

微重力条件下 PCM 液桥内固液相变过程 及热毛细对流数值模拟*

张永春¹ 董文利¹ 孙涛¹ 高胤宇²
李至柔² 段文豪² 周小明²

1(江苏省特种设备安全监督检验研究院 南京 210036)

2(河海大学机电工程学院 南京 210024)

摘要 为揭示微重力条件下 PCM 液桥相变过程流动特征及相变演化规律, 建立 PCM 液桥数理模型, 采用数值模拟的方法系统研究了不同工况下 PCM 液桥相变过程中固液界面的演化过程, 分析不同高径比和温差对液桥形状、固液界面演化规律、相变速度和热毛细流动的影响. 研究结果显示, 在大温差条件下热毛细流动更加强烈, 处于外部壁面处的相变材料的相变速度也会更快, 外壁处的相变界面与壁面的夹角会更小. 大高径比条件下会有同样的效果, 同时也会产生更多的涡胞结构, 热毛细对流效果更明显. 结果表明, 微重力条件下通过流体界面热毛细效应强化 PCM 相变是一种有效的方法.

关键词 液桥, 相变材料, 热毛细对流, 相变, 界面, 流动

中图分类号 O351.2

Evolution Mechanism of Phase Change Materials Liquid-bridge Phase Transition and Thermocapillary Convection under Microgravity Conditions

ZHANG Yongchun¹ DONG Wenli¹ SUN Tao¹ GAO Yinyu²
LI Zhirou² DUAN Wenhao² ZHOU Xiaoming²

1(Jiangsu Institute of Special Equipment Safety Supervision and Inspection, Nanjing 210036)

2(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024)

Abstract In order to reveal the flow characteristics and evolution law of PCM liquid-bridge phase transition under microgravity conditions, the evolution process of solid-liquid interface during PCM

* 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2021750), 国家市场监管总局科技计划项目(2020MK038)和江苏省特种设备安全监督检验研究院项目(KJ(Y)202409)共同资助

2023-09-25 收到原稿, 2023-11-26 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

liquid-bridge phase transition under different working conditions was numerically studied based on numerical simulation method. The effects of different height-diameter ratio and temperature difference on the shape of liquid bridge, the evolution law of solid-liquid interface, phase transition velocity and thermal capillary flow were analyzed. The results show that under the condition of large temperature difference, the thermal capillary flow is more intense, the phase transition speed of the phase change material at the outer wall is faster, and the angle between the phase change interface at the outer wall and the wall is smaller. Under the condition of large aspect ratio, the same effect will be achieved, and more vortex cell structures will be generated, and the thermal capillary convection effect is more obvious. The results show that strengthening PCM phase transition through fluid interface thermal capillary effect under microgravity conditions is an effective method.

Key words Liquid bridge, Phase change material, Thermocapillary convection, Phase change, Interface, Flow

0 引言

相变储热利用物质相变时的能量转化储存或释放能量, 是一种重要的储能技术. 相变材料 (Phase Change Materials, PCM) 是一种备受关注的储热材料^[1], 具有储能密度大、结构紧凑、相变温度恒定且易于控制的优点, 能够在有限的空间内在接近恒定温度的情况下实现能量的储存和释放^[2], 适用于对尺寸及功耗有严格限制的航天领域. 航天器在轨道运行时, 外部会受到周期性变化的热流作用, 内部设备在运行时也会产生余热, 二者都会影响航天器内部温度, 进而影响内部电子设备的正常工作. 有效控制航天器内部温度恒定是保证在轨航天器安全、稳定运行的关键. 相变材料可以在接近恒温状态下实现高热流密度的换热储能, 同时还兼具小体积便携的优势, 很适用于航天器的热管理系统. PCM 储热技术能够解决航天器内部电子设备的散热及保温问题, 有效控制航天器内部温度在合理范围内. 在航天工业领域, PCM 储能设备已在重要任务中投入使用, 例如阿波罗 15 号月球车、空间实验室 SL-1 和 Venera 8-10 号探测器^[3,4]均已采取相变材料进行储能蓄热.

表面的温度差会引起表面张力梯度, 这种由温差驱动的表面张力变化称为热毛细效应. 在微重力环境下, 浮力对流效果大幅度减弱, 热毛细力成为流体流动的主要驱动力. Li 等^[5]发现在微重力条件下由自由界面的温度梯度所诱发的热毛细对流对晶体质量的影响更为突出. Madruga 和 Mendoza^[6,7]研究了正方形石蜡中含热毛细效应的自然对流, 并发现在邦德数 (Bo) 较小的情况下热毛细效应对传热的强化效果更

为明显.

目前也有研究在微重力环境下开展热毛细对流实验, Ezquerro 等^[8,9]在抛物线飞行提供的微重力环境中进行相变与热毛细对流耦合的实验. Kang 等^[10,11]开展空间与地面匹配实验, 研究大尺寸半浮区液桥特别是转捩的临界条件及临界状态附近的流动情况, 发现大尺寸半浮区液桥流动模式会受到高径比、体积比以及液桥两端温差的影响. 同时, 在实践十号卫星内研究开口环形液池在径向温度梯度作用下自由面的温度振荡临界条件, 发现当两端温差超过某一临界温度时会出现振荡, 其中硅油液池自由面振荡的临界温度与液层厚度的变化趋势一致.

热毛细流动的动力学特征主要由液体区域的形状、边界位置以及温度决定, 在 PCM 融化过程中, 不断上升的液相率使整个流动变得更为复杂. Sanchez 等^[12,13]在矩形管中发现热毛细动力学的范围主要受普朗特数 (Pr) 和高径比影响, 同时他们也分析了高 Pr 数石蜡在等温边界条件下的相变演化, 研究了石蜡在不同高径比的矩形中热毛细效应的极限情况, 发现在临界马兰戈尼数时, 石蜡流体以水热行波和振荡驻波模式出现振荡对流, 并分析了大小高径比对换热速率的影响. 由于重力效应, 地面实验中形成的液桥比较脆弱, 实验研究一般集中在不同高径比液桥的不稳定性上. Slobozhanin 和 Perales^[14]分析了等温状态下液桥在不同程度重力扰动下的稳定性, 并以 Bo 评估重力对液桥稳定性的影响. Chernatinsky 等^[15]分析了长液桥 (长宽比 $L/R=5$) 中的轴对称热毛细对流情况, 发现随着马兰戈尼数的增加, 稳态流动转变为振荡流, 并确定了临界马兰戈尼数对长宽比的依赖关

系. 为进一步揭示 PCM 液桥的相变过程机理, 探索 PCM 在微重力下速度场、温度场与相变界面的演化情况, 进一步观测热毛细对流的不稳定性. 本文基于 PCM 液桥的数学物理模型, 采用 COMSOL 软件构建多物理场耦合模型进行计算, 研究不同半径、高径比以及温差对液桥相变演化过程的影响.

1 物理模型

1.1 模型结构

采取高度为 H 、半径为 r 的 PCM 圆柱体作为模型, 上下表面均为固定无滑移面, 周围自由表面热绝缘且忽略变形. 上下两个等直径圆形表面之间放置有相变材料, 垂直界面为自由表面, 其高径比定义为 $\Gamma=H/(2r)$. 上下圆表面的温度分别为 T_h 和 T_c , $T_h>T_c$. 在上下表面温差的作用下, 内部的 PCM 融化为液态产生相变界面, 外部的圆柱表面产生温度差, 表面张力 σ 受温度影响在表面形成了张力差, 进而引起内部流体流动. 对于圆柱状物理模型, 采取二维轴对称结构进行模拟, 具体结构如图 1 所示.

1.2 数学方程

研究不考虑自由表面的变形效应, 忽略空间环境存在残余重力场及重力效应, 提出如下假设: (1) 流体为不可压缩的层流, 流动符合纳维-斯托克斯方程; (2) 材料内部的热辐射忽略相变; (3) 石蜡在固液相下的热物性均为常数且各向同性. 基于上述假设, 得到控制方程如下.

连续性方程

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

动量方程

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}. \quad (2)$$

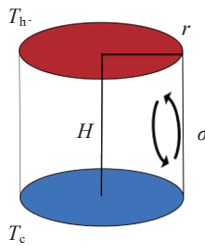


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

能量方程

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = k \cdot \nabla T - \rho C_l \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f_1 \right). \quad (3)$$

其中, $\mathbf{u}$ 为速度, p 为压力, μ 为动力黏度, ρ 为密度, T 为温度, C_p 为恒压热容, k 为导热系数, C_l 为相变潜热, f_1 为液相分数.

表面张力 σ 受温度 T 的影响, 温度分布不均产生表面张力梯度, 流体从表面张力较低的区域流动到表面张力较高的区域, 在张力的作用下产生热毛细对流. 表面张力与温度的关系为

$$\sigma = \sigma_0 - \gamma (T - T_m). \quad (4)$$

其中, σ_0 为熔点下的石蜡表面张力, γ 为表面张力温度系数.

相变过程中石蜡液相率 f_1 从 0 转变到 1, 其中固液共存的区域可以视为糊状区, 糊状区石蜡的热物性参数随 f_1 变化, 方程表示如下:

$$\rho_{\text{pcm}} = \rho_s + (\rho_l - \rho_s) f_1, \quad (5)$$

$$\mu_{\text{pcm}} = \mu_s + (\mu_l - \mu_s) f_1, \quad (6)$$

$$C_{p,\text{pcm}} = C_{p,s} + (C_{p,l} - C_{p,s}) f_1, \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{pcm}} = \lambda_s + (\lambda_l - \lambda_s) f_1. \quad (8)$$

其中, 下标 l 和 s 分别表示液相和固相. 为了抑制固相区的流速, 设置虚拟黏度 μ_s , 此处取为 1000 Pa·s, 通过该设置可将固相区的流速近似设为 0.

边界条件: 当 $z = H$ 时 $\mathbf{u} = 0$, $T = T_h$; 当 $z = 0$ 时 $\mathbf{u} = 0$, $T = T_c$; 当 $r = r_0$ 时 $\mathbf{w} \cdot \mathbf{n} = 0$, $\mu \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial n} = \gamma \nabla T$; 当 $t = 0$ 时 $\mathbf{u} = \mathbf{w} = 0$, $T = T_0$.

1.3 相变材料热物性

数值研究中采用的 PCM 为石蜡, 该相变材料具有适合的温度和较大的相变潜热, 广泛应用于空间微重力环境的相变储热. 具体热物性参数见表 1^[16].

2 数值计算方法

PCM 液桥相变过程中, 热毛细流动控制方程采用有限元软件进行求解, 其中扩散和对流项采用向后差分公式法离散; 相对容差设定为 0.005, 减小误差的同时增大收敛速度. 方程组的迭代求解采用全耦合求解器, 减小迭代次数并提高收敛性. 为了精确求解流

场和温度场,对上下壁面和自由表面处进行局部细化.在瞬态数值模拟中,网格的尺寸不合理会导致计算不收敛,是一个重要的影响因素,研究中分别采用4组网格1036,2618,6498,14448进行网格收敛性测试,对比4组液相率变化,结果如图2所示,4组的预测结果基本相同.不同网格数下液相的最大流动速度结果见表2,结果表明网格数为6498时能够满足要求,当迭代求解过程中速度、温度和压力的相对变化率小于 10^{-5} 时,认为计算过程达到收敛要求.

3 计算结果

为揭示微重力条件下 PCM 液桥相变的界面演化规律,基于液桥的计算模型,设置不同边界条件,对比不同温度差和高径比情况下的液桥相变演化过程,研究了上述条件对液桥相变演化的影响.液桥初始时刻 PCM 为固相,取初始温度 $T_0=298\text{ K}$,下边界温度 $T_c=298\text{ K}$,上边界温度 $T_h=T_c+\Delta T$.

3.1 高径比对液桥相变的作用

为揭示不同高径比 Γ 对 PCM 液桥相变过程的影响,建立不同高径比模型进行仿真计算.图3给出了 $r=4\text{ mm}$, $H=8\text{ mm}$, $\Delta T=10\text{ K}$ 时 PCM 液桥相变过程中的相界面、温度及流线,根据相变过程取 $t=5\text{ s}$, $t=10\text{ s}$, $t=20\text{ s}$, $t=30\text{ s}$, $t=40\text{ s}$ 的相变情况,在 40 s 之后石蜡已完全转变为液相,由图中结果可知,相变首先发生在上壁面处,随着温度变化,沿相变边界产生表面张力梯度进一步驱动流体流动,随着相

变过程推进,流动由不稳定的多涡流转变为稳定的单涡流.在相变过程中,存在由热边界向冷边界扩散的涡流,随着过程推进,液相上层的涡流渐渐消失,固液界面逐渐接触到下端低温自由壁面,界面处液相局部厚度随着时间增加,直至达到稳态后相变界面停止移动,靠近界面的小涡流会逐渐被大涡流吸收,总涡流数减少且总体分布于上壁面热边界.

图4给出了 $r=4\text{ mm}$, $H=16\text{ mm}$, $\Delta T=10\text{ K}$ 时 PCM 液桥相变过程中相界面、温度及流线,根据相变过程取 $t=10\text{ s}$, $t=30\text{ s}$, $t=45\text{ s}$, $t=55\text{ s}$, $t=65\text{ s}$ 的相变情况.在 65 s 之后石蜡已完全转变为液相,与图3 ($\Gamma=1$) 中的相变过程类似,相变首先发生在上壁面,并伴随温度差产生热毛细流动,但是在稳定后液相并未由多涡流转变为稳定的单涡流,而是仍有多个涡流存在.通过对比可以看出,对于高径比大的液桥,靠近热毛细边界的区域形成的小涡流较多,并且随着固液界面的推进会形成多个不均匀的小涡流,而高径比小的液桥达到稳态后形成的涡流相对较少,这是因为高径比大的液桥在相变时液相构成的流动区域更窄,流体流动时更易形成涡流,流动稳定后对流涡更

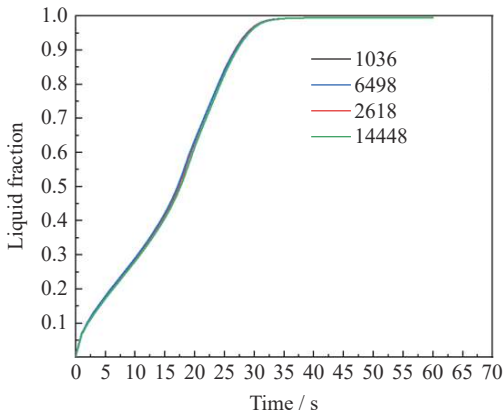


图2 网格计算收敛性对比

Fig. 2 Comparison of grid computing convergence

表1 相变材料热物性 ($T=298\text{ K}$, $P=1.01\times 10^5\text{ Pa}$)
Table 1 Thermal properties of phase change material
($T=298\text{ K}$, $P=1.01\times 10^5\text{ Pa}$)

热物性参数	正十八烷
固相密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	865
固相比热容 $C_{ps}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1934
固相导热系数 $\lambda_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.358
液相密度 $\rho_l/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	780
液相比热容 $C_{pl}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	2196
液相导热系数 $\lambda_l/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.148
动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.00354
潜热 $C_l/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	243.5
表面张力温度系数 $\gamma_T/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	8.44×10^{-5}
熔点 T_m/K	301

表2 不同网格数下液相的最大流速

Table 2 Maximum flow rate of the liquid phase at different grid numbers

网格数	最大流速 $/(m\cdot s^{-1})$
1036	0.00637
2618	0.00645
6498	0.00647
14448	0.00649

加明显. 同时, 高径比大的液桥相变程度比高径比小的液桥更为充分. 因为高径比大的液桥内部液相体积分数较大, 其传热效率更高, 相变速度也更快. 相反, 高径比小的液桥内部的固相体积分数较大, 液相体积分数较小, 加热后液相需要以一个相对更小的面积进行传热, 因此相变速度更慢. 同时, 工质内部液相容易被固相阻碍, 进一步减慢相变速度. 综上所述, 相同加热时间内, 高径比大的液桥更容易发生相变, 液相率更高, 融化更快.

3.2 温度差对液桥相变的作用

为了揭示上下表面温度差对 PCM 液桥相变过程的影响, 建立不同温度差的模型进行仿真计算. 图 5 给出了 $r=4$ mm, $H=8$ mm, $\Delta T=25$ K 时 PCM 液桥相变过程中相界面、温度及流线, 根据分布情况取 $t=2$ s, $t=5$ s, $t=10$ s, $t=15$ s, $t=25$ s. 与图 3 对应的 $r=4$ mm, $H=8$ mm, $\Delta T=10$ K 时 PCM 液桥相变过程中的温度分布进行对比: 当 $\Delta T=25$ K 时, PCM 在 $t=25$ s 时已全部变为液相; $\Delta T=10$ K 时,

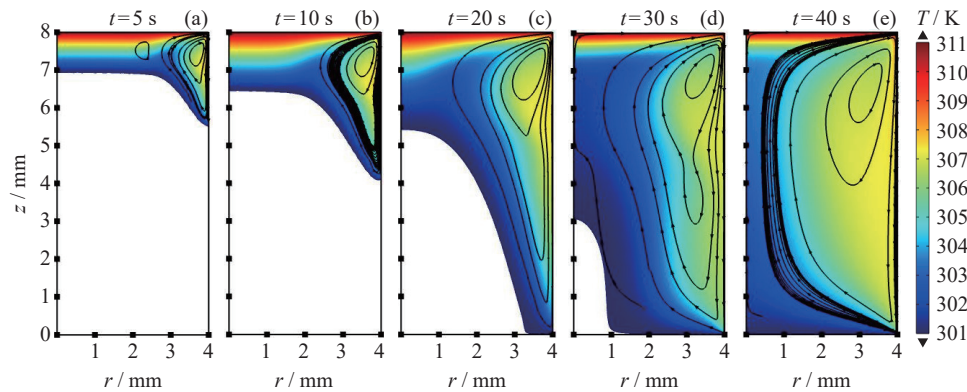


图 3 PCM 液桥固液相变、温度及流线 ($r=4$ mm, $\Gamma=1$)

Fig. 3 Solid-liquid phase transition, temperature and streamline diagram of PCM liquid bridge ($r=4$ mm, $\Gamma=1$)

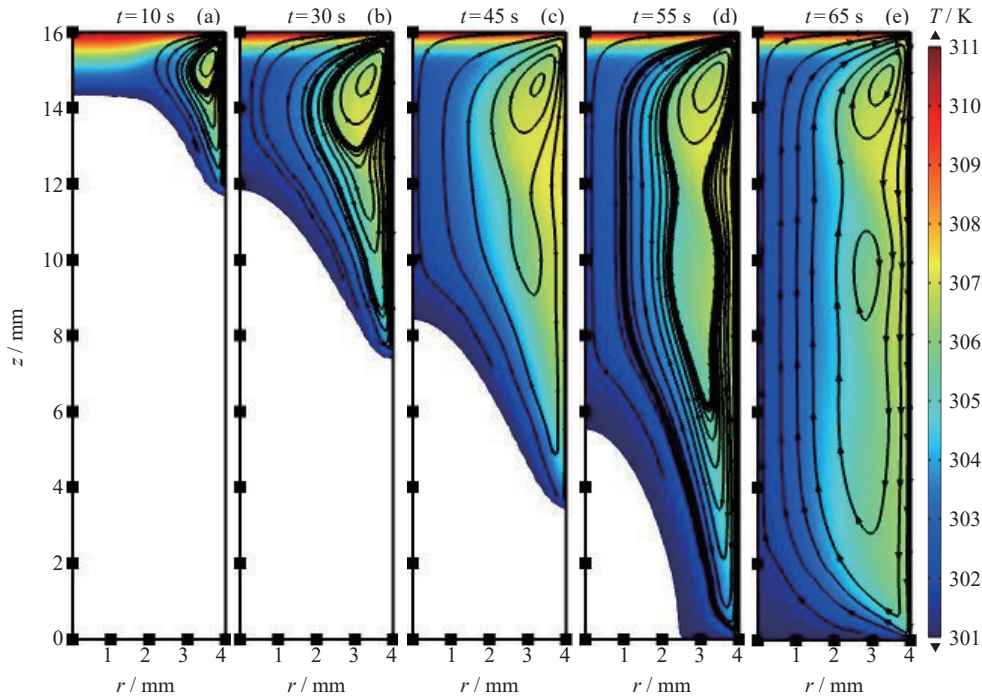


图 4 PCM 液桥固液相变、温度及流线 ($r=4$ mm, $\Gamma=2$)

Fig. 4 Solid-liquid phase transition, temperature and streamline diagram of PCM liquid bridge ($r=4$ mm, $\Gamma=2$)

PCM 在 $t=30$ s 时仍有一部分固相未完成相变. 在液桥上下界面温差更高时, 热量扩散更快, 相变过程也明显加快, 使得相变界面更早离开上边界, 自由壁面的表面张力上升更快, 热毛细对流也随之增强. 这一现象可以促进液相在边界方向上的流动和扩散, 进一步加快相变速度. 同时, 随着温度的升高, 流入边界的热量增加, 液相对流更为剧烈, 也进一步推动相变过程进行. 可以看出, 在温差大的液桥内, 液桥相变过程更容易产生热毛细对流效应, 在自由壁面出现的对流也更为强烈, 这一现象促进了对流换热, 进而促进液桥固液相变过程发生.

3.3 半径对液桥相变的作用

为研究不同半径对 PCM 相变过程中温度分布的影响, 针对不同高径比的 PCM 进行建模计算. 图 6 给出了 $r=6$ mm, $H=12$ mm, $\Delta T=10$ K 时 PCM 液桥相变过程中相界面、温度及流线, 根据分布情况分

别取 $t=10$ s, $t=20$ s, $t=40$ s, $t=60$ s, $t=65$ s. 图 7 给出了 $r=6$ mm, $H=24$ mm, $\Delta T=10$ K 时 PCM 液桥相变过程中的相界面、温度及流线, 根据分布情况分别取 $t=20$ s, $t=40$ s, $t=90$ s, $t=120$ s, $t=130$ s. 在相变初期, 主要依靠热扩散进行传热, 在相变界面处的扩散速度相对较慢. 因此, 整个相变过程中的传热过程不会以正常的热扩散形式进行, 而是由相变传热占据主导. 相变过程中, 工质内的热量使固相逐渐转变为液相. 相变初期一般发生在靠近上部分自由壁面的区域. 相变中期, 相变界面充分远离上壁热面, 传热效率逐渐下降, 热扩散已不是相变过程中主要的传热方式. 此时热毛细流动开始显现, 相变界面上的流体形成了液桥, 促进自由界面附近区域的热毛细流动, 进一步加快了自由界面的熔化. 与图 3 和图 4 对比可以看出, 在半径大的液桥中, 由于边界的实际尺寸厚度更大, 相变所需热量更多, 完全相变所需的时间也会

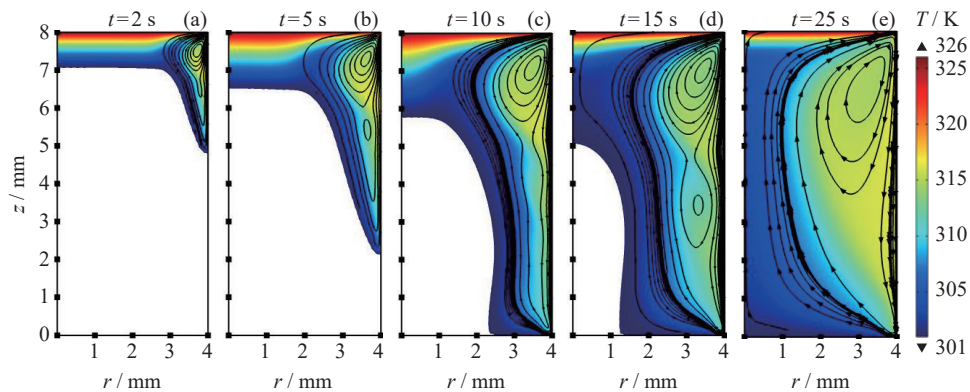


图 5 PCM 液桥固液相变、温度及流线 ($r=4$ mm, $\Delta T=25$ K)

Fig. 5 Solid-liquid phase transition, temperature and streamline diagram of PCM liquid bridge ($r=4$ mm, $\Delta T=25$ K)

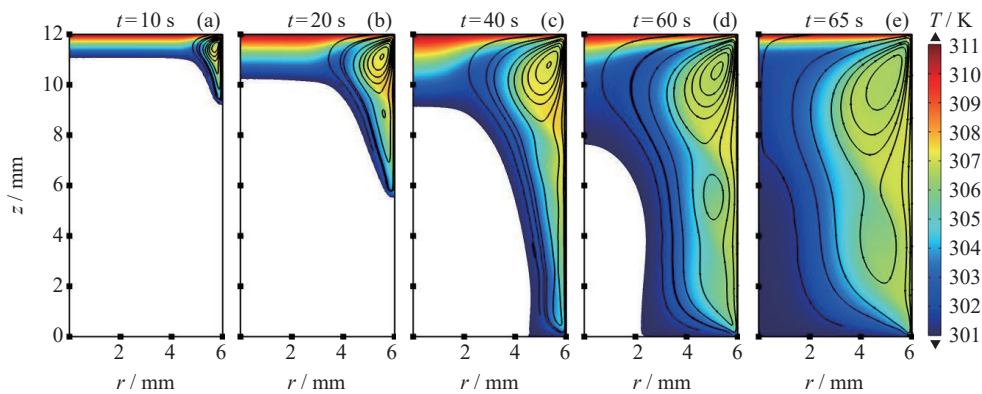


图 6 PCM 液桥固液相变、温度及流线 ($r=6$ mm, $\Delta T=10$ K)

Fig. 6 Solid-liquid phase transition, temperature and streamline diagram of PCM liquid bridge ($r=6$ mm, $\Delta T=10$ K)

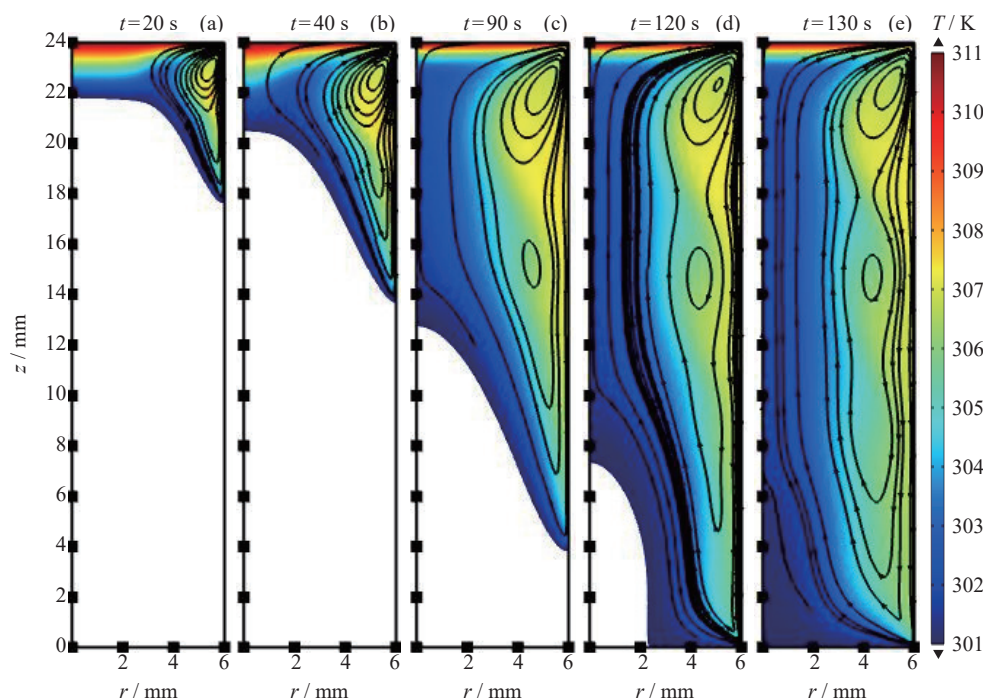


图7 PCM液桥固液相变、温度及流线 ($r=6$ mm, $\Gamma=2$)

Fig. 7 Solid-liquid phase transition, temperature and streamline diagram of PCM liquid bridge ($r=6$ mm, $\Gamma=2$)

更多. 对于高径比较小的液桥, 不同半径下的相变过程并无太大区别, 但对于高径比较大的液桥, 在温度差大的情况下, 液相会在相变中期产生更多的涡流, 进一步强化对流换热并促进相变过程的推进, 这是因为较高的温度差强化了涡流, 使其流动更加剧烈, 也进一步产生了更多的涡流. 在高径比较小的液桥中, 涡流较少使得该强化效果不明显, 在高径比较大的液桥内, 涡流增多流动不稳定, 高温度差的强化效果更加明显.

4 结论

研究了微重力作用下 PCM 液桥相变过程的界面演化过程, 分析了高径比和温度差对 PCM 熔化过程的影响, 得到结论如下.

(1) 相变首先发生在上壁面, 过程中热毛细流动从不稳定多涡流转变为稳定的单涡流. 对于高径比大的液桥, 靠近热毛细边界的区域形成的小涡流较多, 并且随着固液界面的向下推进会形成多个不均匀的小涡流, 而高径比小的液桥达到稳态后形成的涡流相对较少.

(2) 在高径比大的液桥中, 靠近上壁热面的涡流对应的温度较高, 内部固相体积分数较小, 液相体积分

分数较大, 其传热效率更高, 相变速度也更快. 相反地, 高径比小的液桥内部固相体积分数较大, 液相体积分数较小, 工质内部液相容易被固相阻碍, 相变速度更慢.

(3) 液桥温差 $\Delta T=25$ K 相比 $\Delta T=10$ K 时的热毛细对流更为强烈, 此时热毛细效应在 PCM 的传热占据主导地位, 上下壁面温差大, 换热性更好, 固液相变过程更快.

(4) 在高径比较大的液桥内, 高温度差下的强化效果相比高径比较小的情况更加明显, 形成的涡胞数增加.

参考文献

- [1] YOU M, ZHANG X X, LI W, *et al.* Effects of MicroPCMs on the fabrication of MicroPCMs/polyurethane composite foams[J]. *Thermochimica Acta*, 2008, **472**(1/2): 20-24
- [2] HASNAIN S M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques[J]. *Energy Conversion and Management*, 1998, **39**(11): 1127-1138
- [3] LANE G A, SHAMSUNDAR N. Solar heat storage: latent heat materials, Vol. I: background and scientific principles[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1983, **105**(4): 467

- [4] SÁNCHEZ P S, EZQUERRO J M, FERNÁNDEZ J, *et al.* Thermocapillary effects during the melting of phase-change materials in microgravity: steady and oscillatory flow regimes[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, **908**: A20
- [5] LI Jie, YANG Zhigang, MAO Ke, *et al.* Study on the reduction of thermocapillary convection of the single-crystal growth of silicon under microgravity[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, **25**(3): 97-100 (李杰, 杨志刚, 毛科, 等. 微重力下单晶硅生长中热毛细对流的控制研究 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2002, **25**(3): 97-100)
- [6] MADRUGA S, MENDOZA C. Enhancement of heat transfer rate on phase change materials with thermocapillary flows[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2017, **226**(6): 1169-1176
- [7] MADRUGA S, MENDOZA C. Heat transfer performance and melting dynamic of a phase change material subjected to thermocapillary effects[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **109**: 501-510
- [8] EZQUERRO J M, BELLO A, SÁNCHEZ P S, *et al.* The thermocapillary effects in phase change materials in microgravity experiment: design, preparation and execution of a parabolic flight experiment[J]. *Acta Astronautica*, 2019, **162**: 185-196
- [9] EZQUERRO J M, SÁNCHEZ P S, BELLO A, *et al.* Experimental evidence of thermocapillarity in phase change materials in microgravity: measuring the effect of Marangoni convection in solid/liquid phase transitions[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, **113**: 104529
- [10] DUAN Li, WANG Jia, KANG Qi. Research on Space and Ground Experiments of Liquid Bridge Thermocapillary Convection [C]//Summary of Papers at the 9th National Conference on Fluid Mechanics Nanjing: Fluid Mechanics Professional Committee of the Chinese Society of Mechanics, 2016 (段俐, 王佳, 康琦. 液桥热毛细对流空间和地面实验研究 [C]//第九届全国流体力学学术会议论文摘要集. 南京: 中国力学学会流体力学专业委员会, 2016)
- [11] ZHANG Di, DUAN Li, KANG Qi. SJ-10 satellite project—ground research of oscillations characteristics of thermocapillary convection[J]. *Mechanics in Engineering*, 2016, **38**(1): 43-48 (张迪, 段俐, 康琦. 实践十号卫星项目——热毛细对流振荡特征的地面研究 [J]. 力学与实践, 2016, **38**(1): 43-48)
- [12] SÁNCHEZ P S, EZQUERRO J M, FERNÁNDEZ J, *et al.* Thermocapillary effects during the melting of phase change materials in microgravity: heat transport enhancement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, **163**: 120478
- [13] SLOBOZHANIN L A, PERALES J M. Stability of liquid bridges between equal disks in an axial gravity field[J]. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1993, **5**(6): 1305-1314
- [14] SALGADO SÁNCHEZ P, EZQUERRO J M, PORTER J, *et al.* Effect of thermocapillary convection on the melting of phase change materials in microgravity: experiments and simulations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, **154**: 119717
- [15] CHERNATINSKY V I, BIRIKH R V, BRISKMAN V A, *et al.* Thermocapillary flows in long liquid bridges under microgravity[J]. *Advances in Space Research*, 2002, **29**(4): 619-624

作者简介



张永春 男, 1982年3月出生于江苏省苏州市, 现为江苏省特种设备安全监督检验研究院(无锡分院)职员, 高级工程师, 主要研究方向为锅炉运行优化及节能减排技术等。

E-mail: zh_yongchun@163.com



周小明 (通信作者) 男, 1981年11月生人. 现为河海大学机电工程学院副教授, 博士生导师, 主要研究方向为微重力流体与传热、储能与热管理等。

E-mail: xmzhou@hhu.edu.cn