

文章编号:0253-9993(2013)04-0694-06

# 蒸汽相变凝结对 $PM_{2.5}$ 粒径分布的影响

凡凤仙,张明俊

(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

**摘要:**基于多分散颗粒凝结增长理论,进行不同操作条件(停留时间、饱和度、温度)和  $PM_{2.5}$  特性(粒度、分散度)下相变凝结过程中颗粒粒径分布的研究,分析各参数对颗粒相变凝结增长效果的影响。结果表明:随着颗粒在过饱和蒸汽环境中停留时间的延长,颗粒粒径范围迅速变窄,颗粒由初始条件下多分散分布的微粒转变为单分散分布的粒径较大的含尘液滴;饱和度越大,相变凝结的推动力就越大,颗粒增长更为迅速;相同饱和度下,较高的温度能够促使  $PM_{2.5}$  成长为粒径更大的含尘液滴。研究发现,由于相变凝结后颗粒粒径趋于一致,初始  $PM_{2.5}$  粒径分布(粒度、分散度)对颗粒增长效果影响很小。

**关键词:**蒸汽相变; $PM_{2.5}$ ;过饱和蒸汽;颗粒粒径分布

**中图分类号:**TQ546.5 **文献标志码:**A

## Influence of vapor heterogeneous condensation on the $PM_{2.5}$ particle size distribution

FAN Feng-xian, ZHANG Ming-jun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Based on the condensation growth theory of polydispersed aerosols, particle size distribution during the heterogeneous condensation process was investigated in this study. Also, the influences of operational conditions (residence time, degree of saturation and temperature) and  $PM_{2.5}$  properties (size and dispersity) on particle growth were tested. The results show that particle size range narrows rapidly as the residence time of particles increase in the supersaturated vapor environment. Consequently, the initial polydispersed fine particles shift to monodispersed micron-sized droplets by vapor heterogeneous condensation. Under a higher supersaturation condition, the driving force for vapor condensation is greater and thus, the particles grow more rapidly. In cases with the same level of supersaturation, higher gas temperatures can promote the condensation droplet to grow bigger. It has also been found that the condensation growth effect is not dependant on the initial particle size distribution parameter, such as particle diameter and dispersity because the particle sizes trend to the same value after vapor heterogeneous condensation.

**Key words:** heterogeneous condensation;  $PM_{2.5}$ ; supersaturated vapor; particle size distribution

空气动力学直径小于  $2.5 \mu\text{m}$  的颗粒物称为细颗粒,又称  $PM_{2.5}$ ,它是一种重要的大气污染物。这类颗粒物在大气中的稳定程度高,沉降速度慢,被吸入呼吸道的概率大,长时间停留在大气中,不仅影响气候和空气质量、破坏生态环境,而且严重危害人体健康<sup>[1-3]</sup>。在煤炭为主的能源结构以及

与日俱增的能源消费形势下,燃煤锅炉的排放已成为我国环境空气中  $PM_{2.5}$  的主要来源。由于  $PM_{2.5}$  粒径小、质量轻、数目多,现有的除尘技术难以经济、高效地将其清除<sup>[4-5]</sup>。随着环境标准的渐趋严格,燃煤  $PM_{2.5}$  的排放控制成为能源与环境领域亟待解决的问题之一。

目前,大型燃煤电站锅炉普遍在除尘装置后加装

收稿日期:2012-03-12 责任编辑:张晓宁

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(10ZR1420900);上海市科委资助项目(10540501000)

作者简介:凡凤仙(1982—),女,河南项城人,副教授,博士。Tel:021-55272320, E-mail:fanfengxian@hotmail.com

湿法烟气脱硫系统,脱硫塔的除尘功效开始引起研究者的关注。Meij 等<sup>[6]</sup>基于一台 600 MW 燃煤锅炉,研究发现经过静电除尘器和湿法石灰石-石膏脱硫系统后排放的尘粒全部为 PM<sub>2.5</sub>,其中包括 40% 的燃煤飞灰、10% 的石膏颗粒和 50% 的脱硫液蒸发后残留的固体微粒。王琿等<sup>[7]</sup>以一台 300 MW 燃煤锅炉为研究对象,考察了湿法石灰石-石膏脱硫系统对颗粒物的脱除效果,结果表明经过脱硫液喷淋洗涤后,烟气中 PM<sub>2.5</sub> 成分明显增加,脱硫系统出口 PM<sub>2.5</sub> 含有约 7.9% 的石膏颗粒和 47.5% 的石灰石颗粒。颜金培等<sup>[8]</sup>通过实验研究,发现经氨法脱硫系统后燃煤烟气中 PM<sub>2.5</sub> 的数目浓度大幅上升,表明脱硫过程中生成了新的气溶胶微粒。岳焕玲等<sup>[9]</sup>分析指出湿法烟气脱硫喷淋塔的除尘机理主要是惯性碰撞、截留和布朗扩散,并给出了计算湿法烟气脱硫塔除尘效率的思路。笔者在不考虑脱硫剂影响的情况下,计算发现脱硫喷淋塔对 PM<sub>2.5</sub> 的分级脱除效率低于 35%,且随颗粒粒径的增加先降低后增加,粒径在 0.1~1.0 μm 的颗粒最难脱除<sup>[10]</sup>。

由于单纯依靠现有的工艺并不能有效遏制 PM<sub>2.5</sub> 的污染,杨林军等<sup>[11-14]</sup>依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> 凝结长大的原理,提出了利用蒸汽相变原理促进 PM<sub>2.5</sub> 长大并高效脱除的燃煤 PM<sub>2.5</sub> 排放的控制新方法,并建立了相应的实验装置,较为系统地研究了不同操作条件下燃煤 PM<sub>2.5</sub> 的脱除效率。然而,受实验条件的限制,这些研究无法获得蒸汽相变促进 PM<sub>2.5</sub> 长大的宏观效果及颗粒粒径演变过程。由于颗粒的脱除效率与其粒径分布密切相关,对蒸汽相变过程中颗粒粒径分布演变过程和特性进行研究成为探讨 PM<sub>2.5</sub> 脱除机制、优化 PM<sub>2.5</sub> 脱除效果的重要环节,这就迫切要求对蒸汽相变过程进行理论分析和建模处理,通过推理和计算来预测颗粒粒径分布的演变规律。

纵观国内外对蒸汽相变过程中颗粒粒径分布演变的研究, Park 等<sup>[15]</sup>的工作主要侧重于粒径分布演变方程的理论推导,缺乏操作条件(停留时间、饱和度、温度)和颗粒特性(粒度、分散度)对颗粒长大效果影响的研究。赵海波等<sup>[16-18]</sup>提出了用于求解同时考虑凝并、冷凝/蒸发的通用动力学方程的多重蒙特卡罗(Multi-Monte Carlo, MMC)方法,并模拟了特殊冷凝核作用下颗粒粒径分布函数的时间演变,但未能反映出蒸汽相变促进颗粒长大的本质及影响因素。基于此,本文将在多分散颗粒凝结增长理论的基础上,对蒸汽相变凝结过程中 PM<sub>2.5</sub> 粒径分布随操作条件和颗粒特性的变化规律进行理论预测。

## 1 多分散颗粒凝结增长理论

### 1.1 单颗粒的凝结增长

蒸汽相变是自然界和工业过程中广泛存在的现象,也是气相与颗粒相之间重要的质量输运过程。在过饱和蒸汽环境中,蒸汽以颗粒为凝结核发生相变凝结,首先经历异质核化过程,在颗粒上生成液体晶核,之后蒸汽在核化颗粒表面发生相变凝结。在蒸汽相变凝结过程中,首先是最贴近颗粒的蒸汽分子聚集在核化颗粒表面,使该区域蒸汽分子浓度降低,周围高浓度区的蒸汽分子向该区域补充,促进凝结持续进行;同时,凝结潜热使凝结液滴温度升高,而热量又会向气体介质输送,从而影响凝结过程<sup>[19]</sup>。Kulmala<sup>[20]</sup>综合考虑蒸汽扩散和热传导的作用,推导出小过饱和度和情况下单颗粒凝结增长速率的表达式。Williams<sup>[21]</sup>指出 Kulmala<sup>[20]</sup>的表达式适用于蒸汽饱和度不大于 1.2 的情况。

颗粒的相变凝结增长速率<sup>[20]</sup>为

$$\frac{dr}{dt} = \frac{S - S_a}{\rho_d r \left\{ \frac{RT_g}{\beta_m M_v D_v p_s [1 + (S + S_a) p_s / (2p)]} + \frac{S_a L^2 M_v}{\beta_l R K_g T_g^2} \right\}} \quad (1)$$

式中, $r$ 为颗粒半径,m; $t$ 为时间,s; $S$ 为蒸汽饱和度; $S_a$ 为颗粒表面平衡蒸汽饱和度; $\rho_d$ 为凝结液密度,kg/m<sup>3</sup>; $R$ 为气体常数,J/(mol·K); $T_g$ 为气相温度,K; $M_v$ 为蒸汽摩尔质量,kg/mol; $D_v$ 为蒸汽扩散系数,m<sup>2</sup>/s; $p_s$ 为饱和蒸汽压,Pa; $p$ 为气相总压,Pa; $L$ 为凝结潜热,J/kg; $K_g$ 为气相导热系数,W/(m·K); $\beta_m, \beta_l$ 分别为质量流率和热流率的变换修正因子。

一定温度下,平液面的平衡蒸汽压为饱和水汽压,因此平液面的平衡饱和度为 1。而对于小液滴,由于表面曲率对分子间引力的影响,维持平衡所需要的蒸汽压会大于平液面,使得液滴表面的平衡饱和度大于 1。平衡饱和度  $S_a$  和液滴半径  $r$  之间的关系可由 Kelvin 方程<sup>[19]</sup>给出,即

$$S_a = \exp\left(\frac{2\sigma_d M_v}{\rho_d R T_g r}\right) \quad (2)$$

式中, $\sigma_d$ 为凝结液的表面张力,N/m。

由式(2)可知,一定温度下,颗粒粒度越小,要求的平衡蒸汽饱和度越高。为简化起见,本文针对 Kelvin 效应可以忽略的颗粒( $r > 0.025 \mu\text{m}$ )进行研究,此时  $S_a = 1$ 。

蒸汽在气相主体中的扩散系数  $D_v$  可由式(3)<sup>[22]</sup>

估算。

$$D_v = 2.50 \times 10^{-3} (p_{cg} p_{cv})^{1/3} (T_{cg} T_{cv})^{5/12} \left( \frac{1}{M_g} + \frac{1}{M_v} \right)^{1/2} \left( \frac{T_g}{\sqrt{T_{cg} T_{cv}}} \right)^{2.334} \frac{1}{p} \quad (3)$$

式中,  $p_{cg}, p_{cv}$  分别为气相主体和蒸汽的临界压力, Pa;  $T_{cg}, T_{cv}$  分别为气相主体和蒸汽的临界温度, K;  $M_g$  为气相主体的摩尔质量, kg/mol。

基于调和平均方法<sup>[15]</sup>,  $\beta_m, \beta_l$  可写为

$$\beta_m = \frac{3r}{3r + 4\lambda_v} \quad (4)$$

$$\beta_l = \frac{3r}{3r + 4\lambda_g} \quad (5)$$

式中,  $\lambda_v$  和  $\lambda_g$  分别为蒸汽和气相主体分子平均自由程, m。

气体分子平均自由程  $\lambda$  和温度  $T$  及压强  $p$  的关系<sup>[23]</sup>为

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d_m^2 p} \quad (6)$$

式中,  $k$  为波尔兹曼常数, 其值为  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $d_m$  为分子有效直径, m。

将式(4), (5)代入式(1), 并令  $S_a = 1$ , 得到颗粒体积增长速率为

$$I(V) = \frac{dV}{dt} = 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} = \frac{S-1}{C_1 V^{-1/3} + C_2 V^{-2/3}} \quad (7)$$

式中,  $C_1, C_2$  的表达式为

$$C_1 = 3^{-1/3} (4\pi)^{-2/3} \left\{ \frac{\rho_d R T_g}{M_v D_v p_s [1 + (S+1)p_s/(2p)]} + \frac{\rho_d L^2 M_v}{R K_g T_g^2} \right\} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{2}{3} \left( \frac{2}{9\pi} \right)^{1/3} \left\{ \frac{\lambda_v \rho_d R T_g}{M_v D_v p_s [1 + (S+1)p_s/(2p)]} + \frac{\lambda_g \rho_d L^2 M_v}{R K_g T_g^2} \right\} \quad (9)$$

对式(7)积分, 得到一定过饱和度下单颗粒体积随时间的演变为

$$V = \left\{ \left[ \left( \frac{C_2}{C_1} + V_0^{1/3} \right)^2 + \frac{2(S-1)t}{3C_1} \right]^{1/2} - \frac{C_2}{C_1} \right\}^3 \quad (10)$$

式中,  $V_0$  为颗粒的初始体积,  $m^3$ 。

## 1.2 颗粒群体积分布演变

蒸汽相变凝结过程中, 初始体积在  $V_0 \sim (V_0 + dV_0)$  的颗粒, 历经时间  $t$ , 长大为体积在  $V \sim (V + dV)$  的含尘液滴。在忽略颗粒之间碰并的条件下, 颗粒数目浓度将不会发生变化, 因此有

$$n_0(V_0) dV_0 = n(V) dV \quad (11)$$

式中,  $n_0(V_0)$  为初始颗粒体积分布函数,  $m^{-6}$ ;  $n(V)$  为  $t$  时刻颗粒体积分布函数,  $m^{-6}$ 。

由  $I(V) = \frac{dV}{dt}$  经积分变换可以推导出<sup>[15]</sup>

$$\frac{dV}{dV_0} = \frac{I(V)}{I(V_0)} \quad (12)$$

由式(7), (11), (12) 得到颗粒群体积分布演变关系式为

$$n(V) = n_0(V_0) \frac{C_1 V^{-1/3} + C_2 V^{-2/3}}{C_1 V_0^{-1/3} + C_2 V_0^{-2/3}} \quad (13)$$

## 1.3 颗粒粒径分布和体积分布

假设  $PM_{2.5}$  初始粒径分布服从对数正态分布, 则

$$n_0(d_0) = \frac{n_p}{\sqrt{2\pi} d_0 \ln \sigma_{g0}} \exp \left[ -\frac{\ln^2(d_0/d_{g0})}{2 \ln^2 \sigma_{g0}} \right] \quad (14)$$

式中,  $d_0, n_p, \sigma_{g0}$  和  $d_{g0}$  分别为初始颗粒粒径(m)、数目浓度(个/ $m^3$ )、几何标准偏差和几何平均粒径(m)。

相应的  $PM_{2.5}$  初始体积分布函数为

$$n_0(V_0) = \frac{n_p}{3\sqrt{2\pi} V_0 \ln \sigma_{g0}} \exp \left[ -\frac{\ln^2(V_0/V_{g0})}{18 \ln^2 \sigma_{g0}} \right] \quad (15)$$

式中,  $V_{g0}$  为几何平均体积,  $m^3$ ,  $V_{g0} = \frac{1}{6} \pi d_{g0}^3$ ;  $V_0 = \frac{1}{6} \pi d_0^3$ 。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 颗粒粒径分布随时间的演变

图1为蒸汽相变凝结条件下, 颗粒粒径随时间的演变情况。计算条件如下: 初始颗粒几何平均粒径  $d_0 = 0.3 \mu m$ , 几何标准偏差  $\sigma_{g0} = 1.6$ , 颗粒数目浓度  $n_p = 10^7$  个/ $cm^3$ ; 气相温度  $T_g = 50 \text{ }^\circ C$ , 饱和度  $S = 1.15$ 。可以看出, 随着在过饱和蒸汽环境中停留时间的延长, 颗粒数密度峰值急剧增加, 峰值所对应的粒径显著增大, 颗粒分布迅速向大粒径方向迁移。由式(1)可知, 颗粒的凝结增长速度与其粒径成反比, 由于粒径较小的颗粒增长速率较快, 而粒径较大的颗粒增长速度较慢, 使得颗粒粒径范围随时间明显变窄, 颗粒由初始条件下多分散分布的微粒转变为单分散分布的粒径较大的含尘液滴。在 50 ms 时, 颗粒直径已几乎全部集中在  $3.3 \sim 3.5 \mu m$ 。已有研究表明, 通过在脱硫喷淋塔烟气进口或喷淋区上部空间添加蒸汽, 能够在喷淋区或塔顶建立过饱和蒸汽环境<sup>[12]</sup>。

在此基础上,利用蒸汽相变原理,促使细颗粒增长至 3~5 μm 的含尘液滴,从而依靠惯性碰撞机理由洗涤液或高效除雾器将其捕集,对于解决 PM<sub>2.5</sub> 污染问题具有重要意义。适当延长颗粒在过饱和蒸汽环境中的停留时间,可使颗粒粒径增长至更大的程度,有利于颗粒的脱除。然而,延长停留时间,相变区域体积相应增加,导致设备成本和能耗增加。因此,在实际应用中,应选择合适的停留时间,力求在保证 PM<sub>2.5</sub> 脱除效率的同时,减少装置的规模。

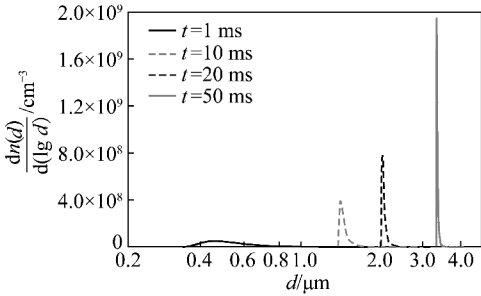


图1 颗粒粒径分布随时间的演变

Fig. 1 Evolution of particle size distribution with time

### 2.2 蒸汽饱和度对颗粒粒径分布的影响

图2为采用与图1完全相同的初始颗粒和气相温度计算得到的凝结增长时间  $t = 50$  ms 时的颗粒粒径分布,给出了蒸汽饱和度对颗粒凝结增长效果的影响。蒸汽在颗粒表面发生相变凝结必须首先经历异质核化过程。核化过程要求蒸汽饱和度高于成核临界饱和度,成核临界饱和度的大小主要取决于颗粒的润湿性、粒径、表面粗糙度及可溶组分。一旦蒸汽饱和度超出成核临界饱和度,蒸汽即可实现在颗粒表面大量凝结。相同温度下,饱和度越大,蒸汽浓度越高,相变凝结的推动力也越大,促进颗粒更为迅速地增长,在相同时间内,形成粒径更大的含尘液滴。由图2可知,饱和度为 1.05, 1.10, 1.15, 1.20 时,数密度峰值所对应的颗粒直径分别为 1.88, 2.71, 3.35, 3.89 μm。较高的饱和度下,蒸汽相变后的颗粒粒度、质量均较大,更易受惯性作用而被捕集。但过饱和和蒸汽环境是由向气相中添加蒸汽实现的,蒸汽饱和度越大,蒸汽添加量也越大,蒸汽添加量的增加将会导致能耗上升。此外,颗粒增长至 3~5 μm 后,喷淋液和除雾器对其已具备较高的惯性脱除效率,若继续增加蒸汽饱和度,虽然能使 PM<sub>2.5</sub> 增长至更大的粒径范围,但是对其脱除效率的影响将较小。在实际应用中,应考虑这些影响因素,选择合适的蒸汽添加量,以实现 PM<sub>2.5</sub> 的低能耗、高效脱除。

### 2.3 气相温度对颗粒粒径分布的影响

采用与图1完全相同的初始颗粒,在蒸汽饱和度

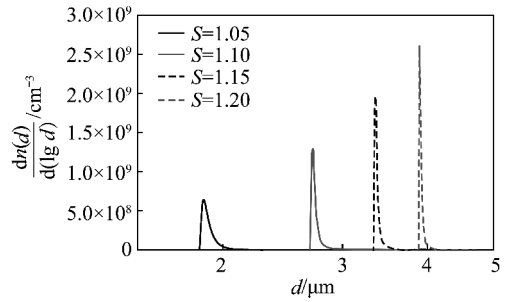


图2 蒸汽饱和度对颗粒粒径分布的影响

Fig. 2 Effect of vapor saturation on particle size distribution

$S = 1.15$ 、凝结增长时间  $t = 50$  ms 的条件下计算得到气相温度对颗粒凝结增长效果的影响,如图3所示。由图3可知,气相温度越高,相变凝结增长后颗粒的粒径越大,在气温分别为 40, 60, 80 °C 时,颗粒粒径分别集中在 3.07~3.38, 3.56~3.86, 3.89~4.18 μm。这是因为温度越高,蒸汽分子的热运动越剧烈,并且相同饱和度下,所能容纳的蒸汽量也越多,将有更多的蒸汽分子在颗粒表面凝聚为液滴,引起颗粒更加快速地增长。颜金培<sup>[24]</sup>的实验研究表明,相同过饱和度和 ( $S = 1.15$ ) 下,烟气温度为 60 °C 时,PM<sub>2.5</sub> 的脱除效率明显高于 50 °C 时 PM<sub>2.5</sub> 的脱除效率,这与本文的研究结果一致。蒸汽相变脱除 PM<sub>2.5</sub> 技术与湿法烟气脱硫系统相结合实现 PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的协同脱除,具有广阔的应用前景。然而,较高的烟气温度对脱硫反应不利,且较高烟气温度下维持相同的蒸汽过饱和度,需要添加的水汽量也较多。

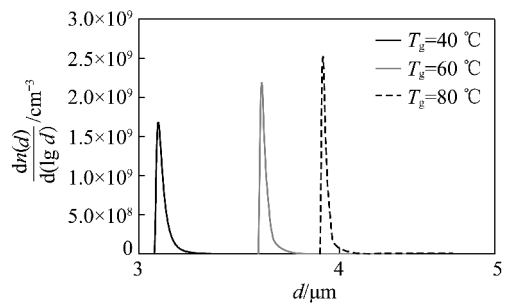


图3 气相温度对颗粒粒径分布的影响

Fig. 3 Effect of gas temperature on particle size distribution

### 2.4 初始颗粒粒度对颗粒粒径分布的影响

图4为不同初始颗粒几何平均粒径 ( $d_{g0} = 0.3, 0.5$  μm) 下蒸汽相变凝结后颗粒粒径分布曲线。图4的计算条件为  $T_g = 50$  °C,  $S = 1.15$ ,  $t = 50$  ms,  $n_p = 10^7$  个/cm<sup>3</sup>,  $\sigma_{g0} = 1.6$ 。由对数正态分布函数的数值表可知,  $d_{g0} = 0.3$  μm 时,几乎全部 (99.73%) 的颗粒粒径在 0.073~1.230 μm;  $d_{g0} = 0.5$  μm 时,颗粒粒径则在 0.12~2.05 μm。蒸汽在这两种粒度的 PM<sub>2.5</sub> 表面发生相变凝结后,颗粒粒径分别在 3.34~

3.61  $\mu\text{m}$  和 3.34 ~ 3.99  $\mu\text{m}$ , 颗粒数密度峰值所对应的粒径分别由初始时刻的 0.3, 0.5  $\mu\text{m}$  增长至 3.35, 3.37  $\mu\text{m}$ 。可见, 较细小的初始颗粒由于增长更为迅速, 凝结增长后的颗粒粒径更为集中; 而较粗大的颗粒凝结增长速率相对缓慢, 最终颗粒粒径分布相对分散。由于蒸汽相变后, 颗粒的最小粒径相等, 数密度峰值粒径接近, 可以推测不同粒度  $\text{PM}_{2.5}$  在相同操作条件下经蒸汽相变凝结后的惯性脱除效率相差不多。颜金培<sup>[24]</sup>在颗粒数目浓度相近时, 对峰值粒径分别为 0.23  $\mu\text{m}$  和 0.07  $\mu\text{m}$  的燃烟煤和燃无烟煤  $\text{PM}_{2.5}$  的蒸汽相变凝结脱除进行实验研究, 发现蒸汽添加量为 0.17  $\text{kg}/\text{m}^3$  (标准状况下) 时, 两者脱除效率分别为 85% 和 82%, 同样表明了适宜的过饱和度条件下, 颗粒初始粒径对凝结增长宏观效果的影响较小。

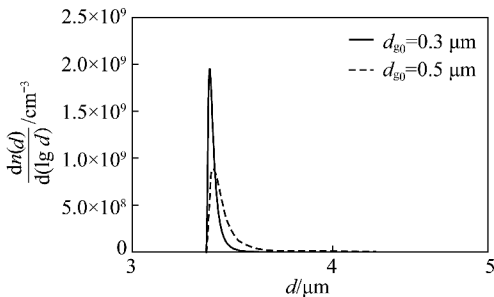


图4 不同初始几何平均粒径下的颗粒粒径分布  
Fig. 4 Particle size distribution at different initial geometrical mean diameter

## 2.5 初始颗粒分散度对颗粒粒径分布的影响

采用与图4相同的气相温度、蒸汽饱和度、凝结增长时间和颗粒数目浓度条件, 在初始颗粒几何平均粒径  $d_{g0} = 0.3 \mu\text{m}$  时, 计算得到不同初始颗粒分散度情况下经蒸汽相变后的颗粒粒径分布曲线, 如图5所示。

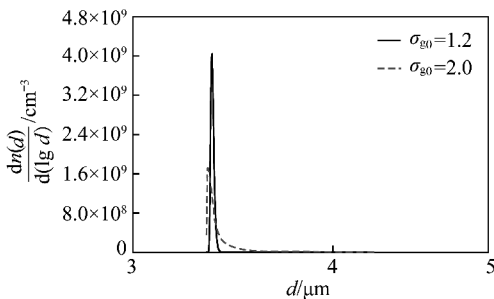


图5 不同初始几何标准偏差下的颗粒粒径分布  
Fig. 5 Particle size distribution at different initial geometrical derivation

在对数正态分布函数中, 几何标准偏差  $\sigma_{g0}$  越大, 颗粒粒径分布范围越宽, 颗粒越分散。当  $\sigma_{g0} = 1.2$  时, 99.73% 的颗粒粒径在 0.17 ~ 0.50  $\mu\text{m}$ , 95.45% 的颗粒粒径在 0.21 ~ 0.43  $\mu\text{m}$ ; 当  $\sigma_{g0} = 2.0$

时, 粒径在 0.04 ~ 2.40  $\mu\text{m}$  的颗粒占 99.73%, 粒径在 0.075 ~ 1.200  $\mu\text{m}$  的颗粒占 95.45%。计算结果表明,  $\sigma_{g0} = 1.2$  的颗粒几乎全部颗粒增长到 3.35  $\mu\text{m}$  以上;  $\sigma_{g0} = 2.0$  的也增长至 3.34  $\mu\text{m}$  以上。由于蒸汽以  $\text{PM}_{2.5}$  为凝结核发生相变后颗粒粒径趋于一致, 初始颗粒分散度对相变凝结增长的宏观效果影响很小。由此可知,  $\text{PM}_{2.5}$  数目浓度稳定时, 粒径分布的波动对颗粒的蒸汽相变凝结脱除效率的影响较小。

## 3 结 论

(1) 随着颗粒在过饱和蒸汽环境中停留时间的延长, 颗粒粒径范围迅速变窄, 颗粒由初始条件下多分散分布的微粒转变为单分散分布的粒径较大的含尘液滴。

(2) 饱和度越大, 相变凝结的推动力就越大, 颗粒增长更为迅速; 相同饱和度下, 较高的温度能够促使  $\text{PM}_{2.5}$  成长为粒径更大的含尘液滴。

(3) 由于蒸汽以  $\text{PM}_{2.5}$  为凝结核发生相变后颗粒粒径趋于一致, 初始颗粒粒径分布 (粒度、分散度) 对颗粒增长的宏观效果影响很小。

## 参考文献:

- [1] 宋晓焱, 邵龙义, 周林, 等. 煤矿区城市可吸入颗粒物基于 DNA 损伤的毒理学[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 650-654. Song Xiaoyan, Shao Longyi, Zhou Lin, et al. Toxicology of airborne particulate matter in coal mine city results from plasmid DAN assay [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 650-654.
- [2] Bao Jingjing, Yang Linjun, Song Shijuan, et al. Separation of fine particles from gases in wet flue gas desulfurization system using a cascade of double towers [J]. Energy and Fuels, 2012, 26(4): 2090-2097.
- [3] Qu Chengrui, Zhao Changsui, Zhou Wu, et al. Emission properties of  $\text{PM}_{2.5}$  derived from CFB under  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  atmosphere [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2829-2835.
- [4] Peukert W, Wadenpohl C. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties [J]. Powder Technology, 2001, 118(1-2): 136-148.
- [5] Seams W S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2003, 81(2): 109-125.
- [6] Meij R, Winkel B. The emissions and environmental impact of  $\text{PM}_{10}$  and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD [J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(6-7): 641-656.
- [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.
- [8] 颜金培, 杨林军, 鲍静静. 湿法脱硫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.  
Yan Jinpei, Yang Linjun, Bao Jingjing. Impact property on fine particles from coal combustion in ammonia flue gas desulfurization process[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5):21-26.
- [9] 岳焕玲, 原永涛, 宏哲. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫喷淋塔除尘机理分析[J]. 电力环境保护, 2006, 22(6):13-15.  
Yue Huanling, Yuan Yongtao, Hong Zhe. Analysis of dust removal mechanism in sprayer of limestone/gypsum wet flue gas desulfurization system[J]. Electric Power Environmental Protection, 2006, 22(6):13-15.
- [10] 凡凤仙, 杨林军, 袁竹林, 等. 喷淋塔内可吸入颗粒物的脱除与凝结增长特性[J]. 化工学报, 2010, 61(10):2708-2713.  
Fan Fengxian, Yang Linjun, Yuan Zhulin, et al. Removal and condensation growth of inhalable particles in spray scrubber[J]. CIESC Journal, 2010, 61(10):2708-2713.
- [11] 杨林军, 张霞, 孙露娟, 等. 湿法脱硫中应用蒸汽相变原理协同脱除PM<sub>2.5</sub>的技术分析[J]. 现代化工, 2007, 27(11):23-25.  
Yang Linjun, Zhang Xia, Sun Lujuan, et al. Analysis of cooperative removal of PM<sub>2.5</sub> by heterogeneous condensation in wet flue gas desulfurization[J]. Modern Chemical Industry, 2007, 27(11):23-25.
- [12] 凡凤仙, 杨林军, 袁竹林. 喷淋洗涤条件下蒸汽饱和度分布特性[J]. 化工学报, 2009, 60(7):1644-1650.  
Fan Fengxian, Yang Linjun, Yuan Zhulin. Properties of water vapor supersaturation under spray scrubbing conditions[J]. CIESC Journal, 2009, 60(7):1644-1650.
- [13] Yang Linjun, Bao Jingjing, Yan Jinpei, et al. Removal of fine particles in wet flue gas desulfurization system by heterogeneous condensation[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(1):25-32.
- [14] 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, 2011, 41(1):118-123.  
Lu Bin, Yang Linjun, Xin Chengyun. Improving removal of fine particles from wet-process desulfurized flue gas by heterogeneous condensation[J]. Journal of Southeast University, 2011, 41(1):118-123.
- [15] Park S H, Lee K W. Condensational growth of polydisperse aerosol for the entire particle size range[J]. Aerosol Science and Technology, 2000, 33(3):222-227.
- [16] 赵海波, 郑楚光. 凝并和成核机理下颗粒尺度分布的 Monte Carlo 求解[J]. 高等学校化学学报, 2005, 26(11):2086-2089.  
Zhao Haibo, Zheng Chuguang. Monte Carlo solution of particle size distribution under simultaneous coagulation and nucleation[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2005, 26(11):2086-2089.
- [17] 赵海波, 郑楚光, 徐明厚. 处理多分散颗粒凝并和冷凝/蒸发问题的多重 Monte Carlo 算法[J]. 化工学报, 2005, 56(5):796-801.  
Zhao Haibo, Zheng Chuguang, Xu Minghou. Multi Monte Carlo method for simultaneous coagulation and condensation/evaporation of polydisperse particles[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005, 56(5):796-801.
- [18] 赵海波, 郑楚光. 凝并和冷凝/蒸发对颗粒尺度分布的影响[J]. 化学工程, 2006, 34(6):21-25.  
Zhao Haibo, Zheng Chuguang. Influence of different coagulation kernel and condensation/evaporation kernel on particle size distribution[J]. Chemical Engineering, 2006, 34(6):21-25.
- [19] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003:310-328.  
Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Atmosphere physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003:310-328.
- [20] Kulmala M. Condensational growth and evaporation in the transition regime: an analytic expression[J]. Aerosol Science Technology, 1993, 19:381-388.
- [21] Williams M. Growth rates of liquid drops for large saturation ratios[J]. Journal of Aerosol Science, 1995, 26(3):477-487.
- [22] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Transport phenomenon[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [23] 程守洙, 江之永. 普通物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006:190-191.  
Cheng Shouzhu, Jiang Zhiyong. Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:190-191.
- [24] 颜金培. 蒸汽相变促进燃煤细颗粒物脱除的研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.  
Yan Jinpei. Study on fine particles removal from coal combustion improved by vapor condensational growth[D]. Nanjing: Southeast University, 2009.