

低温光滑壁面上水滴撞击结冰行为

胡海豹 何强 余思潇 张招柱 宋东

Freezing behavior of droplet impacting on cold surfaces

Hu Hai-Bao He Qiang Yu Si-Xiao Zhang Zhao-Zhu Song Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 104703 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.104703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

爆炸气泡与自由水面相互作用动力学研究

Dynamics of the interaction between explosion bubble and free surface

物理学报.2014, 63(19): 194703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194703>

疏水表面减阻环带实验研究

Investigation about drag reduction annulus experiment of hydrophobic surface

物理学报.2013, 62(15): 154701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.154701>

具有密度跃层分层流体中回转体激发内波特性实验

The characteristics of internal waves generated by a revolution body in a stratified fluid with a pycnocline

物理学报.2012, 61(7): 074701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.074701>

低温光滑壁面上水滴撞击结冰行为*

胡海豹^{1)†} 何强¹⁾ 余思潇¹⁾ 张招柱²⁾ 宋东^{1)‡}

1) (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2) (中国科学院兰州化学物理研究所, 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

(2015年11月18日收到; 2016年2月2日收到修改稿)

采用高速摄像技术测试低温光滑壁面上水滴撞击结冰过程, 分析了撞击速度、壁面温度和材料热导率对水滴撞击铺展、振荡及结冰行为的影响规律. 结果表明, 低温壁面造成水滴最大铺展直径缩小, 且结冰时间随温度降低而缩短; 当撞击 We 数提高时, 水滴最大铺展直径增大, 而振荡和结冰时间减小; 同时材料热导率越高, 最大铺展直径越小, 结冰越迅速. 另外, 从热力学角度推导出水滴撞击结冰时间的理论公式, 预测误差 $< 5.3\%$.

关键词: 结冰, 水滴, 撞击, 传热

PACS: 47.55.dr, 47.55.pb, 44.10.+i, 44.35.+c

DOI: 10.7498/aps.65.104703

1 引言

水滴撞击固体表面现象在电力、航空、新能源等领域非常普遍^[1-3], 具有重要科研价值. 由于水滴撞击结冰行为在生产和生活中经常会引发灾难性后果^[4-6], 如造成电力系统中塔架和电缆因超负荷覆冰而倒塌、断裂^[7], 造成飞机因机翼、发动机进气口和天线等部位结冰而发生恶性事故^[8]. 因此, 水滴结冰和防冰问题一直是一项亟待研究的重要课题. 在低温壁面水滴静态结冰方面, Hu 和 Jin^[9] 通过分子标定温度法分析了水滴结冰过程, 发现固/液间相变潜热会导致液相温度有所升高; Wang 等^[10] 则发现水滴在结冰的相变过程中有明显体积变化, 膨胀系数约为 1.15—1.20. 在低温壁面结霜研究方面, Hoke 等^[11] 研究了层流气流作用时, 聚四氟乙烯和玻璃等低温平板上霜层厚度的增长规律; 黄玲艳等^[12] 测试了低温强制对流条件下水滴结冰过程, 发现壁面温度越低, 空气湿度越大, 相变驱动力越强, 则水滴结冰时间越短. 对于撞击结冰

行为, 朱卫英等^[13] 在铝和玻璃两种材料上初步研究了壁面温度对水滴铺展直径和结冰时间的影响, 发现撞击速度决定铺展半径, 壁面温度决定结冰时间. 而在疏水防结冰方面, Antonini 等^[14] 测试了喷涂超疏水涂层的 NACA0012 翼型在不同试验条件下的水滴结冰过程, 发现疏水涂层能够明显减少机翼表面结冰量; Kulinich 等^[15] 试验则表明, 低温超疏水表面水滴易于因滚动而不结冰, 即使发生结冰行为, 冰的黏附力也随疏水性增强而显著减弱; 与文献^[14, 15] 不同, Kripa 等^[16] 采用环境扫描电镜, 观测具有微米级立柱结构的疏水表面上冰霜形成过程, 却发现结霜后疏水表面上冰的附着力反而更大.

综上所述, 国内外学者对水滴静态结冰、低温壁面结霜及疏水材料防结冰等已有较系统研究, 但对低温壁面上普遍存在的水滴撞击结冰行为及其热力学过程仍缺乏细致研究. 因此, 本文以工程常用的铜、铝、硅材料为对象, 研究了低温光滑壁面上单个水滴撞击结冰行为规律, 并从热力学角度推导

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 51335010)、中央高校基本科研业务费 (批准号: 3102015ZY017) 和西北工业大学研究生创新种子基金 (批准号: Z2015002) 资助的课题.

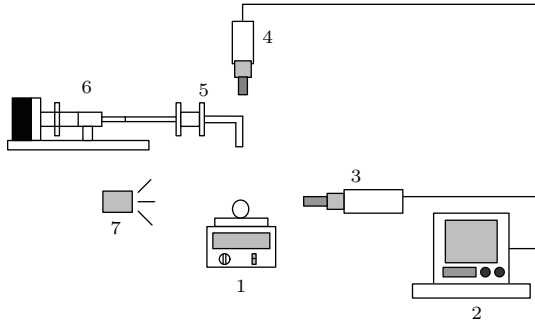
† 通信作者. E-mail: huhaibao@nwpu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: songdong1226@nwpu.edu.cn

了水滴撞击结冰时间的预测公式.

2 实验装置与测试方法

实验装置如图1所示, 主要由可调低温源(温度范围 $-40\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 调节精度 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$)、水滴发生器、高速摄像机2台(RED LAKE IDT N4; RED LAKE HG-100 K)和PC机等组成. 试验中, 低温壁面温度 T 分别设定为 -15 , -25 和 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$; 水滴撞击速度 V 依次选取 1.00 , 1.41 , 1.73 和 2.00 m/s , 对应韦伯数 We 分别为 35 , 70 , 105 和 140 ; 两台高速摄像机同步俯视和侧视拍摄, 采集频率均取 2000 fps ; 光源为普通 100 W 白炽灯, 从约 200 mm 距离处侧面打光. 测试试件为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的抛光铜板、铝板和硅板, 其热导率 λ 分别为 401 , 237 , 148 W/mK , 表面粗糙度均低于 $0.38\text{ }\mu\text{m}$. 试验用水为蒸馏水, 水滴直径 $D_0 = 2.6\text{ mm}$, 密度 $\rho = 998\text{ kg/m}^{-3}$, 黏性系数 $\mu = 1.005 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 表面张力系数 $\gamma = 7.28 \times 10^{-2}\text{ N/m}$, 环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 空气湿度 30 RH . 因此, 每次试验过程中水滴的初始表面张力均相等.



1 低温源; 2 PC机; 3 高速摄像机; 4 高速摄像机;
5 针管; 6 医用注射泵; 7 光源

图1 水滴撞击结冰试验装置图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

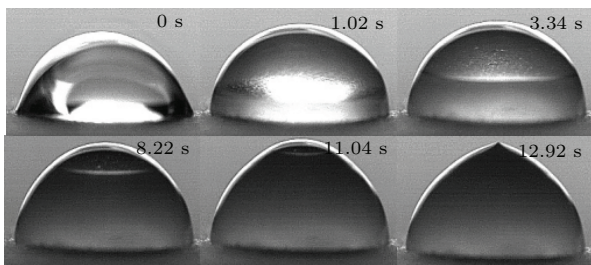


图2 单个水滴静态结冰过程 ($T = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 2. Freezing behavior of a static droplet ($T = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

反复观测发现, 低温壁上水滴静态结冰过程由底部向顶端发展, 依次呈现液态、固/液混合态和固态, 同时水滴颜色从完全透明、半透明, 最终变成不透明的乳白色(见图2). 基于该结冰伴随现象, 本试验中通过水滴颜色来判别其结冰发展过程.

3 结果分析

3.1 水滴撞击结冰规律

1) 水滴撞击结冰过程

通过测试3种壁面温度下, 水滴以4种 We 数撞击铜、铝和硅板的结冰过程发现, 壁面温度、材料热导率和 We 数均会影响水滴撞击结冰行为. 图3所示为不同壁面温度时铜、铝和硅板上, 水滴撞击结冰过程中的典型瞬时状态. 从中可以发现, 水滴撞击结冰过程分铺展、振荡和结冰3个阶段. 铺展阶段从固/液初始接触到水滴运动至最大直径 D_{Max} 位置, 历时约 5 ms , 且低温条件下的 D_{Max} 明显小于常温(见图3(a)和图3(b)), 这是由于低温造成水的黏性系数 μ 和表面张力系数 γ 增大的缘故. 之后水滴持续振荡, 逐渐减弱并停止, 属于阻尼衰减振荡(表面张力充当回复力, 阻尼力源于水的黏性耗散), 历时 $125\text{--}215\text{ ms}$; 但与常温不同, 低温壁上固/液接触线在振荡过程中始终保持不变, 其原因可能在于固/液间热量的快速传递致使近壁面的水膜层在铺展过程中迅速降温至冰点以下, 产生限制固/液接触线回缩的束缚力(源于分子间范德瓦尔斯力). 水滴结冰由底部到顶端, 从四周向中心发展, 且其颜色由透明逐步过渡到半透明, 直至不透明的乳白色, 历时 $1625\text{--}3160\text{ ms}$. 另外, 从图3中还可看出, 不同材料、撞击速度和壁面温度时水滴最大铺展直径、振荡和结冰时间均存在差异.

2) 最大铺展系数

3种材料在不同壁面温度下, 最大铺展系数 β_{Max} 随 We 数均呈近似线性关系. 图4所示为不同温度的铜、铝和硅板上水滴最大铺展系数 β_{Max} 随 We 数的变化规律. 这里, $\beta_{\text{Max}} = D_{\text{Max}}/D_0$. 可以发现, 水滴最大铺展系数 β_{Max} 随 We 数呈线性增加趋势, 且材料热导率越高, 其上升斜率越大. 同时, 同种材料的壁面上, 温度 T 越低, β_{Max} 越小, 其原因在于壁面温度 T 越低(固/液间温差 ΔT 越大), 热流密度($q = \Delta T\lambda/h$)越大^[17], 水滴降温越快, 因而表面张力和黏性阻力更大.

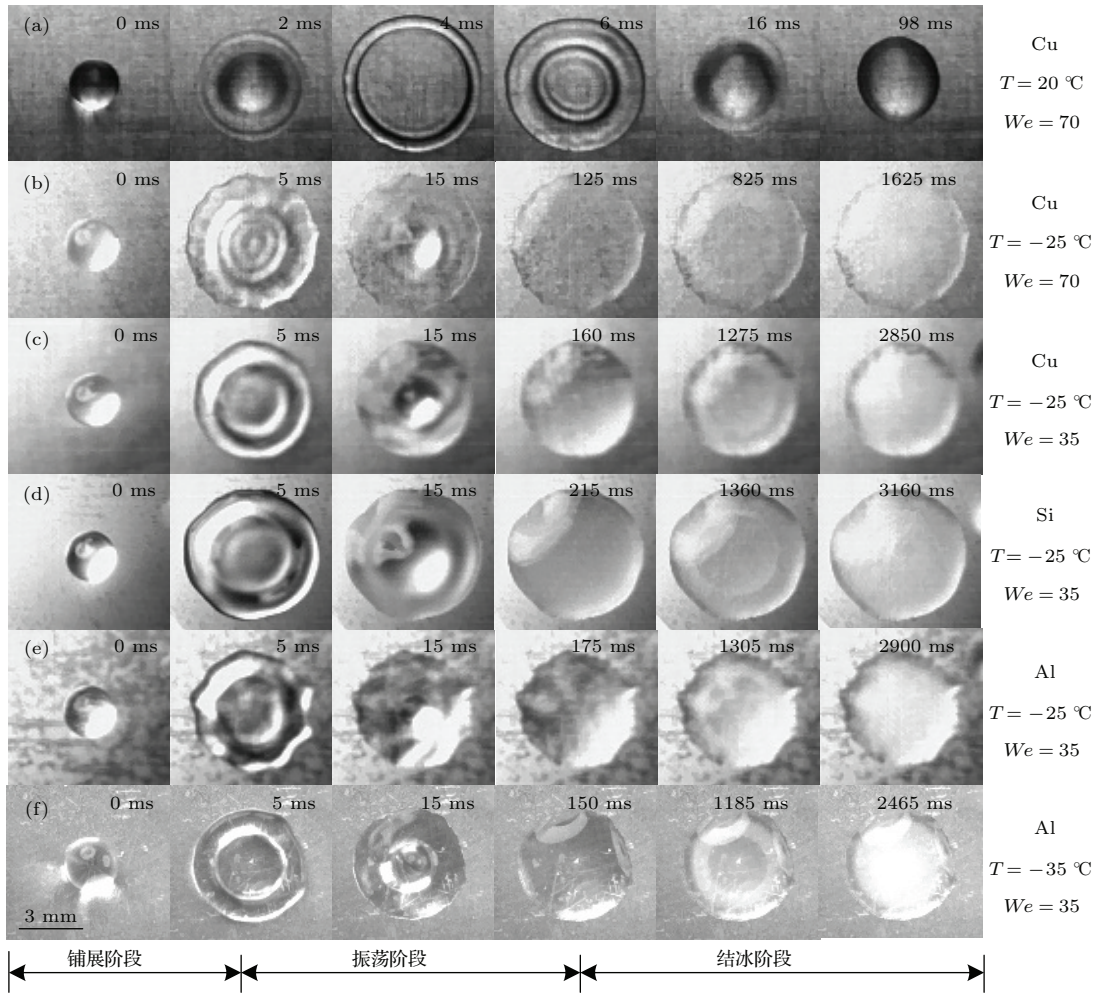


图3 低温壁面水滴撞击结冰过程

Fig. 3. Freezing behavior of impacting droplet on a cold surface.

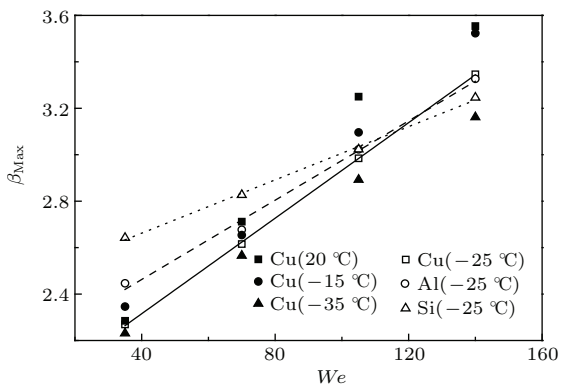


图4 水滴最大铺展系数随We数的变化规律

Fig. 4. Maximum spreading diameter versus We .

3) 振荡和结冰时间

3种材料在不同壁面温度下, 振荡和结冰时间随 We 数均呈现递减趋势. 图5所示为不同温度的铜、铝和硅板上水滴振荡时间 t_1 及结冰时间 t_2 随 We 数的变化规律. 从图5中可以看出, 随 We 数增大, t_1 和 t_2 均缩短; 这是由于随 We 增大, β_{Max} 变

大(见图4), 因而固/液间热传导面积 A 扩大, 对应的热流量($\Phi \propto \Delta T A \lambda$)提高^[17], 水滴降温更迅速, 同时振荡过程中的黏性损耗也越快, 致使 t_1 和 t_2 逐步减小. 从图5中还可以发现, 壁面温度 T 越低, t_1 和 t_2 越小; 同时材料热导率越大, t_1 和 t_2 也越小, 该规律正好与热流量、壁面温度和材料热导率之间的关系相一致(见表1): 壁面温度降低, 或者材料热导率增大, 都会导致热流量 Φ 增加, 进而 t_1 和 t_2 逐渐缩短.

表1 材料和温度对热流量($\Delta T A \lambda$)的影响($We = 70$)

Table 1. Heat flux ($\Delta T A \lambda$) of droplet of different material and temperature ($We = 70$).

	-15 °C	-25 °C	-35 °C
$\lambda_{Si} = 148 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	0.251	0.282	0.315
$\lambda_{Al} = 237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	0.366	0.406	0.451
$\lambda_{Cu} = 401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	0.525	0.655	0.770

注: 因 $\Phi \propto \Delta T A \lambda$, 为直观反映 ΔT 和 λ 对 Φ 的影响, 这里直接取 $\Phi = \Delta T A \lambda$.

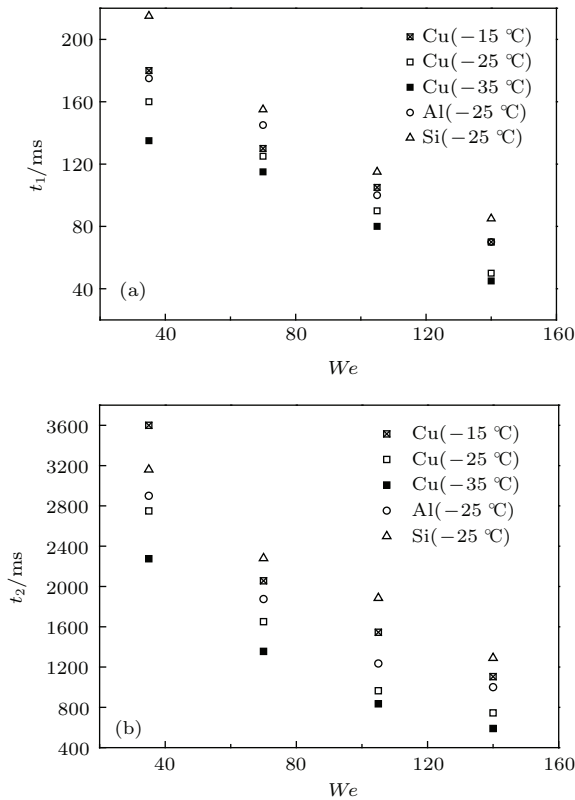


图5 水滴振荡和结冰时间随 We 数的变化规律 (a) 振荡时间; (b) 结冰时间
Fig. 5. Oscillation and freezing time versus We: (a) Oscillation time; (b) freezing time.

3.2 结冰时间的理论分析

根据水滴撞击结冰的前述主要行为特征, 论文做如下物理模型简化:

- 1) 相对于水滴结冰时间, 铺展和振荡时间极短 (低于结冰时间的 5%) (见图 3), 因而这两阶段中固/液间热量传递很少, 可以忽略;
- 2) 相对于固/液间的热量传递量, 水滴和空气间的自然对流换热量很小 (空气的导热系数仅为 0.023 W/m·K), 可以忽略;
- 3) 结冰阶段水滴的形状可近似为圆柱体, 如图 6 所示. 其中, T_w 为水滴初始温度, T_0 为水滴结冰温度, T_a 为空气温度, T_s 为壁面温度.

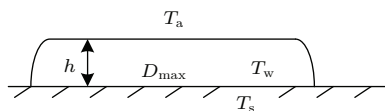


图6 水滴结冰形状示意图

Fig. 6. Diagrammatic sketch of the frozen droplet.

根据假设 3), 结冰阶段的固/液间接触面积 $A = \pi D_{Max}^2/4$, 冰形高度 $h = 2D_0^3/3D_{Max}^2$.

1) 傅里叶导热定律 [17] 中热流量 Φ 的表达式为

$$\Phi = \Delta T/R, \quad (1)$$

其中, 固/液温差 $\Delta T = T_0 - T_s$; R 表示热阻, 其取决于壁面材料和冰的导热系数, 数学表达式为

$$R = \frac{\alpha h}{2A} \left(\frac{1 - X_i}{\lambda_s} + \frac{X_i}{\lambda_i} \right), \quad (2)$$

式中, λ_s 为壁面材料的导热系数, $\lambda_i = 2.22 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 是冰的导热系数, X_i 表示冰的导热系数对传热效率的影响因子, 取 $X_i = 0.05-0.15$. α 为冰形高度的修正系数 [10], 取 $\alpha = 1.05-1.2$.

2) 结冰过程中水滴因温度变化而释放的热量:

$$Q = cm(T_w - T_0), \quad (3)$$

忽略水滴结冰过程中内能变化, 则固/液间传递的热量等于水滴凝固潜热与降温释放热量之和, 即:

$$mH_s + Q = \Phi t_2, \quad (4)$$

将 (1), (2), (3) 代入 (4) 式, 得到水滴结冰时间 t_2 表达式:

$$t_2 = \left(\frac{1 - X_i}{\lambda_s} + \frac{X_i}{\lambda_i} \right) \cdot \frac{\alpha hm(H_s + c(T_w - T_0))}{2A(T_0 - T_s)}. \quad (5)$$

为验证 (5) 式的准确性, 图 7 对比了 3 种温度下铜和硅板上水滴结冰时间理论预测值与试验结果. 可以发现, 与试验规律相一致, 壁面温度越低, 材料热导率越大, 结冰时间的理论预测值也越小, 且二者的最大相对误差约 5.3%.

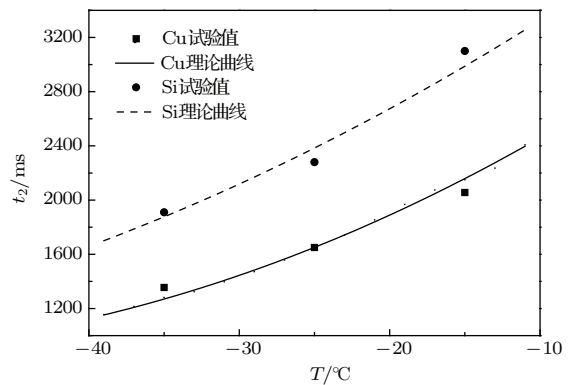


图7 水滴结冰时间理论值与试验值比较 ($We = 70$)

Fig. 7. Theoretical values and experimental values ($We = 70$).

4 结论

1) 材料、 We 数和壁面温度是影响水滴结冰行为的关键因素. 随材料热导率 λ 增加, 水滴最大铺展系数 β_{Max} 减小, 同时振荡 t_1 和结冰时间 t_2 缩短;

随 We 数提高, β_{Max} 增大, 而 t_1 和 t_2 减小; 随壁面温度 T 升高, β_{Max} , t_1 和 t_2 均增大;

2) 根据水滴撞击结冰的主要行为特征, 推导出其结冰时间的简化理论预测公式, 预测结果符合试验规律;

3) 在实际工程中可通过使用低热导率材料, 减小撞击速度, 或提高壁面温度来延缓结冰; 同时, 因结冰时间远大于撞击铺展与振荡时间, 因此, 可考虑利用切向风等加速水滴运动, 使其在结冰前脱落.

参考文献

- [1] Sun Z H, Han R J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3185
- [2] Bi F F, Guo Y L, Shen S Q, Chen J X, Li Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184702 (in Chinese) [毕菲菲, 郭亚丽, 沈盛强, 陈觉先, 李熠桥 2012 物理学报 **61** 184702]
- [3] Hu H B, Huang S H, Chen L B 2013 *Chin. Phys. B* **22** 084702
- [4] Okoroafor E U, Newborough M 2000 *Appl. Therm. Eng.* **20** 737
- [5] Laforte J L, Allaire M A, Laflamme J 1998 *Atmos. Res.* **46** 143
- [6] Hochart C, Fortin G, Perron J 2008 *Wind Energy J.* **11** 319
- [7] Zou M, Beckford S, Wei R 2011 *Appl. Surf. Sci.* **257** 3786
- [8] Zhou L, Xu H J, Long S K 2010 *China Safety Science Journal* **20** 105 (in Chinese) [周莉, 徐浩军, 龚胜科 2010 中国安全科学学报 **20** 105]
- [9] Hu H, Jin Z Y 2010 *Int. J. Multiphas. Flow* **36** 672
- [10] Wang J T, Liu Z L, Gou Y J 2006 *Sci. China Ser. E* **49** 590
- [11] Hoke J L 2000 *Ph. D. Dissertation* (USA Illinois: University of Illinois)
- [12] Huang L Y, Liu Z L, Liu Y M 2010 *J. Eng. Thermophys.-Res* **31** 647 (in Chinese) [黄玲艳, 刘中良, 刘耀民 2010 工程热物理学报 **31** 647]
- [13] Zhu W Y 2007 *M. S. Dissertation* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [朱卫英 2007 硕士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [14] Antonini C, Innocenti M, Horn T 2011 *Cold Reg. Sci. Technol.* **67** 58
- [15] Kulinich S A, Farhadi S, Nose K 2011 *Langmuir* **27** 25
- [16] Varanasi K K, Deng T, Smith J D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 234102
- [17] Tao W Q 2006 *Heat Transfer* (Xian: Northwestern Polytechnical University Press) (in Chinese) [陶文铨 2006 传热学 (西安: 西北工业大学出版社)]

Freezing behavior of droplet impacting on cold surfaces*

Hu Hai-Bao^{1)†} He Qiang¹⁾ Yu Si-Xiao¹⁾ Zhang Zhao-Zhu²⁾ Song Dong^{1)‡}

1) (College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

2) (State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(Received 18 November 2015; revised manuscript received 2 February 2016)

Abstract

Exploring the freezing process and its potential mechanism of the droplets impacting on a solid surface is desperately desired, owing to its anti-icing applications in aircraft, cable, radar, etc. On the controllable low temperature test equipment, the freezing dynamic behaviors of droplets impacting on three cold plates, made of copper, aluminum and silicon, are recorded by a high-speed camera in this paper, and characterized by the droplet spreading diameter, oscillation and freezing time. Here, the freezing behavior of droplets is predicated by observing the color change of the droplet. Through the experimental exploration and theoretical analysis, we reveal the effects of the impacting speed, surface temperature and thermal conductivity of material on the freezing dynamics of the droplet. We demonstrate that a cold surface shrinks the maximum spreading diameter of droplet compared with the surface at ambient temperature; the lower the surface temperature, the shorter the freezing time would be and the smaller the maximum spreading diameter would be; the maximum spreading diameter increases with increasing Weber number, whereas the oscillation and freezing time decrease. Meanwhile, the higher the material thermal conductivity, the shorter the freezing time would be, and the bigger the rising slope of the maximum spreading diameter with increasing Weber number will be. A function to predict the freezing time is derived from thermodynamic condition. The calculated values are in good agreement with the experimental data, with the maximum relative error of less than 5.3%.

Keywords: freezing, droplet, impact, thermal conductivity

PACS: 47.55.dr, 47.55.pb, 44.10.+i, 44.35.+c

DOI: 10.7498/aps.65.104703

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51335010), the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. 3102015ZY017), and the Seed Foundation of Innovation and Creation for Graduate Students in Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. Z2015002).

† Corresponding author. E-mail: huhai bao@nwpu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: songdong1226@nwpu.edu.cn