

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20181168

圆柱壁面上液滴凝固相变对其运动行为的影响

周鑫¹, 邓乐东¹, 王宏^{1,2}, 朱恂^{1,2}, 陈蓉^{1,2}, 廖强^{1,2}, 丁玉栋^{1,2}(¹ 重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400030; ² 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 采用CLSVOF耦合焓-多孔介质方法对单液滴撞击低温光滑圆柱壁面的现象进行数值模拟研究, 揭示了壁面温度、壁面浸润性和液滴撞击速度等因素对液滴撞击低温光滑圆形壁面后动力学行为及相变特性的影响, 研究中主要关注两个重要参数的变化规律: 液膜高度变化和液滴对壁面的润湿特性。研究表明: 提高壁面疏水性可有效减小液滴碰撞圆柱的铺展润湿面积, 从而减小冻结面积, 降低结冰的危害程度; 由于圆柱壁面的曲率作用, 液滴撞击疏水圆柱壁面会出现液膜断裂, 但在极低温度下, 可抑制液膜在圆形壁面上的分裂, 导致液膜在壁面上的铺展面积有所增加, 防结冰性能下降。

关键词: 液滴撞击; 多相流; 相变; 数值模拟; 圆柱壁面

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2019) 03-0883-09

Effect of cooled cylindrical surface on droplet dynamic behavior

ZHOU Xin¹, DENG Ledong¹, WANG Hong^{1,2}, ZHU Xun^{1,2}, CHEN Rong^{1,2}, LIAO Qiang^{1,2}, DING Yudong^{1,2}

(¹ Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing 400030, China; ² Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies & Systems, MOE, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The prevention and control of ice accumulation has important applications in aviation, building construction and power grid construction. A deep physical insight of the ice forming on the cylindrical surface would give an instruction to the ice-removal strategies for energy conversion devices. Simulations were performed using CLSVOF (coupled level-set and volume of fluid) to track the air-water interface and an enthalpy-porosity method to capture the phase transition. The effects of learning behavior and phase transition characteristics are mainly concerned with the variation of two important parameters: the change of liquid film height and the wetting characteristics of droplets on the wall. The results showed that improve the wall hydrophobicity performance, which could effectively reduce the spreading wetted area of the droplet impact cylinder, thereby reducing the frozen area and decreasing the damage degree of icing. Due to the curvature of the cylinder, the liquid film breaks when the droplet hits the hydrophobic cylindrical wall. However, at extremely low temperature, it can inhibit the splitting of the liquid film on the circular wall surface, resulting in an increase in the spreading area of the liquid film on the wall surface, and the icing phenomenon becomes more serious.

Key words: droplet impact; multiphase flow; phase change; numerical simulation; cylindrical surface

收稿日期: 2018-10-09 修回日期: 2018-12-19

通信作者: 王宏(1978—), 男, 博士, 教授, hongwang@cqu.edu.cn

第一作者: 周鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 1525435144@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676022); 中央高校基本科研业务经费项目(2018CDXYDL0001)

引用本文: 周鑫, 邓乐东, 王宏, 朱恂, 陈蓉, 廖强, 丁玉栋. 圆柱壁面上液滴凝固相变对其运动行为的影响[J]. 化工学报, 2019, 70(3): 883–891

Citation: ZHOU Xin, DENG Ledong, WANG Hong, ZHU Xun, CHEN Rong, LIAO Qiang, DING Yudong. Effect of cooled cylindrical surface on droplet dynamic behavior[J]. CIESC Journal, 2019, 70(3): 883–891

引 言

由于我国独特的地形与气候,输电线结冰现象在我国尤为严重,该现象的发生造成很多电力系统事故,严重影响了我国电力系统发展及人们正常的生产生活^[1-3]。输电线结冰过程主要包含液滴撞击固体壁面和低温壁面上液滴相变两种物理现象。液滴撞击输电导线过程中的运动特性、固-液接触面积变化、导线上的残留液体量、相变过程中的液滴运动特性,都会对输电导线结冰现象产生重要影响^[4]。

对于液滴撞击固体表面,诸多学者已开展相关研究^[5-8],发现液滴撞击固体壁面后的运动行为受到很多因素影响,例如壁面形状^[9-10]、壁面浸润性^[11]、撞击速度^[12]、液滴工质^[13]等。在低温环境中,由于液滴与撞击壁面换热,当液体内部温度低于其相变温度时,液体将由液相转变为固相。1974年Flemings^[14]对液体凝固相变现象首次做了较为系统的总结与研究,详细讨论了相变过程中晶体的生长方式、晶体的结构形态、晶体的分布。在实验方面,Schiaffino等^[15]研究了金属熔融液滴以低Weber数(We)撞击低温固体表面后的沉积和相变。Jung等^[16]研究了壁面上过冷液滴的结冰机理,讨论了壁面特性对结冰现象的影响,液滴结冰过程中结晶机理,并对壁面的疏冰性能做了研究。在模拟方面,Alavi等^[17]使用VOF耦合焓变方法研究了液滴内凝固核心直径、撞击速度、温度对半熔融液滴撞击低温壁面运动和相变换热的影响。Yao等^[18]使用OpenFOAM开源软件模拟了液滴撞击水平和倾斜低温固体壁面后液滴的相变及运动特性,得到了液滴运动形态和Weber数、Ohnesorge数(Oh)的分布关系图,实验结果与模拟结果吻合较好。冷梦尧等^[19]使用CLSVOF耦合焓变方法研究了液滴撞击不同浸润性低温壁面后的相变及运动特性,结果表明提高壁面的疏水性能,可以有效减少液滴与低温壁面的接触时间和接触面积,起到有效延缓液滴结冰时间的效果。

对于液滴撞击壁面,学者们主要关注液滴撞击固体壁面后的运动特性^[20-22],而对液滴撞击导线壁面后滞留特性和接触面积变化研究较少;对于液滴撞击低温壁面,学者们主要关注液滴撞击低温平面后的运动及相变特性^[23-24],而对液滴撞击低温圆形曲面后相变特性对润湿特性和滞留特性的影响研

究较少,同时对液滴撞击极低温度壁面的关注较少^[25-26]。因此,本文在前人工作的基础上,研究了液滴撞击低温光滑圆形壁面后相变特性及运动特性,为表面结冰的界面现象以及输电线、制冷行业的防冰/除冰机理研究提供参考。

1 数学模型

1.1 CLSVOF模型介绍

本文采用CLSVOF (couple level-set and volume of fluid)^[27]方法对液滴撞击低温圆柱壁面进行数值模拟。该方法具有计算过程质量守恒、界面曲率和密度的光顺性好的优点,能够精确捕捉两相流界面,如今已被广泛采用。在CLSVOF方法中,将两相流的控制方程写成统一形式。

对于不可压缩流体,其连续性方程和动量方程如式(1)、式(2)所示。

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

$$\frac{\rho \partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla \cdot \mathbf{p} + \nabla \cdot \mu [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T] - \sigma \kappa \delta(\varphi) \nabla \varphi + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

其中, κ 是界面曲率,通过式(3)得到

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \quad (3)$$

$$\delta(\varphi) = \begin{cases} \frac{1 + \cos \pi \varphi / a}{2a} & |\varphi| < a \\ 0 & |\varphi| > a \end{cases} \quad (4)$$

其中, $a=1.5h$, h 是最小网格尺寸,界面法向量 $\mathbf{n}$ 计算如下

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \quad (5)$$

在追踪移动相界面时,由于数值耗散导致界面轮廓总是变得模糊以及振荡,因此有必要在每一次时间步迭代后进行界面重构,在CLSVOF方法中,同时使用了VOF函数和LS函数,VOF函数能很好地保证物理量的守恒,但是无法精确估算界面的法向量、曲率。LS函数是一个距离函数,可以精确计算界面曲率,但是质量不守恒,通过耦合两种函数,使得CLSVOF同时具有以上两者的优点。

1.2 凝固-融化模型

焓-多孔介质方法的凝固相变模型是由Voller等^[28]在1987年提出,该方法通过计算流体焓值,将控制单元内流体的焓值和流体分数对应,通过不同焓值下对应的流体分数表征控制单元内物质的相变特性。通过能量方程可以得到计算域内流体在

各控制单元内的温度。描述凝固-融化相变问题的能量方程表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S' \quad (6)$$

式中, H 表示控制单元内物质发生相变过程中的总焓值, $\text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$; k 为流体热导率; S' 为能量方程源项。在整个相变过程中, 物质具有的总焓值发生变化, 总焓值的变化由显热焓和潜热焓两部分组成。相变过程中控制单元内物质总焓值计算表达式为

$$H = h + \Delta H \quad (7)$$

式中, h 表示控制单元内物质发生相变过程中的显热焓值; ΔH 表示控制单元内物质发生相变过程中的潜热焓值。

显热焓 h 和潜热焓 ΔH 计算表达式分别如下

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (8)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (9)$$

其中, 在显热焓 h 计算过程中, 显热焓 h 由温度变化计算得到, h_{ref} 为参考焓值, T_{ref} 为参考温度, c_p 为比定压热容, T 为物质当前温度。在潜热焓 ΔH 计算过程中, 潜热焓 ΔH 由控制单元内流体分数 γ 变化计算得到, 而控制单元内流体分数 γ 变化通过物质温度计算得到, 计算表达式为

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < T_{\text{solidus}} \\ \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} & T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \\ 1 & T > T_{\text{liquidus}} \end{cases} \quad (10)$$

对于纯物质相变的模拟(本文采用情况), 有 $T_{\text{liquidus}} = T_{\text{solidus}} = T'$, 则控制单元内流体分数 γ 计算表达式简化为

$$\gamma = \begin{cases} 0 & T < T' \\ 1 & T > T' \end{cases} \quad (11)$$

在焓-多孔方法中, 可以通过添加源项的方式对基本流体动量方程进行修改, 起到反映固/液体不同运动状态的效果。动量方程源项的表达式为

$$S' = \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} A_{\text{mush}} (\mathbf{v} - \mathbf{v}_p) \quad (12)$$

式中, γ 为控制单元内流体分数; $\varepsilon = 0.001$ 可以防止分母为零时分数表达式失去意义, 无实际物理意义; A_{mush} 为糊状区常数; $\mathbf{v}_p$ 为固体速度。

2 计算模型及验证

对于液滴撞击圆柱壁面的现象, Liang 等^[29]对比了三维模型与二维模型的区别, 结果表明, 二维模型也可以精确地捕捉液滴撞击圆柱壁面的现象, 如二次液滴的生成。本文重点关注液滴在低温圆柱壁面上相变过程对液膜铺展特性和滞留特性的影响, 二维模型相比于三维模型, 既能反映液膜在圆柱壁面铺展特性和润湿特性, 又能减少计算量, 因此本文采用二维模型进行模拟。本文模拟区域建立如图 1 所示的形状, 即空心圆形。采用 Fluent 软件模拟, 计算工质为水和空气, 空气相为主相, 水为第 2 相, 液滴直径 2.2 mm, 初始时刻空气和液滴温度均为 15.15°C, 圆柱直径 4.4 mm, 壁面接触角为 67°, 圆柱温度为 -20°C。计算域中圆形壁面处采用无滑移壁面(wall)流动边界条件, 通过设置壁面静态接触角大小, 反映壁面的亲疏水特性; 为保证控制域中的低速运动流体在其他边界上可以自由流入/流出计算域, 除壁面外其他边界采用压力入口(pressure-inlet)流动边界条件。

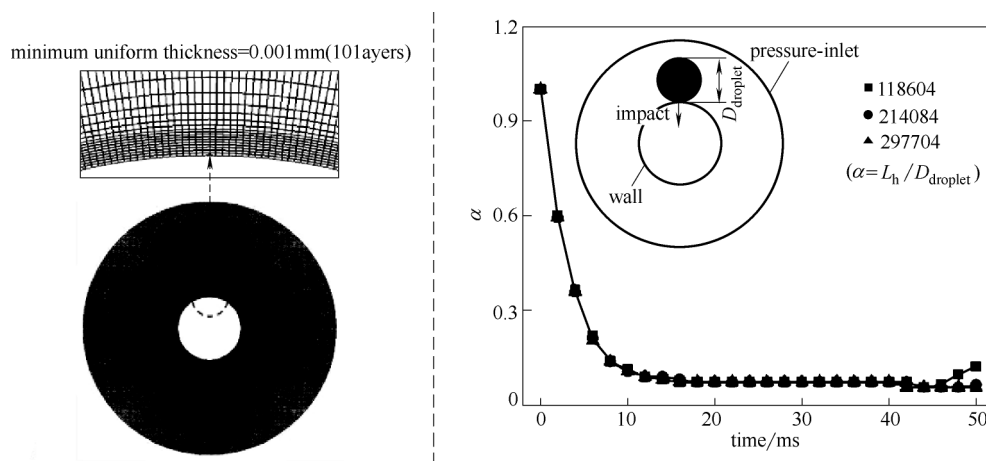


图1 计算域的网格划分方法及网格无关性验证

Fig.1 Computational solution domain and mesh independence test

图 1 为在计算域内不同网格数量下模拟液滴撞击低温光滑圆形壁面后液膜高度系数 α 的变化。通过对比发现, 118604 个网格计算域得到的液膜高度随时间变化相较于 214084 个和 297704 个网格的变化曲线振荡较大, 20 万个和 30 万个网格计算域得到的液膜高度随时间变化趋势相似, 且数值相近。考虑到模拟结果的精确性和模拟的经济性, 最终确定液滴撞击圆柱模型网格数量 21 万个, 能够精确地捕捉到气液自由界面以及相界面的移动变化。计算中采用速度压力耦合算法(PISO), 气液界面重构采用 geo-reconstruct 方法, 动量项采用二阶迎风格式, Level-set 函数采用一阶迎风格式。

为验证模型的正确性, 模拟了单液滴撞击过冷壁面并与实验结果对比。液滴直径 2.93 mm, 撞击速度 0.95 m/s, 液滴温度 9℃, 壁面接触角 160°, 壁面温度 T_s 为 -28.6℃。图 2 为液滴撞击低温超疏水壁面 20 ms 内模拟和实验形态对比结果, 通过对比发现, 模拟和实验中的液滴具有相似的运动特性, 证明本文采用的模型可行。计算采用了接触角为 67°、105°、135° 典型的浸润性表面, 壁面温度为 0、-10、-30、-50℃, 撞击速度 0.5、1.2、2.2 m/s 等不同工况进行研究。

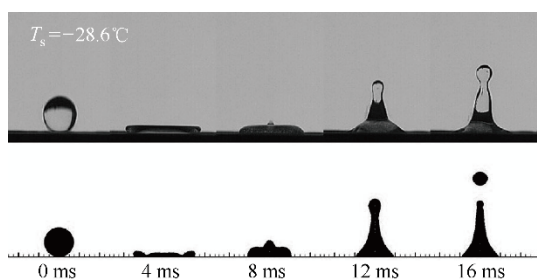


图 2 液滴撞击低温平壁面实验^[30]和模拟在相同时刻下的形态对比

Fig.2 Impacting morphological comparisons between experimental images^[30] and simulation results after water droplet impacting on cold flat substrate

3 结果与讨论

为研究液滴撞击低温圆形导线壁面后的运动特性和滞留特性, 主要研究壁面浸润性、液滴撞击速度、壁面温度对液滴撞击低温圆形壁面后运动特性的影响, 以及对达到稳定状态下壁面上残余液体滞留特性的影响。

研究中定义了无量纲数 α 、 δ 、 β , 表达式为

$$\beta = D_{\text{droplet}}/D_{\text{substrate}} \quad (13)$$

$$\alpha = L_h/D_{\text{droplet}} \quad (14)$$

$$\delta = l/C \quad (15)$$

式中, D_{droplet} 表示液滴的初始直径; $D_{\text{substrate}}$ 表示圆形壁面直径; β 表征液滴和圆形壁面相对大小; L_h 表示液滴在圆形壁面上沿垂直方向液膜的厚度; α 表征液滴撞击壁面后液膜高度变化, 可用来描述液滴的运动特性; l 表示液滴撞击圆形壁面后液膜润湿壁面的长度; C 表示圆形壁面总长度; δ 表征液滴撞击壁面后对圆形壁面的润湿情况, 可用来描述液滴的运动和滞留特性。其中, 参数测量方法如图 3 所示。

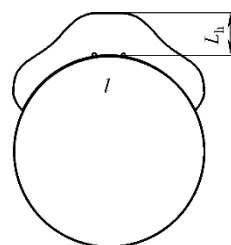


图 3 参数测量示意图

Fig.3 Schematic diagram of measurements

3.1 液滴撞击低温圆柱壁面的运动行为

图 4 为液滴撞击低温光滑圆形壁面过程中相变过程和速度矢量分布变化情况, 液滴直径 2.2 mm, 圆柱直径 4.4 mm, 撞击速度 0.5 m/s, 壁面接触角分别为 67°、135°, 壁面温度分别为 20、-50℃。液滴撞击圆柱壁面的初始铺展过程较为相似, 在惯性力和重力沿着壁面切线方向分力的共同作用下, 液膜沿着壁面周向铺展, 液滴内的流体速度方向呈对称分布, 液体内部近壁区域流体的运动速度方向为壁面周向的切线方向, 但是由于壁面浸润性、温度的影响, 在液膜回缩过程出现较大差异。对比常温(20℃)条件下无相变时, 不同浸润性下液滴撞击圆柱过程。在亲水性圆柱面上(67°), 液滴撞击后形成的沿圆柱壁面铺展的液膜, 20 ms 达到最大铺展面积后, 在表面张力的作用下开始回缩。但是在疏水性圆柱壁面上(135°), 液滴在铺展过程中出现分裂, 随后受重力和液滴动能的影响, 分裂的液滴将脱离圆柱壁面, 如图 4 中 50 ms 所示, 这意味着增加壁面疏水性有利于迅速排液。

对比相同亲/疏水性、不同温度条件下液滴的动力学行为发现, 在亲水性(67°)壁面上, 液滴前期铺展过程类似, 但是常温壁面上的液膜出现大幅度回缩, 而在 -50℃ 的壁面上, 对比 30 ms 和 50 ms 液膜相图分布, 由于底层液膜出现凝固, 三相接触线只有

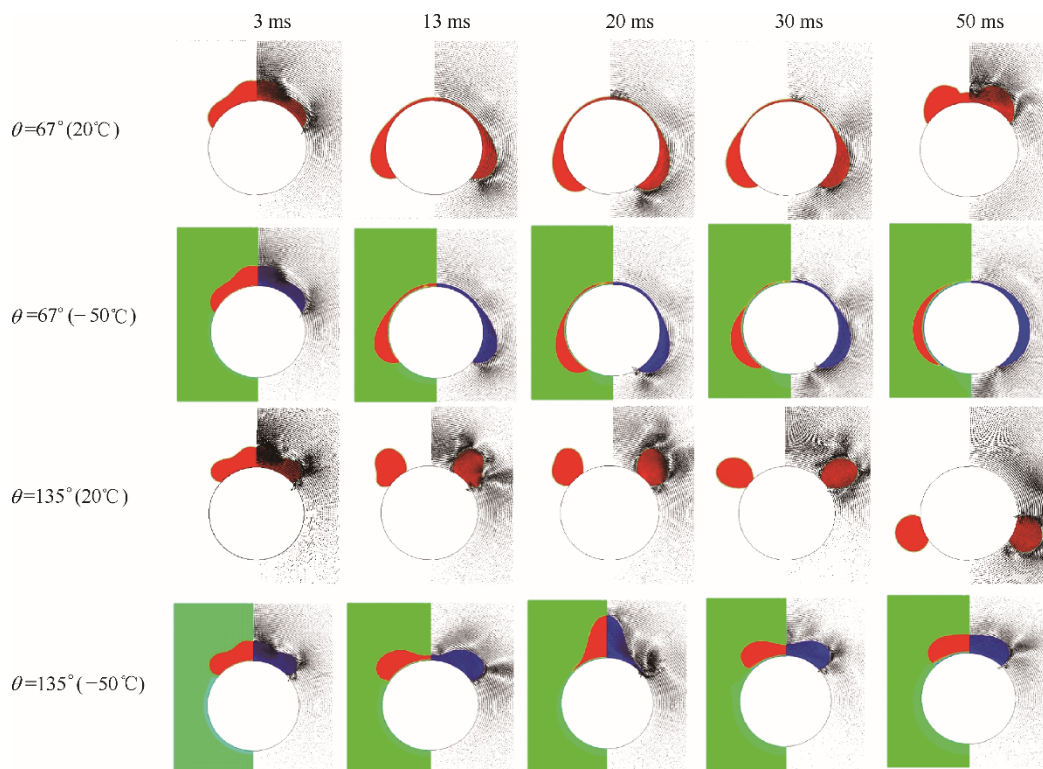


图4 单液滴撞击低温光滑圆形壁面过程中相变过程和速度矢量变化

Fig.4 Phase transition and vector distribution during a water droplet impacting on cold circular substrate

略微的回缩,而上层未凝固的液膜回流后明显变薄。在疏水性(135°)壁面上, -50°C 的低温圆柱壁面抑制了液滴的分裂而形成液膜,同时由于相变换热的存在,流动过程中的液滴底层已经开始凝固,该过程将使得液滴回缩的动能大幅度降低,同时液滴底层温度和上层液体之间将存在较大的温度梯度,导致液滴内部黏性变化较大,使得内部的黏性耗散增加。因此,当液滴以相同的速度撞击低温壁面时,液滴不能够分离并脱离壁面,将导致疏水圆柱壁面出现较为严重的冰层生长。

3.2 壁面浸润性对液滴运动行为特性影响

图5为单液滴撞击不同浸润性低温光滑圆柱的运动演变过程。撞击速度 0.5 m/s ,壁面温度 -50°C 。由于壁面的浸润性不同,导致液滴在壁面上的铺展特性产生较大差异。在 67° 壁面上,液膜对壁面的铺展能力较强,液滴沿着圆形壁面周向方向的运动距离较远,铺展较为充分,接触面积大,更易于液膜与低温壁面换热。在 40 ms 之后,由于底部液膜凝固,导致三相接触线没有回缩。提高壁面疏水性,液滴沿着圆形壁面的铺展能力减弱,回缩能力增强,回缩后液滴振荡现象加剧,底部液膜并未完全凝固。

图6反映出同样的趋势,接触角为 67° 壁面上,

液膜无明显振荡,也几乎没有回缩,其 α 逐渐变小并趋于恒定, δ 逐渐增大并趋于恒定。壁面疏水能力越强,液滴在回缩过程中所具有的残余能量越大,导致液滴发生振荡现象,因此 α 波动现象增强。值得注意的是,液滴撞击低温壁面后, δ 呈现先增大至最大铺展系数,然后略微下降,最后趋于恒定的变化趋势,这是由于疏水表面上,液膜边缘处液体在其表面张力和固液界面张力的共同作用下使得液膜回缩能力更强,足以克服底层液膜相变引起的黏滞阻力,使得底层液膜能够略微回缩。同时 δ 随接触角的增大明显减小,意味着提高壁面疏水性能减小液滴碰撞的铺展润湿面积,从而减小冻结面积,降低结冰的危害程度,但是在 -50°C 的极低温度下,壁面疏水性的提高并没能有效地使液滴脱离壁面,无法达到防结冰的效果。

3.3 壁面温度对液滴运动行为特性影响

如图7所示为单液滴撞击不同温度光滑圆形壁面的动态过程,撞击速度 0.5 m/s ,壁面接触角为 105° 。在前 10 ms 的铺展阶段,由于液滴动能占主导作用,液滴的铺展过程相似,但在液膜回缩过程,壁面温度对液滴的运动过程产生较大影响。对比 0°C 和 -10°C 壁面上液膜铺展,液膜都从中间发生断裂,形成两个分液滴, 0°C 壁面上的分液滴在重力作

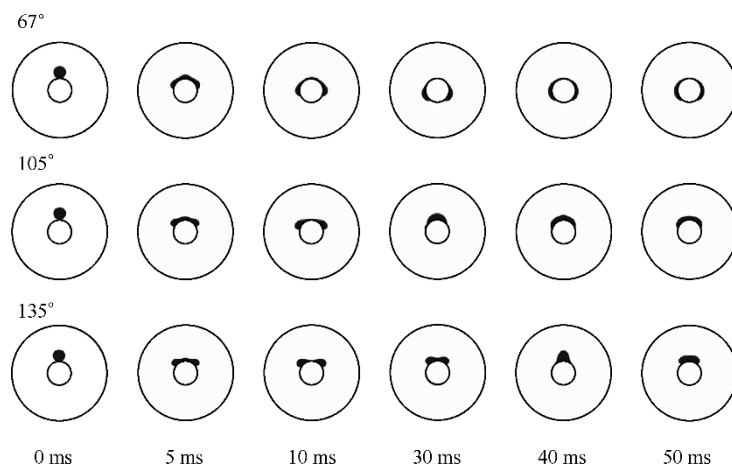
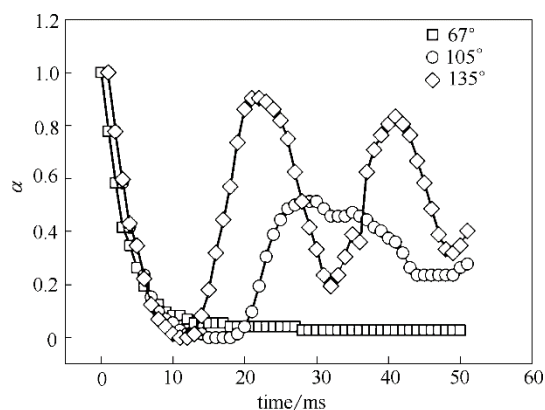
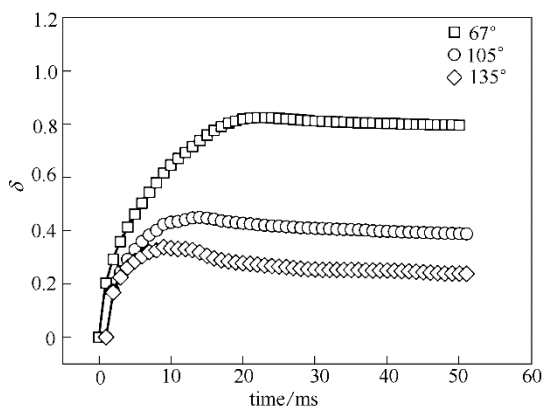


图5 单液滴撞击不同浸润性低温光滑圆柱的运动演变过程($v=0.5$ m/s, $\beta=0.5$, $T=-50^{\circ}\text{C}$)

Fig.5 Evolution of a single droplet impact on different wettability cold smooth cylinders



(a) α 随时间的变化 ($\alpha=L_{\text{th}}/D_{\text{droplet}}$)



(b) δ 随时间的变化 ($\delta=l/C$)

图6 单液滴撞击不同浸润性低温光滑圆柱下 α 和 δ 的变化

Fig.6 Change of α and δ after a single droplet impacting on different wettability cold smooth cylinders

用下沿着圆形壁面两侧向下滚落。而在 -10°C 壁面上, 40 ms 之后, 液滴近乎处于静止状态, 这是由于液滴底层液体发生相变, 液滴与圆柱壁面的摩擦损耗以及内部流体的黏性耗散增大, 因此分液滴剩余动能减少, 运动缓慢, 最终同壁面发生黏结, 直至完

全凝固。随着温度继续降低, 对比 -10°C 、 -30°C 、 -50°C 壁面上液膜状态, 温度越低, 液膜不会发生断裂, 且液膜有明显的振荡现象。这是由于温度梯度的增大, 导致换热能力增强, 液膜相变速率加快, 底层液膜快速与壁面黏结, 剩余的动能使得表层液膜不断振荡。

图8为不同温度下 α 和 δ 随时间的变化。在回缩阶段, 由于 0°C 和 -10°C 壁面上液膜发生断裂, 其 α 突变为0。在 -10°C 壁面上, 由于换热能力较弱, 底层液膜经过一段时间才发生相变, 所以 δ 先有一段时间的振荡再趋于恒定。在 -30°C 和 -50°C 壁面上, 两者 α 均在波动, 且 -50°C 波动幅度略小, 同时对比 δ 的变化可以发现, -50°C 壁面的铺展面积略大, 这意味着随着温度的进一步降低, 有更多的动能被耗散在黏性底层。温度的减低使得液膜迅速凝固, 抑制液膜在圆柱壁面上的分裂, 铺展面积增加, 结冰现象更为严重, 这说明随着温度的降低, 疏水壁面并不能有效减少结冰面积。

3.4 撞击速度对液滴运动行为特性影响

图9为单液滴以不同速度撞击光滑圆形壁面下 α 和 δ 随时间的变化, 圆柱壁面接触角为 105° , 壁面温度为 -50°C 。 α 在速度较小时呈明显振荡趋势, 但随着撞击速度的增加, 振荡消失, α 呈快速下降最后趋于稳定, 且速度越大, α 变化速率越快。由于速度较小, 动能不足以使液膜在圆形壁面充分铺展, 因而形成的液膜较厚, 表层未发生相变的液体出现反复振荡, 速度增大, 动能占主导作用, 液膜能充分覆盖圆柱壁面, 接触面积的增大使得换热能力增强, 底层液膜凝固导致大部分动能被壁面摩擦与内部流体黏性耗散, 因此液膜没有振荡。对比 δ 的变化

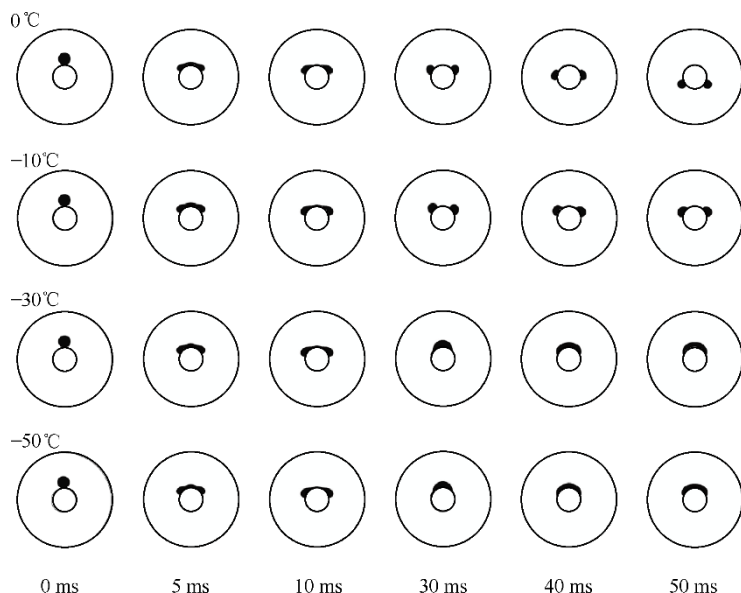
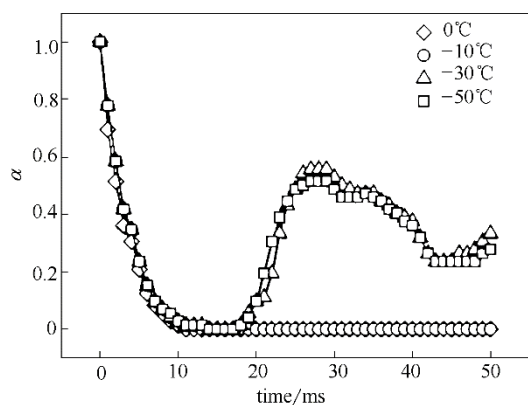
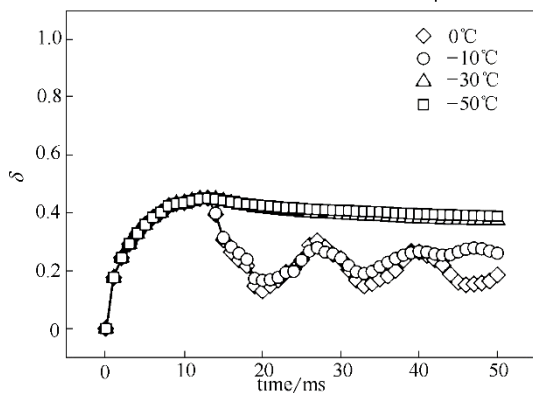


图7 单液滴撞击不同温度光滑圆形壁面的运动演变过程($v=0.5$ m/s, $\beta=0.5$, $\theta=105^\circ$)

Fig.7 Evolution of a single droplet impacting on different temperature smooth cylinders



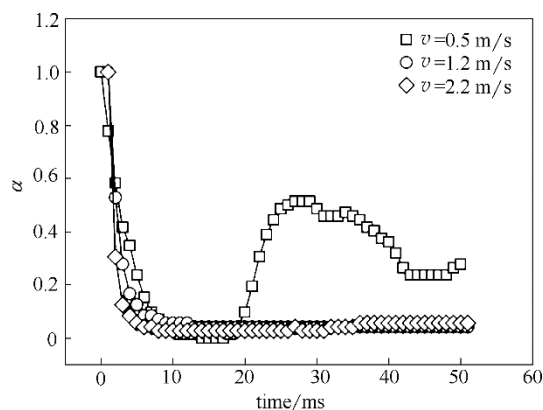
(a) α 随时间的变化 ($\alpha=L_h/D_{\text{droplet}}$)



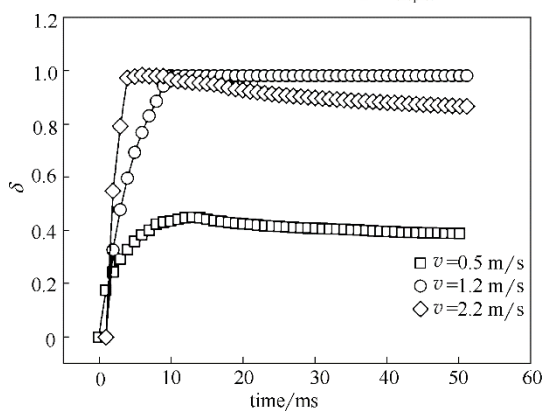
(b) δ 随时间的变化 ($\delta=l/C$)

图8 单液滴撞击不同温度光滑圆形壁面下 α 和 δ 的变化

Fig.8 Change of α and δ after a single droplet impacting on different temperature smooth cylinders



(a) α 随时间的变化 ($\alpha=L_h/D_{\text{droplet}}$)



(b) δ 随时间的变化 ($\delta=l/C$)

图9 单液滴以不同速度撞击光滑圆形壁面下 α 和 δ 的变化

Fig.9 Change of α and δ after a single droplet impacting on smooth cylinders at different velocities

可以发现,随着液滴撞击速度增大,液膜对圆形壁面的铺展速率增大,且准稳定状态下的 δ 增大。需

要注意的是,由于2.2 m/s撞击速度下液膜在铺展过程和回缩过程中发生破裂,使得 δ 增大到最大后逐

渐减小,最终维持恒定。

4 结 论

(1)随着壁面疏水性的提升,液滴的铺展能力减弱,但液膜在壁面法线方向上波动增大。增加壁面疏水性能有效减小液滴碰撞的铺展润湿面积,从而减小冻结面积,降低结冰的危害程度,但是在-50℃的极低温度下,壁面疏水性的提高并没能有效地使液滴脱离壁面,无法达到防结冰的效果。

(2)由于圆柱壁面的曲率作用,液滴撞击圆柱壁面会出现液膜断裂,较低温度的情况下,液膜分裂且先振荡一段时间再相变结冰,在极低温度下,能抑制液膜在圆形壁面上的分裂,导致液膜在壁面上的铺展面积有所增加,此时疏水表面的防结冰能力下降。

(3)对于低温疏水圆柱壁面,随着液滴撞击速度的增加,液膜对壁面的铺展能力先增大后减小,且铺展速率增加,当液膜底层发生相变和壁面黏结后,液膜在壁面法线方向上波动减小。

符 号 说 明

A_{mush}	糊状区常数
C	圆形壁面总长度,mm
c_p	比定压热容,kJ/(kg·K)
D_{droplet}	液滴的初始直径,mm
$D_{\text{substrate}}$	圆形壁面直径,mm
g	重力加速度,kg/m ²
ΔH	潜热焓,kJ/K
h	显热焓,kJ/K
h_{ref}	参考焓值,kJ/K
k	流体热导率,W/(m·K)
L_h	液滴在圆形壁面上沿垂直方向液膜的厚度,mm
l	液滴撞击圆形壁面后液膜润湿壁面的长度,mm
n	界面法向量
p	压力,Pa
S'	能量方程源项
T_{ref}	参考温度,℃
T_s	壁面温度,℃
t	时间,s
U	速度,m/s
v_p	固体速度,m/s
α	液滴撞击壁面后液膜高度变化

β	液滴和圆形壁面相对大小
γ	控制单元内液体分数
δ	液滴撞击壁面后对圆形壁面的润湿情况
κ	界面曲率,m ⁻¹
μ	黏度,kg/(m·s)
ρ	密度,kg/m ³
σ	表面张力,N/m
φ	水平集函数

参考文献

- [1] 金传芳,郑国璋,韩军青. 2008年初我国南方低温雨雪冰冻灾害分析[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2009, 23(2): 94-98.
Jin C F, Zheng G Z, Han J Q, et al. Analysis of the freezing disasters of low temperature rain and snow in southern China in early 2008[J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 23(2): 94-98.
- [2] 胡琴,于洪杰,徐勋建,等. 分裂导线覆冰扭转特性分析及等值覆冰厚度计算[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3615-3620.
Hu Q, Yu H J, Xu X J, et al. Study on torsion characteristic and equivalent ice thickness of bundle conductors[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3615-3620.
- [3] 殷水清,赵珊珊,王遵娅,等. 全国电线结冰厚度分布及等级预报模型[J]. 应用气象学报, 2009, 20(6): 722-728.
Yin S Q, Zhao S S, Wang J Y, et al. National wire icing thickness distribution and grade prediction model[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(6): 722-728.
- [4] 范瑶,王宏,朱恂,等. 壁面曲率及过冷度对液滴铺展特性的影响[J]. 化工学报, 2016, 67(7): 2709-2717.
Fan Y, Wang H, Zhu X, et al. Effect of curvature and undercooling degree of surface on behavior of droplet spreading [J]. CIESC Journal, 2016, 67(7): 2709-2717.
- [5] Worthington A M. A second paper on the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1876, 25(171-178): 261-272.
- [6] Mao T, Kuhn D C S, Tran H. Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces[J]. AIChE Journal, 1997, 43(9): 2169-2179.
- [7] Heungsup P, Carr W W, Zhu J, et al. Single drop impaction on a solid surface[J]. AIChE Journal, 2010, 49(10): 2461-2471.
- [8] Rioboo R, Marengo M, Tropea C. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces[J]. Experiments in Fluids, 2002, 33(1): 112-124.
- [9] Hung L S, Yao S C. Experimental investigation of the impaction of water droplets on cylindrical objects[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(8): 1545-1559.
- [10] Liang G T. Special phenomena of droplet impact on an inclined wetted surface with experimental observation[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 084707.
- [11] 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 C, Wang H, Zhu X, et al. Numerical simulation of droplet impact on surfaces with different wettability[J]. CIESC Journal,

- 2013, **64**(8): 2745–2751.
- [12] 杨宝海, 王宏, 朱恂, 等. 速度对液滴撞击超疏水壁面行为特性的影响[J]. 化工学报, 2012, **63**(10): 3027–3033.
Yang B H, Wang H, Zhu X, et al. Effect of velocity on behavior of droplet impacting on superhydrophobic surface[J]. CIESC Journal, 2012, **63**(10): 3027–3033.
- [13] Liang G, Guo Y, Yang Y, et al. Liquid sheet behaviors during a drop impact on wetted cylindrical surfaces[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, **54**(5): 67–74.
- [14] Flemings M C. Solidification Processing[M]. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [15] Schiaffino S, Sonin A A. Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers[J]. Physics of Fluids, 1998, **9**(11): 3172–3187.
- [16] Jung S, Tiwari M K, Doan N V, et al. Mechanism of supercooled droplet freezing on surfaces[J]. Nature Communications, 2012, **3**: 615.
- [17] Alavi S, Passandideh-Fard M, Mostaghimi J. Simulation of semi-molten particle impacts including heat transfer and phase change [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, **21**(6): 1278–1293.
- [18] Yao Y, Li C, Zhang H, et al. Modelling the impact, spreading and freezing of a water droplet on horizontal and inclined superhydrophobic cooled surfaces[J]. Applied Surface Science, 2017, **419**: 52–62.
- [19] 冷梦尧, 常士楠, 丁亮. 不同浸润性冷表面上水滴碰撞结冰的数值模拟[J]. 化工学报, 2016, **67**(7): 2784–2792.
Leng M Y, Chang S N, Ding L, et al. Numerical simulation of droplet impinging and freezing on cold surfaces with different wettability[J]. CIESC Journal, 2016, **67**(7): 2784–2792.
- [20] Liang G, Yang Y, Guo Y, et al. Rebound and spreading during a drop impact on wetted cylinders[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, **52**(52): 97–103.
- [21] Liu Y, Andrew M, Jing L, et al. Symmetry breaking in drop bouncing on curved surfaces[J]. Nature Communications, 2015, **6**: 10034.
- [22] Andrew M, Liu Y, Yeomans J. Variation of the contact time of droplets bouncing on cylindrical ridges with ridge size[J]. Langmuir, 2017, **33**(30): 7583–7587.
- [23] Li H, Roisman I V, Tropea C. Influence of solidification on the impact of supercooled water drops onto cold surfaces[J]. Experiments in Fluids, 2015, **56**(6): 133.
- [24] Yao Y, Li C, Tao Z, et al. Experimental and numerical study on the impact and freezing process of a water droplet on a cold surface [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, **137**: 83–92.
- [25] Yang G, Guo K, Li N. Experimental study on the freezing mechanism of super-cooled water droplets impacting on a wire[J]. Journal of Refrigeration, 2011, **32**(5): 37–41.
- [26] 杨国敏, 郭开华, 李宁. 过冷水滴碰撞导线表面结冰机理的实验研究[J]. 制冷学报, 2011, **32**(5): 37–41.
Yang G M, Guo K H, Li N, et al. Experimental study on the freezing mechanism of super-cooled water droplets impacting on a wire[J]. Journal of Refrigeration, 2011, **32**(5): 37–41.
- [27] Sussman M, Puckett E G. A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows[J]. Journal of Computational Physics, 2000, **162**(2): 301–337.
- [28] Voller V R, Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, **30**(8): 1709–1719.
- [29] Liang G, Shen S, Mu X. Numerical analysis and insight of drop impacting dynamics upon a liquid film[J]. Acta Mechanica, 2017, **228**(2): 385–400.
- [30] Ding B, Wang H, Zhu X, et al. How supercooled superhydrophobic surfaces affect dynamic behaviors of impacting water droplets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, **124**: 1025–1032.