

DOI: 10.7652/xjtub202003005

气液射流反应流动特性的数值研究

宗潇, 李宏伟, 韩新波, 彭博, 杨赅石

(中国船舶重工集团公司第七〇五研究所, 710075, 西安)

摘要: 针对气液射流反应过程的流动特性,在欧拉两相流模型、组分输运模型、涡耗散化学反应模型以及 Lee 相变模型的基础上,对气态六氟化硫与高温液态金属锂的气液射流反应过程进行了三维数值模拟研究,分析了射流反应气羽宏观参数及其变化规律,研究了入口压力对流场温度分布的影响及其与气羽的对应关系。研究表明:所采用的数值模拟方法可以较好地预测气液射流反应过程;射流反应气羽主要由六氟化硫核心区和锂蒸气气羽区组成,宏观结构参数主要由锂蒸气气羽决定;六氟化硫核心区与锂蒸气气羽穿透长度均随入口压力的增加而增加;温度峰值位置和总反应速率峰值位置与射流反应气羽尾部相对应。研究结果可为气液射流反应器的优化设计和安全运行提供指导。

关键词: 射流反应;液态金属锂;相变;气羽;数值模拟

中图分类号: TK2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0035-06

Numerical Investigation on Flow Characteristics of Gas-Liquid Reactive Jet

ZONG Xiao, LI Hongwei, HAN Xinbo, PENG Bo, YANG Chengshi

(The 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710075, China)

Abstract: For the purpose of investigating the flow characteristics of the gas-liquid reactive jet, an integrated mathematical model, including Euler two-phase model, species transport model, eddy-dissipation reaction model and Lee phase change model, was built up for 3D numerical simulation on the gas-liquid reactive jet of gaseous sulfur hexafluoride (SF_6) injected into liquid metal lithium, wherein the key parameters of the reactive jet plume and their variation were investigated. The effect of inlet pressure on temperature field was analyzed, and the corresponding relationship between jet plume and temperature field was also investigated. The results indicate that the numerical model could better predict gas-liquid reactive jet in present work, the reactive jet plume consists of the core region of sulfur hexafluoride and the region of lithium vapor plume, and the macrostructure of the reactive jet is mainly determined by lithium vapor plume. The core region of sulfur hexafluoride and the lithium vapor plume increase with the inlet pressure. The crest values of temperature distribution and total reaction rate correspond with jet plume tail. The investigation in this work would be helpful for better design and safer operation of the gas-liquid jet reactor.

Keywords: jet reactor; liquid metal lithium; phase change; plume; numerical simulation

收稿日期: 2019-07-08。 作者简介: 宗潇(1988—),男,博士后。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61403306);中国博士后科学基金资助项目(2018M633600);中国科协青年人才托举项目(2017QNRC001)。

网络出版时间: 2019-12-09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191207.1442.006.html>

气液射流反应器是以气态氧化物喷射入高温液态金属燃料熔池反应放热为能量来源的热源装置,具有储能密度大、结构简单、可靠性高等特点,在航空航天以及水下推进等领域有广阔的应用前景^[1-3]。

射流反应核心区结构参数及其流场分布是反应器设计和运行的关键参数,国内外学者进行了大量研究。例如:Avery 等对 $\text{Cl}_{2(g)}\text{-Na}_{(l)}$ 以及 $\text{Cl}_{2(g)}\text{-Na/NaCl}_{(l)}$ 混合物中的射流反应过程进行了可视化研究,建立了基于可变密度模型的射流穿透长度实验关联式,研究结果表明所建立的实验关联式在其他射流反应体系中也有良好的通用性^[4];Parnell 等在 $\text{SF}_{6(g)}\text{-Li}_{(l)}$ 射流反应的可视化研究中发现 SF_6 气体质量流率、反应压力以及射流方向等均会对穿透长度及流动稳定性造成影响^[5-6];Cho 等在 $\text{HCl}_{(g)}\text{-NH}_{3(aq.)}$ 的可视化研究中发现射流穿透长度的周期性变化与氨气羽的生长和破碎过程有关^[7];郑邯勇等通过实验研究和理论分析建立了 $\text{HCl}_{(g)}\text{-NH}_{3(aq.)}$ 射流穿透长度的预测关联式,确定了穿透长度的主要影响因素及其主次关系,在此基础上使用 X 光照相高速动态成像技术观测了 $\text{SF}_{6(g)}\text{-Li}_{(l)}$ 射流反应核心区的宏观结构,采用有限差分方法计算得到了反应器内温度场、物质组分分布等重要参数,并给出了有利于稳定反应与强化传热的运行条件^[8-9];Chan 等采用化学状态平衡方法计算得到了 $\text{SF}_{6(g)}\text{-Li}_{(l)}$ 气羽穿透长度、流场分布等重要参数^[10]。此外,一些学者采用局部均相流模型^[11-12]和两相流模型^[13-14]与概率密度函数模型相结合的方法预测射流核心区宏观结构和流场分布等重要参数,但由于该方法中概率密度函数的构成形式会对模拟结果产生影响,因此计算结果精度有待进一步提高。Gulawani 等采用欧拉-拉格朗日方法对 $\text{SF}_{6(g)}\text{-Li}_{(l)}$ 射流反应过程进行了数值模拟,研究了浮力对气液两相流动特性及其相间热质传递的影响^[15]。在此基础上,Dahikar 等采用大涡模拟方法计算了 $\text{HCl}_{(g)}\text{-NH}_{3(aq.)}$ 射流反应过程,计算结果与可视化实验结果符合较好^[16-17]。

现有研究采用单相流模型或者简化的两相流模型对射流反应过程进行模拟研究,而对射流反应过程至关重要的流场细节特征研究相对较少,特别是入口压力对流场参数以及气羽结构影响的研究尚未见公开文献报道。因此,本文采用三维稳态计算方法,在欧拉两相流模型和组分输运模型的基础上,通过 Ansys Fluent 计算平台以自定义函数(UDF)的方法描述射流反应过程中所涉及的异相化学反应以及蒸发和凝结等物理现象,对气态 SF_6 与高温液态

金属锂($\text{SF}_6\text{-Li}$)射流反应气羽的宏观结构及其流动特性进行数值模拟计算,给出了 $\text{SF}_6\text{-Li}$ 射流反应气羽的宏观结构及变化规律,研究了入口压力对气羽和温度分布的影响,并讨论了流场与气羽的对应关系,以期气液射流反应器的设计和安全运行提供指导。

1 气液射流反应现象

$\text{SF}_6\text{-Li}$ 射流反应现象物理模型如图 1 所示。气态 SF_6 喷射入高温金属燃料熔池与液态 Li 进行反应,在熔池温度下,液态 Li 已接近饱和温度。由于 $\text{SF}_6\text{-Li}$ 反应放热量极大,当反应核心高温区温度超过液态 Li 对应压力下的饱和温度时,部分 Li 开始蒸发,形成 Li 蒸气区。同时, Li 蒸气与周围液态 Li 又会发生直接接触凝结换热现象,放出潜热,再次转变为液态。因此, SF_6 核心区与 Li 蒸气区共同构成了类似于射流凝结现象中的气羽^[18]。

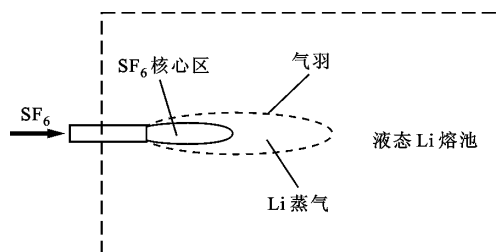


图1 $\text{SF}_6\text{-Li}$ 射流反应现象物理模型

2 数值模型及边界条件

2.1 模型设置

本文在涡耗散化学反应速率模型和 Lee 相变模型^[19]的基础上,采用欧拉两相流模型与组分输运模型相结合的方法对射流反应过程进行数值模拟。计算时 SF_6 设置为第二相,反应混合物设为主相, SF_6 高速流动并且可压缩,因此将其视为可压缩流体,以理想气体方程计算其密度,并采用 Realizable $k\text{-}\epsilon$ 湍流模型描述其湍流特性。相间曳力采用 Schiller-Naumann 模型,传热采用 Ranz-Marshall 模型,由涡耗散模型计算的化学反应速率和 Lee 相变模型计算的相变质量交换速率分别以 UDF 的方式嵌入 Ansys Fluent 计算平台。模型中热物性参数,如比热容、黏度、导热系数等均来自 NIST 数据库,采用双精度求解器进行计算,并采用压力-速度耦合的 Phase Coupled SIMPLE 算法进行求解。喷嘴直径相对于反应器尺寸很小,在一定的时间内,距喷嘴较远处的温度及其组分浓度变化可忽略,因此采用稳

态求解器。由于反应和相变过程都很剧烈,因此为保证计算的稳定性和收敛性,除动量、能量以及组分方程采用2阶迎风格式外,密度与体积分数均采用1阶迎风格式对控制方程进行离散。计算过程中对SF₆入口质量流量进行实时监测,当流量不再变化,且能量方程残差小于10⁻⁶、其余方程残差小于10⁻³时认为迭代收敛。

2.2 欧拉两相流模型

采用欧拉两相流模型分别计算气液相的连续性方程、动量方程和能量方程,并采用压力、温度以及相对速度等计算相间耦合作用。其中,连续方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) = (m_{ig} - m_{gf}) + S_m \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}_g$ 为气相速度; m_{ig} 和 m_{gf} 为相变质量交换速率; S_m 为其他质量源项。

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \tau_g + \alpha_g \rho_g \mathbf{g} + (F_{ig} + m_{ig} \mathbf{v}_{ig} - m_{gf} \mathbf{v}_{gf}) + F_g + F_{lift,g} + F_{vm,g} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{v}_{ig}$ 和 $\mathbf{v}_{gf}$ 为相间速度; $\nabla \tau_g$ 为切应力; F_g 为内部体积力; $F_{lift,g}$ 为升力; $F_{vm,g}$ 为虚拟质量力; F_{ig} 为相间曳力。

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g h_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g h_g) = -\alpha_g \frac{\partial p_g}{\partial t} + \tau_g \nabla u_g - \nabla q_g + S_g + (Q_{ig} + m_{ig} h_{ig} - m_{gf} h_{gf}) \quad (3)$$

式中: h_g 为比焓; S_g 为能量源项。

2.3 组分输运模型

组分输运模型为反应过程中描述组分变化的基本控制方程,对于组分 i ,其控制方程为

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{ieff} \frac{\partial(Y_i)}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (4)$$

式中: Y_i 为组分 i 的质量分数; Γ_{ieff} 为有效扩散系数; S_i 是由于化学反应而产生的组分源项。组分 i 的生成或消耗速率可由其参与反应的反应速率决定

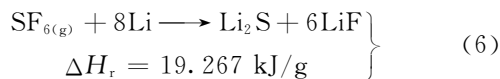
$$S_i = \sum_{i=1}^N (\nu''_i - \nu'_i) R_i \quad (5)$$

式中: R_i 为相对于组分 i 的化学反应速率; ν''_i 、 ν'_i 分别为生成物和反应物的化学计量数。

2.4 反应模型

由SF₆-Li射流反应的物理过程可知,在射流反应器内部主要会出现4种物理现象:①SF₆与Li蒸气的反应;②SF₆与液态Li的反应;③在剧烈放热作用下液态Li的蒸发;④未参与反应的气态Li的

凝结。其化学反应方程式为



本文以涡耗散模型计算SF₆-Li射流反应过程的宏观化学反应速率,在此模型中,混合速率可由局部湍流动能及其耗散率计算,由反应物浓度计算的总反应速率为

$$R_{i,R} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A \rho_i \frac{\epsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{\nu_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (7)$$

式中:下标R代表反应物; M_w 为摩尔质量; ν' 为化学计量数; ϵ 和 k 分别为湍流耗散率和湍流动能。对于反应产物,宏观反应速率为

$$R_{i,P} = \nu'_{i,r} M_{w,i} A B \rho_i \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\sum_{j=1}^N Y_{j,P}}{\sum_{j=1}^N \nu''_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (8)$$

式中:下标P代表反应产物; A 和 B 通常是由反应类型决定的常数,分别为4.0和0.5。总的宏观反应速率由式(7)和式(8)中最小的一个决定,因此组分输运模型中的化学反应速率可由下式计算

$$R_i = \min(R_{i,P}, R_{i,R}) \quad (9)$$

2.5 相变模型

SF₆-Li射流反应过程中液态Li的蒸发和Li蒸气的凝结现象由Lee^[19]相变模型计算。此模型中,相变质量交换速率由下式计算

$$m_{ig} = r_{ig} \alpha_f \rho_f \frac{T - T_s}{T} T > T_s \quad (\text{蒸发}) \quad (10)$$

$$m_{gf} = r_{gf} \alpha_g \rho_g \frac{T_s - T}{T} T < T_s \quad (\text{凝结}) \quad (11)$$

式中: m_{ig} 和 m_{gf} 分别为蒸发和凝结时的质量交换速率; α_f 、 α_g 、 ρ_f 、 ρ_g 分别为液态Li和Li蒸气的体积分数和密度; r_{ig} 和 r_{gf} 分别代表蒸发和凝结时的相变强度的经验常数,在计算过程中,为使气液界面温度接近局部压力下的饱和温度,其值通常在0.1~10⁷ s⁻¹的范围内变化。本文模拟计算结果表明,在蒸发常数取值为10⁴和凝结常数取值为10⁶下,可取得与实验符合较好的模拟结果,因此在本文研究中,蒸发常数和凝结常数的取值分别为10⁴和10⁶。

2.6 边界条件

在模拟过程中:喷嘴采用压力入口,喷嘴内SF₆高速流动,因此其壁面采用绝热边界条件;反应器壁面远离射流核心区,且外壁面通常设置冷却器,因此采用等温壁面;反应器出口布置在喷嘴对面,设置为压力出口,其压力即为反应器内部的环境压力,温度为液态Li的温度。模拟过程中边界条件的设置如

表 1 所示。

表 1 数值模拟边界条件	
参数	数值
入口压力 p_g/kPa	200~800
入口温度 T_g/K	298
喷嘴直径 d_e/mm	2
熔池温度 T_0/K	1 200
环境压力 p_o/kPa	100

3 模型验证

为验证模型的正确性,本文分别在网格数为 82 000、117 180 和 175 584 下对射流反应过程进行了模拟计算,并对熔池中心轴线温度 $T_{\text{mix},x}$ 分布进行比较,模拟区域及网格划分如图 2 所示,模拟结果如图 3 所示。可以看出,不同网格数下的中心轴线温度分布基本一致,因此本文选取网格数为 117 181 的网格划分策略对射流反应过程进行数值模拟计算。

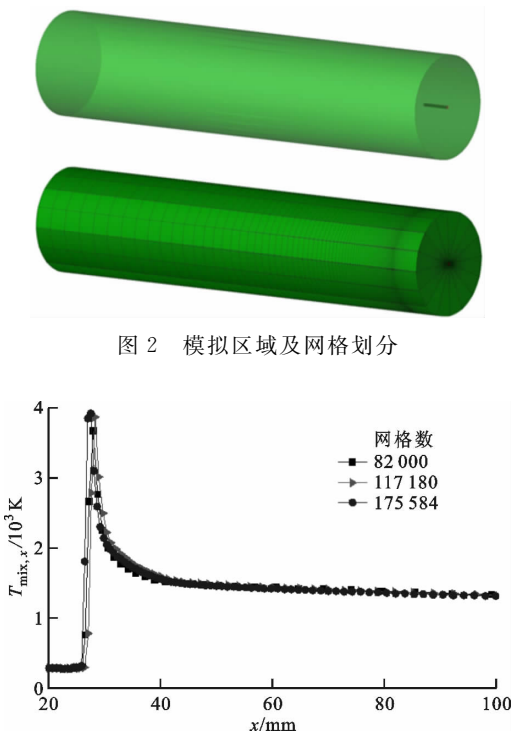


图 2 模拟区域及网格划分

图 3 网格无关性验证

本文射流反应归一化气羽穿透长度 L_{pre} 的计算结果与文献[5,10]中归一化气羽穿透长度 L_{lit} 的对比如图 4 所示,可以看出,本文计算结果误差在 $\pm 25\%$ 以内,表明了本文模拟计算模型和计算结果的正确性。

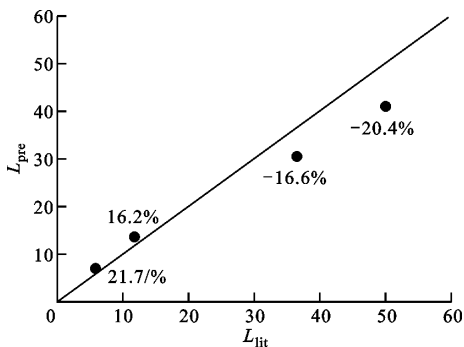


图 4 本文归一化气羽穿透长度的计算结果与文献结果^[5,10]的对比

4 结果与讨论

4.1 射流反应气羽结构

图 5 所示为 SF_6 -Li 射流反应气羽的宏观结构,其中 α_{SF_6} 为气态 SF_6 的体积分数, $\alpha_{\text{Li},g}$ 为 Li 蒸气的体积分数。从图中可以看出,射流反应气羽主要由 SF_6 核心区和 Li 蒸气区组成, SF_6 核心区与 Li 蒸气区共同构成了类似于射流凝结现象中的气羽。 SF_6 在流出喷嘴后与熔池内液态 Li 迅速反应,而由反应放热蒸发形成的 Li 蒸气区远远大于 SF_6 核心区,因此 SF_6 -Li 射流反应气羽的宏观结构参数及其影响区域主要由 Li 蒸气气羽决定。

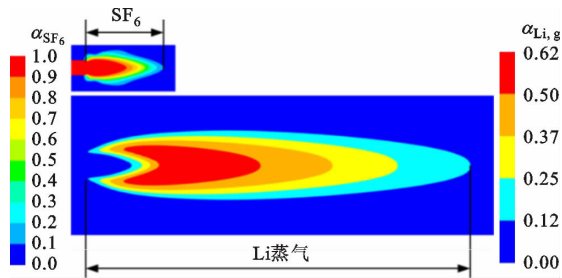


图 5 射流反应气羽宏观结构

图 6 和图 7 分别给出了入口压力对 SF_6 核心区以及 Li 蒸气气羽的影响。从图中可以看出, SF_6 核心区与 Li 蒸气气羽穿透长度均随入口压力的增大而增大。这是因为随着入口压力的增大, SF_6 质量

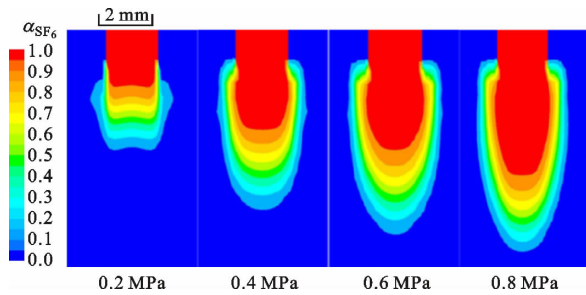


图 6 入口压力对 SF_6 核心区的影响

流量也随之增加,因此有更多的 SF_6 气体通过喷管流入熔池与金属 Li 进行反应,在宏观反应速率基本保持不变的情况下,需要更多的空间进行反应使 SF_6 完全消耗,因此造成 SF_6 核心区随入口压力增大而逐渐扩大的结果。

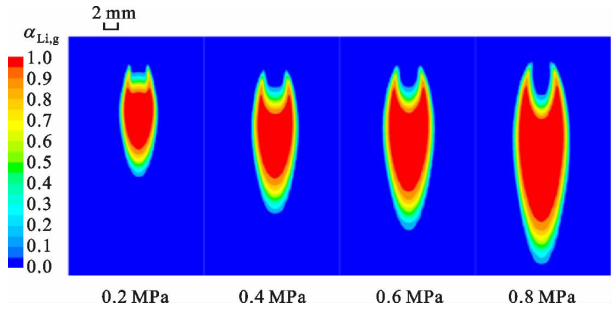


图 7 入口压力对 Li 蒸气气羽的影响

另一方面,熔池中反应总放热功率与 SF_6 气体质量流量成正比,当熔池局部温度超过液态 Li 局部压力下的饱和温度时,反应放热会由液态 Li 的蒸发相变过程吸收,因此随着放热功率的增加,将会有更多的液态 Li 蒸发为气态,而对于 Li 蒸气的凝结过程,在一定的熔池温度下,其冷凝驱动势保持不变,因此在 Li 蒸气量增大时,需要更多的气液界面使 Li 蒸气凝结, Li 蒸气气羽穿透长度也会随着入口压力以及 SF_6 质量流量的增大而增大。

图 8 所示为 Li 蒸气体积分数随入口压力的变化。从图中可以看出:在喷嘴之后, Li 蒸气体积分数迅速上升,在一定区域内存在几乎全部为 Li 蒸气的区域($\alpha_{\text{Li,g}} > 0.9$);随着入口压力的增大, Li 蒸气核心区不断扩大,在核心区之后, Li 蒸气体积分数迅速下降。由于液态 Li 的冷凝驱动势主要由熔池温度决定,因此在一定熔池温度下, Li 蒸气气羽体积分数的下降速率也基本一致。

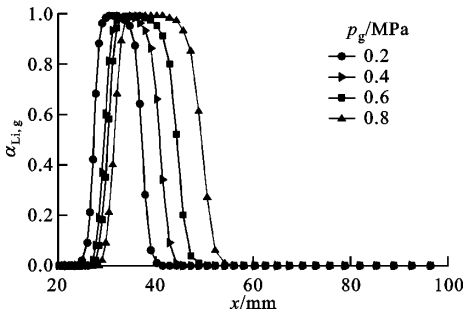


图 8 Li 蒸气体积分数分布随入口压力的变化

4.2 温度分布

图 9 给出了熔池中心轴线温度分布随入口压力的变化。从图中可以看出:随入口压力的增大,温度峰值逐渐减小,并且峰值位置离喷嘴越远。这是由

于在入口压力较小时, SF_6 气体流量也随之较小, SF_6 在距离喷嘴很短的距离内与金属 Li 完全反应,因此其温度峰值也离喷嘴较近;随着入口压力的增大, SF_6 喷嘴出口流速随之增加,因此周围流场与高温核心区反应产物间的混合和传热速率增大,温度峰值随之减小。

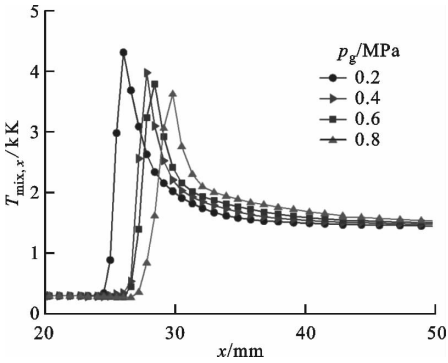


图 9 熔池中心轴线温度分布随入口压力的变化

图 10 给出了溶池中心径向温度 $T_{\text{mix},r}$ 分布随轴向位置的变化。从图中可以看出:在不同轴向位置处,温度峰值均位于中心轴线;随着轴向距离的增加,温度逐渐降低,并且在相同的轴向间距内,温度降低幅度逐渐增大。这是因为轴向距离较小的区域更接近气羽核心,此处 Li 蒸气还未与周围液态 Li 接触凝结,因此温度相对较高,而在气羽尾部,大量液态金属被卷入气羽,从而使局部凝结换热强度增大, Li 蒸气消耗更快,因此局部温度降低更快。

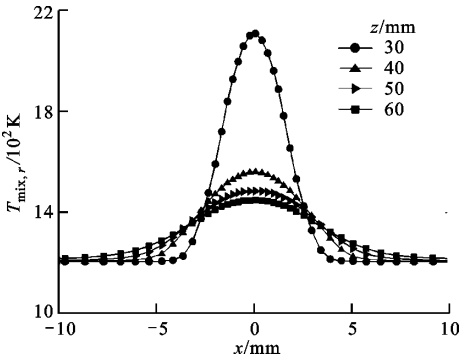


图 10 $p_g = 0.6 \text{ MPa}$ 时熔池中心径向温度分布随轴向位置的变化

图 11 给出了熔池中心径向温度分布随入口压力的变化。从图中可以看出:在不同入口压力下,温度分布峰值同样位于中心轴线;随着入口压力的降低,径向温度逐渐减小。这是由于入口压力较低时气羽长度也相对较短,因此轴向位置不变时 Li 蒸气区域更靠近气羽尾部,在凝结换热的作用下,其温度更低。

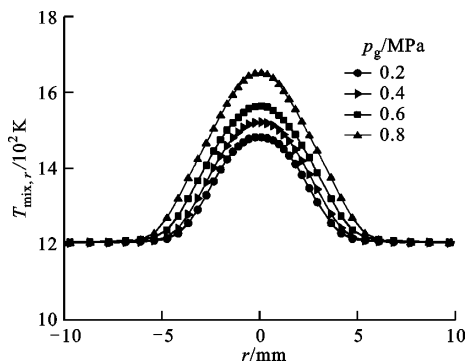


图 11 $z=40\text{ mm}$ 时熔池中心径向温度分布
随入口压力的变化

4.3 流场对应关系

图 12 给出了流场分布与气羽的对应关系,图中宏观化学反应速率 R 包括 SF_6 与液态 Li 和 Li 蒸气的总反应速率。从图中可以看出:温度分布与反应速率均沿轴线先上升后下降,温度峰值位置与反应速率峰值位置相同,表明在宏观反应速率较大的区域内其温度也相对较高;此外,温度、反应速率峰值位置与 SF_6 核心区尾部相对应。这是因为在 SF_6 尾部区域内,液态与气态 Li 同时存在, SF_6 与 Li 蒸气反应放热远远大于液态 Li,因此有使局部温度进一步升高的趋势。同时, SF_6 与液态 Li 的反应速率随着温度的升高而加快,因此在 Li 蒸气与液态 Li 同时反应的局部区域温度远远高于其他区域。

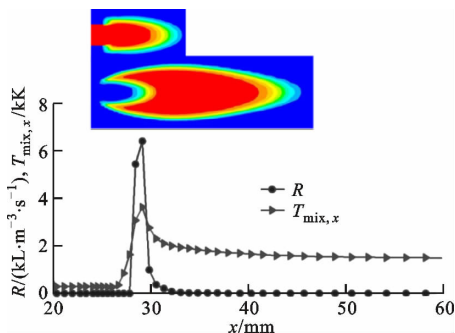


图 12 流场分布与气羽的对应关系

5 结 论

本文在欧拉两相流模型和组分模型的基础上,对气态 SF_6 与高温液态 Li 的气液射流反应过程进行了三维数值模拟研究,主要结论如下。

(1)在欧拉两相流模型和组分输运模型的基础上,本文所采用的 Lee 相变模型和涡耗散反应速率模型相结合的模拟方法可以较好地预测气液射流反应过程。

(2) SF_6 -Li 射流反应气羽主要由 SF_6 核心区和 Li 蒸气气羽区组成,Li 蒸气气羽穿透长度远远大于 SF_6 核心区,因此 SF_6 -Li 射流反应宏观结构参数主要由 Li 蒸气气羽决定。

(3) SF_6 核心区与 Li 蒸气气羽穿透长度均随入口压力的增加而增加,流场温度峰值随入口压力增大而减小,温度峰值和总反应速率峰值位置相对应,均位于 SF_6 核心区尾部。

参考文献:

- [1] 郑邯勇. Li/ SF_6 热反应器的结构形式与特点 [J]. 现代舰船, 1994, 11: 17-19.
- ZHENG Hanyong. Characteristics of the Li/ SF_6 thermal-reactor [J]. Modern Ships, 1994, 11: 17-19.
- [2] 路骏, 韩勇军, 马为锋, 等. 铝基水反应金属燃料动力系统建模与仿真 [J]. 鱼雷技术, 2016, 3(24): 211-216.
- LU Jun, HAN Yongjun, MA Weifeng, et al. Modeling and simulation of underwater propulsion system based on hydrot reactive aluminum metal fuel [J]. Torpedo Technology, 2016, 3(24): 211-216.
- [3] ZONG X, LU J, LI H W, et al. A two-phase Eulerian CFD model for predicting gas-liquid reactive jet [C]// 2019 International Conference on Power Engineering. New York, USA: ASME, 2019: 1019-1024.
- [4] AVERY J F, FAETH G M. Combustion of a submerged gaseous oxidizer jet in a liquid metal [C]// 16th International Symposium on Combustion. Boston, USA: The Combustion Institute, 1976: 501-512.
- [5] PARNELL L A, GILCHRIST J T, EDMUNDS D G. Characteristics of reaction zones in closed liquid metal combustion [C/OL] // Proceedings of AIAA/SAE/ASME/ASEE 24th Joint Propulsion Conference. [2019-06-29]. DOI: 10.2514/6.1988-2885.
- [6] PARNELL L A, GILCHRIST J T, SORESENSEN M L. A circulation-dependent instability of submerged oxidizer jets in liquid metal fuels [C/OL] // Proceedings of AIAA/SAE/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference. [2019-06-29]. DOI: 10.2514/6.1990-2750.
- [7] CHO D H, ARMSTRONG D R, BOVA L. Experimental study of reacting gas jets in liquids: heat release effects [J]. Chemical Engineering Science, 1990 (45): 423-435.
- [8] 郑邯勇, 卜建杰, 王树峰, 等. 氯化氢气在氨水中浸没喷射的研究 [J]. 推进技术, 1995, 3(6): 70-77.

(下转第 196 页)

- materials in open-cell metal foams in an inclined rectangular enclosure [J]. *Energy Procedia*, 2018, 152: 215-220.
- [23] 梁林, 刁彦华, 康亚盟, 等. 平板微热管阵列泡沫铜复合结构相变蓄热装置蓄放热特性 [J]. *化工学报*, 2018, 69: 34-42.
- LIANG Lin, DIAO Yanhua, KANG Yameng, et al. Thermal storage and release characteristics of flat-plate micro-heat pipe array-foam copper composite structure phase change thermal storage device [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69: 34-42.
- [24] LI W Q, WAN H, JING T T, et al. Microencapsulated phase change material (MEPCM) saturated in metal foam as an efficient hybrid PCM for passive thermal management: a numerical and experimental study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 146: 413-421.
- [25] 韦攀, 喻家帮, 郭增旭, 等. 环形管填充金属泡沫强化相变蓄热可视化实验 [J]. *化工学报*, 2019, 70(3): 850-856.
- WEI Pan, YU Jiabang, GUO Zengxu, et al. Visualization experiment of phase change heat storage enhanced by annular tube filled with metal foam [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(3): 850-856.
- [26] MESALHY O, LAFDI K, ELGAFY A, et al. Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(6): 847-867.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 40 页)

- ZHENG Hanyong, PU Jianjie, WANG Shufeng, et al. A study on submerged penetration of gaseous hydrogen chloride into ammonia water [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995, 3(6): 70-77.
- [9] 郑邯勇, 卜建杰. 六氟化硫在熔融锂中的浸没喷射反应过程 [J]. *化工学报*, 1996, 12(6): 656-662.
- ZHENG Hanyong, PU Jianjie. Submerged reaction jet of SF_6 injected into molten Li [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 1996, 12(6): 656-662.
- [10] CHAN S H. LiSF_6 combustion in stored chemical energy propulsion systems: AD-A224846 [R]. Arlington, USA: Office of Naval Research, 1990.
- [11] CHEN L D, FAETH G M. Structure of turbulent reacting jets submerged in liquid metals [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1983(31): 277-296.
- [12] 李侃侃, 程惠尔, 臧家亮. 用均质流模型研究 SF_6/Li 燃烧体系 [J]. *上海交通大学学报*, 1999, 33(8): 1017-1022.
- LI Kankan, CHENG Huier, ZANG Jialiang. Study on SF_6/Li combustion system using the model of homogeneous flow [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 1999, 33(8): 1017-1022.
- [13] ZHANG H Q, ZHOU L X, CHAN C K. A double- $k-\epsilon$ and multi- δ pdf model for turbulent gas-liquid reacting flows [J]. *Fuel*, 2002(81): 817-827.
- [14] 张会强, 林文漪, 周力行. 水汽浸没凝结射流两相流动的数值研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 1996, 2(3): 228-235.
- ZHANG Huiqiang, LIN Wenyi, ZHOU Lixing. Numerical simulation of the steam jet submerged in cool water with condensation [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1996, 2(3): 228-235.
- [15] GULAWANI S S, DAHIKAR S K, JOSHI J B, et al. CFD simulation of flow pattern and plume dimensions in submerged condensation and reactive gas jets into a liquid bath [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(9): 2420-2435.
- [16] DAHIKAR S K, GULAWANI S S, JOSHI J B, et al. Effect of nozzle diameter and its orientation on the flow pattern and plume dimensions in gas-liquid jet reactors [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(24): 7471-7483.
- [17] DAHIKAR S K, JOSHI J B, SHAH M S, et al. Experimental and computational fluid dynamic study of reacting gas jet in liquid: flow pattern and heat transfer [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(2): 827-849.
- [18] WU X Z, YAN J J, LI W J, et al. Experimental study on sonic steam jet condensation in quiescent subcooled water [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(23): 5002-5012.
- [19] LEE W H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling [C]// *Multiphase Transport Fundamentals, Reactor Safety, Applications*. Washington DC, USA: Hemisphere Publishing, 1980: 407-431.

(编辑 荆树蓉)