

研究论文

水平表面结霜过程的实验研究

马强, 吴晓敏, 陈永根

(清华大学热能工程系热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京市 CO₂ 资源利用与减排技术重点实验室, 北京 100084)

摘要: 对水平表面在低温高湿条件下结霜过程进行实验研究, 分析了冷面温度、湿空气温度和表面特性等因素对水珠冻结和霜层生长的影响。结果表明: 冷面温度越低, 过冷水珠冻结时间越短、冻结直径越小; 在湿空气温度与冷面温度温差相等的条件下, 湿空气温度越低, 过冷水珠冻结时间越短、冻结直径越小; 疏水表面上过冷水珠的冻结时间比裸铝表面晚。冷面温度越低, 湿空气流速越快, 则霜层生长越快。

关键词: 相变; 表面; 传热; 冻结时间; 霜晶形貌; 霜层高度

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150324

中图分类号: TK 123

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) S1—0095—05

Experimental study of frosting on horizontal plate

MA Qiang, WU Xiaomin, CHEN Yonggen

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Beijing Key Laboratory of CO₂ Utilization and Reduction Technology, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Frosting process on a horizontal plate was experimentally investigated in this paper. This study focuses on several factors affecting the condensate water droplets freezing process and frost layer growth process, *i.e.* the cooling surface temperature, the air temperature and humidity, and the surface type. The results showed that the condensate droplets are smaller and freeze earlier with lower cooling surface temperature and lower humid air temperature. The water droplets freezing onset time on the hydrophobic surface is about 13 min later than on the bare aluminum surface, which means the frost process on the hydrophobic was delayed. The frost layer grows faster with lower cooling surface temperature and higher air velocity.

Key words: phase change; surface; heat transfer; freezing onset time; frost crystals shape; frost height

引 言

结霜现象广泛存在于空气源热泵、航空航天、输电电缆、风力发电等领域并带来一系列危害。例如, 换热器结霜会增大换热热阻、阻碍流动使传热恶化; 飞机机翼结霜使阻力增大、升力减小; 风力机叶片结霜降低风力发电效率并产生安全隐患。

Wu 等^[1-2]发现冷面上的结霜过程经历了水珠生

成、长大、冻结、初始霜晶生成以及霜晶成长等过程。许旺发等^[3]测量了水平冷面结霜过程中, 过冷水珠冻结的时间和冻结直径。Sahin^[4]认为霜晶可以分为片状霜晶和柱状霜晶两大类, 张新华^[5]对紫铜表面上霜晶形貌进行了更为细致的划分。

冷面上霜层生长的实验研究开始较早^[6-8]。Cheng 等^[9]实验和理论研究了自然对流条件下平板表面结霜过程, 考察了冷面温度、湿空气温度、相

2015-03-16 收到初稿, 2015-03-26 收到修改稿。

联系人: 吴晓敏。第一作者: 马强 (1990—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20130002110073); 清华大学自主科研计划项目 (20131089319)。

Received date: 2015-03-16.

Corresponding author: Prof. WU Xiaomin, wuxiaomin@tsinghua.edu.cn

Foundation item: supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20130002110073) and the Tsinghua University Initiative Scientific Research Program (20131089319).

对湿度和速度对霜层生长的影响。Lee 等^[10]研究多种环境因素对霜层生长的影响,并且推导了霜层生长计算式。Sahin^[11]和 Kandula^[12]做了类似的工作,但将霜层生长计算式拓展到更广的适用范围。Hermes 等^[13-14]、Kandula^[15]和 Nascimento 等^[16]对霜层生长过程中密度的变化进行了研究,得到了霜层密实化过程的计算方法。

Huang 等^[17]研究了具有微纳结构的超疏水铜表面上的结霜过程,得出超疏水表面上冷凝形成的水珠更小而且更分散,水珠冻结时间较晚,而且超疏水表面上形成的初始冰晶呈六方晶体。Liu 等^[18]实验得出,疏水表面上冷凝水珠冻结比黄铜表面晚 55 min,说明疏水表面具有很好的延缓结霜的性能。Jing 等^[19]和 Kim 等^[20]研究了不同表面的结霜过程,也得到疏水性表面可以延缓结霜的结论。

已有研究的结霜实验一般在较高的湿空气温度下进行,而生产生活中,设备表面结霜很多都处于低温高湿的环境中。本文完善了课题组已有的结霜实验台,对低温高湿条件下水平表面的结霜过程进行了实验研究,主要考察冷面温度、湿空气温度、表面特性等因素对冷凝水珠冻结和霜层生长的影响。本文的研究结果使影响霜层生长的因素更为明确,并对探究合理的抑霜手段具有借鉴意义。

1 实验系统

本文研究了受迫对流条件下水平冷面上水珠生长过程和结霜过程,实验系统参考文献[1-3],但增加了湿空气冷却系统。本文对低温高湿条件下冷面结霜进行了实验研究,实验条件如表 1 所示。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Value
surface temperature $T_w/^\circ\text{C}$	-20, -15, -12; -13, -8, -5
air temperature $T_{\text{air}}/^\circ\text{C}$	-5, 2
relative humidity RH	85%
air velocity $u/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.92, 0.62, 0.31
bare surface contact angle CA_b	89°
hydrophobic surface contact angle CA_h	142°

2 水珠冻结时间和霜晶形貌

2.1 冷面温度的影响

图 1 是在冷面温度 $T_w = -13, -8, -5^\circ\text{C}$, 湿空

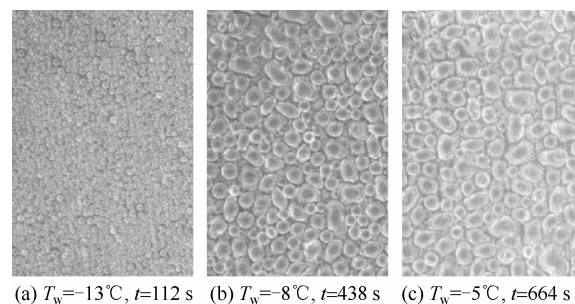


图 1 $T_{\text{air}}=2^\circ\text{C}$, $\text{RH}=85\%$, $u=0.92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 水珠开始冻结图片

Fig.1 Pictures of water droplets freezing

气温度 $T_{\text{air}}=2^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\text{RH}=85\%$, 流速 $u=0.92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下水珠开始冻结时的照片。实验结果说明冷面温度越低, 水珠开始冻结的时间越短且开始冻结时水珠越小。

使用 CCD 相机从尾部沿湿空气流动的逆向拍照以获取霜晶的形貌, 图 2 为不同冷面温度下, 实验时间为 30 min 时的霜晶形貌。从图中可以看出, 冷面温度越低, 霜晶沿高度方向生长越快。冷面温度为 -13°C [图 2(a)], 非常小的水珠迅速冻结, 霜晶主要沿垂直冷面方向生长; 冷面温度为 -5°C [图 2(c)], 霜晶形貌类似于大水珠的冻结, 之后霜层在冻结的大水珠之间和水珠上生长, 沿垂直冷面方向生长慢; 而冷面温度为 -8°C [图 2(b)], 霜晶形貌类

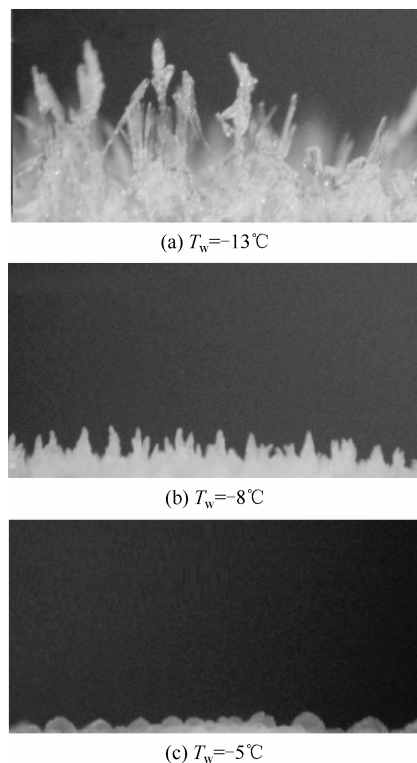


图 2 $T_{\text{air}}=2^\circ\text{C}$, $\text{RH}=85\%$, $u=0.92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $t=30 \text{ min}$ 霜晶形貌

Fig.2 Pictures of frost crystal shape

似于在冻结的较大水珠的基础上，霜晶沿垂直冷面方向生长，但其生长较 -13°C 冷面慢很多。

2.2 湿空气温度的影响

在冷面温度 $T_w = -20, -15, -12^{\circ}\text{C}$ ，湿空气温度 $T_{\text{air}} = -5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\text{RH}=85\%$ ，湿空气流速 $u=0.92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下，水珠的冻结时间分别为 92、216 和 230 s。与冷面温度 $T_w = -13, -8, -5^{\circ}\text{C}$ ，湿空气温度 $T_{\text{air}}=2^{\circ}\text{C}$ 的实验数据相比，在湿空气温度和冷面温度温差相等的情况下，湿空气温度越低，水珠的冻结时间越短。

图 3 为不同冷面温度下，实验时间为 30 min 时的霜晶形态。从图中可以看出，冷面温度越低，霜晶沿高度方向生长越快。因为 3 个冷面温度都较低，霜晶主要沿垂直冷面方向生长。

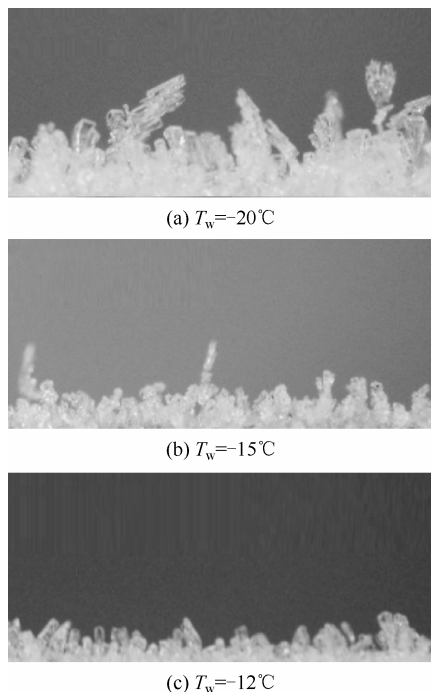


图 3 $T_{\text{air}} = -5^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=85\%$, $u=0.92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $t=30\text{ min}$ 霜晶形态
Fig.3 Pictures of frost crystal shape

2.3 表面特性的影响

图 4 为自制的疏水表面（接触角 142° ）在冷面温度 $T_w = -5^{\circ}\text{C}$ ，湿空气温度 $T_{\text{air}}=2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\text{RH}=85\%$ ，湿空气流速 $u=0.92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的实验条件下，水珠开始冻结时的照片。

可以看出，与裸铝表面上的水珠形态相比，疏水表面上的水珠形态更规整，呈球缺状。与裸铝表面在同样实验条件下的水珠冻结时间 664 s 相比，疏水表面水珠冻结时间为 1438 s，说明疏水表面具有很好的延缓霜晶出现的作用。

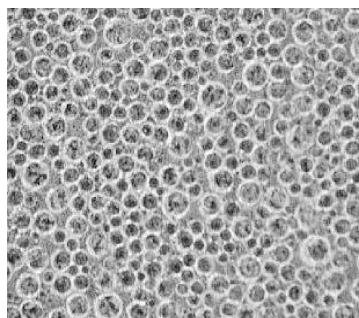


图 4 $T_{\text{air}}=2^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=85\%$, $u=0.92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 疏水表面水珠形态
Fig.4 Water droplets on hydrophobic surface

3 霜层生长的实验结果与分析

本文研究了冷面温度、湿空气温度以及湿空气流速对裸铝表面结霜的影响，并对实验结果进行分析。首先，对不同实验条件下水蒸气分子转化为晶体状态的相变驱动势进行计算，以 $-\Delta g$ 表征^[21]

$$-\Delta g = kT_w \ln \alpha \quad (1)$$

其中， k 为 Boltzmann 常数， $\alpha=p/p_s$ ， p 为湿空气中水蒸气的分压， p_s 为冷面温度对应的水蒸气饱和压力。表 2 为不同条件下的相变驱动势。

表 2 相变驱动势

Air temperature $T_{\text{air}}/^{\circ}\text{C}$	Surface temperature $T_w/^{\circ}\text{C}$	Driving force $-\Delta g \times 10^{23}/\text{J}$
2	-13	397
	-8	242
	-5	149
-5	-20	420
	-15	258
	-12	163

3.1 冷面温度对霜层生长的影响

图 5 为在冷面温度 $T_w = -13, -8, -5^{\circ}\text{C}$ ，湿空气温度 $T_{\text{air}}=2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\text{RH}=85\%$ ，湿空气流速 $u=0.92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的实验条件下，霜层的平均高度随时间的增长规律。从图中可以看出，随时间的增长，霜层不断生长，而且冷面温度越低，霜层生长越快。这是因为冷面温度越低，水蒸气分子转化为晶体状态的相变驱动势越大，而且冷面温度越低，霜晶越趋于沿垂直冷面方向生长。

3.2 湿空气温度对霜层生长的影响

图 6 为在冷面温度 $T_w = -20, -15, -12^{\circ}\text{C}$ ，湿空气温度 $T_{\text{air}}=-5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\text{RH}=85\%$ ，湿空气流速 $u=0.92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的实验条件下，霜层的平均高度随时间的增长规律。

对比图 5 和图 6, $T_w=-20^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}}=-5^\circ\text{C}$ 的霜高 (图 6 中三角形) 与 $T_w=-13^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}}=2^\circ\text{C}$ 的霜高 (图 5 中三角形) 相比, 湿空气温度和冷面温度的温差相等, 湿空气温度较高, 结霜量较多。这是因为相变驱动力相近, 由于相对湿度相等, 湿空气温度较高则水蒸气浓度较大, 则参与相变的分子多。但是在结霜时间 $t=10\text{ min}$ 时, 冷面温度 $T_w=-20^\circ\text{C}$ 的霜层平均高度较高, 这是因为结霜初期, 冷面温度越低, 霜晶越趋于垂直冷面方向生长, 所以霜晶的平均高度较高。

$T_w=-15^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}}=-5^\circ\text{C}$ 的霜高 (图 6 中圆形) 与 $T_w=-8^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}}=2^\circ\text{C}$ 的霜高 (图 5 中圆形) 相比, 在结霜时间 $t=10, 20, 30, 40\text{ min}$ 时, 冷面温度 $T_w=-15^\circ\text{C}$ 霜层平均高度较高, 而 $t=50, 60\text{ min}$ 时, 冷面温度 $T_w=-8^\circ\text{C}$ 霜层平均高度较高。这也是因为, 温度越低的冷面, 霜晶越趋向沿垂直冷面方向生长, 而冷面温度 $T_w=-8^\circ\text{C}$ 的实验中, 湿空气温度较高, 水蒸气浓度较大, 所以一定时间后, 其霜层的平均高度较高。

$T_w=-12^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}}=-5^\circ\text{C}$ 的霜高 (图 6 中正方形) 与 $T_w=-5^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}}=2^\circ\text{C}$ 的霜高 (图 5 中正方形) 相比, 冷面温度 $T_w=-12^\circ\text{C}$ 霜层的平均高度较高。这是因为, 冷面温度 $T_w=-12^\circ\text{C}$ 霜层沿垂直冷面方向快速生长, 而冷面温度 $T_w=-5^\circ\text{C}$ 霜层类似于霜层在冻结的大水珠上和冻结的大水珠之间生长, 沿垂直冷面方向生长慢。

在湿空气温度和冷面温度温差相等的条件下, 两组实验水蒸气分子转化为晶体状态的相变驱动力相近, 冷面温度越高即湿空气温度越高, 水蒸气浓度越大, 结霜量越多。但是, 霜晶的形貌也影响霜高, 冷面温度越低霜晶越趋于沿垂直冷面方向生长。

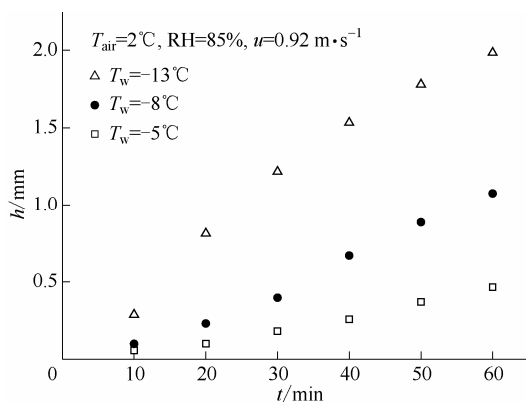


图 5 2°C 湿空气、不同冷面温度下霜层随时间的增长

Fig.5 Frost growth with different cooling surface temperature ($T_{\text{air}}=2^\circ\text{C}$)

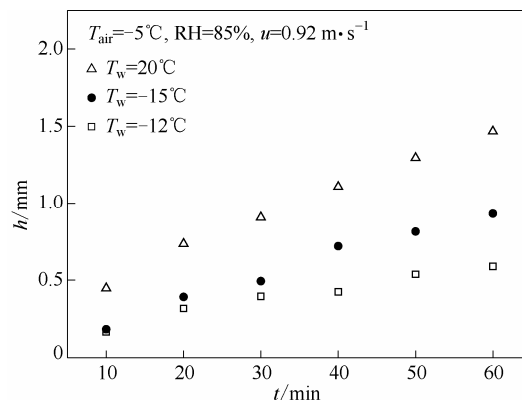


图 6 -5°C 湿空气、不同冷面温度下霜层随时间的增长

Fig.6 Frost growth with different cooling surface temperature ($T_{\text{air}}=-5^\circ\text{C}$)

所以, 在霜层的高度较低时, 冷面温度越低, 霜层高度越高; 在霜层高度较高时, 冷面温度越高, 霜层高度越高。

3.3 湿空气流速对霜层生长的影响

图 7 为在冷面温度 $T_w=-13^\circ\text{C}$, 湿空气温度 $T_{\text{air}}=2^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\text{RH}=85\%$, 湿空气流速 $u=0.92, 0.62, 0.31\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的实验条件下, 霜层的平均高度随时间的增长规律。从图中可以看出, 湿空气流速越快, 随时间的增长, 霜层平均高度越高, 这是因为, 湿空气流速快, 在同样的时间内, 有更多的湿空气流过冷面, 更多的水蒸气发生冷凝。

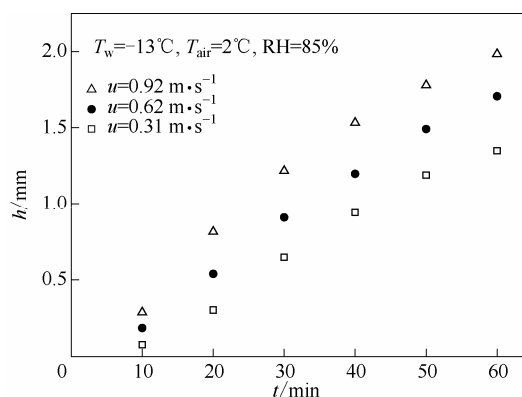


图 7 不同湿空气流速下霜层随时间的增长

Fig.7 Frost growth with different air velocity

4 结 论

本文对水平冷表面在低温高湿条件下的结霜过程进行了实验研究, 观测了表面上过冷水珠冻结时间、霜晶形貌和霜层生长过程, 分析了冷面温度、来流湿空气温度和表面特性等因素对水珠生长和霜层生长的影响。主要得到以下结论。

(1) 冷面温度越低, 过冷水珠冻结时间越短、

冻结直径越小; 在湿空气温度与冷面温度温差相等的条件下, 温度越低, 过冷水珠冻结时间越短、冻结直径越小。

(2) 疏水表面上过冷水珠的冻结时间比裸铝表面晚, 说明疏水表面具有一定延缓结霜的性能。

(3) 冷面温度越低, 霜晶越趋向于沿垂直冷面方向生长。

(4) 冷面温度越低, 湿空气流速越快, 则霜层生长越快。

(5) 在湿空气流速相等、湿空气温度与冷面温度温差相等的条件下, 霜层生长速度受水蒸气浓度和霜晶生长形式的影响。

References

- [1] Wu Xiaomin, Dai Wantian, Xu Wangfa, Tang Liming. Mesoscale investigation of frost formation on a cold surface [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, **31**: 1043-1048.
- [2] Wu Xiaomin, Dai Wantian, Shan Xiaofeng, Wang Weicheng, Tang Liming. Visual and theoretical analyses of the early stage of frost formation on cold surfaces [J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2007, **14**(3): 257-268.
- [3] Xu Wangfa(许旺发), Wu Xiaomin(吴晓敏), Wang Weicheng(王维城), Tang Liming(唐黎明). Experimental study of frost growth on horizontal cooling plate [J]. *Cryogenics*(低温工程), 2003, **6**: 41-46.
- [4] Sahin A Z. Effective thermal conductivity of frost during the crystal growth period [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, (43): 539-553.
- [5] Zhang Xinhua(张新华). Study of frost formation on a vertical cold plates with and without external electric field under natural convection conditions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [6] Jones B W, Parker J D. Frost formation with varying environmental parameters [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1974, **97**(2): 255-259.
- [7] Barron R F, Han L S. Heat and mass transfer to a cryosurface in free convection [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1965, **84**(4): 499-506.
- [8] Biguria G, Wenzel L A. Measurement and correlation of water frost thermal conductivity and density [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamental*, 1970, **9**(7): 129-138.
- [9] Cheng C H, Wu K H. Observations of early-stage frost formation on a cold plate in atmospheric air flow [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, **125**(1): 95-102.
- [10] Lee K, Lee T, Kim W. A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, **40**(18): 4359-4365.
- [11] Sahin A Z. An experimental study on the initiation and growth of frost formation on a horizontal plate [J]. *Experimental Heat Transfer*, 1994, **7**(2): 102-119.
- [12] Kandula M. Frost growth and densification on a flat surface in laminar flow with variable humidity [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, **39**(8): 1030-1034.
- [13] Hermes C J L, Piucco R O, Barbosa J R, et al. A study of frost growth and densification on flat surfaces [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, **33**(2): 371-379.
- [14] Hermes C J L, Loyola F R, Nascimento V S. A semi-empirical correlation for the frost density [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, **46**: 100-104.
- [15] Kandula M. Correlation of water frost porosity in laminar flow over flat surfaces [J]. *Special Topics & Reviews in Porous Media — An International Journal*, 2012, **3**(1): 79-87.
- [16] Nascimento V S, Loyola F R, Hermes C J L. A study of frost build-up on parallel plate channels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, **60**: 328-336.
- [17] Huang L, Liu Z, Liu Y, Gou Y. Preparation and anti-frosting performance of super-hydrophobic surface based on copper foil [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, **50**(4): 432-439.
- [18] Liu Z, Gou Y, Wang J, et al. Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**(25/26): 5975-5982.
- [19] Jing T, Kim Y, Lee S, Kim D, Kim J, Hwang W. Frosting and defrosting on rigid superhydrophobic surface [J]. *Applied Surface Science*, 2013, **276**: 37-42.
- [20] Kim K, Lee K. Frosting and defrosting characteristics of a fin according to surface contact angle [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, **54**(13/14): 2758-2764.
- [21] Min Naiben(闵乃本). Physics Foundation for Crystal Growth(晶体生长的物理基础)[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982: 340-344.