



Effect of coordination of acoustic wave and chemical agglomeration on fine dust agglomeration in converter

Yuqing ZHANG¹, Yimin YIN^{2*}, Haiying LI², Qiudong HU²

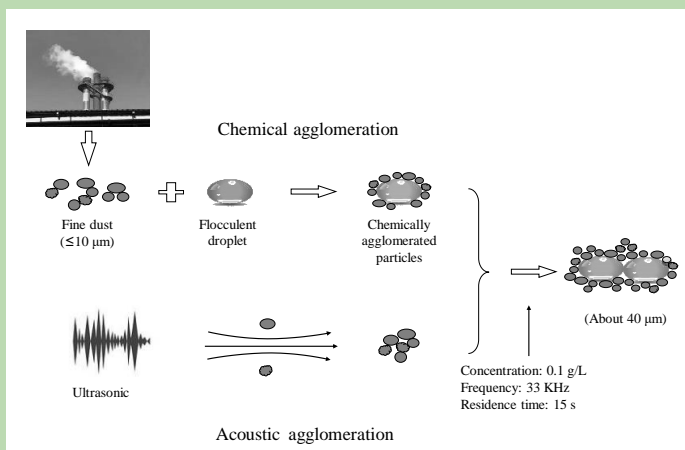
1. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 10044, Sweden

2. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China

Abstract: At present, air pollution caused by heavy industrial products such as iron and steel, thermal power generation and cement is still very serious in China. The main reason is the low dust removal effect of PM_{2.5} and PM₁₀ particles. To solve the problem of difficult treatment of fine dust in converter flue gas, the collaborative treatment method based on acoustic waves and chemical agglomeration was used to pretreat converter flue gas dust in an evaporative cooler to improve the dust removal efficiency of fine dust. Single-factor experiment and orthogonal experiment were used to

study the agglomeration effect of fine dust under different factors, such as the type of flocculants [acrylamide (PAM), sodium carboxymethyl cellulose (CMC) and xanthan gum (XTG)], flocculant concentration, acoustic frequency and acoustic field time. The results of the single-factor experiment showed that the agglomeration effect of the three flocculants was PAM>CMC>XTG from large to small, taking the increase of the peak particle size of the fine dust as the evaluation standard. The agglomerating effect was the best when the concentration of agglomerating agent was 0.1 g/L, the effect was obvious when the acoustic frequency was 33 kHz, and the effect was the best when the acoustic residence time was 15 s. The synergistic effect of the acoustic wave and chemical agglomeration was better than that of chemical agglomeration and acoustic wave alone. The results of the orthogonal experiment showed that when the concentration was 0.1 g/L, the acoustic frequency was 33 kHz, and the acoustic residence time was 15 s, the agglomeration effect was the most significant. The peak particle size increased from 3.311 μm to 43.59 μm , and the dust removal efficiency of the corresponding electrostatic precipitator reached 97%. From the experimental comparison of the coordination mechanism and the single agglomeration mechanism, the synergetic mechanism combined the advantages of a single agglomeration mechanism such as chemistry and acoustic waves, and provided a feasible basis for multi-mechanism dust removal in the industry. The results can provide reliable basic data for improving the removal of fine dust in the flue gas of iron and steel production, and lay a foundation for improving the removal efficiency of fine dust in the industrial flue gas.

Key words: fine dust; chemical agglomeration; acoustic wave; coordination; orthogonal experiment



收稿: 2020-10-20, 修回: 2021-01-12, 网络发表: 2021-02-24; Received: 2020-10-20, Revised: 2021-01-12, Published online: 2021-02-24

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(编号: E2019209522); 唐山市人才资助项目(编号: A201903006)

作者简介: 张宇擎(1997-), 男, 河北省唐山市人, 硕士研究生, 能源与动力工程专业, E-mail: yuqingzhang@kth.se; 尹贻民, 通讯联系人, E-mail: 2683483674@qq.com.

引用格式: 张宇擎, 尹贻民, 李海英, 等. 声波与化学团聚协同作用对转炉微细粉尘团聚的影响. 过程工程学报, 2021, 21(11): 1323-1329.
Zhang Y Q, Yin Y M, Li H Y, et al. Effect of coordination of acoustic wave and chemical agglomeration on fine dust agglomeration in converter (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(11): 1323-1329, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220343.

声波与化学团聚协同作用对转炉微细粉尘团聚的影响

张宇擎¹, 尹贻民^{2*}, 李海英², 胡秋冬²

1. 瑞典皇家理工学院, 瑞典 斯德哥尔摩 10044

2. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210

摘要: 针对转炉烟气中微细粉尘的难处理问题, 采用声波与化学团聚协同处理方法, 在蒸发冷却器内对转炉烟气粉尘进行预处理, 以提高微细粉尘的除尘效率。采用单因素实验和正交实验方法研究了絮凝剂的种类[丙烯酰胺(PAM)、羧甲基纤维素钠(CMC)和黄原胶(XTG)]、絮凝剂浓度、声波频率、声波驻场时间等不同影响因素下的微细粉尘的团聚效果。单因素实验结果表明: 三种絮凝剂的团聚效果由大到小依次为PAM>CMC>XTG, 絮凝剂浓度为0.1 g/L时团聚效果最好, 声波频率为33 KHz时作用效果较为显著, 声波驻场停留时间为15 s时效果最佳; 声波与化学团聚协同作用效果好于化学团聚和声波团聚单独作用效果。通过正交实验得出, 当浓度为0.1 g/L、声波频率33 KHz、声波驻场停留时间15 s的条件下, 团聚效果最显著, 峰值粒径由原始的3.311 μm 提升至43.59 μm , 对应的静电除尘器的除尘效率可达到97%。研究成果可为提高钢铁工业烟气中微细粉尘的去除工艺开发提供可靠的基础数据, 为工业烟气中微细粉尘的去除效率提高奠定了基础。

关键词: 微细粉尘; 化学团聚; 声波; 协同; 正交实验

中图分类号: TB14

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)11-1323-07

1 前言

当前, 由于钢铁、火力发电、水泥等重工业生产引发的大气环境污染问题在我国仍然很严重, 其中以PM_{2.5}和PM₁₀为首要污染物的天数占重度及以上污染天数的97.2%^[1]。传统静电除尘器出口处, PM₁₀和PM_{2.5}粒级的微细粉尘占排灰百分比达92.47%和35.56%, 可见除尘设备对微细粉尘的去除率不高^[2]。针对使用电除尘器处理烟尘中PM₁₀级别的微细粉的脱除, 当前主要有两个途径: 一是研发新式除尘器(如低温电除尘器、湿式静电除尘器), 但其投资较高; 二是开发除尘器前设置预处理技术, 使微细粉尘在物理、化学的作用下团聚凝并形成较大颗粒^[3]。

粉尘预处理技术按作用机理可分为化学、声波、磁团聚、热团聚、光团聚、湍流团聚、电团聚、蒸汽相变等^[4]。Liu等^[5]分析了絮凝剂的种类、浓度、烟气温度、凝聚液pH值、雾滴直径等操作参数对细颗粒去除率的影响。结果表明, 借助润湿、液桥力和吸附架桥等外力因素, 颗粒平均粒径可增大4倍以上, 电除尘器出口PM_{2.5}浓度可降低40%。康豫博等^[6]以10~487 nm的微细颗粒为研究对象, 探究了声波条件下细颗粒的最佳参数, 在声波频率20 kHz、团聚时间18 s时, 细颗粒的去除效率最高可达82.4%。除了单一机制下预处理技术外还有各种机制复合的团聚技术, 张光学等^[7]研究了喷雾联合声波团聚, 结果表明, 添加喷雾后声波团聚效率提高25%~

40%, 其认为喷雾液滴在声波团聚中作为种子颗粒可使颗粒有效碰撞系数提高。Yan等^[8]建立了声团聚与蒸汽凝结相结合的实验装置, 结果表明, 声团聚使微细粉尘的去除率由10%~23%提高到53%~80%。Sun等^[9]研究了化学团聚、湍流团聚二者互相耦合的效果, 各机制间起正向促进作用, 除尘效果优于单一机制。吴瑞鹏等^[10]对化学联合声波的正交实验和单因素进行了分析, 认为实验因素中对团聚效果的顺序为团聚剂浓度>烟气浓度>声压级>频率。赫明春^[11]对比了声波和脉冲联合作用对颗粒物的团聚长大效果, 得出联合场优于单场作用; 其次研究了化学场、声波场、电场三种联合场与除尘器的结合, 其除尘效果优于两种联合场与除尘器结合。

为了提高微细粉尘的团聚效率, 各种处理技术的协同作用越来越受到关注^[12]。本研究基于声波与化学团聚协同处理方法, 考察了不同影响因素对化学团聚、声波及二者协同作用场下转炉烟气中微细粉尘的团聚效果。研究成果可用于提高钢铁、电力、水泥等行业工业烟气中微细粉尘的去除效果。

2 实验

2.1 实验材料及分析仪器

本实验所用粉尘选自某大型钢铁公司静电除尘器出口粉尘。原始粉尘粒度采用LS-P0P激光粒度分析仪(欧美克仪器公司)进行分析, 团聚后的样品由Leica DM6M型光学显微镜(徕卡仪器有限公司)对玻璃纤维

滤膜采集到的实验样品粉尘进行粒径、形貌等观察与统计,统计结果由仪器自带软件计算得出。

为了研究声波与化学团聚协同处理微细粉尘的效果,研究中以峰值粒径变化情况作为团聚效果评价参考因素。对实验初始样品进行了预筛分处理,采用 170 目 (90 μm) 筛子进行了筛分,取筛下物料作为实验原料,进行激光粒度分析,粒径分布区间 0~90 μm ,粒度分布曲线如图 1 所示,峰值粒径为 3.311 μm ,主要集中在 10 μm 以下的微细粉尘体积分数占 54.21%。

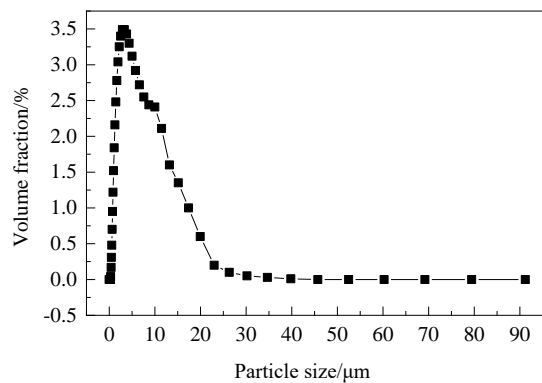


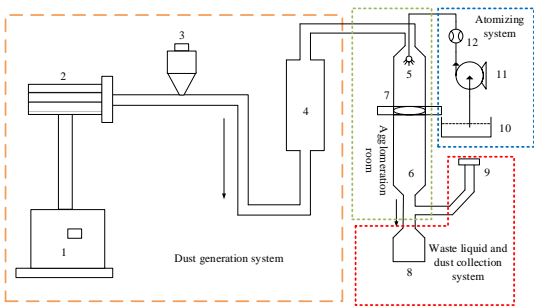
图 1 实验初始粉尘体积分数随粒度分布曲线
Fig.1 Distribution curve of original dust volume fraction with particle size

2.2 实验装置与设备

实验装置由四部分构成,即粉尘发生系统、团聚室、雾化系统、废液及粉尘收集系统,如图 2 所示。粉尘发生系统由空气预热箱、鼓风机、给粉机、预混室构成;团聚

室由团聚腔体、声波振子构成;雾化系统由溶液池、流量计、给水泵构成;废液及粉尘收集系统由废液池、玻璃纤维膜构成。所用设备及其参数见表 1。

团聚实验流程:首先打开空气加热箱为整个系统提供热量,模拟实际中烟温状态,团聚室温度维持在 120℃ 左右,给粉机贮存的粉尘在鼓风机的作用下随热空气一并送入缓冲罐,缓冲罐为热空气与工业粉尘提供充分混合的空间,烟尘将以 1.5 m/s 的速度进入团聚室。粉尘进入团聚室前打开给水泵,将团聚液引入团聚室顶端的雾化喷嘴,喷出絮凝剂溶液,在絮凝剂的作用下粉尘发生化学团聚,位于排气末端的玻璃纤维滤膜收集粉尘待观测样本;关闭给水泵打开声波发生装置,研究声波对粉尘的团聚作用,玻璃纤维滤膜收集经声波团聚后的粉尘待观测样本,该部分为声波团聚实验研究



1. Air heating box 2. Blower 3. Powder feeder 4. Buffer tank
5. Nozzle 6. Reunion room 7. Sonic vibrator
8. Waste liquid recovery tank 9. Glass fiber membrane
10. Flocculant solution 11. Feed water pump 12. Flowmeter

图 2 实验平台
Fig.2 Experiment platform

表 1 实验设备运行参数
Table 1 Operation parameters of experimental equipment

Equipment name	Model	Parameter
Blower	-	Rated voltage: 12 V, air output: 3.2 m ³ /min, stepless speed regulation
Air heating box	-	Heating temperature range: 0~1000℃
Automatic powder feeder	GZVF	Feeding rate: 1~2 g/s
Micro direct current diaphragm water pump	PLD-1206	Rated voltage: 12 V, rated power: 45 W, maximum pressure: 1 MPa, maximum flow: 4 L/min
Atomizing nozzle	6E36911C	Vortex design, water mist particle size≤70 μm

3 结果与讨论

3.1 化学团聚实验

3.1.1 絮凝剂种类对团聚效果的影响

实验分别选取了高分子絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM)、羧甲基纤维素钠(CMC)和黄原胶(XTG)(浓度均为 0.1 g/L)三种絮凝剂,研究了其对微细粉尘团聚效果的影响。

三种絮凝剂作用下,粉尘颗粒相较于原始粒径变化如图 3 所示。由图可知,添加絮凝剂后原始粉尘粒径均大幅增大,PAM, CMC, XTG 三种絮凝剂分别作用下峰值粒径由原始 3.311 μm 分别增至 37.587, 30.4748 和 26.4731 μm ,峰值粒径向右偏移程度越大颗粒团聚的效果越明显,根据峰值粒径偏移程度,效果依次为 PAM>CMC>XTG,其中 PAM 作用效果最佳。有机絮凝剂雾化后与

粉尘碰撞黏接,粉尘之间的絮凝剂起到桥连作用,其产生的液桥力在粉尘团聚过程中起主导作用;由于相同浓度下XTG的黏度更大^[13],该雾化喷嘴产生的雾化液滴的粒径过大或难以达到雾化效果,即XTG产生的雾化液滴的数目相较PAM和CMC显著减少,致使粉尘与液滴接触碰撞概率大幅降低,影响团聚效果。

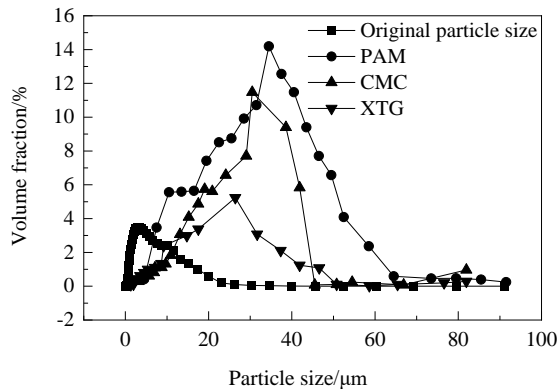


图3 絮凝剂种类对微细粉尘团聚效果的影响
Fig.3 Effect of flocculant species on the agglomeration effect of fine particles

3.1.2 絮凝剂浓度对团聚效果的影响

基于上述实验结果,本实验选定团聚效果较优的PAM作为絮凝剂,研究絮凝剂浓度(0.05, 0.1, 0.15 g/L)对微细粉尘颗粒团聚效果的影响,结果如图4所示。由图可知,粉尘经三种浓度的PAM作用后,浓度为0.1g/L时峰值粒径增大幅度较显著,峰值粒径分布在37.587 μm。浓度过低(0.05 g/L)时由于絮凝剂中起团聚作用的分子链(极性基团)显著减少,单位体积内分子链(基团)与粉尘接触机会锐减,从而削弱团聚效果。浓度过高(0.15 g/L)也会抑制粉尘团聚。随浓度增加,絮凝液黏性越强,喷嘴失去雾化作用使絮凝液成连续态流下或雾滴粒径很大,减小了团聚室内粉尘与雾滴的接触面积。因此,絮凝剂浓度为0.1 g/L可获得较优的团聚效果。

3.2 声波团聚实验

3.2.1 声波频率对团聚效果的影响

实验中依次对同一声压级的20, 28, 33和40 kHz四种频率的声波进行单变量声波团聚实验,声波停留时间为10 s,结果如图5所示。由图可知,声波频率可大幅度促进微细粉尘的团聚,团聚效果与声波频率非线性关系,声波频率为33 KHz时作用效果较显著。Markauskas等^[14]研究了具有不同声波频率的二维多分散粒子系统,确定了团聚的主要机制是声尾流效应。根据Shi等^[15]的研究发现,不同频率的声波作用下,声压的空间分布有明显变化,频率越高,声场的零压等值面越密集、越窄,

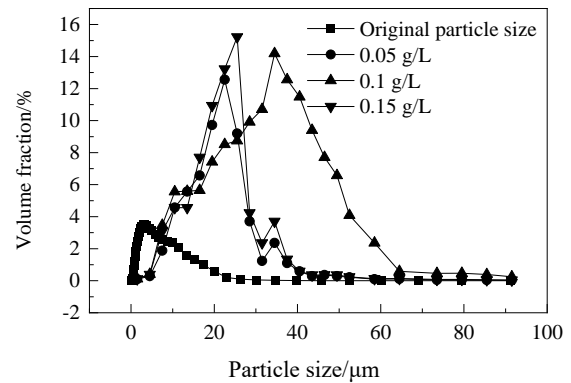


图4 絮凝剂浓度对微细粉尘团聚效果的影响
Fig.4 Effect of flocculant concentration on the agglomeration effect of fine particles

团聚体易于沿着相对较低的压力面或声波节点移动,因此团聚体在相对较高声波频率的作用下轨迹更密集。所选四个频率段内33 KHz属于相对较高的频率,在该频率下,团聚体轨迹更密集,使粉尘颗粒物碰撞团聚的概率增加;Mednikov^[16]从夹带系数角度认为声波频率过低,气体中的粉尘夹带系数接近于1,导致粉尘振幅相同,颗粒间保持相对静止;声波频率过高,几乎所有粉尘颗粒物夹带系数接近0,粉尘颗粒物不受气体振动的影响而保持静止,碰撞几率大幅降低不利于团聚的发生。

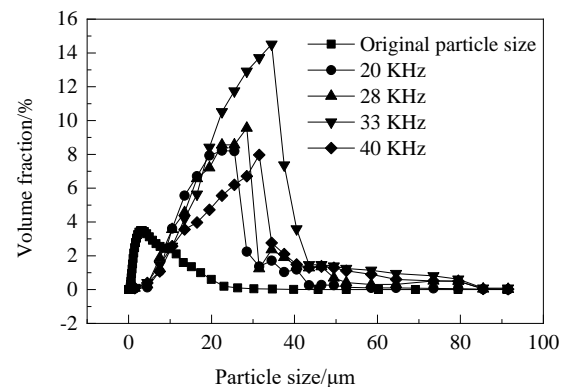


图5 声场频率对微细粉尘团聚效果的影响
Fig.5 Effect of sound field frequency on the agglomeration effect of fine particles

3.2.2 声波驻场时间对团聚效果的影响

实验选取声波频率33 KHz,设置声波停留时间为5, 10, 15, 20 s,考察声波作用时间对团聚效果的影响,实验结果如图6所示。根据峰值粒径右移幅度,声波驻场作用时间15 s时效果最佳,5 s作用效果最差。声波对粉尘的团聚作用体现在一段时间范围内,超出最佳时间后声波对粉尘的团聚起到破坏作用,导致较大的团聚体重新破碎,峰值颗粒体积分数占比减少。声波作用15 s

之前,粉尘峰值粒径右移幅度与作用时间正相关,各状态下的峰值粒径对应的体积分数也随声波作用时间的增加呈上升趋势。因此声波作用时间 15 s,粉尘处于声波碰撞团聚的生长期,15~20 s 之间存在团聚生长的拐点时间,此后时刻粉尘团聚效果不明显,较大的粉尘团聚体破碎频率大于团聚频率,声波作用过长,可使原本团聚的不牢固粉尘团聚体破碎,致使其峰值粒径体积分数下降,从图中看出声波停留 20 s,其峰值粒径也会向右偏移但峰值粒径对应的体积分数远不及 15 s 的。

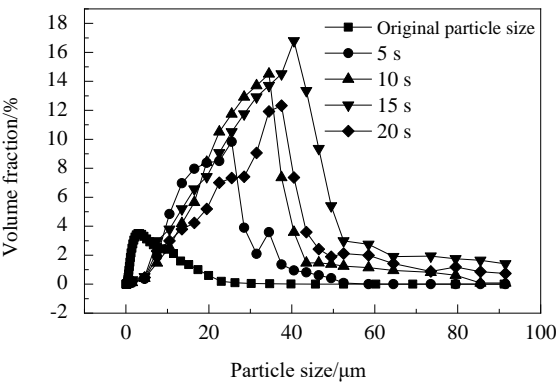


图6 停留时间对微细粉尘团聚效果的影响
Fig.6 Effect of residence time on the agglomeration effect of fine particles

3.3 多因素正交实验

为了研究复合团聚较单一团聚的优势,采用正交实验法找出不同工况协同作用时的最优组合,以每次团聚实验后峰值粒径对应下的除尘效率作为正交实验结果的评价指标,设计 L9(3⁴) 正交实验。本研究团队多鹏^[17]模拟了静电除尘器除尘效率与粒径的关系,5~45 μm 内除尘效率随粒径增大而增大,粒径超过 45 μm 后除尘效率略微下降。粉尘粒径大小与静电除尘器除尘效率存在如图 7^[16]所示的关系。

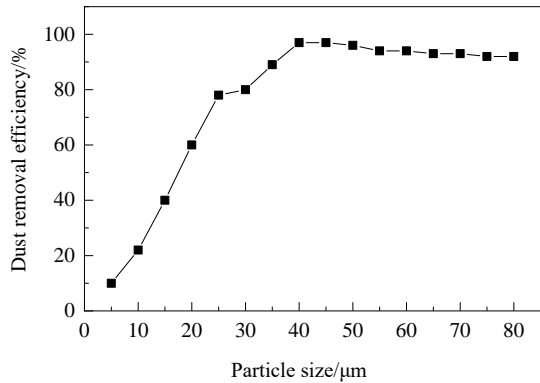


图7 颗粒物粒径对除尘效率的影响^[16]
Fig.7 Effect of dust particle size on dust removal efficiency^[16]

设定絮凝剂种类(A)、絮凝剂浓度(B)、声波频率(C)和粉尘在声场中的停留时间(D)为考察因素,各项因素水平列表如表 2 所示。设置实验时温度为室温(25℃)不变,在 4 因素 3 水平下得到 9 种组合的团聚粉尘的峰值粒径,参照图 7 得到其对应的除尘效率,该除尘效率值即为评价价值,除尘效率越高代表因素组合效果越好,实验组合及结果如表 3 所示。

由表 3 可知,絮凝剂种类(A)、絮凝剂浓度(B)、声波频率(C)和粉尘在声场中的停留时间(D)等因素对应下的极差值分别为 13.3, 20.3, 6.4, 29.3。极差 R 分析为直观分析法,极差越大说明该因素对实验结果影响越大^[18]。对除尘效率影响的程度大小依次为:粉尘在声场中的停留时间、絮凝剂浓度、絮凝剂种类和声波频率。各因素最优组合采用直观分析法为 D₂B₂A₁C₂, 即选取 0.1 g/L 的 PAM 以喷雾的方式在驻场声波频率为 33 KHz 的条件下,向团聚室内的微细粉尘喷洒,停留时间为 15 s,此工况下峰值粒径达到 43.59 μm,该粒径下静电除尘器除尘效率达到 97%。

表2 转炉粉尘除尘效率正交实验				
Table 2 Orthogonal experiment on dust removal efficiency of converter dust				
Level	Type of flocculants, A	Flocculant concentration/(g/L), B	Acoustic frequency/KHz, C	Acoustic field time/s, D
1	PAM	0.05	28	10
2	CMC	0.1	33	15
3	XTG	0.15	40	20

表3 正交实验分配与结果						
Table 3 Orthogonal experiment assignment and results						
Test number	Factor				Peak particle size/μm	Dust removal efficiency/%
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	30.94	81.2
2	1	2	2	2	43.59	97
3	1	3	3	3	33.02	82.7
4	2	1	2	3	32.85	82
5	2	2	3	1	31.01	81.6
6	2	3	1	2	37.01	85
7	3	1	3	2	30.98	81.9
8	3	2	1	3	35.01	83
9	3	3	2	1	23.95	73.6
K ₁	261.8	245.1	249.2	236.4		
K ₂	248.6	261.6	252.6	265.7		
K ₃	248.5	241.3	246.2	247.7		
k ₁	87.27	81.7	83.1	78.8		
k ₂	82.9	87.2	84.2	88.57		
k ₃	82.3	80.4	82.1	82.6		
R	13.3	20.3	6.4	29.3		

根据正交实验结果,化学絮凝剂选用0.1 g/L的PAM、声波频率为33 KHz、声波停留时间为15 s,共同作用于粉尘,单一场与复合场团聚效果如图8所示。峰值粒径偏移幅度越大说明粉尘主体受团聚机制下作用越强,团聚效果越显著,复合场、声波场、化学场对应的峰值粒径分别为43.59, 34.50, 39.85 μm ,复合场粉尘团聚的作用显然强于单一场,复合团聚比单一化学、声波条件更有利于提高除尘效率。这是因为不同团聚机制之间相互补充,正向促进。吴瑞鹏^[19]提出的“双模态”团聚作用和“团聚正反馈”作用,认为化学絮凝剂添加增大团聚室内气体介质黏性系数,促进声波团聚;另外,絮凝剂液滴和固体颗粒物之间的碰撞次数随声波的携带作用会增多,提高化学团聚效率。

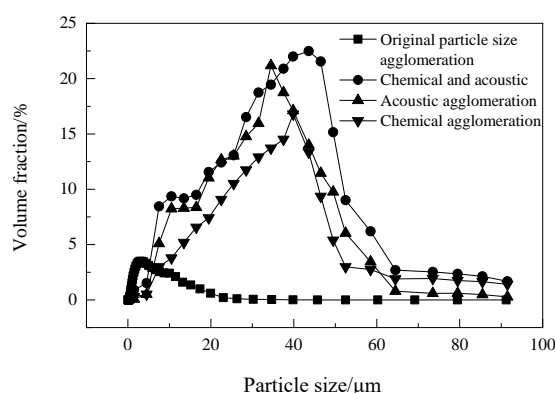


图8 不同机制对微细粉尘团聚效果对比

Fig.8 Comparison of the effect of different mechanisms on the agglomeration of fine particles

4 结论

研究基于化学团聚与声波团聚协同处理方法,对转炉烟气处理系统中微细粉尘团聚的影响因素进行了单一变量实验和正交实验,探索了絮凝剂的种类[丙稀酰胺(PAM)、羧甲基纤维素钠(CMC)和黄原胶(XTG)]、絮凝剂浓度、声波频率、声波驻场时间等不同条件下的团聚效果,得到以下结论:

(1) 从峰值粒径变化幅度来看,化学团聚实验中选用的三种絮凝剂团聚效果 PAM>CMC>XTG。PAM 团聚效果最佳浓度为0.1 g/L;声波频率为33 KHz时作用效果较为显著、声波驻场停留时间15 s时效果最佳。

(2) 实验证明基于声波和化学团聚的复合团聚场对微细粉尘团聚的能力比单一的化学团聚或声波团聚效果更好。

(3) 通过正交实验得出,当絮凝剂浓度为0.1 g/L、声波频率33 KHz、声波驻场停留时间15 s的条件下,团聚效果最显著,峰值粒径由原始的3.311 μm 提升至43.59

μm ,对应的静电除尘器的除尘效率可达到97%。

参考文献

- [1] 2018年《中国生态环境状况公报》(摘录一) [J]. 环境保护, 2019, 47(11): 47-53.
China ecological environment status bulletin in 2018 (Excerpt 1) [J]. Environmental Protection, 2019, 47(11): 47-53.
- [2] 代旭东, 徐晓亮, 缪明烽. 电厂PM2.5排放现状与控制技术 [J]. 能源环境保护, 2011, 25(6): 1-4.
Dai X D, Xu X L, Miao M F. Emission status and control technology of ultra fine particles in coal-fired power plants [J]. Energy Environmental Protection, 2011, 25(6): 1-4.
- [3] 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): 1317-1325.
Sun Z K, Zhang X D, Yang L J, et al. Promoting the agglomeration and removal of coal-fired fine particles by coupling of chemical and turbulent agglomeration [J]. CIESC Journal, 2020, 71(3): 1317-1325.
- [4] 李海英, 张春奇, 刘东. 细颗粒物PM2.5团聚除尘技术的研究进展 [J]. 环境工程, 2018, (9): 93-98.
Li H Y, Zhang C Q, Liu D. Research process of PM2.5 agglomeration and removal technology [J]. Environmental Engineering, 2018, (9): 93-98.
- [5] 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.
- [6] 康豫博, 朱益佳, 蔺锋, 等. 超细颗粒物超声波团聚的影响因素 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(4): 551-556.
Kang Y B, Zhu Y J, Lin F, et al. Influencing factors of acoustic agglomeration of ultrafine particles [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(4): 551-556.
- [7] 张光学, 朱颖杰, 周涛涛, 等. 喷雾对促进细颗粒物声波团聚的影响 [J]. 化工学报, 2017, 68(3): 864-869.
Zhang G X, Zhu Y J, Zhou T T, et al. Improve acoustic agglomeration of fine particles by droplet spray [J]. CIESC Journal, 2017, 68(3): 864-869.
- [8] Yan J P, Chen L Q, Yang L J. Combined effect of acoustic agglomeration and vapor condensation on fine particles removal [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 290: 319-327.
- [9] Sun Z K, Yang L J, Shen A, et al. Combined effect of chemical and turbulent agglomeration on improving the removal of fine particles by different coupling mode [J]. Powder Technology, 2018, 344: 242-250.
- [10] 吴瑞鹏, 谢显卓, 刘凯, 等. 化学联合声波团聚的正交实验优化和单因素分析 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(10): 103-109.
Wu R P, Xie Y Z, Liu K, et al. Chemical joint sound waves reunion orthogonal experiment optimization and single factor analysis [J]. Journal of Thermal Power Engineering, 2020, 35(10): 103-109.
- [11] 赫明春. 多场协同作用下细颗粒物团聚和脱除研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 6-10.
He M C. Many fine particulate matter under the field synergy together and removal research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 6-10.
- [12] 林伟强. 声场联合超声波水雾强化过滤式除尘性能的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014: 36-38.
Lin W Q. Intensification of acoustic agglomeration and ultrasonic atomization on behavior of fine dust in air filtration process [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 36-38.

- [13] 张龙龙. 泡沫法团聚微细粉尘的实验研究及数值模拟 [D]. 青岛: 青岛大学, 2017: 13–14.
Zhang L L. Experimental study and numerical simulation on agglomeration of fine particles by foam method [D]. Qingdao: Qingdao University, 2017: 13–14.
- [14] Markauskas D, Ka Ianauskas R, Maknickas A. Numerical particle-based analysis of the effects responsible for acoustic particle agglomeration [J]. *Advanced Powder Technology*, 2015, 26(3): 698–704.
- [15] Shi Y, Wei J H, Qiu J, et al. Numerical study of acoustic agglomeration process of droplet aerosol using a three-dimensional CFD–DEM coupled model [J]. *Powder Technology*, 2020, 362: 37–53.
- [16] Mednikov E. Acoustic coagulation and precipitation of aerosols [M]. New York: Consultants Bureau, 1965: 77.
- [17] 多鹏. 转炉静电除尘器数值模拟与工艺优化 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2017: 27–28.
Duo P. Numerical simulation and process optimization of converter electrostatic precipitator [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2017: 27–28.
- [18] 曹年欢, 王国志, 谭元文. 基于拟水平正交实验法的隧道除尘喷嘴设计 [J]. *液压与气动*, 2020, (7): 138–143.
Cao N H, Wang G Z, Tan Y W. Tunnel dust removal nozzle design based on quasi-horizontal orthogonal experiment method [J]. *Hydraulics and Pneumatics*, 2020, (7): 138–143.
- [19] 吴瑞鹏. 燃煤烟气 $PM_{2.5}$ 化学联合声波团聚实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019: 9–11.
Wu R P. Experimental study on chemical and acoustic co-agglomeration of coal-fired gas $PM_{2.5}$ [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019: 9–11.