

文章编号: 0253-4339(2012)04-0043-05

doi: 10.3969/j.issn. 0253-4339. 2012. 04. 043

基于分形论的深冷翅片管气化器结霜数值模拟

陈叔平 姚淑婷 谢福寿 韩宏茵

(兰州理工大学石油化工学院 兰州 730050)

摘要 利用分形理论DLA模型, 建立翅片管气化器深冷表面霜层生长模型, 通过控制程序循环次数模拟了深冷表面霜层生长不同阶段。结合实验观测到的深冷表面霜层生长过程, 从分形维数和霜层密度两个方面验证数值模拟的合理性。结果表明, 结霜初期随着初始霜枝晶上不断长出分枝晶, 霜层密度随厚度的增大而减小, 且深冷表面上霜层分形维数较一般冷表面分形维数大, 说明深冷表面霜的生长更加复杂, 充满空间的能力更大。这对进一步理解空温式深冷翅片管气化器表面结霜机理, 探索有效除霜方法, 提高气化器换热特性有重要意义。

关键词 工程热物理; 翅片管气化器; 分形; 数值模拟

中图分类号: TB61⁺1; TB657.5; TP391.9; TQ026.5

文献标识码: A

Numerical Simulation on Frost of Cryogenic Finned-Tube Vaporizer Based on Fractal Theory

Chen Shuping Yao Shuting Xie Fushou Han Hongyin

(School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

Abstract A model of frost formation and growth on the cryogenic surface of finned-tube vaporizer was proposed based on Diffusion Limited Aggregation (DLA) model, and through controlling the times of program running, the simulation on the different stages of frost formation and growth on the cryogenic surface was carried out in this paper. Combined with frost formation and growth on the cryogenic surface obtained by experimental observations, the rationality of numerical simulation was verified from fractal dimension and frost layer density. The result shows that frost layer density decreases with the increase of thickness in the early frosting stage as initial frost dendrite constantly grows branch crystal, and the fractal dimension of frost layer on the cryogenic surface is larger than the fractal dimension of frost layer on the general cold surface. The frost growth on the cryogenic surface is more complex, and it has a bigger ability of filling space. This investigation is significant to further understand the frosting mechanism on the surface of cryogenic finned-tube vaporizer, explore the effective defrosting methods, and enhance heat transfer characteristics of the vaporizer.

Keywords Engineering thermophysics; Finned-tube vaporizer; Fractal; Numerical simulation

冷表面结霜现象广泛存在于低温制冷、热泵空调、低温液体贮运、气体液化以及航空航天等领域。当湿空气遇到温度低于水蒸气凝固点温度的冷表面时, 就会凝华结霜。结霜会增大换热热阻和流动阻力, 降低系统性能, 而除霜又会带来额外能耗, 所以有必要深入研究结霜机理及规律, 探索有效的抑制结霜方法。近年来, 围绕结霜问题国内外已开展了大量理论和实验研究^[1-4], 并提出了分子扩散等多种简化结霜模型。实际上, 气化器表面结霜是伴随着气固相变、涉及传热传质, 特殊多孔介质移动边界的非稳态过程^[5], 对其简化势必造成实验结果与理论结果有较大偏差, 而想要得到一个精确结霜模型又是很困难的。自1981年T. A. Witten

和L. M. Sander提出有限扩散聚集(Diffusion Limited Aggregation)的分形生长模型以来, 很多学者开始借助分形理论来直接模拟霜层生长物理过程。DLA模型是分形理论中最为人们所重视的生长模型之一。按照DLA模型, 就可以产生经过复杂非线性动力学演化过程而形成的具有标度不变性和自相似的分形结构。张洋念^[6]进行了霜层生长过程实验, 运用分形理论对模拟生长图片进行分形维数的计算, 发现模拟图像具有分形特征且随着霜层厚度的增加, 分形维数随之增大。郝英立^[7]等指出在结霜临界状态时冰粒的大小及其在冷表面上的分布具有分形特征; 侯普秀^[8]等用计盒维数的方法对霜层生长初期冰晶体的形态进行了分形分析, 指出充分

基金项目: 国家自然科学基金(51076061)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51076061).)

收稿日期: 2011年11月7日

生长的树枝状冰晶体在一定的尺度范围内具有分形特征。这些研究主要集中在普冷工况下(结霜冷表面温度 $t_w < -30^\circ\text{C}$)霜层物性参数、结霜影响因素等方面,但对于运行在深冷工况下的气化器等低温贮运设备而言,其冷表面温度已经远远超过了上述结霜表面温度^[9],对于这种深冷表面霜层的分形特性还有待进一步的研究。结合实验观测到的霜层生长过程,基于分形理论的DLA模型,在MATLAB平台下建立霜层生长分形模型,模拟深冷表面霜层初期生长过程,对深冷翅片管气化器结霜进行分形特性分析,揭示结霜初期深冷表面上具有分形特征的霜层密度随厚度的变化规律。

1 霜层生长实验

图1为实验拍摄的深冷表面上不同时刻的霜层生长图像,该实验是在环境温度 $T_\infty=16.3^\circ\text{C}$,深冷表面温度为 $T_w=-120^\circ\text{C}$,环境湿度为 $RH=55\%$ 的条件下进行的。

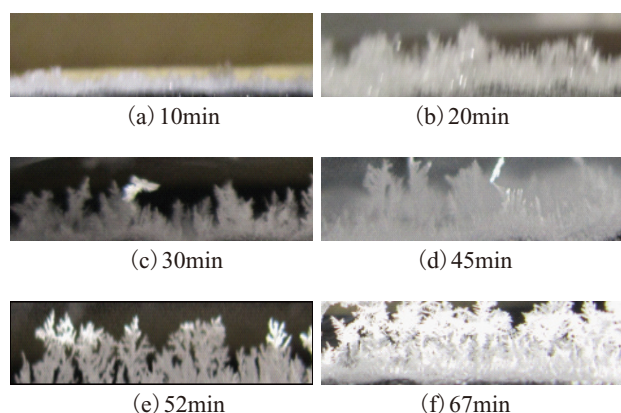


图1 不同时刻的霜层生长实验图像

Fig.1 Experimental images of frost formation and growth at different stages

由实验观测到,当湿空气接触冷壁面后,水蒸气直接凝华生成冰晶,初始生成的冰晶呈柱状,沿垂直壁面方向生长,如图1(a), (b)所示;随着时间的推移在已有的冰晶上端开始出现分叉,整个冰晶由初始的柱状变为呈树枝状向上及两侧生长,如图1(c)所示;树枝状冰晶继续长大,不断产生新的分叉,如图1(d)所示;当结霜进行一段时间后,如图1(e)所示,此时充分生长的树枝状冰晶体在一定尺度范围内具有明显的自相似性;图1(f)为结霜后期拍摄的图片,此时霜层逐渐处于稳定状态,霜层厚度基本不变,霜层密度明显增大。

从最终的实验图像可以看出,越靠近冷表面的位置由于温度低,越容易结霜,霜晶体相互交

错,霜层呈现出很紧密的聚集形态,而靠近空气侧的霜晶体则显得稀疏,呈现出枝杈状的生长形态。在霜层生长过程中,进入霜层的水蒸气分为两部分,一部分用来增加霜层的厚度,另一部分用来增加霜层的密度^[10]:结霜初期,霜层厚度增长很快,随着霜层的增厚,上端的霜表面温度逐渐升高,霜层增长速度逐渐减慢,生成霜晶形状在不断变化;当达到一定高度后停止生长,水蒸气在凝华过程中放出的热量,使得霜层表面的霜晶融化渗入到霜层内部,霜层结构变的致密,密度增加^[11],而霜层厚度没有明显变化,如图1(f)所示。整个霜层的温度由下而上是逐渐升高的,越靠近深冷表面的地方,越易形成具有分形特征的柱状霜晶体,离深冷表面越远,由于温度升高,霜晶体越不容易形成。

2 霜层生长模型

分形几何学是为描述具有自相似性的不规则形体而提出的,所谓分形是指在形态和结构上存在着自相似的几何对象。分形结构实际上是一种理想模型,它是自然界中很多复杂物体的一种抽象。自然界中的真实物体更接近随机分形,在某一标度范围内具有自相似性。分形维数是描述具有分形特征对象的定量参数,它是分形对象复杂程度的一个度量,数值越大,分形对象就越复杂。霜层作为一种随机无序多孔介质,在结霜初期随着初始枝状冰晶不断长大,树枝状冰晶不断产生新的分叉,这一过程具有分形生长的特征^[12]。

2.1 分形模型

基于翅片管气化器结霜特点,以分形理论的DLA模型为基础,在MATLAB平台下模拟霜层生长过程,建立霜层生长的分形理论模型。模拟结霜的具体算法如下:

- 1) 划分网格,构造 $a \times b$ 的网格矩阵。
- 2) 在绘图区的底部画一条直线 L ,代表结霜的深冷表面。
- 3) 在直线 L 上方,距直线 d 距离处设置一条虚拟直线 L' ,在 L' 上产生一随机粒子来代表水蒸气分子,随机粒子可向左、下、右3个方向随机游走。
- 4) 判断该游走粒子每一步左、下、右邻居中是否含有粒子,如果有则被粘住,如果没有则继续游走。当随机粒子游走到直线 L 左右两侧范围之外,则此粒子消失,同时在 L' 上产生新的随机游走粒子,并继续按步骤3)的方式向下游走;当游走粒子被粘到某处时,虚拟直线 L' 的位置将被调整,

以保持 L' 到最新粘贴粒子的距离为 d ，然后在 L' 上产生一新粒子，并使新粒子继续按步骤3)的方式向下游走。

5) 完成相应循环次数，程序运行结束。

由实验观察到，冰晶体生长的方向为向上同时呈树枝状向两侧生长，因此在模拟过程中，粒子之间以次近邻条件进行凝聚，以程序运行循环次数来代表霜层生长的时间，通过改变程序运行的循环次数来模拟霜层生长的各个阶段。

2.2 霜层分形特性分析

图2为环境温度为 $T_{\infty}=16.3^{\circ}\text{C}$ ，深冷表面温度为 $T_w=-120^{\circ}\text{C}$ ，环境湿度为 $RH=55\%$ 下的深冷表面霜层生长过程的模拟图像。

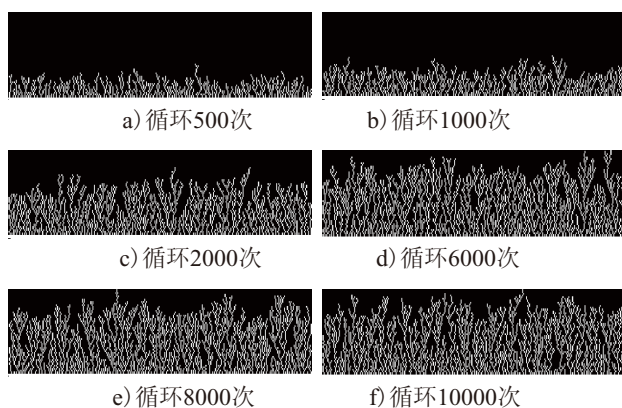


图2 不同时刻霜层生长模拟图像

Fig.2 Simulation images of frost formation and growth at different stages

由图2可见，霜层生长过程的分形理论模拟图像随程序循环次数的变化与实验得到的霜层生长形态随时间的变化(见图1)在形态和趋势上保持一致，可见用循环次数来代表霜层生长时间是合理的。为了对翅片管气器深冷表面结霜进行分形特性分析，这里采用改变测量尺度求分维的计盒法，计算翅片管深冷表面霜层的分形维数。计盒法是由相同形状盒子覆盖来确定分形维数的，其数学计算及经验估计相对容易一些，在实际计算中应用较多^[13]。计盒维数的数学定义如下：

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{-\ln \delta} \quad (1)$$

式中： D —计盒维数； $N(\delta)$ —盒子数目； δ —盒子的特征长度。具体计算步骤如下：

1) 在一定的尺度范围内，构造任意不同的特征长度 δ 。

2) 在霜层剖面上任取一点作为计算区中心，利用特征长度为 δ 的盒子，去覆盖整个霜层剖面。

一直到整个霜层剖面都被等几率地覆盖到，将覆盖霜层剖面所需的特征长度为 δ 的盒子的最少个数取为 $N(\delta)$ 。

3) 改变特征长度 δ ，重复上述步骤1)和2)，得到不同尺度 δ_i 对应的一系列盒子数 $N_i(\delta)$ 。

4) 运用最小二乘法回归出 $\ln N(\delta) - \ln \delta$ 的直线。

为了验证模拟的合理性，对图3经过二值化处理的实验图像进行分形维数计算，并与图4所示基于分形理论DLA模型模拟所得到的具有分形特征的霜层结构图像所求得的分形维数进行对比，计算结果如图5所示，由直线的斜率 K ，可得分形维数：

$$D = -K \quad (2)$$



图3 霜层生长实验二值图像

Fig.3 Experimental binary image of frost formation and growth



图4 霜层生长模拟图像

Fig.4 Simulation image of frost formation and growth

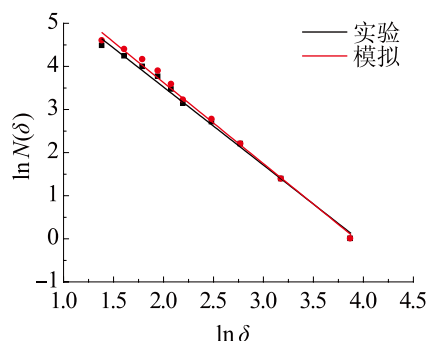


图5 线性拟合求分形维数

Fig.5 Linear fitting for the fractal dimension

由图5可知，模拟深冷表面结霜初期充分生长霜层的分形维数为1.88，而实验得到深冷表面结霜初期充分生长霜层的分形维数为1.81，模拟结果与实验结果对比表明两者取得良好的一致，验证了数值模拟的合理性。此外，深冷翅片管气器表面充分生长霜层分形维数相比于冷表面上充分生长霜层分形维数大^[14]，说明深冷翅片管气器表面上的结霜机理更加复杂，霜层充满空间的能力更大。在深冷工况下，随着霜层厚度的不断增加，霜层表面温度随时间和空间不断升高，导致新生长冰晶的附着

基体温度不断升高,冰晶形状不断变化,霜层结构更加趋于复杂化;而深冷表面温度越低,形成枝状霜晶的几率越大,充满空间的能力也就越大。

3 霜层密度计算

由于霜层物性主要受到其密度影响,因此在Matlab平台下对实验得到的霜生长图像进行霜层密度计算:首先,对于在环境温度 $T_e=16.3^{\circ}\text{C}$ 、深冷表面温度 $T_w=-120^{\circ}\text{C}$ 、环境湿度 $RH=55\%$ 条件下进行的实验图像,通过Matlab软件将其转化为二值图片,图片中的像素点仅由0和1来表示,如图3所示。图4所示为相同条件下进行的模拟图像。然后,以层为单位,从下到上每增加一个像素为一层,霜层每增加一层,对以下格点分别进行统计,得冰晶与空气的比例,采用式(3)计算每层的密度,从而得出霜层密度随厚度的变化,如图6所示。

$$\rho = \frac{N_{ice}}{N_{ice} + N_a} \rho_{ice} + \frac{N_a}{N_{ice} + N_a} \rho_a \quad (3)$$

式中: ρ —霜层密度, kg/m^3 ; ρ_a —空气密度, $\rho_a=1.292\text{kg/m}^3$; ρ_{ice} —冰晶密度, $\rho_{ice}=0.9 \times 10^3\text{kg/m}^3$; N_a —空气在已生长的晶格中的个数; N_{ice} —冰晶体在已生长的晶格中的个数。

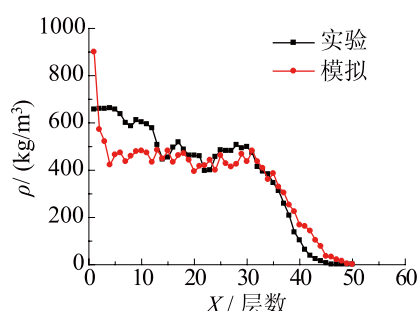


图6 霜层密度随厚度的变化

Fig.6 Density varied with thickness of frost layer

从图6可以看出,结霜初期随着冷表面温度降低,霜层厚度明显增加,霜层密度随着霜层增厚经历了由高逐渐到低的过程,验证了在建立霜层生长模型,计算霜层物性参数时,不能将霜层密度作常数处理,这与Brain等人得到的霜层密度沿其厚度方向有显著变化的实验结果是一致的^[15]。当结霜进行一段时间后,受霜层表面霜晶升华及霜晶倒伏的影响,霜层厚度基本不变,密度明显增大,如文献[15]所示。因此,在整个结霜过程中,霜层密度是变化的,在研究霜层物性参数时,有必要将结霜过程分为具有分形生长特征的霜层生长初期和以霜层老化为特征的霜层生长后期,否则计算的霜层物性

参数会与实验结果有较大误差。

4 结论

根据实验观测到的霜层生长过程,基于分形理论的DLA模型,模拟了深冷翅片管气化器表面霜层初期生长过程。实验结果和模拟结果的一致性说明用分形理论的DLA模型来模拟霜层生长过程的合理性。在霜层生长初期,深冷翅片管气化器表面霜层密度随厚度的增大而减小,且霜层分形维数较一般冷表面上的分形维数大,说明霜层具有更加复杂的结构,充满空间的能力更大。这对进一步理解深冷翅片管气化器表面霜层生长机理,探索有效的气化器抑霜方法,提高气化器换热特性有重要意义。

参考文献

- [1] Hayashi Y, Aoki A, Adachi S, et al. Study of frost properties correlating with frost formation types[J]. Journal of heat transfer, 1977, 99 (2): 239-245.
- [2] Tao Y X, Besant R W, Rezkallah K S. A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate[J]. International journal of heat and mass transfer, 1993, 36 (2):353-363.
- [3] 苏海林, 陈叔平, 孙李宁, 等. 低温翅片管换热器结霜试验研究 [J]. 低温工程, 2007, 159 (5): 51- 59. (Su Hailin, Chen Shuping, Sun Lining, et al. An experimental study of low-temperature finned-tube heat exchanger in frosting condition[J].Cryogenics, 2007,159 (5):51-59.)
- [4] 周丽敏, 李祥东, 汪荣顺. 竖直低温星形翅片管表面结霜及传热传质理论模型[J]. 低温与超导, 2009, 37 (11):60-65. (Zhou Limin, Li Xiangdong, Wang Rongshun. A theoretical model for heat and mass transfer during frosting on a vertical cryogenic star-shaped fin-tube[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2009, 37 (11): 60-65.)
- [5] 刘中良, 黄玲艳, 勾昱君, 等. 结霜现象及抑霜技术的研究进展[J]. 制冷学报, 2010, 31 (4): 1-6. (Liu Zhongliang, Huang Lingyan, Gou Yujun, et al. A Review on Frost Formation and Anti-frosting Technology[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31 (4):1-6.)
- [6] 张洋念. 霜层生长过程实验研究与分形模拟[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [7] Hao Y L, Jose I, Yong X T. Experimental study of initial state of frost formation on flat surface[J]. J. Southeast Uni., 2005, 35 (1):149-153.
- [8] Hou P X, Cai L, Yu W P. Experimental study and fractal analysis of ice crystal structure at initial period of frost formation[J]. J. Appl. Sci., 2007, 25 (2):193-197.
- [9] 陈叔平, 来进琳, 殷劲松, 等. 空温式深冷翅片管气

- 化器表面结霜特性实验研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(4):26-30. (Chen Shuping, Lai Jinlin, Yin Jinsong, et al. Experiment on Frosting Characteristic of Air-warmed Cryogenic Finned-tube Vaporizer[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(4):26-30.)
- [10] Na B, Webb R L. New model for frost growth rate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(5):925-936.
- [11] Chin H C, Keng H W. Observations of early-stage frost formation on a cold plate in atmospheric air flow[J]. J. Heat Transfer., 2003, 125(2):95-102.
- [12] 戴万田, 吴晓敏, 王维城, 等. 结霜初期现象分形特征的研究[C]//中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集, 北京, 2005:1398-1401.
- [13] Kenneth F. Fractal Geometry Mathematical Foundations and Applications[M]. Second ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007:270-275.
- [14] 刘耀民, 刘中良, 黄玲艳, 等. 基于分形论的霜晶生长模型及计算机模拟[J]. 中国科学(E辑: 技术科学), 2009, 52(12): 3497-3503. (Liu Yaomin, Liu Zhongliang, Huang Lingyan, et al. Fractal model for simulation of frost formation and growth [J]. Science in China Series E-Technological Sciences, 2009, 52(12):3497-3503.)
- [15] Brian P, Reid R C, Shah Y T. Frost deposition on cold surfaces[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1970, 9(3):375-380.

通讯作者简介

陈叔平, 男(1964—), 教授, 过程装备与控制工程系主任, 兰州理工大学石油化工学院, 13321225936, E-mail: chensp@lut.cn. 研究方向: 低温储运与传热。现在进行的研究项目有: 国家自然科学基金项目——空温式深冷翅片管气换热器结霜工况下动态传热特性研究。

About the corresponding author

Chen Shuping (1964—), male, professor/director, Department of Process Equipment and Control Engineering, School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, 13321225936, E-mail: chensp@lut.cn. Research fields: cryogenic storage-transportation technology and heat transfer. The author takes on a project supported by the Nation Natural Science Foundation of China: Dynamic heat transfer characteristic study of air-heating cryogenic finned-tube vaporizer under frosting condition.

(上接第15页)

度为100℃时, 其热端泵热量可达1037.7W, COP为3.18, 相对卡诺效率为59.73%。

以上研究表明双行波热声热泵具有很好的性能系数, 在高温热泵应用领域有应用前景和发展潜力。

参考文献

- [1] 胡斌, 王文毅, 王凯, 等. 高温热泵技术在工业领域的应用[J]. 制冷学报, 2011, 32(5):1-5. (Hu Bin, Wang Wenyi, Wang Kai, et al. The application of high-temperature heat pump in industrial refrigeration field [J]. Journal of refrigeration, 2011, 32(5):1-5.)
- [2] 罗二仓, 戴巍, 胡剑英, 等. 一种双作用单级行波热声系统: 中国, 201110082230.3 [P].
- [3] Swift G W, Gardner D L, Backhaus S. Acoustic recovery of lost power in pulse tube refrigerators [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1999, 105(2):711-724.
- [4] Ward B, Clark J, Swift G. Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion (DeltaEc),

Version 6.2, Users guide [M]. Los Alamos National Laboratory, LA-CC-01-13, 2008.

- [5] Swift G W. Thermoacoustics: A Unifying Perspective for some Engines and Refrigerators [M]. Acoustical Society of America Publications, Sewickley PA, 2002.
- [6] 肖家华. 热声效应与回热式低温制冷机(热机)的热声理论[D]. 中国科学院物理研究所博士学位, 1990.

通讯作者简介

罗二仓, 男(1967—), 博士, 中国科学院理化技术研究所研究员, 中科院低温工程学重点实验室主任。中国科学院理化技术研究所, (010)82543750, E-mail: Ecluo@mail.ipc.ac.cn. 研究方向: 新型制冷, 热声技术, 太阳能利用。

About the corresponding author

Luo Ercang (1967—), male, Ph.D., Professor and Director, The Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 010-82543750, Email: Ecluo@mail.ipc.ac.cn. Research fields: novel refrigeration technology, thermoacoustic technology, and solar energy utilization.