## [研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.04.009

# 冷面霜层生长过程及其抑制对策实验研究

## 董 涛,夏 鹏

(上海工程技术大学 机械工程学院,上海 201620)

摘 要:针对目前制冷设备在制冷过程中易结霜导致蒸发器外侧的换热热阻增加,传热系数降低等问题,课题组进行了 憎水性抑霜涂层的研究。设计了采用半导体制冷方式的试验装置,通过与温度传感器连接的温控器来控制并实时测量 冷表面温度,采用体视显微镜对结霜过程进行观测并测量出霜层在每个时刻的厚度变化,并在显微镜上连接 CCD 摄像 头,将放大的图片通过视频电缆传输到计算机。对比实验表明:憎水性表面能有效延缓霜晶的形成,且在一定时间范围 内,憎水性表面霜层的厚度始终小于普通铝表面。同时,运用热力学理论分析了憎水性表面霜层生长较慢的原因,当接 触角达到极限 180°时,冰晶就不能粘附在冷表面上。因此憎水性涂层能够有效抑制霜层的生长。

关键 词:制冷系统;结霜;憎水性表面;抑制结霜;霜高生长

中图分类号:TB61 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)04-0044-04

## Experimental Study on Growth Process and Inhibition of Cold Frost

#### DONG Tao, XIA Peng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, 201620, China)

Abstract: Aiming at the refrigeration equipment current problems of frosting phenomenon, heat resistance increasing and heat transfer coefficient decreasing outside the evaporator the study of hydrophobic defrosting coating was carried out. The research group designed the test device with semiconductor refrigeration, measured the temperature by the temperature controller connected with temperature sensor and real-time measurement of cold surface temperature, observed and measured the frost thickness changes at each time of the frosting process by stereo microscope, connected CCD camera to the microscope, magnified picture cable was transmitted to the computer. The comparison experiments show that the hydrophobic coat can effectively delay the formation of frost, and the hydrophobic coat frost thickness is always lower than aluminum surface in a certain period of time. The reason why the frost layer grows slowly on the hydrophobic coat is analyzed by thermodynamic theory, and when the contact angle reaches 180° limit, ice crystals cannot adhere to the cold surface. So the hydrophobic coat can effectively restrain the growth of frost.

Keywords: refrigeration system; frosting; hydrophobic coat; restrain frosting; frost growing

当暴露在空气中的表面温度低于露点时,会出现 凝结现象;当表面温度在0℃以下,水蒸气就会发生相 变生成霜<sup>[1]</sup>。结霜是制冷工程等领域中最常见的现 象之一,会对制冷系统的运行造成重大的损害,不但使 换热器表面的热阻增加,而且增加空气的流动阻力,使 换热器换热能力大幅度降低,风机功耗增加,从而影响 整个制冷系统的正常工作,所以定期除霜必不可 少<sup>[24]</sup>。目前,传统的除霜方法不仅增加投资费用而且 还会带来能源的消耗,所以探究有效的抑制霜层生长 的手段无疑非常重要<sup>[5-6]</sup>。课题组通过实验对比憎水 性表面与普通金属表面结霜过程,得出憎水性表面能 有效的抑制霜层的增长,为将来研制抑制结霜的材料 提供参考。

#### 1 实验装置

整个实验系统的分为3个部分:制冷装置、温控装置及图像采集系统。实验系统如图1所示,采用半导体制冷方式,制冷片最大制冷量为75W,通过风机对半导体制冷片的热端进行散热,用铝板作为冷表面材

第一作者简介:董涛(1990),男,山东邹城人,硕士,主要研究方向为制冷及低温技术。E-mail:DT429524@163.com

收稿日期:2017-10-14;修回日期:2017-11-08

料。铝板实验前经过加工打磨,使其表面光滑,同时在 铝板的侧面靠近表面处钻孔,布置温度传感器,孔深为 12 mm。通过与温度传感器连接的温控器来控制并实 时测量冷表面温度。温控器的测量误差为±0.5 ℃, 控制精度为0.1 ℃。采用上海光密仪器有限公司生产 的 XTL-850P 体视显微镜观测结霜过程,并测量出霜 层在每个时刻的厚度,显微镜上连接有 CCD 摄像头, 显微镜放大的图片通过视频电缆传输到计算机。





Figure 1 Experimental system diagram

#### 2 实验过程

用尺寸为150.0 mm×120.0 mm×9.5 mm 的铝板 表面作为结霜测试表面,在铝板的右半部分均匀涂抹 黏度100 mm<sup>2</sup>/s 的硅油作为憎水性表面,铝板的左半 部分为普通铝表面。显微镜调焦,对准实验表面,利用 显微镜来测量不同表面上霜层的厚度。实验过程中, 使用冷光源给试验台照明。环境的温湿度使用 Testo 温湿度测量仪测量。

在环境温度为 22.9 ℃, 空气湿度为 51.4% 的自 然对流条件下进行实验研究, 冷表面的温度随时间的 变化如图 2 所示。



图2 冷表面温度随时间变化



随着冷表面温度的下降,冷表面开始出现结霜现象,通过 CCD 显微镜观察。

 1)无涂层的表面上结霜过程:结露阶段→水珠变 大→形成水膜→水膜冻结→冰层上结霜。

 2)有硅油涂层的憎水性表面上结霜过程:结露阶 段→水珠变大→形成冰球→冰球上结霜。

通过实验观察到:相比涂有硅油的憎水性表面,光 滑的铝表面上水珠出现的时间较早,露珠直径较小,但 很快形成水膜,在较短的时间内形成冰核,霜层开始生 长,且形成的霜层上面的枝晶较多并且数量均匀;涂有 硅油的憎水性表面上结露时间晚于光滑的铝表面,露 珠直径较大,露珠冻结时间较晚,憎水性表面并未形成 水膜而是结成大的冰珠,霜层上面的枝晶分布不均匀。 光滑铝表面与憎水性表面结霜情况如图3所示,左半 部分光滑铝表面上霜层十分致密,而右半部分涂有硅 油的憎水性表面上,由于霜晶在冻结的冰球上生长,使 得霜层比较疏松。





图 4 所示为环境温度 22.9 ℃,湿度 51.4% 的工 况下,铝表面温度从环境温度降至-8.7 ℃,普通铝表 面和憎水性表面上不同霜层厚度的对比。



图 4 不同表面上霜层厚度随时间的变化 Figure 4 Variation of frost layer thickness with time on different surfaces

## 3 理论分析<sup>[7-10]</sup>

在实验过程中把亚稳态过饱和水蒸气凝结或凝华 的整个过程看作气相生长系统。假设气相的温度和压 力分别为 *T* 和 *P*,并且整个系统的温度均匀相等。气 相的化学势表示为μ(*P*,*T*)。当温度为 *T* 时平界面下 液相的水或者固相的冰作稳定相,此时对应温度 *T* 的 饱和压力  $P_s$  即为稳定相的平衡压力,稳定相的化学势 表示为 $\mu(P_s,T)$ 。根据热力学理论,可以得到亚稳态 与稳态化学势之间的关系为

 $\mu(P,T) = \mu(P_s,T) + R_m T \ln (P/P_s)_{\circ}$ 

从亚稳态过饱和水蒸气转变为稳定相的液相 (水)或固相(冰)时,系统摩尔自由焓的改变量(不考 虑界面张力)为

 $\mu(P_s, T) - \mu(P, T) = G_{m2} - G_{m1} = -R_m T \ln (P/P_s)$ 。 式中  $G_{m1}$ 为亚稳态时系统摩尔自由焓; $G_{m2}$ 为稳定相时 系统摩尔自由焓。

因为 $R_{\rm m}$ , T都大于 0, 且  $P/P_{\rm s} > 1$ , 可知系统自由 焓具有减小的趋势, 这与系统自发进行的条件相符。 又 $R_{\rm m} = N_0 \cdot k_{\circ}$  式中:  $N_0$  为阿弗加德罗常数, 取 $N_0 =$ 6. 02 × 10<sup>23</sup> mol<sup>-1</sup>; k 为玻尔兹曼常数, 取k = 1. 38 × 10<sup>-23</sup> J·K<sup>-1</sup>。

則  $\Delta G_{\rm m} = \Delta G_{\rm m2} - \Delta G_{m1} = -N_0 kT \ln (P/P_{\rm s})_{\circ}$ 

式中 $\Delta G_{m1}$ 为1 mol水蒸气的自由焓, $\Delta G_{m2}$ 为1 mol水 蒸气转变为水或冰后的自由焓; $\Delta G_m$ 为1 mol水蒸气 转变为水或冰所引起的自由焓的减少值(不考虑界面 张力)。

$$\chi \qquad \Delta g = \frac{\Delta G_{\rm m}}{N_0} = -kT \ln \left( \frac{P}{P_{\rm s}} \right)_{\circ} \tag{1}$$

式中 $\Delta g$ 为单个水蒸气分子转变为水或冰所引起的自 由焓的减少值(不考虑界面张力)。水蒸气凝结或凝 华过程的本质是相界面向气相的推进过程,相变热力 学中以相变驱动力f表示,设单个水分子的体积为 $\Omega_s$ ,则

 $f = kT(\ln (P/P_s))/\Omega_{so}$ 

假设冷表面是光滑的、空气中的水蒸气是纯净的, 且水蒸气在冷表面上生成的冰晶体呈球冠形。如图 5 所示,球冠形状的冰晶体在冷表面上生成时产生了 2 个界面,即冷表面与冰晶之间的平晶界面  $F_{\rm MS}$ ,以及过 饱和水蒸气与冰晶间球冠界面  $F_{\rm VS}$ 。原来冷面与过饱 和蒸汽间界面  $F_{\rm MV}$ (即消失的界面)为现在的界面  $F_{\rm MS}$ 。在三相交界处的位置 0,界面张力分别为  $\sigma_{\rm VS}$ ,  $\sigma_{\rm MS}$ , $\sigma_{\rm MV}$ 。当3 个力之间平衡可得

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\rm VS} - \sigma_{\rm MS}}{\sigma_{\rm VS}}$$

式中:表面接触角  $\theta$  是平面与  $\sigma_{vs}$ 之间的夹角, $\theta$  的变 化范围为 0°~180°。

其中球冠体积

$$V_{\rm s} = \frac{1}{3} (2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta) \pi r_{\circ}^3$$
(2)



图5 球冠冰核上各界面张力

Figure 5 Spherical surface of ice core on interface tension 球冠与冷表面之间的接触面积

$$S_{F_{\rm MS}} = \pi r^2 (1 - \cos^2 \theta)_{\circ} \tag{3}$$

由公式(2)和公式(3)可知,当球冠体积 $V_s$ 一定 时, $S_{F_{MS}}$ 随着 $\theta$ 的增大单调减小。把接触角 $\theta$ 作为表面 水湿性特性参数,当 $\theta > 90°$ 时,冰晶与表面接触面积 较大,称这种表面为"亲水性"表面;时冰晶与表面接 触面积较小,称这种表面为"憎水性"表面。当冰晶在 冷表面上生成时,系统的自由焓变化量

$$\Delta G(r) = \frac{V_{\rm s}}{\Omega_{\rm s}} \Delta g + (S_{F_{\rm VS}\sigma_{\rm VS}} + S_{F_{\rm MS}\sigma_{\rm MS}} - S_{F_{\rm MV}\sigma_{\rm MV}})_{\circ}$$
(4)

式中: $S_{F_{VS}} = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta)$ ,为晶体的球冠界面面积;  $\Omega_s$ 为单个水分子的体积。

将公式(1)~(3)代入到公式(4),并且考虑3个 界面张力间的关系,则

$$\Delta G(r) = \left( -\frac{4\pi r^3}{3\Omega_{\rm s}} \cdot kT \ln\left(\frac{P}{P_{\rm s}}\right) + 4\pi r^2 \sigma_{\rm VS} \right) \cdot \eta(\theta)_{\circ}$$
(5)

式中, $\eta(\theta) = \frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4}$ 。

当 θ 从 0 增加到 180°时, η(θ) 从 0 单调增加到 1, 如图 6 所示。



图 6  $\eta(\theta)$ 与  $\theta$  的关系曲线 Figure 6 Relationship curve of  $\eta(\theta)$  and  $\theta$ 

 $\Delta G$  对 r 求极值,可得

$$r_{\rm VS}^* = \frac{2\sigma_{\rm VS}\Omega_{\rm s}}{kT {\rm ln} \ (P/P_{\rm s})}$$

将 r<sub>vs</sub>代入公式(5)中得到平壁表面上球冠形冰晶的相变能障为

$$\Delta G(r_{\rm VS}^*) = \frac{16\pi\sigma_{\rm VS}^3(V_{\rm s,m})^2}{3(R_{\rm m}T \ln (\frac{P}{P_{\rm s}}))^2} \eta(\theta)_{\circ}$$

式中: $V_{s,m} = N_0 \Omega_s$ ,为1 mol 水分子的体积。

当 $\theta$  = 180°时,此时均匀成核的能障最大,等于非 均匀成核能障  $\Delta G^*$ ,即提高相变能障的最佳理想情况 为均匀成核,此时冰核就不能粘附在冷表面上。因此, 可以增大表面接触角 $\theta$ ,提高相变能障,进而抑制霜层 的生长。

4 结语

 1) 课题组通过实验对比涂有硅油的憎水性表面 和普通铝表面的结霜过程发现,在外界环境工况一样 的条件下,憎水性表面霜层的厚度在一定的时间范围 内始终小于普通铝表面上霜层厚度。

 2)课题组运用热力学理论,分析验证了憎水性涂 层抑制结霜的可行性,球冠冰晶与冷表面接触面积随 着接触角θ的增大而减小,当接触角θ达到极限180° 时,冰晶就不能粘附在冷表面上。

#### 参考文献:

- 张新华,刘中良,王皆腾,等.外电场对自然对流条件下霜层生长 影响的实验研究[J].自然科学进展,2006,16(3):370.
- [2] 李栋,陈振乾.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.
- [3] BRAGG M B, HEINRICH D C, VALAREZO W O, et al. Effect of under-wing frost on a transport aircraft airfoil at flight Reynolds number[J]. Journal of aircraft, 1994, 31(6):1372-1378.
- [4] CAI Liang, WANG Ronghan, HOU Puxiu, et al. Study on restraining frost growth at initial stage by hydrophobic coating and hygroscopic coating[J]. Energy and buildings, 2011, 43(5):1159-1163.
- [5] 王洪燕,刘中良,孟声,等. 自然对流下强吸水表面上结霜特性的 研究[J]. 制冷学报,2004,25(4):25-29.
- [6] 勾昱君,刘中良,黄玲艳,等.自然对流条件下新型亲水涂料的抑 霜实验研究[J].流体机械,2007,35(12):47-52.
- [7] 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.
- [8] 许旺发. 冷面结霜机理及其抑制对策的实验研究[D]. 北京:清 华大学,2004:42-45.
- [9] 刘清江,刘中良,王洪燕,等.自然对流条件下疏水表面与普通金属表面霜生长的对比研究[J].制冷与空调,2004,4(3):20-23.
- [10] 刘清江,韩学廷,刘中良,等. 憎水表面抑制结霜的研究[J]. 流体机械,2004,32(4):57-59.



