

# 小冷凝速率下亚微米气溶胶自然沉积实验研究

陈君岩<sup>1</sup>, 高璞珍<sup>1</sup>, 谷海峰<sup>1,\*</sup>, 于明锐<sup>2</sup>, 李精精<sup>2</sup>, 周艳民<sup>1</sup>, 于汇宇<sup>1</sup>, 鄂鑫诺<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘要:**为了研究小型反应堆在事故后亚微米气溶胶自然沉积行为, 自主搭建了实验平台并开展了小冷凝速率下的相关实验。研究中发现蒸汽份额的提升对气溶胶基础的重力沉降过程存在促进作用, 压力提升存在抑制作用; 泳动去除机制的贡献占比随着蒸汽冷凝速率的提升而增加; 冷凝速率较小时, 热泳沉积机制在泳动去除机制中的占比可忽略不计; 扩散泳 S/W 模型的适用性提高至 385 K, 当蒸汽密度和压力再增加时, 实验所得亚微米气溶胶的扩散泳沉降速率高于 S/W 模型预测结果, 根据蒸汽冷凝相关理论提出了修正系数。吸湿性气溶胶更容易在蒸汽冷凝条件下被扩散蒸汽夹带去除, 3 种扩散泳计算模型均无法准确预测吸湿性气溶胶的沉降过程。

**关键词:**小型化反应堆; 小蒸汽冷凝速率; 自然沉积; 亚微米气溶胶; 吸湿性气溶胶

中图分类号: TL364

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2023)11-2129-09

doi: 10. 7538/yzk. 2023. youxian. 0316

## Experimental Study on Natural Deposition of Submicron Aerosols at Small Steam Condensation Rate

CHEN Junyan<sup>1</sup>, GAO Puzhen<sup>1</sup>, GU Haifeng<sup>1,\*</sup>, YU Mingrui<sup>2</sup>, LI Jingjing<sup>2</sup>,  
ZHOU Yanmin<sup>1</sup>, YU Huiyu<sup>1</sup>, E Xinnuo<sup>1</sup>

(1. *Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;*

2. *China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China*)

**Abstract:** In order to study the natural deposition behavior of submicron aerosols at a small steam condensation rate, an experimental platform was built and the related experimental research was carried out in this paper. In the process of the experiment, the self-developed sampling pretreatment system was used to carry out the aerosol sampling analysis in the high temperature and high humidity environment. The gravity sedimentation mechanism is one of the most common removal mechanisms in natural deposition. Several gravity sedimentation experiments were carried out first, and the experiments were used as the basis for other experiments. Next, the natural deposition experiment of sub-micron aerosol was carried out at a small steam condensation rate by

adjusting the steam condensation rate before distributing the aerosol. Based on the gravity sedimentation data with the same thermal parameters, the attenuation constants under the action of thermophoresis and diffusiophoresis were obtained. The results show that when there is steam in the working medium, the gravity removal effect of submicron aerosol is better than that of pure air under the same thermal conditions. The proportion of steam can promote the gravity settlement. The pressure has inhibitory effect on gravity settlement. And with the increase of pressure, the increase of steam share has a more significant effect on the increase of gravity removal rate. In the natural removal process of submicron aerosols, the proportion of removal by diffusiophoresis and thermophoresis mechanisms increase with steam condensation rate, accounting for more than 90%. Under the condition of low vapor condensation, the contribution of diffusiophoresis is great, followed by gravity deposition, and thermophoretic deposition can be ignored to a certain extent. When the steam density is low, the diffusiophoresis sedimentation rate is in good agreement with the S/W model. When the steam density increases, the experimental sedimentation rate is higher than the calculation result of the S/W model, and relevant corrections have been made. Under the same thermal parameters, the diffusiophoresis sedimentation rate of NaCl is much higher than that of  $\text{TiO}_2$ , and much larger than the prediction results of the three current diffusiophoresis models.

**Key words:** miniaturized reactor; small vapor condensation rate; natural deposit; submicron aerosol; hygroscopic aerosol

小型化反应堆主要采用双层安全壳设计理念,内层为钢制安全壳,外部为混凝土安全壳,在严重事故发生后,通过非能动空气冷却系统导出安全壳内热量,散热能力相对较差,使得事故后安全壳内壁面和气空间的温差较小,蒸汽在安全壳内壁面的冷凝量相对较小<sup>[1]</sup>。基于以上设计,小型化反应堆安全壳内气溶胶的主导去除方式为自然去除,其主要作用机制为重力沉降、热泳及扩散泳沉积。

在气溶胶的自然沉积过程中,虽然微米尺寸颗粒(颗粒尺寸大于  $1 \mu\text{m}$ )的数量浓度占比较少,但由于其粒径尺寸较大使得质量浓度占比很高,重力沉降相较于其他去除机制对于大尺寸颗粒的去除速率较快,使得重力对于微米级气溶胶去除占据主导位置<sup>[2-3]</sup>。事故后安全壳内的气溶胶除却微米级气溶胶外,还存在很多粒径小、数量浓度高的亚微米级气溶胶(颗粒尺寸范围  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ )<sup>[3-4]</sup>,这些亚微米级气溶胶由于尺寸较小,衰减很慢,极易在安全壳完整性受到破坏时,泄漏到环境中,给周边人员及环境造成损害,因此安全壳内亚微米气溶胶的浓度监测对于核电厂事故应急措施的制定具有重

要的参考价值<sup>[4]</sup>。

为探究小型化反应堆安全壳在发生事故时气溶胶释放后的固有安全性,开展亚微米气溶胶在小冷凝速率下的沉积行为研究便尤为重要。基于相关文献调研,国内外开展气溶胶自然沉积行为的台架包括:CSE<sup>[5]</sup>、VANAM<sup>[6]</sup>、TOSQAN<sup>[7]</sup>、THAI<sup>[8]</sup>和FADE<sup>[9]</sup>。CSE台架无壁面控温装置,采用机械取样的方式,开展了瞬态条件下的气溶胶重力沉降与含有蒸汽条件下气溶胶和碘类物质的综合去除实验。VANAM台架未设壁温控制装置,研究了不同热工水力条件的多腔室结构对可溶、不可溶气溶胶迁移、沉降行为的影响。TOSQAN壁面使用油套控温,使用光学测量设备,开展了气溶胶喷淋去除实验与部分低温稳态气溶胶重力沉降实验与热态气溶胶综合去除实验。THAI实验台架内部设有小筒体,壁面有三段式控温系统,主要进行热工水力实验、 $\text{I}_2$ 的沉积与气液质量传递实验;使用内层小筒体进行气溶胶的低温重力沉积实验与热态气溶胶综合去除实验。国内中国原子能科学研究所的FADE实验台架采用壁面控温,使用空气动力学粒径谱仪开展了少量小冷

凝速率的扩散泳沉积实验,由于取样设备的限制,所得结果并不完善。GRACE 和 FADE<sup>[6]</sup>实验台架分别在温度 302~310 K 和 303~312 K 的基础上验证了 S/W 模型的准确度,未包含温度更高时的验证结果。

基于上述调研可发现,目前国内外并没有实验台架开展过全面的类似实验,即缺少可用于评估小冷凝速率下亚微米气溶胶去除行为的相关实验数据。本文通过自主搭建实验平台,开展小冷凝速率下的亚微米气溶胶去除实验,得到不同亚微米气溶胶(吸湿和非吸湿性)在小冷凝速率下的衰减数据,旨在为小型化反应堆事故后的辐射防护安全性评估提供数据支持。

## 1 气溶胶沉积模型

亚微米气溶胶的自然演变过程中,其浓度遵循指数衰减规律,即:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda_m t} \quad (1)$$

式中: $N_0$  为初始时刻气溶胶数量浓度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $N(t)$  为  $t$  时刻气溶胶数量浓度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $\lambda_m$  为去除过程中总衰减常量,  $\text{s}^{-1}$ 。

当去除机制为重力沉降、热泳和扩散泳沉积时,  $\lambda_m$  为:

$$\lambda_m = \lambda_G + \lambda_R + \lambda_D = \frac{A_G}{V_G} v_G + \frac{A_R}{V_R} v_R + \frac{A_D}{V_D} v_D \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为衰减常量,  $\text{s}^{-1}$ ;  $A$  为沉积面积,  $\text{m}^2$ ;  $V$  为沉积体积,  $\text{m}^3$ ;  $v$  为沉积速率,  $\text{m/s}$ ; 下标 G、R 和 D 分别指代重力沉降、热泳和扩散泳沉积机制。

考虑重力沉降对气溶胶的去除作用时,假设安全壳模拟体内载气与气溶胶均匀混合,气溶胶在安全壳模拟体内由于重力效应引起的沉降速率可使用具有 Cunningham 滑移修正因子的 Stokes 方程来进行计算<sup>[10]</sup>,并且由于实际的气溶胶粒子绝大多数为有空隙和非规则球体,所以引入动力形状因子  $\chi$ <sup>[10-11]</sup>,则修正后可用于有空隙和非规则球体的气溶胶重力沉降速率  $v_G$  ( $\text{m/s}$ ) 计算公式为:

$$v_G = \frac{2\rho_p g r^2 Cn}{9\mu\chi} \quad (3)$$

式中: $\rho_p$  为气溶胶粒子的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $r$  为气溶胶粒子的半径,  $\text{m}$ ;  $\mu$  为气

体动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $Cn$  为 Stokes-Cunningham 滑移修正系数,本文使用 Willeke 表达式<sup>[10]</sup>:

$$Cn = 1 + Kn(1.246 + 0.42\exp(-0.87/Kn)) \quad (4)$$

式中,  $Kn$  为克努森数,是反映粒子扩散能力的重要参数,  $Kn = 2\lambda/d_p$ ,  $d_p$  为颗粒的直径 ( $\text{m}$ ),  $\lambda$  为流体分子的平均自由程 ( $\text{nm}$ )。

对于气溶胶的形状修正因子,使用 Melcor 程序中的修正公式<sup>[12]</sup>:

$$\chi = \gamma = \alpha^{-1/3} \quad (5)$$

$$\alpha = [\epsilon\rho_p + (1-\epsilon)\rho_w]/\rho_w \quad (6)$$

式中: $\epsilon$  为气溶胶颗粒的密实系数;  $\rho_w$  为水的密度。在本实验中,使用的气溶胶为粉末状的  $\text{TiO}_2$ ,并处于高温高湿环境,此时的气溶胶动态形状因子  $\chi = 1.12$ <sup>[10-11]</sup>。

热泳去除速率采用式(7)进行计算:

$$v_R = -K_{th}\nu \frac{\nabla T}{T} \quad (7)$$

式中: $K_{th}$  为热泳扩散系数;  $\nu$  为混合气体运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\nabla T$  为气体的温度梯度,  $\text{K}$ 。

实验表明,在  $Kn \ll 4$  时,采用 Brock-Talbot 公式计算的热泳扩散系数较为准确,具体表达式<sup>[13]</sup>如下:

$$K_{th} = \frac{2C_s(k_g/k_p + C_t Kn)Cn}{(1 + 3C_m Kn)(1 + 2k_g/k_p + 2C_t Kn)} \quad (8)$$

式中: $k_g$  为气体的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $k_p$  为气溶胶颗粒的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $C_s$  为热滑移系数,取 1.17;  $C_t$  为温度跳跃系数,取 2.18;  $C_m$  为动量交换系数,取 1.14。

目前伴随 Stefan 流并考虑扩散滑移的扩散泳公式,式(9)<sup>[6,14]</sup>的使用较为广泛,但在实际应用中,由于含有压降项,实验中并不易得到结果,所以需对该公式进行再推导:

$$v_D = \frac{\sqrt{M_v}}{r_v \sqrt{M_v} + r_a \sqrt{M_a}} \frac{D_v}{p_a} \frac{dp_v}{dx} \quad (9)$$

式中: $M_v$  为蒸汽摩尔质量,  $M_v = 18 \text{ g/mol}$ ;  $M_a$  为空气摩尔质量,  $M_a = 29 \text{ g/mol}$ ;  $r_v$  为蒸汽摩尔份额;  $r_a$  为空气摩尔份额;  $D_v$  为蒸汽扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $p_a$  为空气分压,  $\text{Pa}$ ;  $dp_v/dx$  为蒸汽压力梯度。

通过文献[14]可知,  $dp_v/dx$  项可进行替换:

$$\frac{dp_v}{dx} = \frac{p_a}{p_t} \frac{RT}{S_{dp} D_v} \frac{q_{dp}}{M_v} \quad (10)$$

式中:  $q_{dp}$  为蒸汽凝结质量流量, g/s;  $S_{dp}$  为蒸汽凝结面积,  $m^2$ ; 令  $q_m = q_{dp}/S_{dp}$ ,  $q_m$  为单位面积上的蒸汽凝结质量流量,  $g/(m^2 \cdot s)$ ;  $R$  为气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为气体温度, K;  $p_t$  为总压, Pa。

通过整合式(9)和式(10), 并考虑单位换算, 可得到含有蒸汽冷凝率的扩散泳速度公式:

$$v_{D,S/W} = \frac{r_v \sqrt{M_v}}{r_v \sqrt{M_v} + r_a \sqrt{M_a}} \frac{q_m}{\rho_v} \quad (11)$$

式中,  $\rho_v$  为计算工况下的饱和水蒸气密度,  $kg/m^3$ 。这样在扩散速度的实际使用中即可忽略扩散系数, 直接与蒸汽冷凝率相关联, 式(11)<sup>[14]</sup>即为 Schmitt/Waldmann(S/W)模型。

除了 S/W 模型之外, 还有两种用于计算扩散泳去除速率的模型: 仅考虑流体平均摩尔流的 Stefan 流(SF)模型<sup>[6,14]</sup>和考虑流体平均质量流速的 Whitmore/Meisen(W/M)模型<sup>[6,14]</sup>, 表达式如下:

$$v_{D,SF} = \frac{D_v}{p_a} \frac{dp_v}{dx} = \frac{D_v}{p_a} \frac{p_a}{p_t} \frac{RT}{S_{dp} D_v} \frac{q_{dp}}{M_v} = r_v \frac{q_m}{\rho_v} \quad (12)$$

$$v_{D,W/M} = \frac{M_v}{r_v M_v + r_a M_a} \frac{D_v}{p_a} \frac{dp_v}{dx} = \frac{r_v M_v}{r_v M_v + r_a M_a} \frac{q_m}{\rho_v} \quad (13)$$

## 2 亚微米气溶胶自然沉积实验平台

为研究小温差条件下亚微米气溶胶的扩散泳沉积效应, 设计并建造了如图 1 所示的实验平台。实验平台主要包括安全壳模拟体、气体供应系统、壁温控制系统、凝液收集系统、气溶胶配送与测量系统等。安全壳模拟体采用分段式圆柱体结构, 其中部筒体高度为 3 m, 内直径

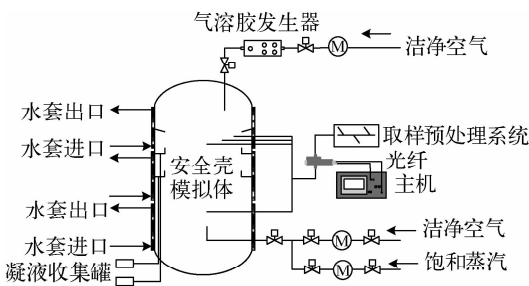


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

为 2 m。为了在实验过程中建立稳定的气体-壁面温差, 并防止非冷凝面存在蒸汽凝结的现象, 在安全壳模拟体的顶部和底部封头处配置有电伴热设备, 通过控制伴热设备的输入功率, 可对模拟体的底部和顶部壁面进行精准控温。安全壳模拟体的中部筒体壁面为主要蒸汽冷凝面, 中部筒体配置了三段式壁温控制系统, 通过控制冷却水的循环温度和冷却流速准确控制换热器的热量导出功率, 以实现混合气体和中部筒体侧面壁面温差的稳定建立。

本实验中使用的气溶胶发生器为 TSI 流化床式固体粉末发生器与 8188A 盐类发生器, 气溶胶种类为多分散  $TiO_2$  与 NaCl。安全壳模拟体内根据气溶胶沉积位置的不同, 在轴向和径向位置共设置了 4 个气溶胶取样点位, 并使用 WELAS promo 3000HP 型光学颗粒计数器来开展气溶胶的连续取样工作。为了保证光学颗粒计数器在高蒸汽份额条件下可正常进行气溶胶的采样分析工作, 自主研发了适用于高蒸汽份额条件下使用的气溶胶取样预处理系统<sup>[3]</sup>。实验过程中的热工参数通过热工参数采集与控制系统进行采集与显示。

实验过程主要包括安全壳模拟体壁面温度调节、气溶胶配送、安全壳模拟体内压力调节与气溶胶取样。实验开始前, 需通过壁温控制系统与气体配送系统中的蒸汽配送来对安全壳模拟体的壁面进行升温, 通过设置在安全壳模拟体底部的排水阀进行气体置换, 使得常压下模拟体内蒸汽份额达到 95% 以上, 并控制内壁面温度接近实验所需。实验过程中先在准稳态过程中调节蒸汽的供应量和壁面水套带出的热量平衡, 之后通过 10~15 min 的气溶胶配送使得模拟体内的蒸汽份额和罐体压力达到实验所需。气溶胶配送结束后通过均匀设置在模拟体轴向和径向的共计 4 根取样管, 配合取样预处理系统和光学颗粒计数器实现气溶胶实时在线浓度测量。

本文开展的实验工况列于表 1。

## 3 结果与讨论

使用非吸湿性气溶胶  $TiO_2$  和吸湿性气溶胶 NaCl, 在热工条件规律性变化的条件下开展了气溶胶重力沉降实验研究。通过控制模拟体

内壁面和主流气体的温差,即控制蒸汽在模拟体内壁面的冷凝速率,开展不同冷凝速率下的自然沉积实验研究,并通过实验所得相同热工参数下的重力沉降衰减常量,剥离得到泳动沉积机制对亚微米气溶胶沉降的影响特性。

表 1 亚微米气溶胶自然沉积实验工况

Table 1 Experimental condition of natural deposition of submicron aerosol

压力/ MPa	蒸汽摩尔 份额/%	蒸汽冷凝速率/ ( $10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )	气溶胶 种类
0.2	0.1/35/50/70	—	TiO <sub>2</sub>
0.3	0.1/35/50/70	—	TiO <sub>2</sub>
0.4	35/50/70	—	TiO <sub>2</sub>
0.3	50	—	NaCl
0.3	50	2.33/3.90/5.01/6.21	TiO <sub>2</sub>
0.3	70	3.17/3.32/5.05/6.06	TiO <sub>2</sub>
0.4	50	3.50/4.34/5.17/6.17	TiO <sub>2</sub>
0.4	60	2.01/3.22/4.81	TiO <sub>2</sub>
0.4	70	2.22/2.70/4.31	TiO <sub>2</sub>
0.3	50	1.64/1.89/2.17/2.36	NaCl

### 3.1 不确定性分析

实验过程中,受仪器与仪表自身精度的限制,测量所得实验数据与客观真实值之间难免存在误差,实验中常使用不确定度来评估测量结果的可靠性。对温度、压力、气体流量等通过仪器仪表可以直接获取的测量参数,只需考虑B类不确定度,即只考虑测量仪表和采集系统的误差。在本文所进行的气溶胶实验中,针对每个工况开展3组实验测量,若实验所得衰减常量之间相对偏差在10%以内,则取3组实验的平均值为本工况下的实验结果,若相对偏差较大则开展第4次实验,不确定度结果列于表2。

表 2 直接测量不确定度

Table 2 Direct measurement uncertainty

直接测量参数	不确定度
温度	0.5 °C
进气压力	1.0%
实验罐压力	0.5%
气溶胶配送流量	2.5%
气溶胶取样流量	1.0%
气溶胶数量浓度	5%

### 3.2 亚微米气溶胶重力沉降实验研究

首先使用非吸湿性 TiO<sub>2</sub> 气溶胶在不同压力、蒸汽份额下开展重力沉降实验,得到的衰减常量如图 2 所示。当模拟体内环境压力相同时,随着蒸汽份额的提升,混合气的动力黏度会随之减小,各个尺寸颗粒的重力沉降速率均得到提升,并且考虑到蒸汽份额提升的同时,温度会随之提升,颗粒之间的布朗聚并效应也会随之加剧,重力去除同样得到增强。当模拟体内混合气体的蒸汽份额相同时,随着压力的提升,虽然混合气的摩尔比例未发生改变,但混合气的动力黏度会随之增大、布朗聚并效应随之减弱,使得重力在此过程中去除速率减缓。当气溶胶沉降环境含有蒸汽份额时,一方面环境介质的动力黏度会显著减小,另一方面温度会促进颗粒之间的聚并效应,使得含蒸汽份额时的气溶胶重力沉降衰减常量大于冷态纯空气结果。

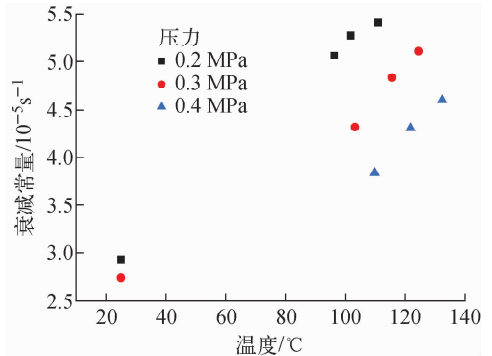


图 2 不同工况下亚微米 TiO<sub>2</sub> 重力沉降衰减常量汇总

Fig. 2 Summary of submicron TiO<sub>2</sub> gravitational sedimentation attenuation constants in different thermal environments

### 3.3 含泳动机制下亚微米气溶胶自然沉积实验研究

以重力沉降实验为基础,通过控制模拟体内壁面和主流混合气的温差,开展了若干含蒸汽冷凝现象的气溶胶综合沉积实验,0.3 MPa-50%蒸汽份额条件下的衰减曲线如图 3 所示。由图 3 可发现,低冷凝速率条件下的自然沉积过程中,随着蒸汽冷凝速率的增加,亚微米气溶胶浓度衰减速率也随之增加。

使用稳态综合自然沉积实验和相同温度、

压力条件下重力沉降实验所得到的衰减常量,从实验角度对泳动衰减常量进行剥离,形成了泳动衰减常量和总衰减常量在不同冷凝速率条件下的占比图,如图4所示。对于亚微米气溶胶的自然去除过程,泳动沉降机制在此工况下占据90%及以上比例,并且泳动去除的占比随着蒸汽冷凝速率的提升而增加。

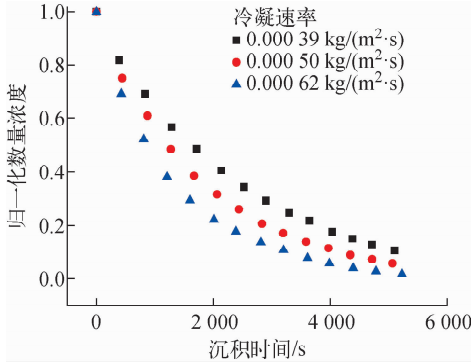


图3 小冷凝速率下  $\text{TiO}_2$  气溶胶的衰减曲线  
Fig. 3 Attenuation curve of  $\text{TiO}_2$  at low condensation rate

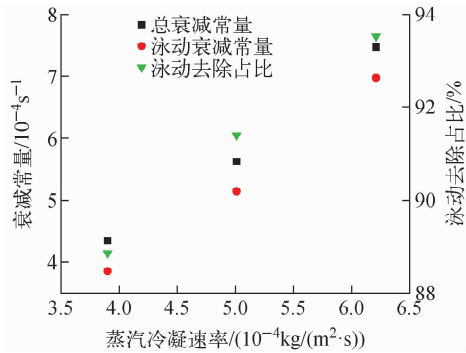


图4 0.3 MPa-50%蒸汽份额下泳动衰减占比  
Fig. 4 Attenuation ratio under 0.3 MPa-50% steam fraction

泳动机制又包含热泳和扩散泳两种机制,为了探究热泳在泳动去除过程中的贡献情况,以0.3 MPa-50%份额的混合气为介质,从模型的角度分析了不同粒径气溶胶在重力沉降、热泳(温度梯度 833 K/m)和扩散泳(蒸汽冷凝率  $5.01 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )机制分别作用下的衰减常量,如图5所示。从各机制作用下的衰减常量比对可发现,亚微米气溶胶在小温度梯度下的热泳贡献小于重力沉降,并远小于扩散泳,

即在小温差(小冷凝速率)下,相较于扩散泳机制的去除贡献,热泳贡献可忽略,进一步可知实验所得的泳动衰减常量可近似认为是扩散泳衰减常量。

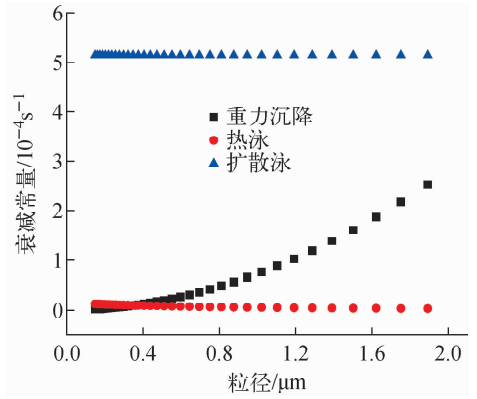


图5 0.3 MPa-50%份额中各沉降机制衰减常量比对  
Fig. 5 Comparison of attenuation constants of each sedimentation mechanism under 0.3 MPa-50% steam fraction

在确认泳动衰减常量可近似认为扩散泳衰减常量后,将实验所得的不同温度、压力和冷凝速率条件下的扩散泳去除速率与3种扩散泳沉积模型的计算结果进行了汇总比对,结果如图6所示。对比图6中3种混合气压力和温度下的结果可发现,当亚微米  $\text{TiO}_2$  处于0.3 MPa-50%份额的混合气中扩散泳去除速率与S/W模型的预测结果符合较好,当蒸汽份额与压力分别提升时,扩散泳去除实验值均大于3种扩散泳模型去除结果。

查阅相关文献<sup>[6,9,14-15]</sup>,含不凝性气体的蒸汽冷凝过程如图7所示。蒸汽的冷凝夹带,使得气溶胶颗粒穿过不凝性气体的扩散层,达到液膜处,并被冷凝液携带去除为扩散泳去除气溶胶的基础,颗粒是否容易穿过不凝性扩散层便为扩散泳去除速率强弱的关键。基于含不凝性气体的蒸汽冷凝相关研究中的 suction 效应<sup>[15-16]</sup>发现,当压力或蒸汽浓度梯度增加,蒸汽冷凝速率得到提升时,气体沿壁面法向对流/扩散传质的增强会引起近壁面不凝性气体层减薄。这一现象使得现有的气溶胶扩散泳去除模型在压力和蒸汽密度较高时,计算所得去除速率偏低。

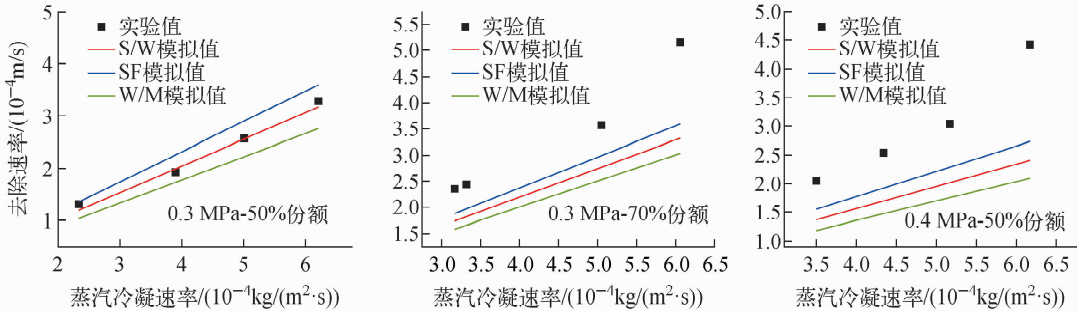


图 6 扩散泳实验数据与模型计算结果对比

Fig. 6 Comparison of diffusiohoresis experiment data and model calculation results

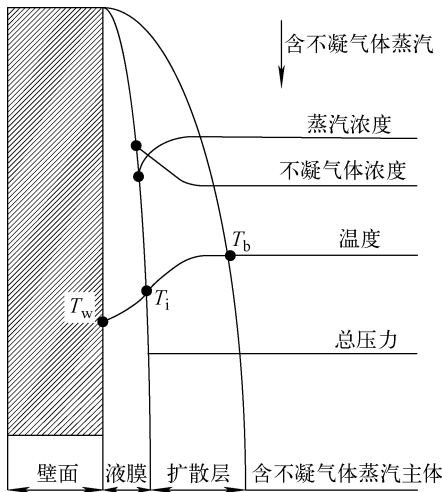


图 7 含不凝性气体的蒸汽冷凝过程图

Fig. 7 Diagram of steam condensation process with noncondensable gas

研究发现,当不凝性气体扩散层厚度发生变化时,直接增强扩散泳去除效应的因素为压力和蒸汽密度,并且考虑到蒸汽冷凝量(蒸汽法向速度)的提升<sup>[17]</sup>也会对扩散层产生减薄现象。考虑到低蒸汽密度和压力时 S/W 模型与实验结果符合较好,并且该模型充分考虑了不凝性气体在混合气中的作用,现根据实验数据,使用分段函数,在 S/W 模型的基础上提出适用于高蒸汽密度和压力下的修正系数  $\phi$ ,将修正系数以蒸汽冷凝速率为  $5 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  作为阈值,低于阈值使用修正系数  $\phi_1$ ,高于阈值使用修正系数  $\phi_2$ ,回归分析后修正系数具体形式如式(14)和(15)所示。

$$\phi_1 = \left(\frac{p}{0.3}\right)^{r_v} \left(\frac{\rho_v}{0.8625}\right)^n \quad (14)$$

$$\phi_2 = \left(\frac{p}{0.3}\right)^{r_v} \left(\frac{\rho_v}{0.8625}\right)^n \frac{q_{m,i}}{q_{m,5}} \quad (15)$$

$$v_D = \phi \frac{r_v \sqrt{M_v}}{r_v \sqrt{M_v} + r_a \sqrt{M_a}} \frac{q_m}{\rho_v} \quad (16)$$

式中: $p$  为气溶胶所处环境压力,MPa; $\rho_v$  为蒸汽密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $q_{m,5}$ 、 $q_{m,i}$  为蒸汽冷凝速率, $q_{m,5} = 5 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,为常数。当蒸汽摩尔份额为 50% 时, $n=1$ ,当蒸汽摩尔份额大于 50% 时, $n=0.8$ 。

修正 S/W 模型在高蒸汽密度和较高压力下计算结果与实验结果的偏差情况如图 8 所示。

在对  $\text{TiO}_2$  气溶胶进行扩散泳沉积探究后,对吸湿性  $\text{NaCl}$  气溶胶也进行了相关研究,并在模拟体内压力和温度一致的条件下,对小冷凝速率下的扩散泳去除速率进行了比对,如图 9 所示。从实验结果可发现,当蒸汽冷凝速率接近时, $\text{NaCl}$  气溶胶的扩散泳去除速率远高于  $\text{TiO}_2$  气溶胶的,并且吸湿性  $\text{NaCl}$  气溶胶在蒸汽冷凝速率极小时便存在较高的扩散泳沉积速率。亚微米粒径分布的吸湿性  $\text{NaCl}$  气溶胶的密度仅为  $2.13 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,相比于更重一些的  $\text{TiO}_2$  颗粒更易随蒸汽流动方向产生迁移现象,并最终跟随蒸汽冷凝从气相迁移至凝液中,即吸湿性  $\text{NaCl}$  气溶胶更易在蒸汽冷凝条件下被扩散蒸汽夹带去除。

将  $\text{NaCl}$  的扩散泳去除速率实验值与扩散泳的 3 种模型预测结果进行了比对,结果如图 10 所示。当蒸汽冷凝速率相同时, $\text{NaCl}$  气溶胶的扩散泳去除速率实验值远大于 3 种模型的预测结果,并且随着蒸汽冷凝速率的提升,实验与计算结果的偏差显著增加,即 S/W、SF、W/M 3 种模型均无法预测吸湿性气溶胶的扩散泳沉降速率。

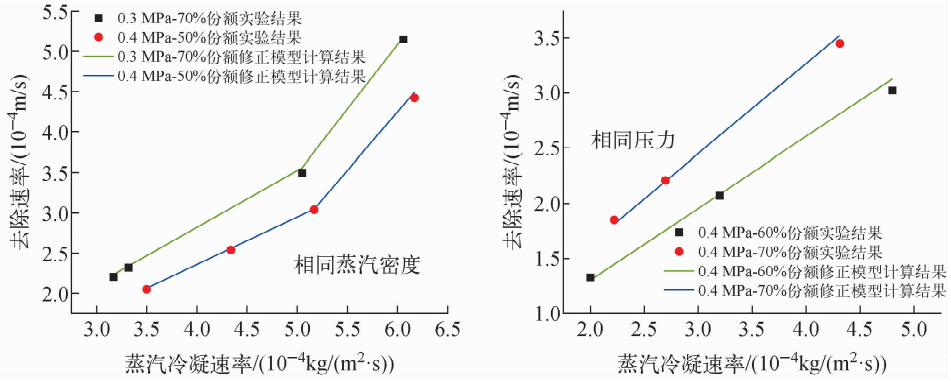


图8 修正后的S/W模型与实验结果比对

Fig. 8 Comparison between calculated results of modified S/W model and experimental result

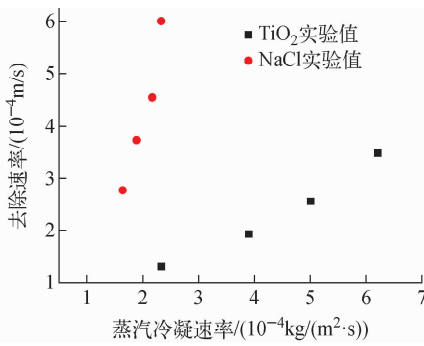


图9 0.3 MPa-50%份额下不同类型气溶胶扩散泳去除速率比对

Fig. 9 Comparison of diffusio-phoresis removal rates of different aerosol types under 0.3 MPa-50% steam fraction

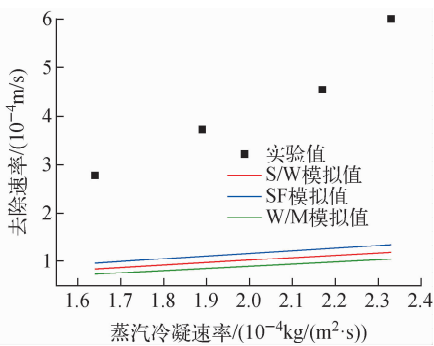


图10 NaCl在0.3 MPa-50%份额下扩散泳实验结果和模型预测比对

Fig. 10 Comparison of NaCl removal rate experimental results and model prediction under 0.3 MPa-50% steam fraction

小冷凝速率下的自然沉积行为,研究结果如下。

1) 蒸汽份额对重力沉降速率存在促进作用,压力对其存在抑制作用,并且含蒸汽条件下的气溶胶去除速率是高于纯空气所得,随着压力的提升,蒸汽份额的增加对去除速率的增幅作用,越发显著。

2) 对于亚微米气溶胶的自然去除过程,泳动沉降机制在此工况下占据90%及以上比例,并且泳动去除的占比随着蒸汽冷凝速率的提升而增加;低冷凝量条件下,扩散泳的贡献极大,重力沉降次之,热泳沉积可忽略,近似认为泳动衰减常量为扩散泳衰减常量。

3) 在蒸汽密度较低时,扩散泳沉降速率与S/W模型符合较好,蒸汽密度较高时,需使用修正系数对S/W模型进行修正。在相同实验条件下,NaCl气溶胶的扩散泳沉降速率远高于TiO<sub>2</sub>气溶胶的,3种扩散泳计算模型均无法准确预测。

#### 参考文献:

- [1] 冯雨,刘卓. ACP100非能动安全壳空气冷却系统换热性能模拟研究[J]. 核安全,2023,22(1): 55-62.  
FENG Yu, LIU Zhuo. Simulation study on heat transfer performance of passive containment air cooling system for ACP100[J]. Nuclear Safety, 2023, 22(1): 55-62(in Chinese).
- [2] 刘建昌,陈忆晨. 华龙一号失水事故后安全壳内气溶胶自然沉降现象研究[J]. 核安全,2022,21(1):75-81.  
LIU Jianchang, CHEN Yichen. Research on

## 4 结论

本文通过实验手段研究了亚微米气溶胶在

- aerosol natural deposition phenomenon of HPR1000 loss of coolant accident[J]. Nuclear Safety, 2022, 21(1): 75-81(in Chinese).
- [3] 陈君岩,高璞珍. 事故后聚并对亚微米气溶胶重力沉降的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022, 43(12):1 719-1 727.  
CHEN Junyan, GAO Puzhen. Effects of coagulation on the gravity deposition of submicronaerosols under severe accident conditions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(12): 1 719-1 727(in Chinese).
- [4] 朱继洲. 核反应堆安全分析[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000:50-80.
- [5] HILLIARD R, COLEMAN L F. Natural transport effects on fission product behavior in the containment systems experiment[R]. US: Battelle-Northwest, 1970.
- [6] 陈林林,孙雪霆. 安全壳内气溶胶扩散泳行为的试验方法研究[J]. 辐射防护,2017,37(1):45-49.  
CHEN Linlin, SUN Xueting. Study on experimental method of aerosol diffusiophoresis behavior in containment[J]. Radiation Protection, 2017, 37(1): 45-49(in Chinese).
- [7] PORCHERON E, LEMAITRE P, MARCHAND D, et al. Experimental and numerical approaches of aerosol removal in spray conditions for containment application[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240: 336-343.
- [8] GUPTA S, SCHMIDT E. 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.
- [9] 孙雪霆,陈林林. 严重事故下水蒸气凝结对气溶胶扩散泳影响研究[J]. 原子能科学技术,2017, 51(1):73-78.  
SUN Xueting, CHEN Linlin. Study on effect of steam condensation on aerosol diffusiophoresis in sever accident condition[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 73-78(in Chinese).
- [10] POWERS D A, WASHINGTON K E, BURSON S B, et al. A simplified model of aerosol removal by natural processes in reactor containments[R]. US: NRC, 1996.
- [11] BROCKMANN J E. Range of possible dynamic and collision shape factors[R]. USA: Sandia National Laboratories, 1985.
- [12] GENG J, PARK H, SAJO E. Simulation of aerosol coagulation and deposition under multiple flow regimes with arbitrary computational precision[J]. Aerosol Science and Technology, 2013, 47: 530-542.
- [13] 杨林民,周涛. 压水堆严重事故下气溶胶热泳沉积规律[J]. 原子能科学技术,2008,42(1):63-66.  
YANG Linmin, ZHOU Tao. Law of aerosol thermophoretic deposition at severe accidents of pressurized water reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(1): 63-66(in Chinese).
- [14] SNEPVANGERS L J M, van de VATE J F. Diffusiophoresis of fission product aerosol in an LWR containment after code meltdown[R]. European: Commission of the European Communities, 1987.
- [15] DEHBI A, JANASZ F, BELL B. Prediction of steam condensation in the presence of noncondensable gases using a CFD-based approach[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 258: 199-210.
- [16] DEHBI A. A unified correlation for steam condensation rates in the presence of air-helium mixtures under naturally driven flows[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 300: 601-609.
- [17] 周姗,韩立勇. 流速对含不凝气体的蒸汽冷凝的影响[J]. 核动力工程,2016,37(4):15-18.  
ZHOU Shan, HAN Liyong. Effect of velocity on steam condensation with non condensable gas[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(4): 15-18 (in Chinese).