

文章编号: 0253-2409(2015)06-0754-07

典型煤灰成分细颗粒物在过饱和水汽环境中的长大特性

周璐璐, 张 军, 徐俊超, 于 燕, 孟 强, 杨林军, 袁竹林

(东南大学 能源与环境学院 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 实验采用专门针对液滴的滴谱仪作为测量工具, 以典型煤灰成分细颗粒物石英、氧化铁、莫来石、硫酸钙为研究对象, 在热水与冷空气接触形成的低过饱和度下进行了蒸汽异相凝结长大实验研究。考察了颗粒润湿性、粒径以及热水温度对颗粒长大效果的影响。结果表明, 润湿性好的颗粒长大效果好, 初始粒径越小的颗粒长大倍数越大; 热水温度对颗粒长大影响非常明显, 热水温度越高, 颗粒越容易发生异相凝结, 颗粒最终直径越大。

关键词: 煤灰; 细颗粒; 长大; 水汽相变; 饱和水汽环境

中图分类号: X51 **文献标识码:** A

Growth of fine particulates of typical coal ash components in supersaturated water environment

ZHOU Lu-lu, ZHANG Jun, XU Jun-chao, YU Yan, MENG Qiang, YANG Lin-jun, YUAN Zhu-lin

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education,
School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: By using the droplet size meter, the growth of fine particulates of typical coal ash components, including quartz, ferric oxide, calcium sulphate and mullite, was investigated in supersaturated water environment. The supersaturated water vapor environment was built through the contact of hot water with cold air. The results show that the fine particulates with good wettability grow easily; the smaller the initial particle, the fast it grows. The temperature of hot water has a great influence on the growth of particulates; higher temperature is favorable to form larger particulates. Overall, the diameter of particulates with different physical and chemical properties can be increased to 1 to 6.6 times larger at low supersaturation.

Key words: coal ash; fine particulate; growth; condensation; supersaturated water environment

中国一次能源以煤为主, 且大部分用于发电^[1], 目前, 中国近 90% ~ 95% 的燃煤电站都采用静电除尘器(ESP)收集烟气中的飞灰颗粒, 然而静电除尘器对 PM_{2.5} 的捕集率却低, 致使燃煤电厂成为中国大气 PM_{2.5} 的主要来源之一^[2,3]。为减缓并消除中国日益严重的雾霾天气, 控制燃煤电厂 PM_{2.5} 的排放迫在眉睫。

设法使细颗粒物在进入除尘设备前长大是提高燃煤电厂 PM_{2.5} 排放控制水平的有效途径, 多种颗粒长大促进技术在研发中, 包括: 声团聚^[4]、电聚变^[5]、磁聚并^[6]、热团聚^[7]、水汽相变^[8]等。水汽相变促使细颗粒物长大的原理是: 在过饱和水汽环境中, 水蒸气在颗粒表面发生异相凝结, 从而使得颗粒质量变重体积增大。这种方法优点是其可以与现有的湿法脱硫设备结合时实现多种污染物联合脱除, 是一种很有前景的脱除细颗粒的预处理方法^[9]。

利用水汽相变促进颗粒物长大研究报道较多,

一些学者对不同性质颗粒的长大特性进行了研究。Yoshida 等^[10]研究了香烟微粒、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)、硬脂酸、炭黑亚微米级微粒在过饱和水蒸气中的长大特性; Porstendorfer 等^[11]研究了水蒸气在 Ag 和 NaCl 颗粒表面的异相相凝结长大特性, 发现 Ag 颗粒其临界过饱和度要比开尔文方程计算的大, 而 NaCl 颗粒其临界过饱和度要比开尔文方程计算的小, 但长大后粒径分布并未出现理论分析长大后粒径分布变窄的结果; Heidenreich 等^[12]的理论结合实验研究了亚微米 NaCl 颗粒在水蒸气环境中凝结长大特性, 理论计算了其在不同含湿量下的长大效果, 发现由于不同粒径颗粒长大速率不同, 长大后粒径分布有变窄的趋势; Tammaro 等^[13]研究了燃烧乙烯产生的颗粒物在过饱和水蒸气环境的长大特性, 颗粒停留时间越长以及烟气和水温差越大颗粒最终粒径越大。从这些研究的结果来看, 除了外界条件的影响, 颗粒本身性质也是影响其长大的一个

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-02-23。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划, 2013CB228504); 2015 年度能源高效清洁利用湖南省高校重点实验室开放基金资助(2015NGQ003)。

联系作者: 张军, E-mail: junzhang@seu.edu.cn。

重要因素,但研究者所采用的微粒特性与主要硅铝质化合物的燃煤细颗粒物^[14]相比有较大差别,因此,要掌握燃煤细颗粒物的长大特性,必须以其为对象进行研究。

目前,对燃煤细颗粒物的长大特性了解很少。鲍静静等^[15~17]对煤燃烧源细颗粒在湿式除尘器中的异相凝结脱除进行了研究,结果显示,利用水汽相变能大幅减少 PM_{2.5} 的排放,这一结果展示了该技术应用的良好前景,但其研究都集中在脱除效率上。显然,为促进该技术的发展,必须深入掌握燃煤细颗粒物的长大特性,这是本研究的目的所在。

燃煤细颗粒包含多种成分,因此,要全面掌握燃煤细颗粒物的长大特性需要进行大量的研究工作。作为初步的研究工作,实验选择了典型煤灰成分细颗粒物为研究对象,对其长大特性进行了研究。

1 实验部分

1.1 实验原料

实验系统示意图见图 1。实验装置主要包括气溶胶发生器、低温恒温槽、生长管、测量窗口、滴谱仪等。生长管尺寸为长度 0.4 m,直径 0.015 m,为玻璃材质。细颗粒物的给料通过气溶胶发生器(德国 Topas 品牌 SAG410 型号)进行。低温恒温槽(南京舜玛仪器设备公司 SDC-6 型号)使用的目的是为控制进入生长管的气流的状态。ELPI 是在细颗粒物研究中常用的测量仪器,但其对含尘液滴测量会对液滴尺寸产生破坏,为此这里采用了能对液滴直接测量的滴谱仪(欧美克 DP-02 型号)进行颗粒尺寸在线测量。为避免水蒸气在测量窗口凝结,在测量窗口装有加热装置,以保证测量窗口壁温与生长管内热水温度一致。

生长管是该实验系统的关键,其提供颗粒长大

所需要的过饱和环境。该实验的过饱和水汽场是通过饱和空气与热水接触来形成的。具体形成途径如下:首先,将常温的空气送入低温恒温槽冷却,冷却至露点温度,使其达到饱和状态;其次,恒温槽中的热水通过微型水泵切相送入生长管,然后沿着生长管内壁螺旋回流至恒温槽,形成循环,在此过程中,生长管内壁形成一层热水膜;最后,当空气流经生长管由下往上流动时,沿着管壁的由上而下热水膜可以源源不断的向生长管内提供水蒸气(在实验工况下水蒸气从管壁附近向管道中心的扩散速率比温度从管壁附近传递到中心气流的速率要快,操作温度为:293~323 K,温度传播速率为0.215 cm²/s,水蒸气扩散速率为 0.265 cm²/s^[18]),在管内则形成过饱和场。

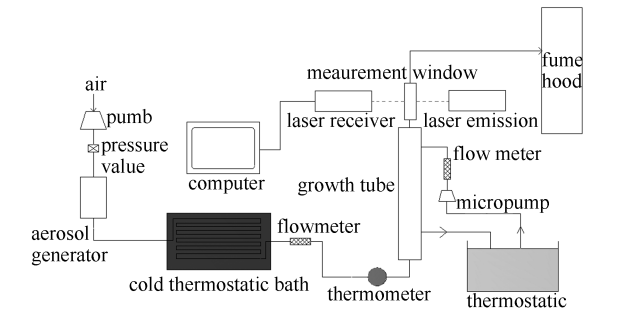


图 1 实验系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of the particulate growth measurement system

1.2 实验过程

根据典型煤灰成分^[19],选用石英、莫来石、氧化铁、硫酸钙等细颗粒物(上海 Aladdin 化学试剂公司的化学试剂)作为研究对象。实验前,将颗粒在干燥箱进行干燥,待完全干燥后放入气溶胶发生器中。实验参数见表 1。

表 1 实验参数

Table 1 Test parameters for the particulate growth measurement

Test	Parameter	T_{in}/K	T_h/K	$Q/(L \cdot min^{-1})$	$Q_w/(L \cdot min^{-1})$	$U/(m \cdot s^{-1})$	t/s	$c/(1 \cdot cm^{-3})$	S
1	number	293.6	303	3.5	1.012	0.33	1.2	$(1 \sim 2) \times 10^6$	1.047 5
2	number	293.6	308	3.5	1.012	0.33	1.2	$(1 \sim 2) \times 10^6$	1.080 5
3	number	293.6	313	3.5	1.012	0.33	1.2	$(1 \sim 2) \times 10^6$	1.119 8
4	number	293.6	323	3.5	1.012	0.33	1.2	$(1 \sim 2) \times 10^6$	1.211 9

T_{in} : inlet air temperature; T_h : hot water temperature; Q : gas flow; Q_w : hot water flow; U : gas flow velocity; t : growth time; c : number concentration; S : mean supersaturation

较大过饱和度会产生同相凝结^[12,20]形成液滴影响测量精确性,但过饱和度无法直接测得,为此采用文献^[21]中的计算方法对生长管内的过饱和场进

行计算,图 2 为按 100×500 划分网格时生长管中过饱和度的典型分布。

对网格中 500×100 个点取平均值得到一个过

饱和度的平均值,结果也见表 1。

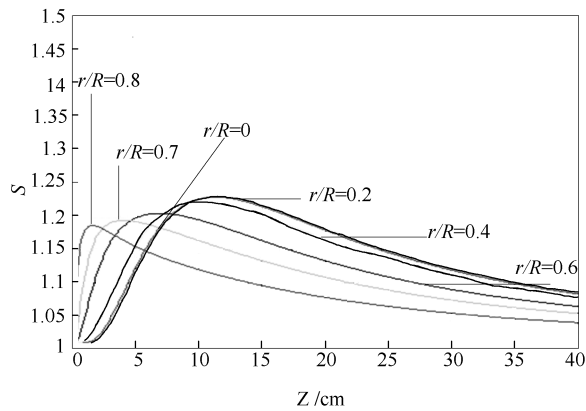


图 2 过饱和度分布
Figure 2 Supersaturation distribution
($T_h=313\text{ K}$, $T_{in}=20.6\text{ K}$)

由表1可知,所选实验参数形成的过饱和度在

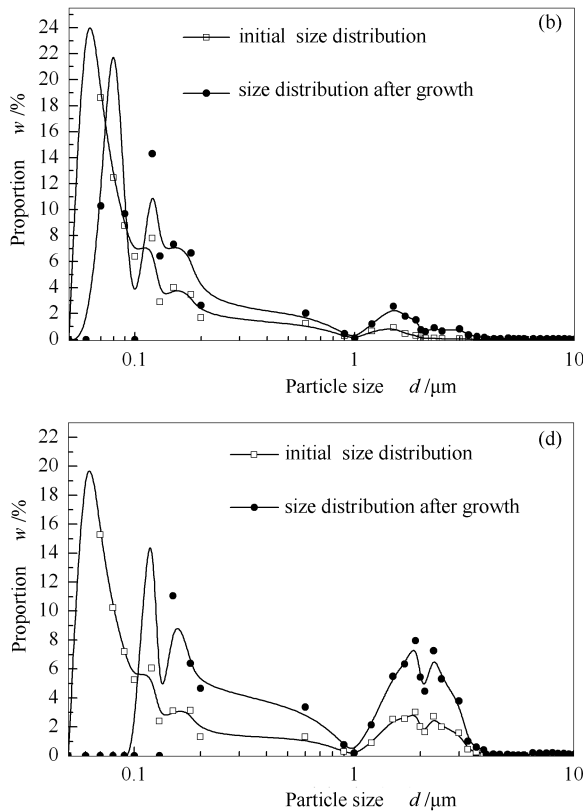
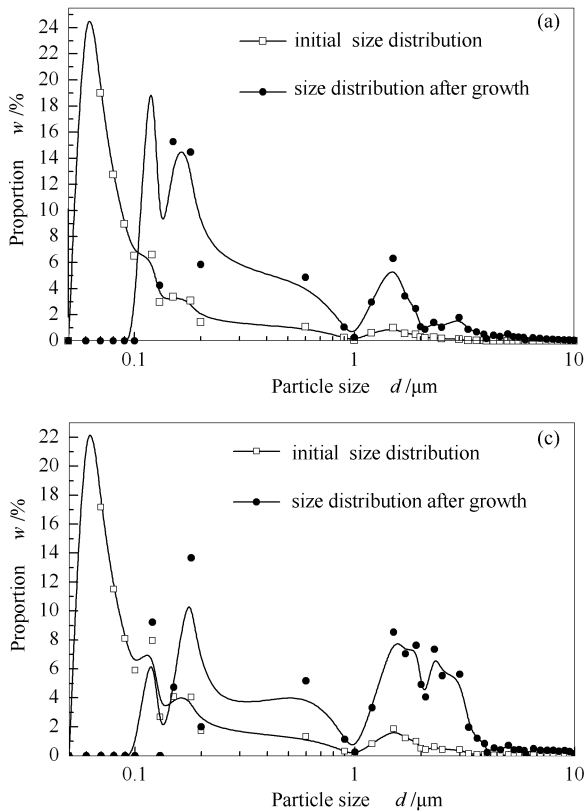


图 3 单质颗粒长大前后粒径分布

Figure 3 Particle size distribution before and after growth ($T_h=313\text{ K}$, $T_{in}=20.6\text{ K}$, $t=1.2\text{ s}$)
(a): quartz; (b): ferric oxide; (c): calcium sulphate; (d): mullite

由图3可以看出,长大后所有组分颗粒中小颗粒有所减少而大颗粒有所增加,但不同种颗粒的长大效果不同,石英颗粒初始粒径主要是纳米级颗粒,波峰在 $50 \sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$,长大后波峰向右移动明显,小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒几乎都测不到了,且微米级颗粒数

$1 \sim 1.25$,明显低于同相凝结的所需的过饱和度($2 \sim 5$)^[12,22]。实验中,也对各热水条件下无颗粒加入时的气流进行了测定,均未发现水滴的产生。实验时首先在生长管不加热热水的情况下测得原始的气溶胶中的粒径分布,然后启动生长管中热水循环,待水流稳定后再测量长大后的粒径分布,由滴谱仪测得,仪器测量结果为体积浓度分数分布。小颗粒虽然体积占得很少,但是其在数量上却很多,且小颗粒对大气的影响更为严重,因此,从数量上观察颗粒的长大更有意义,为此用 ELPI 对初始数量浓度进行测量,然后将体积百分比分布换算成数量百分比分布,换算方法见文献^[20]。

2 结果与讨论

2.1 不同组分颗粒长大效果

图3为颗粒长大前后的数量浓度分数分布。

量增加明显;氧化铁颗粒初始粒径波峰在 $50 \sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$,长大后波峰位置变化小,小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒还有很多,微米级颗粒数量变化不大;硫酸钙初始分布中有很多小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒在长大后都不见了,小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒减少明显,且初始分布中微米

级颗粒很少但在长大后数量剧增;莫来石初始粒径较硫酸钙较粗一些,其纳米、亚微米级颗粒数量比硫酸钙少,微米级颗粒比硫酸钙多些,莫来石与硫酸钙相比较其长大后亚微米级颗粒减少不明显,微米级颗粒增大亦不明显。

由表3可知,润湿性关系是:硫酸钙>石英≈莫来石>氧化铁。根据 Kulmala^[23]经典异质成核理论,颗粒润湿性越好,蒸汽在颗粒表面凝结长大的概率越大。石英与氧化铁相比湿性更好,则其可能发生异相凝结长大的概率较氧化铁大,因此,整体长大

效果较氧化铁好;对于硫酸钙与莫来石来说,润湿性好的硫酸钙更容易发生凝结长大,因此,其长大效果比莫来石好。

2.2 粒径对颗粒长大的影响

对比表2和表3中莫来石与石英的数据发现,它们的接触角相近,但小粒径的石英颗粒长大倍数更大,因此,粒径可能是影煤灰组分颗粒长大效果的一个因素,为此,选取了两种不同尺寸的石英颗粒进行了颗粒长大实验,实验结果见图4。

表2 颗粒长大前后平均粒径
Table 2 Mean particle size before and after growth

Name	Quartz	Ferric oxide	Calcium sulphate	Mullite
Intial mean size d/nm	133	143	258	518
Mean size after growth d/nm	795	398	1 695	1 200
Multiple of growth	6.0	2.8	6.6	2.4

表3 润湿性表征
Table 3 Characterization of wettability

Name	Quartz	Ferric oxide	Calcium sulphate	Mullite
Contact angle	35.7	55.9	17.2	33.4

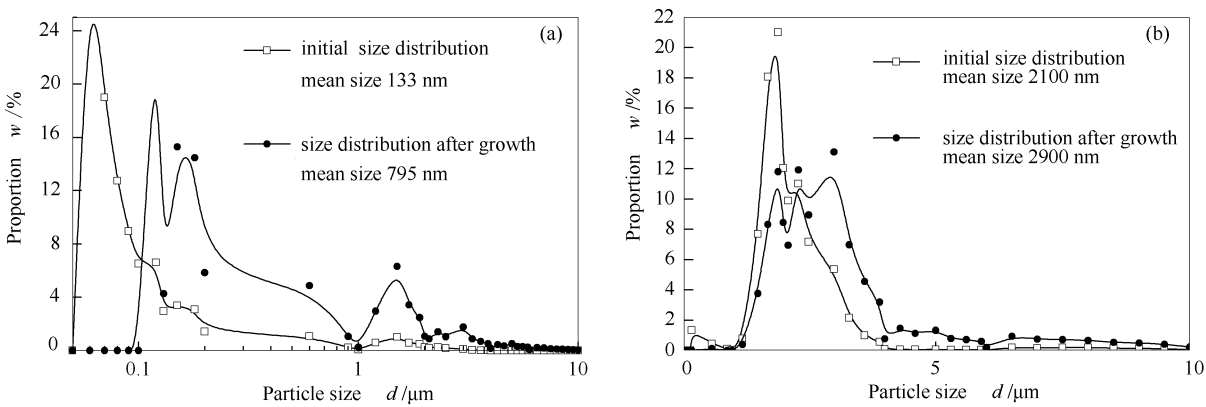


图4 石英颗粒长大前后粒径分布

Figure 4 Quartz particle size distribution before and after growth ($T_h=313\text{ K}, T_{in}=20.6\text{ K}, Q=3.5\text{ L/min}$)
(a): fine quartz particle; (b): bold quartz particle

为更直观的比较颗粒长大的效果,对这4种颗粒长大前后平均几何粒径进行了计算,结果见表2。从平均粒径来看,石英和氧化铁气溶胶初始平均粒径相近,但长大后石英长到了795 nm,氧化铁只长到398 nm,氧化铁长大效果明显不如石英。比较莫来石和硫酸钙的情况发现硫酸钙长大效果好于莫来石,初始硫酸钙平均粒径比莫来石小,长大后的平均达到1700 nm,而莫来石长大到1200 nm,长大后硫酸钙平均粒径反而比莫来石大。

不同种颗粒的长大效果不同源于其物化性质不

同,研究表明,对于水汽相变技术来说润湿性是非常重要的物化性质^[8,14],为此研究对其润湿性进行了表征,表征方法采用直接测其接触角的方法。将超细粉体进行干燥后,用压片机进行压片,压片直径0.01 m,压片后静置1 h,取出后将1.5 mL的蒸馏水滴放入待测平面,多次测量取平均值。接触角测量仪型号为JC2000D2(配有德国 guppy pro 高速 CCD),测量结果见表3。

细石英颗粒的长大后小于0.1 μm的颗粒都长大到0.1 μm之外了,微米级的也增加不少但多在

1 ~ 3 μm,与细石英颗粒相比,初始粗石英颗粒并没有亚微米级颗粒其颗粒多分布在 1 ~ 4 μm,长大后其很大一部分长大到 5 ~ 10 μm,但仍有很多 1 ~ 4 μm的颗粒。从平均粒径变化可以直观的比较粗细石英的长大效果。细石英气溶胶的平均粒径为 133 nm,长大后平均粒径为 795 nm,长大倍数为 6.6 倍。粗石英气溶胶平均粒径为 2 100 nm,长大后平均粒径为 2 900 nm,长大倍数约为 1.4 倍,可见颗粒越小长大倍数越大。

Dara^[24] 方程给出了颗粒长大速率的方程:

$$\frac{dr_p}{dt} =$$
$$\frac{S-S_a}{\rho r_p \left[\frac{R_g T}{\beta_m M_v D P_\infty \{1+(S+S_a)\} P_\infty / (2P)} + \frac{S_a L^2 M_v}{\beta_l R_g K T^2} \right]}$$

(1)

式中, r_p 为颗粒的粒径,m; S 为过饱和度; S_a 为 Kelvin 效应下的颗粒表面过饱和度; ρ 为颗粒的密度,kg/m³; D 为凝结蒸气的扩散系数,cm²/s; R_g 为气体常数,8.314 J/(k · mol); L 为气化潜热,J/(kg · K); K 为导热率,w/(m · K); M_v 蒸气摩尔质量,g/mol; P_∞ 饱和蒸气压,Pa; P 为总压,Pa; β_m 、 β_l 分别为质量流量和热流量的修正系数。

从式(1)中可以看出,颗粒粒径越小其长大的速率越大。在实验中,细石英颗粒要比粗石英颗粒长大速率大,当长大时间相同时速率大的颗粒长得更快,因此,小粒径长大的倍数更大。这可能是因为与小颗粒相比大颗粒的比表面积更大,在其表面凝结使直径增大时需要增加更多的质量^[25]。

表 4 不同热水时颗粒平均粒径
Table 4 Mean particle size with different hot water temperatures

T_h/K	303	308	313	323
Intial mean size d/nm	518	518	518	518
Mean size after growth d/nm	720	987	1 200	2 816

由表 4 可知,随热水温度升高,平均粒径增加,可见热水温度对颗粒的异相凝结长大有着显著的影响。颗粒在过饱和水蒸气中发生异相凝结需要一个激发过饱和度,过饱和度越大,越易激发小颗粒发生异相凝结^[12,22],随着热水温度升高,生长管内的过饱和度增加,被激发长大的小颗粒也越多。此外,由式(1)可知,过饱和度越高颗粒异相凝结后的长大速率也会越大。因此,对于同一种颗粒来说,热水温度越高其最终长大的粒径也就越大。

2.3 过饱和度的影响

理论上来说过饱和度越大,水蒸气在颗粒表面发生异相凝结长大的可能性越大^[23]。在实验系统中,过饱和度的变化是通过改变热水温度来实现的。图 5 为不同过饱和度(热水温度)下莫来石颗粒的实验结果。由图 5 可知,添加热水后莫来石气溶胶颗粒粒径分布往大颗粒方向偏移,且热水温度不同颗粒有着不同粒径分布。初始分布中很多纳米级以及亚微米级的颗粒,经过生长管后,当热水温度 303 K 和 308 K 时,其小于 0.1 μm 的颗粒仍有很多,但是当热水温度为 313 K 时,其小于 0.1 μm 的颗粒几乎都长大到了 0.1 μm 以外,当热水温度为 323 K 时微米级以下的颗粒都测不到了,且其微米级颗粒增加很多。

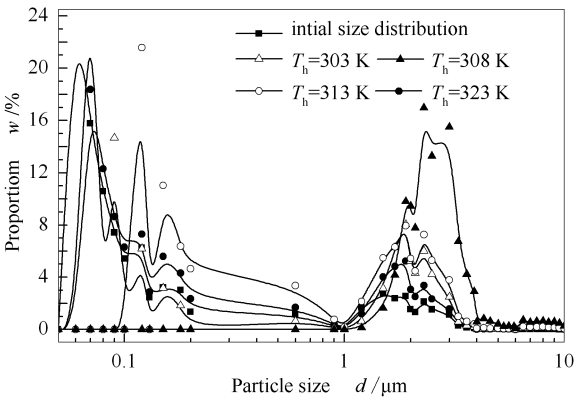


图 5 不同热水温度下莫来石粒径分布
Figure 5 Mullite particle size distribution with different hot water temperatures ($T_{in}=20.6\text{ K}$, $Q=3.5\text{ L/min}$)

表 4 为颗粒长大前后平均几何粒径的变化。

图 6 为过饱和度与热水温度以及长大后平均粒径的分布。由图 6 可知,热水温度与过饱和度成正向线性关系,而长大后的平均粒径随着过饱和度的增加平均粒径也增加,但开始增加地较为缓慢,但当过饱和度到达一定值时增加的较为迅速。这可能是因为当生长管内的过饱和度较低时很多小粒径颗粒无法被激发而不能发生异相凝结,当过饱和度增加到某一数值时,管内所有的颗粒都被激发,从而发生异相凝结长大,在平均粒径上则表现

为粒径突然明显增大。

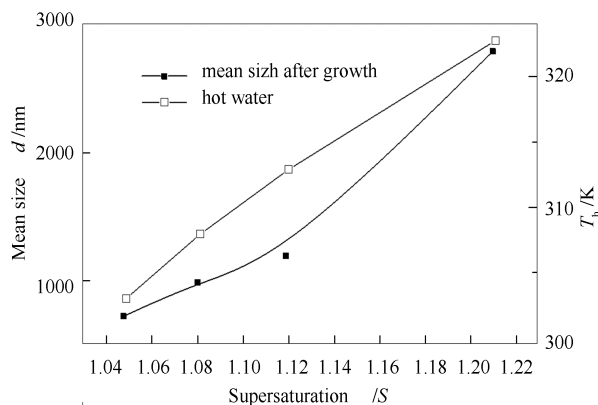


图6 不同热水温度下莫来石平均粒径

Figure 6 Mean particle size of mullite with different hot water temperatures

参考文献

- [1] SENIOR C L, HELBLE J J, SAROFIM A F. Emissions of mercury, trace elements and fine particles from stationary combustion sources[J]. Fuel Process Technol, 2000, **65**(6): 263-288.
- [2] 隋建才, 徐明厚, 丘纪华, 韩军. 煤燃烧中可吸入颗粒物的形成及其控制研究现状[J]. 热力发电, 2004, **12**(3): 9-12.
(SUI Jian-xue, XU Ming-hou, QIU Ji-hua, HAN Jun. Status quo of study on formation of particulate matters absorbable into coal fired utility boilers and control thereof[J]. Therm Power Gener, 2004, **12**(3): 9-12.)
- [3] 王鹏. 燃煤电厂可吸入颗粒物排放及控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
(WANG Peng. Study on PM_{2.5} emission and control in coal combustion boiler of power plants[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.)
- [4] 凡凤仙, 袁竹林. 外加声场对增加 PM_{2.5} 碰撞几率的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, **26**(11): 12-16.
(FAN Feng-xian, YUAN Zhu-lin. Numerical simulation of the collision rate of PM_{2.5} in sound wave field[J]. Proc CSEE, 2006, **26**(11): 12-16.)
- [5] WATANABE T, TOCHIKUBO F, KOIZUMI Y, TSUCHIDA T, HAUTANEN J, KAUPPINEN E. Submicron particle agglomeration by electrostatic agglomerator[J]. J Electrostatics, 1995, **34**(4): 367-383.
- [6] LI Y W, ZHAO C S, WU X, LU D F. Aggregation experiments on fine fly ash particles in gradient magnetic field[J]. Chem Eng Technol, 2007, **30**(8): 1-6.
- [7] LIND T, KANPPINEN E I, SRINIVASACHAR K, PORLE K, GURAV A S, KODAS T T. Submicron agglomerate particle formation in laboratory and full-scale pulverized coal combustion[J]. J Aerosol Sci, 1996, **127**(8): 361-362.
- [8] 杨林军, 颜金培, 沈湘林. 蒸汽相变促进燃烧源 PM_{2.5} 凝并长大的研究现状与展望[J]. 现代化工, 2005, **25**(11): 22-26.
(YANG Lin-jun, YAN Jin-pei, SHEN Xiang-lin. Prospect and advances in growth of PM_{2.5} from combustion by vapor condensation[J]. Mod Chem Ind, 2005, **25**(11): 22-26.)
- [9] 鲍静静, 杨林军, 颜金培, 黄永刚, 蒋振华, 沈湘林. 应用蒸汽相变协同脱除细颗粒和湿法脱硫的实验研究[J]. 中国电机学报, 2009, **29**(2): 13-19.
(BAO Jing-jing, YANG Lin-jun, YAN Jin-pei, HUANG Yong-gang, JIANG zhen-hua, SHEN xiang-lin. Experimental study on combined wet flue gas desulfurization and removal of fine particles by heterogeneous condensation enlargement[J]. Proc CSEE, 2009, **29**(2): 13-19.)
- [10] YOSHIDA T, KOUSSAKA Y, OKUYAMA K. Growth of aerosol particles by condensation[J]. Ind Eng Chem, 1976, (1): 37-41.
- [11] PORSTENDÖRFER J, SCHEIBEL H G, POHL F G, REISCH G, WAGNER P E. Heterogeneous nucleation of water vapor on mono dispersed Ag and NaCl particles with diameters between 6 and 18 nm[J]. Aerosol Sci Technol, 1985, **4**(1): 65-79.
- [12] HEIDENREICH S, EBERT F. Condensation droplet growth as a preconditioning technique for the separation of submicron particles from gases[J]. Chem Eng Process, 1995, **34**(3): 235-244.
- [13] TAMMARO M, DI NATALE F, SALLUZZO A, LANCIA A. Heterogeneous condensation of submicron particles in a growth tube[J]. Chem Eng Sci, 2012, **74**: 124-134.
- [14] 颜金培, 杨林军, 沈湘林. 燃烧源 PM_{2.5} 微粒润湿性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, **36**(5): 760-764.
(YAN Jin-pei, YANG Lin-jun, SHEN Xiang-lin. Wettability of PM_{2.5} from combustion[J]. J Southeast Univ(Nat Sci Ed), 2006, **36**(5): 760-764.)
- [15] 鲍静静, 杨林军, 颜金培. 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 Jing-jing, YANG Lin-jun, YAN Jin-pei. Experimental study on combined wet flue gas desulfurization and removal of fine particles by heterogeneous condensation enlargement[J]. Proc CSEE, 2009, **29**(2): 13-19.)
- [16] 陆斌, 杨林军, 辛成运. 蒸汽相变促进湿法脱硫净烟气中细颗粒物的脱除[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, **41**(1): 118-123.
(LU Bin, YANG Lin-jun, XIN Cheng-yun. Improving removal of fine particles from wet-process desulfurized flue gas by heterogeneous condensation[J]. J Southeast Univ(Nat Sci Ed), 2011, **41**(1): 118-123.)

- [17] 颜金培, 杨林军, 张霞. 应用蒸汽相变机理脱除燃煤可吸入颗粒物实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, **27**(35): 12-16.
(YAN Jin-pei, YANG Lin-jun, ZHANG Xia. Experimental study on separation of inhalable particles from coal combustion by Heterogeneous condensation enlargement[J]. Proc CSEE, 2007, **27**(35): 12-16.)
- [18] PERRY R H, GREEN D W. Perry's chemical engineering handbook[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [19] 郭欣, 郑楚光, 孙涛. 电厂煤飞灰颗粒物的物理化学特征[J]. 燃烧科学与技术, 2005, **11**(2): 192-195.
(GUO Xin, ZHENG Chu-guang, SUN Tao. Physicochemical characteristics of fly ash from coal-fired power station[J]. J Combust Sci Technol, 2005, **11**(2): 192-195.)
- [20] HERING S V, STOLZENBURG M R. A method for particle size amplification by water condensation in a laminar, thermally diffusive flow [J]. Aerosol Sci Technol, 2005, **39**(5): 428-435.
- [21] 徐俊超. 细颗粒物核化凝结长大实验平台设计及特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
(XU Jun-chao. Fine particle growth by nucleation and condensation experiment system and characteristic research[D]. Nangjing: Southeast University, 2014.)
- [22] HERING S V, STOLZENBURG M R. A method for particle size amplification by water condensation in a laminar, thermally diffusive flow [J]. Aerosol Sci Technol, 2005, **39**(5): 428-436.
- [23] FLETCHER. Size effect in heterogeneous nucleation[J]. J Chem phys, 1958, **29**(3): 572-576.
- [24] KULMALA M. Condensational growth and evaporation in the transition regime[J]. Aerosol Sci Technol, 1993, **19**(3): 381-388.
- [25] AKYUREK B O, LARSON D, WANG G C. Cloud droplet growth: SIO217A[P]. 2013-12-06