

研究论文

超声波抑制平板表面结霜的试验研究

李 栋, 陈振乾

(东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 对自然对流条件下施加 20 kHz 频率的超声波和未施加超声波两种作用机制下平板表面的结霜现象进行了微观可视化研究, 对比分析了有无超声波作用下不同冷表面温度对霜层厚度的影响。研究显示, 冷表面霜层在施加超声波作用后仅有少量生长, 霜层分布相对规则, 由一簇簇“霜线”组成。结果表明, 超声波对平板表面霜层的生长具有显著的抑制作用。

关键词: 结霜; 超声波; 霜线; 冷表面温度

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 09-2171-06

Effect of ultrasound on restraining frost formation on flat surface

LI Dong, CHEN Zhenqian

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: The effect of ultrasound on restraining the occurrence of frost on the flat surface was studied. The frost phenomena on the flat surface with and without 20 kHz ultrasound under natural convection conditions were visually studied. The effects of different cold surface temperatures on the frost thickness with and without ultrasound were compared and analyzed. The experimental results indicated that the frost layer grew very slowly with the effect of ultrasound, and the frost layer composed by “frost line” was more inerratic. The results showed that the frost growth on the flat surface was remarkably restrained by ultrasound.

Key words: frost formation; ultrasound; frost line; cold surface temperature

引 言

当暴露在湿空气中的冷表面温度低于露点温度时, 空气中的水蒸气会在冷表面凝结。如果冷表面温度低于冰点温度, 水蒸气会凝结成霜。结霜现象广泛存在于各种航空航天飞行器表面以及制冷空调系统的蒸发器表面。霜层的形成严重影响飞行器飞行安全以及制冷空调系统运行的稳定性。因此, 探求有效的抑霜和除霜方法无疑具有重要的工程应用价值。

大量研究通过改变冷表面的表面特性(如添加各种亲水或疏水的表面涂层)抑制结霜^[1-7], 虽然在很大程度上延缓了霜的形成, 但并没有从根本上解决结霜的问题。还有部分文献研究外电场的作用对结霜的影响^[8-9], 虽然外电场的施加对霜的生长产生了一定的抑制作用, 但作用并不明显。文献[10]研究了机械振荡对霜层形成的影响, 发现 100~200Hz 频率的振荡并不能有效抑制结霜。因此, 寻求更加有效的抑霜方法便成了研究的重点。

近年来, 超声波以其频率高、波长短, 具有传

2009-03-26 收到初稿, 2009-06-17 收到修改稿。

联系人: 陈振乾。第一作者: 李栋 (1985—), 男, 博士研究生。

Received date: 2009-03-26.

Corresponding author: Prof. CHEN Zhenqian, zqchen@seu.edu.cn

播方向性强,遇到障碍物易反射的特点在暖通空调与制冷领域取得了广泛的应用,并在雾化加湿、促进传热传质、增强除垢等多方面取得了可喜的研究成果^[11]。而超声波在抑霜和除霜方面的研究却很少。

閻勤劳等^[12]在超声波除霜方面做了研究,认为超声波频率为 20 kHz 时,纵波除霜效果最好;当超声波频率为 15 kHz 时,横波的除霜效果最好。双声源除霜效果明显优于单声源,尤其是横波双声源除霜效果最好^[11-12]。他们虽然对不同超声波频率下霜的生长做了定量的分析,但没有给出相应的霜生长的图片对比,对超声波除霜机理也没有进行深入研究。

为此,本文对自然对流条件下的平板表面施加 20 kHz 超声波以及不施加超声波两种作用机制下的霜层生长以及分布进行了对比显微观测,记录了两种作用机制下霜的不同生长过程以及结构形态,并对有无超声波作用下不同冷表面温度对霜层厚度的影响进行了对比试验分析,探讨了超声波对自然对流条件下平板表面结霜过程的影响。

1 试验装置

结霜试验装置简图如图 1 所示,整个试验系统由制冷系统、显微观测系统、数据采集系统、超声波振荡系统组成。制冷系统由半导体制冷片、U 型水道、直流稳压电源、恒温水浴组成。半导体制冷片为试验提供冷源,可实现冷表面温度在 $-30\sim-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化,其冷端和试验片接触,热端与 U 型水道接触,各接触面间涂有导热硅脂,以减少接触热阻。恒温水浴提供 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷水流经 U 型水道,以带走制冷片热端的热量。试验片为 $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的抛光铜片,在其两侧靠近表面处各钻有两个直径 1.2 mm、深度 20 mm 的小孔,均匀布置 4 根 K 型热电偶测量冷表面温度,热电偶布点位置如图 2 所示。霜的分布以及生长采用显微观测系统进行观测,霜层厚度由显微系统测量软件测量。CCD 摄像镜头与显微镜连接,通过视频电缆将显微镜放大的图像传输到计算机中,由图像采集卡记录试验过程。试验所用超声波换能器频率为 20 kHz,超声波为纵波,功率可实现 $0\sim 100\text{ W}$ 内可调。试验中超声波的功率控制在 $50\sim 60\text{ W}$ 之间微变。超声波换能器与平板的位置关系如图 3 所示,换能器和平板平行放置。整个试验过程在一个封闭的大空间进行,环境湿度由超声波加湿器进行

调节,环境温、湿度由温湿度计采集。试验前,用细砂纸将试验铜片打磨抛光,调节显微镜使图像清晰的呈现于计算机上,同时开启直流稳压电源,调节电压,控制试验片冷表面的温度。超声波发生器在电源通电的同时开启,保障在制冷的同时对冷面施加超声波的作用。

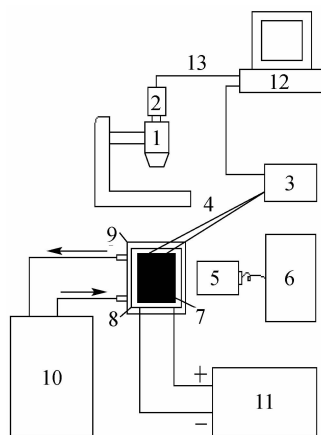


图 1 结霜试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for frosting tests

1—stereo microscope; 2—CCD; 3—data acquisition system; 4—K-type thermocouple; 5—ultrasonic transducer; 6—ultrasonic generator; 7—cold copper surface; 8—semiconductor chilling plate; 9—U-type watercourse; 10—constant temperature water bath; 11—DC regulated power source; 12—image acquisition card; 13—cable

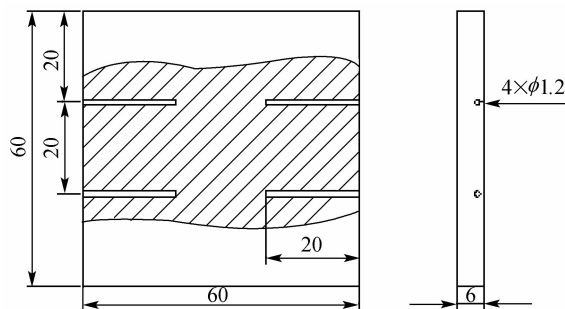


图 2 热电偶布点图

Fig. 2 Location of thermocouples

2 结果分析与讨论

2.1 超声波对霜层生长的影响

为了更具体地观察超声波对霜层生长的影响,对不同试验条件下有无超声波影响的霜层生长过程进行了对比显微观测。图 4 为两种作用机制下的霜层生长图片。从图中可以看出,有无超声波影响下

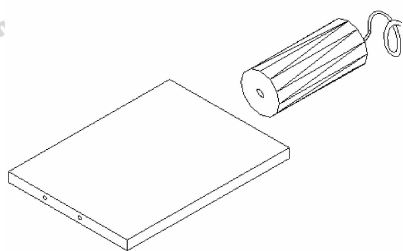


图3 超声波换能器与平板的位置关系示意图

Fig. 3 Location relationship between ultrasonic transducer and flat

的霜层生长状态完全不同。180 s 时，无超声波作用的霜层开始出现文献 [13] 所述的羽毛状霜枝，如图 4 中 A 所示。随着时间的推移，霜枝迅速长大，600 s 时，霜枝的羽毛形状更加明显。此外，霜层由于霜枝对水蒸气的作用能力的不同出现了相界面的不稳定生长。而在超声波影响下，霜层仅有少量生长，直到 420 s 才有少量霜晶出现，600 s 时霜层高度和 180 s 时相比只有少量的增加，形成的

霜层致密，霜层表面相对平坦光滑。这是由于超声波具有机械作用，在传播过程中会引起平板表面附近局部空气中水蒸气周期性的剧烈振荡，水蒸气振动的加速度很大，是重力加速度的 10^4 数量级倍^[14]，如此大的加速度使得沿着超声波传播方向上冷表面附近的水蒸气扰动剧烈，冷表面附近的水蒸气由于浓度梯度向冷表面产生定向迁移的作用被破坏，使得进入霜晶界面的水蒸气分子数显著减少，水蒸气不能在霜表面凝华沉积增加霜层厚度，霜层几乎不生长。此外，超声波在空气中传播时，其振动能量不断被周围的空气以及霜层表面吸收，尤其在霜层表面和周围空气，以及霜层和铜板的分界面上，由于分界面上的特性阻抗不同，将产生反射，引起分子间的相对摩擦而发热^[14]，使得霜层表面的温度升高，从而使霜层表面和周围空气的温度梯度减小，霜晶界面趋于稳定生长^[15]，所以霜层表面相对平坦光滑。由图可见，超声波作用下霜层的厚度明显低于无超声波作用的情况。

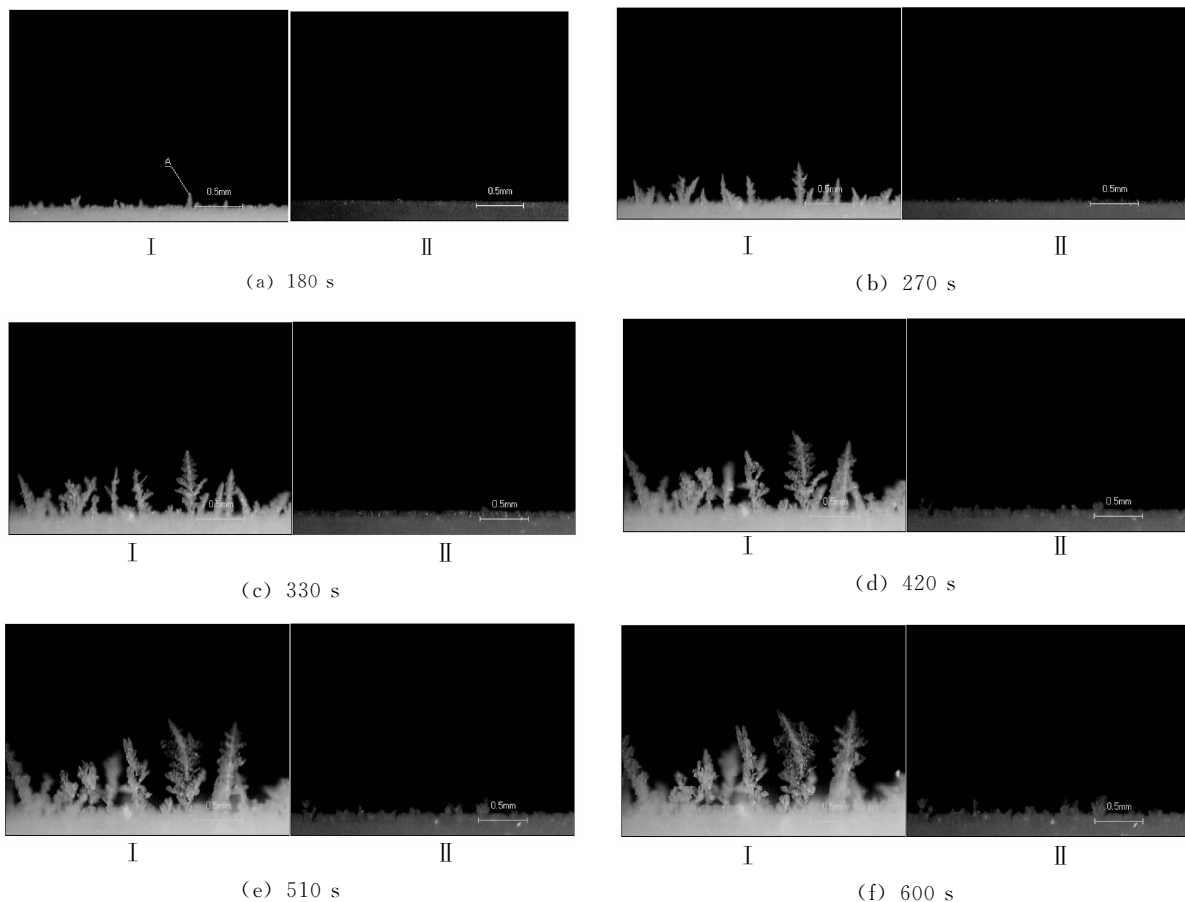


图4 有无超声波作用下霜层生长对比

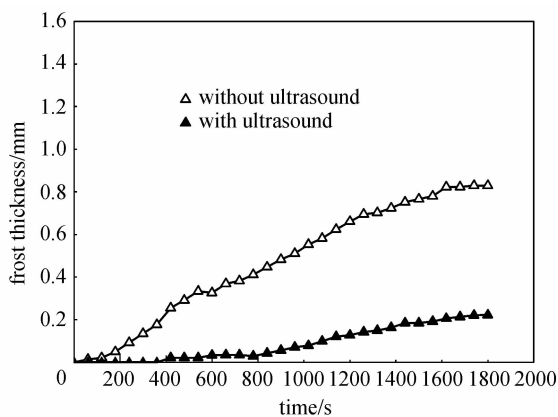
Fig. 4 Comparisons of frost layer growth with/without ultrasound (49×)

I —without ultrasound; II —with ultrasound

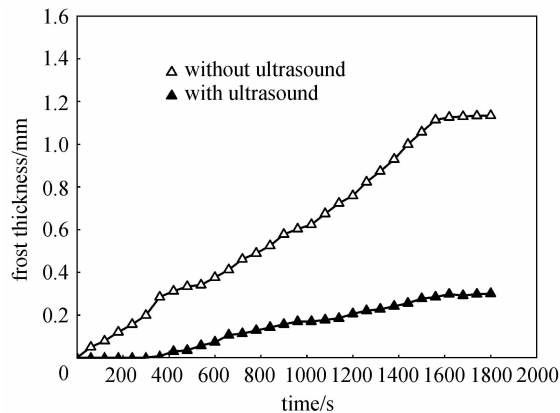
为了定量分析超声波对霜层生长的影响,图5给出了不同试验条件下,有无超声波作用的结霜厚度随时间的变化曲线。从图中可以看出,超声波的存在对霜层生长具有明显的抑制作用。以图5(a)为例,超声波作用下的霜晶直到420 s才出现,而此时无超声波作用下的霜层高度已经达到了0.255 mm。1200 s时,由于超声波的作用,霜层高度仅有0.128 mm,而此时无超声作用下的霜层高度为0.661 mm。1800 s时,无超声波作用下霜层高度达到了0.830 mm,而超声波作用下霜层高度为0.222 mm,仅是无超声波作用下霜层高度的26.7%。由4种试验条件下的图线对比分析可以发现,超声波作用下平板上初始霜晶出现的时间比无超声波影响的情况平均晚5~6 min。随着时间的推移,两种作用机制下霜层厚度的差异越明显。图中所示30 min内,超声波作用下的霜层厚度平均仅为未加超声波作用的28%。

2.2 超声波对霜层分布及其结构的影响

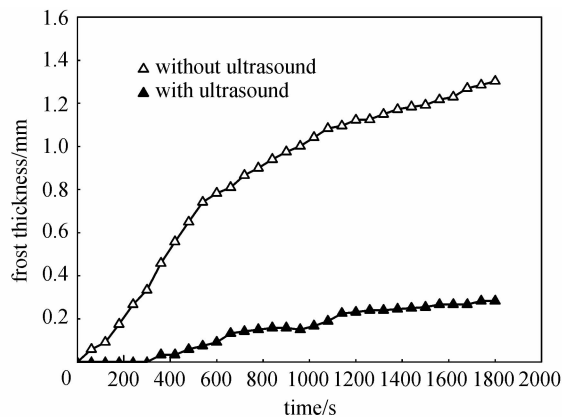
图6为有无超声波作用下霜层分布以及霜晶结构典型对比图片。从图中可以看出,有无超声波作用下霜层分布以及霜晶结构完全不同。无超声波影响下,霜层凹凸不平,100 s时,局部出现如图6(a)中A所示的霜枝。随着时间的推移,霜枝显著生长,相互倾覆,如图6(b)左图所示。而超声波作用下的霜层相对规则,霜晶开始也并不像无超声波作用的情况一样垂直冷表面方向生长,而是沿着水平的方向,形成一道道“霜线”,如图6(a)中B所示。这是由于超声波频率高,传播方向性好,沿着传播方向上的水蒸气微小颗粒因受机械作用而凝聚,在空间形成周期性的堆积进而沉降在冷表面上便形成了“霜线”形状的霜层结构。随着时间的推移,霜线会发生合并变粗,“霜线”的结构越来越不明显,如图6(b)右图所示。



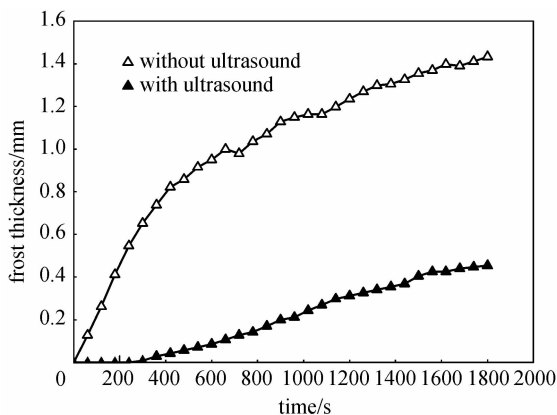
(a) $T_a=13^{\circ}\text{C}$, $T_w=-12^{\circ}\text{C}$, $\Phi=60\%$



(b) $T_a=13^{\circ}\text{C}$, $T_w=-18^{\circ}\text{C}$, $\Phi=60\%$



(c) $T_a=13^{\circ}\text{C}$, $T_w=-24^{\circ}\text{C}$, $\Phi=60\%$



(d) $T_a=13^{\circ}\text{C}$, $T_w=-30^{\circ}\text{C}$, $\Phi=60\%$

图5 有无超声波作用下霜层高度生长比较

Fig. 5 Variations of frost thickness growth with/without ultrasound

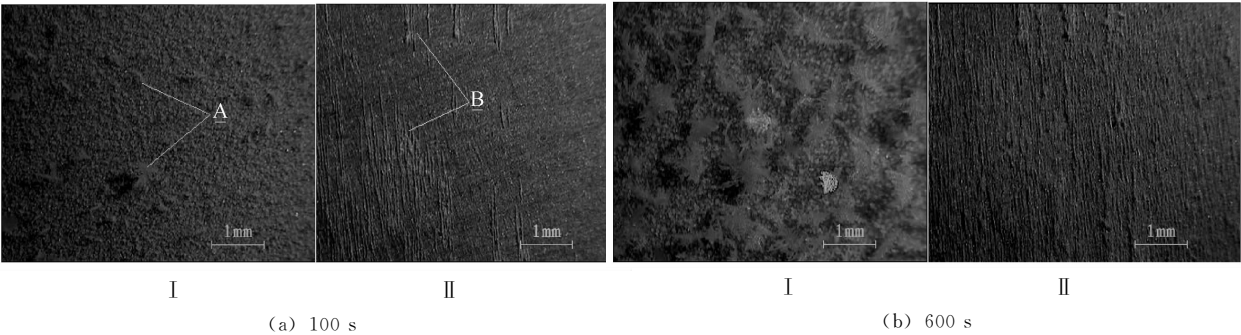


图 6 有无超声波作用下霜层结构对比
Fig. 6 Comparisons of frost layer structure with/without effect of ultrasound (23×)
($T_a=18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_w=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Phi=54\%$)
I —without ultrasound; II —with ultrasound

2.3 超声波作用下冷表面温度对结霜厚度的影响

在相同的环境温度和空气相对湿度下，冷表面温度越低过冷度越大，霜晶生长越容易出现。图 7 为相同的环境温度和空气相对湿度下，冷表面温度对有无超声波作用下结霜厚度的影响。从图 7 (a) 可以看出，随着冷表面温度的增加，霜层厚度显著增加。而超声波作用下冷表面温度对结霜厚度的影响明显减弱。如图 7 (b) 所示，随着冷面温度的降低，霜层高度虽有所增加，但远没有未加超声波作用下冷表面温度对结霜厚度影响显著。30 min 内，未加超声波作用下，试验中最低冷面温度 ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和最高冷面温度 ($-12\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下霜层厚度相差为 0.6 mm，施加超声波作用后，最低冷面温度 ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和最高冷面温度 ($-12\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下霜层厚度相差 0.2 mm，仅为前者的 1/3。整个试验过程中， $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷表面温度下霜层厚度甚至出现了交叉。这是因为平板周围水蒸气由于超声波的机械作用剧烈振荡，使得大多数水蒸气分子由于振荡具有的能量足以克服不同冷平板表面温度对其产生的相变驱动力的作用从而逃逸出霜晶界面。冷表面温度越低，相变驱动力越大，超声波作用下沉降在冷表面的霜晶相对越多，所以随着冷表面温度的降低，超声波作用下霜层厚度会少量增加，但从总体上分析，在以上试验的冷表面温度范围内，超声波的作用使得冷表面温度对霜层厚度的影响明显减弱。

3 结 论

对自然对流条件下施加 20 kHz 频率的超声波和未施加超声波两种作用机制下平板表面的结霜现象进行了显微可视化研究。试验结果表明，在超声

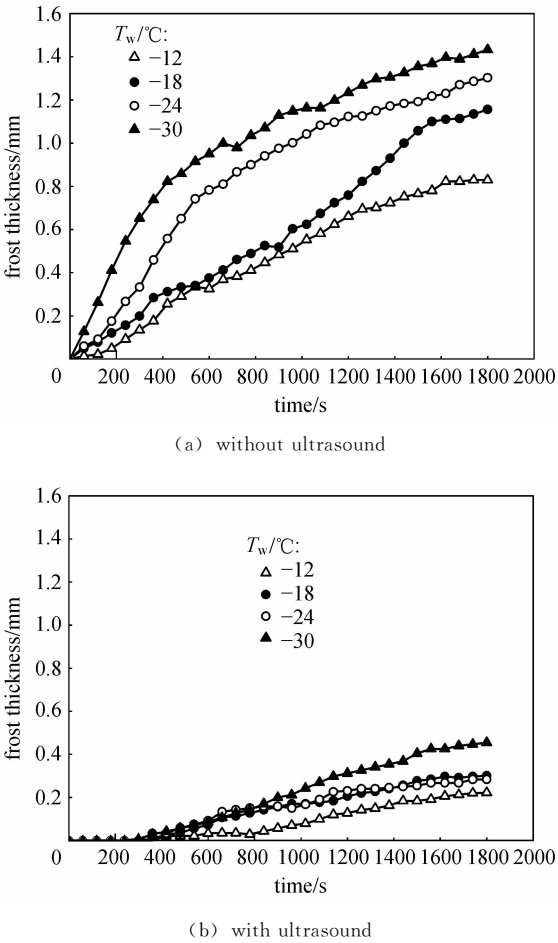


图 7 冷面温度对有无超声波影响下结霜厚度的影响
Fig. 7 Effects of cold surface temperature on frost thickness with/without ultrasound
($T_a=13\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Phi=60\%$)

波作用下霜层生长厚度平均仅为在相同条件下未加超声波作用霜层厚度的 28%，形成的霜层致密，霜层表面相对平坦光滑，霜层分布相对规则，沿着超声波传播的方向形成“霜线”形状的霜层结构。

在超声波作用下,冷表面温度在 $-30\sim-12^{\circ}\text{C}$ 范围内对霜层厚度增长的影响明显减弱。结果表明,超声波能够显著抑制平板表面霜层的生长。

符 号 说 明

- T_a ——环境温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_w ——冷表面温度, $^{\circ}\text{C}$
 Φ ——环境相对湿度,%

References

- [1] Shin J, Tikhonov A V, Kim C. Experimental study on frost structure on surfaces with different hydrophilicity: density and thermal conductivity. *ASME J. Heat Transfer*, 2003, **125**: 84-94
- [2] Lee Hyunuk, Shin Jongmin, Ha Samchul, Choi Bongjun, Lee Jaekeun. Frost formation on a plate with different surface hydrophilicity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47** (22): 4881-4893
- [3] Liu Zhongliang, Zhang Xinghua, Wang Hongyan, Meng Sheng, Cheng Shuiyuan. Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, **31** (7): 789-794
- [4] Wang Hongyan (王洪燕), Liu Zhongliang (刘中良), Meng Sheng (孟声), Ma Chongfang (马重芳), Zhang Xinhua (张新华). Experimental study on characteristics of frost formation on strong hydrophilic surfaces under natural convection conditions. *Journal of Refrigeration* (制冷学报), 2004, **4**: 25-29
- [5] Liu Zhongliang, Gou Yujun, Wang Jieteng, Cheng Shuiyuan. Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51** (25/26): 5975-5982
- [6] Zhang Xinhua (张新华), Liu Zhongliang (刘中良), Wang Jieteng (王皆腾), Gou Yujun (勾昱君), Meng Sheng (孟声), Ma Chongfang (马重芳). Experimental study of restraining frost formation on nano-SiO₂ coating surface under natural convection conditions. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2006, **27** (2): 277-279
- [7] Wang X, Jiang S. Discussions on hydrophobic surface for preventing frosting and speeding defrosting of heat pump. *Energy Conserv. Technol.*, 2004, **127** (22): 37-38
- [8] Wang Chi-Chuan, Huang Ren-Tsung, Sheu Wen-Jenn, Chang Yu-Juei. Some observations of the frost formation in free convection: with and without the presence of electric field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, **47** (14/15/16): 3491-3505
- [9] Zhang Xinhua (张新华), Liu Zhongliang (刘中良), Wang Jieteng (王皆腾), Gou Yujun (勾昱君), Meng Sheng (孟声), Cheng Shuiyuan (程水源). Influences of surface characteristics on frost formation on vertical cold plate with electric field. *Journal of Refrigeration* (制冷学报), 2006, **27** (3): 54-58
- [10] Cheng Chin-Hsiang, Shiu Chiuan-Che. Oscillation effects on frost formation and liquid droplet solidification on a cold plate in atmospheric air flow. *International Journal of Refrigeration*, 2003, **26**: 69-78
- [11] Lu Zhi (陆志), Yao Ye (姚晔), Lian Zhiwei (连之伟). Application of ultrasonic technique in HVAC&R field. *Building Energy&Environment* (建筑热能通风空调), 2007, **26** (6): 19-22
- [12] Yan Qinlao (阎勤劳), Zhu Lin (朱琳), Zhang Mi'e (张密娥), Yan Ningxia (阎宁霞), Hui Xueying (惠学英). Study on ultrasonic defrost technology of refrigeration fan. *Journal of Agriculture and Machine* (农业机械学报), 2003, **34** (3): 74-75
- [13] Wu Xiaomin, Dai Wantian, Xu Wangfa, Tang Liming. Mesoscale investigation of frost formation on a cold surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, **31** (8): 1043-1048
- [14] Yuan Yiquan (袁易全), Chen Sizhong (陈思忠). Principle and Application of Modern Ultrasound (近代超声原理与应用). Nanjing: Nanjing University Press, 1996
- [15] Wu Xiaomin (吴晓敏), Dai Wantian (戴万田), Wang Weicheng (王维城). Theoretical analysis of interface transformation during frost crystal growth. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology* (清华大学学报: 自然科学版), 2007, **47** (8): 1352-1355