

降低锅炉冷态启动高压汽包壁温差的实践与控制

闫煜鑫 王亚宁 曾幻麒 张紫京 侯 辉

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516157

【摘要】：针对三菱 M701F4 型燃气-蒸汽联合循环机组余热锅炉冷态启动时高压汽包上下壁温差偏大、超限时间长、制约机组并网与加负荷速度的问题，本文分析温差产生的核心原因，提出在高压蒸发器下降管集箱增设辅助蒸汽预暖系统、优化预暖工艺与启动控制参数的技术方案。工程应用表明：该方案将汽包最大温差由 68℃ 降至 45℃，温差超限时间缩短 83%，燃机点火至并网时间缩短 13%，天然气消耗降低 13%，在保障设备安全、延长汽包使用寿命的同时，提升了机组调峰响应能力与运行经济性，可为同类型联合循环机组锅炉冷态启动优化提供参考。

【关键词】：联合循环机组；余热锅炉；冷态启动；高压汽包上下壁温差；辅助蒸汽预暖

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.028

1 引言

燃气-蒸汽联合循环机组以高效、低排放、启动速度快等优势，成为电网调峰的核心电源。余热锅炉作为联合循环系统的关键换热设备，其高压汽包属于厚壁承压元件，冷态启动过程的上下壁温差控制直接关系设备安全与机组启动性能。

我厂选用的三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置的燃气—蒸汽联合循环发电供热机组在冷态启动过程中，余热锅炉高压汽包上下壁温差长期偏高。启动初期水循环尚未完全建立，汽包下半部被炉水以自然对流方式加热，而上半部被饱和蒸汽以凝结换热方式加热，凝结换热系数约为自然对流的 3~4 倍，导致上壁温度上升远快于下壁，上下壁温差迅速扩大。高压汽包热应力的产生来源于汽包上下壁温差和内外壁温差，壁温差越大，热应力越大，长期在过应力工况下运行会增加汽包寿命损耗。^[1]同时，由于汽包上下壁温差受到限制，燃机点火后必须限制汽包升压速率以等待汽包温差稳定，直接制约了机组并网后的加负荷速度，整体启动耗时延长，不仅影响了燃机并网时间和机组的调峰响应能力，还增加了启动期间的气耗和碳排放。

2 设备概况与问题现状

2.1 机组与锅炉设备简介

全厂配置两套三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置的燃气—蒸汽联合循环发电供热机组，单套额定功率 484.22MW。每套机组由一台燃机、一台燃机发电机、一台无补燃三压再热脱硝型余热锅炉、一台汽轮机、一台汽机发电机及其相关辅助设备组成。

锅炉型号为 MHDB-M701F4-Q1，采用半露天布置。本余热锅炉采用卧式炉型，其钢结构为全钢构架与炉壳组合自支承形式。锅炉本体由：进口烟道，换热室，出口烟道及烟囱组成。换热室的前部连接锅炉进口烟道，换热室尾部连接锅炉出口烟道及烟囱。锅炉本体受热面采用模块结构，由垂直布置的顺列和错列螺旋鳍片管和进出口集箱组成，以获得最佳的传热效果

和最低的烟气压降。锅炉设置高、中、低压三个锅筒，除氧器布置在低压锅筒上方，低压锅筒同时作为除氧器水箱。锅炉采用一次中间再热，过热蒸汽与再热蒸汽调温方式采用喷水调节。

2.2 冷态启动温差问题现状

(1) 机组冷态启动规程明确规定：高压汽包饱和温度上升速率 $<5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，上下壁温差 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ 。实际运行数据显示：

(2) 燃机点火后，汽包上下壁温差快速升至 60~70℃，超出限值；

(3) 温差回落至 50℃ 以下需约 46 分钟，期间燃机并网后必须限制升负荷速率；

(4) 燃机点火至并网平均耗时 38 分钟，启动效率偏低，气耗量偏高。

3 高压汽包上下壁温差偏大原因分析

3.1 换热系数差异导致升温速率不均

燃机点火后初带一定负荷，余热锅炉在冷态下升温升压，由于汽包上下壁温度低，汽包上部饱和蒸汽和下部炉水分别对汽包上下壁进行加热，汽包下部炉水对汽包下壁进行对流换热，上部饱和蒸汽对汽包上壁进行凝结换热，后者的换热系数是 3~4 倍。^[2]启动初期凝结换热系数远大于水侧对流换热系数：在升压初期，饱和蒸汽在汽包上壁面凝结放热，放热系数约为 $7000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，而炉水对汽包下半部的放热仅为 $1000 \sim 2500\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，上壁升温速度显著快于下壁，形成温差。

3.2 初始壁温低与饱和温度特性影响

冷态启动前汽包壁温仅 30~45℃，无预热措施；压力 $<0.5\text{MPa}$ 时，蒸汽饱和温度对压力的变化率很大，压力小幅度升高即带来饱和温度的大幅度升高，上壁温度随之快速攀升。

3.3 水循环滞后与无预加热手段

启动初期水循环建立滞后，下壁换热不足，下壁升温迟缓；锅炉点火前无法对水侧预加热，炉水从零温开始升温，无法在

点火前提升炉水温度。

3.4 高压汽包壁厚大

余热锅炉启动过程, 高压汽包内壁直接与水 and 饱和蒸汽接触, 温度跟快速上升, 汽包外壁温度的升高受到金属导热的限制, 汽包内外壁温差与汽包壁厚和导热系数成正比, 故外壁温度上升缓慢, 此外汽包外壁温度通过保温层与大气进行换热, 由此造成汽包内壁温度上升快, 外壁温度上升慢, 从而产生内外壁温差。^[3]

4 控制方案与实施工艺

4.1 增设辅助蒸汽预热系统

在余热锅炉高压蒸发器下降管集箱加装辅助蒸汽加热管系, 辅助蒸汽由启动锅炉或邻机供给, 在燃机点火前对高压蒸发器与汽包炉水提前预热, 提升初始壁温、缩小初始温差, 从源头抑制温差扩大。

系统优化设计: 选用耐高温高压管材, 加装电动截止阀、调节阀与疏水阀, 接入 DCS 远方控制, 确保蒸汽均匀分布, 避免局部过热与热胀不均。

4.2 预热实施工艺

(1) 投入循环水、凝结水、给水系统, 建立凝汽器真空, 确认除氧器与汽包水位正常;

(2) 全开供汽管道疏水阀充分疏水, 防止水击;

(3) 辅助蒸汽参数稳定在 0.6~0.8MPa、约 200℃, 缓慢开启供汽阀, 控制加热速率 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$;

(4) 预热中控制汽包上下壁温差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$, 维持水位正常;

(5) 汽包上下壁温均达 80℃以上, 恒温 15 分钟后具备点火条件。

4.3 工艺优化升级

将辅汽参数提升至 0.9MPa、约 290℃, 加热速率控制 $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 温差限值放宽至 25℃; 汽包上壁 $\geq 95^{\circ}\text{C}$ 、下壁 $\geq 80^{\circ}\text{C}$, 恒温 10 分钟即可点火, 预热与上水同步进行, 不占用主线启动时间。

5 实施效果与数据对比

5.1 关键运行参数改善

对 2025 年 10 月—2026 年 3 月 5 次冷态启动高压蒸发器预热投入前后数据进行跟踪统计对比, 结果如下:

表 4 冷态启动各项参数对比

日期 参数	2025.10.09	2025.12.01	2025.12.16	2025.12.23 (投入预热)	2026.03.10 (投入预热)
升压初期最大温差	70℃	67℃	68℃	52℃	39℃
温差超限持续时间	22min	17min	14min	6min	0min
燃机点火至并网用时	36min	38min	39min	34min	32min
燃机并网气耗量	10354Nm ³	11639Nm ³	11404Nm ³	9653Nm ³	9927Nm ³

表 5 高压蒸发器预热投入效果对比

参数	投入前 (平均值)	投入后 (平均值)	改善幅度
升压初期最大温差	68℃	45℃	降低 34%
温差超限持续时间	18 分钟	3 分钟	缩短 83%
燃机点火至并网用时	38 分钟	33 分钟	缩短 13%
燃机并网气耗量	11,132Nm ³	9,790Nm ³	降低 13%

(1) 升压初期最大温差由 68℃降至 45℃, 降低 34%;

(2) 温差超限持续时间由 18 分钟缩短至 3 分钟, 缩短 83%;

(3) 燃机点火至并网时间由 38 分钟缩短至 33 分钟, 缩短 13%;

(4) 燃机并网气耗由 11132Nm³降至 9790Nm³, 降低 13%。

5.2 优化后典型启动效果

预热后汽包初始壁温达 90~100℃, 初始温差<10℃; 燃机点火后温差峰值 49.7℃, 全程≤50℃; 点火至并网仅 24 分钟, 并网后可快速加负荷, 调峰响应能力大幅提升。

6 效益分析

6.1 安全效益

冷态启动全过程高压汽包上下壁温差降低 20℃, 温度应力大幅下降, 汽包使用寿命得到有效保障。彻底消除了因温差过大导致汽包弯曲变形和焊口开裂的安全隐患。

6.2 经济效益

第一, 缩短燃机并网时间 12 分钟: 以 1 台 9F 级燃气轮机 (约 300MW) 平均满负荷上网电价 0.6 元/kWh 计算, 每次冷态启动可增加上网电量约 2.5 万度 (12 分钟按燃机并网至额定负荷过程中平均负荷 150MW 计), 直接增加电费收益约 1.5 万元/次。按年冷态启动 36 次计算, 年创效约 54 万元。

第二, 降低天然气和辅汽消耗: 由于燃机能更快进入带负荷阶段, 每次并网前燃机 3000 转运行时间缩短 12 分钟, 天然气消耗相应减少约 5000m³, 单次创效 1.5 万元, 按按年冷态启动 36 次计算, 年创效约 54 万元。

第三, 降低厂用电量: 缩短燃机并网时间 12 分钟, 减少

该段时间内的厂用电耗量 0.26 万度, 按平均满负荷上网电价 0.6 元/kWh 计算, 每次冷态启动可节约电费 0.16 万元, 按年冷态启动 36 次计算, 年创效约 5.8 万元。

6.3 社会效益

社会效益: 机组调峰响应速度的提升进一步增强了电网的灵活调节能力。系统的普及应用带动了区域内关键设备设施的国产化应用, 优化了服务和支持, 有助于推动清洁能源与灵活调峰技术的协同发展。

7 巩固措施与标准化

(1) 制度固化: 将辅助蒸汽预热操作、分段升压曲线、温差预警纳入《余热锅炉冷态启动运行操作规程》;

(2) 操作规范: 制定专项操作票, 明确预热、上水、升压、排污参数, 执行两级确认;

(3) 人员培训: 开展上下壁温差控制与预热操作专项培训, 考核合格上岗;

(4) 持续优化: DCS 启用壁温趋势预警, 建立启动后分析与长期跟踪机制。

8 结论与展望

本文通过增设高压蒸发器辅助蒸汽预热系统、优化预热工艺与启动控制参数, 成功解决了三菱 M701F4 型联合循环机组余热锅炉冷态启动高压汽包上下壁温差超限问题, 实现设备安全、启动效率、运行经济性的同步提升。

后续将试点基于壁温动态监测的自动预热控制技术, 优化 DCS 逻辑, 实现预热温度自动调节与全程自动升压控制, 进一步提升机组一键启动自动化水平, 降低人为操作风险, 为同类型机组提供可复制、可推广的优化方案。

参考文献:

- [1] 赵玉莲, 崔艳华, 黄建荣. 电站锅炉设备及运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 280-281.
- [2] 康晓光. 1025th 锅炉汽包壁温差产生的原因分析及对策[J]. 山西焦煤科技, 2010(S1): 1-3.
- [3] 孙广科. 锅炉汽包壁温差产生的原因与控制[J]. 东北电力技术, 2007(03): 27-29.