



推荐阅读:

选煤:

[煤泥水中微细高岭石/蒙脱石颗粒表面水化分子动力学模拟研究](#)

[细粒煤超声同步浮选的试验研究](#)

[基于水化膜弱化促进煤泥脱水的机理及试验](#)

[2-羟乙基三甲基氯化铵抑制蒙脱石水化膨胀的密度泛函计算](#)

[颗粒气泡黏附科学——宏观尺度下颗粒气泡黏附研究进展及困境](#)

[颗粒气泡黏附科学——基于 AFM 和 DWFA 的颗粒气泡间疏水作用力研究](#)

煤化学:

[电化学强化无烟煤吸水性的实验研究](#)

[泥炭基活性炭水蒸汽活化过程孔结构演化的碳烧失特征](#)

[活化过硫酸铵溶液对煤样氧化增透的实验研究](#)

[伊敏褐煤不同化学组分结构特征的红外光谱研究](#)

煤燃烧:

[O₂/CO₂气氛下煤焦恒温燃烧 NO_x 释放特性](#)

[燃用准东煤过程中碱/碱土金属迁移规律及锅炉结渣沾污研究进展](#)

[五彩湾煤半焦水热脱钠提质及其燃烧特性的演变](#)

[SOFA 参数对 W 锅炉燃烧及 NO_x 排放影响的数值模拟](#)

热解:

[低温热解对低阶煤表面疏水性的影响机制及半焦可浮性分析](#)

[微波辅助铁催化低阶煤热解特性](#)

[水溶 Na 对高碱煤热解及氮热变迁的影响](#)



推荐阅读:

[煤热解焦油催化裂解和乙烷水蒸气重整耦合提高焦油品质](#)

[大柳塔煤及显微组分在不同气氛下的热解行为](#)

[升温速率对准东褐煤热解特性及煤焦孔隙结构的影响](#)

气化:

[多喷嘴对置式气流床气化炉内热态行为的研究进展](#)

液化:

[褐煤直接液化过程中存在的问题与思考](#)

[煤基液体产物中酚类化合物的组成研究](#)

[煤液化条件下铁系催化剂的相变](#)

[基于分子质量的煤沥青芳香分组成结构表征](#)

[不同类型重油中碱性氮化合物分子组成及其加氢裂化转化规律](#)

清洁利用:

[煤炭分级利用新思路——事前分离与精准利用](#)

[煤基新材料-煤基石墨烯的制备及石墨烯在导热领域应用研究进](#)



移动阅读

张秋双,姚竣文,崔琳,等. 脱硫废水荷电蒸发及产物特性研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2987-2994.

ZHANG Qiushuang, YAO Junwen, CUI Lin, et al. Evaporation and dry products characteristics of charged desulfurization wastewater[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2987-2994.

脱硫废水荷电蒸发及产物特性研究

张秋双^{1,2}, 姚竣文^{1,2}, 崔琳^{1,2}, 郇栋^{1,2}, 陈桂芳^{1,2}, 董勇^{1,2}

(1. 山东大学 燃煤污染物减排国家工程实验室, 山东 济南 250061; 2. 山东省能源碳减排技术与资源化利用重点实验室, 山东 济南 250061)

摘 要:传统的石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术在高效脱除烟气中 SO_2 的同时,会产生一定量难处理的脱硫废水。目前利用热烟气蒸干是处理脱硫废水的有效途径,但在实际应用中,由于脱硫废水蒸发速度慢等问题容易引起烟道的结垢与腐蚀。为更好地实现脱硫废水烟气蒸发处理,提高脱硫废水在烟道内的蒸发速度,本文利用高压静电感应荷电理论,提出脱硫废水荷电蒸发技术,通过搭建脱硫废水荷电蒸发热态实验系统,对脱硫废水荷电蒸发后的沿程温度分布,不同荷电电压与雾化压力下干燥产物自身的粒径分布与荷电量变化等进行了研究。结果表明,脱硫废水中由于 CaCl_2 等盐分的存在,限制了其蒸发速度,且干燥后增加了烟气中细颗粒的浓度;与不荷电相比,荷电雾化能够提高脱硫废水的蒸发速度,并能够通过电荷迁移使干燥后的细颗粒荷电,而且颗粒粒径越大所带的电荷量越多;受荷电液滴蒸发破碎机制不同的影响,提高荷电电压,脱硫废水蒸发干燥后的细颗粒数减少,但细颗粒所带的电荷量增加;提高雾化压力,脱硫废水蒸发干燥后的细颗粒数增加,但细颗粒所带的电荷量减少;荷电电压极性对干燥产物的粒径分布基本没有影响。研究结论证明了脱硫废水荷电蒸发的可行性,并为脱硫废水荷电蒸发协同促进细颗粒团聚提供了基础数据与理论支持。

关键词: 脱硫废水; 感应荷电; 雾化蒸发; 温度分布; 粒径分布; 电荷分布

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2020)08-2987-08

Evaporation and dry products characteristics of charged desulfurization wastewater

ZHANG Qiushuang^{1,2}, YAO Junwen^{1,2}, CUI Lin^{1,2}, BING Dong^{1,2}, CHEN Guifang^{1,2}, DONG Yong^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Coal Fired Pollutants Emission Reduction, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Province Key Laboratory for Energy Carbon Reduction and Resource Utilization, Jinan 250061, China)

Abstract: The SO_2 can be removed effectively by the traditional limestone-gypsum wet flue gas desulfurization technology, but some desulfurization wastewater can be produced simultaneously. At present, using the hot flue gas to evaporate desulfurization wastewater is one of effective ways, but in practical applications, because of the slow evaporation rate of desulfurization wastewater, it is easy to cause scaling and corrosion of the flue. For achieving a better flue gas evaporation treatment of desulfurization wastewater, accelerating the evaporation rate of desulfurization wastewater in the flue, a charged desulfurization wastewater evaporation technology was proposed based on the electrostatic induction charge theory. The flue gas temperature distribution, the particle size distribution of the dried products and the change

收稿日期: 2019-04-15 修回日期: 2019-07-22 责任编辑: 常明然 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0469

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603202); 山东省重点研发计划资助项目(2019GSF109003); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2017BEE029)

作者简介: 张秋双(1993—),女,安徽合肥人,硕士研究生。E-mail: 1220635053@qq.com

通讯作者: 崔琳(1978—),男,山东寿光人,副教授。E-mail: lincui@sdu.edu.cn

of charge amount were investigated using a thermal experiment system of charged desulfurization wastewater evaporation under different charge voltages and atomization pressures. The results show that the evaporation rate is limited and the fine particle concentration of dried flue gas is increased due to the presence of salt such as CaCl_2 in the desulfurization wastewater. Compared with no charge, the concentration of fine particle is still unimodal distribution after charged desulfurization wastewater evaporation, the charged atomization can raise the evaporation rate of desulfurization wastewater, the dried fine particles can be charged by the charge transfer, and the electric charge quantity of the particle is higher with larger particle size. Affected by the evaporation and fragmentation mechanism of charged droplets, the measurable dried fine particle number decreases with the increase of the charge voltage after desulfurization wastewater evaporation, but the electric charge quantity of dried fine particle increases. While the measurable dried fine particle number increases with the increase of the atomization pressure, but the electric charge quantity of dried fine particle decreases. The polarity of charged voltage has no effect on the particle size distribution of dried product. The feasibility of charged desulfurization wastewater evaporation is proved, and the basic data and theoretical support for the combined evaporation of charged desulfurization wastewater with particles agglomeration are provided.

Key words: desulfurization wastewater; induction charging; atomization evaporation; temperature distribution; particle size distribution; charge distribution

煤炭是当前世界上最重要的能源之一^[1],为实现煤炭燃烧后烟气中 SO_2 的超低排放控制,以石灰石-石膏湿法烟气脱硫为代表的脱硫工艺获得了广泛应用^[2-4],该方法在实现烟气中 SO_2 超低排放的同时,会产生一定量的脱硫废水。脱硫废水成分复杂,含有 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,可悬浮颗粒物以及微量重金属等多种污染物,必须处理后才能排放^[5]。传统的脱硫废水处理方法是采用“三联箱”处理的物理化学方法,该方法通过添加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 提高脱硫废水的 pH 值,把大部分重金属与镁、铁离子等用氢氧化物的形式沉淀出来,通过添加有机/无机硫化物,把 Hg 离子高效沉淀出来,处理后的脱硫废水主要以 CaCl_2 为主^[6],难以脱除废水中富集的 Cl^- ^[7],无法实现脱硫废水的循环利用。随着国家对废水排放要求的日趋严格,实现脱硫废水的循环利用与零排放,成为当前急需解决的问题。

利用热烟气蒸干是处理脱硫废水的有效途径^[8],特别是脱硫废水烟道蒸发技术,通过将脱硫废水喷入空预器与除尘器之间的烟道,利用烟气余热蒸发废水,蒸干后的固体颗粒随烟气进入除尘器进而被脱除,实现了脱硫废水的低成本零排放处理与水分的回收利用^[9-10],不但系统简单、投资运行费用低,而且在处理废水的同时可以促进细颗粒团聚长大,解决细颗粒粒径太小且难以荷电导致的静电除尘器对其脱除效率不高的问题,增强静电除尘器对细颗粒物的脱除效率^[11-12],因此成为当前研究与利用的热点。但在实际应用中由于尾部烟气温度低,蒸发速度慢,脱硫废水不易蒸干,容易引起烟道的腐蚀、结垢与堵塞^[13],限制了技术的推广应用。

因此,良好的喷雾蒸发特性是实现脱硫废水烟气蒸发零排放技术的关键^[14],而改善废水雾化效果是提高蒸发速度的有效手段。根据笔者所在课题组^[15]及相关研究,利用静电雾化技术有利于进一步减小雾滴的粒径^[16-17],加速雾滴蒸发,同时水雾荷电后能够有效促进微细颗粒的团聚^[18-19],提高细颗粒物脱除效率^[20-21],因此,将脱硫废水烟道蒸发与静电雾化技术结合,不但有利于解决脱硫废水低温不易蒸发的问题,而且也有利于进一步提高细颗粒物的团聚脱除效率。

基于此,笔者提出脱硫废水荷电雾化蒸发技术,针对“三联箱”处理后的富氯脱硫废水,通过建立脱硫废水荷电蒸发热态试验系统,采用 CaCl_2 溶液模拟脱硫废水,重点研究了脱硫废水荷电雾化后的蒸发干燥特性、干燥产物自身的粒径分布与荷电量变化等,可为后续研究脱硫废水荷电雾化蒸发协同促进细颗粒团聚提供借鉴。

1 试验系统及测试分析方法

1.1 试验系统

本实验通过搭建脱硫废水荷电雾化蒸发热态试验系统,进行脱硫废水荷电蒸发特性研究。试验系统如图 1 所示,由电加热装置、荷电雾化装置、测试装置、引风机等组成。烟气通过电加热器加热;荷电装置中环形电极接高压电源,电极环直径 60 mm、宽度 10 mm、距喷嘴 10 mm;采用美国喷雾公司生产的双流体雾化喷嘴(JACSU22B),进入喷嘴的脱硫废水水量与水压由高压水泵和流量计进行控制,压缩空气压力由气体减压阀控制。液滴荷

电采用静电感应荷电理论,通过静电场对电荷的吸引与排斥作用,喷嘴喷出的液滴将带上与感应电极极性相反的电荷。

1.2 测试方法及实验条件

脱硫废水蒸发测量段设有 6 个测点,测点间距为 1 m,采用屏蔽式热电偶测量沿程烟气温度变化。干燥产物的粒径分布和荷电量由电称低压冲击器(EL-

PI,Dekati)测量。ELPI 能够把 0.027 ~ 9.890 μm 内的颗粒分为 13 级进行在线测量,各级粒径见表 1。测试过程中,打开 ELPI 的荷电器,进入 ELPI 的颗粒物通过荷电器饱和荷电后被 13 级撞击采样器分级收集,每 1 级的撞击器上面沉积的颗粒所带的电荷通过多通道灵敏静电计以电流的形式获得,以此计算对应粒径区间的颗粒数目^[22]。

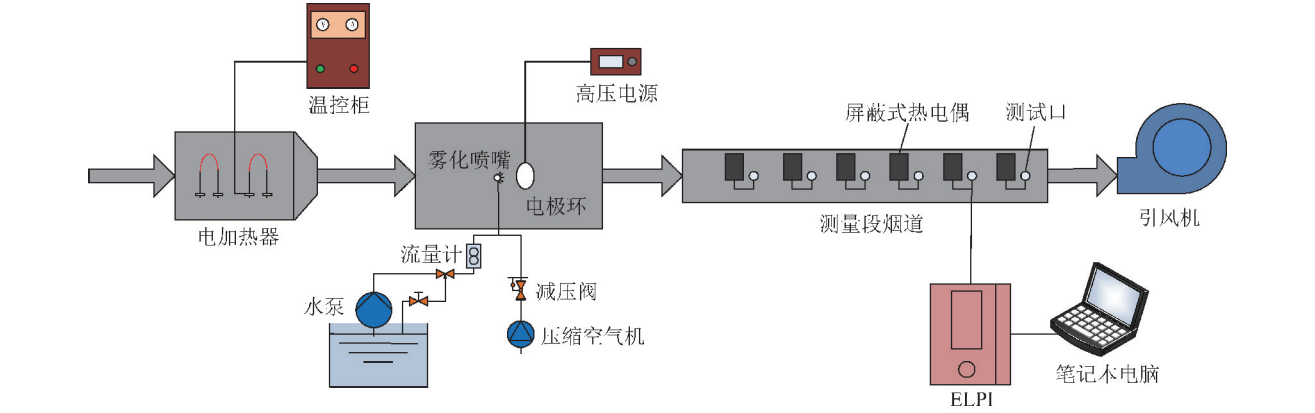


图 1 实验系统

Fig. 1 Experiment system

表 1 ELPI 各级平均粒径

Table 1 Average size of capture particles corresponding to each grade of ELPI													μm
Grade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
D_{50}	0.027	0.055	0.094	0.160	0.260	0.380	0.610	0.950	1.600	2.390	3.990	6.670	9.890
D	0.04	0.07	0.12	0.20	0.32	0.48	0.76	1.23	1.96	3.09	5.16	8.12	—

注: D 为相邻两级 D_{50} 的几何平均值; D_{50} 为累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的粒径。

电流与颗粒数目浓度的关系为

$$I = Pn eq_v N$$

其中, I 为电流; P 为颗粒在电晕区的荷电效率; n 为单个粒子的平均荷电数; e 为基本电荷电量; q_v 为采样气体体积流量; N 为颗粒数目浓度。荷电效率 P 和荷电数 n 的乘积 Pn 与颗粒动力学粒径 D_p 有关,其值由试验标定得到,关系式为

$$Pn = \begin{cases} 174.15 D_p^{1.9087}, & D_p < 0.095 \mu\text{m} \\ 50.507 D_p^{1.3805}, & 0.095 \mu\text{m} < D_p < 1.8 \mu\text{m} \\ 79.732 D_p^{0.5909}, & D_p > 1.8 \mu\text{m} \end{cases}$$

测试过程中如果关闭 ELPI 的荷电器,则 ELPI 静电计所测电流为颗粒物自身所带电荷所形成的电流,结合实际的颗粒数目浓度,得到单个粒子的平均电荷量,再除以基本电荷的电量,可以得到单个粒子的基本电荷数目,能够用于分析电荷在液滴与颗粒物之间的迁移情况^[23]。

实验过程中,脱硫废水雾化压力控制在 0.1 ~ 0.6 MPa,荷电电压在 0 ~ 12 kV,喷水量在 6 ~

12 L/h,模拟脱硫废水中 Cl^- 质量浓度为 20 g/L,对应 Ca^{2+} 质量浓度约为 11.3 g/L。空气通过电加热器加热到 125 ℃ 后进入荷电雾化装置,然后以 3 m/s 的速度流经水平测试烟道。测量段烟道长度 5 m,第 1 个测点距离喷嘴 1 m,因此测量段各点处蒸发时间在 0.33 ~ 2 s。

2 试验结果与分析

2.1 脱硫废水荷电蒸发特性分析

蒸发速度是影响脱硫废水低温烟气蒸发处理的关键因素。通过比较相同条件下(不荷电,喷水量 8 L/h,雾化气压 0.3 MPa)脱硫废水与清水蒸发后的沿程温度分布,发现与清水蒸发相比,在同一测量点经过相同的蒸发时间后,脱硫废水蒸发后的烟气温度相对更高,如图 2 所示。分析认为,这主要是因为脱硫废水中 CaCl_2 等盐分的存在会导致液滴表面水蒸气分压下降,从而减缓了液滴中水分的蒸发速率,使得气、液之间换热速度变慢,烟气降温速度也相应变小,液滴蒸干时间延长,不利于脱硫废水的快速蒸发

处理。

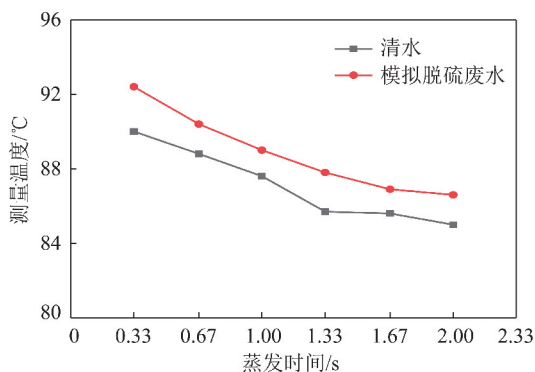


图2 雾化蒸发后的沿程烟气温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of flue gas along the flue gas flow after atomization and evaporation

液滴荷电后,荷电电压对脱硫废水蒸发后的烟气沿程温度分布影响如图3所示。由图3可知,随着荷电电压的逐渐升高,经过相同蒸发时间后的烟气温度逐渐降低,说明荷电电压提高了液滴与烟气之间的换热速度,加快了液滴的蒸发速度。分析认为,液滴表面张力是由于液体表面层分子引力不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的力,其方向垂直指向液体内部,使液滴趋向于球形并保持稳定;荷电之后液滴内部会产生与表面张力方向相反的斥力,带电液滴能够稳定的条件是其带电量不超过某一定值,超过该电量则斥力大于表面张力,液滴无法保持稳定状态,进而分裂为小液滴。这一数值称为 Rayleigh 极限^[24],相关文献已对 Rayleigh 极限与应变条件之间的对应关系进行了详细研究^[25],也通过实验证实了液滴荷电破裂的过程^[26]。Rayleigh 极限具体表达式为

$$Q_R = 2\pi(2\varepsilon\gamma\Phi_d^3)^{1/2}$$

式中, Q_R 为临界荷电量; ε 为周围介质的介电常数; γ 为液体表面张力; Φ_d 为球状液滴直径。

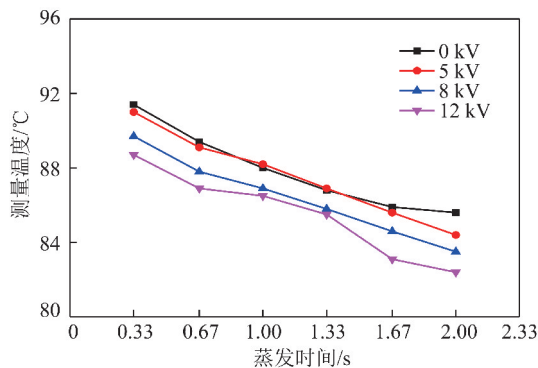


图3 荷电电压对沿程烟气温度分布的影响

Fig. 3 Effect of charged voltage on temperature distribution of flue gas along the flue gas flow

液滴荷电后,在蒸发过程中随着液滴粒径不断

减小,表面电荷密度不断增加,到达 Rayleigh 极限后,电荷间的库仑排斥力足以抵消液滴表面的张力,液滴破裂成为更多更细小的颗粒,更易于蒸发换热,而且在感应荷电范围内,荷电电压越高,液滴荷电量越大^[27-28],越有利于促进液滴的蒸发破碎,烟温降低的幅度也越大。因此,脱硫废水荷电后蒸发能够有效提高液滴干燥速度,从而改善脱硫废水常规雾化蒸发速度慢的问题。

另外,脱硫废水荷电蒸发过程中,雾化压力与喷水量对蒸发后烟气沿程温度分布的影响如图4,5所示。在脱硫废水荷电蒸发过程中,随着雾化压力升高,液滴的初始粒径进一步减小,有利于进一步促进液滴的蒸发,因此,对应相同测点经过相同蒸发时间后的烟气温度也越低,但过高的雾化压力增加了能耗与耗气量。而随着喷水量的增加,蒸发所需的热量不断增大,相同测点所对应的烟气温度则不断降低,因此,降低喷水量可提高蒸发速度。在后续应用过程中,应根据实际需要合理选择雾化压力与水量。

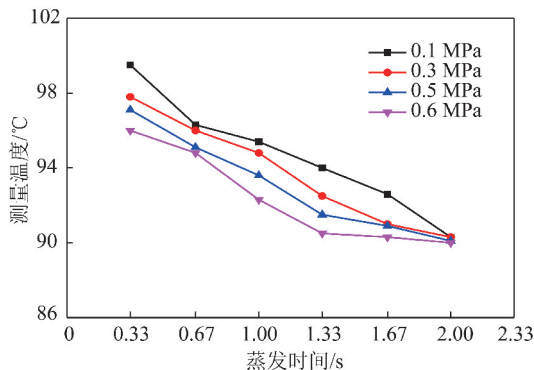


图4 雾化压力对沿程烟气温度分布的影响

Fig. 4 Effect of atomization pressure on temperature distribution of flue gas along the flue gas flow

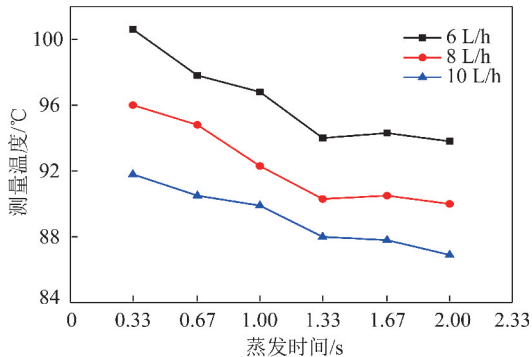


图5 喷水量对烟气沿程温度分布的影响

Fig. 5 Effect of spray water volume on temperature distribution of flue gas along the flue gas flow

2.2 脱硫废水荷电蒸发产物的粒径分析

脱硫废水中含有的大量盐离子,在蒸发后会以细颗粒的形式析出。为研究脱硫废水荷电蒸发干燥产

物自身的粒径分布特性,本试验采用 ELPI 测试分析了不同条件下脱硫废水荷电蒸发干燥产物的分级粒径浓度分布。

为验证脱硫废水荷电电压极性对干燥产物粒径分布的影响,分别采用正、负极性高压电源对液滴荷电进行试验,结果如图 6 所示。由图 6 可知,分别采用正、负极性高压电源对液滴荷电,液滴蒸发后各级粒子数分布基本一致,证明荷电电压极性对荷电液滴干燥产物的粒径分布基本没有影响,因此,后续实验只采用负高压电源使液滴荷电。

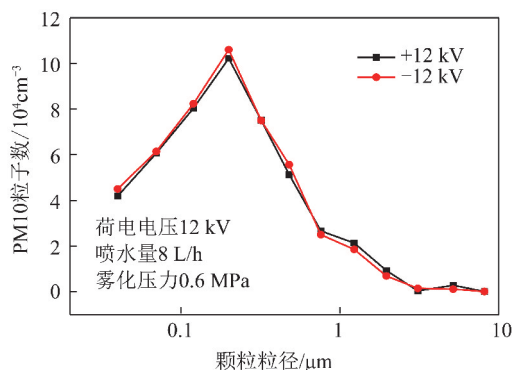


图 6 正、负极性电压对颗粒粒径分布的影响

Fig. 6 Effect of positive and negative voltage on particles size distribution

脱硫废水与清水分别蒸发后产物的粒径分布如图 7 所示,由图 7 可知,荷电电压对脱硫废水和清水蒸发产物的粒径分布影响规律基本相同,但由于废水中 CaCl_2 的存在,脱硫废水蒸发后测得的 PM10 粒子数明显多于清水。与不荷电蒸发相比,脱硫废水荷电蒸发后,分级粒径粒子数浓度分布规律一致,均呈单峰分布,峰值平均粒径在 $0.12 \sim 0.20 \mu\text{m}$ 。但荷电后 ELPI 测得的各级粒子数明显降低,且在荷电初期,各级粒子数变化更为明显,随着电压升高,各级粒子数减小趋势变平缓,如图 8 所示。

分析认为,脱硫废水荷电蒸发是一个复杂的过程。一方面,受 Rayleigh 极限作用的影响,荷电液滴会发生二次甚至多次破碎;另一方面,在破碎过程中液滴蒸发形成固态颗粒,其颗粒大小不再变化,电荷由液滴迁移到固体颗粒。

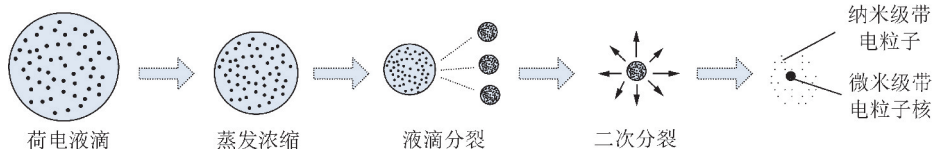


图 9 荷电液滴蒸发分裂干燥成核过程

Fig. 9 Nucleation process of charged droplets through evaporation breakup and dry

荷电条件下雾化压力对脱硫废水干燥产物粒径分布影响如图 10 所示,由图 10 可知,在荷电电压一

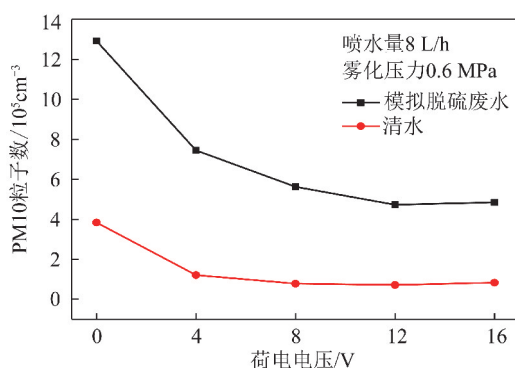


图 7 脱硫废水和清水蒸发后 PM10 粒子数

Fig. 7 Particle number of PM10 after desulfurization wastewater and water evaporation

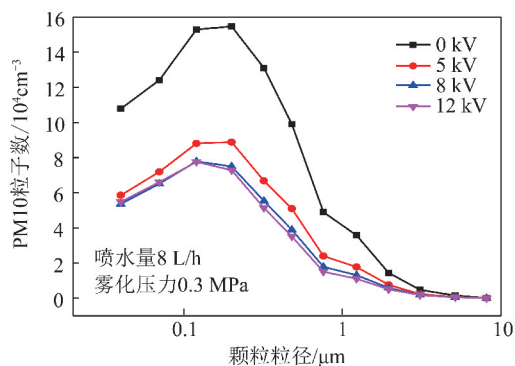


图 8 不同荷电电压对颗粒粒径分布的影响

Fig. 8 Effect of different charged voltage on particle size distribution

由于初始液滴的粒径与荷电量并不相同,一方面,部分小液滴或者荷电量比较高的液滴,在蒸发与 Rayleigh 极限导致的多次破碎共同作用下,最终成为低于仪器测量下限的纳米级的颗粒,从而导致脱硫废水荷电蒸发后整体的颗粒数目降低;另一方面,荷电液滴蒸发单次分裂过程中主液滴比分离出去的子液滴质量要高出 1 个数量级^[29-30],如图 9 所示,因此,如果部分液滴的荷电量较少,不足以支撑多次分裂,则这部分液滴蒸发后的粒径变化不大。这两方面的共同作用,使得脱硫废水荷电蒸发后随着荷电电压的升高,干燥后的颗粒数目不断降低,同时整体上还能保持相对一致的分布规律。

定的条件下,随着雾化压力的升高,干燥后各级粒子数均增加,这与荷电电压的影响规律不同。

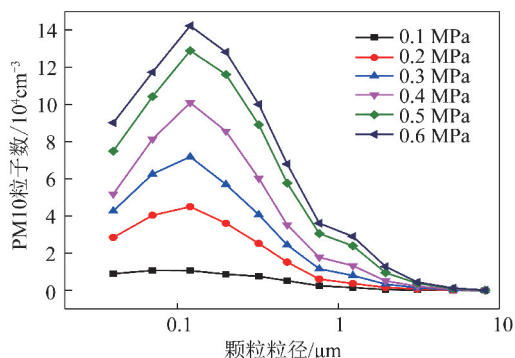


图 10 不同雾化压力对颗粒粒径分布的影响

Fig. 10 Effect of different atomization pressure on particle size distribution

分析认为,与液滴荷电后在蒸发过程中会发生二次破裂导致可检测到的细颗粒数降低机制不同,通过提高雾化压力所形成的细小液滴在蒸发过程中虽然可能由于受热不均匀而发生二次破裂,但与提高荷电电压相比,这种二次破裂的程度并不剧烈,因此,其雾化蒸发后细颗粒的数目主要与初始雾化液滴个数有关。

当荷电电压与雾化水量不变时,虽然随着雾化压力的升高,液滴的整体荷电量有所提高,但是随着雾化压力升高、液滴粒径减小^[15],初始液滴的个数也急剧增加,导致单个液滴的荷电量反而降低。由此,随着雾化压力增加,一方面初始液滴的个数增加能够增加干燥后细颗粒的个数,另一方面单个液滴荷电量的降低使得液滴荷电蒸发所导致的可检测细颗粒数降低的影响减弱,因此,在荷电条件下随着雾化压力的升高,从整体上呈现各级粒子数均增加的趋势。

2.3 脱硫废水荷电蒸发产物的荷电量分析

脱硫废水荷电后,在蒸发过程中随着液滴分裂与电荷迁移,部分电荷会由液滴迁移到干燥后的细颗粒,使其成为带电粒子核心,能够进一步促进烟气中细颗粒的团聚。因此脱硫废水蒸发产物自身所带电荷也是需要研究的重点。

不同荷电电压对蒸发后细颗粒荷电量的影响如图 11 所示,可以看出,与脱硫废水不荷电蒸发相比,当颗粒平均粒径大于 0.32 μm 时,荷电蒸发干燥后细颗粒所带的基本电荷数明显增加,且随着粒径的增加颗粒所带的基本电荷数明显增大,这充分证明了脱硫废水荷电蒸发过程中电荷迁移的有效性,同时也说明颗粒所带的电荷数与其比表面积有关,比表面积越大所需携带的电荷数越多。

而且,随着荷电电压的升高,单个粒子所带的基本电荷数也增加,这与蒸发前液滴荷电量随着荷电电压升高而升高的结论^[31]相一致,说明虽然带电液滴

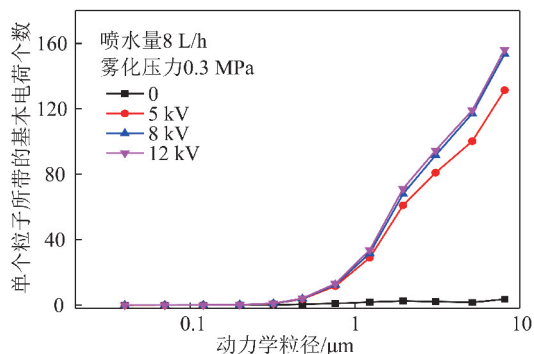


图 11 荷电电压对脱硫废水干燥颗粒的荷电量影响

Fig. 11 Effect of charged voltage on charge of particle from desulfurization wastewater drying

在蒸发分裂过程中,部分分裂出的带电液滴在由大到小最后变为纳米级的粒子的过程中可能携带了部分电荷脱离了主液滴,但是更多的电荷仍然留在主液滴并迁移到干燥后的细颗粒上。

然而,无论电荷留在干燥后的颗粒还是依附于纳米级的粒子分布在烟气中,均能通过后续与烟气中细颗粒物接触而使其强制荷电,对于烟气中细颗粒物的团聚与捕集均有积极的作用。

荷电条件下雾化压力对脱硫废水干燥颗粒所带基本电荷的影响如图 12 所示,荷电条件下随着雾化压力的增加,脱硫废水干燥后的颗粒所带基本电荷数减少,此结论也再次验证了荷电条件下不同雾化压力对颗粒粒径分布影响中的相关分析,即随着雾化压力升高液滴初始粒径减小、整体液滴的数量也急剧增加,导致单个液滴的荷电量反而降低。

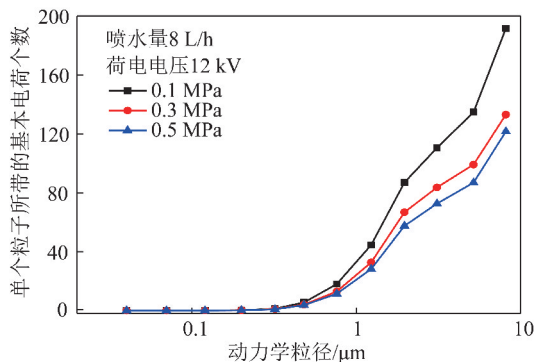


图 12 雾化压力对干燥颗粒平均电荷量的影响

Fig. 12 Effect of different atomization pressure on charge of particle from desulfurization wastewater drying

3 结 论

(1) 脱硫废水中由于 CaCl_2 等盐分的存在导致其蒸发速度变慢,提高荷电电压、增大雾化气压以及降低蒸发水量,均有利于提高脱硫废水的蒸发速度。

(2)与不荷电相比,脱硫废水荷电蒸发后的细颗粒浓度仍呈单峰分布,峰值平均粒径在 $0.12 \sim 0.20 \mu\text{m}$,但脱硫废水中由于盐分的存在,干燥后的粒子数明显多于清水。受荷电后液滴蒸发破碎机制与 ELPI 测试下限的影响,提高荷电电压,测量范围内的粒子数减少,而提高雾化压力,测量范围内的粒子数增加。试验同时证明了高压电源的极性对于脱硫废水干燥产物的粒径分布没有影响。

(3)脱硫废水荷电蒸发干燥后细颗粒的基本电荷数明显增加,证明了液滴所带的电荷能够迁移到干燥后的细颗粒,且颗粒粒径越大所带的电荷量越多;随着荷电电压的升高,单个粒子所带的基本电荷数增加,但提高雾化压力后单个粒子所带的基本电荷数减少。

参考文献 (References):

- [1] HEENA Dhawan, DURLUBH Kumar Sharma. Advances in the chemical leaching (inorgano-leaching), bio-leaching and desulphurization of coals [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2019, 6(2): 169-183.
- [2] CORDOBA P. Status of flue gas desulfurization (FGD) system from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs [J]. Fuel, 2015, 144: 274-286.
- [3] SUN Z, WANG S, ZHOU Q, et al. Experimental study on desulfurization efficiency and gas-liquid mass transfer in a new liquid-screen desulfurization system [J]. Applied Energy, 2010, 87(5): 1505-1512.
- [4] 马双枕, 别璇, 孙尧, 等. 湿法脱硫烟气回收技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 64-70.
MA Shuangchen, BIE Xuan, SUN Yao, et al. Research progress on flue gas water recovery technology in wet FGD [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 64-70.
- [5] CUI L, LI G P, LI Y Z, et al. Electrolysis-electrodialysis process for removing chloride ion in wet flue gas desulfurization wastewater: Influencing factors and energy consumption analysis [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016, 123: 240-247.
- [6] 马双枕, 于伟静, 贾绍广, 等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术研究与应用进展 [J]. 化工进展, 2016, 35(1): 255-262.
MA Shuangchen, YU Weijing, JIA Shaoguang, et al. Research and application progresses of flue gas desulfurization (FGD) wastewater treatment technologies in coal-fired plants [J]. Chemical Industry Engineering Progress, 2016, 35(1): 255-262.
- [7] 马双枕, 刘亚争, 马岚, 等. 焙烧镁铝水滑石吸附脱硫废水中高浓度 Cl^- 的基础研究 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 611-617.
MA Shuangchen, LIU Yazheng, MA Lan, et al. Adsorption and ion-exchange behavior of calcined Mg-Al layered double hydroxide for high concentration Cl^- from flue gas desulfurization wastewater [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 611-617.
- [8] ZHENG C H, ZHENG H, YANG Z D, et al. Experimental study on the evaporation and chlorine migration of desulfurization wastewater in flue gas [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(5): 4791-4800.
- [9] 王祖林, 张翼, 苏国萍, 等. 燃煤电站脱硫废水零排放烟道喷雾蒸发特性的试验研究 [J]. 动力工程学报, 2018, 38(4): 291-297.
WANG Zulin, ZHANG Yi, SU Guoping, et al. Spray evaporation characteristics of desulfurization wastewater with zero discharge in coal-fired power plant [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(4): 291-297.
- [10] MA S C, CHAI J, CHEN G D, et al. Research on desulfurization wastewater evaporation: Present and future perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1143-1151.
- [11] 胡斌, 王晓焰, 白璐, 等. 脱硫废水蒸发增强电除尘脱除 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_3 实验研究 [J]. 燃料化学学报, 2017, 45(7): 889-896.
HU Bin, WANG Xiaobei, BAI Lu, et al. Experimental study on strengthening the electrostatic precipitation removal of $\text{PM}_{2.5}$ and SO_3 by desulfurization wastewater evaporation [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2017, 45(7): 889-896.
- [12] 刘勇, 赵汶, 刘瑞, 等. 化学团聚促进电除尘脱除 $\text{PM}_{2.5}$ 的实验研究 [J]. 化工学报, 2014, 65(9): 3609-3616.
LIU Yong, ZHAO Wen, LIU Rui, et al. Improving removal of $\text{PM}_{2.5}$ by electrostatic precipitator with chemical agglomeration [J]. CIESC Journal, 2014, 65(9): 3609-3616.
- [13] 杨建国, 耿梓文, 袁伟中, 等. 燃煤烟气脱氯实现脱硫废水零排放技术及其影响 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2657-2664.
YANG Jianguo, GENG Ziwen, YUAN Weizhong, et al. The technology of coal-fired flue gas dichlorination for realizing zero-discharge of desulfurization wastewater and its influences on boiler [J]. Proceedings of CSEE, 2018, 38(9): 2657-2664.
- [14] 张子敬, 汪建文, 高艺, 等. 燃煤电厂脱硫废水烟气蒸发特性场模拟 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 678-683.
ZHANG Zijing, WANG Jianwen, GAO Yi, et al. Flow field simulation of smoke and gas evaporation characteristics of desulfurization wastewater in coal-fired power plant [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 678-683.
- [15] 崔琳, 李林, 孟凡腾, 等. 感应荷电过程中液滴雾化与荷电特性相互影响 [J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2536-2541.
CUI Lin, LI Lin, MENG Fanteng, et al. Interrelationship of droplet atomization and charged characteristic in the induction charging process [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2536-2541.
- [16] JAWOREK A, KRUPA A, SOBCZYK A T, et al. Submicron particles removal by charged sprays. Fundamentals [J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(3): 345-350.
- [17] 王军锋, 顾维锴, 王晓英, 等. 感应荷电喷雾荷电性能与喷雾特性试验研究 [J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 504-509.
WANG Junfeng, GU Weikai, WANG Xiaoying, et al. Experimental study on charging performance and spray characteristic of induction charged spray [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 504-509.
- [18] 陈志刚, 周金木, 吴春筠, 等. 高压脉冲负电晕荷电喷雾试验研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(2): 128-131.

- CHEN Zhigang, ZHOU Jinmu, WU Chundu, et al. Experimental study on electrostatic spraying of negative high-voltage pulse corona charge[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(2): 128-131.
- [19] GAUNT L F, HUGHES J F, HARRISON N M. Removal of domestic airborne dust particles by naturally charged liquid sprays[J]. Journal of Electrostatics, 2003, 58(3): 159-169.
- [20] BALACHANDRAN W, JAWOREK A, KRUPA A, et al. Efficiency of smoke removal by charged water droplets[J]. Journal of Electrostatics, 2003, 58(3): 209-220.
- [21] JAWOREK A, BALACHANDRAN W, LACKOWSKI M, et al. Multi-nozzle electrospray system for gas cleaning processes[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(3): 194-202.
- [22] MARJAMÄKI M, KESKINEN J, CHEN D R, et al. Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (elpi)[J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31(2): 249-261.
- [23] 龙正伟, 姚强, 黄斌, 等. 用 ELPI 测量颗粒物的分级荷电量[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 176-178.
- LONG Zhengwei, YAO Qiang, HUANG Bin, et al. Measuring the graded charge of particle by ELPI[J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 2006, 27(2): 176-178.
- [24] RAYLEIGH L. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity [J]. Philosophical Magazine, 1882, 14(87): 184-186.
- [25] 于水, 李理光, 胡宗杰, 等. 静电喷雾液滴破碎的理论边界条件[J]. 内燃机学报, 2005, 23(3): 239-243.
- YU Shui, LI Liguang, HU Zongjie, et al. Study on theoretical boundary of charged droplet breakup in electrospray[J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(3): 239-243.
- [26] 王贞涛, 岑旗钢, 宋晓宁, 等. 双流体荷电雾化的 PDA 试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 80-84.
- WANG Zhentao, CEN Qigang, SONG Xiaoning, et al. Experiment of twin-fluid charged spray by PDA [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 80-84.
- [27] 崔琳, 李林, 孟凡腾, 等. 雾滴感应荷电的影响因素及相关性分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1390-1395.
- CUI Lin, LI Lin, MENG Fanteng, et al. Influence factors of atomized droplets charging by induction and the correlation with the charging effect [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 37(8): 1390-1395.
- [28] 王军锋, 张仕超, 左子文. 感应荷电过程中喷雾荷电特性影响规律实验研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 514-519.
- WANG Junfeng, ZHANG Shichao, ZUO Ziwen, et al. Experimental study of influence rules on spray charged characteristic in the induction charging process [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 514-519.
- [29] ADHIKARI S, FERNANDO S, NOVOTNY M. Nanoparticles production from glycerin via electrospray and size measurement techniques[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 1269-1272.
- [30] ANDRIES P Bruins. Mechanistic aspects of electrospray ionization [J]. Journal of Chromatography A, 1998, 794: 345-357.
- [31] 崔海蓉, 杨超珍, 余盛兵, 等. 电极参数影响射流喷雾荷电量的试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4042-4047.
- CUI Hairong, YANG Chaozhen, YU Shengbing, et al. Experimental study of electrode parameters' effect on jet spray charge[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4042-4047.