

电除尘凝聚预处理技术对提钒转炉 烟气除尘超低排放的影响

陈 琛

(中冶京诚工程技术有限公司 环保与暖通工程技术所, 北京 100176)

[摘 要] 针对提钒转炉烟气粉尘中 $10\ \mu\text{m}$ 及以下粒级的含量高于脱碳转炉, 较难达到超低排放要求的问题, 本文提出对提钒转炉一次烟气进行溶液喷雾凝聚预处理, 再利用干式电除尘器进行静电吸附的工艺方法, 并对 3 种凝聚剂进行了凝聚效果试验。结果表明, KGM-g-PDMC 凝聚效果最好, 可以使 100% 除尘粒径降到 $120\ \mu\text{m}$, 对 $10\ \mu\text{m}$ 粒级以上大小颗粒物除尘效率达到了 70%, 而且通过适当增大凝聚剂浓度、降低烟气温度, 可以增加 KGM-g-PDMC 的凝聚效果。通过对有、无凝聚剂处理的粉尘进行扫描电镜检测, 发现凝聚预处理不同于静电吸附作用, 凝聚作用不单使得颗粒物粒径变大, 而且可以发生链式附聚耦合效应, 使得比表面积进一步增大, 更加有利于后续颗粒的继续附聚耦合。该附聚耦合工艺采用的凝聚剂 KGM-g-PDMC 经济合理, 处理后的提钒转炉烟气可以满足超低排放要求, 而且投资小于开发新型电除尘器, 具有推广价值。

[关键词] 静电吸附; 凝聚预处理; 附聚耦合; 分级除尘效率; 双联法提钒工艺; 转炉微细粉尘; 凝聚剂

[中图分类号] X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)06-0091-06

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.06.013

钢铁冶炼是我国大气污染物排放的重要污染源行业, 推进钢铁行业超低排放改造是促进在京津冀大气污染传输通道城市的行政区域范围内全面实现大气污染物特别排放限值的重要举措。在 2020 年《中国生态环境状况公报》各项大气污染物排放记录中, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 为首要污染物的超标天数占重度及以上污染天数的 62.7%^[1]。而传统转炉干法除尘系统静电除尘设备出口处, PM_{10} 及以下粒级的微细粉尘占排灰百分比高达 92.47%。由于传统静电除尘设备对 PM_{10} 及以下粒级的粉尘去除率不高, 导致大量的细颗粒物被排放到大气中, 造成严重空气污染^[2]。同时, 微细粉尘比表面积大, 极易吸附其他有害物质, 如重金属污染物、挥发性有机污染物, 并随呼吸进入人体, 对人类健康造成威胁^[3-6]。因

此, 提高钢铁行业微细粉尘的脱除效果是环境保护领域一个迫切要解决的问题。

由于我国主流的提钒转炉冶炼无论采用单渣法、双渣法还是双联法均基于留渣去钢的特殊工艺, 冶炼需要根据温焔图来控制工艺参数, 尽量发生钒氧化反应而不是碳氧化反应, 因此在提钒炼钢工序中, 相同烟气流下, $10\ \mu\text{m}$ 及以下粉尘的分布比例相比传统脱碳转炉要高不少, 导致提钒转炉的一次除尘超低排放处理难度比脱碳转炉要大很多。

电除尘器处理烟尘是利用电场力和重力场力驱动粉尘径向运动来最终形成对粉尘的吸附, 电场力吸附主要是针对 $10\ \mu\text{m}$ 以上的粉尘, 重力场吸附主要是针对 $100\ \mu\text{m}$ 以上的粉尘^[7-11]。提钒转炉一次烟尘 $10\ \mu\text{m}$ 及以下粉尘含量高, 分级处理效率低, 如果单纯采用电除尘器处理烟尘, 效果较差, 亟需对粉尘静电吸附工艺进行改造。改进主要有 2 个途径: 一是投入较高研发资金开发静电吸附作用效果好的微细粉尘电除尘器(如强磁电耦合场除尘器); 二是开发除尘器前置预处理技术, 使微细粉尘在预处理过程中凝聚形成较大粒

[收稿日期] 2022-07-19

[作者简介] 陈琛(1986—), 五矿集团高级工程师, ESG 高级咨询工程师(投资), 注册化学工程师, 注册公用设备工程师, 长期从事冶金化工三废理化基础研究和冶金领域动力能源和环保工程应用工作。

[引用格式] 陈琛. 电除尘凝聚预处理技术对提钒转炉烟气除尘超低排放的影响[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(6): 91-96.

径颗粒,以满足现有干式静电除尘设备吸附 $10\ \mu\text{m}$ 以上粉尘的处理能力,该耦合凝聚和静电吸附作用被称为附聚耦合作用。

本文提出对提钒转炉一次烟气进行溶液喷雾凝聚预处理,再利用干式电除尘器进行静电吸附的工艺方法,并考察附聚耦合作用对微细粉尘的捕集效果,从而探索可提高干式电除尘捕集 $10\ \mu\text{m}$ 级别微细粉尘效率的凝聚药剂和经济性运行条件。

1 试验介绍

1.1 试验原料及药剂

本试验所用粉尘样品来自我国某钢铁企业双联法提钒转炉重力除尘后的细粉尘。为了研究电除尘器与化学凝聚剂的附聚耦合作用捕集微细粉尘的效果,研究中以分级D50粒径变化情况、粒径累积分布函数作为附聚耦合效果的分析指标。

试验中使用到的药剂有:拜客化学生产的聚丙烯酰胺(PAM)、聚合氯化铝铁(PAFC),立栎生物生产的魔芋葡甘聚糖聚三甲基氯化铵(KGM-g-PD-MC)。

1.2 分析仪器及计算方法

粉尘粒度分析采用Win2308激光粒度分析仪(主激光源:高性能激光器 $\lambda = 639\ \text{nm}$, $p > 2.0\ \text{mW}$)。除尘效率计算公式见式(1)。

$$\eta = 1 - \frac{\text{处理后粉尘浓度}}{\text{处理前粉尘浓度}} \quad (1)$$

1.3 工艺流程和中试试验规模

试验装置由3部分构成,包括粉尘凝聚室、电除尘器和引风机,如图1所示。图2为中试系统装置

布置图。

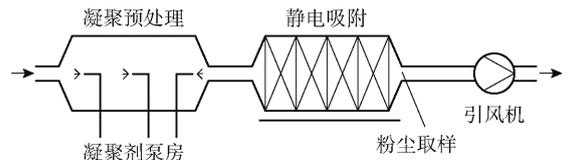


图1 试验装置流程

Fig. 1 Flowchart of experimental device

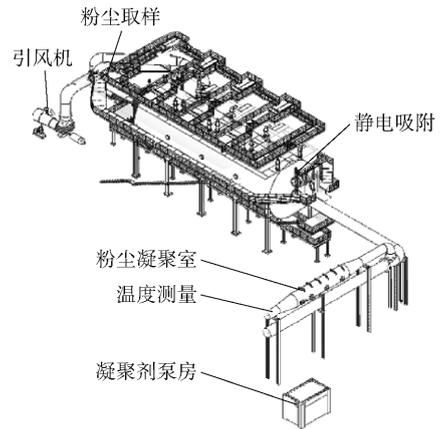


图2 中试系统装置布置

Fig. 2 Layout of pilot scale device

雾化系统构成本次试验装置的变量调节系统。在原电除尘入口处串联粉尘凝聚室,含尘烟气通过引风机先吸入到粉尘凝聚室;粉尘凝聚室由雾化系统和重力沉降腔体构成;雾化系统由蠕动泵、雾化喷枪构成;雾化喷枪喷入凝聚剂,经凝聚后的含尘烟气送入电除尘器入口进行静电吸附。试验所用装置型号及具体参数见表1。

表1 中试试验装置型号及具体参数

Table 1 Pilot test device scale and specific parameters of each equipment

序号	设备	型号	单位	设备规模/能力
1	引风机	陕鼓 AII2900-1.04/0.95	m^3/s	30
2	温度测量	川仪双金属测温计	$^{\circ}\text{C}$	150 ~ 300
3	粉尘测量	Win2308 激光粒度分析仪	μm	1 ~ 1 000
4	电除尘器	西安重型机械研究所	m	$\Phi 9.0 \times 30$
5	凝聚雾化系统	Spray Dual Channel II	μm	30 ~ 75

1.4 试验流程

首先打开过热蒸汽对凝聚室加热温度维持在 $75\ ^{\circ}\text{C}$ 左右,打开附聚系统引风机将一部分电除尘出口的烟气吸入凝聚室。

试验1:保持蠕动泵关闭,仅研究电除尘器对粉尘的捕集作用,采用玻璃纤维滤膜收集经电除尘器后的粉尘,观测粒径分布情况,记为样本1,该部分为仅有静电吸附的背景参照系对比。

试验2:在粉尘进入凝聚室前打开凝聚剂药剂泵,将凝聚剂引入凝聚室腔室内的雾化喷嘴,喷出凝聚剂溶液,在凝聚剂的作用下粉尘发生微细粉尘凝聚长大,长大后的粉尘被静电吸附作用捕获。位于排气末端的玻璃纤维滤膜收集不同凝聚剂作用下电除尘器出口没有被捕获的粉尘,该部分为相同温度和凝聚剂浓度、不同种类凝聚剂的试验,观测粒径分布情况,记为样本2。

表2 相同温度和凝聚剂浓度、不同种类凝聚剂下试验参数(试验2)

Table 2 Chemical reagent and variable parameters of experiment No. 2

凝聚剂	简称	名称	环境友好特性	试验1浓度/(g·g ⁻¹)	试验1温度/℃
PAM	M	聚丙烯酰胺	有机化学品	1:300	75
PAFC	C	聚合氯化铝铁	无机化学品	1:300	75
KGM-g-PDMC	K	魔芋葡甘聚糖聚三甲基氯化铵	生物易降解药剂	1:300	75

表3 相同温度和凝聚剂、不同浓度下试验参数(试验3)

Table 3 Chemical reagent and variable parameters of experiment No. 3

凝聚剂	名称	温度/℃	试验3-1浓度/(g·g ⁻¹)	试验3-2浓度/(g·g ⁻¹)	试验3-3浓度/(g·g ⁻¹)
KGM-g-PDMC	魔芋葡甘聚糖聚三甲基氯化铵	75	1:300	1:600	1:900

表4 相同凝聚剂和浓度、不同温度下试验(试验4)

Table 4 Chemical reagent and variable parameters of experiment No. 4

凝聚剂	名称	浓度/(g·g ⁻¹)	试验4-1温度/℃	试验4-2温度/℃	试验4-3温度/℃
KGM-g-PDMC	魔芋葡甘聚糖聚三甲基氯化铵	1:300	75	100	120

2 结果与讨论

2.1 仅有静电吸附作用的除尘效果

作为后续试验的对比参数,试验1对原静电除尘系统进行有、无静电吸附作用的粉尘粒径检测和除尘效率检测,结果见图3。从图3可以看出,提钒转炉的D50粒径约为120 μm,而脱碳转炉D50粒径约为170 μm,平均粒径减少约50 μm,增大了微细粉尘的处理量。

将固定分布粒径下的粉尘分布百分比代入式(1)可以得到分级除尘效率。图3中,双联法提钒转炉(蓝色、紫色)和脱碳转炉(棕色、灰色)粉尘的粒径范围主要集中在2.5~1 000 μm。由灰色和紫色曲线可以得出:无论提钒或者脱碳工艺,电除尘器对于250 μm以上粒度粉尘的除尘效率几乎为100%,随着粒度下降除尘效率逐渐下降。当粉尘粒

试验3:保持相同温度,分批喷入不同浓度配比的KGM-g-PDMC溶液(以下简称K溶液),并观测相同温度和凝聚剂(K)、不同K溶液浓度作用下粉尘粒径分布情况,记为样本3。

试验4:维持凝聚剂K溶液的浓度,考察不同的凝聚室环境温度对电除尘器出口粉尘粒度分布的影响,记录为样本4。各试验参数记录见表2、表3、表4。

度在2.5~10 μm时,电除尘器的除尘效率只有60%;而2.5 μm以下粉尘颗粒的除尘效率微乎其微。从试验1可知,对于2.5~10 μm及以下粒级粉尘,由于其在脱碳转炉微细粉尘分级浓度较低,因此烟气处理后排放的该粒级含量相比提钒转炉要低40%。

2.2 凝聚剂种类对附聚预处理除尘效率的影响

在试验2中引入3种不同的凝聚剂(有机化学品聚丙烯酰胺(PAM)、无机化学品聚合氯化铝铁(PAFC)、生物易降解药剂魔芋葡甘聚糖聚三甲基氯化铵(KGM-g-PDMC)),测量收尘纤维滤膜,得到观测样本2,如图4所示。图4表明,相比无预处理除尘,添加凝聚剂后粒度250 μm以上的粉尘除尘效率几乎为100%;100%除尘粒径大幅度下降,其中KGM-g-PDMC在3种凝聚剂中效果最好,100%除尘粒径达到了120 μm;在预处理后,对10~

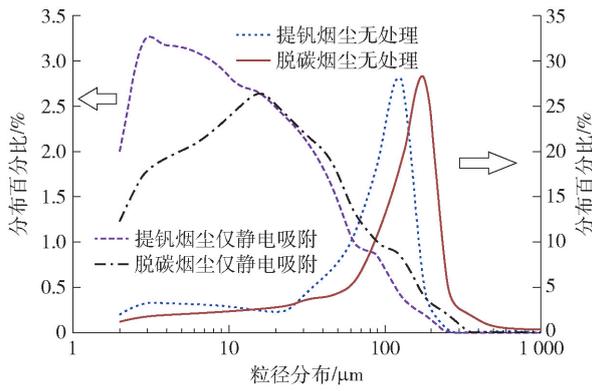


图3 提钒转炉和脱碳转炉烟气粉尘分布对比

Fig. 3 Comparison chart of flue gas dust distribution of vanadium converter and decarburizing converter

120 μm 粒度粉尘除尘效率也显著提高,其中 KGM-g-PDMC 对该粒级范围除尘效率达到了 70% (提高 16.6%)。

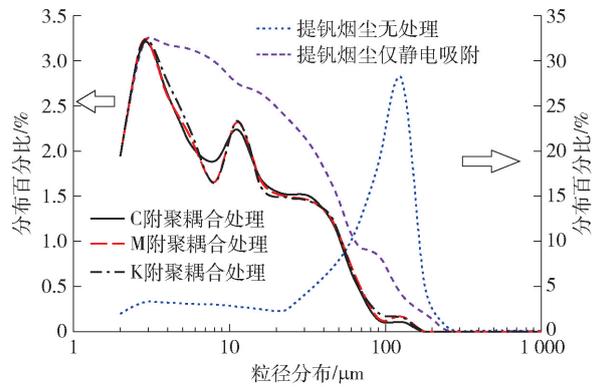


图4 提钒烟气无处理、静电吸附处理及不同凝聚剂附聚耦合处理效果对比

Fig. 4 Comparison among non-treatment, electrostatic adsorption and agglomeration coupling with electrostatic treatment by different coagulants of flue gas dedust outputs

2.3 质量浓度对附聚预处理除尘效率的影响

通过试验 3,对比不同浓度下相同凝聚剂 (KGM-g-PDMC) 在相同温度下的附聚效果,结果见图 5。图 5 表明,随着浓度的提高除尘效率略有上升,当浓度从 1:900 提高到 1:300 时,预处理对 10~120 μm 颗粒物除尘效率可以提升 5%。

2.4 温度对附聚预处理除尘效率的影响

通过试验 4,对比不同温度对凝聚剂 (KGM-g-PDMC) 附聚效果的影响,结果见图 6。图 6 表明,温

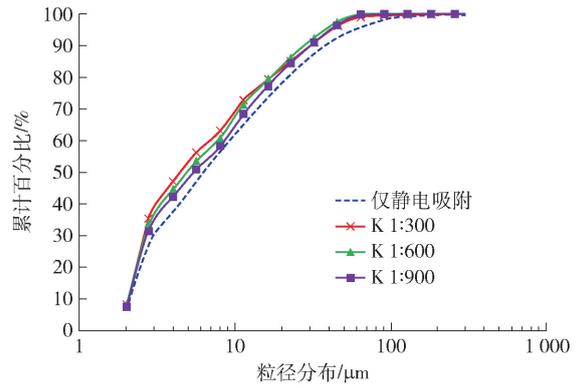


图5 不同凝聚剂浓度对附聚耦合静电除尘效果的影响

Fig. 5 Effect of different concentration and the same temperature solution in Experiment 3

度降低有利于附聚预处理除尘效率的提高,相比 100℃,75℃ 环境温度的预处理对 10~120 μm 粒级大小颗粒物除尘效率可以提升 5%。

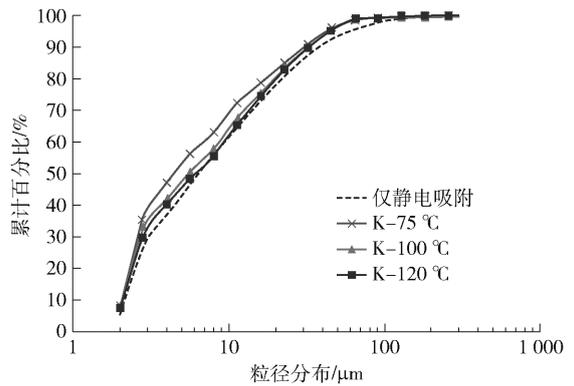


图6 温度对附聚耦合静电除尘效果的影响

Fig. 6 Effects of different temperatures and the same concentration in Experiment 4

2.5 粉尘附聚的形貌表征分析

对预处理后的粉尘取样送扫描电镜检测,观察分析附聚耦合微观原理,结果见图 7。由图 7 可以看出,烟气粉尘颗粒物在附聚耦合作用下出现微细粉尘向大颗粒粉尘聚集凝聚现象,在粒径较大的颗粒物表面附着一层微细颗粒物,并且形成相对稳定的凝聚形态。这种凝聚预处理不同于静电吸附作用,凝聚作用使得颗粒物粒径变大,而且由于表面凝聚剂的黏附性,可以发生链式附聚耦合效应,从而导致附聚耦合后的颗粒物表面光滑度明显下降,比表面积进一步增大,更加利于后续颗粒的继续附聚

耦合。

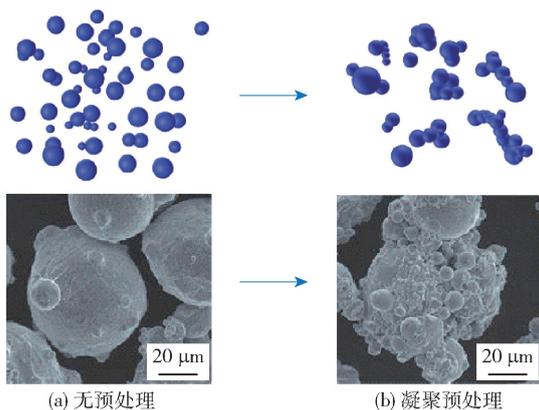


图7 附聚耦合微观原理图和扫描电镜对比图

Fig.7 Microscopic schematic diagram of SEM

3 结论与展望

试验表明,使用凝聚剂预处理工艺对电除尘器工艺捕集各个粒级粉尘颗粒的效率可大幅度提升,其中KGM-g-PDMC是一种优良的凝聚剂,可使 PM_{10} 粒级粉尘电除尘效率提高16.6%。因此粉尘附聚预处理工艺是一种有前景的除尘工艺。

3.1 结论

1) 双联法提钒转炉和脱碳转炉烟气中的粉尘粒径范围主要集中在 $2.5 \sim 1\,000 \mu\text{m}$,提钒转炉的 D_{50} 粒径约为 $120 \mu\text{m}$,而脱碳转炉 D_{50} 粒径约为 $170 \mu\text{m}$,提钒转炉烟气中的微细粉尘处理量相对较大。

2) 使用凝聚剂预处理可大幅度提升电除尘器除尘效率,KGM-g-PDMC凝聚效果好于PAM和PAFC,使得100%除尘粒径降到了 $120 \mu\text{m}$,对 $10 \mu\text{m}$ 粒级以上大小颗粒物除尘效率达到了70%。

3) 采用KGM-g-PDMC凝聚剂,通过提高凝聚剂浓度和适当降低烟气温度有利于提升凝聚效果。

4) 凝聚预处理可使得颗粒物粒径变大,而且可以发生链式附聚耦合效应,更加利于后续颗粒的继续附聚耦合。

3.2 展望

1) 由于提钒转炉粉尘中的微细粉尘颗粒分布百分比不断提高,面对日益严峻的排放法规,原先电除尘器设计规范中以质量浓度作为性能评价指标已经无法满足超低排放要求,而粉尘凝聚预处理系统(CCU)对LT静电除尘的补充可以满足超低排放

要求。

2) 附聚耦合工艺除尘成本较合理,具有推广价值。以KGM-g-PDMC体系为例,工业级KGM-g-PDMC单价约4万元/t,而稀释1:300的KGM-g-PDMC溶液单价仅为133元/t,设备投资主要为计量泵组,对比投资湿式电除尘器以及磁电耦合场除尘器,投资回收年限缩短一半以上。

3) 选择环境和健康友好型生物凝聚剂,可推广到其他冶炼工艺的应用。在凝聚剂的选择上可以选择无机凝聚剂、有机凝聚剂以及生物凝聚剂,但是从生命周期考虑,选择对环境和人类健康友好的凝聚剂可以有效地减小二次污染。此外,该工艺除在双联提钒工艺的一次烟气除尘应用,也可以在类似的冶炼工艺中应用,例如无钙焙烧提铬的烟气除尘工艺。

[参考文献]

- [1] 2020年中国生态环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgh/>. [2022-06-20].
2020 China ecological environment bulletin [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgh/>. [2022-06-20].
- [2] 杨晓东,张玲,姜德旺,等. 钢铁工业废气及 $PM_{2.5}$ 排放特性与污染控制对策[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2013, 5(3): 12.
YANG Xiaodong, ZHANG Ling, JIANG Dewang, et al. Exhaust gas of iron & steel industry and emission characteristics of $PM_{2.5}$ and pollution control measures [J]. Journal of Engineering Studies, 2013(5): 12.
- [3] 龚长义,田振永,薄亮,等. 空气污染物与急性冠脉综合征患者外周血细胞、心肌酶谱和炎症反应的关系[J]. 环境与职业医学, 2014, 31(8): 6.
GONG Changyi, TIAN Zhenyong, BO Liang, et al. Relationship of air pollutants with peripheral blood cells, myocardial enzymes, and inflammatory response of patients with acute coronary syndrome [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2014, 31(8): 6.
- [4] 陶燕,刘亚梦,米生权,等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 592-597.
TAO Yan, LIU Yameng, MI Shengquan, et al. Atmospheric pollution characteristics of fine particles and their effects on human health [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(3): 592-597.
- [5] 王煜倩,张元宝,赵鹏,等. 某纳米碳酸钙企业超细颗粒暴露特征及其健康影响[J]. 环境与职业医学, 2015, 32(10): 6.
WANG Yuqian, ZHANG Yuanbao, ZHAO Peng, et al. Exposure patterns and health effects of nanometer calcium carbonate in a manufacturer [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2015, 32(10): 6.

- [6] 任中夏,程志浩,贾光,等. 超细颗粒物及其健康效应研究进展[C]//第十三届全国环境与职业医学研究生学术研讨会论文集,2017:231-236.
REN Zhongxia, CHENG Zhihao, JIA Guang, et al. Research progress on ultrafine particles and their health effects[C]//Proceedings of the 13th National Symposium for Postgraduates of Environmental and Occupational Medicine, 2017:231-236.
- [7] 陈琛. 通过转炉灰粒径分析指导和评价目前主流一次除尘工艺[C]//全国冶金能源环保生产技术会. 2022.
CHEN Chen. Guiding and evaluating the current primary dust removal process by particle size analysis of converter ash[C]//National Metallurgical Energy Environmental Protection Production Technology Association. 2022.
- [8] 张建平,高鹏飞,徐达成,等. 不同烟气流速下线板式电除尘器中磁场效应验证[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3121-3127.
ZHANG Jianping, GAO Pengfei, XU Dacheng, et al. Verification of magnetic field effect in a wire-plate electrostatic precipitator at different flue gas velocities[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3121-3127.
- [9] 孙康宁,高佳欣,肖立春. 钢铁企业粉尘超低排放技术研究进展[J]. 山西冶金,2020(6):90-92, 107.
SUN Kangning, GAO Jiaxin, XIAO Lichun. Research progress of ultra-low dust emission technology in iron and steel enterprises[J]. Shanxi Metallurgy, 2020(6): 90-92, 107.
- [10] 陈耀东. “湿式电除尘新技术”是地方热电厂实现超低排放[5mg/m³]的最佳选择[C]//2015火电厂污染物净化与节能技术研讨会, 2015.
CHEN Yaodong. Wet electrostatic precipitation technology is the best choice for local thermal power plants to achieve ultra-low emissions [5mg/m³][C]//2015 Thermal power plant pollutant purification and energy saving technology seminar, 2015.
- [11] 孙宗康,张笑丹,杨林军,等. 化学与湍流团聚耦合促进燃煤细颗粒物团聚与脱除[J]. 化工学报, 2020, 71(3): 9.
SUN Zongkang, ZHANG Xiaodan, YANG Linjun, et al. Promoting the agglomeration and removal of coal-fired fine particles by coupling of chemical and turbulent agglomeration[J]. Proceedings of the CSEE, 2020(6):1938-1947.

Effect of dust agglomeration pretreatment of ESP on the ultra-low emission of primary flue gas from vanadium extraction converters

CHEN Chen

(Department of HVAC, Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: The distribution ratio of PM₁₀ dust in the vanadium extraction process is higher than that of traditional decarburization converters, it's hard to meet ultra-low emission standard. In this paper, the process of pre-treatment by dust agglomeration followed by electrostatic adsorption with dry ESPs was proposed to treat the primary flue gas from vanadium extraction converters, and tests were carried out on the performance of three coagulants. The test results indicate that the coagulant KGM-g-PDMC shows the best effect by reducing dc100 to 120 μm and enabling the removal rate of 10 μm and above particulate matter to reach 70%; moreover, the coagulation effect of KGM-g-PDMC is improved with the increase of its concentration and the decrease of off-gas temperature. According to the SEM detection of the dust with and without coagulation pre-treatment, it was found that agglomeration could contribute to convergence-adsorption coupling effect while enlarging particle size, making the specific surface area of dust further increased, which favors to continuous convergence-adsorption coupling in the downstream treatment. In this process, the coagulant KGM-g-PDMC is cost-effective, the off-gas after treatment can meet the requirement of ultra-low emission and the overall investment is lower than that of developing a new type of ESP, thus, the process is worthy of promotion.

Key words: electrostatic adsorption; dust agglomeration; convergence-adsorption coupling; grade dust removal efficiency; vanadium extraction and steelmaking process; converter fine dust; coagulant