脱硫浆液循环泵效率衰减原因分析及应对措施

靳建峰 [1] 李德志 [2]

1.郑州裕中能源有限责任公司，中国·河南 郑州 450000

2.华润电力湖北有限公司，中国·湖北 赤壁 437300

摘要：本文以某燃煤火力发电厂 2×1000MW 超超临界机组配套的湿法脱硫系统为研究对象，深入分析了脱硫浆液循环泵性能衰减趋势。通过现场测试与理论相结合，证实了将夜循环泵过流部件磨损是导致泵效率下降的主要原因。通过实施更换浆液循环泵叶轮、修复耐磨板和调整两者间隙，并对其前、后参数进行了对比。试验结果证实：更换新叶轮后，泵的运行电流恢复至设计值，流量与扬程显著提升，泵效率提高约 6.64%。该研究结论对同类型机组的脱硫将夜循环泵分析和提质增效具有重要的参考价值。

关键词：湿法脱硫；浆液循环泵；叶轮；耐磨板

Analysis of the Causes of Efficiency Degradation in Flue Gas Desulfurization Slurry Circulating Pumps and Countermeasures

Jin Jianfeng[1], Li Dezhi[2]

1. Zhengzhou Yuzhong Energy Co., Ltd., China Henan Zhengzhou 450000

2. Huarun Power Hubei Co., Ltd., China Hubei Chibi 437300

Abstract: This study focuses on the wet flue gas desulfurization system supporting a 1000MW ultra-supercritical unit at a power plant, analyzing the operational status and performance degradation patterns of the slurry circulation pump. Through field tests and theoretical calculations, it is revealed that wear of flow components is the primary cause of the pump's efficiency decline over time. Based on these findings, the impeller was replaced, and key parameters were compared before and after the retrofit. The results show that after replacing the impeller, the pump's operating current returned to near the design value, with significant improvements in flow rate and head, achieving approximately a 6.64% increase in pump efficiency. The research conclusions provide valuable reference for optimizing desulfurization systems in similar 300MW and 600MW units.

Keywords: Wet flue gas desulfurization; Slurry circulation pump; Impeller; Wear-resistant plate

0 引言

本文以某 2×1000MW 机组湿法脱硫系统的浆液循环泵为研究对象，通过查询 DCS 画面浆液循环泵运行参数历史趋势、现场测量数据收集、效率试验及磨损程度分析，分析其性能下降的规律与机理，并提出针对性的解决方案。通过优化前、后运行参数对比，证实该措施的有效性，为同类浆液循环泵的运维与优化提供借鉴意义[1]。

1 设备概况

1.1 脱硫系统与循环泵配置

某电厂 #3 机组脱硫系统，采用石灰石—石膏湿法烟气脱硫技术，一炉一塔布置方式。在燃用设计煤种时每套 FGD 的设计处理烟气量为 3198785Nm^3/h（标况，湿基，实际 O2），脱硫装置设计 FGD 入口原烟 SO2 浓度 5455mg/m^3（标态，干基，6%O2），设计脱硫效率不低于 99.36%，脱硫装置出口 SO_2 浓度≤ 35mg/Nm^3；原脱硫装置原入口烟尘浓度 50mg/Nm^3，脱硫装置出口烟尘浓度不超过 5mg/Nm^3。

吸收塔设置 5 台浆液循环泵，采用单级单吸卧式离心泵，过流部件均为耐磨陶瓷碳化硅材料，泵体及叶轮全进口技术。

1.2 浆液循环泵效率测试与计算方法

泵扬程计算公式如下：

$$H=\frac{P_2-P_1}{\overline{\rho}g}\times10^6+\frac{C_2^2-C_1^2}{2g}+(Z_2-Z_1) \quad (1-1)$$

式中：

P_1、P_2—泵进、出口压力，MPa；

$\overline{\rho}$—泵进、出口水的密度平均值，kg/m3；

$$\overline{\rho}=\frac{\rho_1+\rho_2}{2} \quad (1-2)$$

ρ_1—泵进口水的密度，kg/m3；

ρ_2—泵出口水的密度，kg/m3；

C_1—泵进口水的流速，m/s；

C_2—泵出口水的流速，m/s；

Z_1—泵进口标高，m；

Z_2—泵出口标高，m。

泵轴功率计算公式如下：

$$P_a = P_{gr} \times \eta_{dj} \times \eta_j \quad (1-3)$$

式中：

η_{dj}—电机效率，%；

η_j—机械传动效率，%；

P_{gr}—电机功率，kW。

泵有效功率计算方法

$$P_u = \frac{\bar{\rho} gQH}{3600} \times 10^{-3} \quad (1-4)$$

泵效率计算方法

$$P_u = \frac{\bar{\rho} gQH}{3600} \times 10^{-3} \quad (1-5)$$

式中：Q 为浆液循环泵实际流量（采用管道超声波流量计测量），m^3/s。

2 诊断分析

2.1 泵性能现状

在机组稳定满负荷工况下，对比 5 台吸收塔浆液循环泵运行参数，对比原设计值，发现泵性能衰减持续加剧。

对比可知：目前各泵运行电流均低于设计值，尤其 A 泵仅为额定电流的 78%（52.8A/67.6A）；实测流量较原设计值下降 11.6%~15.3%（A 泵降幅最大）。

2.2 浆液循环泵过流部件磨损现状

随着吸收塔浆液循环泵运行年限的增长，其出力逐年下降，通过解体后发现：叶轮、耐磨护板和泵壳等通过吸收塔浆液的部件，磨损量逐年增多。叶轮和耐磨护板间隙逐年增大，远超厂家说明书要求的数值，造成浆液循环泵效率和出力均大幅下降。

2.3 叶轮磨损对泵性能的影响

（1）由于吸收塔浆液循环泵叶轮和耐磨护板磨损严重，导致吸收塔内石膏浆液从叶轮与耐磨护板处回流，造成吸收塔浆液循环泵效率降低、泵的出口压力大幅度降低、运行电流远低于额定电流，当叶轮内局部压力低于液体气化压力时，将会引发吸收塔浆液循环泵体的气蚀。

（2）气蚀以后，叶轮动平衡被破坏，各叶片重量不同，运行中产生振动，叶轮的异常振动极大地缩短了机械密封及轴承的使用寿命。

（3）浆液循环泵出力持续下降，相同工况下，泵实际出力较设计值显著降低，需要增启浆液循环泵才能使脱硫效率达标，增加脱硫电耗，使厂用电率上升，经济性受到较大影响。同时在机组负荷波动较大时，极易引起脱硫出口二氧化硫浓度异常超标，造成环保超标事故。

2.4 效率测试

为进一步对浆液循环性能进行评估，在机组负荷稳定工况下对 5 台泵进行了单台和多台浆液循环泵的运行效率进行试验对比。

2.5 对泵性能衰减进行分析

结合现场测试和理论测算分析，造成吸收塔浆液循环泵效率下降的主要原因如下：

（1）浆液冲刷磨损：浆液中的固体颗粒（未充分氧化和反应的亚硫酸盐、灰分、颗粒杂质、结垢物、玻璃鳞片等杂物，在高流速（叶轮入口及出口边速度可达 20-40 m/s）下对叶轮、耐磨护板、舌口等部位高频切削。叶轮出口边缘处出现了锯齿和蜂窝状缺损、叶片减薄，耐磨护板内侧形成鱼鳞状或沟壑状冲蚀纹路，破坏了流道的几何型线，导致吸收塔浆液的流量损失增大。

（2）间隙泄漏量增大：叶轮和耐磨护板因冲刷磨损，配合间隙逐渐增大，高压区的吸收塔浆液通过以上间隙回流到低压入口管道内，最终形成泵体内部泄漏往复循环的情况。泄漏流量虽未被流量计监测到，但是一直在消耗吸收塔浆液循环泵的轴功率，引起泵体的实际容积减少，泵的效率下降。

（3）汽蚀破坏：当泵体内吸入口管道或叶轮入口方向流速过高时，吸收塔石膏浆液中溶解气体析出并产生汽泡，汽泡在高压区破裂时产生微射流，对泵叶轮吸入口表面形成针孔状或蜂窝形状的剥落或破裂。陶瓷碳化硅材料虽硬度高，但其韧性较差，在集中冲击载荷情况下，易出现叶轮局部崩裂，进一步加剧泵的运行性能衰减。

（4）腐蚀加速磨损：吸收塔内浆液中氯离子在逐层磨损叶轮碳化硅表面形成点蚀，外层碳化硅剥落后又暴露出新的碳化硅表面，在腐蚀与磨损双重作用下，明显增加了叶轮碳化硅材料损失速率。经试验表明，浆液循环泵过流件在酸性浆液中，磨损和腐蚀的双重耦合造成的碳化硅材料磨损量远大于纯磨损或纯腐蚀的量。

3 应对措施

综合上述问题分析，结合浆液运行条件与经济性测算，确定对浆液循环泵性能衰减最严重的解决方案，具体如下：

（1）过流件外送检修不可靠：叶轮、耐磨护板、泵壳等过流件外送检修时，由于大部分单位均无原设计图纸和尺寸，只是采用 3D 扫描仪测绘旧叶轮、耐磨板等尺寸，修复工艺和尺寸精度无法保障，目前国内碳化硅材料市场参差不齐，一般采取低价中标方案，材料、尺寸和修复工艺都达不到原设计技术要求，造成修后浆液循环泵的效率仍无法恢复原设计要求和使用寿命。

（2）原厂采购价格高：采购原厂部件虽能满足技术要求，但采购费用高，且供货周期长达 8 个月，检修工期和设备失备无法保证。

（3）采购更换同型号、尺寸、材质的新叶轮，吸收塔浆液循环泵实际运行效率达到 83.2%，较更换前提高 6.64%，出口流量恢复到额定设计值的 97%。如果同时更换叶轮和护板，并将泵壳修复后，性价比将会更高。该方案在保证浆液循环泵性能的同时，又兼顾了经济性与供货周期，是解决当前浆液循环泵效率衰减的最优方法[2]。

4 效果验证

（1）以 B 吸收塔浆液循环泵为例，更换叶轮后，在机组同样负荷、同样吸收塔浆液密度和液位的工况下进行测试。

（2）根据所测运行数据，更换叶轮后吸收塔浆液循环泵运行效率由 76.56% 提高到 83.2%，提升 6.64%；实测流量恢复至额定设计值的 97%。

（3）电费节约计算：

更换叶轮前电机的输入功率：728.06 kW，更换新叶轮后，电机功率计算如下：

轴功率 =524.49 ÷ 0.8320=630.40（kW），电机功率 = 630.40 ÷ 0.941 = 670.14（kW），

节省功率 =728.06（kW）−670.14（kW）=57.92（kW）。

按年运行 5000 小时计算、电价 0.4 元 /kWh：

57.92 × 5000 × 0.4 =115840 元。

综上所述，只是通过更换浆液循环泵新叶轮，B 浆液循环泵效率显著提升，单台泵每年可节约电费 11.584 万元。如果同时更换配套新叶轮和修复泵壳和耐磨板后，经济效益更可观，同时也可避免和减少浆液循环泵轴承箱、机械密封和减速机等设备的故障率，减少浆液循环泵备品备件和人工成本的投入费用，设备可靠性明显提升。若推广至 A、C、D、E 浆液循环泵，预期可取得同样的节能效果。此外，吸收塔浆液循环流量和压力恢复至原设计，可有效避免脱硫效率下降和石膏品质恶化等问题，间接效益也同样显著增加。

5 结语

（1）浆液循环泵在长期运行中，因浆液冲刷磨损、间隙泄漏量扩大、汽蚀及腐蚀耦合相互作用，会引起浆液循环泵叶轮、耐磨板、泵壳等过流部件磨损，是泵效率下降、流量扬程不足的根本原因。本案例中浆液循环泵运行 10 年的泵效率下降至 60%−65%，远低于新泵性能。

（2）更换国产叶轮和耐磨板，外送修复泵壳，可有效解决上述泵性能衰减问题。通过事实验证，更换新叶轮和耐磨板后，泵效率提升 6% 以上，流量恢复至设计值的 97% 以上，节能降耗与提效效果显著。

（3）本次研究是以 1000MW 机组为例获得的浆液循环泵性能衰减规律及改善措施，对于配置相近工艺的湿法脱硫系统浆液循环泵具有直接参考价值。建议依据吸收塔浆液颗粒特性、泵运行时长及运行电流、振动等状态数据，建立预防性维护计划，在浆液循环泵效率下降至 70% 以下时，应及时采取更换新叶轮和耐磨板，并调整叶轮与耐磨板间隙以提高浆液循环泵效率，以实现脱硫系统收益最大化[3]。

参考文献：

[1] 周至祥，段建中，薛建明. 火电厂湿法烟气脱硫技术手册[M]. 北京：中国电力出版社，2006.

[2] 杨勇，王小明. 脱硫浆液循环泵过流部件失效机理与材料选择[J]. 热力发电，2015, 44(6): 110−114.

[3] 刘忠，刘刚. 湿法脱硫系统浆液循环泵磨损分析与改造[J]. 电力科技与环保，2018, 34(2): 45−48.

作者简介：靳建峰（1982.10−），男，河南省周口人，汉族，本科，工程师，研究方向：从事火力发电厂除灰脱硫系统运行与检修研究。