



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405075

引用格式:张金阳,熊平,江启峰,等.液滴撞击不同润湿性加热表面的数值模拟[J].科学技术与工程,2025,25(14):5730-5736.

Zhang Jinyang, Xiong Ping, Jiang Qifeng, et al. Numerical simulation of droplet impact on heated surface with different wettability[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 5730-5736.

力学

液滴撞击不同润湿性加热表面的数值模拟

张金阳,熊平*,江启峰,周铃岚,杨世豪

(西华大学流体及动力机械教育部重点实验室,成都 610039)

摘要 为研究液滴撞击不同润湿性加热表面的传热传质问题,基于体积分数(volume of fluid, VOF)方法,分析了壁面润湿性和表面温度对液滴形态及传热特性的作用机理,结果表明:亲水壁面有利于液滴的铺展,疏水壁面则有利于液滴的反弹,随着接触角的增大,液滴最大铺展因子减小,达最大铺展因子的时间缩短,壁面平均热流密度减小。表面温度对液滴铺展阶段的影响较小,随着表面温度的升高,液滴相变速率加快,壁面平均热流密度增大,表面温度超过临界温度时,产生 Leidenfrost 现象。

关键词 液滴撞击;VOF方法;铺展因子;热流密度;数值模拟

中图法分类号 O359+.1; 文献标志码 A

Numerical Simulation of Droplet Impact on Heated Surface with Different Wettability

ZHANG Jin-yang, XIONG Ping*, JIANG Qi-feng, ZHOU Ling-lan, YANG Shi-hao

(Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039, China)

[Abstract] In order to investigate the heat and mass transfer of liquid droplet impinging on a heated surface with different wettability, VOF (volume of fluid) numerical simulation method was used to analyze the mechanisms of wall wettability and surface temperature on droplet morphology and heat transfer characteristics. The results show that the hydrophilic wall is favorable for droplet spreading, while the hydrophobic wall is favorable for droplet rebound. With the increase of contact angle, the maximum spreading factor of droplets decreases, the time to reach the maximum spreading factor is shortened, and the average heat flux of the wall surface decreases. Surface temperature has less influence on the droplet spreading stage, with the increase of surface temperature, the droplet phase transition rate accelerates, the average heat flux of the wall surface increases, and the Leidenfrost phenomenon occurs when the surface temperature exceeds the critical temperature.

[Keywords] droplet impact; VOF (volume of fluid) method; spreading factor; heat flux; numerical simulation

液滴撞击固体表面现象广泛存在于日常生活和工业领域中,如表面喷雾冷却技术^[1]、金属热处理^[2]、热喷雾涂层^[3]、内燃机燃油喷射^[4]和喷墨打印^[5]等。其中喷雾冷却技术由于其出色的热质传递能力,被广泛应用于微电子及航空航天技术的发展中。液滴撞击后由于受力变化,出现铺展、收缩和破碎飞溅等现象^[6],引起液滴撞击过程中形态变化的因素众多,包括液滴的物性参数^[7]、壁面润湿性^[8]、撞击速度^[9]以及壁面温度^[10]等。对液滴撞击热壁面的数值模拟研究有助于理解微尺度传热传

质过程,在能源转换、热管理等工程技术领域具有广泛的应用前景。

实验研究可以直观地表现出液滴复杂的形态变化,却难以体现传热传质变化的连续过程,数值模拟技术的发展则弥补了传统实验研究的不足。国内外众多学者针对液滴撞击壁面这一复杂运动展开了大量研究,Gunjal等^[11]结合实验与数值模拟对液滴撞击壁面后的动态特性进行研究。梁超等^[12]采用VOF(volume of fluid)方法,研究发现接触角对液滴铺展的影响较大,接触角过大时,液膜

收稿日期:2024-07-07; 修订日期:2025-02-27

第一作者:张金阳(1999—),男,汉族,四川巴中人,硕士研究生。研究方向:多相流动与传热传质。E-mail:zjinyang2023@163.com。

*通信作者:熊平(1991—),男,汉族,四川宜宾人,博士,讲师。研究方向:导热反问题算法、骤冷沸腾和多相流动与传热传质。E-mail:xiogp0808@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

会出现断裂。Chun 等^[13]通过实验研究液滴撞击后的铺展特性,建立了适用于超亲水表面最大铺展直径的预测模型。该模型能较好预测宽韦伯数范围内超亲水、亲水和疏水固体表面的最大铺展直径。

壁面温度是影响液滴撞击过程中液滴相变的关键因素,液滴撞击温度很高的热壁面时,液滴底层液体迅速汽化形成一层连续的蒸汽层,将液滴与壁面分隔开,这就是 Leidenfrost 现象。为了更清晰地了解液滴撞击热壁面时的动态特性,宋翔等^[14]基于格子玻尔兹曼方法,研究黏滞系数与撞击速度等因素对液滴撞击热壁面传热性能的影响。胡亮春等^[15]基于数值模拟方法,研究液滴撞击热壁面的相变行为,发现撞击角度与撞击速度能够显著影响二者间的换热性能。刘联胜等^[16]对不同工况下液滴撞壁过程进行数值模拟,得到了液滴初始速度和液滴直径对液滴撞壁后的动态铺展规律以及壁面换热特性的影响规律。宋峰毅等^[17]基于 CLSVOF (coupled level set and volume of fluid) 方法和蒸发模型,研究液滴在加热表面上的蒸发过程。结果发现接触角和液滴撞击速度是影响液滴蒸发的主要因素,壁面温度在短时间内对蒸发过程的影响较小。

目前,针对液滴撞击壁面问题的研究,大多集中在液滴撞击壁面后的形态演变及动力学特性的变化规律方面,对液滴撞击高温壁面的相变行为研究相对较少。现基于 VOF 方法,建立液滴撞击壁面的三维模型,并对模型进行可行性验证。基于验证后的模型,对液滴在不同壁面润湿性与不同壁面温度条件下的撞击特性进行探究,分析液滴在壁面上的动态特性及传热特性。

1 计算模型及方法

1.1 计算模型及网格无关性验证

本文研究建立模型描述液滴撞击固体壁面的过程,液滴受重力影响,垂直撞击到壁面上,液滴具有一定的撞击速度。计算相关参数如表 1 所示。

表 1 计算时的相关参数

Table 1 Relevant parameters for calculations

参数	参数值
液滴初始直径 D_0/mm	2.4
液滴撞击速度 $v_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.5
液滴初始温度 $T_0/^\circ\text{C}$	25
液滴密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	998
液滴动力黏度 $\mu/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	0.001 01
表面张力系数 $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.073
壁面温度 $T_w/^\circ\text{C}$	50, 100, 250, 400
接触角 $\theta/^\circ$	20, 65, 110, 160

撞击壁面边界设置为无滑移热壁面边界,其余边界设置为压力出口 (pressure outlet)。湍流模型选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,多相流计算模型选用 VOF 模型。采用 PISO (pressure implicit split operator) 算法实现对液滴压力和速度耦合的计算。假定液滴初始形状为球形,如图 1(a) 所示,计算域尺寸为 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,边界条件如图 1(b) 所示。

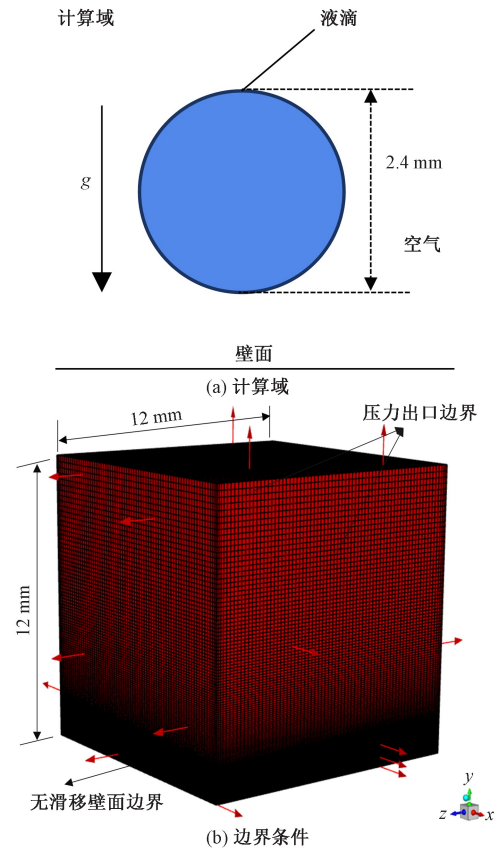


图 1 计算域与边界条件

Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

为减小网格对计算精度的影响,对不同数量的网格进行无关性验证,网格划分数量分别为 583 704, 740 000, 1 248 200, 验证结果如图 2 所示。当网格数量达到 740 000 时,液滴铺展因子变化趋于稳定,网格数为 740 000 和 1 248 200 对应的铺展因子最大误差为 3.03%,网格数量对液滴铺展过程的影响较小。为减少计算时间,最终采用网格数量为 740 000 的模型进行计算。

1.2 控制方程

数值模拟过程中涉及的控制方程主要有:连续性方程、动量守恒方程及能量守恒方程,即

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\varphi) \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \nabla \cdot \mu(\varphi) [\nabla u + (\nabla u)^T] - \sigma \kappa \delta(\varphi) \nabla H(\varphi) + \rho(\varphi) g - \nabla P \quad (2)$$

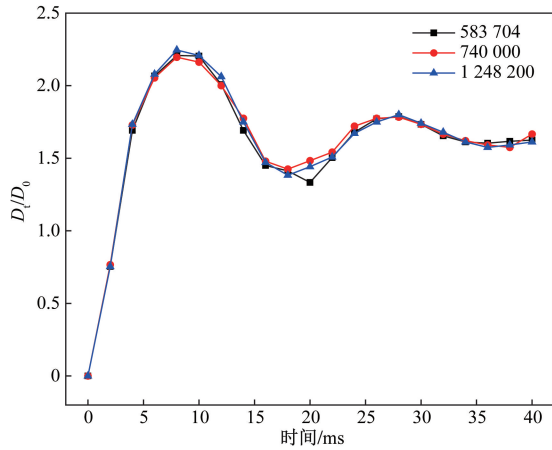


图2 网格数量对液滴铺展因子的影响
Fig. 2 Effect of the number of grids on droplet spreading factor

$$\rho(\varphi) \frac{\partial(C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\varphi) C_p u T] = \nabla \cdot \lambda \nabla T \quad (3)$$

式中： u 为速度，m/s； ρ 为密度，kg/m³； μ 为动力黏度系数，N·s/m²； σ 为表面张力系数，N/m； κ 为曲率，m⁻¹； φ 为距离系数； P 为压强，Pa； C_p 为定压比热容，J/(kg·K)； T 为热力学温度，K； λ 为导热系数，W/(m·K)。

为方便比较，定义无量纲铺展因子 ε 为

$$\varepsilon = \frac{D_1}{D_0} \quad (4)$$

式(4)中： D_1 为液滴与壁面接触的润湿长度； D_0 为液滴的初始直径。

1.3 界面追踪法与蒸发模型

VOF 方法是常用的流体界面追踪方法，它通过体积分数 α_1 实现对相间界面的追踪，表示其中一相的体积 α_1 占所在网格体积的比值。表达式为

$$\begin{cases} \alpha_1 = 1, & \text{单元网格中充满液体} \\ 0 < \alpha_1 < 1, & \text{气液混合区域} \\ \alpha_1 = 0, & \text{单元网格中充满气体} \end{cases} \quad (5)$$

壁面初始温度高于液滴的饱和温度时，液滴撞击壁面后会发生相变。利用应用广泛的 Lee 模型对液滴撞击高温壁面的过程进行模拟。表达式为

$$\dot{m}_g = \gamma \alpha_1 \rho_l \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}}, \quad T > T_{sat} \quad (6)$$

$$\dot{m}_l = \gamma \alpha_g \rho_g \frac{T_{sat} - T}{T_{sat}}, \quad T < T_{sat} \quad (7)$$

式中： \dot{m}_g 和 \dot{m}_l 分别为气相与液相的相变速率； α_1 和 α_g 分别为液相与气相的体积分数； ρ_l 和 ρ_g 分别为液相与气相密度； T_{sat} 为饱和温度； γ 为相变因子。

1.4 模型验证

为了验证建立的液滴撞击壁面模型的合理性，将数值模拟结果与周思雨^[18]实验拍摄的实验图像进行对比。模拟采用与实验相同的参数(壁面接触角为 160°，液滴初始直径为 2 mm，液滴撞击速度为 0.21 m/s)。对比结果如图 3 所示，由图 3 可知，数值模拟结果与实验拍摄的液滴撞击壁面后的形态演变过程基本一致。此结果验证了上述模型及数值模拟方法的有效性。

2 结果与分析

2.1 表面润湿性的影响

固体表面的润湿性与粗糙度和壁面自身的属性有关，通常用接触角 θ 来反映固体表面润湿的程度。为了探究表面润湿性对液滴铺展的影响，接触角 θ 的取值分别为 20°、65°、110°、160°。随着接触角的增大着接触角的增大，壁面对液滴的排斥性加强，壁面润湿性变差，壁面依次变为亲水、疏水、超疏水壁面。通过监测铺展因子的动态变化过程能够直观反映液滴撞击壁面后铺展变化的规律。

液滴撞击 50 °C 不同润湿性壁面后的形态变化如图 4 所示。由图 4 可知，壁面润湿性对液滴撞击壁面后的形态变化有重要影响，亲水壁面上的液滴更容易铺展，疏水壁面更利于液滴的反弹。液滴撞

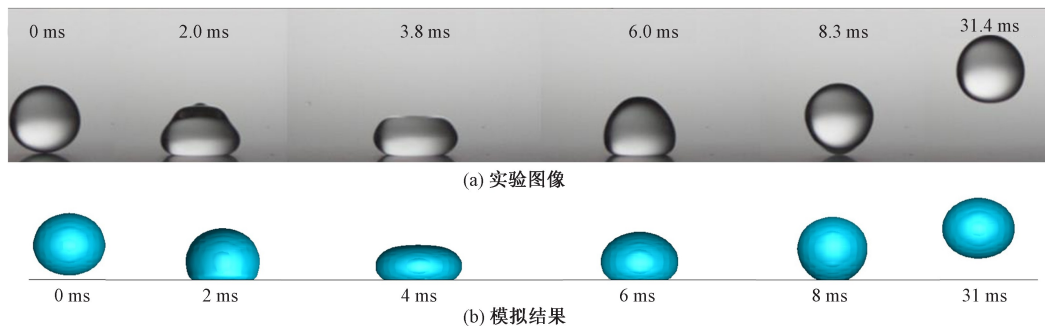


图3 数值模拟与实验中液滴撞击后的形态演变对比

Fig. 3 Comparison of numerical simulation and experimental morphology evolution after droplet impacts

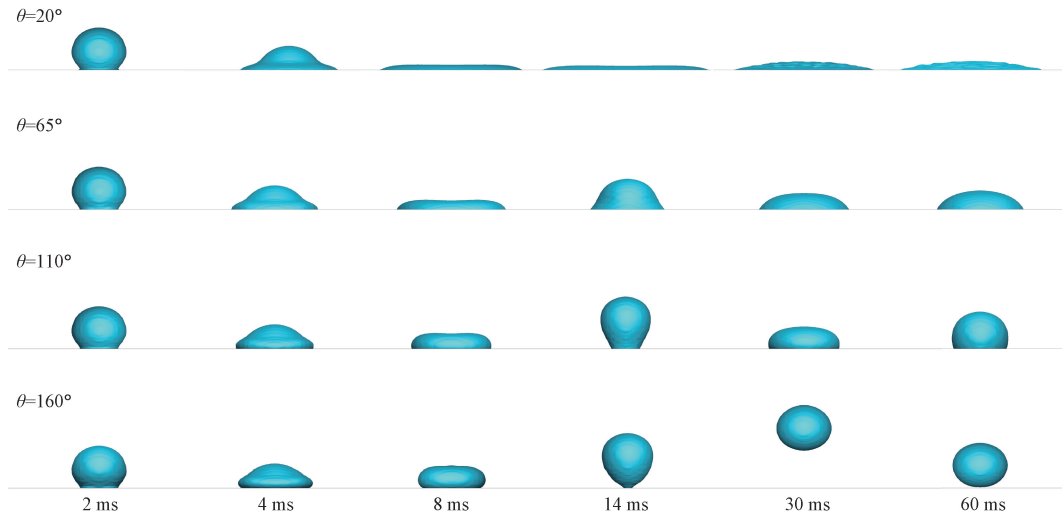


图4 壁面润湿性对液滴形态的影响

Fig. 4 Effect of wall wettability on droplet morphology

击 $\theta = 20^\circ$ 亲水壁面后, 在惯性力的作用下迅速铺展成圆盘形, 达最大铺展直径后, 液滴开始缓慢收缩, 最终液滴呈中心厚边缘薄的状态 (60 ms); 液滴撞击 $\theta = 65^\circ$ 壁面后, 液滴从撞击处向外铺展, 形成边缘厚中心薄的状态 (8 ms), 达最大铺展直径后液滴开始回缩, 液滴向上凸起, 铺展直径先增大后减小, 并不断震荡; 液滴撞击 $\theta = 110^\circ$ 疏水壁面后, 最大铺展直径较亲水壁面明显减小, 壁面的疏水性使得液滴在撞击过程中损耗更少的能量, 液滴迅速向中心回缩并向上反弹, 呈上大下小状态 (14 ms), 但最终并未脱离壁面; 液滴撞击 $\theta = 160^\circ$ 超疏水壁面后, 所达到的最大铺展直径最小, 液滴与壁面短暂接触后完全反弹, 达最大弹起高度后开始下落 (30 ms)。

图5为接触角对液滴铺展因子的影响。从整体上看, 不同接触角下液滴铺展因子均呈现先增大后减小的变化趋势, 且亲水壁面上液滴的铺展因子明显大于疏水壁面液滴的铺展因子。液滴撞击 $\theta = 20^\circ$ 的亲水壁面后, 铺展因子达到峰值后开始缓慢下降; 液滴撞击 $\theta = 65^\circ$ 与 $\theta = 110^\circ$ 的壁面后, 铺展因子曲线具有相似的变化规律, 即铺展因子上升达峰值后开始下降, 降至波谷时再次上升, 曲线呈先增大后减小的震荡趋势, 这是液滴在壁面上不断铺展与收缩造成的; 液滴撞击 $\theta = 160^\circ$ 的超疏水壁面后, 铺展因子达峰值后开始减小直至减小为0并保持不变。这是由于壁面的超疏水性使得液滴撞击后迅速达到最大铺展状态, 随后液滴离开壁面完全反弹至空中。

图6为壁面润湿性对液滴最大铺展因子及达最大铺展因子所需时间的影响。液滴撞击 $\theta = 20^\circ$ 的亲水壁面后, 在惯性力作用下, 经过 18 ms 达到最大铺展状态, 其最大铺展因子为 3.42。液滴撞击 $\theta = 160^\circ$ 的超疏水壁面后, 经过 4 ms 便达到最大铺展状

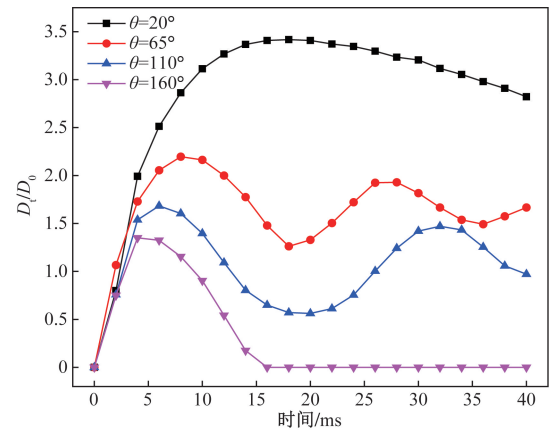


图5 接触角对液滴铺展因子的影响

Fig. 5 Effect of contact angle on droplet spreading factor

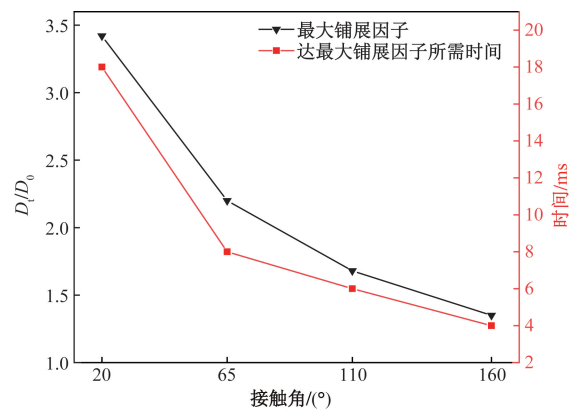


图6 液滴撞击不同润湿性壁面后最大铺展因子及达最大铺展因子所需时间的变化曲线

Fig. 6 Curves of the maximum spreading factor and the time required to reach the maximum spreading factor after droplet impacts on walls with different wettability. impacts on walls with different wettability

态,其最大铺展因子为 1.35。由图 6 可知,随着接触角的增大,液滴所能达到的最大铺展因子减小,达到最大铺展因子的时间缩短。

图 7 为壁面温度为 50 °C 的条件下,不同接触角对壁面平均热流密度的影响。从图 7 中可以看出,接触角的大小对壁面平均热流密度具有较大影响,壁面平均热流密度的峰值以及达峰值所需时间均随接触角的减小而增大。这是由于液滴的铺展范围随接触角的减小而增大,接触角越小,液滴与壁面接触的范围就越大,壁面平均热流密度越大,热流密度达峰值所需时间越长。

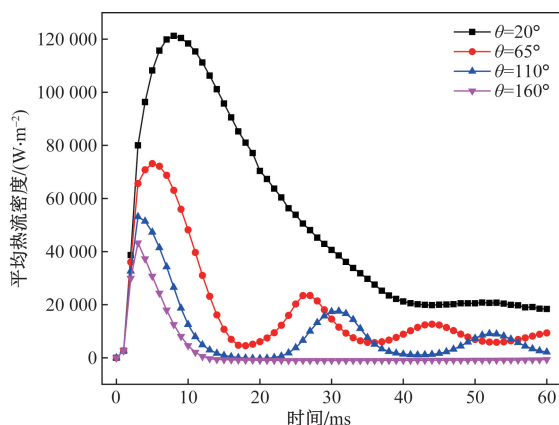


图 7 接触角对壁面平均热流密度的影响

Fig. 7 Effect of contact angle on wall-averaged heat flux

2.2 壁面温度的影响

2.2.1 壁面温度对液滴动态特性的影响

不同壁面温度条件下,初始温度为 25 °C 的液滴撞击 $\theta = 65^\circ$ 亲水壁面后的形态变化如图 8 所示。从图 8 中可以看出,壁面温度为 50、100 °C 时,液滴

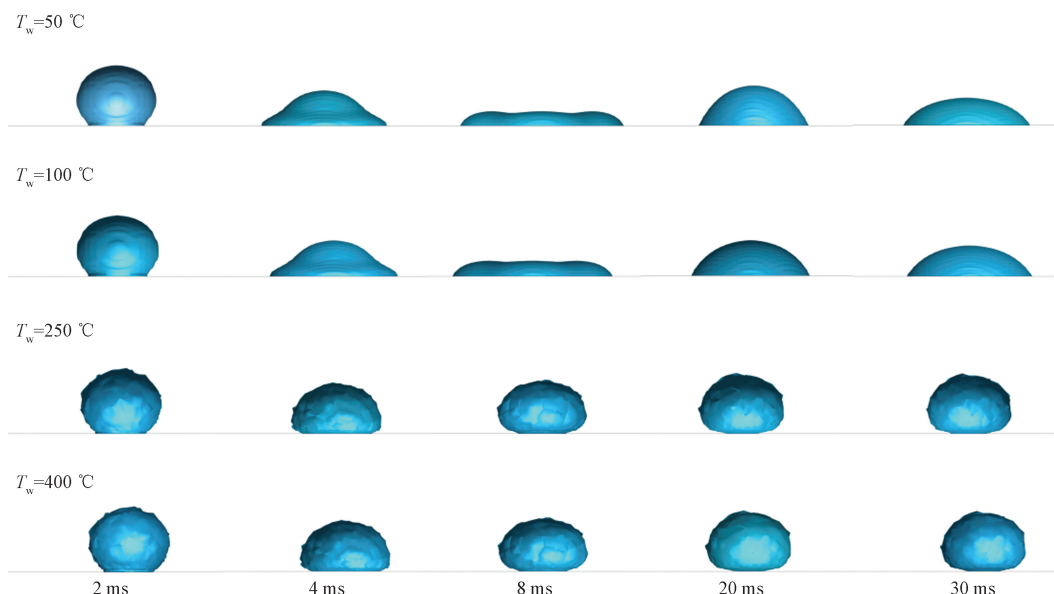


图 8 壁面温度对液滴形态演变的影响

Fig. 8 Effect of wall temperature on the evolution of droplet morphology

撞击壁面后,经历铺展与收缩,铺展稳定后,液滴呈半椭圆形停留于壁面上。此时壁面温度的升高对液滴形态变化的影响较小,这是由于温度较低时,影响液滴形态变化的因素主要是壁面润湿性。当壁面温度为 250、400 °C 时,液滴撞击壁面后,液滴在铺展阶段的形态变化较小,液滴在撞击后,有向上反弹的趋势。当壁面温度为 250 °C 时,壁面温度高于液滴的沸点,液滴与壁面接触的部分产生沸腾,最外层液体汽化形成一层薄蒸汽膜,蒸汽膜的存在减少了液滴与壁面的直接接触,导致液滴形态无明显变化。当壁面温度为 400 °C 时,温度达到液滴的 Leidenfrost 温度点,产生 Leidenfrost 效应,即液滴与壁面之间形成蒸汽层,液滴悬浮与壁面之上。形成的蒸汽层如图 9 所示。

图 10 为不同壁面温度下液滴铺展因子的变化情况。从整体上看,壁面温度对液滴铺展阶段的影响相对较小。壁面温度为 50、100 °C 时,液滴的铺展因子随壁面温度的升高有微小增大。壁面温度为 250、400 °C 时,液滴的最大铺展因子小于壁面温度为 50、100 °C 时液滴的最大铺展因子。这是由于壁面温度很高时,与热壁面接触的液体迅速汽化形成气膜,并对液滴产生汽化冲力,由于气膜对液滴向上的支撑作用,固液界面有缩小的趋势,使得最大铺展直径减小。同时,惯性力仍是液滴铺展过程中的主导力,故不同壁面温度下液滴达到最大铺展因子的时间几乎相同。

2.2.2 壁面温度对液滴传热特性的影响

图 11 为液滴撞击不同温度壁面后壁面平均热流密度的变化曲线。从整体上看,不同壁面温度

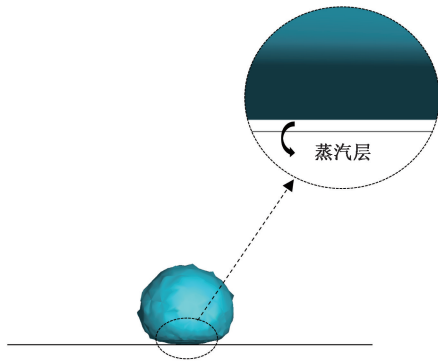


图9 壁面温度为400℃时液滴底部的蒸汽层

Fig. 9 Vapor layer formed at the bottom of the droplet at a wall temperature of 400℃

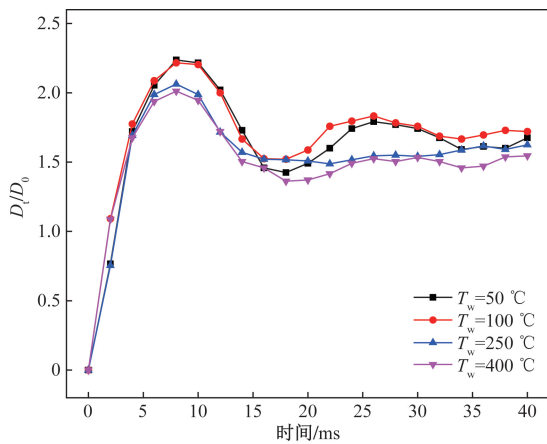


图10 壁面温度对液滴铺展的影响

Fig. 10 Effect of wall temperature on droplet spreading

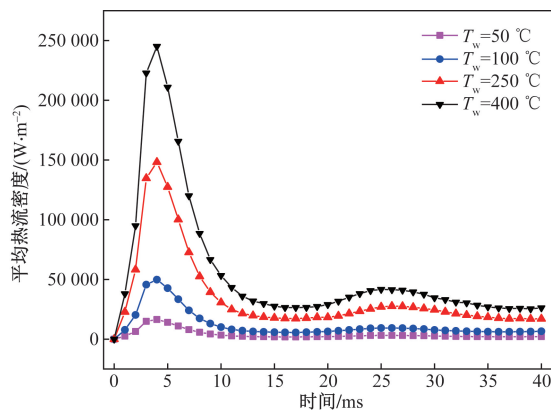


图11 液滴撞击不同温度壁面后壁面平均热流密度的变化曲线

Fig. 11 Curves of wall-averaged heat flux after droplet impacts on wall surfaces of different temperatures

下,壁面平均热流密度具有相似的变化规律,壁面平均热流密度的峰值随温度的升高而升高。液滴撞击壁面后的较短时间内,二者之间存在巨大的温差,因此热流密度的峰值出现在液滴撞击壁面的初期。当液滴震荡接近平衡状态时,液滴与壁面间的

温差减小,壁面平均热流密度也逐渐减小。其中,壁面温度为400℃时,壁面平均热流密度峰值相比于壁面温度为50、100、250℃的壁面的平均热流密度峰值分别提高了93.3%、79.7%和39.6%。

图12为液滴撞击不同温度壁面后液滴体积分数的变化情况。其中,体积分数 $\alpha = V_t/V_0$ 表示液滴体积与液滴初始体积之比。由于液滴在较短时间内温度上升很小,致使在整个过程中液滴的蒸发量很小。从整体上看,壁面温度越高,液滴体积分数越小,体积分曲线越低,液滴的蒸发速率越快。表面温度为50℃时,尚未达到水的饱和温度,此时液滴的体积分数基本不发生改变,壁面温度为100℃时,虽然达到水在常压下的饱和温度,但液滴撞击壁面后,液滴底部温度在短时间内难以达到饱和温度,因此体积分数变化极小。对于温度超过液滴饱和温度的热壁面,液滴与热壁面经过一定时间的导热后,二者接触部分的液体开始逐渐升温,相变速率加快,液滴体积分数随之减小。

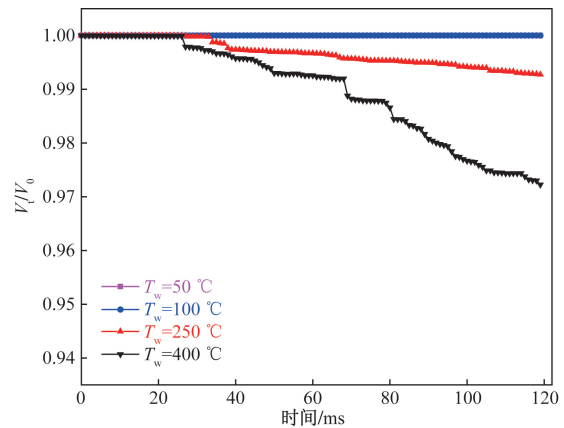


图12 液滴撞击不同温度壁面后体积分数的变化曲线

Fig. 12 Curves of change in volume fraction of liquid droplets after hitting the wall at different temperatures

3 结论

基于VOF方法,建立了考虑壁面润湿性和壁面温度作用的液滴撞击壁面流动数值模型,研究液滴撞击壁面流动及传热行为,分析了壁面特性对液滴动态特性及传热特性的影响,得出以下结论。

(1)壁面润湿性对液滴撞击壁面后的形态变化有显著影响,亲水壁面有利于液滴的铺展,疏水壁面则更有利于液滴的反弹。

(2)随着接触角的增大,壁面疏水性增强,液滴铺展范围缩小,达最大铺展因子所需时间缩短。

(3)出现Leidenfrost现象前,壁面温度对液滴铺展的影响较小。壁面温度高于液滴沸点时,液滴与壁面接触的部分发生沸腾,最外层液体汽化形成一

层蒸汽膜。壁面温度高于液滴的 Leidenfrost 温度点时,产生 Leidenfrost 现象。

(4)壁面温度与接触角对壁面热流密度的影响较大,接触角越小,壁面温度越高,壁面平均热流密度越大。

(5)壁面温度高于液滴的饱和温度时,壁面温度越高,液滴的相变速率越快,体积分数越小,体积分数曲线越低。

参 考 文 献

[1] Al-Ahmadi H M, Yao S C. Spray cooling of high temperature metals using high mass flux industrial nozzles[J]. *Experimental Heat Transfer*, 2008, 21(1): 38-54.

[2] Zhao X, Zhang B, Yang Z, et al. Surface orientation effects on heat transfer performance of spray cooling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 147. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2019.118960.

[3] Liu X, Yang L, Tamura S, et al. Thermal response of plasma sprayed tungsten coating to high heat flux[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2004, 70(4): 341-349.

[4] Moreira A L N, Moita A S, Panão M R. Advances and challenges in explaining fuel spray impingement; how much of single droplet impact research is useful? [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(5): 554-580.

[5] Ko S H, Chung J, Hotz N, et al. Metal nanoparticle direct inkjet printing for low-temperature 3D micro metal structure fabrication [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(12). DOI: 10.1088/0960-1317/20/12/125010.

[6] 刘冬薇, 宁智, 吕明, 等. 液滴撞击超疏水壁面反弹及破碎行为研究[J]. *计算力学学报*, 2016, 33(1): 107-113.
Liu Dongwei, Ning Zhi, Lü Ming, et al. Study on the rebound and fragmentation behavior of liquid droplets hitting superhydrophobic walls[J]. *Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(1): 107-113.

[7] 刘晓华, 赵一鸣, 王开珉, 等. 粘性力和表面张力对液滴撞击超疏水管壁动力学特性的影响研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(10): 1-7.
Liu Xiaohua, Zhao Yiming, Wang Kaimin, et al. Influence of viscous force and surface tension on the kinetic properties of droplets impacting on superhydrophobic pipe walls [J]. *Journal of Solar Energy*, 2020, 41(10): 1-7.

[8] 方亚芹. 壁面润湿性对液滴撞击管壁的动力学特性影响实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
Fang Yaqin. Experimental study on the effect of wall wettability on the kinetic properties of droplet impact on tube wall[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[9] Pan K L, Tseng K C, Wang C H. Breakup of a droplet at high ve-

locity impacting a solid surface[J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 48(1): 143-156.

[10] 闵敬春, 吴晓敏, 菊地义弘, 等. 加热面上液滴的冲击行为及 Leidenfrost 现象[J]. *工程热物理学报*, 2001(S1): 105-108.
Min Jingchun, Wu Xiaomin, Kikuchi Yoshihiro, et al. Impact behavior of droplets on a heated surface and Leidenfrost phenomenon [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001(S1): 105-108.

[11] Gunjal P R, Ranade V V, Chaudhari R V. Dynamics of drop impact on solid surface: experiments and VOF simulations [J]. *AIChE Journal*, 2005, 51(1): 59-78.

[12] 梁超, 王宏, 朱恂, 等. 液滴撞击不同浸润性壁面动态过程的数值模拟[J]. *化工学报*, 2013, 64(8): 2745-2751.
Liang Chao, Wang Hong, Zhu Xun, et al. Numerical simulation of the dynamic process of droplet impact on walls with different wettability[J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2013, 64(8): 2745-2751.

[13] Chun J, Wang J X, Xu C, et al. Theoretical model of maximum spreading diameter on superhydrophilic surfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10). DOI: 10.7498/aps. 70.20201918.

[14] 宋翔, 何小泷. 基于格子玻尔兹曼方法的双液滴撞击壁面液膜的热特性演化过程[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(3): 1207-1215.
Song Xiang, He Xiaolong. Evolution of thermal properties of a two-droplet impacting wall liquid film based on the lattice Boltzmann method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(3): 1207-1215.

[15] 胡亮春, 徐文冰, 王均毅, 等. 机载条件下单液滴撞击热固壁面相变特性[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(36): 15333-15339.
Hu Liangchun, Xu Wenbing, Wang Junyi, et al. Characterization of phase change of single droplet impacting thermoset wall under airborne condition [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(36): 15333-15339.

[16] 刘联胜, 任蕴佳, 田亮, 等. 液滴撞击壁面铺展及换热过程数值模拟[J]. *低温与超导*, 2021, 49(1): 45-52.
Liu Liansheng, Ren Wenjia, Tian Liang, et al. Numerical simulation of droplet impact wall spreading and heat transfer process[J]. *Low Temperature and Superconductivity*, 2021, 49(1): 45-52.

[17] 宋锋毅, 郭亚丽, 王峰, 等. 液滴撞击圆柱外表面蒸发换热的数值模拟[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(1): 114-120.
Song Fengyi, Guo Yali, Wang Feng, et al. Numerical simulation of evaporative heat transfer of liquid droplets impacting the outer surface of a cylinder[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(1): 114-120.

[18] 周思雨. 粘弹性液滴在超疏水表面上的碰撞动力学研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
Zhou Siyu. Collision dynamics of viscoelastic droplets on superhydrophobic surfaces [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023.