

基于遗传算法的 SOBER-SJ10 池沸腾传热研究

刘鹏^{1,2} 杜王芳^{1,2} 吴克^{1,2} 赵建福^{1,2} 李会雄³

(1. 中国科学院力学研究所国家微重力重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049;

3. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘要 基于遗传算法构建了沸腾过程中加热固壁一维瞬态导热反问题计算方法, 采用具有精确解的半无限瞬态导热问题构造了一个校核算例, 验证了该算法具有较高的准确度和抗干扰能力, 能够准确反演计算沸腾传热瞬态热流密度。基于该算法分析了 SOBER-SJ10 地面和空间实验中沸腾传热特性, 结果表明微重力环境中单相传热被严重抑制, 热流密度远小于地面数值; 不同重力条件下核态沸腾传热曲线落在同一位置, 显示出低热流密度时核态沸腾传热具有某种重力无关特征; 但微重力条件下核态沸腾曲线起始于远低于地面的热流密度, 同时在远比地面小的热流密度值时达到临界热流状态, 并转变为过渡沸腾模式。

关键词 池沸腾; 微重力; 遗传算法; 单相传热; 热流密度

中图分类号: O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2021)07-1784-07

Study on Performance of Pool Boiling Heat Transfer in SOBER-SJ10 Based on Genetic Algorithm

LIU Peng^{1,2} DU Wang-Fang^{1,2} WU Ke^{1,2} ZHAO Jian-Fu^{1,2} LI Hui-Xiong³

(1. CAS Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract A genetic algorithm-based model is constructed for the one-dimensional transient inverse heat conduction problem inside heating solid wall during the boiling process. Based on this algorithm, the transient heat flux during boiling processes can be calculated with high accuracy and robustness, which is verified by a benchmark based on transient half-plane heat conduction problem with accurate solution. Data obtained from ground and space experiments in the project SOBER-SJ10 are analyzed. It is observed that single phase heat transfer in microgravity is severely suppressed with obviously lower heat fluxes than those on the ground. The nucleate boiling curves at different gravity conditions are overlapping, showing some gravity-independence of nucleate boiling heat transfer at low heat flux. Nucleate boiling curve in microgravity, however, begins from a location corresponding to a lower heat flux compared to that in normal gravity, while it ends at an obviously lower critical heat flux, at which the boiling mode changes from nucleate boiling to transitional boiling.

Key words pool boiling; microgravity; genetic algorithm; single-phase heat transfer; heat flux

0 引言

沸腾传热的高效性使得其在地面常重力与空间微重力环境中均有广泛而重要的应用。沸腾过程涉及到多相流动、相变传热与传质等复杂过程, 液、气两相密度差异显著, 浮力作用会主导常重力沸腾特征, 而微重力条件下浮力被抑制从而呈现不同的特性^[1]。已有的经验关联式及理论模型往往依赖大量精心设计的地面实验所获得的经验数据, 尽管可以较好地满足地面环境诸多工业需求, 但在空间微重力环境下的预测能力变得极不可靠。此外, 微重力

环境能够消除浮力对沸腾的影响, 有利于更好地观察沸腾传热现象, 揭示沸腾传热机理。因此, 微重力沸腾传热研究作为目前微重力科学和传热学领域的前沿方向之一, 广为关注。

另一方面, 针对沸腾传热的研究多关注加热面热流密度的宏观平均结果, 对瞬态过程关注较少, 难以构建准确的热流密度-温度函数关系, 导致现有沸腾传热经验关联式及理论模型对沸腾瞬态现象的机理缺乏数据支持。如何在沸腾实验有限测点

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No.U1738105) 和中国科学院前沿科学重点研究计划 (No.QYZDY-SSW-JSC040)

作者简介: 刘鹏 (1995-), 男, 博士研究生, 主要从事沸腾传热及气泡动力学研究。通信作者: 赵建福, 研究员, E-mail: jfzhao@imech.ac.cn.

数据约束下, 通过沸腾传热反问题计算, 反演加热面向工质传递的瞬态热流, 有望为理解沸腾传热机理提供细致全面的数据。Egger^[2]、衡益等^[3-5]基于最优化过程的正则化方法, 基于加热器内部有限测点数据, 计算得到加热面上高分辨率的热流密度。针对工程中薄加热箔的三维瞬态导热问题, Luo 等^[6]通过一阶近似方程重构沸腾表面上的 Dirichlet 边界条件, 替换未知的 Neumann 边界条件, 将反问题转化为一个适定的正问题, 利用有限差分法求解温度场信息, 得到沸腾表面的瞬态热流密度规律。Vakili 和 Gadala^[7]利用粒子群算法求解了一、二和三维传热热流密度反问题。Cui 等^[8]利用改进的 Levenberg-Marquardt 算法实现了对边界热流的预估和计算。Najafi 等^[9]利用人工神经网络建立滤波方法在线估算热流密度。Pourgholi 等^[10]验证了基于遗传算法计算导热反问题的准确性, 并且使用顺序和多核并行来提高遗传算法在传热反问题中的计算效率。这些基于优化算法的导热反问题计算, 提供了计算瞬态热流密度的有效方法, 有助于进一步分析沸腾传热机理。

SOBER-SJ10 是我国 SJ-10 返回式科学实验卫星 19 项科学实验之一, 于 2016 年 4 月顺利完成了计划的空间飞行实验任务^[11-13]。本文基于遗传算法构建了一套加热壁面内一维瞬态热流密度的反演方法, 以对 SOBER-SJ10 空间飞行实验和地面常重力实验数据进行分析 and 对比, 揭示不同重力条件对沸腾传热特征及其规律的影响。

1 实验装置与操作条件

SOBER-SJ10 实验采用除气后的 FC-72 作实验工质, 通过预热调控液体过冷度, 并采用波纹管稳压器实现液池压力的恒定。实验核心部件集成微加热器采用厚度 2 mm 的石英玻璃为加热基板, 正面设有 10 路 Pt 薄膜热电阻局部温度测点, 各自到中心处的气泡激发器距离不一, 但周向均匀分布, 用以测量加热表面温度分布及其演化; 底面的蛇形 Pt 薄膜电阻主加热器, 在提供沸腾实验热源的同时, 测量基板底面的平均温度。加热器基板正面还覆盖了一层厚度为 200 Å 的 SiO₂ 薄膜, 用以保护表面电路, 并保证加热面的光滑。

1 次完整的实验流程包括 5 个不同液体过冷度阶段, 每个阶段各有 5 次实验, 其中, 前 4 次为不同加热电压下的单气泡沸腾实验, 由气泡激发器上施加的脉冲电流通过局部过热产生 1 个小气泡, 并使其在主加热器恒定加热电压的作用下持续生长; 第

5 次则为常规池沸腾实验, 气泡激发器不工作, 主加热器加热电压按照 2、3、4、5 和 6 V 阶梯状提升, 阶梯持续时间依次为 150、120、100、80 和 60 s (图 1)。

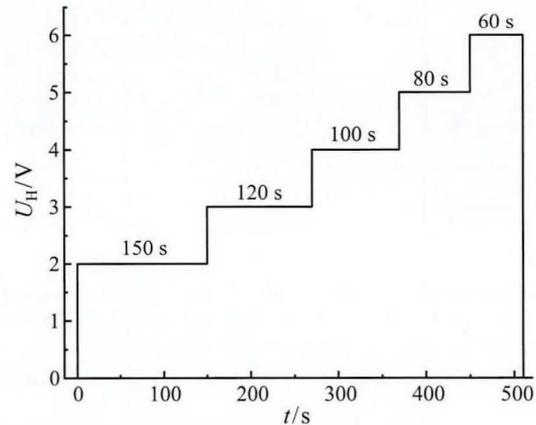


图 1 常规池沸腾实验中主加热器阶梯电压

Fig. 1 Steps of heating voltage in normal pool boiling experiment

本文采用一维瞬态导热模型分析了地面和空间实验中的常规池沸腾模式中的加热基板内的瞬态导热问题 (表 1), 其中, 加热基板底面温度采用基于主加热器电阻反演给出的底面平均温度, 而正面平均温度则由 10 路局部温度测点数据的面积加权平均值确定, 即

$$T_{\text{top}} = \sum_{i=1}^{10} \frac{A_i t_i}{A} \quad (1)$$

其中, i 为局部温度测点编号, A_i 为其代表面积 (由第 $i-1$ 及 i 个温度测点之间所界定的圆环面积), A 为以最远温度测点到中心距离为半径的原面积。温度测量的不确定度为 0.6°C。

表 1 实验工况参数

Table 1 Experimental conditions

Stage	$T_{\text{bulk}}/^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{bulk}}/\text{kPa}$	$T_{\text{sat}}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\text{sub}}/^{\circ}\text{C}$
SE1/1.5	17.3	100.1	55.4	38.1
GE7/1.5	20.5	103.3	56.3	35.8

2 一维瞬态导热反问题的遗传算法求解

导热问题可以由偏微分方程来描述, 正问题是根据定解条件求解偏微分方程确定温度和相应的热流, 而反问题是根据已知的有限测量结果求解未知的输入条件, 即由果溯因。针对图 2 所示的集成微加热器基板内一维瞬态导热, 基板正面和底面平均温度为已知信息, 2 个表面上的热流 (以及内部温度

分布演化) 为待求量, 属于典型的一维瞬态导热边界条件识别反问题。

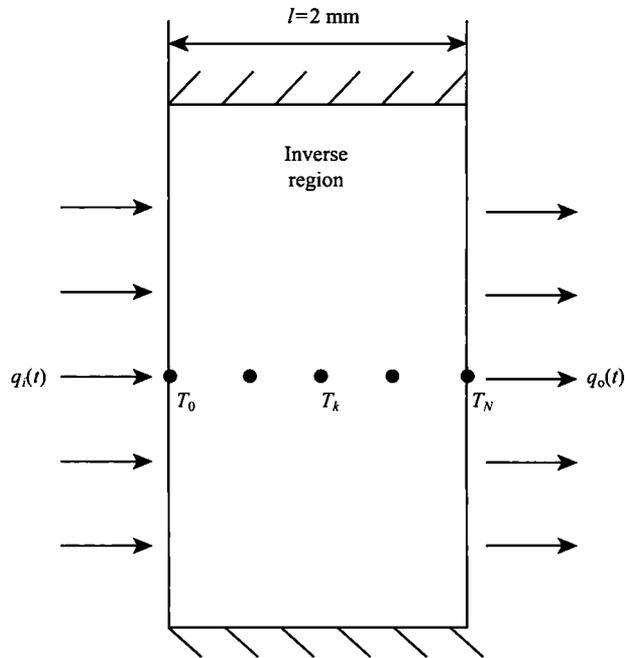


图 2 一维瞬态导热反问题物理模型

Fig. 2 One-dimensional transient heat conduction inverse problem model

忽略基板横向温度分布的不均匀性以及导热系数 α 随温度的变化, 池沸腾过程中加热器基板沿厚度方向的一维瞬态导热方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} & 0 < x < l, t > 0 \\ T(x, 0) = T_s \\ T(0, t) = T_0(t) \\ T(l, t) = T_N(t) \\ \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q_i(t) \\ \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = q_o(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, q_i 为底面 (主加热器) 向加热基板输入的热流密度, q_o 为基板正面向工质输出的热流密度 (也即沸腾实验所需测定的沸腾传热热流密度), T_s 为基板初始温度, T_0 为基板底面, T_N 为基板正面温度。这里, T_0 和 T_N 随时间变化数据可由沸腾实验给出, 而输入热流 $q_i(t)$ 与输出热流 $q_o(t)$ 为待求参数。

遗传算法是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机化搜索算法, 通过选择、交叉及变异等机制, 模拟一个人工种群的进化过程, 每次迭代保留一组候选个体, 经过若干代进化后, 理想情况下种群适应度将达到近似最优状态^[10]。基于遗传算

法寻找上述一维导热反问题最优解的具体流程如图 3 所示。

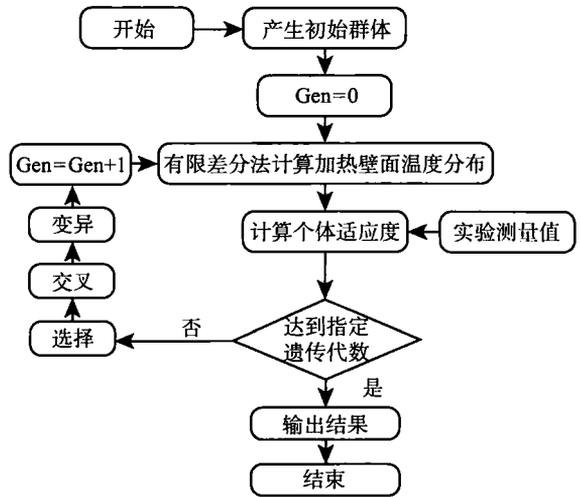


图 3 基于遗传算法的一维瞬态导热反问题求解流程图

Fig. 3 Flow chart of solving one-dimensional transient heat conduction inverse problem based on genetic algorithm

为提高遗传算求解的精度和效率, 设计了如下约束条件:

1) 初始种群生成与迭代终止条件

生成初始种群时, 需要根据先验知识设置待求参数范围, 并在该范围内随机生成种群, 以搜索待求参数的最优解。本文中待求参数 $q_i(t)$ 与 $q_o(t)$ 种群值域设置为 $[-1000, 100000] \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 种群数量为 40。当优化收敛趋于稳定时, 停止计算子代。此外, 为提高初始阶段的计算效率, 当种群迭代次数大于 100 时, 迭代也停止并输出结果。

2) 交叉、变异与选择条件

交叉运算决定了算法全局搜索能力, 本文取交叉概率为 0.9。变异运算决定了算法的局部搜索能力, 本文取变异概率为 0.01。选择运算是以一定的比例从当前种群中选取适应度较高的个体繁殖进入下一代, 本文取适应度前 20% 的个体生成子代种群。

3) 适应度函数

遗传算法中最重要的部分是适应度函数的选取。根据常规池沸腾模式特点, 适应度函数取为

$$objJ = \sqrt{(T_0(t) - T_{0,e}(t))^2 + (T_N(t) - T_{N,e}(t))^2} \quad (3)$$

式中, $T_{0,e}(t)$ 、 $T_{N,e}(t)$ 分别表示基板底面和顶面平均温度的测量结果, $T_0(t)$ 、 $T_N(t)$ 则为计算输出数值。适应度函数的值越小, $T_0(t)$ 、 $T_N(t)$ 越接近测量值, 相应地, 当前时刻的 $q_i(t)$ 与 $q_o(t)$ 也将越准确。

为了验证上述方法的准确性及稳定性, 以具有解析解的一维导热作为基准算例进行比较。恒定表面热流密度条件下, 半无限大固体一维导热的温度分布及热流密度分布分别为

$$T(x, t) = \frac{2q_0(\alpha t/\pi)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0\gamma}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) + T_i \quad (4)$$

$$q_0(x) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{\alpha t}}\right) + \frac{xq_0(\alpha t/\pi)^{\frac{1}{2}}}{\alpha t} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{xq_0}{k\sqrt{\alpha\pi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) \quad (5)$$

固体材质取为实验中加热基板材质, 即石英玻璃。设初始温度 T_i 为 20°C , 恒定表面热流 q_0 为 $1600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 将 $x=0 \text{ mm}$ 和 2 mm 处的温度值按照 500Hz 采样频率读出以模拟池沸腾实验加热基板正面温度 $T_{t,e}$ 和底面温度 $T_{b,e}$, 并对取样数据添加 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 的随机误差以模拟测量数据的不确定度 (图 4)。

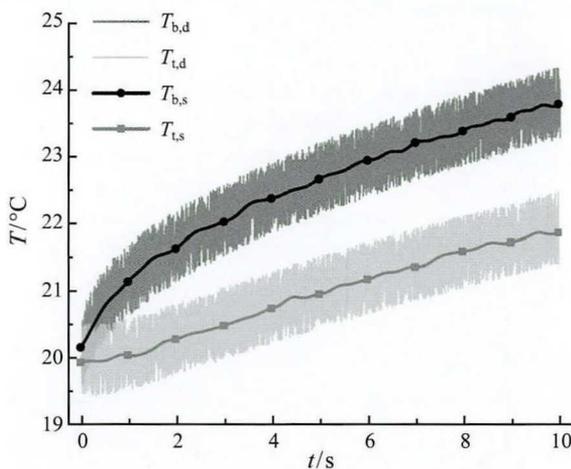


图 4 恒热流条件下半无限大石英玻璃一维导热在 $x=0$ 和 2 mm 处的温度数据

Fig. 4 Temperature at $x=0$ and 2 mm in one-dimensional heat conduction in infinite half-plane SiO_2 at constant heat flux

对添加随机噪声后的温度数据 $T_{t,d}$ 和 $T_{b,d}$, 采用和实验数据预处理过程一样的低通滤波处理 (截止频率为 5 Hz), 滤波后的数据作为导热反问题计算的输入。图 5 显示了 2 个相应截面上的热流密度 $q_{i,r}(t)$ 和 $q_{o,r}(t)$ 计算结果, 以及相应的精确解。可以清楚看到, 反演结果的精度与抗干扰能力均令人满意。

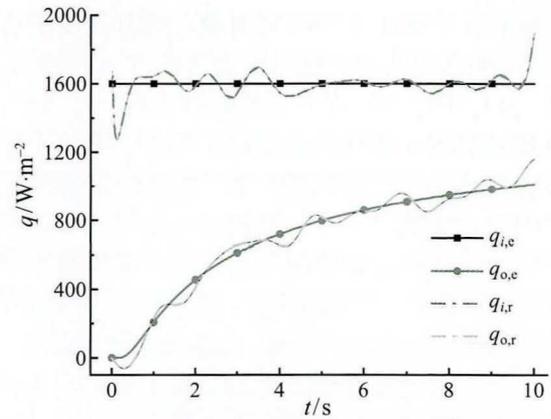


图 5 热流密度反演计算结果与精确解对比

Fig. 5 Comparison of heat flux inversion calculation results and exact solutions

3 不同重力条件下池沸腾传热特性

图 6 显示了地面常重力实验 GE7/1.5 中加热器基板上、下表面平均温度的变化, 以及基于遗传算法反演得到的底面输入热流密度和加热表面热流密度随时间的变化情况, 图 7、8 放大显示 2 个特殊时段以分析具体过程特征。图中还显示了基于稳态假设设计的拟稳态热流 q_s

$$q_s = -\lambda \frac{\Delta T}{l} = -\lambda \frac{T_t - T_b}{l} \quad (6)$$

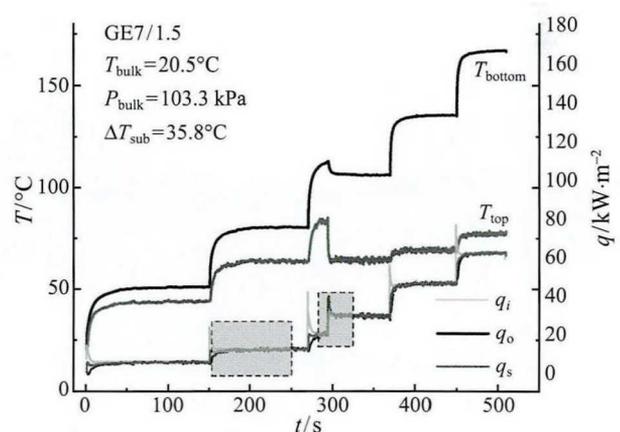


图 6 地面常重力实验 GE7/1.5 中加热基板上、下表面平均温度与热流的变化

Fig. 6 The evolution of average temperature and heat flux on the upper and lower surfaces of the substrate in ground experiment GE7/1.5

地面实验中, 主加热器开始加热后, 上、下表面温度迅速上升, 随后减缓, 在首个加热电压台阶末端趋于稳定, 该阶段没有气泡生成, 处于单相传热状

态, 基于遗传算法得到的底面输入热流密度最初快速下降, 加热面热流密度则较快增长, 二者逐渐趋于一致, 并且于稳态计算热流密度相同 (图 7), 说明在首个台阶末端单相传热达到稳定状态。第二个加热电压台阶初期与之前相似, 上、下表面温度和热流密度很快达到统计平稳。沸腾出现在第三个加热电压台阶中, 沸腾起始前的单相自然对流与稳定状态略有差异 (图 8)。沸腾起始后, 准稳态的沸腾过程在沸腾起始后 5 s 内可以达到。此前的过渡阶段里, 近壁过热液层快速相变释放的热量和加热面固壁表面附近热容的释放导致壁面热流密度 q_o 高于底面 q_i 。

者逐渐趋于一致, 并且趋于稳态计算结果, 但存在明显大于地面时的波动 (图 10)。第二个加热电压台阶初期与之前相似, 上下表面温度先随加热电压的提升而迅速上升, 随后减缓, 但尚未趋于稳定, 沸腾即已开始, 引起上下表面温度急剧下降 (图 11)。可以看出, 在沸腾起始前, 基于遗传算法得到的底面输入热流密度与加热面热流密度存在明显可见的差异, 说明单相传热尚未完全达到稳定。与地面实验相似, 沸腾起始后过热液层和加热基板表面附近热量的迅速释放, 导致壁面热流密度 q_o 高于底面输入热流密度 q_i 。空间实验中 8 s 内可以达到准稳态沸腾过程, 明显比地面有所延长。

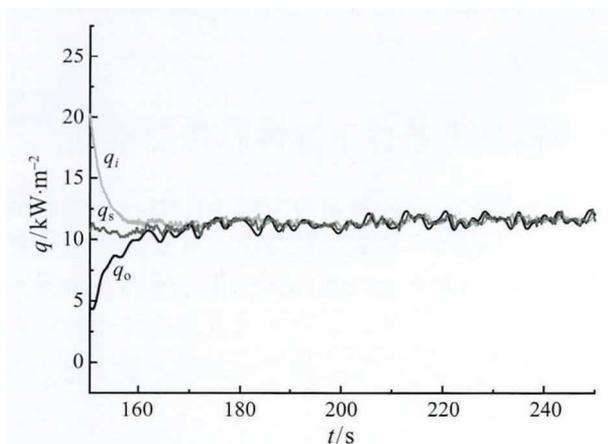


图 7 地面实验中首个加热台阶终端热流密度的变化

Fig. 7 Heat flux near the end of the first heating voltage step in the ground experiment

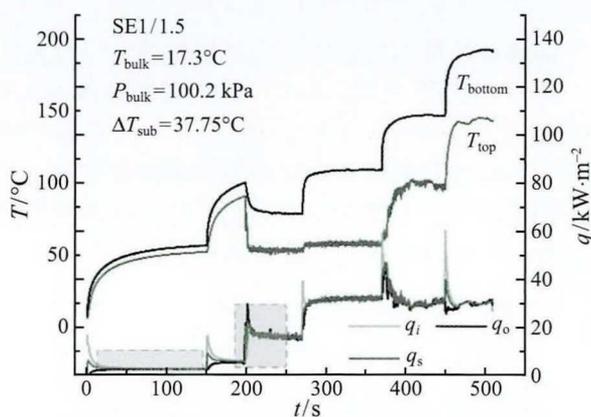


图 9 空间微重力实验 SE1/1.5 中加热基板上、下表面温度与热流的变化

Fig. 9 The evolution of average temperature and heat flux on the upper and lower surface of the substrate in space experiment SE1/1.5

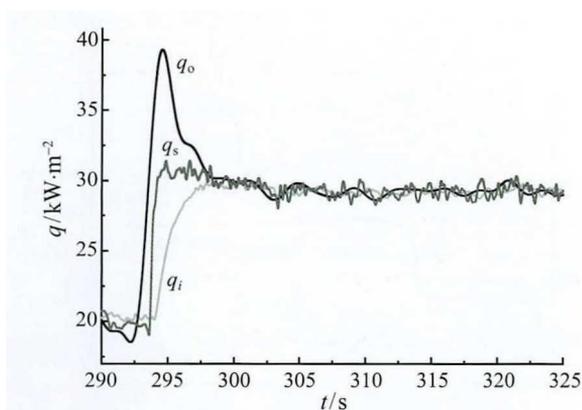


图 8 地面实验中沸腾起始前后热流密度的变化

Fig. 8 Heat flux before and after boiling incipience in the ground experiment

图 9 显示了空间飞行实验 SE1/1.5 中的相应结果, 同样在图 10、11 放大显示了 2 个特殊时段的情况。空间实验中, 首个加热电压台阶同样处于单相传热阶段, 基于遗传算法得到的底面输入热流密度最初快速下降, 而加热面热流密度则较快增长, 二

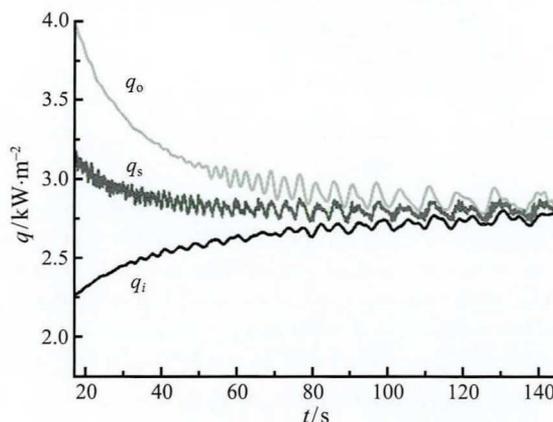


图 10 空间实验中首个加热台阶终端热流密度的变化

Fig. 10 Heat flux near the end of the first heating voltage step in the space experiment

微重力沸腾起始于爆沸, 加热面及其附近液层过热导致快速气化, 形成由加热面向液体中快速膨

胀的极不规则的液气混合物。由于浮力的缺失, 在表面张力的影响下, 生成的气体会在加热面合并生成较大的气泡; 同时, 远离加热面的过冷液体会导致部分气体凝结消失, 及较大气泡顶端的持续凝结, 从而维持了较高传热效率的核态沸腾模式。沸腾起始后, 加热面热流密度会先高高跳起, 随后快速衰减, 计算所得的 3 个不同热流密度逐渐趋同 (图 11)。第三个加热电压台阶依然如此, 但在第四个加热电压台阶, 高热流输入导致气泡尺寸超过加热面, 加热表面温度急剧升高, 核态沸腾不能维持, 进入过渡沸腾。

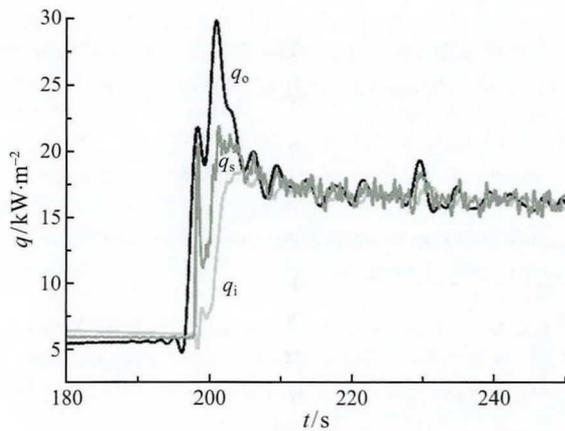


图 11 空间实验中沸腾起始前后热流密度的变化

Fig. 11 Heat flux before and after boiling incipience in the space experiment

图 12 比较了地面实验中基于稳态假设和遗传算法所获得的沸腾曲线。可以清楚看到, 基于遗传算法计算的单相自然对流传热热流密度, 在前 2 个加热电压阶段除起点附近区外, 较好地符合了 Kobus 和 Wedekind 单相自然对流传热关联式 [14] 的预测, 明显较稳态假设能更好地刻画沸腾实验中的瞬态传热特征。沸腾起始瞬间伴随着加热面热流密度的峰值, 随后壁温大幅回落; 随后, 热流密度会随壁温的缓慢下降而有明显下降, 其轨迹与稳定的核态沸腾曲线一致。受高过冷度的影响, 低热流密度条件下的沸腾未能达到充分发展, 因此, 与 Rohsenow 核态沸腾传热关联式 [15] 的预测偏差明显, 但其差距随着热流密度的提高而逐渐减小。地面实验中, 沸腾起始后一直处于核态沸腾状态。

图 13 比较了空间实验中基于稳态假设和遗传算法所获得的沸腾曲线, 其中重力加速度取值为 SJ-10 卫星上的稳态重力水平, 即 $2 \times 10^{-6} g_e$ [16]。Kobus 和 Wedekind 自然对流关联式预测明显低于对应实验结果, 这可能源于空间实验中重力跳动引起的对

流强化传热效应。空间实验与地面显著不同处在于核态沸腾临界在很低的热流密度 ($45 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) 下发生, 导致壁温快速升高, 而热流密度反而有所下降。

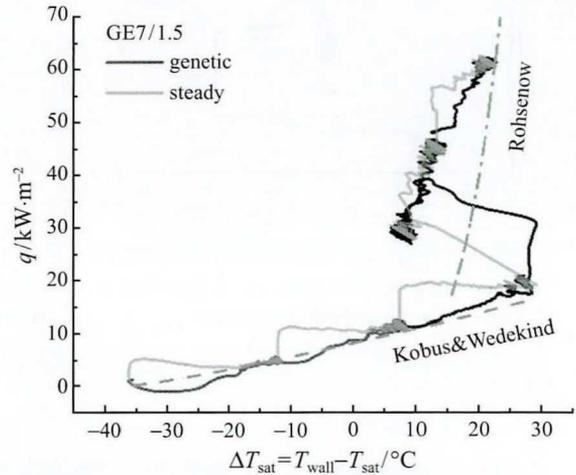


图 12 地面实验沸腾曲线

Fig. 12 Boiling curve in ground experiment

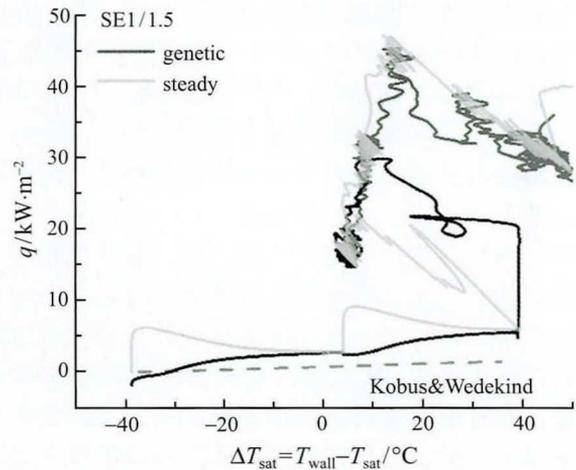


图 13 空间实验沸腾曲线

Fig. 13 Boiling curve in space experiment

图 14 比较了地面常重力和空间微重力条件下沸腾传热曲线的差异, 为清楚起见, 只显示了基于遗传算法反演计算的结果。可以看到, 地面单相自然对流传热明显强于空间的单相传热, 这源于重力 (浮力) 的巨大差异; 空间微重力条件下核态沸腾曲线的起始热流密度远低于地面, 但核态沸腾曲线位置几乎不变, 显示出重力无关的特征; 微重力条件下核态沸腾曲线终点对应的临界热流密度明显低于地面。

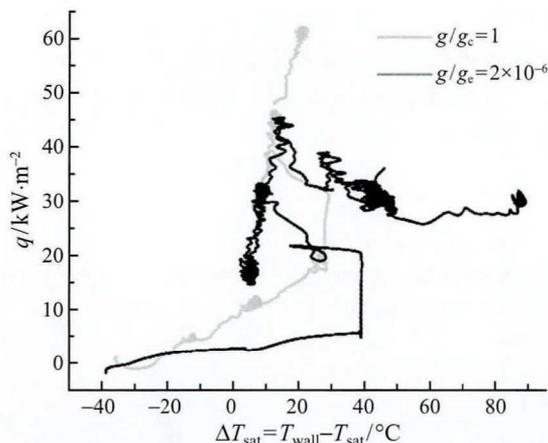


图 14 地面、空间实验中的沸腾传热曲线比较

Fig. 14 Comparison of boiling curves between ground and space experiments

4 结 论

本文利用遗传算法构建了沸腾过程中加热固壁一维瞬态热流计算模型,采用具有精确解的半无限瞬态导热问题构建一个校核算例,验证了该模型具有令人满意的准确度和抗干扰能力。对 SOBER-SJ10 卫星实验中微重力沸腾传热特性进行了分析,并与地面常重力池沸腾传热进行了对比。结果表明,在单相传热阶段,微重力环境浮力对流被严重削弱,热流密度远小于地面时;由于空间实验存在重力跳动,致使对流换热在较小重力条件下产生;地面常重力沸腾起始后,一直处于核态沸腾模式,沸腾曲线起始点高于微重力沸腾起始点,这与地面单相自然对流传热效率的高效有直接关系;但空间微重力沸腾起始后,在较低热流密度和壁面过热度下即进入核态沸腾,同时也在远小于地面临界热流密度时即偏离核态沸腾,转变为过渡沸腾或膜态沸腾模式。不过,不同重力条件下的核态沸腾传热曲线落在同一条线上,显示出核态沸腾模式下载热特性与重力无关的特征。

参 考 文 献

- [1] 杜王芳, 赵建福. 核态池沸腾传热现象中的重力标度规律 [J]. 科学通报, 2020, 65(17): 1629-1637
DU Wangfang, ZHAO Jianfu. Gravity Scaling Law of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(17): 1629-1637
- [2] Egger H, Heng Y, Marquardt W, et al. Efficient Solution of a Three-Dimensional Inverse Heat Conduction Problem in Pool Boiling [J]. Inverse Problem, 2009, 25(9): 0950064
- [3] Heng Y, Lu S, Mhamdi A, et al. Model Functions in the Modified L-curve Method - Case Study: the Heat Flux Reconstruction in Pool Boiling [J]. Inverse Problem, 2010, 26(5): 055006
- [4] Heng Y, Karalashvili M, Mhamdi A, et al. A Multi-Level Adaptive Solution Strategy for 3D Inverse Problems in Pool Boiling [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2011, 21(5): 469-493
- [5] 衡益, 罗玖, 杨青青, 等. 池沸腾强化传热中的三维瞬态导热反问题 [J]. 科学通报, 2020, 65(18): 1857-1874
HENG Yi, LUO Jiu, YANG Qingqing, et al. Three-dimensional Transient Inverse Heat Conduction Problems in The Enhanced Pool Boiling Heat Transfer [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(18): 1857-1874
- [6] Luo J, Yang Q Q, Lu S, et al. A Novel Formulation and Sequential Solution Strategy with Time-Space Adaptive Mesh Refinement for Efficient Reconstruction of Local Boundary Heat Flux [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 1288-1300
- [7] Vakili S, Gadala M S. Effectiveness and Efficiency of Particle Swarm Optimization Technique in Inverse Heat Conduction Analysis [J]. Numerical Heat Transfer B, 2009, 56(2): 119-141
- [8] Cui M, Yang K, Xu X L, et al. A Modified Levenberg-Marquardt Algorithm for Simultaneous Estimation of Multi-Parameters of Boundary Heat Flux by Solving Transient Nonlinear Inverse Heat Conduction Problems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 908-916
- [9] Najafi H, Woodbury K A. Online Heat Flux Estimation Using Artificial Neural Network as a Digital Filter Approach [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91: 808-817
- [10] Pourgholi R, Dana H, Tabasi S H. Solving an Inverse Heat Conduction Problem Using Genetic Algorithm: Sequential and Multi-Core Parallelization Approach [J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(7/8): 1948-1958
- [11] Wu K, Li Z D, Zhao J F, Li H X, Li K. Partial Nucleate Pool Boiling At Low Heat Flux: Preliminary Ground Test for SOBER-SJ10 [J]. Microgravity Science and Technology, 2016, 28(2): 165-178
- [12] 吴克, 赵建福, 李会雄. 微重力池沸腾过程中的气泡热动力学特征研究 [J]. 力学与实践, 2016, 38(2): 203-206
WU Ke, ZHAO Jianfu, LI Huixiong. Thermal Dynamical Behavior of Vapor Bubble During Pool Boiling in Microgravity [J]. Mechanics in Engineering, 2016, 38(2): 203-206
- [13] 吴克, 赵建福, 李会雄, 等. SOBER-SJ10 池沸腾现象天地实验研究 [J]. 工程热物理论, 2017, 38(11): 2378-2381
WU Ke, ZHAO Jianfu, LI Huixiong, et al. Space and Ground Experiment on Pool Boiling Phenomenon Utilizing SOBER SJ-10 Facility [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(11): 2378-2381
- [14] Kobus C J, Wedekind G L. An Experimental Investigation into Natural Convection Heat Transfer from Horizontal Isothermal Circular Disks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(17): 3381-3384
- [15] Rohsenow W M. A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids [J]. Transactions of ASME, 1952, 74: 969-976
- [16] Zhao H G, Qiu J W, Tang B C, et al. The SJ-10 Recoverable Microgravity Satellite of China [J]. Journal of Space Exploration, 2016, 4(3): 1-9