

高磷酸钙/镁含量亚临界锅炉化学清洗研究

任素梅

郑州裕中能源有限责任公司 河南 新密 452376

摘要: 某电厂#1锅炉为上海锅炉厂有限公司设计制造的亚临界压力中间再热自然循环煤粉炉, 型号为SG-1080/17.4-M888, 采用单炉膛、Π型布置、四角切圆燃烧方式。供热返回水大部分回到低压加热器, 未经过100%凝结水精处理处理。同时锅炉给水采取低磷酸盐处理方式, 在锅炉热负荷高的位置结垢生成磷酸钙镁垢。通过电镜能谱分析结果表明: 水冷壁向火侧垢成份主要为Fe、P、Ca及少量的Si、Mn、Al、S、Mg、Zn、Ba、Sb。本文详细分析了结垢原因, 介绍了针对高磷酸钙/镁垢的化学清洗工艺及系统设计, 并对清洗效果进行全面评估。

关键词: 亚临界锅炉; 化学清洗; 磷酸钙镁垢; 腐蚀控制; 除垢率

引言: 锅炉化学清洗是指采用特定清洗工艺, 利用化学药剂的水溶液与锅炉水汽系统中的腐蚀产物、沉积物及污染物发生化学反应, 以清除受热面内表面的沉积物, 并在金属表面形成致密钝化膜的技术方法。该技术是防止锅炉受热面因腐蚀与结垢引发运行事故、特别是防止“四管”爆漏的重要措施^[1], 同时也可有效提升锅炉热效率、改善机组水汽品质。作为锅炉维护中的关键环节, 化学清洗直接关系到设备的安全稳定运行与能效水平, 因而具有重要的工程实践意义。

1 结垢原因分析

1.1 水质问题

2024年4月机组C级检修期间, 割管检测水冷壁管向火侧最大垢量达298.8 g/m²; 2025年4月再次检查发现28米燃烧器区域结垢加剧, 1号角向火侧最大垢量高达730 g/m²。根据DL/T 794-2024《火力发电厂锅炉化学清洗导则》规定, 需进行化学清洗。水冷壁向火侧内表面垢物元素转化为氧化物结果见表1.1。

表1.1 物元素转化为氧化物结果

元素名称	元素平均含量%	氧化物名称	氧化物含量%
Mg	1.02	MgO	1.72
Al	0.24	Al ₂ O ₃	0.45
Si	0.40	SiO ₂	0.85
P	6.58	P ₂ O ₅	15.16
S	0.15	SO ₃	0.39
Ca	12.93	CaO	18.20
Mn	0.89	MnO ₂	1.42
Fe	41.52	Fe ₂ O ₃	59.64
Zn	0.18	ZnO	0.23
Ba	0.82	Ba ₂ O	0.87
Sb	0.88	Sb ₂ O ₃	1.06

1.2 燃烧方式影响

本锅炉采用四角切圆的燃烧方式, 切圆火焰在分离燃尽风的扰动下, 向四角偏移, 在切圆四角区域形成高热负荷区域, 加剧了结垢物的生成。

1.3 传热恶化

在28米四角区域布置有SOFA (分离燃尽风)风箱, 如图1.1所示。

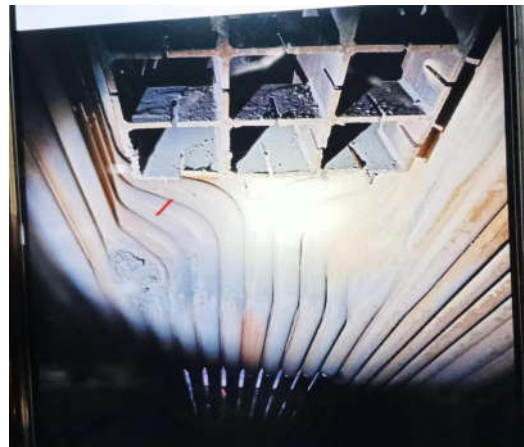


图1.1 SOFA (分离燃尽风)风箱

亚临界压力锅炉的蒸发受热面中水或汽水混合物与管壁间被一层汽膜隔开, SOFA风箱附近的水冷壁管由于大角度的折弯, 生成的汽膜难于扩散, 导致传热系数急剧下降, 管壁温度急剧升高, 甚至出现过烧的现象。进一步加剧了结垢物的生成。

2 清洗工艺及系统设计

2.1 清洗工艺选择

根据垢样分析, 其中磷酸钙/镁含量高达30%左右, 根据小型试验情况, 同时考虑经济与环保情况, 采用以下清洗工艺:

酸洗介质: 3~6%有机复合酸(2~4%羟基乙酸

+1~3%甲酸)+0.2~0.4%缓蚀剂N-108+0.3~0.5%除铜剂+0.05%N-209A+适量消泡剂N-202+适量还原剂N-209+适量助剂清洗16h左右加入1~2%氨基磺酸清洗^[2]。

温度: 80~95℃;

时间: 12~24h(参考全铁平衡的时间);

漂洗: 0.1~0.3%柠檬酸, pH 3.5~4.0, 温度50~80℃, 时间2h;

钝化: 0.1~0.3%双氧水, pH 9.5~10.0, 温度45~55℃, 时间4~6h。

温度: 80~95℃

时间: 12~24h(参考全铁平衡的时间)

2.2 清洗系统设计

2.2.1 化学清洗回路

I 回路: 清洗箱→清洗泵→省煤器→汽包→四周水冷壁→清洗箱

II 回路: 清洗箱→清洗泵→省煤器/左半侧水冷壁→汽包→右半侧水冷壁→清洗箱。

III回路: 清洗箱→清洗泵→省煤器/右半侧水冷壁→汽包→左半侧水冷壁→清洗箱

省煤器、水冷壁系统材质和清洗流速估算, 结果见表2.1。

表2.1 清洗流速估算表

部位	根数	规格	材质	流量 (t/h)	
				流速0.2m/s时	流速0.5m/s时
左半侧水冷壁	310	Φ60×8	20G	339	846
右半侧水冷壁	310	Φ60×8	20G	339	846
省煤器蛇形管	330	Φ51×6	20G	281	702

根据DL/T 794-2024《火力发电厂锅炉化学清洗导则》要求“循环清洗宜维持炉管中清洗介质的流速为0.2~0.5m/s”^[1], 选用两台500t/h清洗泵进行化学清洗工艺, 单台清洗泵正常运转可达到500t/h, 满足清洗流速要求。

2.2.2 临时系统设计

1) 省煤器再循环管在主给水管道处割开, 采用Φ219×7管道接至清洗平台。

2) 水冷壁接口: 左右侧各设2个Φ133×4.5接口, 汇入Φ219×7母管再接至清洗平台。

3) 除盐水接口: 将#1机凝补水调节阀拆除, 用Φ159×4.5管道连接清洗箱。

4) 蒸汽接口: 将稀释风暖风器入口管道断开, 连接Φ108管道提供0.6~0.8MPa蒸汽。

5) 监视管的安装: 在水冷壁#1、#3角各设一处监视管, 控制其流速与水冷壁管流速基本一致, 用弯头连接

引到炉墙外, 并在两端各加一个阀门, 中间安装400mm长的水冷壁原位监视管。

2.2.3 汽包临时液位计接口:

借用汽包正式液位计的专用连接管, 汽包临时液位计液位指示将由XLG-500型化学清洗平台所装配的专用电视摄像头传输到化学清洗控制室。

2.2.4 汽包临时排气接口:

汽包临时排气管可借用汽包顶上正式排空管道。

2.2.5 汽包有关工作。

(1) 汽包内部装置(如旋风分离器等)在化学清洗前先拆除, 待清洗完毕后再行回装, 回装前汽包内部装置由专人对清洗后的残渣彻底清理干净, 再对内部装置回装。

(2) 汽包内给水插入下降管顶部割开, 在管内加堵, 同时集中下水管管口加装中心孔径约为Φ25mm孔的截流孔板, 孔板平整规则, 毛刺清理干净, 安装牢固、严密, 不留缝隙。

(3) 将汽包内事故放水管口加堵板, 清洗后恢复。

3 化学清洗过程

3.1 水冲洗

清洗箱→清洗泵→省煤器→汽包→四周水冷壁→排放
冲洗流量: 200t/h, 冲洗终点: 出水澄清, 基本无杂物。

3.2 过热器充保护液

锅炉水冲洗结束后, 将省煤器的水全部放尽, 水冷壁的水不放, 关闭汽包空气门, 打开过热器空气门, 启动清洗泵, 在清洗箱中加氨水调整pH > 10.5配置保护液, 由省煤器、汽包向过热器充保护液; 当过热器空气门全部出水后, 保护液充满, 关闭过热器放空气门。

3.3 升温试验

全开临时系统加热器进行升温试验, 回液出现升温后开始计时, 如每小时内循环系统温度达到10℃以上, 则认为加热系统和炉膛封闭合格, 否则应采取补救措施。升温至50℃左右, 用红外热成像仪对水冷壁所有受热面进行热成像检查, 消除异物堵塞, 偏流等原因造成的壁温异常情况。

3.4 有机复合酸清洗

升温试验合格后, 建立第I循环回路, 当回液温度达60℃时开始加药, 向清洗箱中均匀加入缓蚀剂N-108, 浓度0.2~0.4%, 循环均匀后, 加入有机复合酸, 配药结束时, 有机复合酸浓度应为3~6%。根据镀铜情况添加适量除铜剂和N-209A, 根据泡沫大小可加适量消泡剂N-202, 并根据测定的Fe³⁺含量大小加入还原剂N-209,

控制 $Fe^{3+} < 300mg/L$ ，根据向火侧清洗情况加入1%~2%的氨基磺酸对残余的向火侧残余垢进行清洗。

加药完毕后，按第Ⅱ，第Ⅲ循环回路进行轮换清洗。监视汽包水位，中心线上+150mm~250mm，维持酸洗液温度80~95℃。酸洗结束前1小时向系统内加入适量助剂。清洗开始每小时化验一次，接近终点时每30min化验一次，待出口全铁离子总量2~3次取样化验基本不变，出口酸的浓度2~3次取样化验基本不变，残余酸度 $\geq 2.0\%$ ，监视管段清洗干净，再循环1~2小时结束酸洗。

3.5 酸洗后水冲洗

清洗结束后，用除盐水对系统进行水冲洗，冲洗过程中全开表面式加热器及混合加热器，冲洗过程中注意对死区的冲洗，把各联箱疏水门逐次打开进行冲洗。冲洗至出水澄清，出口PH值4.0~4.5，全铁 $< 50mg/L$ 。

3.6 漂洗

水冲洗结束后，建立第Ⅱ清洗系统循环回路升温，当回液温度50℃时，加0.05%的缓蚀剂，0.1%~0.3%

柠檬酸溶液，加氨水调PH值至3.5~4.0，控制漂洗温度50~80℃，漂洗液中总铁量 $< 300mg/L$ ，漂洗约2h结束。

3.7 钝化

漂洗结束后，用氨水调节 $pH > 10.0$ 除盐水顶排部分漂洗液，顶排过程中加入氨水，当回液 $pH > 9.0$ 后停止顶排，将温度调整至45~55℃，用氨水将pH值调至9.5~10.0，加0.1~0.3%双氧水，进行钝化，钝化过程中，控制温度45~55℃,pH值维持在9.5~10.0，钝化4~6小时，结束钝化，排空钝化液。

3.8 结束

化学清洗结束，排完清洗液后，迅速打开汽包人孔门和下水包人孔门，同时尽快拆除化学清洗接口，使锅炉处于自然通风状态，利用炉膛余热将炉内烘干。

4 清洗效果评价

4.1 腐蚀控制

化学清洗完毕后，对腐蚀指示片进行测量、计算，结果见表4.1。

表4.1 腐蚀指示片进行测量及计算结果

材质	编号	洗前重量(g)	洗后重量(g)	尺寸(长×宽×厚m)	时间(h)	平均腐蚀速率($g/m^2 \cdot h$)	平均腐蚀总量(g/m^2)
20G	0	12.9335	12.8601	48.44×11.18×3.20	31.5	1.0526	33.1569
	1	13.3578	13.2799	48.82×11.18×3.20	31.5		
	2	13.5840	13.5081	48.42×11.36×3.22	31.5		
	3	13.4350	13.4153	48.48×11.34×3.24	31.5		
	4	13.6111	13.5899	48.90×11.34×3.24	31.5		
	5	12.9954	12.9692	48.64×11.18×3.10	31.5		

平均腐蚀速率 $1.0526g/m^2 \cdot h$ ，平均腐蚀总量 $33.1569g/m^2$ 。化学清洗过程中，腐蚀控制合格，腐蚀速率、腐蚀总量均满足DL/T 794的标准要求，平均除垢率结果见表4.2。

4.2 除垢率

本次锅炉酸洗后，对水冷壁在线监视管进行残余垢量测定，测定结果见表4.2。

除垢率大于95%，钝化膜均匀完整、无二次锈蚀，无镀铜现象^[1]。

表4.2 平均除垢率结果

名称编号	原始垢量(g/m^2)	残余垢量(g/m^2)	平均除垢率(%)
28米1号角第2根水冷壁向火侧	730.72	7.7	99
28米1号角第2根水冷壁背火侧	229.27	1.7	
28米3号角第2根水冷壁向火侧	492.26	1.5	
28米3号角第2根水冷壁背火侧	195.09	1.2	

4.3 清除铁垢量

本次锅炉酸洗清除铁垢(以 Fe_3O_4 计) $3864 \times 200 \times 1.38 \times 10^{-6} = 1.066$ 吨(其中化学清洗水容积为 $200m^3$ ，1.38为全铁换算为 Fe_3O_4 的换算系数 $3864mg/L$ 为清洗终点的全铁含量)。

结束语

本次化学清洗有效清除了锅炉受热面沉积物，显著改善了锅炉传热效率，腐蚀控制和除垢率均达到优良标准，为机组安全稳定运行提供了保障。

参考文献

- [1]DL/T 794-2024 火力发电厂锅炉化学清洗导则[S]
- [2]费俊锋 有机复合酸洗技术在亚临界发电机组锅炉化学清洗中的应用[J],清洗世界 2025.41(6).1-3,7
- [3]朱力华,朱永强,宁淑华,程稳香,张伟,邱晓东,火力发电厂亚临界锅炉化学清洗技术[J],清洗世界 2018.34(7).1-4,9