DONGFANG ELECTRIC REVIEW

公开 ISSN 1001-9006 第38卷第4期 (总第152期) 国内邮发代号：62-187
发行 CN 51-1333/TM 出版日期:2024年7月25日 国 内 定 价：8.00 元

东方电气评论 第三十八卷 第四期 二〇二四年七月

ISSN 1001-9006
CN 51-1333/TM

4

2024

第38卷 总第152期

東方電氣評論

DONG FANG DIAN QI PING LUN

- 中国发电设备专业技术期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》期刊源
- 《万方数据-数字化期刊群》全文收录
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》期刊源
- 《中文科技期刊数据库》（维普网）全文收录
- 《中国期刊全文数据库(CJFD)》全文收录

ISSN 1001-9006
07>
9 771001 900248

中国东方电气集团有限公司
四 川 省 动 力 工 程 学 会 主办

4
2024
第38卷第4期 总第152期
（双月刊，1987年创刊）

東方電氣評論

目 次

[期刊基本参数]CN51-1333/TM*1987*b*A4*88*zh*p￥8.00*750*18*2024-04

主管：中国东方电气集团有限公司
主办：中国东方电气集团有限公司·四川省动力工程学会
主编：胡修奎
副主编：董娜 唐健
本期责任编辑：李宏
英文编辑：张媛
编辑出版：《东方电气评论》编辑部
地址：成都市高新西区西芯大道18号
邮编：611731
电话：028-87898263
传真：028-87898267
电子信箱：dfdqpl@dongfang.com
印刷单位：成都金恒信印务有限公司
国内发行：四川省报刊发行局
国外发行：中国出版对外贸易总公司北京782信箱

DONGFANG ELECTRIC REVIEW

4
2024
2024-7-25 Vol.38 No.4
(Bimonthly, since 1987)

CONTENTS

Sponsor: Dongfang Electric Corporation
Chief Editor: HU Xiukui
Vice Chief Editors: DONG Na, TANG Jian
Executive Editor: LI Hong
English Editor: ZHANG Yuan
Edited and Published by:
Editorial Department of Dongfang Electric Review
No. 18 Xi Xin Avenue, Gao Xin Xi District, Chengdu, Sichuan, P. R. China
Postal Code: 611731
Tel: 028-87898263 **Fax:** 028-87898267
E-mail: dfdqpl@dongfang.com
Overseas Distrbution by:
China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, P. R. C.)

面向薄弱配电网“低电压”电力用户的末端电压柔性补偿研究

陈建国　杨嘉伟　徐箴箴*

东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731

摘要：为应对农村配电线路末端“低电压”问题，本文提出了一种末端电压柔性补偿装置。首先通过其典型的拓扑结构建立其串联环节及并联环节的数学模型；在其数学模型的基础上，建立了电压电流双环解耦控制模型，其次，在仿真软件中搭建了末端电压柔性补偿装置的仿真模型，仿真实现了对负载低电压和负载高电压的快速补偿和动态调节，验证了数学模型和控制策略的正确性。最后，搭建电压柔性补偿装置实验平台，通过实验进一步验证了电压柔性补偿装置对负载电压补偿的有效性。

关键词：配电线路；低电压问题；电压柔性补偿；解耦控制

中图分类号：TM615　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0001-05

Study on Flexible Terminal Voltage Compensation Converter for Low-voltage Power Consumers in Weak Distribution Power Grid

*CHEN Jianguo, YANG Jiawei, XU Zhenzhen**

(DEC Academy of Science and Technology Co.,Ltd., 611731, Chengdu, China)

Abstract: In order to address the problem of low voltage at the end of rural distribution lines, this paper proposes a flexible compensation device for end voltage. Firstly, establish mathematical models for its series and parallel sides through its typical topological structure; On the basis of its mathematical model, a voltage and current dual loop decoupling control model was established. Secondly, a simulation model of the terminal voltage flexible compensation device was built in simulation software, which achieved rapid compensation and dynamic adjustment of low and high load voltages. The correctness of the mathematical model and control strategy was verified. Finally, a voltage flexible compensation device experimental platform was established to further verify the effectiveness of the voltage flexible compensation device for load voltage compensation through experiments.

Keywords: distribution lines; low-voltage issues; voltage flexible compensation; decoupling control

农村配电网是农村电气化和农业现代化的基础设施，是促进农业生产、农村经济和农村社会发展，提高农村人口物质文化生活水平的基础条件。[1]农村配电网是智能电网到农村电力用户的最后一环，与最普通人民群众的联系最为紧密，对用户的供电可靠性和供电质量的影响最为直接。

现阶段，农村配电网建设滞后与日益增长的农村配电网用电负荷之间的矛盾日渐突出，主要体现在：（1）10 kV 主干网架结构薄弱，分支级数多，分支线以及低压主干线路、接户线的截面均过小；（2）电网覆盖区域大，线路供电半径长，台区分布常超过合理的供电半径；（3）用户布点分散，负荷密度较小，投资效益不明显；（4）各地区地理条件、气象条件、负荷特性差异较大；（5）树线、雷害、鸟害等矛盾突出，故障发生率高，但由于距离远，分支多，故障点查找困难；（6）农业

收稿日期：2024-06-17

作者简介：陈建国（1971－），男，硕士研究生，高级工程师，研究方向为能源电力技术等领域。

徐箴箴（1994－），女，2017 年毕业于新加坡国立大学电子和计算机工程系电气工程专业，硕士，工程师，主要从事电力电子功率硬件研发工作。通信邮箱：Xuzz6414@dongfang.com。

生产的季节性等因素造成了农村配电网的用电负荷季节性很强；（7）自然功率因素低，极度缺乏无功补偿能力，电压质量差。因此，“低电压”现象为主的电能质量问题成为农村配电网常见问题[2]，直接影响了人民群众的生产生活，解决农村配电网“低电压”问题非常迫切。[3]

为了解决农村配电网的低电压的问题，国家电网在 2010 年和 2014 年两次对低电压问题进行集中整治，主要有以下几类方法：

（1）农村配电网优化升级。更换大容量的配电变压器、新建变电站、扩大配电网的输电线的导线半径以及优化台区划分等。

（2）变电站、线路和配电电压三级联调。充分利用既有有载调压变压器、无功补偿装置及线路调压器等多种调压手段，抑制 10 kV 主干网“低电压”现象的发生。

（3）县域电网无功补偿能力建设。对于极度缺乏无功电源的局域电网，合理新建无功补偿装置，实现无功功率分层分区就地平衡。

（4）配电网调压器技术应用。在电压波动较大或压降较大的中低压线路，通过采用在配电变压器中安装自动调压装置的方式，例如宽幅无载调压配电变压器等，增大配电变压器自身调压范围，提升整个供电台区电能质量水平，提升配电台区电压调控能力。

除此之外，文献[4-5]以电力电子技术为基础，结合分布式光伏的建设，提出分布式光伏并网来解决农村配电网的低电压现象。文献[6]提出了基于光伏+储能的低电压治理技术方案。文献[7]建立了以配电网中总的电压偏差最小为目标函数，使用粒子群算法寻找光伏接入配电网的最优位置。

然而，以上方法各存在问题。电网优化升级、新增调压或无功补偿设备和建设光储装置等方法，投资成本巨大，建设周期长，受电力系统规划约束，限制条件较多，适应性差；该发生低电压问题的台区，配电网线路容量并未得到充分利用；而在配电变压器中配置自动调压装置方法，存在电压调节速度慢、无法频繁调节、调节精度差等问题，无法针对配电网末端分布的低电压用户进行针对性电压补偿；更无法解决负荷所在区域的分布式光伏出力增大导致负荷端电压升高的问题。[8]随着农村配电网用电负荷进一步增长，“低电压”问题仍将不断出现，所以迫切需要研究一种低成本、行之有效的“低电压”问题的解决方案。

为此，基于电力电子变换技术，本文提出了一种面向薄弱配电网“低电压”电力用户的新型末端电压柔性补偿装置。基于末端电压柔性补偿装置的串联环节和并联环节的等效数学模型，建立了两个环节的电压电流双环解耦控制模型，并通过仿真和实验验证了末端电压柔性补偿装置的可行性和有效性。

1 拓扑与模型

1.1 典型电路拓扑结构

配电网末端电压柔性补偿装置的典型拓扑结构如图 1 所示，由串联环节和并联环节两部分组成。

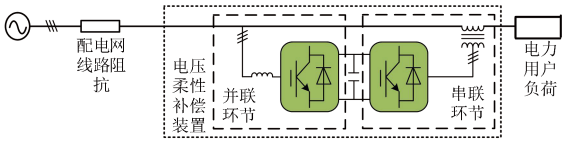


图 1 电压柔性补偿装置典型拓扑

1.2 数学模型

（1）并联环节数学模型

并联环节是典型的电压源变换器，其等效电路如图 2 所示（仅展示 A 相，B 相和 C 相相似）。u_{sa} 为电网相电压，L_1 和 R_1 分别是网侧等效电感和及其内阻，C_{dc} 为电压源变换器直流电容，u_{dc} 为直流母线电压。

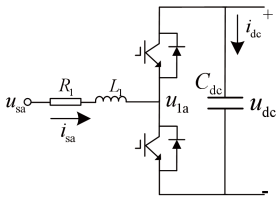


图 2 并联环节等效电路

根据基尔霍夫电压和电流定律，并联环节的通用数学模型为：

$$(R_1 + L_1\frac{d}{dt})\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sa} - u_{1a} \\ u_{sb} - u_{1b} \\ u_{sc} - u_{1c} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{dc}\frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} \quad (2)$$

并联环节在同步旋转 dq 坐标系下的数学模型可以描述为：

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 p & -\omega L_1 \\ \omega L_1 & L_1 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式（3）中，ω 为同步旋转角速度，u_{sd} 和 u_{sq} 分别为电网电压 u_{sa}、u_{sb} 和 u_{sc} 在 dq 坐标系下的 dq 分量；u_{1d} 和 u_{1q} 分别为并联环节电压 u_{1a}、u_{1b} 和 u_{1c} 在 dq 坐标系下的 dq 分量；i_{sd} 和 i_{sq} 分别为并联环节网侧等效电感电流 i_{sa}、i_{sb} 和 i_{sc} 在 dq 坐标系下的 dq 分量。

（2）串联环节数学模型

串联环节与并联环节共用直流母线，串联环节等效电路如图 3 所示（仅展示 A 相，B 相和 C 相相似）。L_2 和 R_2 分别为滤波电感及其内阻；C_2 为串联环节滤波电容；u_{2a} 为串联环节补偿电压；i_{La} 为滤波电感电流；i_{pa} 为输出电流；u_{pa} 为串联环节输出电压。

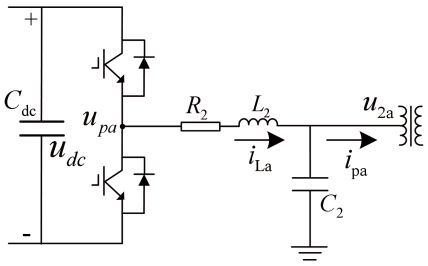


图 3　串联环节等效电路

在只考虑三相平衡的情况下，其状态空间平均数学模型为

$$(R_2 + L_2 \frac{d}{dt}) \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{pa} - u_{2a} \\ u_{pb} - u_{2b} \\ u_{pc} - u_{2c} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$C_2 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{2a} \\ u_{2b} \\ u_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{La} - i_{pa} \\ i_{Lb} - i_{pb} \\ i_{Lc} - i_{pc} \end{bmatrix} \tag{6}$$

当不计及线路和开关损耗时，串联环节在同步旋转 dq 坐标系下的数学模型可以描述为：

$$\begin{bmatrix} u_{pd} \\ u_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lp & -\omega L_2 \\ \omega L_2 & Lp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{2d} \\ u_{2q} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_2 p & \omega C_2 \\ \omega C_2 & -C_2 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2d} \\ u_{2q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中，u_{pd} 和 u_{pq} 分别为串联环节输出电压 u_{pa}、u_{pb} 和 u_{pc} 在 dq 坐标系下的 dq 分量；i_{Ld} 和 i_{Lq} 分别为串联环节滤波电感电流 i_{sa}、i_{sb} 和 i_{sc} 在 dq 坐标系下的 dq 分量；u_{2d} 和 u_{2q} 分别为串联环节补偿电压 u_{2a}、u_{2b} 和 u_{2c} 在 dq 坐标系下的 dq 分量；i_{pd} 和 i_{pq} 分别为串联环节输出电流 i_{pa}、i_{pb} 和 i_{pc} 在 dq 坐标系下的 dq 分量。

1.3 控制模型

1.3.1 并联环节控制模型

并联环节主要实现直流母线电压稳定、无功功率补偿等功能。可采用电压电流双环控制，在两相旋转 dq 坐标系下通过引入 d 轴和 q 轴的电压、电流状态，通过交叉反馈解耦矩阵控制实现 dq 轴之间的解耦控制，进而通过直接控制 dq 轴的电压来实现功能，控制框图如图 4 所示。

将直流电压的实际值 u_{dc} 与参考值 u_{dc}^* 进行比较，经 PI 控制器得到电流内环 d 轴的参考值 i_{sd}^*，以实现直流母线电压稳定的控制目标；将装置发出无功功率的实际值 Q 与参考值 Q^* 进行比较，经 PI 控制器得到电流内环 q 轴的参考值 i_{sq}^*，以实现无功功率补偿的控制目标。

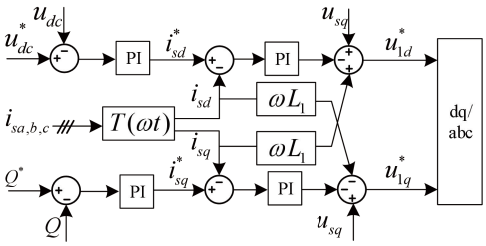


图 4　并联环节控制框图

1.3.2 串联环节控制模型

串联环节主要实现电压柔性补偿功能。可采用基于输出电压和输出滤波电感电流的双环 PI 控制，其解耦控制框图如图 5 所示。

负载端电压 u_{Ld}、u_{Lq} 与额定负荷端电压 u_{Ld}^*、u_{Lq}^* 比较，可以得到串联环节给定补偿电压 u_{2d}^*、u_{2q}^*，给定补偿电压与补偿电压反馈信号 u_{2d}、u_{2q} 比较得到补偿电压误差，经过 PI 控制器产生电感电流给定信号 i_{Ld}^*、i_{Lq}^*，再与电感电流反馈信号比较，得到电流误差信号经过 PI 控制器形成电压信号 u_{pd}、u_{pd}，进而对串联环节变换器进行控制。

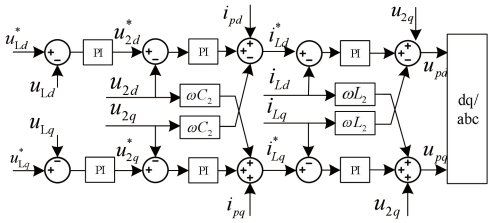


图 5　串联环节控制框图

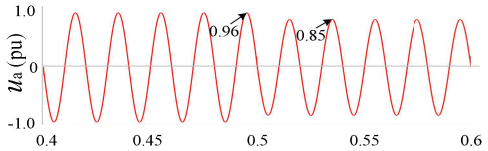
2 仿真分析

为了验证上文所述配电网末端电压柔性补偿装置的数学模型和控制模型的正确性和可行性，利用仿真软件搭建了末端电压柔性补偿装置单相仿真模型，如图 1 所示，主要仿真参数如下表 1 所示。仿真结果均以标幺值显示。

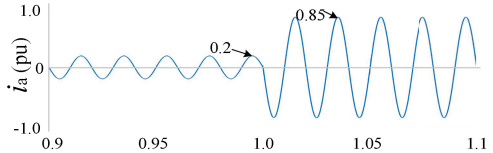
表 1 主要仿真参数

参数	数值
功率基准值值	10 kW
电压基准值	380 V
线路阻抗	0.880 5+j0.1014Ω
变压器变比	200:40
直流电压	350 V
并联环节滤波电感 L_1	8.0 mH
串联环节滤波电容 C_2	0.2 mF
串联环节滤波电感 L_2	12.0 mH
直流电容 C_{dc}	0.4 mF
开关频率	10 kHz

2.1 负荷低电压补偿工况



（a）负荷端电压



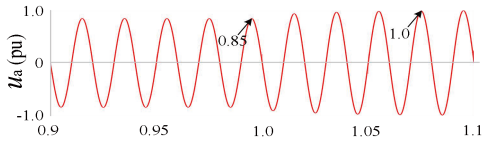
（b）负荷电流

图 6 负荷增加导致负荷端电压降低仿真结果

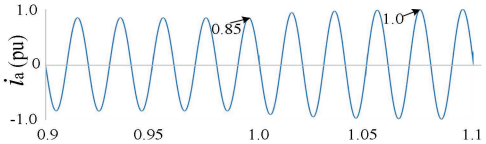
初始状态下，配电网未投入末端电压柔性补偿装置，负载功率为 2 kW。在 0.5s 时，负载功率突增到 10 kW，由于线路阻抗的存在，负荷突增导致线路压降增大，负荷端电压由 0.96 pu 跌至 0.85 pu，发生低电压问题，线路电流由 0.2 pu 增加至 0.85 pu，如图 6 所示。

在 1.0 s 时，在配电网投入末端电压柔性补偿装置。如图 7 所示，负载端电压经过 0.06 s 由 0.85 pu 增至 1.0 pu，流过负载的电流经过 0.06 s 由 0.85 pu 增值 1.0 pu；装置直流母线电压经过 0.15 s 快速恢复至 1.0 pu。

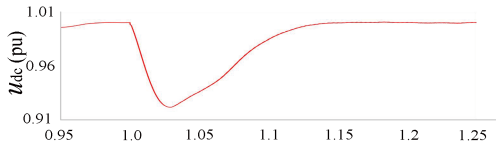
通过图 6、7 的对比分析可知，末端电压柔性补偿装置可以能够实现低电压的快速动态补偿。



（a）负载端电压



（b）负荷电流



（c）直流母线电压

图 7 投入电压柔性补偿装置仿真结果

2.2 负荷高电压调节工况

未投入末端电压柔性补偿装置：负荷功率 10 kW，此时光伏在 0.5 s 前发出 8 kW 功率，在 0.5 s 后功率增至 20 kW，光伏不能就地消纳，需要经过配电网倒送至上级电网。负荷的端电压在 0.5 s 时负荷端电压由 0.97 pu 突增至 1.13 pu，发生高电压问题，如图 8 所示。

在 1.0 s 时投入末端电压柔性补偿装置。如图 9 所示，经过 0.06 s 电压从 1.13 pu 调节至 1.0 pu。装置直流母线电压在跌落至 0.93 pu 后，经过 0.15 s 升至 1.0 pu 并保持稳定。通过图 8 和图 9 的对比分析可知，末端电压柔性补偿装置可以能够实现高电压的快速动态补偿。

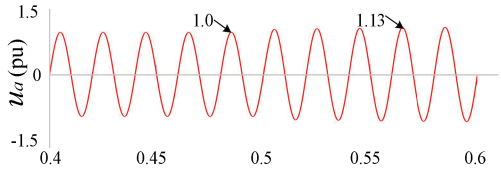
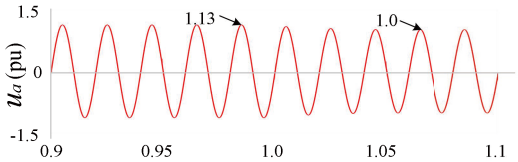
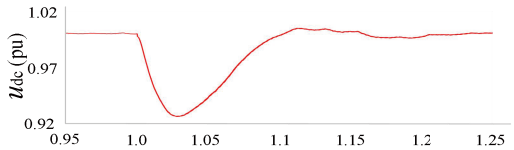


图 8 光伏大发导致负荷端电压抬升仿真结果



（a）负荷端电压



（b）直流母线电压

图 9 投入电压柔性补偿装置仿真结果

3 实验结果

3.1 实验平台与参数

为了进一步验证配电末端电压柔性补偿装置的低电压和高电压调节能力，本研究搭建了基于 RTU-BOX 控制器的单相配电末端电压柔性补偿装置实验平台，利用调压器模拟单相交流电压，由功率电阻模拟线路阻抗和负荷，接线方式如图 10 所示。实验平台主要参数如表 2 所示，实验平台如图 11 所示。

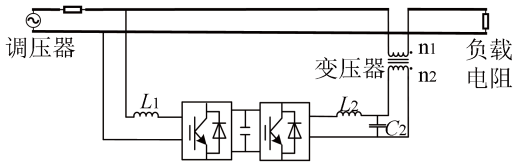


图 10 实验接线图

表 2 电力电子变压器主要运行参数

参数名称		值
系统参数	额定功率	300 W
	额定交流电压	100 V
	直流母线电压	200 V
并联环节	输入滤波电感 L1	5 mH
	PWM 开关频率	10 kHz
	直流电容	0.2 mF
串联环节	输出滤波电感 L2	2 mH
	输出滤波电容 C2	0.1 mF
	PWM 开关频率	10 kHz
	隔离变压器变比	1 : 4

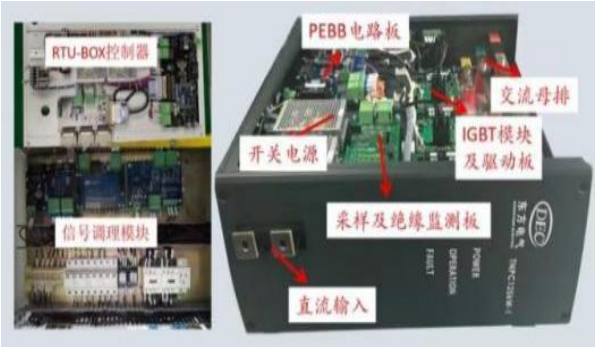


图 11 配电末端电压柔性补偿装置实验平台

3.2 实验波形分析

低电压补偿工况下负载端电压和电流的实验波形，如图 11 所示。在 0.5 s 前，未投入末端电压柔性补偿装置，负荷两端电压约为 0.8 pu，电流约为 0.4 pu；在 0.5 s 后投入末端电压柔性补偿装置，经过 0.06 s 电压由 0.8 pu 被抬升至 1.0 pu，电流抬升至 0.5 pu。

高电压补偿工况下负荷端电压及电流的实验波形，如图 12 所示。在 0.5 s 前，未投入末端电压柔性补偿装置，负荷端电压约为 1.2 pu，电流约为 0.4 pu；在 0.5 s 时投入末端电压柔性补偿装置，负载端电压在 0.06 s 内由 1.2 pu 降到 1.0 pu，电流降至 0.35 pu。

由图 12、13 表明本文提出的配电末端电压柔性补偿装置可以对负载电压进行快速有效的动态补偿，提高配电网末端电力用户的电能质量。

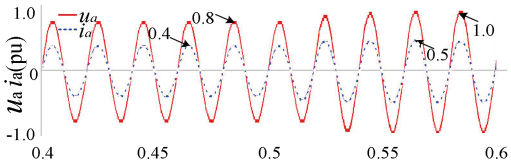


图 12 低电压补偿实验波形

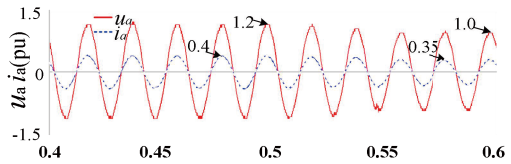


图 13 高电压补偿实验波形

（下转第 31 页）

质子交换膜燃料电池堆密封研究进展

张娟[1,2] 李航[1,3] 李团锋[1,2] 王亮亮[1] 张尉[1]

1.东方电气（成都）氢能科技有限公司，成都，611731；2.长寿命燃料电池四川省重点实验室，成都，611731；
3.东方江峡产业投资私募基金管理（成都）有限公司，北京，100080；

摘要：质子交换膜燃料电池堆的密封性能直接关系到电堆的安全性、可靠性和耐久性。本文综述了电堆密封技术要求、电堆密封设计、密封材料选型和密封工艺路线等密封技术的研究进展，提出了密封材料选型的建议和未来密封技术路线的发展方向，为长寿命、高性能燃料电池堆密封设计和验证提供理论参考。

关键词：质子交换膜；燃料电池堆；密封设计；材料选型；工艺路线

中图分类号：TM911.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）04-0006-05

Progress of Sealing Research on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack

ZHANG Juan[1, 2], LI Hang[1, 3], LI Tuanfeng[1, 2], WANG Liangliang[1], ZHANG Wei[1]

(1.Dongfang Electric (Chengdu) Hydrogen Technology Co., Ltd., 611731, Chengdu, China;
2.Long-Life Fuel Cell Key Laboratory of Sichuan Province,611731, Chengdu, China;
3.Dongfang River Gorges capital Co., Ltd., 100080, Beijing, China;)

Abstract: The sealing performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack is directly related to the safety, reliability, and durability of the stack. This paper takes the sealing design, sealing material selection and sealing process route as the research objects, comprehensively reviews the research progress of the sealing technology of the PEMFC stack. The suggestions on the selection of sealing materials and the development direction of future sealing technology routes are put forward, which provides a theoretical reference for the design and verification of long life and high performance fuel cell stack seals.

Key words: proton exchange membrane; fuel cell stack; sealing design; material selection; process route

质子交换膜燃料电池具有发电效率高、噪音低、零污染、零碳排放等优点，是达成“3060”双碳目标的重要技术途径之一，近年来受到研究人员的广泛关注。[1-2]电池堆作为能量转换发生的场所，将氢气中的化学能通过电化学反应的方式转化为电能，并通过冷却水移除反应热量。其结构通常包含多节发电基础单元的单电池（包含双极板、膜电极和密封圈等部件）、引出电流的集流板、隔绝高电压的绝缘板，通过端板、及紧固件等压装形成。其中，密封部件需要保证宽泛的工作温度区间（-40~90 ℃）内 3 种高压流体的可靠密封，保证流体不外漏且不互窜，是电池堆安全性和可靠性的决定性因素之一。[3]因此，归纳总结质子交换膜燃料电池堆密封研究进展，对于优化电堆密封设计验证体系、提升密封可靠性和安全性，具有重要的参考意义。

1 电堆密封技术要求

在燃料电池堆的全生命周期内，密封部件在密封流体、补偿组件公差和保持膜电极处于合适的压缩状态等方面发挥着关键作用。[4]GB/T 33978-2017 中明确定义了道路车辆用质子交换膜燃料电模块中的电堆模块气密性试验方法[5-6]，但未提具体泄漏

收稿日期：2024-3-14

作者简介：张娟（1993－），女，2016 年毕业于兰州理工大学材料学专业硕士学位，研究生学历，工程师。现任东方电气（成都）氢能科技有限公司研发工程师，主要从事氢燃料电池堆技术研究工作，研究方向为电池堆密封设计。

标准值；殷俊等表示[3]，密封性能测试主要通过气密性指标表征，其指标与标准泄漏率（单位：mL·(min·m^2)$^{-1}$）分别为氢腔外漏＜8.0、空腔外漏＜8.0、冷却腔外漏＜1.0、氢/空窜漏＜66.0、氢/冷却液窜漏＜1.0、空/冷却液窜漏＜1.0 以及三腔总外漏＜75.0，共 7 项指标衡量单电池的泄漏是否合格。基于燃料电池实际服役环境，耦合高低温、压缩、酸性、渗氢等条件，密封材料通用技术规格要求以及指标[7]包括：温度范围-40~100 ℃、硬度 HA20~60、应力松弛＜25 %、电阻率＞10^{14} Ω·cm、绝缘强度 15~17 kV/mm、线收缩率＜3 %、可密封压力 20~200 kPa、溶胀率＜5 %、低离子析出率等，以确保电池堆在服役的全生命周期密封性能可靠。

2 电堆密封设计

质子交换膜燃料电池的运行过程中，密封材料面临复杂的工况，材料性能会随着服役时长的增加而衰减，从而导致密封性能降低。因此，在密封设计中应同步考虑初始密封和寿命终止的 2 种状态，关键指标包括密封圈压缩载荷、气体扩散层受压缩状态及电堆封装力等。其中，压缩载荷是燃料电池堆压缩的关键因素[4]，一方面，若压缩载荷不够，接触界面上的静摩擦力将无法限制组件之间的相对运动，不满足密封界面密封压力的要求，导致反应气体泄漏，使电堆无法正常运行并存在安全隐患[8]；另一方面，若施加过大的压缩载荷，气体扩散层孔隙率急剧下降，阻碍反应物气体向膜电极扩散，使得电池堆性能严重下降。[9]因此，确定适当的压缩载荷对于电堆密封设计具有重要意义。

在基于最佳封装力的密封结构设计方法中，电堆密封的圈槽结构设计与最佳封装力和介质工作压力密切相关，密封圈预压缩量应小于材料的压缩永久变形量，使得密封圈的使用寿命更为可靠。[10]针对气体密封不严导致的电化学性能低和泄露问题，张智明等基于单边接触理论和有限元方法，研究了固态光固化密封胶截面形状分别为半圆形、矩形、双峰形、三峰形在不同温度、不同压缩率下的受力仿真分析（图 1），提出了基于流固耦合密封效应的三峰形结构（图 2），提高密封可靠性、降低流体泄露风险；在电堆设计中，密封圈按照 30 % 的压缩率设计更为合理，以满足密封圈受力不超过 1.3 MPa 的要求。[11]

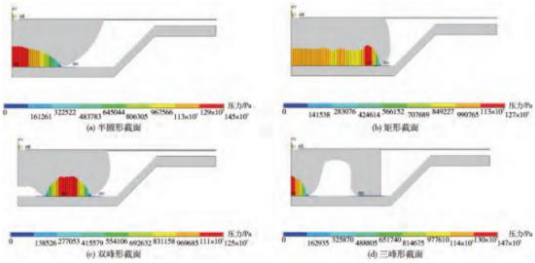


图 1 四种截面形状密封胶接触压力分布[11]

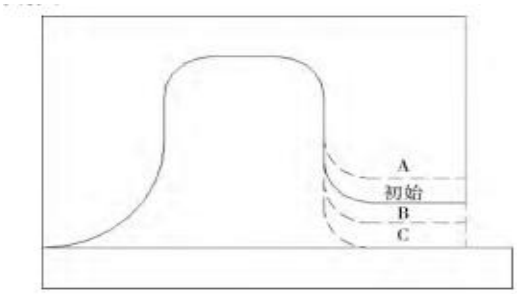
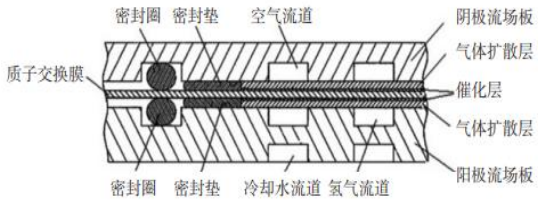
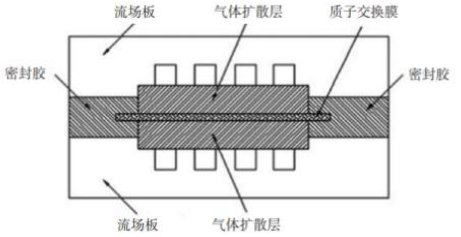


图 2 三峰形截面优化示意图[11]

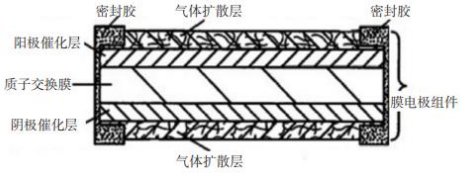
此外，对于燃料电池利用橡胶弹性体密封，密封结构的圈槽设计与配合非常重要，核算压缩率和填充率时，密封槽的宽度是关键设计参数，侧壁的存在可以增加相同压缩量下的密封夹紧力，有利于实现自锁密封，进一步提升密封的可靠性，避免在静摩擦力平衡压力过程中可能发生的滑动现象。[12]密封可靠性直接影响电池堆结构的可靠性，殷俊等[3]通过注塑将阳极板、阴极板和膜电极组成一个整体，开发出一种新的单电池密封方式，有效地减小了质子膜活性区域边缘平面内平均变形量，降低了膜电极撕裂风险。白子为等[13]阐述了当前比较成熟的质子交换膜直接密封式、刚性框架密封式、密封框架包裹质子交换膜式、密封框架包裹膜电极式[3,14]（图 3）4 类密封结构设计的优缺点，明确大功率电堆密封设计中框架包裹质子膜结构在可靠性和经济性方面具有更广阔的前景。



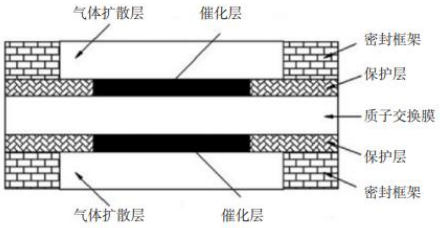
（a）质子交换膜直接密封式



（b）密封框架包裹质子交换膜式



（c）密封框架包裹膜电极组件式



（d）刚性密封框架式

图 3 PEMFC 传统的密封结构示意图[3,14]

3 电堆密封材料选型

典型的质子交换膜燃料电池堆密封材料主要包括硅橡胶、聚烯烃和氟橡胶三类，材料选型应考虑具备较高的气体阻隔性、低透湿性、高耐湿性、环境耐热性、环境绝缘性、橡胶弹性体、低离子析出率等特性。[15]目前，因硅橡胶适用范围广、易加工、价格优势明显，国内在金属体系、石墨体系电堆中应用最为广泛；国际上聚烯烃类的应用主要以日本丰田为代表，通过注塑工艺与金属双极板、膜电极实现单电池一体化密封，国内暂未批量应用。而氟橡胶因其耐低温性能不佳、硬度较高，可能导致石墨板电堆双极板碎裂或者金属板电堆双极板变形，且加工工艺复杂、制造成本较高，因此，在电堆制造商中使用相对较少。

硅橡胶的组成包括线型聚硅氧烷、补强填料、交联剂、催化剂和改性添加剂等，经过混炼加工，在一定条件下进行交联硫化，使混炼胶从黏性液态转变成高弹态，以满足不同使用要求。[16]大量研究人员通过模拟电堆密封圈在服役工况条件下的性能，反复论证硅橡胶的密封可靠性。温度循环作用对硅橡胶的压应力影响显著，温度变化过程中，除了应力松弛外，材料的热膨胀或热收缩对应力变化的贡献最为显著，且硅橡胶的刚度随温度变化而变化。[17]综合考虑密封圈服役的复杂环境，Wu 等人模拟研究了 PEMFC 在-20~90 ℃下交替循环过程中硅橡胶的老化与降解[18]，随着温度循环次数的增加，样品硬度增大、重量减少、表面逐渐出现裂纹和孔洞，样品表面化学性质发生了变化，骨架中的链发生断裂。随着温度的升高，硅橡胶的老化程度越来越严重，表现为压缩永久变形、力学性能和表面形貌的显著变化，当温度超过 100 ℃时，硅橡胶不适用于燃料电池密封；此外，反应加湿气体中携带的水分子会加速硅橡胶的老化，主要是由于连接聚硅氧烷骨架的交联剂单元和硅原子上的甲基发生了化学分解。[19]在高温状态下，水分子对硅橡胶主链的攻击和热降解同时存在，攻击的速率取决于温度的高低。[20]

聚烯烃类橡胶的主链由碳碳键构成，分子链相对于硅氧键较短，因此其对水和气体的密封性能优于硅胶。[15,21]三元乙丙橡胶（EPDM）通常由乙烯、丙烯和较少量非共轭二烯烃共同聚合而成[22]，具有优良的弹性、电绝缘性、化学稳定性、耐老化性能及低压缩永久变形的特性。EPDM 橡胶作为密封材料时，压缩应力和热氧老化是引发老化的关键因素，随着时效增加，力学性能明显下降，分子链发生降解和交联网络破坏，材料内部物理和化学结构发生变化，出现脆化；压缩应力和热氧老化耦合对 EPDM 密封材料分子结构影响显著，比单一的热氧老化更具侵蚀能力，使得氧化降解反应更加容易，在密封性能中表现为接触应力松弛，密封性能变差[23]，而提高回弹性能是提升密封性能的关键，有研究表明[24]在 EPDM 橡胶体系中构建 Zn^{2+}-羧基盐键，形成离子交联网络，可有效提高持久密封的回弹性能。

4 电堆密封工艺路线

电堆密封主要通过预制成型密封圈、注塑胶线（膜电极边框或双极板密封槽）、以及密封胶密封三种方式实现。预制成型密封圈通常使用固态橡胶通过模压（或模压后冲切）工艺进行加工，制造工

艺简单、加工成本低、供货周期短，是目前国内市场上批量应用的密封方式，但密封圈加工精度较低、组件数量多、刚度低，导致后期组装难度大，装配一致性难以保障。注塑胶线是将密封胶通过注塑工艺直接硫化在膜电极边框或双极板密封槽上来实现电堆密封，其精度高、批量一致性好，大大减少了电堆装配组件的数量，可避免密封圈装配不对中引起的密封失效和双极板碎裂，提升电堆装配效率和质量，但对设备、模具和双极板精度要求高，工艺稳定性要求高，目前在市场上的应用相对较少，仍处于关键技术攻关的阶段。密封胶密封主要包括原位成型和原位固化两种，均充分利用了液体密封胶的流动性。原位成型（FIPG）是将密封胶涂敷在组件表面，在密封胶固化之前进行组装，之后再进行固化，可通过自适应的形状予以补偿精度。[14]原位固化（CIPG）是将密封胶涂敷在组件表面，通过控制密封胶的粘度、收缩率、点胶速率等，依靠流动性和表面张力来控制胶线的截面形状，通过提供加热、紫外光照或潮湿环境等条件来固化，实现密封作用，行业内称为“密封点胶”，但其因接头处的正公差累积，在批量应用中受到了限制。[4]

密封性能的影响因素除了密封材料本身的物理和化学性能、结构设计外，表面形貌因影响密封界面，也是其关键因素，与不同工艺路线有直接关系。部分研究表明，光滑表面比粗糙表面应力分布更均匀，粗糙表面的最大应力与最大接触压力均高于光滑表面，多次加载后易导致凸起处的塑性变形，应尽量降低表面粗糙度。[25]多界面耦合密封原理[13]表明电堆密封涉及橡胶类材质的两界面接触密封，当有效接触面积降至名义接触面积的 40 %或以下时，大概率将形成泄露通道，造成密封失效[26-27]，泄漏量主要与界面粗糙度、材质弹性模量和泊松比、泄漏工质的黏度有关。[13]硅橡胶的表面形貌[28]如图 4 所示，当表面粗糙度足够小，橡胶的粗糙接触面积等于光滑表面的接触面积，可完全接触密封界面，气体泄漏风险减小；表面粗糙度 Ra 对接触面积的影响如图 5 所示，若 Ra 增大，则实际接触面积减小，界面上可能形成空洞或气体泄露通道，导致密封性能下降。[28]因此，在整个密封工艺路线的选择上，应降低密封件表面的粗糙度。

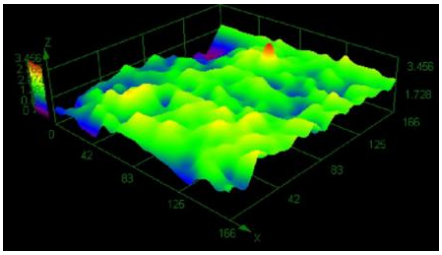


图 4 硅橡胶微观表面形貌[28]

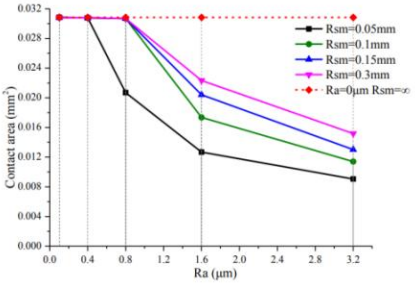


图 5 表面粗糙度对接触面积的影响[28]

5 结语

密封圈作为氢燃料电池堆的至关重要组件，其密封性能直接关系到电堆的安全性、可靠性和耐久性。本文全面综述了 PEMFC 密封技术在电堆密封设计、密封材料选型和密封工艺路线方面的研究进展，总结如下：

（1）在密封设计方面，电堆最佳封装力和最优压缩载荷设计对电堆性能和寿命至关重要。然而，目前公开报道的理论计算和设计方法相对较少，主要仍依赖经验估算、模拟实验和部分数值计算，存在一定的局限性。未来研究需要加强理论体系的正向发开，深入研究和比较不同的设计方法。

（2）在材料选型方面，尽管硅橡胶在国内电堆密封中广泛应用，但研究表明其在耐蚀性和耐久性方面存在不足，析出物和老化降解的产物可能导致膜电极中毒和机械损伤。相比之下，聚烯烃类橡胶表现出更优越的综合性能，未来具有更显著的应用优势。

（3）在工艺路线方面，简化电堆多组件组装的设计是提高集成度的关键。在批量生产过程中，需要同步提高效率和降低成本，以提升电堆装配效率和一致性，减少返修难度和部件损坏率。这对各密封界面的可靠性提出更高的要求，因此，单电池路线和密封一体化的工艺路线是未来的发展方向。

参考文献：

[1] （美）弗朗诺.巴尔伯（Frano Barbir）著. PEM 燃料电池：理论与实践[M]. 李东红等译. 北京：机械出版社, 2016

[2] 衣宝廉, 俞红梅, 侯中军. 氢燃料电池[M]. 化学工业出版社, 2021

[3] 殷骏, 杨帆, 杨代军, 等. 质子交换膜燃料电池一体化密封设计与仿真[J]. 汽车技术, 2021(11): 15-21

[4] Zhao J H, Guo H J, Xing Y C, et al. A review on the sealing structure and materials of fuel-cell stacks[J].Clean Energy, 2023, 7(1) :59-69

[5] 中国电器工业协会. 道路车辆用质子交换膜燃料电池模块: GB/T 33978-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 4-5. China Electrical Equipment Industry Association. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Modules for Road Vehicles: GB/T 33978-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 4-5

[6] 中国电器工业协会. 燃料电池电动汽车 燃料电池堆安全要求：GB/T 36288-2018[S]. 北京：中国标准出版社, 2018: 2. China Electrical Equipment Industry Association. Fuel Cell Electric Vehicles: Safety Requirement of Fuel Cell Stack: GB/T 36288-2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018: 2

[7] Frisch, L. PEMFC Stack Sealing Using Silicone Elastomers. SAE Technical Paper, 2003-01-0801, 2003

[8] Zhou P, Wu C W, Ma G J. Contact resistance prediction and structure optimization of bipolar plates. J Power Sources, 2006, 159:1115- 1122

[9] Yu P T, Gu W, Zhang J, et al. Carbon-support requirements for highly durable fuel cell operation. In: Büchi FN, Inaba M, Schmidt TJ (eds). Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability. New York, NY: Springer, 2009, 29-53

[10] 张圣卓, 于亮. 质子交换膜燃料电池密封结构设计方法研究[J]. 佳木斯大学学报（自然科学版）, 2018, 36(3): 475-478

[11] 张智明, 张娟楠, 潘涛, 等. PEMFC 金属双极板密封设计的有限元仿真[J]. 中国科技论文,2017,12(16):1895-1901

[12] 周平, 吴承伟. 燃料电池弹性体密封特性的若干影响因素[J]. 电源技术, 2005, 29(4), 236-340

[13] 白子为, 谭晖, 石秋雨, 等. 质子交换膜制用氢设备密封技术综述[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 49-55

[14] Ye D H, Zhan Z G. A review on the sealing structures of membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2013, 231: 285-292

[15] 李新, 王一丁, 詹明. 质子交换膜燃料电池密封材料研究概述[J]. 船电技术, 2020, 40(6): 19-23

[16] 朱晓敏，章基凯. 有机硅材料基础[M]. 化学工业出版社. 2013.

[17] Cui J, Chan, Y J. Van Zee J W. Thermal stress development of liquid silicone rubber seal under temperature cycling [J]. Polymer Testing, 2013,32(7), 1202-1208

[18] Wu F, Chan B, Yan Y Z, et al. Degradation of Silicone Rubbers as Sealing Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cells under Temperature Cycling[J]. Polymers, 2018, 10(5): 522

[19] Chang H W ,Wan Z M, Chen X, et al.Temperature and humidity effect on aging of silicone rubbers as sealing materials for proton exchange membrane fuel cell applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 104: 472-478

[20] Cui T, Chao Y J, Chen X M, et al. Effect of water on life prediction of liquid silicone rubber seals in polymer electrolyte membrane fuel cell [J].Journal of Power Sources, 2011, 196: 9536-9543

[21] Bieringer R, Adler M, Geiss S, et al. Gaskets: Important durability issues[M]. Polymer electrolyte fuel cell durability. Springer, New York, NY, 2009: 271-281

[22] 苏春义, 丁业乾, 杨春, 等. 耐低温超低压缩永久变形三元乙丙橡胶的配方设计[J].橡胶科技, 2024, 22(1): 15-19

[23] Li C J, Ding Y Q, Yang Z, et al. Compressive stress-thermo oxidative ageing behaviour and mechanism of EPDM rubber gaskets for sealing resilience assessment [J]. Polymer Testing, 2020(84): 106366

[24] Li C J, Yuan Z , Ye L. Macromol. Facile Construction of Z^{n2+}-Carboxyl Salt-Bonding as Sacrificial Unit in EPDM Rubber toward Mechanical and Sealing Resilience Performance Enhancement [J]. Mater. Eng. 2021, 306(8), 2100184

[25] 张文超, 卜庆元, 李艳昆, 等. 表面形貌对燃料电池密封件接触特性的影响[J]. 润滑与密封, 2022, 47(8): 134-140

[26] Ma B, Fan J, Zhi S, et al. Leakage analysis of bolted flange joints considering surface roughness-A theoretical model[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2017, 232(2): 1989-1996

[27] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics[J]. The Journal of Chemical Physics, 2001, 115(8): 3840-3861

[28] Wu J, Dong J Y, Wang Y S, et al. Bipin Kumar Gond. Thermal oxidation ageing effects on silicone rubber sealing performance [J].Polymer Degradation and Stability, 2017,135,43-53

高纯锡中频挥发工艺中的保温罩材质对提纯效果的影响

任伟　雷聪

东方电气（乐山）峨半高纯材料有限公司，四川 夹江 614100

摘要：通过对高纯锡中频挥发工艺中的石墨、石英和刚玉三种材质的保温罩对提纯效果的研究。研究表明，刚玉材质的保温罩对高纯锡中杂质的提纯效果最佳，经济性好，安全性好。采用此种材质的保温罩提纯后的锡中 S、Mg、Zn、As、Cd、Pb、Sb、Bi、In 等杂质元素能降低至最低值，为高纯锡后续工艺制备纯度为 99.999 99 %以上的超纯锡提供保障。

关键词：高纯锡；中频挥发；保温罩；杂质含量

中图分类号：TF814　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0011-05

Insulation Cover Material in High Purity Tin Medium Frequency Volatilization Process Impact on Purification Effect

REN Wei, LEI Cong

(Eastern Electric (Leshan) e half high pure Materials Co., Ltd., 614100, Jiajiang, Sichuan, China)

Abstract: Research on the purification effect of insulation covers made of graphite, quartz, and corundum in the medium frequency volatilization process of high-purity tin. Research has shown that the insulation cover made of corundum material has the best purification effect on impurities in high-purity tin, has good economy, and is safer. The impurity elements such as S, Mg, Zn, As, Cd, Pb, Sb, Bi, In in the tin purified by using this material's insulation cover can be reduced to the lowest value, providing guarantee for the subsequent preparation of ultrapure tin with a purity of over 99.999 99 % in high-purity tin processes.

Key words: high purity tin; intermediate frequency volatilization; insulation cover; impurity content

锡是重要的战略资源，我国锡储量丰富，精锡年产量约15万吨，占全球产量的40 %以上[1]，锡是我国的优势特色资源，高纯锡作为一种新兴功能材料，广泛应用于航空航天、电子信息中半导体材料等方面，已成为支撑人类高科技发展的关键材料[2]，随着国内外电子工业、原子能工业和航空工业的飞速发展，对高纯锡的用量日益增多，社会对锡材料的需求量逐渐增大。

高纯锡广泛用于半导体工业和制造超导合金中。高纯锡是一种很有前途的功能材料，广泛应用于国防、航天航空、电子工业及原子能工业，主要用于制备化合物半导体、高纯合金、超导材料、焊料及作为化合物半导体掺杂剂。随着我国电子信息行业技术的快速发展，对高纯锡材料的纯度要求越来越高，高纯锡中的杂质含量将会影响相关下游产品的质量和性能。

近年来，随着有色金属提纯技术的不断发展，高纯锡的制备方法有很多种，主要有电解法、氯化还原法、萃取法、真空挥发法、区域熔炼法和定向凝固法等。[3]采用单一提纯方法很难将锡提纯到

收稿日期：2023-11-28

作者简介：任伟（1985－），男，2008 年毕业于西南科技大学过程装备与控制工程专业，本科，工程师，在东方电气（乐山）峨半高纯材料有限公司从事高纯材料制备工作。

99.999 99 %（7N）纯度，通常采用多种提纯工艺相结合的方式。一般先采用电解精炼提纯方式对粗锡进行提纯，可提纯到 5N 纯度；要进一步将锡提纯到 7N 纯度，则需要通过中频真空挥发、区域熔炼等提纯工艺。在 1 300 ℃以下时锡的饱和蒸气压较低，S、Mg、Zn、As、Cd、Pb、Sb、Bi、In 等杂质元素在 1 200~1 300 ℃的饱和蒸气压均远大于锡，因此可以通过在中频真空挥发达到较好提纯效果。Cu、Ag、Ca、Fe、Ni、Al 等元素在此温度下的饱和蒸气压是远低于锡的，因此基本没有除杂效果，通过后续其他提纯工艺去除。在 1 200~1 300 ℃范围，要确保中频加热炉稳定恒定，除了要有精准的加热控温系统外，还需要性能良好的保温罩，要求保温罩材质在该温度下性能稳定，不能对产品提纯效果产生影响。本文通过对高纯锡中频挥发提纯工艺中的保温罩性能进行研究，并开展相关实验，选择满足工艺的保温罩材质，以达到降低高纯锡中 S、Mg、Zn、As、Cd、Pb、Sb、Bi、In 等杂质元素的含量，同时达到最佳的经济效益。

1 实验方法

1.1 实验目的

以电解精炼后纯度为 99.995 %的锡为原料，选择不同类型的中频加热保温罩进行中频真空挥发实验，对中频真空挥发后锡采样分析，对比不同材质保温罩对锡中频挥发除杂效果，选择效果最优的保温罩。经过中频真空挥发提纯工艺，将锡原料中的 S、Mg、Zn、Cd、Pb、Sb、Bi、In 等杂质元素含量稳定控制在 10^{-6} %以下，As 元素含量稳定控制在 2×10^{-6} % 以下，达到中频真空挥发除杂的目的，为高纯锡后续其他工艺进一步提纯制备纯度为 99.999 99 %的高纯锡做准备。

1.2 实验原料

本实验采用电解精炼后纯度为 99.995 %的锡为原料，原料中各项杂质元素含量见表 1；实验用保温罩壁材质分别为石墨、石英、刚玉（氧化铝）三种，大小、形状、壁厚等规格保持一致，各材质具体性能见表 2。

表 1 锡原料中各项杂质元素含量

元素	含量/%	元素	含量/%	元素	含量/%
Cu	5×10^{-6}	Ni	5×10^{-6}	Ca	5×10^{-6}
Ag	5×10^{-6}	Zn	5×10^{-6}	Fe	5×10^{-6}
Mg	5×10^{-6}	Bi	5×10^{-6}	Cd	5×10^{-6}
Sb	3×10^{-6}	In	2×10^{-6}	Al	3×10^{-6}
S	5×10^{-6}	As	5×10^{-6}	Pb	5×10^{-6}

表 2 实验保温罩材料的特性[4]

材质名称	主要成分	纯度（%）	熔点（℃）	导热系数（W/m•K）	导电性
石墨	C	99.99	3 850	119～165	易导电
石英	SiO_2	99.99	1 750	7.6	不导电
刚玉	Al_2O_3	99.99	2 030	45	不导电

1.3 实验原理

根据主体金属锡及锡中杂质元素在相同温度下的饱和蒸气压不同，S、Mg、Zn、As、Cd、Pb、Sb、Bi、In 等杂质元素在 1 200~1 300 ℃的饱和蒸气压均远大于锡，采用中频感应加热线圈进行加热，在恒定温度和真空度的条件下进行中频挥发提纯实验。实验过程中锡原料置于高纯石墨坩埚中，石墨坩埚放置于加热线圈中心处，在石墨坩埚与加热线圈间放置有保温罩，如图 1 所示。采用单一变量原则，改变实验过程保温罩材质，研究在相同条件下不同材质保温罩对锡中频真空挥发提纯效果的影响，选择效果最佳的保温罩，提升高纯锡产品的质量稳定性。

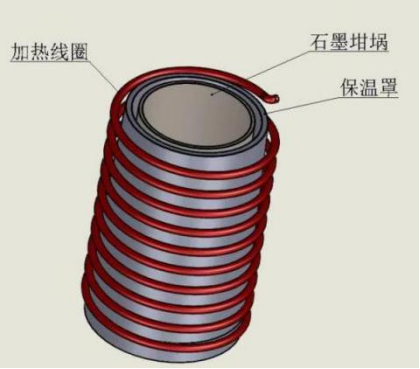


图 1 保温罩、加热线圈、石墨坩埚的位置示意图

1.4 主要材料及设备

原料：99.995 %的锡；

设备：中频挥发炉（含加热及控制系统）、真

空系统、电子天平；

辅材：高纯石墨坩埚、挥发物收集装置、出装炉工装、耐温手套、食品级一次性手套；

检测设备：辉光放电质谱仪(GDMS）；

实验材料：材质分别为石墨、石英、刚玉的保温罩。

1.5 加热温度的确定

当温度高于 600 ℃时，S、Cd、As 饱和蒸汽压随着温度的升高而快速增大；当温度高于 700 ℃时，Zn、Mg 饱和蒸汽压随着温度的升高而快速增大；当温度高于 1 100 ℃时，Pb、Sb、Bi、In 饱和蒸汽压开始快速增大。锡的熔点为 231.9 ℃，沸点为 2 260 ℃，当温度低于 1 300 ℃时，其饱和蒸气压极低，随着温度的增加，饱和蒸汽压也出现指数性增大，锡的蒸汽压变化如图 2 所示，锡与部分杂质元素的饱和蒸气压变化对比情况如图 3 所示。

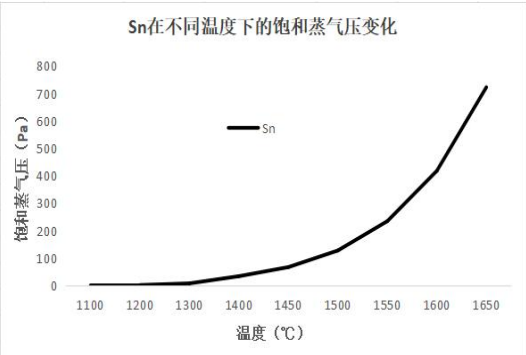


图 2　Sn 在不同温度下的饱和蒸汽压曲线图

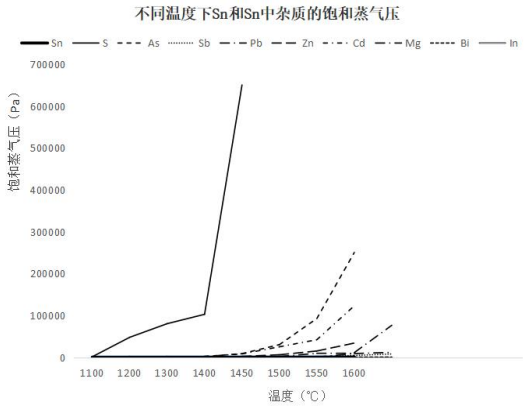


图 3　Sn 及 Sn 中杂质在不同温度下的饱和蒸汽压曲线

综上可以得出，在 1 200~1 300 ℃时，主体金属锡饱和蒸气压极低，而此温度下 S、Mg、Zn、As、Cd、Pb、Sb、Bi、In 元素的蒸汽压较大，结合所选三种材质的特性，兼顾除杂效果和保温罩长期高温环境下的稳定性，选取 1 250 ℃作为实验恒温温度。

1.6 实验操作流程

（1）实验前，先把预先准备的石墨、石英、刚玉材质保温罩清洗干净并用纯水最终清洗后烘干，备用。

（2）把石墨保温罩放入中频炉加热线圈中心处固定好，称取原料锡 6 kg 放入石墨坩埚内，再用出装炉工装把盛有物料的石墨坩埚放置在保温罩中心处。

（3）关闭中频炉炉盖，启动真空系统，待炉内真空度达到 10^{-3}Pa 时，启动中频炉加热系统，设定加热线圈恒温温度为 1 250 ℃，温度恒定后恒温 2 小时，过程中每 10 min 记录一次石墨坩埚内物料温度。

（4）恒温时间结束自动停止加热，当炉内温度降至常温时，开炉出料，对出炉锡料重量及挥发量进行称量并记录，出炉后的锡料进行采样检测杂质含量。

（5）按照上述操作流程分别更换石英、刚玉保温罩进行实验，对实验现象和数据进行记录。

2　结果与讨论

在恒定投料量、系统真空度、加热线圈温度、恒温时间、保温罩形状及尺寸的条件下，对不同材质保温罩的锡中频挥发除杂效果进行实验及讨论，研究不同材质保温罩对锡中频挥发提纯效果的影响，选择效果最优的保温罩。

2.1 未安装保温罩

在锡中频挥发提纯未安装保温罩，将盛载锡料的石墨坩埚直接放置在加热线圈中部，按照上述操作流程进行中频挥发实验，实验过程中发现，加热线圈设定温度为 1 250 ℃，但是当温度升至 900 ℃左右，温度就无法继续升高，加大中频加热功率后效果也不明显，无法将温度升到设定的 1 250 ℃。主要原因是锡和石墨导热性能都较好，当温度升至 900 ℃后，系统的散热和中频加热线圈的供热基本达成平衡，导致温度无法继续升高，因此，需要保温罩来减少热量的散失。

2.2 石墨保温罩

采用石墨材质保温罩开展三炉次实验，实验过

程中，物料温度、输出功率变化及出炉情况记录数据如表 3。

表 3　石墨材质保温罩实验情况

实验炉次	恒温时功率（kW）	物料温度（℃）	出炉量（kg）	挥发量（kg）	挥发料占比（%）	现象
1	18～19	1 285	5.03	0.97	16.1	石墨保温罩外壁处有打火现象
2	18～19	1 288	4.92	1.08	18	石墨保温罩外壁处有打火现象
3	18～19	1 284	5.07	0.93	15.5	石墨保温罩外壁处有打火现象

从表 3 可以看出，炉内物料处的温度变化幅度较小，温度略高于设定的加热温度，单炉次的损耗偏高，石墨保温罩外壁处出现打火现象。原因分析：主要是因为石墨材质保温罩保温性能好，同时，因为石墨具有导电性，对中频加热线圈的感应电流有影响，导致石墨保温罩自身产生一部分热量，所以物料温度略高于设定值，石墨的导电性也导致石墨保温罩外壁处出现打火现象，存在安全隐患。

分别对实验的三炉次试样采样，用 GDMS 设备进行全元素分析检测，锡中的杂质含量情况如表 4 所示。

表 4　石墨保温罩实验样品中杂质含量检测情况

元素	试样 1/%	试样 2/%	试样 3/%	元素	试样 1/%	试样 2/%	试样 3/%
Cu	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Ni	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
Ag	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Zn	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Mg	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	Bi	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Sb	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	In	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$
S	$<5\times10^{-7}$	$<5\times10^{-7}$	$<5\times10^{-7}$	As	2×10^{-6}	10^{-6}	2×10^{-6}
Ca	3.7×10^{-5}	3.3×10^{-5}	4.2×10^{-5}	Al	2.7×10^{-5}	2.1×10^{-5}	3.2×10^{-5}
Fe	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Pb	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$
Cd	$<10\text{-}^{6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$				

从表 4 的检测结果可以得出，石墨材质的保温罩对金属锡中频挥发提纯工艺的除杂效果较好，锡中的 S、Mg、Zn、Cd、Pb、Sb、Bi、In 杂质元素含量均小于 10^{-6} %，As 元素含量控制在 2×10^{-6} % 左右，达到实验目标。

2.3 石英材质保温罩

采用石英材质保温罩开展三炉次实验，实验过程中，物料温度、输出功率变化及出炉情况记录数据如表 5。

表 5　石英材质保温罩实验情况

实验炉次	恒温时功率（kW）	物料温度（℃）	出炉量（kg）	挥发量（kg）	挥发料占比（%）	炉内现象
4	26～29	1 160±10	5.74	0.26	4.34	石英表面发白
5	26～29	1 150±10	5.81	0.19	3.2	石英罩有轻微变形
6	26～29	1 170±10	5.58	0.42	7	石英罩软化、变形严重

从表 5 可以看出，恒温功率输出较大，炉内物料处的温度变化幅度较大，温度低于设定的加热温度，单炉次的损耗相对较低，石英保温罩表面出现发白、变形等现象。原因分析：主要是因为石英材质保温罩保温性能不好，所以恒温功率输出即便达到额定输出，物料温度也低于设定值；石英的熔点 1 750 ℃，但是其在超过 1 100 ℃时表面会出现析晶现象，导致表面发白，石英的理论软化点为 1 713 ℃，但其在 1 200 ℃长时间使用时就会出现软化变形。

分别对实验的三炉次试样采样，用 GDMS 设备进行全元素分析检测，锡中的杂质含量情况如表 6 所示。

表 6　石英保温罩实验样品中杂质含量检测情况

元素	试样 4/%	试样 5/%	试样 6/%	元素	试样 4/%	试样 5/%	试样 6/%
Cu	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Ni	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
Ag	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Zn	5×10^{-7}	10^{-6}	5×10^{-7}
Mg	10^{-6}	5×10^{-7}	5×10^{-7}	Bi	10^{-6}	10^{-6}	5×10^{-7}
Sb	3×10^{-5}	4×10^{-5}	2×10^{-5}	In	4×10^{-5}	4×10^{-5}	2×10^{-5}
S	$<5\times10^{-7}$	$<5\times10^{-7}$	$<5\times10^{-7}$	As	8×10^{-6}	6×10^{-6}	5×10^{-6}
Ca	3.5×10^{-5}	3.6×10^{-5}	2.2×10^{-5}	Al	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
Fe	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Pb	4×10^{-6}	2×10^{-6}	10^{-6}
Cd	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10\text{-}6$				

从表 6 的检测结果可以得出，采用石英保温罩进行中频真空挥发后，只有锡中的 S、Mg、Zn、Cd、Bi 杂质元素含量实现小于或等于 10^{-6} %，且含量控制存在一定波动，Pb、Sb、In、As 元素含量均

未达到实验要求，石英保温罩对金属锡中频挥发提纯工艺的除杂效果没有达到预期要求，未达到实验目标。

2.4 刚玉材质保温罩

采用刚玉材质保温罩开展三炉次实验，实验过程中，物料温度、输出功率变化及出炉情况记录数据如表 7。

表 7　刚玉材质保温罩实验情况

实验炉次	恒温时功率（kW）	物料温度（℃）	出炉量（kg）	挥发量（kg）	挥发料占比（%）	炉内现象
7	19～20	1 255	5.35	0.65	10.8	保温罩无异常
8	19～20	1 257	5.34	0.66	11	保温罩无异常
9	19～20	1 258	5.33	0.67	11.1	保温罩无异常

从表 7 中的实验情况可以看出，刚玉材质的保温罩导热性能好，炉内物料处的温度与设备的加热温度基本一致，单炉次的挥发量占比能控制在 11 % 左右。再分别对实验的三炉次试样采用 GDMS 设备分析检测，锡中的杂质含量情况如表 8 所示。

从表 7 可以看出，恒温功率输出略高于石墨加热罩，炉内物料处的温度变化幅度极小，物料温度和设定加热温度基本一致，单炉次的损耗适中，刚玉保温罩无任何异常现象。

分别对实验的三炉次试样采样，用 GDMS 设备进行全元素分析检测，锡中的杂质含量情况如表 8 所示。

表 8　刚玉保温罩实验样品中杂质含量检测情况

元素	试样 7/%	试样 8/%	试样 9/%	元素	试样 7/%	试样 8/%	试样 9/%
Cu	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Ni	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
Ag	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Zn	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Mg	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	Bi	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Sb	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	In	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$
S	$<5\times10^{-7}$	$<5\times10^{-7}$	$<5\times10^{-7}$	As	2×10^{-6}	2×10^{-6}	2×10^{-6}
Ca	3.5×10^{-5}	3.7×10^{-5}	4×10^{-5}	Al	3×10^{-5}	2.7×10^{-5}	2.5×10^{-5}
Fe	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	Pb	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$	$<10^{-7}$
Cd	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$	$<10^{-6}$				

从表 8 的检测结果可以得出，刚玉材质的保温罩对金属锡中频挥发提纯工艺的除杂效果较好，三批次样品锡中的 S、Mg、Zn、Cd、Pb、Sb、Bi、In 杂质元素含量稳定且小于 10^{-6} %，As 元素含量控制在 2×10^{-6} %左右，达到实验目标。

综上石墨保温罩和刚玉保温罩均达到实验目标，石英保温罩未达到实验目标。石墨保温罩相对刚玉保温罩的物料损耗更高、加热输出功率略低，但石墨保温罩存在外壁打火现象，存在安全隐患，因此最终确定采用刚玉保温罩。

3　结语

采用石墨、石英、刚玉三种材质的保温罩进行锡中频挥发提纯实验，研究这几种材质保温罩对锡提纯效果的影响。通过实验，从提纯效果、经济性、安全性等几方面确定最佳的保温罩材质。从实验结果来看，石墨和刚玉材质的保温罩提纯效果都最佳，但石墨材质的保温罩由于具有导电性，使用过程中易有打火现象存在安全隐患，同时也会降低中频感应线圈的使用寿命；石英材质的保温罩保温性能差，恒温功率较高不经济，且提纯效果未达到实验目标。综合考虑，在锡中频挥发提纯工艺中选用刚玉材质的保温罩，锡中的 S、Mg、Zn、As、Cd、Pb、Sb、Bi、In 等杂质元素含量稳定且均达到实验目标，为后续工艺制备纯度为 99.999 99 %及以上的超纯锡提供保障。

参考文献：

[1] 孙虎，王建平，王玉峰，等. 中国锡矿开发利用现状及可持续发展建议[J]. 资源与产业. 2012,14（4）:58-62

[2] 吕中海，胡卫波，张俊，等. 锡矿石选矿工艺研究现状与进展[J]. 现代矿业, 2009, 25(10):19-22

[3] 李一夫，王安祥,杨斌，等. 粗锡真空蒸馏精炼的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(3):334-337

废塑料资源化回收利用技术

郑明媚[1] 庄原发[1,2] 秦佳旺[1]

1.东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001；2.清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室，成都 611731

摘要：本文综述了废塑料资源化回收利用技术的研究进展，从物理资源化利用和化学资源化利用两方面介绍了各技术的原理、特点及现存问题。本文提出在当前碳达峰、碳中和背景下，开发成本较低、产品附加值高以及有助于节能降碳的资源化利用技术是未来废塑料资源化利用的重点研究方向。

关键词：废塑料；物理资源化利用；化学资源化利用

中图分类号：X705 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）04-0016-05

Resource Recycling Technologies of Waste Plastics

ZHENG Mingmei[1], *ZHUANG Yuanfa*[1,2], *QIN Jiawang*[1]

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China;

2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: The research progresses of waste plastics resource recycling technologies are reviewed. The principle, characteristics and existing problems of each technology are introduced from two aspects of physical and chemical resource utilization. It is proposed that under the current background of carbon peak and carbon neutralization, the resource utilization technology with low cost, high added value of products and energy saving and carbon reduction is the key research direction of waste plastics resource utilization in the future.

Key words: waste plastics; physical resource utilization; chemical resource utilization

塑料自问世以来，凭借优异的性能成为了现代社会的重要组成部分，具有广泛的应用。[1]据统计，2020 年全球塑料产量 3.67 亿吨，预计 2050 年将达到 11.24 亿吨。[2]我国作为塑料生产第一大国，塑料制品产量约占世界总产量的 30 %，国家统计局数据表明，截至 2023 年 11 月我国塑料制品产量高达 6 658.8 万吨。

塑料制品的大规模生产和使用，势必会产生大量的废塑料。其来源主要有生产塑料制品时产生的工业废塑料以及人类社会活动中产生的生活废塑料两大类。[3]我国年产废塑料约 6 000 万吨，而回收率却不足 30 %，仍明显低于国际水平的 50 %。塑料质量轻且难降解的性质会引发严重的环境污染问题。[4]一方面，塑料老化后释放的有害成分会污染空气、地下水和土壤，在土壤中残留的废塑料也会破坏土壤的理化性质，影响农作物生长。[5]另一方面，废塑料长时间堆放不仅会产生视觉污染，也会滋生有害病菌，加速疾病的传播，危害生物安全。此外，生产塑料的原料主要来自于煤、石油等不可再生能源[6]，如不能对其回收利用则是对资源的极大浪费，据测算回收利用 1 吨废塑料相当于节约 6 吨石油，可减排温室气体 0.36 tCO_2e。[7-8]

因此在当前环境问题、能源危机以及双碳目标的背景下，废塑料的资源化回收利用是同时实现环境和经济效益的有效途径。

1 废塑料资源化利用技术分类

废塑料处理有填埋、焚烧与资源化利用三种途

收稿日期：2024-02-19

作者简介：郑明媚 (1996－)，女，2021 年毕业于大连理工大学环境工程专业，硕士，助理工程师。现在于东方电气集团东方锅炉股份有限公司技术创新中心，从事水污染处理技术研发工作。

径，相比之下，资源化利用既能有效处置废塑料，减少环境污染，又能对废塑料进行资源回收，符合减量化、无害化、资源化的要求。[9]根据处理方式以及最终目的不同可分为物理资源化利用和化学资源化利用技术。

2 物理资源化利用

物理资源化利用也称为再生利用，主要分为简单再生和改性再生，如图 1。

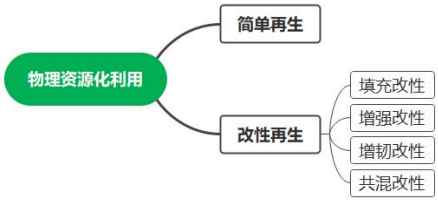


图 1 物理资源化利用技术

2.1 简单再生

废塑料经预处理（分选、清洗、破碎、熔融、造粒等）后直接加工生产再生塑料制品的工艺称为简单再生，适用于工业废塑料以及易挑选/清洗的一次性废塑料。[10]由于工艺简单、成本低，简单再生应用广泛，且产品被大量应用于农业、工业等领域。[4]然而，不同塑料的占比及相容性的差异导致简单再生产品的性能较差、附加值不高。

2.2 改性再生

改性再生是指采取不同方法对废塑料进行改性以恢复其性能的技术，分为物理改性和化学改性。物理改性通过加入不同的改性剂，将废塑料转化成附加值较高的材料，分为填充改性、共混改性、增韧改性和增强改性等。[11]通过接枝、共聚等方法调整废塑料分子链或通过交联剂、成核剂、发泡剂等进行改性处理，提升废塑料性能的技术为化学改性。[12]

3 化学资源化利用

化学资源化利用是通过化学方法，对成分复杂、分离困难、或混合处理效果不佳的废塑料加以回收利用的技术，是近年来的研究热点，共包含如下技术（图 2）。

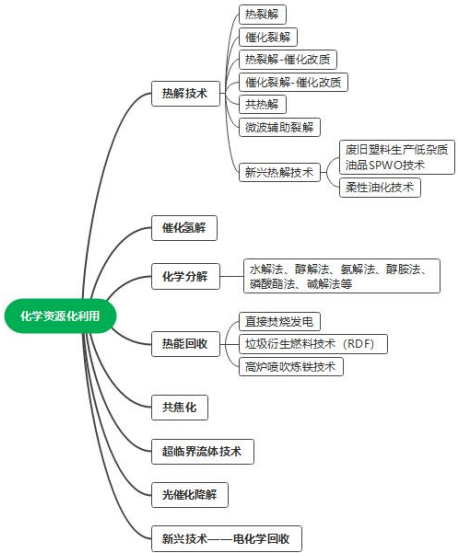


图 2 化学资源化利用技术

3.1 热解技术

热解技术通过在高温反应器中将废塑料在无氧或少氧条件下加热裂解，回收反应产生的有价值的燃料油、燃料气、炭黑、蜡、聚合物单体或者其他高附加值产品（如碳纳米管等），从而实现废塑料的资源化利用。[13-14]具体分为以下几种技术。

3.1.1 热裂解

热裂解是将废塑料直接加热（600~900 ℃），使分子键断裂生成长度各异的分子烃，经后续分馏后得到不同的燃料油和燃料气等产物。[15-16]热裂解所需的温度较高、时间长、燃料油品质差、产率低，对反应装置和管道等硬件设施的要求严格且热解时易生成石蜡堵塞管路，生产成本较高。[16]因此，工业上一般不采用热裂解法。

3.1.2 催化裂解

由于热裂解的诸多不足，催化裂解应运而生。该法是将催化剂和废塑料混合后再加热裂解，不仅降低了反应温度、提高了反应速率，而且可选择性地提高目标产物的产率。但裂解后催化剂会与废塑料中的杂质和裂解残碳相混合，导致催化剂容易失活并难以回收，从而增加过程成本；且催化剂会影响油品质量，这在一定程度上限制了该技术的发展。[17]

3.1.3 热裂解-催化改质

热裂解-催化改质是将废塑料热裂解的产物在催化剂的作用下发生改质反应，以改善产品品质的

技术。[18-19]此外，相较于热裂解，原料的转化率也有所提高，且催化剂可循环利用。虽然投资较大，工艺较复杂，但是相较于前两种方法，此法在工业上的应用更加广泛。[20]

3.1.4 催化裂解-催化改质

催化热解法和热解—催化改质法二者结合又衍生出了催化裂解-催化改质法。将废塑料与催化剂直接接触气化，然后裂解气通入到催化管中进行催化改质。[21]该技术热解效率高、节省能源、产物质量高，因此最具发展前景。但该方法催化剂用量大，同时会衍生出一些工艺问题，导致成本过高，后续还需进一步开发廉价、高效的催化剂，从而推动其工业化进程。[22]

3.1.5 共热解

废塑料回收时难免会混入其他废物，为了减小垃圾分类回收的成本并提高废物的综合利用效率，最佳途径为废塑料与其他物质的共热解技术。[23]通常与废塑料共裂解的物质主要有生物质、油和煤（与煤共热解也称共焦化技术，在 3.5 中介绍）等。由于塑料中含氢量多，将其与生物质共裂解，有利于二者的成油转化。[3]将废塑料与油混合进行共裂解，可提高裂解炉中的导热速率，减少热解炉结焦，提升产品油的质量。由于共裂解原料的多样性，使产物组分复杂，直接燃烧会产生有毒有害气体，无法直接作为燃料使用。因此，后续仍需深入研究共热解组分的选取、反应机制以实现共热解产物的直接清洁化利用。

3.1.6 微波辅助裂解

塑料作为微波透过物质，无法直接吸收微波的能量来进行裂解。研究发现[24]，将塑料与多孔碳等含碳材料或金属丝等微波吸收能力较强并且能将微波能转化为热能的物质混合后进行微波裂解，可显著改善塑料的吸波性能。根据裂解过程中催化剂的添加与否，可分为非催化剂和催化剂微波辅助裂解。对于后者，催化剂兼具微波吸收与促进裂解的作用。但该技术目前还多处于基础研究阶段，实际工程应用较少。

中国石化北京化工研究院[25]研制的一种新型碳材料可在微波场中迅速产生高温，无需使用催化剂。实验结果表明，微波辅助裂解 40 s 即可使废塑料几乎全部裂解，产生富含乙烯、丙烯等物质的裂解气，实现废塑料的高效资源化利用。

3.1.7 新兴热解技术

（1）废旧塑料生产低杂质油品 SPWO 技术

针对现有热解技术产率低、杂质含量多（尤其是 Cl，Si 杂质）的问题，中国石化石油化工科学研究院提出了一种废旧塑料生产低杂质油品 SPWO 技术方案。[25]利用塑料间溶解性的差异，选择性的脱除废塑料中的聚氯乙烯（PVC），从而实现脱氯的目的，脱除率高达 99.5 %以上。对于脱硅过程，在适当温度下将以聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP）为主的废塑料溶解于溶剂油中，用吸附剂吸附或富集废塑料中的有机硅，后续将通过溶剂热解分离产物制成低杂质油品。该技术大大降低了热解油深加工过程的脱氯、脱硅成本。

（2）柔性油化技术

柔性油化技术是由福海蓝天（北京）环保科技有限公司开发的废塑料资源化利用工艺，其实质也是一种热解工艺。最直接的区别是，柔性油化技术通过控制低、中、高三种反应温度，缓慢地对废塑料进行裂解。废塑料在较低温度下（200~250 ℃）就开始裂化反应，逐步过渡到高温，分阶段对产品油进行分类收集，有效避免了过度高温裂解产生的结焦、缩聚反应，降低了原料的结焦率，减少了产品油的杂质。[26]该工艺技术先进，设备可靠，可连续生产，每日可消纳废塑料 200~300 吨，出油率可达 80 %以上，油品生产过程符合环保要求，具有较好的社会效益。[27]

3.2 化学分解

化学分解技术指在不同的介质中，废塑料中的高聚物发生解链反应，分解成原料单体或低分子聚合物，以便后期加工成高附加价值产品，从而达到回收再利用的目的。根据分解剂的类型以及分解方法可将化学分解细化为水解法、醇解法、氨解法、醇胺法、磷酸酯法、碱解法等。[28-30]化学分解相较热解法的优势在于其产物均匀性高且便于控制，一般不需要分离纯化并且其设备投资较少。但是对废塑料的洁净程度和品种均一性有较高的要求，因此

更适于较单一、污染程度低的废塑料。[6]

3.3 催化氢解

对于聚乙烯（PE）和聚对苯二甲酸类塑料（PET）等废塑料，可向其中添加氢气或者生物质，在催化剂的作用下，发生催化氢解反应，将废塑料转化成烷烃类碳氢化合物从而作为燃料使用。而且催化氢解过程反应温度低，产物可作为燃料来源，但对催化剂的效率和选择性有较高要求，且产生的低价值烷烃产物需要较大的分离成本。

3.4 热能回收

废塑料主要由C、H元素组成，燃烧后会释放大量热量，其热值几乎与燃油相当。[31]热能回收法可高效获取其中的能量，且废塑料灰分少、含硫量低、燃烧速度更快，因此是一种重要的废弃物资源化方式。[32]该方法特别适用于因不易分离、污染严重等因素不能被回收利用的废塑料。[33]

3.4.1 直接焚烧发电

焚烧对原料预处理的要求低，操作方便、处置效率高、成本相对较低、且工艺较为成熟，目前很多垃圾焚烧厂将部分废塑料作为燃料进行发电。但由于焚烧过程的不稳定性，大多数废塑料在焚烧时都会产生二噁英、一氧化碳等有毒有害污染物，对环境产生二次污染。[3]因此，控制塑料焚烧过程中的二次污染是一大难题。此外，焚烧法设备会有一定损耗且投资运行费用高。[34]

3.4.2 垃圾衍生燃料技术（RDF）

为了控制废塑料焚烧时产生的二次污染，美国开发了垃圾衍生燃料技术（RDF）。将废塑料粉碎后与生石灰为主的添加剂混合后制成体积小的颗粒燃料，其发热量与重油相当，能量利用率高、污染物排放少，但由于其设备昂贵，难以推广。[35]

3.4.3 高炉喷吹炼铁技术

根据废塑料燃烧性能良好的特性将其用于以高炉为基础的现行钢铁制造的技术称为高炉喷吹炼铁技术。废塑料经预处理后制成粒径适宜的颗粒，作为部分还原剂燃料以减少高炉的焦炭消耗，其中废塑料的能量利用率高达80 %。在德国和日本，该技术已有近40年的研究历程，每吨铁水喷吹废塑料质量（喷塑比）由10 kg提升至250 kg[36]，废塑料的消耗量大大提升。高炉喷吹技术预处理简单、能量利用率高、运行成本低且不易产生二噁英等有毒有害气体，但也存在着预处理成本较高、设备初期投资成本高等缺点。

3.5 共焦化技术

废塑料与煤共焦化是在现有炼焦炉的高温干馏技术的基础上，将废塑料按一定比例配煤后进行高温干馏，可得到焦炭、焦油以及焦炉煤气等产物。[37]该技术对原料的要求低、可处理混合废塑料、预处理简单、设备投资较小且不会产生二噁英等剧毒物质。但值得注意的是，不同种类的废塑料会对炼焦产生不同的影响，因此对废塑料进行分类收集、提高配入比例以及减少有害杂质的影响仍需进一步探索。2011年，首钢公司的国内首条废塑料共焦化处理生产线调试成功，该生产线处理量为每年1万吨废塑料，同时可得到5万吨炼焦用原料，实现了废塑料的无害化处理和资源化利用，但由于经济性较差，目前处于停用状态。[38]

3.6 超临界流体技术

利用超临界流体优异的溶解能力和传质性能，可将废塑料快速、高效地分解成单体或低聚物。[39-40]超临界水是最常用的一种溶剂，而对于特定废塑料如PET，超临界甲醇因其独特优势也作为溶剂使用。侯彩霞等[41]研究表明，PE或PE/PS（聚苯乙烯）的混合物在440 ℃的超临界水中反应30 min，可完全降解为液体和气体。超临界流体技术反应速率快、产率高并且可直接获得单体化合物，但反应条件苛刻、需要高额的设备投资和运行成本，还存在设备腐蚀和盐堵塞等问题，工业应用受限。

3.7 光催化降解技术

在紫外光的照射下，废塑料物理性质和化学结构会遭到破坏而进行分解。利用这一特性，选用合适的光催化剂，废塑料可转化成高附加值的氢气和其他小分子化合物。在光照下，光催化剂发生电子-空穴分离效应，空穴可直接氧化塑料，电子和空穴也可与O_2和H_2O反应生成羟基自由基和超氧自由基进一步降解塑料，生成小分子有机物或最终转化

成 CO_2 和 H_2O，电子则将 H_2O 还原为 H_2。光催化降解技术利用太阳能作为能源，反应可在常温常压下进行，产品附加值高，但废塑料上的污渍会影响光的穿透性，从而降低降解效率，而且产生的 CO_2 也涉及碳减排的问题。

3.8 新兴技术—电化学回收

在碱性电解液中，PET 易水解为对苯二甲酸和乙二醇，将该过程与电催化氧化裂解耦合，可从 PET 中获得高附加值化学品。基于此 Zhou 等[42]将废 PET 置于 KOH 电解液中进行电解，在催化剂的作用下室温促进 PET 分解，产物经分离后可得到二甲酸钾（用作饲料）和氢气燃料。该技术产品附加值高且具有经济可行性，通过评估得知回收 1 吨废塑料的净收入约 350 美元。但该技术规模化应用还有一定的距离，还需进一步优化电解池的设计和分离纯化工艺，并开发高效、高选择性的催化剂，降低成本。

4 结语

废塑料的资源化利用具有节约资源、保护环境的重要意义，同时又兼具一定的经济性。近年来国家也陆续出台了多项政策来推动废塑料的资源化能源化利用，并鼓励废塑料同级化、高附加值利用。在废塑料资源化处理技术中物理资源化利用技术发展最为成熟，应用也最广泛。其次为化学资源化利用中的热解油化技术，而一些新兴技术如电化学回收废塑料还处于实验室研究阶段。回收利用再生资源能够同步实现碳减排和污染物减排，无疑是实现碳达峰和碳中和的重要方式。在此背景下，废塑料的回收利用将成为大力推进的产业方向，开发成本较低、产品附加值高以及有助于节能降碳的资源化利用技术成为了未来研究的重点。

参考文献：

[1] 高微. 聚对苯二甲酸乙二醇酯/无机纳米复合材料的制备与研究[D].吉林大学，2013

[2] 王月, 赵秦峰, 张占全, 等. 碳中和背景下国内外废塑料裂解法回收进展[J]. 化工进展, 2022，41(3):1470-1478

[3] 闫国荀. 聚烯烃热裂解及裂解产物作低碳烯烃生产原料的研究[D].青岛科技大学, 2015

[4] 汤桂兰, 胡彪, 康在龙, 等. 废旧塑料回收利用现状及问题[J].再生资源与循环经济, 2013，6(1):31-35

[5] 王奔, 黄菊文, 朱昊辰, 等. 废塑料资源化高值利用的产业发展[J]. 上海节能，2021(1):20-25

[6] 白婕. 废塑料配煤炼焦的实验研究[D]. 辽宁科技大学, 2016

[7] 宁晓琴. 塑料包装行业发展现状及趋势分析[J].塑料包装，2014, 24(3):1-4

[8] 戴铁军, 潘永刚, 张智愚, 等. 再生资源回收利用与碳减排的定量分析研究[J].资源再生，2021(3):15-20

[9] 李千婷. 废塑料资源化产品的环境安全性评价[D].北京化工大学, 2010

[10] 王媚娴. 超/亚临界水中聚对苯二甲酸乙二醇酯解聚研究[D].浙江工业大学, 2010

[11] 李二平, 胡晴, 邱亚群, 等. 废塑料再利用技术研究进展[C]//.2016中国环境科学学会学术年会论文集（第三卷）. 2016:848-854

[12] 徐竞. 废塑料的再生利用和资源化技术[J].上海塑料，2010(1): 43-48

[13] 张友根. 废弃塑料包装资源绿色高值化解决方案的持续创新(一)[J].橡塑技术与装备，2018，44(24):23-31

[14] Kumar S R, Biswajit R, Kumar S A, et al. Conventional pyrolysis of Plastic waste for Product recovery and utilization of pyrolytic gases for carbon nanotubes production[J]. Environmental Science and Pollution Research，2020，29(14): 1-10

[15] Grause G, Alfons B, Yusaku S, et al. Feedstock recycling of waste polymeric material[J]. Journal of Material Cycles&Waste Management，2011，13(4):256-284

[16] 林宏飞, 苏丽梅, 徐国涛, 等. 塑料垃圾热解炼油技术的研究进展[J].能源与节能，2018(03):2-5+18

[17] Tschan M J L， Brule E， Haquette P， et al. Synthesis of biodegradable polymers from renewable resources[J]. Polymer Chemistry，2012，3(4):836-851

[18] 张君涛, 刘健康, 梁生荣, 等. 废塑料化学转化制燃料的催化剂研究进展[J].化工进展，2014(10):2644-2649

[19] 张郑磊. 废塑料热解-催化改质实验研究[D].华北电力大学，2008

[20] Vasile C, Brebu M A, Karayildirim T, et al. Feedstock recycling from plastics and thermosets fractions of used computers. II. Pyrolysis oil upgrading[J]. Fuel, 2007, 86(4):477-485

[21] 朱向学, 安杰, 王玉忠, 等. 废塑料裂解转化生产车用燃料研究进展[J].化工进展，2012(Supply1):398-401

[22] 刘健康, 张君涛, 苏彤. 废塑料制燃料油研究进展[J].广东化工，2013，40(24):63-64

[23] 时宇. 废塑料热裂解技术[J]. 当代化工, 2020,49(12):2840-2843

[24] 高腾飞, 肖天存, 闫巍, 等. 固体废弃物微波技术处理及其资源化[J].工业催化，2016，24(7):1-10

[25] 李明丰, 蔡志强，邹亮，等. 中国石化废旧塑料化学回收与化学循环技术探索[J].中国塑料，2021，35(8):64-76

（下转第73页）

基于物理去除方法的反应堆及一回路系统腐蚀产物过滤系统设计

苏志勇[1] 曲德庆[2] 龚剑[2] 罗毅明[2] 丁然[1] 隆涛[1]

1.中国核动力研究设计院，成都 610065；2.中国人民解放军 92730 部队，三亚 572099

摘要：随着核反应堆服役年限的增加，反应堆一回路系统的设备、管道、阀门内表面存在一定的剥落，形成腐蚀产物悬浮于冷却剂中，最终变为活化腐蚀产物。随着活化腐蚀产物的不断增加会造成冷却剂中总固水平增加和反应堆厂房内空间剂量水平升高，也会对设备的运行造成一定的影响。为解决这一问题，本文采用在一回路系统上增设并联支路，支路中设置腐蚀产物过滤系统，采用物理去除的方法不断对冷却剂过滤去除其内的腐蚀产物，进而降低冷却剂中的总固水平。对于腐蚀产物过滤系统的过滤器，采用碟片式结果，采用有限元方法进行了过滤器单层固液两相分离仿真。经工程应用验证表明，本文设计的腐蚀产物过滤系统可有效降低冷却剂中的总固水平，表明对去污冷却剂中的腐蚀产物效果明显。

关键词：反应堆及一回路系统过滤系统；腐蚀产物；物理去除；过滤器；有限元方法

中图分类号：TM623 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）04-0021-05

Design of Corrosion Product Filtration System for Reactor and Primary System Based on Physical Removal Method

SU Zhiyong[1], QU Deqing[2], GONG Jian[2] , LUO Yiming[2], DING Ran[1], LONG Tao[1]

（1.Nuclear Power Institute of China,610065,Chengdu;2.Unit 92730 of the People's Liberation Army,572099,Sanya）

Abstract:With the increase of the service life of nuclear reactors, the inner surface of the equipment, pipes and valves of the reactor primary circuit system has some spalling, forming corrosion products suspended in the coolant and eventually becoming activated corrosion products. With the continuous increase of activated corrosion products, the total solid level in the coolant and the spatial dose level in the reactor building will increase, which will also have a certain impact on the operation of the equipment. In order to solve this problem, a parallel branch is added to the primary system, and a corrosion product filtration system is set up in the branch, and the corrosion products in the coolant are constantly filtered and removed by physical removal method, thus reducing the total solid level in the coolant. For the filter of corrosion product filtration system, the simulation of single-layer solid-liquid two-phase separation of the filter was carried out by finite element method using the disc results. The engineering application verification shows that the corrosion product filtration system designed in this paper can effectively reduce the total solid level in the coolant, indicating that the effect on the decontamination of corrosion products in the coolant is obvious.

Key words：reactor and primary system filtration system; corrosion product; physical removal;filter; finite element method

目前，我国大部分核反应堆类型为压水堆，以去离子水作为冷却剂。反应堆一回路系统的设备、管道、阀门大多为金属制品，在高温、高压的冷却水长期浸蚀和冲刷下，一回路系统的设备、管道、

收稿日期：2024-04-03

作者简介：苏志勇 (1985一)，男，2008 年毕业于哈尔滨工业大学机械设计及其自动化专业，学 士，高级工程师。现任中国核动力研究设计院，主要从事反应堆检修研究方向核反应堆一回路系统检修工作。

阀门内表面存在一定的剥落形成腐蚀产物，悬浮于冷却剂中，随冷却剂经过反应堆堆芯活化段时被中子活化，最终变为活化腐蚀产物。随着核反应堆服役年限的增加，反应堆及一回路系统内的活化腐蚀产物不断累积，造成冷却剂中总固水平增加核反应堆厂房内空间剂量水平升高。同时，活化腐蚀产物在压力容器堆内构件、燃料组件表面、蒸发器换热管一次侧、主泵阀门等设备表面沉积，会降低传热效率和设备性能，严重时会损伤密封面，导致密封失效。此外，活化腐蚀产物会随反应堆放射性废水排放、卸料检修等活动进入放射性废物处理设施，造成废水设施污染和设备故障。

为了保证系统设备的固有安全，降低从事在役检查、维修、换料工作人员照射剂量，有必要对反应堆一回路系统中累计的腐蚀产物进行治理，常用物理或化学的方法对一回路系统进行去污。化学法是将堆内燃料组件全部卸出后，向反应堆一回路系统加入酸、碱等化学试剂，升温后通过主泵将化学试剂送至设备、管道、阀门内表面进行去污。2010年，李烨[1]等人针对反应堆一回路堆外系统进行了清洗配方研究，确定了清洗主剂为10 % HNO_3、侵蚀剂为$KMnO_4$、缓蚀剂为苯并三唑；2012年，谭昭怡[2]等人总结了近年来反应堆一回路冷却系统去污工艺和去污试剂对结构材料腐蚀的影响；2021年，李烨、谭昭怡等人[3]进行了反应堆一回路不锈钢管道沉积物制备及去污模拟研究。此外，中国原子能科学研究院、中国辐射防护研究院针对反应堆、一回路的化学去污也做了模拟研究。他们的研究表明，化学法对沉积在表面的腐蚀产物效果较好，但化学试剂在去除腐蚀产物的同时，可能对设备、管道、阀门内表面基体同样存在一定的腐蚀，影响设备性能；为防止化学试剂残留，化学去污后需进行多次漂洗，产生的废物量较大。物理法是利用机械过滤器和高流速松动、冲刷、滤除系统内的活化腐蚀产物，与化学法相比，因不担心化学试剂残留对设备、管道、阀门的损伤，无需额外加入冷却剂，产生的废物量较少。本文提出了一种反应堆及一回路系统腐蚀产物过滤去污方案，并对实施可行性进行了分析。

1 腐蚀产物过滤去污工艺设计

为确保反应堆及一回路系统正常安全运行，不破坏系统原有运行特性，考虑在一回路系统上增设并联支路，支路中设置腐蚀产物过滤系统，既在一回路系统选取合适的管道接口或阀门与腐蚀产物过滤系统的入口连接，腐蚀产物过滤系统另一端出口与反应堆及一回路另一管道或阀门连接，形成一个并行的环路。过滤操作时，将反应堆一回路内的腐蚀产物搅起，一并在一回路内流动，同时利用加压泵将含腐蚀产物的冷却剂抽排至腐蚀产物过滤系统中进行三级过滤，过滤后返回反应堆一回路系统，见图1所示。经过连续过滤，反应堆一回路冷却剂内的腐蚀产物会逐步减少，降低了反应堆冷却剂的总固水平。通过对一回路冷却剂中总固水平测量来判断过滤效果。

过滤系统产生的少量废液首先收集在集液槽中，通过排污泵排向厂房内的放射性废液处理设施。过滤系统产生的放射性废气通过核级空气过滤器过滤后排放。

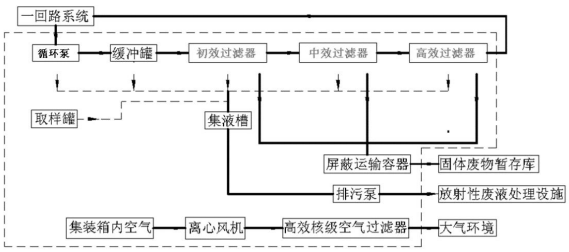


图 1 系统流程图

2 腐蚀产物过滤系统设计

2.1 总体结构设计

腐蚀产物过滤系统由循环泵、缓冲罐、过滤机组（初效过滤器、中效过滤器、高效过滤器）、集液槽、排污泵、离心风机、核级空气过滤机组、中央空调、测量仪表、显示报警、配电箱、视频监控系统、集装箱组成，见图 2 所示。循环泵、缓冲罐、过滤机组（初效过滤器、中效过滤器、高效过滤器）、集液槽、排污泵、离心风机、高效核级空气过滤器、配电箱、视频监控系统均集成在集装箱内部。

Z001 端为一回路系统冷却剂进口，Z003 端为过滤后冷却剂出口。循环泵（S001）抽取反应堆一回路系统中含有活化腐蚀产物的冷却剂，并加压后冷却剂先后通过初效过滤器（S002）、中效过滤器（S003）和高效过滤器（S004），过滤后的水最终流入一回路系统中。每个过滤器增加一个旁通，通

过单独调节可以控制通过每种过滤器的流量，甚至可以根据情况短路某个过滤器。更换过滤器时，关闭 Z002 阀门和 Z003 阀门，阻断回路进出水，更换过滤器。

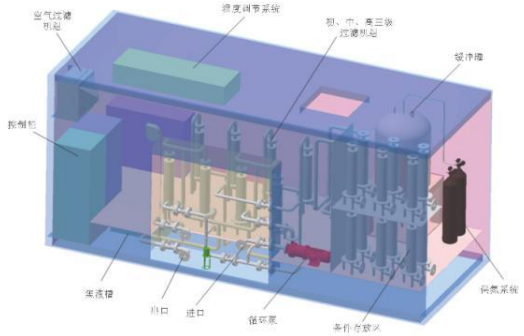


图 2　腐蚀产物过滤系统结构示意图

稳压部分是过滤系统的一个支路。首先向缓冲罐（S005）内充入一定压力的压缩氮气，对系统进行加压，保证一回路系统正常运行，待系统运行冷却剂因温度上升体积膨胀带来系统压力升高时，膨胀部分水进入缓冲罐（S005）内，并挤压密闭空间内的高压氮气，高压氮气达到阈值时系统停止运行，一回路开始进行余热排出，待系统温度降至预定值时，再次开始新的循环，过程中出现意外超压，缓冲罐安全阀作用起跳放气泄压，保证安全。过滤装置系统流程如图 3 所示。

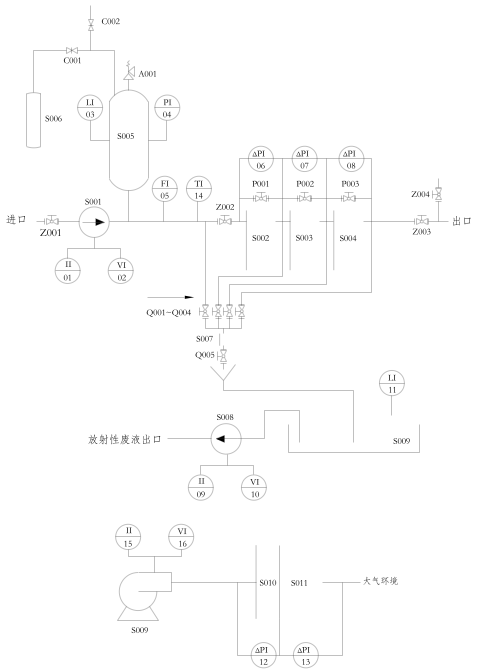


图 3　腐蚀产物过滤系统图

为监控系统运行状态，在主回路设置流量、压力、压差、温度测量点；缓冲罐设置液位测量点；取样减压罐设置液位测量点；泵设置电压和电流测量点；空气过滤器设置压差测量点；集装箱内增设 γ 剂量率测点；集装箱内环境温湿度测点。

2.2 过滤器设计及力学分析

过滤器是腐蚀产物过滤系统过滤的主力部件。过滤器选用 750 目（20 μm）滤材，滤材材质为聚丙烯，一种只有碳氢氧两种元素的有机材料（不会析出有害元素），滤材外观为白色的布料。考虑到精细过滤器在该系统中需要过滤大部分的不溶性固体，因此，该位置过滤需要需用纳污量较大的结构形式，结合以往工程使用经验来看，碟片式过滤器具有较大的纳污量。精细水过滤器进口口径为 DN40，不堵塞流量不小于 15 t/h，外径约 400 mm，高度约为 500 mm，为了便于安装和拆卸，过滤器接口处设有 O 型密封圈，采用快插的方式进行密封，如图 4 所示:

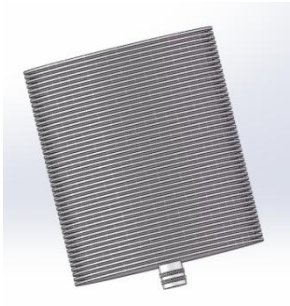


图 4　过滤器三维结构示意图

过滤器结构和参数确定后，对放射性废液及固体不溶杂质在其内的流动过程单个过滤层进行了 CFD 仿真分析。考虑到多孔介质模型的复杂程度，在方细波[4]的研究基础上，采用 porous-jump 模型，该模型更易于收敛，该多孔阶跃模型的参数符合 Darcy 关系式。

$$\frac{\Delta P}{L}=\frac{\mu}{K}u \tag{1}$$

式（1）中：ΔP—压降；

L—多孔介质长度；

K—渗透率；

u—流体平均流速。

分析过程采用 Gambit 进行了网格划分，建立了如图 5 所示的有限元模型。

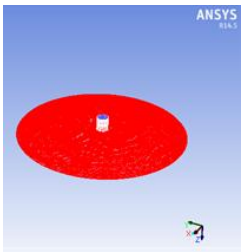


图 5　过滤器单层有限元模型

为计算机模拟计算，加快收敛速度，本项目仿真做以下几个假设条件：①固液分离仿真过程中，只考虑稳定后状态，忽略开始和结束时的瞬态变化；②固液分离过程视为常温下的流动运行，忽略温度变化及系统的传热过程；③过滤达到稳定状态后，过滤袋体积及形状不再发生变化；④流动为不可压缩流动，湍流模型采用标准的 k-￡计算求解。采用 fluent14.5 完成了固液两相分离仿真模拟[5]，部分主要参数设置如表 1 所示。通过计算结果绘制出了 XY Plot，Histogram，压力云图等相关结果。具体参数设置及结果如图 6~12 所示。

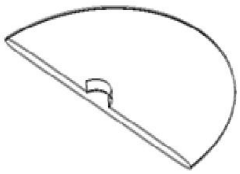


图 6 过滤袋单层物理模型图

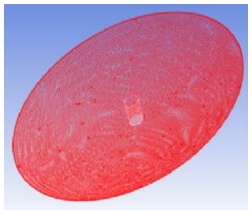
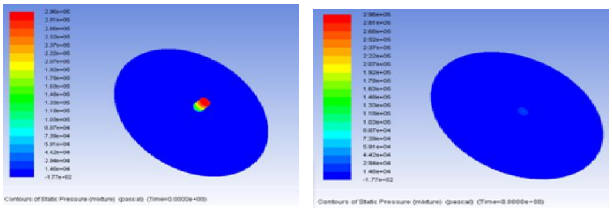


图 7 过滤袋 Mesh 网格划分

表 1　数值模拟主要参数设置

通用		模型		材料		
类型	时间	多相	粘性	碳-固	水-液	铝
压力基	瞬态	混合	k-e 标准,标准壁 fn	流体型	流体型	固态型
相		计算方式		模型树节点	—	—
水	粒子	变量	梯度	压力	湍流能	耗散率
初相	次相	分离求解法	格林-高斯方法	0.5	0.8	0.8



（a）　（b）

图 8　压力等高线仿真结果

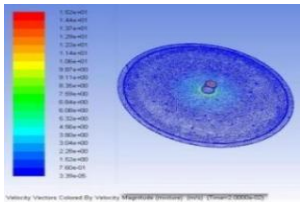


图 9　速度矢量仿真结果

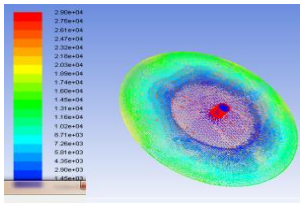
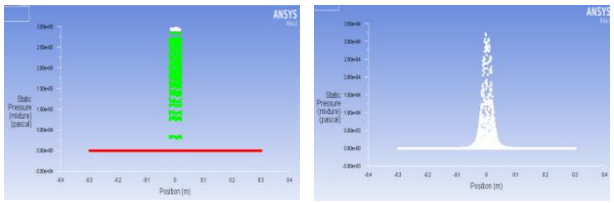


图 10　迹线仿真结果



（a）　（b）

图 11　颗粒分布仿真结果

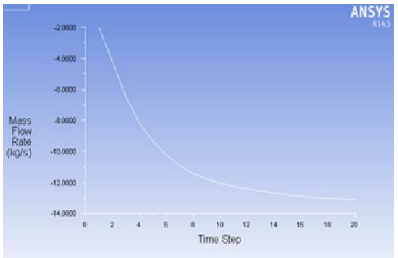


图 12　质量流仿真结果

分析结果表明：过滤单元边夹角适中、尺寸分布与应力或梯度分布符合要求；压力集中于入口处，其余部位压力分布接近均匀，速度和迹线主要集中于入口，其余部位分布接近均匀，颗粒分布主要集中于入口处，其余部位分布接近均匀；除入口处外，其余部位均在安全使用范围内，符合设计要求。实际应用过程中对入口进行了加厚处理。

3　工程应用

在一核电厂反应堆运行过程中，采用本过滤装

置对反应堆及一回路冷却介质进行了过滤效果验证。腐蚀产物过滤系统运行过程中，通过对冷却剂定期取样并对样品中的总固水平进行了测量分析。原水或蒸残液中总固 c 按下式计算：

$$c=\frac{(W-W_0)\times 10^3}{V\times 10^{-3}} \qquad (2)$$

式（2）中：c—原水中总固，mg/L；

W—蒸发皿及残渣的总重量，g；

W_0—蒸发皿的重量，g；

V—水样体积，mL。

机械过滤去污后回路水的总固去除率 f 按下式计算：

$$f=\frac{(M-M_0)}{M_0}\times 100\% \qquad (3)$$

式（3）中：f—水的总固去除率；

M—去污后回路水的总固值，mg/L；

M_0—去污前回路水的总固值，mg/L；

图 13 为过滤前后回路水的总固值的变化趋势，过滤后水溶液的总固值略大于过滤前的总固值。

图 14 为一回路水中腐蚀产物去除率变化趋势。原一回路系统水样的总固值为 104.20 mg/L，经过滤系统过滤后，一回路系统中水样总固值为 0.5 mg/L，一回路系统腐蚀产物过滤去除率达到 99.52 %，将总固值换算电导率，即 0.5 mg/L=0.9 μS/cm，过滤后一回路系统水样的电导率与去离子水的电导率相等（0.1 ~1.0 μS/cm），表明腐蚀产物过滤系统去污效果显著，过滤去污后的水溶液与离子水相当。

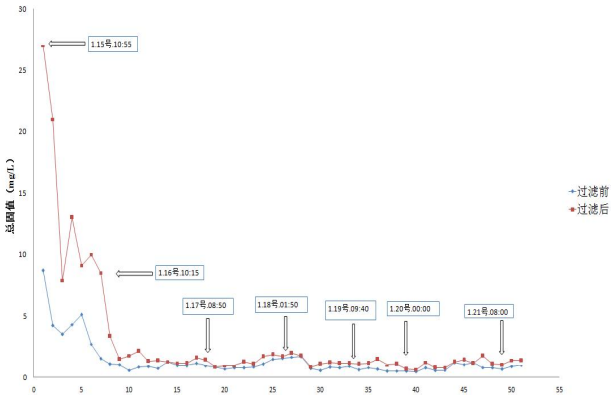


图 13　过滤前后回路水的总固值的变化趋势

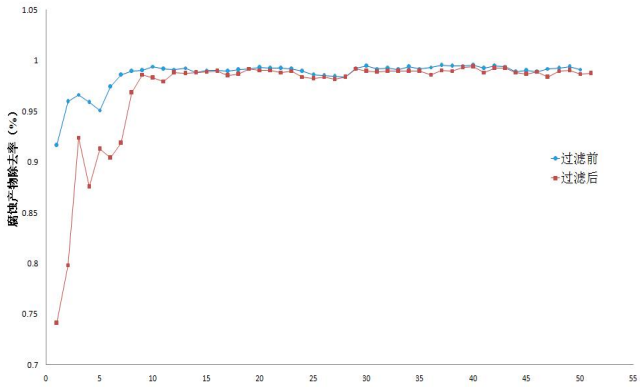


图 14　一回路水中腐蚀产物除去率变化趋势

4　结语

本文采用在一回路系统上增设并联支路，支路中设置腐蚀产物过滤系统的方法将反应堆一回路冷却剂内的腐蚀产物不断过滤去除。对腐蚀产物过滤系统的过滤器采用碟片式结构，经有限元分析过滤器满足技术要求。经工程实施验证，本文中基于物理去除的反应堆及一回路系统腐蚀产物过滤系统可有效降低一回路系统冷却剂中总固水平，表明对腐蚀产物的过滤去除效果明显。

参考文献：

[1] 李烨，谭昭怡，孙宇，等. 反应堆一回路系统循环去污配方实验研究[J]. 原子能科学技术, 2010, 44（Suppl1）：114-118

[2] 谭昭怡，李烨，孙宇，等. 反应堆一回路系统去污工艺及其对结构材料腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术. 2012,24(4): 275-279

[3] 李烨，谭昭怡，龙兴贵. 反应堆一回路不锈钢管道沉积物制备及去污的模拟研究[J]. 化学研究及应用, 2021,33（3）: 554-561

[4] 方细波. 金属多孔介质气固分离器流场数值模拟及结构优化[D]. 西安理工大学, 2018

[5] 丁欣硕，焦楠. FLUENT14.5 流体仿真计算从入门到精通[M]. 北京：清华大学出版社, 2014

直流式蒸汽发生器壳侧局部阻力特性试验研究

姜凤鸣[1] 武志广[2] 代文花[1] 樊俊[1] 王博[1]

1.东方电气股份有限公司，成都 611731；2.中国原子能科学研究院，北京 102413

摘要：本文基于模化试验方法研究了直流式蒸汽发生器壳侧局部阻力特性，测得了不同工况下试验体总体压降与分段压降，以及各复杂关键部件如进出口接管、均流格栅、进出口流量分配罩等位置的流量、温度、压力和差压数据，拟合出了蒸汽发生器试验体总阻力系数与雷诺数的关系式，本文试验结果可为蒸汽发生器 CFD 计算方法提供验证和支撑。

关键词：蒸汽发生器；壳侧局部阻力特性；模化分析；试验研究

中图分类号：TL353.13 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）04-0026-06

The Experimental Study on Resistance Characteristics of Shell Side of Once-through Steam Generator

JIANG Fengming[1], WU Zhiguang[2], DAI Wenhua[1], FAN Jun[1], WANG Bo[1]

（1. Dongfang Electric Corporation Limited, 611731, Chengdu, China; 2. China Institute of Atomic Energy, 102413, Beijing, China）

Abstract: In this paper, the local resistance characteristics of the shell side of the once-through steam generator were studied based on the scaling analysis method. The test equipment overall pressure drop and segmented pressure drop under different working conditions were measured, as well as the flow rate, temperature, pressure and pressure drop data of each complex key component, such as the inlet and outlet nozzles, the flow board equalization and the inlet and outlet flow distribution equipment. The relationship between the total resistance coefficient of the steam generator test body and the Reynolds number was fitted. The results of this paper could provide verification and support for the CFD calculation method of the once-through steam generator.

Key words: steam generator; the local resistance characteristics of the shell side; scaling analysis; experimental research

核电厂直流式蒸汽发生器壳侧结构复杂，一般包含进出口接管、进出口流量分配罩、均流格栅、支撑板等局部异形装置，壳侧的局部阻力特性研究一直是蒸汽发生器设计关注的重点问题之一。

李勇等[1]先采用 CFD 数值分析方法对蒸汽发生器支撑板进行数值模拟，为试验段进行结构设计，之后文博等[2]开展试验模拟，获得支撑板的阻力特性。赵二雷等[3]在蒸汽发生器综合性能试验中对给水组件的阻力特性开展试验研究，获得给水组件阻力随功率变化的趋势。李旭东[4]基于多孔介质方法研究支撑板对壳侧热力特性的影响。莫少嘉等[5]对蒸汽发生器流量分配板及横向流局部阻力采用 GENEPI 进行了模拟研究。李磊[6]、施杨[7]、曲世祥[8]对蒸汽发生器壳侧进口管嘴开展了数值模拟流动特性分析，其中，曲世祥还开展了缩比样机的局部阻力试验研究。印度 Patil[9]和 Khadamakar[10]针对流量分配装置的均流格栅进行数值研究并开展了缩比试验样件试验，获得均流格栅对流量分配的影响。

收稿日期：2024-03-11

作者简介：姜凤鸣 (1988－)，女，2010 年毕业于西安交通大学过程装备与控制工程专业，本科，工程师。现在东方电气股份有限公司核设备设计所，主要从事核设备设计研发工作。

考虑到蒸汽发生器壳侧流动的复杂性，本文以直流式蒸汽发生器为研究对象，在模化分析的基础上开展壳侧关键部件流动阻力特性试验，一方面为设备本体及系统回路设计提供有力数据支撑，另一方面可为 CFD 数值模拟计算提供验证。

1 试验方案及试验系统

1.1 试验原理

某蒸汽发生器产品原型结构如图 1 所示，为立式布置固定管板换热器，高温液态金属自设备上部的壳侧进口接管流入，下部出口接管流出，冷却水自设备下部的管侧进口接管流入，经与液态金属逆向换热后，形成过热蒸汽从上部出口接管流出。

设备壳侧关键部件主要包括进出口接管、均流格栅、进出口流量分配罩及支撑板。考虑到试验的可行性与经济性，按照流动相似原理采用冷态条件下的水代替原有热态金属进行模化试验，用于获得壳侧关键部件的阻力系数。

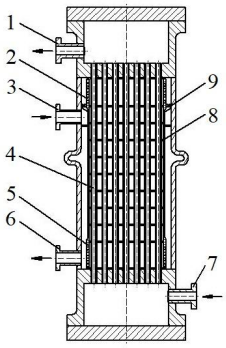


图 1 直流式蒸汽发生器结构示意图

1-管侧出口接管；2-进口流量分配罩；3-壳侧进口接管；4-换热管；5-出口流量分配罩；6-壳侧出口接管；7-管侧进口接管；8-支撑板；9-均流格栅。

蒸汽发生器壳侧阻力大多是局部阻力与摩擦阻力叠加的效应，且多数结构是由局部阻力主导。影响局部阻力的相似准则数为欧拉数，欧拉数主要是由几何结构决定，满足几何相似即保证了欧拉数相似。影响摩擦阻力的相似准则数为雷诺数，保证关键流道的雷诺数达到自模区即保证了雷诺数相似。对于壳侧局部阻力试验体，除换热高度及支撑板个数外，试验体按照实际产品结构尺寸比例 1:1 设计，保证欧拉数相似。在表 1 所给定的流量下，对蒸汽发生器壳侧原型及试验体不同部位的雷诺数进行了对比，可以看出:试验体、蒸发器原型在各典型关键部位的雷诺数均超过 10^5，流动达到自模化，满足相似要求，可以认为试验具有较好的代表性。

表 1 壳侧局部阻力试验模拟准则表

位置	参数	单位	产品原型	试验体
	介质	—	液态金属	水
整体	壳侧流量	kg/s	372	396
	壳侧流量	t/h	1 340	1 425
进出口接管至入口腔室	定性温度	℃	467	50
	流速	m/s	3.24	2.93
	雷诺数	—	4.42E+06	2.21E+06
环形腔室至管束	定性温度	℃	467	50
	流速	m/s	1.078	0.975
	雷诺数	—	1.07E+06	5.37E+05
管束至环形腔室	定性温度	℃	308	50
	流速	m/s	1.03	0.97
	雷诺数	—	8.15E+05	5.37E+05
出口接管至出口腔室	定性温度	℃	308	50
	流速	m/s	5.95	5.63
	雷诺数	—	4.64E+06	3.06E+06

1.2 试验设施

设计的蒸汽发生器壳侧局部阻力试验体结构如图 2 所示，试验体总高度为 4 800 mm，吊装质量 4 000 kg，充水后总质量 7 500 kg。试验体结构具有以下特点：

- 换热管高度及支撑板个数减少；
- 各部件的结构尺寸均与原型相同。

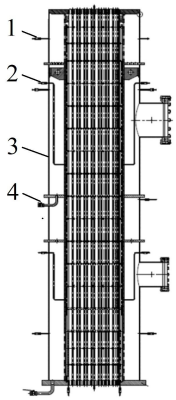


图 2 壳侧局部阻力试验体结构示意图

1-铠装热电偶；2-差压变送器；3-试验体；4-压力变送器。

1.3 试验系统

蒸汽发生器壳侧局部阻力试验系统如图 3 所示，由主循环泵、冷却器、流量测量管段、缓冲罐等设备和管道组成。系统工作压力 0.5 MPa，工作温度 50 ℃，主循环泵扬程 50 m，额定循环流量 1 500 t/h。此外根据试验要求配置有电磁流量计、铠装热电偶、

压力变送器及差压变送器，用以测量流量、温度、压力及差压数据。

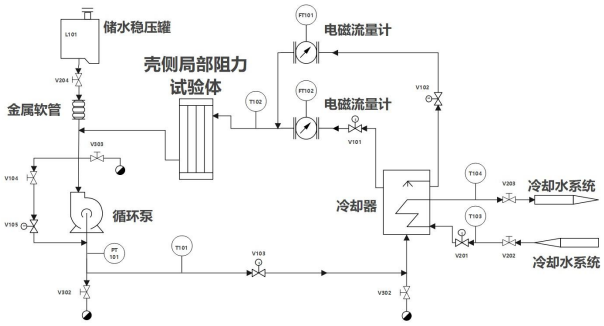


图 3 蒸汽发生器壳侧局部阻力试验系统工艺流程示意图

2 试验数据处理

2.1 试验数据采集和处理

在试验系统达到试验要求的流量、压力、温度后，进行试验数据采集与记录，试验数据由专业的技术人员处理，所有测点的数据应根据测量仪表的标定曲线进行修正。

2.2 试验体各部位局部阻力系数计算

根据流体力学原理，蒸汽发生器壳侧各部位的局部阻力系数ε可由下式得出：

$$\varepsilon = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} \tag{1}$$

式（1）中：

ΔP —压降，Pa；

v —流速，m/s；

ρ —流体的密度，kg/m^3。

根据上述公式，在试验中需要测量得出压降ΔP、不同部位的流体流速 v、介质温度 T（查表获得流体密度），其中：

不同位置的压降ΔP 由差压变送器测量获得；

试验过程中不涉及到换热，因此可认为整个系统中的流体温度一致，由热电偶测量获得；

不同位置的流体流速 v 按照由流量计测得的体积流量与不同部位的流通截面积计算获得。

2.3 蒸汽发生器壳侧局部阻力试验体总阻力系数计算

试验所测得的蒸汽发生器壳侧局部阻力试验体（共含 17 块支撑板）总阻力为ΔP_1，三组（9 块）支撑板的阻力为ΔP_2，则蒸汽发生器原型壳侧总阻力ΔP 为：

$$\Delta P = \Delta P_1 + \frac{(n-17)}{9} * \Delta P_2 \tag{2}$$

以进口速度为基准，则原型蒸汽发生器壳侧总阻力系数ε 为：

$$\varepsilon = \frac{2\Delta P}{\rho v_1^{\ 2}} \tag{3}$$

式（3）中：

ΔP_1 —蒸汽发生器壳侧局部阻力试验体（共含 17 块支撑板）压降，Pa；

ΔP_2 —三组（9 块）支撑板压降，含支撑板阻力及纵向冲刷阻力，Pa；

n —原型蒸汽发生器中支撑板个数；

v_1 —进口流速，m/s；

ρ —流体密度，kg/m^3。

3 试验结果与分析

3.1 试验工况

本试验完成的蒸汽发生器壳侧局部阻力试验 7 种工况参数如表 2 所示，设计的试验参数能够完全覆盖试验目的要求。

表 2 壳侧局部阻力试验工况参数

名称	压力 (MPa)	质量流量(t/h)	介质温度(℃)
工况 1	0.1～0.5	1 479	50
工况 2	0.1～0.5	1 434	50
工况 3	0.1～0.5	1 140	50
工况 4	0.1～0.5	858	50
工况 5	0.1～0.5	715	50
工况 6	0.1～0.5	566	50
工况 7	0.1～0.5	282	50

3.2 试验体总压降

图 4 和图 5 分别给出了试验体测量总压降随着流量的变化曲线和总阻力系数随着雷诺数的变化曲线。由图可以看出：试验体总压降不同测点间的偏差极小，随着雷诺数的增加，试验体总阻力系数也逐渐下降并达到平稳，额定工况下蒸汽发生器壳侧局部阻力试验体的总阻力系数为 6.37。经过数据处理后得到试验体总阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$\varepsilon = 6.34 + 0.80e^{-\frac{\mathrm{Re}}{783509}} \tag{4}$$

（其中 $4.23\times10^5 < \mathrm{Re} < 2.62\times10^6$）。

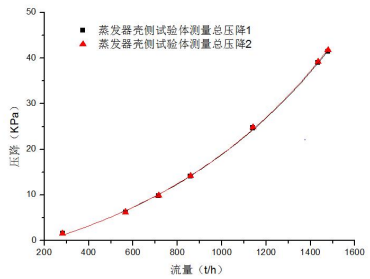


图 4 试验体测量总压降随流量的变化曲线

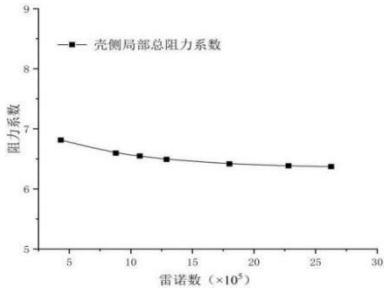


图 5 蒸汽发生器壳侧局部阻力试验体总阻力系数随雷诺数变化曲线

3.3 进出口接管压降

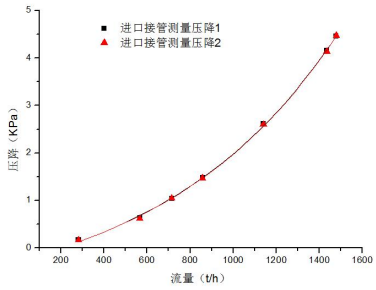


图 6 进口接管测量压降随循环流量的变化曲线

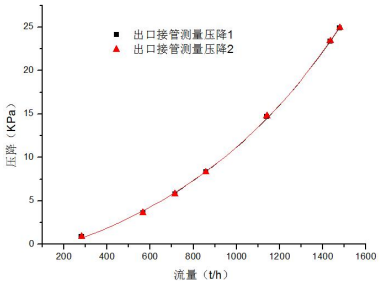


图 7 出口接管测量压降随循环流量的变化曲线

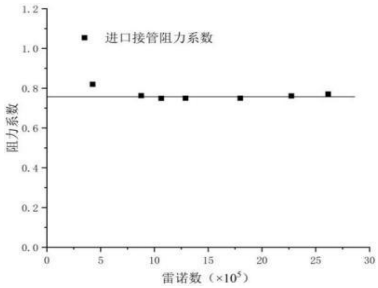


图 8 进口接管处阻力系数随雷诺数变化曲线

（以进口流速作为特征流速）

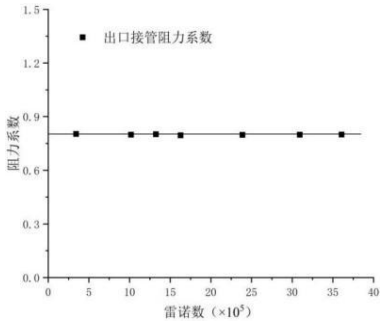


图 9 出口接管处阻力系数随雷诺数变化曲线

（以出口流速作为特征流速）

图 6～9 分别给出了出口接管压降随循环流量的变化曲线和接管局部阻力系数随雷诺数的变化曲线。由图可以看出：随着流量的增加，进出口接管的测量压降也逐渐增加，不同测点间的压降偏差极小，额定工况下蒸汽发生器进口接管处的局部阻力系数为 0.77，出口接管处的局部阻力系数为 0.80。

3.4 均流格栅压降

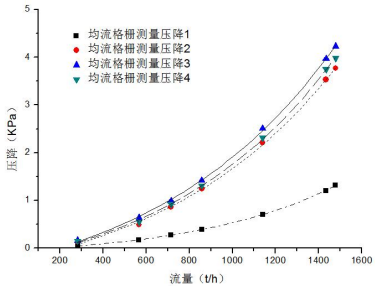


图 10 均流格栅测量压降随着循环流量变化曲线

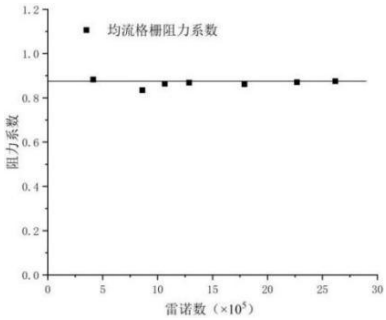


图 11 均流格栅阻力系数随雷诺数变化曲线

（以进口流速作为特征流速）

图 10 和图 11 分别给出了均流格栅的压降随着循环流量变化曲线和阻力系数随雷诺数的变化曲线。由图看出：均流格栅测量压降 3 最大，而均流格栅测量压降 1 与其他 3 个测量值相比偏小，这主要是由均流格栅结构所造成的，压降 3 测点所对应的均流格栅结构开孔尺寸较小，而压降 1 测点所对应的均流格栅开孔尺寸较大。同时压降 1 测点位于进口接管的正上方，该处流场较紊乱，对测量也有

一定的影响，因此在进行阻力系数计算时，选择除均流格栅压降 1 以外的另外 3 组数据取平均值进行计算。随着雷诺数的增加，均流格栅的阻力系数基本达到稳定，额定工况下均流格栅的阻力系数为 0.87（以进口流速作为特征流速）。

3.5 横向冲刷压降

图 12 给出了横向冲刷压降随循环流量的变化曲线。由图 12 可以看出：随着循环流量的增加，横向冲刷压降逐渐增加，不同测点间的测量数据有所偏差，换热管横向冲刷压降占蒸汽发生器壳侧局部阻力试验体总压降的比例极小。

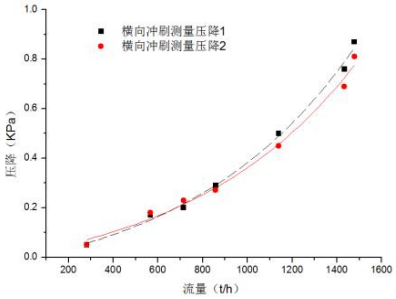


图 12 横向冲刷测量压降随循环流量的变化曲线

3.6 进出口流量分配罩压降

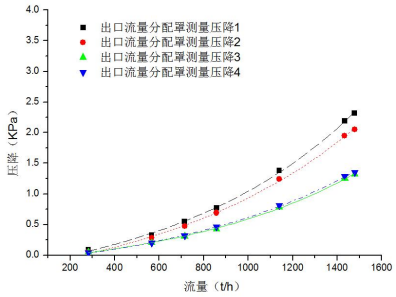


图 13 出口流量分配罩测量压降随循环流量的变化曲线

图 13 给出了出口流量分配罩的测量压降随流量的变化曲线。由图 13 可以看出：随着流量的增大，出口流量分配罩压降逐渐增大，但是不同测点处的测量压降有所偏差，这主要是由于出口流量分配罩位于试验体的底部，其附近的流场同样比较紊乱，因此不同测点测量所得到的压降有所不同。

3.7 支撑板压降

图 14 和 15 分别给出了支撑板测量压降随流量的变化曲线，阻力系数随雷诺数变化的曲线。由图 14 可以看出：不同位置测点处的支撑板测量压降基本相同，随着雷诺数的增加，支撑板的总阻力系数最终达到稳定，额定工况下三组（9 块）支撑板的阻力系数为 4.17。经过数据处理后得到试验体支撑板局部阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$\varepsilon = 4.13 + 3.06e^{-\frac{\mathrm{Re}}{28521.2}} \tag{5}$$

（其中 $2.11\times10^4<\mathrm{Re}<1.3\times10^5$）。

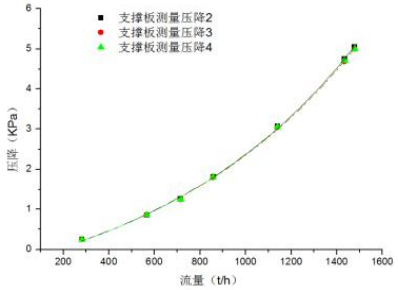


图 14 支撑板测量压降随循环流量的变化曲线

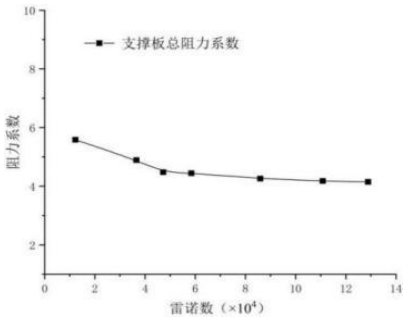


图 15 试验体支撑板总阻力系数随雷诺数变化曲线

3.8 蒸汽发生器原型壳侧总阻力系数计算

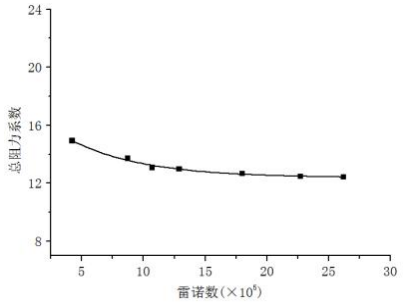


图 16 蒸汽发生器壳侧总阻力系数随雷诺数变化曲线（以进口流速作为特征流速）

图 16 给出了蒸汽发生器原型壳侧的总阻力系数随雷诺数的变化曲线，由图可以看出：随着雷诺数的增加，蒸汽发生器原型壳侧的总阻力系数逐渐下降并最终达到稳定，额定工况下蒸汽发生器原型壳侧的总阻力系数为 12.43。经过数据处理后得到蒸汽发生器原型壳侧局部阻力系数与雷诺数的关系式为：

$$\varepsilon = 12.36 + 5.22e^{-\frac{\mathrm{Re}}{600213}} \tag{6}$$

（其中 $4.23\times10^5<\mathrm{Re}<2.62\times10^6$）。

4 结语

本试验测量了不同工况下蒸汽发生器壳侧各部件的流量、温度、压力和差压，获得了蒸汽发生器原型壳侧总阻力系数和各关键部件阻力特性，同时得出以下主要结论：

（1）本试验的测量仪表鉴定合格，测量精度满足试验要求，每个试验工况的分段压降和与总压降基本相等，最大误差不超过 2 %，试验数据可信。

（2）通过试验获得了不同循环流量下蒸汽发生器壳侧局部阻力试验体总压降、进出口接管压降、均流格栅压降、横向冲刷压降、出口流量分配罩压降、支撑板压降等；其中额定工况下蒸汽发生器壳侧试验体的总阻力系数为 6.37，进口接管的阻力系数为 0.77，出口接管的阻力系数为 0.80，三组（9 块）支撑板的阻力系数为 4.17，经过数据处理后获得额定工况下蒸汽发生器原型壳侧的总阻力系数为 12.43。

（3）本试验得到的蒸汽发生器原型壳侧总阻力系数数据可用于修正与验证直流式蒸汽发生器 CFD 理论计算方法，同时得到的各工况下试验体各关键部件压降数据还可为计算程序开发提供输入条件，为设备本体以及整个系统回路设计提供了有效数据支撑。

参考文献：

[1] 李勇, 朱海雁, 文博, 等. 基于 CFD 方法的蒸汽发生器管子支承板水力特性试验规模分析[J]. 核动力工程, 2016, 37(4)：39-43

[2] 文博, 李勇, 熊挺, 等. 蒸汽发生器管子支承板水力特性试验研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(2)：23-26

[3] 李旭东, 陆道纲, 曹琼, 等. 基于耦合单孔板多孔介质模型的钠冷快堆蒸汽发生器钠侧三维水力特性数值模拟[C] //中国核学会核能动力分会反应堆热工流体专业委员会.第十四届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室 2015 年度学术年会论文集.华北电力大学非能动核能安全技术北京市重点实验室; 中国原子能科学研究院, 2015, 7

[4] 赵二雷, 李朋洲, 彭兴建, 等. 新型蒸汽发生器综合性能实验研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(5)：768-874

[5] 莫少嘉, 左超平, 姜峰. 蒸汽发生器流量分配板及横向流局部压力损失系数计算[J]. 原子能科学技术,2015,49(6)：1039-1044

[6] 李磊, 汤臣杭, 黄伟, 等. 蒸汽发生器一次侧流阻数值模拟研究[J].科技视界, 2015, (25)：265-267

[7] 施杨, 姚彦贵, 祖洪彪. 蒸汽发生器一次侧进出口管嘴流阻的数值模拟研究[J]. 核技术,2013,36(12)：52-55

[8] 曲世祥, 顾汉洋. 蒸汽发生器管嘴局部阻力试验与数值研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(9)：436-441

[9] Patil L T, Patwardhan A W, Padmakumar G, et al. Distribution of liquid sodium in the inlet plenum of steam generator in a Fast Breeder Reactor[J]. Nuclear engineering and design, 2010, 240(4): 850-859

[10] Khadamakar H P, Patwardhan A W, Padmakumar G, et al. Flow distribution in the inlet plenum of steam generator[J]. Nuclear engineering and design, 2011, 241(10): 4165-4180

（上接第 5 页）

4 结语

针对农村低压配电网的“低电压”问题治理，本文提出了一种位于配电网末端的电压柔性补偿装置，建立了其数学模型和双环解耦控制模型，仿真和实验结果表明，电压柔性补偿装置能够能够满足多种工况下对末端电力用户电压灵活动态补偿需求，有效提高配电网末端电力用户的电能质量。

参考文献：

[1] 潘凯峰. 农村配电网低电压成因分析及解决措施 [J]. 大众用电, 2023, 38 (12): 57-58

[2] 王连辉, 黄超艺, 王呈杰. 农村配变台区低电压成因与治理方案 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(12): 41-45

[3] 王相桥. 农村电网低电压产生原因及治理措施 [J]. 农村电工, 2023, 31 (11): 41-42

[4] 安睿, 程立光, 李文雯, 等. 基于电能质量扰动抑制的配电网低电压治理方法[J].电子设计工程，2020，28（4）：127-131+136

[5] 阮永丽, 程军照, 余永琨. 分布式光伏接入与农村配电网低电压、重过载治理融合方法探索[J].云南电力技术，2022，50(3)：69-72+76

[6] 廖海强. 基于光伏储能系统的农网台区低电压治理技术研究[J]. 大众用电，2021，36(12)：28-30

[7] 刘旭鹏, 邱爽, 李海波, 等. 基于分布式光伏的低压配网“低电压”治理[J].农村电气化，2022(7)：5-7+11

[8] 范成. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电工技术, 2023,(24):100-103

某核电厂低压转子超声波探伤缺陷分析

曹寒　杨培平　杨灵　祁乃斌　何江南　陈丹　赵力

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川德阳，618000

摘要：本文以某核电厂低压焊接转子内部缺陷为例，首先介绍了工程中对缺陷进行模拟的原则，其次介绍了采用断裂力学理论进行转子安全性校核的方法和流程，最后根据评估结果认为，内部缺陷的存在不会影响转子的使用寿命。

关键词：转子；断裂力学；缺陷分析

中图分类号：TK263.61　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0032-03

Defect Analysis of Ultrasonic Testing for Low Voltage Rotor in a Nuclear Power Plant

CAO Han, YANG Peiping, YANG Ling,QI Naibin, HE Jiangnan, CHEN Dan, ZHAO Li

（Dongfang Trubine Co.，Ltd.，618000，Deyang，Sichuan，China）

Abstract:In this paper, internal defects of low-pressure welded rotors in a nuclear power plant are taken as an example. The principle of simulating defects in engineering is introduced, and the method and process of checking the safety of rotors by using fracture mechanics theory are introduced. Finally, according to the evaluation results, the existence of internal defects does not affect the service life of rotors.

Key words:the rotor; fracture mechanics; defect analysis

汽轮发电机组中某些大型轮盘和转子的意外破坏，以及大型汽轮机对安全性的严格要求，促使人们去研究安全校核的新方法。于是，断裂力学理论日益被广泛地应用于汽轮机零件的安全校核之中。轮盘、转子等大型构件，在加工和使用过程中，由于各种原因，如锻造缺陷、焊接缺陷、表面划痕、非金属夹渣、腐蚀坑等，构件表面和内部可能已存在着各种类型的真正裂纹或类裂纹。带有这种裂纹的构件，在承受交变应力时，即使其应力水平低于材料本身的疲劳极限，裂纹也可能扩展，可能导致构件破坏。[1]

本文以某核电厂低压焊接转子内部缺陷为例，介绍了工程中应用断裂力学理论对缺陷进行安全校核的方法，供汽轮机设计人员及电厂工作人员参考。

1　缺陷分析流程

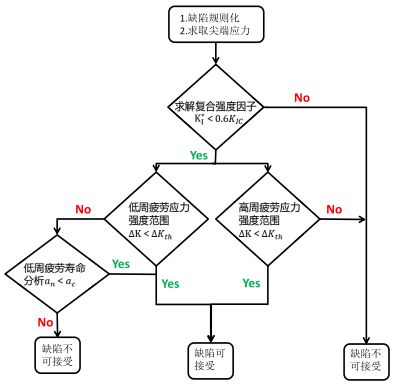


图 1　断裂力学分析缺陷流程图

汽轮机组轮盘和转子运行在高温高压蒸汽环境中承受着交变的热应力以及机械应力，这些部件不允许有真正裂纹存在，但是轮盘和转子部件在制

收稿日期：2022-10-11

作者简介：曹寒（1985－），女，工学硕士，高级工程师，2009 年毕业于西安交通大学机械设计与制造专业，现主要从事汽轮机转子与轴承相关研发、设计及汽轮机现场故障处理工作。

造和加工过程中可能存在夹渣类的超标缺陷，在工程中一般采用保守的方式将这些缺陷当作初始裂纹用断裂力学理论进行分析，分析的流程如图 1 所示。本文将以某核电厂低压焊接转子超标缺陷为例，采用断裂力学的方法以图 1 的流程进行安全性校核。

2 缺陷数据

某核电厂低压焊接转子焊缝处检测到超标缺陷的最大反射当量约Φ2.88 mm，缺陷深度范围约 68~78 mm，轴向距离焊缝中心线约 10 mm（靠近焊缝坡口位置），圆周弧长约 24.5 mm，疑似体积型夹渣缺陷，缺陷分布示意如图 2 所示。

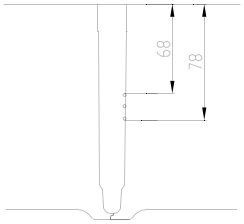


图 2 缺陷位置示意图

2.1 缺陷规则化

应用断裂力学理论分析缺陷时，一般将缺陷形状规则化为圆形或椭圆形，在此基础上有以下两个原则[2]：

原则一：对于超声波检测的小于或等于φ5 当量的缺陷，对其面积放大 S1 倍；对于超声波检测小于或等于φ10 当量的缺陷，对其面积放大 S2 倍；对于超声波检测大于φ10 当量的缺陷，按检测尺寸进行缺陷的规则化[2]，如图 3 所示。

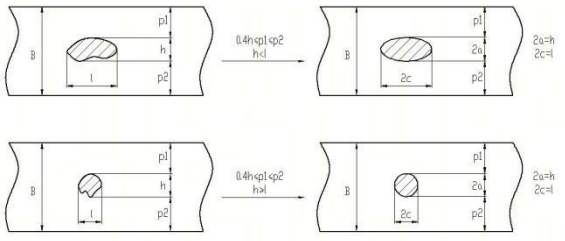


图 3 缺陷的规则化

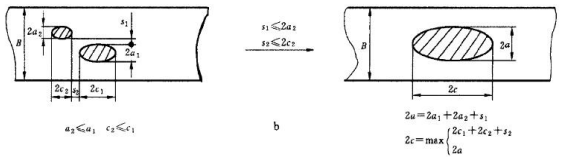


图 4 埋藏缺陷的合并

原则二：当量缺陷或多缺陷相邻时，应考虑缺陷之间的相互影响，凡是缺陷距离＜N1 倍缺陷等效直径的，则将缺陷复合，缺陷距离≥N1 倍缺陷等效直径的，则可忽略缺陷相互间的影响，分别作为单个缺陷进行评价[2]，缺陷合并如图 4 所示。

针对本文中核电低压转子焊缝处缺陷，根据缺陷规则化的原则一和原则二，并采用保守的分析原则，将缺陷合并为平面椭圆缺陷（2a 为椭圆短轴，2c 为长轴），缺陷数据列于表 1。椭圆的轴比（a/c）分别取 1、0.4、0.2 得出等效椭圆短轴 2a，以计算所得最大值进行评估，此方法中轴比的选取经工程验证是全面和安全的，在缺陷面积相等的前提下可以得出最大的复合强度因子。缺陷计算的等效尺寸如表 2 所示。

表 1 缺陷数据

缺陷项目	数据
距离转子外圆表面距离/mm	68~78
缺陷尺寸/mm	圆周范围内长度 24.5 密集区域内缺陷当量直径Φ2.88
合并后缺陷尺寸/mm	2a=10 2c=24.5

表 2 缺陷计算当量尺寸表

缺陷轴比（a/c）	1	0.4	0.2
等效椭圆尺寸/mm	2a=2c=15.65	2a=9.9 2c=24.75	2a=7 2c=35

2.2 缺陷尖端应力

本文中核电低压转子焊缝处缺陷的尖端应力，主要包括离心力产生的切向和径向应力、热应力、重力产生的弯曲正应力、电机短路工况扭矩引起的剪应力以及残余应力，对转子各工况的应力值进行计算，将计算结果列于表 3。

表 3 各工况应力值

工况	离心力和热应力 MPa	弯曲正应力 MPa	残余应力 MPa	剪应力 MPa
额定工况	120	10	50	12.7
超速工况	165	10	50	---
电机短路工况	120	10	50	63.6

3 复合强度因子判据

复合强度因子用于评估已有缺陷是否会导致部件的一次性断裂，如复合强度因子$K_I^*<0.6K_{IC}$(K_{IC}为材质的断裂韧度，通过试验方法获得)，则表明现存缺陷不会使部件发生一次性断裂。如前所述，在工程中一般采用保守的方式将缺陷当作裂纹用断裂力学理论进行分析。断裂力学中裂纹的扩展如图5所示分为三种典型型式，I为张开型，II为滑开型，III为撕开型。复合强度因子为三种裂纹扩展型式强度因子的叠加，需分别求出K_I、K_{II}和K_{III}。

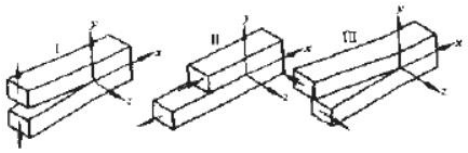


图5 三种裂纹典型扩展型式

3.1 应力强度因子 K_I

张开型裂纹的强度因子K_I的计算公式为:

$$K_I=\frac{M_e\sigma\sqrt{\pi a}}{\varphi} \quad (1)$$

式（1）中：Me、φ是与裂纹形状有关的修正系数，在参考文献[1]中查取。

σ为裂纹尖端应力，工程应用中为使分析结果偏于保守，一般取离心力、热应力、弯曲正应力和残余应力之和。

3.2 应力强度因子 K_{II}

滑开型裂纹的强度因子K_{II}的计算公式为:

$$K_{II}=\tau\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式（2）中:τ为裂纹处剪应力；

3.3 应力强度因子 K_{III}

撕开型裂纹的强度因子K_{III}的计算公式为：

$$K_{III}=\tau\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

式（3）中:τ为剪应力。

3.4 复合强度因子K_I^*

三种裂纹扩展型式的强度因子计算中，K_{II}和K_{III}中应力只与剪应力有关，一般转子所受的剪应力只有扭转产生的剪应力，因此根据平面裂纹张开的方向不同，则K_{II}和K_{III}中必有一个为零，工程中一般令$K_{II}=0$。

根据参考文献[2]，当材料的泊松比μ取0.3时，可得计算K_I^*的简化公式为：

$$K_I^*=\sqrt{(0.49K_I^2+K_{III}^2)/0.4} \quad (4)$$

本文中核电低压转子焊缝处的复合强度因子计算情况列于表4中。

表4 缺陷的复合应力强度校核

缺陷轴比（a/c）	1	0.4	0.2
$K_I^*/MPa\times\sqrt{m}$	34.4	35.6	32.3

表2中缺陷处不同轴比下的复合应力强度因子K_I^*均满足要求，转子不会发生一次性断裂的风险。

4 疲劳裂纹扩展寿命分析

由上文分析可知焊缝处缺陷不会使转子发生一次性断裂，但根据图1的分析流程需继续评估缺陷在转子寿命期内是否会扩展导致转子开裂，评估方法为对缺陷部件的疲劳扩展寿命进行分析，主要包括两部分：

（1）考虑机组启停造成的影响对缺陷处进行低周疲劳分析；

（2）考虑转子重力的影响对缺陷处进行高周疲劳分析。

4.1 低周疲劳分析

进行低周疲劳分析时需计算缺陷部位的应力强度范围ΔK，计算公式为：

$$\Delta K=\frac{Me\Delta\sigma\sqrt{\pi a}}{\varphi} \quad (5)$$

式（5）中：Me、φ是与裂纹形状有关的修正系数，在参考文献[1]中查取；

Δσ为缺陷部位的循环应力范围；当Δσ小于材料的寿命消耗阈值时，则可以忽略对疲劳寿命的影响。

如$\Delta K>\Delta K_{th}$（ΔK_{th}为材料的疲劳裂纹扩展阈值），理论计算表明裂纹会扩展，需进一步判断缺陷的疲劳裂纹扩展寿命。

本文中核电低压转子缺陷处循环应力小于材料的寿命消耗阈值，故可忽略对低周疲劳寿命的影响。

4.2 高周疲劳分析

评估高周疲劳时，仅考虑重力引起的交变应力，同样采用公式(5)计算缺陷处应力强度范围，需满足

（下转第88页）

ACP100 堆芯围板组件焊接变形研究

王盛 唐炼 浦春梅 舒华安 杜凡 刘杨 孙诗扬

东方电气集团东方电气（武汉）核设备有限公司，武汉 430223

摘要：ACP100 模块式小型堆堆芯围板组件为一体化焊接结构，类似结构国内首次制造。针对新型堆芯围板组件结构特点，选择合适的焊接方法、焊接顺序，设置专用防变形工装。根据各工艺阶段焊接变形数据，总结分析了堆芯围板组件焊接变形规律，同时为后续类似结构堆芯围板组件的制造提供了数据参考。

关键词：ACP100；堆芯围板组件；焊接变形

中图分类号：TM623.4　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0035-03

Research on Welding Deformation of ACP100 Cores Shroud

WANG Sheng, TANG Lian, PU Chunmei, SHU Huaan, DU Fan, LIU Yang, SUN Shiyang

(Dongfang Electric (Wuhan) Nuclear Equipment Co., Ltd., 430223, Wuhan, China)

Abstract: The ACP100 modular small reactor cores shroud is an integrated welded structure, which was first manufactured in China. Select appropriate welding methods and sequences based on the structural characteristics of the new cores shroud, and set up dedicated deformation resistant tooling. Based on the welding deformation data of each process stage, the welding deformation patterns of the cores shroud were summarized and analyzed, providing data reference for the subsequent manufacturing of similar structure cores shroud.

Key words:　ACP100；cores shroud；welding deformation

ACP100 模块式小型堆是中核集团在成熟的压水堆核电技术的基础上，采用非能动的安全系统和一体化反应堆设计技术的革新型压水堆。[1]堆内构件中为燃料组件提供可靠的支承约束以及精确定位的堆芯围板组件采用了全新结构，按一体化设计，保证高可靠性要求。由传统的螺钉连接结构改为全焊接整体式结构形式，类似结构国内属首次制造。

1 结构简介

ACP100 堆芯围板组件由 1 件顶板、3 件环板、1 件底板、2 件 M 形围板I型和 2 件 M 形围板II型焊接而成，如图 1 所示。

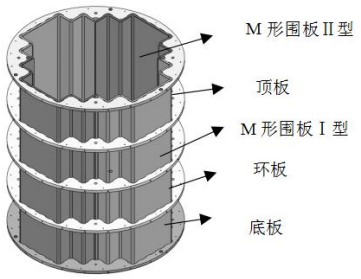


图 1　ACP100 堆芯围板组件示意图

堆芯围板组件轮廓尺寸为φ2 194×2 480 mm，内腔尺寸最大为 1 936.8 mm，围板壁厚为 25 mm，属于大尺寸薄壁焊接结构件。

顶/底板与 M 形围板焊缝上端面为深 8 mm 的坡口焊，背面为 8 mm 焊高的角焊缝；环板与 M 形

收稿日期：2023-12-28

作者简介：王盛（1988－），男，2013 年毕业于重庆大学机械设计及理论专业，硕士，工程师。现任东方电气（武汉）核设备有限公司工艺工程师，主要从事核设备堆内构件和配套换热器及工具的制造工艺研究。

围板焊缝为 8 mm 焊高的双面角焊缝。圆周方向焊缝为断续分布，每段焊缝长约 100 mm，每圈共 40 条，总计 200 条。M 形围板I型、M 形围板II型纵缝为 T 型对接焊缝，单条焊缝长达 2 480 mm，共 4 条对接焊，纵缝背面为角焊缝，焊高约 5 mm。焊缝数量多、分布范围广，焊接变形控制难度大。

2 焊接方法的选择

根据堆芯围板组件结构特点和设计要求，顶/环/底板与 M 形围板的焊缝主要为角焊缝，采用手工 TIG 焊焊接方法。M 形围板纵缝尺寸较长，且要求全焊透，为减小焊接变形，采用大功率激光焊焊接成型，大功率激光焊可一次焊透，热输入量小，较易控制焊接变形。[2-3]

3 防变形工装设置

堆芯围板组件各零件之间的连接较少，整体刚性较差。[4]为实现围板组件的装配焊接、焊接变形控制等要求，设置了整体防变形工装。[5-8]装配时对顶/环/底板进行定位固定，M 形围板装配至顶/环/底板内框中保证 M 形围板纵缝装配间隙和错边量。焊接时为控制焊接变形，需对围板和顶/环/底板进行限位固定。根据堆芯围板组件结构特点，结合装配和焊接工艺需求，堆芯围板组件装配焊接工装设计方案如图 2 所示。

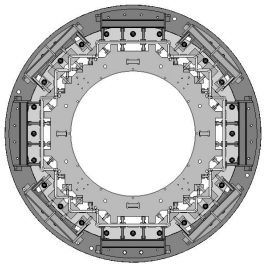


图 2　环板间内外支承定位布置图

堆芯围板整体装配焊接工装主要由内支承、滚板组件、平面外支承、拐角外支承、定距套管等组成。

内支承共 9 层，其中 5 层的位置与顶/环/底板位置向对应，另外 4 层位于两环板中间，每层共有 40 处顶块，其中平面顶块 24 处，凸三角顶块 16 处，M 板纵缝处还设有调整顶块。装配时采用顶块调整 M 形围板纵缝的错边量及间隙均≤0.20 mm，以满足激光焊焊接要求。

环板间的间距为 500 mm，为控制环板间的 M 板焊接向外侧变形，设置了外部支承。内外支承装配后，调整环板处内支承的顶块将 M 板与环板贴紧，环板间内外支承互相作用将 M 板进行限位，控制焊接变形，如图 3 所示。

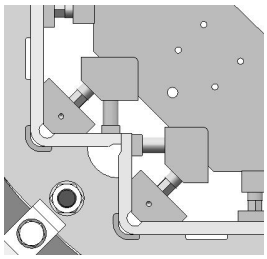


图 3　M 板纵缝装配调整顶块

4 焊接顺序选择

顶/环/底板与 M 形围板焊缝焊高为 8 mm，需分多层多道焊接完成，M 形围板纵缝采用大功率激光焊，一次焊透。焊接基本顺序为：定位焊→打底焊→纵缝激光焊→顶/环/底板与 M 形围板焊妥。

顶/环/底板与 M 形围板为整圈多段焊缝，为控制焊接变形，打底焊按照交替对称的顺序进行操作。层与层的焊接顺序按图 4 执行，每层的各段焊缝焊接顺序按图 5 执行。

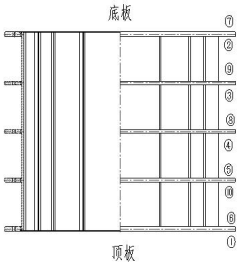


图 4　层与层焊接顺序图

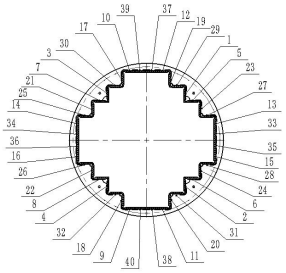


图 5　每层各段焊缝焊接顺序

5 焊接变形数据测量与分析

打底焊、激光焊和焊妥后分别测量内腔尺寸，高度方向共分 9 层，每个象限测量 6 个开裆间距尺寸，如图 6 所示。

分别测量打底焊后、激光焊后、焊妥后（热处理前）和热处理后各内腔间距尺寸。根据测量数据计算各阶段内腔尺寸变形量。以 90 °方向为例，各阶段变形数据如图 7：

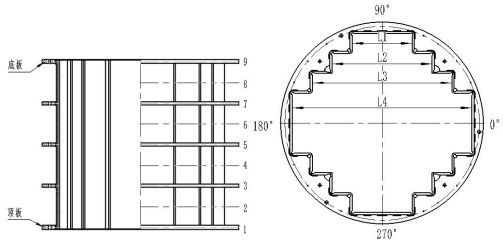


图 6　内腔尺寸测量图

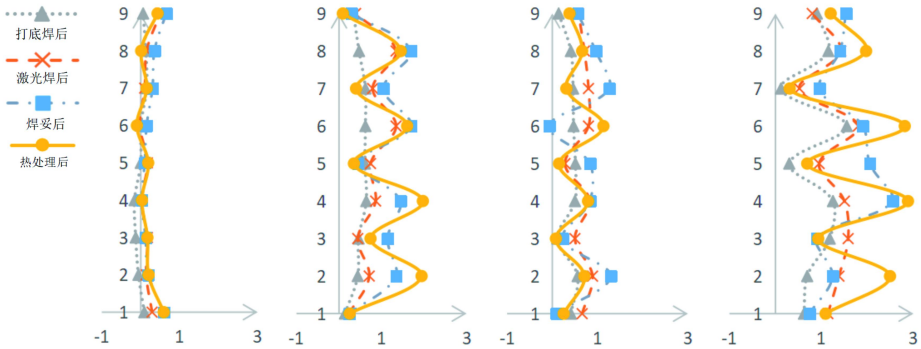


图 7　90°各内腔不同阶段变形图

分析图 7 可知：

（1）环板间的围板内腔尺寸呈变大的趋势。由于环板的束缚，环板处的内腔尺寸变形较小。

（2）L_1 总变形量较小，约为-0.1～0.59 mm；L_3 次之，约为 0.08～1.13 mm；L_2、L_4 总变形较大，约为 0.31～2.88 mm。

（3）激光焊后内腔继续呈变大趋势，L_1 相对变形量-0.02～0.5 mm，L_2 相对变形量 0.24～1.34 mm，L_3 相对变形量 0.28～0.89 mm，L_4 相对变形量 0.52～1.8 mm。

（4）热处理后应力重新分布，导致部分位置的变形相较于焊妥后有较大变化，开裆间距尺寸总体呈缩小的趋势，L_1 相对变形量-0.34～0.09 mm，L_2 相对变形量-0.64～0.60 mm，L_3 相对变形量-0.95～1.2 mm，L_4 相对变形量-1.36～1.25 mm。

6 结语

根据 ACP100 堆芯围板组件结构特点，分析围板组件工艺控制要求，合理设置了防变形工装、选择合适的焊接方法及焊接顺序。经过各工艺环节的变形数据测量，得出了 ACP100 堆芯围板组件焊接变形规律，各内腔间距尺寸总体变形量-0.1～2.88 mm。

经过 ACP100 堆芯围板组件的研制和变形数据分析，为后续类似结构堆芯围板组件的制造提供了数据参考。

参考文献：

[1] 宋丹戎, 刘承敏. 多用途模块式小型核反应堆[M]. 北京:中国原子能出版社, 2021

[2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册（第 2 卷）：材料的焊接[M]. 北京:机械工业出版社, 2001

[3] 张明军. 万瓦级光纤激光深熔焊接厚壁金属蒸汽行为与缺陷控制[D]. 湖南大学, 2013

[4] 曾秀川. AP1000 堆内构件制造技术难点浅析[J]. 东方电气评论, 2017, 31(2):55-58

[5] 付荣柏. 焊接变形的控制与矫正[M]. 北京：机械工业出版社, 2006

[6] 夏欣, 李宁, 李燕, 等. 堆内构件吊篮筒体加工变形及其控制措施研究[J]. 核动力工程,2016,37(5):71-74

[7] 王庆田, 许斌, 李燕. 秦山核电二期扩建工程 3#堆吊篮筒体焊接变形处理[J]. 电焊机,2010,40(8):50-54

[8] 曾志斌, 史志强, 史永吉. 大型钢结构厚板对接焊接变形试验研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(3):33-39

风电场监控系统异步协同数据迁移方法

王静　高中华

东方电气集团东方风电有限公司，四川 德阳 618000

摘要：本文介绍了一种创新的风电场监控系统异步协同数据迁移方法及其配套装置，旨在解决传统数据迁移过程中效率低下和系统稳定性差的问题。这一方法涵盖从源主机到目标主机的预处理、基于迁移策略的多任务并行数据迁移，以及迁移后目标主机数据库的完整性验证。特别地，它包含了环境检测、数据抽取与转换、数据转换结果的验证、数据库的备份和清表等关键步骤。通过高效的任务编排和调度，本方法显著降低了操作人员的工作量，同时确保了旧监控系统与新智慧系统的无缝对接和平稳运行。本研究对风电场监控系统在智慧化升级过程中的数据迁移提供了一种高效、可靠的解决方案，具有重要的实际应用价值和创新意义。

关键词： 风电监控系统；任务编排；数据迁移；异步协同

中图分类号：TM614；TP277　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0038-03

Asynchronous Collaborative Data Migration Method for Wind Farm Monitoring System

WANG Jing, GAO Zhonghua

(Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd.,618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: This thesis presents an innovative asynchronous collaborative data migration method for wind farm monitoring system and its supporting device, which aims to solve the problems of inefficiency and poor system stability in the traditional data migration process. This method covers preprocessing from the source host to the target host, multi-task parallel data migration based on migration policies, and integrity verification of the target host database after migration. In particular, it contains key steps such as environment detection, data extraction and conversion, validation of data conversion results, database backup and table clearing. Through efficient task orchestration and scheduling, this method significantly reduces the workload of the operators, while ensuring the seamless connection and smooth operation of the old monitoring system and the new intelligent system. This study provides an efficient and reliable solution for data migration of wind farm monitoring system in the process of intelligent upgrade, which has important practical application value and innovative significance.

Keywords: wind power monitoring system ; task organization; data migration; asynchronous collaboration

随着智能化技术的飞速发展，风电场监控系统正从传统数字化向智慧化系统转型。在这个转型过程中，一个主要挑战是如何高效、准确地将大量数据从旧系统迁移到新系统，同时保持系统的稳定运行。现有的数据迁移方法往往在效率和稳定性方面不尽人意，增加了工作量和错误风险。本研究提出了一种创新的风电场监控系统异步协同数据迁移方法及装置，旨在克服现有方法的局限，实现高效且可靠的数据迁移，确保在整个迁移期间监控系统的平稳运行。这一方法对于风电场的智慧化升级具有重要意义。

1　文献综述

随着风电场规模扩大，传统数据迁移方法在处理大规模数据和保障系统稳定性上面临挑战。黄伟

收稿日期：2024-01-05

作者简介：王静（1985－），女，2008 年毕业于青岛大学软件工程专业，本科，工程师。现在东方电气风电有限公司从事智能技术开发工作。

等[1]指出当前电厂运行数据并行迁移系统的数据迁移速度慢，导致高系统延迟，他们提出了基于混合云架构的新型迁移系统；张海全等[2]在电力信息系统 XC 改造工作中强调，国产数据库的适配测试与迁移是一项复杂且具有挑战性的任务，需要深入理解数据库原理和特性。他们提出了适用于电力行业的国产数据库适配测试方法。

异步数据迁移虽灵活，但其应用受限于技术复杂度、系统环境依赖性和操作不确定性。协同迁移策略保证数据一致性，但实施过程复杂，使得应用繁琐。现有风电场监控系统数据迁移技术进步但仍存在效率、一致性和稳定性问题。因此，本研究创新提出异步协同数据迁移方法，旨在解决这些挑战，提供高效、可靠且稳定的迁移方案，对风电场监控系统的智能化升级具有重要意义。

2 研究方法和设计

本研究提出的风电场监控系统异步协同数据迁移方法及装置，针对提高数据迁移效率和确保系统稳定性的需求，采用了以下关键步骤和设计，整个迁移过程定义 task 代表数据迁移任务，step 代表步骤，步骤之间串行执行，job 代表具体要做的事情，job 在 step 内部并行执行，图 1 展示整个定义；

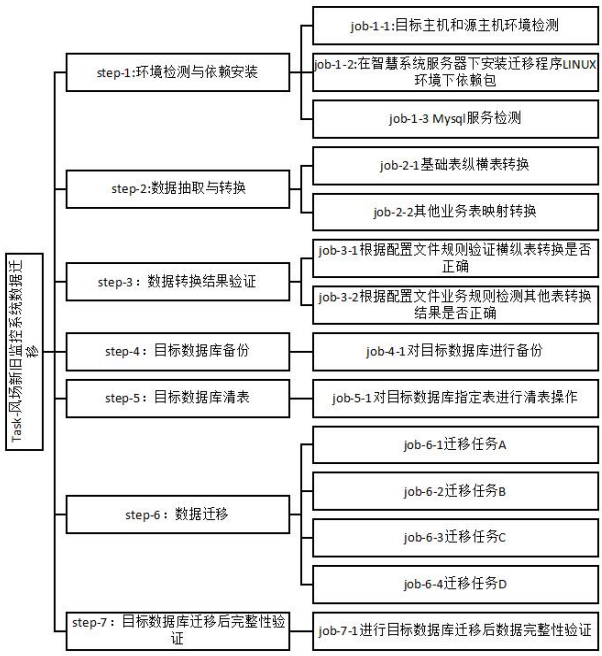


图 1 风电场监控系统异步协同数据迁移方法

2.1 环境检测与依赖安装

根据图 1 所示的定义做任务编排，采用线程池的方式对以下步骤顺序执行，步骤内的 job 并发执行，在 step-1 环境检测与依赖安装中，定义配置文件 env.ini 设置如图 2 所示。xxxx.xxxx.xxxx.xxxx 代表 IP 地址，node 代表主机别名；root_password 是原监控系统服务器用户名和密码；time_sync_diff 设置为 30 s，当两台主机时间相差小于等于 30 s 时认为两主机时间一致。启动线程 1 调用 env.sh 文件执行主机连通性、主机时间差值、磁盘剩余空间容量大小是否满足备份数据库所需空间检测。启动线程 2 并行执行 env.sh 环境检测脚本来进行 JDK、PIP 环境配置，迁移程序所需依赖包安装。启动线程 3 并行执行 Docker 服务、Mysql 服务检测。

```
[hosts]
xxxx.xxxx.xxxx.xxxx node1
xxxx.xxxx.xxxx.xxxx node2
[root_password]
xxxxxx
[time_sync_diff]
30
```

图 2 预处理所需配置文件

2.2 数据抽取与转换

对于源数据库、目标数据库结构有差异的数据，建立中间过渡库，中间库在原数据库平台中建立，使其结构与目标数据库的结构相同。将源数据库转入中间库的过程是一个数据的重新组合和关联的过程，将是转换的中心和重点工作，需要对源数据库与新数据库的数据关系进行深入分析，对每一个数据库写出转换策略。根据图 1 所示的定义待环境检测和依赖包安装完成后执行步骤 step-2 数据抽取与转换，抽取原监控系统数据字典到内存中根据参数序号和最大值、最小值、平均值等的映射关系自动转化成横表 A，加载新监控系统基础表 B 到内存根据业务规则自动和横表 A 做列的映射。

2.3 数据转换结果验证

根据图 1 所示的定义映射完成后任务调度执行步骤 step-3 数据转换结果验证，纵表和横表转换的

规则见配置文件 table.ini，columns 表示纵表转横表生成的列数，启动线程查询老监控系统转换后横表列个数和 columns 是否相同，其他业务类型生成中间表个数是否和配置文件中 intermediate_table 相同。

2.4 目标数据库备份及清表

在进行新旧系统数据转换时，对原系统数据进行备份以保证历史数据的可追溯性。一旦在新系统中业务办理出现问题，则可以通过追溯历史数据来判断是数据转换错误，还是新系统程序存在 BUG。根据图 1 所示的定义检查完成后任务调度启动线程依次执行 step-4 数据库的备份，step-5 数据库的清库操作。

2.5 数据迁移

根据图 1 所示的定义数据库备份和清库操作完成后任务调度启动线程执行 step-6 数据迁移操作，在数据迁移步骤内定义 4 个 job，job-6-1 迁移任务 A、job-6-2 迁移任务 B、job-6-3 迁移任务 C、job-6-4 迁移任务 D 启动四个线程并发执行迁移过程。

2.6 目标数据库迁移后完整性验证

在风电场监控系统异步协同数据迁移方法中，目标主机数据库的完整性验证是一个关键步骤，确保迁移过程不仅快速高效，而且保证了数据的准确性和完整性。分为以下步骤：

（1）验证策略的设计：设计详细的验证流程，包括但不限于数据的一致性检查、数据完整性测试以及业务规则的符合性检验;确定验证指标，如数据记录的数量匹配、关键字段的准确性、数据结构的一致性等；

（2）数据对比分析：对源主机和目标主机中相同业务类型的数据进行对比，验证数据迁移后的一致性;使用自动化脚本对比源数据库和目标数据库中的记录，确保所有数据均被准确迁移且无丢失；

（3）错误记录与处理：对于验证过程中发现的任何差异和错误，进行详细记录，并分类分析其原因；设计针对性的纠错措施和数据修复流程，以确保数据库的最终一致性；

（4）性能和效率测试：测试目标数据库在迁移后的查询效率和响应时间，保证其满足风电场监控系统的性能要求;验证数据库的负载能力，确保其在高负载情况下仍能保持稳定性和准确性；

（5）最终审核与确认：在完成上述所有验证和测试后，进行最终的审核，以确认数据迁移的成功和数据库的完整性；

通过以上步骤，目标主机数据库的完整性验证不仅确保了数据迁移的质量，而且保障了风电场监控系统在迁移后的稳定运行和数据准确性，从而为系统的长期运行和维护打下坚实的基础。

3 实验案例迁移结果

本论文的目的在于采用一种合理的任务编排和任务调度的方式提供一种风场老监控系统到智慧系统数据迁移的方法，极大程度的减少了操作人员的工作量，在保证老监控系统和智慧系统能同时正常运行的情况下提高了迁移的效率。

4 结语

一种异步协同数据迁移的方法及装置有效实现了风电场监控系统数据高效的迁移，保障了数据完整性与准确性，并维护了系统的稳定性。通过创新的异步协同机制，展现出显著的实用性和创新性，对风电场监控系统的智慧化升级及整个行业的技术进步具有重要意义。

参考文献：

[1] 黄伟, 王小波, 乔蓓蓓. 基于混合云架构的电厂运行数据并行迁移系统[J]. 电子设计工程, 2023,31(2):126-129+134

[2] 张海全, 金贝贝, 陈春桦, 等. 电力行业国产数据库适配测试方法和技术研究[J]. 电器工业, 2023(1):78-79+82

氨燃料经济分析及煤掺氨燃烧试验研究

韦耿[1] 赵硕[1*] 王星博[2] 王勇[1] 汪鑫[2]

1.东方电气集团东方锅炉股份有限公司 清洁燃烧与烟气净化四川省重点试验室，成都 611731；

2.上海交通大学 机械与动力工程学院，上海 200240

摘要：目前，世界各国对温室气体的排放愈加关注。在我国“双碳”的背景下，对低碳或无碳燃料的充分利用势在必行。氨作为基本化工的无碳原料，产量大，具有易液化、易长期存储、易长距运输、零碳排放等特点。煤掺氨燃烧可以减少燃煤锅炉CO_2的排放，在碳中和背景下，氨将成为氢能利用的一种重要氢基燃料。西部大型综合风光能源基地会产生不稳定电源，随之存在大量的弃风、弃光，故可将其用于氨燃料的生产。本文对氨燃料的生产成本进行经济性分析，后对锅炉煤掺氨燃烧技术进行分析。研究发现绿氨的生产成本主要受到电价的影响，当电价降到0.1元/kW·h以下，可用其代替天然气；当煤与氨混合燃烧时，氨煤的混合比例和不同的分级水平会影响NO_x的排放。在空气不分级燃烧条件下，当氨混合比增加时，NO_x排放减少。在空气分级燃烧条件下，可以发现尾气NO_x排放量随着NH_3混合比的增加而增加，但NH_3的增加对NO_x排放量增加的影响随着燃尽空气位置比的增加逐渐消失。

关键词：氨燃料；经济性分析；氨煤混燃；NO_x排放

中图分类号：TQ534　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0041-06

Economic Analysis of Ammonia Fuel and Experimental Analysis of Coal-ammonia Blending and Combustion

WEI Geng[1],ZHAO Shuo[1], WANG Xingbo[2],WANG Yong[1], WNAG Xin[2]*

(1. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731 , Chengdu , China；

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, 200240, Shanghai, China)

Abstract: Currently, countries around the world are increasingly concerned about greenhouse gas emissions. In the context of China's "dual carbon" goals, it is imperative to fully utilize low-carbon or zero-carbon fuels. Ammonia, as a basic chemical industry zero-carbon fuel, has the characteristics of large production, easy liquefaction, long-term storage, long-distance transportation, and zero carbon emissions. Coal mixed with ammonia combustion can reduce the CO_2 emissions of coal-fired boilers. This paper conducts an economic analysis of the production costs of ammonia fuel, and then analyzes the technology of coal mixed with ammonia combustion in boilers. The study found that the production cost of green ammonia is mainly affected by electricity prices. When the electricity price drops below 0.1 kW·h, it can replace natural gas. When coal is mixed with ammonia combustion, the ratio of ammonia-coal mixing and the different grading levels will affect the emission of NO_x. Under the air non-grading combustion conditions, when the ammonia mixing ratio increases, the NO_x emission decreases. Under the air grading combustion condition, it can be found that the tail gas NO_x emission increases with the increase of NH_3 co-combustion ratio, but the effect of NH_3 addition on the increase of NO_x emission gradually disappears with the increase of the burnout air position ratio.

Key words: ammonia fuel; economic analysis; coal-ammonia blending; NO_x emissions

收稿日期：2023-12-19

基金项目：国家重点研发计划资助项目；项目编号：2022YFB4003904

作者简介：韦耿（1983－），男，2010年毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业，研究生学历，高级工程师。现任职东方电气集团东方锅炉股份有限公司，主要从事清洁燃烧与烟气净化以及碳捕集方向研究工作。

赵硕（1997－），男，2019年毕业于中国石油大学（华东）船舶与海洋结构物设计制造专业，研究生学历，助理工程师，现任职东方电气集团东方锅炉股份有限公司，主要从事清洁燃烧与烟气净化方向研究工作。通信邮箱：shuoss02@163.com。

我国明确提出2030年前实现“碳达峰”、2060年前实现“碳中和”。在我国能源结构中，燃煤的比例是最大的，石油次之，但化石能源严重依赖进口，而且该燃料碳排放量过大。碳减排技术在燃烧领域中包含燃烧前生物质燃烧[1]、无碳燃料的应用[2],燃烧中煤炭的加压富氧燃烧技术[3],燃烧后处理阶段的碳捕集、利用与存储等技术。[4]

现阶段，风电、光电等能源发电方式得到了快速的发展，但其为不稳定电源，给电网带来了巨大压力；因此，可将这些浪费的能源储存起来，采用氢、氨等化学储能方式，其种种优势得到了重视，具有低成本大规模推广应用的前景。

当电站有过剩电量的时候，可以通过电解水获取氢气，将氢气进行储存，在需要的时候进行使用，比如在锅炉中直接燃烧或者掺混在燃煤燃气锅炉中燃烧进行发电、供暖、供热等；也可掺混到天然气管道中进行输送，代替一部分天然气的使用。但是氢能利用也具有一定的局限性，氢气易燃易爆，液化温度太低，储运较为困难。与之比较，氨稳定性较好，易于加压液化，也有十分成熟的运输系统，可以通过合成氨反应将氢气和氮气合成为液氨，在化工领域合成氨技术已经成熟，因此将液氨作为氢能的载体具有技术可行性，适用于大规模工业能源应用；然而，如表1所示，氨气与氢气、天然气相比燃烧时的最大层流火焰速度较低，而且不易着火。氨气贫燃还会产生较高的氮氧化物，富燃则会产生较高的氨逃逸。[5]所以，对煤粉掺烧氨的燃烧特性研究是有必要的，一方面为了降低燃烧产物中氮氧化物的排放，另一方面可以进一步控制氨逃逸。

表1 氨、氢和甲烷的燃烧特性[5]

燃料	低位体积热值(MJ/m³)	最大层流火焰速度/(m/s)	火焰极限	最低着火温度/℃
氨气	14.3	0.07	0.63~1.40	650
氢气	10.8	2.91	0.1~7.1	520
甲烷	35.9	0.37	0.5~1.7	630

绿氢和绿氨在制取方面的技术已经趋于成熟，目前主要聚焦在成本的降低上，而在其利用方面则有更多的技术难题，如何将绿氢、绿氨进行充分的利用，用于大规模发电或者供热供暖，是现今科学界和经济市场中的重要课题。一方面，燃用纯氢气和纯氨气的锅炉可进行发电或供热供暖；另一方面，可以将绿氢和绿氨同燃煤和燃气进行掺烧，可充分利用已有的燃烧设备进行改进，大大节约成本，同时降低了含碳燃料的使用量，进而降低了碳排放。前文已经总结了氨燃料的燃烧特性，包括低位体积热值，最大层流火焰速度，火焰极限以及最低着火温度，然而现阶段对氨燃料其他方面的研究较少，比如氨燃料生产成本的经济性以及煤掺氨燃烧的烟气排放等内容。本文将对这两方面进行研究与分析。

1 绿氨生产成本的经济性分析

通过可再生能源发电，再制取的氢气和氨气被称为“绿氢”和“绿氨”，而且我国在制取绿氢以及绿氨的技术非常成熟，目前的主要目标是降低成本，该目标也是经济体系的重要难题。

1.1 氨的合成

氨是氢气和氮气在高温高压等条件下合成的化工产物。早在2019年，我国液氨的产量就已经达到了1 747万吨，而且在逐年增长。在“双碳目标”的背景下，氨能源的越来越受到国家的重视，已经成为我国重要的能源之一。

1.2 合成氨经济性分析

首先对合成绿氨的原料氢气进行经济性分析，目前，电解水制绿氢技术主要分为三种技术：碱性电解（AEC），质子交换膜电解（PEM），固体氧化物电解（SOEC）。其中碱性电解技术较为成熟，成本较低，但是存在效率较低和无法灵活机动等缺点；质子交换膜电解技术功率较高，操作灵活，但是由于贵金属催化剂等原因导致成本较高；固体氧化物电解技术还在实验室规模进行开发，暂时无法大规模商用。本节较为具体的分析PEM电解技术的设备成本和制氢耗能，再分析通过PEM制取的氢气来合成氨的成本分析。

根据文献[6]，现在的PEM电解槽制造成本约为6 750元/ 千瓦时，设备的寿命在20 000小时到50 000小时，可取其平均数为35 000小时，所以PEM电解槽每消耗1千瓦时的电用于制氢的设备成本为0.193元。每生产1立方米H_2需要耗能3.9 千瓦时，则生产

1吨H_2需耗电43 381.54 千瓦时。耗电乘以绿电价格，生产1吨H_2需要消耗电费10 511.35元，再加上PEM设备费用折合8 366.44元，绿氢的生产成本约为18 877.78元/吨。将绿氢与天然气的价格进行比较，现在国内天然气价格较低时大约在2元/标准立方，折合大约在2 790元/吨。若提供相同的热值，1吨天然气相当于0.417吨氢气，则绿氢的生产成本为7 872元，价格大约为天然气的3倍。如果电价降低至0.1元/千瓦时，并且PEM设备成本降低为2 000元/千瓦时，则绿氢替代天然气的成本大约在2 843元/吨，与现在的天然气价格接近。如果改用碱式电解槽，现在设备成本可以控制到2 000元/千瓦时，寿命约为90 000小时，比PEM电解槽设备成本更低，但是缺点是生产氢效率较低，能耗大，生产1标准立方H_2需要耗电5千瓦时。其他数据和使用PEM电解槽计算相同，计算得到使用碱式电解槽生产绿氢成本约为14 712元/吨H_2，比PEM电解槽生产绿氢成本18 877.78元/吨低了不少。其成本差主要在于设备成本，如果PEM设备成本能够降低到3 500元/千瓦时以下，则比起碱式电解更具经济优势。

使用绿电电解水得到的绿氢来合成绿氨是极有潜力的一条能源路线，这个过程中完全使用可再生能源产生的绿电，碳排放为0。根据文献[7]，H-B法合成氨能耗约为1 340kW·h/吨NH_3，也采用绿电价格进行计算，为324.68元/吨NH_3。同时对于较小规模的合成氨设备，每生产1吨氨的设备成本约为967元。与此同时生成一吨氨，按照化学当量计算，需要0.178吨H_2，折合绿氢生产价格3 360.25元，将绿氢成本和合成氨能耗、设备成本相加，绿氨的生产成本总共为4 651.93元/吨。

与之相比，现在天然气生产氨的总成本约为3 440元/吨NH_3，还是有较大的差距，如下图1计算可得，在绿电价格约为0.1元/千瓦时的时候，可再生能源发电生产绿氨的成本可以小于天然气制氨。

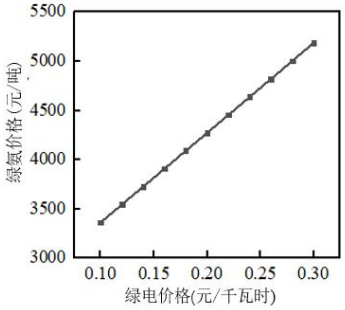


图 1 绿氨成本随绿电价格的变化

2 煤氨混燃的试验研究现状

近些年来，煤氨混燃的研究大多集中在有限元模拟，有一些处于实验室阶段，目前没有在工业上的大规模应用。

Tamura[8]等在1.2 MW的卧式煤粉炉中进行了煤掺氨燃烧的研究，旋流燃烧器由旋流风叶、环形煤粉喷嘴和位于燃烧器中心的氨气喷枪构成。本次试验分为工况一：氨气从煤粉管道进入；工况二：氨气从氨气喷枪进入；工况三：氨气从侧方距上喷口1 m处进行喷射。结果发现：工况一燃烧生成的NO_x最少，飞灰的含碳量最高；以工况一为对照，工况三相比工况一燃烧生成的NO_x急剧提升，但飞灰的含碳量相对较少。工况二相比工况一燃烧生成的NO_x大体一致，但飞灰含碳量显著减少。根据试验结果发现，氨气从氨气喷枪进入时，NO_x的生成量与氨气从煤粉管道进入时基本相同，但煤的燃尽率大幅度提升，这种方式可以作为氨煤混燃的优先选择。氨气的流速也会影响NO_x的生成，如果氨气的速度过快，会使得氨气在氧化性气氛大量生成NO_x，选择适当的速度可以控制NO_x的排放。

在煤掺氨燃烧的过程中，火焰形状会发生变化。如在规模为8.5 MWth的燃煤锅炉中通过模拟可知当氨含量超过40 %时，火焰形状会从正常的旋流火焰变成细长状。[9]火焰形状的改变会导致锅炉中各炉墙上的热流分布发生明显的变化。不同掺氨比的混合燃料在燃烧过程中的换热方式存在差异，这也会影响锅炉内的温度分布。如当掺氨比小于60 %时，颗粒辐射强度对炉墙上的换热影响更明显；而进一步提高掺氨比时，对流换热的作用更加明显。因此，需要根据煤掺氨燃烧的具体情况对常用的燃煤锅炉结构进行调整，从而保障锅炉的安全高效稳定运行。

在排放特性方面，在煤粉掺氨的锅炉中，NO_x的形成与煤和氨都有巨大的关系。Wang 等人[10]结合试验研究总结的煤掺氨燃烧过程中的主要反应路径发现HNO是影响 NO 产生的关键基团。煤炭中的含氮的主要反应路径为挥发分→HCN→HNO→NO。氨主要有两条反应路径，在贫燃条件下的主要反应路径为NH_3→H_2NO→HNO→NO；在低氧条件下的反应路径为 NH_3→NH_2→NNH→N_2。

研究发现，在反应过程中，当氨含量较低时，HNO与H、O和OH自由基反应以及H与NO_2自由基反应来产生NO。当氨含量进一步升高时，NH_2和NH自由基能将NO还原为N_2。同时，NH_3能消耗大量的O，抑制HCN转化为HNO，从而降低NO排放。[11]

3 试验系统及氨煤掺混燃烧试验

目前，对于煤粉低NO_x燃烧技术的实验室研究主要局限在出口延期排放特性分析，而对于燃烧过程中NO生产机理的试验研究比较少。本次试验在可控壁温的燃烧炉试验系统开展，建立了类似实际锅炉炉膛中不同负荷下的煤粉燃烧的热环境，可模化比拟煤粉在锅炉中的实际燃烧过程，研究燃烧过程中NO形成机理和其他燃烧机理。

可控壁温的燃烧炉实验装置于2020年在上海交通大学实验室建成，并已经成功用于煤粉的分级燃烧原理研究。它是一台下行燃烧综合试验系统，可开展的研究工作包括：给粉系统、燃烧器、配风系统、炉本体系统以及尾部烟道和采样系统等组成，如图2所示。它的技术特点包括：

（1）高工作温度区间（800～1 500 ℃）及稳定的炉膛温度分布；

（2）灵活的分级配风和取样方式（实现燃尽风的轴向布置和轴向的连续取样）；

（3）广泛的适用范围（实现分级燃烧及不同燃料燃烧）；

（4）可变的炉膛壁温及炉膛气相环境；

（5）立式对开管状加热炉外炉壳体，便于炉管更换，同时具有良好的炉膛气密性；

（6）炉管恒温段长度2 m，可以配置内径为80～200 mm的刚玉碳化硅管。

燃烧炉前端设置有预热反应段，助燃空气主要在预热反应段后部供入炉膛。燃烧炉内层刚玉碳化硅管及外层保温材料之间安装有硅钼棒加热元件，同时炉顶还可安装上下移动调节式水冷管，进而实现内层炉管壁温的双向调节，保证燃烧工况燃烧室壁温的精确可控。燃烧炉沿程开设多组抽气或观察孔，用于抽气检测、烟气再循环及观测记录，同时可实现分级燃烧。

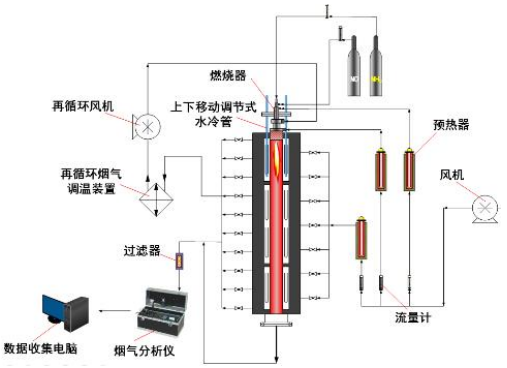


图 2 可控壁温的燃烧炉试验系统

给粉系统是一个试验台的核心，给粉系统能否长时间稳定、定量的送粉，对于试验的顺利进行起到了关键性作用。试验系统运行时粉仓中的煤粉颗粒通过转动电机带动搅拌轴搅动煤粉，通过推进机构送入锥形落粉锥里面，通过引射器将煤粉输送到一次风管里面，由提前预热到80 ℃的一次风携带进入炉膛顶部上的燃烧器，进入炉膛与提前预热到200 ℃的旋流二次风混合燃烧。改变调频电机的转动频率可以改变螺旋推进机构的旋转速度，从而调节给粉速度。煤粉仓里面设置的搅拌轴由给粉机顶部的搅拌电机带动旋转，一般将搅拌电机的转动频率控制在合适的固定值，尽量减少由于搅拌轴搅拌速度的变化而影响煤粉仓中煤粉的出粉量。

图3是给粉机输送大同烟煤（试验煤种）的标定曲线，由图中可以看到，给粉机给粉线性规律较好，满足试验要求。

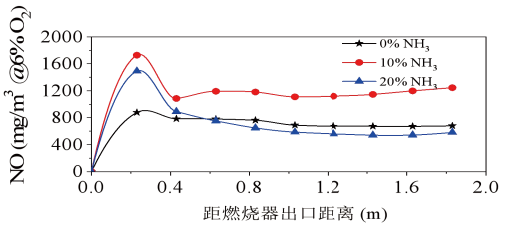


图 3 螺旋给粉机标定值拟合线形图

试验所需的空气直接由无油空气压缩机提供，试验所需特殊气体如NH_3由气瓶提供。在进行氨煤掺烧试验时，空气在经过压缩机之后直接进入配气箱，然后再通过配气箱上的各个接口连接各一次风、二次风和燃尽风的流量计控制风量。一次风、二次风以及燃尽风在进入炉膛之前分别设置空气预热系统，空气预热系统是由3台温控器以及3个电加热器组成。3台温控器的作用是控制电加热器在一次风、二次风、燃尽风进入炉膛前的预加热温度。电

加热器为不锈钢管道内布置电加热棒，通过电加热棒与经过不锈钢管道内的空气对流换热实现加热升温，温控器通过布置在电加热器上的热电偶反馈信号控制电加热棒，使预热空气稳定在目标温度值。在试验进行过程中，能够长时间维持一次风温度维持在80 ℃，二次风和燃尽风温度维持在200 ℃。炉体沿程等距布置7个燃尽风进风口，7个燃尽风进风孔和燃尽风母管相连，燃尽风进入燃尽风母管，通过燃尽风进风管与燃尽风母管间的不锈钢球阀控制燃尽风进入位置，可以方便在试验中对燃尽风位置随时根据试验需求切换，方便快捷，对试验工况的切换非常灵活。

3.1 煤粉及成分

试验选用神化烟煤作为主要用煤，煤质分析如表2所示。

表 2 试验所用煤样的工业分析和元素分析

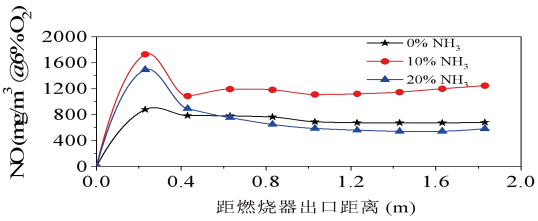
	工业分析 (wt%)				元素分析(wt%)					低位发热量 (kJ/kg)
煤样	Vad	Aad	Mad	Fixed Carbon	Cad	Had	St. ad	Nad	Oad	
神华烟煤	24.22	10.7	11.5	53.58	63.13	3.62	0.41	0.7	9.94	24.136

3.2 不同分级程度氨煤掺烧比对 NO_x 排放的影响

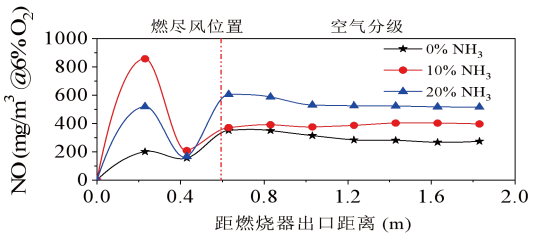
开展氨煤掺烧在空气不分级燃烧和空气分级燃烧的试验，总过量空气系数在1.2下进行，考察了氨煤掺烧比例对NO_x排放的影响。空气分级燃烧工况考察了燃尽风离主燃烧器不同距离的影响，采用燃尽风位置率（Ms）来表示，其值选择0.29、0.39。

图5为设定1 100 ℃恒定炉壁壁温下进行的空气不分级、分级、不同分级位置、不同氨煤掺烧比下的NO_x排放规律。图中显示燃烧过程中NO_x生成趋势。空气不分级时所呈现的NO_x变化特性符合实际锅炉煤粉燃烧的生成特性，NO_x在距离主燃烧器0.2 m的第一个测点处迅速达到峰值，而后发生了NO_x的还原反应形成NO_x的波谷，均相还原反应和焦炭与NO_x之间的异相还原反应都存在，随着燃烧的继续进行，使NO_x浓度有些波动并保持至出口。对于10 %掺氨工况，燃料燃烧初期生成较高NO后会逐渐下降，但仍保持较高浓度伴随燃料整个燃烧过程，直至燃烧结束，排放的NO_x水平必然呈现较高值，燃烧初期生成的NO_x浓度更高，而后呈现下降的趋势，且掺烧20 %比例的氨气相对于掺烧10 %氨气来说，其延程NO_x浓度峰值更低，尾部NO_x排放也更低。

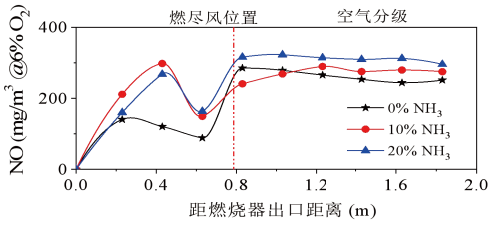
图中曲线显示分级燃烧的特征明显，主燃区、还原区和燃尽区的界限可以通过NO_x的变化规律进行判断和区分。当然，在实际燃烧中三个区域并没有明显的分界线，存在重叠区域，尤其是图中可见的燃尽风位置靠后的工况。对于分级燃烧工况，燃料燃烧在前期会由于氧气充足，释放出大量的NO，但是随着燃料进入还原区域，主燃烧器送入炉内的氧量的迅速耗尽，在这一区域会迅速生成大量还原性气氛，在还原区形成对NO还原的介质，这样炉内已生成的NO会在还原气氛，如CO、H_2或者未反应的NH_3大幅度还原。在空气分级燃烧工况下，可以发现尾气NO_x排放量随NH_3掺烧比例的增加而增加，但是随着燃尽风位置比的增大，NH_3的添加所带来的NO_x排放增大的影响会逐渐消失。



（a）空气不分级



（b）30 %燃尽风，Ms=0.29

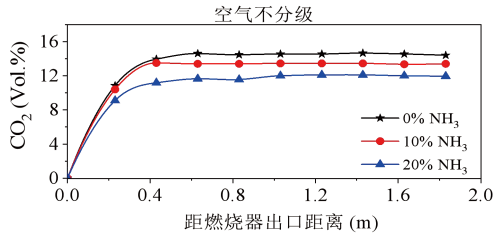


（c）30 %燃尽风，Ms=0.39

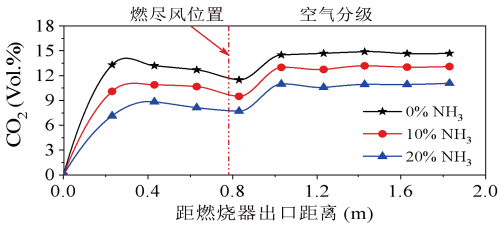
图 5 氨煤掺烧 NOx 排放规律

3.3 不同分级程度氨煤掺烧比对 CO_2 排放的影响

图6为设定1 100 ℃恒定炉壁壁温下进行的空气不分级、分级、不同氨煤掺烧比下的CO_2排放规律。从图可以看出，氨气的掺烧可以显著的降低CO_2的释放，在空气不分级工况下，无氨气掺烧，CO_2的排放浓度约为14.5 %，掺10 %及20%的氨气后分别下降1 %和2.4 %，在空气分级工况下，无氨气掺烧，CO_2的排放浓度同样约为14.5 %，掺10 %及20 %的氨气后分别下降1.6 %和2.9 %，这表明空气分级工况下NH_3对CO_2减排的有一定的影响。



（a）空气不分级



(b) 30 %燃尽风，Ms=0.39

图 6 氨煤掺烧 CO2 排放规律

4 结语

（1）绿氨的成本价格主要取决于电价，若要完成对天然气的替代，电价要低于0.1元/kW·h，目前可以利用西部大型综合风光能源基地产生的不稳定电源来生产绿氨，实现绿氨对天然气的部分替代。

（2）在10 %的掺氨比下，燃烧生成较高NO后逐渐下降，但在燃烧整个过程中NO仍保持较高的浓度直至燃烧结束，排放的NO_x水平也必然呈现较高值，燃烧初期生成的NO_x浓度高，然后逐渐下降。当掺氨比为20 %时，其整个过程中的NO_x峰值更低，尾部的NO_x也更低。分析认为，在1 100 ℃的壁温下，烟气中氨与NO可能发生了SNCR反应，氨气在燃烧初期产生大量NO，而后炉内发生SNCR反应，使得NO_x大幅度下降，可以发现20 %的掺氨比还原NO的效果更好。在空气分级的情况下，尾气NO_x排放量随NH_3掺烧比的增加而增加，但是随着燃尽风的位置比的增大，NH_3的增加导致NO_x排放增大的影响会逐渐消失。

（3）氨气的掺烧可以减少CO_2的排放，在空气不分级的工况下，不掺氨气燃烧时，CO_2的排放浓度约为14.5 %，掺氨10 %下降1 %，掺氨20 %下降2.4 %，在空气分级的情况下，无氨掺烧CO_2的排放浓度同样约为14.5 %，掺10 %和20 %的氨气后分别下降1.6 %和2.9 %，这表明空气分级下NH_3对CO_2的减排有一定的影响。

参考文献：

[1] Zhang J , Zheng S , Chen C , et al.Kinetic model study on biomass pyrolysis and CFD application by using pseudo-Bio-CPD model[J]. Fuel, 2021, 293(1):120266

[2] Zhou S , Yang W , Tan H ,et al.Experimental and kinetic modeling study on NH3/syngas/air and NH3/bio-syngas/air premixed laminar flames at elevated temperature[J].Combustion and Flame, 2021, 233:111594

[3] Wang, X., et al. "Assessment of sulfur trioxide formation due to enhanced interaction of nitrogen oxides and sulfur oxides in pressurized oxy-combustion.[J] "Fuel 290. 24(2021):119964

[4] Baroudi H A , Awoyomi A , Patchigolla K , et al.A review of large-scale CO2 shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage[J].Applied Energy, 287[2024-06-24]

[5] A, Valera Medina, et al. "Ammonia for power[J]." Progress in Energy and Combustion Science 69(2018):63-102

[6] 马晓锋, 张舒涵, 何勇, 等. PEM 电解水制氢技术的研究现状与应用展望[J].太阳能学报, 2022, 43(6):420-427

[7] 何发明, 曾庆, 吴剑, 等. 天然气裂解制氢与水电解制氢合成氨工艺特性比较[J]. 化肥设计, 2020, 58(2):5-9

[8] Tamura M , Gotou T , Ishii H ,et al.Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2MW-thermal pulverised coal firing furnace[J].Applied Energy, 277[2024-06-24]

[9] Zhang J , Ito T , Ishii H ,et al.Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: Effect of ammonia co-firing ratio[J].Fuel, 2020, 267:117166

[10] Wang X , Fan W , Chen J ,et al.Experimental study and kinetic analysis of the impact of ammonia co-firing ratio on products formation characteristics in ammonia/coal co-firing process[J].Fuel, 2022

[11] Ishihara S , Zhang J , Ito T .Numerical calculation with detailed chemistry on ammonia co-firing in a coal-fired boiler: Effect of ammonia co-firing ratio on NO emissions[J] .Fuel, 274 [2024-06- 24]

一种基于在线图像识别的新型空预器积灰堵塞诊断系统设计

徐游波[1] 陈欢[1] 王正杰[1] 郭光亮[2]

1.东方电气集团科学技术研究院有限公司，成都 611731；2.东方电气集团东方锅炉股份有限公司，成都 611731

摘要：在能源结构转型背景下，结合实际工程需求，针对燃煤机组回转式空预器运行防堵及在线监测，结合先进的图像分析方法形成一套基于图像与数据特征融合的空预器积灰堵塞诊断系统，实现对空预器局部与整体的堵塞程度、发展趋势的监测，保障了空预器的安全运行，提高了运行维护的智能化水平，为“双碳”战略下我国能源结构稳步转型提供技术支持。

关键字：空气预热器；积灰堵塞；可视化监测系统；图像处理；神经网络算法

中图分类号：TM621 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）04-0047-05

A Diagnostic Technique for Dust Accumulation and Blockage in Air Preheaters Based on Multimodal Image Fusion

XU Youbo[1], *CHEN Huan*[1], *WANG Zhengjie*[1], *GUO Guangliang*[2]

（1. DEC Academy of Science and Technology Co.,Ltd., 611731, Chengdu, China;

2. Dongfang Electric Group Dongfang Boiler Co., Ltd., 611731, Chengdu, China）

Abstract: In the context of energy structure transformation, combined with practical engineering needs, a set of air preheater ash blockage diagnosis system based on image and data feature fusion is formed by combining advanced image analysis methods to prevent blockage and online monitoring of rotary air preheaters in coal-fired units. This system monitors the degree and development trend of local and overall blockage of air preheaters, ensuring their safe operation and improving the intelligence level of operation and maintenance, Provide technical support for the steady transformation of China's energy structure under the "dual carbon" strategy.

Key words: air preheater; ash blockage; visual monitoring system; image processing; neural network algorithm

“双碳”战略下我国能源结构稳步转型，火力发电成为保障能源安全前提下大规模消纳可再生能源的“压舱石”，从保障基础负荷逐步转向深度灵活调峰运行。[1]空预器是布置在锅炉尾部烟道中利用烟气余热预热所需空气的换热设备，可充分利用烟气余热，降低排烟热损失提高锅炉热效率。[2]同时，预热空气有助于降低着火热，改善煤粉气流着火及燃烧条件，减少不完全燃烧热损失。但为提高换热效率、便于烟道布置，空预器内蓄热元件为紧凑布置的波纹板，流道较为狭窄，易被堵塞，这使得空预器面临新的技术挑战。[3]

空预器堵塞是超低排放下污染物脱除策略粗放造成的运行问题，具体原因为SCR过度喷氨导致烟气中氨气含量增加，与烟气中的硫化物反应生成高黏性的硫酸氢铵，当温度下降时凝结在空预器波纹板表边，吸附烟气中飞灰，造成蓄热元件堵塞，导致空预器换热效率降低，流道阻力增大，风机能耗增大，引起风机喘振、失速等现象，

收稿日期：2024-01-22

基金项目：国家重点研发计划：亚临界煤电机组深度灵活调峰关键技术及工程示范；项目编号：2023YFB4102900。

作者简介：徐游波（1988－），男，2015年毕业于东南大学动力工程专业，硕士，工程师。现任东方电气集团科学技术研究院有限公司研究员,主要从事智慧电厂研究方向的工作。

严重时需停机清洗，给电厂带来不必要的经济损失。过量的硫酸铵盐在 SCR 脱硝系统会覆盖催化剂部分活性中心，导致催化剂的脱硝活性下降，也会在空气预热器中下段达到熔点，黏附飞灰沉积在设备上堵塞并腐蚀换热元件表面，进而影响后续除尘设备效率。但也有研究发现适量硫酸铵盐可使低温 SCR 脱硝系统中催化剂表面的酸性位增多，形成新的活性点位及酸性吸附中心，促进低温催化剂对 NH_3 的吸附量，提高催化剂的脱硝活性。硫酸铵盐生成速率与消耗速率是决定硫酸铵盐对催化剂起促进作用/抑制作用的关键。因此，针对空预器开展内部状态综合监测研究，根据现场摄取的图像对空预器冷热端换热元件表面堵塞状态进行实时可视化监测与图像分析是十分必要的。[4-5]

近年来随着计算机视觉技术的发展，可视化监测手段在工业场景中的应用愈加广泛。因此，结合先进的图像分析方法，开展近似真实条件下的空预器堵塞状态监测及分析，是空预器堵塞可视化监测技术的关键，这在现有文献中报道较少。本研究针对机组深度调峰灵活性运行背景下空预器积灰堵塞增加的问题提出一种基于工业相机的空预器堵塞实时可视化监测方法，开展多模态图像融合的通用性故障诊断技术研究，实现空预器积灰堵塞故障诊断和操作决策建议。形成一套基于图像与数据特征融合的空预器积灰堵塞诊断系统，并在具备条件的机组上开展试用，实现对空预器局部与整体的堵塞程度、发展趋势的监测，为“双碳”战略下我国能源结构稳步转型提供技术支持。[6-7]

1 空预器防堵技术路线

电厂中调控硫酸铵盐的可行性方案分为主动控制与被动控制。主动控制指从源头预防硫酸铵盐的生成物产生，而被动控制是优化装置清除硫酸铵盐生成量，应根据电厂实际情况，合理选择相应措施。基于此，利用大数据分析方法，采用分区喷氨在线监测智能控制系统，提出了可视化监测手段，实时获取空预器冷端转子运行图像，利用图像分割技术计算堵塞程度，实现空气预热器硫酸氢铵堵塞机理分析及防堵预测手段。建立空预器堵塞预警系统，得到更为精准的空预器实时运行监测数据，确保该系统可以在空预器运行过程中实时监测其内部堵塞状态，并对堵塞区域的发展趋势做出预测；同时，针对危险区域提前预警，保障了空预器的安全运行，提高了运行维护的智能化水平，避免了严重堵塞现象的发生。

1.1 空预器状态评估

分析不同负荷下空预器历史运行数据中关键参数（压差、排烟温度、冷端温度）的概率密度分布，构建空预器堵塞因子计算模型，以得到空预器整体堵塞率的长/短期变化趋势，实时指导吹灰。通过厂内 DCS/SIS 系统获取空预器进出口烟气差压、温度、实时负荷、烟气流量检测值等相关数据计算空预器阻力系数。

基于历史数据的空预器监测拟分负荷段对其历史运行各项指标进行数据统计，考察不同负荷段下空预器各项运行指标健康状态，结合机组调峰运行时各指标的失稳概率，并通过数据融合建立起对各设备的综合评价，对空预器整体运行健康状态进行判断。对机组历史数据进行分段分析，提取典型运行负荷段，分别整合机组在对应负荷段的历史运行数据。进一步，对反应空预器运行状态的关键因素进行分析，获取各项指标的限制要求。以经验分布作为实际分布的近似，将前述分析获取的各参数所允许的限值与所获分布函数相对应，以获取空预器各测点参数反应的历史稳定运行的概率。进而，对获得的各参数独立反应的运行情况进行融合，综合评估、判断机组过去一段时间的运行情况。根据不同规律变化期探索不同形式的阻力系数，以建立不同时间尺度的堵塞因子预测模型，反映空预器整体堵塞程度的变化趋势，实现提前预警。

1.2 积灰堵塞识别

空预器冷端风仓内温度较低、气相飞灰含量少，为工业相机布置提供了空间，可在空预器冷端风仓内沿径向布置多个防尘工业相机及相应的补光设备，拍摄空预器冷端堵塞形态。将拍摄图片利用图像引导算法去除噪声后，采用图像分割算法将图像中像素点按灰度值分为流通区域和实体区域，量化表征堵塞程度。

1.3 空预器积灰堵塞诊断

利用 CNN（卷积神经网络）提取图像特征，将特征与数值型数据拼接在一起，实现图像和数值型数据的融合。

2 空预器可视化监测系统

2.1 空预器可视化监测系统总体方案

针对现有监测手段的不足，提出了采用工业相机实时可视化监测空预器堵塞程度的方法。在空预器冷端二次风仓内布置多个防尘工业相机及相应的补光设备，拍摄空预器冷端堵塞形态；进而利用图像分割算法，获得图像区域内的堵塞面积，即各径向位置堵塞程度。

在空预器冷端下方布置工业相机，实现对空预器冷端工作条件下的实时可视化监测，得到冷端图像；在空预器冷端布置红外热像仪，进行转子表面温度测量，并生成可视化的温度分布云图；读取空预器进出口压力、实时负荷等相关数据，汇入分析系统。之后根据实时图像，结合实验验证，利用阈值分割技术及卷积神经网络等深度学习方法，获得相机布置径向位置堵塞率η，进一步根据径向位置加权平均，获得整体堵塞程度η_0；

相机布置径向位置堵塞率η：

$$\eta=\frac{\text{实体区域像素点个数}}{\text{图像像素点总个数}}-\text{空预器波纹板面积占比}$$

整体堵塞率按相机所在径向位置加权平均：

$$\eta_0=\frac{r_1^2\eta_1+r_2^2\eta_2+\ {}_3^2\eta_3+r_4^2\eta_4}{r_1^2+r_2^2+r_3^2+r_4^2} \tag{1}$$

其中 r 为相机所在位置的半径。

利用入口烟气成分、温度，计算沉积温度，结合红外热像仪测得温度分布，将转子按堵塞危险程度分区，与图像监测结果对比分析，确定已堵塞区域、危险区域、安全区域。再根据流经空预器前后烟气压差、锅炉负荷、烟气流速等数据，选取合适长度的历史跨度，计算堵塞因子长期变化趋势；对短期运行结果，按功率分段，分别结合一定时间跨度的历史数据，计算短期堵塞率变化趋势，结合各区域的大小，计算整体堵塞增长速度，其大于一定阈值时，系统发出预警。

2.2 堵塞率计算与堵塞识别方案

燃煤发电机组正常运行时，空预器本身匀速旋转。因此，位移传感器可以被动地循环“扫描”空预器冷端表面圆周方向上各位置与其的距离 d，当位移传感器固定不动时，位移传感器扫描获得的是半径坐标 r 处的空预器圆周方向的一维信息，即其采样是一维的。若位移传感器在受控下沿径向在$[r_1, r_2]$范围内往复运动，则虽然每一时刻获得的仍然是单点信息，但在空预器持续旋转多圈后，则累计获得的单点信息即相当于对半径范围$[r_1, r_2]$内的空预器冷端表面进行了扫描。至此获得了空预器冷端表面的形貌信息，接下来将通过数学方法、图像分析算法对其进行分析、处理，甄别堵塞区和非堵塞区，最终计算堵塞区的占比，即可作为衡量空预器堵塞程度的定量指标。

位移传感器扫描得到的原始数据可用二维曲线描述，横坐标（x 轴）为位移传感器在空预器冷端表面上的测量点的移动距离，纵坐标数值为 z=(H-d)，（图 1）。

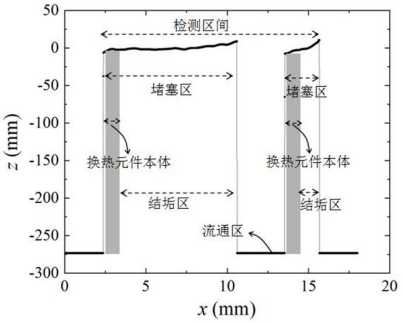


图 1 某个局部区域扫描得到的 z～x 曲线

z（x）的物理意义是空预器冷端表面某点 x 在空预器旋转轴轴向上相对于空预器冷端表面的距离。直观地，这可看做一维的地形的高低起伏（形貌），识别固体表面（堵塞区）与气流通道（流通区）的界面是接下来的关键。得到如图 1 所示 z～x 的曲线，由其特征可以识别流通区、堵塞区。识别堵塞区与流通区后，可按下式计算名义堵塞比率：

η^*=堵塞区面积/（堵塞区面积+流通区面积）

扣除换热元件本身对名义堵塞比率的贡献可得到实际堵塞比率，即有：

$$\eta=\frac{\eta^*-\eta_0^*}{1-\eta_0^*}\times 100\% \tag{2}$$

其中η^*为空预器换热元件完全未发生堵塞时

的名义堵塞比率；

定性地看，换热元件的本体以及冷端表面的堵塞区域，其 z 值在 0 附近小范围波动（冷端表面结垢主要是沿换热元件之间横向方向上增长，而不会明显地向冷端表面外部凸出），且变化是较为平缓的，但在其与气流通道的界面上，则形成类似于“断崖”的突变。

3 实验验证方法

通过制作等比缩放模型对空预器冷端形貌进行模拟实验，验证利用工业相机在黑暗、高尘环境下实时可视化空预器换热件积灰、堵塞状态的可行性及预期效果。

3.1 实验器材及环境准备

3.1.1 获取缩比空预器模型

根据空预器的结构尺寸绘制其 3D 结构图，制造获得等比实验模型，保证模型样貌与真实空预器相似。基于获取的模型进行手工“堵灰”，模拟不同积灰程度的空预器堵塞形貌。

3.1.2 模拟空预器实际工作环境

实验模拟现场实际生产环境，在除专门布设的补光灯光外无其他光源的黑暗环境内展开实验。所布设光源尽量保证拍摄图片的光源分布均匀，具体需在实验中根据所拍图像情况实时调整。通过为空预器的等比缩放模型安装中心轴及电机，使其依据现场实际空气预热器旋转角速度旋转。

3.2 实验图像处理

对工业相机获得的冷端图片，利用图像平滑算法去除噪声后，采用图像分割算法将图像中像素点按灰度值分为流通区域和实体区域，量化表征堵塞程度，此处介绍图像处理方法。

3.2.1 基于阻力系数堵塞因子计算

连接电厂 SIS 系统获取空预器进出口烟气差压、温度、实时负荷、烟气流量检测值等相关数据。直接利用堵塞因子定义式计算实时堵塞率：

$$K = 2\frac{p_{out} - p_{in}}{\overline{\rho_f}\,(Q_v / A_{ph})^2} \tag{3}$$

式（3）中，p_{out}、p_{in} 分别是空预器烟气侧出口、入口的静压（单位：Pa），$\overline{\rho_f}$ 是流经空预器的烟气的平均密度（单位：kg/m^3），Q_v 是流经空预器的烟气的体积流量（单位：m^3/s，折算至烟气平均温度状态下），A_{ph} 是空预器烟气侧的流通截面积（单位：m^2）。

烟气量测量的可靠性不高，但机组负荷足够可靠，而烟气量与机组负荷成正相关，故可利用实时负荷 $W(t)$ 代替烟气流量，拟合得到堵塞因子：

$$\Delta p = K(t) \times W(t)^2 + b \tag{4}$$

针对时长选取问题，选取一定跨度的历史数据，分别分成不同的时间段拟合，计算不同时间段长度下拟合得到的压差与实测压差偏差值的平方和，约束时间跨度选取上界；而针对短期运行数据，将运行数据按功率分段，分别结合相应负荷段下的历史数据，拟合堵塞因子变化趋势，截取所需短期内堵塞因子数值。综合不同功率段结果，整理得到短期变化趋势。

3.2.2 风仓图像前景和后景区分

空预器内部照明条件不足，拍摄图片效果不佳，需要采用技术手段降低前景（烟气）对后景（积灰堵塞）的影响。输入拍摄的空预器内部图像序列并进行预处理，将图像分成不重叠的子块，根据子块分配运动特征，再利用期望最大化（Expectation Maximization，EM）算法对每个图像子块训练高斯混合模型以最大化似然函数，进而区分前景（烟气）和后景（积灰）。模拟实验中，背景就是静止的，或者移动非常缓慢的物体，即积灰；前景就是相对于背景正在移动的物体，即烟气。该技术的目标为在视频中区分积灰与烟气，以达到排除烟气影响的目的。

针对不同数据分布，采用高斯混合模型（Gaussian Mixture Model，GMM）进行处理。GMM 是一种概率模型，用于表示在总体中含有多个子分布的情况。它认为数据是由多个高斯分布组成的混合体，每个高斯分布代表一个聚类。通过调整高斯分布的参数和数量，可以调整模型以适应不同的数据分布。此外，GMM 使用期望最大化算法来迭代优化参数，以最大化似然函数。在 E 步（Expectation step），计算每个数据点的概率分配给每个高斯分布；在 M 步（Maximization step），根据计算出的概率更新每个高斯分布的参数。

基于混合高斯模型的自适应背景差分算法，类似于帧间差分法，使用混合高斯分布模型来表征图像帧中每一个像素点的特征，当获取新的图

像帧时，适时更新混合高斯分布模型，某一时刻选取混合高斯模型中的一个子集表征当前背景。

3.2.3 前景噪声去除

空预器内部照明条件不足，拍摄图像效果暗淡、模糊，拟采用图像引导滤波算法对图像进行处理，在提升图片对比度的同时进一步排除烟气对积灰的影响。

引导滤波即需要引导图的滤波器，引导图可以是单独的图像或者是输入图像，当引导图为输入图像时，引导滤波就成为一个保持边缘的滤波操作，可以用于图像重建的滤波。对于图像噪声，多采用图像平滑滤波算法消除，相比于均值滤波、中值滤波而言，高斯滤波算法以二维高斯函数对邻域内各像素点灰度值按位置加权平均，保证了各方向上平滑程度相同，不改变原图像边缘走向。由于高斯函数是单值函数，中心点权重最大，在所有方向上单调递减，中心点像素不会过度受距离较远的像素点的影响，保留了各像素点的特征信息及图像的边缘特性。

3.2.4 堵塞程度表征

采用图像分割算法将图像中像素点按灰度值分为流通区域和实体区域，量化表征堵塞程度。阈值分割算法是图像分割中广泛使用的方法，通过不同的准则函数计算最优分类灰度值作为分类阈值，将图像分为两个或多个类别的区域。其中，最大类间方差法（OTSU）以最大化分类后两类像素点之间的方差为准则选取图像阈值，效果明显、易于实现，适用于图像中物体类别较少的场景。其算法具体步骤如下：对于图像 I（x ,y），分割阈值记作 T，属于 A 类的像素点占整幅图像的比例记为ω_0，其平均灰度μ_0；属于 B 类的像素点占整幅图像的比例为ω_1，其平均灰度为μ_1。图像的总平均灰度记为μ，类间方差记为 g。对于背景较暗的图像，设图像大小为 M×N，图像中像素的灰度值小于阈值 T 的像素个数记作 N_0，像素灰度大于阈值 T 的像素个数记作 N_1，则有：

$$\omega_0=\frac{N_0}{M\times N} \tag{5}$$

$$\omega_1=\frac{N_1}{M\times N} \tag{6}$$

$$\mu=\omega_0\mu_0+\omega_1\mu_1 \tag{7}$$

$$g=\omega_0(\mu_0-\mu)^2+\omega_1(\mu_1-\mu)^2 \tag{8}$$

式（8）中 g 是类间方差，采用遍历法得到使类间方差 g 最大的阈值 T, 即为该图像的灰度阈值。

3.2.5 图像自动识别模型构建与优化

卷积神经网络是一类包含卷积计算且具有深度结构的前馈神经网络，是深度学习领域最为常用的图像处理算法。利用卷积、池化等操作，实现参数共享，不断减小数据特征维度，构建图像——向量的映射结构，大幅减少训练参数。作为一种监督学习算法，其需要有标签的样本作为训练集以训练神经网络。定义损失函数衡量模型输出与样本标签的差距，计算使损失函数下降最快的参数变化方向，优化模型参数取值。

4 结语

在能源结构转型背景下，结合实际工程需求，针对燃煤机组回转式空预器运行防堵及在线监测，提出实现空预器积灰堵塞故障诊断和操作决策建议，形成一套基于图像与数据特征融合的空预器积灰堵塞诊断系统，实现对空预器局部与整体的堵塞程度、发展趋势的监测，对电厂运行优化具有重要意义，为“双碳”战略下我国能源结构稳步转型提供技术支持。

参考文献：

[1] 马汀山, 王妍, 吕凯, 等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(Suppl1):136-148

[2] 石全成, 吴承刚, 田永强. 火电机组空预器防堵治理技术优化研究[J]. 中国设备工程, 2023(23):212-214

[3] 吴健. 火电厂空预器堵塞问题的改善对策研究[J]. 现代制造技术与装备, 2023,59(10):144-146

[4] 颜鲁. 脱硝伴生硫酸氢铵与飞灰相互作用机制及对空预器堵塞影响的研究[D]. 山东大学, 2020

[5] 刘海啸. 硫酸氢氨造成的空预器堵塞治理对策研究[D]. 华北电力大学(北京), 2018

[6] 余进. 基于图像特征的空预器热点监测系统研究[D]. 西安理工大学, 2005

[7] 邹军, 夏继胜, 吴凯, 等. 空气预热器实时监控系统堵塞可视化性能研究[J]. 热力发电, 2020,49(7):158-162

汽轮机隔板汽道尺寸设计制造研究

欧楚雄　段增辉　张蕊　张增明

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳 618000

摘要：文章对汽轮机隔板汽道尺寸进行了仔细分析，给出了汽轮机隔板汽道尺寸的理论定义，为实际生产中隔板汽道尺寸的验收提供了理论依据。文章同时给出了隔板制造过程中控制汽道尺寸的优化手段及实际应用中的隔板汽道尺寸验收方法及验收准则，可作为实际工程应用中的参考。

关键词：汽轮机；隔板；汽道

中图分类号：TK267　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0052-04

Research of Design and Manufacture of Steam Path Dimensions of Turbine Diaphragme

OU Chu xiong, DUAN Zenghui , ZHANG Rui, ZHANG Zengming

(Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan, China)

Abstract: This article analyses in detail for diaphragme steam path dimensions of turbine and provides theoretical value of diaphragme steam path dimensions .This article provides the theoretical basis for examine of turbine diaphragme steam path dimensions . At the same time, the optimization method of controlling steam passage size in the process of diaphragm manufacturing and the acceptance method and acceptance criterion of diaphragm steam passage size in practical application are given, which can be used as reference in practical engineering application.

Key words: turbine；diaphragme；steam path

汽轮机隔板是汽轮机的关键通流设备之一，是组成一个通流单元（级）的必备部分，较高效率的隔板设计能够带来较高的通流效率，进而提升汽轮机的出力水平。对于汽轮机隔板而言，影响出力的主要参数是汽道尺寸，主要指喉宽和出口总面积。因此，要设计生产出一副高效率的隔板，关键就是要控制好隔板的汽道尺寸，使其不会在要求的理论值附近偏离太大。

本文就汽轮机隔板的汽道尺寸的理论要求及实际生产中如何验收做出了详细阐述，可为理论设计和实际验收提供一定的指导。

1　汽轮机隔板喉宽和出口总面积的理论定义

汽轮机隔板的工作原理是通过一个静叶栅来将水蒸汽的热力学能转化为动能，隔板内环形布置的静叶栅形成一个个汽道（汽道数等于叶片数），单个汽道在任意直径上的剖切都会形成一个二维的喷管，水蒸汽流经喷管时会加速，以温度和压力为表现形式的热力学能会转化成以速度为表现形式的动能（同时温度和压力降低），从而在静叶栅出口得到高速的蒸汽流，进入动叶栅冲动转子做功。

静叶栅形成的喷管有两种类型，一种为渐缩型喷管，出口速度为亚音速，一种为缩放型喷管，出口速度为超音速，但无论哪种类型的喷管，理论上都取喷管流道内最窄的地方为喉宽，对于渐缩型喷管为从出汽边点至相邻导叶背弧的最小距离，对于缩放型喷管则不然。图 1 为隔板喷管示意图。

收稿日期：2023-11-10

作者简介：欧楚雄 (1980一)，男，2005 年毕业于江苏大学热能与动力工程专业，大学本科学历，高级工程师。现任东方电气集团东方汽轮机有限公司产品研发中心产品设计员，主要从事汽轮机设计及研究工作。

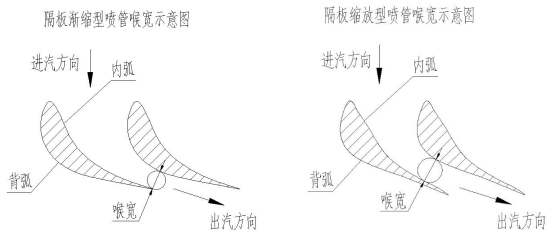


图 1 隔板喷管示意图

将静叶栅中从叶根到叶顶把每一个高度上的喉部画出来，得到的一个由喉宽组合而成的面，这个面的面积就是单个汽道的理论出汽面积，该面积等于从叶根到叶顶的喉宽的积分。图 2 为隔板汽道喉宽示意图。

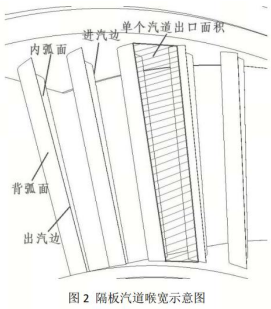


图 2 隔板汽道喉宽示意图

单个汽道的理论出汽面积 A 可以用一个公式来表示：

$$A=\int_0^h Li \qquad (1)$$

式（1）中 h 为叶高，Li 为各个叶高上的喉宽值隔板汽道理论出口总面积 S 为单个汽道的理论出口面积乘以叶片数，如下所示：

$$S=A*n \qquad (2)$$

式（2）中 A 为单个汽道的理论出汽面积，n 为叶片数以上就是隔板喉宽和出口总面积的理论定义，而隔板喉宽及出口总面积的理论公差，一般应该与叶片型线公差相吻合。当然，也可以根据实际需要调整隔板喉宽和出口总面积的公差要求。

2 汽轮机隔板喉宽和出口总面积的实际检查要求

实际隔板制造过程中，在焊接热处理后（或精加工后），都要检查隔板的汽道尺寸，主要检查各个汽道喉宽值及出口总面积是否合格。实际检查时不可能无限制的检查不同直径上的喉宽来积分得出出口总面积，那样不具备实际上的操作性。实际操作中一般选择 3 个检查直径来检查喉宽尺寸，然后通过计算得出出口总面积，其中的一个检查直径（检查直径 2）一般取为汽道中径，而另外两个检查直径一般相对于中径呈对称分布。图 3 为隔板检查直径示意图。

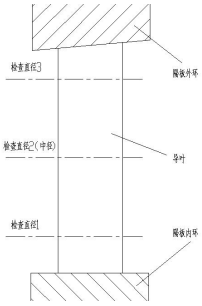


图 3 隔板检查直径示意图

理论上检查直径 1 上的喉宽值为 L_1，检查直径 2 上的喉宽值为 L_2，检查直径 3 上的喉宽值为 L_3，则单个汽道的出口面积检查理论值 A_1 可以用以下公式表示：

$$A_1=（L_1+L_2+L_3）*h/3 \qquad (3)$$

式（3）中 h 为叶高，L_1，L_2，L_3 分别为 3 个检查直径上的喉宽值

对应的整个隔板汽道出口总面积检查理论值 S_1 为单个汽道的出口面积检查值乘以叶片数，如下所示：

$$S_1=A_1*n \qquad (4)$$

式（4）中为叶片数，A_1 为单个汽道的出口面积检查理论值

若考虑汽道中径处检查值的特殊性，取两倍权重，其他两个检查直径处权重不变，则单个汽道的出口面积检查值公式及汽道出口总面积检查值公式（公式 3 和公式 4）变为：

$$A_2=（L_1+2*L_2+L_3）*h/4 \qquad (5)$$

式（5）中 h 为叶高，L_1，L_2，L_3 分别为 3 个检查直径上的喉宽值

$$S_2=A_2*n \qquad (6)$$

式（6）中 n 为叶片数，A_2 为单个汽道的出口面积检查值(中径处取两倍权重)

公式（3）~（6）均可应用于工程应用中。公式 5 中将位于中部位置的检查直径 2 处的喉宽值取 2 倍的权重，是因为该处位于导叶中部位置，受到来自焊接及加工的变形影响较小，更能反映整个汽道高度上的整体制造水平，因此在工程应用中应用

更为广泛。隔板实际制造过程中，可用 L_1，L_2，L_3 作为单个汽道各个检查直径上的喉宽理论要求，用公式 4 中的 S_1 或公式 6 中的 S_2 作为整副隔板的出后总面积理论要求。

3 汽轮机隔板汽道尺寸改进措施

实际隔板制造过程中，理论上最优的结果就是使实际汽道尺寸与理论汽道尺寸完全吻合，但实际制造过程中永远无法做到 100 %吻合，我们所能做的就是使实际汽道尺寸相对于理论汽道尺寸的偏离值尽可能的小，从而使实际隔板能够工作在设计工况点附近，实现设定的通流效率。要使制造出来的隔板汽道尺寸的偏离值尽可能的小，可以从设计角度和制造角度两方面来努力。

3.1 设计角度方面

目前主流的隔板有三种型式，即拂配式隔板（带大冠导叶），围带式隔板（带小冠导叶），直焊式隔板（直焊式导叶）。一般来说，拂配式隔板制造精度最高，围带式隔板次之，直焊式隔板最差。拂配式隔板制造精度最高的原因主要在于带大冠导叶整个叶身全部是根据理论叶身型线铣削成型，叶身本体精度最高。然后整圈导叶进行拂配操作后和隔板内外环焊接，由于主焊缝和导叶叶身之间隔着内外冠，因此主焊缝焊接变形对叶身部分影响甚微，故而能够实现很高的制造精度，一般用于高中压通流部分及低压前几级。围带式隔板和直焊式隔板对于导叶本身而言并无差别，导叶均是锻造成型（低压末级次末级可能是铸造成型或者焊接成型），铸锻件的尺寸偏差必然比铣削成型的大冠导叶尺寸偏差大，因而制造精度必然比不上拂配式隔板。围带式隔板在导叶和隔板内外环之间有一个过渡围带（厚约 10 mm 左右），在导叶顶部和底部加工出略大于叶身型线且形状相对较为规则的小冠，在内外围带上按小冠型线开孔，小冠导叶先插入内外围带后与内外围带焊接固定，然后内外围带与隔板内外环焊接。而直焊式隔板就是导叶直接与隔板内外环进行焊接。由于围带式隔板主焊缝与导叶型身之间相隔一个围带，因此主焊缝焊接变形对导叶叶身的影响比直焊式隔板要小，因而制造精度优于直焊式隔板。设计过程中可以综合考虑精度要求及制造成本，选择合适的隔板型式。

3.2 制造角度方面

制造方面的手段主要是控制焊接变形及优化工序等。如在隔板内外环零件状态增加工艺收缩余量来抵消实际焊接过程中存在的焊接收缩。采用整圈焊接的方式来抵抗隔板中分面处的张口变形。在隔板内环内圆处增加 T 型工艺拉筋来防止焊接张口。采用激光焊接或者真空电子束焊接等无焊材的焊接方式来代替普通焊材焊接。通过前期制造经验预设反变形手段（如喉宽尺寸热处理后会变小则在焊接时先放大）等。

经验表明，使用设计角度方面和制造角度方面的多重手段，能够使制造出来的隔板的汽道尺寸达到预期的精度目标。

4 汽轮机隔板喉宽的具体测量方法

实际隔板制造过程中，需要按照检查直径逐个汽道测量喉宽值，对于渐缩型喷管来说，理论喉宽就是检查直径上出汽边点至相邻叶片背弧的距离，此处很容易测得。对于缩放型喷管来说则不然，喉宽值不再位于出汽边点处，而是往汽道里面走的汽道最狭窄处某点，此处实际操作中不容易测得（实际制造变形可能使缩放喷管变形成了渐缩喷管，在实物上无法找到理论点来测量）。

由于制造过程中的喉宽检查值仅仅是为了检查隔板的制造精度（与理论隔板的偏差），该检查值是否等同于理论上的喉宽值并不重要，它仅仅作为一个理论上的标准值使用，并且要求实际测量时能够方便准确的执行测量操作而不会有人为的测量误差。因此，无论隔板汽道是渐缩型喷管还是缩放型喷管，在实际执行中我们都可以定义检查直径上出汽边点至相邻叶片背弧线的最短距离作为该检查直径上的喉宽检查值，并通过这个检查值来考核制造隔板的出口总面积。此时的隔板出口总面积同喉宽值一样，也不等同于理论上的隔板出口总面积，而仅仅作为一个理论上的检查标准值使用。

实际隔板检查时可将隔板出汽边朝上平放，在各个导叶上画出检查直径线，然后测量图 4 中检查直径上出汽边点 A 点至相邻导叶检查直径上背弧

线 B 线的最小距离，则得到实际的喉宽值。图 4 为隔板喉宽检查示意图。

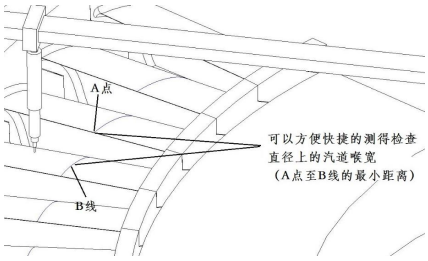


图 4 隔板喉宽检查示意图

5 汽轮机隔板汽道尺寸的具体验收操作

实际隔板制造过程中，一般按以下验收要求执行：

5.1 验收方式 1

检查各个检查直径上各个汽道的喉宽值，若每个检查直径上的喉宽值均满足设计要求，则隔板出口总面积一般也满足设计要求（原则上隔板出口总面积公差带应该与喉宽值的公差带一致），隔板汽道尺寸满足设计要求，产品合格。

5.2 验收方式 2

若部分汽道喉宽值不满足设计要求（一般来说所有汽道喉宽值全部满足设计要求的情况几乎不可能出现），可以对单个汽道喉宽值另给一个极限值要求（该极限值大于图纸上的喉宽值公差，可根据隔板形式及实际制造水平综合给定，也可以区别中分面汽道和普通汽道分别给出不同的极限值）。在喉宽值满足极限值要求同时隔板出口总面积满足设计要求的情况下可视为合格。

5.3 验收方式 3

由于隔板汽道众多，单独的喉宽极限值要求往往无法反映整副隔板的汽道尺寸状态，在前面验收方式 2 的基础上，可以进一步引入喉宽实测值的标准偏差值来考核，也可以同时考核超出图纸喉宽公差但小于极限值的汽道数的比例，以控制整副隔板汽道尺寸的均匀性。

实际制造过程中，可以根据设计要求及实际制造水平，选取前面的三种验收方式中的一种或者组合进行隔板验收。

6 结语

汽轮机隔板出口总面积的理论值和实际检查要求值是两个不同的概念。由于实际检查时只能选取有限检查直径截面进行检查，此时给出的检查要求值仅仅是作为制造检查过程中的基准值，用于制造过程中检查隔板出口总面积的实际偏差。

为了使制造出来的隔板满足设计的既定精度要求，可以分别从设计角度和制造角度两方面努力来改进隔板汽道尺寸。

定义喉宽检查值为检查直径上的出汽边点至相邻导叶背弧线上的最小距离，并在检查时在各个导叶上画出检查直径线，通过测量检查直径上出汽边点至相邻导叶背弧线的最小距离得到实测的喉宽值。这种方法能保证实测喉宽值的位置与给出的喉宽检查值的位置保持一致，排除人为因素对隔板喉宽测量值的影响，能够更有效的检查出隔板的实际制造精度。

汽轮机隔板实际制造过程中，可以根据设计要求及实际制造水平综合选取合适的隔板汽道尺寸验收准则。

参考文献：

[1] 孙奇, 李军, 孔祥林, 等. 后加载和高负荷前加载叶型气动性能的试验研究[J]. 西安交通大学学报,2007, 41(1):23-27

[2] 文圆圆, 韦龙飞, 米斌, 等. 四排汽及以上汽轮机提高调峰深度的方案研究[J]. 东方汽轮机,2022, (3):14-18+ 28

[3] 马骏, 赵海峰, 孙伟, 等. 汽轮机隔板强度计算方法的比较[J]. 东方电气评论,2015,29(2)：29-32

[4] 邱健, 段增辉. 核电 35MW 小汽轮机整体发货结构方案研究[J]. 东方汽轮机,2018, (2):32-35

[5] 黄勇. 自带冠静叶隔板焊接变形的模型试验研究[J].东方电气评论,2004,(4)：185-189

[6] 欧楚雄, 卢平. 汽轮机盘车装置电动机的功率选择[J]. 东方汽轮机,2018, (2):29-31+35

[7] 章艳, 刘东旗, 赵仕志, 等. 筒形汽缸隔板结构对其变形特性的影响研究[J].东方电气评论,2021,35(3):66-69

[8] 张晓东, 方宇, 唐清舟, 等. 660MW 超超临界二次再热汽轮机结构特点[J]. 东方汽轮机,2015, (2):1-6

[9] 陈显辉, 谭锐, 张志勇, 等. 东方超超临界二次再热 660MW 汽轮机热力设计特点[J]. 东方汽轮机,2014, (4):1-5

[10] 段增辉, 高宏喜, 陶功新, 等. AP1000 核电汽轮机设计特点分析[J].东方汽轮机,2020, (1):14-18

海外火电厂老旧锅炉机组 SCR 脱硝改造技术方案研究

李国柱[1] 李小勤[1] 李灵均[1,2]

1.东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001；2.清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室，成都 611731

摘要：海外经济欠发达地区（如：中东欧、非洲和亚洲等）随着经济的不断发展，越来越多的国家和地区都在逐步严格环保政策，提高了对火电厂大气污染物的排放要求，有大量老旧锅炉机组有待改造增配环保装置，市场潜力巨大。以东方锅炉首个为海外燃煤火电锅炉机组加装烟气 SCR 脱硝装置的改造设计为例，介绍了此类改造工程的主要特点和难点，为后续类似环保改造工程提供借鉴和参考。

关键词：海外火电厂；老旧锅炉机组；脱硝改造

中图分类号：X773 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-9006（2024）04-0056-08

Research on SCR Denitration Transformation Technology Scheme for Old Boiler Units in Overseas Thermal Power Plants

LI Guozhu[1]，*LI Xiaoqin*[1]，*LI Lingjun*[1,2]

(1. Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China; 2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, 611731, Chengdu, China)

Abstract: With the continuous development of the economy in underdeveloped regions overseas (such as Central and Eastern Europe, Africa, and Asia), more and more countries and regions are gradually tightening environmental protection policies and increasing the emission requirements for air pollutants from thermal power plants. There are a large number of old boiler units that need to be renovated and equipped with environmental protection devices, and the market potential is enormous. This article takes the renovation design of Dongfang Boiler's first overseas coal-fired thermal power boiler unit to install a flue gas SCR denitrification device as an example to introduce the main characteristics and difficulties of such renovation projects, providing reference and reference for similar environmental protection renovation projects in the future.

Key words: overseas thermal power plants; old boiler units; denitration transformation

黑山共和国当地时间 2020 年 6 月 9 日，中国东方电气集团有限公司与其国家电力公司（EPCG）签订了《黑山普利电厂改建项目 EPC 总承包合同》，工程范围包括：选择性催化还原烟气脱硝系统（SCR）、石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统（FGD）、蒸汽-烟气换热器（SGH）系统、机组水冷式冷却塔和除灰渣系统等七大系统的改建/新增，其中加装 SCR 烟气脱硝装置及相关锅炉改造由东方锅炉股份有限公司负责设计、供货。本项目是东方锅炉首个为海外燃煤火电锅炉机组加装烟气 SCR 脱硝装置的改造工程，为拓展东欧地区燃煤机组改造市场和进一步做大做强海外现代服务产业奠定了良好的基础。

收稿日期：2023-12-28

作者简介：李国柱 (1980—)，男，2004 年毕业于武汉化工学院过程装备与控制工程专业，本科，中级工程师。现任东方电气集团东方锅炉股份有限公司 环保新能源工程公司研发设计员，主要从事大气污染物治理技术研发设计工作。

1 项目概况

黑山共和国普利电厂位于该国北部的普列夫利亚市，在役有 1 台燃煤热电机组（TPP “Pljevlja” Block 1），标称功率容量为 225 MW，属于坑口电厂，于 1976 年建成并投入运行，截止目前为止已经运行了约 47 年，整体维护情况良好，常年满负荷运行。该机组的燃煤锅炉是前苏联时期的产品，采用六角切圆型燃烧方式、Π型布置、全悬吊结构和风扇磨机，型号为：E670-140-I，蒸汽参数为高温高压、一次再热，锅炉炉膛出口及水平烟道依次布置屏过、高再、高过，转向室及尾部烟道依次布置低再、上级省煤器、下级省煤器和管式空气预热器，燃料主要为当地煤场出产的低热值褐煤，该煤矿和电厂均归黑山国家电力公司（EPCG）所有，锅炉制粉系统干燥剂采用三种介质：热一次风、热炉烟和冷炉烟，锅炉启动时采用重油点火。整个锅炉及区域相关设备均布置于全封闭、钢结构紧身封闭内。

锅炉主要入炉燃料的元素分析数据见表 1。现有锅炉主要设计和实际运行数据见表 2。本期项目的改造范围在现有锅炉中的位置见图 1 和图 2。

表 1 入炉煤质元素分析数据

		单位	煤质特性数据		
			最小	设计	最大
工业分析	收到基全水分 Mar	%	27.00	35.00	35.00
	收到基灰分 Aar	%	25.00	25.00	25.00
	收到基挥发分	%	18.87	27.00	30.00
	收到基低位发热量 Qnet.ar	MJ/kg	9.151	9.300	9.406
元素分析	收到基碳 Car	%	26.50	26.90	27.30
	收到基氢 Har	%	2.10	2.10	2.10
	收到基氮 Nar	%	1.00	1.00	1.00
	收到基氧 Oar	%	10.60	10.60	10.60
	收到基硫 Sar	%	0.80	0.95	1.10
	可磨系数 HGI	—	38.00	59.85	70.00
灰熔点	初始变形温度 DT	℃	930	936	1 250
	半球温度 HT	℃	1 230	1 394	1 510
	流动温度 FT	℃	1 270	1 426	1 530
灰成分分析	二氧化硅 SiO_2	%	11.80	36.00	45.00
	三氧化二铝 Al_2O_3	%	8.07	19.70	28.50
	三氧化二铁 Fe_2O_3	%	3.97	8.43	9.00
	二氧化钛 TiO_2	%	0.17	0.32	0.83
	氧化钙 CaO	%	7.62	21.75	30.00
	氧化镁 MgO	%	0.70	1.56	1.80
	氧化钠 Na_2O	%	0.30	0.38	0.46
	氧化钾 K_2O	%	0.79	0.95	1.74
	三氧化硫 SO_3	%	2.06	8.83	22.71
	五氧化二磷 P_2O_5	%	0.06	0.14	0.28

表 2 锅炉主要设计和实际运行数据

项 目 名 称	单 位	性能设计数据	实际运行数据
主蒸汽压力	MPa.a	13.5	
主蒸汽温度	℃	547	
主蒸汽流量	t/h	682	
冷再入口蒸汽压力	MPa.a	2.60	
冷再入口蒸汽温度	℃	325	
热再出口蒸汽压力	MPa.a	2.30	
热再出口蒸汽温度	℃	545	
再热蒸汽流量	t/h	634.5	
给水温度	℃	247	
上级省煤器入口烟温	℃	594	580～610
上级省煤器出口烟温	℃	440	420～450
上级空预器出口烟温	℃	381	381
下级省煤器出口烟温	℃	295	280～340
下级空预器出口烟温	℃	165	150
下级空预器入口风温	℃	55～70	55～70
热一次风温	℃	277	265～270
热二次风温	℃	380	400～430

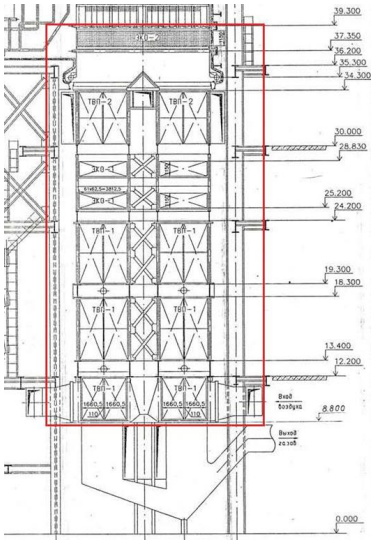


图 1　改造范围（立面图）

电厂于 2000 年对锅炉燃烧系统进行了全面的改造，于 2006 年对静电除尘器（ESP）进行了改造，于 2007 年对锅炉省煤器和管式空气预热器进行了更换，但一直未配置除了除尘装置以外的烟气净化装置。为了满足更严格的烟气污染物排放限值，电厂计划为该台机组增设烟气脱硝、脱硫装置。改造前锅炉排放烟气中污染物为：NO_x 浓度≤620 mg/Nm^3（标态、干基、6%含 O_2，以 NO_2 计）、SO_2 浓度≤6 000 mg/Nm^3（标态、干基、6%含 O_2）。

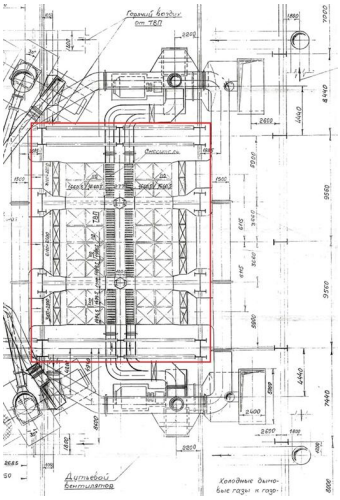


图 2　改造范围（俯视图）

2　改造目标

欧盟区域从 2016 年 1 月 1 日起全面执行 2010/75/EU 指令对火电厂排放烟气中大气污染物浓度的限值[1]，依据机组容量、燃料类型和燃烧技术等的不同[1]，排放烟气中 NO_x 浓度的限值为 150～450 mg/Nm^3（标态、干基、6%含 O_2，以 NO_2 计）。欧盟对使用固体燃料的燃烧装置 NO_x 排放限值见表 3。[2-3]

表 3 欧盟对使用固体燃料的燃烧装置 NO_x 排放限值

额定功率容量（MW）	排放烟气中 NO_x 浓度限值（mg/Nm^3）					
	现有燃烧装置			新建燃烧装置		
	煤、褐煤和其他固体燃料	生物质	泥煤	煤、褐煤和其他固体燃料	生物质	泥煤
50～100	300　450（煤粉锅炉）	300	300	300、400（煤粉锅炉）	250	250
100～300	200	250	250	200	200	200
＞300	200	200	200	150、200（煤粉锅炉）	150	150

在完成加装 SCR 烟气脱硝装置的改造后，本项目最终排放烟气中 NO_x 浓度满足上述欧盟区域的限值要求，排放烟气中 NO_x 浓度≤150 mg/Nm^3（标态、干基、6%含 O_2，以 NO_2 计）。

3 烟气脱硝改造方案

3.1 脱硝工艺方案选择

本项目采用 SCR 烟气脱硝工艺，脱硝还原剂（气氨 NH_3）采用尿素水解工艺制备。早期 SCR 烟气脱硝工艺方案由德国 STEAG 公司提出，采用低温、低尘布置方案，工艺流程见图 3，即：SCR 脱硝装置布置于 FGD 脱硫装置之后，由 ESP 除尘器出来的原烟气通过引风机进入 FGD 脱硫吸收塔中脱硫（SO_x）后，烟气温度降低至 50～60 ℃，然后进入烟气-烟气换热器（GGH）中被初步加热至~240 ℃，接着进入蒸汽-烟气换热器（SGH）继续将其加热至满足 SCR 脱硝装置正常运行所需温度（≥310 ℃），然后进入 SCR 脱硝装置中脱除烟气中的氮氧化物，接着再进入烟气-烟气换热器（GGH）中被冷却降温至~130 ℃后经烟囱排入环境大气。其中，蒸汽-烟气换热器（SGH）所需过热蒸汽抽取自锅炉机组主蒸汽，加热蒸汽耗量占锅炉主蒸汽总量约 10 %。

由于该 SCR 烟气脱硝工艺需要抽取大量的锅炉主蒸汽，锅炉机组将因此减少~22 MW 的发电量，运行成本太高，且蒸汽换热后产生的蒸汽冷凝水量很大，无法通过现有的机组系统进行回收和利用。为此，将 SCR 烟气脱硝工艺更改为高温、高尘布置方案，工艺流程见图 4，即：SCR 脱硝装置布置于锅炉尾部区域，从锅炉省煤器出来的原烟气进入 SCR 脱硝装置中脱除了氮氧化物（NO_x）后，依次流经空气预热器、ESP 除尘器和引风机，然后进入 FGD 脱硫装置中脱除烟气中的硫氧化物（SO_x），最后在 SGH 蒸汽加热器中将净烟气加热至~130 ℃后经烟囱排入环境大气。其中，SGH 蒸汽加热器布置在 FGD 脱硫吸收塔出口至烟囱之间的烟道中，采用过热蒸汽将 FGD 脱硫装置出口低温烟气加热至其露点温度以上，避免烟气中的冷凝液对电厂现有烟囱造成腐蚀，所需过热蒸汽抽取自锅炉高温再热器出口蒸汽。

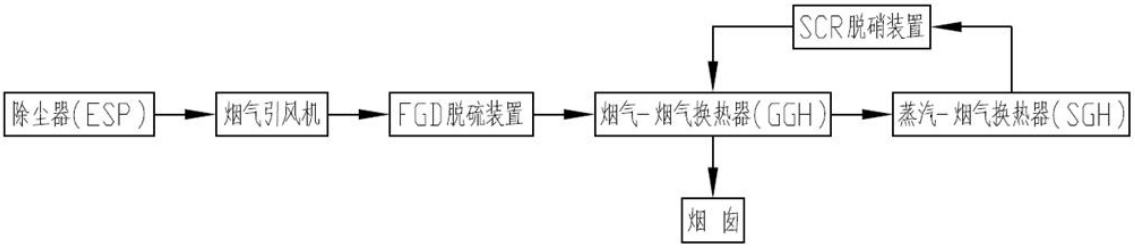


图 3 工艺方案一

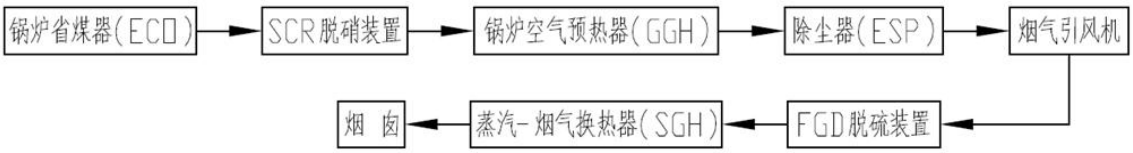


图 4 工艺方案二

3.2 脱硝布置方案确定

SCR 烟气脱硝反应最佳的温度区间为 310～420 ℃，由表 2 中数据可知：上级空气预热器出口与下级省煤器入口之间处烟气温度满足 SCR 烟气脱硝反应要求。初步考虑在锅炉炉后或炉侧独立建设钢结构支架布置 SCR 反应器，锅炉原烟气从上级空气预热器出口引出，在 SCR 反应器中脱除 NO_x 后再将净烟气引入下级省煤器入口；由于上级空气预热器出口与下级省煤器入口之间的空间太小，无法满足引出原烟气和引入净烟气的烟道布置需要，故根据现场实际情况，提出了以下四种 SCR 脱硝装置布置方案。

方案一：将现有锅炉下级省煤器拆除，移至 SCR 反应器正下方，在拆除后空出位置布置引出

SCR 脱硝入口烟道和引入 SCR 脱硝出口烟道，锅炉原烟气由上级空气预热器出口引出，在 SCR 反应器中完成脱硝反应，然后流经下级省煤器并通过 SCR 脱硝出口烟道引入炉内下级空气预热器入口。每台锅炉机组设置一台 SCR 反应器，布置于炉后电除尘器正上方，SCR 脱硝入口烟道从炉后侧拉出锅炉钢构架，SCR 脱硝出口烟道再从炉后侧返回锅炉后竖井。

方案一的优点：①只对现有锅炉下级省煤器进行移位改造，改造范围小。②充分利用现有炉后平台布置相关脱硝设备。③仅 SCR 入口、出口烟道与现有锅炉接口处和局部锅炉钢构架需要改造，锅炉改造工作量小。④在炉后单独设 SCR 钢支架和平台布置工艺设备，对周边现有设备、设施等影响小。

方案一存在的问题和风险：①SCR 入口、出口烟道只能在两层现有锅炉构架主层之间和下级省煤器移位后的空间内布置，受空间所限烟道流通截面不足、烟气流速过高（接近~30 m/s），局部烟气阻力大、烟道磨损严重。②为了布置下级省煤器和 SCR 出口烟道，SCR 反应器布置于炉后紧身封闭外远高于电除尘器顶部位置处，SCR 入口、出口烟道长，烟道转弯和变截面多，烟气流场均匀性差、阻力大。③SCR 反应器及相关设备布置位置高（顶部超过+58.00 m，基本与锅炉房等高），受下方除尘器及其周边设备、土建基础所限，SCR 支撑钢结构跨度非常大且高度很高，钢结构重量会很重，建设成本高。④SCR 支撑钢结构柱脚土建基础被现有地下设施隔断，难以通过地梁连接成整体，各柱脚不均匀沉降和水平力传递难以解决，土建基础建设、施工成本高。⑤锅炉房Г/Ж 排柱密且横截面尺寸大，SCR 脱硝烟道引出和引入难以实施。⑥需要额外增加 SCR 区域紧身封闭。

方案二：锅炉下级省煤器改造方案与方案一一致，SCR 入口、出口烟道更改为由锅炉两侧引接，即：从锅炉上级空气预热器出口左、右侧各引出一路 SCR 入口烟道，在钢构架副跨内转向炉后穿出锅炉房后合并为一路烟气进入 SCR 反应器，SCR 出口烟道先在锅炉房外分成左、右两路，由钢构架副跨进入锅炉房内分别从两侧送回后竖井中下级空气预热器入口。SCR 反应器布置方案同方案一，仅将其入口、出口烟道更改为由锅炉两侧引接。

方案二的优点：与方案一基本一致，且解决了方案一存在的问题①⑤，在有限的高度空间内将一路烟道更改为两路，加大了烟道流通截面，降低了烟气流速、局部烟气阻力并解决了烟道磨损问题；同时，由于更改后单侧脱硝烟道截面宽度减小而副跨内钢构架立柱间净空更大，可以解决脱硝烟道引出和引入难题。

方案二存在的问题和风险：存在与方案一相同的问题②③④⑥，但入口、出口烟道更长，还增加了烟道汇合段、分岔段和转弯、变截面段，烟气流场均匀性更差，烟道成本也更高；钢构架副跨内现有锅炉冷/热风道、吊物孔及其它装置、管道，使脱硝烟道引出和引入仍存在不小困难。

方案三：将现有锅炉下级省煤器拆除，更改为两套下级省煤器并联布置于两台 SCR 反应器正下方，在拆除后空出位置向锅炉房左、右侧各引出一路 SCR 入口、出口烟道，即：从上级空气预热器出来的锅炉原烟气分成两路分别进入两台 SCR 反应器，各自在 SCR 反应器中完成脱硝反应后，再汇合成一路烟气进入现有后竖井内下级空气预热器。两台 SCR 反应器分别在锅炉房左、右侧布置，其入口、出口烟道各自穿过钢构架副跨与锅炉上级空气预热器出口和下级空气预热器入口连接。

方案三的优点：与方案一基本一致，并兼具了方案二的优点，使 SCR 入口、出口烟道长度大为缩短，烟道转弯和变截面少，且 SCR 反应器及相关设备布置高度相较方案一、二可降低约 8.0 m，其支撑钢结构跨度大为缩短，解决了方案一存在的问题①～⑤中大部分。

方案三存在的问题和风险：①因现有锅炉结构及其土建基础等建设年代久远，竣工图和荷载分布等设计资料缺失，其结构和土建基础材料的力学性能衰减情况难以评估，加上锅炉房内现有空间不足，两台 SCR 反应器只能在紧身封闭外布置，需单独设钢支架支撑。②在避开现有锅炉钢结构土建基础的前提下，新增 SCR 钢支架靠近锅炉房布置，避免传递水平力给现有锅炉结构及其土建基础。③方案一存在的问题①～⑤仅能部分解决，SCR 反应器和下级省煤器由一台更改为两台，其综合成本和施

工工作量有所增加。

方案四：拆除现有低温再热器，并对下游管式空气预热器和省煤器进行改造，充分利用节省出来的高度空间布置 SCR 反应器。在锅炉后竖井内仅设置一台 SCR 反应器，氨注射格栅（AIG）布置于 SCR 反应器入口处，SCR 区相关工艺设备就近布置于两层现有锅炉平台上。

方案四的优点：基本解决了前述三个方案的所有问题，总体布置方案更为简洁、紧凑，且改造区域主要集中在炉内，对现有炉外管道、锅炉钢构架的影响小，建设成本和施工工作量大为减少。

方案四存在的问题和风险：①更换管式空气预热器和省煤器需要对锅炉性能重新进行核算，在设计条件不充分和原始设计资料缺失的情况下，承包商须具有丰富的锅炉设计和改造经验，并需对锅炉机组的现有条件、入炉燃煤数据、实际运行情况等进行仔细摸底，合理确定相关设计参数。②需要仔细核算加装脱硝催化剂、SCR 反应器等相关脱硝设备和更换管式空气预热器、省煤器而增加的荷载，与拆除的低温再热器、省煤器、管式空气预热器和烟道等荷载作对比，核实现有锅炉结构及其土建基础能否承受新增加的荷载，将可能的风险控制在允许的范围内。③DCS 系统中历史运行数据显示锅炉原始排放烟气中 NO_x 浓度长期在 550 mg/Nm^3（标态、干基、6 %含 O_2，以 NO_2 计）左右，且存在 CEMS 监测数据不准的风险，在后竖井挤出的有限高度空间内仅能够布置两层脱硝催化剂的情况下，确保 SCR 脱硝装置的各项性能满足合同中的性能保证指标要求，要求承包商具有雄厚的技术实力和丰富的改造经验。④由于现有锅炉机组已投运多年，且经过了多次改造，能够收集到的原始设计资料不全且与现场实际情况多有不符，需要设计人员赴现场充分地勘踏和实测，根据锅炉后竖井周边现有设备、设施等的布置情况和剩余空间等实际条件进一步优化设计方案，确保改造方案能够顺利实施并便于施工。⑤因现有锅炉结构及其土建基础等是由前苏联设计、建造的且建成年代已久远，其竣工图和荷载分布等设计资料缺失，且结构材料的力学性能衰减情况难以评估，需要经验丰富的专业结构设计人员经过综合评估后对其进行必要的局部改造和加固，严格控制结构安全风险。

尽管方案四的改造难度最大，但其综合成本和施工难度相比前三种方案有明显优势，经过相关各方充分交流、讨论，对可能存在的困难和风险有了充分的预案和防控措施，最终确定采用方案四付诸实施，并明确 SCR 脱硝改造的边界条件有：

（1）SCR 反应器内设置 2 层催化剂，不设置预留层；

（2）SCR 脱硝装置按照入口氮氧化物（NO_x）浓度≤660 mg/Nm^3（标态、干基、6 %含 O_2，以 NO_2 计）进行设计；

（3）脱硝催化剂的化学寿命保证 2 年（16 000 小时）。

3.3 锅炉局部改造方案

现有锅炉炉膛、水平烟道、后竖井包墙下集箱及其以上管屏和管式空气预热器出口尾部烟道均不做改动，本期改造工程拆除包墙下集箱以上后竖井内部低位再热器（部分）、省煤器蛇形管及其入口/出口集箱和包墙下集箱以下与尾部烟道入口之间的管式空气预热器、烟道、部分风道，在现有包墙下集箱与新更换管式空气预热器入口之间空出约 12.28 m 高度空间布置 SCR 反应器及其入口、出口连接烟道和非金属膨胀节等相关工艺设备。改造后的锅炉主要设计数据见表 4。

3.4 SCR 脱硝工艺方案

SCR 脱硝装置所需还原剂采用尿素水解工艺制备，原料为尿素颗粒，采用罐车将尿素颗粒运送至本项目新建尿素站。稀释尿素水解产品气所需稀释空气采用离心式鼓风机供应，锅炉机组设置 2 台稀释空气风机，采用“一台运行+一台备用”的运行方式。稀释空气风机直接抽取其环境中的大气，经空气加热器加热至≥160 ℃后进入氨-空气混合器，由尿素水解制备气氨系统输送至 SCR 区的产品气在氨-空气混合器中被稀释至安全浓度（混合气体中气氨的体积浓度为～5.0 %vol.）后经由氨注射栅格（AIG）喷入 SCR 反应器入口，在空气加热器中采用过热蒸汽加热稀释空气。由新更换省煤器出来的锅炉原烟气在 SCR 反应器入口与喷入的脱硝还原剂充分混合均匀，然后在脱硝催化剂区域完成脱除 NO_x 的氧化还原反应后进入下游空气预热器。

表 4　改造后锅炉主要设计数据

项　目　名　称	单 位	性能设计数据	备　注
1、新更换锅炉省煤器			
省煤器管束型式	——	H 型鳍片管	
省煤器入口烟温	℃	594	
省煤器出口（SCR 反应器入口）烟温	℃	375	
省煤器入口给水温度	℃	247	
省煤器出口工质温度	℃	341	
烟气流经省煤器阻力	Pa	150	
管内工作介质阻力	MPa	0.06	
2、新更换锅炉空气预热器（三级）			
空气预热器管束型式	——	光管、立式	
上级空气预热器入口（SCR 反应器出口）烟温	℃	373	
上级空气预热器出口烟温	℃	340	
上级空气预热器入口风温	℃	299	
上级空气预热器出口风温	℃	352	
上级空气预热器烟气侧阻力	Pa	299.4	
上级空气预热器风侧阻力	Pa	844.9	
中级空气预热器入口烟温	℃	340	
中级空气预热器出口烟温	℃	271	
中级空气预热器入口风温	℃	188	
中级空气预热器出口风温	℃	299	
中级空气预热器烟气侧阻力	Pa	251.2	
中级空气预热器风侧阻力	Pa	745.2	
下级空气预热器入口烟温	℃	271	
下级空气预热器出口烟温	℃	176	
下级空气预热器入口风温	℃	30	
下级空气预热器出口风温	℃	188	
下级空气预热器烟气侧阻力	Pa	299.4	
下级空气预热器风侧阻力	Pa	909.9	
3、新增低温省煤器			
低温省煤器管束型式	——	H 型鳍片管	
低温省煤器入口烟温	℃	176	
低温省煤器出口烟温	℃	150	
低温省煤器入口工质温度	℃	97	
低温省煤器出口工质温度	℃	148	
烟气流经低温省煤器阻力	Pa	300	
管内工作介质阻力	MPa	0.01	

3.5 SCR 脱硝总体布置

炉内布置的 SCR 反应器整体支撑在锅炉钢构架 EL+24.20 m 层梁上，其入口与现有锅炉后竖井包墙下集箱连接，出口与新更换锅炉管式空气预热器入口连接。在 SCR 反应器内布置 2 层脱硝催化剂，在每层催化剂层上设置 2 个检修人孔门、1 个催化剂装载门和 4 台耙式半伸缩式蒸汽脱硝吹灰器、8 台膜片式声波脱硝吹灰器，蒸汽脱硝吹灰器采用过热蒸汽作为吹扫清灰介质，所需过热蒸汽取自现有锅炉蒸汽吹灰系统，声波脱硝吹灰器采用压缩空气作

为吹扫清灰介质，所需压缩空气取自锅炉煤仓间现有仪用压缩空气管路。利用 EL+24.20 m 和 EL+30.00 m 两层现有锅炉平台作为脱硝催化剂装载平台和设备日常维护、检修平台，对现有 EL+24.20 m 层平台进行局部加宽，增加催化剂模块转运通道，并为蒸汽脱硝吹灰器增加操作、检修平台；稀释空气供应和加热系统、尿素水解产品气流量控制模块、仪用压缩空气系统等的设备、管道、阀门、仪表布置在现有 EL+30.00 m 层主平台上，仅需要对局部平台梁进行加固处理。SCR 区设备布置图见图 5 和图 6。

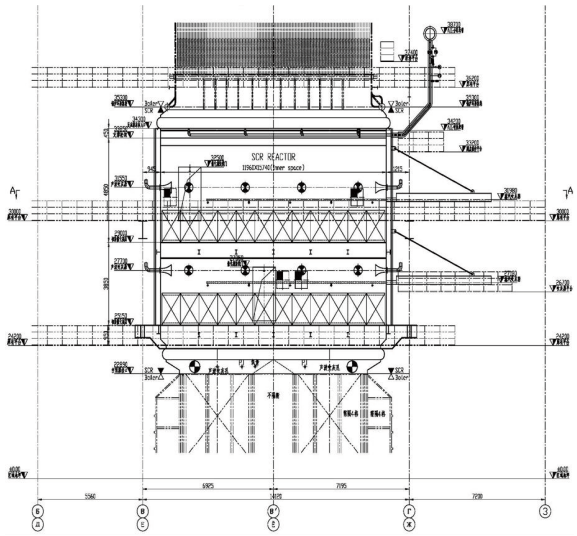


图 5 SCR 区设备布置立面图

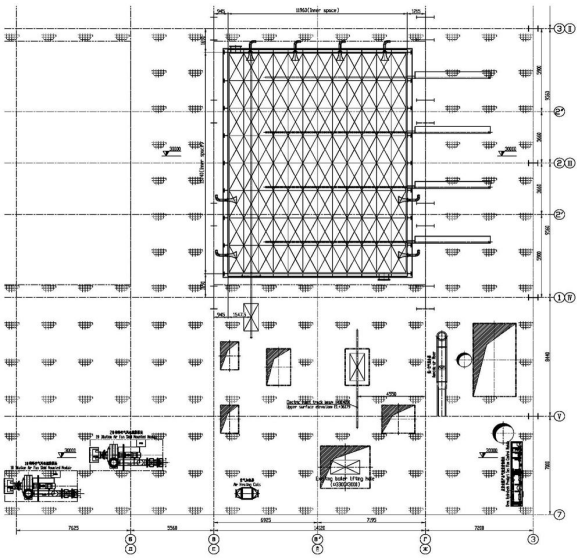


图 6 SCR 区设备布置平面图

氨注射栅格（AIG）采用“耙管+小喷孔”型式，布置于 SCR 反应器本体入口处，将此处横截面内空均匀分为 6×4=24 个区域，每个区域的喷氨耙管对应与 1 根喷氨支管连接，通过调节喷氨支管上可调阀门的开度来精确控制 SCR 反应器横截面上各个区域的脱硝还原剂喷入量，使其与喷氨耙管所覆盖区域内原烟气中的 NO_x 量相匹配。为了保证在进入最上层脱硝催化剂之前由 AIG 喷入的脱硝还原剂与原烟气能够充分混合均匀，将最上层脱硝催化剂相对于 EL+30.00 m 层平台下沉 1.0 m 布置，确保二者之间有足够长的混合直段。新增加 EL+33.20 m 层平台，用于氨注射栅格（AIG）喷氨支管上阀门、仪表和 SCR 反应器入口处调试测点、在线监测仪表的操作和日常维护、检修。

4 结语

本改造项目通过收集原始设计资料、现场踏勘与实测和对 SCR 烟气脱硝改造方案的反复论证与对比分析，最终确定采用最优的“锅炉改造+高温、高尘 SCR 脱硝装置”方案，并顺利落地实施，积累了成功经验，为后续海外火电机组脱硝改造项目提供了借鉴意义。

国外火电老旧锅炉机组脱硝改造市场广阔，存在设计标准不同、技术流派多样、建成投运时间久远、设计资料缺失等问题和困难，在对这些老旧锅炉机组进行改造和加装 SCR 脱硝装置时，SCR 脱硝方案需结合场地空间、基础条件、锅炉结构及其实际运行情况等综合考虑后确定，尽量减少对现有锅炉系统和性能的不利影响，并尽量减少改造范围和施工工作量，以节省投资成本和缩短建设周期。这就要求承包商须对整个锅炉系统和各种 SCR 脱硝技术方案均比较熟悉，并具有丰富的改造工程经验，才能对此类运行多年的老旧锅炉机组进行全面的诊断，并提供可行性最好、最经济和最为优化的综合性改造方案，故建议由经验丰富的专业锅炉厂承担。

参考文献：

[1] 邓伟妮. 中欧火电厂烟气排放规定对比研究[J]. 中国电力，2015, 48(3):156-160

[2] 赵伟, 孙雪丽, 胡正新, 等. 欧盟火电厂大气污染排放标准分析[J]. 电力学报, 2019, 34(4):399-404

[3] DIRECTIVE 2010/75/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) [S]

关于一种汽轮机轴端汽封体密封结构的研究

董慧 文谋 段增辉 李继朝 欧楚雄 王涛

东方电气集团东方汽轮机有限公司 德阳 618000

摘要：本文对一种汽轮机轴端汽封体密封结构进行了研究，其特征在于：T型悬浮齿属于接触密封齿，受力时可自由退让，在一定程度上实现了零间隙密封，阻挡了汽封漏汽，增强了整体密封性能。针对该密封结构建模并进行有限元分析，结果表明该结构有效地减少了漏汽量使得汽轮机轴端整体密封效果显著提升。

关键词：汽轮机；密封；悬浮齿

中图分类号：TM263.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0064-3

Study on the Sealing Structure of Steam Turbine Shaft End Gland Body

DONG Hui , WEN Mou，DUAN Zenghui，LI Jichao, OU Chuxiong, WANG Tao

(Dongfang Turbine Co., Ltd., 618000, Deyang, Sichuan,China)

Abstract: In this paper, a sealing structure of steam turbine shaft end gland body was studied. Its characteristics are as follows: the T-type suspension teeth belong to the contact sealing teeth, which can be freely backed off when stressed. To a certain extent, the zero clearance seal is realized, which prevents the steam leakage of the steam seal and enhances the overall sealing performance. The sealing structure is modeled and finite element analysis is carried out. The results show that the structure can effectively reduce the leakage of steam and improve the overall sealing effect of turbine shaft end significantly.

Key words: turbine; seal; suspension teeth

目前，为适应市场发展需求，不断提高汽轮机效率成为了一项重要的竞争指标。据多项研究论文统计，汽轮机蒸汽泄漏使得机组内效率降低，漏汽损失占级总损失的 29 %。[1-5]尤其，有深度调峰能力的汽轮机组在部分运行参数偏离设计值过高、运行工况频繁变化情况下会引起静子部件、转子变形从而导致汽封齿异常磨损的问题出现[6]，一般处理方式就是加大通流间隙防止动静碰磨，这个时候漏气损失就会更为突出，那么研究一种能够自适应很多工况，减少汽轮机漏汽损失的密封结构就显得尤为重要了。

汽轮机转子在穿出汽缸处，存在动、静之间有间隙的现象，因为内外有压差就会导致蒸汽外泄甚至窜入轴承箱使润滑油中进水或者外部空气漏入破坏真空，这就会产生漏汽损失影响机组的效率。[7]为了更好的解决泄露现象，在汽轮机的轴端均会设置密封装置，传统的轴端汽封体密封型式主要有迷宫式汽封、蜂窝式汽封以及刷式柔齿汽封等。[8]

现有的传统密封装置由于结构、材质等原因泄漏量大、易磨损转子表面。

1 轴端汽封体密封结构及密封原理

1.1 轴端汽封体密封结构介绍

一种汽轮机轴端汽封体密封结构（图 1），包括汽封块、固定架、固定杆、圆柱压缩性弹簧、滑动载体、T 型悬浮齿、弹簧片；汽封块上开有环形汽封槽，环形汽封槽包括出口段和容纳段，出口段的宽度小于容纳段的宽度。滑动载体设置于环形汽

收稿日期：2023-11-07

作者简介：董慧（1985－），女，2013 年毕业于沈阳航空航天大学机械专业，硕士，高级工程师，现在产品研发中心核电研发室，主要从事核电设计工作。

封槽内呈凹形设计（图 2），载体的最大宽度大于环形汽封槽出口段的宽度，在其内部两侧表面开凹槽，凹槽内固定设有弹簧片，弹簧片通过焊接或螺栓连接固定于凹槽内使弹簧片形成弧形，滑动载体下端开有 T 型槽，T 型悬浮齿安装于 T 型槽内。固定架设置于环形汽封槽内并与环形汽封槽的顶部固定连接，其对称设置向两侧倾斜的支撑板，支撑板与弹簧片弹性接触。固定杆设有挡板，位于挡板两端有连接杆和导向杆（图 3），连接杆与固定架固定连接，圆柱压缩性弹簧套在导向杆外。导向杆的作用就是对圆柱压缩性弹簧进行导向定位，保证弹簧不偏移；同时导向杆与滑动载体不接触，具有一定的压缩距离。

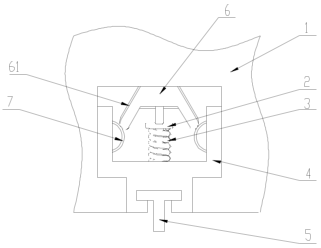


图 1　汽轮机轴端汽封体密封结构示意图

1-汽封块；2-固定杆；3-弹性件；4-载体；5-悬浮齿；6-固定架；61-支撑板；7-弹簧片。

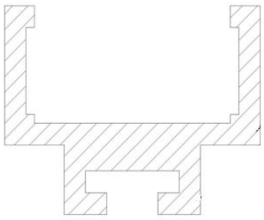


图 2 滑动载体示意图

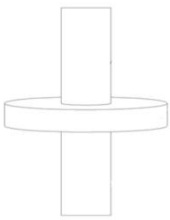


图 3　固定杆示意图

滑动载体为分段结构，根据转子直径大小沿圆周方向均分为若干个弧段，相邻弧段之间留有膨胀间隙。同理，T 型悬浮齿也为分段结构并且留有膨胀间隙；固定架、固定杆以及弹性件沿圆周方向均匀设置多个保证悬浮齿在周向上受力均衡。

根据汽轮机组的实际结构型式轴端汽封体内部可布置多级该密封结构而不限于布置一级。

1.2 轴端汽封体密封结构原理

（1）轴端汽封体密封结构原理图如图 4 所示，汽轮机组通过镶嵌在汽封块内的常规齿与转子进行初步汽封，T 型悬浮齿与转子进行接触密封，两者形成复合汽封克服单一汽封型式固有的缺陷。

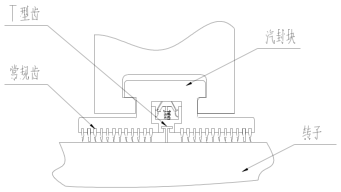


图 4　轴端汽封体密封结构原理图

（2）T 型悬浮齿属于接触密封齿受力时可自由退让，在一定程度上实现了零间隙密封，阻挡了汽封漏汽。悬浮齿受力时会推动载体向上滑动，进而推动弹性件，由于挡板固定不动，弹性件压缩形成反作用力，保证悬浮齿与转子之间的汽封。

（3）T 型悬浮齿受力时，载体两侧弹簧片推动支撑板，支撑板固定不动，来自支撑板的反作用力推弹簧片，反作用力具有倾斜角度分解为竖直方向和水平方向的反作用力，竖直方向的反作用力进一步保证悬浮齿与转子的汽封，水平方向的反作用力保证载体在受力时更加稳定避免左右晃动。

（4）滑动载体下端采用 T 型槽安装 T 型悬浮齿，使得悬浮齿不会产生滑落现象更加安全，并且将滑动载体与 T 型悬浮齿分开设计，不仅安装简便，而且降低了维护成本。如果出现弹簧失效的情况，该结构中弹簧放置方式方便更换。

2　轴端汽封体密封结构有限元分析

汽轮机组在部分运行参数偏离设计值过高、运行工况频繁变化情况下容易引起汽封齿异常磨损的问题。这就需要加大通流间隙以避免动静碰磨，汽封设计间隙一般取为 0.45 ~ 0.80 mm。T 型悬浮齿属于接触密封齿，可以自由退让，能够自适应很多工况。一般非金属接触齿可将径向间隙调整至原汽封齿无法达到的 0.05 ~ 0.10 mm。[9]

本文计算分析对只布置有常规齿模型和布置有 T 型悬浮齿密封结构的模型进行了比对，分别在周向上取一段 15°的扇形区域作为分析对象，由 ANSYS Meshing 生成非结构化网格，计算采用商用计算软件 CFX 求解三维定常粘性雷诺时均 NS 方程组，其通用控制方程[10]为：

$$div\left(\rho \mathbf{U}\phi\right)=div\left(\Gamma grad\phi\right)+S \qquad (1)$$

式（1）中：Φ为通量变量，代表 u、v、w、T 等求解变量；Γ为广义扩散系数；S 为广义源项。

对控制方程的离散采用基于单元中心的有限

体积法，方程中的扩散项和源项的离散均采用二阶中心差分，而对流项的离散则采用 Barth 和 Jesperson 共同提出的高精度离散格式。湍流计算采用 SST 湍流模型和自动近壁面处理法。水和水蒸汽的热力学性质满足 IAPWS-IF97 标准，本文中计算工质为过热蒸汽。入口给定总温总压，出口静压，两径向面旋转周期性边界，上壁面及齿面静止，下壁面转速 3 000 r/min，具体边界条件的值如表 1：

表 1 计算边界条件

	数值
进口总压 MPa	0.2
进口总温 ℃	150
出口静压 MPa	0.098 8

三维流场计算结果如图 5~8 所示：

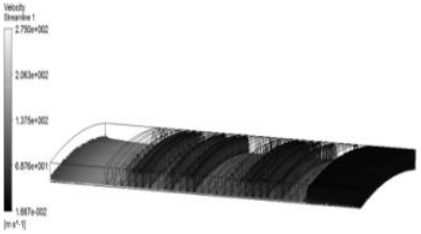


图 5 常规齿三维流线图

图 6 常规齿径向截面二维流线图

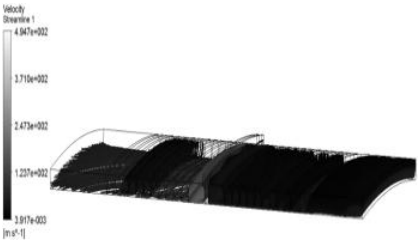


图 7 T 型齿三维流线图

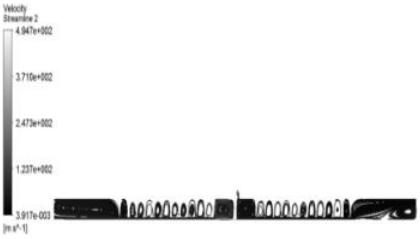


图 8 T 型齿径向截面二维流线图

从计算结果可知常规齿模型和 T 型齿模型三维流动结果相似，汽封齿与汽封齿之间的空腔形成了漩涡。由于结构的差异 T 型齿两边的腔室形成了更大的漩涡。常规齿的整圈漏汽量为 0.166 8 kg/s，T 型齿的整圈漏汽量为 0.054 5 kg/s，漏汽量降低了 67.3 %，效果明显。

3 结语

密封结构性能的优劣对机组的经济性和可靠性有重要影响，为降低漏汽损失，研究新型密封结构是十分必要的。本文研究的一种汽轮机轴端汽封体密封结构，利用 T 型悬浮齿在一定程度上实现了零间隙密封，可以更好的阻挡并减少蒸汽泄漏，提高了密封性能，而且该结构中弹性件更换方便，悬浮齿不会产生滑落现象更加安全，安装简便，维护成本低。

参考文献

[1] 宁哲, 王生鹏. 自调整刷式汽封技术资料编译[Z] .2007.10

[2] 李敬, 孟召军, 盛伟, 等. 对汽封改革趋势的综合分析[J] .东北电力技术, 2004, 25(12):37-39

[3] 朱小令, 刘安, 张立志, 等. 国产引进型 300M W 汽轮机降耗措施研究[C] .第四届全国火力发电技术学术年会论文集,2003, 11: 221-225

[4] 倪定. 国产引进型300 MW汽轮机发电机组汽机优化进程和高中压缸改造可行性[C] .第四届全国火力发电技术学术年会论文集, 2003,11:256-259

[5] 王栩, 宫奎, 高兴生, 等. 国产引进型300MW汽轮机组设备及系统优化改进[J]. 热力发电, 2003(8):2-5+69

[6] 苏鑫海, 谭俊, 谢峰, 等. 汽轮机低压汽封异常磨损分析及优化[J].东 方汽轮机, 2022(1):73-76

[7] 罗勇, 牟春雨, 谢强, 等. 300 MW反动式改造汽轮机径向通流间隙计算[J]. 东方汽轮机, 2021(1):21-22+43

[8] 刘勇, 梁崇治. 迷宫密封结构设计优化[J].东方汽轮机,2017(2) : 16-20

[9] 游利国, 胡千彬, 王燕, 等. 接触式汽封改造提高机组经济性的工程试验研究[J]. 中国电业(技术版), 2011(9):43-45

[10] 王福军. 计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社, 2004: 122

脱硝工程中偏心支撑钢结构的应用

余友华[1,2] 陈驹[3] 刘旭[3] 黄家荣[1,2] 胡亮[1,2] 黄海涛[1,2]

1.清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室，成都 611731； 2.东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001；

3.浙江大学建筑工程学院，杭州 310030

摘　要：脱硝钢结构的框架-中心支撑抗侧力体系有足够抗风需要的结构弹性刚度，在地震作用下，支撑设计不致屈曲则地震力过大，导致结构内力和基础反力过大，结构和基础总体造价偏高。如允许支撑在设防烈度及罕遇地震时屈曲降低地震作用，则支撑屈曲后性能退化，影响它的耗能能力使得结构缺失必要的抗侧刚度，结构有倒塌的安全问题。本文通过脱硝工程框架-偏心支撑体系在钢结构中的应用，论证了该结构体系弹性阶段满足多遇地震下的抗侧刚度和变形能力需求，罕遇地震下其消能梁段在结构中发挥了“保险丝”作用，在主体结构发生屈服前耗散大量的地震能量，避免支撑发生屈服，实现了罕遇地震下主体结构必要的安全要求。偏心支撑体系允许耗能梁段屈曲耗能，较大的减小了设防烈度和罕遇地震下结构的内力和支座反力，可在造价较低下满足结构安全性和经济性需求，说明了在高烈度地区偏心支撑技术在脱硝钢结构上有较好的推广价值。

关键词：高烈度；偏心支撑；钢框架；抗侧体系

中图分类号： TU391；TU352.11　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0067-07

Application of Eccentrically Braced Steel Structure in Denitration Project

YU Youhua [1,2] ,CHEN Ju [3] ,LIU Xu [3] ,HUANG Jiarong [1,2] ,HU Liang [1,2] ,HUANG Haitao [1,2]

（1. Sichuan Key Laboratory of Clean Combustion and Flue Gas Purification, 611731, Chengdu ,China; 2. Dongfang Electric Group Dongfang Boiler Co., Ltd., 643001, Zigong, Sichuan, China; 3. School of Architecture and Engineering, Zhejiang University, 310030, Hangzhou, China）

Abstract: The frame-center braced system of SCR. steel structure has enough structural elastic stiffness to withstand wind. Be affected by the high seismic intensity, because of the brace does not buckle, the earthquake force is too large, resulting in the structure internal force and support reaction force too large and the overall structure and foundation cost is too high. If the brace is allowed to buckle and reduce the seismic effect in the case of fortification intensity and rare earthquakes, the performance of the brace after buckling will degrade, affecting energy dissipation capacity, resulting in the loss of necessary lateral stiffness of the structure, and the safety of the structure will collapse. Research on theoretical basis for eccentrically braced steel structure , in order to solve the contradiction between security and economy, this paper through the frame-eccentrically braced system in the practical application of steel structure, demonstrates the stage of elastic structural system satisfy the wind resistance and lateral stiffness and deformation capacity under severe earthquake demand, the energy dissipation beam section under severe earthquake in the structure of the“fuse”role, in the main structure with dissipation of earthquake energy, avoid brace to buckle, implements the guarantee subject structure under severe earthquake necessary safety requirements. Should be eccentrically braced system allows the energy dissipation beam section buckling, energy consumption reduced the fortification intensity and rarely met internal force and bearing reaction force of the structure under the earthquake makes the whole structure and the basis of low cost, meet the demand of the structural safety and economy at the same time, better illustrates the eccentrically braced steel structure in different types of steel structure in high-intensity region has better promotion value.

Key words: high seismic intensity; eccentrically braced; steel frame; anti-lateral system

收稿日期：2023-11-08

作者简介：余友华 (1973－)男，1996 年毕业于哈尔滨理工大学，本科，高级工程师。东方电气集团东方锅炉股份有限公司，主要从事结构工程研究钢结构设计方向工作。

随着我国能源及钢厂等工业建设规模增大，在生产中会产生大量的氮氧化物对大气有所损害，脱硝系统可以在燃烧前后有效的脱除氮氧化物以降低污染。对于建在高设防区的脱硝钢结构，为提高安全性，如何提高钢支架的抗震与减震性能尤为重要。

当前在脱硝钢结构中主要为中心支撑，但是在高烈地震作用下支撑容易率先屈曲破坏使结构抗侧刚度下降；而若将支撑设计不致屈曲则地震力过大，导致结构内力和基础反力过大，总体造价偏高。

偏心支撑钢结构中的耗能梁段先塑性变形而限制了支撑中轴向力增加，避免支撑失效后结构倒塌从而减少人员伤亡及财产损失。地震后，仅对耗能梁段进行修复或更换可显著提高震后重建进程。[1]

1977 年，伯克利分校的 Popov 和 Roeder 研究了 D 型偏心支撑结构线弹性分析和动力分析。研究表明偏心支撑结构具有较强刚度可满足结构侧移需求，耗能梁段宜按剪切型设计；偏心支撑结构具有较好的弹性刚度，弹塑性滞回曲线饱满且无捏拢和强度、刚度退化现象。[2]我国 2000 年前后开始偏心支撑钢结构的研究，在高层民用建筑也有较多的应用，但是在工业建筑方面还很少使用。

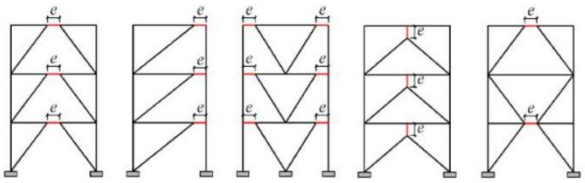
近年来，国内对于脱硝结构的静力研究也比较多，王庆杨[3]采用有限元分析软件对脱硝反应器钢结构在各荷载工况下的内力和变形进行了分析研究，校核结构的安全性，并给出了进一步分析需要考虑的问题。刘力力[4]采用腹板开孔的方式代替了传统的蜂窝钢梁，改善了脱硝钢结构钢梁-钢柱结点的抗震性能。宋志强[5]对火力发电厂脱硝钢结构的荷载组合分析情况进行了研究，以现有规范标准为基础给出了荷载组合选取方法，对工程设计有一定的指导作用。但是脱硝钢结构的耗能减震研究较少。

本文首先介绍偏心支撑钢结构和关键构件耗能梁段及支撑、柱、梁杆件设计理论。随后基于有限元分析软件 SAP2000，对框架-偏心支撑钢结构体系的脱硝工程应用进行分析，重点对中心支撑和偏心支撑结构开展罕遇地震下的弹塑性时程分析。通过对比研究地震下的基底剪力、层间位移和整体位移、罕遇地震下塑性铰发展情况而得出相应的结论。

1 偏心支撑钢结构

1.1 偏心支撑类型

偏心支撑是指支撑中至少有一端与梁和主节点相对偏移，另一端与梁或柱节点相交，或者另一端与另一个支撑在梁上相交的一种支撑结构。根据布置形式可分为 K 型、D 型、V 型、Y 型偏心支撑及混合形偏心支撑，如图 1 所示，图中 e 表示耗能梁段的长度。[6]



(a) K 型　(b) D 型　(c) V 型　(d) Y 型　(e) KV混合型

图 1 偏心支撑类型

1.2 偏心支撑抗震性能

在大震下，耗能梁段通过自身稳定可控的塑性变形，使得耗能梁段处率先变形吸收地震能量，从而保证了偏心支撑在地震作用下不被破坏，即延后了塑性铰在支撑中的出现。对偏心支撑钢结构而言，它是一种抗震效果较中心支撑更好的结构体系，适合在高烈度地区的民用或工业建筑中应用。

1.3 构件设计

1.3.1 构件设计原则

针对偏心支撑钢结构构件设计应遵循以下原则：

（1）耗能梁段设计原则是强柱、强支撑和弱耗能梁段。[7]即罕遇地震作用下，结构通过耗能梁段的剪切屈服、弯曲屈服或弯剪屈服来耗散地震能量。

（2）在极限荷载作用下，应设计为梁、支撑、柱及其连接节点处于弹性阶段。消能梁段出现非弹性变形，且应有良好的延性和耗能能力。

（3）在罕遇地震作用下，耗能梁段允许出现永久性变形和损坏。

（4）为了较好的消耗能量，耗能梁段宜设计为剪切屈服型。

1.3.2 耗能梁段设计

耗能梁段作为结构中最先屈服的构件，其强度不能太高。《高层民用建筑钢结构技术规程》和《建筑抗震设计规范》关于耗能梁段的强度及宽厚比有如下规定：耗能梁段所使用钢材的屈服强度不应大于 345 MPa，且板件的宽厚比与同跨内的非耗能梁段相比，应符合表 1 的限值要求。[8-9]

表 1 偏心支撑钢结构耗能梁板件宽厚比限值

规范	板件名称	宽厚比限值
《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-2015)	翼缘板	8
	腹板 轴压比 $N/Af \le 0.14$	$90(1-1.65N/Af)$
	腹板 轴压比 $N/Af > 0.14$	$33(2.3-N/Af)$
《建筑抗震设计规范》GB50011-2010	翼缘板	8
	腹板	$72-100(N/Af)$

对于剪切服型耗能梁段的长度应符合式（1）的要求。

$$e \le 1.6\frac{M_p}{V_p} \tag{1}$$

在水平地震力作用下，耗能梁段会产生轴压力，较大的轴压力会影响耗能梁段的屈服后性能。当水平地震作用对结构产生的轴压力过大时，耗能梁段的长度应当适当减小。

当 $N/Af > 0.16$ 时，剪切服型耗能梁段的长度应符合式（2）的要求：

$$e \le \begin{cases} 1.6\dfrac{M_p}{V_p} & p(A_w/A) < 0.3 \\ \left[1.15-0.5p\left(A_w/A\right)\right] & p(A_w/A) \ge 0.3 \end{cases} \tag{2}$$

式（2）中，f 表示耗能梁段钢材的抗压强度设计值；A 表示耗能梁段全截面面积；N 表示耗能梁段轴压力；表示耗能梁段轴力设计值与剪力设计值的比值；V 表示耗能梁段剪力值；A_w 表示耗能梁段工字钢腹板截面面积；M_p 表示耗能梁段塑性弯矩承载能力；V_p 表示耗能梁段塑性剪切承载能力。

设置耗能梁段加劲肋以防止腹板因为剪力发生屈曲，避免偏心支撑的耗能梁段腹板剪切耗能能力失效而无法实现耗能的需求，从而实现耗能梁段的耗能能力和变形能力的需求。

1.3.3 杆件设计

1.3.3.1 支撑设计

为了实现强支撑目标，柱、梁、支撑的设计值应在耗能梁段受剪承载力对应的内力基础上乘以增大系数，柱、梁、支撑的内力增大系数取值按表 2 的要求。

表 2 耗能梁段以外构件内力增强系数

构件名称	一级抗震措施	二级抗震措施	三级抗震措施	四级抗震措施
支撑	1.4	1.3	1.2	1.0
梁柱	1.3	1.2	1.1	1.2

其次，支撑作为重要的抗侧力构件，为保证其不在结构整体失稳前发生局部屈曲，支撑杆件的宽厚比应满足表 3 的要求。

表 3 钢支撑宽厚比限值

板件名称	抗震设防烈度			
	≤6 度	7 度	8 度	9 度
翼缘板	100.1	13	11	9
工字形截面腹板	250.5	33	30	27
槽形截面腹板	40	31	28	25

此外，支撑作为二力杆，为保证其不在耗能构件破坏前发生整体失稳破坏，支撑的长细比也不宜大于表 4 的限值。

表 4 钢支撑长细比限值

支撑设计类型	抗震设防烈度		
	≤ 7 度	8 度	9 度
按压杆设计	150	120	120
按拉杆设计	200	150	150

偏心支撑框架的支撑杆件需承受消能梁段的梁端弯矩，支撑与梁端的连接应设计成刚接。承受轴力和弯矩的斜杆，与框架结构协同作用已桁架形式抵抗侧向力。地震组合时支撑的内力调整方式按式（3）和（4）的要求取其最小值：

$$N_{br} = \eta_b \frac{V_1}{V} N_{br,com} \tag{3}$$

$$N_{br} = \eta_b \frac{M_1}{M} N_{br,com} \tag{4}$$

式中，N_{br} 为支撑的轴力设计值；η_b 为支撑的内

力放大系数，根据不同的抗震措施按表 3 取值；$N_{br,com}$ 为对应消能梁段剪力设计值 V 的支撑组合的轴力计算值；$M_1=V_Pe/2$ 为耗能梁端的受弯承载力。基于支撑的内力值，对支撑斜杆的轴向承载力进行设计：

$$\frac{N_{br}}{\varphi A_{br}} \le f / \gamma_{RE} \tag{5}$$

式（5）中：A_{br} 为支撑截面面积；φ 为支撑轴心受压构件的稳定系数。

1.3.3.2 钢梁设计

框架梁的承载力计算公式，框架梁弯矩设计值取下列两式中最小值：

$$M_b = \eta_b \frac{V_1}{V} M_{b,com} \tag{6}$$

$$M_b = \eta_b \frac{M_1}{M} M_{b,com} \tag{7}$$

式（5）中，η_b 为框架梁的内力放大系数，根据不同的抗震措施按表 3 取值；$M_{b.com}$ 表示竖向和水平作用最不利组合下的梁弯矩。

根据式（6）和式（7）确定框架梁的弯矩设计值，然后按《钢结构设计标准》GB50017 对梁的承载力进行验算。

1.3.3.3 立柱设计

为实现“强柱弱梁”的设计原则，偏心支撑的柱在进行结构设计时要将其内力放大。柱的承载力计算公式：

（1）框架柱弯矩设计值取下列两式中最小值：

$$M_c = \eta_c \frac{V_1}{V} M_{c,com} \tag{8}$$

$$M_c = \eta_c \frac{M_1}{M} M_{c,com} \tag{9}$$

式中，η_c 为框架柱的内力放大系数，根据不同的抗震措施按表 3 取值；$M_{c,\ com}$ 表示竖向和水平作用最不利组合下的柱弯矩。

（2）框架柱轴力设计值取下列两式中最小值：

$$N_c = \eta_c \frac{V_1}{V} N_{c,com} \tag{10}$$

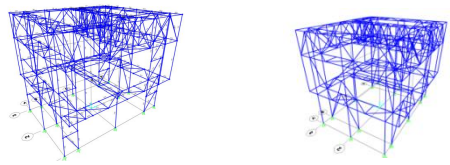
$$N_c = \eta_c \frac{M_1}{M} N_{c,com} \tag{11}$$

式中，$N_{c,\ com}$ 表示竖向和水平作用最不利组合下的柱轴力。

2 工程实例

2.1 工程概况

以某脱硝工程地震设防烈度取为 7 度(0.15 g)、III类、第二组为例，采用 Sap2 000 软件建立了脱硝钢结构对比分析模型见图 2。



（a）偏心支撑　　（b）中心支撑

图 2 脱硝钢结构

表 5 中为偏心支撑脱硝结构中各耗能梁段情况，采用的为 D 型偏心支撑，耗能梁段的最优长度率的取值范围为（0.9 ~ 1.39），即$0.9<\rho<1.39$。所选耗能梁段分别有剪切型和弯剪型两种耗能梁段。

表 5 偏心支撑脱硝结构中各耗能梁段情况

截面	偏心支撑类型	耗能梁段长度 e/m	长度率 P
HN300×150×5.5×8	D 型	0.6	1.18
HN350×175×6×9	D 型	0.6	0.99
HN400×300×10×16	D 型	0.6	0.59
HN300×150×5.5×8	D 型	0.5	0.98
HN350×175×6×9	D 型	0.5	0.83

2.2 地震波选则

本文按照《建筑抗震设计规范》[9]中的相关规定要求以及建筑的场地特征选取了三条地震波，分别为 ARRAY06、HOLLISTE 和特征周期为 0.55 的人工波。

在建模过程中将地震波参数根据规范进行调整，加速度时程的最大值可按表 6 选择。

表 6 地震加速度最大值[5]

地震影响	6 度	7 度（0.10 g）	7 度（0.15 g）	8 度（0.20 g）	8 度（0.30 g）	9 度
多遇地震	18	35	55	70	110	140
设防地震	50	100	150	200	300	400
罕遇地震	125	220	310	400	510	620

2.3 罕遇地震下的弹塑性时程分析

2.3.1 弹塑性时程分析模型设置

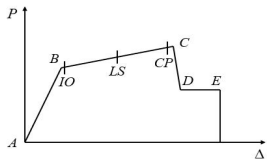


图 3 塑性铰 P−Δ曲线

先创建罕遇地震下反应谱函数以及时程分析所需要的时程函数，按照规范选取对应的罕遇地震下的参数荷载工况，设置完毕后可对结果塑性铰进行设置，塑性铰常用可分为三种，对于桁架一般定义轴力铰；对梁一般定义弯矩铰和剪力铰；对于柱一般定义 P-M-M 相关铰。

塑性铰的 $P-\Delta$ 曲线如图 3 所示。[10]其中点 B 代表铰的屈服，当铰到达点 C 时开始失去承载力，D 点为铰的残余强度，E 点表示铰完全失效。点 IO、LS、CP 代表铰的能力水平，分别对应于直接使用、生命安全和防止倒塌。

塑性铰布置可采用软件生成的自动铰。在相对位置 0.1 和 0.9 处设置梁的 M3 铰，在相对位置 0.1 和 0.9 处设置立柱的 P-M2-M3 铰，在相对位置 0.5 处设置支撑的轴力铰，在耗能梁段跨中布置 V2 铰。[11]

2.3.2 偏心支撑与中心支撑结果对比

在罕遇地震下弹塑性分析时，对于偏心支撑 X 方向和 Y 方向选取的地震波分别为 ARRAY06、HOLLISTE 以及一条人工波，对中心支撑也选择与中心支撑相同地震波。

表 7 所示为各地震波下偏心支撑和中心支撑脱硝结构的基底剪力对比，通过剪力的对比可以看出，相较于中心支撑，偏心支撑结构的基底剪力有很大程度的降低，也反映出了偏心支撑的耗能作用的提高。

提取两种结构的层间位移和层间位移角，如表 8 和表 9 所示，也可以看出相对中心支撑结构，偏心支撑的刚度更小，在罕遇地震下的耗能能力更大。

人工波和两组天然波的对应的位移云图见图 4~6，偏心支撑钢结构层间位移角如图 7 所示。

表 7 偏心支撑和中心支撑脱硝结构的基底剪力对比

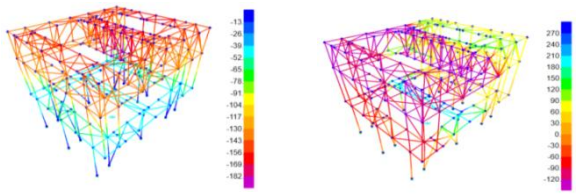
钢架类型	地震波	基底剪力/KN	
		X 方向	Y 方向
偏心支撑	人工波	6 150.624	5 320.722
	ARRAY06	8 713.472	6 980.246
	HOLLISTE	6 181.495	6 250.921
	反应谱法	6 700.610	5 518.247
中心支撑	人工波	9 806.669	6 361.366
	ARRAY06	8 708.456	5 471.840
	HOLLISTE	7 853.884	6 184.971
	反应谱法	8 580.668	6 259.911

表 8 偏心支撑钢架在各地震波作用下的层间位移和层间位移角

地震波	层数	X 方向/mm		Y 方向/mm	
		层间位移	层间位移角	层间位移	层间位移角
人工波	一层	-60.79	0.001 076	11.63	0.002 174
	二层	120.34	0.013 08	147.38	0.016 02
	三层	119.68	0.013 298	160.51	0.017 834
ARRAY06	一层	20.33	0.003 8	13.71	0.002 563
	二层	133.57	0.014 518	171.63	0.018 655
	三层	165.51	0.018 39	198.12	0.022 013
HOLLISTE	一层	7.53	0.001 407	13.28	0.002 482
	二层	116.34	0.012 646	166.06	0.018 05
	三层	121.95	0.013 55	185.07	0.020 563

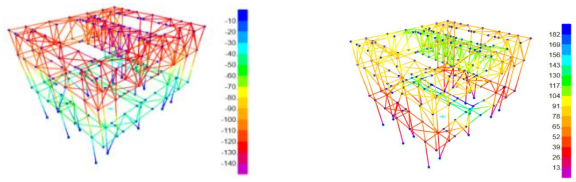
表 9 中心支撑钢架在各地震波作用下的层间位移和层间位移角

地震波	层数	X 方向/mm		Y 方向/mm	
		层间位移	层间位移角	层间位移	层间位移角
人工波	一层	10.07	0.001 882	15.02	0.002 807
	二层	87.48	0.009 51	56.09	0.006 097
	三层	48.32	0.005 37	65.01	0.007 223
ARRAY06	一层	6.69	0.001 25	6.84	0.001 279
	二层	72.17	0.007 845	39.15	0.004 255
	三层	43.98	0.004 887	46.86	0.005 207
HOLLISTE	一层	100.74	0.018 83	22.14	0.004 138
	二层	6.06	0.000 659	192.29	0.020 901
	三层	36.97	0.004 108	57.51	0.006 39



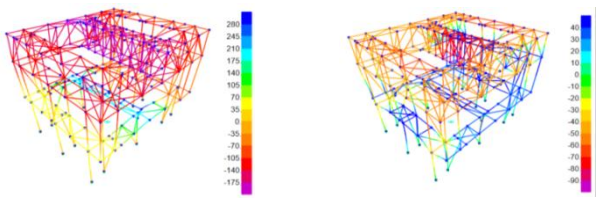
（a）X 向位移图　　（b）Y 向位移图

图 4　人工波作用下中心支撑钢架位移响应



（a）X 向位移图　　（b）Y 向位移图

图 5　ARRAY06 波作用下中心支撑钢架位移响应



（a）X 向位移图　　（b）Y 向位移图

图 6　HOLLISTE 波作用下中心支撑钢架位移响应

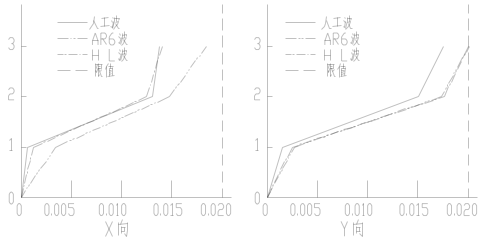


图 7　偏心支撑钢结构层间位移角

2.3.3 罕遇地震下钢结构塑性铰发展情况

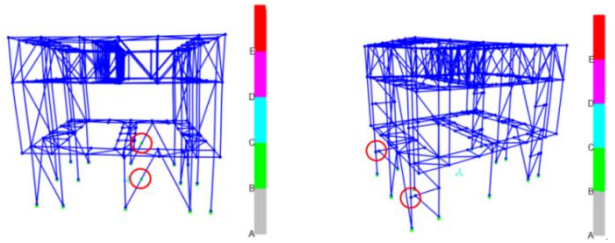
为了解偏心支撑和中心支撑脱硝结构在高烈度地区下的力学性能，以改善结构的设计，对两种支撑形式的钢架结构的塑性铰进行分析。

2.3.3.1 X 方向地震响应

取同一种地震波 ARRAY06 下两种结构的响应进行对比，在 X 方向地震作用下，如图 8（a）所示，中心支撑钢架在地震作用到 5.52 s 时，1、3 轴线一层中间的中心支撑开始出现塑性铰，而此时偏心支撑尚未出现塑性铰。

在作用到 9.2 s 时偏心支撑开始出现塑性铰，如图 8（b）所示可以看出，此时塑性铰出现在 1、3 轴线一层的耗能梁段处，支撑并没有先于耗能梁段发生破坏，而此时中心支撑 1、3 轴线处的塑性铰已经发展到了图 3 所示的 C 点，开始失去承载能力，同时在二层处的中心支撑也开始出现塑性铰并失去承载能力。

在偏心支撑出现塑性铰后，很快一层其他位置处的耗能梁段也先后开始出现塑性铰，然后在支撑处也开始出现。偏心支撑钢架在 X 方向地震作用下的破坏主要集中在一、二层的耗能梁段以及支撑处，随着时间推移一层的柱子开始逐渐发生破坏出现塑性铰。



（a）5.52s 中心支撑出现塑性铰　（b）9.2s 偏心支撑耗能梁段出现塑性铰

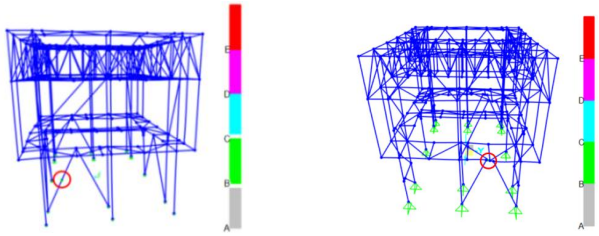
图 8 X 方向震动下塑性铰分布情况

2.3.3.2 Y 方向地震响应

对于 Y 方向地震作用下，如图 9（a）所示，中心支撑钢架在地震作用到 6.01 s 时，一层中心支撑位置开始出现塑性铰，而此时偏心支撑尚未出现塑性铰。

在作用到 9.28 s 时偏心支撑开始出现塑性铰，如图 9（b）所示可以看出，此时塑性铰出现在 E 轴线一层处的耗能梁段处，支撑并没有先于耗能梁段发生破坏，而此时中心支撑 1、3 轴线处的塑性铰已经发展到了图 3 所示的 E 点，完全丧失承载能力。

在偏心支撑出现塑性铰后，很快二层的耗能梁段和支撑也先后开始出现塑性铰。偏心支撑钢架在 Y 方向地震作用下的破坏主要集中在一、二层的耗能梁段以及支撑处，并且在 1、3 轴线一层的柱子开始发生破坏出现塑性铰。



（a）6.01 s 中心支撑出现塑性铰　（b）9.28 s 偏心支撑出现塑性铰

图 9　Y 方向震动下塑性铰分布情况

根据塑性铰的发展情况，可以看到设置偏心支撑的钢结构塑性铰首先出现在耗能梁段，然后是非耗能梁段，包络值分析下才发展进入垂直支撑内，表现出结构符合强支撑弱杆件、强柱弱梁的结构抗震设计的优异性能。罕遇地震下偏心支撑钢结构不倒塌，且首先在耗能梁段进入塑性，其余杆件多数未发展塑性或最小的局部损伤，通过控制震害损失实现了“可恢复功能抗震设计”的目标。[11]

3　结语

分析研究表明脱硝钢结构的偏心支撑结构可以用于脱硝、除尘、脱硫等工业领域作为主要的承载钢结构。且根据分析，可以得到以下结论：

（1）偏心支撑钢结构具有中心支撑的刚度，耗能段使结构有很好的耗能能力。实际结构可以按中心支撑、偏心支撑混合的模式进行布置，从而为工业管道布置提供更好的灵活性。

（2）遭受罕遇地震后，偏心支撑结构的塑性铰演化趋势与结构抗震性能目标一致，结构层间位移值小于 1/50，结构保持了很好的稳定性。符合多道设防目标和实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震性能化需求。

（3）按静力分析完成规范设计的中心支撑结构也完成了罕遇地震分析，发现垂直支撑首先出现塑性铰，随后立柱会随之出铰，结构整体抗震性能表现较差，已不符合结构设计原则，有失去承载的安全风险。目前，主流结构分析软件已有成熟的弹塑性分析功能，建议在高烈度地区的有必要做罕遇地震下弹塑性分析，以合理开展中心支撑钢结构的安全性评估工作。

（4）与中心支撑钢结构比，高烈度地区脱硝偏心支撑钢结构地震下内力和基础反力比中心支撑更小。因此偏心支撑钢结构不仅有优异的安全性，同时也兼具良好的经济性。

参考文献：

[1] 张芝萍. 偏心支撑框架耗能梁段的研究进展[J],江西科学,2015.06,33(3):402-406

[2] 赵宝成. 偏心支撑钢框架在循环荷载作用下的破坏机理及抗震设计对策[D], 西安建筑科技大学, 2004

[3] 王庆杨. 基于SAP2000的脱硝反应器钢结构计算分析[J]. 山西建筑, 2018, 44(11):53-54

[4] 马洪明, 刘雨琳, 韩伟. 燃煤烟气高温SCR脱硝反应器的结构工程设计讨论[J]. 化工设备与管道, 2017, 54(1):25-28+38

[5] 郁一凡. 水平地震作用下脱硝钢架支撑体系抗震性能分析[D], 浙江大学, 2018

[6] 钢结构设计标准, GB50017-2017,[S],北京,中国建筑工业出版社,2017

[7] 张瑾, 杨律磊, 朱寻鑫, 等. 钢框架-偏心支撑结构体系在高烈度区工程中的应用研究[J], 建筑结构, 2016.12,46(23):10-17

[8] 高层民用建筑钢结构技术规程, JGJ99-2015, [S], 北京, 中国建筑工业出版社, 2015

[9] 建筑抗震设计规范, GB50011-2010(2016版),[S], 北京, 中国建筑工业出版社, 2016

[10] 樊启武, 罗永坤. 偏心支撑钢框架地震耗能分析和塑性铰模型, 抗震加固改造技术第一届学术交流会论文集, 2004年

[11] 陆新征, 蒋庆, 廖志伟, 等. 建筑抗震弹塑性分析(第二版)[M], 北京, 中国建筑工业出版社, 2015

（上接第 20 页）

[26] 无污染废塑料柔性油化工艺设备研发成功[J]. 橡塑智造与节能环保, 2017，1(8):23-25

[27] 朱育漩. 福海蓝天环保科技有限公司董事长李勇:废塑料柔性油化技术解白色污染之危[J].环境经济，2019(2):40-41

[28] 赵栋. 废旧硬塑料催化裂解制备碳纳米管的实验研究[D].河北工业大学，2018

[29] 熊秋亮, 黄兴元, 陈丹. 废旧塑料回收利用技术及研究进展[J].工程塑料应用, 2013，41(11):111-115

[30] Mansour S H. Depolymerization of Poly(ethylene terephthalate) Waste Using 1,4-Butanediol and Triethylene Glycol[J]. Journal of Elastomers & Plastics，2003，35(2):133-148

[31] 石鑫, 石玉华. 浅析建筑垃圾的循环利用[J].农业与技术，2013(9):238+240

[32] 余广炜. 利用焦化工艺处理废塑料实验研究[D].东北大学，2005

[33] 付晓婷, 何周坤, 丁明明等. 废旧塑料的回收和增值利用[J].塑料工业, 2007，35(9):4-6+67

[34] 杨忠敏. 车用废旧塑料的再生处理技术[J].上海塑料，2011(2):12-17

[35] 李俊, 蒋凌云, 李继霞, 等. 含铑催化剂回收再利用技术进展[J].广州化工, 2014, 42(3):12-13+33

[36] 李博知, 王钦. 废塑料应用于高炉喷吹的技术现状及展望[J].天津冶金, 2002(5):14-16

[37] 张婷婷, 白宗庆, 侯冉冉, 等. 煤与废塑料共热解特性研究进展[J].化工进展, 2021, 40(5):2461-2470

[38] 王晓霞, 慕进文, 朱青德. 废塑料在钢铁行业的应用[J].工业加热，2021, 50(9):59-64

[39] 何友宝, 詹世平, 王景昌, 等. 超临界流体技术解聚废旧塑料的研究[J].科技咨询导报, 2007(13):96-97

[40] 胡自伟. 超临界流体技术解聚废弃聚苯乙烯的研究[D].浙江工业大学，2003

[41] 侯彩霞, 马沛生, 樊丽华. 超临界水降解聚乙烯及聚乙烯/聚苯乙烯混合塑料的研究[J].环境化学，2005(1):47-50

[42] Hua Z , Ren Y , Zhenhua L , et al. Electrocatalytic upcycling of polyethylene terephthalate to commodity chemicals and H_2 fuel[J]. Nature Communications, 2021, 12(1):4679

大型发电设备装配场地的设计及安装

谢龙飞　刘祥　吴攀　张斌　罗霞

东方电气集团东方汽轮机有限公司，四川 德阳，618000

摘要：本文根据目前大型发电设备装配场地水平精度低，承载能力差，适应产品变化能力弱，可移动起吊设备挪位安装困难等问题，提出了新的建造技术方案，保证了后继电站三大主机设备优质、高效装配的需要。

关键词：发电设备；装配场地；设计；安装

中国分类号：TM31　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0074-04

Design and Installation of Assembly Site for Large Generation Equipment

XIE Longfei，LIU Xiang，WU Pan，ZHANG Bin，LUO Xia

（Dongfang Electric East Steam Turbine Co., Ltd.,618000, Deyang, Sichuan, China）

Abstract:According to the problems of low horizontal precision, poor bearing capacity, weak ability to adapt to product changes, and difficult installation of movable lifting equipment in the assembly site of large power generation equipment, this paper proposes a new construction technology scheme to ensure the high quality and efficient assembly of the three main equipment in the subsequent power station.

Key words: generation equipment; assembly site; design; installation

大型发电设备三大主机大型化、高精度化、智能化的发展，对制造过程提出了越来越高的要求，各零部件生产过程中，每一道工序务必精雕细刻，特别是机组的装配工序更须做到万无一失。在用户层面，他们同样将更多的注意力集中到机组的装配和使用。目前，几乎所有零部件加工后都要进行部套或整机装配，还有很多诸如结构件的装焊、大型铸锻件的毛坯成形、大型件的尺寸和形状检验、部套或整机完工后的试验等工作都需在装配场地上进行，故装配场地是极为重要的生产设施。就整个行业而言，装配场地的水平精度和承载能力均不尽人意，由此给产品的制造质量、生产效率带来了较大影响。为满足制造要求，对将要改建或新建的装配场地而言，不能再按过去方式建造，必须做到水平精度高、承载能力强、功能全面，同时还能适应产品的变化。机组在装配过程中，不同重量的工件、工装、工位器具的起吊特别频繁，为提高起吊效率，在机组装配的临近位置安装可移动悬臂吊是最好的手段。中、大工件的起吊用桥式吊车，轻、小工件的起吊用悬臂吊，这样处理既方便又安全。一些需临时或短时使用的大型机加设备，如做钢筋混凝土基础，则成本高，直接安装在装配场地上使用，其经济效益明显。总之，建造较目前更优的装配场地是当下和未来发电设备三大主机制造的客观要求，具有一定的紧迫性。

1　目前在用装配场地存在的主要问题

目前在用中的装配场地存在的问题较多，参见图 1、图 2。一是设计和建造精度过低，其根本原因是对装配场地的水平要求和承载能力所需认识不足；二是槽铁本体结构单薄，刚性差、强度低；三是地脚螺栓尺寸小、数量少、分布不合理，槽铁只能勉强满足正常的承压要求，但材料为 Q235 的

收稿日期：2023-02-10

作者简介：谢龙飞(1963－)，男，大专，主任工程师，1982 年毕业于成都一机校机制专业，2004 年毕业于电子科大计算机及其应用专业，从事汽轮机、燃气轮机、风电静子零部件加工及装配工艺等方面工作。

M24 地脚螺栓抗拉强度偏低，槽铁所能承受的向上拉力十分有限。比如图 3 中的悬臂吊就不能直接安装在现有槽铁地上使用。有时需临时安装的机加或试验设备也会出现同样的问题，以此带来合理的工艺方案不能实施，大幅增加了制造成本。四是槽铁的支点结构不合理，支撑斜铁直接落在不平的混凝土地面，支点不实。槽铁安装时靠敲击斜铁来调整槽铁的水平，其调平精度严重受限。螺帽拧紧力矩也不便把控，槽铁固位不牢，末次灌浆时槽铁容易串动。五是槽铁安装时选用的是精度偏低的圆水准仪和框式水平仪来调平槽铁的纵、横方向，圆水准仪又是置放在三角架上对着手扶水准尺的人进行操作、测量，人为因素严重影响测量精度。由于影响测量精度的因素多、误差大，精调后，单根槽铁水平误差一般都在 0.5～1.5 mm 左右或更差一些。末次灌浆时，因捣实混凝土时的振动，槽铁的水平误差还有增加，在用中面积都为本文四分之一左右的三块装配场地，水平精度最好的都只有 4 mm。六是每根地脚螺栓平均需用两套支撑垫铁，用量大，材料浪费多。七是由于装配场地水平精度过低，造成置于其上的工件、工装接触不实，当零部件叠装后重量较大或出现偏重状态，会带来较大的装配或测量误差，同时大幅增加工作量和劳动强度。作为机组安装基准的装配场地，应该具备高的水平精度和较强的承载性能，装配精度是保证产品质量的最后一道关口。

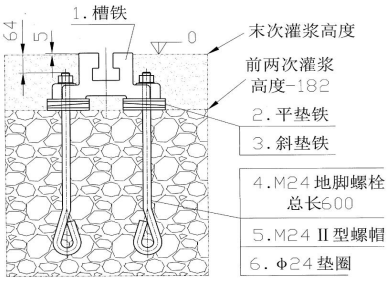


图 1　现有装配场地槽铁安装图

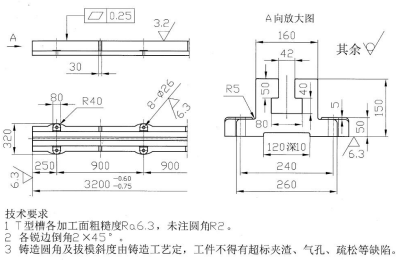


图 2　现有装配场地所用槽铁

2 装配场地的设计

针对在用装配场地存在的问题，大型发电设备三大主机特性，现有、后继产品的变化，长度 300～500 m、跨宽 36 m 重型综合厂房承载能力和桥式吊车规格等因素，完成了可满足 1 000 MW 以上级各型发电设备主机制造装配场地的设计方案。

2.1 主要技术参数及精度

装配场地工作面长×宽=100 m×30.2 m，槽铁间距 0.5m。地基承载力特征值 f_{ak}≥200 kPa。用 C15 混凝土做基础垫层；用 C30 钢筋混凝土做基础，基础长×宽×厚=100.6 m×30.9 m×3 m，槽铁水平精度 0.05 mm/1000 mm，0.12 mm/100 m×30.2 m。基础四周有 50 mm 厚的隔振层，地面四周是宽 250 mm 的排水沟，每排端头槽铁的 T 型槽接有排水钢管与排水沟相通，见图 3。

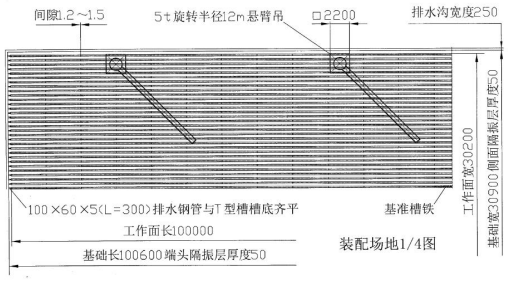


图 3　新设计的装配场地

2.2 槽铁的设计

槽铁的设计参见图 4、5、6。材料选择：槽铁 HT200，地脚螺栓、螺帽、T 型槽方螺母、快换 T 型螺栓 35 CrMoA，垫圈 45 钢。T 型槽规格 48 mm，配 M36 T 型槽螺母和 M 36 快换 T 型螺栓用于工件、工装的压紧,其他同规格紧固件也可使用。当同排相邻槽铁端面留 1.2～1.5 mm 间隙贴近安装后，端面部位 T 型槽螺母下落孔尺寸为 90 mm 方孔。M 36 快换 T 型螺栓的结构与国标和目前在用的其他类似 T 型槽螺栓结构不同，增加了防转止口，可保证振动状态下螺栓不至松落。即当快换 T 型槽螺栓双肩与 T 型槽双肩贴合后，宽 48 (-0.4～-0.2)mm 高 7 mm 的防转止口将卡落在 T 型槽 48 mm 宽的槽内，实现防转。考虑到机组装配时槽铁将有承受较大向上拉

力的情况，故选用 M 30 地脚螺栓，在槽铁两端头布置有压紧点，改变了原槽铁承受向上拉力十分有限的弊端。兼顾使用要求和加工成本，单根槽铁加工时的平面度按 0.02 mm/1 000 mm、全长 0.04 mm 选定，这种精度普通龙门铣均能保证。见图 2、图 4。安装时的调平支点由平、斜垫铁支撑、上螺帽压紧方式改为下螺帽支撑、上螺帽压紧方式，见图 1、图 6。

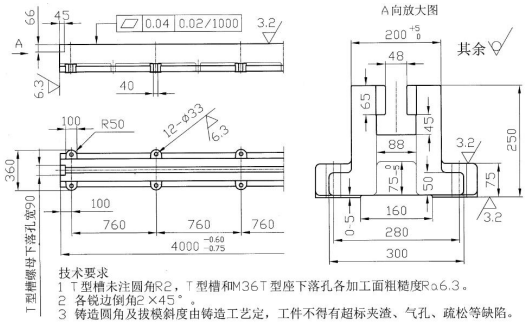


图 4　新设计的槽铁

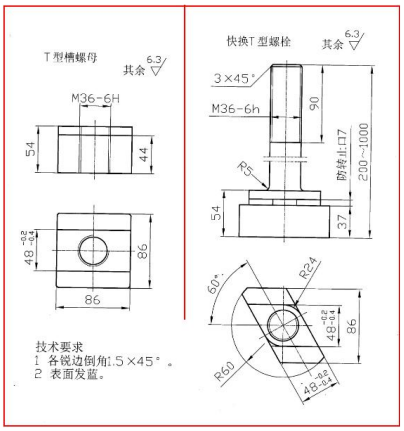


图 5 用于 T 型槽的紧固件

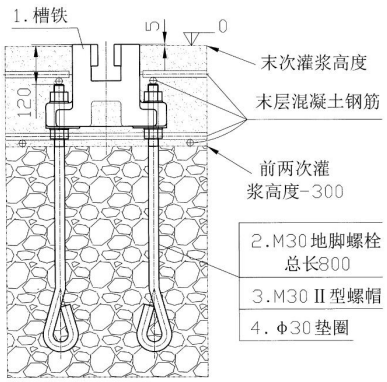


图 6 新设计装配场地槽铁安装图

3　槽铁的加工

槽铁的制造过程为：毛坯铸造→单面留 4 mm 余量粗加工→去应力热处理→精加工。在龙门铣精加工时，先底面向上，监百分表压紧，要求装卡变形＜0.02 mm，在一次装卡、一次走刀下精铣各地脚螺栓孔上下端面。然后按图 7 装卡，精铣 T 型槽、上平面、两端面等部位。其过程为：先将工艺平板装卡在龙门铣工作台上，在一次走刀下铣出焊于工艺平板上的各支撑套端面并钻攻压紧螺孔，再将槽铁就位，用工艺螺栓通过槽铁的地脚螺栓孔压紧在支撑套上进行精加工。这样加工槽铁，其支、压点与安装时完全一致，避免了基准不重合误差。

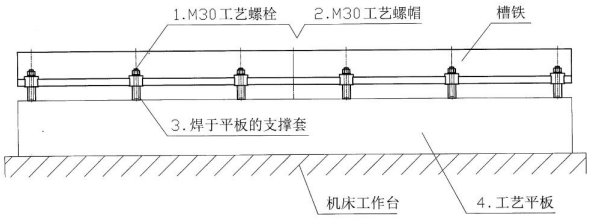


图 7 新设计的槽铁精加工

4　基础浇铸及槽铁安装

4.1 基础浇铸

基础选用 C30 钢筋混凝土浇铸，分三次灌浆完成。基础四周有 50 mm 厚的泡沫隔振层，每排槽铁 T 型槽端头埋置的矩形钢管与 T 型槽槽底齐平并与基础四周的排水沟相通，见图 3。首次灌浆高度至地面-320 mm,预留地脚螺栓孔。槽铁就位前，在槽铁底部的纵横方向扎一层φ20 螺纹钢筋，见图 6。然后将槽铁、地脚螺栓就位，粗调槽铁水平，合格后对地脚螺栓孔进行二次灌浆。接下来是精调槽铁水平，合格后在地脚螺栓端面的纵、横方向焊、扎φ20 螺纹钢筋，焊缝高度与钢筋和螺栓外径齐平，再将两层钢筋连扎，最后安装与端头槽铁 T 型槽相接的矩形排水管。接下来选用无收缩（微膨胀）C30 混凝土进行末次灌浆。

4.2 槽铁安装要求

槽铁的安装参见图 6、图 9。测量选用图 8 八杯水连通水平测量工具，合像水平仪，深度千分尺，

百分表，激光准直仪等常用量具。槽铁地脚螺栓螺帽拧紧力矩 405～435 N·m。单根槽铁的横向水平用合像水平仪检测，所有槽铁的纵向水平用水连通水平测量工具，测量点均选支点上方。基准槽铁的六个支点按零位调等高、横向水平按 0.025 mm /1 000 mm 保证，其他槽铁各支点相对于基准槽铁的等高按±0.02 mm、横向水平 0.05 mm/1 000 mm 保证。粗调槽铁水平，水连通水平测量工具水面稳定时间 15～20 分钟，精调 25～30 分钟，时长随胶管长度增加。选用生活用水，保持水质清洁，除测量时外，测量杯杯口须盖上薄纸盖防尘。考虑到末次灌浆后，槽铁有微动的可能，故精调槽铁水平时，水平精度提高到要求值的一半即 0.06 mm 保证。为提高安装效率，可同时用 4～6 套水连通水平测量工具进行槽铁安装、调平。

图 8 水连通水平测量工具(左：测量杯 右：灌水杯)

4.3 槽铁安装步骤

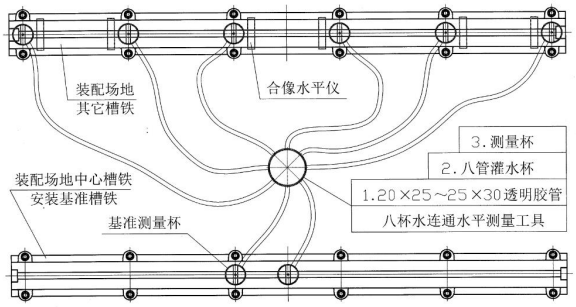


图 9 安装中的槽铁找平中

（1）在基础首次灌浆后，将各槽铁和地脚螺栓就位并粗调水平，地脚螺栓螺帽拧紧力矩按 200～220N·m 选定。选择槽铁两端距端面 480 mm 两处为支点，选择装配场地对角线交点上槽铁为基准槽铁。先粗调基准槽铁水平，要求两支点部位横向水平 0.1 mm/1 000 mm、等高 0.2 mm 以内，燃后灌浆固定地脚螺栓。再以基准槽铁为基准粗调其他槽铁，要求两支点部位横向水平 0.2 mm/1 000 mm、等高±0.2 mm 以内。

（2）对各槽铁地脚螺栓孔进行二次灌浆。

（3）二次灌浆的养护期满后，用地脚螺栓的支、压螺帽进行槽铁的水平的精调，同时保证螺帽的拧紧力矩。先精调基准槽铁，再以此为基准由远到近精调其他槽铁。

（4）用激光准直仪对所有槽铁的支点部位进行等高复检，有超差点用水连通水平测量工具调平至合格，然后进行末次灌浆。

（5）在末次灌浆 5 周后，再次复检所有槽铁各支点部位的水平并记录、备用。

5 结语

本文介绍的装配场地建造方案，在微增投资费用基础上，将水平精度由原来的4 mm或更差一些提高到0.12 mm，承载能力也有质的提高。这样的装配场地不仅能很好满足现有和后继产品的装配要求，还大幅降低了劳动强度、缩短了装配时间，技术先进、经济效益显著。此装配场地还可用做大型零部件的尺寸检测平台、划线平台、机组的试验平台及安装临时机加设备等用途。槽铁承受向上拉力增大后，可灵活的根据被装机组要求就近布置悬臂吊，方便中小型零部件的高效、安全装配。在一些大型结构件的装焊过程中，装配场地的水平误差会成倍以上的放大到工件上，采用水平精度高的装配场地即可大幅提高工件的尺寸和几何形状精度。总之，本文介绍的装配场地能有效提高产品制造质量，是适用性很强的生产设施，十分值得应用和推广。

参考文献

[1] 朱佳生. 透平机械制造工艺学[M].西安交通大学出版社.2005
[2] 蔡怀崇等. 材料力学[M].西安交通大学出版社.2005
[3] 谢龙飞，刘祥，卞文，等. 核电汽轮机静子零部件划线平台的设计特点及安装要领[J].东方汽轮机，2019，(12):48-52

浅析核电设备陆运风险评价指标体系

谢天

中国核动力研究设计院 核电设备集成采购部，成都 610213

摘要：核电设备的安全交付是核电项目建设的先决条件，也是核电设备采购管理的主要目标。绝大部分核电设备采用陆运方式进行运输，因此，核电设备陆运风险管理工作意义重大，而核电设备陆运风险评价指标体系，是核电设备陆运风险管理工作的重要组成部分。本文结合核电设备陆运工作实际情况和以往成功经验，分析了核电设备陆运风险评价指标体系的建立，并阐述了该体系在核电设备陆运工作中的实际应用和效果。

关键词：核电设备；陆运；风险源；风险分析；风险评价

中图分类号：TM623　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0078-05

The Risk Indicator System of Nuclear Power Equipment Land Carriage

XIE Tian

（Nuclear Equipment Purchasing Department Nuclear Power Institude of China, 610213, Chengdu, China）

Abstract: A secure delivery is the necessary prerequisite to the construction of nuclear power plant, which is also the main target of nuclear equipment purchasing management. According to the experience of other power plant, most equipment is delivered by land. Therefore the land-carriage risk management and its evaluation system is very important.

This article analysed the construction of risk evaluation system,then discussed the application and effect of this system.

Key words: nuclear equipment; land carriage; source of risk; risk analysis; risk evaluation

1　核电设备陆运风险管理基本理论

1.1 概念

核电设备陆运风险管理是对核电设备陆运工作进行风险管理。通过对核电设备陆运过程中可能遇到的风险进行识别、分析和控制。有助于规避风险、预防核电设备运输事故、确保核电设备运输安全抵达目的地。

1.2 目的

核电设备陆运风险管理的目的是降低风险发生概率，减少损失，预防运输事故的发生。其关键在于准确把握风险，科学地实施风险评价并采取有针对性的风险控制措施。

1.3 步骤

核电设备陆运风险管理的主要工作步骤包括：

（1）建立核电设备陆运风险评价指标体系；

（2）掌握整个运输过程可能面临的风险，并根据实际情况和以往经验，筛选出需要应对的风险；

（3）根据风险评价指标体系，判断运输过程中的综合风险等级，确定风险应对的优先次序，据此对其采取措施进行预防和规避。

2　核电设备陆运风险评价指标体系的建立

通过对风险源的识别和对风险发生的可能性、严重性的分析，运用公式计算出每个风险源的风险等级并列出风险源清单，提前进行风险排查，有效避免风险发生，提高陆运工作的安全性。

收稿日期：2024-01-15

作者简介：谢天 (1981－)，男，2009 年毕业于西南财经大学工商管理专业，研究生，高级工程师。现就职于中国核动力研究设计院，主要从事设备采购管理及运输管理相关工作。

2.1 风险识别

根据实际情况，从驾驶员、运输工具、运输环境以及运输管理等方面着手，全面分析和排查运输过程中可能存在的风险因素，形成风险源清单。并根据此清单找出运输过程中的风险源，为风险评价指标体系提供依据。

2.1.1 驾驶员

驾驶员单车作业和车辆高速运行的特点，决定了驾驶员是交通安全的基础和源头，是影响道路交通安全最重要的因素，因此，核电设备陆运安全的核心在于驾驶员。驾驶员的生理状况、心理状况、职业道德、驾驶经验技术等方面都对运输安全有着重要的影响，无论哪一个方面出现问题，都有可能诱发风险，引起事故。

（1）生理状况

驾驶员的生理状况会影响到驾驶员的感知、判断和操作的各个环节，因此，身体状况的好坏决定了驾驶员对自身驾驶风险的控制能力。

可能存在的风险因素：疲劳驾驶、带病驾驶等情况。

（2）心理状况

核电设备的陆路运输路线一般是从内陆省份运往沿海核电现场。整个运输过程具有时间长、距离远、路况复杂等特点，这就要求驾驶员必须具备较强的心理素质，稳定良好的情绪与情感，较好的记忆、思维、反应能力与意志力等。

可能存在的风险因素：运输责任过于重大导致的心态失衡、冲动驾驶、注意力分散等情况。

（3）职业道德

每一名驾驶员都应具备良好的职业道德。一方面，要按照自身职责，自觉遵守交通法规，圆满完成本职工作；另一方面，要认真配合运输组织者，听从统一指挥和管理，保证运输过程安全顺利。

可能存在的风险因素：自诩经验丰富，自行其是等情况。

（4）驾驶经验技术

从事核电设备陆运工作的驾驶员，必须具备熟练的专业技术和丰富的驾驶经验，不仅能够在驾驶时自如地处置各种情况，还应具备一定的维修保养知识，掌握安全运输的要点。

可能存在的风险因素：处理突发状况的经验不足、违规操作、车辆故障无法自行排除等情况。

（5）风险分析依据

驾驶相关证件和执照、以往运输业绩、以往违章记录等。

2.1.2 运输管理

运输管理工作包括运输前各类方案及程序的制定、运输中的全程监控及沟通、出现事故时的及时妥善处理、运输完成后的总结和反思等方面。

（1）运输管理团队

为了确保核电设备陆运工作的安全性，运输管理团队成员必须具备经验丰富、责任心强、严格按规章制度办事等特质。

可能存在的风险因素：团队成员玩忽职守、运输前制定方案及程序时考虑不周、运输过程中未确保全程监控等。

（2）风险分析依据

团队成员资质、以往运输管理业绩、以往过失记录等。

2.1.3 运输工具

核电设备陆运的主要方式是公路运输，运输工具以车辆为主。车辆本身的安全是行车安全的基础，在运输过程中，车辆自身出现问题对运输安全的直接影响是巨大的。但从以往的统计记录来看，直接因车辆机械故障引起的事故比例不超过 10 %，这说明，车辆作为运输过程中的客体，其本身的安全可以被驾驶员所掌握。然而，在车辆运输中，来自车辆的风险不仅仅包括机械故障，车辆的安全性能和结构等方面在运输安全中同样具有重要的意义。

（1）安全性能

主要包括制动性、稳定性等方面。制动性是车辆的主要安全性能之一，直接决定了车辆的总体性能和安全状况。可能存在的风险因素有刹车失灵导致车轮附着力不足等情况。稳定性是车辆的又一主要安全性能。可能存在的风险因素有车辆载重过大、重心过高影响稳定性等情况。

（2）结构

安全车辆的结构应当配备足够的安全防护装置，重要部位应予以加强。

可能存在的风险因素有驾驶环境恶劣、可能发生直接碰撞的部位强度不足、挂车与车头连接部位的强度不足等情况。

（3）风险分析依据

车辆行驶证等证件和执照、以往车况检查报告、

故障维修记录、车辆配载方案等。

2.1.4 运输环境

核电设备陆运过程中的环境条件一般分为道路条件、天气气候条件以及时间段等。

（1）道路条件

可能存在的风险因素：恶劣路况造成颠簸损坏设备以及单调笔直的路段造成驾驶员疲劳、分神等情况。

（2）天气气候条件

可能存在的风险因素：高温酷热天气造成发动机爆缸或轮胎爆胎、雨雪天气道路湿滑导致刹车失灵、大雾天气降低能见度等情况。

（3）时间段

可能存在的风险因素：深夜驾驶引发疲劳驾驶等情况。

（4）风险分析依据

运输全程路况勘察报告、危险路段情况报告、运输期间天气预报等。

2.1.5 风险源清单

根据以上分析，在核电设备陆运工作开始前，编制风险源清单如下：

表 1　风险源清单

一层指标	二层指标	三层指标
驾驶员	生理状况	疲劳驾驶
		带病驾驶
	心理状况	心态失衡
		冲动驾驶
		注意力分散
	职业道德	自行其是
	驾驶经验技术	经验不足
		违规操作
运输管理	运输管理团队	自行排故失败
		团队成员玩忽职守
运输工具	安全性能	刹车失灵
		超重
	结构	直接碰撞部位强度不足
		连接部分强度不足
运输环境	道路条件	颠簸
		路面单调造成分神
	天气与气候条件	高温爆缸、爆胎
		雨雪天气道路湿滑引发刹车失灵
		大雾天气导致能见度下降
	时间段	深夜驾驶引发疲劳驾驶

2.2 风险分析

通过逐一分析核电设备陆运风险源清单包含的各风险源，弄清各种风险因素发生损失的可能性和严重性，确定风险等级。通过收集总结得到的分析结果，对风险进行定性分析和定量计算，建立运输安全风险评价指标体系。该体系建立后，即可据此对任何核电设备陆运工作进行风险分析和评价。

2.2.1 风险可能性分析

安全风险发生的可能性可通过以往统计数据或经验得出，在列表检查时选取适当的概率语言表述，列表检查结果可通过汇总得出定性的风险发生可能性。设为字母 P（Possibility），数字区间为 1~5，数值越高，可能性越高。

表 2　风险可能性

级别	可能性	说明
5	很可能	几乎经常出现
4	有可能	有一定概率出现
3	有时	出现概率较小
2	极少	不能认为不会出现、有很小可能发生的
1	几乎不可能	出现的概率接近于零、可以假设不发生的

2.2.2 风险严重性分析

根据风险发生后可能造成的损失，区分为人和物（车辆和货物）等。人包括驾驶员、乘员、行人、其他驾车人等，其后果属于人身伤害，分为死亡、重伤、轻伤、无伤害，设为字母 p（personnel），数字区间为 0~3；物包括己方车辆和货物、交通冲突方车辆、其他相关车辆等，其后果属于财产损失，分为报废、重度损坏、轻度损坏、无损坏，设为字母 E（Equipment），数字区间为 0~3。

人身伤害和财产损失都属于事故，其严重性按程度分为灾难性的、危险性的、临界的、安全的。设为字母 D（Damage）：D=p+E

D 的数值越高，损失越大，定量划分详见下表：

表 3　风险严重性

严重性	人（人身伤害）	物（财产损失）
灾难性（5~6）	死亡（3）	报废（3）
危险性（3~4）	重伤（2）	重度损坏（2）
临界（1~2）	轻伤（1）	轻度损坏（1）
安全（0）	无伤害（0）	无损坏（0）

2.2.3 风险等级计算

风险等级设为字母 L（Level）：

L=P*D =P*(p+E)

L 的区间划分详见下表：

表 4　风险等级区间表

	灾难性的（5~6）	危险性的（3~4）	临界的（1~2）	安全的（0）
很可能（5）	25~30	15~20	5~10	0
有可能（4）	20~24	12~16	4~8	0
有时（3）	15~18	9~12	3~6	0
极少（2）	10~12	6~8	2~4	0
几乎不可能（1）	5~6	3~4	1~2	0

3　核电设备陆运风险评价指标体系的实际应用

3.1 运输难度系数的引入

核电设备具有形状特殊、尺寸超限、重量极大等特点，部分核电设备还有特殊运输要求（如充氮、设置加速度仪等），而这些特点往往会提高运输难度，使实际风险等级高于公式计算所得。

为了提高风险评价指标体系的可靠性，在实际工作中，应用该体系对核电设备运输进行风险评价时，还需根据核电设备各类特点引入相应难度系数 d（difficulty）：

$$d=d_1*d_2*...d_n$$

使用经验判断法，得出常见运输难度系数的数值区间表如下：

表 5　运输难度系数

设备特点	形状特殊，固定难度大(d_1)	尺寸超限(d_2)	重量极大(d_3)	运输特殊要求 充氮(d_4)	运输特殊要求 加速度仪(d_5)
难度系数(d)	1.5	1.5	1.6	1.4	1.4

3.2 案例田湾核电项目 5 号机组反应堆压力容器支承运输

在该设备运输工作开始前，通过道路勘察、各类文件审查等手段，了解到本次运输工作的一些特点：

该设备形状特殊、尺寸超标，在计算相应风险等级时，需要引入表 3.1 中 d_1 和 d_2 数值；

通过对驾驶员的驾驶执照、运输业绩和以往违反交通法规情况进行审查后得知，执行本次运输任务的驾驶员驾龄超过十年，具备丰富的大件核电设备运输经验，三年前开始执行核电设备运输任务后，未违反交通法规。

通过调查运输团队成员的资质、运输管理业绩和以往过失记录得知，执行本次运输任务的中国外运大件物流有限公司是一家成立于 2000 年的专业大件运输公司，运输资质满足设备运输要求，运输质量管理符合 ISO 9001 标准，还具备丰富的核电设备大件运输经验。

通过对运输车辆的行驶证等证件和执照、以往车况检查报告、故障维修记录、车辆配载方案进行审查后得知，执行本次运输任务使用的车辆已服役两年，安全运行超过 5 万公里，车况良好，未进行过大修，运输方出具的配载方案科学有效且满足设备运输相关要求。

通过运输全程路况勘察报告、危险路段情况报告、运输期间天气预报得知，除抵达现场之前的一段道路外，本次运输工作经行的道路均为高速公路。运输全程最低限高 5 m，最窄路面 12 m。运输时间为 2018 年 4 月 24 日至 2018 年 4 月 25 日，运输期间气温 14~23 ℃，期间以阴天为主，间或小雨。

结合上述实际情况，通过经验判断法，得出每个三层指标的 P、p、E 值，代入公式计算出风险等级（L），详见表 6：

通过表 6 可以看出，风险等级超过 20 的风险源共有 4 条，全部集中在环境条件方面，针对这 4 条风险源采取的控制措施包括：

- 双人轮流驾驶，副驾驶位人员同样需要观察路面情况，必要时提醒驾驶员，避免分神引发事故；
- 规定了执行该设备运输任务时的最高行驶速度和过弯最高速度；
- 出现严重影响能见度的大雾天气时，将车辆驶入高速休息站或路边停车区等待；
- 每日行驶时间不得超过 8 小时，0~5 点车辆禁止上路。

通过上述四条以及针对其他风险源采取的控制措施，该设备在运输途中无任何事故发生，最终安全运抵现场并交付。

3.3 效果评价

通过对以上案例的分析，可以看出，应用风险指标评价体系的优点主要体现在：

➢ 检查风险源时，可以十分直观地观察和对比所有风险源及其对应的风险等级区间；

➢ 可将风险源按风险等级按由高到低降序排列，根据风险等级的高低采取力度不同风险控制措施；

➢ 可将风险源按表中一、二层指标分类，对于同类别且风险等级区间相近的风险源，批量进行风险控制。例如：驾驶员方面的风险，通过提高审核条件、严格规章制度、加强培训等措施进行统一控制。

表 6　田湾 5 号机组反应堆压力容器支承陆运风险源检查清单

一层指标	二层指标	三层指标	风险可能性 P）	风险严重性（D）		风险等级（L）
				人（p）	物（E）	
驾驶员	生理状况	疲劳驾驶	1	2	2	9
		带病驾驶	1	2~3	3	11.25~13.5
	心理状况	心态失衡	1	1~2	1~2	4.5~6.75
		冲动驾驶	1	1~2	1	4.5~6.75
		注意力分散	1	1~2	1~2	4.5~9
	职业道德	自行其是	1	1	1	4.5
	驾驶经验技术	经验不足	1	1~2	1~2	4.5~9
		违规操作	1	1~2	1	2.25~4.5
		自行排故失败	2	1	1	4.5
运输管理	运输管理团队	团队成员玩忽职守	1	1~4	1~4	4.5~18
运输工具	安全性能	刹车失灵	1	2~3	2~3	9~13.5
		超重	1	1~2	2~3	6.75~11.25
	结构	直接碰撞部位强度不足	1	1~3	2~3	6.75~13.5
		连接部分强度不足	1	1~2	2~3	6.75~11.25
环境条件	道路条件	颠簸	2	1	1~2	9~13.5
		路面单调造成分神	3	1~3	1~3	13.5~40.5
	天气与气候条件	高温爆缸、爆胎	1	1~3	1~3	4.5~13.5
		雨雪天气道路湿滑引发刹车失灵	3	1~2	1~2	13.5~27
		大雾天气导致能见度下降	3	2~3	2~3	27~40.5
	时间段	深夜驾驶引发疲劳驾驶	4	2~3	2~3	36~54

4　结语

核电设备陆运风险评价指标体系有助于更加全面和准确地把握实际运输工作中可能存在的风险因素。通过对风险等级的区分，在采取风险控制措施时能做到对症下药，大大提高风险管理的效率，最大程度地避免风险的产生和降低风险造成的损失，进而有效确保核电设备得以安全、顺利地运抵核电现场。

参考文献：

[1] 许谨良. 风险管理(第三版)[M]. 北京：中国金融出版社，2006

[2] 王凯全. 风险管理与保险[M]. 北京：机械工业出版社，2008

[3] 叶陈刚, 郑君彦. 企业风险评估与控制[M]. 北京：机械工业出版社，2009

[4] 吉姆·怀廷，王光远，宁丙文(译). 安全风险管理标准ISO31000[J]. 劳动保护, 2009(2):18-20

[5] 曹元坤, 王光俊. 企业风险管理发展历程及其研究趋势的新认识[J].当代财经, 2011(1):85-92

[6] 杨杰. 军队汽车运输安全风险评估与控制研究[D].华中科技大学, 2014

海外 EPC 总承包项目管理要素和风险控制

许井

东方电气集团国际合作有限公司，成都 611731

摘要：在 EPC 项目的执行过程中，各项目背景不同，存在的风险也各自不同，要根据当时当地的具体情况、项目的合作方式、业主的管理水平等有针对的采取多种灵活的执行方式，在项目管理方面也需要更多更有效的配套措施和方法，对项目可能存在的风险要提前识别并加以管控。本文通过在越南海防 EPC 项目工程执行过程中，对我们合同履约时在设计、采购和施工等方面所遇到的问题和采取的措施，进行探讨和剖析，为公司今后海外 EPC 总承包项目管理方式和风险控制提供参考。

关键词：EPC；设计；采购；施工；施工承包商；风险控制

中图分类号：F426.7; F125　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-9006（2024）04-0083-06

Management Element and Risk Control in Overseas EPC Project

XU Jing

（Dongfang Electric International Corporation， 611731，Chengdu, China）

Abstract:During the execution of EPC projects, each project has different backgrounds and the associated risks vary. It is necessary to adopt flexible execution methods which are tailored to local conditions, collaboration approaches and the owner's management level. Project management requires more effective supporting methods. It is crucial to identify and control potential risks proactively. This article analyzes the problems encountered and the measures taken during the process of engineering, procurement and construction of the EPC project, which is located in Hai Phong, Vietnam. The goal is to provide insights and lessons that could help to improve the project management and risk control of the company's future overseas EPC turnkey projects.

Keywords: EPC; engineering; procurement; construction; construction contractor; risk control

1 总承包项目管理要素的控制

1.1 设计（Engineering）

EPC 项目的设计管理工作中，设计周期过长是影响工期的一大因素。设计管理流程复杂、设计提资慢、业主工程师审批慢是其中三个主要原因。

（1）设计管理流程复杂：EPC 项目设计管理流程基本为“设计院-项目经理部-业主工程师-施工分包商”，总的来说图纸审批环节矛盾较为突出，造成若干关键图纸无法及时批准和供施工使用的现象。图纸审批速度决定着现场施工进展快慢，作为国际 EPC 总包商，我们可以通过在主合同中限定图纸提交版数，优选设计团队和设总以及向设计团队进行合同交底等，先审批图纸目录、提高设计质量等手段来提高图纸审批进度。

（2）设计提资慢：有设计院、厂家、业主的问题，也有总包商自己的问题，因此总包商对设计提资的协调效率与适当及时决策至关重要。加大对设计院提供设备技术规范书的效率和对厂家

收稿日期：2024-03-11

作者简介：许井（1966－），男，学士，1988 年毕业于重庆建筑工程学院（后合并于重庆大学），先后从事国内外火电、市政环保项目的工程管理和监理工作，现负责东方国际公司的质量安全方面管理工作。

提供资料的力度，可以在项目部中指定专人直接负责各专业厂家与设计院之间协调，提资清单由各专业提供，即在相对高峰期可以设置一名“设计提资总协调人”来解决这个问题。紧急状态下也可以采取厂家和设计院直接对口，以及在设计院二次确认前要求厂家提前备料等方式来缩短中间时间。

（3）业主工程师审批慢：我们最终目标是让图纸尽快用于施工，因此让业主尽早介入图纸审批工作的监督管理协调、制定最终用于施工目标日期、求同存异与阶段执行并举、适当举行封闭式联合图纸会审会签、在我方有把握的情况下单方面提供施工图给施工分包商等措施，可以缩短一定出图时间。

1.2 采购（Procurement）

在各级采购制度比较健全、采购程序相对规范的情况下，海防项目的设备物资采购在进度控制、价格比选、质量把控等方面还存在以下问题：

（1）设备采购周期偏长：采购的周期应该限定在每批设备一个月内完成，为达到此目的，在招投标过程中要提前对投标文件中未明确的事项，应进行充分的澄清，为后续评标提供依据，减少合同谈判时双方的争议和分歧；注意核对投标人的报价范围是否与技术招标文件中的供货范围一致，同时注意投标人的商务文件及技术文件是否有相互矛盾之处；注意投标人的报价中是否存在有意的不平衡报价，导致日后因工程量增加引起合同总价大幅增加。

另外，今后公司新能源项目多时，所采购的设备材料从厂家到型号都存在大量雷同的情况下，各项目部有时会为先得到自己的设备而暗中较劲，人力资源浪费较多。可以考虑对一些重要的、定型的以及一些价格随市场变化大的设备材料进行集中采购，可以很好的掌控价格和协调各项目部的设备材料交货期，从经济和工期上有利于各项目部的工作。

（2）市场价格预测工作不足：国际国内钢材、铜材等各种材料价格经常变化，要结合工期在价格上涨前用较低价格把大部分设备采购完，预判全球材料市场价格开始下滑时要减缓采购进度。在项目规划阶段请期货专家提前预测市场价格波动规律，并让有关工作尽量向这个方向靠拢，那么我们的损失将会大大减少，在后续项目上应该格外注意。

（3）厂家设备出厂监控弱：项目部自身对设备出厂前检查、验收、发货顺序和包装环节监控较弱，对运输也造成了直接负面影响。应根据设备情况考虑直接聘用设备监造工程师和成建制监造单位相结合的模式，针对每一个采购合同统一进行生产巡检和出厂控制。

（4）运输各环节控制薄弱：海外设备材料运输，港口装船经常甩货、通关办理慢导致长期滞港、港口运输效率低且出货无顺序。要解决这些问题，不仅仅是运输承运商单方面的事情，而是整个项目部各个部门和专业统一协调的事情，同时加强对运输承运商服务质量和效率的管控，加大海关人员定期沟通力度。

（5）现场仓储场地周转慢、保管差：解决现场仓储场地紧张这个矛盾的重点是加快施工进度和加强现场调度，同时辅以在场区外寻找或租用备用场地。施工分包商的仓储保管容易出现货到现场不知道或找不到的现象，必须对承包商的物资管理台帐进行严格管理，随时掌握设备材料进出库情况；对设备堆放区域进行合理规划，避免更多的二次倒运现象；对仓储条件进行加大投入，确保重要、易损件得到妥善入库保存；对开箱过程进行规范管理，掌握设备材料漏损情况，以便及时消缺和补货。只有这样，才能保证各方行动一致，将设备材料对工期造成影响的人为因素降到最低。

1.3 施工（Construction）

EPC 项目实施的难度主要集中在 C 部分，即现场施工，这涉及到项目分包管理、组织协调、计划控制、资源调配、安全质量管理、过程成本控制等诸多因素，施工组织管理方面需要关注如下问题：

（1）施工分包商组织能力弱

选择一家施工总包商，有可能因其管理能力弱，经验不足，导致项目组织涣散、工程拖期、人心不稳、效率效益低下等不良现象。为避免这种风险，可以考虑在以后大型 EPC 项目施工承包商选择时，选择两到三家单位共同执行施工承包合同，形成竞争机制，在工程进行过程中，公司有权进行工程项目的再分配，并按照合同签订时制定的有效条款进行商务切块。对于场地管理，在签订合同时，就按照几方的施工总平规划方案，合理的划分所需施工用地。一旦出现重新切块情况，迅速调整场地分配，形成多干多得的局面，有效保证工程进度。当然，合同签订时工程量及单价的把握、施工中的总平管控、违约责任认定就显得尤为重要，这对公司的计经人员、现场管理人员等素质能力也提出更高要求。

（2）资源总量与进度节奏控制配合不好

作为施工管理，资源总量包括人力、机械、设备材料、图纸、场地、力能供应、资金等多个方面，各种资源的节奏控制对施工有不同程度的影响。项目资源总量和施工计划之间的配合不合理、施工承包商的人、机、料的进场与公司的设备材料、图纸、资金等配合不合理，都会导致现场多个作业面反复出现资源过剩而窝工或无资源而不能开工两种极端现象。在这一点上，EPC 总包商应和施工分包商一起努力保证符合现场工期计划的有弹性的资源配置，进可攻，退可守。

（3）把控现场施工

1）施工总平的管理工作，是现场管理的重中之重。施工道路排水不畅、仓储堆放凌乱、组合场地使用不合理、大型施工机械利用率低下等现象，都是与总包商的经验欠缺、协调不力、措施不到位有关，对施工工序的把握及组织协调方面需要项目经理部员工认真学习研究。

2）充分重视地基处理。对于地下构造复杂的项目，一旦出现施工分包商施工经验弱、设计院过于保守、桩基试验过程偏长等原因，将会严重制约整个现场的土建工作。为避免和改善这些影响因素，可以将地基处理工程单独直接分包，项目经理部聘请有真材实料的桩基专工进行现场指导验收，并提前做好试桩工作，选择国内合格的试验单位与当地试验单位相结合进行，协调好业主、监理工程师的工作，控制试桩数量，缩短试桩时间，为设计院提供真实、详尽的试桩报告，并做好评审工作，打消设计院的顾虑，让他们能提供经济、合理、完整的桩基图。

3）提升管理水平，用专业的人干专业的事。在公司施工管理人员能力不能满足项目的需要时，可以考虑如下两种模式弥补。一是与专业的工程项目管理有限公司合作，成建制的加入到项目现场管理团队，全面参与现场施工管理、质量控制、安全管理、商务管理和综合管理。二是项目经理部根据需要直接聘用少量专业人员参与我们的施工管理活动中。

两种模式各有利弊，成建制模式能在第一时间用他们的工程管理人员和经验搭建成熟高效的管理机构和施工管理平台，使现场资源配备和施工更加科学合理，全面参与计划、现场施工监理、质量和安全检查管控和进度控制；不利的一面是项目管理公司人员也存在经验欠缺和人员流动性较大的问题，对工程进度和管理造成一定的影响。而采取直接聘用模式聘用人员更有针对性，所聘人员的工作积极性和责任性更高，而且直接聘用人员的成本较成建制聘用低。但是公司作为中国电力行业的龙头企业之一，要想开拓海外市场，继续实施 EPC 项目，做大做强还是要靠我们自己。因此，必须加强项目经理团队建设，培养以项目经理为首的能吃苦、够专业、善敬业的管理队伍，能及时协调与设计院、供应商、施工分包商、监理、业主间的各种困难，保证项目的顺利执行。

（4）强化计划进度控制

为保证进度计划的实现，需要解决如下问题：

1）人力资源

人力资源一直是制约现场进度的一个瓶颈，各个国家当地政府对当地劳工占比有一定要求，还经常出现改变工作签证或工作准证政策而限制外国人（尤其是中国人）大量进入的情况。各个国家希望中国资金去投资，却又担心中国人的劳动力输入而影响本国人员就业。中国企业目前在

世界各国的在建和在投标中的项目非常多，不管政策如何变化，国际市场还得继续参与。有鉴于此，应改变过去以中国劳动力和分包商为主、以中国采购和供货为主的常规思维，转而要加大项目所在国属地化开发与应用，在劳动力、分包商、机械、设备、材料等多方面对当地资源进行调研和开发，力争项目执行不受或降低人力资源等带来的影响。

2）资金支付

即使 EPC 总包商保证施工分包商现场进度款时，也有可能出现施工分包商拖欠他们的分包商工程款的情况，引发各种矛盾而影响工期。为避免总包商支付的资金不能到达现场一线施工队伍，我们可以尝试专款专用的付款方式，要求施工分包商上报各区域、未来数月的资金需求计划，而且要求其落实到每个分包商，总包商核实资金计划后审批施工分包商的付款申请，付款时在相关三方见证的情况下，将资金付到一线施工队伍或材料供应商手上。

3）图纸和设备

项目经理部应严格按照进度计划给施工分包商提供图纸设备，还要超计划落实后续图纸设备材料，这就要求有专人对施工分包商提交的专项计划中涉及到的图纸设备材料进行全面统计清点，识别出施工分包商真实需求。同时，要加强物资及设备的管理力度，保证不出现设备材料入库后查找不到或损坏后不知晓的现象。

4）组织措施

计划一旦付诸实施，就需要项目经理部各区域专工提高执行力度，除了正常的质量安全管理外，还要加强进度和资源的管理，对照专项计划，每天盘点负责区域的完成情况和到岗人数，保持顺畅的沟通机制，及时将信息反馈到施工承包商主要负责人、项目现场部门负责人或项目领导那里，一方面能鞭策他们加快进度，另外一方面也可为以后索赔留下原始数据。

5）文明施工及质量安全管控

加大文明施工的管理，杜绝排水设施和厂区道路人为破坏现象，保证现场的施工协调有序；强化施工分包商的质量管理意识，提高土建施工及安装的质量工艺标准，减少返工及消缺损失；提高参建各方的安全生产意识，确保不因安全事故而影响正常生产，都是项目计划进度得以实现的前提。

（5）提前规划和安排，做好“事前”预防工作

1）场地移交：在海外项目中，由于业主的征地和三通一平工作往往不到位，项目的建设用地基本上都是边征地、边回填、边移交、边施工，非常影响项目的进程。必要时应自己想办法进行部分急需场地的回填和租赁工作，同时做好工期和费用方面的索赔记录。

2）加大合同评审的广度和深度，提前建立规范的管理制度。合同签约后应再次对合同进行深度评审，发现风险点，找到相应应对措施。同时，按照公司的管理要求，尽快编制《工程项目实施计划》《质量计划》《HSE 计划》《管理制度汇编》等基本手册，并尽快向业主提交质量计划、项目实施手册、HSE 计划等各种程序性文件。这些内外管理制度越能尽快建立，越能有效地规范和保证项目有序准确的进行，促进项目质量安全和进度。

3）地质勘探工作，由于是工程设计和地基处理的重要依据之一，可以在业主移交场地的同时就开展此项工作，并且在点位的选择上要做到合理、适量。这项工作做的越早越准确，越可以为项目节约工期。

4）工程试桩的好坏，直接影响到桩基图出图的效率和质量，提早引进专业试桩分包商，聘用专业人员监督试桩施工、试验及提资工作，为设计院尽早提供桩基施工图创造条件。

5）工程设计及施工等中国标准和规范的提前认定，有利于后续施工的便捷验收。在国际承包过程中，中国标准和规范很少被列入合同认可标准范围，而国内承包商一般都是对中国标准和规范非常熟悉，因此提前策划中国标准和规范在所在国的认可和批准，是公司技术人员和设计分包商共同努力的目标，同时，加强设计院、施工分包商和公司技术人员的国际标准学习也是必要的。

2 风险管控

海外 EPC 总承包合同，受国际经济、政治环境的影响，加上不同国家不同地质情况，使得项目风险极大，大致分为标准规范问题、汇率风险、地质风险、社会治安风险、税务和法律风险、政治风险等几个方面。

2.1 标准、规范的问题

国内电力行业的建设技术已经非常成熟，在 EPC 合同投标过程中，按照行业惯例，公司多与国内设计院进行合作。而国内设计院的系统设计和大部分国内设备、材料的制造和检验是以中国现行的标准、规范为基础，但在海外 EPC 合同文件中，多采用国家的 G7 标准或者国际上公认的标准作为要求，加之海外业主多为项目聘请的欧洲咨询工程师，尽管合同谈判时我们推荐了中国标准，但业主往往不认可，在实际使用时需要单独报批，这对中国承包商来说就出现了“双重标准”问题，一方面耗时长，另一方面增加了项目成本。

在图纸审批过程中，业主及咨询工程师往往以国际标准来审图，会对中国规范提出质疑，公司要花费大量的时间精力去解释和澄清。因此需要联合设计院不遗余力的进行中国规范标准在海外普及和推广工作，提供不同标准的对比，力争在合同生效前使中国标准得到业主的批准。

对于部分得不到业主认可的中国标准，为了推动项目进展，避免影响工期，可以考虑采取将技术问题转化成商务问题的方式来解决，项目经理部需要在工程成本和工期上进行权衡。

2.2 汇率风险

自海防项目合同签订到获得 PAC 证书为止，在合同执行过程中，人民币对国际结算货币美元的汇率一直波动剧烈，虽然我们为了降低汇率风险采取了远期结汇的措施，但仍然存在汇率损失情况。

为降低汇率影响，通常可以采用多种方式，如：通过应收账款买断锁定汇率风险、合同采取固定汇率或强势货币、通过外汇对冲操作锁定汇率风险、通过外汇结构性存款获取收益，以及把握进口设备材料的采购时间等。

2.3 地质风险

针对项目所在地的不同地址条件，在合同生效前收集当地地址条件、地质灾害历史记录和潜在风险因素，或聘请当地地勘队伍进行初勘获得一手资料；合同生效后尽快安排详勘或试桩队伍进场，为设计院提供详细的地勘和试桩资料，以便选用合适的施工技术和方法。

2.4 社会治安风险

由于电力项目选址往往较为偏僻，离城市较远，治安环境也难有保障，存在现场物资被抢、被盗现象，面对恶劣的治安环境，一方面需要加强与当地公安部门的联系和沟通，另一方面需要从国内聘请专业保安队伍负责现场看守。同时，了解当地宗教、习俗、文化等有关信息，加强与当地居民间的沟通互信，必要时联合当地有实力的家族、长老、企业组成联合体互担风险。

2.5 税务和法律风险

了解项目所在国的税收政策，在合同谈判阶段明确工程是否符合相关免税政策，并明确可以免除的税种及需要办理的免税手续，财务人员从合同管理等各个方面做好税收规划，规避税务风险，在遵章纳税的同时，尽可能合理降低税额保证利润最大化，聘请熟悉税法且能力强的当地会计师，选用对企业有利的会计核算方式，做好企业各类税务报表的编制和报审工作，了解国内有关税收政策，如出口设备的退税政策以及在国外已缴纳的某些税种在国内是否有优惠或减免政策，加强同中国驻当地使馆及经参处商会的联系，了解当地的劳动法律，对当地雇员签订合法的劳动合同，减少劳动纠纷，同时加强与当地政府及警察的关系，必要时寻求政府的帮助。

2.6 项目融资及经济风险

电力项目具有投资大，建设周期长的特点，除了业主自有资金的准备外，项目的融资贷款不能及时“落地”是制约项目顺利实施的重要因素。由于贷款金额大，所在国政府提供主权担保、银行审批流程繁琐，贷款协议的生效条件等等，每一个环节 EPC 总包商都难以控制，一旦贷款不能及时生效放款，直接影响工期，给承包商已发生的成本造成损失。

作为企业，必须强调成本管理，强化成本的精细化管理，防范经济风险。比如可通过风险转移来控制，将垫资任务分解到各分包单位，做到风险转移；材装价格风险可通过合理的招投标或者分批采购等方式使风险降到最低；回款进度风险，在合同签订阶段就要考虑结算方式，减少签字流程，明确在合同约定时间内没有给出明确意见应视为同意支付工程款。

2.7 社会政治风险

战争与内乱，可能使建设项目终止或毁约，或者建设现场直接遭受战争或恐怖袭击的破坏，使承包商和业主都遭受损失；国有化征用与没收外资，往往使项目的外方业主蒙受重大损失；EPC工程总承包项目合同履行过程中，项目所在国法律、政策发生变化，可能使承包商担额外的责任，造成较大的履约风险。

要尽量选择与中国有友好外交关系的国家和政治稳定的国家投标。在项目投标前要对项目所在国的政治情况进行跟踪调查，是否有政治冲突，了解宗教、习俗、文化等有关信息。并做出是否参与投标的判断，做到风险回避，同时可联合国内外有实力的企业组成联合体风险共担。

3 结语

东方国际将紧紧抓住时代发展机遇，充分发挥集团公司国际业务“主力军”和顶梁柱作用，提高集团公司的品牌和经营水平，大力提升国际传播力和影响力，为做优做强做大集团公司国际业务板块，促进集团公司实现创建世界一流企业做出应有贡献。因此，我们要总结以往EPC项目工程管理中的经验教训，加快进行适应工程执行能力的全面改革，强化核心功能转型适应能力改革，提升工程项目履约能力，不断提高项目管理水平筑牢工程承包履约基础。

一是进一步加强合同履约全过程管理，适当增加合同评审的广度和深度，提高“事前”预防作用；加大检查频次，强化“事中”监测功能；严格量化考核，增强“事后”评价效果。二是强化项目成本管控，继续开展成本精细化管理，切实提升项目履约质量，实现合同经济效益。三是加强项目经理团队建设，通过加强对“项目经理”这一项目履约“关键少数”的培养和监督，打造一支素质高、能力全、作风正的工程项目管理专业化队伍。

（上接第34页）

$\Delta K < \Delta K_{th}$，即在高周载荷下裂纹不扩展。经校核缺陷不扩展，如表5所示。

表5 缺陷处的应力强度范围

缺陷轴比（a/c）	1	0.4	0.2
ΔK/ MPa × $\sqrt{m}$	2	2.18	2
ΔK_{th}/ MPa × $\sqrt{m}$		*ΔK_{th}	

5 结语

本文采用断裂力学方法对某核电厂低压转子焊缝处的超标缺陷进行了评估，评估结果如下，同时证明，采用断裂力学方法进行缺陷评估是安全可靠的。

（1）经分析评估，该处缺陷为可接受缺陷，不会造成转子的一次性断裂；

（2）对转子进行了低周疲劳的寿命分析，经评估，在转子的寿命期内，该缺陷的存在不会导致转子发生断裂，为可接受缺陷。

（3）对转子进行了高周疲劳的寿命分析，经评估，在转子的寿命期内，高周载荷下该缺陷不会扩展，为可接受缺陷。

参考文献：

[1] 丁有宇. 汽轮机强度计算手册[M].北京:中国电力出版社, 2010：427

[2] 电力行业电站金属标准化技术委员会. 中华人民共和国电力行业标准火电机组寿命评估技术导则：DL/T654-2009[S].北京：中国电力出版社, 2009：11-15