

外电场对自然对流条件下霜层生长影响的实验研究*

张新华 刘中良** 王皆腾 勾昱君 孟声 马重芳

北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100022

摘要 研究了自然对流条件下直流电场对竖直表面上霜层的厚度和结霜质量的影响. 拍摄了有、无电场的情况下霜层生长的照片, 发现外加电场可以控制霜层的厚度. 另外, 还分别研究了在电场条件下冷壁温度和环境温度对霜层厚度和结霜质量的影响. 实验结果表明: 在电场条件下, 冷壁温度能够影响霜层的厚度, 但对霜层质量影响较小; 环境温度能够明显地影响霜层的质量, 但对霜层的厚度影响较小.

关键词 电场 结霜 制冷

当暴露在空气中的表面温度低于露点时, 会发生凝结现象, 如果表面温度在 0°C 以下, 水蒸气就会发生相变生成霜. 结霜是一个复杂的瞬态传热传质过程, 其形成和生长规律会因结霜表面、空气温度、空气流速和空气湿度的不同而不同. 由于传热面上的霜层会增加传热热阻、降低能量的传递速率, 因此, 结霜现象的存在对于制冷、低温和航天技术的影响十分严重. 寻求有效的除霜方法一直受到国内外学者的关注.

由于冷壁面上着霜在很大程度上是一种界面现象, 因此, 冷壁面的性状必然会对着霜过程产生重要影响. 于是, 人们一直试图改变冷壁面的表面状况包括施加各种涂层来抑制结霜. 尽管人们做出了大量的努力, 但沿着这一思路并没有取得突破性进展.

另一方面, 由于水分子具有很强的极性, 而结霜又是一种水分子的迁移过程, 所以可以推断, 外加电场必然会对结霜产生影响. Swanson 等^[1]指出, 电场影响霜层表面附近水分子的扩散方式. 当霜晶生长时, 在晶体的周围将会产生一个较强的电场, 而且在晶体的突出点处, 电场将会更强. 由于水分子有内在的电极化性能, 所以电场的存在将使水分

子进一步极化. 如果电场有很强的梯度, 那么被极化的水分子会被沿着电场方向吸引. Wang 等^[2]也发现, 在高压电场的作用下, 冰柱被拉向电极的方向生长, 并且冰柱细长、易碎, 在自身重力的作用下更易折断.

Schaefer 报道^[3]了在很高的电场梯度下, 以胡须状聚集的霜晶快速生长现象. Munakata 等^[4]的数据显示在 7.5 kV 的电压下, 霜减少 30% , 是减少最多的情况. 孟繁炯等^[5]对单根导线电极和多根导线电极与铜板电极形成的静电场中冷壁面上霜的结晶生长和传热传质进行了研究, 提出了电场中凝华结霜传热传质数学模型并进行了数值分析. 在电场条件下, 关于冷壁温度和环境温度对结霜的影响的研究尚不多. 因此, 本文主要研究外加直流电场对自然对流条件下竖直冷平板表面上霜层生长的影响, 探讨了在电场条件下冷壁温度和环境温度等参数对霜层生长的影响规律.

1 实验装置和实验步骤

实验系统装置如图 1 所示, 主要由实验部分、采集部分和静电发生系统组成.

实验部分的冷却装置采用半导体温差电制冷器

2005-05-10 收稿, 2005-06-23 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 50376001)和国家“九七三”(批准号: G2000026304)资助项目

** 通讯作者, E-mail: liuzhl@bjut.edu.cn

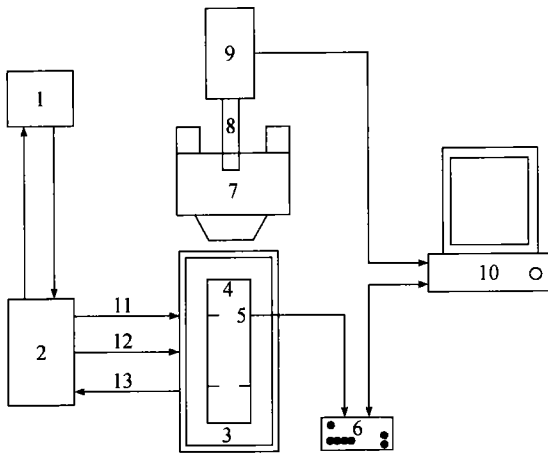


图1 实验系统图

1—制冷水源；2—制冷电源；3—半导体温差制冷台；4—冷板；
5—热电偶；6—数据采集仪；7—立体显微镜；8—摄像头；
9—CCD；10—电脑；11—电缆；12—进水管；13—出水管

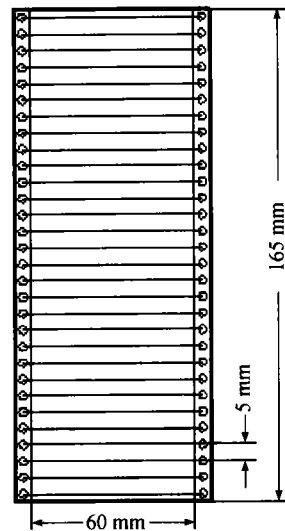


图2 平行电极的尺寸

件，制冷电源采用单相桥式硅元件整流，最低温度可达到 $-26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。用可拆卸的紫铜板作为结霜表面，尺寸为 $150\text{ mm}\times 52\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ ，在铜板的两侧靠近表面处钻孔，深度为 13 mm ，布置4根T型热电偶来测定铜表面温度。

采集部分采用显微系统观察霜的生长，显微镜可在7—110倍之间进行无级放大。CCD摄像头与显微镜连接，通过视频电缆将显微镜放大的图像传输到计算机，由图像采集卡记录实验过程，采集速度为 $30\text{ f}\cdot\text{s}^{-1}$ 。霜厚通过显微测量软件读取。由于实验过程中霜层的厚度是不均匀的，本文仅对冷板的上边缘的霜层厚度进行测量，并取上边缘霜层厚度的平均值作为本次的测量值。又由于边缘效应的缘故，边缘的霜层比内部的厚，所以所测量的结果比实际的稍大。

静电发生系统由直流静电发生器和平行电极组成。直流静电发生器可以产生 $0\text{--}100\text{ kV}$ 的直流电压，平行电极的形状和尺寸如图2所示，所使用的裸线为 0.3 mm 的镍铬丝。

整个实验过程是在一个封闭的大空间内进行的，该空间的湿度通过电极加湿器进行调节，并将相对湿度的测量误差范围控制在 $\pm 5\%$ 以内，使相对湿度值基本上维持在一个恒定值。通过热电偶采集实验空间内的温度，多次测量，求其平均值即为该实验的环境温度。

实验前，将显微镜对准紫铜板调焦；调节好平行电极离冷板表面的距离，依次打开静电发生器、制冷台冷却水开关、制冷台电源并设定需要的温度，然后打开制冷电源；实验过程中，借助于冷光源照明，通过计算机进行实时监控，并将T型热电偶接到数据采集仪进行测温；实验临近结束时，关闭静电发生器电源，迅速取下结霜紫铜板，将其放进密封袋内，用精密电子天平称量霜的质量；然后依次关掉冷光源、制冷电源、冷却水系统，实验结束。

2 实验结果和分析

2.1 现象观察

本文采用平行板裸线电极作为电场的负极，施加高压静电场进行结霜实验，借此来研究电场对霜形成的影响。在本文所有的实验中，每组实验的持续时间均为 120 min 。在实验进行的过程中，我们能够看到强烈的局部放电现象，在电极和结霜铜板之间产生蓝色的电火花，形成很强的电晕风，产生强烈的对流传热传质强化作用，从而使霜晶出现较早，所形成的霜层致密，霜层表面平坦、光滑，难以除去。另外，我们还发现，当环境湿度较大时，能够看到细长的针状霜晶出现，且这种霜晶易倒伏，并在重力的作用下从霜层表面滑落，其中一部分在电场力的作用下被吸附到裸线电极上。但是，当环境湿度较小时，我们没有

发现这种细长的针状霜晶. 为了更具体地观察电场对霜层生长的影响, 我们分别无电场和有电场的条件下进行了实验研究, 并拍摄了霜层生长照片, 如图3所示. 其中, 无电场时, 环境温度 $T_{\infty}=19.3^{\circ}\text{C}$, 空气相对湿度 $\varphi=69\%$, 冷壁温度 $T_w=-9.3^{\circ}\text{C}$; 有电场时, 电场强度 $E=12\text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, 环境温度 $T_{\infty}=19.3^{\circ}\text{C}$, 空气相对湿度 $\varphi=70\%$, 冷壁温度 $T_w=-10.5^{\circ}\text{C}$. 从图3中我们可以看出, 在实验进行的前35 min内, 由于电场力的作用, 水分子沿电场的方向排列, 促进了霜晶的生长, 致使霜层的厚度比无电场

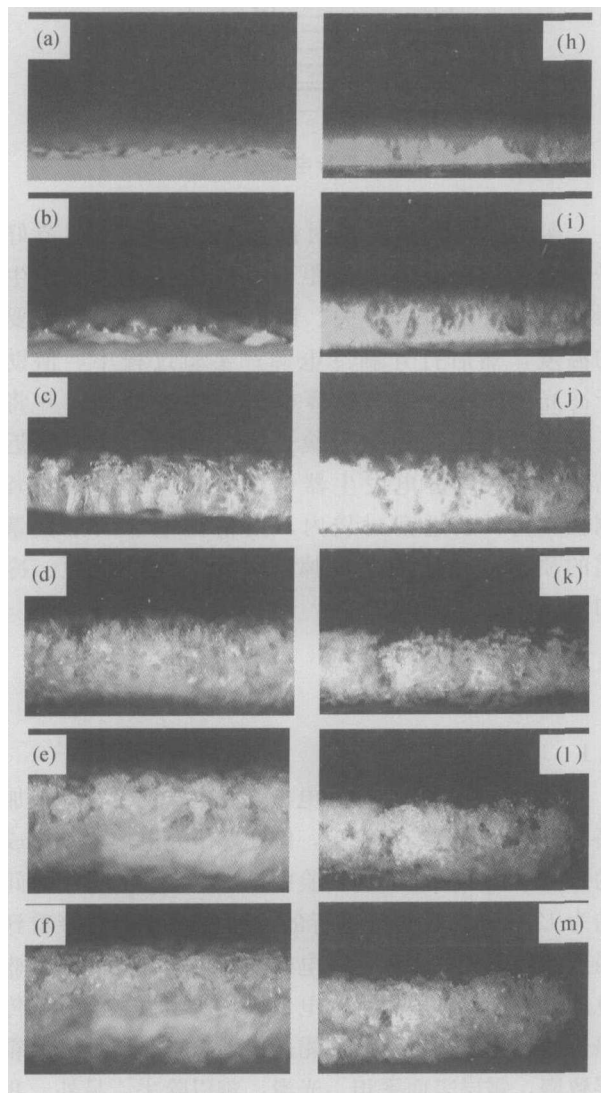


图3 有无电场条件下霜层厚度对比

当无电场时: (a): 10 min; (b): 15 min; (c): 35 min; (d): 65 min; (e): 90 min; (f): 115 min 当电场强度 $E=12\text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时: (h): 10 min; (i): 15 min; (j): 35 min; (k): 65 min; (l): 90 min; (m): 115 min

时大. 但是, 随着实验的进行, 霜晶逐渐长长, 这种细长的霜晶由于不能承受自身的重力而折断并脱落, 所以, 这时电场作用下霜层的厚度明显的低于无电场时的情况.

2.2 电场对结霜的影响

由于电场力的存在, 水分子作为极性分子势必会在电场力的作用下沿着电力线的方向排列, 因而所生成的线状霜也会沿着电力线的方向. 但是, 由于在电场力作用下所生成的细长的霜晶易折断, 所以, 电场的存在能够影响霜层的高度. 为此, 本文从这方面进行了实验研究. 在环境温度 $T_{\infty}=20.4^{\circ}\text{C}$, 空气相对湿度 $\varphi=81\%$, 冷壁温度 $T_w=-13.2^{\circ}\text{C}$ 的实验条件下, 当电场强度分别为 $E=0$ (无电场), 4, 8, 12 $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时进行了四组实验. 实验的过程中, 每隔 5 min, 记录 1 次霜层的厚度. 在实验进行到 120 min 时, 迅速取下实验用的结霜铜板, 并将其放入到密封袋内, 利用电子天平称出所生成的霜的质量. 如图4所示.

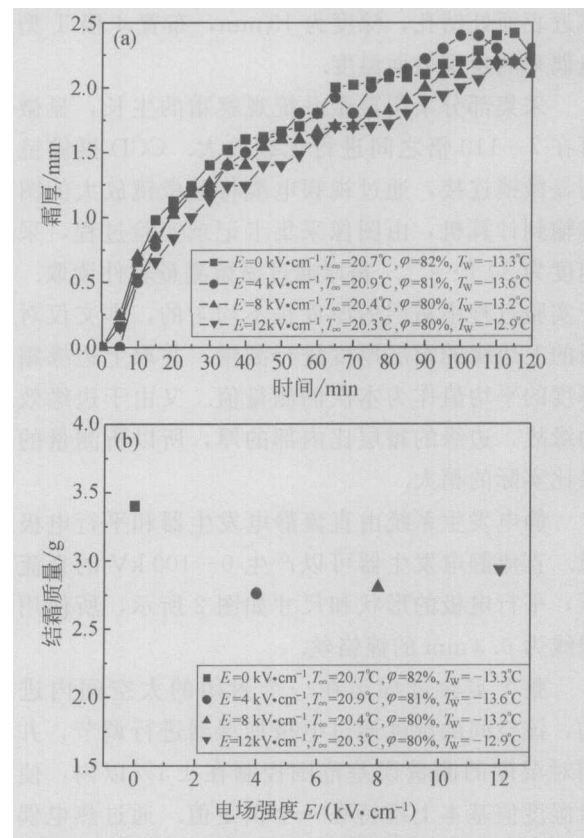


图4 不同电场强度对霜层厚度和结霜质量的影响

(a) 霜层厚度对比; (b) 120 min 结霜后质量对比

从图4(a)可知, 电场能够控制霜层的生长, 但是, 要想得到能够控制霜层生长的最佳电场仍需要我们对更深入的进行研究. 图4(b)给出了不同电场强度条件下结霜120 min时结霜量的称量结果, 从图中看出, 电场的存在对结霜量有着明显影响. 在实验条件下, 加电场与没有加电场的情况相比, 最多可以使结霜量减少18.8%. 此外, 从图中还可以看出, 似乎存在着一个影响霜层生长的最佳电场强度. 由于电场的作用, 水分子沿电场方向被吸引, 因而生成细长的霜晶, 这些细长的霜晶易碎, 在自身重力的作用下容易折断, 从而致使霜层厚度降低, 质量减少. 另外, 局部还存在强烈地放电现象, 因而, 电击作用也导致了霜层厚度的降低和结霜量的减少.

2.3 冷壁温度对电场条件下结霜的影响

在相同的环境温度下, 冷壁温度越低则过冷度越大, 越易出现枝晶生长. 本文在外加静电场的条件下对这一结论进行了验证. 在电场强度 $E = 12 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$, 环境温度为 $T_{\infty} = 20.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 空气相对湿度 $\varphi = 80\%$, 对冷壁温度分别为 $T_w = -7.6$ 和 $-12.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 这两种不同的情况下测量霜层的厚度和质量. 图5给出了冷壁面温度对电场条件下结霜厚度的影响情况. 从图中可以看出, 冷壁面温度对霜层的厚度有较明显的影响. 但对结霜的质量的测量表明, 冷壁面温度为 $-7.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时120 min结霜量为2.81 g, 而 $-12.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时相对应的结霜量为2.93 g, 两种情况下的结霜质量差别并不大, 只有0.12 g, 相差不到4%.

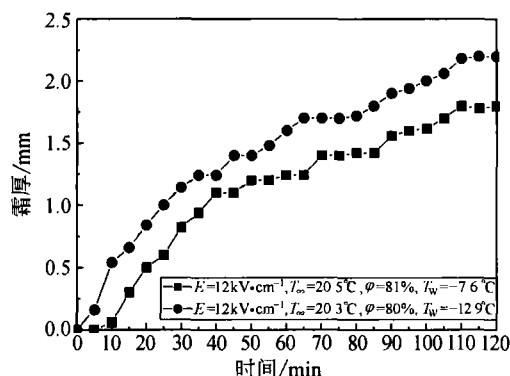


图5 电场条件下冷板温度对霜层厚度的影响

在汽相生长系统中, 过饱和度大是出现枝晶生长的根本原因. 而且, 过饱和度越大, 亦即过冷度越大, 温度越低, 则越易出现枝晶生长. 据此, 刘中良¹⁾提出了霜厚增长驱动力的概念, 认为霜厚增长驱动力越大, 霜厚增长越快. 这也就说明了在较低冷壁温度下更能促进霜厚的增加.

$$\Delta g_i = \left(\frac{\Delta T}{T_s} \right) \Delta g = R \Delta T \ln \left(\frac{p}{p_s} \right),$$

式中 Δg_i 表示霜厚增长相变驱动力; $\Delta T = T_m - T_s$ 表示过冷度; T_m 表示水蒸气之三相点温度; T_s 表示霜表面的温度; Δg 表示相变驱动力; p 表示远离相变分界面处的蒸汽压; p_s 表示对应于温度 T_s 下的饱和蒸汽压; R 表示气体常数.

2.4 环境温度对电场条件下结霜的影响

文献[6]在冷壁温度和相对湿度都相同的情况下, 测得的环境温度不同的两条霜厚曲线基本重合在一起, 并且有交叉点. Cheng^[6]认为, 高的环境温度导致水蒸气的温度不能迅速降低到冰点以下, 所以水蒸气不能在霜表面凝华沉积来增高霜的厚度, 而是进入霜层内部来增加霜的密度. 高的环境温度导致霜表面温度也较高, 所以表面枝晶的融化过程更容易发生. 王洪燕²⁾也认为, 霜厚主要是受含湿量的影响, 受环境温度的影响较小, 在保持壁温和含湿量基本相等的条件下, 环境温度越高, 霜层越薄. 以上两人的研究均是在无电场的条件下进行的, 本文对电场条件下环境温度对结霜的影响进行了实验研究. 在该实验中, 电场强度 $E = 8 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$, 空气相对湿度 $\varphi = 81\%$, 冷壁温度 $T_w = -8.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 环境温度分别为 $T_{\infty} = 18.4$ 和 $22.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 通过实验研究, 得出了在此条件下的霜层的厚度随时间的变化曲线, 见图6. 从图6我们可以看出, 两种不同环境温度下霜层的厚度差别很小, 并且在环境温度较高时, 霜层的厚度略低. 这与文献[6]在无电场情况下得出的结论是一致的. 但是, 我们的结霜质量测量结果却表明, 在环境温度较高时,

1) 刘中良. 自然对流下竖直冷平板上霜层厚度增长速率方程及其数值解. 大连海运学院硕士学位论文, 1984

2) 王洪燕. 自然对流条件下亲水/疏水冷表面上结霜现象的实验研究. 北京工业大学硕士论文, 2004

所生成的霜的质量远远大于环境温度较低时的情况, 环境温度为 $22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 120 min 结霜量为 4.78 g , 而 $18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时相对应的结霜量为 2.51 g , 两者相差近一倍. 这说明, 环境温度高, 所形成的霜层密度大, 有更多的水份进入霜层内部相变成霜. 因此, 有电场作用时, 环境温度对结霜的影响与无电场时是一致的.

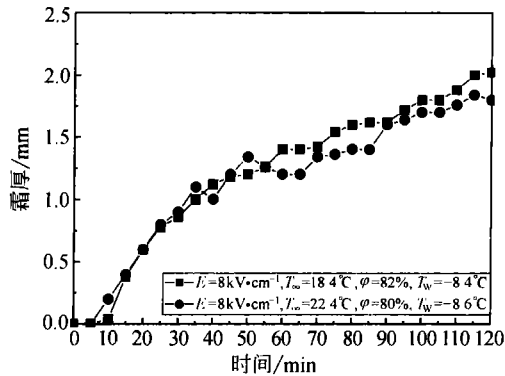


图6 电场条件下环境温度对霜层厚度的影响

3 结论

通过实验研究, 我们发现, 在结霜的过程中, 电场能够改变霜晶生长的形态, 降低霜层的厚度, 使结霜的质量比没加电场时减少 18.8% . 另外, 在电场的作用下, 冷壁温度在很大程度上能够影响霜

层的厚度, 壁温越低, 霜层越厚, 但对霜层的质量影响很小, 在本文的实验条件下, 壁温的降低影响霜层质量的减少量不到 4% ; 环境温度对霜层的厚度影响不大, 但对霜层的质量影响很大, 本文中, 环境温度的升高导致霜层的质量增加了近一倍, 这与在无电场的条件下得出的结论基本上是一致的.

参 考 文 献

- 1 Swanson M, Libbrecht K G. Crystals grow quicker in E-fields. Caltech Undergraduate Research Journal, 2001, 1: 48—53
- 2 Wang C C, Huang R T, Sheu W J, et al. 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: 3491—3505
- 3 Schaefer V J. Project Cirrus, General Electric Research Laboratory, Schenectady. New York, Final Report 1953, 52—53, 250
- 4 Munakata T, Yabe A, Tanasawa I. Effect of electric fields on frosting phenomenon. In: The 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering. 1993, 381—386
- 5 孟繁炯, 马鸿斌, 岳丹婷, 等. 高压静电场中凝华结霜的强化相变传热. 大连海运学院校庆八十周年学术报告会. 大连, 1989, 38—44
- 6 Cheng C H. Observations of early-stage frost formation on a cold plate in atmospheric air flow. Journal of Heat Transfer, 2003, 125: 95—102