

# 对喷流协同蒸汽相变对燃煤细颗粒脱除性能的影响

熊桂龙, 杨林军, 颜金培, 陆斌, 耿俊峰

(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

## Removal of Fine Particles From Coal Combustion by Combined Impinging Streams and Heterogeneous Condensation

XIONG Guilong, YANG Linjun, YAN Jinpei, LU Bin, GENG Junfeng

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** The removal of fine particles from coal combustion was investigated experimentally based on impinging streams and heterogeneous condensation, with electrical low pressure impactor and Vaisala-HMT337 type temperature and humidity sensor. The influence of the operating parameters on fine particles removal efficiency was analyzed. The experimental results show that increased addition amount of steam and velocity of flue gas brings higher removal efficiency. An increase in horizontal gap between the opposing impinging causes an increased collect efficiency firstly, but then decreased. The mesh demister mounted at the top of the heterogeneous condensational growth chamber has better performance in removal particles than corrugated plate demister. Removal efficiency can be effectively promoted by adding volatile wetting agent glycol to flue gas, but not distinct by adding isooctyl alcohol or ethylenediamine. Fine particles can be removed effectively by adopting the combined impinging streams and heterogeneous condensation technology.

**KEY WORDS:** heterogeneous condensation; impinging streams; fine particles; removal

**摘要:** 以燃煤锅炉产生的含尘热烟气为对象, 采用电称低压冲击器(electrical low pressure impactor, ELPI)和 Vaisala-HMT337 型温湿度变送器测试仪器, 研究倾斜对喷流与蒸汽相变相结合的方法对燃煤细颗粒的脱除性能, 实验考查烟气对喷流速、烟气对喷间距、蒸汽添加量、除雾器类型、添加润湿剂等对细颗粒脱除效率的影响规律。研究结果表明: 采用对喷流和蒸汽相变技术相结合的方法可以高效脱除细颗粒物; 细颗粒脱除效率随烟气对喷间距的增大先提高后降低, 随烟气流速和蒸汽添加量的增大而提高; 相变室出口安

装丝网除雾器的脱除效果优于采用板波纹除雾器; 烟气中添加挥发性乙二醇润湿剂对细颗粒脱除有一定的促进效果。

**关键词:** 蒸汽相变; 对喷流; 细颗粒物; 脱除

## 0 引言

细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)污染已成为我国突出的大气环境问题, 是导致大气能见度降低、酸雨、灰霾天气和全球气候变化等重大环境问题的重要因素。虽现有除尘技术对总颗粒物的脱除效率已达到很高水平, 但对细颗粒物的捕集率却较低, 造成大量细颗粒物排入大气环境<sup>[1-2]</sup>。燃煤电厂是大气细颗粒物的主要来源; 因此, 控制燃煤电厂细颗粒排放是迫切需要解决的问题。

目前控制 PM<sub>2.5</sub> 的主要途径是采取预处理措施, 使其通过物理或化学作用长大成较大颗粒后加以脱除。其中, 将蒸汽相变技术与现有燃煤锅炉湿法烟气脱硫技术结合是最有可能实现工程应用的重要途径之一; 利用过饱和水汽在细颗粒物表面的核化凝结是促使细颗粒物长大及其脱除的重要措施, 已有较多报道<sup>[3-8]</sup>。但已有研究中, 应用蒸汽相变促进细颗粒物长大通常在一空的腔体(相变室)中进行, 相变室内水汽和含细颗粒物烟气混合不均匀, 导致不少水汽未能在细颗粒物表面凝结而直接由烟气带走。同时, 鉴于细颗粒凝结长大后成为外表面覆盖一层液膜的含尘雾滴, 需与可脱除雾滴的除尘设备配套, 其中高效除雾器是最适宜的设备之一, 其对粒径 3~5 μm 以上的雾滴有较佳的脱除效果。虽理论上, 提高蒸汽添加量, 可使细颗粒物凝结长大至更大的尺寸, 但由于蒸汽相变潜热的释放、加入蒸汽后烟温的上升及其过高水汽过饱和度

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划项目(2008AA05Z306); 江苏省自然科学基金项目(BK2008283)。

The National High Technology Research and Development of China (2008AA05Z306); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK-2008283).

下的均相成核作用,对于 $PM_{2.5}$ 中的亚微米级微粒,单靠过饱和水汽在颗粒物表面的凝结作用,长大至 $3\sim 5\mu m$ 以上有一定难度,且过高的蒸汽添加量会导致能耗过大。对喷流是强化相间传递和促进混合(尤其是微观混合)最有效的方法之一;同时,气流携带的颗粒物相向撞击可导致颗粒间剧烈的碰撞,对于高湿、高黏附性细小颗粒(如细雾滴),会因碰撞而相互团聚长大<sup>[9-17]</sup>;伍沅等<sup>[18-19]</sup>研究发现微米级雾滴撞击后倾向于团聚长大,几十至几百微米的大雾滴撞击后倾向分裂,使撞击后雾滴粒径分布变窄;利用这一特性,可促进表面凝结有水膜的细颗粒物进一步碰撞凝并长大。但对喷流技术在蒸汽相变促进细颗粒物长大中未见应用。

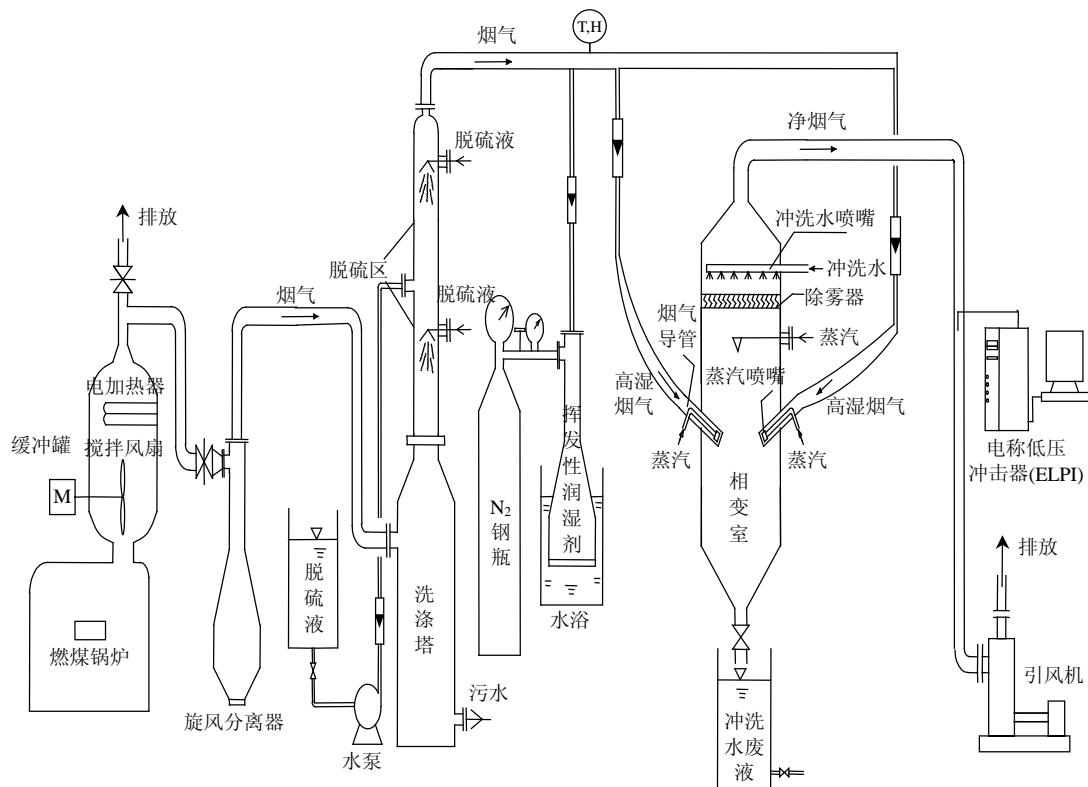
本文以燃煤湿法脱硫烟气为研究对象(烟气量 $150 m^3/h$ ),采用倾斜式对喷流与蒸汽相变结合的方法,实验研究了烟气对喷流速、烟气对喷距离、蒸汽添加量、润湿剂、除雾器类型等对细颗粒脱除效率的影响规律,考查对喷流的除尘性能;为应用对喷流与蒸汽相变促进细颗粒物的脱除提供理论基础。

## 1 试验部分

### 1.1 试验系统

试验系统如图1所示,主要由含细颗粒烟气发生系统、缓冲罐、扩散式旋风除尘器、湿法脱硫系统、对喷流相变室、测试控制系统等组成。

由全自动燃煤锅炉产生的含尘烟气经缓冲罐



T、H—温度、湿度测点。

图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

进入扩散式旋风除尘器,脱除粗颗粒后进入喷淋脱硫塔,脱硫后处于或接近饱和状态的高湿烟气分成等量的2股,经倾斜(倾角 $30^\circ$ )对称布置的烟气导管与注入的蒸汽(蒸汽压力为 $0.4 MPa$ ,温度为 $120^\circ C$ )混合后进入倾斜对喷流相变室,在相变室内细颗粒发生凝增长大和碰撞团聚,长大后的细颗粒经设置在相变室顶部的除雾器进行脱除。缓冲罐内装有搅拌风扇和电加热管,用于保证烟尘浓度及粒径分布

的稳定性和调节烟气温度。缓冲罐及管路均包有陶瓷棉进行保温。水浴加热的挥发性润湿剂以钢瓶 $N_2$ 为载气加入到含细颗粒的燃煤烟气中。

### 1.2 试验测试方法

采用电称低压冲击器(electrical low pressure impactor, ELPI)实时在线测量细颗粒的浓度和粒径分布,粒径测量范围为 $0.023\sim 9.314\mu m$ 。测量时由于烟气含湿量较高,水蒸气易在采样管路及 ELPI

冲击盘上凝结,影响测量结果,因此,对采样管路进行了加热保温处理,并用加热的高温净化空气做为稀释气,稀释比为 8.19:1。在相变室前设有温湿度测点,采用 Vaisala-HMT337 型温湿度变送器(精度:湿度 $\pm 1\%$ RH,温度 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ )测定相变室进口烟气温度和相对湿度。烟气中  $\text{SO}_2$  浓度采用德国 MRU 公司生产的 Delta 2000CD-IV 型烟气分析仪( $\text{SO}_2$  精度为 $\pm 5 \times 10^{-6}$ )测试。

### 1.3 试验颗粒

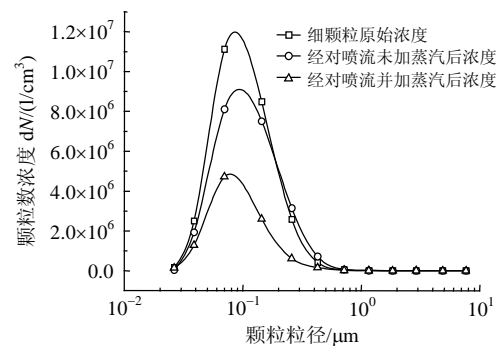
试验用的燃煤细颗粒由全自动燃煤锅炉产生,燃用煤种为无烟煤。燃煤产生的细颗粒大多呈表面粗糙的球形结构,大小较为均匀,颗粒之间相互堆积在一起,主要成分有 Si、Al、Ca、O 等元素,占 75.99%,其余为 Na、Mg、S、K 等次要元素,从其主要元素的种类可知,燃煤细颗粒主要是难溶于水的硅铝质矿物颗粒。燃煤烟气经石灰石-石膏湿法脱硫系统后,细颗粒大多呈大小较均匀的球形结构,但含少量微米级的块状结构颗粒;同时, Ca、S、O 元素含量增加,这可能是烟气经  $\text{CaCO}_3$  脱硫液洗涤后,颗粒中含有脱硫形成的  $\text{CaSO}_3$ 、 $\text{CaSO}_4$  晶粒及  $\text{CaCO}_3$  颗粒等<sup>[20]</sup>。

## 2 实验结果与分析

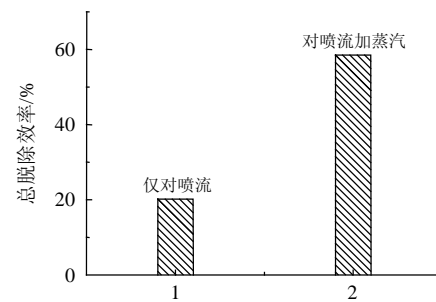
### 2.1 对喷流脱除细颗粒的性能

实验烟气中水汽含量呈饱和状态,倾斜对喷流相变室进口烟气温度为  $45\sim 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,导管中烟气流速为  $30\text{ m/s}$ ,对喷的水平间距  $S=240\text{ mm}$ ,蒸汽在烟气撞击前添加,蒸汽添加量为  $0.06\text{ kg/m}^3$ ,相变室烟气出口安装丝网除雾器。烟气经对喷流相变室前后细颗粒的脱除效率和数浓度分布变化特性如图 2 所示。

由图 2 可看出,试验细颗粒数浓度在 ELIPI 可测范围内呈单峰分布,集中分布在  $0.04\sim 0.30\text{ }\mu\text{m}$ ,大多数颗粒为亚微米级颗粒物,颗粒数浓度的峰值达到  $10^7$  个/ $\text{cm}^3$ 。未添加蒸汽时,经对喷流相变室后总脱除效率约为 20%,这主要是因为 2 股含中等黏附性燃煤细颗粒的高湿烟气在对喷流撞击区高速碰撞,使细颗粒在撞击区相互渗透及往复振荡,增加了细颗粒在撞击区的停留时间,从而使撞击区成为高浓度区,俄罗斯 Elperin 等<sup>[21]</sup>研究表明,撞击区的颗粒数浓度比周围的颗粒数浓度要高 5~7 倍,最高可达 28 倍。高浓度的撞击区增大了颗粒间发生碰撞而团聚的机率,强化了颗粒的团聚效应,团聚后粒径较大,进而提高对喷流相变室烟气



(a) 颗粒的数量浓度分布



(b) 脱除效率

图 2 对喷流促进细颗粒物脱除的性能

Fig. 2 Performance of opposing jet in particles removal

出口处除雾器的捕集效率。但仅靠细颗粒物间的碰撞团聚作用,难以使其长大至除雾器可有效脱除的粒度,脱除效率有限。

蒸汽添加量为  $0.06\text{ kg/m}^3$  时,经对喷流相变室后细颗粒数浓度峰值由  $1.2 \times 10^7$  个/ $\text{cm}^3$  减少到  $0.6 \times 10^7$  个/ $\text{cm}^3$ ,数浓度由  $2.52 \times 10^7$  个/ $\text{cm}^3$  减少到  $1.05 \times 10^7$  个/ $\text{cm}^3$ ,总脱除效率 58.3%,这是因为撞击区高度湍动的流动状态为水汽与细颗粒物的结合创造了极佳的传递与混合条件,强化了细颗粒在过饱和蒸汽中的凝结长大,另一方面,表面凝结有水膜的细颗粒物之间相互接触,液体表面张力产生的毛细黏附力形成液桥,会将两黏附体拉在一起;在高浓度的撞击区,颗粒间发生频繁碰撞,凝结有水膜的细颗粒物在毛细黏附力作用下团聚长大,强化了细颗粒的碰撞团聚效应;极大地提高了细颗粒物脱除效率。

### 2.2 蒸汽添加量对细颗粒脱除效率的影响

图 3 为蒸汽添加量对细颗粒总脱除效率的影响规律;可见,3 种蒸汽添加方式均可有效促进燃煤细颗粒的脱除,脱除效率随烟气对喷后蒸汽添加量的增加而提高,随烟气对喷前蒸汽添加量的增加先提高后趋于稳定。根据 Fletcher<sup>[22]</sup>异质成核理论,对于不可溶球形颗粒的临界过饱和度为

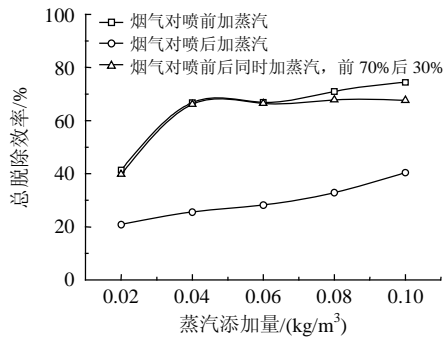


图3 细颗粒脱除效率随蒸汽添加量的变化

Fig. 3 Removal efficiency of fine particles as a function of the addition amount of steam

$$S_{cr} = \exp\left\{\frac{V_L}{kT} \left[ \frac{8\pi\sigma^3}{3kT \ln(4\pi r_p^2 K_c)} f(m_\theta, r) \right]\right\} \quad (1)$$

式中:  $k$  为波尔兹曼常数;  $T$  为水汽温度;  $V_L$  为一个水分子的体积;  $K_c$  为动力常数;  $\sigma$  为表面张力;  $r_p$  为颗粒半径;  $r$  为完全润湿的球形粒子的临界半径;  $m_\theta (\leq 1)$  为水与颗粒接触角的余弦值,  $f(m_\theta, r)$  随  $m_\theta$  的减小而增大。

由式(1)可以看出, 临界过饱和度  $S_{cr}$  与颗粒的初始粒径成反比, 临界过饱和度越大发生核化的颗粒粒径越小。

根据 Kulmala 等<sup>[23]</sup>描述颗粒凝结长大速率  $dr_p/dt$  与过饱和度  $S$  之间的关系

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{S-1}{\rho_l r_p \left[ \frac{RT}{MDp_s [1+(S+1)p_s/(2p)]} + \frac{L^2 M}{RKT^2} \right]} \quad (2)$$

式中:  $S$  为过饱和度;  $\rho_l$  为液滴的密度;  $D$  为凝结蒸汽的扩散系数;  $R_g$  为通用气体常数;  $L$  为凝结潜热;  $K$  为热导率;  $M$  为蒸汽摩尔质量;  $p_s$  为饱和蒸汽压;  $p$  为气相总压。

由式(2)可知, 颗粒凝结长大速率随过饱和度的增加而提高。

随蒸汽添加量的增加, 对喷流相变室内达到的过饱和度相应增大, 可凝结蒸汽量增多, 根据式(1)、(2)可知, 一方面可使发生核化凝结的微粒临界粒径减少, 促使更多的细颗粒发生核化凝结长大; 另一方面, 颗粒凝结长大速率提高, 微粒表面凝结的蒸汽量增多, 凝结长大后的含尘液滴粒径越大, 从而使颗粒的脱除效率随蒸汽添加量的增加而增大。

由图3还可见, 3种不同的蒸汽添加方式均可有效促进燃煤细颗粒的脱除, 其中以烟气对喷前添加蒸汽的效率最高, 对喷后添加蒸汽的效率最低, 蒸汽添加量为  $0.08 \text{ kg/m}^3$  时, 3种添加方式的脱除

效率分别为 71%, 67.8%, 32.9%。这主要是因为, 烟气对喷后添加蒸汽, 烟气和蒸汽混合很不均匀, 易造成烟气中局部蒸汽浓度过高, 过高饱和度下水汽均相成核作用和蒸汽相变潜热的释放、加入蒸汽后烟温的上升、过饱和水汽凝结的非平衡效应使得烟气过饱和度增加有限, 细颗粒长大至常规除尘(除雾)系统可高效脱除的粒度范围为  $3\sim 5 \mu\text{m}$  以上有一定的难度; 而在烟气对喷前添加蒸汽不仅可强化水汽在细颗粒表面的凝结长大, 而且凝结有水膜的细颗粒在对喷流高浓度撞击区碰撞团聚进一步长大, 大大促进了细颗粒的脱除。

### 2.3 烟气对喷流速对细颗粒脱除效率的影响

图4为不同蒸汽添加量下细颗粒总脱除效率随导管烟气流速变化的规律。

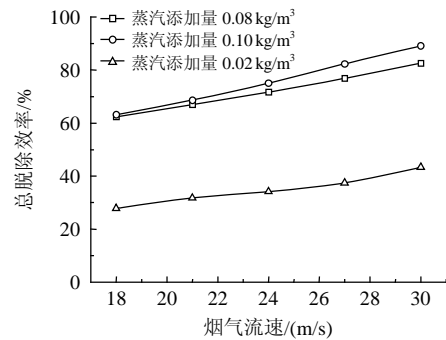


图4 烟气流速对脱除效率的影响

Fig. 4 Removal efficiency of fine particles as a function of the flue gas velocity

由图4可看出, 细颗粒的脱除效率随烟气流速的增大而增加, 蒸汽添加量  $0.10 \text{ kg/m}^3$  时, 烟气流速由  $18 \text{ m/s}$  增加到  $30 \text{ m/s}$ , 细颗粒脱除效率由 63.2% 提高到 89.1%, 提高了 25.9%, 这主要是因为烟气速度越高, 撞击区湍动程度越高, 有利于相间热质过程的传递, 强化了水汽在细颗粒表面的凝结, 促使细颗粒凝结长大; 另一方面, 烟气流速提高, 有利于细颗粒在撞击区的来回振荡, 增加颗粒在撞击区往复振荡的次数, 颗粒在撞击区的停留时间增加, 在撞击区形成高浓度区, 增加了细颗粒的碰撞机率, 强化了含尘液滴的团聚效应, 有利于促进细颗粒的脱除。因此, 在本试验条件下, 最佳烟气对喷流速为  $30 \text{ m/s}$ 。

### 2.4 烟气对喷水平间距对细颗粒脱除效率的影响

图5为不同蒸汽添加量下, 细颗粒总脱除效率随烟气对喷水平间距变化的影响规律。可以看出, 细颗粒脱除效率随烟气对喷水平间距的增加先增大后减小, 当烟气对喷水平间距为  $0.2\sim 0.24 \text{ m}$  时细

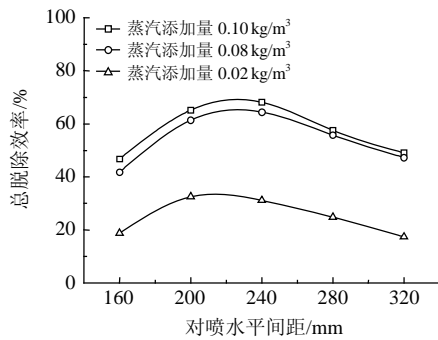


图 5 烟气对喷的水平间距对脱除效率的影响

Fig. 5 Removal efficiency of fine particles as a function of the horizontal gap between the opposing jets

颗粒的脱除效率最高，大于或小于该值会减弱相间热质传递与细颗粒在撞击区往复振荡的次数和团聚效应，从而导致细颗粒脱除效率的降低。在本试验条件下，适宜的烟气对喷距离为 0.20~0.24 m。

### 2.5 烟气中添加挥发性润湿剂对细颗粒脱除效率的影响

燃煤细颗粒物属中等憎水性颗粒，润湿性能较差，添加合适的润湿剂是改善细颗粒润湿性能进而提高其脱除效果的重要手段。润湿剂分子吸附于细颗粒物表面减小了液体与颗粒之间的接触角，由式(1)可知，接触角越小，临界过饱和度  $S_{cr}$  也越小，可发生核化的颗粒粒径越小，参与核化凝结长大的颗粒数增多。图 6 为不同蒸汽添加量下，各种挥发性润湿剂对细颗粒总脱除效率的影响。

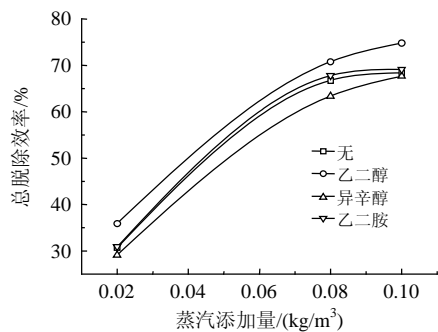


图 6 挥发性润湿剂对脱除效率的影响

Fig. 6 Influence of addition volatile wetting agent on particle removal efficiency

由图 6 可看出，烟气中添加挥发性乙二醇润湿剂对细颗粒脱除效果有较好的促进效果，当烟气中挥发性乙二醇润湿剂含量为  $3 \times 10^{-5}$ ，蒸汽添加量为  $0.10 \text{ kg/m}^3$  时，细颗粒脱除效率由 68.4% 提高到 74.8%，提高了 6.4%；而烟气中分别添加挥发性异辛醇、乙二胺润湿剂对细颗粒脱除效率的影响不明显。3 种挥发性润湿剂对细颗粒脱除效率影响差异

的原因可能是 3 种挥发性润湿剂的饱和蒸汽压不同造成的，20℃时，乙二醇、异辛醇、乙二胺 3 种润湿剂的饱和蒸汽压分别为 6.21 kPa, 48 Pa, 1.43 kPa。

### 2.6 除雾器类型对细颗粒脱除效率的影响

对喷流相变室中长大后的含尘液滴由相变室出口处的除雾器脱除，因此除雾器性能对细颗粒脱除具有决定作用。图 7 给出了各蒸汽添加量下采用 2 种不同类型的除雾器时凝并长大后的含尘液滴的脱除效率。

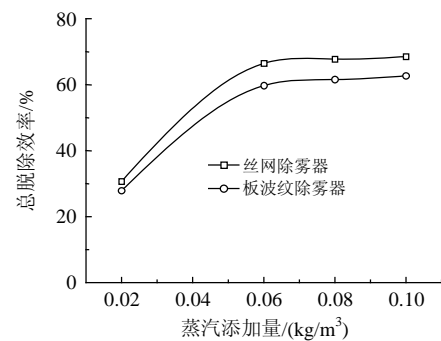


图 7 除雾器类型对脱除效率的影响

Fig. 7 Influence of demister type on particle removal efficiency

由图 7 可以看出，丝网除雾器和板波纹除雾器对凝并长大后的含尘液滴均具有较好的脱除效果，蒸汽添加量为  $0.10 \text{ kg/m}^3$  时，细颗粒的脱除效率分别为 68.5%，62.7%。在相同的蒸汽添加量下，采用高效丝网除雾器时，细颗粒脱除效率明显高于板波纹除雾器；因此，对于倾斜对喷流相变室中同时发生凝结长大和碰撞团聚后含尘液滴的脱除，选择丝网除雾器更为合适。

## 3 结论

1) 利用蒸汽相变技术与湍流对喷流技术相结合的方法脱除燃煤脱硫净化湿烟气中的细颗粒是可行的。对喷流不仅可促进水汽在细颗粒表面凝结长大，同时可使表面凝结有水膜的细颗粒物间发生相互碰撞，促使其进一步碰撞凝并长大；在蒸汽添加量为  $0.06 \text{ kg/m}^3$  时，细颗粒物的数浓度脱除率为 60%。

2) 烟气对喷速度、烟气对喷距离等对细颗粒物相变脱除效果均有一定影响，在本试验条件下，最佳烟气对喷速度为 25~35 m/s；适宜的烟气对喷距离为 0.20~0.24 m。

3) 烟气中添加挥发性润湿剂乙二醇，可改善细颗粒的润湿性能，提高细颗粒的脱除效率；烟气

中分别添加挥发性润湿剂异辛醇、乙二胺对细颗粒脱除效率的影响则不明显。

4) 除雾器类型对细颗粒脱除效率有重要影响。在相变室出口安装丝网除雾器, 细颗粒的脱除效果优于采用板波纹除雾器, 而且丝网除雾器阻力适中。

## 参考文献

- [1] 高翔鹏, 徐明厚, 姚洪. 燃煤锅炉可吸入颗粒物排放特性及其形成机理的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 11-17.  
Gao Xiangpeng, Xu Minghou, Yao Hong. Experimental Study on emission characteristics and formation mechanisms of PM10 from a coal-fired boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 11-17(in Chinese).
- [2] 张宇, 杨林军, 张霞. 文丘里洗涤器脱除燃烧源 PM2.5 的实验研究[J]. 动力工程, 2008, 28(2): 297-301.  
Zhang Yu, Yang Linjun, Zhang Xia. Removal of PM2.5 from combustion with venturi scrubber[J]. Power Engineering, 2008, 28(2): 297-301(in Chinese).
- [3] Calvert S, Jhaveri N C. Flux force condensation scrubbing[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1974, 24(10): 946-951.
- [4] Heidenreich S, Vogt U, Büttner H, et al. A novel processes to separate submicron particles from gases a cascade of packed columns [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(15): 2895-2905.
- [5] Vogt U, Heidenreich S. Separation of submicron particles in packed Columns optimization and scale up of the process[J]. Chemical Engineering Technology, 1999, 22(11): 935-942.
- [6] 颜金培, 杨林军, 张霞, 等. 凝结洗涤塔脱除燃煤超细颗粒实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 8-13.  
Yan Jinpei, Yang Linjun, Zhang Xia, et al. Experimental study on removal of ultrafine particles from coal combustion using condensation wet scrubber [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(23): 8-13(in Chinese).
- [7] 王珩, 宋蕾, 姚强, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 1-7.  
Wang Hui, Song Qiang, Yao Qiang, et al. Experimental study on removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles from a coal-fired power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 1-7(in Chinese).
- [8] 颜金培, 杨林军, 鲍静静, 等. 湿法脱硫协同蒸汽相变脱除燃煤 PM2.5 的试验研究[J]. 动力工程, 2009, 29(1): 84-89.  
Yan Jinpei, Yang Linjun, Bao Jingjing, et al. Wet flue gas desulfurization and simultaneous removal of PM2.5 fine particles from coal combustion by heterogeneous condensation[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(1): 84-89(in Chinese).
- [9] Lainer A I, Israfilov T D, Elperin I T, et al. Study of counter flow trapping of alunite dust[J]. The Soviet Journal of Non-Ferrous, 1975, 4(8): 431-45.
- [10] Lainer A I, Lainer Y A, Elperin I T, et al. Investigation of the process of trapping of roasted and reduced Aluminium-Oxide dust in impinging jets[J]. Izvestia Vyshich Uchebnich Zavedeni Non-Ferrous Metallurgy, 1975, 4(6): 51-53.
- [11] Berman Y, Tmair A. Experimental investigation of phosphate dust collection in impinging stream [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1996, 74(6): 817-821.
- [12] Berman Y, Tmair A. Coalescence model of particles in coaxial impinging stream[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1996, 74(6): 822-833.
- [13] Berman Y, Tmair A. Kinetics of droplets' sedimentation in a continuous gravity settler[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(10): 2089-2102.
- [14] 张明星, 陈海焱, 颜翠平, 等. 对喷流除尘性能影响因素的正交实验研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(5): 500-504.  
Zhang Mingxing, Chen Haiyan, Yan Cuiping, et al. Study on performance of dust collection in impinging stream by orthogonal experimental design[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(5): 500-504(in Chinese).
- [15] 张明星, 陈海焱, 王永强, 等. 对喷流除尘技术在收集硫酸铵和硝酸铵粉尘中的应用研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1): 61-63.  
Zhang Mingxing, Chen Haiyan, Wang Yongqiang, et al. Application of impinging stream to collect ammonia sulfate and ammonium nitrate dust particles[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(1): 61-63(in Chinese).
- [16] 张明星, 陈海焱, 潘成君, 等. 对喷流除尘技术[J]. 暖通空调, 2006, 36(8): 104-107.  
Zhang Mingxing, Chen Haiyan, Pan Chengjun, et al. Technology of dust separation by impinging streams [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006, 36(8): 104-107(in Chinese).
- [17] 熊桂龙, 杨林军, 颜金培, 等. 蒸汽相变与撞击流耦合促进细颗粒物脱除[J]. 东南大学学报(自然科学版),

- 2011, 41(4): 761-766.
- Xiong Guilong, Yang Linjun, Yan Jinpei, et al. Improving removal of fine particles by coupling heterogeneous condensation with impinging streams[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2011, 41(4): 761-766(in Chinese).
- [18] 伍沅. 撞击流性质及应用[J]. 化工进展, 2001(11): 8-13. Wu Yuan. Properties and application of impinging streams [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2001(11): 8-13(in Chinese).
- [19] 伍沅. 撞击流-原理·性质·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 80-88. Wu Yuan. Impinging streams-principle-property application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 80-88(in Chinese).
- [20] 鲍静静, 杨林军, 颜金培, 等. 应用蒸汽相变协同脱除细颗粒和湿法脱硫的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(2): 13-19. Bao Jingjing, Yang Linjun, Yan Jinpei, et al. Experimental study on combined WFGD and removal of fine particles by heterogeneous condensation enlargement [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(2): 13-19(in Chinese).
- [21] Elperin I T, Meltser V L, Levental L E, et al. Influence of solid particles concentration on their motion in impinging jets [J]. Proceedings of the Academy of BSSR Series of Physical-Energy Science, 1971(4): 66-74.
- [22] Fletcher N H. Size effect in heterogeneous nucleation [J]. The Journal of Chemical Physics, 1958, 29(3): 572-576.
- [23] Kulmala M, Majerowicz A, Wagner P E. Condensational growth at large vapor concentration: Limits of applicability of the Mason equation[J]. Journal of Aerosol Science, 1989, 20(8): 1023-1026.



熊桂龙

收稿日期: 2011-04-27。

作者简介:

熊桂龙(1981), 男, 博士研究生, 研究方向为燃煤大气污染控制, jcijxcn@163.com;

杨林军(1967), 男, 教授, 博士生导师, 从事大气污染控制的研究, ylj@seu.edu.cn;

颜金培(1981), 男, 博士, 讲师, 研究方向为燃煤大气污染控制, rocleaf@163.com;

陆斌(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为燃煤大气污染控制, lubin3666@126.com;

耿俊峰(1985), 女, 硕士研究生, 研究方向为燃煤大气污染控制, geng1985junfeng@163.com。

(责任编辑 张媛媛)