

窄脉冲电晕放电烟气脱硫产物粒径分析的实验研究*

许德玄 刘钟阳

(东北师范大学静电研究所, 长春 130024 E-mail: physics @ ivy. nenu. edu. cn)

摘要 为了便于脱硫产物的收集和应用,用沉降法采样,用电子显微镜对产物气溶胶进行粒径分析. 实验在窄脉冲电晕放电装置上,模拟含硫烟气在工况条件下(气体流量 $2\text{m}^3/\text{h}$,反应器入口处 SO_2 浓度 $2000\text{ml}/\text{m}^3$, SO_2 和 NH_3 在通道中停留时间为 5s 以上,温度 60°C 、水蒸气体积比 7.5% ,相对湿度 38.2%)进行. 电子显微镜的观测结果显示,脱硫产物粉尘结构疏松,颗粒形状不规则. 根据电镜照片的统计结果,得出产物粉尘的数目中位径 NMD 为 $0.40\mu\text{m}$,几何标准偏差 $\sigma_1 = 5.21$;质量中位径 MMD 为 $2.82\mu\text{m}$,几何标准偏差 $\sigma_2 = 1.43$.

关键词 窄脉冲,粒径分析,脱硫产物,电子显微镜,气溶胶.

Experiment Researches on Size Analysis of Desulphurization Products from Flue Gas by Narrow Pulse Corona Discharge

Xu Dexuan Liu Zhongyang

(Institute of Electrostatics, North East Normal University, Changchun, 130024 E-mail: physics @ ivy. nenu. edu. cn)

Abstract In order to collect and apply desulphurized products, desulphurization experiment at the condition of operating mode (flux of flue gas $2\text{m}^3/\text{h}$, initial concentration of SO_2 $2000\text{ml}/\text{m}^3$, retaining time of SO_2 and NH_3 in simulator more than 5s , 60°C , volume ratio of water vapor 7.5% , relative humidity 38.2%) by narrow pulse corona discharge simulator dealing with flue gas including SO_2 was carried out. The deposit method was used to sample from product aerosol and electron microscope photo were used to observe and analyse shape and structure of products. The results showed that the product aerosol is irregular shape and loose structure, its number median diameter is $0.40\mu\text{m}$ and geometric standard deviation is 5.21 , mass median diameter is $2.82\mu\text{m}$ and geometric standard deviation is 1.43 .

Keywords narrow pulse, size analysis, desulphidation products, electron microscope, aerosol.

在众多的烟气脱硫技术中,窄脉冲电晕放电等离子体化学过程(PPCP)是目前各国都在竞相研究的一个课题^[1-3]. 在 PPCP 烟气脱硫的研究过程中,需收集脱硫反应的粉状产物(约含 $80\%—90\%$ 的硫酸铵和 $10\%—20\%$ 的亚硫酸铵),防止造成严重的环境污染,如能回收可用作化肥. 现在对于在其它条件下生成的硫酸铵气溶胶已经有所了解^[4],但是关于在 PPCP 这种特定条件下产生的此种粉尘的粒径分布,国内外尚无资料报道. 本文采用沉降法取样并用电子显微镜进行了观测,给出了脱硫产物颗粒形状的照片和粒径的统计分析结果.

1 PPCP 烟气脱硫产物粉尘的产生和取样

1.1 粉尘的实验室产生

为了在实验室内得到电镜分析用的脱硫产物的气溶胶粉尘,同时考虑尽可能地符合实际工况,自制了 PPCP 烟气脱硫小型模拟装置(见图 1).

为了使取样用的脱硫产物粉尘符合 PPCP

* 国家“九五”科技攻关项目(The National Key Science and Technology Project during The Ninth Five-Year Plan Period): 96-910-02-01

许德玄:男,53岁,副教授

收稿日期:1998-03-16

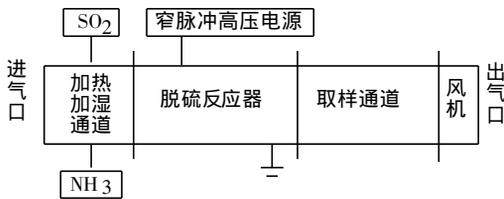


图1 PPCP烟气脱硫实验模拟装置示意图

烟气脱硫工况, 实验的操作条件如下:

(1) 调整气体流量为 $2\text{m}^3/\text{h}$, 在反应器入口处, 保持 SO_2 气体浓度为 $2000\text{ml}/\text{m}^3$, NH_3 浓度 $4000\text{ml}/\text{m}^3$ 左右。

(2) 保证 SO_2 、 NH_3 在通道中的停留时间为 5s 以上, 使它们的化学反应完全, 以符合实际工况。

(3) 调整加热加湿设备, 保持通道中的水蒸气含量(体积比)为 7.5% , 温度为 60°C , 此时对应的相对湿度为 38.2% 。

(4) 反应器中同极距为 50mm , 通过调整窄脉冲高压电源输出电压的脉宽和峰值, 使放电电极的峰值电压达到 40kV , 产生稳定的窄脉冲电晕放电。

1.2 粉尘的取样

选用电子显微镜作粉尘的粒径分析。

为了尽可能不人为地影响样品中粉尘的粒径分布, 选用沉降法。即在产物粉尘浓度稳定的情况下, 密封采样通道, 使粉尘在静止的空气中自然沉降到载玻片上形成薄层, 供电镜作粒径分析用。但是, 不同粒径的粉尘具有不同的空气动力学性质, 需要估算不同数量级粉尘的张弛时间和临界沉降速度, 才能确定合适的沉降时间和沉降距离。

1.2.1 沉降时间和沉降距离的确定

在生成产物的浓度稳定后, 密封取样通道时, 其中的空气会有短时间的紊流, 然后很快趋于静止。因为这段时间极短, 为讨论问题方便, 将其忽略。即认为在密封取样通道的瞬时, 空气就处于静止状态, 粉尘在其中沉降。根据气溶胶动力学, 在重力场中, 初速度为 v_0 的尘粒在静止空气中的运动方程为:

$$v_t = v_T - (v_T - v_0)e^{-gT} \quad (1)$$

式中, v_t 为 t 时刻尘粒的运动速度; v_T 为临界沉降速度; τ 为张弛时间 (relaxation time), 它是表征粉尘在重力的作用下, 调整其速度所需时间的重要参数, 其物理意义为: 尘粒运动速度减小到原来的 $1/e$ 所需的时间。

由(1)式可以看出, 在理论上尘粒达到临界沉降速度的时间为 t , 但是当 $t = 3\tau$ 时, $v_t = 0.95v_T$, 可以近似地认为, 此时尘粉已达到临界沉降速度。

根据斯托克斯定律, 并忽略空气浮力, 可以得到 τ 和 v_T 的表达式:

$$\tau = \rho d^2 C_0 / 18\mu \quad (2)$$

$$v_T = \tau g \quad (3)$$

(2) 式中, ρ 为尘粒的密度, $\rho = 1700\text{kg}/\text{m}^3$; C_0 为库宁汉滑动修正系数, 查表可得。 μ 为空气粘滞系数, 取 60°C 时的 $\mu = 20.0 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。 g 为重力加速度, 取 $g = 9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。 d 为尘粒直径, 根据光学显微镜的初步观测, 脱硫产物的粉尘粒径均在 $10\mu\text{m}$ 以下, 所以分别取 d 为 0.01 、 0.1 、 1.0 、 $10.0\mu\text{m}$ 代入(2)、(3)式中, 结果如表1所示。

表1 不同粒径尘粒的 τ 和 v_T 的估算值

粒径 / μm	张弛时间 / s	3 倍的张弛时间 / s	临界沉降速度 / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
0.01	1.07×10^{-8}	3.21×10^{-8}	1.05×10^{-5}
0.1	1.37×10^{-7}	4.17×10^{-7}	1.34×10^{-4}
1.0	5.52×10^{-6}	1.65×10^{-5}	5.41×10^{-3}
10.0	4.80×10^{-4}	1.44×10^{-3}	4.70×10^{-1}

表1表明: 达到临界沉降速度前的时间 (3τ) 是极短的, 完全可以忽略, 即认为尘粒在密封通道后就以速度 v_T 运动。

在本实验粉尘浓度条件下, 经反复试验确定, 当载玻片上方离通道壁 1cm 时, 粉尘样品厚度适于电子显微镜观测, 故计算尘粒沉降 1cm 所需时间如表2。

表2 尘粒每沉降 1cm 所需的时间

粒径 / μm	0.01	0.1	1.0	10.0
t	26.39h	2.07h	3.08min	2.13s

为保证取样能正确反映烟尘的粒径分布, 防止小尘粒的遗漏, 较长的沉降时间是适宜的。考虑到夜间空气无扰动故沉降时间选为一夜

(10—12h).

1.2.2 粉尘取样过程及注意事项

按照上述操作条件在 PPCP 烟气脱硫实验室小型模拟装置中产生粉尘气溶胶,待稳定发尘后,迅速将数片洁净的载玻片(2cm×2cm)放入取样通道中距上壁 1cm 处,完成后立即密封通道,并关闭电源、气源,使粉尘自然沉降一夜后取出,然后将附着有粉尘薄层的载玻片送到电镜室进行观察,选取有代表性的部分拍照.在取样过程中,需要注意:在产物粉尘气溶胶发生过程中,严格稳定实验条件;密封通道要迅速,使其中空气很快静止;粉尘沉降过程中,要避免外界环境的干扰.

2 电镜照片的统计结果

PPCP 脱硫产物的典型形状如图 2 的电镜照片所示.

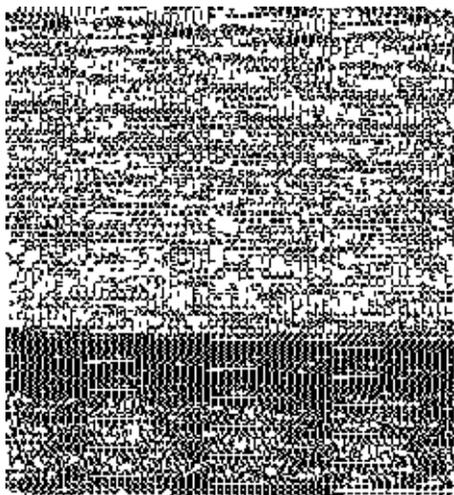


图 2 PPCP 脱硫产物粉尘的典型形状
(放大 7.00k 倍的电镜照片)

由图 2 可以看出,粉尘颗粒形状不规则,结构疏松,其中部分较大的尘粒是由小颗粒粉尘凝并而成.在电子显微镜下观测粉尘的等效投影面积径,并统计拍摄电镜照片,得到 PPCP 烟气脱硫产物粉尘的粒径分析结果(表 3).

由观测和统计结果可以计算出,尘粒的数目中位径(NMD)约为 0.4 μm .为使得到的粒径分析结果对于粉尘的收集更有针对性,利用上述粒径分布的数值,绘得不同粒径范围粉尘的

质量百分数直方图;并计算得出质量中位径(MMD)约为 2.8 μm .

表 3 温度为 60、含水量 7.5% 时的粒径分布

区间 编号	粒径范围 / μm	粒径中值 / μm	分布频率 / %	累计频率 分布/ %
1	< 0.6	0.3	41.10	41.10
2	0.6—1.2	0.9	30.67	71.77
3	1.2—2.4	1.8	19.02	90.79
4	2.4—3.6	3.0	7.36	98.15
5	3.6—4.2	3.9	1.22	99.37
6	4.2—6.0	5.1	0.61	100

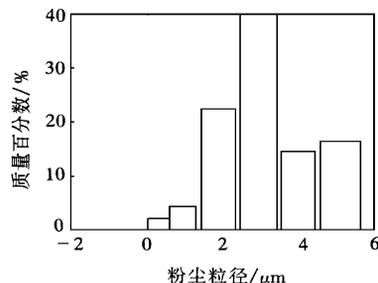


图 3 60 时粉尘的质量百分数

3 结论

(1) 采用沉降法取样并利用电子显微镜观测,可以测量 PPCP 脱硫产物中所有粉尘的粒径,从而较全面地得出此种粉尘的粒径分布.

(2) 尘粉的结构比较疏松,形状不规则.

(3) 在烟气脱硫工况条件下,即水蒸气体积含量为 7.5%,温度为 60 时粉尘的 NMD 为 0.40 μm ,几何标准偏差 $\sigma = 5.21$; MMD 为 2.82 μm , $\sigma = 1.43$.若考虑到实际工况的波动,当水蒸气体积比保持不变,根据气溶胶理论和文献[4]的有关实验结果可得:如果温度降低,粉尘粒径将减小;温度升高,粒径增大.

参 考 文 献

- 1 Rongyi Wang et al. . Apparent energy yield of a high efficiency pulse generator with respect to SO₂ and NO_x. J. of Electrostatics, 1995, 34: 355
- 2 Senichi Masuda et al. . Novel cold plasma technologies for pollution control. Proceedings of the 2nd International Conference, Beijing, 1993: 1
- 3 Dinelli G et al. . Industrial experiment on pulse corona simultaneous removal of NO_x and SO₂ from flue gas. IEEE trans. IND. Appl. , 1990, 26(3): 535—541
- 4 Peter Seier Christensen et al. . Kinetics of the Photolytic Formation of Aerosols from SO₂ and NH₃ in Stackplumes. J. Aerosol Sci. , 1995, 26(Suppl. 1): 223—224