

飞灰残碳量对除尘器性能影响规律

夏少波^{1,2,3}, 段璐^{2,3}, 王建朋^{2,3}, 纪任山^{2,3}, 崔豫泓^{2,3}, 张朝^{2,3}

(1.煤炭科学研究总院,北京 100013;2.北京天地融创科技股份有限公司,北京 100013;3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘要:燃煤工业锅炉应用单一布袋除尘器已难以满足愈发严格的排放标准,电袋除尘器是实现燃煤工业锅炉超低排放的选择之一。基于耦合电袋除尘器实验平台,研究了残碳量对飞灰特性及布袋除尘器和电袋除尘器除尘性能、运行情况及能耗等的影响,结果表明,堆积密度随飞灰残碳量降低而增大,残碳量高于 18.18% 时增速较慢,低于 18.18% 时增速较快。与布袋除尘器相比,电袋除尘器出口总尘质量浓度和不同粒径颗粒物质量浓度均降低,总尘脱除效率和分级脱除效率均提高,喷吹周期延长,喷吹压降最低值普遍降低,总能耗均降低,并且残碳量越低,除尘性能越好。布袋除尘器对不同残碳量飞灰有不同穿透窗口,脱除效率随飞灰残碳量降低而提高,而电袋除尘器对残碳量低于 18.18% 的飞灰无明显穿透窗口。两除尘器喷吹周期均随着喷吹次数增加而减小,压降最低值随着喷吹次数增加而升高。电袋除尘器对 4 种飞灰的平均喷吹周期分别是布袋除尘器的 3.27 倍、4.27 倍、4.91 倍和 1.92 倍,并且随着飞灰残碳量的降低,布袋除尘器的喷吹周期延长,压降最低值减小,总能耗先减后增,电袋除尘器的喷吹周期则先延长后缩短,压降最低值先减后增,总能耗先增后减,布袋压降是布袋除尘器和电袋除尘器总能耗的主要因素。总体而言,电袋除尘器在除尘性能、长周期运行和能耗等方面均优于布袋除尘器,是燃煤工业锅炉实现超低排放的有效途径之一。

关键词:布袋除尘器;电袋除尘器;残碳;除尘性能;压降;能耗

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2022)09-3463-09

Effect of residual carbon on precipitator performance

XIA Shaobo^{1,2,3}, DUAN Lu^{2,3}, WANG Jianpeng^{2,3}, JI Renshan^{2,3}, CUI Yuhong^{2,3}, ZHANG Chao^{2,3}

(1.China Coal Research Institute,Beijing 100013,China;2.Beijing Tiandi Rongchuang Technology Co.,Ltd.,Beijing 100013,China;3.National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control,Beijing 100013,China)

Abstract: Hybrid electrostatic precipitator is one of prospective devices for ultra-low emissions in coal-fired industrial boilers because a single bag filter has been difficult to meet stricter emission standards. An experiment has been carried out based on the coupling electric bag filter experimental system to investigate the effect of carbon residue on particle characteristics, dust removal performance, operating conditions and energy consumption of the bag filters and hybrid electrostatic precipitators. The results show that the bulk density increases slowly and then increases sharply as the carbon residue increases more than 18.18%. Compared to the bag filter, the total and grade dust mass concen-

收稿日期:2021-09-05 修回日期:2021-11-08 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1397

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51906095);中国煤炭科工集团有限公司国际合作资助项目(2019-TD-2-CXY003)

作者简介:夏少波(1998—),男,河北石家庄人,硕士。E-mail:xiashaobo0201@163.com

通讯作者:段璐(1987—),女,陕西咸阳人,副研究员,博士。E-mail:duan_lu@126.com

引用格式:夏少波,段璐,王建朋,等.飞灰残碳量对除尘器性能影响规律[J].煤炭学报,2022,47(9):3463-3471.

XIA Shaobo, DUAN Lu, WANG Jianpeng, et al. Effect of residual carbon on precipitator performance[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3463-3471.



移动阅读

trations at the outlet of hybrid electrostatic precipitators are lower, the total and grade dust removal efficiencies are higher, the blowing cycles are extended, the minimum pressure drop is reduced, and the total energy consumption is decreased. Moreover, dust removal performance is better with lower carbon residue of fly ash. The penetration windows of the bag filter distribute at different particle sizes with different carbon residues. Also the hybrid electrostatics has no obvious penetration window expected for the fly ash with residual carbon less than 18.18%. The blowing cycles of both dust collectors decrease and the minimum pressure drop of both dust collectors increases as the number of blows increases. An average blowing cycle of the hybrid electrostatic precipitators for four kinds of fly ash is 3.27, 4.27, 4.91 and 1.92 times of the fiber filter, respectively. With carbon residue decreasing, the blowing cycle of the fiber filter extends and the minimum pressure drop decreases, the blowing cycle of hybrid electrostatic precipitators first extends and then shortens and the minimum pressure drop decreases firstly and then increases. In addition, with the residual carbon reduction, the total energy consumption first decreases and then increases for the bag filter and first decreases and then increases for the hybrid electrostatic precipitators. Bag pressure drop is the main factor in the total energy consumption of the bag filters and hybrid electrostatic precipitators. Overall, the hybrid electrostatic precipitator is better than the bag filter in terms of dust removal performance, long-cycle operation and energy consumption. Therefore, the hybrid electrostatic precipitator is one of the prospective ways to achieve ultra-low emissions for coal-fired industrial boilers.

Key words: bag filter; hybrid electrostatic precipitators; residual carbon; removal performance; pressure drop; energy consumption

2019 年, 全国颗粒物排放量为 1 088.5 万 t。其中, 工业源颗粒物排放量为 925.9 万 t^[1], 燃煤工业锅炉是主要工业源之一, 粉尘大量排放对大气环境和人类健康有严重危害^[2-4], 因此, 国家对燃煤锅炉粉尘排放标准愈发严格^[5-6]。燃煤电厂目前主要采用湿式电除尘器、低(低)温电除尘器、电袋除尘器和布袋除尘器, 其装机容量到 2018 年底已分别达 61, 104, 131 及 12 GW, 基本已实现粉尘超低排放^[7], 2018 年国务院发布“打赢蓝天保卫战 3 a 行动计划”, 开始将燃煤工业锅炉粉尘排放作为治理重点^[8]。

目前, 燃煤工业锅炉主要采用布袋除尘器, 但布袋除尘器压降较大, 滤袋寿命受温度、流场及飞灰中腐蚀成分等影响较大, 较难实现超低排放^[9-11], 静电除尘器虽然性能优越, 但一次投资高、占地面积大, 不适用于燃煤工业锅炉^[12], 电袋除尘器是静电除尘器与布袋除尘器的结合, 高效稳定、运行压降低、结构紧凑、占地少且运行成本低^[13-15], 在燃煤工业锅炉将有广阔的应用前景。

飞灰特性对不同除尘器性能有较大的影响。飞灰粒径直接影响除尘器性能, 不同除尘器穿透窗口不同, 李茹雅等^[16]通过分析发现了布袋除尘器脱除效率在 0.2~0.4 μm 内效率最低, 且随粒径增大而提高; 靳星^[17]研究了颗粒电迁移率与粒径间关系, 发现 0.1~1.0 μm 内颗粒电迁移速率最小, 颗粒脱除效率最低; ZHANG 等^[18]发现静电除尘器对 0.1~1.0 μm 内飞灰脱除效率最低, 袋式除尘器对 0.3 μm 飞灰脱

除效率最低; YUN 等^[19]发现金属过滤器对 1 μm 以下颗粒脱除效率随粒径变小急剧降低; 刘含笑等^[20]对国内煤种成分、飞灰成分、比电阻等进行分析, 发现飞灰中 Na_2O , Fe_2O_3 等成分有利于电除尘器性能, Al_2O_3 , SiO_2 等成分为不利因素, 比电阻过大和过小均不利于电除尘器集尘; LI 和 REN^[21]分析了粉尘电阻率对电除尘机理的影响, 分别针对低比电阻及高比电阻粉尘提出调节方法, 提高脱除效率。飞灰残碳量与粒径有峰值关系, 且对飞灰形貌、成分及比电阻等特性有重要影响, 刘娟娟、樊保国等^[22-23]分别分析了循环流化床锅炉飞灰微观及分形特性, 发现飞灰在 20~50 μm 内残碳量最高, 不同残碳量飞灰微观形貌相差较大; 张灿强^[24]研究了不同粉煤灰特性, 发现粉煤灰比电阻随含碳量增加而降低, 导电性能随含碳量增加而增强; 梅丹等^[25]发现小密度飞灰残碳量与大密度飞灰有明显不同; ZHAO 等^[26]研究发现生物质电厂飞灰残碳倾向存在于大粒径范围; UACIQUETE 等^[27]发现残碳含量对飞灰中成分有所影响。目前研究主要集中在飞灰残碳量对飞灰特性的影响, 针对飞灰残碳量对除尘器性能影响的研究鲜有报道。

笔者基于耦合电袋除尘器实验平台, 研究不同残碳量飞灰对布袋除尘器和电袋除尘器的除尘性能、运行情况及能耗等的影响, 该研究可为除尘器的选用与运行提供理论指导。

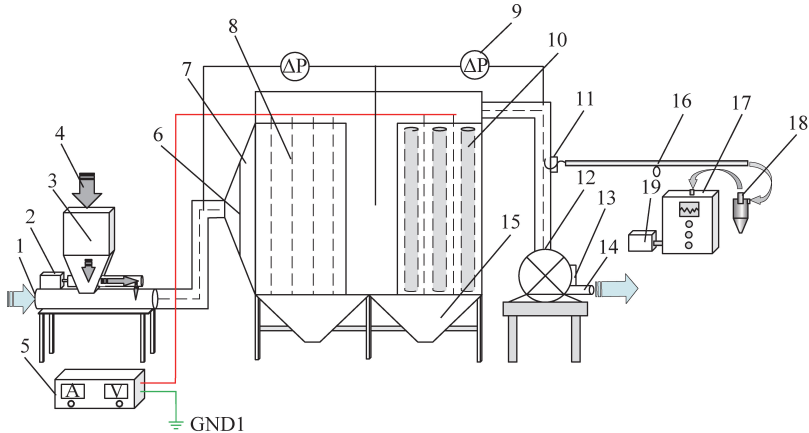
1 实验系统与方法

1.1 实验系统

耦合电袋除尘器实验系统如图 1 所示,主要包括 4 部分:① 供料系统:通过变频控制器控制供料器螺旋杆转速改变飞灰入口量,飞灰从供料仓落灰口处落入下方管道,在压缩空气吹动下分散与空气混合进入除尘器。② 供电系统:选用泰斯曼 TD2202N20-400(-20~0 kV,400 W)直流负高压电源为电场提供高压电。③ 除尘系统:除尘器前区为一 200 mm×1 000 mm通道;后区为 AHPC(Advanced Hybrid Particulate Collector)电袋除尘器,包括 4 个静电除尘区和 3 个布袋除尘区,放电电极、收尘极板及滤袋交错排列,选用针刺电极作为阴极线,选用冷轧碳钢(SPCC)薄板作为阳极板,布袋区选用 PPS 耐高温耐酸碱过滤毡材质的滤袋,滤袋长 1 m。④ 测试系统:采用 testo 510i 无线迷

你压差测量仪测量除尘器压降并间隔 2 s 记录压降值;利用 testo 405i 无线迷你风速测量仪测定并记录风速。电压、电流通过泰斯曼 TD2202N20-400 高压电源读数获得。利用低压静电撞击器(ELPI)及其稀释系统进行上下游等速采样,测量 0.3~10.0 μm 飞灰质量浓度,测点分别设置在实验平台进、出口管道上。通过称重得到进口、前区和后区总尘质量浓度,并结合马尔文粒径分析仪分析得到飞灰粒径分布。

实验有 2 种工况:① 后区静电除尘区不施加电压,即布袋除尘器除尘;② 后区静电除尘区施加 -18 kV 电压,即电袋除尘器除尘。实验过程中气体流量为 407 m³/h,4 种飞灰工况 1 下进口质量浓度分别为 16.69,18.11,18.46 和 16.67 g/m³,工况 2 下进口质量浓度分别为 20.00,15.78,18.99 和 16.24 g/m³,质量浓度最大偏差为 26.74%,实验过程中当除尘器压力达到 750 Pa 时开启喷吹装置,实验进行 5 个喷吹周期。



1—烟气入口; 2—供料器变频电极; 3—料仓; 4—飞灰添加; 5—高压电源; 6—布风板; 7—入口锥体; 8—针刺电极; 9—压差计; 10—滤袋; 11—取样孔; 12—引风机; 13—引风机变频控制器; 14—烟气出口; 15—灰斗; 16—取样枪; 17—ELPI; 18—PM₁₀切割器; 19—真空泵

图 1 实验系统示意
Fig.1 Schematic of the experimental system

1.2 实验飞灰

实验选用 4 种残碳量飞灰,取自煤粉工业锅炉除尘器灰斗,其工业分析和灰成分分析分别见表 1,2,按残碳量由高到低分别命名为 1,2,3,4 号。采用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 3000)测定 4 种飞灰粒径分布,结果如图 2 所示,随着飞灰残碳量减小,中值粒径($D_v(50)$)逐渐向小粒径移动。

表 1 飞灰工业分析				
Table 1 Industry analysis of fly ash				
飞灰	M_{ad}	A_d	V_d	FC_{ad}
1 号	0.20	47.53	4.31	48.07
2 号	0.14	73.53	8.26	18.18
3 号	1.03	77.36	7.41	15.23
4 号	0.10	92.13	6.02	1.85

表 2 灰成分分析											
Table 2 Fly ash composition analysis											
飞灰	灰成分质量分数										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO ₂	SO ₃
1 号	51.78	17.94	6.72	10.27	1.08	1.49	0.73	0.80	0.092	0.140	6.18
2 号	49.04	15.54	8.55	16.76	1.17	1.48	1.80	0.66	0.082	0.200	2.88
3 号	42.42	13.10	7.22	25.51	1.30	1.31	1.73	0.55	0.069	0.230	5.30
4 号	51.78	30.26	4.20	6.74	1.05	1.29	0.72	1.25	0.210	0.086	0.46

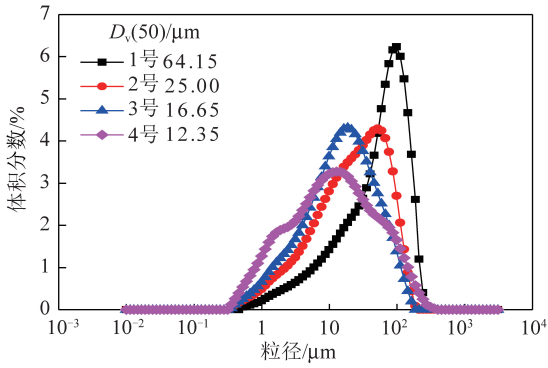


图 2 飞灰粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of fly ash

飞灰的堆积密度通过式(1)进行计算:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V \times 10^{-6}} \quad (1)$$

式中, ρ 为飞灰堆积密度, kg/m^3 ; m_1 为烧杯自身质量, kg ; m_2 为烧杯与飞灰总质量, kg ; V 为烧杯体积, mL , 此次实验采用烧杯体积为 200 mL 。

图 3 为 4 种飞灰堆积密度计算结果。如图 3 所示, 飞灰残碳量越低堆积密度越大, 残碳量大于 18.18% 时, 飞灰堆积密度随残碳量减小缓慢增加, 残碳量小于 18.18% 时, 飞灰堆积密度增速加快。

利用 ZEISS MERLIN compact-61-78 超高分辨率场发射扫描电镜观察颗粒形貌, 结果如图 4 所示。1 号飞灰颗粒形貌较多样, 存在球形、片形、块形等, 粒径较大; 2 号飞灰孔洞较多, 孔隙率较高, 颗粒粒径居中; 3 号、4 号飞灰颗粒形状大多为球状, 粒径较小且表面几乎观察不到孔洞结构; 这主要是因为大粒径

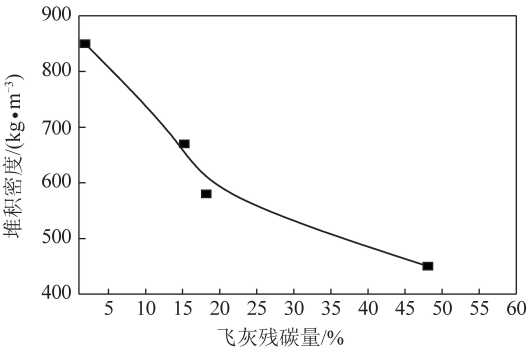


图 3 4 种飞灰堆积密度

Fig.3 Bulk density of four kinds of fly ash

飞灰是煤粉未完全燃烧产生, 部分挥发分在燃烧过程中析出造成颗粒内部大量孔隙结构, 颗粒物密度较小, 而小粒径飞灰主要由矿物气态-凝结形成, 燃烧较为充分。

2 结果与分析

2.1 除尘性能

2.1.1 除尘器总体除尘性能

图 5 为采用 ELPI 测量的 4 种飞灰在除尘器进、出口颗粒物质量浓度的密度分布函数及分级脱除效率, 其中, M 为颗粒质量浓度, d_p 为颗粒粒径。

如图 5 所示, 4 种飞灰在 $1.50 \sim 2.50 \mu\text{m}$ 内进口颗粒物质量浓度较高, 导致布袋除尘器和电袋除尘器在该粒径范围内进出口颗粒物质量浓度较高。总体来看, 电袋除尘器出口颗粒物质量浓度低于布袋除尘器, 对于 1 号飞灰, 电袋除尘器在 $0.03 \sim 0.60 \mu\text{m}$ 内出口颗粒物质量浓度低于布袋除尘器, 且粒径越小, 电

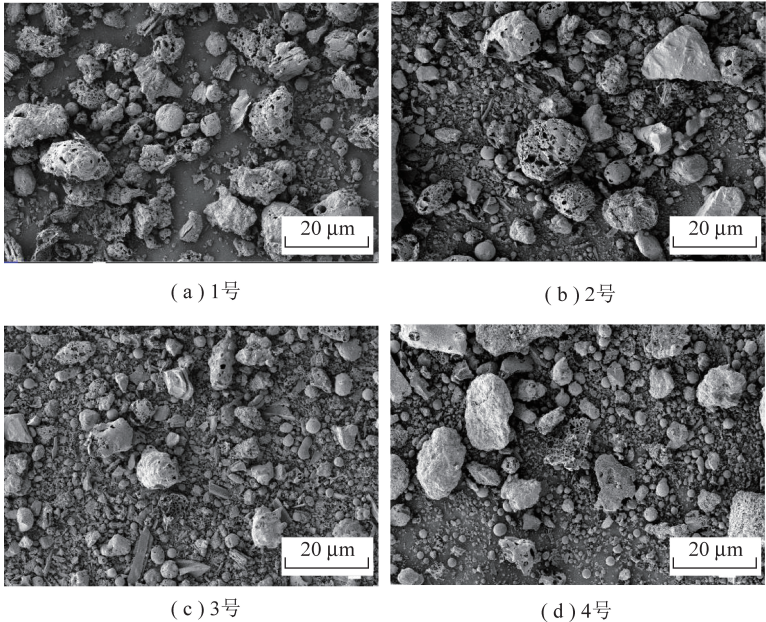


图 4 SEM 分析

Fig.4 SEM analysis

袋除尘器的除尘性能越优于布袋除尘器。此外,残碳量越低,电袋除尘器相对于布袋除尘器出口颗粒物质量浓度的减小量越大,且粒径范围越大,如 1 号飞灰在电袋除尘器出口质量浓度较布袋除尘器在 $2.38\text{ }\mu\text{m}$ 粒径处降低了 9.70%,而 4 号飞灰降低了 96.77%。

就分级脱除效率而言,布袋除尘器和电袋除尘器的脱除效率随残碳量减少而提高,且 2 者效率提高值

与出口颗粒物质量浓度减少量类似。布袋除尘器对不同残碳量飞灰的穿透窗口有明显差异,1 号飞灰到 4 号飞灰的穿透窗口分别为: $0.09\sim 0.61,0.03\sim 0.09,0.15\sim 0.61$ 和 $0.30\sim 2.38\text{ }\mu\text{m}$,残碳量越小,穿透窗口处的脱除效率越高。电袋除尘器对 1 号飞灰的穿透窗口在 $0.03\sim 0.38\text{ }\mu\text{m}$,而残碳量低于 18.18% 时电袋除尘器不存在明显的穿透窗口。

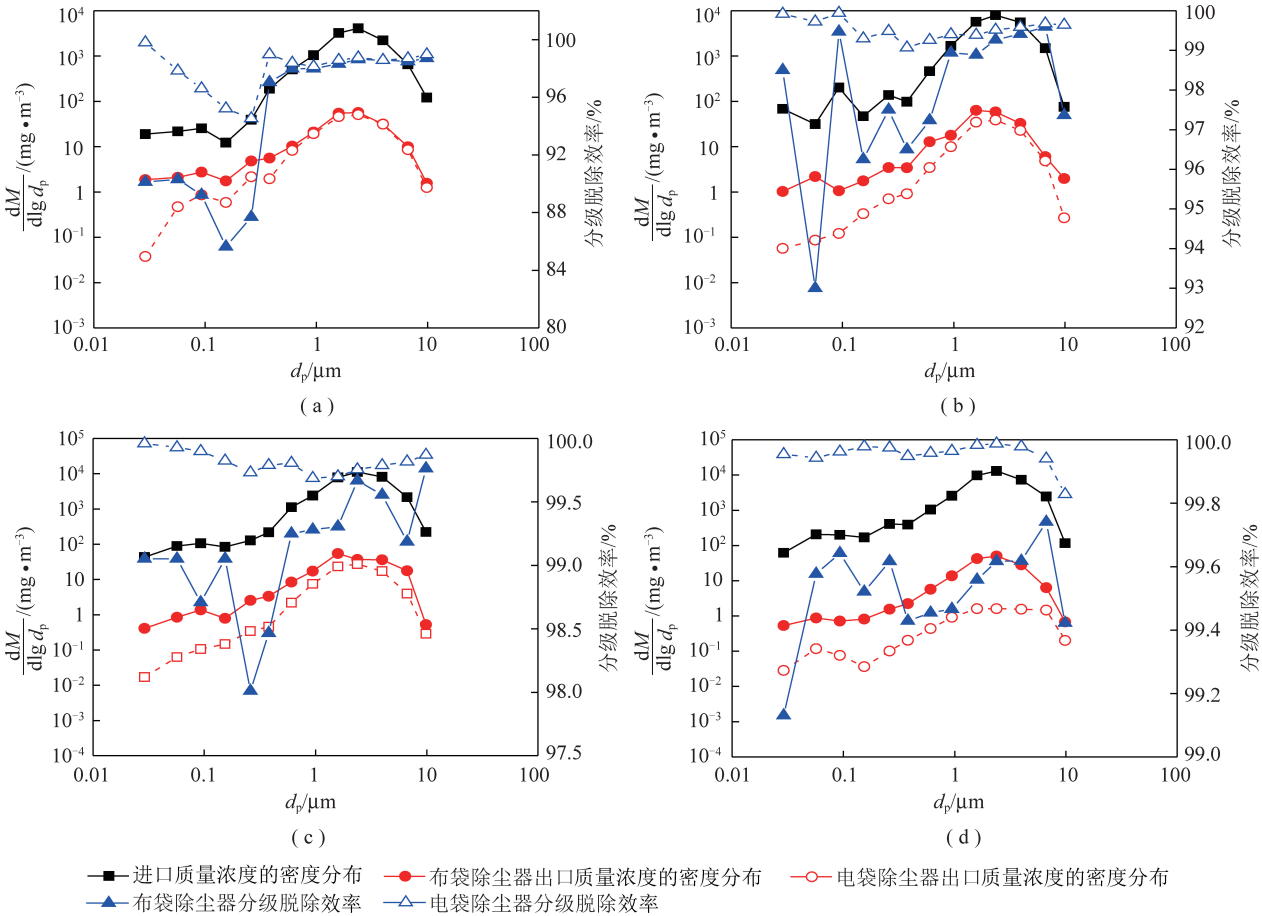


图 5 飞灰进、出口颗粒物质量浓度的密度分布函数和分级脱除效率

Fig.5 Particle mass concentration distribution at inlet,outlet of fly ash and classification removal efficiency

图 6 为布袋除尘器和电袋除尘器出口总尘质量浓度与整体脱除效率。如图 6 所示,随着残碳量的降低,布袋除尘器和电袋除尘器的出口总尘质量浓度均降低,整体脱除效率均提高。随着残碳量从 48.07% 降低到 1.85%,电袋除尘器的出口总尘质量浓度较布袋除尘器的减少量由 6.80 mg/m^3 增加到 30.34 mg/m^3 ,整体除尘效率提高值由 0.08% 增加到 0.18%。因此,布袋除尘器与电袋除尘器除尘性能随残碳量的降低均有所提高,且电袋除尘器相对于布袋除尘器的优势随残碳量的降低逐渐扩大。

2.1.2 除尘器前区除尘性能

耦合电袋除尘器实验平台前区为一 $200\text{ mm}\times 1\text{ }000\text{ mm}$ 通道,部分飞灰在重力作用下沉积到前区

灰斗,通过马尔文激光粒度仪和称重法分析进口和前区灰斗沉积飞灰,得到沉积效率如图 7 所示。总体而言,飞灰残碳量降低,密度增大,粒径越大,沉降效率越大。

2.1.3 除尘器后区除尘性能

通过马尔文激光粒度仪、称重法和 ELPI 得到除尘器后区和出口飞灰质量浓度分布及脱除效率,如图 8 所示。电袋除尘器对各粒径段飞灰脱除效率均高于布袋除尘器,布袋除尘器对 4 种飞灰 PM_{10} 脱除效率分别为 51.21%,84.53%,93.43%及 97.46%,电袋除尘器分别为 71.65%,98.30%,98.97%及 99.77%,分别提高了 20.44%,13.77%,5.54%及 2.31%,对 $\text{PM}_{1-2.5}$ 脱除效率分别提高了 11.20%,14.10%,4.93%及 3.76%,对 $\text{PM}_{2.5-10}$

脱除效率分别提高了 1.18%, 1.77%, 1.14% 及 0.60%, 对 PM_{10+} 脱除效率均为 100%, 可见电袋除尘器对亚微米级颗粒的脱除效果更好。此外, 两除尘器对 4 种飞灰 PM_1 , $PM_{1\sim2.5}$ 和 $PM_{2.5\sim10}$ 脱除效率均随残碳量减少而提高, 且电袋除尘器优势随残碳量降低而扩大。

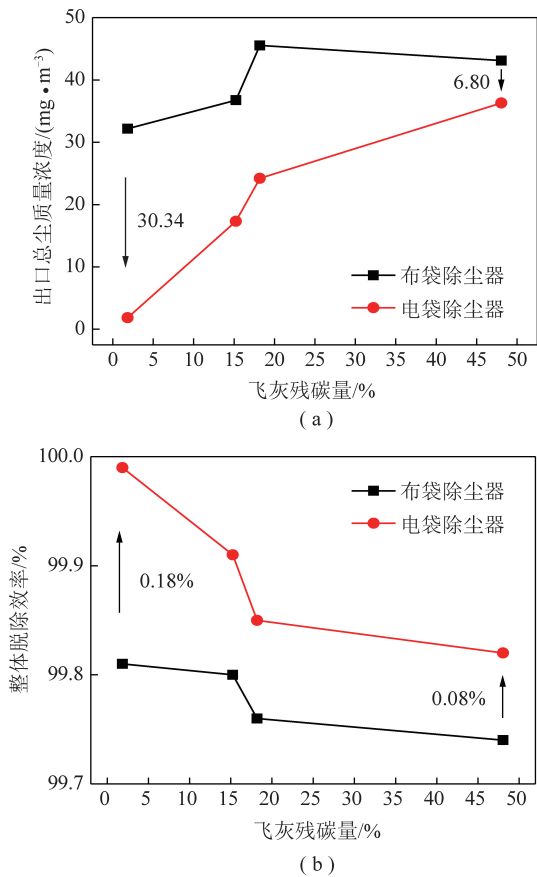


图 6 残碳量对除尘器出口总尘质量浓度和除尘效率的影响
Fig.6 Effect of residual carbon on total dust mass concentration and dust removal efficiency at the outlet of the dust collector

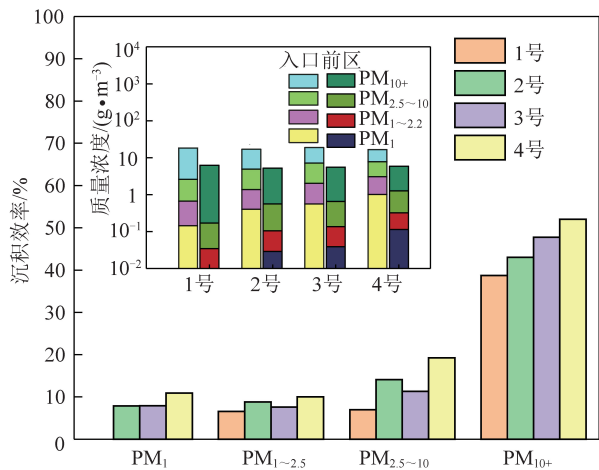


图 7 除尘器前区对飞灰颗粒沉积效率和沉降质量浓度
Fig.7 Removal efficiency and settling concentration of fly ash at the dust collector's front area

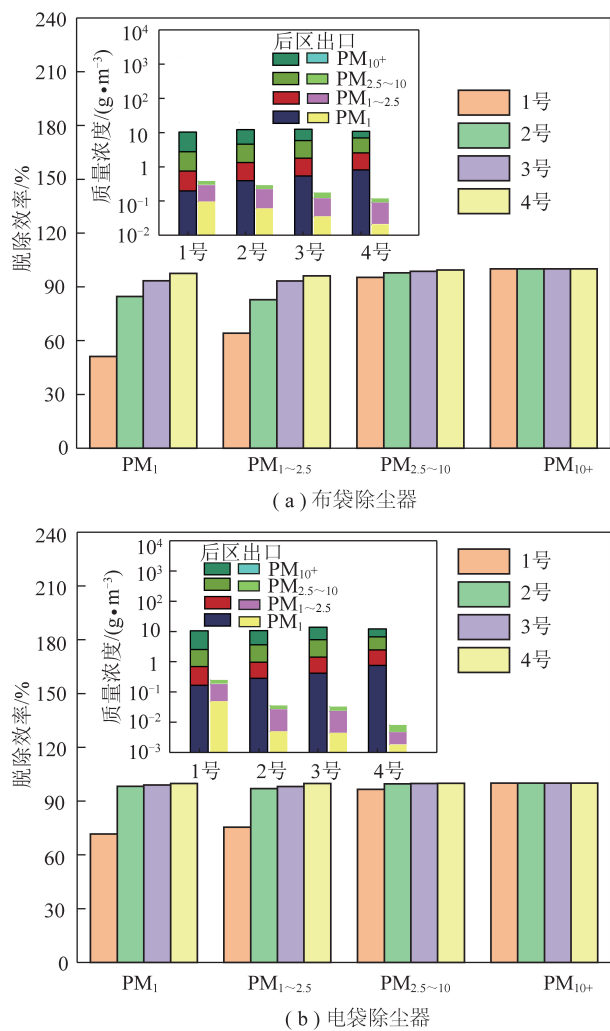


图 8 除尘器后区对飞灰颗粒脱除效率以沉降浓度
Fig.8 Removal efficiency and settling concentration of fly ash at rear area

2.2 运行分析

2.2.1 整体压降

图 9 为布袋除尘器和电袋除尘器周期性压降。由图 9 可知, 布袋除尘器喷吹周期随飞灰残碳量的降低而延长, 而电袋除尘器喷吹周期先延长后缩短。电袋除尘器喷吹周期均长于布袋除尘器, 说明荷电后的飞灰在滤袋上堆积结构疏松, 能有效减小负荷, 电袋除尘器长期运行情况优于布袋除尘器。

2.2.2 喷吹周期

对布袋除尘器和电袋除尘器多个喷吹周期进一步分析, 得到周期随喷吹次数增加的规律如图 10 所示。由图 10 可知, 布袋除尘器对 4 种飞灰喷吹周期平均值分别为 3.67, 3.99, 4.40 和 5.20 min, 可见残碳量越低, 布袋除尘器喷吹周期越长, 电袋除尘器分别为 12.00, 17.05, 21.60 和 10.00 min, 喷吹周期随残碳量降低先增后减, 这是因为随残碳量降低, 飞灰密度提高、粒径减小、比电阻提高、荷电能力降低, 初始密

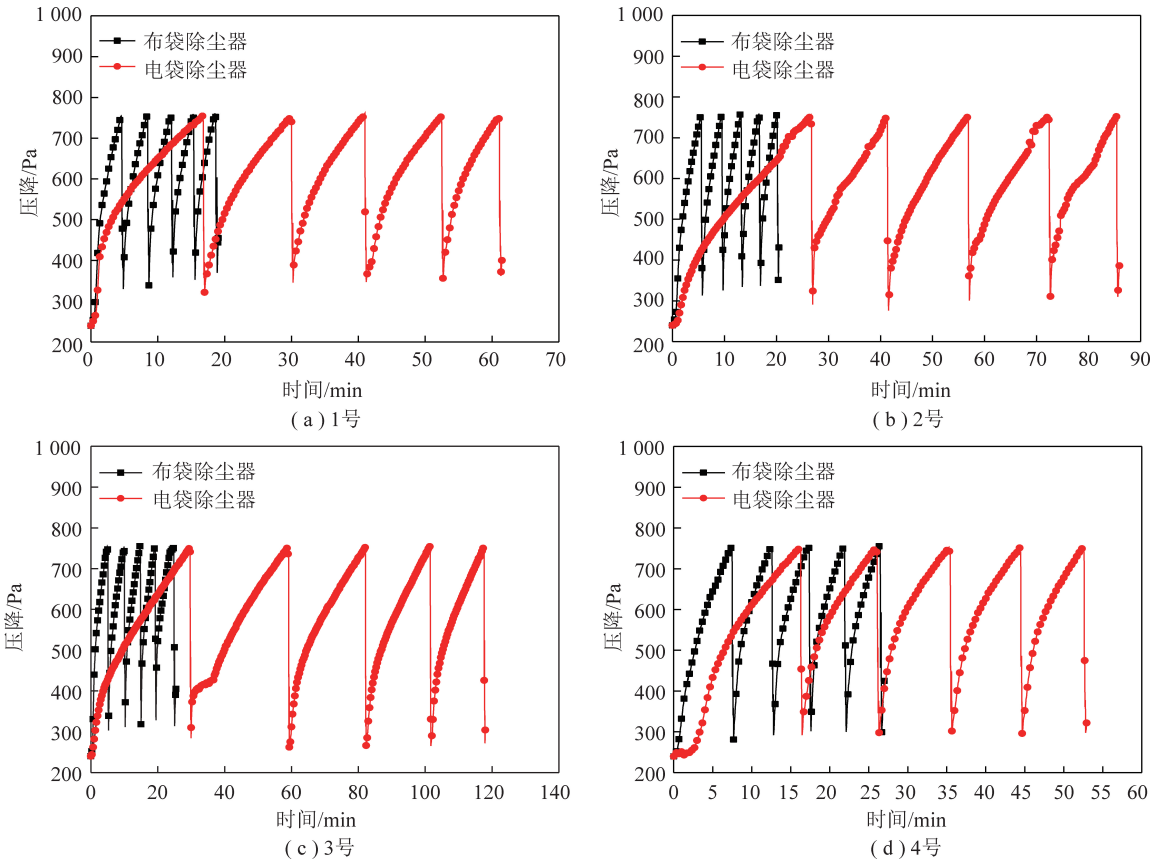


图 9 不同工况下压降变化
Fig.9 Variation of pressure drop under different working conditions

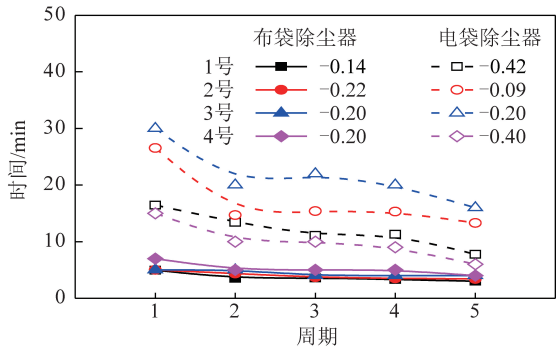


图 10 喷吹周期
Fig.10 Blowing cycle

度提高占主导地位, 喷吹周期增加, 但当残碳量降低至 1.85% 时, 小粒径颗粒增多、荷电能力下降占主导地位, 喷吹周期减小。并且, 电袋除尘器喷吹周期分别是布袋除尘器的 3.27、4.27、4.91、1.92 倍, 随残碳量的降低先增后减。两除尘器喷吹周期均随喷吹次数增加而缩短, 因为随运行时间增加, 部分飞灰进入布袋纤维内部, 喷吹难以清除这部分飞灰, 导致布袋堵塞, 喷吹周期缩短; 随飞灰残碳量降低, 从第 2 周期到第 5 周期电袋除尘器周期减小率较布袋除尘器先高后低再高, 整体而言电袋除尘器运行性能优于布袋除尘器, 且优势随残碳量降低先增大后减小。

2.2.3 喷吹后压降变化规律

4 种飞灰在实验过程中周期喷吹后压降最低点如图 11 所示。

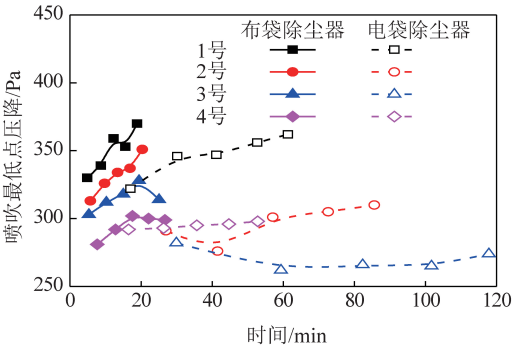


图 11 喷吹压降最低点
Fig.11 Blowing pressure drop minimum point

由图 11 可以看出, 布袋除尘器压降最低点普遍高于电袋除尘器, 布袋除尘器对 4 种飞灰压降最低点平均值分别为 350.20、332.20、315.00 和 294.80 Pa, 电袋除尘器分别为 346.60、296.60、269.80 和 294.80 Pa, 布袋除尘器压降最低值随残碳量降低而减小, 电袋除尘器随残碳量降低先减后增, 这是因为布袋除尘器喷吹主要受惯性影响, 残碳量低, 堆积密度大, 惯性强, 利于喷吹; 电袋除尘器需考虑惯性和荷电。飞灰

残碳量低,荷电能力降低,飞灰在滤袋上堆积相对紧密,不利于喷吹,且残碳量高于 1.85% 时惯性对电袋除尘器喷吹起主导作用,低于 1.85% 时,荷电能力占主导地位。

此外,布袋除尘器和电袋除尘器压降最低值随喷吹次数增加而升高,布袋除尘器压降最低值随喷吹次数上升较快,电袋除尘器较慢,增长速率随残碳量降低而减慢。就长期运行而言,布袋除尘器总体压降逐步上升,长时间在高压降下运行,增加系统运行能耗,电袋除尘器长期运行优于布袋除尘器。

2.3 能耗分析

实验过程中布袋除尘器能耗主要包括系统压降和喷吹能耗,电袋除尘器能耗主要包括电耗、系统压降及喷吹能耗,利用文献中公式^[28]进行计算,公式为

$$E_{\text{charge}} = UIt \tag{2}$$

$$E_{\text{comp}} = N(P_1 - P_2)V_{\text{header}}/(1 - n) \tag{3}$$

$$E = \Delta P(t)A_{\text{filter}}t \tag{4}$$

其中, E_{charge} , E_{comp} , E 分别为电耗、喷吹耗能、布袋耗能, J; U 为电压, V; I 为电流, A; N 为喷吹次数; P_1 , P_2 , $\Delta P(t)$ 分别为喷吹前后压降以及实验过程布袋压降, Pa; A_{filter} 为过滤面积, m^2 ; t 为实验用时, s; n 为多变指数。不同飞灰实验用时不同,因此将 5 个周期总能耗换算为单位小时内除尘器能耗。

布袋除尘器和电袋除尘器实验能耗如图 12 所示,布袋除尘器对 4 种飞灰总能耗分别为 0.42, 0.41, 0.37, 0.46 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 随残碳量降低先减后增,这是因为残碳量低,飞灰粒径减小、密度增加,初始残碳量降低,密度增加占主导地位,颗粒在惯性作用下更易沉积在多孔板上,而残碳量进一步降低,小粒径颗粒增加,大量小粒径颗粒随流沉积在布袋上,导致布袋表

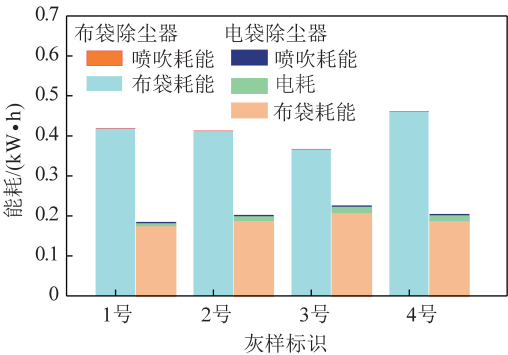


图 12 能耗比较

Fig.12 Comparison of energy consumption

面颗粒层厚度增加,增加了布袋压降。电袋除尘器分别为 0.18, 0.20, 0.23, 0.20 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 可见,电袋除尘器能耗随残碳量降低先增后减;电袋除尘器对 4 种飞灰总能耗比布袋除尘器分别低 57.14%, 51.22%, 37.84% 及

56.52%, 随残碳量降低先减后增。可见,电袋除尘器总能耗均小于布袋除尘器,布袋喷吹是布袋除尘器和电袋除尘器能耗的主要因素。

3 结 论

(1) 残碳量影响飞灰的堆积密度和粒径分布,残碳量越低,飞灰堆积密度越大,残碳量大于 18.18% 时,堆积密度随残碳量减小缓慢增加,残碳量小于 18.18% 时,堆积密度增速加快;残碳量降低,小粒径颗粒体积分数增加。

(2) 电袋除尘器除尘性能优于布袋除尘器。电袋除尘器出口总尘质量浓度和分级颗粒物质量浓度降低,脱除效率提高,对超细颗粒的捕集能力显著,残碳量越低除尘性能越好,残碳量高于 18.18% 飞灰穿透窗口在 0.03~0.38 μm ;而布袋除尘器对不同残碳量的飞灰,穿透窗口明显不同。

(3) 两除尘器喷吹周期随喷吹次数增加而缩短,压降最低值均随喷吹次数增加而升高。布袋除尘器喷吹周期随飞灰残碳量降低而延长,电袋除尘器先延长后缩短,布袋除尘器压降最低值随喷吹次数上升较快,最低值随残碳量降低而减小,电袋除尘器上升较慢,最低值随残碳量降低先减后增。电袋除尘器较布袋除尘器喷吹周期更长,喷吹最低点更低,且电袋除尘器对 4 种飞灰平均喷吹周期分别是布袋除尘器的 3.27, 4.27, 4.91 和 1.92 倍。因此电袋除尘器运行性能优越,适于长周期运行。

(4) 布袋除尘器能耗来自于除尘器压降和喷吹能耗,电袋除尘器能耗来自于除尘器压降、喷吹能耗和电耗,其中布袋耗能是能耗的主要因素。随残碳量降低,布袋除尘器对 4 种飞灰总能耗先减后增,电袋除尘器先增后减,且电袋除尘器总能耗均小于布袋除尘器,因此,采用电袋除尘器有利于降低除尘系统的运行成本。

参考文献 (References) :

[1] 中华人民共和国生态环境部, 2019 年中国生态环境统计年报 [A/OL]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202108/t20210827_861012.shtml.

[2] PUI D Y H, CHEN S C, ZUO Z. $\text{PM}_{2.5}$ in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation [J]. Particuology, 2014 (2) : 26.

[3] HSIEN CC, DA W C, CHE C H, et al. The effects of fine and coarse particulate matter on lung function among the elderly [J]. Scientific Reports, 2019, 9 (1) : 14790.

[4] KIM H, KIM W H, KIM Y Y, et al. Air pollution and central nervous system disease: A review of the impact of fine particulate matter on neurological disorders [J]. Frontiers in Public Health, 2020,

- 8;575330.
- [5] GB13223—2011,火电厂大气污染物排放标准[S].
- [6] 环保部,国家发改委,国家能源局.关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知[EB/OL].(2015-12-11).https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm.
- [7] 中国电力企业联合会,2018年度火电厂环保产业登记信息(发布稿)[EB/OL].(2019-03-08).<https://cec.org.cn/detail/index.html?3-11274>.
- [8] 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知[EB/OL].(2018-07-03).http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm.
- [9] 李东梅,田娱嘉,郭阳,等.布袋除尘器滤袋使用寿命的影响因素分析[J].热力发电,2013,42(4):104-106.
- LI Dongmei, TIAN Yujia, GUO Yang, et al. Factors affecting the service life of filter bag[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(4):104-106.
- [10] ASIS Patnaik, RAJESH D Anandjiwala. Reasons for filter bag failure and method development to improve its life span[J]. Chemical Engineering & Technology, 2016, 39(3):529-534.
- [11] PRABHANSU, KARMAKAR M K, CHANDRA P, et al. A review on the fuel gas cleaning technologies in gasification process[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(2):689-702.
- [12] 胡燕.探析我国燃煤工业锅炉大气污染物治理技术[J].环境与发展,2020,32(8):87,90.
- HU Yan. Discussion on air pollution control technology of coal-fired industrial boilers in China[J]. Environment and Development, 2020, 32(8):87,90.
- [13] 熊桂龙,李水清,陈晟,等.增强PM_{2.5}脱除的新型电除尘技术的发展[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2217-2223.
- XIONG Guilong, LI Shuiqing, CHEN Sheng, et al. Development of advanced electrostatic precipitation technologies for reducing PM_{2.5} emissions from coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9):2217-2223.
- [14] 唐敏康,余骏斌,贺玲,等.电袋除尘器中荷电烟尘粒子在滤袋表面的堆积机理[J].工业安全与环保,2015,41(11):79-83.
- TANG Minkang, YU Junbin, HE Ling, et al. The accumulation mechanism of charged particles on the surface of bag filter in EBP[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(11):79-83.
- [15] YAO Yuping, ZHAO Xiyong. Application of electrostatic fabric hybrid particulate collector[A]. 11th International Conference on Electrostatic Precipitation[C]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009:482-484.
- [16] 李茹雅,祁君田,殷焕荣,等.布袋除尘器过滤效率影响因素研究[J].热力发电,2012,41(1):6-7,11.
- LI Ruya, QI Juntian, YIN Huanrong, et al. Affect factors upon filtering efficiency of bag filters[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(1):6-7,11.
- [17] 靳星.静电除尘器内细颗粒物脱除特性的技术基础研究[D].北京:清华大学,2013.
- JIN Xing. Research on the capture technology of fine particles in electrostatic precipitator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [18] ZHANG Songsong, QI Guoli, GUAN Jian, et al. The removal efficiency of PM_{2.5} with different particle size of dust removers[A]. Science and Engineering Research Center. Proceedings of, 2016 International Conference on Advanced Manufacture Technology and Industrial Application (AMTIA 2016)[C]. Science and Engineering Research Center, 2016:5.
- [19] YUN Yongseung, CHUNG Seok Woo, LEE Seung Jong. Dust removal efficiency and operation characteristics of metal filters for coal gasification fines and standard dust sample[J]. Korean Chemical Engineering Research, 2019, 57(4):461-468.
- [20] 刘含笑,郗建国,姚宇平,等.国内煤/飞灰特性及电除尘性能研究[J].环境工程,2018,36(2):88-91,97.
- LIU Hanxiao, LI Jianguo, YAO Yuping, et al. The research of China's domestic coal/ash properties and electric properties[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(2):88-91,97.
- [21] LI M, REN J. Study on the change characteristics of dust specific resistivity and electrostatic precipitation efficiency[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 108:052115.
- [22] 刘娟娟,乔晓磊,冯翠英,等.循环流化床锅炉飞灰微观特性的研究[J].煤炭学报,2011,36(11):1922-1927.
- LIU Juanjuan, QIAO Xiaolei, FENG Cuiying, et al. Research on microcosmic characteristics of fly-ash from circulating fluidized bed boilers[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11):1922-1927.
- [23] 樊保国,刘兴国,刘海玉,等.循环流化床锅炉飞灰的分形特性[J].煤炭学报,2014,39(6):1154-1158.
- FAN Baoguo, LIU Xingguo, LIU Haiyu, et al. Fractal characteristics of fly ash in circulating fluidized bed boilers[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6):1154-1158.
- [24] 张灿强.不同种类粉煤灰特性的实验研究[D].南京:东南大学,2017.
- ZHANG Canqiang. Experimental study on characteristics of different kinds of fly ash[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [25] 梅丹,崔志刚,马素霞.飞灰中晶体矿物及非晶体与残碳分布的关系[J].热力发电,2018,47(1):59-65.
- MEI Dan, CUI Zhigang, MA Suxia. Relationship of crystal minerals and amorphous as well as residual carbon distribution in fly ash[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(1):59-65.
- [26] ZHAO M, HAN Z, SHENG C, et al. Characterization of residual carbon in fly ashes from power plants firing biomass[J]. Energy & Fuels, 2013, 27:898-907.
- [27] UACIQUETED, SAKUSABE K, KATO T, et al. Influence of unburned carbon on mercury chemical forms in fly ash produced from a coal-fired power plant[J]. Fuel, 2021, 300(14):120802.
- [28] CHOI H K, PARK S J, LIM J H, et al. A study on the characteristics of improvement in filtration performance by dust precharging[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2002, 19(2):342-346.