

# 反应堆安全壳高精度气溶胶自然沉积模型的开发及验证

李济深<sup>1</sup> 张斌<sup>2</sup> 高鹏程<sup>1</sup> 缪凡<sup>1</sup> 单建强<sup>2</sup>

1(西安交通大学核科学与技术学院 西安 710049)

2(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室 西安 710049)

**摘要** 在压水堆严重事故过程中,气溶胶作为裂变产物的主要载体在安全壳内悬浮,有泄漏到外部环境中造成放射性污染潜在威胁。安全壳气相悬浮的气溶胶会通过自然沉积机理沉降到壁面或地坑水,降低大气放射性。针对ISAA程序气溶胶模型精度不足的问题,改进安全壳气溶胶自然沉积模型。通过引入气溶胶动态形状因子,修正非球形气溶胶自然沉积速率,改进了重力沉积、布朗扩散、热泳和扩散泳沉积模型。选取AHMED(Aerosol and Heat Transfer Measurement Device)、ABCOVE(Aerosol Behavior Code Validation and Evaluation)和LACE(Light Water Reactor Aerosol Containment Experiments)实验对改进代码进行评估。结果表明:改进模型能够更加精确模拟气溶胶质量峰值,响应安全壳压力温度对气溶胶自然沉积速率的影响,显著地提高了安全壳气溶胶残留质量的计算精度。改进后ISAA程序性能可以满足分析先进压水堆严重事故安全壳内气溶胶自然沉积行为的需要。

**关键词** 气溶胶, 核安全, 严重事故, 自然沉积模型, ISAA

中图分类号 TL364

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050604

## Development and validation of high-precision aerosol models for natural deposition processes in reactor containment

LI Jishen<sup>1</sup> ZHANG Bin<sup>2</sup> GAO Pengcheng<sup>1</sup> MIAO Fan<sup>1</sup> SHAN Jianqiang<sup>2</sup>

1(School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** [Background] Nuclear safety is the lifeline for the development and application of nuclear energy. In severe accidents of pressurized water reactor (PWR), aerosols, as the main carrier of fission products, are suspended in the containment vessel, posing a potential threat of radioactive contamination caused by leakage into the environment. The gas-phase aerosols suspended in the containment will settle to the wall or sump water through the natural deposition mechanism, thereby reducing atmospheric radioactivity. [Purpose] This study aims to improve the low accuracy of the aerosol model in the ISAA code by developing high-precision natural deposition model of aerosol in the containment. [Methods] Firstly, the aerosol dynamic shape factor was introduced to correct the natural deposition rate of non-spherical aerosols. Then, the gravity, Brownian diffusion, thermophoresis and diffusiophoresis

国家重点研发计划(No.2019YFE0191600)资助

第一作者: 李济深, 男, 1995年出生, 2020年于西安交通大学获硕士学位, 现为博士研究生, 研究领域为核反应堆严重事故

通信作者: 张斌, E-mail: binzhang@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-09-28, 修回日期: 2022-12-14

Supported by National Key Research and Development Plan (No.2019YFE0191600)

First author: LI Jishen, male, born in 1995, graduated from Xi'an Jiaotong University with a master's degree in 2020, doctoral student, focusing on nuclear reactor severe accidents

Corresponding author: ZHANG Bin, E-mail: binzhang@mail.xjtu.edu.cn

Received date: 2022-09-28, revised date: 2022-12-14

deposition models were improved respectively. Finally, AHMED (Aerosol and Heat Transfer Measurement Device), ABCOVE (Aerosol Behavior Code Validation and Evaluation) and LACE (Light Water Reactor Aerosol Containment Experiments) experiments were employed to validate and evaluate the improved ISAA code. **[Results]** Calculation results show that the improved model is applicable to more accurate simulation of the peak aerosol mass and responding to the influence of the containment pressure and temperature on the natural deposition rate of aerosols, and the calculation accuracy of the residual mass of aerosols in the containment is significantly improved simultaneously. **[Conclusions]** The performance of improved ISAA with high-precision aerosol models of this study meets the requirements for analyzing the natural deposition behavior of aerosol in containment of advanced PWRs in severe accident. In the future, further optimization will be made to address the problems found in the current aerosol model.

**Key words** Aerosol, Nuclear safety, Severe accident, Natural deposition model, ISAA

核安全是核能发展和应用的生命线。在压水堆严重事故过程中,反应堆包壳失效导致裂变产物释放到压力容器中,裂变产物中最重要的部分是以气溶胶的形式迁移,可能通过主回路破口排放到安全壳。如果安全壳失效,裂变产物将被释放到环境中,导致放射性污染。核电站采用安全壳喷淋系统(Containment Spray System, CSS)降低事故后气相悬浮的放射性物质。然而,从福岛核事故中得到的教训是,能动设备对核电站严重事故缓解是不可靠的。一旦发生全场断电事故(Station Blackout, SBO),作为有效去除放射性裂变产物的安全壳喷淋将会失效。因此,先进压水堆采用了非能动安全壳热量导出系统(Passive Containment Heat Removal System, PCS)对安全壳冷却。安全壳气相悬浮的气溶胶会通过自然沉积机理沉降到壁面或地坑水,降低大气放射性,这成为严重事故安全壳气溶胶分析的重要现象。

鉴于对源项后果评估的重要性,许多研究机构对安全壳气溶胶自然沉积行为进行了实验研究,如 DEMONA<sup>[1]</sup>、KAEVER<sup>[2]</sup>、THAI<sup>[3]</sup>。此外,目前国际上已经开发了许多气溶胶分析程序并做了大量的代码验证工作。Herranz 等<sup>[4]</sup>对比了 ASTEC<sup>[5]</sup>、MELCOR<sup>[6]</sup>、ECART<sup>[7]</sup>三种代码模拟 ABCOVE (Aerosol Behavior Code Validation and Evaluation)实验。三种程序采用了相同的气溶胶沉积模型,模拟结果与实验值存在一定误差。Passalacqua 等<sup>[8]</sup>使用 JERICHO 和 AEROSOLS-B2 模拟 LACE (Light Water Reactor Aerosol Containment Experiments)实验,模拟气溶胶质量下降趋势与实验值差异较大。Kang 等<sup>[9]</sup>基于 ABCOVE 实验数据拟合的经验关系式改进 COMPASS-FP 模块。近年来,国内学者对气溶胶自然沉积现象和模型进行了一些研究工作。卢俊晶<sup>[10]</sup>研究了多组分吸湿性气溶胶增长理论和气溶胶重力沉降行为,并分析了压水堆核电厂相对湿度、

气溶胶粒径和非吸湿性组分质量对重力沉降去除系数的影响。孙雪霆<sup>[11]</sup>基于模拟 AP 系列非能动安全壳冷却的气溶胶迁移机理试验平台,研究水蒸气凝结对气溶胶扩散泳的影响。张天琦<sup>[12]</sup>研究气溶胶粒径、安全壳壁面温度梯度对气溶胶热泳沉积效应的影响。

ISAA<sup>[13-14]</sup>代码中实现的气溶胶自然沉积模型与国际上已开发分析程序中实现的气溶胶模型相似,原有模型在定性上能够正确模拟气溶胶沉积行为,但在定量上存在误差。原有模型假设气溶胶为球形颗粒,相比于非球形的真实情况,气溶胶将获得更大的沉降速率。计算安全壳复杂热工水力的情况下,模型对压力温度的响应较差。一些与温度和粒径相关的变量,但在模型中取经验常数,导致克努森数和布朗扩散速率求解误差。此外,原有热泳沉积模型不适用于高电导率和高克努森数工况。由于这些原因,原有模型在安全壳早期气溶胶注入安全壳过程中计算的天然沉积速率过大导致低估气溶胶质量峰值,而在安全壳长期冷却期大大高估了气溶胶残余质量。

为满足先进压水堆严重事故安全壳源项后果评估的需求,本文针对 ISAA 程序气溶胶模型精度不足的问题,改进了安全壳气溶胶自然沉积模型。在自然沉积模型中引入气溶胶动态形状因子,以修正非球形颗粒的自然沉积速率。修正滑移因子,引入动量、能量调节系数,采用包含压力梯度、水蒸气分压、散射核的扩散泳模型,使自然沉积模型能够准确响应压力温度变化带来的影响。采用模型公式计算平均自由程和扩散边界层厚度,使自然沉积模型能够更加精确求解克努森数和布朗扩散速率。采用一个由蒙特卡洛型数值模型创建的新模型以扩展热泳沉积模型在高电导率和高克努森数时的适用范围。为验证改进后的 ISAA 程序,选取了 AHMED、ABCOVE 和 LACE 实验评估改进代码。这项工作

有助于了解安全壳热工水力环境对气溶胶自然沉积行为的影响,获得模拟精度更高的代码分析手段,发现现阶段 ISAA 程序在气溶胶行为模拟上的不足,并探索代码未来的改进方向。

## 1 高精度气溶胶模型开发

高精度气溶胶模型在 ISAA 裂变产物行为模块中实现。ISAA 是一体化系统级计算机代码,用于模拟核反应堆的严重事故过程。ISAA 采用模块化方法,使用多个不同的模块来模拟严重事故期间的不

同物理现象。主要模块的调用关系和功能如图 1 所示。ISAA 的模块可以分为三类:第一类与基本的物理现象有关,如流体动力学、热构件之间的传热传质、流体材料物性和气体燃烧等;第二类与反应堆中包含的物理现象有关,如堆芯燃料及堆芯结构的熔化、堆芯熔融物迁移、下封头失效、堆腔中熔融物与混凝土相互作用、衰变热产生、放射性核素释放以及迁移、安全壳喷淋和特殊安全设施等;第三类为前两者提供辅助求解支持,如表格函数、材料属性、数据采集与处理、方程求解器等。

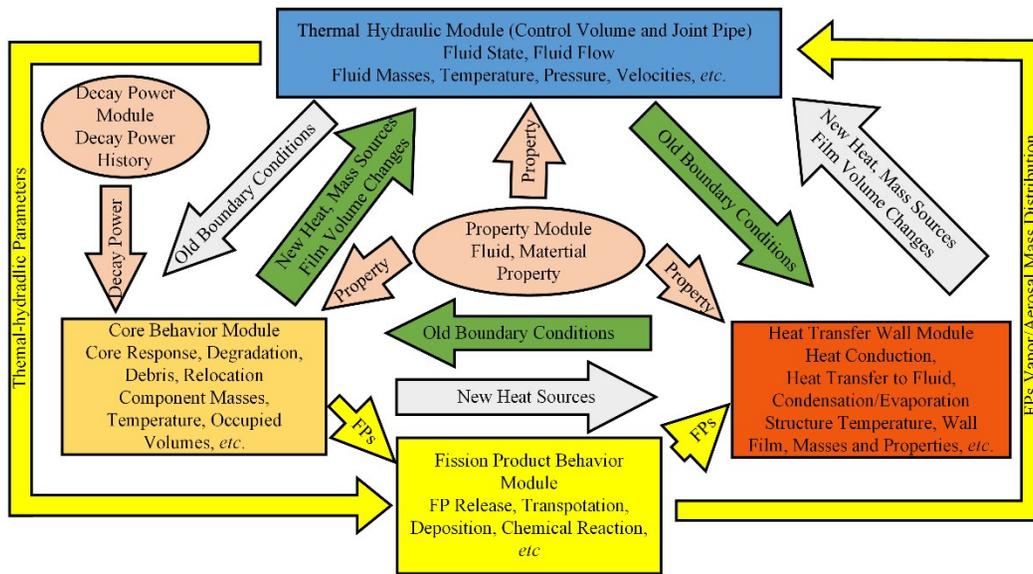


图 1 ISAA 主要模块功能和关系示意图  
Fig.1 Diagram of the relationships and functions of main modules in ISAA

### 1.1 ISAA 原始气溶胶模型

气溶胶自然沉积模型用于预测轻水堆事故期间气溶胶行为。裂变产物可以在轻水堆事故早期从燃料中释放并随后从反应堆冷却剂系统中排出时形成气溶胶。在事故后期发生的其他事件和过程中(例如 MCCI、水池沸腾、安全壳直接加热和爆燃)也可能产生气溶胶。

气溶胶行为分析中主要关注的气溶胶参数是气溶胶颗粒的质量和组成及其在整个反应堆冷却剂系统和安全壳中的分布。气溶胶凝聚和沉积过程的计算基于 MAEROS 代码<sup>[15]</sup>。MAEROS 的气溶胶凝聚和沉积模型用于计算控制体中每个时步气溶胶尺寸分布的变化。颗粒凝聚,沉积在热结构表面上,以及气溶胶源的影响都集成在 MAEROS 计算中。此外,水蒸气向气溶胶表面冷凝和气溶胶吸湿生长现象可通过冷凝蒸发模型来模拟。

气溶胶尺寸分布的建模由复杂的积分-微分方程控制,将 MAEROS 方程离散化为可以数值求解的

形式。在 MAEROS 求解方法中,气溶胶质量被分成  $m$  个区段,  $Q_{\ell,k}(t)$  被定义为在时间  $t$  的区段  $\ell$  中每单位体积流体气溶胶总质量。

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{\ell,k}}{dt} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\ell-1} \sum_{j=1}^{\ell-1} \left[ {}^{1a}\bar{\beta}_{ij,\ell} Q_{j,k} Q_{i,k} + {}^{1b}\bar{\beta}_{ij,\ell} Q_{i,k} Q_{j,k} \right] - \\ & \sum_{i=1}^{\ell-1} \left[ {}^{2a}\bar{\beta}_{i,\ell} Q_{i,k} Q_{\ell,k} - {}^{2b}\bar{\beta}_{i,\ell} Q_{\ell,k} Q_{i,k} \right] - \\ & \frac{1}{2} {}^3\bar{\beta}_{\ell,\ell} Q_{\ell,k} Q_{\ell,k} - Q_{\ell,k} \sum_{i=\ell+1}^m {}^4\bar{\beta}_{i,\ell} Q_{i,k} + {}^1\bar{G}_{\ell,k} Q_{\ell,k} - \\ & \sum_{i=1}^{N_s} \left[ {}^2\bar{G}_{\ell,k} Q_{\ell,k} - {}^2\bar{G}_{\ell\pm 1,k} Q_{\ell\pm 1,k} \right] + {}^3\bar{G}_{\ell\pm 1,k} Q_{\ell\pm 1,k} + \\ & \bar{S}_{\ell,k} - \bar{R}_{\ell,k} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $dQ_{\ell,k}/dt$  为在时间  $t$  内区段  $\ell$  的气溶胶质量时间变化率;  $k$  为气溶胶组分;  $\ell$  为气溶胶离散区段;  $\ell-1$  为冷凝;  $\ell+1$  为蒸发。

式(1)中的每项表示特定区段中组分  $k$  质量浓度变化的不同机理:  $\bar{\beta}$  为凝聚系数,该系数结合了重力凝聚和扩散凝聚等不同物理过程下的影响;  $\bar{G}$  为

冷凝/蒸发系数,表示水和气溶胶颗粒的冷凝或蒸发; $\bar{S}$ 为气溶胶源项; $\bar{\mathfrak{R}}$ 为自然沉积去除。

自然沉积去除模型考虑了气溶胶重力沉积、布朗扩散、热泳和扩散泳4种机理沉积到结构表面。将这4种沉积效应考虑到MAEROS方程中。

重力沉积仅对方向朝上的表面有效,对于方向朝下的表面,该机理抵消其他沉积的过程。重力沉积速度由下式给出:

$$v_{\text{grav}} = \frac{d_p^2 \rho_p g C_n}{18\mu} \quad (2)$$

式中: $v_{\text{grav}}$ 为重力沉积向下终端速度; $d_p$ 为颗粒直径; $\rho_p$ 为颗粒密度; $g$ 为重力加速度; $\mu$ 为动力黏度; $C_n$ 为坎宁安滑移校正因子,它减少斯托克斯阻力,以解决非连续性效应。

$$C_n = 1 + Kn \left[ F_{\text{slip}} + 0.4 \exp(-1.1/Kn) \right] \quad (3)$$

式中: $F_{\text{slip}}$ 为滑移因子,1.257; $Kn$ 为克努森数:

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (4)$$

式中: $\lambda$ 为平均自由程。在模型中平均自由程取空气在298 K时的值(约 $6.9 \times 10^{-8}$  m)。

布朗扩散沉积由气溶胶从较高浓度区域扩散到较低浓度区域产生。扩散沉积速度由式(5)给出:

$$v_{\text{diff}} = \frac{\kappa T C_n}{3\pi\mu d_p \Delta} \quad (5)$$

式中: $v_{\text{diff}}$ 为扩散沉积速度; $\kappa$ 为玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23}$ ;  $\Delta$ 为扩散边界层厚度, $1 \times 10^{-5}$  m。

热泳沉积由气体中的温度梯度施加在气溶胶颗粒上的力产生。热泳沉积速度 $v_{\text{therm}}$ 由式(6)给出:

$$v_{\text{therm}} = \frac{3\mu C_n (C_t Kn + k_{\text{gas}}/k_p)}{2\rho_{\text{gas}} T_w (1 + 3F_{\text{slip}} Kn) (1 + 2C_t Kn + 2k_{\text{gas}}/k_p)} \nabla T \quad (6)$$

式中: $k_{\text{gap}}/k_p$ 为气体导热系数与气溶胶颗粒导热系数之比; $\nabla T$ 为结构表面温度梯度; $\rho_{\text{gas}}$ 为气体密度; $T_w$ 为壁温; $C_t$ 为热调节系数,2.25。

扩散泳沉积由水冷凝或蒸发时,相邻气体中存在的组分梯度产生。两个相关的机制将产生这些梯度。首先,存在一个朝向表面的气体净摩尔通量,并且该净通量将倾向于随着斯蒂芬流<sup>[16]</sup>移动气溶胶颗粒。第二,分子影响转移到颗粒相对侧的动量差将倾向于使颗粒沿着浓度降低的方向移动。扩散泳沉积速度 $v_{\text{diffusio}}$ 由式(7)给出:

$$v_{\text{diffusio}} = \left( \frac{\sqrt{M_s}}{X_s \sqrt{M_s} + X_{\text{NC}} \sqrt{M_{\text{NC}}}} \right) \left( \frac{W_{\text{cond}}}{\rho_b} \right) W_{\text{cond}} \geq 0 \quad (7)$$

$$v_{\text{diffusio}} = W_{\text{cond}}/\rho_s \quad W_{\text{cond}} < 0 \quad (8)$$

式中: $M_s$ 为水的分子量; $M_{\text{NC}}$ 为不可凝气体的分子量; $W_{\text{cond}}$ 为表面冷凝质量通量; $\rho_b$ 为气体密度; $\rho_s$ 为水蒸气饱和密度; $X_s$ 为气体中水蒸气的摩尔分数; $X_{\text{NC}}$ 为大气中不可凝气体的摩尔分数。

自然沉积模型通过计算每个表面的重力、布朗扩散、热泳和扩散泳沉积速率,以如下形式给出气溶胶去除率项 $\bar{\mathfrak{R}}_{\ell,k}$ :

$$\bar{\mathfrak{R}}_{\ell,k} = \sum_{j=1}^{N_{\text{str}}} K_{j,\ell} Q_{\ell,k} \quad (9)$$

式中: $N_{\text{str}}$ 为用于控制体中气溶胶沉积的结构表面总数; $Q_{\ell,k}$ 为区段 $\ell$ 组分 $k$ 的密度; $K_{j,\ell}$ 为区段 $\ell$ 的气溶胶在热结构表面 $j$ 的沉积速率:

$$K_{j,\ell} = \frac{A_j}{V} (v_{\text{grav}} + v_{\text{diff}} + v_{\text{therm}} + v_{\text{diffusio}}) \quad (10)$$

式中: $A_j$ 为热结构面积; $V$ 为控制体中大气体积。

## 1.2 高精度气溶胶自然沉积模型

原有模型的气溶胶物理方程是为完全致密的球形气溶胶颗粒编写的。当然,真正的气溶胶颗粒从来都不是真正的球体。在干燥的环境中,随着气溶胶凝聚,球形气溶胶颗粒会产生变形。在反应堆严重事故期间安全壳潮湿环境中,预计不会出现如此大的颗粒变形。通常,在潮湿环境中形成的气溶胶凝聚体是多孔的并且接近球形。由于粒子不是完全致密的,因此需要引入气溶胶动态形状因子对气溶胶方程进行一些修正。

Powers<sup>[17]</sup>认为,水在颗粒凝聚的凹孔中凝结产生的表面张力效应会导致颗粒收缩成多孔球形结构。这些形状因子仅取决于气溶胶材料的堆积密度:

$$\chi = 1/\alpha^{1/3} \quad (11)$$

式中: $\alpha$ 是球体的有效密度除以构成气溶胶的材料密度。如Powers和Burson<sup>[18]</sup>所论证,气溶胶颗粒内的空隙将充满水,那么:

$$\alpha = [\varepsilon \rho_p + (1 - \varepsilon) \rho_w] / \rho_p \quad (12)$$

式中: $\varepsilon$ 为填充分数; $\rho_w$ 为水的密度。

Powers和Burson<sup>[18]</sup>发现:

$$\varepsilon = \min \left[ 1, \left( d_{\text{pr}}/d_p \right)^{1.214} \right] \quad (13)$$

式中: $d_{\text{pr}}$ 是构成凝聚的初级粒子的直径。

考虑气溶胶颗粒动态形状因子的重力沉积速度由式(14)给出:

$$v_{\text{grav}} = \frac{d_p^2 \rho_p g C_n}{18\chi\mu} \quad (14)$$

为了使重力沉积模型能够准确响应温度变化带来的影响,引入动量、能量调节系数并对滑移因子进

行修正。Phillips<sup>[19]</sup>对滑移因子问题的理论研究得出了不同的表达式和非几何相关性:

$$C_n = \frac{15 + 12C_1Kn + 9(C_1^2 + 1)Kn^2 + 18C_2(C_1^2 + 2)Kn^3}{15 - 3C_1Kn + C_2(8 + \pi\alpha_i)(C_1^2 + 2)Kn^2} \quad (15)$$

式中:  $\alpha_i$  为能量调节系数,  $C_1 = (2 - \alpha_m)/\alpha_m$ ,  $C_2 = 1/(2 - \alpha_m)$ ,  $\alpha_m$  为动量调节系数。

能量调节系数由以下表达式<sup>[20]</sup>计算:

$$\alpha_i = 2\eta/(1 + \eta)^2 \quad (16)$$

式中:  $\eta$  是气体和表面材料的分子量之比。

动量调节系数是从用于研究滑移修正因子的数据中得出的。Rader<sup>[21]</sup>认为动量调节系数只是气体成分的函数, 并给出表1中各种气体的动量调节系数。

表1 不同气体的动量调节系数  
Table 1 Accommodation coefficients of momentum of various gases

气体 Gas	$\alpha_m$
空气 Air	0.897 2
Ar	0.889 1
He	0.869 4
H <sub>2</sub>	0.925 1
CH <sub>4</sub>	0.919 5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.878 4
H <sub>2</sub> O	0.897 2
CO <sub>2</sub>	0.896 8

在克努森数的求解中需要计算气体分子的平均自由程。原有模型中平均自由程取经验常数(约  $6.9 \times 10^{-8}$  m), 但平均自由程通常与温度有关。对于气体混合物的平均自由程为:

$$\lambda = \left[ \frac{2MW}{RT} \right]^{1/2} \mu_g / \rho_g \quad (17)$$

式中:  $MW$  是气体的平均分子量;  $R$  是气体常数。

考虑气溶胶颗粒动态形状因子的扩散沉积速度由式(18)给出:

$$v_{\text{diff}} = \frac{\kappa TC_n}{3\pi\chi\mu_d\Delta} \quad (18)$$

原有布朗扩散模型中认为扩散边界层厚度是恒定的, 与流动条件和气溶胶粒径无关, 因此布朗扩散边界层厚度取经验常数( $1 \times 10^{-5}$  m), 这使得布朗扩散速率被低估。事实上, 扩散运动导致颗粒沉积之前, 较大的颗粒将被输送到更靠近表面的位置。因此, 扩散边界层厚度应该取决于粒径。Vandevate<sup>[22]</sup>给出了布朗扩散边界层厚度公式:

$$\Delta = 0.046 \left( \frac{\kappa TC_n}{3\pi\chi\mu_d} \right)^{0.265} \quad (19)$$

原有热泳沉积模型在低电导率和低克努森数下计算热泳沉积速率, 无法在高电导率和高克努森数时应用。但是, 有一个由蒙特卡罗型数值模型创建的新模型以扩展模型适用范围<sup>[23]</sup>:

$$v_{\text{therm}} = \frac{2\mu C_n (\alpha_i Kn + k_{\text{gas}}/k_p) (1 + 9Kn/(4 + \pi/2))}{\chi \rho_{\text{gas}} T_w (1 + 3\alpha_m Kn) (1 + 2\alpha_i Kn + 2k_{\text{gas}}/k_p)} \nabla T \quad (20)$$

为了使扩散泳模型能够准确响应压力和温度变化带来的影响, 采用了一个新的包含压力梯度、水蒸气分压、散射核的计算公式。Williams 和 Schmitt<sup>[24]</sup>在理论研究扩散泳效应时定义了散射核, 为了近似校正粒子的非球形性并将推导扩展到小粒子状态:

$$v_{\text{diff}} = -\frac{C_n}{\chi} \left[ \frac{\chi}{C_n} + \sigma_{12} (1 - P_w/P_T) \right] \frac{D_w}{P_T - P_w} \nabla P_w \quad (21)$$

式中:  $\sigma_{12}$  为散射核;  $P_w$  为水蒸气分压;  $P_T$  为总压力;  $D_w$  为水蒸气在大气中的扩散系数;  $\nabla P_w$  为水蒸气分压梯度。

考虑动量和能量调节推导出散射核:

$$\sigma_{12} = \frac{M_s^{1/2} Q_w - M_g^{1/2} Q_g}{X_s M_s^{1/2} Q_w + X_g M_g^{1/2} Q_g} \quad (22)$$

式中:  $M_g$  为气体质量;  $X_g$  为气体摩尔分数; 与动量和能量调节相关的系数由式(23)求解:

$$Q(i) = 1 + \pi/8 - 0.5(1 - \alpha_m(i)) + \pi(1 - \alpha_i(i))/16 \quad (23)$$

## 2 气溶胶自然沉积模型验证

为了验证改进气溶胶自然沉积模型, 选取了 AHMED、ABCOVE 和 LACE 实验评估改进代码。AHMED 实验是在封闭安全壳恒定热工条件下研究气溶胶重力沉降。实验过程中控制安全壳内温度压力不变, 壁面维持较小的温度梯度且没有大量蒸汽冷凝导致的质量通量, 可以认为实验过程中没有热泳和扩散泳效应。此外, 该实验颗粒直径为  $2.4 \mu\text{m}$ , 布朗扩散沉积贡献微小。因此, 该实验可用于单一验证重力沉积。ABCOVE 实验的 AB5 测试是在封闭安全壳瞬态热工条件下研究气溶胶重力沉降。实验中没有水蒸气, 因此该实验过程中没有热泳和扩散泳效应。该实验颗粒直径为  $0.25 \mu\text{m}$ , 布朗扩散沉积占有一定贡献。因此, 该实验可用于验证重力和布朗扩散沉积。LACE 实验的 LA4 测试是安全壳泄漏整体性实验, 实验过程包含了大量蒸汽冷凝、安全壳壁面导热、管道泄压排气等。因此整体性实验涵盖了 4 种沉积机理。

验证主要目标是关注气相气溶胶质量随时间的变化, 以评估修改后的代码对计算精度的提升。因

为气溶胶模型修改对热工水力结果几乎没有影响，所以仅给出 ISAA 模拟的热工水力结果并与实验值比较，以说明本文在实验的热工水力条件下讨论气溶胶沉积结果。

## 2.1 AHMED 实验

气溶胶和传热测量装置 (Aerosol and Heat Transfer Measurement Device, AHMED) 由 VTT (Technical Research Centre of Finland) 气溶胶技术团队于 1991 年建造<sup>[25]</sup>。通过将气溶胶形式的 NaOH 注入大气中，在 AHMED 设备进行了一系列气溶胶实验。这些实验旨在研究受控温度和湿度条件下的吸湿和非吸湿气溶胶行为。由于设施的简单性和相对较低的气溶胶浓度，AHMED 提供了丰富的吸湿气溶胶数据，且不受大型整体性实验相关的热工水力耦合现象的影响。

AHMED 设备由一个 1.81 m<sup>3</sup> 的圆柱形容器组成，半径为 0.635 m，沉降面积为 1.27 m<sup>2</sup>。该实验使

用 Pt100 型温度传感器在 13 个位置测量壁温，并在 14 个位置测量内部和外部环境温度。该实验使用加热电缆控制容器壁的温度。所有容器内表面和气体温度大致相等。在整个实验过程中监测容器和输入管线压力以及蒸汽和空气流速。容器内的压力保持在与环境相同的压力 (0.1 MPa)。使用湿度探测器在三个位置测量相对湿度。AHMED 设备参数在表 2 中提供。

将 NaOH 气溶胶注入到相对湿度恒定的容器中。由于良好的导热和相对稳定的热工条件，大部分气溶胶主要以重力向壁面沉积。气溶胶低浓度使凝聚过程缓慢，因此，主要现象是气溶胶颗粒由于开尔文效应和溶解度等吸湿效应从大气中吸收水分，从而吸湿生长。吸湿性增长一直持续到颗粒尺寸大到足以使重力沉积效应变得显著为止。在本文中，ISAA 用于模拟相对湿度 (Relative Humidity, RH) 为 22%、82% 和 96% 的 NaOH 实验。AHMED 实验的详细条件在表 2 中提供。

表 2 AHMED 设备和实验条件<sup>[25-26]</sup>  
Table 2 Facility and experimental conditions of AHMED<sup>[25-26]</sup>

条件 Conditions		值 Parameter
容器尺寸 Vessel dimension	半径 Radius	0.635 m
	有效高度 Effective height	1.425 m
	体积 Volume	1.81 m <sup>3</sup>
容器面积 Vessel area	气溶胶沉降 Aerosol settling	1.27 m <sup>2</sup>
	气溶胶扩散 Aerosol diffusion	9.42 m <sup>2</sup>
初始压力 Initial pressure		0.101 3 MPa
初始温度 Initial temperature	RH 22%	323.15 K
	RH 82%	300.15 K
	RH 96%	296.15 K
初始气溶胶浓度 Initial aerosol concentration	RH 22%	112 mg·m <sup>-3</sup>
	RH 82%	208 mg·m <sup>-3</sup>
	RH 96%	218 mg·m <sup>-3</sup>
NaOH 密度 NaOH density		2.13 g·m <sup>-3</sup>
AMMD		2.4 μm
GSD		1.64

图 2 分别显示了用 ISAA 和改进 ISAA 计算 AHMED 实验在 RH 为 22%、82% 和 96% 时安全壳大气中的归一化气溶胶质量。具有水溶性的 NaOH 在具有湿度的安全壳环境下表现出吸湿增长现象。NaOH 气溶胶不断吸水生长，使得颗粒尺寸变大，加速了实验过程早期的重力沉降。对比三种湿度可以看出，RH 为 96% 的工况气溶胶沉降速度明显加快。ISAA 和改进 ISAA 计算不同湿度条件下 NaOH 气溶胶沉降曲线与测试数据趋势一致。

为了量化改进模型的精度提升，表 3 给出三种

工况最大误差点进行对比。对比结果可以看出，改进 ISAA 的计算误差更小。改进 ISAA 气溶胶模型在高湿度条件下与实验值拟合更好，而这种条件更加符合真实事故下安全壳环境。

## 2.2 ABCOVE 实验

气溶胶行为代码验证和评估 (Aerosol Behavior Code Validation and Evaluation, ABCOVE) 计划<sup>[27]</sup>研究了 LMFBR 中的核气溶胶行为，在位于汉德福工程开发实验室的安全壳系统测试装置 (Containment Systems Test Facility, CSTF) 中进行了一系列实验。

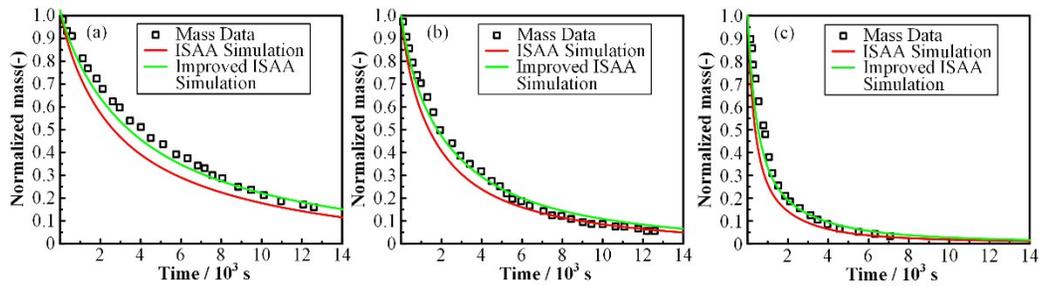


图2 不同热工水力条件下NaOH气溶胶归一化质量  
(a) RH=22%, 323.15 K, 0.1 MPa, (b) RH=82%, 300.15 K, 0.1 MPa, (c) RH=96%, 296.15 K, 0.1 MPa  
Fig.2 Normalized mass of NaOH aerosol at various thermal hydraulic conditions  
(a) RH=22%, 323.15 K, 0.1 MPa, (b) RH=82%, 300.15 K, 0.1 MPa, (c) RH=96%, 296.15 K, 0.1 MPa

表3 AHMED计算值与测量点比较  
Table 3 Comparing calculated and measured points of AHMED

最大误差点 Maximum error point	测量值 Measured value	ISAA模拟值/相对误差 ISAA/relative error / %	改进ISAA模拟值/相对误差 Improved ISAA/relative error / %
401.7 s, RH=22%	0.511	0.390/23.7	0.456/10.8
340.6 s, RH=82%	0.350	0.275/21.4	0.334/4.57
187.0 s, RH=96%	0.209	0.151/27.8	0.203/2.87

这些实验为评估气溶胶代码在模拟假设事故期间安全壳建筑物中气溶胶沉积方面提供了依据。本文使用AB5测试结果评估改进模型。在AB5测试中,通过将钠以高速喷射到空气中,产生了单一组分的气溶胶。AB5测试的主要目的是提供关于气溶胶行为的实验数据。

如图3所示,CSTF安全壳是一个852 m<sup>3</sup>的碳钢容器,安装在混凝土坑中。所有内表面都涂有改性酚醛涂料,外表面覆盖有25.4 mm厚的玻璃纤维绝

缘层。安全壳的其他参数在表4中提供。

测试气溶胶由钠雾火产生,通过位于5.15 m高程的两个喷嘴将钠从外部供应罐注入CSTF容器。实验过程在872 s内喷洒223 kg钠,所有钠经过氧化转化为气溶胶。在测试中多次注入压缩空气(23.3% O<sub>2</sub>)以补充采样损失并防止安全壳压力变为负值。在检修门打开前,安全壳容器保持密封5.136×10<sup>5</sup> s(5.94 d)。AB5测试的详细条件在表5中提供。

表4 AB5测试安全壳容器参数<sup>[27]</sup>  
Table 4 Containment vessel properties of AB5 test<sup>[27]</sup>

容器参数 Vessel properties		值 Parameter	结构表面 Surface areas	值 Parameter
尺寸 Dimension	直径 Diameter	7.62 m	传热面 Hat transfer areas	上封头 Top head 63.0 m <sup>2</sup>
	总高度 Total height	20.3 m		下封头 Bottom head 63.0 m <sup>2</sup>
	体积 Volume	852.0 m <sup>3</sup>		圆柱面 Cylinder 394.0 m <sup>2</sup>
厚度 Thickness	上封头 Top head	18.1 mm		内部组件 Internal components 232.0 m <sup>2</sup>
	下封头 Bottom head	18.1 mm	总气溶胶沉降面积 Total aerosol settling areas	88.2 m <sup>2</sup>
	圆柱面 Cylinder	22.9 mm	总气溶胶扩散面积 Total aerosol diffusion areas	752.0 m <sup>2</sup>

表5 AB5测试实验条件<sup>[27]</sup>  
Table 5 Experimental conditions of AB5 test<sup>[27]</sup>

热工水力条件 Thermal hydraulic condition	值 Parameter	气溶胶条件 Aerosol condition	值 Parameter
初始温度 Initial temperature	302.25 K	生成速率 Generation rate	445.0 g·s <sup>-1</sup>
初始压力 Initial pressure	0.122 MPa	密度 Density	2.5 g·cm <sup>-3</sup>
露点 Dew point	289.15 K	AMMD	0.25 μm
Na喷淋速率 Na spray rate	256.0 g·s <sup>-1</sup>	GSD	1.5
Na喷淋温度 Na temperature	836.15 K	钠气溶胶质量比 Mass ratio of aerosol and total	1.74

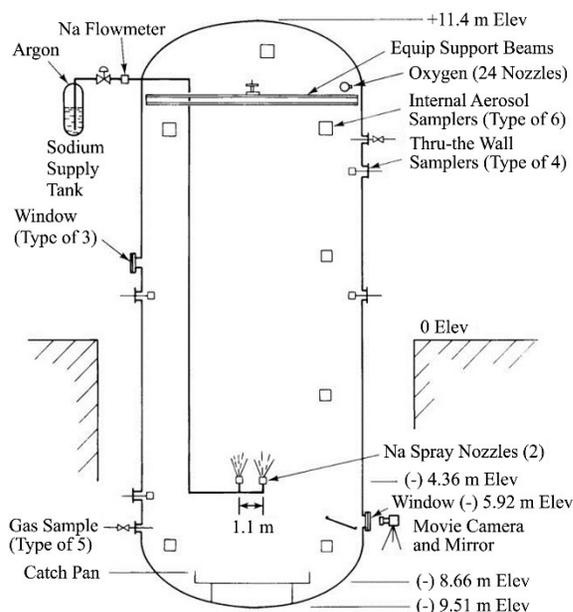


图3 用于AB5测试的CSTF安全壳容器布置<sup>[27]</sup>  
Fig.3 Arrangement of CSTF containment vessels for AB5 test<sup>[27]</sup>

图4显示了ISAA计算得出的AB5测试温度和压力变化。图5显示了用ISAA和改进ISAA计算得出的AB5测试安全壳大气中的气溶胶悬浮质量。由于在安全壳环境中没有蒸汽，壁温温度梯度很小，该实验过程几乎没有扩散泳和热泳，因此AB5测试中干气溶胶沉积机理主要为重力沉积。

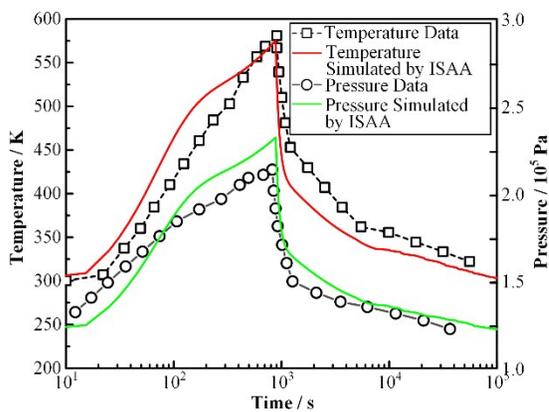


图4 AB5测试中温度和压力  
Fig.4 Temperature and pressure in the AB5 test

测得的空气质量在钠雾火期间不断增加，在383 s达到最大值145 kg。ISAA模拟质量增加在303 s达到峰值为118.73 kg，相对误差18.1%，改进后ISAA模拟质量增加在353 s达到峰值为130.13 kg，相对误差10.3%。在钠雾火后约2 h，空气中的质量降低至最大质量的1%，该过程中气溶胶质量的下降趋势与实验数据一致。对比计算结果可以看出，改进ISAA能够更加准确模拟钠气溶胶质量峰值和平台期。在钠雾火结束后，ISAA和改进ISAA模拟质

量下降阶段的趋势有细微差异。

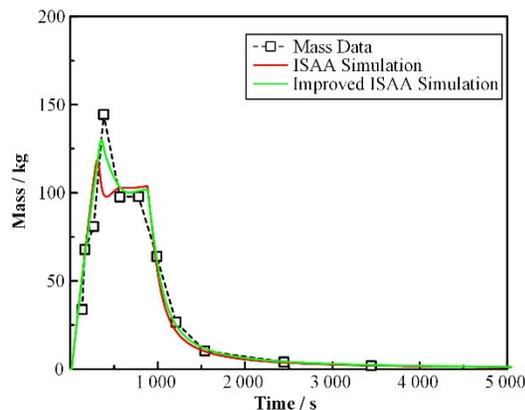


图5 AB5测试中Na气溶胶气相质量  
Fig.5 Airborne mass of Na aerosol in the AB5 test

### 2.3 LACE实验

轻水堆气溶胶安全壳实验(Light Water Reactor Aerosol Containment Experiments, LACE)<sup>[28]</sup>是一项合作计划，旨在调查假定高源项后果事故情况的气溶胶行为。考虑的事故情况包括安全壳隔离失效，安全壳在事故早期破损，安全壳失效与大量裂变产物泄漏同时发生等。在汉福德工程开发实验室的CSTF进行了6项大规模实验。本文选取了LA4测试结果评估改进模型。

LA4<sup>[29]</sup>测试用于模拟LWR严重事故中后期安全壳失效的安全壳条件。LA4测试的目的是确定气溶胶在高蒸汽浓度条件下，气溶胶在安全壳建筑中的行为。图6显示了实验装置中靠近容器上部的排气口和各种注入管线的位置，以及测量传热和传质速率装置的位置。在加热阶段通过靠近容器底部的蒸汽管线注入蒸汽，并在实验阶段以低速率保持稳态条件。气溶胶注入管线位于容器的中平面附近。氮气和蒸汽用于气溶胶载体介质。大气气溶胶浓度是通过在测试期间过滤器采集的样品来确定的，随后对这些样品进行化学分析以确定质量和组成。LA4容器的详细信息见表6。

LA4测试过程包含7个连续的热工水力阶段，如下所示：

第1阶段(-3 000~0 s)是快速升温阶段，将蒸汽注入到容器中以将容器的大气温度提高约70 K并建立所需的蒸汽浓度。

第2阶段(0~1 830 s)是CsOH单一注入阶段，CsOH气溶胶与蒸汽混合注入安全壳大气。

第3阶段(1 830~3 030 s)是混合注入阶段，CsOH和MnO气溶胶与蒸汽混合注入安全壳大气。

第4阶段(3 030~4 812 s)是MnO单一注入阶段，MnO气溶胶与蒸汽混合注入安全壳大气。

表6 LA4测试安全壳容器参数<sup>[29]</sup>  
Table 6 Containment vessel properties of LA4 test<sup>[29]</sup>

容器参数 Vessel properties		值 Parameter	结构表面 Surface areas	值 Parameter
尺寸 Dimension	直径 Diameter	7.62 m	传热面 Heat transfer areas	上封头 Top head 63.0 m <sup>2</sup>
	总高度 Total height	20.3 m		下封头 Bottom head 63.0 m <sup>2</sup>
厚度 Thickness	体积 Volume	852.0 m <sup>3</sup>		圆柱面 Cylinder 394.0 m <sup>2</sup>
	上封头 Top head	19.3 mm		内部组件 Internal components 221.0 m <sup>2</sup>
	下封头 Bottom head	19.3 mm	总气溶胶沉降面积 Total aerosol settling areas	87.8 m <sup>2</sup>
	圆柱面 Cylinder	16.9 mm	总气溶胶扩散面积 Total aerosol diffusion areas	741.0 m <sup>2</sup>

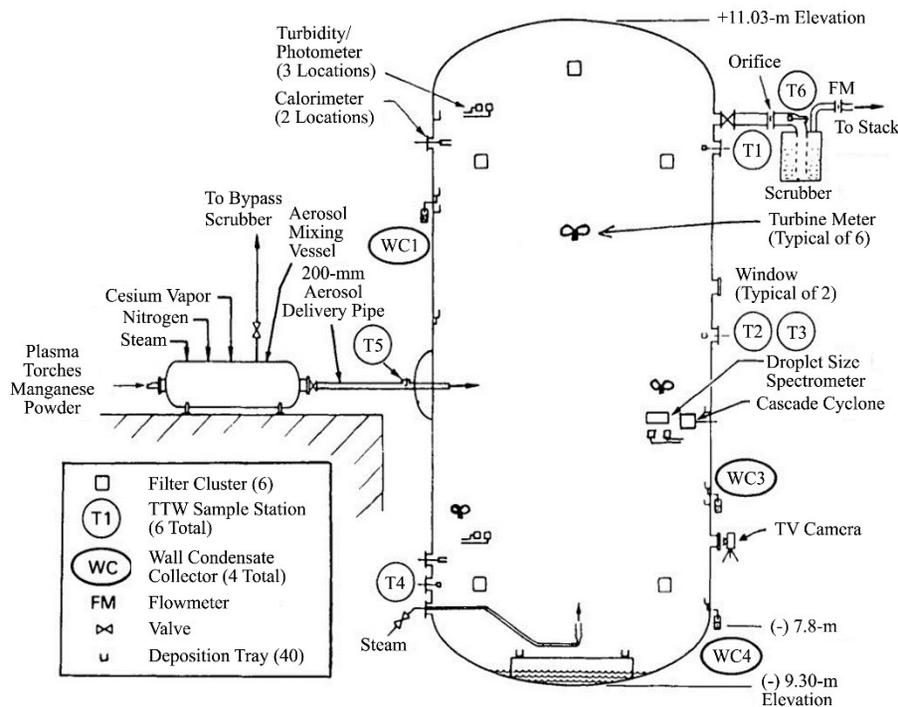


图6 用于测试LA4的CSTF容器布置<sup>[29]</sup>  
Fig.6 Arrangement of CSTF containment vessels for LA4 test<sup>[29]</sup>

第5阶段(4 812~16 800 s)是长稳态期,通过容器底部的蒸汽管线以低速率注入蒸汽保持稳态条件。

第6阶段(16 800~36 000 s)是排气阶段,打开靠近容器上部的排气口,此时安全壳内混合气体从排气口排出。当阀门排气停止时,关闭排气口。

第7阶段(36 000~342 000 s)是冷却阶段,停止所有气体注入。当安全壳内部压力低于外部环境压力时,再次打开排气口防止安全壳压力变为负压。

表7给出了LA4实验初始条件,表8为各阶段气体的注入速率和温度,表9给出了两种气溶胶的注入速率和尺寸分布参数。

图7显示了用ISAA计算得出的LA4测试温度

表7 LA4测试实验初始条件<sup>[29]</sup>  
Table 7 Experimental initial conditions of LA4 test<sup>[29]</sup>

初始条件 Initial conditions	值 Parameter
气体温度 Gas temperature / K	315.65
壁面温度 Wall temperature / K	315.65
压力 Pressure / kPa	107.0
地坑水质量 Sump water mass / kg	950
地坑水温度 Sump water temperature / K	315.05

和压力变化。图8和图9分别显示了用ISAA和改进ISAA计算得出的LA4测试安全壳大气中CsOH和MnO气溶胶悬浮质量。在实验初期,安全壳建立

了稳定的蒸汽环境。在气溶胶注入期,湿气溶胶吸水生长,大颗粒发生显著的重力沉降。在冷却期,大量蒸汽向安全壳壁面冷凝,颗粒热泳和扩散泳沉积

也起到了重要作用。在实验末期,残余的微小颗粒通过布朗扩散效应向安全壳壁面沉积。

表8 LA4测试实验条件<sup>[29-30]</sup>  
Table 8 Experimental conditions of LA4 test<sup>[29-30]</sup>

实验阶段 Phase	蒸汽 Steam		氮气 Nitrogen		氦气 Helium		氩气 Argon	
	速率 Rate / kg·s <sup>-1</sup>	温度 Temperature / K						
第1阶段 Period 1	0.451	434.15	0.002 7	433.15	—	—	—	—
第2阶段 Period 2	0.029	440.15	0.067 0	510.15	0.000 59	510.15	0.000 84	510.15
第3阶段 Period 3	0.029	440.15	0.066 0	526.15	0.000 59	526.15	0.000 84	526.15
第4阶段 Period 4	0.029	440.15	0.067 0	535.15	0.000 59	535.15	0.000 84	535.15
第5阶段 Period 5	0.029	440.15	0.003 7	463.15	—	—	—	—
第6阶段 Period 6	0.029	440.15	0.002 6	433.15	—	—	—	—
第7阶段 Period 7	—	—	0.002 2	393.15	—	—	—	—

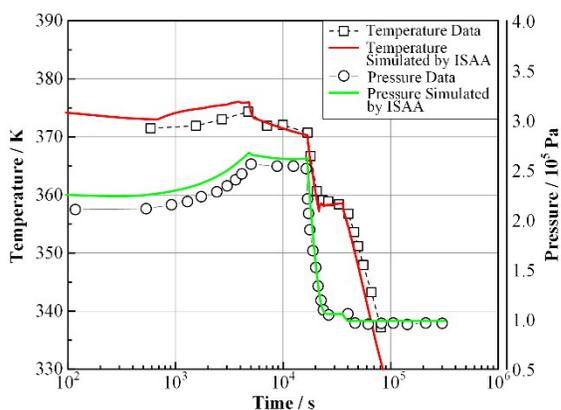


图7 LA4测试中温度和压力  
Fig.7 Temperature and pressure in the LA4 test

表10分别给出LA4测试峰值和残余质量的相对误差。对比结果可以看出,改进ISAA在整体性实验中模拟气溶胶峰值的计算误差更小,并且对实验末期气溶胶残余质量的计算精度有着显著提升。例如LA4测试中,实验测量MnO的残余质量为 $3.55 \times 10^{-6}$  kg, ISAA模拟残余质量为 $7.44 \times 10^{-5}$  kg,误差超过20倍,大大高估了冷却期气溶胶残留质量,而改进ISAA模拟残余质量为 $6.04 \times 10^{-6}$  kg,误差为1.7倍。

然而从整体性实验计算结果对比中也发现了现阶段ISAA在气溶胶模拟方面的缺陷。在LACE实验中气溶胶在安全壳卸压和泄漏过程中会通过管道迁移至环境。ISAA模拟气溶胶迁移考虑控制体浓度和管道流速,一旦控制体浓度和管道流速变得微

小,气溶胶迁移速率几乎为0。但真实情况下只要安全壳和外界管道保持连接,气溶胶可通过扩散机理向环境迁移。因此ISAA低估了LA4气溶胶在低浓度和低流速热工水力条件下的泄漏质量,导致气溶胶在排气期的质量变化趋势与实验值不一致。

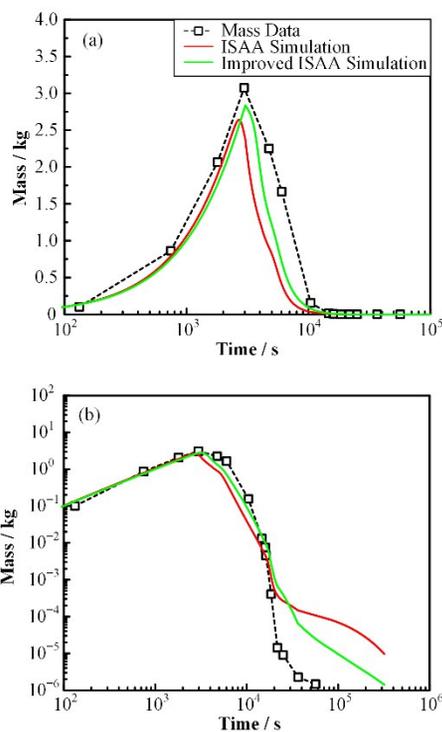


图8 LA4测试CsOH气溶胶气相质量  
(a) 早期, (b) 整体过程  
Fig.8 Airborne mass of CsOH aerosol in the LA4 test  
(a) Early period, (b) Entire period

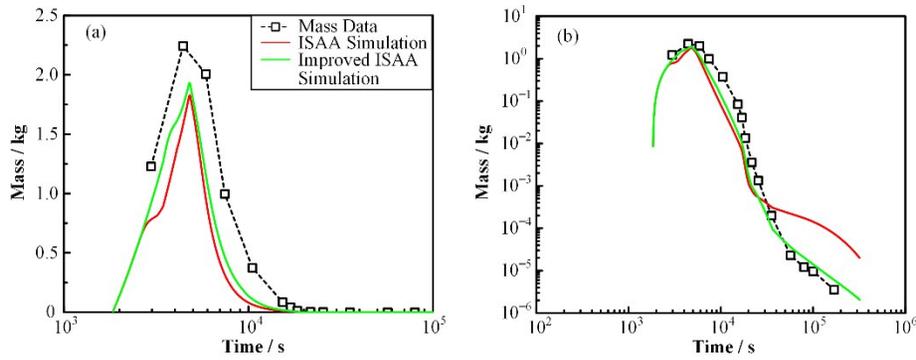


图9 LA4测试MnO气溶胶气相质量 (a) 早期,(b) 整体过程  
Fig.9 Airborne mass of MnO aerosol in LA4 test (a) Early period, (b) Entire period

表9 LA4测试气溶胶源条件<sup>[31]</sup>  
Table 9 Aerosol source conditions of LA4 test<sup>[31]</sup>

实验阶段 Phase	时刻 Time / s	CsOH			MnO		
		AMMD / $\mu\text{m}$	GSD	速率 Rate / $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	AMMD / $\mu\text{m}$	GSD	速率 Rate / $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
第2阶段 Period 2	78	1.35	1.81	1.024	—	—	—
	288			0.685			
	738			1.099			
	1 218			1.082			
	1 698			0.988			
	1 830			0.988			
第3阶段 Period 3	1 902	2.22	1.80	0.886	2.43	1.70	0.840
	2 112			0.920			0.840
	2 532			1.002			0.959
	2 748			1.033			0.617
	2 952			0.766			0.631
	3 030			0.766			0.475
第4阶段 Period 4	3 204	—	—	—	1.82	2.56	0.475
	3 438						0.659
	3 858						1.350
	4 338						0.782
	4 764						0.680
	4 812						0.573

表10 LA4测试计算值与测量点比较  
Table 10 Comparing calculated and measured points of test LA4

测量点 Measured point	测量值 Measured value / kg	ISAA 模拟值/相对误差 ISAA/relative error	改进 ISAA 模拟值/相对误差 Improved ISAA/relative error
CsOH 峰值 CsOH peak	3.07	2.64 kg/14.0%	2.84 kg/7.49%
CsOH 残余 CsOH residual	$1.46 \times 10^{-6}$	$1.07 \times 10^{-4}$ kg/73.3 times	$2.49 \times 10^{-5}$ kg/17.1 times
MnO 峰值 MnO peak	2.24	1.82 kg/18.8%	1.93 kg/13.8%
MnO 残余 MnO residual	$3.55 \times 10^{-6}$	$7.44 \times 10^{-5}$ kg/20.96 times	$6.04 \times 10^{-6}$ kg/1.70 times

### 3 结语

本文针对 ISAA 程序气溶胶模型精度不足的问题,改进安全壳气溶胶自然沉积模型。为了验证改进气溶胶自然沉积模型,选取了 AHMED、ABCOVE

和 LACE 实验评估改进代码。

1)改进模型考虑了气溶胶形状因子,并将其引入到自然沉积模型中。相比于球形颗粒,不规则非球形颗粒会获得较低的自然沉积速率;

2)在重力、热泳和扩散泳沉积模型中修正滑移

因子,引入了动量调节系数、能量调节系数,改进扩散沉积模型中考虑了压力梯度、水蒸气分压和散射核碰撞等因素,这些修正使得改进模型能够更加精确模拟气溶胶质量峰值,响应安全壳压力温度对气溶胶自然沉积速率的影响;

3)改进模型精确求解了影响布朗扩散沉积速率的扩散边界层厚度,改进重力、布朗扩散和扩散沉积模型能够显著提高安全壳气溶胶残留质量的计算精度。

总体来看,改进ISAA性能能够满足分析先进压水堆严重事故安全壳内气溶胶自然沉积行为的需要。未来将针对当前气溶胶模型中发现问题做进一步优化,开发和改进气溶胶模型使代码能够具备精确分析回路管道气溶胶迁移的能力。

**作者贡献声明** 李济深负责软件开发、初稿准备;张斌负责调研、方法论;高鹏程负责修改文章,数据整理;缪凡负责实验调研;单建强负责审核修改文章。

#### 参考文献

- Schöck W, Bunz H, Adams R E, *et al.* Large-scale experiments on aerosol behavior in light water reactor containments[J]. Nuclear Technology, 1988, **81**(2): 139 - 157. DOI: [10.13182/nt88-a34089](https://doi.org/10.13182/nt88-a34089).
- Lee Y, Cho Y J, Lim K. Coupling scheme of multicomponent sectional equations and Mason equations via transition rate matrix of hygroscopic growth applied to international standard problem No. 44[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, **127**: 437 - 449. DOI: [10.1016/j.anucene.2018.12.028](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.12.028).
- Kaltenbach C, Laurien E. CFD Simulation of aerosol particle removal by water spray in the model containment THAI[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, **120**: 62 - 81. DOI: [10.1016/j.jaerosci.2018.03.005](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.03.005).
- Herranz L E, Garcia M, Morandi S. Benchmarking LWR codes capability to model radionuclide deposition within SFR containments: an analysis of the Na ABCOVE tests [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **265**: 772 - 784. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2013.05.030](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.05.030).
- Hu W C, Zhao C Q, Bi J S, *et al.* ASTEC simulation of fission product source term ruthenium in coolant in severe accident[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, **133**: 658 - 664. DOI: [10.1016/j.anucene.2019.06.063](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.06.063).
- Merrill B J, Hagrman D L. MELCOR aerosol transport module modification for NSSR-1[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1996. DOI: [10.2172/228109](https://doi.org/10.2172/228109).
- Paci S, Pinna T, Porfiri M T. Analysis of the ICE Experimental Tests Using the ECART Code[C]//Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9). 2017.
- Passalacqua R, Tarabelli D, Renault C. Light water reactor aerosol containment experiment LA4 simulated by JERICO and AEROSOLS-B2 codes[J]. Nuclear Technology, 1996, **116**(3): 283 - 292. DOI: [10.13182/nt96-a35284](https://doi.org/10.13182/nt96-a35284).
- Kang H, Rhee B, Kim D. Development of a fission product transport module predicting the behavior of radiological materials during severe accidents in a nuclear power plant[J]. Journal of Radiation Protection and Research, 2016, **41**(3): 237 - 244. DOI: [10.14407/jrpr.2016.41.3.237](https://doi.org/10.14407/jrpr.2016.41.3.237).
- 卢俊晶, 毛亚蔚, 张天琦, 等. 严重事故下多组分吸湿性气溶胶的重力沉降研究[J]. 核动力工程, 2021, **42**(4): 80 - 85. DOI: [10.13832/j.jnpe.2021.04.0080](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0080).  
LU Junjing, MAO Yawei, ZHANG Tianqi, *et al.* Study on gravity sedimentation of multicomponent hygroscopic aerosols in reactor severe accident[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, **42**(4): 80 - 85. DOI: [10.13832/j.jnpe.2021.04.0080](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0080).
- 孙雪霆, 陈林林, 史晓磊, 等. 严重事故下水蒸气凝结对气溶胶扩散沉积影响研究[J]. 原子能科学技术, 2017, **51**(1): 73 - 78. DOI: [10.7538/yzk.2017.51.01.0073](https://doi.org/10.7538/yzk.2017.51.01.0073).  
SUN Xueting, CHEN Linlin, SHI Xiaolei, *et al.* Study on effect of steam condensation on aerosol diffusiophoresis in severe accident condition[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, **51**(1): 73 - 78. DOI: [10.7538/yzk.2017.51.01.0073](https://doi.org/10.7538/yzk.2017.51.01.0073).
- 张天琦, 于明锐, 宋明强, 等. 核电厂安全壳内气溶胶热泳沉积特性研究[J]. 核安全, 2018, **17**(3): 36 - 39. DOI: [10.16432/j.cnki.1672-5360.2018.03.007](https://doi.org/10.16432/j.cnki.1672-5360.2018.03.007).  
ZHANG Tianqi, YU Mingrui, SONG Mingqiang, *et al.* Characteristics of thermophoresis deposition of aerosols in the containment[J]. Nuclear Safety, 2018, **17**(3): 36 - 39. DOI: [10.16432/j.cnki.1672-5360.2018.03.007](https://doi.org/10.16432/j.cnki.1672-5360.2018.03.007).
- Gao P C, Zhang B, Li J S, *et al.* Development of mechanistic cladding rupture model for integrated severe accident code ISAA. Part I: module verification and application in CAP1400[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, **158**: 108305. DOI: [10.1016/j.anucene.2021.108305](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108305).
- Gao P C, Zhang B, Li J S, *et al.* Development of mechanistic cladding rupture model for severe accident analysis and application in PHEBUS FPT3 experiment[J].

- Nuclear Engineering and Technology, 2022, **54**(1): 138 - 151. DOI: [10.1016/j.net.2021.07.029](https://doi.org/10.1016/j.net.2021.07.029).
- 15 Gelbard F. MAEROS user manual[Z]. 1982.
- 16 Hinds W C. Aerosol technology[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- 17 Powers D A, Washington K E, Sprung J L, *et al.* A simplified model of aerosol removal by natural processes in reactor containments[R]. Nuclear Power Reactors & Associated Plants, 1996. DOI: [10.2172/270806](https://doi.org/10.2172/270806).
- 18 Powers D A. A simplified model of decontamination by BWR steam suppression pools[R]. Office of Entific & Technical Information Technical Reports, 1997. DOI: [10.2172/481867](https://doi.org/10.2172/481867).
- 19 Phillips W F. Motion of aerosol particles in a temperature gradient[J]. Physics of Fluids, 1975, **18**(2): 144. DOI: [10.1063/1.861119](https://doi.org/10.1063/1.861119).
- 20 Goodman F O, Wachman H Y. Formula for thermal accommodation coefficients[J]. The Journal of Chemical Physics, 1967, **46**(6): 2376 - 2386. DOI: [10.1063/1.1841046](https://doi.org/10.1063/1.1841046).
- 21 Rader D J. Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases[J]. Journal of Aerosol Science, 1990, **21**(2): 161 - 168.
- 22 De J F V. Investigations into the dynamics of aerosols in enclosures as used for air pollution studies[D]. Landbouwhogeschool te Wageningen, 1980.
- 23 Vechgama W, Silva K, Rassame S. Validation of modified ART mod 2 code through comparison with aerosol deposition of cesium compound in phébus FPT3 containment vessel[J]. Science and Technology of Nuclear Installations, 2019, **2019**: 1 - 16. DOI: [10.1155/2019/4081943](https://doi.org/10.1155/2019/4081943).
- 24 Davies C N. Thermophoresis, diffusiohoresis[M]. Amsterdam: Elsevier, 1966. DOI: [10.1016/C2013-0-01803-8](https://doi.org/10.1016/C2013-0-01803-8).
- 25 Makynen J, Jokiniemi J. AHMED code comparison exercise[R]. Finland: VTT Energy, 1995.
- 26 Mäkynen J M, Jokiniemi J K, Ahonen P P, *et al.* AHMED experiments on hygroscopic and inert aerosol behaviour in LWR containment conditions: experimental results[J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, **178**(1): 45 - 59. DOI: [10.1016/S0029-5493\(97\)00174-X](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(97)00174-X).
- 27 Hilliard R K, McCormack J D, Postma A K. Results and code predictions for ABCOVE aerosol code validation - Test AB5[R]. Washington, 1983. DOI: [10.2172/706059](https://doi.org/10.2172/706059).
- 28 Muhlestein L D, Hilliard R K, Bloom G R, *et al.* LWR aerosol containment experiments (LACE) program and initial test results[R]. Washington, 1983.
- 29 McCormack J D R H, Salgado J M. Final report of experimental results of LACE test LA-4[R]. LACE TR-025, Westinghouse Hanford Co., October 1987.
- 30 Kmetyk L N. MELCOR 1.8.1 assessment of LACE aerosol experiment LA-4[R]. NewMexico, 1991. DOI: [10.2172/6119518](https://doi.org/10.2172/6119518).
- 31 Kljenak I, Mavko B. Icone15-10322 simulation of lace La4 experiment on aerosol behavior in a npp containment at severe accident conditions with the astec cpa code[C]// Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE). 2007, 2007.15: \_ICONE1510. DOI: [10.1299/jsmeicone.2007.15.\\_icone1510\\_162](https://doi.org/10.1299/jsmeicone.2007.15._icone1510_162).