

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.030

熔融铝液遇水爆炸及碎化过程模拟研究^{*}

唐文博¹,何向问²,马书志²,王正易达¹,毛力³,彭泽军⁴,黄楚原¹,刘丽娟¹,陈先锋¹

(1. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 武汉 430070; 2. 中色科技股份有限公司, 洛阳 471000;

3. 广州特种设备检测研究院, 广州 510000; 4. 武汉市特种设备检验检测研究院, 武汉 430070)

摘要: 为探究熔融铝液遇水爆炸机理, 基于CFD方法开展了数值模拟研究。构建了熔融铝液泄漏模型, 采用VOF多相流方法耦合水的相变与传热传质过程, 模拟了熔融铝液入水后碎化及蒸汽爆炸过程, 分析了铝液碎化规律及爆炸压力和温度特性。结果表明: 铝液碎化受水力和热力效应协同作用, 碎化增大了铝液与水的换热面积, 产生大量水蒸气并引发蒸汽爆炸, 爆炸过程呈现“水力主导变形—热力驱动碎化—蒸汽爆炸”的连锁机制; 监测点处产生两次压力峰值, 证实碎化引发的换热增强是蒸汽爆炸的关键因素; 熔融铝液遇水过程的温度分布呈阶段性动态变化。本研究系统模拟了熔融铝液遇水碎化及导致蒸汽爆炸的演化过程, 为提升铝加工行业安全防控水平提供了理论与技术支撑。

关键词: 熔融铝液; 蒸汽爆炸; VOF方法; 碎化特性; 相变

中图分类号: X938 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0285-08

Numerical Simulation of Explosion and Fragmentation Process in Molten Aluminum-water Interactions

TANG Wen-bo¹, HE Xiang-wen², MA Shu-zhi², WANG Zheng-yi-da¹, MAO Li³,
PENG Ze-jun⁴, HUANG Chu-yuan¹, LIU Li-juan¹, CHEN Xian-feng¹

(1. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. China Nonferrous Metal Technology Co., Ltd., Luoyang 471000, China; 3. Guangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Guangzhou 510000, China; 4. Wuhan Special Equipment Inspection and Testing Research Institute, Wuhan 430070, China)

Abstract: To investigate the explosion mechanism of molten aluminum-water interactions through computational fluid dynamics (CFD) simulations, a leakage scenario model was developed using the Volume of Fluid (VOF) multi-phase approach to integrate water phase transition with coupled heat and mass transfer dynamics. The simulation successfully reproduced molten aluminum fragmentation during water entry and subsequent vapor explosion, and quantitatively analyzed fragmentation morphology, as well as explosion pressure and temperature distributions. Findings

收稿日期 (Date of reception): 2025-12-22

网络首发日期 (Published online): 2026-01-20

作者简介: 唐文博 (2003-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为熔融金属爆炸安全与防护, (E-mail) 358955@whut.edu.cn。

通信作者: 陈先锋 (1975-), 男, 湖北应城人, 博士、二级教授、博导, 主要从事工业安全与防火防爆、新能源安全与应急技术等方面研究工作, (E-mail) cxf618@whut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (52274224); 中铝国际重点科研项目 (01032025017001); 湖北省自然科学基金计划 (创新群体项目) (2023AFA013)

About the author: TANG Wen-bo (2003-), male, born in Xuchang city, Henan province, master degree candidate, mainly engaged in the research work on safety and protection of molten metal explosions, (E-mail) 358955@whut.edu.cn.

Corresponding author: CHEN Xian-feng (1975-), male, born in Yingcheng city, Hubei province, Ph. D., second-class professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research on industrial safety and fire/explosion prevention, new energy safety, and emergency response technologies, (E-mail) cxf618@whut.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52274224), Key Scientific Research Project of Chalco International (01032025017001), Hubei Provincial Natural Science Foundation Program (Innovative Research Group Project) (No. 2023AFA013)

demonstrate that aluminum fragmentation results from the combined effects of hydrodynamic and thermodynamic interactions. Fragmentation significantly enlarges the interfacial contact area between molten aluminum and water, promoting rapid steam generation and subsequent vapor explosion. The detonation process follows a distinct sequential mechanism: “hydraulic dominant deformation-thermal driven fragmentation-steam explosion.” Two pressure peaks were observed at the monitoring point, confirming that enhanced heat transfer due to fragmentation is a key factor in steam explosions. The temperature field evolution during molten aluminum-water interaction demonstrated distinct phase-dependent dynamic characteristics. This study systematically simulated the evolution of molten aluminum fragmentation upon contact with water and the subsequent steam explosion, providing fundamental theoretical insights and practical methodologies to improve safety protocols in aluminum production facilities.

Key words: molten aluminum; steam explosion; VOF method; fragmentation characteristics; phase transition

熔融铝液遇水爆炸事故是铸铝行业最严重的灾害之一,熔融铝液与水接触时,巨大的温差使铝液与水接触面发生剧烈相变,铝液表面蒸汽膜破裂,急剧的传热和传质使蒸发速度激增,从而引起周围液体的爆发性沸腾,形成内部强大的压力波,瞬间释放的能量会引起蒸汽爆炸^[1,2],造成重大的人员伤亡和

财产损失^[3]。近年来,铸铝工业中熔融铝液遇水爆炸事故频发,如表 1(表中数据来源于国家应急管理部门公开通报及行业事故报告),可以看出此类事故严重危及生产安全、制约行业进步并引发社会关切,这一现状使得熔融铝液遇水爆炸成为铝行业生产安全领域的重要研究课题^[4]。

表 1 铝液遇水爆炸事故

Table 1 Accidents involving explosions of molten aluminum upon contact with water

时间 Time	公司 Company	死亡人数 Deaths	受伤人数 Injuries	财产损失(万元) Property loss(10 000 yuan)
2023 年 10 月 October 2023	广西兴越材料科技 Guangxi xingyue materials technology	6	5	1900.0
2024 年 1 月 January 2024	福建奋安铝业 Fujian fen'an aluminium industry	2	1	799.5
2024 年 2 月 February 2024	江苏亚太轻合金科技 Jiangsu yatai light alloy technology	5	13	1878.3
2024 年 7 月 July 2024	河南中瑞有色金属 Henan zhongrui nonferrous metals	5	14	1862.3
2024 年 8 月 August 2024	山西东南精工科技 Shanxi dongnan precision engineering technology	3	1	1269.8

实验研究很难从微观角度上去捕捉熔融铝液遇水爆炸的全过程,以及解释熔融铝液遇水爆炸机理,故研究人员在实验研究基础上,对熔融金属遇水爆炸及泄漏扩散行为等进行了一定的数值模拟研究。夏营针对 FCI 粗混合阶段数值计算的核心数学模型展开了研究^[5],发现熔融物液滴的粗碎化过程会显著影响冷却剂的蒸发效果,进而作用于后续的蒸汽爆炸阶段;通过对传热模型的分析得出,在熔融物与冷却剂相互作用的粗混合阶段,对流换热占据主导地位,而液柱传热过程对冷却剂总蒸发量及液柱碎化的影响甚微。Ling 建立了铝液在铸造过程中的泄漏模型^[6],得出铝液泄漏量随高度和出口半径的增大而增大,扩散面积随铝液高度的增大而增大且,由于铝液与空气之间存在边界层,出口半径对扩散面

积的影响较为复杂。Bui 等学者融合 Level set 方法与 CIP 方法^[7],研发了 SIPHRA-3D 程序,对熔融物射流以特定速度进入密度较小的液体这一过程进行了模拟,探究了熔融物形态变形及碎化特征,考察了熔融物物理属性与流动条件对界面不稳定性产生的作用,不过该研究未纳入冷却剂蒸发量这一关键因素,与实际工况存在一定偏差。在熔融铝液与水直接接触诱发蒸汽爆炸的机理探究过程中,实验手段难以从微观细节层面刻画二者的反应历程,亦不能精准清晰地捕获铝液的碎化演变过程^[8]。

本研究基于 CFD 方法开展数值模拟工作,结合铸铝工业生产的实际场景,构建了铝液泄漏相关模型。该模型以生产过程中铝液泄漏引发爆炸的实际现象为核心背景,着重探究熔融铝液与水接触后产

生的形态变化及碎化过程,最终对铝液泄漏遇水爆炸过程的压力及温度特性展开了系统分析^[9]。

1 计算模型及参数设置

1.1 几何模型

铸造车间铝液从混合炉出口流入槽道,再通过槽道输送到输送机上的各个铸型模具中,进而冷却模具中的铝液,使其成为铝锭。由于喷淋冷却区的存在,浇铸车间的地面上分布着水,如果熔化的铝液泄漏并接触到水,就可能会有爆炸的风险。基于此,本研究设计了一个方形空间为计算区域,如图 1(a)所示,然后对该几何模型进行了网格划分,如图 1(b)。区域底部放置一方形水槽(左右两个白色部分为水槽边界)。方形区域为 60 cm×60 cm 的正方形,且正方形中心为 $x-y$ 坐标轴的原点, $y=-30\text{ cm}$ 处为地面,区域底部的水槽长 30 cm,高 30 cm,水槽厚度为 1 cm。

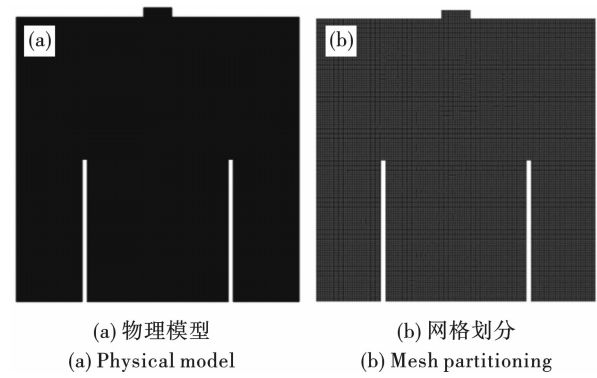


图 1 铝液遇水爆炸几何模型
Fig. 1 Geometric model of molten aluminum explosion upon water contact

1.2 数值模型和控制方程

铝液、水和空气参数设置如表 2 所示。由于铝液的密度随温度变化不大,故可将其密度设为常量^[10]。

表 2 材料及参数设置
Table 2 Materials and parameter settings

参数 Parameters	铝液 Aluminum liquid	水 Water	空气 Air
密度 Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2370	998	1.225
比热 Specific heat/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1080	4182	1006
热导率 Heat conductivity/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	216	0.6	0.242
粘度 Viscosity/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.1×10^{-4}	10^{-3}	1.8×10^{-5}
相对分子质量 Relative molecular mass/($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	27	18	29
温度 Temperature/K	1173	300	300

熔融铝液遇水爆炸的核心物理机制,涵盖多相界面演化、跨相传热传质及水的相变^[11],需借助多相流模型、流体运动方程与能量方程的耦合作用进行描述。本研究采用 VOF 多相流方法对多相界面实施追踪,同时结合相变模型建立物理场控制方程,具体设定如下。

1.2.1 多相流模型选择

熔融铝液、水与空气为互不相溶介质,且爆炸过程中铝液与水的界面存在剧烈破碎、融合及迁移,需精准捕捉界面形态^[12]。因此选用 VOF 体积分数法 (Volume of Fluid) 多相流模型,其原理通过定义各相的体积分数描述空间内各相的分布,满足四相体

积分数守恒

$$\alpha_{\text{铝}} + \alpha_{\text{水}} + \alpha_{\text{空气}} + \alpha_{\text{汽}} = 1 \tag{1}$$

式中: α_k 为各相的体积分数; k 代表铝液、水、水蒸气或空气相。

采用混合相属性模型计算物理参数(密度、粘度等),参数值由四相体积分数加权平均得到,具体公式如下:

(1)混合相物理参数

混合密度($\rho_m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

$$\rho_m = \alpha_{\text{铝}} \rho_{\text{铝}} + \alpha_{\text{水}} \rho_{\text{水}} + \alpha_{\text{空气}} \rho_{\text{空气}} + \alpha_{\text{汽}} \rho_{\text{汽}} \tag{2}$$

混合粘度($\mu_m, \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$\mu_m = \alpha_{\text{铝}} \mu_{\text{铝}} + \alpha_{\text{水}} \mu_{\text{水}} + \alpha_{\text{空气}} \mu_{\text{空气}} + \alpha_{\text{汽}} \mu_{\text{汽}} \quad (3)$$

混合热导率 ($k_m, \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$k_m = \frac{\alpha_{\text{铝}} \rho_{\text{铝}} k_{\text{铝}} + \alpha_{\text{水}} \rho_{\text{水}} k_{\text{水}} + \alpha_{\text{空气}} \rho_{\text{空气}} k_{\text{空气}} + \alpha_{\text{汽}} \rho_{\text{汽}} k_{\text{汽}}}{\rho_m} \quad (4)$$

(2) 界面张力模型

四相体系中存在铝液—水与水—水蒸气两类关键界面,空气与水蒸气均为气相,界面张力可忽略,采用连续表面力模型(CSF)将界面张力转化为体积力纳入动量方程^[13],公式为

$$F_s = F_{s, \text{铝-水}} + F_{s, \text{水-汽}} \quad (5)$$

铝液—水界面张力体积力 $F_{s, \text{铝-水}}$

$$F_{s, \text{铝-水}} = \sigma_{\text{铝-水}} \frac{\rho_m}{0.5(\rho_{\text{铝}} + \rho_{\text{水}})} \cdot (\alpha_{\text{铝}} \nabla \alpha_{\text{水}} + \alpha_{\text{水}} \nabla \alpha_{\text{铝}}) | \nabla \alpha_{\text{铝}} | \quad (6)$$

水—水蒸气界面张力体积力 $F_{s, \text{水-汽}}$

$$F_{s, \text{水-汽}} = \sigma_{\text{水-汽}} \frac{\rho_m}{0.5(\rho_{\text{水}} + \rho_{\text{汽}})} \cdot (\alpha_{\text{水}} \nabla \alpha_{\text{汽}} + \alpha_{\text{汽}} \nabla \alpha_{\text{水}}) | \nabla \alpha_{\text{水}} | \quad (7)$$

式中: σ 为表面张力系数; $\sigma_{\text{铝-水}} = 0.4 \text{ N/m}$; $\sigma_{\text{水-汽}} = 0.059 \text{ N/m}$; F_s 方向垂直于对应界面,主导铝液碎化与水蒸气气泡生成; ρ_m 为四相体系的混合密度, kg/m^3 ; α_k 为各相的体积分数; k 代表铝液、水或水蒸气相; ∇ 为梯度算子; $| \nabla \alpha_{\text{铝}} |$ 和 $| \nabla \alpha_{\text{水}} |$ 为铝液和水的体积分数梯度的模。

1.2.2 基本控制方程

铝液、水密度稳定,空气与水蒸气流速低于声速,假设各相为不可压缩牛顿流体,忽略辐射换热,对流与导热为主要传热方式^[14],建立四相耦合的控制方程:

(1) 质量守恒方程

描述控制体总质量守恒,忽略外部质量源项,方程为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla (\rho_m u) = 0 \quad (8)$$

式中: t 为时间, s ; u 为流体速度矢量, m/s ; ∇ 为散度算子;左侧第一项为非稳态质量变化率,第二项为对流质量通量变化。

(2) 动量守恒方程

考虑重力、粘性力及两类界面张力,动量方程(Navier-Stokes 方程)为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla (\rho_m u) = - \nabla p + \nabla [\mu_m (\nabla u + \nabla u^T)] + \rho_m g + F_s \quad (9)$$

式中: p 为静压力, Pa ; ∇ 为梯度算子; ∇u^T 为速

度梯度转置矩阵(描述粘性应力张量); g 为重力加速度矢量,取 9.81 m/s^2 ,沿 y 轴负向;右侧依次为压力梯度力、粘性力、重力及总界面张力,主导铝液下落、水的流动及水蒸气气泡上浮。

(3) 能量守恒方程

核心驱动为高温铝液向水的传热及水-水蒸气相变潜热交换^[15],能量方程需耦合相变源项,公式为

$$\frac{\partial (\rho_m c_{p,m} T)}{\partial t} + \nabla (\rho_m c_{p,m} u T) = \nabla (k_m \nabla T) + S_{\text{phase}} \quad (10)$$

式中: T 为温度, K ; $c_{p,m}$ 为多相体系的混合比热容,由各相热物理参数加权得到;左侧第一项为非稳态能量变化率,第二项为对流换热项;右侧第一项为导热换热项; S_{phase} 为水-水蒸气相变源项,是连接传热与相变的关键。

由于爆炸过程持续时间约 $10 \sim 100 \text{ ms}$,远短于铝液凝固所需的秒级时间,故可以忽略铝液凝固^[16];空气与水蒸气无相变作用,仅通过对流与导热参与热量交换,符合实际爆炸场景中“空气为惰性气相”的特性^[17]。

1.2.3 湍流模型($k-\omega$ 模型)

熔融铝液遇水爆炸过程中,铝液从初始下落的射流态、与水接触后的碎化过程,到水蒸气气泡生成后的上浮扰动,均伴随强剪切流动与湍流脉动^[18],如铝液-水界面的速度梯度引发的涡旋、水蒸气气泡破裂产生的局部流场扰动,需通过湍流模型量化湍流对动量传递的影响。本研究选用标准 $k-\omega$ 湍流模型,其核心是通过求解湍动能与比耗散率的输运方程,构建湍流粘性系数 μ_t ,进而修正动量方程中的粘性项。

(1) $k-\omega$ 模型的控制方程

$k-\omega$ 模型通过求解 k 和 ω 的双输运方程,实现对湍流粘性系数 μ_t 的动态计算,进而将“层流粘性 μ_m + 湍流粘性 μ_t ”作为总粘性系数纳入公式(9)的动量方程。具体输运方程如下:

湍动能(k)输运方程

$$\frac{\partial (\rho_m k)}{\partial t} + \nabla (\rho_m u k) = \nabla \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (11)$$

比耗散率(ω)输运方程

$$\frac{\partial (\rho_m \omega)}{\partial t} + \nabla (\rho_m u \omega) = \nabla \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (12)$$

式中: ρ_m 为四相体系的混合密度; ∇ 为散度算子; u 为流体速度矢量; μ_m 为四相体系的混合层流

粘度; μ_t 为 $k-\omega$ 模型计算得到的湍流粘性系数; G_k 为湍动能生成项; Y_k 为湍动能耗散项; S_k 为湍动能的源项,本研究无额外外部扰动,取0; σ_ω 为比耗散率 ω 的扩散系数; G_ω 比耗散率生成项; Y_ω 比耗散率耗散项; D_ω 比耗散率的交叉扩散项; S_ω 比耗散率的源项,但本研究无额外外部扰动,取0。

(2) 选择 $k-\omega$ 模型的原因

$k-\omega$ 模型在本研究熔融铝液遇水爆炸模拟中适配性突出:针对铝液与水槽壁面、铝液-水界面的强剪切流,能精准捕捉近壁湍流梯度,契合铝液碎化过程。另外作为两方程模型,相比计算量较大的DNS等高级模型,可在保证湍流核心特性及模拟精度的同时,将瞬态爆炸过程的计算资源需求控制在合理范围,兼顾时效性与可靠性。

1.3 边界条件和求解方法

初始状态下各相分布图如图2所示,模型上端凸起部分为压力出口,表压为零,计算区域内压力为一个标准大气压,模型外侧与水槽边界均定义为无滑移壁面(wall),且设置零速度梯度条件,以实现对流体域的约束。红色区域为熔融铝液,绿色区域为水,蓝色区域为空气,后面会有橙黄色区域表示为水发生相变之后产生水蒸气。数值模拟在常温常压下进行,重力加速度为 -9.8 m/s^2 ,两个铝液柱参数一致,宽度为2.5 cm,高度为10 cm,初始温度为1173 K,初始速度大小为3 m/s。水槽内水的宽度为30 cm,高度为15 cm,初始温度为300 K。

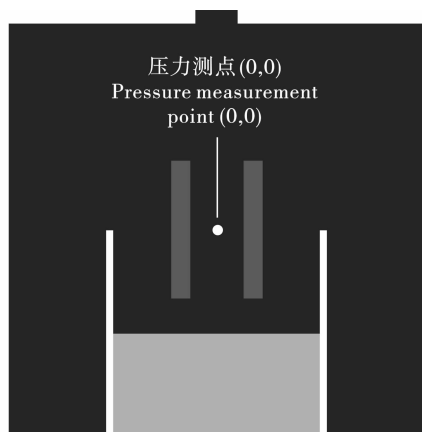


图2 初始状态下各相分布图

Fig. 2 Distribution of each phase in the initial state

采用二维双精度压力基求解器进行计算,压力-速度耦合计算采用SIMPLE算法。动量与能量采用的离散方法是二阶迎风格式,压力选用PRESTO高阶数值离散格式,迭代时间步长设定为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}$,单步迭代次数为20次。

通过该模型计算出熔融铝液遇水爆炸过程中的多相分布状态图、测点处爆炸压力大小和计算区域温度云图。

2 模拟结果及讨论

2.1 网格独立性验证

为验证网格独立性,采用了三种网格划分方案,分别包含14208、88800和227328个网格。通过监测水槽开口中心处(0,0)的压力峰值的大小,评估网格的数量划分对模拟结果的影响,如图3所示,14208网格的与88800和227328网格的测点处压力峰值存在明显偏差,而后两者的峰值相近。因此,选取88800个网格,以确保数值模拟的精度达到要求的同时兼顾计算效率。

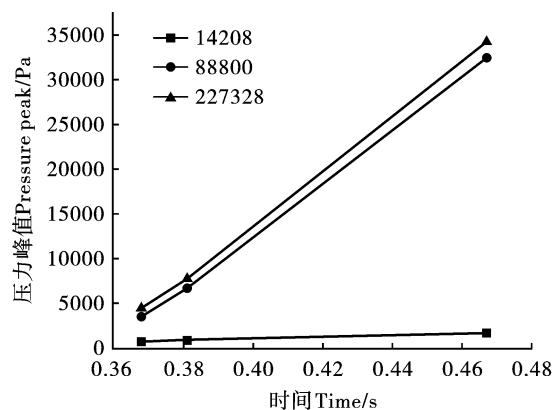


图3 网格独立性验证

Fig. 3 Verification of grid independence

2.2 熔融铝液遇水爆炸过程

图4为熔融铝液泄漏到水槽中与水发生热交换以及水槽内压力急剧膨胀做功的过程。如图4所示, $t=0 \sim 0.045 \text{ s}$ 时,两根铝液柱体从水面上方进入水中,初始阶段并未产生很多的水蒸气,铝液柱下端接触水后受与密度相关的 $R-T$ 不稳定性影响呈倒伞状,液柱侧面受与相对速度相关的 $K-H$ 不稳定性影响而变得不规则,此时铝液的变形主要为水力效应导致的。 $t=0.090 \text{ s}$ 时,相邻铝液中间部分的水由于铝液的传热而开始发生相变产生水蒸气,熔融铝液入水后其表面会形成蒸汽膜而阻碍其将热量持续的传递给水,主体铝液柱传递水的热量非常少,从图中可以看出铝液柱的主体部分在最下端部分,故此处并未产生水蒸气。 $t=0.150 \text{ s}$ 时,该阶段铝液呈U型,发生变形铝液比表面积变大,传热速率加快,产生了许多水蒸气,其压力将部分水顶出水槽上方。 $t=0.285 \text{ s}$ 时,铝液的变形使得铝液与水接触的比表面积增加,并产生大量的水蒸气,水蒸气对上

端铝液的挤压使其变形的更加明显,此时铝液的变形主要由热力效应导致的。 $t = 0.300 \sim 0.345$ s,可以看到部分铝液受到水蒸气挤压发生碎化,而且此部分铝液脱离主体铝液后,在流场内更容易发生进一步的碎化,从而放出更多的热量传递给水,故产生了

大量的水蒸气。 $t = 0.345 \sim 0.600$ s,铝液的主体部分接触到水槽底部并发生碎化,同时生成的大量水蒸气进一步聚拢成很大的水蒸气团,在压力作用下向外做功,使得水槽内外大部分区域被水蒸气覆盖。

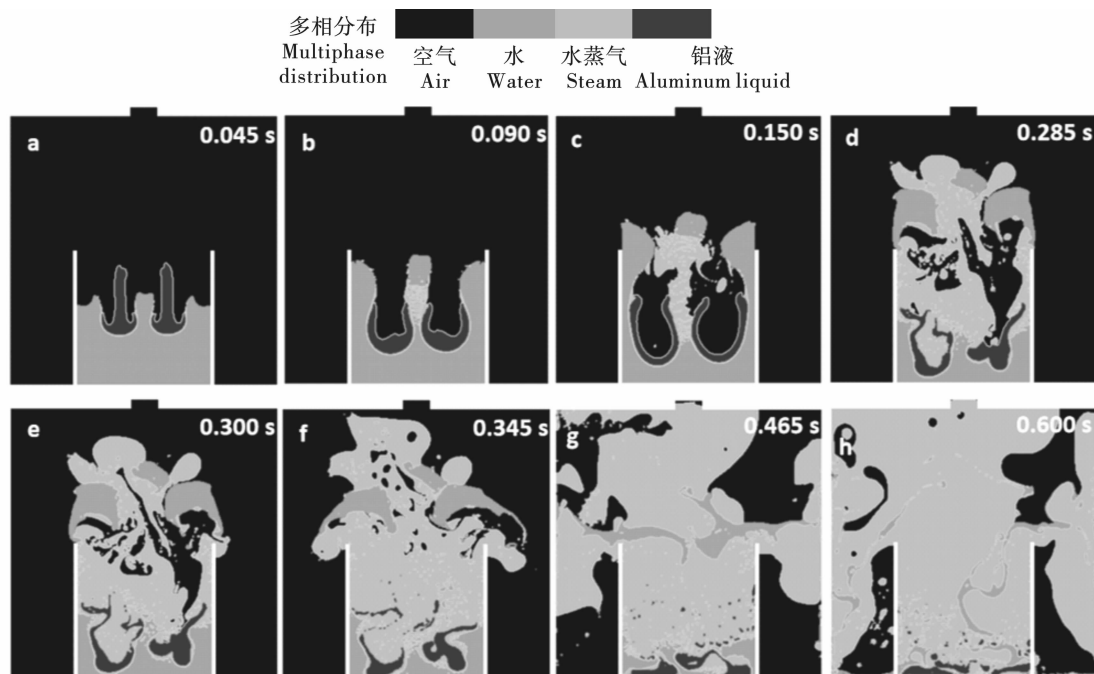


图 4 不同时间下熔融铝液遇水多相图

Fig. 4 Phase diagram of molten aluminum in contact with water at different time points

2.3 爆炸压力分布

为探究熔融铝液爆炸过程中压力的变化规律,在水槽开口中心设置了一个监测点(0,0),图 5 为熔融铝液遇水爆炸对测点处产生的压力随时间的变化趋势。

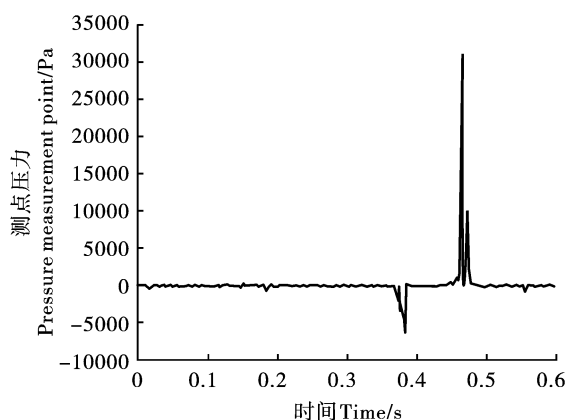


图 5 测点处爆炸压力随时间的变化曲线

Fig. 5 Time-dependent curve of explosion pressure at the measurement point

由测点压力曲线可知,仅发生初次碎化时,系统

仅出现微弱压力波动, $t = 0.38$ s 时约 -5 kPa 的局部负压,未形成有效爆炸; $t = 0.45 \sim 0.47$ s,测点处发生了两次压力突变,说明系统曾发生两次蒸汽爆炸, $t = 0.465$ s 时出现第一次蒸汽爆炸,爆炸压力大小在 31.5 kPa 左右,此次爆炸使得铝液继续碎化出更多小液滴且主体铝液发生显著变形,铝液与水之间的换热效率显著提升,并在 $t = 0.47$ s 引发第二次蒸汽爆炸,爆炸压力仅有 10 kPa 左右,此后蒸汽团压力聚集到一定程度向外做功,压力迅速下降。

2.4 爆炸温度分布

熔融铝液遇水过程的温度随时间的分布如图 6 所示。

由图可知, $t = 0.090$ s 时铝液刚与水接触,铝液表面形成蒸汽膜,隔绝铝液与水的直接接触。红色高温区集中在铝液主体部分,对应图 4(b),形态完整,此时铝液尚未发生碎化,热量以传导和对流为主向水传递。 $t = 0.285$ s 时,蒸汽膜因热不稳定发生坍塌,水与铝液直接接触使其之间的换热面积增大,故图 6(b)中铝液附近为高温区,水受热发生相变产生大量的水蒸气,对应图 4(d),水蒸气温度大约在

400 ~ 800 K 之间。 $t = 0.465$ s 时,碎化后铝液的比表面积剧增,热交换效率迅速提升,水被瞬间闪蒸为水蒸气,引发蒸汽爆炸,水槽内充满着大量的高温水

蒸气,对应图 4(g),且温度明显高于水槽外的水蒸气。 $t = 0.600$ s 时,温度分布趋于更均匀的扩散状态,对应图 4(h),表明爆炸能量已初步释放。

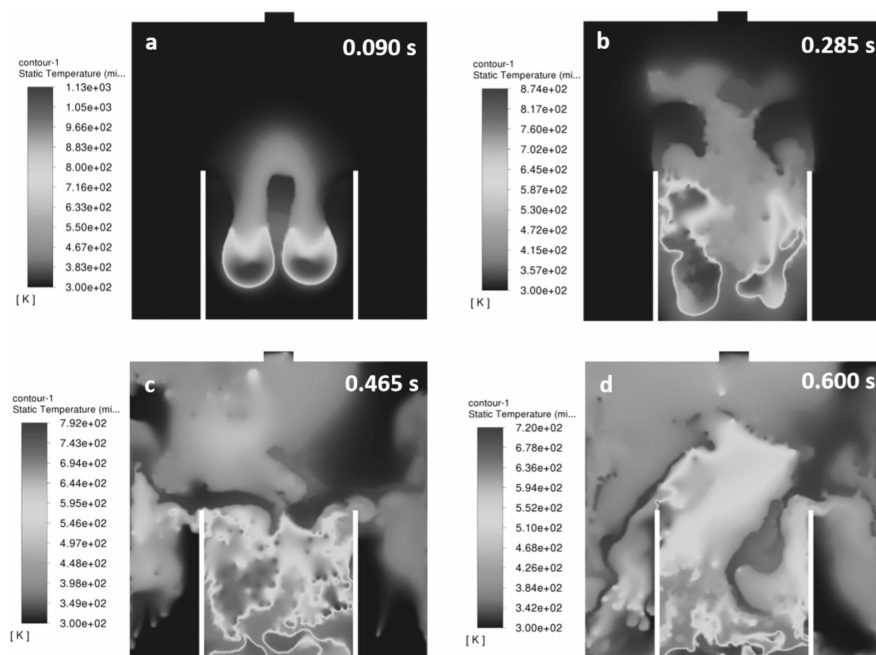


图6 熔融铝液遇水温度随时间分布图

Fig. 6 Temperature distribution of molten aluminum upon contact with water over time

2.5 模型局限性分析

本研究构建的数值模型对熔融铝液遇水爆炸过程进行了模拟,但仍存在一定局限性。采用的二维轴对称模型,虽能捕捉主要物理机制,但无法反映三维空间中的湍流混合与不对称破碎细节;模型忽略了铝液凝固过程以及铝液与水的化学反应,这与实际中铝液遇水过程有所区别;本研究主要进行了模拟结果的自洽性与趋势性分析,缺乏与实验数据的定量对比验证。未来的研究将致力于发展三维模型、加入化学反应模型,并通过与实验的对比,进一步提升模型的预测精度。

3 结论

本研究通过对水力效应与热力效应引发的铝液碎化现象开展仿真分析,构建了熔融铝液泄漏模型,探究熔融铝液遇水爆炸中水力效应、热力效应导致的变形碎化,系统分析了铝液碎化机制,研究爆炸过程及水槽开口中心处的压力情况及计算区域内温度分布情况,结论如下:

(1)熔融铝液遇水爆炸过程中,水力和热力效应均对铝液的变形及碎化具有一定影响。熔融铝液遇水碎化过程呈现“水力主导初期变形—热力驱动

后期碎化”的阶段性特征,其中热力效应是导致铝液进一步碎裂并引发爆炸的关键动力。

(2)碎化引起的换热增强是蒸汽爆炸的关键因素。铝液碎化后比表面积增大会显著增强传热,导致水蒸气急剧生成与压力骤增。监测点处两次压力峰值(最高约 31.5 kPa)证实了“碎化—换热—蒸汽爆炸”的链式反应机制。

(3)熔融铝液遇水过程的温度分布呈阶段性动态变化。初始阶段铝液表面形成蒸汽膜隔绝传热,高温区集中于铝液主体;蒸汽爆炸阶段铝液与水的换热面积剧增引发蒸汽爆炸,爆炸区水蒸气温度高于外围;爆炸后阶段温度分布均匀,能量释放扩散,系统进入热平衡过渡状态。

参考文献 (References)

- [1] 陈凌海,罗锐,王洲,等. 两种不同类型 FCI 的机理对比研究[J]. 核动力工程, 2007(1): 45-48.
- [1] CHEN Ling-hai, LUO Rui, WANG Zhou, et al. Comparative study on the mechanisms of two different types of FCI [J]. Nuclear Power Engineering, 2007(1): 45-48. (in Chinese)
- [2] 周雅凡. 高温熔融铝液遇水爆炸风险分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.

- [2] ZHOU Ya-fan. Risk analysis of explosions caused by high-temperature molten aluminum liquid contacting water [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020. (in Chinese)
- [3] 沈正祥, 陈 虎, 王 杜, 等. 铸造工艺中蒸汽爆炸事故形成机制分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(5): 150-154.
- [3] SHEN Zheng-xiang, CHEN Hu, WANG Du, et al. Analysis of the formation mechanism of steam explosions in casting processes[J]. China Journal of Work Safety Science and Technology, 2018, 14(5): 150-154. (in Chinese)
- [4] 陈守辉, 唐 剑, 陈向富, 等. 铝熔体半连续(深井)铸造爆炸事故的原因分析及防范措施[J]. 铝加工, 2022(5): 67-72.
- [4] CHEN Shou-hui, TANG Jian, CHEN Xiang-fu, et al. Analysis of causes and preventive measures for explosions in semi-continuous(deep-well) casting of molten aluminum [J]. Aluminum Processing, 2022(5): 67-72. (in Chinese)
- [5] 夏 营. 熔融物与冷却剂相互作用过程粗混合阶段的数值模拟分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [5] XIA Ying. Numerical simulation analysis of the coarse mixing stage in the interaction process between molten materials and coolants[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)
- [6] KONG Ling-yu, LIU Xiao-zhen, SHI Zhong-ning, et al. Numerical simulation of liquid aluminum leakage in casting process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(1): 297-305.
- [7] V A Bui, T N Dinh, B R Sehgal. Numerical simulation of surface instability phenomena associated with fuel-coolant interaction[C] // Proceedings of the Eighth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NuReTH-8), Kyoto, Japan, 1997: 639-646.
- [8] WEI Lin-kai, RENAUD M, ST PHANE P, et al. Analysis and sensitivity study of steam explosion loads[J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 194: 110064.
- [9] 王瑞金, 张 凯, 王 刚. FLUENT 技术基础与实用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [9] WANG Rui-jin, ZHANG Kai, WANG Gang. Fundamentals and practical applications of FLUENT technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [10] WANG Qiang, GOSSELIN L, FAFARD M, et al. Numerical investigation on the impact of anode change on heat transfer and fluid flow in aluminum smelting cells[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, 47(2): 1228-1236.
- [11] 单梦琪. 熔融金属与水接触相变换热与碎化特性研究[D]. 常州: 常州大学, 2023.
- [11] SHAN Meng-qi. Study on phase change heat transfer and fragmentation characteristics of molten metal in contact with water [D]. Changzhou: Changzhou University, 2023. (in Chinese)
- [12] Minsoo K, KWANG Hyun B. Numerical simulation of kelvin helmholtz instability and boundary layer stripping for an interpretation of melt jet breakup mechanisms [J]. Energies, 2022, 15(20): 7517-7517.
- [13] 段广涛, 陈 斌. 一种适用于气泡运动模拟的半隐式粒子法[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(5): 1019-1022.
- [13] DUAN Guang-tao, CHEN Bin. A semi-implicit particle method for bubble motion simulation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(5): 1019-1022. (in Chinese)
- [14] 李好婷, 朱玉颖, 孔德旭, 等. 多孔介质内颗粒流动特性及其对传热影响的模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(8): 2017-2026.
- [14] LI Hao-ting, ZHU Yu-ying, KONG De-xu, et al. Simulation study on particle flow characteristics in porous media and their influence on heat transfer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(8): 2017-2026. (in Chinese)
- [15] LIU Tao, ZHOU Yuan, ZHONG Ming-jun, et al. A cfd modeling coupled with vof method and solidification model for molten jet breakup at low velocity[J]. Nuclear Science and Engineering, 2023, 197(3): 398-412.
- [16] 周 宁, 李 雪, 陈 兵, 等. 高温熔融铝液与水接触爆炸过程实验研究[J]. 实验力学, 2021, 36(1): 114-122.
- [16] ZHOU Ning, LI Xue, CHEN Bing, et al. Experimental study on the explosion process of high-temperature molten aluminum liquid contacting water[J]. Experimental Mechanics, 2021, 36(1): 114-122. (in Chinese)
- [17] SHEN Zheng-xiang, CHEN Hu, LV Zhong-jie, et al. Study on large - scale steam explosion of molten aluminum and water [J]. Process Safety Progress, 2020, 39(4): 12149.
- [18] 辛 琦, 吕中杰, 冯 杰, 等. 熔融铝液遇水碎化研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2): 228-232.
- [18] XIN Qi, LV Zhong-jie, FENG Jie, et al. Study on the fragmentation of molten aluminum upon contact with water [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2014, 35(S2): 228-232. (in Chinese)