

液滴撞击过冷壁面的结冰特性实验研究

尚宇恒, 白博峰, 侯予, 钟昕

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了研究液滴动态铺展特性以及冻结行为和机理,基于可视化实验平台,探究了壁面温度对液滴动态结冰过程的影响,分析了铺展直径随时间的变化规律和不同冰型形成的物理机制。实验中采用亲水硅片以及较大的撞击速度增加换热面积,同时采用较低的壁面温度强化液体与冷板之间的换热过程。结果表明,壁温降低导致液滴黏性耗散增加,液滴最大铺展直径略有减小,但壁面温度对于动态铺展阶段的影响不大;壁面温度对结冰过程的影响十分显著,不同的壁面过冷度可产生不同结冰形态;当壁面温度相对较高时,液滴呈现中间成尖结冰形态,壁面温度较低时,出现了一种新的内凹环状结冰形态,后者的形成是由于触发了液膜内部结冰,从而导致液膜内出现冻结锋面,且该锋面同时向外、向上发展。另外,本研究提出了无量纲导热因子以反映壁面导热性能的影响,通过结合无量纲导热因子和韦伯数的影响,揭示了不同冰型产生的条件,为控制结冰形态提供了新的策略。

关键词: 液滴撞击;动态铺展;结冰形态;导热效率

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202110016 **文章编号:** 0253-987X(2021)10-0144-06



OSID 码

Experimental Research for Freezing Characteristics of Droplets Impacting on Supercooled Surface

SHANG Yuheng, BAI Bofeng, HOU Yu, ZHONG Xin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To enrich the understanding of droplet spreading dynamics and the mechanism of freezing behavior, the role of surface temperature in influencing the droplet freezing process is investigated experimentally by a high-speed camera. The evolution of spreading diameter and the physical mechanism of different freezing patterns are analyzed. A hydrophilic silicon wafer and a relatively high impact velocity are chosen to enlarge the contact area between the droplet and substrate. Along with a high surface subcooling, the heat transfer rate through the droplet is enhanced. Upon increasing the surface subcooling, the maximum spreading diameter slightly decreases due to a relatively larger viscous dissipation. The effect of surface temperature on the spreading process is relatively smaller compared with the freezing process. The final freezing morphology is a central cap at a relatively high surface temperature, while a unique single-ring pattern is formed at a relatively low surface temperature. The formation of the single-ring icing is attributed to the ice nucleation at the central region induced by the enhanced heat transfer rate,

收稿日期: 2021-04-25。 作者简介: 尚宇恒(1996—),女,硕士生;钟昕(通信作者),女,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51806163);结冰与防除冰重点实验室开放课题资助项目(IADL20190101);中央高校基本业务费资助项目(ND6J005)。

网络出版时间: 2021-05-29 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210529.2019.002.html>

resulting in an additional freezing front advancing both outwards and upwards during the freezing process. A freezing regime map described by the dimensionless heat conduction rate and Weber number indicating the conditions for the emergence of different ice profiles are proposed. This approach provides new insights for controlling ice profiles in droplet-based applications.

Keywords: droplet impact; spreading dynamics; freezing profile; heat conduction efficiency

液滴撞击固体过冷表面发生结冰现象广泛存在于各个领域,如航空发动机进气口及机翼发生结冰^[1-3],高寒地区风机叶片结冰^[4-5],冷涂喷层^[6]等。因此,对于发展高效除冰技术以及基于冻结背景的工程应用,研究液滴动态撞击结冰机理具有重大意义。

液滴在固体壁面的动力学过程受液滴直径(D_0)^[7]、撞击速度(v_0)^[8-9]、液体表面张力(σ)^[10]、黏性力(μ)^[11]、密度(β)、壁面粗糙度^[12]、壁面润湿性^[13-14]、温度及压强^[15-16]等诸多因素的影响。实验条件的改变会导致液滴动态行为发生巨大的变化。

当液滴撞击固体表面后,首先沿水平方向快速铺展,这一阶段受到惯性力的驱使以及表面张力和黏性力的阻碍^[17]。惯性力和表面张力的相对大小用韦伯数 $We = \frac{\rho D_0 v_0^2}{\sigma}$ 来衡量,惯性力和黏性力的相

对大小用雷诺数 $Re = \frac{\rho D_0 v_0}{\mu}$ 来衡量。随后由于黏性耗散,液滴铺展速度逐渐减小为 0,到达最大铺展直径(D_{max}),并根据表面的润湿特性发生不同程度的回缩,甚至反弹。

目前,只有少量文献针对壁面过冷度对液滴铺展、回缩及结冰现象的影响展开研究。Yao 等发现壁面温度对液滴铺展过程影响较小^[18],而 Maitra 等则指出壁面温度降低导致的黏性增加会显著减弱液滴铺展程度^[19],产生差异的主要原因是 Yao 等采用的常温液滴,而 Maitra 等则使用的过冷液滴。另一方面,随着壁面温度的降低,液滴底部会更早地发生结冰,从而阻碍液滴继续铺展。Jin 等的研究表明由于回缩阶段耗时更久,壁面温度显著影响这一过程^[20]。但是,无论液滴的尺寸,壁面的温度如何变化,目前大多数文献中的结冰形态均为中间成尖,其原因可能是近几十年来强调发展疏水及超疏水表面以抑制结冰程度。对于液滴撞击高疏水性表面而言,液滴与壁面的接触面积有限且液滴高度相对较大,从而限制了液滴与基板之间的换热强度,即使表面温度较低也难以改变最终结冰形态。

本文使用亲水硅片作为基板,采用较大的撞击

速度以增加液滴与表面的接触面积,研究壁面过冷度对滴液动态结冰过程的影响,以期为控制液滴结冰形态的相关应用提供理论指导。

1 实验方法

1.1 实验工质及壁面

本文采用常温状态下的去离子水进行实验,该状态下液体的密度为 998.2 kg/m^3 ,表面张力为 $71.5 \times 10^{-3}\text{ N/m}$,黏度为 $9.89 \times 10^{-4}\text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。通过更换不同直径的针头实现液滴初始直径变化范围为 $2.35 \sim 3.11\text{ mm}$,撞击速度取决于液滴滴落高度,本文采用的撞击速度为 2.56 m/s ,相应的韦伯数范围为 $215 \sim 285$ 。

实验壁面为亲水硅片,尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,常温状态下 1 mL 去离子水在该表面上的静态接触角为 59.6° 。

1.2 实验系统

图 1 为液滴撞击冷表面的实验装置,分为液滴发生系统、壁面降温系统以及视频拍摄系统 3 部分。针泵以较低的速度推动液体从针头挤出,当液体的重力克服表面张力,形成的液滴从针头滴落。壁面的温度通过半导体制冷片外加稳压电源以及恒温水浴仪来综合调控,半导体制冷片热端与恒温水浴仪的冷模块相接,使得热量及时被带走,从而冷端温度可降至更低。采用 K 型热电偶检测壁面温度(T_s),本文中壁温变化范围为 $-36.7 \sim -5.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。液滴的动态结冰过程通过水平放置以及具有一定倾斜角度

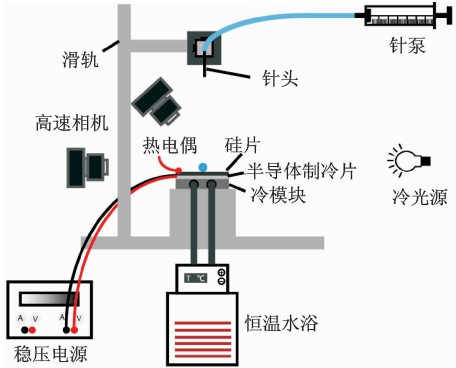


图 1 液滴撞击实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

放置的高速相机来记录,拍摄速度为10 000帧/s,拍摄过程中采用冷光源调节亮度。为减少实验误差,每个工况重复3次实验。实验过程中环境温度和相对湿度分别控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 和 $(40 \pm 4)\%$ 。在每次实验中液滴滴落之前快速用无纺布清洁表面,以消除结霜对实验结果的影响。

1.3 实验数据处理

拍摄所得液滴动态撞击视频在PFV软件中进行处理,测量接触长度和动态接触角。液滴在接触壁面之前可以视为椭圆状,所以液滴的初始直径为

$$D_0 = (D_v D_h^2)^{1/3} \quad (1)$$

式中: D_v 为液滴的垂直长度; D_h 为液滴的水平长度。液滴的撞击速度根据接触壁面之前连续的两张拍摄图像可得

$$v_0 = \frac{S_{2f}}{t_{2f}} \quad (2)$$

式中: S_{2f} 为液滴在两帧之内移动的距离; t_{2f} 为两帧所用的时间。

2 结果讨论

2.1 液滴碰撞结冰现象

在具有一定倾斜角度拍摄的情况下,直径2.35 mm液滴撞击壁面温度为 -18.4°C 及 -36.7°C 的动态过程如图2所示。液滴接触表面的时刻定义为初始时刻, $t=0$ s,从图2可以看出,撞击之后的几ms内,液滴快速向四周铺展直至最大直径,表明初始动能已经完全转化为表面能以及黏性耗散。仔细观察液滴铺展至最大程度时刻 $t_{\max}$ 的图像可以发现,随着壁面温度的降低,液滴薄膜四周出现了手指状突出,如图2b所示($t=2.2$ ms)。这是因为,壁面温度的降低导致了表面张力和黏性力的增加,从而造成液滴减速加剧,剧烈的减速会增强瑞利-泰勒不稳定性,进而引发手指状边缘现象。由于液体底部迅速结冰,液滴几乎不发生回缩现象,只有上层液体继续震荡直至静止,随着换热时间的延长,不同壁面过冷度下的液滴呈现出不同的结冰过程以及结冰形态。

结冰初始阶段,由于四周液体层较薄所以换热更为剧烈,优先结冰,冻结锋面(固-液界面)由下往上扩展的同时从四周向内逐渐回缩,如图2中黑色虚线所示。结冰后期,在 -18.4°C 的工况下,此过程与静态液滴结冰过程相似^[21],固-液界面的换热强度远大于气-液界面的,故气-液界面的换热量可以忽略不计,冻结锋面在发展过程中始终垂直于固-

气界面,最终液滴中心形成顶部凸起,标志着结冰过程的完成。在 -36.7°C 的工况下,结冰发展到120.2 ms时,液体内部也开始结冰,产生了由内向扩展的冻结锋面,最终内外两个冻结锋面汇合,形成内凹环状,类似火山口的结冰形态。为了更清晰地展现两种结冰形态的特征,图2虚线方框中分别给出了中间成尖冰型和内凹环状冰型的示意图与水平拍摄图。内部冻结锋面产生的原因是,外部冻结锋面向内回缩的行为导致凹形液面的产生,当液膜厚度最薄处的过冷度足以引发成核时,内部结冰便被触发。结冰后期在图2b中可观测到明显的液滴碎裂情况,并且通过对比其他实验工况,发现这种现象一般出现在壁面温度较低时。这是因为,液体底层冻结后,与冷板之间持续进行换热,导致冰层的温度下降,由于热胀冷缩,冰层产生收缩的趋势,但是冰层与冷板紧密粘附,无法自由收缩,所以会产生裂缝^[22]。

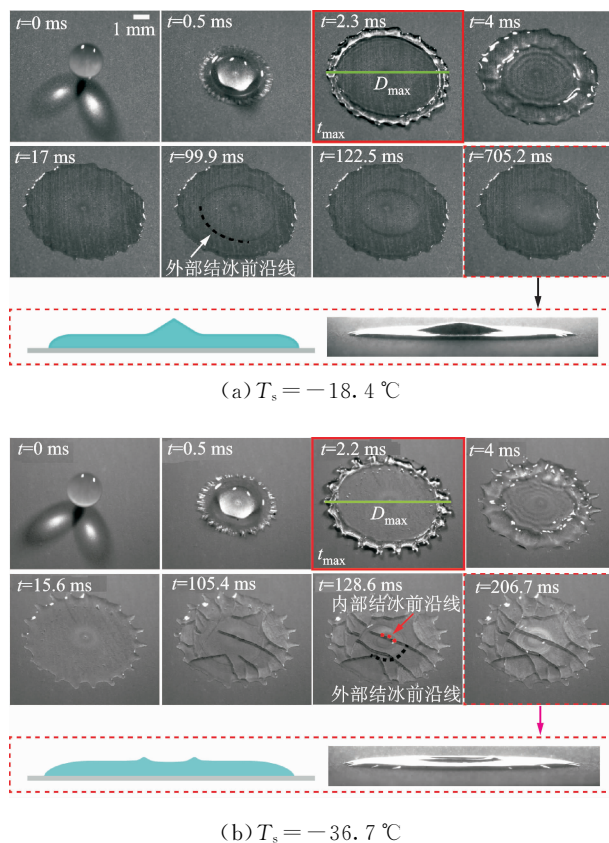


图2 直径为2.35 mm的液滴撞击不同温度壁面的动态结冰过程

Fig. 2 Dynamic freezing process of 2.35 mm impacting droplet at different surface temperature

以上两种结冰形态形成的实验条件与Ma等^[23-24]的结果一致,在亲水、光滑壁面上,当壁面温

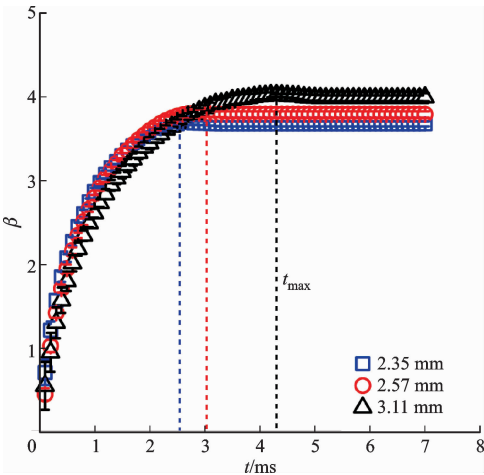
度较低时,液滴以内凹环状的形态冻结,随着壁面温度的升高,冰型转变为中间成尖。用斯特凡数 $Ste = \frac{c_p(T_m - T_s)}{\Delta H_{sl}}$ 来反映显热与潜热的相对大小,其中 T_m 为液滴的融化温度, c_p 为比定压热容, ΔH_{sl} 为相变潜热。液滴尺寸较小时,模拟结果中发生冰型转变的条件为 $Ste = 0.3333, \theta = 65^\circ$, 本文中对应的实验工况为 $Ste = 0.338, \theta = 59.6^\circ$, 实验与模拟结果的吻合性较好。同时, Ma 等的研究结果表明壁面粗糙度、润湿性对结冰形态也具有显著影响,并且还发现,结冰形态为中间成尖时,液滴中间部分的温度更高,而在内凹结冰的情况下,液滴呈现凹液面形态,中间的液膜更薄,温度更低,为触发内部快速结冰提供了有利条件。

2.2 液滴尺寸对动态铺展过程的影响

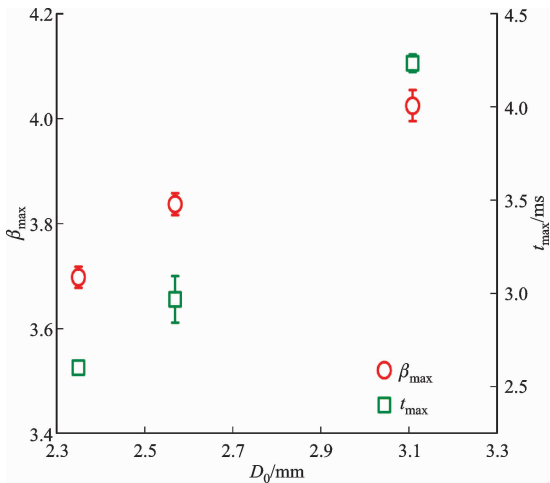
为了定量分析不同参数对动态铺展过程的影响,将铺展系数 β 定义为液滴动态直径 D 与初始直径的比值,其中到达最大铺展直径时刻的铺展系数 β_{max} 是用于表征液滴撞击动力学的重要参数之一。图 3a 给出了壁面温度为 -21.1°C 及不同液滴尺寸下,铺展系数随时间的变化情况,图 3b 为最大铺展系数和最大铺展时刻与液滴尺寸的关系。从图中可以看出,不同液滴尺寸下, β 均随时间快速增加直到 t_{max} , D_0 的增加导致 t_{max} 以及铺展程度显著增加,其原因是液滴尺寸的增加使得初始动能增加。同时,最大铺展系数随液滴尺寸线性增加, D_0 从 2.35 mm 增加至 3.11 mm, 增量为 32%, 导致 β_{max} 从 3.70 增加至 4.02, 增量为 8.6%。铺展程度的增加意味着换热面积的增加,为液滴内部触发结冰提供了可能。

2.3 壁面温度对动态铺展过程的影响

如图 4 所示,壁面温度对于液滴动态铺展过程的影响相对较小,随着壁面温度的增加,液滴最大铺



(a) 铺展系数随时间的变化关系



(b) 最大铺展系数、最大铺展时刻与液滴初始直径的关系

图 3 液滴尺寸对动态铺展过程的影响

Fig. 3 The effect of the droplet size on the spreading dynamics

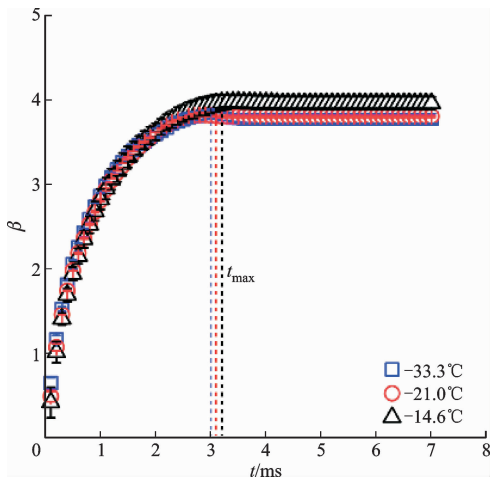


图 4 直径为 2.56 mm 的液滴撞击不同温度壁面的铺展系数随时间的变化

Fig. 4 Spreading factor with time at different surface temperature for 2.56 mm droplet

展程度以及 t_{max} 略微增加。该趋势产生的原因是随着壁面温度的增加,液滴的温度相对较高,导致黏性力以及表面张力减小,从而增加了铺展程度。

2.4 不同冰型形成条件

为揭示中间成尖结冰形态与内凹环状结冰形态的形成条件,本文定义了无量纲导热因子来反映冷板的导热性能,如下

$$\tilde{Q} = \frac{D_{max}^2 k_w (273.15 - T_s)}{4 D_0^2 k_{air} (T_{air} - 273.15)} \tag{3}$$

式中: T_{air} 为环境空气的温度; k_w 、 k_{air} 分别为水与空气的导热系数。

综合 $\tilde{Q}$ 和 We 的影响,图 5 绘制了不同冰型的

分布相图。从图中可以看出,中间成尖结冰形态和内凹环状形态有着明显的分界线。当 $\tilde{Q}$ 小于一定数值,无论 We 如何变化,冰型均为中间成尖形态;当 $\tilde{Q}$ 大于虚线的数值,冰型则转变为内凹环状形态。这一结论表明,当导热量较大时才能触发内部结冰,与图 2 观察到的现象一致。

当 We 逐渐增大时,发生冰型转换的临界 $\tilde{Q}$ 先减小之后几乎保持恒定,说明 We 的增加在一定程度上有助于内凹环状形态的产生。将液滴在最大铺展时刻的形态简化为圆饼状,高度可近似为 $\tilde{h} = D_0^2 / 6\beta_{\max}$,液滴与冷板的热流量近似可用 $Q = 3\pi k_w \beta_{\max}^3 \Delta T / 2$ 来计算,其中 ΔT 代表液滴与冷板之间的温差。随着 We 的增加,液滴铺展程度随之增加,导致热流量 Q 增加,意味着液滴与冷板之间导热更为显著。因此,触发内部结冰所需要的无量纲导热因子减小,并且由于 We 的增加不能无限地增加换热面积,强化导热性能,所以当 We 继续增大时对临界 $\tilde{Q}$ 不再产生影响。

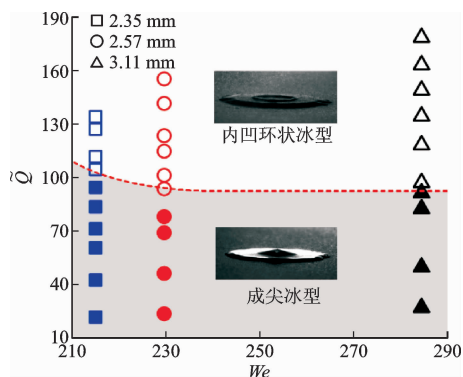


图5 不同结冰形态相图

Fig. 5 Phase diagram of different icing patterns

3 结论

本文研究了较高撞击速度的液滴在过冷壁面上的动态结冰特性,并分析了液滴尺寸以及壁面温度对动态铺展过程及结冰过程的影响,结果表明如下。

(1) 增加液滴尺寸可有效增大铺展程度,延长到达最大铺展时刻的时间。

(2) 壁面温度对于液滴动态铺展过程影响相对较小,仅使得最大铺展程度略有减小,而对结冰过程起主导作用。

(3) 壁面温度相对较高时,结冰过程仅有一个外部冻结锋面,最终形成中间成尖结冰形态;在壁面温度相对较低时,形成内外两个冻结锋面并最终汇合产生内凹环状冰型。

(4) 韦伯数的增加在一定范围内可以促进内凹环状结冰的出现。

参考文献:

- [1] 宋建宇, 吴晶峰, 邱长波, 等. 民用涡轴发动机进气系统结冰试验 [J]. 航空动力学报, 2020, 35(5): 1089-1098.
SONG Jianyu, WU Jingfeng, QIU Changbo, et al. Civil turboshaft engine induction system icing test [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(5): 1089-1098.
- [2] 姚一娜, 刘呈, 李聪, 等. 液滴撞击超疏水冷表面的反弹/黏附特性对比研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(1): 31-35.
YAO Yina, LIU Cheng, LI Cong, et al. Comparative study on rebound/adhesion characteristics of droplets impacting superhydrophobic cold surface [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(1): 31-35.
- [3] ZHANG Chen, LIU Hong. Effect of drop size on the impact thermodynamics for supercooled large droplet in aircraft icing [J]. Physics of Fluids, 2016, 28(6): 062107.
- [4] 胡良权, 陈进格, 沈昕, 等. 结冰对风力机载荷的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(8): 904-909.
HU Liangquan, CHEN Jinge, SHEN Xin, et al. Load of wind turbine affected by icing [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(8): 904-909.
- [5] 朱程香, 王珑, 孙志国, 等. 风力机叶片翼型的结冰数值模拟研究 [J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 522-528.
ZHU Chengxiang, WANG Long, SUN Zhiguo, et al. Numerical study of wind turbine blade airfoil ice accretion [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(4): 522-528.
- [6] MARX S, PAUL A, KÖHLER A, et al. Cold spraying: innovative layers for new applications [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15(2): 177-183.
- [7] CLANET C, BÉGUIN C, RICHARD D, et al. Maximal deformation of an impacting drop [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 517: 199-208.
- [8] JIN Zheyang, ZHANG Huanhuan, YANG Zhigang. Experimental investigation of the impact and freezing processes of a water droplet on an ice surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 716-724.

- [9] XU Qing, LI Zhanyong, WANG Jin, et al. Characteristics of single droplet impact on cold plate surfaces [J]. *Drying Technology*, 2012, 30(15): 1756-1762.
- [10] BAEK S, YONG K. Impact dynamics on SLIPS: effects of liquid droplet's surface tension and viscosity [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 506: 144689.
- [11] LIN Shiji, ZHAO Binyu, ZOU Song, 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.
- [12] HAO Jiguang. Effect of surface roughness on droplet splashing [J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(12): 122105.
- [13] 赵亚鸽, 林世玑, 赵彬钰, 等. 微结构超疏水表面的制备及其对液滴撞击动力学的影响 [J]. *微纳电子技术*, 2020, 57(8): 643-649.
- ZHAO Yage, LIN Shiji, ZHAO Binyu, et al. Preparation of the micro-structured superhydrophobic surface and influence on droplet impact dynamics [J]. *Micro-nano-electronic Technology*, 2020, 57(8): 643-649.
- [14] 张莹, 许术方, 李文彬, 等. 液滴撞击亲疏水间隔条纹表面 [J]. *化工进展*, 2020, 39(2): 461-467.
- ZHANG Ying, XU Shufang, LI Wenbin, et al. Drops impinging on alternating hydrophobic and hydrophilic stripes [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(2): 461-467.
- [15] DING Bin, WANG Hong, ZHU Xun, 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.
- [16] LATKA A, STRANDBURG-PESHKIN A, DRISCOLL M M, et al. Creation of prompt and thin-sheet splashing by varying surface roughness or increasing air pressure [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(5): 054501.
- [17] LAAN N, DE BRUIN K G, BARTOLO D, et al. Maximum diameter of impacting liquid droplets [J]. *Physical Review Applied*, 2014, 2(4): 044018.
- [18] YAO Yina, LI Cong, TAO Zhenxiang, 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.
- [19] MAITRA T, TIWARI M K, ANTONINI C, et al. On the nanoengineering of superhydrophobic and impalement resistant surface textures below the freezing temperature [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 172-182.
- [20] JIN Zheyang, WANG Zhangning, SUI Dongyu, et al. The impact and freezing processes of a water droplet on different inclined cold surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97: 211-223.
- [21] MARÍN A G, ENRÍQUEZ O R, BRUNET P, et al. Universality of tip singularity formation in freezing water drops [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(5): 054301.
- [22] GHABACHE E, JOSSERAND C, SÉON T. Frozen impacted drop: from fragmentation to hierarchical crack patterns [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(7): 074501.
- [23] MA Zhiyuan, XIONG W, CHENG P. 3D lattice Boltzmann simulations for water droplet's impact and transition from central-pointy icing pattern to central-concave icing pattern on supercooled surfaces: part I Smooth surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 171: 121097.
- [24] MA Z Y, XIONG W, CHENG P. 3D lattice Boltzmann simulations for water droplet's impact and transition from central-pointy icing pattern to central-concave icing pattern on supercooled surfaces: part II Rough surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 172: 121153.

(编辑 杜秀杰 亢列梅)