

文章编号: 0258-0926(2014)06-0172-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.06.0172

# 钠气溶胶在事故通风管道中的沉降研究

孙大杰, 张东辉, 任丽霞, 胡文军

中国原子能科学研究院, 北京, 102413

**摘要:** 从沉降的机理出发, 在对湍流流场作合理简化的基础上, 对钠气溶胶的物理性质及在迁移过程中影响其沉降的多种因素进行分析, 给出一维管道内气溶胶的输运方程, 建立计算事故通风管道中沉降率的物理模型。该模型的分析表明, 影响钠气溶胶沉降率的主要因素为重力、布朗凝聚和湍流等, 其他的如布朗扩散等均可忽略。

**关键词:** 钠气溶胶; 沉降率; 重力; 布朗凝聚; 湍流扩散; 湍流凝聚; 惯性沉降

**中图分类号:** TL353+.11 **文献标志码:** A

## 0 引 言

对于气溶胶在通风系统的沉降研究, 国外已经积累了 40 余年的实验数据和经验, 但是限于湍流本身的复杂性和气溶胶粒子本身运动的复杂性, 目前现有的理论模型与实验结果尚有一定的差距。而国内对气溶胶的研究尚处在起步阶段, 缺乏对其沉降机理和影响因素的细致研究。本研究基于气溶胶动力学, 在描绘气溶胶粒子运动和相互作用的基础上对湍流模型合理地简化, 给出一维管道内气溶胶的输运方程, 构造相关的沉降计算模型, 并细致地分析其沉降机理和影响因素。在计算钠气溶胶在事故通风系统管道中的沉降时, 主要考虑钠气溶胶粒子尺寸分布、重力沉降、湍流扩散、及惯性沉降等几个重要因素。

## 1 钠气溶胶粒子的尺寸分布

钠气溶胶粒子尺寸分布的规律及其变化特性是气溶胶行为研究的基础。

钠气溶胶的粒子尺度服从对数正态分布<sup>[1]</sup>。

设  $t$  时刻其概率密度函数为<sup>[2]</sup>:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_g(t)} \cdot r} \times \exp \left\{ -\frac{[\ln r - \ln r_g(t)]^2}{2 \ln^2 \sigma_g(t)} \right\} \quad (r > 0) \quad (1)$$

式中,  $r$  为粒子半径;  $\sigma_g(t)$  为气溶胶粒子半径的标准几何偏差;  $r_g(t)$  为气溶胶粒子数量中值半径。对这些参数的物理意义的详细描述见文献[2]。

## 2 钠气溶胶粒子的凝聚

钠气溶胶粒子的凝聚会影响气溶胶粒子的尺寸分布, 主要包括布朗凝聚和湍流凝聚, 前者是在分子之间的相互作用产生, 后者是只是在湍流工况下产生。

### 2.1 布朗凝聚

即使在静止的空气中, 气溶胶粒子也不是完全静止的, 而是处于永不停息的随机运动状态——布朗运动。布朗运动直接影响粒子的尺寸分布从而间接影响其沉降速率, 但不会直接造成粒子的沉降。K. W. Lee 和 H. Chen 得出布朗运动中两粒子碰撞核心函数为<sup>[3]</sup>:

$$\beta_{bc}(v_i, v_j) = \frac{2kT}{3\mu} (v_i^{1/3} + v_j^{1/3}) \times \left[ \frac{C(v_i)}{v_i^{1/3}} + \frac{C(v_j)}{v_j^{1/3}} \right] \quad (2)$$

式中,  $\beta_{bc}$  为布朗运动的碰撞核心函数;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度;  $\mu$  为介质的动力粘度;  $v_i$  和  $v_j$  分别为粒子  $i$ 、 $j$  的体积;  $C(v_i)$  和  $C(v_j)$  分别表示体积为  $v_i$ 、 $v_j$  的粒子  $i$ 、 $j$  由于分子运动滑移而产生的库宁汉修正系数。

以  $n(v, dv)$  表示体积在  $(v, v+dv)$  范围内的粒子数量密度, 其受布朗凝聚的影响而随时间的变化

率为<sup>[3]</sup>：

$$f_{bc} = \frac{\partial n(v dv)}{\partial t} = \frac{1}{2} \left[ \int_0^v \beta_{bc}(\bar{v}, v - \bar{v}) n(\bar{v}) n(v - \bar{v}) d\bar{v} \right] dv - \left[ \int_0^\infty \beta_{bc}(v, \bar{v}) n(\bar{v}) n(v) d\bar{v} \right] dv \quad (3)$$

式中， $\beta_{bc}(v, \bar{v})$ 表示体积分别为  $v$  和  $\bar{v}$  的两粒子间的布朗凝聚碰撞核心函数。

布朗凝聚对气溶胶粒子数量浓度的影响如图 1 所示。从图 1 可以看出，在初始时刻，布朗凝聚是个非常剧烈、迅速的过程，随着凝聚的进行，粒子直径增大，凝聚作用减缓，但凝聚过程始终都在进行中，不会达到平衡状态。事故状态下钠气溶胶的浓度比较大，因此，在气溶胶的迁移沉降过程中，布朗凝聚的作用必需加以考虑。

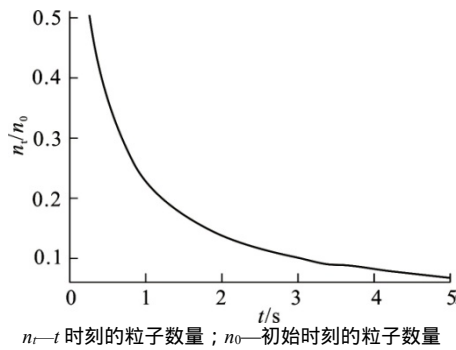


图 1 布朗运动导致的气溶胶数量浓度的变化  
Fig. 1 Evolution of Number Concentration of Aerosol due to Brown Coagulation

### 2.2 湍流凝聚

和布朗凝聚一样，湍流凝聚的作用也必须加以考虑。湍流凝聚的粒子碰撞核心函数为<sup>[4]</sup>：

$$\beta_{tc}(v_i, v_j) = 1.3 \left( \frac{\epsilon_d}{v} \right)^{1/2} (r_i + r_j)^3 \quad (4)$$

式中， $\epsilon_d$ 为湍流流体单位质量的能量耗散率； $r_i$ 和  $r_j$ 分别为粒子  $i$  和  $j$  的半径。

对体积在  $(v, v+dv)$  范围内的粒子，其数量密度  $n$  受湍流凝聚的影响而随时间的变化率  $f_{tc}$  为：

$$f_{tc} = \frac{\partial n(v dv)}{\partial t} = \frac{1}{2} \left[ \int_0^v \beta_{tc}(\bar{v}, v - \bar{v}) n(\bar{v}) n(v - \bar{v}) d\bar{v} \right] dv - \left[ \int_0^\infty \beta_{tc}(v, \bar{v}) n(\bar{v}) n(v) d\bar{v} \right] dv \quad (5)$$

### 3 钠气溶胶的沉降

影响钠气溶胶粒子在管道中迁移的沉降因素主要有：重力、热扩散、湍流扩散和惯性沉降等。钠冷快堆通风管道内的流动绝大多数为湍流，本文中只给出相应湍流模型的钠气溶胶沉降公式。

#### 3.1 重力沉降

3.1.1 重力沉降模型 气流在管道中流动时，重力作用会引起沉降，重力作用在水平管道中尤其显著。因此，这里先讨论重力沉降。

如图 2 所示，圆形管道的半径为  $a$ ；长度为  $x$ ；与水平面的夹角为  $\theta$ ；管道中气体流速为  $u$ 。考虑到湍流的搅混效应和速度剖面，作以下 2 点合理假设：管道断面上气体流速均匀；管道断面上气溶胶浓度均匀。得到以下微分方程：

$$f_g = u \frac{\partial n(v dv)}{\partial x} = - \frac{2n(v dv)v_t}{\pi a} \quad (6)$$

式中， $v$  为粒子的体积； $n(v dv)$ 表示体积在  $(v, v+dv)$  之间的粒子数量； $a$  为圆管半径； $v_t$  为重力沉降速度<sup>[5]</sup>：

$$v_t = \tau g = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} g \cos(\theta) \times \left\{ 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left[ 1.257 + 0.4 \exp\left(-1.1 \frac{d_p}{2\lambda}\right) \right] \right\} \quad (7)$$

式中， $\tau$ 为粒子弛豫时间<sup>[5]</sup>； $g$ 为当地的重力加速度； $\lambda$ 为空气分子的平均自由程； $d_p$ 为粒子直径； $\rho_p$ 为粒子的物质密度； $\mu$ 为介质动力粘度。

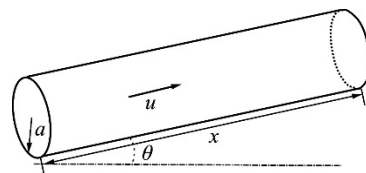


图 2 气流通过长直圆形管道  
Fig. 2 Flow of Gas through Long Pipe

3.1.2 重力沉降模型验证 托马斯公式<sup>[5]</sup>是空气污染控制领域广泛使用的经验公式。本文重力沉降模型计算结果与托马斯公式结果对比如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，二者的计算结果在管道长度  $1 \sim 500$  m 的范围内相差小于  $10^{-3}$ ，两条曲线几乎重合。

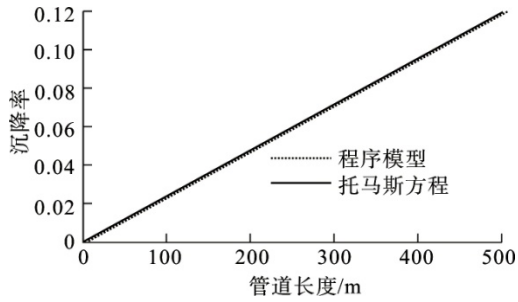


图3 重力沉降模型的验证

Fig.3 Verification of Gravity Deposition Model

3.2 湍流扩散沉降

在重力沉降相对比较微弱的时候湍流扩散沉降作用不可忽略，如垂直管道情形。

通过求解图4所示管道内的扩散方程，得到湍流扩散作用导致的粒子浓度随时间的变化率  $f_{td}$ ：

$$f_{td} = u \frac{\partial n(v dv)}{\partial x} = -n(v dv) \frac{AD_t}{a^2} \exp\left(-\frac{A D_t}{a^2 u} x\right) \quad (8)$$

式中， $D_t$ 为湍流扩散系数； $A$ 为由边界条件决定的常数，如在边界处浓度为0的情况下  $A=5.782$ 。由于湍流扩散系数的计算本身比较复杂，在本模型中，式(8)中  $AD_t$ 作为一个整体，其值的选取由俄罗斯的Box程序中的相关参数计算而来。

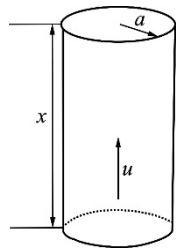


图4 气流在垂直管道中的流动

Fig.4 Gas Getting through Vertical Pipe

3.3 惯性沉降

3.3.1 惯性沉降作用 惯性沉降主要是指气流流经图5弯头时由于流动方向的突然变化，气流中所夹带的气溶胶粒子由于惯性力的作用碰撞到弯头管壁面而被吸附所导致的沉降行为。

在对湍流流场合理简化的基础上，忽略其他沉降因素，使用拉格朗日描述法，通过追踪单个粒子的运动轨迹，求解得到在弯头处的惯性沉降

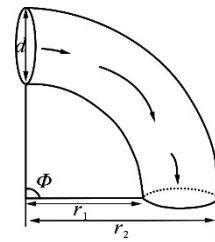


图5 气体通过弯头示意图

Fig.5 Schematic Diagram of Gas through Elbow

$r_1$ 、 $r_2$ —弯管最内侧和最外侧转弯半径

效率的解析形式：

$$\eta = 1 - \frac{c}{c_0} = 1 - \exp\left(-\frac{4\tau u}{\pi d} \phi\right) \quad (9)$$

式中， $d$ 为管道直径； $\phi$ 为弯头部的转角； $c$ 和  $c_0$ 分别为弯头出口处和入口处的气溶胶浓度。

从式(9)可以看出，弯头处惯性沉降率与弯头的转弯半径无关。实验表明，在弯头曲率1~5的范围内，这个结论与实验结果基本一致<sup>[6]</sup>。

3.3.2 惯性沉降作用的验证 在弯头处的沉降主要为惯性沉降，管道弯头处的穿透率也可以采用 McFarland 等由实验数据拟合出的经验公式来计算<sup>[7]</sup>。针对气溶胶数量中值直径 (CMD) 分别为 2  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  的情形，将本模型的计算结果与 McFarland 等的实验拟合结果进行比较。

从比较结果可看出，在粒子直径比较大时，本模型计算结果与 McFarland 等的实验拟合值符合得很好，但是当粒子直径较小时，计算结果比实验值大一倍，这种差别可能是由于粒子直径较小时其惯性亦较小，湍流等作用比较强所致。

4 各因素的综合考虑

各个影响因素的考虑情况见表1。

综合以上所述的各种因素，与水平面夹角为  $\theta$  的长直管道的气溶胶的运输方程为：

$$\frac{\partial n(v dv)}{\partial t} = f_{bc} + f_{tc} + f_g + f_{td} - u \frac{\partial n(v dv)}{\partial x} \quad (10)$$

表1 模型中的考虑因素

Table 1 Factors Considered in Model

影响气溶胶沉降的因素	因素说明	模型中是否考虑
重力	计算重力沉降速度	考虑
热扩散	求解扩散方程	不考虑
布朗运动凝聚	影响粒度分布	考虑
湍流的影响	解湍流扩散、湍流凝聚	考虑

$$c = \int_0^{\infty} n(v, dv) dv \quad (11)$$

$$\eta = 1 - \frac{c}{c_0} \quad (12)$$

式中,  $f_{bc}$ 、 $f_{ic}$ 、 $f_g$ 、 $f_{id}$  分别为由布朗凝聚、湍流凝聚、重力作用和湍流扩散作用导致的粒子浓度随时间的变化率, 其表达式分别由式(3)、式(5)、式(6)和式(8)给出。式(10)具有普适性, 方程右侧的各个源项体现了气溶胶在迁移过程中运输、沉降、凝聚、扩散等多种因素对气溶胶浓度的影响。若式(10)左侧部分为0, 则可求解得到稳态时一维管道内的气溶胶浓度分布。

弯头处的沉降效率由式(9)给出:

$$\eta = 1 - \frac{c}{c_0} = 1 - \exp\left(-\frac{4\tau u}{\pi d} \phi\right) \quad (13)$$

## 5 结 论

以国内外关于气溶胶的相关实验成果为基础, 研究分析气溶胶物理性质和沉降机理, 给出了一维管道内气溶胶的输运方程, 构造了相关的

沉降计算模型。研究表明, 在实际工况下影响气溶胶沉降的主要有其尺寸分布、重力、布朗凝聚、湍流凝聚、湍流扩散和惯性沉降等因素。

参考文献:

- [1] Seiji Kawahara. Description of aerosol release associated with sodium burning [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1977, 14(5): 343-350.
- [2] 孙大杰, 张东辉, 任丽霞, 等. 钠气溶胶粒子尺寸分布参数的数学模型研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32(4): 315-318.
- [3] Lee K W, Chen H. Coagulation rate of polydisperse particles[J]. Aerosol Science and Technology, 1985, 3(3): 327-334.
- [4] Sheldon K Friedlander. Smoke, Dust and Haze. Fundamental of aerosol dynamics [M]. Second Edition, New York, Oxford University Press, 2000. 189-210.
- [5] 向晓东. 气溶胶科学技术基础[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012. 50-53.
- [6] 吴俊, 赵彬. 通风管道内颗粒的沉降规律研究及应用[J]. 暖通空调, 2008, 38(4): 18-23.
- [7] McFarland A R, Gong H, Muyschondt A, et al. Aerosol deposition in bends with turbulent flow[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(12): 3371-3377.

# Analysis on Sedimentation Rate of Sodium Aerosol In Emergency Ventilation System

Sun Dajie, Zhang Donghui, Ren Lixia, Hu Wenjun

China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413, China

**Abstract:** In the paper, the chemical and physical characteristics of sodium aerosol particles as well as factors that influence the sedimentation rate of sodium aerosol during its transport are analyzed. Besides, a simplified model is given to calculate the sedimentation rate when aerosol getting through the emergency ventilation system. It has been found that the sedimentation rate is largely determined by gravity, turbulent coagulation and turbulent, other factors, such as brownian diffusion, could be ignored.

**Key words:** Sodium aerosol, Sedimentation rate, Gravity, Brownian coagulation, Turbulent diffusion, Turbulent coagulation, Inertial settling

作者简介:

孙大杰(1988—), 男, 工程师。2013年毕业于中国原子能科学研究院。现从事反应堆运行方面的研究。

张东辉(1971—), 男, 研究员。1999年毕业于中国原子能科学研究院。现从事反应堆安全方面的研究。

任丽霞(1979—), 女, 副研究员。2006年毕业于中国原子能科学研究院。现从事反应堆安全方面的研究。

(责任编辑: 刘胜吾)