

柴油液滴撞击倾斜壁面碰撞速度效应数值分析

郑志伟¹ 李大树² 仇性启¹ 朱晓丽¹ 马培勇³ 张 铎⁴

(1. 中国石油大学(华东)化学工程学院, 青岛 266580; 2. 中海油研究总院, 北京 100028;

3. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 4. 萨里大学工程与物理科学学院, 吉尔福德 GU2 7XH)

摘要: 采用复合水平集和流体体积法并综合考虑传热及接触热阻的作用建立了液滴碰撞倾斜壁面的数值模型, 并验证了模型的可靠性。通过分析计算, 获得了柴油液滴撞壁动力学形态的变化规律, 揭示了液滴撞壁流动破碎机理, 探索了液滴前、后铺展系数和铺展速度、总铺展系数以及壁面平均热流密度的碰撞速度效应规律。研究表明: 液滴碰撞倾斜壁面射流和飞溅特征仅出现在前铺展边缘, 且射流存在颈部破碎和根部破碎; 液滴前铺展边缘射流区域内压力梯度是射流形成、发展及其颈部、根部断裂的主要原因; 毛细波的作用是射流颈部和根部破碎的关键因素; 碰撞速度越大, 液滴的前、后铺展系数和铺展速度、总铺展系数以及壁面平均热流密度均越大; 随着碰撞速度的增加, 液滴撞壁特性的碰撞速度效应逐渐减小。

关键词: 液滴撞壁; 铺展系数; 动力学行为; 数值分析

中图分类号: TK124; O351.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0317-08

Numerical Analysis of Effect of Impacting Velocity on Diesel Droplet Impacting on Inclined Surface

Zheng Zhiwei¹ Li Dashu² Qiu Xingqi¹ Zhu Xiaoli¹ Ma Peiyong³ Zhang Duo⁴

(1. School of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China

3. School of Mechanical and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

4. Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, UK)

Abstract: In order to explore the process of liquid film formed by fuel droplet impact on the surface in small-size combustor of diesel engine, a numerical model was developed using coupled level set and volume of fluid method, including heat transfer and contact resistance, to explore the mechanism of a droplet impacting on inclined surface. The dynamic motion and mechanism of flow and breakup of droplet were obtained according to results analysis. The effect of impacting velocity on spreading factor, average wall heat flux, forward and backward spreading factors and spreading velocities were also explored. The results showed that the liquid jet was observed only at the front spreading edge during the oblique impact, which was different from the horizontal impact. The tangential forces for the oblique impact promoted the forward spreading and the formation of liquid jet at the front spreading edge. The breakup of liquid jet was observed at both neck and root areas. The pressure gradient inside the liquid jet was the main factor resulting in the formation, development and breakup of the liquid jet; capillary wave resulted in the breakup at the neck and root of liquid jet. The impacting characteristics were closely related to impacting velocity, the spreading factor, average wall heat flux, forward and backward spreading factors and spreading velocities obviously increased with the increase of impacting velocity; the effect of impacting velocity on impacting characteristics decreased as impacting velocity increase.

Key words: droplet impact; spreading factor; dynamics; numerical analysis

收稿日期: 2016-03-21 修回日期: 2016-04-29

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD30B01)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(15CX06052A)

作者简介: 郑志伟(1990—),女,博士生,主要从事喷雾、流动及传热技术研究,E-mail: kwx0205@163.com

通信作者: 李大树(1990—),男,工程师,博士,主要从事传热及燃烧研究,E-mail: lstax01@163.com

引言

液滴撞壁现象广泛存在于工业技术领域中,如喷雾冷却、喷雾干燥和喷雾燃烧等^[1]。现代柴油机中,高速喷雾液滴不可避免冲击壁面。研究液滴撞壁过程不仅能够丰富自由界面气液两相流动理论,而且有助于预测附壁油膜状况,对喷雾技术的工程应用有重要指导意义^[2-3]。

近年来,研究者针对液滴撞壁现象进行了一定研究^[4-9]。MAO等^[5]对液滴碰撞水平壁面铺展和回弹现象进行了可视化研究,并获得了碰撞速度、液滴粘度、液滴直径和壁面粗糙度对液滴撞壁特性的影响规律。PASANDIDEH-FARD等^[6]实验观测了液滴撞壁的沉积和凝固过程,并揭示了撞壁后液滴形态演变及其动力学特性的变化规律。KAMNIS等^[7]采用VOF法分析了不同碰撞速度下液滴冲击水平壁面的铺展特性。YOKOI^[8]采用复合水平集和流体体积(CLSVOF)法研究了水滴碰撞水平干壁面的飞溅现象。李大树等^[9]采用CLSVOF法探讨了液滴碰撞不同浸润性壁面的碰撞速度效应规律,并揭示了液滴铺展和飞溅机理。目前,有关液滴撞壁现象的研究仍以碰撞水平壁面为主,而实际工况中,有时会存在液滴碰撞倾斜壁面的现象,由于上述过程的不对称性,受切向作用力影响,液滴的动力学行为与其碰撞水平壁面存在很大不同,但现有相关研究相对较少。ŠIKALO等^[10]实验观测了液滴碰撞倾斜壁面运动形态变化,并对比分析了水和甘油液滴的撞壁特性。随后,进一步实验揭示了液滴碰撞倾斜壁面的部分回弹现象^[11]。在数值研究方面,LUNKAD等^[12]采用VOF法数值分析了液滴碰撞倾斜壁面的铺展过程,并获得了液滴前、后铺展系数的变化规律。沈胜强等^[13]用数值方法研究了水滴撞击不同润湿性倾斜壁面的铺展过程,并获得了壁面浸润性对液滴铺展过程的影响规律。

目前,现有文献虽对液滴碰撞倾斜壁面进行了一定研究,但相关研究主要集中在液滴撞壁形态变化上,如自由表面流动、三相接触线行为等,有关撞壁过程中流动破碎机理的揭示仍较缺乏。现有研究多忽略液滴与壁面间传热,而液滴的热物性会对其动力学行为存在一定影响。同时,在涉及传热的液滴撞壁过程中,接触热阻是描述液固耦合的重要参数,而目前采用接触热阻的液滴撞壁模型还极其缺乏。此外,在常用的相界面追踪方法中,VOF法由于相函数不连续,对相界面法线方向和曲率的计算不够精确^[14];Level-set方法相界面计算精度高,但由于求解过程中相函数容易偏离距离函数,计算过

程中质量有时难以守恒^[15]。因此,考虑VOF法和Level-set法的不足,本文采用CLSVOF法^[16]并综合考虑传热及接触热阻的作用建立液滴碰撞倾斜壁面数值模型,分析液滴运动形态变化规律,揭示液滴撞壁流动破碎机理,探索液滴前、后铺展系数和铺展速度、总铺展系数以及壁面平均热流密度的碰撞速度效应规律。

1 数值计算方法

液滴碰撞倾斜壁面的几何模型,如图1所示。定义液滴的参数如下,初始直径为 D_0 ,碰撞速度为 U_0 ,垂直分速度为 v ,壁面切向分速度为 u 。碰撞角 α 为碰撞速度与壁面的夹角,则壁面倾斜角为 $90^\circ - \alpha$ 。由于液滴撞壁后沿壁面铺展呈不对称性,分别定义液滴前、后铺展长度为 x_f 和 x_d ,则液滴的前、后铺展系数分别可以表示成 x_f/D_0 和 x_d/D_0 ,其中,液滴的前铺展长度是碰撞点 M 到液滴铺展前端的距离,后铺展长度是碰撞点 M 到液滴铺展后端的距离,液滴的总铺展长度和总铺展系数分别可以表示成 $L = x_f + x_d$ 和 L/D_0 。

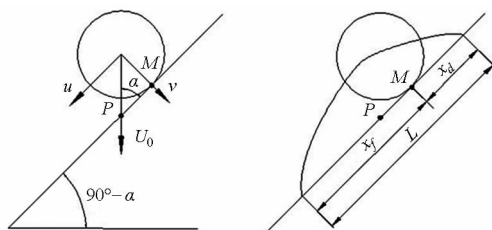


图1 液滴碰撞倾斜壁面示意图

Fig. 1 Schematic of droplet impact on inclined surface

数值模型采用柴油作为燃料液滴,液滴的初始直径 $D_0 = 2 \text{ mm}$,初始温度 $T_d = 345 \text{ K}$,以一定的碰撞速度冲击恒温不锈钢倾斜壁面,碰撞角 $\alpha = 60^\circ$,壁面和环境温度均为 300 K ,环境压力为 1 个大气压,壁面前进、后退和静态接触角分别为 $\theta_r = 20^\circ$ 、 $\theta_b = 40^\circ$ 和 $\theta_e = 30^\circ$ 。此外,模型加入Marangoni应力边界以求解液固交界面热应力,采用热物性参数替代常数参数,并考虑壁面接触热阻对液滴撞壁过程的影响。针对液滴的铺展和收缩过程,计算模型分别采用前进和后退接触角以求解液滴与壁面间的液固润湿作用。数值模型对控制方程进行求解,并假设气液界面无相变发生,碰撞过程一直处于层流状态。

根据CLSVOF方法,连续性方程、动量方程和能量方程分别可以表示成

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\rho(\phi) \mathbf{v}] + \nabla \cdot [\rho(\phi) \mathbf{v} \mathbf{v}] = \\ - \nabla p + \nabla \cdot [\mu(\phi) (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho(\phi) \mathbf{g} - \mathbf{F} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho(\phi)c_pT] + \nabla \cdot [\rho(\phi)c_p\mathbf{v}T] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{v}$ ——速度矢量 $\mathbf{F}$ ——表面张力源项
 p ——压力 $\mathbf{g}$ ——重力矢量
 ϕ ——Level-set 函数
 $\rho(\phi)$ ——计算单元内密度
 $\mu(\phi)$ ——计算单元内动力粘度
 c_p ——计算单元内比热容
 T ——计算单元内温度
 λ ——计算单元内导热系数

动量方程中表面张力源项采用连续表面力 (CSF) 模型进行求解^[17], 并通过引入 Heaviside 函数进行连续化处理, 可以表示为

$$\mathbf{F} = \sigma \kappa(\phi) \nabla H(\phi) \quad (4)$$
$$H(\phi) = \begin{cases} 0 & (\phi < -a) \\ \frac{1}{2} + \frac{\phi}{2a} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi\phi}{a}\right) & (|\phi| \leq a) \\ 1 & (\phi > a) \end{cases} \quad (5)$$

其中 $a = 1.5h$

式中 $\kappa(\phi)$ ——曲率 σ ——表面张力系数
 $H(\phi)$ ——Heaviside 函数
 a ——相界面处过渡区域厚度^[18-20]
 h ——最小网格尺寸

连续化后的密度和粘度分别为

$$\rho(\phi) = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)H(\phi) \quad (6)$$

$$\mu(\phi) = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)H(\phi) \quad (7)$$

式中下标 g, l 分别表示气相和液相。

壁面 Marangoni 应力, 可以表示为

$$\tau = \frac{d\sigma}{dT} \nabla T \quad (8)$$

接触角模型以壁面边界条件的形式施加到数值模型中, 可以表示成

$$\theta_{dy}(U_{cl}) = \begin{cases} \theta_r & (U_{cl} > 0) \\ \theta_e & (U_{cl} = 0) \\ \theta_b & (U_{cl} < 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中 θ_{dy} ——壁面接触角 U_{cl} ——接触线速度

采用二维模型研究液滴碰撞倾斜壁面过程。为提高相界面的计算精度, 对壁面附近区域网格进行自适应加密, 经网格无关性检验, 选取网格尺寸为 0.03 mm, 即可保证计算精度, 又可节省计算时间和成本, 网格数为 462 000。

基于 Fluent 平台求解数值模型。采用有限体积法对控制方程进行离散, 压力速度耦合采用 SIMPLE 方法, 压力求解采用 PRESTO! 方法, 计算单元液相

体积分数采用 CICSAM 方法^[21]离散求解, 控制方程采用 QUICK 格式进行离散, 以减少假扩散, 提高精度, 时间步长 $\Delta t = 10^{-6}$ s, 本文经收敛性检验选取 Δt 内迭代次数为 100, 在该次数内可满足收敛精度要求, 计算结果收敛。

2 计算模型验证

为验证模型的准确性, 将液滴碰撞倾斜壁面实验观测值^[10]与数值结果进行对比。图 2 是实验观测和数值模拟所得液滴前、后铺展系数随无量纲时间 ($t^* = tU_0/D_0$) 的变化。其中, 液滴初始直径 $D_0 = 2.72$ mm, 碰撞速度 $U_0 = 1.54$ m/s, 碰撞角 $\alpha = 45^\circ$ 。

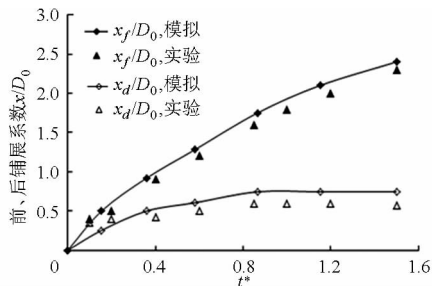


图 2 液滴碰撞倾斜壁面前后铺展系数模拟与实验对比

Fig. 2 Comparison of forward and backward spreading factors for simulations and experiments

从图 2 可以看出, 实验观测与数值模拟所得液滴前、后铺展系数较为接近, 可见, 采用 CLSVOF 方法并结合网格自适应技术所建立的数值模型能够较为精确地预测具有复杂强瞬变相界面拓扑结构的液滴撞壁过程。由图 2 还可以看出, 数值模拟前、后铺展系数略大于实验观测值, 分析认为, 这是由于现有相界面追踪技术和图像处理技术的局限性所造成的。

3 数值计算结果

3.1 动力学形态分析

图 3 是数值模拟液滴以 1 m/s 的碰撞速度冲击不锈钢倾斜壁面和平面的动力学形态, 其中, 液滴冲击倾斜壁面的碰撞角 $\alpha = 60^\circ$, 液滴冲击水平壁面为垂直撞壁。液滴的初始直径 $D_0 = 2$ mm, 壁面前进接触角和后退接触角分别是 $\theta_r = 20^\circ$ 和 $\theta_b = 40^\circ$, 静态接触角 $\theta_e = 30^\circ$ 。

从图 3a 可以看出, 液滴与倾斜壁面接触后沿壁面铺展 (0 ~ 0.6 ms), 液滴的自由界面形态与碰撞水平壁面相似 (图 3b)。由于液滴碰撞倾斜壁面铺展过程中存在较大的切向作用力, 液滴的前铺展长度逐渐大于后铺展长度, 同时, 液滴前铺展边缘液体的厚度逐渐大于后铺展边缘 (1.2 ms), 这与液滴碰撞水平壁面明显不同。随着液滴的继续铺展, 液滴的

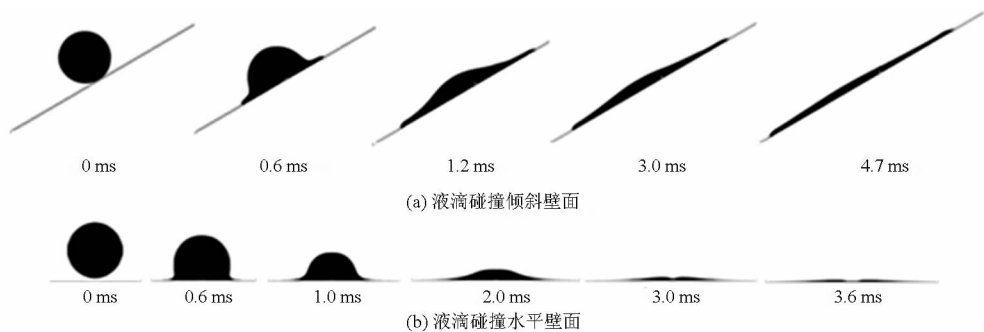


图3 数值模拟液滴以1 m/s的碰撞速度冲击不同壁面运动形态变化

Fig.3 Simulated droplet impacts on different surfaces at impacting velocity at 1 m/s

前、后铺展长度逐渐增大,总铺展长度也相应增大(1.2~3.0 ms)。由图3a还可以看出,液滴前铺展长度的增幅较大,而后铺展长度的增幅较小,前铺展边缘的液体厚度明显大于后铺展边缘(3.0~4.7 ms),表现出较为明显的不对称流动状态。这是由于碰撞角的存在,液滴向前铺展动能大于向后铺

展动能,同时,重力的作用表现为向前铺展的动力,而对于液滴向后铺展,则表现为铺展的阻力,在上述两方面的共同作用下,液滴的前铺展长度逐渐大于后铺展长度。继续增大液滴的碰撞速度到6 m/s,如图4所示。

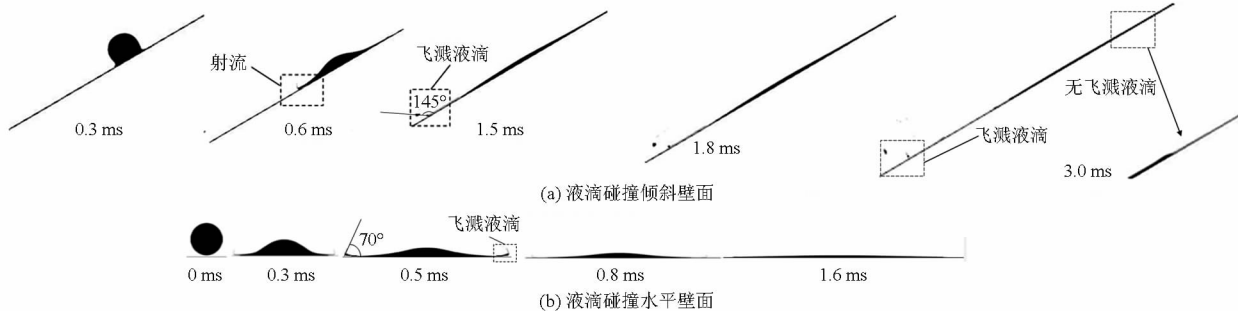


图4 数值模拟液滴以6 m/s的碰撞速度冲击不同壁面运动形态变化

Fig.4 Simulated droplet impacts on different surfaces at impacting velocity at 6 m/s

从图4a可以看出,液滴接触倾斜壁面后,由于较大的冲击动能足以克服液滴的表面张力做功,液滴迅速铺展并在前铺展边缘处产生射流(0.6 ms),这与液滴碰撞水平壁面铺展两侧均产生飞溅现象明显不同(图4b)。随着液滴继续铺展,液滴前铺展边缘射流顶部产生破碎,形成飞溅液滴(1.5 ms),由于飞溅液滴仍具有较大的动能,向外继续运动。在飞溅初期,飞溅液滴进行减速运动,速度由9.5 m/s($t = 1.2$ ms)减小到8.9 m/s($t = 1.5$ ms),液滴受Rayleigh-Taylor不稳定性作用明显;同时,由于飞溅液滴形成时 Oh 数较小($Oh = 0.03$),且Weber数较大($We = 338$),因此,空气剪切力对飞溅液滴的作用较大^[22],可见,在上述两方面共同作用下,飞溅液滴继续破碎成小液滴。此外,从图4还可以看出,倾斜撞壁过程中飞溅液滴与液滴主体间的夹角为145°(图4a),而水平撞壁过程中飞溅液滴与液滴主体间的夹角为70°(图4b),可见,较碰撞水平壁面,液滴碰撞倾斜壁面飞溅液滴与液滴主体间的夹角较大。分析认为,这是由于倾斜撞壁过程中存在不对称性,重力加速度沿着倾斜壁面存在切向分量,导致

飞溅液滴沿倾斜壁面方向的运动速度和飞溅距离较大,因此,飞溅液滴与液滴主体间的夹角较大。

由图4a还可以看出,随着液滴继续铺展,液滴高度逐渐减小,液滴在壁面始终表现出良好的沉积性(1.8~3.0 ms)。需要指出,液滴碰撞倾斜壁面过程中,后铺展边缘没有产生射流和飞溅液滴(3.0 ms),这是由于后铺展动能较小,不足以克服表面张力做功所造成的。

3.2 射流破碎分析

由图4可知,碰撞速度较大的液滴具有较大的冲击动能,在前铺展边缘处产生了飞溅现象。图5对液滴碰撞倾斜壁面不同时刻前铺展边缘射流形态进行分析,其中, $U_0 = 6$ m/s, $D_0 = 2$ mm, $\theta_r = 20^\circ$, $\theta_b = 40^\circ$, $\theta_c = 30^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ 。可以看出,液滴撞壁后前铺展边缘三相接触线附近产生射流(0.9 ms),且射流顶端与壁面存在一定夹角,在表面张力作用下,射流颈部相界面拓扑结构产生变化,表面张力作用复杂,分别指向壁面和环境空气。在上述复杂表面张力的作用下,射流颈部产生收缩,当颈部直径足够小以及表面张力足够大时,射流在颈部断裂,产生破碎

液滴(1.2 ms),由于破碎液滴仍具有较大的动能,向外继续飞溅。随后,1.5 ms 可见,射流根部与液滴主体连接处相界面拓扑结构变化较大,表面张力作用十分复杂,射流根部产生收缩(1.5 ms)并断裂(1.8 ms),受惯性力作用,几乎平行于壁面向外飞溅(1.8 ms),这与液滴碰撞水平壁面仅存在射流颈部收缩破碎现象完全不同^[2,14]。

上述分析可以看出,液滴射流飞溅主要是由于毛细波(又称表面张力波)的作用,射流破碎的临界毛细波波长可以表示成^[23-24]

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}r_l$$

(10)

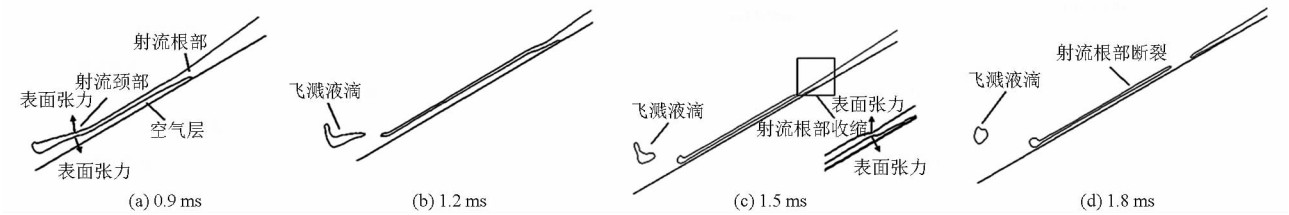


图 5 数值模拟射流形态
Fig. 5 Simulated jet shapes

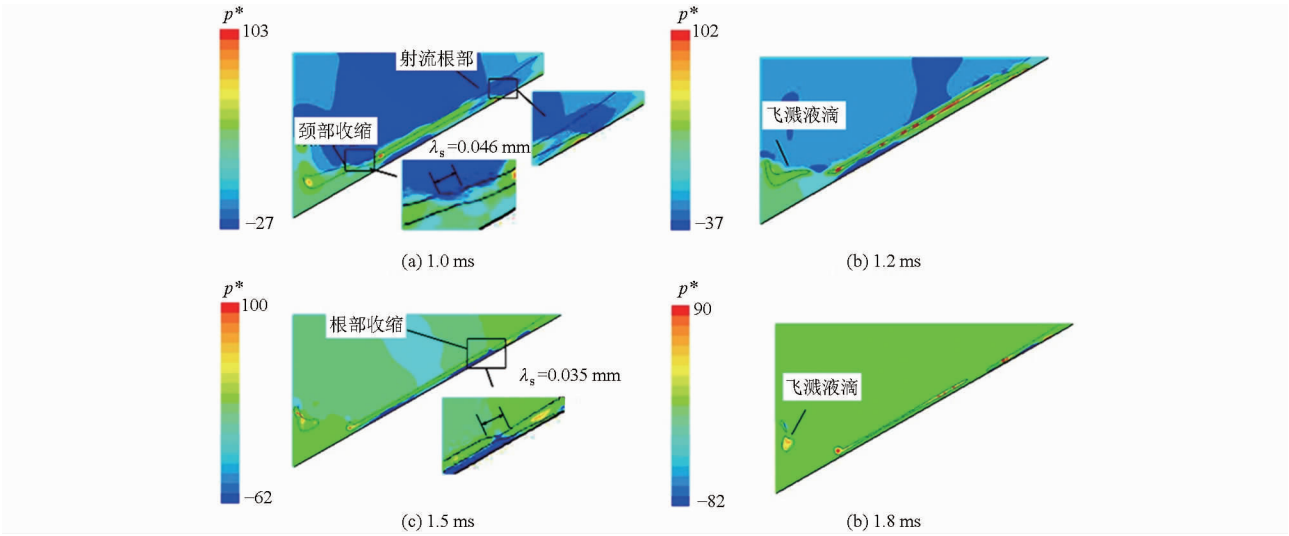


图 6 数值模拟射流无量纲压力分布
Fig. 6 Simulated dimensionless pressure distributions of jet

力梯度较大,该区域内压力梯度则是射流形成的主要原因。1.2 ms 时,射流颈部出现断裂,形成飞溅液滴。1.5 ms 时,射流根部在较大压力梯度持续作用下产生收缩,1.8 ms 时,形成断裂飞溅射流。根据毛细波长的定义和文献[23-24]中波长和速度的关系可得,射流颈部波长为 0.046 mm,射流根部波长为 0.035 mm。考虑到射流颈部和根部破碎的临界波长分别是 0.018 mm 和 0.016 mm,与射流颈部和根部波长相比较小因此,液滴撞壁后射流颈部和根部均产生了破碎飞溅现象。

式中 λ_c ——临界波长
 r_l ——射流颈部和根部半径
将数值计算结果代入式(10)得,图 5 中射流颈部和根部破碎临界毛细波波长分别是 $\lambda_n = 0.018\text{ mm}$ 和 $\lambda_r = 0.016\text{ mm}$ 。

图 6 是液滴碰撞倾斜壁面射流区域无量纲压力分布,考虑液滴表面张力和毛细波的作用,无量纲压力可以表示成

$$p^* = pr_l/\sigma$$

(11)

从图 6 中可以看出,1 ms 时,射流颈部的压力较小,且该区域内具有较大的压力梯度,这是射流斜向上运动和颈部收缩的主要原因。此时,射流根部压

3.3 撞壁特性分析

图 7 将不同碰撞速度下液滴碰撞倾斜壁面的铺展系数表示成无量纲时间 t^* 的函数,其中,碰撞速度 U_0 分别是 1、6、20 m/s。可以看出,撞壁初始阶段,液滴的前、后铺展系数随 t^* 逐渐增大,前铺展系数的增幅大于后铺展系数。分析认为,这是由于液滴接触壁面后,受惯性力、粘滞力、表面张力和重力壁面切向分量的共同作用,碰撞点处液滴的合力方向沿壁面切向方向向下,有利于液滴向前铺展,阻碍了液滴向后铺展。碰撞速度越大,前、后铺展系数越

大,这是由于碰撞速度越大,冲击动能越大,液滴沿壁面的铺展势能越大。当 t^* 大约等于6时,液滴的后铺展系数几乎不变,而前铺展系数继续增加。

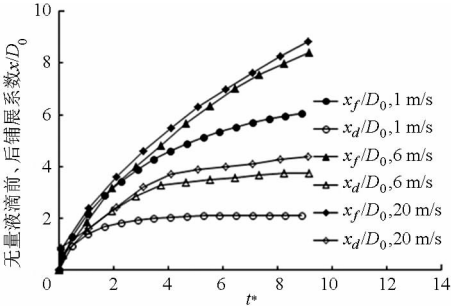


图7 不同碰撞速度下前后铺展系数随无量纲时间的变化
Fig. 7 Changes of forward and backward spreading factors with dimensionless time at different impacting velocities

图8将液滴的总铺展系数表示成无量纲时间 t^* 的函数,可以看出,碰撞速度越大,液滴的总铺展系数越大。但随着碰撞速度的增大,液滴总铺展系数的增幅逐渐减小。当碰撞速度大于6 m/s时,液滴的铺展系数较为接近,说明,液滴的总铺展系数与碰撞速度的相关性逐渐减小。

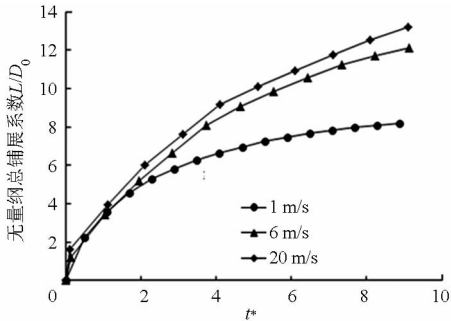


图8 不同碰撞速度下总铺展系数随无量纲时间的变化
Fig. 8 Changes of spreading factor with dimensionless time at different impacting velocities

图9将不同碰撞速度下液滴的前、后铺展速度 U_f 和 U_d 表示成无量纲时间 t^* 的函数,其中,铺展速度为正表示液滴沿壁面向前铺展,铺展速度为负表明液滴沿壁面向后铺展。

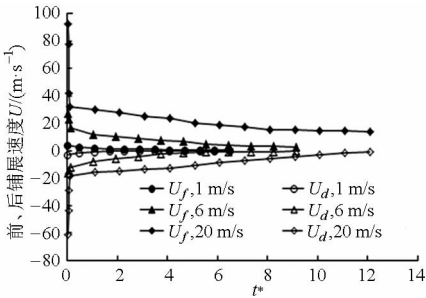


图9 不同碰撞速度下前后铺展速度随无量纲时间的变化
Fig. 9 Changes of forward and backward spreading velocities with dimensionless time at different impacting velocities

从图9中可以看出,撞壁初始时刻,液滴的前、

后铺展速度最大,随 t^* 近似指数递减,碰撞速度越大,液滴的铺展速度越大。由图9还可以看出,液滴的前铺展速度大于后铺展速度,当铺展速度减小到10%时,前铺展速度对应的 t^* 分别是6、9和12,后铺展速度对应的 t^* 分别是4、4.6和8。

图10是液滴最大铺展速度随雷诺数 Re 的变化,其中,在 Re 的求解中,液滴密度为 835 kg/m^3 ,粘度为 $0.002\,745\text{ Pa}\cdot\text{s}$,液滴初始直径为 2 mm ,碰撞速度分别是1、6、10和 20 m/s 。可以看出,液滴的最大前、后铺展速度随雷诺数近似线性递增,当雷诺数分别是608、3 650、6 083和12 166时,最大前铺展速度分别是4.5、27、46和 92 m/s ,最大后铺展速度分别是-2.6、-16、-30和-60 m/s。可见,最大前、后铺展速度均大于相应的碰撞速度,最大前铺展速度大约是碰撞速度的4.5倍,最大后铺展速度大约是碰撞速度的3倍。

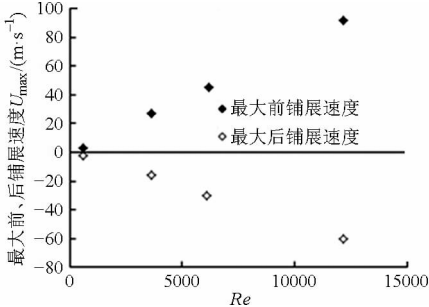


图10 最大前、后铺展速度随雷诺数的变化
Fig. 10 Changes of maximum forward and backward spreading velocities with Reynolds number

进一步地研究液滴与壁面间的传热特性,图11将不同碰撞速度下壁面平均热流密度 q_w 表示成无量纲时间 t^* 的函数。可以看出,不同碰撞速度下 q_w 均随 t^* 先增加后减小。碰撞速度越大, q_w 越大,这是由于具有较大碰撞速度的液滴对壁面的冲击扰动较大,液滴与壁面间传热能力也相应增大,因此, q_w 越大。但不同碰撞速度下壁面达到最大 q_w 所需无量纲时间较为接近, t^* 大约为0.6。可见,液滴碰撞

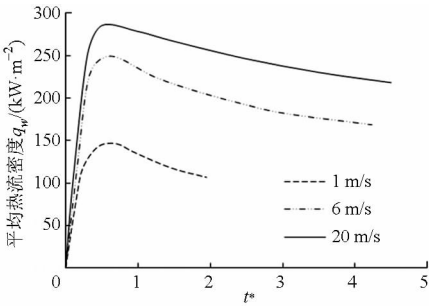


图11 不同碰撞速度下壁面平均热流密度随无量纲时间的变化
Fig. 11 Changes of average wall heat flux with dimensionless time at different impacting velocities

倾斜壁面 q_w 与碰撞速度的相关性较大,但其达到最大 q_w 所需无量纲时间与碰撞速度的相关性较小。

4 结论

(1)液滴碰撞倾斜壁面随碰撞速度的增加依次呈现出铺展、射流和飞溅等现象;与碰撞水平壁面两侧顶部射流破碎相比,液滴碰撞倾斜壁面射流和飞溅特征仅出现在前铺展边缘,且射流存在顶部破碎和根部破碎;液滴碰撞倾斜壁面的切向作用力促进了液滴的向前铺展以及前铺展边缘的射流飞溅。

(2)液滴撞壁射流飞溅有利于喷雾二次雾化,液滴前铺展边缘射流区域内压力梯度是射流形成、

发展及其颈部、根部断裂的主要原因;毛细波的作用是射流颈部和根部破碎的关键因素。

(3)液滴撞壁特性的碰撞速度效应明显,碰撞速度越大,液滴的前、后铺展系数和铺展速度以及总铺展系数越大,但随着碰撞速度的增加,液滴的撞壁特性与碰撞速度的相关性逐渐减小。撞壁初始时刻,液滴的铺展速度最大,最大前铺展速度大约是碰撞速度的 4.5 倍,最大后铺展速度大约是碰撞速度的 3 倍。

(4)壁面平均热流密度与液滴碰撞速度的相关性较大,但壁面达到最大平均热流密度所需无量纲时间与碰撞速度的相关性较小。

参 考 文 献

- 1 李大树,仇性启,崔运静,等. 柴油机冷启动喷雾油滴撞壁速度效应数值分析[J]. 农业机械学报,2014,45(6):25-31.
LI Dashu, QIU Xingqi, CUI Yunjing, et al. Numerical analysis on impacting velocity effect on spray oil droplet impacting onto a surface during diesel engine cold starting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 25-31. (in Chinese)
- 2 YANG W M, AN H, CHOU S K, et al. Impact of emulsion fuel with nano-organic additives on the performance of diesel engine[J]. Applied Energy, 2013, 112: 1206-1212.
- 3 李大树,仇性启,于磊,等. 喷雾液滴撞壁研究综述[J]. 工业加热, 2014, 43(2): 1-4.
LI Dashu, QIU Xingqi, YU Lei, et al. Review of spray droplet impact on a surface[J]. Industrial Heating, 2014, 43(2): 1-4. (in Chinese)
- 4 MOREIRA A L N, MOITA A S, PANA O 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 MAO T, KUHD D, TRAN H. Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces[J]. AIChE Journal, 1997, 43(9): 2169-2179.
- 6 PASANDIDEH-FARD M, BHOLA R, CHANDRA S, et al. Deposition of tin droplets on a steel plate: simulations and experiments [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(19): 2929-2945.
- 7 KAMNIS S, GU S. Numerical modelling of droplet impingement[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(19): 3664-3673.
- 8 YOKOI K. Numerical studies of droplet splashing on a dry surface: triggering a splash with the dynamic contact angle[J]. Soft Matter, 2011, 7(11): 5120-5123.
- 9 李大树,仇性启,郑志伟,等. 液滴冲击不同浸润性壁面的数值分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 294-302.
LI Dashu, QIU Xingqi, ZHENG Zhiwei, et al. Numerical analysis of droplet impact on surfaces with different wettabilities[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 294-302. (in Chinese)
- 10 ŠIKALO Š, TROPEA C, GANIC E N. Impact of droplets onto inclined surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 286(2): 661-669.
- 11 ŠIKALO Š, GANIC E N. Phenomena of droplet-surface interactions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006, 31(2): 97-110.
- 12 LUNKAD S F, BUWA V V, NIGAM K D P. Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal and inclined surfaces[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(24): 7214-7224.
- 13 沈胜强,崔艳艳,郭亚丽. 液滴撞击等温斜面的数值模拟[J]. 热科学与技术, 2009, 8(3): 194-197.
SHEN Shengqiang, CUI Yanyan, GUO Yali. Numerical simulation of droplet striking on inclined isothermal surface[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2009, 8(3): 194-197. (in Chinese)
- 14 HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- 15 OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1): 12-49.
- 16 YOKOI K. A numerical method for free-surface flows and its application to droplet impact on a thin liquid layer[J]. Journal of Scientific Computing, 2008, 35(2-3): 372-396.
- 17 BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.

18 YOKOI K. A practical numerical framework for free surface flows based on CLSVOF method, multi-moment methods and density-scaled CSF model; numerical simulations of droplet splashing[J]. Journal of Computational Physics, 2013, 232(1): 252 – 271.

19 GUO Y, WEI L, LIANG G, et al. Simulation of droplet impact on liquid film with CLSVOF[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 53: 26 – 33.

20 杨宝海. 喷雾冷却中液滴撞击固体壁面的动态特性及传热特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.

21 UBBINK O, ISSA R I. A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 153(1): 26 – 50.

22 HSIANG L P, FAEH G M. Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(4): 545 – 560.

23 宋云超. 气液两相流动相界面追踪方法及液滴撞击壁面运动机制的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.

24 SHINJO J, UMEMURA A. Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(7): 513 – 532.

~~~~~

(上接第 47 页)

16 陆雄. 单级单吸离心泵后密封环加大量和平衡孔直径最佳值实验研究[J]. 水泵技术, 1998(5): 3 – 9.  
LU Xiong. The study of single-stage single-suction centrifugal pump based on increasing seal ring and balance hole diameter[J]. Pump Technology, 1998(5): 3 – 9. (in Chinese)

17 何玉洁, 周广凤, 潘金秋, 等. 化多机泵轴向力实验[J]. 排灌机械, 2009, 27(2): 108 – 109.  
HE Yujie, ZHOU Guangfeng, PAN Jinqiu, et al. Experiment for axial thrust of multi-stage pump for seawater desalination[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(2): 108 – 109. (in Chinese)

18 唐忻. 离心泵后盖板上压力分布规律的探索[J]. 水轮泵, 1987(2): 30 – 34.  
TANG Xin. The exploration of pressure distribution on centrifugal pump rear shroud[J]. Turbine Pump, 1987(2): 30 – 34. (in Chinese)

19 刘在伦, 董玮, 张楠, 等. 离心泵平衡腔液体压力的计算与验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 54 – 59.  
LIU Zailun, DONG Wei, ZHANG Nan, et al. Calculation and validation of fluid pressure of balance cavity in centrifugal pump [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 54 – 59. (in Chinese)

20 顾永泉. 流体动密封[M]. 北京:石油大学出版社, 1990.

~~~~~

(上接第 232 页)

18 ACEVEDO N C, BRIONES V, BUERA P, et al. Microstructure affects the rate of chemical, physical and color changes during storage of dried apple discs[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(2): 222 – 231.

19 KROKIDA M K, MAROULIS Z B. Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products [J]. Drying Technology, 1999, 17(3): 449 – 466.

20 YAN Z, SOUSA-GALLAGHER M J, OLIVEIRA F A R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(3): 430 – 440.

21 MAYOR L, MOREIRA R, SERENO A M. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(1): 29 – 37.

22 王庆慧, 戴光, 王丹枫. 过热液体爆炸能量及超压分析[J]. 化工机械, 2011, 38(3): 301 – 304.
WANG Q H, DAI G, WANG D F. The analysis of the superheated liquid explosive energy and overpressure[J]. Transactions of the Chemical Machinery, 2011, 38(3): 301 – 304. (in Chinese)

23 胡连营, 张雷. 凝结水闪蒸与闪蒸凝结水[J]. 节能, 2006, 25(1): 58 – 60.

24 余运波. 沸腾液体膨胀蒸汽爆炸模型修正探讨[J]. 湖南安全与防灾, 2011(3): 46 – 47.

25 胡承望. 微元法的应用研究[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2008, 5(3): 142 – 143.