第 41 卷第 3 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.41, No.3
2020 年 3 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Mar., 2020

亚微米颗粒湍流团聚特性的实验研究

刘鹤欣 谭厚章 杜勇乐 吕钊敏 萧嘉繁 杨富鑫

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘 要 燃煤电厂亚微米颗粒物排放是造成大气环境污染和影响人体健康的重要因素。本文搭建亚微米颗粒湍流团聚实验平台，通过场发射扫描电镜 (FESEM) 对亚微米颗粒的团聚形貌进行微观表征以及扫描电迁移率粒径谱仪 (SMPS) 对亚微米颗粒团聚前后的粒径分布特性进行宏观测量。结果表明：亚微米颗粒湍流团聚形成多分叉颗粒树聚团结构；进口流速为 0.8~5.3 m/s 条件下，PM_1 和 $PM_{0.1}$ 的脱除效率分别为 5.6%~18.6%和 7.0%~21.4%，且 PM_1 和 $PM_{0.1}$ 的脱除效率曲线随速度变化呈现二次函数规律。

关键词 湍流团聚；亚微米颗粒；燃煤电厂；扰流元件

中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2020)03-0763-08

Experimental Study on the Characteristics of Turbulent Agglomeration for Submicron Particulates

LIU He-Xin TAN Hou-Zhang DU Yong-Le LÜ Zhao-Min XIAO Jia-Fan YANG Fu-Xin

(*MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Abstract Submicron particulate emissions from coal-fired power plants play an important role in causing atmospheric pollution and affecting human health. In this work, an experimental platform of turbulent agglomeration for submicron particulates was built. The microscopic morphology of the turbulent agglomeration was measured through Field Emission Electron Microscopy (FESEM), while the particle size distributions before and after the agglomeration were measured through Scanning Mobility Particle Sizes (SMPS). The results show that the submicron particulates form a multi-branched particle tree structure in the process of the turbulent agglomeration. At the inlet velocity of 0.8~5.3 m/s, the removal efficiencies of PM_1 and $PM_{0.1}$ are 5.6%~18.6% and 7.0%~21.4%, respectively. The removal efficiency curve presents quadratic function law with the change of the inlet velocity.

Key words turbulent agglomeration; submicron particulate; coal-fired power plant; disturbing structure

0 引 言

燃煤烟气颗粒物排放对大气环境和人体健康具有重要影响，其中亚微米颗粒 (空气动力学直径小于 1 μm 的颗粒，亦称 PM_1) 能在环境空气中长期悬浮，通常富集有燃煤产生的有毒痕量元素和有机污染物，经人体呼吸系统进入人体血液循环系统后将对人体造成严重危害 [1,2]。数据表明，燃煤电厂烟气中 PM_1 数量占 $PM_{2.5}$ 的 50%~80%[3,4]。然而，传统燃煤锅炉除尘系统因存在穿透窗口而难以脱除 0.1~1 μm 范围内的颗粒，导致亚微米颗粒的大量逃逸 [5]。湍流团聚是一种能有效解决微细颗粒难以捕获脱除的增强型技术手段，其通过在传统除尘设备前端增加扰流团聚装置以促进微细颗粒的团聚长大，进而实现微细颗粒的有效脱除 [6]。随着燃煤电厂微细颗粒物排放控制日益严格，基于湍流团聚原理研发高效低成本微细颗粒物团聚技术将成为未来微细颗粒物控制的发展趋势。

国内外学者针对气溶胶湍流团聚问题 (布朗碰撞、湍流碰撞、凝并效率等) 进行了部分研究。早期研究主要偏向于理论模型和数值模拟。Saffman 和 Turner [7] 基于碰撞球概念首先提出了零惯性颗粒的碰撞核函数模型。Abrahamson [8] 应用气体动力学理论并忽略重力的影响针对极大惯性颗粒的碰撞核函数模型。有限惯性颗粒因受到局部富集效应和湍流输运效应的影响，因而其湍流团聚机理复杂。Kruis

收稿日期: 2019-01-26; **修订日期**: 2020-02-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2016YFB0601504)

作者简介: 刘鹤欣 (1994-), 男, 博士研究生, 主要从事燃烧与污染控制研究。 **通信作者**: 谭厚章, 教授, 博导, hzt@xjtu.edu.cn。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和 Kusters [9] 考虑有限惯性颗粒受到的剪切和加速效应对颗粒碰撞概率进行了研究。Wang 等 [10,11] 基于 DNS 模拟的定量结果，提出了考虑雷诺数和颗粒惯性的碰撞核模型。Chun 和 Koch [12] 考虑离散相动力学效应和颗粒惯性分别对布朗碰撞和湍流碰撞过程中的凝并效率进行了规律研究。Co 和 Sommerfeld [13] 考虑均匀各向同性湍流发展了随机拉格朗日团聚模型，并给出了判定颗粒团聚的临界速度判据。许继云 [6] 针对颗粒布朗扩散进行可视化实验并基于欧拉 - 拉格朗日框架建立了非网格依赖的颗粒湍流碰撞模型。章鹏飞等 [14] 对扰流件条件下不同因素影响微细颗粒湍流团聚的效果进行了数值模拟。刘含笑 [15] 基于颗粒群平衡方程对不同聚并模型及商业聚并器进行了初步分析。然而，由于气溶胶湍流团聚过程复杂并难以进行实时监测，湍流团聚的实验研究较为稀少。澳大利亚 Indigo 公司 [16] 首先研发应用商业颗粒物聚并器，该装置可使 ESP 出口 $PM_{2.5}$ 数量的脱除效率提高至 40%~80%。Duru 和 Koch[17] 采用周期性振荡格栅模拟湍流脉动以及相位多普勒方法测量单分散气溶胶的团聚效率，发现气溶胶平均半径的变化速率与液滴的聚并速率常数相关。陈冬林等 [18] 研发超细颗粒物湍流聚并装置并应用于 300 MW 燃煤机组，可使 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 体积百分比分别下降 56.7%和 62.%。现阶段气溶胶湍流团聚的实验研究较少，同时缺少针对亚微米粒径范围内颗粒物湍流团聚特性和形貌的相关研究，因而有必要进行更多的实验测量来确定湍流团聚的最优化参数和工程应用价值。

本文搭建亚微米颗粒湍流团聚实验平台，首先通过热线风速仪测量流场速度分布以确保流场均匀性，然后采用场发射扫描电镜 (FESEM) 定性表征亚微米颗粒的团聚形貌，再采用扫描电迁移率粒径谱仪 (SMPS) 定量研究团聚前后亚微米颗粒随粒径的分布特征以及 PM_1 和 $PM_{0.1}$ 的脱除效率随速度的变化规律。

1 实验装置及方法

1.1 实验系统和扰流元件

图 1(a) 所示为所搭建亚微米颗粒湍流团聚实验平台。总体设计为环状结构，可确保颗粒具有足够距离扩散均匀。实验系统采用离心风机提供动力并造成湍流流动，亚微米颗粒通过气溶胶发生器产生并经分子筛扩散干燥后进入流道。进出口测量点 (测点 1#和测点 2#) 之间的实验段放置有一定数量和排布的扰流元件。携带有亚微米颗粒的气流在实验段内扰流元件区域发生湍流团聚，同时颗粒团聚前和团聚后具有足够距离保证测点位置处的流场均匀性。

实验系统的实验段部分沿 x 方向长度为 1600 mm，沿 y 方向和 z 方向的横截面尺寸为 150 mm×100 mm。通过比较不同形状扰流件的扰动特性和团聚效果 [18−20]，初步确定扰流件形状应有利于固定漩涡和降低流动阻力，因而选定具有 Y 型结构的扰流元件进行实验。部分研究初步表明 [15,20]，扰流元件的尺寸和相邻间距不宜太大也不宜太小，应有利于不同尺度漩涡的发生、扩散和相互影响，因而本实验将扰流件横截面的整体尺寸限定在 5 cm 范围，相邻间距限定为 3~5 cm 范围。实验采用的单个扰流元件截面形状如图 1(a) 所示，其沿与烟气流向平行平面呈对称结构，沿 x, y, z 三个方向尺寸为 40 mm×30 mm×100 mm，前端导叶片沿 x 方向长度为 15 mm，后端两扰流叶片具有 90° 夹角。假定平行气流流向排布为行，垂直气流流向排布为列。实验中采用了扰流元件 3 排 2 列和 5 排 2 列两种排布方式，其中相邻扰流元件沿平行气流流向的纵向节距固定为 50 mm，沿垂直气流流向的横向节距固定为 30 mm。

1.2 测试取样系统和实验方法

图 1(b) 所示为本文所采用测量取样系统示意图，主要包括以下三个部分：

1) 热线风速仪测量系统。主要仪器为美国 TSI 公司生产的热线风速仪 (型号：IFA 300)，用于测量实验段前后的流场均匀性。

2) 扫描电迁移率粒径谱仪测量系统。主要仪器为美国 TSI 公司生产扫描电迁移率粒径谱仪 (SMPS，型号：3938L72)，用于测量团聚前后亚微米颗粒的粒径分布。

3) 亚微米颗粒取样系统。主要部件为 PM_1 切割器和颗粒物过滤器，用于对团聚前后的亚微米颗粒进行取样。颗粒物过滤器采用特氟龙滤膜，亚微米颗粒样品取样后通过德国卡尔蔡司生产的场发射扫描电子显微镜 (FESEM，型号：Gemini SEM 500) 进行团聚前后颗粒形貌观察。

实验采用美国 TSI 公司生产的多分散气溶胶发生器 (型号：9306) 产生初始亚微米颗粒，其中质量分数为 3%的 NaCl 溶液作为雾化介质，通过调节喷嘴数量和稀释气流量来控制亚微米颗粒的数量浓度。实验测量和取样时，连接管路均采用导电硅胶管以避免测量和采样过程中残余电荷的存在引起亚微米颗粒的二次团聚。为确保实验数据的可靠性，每组实验数据均在稳定工况下重复测量 2~3 次。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

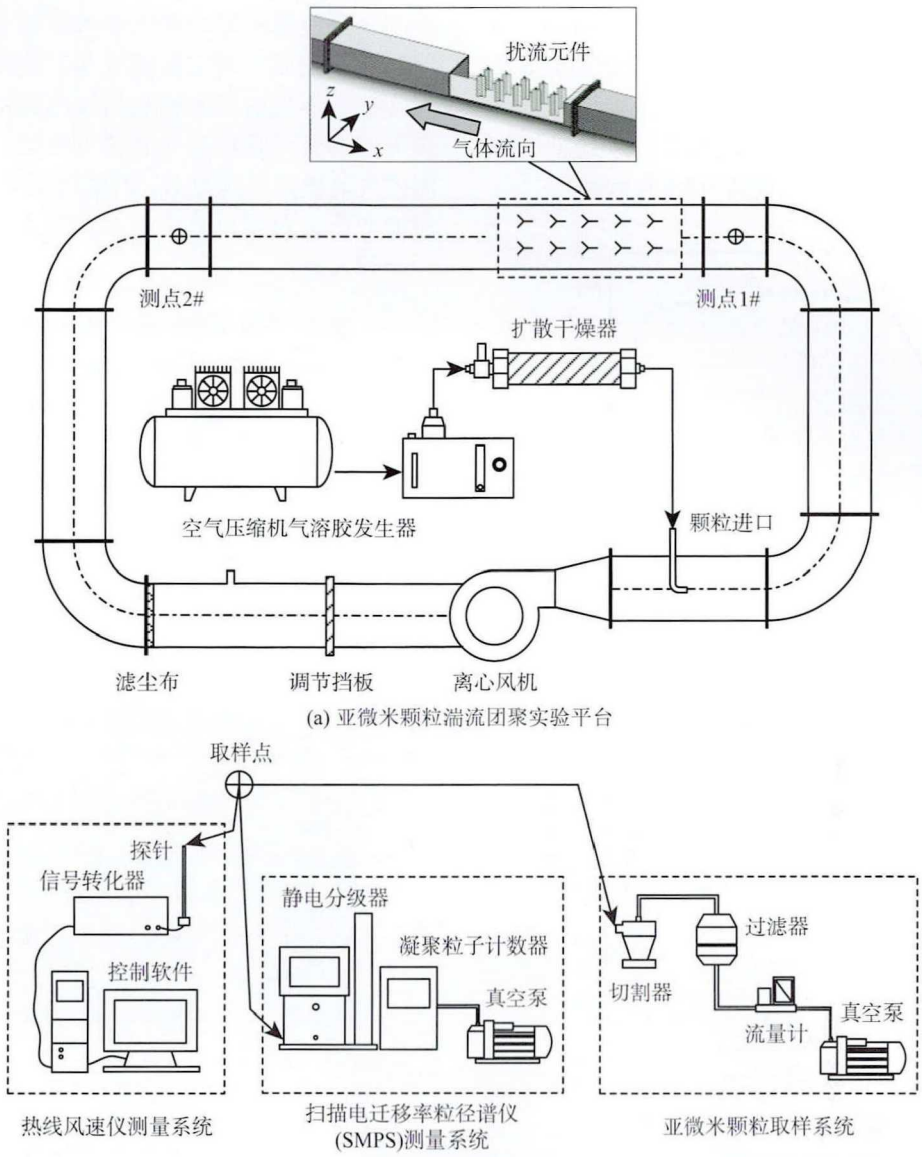


图 1　实验系统示意图

Fig. 1　Schematic system diagram of (a) the experimental platform of submicron particulate turbulence agglomeration, (b) measurement and sampling systems

2　结果与讨论

2.1　流场均匀性

为保证颗粒在实验流道中扩散均匀，颗粒粒径分布测量前先采用热线风速仪测量进出口沿 z 方向的流场均匀性，无量纲速度和湍流强度的测量结果如图 2 所示。测量时实验段进口平均流速稳定为 $U_{\mathrm{mean}}=3.21\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$，测量位置取团聚实验段进出口测点处沿 z 方向的对称轴。从图 2(a) 看出，进口测点 1#处速度分布呈现先逐渐上升后保持稳定，然后近壁面边界层附近开始迅速下降，同时湍流强度与速度曲线对应呈相反变化趋势，出现该现象主要是由于实验流道存在直角弯头会使气流产生一定程度的流动分离。从图 2(b) 看出，出口测点 2#处表现为中间区域稳定而近壁面边界层附近迅速下降的对称速度分布特点，湍流强度曲线对应速度分布呈现相反趋势。根据以上结果，可以看出进出口测点处速度分布符合通道内流动的基本规律，同时绝大部分区域可实现速度和湍流强度保持相对稳定。因此，可认为团聚前后测点位置处流场均匀，所选取测点位置适合颗粒粒径分布测量和颗粒取样。

2.2　亚微米颗粒团聚的微观形貌

为定性研究亚微米颗粒湍流团聚的微观形貌，实验中采用特氟龙滤膜分别对团聚前后测点 1#和

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测点 2#处气溶胶进行取样并采用 FESEM 观察，结果如图 3 和图 4 所示。取样时所采用实验参数如表 1 所示，扰流元件排布为 5 排 2 列，进口流速 2.31 $m\cdot s^{-1}$，亚微米颗粒进口数量浓度为 7.92×10^6 cm^{-3}，取样时间约 20 min，取样流量为 16.7 $L\cdot min^{-1}$。

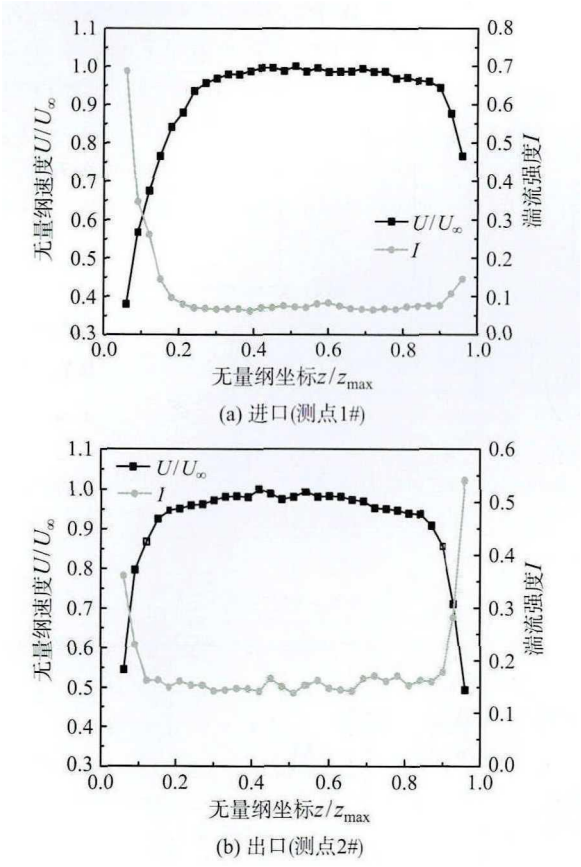


图 2 无量纲速度和湍流强度分布

Fig. 2 The velocity and turbulence intensity: (a) at inlet (site 1#); (b) at outlet (site 2#)

图 3 所示为团聚前亚微米颗粒的形貌特点，可以看出亚微米颗粒流经扰流元件之前几乎没有发生团聚的颗粒形貌，而 NaCl 颗粒呈现出形状规则且边缘较为光滑的立方体结构，同时大部分亚微米颗粒都均匀分布于特氟龙纤维表面。图 4 所示为团聚后亚微米颗粒的团聚形貌特点，图 4(a) 为团聚后亚微米颗粒的分布形貌，图 4(b) 为框内所示团聚后聚团颗粒的放大图。可以看出，单一小粒径颗粒通过搭桥方式相互连接形成多分叉颗粒树形貌，与微细颗粒的单纤维沉积形貌 [21] 有相似之处。该形貌形成是由于亚微米量级颗粒团聚粘附力主要为范德华力，团聚颗粒在湍流输运和碰撞团聚过程中受范德华力影响将出现极化作用，所以团聚后的颗粒呈现出具有分叉结构的颗粒树形貌特点。与化学团聚形成的颗粒形貌相比 [22,23]，湍流团聚的颗粒不具有化学团聚剂使颗粒絮凝聚团的形貌特点，湍流团聚形成的颗粒表面粘附主要通过相对较弱的范德华力相互连接且形成的聚团颗粒结构不致密，因而湍流团聚形成的聚团颗粒存在破碎可能性。总体而言，湍流团聚的微观机理复杂，团聚过程中存在粒子极化、碰撞变形以及颗粒破碎等多种动力学行为，有待进一步深入研究。

表 1 亚微米颗粒团聚形貌取样实验参数

Table 1 Experimental parameters of agglomeration morphology

参数名称	数值
亚微米颗粒进口数量浓度/cm^{-3}	7.92×10^6
进口流速/$m\cdot s^{-1}$	2.32
扰流元件排布	5 排 2 列
取样时间/min	约 20
取样流量/$L\cdot min^{-1}$	16.7

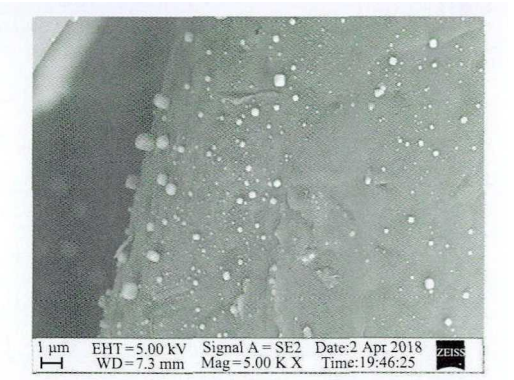


图 3 团聚前亚微米颗粒形貌 (测点 1#)

Fig. 3 Submicron particulate morphology before agglomeration (Site 1#)

2.3 湍流团聚特性随颗粒粒径的变化

气溶胶湍流团聚特性与离散相参数 (初始粒径分布、进口颗粒浓度)、连续相参数 (流场分布、涡量分布)、连续相对离散相的作用 (热泳力、颗粒湍流脉动) 以及离散相之间相互作用 (粘附力、碰撞变形、极化作用) 等参数密切相关。尤其对于亚微米颗粒湍流团聚特性而言，颗粒在湍流流动中受到布朗扩散和湍流脉动影响使团聚机理更为复杂且难以直观观察。因此，本文采用 SMPS 对团聚前后的亚微米颗粒粒径分布进行宏观测量，进而分析亚微米颗粒湍流团聚特性随粒径的变化，用于为机理分析和模拟研究提供基础实验数据及指导工业应用实践。

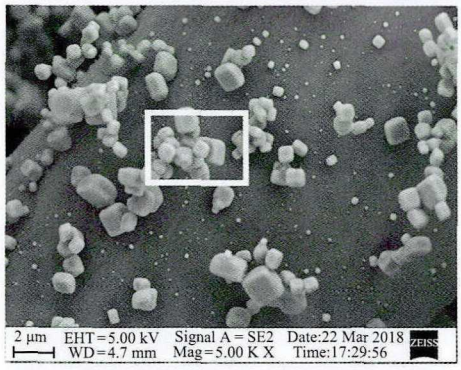
本节实验采用表 1 所述实验参数，扰流元件排布为 5 排 2 列，稳定进口流速为 2.32 $m\cdot s^{-1}$，亚微米颗粒进口数量浓度为 7.92×10^6 cm^{-3}，测量粒径范围为 15.7~850.5 nm，结果如图 5 所示。其中，脱除效

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

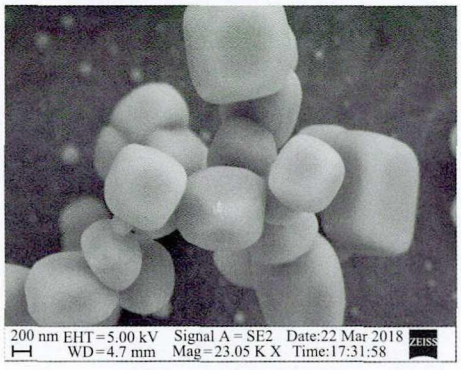
率按下式进行计算：

$$\eta = 1 - \frac{p_{\text{outlet}}}{p_{\text{inlet}}} \tag{1}$$

式中，p_{inlet} 和 p_{outlet} 分别为团聚实验段进口和出口处某一粒径范围内颗粒的数量浓度。



(a) 团聚亚微米颗粒分布形貌



(b) 团聚亚微米颗粒放大图

图 4　团聚后亚微米颗粒形貌 (测点 2#)

Fig. 4　Submicron particulate morphology after aggomeration (Site 2#): (a) distribution morphology after agglomeration, (b) an enlarged view of the agglomerated particulate

图 5(a) 为团聚前后亚微米颗粒的粒径分布，横坐标为颗粒粒径，纵坐标为单位体积颗粒数量浓度的对数分布，右上角小图为颗粒粒径 350.0~850.5 nm 范围内的放大图。从图中可看出，实验工况稳定下，测试数据的重复性较好。团聚实验段进口处亚微米颗粒呈单峰分布，峰值粒径为 68.5 nm，对应峰值浓度为 1.43×10^5 cm^{-3}；团聚实验段出口处亚微米颗粒同样呈单峰分布，峰值粒径为 66.1 nm，对应峰值浓度为 1.07×10^5 cm^{-3}。同时，测量范围内颗粒中位径 D_{50}(颗粒分布的累计百分数达到 50%时所对应的粒径) 由进口处 71.0 nm 变化为 73.7 nm。进一步分析，可发现经过若干扰流元件进行湍流团聚后，团聚实验段进口和出口颗粒粒径分布曲线在 414.2 nm 处出现交叉。具体而言，15.7~414.2 nm 范围内的颗粒数量浓度降低，而 414.2~850 nm 范围内的颗粒数量浓度增加。上述结果表明，经过扰流元件后小颗粒数量减少而大颗粒数量增加，同时说明湍流团聚作用对初始亚微米颗粒粒径分布产生了一定影响。

图 5(b)、(c) 分别为团聚前后亚微米颗粒的数量百分比和体积百分比。从图 5(b) 可以看出，数量百分比曲线与颗粒粒径分布曲线具有相同的峰值粒径。经过扰流元件后，亚微米颗粒的数量百分比由进口峰值粒径 68.5 nm 所对应的 1.99%，变化为出口峰值粒径 66.1 nm 所对应的 1.87%。从图 5(c) 可以看出，进出口亚微米颗粒的体积百分比曲线所对应的峰值粒径发生改变。经过扰流元件后，体积百分比由进口峰值粒径 429.4 nm 所对应 2.84%变化为出口峰值粒径 495.8 nm 所对应的 3.37%。图 5(b)、(c) 对比说明，数量百分比较大的小粒径颗粒对应的体积百分比较小，而数量百分比较小的大粒径颗粒对应的体积百分比较大。同时，解释了图 5(a) 中小粒径颗粒数量明显减少而大粒径颗粒仅略有增加的原因，这是由于基数庞大的小粒径颗粒需要粘附团聚到一定程度后才能发生测试粒径的改变进而形成大粒径颗粒。

图 5(d) 所示为分级粒径颗粒脱除效率随粒径的变化曲线。可以看出，亚微米颗粒脱除效率随颗粒粒径增加整体呈现出下降趋势，其中 D_p<30 nm 范围内的颗粒脱除效率下降较快，30 nm<D_p<420 nm 范围内颗粒脱除效率基本稳定为 10%~20%范围，而 D_p>420 nm 后脱除效率出现负值且存在一定波动。分析原因，D_p<30 nm 范围内脱除效率下降较快以及 D_p>420 nm 范围内脱除效率出现波动主要是由于这两端范围内颗粒数量浓度较低，因而通过脱除效率表征的进出口颗粒数量变化较为剧烈。同时，D_p>420 nm 范围内脱除效率出现负值，表明颗粒数量浓度在该范围内开始增加，原因是湍流团聚使小粒径颗粒数量减少而大粒径颗粒数量增加。表 2 总结了本节实验的主要变化参数，进一步统计得到 PM_1 脱除效率为 18.6%，同时 $PM_{0.1}$ 脱除效率为 21.4%。

2.4　湍流团聚特性随进口流速的变化

考虑到气溶胶湍流团聚特性与流动相流速最为密切相关，本文进一步研究了脱除效率随进口流速的变化关系。实验中亚微米颗粒进口浓度在 5.0×10^6 ~8.5×10^6 cm^{-3} 范围内基本保持稳定，进口流速依次设置为 0.8、1.6、2.5、3.4、4.4、5.3 m·s^{-1}，同时将扰流元件布置为 5 排 2 列和 3 排 2 列两种排列方式，测量粒径范围为 15.7~850.5 nm。本节实验中湍流团聚特性通过脱除效率曲线进行表征，结果如图 6 所示，其中图 6(a) 和图 (b) 分别为 PM_1 脱除

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

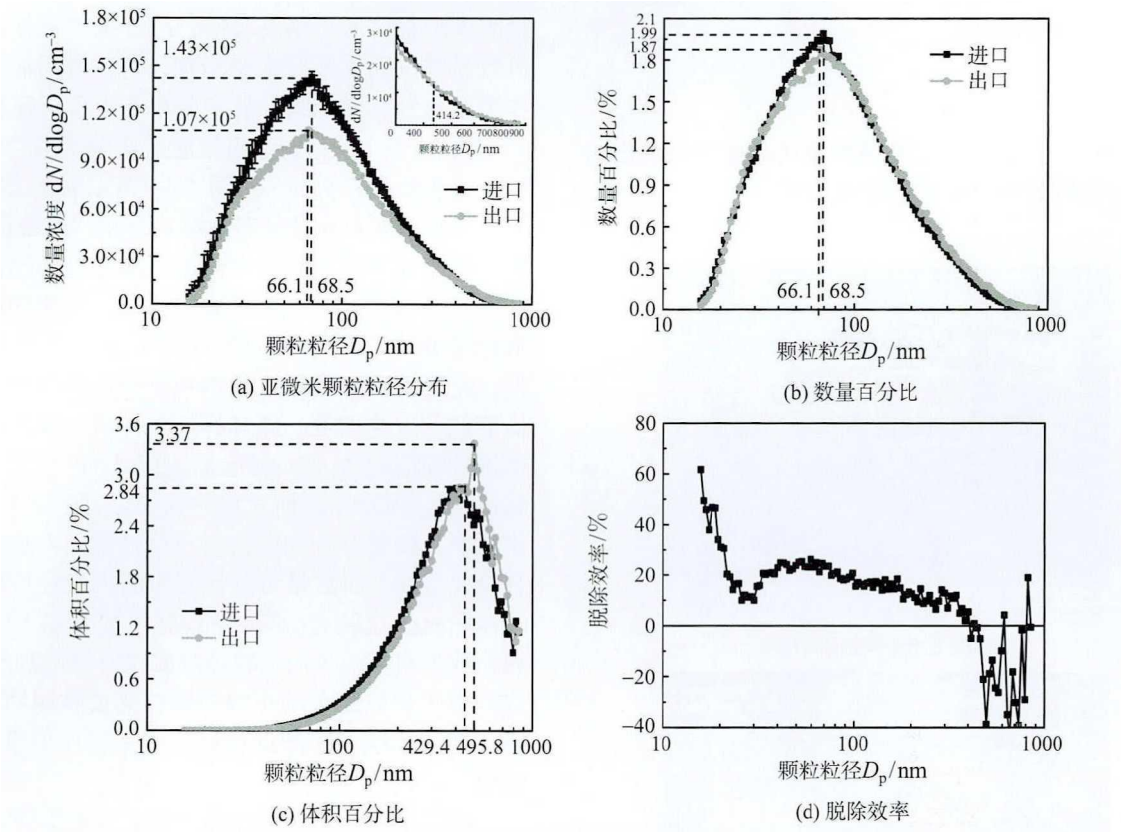


图 5 亚微米颗粒湍流团聚特性

Fig. 5 The characteristics of the turbulent agglomeration for the submicron particulates (a) particle size distributions, (b) number percentage, (c) volume percentage and (d) removol efficiency

效率和 $PM_{0.1}$ 脱除效率随进口流速的变化曲线，图中虚线为采用二次函数的多项式拟合曲线。

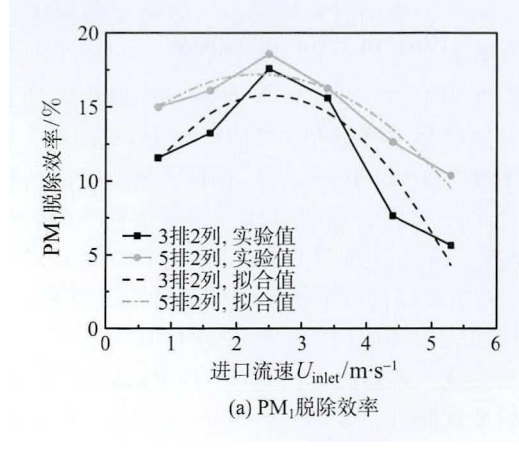
表 2 湍流团聚前后亚微米颗粒主要变化

Table 2 The main changes before and after agglomeration

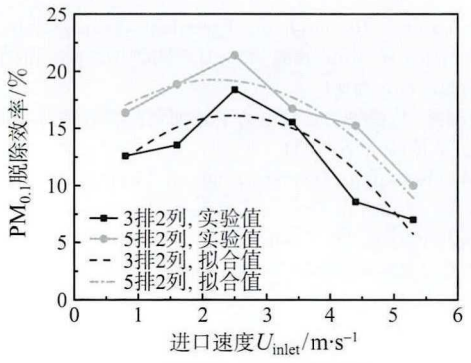
参数名称	进口	出口
亚微米颗粒数量浓度/cm^{-3}	7.92×10^6	5.76×10^6
峰值粒径 D_{pk}/nm	68.5	66.1
中位径 D_{50}/nm	71.0	73.7
PM_1 脱除效率/%	18.6	
$PM_{0.1}$ 脱除效率/%	21.4	

根据图 6(a)、(b)，进口流速为 0.8~5.3 $m\cdot s^{-1}$ 条件下，PM_1 和 $PM_{0.1}$ 的脱除效率分别为 5.6%~18.6%和 7.0%~21.4%。相同进口流速条件下，$PM_{0.1}$ 脱除效率略高于 PM_1 脱除效率，原因是湍流团聚过程中不同粒径范围颗粒同时存在以下两种现象：1) 某一粒径范围内颗粒因小颗粒团聚造成该粒径范围内颗粒数量增加；2) 某一粒径范围内颗粒团聚形成大颗粒造成该粒径范围内颗粒数量减少。相同进口流速情况下，$PM_{0.1}$ 与 PM_1 相比，现象 (1) 相对现象 (2) 发生的概率更高，因而 $PM_{0.1}$ 脱除效率总是略高于 PM_1 脱除效率。同时，相同进口流速条件下，5 排 2 列的颗粒脱除效率总是略高于 3 排 2 列，这表明扰流元件沿气体流向方向排数的增加有利于脱除效率的提高。

进一步分析，可看出曲线随流速变化均呈现二次函数变化规律，表现为脱除效率随速度增加逐渐提高，当速度达到 2.5 $m\cdot s^{-1}$ 时脱除效率达到极大值，然后脱除效率随速度增加逐渐降低。主要原因是，流速较低时湍流扰动不强烈，而流速较高时颗粒在扰流元件部分没有足够停留时间，两种情况均



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(b) $PM_{0.1}$脱除效率曲线

图 6 亚微米颗粒脱除效率随进口流速的变化

Fig. 6 Relationship between removal efficiency and inlet velocity of (a) PM_1, (b) $PM_{0.1}$

导致颗粒的碰撞概率和团聚效果降低。因此，仅当颗粒流场中湍流扰动和颗粒停留时间达到最优化条件时，湍流团聚才能使颗粒实现最佳的团聚效果。

3 结　论

本文搭建亚微米颗粒湍流团聚实验平台，采用场发射扫描电镜 (FESEM) 和扫描电迁移率粒径谱仪 (SMPS) 分别对颗粒团聚形貌进行微观分析和对团聚前后的颗粒粒径分布进行宏观测量，得到主要结论如下所述：

1) 亚微米颗粒湍流团聚可形成多分叉颗粒树结构，聚团颗粒结构不致密且团聚过程中存在颗粒破碎的可能性。亚微米颗粒湍流团聚的微观机理复杂，团聚过程中存在极化作用、碰撞变形和颗粒破碎等多种动力学行为，有待进一步深入研究。

2) 亚微米颗粒粒径分布中，小粒径颗粒数量浓度较高但体积百分比较低，而大粒径颗粒数量浓度较低但体积百分比较高。湍流团聚过程中，基数庞大的小粒径颗粒需要粘附团聚到一定程度后才能发生测试粒径的改变进而形成大粒径颗粒。

3) 进口流速为 0.8~5.3 m·s^{-1} 条件下，PM_1 和 $PM_{0.1}$ 的脱除效率分别为 5.6%~18.6%和 7.0%~21.4%，且 PM_1 和 $PM_{0.1}$ 的脱除效率曲线随速度变化呈现二次函数规律。相同流速条件下，沿气体流向扰流元件排数的增加有利于脱除效率的提高。

参 考 文 献

[1] 岳勇, 陈雷, 姚强, 等. 燃煤锅炉颗粒物粒径分布和痕量元素富集特性实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 74–79
YUE Yong, CHEN Lei, YAO Qiang, et al. Experimental Study On Characteristics of Particulate Matter Size Distribution And Trace Elements Enrichment in Emissions From A Pulverized Coal-Fired Boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 74–79

[2] Samek L, Furman L, Mikrut M, et al. Chemical Composition of Submicron And Fine Particulate Matter Collected in Krakow, Poland. Consequences for the APARIC project [J]. Chemosphere, 2017, 187: 430–439

[3] XU Peng, ZHANG Junke, JI Dongsheng, et al. Characterization of Submicron Particles During Autumn in Beijing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 63(1): 16–27

[4] WANG Junfeng , GE Xinlei , CHEN Yanfang , et al. Highly Time-resolved Urban Aerosol Characteristics During Springtime in Yangtze River Delta, China: Insights From Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(14): 9109–9127

[5] 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

[6] 许继云. 气载微细颗粒物动力学特性及数值模拟 [D]. 北京：北京大学, 2013
XU Jiyun. Dynamic Characteristics of Airborne Fine Particle and its Numerical Simulation [D]. Peking: Peking University, 2013

[7] Saffman P G, Turner J S, On the Collision of Drops in Turbulent Clouds [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1956, 1(16): 30

[8] Abrahamson J, Collision Rates of Small Particles in a Vigorously Turbulent Fluid [J]. Chemical Engineering Science, 1975, 30(11): 1371–1379

[9] Kruis F E, Kusters K A. The Collision Rate of Particles in Turbulent Flow [J]. Chemical Engineering Communications, 2007, 158(1): 201–230

[10] WANG L P, ZHOU Y, Wexler A S. Statistical Mechanical Description and Modelling of Turbulent Collision of Inertial Particles [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 415(415): 117–153

[11] ZHOU Y, Wexler A S, Wang L P. On the Collision Rate of Small Particles in Isotropic Turbulence. II. Finite Inertia Case [J]. Physics of Fluids, 1998, 10(5): 1206–1216

[12] Chun J, Koch D L. Coagulation of Monodisperse Aerosol Particles by Isotropic Turbulence [J]. Physics of Fluids, 2005, 17(2): 107

[13] Chi A H, Sommerfeld M. Modelling of Micro-particle Agglomeration in Turbulent Flow [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(15): 3073–3084

[14] 章鹏飞, 米建春, 潘祖明. 装置元件排列间距和颗粒浓度对细颗粒湍流聚并的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1625–1632
ZHANG Pengfei, MI Jianchun, PAN Zuming. Influences of Elemental Arrangement and Particle Concentration on Fine Particle Amalgamation [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1625–1632

[15] 刘含笑. 燃煤超细颗粒物涡聚并数值模拟 [D]. 北京：华北电力大学, 2012
LIU Hanxiao. The Aggregation Simulation of the Coal-Fired Ultrafine Particulate [D]. Peking: North China Power University, 2012

[16] Truce R. Enhanced Fine Particle and Mercury Emission Control Using the Indigo Agglomerator [C]//International

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Conference on Electrostatic Precipitation, 2008

[17] Duru P, Koch D L, Cohen C. Experimental study of Turbulence-induced Coalescence in Aerosols [J] International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(9): 987–1005

[18] CHEN Donglin, WU Kang, MI Jianchun. Experimental Investigation of Aerodynamic Agglomeration of Fine Ash Particles From A 330 MW PC-fired Boiler [J]. Fuel, 2016, 165: 86–93

[19] LUO Kun, WU Fan, QIU Kunzan, et al. Effects of Preferential Concentration on Collision And Erosion Between Solid Particles And Tube Bank in A Duct Flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 83: 372–381

[20] 李云飞. 燃煤烟气细颗粒物湍流团聚的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2014
LI Yunfei. Research on Turbulent Aggregation of Fine Particles in Flue Gas [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014

[21] 柳冠青. 范德华力和静电力下的细颗粒离散动力学研究 [D]. 北京：清华大学, 2011
LIU Guanqing. Discrete Element Methods of Fine Particle Dynamics in Presence of Van Der Waals And Electrostatic Forces [D]. Peking: Tsinghua University, 2011

[22] GUO Yiquan, ZHANG Junying, ZHAO Yongchun, et al. Chemical Agglomeration of Fine Particles in Coal Combustion Flue Gas: Experimental Evaluation [J]. Fuel, 2017, 203: 557–569

[23] HU Bin, YI Yang, ZHOU Lei, et al. Experimental And DFT Studies of PM2.5 Removal by Chemical Agglomeration [J]. Fuel, 2018, 212: 27–33

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net