

气体射流作用下燃煤可吸入颗粒的团聚

孙德帅, 郭庆杰, 司崇殿

(青岛科技大学化工学院, 山东省清洁化工过程重点实验室, 山东 青岛 266042)

摘要: 在可吸入颗粒团聚室中引入气体射流, 使团聚室内形成局部湍流强化颗粒碰撞. 团聚过程中以撞击式采样器和激光粒子计数器测量可吸入颗粒团聚前后质量与数量变化来评价颗粒的团聚效率. 研究表明, 增大射流出口雷诺数和增大射流与主气流的气速比均能提高可吸入颗粒的清除效率. 射流对不同粒径颗粒的清除效率不同, 粒径较小颗粒($<1.0 \mu\text{m}$)的清除效率最高. 团聚室内气体相对湿度在 40%~50%时, 颗粒清除效率最高, 团聚后颗粒质量中位径由 $2.83 \mu\text{m}$ 增大到 $5.03 \mu\text{m}$. 增大飞灰质量浓度, 可吸入颗粒的质量清除效率与数量清除效率均降低.

关键词: 可吸入颗粒; 团聚; 射流; 清除效率

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2009)03-0437-04

1 前言

可吸入颗粒物是指可通过鼻、口进入人体呼吸道的颗粒物总称, 通常指粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物. 煤炭等化石燃料燃烧是可吸入颗粒物的主要排放源, 也是可吸入颗粒物的主要控制对象. 燃烧排放烟尘中较大飞灰颗粒可被电除尘^[1]、袋式除尘器^[2]等高效除尘装置收集, 但传统的除尘设备对可吸入颗粒已没有明显作用^[3]. 如果能利用可吸入颗粒的团聚特性使其团聚, 颗粒平均粒径变大后容易被常规设备捕获清除.

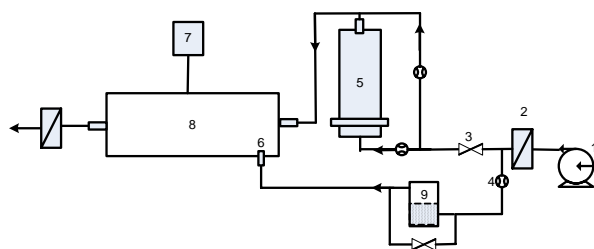
湍流团聚现象在工业过程中广泛存在, 如气相反应器中纳米颗粒的生成^[4]、内燃机中烟尘颗粒的形成^[5]及液相反应器中晶核的产生^[6]等. 自然界中高空云层中的湍流强度很高, 是雨滴形成及凝结增大的主要驱动力^[7]. 1956年, Staffman等^[8]首次解决了粒径小于 Kolmogorov 特征尺度的颗粒在湍流中的团聚问题, 得到了理想状态下的气溶胶湍流团聚函数计算公式. 此后, 众多研究者对颗粒湍流团聚问题进行了理论^[9,10]和数值模拟^[11,12]研究. 由于湍流流体与颗粒间的碰撞过程非常复杂, 目前对气溶胶湍流团聚的实验研究仍然很少^[13]. 虽然研究者对湍流团聚进行了大量研究工作, 但将湍流团聚作为气溶胶预处理技术, 提高对气体中颗粒的清除率研究尚未见报道. 因此, 本工作通过实验系统研究不同射流条件对主气流中可吸入颗粒碰撞团聚的影响.

2 实验

2.1 实验装置

可吸入颗粒物团聚实验台主要由气溶胶发生系统、

射流系统、采样和控制系统、团聚室组成, 如图 1 所示. 实验采用的颗粒为电厂电除尘器飞灰颗粒, 利用流化床气溶胶发生器($\varnothing 0.054 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$)产生所需浓度的气溶胶, 经稀释后通过气流引入团聚室. 射流气体为空气, 选择性经过加湿器后, 由圆形喷嘴喷射进入团聚室 ($\varnothing 0.116 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$). 用撞击式 FA-3 型气溶胶粒度分布采样器(康洁仪器研究所)和 CW-HPC600 激光尘埃粒子计数器(赛纳威环境仪器有限公司)测量记录可吸入颗粒团聚前后质量与数量变化情况. 用 TRH-CA 温湿度计(神荣株式会社)检测团聚室内湿度变化.



1. Compressor 2. HEPA filter 3. Valve 4. Rotameter
5. Fluidized bed aerosol generator 6. Agglomeration chamber
7. Control system 8. Injet nozzle 9. Humidifier

图 1 可吸入颗粒射流团聚实验台示意图
Fig.1 Schematic diagram of inhalable particle agglomeration experimental apparatus

撞击式采样器内部从上至下分为 9 级, 各级撞击盘采集粒子粒径范围见表 1. 利用惯性撞击原理, 将悬浮在气溶胶中的颗粒按其空气动力学等效直径的大小, 分别收集在各级采集板上, 然后称重进行分析. 颗粒数量的测量采用激光粒子计数器, 能在 $0.3\sim 25 \mu\text{m}$ 范围内测

量颗粒数浓度分布.

表 1 采样器的颗粒粒径分级

Stage	Particle diameter, d_p (μm)	Pore diameter (mm)
0	0~0.43	Submicrom (filter membrane)
1	0.43~0.65	0.25
2	0.65~1.1	0.25
3	1.1~2.1	0.34
4	2.1~3.3	0.53
5	3.3~4.7	0.71
6	4.7~5.8	0.91
7	5.8~9.0	1.89
8	9.0~10	2.25

2.2 实验方法

实验前采用 Rise-2002 激光粒度分析仪(济南润之科技有限公司)测定颗粒粒径分布, 计算其中位径为 14.36 μm . 根据 ISO787-2《颜料颗粒通用测试方法: 含水量测定法》测得颗粒的含水量为 0.78%, 根据 GB/T3604-83《普通磨料颗粒密度测定方法》测得颗粒密度为 1838 kg/m^3 . 其他条件为: 流化床气溶胶发生器中气体流速 0.121 m/s, 团聚室内主气流流速 $u_m=0.217$ m/s, 射流气体流速 $u_j=14\sim 26$ m/s, 增加射流后团聚室内气体流速 0.243~0.367 m/s. 团聚室气体温度 20~25 $^{\circ}\text{C}$, 气体相对湿度 RH 40%~50%, 飞灰质量浓度 $C=6.8$ g/m^3 , 颗粒在团聚室内停留时间 11.0 s, 实验连续操作 8 h. 所有数据为同一时间段内 3 次实验平均结果.

3 结果与讨论

团聚室中, 燃煤可吸入颗粒在湍流射流、气流曳力、布朗力、范德华力等作用下发生碰撞团聚, 宏观颗粒团聚过程包括 3 个相互联系的过程, 即颗粒与湍流流体间的几何碰撞过程、颗粒间的气体动力学碰撞过程及碰撞后颗粒在粘附力作用下的团聚过程. 颗粒总质量减少率为颗粒质量清除效率(η), 撞击式采样器每级撞击盘上收集到的颗粒质量减少率为分级清除效率(η_s), 颗粒总数浓度减少率为颗粒数量清除效率.

3.1 射流出口雷诺数对团聚的影响

射流气体喷入团聚室, 在横向流动主气流中形成局部湍流环境, 引起团聚室中气体流速改变, 从而产生速度梯度, 增大主气流中气溶胶颗粒间碰撞几率. 射流出口雷诺数对颗粒清除效率 η 的影响如图 2 所示, 随射流出口雷诺数 Re 增大, 颗粒的质量清除效率与数量清除效率均增大, 但数量清除效率的增幅较小.

在气固两相流中, 颗粒的扩散运动受颗粒的粒径、惯性、自由落体速度和相对密度的影响. 通常以斯托克斯数(St)衡量颗粒在流体中的扩散运动性能^[14]:

$$St = \tau_p / \tau_k, \quad (1)$$

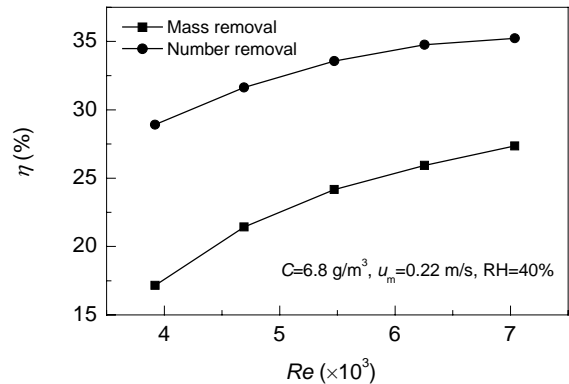


图 2 射流出口雷诺数对颗粒清除效率的影响

Fig.2 Effect of Reynolds number at jet exit on particle removal efficiency, η

其中, $\tau_p = \rho_p d_p^2 / (18\mu)$, 为颗粒的弛豫时间, $\tau_k = \sqrt{\mu/\varepsilon}$, 为 Kolmogorov 特征时间.

射流出口雷诺数 Re 增加, 湍流射流区的附加应力增加, 改变了颗粒与湍流流体间的几何碰撞过程. 气溶胶中粒径较小颗粒的 St 较小, 能快速与射流气体间进行动量交换而获得较高动量. 粒径较大颗粒由于 St 较大, 难以适应流体速度的快速变化, 受射流影响相对较小, 因此大颗粒与小颗粒之间产生较大的速度梯度, 使颗粒间的碰撞几率增加, 碰撞后颗粒在范德华力、液桥力等作用下团聚形成较大颗粒而被清除.

对特定颗粒, 颗粒粒径是影响其在流体中惯性力的主要因素, 因此不同粒径颗粒在射流作用下的团聚清除效率不同, 实验结果见图 3. 粒径较小颗粒很容易被清除, 而中间粒径颗粒(1~5 μm)则很难清除, 这是由于颗粒与湍流流体间几何碰撞不同. 随雷诺数 Re 增加, 中间粒径颗粒质量清除效率显著增大, 而粒径小于 1 μm 颗粒的清除效率则略有减小, 因此, 颗粒的质量清除效率增加较快, 而数量清除效率则增加缓慢.

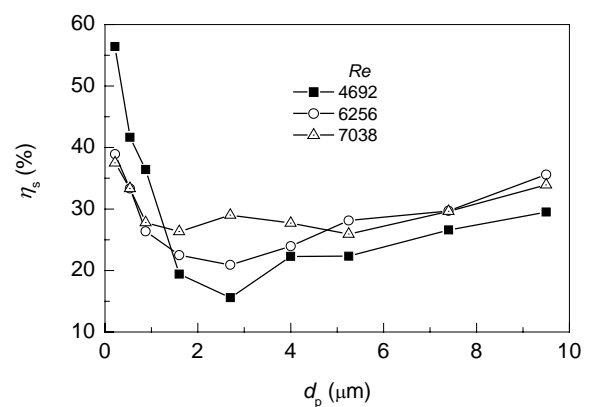


图 3 射流对颗粒分级清除效率的影响

Fig.3 Effect of gas jet on single-stage removal efficiency, η_s , of inhalable particles

3.2 气速比对团聚的影响

实验中保持主气流的气速(u_m)恒定, 增加射流(u_j)与主气流的气速比对颗粒质量清除效率的影响如图 4 所示. 气速比对团聚的影响十分显著, 随气速比从 65.2 增大到 117.2, 颗粒的质量清除效率由 7.0% 增大到 28.8%. 这是因为射流对主气流流场的影响区域随气速比增大而增加, 因此主气流与射流作用时间增加, 射流对主气流中流体的卷吸量增加, 更多的颗粒被卷入射流区域而从射流中获得动量, 强化颗粒间的碰撞作用, 引起颗粒团聚, 容易被传统除尘设备捕获.

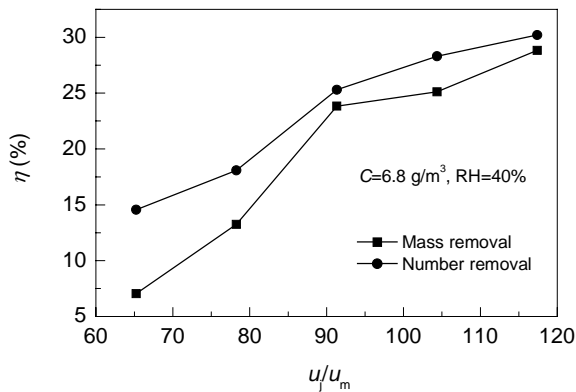


图 4 射流与主气流的气速比对颗粒质量清除效率的影响
Fig.4 Effect of velocity ratio of jet-crossflow on particle removal efficiency, η

3.3 气体湿度对团聚的影响

通过射流作用将一定量的水分带入团聚室, 调节团聚室内气体湿度. 团聚室内气体湿度对颗粒团聚的影响如图 5 所示, 随团聚室内气体相对湿度增大, 颗粒清除效率逐渐增加; 相对湿度为 40%~50%时, 可吸入颗粒清除效率最高; 继续增加湿度, 颗粒清除效率降低. 团聚室内湿度影响颗粒表面性能, 随湿度增大, 水分会在颗粒表面凝结, 改变颗粒间的粘附作用力. 在低湿度条件下, 范德华力是颗粒间的主要粘附力, 由于范德华力的作用较弱, 即使辅以射流作用也难以使颗粒粘附在一起, 因此颗粒的清除效率不足 10%. 相对湿度增加, 颗粒间的液桥力和毛细管力作用增强, 成为颗粒间的主要作用力^[15], 碰撞后的颗粒容易粘附在一起而被去除. 湿度继续增大, 颗粒间的粘附作用力会在某一湿度下迅速减小^[16], 颗粒的清除效率也随之降低.

实验过程中由流化床发生器产生的气溶胶颗粒分布为对数正态分布. 在射流与湿度作用下, 颗粒团聚, 粒径不断增大, 团聚过程的分布参数及颗粒中位直径变化如表 2 所示. 粒径增加趋势与清除效率对应, 在相对湿度为 42%时, 颗粒质量中位粒径由初始的 2.83 μm 增

大为 5.03 μm .

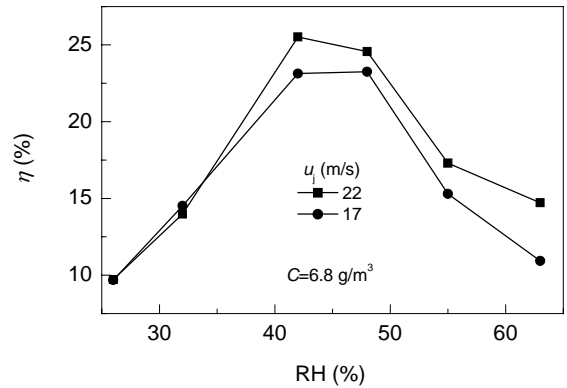


图 5 相对湿度对颗粒质量清除效率的影响
Fig.5 Effect of relative humidity on mass removal efficiency of particles

表 2 相对湿度对颗粒团聚后分布参数的影响
Table 2 Effect of humidity on distribution parameter of particles agglomeration

Relative humidity (%)	Mass mediate diameter (μm)	Geometric error, σ_g	Concentration of inhalable particles, M (mg/m^3)
Initial	2.83	2.64	240.9
25	3.58	2.45	217.5
42	5.03	2.39	179.4
55	4.78	2.31	199.2

3.4 飞灰浓度对团聚的影响

飞灰浓度是影响射流与主气流中颗粒能量交换的重要因素. 飞灰质量浓度对射流作用下颗粒清除效率的影响如图 6 所示, 随飞灰浓度增加, 可吸入颗粒清除效率降低, 可吸入颗粒的数量清除效率高于质量清除效率. 团聚过程射流出口雷诺数 Re 保持恒定, 射流能量保持不变. 当飞灰浓度较低时, 湍流射流对颗粒相的影响程度较大, 小颗粒易被射流的大涡卷吸, 与射流气体间进行充分的能量交换, 部分小颗粒获得较高能量, 通过碰撞方式将其能量传给周围的大颗粒, 小颗粒易与大颗粒

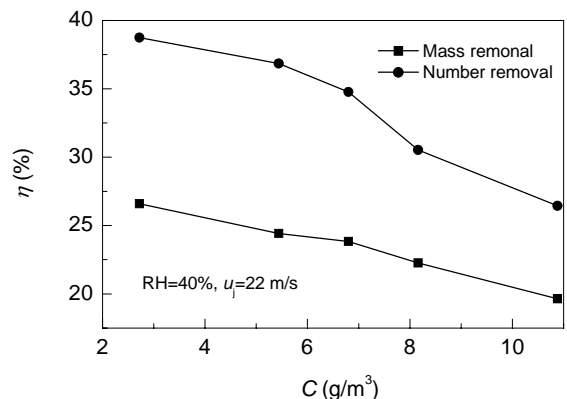


图 6 飞灰浓度对颗粒清除效率的影响
Fig.6 Effect of fly ash concentration on particle removal efficiency

粘附在一起而被清除。飞灰浓度增大,可吸入颗粒清除效率降低包括两方面原因:其一,飞灰浓度较高时,颗粒数太多,从微观上看气相与单个粒子的能量交换没有低质量浓度时剧烈^[17],颗粒初始时从射流得到的动量较小,颗粒间碰撞作用减弱,导致清除效率降低;其二,飞灰浓度增大,颗粒团聚体间的解聚作用增强^[18],使部分小颗粒重新生成,导致颗粒质量清除效率略有降低,而数量清除效率显著减小。

4 结论

通过对射流作用下可吸入颗粒团聚行为进行研究,得到如下结论:

(1) 湍流射流能促进可吸入颗粒团聚,增大射流出口雷诺数,团聚室中可吸入颗粒的质量与数量清除效率均增大,颗粒数量清除效率高于质量清除效率。增大射流与主气流的气速比,同样可以增加颗粒清除效率。射流对不同粒径颗粒的清除效率不同,粒径较小($<1\ \mu\text{m}$)颗粒的清除效率高。

(2) 团聚室内气体湿度能影响可吸入颗粒间的粘附作用力,气体相对湿度为40%~50%,可吸入颗粒的质量清除效率最高,可吸入颗粒质量中位直径由团聚前的 $2.83\ \mu\text{m}$ 增大到团聚后的 $5.03\ \mu\text{m}$ 。增大飞灰质量浓度,可吸入颗粒的质量清除效率与数量清除效率均降低。

参考文献:

- [1] Rodriguez J J. Acoustic Agglomeration for Electrostatic Retention of Fly Ashes at Pilot Scale: Influence of Intensity of Sound Field at Different Conditions [J]. *J. Aerosol Sci.*, 1996, 27(1): 621–622.
- [2] 胡荣泽. 超微颗粒的性能表征 [J]. *中国粉体技术*, 2001, 7(4): 21–23.
- [3] Strand M, Pagels J, Szpila A, et al. Fly Ash Penetration through Electrostatic Precipitator and Flue Gas Condenser in a 6 MW Biomass Fired Boiler [J]. *Energy Fuels*, 2002, 16(6): 1499–1506.
- [4] Pratsinis S E. Flame Aerosol Synthesis of Ceramic Powders [J]. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1998, 24(3): 197–219.
- [5] Wena Z, Yuna S, Thomsons M, et al. Modeling Soot Formation in Turbulent Kerosene/Air Jet Diffusion Flames [J]. *Combust. Flame*, 2003, 135(3): 323–340.
- [6] Schwarzer H C, Peukert W. Combined Experimental/Numerical Study on the Precipitation of Nanoparticles [J]. *AIChE J.*, 2004, 50(12): 3234–3247.
- [7] Shaw R. Particle–Turbulence Interactions in Atmospheric Clouds [J]. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2003, 35(2): 183–227.
- [8] Saffman P G, Turner J S. On the Collision of Drops in Turbulent Clouds [J]. *J. Fluid Mech.*, 1956, 1: 16–30.
- [9] Duru P, Koch D L, Cohen C. Experimental Study of Turbulence-induced Coalescence in Aerosols [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 2007, 33(9): 987–1005.
- [10] Chun J, Koch D L, Rani S L, et al. Clustering of Aerosol Particles in Isotropic Turbulence [J]. *J. Fluid Mech.*, 2004, 536(1): 219–251.
- [11] Stelios R. PDF Method for Population Balance in Turbulent Reactive Flow [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2007, 62(23): 6865–6878.
- [12] Derevich I V. Coagulation Kernel of Particles in a Turbulent Gas Flow [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, 50(7/8): 1368–1387.
- [13] Wang L P, Wexler A S, Zhou Y. Statistical Mechanical Description and Modeling of Turbulent Collision of Inertial Particles [J]. *J. Fluid Mech.*, 2000, 415: 117–153.
- [14] Dominguez A, Aartrijk M, Castello L, et al. *Particles-laden Flow* [M]. Houten: Springer Netherlands, 2007. 361–362.
- [15] Maximova N, Dahl O. Environmental Implications of Aggregation Phenomena: Current Understanding [J]. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 2006, 11(4): 246–266.
- [16] Podczeczek F, Newton J M, James M B. Influence of Relative Humidity of Storage Air on the Adhesion and Autoadhesion of Micronized Particles to Particulate and Compacted Powder Surfaces [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 1997, 187(2): 484–491.
- [17] 蔡丹云, 郑水华, 樊建人, 等. 质量浓度比对气固两相圆湍射流影响的实验研究 [J]. *动力工程*, 2005, 25(3): 408–411.
- [18] Teresa S, Xavier C. Modelling the Aggregation and Break-up of Fractal Aggregates in a Shear Flow [J]. *Appl. Sci. Res.*, 1998, 59: 255–268.

Agglomeration of Inhalable Particles in Gas Jet

SUN De-shuai, GUO Qing-jie, SI Chong-dian

(Col. Chem. Eng., Key Lab. Clean Chem. Process, Shandong Province, Qingdao Univ. Sci. & Technol., Qingdao, Shandong 266042, China)

Abstract: A turbulent gas jet was introduced in an agglomeration chamber to generate a local turbulent flow field and intensify agglomeration process of inhalable particles. Aerosol cascade impactor and laser particle counter were used to measure the mass and number variations of particles after agglomeration. The parameters influencing particle agglomeration were examined in detail. The experimental results showed that the removal efficiency increased with increasing Reynolds number of jet exit and flow ration of jet-crossflow. However, the removal efficiency was affected by particle diameters, and the maximum efficiency observed in small particles ($<1.0\ \mu\text{m}$). When relative humidity in the chamber approached 40%~50%, the maximum removal efficiency was acquired, in which the mass diameter increased from $2.83\ \mu\text{m}$ to $5.03\ \mu\text{m}$. Increment of initial concentration of fly ash could resulted in decreasing of removal efficiency of inhalable particles.

Key words: inhalable particles; agglomeration; gas jet; removal efficiency