

文章编号:1005-0523(2015)04-0124-07

# 我国超细颗粒物PM<sub>2.5</sub>团聚技术研究进展

张卫风,廖春玲

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**PM<sub>2.5</sub>对我国的大气环境造成严重的污染,已经日益引起了人们的重视和关注。PM<sub>2.5</sub>团聚技术通过物理或化学的作用使PM<sub>2.5</sub>颗粒物团聚成较大颗粒物后,利用现有的除尘设备加以清除,进而提高PM<sub>2.5</sub>的去除率。简述各种团聚技术的基本原理,综述各种团聚技术的国内研究进展,对不同团聚技术特点和应用情况进行了对比,并对其未来的研究方向进行了展望。

**关键词:**PM<sub>2.5</sub>; 团聚技术; 超细粉尘

**中图分类号:**X701

**文献标志码:**A

随着我国城市建设的繁荣发展,大气污染成为越来越突出的问题,其最主要的污染物之一就是PM<sub>2.5</sub>。PM<sub>2.5</sub>是指悬浮在空气中,空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物,直径还不到人的头发丝直径的1/20<sup>[1]</sup>。其主要来源是汽车尾气排放、锅炉燃烧、废弃物焚烧、露天烧烤、秸秆和柴草焚烧产生的一次颗粒物及其在大气中经过光化学反应形成的二次颗粒物和工业生产产生的颗粒物、建筑尘、烟草燃烧等<sup>[2-3]</sup>。

PM<sub>2.5</sub>可导致雾霾天气、降低能见度、影响交通和气候,由于其体积小、重量轻,比表面积大,在空气中滞留时间长,极易富集空气中的重金属、酸性氧化物和有机污染物等有毒有害物质,一旦被吸入体内,则引发与呼吸系统、心血管系统和中枢神经系统有关的疾病<sup>[4]</sup>。

目前国内除尘传统采用的设备主要是电除尘器和袋式除尘器,在容量超过500 MW的锅炉中,电除尘器和袋式除尘器的脱除效率分别为96.75%~99.16%和99.72%<sup>[5]</sup>。在工业生产过程当中产生的粉尘颗粒物的尺寸范围很大,包括了从亚微米的分子簇到毫米级微粒,在正常运行工况下电除尘器对于超细颗粒物的脱除效果不够理想,仍有高达15%的颗粒排入大气中<sup>[6]</sup>。虽然袋式除尘器的脱除效率高于电除尘器,但仍无法满足PM<sub>2.5</sub>的脱除效率应高于99.9%的要求<sup>[7]</sup>。由于除尘后工业排放的大部分颗粒物的粒径都小于 $2.5 \mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>,因此在传统的电除尘器和布袋除尘器前的增设预处理阶段,通过团聚技术使PM<sub>2.5</sub>颗粒物团聚成较大颗粒物后加以清除,进而提高PM<sub>2.5</sub>的去除率,是当前PM<sub>2.5</sub>控制技术的发展趋势之一。

## 1 团聚技术

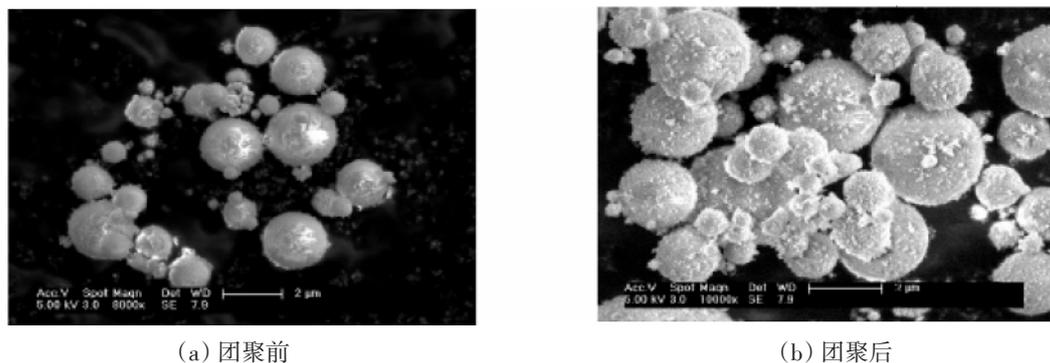
利用化学或物理方法使颗粒物发生相互碰撞并形成粒径更大的颗粒物的过程称为团聚。团聚技术主要包括声团聚技术、磁团聚技术、热团聚技术、光团聚技术、化学团聚技术、湍流团聚技术、电团聚技术、蒸汽相变团聚技术等。颗粒物团聚前后微观形貌的变化如图1所示<sup>[8]</sup>。

### 1.1 声团聚技术

声团聚技术是通过高强度声场使气溶胶中的微米和亚微米颗粒物发生相对运动,增加碰撞频率,使细颗粒物的粒径在很短的时间内从小尺寸向大尺寸范围演变的技术。Medinikov<sup>[9]</sup>较早就对声团聚技术进行了完整的研究。Gallego等<sup>[10]</sup>在流化床燃煤锅炉和静电除尘器之间安装声团聚装置,研究发现颗粒数相对

收稿日期:2014-12-26

作者简介:张卫风(1977—),男,副教授,博士,研究方向为环境工程。



(a) 团聚前

(b) 团聚后

图1 颗粒物团聚前后微观形貌

Fig.1 Microstructure before and after the particles agglomeration

于不采用声团聚时要减少37%~40%。徐鸿等<sup>[11]</sup>研究指出在1.72 kHz声波频率、140 dB声强作用下,PM<sub>2.5</sub>可减少52%~63.6%,PM<sub>10</sub>减少35.6%~53.3%。孙德帅等<sup>[12]</sup>在中等强度驻波声场中,对燃煤中的可吸入颗粒物进行了团聚清除试验研究,结果表明颗粒粒径影响声波团聚过程,直径小于1.1 μm与4.7~10 μm范围的颗粒的清除效率远远高于1.1~4.7 μm范围颗粒的清除效率。张明俊等<sup>[13]</sup>研究了声团聚数值模拟的区域算法、矩量法和蒙特卡罗方法,认为对声团聚过程进行可视化数值模拟将会是今后声团聚数值模拟研究的重要发展方向。

国内对声团聚技术的大量研究表明,该技术对于细颗粒粉尘的收集非常有效,但是由于声波发生装置能耗较高,同时还会产生大分贝噪声,造成噪声污染,并且实验室中研究结果难以直接应用,导致目前能够真正应用实际工程中的几乎没有。因此,如何产生低成本的有效声场,并避免噪声污染,是声波凝聚技术得以应用的重要研究课题<sup>[14]</sup>。

## 1.2 磁团聚技术

磁团聚就是磁性或弱磁性颗粒经磁场作用后,带有磁性的颗粒发生相对运动而相互碰撞接触、团聚和颗粒尺寸变大的技术。何叶青等<sup>[15]</sup>研究了Nd-Fe-B(钕铁硼)磁粉颗粒的磁团聚,发现颗粒的间距越小则磁团聚的作用越明显。韩松等<sup>[16]</sup>研究表明在燃煤电厂锅炉带有弱磁性的飞灰中,颗粒物粒径越小则磁团聚现象越明显,对于PM<sub>2.5</sub>的脱除效果就越明显。李永旺等<sup>[17]</sup>通过实验研究了粒径大小、颗粒质量浓度、外磁场强度以及颗粒在磁场中的停留时间对团聚脱除效率的影响,结果表明增大质量浓度粒子、增大磁感应强度和延长粒子在磁场中停留时间,可以提高飞灰粒子的团聚脱除效率;当飞灰粒子达到饱和磁化时,则团聚脱除效率不再随磁场强度的增大而发生变化。

磁团聚技术对亚微细颗粒的除尘效率是很高的,当前的问题主要是如何实现高效捕捉弱磁性颗粒和清理装置表面吸附的颗粒。这些问题极大限制了磁团聚技术的实际应用。

## 1.3 热团聚技术

热团聚又称为热扩散聚并,是指含超细颗粒物的气固两相流流经存在温度场的流道,使颗粒物受热泳力作用向冷壁面运动,并在冷壁面上发生沉积团聚的技术。流场环境中的温度越高,颗粒物的布朗运动会越快,布朗力作用效果就越显著,就越有利于细颗粒物的团聚。Lind等<sup>[18]</sup>在滴管炉内进行了燃烧实验,研究了初始温度氧气浓度对燃煤飞灰颗粒热团聚效果的影响,结果表明:当氧气浓度为15%时,燃烧温度较高,颗粒发生团聚,产生的颗粒团粒径较大。许世森<sup>[19]</sup>研究了细微尘粒的预团聚对旋风分离器高温除尘性能影响,结果发现在高温条件下,细颗粒物的预团聚可提高装置的除尘效率。杨瑞昌等<sup>[20]</sup>提出了PM<sub>2.5</sub>颗粒在温度场内沉积效率的经验公式。

在目前研究中,热团聚的团聚过程十分缓慢,而且热团聚的最佳沉积效率最高只能达到30%,目前要推广应用还比较困难。

#### 1.4 光团聚技术

光团聚是指利用激光辐射原理促进细颗粒团聚的技术。Lushnikov等<sup>[21]</sup>通过机理分析认为细颗粒光凝聚过程为:入射电子束→等离子体膨发→等离子体云膨胀→成核→冷凝膨胀长大+等离子体云膨胀→凝结→不规则片状形→团聚→凝胶化。Di等<sup>[22]</sup>研究改变激光传播的折射角、光的强度变化等多种参数对颗粒数目、粒径和形态的影响,结果发现细小颗粒物粘结成紧促凝聚结构,并呈现出各种不规则片状结构。目前光凝聚技术投资成本较高,技术尚不够成熟,仍处于研究阶段。

#### 1.5 化学团聚技术

化学团聚技术是使用各种吸附剂通过化学反应促使细颗粒凝聚变大的技术。对于燃煤锅炉飞灰,可以分为燃烧中凝聚和燃烧后凝聚,前者是指在炉膛内喷入凝聚剂或直接在煤粉中混入固态凝聚剂,后者是指在电除尘器入口处喷入凝聚剂<sup>[14]</sup>。Zhuang等<sup>[23]</sup>通过试验研究发现燃烧时加入吸附剂、烟道内加入粘结剂可以有效促进细颗粒的凝聚。Mao等<sup>[24]</sup>对SO<sub>2</sub>和促进细颗粒物团聚长大综合协同脱除进行了理论分析。Rajniak等<sup>[25]</sup>研究不同密度、黏度、液滴大小的团聚促进剂对颗粒物团聚效果的影响,得到了颗粒物团聚与团聚促进剂浓度的关系。赵永椿等<sup>[26-29]</sup>利用由SiO<sub>2</sub>细颗粒(平均粒径0.10 μm)与预热空气配成的模拟烟气,研究了团聚促进剂溶液浓度、pH值和细颗粒物浓度以及团聚室温度等因素对颗粒物团聚效果的影响,结果表明化学团聚对超细颗粒物的脱除效果显著,喷入团聚促进剂的烟尘排放浓度远比无团聚的情况要低。刘加勋等<sup>[30]</sup>基于快速沉降理论,提出了一种燃煤细颗粒化学凝聚模型。董勇等<sup>[31]</sup>研究发现在流态化脱硫塔中加入团聚促进剂,可显著提高脱硫灰对细颗粒物的团聚效果。赵汶等<sup>[32]</sup>研究了在添加团聚促进剂前后,细颗粒物浓度及其粒度分布的变化,结果表明化学团聚技术有效促进颗粒物团聚。

化学凝聚技术不仅对细颗粒脱除效果显著,还可以实现多种污染物同时脱除,具有较好的商业前景,但廉价实用的高效化学团聚促进剂很难获得,对于烟气量大的情况还须添加大量的吸附剂,增加运行成本。另外,燃烧中喷入团聚剂还会影响锅炉的热效率及其运行,同时化学凝聚还可能造成二次污染。因此研究高效的团聚剂是今后研究的趋势。

#### 1.6 湍流团聚技术

湍流团聚技术是指颗粒物在湍流流场中运动时,不同粒径的颗粒随流场运动,颗粒之间发生碰撞、团聚的技术。许世森<sup>[33]</sup>研究发现在湍流场中热团聚、梯度团聚和湍流团聚同时存在的现象,随着细颗粒物的粒径增大,3种团聚作用依次增强,湍流脉动速度对于粒径较小的颗粒团聚效果显著。魏凤等<sup>[28]</sup>研究表明湍流场中热团聚、梯度团聚和湍流团聚共存,并且颗粒物的粒径越大,团聚作用就越强。刘忠等<sup>[34-35]</sup>利用数值方法模拟了细颗粒物在湍流场中的运动轨迹及团聚效果,结果表明:流场流速越大,颗粒受到湍流扰动的影响就越大,湍流团聚的效率就越高;湍流场中热团聚、布朗团聚和湍流团聚同时存在,但湍流团聚发挥主要作用,布朗团聚和热团聚的作用可以忽略。

由于我国湍流团聚技术起步较晚和湍流本身的复杂性,目前,我国湍流团聚的研究主要在理论和数值模拟方面。我国单独使用湍流团聚技术脱除细颗粒并未见工业应用的报道,目前主要将该技术作为一种辅助设备,同其他团聚技术相结合使用,因而湍流团聚技术在国内进行大规模推广应用任重而道远。

#### 1.7 电团聚技术

电团聚技术是通过使细颗粒物荷电,促进细颗粒物以电泳方式到达其他细颗粒表面,从而增强颗粒间团聚的技术。近年来,电团聚技术发展较快,应用结果表明,使用电团聚技术的电除尘器去除可吸入颗粒物的效果可提高30%~40%<sup>[36]</sup>。

目前,电团聚技术广泛应用在4个方面:异极性荷电粉尘的库仑团聚、同极性荷电粉尘在交变电场中的团聚、异极性荷电粉尘在交变电场中的团聚和异极性荷电粉尘在直流电场中的团聚。

Watanabe<sup>[37]</sup>在交变电场中采用三区式静电团聚除尘器对同极性颗粒进行了实验研究,当频率在5 Hz

区域上下浮动时,0.06~12 μm范围内的除尘效率由常规的电除尘器的95%提高到98%。罗果萍等<sup>[38]</sup>建立了亚微米粒子电团聚过程的分形生长数学模型,对亚微米尘粒电团聚进行了分形研究。赵爽等<sup>[39]</sup>进行了电团聚脱除可吸入颗粒物的试验研究,结果表明,在0.5~1.0 μm粒径段的细颗粒物的团聚效率远远高于相同工况下其他粒径的颗粒。陈旺生等<sup>[40]</sup>发现当离子风速为2 m·s<sup>-1</sup>左右,偶极荷电静电除尘器对细颗粒物的除尘效率远高于普通的静电除尘器。刘道清等<sup>[41]</sup>提出了一体式双极荷电团聚方法,由于在整个电场长度上均产生荷电与团聚效应,该团聚方法团聚效果显著。

在多种团聚技术中,电团聚是最可行的团聚方式,将其和静电除尘器结合可显著提高PM<sub>2.5</sub>的脱除效果,在工业应用上具有很大的潜力。国内某公司自主研发双极荷电团聚技术,利用该技术和电除尘器结合对烟气量25 000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>、入口烟尘浓度为10.4 g·m<sup>-3</sup>的工况进行实验,结果显示PM<sub>2.5</sub>的质量浓度下降了15.9%,数量浓度下降了20.8%<sup>[42]</sup>。

### 1.8 蒸汽相变团聚技术

蒸汽相变团聚是指在过饱和蒸汽环境中,蒸汽以PM<sub>2.5</sub>固体颗粒为凝结核发生相变凝结,并在热泳力和扩散泳力作用下促使颗粒迁移运动,相互碰撞接触,从而使PM<sub>2.5</sub>颗粒凝并长大的技术。早在1951年,Schauer<sup>[43]</sup>研究发现利用蒸汽可显著提高文丘里洗涤器对超细颗粒物的脱除效率。Bologa<sup>[44]</sup>等采用蒸汽相变团聚结合静电除尘器技术,对平均粒径为66 μm、浓度35~55 g·m<sup>-3</sup>的颗粒进行脱除研究,结果表明脱除效率可达到90%~95%。杨林军等<sup>[45-48]</sup>根据湿法脱硫塔内烟气的高湿特性与蒸汽相变促进PM<sub>2.5</sub>凝并长大的原理,提出了利用蒸汽相变团聚技术促使PM<sub>2.5</sub>长大并高效脱除PM<sub>2.5</sub>的控制新方法,并且建立了相应的实验装置,系统地研究了在不同操作条件下PM<sub>2.5</sub>的脱除效率,结果发现随着烟气过饱和度的升高、除雾器效率的提高和颗粒数量浓度的减小,蒸汽相变促进细颗粒物脱除作用增强。凡凤仙等<sup>[49]</sup>通过理论分析发现蒸汽相变凝结后的颗粒粒径趋于一致,初始颗粒物的粒径分布(粒度、分散度)对颗粒增长的宏观效果影响很小。对于湿法脱硫工艺、半干半湿法脱硫工艺、湿式除尘工艺,由于这些工艺均需喷水或添加蒸汽,因而可以和蒸汽相变团聚技术相结合,提高这些工艺在应用中的经济优势。

## 2 各类团聚技术的比较

各类团聚技术的比较见表1。

表1 各类团聚技术情况

Tab.1 Different agglomeration technologies

名称	对细颗粒物团聚效果	特点	缺点	工程应用情况
声团聚技术	好	声波作用时间不能太长	能耗高,噪声污染	几乎没有工程应用
磁团聚技术	好	飞灰中磁性颗粒物的多少影响团聚效果	弱磁性颗粒物的捕集效率低,装置表面吸附的颗粒如何清除	限制工程实际应用
热团聚技术	较差	最佳沉积效率最高只能达到30%	团聚过程缓慢	推广应用比较困难
光团聚技术	一般	通过改变激光的强度等可以促进团聚	投资成本高,技术不成熟	尚处于研究阶段
化学团聚技术	好	安全无毒,可以同时去除多种污染物	可能造成二次污染	具有良好的应用前景
湍流团聚技术	一般	只有在较大的流场扰动条件下,团聚效果才明显	湍流本身很复杂,理论并不完善	同其他团聚技术相结合使用
电团聚技术	好	电荷分布影响团聚效果	总体还处于研究阶段	最可行的团聚技术,应用潜力很大
蒸汽相变团聚技术	一般	团聚需要较高的过饱和的蒸汽环境	与烟气脱硫同时使用,会削弱蒸汽效果	与湿式除尘工艺相结合使用

### 3 结语与展望

超细颗粒物 $PM_{2.5}$ 对人体健康以及环境造成极大的危害, $PM_{2.5}$ 团聚技术可以有效地促使颗粒物团聚变大从而被现有的除尘设备加以去除,进而提高除尘效率,减少 $PM_{2.5}$ 的排放,减轻对环境的污染。目前虽然我国超细颗粒物 $PM_{2.5}$ 团聚技术的相关研究取得了一定的研究进展,但尚存在一些问题有待进一步研究,为此笔者提出以下几点建议:

1)  $PM_{2.5}$ 团聚机理以及相关影响因素的研究。国内目前的研究多集中在利用各类团聚技术提高脱除细颗粒效率方面,由于 $PM_{2.5}$ 的微观性和复杂性,相关的团聚控制机理研究较弱,不确定因素较多,制约着 $PM_{2.5}$ 团聚技术的发展。因此应进一步通过试验深入研究 $PM_{2.5}$ 团聚机理以及相关影响因素,并积极探讨团聚技术有关的研究思路和方法,从而有效控制 $PM_{2.5}$ 的排放。

2)  $PM_{2.5}$ 团聚技术工程应用方面的研究。团聚技术工程应用价值在于将 $PM_{2.5}$ 进行团聚的同时,除尘系统运行安全稳定,也在于一次性投资和运行成本。如对于声团聚技术,如何产生低成本的稳定有效声场,使声团聚技术得以应用;在磁团聚技术中如何高效捕捉弱磁性颗粒和清理装置表面吸附的颗粒物将是未来研究的方向;在热团聚技术中如何缩短热团聚过程将大幅度提高热团聚技术的最佳沉积效率;在化学团聚中研究高效的化学团聚剂是化学团聚技术未来的重要研究方向之一。

3)  $PM_{2.5}$ 团聚技术应用中如何防止二次污染问题的研究。团聚技术的研发主要是为了提高除尘器中 $PM_{2.5}$ 的去除率,如果在团聚的过程中出现二次污染,如声团聚技术中的噪声污染,化学团聚中添加的团聚促进剂可能造成的污染等,将大大影响该技术的应用。因此 $PM_{2.5}$ 团聚技术的二次污染预防问题也将是未来研究的方向之一。

4)  $PM_{2.5}$ 团聚技术之间相互结合的混合团聚技术研究。不同的团聚技术都有其自身的优缺点,有些团聚技术由于其缺点已经很大程度影响该技术的未来发展,如果将其与其他团聚技术结合,取长补短,从而高效经济的去除 $PM_{2.5}$ 是未来团聚技术的重要方向之一。双极荷电湍流团聚技术就是有效的例证,该技术有效结合了双极电团聚技术和湍流团聚技术,研究技术成熟,运行可靠, $PM_{2.5}$ 团聚效果显著,在工程应用中具有巨大潜力。

#### 参考文献:

- [1] 刘小峰.  $PM_{2.5}$ 及其工业源头控制技术[J].中国环保产业,2012(8):27-30.
- [2] 吕艳萍,耿超,李春蕾,等. 大气中  $PM_{2.5}$ 的现状分析及新的思考[J].环境科学与技术, 2012,35(6):151-154.
- [3] 吴善兵. 我国  $PM_{2.5}$ 的组成来源及控制技术综述[J].海峡科学,2013(9):28-40.
- [4] 陈隆枢. 袋式除尘技术对 $PM_{2.5}$ 控制的探讨[J].中国环保产业,2013(7):21-27.
- [5] YAO Q, LI S H, XU H W, et al. Studies on formation and control of combustion particulate matter in China: a review [J]. Energy, 2010, 35(4):4480-4493.
- [6] 赵爽. 电凝并脱除可吸入颗粒物的实验研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [7] 邓文义,沈恒根,苏亚欣. 燃烧源 $PM_{2.5}$ 控制技术现状及展望[J].环境工程,2014(7):85-90.
- [8] 刘胜强,曾毅夫,周益辉,等. 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的控制与脱除技术[J].中国环保产业,2014(6):16-20.
- [9] MEDNIKOW E P. Acoustic coagulation and precipitation of aerosols[M]. New York: Consultants Bureau Translated from Russian, 1965:26-35.
- [10] GALLEGO-JUAREZ J A, DE SARABIA E R F, RODRIGUEZ-CORRAL G, et al. Application of acoustic agglomeration to re-

- duce fine particle emissions from coal combustion plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(21): 3843–3849.
- [11] 徐鸿, 骆仲泐, 王鹏, 等. 声波团聚对燃煤电厂可吸入颗粒物的排放控制[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2007(7): 1168–1171.
- [12] 孙德帅, 郭庆杰. 可吸入颗粒物声场团聚试验研究[J]. *化学工程*, 2010, 38(4): 81–84.
- [13] 张明俊, 凡凤仙. 细颗粒物的声凝并数值模拟研究进展[J]. *化工进展*, 2012, 31(8): 1671–1676.
- [14] 郦建国, 吴泉明, 胡雄伟, 等. 促进PM<sub>2.5</sub>凝聚技术及研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(6): 89–96.
- [15] 何叶青, 周寿增, 宋琪, 等. Nd-Fe-B粉末颗粒间的磁团聚现象及有限元模拟计算[J]. *功能材料*, 2002, 33(2): 154–157.
- [16] 韩松, 赵长遂, 吴新, 等. 燃煤飞灰中可吸入颗粒物在磁场中聚并收尘试验研究[J]. *锅炉技术*, 2006(S1): 12–15.
- [17] 李永旺, 吴新, 赵长遂, 等. 均匀磁场中磁种聚并脱除燃煤PM10实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(17): 23–28.
- [18] LIND T, KAUPPINEN E I, SRINIVASACHAR S, et al. Submicron agglomerate particle formation in laboratory and full-scale pulverized coal combustion[J]. *Aerosol Sci*, 1996, 27: S361–S362.
- [19] 许世森. 细微尘粒的预团聚对旋风分离器高温除尘性能影响的实验研究[J]. *动力工程*, 1999, 19(4): 309–314.
- [20] 杨瑞昌, 周涛, 刘若雷, 等. 温度场内可吸入颗粒物运动特性的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(2): 259–261.
- [21] LUSHNIKOV A A. Laser induced aerosols[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1996, 133: 377–378.
- [22] DI STASIO S, MASSOLI P, LAZZARO M. Retrieval of soot aggregate morphology from light scattering/extinction measurements in a high-pressure high-temperature environment[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1996, 27(6): 897–913.
- [23] ZHUANG Y, BISWAS P. Submicrometer particle formation and control in a bench-scale pulverized coal combustor[J]. *American Chemical Society*, 2001, 27(3): 510–516.
- [24] MAO D M, Eduards J R, Kuznetsov A V, et al. Three-dimensional numerical simulation of a circulating fluidized bed reactor for multi-pollutant control[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(20): 4279–4289.
- [25] RAJNIK P. Experiment study of wet granulation in fluidized bed: Impact of the binder properties on the granule morphology[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2007, 334(1/2): 92–102.
- [26] 赵永椿, 张军营, 魏凤, 等. 燃煤超细颗粒物团聚促进机制的实验研究[J]. *化工学报*, 2007, 58(11): 2876–2881.
- [27] 李海龙, 张军营, 赵永椿, 等. 燃煤细颗粒固液团聚实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(29): 63–64.
- [28] 魏凤, 张军营, 王春梅, 等. 煤燃烧超细颗粒物团聚促进技术的研究进展[J]. *煤炭转化*, 2003, 26(3): 27–31.
- [29] 魏凤. 燃煤亚微米颗粒的形成和团聚机制的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [30] 刘加勋, 高继慧, 高建民, 等. 基于快速聚沉理论的燃煤颗粒物化学团聚模型[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(10): 1388–1393.
- [31] 董勇, 齐国杰, 崔琳, 等. 循环流化床烟气脱硫工艺中颗粒增湿团聚现象的分析[J]. *动力工程*, 2009, 29(7): 671–675.
- [32] 赵汶, 刘勇, 鲍静静, 等. 化学团聚促进燃煤细颗粒物脱除的试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(20): 52–58.
- [33] 许世森. 细微尘粒的预团聚对旋风分离器高温除尘性能影响的实验研究[J]. *动力工程*, 1999, 19(4): 309–314.
- [34] 刘忠, 刘含笑, 冯新新, 等. 湍流聚并器流场和颗粒运动轨迹模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(14): 71–75.
- [35] 刘忠, 刘含笑, 冯新新, 等. 超细颗粒物聚并模型比较研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2012, 18(3): 212–216.
- [36] WILKINS J, WILKINSON L, LI D F. Emission reductions at a Chinese power station[C] // *The 11<sup>th</sup> International Conference on Electrostatic Precipitation*, Hangzhou, 2008: 215–222.
- [37] WATANABE T. Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator[J]. *J Electrostatics*, 1995, 34: 367–383.
- [38] 罗果萍, 郭卓团, 张学锋. 亚微米尘粒电凝并的分形研究[J]. *中国稀土学报*, 2004, 22(8): 142–147.
- [39] 赵爽, 骆仲泐, 王鹏, 等. 燃烧锅炉烟气中小颗粒的电凝并脱除[J]. *能源工程*, 2006(3): 34–39.
- [40] 陈旺生, 向晓东, 陆继东. 偶极荷电静电凝并除尘器收尘机理及性能研究[J]. *环境工程学报*, 2008(7): 973–976.
- [41] 刘道清, 何剑, 徐国胜. 一体式双极荷电凝并器试验研究及应用构想[J]. *宝钢技术*, 2014(1): 14–17.
- [42] 祝冠军, 周林海, 余顺利, 等. 燃煤电厂PM<sub>2.5</sub>及其治理技术[J]. *电站系统工程*, 2012, 28(4): 19–20.
- [43] SCHAUER P J. Removal of submicron particles from a moving gas stream[J]. *Industrial Engineering & Chemistry*, 1951, 43(7): 1532–1538.
- [44] BOLOGA A, PAUR H R, WASCHER T. Electrostatic charging of aerosol as a mechanism of gas cleaning from submicron particle[J]. *Filtration & Separation*, 2001, 38(10): 26–30.

- [45] 颜金培,杨林军,鲍静静,等. 氨法脱硫过程烟气中细颗粒物的变化特性[J]. 中国电机工程学报,2009,29(5):21-26.
- [46] 鲍静静,印华斌,杨林军,等. 湿式氨法烟气脱硫中气溶胶的形成特性研究[J]. 高校化学工程学报,2010,24(2):325-330.
- [47] 颜金培,杨林军,沈湘林. 氨法脱硫烟气中气溶胶凝结脱除动力学[J]. 中国电机工程学报,2011,31(29):41-47.
- [48] 刘锦辉,杨林军,熊桂龙,等. LIFAC 烟气脱硫中应用蒸汽相变促进细颗粒物脱除的实验研究[J]. 燃烧化学学报,2011,39(1): 1-7.
- [49] 凡凤仙,张明俊. 蒸汽相变凝结对  $PM_{2.5}$  粒径分布的影响[J]. 煤炭学报,2013,38(4):694-699.

## Research Review on Agglomeration Technologies of Submicron Particles $PM_{2.5}$ in China

Zhang Weifeng, Liao Chunling

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Along with serious pollution of  $PM_{2.5}$  in the atmosphere, more and more attention and concern are caught in China. Through  $PM_{2.5}$  agglomeration technology,  $PM_{2.5}$  particles are gathered into larger particles and are removed by existing dust removal equipment. Thus the removal efficiency of  $PM_{2.5}$  can be improved. In this paper the basic principle of various agglomeration technologies are described briefly, and the domestic various key agglomeration technology research progress is summarized. Features and applications of various agglomeration technologies are compared, and the future research tendency is analyzed as well.

**Key words:**  $PM_{2.5}$ ; agglomeration technology; ultrafine dust

(责任编辑 刘棉玲)