

# 氡室中气溶胶行为规律的实验研究

郑平辉<sup>1</sup>, 张磊<sup>1,2</sup>, 梁珺成<sup>3</sup>, 郭秋菊<sup>1</sup>

(1. 北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;  
2. 防化研究院二所, 北京 102205; 3. 中国计量科学研究院, 北京 100013)

**摘要:** 在静态密闭氡室中, 结合气溶胶的沉降和凝并理论以及气溶胶浓度的变化实测结果, 实验测定了不同粒径处气溶胶粒子的沉降系数和凝并系数。研究表明, 随着气溶胶粒子的粒径从 58.7 nm 增加至 436.4 nm, 沉降系数从  $2.11 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  减小至  $1.55 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (285.2 nm), 再逐渐增加至  $1.72 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 凝并系数从  $2.12 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  减小至  $3.82 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。沉降系数、凝并系数变化规律同以往研究规律类似, 测量值与其它实测值范围较为接近。综合考虑氡室中气溶胶的沉降和凝并规律, 在氡室模拟正常环境(气溶胶浓度  $10\,000 \text{ cm}^{-3}$ ) 情况下, “最稳定” 粒径出现在 252.6 nm, 其浓度减小 5% 的时间约为 40 min, 该值对于氡室中气溶胶浓度的稳定控制及氡子体浓度的控制具有重要意义。

**关键词:** 气溶胶行为; 氡室; 沉降; 凝并; 浓度衰减  
**中图分类号:** R144.1

文献标识码: A

在进行氡子体浓度测量仪器的检定和氡子体行为规律研究时, 都需要创造一个稳定可控的氡子体浓度环境<sup>[1]</sup>, 因此, 氡室在这些方面具有重要的意义。氡室中氡子体行为规律从某种程度上而言, 取决于氡室中气溶胶浓度及粒径分布的变化。为此, 研究氡室中气溶胶行为规律对氡室中气溶胶的控制及氡子体浓度的调控具有重要的意义。

室内气溶胶行为包括了沉降、凝并及产生和过滤等。很多学者研究了室内气溶胶的行为规律, 包括模型研究<sup>[2-4]</sup>和实验研究<sup>[5-8]</sup>。在静态稳定氡室环境中, 气溶胶的行为规律与普通房间内的规律有较大的不同, 起决定作用的是气溶胶的沉降和凝并行为。

本研究在静态密闭氡室中, 结合气溶胶的沉降和凝并理论以及气溶胶浓度的变化实测结果, 测定了不同粒径处气溶胶粒子的沉降系数和凝并系数。

## 1 基本理论

为了有效地对氡室中气溶胶浓度进行控制, 氡室中往往直接鼓入单分散性气溶胶。单分散性气溶胶在氡室环境中, 除了由于重力和附壁导致的沉降以外, 不同粒子之间的凝并过程, 也会导致气溶胶浓度的减小。其行为规律如图 1 所示。

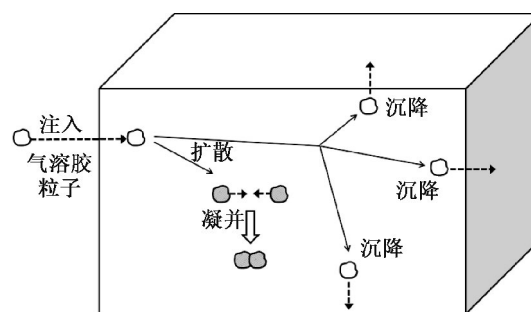


图 1 氡室中气溶胶粒子的主要动力学过程

Fig. 1 Schematic representation of aerosol particle dynamic processes in radon chamber

收稿日期: 2013-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(资助号: 11075009; 11205241); 核物理理科基地资助项目( J1103206)。

作者简介: 郑平辉(1989—), 男, 2011年毕业于北京大学物理学院, 现为北京大学物理学院粒子物理与核物理专业硕士研究生。E-mail: phzheng@pku.edu.cn

通讯作者: 郭秋菊。E-mail: qjguo@pku.edu.cn

根据 Nazaroff 等人的研究<sup>[4]</sup>, 氩室中气溶胶浓度随时间的变化中, 沉降过程导致的浓度变化可以用一个浓度的一阶方程表示, 凝并过程可以用一个浓度的二阶方程表示, 则有:

$$\frac{dN}{dt} = -\beta N - \gamma N^2 \quad (1)$$

初始条件为  $t = 0$  时,  $N = N_0$ 。式中  $\beta$  ( $s^{-1}$ ) 是沉降系数,  $\gamma$  ( $cm^3 s^{-1}$ ) 是凝并系数,  $N$  ( $cm^{-3}$ ) 是气溶胶粒子的数量浓度。等式右边的第一项是由粒子沉降到室内表面引起的衰减, 第二项是单分散气溶胶凝并过程<sup>[9]</sup>。

实验中我们可以对气溶胶浓度进行连续监测, 为了测量不同粒径处的沉降系数和凝并系数, 可以将上式转化为:

$$\frac{1}{N} = \frac{\gamma}{\beta} \cdot \frac{N_0 \gamma + \beta}{N_0 \gamma} \cdot e^{\beta t} - \frac{\gamma}{\beta} \quad (2)$$

假定  $\beta$ 、 $\gamma$  在整个实验过程中都是常数。

(2) 式表明粒子数浓度的倒数随着时间以指数规律变化。在一段时间内测量氩室内的气溶胶粒子数浓度, 得到了粒子数总浓度随着时间变化的数据。根据 (2) 式, 应用最小二乘法拟合实验数据就能得到两个关键参数  $\beta$  和  $\gamma$ 。

## 2 实验方法

测量在中国计量科学研究院的标准氩室中完成。该氩室由不锈钢材料组建, 容积为  $12 m^3$ , 并且装备有温、湿度控制系统, 能够调节通风。在大氩室的侧壁上装有管道, 仪器可以通过侧壁的管道直接采样, 也可以直接放到氩室内部的架子上采样测量。

实验用仪器包括气溶胶发生器 (TSI 3475, USA)、水基凝聚核粒子计数器 (TSI WCPC 3781, USA, 连续监测整个过程中的气溶胶浓度) 等。为了核实气溶胶的单分散性和气溶胶粒径随时间的变化, 采用 SMPS (TSI SPMS 3936, USA) 进行了粒径分布测量。

在实验过程中, 首先使用空气净化器清除氩室内全部的气溶胶粒子。再使用气溶胶发生器单次连续产生某一粒径的单分散气溶胶并注入氩室, 大约持续 2~3 h, 然后停止注入气溶胶, 使氩室处于准静态。整个测量大约持续 10 h。

在气溶胶粒子开始静态衰减之前, 用小风扇将氩室内部的气溶胶混合均匀。所有的实验都近似在常温常压下进行。衰减过程开始后, 气溶胶粒子处于静态密闭的环境中, 而且在氩室内分布均匀。SMPS 从氩室侧壁的采样口进行采样, 采样速率为  $0.2 L/min$ , WCPC 直接放置在内部的支架上进行采样, 它的采样流速是  $0.12 L/min$ , 因而可以认为总共有  $0.32 L/min$  空气中的粒子由于仪器的运行而被除去。如果工作采样的时间是 10 h, 总的采样体积将是  $192 L$ , 这个体积约占大了氩室总体积的 1%。所以采样造成的换气过程对氩室内气溶胶的影响在实验过程中可以忽略不计。

测量完毕后, 读取下降时间段的浓度, 采用公式 (2) 对测量结果进行拟合, 最终得到该粒径处沉降系数和凝并系数。

## 3 结果与讨论

为了实验研究沉降系数、凝并系数与气溶胶粒径大小的关系, 在氩室内进行了 8 组粒子数浓度衰减的实验 (每组实验做一次), 得到如表 1 所示的实测数据。初始的中位粒径 (CMD) 范围为  $58.7 \sim 436.4 nm$ , 初始的几何标准差 (GSD) 范围为  $1.25 \sim 1.46$ , 这表明气溶胶粒子的单分散性较好。某次粒径测量结果如图 2 所示。

从表 1 中的实测结果可以看出, 在气溶胶粒径从  $58.7 nm$  到  $436.4 nm$  的范围变化时, 沉降系数先有些微升高, 随后表现出略微下降的趋势, 并无显著地变化; 与此同时, 凝并系数则是先有较大幅度的下降, 随后下降趋势趋于缓和。

图 3 为本研究实验值、理论模型计算值和其他文献中沉降系数测量结果的对比图<sup>[5, 6, 8]</sup>。其中理论模型计算值根据 Lai 和 Nazaroff<sup>[10]</sup> 提出的粒子沉降到室内表面的理论模型, 选取实验过程中的条件作为参数计算得到的 (假定大气压  $1 atm$ , 温度  $293 K$ , 粒子密度为  $1.0 g \cdot cm^{-3}$ , 选取参数摩擦速率为  $3 cm \cdot s^{-1}$ )。这个模型为分别考虑了粒子沉降到室内四壁、顶部以及地面的不同沉降速度, 进而计算出粒子在室内总的沉降系数。

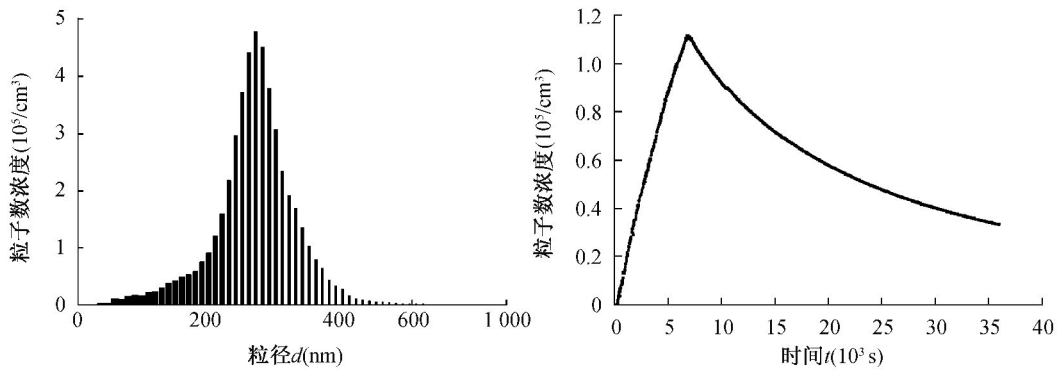


图 2 SMPS 监测气溶胶粒径的变化以及 WCPC 测量气溶胶浓度随时间的变化

Fig. 2 One example of raw data obtained by SMPS and WCPC

表 1 不同粒径下气溶胶粒子的沉降系数和凝并系数

Tab. 1 Initial conditions, deposition coefficients and coagulation coefficients

中位粒径 <i>CMD</i> (nm)	几何标准差 <i>GSD</i>	沉降系数 $\beta$ ( $10^{-5} s^{-1}$ )	凝并系数 $\gamma$ ( $10^{-10} cm^3 s^{-1}$ )
58.7	1.42	2.11	21.2
78.6	1.46	2.15	15.6
154.0	1.32	2.17	5.08
182.9	1.35	1.77	5.83
252.6	1.25	1.65	4.16
285.2	1.29	1.55	5.17
373.3	1.34	1.72	3.82
436.4	1.38	1.60	4.48

图 3 表明,不同研究中实验测量得到的沉降系数分布差异较大,本研究的测量结果在文献报道的数据分布范围内。造成这种差异的原因不同实验条件下的空气流动性和腔室内部的结构复杂性差异较大。本研究的测量结果多数大于理论计算的结果,可能的原因是实际实验环境中,氩室内部的表面要比模型中的理想条件复杂得多。

本研究得到的有关沉降系数变化规律的可能原因考虑如下:气溶胶粒子的沉降过程是由粒子的布朗扩散和重力沉降共同决定的。粒径越小,布朗运动越剧烈,而重力沉降的影响较小;反之,粒径越大,布朗扩散对沉降的影响变小,而重力沉降成为主导因素。综合而言,在小粒径处,粒径越小,沉降系数越大;在大粒径处,粒径越大,沉降系数也越大。在整个粒径范围内,沉降系数随着粒径的变化规律就是先变小后变大。本研究测量的粒径范围恰好处在中间转折处,因而能大致上看出沉降

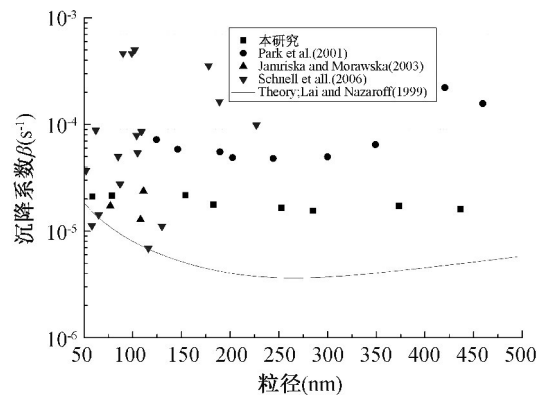


图 3 本研究与其他文献中的沉降系数的对比

Fig. 3 Deposition coefficients from this study and previous works

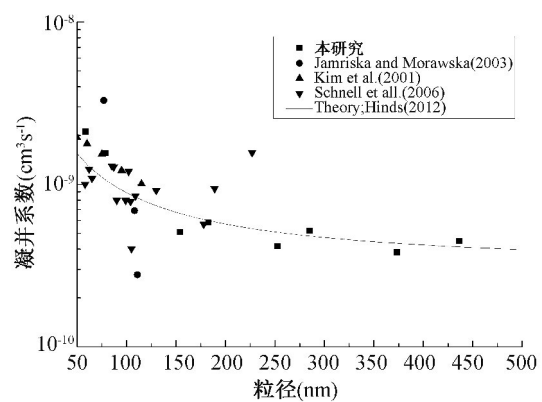


图 4 本研究与其他文献中的凝并系数的对比

Fig. 4 Coagulation coefficients from this study and previous works

系数先减小后增加的趋势。

图 4<sup>[6,8,11]</sup>是本研究中得到的凝并系数的

实测值、理论值与其他文献中的结果的比较图。单分散气溶胶的凝并理论相对简单,这一凝并过程也被称为 Smoluchowski 凝并。根据 Smoluchowski 凝并理论<sup>[9]</sup>,同样将采用本研究实验条件(假定大气压 1 atm,温度 293 K,粒子密度为  $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )作为参数计算出的结果即是图 4 中的理论曲线。

可以看出实验结果和理论模型符合的较好,凝并系数随着粒径的增加而减少。考虑单分散气溶胶情形,粒子的布朗扩散造成的相互碰撞是气溶胶粒子发生凝并的原因,而布朗扩散随着粒径的减小而加剧,因此单分散气溶胶粒子的凝并系数随着粒径大小的变化规律相对简单,粒径越小,凝并系数越大。部分文献中的实验结果波动较大,这种差别可能是由于实验时采用的气溶胶粒子的多分散性引起的。

综合考虑氡室中气溶胶的沉降和凝并规律,(1)式给出了在某一气溶胶粒子数浓度下气溶胶的衰减速率。在氡室模拟正常环境( $10\,000 \text{ cm}^{-3}$ )情况下,将表 1 的各项数据代入(1)式可得到各个粒径处的衰减速率。“最稳定”粒径出现在 252.6 nm,而且粒径大于 252.6 nm 以后的单分散气溶胶衰减速率变化较小,其浓度减小 5% 的时间约为 40 min。

#### 4 结论

影响氡室内气溶胶浓度的两个最主要的物理过程是沉降和凝并。本文采用实验方法在氡室内对气溶胶的沉降系数和凝并系数进行了实验测量,并对其变化规律进行了分析研究。

沉降系数和凝并系数与气溶胶粒径有关,在本实验的气溶胶粒径范围内( $58.7 \sim 436.4 \text{ nm}$ ),沉降系数先有些微升高,随后表现出略微下降的趋势,在数值上并无显著地变化;与此同时,凝并系数则是先有较大程度的下降,随后下降趋势趋于缓和。

不同研究测得的沉降系数与凝并系数差异较大,可能是由实验条件的差别引起。与理论模型比较发现,沉降系数的实验值比理论值要大,而凝并系数的实验值与理论值很接近,

都随着粒径增大而减小。

综合考虑沉降和凝并规律,在氡室模拟正常环境( $10\,000 \text{ cm}^{-3}$ )情况下,气溶胶粒子的“最稳定”粒径出现在 252.6 nm,其浓度减小 5% 的时间约为 40 min。该值对于氡室中气溶胶浓度的稳定控制及氡子体浓度的控制具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] Ichitsubo H, Yamada Y, Shimo M, et al. Development of a radon-aerosol chamber at nirs-general design and aerosol performance [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35(2): 217-232.
- [2] Lu W, Howarth AT, Adam N, et al. Modelling and measurement of airflow and aerosol particle distribution in a ventilated two-zone chamber [J]. *Building and Environment*, 1996, 31(5): 417-423.
- [3] Lai ACK. Particle deposition indoors: a review [J]. *Indoor Air*, 2002, 12(4): 211-214.
- [4] Nazaroff WW. Indoor particle dynamics [J]. *Indoor Air*, 2004, 14(s7): 175-183.
- [5] Park S, Kim H, Han Y, et al. Wall loss rate of polydispersed aerosols [J]. *Aerosol Science & Technology*, 2001, 35(3): 710-717.
- [6] Jamriska M, Morawska L. Quantitative assessment of the effect of surface deposition and coagulation on the dynamics of submicrometer particles indoors [J]. *Aerosol Science & Technology*, 2003, 37(5): 425-436.
- [7] Kim D, Hong S, Kim Y, et al. Deposition and coagulation of polydisperse nanoparticles by brownian motion and turbulence [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37(12): 1781-1787.
- [8] Schnell M, Cheun C, Leung C. Investigation on the coagulation and deposition of combustion particles in an enclosed chamber with and without stirring [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37(11): 1581-1595.
- [9] Hinds WC. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles* [M]. Wiley-interscience, 1999.

(下转第 249 页, Continued on page 249)

## Research Progress on Fingernails Electron Paramagnetic Resonance Signal and its Dosimetric Properties

Wang Liang , Zhang Haiying , Zhang Wenyi , Liu Zhongchao , Cui Songye , Jiao Ling

( Institute of Radiation Medicine , Chinese Academy of Medical Sciences  
and Peking Union Medical College , Tianjin 300192)

**Abstract:** After being irradiated by X-rays or  $\gamma$ -ray , new free radicals would produce within the fingernails. Using electron paramagnetic resonance ( EPR ) technique , signals representing free radicals can be detected and form an electron paramagnetic resonance spectroscopy. EPR signal formation , method of obtaining radiation-induced signal , signal stability and its affecting factors were discussed in this paper.

**Key words:** EPR signal; fingernail; stability

( 上接第 217 页 ,Continued from page 217)

[10] Lai AC , Nazarof WW. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces [J]. Journal of Aerosol Science , 2000 , 31 ( 4 ) : 463 - 476.

[11] Kim D , Park S , Song Y , et al. Brownian coagulation of polydisperse aerosols in the transition regime [J]. Journal of Aerosol Science , 2003 , 34 ( 7 ) : 859 - 868.

## Experimental Study on Aerosol Behavior in Radon Chamber

Zheng Pinghui <sup>1</sup> , Zhang Lei <sup>2</sup> , Liang Juncheng <sup>3</sup> , Guo Qiuju <sup>1</sup>

( 1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology , School of Physics , Peking University , Beijing 100871;  
2. Solid Dosimetric Detector and Method Laboratory , Beijing 102205;  
3. Ionizing Radiation and Medical Science , National Institute of Metrology , Beijing 100013)

**Abstract:** Of all the dynamic processes in an enclosed and still radon chamber , deposition and coagulation of aerosol particles are the dominant processes on deciding aerosol activities. A simple experimental method to determine the corresponding coefficients of deposition and coagulation of aerosol particles was applied in our study. The result shows that as particle diameters increase from 58.7 to 436.4 nm , deposition coefficients decrease from  $2.11 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  to  $1.55 \times 10^{-5}$  ( 282.5 nm ) , then slowly increase to  $1.72 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  and the coagulation coefficients decrease from  $2.12 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  to  $3.82 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Compared with previous researches , they have the similar range of variation. In an environment with aerosol particle concentration of  $10\,000 \text{ cm}^{-3}$  , the most stable particle size is 252.6 nm according to the decay rate influenced by both deposition and coagulation and it takes 40 min for the particle concentration to decrease by 5% . These data are valuable for the accurate control of aerosol and radon progeny in the radon chamber.

**Key words:** aerosol behavior; radon chamber; deposition and coagulation; concentration decay