

综述与专论

火电厂石灰石-石膏湿法脱硫除雾器的研究及应用进展

杨治中, 郭士义

(上海电气电站环保工程有限公司, 上海 200000)

摘要: 本文介绍了电厂石灰石-石膏湿法脱硫除雾器的结构及其工作原理。综述了平板式、屋脊式及组合式除雾器在电厂湿法脱硫中的研究和应用进展。对湿式电除雾器的工作原理及其在电厂湿法脱硫中的应用进行了介绍。最后, 对湿法脱硫除雾器设计和选型的影响因素、常见事故产生的原因及电除雾器的研发方向和前景做了总结。

关键词: 石膏-石灰石; 烟气脱硫; 除雾器; 湿式电除雾

中图分类号: X701.3

文献标识码: B

文章编号: 1006-8759(2014)06-0011-04

A REVIEW ON THE RESEARCH AND APPLICATION OF DEMISTER IN WET LIMESTONE-GYPSUM FLUE GAS DENITRIFICATION SYSTEM AT COAL-FIRED POWER PLANT

YANG Zhi-zhong, GUO Shi-yi

(Shanghai Electric Power Generation Environment Protection Engineering Co., Ltd.,
Shanghai, 200000)

Abstract: This paper described the structure and principle of demister in wet Limestone-Gypsum Flue Gas Denitrification (FGD) system at Coal-fired Power Plant, and reviewed the research and application of flat-plate, wave-plate and combined-plate in wet FGD system. The principle of Wet Electrostatic Precipitator (WEP) and its application in wet FGD at Coal-fired Power Plant were briefly introduced. The influencing factors of demister's design and selection, the causes of common demister's failure, the development and prospects of WEP were briefly summarized at the end of the paper.

Key words: Limestone-Gypsum; Flue Gas Desulfurization; Demister; Wet Electrostatic Precipitator

1 引言

SO₂ 是主要的大气污染物之一, 而燃煤火电厂是该污染物的最大生产源。石灰石-石膏湿法由于其技术成熟, 脱硫效率高达 95% 以上, 脱硫剂廉价, 运行稳定等优点占据了世界 75% 的脱硫市场

[1]。根据中电联发表的数据显示, 超过 95% 的燃煤火电厂采用石灰石-石膏湿法进行脱硫。

除雾器是石灰石-石膏湿法脱硫的主要部件之一, 其除雾效果好坏对下游设备的腐蚀、堵塞以及“石膏雨”的形成起到至关重要的作用。我国《火力发电厂烟气脱硫设计技术规程》(DL/T5196-2004) 规定: “设计工况下脱硫后烟囱入口的烟气温度一般应达到 80℃ 以上排放”。因此, 早年我

收稿日期: 2013-12-08

第一作者简介: 杨治中, 男, 1986.9 出生, 湖南人, 浙江大学毕业, 硕士研究生, 工程师, 现从事: 燃煤电厂烟气脱硫、脱硝、除尘。

国电厂烟气脱硫系统 (Flue Gas Desulfurization, FGD)均设置烟气换热器 (Gas-Gas Heater, GGH) 以满足烟气温度排放要求。但在实际运行过程中发现 GGH 元件会出现严重的腐蚀以及换热元件堵塞等问题^[2,3]。随后在新编制的《火力发电厂烟气脱硫设计技术规程》补充:“在满足环保要求且烟囪和烟道有完善的防腐和排水措施并技术经济比较合理时也可以不设烟气换热器”,所以在后期的 FGD 系统设计中基本不考虑配置 GGH^[4]。不增设 GGH 的 FGD 系统虽然解决了 GGH 元件腐蚀和堵塞问题,却提高了二次污染即“石膏雨”的风险^[4-6]。

无论是 GGH 的腐蚀及换热元件堵塞问题还是“石膏雨”问题,其产生的主要原因均在于 FGD 系统出来的烟气中含有石膏的细小雾滴没有得到有效的去除。因此,为 FGD 系统设计和配置合理、高效的除雾器是非常重要的。

2 脱硫除雾器的结构及其原理

FGD 系统的除雾器一般由除雾器本体和冲洗系统两部分组成,叶片是除雾器本体的重要组成部分,其材质主要包括高分子材料(如聚丙烯 PP、FRP 等)和不锈钢(如 316L、317L 等)两大类。按除雾器叶片的几何形状,可将除雾器分为折流板和波纹板两种形状^[7]。根据除雾器的布置形式,除雾器常分为管式、平板式布置和屋脊式三种形式。目前,应用于实际的主要为后两种布置方式。FGD 系统根据需要通常配置二至三级除雾器,一级除雾器,主要用于清除大颗粒和大水滴,二、三级除雾器,主要用来清除小颗粒和细小水滴。除雾器一般布置在脱硫塔顶端,也有少数设计将除雾器布置在脱硫出口净烟道内。

脱硫除雾器主要是依靠重力和惯性撞击作用捕集细小雾滴。含有雾沫的烟气以一定速度通过除雾器的弯曲通道时,烟气被快速、连续改变运动方向,在惯性和离心力作用下,烟气中的雾沫撞击到除雾器叶片上,当所凝聚的液滴大到其自身重力大于烟气上升的拉力与液体表面张力的合力时,液滴就从叶片表面上被分离出来,下落至浆液池内,实现了气液分离。除雾器叶片所具有的折流或波纹结构增加了雾沫被捕集的机率,从而大大提高了除雾效率。

3 除雾器的研究及应用

3.1 平板式除雾器

平板式除雾器以其结构简单、安装维护方便、经济适用而被广泛采用^[8]。一般断面大、流速平稳(3.5~5.5 m/s),烟气含水量相对较少的脱硫吸收塔推荐选择叶片间距较大的平板式除雾器^[9]。然而,平板除雾器叶片间距的设定需综合考虑除雾器阻力和除雾效率两个因素,建议每层除雾器阻力小于 100 pa,通过除雾器的烟气中液滴含量低于 75 mg/m³(标态,湿基)。有工程师^[10]提出:正弦波型的叶片间距一般选为 30 mm 左右,而二级平板型叶片间距一般选 20~40 mm。颜学升^[11]等从波纹平板式除雾器的设计流速、雾滴直径分布范同、板间距离、布置级数以及弧形弯曲角度等对除雾器效率的影响规律进行了研究,为除雾器的设计和制造提供了参考。为了保证烟气中的液滴能够得到有效去除,平板形除雾器一般采用二级叶片的配置,其临界分离粒径为:28~40 μm,其中一和二级分别为:38~42 μm 和 22~27 μm^[9]。

商丘裕东发电公司的 2×315 MW 机组采用配置二级平板式除雾的脱硫塔对烟气进行石灰石-石膏法脱硫。除雾器采用波纹型平板式,材料为聚丙烯,垂直布置于水平净烟道内,二级除雾器均设有冲洗水系统。在系统初步投运期间,每个脱硫装置每月需停运 2 次进行除雾器冲洗,才能满足实际运行需求。随后对脱硫除雾器进行改造:(1)调整除雾器喷嘴冲洗方向使其与除雾器波形板平行;(2)增加除雾器冲洗水管,每个单元块布置 6 个以上喷嘴;(3)二级除雾器后增加冲洗门。通过改造后,脱硫塔无需再停运来进行除雾器人工冲洗工作,除雾器能够连续运行 4 个月以上,且阻力和除雾效率均满足要求,改造的费用仅一个季度就可收回^[8]。

河北王滩发电公司 2×600 MW 机组的脱硫塔装有二级平板式除雾器。其中,一级除雾器叶片间距为 40 mm;二级除雾器叶片间距为 25 mm。为防止烟气对冲洗水的二次夹带,设计时二级除雾器上没有设置冲洗水。除雾器运行性能表明:烟气经过除雾器后,99.99% 粒径不小于 39 μm 的液滴可以被去除,同时还可以除去 50% 粒径为 20~39 μm 的液滴,20 μm 以下的液滴除雾器则无法拦截。但是,除雾器经常容易堵塞和结垢。究其原因

主要是由于烟气流速过大,冲洗水量、水压和频率不够,二级除雾器上面未设置冲洗水所致。电厂采取了增加二级除雾器上冲洗水系统,定期(2h)对除雾器进行冲洗,适当缩短冲洗周期(发现除雾器压差有增大趋势情况下)等手段,从运行调整和设备维护方面,保证了除雾器的高效和清洁运行^[12]。

3.2 屋脊式除雾器

与平板式除雾器相比,屋脊型除雾器能够在温度相对较高情况下运行。由于烟气通过叶片法线的流速要小于塔内水平截面的平均流速,屋脊型除雾器能够在气流速度偏高或者是吸收塔断面较小的条件下仍有很好的运行效果。与能够布置在脱硫出口净烟道内的平板式除雾器不同,几乎所有的屋脊型除雾器都垂直布置在吸收塔上方。此外,屋脊型除雾器的投入成本要稍高于平板式除雾器。有工程师^[10]提出:单层梁的屋脊型除雾器高度一般为 2 850 mm,二级平板型除雾器高度为 3 230 mm,即单层梁的屋脊型除雾器占用空间相对较小。二级叶片设计的屋脊型除雾器其临界分离粒径为:15~30 μm ,其中一和二级分别为:30~32 μm 和 26.5~28.5 μm ^[9]。

马头热电公司的 2×300MW 机组采用设有两层波纹板屋脊式除雾器的脱硫系统进行脱硫。除雾器由滑石粉加强聚丙烯材料制作,运行温度小于 80 °C,最高耐受温度小于 85 °C(不超过 10 min),正常工况下除雾器能够有效、稳定运行。但当脱硫系统停运时,由于净烟气挡板密封不严和净烟气挡板无法及时关闭的原因,部分高温烟气渗入吸收塔内造成除雾器的严重损坏。电厂不得不对损坏的除雾器进行了检修更换,为了避免类似事件的再次发生,电厂一方面加强了烟气挡板的密封性,另一方面在 DCS 系统增加了连锁保护,并设置手动关闭信号^[13]。

广东某电厂 600MW 机组的湿法脱硫系统采用 Munters 公司设计的屋脊式除雾器。两层除雾器均设置冲洗水系统,冲洗水的覆盖率高于 150%,喷嘴为螺纹连接的实心喷嘴。除雾器能够在 80 °C 的温度下安全运行,出口烟气携带水滴含量控制在 75 mg/Nm³^[14]。

从设计,安装检修简易,运行稳定等因素考虑,实际工程中脱硫除雾器的选择通常只采用一种布置形式。目前,关于两种或者多种除雾器布置形式组合少有报道。

3.3 改良及组合式除雾器

除平板和屋脊两种常用的除雾器外,有学者针对两者的不足,进行了改良研究。目前,改良的除雾器以计算机模拟为主或者说仍停留在实验室阶段,还未见到相关实际工程应用的报道。

姚杰等^[16]在波纹板型除雾器的叶片上增加了小钩,利用 Fluent 6.2 软件对其内部气液两相流场进行数值模拟。结果表明:叶片间距、钩片直段长度、叶片转折角度、钩片圆弧段转弯半径及角度对除雾器的效率和压损有显著的影响。通过计算机模拟,得出了两种高效带钩波纹板除雾叶片结构参数的组合方式,该组合方式可实现在总压降较低的情况下同时达到更加理想的除雾效率。

王大勇等^[17]分别对平板式除雾器和旋流式除雾器在新型伞罩除尘脱硫塔内的三维两相流场进行数值模拟。结果表明,平板式除雾器的拐角区域会产生强烈的湍流耗散,该区域不仅是实现气液分离的关键区域,而且烟气流经该区域时会产生明显的压降;旋流板除雾器可将液滴旋转抛向壁面从而实现气液分离,烟气流经旋流板除雾器时,具有相对对称的速度和压强分布。

从设计复杂程度,安装检修简易性,运行稳定性等因素考虑,实际工程应用中脱硫系统的除雾器通常只采用一种布置形式。目前,关于两种或者多种除雾器组合布置方式少有报道。

广东粤电靖海发电有限公司 2×600MW 机组脱硫系统原采用平板式除雾器,运行过程中发现效果不佳,经常出现 GGH 堵塞问题。通过现场排查,对脱硫系统的设计资料和现场测试数据进行对比,确认造成 GGH 快速堵塞的主要原因在于实际运行中除雾器区域的烟气流速已经接近(局部超出)除雾器对烟气流速的上限要求。进一步表明,在锅炉燃烧煤质差,除雾器区域的烟气流速偏高时,平板式除雾器运行效果欠佳。随后电厂采用屋脊式+管式除雾器的组合设计方案,将 2~3 层管子组成的管式除雾器布置在屋脊式除雾器的下方,对原有除雾器进行了改造。现场数据表明:组合方案能够除掉大部分粒径大于 18 μm 的石膏浆液雾滴,除雾器后烟气雾滴携带量为 19 mg/Nm³(标态、干基),除雾效果大幅提高,且有效的控制了 GGH 的堵塞^[15]。

3.4 湿式电除雾器

机械除雾器能够有效去除大液滴和部分细小

液滴,对于微小水雾(粒径 $<20\ \mu\text{m}$)、重金属、气溶胶粒子等几乎没有去除作用。电除雾器则可有效的捕集烟气中微小水雾、微小尘粒、气溶胶和细小金属颗粒甚至是二恶英、汞等。国内,从20世纪60年代以来就开始了电除雾器的研究和应用。目前,在化工、建材、制酸和冶金等行业已有多年成功运行的业绩。但在燃煤电厂除雾的应用报道较少。国外,近年来湿式电除雾器已经在火力发电厂湿法脱硫除雾上得到了应用^[18]。

电除雾器除雾原理在于通过静电控制装置和直流高压发生装置,将交流电变成直流电送至除雾装置中,在电晕线(阴极)和水雾捕集极板(阳极)之间形成强大的电场,使空气分子被电离,瞬间产生大量的电子和正、负离子,这些电子及离子在电场力的作用下作定向运动,构成了捕集水雾的媒介。同时使烟气中水雾微粒荷电,这些荷电的水雾粒子在电场力的作用下,作定向运动,抵达到捕集水雾的阳极板上。之后,荷电粒子在极板上释放电子,于是水雾被集聚,在喷淋水膜和重力作用下流到除雾器下部的集液槽中,从而达到净化水雾、粉尘、重金属等污染物的目的。

Coleson Cove 电厂的 $3\times 350\ \text{MW}$ 锅炉于2002年在其石灰石-石膏湿法脱硫装置后安装高效电除雾器。该高效除雾器的安装用以保证出口烟气中酸雾排放量小于 $5\ \text{ppm}(3\% \text{O}_2)$,粉尘量小于 $0.015\ \text{lb}/\text{MBtu}$ ^[19]。

虽然,湿式电除雾技术具有避免湿法脱硫造成的腐蚀、堵塞和“石膏雨”问题,可省去后续GGH和烟道防腐工作以及满足更加严格的烟气排放要求等优点。但是,其气速设计流速一般较低($1\text{--}1.5\ \text{m/s}$),而燃煤发电厂烟气流量大,若按此气速进行设计,设备必然庞大甚至无法搁置在吸收塔顶部,且易受到场地条件制约。因此,开发高气速高效电除雾器是其实现广泛应用的关键。

4 结语

除雾器是湿法脱硫系统中的关键设备之一,其性能直接影响着后续设备的堵塞、腐蚀以及周围环境安全等。除雾器的设置不仅关系到脱硫系统的稳定运行,甚至可能影响整个锅炉系统的稳定性。

综上所述,脱硫除雾器的设计和选型主要考虑因素包括:烟气流速、烟气温度、材质、除雾器叶

片形式及其间距和冲洗水系统等。导致除雾器运行不稳定,去除效果不达标、除雾器堵塞、甚至是坍塌的主要原因有:燃煤种类多变、实际烟气流速大于设计值、入口含尘量大于设计值、脱硫剂杂质多、冲洗水系统不合理(水压不足、水量不够、喷嘴布置不合理、冲洗频率不够、冲洗面不够等)、旁路挡板密封差、安装不牢靠等。因此,脱硫除雾器在设计 and 选型时应充分考虑各因素的影响,而在安装和运行时应按照相关规定和要求进行,加强平时的巡视,定期检修以保证除雾器和整个脱硫系统的稳定、高效运行。

近年来,随着“雾霾”天气的加剧,国家对 $\text{PM}_{2.5}$ 的控制越来越重视。传统的机械式除雾器很难再满足国家环保部门不断提高的排放要求。湿式电除雾器作为一种精细除雾和除尘的装置,能够有效减少电厂烟气中胶体颗粒、细小雾滴、重金属等复合污染物排放量。因此,加快高流速、高效湿式电除雾器的研发和应用,对控制 $\text{PM}_{2.5}$ 、提高我国环保设备装备水平等具有重要意义。湿式电除雾器在燃煤电厂深度除雾和除尘方面具有强大的市场需求和广阔的产业化前景。

参考文献

- [1] 董志权. 大气污染控制工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006, 291.
- [2] 陶爱平, 张立民, 杨中彪, 等. 脱硫 GGH 换热元件板型与堵塞关系分析[J]. 华电技术, 2009, 9: 75-78.
- [3] 魏桂芳, 李东. 湿法烟气脱硫系统 GGH 堵塞的原因分析及对策[J]. 中国高新技术企业, 2010, 15: 110-112.
- [4] 程永新. 湿法烟气脱硫系统中“石膏雨”问题的分析及对策[J]. 华中电力, 2010, 5(23): 27-30.
- [5] 王颖聪. 湿法脱硫烟气石膏雨成因分析及处理方案综述[J]. 华北电力技术, 2012, 10: 68-71.
- [6] 李春雨. 火电厂湿法烟气脱硫中“石膏雨”问题分析[J]. 能源工程, 2012, 1: 43-47.
- [7] 金定强. 脱硫除雾器设计[J]. 电力环境保护, 2001, 17(4): 16-18.
- [8] 杨宏慧, 陈晨, 林继香, 等. 电厂脱硫系统中除雾器结垢和局部塌陷问题的分析和对策[J]. 华电技术, 2012, 34(8): 64-65.
- [9] 徐景芳. 净化除雾器在火力发电厂烟气脱硫系统中的应用[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2011, 14(2): 36-39.
- [10] 王小平. 湿法烟气脱硫除雾器设计选型和维护[J]. 电力环境保护, 2009, 25(5): 24-25.
- [11] 颜学升, 王助良, 吴健卫. 脱硫除雾设备性能研究[J]. 电农机化研究, 2003, 3: 136-138.
- [12] 聂鹏飞, 边东升, 吴学民, 等. 600MW 机组湿法脱硫系统除雾器

- SAR interferograms [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [39] 邢学敏, 丁晓利, 朱建军, 等. CRInSAR 与 PSInSAR 联合探测区域线性沉陷研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(5): 1193-1204.
- [40] 王珊珊, 季民, 胡瑞林, 等. 基于 InSAR-GIS 的矿区地面沉陷动态分析平台的实现与应用 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37 (A02): 307-312.
- [41] Zhang H M, Gao Y. The Dynamic Monitoring of Coal Mining Seepers Subsidence District Based on RS and GIS Technology - A Case Study of Huainan City [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 256: 2311-2314.
- [42] 黄宝伟, 宋小刚, 王振杰, 等. 基于 D-InSAR 技术的葛亭煤矿地面沉陷监测研究[J]. *工程勘察*, 2012, 40(4): 55-60.
- [43] Tomás R, Romero R, Mulas J, et al. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013: 1-19.
- [44] 盛耀彬. 基于时序 SAR 影像的地下资源开采导致的地表形变监测方法与应用[D]. 中国矿业大学, 2011.
- [45] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉陷 D-InSAR 监测试验研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2005, 26(8): 778-782.
- [46] 闫大鹏. 基于 D-InSAR 技术监测云驾岭煤矿区开采沉陷的应用研究[D]. 中国地质大学(北京), 2011.
- [47] Ge L, Rizos C, Han S, et al. Mining subsidence monitoring using the combined InSAR and GPS approach [J]. *Proc. 10th FIG Sym. Def. Measur., Orange, California, USA*, 2001: 19-22.
- [48] Ge L, Chang H C, Janssen V, et al. Integration of GPS, radar interferometry and GIS for ground deformation monitoring[C]//*Proc. 2003 Int. Symp. on GPS/GNSS, Toyko, Japan, 15-18 November 2003*. 2003: 465-472.
- [49] Ge L, Chang H, Rizos C. Mine subsidence monitoring using multi-source satellite SAR images [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(3): 259.
- [50] Baek J, Kim S W, Park H J, et al. Analysis of ground subsidence in coal mining area using SAR interferometry [J]. *Geosciences Journal*, 2008, 12(3): 277-284.
- [51] Herrera G, Tomás R, Vicente F, et al. Mapping ground movements in open pit mining areas using differential SAR interferometry [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(7): 1114-1125.
- [52] 李学军. InSAR 技术在大同矿区地面沉陷监测中的应用研究[D][D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [53] 张勤, 赵超英, 丁晓利, 等. 利用 GPS 与 InSAR 研究西安现今地面沉陷与地裂缝时空演化特征 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1214-1222.
- [54] 余景波, 刘国林, 曹振坦. 差分干涉测量 (D-InSAR) 技术在矿区地面沉陷监测中的应用 [J]. *全球定位系统*, 2010, 35 (005): 54-60.
- [55] 陶秋香, 刘国林, 刘伟科. L 和 C 波段雷达干涉数据矿区地面沉陷监测能力分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3681-3689.
- [56] 刘金龙, 郭华东, 宋瑞. 多模式雷达在矿区沉陷监测中的应用研究[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(4): 584-590.
- [57] 胡俊, 李志伟, 朱建军, 等. 基于 BFGS 法融合 InSAR 和 GPS 技术监测地表三维形变[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1).
- [58] 刘国祥. 利用雷达干涉技术监测区域地表形变[J]. 2006.
- [59] Hu Z, Xu X, Zhao Y. Dynamic monitoring of land subsidence in mining area from multi-source remote-sensing data—a case study at Yanzhou, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(17): 5528-5545.
- [60] 刘欢欢, 范景辉, 陈建平, 等. 基于相位空间相关性分析的 PSInSAR 技术在地面沉陷监测中的研究与实践[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(003): 15-19.
- [61] 许才军, 王华. InSAR 相位解缠算法比较及误差分析[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2004, 29(1): 67-71.
- [62] 王珊珊, 季民, 胡瑞林, 等. 基于 InSAR-GIS 的矿区地面沉陷动态分析平台的实现与应用 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37 (A02): 307-312.
- [63] 余景波, 刘国林, 曹振坦. 差分干涉测量 (D-InSAR) 技术在矿区地面沉陷监测中的应用 [J]. *全球定位系统*, 2010, 35 (005): 54-60.
- [64] Dong L, NanShan Z, Gang W. Land Subsidence Monitoring in Mining Area with the Application of GPS and D-InSAR [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011, 4: 033.

(上接第 14 页)

- 堵塞原因分析及对策[J]. *华电技术*, 2011, 11(33): 69-73.
- [13] 姚东民. 烟气脱硫系统除雾器损坏原因分析及处理措施[J]. *河北电力技术*, 2012, 5(31): 43-44.
- [14] 谭学谦. 浅谈 600MW 机组湿法脱硫吸收塔的设计[J]. *电力环境保护*, 2007, 3(23): 32-35.
- [15] 郑桂波, 黄绮锋. 600MW 机组烟气湿法脱硫装置吸收塔除雾器改造及效果分析 [J]. *水电与新能源*, 2012, 4: 76-78.
- [16] 姚杰, 仲兆平, 周山明. 湿法烟气脱硫带钩波纹板除雾器结构优化数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 14(30): 61-67.
- [17] 王大勇, 李彩亭, 曾光明, 等. 伞罩型除尘脱硫塔内除雾器性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2008, 3(30): 13-16.
- [18] 李鑫. 湿式静电除雾器在建材工业用锅炉脱硫上的应用[J]. *新材料与应用*, 2011, 8: 98-100.
- [19] Staehle R, Triscori R J, Kumar K S, et al. The Past, Present, and Future of Wet Electrostatic Precipitators in Power Plant Applications [J]. *Mega Symposium*, May. 2003: 19-22.