

DOI: 10.7511/jslx20210621004

不同壁面条件下液滴撞击铺展特性的模拟研究

周鑫¹, 马小晶^{*1}, 胡丽娜¹, 刘佳², 张博文¹

(1. 新疆大学 电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 中国原子能科学研究院核工程设计研究所, 北京 102413)

摘要:液滴撞击不同润湿性壁面的传热流动问题在自然界和工业生产中广泛存在。研究采用 CLSVOF 方法, 引入描述壁面润湿特性的动态接触角, 并考虑液滴物性参数随温度的变化, 建立液滴撞壁模型, 模拟研究液滴撞击流动行为, 通过与实验对比验证, 确定模型有效性。在此基础上, 对传热作用下考虑壁面润湿性的液滴撞击问题展开研究, 探讨壁面传热作用对液滴撞击铺展特性的影响。研究表明, 在撞击过程中, 液滴先铺展后逐渐收缩, 与静态接触角模型相比, 采用动态接触角模型所得的液滴流动特性与实验结果更加吻合; 随着接触角增大, 液滴在撞壁初期不易铺展, 随后则易于收缩; 虽然固液传热作用会影响液滴铺展直径, 但不改变液滴的运动趋势。

关键词:CLSVOF 方法; 液滴撞击; 动态接触角; 壁面温度

中图分类号:TK123; O35

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2022)06-0761-07

1 引言

在工业生产中, 液滴撞壁现象十分普遍, 引起了学者广泛关注, 如喷淋冷却、推进剂喷雾燃烧和染料喷涂等。液滴在撞击流动过程中会出现铺展和收缩, 甚至是碎裂和飞溅等复杂的流动现象^[1]。影响液滴运动形态的因素众多, 包括液滴的物性参数^[2]、液滴的形状^[3]、壁面润湿性^[4]、传热温差^[5,6]、壁面形状以及撞击速度^[7,8]等。目前, 国内外学者已采用多种研究方法, 对液滴撞壁这一复杂的自由壁面流动过程展开了大量研究。

为了更清晰地观察液滴撞壁流动铺展这一物理现象, 分析液滴自由表面的流动铺展过程, 沈胜强等^[9]通过实验方法研究了水和乙醇两种液滴撞击高温壁面的流动及蒸发过程; Norouzi 等^[10]通过实验对比了牛顿液滴与非牛顿液滴撞击干燥倾斜壁面的铺展因子, 探究了碰撞角度和液体粘度等对液滴铺展因子的影响。Guo 等^[11]通过实验研究液滴冲击高温圆柱表面的传热流动问题, 探讨了柱面温度等因素对液滴流动行为和沸腾方式的影响。文献^[12,13]分别通过理论分析对液滴撞壁过程中的撞击力进行了研究, 并得出了撞击力的求解公式。

近几年来, 随着 CFD (Computational Fluid Dynamics) 计算方法快速发展, 数值模拟方法已经

成为探究液滴撞壁问题的有效手段之一, 并且取得了大量研究成果。Lin 等^[14,15]基于 N-S 方程和粒子跟踪方法对气泡雾化撞壁过程进行了研究, 分析了气液比等影响因素对雾化液滴在撞壁上沉积的影响。张彬等^[16]基于 VOF (Volume of Fluid) 方法模拟液滴与壁面碰撞过程, 探究了液滴形状对碰撞力的影响; 赵可等^[17]基于 CLSVOF (Coupled Level Set and Volume of Fluid) 方法建立了液氮液滴撞壁模型, 探究了壁面润湿性和温度等对液滴撞壁过程中相变行为的影响。沈学峰等^[18]基于有限元方法, 模拟研究了剪切变稀特性对液滴流动铺展过程的影响; Du 等^[19]采用连续水平建模方法, 模拟研究了粘性液滴的撞壁流动过程, 揭示接触线运动的物理机理, 分析了液体粘度和壁面润湿性等对液滴动态特性的影响。

目前, 学者大多针对单一影响因素展开研究, 对多种因素同时作用下液滴撞壁流动过程的研究相对较少。然而, 工业生产中的液滴撞壁问题通常是多种因素综合作用的结果。鉴于此, 本文采用 CLSVOF 方法, 建立壁面润湿性和传热作用综合影响下液滴撞壁模型, 并与相关实验结果进行对比, 验证模型有效性。在此基础上, 对在传热作用下考虑壁面润湿性的液滴撞壁问题展开了研究, 探讨了壁面润湿性和传热综合作用对液滴流动铺展特性的影响。

2 计算模型和模型验证

2.1 控制方程

本文基于 Fluent 软件平台, 采用 CLSVOF 方

收稿日期: 2021-06-21; 修改稿收到日期: 2021-08-01.

基金项目: 国家自然科学基金(12002296; 11762021); 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01C47); 新疆自治区重大科技专项(2022A01002-2)资助项目.

作者简介: 马小晶^{*}(1983-), 女, 博士, 副教授

(E-mail: maxiaojing1983@xju.edu.cn).

法建立数值仿真模型,将气液两相流体均视作不可压缩流体,流体控制方程包括连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程^[17],即

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

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

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

式中 \mathbf{u} 为速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), T 为温度 (K), P 为压强 (Pa), μ 为动力粘度系数 ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$), ρ 为密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), σ 为表面张力系数 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$), κ 为界面曲率 (m^{-1}), C_p 为定压比热容 ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$), λ 为导热系数 ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$), φ 为距离函数。

为了在相界面处实现流体相之间密度和粘度参数的光滑过渡,在计算流体密度 $\rho(\varphi)$ 和粘度 $\mu(\varphi)$ 时,引入了 Heaviside 函数,Heaviside 函数定义为

$$H(\varphi) = \begin{cases} 1 & (\varphi > +h) \\ 0.5 + \frac{\varphi}{2h} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi\varphi}{h}\right) & (|\varphi| \leq h) \\ 0 & (\varphi < -h) \end{cases} \quad (4)$$

因此,粘度 $\mu(\varphi)$ 和密度 $\rho(\varphi)$ 为

$$\mu(\varphi) = \mu_l(1 - H(\varphi)) + \mu_g H(\varphi) \quad (5)$$

$$\rho(\varphi) = \rho_l(1 - H(\varphi)) + \rho_g H(\varphi) \quad (6)$$

式中 h 为相界面过渡区域宽度的 1/2,本文取为 1 倍的网格单元宽度。

在运算过程中,每次循环计算均需要结合 VOF 相函数 α 和 Level Set 距离函数 φ 对气液两相流界面重新构造,并对 Level Set 距离函数 φ 初始化。CLSVOF 方法通过求解 VOF 相函数 α 和 Level Set 距离函数 φ 的对流输运方程精准捕捉两相流界面。

$$D\alpha/Dt = \partial\alpha/\partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\alpha = 0 \quad (7)$$

$$D\varphi/Dt = \partial\varphi/\partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\varphi = 0 \quad (8)$$

界面法相量 \mathbf{n} 和界面曲率 κ 可以通过 Level Set 距离函数 φ 计算得到,即

$$\mathbf{n} = \nabla\varphi/|\nabla\varphi|, \kappa = \nabla \cdot (\nabla\varphi/|\nabla\varphi|) \quad (9,10)$$

考虑到壁面粘附作用,调整壁面附近单元的表面法向量 \mathbf{n}_s 为

$$\mathbf{n}_s = \mathbf{n}_w \cos\theta + \boldsymbol{\tau}_w \sin\theta \quad (11)$$

式中 \mathbf{n}_w 和 $\boldsymbol{\tau}_w$ 分别为壁面单位法向量和切向量, θ 为接触角。

重新对距离函数 φ 初始化,函数 φ 的值是计算单元中心到相界面的最小距离,函数 φ 的符号可以

由 VOF 相函数 α 来确定,即

$$S_\varphi = \text{sign}(0.5 - \alpha) \quad (12)$$

式中 $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数。

2.2 模型设置及网格无关性验证

物理模型可以简化为二维平面模型^[17],设置两相流体均为不可压缩牛顿流体。计算域为 $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的长方形区域,顶部设置为压力出口边界,其他三个边界设置为固体壁面。压力与速度耦合采用 PISO 方法,求解压力采用 PRESTO 方法,对 Level Set 方程求解采用 QUICK 格式,动量和能量方程求解采用二阶迎风格式。

液滴在撞击前受外力作用会产生形变,其几何形状较为复杂,本文在研究过程中仅考虑初始液滴为球形。初始时刻液滴底部与壁面相切,此时可以将液滴的初始速度 u_0 看作液滴的撞击速度 u_c ,即 $u_c = u_0$ 。本文分别采用数量为 $80 \times 160, 100 \times 200, 125 \times 250$ 和 160×320 的四边形结构化网格,模拟液滴撞击等温亲水壁面,验证网格无关性。定义无量纲铺展直径 β 、无量纲接触直径 β_1 和无量纲时间 t_1 为

$$\beta = d/d_0, \beta_1 = d_1/d_0, t_1 = tu/d_0 \quad (13 \sim 15)$$

式中 d_0 为液滴初始直径, d 为液滴铺展直径, d_1 为液滴与壁面接触直径,如图 1 所示。

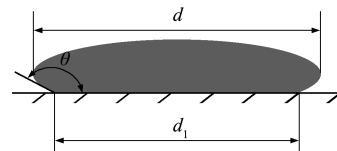


图 1 液滴铺展直径、接触直径和接触角

Fig. 1 Droplet spreading diameter, contact diameter and contact angle

图 2 为四种网格密度下,液滴无量纲铺展直径随时间的变化曲线。可以看出,当网格密度达到 125×250 时,继续增加网格密度对计算结果的影响可以近似忽略,即计算结果不再与网格密度有关。因此,研究后续均采用 125×250 的结构化网格。

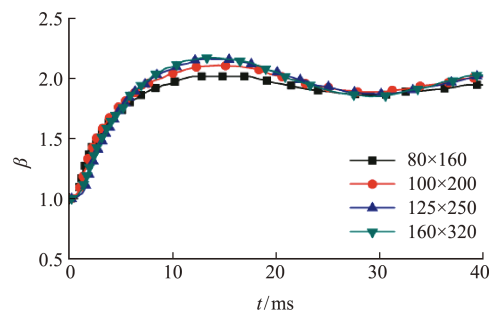


图 2 不同网格密度下, β 随时间变化曲线

Fig. 2 Curves of β under different mesh densities varying with time

2.3 动态接触角模型

壁面润湿性是影响液滴撞壁流动行为的主要因素之一。接触角在模拟研究中常用于描述材料壁面的润湿特性。然而,在撞击过程中接触角随着液滴的流动铺展变化而改变,采用静态接触角求解会导致模拟结果出现较大偏差。因此,本文通过添加UDF(User Define Function)引入Hoffman动态接触角计算模型^[20],即根据液滴与壁面之间的静态接触角 θ_c ,可得动态接触角 θ_d 为

$$\theta_d = F(C_a + F^{-1}(\theta_c)) \quad (16)$$

$$F(x) = \cos^{-1} \left\{ 1 - 2 \tanh \left[\frac{5.16^{1/0.706} x}{1 + 1.32 x^{0.99}} \right]^{0.706} \right\} \quad (17)$$

式中 C_a 为毛细数。

2.4 模型验证

2.4.1 动态接触角模型验证

为了验证本文引入 θ_d 建立模型的有效性,模拟研究了水滴撞击等温亲水壁面的铺展过程, $d_0 = 2.64 \text{ mm}$, $u_c = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并与周龙玉等^[21]液滴撞击等温亲水壁面的实验结果进行对比。液滴物性参数和尺寸均与周龙玉等^[21]的实验参数一致,密度 $\rho = 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,表面张力系数 $\sigma = 0.073 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,粘度 $\mu = 0.001003 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$,接触角 $\theta_c = 40^\circ$ 。

图3为模拟液滴撞击等温亲水壁面所得 β 随时间变化曲线,为了分析对比,图3还给出了采用 θ_c 的模拟结果和文献^[21]的实验结果。可以看出,采用 θ_c 和 θ_d 模拟所得的 β 随时间的变化规律与实验结果基本相同,在撞击过程中先增大后减小,即液滴先铺展后收缩。在撞击初期,液滴沿着壁面向两侧快速铺展, β 迅速增大,并达到最大值 β_{\max} ,其所对应的时间为 t_{\max} ;随后,液滴在自身表面张力的作用下逐渐收缩, β 逐渐减小,并达到最小值 β_{\min} ,其对应的时间为 t_{\min} ;随着液滴撞击能量不断耗散,液滴流动形态逐渐趋于稳定, β 变化较小。

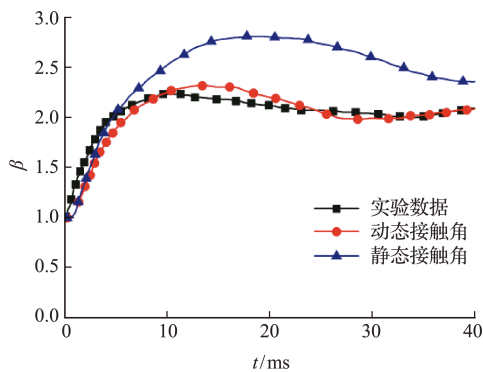


图3 液滴撞击亲水壁面无量纲铺展直径随时间变化曲线
Fig. 3 Curves of dimensionless spreading diameter of droplets impinging hydrophilic wall varying with time

还可以看出,采用 θ_c 模拟液滴撞击等温亲水壁面所得 β 和 t_{\max} 均远大于实验结果。与采用 θ_d 模拟所得结果相比,采用 θ_d 时, β 随时间的变化曲线与实验结果几乎吻合,验证了本文采用 θ_d 建立模型的有效性。为了进一步说明采用 θ_c 和 θ_d 计算模拟所得结果与实验结果的差异,本文对 β_{\max} 和 t_{\max} 与实验数据进行了误差对比,列入表1。

表1 实验数据与模拟数据误差对比

Tab. 1 Error comparison between experimental data and simulated data

数据来源	β_{\max}	t_{\max}/ms	$\beta_{t=40}$
实验结果	2.23	11	2.1
θ_d	2.31	12	2.08
相对误差/%	3.6	9.1	0.95
θ_c	2.81	16	2.36
相对误差/%	26.01	45.5	12.4

由表1可知,相比于采用 θ_c 的模拟结果,采用 θ_d 获得的模拟结果更接近实验结果,与实验结果的相对误差较小。表1还给出了 $t = 40 \text{ ms}$ 时 $\beta_{t=40}$ 的数据。当 $t = 40 \text{ ms}$ 时,采用 θ_d 模拟所得液滴趋于稳定,与实验结果一致,但采用 θ_c 模拟所得液滴还处于收缩过程中。

2.4.2 液滴撞击高温亲水壁面的验证

为了进一步验证壁面润湿性和传热作用综合影响下液滴撞壁数值模型的有效性,本文还模拟研究了液滴撞击高温亲水壁面的流动铺展过程,并与李婧文等^[22]的液滴撞击高温壁面实验结果进行了对比。液滴物性参数与2.4.1节一致,液滴温度 $T_d = 298 \text{ K}$, $d_0 = 2.7 \text{ mm}$, $u_c = 1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,壁面温度 $T_w = 373 \text{ K}$,计算动态接触角时, $\theta_c = 70^\circ$ 。图4为液滴撞击高温亲水壁面后形态变化及温度场分布。

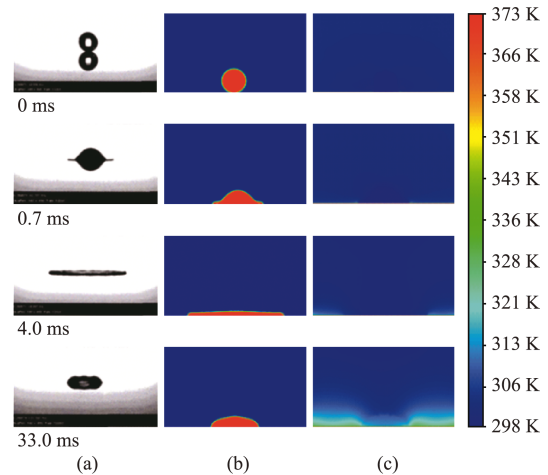


图4 液滴撞击高温亲水壁面形态变化及温度场分布
Fig. 4 Morphology change and temperature field distribution of droplet impacting high temperature hydrophilic wall

图5为模拟液滴撞击高温壁面所得 β_1 随时间变化曲线。为了分析对比,图5还给出了采用 θ_c 模拟所得结果和文献[22]的实验结果。可以看出,采用 θ_c 模拟时, β_1 与实验结果存在较大差异。而采用 θ_d 模拟时,虽然最大铺展对应的时间 $t_{1\max}$ 和 $\beta_{1\max}$ 略小于实验结果,但 β_1 随时间 t 的变化曲线与实验结果较为吻合,验证了在壁面润湿性和传热作用综合影响下液滴撞壁模型的有效性。

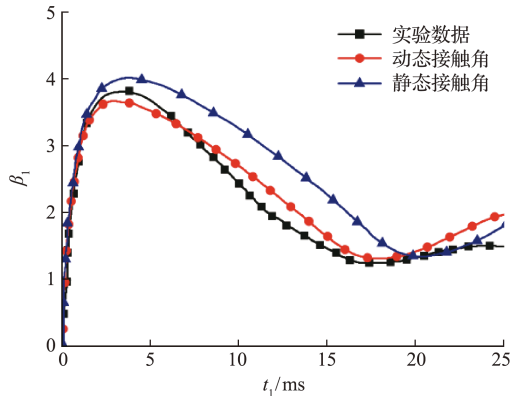


图5 液滴撞击高温壁面无量纲接触直径随时间变化曲线
Fig. 5 Curves of dimensionless contact diameter of droplets impinging high temperature wall varying with time

3 计算结果与分析

3.1 壁面润湿性对液滴撞击铺展过程的影响

随着新兴技术的快速发展,各种不同润湿性材料已经广泛应用于工业生产中,其中超亲水性和超疏水性材料更是引起了研究学者的广泛关注。为了研究壁面润湿性对液滴铺展过程的影响,本文模拟研究了液滴撞击不同润湿性等温壁面的铺展过程, $d_0 = 2.7 \text{ mm}$, $u_c = 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,计算动态接触角时, θ_c 分别取为 $3^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 110^\circ$ 和 155° 。图6为液滴撞击不同润湿性等温壁面时 β_1 随时间变化曲线。

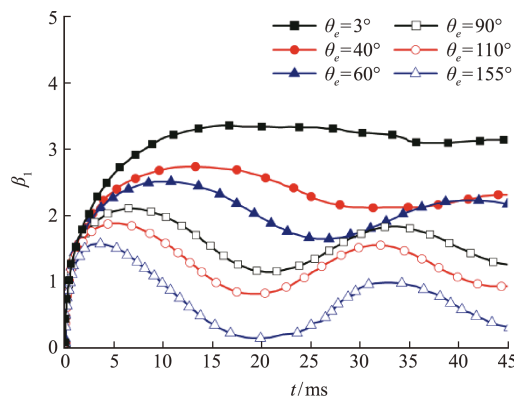


图6 液滴撞击不同润湿性壁面无量纲接触直径随时间变化曲线
Fig. 6 Curves of dimensionless contact diameter of droplets impinging different wettability walls varying with time

可以看出,液滴撞击流动过程与壁面润湿性密切相关。在初期铺展阶段,随着壁面接触角的增加, $\beta_{1\max}$ 减小, $t_{1\max}$ 也相应减小,铺展过程越短;在之后的收缩阶段,从 θ_c 为 $40^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 和 110° 的四条曲线可看出,随着壁面接触角增加, $\beta_{1\min}$ 减小, $t_{1\min}$ 也相应减小,在 $\theta_c \geq 110^\circ$ 时,液滴发生弹跳现象, $\beta_{1\min} < 1$ 。当壁面为超亲水($\theta_c = 3^\circ$)时,液滴在达到最大铺展后, $\beta_{1\max}$ 保持不变,即液滴不发生收缩;对于超疏水壁面($\theta_c = 155^\circ$),液滴在收缩后发生明显的弹跳现象,但向上弹跳的过程中未与壁面完全脱离,在达到一定高度后回落,即重新铺展。

由此可见,不同壁面润湿条件下液滴流动过程有所不同。液滴的撞击流动过程主要受惯性力、粘性力、表面张力以及壁面黏附作用的影响。其中,惯性力会使液滴保持当前的流动状态,粘性力则对液滴流动起到一定的阻碍作用,表面张力会使液滴在流动过程中始终趋于表面积最小的状态,而壁面黏附作用则表现为黏附作用越强,液滴越易铺展。由此可知,在液滴撞击过程中,液滴受惯性力作用逐渐铺展,壁面亲水性越强表现为壁面黏附作用越强,液滴越容易铺展,反之,液滴不易铺展。随后,由于液滴表面张力和粘性力的影响,液滴在达到最大铺展后,开始逐渐收缩。在收缩过程中,壁面疏水性越强,壁面黏附作用越弱,此时表面张力起主导作用,液滴更易于收缩,甚至产生弹跳现象。

3.2 传热作用对液滴撞击铺展过程的影响

研究表明液滴与壁面之间的温差会直接影响二者之间的传热作用,从而对液滴撞击流动铺展过程产生一定的影响^[5,6]。为了探讨在壁面润湿性和固液传热综合作用下液滴的撞击流动行为,本文模拟研究了液滴分别撞击温度为 313 K 和 373 K 壁面的流动过程, $T_d = 298 \text{ K}$, $d_0 = 2.7 \text{ mm}$, $u_c = 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在模拟过程中,由于固液传热作用,液滴的温度逐渐升高,考虑到温度对流体物性参数的影响,本文通过添加UDF,动态调整液滴的粘度、表面张力系数和比热容。图7给出了液滴撞击不同温度壁面 β_1 随时间变化曲线。

可以看出,虽然壁面润湿性不同,但固液传热作用对液滴撞击铺展过程的影响是相似的。随着壁面温度升高,液滴撞壁后, $\beta_{1\max}$ 均略有增大。壁面与液滴之间的固液传热作用主要是通过改变液滴的物性参数来影响液滴撞击流动过程。液滴在撞击流动过程中由于固液传热作用,温度逐渐升高,粘性力和表面张力作用降低,液滴更易于铺展。

在收缩过程中,粘性力阻碍液滴流动过程,而表面张力促进液滴收缩过程,两者表现的作用相反。因此,粘性力和表面张力作用同时对液滴收缩过程的影响不明显。

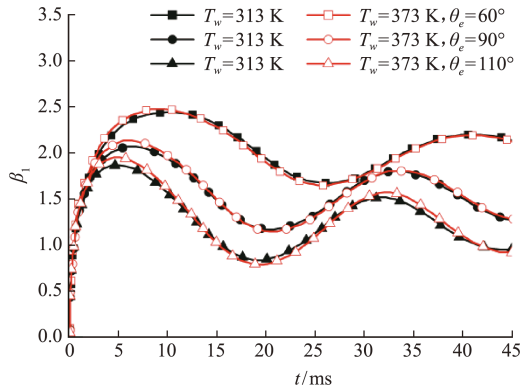


图7 液滴撞击不同温度壁面无量纲接触直径随时间变化曲线
Fig. 7 Curves of dimensionless contact diameter of droplets impinging different temperature walls varying with time

3.3 传热作用对不同物性液滴撞击铺展过程的影响

本文还模拟研究了传热作用下不同物性液滴的撞击流动过程,选取水和乙醇两种液体, $T_d = 298\text{ K}$, $d_0 = 2.7\text{ mm}$, $u_c = 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,壁面温度为 313 K 和 373 K ,计算动态接触角时, $\theta_c = 60^\circ$ 。图8为乙醇液滴的撞击高温亲水壁面形态变化和温度场分布, $T_w = 373\text{ K}$ 。可以看出,在模拟结束时($t = 45\text{ ms}$),乙醇液滴的温度有所上升,但并未达到其沸点($T_f = 351.15\text{ K}$),基于此,本文在模拟研究过程中忽略了沸腾和蒸发等因素对计算结果的影响。

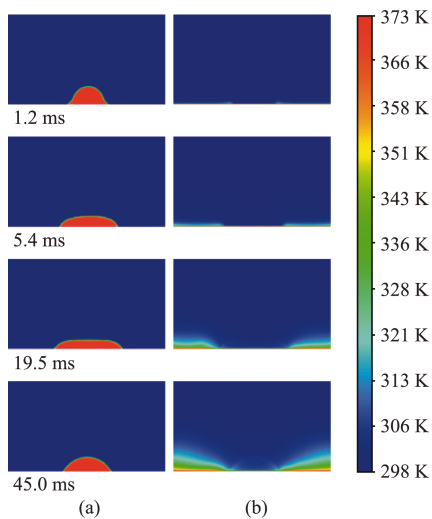


图8 乙醇液滴撞击高温亲水壁面形态变化及温度场分布
Fig. 8 Morphological changes and temperature field distribution of ethanol droplet impacting high temperature hydrophilic wall

图9为水和乙醇两种液滴分别撞击不同温度壁面 β_1 随时间变化曲线。可以看出,随着壁面温度的升高,对于水和乙醇两种液滴, $\beta_{1\text{max}}$ 均有所增加,但二者的增幅具有较大差异。其中,水滴的 $\beta_{1\text{max}}$ 从 2.44 增至 2.47 ,即水滴的 $\beta_{1\text{max}}$ 增大 1.2% ,而乙醇液滴的 $\beta_{1\text{max}}$ 则从 2.54 增至 2.73 ,即乙醇液滴的 $\beta_{1\text{max}}$ 增大 7.5% ,这是因为乙醇的比热容小于水的比热容,且乙醇液滴更易铺展,受热面更大,在相同模拟时间内,乙醇液滴上升的温度大于水滴上升的温度。这也说明,壁面与液滴之间温差越大,固液两相之间的传热作用越强,液滴温度上升越快,液滴的物性参数相对变化量更大,壁面与液滴之间的固液传热作用对液滴撞击流动过程的影响更加显著。

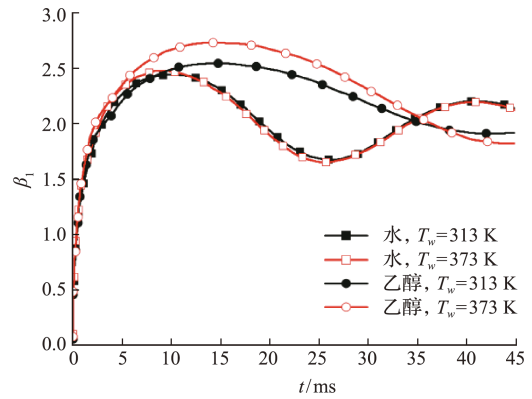


图9 水和乙醇液滴撞击不同温度壁面无量纲接触直径随时间变化曲线
Fig. 9 Dimensionless contact diameter curve of water and ethanol droplets impinging on different temperature walls varying with time

4 结论

本文基于 CLSVOF 方法,建立了考虑壁面润湿性和固液传热综合作用的液滴撞壁流动数值模型,模拟研究液滴撞壁流动行为,分析了壁面特性对液滴流动铺展行为的影响,得出以下结论。

- (1) 采用静态接触角模拟液滴撞壁获得的液滴流动铺展特性与实验结果存在较大差异,采用动态接触角模拟所得结果与实验结果较为吻合。
- (2) 通过模拟研究液滴撞击不同润湿性壁面的流动行为,发现接触角越大,液滴在铺展阶段的铺展直径越小,液滴不易铺展;在之后的收缩阶段,液滴越易收缩,在超疏水壁面上出现了明显的弹跳现象;在超亲水壁面上,液滴在达到最大铺展后没有出现收缩现象。
- (3) 模拟研究了壁面润湿性和固液传热综合作用对液滴撞壁流动行为的影响,在相同壁面润湿

性条件下,提高壁面温度,固液两相之间的传热作用越强,液滴越易于铺展;对不同润湿性壁面,固液传热作用对液滴撞击铺展过程的影响是相似的。

(4) 对不同物性液滴的撞壁流动过程进行模拟研究,结果表明,壁面与液滴的温差传热作用对乙醇液滴撞击铺展行为的影响大于对水滴的影响。由此说明,壁面与液滴的温差传热作用对不同物性参数液滴撞击铺展行为的影响大小不同;固液传热作用会改变液滴的粘度和表面张力等物性参数,从而影响液滴撞壁流动铺展行为。

参考文献(References):

- [1] 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 Dong-wei, NING Zhi, LÜ Ming, et al. Study on the rebound and breakup of the droplet after impacting on the super-hydrophobic wall [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(1): 107-113. (in Chinese))
- [2] 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 Xiao-hua, ZHAO Yi-ming, WANG Kai-min, et al. Research on effect of viscosity force and surface tension on dynamic characteristics of droplet impact on super-hydrophobic tube [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(10): 1-7. (in Chinese))
- [3] 涂德裕,潘庆民,童宝宏.椭球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))
- [4] 孔庆盼,纪献兵,尤天旸,等.液滴碰撞亲-疏水交界面的动力学特征[J].原子能科学技术,2020,54(10):1801-1808. (KONG Qing-pan, JI Xian-bing, YOU Tian-ya, et al. Dynamic characteristic of droplet collision at hydrophilic-hydrophobic interface [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(10): 1801-1808. (in Chinese))
- [5] 刘红,司超,赵传奇,等.乙醇水溶液单液滴碰撞热壁面的动态演化特性[J].化工进展,2021,40(1):74-81. (LIU Hong, SI Chao, ZHAO Chuan-qi, et al. Dynamic evolution characteristics of an ethanol-water droplet on a heated surface [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(1): 74-81. (in Chinese))
- [6] 荣松,沈世全,王天友,等.液滴撞击加热壁面雾化弹起模式及驻留时间[J].物理学报,2019,68(15):260-268. (RONG Song, SHEN Shi-quan, WANG Tian-you, et al. Bouncing-with-spray mode and residence time of droplet impact on heated surfaces [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(15): 260-268. (in Chinese))
- [7] 唐鹏博,王关晴,王路,等.单液滴正碰球面动态行为特性实验研究[J].物理学报,2020,69(2):184-194. (TANG Peng-bo, WANG Guan-qing, WANG Lu, et al. Experimental investigation on dynamic behavior of single droplet impacting normally on dry sphere [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(2): 184-194. (in Chinese))
- [8] 陈博文,王博,田瑞峰,等.液滴撞击干燥倾斜壁面铺展实验研究[J].核动力工程,2020,41(4):64-69. (CHEN Bo-wen, WANG Bo, TIAN Rui-feng, et al. Experimental study on spread of droplet impacting on dry inclined wall [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2020, 41(4): 64-69. (in Chinese))
- [9] 沈胜强,张洁珊,梁刚涛.液滴撞击加热壁面传热实验研究[J].物理学报,2015,64(13):270-276. (SHEN Sheng-qiang, ZHANG Jie-shan, LIANG Gang-tao. Experimental study of heat transfer from droplet impact on a heated surface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(13): 270-276. (in Chinese))
- [10] Norouzi M, Sheykhan M K, Shahmardan M M, et al. Experimental investigation of spreading and receding behaviors of newtonian and viscoelastic droplet impacts on inclined dry surfaces [J]. *Meccanica*, 2021, 56(1): 125-145.
- [11] Guo C F, Sun Y J, Zhao D Y. Experimental study of droplet impact on superheated cylindrical surfaces [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 121: 110263.
- [12] Philippi J, Lagrée P Y, Antkowiak A. Drop impact on a solid surface: Short-time self-similarity [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 795: 96-135.
- [13] Gordillo L, Sun T P, Cheng X. Dynamics of drop impact on solid surfaces: Evolution of impact force and self-similar spreading [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 840: 190-214.
- [14] Lin J Z, Qian L J, Xiong H B, et al. Effects of operating conditions on droplet deposition onto surface of atomization impinging spray [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203(12): 1733-1740.
- [15] Lin J Z, Qian L J, Xiong H B. Relationship between deposition properties and operating parameters for droplet onto surface in the atomization impinging

- spray [J]. *Powder Technology*, 2009, **191**(3): 340-348.
- [16] 张彬,钟骏薇,翟亚鑫,等.液滴与壁面碰撞力的实验和数值研究[J].*工程热物理学报*,2018,**39**(12): 2687-2691. (ZHANG Bin, ZHONG Jun-wei, ZHAI Ya-xin, et al. Impact force of a drop colliding on horizontal plate: Experiment and simulation [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, **39**(12): 2687-2691. (in Chinese))
- [17] 赵可,余阳梓,蒋彦龙,等.液氮滴撞击壁面相变行为的数值研究[J].*物理学报*,2019,**68**(24):201-215. (ZHAO Ke, SHE Yang-zi, JIANG Yan-long, et al. Numerical study on phase change behavior of liquid nitrogen droplets impinging on solid surface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, **68**(24): 201-215. (in Chinese))
- [18] 沈学峰,曹宇,王军锋,等.剪切变稀液滴撞击不同浸润性壁面的数值模拟研究[J].*物理学报*,2020,**69**(6): 158-167. (SHEN Xue-feng, CAO Yu, WANG Jun-feng, et al. Numerical simulation of shear-thinning droplet impact on surfaces with different wettability [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, **69**(6): 158-167. (in Chinese))
- [19] Du J Y, Zhang Y Y, Min Q. Numerical investigations of the spreading and retraction dynamics of viscous droplets impact on solid surfaces [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, **609**: 125649.
- [20] Kistle S F. *Hydrodynamics of Wetting* [M]. CRC Press, 1993.
- [21] 周龙玉,田瑞峰.液滴碰撞实验与数值模拟研究[J].*原子能科学技术*, 2014, **48**(S1): 314-319. (ZHOU Long-yu, TIAN Rui-feng. Experimental and numerical simulation study on droplet impact [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, **48**(S1): 314-319. (in Chinese))
- [22] 李婧文,吴兴辉,段远源,等.水-乙醇液滴撞击加热面过程的可视化观测[J].*工程热物理学报*,2019,**40**(10):2220-2225. (LI Jing-wen, WU Xing-hui, DUAN Yuan-yuan, et al. Visual observation of droplets of water-ethanol mixture impinging on heating surface [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, **40**(10): 2220-2225. (in Chinese))

Simulation study on spreading characteristics of droplet impinging under different wall conditions

ZHOU Xin¹, MA Xiao-jing^{*1}, HU Li-na¹, LIU Jia², ZHANG Bo-wen¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Institute of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The heat transfer and flow problems of droplet impinging walls of different wettability widely exist in nature and industrial production. The research adopts the CLSVOF method with dynamic contact angle, and considers the change of droplet physical parameters with temperature. The model of droplet impinging on the wall is established to simulate the process of droplet impinging and flowing, and the validity of the model is verified by comparing with the experimental results. On this basis, the study on the impinging of droplet considering the wettability of the wall under the effect of heat transfer is also carried out, and the effect of heat transfer on spreading characteristics of droplet is investigated. The research shows that during the impinging process, the droplet spreads first and then gradually shrinks. Compared with the results of the static contact angle model, the spreading characteristics of droplet obtained by the dynamic contact angle model are more consistent with the experimental results. As the contact angle increases, it is difficult for the droplet to spread at the beginning of impinging and then easily shrink. Although the heat transfer affects the droplet spreading diameter, it does not change the spreading trend of droplet.

Key words: CLSVOF method; droplet impinging; dynamic contact angle; wall temperature

引用本文/Cite this paper:

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.