

# 300 MW 燃煤电站细颗粒物化学团聚系统运行及经济性分析

秦占峰<sup>1</sup>, 朱宝宇<sup>1</sup>, 郭沂权<sup>2</sup>, 赵永椿<sup>2</sup>, 李高磊<sup>2</sup>, 张军营<sup>2</sup>

(1. 国电丰城发电有限公司, 江西 丰城 331100; 2. 华中科技大学 能源与动力工程学院 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为实现燃煤电厂的超低排放,对电厂安装细颗粒物化学团聚强化除尘系统的 300 MW 燃煤机组进行了细颗粒物化学团聚强化除尘技术工业应用试验,综合考察了化学团聚系统对机组除尘效率及电厂运行参数的影响,并对细颗粒物化学团聚强化除尘技术的经济性进行分析。机组全年运行数据表明,喷入团聚剂,脱硫后颗粒物平均浓度为  $3.7 \text{ mg/m}^3$ ,较未喷团聚剂时下降约 44.7%。以 300 MW 机组为例,化学团聚技术一次工程投资仅需 600 万元左右,不及湿式静电除尘技术投资额的 1/2,经济性良好。连续喷入化学团聚剂后,ESP 后及脱硫后  $\text{SO}_2$  浓度有所下降; $\text{O}_2$  体积分数平均上升约 0.5%;ESP 后烟气温度下降  $3 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。细颗粒物化学团聚强化除尘系统取得了良好的除尘提升效果。

**关键词:**细颗粒物;化学团聚;超低排放;经济性;燃煤电厂

中图分类号:TM621

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)01-0131-05

## Operation performance and economic benefit on chemical agglomeration of fine particles from a 300 MW coal-fired power plant boiler

QIN Zhanfeng<sup>1</sup>, ZHU Baoyu<sup>1</sup>, GUO Yiquan<sup>2</sup>, ZHAO Yongchun<sup>2</sup>, LI Gaolei<sup>2</sup>, ZHANG Junying<sup>2</sup>

(1. Fengcheng Power Generation Co., Ltd., China Guodian Corporation, Fengcheng 331100, China; 2. State Key Lab of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To achieve ultra-low emission of coal-fired power plants, the industrial application trials of fine particle chemical agglomeration enhanced dust removal system from a 300 MW coal-fired boiler plant boiler was studied in this paper. The effect of chemical agglomeration system on removal efficiency of fly ash fine particles and operational parameters of coal-fired power plant were studied, as well as the economic benefit of chemical agglomeration enhanced dust removal technique. The whole year operating data of the unit shows that the particle concentration after WFGD decreases to  $3.7 \text{ mg/m}^3$ , which is decreased by 44.7% with the chemical agglomeration enhanced dust removal system. As for a 300 MW coal-fired boiler, the initial investment for chemical agglomeration technique is only about 6 million yuan, less than half of the cost for the wet electrostatic precipitation, which shows a better economy. The average  $\text{SO}_2$  concentration after ESP and WFGD decrease. The average  $\text{O}_2$  concentration increases by 0.5%. Besides, the flue gas temperature after ESP decreases by  $3 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ . The fine particle chemical agglomeration enhanced dust removal system helps to improve the removal efficiency of fly ash fine particles.

**Key words:** fine particulate; chemical agglomeration; ultra-low emission; economic benefit; coal-fired power plant

## 0 引言

煤炭是我国能源结构的重要组成部分,但其燃烧过程会产生大量颗粒物以及汞、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  等污染物,为人类健康及生存环境带来影响<sup>[1]</sup>。我国煤

炭需求量极大,针对汞、 $\text{SO}_2$  及  $\text{NO}_x$  等已有较为成熟的脱除技术,而对于颗粒物,特别是细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )的脱除还存在较多问题,“超低排放”面临巨大压力<sup>[2]</sup>。现有的颗粒物排放控制技术包括静电除尘技术(ESP)和布袋除尘技术,其对大于 2.5

收稿日期:2018-12-10;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18121001

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51376074)

作者简介:秦占峰(1964—),男,江西丰城人,高级工程师,从事高效清洁燃煤发电技术研究。E-mail:qinzhanfeng@163.com。

通讯作者:张军营,教授,主要从事污染物的联合脱除。E-mail:jy Zhang@hust.edu.cn

引用格式:秦占峰,朱宝宇,郭沂权,等. 300 MW 燃煤电站细颗粒物化学团聚系统运行及经济性分析[J]. 洁净煤技术,2019, 25(1):131-135.

QIN Zhanfeng, ZHU Baoyu, GUO Yiquan, et al. Operation performance and economic benefit on chemical agglomeration of fine particles from a 300 MW coal-fired power plant boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1):131-135.



移动阅读

$\mu\text{m}$ 粗颗粒物的脱除效率达到99%,但对细颗粒物脱除效果不理想<sup>[3]</sup>。因此,提高除尘器对细颗粒物的脱除效率至关重要。目前提高细颗粒物脱除效率的方法包括电<sup>[4-5]</sup>、声<sup>[6-7]</sup>、蒸汽相变<sup>[8-9]</sup>以及光团聚<sup>[10-11]</sup>等预处理技术以及湿式静电除尘技术和低温电除尘技术等,但存在效率低下、结构复杂、成本较高、不适合大规模工业应用等问题。化学团聚技术<sup>[12-15]</sup>指在除尘前烟道中喷入团聚剂溶液,在一系列物理、化学过程中与细颗粒物发生作用,促使细颗粒物团聚长大的技术,可在现有设备基础上改造,在不影响正常生产的条件下,有效促进细颗粒物团聚,具有效率高、投资少、建设周期短等优点。

王宇翔<sup>[16]</sup>研究了化学团聚喷雾过程中,团聚剂溶液雾化粒径、均匀度、雾化角以及喷雾距离等因素对团聚效果的影响。结果表明,液滴均匀度越好,团聚效果越好。陈富华<sup>[17]</sup>对化学团聚系统在工业应用上的各项费用进行分析,认为化学团聚技术较传统除尘技术初次投资运行成本低,且设备占地空间小。王少龙<sup>[18]</sup>考察了一次空气雾化偏转角度、喷水流量、压缩空气压力等对化学团聚喷枪喷嘴雾化效果的影响。结果表明:当喷嘴一次雾化喷口偏转角为 $15^\circ$ 时,雾化效果更好;且随着液相流量的减小和压缩空气压力的增加,溶液雾化效果逐渐提升。Forbs<sup>[19]</sup>研究了雾化液滴与颗粒物团聚过程中,颗粒的受力情况。Xiao等<sup>[20]</sup>研究了温度对团聚效率的影响。结果表明,温度降低会阻碍慢速团聚过程,但对快速团聚过程无影响。Rabinovich等<sup>[21]</sup>在DLVO理论框架下,研究了颗粒间毛细力对颗粒团聚过程的影响。Goldszal等<sup>[22]</sup>根据团聚剂溶液与颗粒物相互作用时溶液添加量或含湿量,总结了雾化液滴与颗粒物结合的4个阶段:摆动状态、纤维状态、毛细管状态和固-液扩散状态。最终,颗粒均匀分散在团聚剂溶液中。张志荣<sup>[23]</sup>研究了脱硫废水在烟道内的蒸发过程,模拟结果显示,当烟气温度的为453 K、液滴群平均粒径 $50\ \mu\text{m}$ 时,单位时间内液滴群蒸发质量最大;粒径 $0.3\sim 0.4\ \text{mm}$ 液滴的气动破碎有助于缩短雾化液滴的完全蒸发时间。Johansen等<sup>[24]</sup>研究了颗粒物理性质对团聚效果的影响。颗粒形状越规则,颗粒粒径分布越小,团聚效率越高。Durham等<sup>[25]</sup>研究表明,喷入质量分数0.05%的化学团聚剂后,ESP对颗粒物脱除效率由73%升至83%。Liu等<sup>[26]</sup>化学团聚试验表明,喷入团聚剂后,颗粒粒径由 $0.15\ \mu\text{m}$ 增至 $0.65\ \mu\text{m}$ ,ESP后颗粒物数浓度由 $5.72\times 10^6\ \text{cm}^{-3}$ 降至 $3.24\times 10^6\ \text{cm}^{-3}$ ,质量浓度由 $65.4\ \text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $34.4\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。以上研究在

实验室内证明了化学团聚技术的效果,但鲜见该技术在工业上应用的有效性及其经济性。

本文在实验室探究的基础上,针对江西某燃煤电厂300 MW机组进行细颗粒物化学团聚强化除尘试验,分析了化学团聚系统对静电除尘器除尘效率及电厂运行工况的影响,并在此基础上,对细颗粒物化学团聚强化除尘技术的经济性进行分析。

## 1 化学团聚系统

试验在江西某燃煤电厂300 MW机组进行,机组日常负荷维持在 $180\sim 330\ \text{MW}$ 。该电厂使用哈尔滨锅炉厂制造的HG-1025/18.2-YM6型亚临界控制循环汽包炉,单炉膛、四角切圆燃烧、平衡通风、钢炉架、露天布置、一次中间再热、固态排渣。烟气经选择性催化还原脱硝装置(SCR)、静电除尘器(ESP)及石灰石湿法脱硫(WFGD)处理后排放。

化学团聚系统主要由团聚剂乳化制备系统、气液输运系统、团聚剂雾化喷射系统及化学团聚控制系统等组成。团聚剂乳化制备系统用于团聚剂的制备及储存,包括团聚剂原料存储设备、团聚剂乳化设备、溶液配置和储存设备,以及自动计量和控制单元。气液输运系统是将团聚剂及压缩空气分别由操作间运送至团聚剂雾化喷射系统,包含团聚剂溶液和压缩空气输运管道、空气压缩机以及气液流量控制单元。团聚剂雾化喷射系统是在静电除尘器前烟道内安装系列双流雾化喷枪,团聚剂溶液在压缩空气作用下充分雾化,喷入烟道内与烟气中颗粒物作用团聚成较大颗粒团。化学团聚控制系统主要有监控、报警、调节功能,对供水量、供气量、团聚剂溶液喷量等进行调节,保证团聚系统正常运行。根据锅炉负荷、煤种特性以及污染物排放浓度等自动调节团聚系统运行参数,使烟尘排放浓度达到超低排放标准,保证化学团聚系统高效、经济、稳定运行。

## 2 化学团聚试验结果

针对电厂300 MW机组化学团聚系统全年连续运行数据,系统分析化学团聚技术的有效性,并考察喷入化学团聚剂对电厂运行参数的影响,分析化学团聚系统在工业应用上的可靠性。

### 2.1 化学团聚系统全年运行效果

4号机组全年锅炉负荷和化学团聚剂喷量变化如图1所示。锅炉全年最大负荷为340 MW,最小负荷为128 MW,平均240 MW。化学团聚剂单日平均最大喷量为 $9.8\ \text{t}/\text{h}$ ,平均喷量为 $4.5\ \text{t}/\text{h}$ 。

加入团聚剂前后脱硫出口颗粒物浓度如图2所

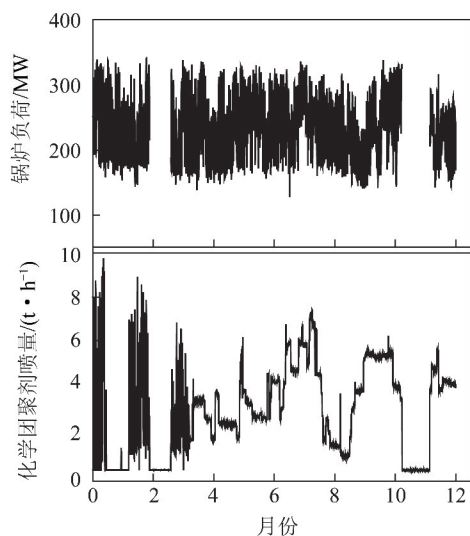


图1 锅炉负荷和化学团聚剂喷量随时间变化

Fig. 1 Change of load-time and flux of chemical agglomeration solution with time

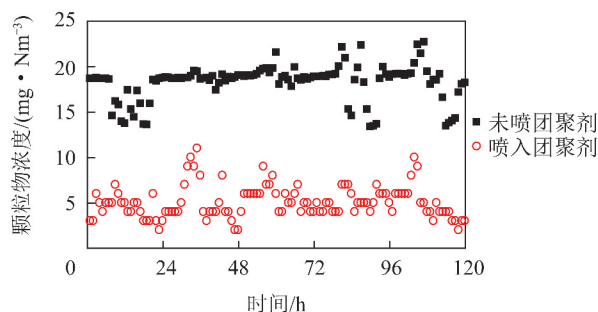


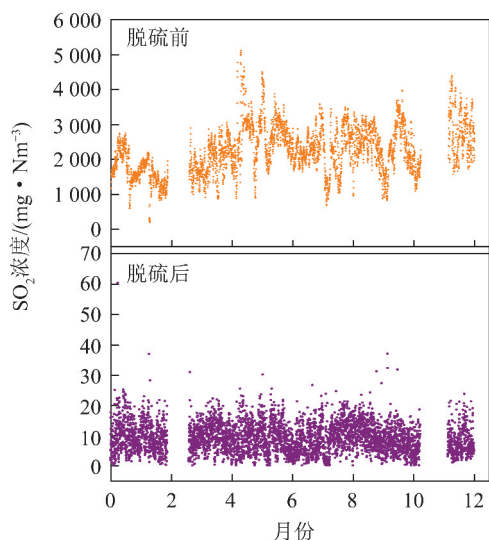
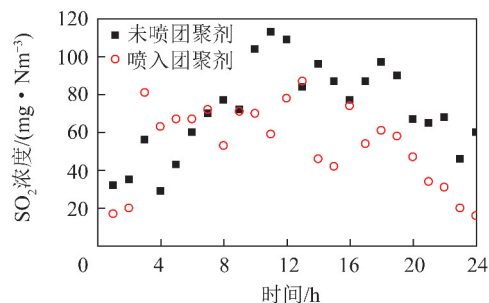
图2 喷入化学团聚剂前后脱硫后颗粒物浓度

Fig. 2 Particle concentration before and after injection of chemical agglomeration

示。图中数据为4号机组连续运行10 d的数据,前5天未喷入团聚剂,后5天喷入团聚剂。喷入团聚剂后,颗粒物浓度下降约44.7%。随化学团聚剂喷量增加,颗粒物浓度逐渐下降。原因为烟道中喷入化学团聚剂后,细颗粒物被烟气中的团聚剂液滴捕集,在液桥力、范德华力等作用下团聚长大,另外,细颗粒物被团聚剂中的有机高分子长链捕获,经过高分子长链的折叠、缠绕聚成一团,使细颗粒物长大,被除尘器脱除。因此,安装化学团聚系统可实现烟尘超低排放。

## 2.2 SO<sub>2</sub> 浓度变化

脱硫前后 SO<sub>2</sub> 浓度如图3所示。可知,脱硫前 SO<sub>2</sub> 平均浓度为 1 890 mg/m<sup>3</sup>,脱硫后为 8.4 mg/m<sup>3</sup>。脱硫后喷入化学团聚剂前后 SO<sub>2</sub> 浓度变化如图4所示。可知,化学团聚剂对烟气中 SO<sub>2</sub> 脱除有一定的协同作用,通过选择适当的团聚剂在脱除细颗粒物的同时,可增强 SO<sub>2</sub> 的协同脱除能力。

图3 脱硫前后 SO<sub>2</sub> 浓度Fig. 3 SO<sub>2</sub> concentration before and after WFGD图4 喷入化学团聚剂前后脱硫后 SO<sub>2</sub> 浓度Fig. 4 SO<sub>2</sub> concentration before and after injection of chemical agglomeration

## 2.3 O<sub>2</sub> 体积分数变化

脱硫前后 O<sub>2</sub> 体积分数如图5所示。脱硫前,喷入团聚剂后,O<sub>2</sub> 平均体积分数为 7.1%,比未喷团聚剂上升约 0.4%。脱硫后,喷入团聚剂后,O<sub>2</sub> 平均体积分数为 7.8%,比未喷团聚剂上升约 0.6%。由于团聚剂溶液在压缩空气作用下雾化喷入烟气中,故烟气中 O<sub>2</sub> 体积分数略有升高,平均增加约 0.5%。

## 2.4 烟气温度变化

脱硫前后烟气温度变化如图6所示。脱硫前,喷入团聚剂后,烟气温度平均下降 3~8℃;脱硫后,烟气平均温度为 50℃左右,喷入团聚剂不影响脱硫系统排烟温度。喷入团聚剂后,静电除尘器后烟气温度略有下降,但不影响电厂正常运行。

## 3 化学团聚工业系统经济性评价

目前细颗粒物排放控制技术有低低温静电除尘技术、湿式静电除尘技术、电袋复合除尘技术等<sup>[27-28]</sup>,其中,湿式静电除尘技术已得到广泛应用<sup>[29-30]</sup>。以化学团聚技术与湿式静电除尘技术为

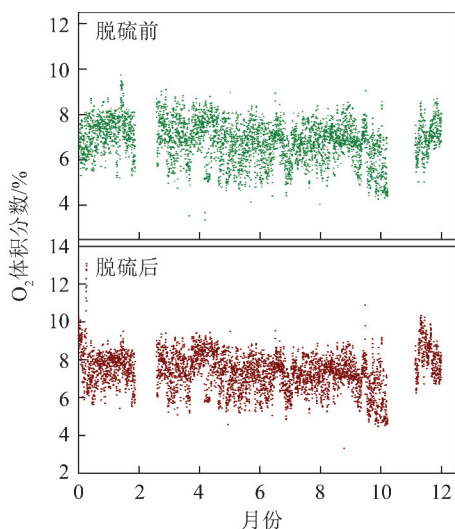
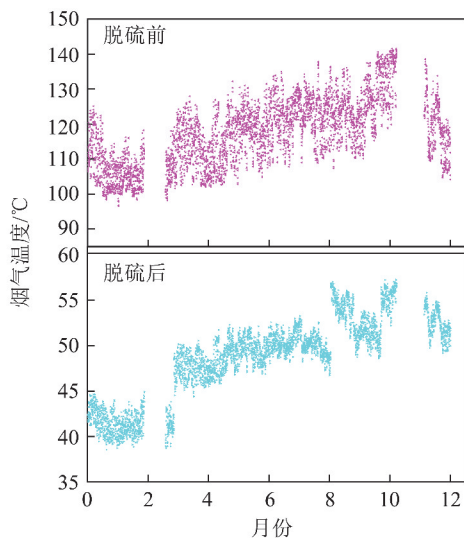
图5 脱硫前脱硫后 O<sub>2</sub> 体积分数Fig. 5 O<sub>2</sub> concentration before and after WFGD

图6 脱硫前后烟气温度变化

Fig. 6 Change of gas temperature before and after WFGD

对象,根据电厂投资造价及技术指标,比较了2种技术在工业应用上的经济性,见表1。

表1 300 MW 机组化学团聚与湿式静电除尘技术经济比较  
Table 1 Economic comparison between chemical agglomeration and wet electrostatic precipitation technique in a 300 MW coal-fired boiler

项目	化学团聚技术	湿式静电除尘技术
工程一次投资/万元	600	1 400
年运行费用(包括用电)/万元	140	120
施工周期/停炉工期/d	30/0	180/60
增加烟气阻力/Pa	<50	≤350 <sup>[31]</sup>

以300 MW 燃煤机组为例,化学团聚技术的工程一次投资约为600万元,主要包括工艺设备系

统、电气系统、热控系统及土建部分投资等。化学团聚系统设备工艺简单,安装方便,施工周期约为30 d,优势是无需停炉施工,不影响电厂正常生产。烟道面积为22.4 m<sup>2</sup>,烟枪总横截面积为0.945 m<sup>2</sup>,占4%,经计算喷枪引起的烟气阻力增加小于50 Pa。湿式静电除尘技术,一次工程投资额较大,设备费用约600万元,土建部分约400万元,增加炉后烟道约400万元,一次投资金额为化学团聚技术的2倍以上。而根据现场湿式静电除尘器的技术指标及文献[31],湿式静电除尘器的引入会使烟气阻力增加最多达350 Pa,此外,湿式静电除尘系统施工周期达180 d,需停炉进行技术升级改造,影响电厂正常运行,而化学团聚技术对电厂正常运行造成的影响更小。

化学团聚技术与湿式静电除尘技术年运行费用比较见表2。可知二者运行费用基本相当,湿式静电除尘器正常运行电消耗量较大,化学团聚系统则需要额外消耗团聚剂。电厂用电费用为0.4元/kWh,化学团聚系统全年运行4 921 h,用电功率总计约50 kW;全年消耗物料18.25 t,水18 250 t,单价分别为5万元/t和2元/t。

表2 化学团聚与湿式静电除尘技术年运行费用比较  
Table 2 Annual operating cost comparison between chemical agglomeration and wet electrostatic precipitation technique

项目	化学团聚技术	湿式静电除尘器
年运行电费/万元	20	80
年大修及维护费/万元	20	40
年物料消耗费/万元	100	0
合计/万元	140	120

化学团聚技术一次工程投资不及湿式静电除尘技术投资额的1/2,安装和后期维护无需停机。考虑到污染物的联合脱除,化学团聚系统中团聚剂溶液配制可采用脱硫废水,在提高细颗粒物脱除效率的同时,协同处理脱硫废水,优势显著。

## 4 结 论

1) 安装化学团聚系统,ESP后全年颗粒物浓度平均17.7 mg/m<sup>3</sup>;脱硫后全年颗粒物浓度平均3.7 mg/m<sup>3</sup>,化学团聚系统可稳定实现烟尘超低排放。

2) 以300 MW 燃煤机组为例,化学团聚技术一次工程投资不到湿式静电除尘技术投资额的1/2,经济性良好,安装维护方便。

3) 安装化学团聚系统, ESP 后烟气温度下降  $3 \sim 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{SO}_2$  浓度略下降;  $\text{O}_2$  浓度上升约 0.5%。

### 参考文献 (References):

- [1] 刘慧媛. 能源、环境与区域经济增长研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [3] YLÄTALO S I, HAUTANEN J. Electrostatic precipitator penetration function for pulverized coal combustion[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1998, 29(1): 17-30.
- [4] HAUTANEN J, KILPELÄINEN M, KAUPPINEN E I, et al. Electrical agglomeration of aerosol particles in an alternating electric field[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1995, 22(2): 181-189.
- [5] WADENPOHL C, LÖFFLER F. Electrostatic agglomeration and cen-trifugal separation of diesel soot particles[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 1994, 33(5): 371-377.
- [6] PATTERSON H S, CAWOOD W. Phenomena in a sounding tube [J]. *Nature*, 1931, 127: 667-680.
- [7] SHIROKOVA N L. Aerosol coagulation[J]. *Physical Principles of Ultrasonic Technology*, 1970, 2: 475-539.
- [8] SCHAUER P J. Removal of submicron aerosol particles from moving gas stream[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1951, 43(7): 1532-1538.
- [9] LANCASTER B W, STRAUSS W. A study of steam injection into wet scrubbers[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1971, 10(3): 362-369.
- [10] DI STASIO S. Observation of restructuring of nanoparticle soot aggregates in a diffusion flame by static light scattering[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32(4): 509-524.
- [11] RAPER J A, AMAL R. Measurement of aggregate fractal dimensions using static light scattering[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 1993, 10(5): 239-245.
- [12] WEI Feng, ZHANG Junying, ZHENG Chuguang. Agglomeration rate and effect forces between atomized particles of agglomerator and inhaled-particles from coal combustion[J]. *Journal of Environment Science*, 2005, 17(2): 335-339.
- [13] 李海龙, 张军营, 赵永椿, 等. 燃煤细颗粒固液团聚实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(29): 62-66.  
LI Hailong, ZHANG Junying, ZHAO Yongchun, et al. Experimental study on solid-liquid two-phase agglomeration of fine particles from coal combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(29): 62-66.
- [14] KAI Zhang, ZHANG Junying, LI Hailong, et al. Agglomeration modeling of submicron particles in flue gas using Monte Carlo method[C]//11th International Conference on Electrostatic Precipitation (ICESP XI). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008: 234-247.
- [15] LI Hailong, ZHANG Junying, ZHAO Yongchun, et al. Wettability of typical fly ashes from four coal-fired power plants in China [J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(13): 7763-7771.
- [16] 王宇翔. 300 MW 燃煤电站细颗粒物化学团聚系统设计及团聚数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [17] 陈富华. 燃煤超细颗粒物化学团聚理论及系统设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [18] 王少龙. 脱硫废水雾化试验及模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [19] FORBES E. Shear, selective and temperature responsive flocculation: A comparison of fine particle flotation techniques[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2011, 99(1): 1-10.
- [20] XIAO F, MA J, YI P, et al. Effects of low temperature on coagulation of kaolinite suspensions[J]. *Water Research*, 2008, 42(12): 2983-2992.
- [21] RABINOVICH Y I, ESAYANUR M S, MOUDGIL B M. Capillary forces between two spheres with a fixed volume liquid bridge: Theory and experiment [J]. *Langmuir*, 2005, 21(24): 10992-10997.
- [22] GOLDSZAL A, BOUSQUET J. Wet agglomeration of powders: From physics toward process optimization[J]. *Powder Technology*, 2001, 117(3): 221-231.
- [23] 张志荣. 火电厂湿法烟气脱硫废水喷雾蒸发处理方法关键问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [24] JOHANSEN A, SCHEFER T. Effects of physical properties of powder particles on binder liquid requirement and agglomerate growth mechanisms in a high shear mixer[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2001, 14(2): 135-147.
- [25] DURHAM M D, SCHLAGER R J, EBNER T G, et al. Method and apparatus for decreased undesired particle emissions in gas streams: US5667651A[P]. 1999-04-13.
- [26] LIU Y, HU B, ZHOU L, et al. Improving the removal of fine particles with an electrostatic precipitator by chemical agglomeration [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(10): 8441-8447.
- [27] GUO Yiquan, ZHANG Junying, ZHAO Yongchun, et al. Chemical agglomeration of fine particles in coal combustion flue gas: Experimental evaluation[J]. *Fuel*, 2017, 203: 557-569.
- [28] 郭沂权, 张军营, 赵永椿, 等. 50 MW 燃煤电站锅炉细颗粒物化学团聚示范工程试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(S1): 87-94.  
GUO Yiquan, ZHANG Junying, ZHAO Yongchun, et al. Experimental research on fine particles chemical agglomeration demonstration project in a 50 MW coal-fired power plant boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(S1): 87-94.
- [29] 王婀娜, 朱林, 王东歌, 等. 湿式静电除尘技术在燃煤电厂中的应用[J]. *中国电力*, 2016, 49(6): 157-160.  
WANG xianna, LIN Zhu, WANG Dongge, et al. Application of wet electrostatic precipitator in coal-fired power plants[J]. *Electric Power*, 2016, 49(6): 157-160.
- [30] 慕银银. 燃煤电厂湿式静电除尘技术及其应用现状[C]//第十七届中国电除尘学术会议论文集. 合肥: 中国环境保护产业协会电除尘委员会, 2017.
- [31] 孙晓健. 湿式电除尘器在某 330 MW 燃煤电厂的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.