

# 自然对流下亲水表面上抑霜的研究

王洪燕 张新华 刘中良 孟声 马重芳

(北京工业大学教育部传热强化与过程节能重点实验室, 北京 100022)

**摘要** 本文用自行研制的强吸水性涂料制作了亲水表面, 并在其上进行了结霜研究。在不同实验条件下进行了吸水表面与普通金属表面上的霜厚及霜表面温度的测量、对比, 并研究了影响亲水表面结霜的因素。结果表明, 这种涂层具有明显的抑霜效果, 在较易结霜的实验条件下可使初始霜晶出现时间延迟 15 分钟以上, 在低于冰点的一定范围内, 可以使初始霜晶出现的时间延迟 3 小时以上, 霜厚减少 40% 以上, 霜表面温度低且霜层疏松, 在外力的作用下很容易除去。

**关键词** 热工学; 亲水涂层; 实验研究; 抑霜

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2005)04-0674-03

## EXPERIMENTAL STUDY OF RESTRAINING FROST FORMATION ON HYDROPHILIC SURFACE UNDER NATURAL CONVECTION CONDITIONS

WANG Hong-Yan ZHANG Xin-Hua LIU Zhong-Liang MENG Sheng MA Chong-Fang

(Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation Key Lab of Ministry of Education,  
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** A new paint which can absorb a large amount of water was developed for restraining frost formation, hydrophilic surface was made using this paint. A series of experiments were carried out, frost thickness and frost surface temperature were measured and compared on the hydrophilic surface and metallic surface, and the main factors that affect frost formation on hydrophilic surface were studied. Experimental results showed this kind of hydrophilic surface can release frost growth very effectively, the onset of the frost formation can be retarded more than 15 minutes under the conditions that frost formed easily, within some certain conditions below the freezing point, there were no frost crystals formed for at least 3 hours, frost thickness greatly reduced by 40% were looser and stronger on the hydrophilic surface than on the metallic surface, and thus they can be removed by external force more easily.

**Key words** pyrology; hydrophilic surface; experimental study; frost

### 1 引言

结霜是制冷和低温设备中最常见的现象之一。传统的除霜方法均是建立在“融霜”的基础上, 所以这些方法要消耗大量的能源。影响结霜的因素除了空气湿度、壁面温度、环境温度等, 还有结霜表面的特性, 所以通过改变结霜表面的性质来抑制结霜成为人们普遍关注的技术。目前, 利用涂料来制作可抑霜的亲水表面是人们利用表面改性来抑制结霜的一个焦点。但现在研制的亲水抑霜涂层基本上都有易挥发, 反复使用性差, 抑霜效果不明显的缺点。本文研制了一种强吸水涂层, 可形成亲水低能表面,

并对表面上的结霜现象进行了细致研究, 发现这种表面具有显著的抑霜特性, 而且涂层的反复使用性能好。

### 2 实验装置

实验系统如文献 [1] 中所述。冷却装置采用半导体温差电制冷器件, 用可拆卸的紫铜板作为结霜表面, 用 T 型热电偶来测定铜表面温度。显微镜与 CCD 摄像镜头和带有图像采集卡的计算机连接, 来记录实验过程。霜厚通过显微测量软件读取。采用 TH5102 的热像仪来测量霜表面的温度分布。

收稿日期: 2005-03-15; 修订日期: 2005-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50376001); 国家重点基础研究发展计划项目 (No. G2000026304)

作者简介: 王洪燕 (1978-), 女, 山东平邑人, 硕士, 从事制冷系统与控制装置的现代技术研究。

### 3 实验过程

实验前将紫铜表面的左半侧均匀喷涂亲水涂层, 厚度为 0.3 mm。将显微镜置于紫铜表面与亲水表面分界处之上, 测量霜层最上边缘的霜厚。为保证较大的视场, 采用较小的放大倍数 10 倍。实验前, 将试件表面用塑料薄膜覆盖, 使表面与空气隔绝, 等到壁温达到设定温度且恒定不变时, 揭开薄膜, 同时开始计时。所列的实验均为自然对流下竖直平板上的结霜。

### 4 实验结果及分析

#### 4.1 亲水表面上霜厚随时间和壁温的变化情况

对不同实验条件下的亲水表面上的霜厚进行了测量对比, 见图 1 所示。图 1(a) 中, 3 次实验的相对湿度  $\varphi$  均在 55% 左右, 实验结果反映了不同壁温对霜厚的影响。可以看出, 在壁温  $T_w$  为 -8.24°C 时, 2 个小时内并没有结霜; 随着壁温的逐渐降低, 霜厚逐渐增厚; 壁温为 -15.6°C 时, 在 20 分钟时出现初始霜晶, 壁温为 -20.5°C 时, 在 15 分钟时出现初始霜晶。图 1(b) 说明了霜厚随相对湿度的变化情况, 实验中的壁温均保持在 -15.5°C 左右, 很明显可以看出, 随着相对湿度的增大, 霜厚逐渐增大。在相对湿度为 30% 时, 并没有结霜。

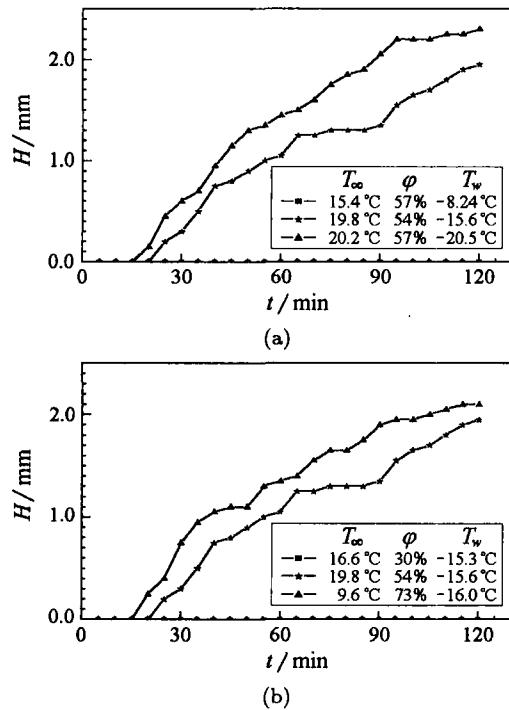


图 1 不同条件下亲水表面上霜层厚度随时间的变化

由以上研究可知, 亲水表面上的霜厚同金属表面上一样随着壁温的降低、空气湿度的增大而逐渐增大。

#### 4.2 亲水表面与紫铜表面上霜厚的对比情况

图 2(a) 的实验条件为  $T_\infty = 15.4^\circ\text{C}$ ,  $T_w = -8.2^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 57\%$ , 2 个小时后, 紫铜表面霜厚已经达到 2.3 mm, 而亲水表面上仍旧没有结霜。在实际实验过程中, 3 个小时时, 亲水表面仍然没有结霜。图 2(b) 中  $T_\infty = 19.6^\circ\text{C}$ ,  $T_w = -16^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 73\%$ , 在 15 分钟时, 亲水表面开始出现初始霜晶。2 小时后, 紫铜表面的霜厚为 3.45 mm, 亲水表面的霜厚为 2.1 mm, 亲水表面比紫铜表面霜厚减少 39%。由于进行的是竖直平板上的结霜, 冷板表面的传热系数及传质系数从上向下逐渐减小, 霜层沿板壁从上向下逐渐变薄。加上边缘效应的影响, 测量结果(霜厚)远大于竖直平板上的平均霜厚, 这对于涂有亲水涂层的情况更为严重, 所以亲水涂层的抑霜效果远比测量显示的结果要好。在实验观察中可以看出, 亲水涂层上霜晶分布很不均匀, 往往上边缘处霜层比较厚时, 涂层表面内部只有少量霜晶, 所以这种涂层实际上可使霜厚减少在 40% 以上。

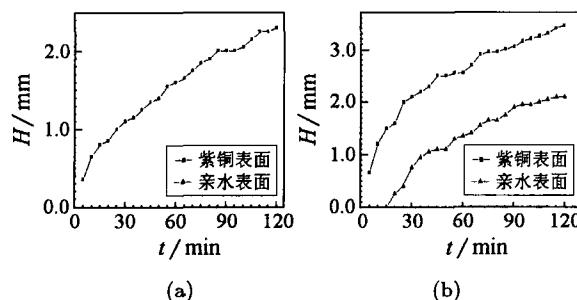


图 2 不同条件下亲水表面与紫铜表面上霜厚的对比情况

#### 4.3 亲水表面与紫铜表面上霜晶形态的对比情况

在实验中观察到, 左半侧亲水表面上初始霜晶出现的晚, 而且霜晶分布不均匀, 开始只在有限的几个点处出现, 随后出现了强烈的枝晶生长, 枝晶粗大且疏松, 如图 3 所示。图 3 为实验中拍摄的在  $T_\infty = 22^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 70\%$ ,  $T_w = -18.3^\circ\text{C}$ , 的条件下结霜 30 分钟的图像。从图中可以明显看出, 右侧紫铜表面上已经布满密实的霜晶, 而左侧强吸水表面上仍有大面积的表面裸露, 上面没有出现任何霜晶。在

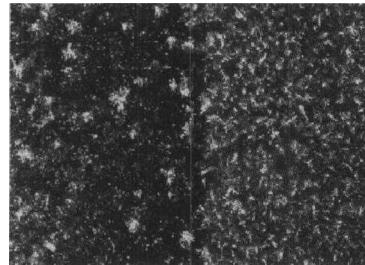


图 3 亲水表面(左侧)与紫铜表面结霜对比

有限的几个点处有霜晶出现，枝晶比右侧的粗大，而且枝晶是以单独的形式出现。

#### 4.4 亲水表面与紫铜表面上霜表面温度的对比情况

图4中测量了在  $T_{\infty} = 26^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 60\%$ ,  $T_w = -18.3^{\circ}\text{C}$ , 实验条件下不同时刻霜层表面温度的分布情况。由于亲水表面具有一定的附加热阻，在刚开始时，表面温度会高于紫铜表面的，随着霜层的迅速形成，霜厚增加，霜表面温度也会随之发生变化。

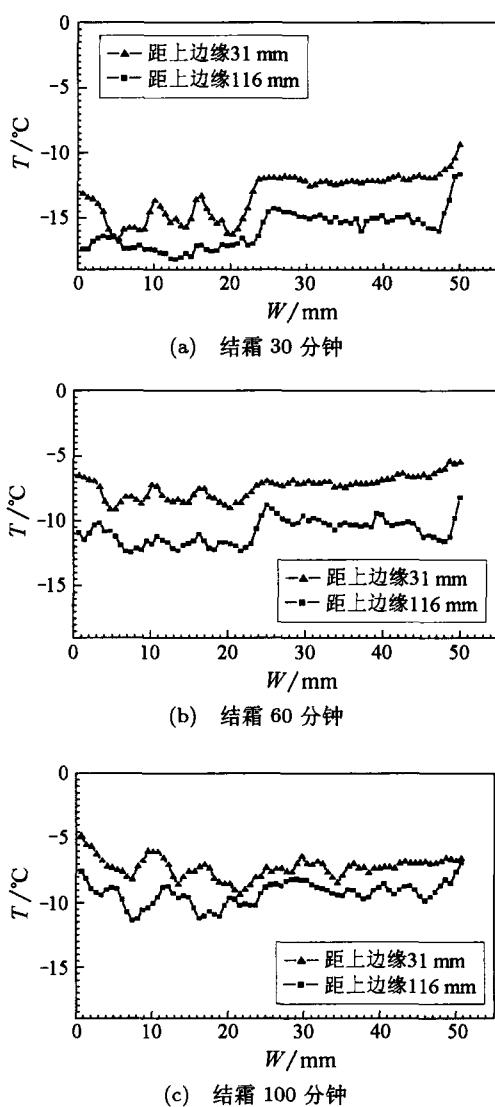


图4 不同位置的霜表面温度随时间变化情况

从图4中可以看出，板壁上部的霜表面温度要高于板壁下端的，这正是因为霜厚从上到下逐渐减薄的缘故。左侧亲水表面的霜表面温度要低于右侧紫铜表面的；紫铜表面的温度曲线相对要平坦，这是因为紫铜表面霜晶分布均匀，而亲水表面霜层稀

疏，霜晶分布不均匀，有霜晶出现的地方霜表面温度要高于没有霜晶或霜晶少的地方，所以温度起伏较大。从图4中还可以看出，随着时间的增加，两侧的霜表面温度都逐渐升高，这是因为霜厚逐渐增大，但亲水表面霜表面温度始终低于紫铜表面的，在100分钟时还可以看出，亲水表面的霜表面温度仍然略低于紫铜表面的。实验中还发现，亲水表面形成的霜层非常疏松，加少量的风量，便很容易除去。

#### 4.5 抑霜涂料反复使用性能的实验研究

对试件进行了两个月的重复性实验，发现其仍能保持良好的抑霜作用，持久性较好。但由于边缘效应导致的边缘处霜晶生长速度快，霜层厚，在反复实验中边缘处涂层吸水膨胀严重，使其附着力逐渐下降，所以试件边缘有轻微的剥离现象发生。

文献[2]和[3]对水在类似的涂层中的结冰行为进行了实验，研究结果表明，水最低可在  $-20^{\circ}\text{C}$  的温度下仍然保持液态而不结冰，所以这种涂层可以大大延迟初始霜晶的出现。由于涂层先吸收了大量的水，然后在膨胀的涂层上逐渐出现霜晶，大大削弱了霜晶的附着力，因而霜层变的非常疏松。

## 5 结 论

所研制的亲水涂层表面的霜厚都是随着湿度的增大、壁温的降低而逐渐增厚的。这种涂层可以使初始霜晶出现时间晚，在本文的实验条件下，初始霜晶可延迟出现15分钟以上，并且成霜速率慢，结霜量减少，霜层疏松，可以在外力的作用下很容易除去。在空气温度较低( $< 40\%$ )、壁面温度相对较高( $> -10^{\circ}\text{C}$ )的情况下，可以将初始霜晶出现的时间延迟3小时以上。亲水表面和紫铜表面上的霜表面温度均是随时间升高的，但亲水表面的霜表面温度始终低于紫铜表面的，并且温度起伏较大。此涂层经过两个月的重复实验，发现抑霜的效果基本不变，表明涂层的重复使用性能较好。

## 参 考 文 献

- [1] 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. 制冷学报, 2004, 25(4): 25-29
- [2] Highgate D, Knight C, Probert S D. Anomalous 'Freezing' of Water in Hydrophilic Polymeric Structures. Applied Energy, 1989, 34(4): 243-259
- [3] Rault J, Ping Z H, Nguyen Q T. Crystallisation of Water in Swollen Poly(Vinylalcohol)-Pol (Vinylpy-Rrolidone) Blends. Polymer Bulletin, 1995, 35(5): 649-652