

改进粒子法在钠冷快堆熔融物水力学 破碎行为中的数值模拟

王文鹏¹, 张斌^{1,2}, 曹胜¹, 任前永¹, 单建强^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了进一步研究钠冷快堆堆芯熔融物水力学射流破碎过程中的关键影响因素, 深入分析熔融物射流破碎形态、穿透深度和破碎机理, 基于改进最小二乘移动粒子半隐式方法, 对熔融物射流在冷却剂钠中的破碎行为进行了模拟。首先, 通过将模拟结果与已有实验数据对比, 验证了该方法的适用性和可靠性; 其次, 将该方法应用于研究金属熔融物与冷却剂钠之间的相互作用, 对熔融物射流的破碎过程进行了数值模拟, 得到了大量数值实验结果; 最后, 基于模拟实验结果, 发现在低 Weber 数下, 射流前端瑞利-泰勒不稳定性主导破碎, 在高低 Weber 数下, 射流破碎主要是由射流侧表面上开尔文-亥姆霍兹不稳定性引发的波状剥离机制驱动, 分析了射流直径和射流初始速度等参数对射流破碎长度的影响, 拟合出针对冷却剂钠的破碎长度关联式, 并与实验值和其他模型结果进行了验证, 误差控制在 $\pm 30\%$ 以内, 从而建立了新的射流破碎模型。研究工作可为钠冷快堆压力容器改进设计提供参考, 同时, 对于评价钠冷快堆堆芯熔融物射流对反应堆压力容器的潜在影响具有重要意义。

关键词: 钠冷快堆; 射流破碎长度; 最小二乘移动粒子半隐式法

中图分类号: TL364.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202504012 **文章编号:** 0253-987X(2025)04-0128-11

Numerical Simulation of Hydrodynamic Crushing Behavior of Melting Materials in Sodium-Cooled Fast Reactors Based on the Improved Moving Particle Semi-Implicit Method

WANG Wenpeng¹, ZHANG Bin^{1,2}, CAO Sheng¹, REN Qian Yong¹, SHAN Jianqiang^{1,2}

(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: To further investigate the key influencing factors during the jet crushing process of the core meltdown material in sodium-cooled fast reactors and deeply analyze the jet crushing morphology, penetration depth, and crushing mechanism, a numerical simulation of the crushing behavior of the meltdown material jet in sodium coolant is carried out based on an improved least-squares moving particle semi-implicit method. Firstly, the applicability and reliability of this method are validated by comparing the simulation results with existing experimental data. Secondly, this method is employed to study the interaction between molten metal and sodium coolant, and

numerical simulations of the jet crushing process of the meltdown material jet are conducted, yielding a large amount of numerical experimental results. Finally, based on the simulation results, it is observed that at low Weber numbers, the Rayleigh-Taylor instability at the jet front dominates the crushing process, while at both high and low Weber numbers, the jet crushing is primarily driven by the wave-like peeling mechanism induced by the Kelvin-Helmholtz instability on the lateral surface of the jet. The effects of parameters such as jet diameter and initial velocity on jet breakup length are analyzed, and a correlation formula for the crushing length in sodium coolant was fitted, validated against experimental values and other model results, with errors controlled within $\pm 30\%$, thus establishing a new jet crushing model. This research can provide valuable references for improving the design of sodium-cooled fast reactor pressure vessels and holds significant importance for evaluating the potential impact of core meltdown material jets on reactor pressure vessels in sodium-cooled fast reactors.

Keywords: sodium-cooled fast reactor; jet-breakup length; least squares moving particle semi-implicit method

为了确保钠冷快堆的安全,实现熔融堆芯材料在假定的堆芯损毁事故(CDAs)中堆内滞留(IVR)是至关重要的^[1]。根据堆芯损毁事故可能发生的情况,熔融堆芯材料在重定位阶段通过控制棒导管排入下腔室,有可能对下部结构施加巨大的热载荷,从而导致反应堆压力容器失效,直接影响堆内滞留^[2]。如果熔融物射流不发生射流破碎行为直接击中内部结构,可能会威胁到反应堆容器的完整性,从而威胁到安全壳的完整性。然而,如果在熔融堆芯材料到达下方结构之前,熔融堆芯材料被很好地破碎成更小的碎片,那么这种热负荷应该通过熔融堆芯材料的强化淬火显著降低。因此,评估熔融堆芯材料的射流破碎长度对钠冷快堆安全至关重要^[3]。

为了更深入地理解和评估熔融物射流破碎现象,进行了多项使用钠作为冷却剂的实验研究,一些机构使用金属熔融物和钠进行的 FCI 现象的实验,这些实验主要针对钠冷快堆。在 JRC 的 BETULLA 设施进行的实验中^[4],将不锈钢和铜熔融物注入钠池。ANL 进行了将金属熔融物注入钠池的实验^[5],并使用 X 光照片将测试部分底部的碎片可视化。电力工业中央研究所(CRIEPI)为钠冷快堆开展了一项使用金属燃料的实验^[6-7],重点研究了凝固效应对 FCI 现象的影响,JAEA 进行了一项将铝熔体注入钠中的实验^[8],用 X 射线观察了钠中的熔融射流。然而,由于钠不透明,在这些实验研究中无法直接观察到射流的破裂形态和机理。因此,可视化实验采用水作为冷却剂^[9-12],并使用各种金属或金属氧化物作为堆芯熔融物进行了研究,在这些实验中可以通过高速相机捕捉到射流断裂的细节。通过对

这些高速摄像机图像进行分析,分析射流断裂过程中的形态、前端速度、射流破碎长度以及机理。然而,考虑到射流动力学受到冷却剂有效密度显著影响^[13],因此可视化实验得出的结论并不能直接应用于钠冷却剂系统。

在这种情况下,计算流体动力学方法更有助于更好地了解射流破碎现象^[14-15]。其中移动粒子半隐式(MPS)方法是一种拉格朗日方法,已被证明适用于具有多组分相间界面的不可压缩流动的模拟^[16-17]。然而,由于传统 MPS 方法存在不稳定和计算精度低等问题,自由表面的变形往往被夸大。此外,在存在较大速度差的流场中,射流液柱与冷却剂之间经常会出现非物理空穴,同时,因为粒子法的计算时效性,往往计算较大工况时计算效率较低。因此,本文对 MPS 方法进行了改进,优化了精度和稳定性,并基于 GPU 进行了并行加速,提高了粒子法的计算效率。模拟结果的自由面与实验值接近,能够较好地模拟射流液柱与冷却剂之间的相互作用。

本文采用改进的 MPS 方法模拟了二维熔融物射流在冷却剂钠中的水力学破碎过程,通过将模拟结果与参考实验结果进行比较,验证了该方法的适用性和可靠性,并将其应用于金属熔融物与冷却剂钠相互作用中熔融物射流破碎的研究。在模拟结果的基础上,通过对破碎形态进行分析,分析了描述破碎形态的射流直径和射流初始速度等参数对射流破碎长度的影响,并拟合得到冷却剂钠系统中破碎长度关联式及破碎模型。

1 数值方法

1.1 控制方程及离散方法

对于黏性不可压缩流体,连续性方程和动量守恒方程为

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \mathbf{f} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; t 为时间, s ; $\mathbf{u}$ 为速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; p 为压力, Pa ; ν 为运动黏度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\mathbf{f}$ 为除重力加速度外的合外力加速度, 如表面张力, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; $\mathbf{g}$ 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

本文采用修正后的 MPS 模型,应用最小二乘移动粒子半隐式方法(LSMPS),采用任意高阶精度无网格离散格式^[18],通过泰勒展开式推导,使用二阶校正矩阵,提高计算精度。

1.2 边界条件

为了更精确地识别自由表面粒子,采用一种基于几何特征的检测方法^[19],在该几何模型中,被检测粒子定义为光源,在被检测粒子周围区域定义为虚拟屏幕,虚拟屏幕划分为 N_v 个象限,如图1所示,可以找到邻近粒子的阴影段 $\theta_{i,j}$, i, j 为中心粒子和作用域内邻近粒子,从而更加清晰的判断自由表面粒子

$$\theta_{i,j} = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right) \quad (3)$$

$$\Delta\theta_{i,j} = \frac{360}{\pi} \arctan\left(\frac{0.5l_0}{|\mathbf{r}_{ij}|^2 - (0.5l_0)^2}\right) \quad (4)$$

计算所有相邻粒子,并得到阴影段的数量

$$\phi = 1 - \frac{N_s}{N_v} \quad (5)$$

式中: N_s 为相邻粒子阴影段的总数。当 $\phi > 1/6$ 的粒子判断为自由表面粒子 l_0 是初始粒子间距。

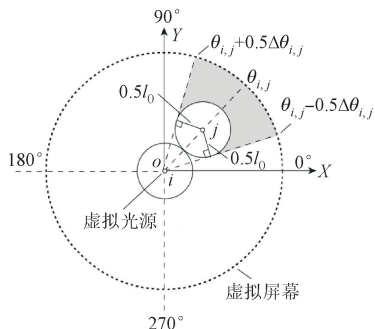


图1 虚拟光源表面检测算法示意图

Fig. 1 Surface detection algorithm using a virtual light source

同时,为了避免在高阶精度计算过程中部分拉格朗日粒子的分布不均匀,采用粒子移动优化方法^[20],具体的计算如下

$$\delta \mathbf{r}_i = -\lambda_{sh} (\Delta l)^2 (\mathbf{I} - \mathbf{n}_i \otimes \mathbf{n}_i) \nabla D_i \quad (6)$$

式中: λ_{sh} 为常数参量; Δl 为粒子间初始距离; D_i 为扩散浓度。

1.3 表面张力模型

表面张力对自由表面和不同组分界面的变形和迁移至关重要。在改进 MPS 方法中,表面张力计算常采用文献[21]提出的连续表面张力(CSF)模型,该模型将表面张力转化为表面粒子上的体积力,计算公式如下

$$\mathbf{F}^s = -\sigma \kappa \nabla C \quad (7)$$

式中: σ 为表面张力系数; κ 为界面曲率; C 为颜色函数。

粒子颜色函数的定义为

$$c_i = \frac{\sum_j w_{ij}}{n^*} \quad (8)$$

式中: w_{ij} 为权重函数; n^* 为临时粒子数密度。

界面曲率的计算式为

$$\kappa = -\nabla \left(\frac{\nabla C}{|\nabla C|} \right) \quad (9)$$

1.4 GPU 并行加速

本文的 LSMPS 程序基于 Fortran 语言开发,应用 OpenACC 对代码进行并行处理^[22],通过在每次迭代之前添加并行“parallel loop”来实现并行化。在并行计算过程中,高效的数据管理是优化并行效率的关键,为了减少数据传输时间,相比于之前的串行计算,GPU 为所有全局变量分配了专用的内存空间,不用单独申请内存进行数据交互。这些全局变量的定期更新仅在 GPU 内进行,以防止不必要的数据传输。本文程序在 Linux 上使用 NVIDIA HPC SDK 23.11 编译器进行编译。性能测试是在安装第 12 代 Intel®Core™i5-12500 处理器(32GB DDR-3200 内存)和 NVIDIA RTX 4090 GPU (16384 CUDA 内核)的台式机上进行的。同时分析了不同粒子数下静压条件下的测试案例,包括了黏性力和表面张力的计算,对比了串行计算与并行计算及加速比,其中加速比为串行时间比并行时间,如图2所示,计算时间为1000步的持续时间,并行计算大幅提升了计算效率和加速比。

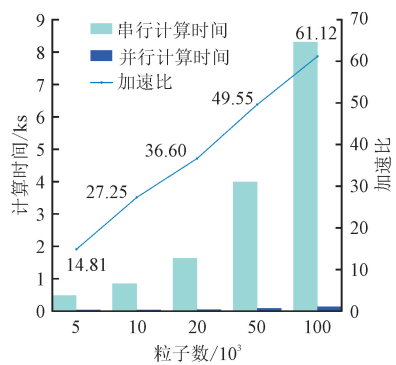


图 2 不同粒子数下的加速比和计算时间

Fig.2 Acceleration ration and calculation time under different particle numbers

2 数值计算模型验证

将使用粒子法的熔融物射流破碎的模拟结果与

参考实验^[11]进行对比。图 3 为熔融物射流计算粒子布置图,为了消除壁面效应,初始工况宽度为射流直径的 25 倍,计算流场深度为射流直径的 50 倍。本文主要以水力学破碎作为射流破碎的主要机制,选用的参考实验^[11]中,将 100 ℃ 的伍德金属射入装有 25 ℃ 水的水箱中,射流形态由高速摄像机捕获。在实验中没有观察到明显的汽泡,可以忽略冷却剂汽化作用,因此可以在数值计算中采用等温条件来简化模拟。实验材料参数如表 1 所示,水和工作温度下的液态钠密度与黏度相近,伍德合金与水之间的密度比接近二氧化铀和钠之间的密度比,因此在适用于研究运动特性而忽略传热特性的熔融物水力学破碎行为。选取参考实验工况中射流直径为 10 mm,射流速度为 1.40 m/s。

表 1 实验材料物性参数

Table 1 Property parameters of experiment materials

参数	数值			
	伍德合金	水	二氧化铀	钠
密度/(kg·m ⁻³)	9 400	978	8 756	869
熔点/℃	70	0	3 000	400
动力黏度/(m ² ·s ⁻¹)	1.91×10 ⁻⁷	4.13×10 ⁻⁷	7.41×10 ⁻⁷	3.24×10 ⁻⁷
表面张力/(N·m ⁻¹)	0.430	0.072	0.484	0.177
密度比	9.61	9.61	10.07	10.07

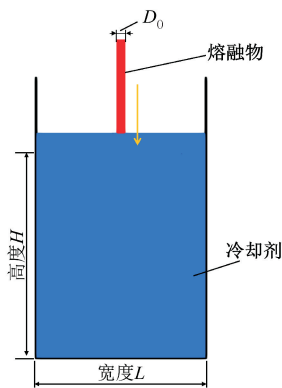


图 3 熔融物射流数值计算区域

Fig.3 Numerical calculation region of melt jet flow

图 4 给出了实验和改进前^[23]及改进后 MPS 方法数值模拟射流穿透深度与时间的关系,图 5 给出了实验和改进后 MPS 方法数值模拟射流前端与时间的关系,模拟结果与实验结果吻合较好。图 4 中改进前的 MPS 方法模拟的射流穿透速度整体上小于实验值,且射流穿透深度与参考实验值的偏差随着时间逐渐增大,最大相对误差大于 10%,并呈继

续增大趋势。然而,改进后 MPS 方法模拟的射流穿透速度在 0.08 s 后整体相对实验稍小,且射流穿透深度对比实验结果的偏差随时间的增加而略有加大,射流穿透深度最大相对误差为 4.3%,相比改进前 MPS 方法,计算精度明显提高。和实验值对比偏差可能是忽略了熔融物射流与冷却剂之间的热力学作用导致了计算的误差。

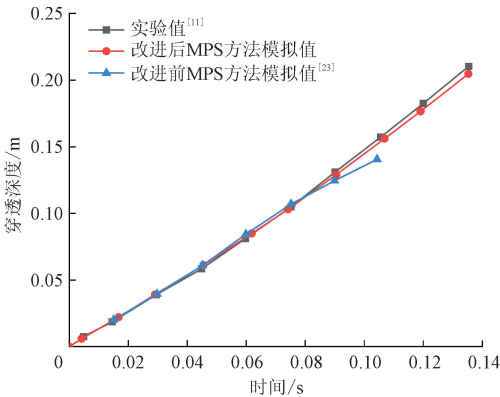


图 4 实验与模拟射流深度对比

Fig.4 Comparison of penetration depth between experiment and simulation

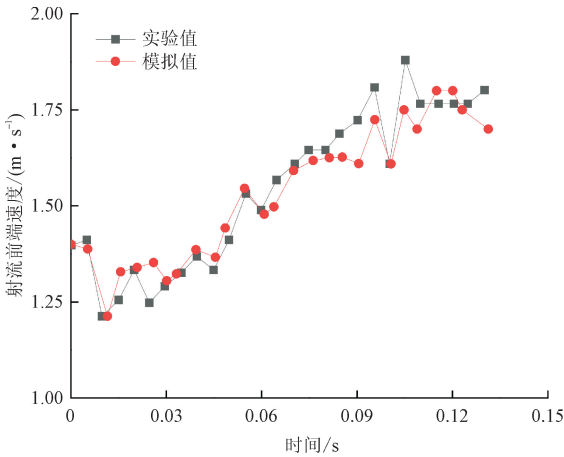


图 5 实验与模拟熔融物射流前端速度的对比

Fig. 5 Comparison of melt jet leading edge velocities between experiment and simulation

图 6 显示了模拟和实验中的熔融金属射流随时间的形态演变,模拟的熔融物射流在不同时刻的形貌与实验结果吻合得较好。首先,随着熔融物射流进入冷却剂,冷却剂在冲击作用下向上翻卷,使射流前缘形成一个球帽状结构,这是在较重流体与轻流体混合过程中经常可以观察到的瑞利-泰勒不稳定性。然后,射流前端的外部部分破裂,随后是射流液柱弯曲随后破裂。射流穿透深度、前端速度和形态的模拟结果表明,本文采用的改进 MPS 方法能够在垂直方向上以较小的误差合理地模拟熔融物射流破碎过程,初步揭示了射流破碎过程的流体力学特性。

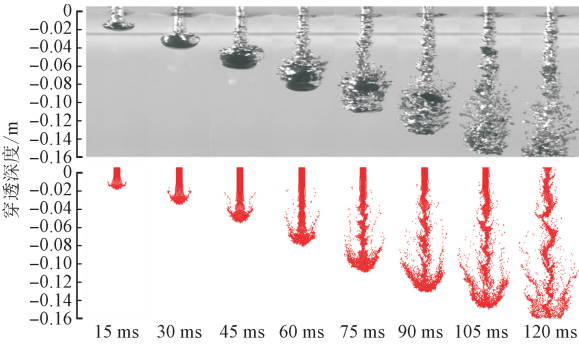


图 6 实验与模拟射流形态对比

Fig. 6 Jet morphology comparison between experiment and simulation

3 数值结果分析

3.1 射流破碎模式和界面发展

尽管国际上针对射流破碎过程进行了一些实验研究,但研究结果仍存在较大差异^[12],不同研究者

拟合的射流破碎长度关联式以及对破碎演变形式的分析往往不一致。由于射流破碎过程涉及复杂的界面行为和水动力学作用,传统实验方法难以精确捕捉这一动态过程,尤其是在冷却剂液钠具有光学不透明性的条件下。因此,利用数值模拟手段对熔融物射流破碎行为进行深入研究尤为必要。

针对熔融物射流在冷却剂钠中破碎的形态及界面发展,本节对不同韦伯(Weber)数下射流破碎过程进行数值模拟研究。金属合金燃料 U-Pu-Zr 因其高燃耗和优良热响应被选为先进快堆核燃料之一,在堆芯损坏事故中,U-Pu-Zr 与不锈钢的共晶反应生成的液相物质熔点约为 650 ℃,低于 U-Pu-Zr 的熔点 1 156 ℃和液态钠的沸点 880 ℃^[24]。鉴于金属铝的熔点为 660 ℃,接近于共晶反应生成物的熔点,本文选择金属铝作为堆芯熔融物替代材料进行模拟实验。同时,由于对 U-Pu-Zr 与不锈钢共晶反应的研究较少,缺乏相关物性参数,使用金属铝可以避免因沸腾效应带来的复杂性。分析表明,U-Pu-Zr 与金属铝在熔融态下具有相近的表面张力和动力黏度,二者与液态金属钠在界面上的水力学相互作用相似。采用金属铝作为熔融物,液钠作为冷却剂,进行的熔融物射流破碎研究将提供更保守的结果,具体参数如表 1、表 2 所示^[25]。

表 2 数值模拟材料物性参数

Table 2 Property parameters of numerical simulation materials

参数	数值	
	U-Pu-Zr	铝
密度/(kg·m ⁻³)	14 927	2 391
熔点/℃	1 156	660
动力黏度/(m ² ·s ⁻¹)	5.63×10 ⁻³	1.35×10 ⁻³
表面张力/(N·m ⁻¹)	1.390	0.875

熔融物射流界面演变过程如图 7~9 所示,可知在不同 Weber 数下熔融物射流破碎过程具有一定相似性,熔融物射流破碎主要由射流前端和射流液柱主体破碎组成。当熔融物射流进入冷却剂钠时,前端形成球帽状结构;随着射流穿透深入,射流液柱侧面出现不稳定波动。然而,在不同 Weber 数下,熔融物射流随着时间的增长,射流深度和射流连续性出现显著差异。

不同 Weber 数下熔融物射流破碎过程具有一定相似性,熔融物射流破碎主要由射流前端和射流液柱主体破碎组成。当熔融物射流进入冷却剂钠时,前端形成球帽状结构;随着射流穿透深入,射流

液柱侧面出现不稳定波动。然而在不同 Weber 数下,熔融物射流随着时间的增长,射流深度和射流连续性出现显著差异。

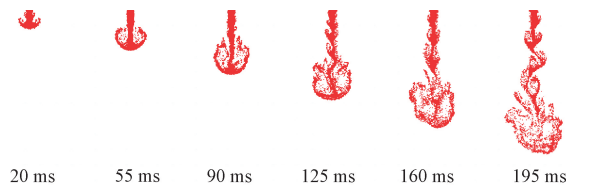


图 7 $We=48$ 时熔融物射流界面的演变过程
Fig. 7 Jet interface evolution at $We=48$

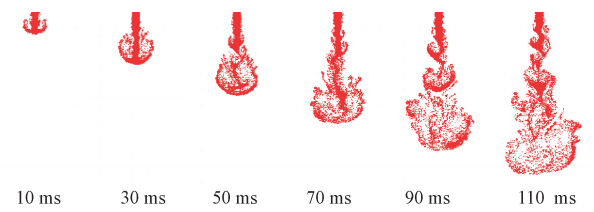


图 8 $We=390$ 时熔融物射流界面的演变过程
Fig. 8 Jet interface evolution at $We=390$

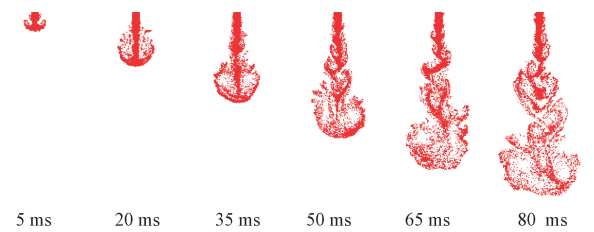


图 9 $We=976$ 时熔融物射流界面的演变过程
Fig. 9 Jet interface evolution at $We=976$

当 Weber 数较小时,随着射流的深入,熔融物射流与冷却剂之间的动量交换导致射流明显减速,从而导致射流前端表面积增大。射流前端形成形成球帽状结构,通常是由于足够强的阻力克服了维持射流表面完整性的表面张力而产生的,形象地描述了瑞利-泰勒不稳定性,这种不稳定性可能发生在两种不同密度流体的相互加速靠近的横向界面上,如图 10 所示,图中 U_j 为熔融物速度, U_c 为冷却剂速度, ρ_j 、 ρ_c 为熔融物和冷却剂密度。在初始变形之后,射流液柱两侧波动逐渐发展,同时碎片逐渐从射流前端剥离,进而发生粗略的破碎。

当 Weber 数较大时,破碎进程较快,射流前端减速,随后碎片从射流前端两侧加速剥离,射流侧碎片的剥离引起侵蚀,导致熔融物射流两侧变薄并最终破碎。观察到的剥离机制类似于开尔文-亥姆霍兹

兹不稳定性如图 11 所示,这可能是由于两种流体界面上的速度差导致的。可以预期,存在于流体中的剥离碎片将会被水动力学进一步破碎,变成更小的碎片。研究表明,在高 Weber 数下,液钠冷却剂中金属熔融物射流破碎主要是由射流侧表面上占主导的开尔文-亥姆霍兹不稳定性引发的波状剥离机制所驱动。

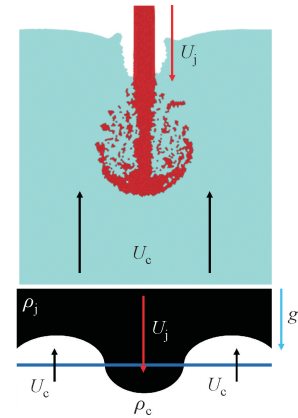


图 10 瑞利-泰勒不稳定性与模拟结果的对比
Fig. 10 Concept of Rayleigh-Taylor instability compared to the simulation results

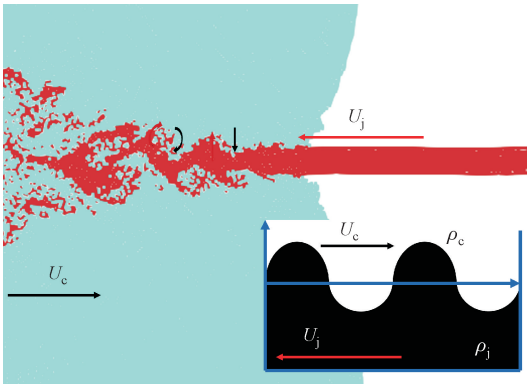


图 11 开尔文-亥姆霍兹不稳定性与模拟结果的对比
Fig. 11 Concept of Kelvin-Helmholtz type instability compared to the simulation results

3.2 射流速度对破碎长度和破碎时间的影响

在对熔融物射流破碎进行研究时,破碎长度为一个重要的参考变量,该变量也是国际上严重事故程序中熔融物射流全局破碎模型建立的基础。在实验中,破碎长度是一个非常重要的测量值,因为如果熔融物射流没有得到充分破碎和冷却,则可能直接威胁反应堆压力容器的完整性。然而,射流破碎长度的测量一直存在着一定的分歧,这归因于测量手

段可行性不同。在射流破碎的实验研究中,射流破碎长度通常被定义为射流第一次发生破碎主体结构断裂的穿透深度。考虑到射流的中间部分在实验中不易观察的事实,一些研究人员使用射流前端减速的现象作为表征射流破碎时刻的指标^[9],也有研究人员捕获冷却剂和覆盖气体的压力变化以确定破裂时刻并随后导出破碎长度^[26]。然而在数值模拟中,射流演变各个时刻的形态很容易得到,因此破碎长度被定义为熔融物射流在冷却剂中的最大连续长度,文献[3,27]分别提出了关于破碎长度预测的关联式,具有代表性并被广泛应用。

基于实验结果,得到熔融物射流的惯性力、密度差产生的浮力以及水力学和热力学产生的力之间平衡是控制射流破碎的重要因素,提出了半经验关联式^[3]

$$\frac{L_{brk}}{D_j} = 2.1 \left(\frac{\rho_l}{\rho_c} \right)^{0.5} Fr^{0.5} \tag{10}$$

$$Fr = \frac{v_j^2}{gD_j} \tag{11}$$

式中: L_{brk} 为射流破碎长度; D_j 为射流直径; v_j 为射流速度; Fr 为弗劳德数; g 为重力加速度。

文献[27]根据界面不稳定性理论和边界层剥离理论,引入夹带系数 E_0 , 用于调整简单建模与实际现象之间的差异,推导得到的破碎长度

$$\frac{L_{brk}}{D_j} = \frac{1}{2E_0} \left(\frac{\rho_l}{\rho_c} \right)^{0.5} \tag{12}$$

式中: E_0 为夹带参数。

式(10)相关性主要取决于射流速度,而式(12)的相关与射流速度无关,取决于夹带系数 E_0 的选取。文献[3]整理了大量实验的破碎长度 L_{brk} 与弗劳德数 Fr 的关系,并与式(10)、(12) 的预测值进行了对比,其中实验材料包含冷却剂为水、钠和模拟材料以及熔融物为氧化物和金属。之前实验中得到的破碎长度 L_{brk} 主要显示了两种趋势:破碎长度 L_{brk} 随弗劳德数 Fr 的增加而增加;破碎长度 L_{brk} 随弗劳德数 Fr 略微变化,但几乎保持不变。当冷却剂为水和钠时,几乎所有的 L_{brk} 值都接近于使用式(12) 的预测范围,随着弗劳德数 Fr 略微变化,但几乎保持不变。然而当冷却剂选用模拟材料为易挥发的液态氟利昂和氮气或者接近饱和液态水进行实验,获得的 L_{brk} 值更接近式(10) 的预测分布趋势。为了研究射流速度对破碎长度和破碎时间的影响,共建立 7 组工况,熔融物为铝,冷却剂为钠,熔融物射流直径为 10 mm,如表 3 所示。

表 3 不同射流速度工况的参数

Table 3 Different jet velocity conditions

工况	射流速度/(m·s ⁻¹)	We
1	0.99	6
2	1.40	12
3	1.98	45
4	2.80	49
5	3.43	74
6	3.96	98
7	4.43	123

通过数值模拟,如图 12 所示给出了不同弗劳德数 Fr 下无量纲射流破碎长度 $(L_{brk}/D_j)/(\rho_j/\rho_c)^{0.5}$ 的模拟值与关联式预测值的对比,图中横坐标为弗劳德数 Fr 。从图 12 可以看出,当射流直径不变时,随着射流速度的变化,射流破碎长度有略微波动,但基本保持在一定范围,与射流速度关联性较小,并且符合式(12)预测值范围,而与式(10)预测分布相差较大。

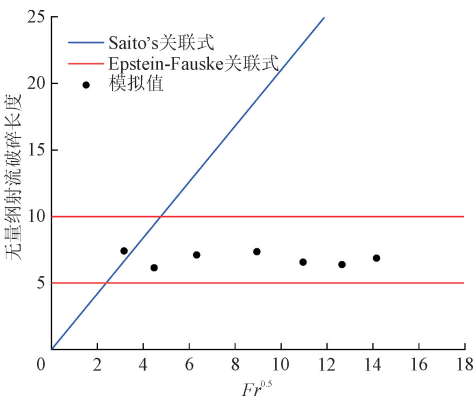


图 12 破碎长度随弗劳德数 Fr 的分布与关联式的对比
Fig. 12 Variation of jet breakup length and correlations' result with respect to Fr

根据 Epstein 关联式易推导出破碎时间的关系

$$t_{brk} = \frac{D_j}{2E_0 U_j} \left(\frac{\rho_l}{\rho_c} \right)^{0.5} \tag{13}$$

图 13 给出了破碎时间和破碎速度的关系,并与式(13)进行对比,结果显示,射流破碎时间随着射流速度的增大稍有减小,分布在 Epstein 关联式的预测值范围内。

3.3 射流直径对破碎长度和破碎时间的影响
根据上节讨论结果,射流破碎长度与射流速度关联性较小,并符合式(12)预测值分布范围内,但不能得到关于冷却剂为钠时夹带系数 E_0 的取值。夹带系数 E_0 的取值在破碎长度预测模型中十分重要,以

往大多根据不同材料进行实验进行拟合,针对性较强,而针对冷却剂为钠时,缺乏相关系统性实验数据。同时根据式(12)可以发现,不同物质之间的密度比和射流直径变化对破碎长度影响明显,其中 $D_j(\rho_j/\rho_c)^{0.5}$ 为修正射流直径。

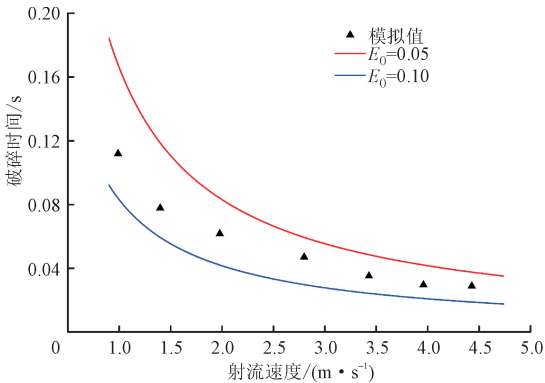


图 13 破碎时间随射流速度的分布与关联式的对比
Fig. 13 Variation of jet breakup time and correlations' result with respect to velocity of a melt jet

本节为了研究射流直径对破碎长度的影响,在射流直径为 8~30 mm 之间设置 7 组不同射流直径工况,射流速度相同,模拟工质物性与上节相同。图 14、15 分别给出了在不同射流直径下破碎长度和破碎时间关联式预测值的对比。从图中可以看出,射流直径对破碎长度和破碎时间有着显著的影响,破碎长度与破碎时间随着射流直径的增大近似成线性变化。因此线性拟合得到 $E_0=0.089$,基于射流破碎长度理论关联式拟合得到关于破碎长度预测模型

$$\frac{L_{brk}}{D_0} = 5.61 \left(\frac{\rho_j}{\rho_c} \right)^{0.5} \tag{14}$$

$$t_{brk} = \frac{5.61 D_0}{U_j} \left(\frac{\rho_j}{\rho_c} \right)^{0.5} \tag{15}$$

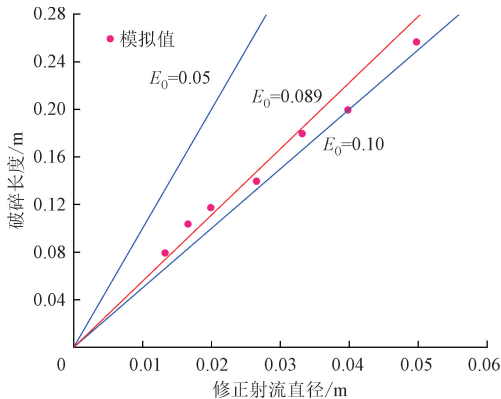


图 14 破碎长度随射流直径的分布与关联式的对比
Fig. 14 Variation of jet breakup length and correlations' result with respect to inlet diameter of a melt jet

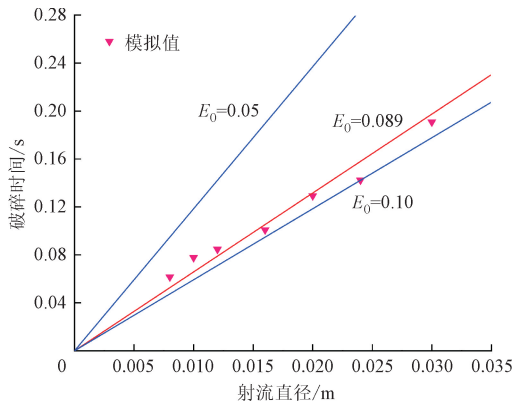


图 15 破碎时间随射流直径的分布与关联式的对比
Fig. 15 Variation of jet breakup time and correlations' result with respect to inlet diameter of a melt jet

为了验证关于冷却剂为钠时,破碎长度预测模型的准确性,与一些科研机构冷却剂为钠的实验数据进行了对比。图 16 给出本文拟合关联式与文献[26,28-29]的实验值比较。结果显示,当射流直径较小时,本文拟合得到的式(14)预测值与实验值较为符合;随着射流直径的增加以及熔融物与冷却剂密度比值的变化,误差有所扩大,但是符合预测分布趋势,误差基本控制在预测值的 $\pm 30\%$ 以内。

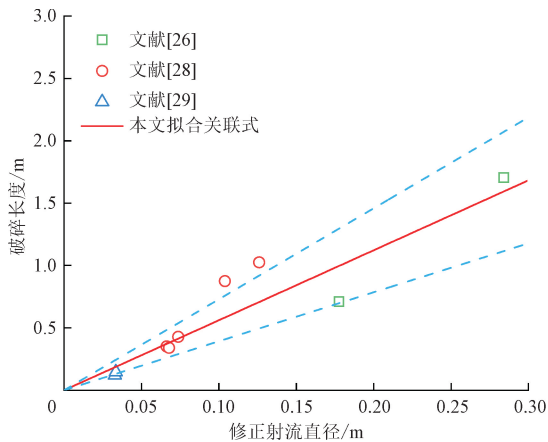


图 16 模拟验证结果
Fig. 16 Simulation verification results

3.4 熔融物射流破碎模型建立

在熔融物射流与冷却剂接触后,在流体动力学效应作用下发生破碎,从而增加熔融物的表面积。研究发现,当熔融物射流的 Weber 数较大时,其表面会形成开尔文-亥姆霍兹不稳定性,其水力学效应使得破碎后的碎片从射流侧表面剥离。此时,射流直径在垂直方向上不断减小。在这种模型下,熔融物射流的破碎程度最为显著,国际上大多数射流破

碎模型都是基于这一理论构建的^[30]。

图 17 给出了射流破碎全局模型示意图,假设由于流体动力学剥离作用,熔融物射流直径在沿深度方向线性减小,并在射流破碎长度 L_{brk} 处达到零,计算熔融物射流侧表面积上破碎生成的熔滴质量转换率。

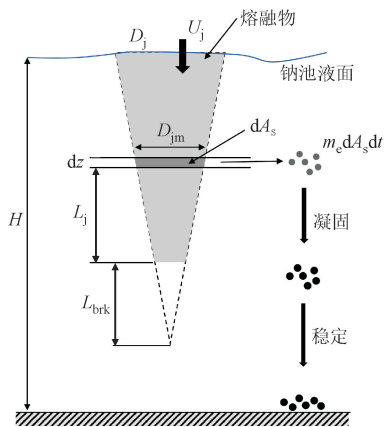


图 17 射流破碎全局模型示意图

Fig. 17 Global model of jet breakup

基于式(12),射流直径线性减小的假设和射流液柱的质量守恒如下

$$\frac{dD_{jm}}{dz} = -\frac{D_j}{L_{brk}} \quad (16)$$

$$-\frac{1}{2} \frac{dD_{jm}}{dz} U_j = \frac{m_e}{\rho_c} \quad (17)$$

式中: D_{jm} 为位置 z 处的射流直径; m_e 为射流表面生成的碎片质量通量,表达式为

$$m_e = -\frac{1}{2} \rho_j \frac{dD_j}{dz} U_j = \frac{1}{2} \rho_j \frac{D_j U_j}{L_{brk}} \quad (18)$$

同时,射流表面($z, z+dz$)在时间 dt 内中产生的碎片质量为

$$m_e dA_s dt = \frac{\pi}{2} \rho_j \frac{D_j U_j}{L_{brk}} \left(1 - \frac{z}{L_{brk}}\right) dz dt \quad (19)$$

式中: dA_s 为对应 dz 部分的射流表面积。

在本文拟合的破碎长度式(14)的基础上,建立了一个关于冷却剂钠的熔融物射流破碎模型

$$M_{jet \rightarrow drop} = m_e = 0.089 U_j (\rho_j \rho_c) \quad (20)$$

熔融物射流碎化后的碎片信息对于评估堆芯解体事故的发展趋势具有重要意义。如果喷射出破损燃料棒中的熔融燃料能够充分破碎并顺利从堆芯排出,将引入足够的负反应性,从而有效抑制堆芯解体事故的进一步发展。然而,如果喷射出的燃料在堆芯中部凝固并堵塞冷却剂通道,不仅会导致堆芯传热恶化,可能引发更为严重的事故后果。此外,燃料

碎片的尺寸分布还直接影响对碎片床的最终形态、长期冷却能力以及再临界风险。

为支持后续液态金属堆严重事故分析程序的开发,本文建立的熔融物射流破碎模型采用全局破碎模型,不依赖射流液柱流动过程中的局部流场信息,形式简单,具有较高的数值稳定性。

4 结 论

本文采用改进的 MPS 方法,并基于改进程序框架进行 GPU 并行加速处理,模拟了熔融物射流在冷却剂钠中的水力学破碎过程。通过模拟结果与参考实验进行对比,验证了该方法的适用性和可靠性;之后分别对不同射流速度和射流直径的熔融物射流进入冷却剂钠的工况数值模拟,描述了射流破碎形态,分析了射流速度和射流直径等参数对射流破碎长度的影响;拟合得到冷却剂钠中破碎长度关联式,并与实验值进行验证,得到一种新的射流破碎模型。得到如下主要结论。

(1)对射流破碎过程的数值模拟发现,基于不同 Weber 数熔融物射流破碎具有相似的规律:熔融物射流破碎主要由射流前端和熔融物射流液柱主体破碎组成;在低 Weber 数下熔融物射流的前端球帽状结构先瓦解对主体破碎过程具有显著贡献;在高 Weber 数下射流破碎主要射流两侧不稳定波动和波状剥离效应主导。

(2)研究发现射流破碎长度和破碎时间,与射流速度关联性较小;射流直径对破碎长度和破碎时间有着显著的影响,破碎长度与破碎时间随着射流直径的增大近似成线性变化。

(3)根据不同射流直径对射流破碎长度的影响,基于 Epstein 关系式,拟合得到冷却剂钠射流破碎长度关联式,并与实验值进行验证,射流破碎长度预测值基本控制在 $\pm 30\%$ 以内,建立了一种新的射流破碎模型。

参考文献:

- [1] FAUSKEH K, KOYAMA K, KUBO S. Assessment of the FBR core disruptive accident: the role and application of general behavior principles [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002, 39(6): 615-627.
- [2] IGARASHI K, SAKAI T, KATO S, et al. Validation of analysis models on relocation behavior of molten core materials in sodium-cooled fast reactors based on the melt discharge experiment [J]. Mechanical Engineering Journal, 2021, 8(4): 00172.

- [3] IWASAWA Y, ABE Y. Melt jet-breakup and fragmentation phenomena in nuclear reactors: a review of experimental works and solidification effects [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2018, 108: 188-203.
- [4] BENZ R, SCHINS H. Boiling fragmentation of molten stainless steel and copper in sodium [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1982, 72(3): 429-437.
- [5] GABOR J D, PURVIANCE R T, AESCHLIMANN R W, et al. Breakup and quench of molten metal fuel in sodium [C]//*Proceedings of the International Top Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*. [S. l.]: [s. n.], 1988: 839-843.
- [6] NISHIMURA S, KINOSHITA I, SUGIYAMA K I, et al. Thermal interaction between molten metal jet and sodium pool: effect of principal factors governing fragmentation of the jet [J]. *Nuclear Technology*, 2005, 149(2): 189-199.
- [7] NISHIMURA S, SUGIYAMA K I, KINOSHITA I, et al. Fragmentation mechanisms of a single molten copper jet penetrating a sodium pool transition from thermal to hydrodynamic fragmentation in instantaneous contact interface temperatures below its freezing point [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2010, 47(3): 219-228.
- [8] MATSUBAK I, KAMIYAMA K, TOYOOKA J I, et al. Experimental discussion on fragmentation mechanism of molten oxide discharged into a sodium pool [J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2016, 3(3): 00595.
- [9] ABE Y, MATSUO E, ARAI T, et al. Fragmentation behavior during molten material and coolant interactions [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236(14/16): 1668-1681.
- [10] MATSUO E, ABE Y, CHITOSE K, et al. Study on jet breakup behavior at core disruptive accident for fast breeder reactor [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238(8): 1996-2004.
- [11] CHENG Hui, ZHAO Jiyun, WANG Jun. Experimental investigation on the characteristics of melt jet breakup in water: the importance of surface tension and Rayleigh-Plateau instability [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 132: 388-393.
- [12] THAKRE S, MANICKAM L, MA W. A numerical simulation of jet breakup in melt coolant interactions [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 80: 467-475.
- [13] DINH T N, BUI V A, NOURGALIEV R R, et al. Experimental and analytical studies of melt jet-coolant interactions: a synthesis [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1999, 189(1/3): 299-327.
- [14] 苗庆硕, 魏震, 陈佳军, 等. 低温风洞中液氮液滴的破碎特性模拟研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(2): 91-99.
- MIAO Qingshuo, WEI Zhen, CHEN Jiajun, et al. Simulation of breakup characteristics of liquid nitrogen droplets in cryogenic wind tunnel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(2): 91-99.
- [15] 席光, 项利峰. 自由表面流动的移动粒子半隐式模拟方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(3): 249-252.
- XI Guang, XIANG Lifeng. Numerical simulation of fluid free surface flow using moving particle semi-implicit method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(3): 249-252.
- [16] XIONG Jinbiao, KOSHIZUKA S, SAKAI M. Investigation of droplet impingement onto wet walls based on simulation using particle method [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, 48(1): 145-153.
- [17] CHEN Ronghua, OKA Y. Numerical analysis of freezing controlled penetration behavior of the molten core debris in an instrument tube with MPS [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 71: 322-332.
- [18] TAMAI T, KOSHIZUKA S. Least squares moving particle semi-implicit method [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2014, 1(3): 277-305.
- [19] SHIBATA K, MASAIE I, KONDO M, et al. Improved pressure calculation for the moving particle semi-implicit method [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2015, 2(1): 91-108.
- [20] KHAYYER A, GOTOH H, SHIMIZU Y. Comparative study on accuracy and conservation properties of two particle regularization schemes and proposal of an optimized particle shifting scheme in ISPH context [J]. *Journal of Computational Physics*, 2017, 332: 236-256.
- [21] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 100(2): 335-354.
- [22] CHANDRASEKARAN S, JUCKELANDG. *OpenACC for programmers: concepts and strategies* [M]. Boston, USA: Addison-Wesley Professional, 2017.
- [23] 彭程, 孟显品, 邓坚. 基于 MPS 方法的射流破裂正交实验及其模型研究 [J]. *核动力工程*, 2024, 45(4): 181-189.
- PENG Cheng, MENG Xianpin, DENG Jian. Study on orthogonal experiments of jet breakup and its modeling based on MPS method [J]. *Nuclear Power Engineer-*

- ing, 2024, 45(4): 181-189.
- [24] NISHIMURA S, ZHANG Zhigang, SUGIYAMA K I, et al. Transformation and fragmentation behavior of molten metal drop in sodium pool [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(23): 2201-2209.
- [25] HU Liang, GE Kui, ZHANG Yapei, et al. Experimental study on fragmentation characteristics of molten aluminum/copper jet penetrating in sodium pool [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 139: 492-502.
- [26] MAGALLON D, HOHMANN H, SCHINS H. Pouring of 100-kg-scale molten UO₂ into sodium [J]. Nuclear Technology, 1992, 98(1): 79-90.
- [27] EPSTEIN M, FAUSKE H K. Applications of the turbulent entrainment assumption to immiscible gas-liquid and liquid-liquid systems [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2001, 79(4): 453-462.
- [28] MATSUBA K I, KAMIYAMA K, TOYOOKA J I, et al. Experimental discussion on fragmentation mechanism of molten oxide discharged into a sodium pool [J]. Mechanical Engineering Journal, 2016, 3(3): 00595.
- [29] MATSUBA K I, ISOZAKI M, KAMIYAMA K, et al. Distance for fragmentation of a simulated molten-core material discharged into a sodium pool [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2016, 53(5): 707-712.
- [30] MORIYAMA K, MARUYAMA Y, NAKAMURA H. A simple evaluation method of the molten fuel amount in a premixing region of fuel-coolant interactions [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002, 39(1): 53-58.

(编辑 赵炜)