

# 核电厂严重事故下安全壳内气溶胶再悬浮机制研究

杨 洋<sup>1,2</sup>, 刘 卓<sup>3</sup>, 张卢腾<sup>1,2,\*</sup>, 唐甲璇<sup>1,2</sup>, 李佳龙<sup>1,2</sup>, 潘良明<sup>1,2</sup>, 高 力<sup>3</sup>, 元一单<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学 核工程与核技术系, 重庆 400044; 3. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘要:** 当核电厂发生严重事故后, 安全壳内可能会存在大量的放射性气溶胶, 沉积在壁面的气溶胶会因为安全壳内的气体流动发生再悬浮, 成为持续的放射性气溶胶源项。气溶胶的再悬浮会增大安全壳放射性气溶胶的浓度, 增加过滤排放系统的工作压力, 加大放射性物质泄漏到外界的风险。本文采用可视化实验和力矩平衡模型对安全壳内不同沉积条件和气流条件下气溶胶的再悬浮特性开展研究。发现随着气流速度的增大, 气溶胶的再悬浮份额逐渐增大; 由于毛细力的存在, 在高湿环境下沉积的气溶胶, 再悬浮份额远低于干燥环境沉积的气溶胶; 安全壳内竖直壁面沉积的气溶胶量远小于水平壁面的, 难以形成松散的堆积结构, 再悬浮份额仅为竖直壁面的 50%; 随着沉积时间的增加, 沉积层发生老化, 黏附力增大, 使得气溶胶的再悬浮份额降低。基于流体动力学和黏附力间的力矩平衡修改了经典 RnR 模型中再悬浮率常数表达式的关键项, 并使用实验数据进行验证, 模型预测值和实验值的最大绝对偏差为 8.92%, 平均绝对偏差为 5.65%。

**关键词:** 严重事故; 气溶胶; 再悬浮; 力矩平衡

中图分类号: TL34

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)03-0634-10

doi: [10.7538/yzk.2024.youxian.0569](https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian.0569)

## Research on Resuspension Mechanism of Aerosols inside Containment during Severe Accidents at Nuclear Power Plant

YANG Yang<sup>1,2</sup>, LIU Zhuo<sup>3</sup>, ZHANG Luteng<sup>1,2,\*</sup>, TANG Jiaxuan<sup>1,2</sup>, LI Jialong<sup>1,2</sup>,  
PAN Liangming<sup>1,2</sup>, GAO Li<sup>3</sup>, YUAN Yidan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Department of Nuclear Engineering and Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:** When a severe accident occurs in a nuclear reactor core, a large amount of radioactive aerosols exist within the containment. These radioactive aerosols deposit on the surfaces of the containment and internal structures due to mechanisms like gravity settling and diffusion swimming, reducing the aerosol concentration inside the containment. During severe accidents, various events can cause gas flow within the containment, broadly categorized into two types. One type includes events

like steam explosions, hydrogen combustion, which generate transient high-speed airflow locally; the other type includes continuous airflow generated between different compartments of the containment, natural convection between compartments, and steam condensation near the wall. When gas flow occurs within the containment due to these events, previously deposited aerosols are resuspended into the air due to fluid drag force, becoming a continuous source of radioactive aerosols. Resuspended aerosols can then migrate with the airflow, affecting the distribution of radioactive substances within the containment. Therefore, aerosol resuspension introduces more uncertainty into the distribution and source term calculations of radioactive substances within the containment during severe accidents. Visual experiments and torque balance models were employed to investigate aerosol resuspension characteristics under different deposition conditions (relative humidity, deposition surface orientation, deposition time) and airflow conditions (airflow velocity, transient airflow, and continuous airflow) in this paper. Experimental results indicate that humidity in different deposition environments affects aerosol resuspension. With increasing humidity in deposition environments, the proportion of aerosol resuspension significantly decreases. For aerosols deposited under three humidity environments of RH30%, RH70%, and RH98% at an airflow velocity of 60 m/s, the resuspension proportions are 93.2%, 32.5%, and 13.5%, respectively. Similarly, compared to horizontally deposited surfaces, vertically deposited surfaces exhibit lower deposition amounts, making it difficult to form loose deposition structures and thus reducing resuspension proportions. Aerosol deposition time also affects resuspension proportions; as deposition time increases, aging of deposits occurs, increasing adhesion forces between aerosols and deposition surfaces as well as among aerosols themselves, thereby decreasing aerosol resuspension proportions. At an airflow velocity of 8 m/s, aerosol resuspension proportion for deposits aged for 24 hours is 58.8%, whereas those aged for 72 hours decrease to 36.3%. Under the influence of low-speed continuous airflow, small particle size aerosols underwent resuspension and were carried downstream, whereas larger clusters underwent rolling motion, significantly reducing the median particle size of aerosols in downstream fluids. Under high-speed transient airflow, multiple layers of aerosols were suspended simultaneously, and clusters formed during the deposition process were carried by the airflow, resulting in a second peak in the particle size distribution after resuspension with larger corresponding particle sizes. Due to its greater acceleration, transient airflow generates additional removal forces such as the Basset force, resulting in significantly higher resuspension proportions for transient resuspension at the same velocity compared to continuous erosion resuspension.

**Key words:** severe accidents; aerosols; resuspension; torque balance

当核电厂反应堆发生严重事故后, 安全壳内会有大量的放射性气溶胶存在。这些气溶胶的主要来源有3类: 高压熔融物喷射等造成堆芯材料的机械粉碎、过饱和放射性蒸汽的冷凝成核以及堆芯熔融物和混凝土反应<sup>[1]</sup>。这些放射性气溶胶在重力沉降、扩散泳等机制的作用下逐渐沉积到安全壳和内部结构的表面上, 使安全壳内的气溶胶浓度降低<sup>[2-4]</sup>。但在严重事故期间, 会有多种事件和因素导致安全壳内产生气体流动, 可大致分为两类: 一类是蒸汽爆炸、氢气爆燃等事件会

在局部产生的瞬态高速气流; 另一类是安全壳不同隔间之间的自然对流、壁面附近蒸汽冷凝等事件所产生的连续低速气流。受到气流扰动的影响, 已经沉积的气溶胶会在流体曳力的作用下重新悬浮到空气中, 成为持续的放射性气溶胶源项<sup>[5-6]</sup>。再悬浮后的气溶胶还会跟随气流迁移, 对安全壳内放射性物质的分布造成影响。因此, 气溶胶的再悬浮给严重事故下安全壳内放射性物质的分布和源项计算带来了更多的不确定性<sup>[7]</sup>。

针对安全壳内气溶胶的再悬浮行为机制, 国

内外已经开展了一些实验和模型研究。STORM 实验<sup>[8-9]</sup> 和 ART 实验<sup>[10]</sup> 在水平管道内开展了连续低速气流产生的气溶胶再悬浮研究, 重点关注一回路管道内热泳沉积和湍流沉积气溶胶的再悬浮行为。THAI 实验<sup>[11-12]</sup> 和陈林林等<sup>[13]</sup> 在安全壳模拟罐内通过氢气爆燃开展了瞬态高速气流产生的气溶胶再悬浮行为研究, 但未见公开发表的完整的实验数据。气溶胶再悬浮的机理模型有两类: 一类基于力平衡原理, 认为沉积面上气溶胶颗粒的力平衡被打破时即会发生再悬浮, 何丽雯等<sup>[14]</sup> 使用 STOTM 实验的数据对 Wichner 和 Michael 模型进行了验证, 结果表明两种模型的预测偏差均超过 69%; 一类是能量积累模型, 认为气溶胶颗粒获得足够的能量克服表面的黏附势阱时, 颗粒发生再悬浮。黄挺等<sup>[15]</sup> 对 RnR 模型和 GASFLOW 中的模型分别进行了计算, 发现 RnR 模型对再悬浮份额的估计过低, GASFLOW 给出的结果更为保守。RnR 模型认为气溶胶在升力、曳力和黏附力的耦合作用下发生再悬浮, 但并未考虑近壁面对颗粒所受气动力的影响, 低估了气动力, 使得其对再悬浮份额的预测值偏低。从国内外的研究现状来看, 其中连续气流的实验多在管道中进行沉积, 和安全壳大空间内沉积形成的沉积结构不同。而瞬态气流相关实验, 可以获取到的实验数据较少。对严重事故下安全壳内气溶胶再悬浮规律的掌握和相关模型的开发存在不足。

本文搭建相关的气溶胶沉积和再悬浮实验平台。在安全壳内不同环境条件下进行自然沉积,

制备气溶胶样片, 然后分别在管道内和大空间中开展连续气流和瞬态气流的再悬浮实验, 进一步建立基于曳力和黏附力矩平衡的 RnR 再悬浮模型, 并考虑近壁面对气溶胶受力的影响, 添加额外的去除力矩, 并对其准确性进行评估。

## 1 实验装置和方法

### 1.1 实验装置

气溶胶沉积及瞬态气流再悬浮实验系统如图 1 所示, 主要由安全壳、气溶胶发生系统、再悬浮平台、数据采集系统以及相关的附属系统组成。

安全壳采用分段式圆柱体结构, 总高 2.5 m, 分为顶部封头和中部筒体, 其中中部筒体高度 2 m、内径 1 m、总容积 1.83 m<sup>3</sup>。容器外部连接了蒸汽发生器, 内部安装有湿度计、热电偶、压力表等仪表, 可以对容器内的温度、湿度和压力进行实时监测及控制。使用空压机、空气过滤器、粉空气溶胶发生器及连接管路进行气溶胶的发生和配送, 气溶胶发生器采用 PALAS 的 RBG 粉尘发生器, 其内置气体质量流量控制器, 以 0.04~800 g/h 的配送浓度向容器内稳定连续的进行气溶胶注入。气溶胶种类的选取参考已有实验的选取方法<sup>[16]</sup>, 在常用的不可溶气溶胶中选取了安全、稳定的 TiO<sub>2</sub> 颗粒。NEA2009 年的报告认为, 严重事故期间气溶胶颗粒的中值粒径在 1 μm 左右<sup>[1]</sup>, 同时参考了 ISP40-STOTM 实验气溶胶选取的粒径为 0.43 μm<sup>[8-9]</sup>, 最终选取了 0.4~1 μm 间的粒径, 由于气溶胶的粒径难以进行精确的定制, 本实验选择中值粒径为 0.54 μm 的多分散 TiO<sub>2</sub> 气溶

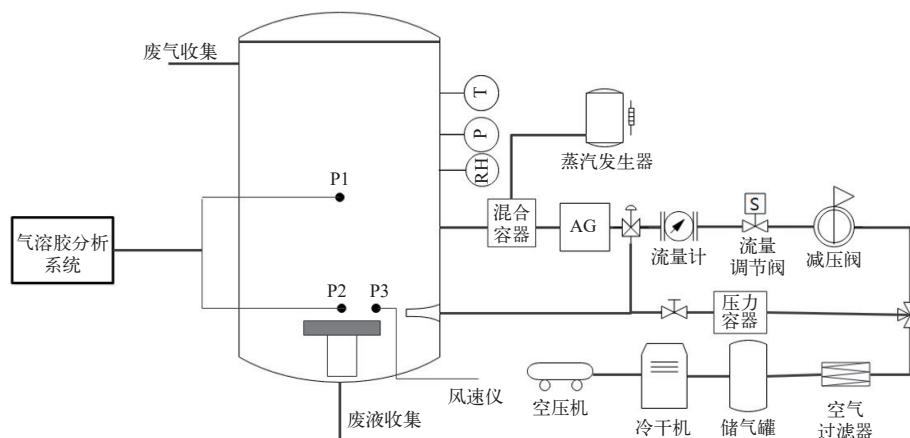


图 1 气溶胶沉积及瞬态气流再悬浮的实验系统示意图

Fig. 1 Experimental system for aerosol deposition and transient airflow resuspension

胶,且全部实验均采用同一批次的粉末进行气溶胶的发生。在容器的中下部设置有水平沉积台,可以放置多片尺寸为 $5\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 的气溶胶沉积样片,沉积样片材质为抛光304不锈钢。

瞬态再悬浮的实验平台由空压机、储气罐、压力表、电磁阀、喷嘴以及配套的管路组成。通过在储气罐内储存高压气体,并配合快速开启的电磁阀,使高压气体突然膨胀形成瞬态的高速气流,通过控制储气压力调节喷嘴的出口流速,达到的最大流速为100 m/s。

连续气流再悬浮实验平台如图2所示,由空压机、空气储罐、质量流量控制器、缓冲罐、矩形试验段、显微镜及配套的管路阀门构成。质量流量控制器可以控制管路中的流量保持稳定,用于获得稳定的气流。矩形通道包括缓冲段和可视化试验段,上游的缓冲段长1 m,用于获得完全发展的流体,下游长度为0.7 m,防止下游的气溶胶采集探头对上游流场产生扰动。整个通道为高2 cm、宽5 cm的矩形通道,且全程无截面变化,可以为再悬浮试验段提供稳定的流场。



图2 连续再悬浮实验平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of continuous resuspension experimental platform

数据采集系统对实验需要的数据进行测量和采集。气溶胶参数通过PALAS Promo 3000粒径谱仪进行测量,其可提供4个量程的粒径测量:0.2~10、0.3~17、0.6~40、2~100  $\mu\text{m}$ ,每个量程有128个粒径尺寸通道,可获得气溶胶的数量浓度和粒径分布。通过OHAUS PR124型电子天平称量再悬浮前后的样片质量,测量精度0.1 mg,进而计算再悬浮份额。瞬态气流的速度使用量程为0~120 m/s的S型皮托管进行测量,连续气流的速度使用质量流量控制器进行控制和测量,测量精度均为1%。

## 1.2 实验方法及工况参数

气溶胶再悬浮实验分为两个阶段进行。第1阶段为沉积阶段,首先控制调节容器内的温度和湿度,再利用气溶胶发生器将 $\text{TiO}_2$ 气溶胶注入到容器中,使用粒径谱仪获得气溶胶的初始粒径分布。放置在沉积台上的样片用于模拟安全壳内的沉积面,自然沉积24 h后,取出样片使用电子天平进行称重,获得沉积气溶胶的初始质量 $m_0$ ,然后密封保存用于第2阶段的再悬浮实验。

现有气溶胶再悬浮理论表明,气溶胶再悬浮的主要影响因素为流体-颗粒间的流体动力学和颗粒-壁面间的黏附力,其中流体动力学主要与气体流

速有关,对于确定的气溶胶和基板材质黏附力和沉积条件相关。因此针对不同的气流速度和沉积条件进行了工况选取,具体的实验参数列于表1,其中实验序号L为连续再悬浮工况,S为瞬态再悬浮工况。对于连续再悬浮工况,将气溶胶样片固定到矩形通道底部后,调节质量流量控制器至预定流量,打开旁路阀门,待气流稳定后开启试验段入口阀门,关闭旁路阀门。气流持续时间为3 min。对于瞬态再悬浮工况,将沉积样片固定到安全壳内的沉积平台上,向储气罐内压入对应压力的气体,开启电磁阀直至储气耗尽。再悬浮结束后再次使用粒径谱仪对悬浮在空间中的气溶胶

表1 实验工况参数

Table 1 Experimental condition parameter

实验序号	沉积环境湿度 RH /%	沉积面朝向	沉积时间/h	气体流速/(m/s)
L1	30	水平	24	1、3、5、8、12、15、16
L2	98	水平	24	1、3、5、12、16
L3	30	竖直	24	1、3、5、8、12、16
L4	30	水平	72	5、8、12、15
S1	30	水平	24	10、20、30、45、60、70、85、100
S2	70	水平	24	20、30、60、70、100
S3	98	水平	24	10、20、30、45、60、70、85、100

粒径分布进行测量，并取出样片再次称重获得样片上剩余气溶胶的质量  $m_1$ 。

气溶胶的再悬浮份额采用称重法进行测量，计算公式如下：

$$f = 1 - m_1/m_0 \quad (1)$$

其中， $m_0$ 、 $m_1$  分别为再悬浮前样片上气溶胶的总质量和再悬浮后样片上剩余气溶胶的质量。

对称量法的不确定度进行分析，主要的不确定度来自电子天平，实验所用的 OHAUS PR124 型电子天平的精度  $\Delta m=0.1\text{ mg}$ ，因此称重法所得再悬浮份额的不确定度为：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f}{f} &= \frac{1}{f} \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial m_1} \Delta m \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial m_0} \Delta m \right)^2} \\ &= \frac{\Delta m}{m_0 - m_1} \sqrt{\left( \frac{m_1}{m_0} \right)^2 + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

本实验多层气溶胶的总质量在 15 mg 左右，再悬浮份额为 50% 时，其不确定度仅为 1.5%，因此可使用该精度的天平通过称重法进行气溶胶再悬浮实验。在实验的第一阶段（沉积阶段），对气溶胶配送以及样片制备的稳定性和多次重复性进行了实验，结果表明可进行稳定的气溶胶配送和样片制备。对 L1 和 S1 工况进行了重复性实验，再悬浮率的绝对偏差在 10% 以内。

## 2 再悬浮实验结果分析

### 2.1 连续气流下的再悬浮

气溶胶发生再悬浮的过程中，受到流体施加给颗粒的流体动力以及沉积面施加给颗粒的黏附力的双重作用<sup>[17]</sup>。不同的气流速度施加给颗粒的流体动力不同，其再悬浮的规律也不同。为了探究气流速度对气溶胶再悬浮的影响，进行了 L1 实验。在不同气流速度条件下气溶胶的再悬浮份额如图 3 所示。当气流速度为 1、3 m/s 时，气溶胶的再悬浮份额基本为零。如图 4 所示，显微镜的图像显示在 3 m/s 的气流速度下，仅在气溶胶沉积层的表面，有一些极为松散的结构发生了再悬浮。有一部分气溶胶沿着气溶胶的沉积层发生滚动运动，并在遇到下游更为坚固的结构时停止滚动。当速度增大到 5 m/s，气溶胶的再悬浮份额为 14.5%，已经有一部分大块的气溶胶团簇发生了再悬浮，这些大块的团簇在沉积层的表面滚动、爬行，并和其下游的气溶胶结合形成更大的团簇。

当团簇增大到一定程度后，整个团簇会直接离开表面，在气溶胶沉积层表面形成一道道封闭的沟壑（图 4b）。当速度增大到 8 m/s 时，气溶胶最上层的松散结构已经基本全部发生了再悬浮，只剩条状的气溶胶结构，再悬浮份额达到了 58.8%。当速度达到 16 m/s 时，沉积面上只剩下零星的点状气溶胶结构，气溶胶的再悬浮份额为 82.1%，可看出气溶胶沉积层表面已没有较大的团簇，只有紧贴沉积面的气溶胶团簇，仍停留在样片表面。

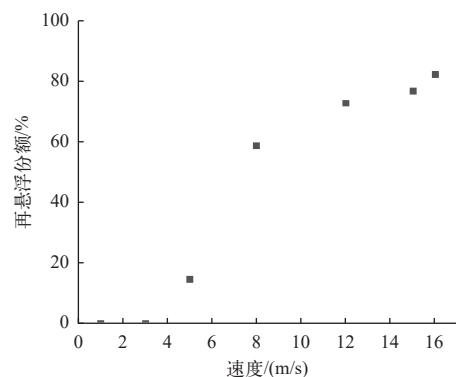
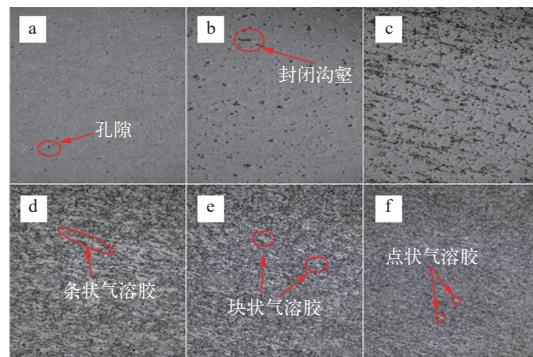


图 3 不同速度下气溶胶的再悬浮份额  
Fig. 3 Resuspension fraction of aerosols at different velocities



a——初始；b——3 m/s；c——5 m/s；d——8 m/s；  
e——12 m/s；f——16 m/s

图 4 不同速度下沉积样片显微镜图像  
Fig. 4 Microscopic images of sedimentary samples at different speeds

气溶胶的再悬浮特性，除了受到流体动力的影响外，还会受到气溶胶颗粒和壁面之间黏附力以及气溶胶沉积结构的影响。因此，针对气溶胶的沉积环境湿度、沉积面朝向以及沉积时间分别进行了 L2~L4 实验。不同参数影响下气溶胶的再悬浮份额如图 5 所示，再悬浮前后气溶胶沉积层的图像如图 6 所示。当气流速度为 16 m/s 时，沉积环境 RH30% 的气溶胶再悬浮份额为 82.1%，

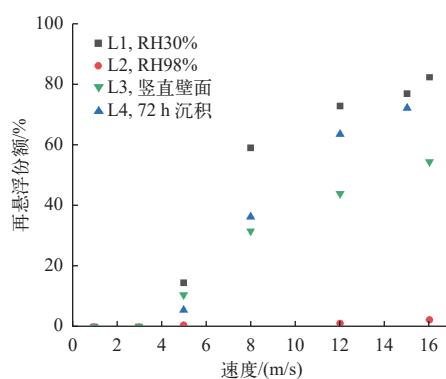
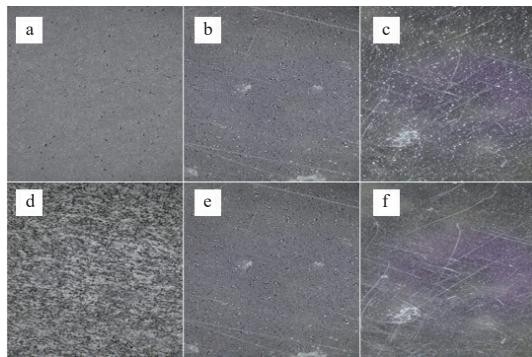


图 5 不同沉积条件下气溶胶连续再悬浮份额随气流速度的变化趋势

Fig. 5 Trend of continuous resuspension fraction of aerosols under different sedimentation conditions as a function of airflow velocity



再悬浮前的沉积层图像: a—RH30%, b—RH98%, c—竖直壁面; 16 m/s气流再悬浮后: d—RH30%, e—RH98%, f—竖直壁面

图 6 不同沉积条件下气溶胶再悬浮前后图像

Fig. 6 Images before and after aerosol resuspension under different sedimentary conditions

而潮湿条件下沉积气溶胶的再悬浮份额仅有2.3%。结合图像,在样片上方气溶胶沉积质量接近的情况下,潮湿条件下气溶胶的沉积层具有更小的孔隙率,且壁面基本没有松散、容易发生再悬浮的结构,因此在高湿环境下沉积的气溶胶其再悬浮份额远低于干燥环境沉积的气溶胶。竖直壁面相比于水平沉积面,其沉积量较低,没有形成多层的松散堆积结构,再悬浮份额仅为水平面的50%。较长的沉积时间,会使沉积物结构发生老化,随着气溶胶在沉积面上停留的时间增加,在毛细力和重力的作用下,颗粒的接触表面逐渐变形,使颗粒与接触面的分离距离减小,黏附力增大。此外,沉积层的孔隙也会塌陷,使孔隙率降低。沉积时间为72 h的气溶胶再悬浮份额略低于沉积时间为24 h的气溶胶。

气溶胶在安全壳内的迁移和分布除了受到气溶胶浓度的影响外,气溶胶的粒径分布也是决定因素之一。因此,在实验过程中使用气溶胶粒径谱仪对再悬浮前后气溶胶的粒径分布进行了测量。图7为16 m/s连续气流作用下再悬浮气溶胶的粒径分布。对于多层次气溶胶的再悬浮,气溶胶的团簇会在气溶胶沉积层的表面进行滚动,在这个过程中,小粒径的气溶胶会在碰撞的过程中分散到气流中,随气流流动到下游后被粒径谱仪探头捕获。而大粒径的气溶胶和团簇则会很快在下游重新沉积或一直紧贴沉积层表面进行移动。因此各工况参数下再悬浮气溶胶的中值粒径均小于初始气溶胶。

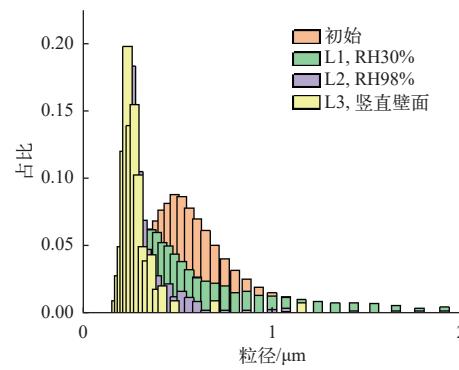


图 7 不同沉积条件下 16 m/s 气流速度的粒径分布变化

Fig. 7 Particle size distribution variation of 16 m/s airflow velocity under different sedimentary conditions

## 2.2 瞬态气流下的再悬浮

由于高湿沉积环境下,低速连续气流所造成的气溶胶再悬浮份额极低,因此使用快速膨胀的高压空气模拟氢气爆燃、蒸汽爆炸等现象产生的瞬态高速气流,针对不同湿度下沉积的气溶胶进行了S1~S3实验。不同影响因素下气溶胶的再悬浮份额如图8所示。对于RH30%环境下沉积的气溶胶,在速度为10 m/s时,其再悬份额已经达到90%,由于低速下绝大部分气溶胶已经再悬浮,随着气流速度的增大,再悬浮份额仅有少量增加,在100 m/s时达到96%。随着沉积环境相对湿度的增大,由于毛细力的增加以及孔隙率逐渐降低,同一速度下气溶胶的再悬浮份额明显降低。

在气流的加速过程中,可能会产生额外的空气动力去除力巴塞特力<sup>[18]</sup>,较高的湍流强度也会增大湍流爆发对黏性亚层的渗透程度。由于瞬态强气流具有较大的加速度,与连续气流引起的再

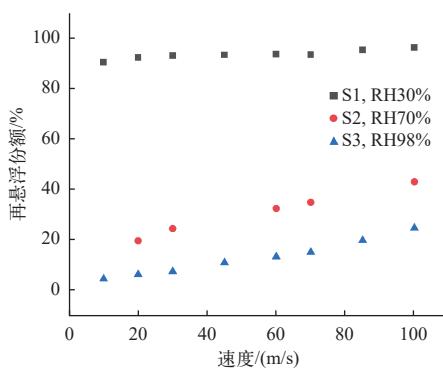


图 8 不同湿度下沉积气溶胶再悬浮份额随瞬态气流速度的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of resuspension fraction of sedimentary aerosols with transient airflow velocity under different humidity levels

悬浮相比,同一速度下,瞬态气流造成的再悬浮份额明显增高。

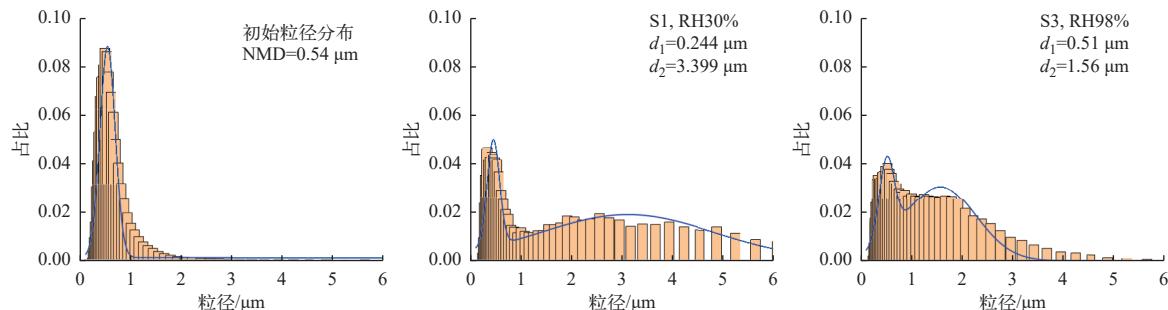


图 9 不同湿度下沉积气溶胶再悬浮前后粒径分布

Fig. 9 Particle size distribution of sedimentary aerosols before and after resuspension under different humidity levels

### 3 再悬浮模型开发与验证

#### 3.1 模型开发

RnR 模型是一个能量积累再悬浮模型,其过程类似于分子表面脱附,当粒子在势阱中具有足够的势能以越过表面势垒时,粒子就会逃离势阱。当流体动力的频率与粒子固有表面振动频率相差不大时,该模型允许共振能量的传递。Reeks 等<sup>[19]</sup>参考分子解吸速率,使用再悬浮率常数描述颗粒的再悬浮:

$$p = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \quad (3)$$

其中,  $N$  为  $t$  时刻气溶胶颗粒的总数目。

因为共振能量传递的估计值很小,因此该模型可采用准静态的分析方法<sup>[20]</sup>。如图 10 所示,在该模型中,假设粗糙表面上的颗粒与表面为两点接触,当颗粒受到流体作用时,颗粒受到升力  $F_L$ 、

图 9 为瞬态气流作用下再悬浮气溶胶的粒径分布,再悬浮后气溶胶的粒径分布和初始状态的粒径分布相比发生明显的变化。初始粒径分布满足 NMD 为 0.54 的正态分布,而再悬浮后的粒径分布为双峰分布。干燥条件下,两个峰值对应的粒径分别为 0.45  $\mu\text{m}$  和 3.11  $\mu\text{m}$ 。在高湿条件下,双峰对应的粒径分别为 0.51  $\mu\text{m}$  和 1.56  $\mu\text{m}$ 。除了初始分布存在的峰外,干燥和高湿条件下都形成了另一个粒径更大的峰,考虑为小粒径的气溶胶在沉积的过程中,形成粒径较大的团簇,高速的瞬态气流使得大部分的团簇同时悬浮起来并被粒径谱仪探头捕获,因此出现第 2 个粒径较大的峰。和干燥条件下的自然沉积形成的气溶胶沉积层相比,高湿条件下的沉积层孔隙率更低,团簇较小,所以第 2 个峰对应的粒径也更小。

曳力  $F_D$ 、重力  $F_G$  和黏附力  $F_A$ , 颗粒在升力和曳力的作用下有围绕 P 点运动的趋势,但受到 Q 点黏附力的阻碍,因此围绕 P 点不同的震动并积累能量。在准静态状态下,可近似认为当流体动力和黏附力达到平衡时, P 点的连接将被破坏,颗粒发生再悬浮。

再悬浮率常数描述气溶胶颗粒在单位时间内脱离表面的概率,当再悬浮率常数确定时,可通过积分计算任意时刻颗粒的再悬浮份额。Reeks 等<sup>[19]</sup>

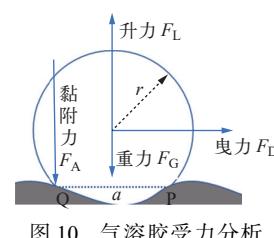


图 10 气溶胶受力分析

Fig. 10 Analysis of aerosol force

给出了假设空气动力的分布函数为高斯分布的再悬浮率常数的表达式:

$$p = \frac{\frac{1}{2\pi} \left( \frac{\langle f^2 \rangle}{\langle f^2 \rangle} \right)^{1/2} \exp \left[ \frac{-(F_A - \langle F \rangle)^2}{2\langle f^2 \rangle} \right]}{\frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{F_A - \langle F \rangle}{\sqrt{2\langle f^2 \rangle}} \right) \right]} \quad (4)$$

其中,  $\langle f^2 \rangle$ 、 $\langle f^2 \rangle$  分别为气动力和气动力导数的均方根。

根据本文的再悬浮实验研究, 颗粒发生再悬浮的形式以滚动为主, 即颗粒的分离是由流体施加的去除力矩和黏附力施加的保持力矩之间的平衡所决定的, 当颗粒将要分离时有:

$$aF_A = rF_D + M_t \quad (5)$$

其中:  $r$  为气流曳力力臂;  $a$  为壁面黏附力力臂;  $F_A$  为壁面施加给颗粒的黏附力;  $F_D$  为流体曳力;  $M_t$  为近壁面颗粒所受到的相对于颗粒中心的力矩(由于近壁面的影响, 靠近壁面处流速低, 远离壁面位置的流速高, 因此会产生相对于颗粒中心的额外的力矩)<sup>[21]</sup>。文献 [22] 给出了近壁面气溶胶的所受到的曳力  $F_D$  以及力矩  $M_t$  的表达式如下:

$$\langle F_D \rangle = 6\pi f \rho_f v_f^2 \left( \frac{R_p u_\tau}{v_f} \right)^2 \quad (6)$$

$$M_t = 8\pi g R_p \rho_f v_f^2 \left( \frac{R_p u_\tau}{v_f} \right)^2 \quad (7)$$

其中:  $f$  和  $g$  为壁面修正系数, 取值分别为 1.700 9 和 0.994;  $\rho_f$  为气流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_f$  为气流动力黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $R_p$  为颗粒半径,  $\text{m}$ ;  $u_\tau$  为摩擦速度, 是湍流切应力与空气密度比值的平方。结合式(6)、(7)可得出作用在颗粒上的等效去除力  $F_t$ :

$$F_t = \frac{M_t}{r} + F_D \quad (8)$$

因此, 基于以上力矩之间的平衡关系, 可得出再悬浮常数为:

$$p = \frac{\frac{1}{2\pi} \left( \frac{\langle f^2 \rangle}{\langle f^2 \rangle} \right)^{1/2} \exp \left[ \frac{-(F_A - G_f \langle F_t \rangle)^2}{2G_f^2 \langle f^2 \rangle} \right]}{\frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{F_A - \langle F_t \rangle}{G_f \sqrt{2\langle f^2 \rangle}} \right) \right]} \quad (9)$$

其中,  $G_f = r/a$  为壁面几何系数, 与壁面粗糙度及结构有关, Reeks 等<sup>[19]</sup> 推荐取值为 100。本文对上述多个因素进行了实验研究, 但由于实验参数的复杂性, 目前在模型中只重点考虑了干燥条件下的再悬浮计算。改进后的再悬浮率常数适用范围

是干燥和水平沉积面的环境, 可对不同气溶胶粒径、气流速度及沉积面粗糙度参数条件下的气溶胶再悬浮份额进行预测。

脉动气动力导数的均方根, Hall 等<sup>[23]</sup> 通过实验获得脉动气动力导数均方根与脉动气动力均方根比值和摩擦速度存在如下关系:

$$\sqrt{\frac{\langle f^2 \rangle}{\langle f^2 \rangle}} = 0.0413 \left( \frac{u_\tau^2}{v_f} \right) \quad (10)$$

对于脉动气动力的均方根, Chepil<sup>[24]</sup> 的研究表明其和时均气动存在线性关系, 文献 [22] 推荐比例系数取 0.2, 本文通过对试验段内流场的大涡模拟得出最佳拟合系数为 0.298 75:

$$\sqrt{\langle f^2 \rangle} = 0.29875 \langle F_t \rangle \quad (11)$$

颗粒和表面间的黏附力, 针对本文的小粒径气溶胶使用 Derjaguin、Muller 和 Toporov 提出的基于光滑表面的 DMT 黏附接触模型进行计算。有关黏附力的研究表明, 与光滑接触相比, 粗糙表面面对颗粒的黏附力会明显降低, 为了表示随机表面粗糙度对黏附力的削弱, 认为表面粗糙度符合对数正态分布函数:

$$F_a = 2\Delta\gamma\pi R_p r' \quad (12)$$

$$\varphi(r'_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{r'_a \ln \sigma'_a} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{\ln(r'_a / \langle r'_a \rangle)}{\ln \sigma'_a} \right]^2 \right\} \quad (13)$$

其中:  $r'_a = r_a/R_p$  为归一化粗糙半径,  $r_a$  为粗糙半径;  $\Delta\gamma$  为表面能;  $\langle r'_a \rangle$  和  $\sigma'_a$  分别为归一化粗糙半径的均值和方差。Biasi 等<sup>[25]</sup> 采用 Hall、Braaten 以及 STORM 和 ORNL ART 的实验数据, 获得了几何平均黏附力和标准差与粒子几何平均半径(以  $\mu\text{m}$  为单位)函数的拟合关系式, 即:

$$\langle r'_a \rangle = 0.016 - 0.0023 R_p^{0.545}, \sigma'_a = 1.8 + 0.13 R_p^{1.4} \quad (14)$$

最后沉积面上气溶胶的再悬浮份额随时间的变化关系可通过积分获得:

$$f = 1 - \int_0^\infty \exp[-p(r'_a)t] \varphi(r'_a) dr'_a \quad (15)$$

### 3.2 模型验证

图 11 为本实验 L1 工况下, 颗粒再悬浮模型预测和再悬浮实验平台测得的气溶胶再悬浮份额对比。本研究模型基于力矩平衡修改了再悬浮率常数表达式的关键项, 考虑了近壁面对气动力的影响, 并使用本实验的数据验证其预测的准

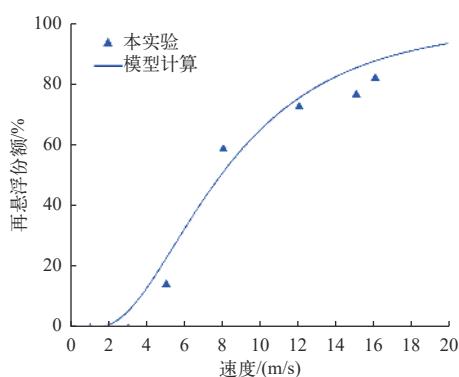


图 11 模型预测和实验对比

Fig. 11 Comparison of model prediction results and experimental data

确性。本模型预测值和实验值最大绝对偏差为 8.92%，平均绝对偏差为 5.65%，模型对颗粒再悬浮预测较为准确。

#### 4 结论

安全壳是防止放射性裂变产物泄漏到外界环境的最后一道屏障。当核电厂发生严重事故时，高温高压的冷却剂迅速从一回路中泄漏，大量的放射性气溶胶会释放到安全壳内，在各种机制下沉积下来的气溶胶，会由于安全壳内气流的扰动发生再悬浮，使得气溶胶浓度增大，增大安全壳泄漏的风险，需要对气溶胶的再悬浮特性进行实验研究。根据实验结果得出主要结论如下。

1) 沉积环境不同的湿度会对气溶胶的再悬浮产生影响。随着沉积环境湿度的增大，气溶胶的再悬浮份额会明显降低，RH30%、RH70%、RH98% 3 种湿度环境下沉积的气溶胶在 60 m/s 的气流速度下，再悬浮份额分别为 93.2%、32.5%、13.5%；同样的初始气溶胶浓度下，相比于水平壁面，竖直壁面的沉积量更低，难以形成松散的沉积结构，其再悬浮份额降低；气溶胶的沉积时间也会对再悬浮份额造成影响，随着沉积时间的延长，沉积物会发生老化，造成气溶胶和沉积表面以及气溶胶与气溶胶之间的黏附力增大，使得气溶胶的再悬浮份额降低。在 8 m/s 的气流速度下，沉积 24 h 后气溶胶的再悬浮份额为 58.8%，27 h 的降低到 36.3%。

2) 在低速连续气流的作用下，小粒径气溶胶发生再悬浮后会被气流夹带到下游，而较大的团簇分离后的运动以滚动为主，使得下游流体中气溶胶的中值粒径明显降低。高速瞬态气流下，多

层气溶胶同时悬浮起来，沉积过程形成的团簇也会被气流夹带，使再悬浮后的粒径分布出现第 2 个对应粒径更大的峰。

3) 由于瞬态气流具有更大的加速度，会产生额外的去除力——巴塞特力，使得相同速度下瞬态再悬浮的再悬浮份额远高于连续再悬浮。

4) 基于流体施加的去除力矩和黏附力施加的保持力矩之间的平衡修改了再悬浮率常数表达式的关键项，考虑了近壁面对气动力的影响，并使用本实验的数据验证了模型预测的准确性。本模型预测值和实验值的最大绝对偏差为 8.92%，平均绝对偏差为 5.65%，模型对颗粒再悬浮预测较为准确。

#### 参考文献：

- [1] ALLELEIN H J, AUVINEN A, BALL J, et al. State of the art report on nuclear aerosols[R]. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development-Nuclear Energy Agency, 2009.
- [2] KONTAUTAS A, URBONAVIČIUS E. Analysis of aerosol deposition in PHEBUS containment during FPT-1 experiment[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(7): 1267-1274.
- [3] 付亚茹, 耿珺, 孙大威, 等. AP1000 核电厂安全壳内气溶胶自然去除分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(4): 700-705. FU Yaru, GENG Jun, SUN Dawei, et al. Aerosol natural removal analysis in containment for AP1000 nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 700-705(in Chinese).
- [4] 陶俊, 咸春宇, 陈军, 等. “华龙一号”安全壳内气溶胶重力沉降特性研究[J]. 核科学与工程, 2020, 40(5): 751-756. TAO Jun, XIAN Chunyu, CHEN Jun, et al. Study on aerosol gravitational sedimentation characteristics in containment of HPR[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 40(5): 751-756(in Chinese).
- [5] ARDEY N, MAYINGER F. Aerosol resuspension by highly transient containment flow-insights by means of laser optical methods[J]. Kerntechnik, 1998, 63(1/2): 68-75.
- [6] SUGIMOTO J, KAJIMOTO M, HASHIMOTO K, et al. Short overview on the definitions and significance of the late phase fission product aerosol/vapour source[R]. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development-Nuclear Energy Agency, 1994.

- [7] WRIGHT A. Primary system fission product release and transport: A state-of-the-art report to the committee on the safety of nuclear installations[R]. Washington D. C.: Nuclear Regulatory Commission, 1994.
- [8] de LOS REYES A C, AREIA CAPITAO J, de SANTI G. International standard problem 40-aerosol deposition and resuspension. final comparison report[R]. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development-Nuclear Energy Agency, 1999.
- [9] KRASENBRINK A, HUMMEL R, HAUTOJARVI A, et al. Simplified tests on resuspension mechanisms: The STORM project[R]. Belgium: VTT Energy, 1996.
- [10] WRIGHT A, PATTISON W, KING J, et al. Series-2 Aerosol resuspension test data summary report[R]. Washington D. C.: NUREG/CR-ORNL/TM, 1984.
- [11] KANZLEITER T, POSS G, FUNKE F, et al. THAI multi-compartment containment test program[C]//14th International Conference on Nuclear Engineering. USA: [s. n.], 2008: 643-649.
- [12] GUPTA S, SCHMIDT E, von LAUFENBERG B, et al. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behaviour in light water reactor containments[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, 294: 183-201.
- [13] 陈林林, 魏严淞, 史晓磊, 等. 安全壳内剥蚀引起的气溶胶颗粒再悬浮[J]. 中国粉体技术, 2020, 26(5): 1-6.  
CHEN Linlin, WEI Yansong, SHI Xiaolei, et al. Aerosol resuspension behavior caused by denudation in containment[J]. *China Powder Science and Technology*, 2020, 26(5): 1-6(in Chinese).
- [14] 何丽雯, 佟立丽, 曹学武. 基于 STORM 实验的气溶胶再悬浮模型适用性分析[J]. *核技术*, 2019, 42(10): 63-68.  
HE Liwen, TONG Lili, CAO Xuewu. Applicability analysis of aerosol resuspension model based on STORM experiment[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, 42(10): 63-68(in Chinese).
- [15] 黄挺, 江斌, 陈炼. 基于 STORM 试验的 GASFLOW 气溶胶再悬浮模型评估与改进[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(3): 474-480.  
HUANG Ting, JIANG Bin, CHEN Lian. Evaluation and improvement of aerosol resuspension model in GASFLOW based on STORM test[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, 55(3): 474-480(in Chinese).
- [16] 周夏峰, 谷海峰, 李富. 安全壳过滤排放系统实验用气溶胶的确定及相关参数的选取[J]. *核动力工程*, 2014, 35(5): 124-127.  
ZHOU Xiaofeng, GU Haifeng, LI Fu. Determination of experimental aerosols for filtered containment venting system and selection of technical parameter[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2014, 35(5): 124-127(in Chinese).
- [17] HENRY C, MINIER J P. Progress in particle resuspension from rough surfaces by turbulent flows[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014, 45: 1-53.
- [18] TADMOR J, ZUR I. Resuspension of particles from a horizontal surface[J]. *Atmospheric Environment*, 1981, 15(2): 141-149.
- [19] REEKES M W, HALL D. Deposition and resuspension of gas-borne particles in recirculating turbulent flows[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1988, 110(2): 165-171.
- [20] REEKES M W, HALL D. Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: Theory and measurement [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32(1): 1-31.
- [21] SOLTANI M, AHMADI G. On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1994, 8(7): 763-785.
- [22] O'NEILL M E. A sphere in contact with a plane wall in a slow linear shear flow[J]. *Chemical Engineering Science*, 1968, 23(11): 1293-1298.
- [23] REEKES M W, REED J, HALL D. On the resuspension of small particles by a turbulent flow[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1988, 21(4): 574-589.
- [24] CHEPIL W S. Dynamics of wind erosion[J]. *Soil Science*, 1945, 60(4): 305-320.
- [25] BIASI L, de LOS REYES A, REEKES M W, et al. Use of a simple model for the interpretation of experimental data on particle resuspension in turbulent flows[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32(10): 1175-1200.