

基于循环流化床锅炉石灰石-石膏湿式脱硫节能降耗

杨中彪 刘 烨 贾忠皓

华电国际电力股份有限公司天津开发区分公司, 天津 300270

[摘要]随着我国环保日益严格,各电力企业在降低大气污染的排放同时也明显增加了能耗,因此节能降耗就显得十分重要。以循环流化床锅炉脱硫系统为研究对象,针对水耗量分析了增设烟气冷却器后对脱硫系统耗水量的影响并提出了相应节水的措施,针对电耗量和脱硫剂耗量通过研究炉内脱硫、炉后脱硫和组合脱硫的经济性提出节能降耗方案。

[关键词]炉内脱硫; 炉后脱硫; 烟气冷却器

DOI: 10.33142/hst.v6i3.8547

中图分类号: TK227

文献标识码: A

Energy Saving and Consumption Reduction Based on Limestone Gypsum Wet Desulfurization of Circulating Fluidized Bed Boilers

YANG Zhongbiao, LIU Ye, JIA Zhonghao

Tianjin Development Zone Branch of Huadian Power International Electric Power Co., Ltd., Tianjin, 300270, China

Abstract: With the increasingly strict environmental protection in China, various power enterprises have significantly increased energy consumption while reducing air pollution emissions. Therefore, energy conservation and consumption reduction are very important. Taking the desulfurization system of circulating fluidized bed boilers as the research object, the impact of adding flue gas coolers on the water consumption of the desulfurization system was analyzed based on water consumption, and corresponding water-saving measures were proposed. For electricity consumption and desulfurization agent consumption, the desulfurization in the furnace and after the furnace were studied. Propose energy-saving and consumption reduction plans for the economy of desulfurization and combined desulfurization.

Keywords: desulfurization in furnace; desulfurization after furnace; flue gas cooler

引言

分析FGD系统能耗特性、研究其节能优化方法,对于降低污染物治理的能耗代价、提高FGD系统及电厂的综合性能乃至对于实现国家节能减排战略而言,有重要的理论与现实意义^[1]。以循环流化床锅炉脱硫系统为研究对象,对脱硫系统耗水量、耗电量和脱硫剂消耗量进行分析,本文提出了相应的节水措以及合理地运用炉内脱硫、炉后脱硫和组合脱硫的运行方式。以实现降低FGD系统的整体能耗。循环流化床锅炉的脱硫形式包括炉内脱硫和炉后脱硫两部分,对比石灰石-石膏脱硫方式和炉内喷钙脱硫组合石灰石-石膏湿式脱硫方式的经济性,结合案例分析与定量计算提出具体优化方案对实现脱硫系统的节能降耗及日常运行操作具有指导作用。

1 各用水点分析介绍

脱硫水系统即脱硫系统补充的水分和消耗的水分。脱硫系统消耗水的途径有烟气携带蒸发的水、副产品石膏带离系统的附着水和结晶水以及湿法脱硫工艺需要排放的废水。脱硫系统补充水主要通过除雾器冲洗水、泵机封水、氧化风机降温水、滤布滤饼冲洗水、制浆用水、管道、设备冲洗水等。

1.1 脱硫系统消耗水的途径

(1) 烟气携带蒸发的水: 烟气与浆液在喷淋层逆向

接触后,携带蒸发的水分分为水蒸汽量和烟气携带液态水滴量。此部分水占脱硫系统消耗水的90%,将这部分水冷凝回收可节省大量水耗。

(2) 副产品石膏: 石膏为石灰石-石膏湿式脱硫工艺中的副产品。氧化后的浆液通过两级脱水后产生含有10%的游离态水分的石膏,这部分水跟随石膏从脱硫系统中排出,故为脱硫系统中消耗水的途径。

(3) 排放废水: 为了维持石灰石-石膏脱硫工艺中浆液的品质,需要排放一定量的废水,此部分水为脱硫系统水的消耗。

1.2 脱硫系统补充水的途径

(1) 泵机封水: 部分泵的机封水为开式水,此部分水直接排到地沟中,最终进入吸收塔,故此部分水量计入脱硫系统补水中。

(2) 氧化风机减温水: 氧化风机减温水作为降低氧化风温度,防止氧化毛管结垢,该部分水计入脱硫系统补水量。

(3) 滤布滤饼冲洗水: 滤布滤饼冲洗水的作用是降低石膏中所含的氯离子和重金属等影响石膏品质杂质的含量。滤布滤饼冲洗水来自真空泵工作排水和工艺水补水两路,这部分水量计入脱硫系统补水量。

(4) 制浆用水：制浆用水采用工艺水或滤布滤饼冲水。若采用工艺水制浆则计入脱硫系统补水量。

(5) 除雾器冲洗水：除雾器是用于分离烟气中携带的液滴。本文案例中吸收塔配置一级管式加三级屋脊式除雾器，布置于吸收塔顶部最后一个喷淋层的上部。烟气穿过循环浆液喷淋层后，管式除雾器再连续流经三层屋脊式除雾器时，液滴由于惯性作用，留在挡板上。由于被滞留的液滴也含有固态物，主要是浆液，因此存在挡板结垢的危险，需定期进行在线清洗，除去所含浆液雾滴。在每层除雾器的上面和下面各布置一层清洗喷嘴。清洗水从喷嘴强力喷向除雾器元件，带走除雾器顺流面和逆流面上的固体颗粒。除雾器清洗系统间断运行，采用自动控制。清洗水由除雾器冲洗水泵提供，冲洗水还用于补充吸收塔中的水分损失。

(6) 管道、设备冲洗水：管道、设备冲洗水主要用于停运设备或系统是将设备和管道中的浆液冲洗干净后排放至地沟中，防止设备和管道中的浆液沉积造成堵塞。此部分水量最终会进入吸收塔中，故计为脱硫系统补水中。

表 1 脱硫系统水平衡统计

序号	名称	单位	原始设计	增烟气换热器	备注
1	脱硫系统外排水量	t/h			
1.1	烟气携带走蒸发水量	t/h	54.00	54.00	
1.2	外排废水量	t/h	6.00	6.00	
1.3	石膏结晶水	t/h	0.56	0.56	
1.4	其他	t/h	0.00	0.00	
1.5	总计	t/h	60.56	60.56	
2	脱硫系统补水				
2.1	烟气冷凝水	t/h	0.00	21.00	
2.2	泵机封水	t/h	8.00	8.00	
2.3	氧化风降温水	t/h	0.09	0.09	
2.4	氧化风机油站冷却水	t/h	0.00	0.00	闭式循环冷却水
2.5	皮带机	t/h	8.00	8.00	
2.6	制浆	t/h	4.80	4.80	
2.7	除雾器冲洗水	t/h	30.00	9.00	增加冷却器后烟气冷凝水作为部分除雾器冲洗水
2.8	总计	t/h	46.09	46.09	
3	吸收塔补水	t/h	19.27	19.27	

2 降低脱硫系统水耗实践

2.1 烟气冷凝水去除雾器冲洗水和工艺水箱

根据《火电厂大气污染物排放标准》(DB12/810—

2018))，要求烟气冷却器出口烟气温度非采暖季(4月至10月)控制在48℃以内，采暖季(11月至次年3月)控制在45℃以内。增设烟气冷凝器是大多数电业单位的选择。增设烟道冷却器后，会产生大量的烟气冷凝水，烟气冷凝水直接回到脱硫系统将影响脱硫系统水平衡，因烟气冷凝水除偏酸性外，水质较好，含固量较低，故将烟气冷凝水作为部分除雾器冲洗水以减少工艺水耗，维持脱硫系统水平衡。在实际运用中，烟气冷凝水受锅炉排烟温度影响较大，在排烟温度较高时烟气冷凝水量还会继续升高，故再将烟气冷凝水作为部分工艺水补水以减少工艺水耗。但需要注意与工艺水的掺配比值，过低的PH值会腐蚀工艺水管路。结合实际工况可以节省20t/h-30t/h的工艺水补水量。

2.2 除雾器冲洗水系统改造

现三台机组的除雾器冲洗水泵为三运一备的运行方式，而除雾器冲洗系统为间断运行方式，机组BMCR时除雾器冲洗水泵工作时长仅占运行时长的三分之一。故增加除雾器冲洗水管道联络门，用一台除雾器冲洗水泵为三台机组提供冲洗水可节省两台除雾器冲洗水泵运行能耗，要注意在北方地区需要额外执行防寒防冻的措施。

3 对于炉内喷钙脱硫投入的经济性

循环流化床锅炉脱硫的形式包括炉内脱硫和炉后脱硫两部分。以350MW循环流化床为研究案例，该项目设计了四台工频浆液循环泵，在运行中发现当硫分处于两台浆液循环泵的出力不足以保证环保参数不超标的情况下，启用第三台浆液循环泵会使得脱硫效率过高而损失经济性，故本文研究了炉内脱硫与炉后脱硫的组合脱硫方式的经济性。通过实际运行数据，拟出两种典型工况，负荷70%，入口烟气量624344Nm³/h，炉内脱硫效率为70%，SO₂初始浓度为1541mg/NM³，炉后脱硫效率为97.8%；负荷70%，入口烟气量858451Nm³/h，炉内脱硫效率为70%，SO₂初始浓度为2823mg/NM³，炉后脱硫效率为98.8%，通过实际运行数据，拟出两种运行工况两种方案进行分析。方案1为投入炉内喷钙与炉后组合脱硫运行方式，方案2为进炉后脱硫运行方式。

3.1 炉内石灰石粉费用

根据炉内石灰石粉的消耗量和单价可以算出炉内石灰石粉的费用为M₁。

$$M_1 = B_1 u_1 T = \frac{1}{64\omega} K_1 Q_1 C_1 \eta_1 u_1 T \times 10^{-7} \quad (1)$$

式中，B₁为石灰石-石膏湿式脱硫石灰石粉耗量，t/h；ω为石灰石粉的纯度，%，这里取90%；K₁为炉内脱硫的钙硫摩尔比，由实际工业运行数据拟合，这里取2；Q₁为进吸收塔的烟气流量，NM³/h；C₁为吸收塔入口SO₂初始浓度，mg/Nm³；η₁为炉内脱硫的脱硫效率，%；u₁为炉内石灰石粉单价，元/t；T为机组运行时间，h。

3.2 炉后脱硫运行费用

3.2.1 炉后石灰石粉费用

根据吸收塔入口二氧化硫浓度、石灰石-石膏湿式脱硫的钙硫摩尔比和脱硫效率可求出炉后石灰石粉的消耗量，炉后石灰石粉的费用为 M_2 。

$$M_2 = B_2 u_2 T = \frac{1}{64\omega} K_2 Q_2 C_2 \eta_2 u_2 T \times 10^{-7} \quad (2)$$

式中， B_2 为石灰石-石膏湿式脱硫石灰石粉耗量，t/h； K_2 为石灰石-石膏湿式脱硫的钙硫摩尔比，由实际工业运行数据拟合，这里取 1.03； Q_2 为进吸收塔的烟气流量， NM^3/h ； C_2 为吸收塔入口 SO_2 初始浓度， mg/NM^3 ； η_2 为石灰石-石膏湿式脱硫的脱硫效率，%； u_2 为炉后石灰石粉单价，元/t； T 为机组运行时间，h。

3.2.2 炉后脱硫运行耗电费用

炉后脱硫采用的是石灰石-石膏湿式烟气脱硫工艺，该工艺主要耗能设备有浆液循环泵、氧化风机、冷却循环水泵、工艺水泵等。本文中主要讨论启停浆液循环泵和启用炉内脱硫的经济性，故将炉后脱硫运行耗电量作为参考。石灰石-石膏湿式烟气脱硫的运行耗电费用为 $\sum M_3$ 。

$$\sum M_3 = \sum_{i=1}^n M_3^i = \sum_{i=1}^n P^i u_3 T \times 10^{-4} \quad (3)$$

式中， $\sum_{i=1}^n M_3^i$ 为运行第 i 台泵的费用，KW； P^i 为运行第 i 台循环泵的耗电功率。

3.2.3 方案 1 和方案 2 的费用

在组合脱硫方案中，烟气中的硫分先通过炉内喷钙去除一部分后，再由炉后脱硫来处理。

$$C_2' = C(1 - \eta_1) \quad (4)$$

式中： C_2' 为经过炉内脱硫后剩余的 SO_2 浓度， mg/NM^3 ；方案 1 的费用 M 可通过公式 (1)、(2)、(3) 得出：

$$M = M_1 + M_2(1 - \eta_1) + \sum M_3 \quad (5)$$

方案 2 的费用 M' 可通过公式 (2)、(3) 得出：

$$M' = M_2 + \sum M_3 \quad (6)$$

3.3 不同工况情景分析

如图 1 为四台工频浆液循环泵在不同组合情况下的能耗，可以看出浆液循环泵能耗增长最小的情况为 BC 浆液循环泵运行工况至 ABC 运行工况，增长最大的情况为 ABC 循环泵运行工况至 ABCD 运行工况。图 2 为取炉内 Ca/S 摩尔比为 2 时，随入口硫份的增长，两种方案石灰石粉的消耗量曲线。可以看出硫份越高组合脱硫运行方式比炉后脱硫运行方式的石灰石粉耗量越大。循环流化床炉内脱硫的 Ca/S 摩尔比随着锅炉燃烧调整的变化而变化，图 3 反映了两个方案在两种工况炉内脱硫 Ca/S 摩尔比对石灰石粉消耗量的关系，可以看出炉内脱硫 Ca/S 摩尔比越低，两种方案的耗粉量之差就越小。现取 1KWh 电量为 0.1 元，

石灰石粉为 400 元。根据公式 (5)、(6) 可以得出在 SO_2 初始浓度为 $1541\text{mg}/\text{NM}^3$ 时，只有炉内脱硫 Ca/S 摩尔比小于 1.088 时方案 1 经济性大于方案 2；在 SO_2 初始浓度为 $2823\text{mg}/\text{NM}^3$ 时，只有炉内脱硫 Ca/S 摩尔比小于 1.048 时方案 1 经济性大于方案 2。

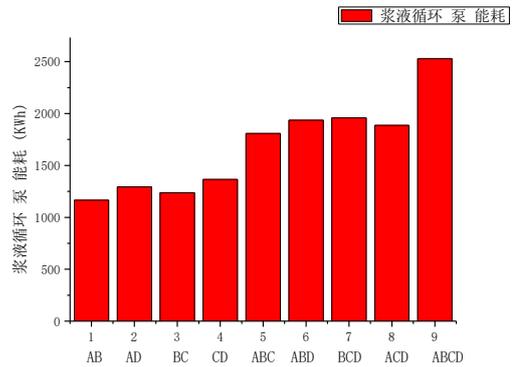


图 1 浆液循环泵不同组合的耗电量

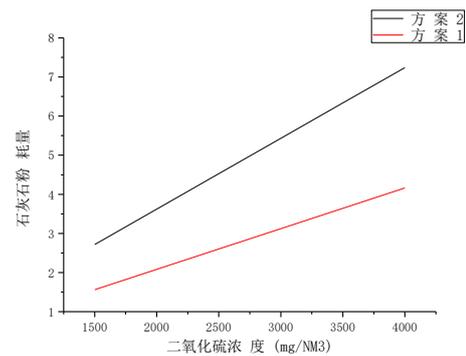


图 2 不同硫份的石灰石耗量

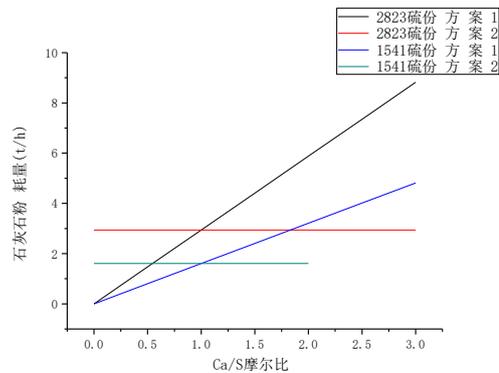


图 3 不同 Ca/S 摩尔比的石灰石耗量

4 结论

本文循环流化床锅炉石灰石-石膏湿式脱硫节能降耗针对水能耗分析了在增设烟气冷却器设备后 FGD 系统的水平衡，并提出了相应的节水措施，针对电耗及脱硫剂耗量本文结合案例分析与定量计算得出在循环流化床锅炉运行中，炉内喷钙脱硫只有在其 Ca/S 摩尔比比较理想时

可替代一台工频循环泵运行,在实际运行中,炉内喷钙脱硫的Ca/S摩尔小于1.1是十分不易的,对于燃烧要求是十分苛刻的。故在大多数的工况中只有在石灰石-石膏脱硫系统达到最大出力后依旧无法满足环保要求时,投入炉内脱硫系统是最为经济的。

[参考文献]

- [1]徐钢.火电机组烟气脱硫系统的节能优化运行[J].中国电机工程学报,2012(32):22-29.
- [2]李皎,廖国权,殿学.石灰石-石膏湿法脱硫系统节能降耗探讨[J].电力科技与环保,2014,30(3):51-54.
- [3]陈美秀.石灰石-石膏湿法脱硫装置节能减排优化设计的研究[D].浙江:浙江大学,2013.

[4]张云飞.对石灰石-石膏湿法脱硫工艺水系统节能降耗的探析[J].经济技术协作信息,2019(28):1.

[5]邢小林,沈新安,叶辰升,等."二炉二塔"脱硫氧化风系统集中控制节能优化[J].电力安全技术,2022(2):024.

作者简介:杨中彪(1968.9-),男,东北电力大学,本科,热能与动力工程,华电国际天津开发区分公司,副总经理,工作年限33年,高级工程师;刘焯(1988.10-),男,济南大学,本科,材料物理,华电国际天津开发区分公司,维护部副主任,工作年限13年,高级工程师;贾忠皓(1995.11-),男,哈尔滨理工大学,本科,电气工程及其自动化,华电国际天津开发区分公司,运行部灰硫主值,工作年限5年,助理工程师。