

微纳复合结构超疏水铝表面抑霜特性研究

鲁祥友¹, 潘雨阳¹, 谢远来²

(1.安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 合肥 230601;

2.中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031)

摘要: **目的** 从微观上揭示超疏水表面的抑霜机理。**方法** 运用化学刻蚀法制备微纳复合结构超疏水铝表面, 在制冷实验台上对试件结霜过程进行微观可视化观测, 并分析试件的霜晶演化规律。将超疏水铝片冷面温度分别设置为-5、-10、-15 °C三个档次, 通过对比普通铝片和超疏水铝片表面的霜晶高度与霜晶质量, 结合相变动力学、经典成核理论、传热与传质理论解释相关结霜与抑霜机理。**结果** 不同的实验阶段及不同的实验温度条件下, 超疏水铝表面本身的抑霜效果虽然有差异, 但是相比普通铝表面的抑霜特性, 超疏水铝表面都具有一定的抑霜效果, 结霜过程整体滞后, 霜层高度发展相对缓慢, 实验进行了 10 min 后, 超疏水表面的霜层高度只有普通表面的 35%。**结论** 由于冷凝水珠在冷表面形成 Wenzel 状态, 水珠浸润在微细结构中, 在一定的条件下, 超疏水铝表面可有效延缓冷凝水珠的生成, 从而抑制结霜。在结霜后期, 当冷凝水珠冻结, 且在表面布满霜晶后, 抑霜效果相对恶化。在经月桂酸修饰后, 普通铝表面也具有一定的抑霜性能, 但效果明显弱于具有微纳复合结构的超疏水表面, 因此建议在制作表面有抑霜需求的材料时, 可以以延缓冷凝水珠的生成为技术手段, 制作合适的表面微纳结构, 以期达到最大程度地抑霜的目的。

关键词: 铝; 凝结; 传热; 微纳结构; 霜晶; 疏水

中图分类号: TG146; TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0106-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.013

Frost Inhibition Characteristics of Superhydrophobic Aluminum Surface of Micro-Nano Composite Structure

LU Xiang-you¹, PAN Yu-yang¹, XIE Yuan-lai²

(1.School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2.Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

ABSTRACT: The paper aims to profoundly reveal the frost inhibition mechanism of the superhydrophobic surface. The surface of superhydrophobic aluminum with micro-nano composite structure was prepared by chemical etching. The frost formation process of the specimen was observed and the frost crystal evolution of the specimen was analyzed on the refrigerating experiment table. The cold surface temperature of the super hydrophobic aluminum sheet was set at -5 °C, -10 °C and -15 °C,

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2019-09-21

Received: 2019-06-03; **Revised:** 2019-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(51606002); 安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2019A0755); 安徽建筑大学自然科学基金项目(JY16-3-184)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51606002) and Provincial Natural Science Research Project of Anhui Province (KJ2019A0755) and the Natural Science Foundation of Anhui Jianzhu University (JY16-3-184)

作者简介: 鲁祥友(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料表面技术与抑霜特性。邮箱: gaoyunwansu@ahjzu.edu.cn

Biography: LU Xiang-you (1973—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: anti-frosting performance of super-hydrophobic surface. E-mail: gaoyunwansu@ahjzu.edu.cn

引文格式: 鲁祥友, 潘雨阳, 谢远来. 微纳复合结构超疏水铝表面抑霜特性研究[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 106-111.

LU Xiang-you, PAN Yu-yang, XIE Yuan-lai. Study on frost inhibition characteristics of superhydrophobic aluminum surface of micro-nano composite structure[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 106-111.

respectively. The frost formation and frost inhibition mechanism were explained by comparing the frost crystal height and mass on the surface of ordinary aluminum sheet and superhydrophobic aluminum sheet in combination with phase change kinetics, classical nucleation theory, heat and mass transfer theory. It was found that the frost inhibition effect of superhydrophobic aluminum surface was different at different experimental stages and temperatures; but compared with the frost inhibition characteristics of ordinary aluminum surface, the superhydrophobic aluminum surface had a certain frost-inhibition effect, and the frost-formation process lagged behind. The frost height developed relatively slowly. After 10 minutes' of the experiment, the frost height on the superhydrophobic surface was only 35% of that of the ordinary surface. Because condensed-water beads formed Wenzel state on the cold surface, the water droplets were infiltrated in a fine structure. Under certain conditions, the formation of condensed-water beads on the ultra-hydrophobic aluminum surface could be effectively delayed, thereby the frost formation could be inhibited. At the later stage of frosting, when the condensed-water beads froze and there were full of frost crystals on the surface, the frost-inhibition effect was relatively deteriorated. Ordinary aluminum surface also has a certain frost inhibition performance after lauric acid modification, but the effect is obviously weaker than that of the superhydrophobic surface with micro-nano composite structure. It is suggested that when producing material whose surface needs the frost-inhibiting feature, delaying the generation of condensed-water beads can be used as a technological means, for producing the suitable superficial micro-nano structure, so as to achieve the frost-inhibiting purpose most effectively.

KEY WORDS: aluminum; condensation; heat transfer; micro-nano structure; frost crystal; hydrophobic

结霜现象普遍存在于热泵、空调等诸多设备, 其对设备运行及性能具有严重影响, 因而研究如何抑制或降低结霜具有很大的实际意义^[1-3]。同时, 近几年的研究结果表明^[4-8], 超疏水特性的表面具有强化换热、防腐、防污、自洁、抑冰等功能, 在工业生产领域具有广阔的应用前景。

关于表面特性对结霜/抑霜的影响, 国内外学者做了大量的实验研究。刘耀民等^[9]通过实验验证了其建立的结霜模型可以有效对霜晶生长过程进行预测。Menini 等^[10]发现, 超疏水表面在多次实验后仍保持较好的性能。周艳艳等^[11]对制备的铝基超疏水表面进行了实验研究, 证实了超疏水表面具有防霜抗冻的特性。Wu 等^[12]提出整个结霜过程是由冷凝水滴产生、合并增大、结冻、生成初始霜晶、霜晶生长等阶段组成。勾昱君等^[13]研究发现, 磁性表面在冷面结霜过程中的液滴粒径相对普通表面更小, 且霜晶更易脱落。陈振乾等^[14]实验验证了超声波可有效抑制结霜初期冷凝水珠的冻结以及霜晶的生长。王皆腾等^[15]研究表明, 水滴冻结时形状改变, 是因为靠近冷面的水滴下部已冻结成形, 而上部未冻结且体积增大所致。丁云飞等^[16]运用静电纺丝法制备了具有纳微结构的超疏水表面, 通过实验验证了超疏水表面的霜晶覆盖率可有效降低。周荃卉等^[17]用超疏水表面与普通表面进行了结霜对比实验, 证明超疏水表面可降低固液间的热传导, 从而达到抑霜的目的。

以上文献对不同表面特性的结霜抑霜性能进行了研究与探讨, 但对不同类型结霜过程的抑霜机制未做深入研究, 尚未从微观上充分揭示超疏水表面的抑霜机理。因此本文运用化学刻蚀-氧化法, 在金属铝表面构建了微纳复合结构, 并通过化学改性获得了较为理想的超疏水特性。通过制冷实验台, 对试件进行

结霜实验, 观测并分析试件的霜晶演化规律, 同时结合相变动力学、经典成核理论、传热与传质理论解释相关机理, 对具有疏水特性的金属表面在抑霜防冻领域的发展具有重要意义。

1 实验

微纳复合结构超疏水铝表面的制备过程如下: 取 30 mm×30 mm×0.5 mm 的光滑铝片, 依次用 600、800、1200 和 2000 目的砂纸打磨后, 分别在丙酮和去离子水中超声震荡 10 min, 取出后烘干。将标记为 1#、2# 和 3# 的试件浸泡在 80 °C 的 8 g/L 氢氧化钠溶液中 3、6、9 min, 以获得表面微米结构。将刻蚀后的 1# 和 2# 试件放入沸水中浸泡 120 min, 将 3# 试件浸泡 180 min 后, 均获得纳米结构。再将 1#、2#、3# 和普通铝片 (4#) 试件烘干, 用 20 g/L 的月桂酸无水乙醇溶液修饰 30 min, 取出后, 放入 120 °C 的烘干箱中 30 min。经测量, 1#、2# 和 3# 试件成功形成了超疏水表面, 其接触角 (CA) 均大于 150°, 4# 试件的接触角为 109°, 而普通铝表面 (5#) 的接触角为 88°。

试件经化学刻蚀后, 在扫描电镜下的微观图像如图 1a 所示, 可以看出, 经过化学刻蚀后的试件表面形成了波浪形的微米结构。在扫描电镜下观察到此时在微米结构之上有一层均匀的针状纳米结构 (如图 1b 所示), 由此可见, 通过化学刻蚀加氧化, 成功地在表面形成了微-纳复合结构。

实验系统如图 2 所示, 由实验段、水冷式散热系统、数据采集系统和显微摄像系统 (CCD) 组成。实验段由试件、半导体制冷装置及水冷式散热系统组成。半导体制冷装置两面均涂有导热硅脂, 以增强传热, 其冷面为试件提供冷量, 热面与下方的水冷式散

热系统相接触。散热系统由 U 型水道水冷头、水泵和恒温水箱组成。温控器通过调节半导体制冷器的输入电流和输入水泵的功率来调节试验件的表面温度。在试验件背面布置热电偶来读取冷表面的温度,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 空气的温湿度由温湿度传感器来测取,其中测温精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测湿精度为 $\pm 2\%$ 。利用数据采集系统和显微摄像系统 (CCD) 对结霜过程进行观测和数据采集。

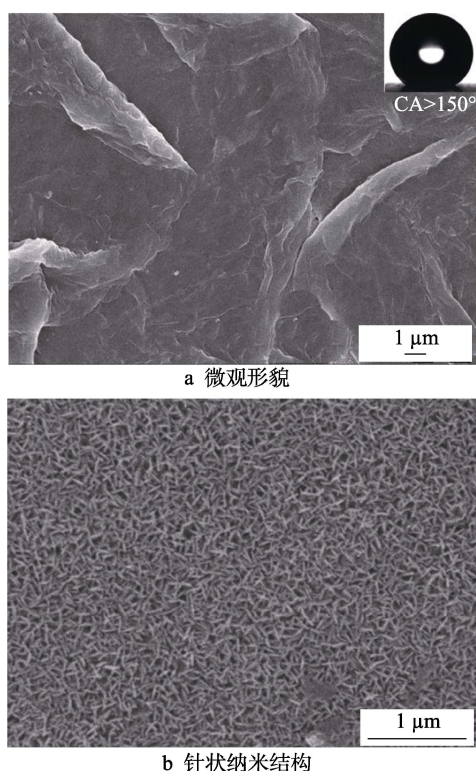
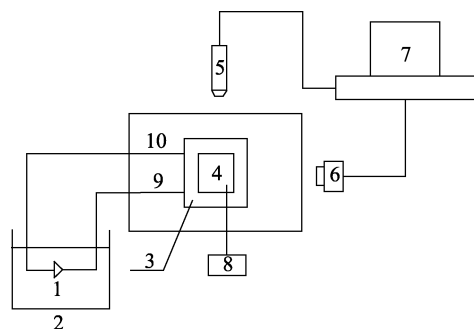


图1 经化学刻蚀-氧化后试件表面的 SEM 形貌
Fig.1 SEM picture of the test piece surface after chemical etching-oxidation



1. Submersible pump; 2. Constant temperature water tank;
3. Semiconductor refrigeration chip; 4. Test piece; 5. Microscope;
6. CCD camera; 7. Computer; 8. Data collection system;
9. Cooling water in; 10. Cooling water out

图2 结霜实验台系统

Fig.2 Diagram of frosting test bench system

2 结果与讨论

本实验环境温度为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 50% 。为

了对普通铝片和超疏水铝片进行结霜实验对比分析, 分别将 5 种表面进行结霜实验, 冷面温度分别设置为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个档次。冷面温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 1#、4#和 5#试件表面的结霜过程如图 3 所示。分析图 3 可见, 当实验进行 3 min 后, 普通表面已经有冷凝水珠形成并合并长大。在实验进行到 5 min 时, 冷凝水珠开始冻结, 此时 4#试件上出现冷凝水珠, 1#试件表面无变化。7 min 时, 冻结的冷凝水珠上开始有霜枝生长, 而此时超疏水表面刚刚形成直径较小的冷凝水珠。10 min 时, 4#和 5#试件表面已经形成了一层较厚的霜层, 而超疏水表面只有一层薄薄的霜膜, 其霜晶高度只有普通表面的 35%, 抑霜效果明显。由此可知, 经月桂酸修饰的普通铝表面虽具有疏水性质, 可以在一定程度上抑制霜晶的生长速率, 但其缺少了表面微细结构, 无法最大程度地发挥疏水表面的抑霜特性, 而具有表面微细结构 (微纳复合结构) 的超疏水表面可在最大程度上发挥其抑霜特性。

由图 4 也可以发现, 随着时间推移, 超疏水表面霜晶生长速率逐渐上升, 且当超疏水表面被霜晶覆盖后, 抑霜性能逐渐减弱, 这与丁云飞等^[18]的研究结果类似。在结霜初期, 由于超疏水表面有效地延缓了冷凝液滴的生成, 整体延缓了冷表面的结霜进程。因此即使随着结霜过程的持续进行, 冷面温度持续降低, 但相比普通表面, 超疏水表面依然可以有效地降低结霜量。

依据经典成核理论和相变动力学理论, 亚稳态的水蒸气与稳定态的液滴之间存在能量势垒, 空气中的水蒸气想要在冷面上形成水珠需要克服这种势垒。气态的水蒸气较液态的液滴更为活跃, 水蒸气的吉布斯自由能较高, 两者的差值即吉布斯自由能的降低量 (ΔG) 在数值上等于水蒸气液化所需的相变驱动力 f 。最小成核半径制约着液滴的生长, 只有液核半径大于最小成核半径的液滴, 才能形成并逐渐长大。相变驱动力 f 、最小成核半径 r_c 、能量势垒 ΔE 的表达式为^[19-20]:

$$f = -\Delta G = kT \ln(p_s / p_v) \quad (1)$$

$$r_c = \frac{2\gamma_{lv}}{\Delta G} \quad (2)$$

$$\Delta E = \frac{16\pi\gamma_{lv}^3}{3\Delta G^2} J_{(\theta)} \quad (3)$$

式中: f 为相变驱动力, J; ΔG 为吉布斯自由能, J; ΔE 为能量势垒, J; k 为玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$; M 为水蒸气分子量, g/mol; n 为单位体积水蒸气分子数, m^{-3} ; p_s 、 p_v 分别为空气中水蒸气分压力、冷面温度对应水蒸气饱和压力, Pa; r_c 为最小成核半径, m; T 为冷面温度, K; θ 为接触角, ($^{\circ}$); γ_{lv} 为水滴与空气间的界面能, J/m^2 ; $J_{(\theta)}$ 为能量势垒因子,

$$J_{(\theta)} = \frac{1}{2} - \frac{3}{4} \cos \theta + \frac{1}{4} \cos^3 \theta$$

$J_{(\theta)}$ 与接触角的函数关系如图 5 所示。由图 5 可

知，能量势垒 ΔE 的大小受接触角的影响，随着接触角的增大， $J_{(\theta)}$ 逐渐增大， $J_{(\theta)}$ 越大，水蒸气在冷面上凝聚成液滴需要克服的能量势垒 ΔE 越大，难以在冷面上冷凝成液滴，从而增强了超疏水表面的抑霜性

能。 $J_{(\theta)}$ 从 60° 至 150° 增长剧烈，之后趋于平稳，逐渐增长到 1。可见接触角超过 150° 时，水蒸气抗液化的能力较强，这可能也是将表面接触角超过 150° 的材料定义为超疏水材料的原因。

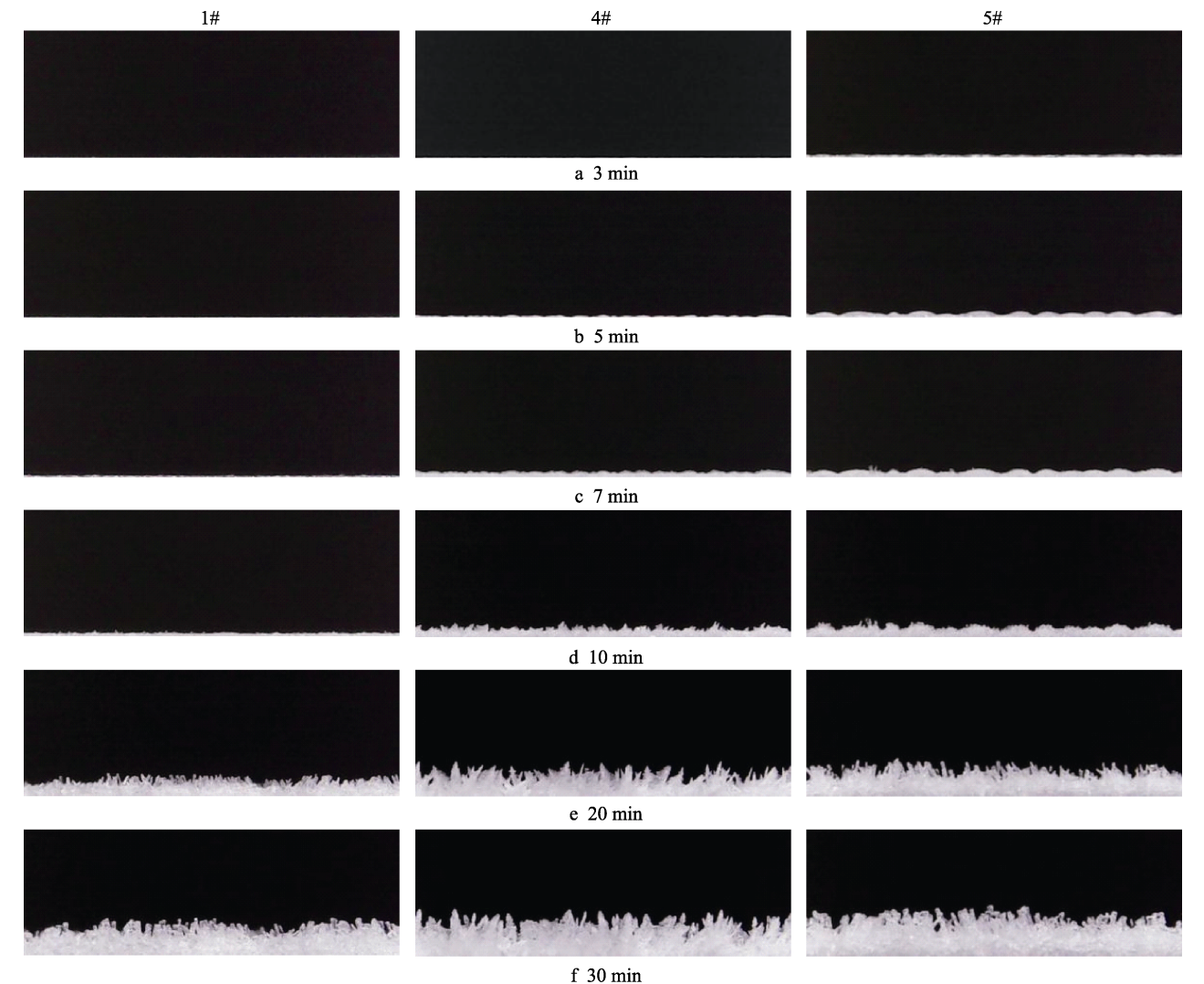


图 3 三种表面在冷面温度为 -5°C 时的结霜对比
Fig.3 Frosting on three surfaces at a cold surface temperature of -5°C

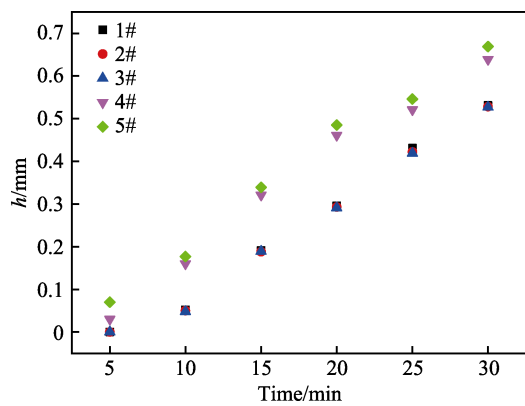


图 4 冷面温度为 -5°C 时不同表面的霜高对比
Fig.4 Frost height contrast of different surfaces when the cold surface temperature is -5°C

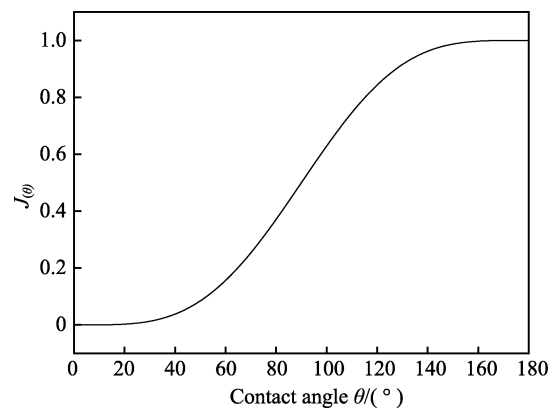


图 5 $J_{(\theta)}$ 随接触角的变化曲线
Fig.5 $J_{(\theta)}$ with the contact angle curve

通过以上分析表明,制作的超疏水表面具有一定的抑霜作用,特别体现在结霜初期延缓了冷凝水珠的生成,使超疏水表面结霜过程整体滞后。因此,建议以延缓冷凝水珠的生成为技术手段,制作合适的表面微纳结构,以期达到最大程度地抑霜的目的。

上述现象与张友法等^[2]研究结果有区别,其研究表明,具有微-纳复合结构的超疏水表面具有延缓水珠冻结的作用。出现以上两种不同现象的原因可能是因为冷面上水珠的生成形式不同^[21]。本实验中试件上的水滴是通过温度的持续降低冷凝得到,在冷凝水珠生成时形成了 Wenzel 状态^[22],如图 6a 所示。虽然较大的接触角使得在水平方向上水珠与固体表面的接触面积减小,但在 Wenzel 状态下,由于表面存在微纳复合粗糙结构,液滴浸润在粗糙结构中,在竖直方向上,水滴与固体表面的接触面积增大,传热面积又有所增加,二者之间有抵消作用,使超疏水表面进一步延缓冷凝水珠冻结的效果减弱。因此当表面被冻结的冷凝水珠覆盖后,霜晶生长过程与普通铝表面相似。而张友法的实验过程中,水珠是使用移液器滴落在冷面上,此时水珠与固体表面形成了 Cassie 状态^[23],如图 6b 所示。此状态下水珠与固体表面之间的接触是一种复合接触,即固液接触面间的凹槽内有空气存在。这种复合接触减小了水珠与固体表面的接触面积,且固液间还有空气的存在,进一步增加了热阻,有效延缓了水珠的冻结。

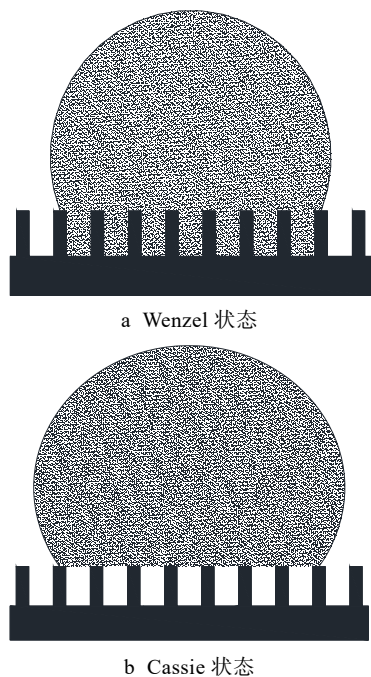


图 6 金属表面上液滴形态

Fig.6 Schematic diagram of droplet shape on metal surface:
a) Wenzel state; b) Cassie state

冷面温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,普通表面(5#)和超疏水表面(1#)的结霜情况如图 7 和图 8 所示。同图 4 对比发现,冷面温度越低,生成冷凝水珠到冻结成霜的时间越短,抑霜效果恶化。在冷面温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,实

验进行 5 min 时,超疏水表面上形成一层平均厚度为 0.038 mm 的霜层。10 min 时,霜层高度是普通铝表面的 66%。可见随着冷面温度的持续降低,虽然超疏水表面的抑霜性能有所减弱,但与普通铝表面相比,仍然可以有效降低结霜量。在冷面温度为 $-5\sim-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,相变驱动能的变化规律如图 9 所示。可见随着冷面温度的持续降低,相变驱动能增加,水蒸气更易在冷面上转化为冷凝液滴,进而冻结成霜。这也与实验结果相吻合。

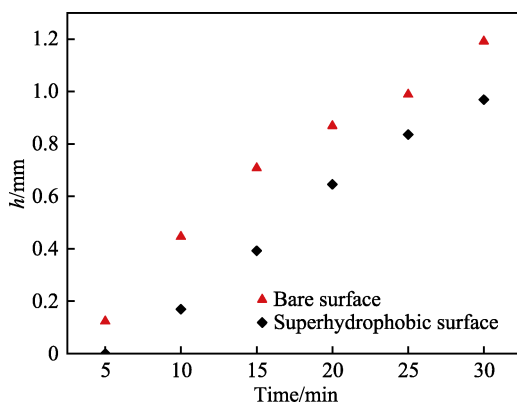


图 7 冷面温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时两种表面的霜高对比
Fig.7 Frost height contrast of two surfaces when the cold surface temperature is $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

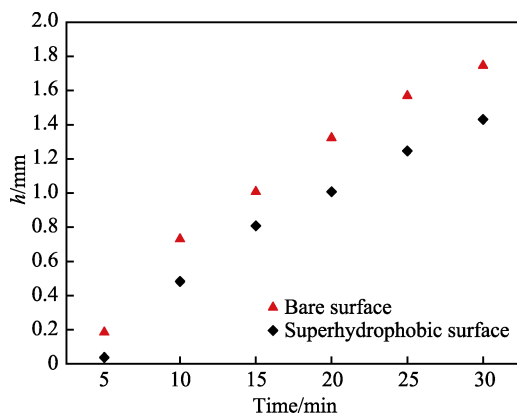


图 8 冷面温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时两种表面的霜高对比
Fig.8 Frost height contrast of two surfaces when the cold surface temperature is $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$

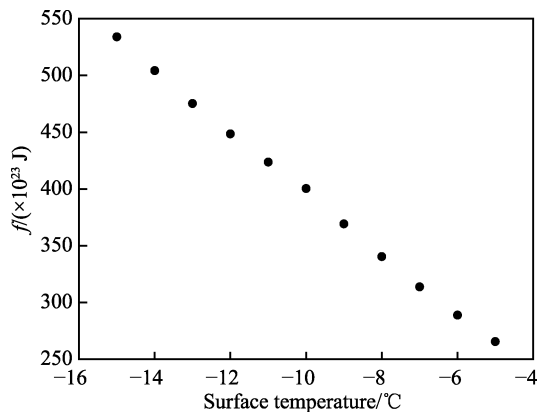


图 9 冷面温度对液化驱动能的影响
Fig.9 Effect of cold surface temperature on liquefaction driving energy

3 结论

本文运用化学刻蚀-氧化法, 制备了具有超疏水特性的铝表面, 表面接触角为 155.6° 。在构建的制冷平台上与普通铝表面进行了对比实验, 比较了两种表面在不同冷面温度下的结霜特性, 结果表明:

1) 表面微细结构对制作超疏水表面有重要影响, 运用化学刻蚀-氧化法在金属铝表面构筑微纳复合结构, 经月桂酸修饰后, 可制得理想的超疏水防冰材料表面。

2) 在结霜初期, 超疏水表面由于具有较大的接触角, 与普通铝表面相比, 生成相同半径液滴的能量势垒较大, 因此可有效延缓冷凝水珠的生成。生成的冷凝水珠直径较小, 导致了结霜过程的整体滞后, 在冷面温度为 -5°C , 实验进行到 10 min 时, 超疏水表面的霜层高度只有普通铝表面的 35%, 可见超疏水表面拥有优良的抑霜防冻特性。

3) 当冷面温度持续降低, 相变驱动能近似呈线性增长, 减少了水蒸气转化为冷凝水珠的时间, 削弱了超疏水表面的抑霜性能。在 -15°C 的冷面上实验进行到 10 min 时, 超疏水表面的霜层高度是普通铝表面的 66%, 可见降低冷面温度, 将对抑霜不利。

4) 随着实验的持续进行, 冷面温度持续降低, 超疏水表面的结霜速率有所增加。从整体上看, 相比普通铝表面, 其表面特性能有效降低结霜量, 从而达到降低结霜速率, 提高设备运行效率的目的。

参考文献:

- [1] 陈小娇, 武卫东, 汪德龙. 超疏水表面抑制结霜研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 87-92.
CHEN Xiao-jiao, WU Wei-dong, WANG De-long. Research progress in anti-frosting performance of super-hydrophobic surfaces[J]. Surface technology, 2015, 44(2): 87-92.
- [2] 张友法, 吴洁, 余新泉, 等. 可控阵列微纳结构超疏水铜表面冰霜传质特性[J]. 物理化学学报, 2014, 30(10): 1970-1978.
ZHANG You-fa, WU Jie, YU Xin-quan, et al. Frost and ice transport on superhydrophobic copper surfaces with patterned micro- and nano-structures[J]. Acta physico-chimica sinica, 2014, 30(10): 1970-1978.
- [3] KYOUNGMIN K, MINHWAN K, DONGRIP K, et al. Thermal performance of micro-channel heat exchangers according to the design parameters under the frosting conditions[J]. International journal of heat and mass transfer, 2014, 71: 626-632.
- [4] SHIBUICHI S, ONDA T, SATOH N, et al. Super water-repellent surfaces resulting from fractal structure[J]. Journal of physical chemistry, 1996, 100(50): 19512-19517.
- [5] NEINHUIS C, BARTHLOTT W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces[J].

Annals of botany, 1997, 79(6): 667-677.

- [6] YAMASHITA H, NAKAO H, TAKEUCHI M, et al. Coating of TiO_2 photocatalysts on super-hydrophobic porous teflon membrane by an ion assisted deposition method and their selfcleaning performance[J]. Nuclear instruments & methods in physics research, 2003, 206: 898-901.
- [7] RUAN Min, LI Wen, WANG Bao-shan, et al. Preparation and anti-icing behavior of super-hydrophobic surfaces on aluminum alloy substrates[J]. Langmuir, 2013, 29(27): 8482-8491.
- [8] JIANG Wei, HE Jian, XIAO Feng, et al. Preparation and antiscaling application of superhydrophobic anodized CuO nanowire surfaces[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2015, 54: 6874-6883.
- [9] 刘耀民, 刘中良, 黄玲艳, 等. 基于分形论的霜晶生长模型及计算机模拟[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(11): 1864-1869.
LIU Yao-min, LIU Zhong-liang, HUANG Ling-yan, et al. Fractal model for simulation of frost formation and growth[J]. Science China series E: Technological sciences, 2009, 39(11): 1864-1869.
- [10] RICHARD M, ZAHIRA G, MASOUD F. Highly resistant icephobic coatings on aluminum alloys[J]. Cold regions science and technology, 2011, 65(1): 65-69.
- [11] 周艳艳, 于志家. 铝基超疏水表面抗结霜特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(6): 929-933.
ZHOU Yan-yan, YU Zhi-jia. The defrosting behavior of the super-hydrophobic aluminum surfaces[J]. Journal of chemical engineering of Chinese universities, 2012, 26(6): 929-933.
- [12] WU Xiao-min, DAI Wan-tian, XU Wang-fa, et al. Mesoscale investigation of frost formation on a cold surface[J]. Experimental thermal and fluid science, 2007, 31(8): 1043-1048.
- [13] 勾昱君, 刘中良, 刘耀民, 等. 磁场对冷表面上结霜过程影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(3): 465-467.
GOU Yu-jun, LIU Zhong-liang, LIU Yao-min, et al. The study of frost formation under magnetic field[J]. Journal of engineering thermophysics, 2009, 30(3): 465-467.
- [14] 陈振乾, 李栋. 超声波影响初始霜晶生长的微观可视化研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(1): 28-35.
CHEN Zhen-qian, LI Dong. Visualization of effects of ultrasound on liquid droplet solidification and frost formation on cold flat surface [J]. Journal of basic science and engineering, 2012, 20(1): 28-35.
- [15] 王皆腾, 刘中良, 勾昱君, 等. 冷铜表面上水滴冻结时的变形[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2006, 36(11): 1344-1354.
WANG Jie-teng, LIU Zhong-liang, GOU Yu-jun, et al. Deformation of freezing water droplets on a cold copper surface[J]. Science in china series E: Technological sciences, 2006, 36(11): 1344-1354.

(下转第 140 页)

- contact and rail corrugation[J]. Tribology international, 2005, 38(8): 769-774.
- [12] GRASSIE S L. Rail corrugation: Characteristics, causes, and treatments[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 2009, 223(6): 581-596.
- [13] OOSTERMEIJER K H. Review on short pitch rail corrugation studies[J]. Wear, 2008, 265(9-10): 1231-1237.
- [14] EADIE D T, KALOUSEK J, CHIDDICK K C. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena[J]. Wear, 2002, 253(1): 185-192.
- [15] 刘棣华. 粘弹阻尼减振降噪应用技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- LIU Di-hua. Application technology of viscoelastic damping in noise and vibration reduction[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1990.
- [16] 雷晓燕, 张鹏飞. 阻尼车轮减振降噪的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 60-64.
- LEI Xiao-yan, ZHANG Peng-fei. Experimental study on reducing the noise and vibration of damped wheels[J]. China railway science, 2008, 29(6): 60-64.
- [17] CHEN G X, ZHOU Z R, OUYANG H, et al. A finite element study on rail corrugation based on saturated creep force-induced self-excited vibration of a wheelset-track system[J]. Journal of sound and vibration, 2010, 329(22): 4643-4655.
- [18] 陈光雄, 钱韦吉, 莫继良, 等. 轮轨摩擦自激振动引起小半径曲线钢轨波磨的瞬态动力学[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 71-76.
- CHEN Guang-xiong, QIAN Wei-ji, MO Ji-liang, et al. A transient dynamics study on wear-type rail corrugation on a tight curve due to the friction-induced self-excited vibration of a wheelset-track system[J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(9): 71-76.
- [19] 赵晓男, 陈光雄, 崔晓璐, 等. 高速列车车轮多边形磨耗的形成机理及影响因素探究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 8-13.
- ZHAO Xiao-nan, CHEN Guang-xiong, CUI Xiao-lu, et al. Formation mechanism and influencing factors of the polygonal wear of high-speed train wheels[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 8-13.
- [20] YUAN Y. An eigenvalue analysis approach to break squeal problem[C]//Proceedings of the 29th ISATA conference on automotive braking systems. Florence: ISATA, 1996: 3-6.
- [21] OREGUI M, LI Z, DOLLEVOET R. An investigation into the modeling of railway fastening[J]. International journal of mechanical sciences, 2015, 92(6): 1-11.
- [22] 潘旦光. 直接确定 Rayleigh 阻尼系数的一种优化方法[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 16-21.
- PAN Dan-guang. An optimization method for the direct determination of Rayleigh damping coefficients[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(9): 16-21.
- [23] 岳金. 碳纤维复合材料防护门抗冲击性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- YUE Jin. Study on the impact resistance performance of the carbon fiber composites blast door[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.

(上接第 111 页)

- [16] 丁云飞, 伍彬, 吴会军, 等. 柱状微结构超疏水表面制备及其结霜性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 106-111.
- DING Yun-fei, WU Bin, WU Hui-jun. Preparation of superhydrophobic surface with cylindrical microstructure and the research of the surface frost characteristics[J]. Surface technology, 2015, 44(1): 106-111.
- [17] 周荃卉, 余新泉, 张友法, 等. 喷砂-阳极氧化-氟化处理构筑铝合金超疏水表面[J]. 高等学校化学学报, 2010, 31(3): 456-462.
- ZHOU Quan-hui, YU Xin-quan, ZHANG You-fa, et al. Fabrication of superhydrophobic surface on aluminum alloy by sandblasting-anodizing-fluorination[J]. Chemical journal of Chinese universities, 2010, 31(3): 456-462.
- [18] 丁云飞, 伍彬, 吴会军. 微纳米结构 ZnO 超亲/疏水表面结霜特性研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2013, 12(4): 52-55.
- DING Yun-fei, WU Bin, WU Hui-jun. Study on frost characteristics of micro-nano structure ZnO superhydrophilic/hydrophobic surface[J]. Journal of guangzhou university (Natural science edition), 2013, 12(4): 52-55.
- [19] 吴晓敏, 王维城. 冷面结霜初始形态的理论分析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 286-288.
- WU Xiao-min, WANG Wei-cheng. Theoretical analysis of initial behavior of frost formed on a cold surface[J]. Journal of engineering thermophysics, 2003, 24(2): 286-288.
- [20] 闵乃本. 晶体生长的物理基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 45-70.
- Min Nai-ben. Physical basis of crystal growth[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982: 45-70.
- [21] 郑黎俊, 乌学东, 楼增, 等. 表面微细结构制备超疏水表面[J]. 科学通报, 2004, 49(17): 1691-1699.
- ZHENG Li-jun, WU Xue-dong, LOU Zeng, et al. Superhydrophobicity from microstructured surface[J]. Chinese science bulletin, 2004, 49(17): 1691-1699.
- [22] WENZEL R N. Resistance of solid surface to wetting by water[J]. Industrial and engineering chemistry, 1936, 28(8): 988-994.
- [23] CASSIE A, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. Trans faraday soc, 1944, 40: 546-551.