

DOI: 10.7511/jslx20230420003

双液滴同时撞击液膜流动及换热过程数值模拟

吴寒旭¹, 朱发兴¹, 赵可², 蒋彦龙^{*1},
董月¹, 黄博阳¹, 罗家琪¹

(1. 南京航空航天大学 航空学院, 南京 210000; 2. 滁州学院 生物与食品工程学院, 滁州 239000)

摘要:液滴撞击液膜对换热特性及液膜形态变化具有较大影响, 对其研究有助于提高机载喷雾冷却性能, 促进航空工业应用与发展。采用 CLSVOF 方法模拟了双液滴同时撞击液膜的现象, 在不同液膜厚度、液滴水平间距和重力加速度工况下, 研究了液膜形态演变过程及特性, 探索了双液滴撞击液膜后中心射流的发展规律, 分析总结了液膜与高温壁面的换热特性。结果表明, 液膜厚度越大, 中心射流上升速度越慢, 射流发生断裂时刻越晚, 撞击后产生的液膜回缩对壁面换热影响较大; 液滴水平间距越大, 中心射流上升速度越慢, 增大液滴间距不改变壁面热流密度变化的趋势; 重力加速度越大, 中心射流上升速度越慢, 射流发生断裂时刻越早, 重力加速度对壁面换热影响较小。

关键词: 双液滴; CLSVOF; 液膜; 中心射流; 换热

中图分类号: O351.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)05-0963-07

1 引言

随着航空科学技术的发展, 飞行器性能不断提高, 机载设备散热需求也不断攀升^[1], 高热流密度散热问题急需高效解决。喷雾冷却技术具有优良的换热能力, 广泛应用于热管理技术中。液滴撞击热壁面及产生的质热交换是喷雾冷却中主要的微观行为, 研究其动力学和传热特性对提升机载设备冷却性能具有重要意义。

液滴撞击液膜后的动力学及传热特性受液滴物性参数、液膜物性参数和重力加速度等因素的影响^[2-4]。涂德浴等^[5,6]利用 CLSVOF (Coupled Level Set and Volume of Fluid) 方法模拟了单液滴撞击固体壁面的过程, 发现椭球液滴撞击壁面后的形态演变与球形液滴相似, 湿润性好的壁面液滴铺展速度明显快于湿润性差的表面; Li 等^[7]利用 CLSVOF 方法研究了单液滴撞击倾斜湿壁面的动力学和传热特性, 探索了撞击速度对液膜铺展的影响, 揭示了气泡的形成机理及其换热影响; 鲍俊等^[8]使用 VOF 法模拟了单液滴撞击液膜的过程, 分析了

不同液滴参数对液膜流动特征和水花形态的影响, 总结了水花产生机理; Yang 等^[9]提出了可以模拟液滴撞击热壁面细节的 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 方法, 直接模拟了气液两相的相变, 结果表明撞击产生的二次液滴的临界韦伯数随壁面温度升高而减小; Lin 等^[10]通过实验研究了不同黏性的液滴撞击不同润湿性表面的过程, 发现撞击结果取决于液滴的物理性质和表面的润湿性; 郑诺等^[11,12]实验研究了液滴撞击疏水壁面后的最大铺展及回弹行为, 发现剪切变稀流体特性对液滴铺展阶段影响很小, 对回缩阶段影响很大; Li 等^[13]研制了可调节液滴撞击频率和液滴直径的液滴发生器, 研究了微液滴连续撞击液膜的过程, 发现冲击频率对最大铺展因子及冲击后的振荡影响较小; 李林豪等^[14]基于自适应分辨率光滑粒子法, 模拟了两个液滴连续撞击高温壁面的过程, 研究了不同液滴直径和撞击速度等参数对撞击模式的影响; Liang 等^[15]采用了 CLSVOF 方法结合高斯分布, 研究了多液滴撞击液膜的单相传热过程, 发现液滴连续撞击时尾部液滴飞溅阈值高于前部液滴, 液滴

收稿日期: 2023-04-20; 修改稿收到日期: 2023-05-20.

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划 (KYCX21_0227); 高空消耗式相变换热技术研究项目 (1001-KFA20680) 资助。

作者简介: 蒋彦龙* (1977-) 男, 博士, 教授 (E-mail: jiang-yanlong@nuaa.edu.cn).

引用本文: 吴寒旭, 朱发兴, 赵可, 等. 双液滴同时撞击液膜流动及换热过程数值模拟 [J]. 计算力学学报, 2024, 41(5): 963-969.

WU Han-xu, ZHU Fa-xing, ZHAO Ke, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer process of double droplets simultaneously impacting on flat liquid film [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(5): 963-969.

同时撞击时中心处存在传热盲点。

目前国内外学者对液滴撞击过程的研究主要集中于单液滴的撞击,对多液滴撞击过程的研究仍相对较少,双液滴撞击液膜过程是多液滴撞击液膜过程简化的典型特例,研究该过程可以探究液滴与液膜互相耦合作用的机理^[16],以提高喷雾冷却换热性能。利用 CLSVOF 方法模拟双液滴撞击液膜的过程,结合撞击后液膜形貌的演变,分析不同液膜厚度及重力加速度对撞击后液膜动力学及传热特性影响,为机载喷雾冷却技术的工程应用提供理论支撑。

2 物理数学模型

2.1 物理模型

数值模拟中将双液滴假设为两个完美球形,液膜假设为光滑的平面,液滴速度垂直向下,工质为水,考虑重力作用,初始时刻液滴与液膜相切,物理模型如图 1 所示,相关物性参数列入表 1。

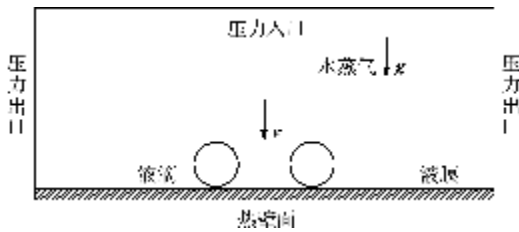


图 1 物理模型
Fig.1 Physical model

表 1 相关参数
Tab.1 Related parameters

参数	数值
双液滴直径/mm	0.6
液滴中心水平间距/mm	1.2
液滴及液膜温度/K	300
环境及壁面温度/K	350
环境压力/Pa	1.01325×10 ⁵

2.2 Coupled Level Set and Volume of Fluid 方法

VOF 方法的思想是定义一个流体体积函数 α 来描述界面,当计算单元中充满液体时, $\alpha = 1$; 当计算单元中充满气体时, $\alpha = 0$, 当计算单元中同时有气体和液体时, $0 < \alpha < 1$ 。VOF 方法的对流运输方程为

$$\partial \alpha / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (1)$$

式中 \mathbf{v} 为界面速度矢量, t 为时间, ∇ 为哈密顿算子。

在高精度的离散格式下,VOF 方法具有较好的守恒性,但由于其不连续性,难以准确求解,且

VOF 方法计算界面曲率、法向量时准确性不高。

Level Set 方法通过定义一个距离函数 ϕ 来区分计算单元中的各相, $\phi = 0$ 时的等值线或面为两相界面, ϕ 函数的对流运输方程为

$$\partial \phi / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (2)$$

运动界面法向量 \mathbf{n} 的计算公式为

$$\mathbf{n} = \nabla \phi / |\nabla \phi| \quad (3)$$

界面曲率 $\kappa(\phi)$ 为

$$\kappa(\phi) = \nabla \cdot \nabla \phi / |\nabla \phi| \quad (4)$$

Level Set 方法可以隐式捕捉液面,且距离函数的光滑程度不受流场改变的影响,但在计算过程中物理量不守恒。因此,将两种方法耦合,结合 Level Set 方法和 VOF 方法的优点,采用 CLSVOF 方法,对液滴撞击附壁液膜进行模拟。其运输方程为

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) F = 0 \quad (5)$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \phi = 0 \quad (6)$$

式中 \mathbf{u} 为液滴流动速度, F 为体积函数。

2.3 控制方程

式(7~10)为液滴碰撞附壁液膜的连续性方程、动量方程和能量方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\rho(\phi) (\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p - \boldsymbol{\varepsilon}_s + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho(\phi) \mathbf{g} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu(\phi) \mathbf{S} \quad (9)$$

$$\partial \rho c_p T / \partial t + \nabla \cdot (\rho c_p T \mathbf{u}) = \nabla \cdot \lambda \nabla T \quad (10)$$

式中 \mathbf{u} 为液滴速度矢量, ρ 为密度, p 为压强, $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ 为表面张力源项, \mathbf{g} 为重力加速度, $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量, \mathbf{S} 为应变率张量, c_p 为计算单元内定压热容, λ 为计算单元内热导率, T 为计算单元内温度。

表面张力对液滴变形有重要影响,采用 CSF 模型来处理表面力的影响

$$\boldsymbol{\varepsilon}_s = \sigma \kappa(\phi) \nabla H(\phi) \quad (11)$$

式中 σ 为表面张力系数, $H(\phi)$ 为 Heaviside 函数, $\kappa(\phi)$ 为界面曲率。

利用 Heaviside 函数来光滑处理界面处的密度和黏度

$$H(\phi) = \begin{cases} 1 & (\phi \geq +h) \\ 0 & (\phi \leq -h) \\ 0.5 + \phi/3h + \sin[2\pi\phi/3h]/2\pi & (|\phi| \leq h) \end{cases} \quad (12)$$

式中 h 为计算域中网格大小。应变率张量 \mathbf{S} 表达式为

$$\mathbf{S} = 1/2[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (13)$$

由 Heaviside 函数计算出的不同区域 ρ 和 μ 的表达式为

$$\rho(\phi) = \rho_l[1 - H(\phi)] + \rho_g H(\phi) \quad (14)$$

$$\mu(\phi) = \mu_l[1 - H(\phi)] + \mu_g H(\phi) \quad (15)$$

式中 ρ_l 为液相密度, ρ_g 为气相密度, μ_l 为液相黏度, μ_g 为气相黏度。

2.4 模型验证

郭加宏等^[17]对液滴撞击液膜后水花及飞溅现象进行了实验研究,为验证 CLSVOF 方法对液膜形态模拟的准确性,选取其中一组实验数据(液滴初始直径为 2 mm,初始速度为 3.65 m/s,液膜厚度为 0.8 mm)和模拟结果对比,使用参考实验相同参数下模拟结果对比如图 2 所示,可以看出,模拟液滴撞击液膜后的流动行为与实验结果较为吻合,验证本文模型可以用于模拟液滴撞击液膜后的形态变化。

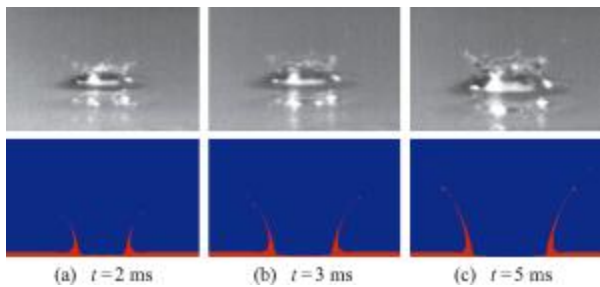


图2 模型形态验证对比

Fig. 2 Model morphology verification comparison

2.5 网格无关性验证

计算区域为 3 mm×6 mm,计算中采用均匀四边形网格。选择液滴直径为 0.6 mm,液膜厚度为 0.12 mm,液滴撞击速度为 2 m/s 的工况对网格进行无关性验证,模型网格数分别划分为 9 万、18 万、36 万和 54 万,对比不同网格数下水花直径与液滴直径之比,当网格数为 36 万时,计算结果与网格数为 54 万时差距较小,如图 3 所示,继续增加网格密度意义不大,故后续数值模拟中采用 36 万网格数。

3 数值模拟与分析

为研究液膜厚度及不同加速度对双液滴撞击液膜后流动及传热的影响,开展以下数值模拟。选择液滴直径为 0.6 mm,初始速度为 2 m/s 的双液滴撞击液膜,初始时刻液滴与液膜相切,液滴与液膜温度为 300 K,底部壁面温度为 350 K,不考虑环境与液膜的换热。

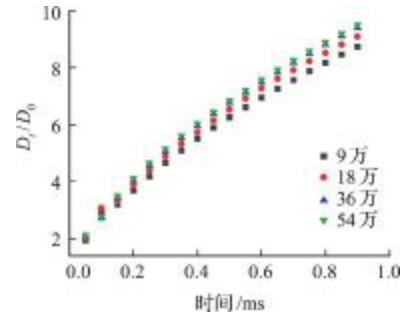


图3 网格验证

Fig. 3 Grid validation

3.1 流动特性

单液滴撞击液膜后其呈铺展状态,铺展边缘处会形成水花径向传播^[18];当两个液滴同时撞击液膜时,径向铺展的水花会在中心处相遇,形成向上发展的中心射流。如图 4(a)所示,当液膜厚度为 0.06 mm 时,由于液膜厚度较低,液体量较少,不能较好地提供射流发展所需的液体,底部液膜出现了回缩现象,随着水花的扩散与底部液膜的收缩,水花与液膜左右两端处的液体相遇,在黏性力及惯性力的作用下,于两端形成了波峰较高的水花,中心处射流随时间继续发展,最终受重力和黏性力的影响发生断裂,射流顶端的液体脱离射流;如图 4(b)所示,随着液膜厚度的增加,双液滴撞击液膜后形成的水花数减少,但两侧的水花高度明显增大且水花外侧的液膜出现了凹陷,底部液膜回缩现象出现较晚,中心射流发展至 1.3 ms 时并未出现断裂;如图 4(c)所示,随着液膜厚度继续增加至 0.18 mm,双液滴撞击液膜后的演变与液膜厚度为 0.12 mm 时类似,但两侧水花高度有所增加,1.3 ms 时底部液膜略有收缩,此时两侧的波峰较为明显。

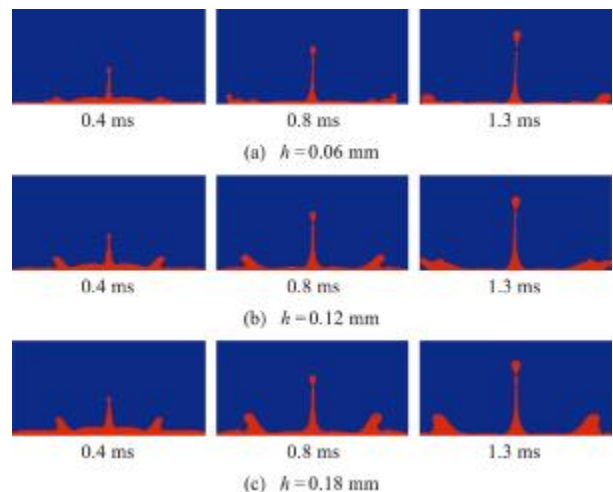


图4 撞击不同厚度的液膜后流动形态演变($S_h = D$)

Fig. 4 Evolution diagram of flow morphology after impacting liquid films with different thickness ($S_h = D$)

由此可以看出双液滴撞击过程与单液滴不同之处,双液滴以一定速度撞击液膜后,在惯性力的作用下,中心射流的发展引起液膜少部分液体进入射流,当液膜厚度较薄时,两端会发生明显的收缩现象,且液膜厚度越薄,收缩现象发生时刻越早。

对比不同间距的双液滴撞击液膜后的流动形态演变如图 5 所示,可以看出,当双液滴间距越近时,撞击形成的水花在中心处相遇越早,且水花相遇时的动能损失较小,如图 5(a)所示,当双液滴间距为 $0.5D$ 时,中心射流顶部的液体将较早地克服表面张力和重力的作用,形成多个液滴脱离射流;如图 5(c,d)所示,当双液滴间距为 $2D$ 时,其两侧的水花于中心相遇时,会形成空心,且空心区域会与射流一起向上发展,但随着时间的推移,空心逐渐增大,其左右两侧的液体逐渐变薄,射流在不同位置先后出现两次断裂现象。

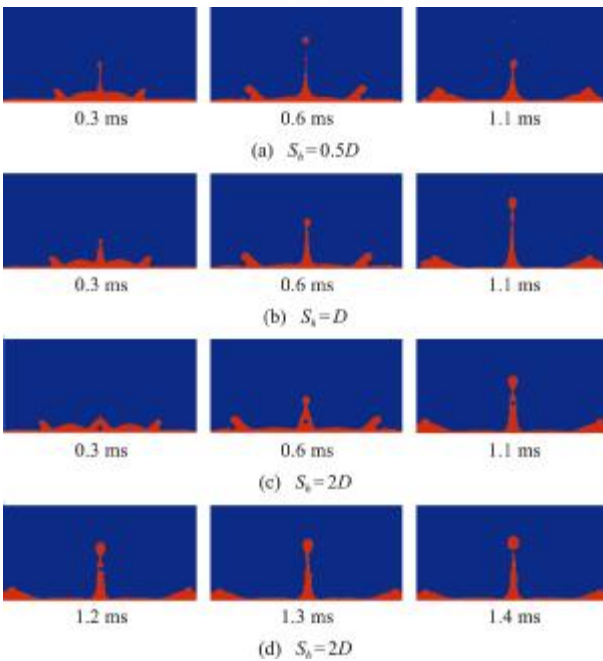


图 5 不同间距的双液滴撞击液膜后流动形态演变 ($h=0.12\text{ mm}$)

Fig. 5 Evolution of flow morphology after two droplets with different intervals impacting on a liquid film ($h=0.12\text{ mm}$)

双液滴撞击不同厚度液膜后中心射流高度随时间变化的曲线如图 6 所示,可以看出,在中心射流发展时期,当液膜厚度增加时,射流高度(均为射流顶部相对于液膜初始平面的距离)略微下降,这是由于双液滴与液膜撞击后发生运动间断,促进液体进入射流,但液膜厚度的增加并未直接增高射流的高度,而是增加了射流顶部液滴的直径。随着射流的进一步发展,液膜厚度为 0.06 mm 的中心射流在 1.2 ms 时发生断裂,液膜厚度为 0.12 mm 的

射流顶部液滴脱离的时刻较晚,而液膜厚度为 0.18 mm 时中心射流在计算时间内并未发生断裂。

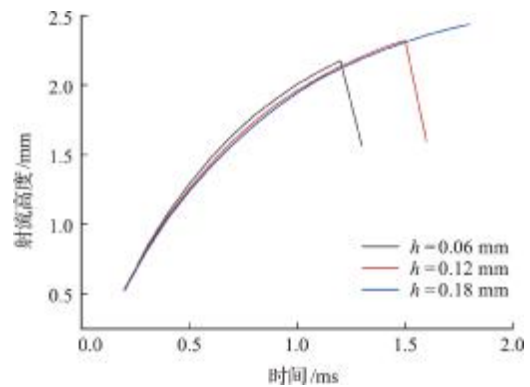


图 6 不同液膜厚度下的射流高度

Fig. 6 Jet height under different liquid film thicknesses

不同间距的双液滴撞击液膜后的射流高度变化曲线如图 7 所示,可以看出,水平间距大小对中心射流上升速度的影响较大,当双液滴间距为 $0.5D$ 时,撞击后形成的中心射流的动能较大,上升速度较快,其顶部液滴脱离的时刻也较早;当双液滴间距为 $2D$ 时,中心射流上升速度慢于间距为 D 时产生的中心射流,但撞击形成了空心区域,且由于该区域的不断扩大,其附近较易发生射流分离现象,故射流在 1.2 ms 发生了第一次断裂,但此时下方的射流仍有向上发展的速度,重新汇入顶部射流,随后在重力的作用下发生二次断裂。

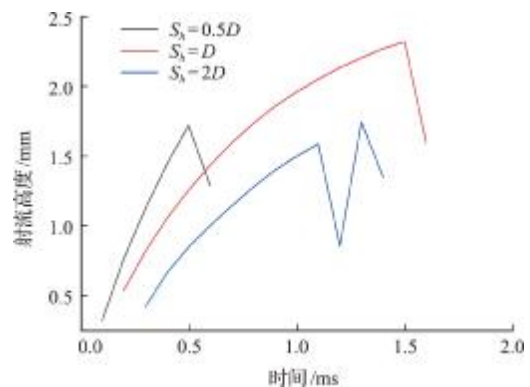


图 7 不同双液滴水平间距下的射流高度

Fig. 7 Jet height under different horizontal distances of double droplets

机载喷雾冷却系统中喷雾液滴撞击液膜时经常会受到不同飞行姿态及俯仰状态的影响,因此有必要研究不同加速度下液滴撞击液膜的过程。

不同加速度下双液滴撞击液膜后中心射流随时间的变化如图 8 所示,可以看出,随着加速度的减小,射流发展期上升的速度略有增加;在加速度为 9.8 m/s^2 和 7.8 m/s^2 时,射流高度发展的曲线基本

一致,都于 1.5 ms 时发生断裂;加速度为 6.8 m/s^2 时的射流在 1.6 ms 出现断裂;当加速度减小至 5.8 m/s^2 时,射流发生断裂的时刻为 1.7 ms,其能达到的最大高度较加速度为 9.8 m/s^2 和 7.8 m/s^2 增加了 0.8 mm;加速度为 3.8 m/s^2 时,中心射流顶部液滴直至 1.8 ms 时才发生脱离,最高射流高度可达到 2.48 mm。中心射流向上发展的过程实际为液体克服重力、表面张力和黏滞力做功的过程,进入射流的液体温度变化极小,所以表面张力和黏滞力可以视为定值,因此加速度越小,射流可达到的最大高度越高,射流断裂现象发生时刻越晚。

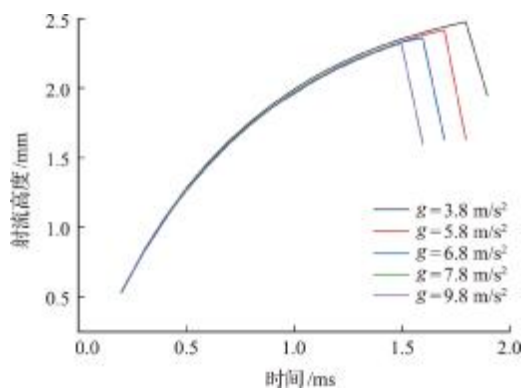


图 8 不同加速度下的射流高度
Fig. 8 Jet height under different gravity accelerations

3.2 传热特性

双液滴撞击不同厚度液膜后壁面热流密度随时间变化情况如图 9 所示,可以看出,0.37 ms 前液膜厚度对壁面平均热流密度的变化基本没有影响,0.37 ms~1 ms 双液滴撞击厚度为 0.06 mm 的液膜时壁面热流密度下降速度比撞击较厚的液膜更快,这是由于双液滴撞击较薄的液膜时较早出现液膜回缩现象,液膜与壁面的接触面积减小,对流换热减弱,壁面热流密度在 1 ms 后开始上升,这是因为随着液滴撞击产生的水花向两侧发展,水花在重力作用下回落,液膜重新覆盖壁面,此时对流

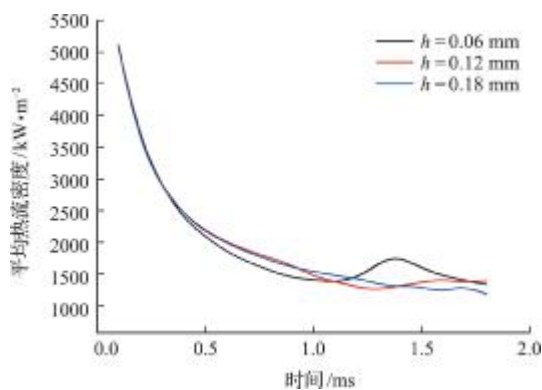


图 9 不同液膜厚度下的壁面热流密度
Fig. 9 Wall heat flux under different liquid film thicknesses

换热增强,壁面热流密度开始上升;0.95 ms 后,厚度为 0.12 mm 液膜在撞击后也开始发生回缩,但回缩程度小于厚度较薄的液膜,故之后的热流密度增幅较小;厚度为 0.18 mm 的液膜在撞击后发生的回缩现象相对不明显,热流密度在 1.6 ms 后增加较小,在液膜重新覆盖壁面后,随着壁面与液膜间的温差减小,两者间的换热开始减弱。

不同间距的双液滴撞击液膜后壁面热流密度的变化如图 10 所示,可以看出,液滴间距的变化不改变撞击后热流密度先减小后增大再减小的变化趋势,但随着液滴间距的增大,出现第二和第三阶段的时刻提前,且热流密度能达到的最小值变大,这是因为随着液滴间距增加,水花碰撞形成的中心射流上升速度降低,故底部液膜中的液体进入射流的速度降低,液膜发生的收缩程度有限,重新铺展的时刻较早,故热流密度出现上升的时刻较早,且此时热流密度降幅较小。

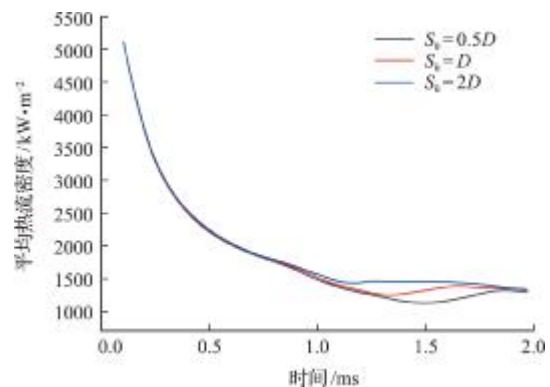


图 10 不同双液滴水平间距下的壁面热流密度
Fig. 10 Wall heat flux under different horizontal distances of double droplets

双液滴在不同加速度下撞击液膜后壁面热流密度的变化如图 11 所示,可以看出,不同加速度下壁面热流密度变化曲线几乎一致。仅 0.8 ms~1.1 ms 时,不同加速度影响下壁面热流密度略有差异,其中加速度为 5.8 m/s^2 时的热流密度最大,加速度为 7.8 m/s^2 时的热流密度最小,但两者平均热流密度相差最大百分比仅为 6.7%,可以看出,加速度对壁面热流密度影响极小。

单液滴撞击液膜后,热流密度会呈迅速增大、平稳增大、急速减小和缓慢减小四个变化趋势,撞击会强化液膜和壁面对流换热^[19];双液滴撞击液膜后,热流密度呈现先减小后增大再减小三个过程,液膜和壁面间的接触面积会影响其对流换热的强度,撞击后液膜的收缩和铺展是影响热流密度波动的主要原因。

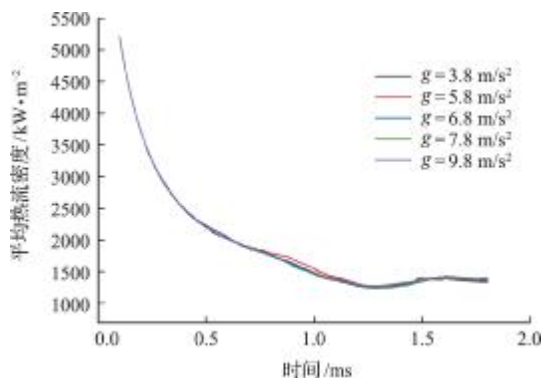


图 11 不同加速度下的壁面热流密度

Fig. 11 Wall heat flux under different gravity accelerations

4 结 论

(1) 当双液滴撞击水平薄液膜产生射流时,一部分液体进入中心射流后液膜出现回缩现象,随着时间的发展,射流在重力作用下回落,底部液膜会重新覆盖壁面。

(2) 同一时刻中心射流高度随液膜厚度增大而减小,射流顶部液滴脱离时刻随液膜厚度增加而推迟,射流能达到的最大高度随液膜厚度增大而增高;随着时间的发展,壁面平均热流密度先减小后增大再减小。

(3) 液滴水平间距较大时,双液滴撞击后形成的射流中出现空心区域,产生该区域的射流发生二次断裂,水平间距越大,中心射流上升速度越慢;液滴间距的变化影响壁面热流密度各变化阶段出现的时间,但不改变其趋势。

(4) 中心射流高度随着加速度的减小有所提高,加速度越小,中心射流断裂发生的时刻越晚;壁面热流密度受加速度影响极小。

参考文献(References):

[1] 屠敏,袁耿民,薛飞,等.综合热管理在先进战斗机系统研制中的应用[J].航空学报,2020,41(6):129-139. (TU Min, YUAN Geng-min, XUE Fei, et al. Application of integrated thermal management in development of advanced fighter system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(6):129-139. (in Chinese))

[2] Fallah Kharmiani S, Passandideh-Fard M, Niazmand H. Simulation of a single droplet impact onto a thin liquid film using the lattice Boltzmann method[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 222:1172-1182.

[3] Liang G T, Mudawar I. Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film[J]. *International Journal of Heat and Mass Trans-*

fer, 2016, 101:577-599.

- [4] Liang G T, Mudawar I. Review of drop impact on heated walls[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106:103-126.
- [5] 涂德浴,潘庆民,童宝宏.椭圆液滴撞击超疏水表面反弹过程数值分析[J].计算力学学报,2021,38(2):215-221. (TU De-yu, PAN Qing-min, TONG Bao-hong. Numerical analysis of rebound process of ellipsoidal droplets impact on superhydrophobic surface [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(2):215-221. (in Chinese))
- [6] 周鑫,马小晶,胡丽娜,等.不同壁面条件下液滴撞击铺展特性的模拟研究[J].计算力学学报,2022,39(6):761-767. (ZHOU Xin, MA Xiao-jing, HU Li-na, et al. Simulation study on spreading characteristics of droplet impinging under different wall conditions[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(6):761-767. (in Chinese))
- [7] Li D S, Duan X L. Numerical analysis of droplet impact and heat transfer on an inclined wet surface[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 128:459-468.
- [8] 鲍俊,王瑜,牛潜,等.喷雾液滴撞击液膜影响参数及流动机理分析[J].航空学报,2021,42(S1):726360. (BAO Jun, WANG Yu, NIU Qian, et al. Influencing parameters and film flow mechanism of spray droplet impacting liquid film[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(S1):726360. (in Chinese))
- [9] Yang X F, Ray M, Kong S C, et al. SPH simulation of fuel drop impact on heated surfaces[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3):3279-3286.
- [10] Lin S J, Zhao B Y, Zou S, et al. Impact of viscous droplets on different wettable surfaces; Impact phenomena, the maximum spreading factor, spreading time and post-impact oscillation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 516:86-97.
- [11] 郑诺,刘海龙.剪切变稀流体液滴撞击疏水表面回弹现象及最大铺展的研究[J].力学学报,2022,54(7):1934-1942. (ZHENG Nuo, LIU Hai-long. Study on rebound behaviour and maximum spreading of shear-thinning fluid droplet impacting on a hydrophobic surface [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(7):1934-1942. (in Chinese))
- [12] Weisensee P B, Tian J J, Miljkovic N, et al. Water droplet impact on elastic superhydrophobic surfaces [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:30328.
- [13] Li J X, Zhang H, Liu Q F. Dynamics of a successive

- train of monodispersed millimetric-sized droplets impact on solid surfaces at low Weber number [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, **102**:81-93.
- [14] 李林豪,杨秀峰, Sohag Md M A, 等. 双液滴连续撞击高温壁面的 SPH-ASR 模拟研究 [J]. 中国科学(物理学、力学、天文学), 2022, **52**(10):33-45. (LI Lin-hao, YANG Xiu-feng, Sohag Md M A, et al. Simulation of two successive drops impacting a heated wall by smoothed particle hydrodynamics with adaptive spatial resolution [J]. *Scientia Sinica Physica*, 2022, **52**(10):33-45. (in Chinese))
- [15] Liang G T, Zhang T Y, Chen L Z, et al. Single-phase heat transfer of multi-droplet impact on liquid film [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **132**:288-292.
- [16] 郭亚丽,张京涛,沈胜强,等. 双液滴同时撞击液膜的动力学演变 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, **37**(6):796-801,884. (GUO Ya-li, ZHANG Jing-tao, SHEN Sheng-qiang, et al. Dynamic evolution of double droplets simultaneously impacting on flat liquid film [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, **37**(6):796-801,884. (in Chinese))
- [17] 郭加宏,戴世强,代 钦. 液滴冲击液膜过程实验研究 [J]. 物理学报, 2010, **59**(4):2601-2609. (GUO Jia-hong, DAI Shi-qiang, DAI Qin. Experimental research on the droplet impacting on the liquid film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4):2601-2609. (in Chinese))
- [18] 李大树,仇性启,郑志伟,等. 液滴碰撞液膜复合 level set-VOF 法的数值分析 [J]. 高校化学工程学报, 2017, **31**(3):570-578. (LI Da-shu, QIU Xing-qi, ZHENG Zhi-wei, et al. Numerical analysis of a coupled level set-VOF method for the study of droplet impact on wetted surface [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2017, **31**(3):570-578. (in Chinese))
- [19] 高 辉,高瑞峰,姚孟君,等. 液滴撞击液膜的流热耦合界面追踪方法数值模拟 [J]. 计算物理, 2020, **37**(4):422-430. (GAO Hui, GAO Rui-feng, YAO Meng-jun, et al. Numerical simulation of fluid-thermal coupled in droplet impact onto liquid film; Front tracking method [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2020, **37**(4):422-430. (in Chinese))

Numerical simulation of flow and heat transfer process of double droplets simultaneously impacting on flat liquid film

WU Han-xu¹, ZHU Fa-xing¹, ZHAO Ke², JIANG Yan-long^{*1},
DONG Yue¹, HUANG Bo-yang¹, LUO Jia-qi¹

(1. School of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China;

2. School of Biological and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: The study of droplet impact on a liquid film is conducive to foster the performance of airborne spray cooling and boost the application and development of the aviation industry, based on its considerable influence on heat transfer and morphological changes of liquid film. On the premise of different thicknesses of a liquid film, horizontal distances of double droplets and gravity accelerations, the research focuses on the evolution process and characteristics of liquid film morphology, explores the development law of the central jet after the double droplets impact on the liquid film, and analyzes the heat transfer characteristics of the liquid film and the high-temperature wall, with a rollout of simulating the simultaneous impact of double droplets on the liquid film using CLSVOF method. The results show that the thicker the liquid film is, the more slowly the central jet rises, the later the jet breaks, and the liquid film retraction has a significant impact on wall heat transfer. The larger the horizontal distance between the two droplets is, the more slowly the central jet rise, increasing the distance does not change the trend of changes in wall heat flux. And the greater the gravity acceleration is, the more slowly the central jet rises, the earlier the jet breaks, and the effect of gravitational acceleration on wall heat transfer is relatively small.

Key words: double droplets; CLSVOF; liquid film; central jet; heat transfer