0254-6124/2019/39(6)-778–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GUO Wenhua, PENG Hao, ZHAO Jianfu. Melting heat transfer characteristics of liquid metal as phase change material under microgravity (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(6): 778-786. DOI:10.11728/cjss2019.06.778

液态金属镓微重力下的融化传热特性 *

郭文华 [1] 彭 浩 [1] 赵建福 [2,3]

1(上海海事大学 航运仿真技术教育部工程研究中心 上海 201306)

2(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

摘 要 相变蓄热适用于周期性热流作用下航天器内部工作单元的温度控制, 但是需解决微重力环境下相变材料融化速率低的问题. 鉴于液态金属高导热系数和高单位体积潜热的特点, 在微重力下将液态金属作为相变材料有望提高融化速率. 通过对微重力下液态金属镓融化过程的相界面演化、流线和温度分布特征进行数值研究, 分析了腔体尺寸和过热度对融化过程的影响. 结果表明: 微重力下镓的融化过程中, 热传导起主导作用; 镓的融化时间比冰和正十八烷分别减少了 88.3% 和 96.4%, 储热量分别为冰和正十八烷的 1.2 倍和 2.2 倍; 融化时间随过热度增加而减小, 随腔体半径增大而增大. 此外推导出了液相分数随无量纲时间变化的关系.

关键词 微重力, 液态金属, 相变材料, 融化, 热毛细对流

中图分类号 V 524, TK 02

Melting Heat Transfer Characteristics of Liquid Metal as Phase Change Material under Microgravity

GUO Wenhua[1] PENG Hao[1] ZHAO Jianfu[2,3]

1(*Engineering Research Center of Shipping Simulation, Ministry of Education, Shanghai Maritime University, Shanghai* 201306)

2(*CAS Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

3(*School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Thermal energy storage is suitable for temperature control of working units in spacecraft under periodic heat flow, but it faces the problem of low melting rate of phase change materials under microgravity environment. In view of high thermal conductivity and high latent heat per unit volume of liquid metal, it is expected that the melting rate under microgravity will be increased by using liquid metal as phase change material. In the present study, the evolution of solid-liquid interface, streamline profile and temperature distribution during melting of gallium under microgravity are

* 上海市自然科学基金项目 (19ZR1422300) 和上海市青年东方学者人才计划项目 (QD2016045) 共同资助

2018-11-12 收到原稿, 2019-09-30 收到修定稿

E-mail: 18817581602@163.com. 通信作者 彭浩, E-mail: hpeng@shmtu.edu.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

numerically investigated, and the influences of cavity size and superheat degree on melting process are analyzed. The results show that heat conduction plays a dominant role in the melting process of gallium under microgravity. The melting time of gallium is 88.3% and 96.4% shorter than that of ice and n-octadecane respectively, and the energy storage is 1.2 and 2.2 times of that of ice and n-octadecane respectively. The melting time decreases with the increase of superheat degree, and increases with the increase of cavity size. Meanwhile, the equation for describing the relationship between liquid fraction and dimensionless time is deduced.

Key words Microgravity, Liquid metal, Phase change material, Melting, Thermocapillary convection

0 引言

航天器在空间轨道运行时, 轨道外热流密度的周期性变化会引起航天器内部仪器热负荷呈现周期性变化. 而电子元器件等仪器通常需要保持恒定的工作温度. 鉴于相变材料在固液相变过程中具有吸收和放出大量潜热而温度几乎不发生变化的特点 [1], 将相变材料用于航天器热控系统能够维持仪器的工作温度稳定 [2−4]. 传统的相变材料导热系数低而造成融化速率慢 [5]. 此外, 航天器运行所处微重力环境下, 自然对流被抑制, 相变材料融化速率减慢 [1,6]. 为了使相变材料能够及时吸收和储存热量, 避免航天器电子元器件局部过热导致烧毁, 有必要寻求提升微重力环境下相变材料融化速率的措施.

作为一种新型相变材料, 液态金属具有高导热系数和高单位体积相变潜热的特点, 故具备提升融化效率的潜力 [7,8]. 现有针对液态金属融化的研究主要集中于常重力环境下. Yang 等 [9] 数值模拟了镓在常重力环境下矩形腔体内的融化过程, 结果表明镓的融化时间与石蜡相比最大缩短了 98.8%. Yang 等 [10] 研究了铋铟锡合金在带有翅片的方形散热器内的融化过程, 结果表明其散热性能是以正十八烷作为相变材料时的 2 倍. Ge 等 [11] 将镓用于电子设备的温控, 实验结果表明镓的融化速率较正十二烷有显著提升, 能够及时排出电子设备产生的热量. 微重力环境下, 自然对流被抑制, 热毛细对流是流体流动的主要特征 [12], 这使得液态金属的融化特性不同于常重力环境, 需要进行单独探究.

本文以液态金属镓为对象, 采用数值模拟方法研究其在微重力下的融化传热特性, 与传统相变材料冰和正十八烷进行对比; 分析腔体尺寸和过热度对镓融化传热的影响, 推导液相分数随无量纲时间变化的关系式.

1 数值模拟

1.1 物理模型

研究对象为微重力下液态金属镓在半圆柱腔体内的融化传热特性, 上表面为自由表面, 圆周壁面为等温壁面, 如图 1 所示. 为分析腔体尺寸对镓融化传热的影响, 选取了 20, 30, 40 mm 三种腔体半径 (R); 为分析过热度对镓融化传热的影响, 选取了 20, 40, 80 K 三种过热度 (ΔT). 镓的热物性参数见表 1.

1.2 控制方程

假定融化过程中体积膨胀和粘性耗散可以忽略, 液相不可压缩且为层流, 描述相变材料融化过程的连续性、动量和能量方程如下.

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0. \tag{1}$$

x 方向的动量方程:

$$\rho\Big[\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial(uu)}{\partial x}+\frac{\partial(uv)}{\partial y}\Big]= -\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\Big(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\Big)+\frac{\partial}{\partial y}\Big(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\Big)+S_x. \tag{2}$$

y 方向的动量方程:

$$\rho\Big[\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial(uv)}{\partial x}+\frac{\partial(vv)}{\partial y}\Big]= -\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\Big(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\Big)+\frac{\partial}{\partial y}\Big(\mu\frac{\partial v}{\partial y}\Big)- \rho g_y[1-\beta(T-T_{\rm ref})]+S_y. \tag{3}$$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 镓的热物性参数

Table 1 Thermophysical properties of gallium

密度/ ($kg\cdot m^{-3}$)	粘度/ ($N\cdot s\cdot m^{-2}$)	比热容/ ($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	热导率/ ($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	相变温度/K	相变潜热/ ($J\cdot kg^{-1}$)	热膨胀系数/K^{-1}
5903.7 (固态) 6094.7 (液态)	1.75×10^{-3}	372.3 (固态) 397.6 (液态)	33.49 (固态) 33.6767 (液态)	302.93	80 160	1.2×10^{-4}

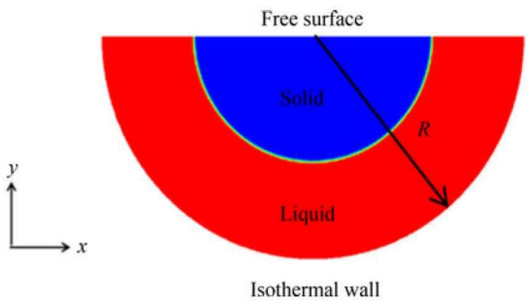

图 1 研究对象物理模型

Fig. 1 Physical model of the research object

能量方程:

$$\rho\Big[\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial(uH)}{\partial x}+\frac{\partial(vH)}{\partial y}\Big]=\frac{\partial}{\partial x}\Big(k\frac{\partial T}{\partial x}\Big)+\frac{\partial}{\partial y}\Big(k\frac{\partial T}{\partial y}\Big). \tag{4}$$

式 (1)~(4) 中: u, v 表示 x, y 方向的速度; t, p, T, ρ, μ, β, k, g 和 H 分别表示时间、压力、温度、密度、动力粘度、热膨胀系数、热导率、重力加速度和焓值; 式 (2) 和 (3) 中, S 表示源项, 定义如下 [13].

$$S_x=\frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3+\varepsilon}A_{\rm m}u, \tag{5}$$

$$S_y=\frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3+\varepsilon}A_{\rm m}v. \tag{6}$$

式中, ε 为常数 (取值 0.001), $A_{\rm m}$ 为固液糊状区常数, γ 为液态体积分数, 其与温度的关系为 [14]

$$\gamma=\begin{cases}0, & T\leqslant T_{\rm s};\\ (T-T_{\rm s})/(T_{\rm l}-T_{\rm s}), & T_{\rm s}<T<T_{\rm l};\\ 1, & T\geqslant T_{\rm l}.\end{cases} \tag{7}$$

式中, $T_{\rm s}$ 和 $T_{\rm l}$ 分别为固相和液相温度.

总焓 H 等于显热 h 和潜热 ΔH 之和, 即

$$H=h+\Delta H, \tag{8}$$

$$h=h_{\rm ref}+\int_{T_{\rm ref}}^{T}c_{\rm p}{\rm d}T, \tag{9}$$

$$\Delta H=\gamma L. \tag{10}$$

1.3 边界条件和初始条件

圆周壁面处于恒定温度 $T_{\rm h}$ 下, 无速度滑移, 因此圆周壁面的边界条件为

$$T=T_{\rm h}, \tag{11}$$

$$u=v=0. \tag{12}$$

忽略自由表面变形, 由温差引起的表面张力梯度产生热毛细对流, 表面张力平衡于剪切力 [15], 有

$$\mu\frac{\partial u}{\partial y}=\frac{\partial\sigma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x}. \tag{13}$$

假定自由表面液体没有渗透即竖直方向的速度分量为零, 且与外界环境之间没有热交换 [16], 即

$$\frac{\partial T}{\partial y}=0, \tag{14}$$

$$v=0. \tag{15}$$

表面张力和温度的线性关系可近似表示为

$$\sigma=\sigma_0-\sigma_{\rm T}(T-T_{\rm ref}). \tag{16}$$

其中, σ_0 为参考温度 $T_{\rm ref}$ 下的表面张力, $\sigma_{\rm T}=-\partial\sigma/\partial T|_{T_{\rm ref}}$ 表示表面张力和温度之间的关系, 镓、冰和正十八烷的 $\sigma_{\rm T}$ 分别为 7.0×10^{-5}, 1.6×10^{-4} 和 $8.4\times10^{-5}\,{\rm N\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$.

1.4 数值方法

采用焓-多孔度方法 [17] 模拟相变材料融化过程和追踪固液相面, 固液糊状区常数 $A_{\rm m}$ 取值为 $10^5\,{\rm kg\cdot m^{-3}\cdot s^{-1}}$ [18]. 利用 PISO 算法耦合速度和压力, 利用 PRESTO 算法处理压力修正方程, 利用 QUICK 差分法处理动量和能量方程. 动量、能量和压力关联方程的松弛因子分别为 0.7, 0.5, 0.3.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.5 网格无关性分析

为了研究网格数和时间步长对计算精度的影响, 这里选取 4 种不同网格数目 (40 000, 80 000, 160 000, 320 000) 的结构化六面体网格和 3 种不同的时间步长 (0.01, 0.05 和 0.1 s) 进行分析. 表 2 给出了微重力下镓在半径 R 为 40 mm、壁面过热度 ΔT 为 20 K 的半圆腔体内融化时, 不同网格数和不同时间步长情况下计算得到的融化时间. 由表 2 可以看出: 网格数由 40 000 增加到 160 000, 融化时间偏差从 8.2% 降低到 1.4%; 时间步长由 0.1 s 减小到 0.05 s, 融化时间偏差由 2.3% 降至 0.5%. 同时考虑计算精度和速度, 网格数采用 160 000, 时间步长采用 0.05 s. 该网格数和时间步长对于其他腔体尺寸和过热度的工况也符合计算精度要求.

1.6 实验验证

由于缺乏微重力实验条件, 搭建了地面固液相变实验装置验证数值模拟方法的准确性. 实验装置如图 2 所示, 主要包括恒温加热系统、实验腔体、热电偶 (标定后精度为 ±0.1°) 和数据采集系统. 其中实验腔体为半圆柱形 (半径 R 为 30 mm, 厚度为 5 mm), 圆弧底面的材质为铜, 前后面由树脂玻璃封装而成, 液态金属镓充注在其中. 实验测试对象为常重力下液态金属镓的融化时间, 选取的过热度 ΔT 分别为 20, 40 和 80 K. 本文将常重力下的数值模拟结果与实验测试结果进行对比. 由于不存在轴向流动及热传递, 且沿着轴向的各个截面融化特性相似, 因此数值模拟中将三维半圆柱形简化为二维半圆形. 图 3 给出了常重力下融化时间的数值模拟结果和实验测试结果, 可以看出两者的最大偏差和平均偏差分别为 4.5% 和 3.5%, 这表明了数值方法的准确性.

2 讨论与分析

2.1 微重力下镓的融化行为特征

图 4 给出了微重力下镓在不同融化阶段 (液相分数 φ 分别为 0.3, 0.6, 0.9) 的相界面演化、流线和

表 2 网格数和时间步长对计算精度的影响

Table 2 Effects of the grid number and time step on accuracy of numerical simulation

网格数	融化时间/s	偏差/(%)	时间步长/s	融化时间/s	偏差/(%)
40 000	270	8.2	0.1	285	2.3
80 000	281	4.4	0.05	290	0.5
160 000	290	1.4	0.01	291.6	基准
320 000	294	基准	—	—	—

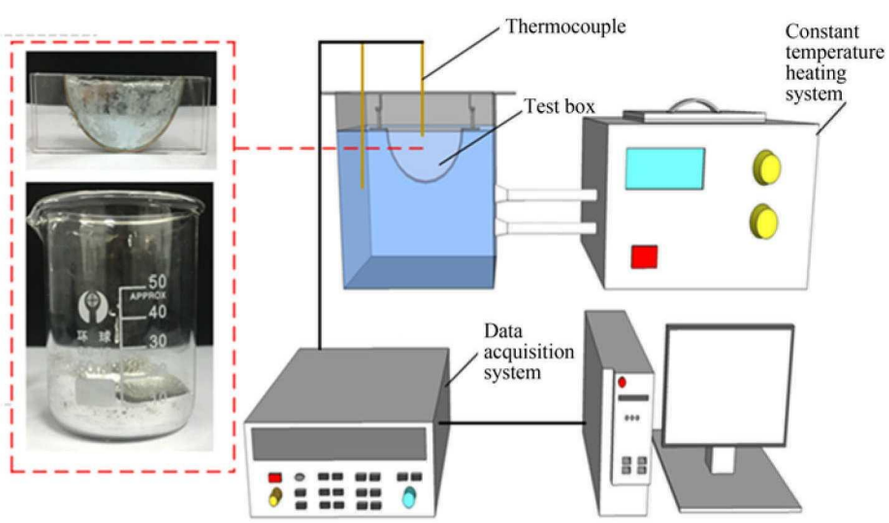

图 2 实验装置和材料

Fig. 2 Experimental setup and material

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

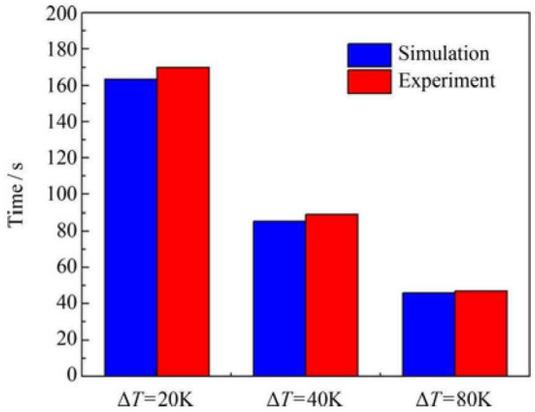

图 3 融化时间的数值模拟和实验测试结果对比

Fig. 3 Comparison of the melting time between numerical simulation and experimental results

温度分布及其与冰和正十八烷的对比. 从图 4 中可以看出: 微重力下镓的融化初期, 自由表面附近的固液相界面出现朝向对称轴的偏折, 腔体周向的固液相界面近似平行于圆周壁面; 融化中期, 自由表面附近的固液相界面偏折程度增大; 融化后期, 固液相界面始终没有脱离自由表面, 直到融化完成. 产生上述现象的原因可以通过流线和温度分布的演化进行分析, 具体如下.

融化初期, 自由表面附近热毛细对流和热传导共同影响融化过程. 在热毛细对流作用下, 液态镓在自由表面与腔体圆周壁面之间分别形成了 2 对对称的小流胞. 其中自由表面附近的流胞为主流胞, 其流动强度大于下方的次流胞, 主流胞的存在打破了固液相界面与圆周壁面的平行, 使得等温线和固液相界面产生了朝向对称轴的偏折. 腔体周向热传导起主导作用, 等温线和固液相界面近似平行于圆周壁面. 融化中期, 自由表面附近的流胞不断向腔体中心对称轴处延伸并增大, 流胞的增大使得自由表面附近等温线和固液相界面的偏折程度增大. 融化后期, 自由表面附近的流胞最终没有延伸至对称轴处, 因而固液相界面始终没有脱离自由表面, 主流胞和次流胞的不断增大使得等温线产生扭曲.

从图 4 还可以看出, 微重力下冰和正十八烷的融化行为特征明显不同于镓. 融化初期, 冰和正十八烷的固液相界面都脱离了自由表面. 随着融化的进行, 冰的固液相界面由近似半圆形演化为不规则的心形, 最后变为马鞍形. 正十八烷的固液相界面由近似半圆形演化为心形, 最后变为梭形, 两种相变材料的融化完成位置皆在腔体的中下部. 产生上述现象的原因可以通过流线和温度分布的演化进行分析, 具体如下.

融化初期, 冰和正十八烷都是在热壁面的角落处产生出流胞, 流胞不断向对称轴方向延伸并很快平行于自由表面, 这使得固液相界面脱离自由表面. 随着融化的进行, 小流胞不断变大重组成大流胞, 使得固液相界面产生不规则的变化; 腔体上半部分热毛细对流和热传导共同影响融化过程, 冰和正十八烷的等温线出现了较大的波动; 腔体下半部分的热传导影响融化过程, 等温线近似平行于圆周壁面; 未融化的固体到自由表面的距离大于到腔体底部的距离, 故相对于镓, 热毛细对流对于冰和正十八烷的融化促进作用更大 [16,19].

镓与冰和正十八烷在热物性上的差异导致微重力下镓的融化行为特征不同于冰和正十八烷. 镓的导热系数远大于冰和正十八烷; 马兰戈尼数

$$Ma = \frac{-\sigma_{\mathrm{T}} \Delta T R}{\mu \alpha}$$

约为 9.2×10^3, 远小于冰 ($Ma \approx 4.0\times10^6$) 和正十八烷 ($Ma \approx 9.8\times10^5$), 其中 α 表示热扩散率. 对于镓, 其融化过程主要受热传导的影响, 热毛细对流对其影响较弱, 固液相界面始终没有脱离自由表面, 最终在自由表面上完成融化. 对于冰和正十八烷, 热毛细对流对其融化过程的影响较大, 固液相界面快速脱离自由表面, 融化完成位置在腔体中下部.

图 5 给出微重力下镓、冰和正十八烷融化过程中液相分数随时间的变化. 由图 5 可见, 镓、冰和正十八烷的融化时间分别为 80.5, 685.5 和 2206.5 s; 镓的融化时间比冰和正十八烷分别减少了 88.3% 和 96.4%. 产生该现象的原因主要是三种相变材料的导热系数和粘度存在明显差异. 镓、冰和正十八烷的液体导热系数分别为 33.68, 0.6 和 0.13 $\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$, 粘度分别为 1.75×10^{-3}, 8.9×10^{-4} 和 $3.6\times10^{-3}\,\mathrm{N\cdot s\cdot m^{-2}}$. 液体导热系数越高则热阻越小, 使得融化时间越快; 粘度越大, 则热毛细对流越弱, 使得融化时间越慢. 二者综合作用的结果可以用普朗特数 Pr ($Pr = v/\alpha$) 反映, 即 Pr 的减小会促进融化, 缩短融化时间. 镓、冰和正十八烷的 Pr 值分别为 0.021, 6.199 和 60.81, 故融化时间长短顺序依次为正十八烷、冰和镓.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

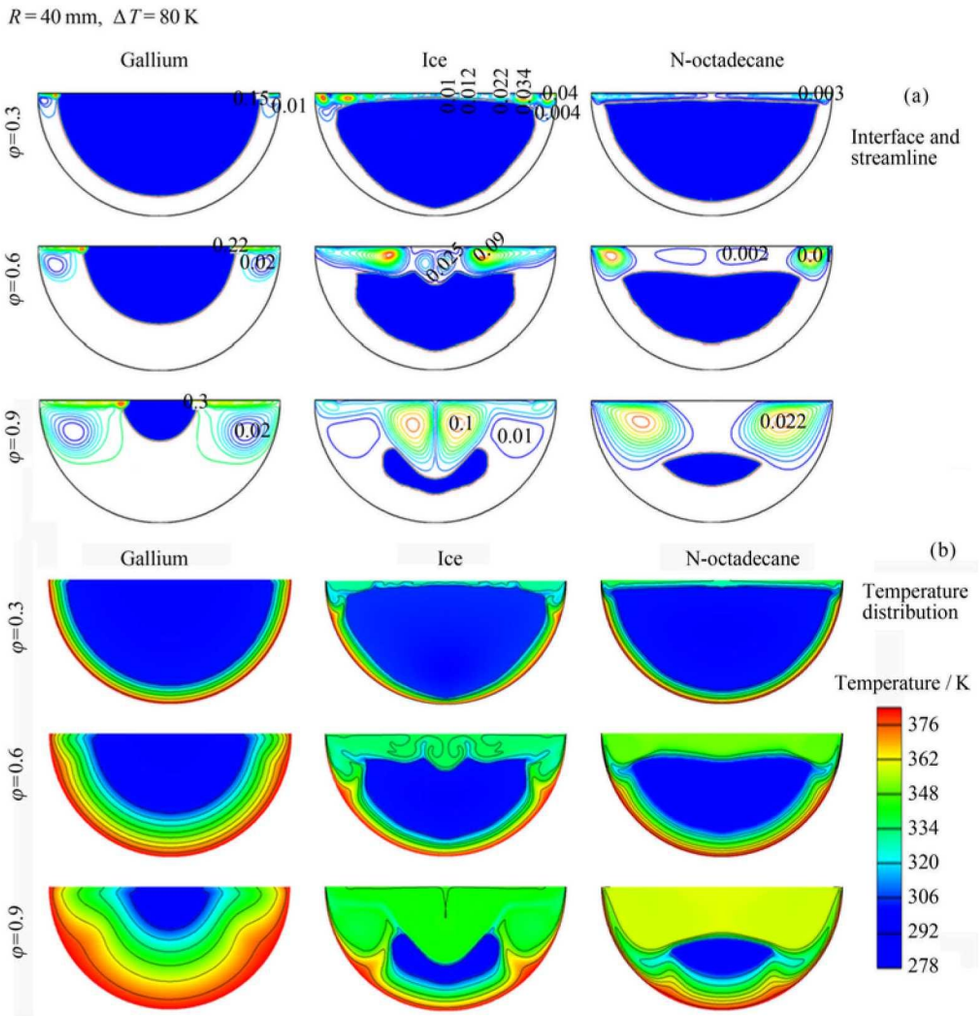

图 4 微重力下镓、冰和正十八烷融化过程的相界面演化、流线和温度分布

Fig. 4 Evolution of the solid-liquid interface, streamline profile and temperature distribution during the melting of gallium, ice and n-octadecane under microgravity

图 6 给出了微重力下镓、冰和正十八烷融化过程中储热量随时间的变化. 由图 6 可以看出, 镓、冰和正十八烷的储热量分别为 1.63×10^6, 1.35×10^6 和 7.30×10^5 J. 相对于冰和正十八烷, 镓的储热量最多, 分别为冰和正十八烷的 1.2 倍和 2.2 倍. 这是因为镓的单位体积相变潜热为 488.6 $\mathrm{MJ\cdot m^{-3}}$, 高于冰 (334.3 $\mathrm{MJ\cdot m^{-3}}$) 和正十八烷 (189.0 $\mathrm{MJ\cdot m^{-3}}$).

图 7 给出了常重力下镓在不同融化阶段 (对应的液相分数 φ 分别为 0.3, 0.6, 0.9) 的相界面演化、流线和温度分布. 由图 7 可以看出: 常重力下镓的融化初期, 自由表面附近的固液相界面出现朝向对称轴的偏折, 腔体周向的固液相界面出现 3 组对称的凹面; 融化中期, 自由表面附近的偏折和相邻凹面结合形成一个大的偏折, 腔体周向的固液相界面形成 2 组对称的凹面; 融化后期, 自由表面附近的偏折程度不断增大, 2 组对称的凹面重组成一个平面, 固液相界面呈梯形不断收缩. 产生上述现象的原因可以通过流线和温度分布的演化进行分析.

融化初期, 在微弱的热毛细对流作用下, 液态镓在自由表面与腔体圆周壁面之间形成 1 组对称的小流胞, 使得等温线与固液相界面产生了朝向对称轴的偏折; 在自然对流的作用下, 液态镓沿着腔体周向形成 3 组对称的流胞, 导致固液相界面出现 3 对对称的凹面且相同数目的热羽流从腔体周向壁面升起. 融

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

化中期, 流胞不断增大和重组, 使自由表面上的固液相界面偏折增大, 同时腔体周向形成 2 组对称的凹面且相同数目的热羽流从腔体周向壁面升起. 融化后期, 流胞重组成均匀分布在腔体两侧的 2 组对称大流胞, 同时热羽流从腔体底部升起, 导致固液相界面呈梯形不断收缩. 因此, 在常重力下, 自然对流对镓的融化过程有显著影响.

图 8 给出了微重力和常重力下镓融化过程中液相分数随时间的变化. 由图 8 可见, 镓在微重力和常重力下的融化时间分别为 80.5 s 和 27.5 s. 常重力下镓的融化时间比微重力下减少了 65.8%, 这说明常重力下自然对流的存在对镓的融化有较大促进作用.

2.2 腔体尺寸和过热度对镓融化的影响

图 9 给出了腔体尺寸和过热度对微重力下镓融化速率的影响. 腔体半径 R 为 20, 30, 40 mm, 过热度 ΔT 为 20, 40, 80 K. 由图 9 可以看出, 对于相同的腔体尺寸, 融化时间随着过热度的增加而缩短. 这是由于过热度越高, 热流密度越大, 传输的热量越多. 对于相同的过热度, 融化时间随着腔体半径增大而增加. 这是由于镓的融化主要靠导热的影响, 腔体尺寸

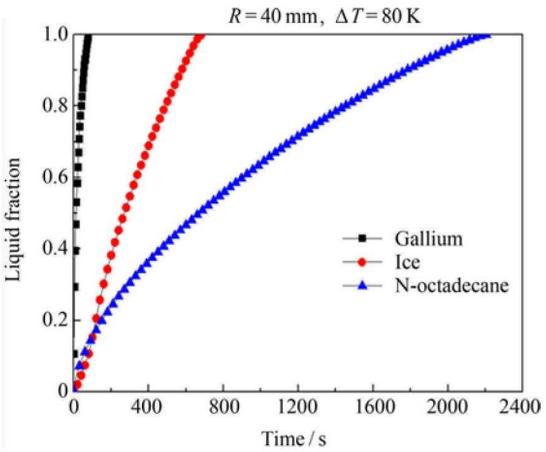

图 5 微重力下镓、冰和正十八烷融化过程中液相分数随时间的变化

Fig. 5 Time evolution of the liquid fraction during melting of gallium, ice and n-octadecane under microgravity

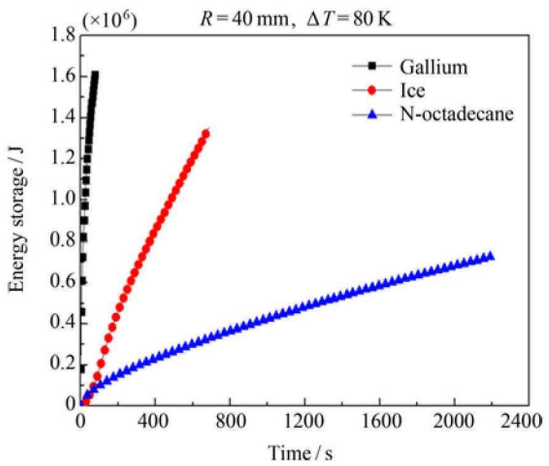

图 6 微重力下镓、冰和正十八烷融化过程中储热量随时间的变化

Fig. 6 Time evolution of the energy storage during melting of gallium, ice and n-octadecane under microgravity

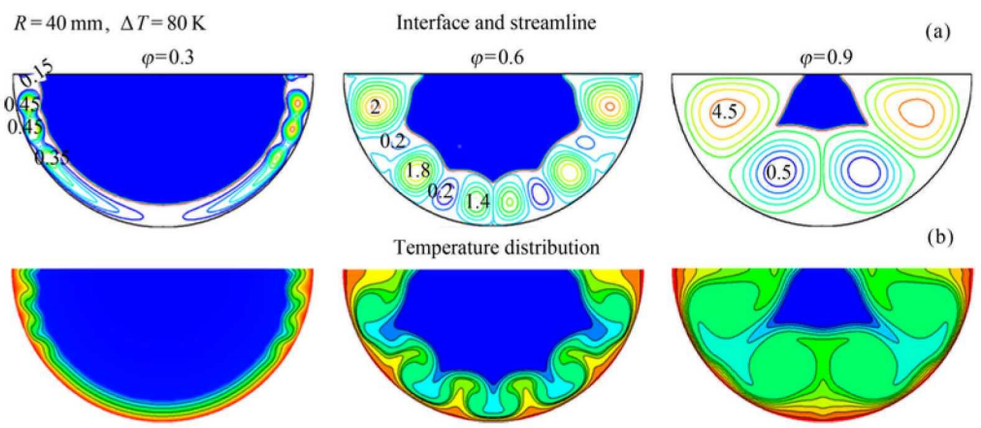

图 7 常重力下镓融化过程的相界面演化、流线和温度分布

Fig. 7 Evolution of the solid-liquid interface, streamline profile and temperature distribution during melting of gallium under gravity

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

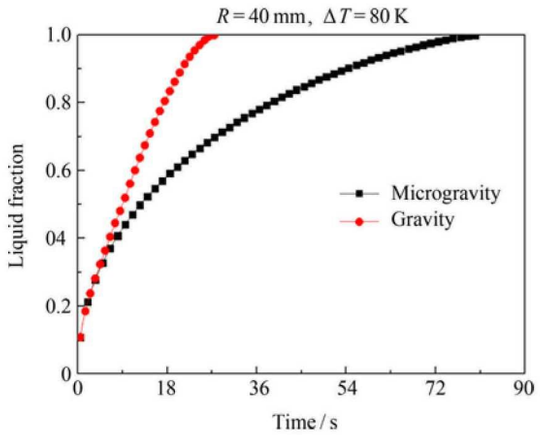

图 8 微重力和常重力下镓融化过程中液相分数随时间的变化

Fig. 8 Time evolution of the liquid fraction during the melting of gallium under microgravity and gravity

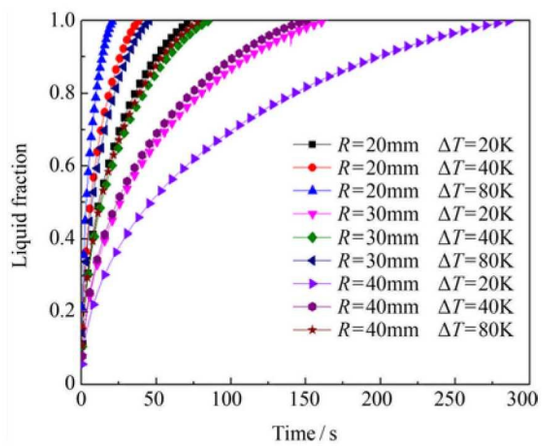

图 9 腔体尺寸和过热度对微重力下镓融化速率的影响

Fig. 9 Influences of the cavity size and superheat degree on the melting rate of gallium under microgravity

增大导致热阻增大, 融化时间增加.

为定量描述腔体尺寸和过热度对微重力下镓融化速率的影响, 对镓的融化过程进行了无量纲分析. 考虑到瞬态热传导和相变过程, 无量纲时间 τ 定义为 [20,21]

$$\tau = FoS_t = \alpha C_{\rm p}\Delta Tt/(\Delta HR^2). \tag{17}$$

式中: Fourier 数定义为 $Fo = \alpha t/R^2$; Stefan 数定义为 $S_t = C_{\rm p}\Delta T/\Delta H$. 其中 $C_{\rm p}$ 表示比热容.

图 10 给出了微重力下镓融化过程中液相分数 (φ) 与无量纲时间 (τ) 的关系. 由图 10 可以看出, 对于不同腔体尺寸和过热度, 液相分数随无量纲

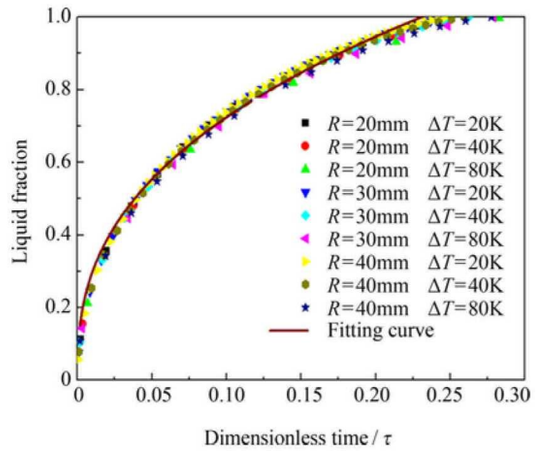

图 10 微重力下镓融化过程中液相分数随无量纲时间的变化曲线

Fig. 10 Relationship between the liquid fraction and dimensionless time during the melting of gallium under microgravity

时间的变化具有一致性, 可以拟合成如下关系:

$$\varphi = 1.76\tau^{0.387}. \tag{18}$$

3 结论

微重力下镓的融化过程主要受热传导的影响, 热毛细对流的影响较弱, 固液相界面始终没有脱离自由表面, 最终在自由表面上完成融化; 冰和正十八烷融化过程中热毛细对流影响较大, 固液相界面快速脱离自由表面, 融化完成位置在腔体中下部.

微重力下镓在相同腔体和过热度情况下的融化时间比冰和正十八烷分别减少了 88.3% 和 96.4%, 储热量分别为冰和正十八烷的 1.2 倍和 2.2 倍.

微重力下镓的融化时间随着过热度增加而减小, 随着腔体半径增大而增大, 其液相分数可以表示为无量纲时间的函数.

参考文献

[1] WANG Lei, JIAN Lujing. Application of phase change materials in spacecraft [J]. *Spacec. Environ. Eng.*, 2013, **30**(5): 522-528 (王磊, 菅鲁京. 相变材料在航天器上的应用 [J]. 航天器环境工程, 2013, **30**(5): 522-528)

[2] ZHU Fanglong. Numerical simulation of heat transfer for thermal protective clothing incorporating phase change material layer [J]. *J. Basic Sci. Eng.*, 2011, **19**(4): 635-643 (朱方龙. 附加相变材料层的热防护服装传热数值模拟 [J].

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应用基础与工程科学学报, 2011, **19**(4): 635-643)

[3] RUAN Shiting, ZHANG Jimin, CAO Jianguang, *et al.* Numerical simulation of melting process of phase change energy storage unit under microgravity [J]. *J. Beijing Univ. Aeront. Astron.*, 2018, **44**(10): 2224-2231 (阮世庭, 张济民, 曹建光, 等. 微重力下相变储能单元融化过程数值模拟 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018, **44**(10): 2224-2231)

[4] MA Caixin, SHENG Qiang, TONG Tiefeng. Thermal design and simulation of a space phase change heat exchanger [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(3): 409-417 (麻才新, 盛强, 童铁峰. 一种空间相变换热器热设计与仿真分析及其改进 [J]. 空间科学学报, 2018, **38**(3): 409-417)

[5] ZHANG Jingchi, SHENG Qiang, REN Weijia, *et al.* Numerical simulation of thermal storage device of foam composite phase change material in microgravity [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(3): 336-343 (张靖驰, 盛强, 任维佳, 等. 微重力条件下泡沫复合相变材料蓄热装置数值仿真 [J]. 空间科学学报, 2016, **36**(3): 336-343)

[6] ZHAO Jianfu, HU Wenrui. Novel investigation on the principle of similarity for microgravity two-phase flow [J]. *J. Basic Sci. Eng.*, 2002, **10**(1): 1-7 (赵建福, 胡文瑞. 微重力两相流相似模拟准则新探 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, **10**(1): 1-7)

[7] YANG Xiaohu, LIU Jing. Advanced liquid metal cooling: historical developments and research frontiers [J]. *China Acad. J.*, 2018, **36**(15): 54-66 (杨小虎, 刘静. 液态金属高性能冷却技术: 发展历程与研究前沿 [J]. 科技导报, 2018, **36**(15): 54-66)

[8] GE Haoshan, LI Haiyan, MEI Shengfu, *et al.* Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: an emerging frontier in energy area [J]. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2013, **21**: 331-346

[9] YANG Xiaohu, TAN Sicong, LIU Jing. Numerical investigation of the phase change process of low melting point metal [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2016, **100**: 899-907

[10] YANG Xiaohu, TAN Sicong, DING Yujie, *et al.* Experimental and numerical investigation of low melting point metal based PCM heat sink with internal fins [J]. *Int. Commun. Heat Mass Trans.*, 2017, **87**: 118-124

[11] GE Haoshan, LIU Jing. Keeping smartphones cool with gallium phase change material [J]. *J. Heat Trans.*, 2013, **135**: 1-5

[12] ZHAO Jianfu, LU Yanghui, LI Zhendong, *et al.* Marangoni effect in subcooled nucleate pool boiling [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(2): 159-163 (赵建福, 鲁仰辉, 李震东, 等. 过冷核态池沸腾中的 Marangoni 效应 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(2): 159-163)

[13] ARICI M, TÜTÜNCÜ E, KAN M, *et al.* Melting of nanoparticle-enhanced paraffin wax in rectangular enclosure with partially active walls [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2017, **104**: 7-17

[14] CHEN Chen, PENG Hao. Numerical simulation of solidification characteristics of graphene nanofluid as phase change material [J]. *Chem. Ind. Eng. Prog.*, 2018, **37**(2): 681-688 (陈晨, 彭浩. 石墨烯纳米流体相变材料蓄冷特性的数值模拟 [J]. 化工进展, 2018, **37**(2): 681-688)

[15] BERGMAN T L, KELLER J R. Combined buoyancy, surface tension flow in liquid matals [J]. *Numer. Heat Trans.*, 1988, **13**(1): 49-63

[16] MADRUGA S, MENDOZA C. Heat transfer performance and melting dynamic of a phase change material subjected to thermocapillary effects [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2017, **109**: 501-510

[17] VOLLER V R, PRAKASH C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 1987, **30**(8): 1709-1719

[18] HONG Yuxiang, YE Weibiao, DU Juan, *et al.* Solid-liquid phase-change thermal storage and release behaviors in a rectangular cavity under the impacts of mushy region and low gravity [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2019, **130**: 1120-1132

[19] MADRUGA S, MISCHLICH G S. Melting dynamics of a Phase Change Material (PCM) with dispersed metallic nanoparticles using transport coefficients from empirical and mean field models [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, **124**: 1123-1133

[20] BECKERMANN C, VISKANTA R. Effect of solid subcooling on natural convection melting of a pure metal [J]. *Trans. ASME*, 1989, **111**: 416-424

[21] SHATIKIAN V, ZISKIND G, LETAN R. Numerical investigation of a PCM-based heat sink with internal fins [J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2005, **48**: 3689-3706

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net