

1 000 MW 超低排放燃煤机组湿法脱硫和湿式电除尘运行性能及废水排放工艺研究

蒋奕锋^{1*}, 王家伟², 汪涛², 张永生²

(1. 神华国华寿光发电有限责任公司, 山东 潍坊 262714;

2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要:为了研究湿法脱硫和湿式电除尘运行性能及废水排放特性,以神华国华寿光 1 000 MW 超低排放燃煤机组为对象,分别对脱硫塔性能、湿除液滴特性以及脱硫和湿除废水水质进行分析。结果表明,100%和 45% 负荷下,脱硫塔脱硫效率均超 99%,SO₂ 排放浓度远低于超低排放限值;湿式电除尘可实现液滴的深度脱除,液滴排放浓度低至 6.5 mg/m³;脱硫和湿除废水排放 pH、硫酸盐、硫化物、悬浮物、重金属含量基本满足电力行业标准要求,但需优化废水处理系统中颗粒沉淀和絮凝工艺。

关键词:燃煤电厂;超低排放;湿法脱硫;湿式电除尘;液滴;废水水质

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)S-0324-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.S.067

Operating performance and wastewater emission situation of wet desulfurization unit and wet electrostatic precipitator in a 1 GW ultra-low emission coal-fired power plant

JIANG Yi-feng^{1*}, WANG Jia-wei², WANG Tao², ZHANG Yong-sheng²

(1. Shenhua Guohua Shouguang Power Generation Co., Ltd., Weifang 262714, China; 2. College of Energy,

Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to study the operating performance and wastewater emission characteristics of both wet desulfurization unit and wet electrostatic precipitator, Shenhua Guohua Shouguang's 1 GW ultra-low emission coal-fired power plant is selected to analyze the performance of desulfurization column, the droplet-removing characteristics of wet electrostatic precipitator, the quality of wastewater from wet desulfurization unit and wet electrostatic precipitator. Study results show that the desulfurization efficiencies of desulfurization column exceed 99.0% at both 100% load and 45% load, with a SO₂ emission concentration far below the ultra-low emission limit. Deep removal of droplets can be achieved through wet electrostatic precipitator, and the droplet content at the outlet of wet electrostatic precipitator is as low as 6.5 mg·m⁻³. The pH value and the contents of sulfates, sulfides, suspended solids, heavy metals in discharged wastewater are all lower than the standard levels for the power industry. But it is necessary to optimize the particle precipitation and flocculation process in the wastewater treatment system.

Key words: coal-fired power plant; ultra-low emission; wet desulfurization; wet electrostatic precipitator; droplets; wastewater quality

近 10 余年来,我国火电行业得到飞速发展,与此同时,火电机组排放的污染物越来越受到社会的关注^[1]。煤炭燃烧过程中排放比重较大的污染物有烟尘、SO₂ 及氮氧化物(NO_x),这些污染物会严重污染大气,且危害人类的健康^[2]。超低排放或近零排放改造是解决火电机组污染问题的根本途径,可以进一步降低火电机组的污染物排放量^[3-4]。大量超低排放机组要求的排放浓度限值为:基准氧含量为 6%时,烟尘 ≤ 5 mg/m³、SO₂ ≤ 35 mg/m³、NO_x ≤ 50 mg/m³^[5]。

目前我国有 80% 以上的火力发电厂均采用石灰石-石膏湿法脱硫(FGD)技术对烟气进行脱硫处理^[6],湿法脱硫系统需要排出一定量的脱硫浆液来维持系统的稳定性,这部分浆液称为脱硫废水^[7]。脱硫废水中主要包含悬浮物、盐类以及小部分的重金属。盐类包括 Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻ 以及 SO₄²⁻;重金属包括 As、Hg、Pb、Cd、Cr 等^[8-10]。由于上述重金属元素被我国列为第一类污染物,因此对不同负荷下电厂脱硫废水的水质进行分析是必要的^[11]。

大气环境中约 10% 的 PM_{2.5} 来自燃煤电厂排

收稿日期:2021-01-19;修回日期:2021-05-18

作者简介:蒋奕锋(1971-),男,硕士,高级工程师,从事电力生产技术管理和燃煤电站污染物控制技术应用研究,通讯联系人,yifeng.jiang@chnenergy.com.cn。

放,控制燃煤电厂 PM_{2.5} 排放是大气污染防治的重要需求^[12]。考虑普通电除尘器对 PM_{2.5} 去除率较低,因此具有较高 PM_{2.5} 去除率的湿式电除尘技术在很多国家广泛使用^[13-14]。由于湿式电除尘中溶有颗粒物的废水含有一定量的无机盐、重金属等,该废水能否直接排放或利用尚不明确,亟需对湿式电除尘的废水进行水质分析。另外,烟气经过脱硫浆液洗涤后,水蒸气达到饱和且携带了一定量的液态水,导致湿法脱硫系统出口及后续烟气携带大量的微小液滴^[15-16],其中包含一定量的 SO₃²⁻、SO₄²⁻ 和少量重金属元素,因此液滴的排放特性也需进一步探究。基于上述分析,本文针对 1 000 MW 超低排放燃煤机组,开展不同负荷下湿法脱硫运行性能及湿式电除尘脱除液滴特性研究,并对工艺水、脱硫废水、湿除废水进行水质分析。

1 机组概况

试验机组为神华国华寿光电厂 1 000 MW 超临界超低机组,流程如图 1 所示。污染物控制单元包括低氮燃烧器、SCR 脱硝、干式静电除尘、湿法脱硫和湿式电除尘。锅炉的燃烧器采用低 NO_x 旋流式煤粉燃烧器,使用 NO_x 焰内还原技术;SCR 脱硝中,使用尿素作为还原剂,SCR 催化剂按 2+1 层布置,催化剂的型式采用蜂窝式,利用烟气-空气换热器尿素热解技术;干式除尘器采用 3 室 5 电场高频静电除尘器,刺线+螺旋线组合技术;湿法脱硫塔和湿式电除尘器详细介绍如下。

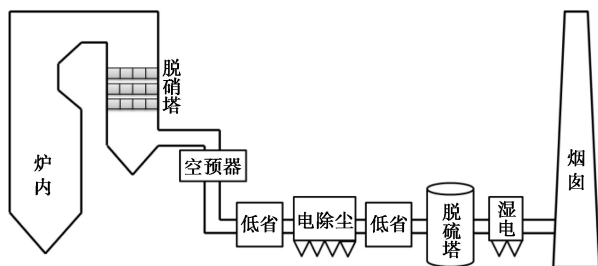


图 1 燃煤机组流程图

1.1 脱硫系统

试验机组采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺,主要包括 SO₂ 吸收系统、石灰石浆液制备系统、石膏脱水系统、事故浆液罐及浆液排放系统、脱硫废水处理系统和工艺水系统等。湿法脱硫塔设置 5 层高效喷淋装置,塔内顶部设置四级除雾器(三级屋脊式+一级管式)。脱硫塔总高达 42.3 m,液位可保

持 12.5 m 运行,液气比达到 19.5 L/Nm³,反应池容积 4 250 m³;空塔烟气流速设计 3.8 m/s,单台浆液循环泵流量 14 500 m³/h,脱硫废水处理量为 45~55 m³/h。

1.2 湿除系统

试验机组配置 2 台结构上具有独立壳体的湿式电除尘器,收尘极采用宽度为 818 mm 的平板型阳极板,同极间距 300 mm,该阳极板有效解决了极板强度、水膜和“沟流”问题,增强了极板的抗污染性;选用尖端放电的针刺型阴极线,极线放电强度高,起晕电压低、电晕电流大,增强了抗粉尘污染的性能。湿式电除尘器中的水主要以雾化水滴形式存在,水膜水量为 180 t/h,耗水量≤17.1 t/h。为了节约用水,湿除废水经刮泥机和澄清池处理后,再次进入脱硫塔进行循环利用。

1.3 取样测试方法

采用煤工业分析仪(美国 LEGO, TGA701S4C)和元素分析仪(美国 EURO, EA3000)测试煤的基本组成;德国德图 Testo350Pro 烟气分析仪测试 SO₂ 浓度;美国赛默飞世尔科技 ICS-1100 离子色谱仪测试废水中阴离子含量;电感耦合等离子体质谱仪(美国 Pekin Elmer, NexION 2000C)检测废水中金属阳离子含量;按照燃煤烟气脱硫设备性能测试方法(GB/T 21508—2008)中镁离子示踪法对烟气中携带的液滴进行监测;采用重量法(GB 11901—89)检测水中悬浮物含量;重铬酸盐法(GB 11914—89)检测废水中化学需氧量。

表 1 是煤样的基本数据。100% 负荷条件下和 45% 负荷条件下,煤的基本组成数据无明显差距。

表 1 煤样工业分析和元素分析 %

负荷/%	水分	挥发分	灰分	固定碳	C	H	O	N	S
100	6.03	27.56	17.17	49.24	63.59	4.33	13.45	0.83	0.65
45	5.46	27.95	16.94	49.65	64.09	4.18	13.45	0.70	0.64

石灰石成分分析及用量如表 2 所示,石灰石纯度均在 93% 以上。100% 负荷条件下,石灰石耗量为 4.30 t/h,负荷为 45% 时,石灰石用量降到 2.41 t/h。

表 2 石灰石成分分析及用量

负荷/ %	CaCO ₃ / %	MgCO ₃ / %	SiO ₂ / %	Al ₂ O ₃ / %	Fe ₂ O ₃ / %	耗量/ (t·h ⁻¹)
100	93.95	3.55	0.45	0.54	0.31	4.30
45	93.20	4.49	1.23	0.20	0.20	2.41

2 结果与讨论

2.1 脱硫性能分析

实验中测试了脱硫前后和湿除后的 SO_2 浓度。不同负荷下 SO_2 浓度如图 2 所示。100% 负荷下 FGD 入口 SO_2 浓度为 866 mg/m^3 , 出口 SO_2 浓度为 7.2 mg/m^3 , 脱硫效率为 99.2%; 45% 负荷下 FGD 入口 SO_2 浓度为 773 mg/m^3 , 出口 SO_2 浓度为 8.0 mg/m^3 , 脱硫效率为 99.0%。由图 2 还可发现, 在 100% 负荷下, 湿式电除尘器出口 SO_2 浓度为 6.9 mg/m^3 , 对 SO_2 有微弱的脱除效果; 当负荷降到 45% 时, 湿式电除尘器前后 SO_2 浓度基本没有变化。

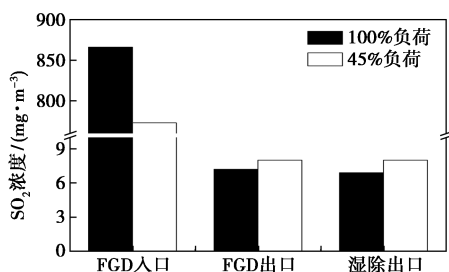


图 2 不同负荷下 SO_2 浓度

对实验期间石灰石和石膏样品进行分析, 100% 和 45% 负荷下, 石灰石样品纯度分别为 93.95% 和 93.20%, 基本满足使用要求, 但 MgCO_3 含量较高, 分别达到 6.50% 和 4.49%, 脱硫塔运行时容易产生泡沫; 此外, 2 个工况下, 石膏样品的含水量较高, 分别达到 22.23% 和 11.19%。由此可见, 湿法脱硫系统可以较好地实现深度脱硫, 排放浓度远低于 35 mg/m^3 的超低排放限值, 但在日常运行管理过程中仍应加强石灰石品质管理和脱硫石膏脱水处理。

2.2 液滴排放特性分析

烟气经过湿法脱硫会存在浆液液滴携带问题, 液滴含量主要取决于除雾器性能。在试验机组烟气处理系统中, 湿法脱硫后设置了湿式电除尘器, 对于细微颗粒具有脱除效果。为研究湿除对液滴脱除的效果, 测得其前后 2 个采样点烟气中液滴浓度, 如图 3

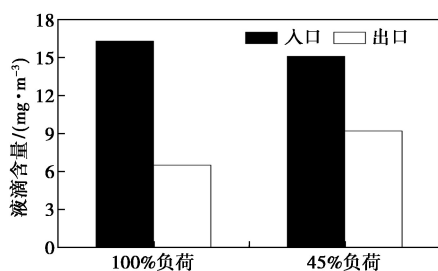


图 3 不同负荷下湿式电除尘器前后液滴浓度

所示。从图中可看出, 100% 负荷下湿除入口液滴浓度为 16.3 mg/m^3 , 脱硫塔内四级除雾器对液滴的去除效果良好; 45% 负荷下湿除入口液滴浓度为 13.9 mg/m^3 。

进一步分析发现, 100% 和 45% 负荷下, 湿除出口液滴浓度分别降至 6.5 mg/m^3 和 8.6 mg/m^3 , 脱除效率分别达到 60.1% 和 38.1%, 说明湿式电除尘可以实现液滴的深度脱除。同时, 高负荷时表现出更优越的性能, 这可能是由于烟气量的提高强化了小液滴在扩散泳作用下的碰撞聚并效果。

2.3 水质分析

工艺水水质如表 3 所示。45% 负荷下工艺水中氯化物、硫酸盐、悬浮物和化学需氧量均明显高于 100% 负荷。

表 3 工艺水水质分析

项目	100% 负荷	45% 负荷
pH	6.71	6.77
氯化物	30.1	111
硫酸盐	<8	129
悬浮物	26	36
化学需氧量	8	18

不同负荷下脱硫和湿除废水排放水质如表 4 所示。大部分特征污染物含量满足《火电厂石灰石—石膏湿法脱硫废水水质控制指标》(DL/T 997—2006) 标准要求; 废水中悬浮物含量相对较高, 这可能是由于废水中存在粒径较小的颗粒, 在沉淀、絮凝、澄清等过程中未得到有效去除。高负荷工况下, 废水中硫酸盐、硫化物、悬浮物等都低于 45% 负荷, 这和低负荷下工艺水中污染物含量更高显著相关。100% 负荷下铜、锌、铅、镍、镉、铁、汞、铬都远低于 45% 负荷, 但是 100% 负荷下锰的含量却高于 45% 负荷, 脱硫系统中锰主要有两个来源: 工艺水和随着石灰石、飞灰和烟气进入脱硫系统的二氧化锰。进入烟气脱硫系统的锰 72% 来自于石灰石^[17], 因此, 可能是石灰石的差异导致废水中锰含量的异常。100% 负荷下, 脱硫废水中钙和镁离子的含量明显高于 45% 负荷, 主要原因是高负荷时石灰石的消耗量大增, 石灰石主要成分为碳酸钙和碳酸镁, 导致废水中钙和镁的含量增大。湿除废水中, 100% 负荷时 pH 低于 45% 负荷, 由于 100% 负荷下湿除脱硫效果为 4.2%, 导致湿除废水的 pH 更低。

表4 脱硫和湿除废水水质分析 mg/L

项目	100%负荷		45%负荷		标准
	脱硫废水	湿除废水	脱硫废水	湿除废水	
pH	—	7.26	—	7.57	6~9
硫酸盐	12	350	69	563	2000
硫化物	0.024	0.029	0.066	0.025	1.0
悬浮物	66	84	182	62	70
铜	<0.05	<0.05	0.07	<0.05	—
锌	<0.05	0.05	0.18	<0.05	2.0
铅	<0.2	<0.2	1.3	0.3	1.0
镍	<0.05	<0.05	0.49	0.1	1.0
镉	<0.05	<0.05	0.16	<0.05	0.1
铁	0.11	0.36	1.72	1.98	—
汞	0.00017	0.00022	0.001	0.004	0.05
锰	1.67	0.99	0.686	0.221	—
铬	0.014	0.025	0.174	0.008	1.5
钙	217	54.6	<2	68.1	—
镁	160	49.1	47.9	45.1	—

参考文献

3 结论

本文针对1 000 MW 超低排放燃煤机组,开展了不同负荷下湿法脱硫和湿式电除尘的运行性能研究及废水水质分析,主要结论如下:

(1)不同负荷下试验机组脱硫塔性能优越,脱硫效率均高于99%,SO₂ 排放浓度均小于10 mg/m³,远低于超低排放限值;日常运行过程中还应加强石灰石品质管理和脱硫石膏浆液处理,提高脱硫副产物综合利用价值。

(2)湿式电除尘可以实现液滴的深度脱除,且高负荷时性能更优越,取决于小液滴在阳极水膜层中的传质扩散条件。

(3)脱硫和湿除废水中pH、硫酸盐、硫化物、悬浮物、重金属含量基本满足DL/T 997—2006标准要求,但悬浮物含量相对较高,废水处理过程还需强化颗粒的沉淀和絮凝效果。

(上接第323页)

- [8] 谭捷.甲基丙烯酸甲酯的生产技术及其研究进展[J].乙醛醋酸化工,2017,(1):21-23.
- [9] 左杰,田绍友.甲基丙烯酸甲酯工业化合成路线及发展状况[J].天津化工,2017,31(3):13-15.
- [10] 许立强,邵晶晶,党伟荣,等.醋酸甲酯合成甲基丙烯酸甲酯的研究进展[J].现代化工,2020,40(6):51-56.
- [11] 贾志光,雷鸣.异丁烯氧化法生产甲基丙烯酸甲酯研究进展[J].石化技术,2008,15(4):52-55.

- [1] 刘备.煤电机组的超低排放技术与发展综述[J].河南科技,2017,(23):120-125.
- [2] 周洪光,赵磊,陈创社,等.燃用神华煤火电厂近零排放技术路线与工程应用[J].中国电力,2015,48(5):89-92.
- [3] 王树民,宋畅,陈寅彪,等.燃煤电厂大气污染物“近零排放”技术研究及工程应用[J].环境科学研究,2015,28(4):487-494.
- [4] 靳琳芳.燃煤烟气污染物超低排放技术综述及排放效益分析[J].绿色科技,2017,19(20):70-73.
- [5] 张军,郑成航,张涌新,等.某1 000 MW 燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J].中国电机工程学报,2016,36(5):1310-1314.
- [6] 王文彪,许月阳,薛建明,等.燃煤电厂脱硫技术研究进展及建议[J].电力科技与环保,2020,36(3):1-5.
- [7] 庞冬,贾尔恒·阿哈提,何秉宇,等.某火电厂湿法脱硫废水水质分析及处理工艺优化[J].水处理技术,2018,44(8):89-93.
- [8] 康鼎.燃煤电厂脱硫废水处理工艺研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [9] Zheng L, Jiao Y, Zhong H, *et al.* Insight into the magnetic lime coagulation-membrane distillation process for desulfurization wastewater treatment: From pollutant removal feature to membrane fouling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 391: 122202.
- [10] Han X, Zhang D, Yan J, *et al.* Process development of flue gas desulphurization wastewater treatment in coal-fired power plants towards zero liquid discharge: Energetic, economic and environmental analyses[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121144.
- [11] 王敏琪.火电厂湿式烟气脱硫废水特性及处理系统研究[D].杭州:浙江工业大学,2013.
- [12] 王树民,张翼,刘吉臻.燃煤电厂细颗粒物控制技术集成应用及“近零排放”特性[J].环境科学研究,2016,29(9):1256-1263.
- [13] 史斌,郑川江.对湿式电除尘技术及其在燃煤电厂中的应用分析[J].电力设备管理,2020,(4):110-112.
- [14] Yang Z D, Zheng C H, Chang Q Y, *et al.* Fine particle migration and collection in a wet electrostatic precipitator[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2017, 67(4): 498-506.
- [15] 周艳明,张鸿,吴仁军,等.FGD 系统运行对出口烟尘排放影响的研究[J].湖南电力,2015,35(3):16-22.
- [16] 陈凯华,宋存义,李强,等.湿法烟气脱硫系统中折板式除雾器性能的数值模拟[J].环境工程学报,2007,1(7):91-96.
- [17] 陈洪涛,施依娜,陆俊超,等.石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统中锰元素的行为方式研究[J].华东电力,2010,38(10):1611-1614. ■
- [12] Koichi K. Integrated method for producing methyl methacrylate and hydrogen cyanide; US6075162[P]. 2002-06-13.
- [13] Gerald O. A new C₂-based production route to MMA[J]. Chemical Engineering, 2017, 124(11): 7.
- [14] 中国石化有机原料科技情报中心站. 赢创公司正在开发“LiMA”甲基丙烯酸甲酯生产新工艺(简讯)[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(1): 108.
- [15] Evonik. Evonik introduces new MMA production process[J]. Focus on Catalysts, 2017, 2017, (11): 6. ■