

基于灰色关联度的棒束通道内液态铅铋合金中颗粒物运动沉积研究

周涛^{1,2,3} 唐剑宇^{1,2,3} 蒋屹^{2,4}

1(东南大学 能源与环境学院核科学与技术系 南京 210096)

2(核热工安全与标准化研究团队 南京 210096)

3(大型发电装备安全运行与智能测控国家工程研究中心 南京 210096)

4(华北电力大学 核科学与工程学院 北京 102206)

摘要 液态铅铋合金在流动中产生的不溶性颗粒物会在流道内局部聚集,影响铅铋快堆的运行。利用 ANSYS 软件对小型自然循环铅冷快堆 SNCLFR-100 棒束通道中颗粒物沉积进行了数值模拟计算,得到颗粒物的沉积运动情况;基于灰色理论,得到颗粒物种类、颗粒物粒径、颗粒物速度对颗粒物沉积的影响。结果表明:通道内颗粒物沉积主要发生在入口阶段,进口段表面为大面积附着沉积,在中段及后段表面为点状沉积;随着轴向距离的加大,湍动能大小是影响颗粒物径向分布的主要因素;颗粒物密度以及粒径的增大会加强颗粒物的沉积;颗粒物速度的增大会降低颗粒物的沉积;对颗粒物沉积的影响程度大小为粒径>种类>速度。

关键词 铅铋快堆, 棒束通道, 颗粒物, 沉积, 灰色关联度

中图分类号 TL333

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070603

Sedimentation movement of particles in liquid lead-bismuth alloy reactor core channel based on grey correlation degree

ZHOU Tao^{1,2,3} TANG Jianyu^{1,2,3} JIANG Yi^{2,4}

1(Department of Nuclear Science and Technology, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

2(Institute of Nuclear Thermal-hydraulic Safety and Standardization, Nanjing 210096, China)

3(National Engineering Research Center of Power Generation Control and Safety, Nanjing 210096, China)

4(School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract [Background] In the international fourth-generation nuclear power system, the lead-bismuth fast reactor is one of the most concerned technologies. However, insoluble particulate matter generated in the flow of liquid lead-bismuth alloys will collect locally in the flow channel and affect the operation of lead-bismuth fast reactors. [Purpose] This study aims to find the motion deposition of particulate matter in the flow channel, understand its influence on the safe operation of small lead-bismuth fast reactors, and provide a reference for the safe design of lead-bismuth reactors. [Methods] Firstly, based on the design scheme of 100 MWth small natural circulation lead cooled fast reactor SNCLFR-100, the particle deposition in the rod bundle channels that were divided into three types according to the relative position and wall conditions: triangle like channels, pentagon like channels and trapezoid

江苏省双创人才(No.JSSCR2021500)、国家重点研发计划重点专项(No.2020YFB1901700)资助

第一作者: 周涛, 男, 1965年出生, 2002年于西安交通大学获博士学位, 研究领域为核能与热能研究, E-mail: 101012636@seu.edu.cn

收稿日期: 2022-10-11, 修回日期: 2023-01-18

Supported by Jiangsu Province Double Innovation Talent Program (No.JSSCR2021500), Nuclear Safety and Advanced Nuclear Energy Technology Key Special Project (No.2020YFB1901700)

First author: ZHOU Tao, male, born in 1965, graduated from Xi'an Jiaotong University with a doctoral degree in 2002, focusing on nuclear and thermal energy research, E-mail: 101012636@seu.edu.cn

Received date: 2022-10-11, revised date: 2023-01-18

like channels, was numerically simulated using ANSYS software, and the particle deposition movement was obtained. Then, the effects of particle type, particle size and particle velocity on particle deposition were obtained on the basis of grey correlation degree theory. Finally, the correlation degree of various factors affecting particle deposition rate was analyzed. **[Results]** The results show that the particle deposition mainly occurs at the inlet stage, the surface of the inlet section is large area adhesion deposition, and the surface of the middle and rear sections is point-like deposition. With the increase of axial distance, the magnitude of turbulent kinetic energy is the main factor affecting the radial distribution of particulate matter. The increase of particle density and particle size will strengthen the deposition of particulate matter. The increase of particle velocity will reduce the particle deposition. The degree of influence on particle deposition is particle size > type > particle velocity. **[Conclusions]** During the operation of lead-bismuth fast reactor, attention should be paid to the deposition of particles in the inlet section and to remove the particles with larger particle size.

Key words Lead-bismuth fast reactor, Rod bundle channel, Particulate matter, Deposit, Grey correlation degree

铅铋快堆作为国际第四代核能系统的优选技术路线之一,具有中子经济性好、嬗变率高、功率密度高等优点;同时,作为冷却剂的铅铋共晶具有传热性能强、抗辐照能力好的特点,这使得铅铋堆的系统组成和配套设施得以简化,相比其他堆型更容易实现小型模块化,成为构建小堆的良好选择。虽然采用铅铋快堆构建小堆具有造价更低、更易建造、更安全灵活的优点,但液态铅铋合金在其流动过程中会对其流经的冷却剂通道产生腐蚀冲刷、腐蚀,以及管道流体加速腐蚀效应,产生的不溶性颗粒物将在冷却剂通道、棒束通道内局部聚集,其沉积效应可能会导致堆芯过热,严重时会导致堆芯熔化^[1]。闫静贤等^[2]利用CFD方法从三维的对流-传质扩散方程出发,研究了铅铋合金流体回路中,腐蚀所产生的颗粒物的沉积情况,并建立了腐蚀模型。王琛等^[3]通过实验和模拟相结合的方式,讨论了液态铅铋流体在管内流动时,不同湍流普朗特数模型和不同湍流模型的选取对计算结果的影响,提出了不同普朗特数下推荐采用的物理模型。周涛等^[4-5]对铅铋流体热工力学及安全特性以及核电中颗粒物运动沉积方法进行了整理,并提出了未来进一步的研究方向。陈娟等^[6]对液态铅铋合金中的金属纳米颗粒的热泳现象进行研究,分析了不同种类的纳米颗粒在液态铅铋中的热泳速度。邹文重等^[7]对注入气体后液态铅铋流动换热特性进行了研究,得到了注入气体后不同条件下液态铅铋的温度与压力分布。阮章顺等^[8]对铅铋快堆燃料包壳材料进行了研究,分析了铅铋合金的温度与氧含量对包壳材料的腐蚀行为。刘鹏等^[9]对铅铋合金系统的膨胀箱内的固态颗粒物运动进行研究,得出铅铋合金中氧化锂颗粒物的运动规律。目前研究工作^[10-13]主要集中于液态铅铋合金的流动换热特性研究及液态铅铋合金与结构材料的相容性研究。而对于液态铅铋合金在小型快堆堆芯棒

束通道内的颗粒物沉积运动研究不足。通过对不溶性粒状腐蚀产物在堆芯燃料棒流域的沉积过程进行计算研究,得到小型铅铋快堆棒束通道内颗粒物沉积运动情况,以便了解其对小型铅铋快堆安全运行的影响,为探究铅铋反应堆安全设计提供参考。

1 研究对象

1.1 几何模型

依据陈钊^[14]的小型模块化自然循环铅铋快堆SNCLFR-100的堆芯设计方案,其燃料组件通道分布如图1所示。

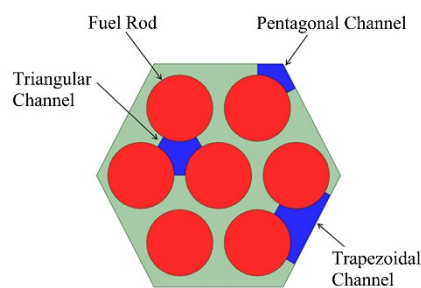


图1 燃料组件模型
Fig.1 Fuel assembly model

从图1可以看出,堆芯燃料组件内部的通道按相对位置和壁面条件分为三种类型:类三角形通道、类五边形通道和类梯形通道。通道长度为400 mm,相邻棒心间距为7 mm,燃料元件外径为6 mm。

1.2 网格划分

使用ANSYS ICEM CFD前处理软件对通道模型进行网格划分,计算区域为单纯的流体域。为保证计算精度,采用六面体结构网格。为适应 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对边界网格进行加密处理,保证 y^+ 值位于30~300,整体网格整体质量0.7以上。通道网格情况如图2所示。



图2 内三角(a)、类五边形(b)和类梯形(c)通道网格划分
Fig.2 Mesh model of triangular channel (a), pentagonal channel (b) and trapezoidal channel (c)

1.3 参数设置

液相选择铅铋合金流体,铅铋合金流体的物性参数选择参考 koji 等^[15]、苏子威等^[16]的研究结果。在实际运行过程中,管道基体材料会氧化脱落^[11]且在液态铅铋合金(Lead-Bismuth Eutectic, LBE)作为

冷却剂材料时常会采用 LiH 与 O₂ 反应来降低氧气含量^[9]。因此,会产生不同种类的颗粒物,综合考虑后选择 Li₂O、PbO、Fe₃O₄ 作为研究对象。由于 LBE 中固态颗粒的溶解与沉积始终处于一种动态平衡过程中,整体颗粒物含量较少且处于稀相,因此,选择进口颗粒物浓度为 1%。相关参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置
Table 1 Parameter settings

名称 Name	参数 Parameter
流体密度 Fluid density / kg·m ⁻³	$\rho=11\ 096-1.323\ 6\ T$
流体定压比热容 Specific heat capacity of fluid at constant pressure / J·(kg·K) ⁻¹	$C_p=159-2.72\times 10^{-2}\ T+7.12\times 10^{-6}\ T^2$
流体热导率 Thermal conductivity of fluids / W·(m·K) ⁻¹	$\lambda=3.61+1.517\times 10^{-2}\ T-1.741\times 10^{-6}\ T^2$
流体动力黏度 Hydrodynamic viscosity / Pa·s	$\eta=4.94\times 10^{-4}\ \exp(754.1/T)$
入口温度 Inlet temperature / K	533
入口流速 Inlet flow velocity / m·s ⁻¹	2~4
壁面热流密度 Wall heat flux / W·m ⁻²	80 000
颗粒直径 Particle diameter / μm	0.5~10

在表 1 中, T 指流体当前的温度, K ; 铅铋流体的密度、定压比热容、热导率、动力黏度均是与温度相关的函数。流体湍流模型选取标准 $k-\epsilon$ 模型, 近壁面处理采用标准壁面函数, 求解方式采用 SIMPLE 算法, 其中压力项采用标准差分方式, 湍动能、动量和能量等均采用二阶迎风差分格式, 这种格式使得计算的速度较快, 同时又具有较好的精度和收敛性; 离散相与流体的耦合计算采用双向耦合方式, 以模拟颗粒物与流场之间的相互影响, 步长采用默认步长。进口边界条件为速度进口, 并作为颗粒物入射面, 出口边界条件为压力出口, 并作为颗粒物出口面; 燃料棒表面边界条件为定热流密度, 组件壁面可认为与相邻壁面温度相同, 不发生传热, 设置为绝热壁面, 对于颗粒物, 壁面为吸收面; 同时编写 UDF 定义颗粒物于壁面的边界条件, 根据颗粒物的临界速度判断其是 trap 还是 reflect。通道中的对称面设置为对称边界条件, 颗粒物浓度采用体积占比来表示。

1.4 网格无关性检验

1) 流体网格无关性验证

为了保证计算网格的独立性以及时间步长的收敛性, 根据 §1.3 的参数设置计算不同网格数量条件下三种管道的出口速度, 得到的结果如图 3 所示。

由图 3 可以得到, 当网格数量大于 450 000 时,

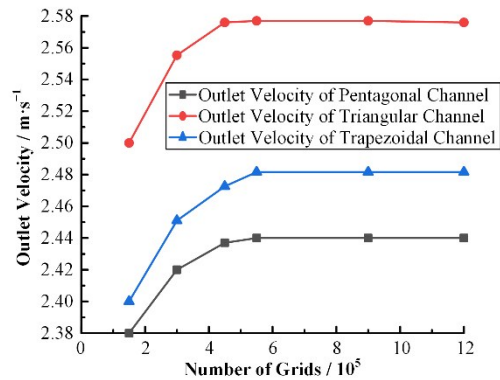


图3 三种通道的出口速度
Fig.3 Outlet velocity of different channels

内通道的流体出口速度几乎保持不变, 当网格数量大于 500 000 时, 角通道的流体出口速度几乎保持不变, 当网格数量大于 550 000 时, 边通道的流体出口速度几乎保持不变。

2) 颗粒物网格无关性验证

根据 §1.3 参数设置, 选取两种不同粒径的颗粒物, 计算在不同网格条件下管道出口浓度, 结果如图 4 所示。

由图 4 可以得到, 对于内通道, 网格数量大于 450 000 时, 不同粒径下出口颗粒物浓度随网格变化较小。对于角通道, 网格数量大于 450 000 时, 不同

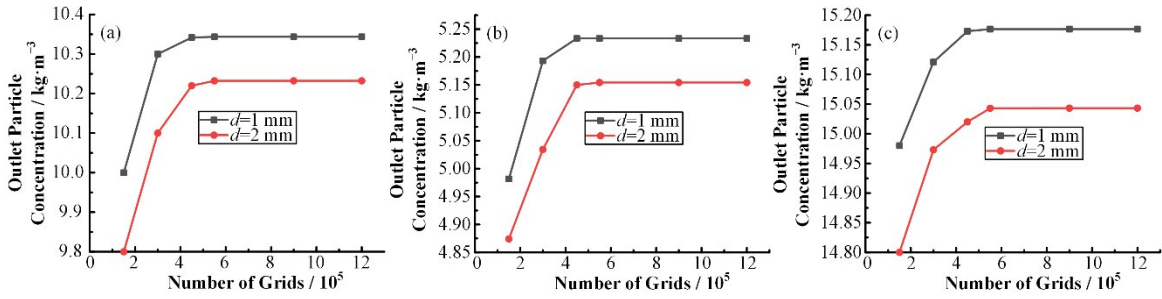


图4 不同粒径三种通道的出口颗粒物浓度 (a) 内通道, (b) 角通道, (c) 边通道
Fig.4 Outlet particle concentration of different channels with different particle sizes
(a) Triangular channel, (b) Pentagonal channel, (c) Trapezoidal channel

粒径下出口颗粒物浓度随网格变化较小。对于边通道, 网格数量大于 550 000 时不同粒径下出口颗粒物浓度随网格变化较小。综合两次验证结果, 考虑计算机运行效率, 确定内通道模型网格节点数为 495 662, 边通道模型网格节点数为 587 894, 角通道模型网格节点数为 506 543。

2 计算模型

2.1 标准 k - ε 模型

标准 k - ε 模型属于二方程模型, 适用于完全湍流状态且分子黏性可以忽略的流动模拟, 是目前工程流场的计算中应用最多、适用范围最广的湍流模型。因此, 模拟选用该模型进行计算。标准 k - ε 模型是以湍动能 k 方程为基础, 通过引入湍动能耗散率 ε 而建立的输运方程。该模型中的 ε 定义为:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (1)$$

湍流黏度 μ_t 可表示成 k 与 ε 的函数:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

标准 k - ε 模型的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \varepsilon \rho - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: μ 为流体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; u_i 为时均速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; G_k 为层流速度梯度产生的湍流动能, $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; G_b 为浮力产生的湍流动能, $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; Y_M 为可压缩湍流中脉动扩张项, $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常量; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 方程和 ε

方程的湍流普朗特数; S_k 和 S_ε 为 k 方程和 ε 方程的用户自定义源项, $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; x_i 、 x_j 、 x_k 是方向坐标; x 、 y 、 z 分别记作 x_1 、 x_2 、 x_3 , 其中 $i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3$; $k=1, 2, 3$ 。

2.2 离散相计算模型

在离散相 (Direct Part Marking, DPM) 中, 流场中颗粒的运动轨迹是通过拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程进行积分得到的, 颗粒的作用力平衡方程可表示为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (5)$$

式中: $F_D(u - u_p)$ 是单位颗粒质量所受到的流体曳力, 其中:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D Re_p}{24} \quad (6)$$

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (7)$$

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{Re_p} + \frac{\alpha_2}{Re_p^2} \quad (8)$$

式中: u 为流体速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; u_p 为颗粒速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_p 为颗粒密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; d_p 为颗粒粒径, m ; C_D 为曳力系数; Re_p 为相对雷诺数; α 为弯管角度; t 为时间, s ; g_x 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; F_x 为其他作用力, $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$, 包括浮力、压力梯度力、附加质量力、沙夫曼力、热泳力、湍流力等。

2.3 湍流普朗特数

因为液态铅铋的特殊性质, 其湍流普朗特数较小, 常规模型不再适合。目前, 针对液态铅铋湍流普朗特数的计算模型有多种, 考虑到定壁面热流密度条件下, Cheng^[17] 提出的湍流普朗特数模型的数值模拟结果与实验数据的吻合度更好。其模型表达为:

$$Pr_t = \begin{cases} 4.12 & (Pe \leq 1000) \\ \frac{0.01Pe}{[0.018Pe^{0.8} - (7 - A)]^{1.25}} & (1000 < Pe \leq 6000) \end{cases} \quad (9)$$

其中：

$$A = \begin{cases} 5.4 - 9 \times 10^{-4} Pe & (100 < Pe \leq 2000) \\ 3.6 & (2000 < Pe \leq 6000) \end{cases} \quad (10)$$

式中： Pr_t 表示湍流普朗特数； Re 表示雷诺数； Pr 是分子普朗特数。

2.4 灰色关联度

灰色关联分析是将因素之间发展趋势的相似或相异程度，作为衡量因素间关联程度的一种方法，并通过建立灰色关联分析模型，来衡量因素间的关联程度大小。

X_0 为参考序列，表示系统中具有行为特征的数据序列； X_i 为比较序列，表示影响系统行为的数据序列。为保证数据处理准确，两种数据序列据需要进行无量纲化处理。这两种数据^[18]均为1-时距序列。比较序列在 j 时刻上的观测数据为 $X_i(j)$ ，可表示为：

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n)) \quad (11)$$

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(n)) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

X_0 和 X_i 在区间 $[k-1, k]$ ，($k=2, 3, \dots, n$)上的斜率所组成的序列号，可表示为：

$$K_0 = (k_{01}, k_{02}, \dots, k_{0(n-1)}) = (x_0(2) - x_0(1), \dots, x_0(n) - x_0(n-1)) \quad (13)$$

$$K_i = (k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{i(n-1)}) = (x_i(2) - x_i(1), \dots, x_i(n) - x_i(n-1)) \quad (14)$$

X_0 和 X_i 在各个对应时段的斜率比值所组成的序列表达式可写为：

$$K_{0i} = (k_{01}/k_{i1}, k_{02}/k_{i2}, \dots, k_{0(n-1)}/k_{i(n-1)}) \quad (15)$$

序列 $K_{0i} = (k_{01}, k_{02}, \dots, k_{0(n-1)})$ 的变异系数表达式可写为：

$$\delta(X_0) = \frac{S_0}{\bar{K}_0} \times 100\% \quad (16)$$

其中：

$$\bar{K}_0 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} k_{0j} \quad (17)$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^{n-1} (k_{0j} - \bar{K}_0)^2} \quad (18)$$

序列 $K_{0i} = (k_{01}/k_{i1}, k_{02}/k_{i2}, \dots, k_{0(n-1)}/k_{i(n-1)})$ 的广义变异系数表达式可写为：

$$\xi(X_0/X_i) = \frac{S_{0i}}{\bar{K}_{0i}} \times 100\% \quad (19)$$

其中：

$$\bar{K}_{0i} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} (k_{0j}/k_{ij}) \quad (20)$$

$$S_{0i} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{k_{0j}}{k_{ij}} - 1 \right)^2} \quad (21)$$

综合以上公式，可得到比较序列 X_i 、参考序列 X_0 的灰色关联度结果，可写为：

$$\gamma(X_0, X_i) = \begin{cases} \frac{1 + |\delta(X_0)|}{1 + |\delta(X_0)| + \xi\left(\frac{X_0}{X_i}\right)} & \bar{K}_{0i} < 0 \\ \frac{1 + |\delta(X_0)|}{1 + |\delta(X_0)| + \xi\left(\frac{X_0}{X_i}\right)} & \bar{K}_{0i} \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

计算序列之间的灰色关联度，应将序列与序列之间的结果当作整体来看待，避免单独的点与点之间的数据对比。考虑到序列之间存在正负相关性，可通过加权平均取绝对值的方式抵消引起的正负行问题。并且最终得到的结果位于 $[-1, 1]$ 之间，根据曹明霞^[19]所得模型， X_0 和 X_i 在每一段的斜率比值接近1，灰色关联度就越大。

3 数值模拟结果及分析

3.1 各通道速度分布

选取流体进口速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，进口温度 533 K ，颗粒物种类为 Fe_3O_4 ，加热段热流密度为 $80000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的工况，各通道轴向速度分布如图5所示，各通道充分湍流段速度分布云图如图6所示。

从图5和图6可以看出，由于流场受到堆芯流域结构的挤压，通道中径向速度的分布整体上沿着中

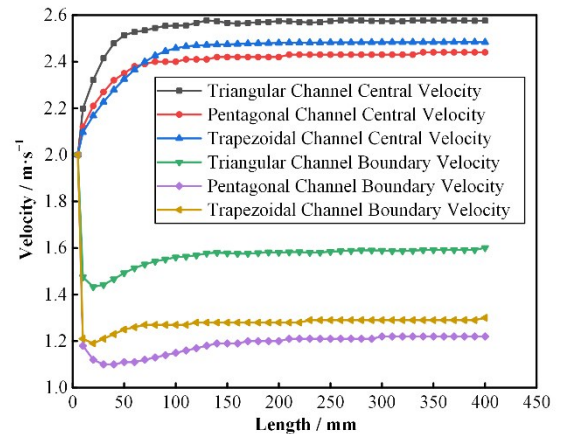


图5 通道轴向速度分布
Fig.5 Axial velocity distribution of channels

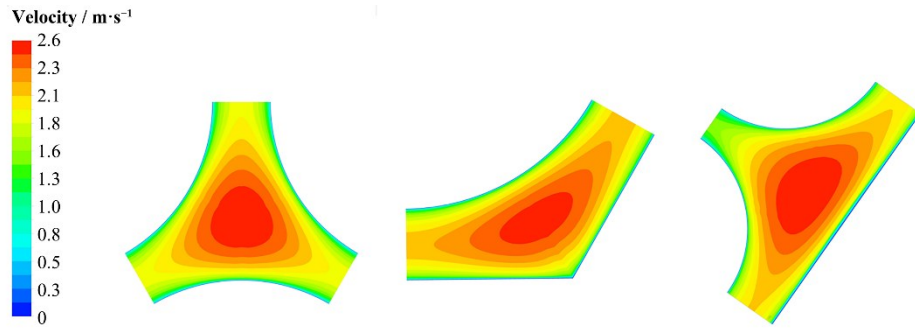


图6 通道速度分布

Fig.6 Velocity distribution in turbulent section of channels

心至壁面梯度呈下降趋势。沿流体流动的方向,通道内流体中心速度逐步增大后趋于稳定,边界速度在进口处快速下降后上升,随后趋于稳定。其原因在于:进口处边界处流体受壁面加热以及自身黏滞力的影响,横向流动较弱,而随着轴向距离的增加,壁面黏滞力的影响逐步向流体内部传递,边界层增厚转变为湍流边界层,流体的脉动强化了动量传递,

使得速度的变化变得平缓。

3.2 通道湍动能分布

选取流体进口速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 进口温度 533 K , 颗粒物种为 Fe_3O_4 , 加热段热流密度为 $80\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的工况, 各通道轴向 1 mm 、 200 mm 、 399 mm 处的铅铋合金湍动能分布如图7所示。

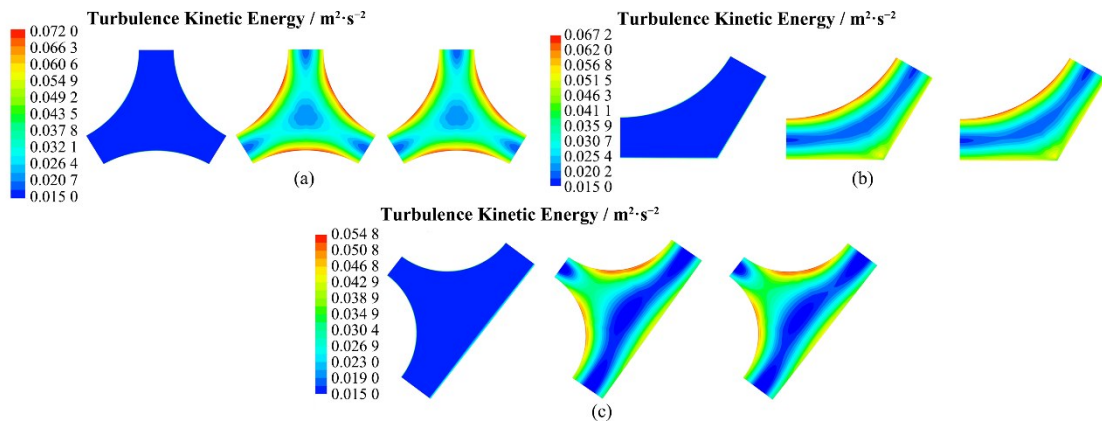


图7 内三角形通道(a)、类五边形通道(b)、类梯形通道(c)湍动能分布

Fig.7 Triangular channel (a), pentagonal channel (b), trapezoidal channel (c) turbulent kinetic energy distribution

从图7可以看出,类三角形通道的湍动能呈中心对称分布,谷值出现在流域和对称面中部,类五边形通道和类梯形通道流域中部的湍流速度涨落较小,从而出现湍动能谷值。从图7中还可以看出,湍动能的峰值出现在燃料棒外表面近壁面区域,产生该现象的原因是湍流边界层内的速度呈现的脉动特性使得近壁面流体的速度涨落较大,导致湍流强度增强。

3.3 颗粒物浓度分布

3.3.1 轴向颗粒物分布

选取流体进口速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 进口温度 533 K , 颗粒物种为 Fe_3O_4 , 加热段热流密度为 $80\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的工况, 探测点为距离加热壁面 0.1 mm 的位置处, 各通道内颗粒物轴向浓度分布如图8所示。

从图8可以看出,三种通道内颗粒物的变化趋

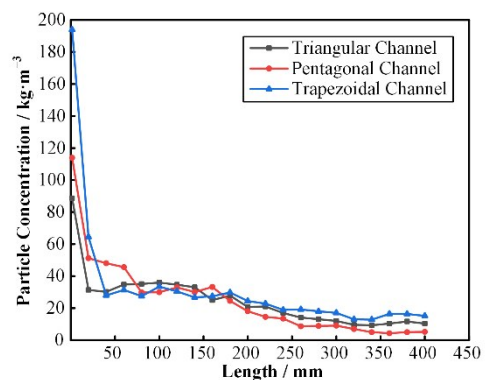


图8 轴向颗粒物浓度变化

Fig.8 Variation of particle concentration distribution in streamline direction

势趋于一致,随着轴向距离的加大,管道中颗粒物的浓度在入口处先迅速下降,并在管道中后部逐步趋于稳定。表明通道内颗粒物的沉积主要发生在入口

阶段。原因在于湍流分为湍流核心区和湍流边界层，湍流边界层又可分为过渡区和黏性底层两个流动区，颗粒物的沉积需要经过三个流动区。在湍流核心区，颗粒物容易向壁面运动，并进入到过渡区，而过渡区的颗粒物需要具有足够惯性，才能穿过过渡区进入黏性底层并在该区域形成运动与沉积的动态平衡。此时颗粒物是否沉积与其受力大小相关。在入口处，近壁面流体速度梯度大，越靠近壁面流体的速度越低，颗粒物的流场跟随性也随之减弱，使得颗粒物在入口处大量沉积。而随着流体湍流强度逐步增强，附壁层减薄，近壁面湍动能逐步增大使得颗粒物平均速度加大、不规则运动加剧，受湍流扩散作用克服惯性力而向着中心富集。

3.3.2 径向颗粒物分布

选取流体进口速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，进口温度 533 K ，颗

粒物种类为 Fe_3O_4 ，加热段热流密度为 $80\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的工况，探测点为通道轴向距离 240 mm 位置处，各通道内颗粒物径向浓度分布如图 9 所示。

从图 9 可以看出，在湍流充分发展段，湍动能的大小是影响颗粒物浓度分布的主要因素，湍动能的分布与颗粒物浓度分布成反比关系。颗粒物浓度的谷值出现在燃料棒的近壁面附近，这是由于燃料棒的近壁面附近流体的湍动能涨落较大，不利于颗粒物沉积。

3.3.3 壁面颗粒物分布

选取流体进口速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，进口温度 533 K ，加热段热流密度为 $80\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，颗粒物种类为 Fe_3O_4 的工况，各通道壁面颗粒物浓度分布如图 10 所示。

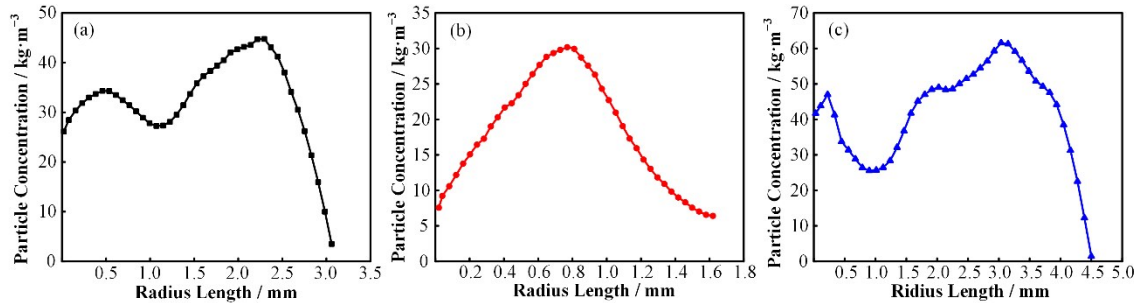


图 9 径向颗粒物浓度变化 (a) 类三角形通道, (b) 类五边形通道, (c) 类梯形通道

Fig.9 Variation of particle concentration distribution in radius location
(a) Triangular channel, (b) Pentagonal channel, (c) Trapezoidal channel

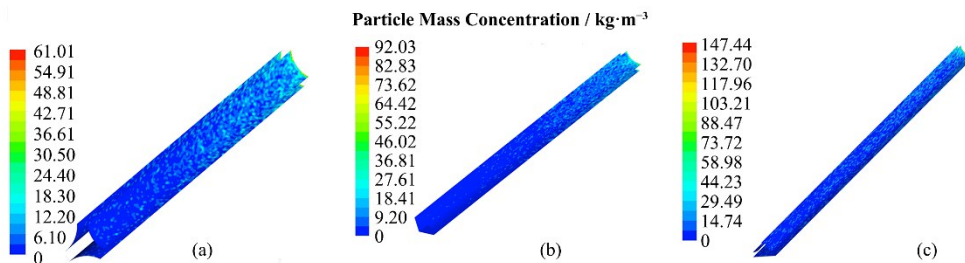


图 10 通道壁面颗粒物浓度分布 (a) 类三角形通道, (b) 类五边形通道, (c) 类梯形通道

Fig.10 Particle concentration distribution in channel wall

(a) Triangular channel, (b) Pentagonal channel, (c) Trapezoidal channel

从图 10 可以看出，随着管道长度的增加，各通道的颗粒物沉积规律类似，表现为在进口段燃料棒表面发生大面积附着沉积现象，中段及后段以点状沉积现象为主。在包壳表面点状沉积区域会出现包壳点蚀现象，点蚀区域也会引起局部传热恶化，破坏包壳完整性；大面积附着沉积会改变包壳材料的热导率和堆芯中子通量分布，引起堆芯轴向功率偏移。

3.3.4 颗粒物种类对沉积率的影响

选取流体进口速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，进口温度 533 K ，加热段热流密度为 $80\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的工况，颗粒物种类

选取 PbO 、 Li_2O 、 Fe_3O_4 ，粒径 $2 \mu\text{m}$ 。通过模拟计算，不同通道内颗粒物沉积率如图 11 所示。

从图 11 可以看出，不同通道内沉积率变化趋势相同，颗粒物沉积率随着颗粒物的密度而增大，原因在于较大密度颗粒物的单位质量较大，惯性较大，造成流场跟随性弱。从图 11 还可以看出，颗粒物的沉积率随着通道当量直径的减小而增大。原因在于管道的当量直径越大，管道主流流场的速度分布较均匀，湍流度较小，颗粒物在流体中的跟随性较好，沉积率更低。这与朱亮宇等^[20]得到的颗粒物沉积率随管道直径的变化趋势一致。

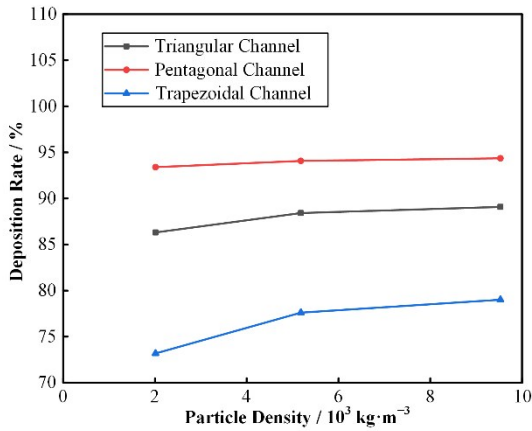


图 11 颗粒物沉积率随颗粒物种类的变化关系
Fig.11 Relationship between particle deposition rate and particle type

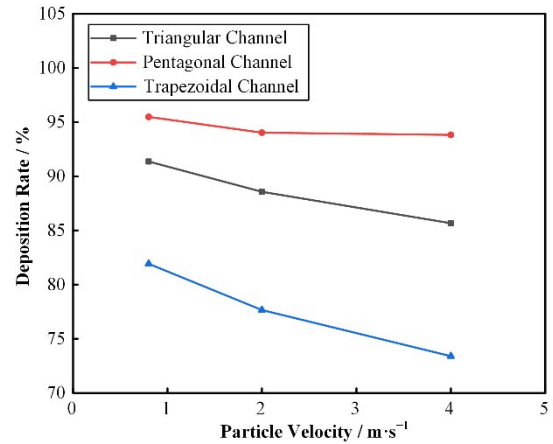


图 13 颗粒物沉积率随颗粒物速度的变化关系
Fig.13 Relationship between particle deposition rate and particle velocity

3.3.5 颗粒物粒径对沉积率的影响

选取流体进口速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 进口温度 533 K , 加热段热流密度为 $80\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的工况, 颗粒物种类选取 PbO , 粒径选取 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 。通过模拟计算, 不同通道内颗粒物沉积率如图 12 所示。

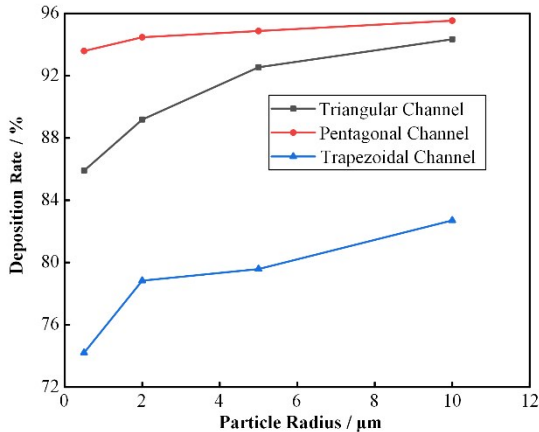


图 12 颗粒物沉积率随颗粒物粒径的变化关系
Fig.12 Relationship between particle deposition rate and particle size

从图 12 可以看出, 不同通道内沉积率变化趋势相同, 颗粒物沉积率随着颗粒物的粒径增大而增大。原因在于流速一定的情况下, 粒径越大的颗粒会导致单颗粒的质量增大, 流场跟随性变弱, 越容易在进口处发生沉积。

3.3.6 进口速度对沉积率的影响

选取进口温度 533 K , 加热段热流密度为 $80\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 颗粒物种类为 Fe_3O_4 , 粒径 $2 \mu\text{m}$ 的工况, 分别设置流体进口速度为 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 通过模拟计算, 不同通道内颗粒物沉积率如图 13 所示。

从图 13 可以看出, 不同通道内沉积率变化趋势

相同, 颗粒物沉积率随着流体流速的增大而降低。原因在于流速增大使得颗粒物受到的切应力增大, 导致原来低速条件下沉积在壁面的颗粒物脱离管壁, 降低了壁面附近的颗粒物浓度。颗粒物在通道内的沉积容易导致传热恶化, 上述结果表明: 增大铅铋的流速, 有利于回路的正常安全运行。

3.3.7 各参数对颗粒物沉积的灰色关联度分析

利用灰色关联度分析在其余条件相同时颗粒物种类、颗粒物浓度、进口速度对颗粒物沉积的影响程度。沉积率为管道中沉积的颗粒物与所有颗粒物之比, 以沉积率作为目标参数, 颗粒物种类、颗粒物浓度、进口速度作为影响参数。关联度分辨系数分别选择 0.5 、 0.3 、 0.1 进行计算, 结果如图 14 所示。

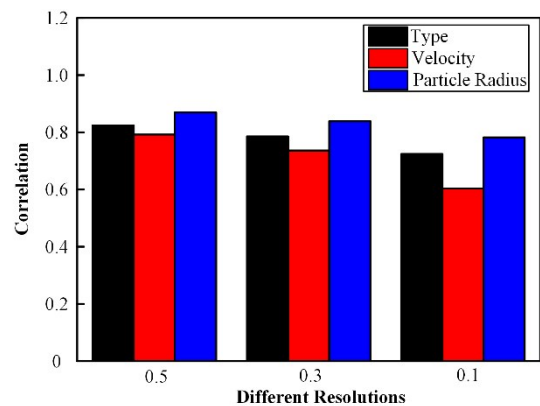


图 14 影响颗粒物沉积率的各因素关联度
Fig.14 Correlation degree of various factors affecting particle deposition rate

从图 14 可以看出, 选取的分辨率与各因素之间的关联度大小呈负相关, 同时关联度的大小也受分辨率的影响。其中, 粒径跟沉积率的关联程度最大, 即两者关系最为密切; 其次, 颗粒物种类跟沉积率的关联程度较小; 最后, 速度跟沉积率的关联程度最

小。这是因为随着颗粒物粒径的增大,受重力的影响开始增大。而对于较大粒径的颗粒物而言,重力是最主要的沉积影响因素,因而关联程度最大。颗粒物种类主要受颗粒物自身密度的影响,即相同粒径下不同颗粒质量不同所受重力不同。但由于颗粒物尺寸较小,不同颗粒物间的质量差别不大,因而关联度较小。流体速度会对颗粒物有一个携带作用,形成切应力,在速度相差不是十分大时,相比重力对颗粒物的沉降影响来说较小,因而关联度最小。

4 结语

通过对铅铋快堆棒束通道中细颗粒物运动沉积的计算,得到铅铋快堆棒束通道内颗粒物的沉积运动情况。并分析了不同颗粒物种类、颗粒物粒径、颗粒物速度对颗粒物沉积运动的影响,并利用灰色关联度分析法分析比较各参数对颗粒物沉积的影响程度大小。

1)反应堆堆芯流道内颗粒物的沉积主要发生在入口阶段,具体表现为进口段大面积附着沉积,中段及后段以点状沉积为主;随着轴向距离的加大,湍动能大小是影响颗粒物径向分布的主要因素。

2)颗粒物密度的增大会加强子通道内颗粒物的沉积情况。颗粒物的密度增大使得颗粒物的单位质量增大,造成流场跟随性变弱,更容易沉积。

3)颗粒物粒径的增大会加强颗粒物的沉积情况。颗粒物粒径的增大使得单颗粒的质量增大,流场跟随性变弱,越容易在进口处发生沉积。

4)初始颗粒物进口速度的增大会降低颗粒物的沉积情况。颗粒物进口速度增大使得颗粒物受到的切应力增大,导致原来低速条件下沉积在壁面的颗粒物脱离管壁,降低了壁面附近的颗粒物浓度。增大铅铋的流速有利于回路的正常安全运行。

5)对颗粒物沉积的灰色关联度大小为粒径>种类>速度。其中,颗粒物速度对颗粒物沉积影响程度最小,颗粒粒径影响最大。

作者贡献声明 周涛负责提出设计和研究思路,实施研究方案,对文章的知识性内容作批评性审阅,获取研究经费,指导;唐剑宇负责实施研究,采集数据,分析计算/解释数据,文章部分起草和修改;蒋屹负责实施研究,采集数据,计算/解释数据,文章部分起草。

参考文献

1 杨旭,周涛,方晓璐,等. 铅铋共晶合金流动传热特性及不溶性腐蚀产物沉积特性数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(8): 1386 - 1392. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.

08.1386.

YANG Xu, ZHOU Tao, FANG Xiaolu, *et al.* Numerical simulation of heat-transfer and insoluble corrosion product deposition in lead-bismuth eutectic alloy[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(8): 1386 - 1392. DOI: 10.7538/yzk.2015.49.08.1386.

2 闫静贤,赵平辉,李远杰. 基于CFD方法对液态铅铋合金回路中腐蚀及腐蚀产物沉积的研究[J]. 核科学与工程, 2022, 42(4): 785 - 791. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2022.04.007.

YAN Jingxian, ZHAO Pinghui, LI Yuanjie. Study on corrosion product deposition in liquid lead-bismuth alloy loop by the CFD method[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(4): 785 - 791. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2022.04.007.

3 王琛,王成龙,张衍,等. 液态铅铋合金管内流动传热特性研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(5): 822 - 828. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0356.

WANG Chen, WANG Chenglong, ZHANG Yan, *et al.* Investigation on flow heat transfer characteristic of lead-bismuth eutectic alloy[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(5): 822 - 828. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0356.

4 周涛,漆天,陈娟,等. 铅铋流体热工力学及安全特性研究进展[J]. 核科学与工程, 2021, 41(6): 1105 - 1118. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2021.06.002.

ZHOU Tao, QI Tian, CHEN Juan, *et al.* Study progress on thermal mechanics and safety characteristics of lead bismuth fluid[J]. Nuclear Science and Engineer, 2021, 41(6): 1105 - 1118. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2021.06.002.

5 周涛,李子超,李兵,等. 核电运行及事故颗粒物运动沉积分析方法研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2019, 49(11): 24 - 46. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00236.

ZHOU Tao, LI Zichao, LI Bing, *et al.* Study on the method of nuclear power operation and analysis of movement and deposition of accident particles[J]. Scientia Sinica - Physica Mechanica & Astronomica, 2019, 49(11): 24 - 46. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00236.

6 陈娟,周涛,方晓璐,等. 液态铅铋共晶合金中纳米颗粒的热泳运动研究[J]. 核科学与工程, 2017, 37(2): 223 - 228. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2017.03.009.

CHEN Juan, ZHOU Tao, FANG Xiaolu, *et al.* Research of nanoparticles' thermophoresis movement in liquid lead-bismuth eutectic alloy[J]. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(2): 223 - 228. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2017.03.009.

7 邹文重,周涛,苏子威,等. 注气对铅铋流动换热参数影

- 响的数值研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2013, **33**(2): 187 - 192. DOI: [10.16568/j.0254-6086.2013.02.013](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.2013.02.013).
- ZOU Wenzhong, ZHOU Tao, SU Ziwei, *et al.* Numerical simulation of the impact gas injection on the lead-bismuth liquid flow and heat transfer parameters[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2013, **33**(2): 187 - 192. DOI: [10.16568/j.0254-6086.2013.02.013](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.2013.02.013).
- 8 阮章顺, 秦博, 付晓刚, 等. 燃料元件包壳材料 CN-1515 不锈钢在可控氧铅铋环境下的腐蚀行为[J]. 原子能科学技术, 2021, **55**(5): 901 - 908. DOI: [10.7538/yzk.2020.youxian.0332](https://doi.org/10.7538/yzk.2020.youxian.0332).
- RUAN Zhangshun, QIN Bo, FU Xiaogang, *et al.* Corrosion behavior of fuel cladding material CN-1515 stainless steel in lead-bismuth eutectic alloy with oxygen control[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, **55**(5): 901 - 908. DOI: [10.7538/yzk.2020.youxian.0332](https://doi.org/10.7538/yzk.2020.youxian.0332).
- 9 刘鹏, 杜晓超, 洪锋, 等. 液态金属中固态颗粒物运动特性的数值模拟[J]. 核技术, 2020, **43**(3): 030503. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030503](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030503).
- LIU Peng, DU Xiaochao, HONG Feng, *et al.* Numerical simulation of motion characteristics of solid particles in liquid metal[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(3): 030503. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030503](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030503).
- 10 苏子威. 铅铋流动界面特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- SU Ziwei. Research on interface characteristics of liquid lead-bismuth eutectic flow[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- 11 杜晓超, 刘帅, 刘鹏, 等. 基于DPM模型的铅铋合金中颗粒物对管道冲蚀的数值模拟研究[J]. 核动力工程, 2021, **42**(1): 48 - 53. DOI: [10.13832/j.jnpe.2021.01.0048](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.01.0048).
- DU Xiaochao, LIU Shuai, LIU Peng, *et al.* Numerical simulation of pipeline erosion of particulate matter in LBE based on DPM model[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, **42**(1): 48 - 53. DOI: [10.13832/j.jnpe.2021.01.0048](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.01.0048).
- 12 陈钢, 雷玉成, 鞠娜, 等. 铅铋共晶合金的流动速度对 CLAM 钢腐蚀行为的影响[J]. 材料导报, 2019, **33**(22): 3772 - 3776. DOI: [10.11896/cldb.18110053](https://doi.org/10.11896/cldb.18110053).
- CHEN Gang, LEI Yucheng, JU Na, *et al.* Corrosion behavior of CLAM steel in various flow velocities of Pb-Bi eutectic alloy[J]. Materials Reports, 2019, **33**(22): 3772 - 3776. DOI: [10.11896/cldb.18110053](https://doi.org/10.11896/cldb.18110053).
- 13 廖庆, 李炳生, 葛芳芳, 等. T91 钢和 SIMP 钢表面 AlO_x 涂层在 600 °C 静态液态铅铋共晶中的稳定性和腐蚀行为[J]. 物理学报, 2022, **71**(15): 218 - 228. DOI: [10.7498/aps.71.20220356](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220356).
- LIAO Qing, LI Bingsheng, GE Fangfang, *et al.* Stability and corrosion behavior of AlO_x coating on T91 steel and SIMP steel in static liquid Pb-Bi eutectic at 600 °C [J] Acta Physica Sinica, 2022, **71**(15): 218 - 228. DOI: [10.7498/aps.71.20220356](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220356).
- 14 陈钊. 小型自然循环铅冷快堆 SNCLFR-100 热工水力设计与安全分析研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- CHEN Zhao. Thermal-hydraulics design and safety analysis of a 100 MWth small natural circulation lead cooled fast reactor SNCLFR-100[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- 15 Morita K, Maschek W, Flad M, *et al.* Thermophysical properties of lead-bismuth eutectic alloy in reactor safety analyses[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2006, **43**(5): 526 - 536. DOI: [10.1080/18811248.2006.9711131](https://doi.org/10.1080/18811248.2006.9711131).
- 16 苏子威, 周涛, 邹文重, 等. 液态铅铋合金热物性程序开发研究[J]. 电力学报, 2013, **28**(4): 336 - 340. DOI: [10.13357/j.cnki.jep.002258](https://doi.org/10.13357/j.cnki.jep.002258).
- SU Ziwei, ZHOU Tao, ZOU Wenzhong, *et al.* Thermophysical properties program development of liquid lead-bismuth eutectic[J]. Journal of Electric Power, 2013, **28**(4): 336 - 340. DOI: [10.13357/j.cnki.jep.002258](https://doi.org/10.13357/j.cnki.jep.002258).
- 17 Cheng X, Tak N. Investigation on turbulent heat transfer to lead-bismuth eutectic flows in circular tubes for nuclear applications[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, **236**(4): 385 - 393. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2005.09.006](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2005.09.006).
- 18 刘思峰, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2004: 48 - 53.
- LIU Sifeng, DANG Yaoguo. Grey system theory and its application[M]. 3rd Ed. Beijing: Science Press, 2004: 48 - 53.
- 19 曹明霞. 灰色关联度模型正负性问题的研究及其改进[J]. 系统工程与电子技术, 2008, **30**(6): 1086 - 1088. DOI: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.06.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.06.020).
- CAO Mingxia. Study and improvement on properties of positive and negative of grey incidence degree model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, **30**(6): 1086 - 1088. DOI: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.06.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.06.020).
- 20 朱亮宇, 周涛, 秦雪猛, 等. 不同尺寸管道中细颗粒的沉积运动规律研究[J]. 核科学与工程, 2019, **39**(5): 695 - 700. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2019.05.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2019.05.004).
- ZHU Liangyu, ZHOU Tao, QIN Xuemeng, *et al.* Study on sedimentation movement of fine particles in pipelines of different sizes[J]. Nuclear Science and Engineering, 2019, **39**(5): 695 - 700. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2019.05.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2019.05.004).