 DOI: https://doi.org/10.12345/gcjsygl.v9i6.24362

Research and application of combination technology of low-pressure outer cylinder for secondary reheat million kilowatt unit

Yong Li

China Energy Construction Group Guangdong Thermal Power Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510735, China

Abstract

With the development of thermal power units to large capacity and high parameters, the secondary reheat technology has become the key means to improve the thermal efficiency of the units. Huaneng Laiwu expansion project adopts 21000MW ultra-supercritical, secondary reheat, five-cylinder and four-row steam extraction steam condensing steam turbine, and its low-pressure external cylinder needs to be assembled and welded on site due to its huge volume. Taking this project as the background, the key technology of low-pressure outer cylinder combination is studied systematically, including the inspection and installation of end plate and side plate, welding process optimization, deformation control method and dynamic monitoring strategy. Through the strict quality control process and the piecewise symmetrical jump welding method, the welding deformation and medium deviation problems are effectively solved, and the high precision combination of the low pressure outer cylinder is realized. The practice shows that this technology can guarantee the operation stability of steam turbine and provide an important reference for the construction of similar type of units.

Keywords

low-pressure outer cylinder; Joint cylinder technology; Welding process; Deformation control; monitoring

二次再热百万千瓦机组低压外缸拼缸组合技术研究与应用

李勇

中国能源建设集团广东火电工程有限公司，中国·广东 广州 510735

摘　要

随着火力发电机组向大容量、高参数方向发展，二次再热技术成为提升机组热效率的关键手段。华能莱芜扩建工程采用 2×1000MW超超临界、二次再热、五缸四排汽抽汽凝汽式汽轮机，其低压外缸因体积庞大需现场拼装焊接。本文以该工程为背景，系统研究了低压外缸拼缸组合的关键技术，包括端板与侧板的检查与安装、焊接工艺优化、变形控制方法及动态监测策略。通过严格的质量控制流程和分段对称跳焊法，有效解决了焊接变形与对中偏差问题，实现了低压外缸的高精度组合。实践表明，该技术可保障汽轮机运行稳定性，为同类型机组建设提供了重要参考。

关键词

低压外缸；拼缸技术；焊接工艺；变形控制；动态监测

1 引言

汽轮机作为火力发电机组的核心设备，其结构精度直接影响机组效率和运行安全。二次再热技术通过提升蒸汽参数和优化热力循环，显著提高了机组热效率，但也对汽轮机结构设计提出了更高要求。华能莱芜扩建工程采用五缸四排汽结构，其中低压外缸因运输限制需现场拼装，其组合精度直接影响转子对中、动静间隙及热膨胀协调性。目前，国内外关于大型汽轮机低压外缸现场拼装的研究较少，尤其在焊接变形控制与动态监测方面存在技术空白。本文结合工程实践，系统阐述低压外缸拼缸组合的关键技术，为同类型机组建设提供理论依据与工程经验。

【作者简介】李勇（1985–），男，中国湖南常德人，工程师，从事工程施工技术研究。

2 低压外缸结构与技术难点

2.1 结构组成

低压外缸由端板、侧板、外缸上半（含三部分）及下半钢架组成（图 1），总重量达 47.5 吨。外缸下半通过支撑管与凝汽器连接，内缸通过猫爪支撑于轴承座，整体结构需满足高刚度与热膨胀补偿要求。外缸上方运用多段拼接结构，每段之间设置法兰连接，法兰表面经过高精度加工以保证装配时的严密贴合，减少拼装误差。侧板运用厚壁铸钢件

并借助加强筋与端板连接，以优化受力分布，降低运行时的变形风险。内缸与外缸之间设置膨胀缝，允许运行过程中热膨胀引起的微小位移，从而保障机组长期稳定运行。

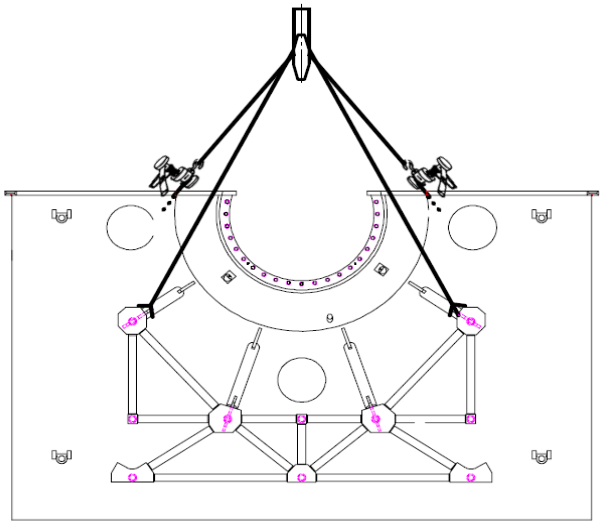


图 1 低压外缸结构示意图

2.2 技术难点

2.2.1 尺寸精度控制

端板与侧板几何尺寸误差需小于 ±1mm，水平结合面高度差需控制在 ±0.5mm 以内。运用三坐标测量仪、激光跟踪仪等高精度测量工具，对关键连接部位进行尺寸检测并借助调整加工工艺，如精密机加工和装配过程中的定位销导向，以保证组件的尺寸精度满足要求。装配过程中引入误差补偿技术，以减少累积误差对整体拼装精度的影响 [1]。

2.2.2 焊接变形抑制

焊缝总长度超过 200 米，焊接热应力易导致局部翘曲与整体对中偏差。使用分段对称跳焊法等合理的焊接顺序，并优化降低焊接线能量、提高焊接速度等焊接参数，以减少热输入。焊接过程中应用局部刚性固定装置，防止焊接收缩变形并在关键部位进行多点测温，以动态调整预热和后热处理工艺，来保证焊接残余应力均匀分布，从而降低焊接变形的影响。

2.2.3 动态监测需求

拼装过程中需实时监测变形量，确保轴系中心线与设计值一致。使用高精度位移传感器和激光测距仪，结合数字化测控系统，对端板、侧板及焊接区域的变形趋势进行连续监测，并借助数据建模分析预测变形发展趋势。若监测到偏差超过控制范围，可实时调整支撑工装或局部冷却策略以修正误差。运用光学准直仪和三维扫描技术，对轴系中心线进行复核校准，以保证最终装配精度满足设计要求。

3 端板与侧板的质量控制

3.1 预处理工艺

3.1.1 表面清理

采用铜丝砂轮片打磨内外壁至金属光泽，清除油污与锈斑，为后续探伤提供基础。为保证表面清洁度达到焊接要求，还需使用高压空气或无水乙醇擦拭以去除微小颗粒和油脂残留，防止焊接过程中产生气孔或夹杂物。

3.1.2 焊缝检查

通过渗透检测（PT）验证焊缝质量，发现裂纹或未熔合缺陷需返修至符合 ASME 标准。对于端板与侧板连接区域等关键受力部位，需增加超声波检测（UT）或射线检测（RT）以提高缺陷检出率，保证焊接接头的内部质量符合设计标准 [2]。

3.1.3 尺寸修整

依据轴承座中分面至凝汽器接颈的实测距离，修正端板与侧板高度，预留焊接收缩余量（设计值 2.5mm+ 挠度补偿）。在修整过程中应运用激光测距仪或电子水平仪进行测量，并对调整点进行标记以保证拼装过程中位置的一致性。对于存在局部尺寸偏差的区域，可使用精密机加工或局部填补焊接的方法修正，以保障最终装配精度满足设计要求。

3.2 安装与对中技术

3.2.1 端板就位

利用中心导向销定位端板法兰孔，通过液压千斤顶调整径向位置（图 2），百分表监控移动量。为提高安装精度可在端板下部设置限位块，防止位移过程中产生不均匀受力，并使用高精度千分尺进行实时复核，保证端板安装偏差控制在允许范围内。

3.2.2 垂直找正

结合水平仪与挠度曲线，调整端板水平结合面至高出轴承座 352.5mm（含收缩余量），误差 ≤0.1mm/m。在调整过程中需运用对称式调节方法，即两侧同时施加调整力，以防止单侧受力过大导致倾斜。在端板顶部安装精密位移传感器来保证调整精度，实时监测调整过程中的高度变化并结合数据分析进行微调。

3.2.3 轴线对齐

纵向钢丝与千分尺配合，确保端板中心线与轴系中心线偏差小于 ±0.05mm。在拼装过程中使用光学准直仪对轴线进行复核，并在轴承座两端安装基准块，以保证整个低压外缸的拼装轴心线与设计基准线严格一致。结合有限元分析来模拟可能产生的变形趋势，并在施工过程中实时调整安装参数以优化最终装配质量 [3]。

4 焊接工艺优化与变形控制

4.1 分段对称跳焊法

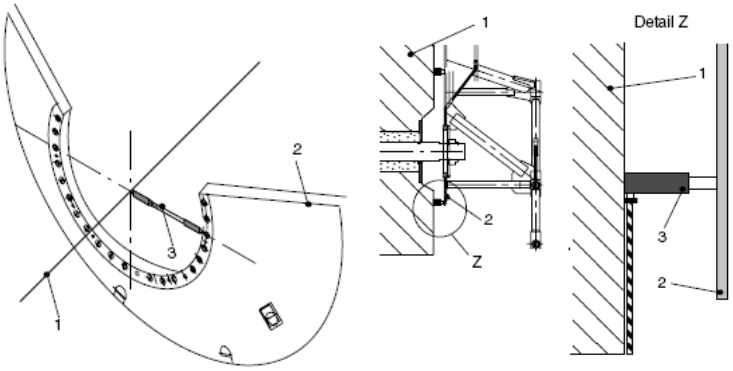
为减少焊接热应力集中，采用四角同步焊接策略：

①分区焊接：将焊缝划分为 10 段，每段长度 ≤300mm，焊工对称施焊。焊接过程中需运用多层多道焊工艺，并在施焊过程中调整电流、电压及焊接速度，以保证各焊接区域均匀受热，减少因局部过热造成的焊接变形。

②层间应力释放：每层焊后使用气锤敲击，降低残余应力 30% 以上。在端板与侧板连接区域等关键焊缝部位，

可增加间歇冷却法或局部热处理等局部温控处理，以进一步释放焊接过程中累积的内应力，防止因残余应力引起的焊缝裂纹或局部变形。

③动态监测：猫爪与导向销处安装千分表，实时监测变形量，控制单次焊接变形 ≤0.08mm。焊接过程中在焊接区域设置多点测温装置，实时监测焊接温度变化并结合有限元分析模型预测焊接变形趋势，在焊接过程中适时调整施焊顺序和冷却速率以进一步优化焊接质量，保证整体拼装精度满足设计要求。



1：代表纵向轴线的钢丝 2：汽缸端板 3：千分尺 1：基础 2：汽缸端板 3：液压千斤顶

图 2 液压千斤顶调整示意图

4.2 变形预测模型

基于热弹塑性理论建立有限元模型，模拟不同焊接顺序下的变形趋势结果表明：①对称跳焊法可降低整体翘曲量 50% 以上；在焊接过程中设置多点约束并结合实时温度监测数据，对焊缝热膨胀及收缩情况进行动态修正，进一步优化焊接应力分布。对于焊接过程中可能出现的局部塌陷或收缩不均匀现象，可利用计算机模拟不同夹具布置方式，优化焊接支撑方案以保证整体焊接变形控制在设计允许范围内。②焊接速度由 0.5m/min 提升至 0.8m/min，热输入减少 22%，变形量降低 15%。在模拟过程中考虑不同焊接工艺参数焊接电流、电压、焊接方向等对变形量的影响，结果表明合理调整焊接参数，可以进一步降低焊缝区域的热应力梯度，从而减少焊接后变形的累积效应。引入动态变形补偿算法，在焊接过程中实时调整焊接路径与焊缝填充量以提高焊接质量的稳定性，保证低压外缸拼装后的几何精度达到设计要求 [4]。

5 动态监测与误差修正

5.1 激光跟踪仪应用

在拼装过程中，采用激光跟踪仪实时采集关键点坐标，生成三维点云数据，与 CAD 模型对比，修正偏差：①端板垂直度偏差修正至 ±0.3mm；在测量过程中利用多角度测量方法，结合高精度全站仪进行交叉验证以提高测量数据的准确性。建立误差实时分析系统来对检测到的偏差进行趋势分析，预测可能出现的结构变形并提前采取调整限位夹具或采用局部冷却法进行误差补偿等修正措施。②侧板对角线误差控制在 ±1.2mm 内。在侧板拼装过程中引入可调式液压支撑装置等智能调整工装，结合激光跟踪数据进行动态调整，以降低因焊接应力释放导致的累积误差。在侧板拼接焊接前增加局部刚性加强措施，并利用有限元仿真优化焊接顺序，以减少热变形对最终尺寸精度的影响 [5]。

5.2 数据驱动调整

基于蒙特卡洛算法，预测不同焊接参数下的变形概率分布，优化调整策略：①焊接电流由 180A 调整至 160A，电弧稳定性提升；在调整过程中利用数字化焊接监测系统对电流波形进行实时分析，优化电流控制策略，以此减少焊接过程中因电流波动导致的熔深变化，并结合高频脉冲焊接技术，进一步提高焊接接头的一致性和稳定性。②预热温度由 120℃升至 150℃，裂纹率下降 40%。在预热过程中运用红外热成像技术对温度场进行实时监测，并借助反馈控制系统调整加热功率以保证温度均匀分布，减少局部过热或冷却不均匀导致的焊接缺陷。优化焊接后缓冷工艺以降低热应力梯度，从而减少焊缝区域的裂纹敏感性，以此提高整体拼装质量。

6 结论与展望

本文系统研究了二次再热机组低压外缸拼缸组合的关键技术，通过精细化预处理、分段对称焊接及动态监测策略，实现了高精度装配。未来研究方向包括：①开发自动化焊接机器人，提升工艺一致性。②引入数字孪生技术，实现拼装过程全生命周期管理。

参考文献

[1] 谢英杰,易利君. 百万千瓦机组立式高压加热器吊装技术研究 [J]. 中国电力企业管理, 2021, (33): 88.

[2] 谢英杰,易利君. 百万千瓦机组燃煤电厂立式高压加热器吊装技术 [J]. 石油化工建设, 2021, 43 (04): 15-17.

[3] 陈菲. 百万千瓦火电机组立式高压加热器安装技术研究 [J]. 建筑机械化, 2020, 41 (02): 56-58.

[4] 李延雷,刘静茹. 百万千瓦二次再热机组高压加热器配置研究 [J]. 山东电力技术, 2018, 45 (02): 58-61.

[5] 张耀华,薛江涛,丁建良,等. 百万千瓦超超临界二次再热凝汽式汽轮机启动方式研究 [J]. 能源研究与利用, 2017, (01): 33-36+48.