

激光光热效应对双层流体热毛细对流 主动调控机理研究*

段文豪¹ 周小明¹ 陈启生²

1(河海大学机电工程学院 常州 213022)

2(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 热毛细对流不稳定性的主动调控是微重力流体力学和传热传质学领域的前沿问题, 为了实现双层流体热毛细对流不稳定性的有效控制, 提出利用激光光热效应对其不稳定性进行主动调控, 并模型化研究了激光光热效应参数(激光束位置、激光功率和光斑尺寸)对双层热毛细对流不稳定性的调控作用机理. 计算结果显示, 激光功率和光斑尺寸的调整能够显著改变双层流体热毛细对流的对流涡结构, 并减小温度波的振动幅度. 在一定工况下, 热源附近温度波动范围由 0.7 K 变为 0.1 K, 变化显著; 随光斑尺寸增大, 温度振荡幅度先减小后增大. 激光位置的调整能够影响液层局部对流涡的位置, 进而改变激光位置两侧对流强度, 实现局部区域的振荡不稳定流动的控制, 通过光热效应参数的合理选择, 可以实现对双层流体热毛细对流的有效控制.

关键词 双层流体, 热毛细对流, 光热效应, 主动调控

中图分类号 O351.2

Study on the Active Regulation Mechanism of Laser Photothermal Effect on Thermocapillary Convection of Double-layer Fluid

DUAN Wenhao¹ ZHOU Xiaoming¹ CHEN Qisheng²

1(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022)

2(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Active control of thermocapillary convective instability is a frontier scientific issue in the field of microgravity hydrodynamics and heat and mass transfer. In order to achieve effective control of thermocapillary convective instability of double-layer fluid, this paper innovatively proposes to use laser photothermal effect to actively control flow, the regulation mechanism of laser photothermal effect parameters (laser beam position, laser power and spot size) on the instability of double-layer thermocapillary convection is studied. The calculation results show that the adjustment of laser power and spot size can significantly change the structure of the double-layer thermocapillary convection vortices, and reduce the amplitude of the temperature wave. Under certain operating conditions, the temperature fluctuation range near the heat source changes from 0.7 K to 0.1 K, which is significant; with the increase of the spot size, the temperature oscillation amplitude first decreases and then increases. The adjustment of the laser position can affect the local position of the convection vortices, thereby changing the convection intensity on both sides of the laser position, realizing the control of the oscillation unstable flow in the local area. Through the reasonable selection of the photothermal effect parameters, the effective control of the double-layer thermocapillary convection can be achieved.

* 国家自然科学基金项目资助 (51976080)

2023-03-17 收到原稿, 2023-06-29 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/>)

lary convection are also studied. The calculation results show that the adjustment of laser power and spot size can significantly change the convective vortex structure in the spot area and weaken the vibration amplitude of temperature wave. Under certain working conditions, the temperature fluctuation range near the heat source changes significantly from 0.7 K to 0.1 K. The amplitude of temperature oscillation decreases first and then increases with the increase of spot size. The adjustment of the laser position can affect the position of the local convection vortex in the liquid layer, and then change the convection intensity on both sides of the laser position, so as to realize the control of the oscillating and unstable flow in the local region, the effective control of thermocapillary convection of double-layer fluid can be realized through the reasonable selection of photothermal effect parameters.

Key words Two-layer fluid system, Hot capillary convection, Photothermal effect, Active regulation

0 引言

表面张力存在于液体的表面或两种互不相溶的液体交界面处,由水平温差引起的表面张力梯度驱动的流体流动称为热毛细对流^[1].在实际应用中,双层流体热毛细对流广泛存在于化工、冶金及多层铸造等工艺中,并且不稳定的热毛细对流会影响产品质量,例如在晶体生长过程中,不稳定对流会产生密度上的瑕疵和杂质的不均匀掺混,导致晶体质量下降.为了解热毛细对流的失稳机理及其不稳定性规律,近几十年来从理论分析^[2-5]、数值模拟^[6-10]和实验探究^[11-13]等方面对单层或双层热毛细流动特性进行了广泛研究. Qiao 等^[14]开展了薄液层蒸发与热毛细对流的耦合实验以及纳米流体热毛细对流实验,揭示了存在蒸发效应时液层表面温度波动以及界面变形规律,同时发现纳米流体液面蒸发更容易发生失稳现象. Zhu 等^[15]研究了气液界面蒸发效应对热毛细对流发展的影响规律,分析了蒸发面上不同位置点的温度、液体蒸发速率及涡胞发展规律. Shi 等^[16]研究了矩形液池内由蒸发引发的 Marangoni 对流不稳定性,结果表明增加侧壁温度,将增强热毛细对流,抑制 Bénard-Marangoni 对流;当壁面温度与环境温度相差足够大时,实验中出现多涡胞结构和热流体波不稳定性. Villers 等^[17]在醇-水双层体系中开展了浮力-热毛细对流相互作用的实验研究,首次展示了双层体系中流体相互作用的耦合效应.在数值研究方面, Li 等^[18]和 Shi 等^[19]揭示了环形液池内双层体系中流体热毛细对流不稳定性机理.

基于热毛细对流的流动特性,有必要进一步开展双层流体热毛细对流不稳定性调控研究.如何控制热

毛细流动的不稳定性受到广泛关注, Liu 等^[20]和 Zhou^[21]等分析了高频振动和外部磁场对热毛细对流不稳定性的控制作用. Shiomi 等^[22]在液桥流体自由表面引入一个或多个点热源,实现了对于流体热流体波不稳定性的有效抑制.为进一步提高热毛细对流控制的精准性及可操作性,提出利用激光产生的局部光热效应对热毛细对流进行控制,进而实现对热毛细对流不稳定性的控制.因此,本文通过数值模拟的方法,研究光热效应作用下热毛细对流的流动特性,以揭示局部光热效应对双层流体热毛细对流的作用,为光热效应调控热毛细对流提供理论基础和指导.

1 物理数学模型

1.1 结构与假设

采用的物理模型如图 1 所示,矩形液池长为 10 mm(x),高为 2 mm(y).液池上层为 0.65 cSt 硅油,下层为水,上下层流体厚度均为 1 mm.左侧壁面为低温壁面, $T_c = 298.15$ K,右侧壁面为高温壁面,且 $T_h > T_c$.在物理模型中做出以下假设.

假设 1 上下层流体的流动均为层流流动.

假设 2 所涉流体为不可压缩流体,除表面张力外,所有物性参数不随温度发生改变.

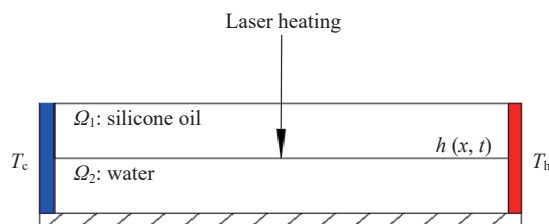


图 1 研究模型

Fig. 1 Research model

假设 3 表面张力为温度的线性函数, 并具有如下形式:

$$\sigma = \sigma_0 - \gamma(T - T_0). \quad (1)$$

其中, γ 为流体表面张力的温度系数, $\gamma = -\frac{\partial \sigma}{\partial T}$; σ_0 为温度 T_0 时的表面张力.

为定义液液界面上的表面张力 $\bar{\sigma}(T)$, 假设系统中的液体处于相互饱和的状态. 应用 Antonoff 规则^[23] 计算液液界面上的表面张力, 有

$$\bar{\sigma}(T) = \sigma_1(T) - \sigma_2(T). \quad (2)$$

基于以上假设, 建立双层流体热毛细对流的控制方程. 连续性方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_i = 0. \quad (3)$$

动量方程为

$$\rho_i \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} + \rho_i \mathbf{v}_i \cdot \nabla (\mathbf{v}_i) = -\nabla p_i + \mu_i \nabla^2 \mathbf{v}_i. \quad (4)$$

能量方程为

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + \mathbf{v}_i \cdot \nabla T_i = k_i \nabla^2 T_i. \quad (5)$$

其中, 下角 i 取值为 1 和 2, 1 代表的是上层的硅油, 2 代表下层的水; ρ_i 为流体密度; μ_i 为流体动力学黏度; p_i 为流体压力; k_i 为流体的热导率; $\mathbf{v}_i$ 为流体速度.

考虑交界面发生变形, 求解界面位置 $h(x, t)$. 硅油-水交界面 $F = y - h(x, t) = 0$ 应满足动力学和运动学条件, 即

$$\mathbf{n}_2 \cdot (\Pi_1 - \Pi_2) = [\nabla \cdot \sigma(t) \cdot \mathbf{n}_2] \mathbf{n}_2 - \nabla \cdot \sigma(t). \quad (6)$$

$$\Pi_i = -p_i I + \mu_i \nabla \mathbf{u}_i. \quad (7)$$

$$u_1 = u_2. \quad (8)$$

$$\frac{1}{|\nabla F|} \frac{\partial F}{\partial t} = u_2 \cdot \mathbf{n}_2. \quad (9)$$

其中, $\mathbf{n}_2$ 表示指向水的单位法向矢量, Π_i 表示两相中的无量纲应力张量.

1.2 流体界面处局部激光光热效应

假设激光器的模拟能量密度服从高斯分布, 其功率分布可以表示为

$$f(O, e) = q \frac{1}{2\pi\alpha^2} \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2\alpha^2}\right),$$

$$d = \frac{\|e \times (x - O)\|}{\|e\|}. \quad (10)$$

式中, $f(O, e)$ 为激光在液液界面的功率分布, α 为标准差; O 为束原点, 坐标为 $(10, 1)$; q 为激光功率; 光斑半径为 $\sqrt{2}\sigma$; d 为液液界面上的点到束原点的水平距离.

1.3 边界条件

除上壁面为自由表面外, 其余壁面均满足无滑移条件且分为左右壁面, 即

$$u = v = 0, \quad T = T_c, \quad x = 0 \text{ mm};$$

$$u = v = 0, \quad T = T_h, \quad x = 10 \text{ mm};$$

$$u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad y = 0 \text{ mm};$$

$$v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \mu_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} = -\gamma_1 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad y = 2 \text{ mm};$$

$$T_1 = T_2, \quad k_1 n_1 \nabla T_1 = k_2 n_1 \nabla T_2,$$

$$q_{v, \text{liquid}} = \eta_i f(O, e), \quad y = h(x, t).$$

式中, $h(x, t)$ 为界面位置; k_i 为流体的热导率; $q_{v, \text{liquid}}$ 为被液体吸收并转化为热能的光能. η_i 为液体的吸热率.

2 计算方法

采用有限元方法求解控制方程. 在初始阶段用向后欧拉法进行数值处理, 后续流体振荡过程采用向后差分公式进行计算. 采用三角形网格对模型计算区域进行划分, 考虑激光分布和精度问题, 在上表面和流体界面处进行局部加密, 如图 2 所示. 网格独立性验

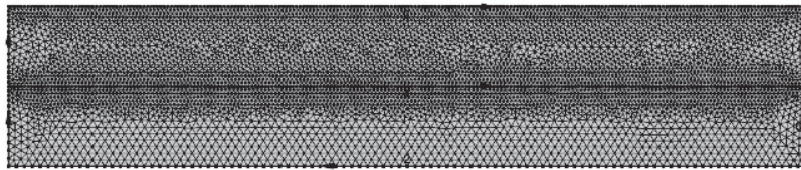


图 2 网格划分

Fig. 2 Diagram of the grid division

表 1 网格独立性测试
Table 1 Grid independence test

网格数	上层流速/(m·s ⁻¹)	下层流速/(m·s ⁻¹)
5232	1.22×10^{-3}	1.88×10^{-3}
6437	1.12×10^{-3}	1.81×10^{-3}
11958	1.05×10^{-3}	1.73×10^{-3}
14596	1.01×10^{-3}	1.73×10^{-3}
16210	9.8×10^{-4}	1.705×10^{-3}
20388	9.7×10^{-4}	1.7×10^{-3}

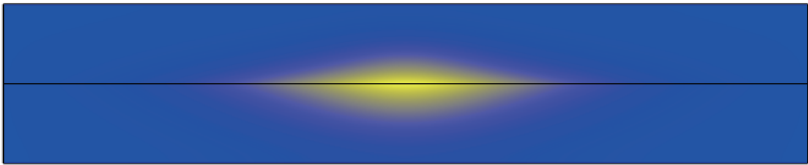


图 3 激光热源温度场
Fig. 3 Temperature field of laser heat source

证结果见表 1, 考虑计算的时间和精度, 选择网格数为 16210. 热源设置采用计算软件中的表面沉积光束, 在液液界面引入热源.

硅油和水在 632.8 nm 波长下的吸收系数约为 0.0024 cm^{-1} . 因此, 激光束在液体内的热效应可以忽略不计. 参照 Bekezhanova 实验中, 通过在液液界面加入绿色薄层液体, 将激光束从上方引导到双层体系的流体交界面^[24]. 仿真中简化掉薄层液体, 仅在液液界面引入热源, 其表现形式如图 3 所示. 激光热源的表现形式符合高斯光束特点.

3 计算结果与分析

3.1 无激光干预

左右壁面存在的温差将使得流体的交界面产生表面张力梯度, 驱动流体运动形成热毛细对流. 温差较小时会形成单胞稳态对流 (基态流动); 温差大于临界温差时, 稳态对流将转变为非稳态振荡对流. 图 4 为不同温差下流体充分发展时流场的分布. 从图中可以看出, 随着左右壁面温差的增大, 流体流动从稳定单涡胞结构向多涡胞结构转变. 左右壁面温差为 1 K 和 2 K 时为稳态流动, 上层流体中存在两个涡胞; 温差为 1 K 时上层流体中靠近自由界面的涡胞受到挤压, 随着温差增大, 挤压现象减弱. 当温差为 5 K

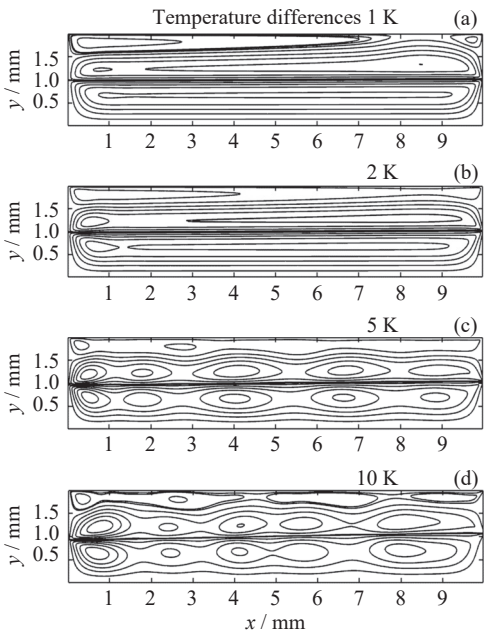


图 4 不同温差下流体的流线分布
Fig. 4 Fluid flow line distribution under various temperature differences

和 10 K 时, 温差大于临界温差, 流动转变为振荡流动, 上下层流体对流结构均发展成多涡胞.

图 5 给出的是不同温差下, 在 $t=10 \text{ s}$ 时液池内温度等值线的分布. 从图 5(a) 可以看出, 在小温差状态下, 液池内温度的变化较为平稳, 等值线没有出现

较大的扭曲, 因为此时热量的传递主要是靠热传导的方式进行的, 热毛细对流的影响较小, 仅是靠近自由表面和液液界面的区域内热量传导发生“变形”; 随着温差不断增大, 温度等值线弯曲程度不断增大, 对流换热效应增强. 从图 5(b)(c) 中可以看出, 在温差较大的情况下, 流体温度等值线的弯曲程度增大, 并且表现出周期性规则结构分布, 这是因为随温差增大热毛细效应增强, 热量传递受对流涡影响而增强, 进而导致流体对流不稳定.

为直观了解热毛细对流的振荡现象, 对热毛细对流不稳定性发生过程中点 M ($x=5$ mm, $y=1.5$ mm) 的温度变化进行监测. 图 6 给出的是监测点 M ($x=5$ mm, $y=1.5$ mm) 温度随时间的变化. 当温差增大 ($\Delta T \geq 5$ K) 时, 监测点处温度出现明显波动, 其波动幅度呈现不同程度的增大.

从图 6 中可以看出, 当温差为 5 K, $t > 15$ s 时监测点温度开始出现稳定的周期性波动, 其波动周期约为 1.1 s, 此即为热毛细对流的振荡周期. 温差为 10 K 时 (见图 7), 由于温度差增加, 监测点温度波动不再是规则的正弦曲线.

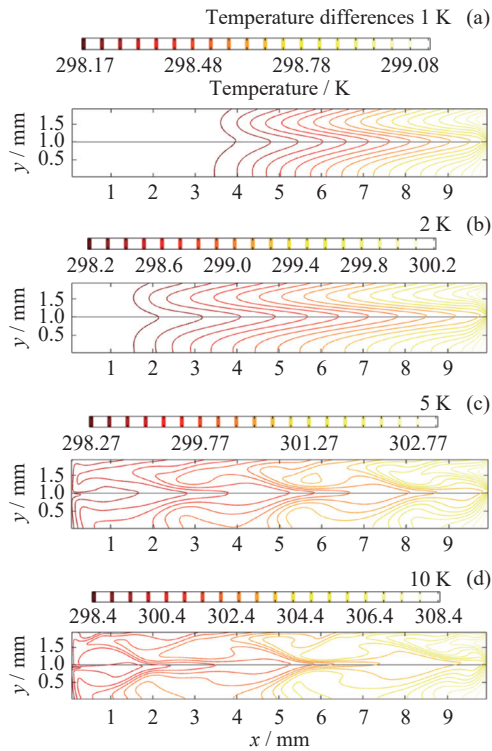


图 5 不同温差下流体的温度等值线

Fig. 5 Contour map of fluid temperature under various temperature differences

3.2 激光位置影响

为揭示激光加热位置对热毛细对流的影响, 研究不同温差下热源相关参数和流体特征的变化情况. 图 8 给出的是在温差为 1 K、激光功率 0.01 W、标准差 0.3 mm 情况下, 不同加热位置下的流体流线. 可以看出, 当激光位置远离高温侧 ($x=1$ mm) 时, 在激光点左右两侧形成了单涡胞且右侧流线明显变得稀疏; 从图 8(a) 中可以看出左侧涡胞向高温侧发展势头明显. 同一层流体左右两侧涡胞交界处明显右移. 当激光点靠近高温侧时 ($x=8$ mm), 左侧流线明显变得稀疏, 并在远离热源处分离出对流涡, 而在热源右侧上层流体同样向右分离出对流涡, 下层流体也有向右分离涡胞的趋势. 激光点处温度随加热时间增大而升高, 当温度增高到一定程度时, 所加热源形成的对流涡与水平温差驱动下形成的对流涡相互影响.

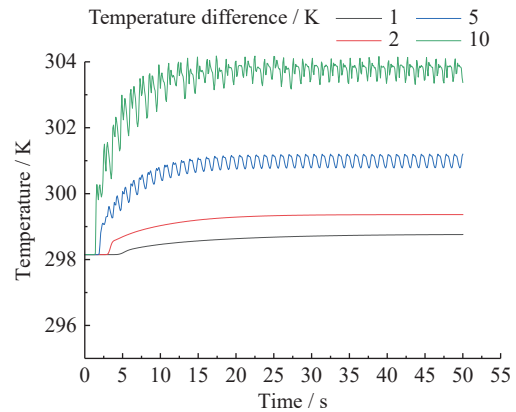


图 6 不同温差下监测点 M 的温度变化

Fig. 6 Temperature variation of monitoring point M under different temperature differences

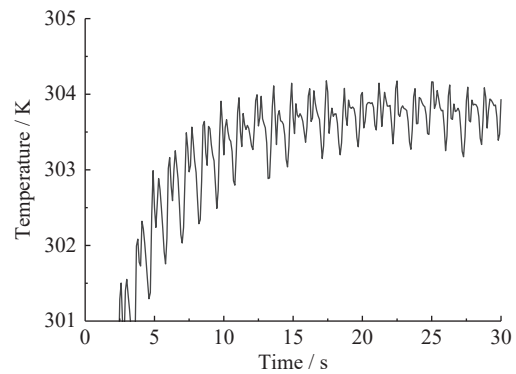


图 7 $\Delta T = 10$ K 时监测点 M 的温度变化

Fig. 7 Temperature change at monitoring point M when $\Delta T = 10$ K

图 9 为激光加热点在不同位置时, 监测点 $M(x=5 \text{ mm}, y=1.5 \text{ mm})$ 温度随时间的变化, 可以看出, 此时热源的引入并未引得流体温度发生振荡, 只是引起流体温度大小发生变化.

图 10 给出的是在大温差 $\Delta T = 10 \text{ K}$ 和激光功率 0.01 W 情况下, 不同加热位置下的流体流线. 当激光位置远离高温侧 ($x=1 \text{ mm}$) 时, 热源位置处的涡胞流线变得密集, 涡胞中心明显发生右移, 涡胞右侧流线比左侧更加密集, 这表明对流涡与右侧流体存在一定的挤压作用. 而流体中间部位处的涡胞, 在挤压作用的影响下开始融合.

当热源施加在中间部位 ($x=5 \text{ mm}$) 时, 热源位置

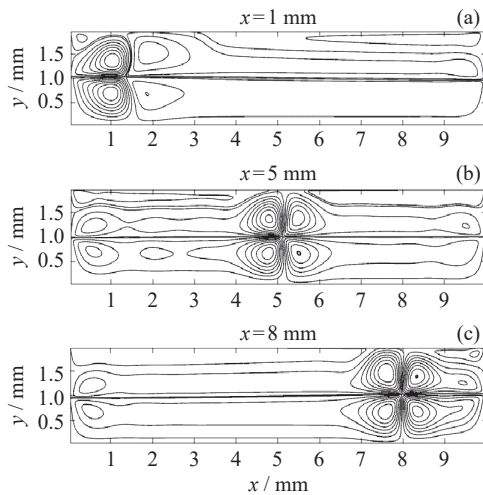


图 8 小温差激光点在不同位置时流体的流线分布

Fig. 8 Fluid flow line distribution at different positions of laser under small temperature difference

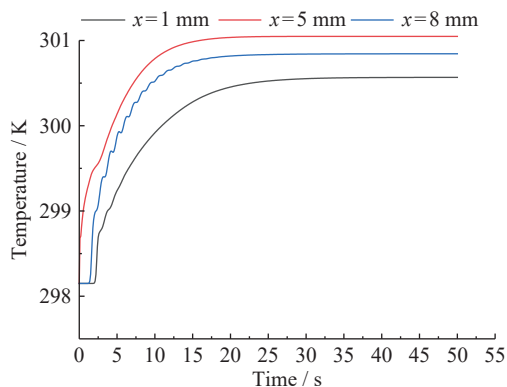


图 9 小温差激光在不同位置处监测点 M 的温度变化

Fig. 9 Temperature changes at monitoring point M at different positions of laser with small temperature differences

及其左侧的涡胞流线变得密集, 同样热源处涡胞右侧流线比左侧更加密集, 表明对流涡与右侧流体存在挤压作用. 当热源靠近高温侧 ($x=8 \text{ mm}$) 时, 整个流体范围内主要涡胞数量并未变化, 但是涡胞分离更加明显.

图 11 给出了监测点 $M(x=5 \text{ mm}, y=1.5 \text{ mm})$ 温度随时间的变化, 可以看出在左右两侧加入热源时, 监测点整体温度波的强度与形状相似, 仅波动区间对应的温度变化明显; 而在监测点下方施加热源

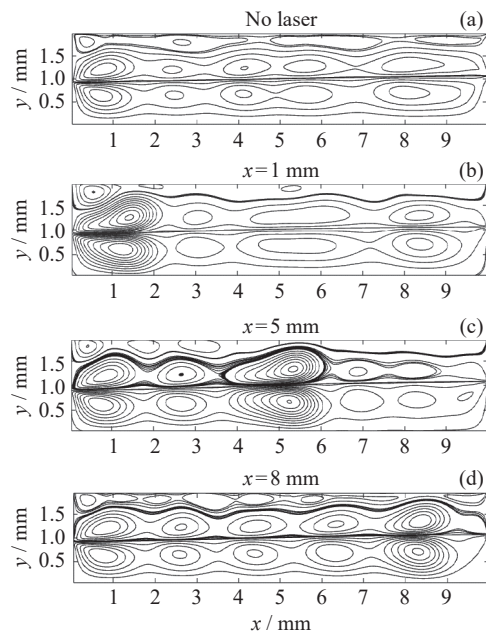


图 10 大温差激光在不同位置处流体的流线分布

Fig. 10 Fluid flow line distribution at different positions of laser with large temperature difference

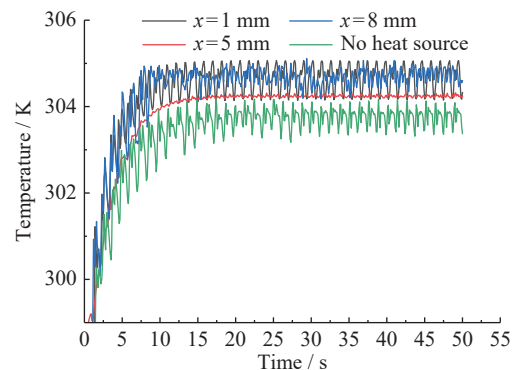


图 11 大温差激光在不同位置处监测点 M 温度变化

Fig. 11 Temperature changes of monitoring point M at different positions of laser with large temperature difference

时, 监测点温度波动虽无明显规律, 但其温度波动减小到 0.1 K.

3.3 激光功率影响

为了探究激光功率对流体热毛细对流影响, 在 $x=5$ mm, $y=1$ mm 处施加热源, 激光标准差为 0.3 mm. 图 12 为小温差 $\Delta T = 1$ K 时, 不同激光功率下对应流体的流线. 从图 12 可以看出, 由于引入热源, 流体被分割为 4 个流动区域, 上下两层流体均从热源处向左右两侧流动, 并向多涡胞发展, 随着加热功率的增大, 多涡流态更加清晰. 并且热源左右两侧流线具有一定的对称性. 此时流体流动驱动力由激光主导, 功率的增大增强了流体的热毛细对流.

图 13 所示为小温差不同激光功率下, 监测点 M ($x=5$ mm, $y=1.5$ mm) 的温度变化. 图 14 为监测点 N ($x=8$ mm, $y=1.5$ mm) 的温度变化. 从图 13 可以看出, 与其余点相比, 热源上方监测点温度波动范围减小, 这与上述结果相同, 当功率为 0.03 W 时, 热源上方监测点 M 相比 N 点, 其温度基本保持恒定. 从图 13 和 14 中还可以看出, 当激光功率为 0.01 W 时, 流体为稳态流动, 随着激光功率的增加, 流体向非稳态流动转变.

图 15 为大温差 $\Delta T = 10$ K 时不同激光功率下对

应流体的流线. 相比小温差的情况, 当激光功率为 0.01 W 时, 流体并未因加入热源而在热源两侧产生分离的涡胞. 而随着功率不断增大, 在左右两侧出现了独立的涡流. 同时可以观察到随着功率增大, 上层流体中靠近自由表面的涡流不断向下发展.

为便于分析, 绘制监测点 M 和 N 的温度变化曲线分别见图 16 和图 17. 可以看出热源上方监测点 M 在 4 种工况下温度波动很小, 整体比较平稳. 在另一侧的监测点 N , 当功率为 0.03 W 和 0.05 W 时, 温度波动很小或无波动. 在功率为 0.01 W 时, 温度波动

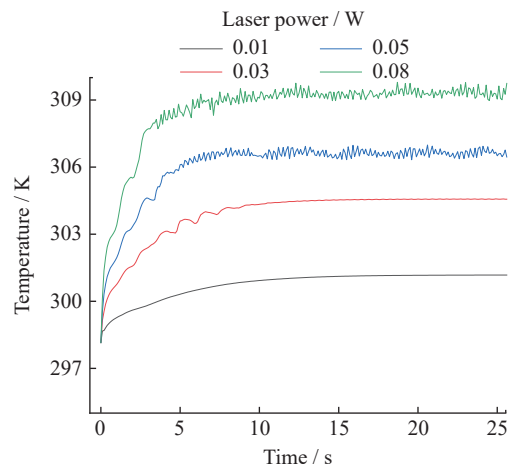


图 13 小温差不同激光功率下监测点 M 的温度变化
Fig. 13 Temperature change diagram of monitoring point M under small temperature difference and different laser powers

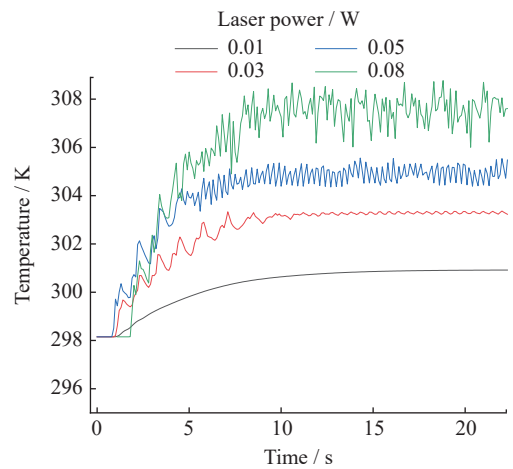


图 14 小温差不同激光功率下监测点 N 的温度变化
Fig. 14 Temperature change diagram of monitoring point N under small temperature difference and different laser powers

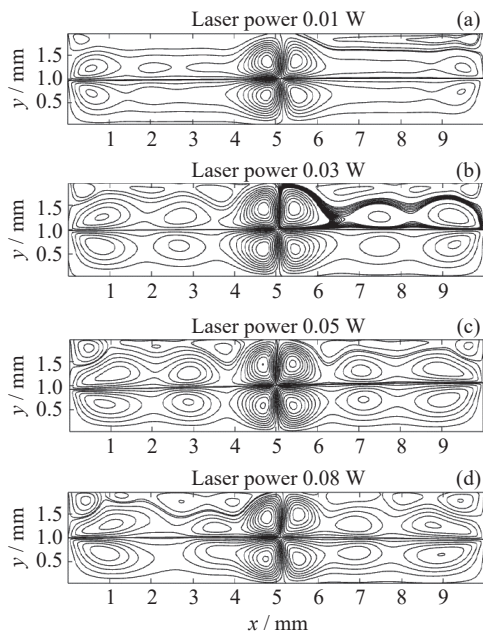


图 12 小温差不同激光功率下流体的流线分布
Fig. 12 Fluid flow line distribution under small temperature difference and different laser powers

近似为周期性波动; 功率为 0.08 W 时, 温度波动变得复杂没有规律. 热源的引入对右侧流体的流动产生了很大的影响, 当功率较小时, 水平温差对热毛细对流起到主导作用, 热源的加入削减了温差的影响. 当功

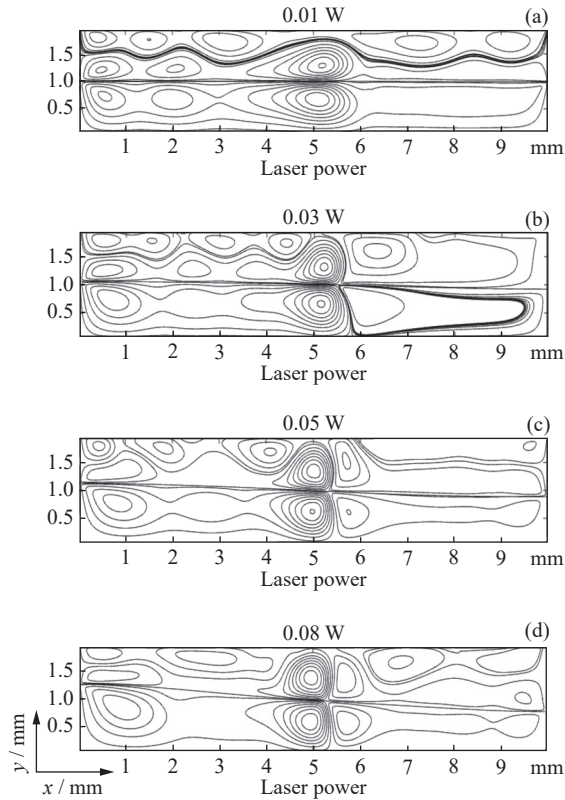


图 15 大温差不同激光功率下流体的流线分布
Fig. 15 Fluid flow line distribution under large temperature difference and different laser powers

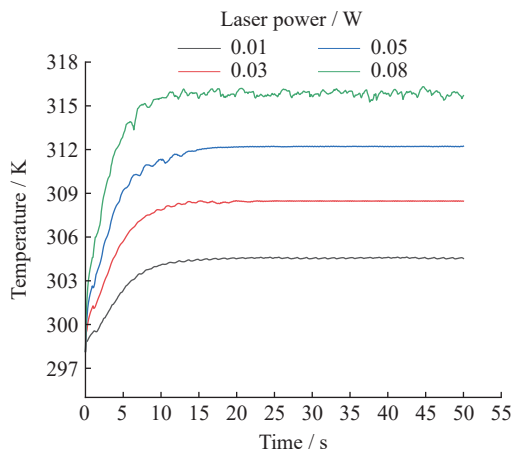


图 16 大温差不同激光功率下监测点 M 的温度变化
Fig. 16 Temperature change diagram of monitoring point M under large temperature difference and different laser powers

率持续增大, 削减效应不断增大, 体现为温度波动幅度大大减小. 当功率超过一定限制后, 热源成为主导, 影响流体热毛细对流.

为进一步分析规律, 在上层流体中热源左侧设置一个新监测点 Q ($x=2$ mm, $y=1.5$ mm), 如图 18 所示. 可以看出引入热源后, 热源左侧的监测点温度波动变得更加复杂. 对于左侧流体, 热源抑制作用不明显, 功率增大更加剧了流体的不规则运动.

3.4 光斑尺寸影响

在探究光斑尺寸对流体热毛细对流的影响时, 本

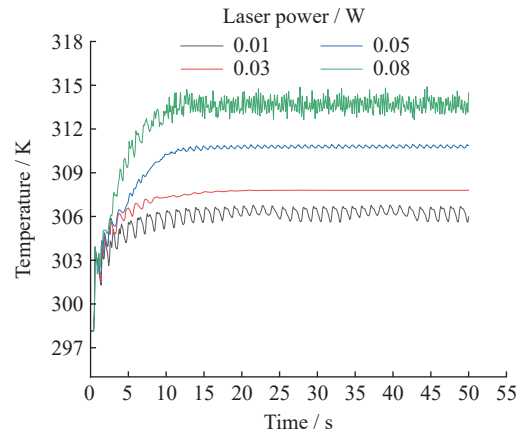


图 17 大温差不同激光功率下监测点 N 的温度变化
Fig. 17 Temperature change diagram of monitoring point N under large temperature difference and different laser powers

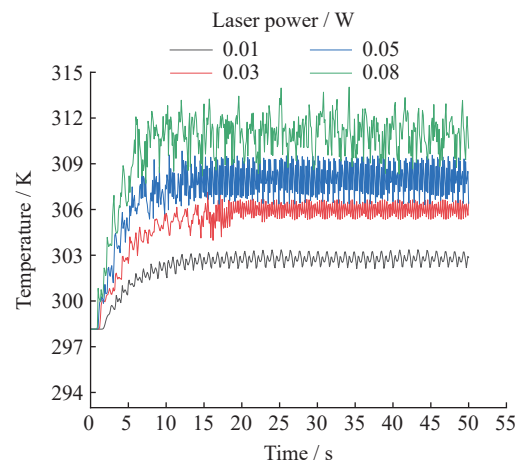


图 18 大温差不同激光功率下监测点 Q 的温度变化
Fig. 18 Temperature change diagram of monitoring point Q under large temperature difference and different laser powers

文在 $x=5\text{ mm}$, $y=1\text{ mm}$ 处施加热源, 激光功率为 0.01 W . 仿真设置中, 通过改变标准差 α 来改变光斑尺寸 r ($r = \sqrt{2}\alpha$).

图 19 为小温差 $\Delta T = 1\text{ K}$ 下不同标准差对应流体的流线. 从图 19 可以看出, 当 $\alpha = 0.3\text{ mm}$ 时, 热源左右两侧均呈现多涡流形态, 随着标准差的增大, 热源左侧流体由多涡胞转变为单涡胞, 而右侧也有涡胞融合的趋势. 并且随着标准差的增大, 主涡胞的中心开始逐渐右移.

图 20 所示为小温差不同标准差条件下, 监测点 M ($x=5\text{ mm}$, $y=1.5\text{ mm}$) 的温度变化. 在图 20 所示情况下, 监测点温度在最终平衡时均为恒定温度. 在标准差不断增大的情况下, 监测点 M 的最终恒定温度逐渐减小, 但始终高于右侧壁面温度.

图 21 为大温差 $\Delta T = 10\text{ K}$ 下不同标准差对应的流体流线. 当标准差增大时, 热源右侧涡胞向多涡胞发展, 同时热源处上下涡胞的中心开始逐步向左移动, 并且涡胞形态逐渐变得扁平. 这是由于在激光功率不变的情况下, 增大 α 会降低热源的升温能力, 对其上下涡胞的影响减弱, 进而在水平温差的驱动下, 涡胞向左移动.

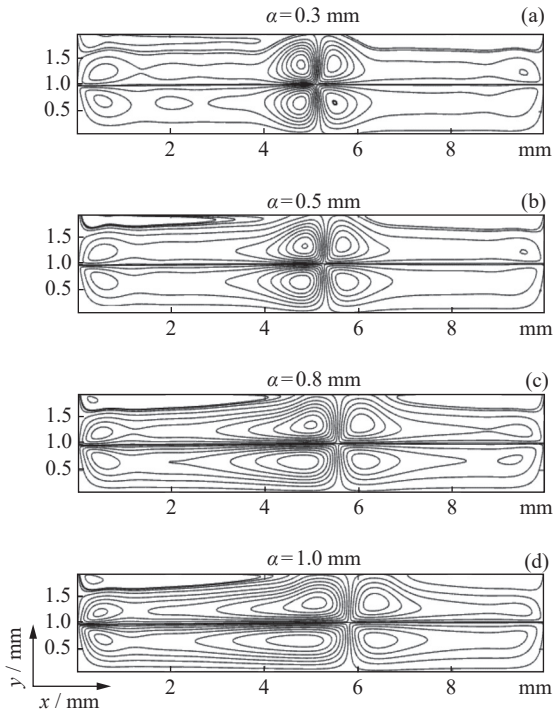


图 19 小温差 $\Delta T = 1\text{ K}$ 时不同标准差流体的流线分布

Fig. 19 Fluid flow line distribution with different standard deviations at $\Delta T = 1\text{ K}$

图 22 所示为大温差不同标准差条件下, 监测点 M ($x=5\text{ mm}$, $y=1.5\text{ mm}$) 的温度变化. 从图 22 可以看出, 热源的存在会大幅减小热源附近流体的温度波动幅度; 当 $\alpha = 0.5\text{ mm}$ 时, 监测点 M 温度波动幅度最小, 当 α 减小到 0.3 mm 时, 其温度区间和波动幅度都有一定程度的增大. 图 23 所示为大温差不同标准

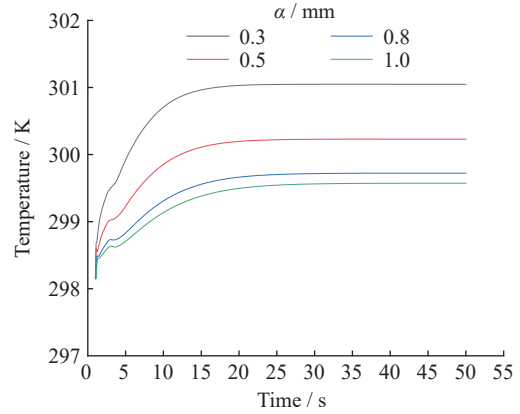


图 20 小温差 $\Delta T = 1\text{ K}$ 时不同标准差下监测点 M 温度变化

Fig. 20 Temperature changes at monitoring point M with different standard deviations at $\Delta T = 1\text{ K}$

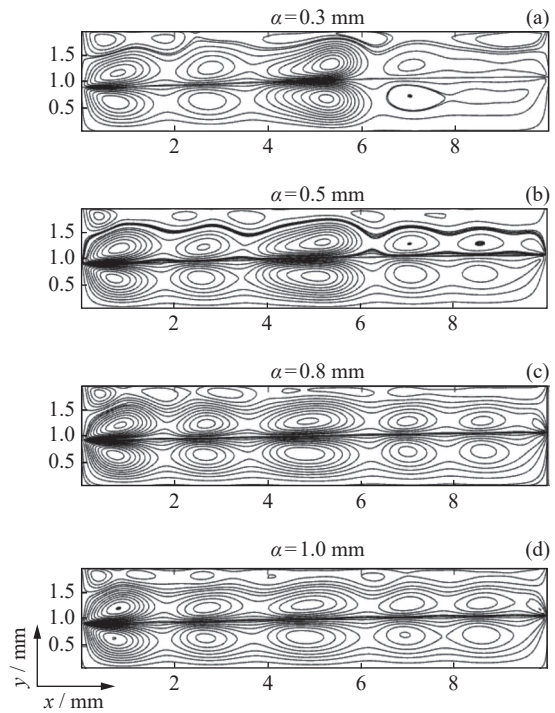


图 21 大温差 $\Delta T = 10\text{ K}$ 时不同标准差流体流线分布

Fig. 21 Fluid flow line distribution with different standard deviations at $\Delta T = 10\text{ K}$

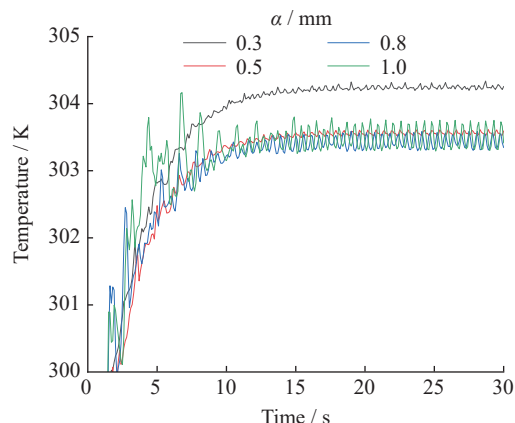


图 22 大温差 $\Delta T = 10$ K 时不同标准差下监测点 M 温度的变化

Fig. 22 Temperature changes at monitoring point M with different standard deviations at $\Delta T = 10$ K

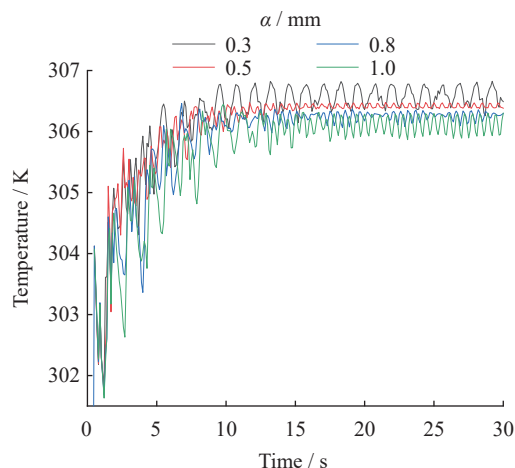


图 23 大温差 $\Delta T = 10$ K 时不同标准差下监测点 N 温度的变化

Fig. 23 Temperature changes at monitoring point N with different standard deviations at $\Delta T = 10$ K

差条件下, 监测点 N 的 ($x=8$ mm, $y=1.5$ mm) 温度变化. 在不同标准差下, 温度波动状态不同, 但同样在 $\alpha = 0.5$ mm 时, 监测点 N 温度波动幅度最小.

4 结论

对光热效应作用下的流体热毛细对流进行数值研究, 在激光热源驱动和水平温差驱动的双重作用下, 分析了激光束位置、激光功率和光斑尺寸对热毛细对流的影响, 得出如下结论.

(1) 在流体界面引入激光热源时, 流体温度波动的幅度和波动区间会受到影响, 在热源周围区域, 特别是热源上方, 温度波动变化明显, 热源位置主要影响热源作用区域.

(2) 改变激光功率时, 热源与高温壁面之间流体温度波动受到明显抑制, 存在振动—平稳—振动的变化过程. 小温差下, 热源主导产生不稳定的多涡胞流动.

(3) 减小光斑半径时, 温度波的振动幅度明显降低. 而增大光斑直径会降低热源驱动对流体流动的影响.

(4) 当流体同时受到水平温差和激光驱动的影响时, 通过改变激光位置、功率和光斑半径可以在局部削减温度的波动, 改变流体的流动状态.

参考文献

- [1] LIU Jia. Linear Stability Analysis of Buoyancy-thermocapillary Convection Driven by Bidirectional Temperature Gradients[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019 (刘佳. 双向温度梯度作用下浮力-热毛细对流的线性稳定性分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019)
- [2] JIANG Y N, CHI F X, CHEN Q S, *et al.* Effect of substrate microstructure on thermocapillary flow and heat transfer of nanofluid droplet on heated wall[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2021, **33**(3): 37
- [3] JIANG Y N, ZHOU X M, WANG Y. Effect of nanoparticle shapes on nanofluid mixed forced and thermocapillary convection in mini channel[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, **118**: 104884
- [4] JIANG Y N, ZHOU X M, WANG Y. Comprehensive heat transfer performance analysis of nanofluid mixed forced and thermocapillary convection around a gas bubble in minichannel[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, **110**: 104386
- [5] ZHOU X M, JIANG Y Q, WANG Y, *et al.* Comprehensive heat transfer performance analysis of liquid metal based nanofluid laminar flow in circular tube[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, **175**: 105530
- [6] JIANG Y N, ZHOU X M, WANG Y. Effects of nanoparticle shapes on heat and mass transfer of nanofluid thermocapillary convection around a gas bubble[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2020, **32**(2): 167-177
- [7] ZHOU X M, JIANG Y N, HOU Y, *et al.* Thermocapillary convection instability in annular two-layer system under various gravity levels[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2019, **31**(5): 641-648
- [8] HAMED M, FLORYAN J M. Marangoni convection. Part 1. a cavity with differentially heated sidewalls[J]. *Journal*

- of Fluid Mechanics*, 2000, **405**: 79-110
- [9] SOMEYA S, MUNAKATA T, NISHIO M, *et al.* Flow observation in two immiscible liquid layers subject to a horizontal temperature gradient[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2002, **235**(1/2/3/4): 626-632
- [10] FONTAINE J P, SANI R L. Thermocapillary effects in a multilayered fluid system[C]//Proceedings of the 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1992
- [11] AZUMA H, YOSHIHARA S, OHNISHI M, *et al.* Upper layer flow phenomena in two immiscible liquid layers subject to a horizontal temperature gradient[C]. *Microgravity Fluid Mechanics*, 1992, 205-212
- [12] GÉORIS P, LEGROS J C. Pure thermocapillary convection in a multilayer system: first results from the IML-2 mission[C]//Proceedings of the IXth European Symposium on Gravity-Dependent Phenomena in Physical Sciences Held at Berlin. Berlin: Springer, 1996: 299-311
- [13] ZHOU Binghong, LIU Qiusheng, HU Liang, *et al.* Space experiments of thermocapillary convection in two-liquid layers[J]. *Science in China Series E: Technological Science*, 2002, **45**(5): 552-560 (周炳红, 刘秋生, 胡良, 等. 两层流体热毛细对流空间实验研究 [J]. *中国科学 E 辑*, 2002, **32**(3): 316-322)
- [14] QIAO Lili. Thermocapillary Convection Experiment of the Thin Evaporating Liquid Layer[D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019 (乔莉莉. 蒸发薄液层的热毛细对流实验 [D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2019)
- [15] ZHU Zhiqiang, JI Yan, LIU Qiusheng, *et al.* Experimental study on the coupling of thermocapillary convection and evaporation effect in a liquid layer[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, **28**(1): 12-16 (朱志强, 纪岩, 刘秋生, 等. 蒸发效应与热毛细对流耦合现象的实验研究 [J]. *空间科学学报*, 2008, **28**(1): 12-16)
- [16] SHI W Y, RONG S M, FENG L. Marangoni convection instabilities induced by evaporation of liquid layer in an open rectangular pool[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2017, **29**(1): 91-96
- [17] VILLERS D, PLATTEN J K. Separation of Marangoni convection from gravitational convection in earth experiments[J]. *Physico Chemical Hydrodynamics*, 1987, **8**(2): 173-183
- [18] GONG X W, MO D M, WU C M, *et al.* Linear-stability analysis of thermocapillary-buoyancy convection in annular two-layer system with a radial temperature gradient[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, **66**: 58-62
- [19] LI H M, SHI W Y. Thermocapillary convection in a differentially heated two-layer annular system with and without rotation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **105**: 684-689
- [20] LIU Q S, ZHOU J Y, WANG A, *et al.* Thermovibrational instability of Rayleigh-Marangoni-Bénard convection in two-layer fluid systems[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(12): 2131-2136
- [21] ZHOU X M, HUANG H L. MHD effects on the instability of thermocapillary convection in two-layer fluid system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, **53**(25/26): 5827-5834
- [22] SHIOMI J, KUDO M, UENO I, *et al.* Feedback control of oscillatory thermocapillary convection in a half-zone liquid bridge[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, **496**: 193-211
- [23] ANTONOW G N. Sur la tension superficielle à la limite de deux couches[J]. *Journal de Chimie Physique*, 1907, **5**: 372-385
- [24] BEKEZHZANOVA V B, FLIAGIN V M, GONCHAROVA O N, *et al.* Thermocapillary deformations of a two-layer system of liquids under laser beam heating[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, **132**: 103429

作者简介



段文豪 男, 1999 年 9 月出生于河南周口. 现为河海大学机电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为微重力流体与传热、光热调控技术等

E-mail: 211319010007@hhu.edu.cn



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