

文章编号:1671-4229(2004)06-0564-04

结霜与微尺度表面特性的实验研究

张海英, 梁 栋

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510405)

摘 要: 针对翅片式蒸发器表面的结霜问题,提出了一种新的实验研究方法,即利用 CSPM2000(扫描探针显微镜)对两类材料冷表面进行扫描记录,同时利用专门的 CCD 摄像与显微镜系统,观测两类材料表面的整个结霜过程,从而探讨微观表面结构与材料表面霜层形成的关系.实验结果表明,材料的表面粗糙度对结霜有很大影响,表面光洁度好,霜沉降量较小.

关键词: 结霜;微尺度;蒸发器;表面特性

中图分类号: TB 61 **文献标识码:** A

0 引 言

结霜一直是暖通空调行业中十分关注的问题,制冷系统中霜的存在,不但使热传递效果变差,而且使系统的运行和维护费用相应提高.从上世纪 50 年代开始,国内外很多学者就对低温制冷过程中的结霜问题做了很多研究.霜是由冰晶构成的多孔性松散物质,整个结霜过程是一种非定常、有相变的边界层移动的非常复杂的过程,是集对流及传热传质同时发生的.先前的研究分析表明霜层生长的影响因素包括冷壁面温度、空气温度、空气湿度、空气流速和结霜表面特性等^[1-5].对于霜层初期的形成过程,已有研究^[6,7]表明,结霜过程可分为两类:一类是水蒸汽首先在冷表面凝结成小水滴,小水滴不断聚合长大,并以过冷水的形态持续一段时间后在冷表面冻结,然后在冻结水珠的顶部继续霜层生长;另一类结霜是水蒸汽在冷表面的不同位置发生凝华,形成针状霜.在某些实验工况下这两类结霜过程会同时出现.

随着人类对客观世界认识的不断深入,在微尺度范围内认识和改造自然也成为一种趋势.扫描探针显微镜是国际上近年发展起来的表面分析仪器,是综合运用光电子技术、激光技术、微弱信号检测技术、精密机械设计和加工、自动控制技

术、数字信号处理技术、应用光学技术、计算机高速采集和控制及高分辨图形处理技术等现代科技成果的高科技产品,在纳米科技中隧道显微镜占有重要的地位,以扫描显微镜为分析和加工手段所做的研究就占有一半以上.

在制冷行业中,受微尺度研究技术手段限制,对于结霜问题的研究往往采用宏观手段,对于材料表面的微尺度特性(包括材料表面的粗糙度、微观形状、结构及排列)与结霜关系方面的研究少,未见有相关论文论述.本文利用扫描探针显微镜 CSPM2000 系统与制冷系统结合,采用一种新的实验手段对结霜问题进行研究,通过对铝片和铜片的表面特性的扫描分析,对两类材料在深冷条件下的结霜进行对比分析,从而探讨在微尺度条件下材料表面特性与结霜的关系.

1 实验设备和实验方法

1.1 实验装置

图 1 为实验装置简图,实验装置由制冷系统、光学显微镜、CCD 显微摄像、视频采集、CSPM2000 扫描探针显微镜主控机箱、CSPM 扫描探头及计算机终端系统组成,虚线部分为人工环境控制箱,采用了密封隔热,用来控制空气温度、湿度及流速.制冷系统为试验样品提供冷源,主要包括法国

收稿日期:2004-08-31

作者简介:张海英(1980-),女,硕士研究生,主要从事制冷空调的研究.

4461 活塞式压缩机(设计功率为 375 W,制冷剂采用 R12)、冷风机(设计计算翅片管式蒸发器的蒸发温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$,蒸发面积为 2.5 m^2)、变频式风机、强迫对流风冷式冷凝器、储液器以及过滤器。

1.2 实验方法

扫描探针显微镜系统集激光原子力显微镜(AFM)和扫描隧道显微镜(STM)两种功能,本文实验中均采用原子力显微镜进行检测,原子力显微镜由探头、主控机箱、连接电路及后处理软件构成。测量时,控制探针在被测样品表面进行扫描,由于探针与样品表面间的原子发生相互作用,将随被测表面的起伏面上下波动。通过用隧道电流或光学方法检测微悬臂的位移,实现对探针尖端原子与表面原子之间的排斥力的监测,进而可测出试件表面的微观形貌。

实验中所用样品材料面积均为 $10\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。首先,将试验样品固定于扫描探针显微镜探头上进行扫描,观测并记录下各样品的表面形貌,通过专门的后处理软件对扫描图像进行平均滤波及曲面拟合校正,分析得到试验样品的三维图形、高度、层次、面粗糙度及颗粒尺度分析结果。然后将样品取下,进行天平称重,实验中所用天平为赛多利斯(sartorius)电子天平,型号为 BP211D,精度 0.001 g ,再将称重后的样品置于制冷系统蒸发器上,用双面胶固定,调节蒸发温度,同时,将安装有 CCD 摄像头的显微镜对准样品表面,调节其放大倍数使图像最清晰,打开录像开关,制冷系统电源开关,将制冷过程中样品表面的结霜过程进行连续拍摄从而观测样品的表面变化,霜层变化稳定结束实验。将结霜后的样品取下再次称重,与制冷前所测重量差值为实验所得霜重。实验过程还采用了精度为 0.05 mm 的刻度尺,以便对样品表面凝结水滴进行量化对比。

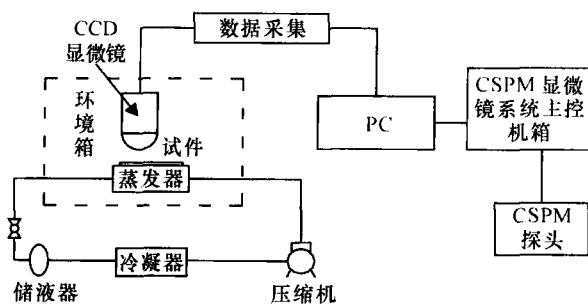


图1 实验装置示意图

Fig.1 Scheme diagram of experimental apparatus

2 实验结果及分析

2.1 材料的微尺度表面特性

实验中原子力显微镜的扫描范围设为 $10\ 000\text{ nm}$,为不影响扫描图像的真实性,扫描频率设为 0.6 Hz ,以下图片为 $10\ 000\text{ nm}$ 范围内两种材料的表面结构图像。从图2中可以看出,铝片的表面光洁度较铜片高,表面起伏较小。

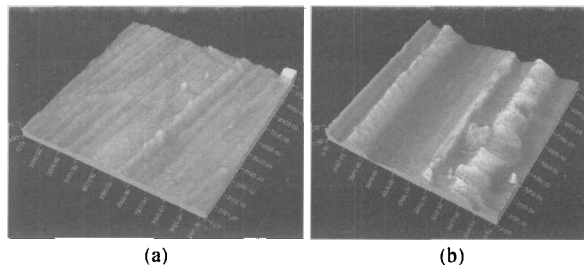


图2 铝片(a)和铜片(b)两类样品表面的三维图形对比

Fig.2 Comparison of three-dimension pictures between two samples of aluminum (a) surface and copper (b) surface

图3所示为铝片与铜片表面的粒度分布图,横坐标表示材料表面的颗粒直径,纵坐标表示某颗粒直径所占的百分比。

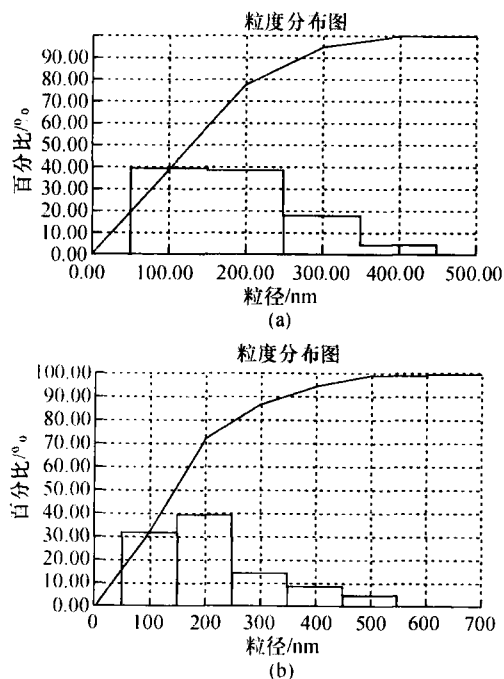


图3 铝片(a)和铜片(b)两类样品表面的颗粒分析

Fig.3 Comparison of the granularity between two samples of aluminum (a) surface and copper (b) surface

2.2 两种材料的结霜对比

下面给出了在自然对流条件下所观测到的两类冷表面在不同时间的微观可视化结霜图片。实

验中环境温度为 28°C , 冷表面温度为 -27°C , 空气相对湿度为 75% .

实验中通过连续显微摄像观察到: 在冷表面上的结霜经历了水珠形成及成长、水珠合并、水珠冻结、霜晶形成、霜晶成长等一系列过程. 在制冷设备开启之前, 冷表面上均无液滴, 随着制冷设备的启动, 在 20 s 内开始有液滴形成, 这时候的液滴直径较小, 水珠呈透明状, 见图 4; 随着时间推移, 液滴开始成长, 直径不断增大, 120 s 内, 水珠大量迅速长大, 见图 5, 在这个过程中, 既有水蒸汽凝结在冷表面上的水滴, 也有小尺寸水滴的不断合并并长大, 在 20 min 时, 水滴开始冻结, 并逐渐有霜晶形成, 这时观测到的冻结水滴的透明度变小; 随后, 水滴继续冻结, 表面霜晶开始成长, 霜晶颜色为白色, 见图 6.

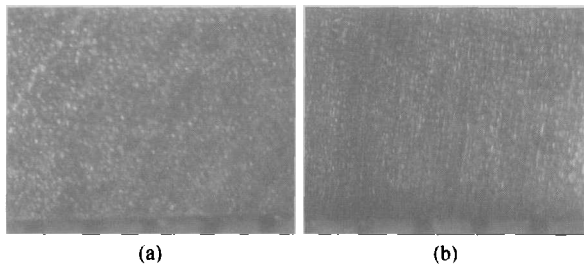


图 4 $t = 30\text{ s}$ 时, 铝片(a)和铜片(b)两类材料表面的结霜对比
Fig.4 Comparison of the vapor condensation on two surfaces of aluminum (a) surface and copper (b) surface when $t = 30\text{ s}$

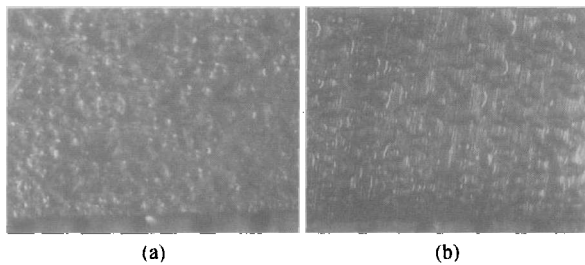


图 5 $t = 120\text{ s}$ 时, 铝片(a)和铜片(b)两类样品的水珠凝结对比
Fig.5 Comparison of vapor condensation on two surfaces of aluminum (a) surface and copper (b) surface when $t = 120\text{ s}$

2.3 结果分析

扫描探针显微镜系统中设定的样品表面扫描

参考文献:

- [1] Biguria G, Wenzel L A. Measurement and correlation of water frost thermal conductivity and density[J]. *I&EC Fundamentals*, 1970, 9(1):129 - 138.
- [2] O'Neal D L, Tree D R. Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry[J]. *ASHRAE Transactions*, 1984, 90(2):278 - 290.
- [3] Mark A. Generalized correlation of the water frost thermal conductivity[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1983, 26(4):607 - 619.
- [4] 童均耕, 杨志斌, 范云良. 霜层综合导热系数的研究[J]. *低温工程*, 1996, 95(5):46 - 50.

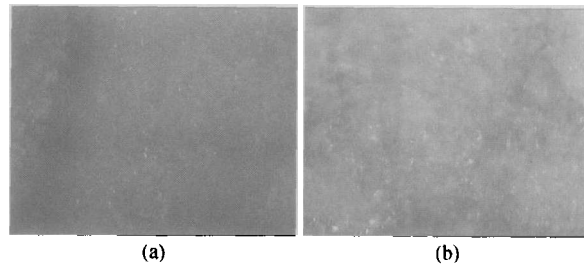


图 6 $t = 3600\text{ s}$ 时, 铝片(a)和铜片(b)两类表面的结霜对比
Fig.6 Comparison of the frost on two surfaces of aluminum (a) surface and copper (b) surface when $t = 3600\text{ s}$

范围均为 $10\ 000\text{ nm}$, 图 2 表明, 铝片表面较铜片表面光洁度好, 表面起伏较小, 从图 3 可以看出, 铝片表面颗粒的平均直径为 138.02 nm , 铜片为 167.48 nm , 铝片平均粒径较小; 在实验进行的 60 min 里, 铝片表面的结霜量为 0.0190 g , 铜片表面的结霜量为 0.0263 g ; 通过图片 4、5、6 可以看出, 实验进行初期两种表面所凝结的水滴量不同, 水滴的成长幅度也不同, 在 120 s 时, 铝片表面凝结水滴直径较小, 分布较疏, 相比之下, 铜片表面凝结水滴合并较快, 直径较大, 分布较密, 同时, 这两种材料表面所结霜的形态也不同. 联系扫描探针显微镜结果, 可以说明材料的表面粗糙度对结霜有很大影响, 表面光洁度好, 霜沉降量则较小; 当冷表面上水蒸气先凝结为水滴后形成霜层时, 表面粗糙度对结霜初期凝结水珠的量以及水珠的合并与生长都产生影响.

3 结 论

采用扫描探针显微镜系统, 实现对结霜问题研究的一种新的实验手段, 利用原子力显微镜所测得的材料表面微观特性, 与制冷装置中蒸发器表面的结霜充分结合, 可以对制冷系统中存在的结霜问题进行更深入地研究与分析. 对于材料表面的微尺度特性与结霜之间的关系有待于进一步研究分析.

- TONG Jun-geng, YANG Zhi-bin, FAN Yun-liang. Study on synthetical conductivity of frosting[J]. *Cryogenic Engineering*, 1996, 95(5):46-50.
- [5] 查世彤,连添达,姚普明. 关于霜的生长的研究综述[J]. 天津商学院学报,1996(1):20-24.
CHA Shi-tong, LIAN Tian-da, YAO Pu-ming. Research on frost growth[J]. *Journal of Tianjin Commercial College*, 1996(1):20-24.
- [6] 徐 煦,段远源,曲凯阳. 结霜发生随机性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2):194-197.
XU Xu, DUAN Yuan-yuan, QU Kai-yang. Experimental study on randomness of the frost formation[J]. *Journal of Thermal Physical Engineering*, 2003, 24(2):194-197.
- [7] 吴晓敏,王维城. 冷面结霜初使形态的理论分析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2):286-288.
WU Xiao-min, WANG Wei-cheng. Theoretical analysis of initial behavior of frost formed on a cold surface[J]. *Journal of Thermal Physical Engineering*, 2003, 24(2):286-288.
- [8] 张立德,牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京:科学出版社, 2002.
ZHANG Li-de, MOU Ji-mei. Nano material and nano structure[M]. Beijing:Science Press, 2002.

Experimental study on frost formation and the meso-scale surface feature

ZHANG Hai-ying, LIANG Dong

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: In the paper, a new experimental scheme, which uses CCD, microscope system and CSPM2000, was presented for the purpose of that relationship between the meso-scale surface structure and frost formation on fin-tube evaporators can be deduced. Connected with the experiment, it is shown that the roughness of the aluminum surface was better than the copper and the frost formed on the aluminum surface was much more than the copper one.

Key words: frosting; meso-scale; evaporator; surface feature

【责任编辑:刘少华】

(上接第 494 页)

The equivalent definition of topology

YOU Shu-jun, YUAN Wen-jun

(School of Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Firstly, some known equivalent definitions of topology space are introduced, and the proofs of equivalent definitions with closed set and interior are supplemented. Then, two new equivalent definitions are presented in terms of exterior and neighborhood basis. Finally, two contrary examples are given to indicate that derived set and set of independent points can not define topology space.

Key words: open set; exterior; neighborhood system; subbasis

【责任编辑:周 全】