

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.18162

脱硫吸收塔废水坑浆液溢流原因分析及控制对策

颜海伟¹, 王亚钊², 郭静东³, 王科⁴, 廖冬梅¹

(1. 武汉大学动力与机械学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 中国华能集团有限公司, 北京市 西城区 100031; 3. 华能海南发电股份有限公司海口电厂, 海南省 海口市 570100; 4. 华能海南发电股份有限公司东方电厂, 海南省 东方市 572600)

Cause Analysis and Control Countermeasures of Slurry Overflow in Desulfurization Absorber Tower Wastewater Pit

YAN Haiwei¹, WANG Yazhao², GUO Jingdong³, WANG Ke⁴, LIAO Dongmei¹

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China; 2. China Huaneng Group Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100031, China; 3. Haikou Power Plant, Huaneng Hainan Power Generation Co., Ltd., Haikou 570100, Hainan Province, China; 4. Dongfang Power Plant, Huaneng Hainan Power Generation Co., Ltd., Dongfang 572600, Hainan Province, China)

摘要: 某燃煤电厂脱硫系统中, #1 吸收塔出现废水坑大量浆液溢流、石膏含水量过高和除雾器堵塞等现象。通过分析, 发现主要原因为吸收塔负荷较大, 导致空塔流速过快、亚硫酸钙氧化不充分、吸收塔内浆液密度过高、脱硫吸收浆液雾化颗粒量不足; 结合其脱硫系统的超低排放改造, 进行了增设喷淋层和改用单向双头式喷嘴、增设不锈钢托盘、设置增效环、改用三级屋脊高效除雾器、增加备用旋流子等设备改扩建。同时, 提出了控制吸收塔 pH 值和密度、添加脱硫增效剂、增加氧化风机运行台数和提高除雾器清洗频率等改进措施。

关键词: 湿法脱硫; 浆液溢流; 除雾器堵塞; 超低排放

ABSTRACT: In the #1 absorption tower of a power plant wet flue gas desulfurization (WFGD) system, a large number of slurry overflowed from effluent pit, the gypsum moisture content beyond index and mist eliminator was blocked. Through analysis, the main reasons were the high load of absorption tower, the fast flow rate of the tower, the insufficient oxidation of calcium sulfite, the high slurry density in the absorption tower and the less desulfurization absorption slurry atomization particles. Combined with the ultra-low renovation project of the desulfurization system, some equipment expansion was implemented such as increasing the spray layer and backup swirl, switching

to the one-way double-headed nozzle and three-roof ridge efficient demisters, installing the stainless-steel tray and synergistic ring on tower wall. Meanwhile, some improvement measures were put forward, such as controlling the pH value and density of the absorption tower, adding desulfurization synergist, increasing the number of oxidation fan operation and improving the demister cleaning frequency.

KEY WORDS: wet flue gas desulfurization (WFGD); slurry overflow; eliminator blockage; ultra-low emissions

0 引言

由于环保要求日益严格, 燃煤电厂烟气脱硫工作引起了广泛关注^[1]。石灰石石膏湿法脱硫 (wet flue gas desulfurization, WFGD) 工艺由于具有脱硫剂原料廉价易得、脱硫效率高、技术成熟、运行可靠等优点, 已成为我国燃煤电厂烟气脱硫的首选工艺^[2]。

在 WFGD 系统中, 由于现场实际运行状态与设计工况的偏差, 往往会产生各种不正常现象和问题。本文对某电厂脱硫吸收塔废水坑浆液溢流和除雾器堵塞等现象发生的原因, 以及运行操作需要注意的问题进行了分析与探讨。

1 脱硫系统概述

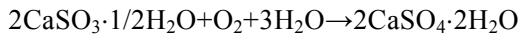
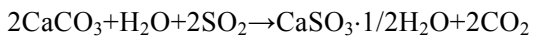
某电厂脱硫系统采用 WFGD 工艺。此法将破

基金项目: 国家自然科学基金项目(11472197); 中国华能集团公司总部技术基金项目(HNKJ17-H15)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (11472197); Huaneng Group Corporation Headquarters of China Technology Fund Project (HNKJ17-H15).

碎研磨的粉状石灰石与水混合，搅拌制成脱硫吸收浆液；其在吸收塔内与烟气充分接触混合，浆液中的 CaCO_3 与烟气中的 SO_2 以及鼓入的氧化空气进行化学反应，生成脱硫石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ；石膏经脱水装置脱水后回收， SO_2 由此被脱除^[3]。

具体化学反应原理如下：



该电厂#1机组为350MW的国产超临界燃煤发电机组，一炉一塔，未设置烟气换热器(gas gas heater, GGH)。SO₂原设计排放浓度为168mg/m³，脱硫效率不小于95%。脱硫岛主要由烟气系统、吸收塔系统、石灰石浆液制备系统、废水处理系统、石膏脱水系统、工艺冲洗水系统等组成，如图1所示。

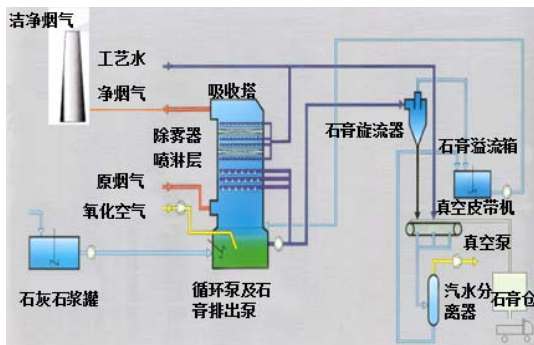


图1 #1机组脱硫岛运行系统

Fig. 1 #1 unit desulfurization island operation system

吸收塔设计为喷淋塔式，高31.25m，直径12m，设计液位9.7m，实际运行中的浆池容积为1100m³。设置2台氧化风机，分别向吸收塔供应氧化空气，运行方式为一运一备。塔内浆液循环功能由3台浆液循环泵和3个喷淋层实现，喷淋层每层间隔2m，喷嘴采用单向单头式，喷淋层上方为单级平板式除雾器。石膏浆液密度仪表安装在吸收塔底部石膏排泵出口管道上，运行中根据该仪表密度值的高低自动控制石膏浆液的排放，即密度值低于设定值(一般为1130~1140kg/m³)时，石膏旋流分离器双向分配器转换到吸收塔，浆液在塔内继续循环，吸收SO₂；一旦密度超过设定的最大值，双向分配器转换到排泵出口管道，开始排放石膏，并运至石膏旋流器^[4]。石膏浆液脱水系统主要分为2级，一级系统包括2台石膏排浆泵运行和1套石膏旋流器(包

含5个旋流子)，运行方式分别为一运一备和四运一备；经一级系统脱水后的石膏浆液固含量约50%，再送入公用的二级脱水装置，真空皮带脱水机处理至固含量达到90%左右，贮存于石膏仓库间。

脱硫后的净烟气腐蚀性有所降低，但其湿度增大、温度下降；由于系统不设GGH，导致进入净烟道的烟气温度低于硫酸蒸气的露点温度^[5]，造成其夹带的少量水蒸气和SO₃，在流经烟道和烟囱过程中遇冷形成酸性冷凝水。冷凝水通过烟道及烟囱上安装的冷凝水管回收至#1废水坑，由地坑排水泵输送至脱硫吸收塔。脱硫烟道冷凝水收集及处理路线如图2所示。

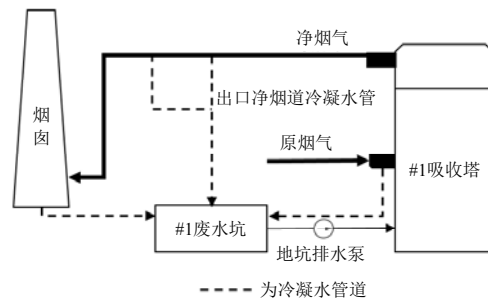


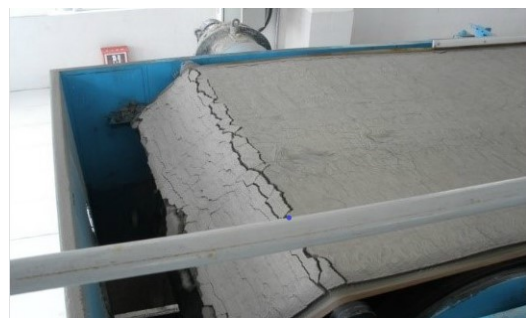
图2 脱硫烟道冷凝水收集及处理路线

Fig. 2 Desulfurization flue condensation water collection and processing route

2 事故及原因分析

2.1 事故经过

3月1日18:00事故发生时，某电厂脱硫系统处于运行状态，大量浆液从#1吸收塔出口净烟道冷凝水管流出，导致#1废水坑满坑，大量浆液溢流至#1吸收塔周围地面，污染了环境。同时，发现脱水机脱水困难，产出的石膏含水率为23.6%，超过了验收标准(12%)^[6]，品质不合格，如图3所示。



(a) 合格



(b) 不合格

图3 含水率不合格和合格的石膏

Fig. 3 Water content unqualified and qualified gypsum
 停机检修时,发现除雾器叶片堵塞严重,如图4所示。



图4 #1吸收塔内除雾器叶片堵塞

Fig. 4 The eliminator of #1 Absorber tower blocked
 2.2 吸收塔负荷较大导致空塔流速过快

从表1数据分析,自2月21日以来,进入锅炉的燃煤平均含硫量在1.4%以上,锅炉平均负荷在80%以上;由于燃煤发热量降低,相对燃用煤

量增大,烟气量也随之增大,加上原煤中含硫量较高,造成进入#1吸收塔需要处理的SO₂总量增加。

因此,需要处理的烟气量和SO₂浓度均超过原设计值,吸收塔负荷较高,可能引起空塔流速激增^[7]。根据空塔流速计算公式:

$$V = Q / A = Q / (\pi \cdot R^2) \quad (1)$$

式中:V为烟气的空塔流速,m/s;Q为塔内原烟气流量,m³/s;A为吸收塔横截面,m²;R为吸收塔横截面半径,m。

事故出现时,Q为5.14×10⁸m³/s,R为6m,可计算得知V=4.55m/s,远大于设计时的流速3.8m/s。

吸收塔设计流速^[8]一般为3.4~4.0m/s,在此区间内比较适合气液逆流混合。空塔流速太快,造成烟气和脱硫吸收浆液接触反应时间短,出现烟气短路现象,导致脱硫效率达不到95%的设计要求。此外,除雾器设计流速略高于吸收塔设计流速^[9],若空塔内烟气流速过高,烟气通过除雾器的流速更高,超过其设计流速,导致除雾器不能有效去除烟气携带的浆液颗粒,同时除雾器叶片被部分破坏、失效,烟气夹带大量石膏浆液进入净烟道,并流至烟道冷凝水排放管。

脱硫系统超低排放改造中,该电厂已经完成了吸收塔的原地重建,将其直径扩大到13.1m,当Q不变时,可根据式(1)得到改造后的V=

表1 事故发生前某电厂#1机组运行参数

Tab. 1 Power Plant # 1 unit operating parameters Before the incident

序号	日期	收到基全硫/%	收到基低位发热量/(J/g)	燃煤量/t	#1机组负荷/MW	#1原烟气流量/(km ³ /h)	#1原烟气SO ₂ 浓度/(mg/m ³)	#1烟囱入口SO ₂ 浓度/(mg/m ³)	脱硫效率/%
1	2月21日	1.41	20.12	2910	283	1285	3198	182	94.3
2	2月22日	1.38	19.26	2947	285	1303	3378	200	94.1
3	2月23日	1.47	20.98	2944	291	1313	3610	231	93.6
4	2月24日	1.55	20.74	2939	297	1344	3553	226	93.6
5	2月25日	1.57	21.45	2881	306	1439	3632	220	93.9
6	2月26日	1.58	20.49	2957	308	1488	3728	243	93.5
7	2月27日	1.75	20.34	3147	312	1535	3947	285	92.8
8	2月28日	1.65	20.22	3152	270	1188	3868	324	91.6
9	3月1日	1.76	20.21	2794	218	1093	3638	257	92.9
平均值		1.57	20.42	2963	285	1332	3617	241	93.3
原设计工况		1.4	23.44	3072	350	987.7	3393	168	95.0

3.8 m/s, 符合设计流速。

2.3 亚硫酸钙氧化不充分

WFGD 的实际运行工况表明, 在其他基本参数稳定的情况下, 增加石灰石浆液量, 即升高浆液 pH 值, 可在一定程度上提高脱硫效率。由于需要处理的 SO₂ 总量增多, 为保证 SO₂ 排放浓度达到原设计值(≤168 mg/m³), 吸收塔控制 pH 值较高, 在 5.7~6.0 之间。但是 SO₃²⁻氧化的最佳 pH^[10] 为 4.5~4.7, 如图 5 所示; 当 pH 值为 5.7~6.0 时, 塔内的氧化效率明显降低。为保证石膏氧化效果, 电厂启动了备用氧化风机, 保持 2 台氧化风机运行, 但其设计裕量无法满足系统要求, 导致石膏浆液中的亚硫酸盐超标, 无法形成较大颗粒的石膏晶体, 因此部分小粒径石膏晶体容易被烟气携带进入冷凝水管。

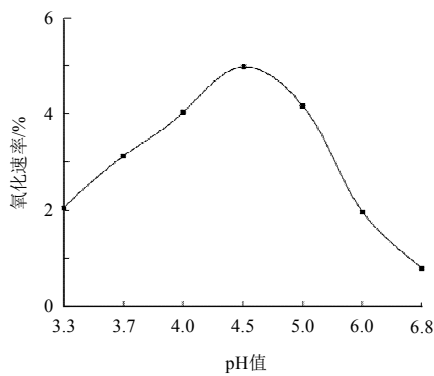


图 5 pH 对 SO₃²⁻氧化速率的影响

Fig. 5 Effect of pH on SO₃²⁻ oxidation rate

同时, 石膏浆液中 CaSO₃ 含量过高易结晶析出 CaSO₃·1/2H₂O, 该晶体呈针状, 其黏性较高, 粒径偏小, 密度大。当该针状晶体含量过高时,

会造成浆液黏稠、密度偏大, 不利于石膏脱水^[11]。此外, 大量 CaSO₃ 浆液颗粒被烟气携带, 沾在除雾器叶片表面, 正常冲洗程序无法去除, 长时间运行会造成除雾器堵塞^[12]。

2.4 吸收塔内浆液密度过高

吸收塔内浆液的密度直观反映塔内 CaSO₄·2H₂O, CaCO₃, CaSO₃·1/2H₂O 等固体物质的浓度大小; 在不同密度下, 塔内浆液的成分是不同的。通过化验可知, 当密度大于 1150 kg/m³ 时, 浆液中 CaCO₃ 和 CaSO₄·2H₂O 的浓度已趋于饱和, 常温下 CaCO₃ 溶解度为 0.0013 g/100 mL, 溶解度小于 0.01 g, 属于难溶物质, CaSO₄·2H₂O 溶解度为 0.241 g/100 mL, 所以在过饱和状态下, 密度值升高, 说明浆液中的石膏固体含量随之增加^[13]。事故发生前一个小时, 回流水箱出口母管穿孔泄漏, 石膏脱水系统停运检修 4 h, 直接造成塔内浆液密度高达 1217 kg/m³; 含大量 CaSO₃ 和 CaSO₄ 的高密度浆液被循环泵运至塔内喷淋层, 吸收 SO₂ 效率降低, 与烟气接触时极易被携带, 为除雾器的堵塞和石膏浆液的溢出提供了条件。此后, 脱水系统恢复运转, 石膏旋流器的 5 个旋流子全开, 仍然出力不足, 根本无法有效、快速降低塔内浆液密度。

3 控制对策

3.1 事故联系

综上所述, 分析事故现象、原因之间的联系, 如图 6 所示; 通过脱硫系统的超低排放改造和运行参数控制, 防止了事故的再次发生。

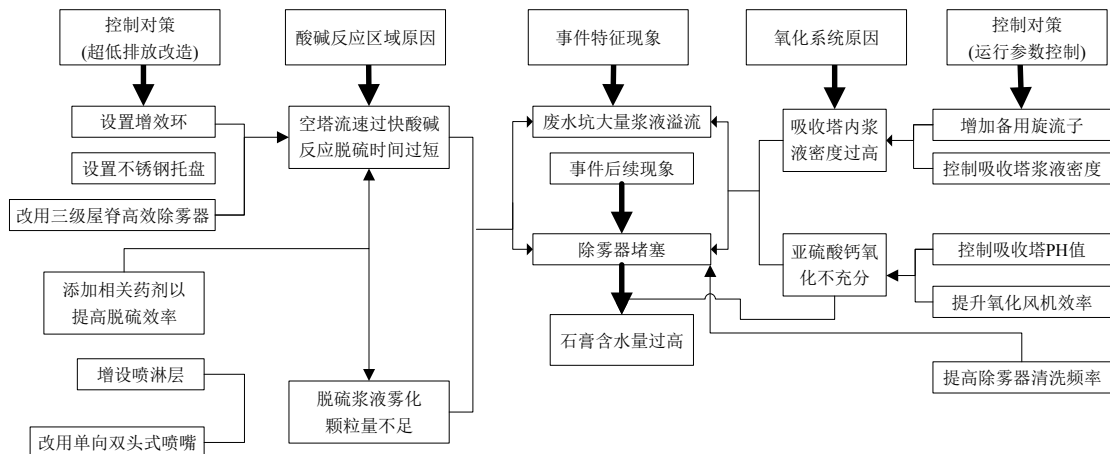


图 6 事故现象、原因及控制措施联系图

Fig. 6 The relationship between phenomenon, cause and control measures

3.2 脱硫系统超低排放改造

3.2.1 增设喷淋层和改用单向双头式喷嘴

在 WFGD 工艺中,喷淋空塔的喷淋层设计一般不少于 3 层,交错布置。改造后,塔内增设 2 层喷淋层(共 5 层),塔高相应至少增加 4 m,塔重建高度为 42.5 m。最下一层喷淋层距吸收塔入口烟道上沿大于 3 m;喷淋层之间距离为 2 m,这可使喷淋层喷出的浆液有效地接触进入吸收塔的烟气,增加气液接触时间。顶层喷淋层距离除雾器底部大于 2 m,较大距离可促进细小雾滴聚集成大颗粒,更易通过重力沉降返回浆液池^[14]。

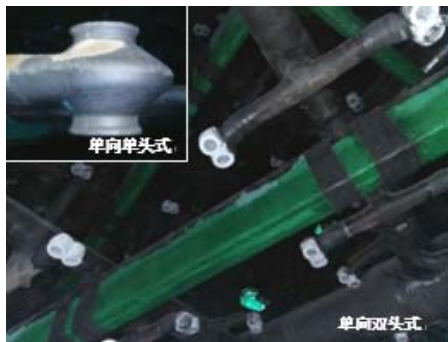


图 7 单向单头式和单向双头式喷嘴

Fig. 7 Unidirectional one-headed and unidirectional two-headed nozzles

同时,喷嘴由单向单头式改用单向双头式,如图 7 所示;相同的喷嘴流量以及工作压力下,双头喷嘴的每个雾化喷射腔体需要雾化的浆液流量只是标准喷嘴的一半,因此也具有更小的雾化腔体,可获得更小的浆液雾滴颗粒平均直径(Sauter mean diameter, SMD 值),为接下来的 SO_2 吸收反应提供了有利条件。该电厂#1 机组喷淋系统实际运行中喷嘴压力设置为 80 kPa,得到雾滴的 SMD 值为 2 000 μm 。雾滴离开喷嘴后,在周围空气流动作用下,发生二次雾化,双头喷嘴能够密集提升浆液喷淋层的二次雾化效果,在二次雾化过程中,包裹在原液滴表面的壳体被打破,内部浆液会转移到新的液滴表面,能够继续与烟气反应吸收 SO_2 ,最大限度地提升雾化液滴的反应效率。

3.2.2 增设不锈钢托盘

根据美国巴布科克-威尔科克斯公司(B&W)的托盘专利技术,在喷淋层下方设置一不锈钢托盘,托盘是带有小孔的格栅^[11],如图 8 所示,使



图 8 喷淋层下方的合金托盘

Fig. 8 Alloy tray under the shower layer

浆液停留时间大于 4.3 min,符合 WFGD 工艺对于浆液循环停留时间在 3.5 min 以上的要求。

烟气由吸收塔入口进入,形成一个涡流区;浆液从喷淋层喷射下来,通过合金托盘后的烟气向上流速降低,两者在托盘上掺混,形成泡沫层,泡沫层大大增加了气液接触界面,对 SO_2 具有良好的吸收能力。同时,泡沫层使烟气在吸收塔内的停留时间增加,气液充分接触,强化了气液传质,从而有效降低了液气比,使烟气中的液滴携带量减少,减轻了除雾器的处理负荷,提高脱硫效率^[11]。

3.2.3 塔壁设增效环

塔壁设增效环,主要目的是防止烟气短路。 SO_2 浓度在吸收塔截面上的变化是两边高,中间低,靠近吸收塔中心位置的浆液喷淋密度比吸收塔内壁位置的要高得多;同时,有部分浆液喷到吸收塔内壁,其气液接触面的传质效果非常差;这部分烟气没有经过足够的气液接触便离开吸收塔,造成了烟气沿吸收塔内壁的“逃窜”,从而影响了烟气脱硫效率。布置聚气环后,可以强化气流往中心流动,有效避免了烟气走廊的形成^[15],如图 9 所示。

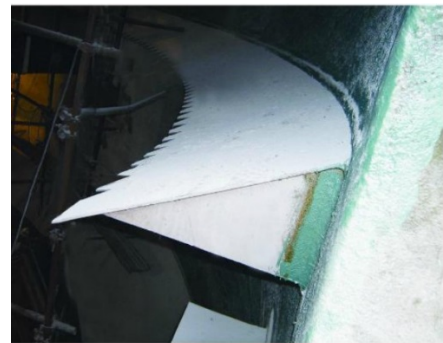


图 9 吸收塔壁的增效环

Fig. 9 Synergistic ring on absorption tower wall

3.2.4 改用 3 级屋脊高效除雾器

吸收塔上部安装原装进口的 3 级屋脊高效除雾器，如图 10 所示。与原单级平式除雾器比较，屋脊除雾器适用于烟气流量变化大的场合，排水性能更佳，除雾效率更高^[16]；而且每个单元除雾器之间设有走道，便于维修和保养。



图 10 屋脊式高效除雾器

Fig. 10 Roof efficient demister

3.2.5 增加备用旋流子

在石膏旋流器的备用孔加装一个旋流子(改为四用二备)，当吸收塔浆液密度居高不下时，可通过同时运行 6 个旋流子，提升石膏产量，有效降低浆液密度。

3.3 脱硫系统运行参数控制

3.3.1 控制吸收塔 pH 值和密度

吸收塔浆液的 pH 值和密度是 WFGD 系统的重要参数，直接影响运行工况^[17]。因此，操作时运行人员应严格控制塔内 pH 值在 5.4~5.5 左右，密度在 1 130~1 140 kg/m³ 之间，保证脱硫系统正常运行。同时，应定期通过化学方法对在线 pH 计、密度计进行校验，并与化验室仪表进行比对。

3.3.2 添加相关药剂以提高脱硫效率

当出现入口烟气量和含硫量增幅较大时，可适当通过添加消泡剂加快化学吸收过程，但应缓慢添加并控制添加量^[18]；或者添加脱硫增效剂，提高脱硫效率，降低 SO₂ 排放浓度^[19]。

3.3.3 提升氧化风机效率

当出现入口烟气量增幅较大时，应适当增加氧化风机运行台数，保证塔内 CaSO₃ 氧化和石膏结晶的正常进行，利于脱水。由于同时运行 2 台氧化风机可能导致其轴承温度剧烈升高，超过额定温度 80℃，有跳闸风险；可以通过间断启动备

用氧化风机增加空气量来达到加强氧化效果。

3.3.4 加强除雾器清洗

当入口烟气量增幅较大时，应提高除雾器的冲洗频率，减少除雾器叶片表面黏结 CaSO₄·2H₂O 和 CaSO₃。同时，需要注意由于冲洗水增加造成的塔内水不平衡现象，必要时可增加废水排放量^[20-21]。

4 结论

通过对某电厂 4 台机组的超低排放改造，机组脱硫系统 SO₂ 排放含量控制在 35 mg/Nm³ 以下，脱硫效率提高到 99.2%；同时，通过严格控制脱硫系统运行参数，#1 吸收塔再没发生除雾器堵塞、浆液溢流等现象。为解决燃煤电厂脱硫系统所出现的复杂问题提供了参考性经验。

参考文献

- [1] 张爽. 湿法烟气脱硫装置采用湿烟囱排放的探讨[J]. 电力建设, 2005, 26(1): 64-66.
- [2] 李文鼎, 高惠华, 蔡文丰. 石灰石-石膏湿法脱硫吸收塔结垢分析及预防措施[J]. 发电技术 2019, 40(1): 51-55.
- [3] 全国环保产品标准化技术委员会环境保护机械分技术委员会, 武汉凯迪电力环保有限公司. 燃煤烟气湿法脱硫设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] 张忠, 武文江. 火电厂脱硫与脱硝实用技术手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [5] 王中伟, 孙君建, 赵立春, 等. 湿法脱硫对电厂钢筋混凝土烟囱的腐蚀及防腐方法研究[J]. 发电技术, 2018, 39(6): 546-553.
- [6] 张磊, 王德坚, 刘红蕾, 等. 电厂锅炉湿法脱硫设备检修技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [7] 何仰朋, 陶明, 石振晶, 等. 喷淋脱硫塔内除雾器运行特性[J]. 中国电力, 2015, 48(7): 124-128.
- [8] 禾志强, 祁利明, 周鹏, 等. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫优化运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [9] 赵毅, 华伟, 王亚君, 等. 湿式烟气脱硫塔中折线型挡板除雾器分离效率的数值模拟[J]. 动力工程, 2005, 25(2): 293-297.
- [10] 周祖飞. 湿式石灰石-石膏烟气脱硫系统的工艺控制[J]. 环境科学与技术, 2005(2): 80-81.
- [11] 李元, 杨志忠. 湿法烟气脱硫关键影响因素及新型单塔双循环技术[J]. 环境工程, 2016, 34(1): 69-73.

- [12] 朱国宇. 脱硫运行技术问答 1100 题[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [13] 张小茹. 吸收塔浆液密度对湿法脱硫的影响[J]. 中国环保产业, 2016(7): 61-63.
- [14] 郭长仕. 石灰石-石膏湿法脱硫“石膏雨”现象原因分析及治理措施[J]. 环境工程, 2012, 30(增): 221-223.
- [15] 望亭发电厂, 戚墅堰发电公司. 发电厂综合技术改造案例解析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [16] 曹宾. 高效除雾器使用研究[J]. 科技与创新, 2014(18): 14-16.
- [17] 梁磊, 马洪玉, 丁华, 等. 石灰-石膏法烟气脱硫系统塔内浆液 pH 值及密度测量改进[J]. 中国电力, 2012, 45(9): 80-84.
- [18] 西安热工研究院. 火电厂烟气污染物超低排放技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [19] 李兴华, 牛拥军, 雷鸣, 等. 火电机组脱硫系统超低排放改造节能优化[J]. 热力发电, 2017, 46(11): 119-123.
- [20] 朱跃. 火电厂“厂界环保岛”改造与运维关键技术[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 1-12.
- [21] 郭静东, 廖冬梅, 颜海伟. 燃煤电厂脱硫石膏品质影响因素及改进措施[J]. 发电与空调, 2017, 38(6): 10-13.

收稿日期: 2018-12-06。

作者简介:



颜海伟

颜海伟(1992), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电厂运行参数控制与管理, 472870096@qq.com;

廖冬梅(1975), 女, 博士, 高级实验师, 主要研究方向为电厂化学与环保, 本文通讯作者, 619168787@qq.com。

(责任编辑 车德竞)