

低温罩表面结霜过程数值模拟

王丽红,王 骥,温永刚,陈光奇,董 亮,孙冬花

(兰州物理研究所,真空低温技术与物理重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘 要 对低温罩表面结霜过程进行了数值模拟研究。通过能量和质量平衡方程建立了低温罩结霜的物理模型,考虑了霜层厚度增加的传质和传热过程。据此分析了来流空气的温度、相对湿度、速度及冷壁面温度对霜层表面温度和霜层厚度的影响。计算结果表明,来流空气的温度及冷壁面温度对结霜的影响较大,而来流空气的速度和相对湿度对结霜的影响则较小。最后指出了对低温罩在加注低温液体时采取隔热防霜措施的必要性。

关键词 低温罩 表面温度 结霜模型 传热传质

中图分类号:TB61+1

文献标识码:A

文章编号:1006-7086(2010)04-0214-05

DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2010.04.006

SIMULATION STUDY ON FROSTING PROCESS OF CRYOGENIC ENCLOSER

WANG Li-hong, WANG Ji, WEN Yong-gang, CHEN Guang-qi, DONG Liang, SUN Dong-hua

(Science and Technology on Vacuum & Cryogenics Technology and Physics Laboratory,
Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The frost formation of cryogenic enclosure is studied with simulation method. A mathematical model is established by energy conservation and mass conservation during frosting process, in which heat transmission and mass transport process are considered. Then the influence of inflow air temperature, relative humidity, flow speed and cold wall temperature on the surface temperature and thickness of frost layer are analyzed based on the model. The simulation shows that the influence of inflow air and cold wall temperature are larger than those of flow speed and relative humidity. The necessity is pointed out to adopt some heat insulation and frost protection methods during cryogenic liquid filling process.

Key words: cryogenic enclosure; surface temperature; frosting model; heat transmission and mass transport

1 引 言

大气层和外层空间物体的红外辐射特征一直都是目标探测、跟踪、识别和遥感的有效手段,在当前空间技术研究中受到广泛关注。目标物体的红外辐射包括表面热辐射和表面反射的环境辐射,其中表面热辐射取决于表面温度,通过在其表面增加低温罩可以有效地降低表面温度,减小表面红外辐射强度^[1]。但是在大量下降物体表面温度,在大气层中必然会导致表面水汽凝结出现结霜。结霜会使低温罩的热传导性能变差,内部热量传递会导致低温罩表面温度升高,红外辐射强度增加。同时,霜层红外发射率与金属发射率差异较大会造成结霜前后目标红外辐射能量的差别,严重影响对目标物体的红外辐射强度控制。例如,50℃下抛光且

收稿日期:2010-10-19.

基金项目:“十一五”航天技术支撑项目(617010302)资助。

作者简介:王丽红(1973-),女,河北省定兴县人,工程师,从事真空低温与检漏技术研究。

未氧化时铝的发射率为 0.02,而轻微氧化后为 0.2,严重氧化时可达 0.45,但发生结霜后, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的霜对波长为 $(8\sim 14)\text{ }\mu\text{m}$ 的红外线发射系数高达 0.98。因此有必要对目标物体低温罩的结霜过程及其影响因素进行研究,为采取有效方法控制结霜提供依据。

目前对结霜问题的研究很多^[2-4],主要围绕着霜层内传热传质的研究。一般而言,对壁面温度和环境气流存在较小温差的情况,水蒸气通过分子扩散和紊流扩散过程传输到冷表面。如果二者存在较大温差,水蒸气可能在壁面附近凝结或雾化,颗粒间的碰撞和表面对颗粒的吸收成为结霜的主要机理。而当壁面温度极低时,水蒸气成为小冰粒形成霜层,并且由于热扩散这些冰粒而逐渐向冷表面迁移,导致霜层密度增加。在霜层生长过程中,表面温度随时间和空间位置发生变化,表面水蒸气分压力也随之变化,这将改变热边界层和扩散边界层的结构,从而导致传热传质速率随时间和空间位置的变化。

2 低温罩表面结霜模型

2.1 模型的建立

低温罩在加注低温液体时,液体会大量蒸发汽化,初始阶段主要是将低温罩整体从室温冷却到可以贮存低温液体的温度,随着低温罩温度的降低,壁面处于结露状态,出现水珠并很快冻结,初始结晶开始在冰珠上生长,初始霜晶都是沿纵向生长,霜层增长速率较快。随着霜层的增厚,霜层表面温度升高,局部霜晶末端开始回融,所以霜层纵向生长速率减缓,主要是霜层密实化。当霜层增厚到一定程度,霜层表面温度升高到三相点温度附近,霜层表面开始大面积回融,这是新生长的霜晶回融后,渗透到霜层内部。研究结霜层对低温罩表面温度的影响,必须要研究霜层物性,计算结霜厚度、表面温度。

由于霜层的多孔性,空气中水蒸气在压力作用下不断向冷表面移动并凝结的传质过程分为两部分,一部分水蒸气在霜表面直接凝结从而增加霜层的厚度,另一部分水蒸气渗入霜层内部用来增加霜层的密度。在霜层表面,传热过程包括由温差引起的空气与霜层之间的热交换和质传递以及水蒸气凝结所释放的潜热,霜层表面温度即可通过该能量平衡关系来确定。

作者做如下假设:(1)霜层的生长是一维准静态过程,即在一个时间步长内为稳态^[5];(2)霜层的传热和传质系数是常数^[5];(3)霜层的形成是由水蒸气瞬时凝华形成的;(4)假设边界层处的湿空气处于过饱和状态;(5)不考虑霜层内部物理过程细节,密度以平均值计算;(6)不考虑冷表面的温度变化,取为固定温度边界。

建立低温罩表面结霜模型如图 1 所示。

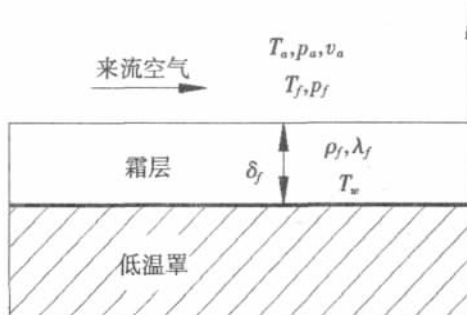


图 1 低温罩表面一维结霜模型

图 1 中, T_a 为来流空气的温度, $^{\circ}\text{C}$; p_a 为来流空气中水蒸气分压力,Pa; v_a 为来流空气的流动速度,m/s; T_f 为霜层表面空气的温度,即霜层表面温度, $^{\circ}\text{C}$; p_f 为霜层表面空气中水蒸气分压力,Pa; δ_f 为霜层厚度,m; ρ_f 为霜层平均密度, kg/m^3 ; λ_f 为霜层热导率, $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$; T_w 为低温罩表面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 结霜模型公式推导

设 h_m 为来流空气与霜层的质交换系数 (m/s), C_a 和 C_f 分别为来流湿空气和霜层表面湿空气的水蒸气密度 (kg/m^3),那么,由霜层与来流空气表面的质量守恒关系可得^[6]

$$h_m(C_a - C_f) = \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} + \delta_f \frac{d\rho_f}{dt} \quad (1)$$

根据理想气体方程,式 (1) 可进一步写为

$$\frac{h_m}{R} \left(\frac{p_a}{T_a} - \frac{p_f}{T_f} \right) = \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} + \delta_f \frac{d\rho_f}{dt} \quad (2)$$

考虑霜层表面的热平衡过程,设 h_c 为霜层与其表面来流空气之间的对流换热系数, i_{sv} 为水蒸气的凝华热,又有

$$h_c (T_a - T) + i_{sv} \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} = \frac{\lambda_f}{\delta_f} (T_f - T_w) \quad (3)$$

霜层的平均密度和热导率由 Sanders 关联式计算,即^[7]

$$\rho_f = 650 \exp (0.227 (T_f - 273.15)) \quad (4)$$

$$\lambda_f = 0.001202 \rho_f^{0.963} \quad (5)$$

由式 (3) 可得

$$\frac{d\delta_f}{dt} = \frac{\frac{\lambda_f}{\delta_f} (T_f - T_w) - h_c (T_a - T)}{i_{sv} \rho_f} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (2), 可得

$$\frac{h_m}{R} \left(\frac{p_a}{T_a} - \frac{p_f}{T_f} \right) = \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} + 147.55 \exp (0.227 (T_f - 273.15)) \delta_f \frac{dT_f}{d\delta_f} \frac{d\delta_f}{dt} \quad (7)$$

则有

$$\frac{dT_f}{d\delta_f} = \frac{\frac{h_m}{R} \left(\frac{p_a}{T_a} - \frac{p_f}{T_f} \right) / \frac{d\delta_f}{dt} - \rho_f}{147.55 \delta_f \exp (0.227 (T_f - 273.15))} \quad (8)$$

由此,可利用数值方法求解式 (6) 和式 (8) 获得霜层密度 ρ_f 、厚度 δ_f 和表面温度 T_f ,可以得出不同影响因素对结霜的影响。

2.3 结霜温度场计算方法

设数值计算的时间步长为 Δt ,那么时间 t 离散为

$$t_i = i\Delta t, i = 0, 1, \dots, \infty \quad (9)$$

记式 $T(i\Delta t) = T^i$,则式 (6) 和式 (8) 离散后可表示为

$$\Delta\delta_f^i = \frac{\frac{\lambda_f^{i-1}}{\delta_f^{i-1}} (T_f^{i-1} - T_w) - h_c (T_a - T_f^{i-1})}{i_{sv} \rho_f^{i-1}} \Delta t \quad (10)$$

$$\delta_f^i = \delta_f^{i-1} + \Delta\delta_f^i \quad (11)$$

$$\Delta T_f^i = \frac{\frac{h_m}{R} \left(\frac{p_a}{T_a} - \frac{p_f^{i-1}}{T_f^{i-1}} \right) / \frac{d\delta_f^i}{dt} - \rho_f^{i-1}}{147.55 \delta_f^i \exp (0.227 (T_f^{i-1} - 273.15))} \Delta\delta_f^i \quad (12)$$

$$T_f^i = T_f^{i-1} + \Delta T_f^i \quad (13)$$

3 结果与讨论

3.1 来流空气温度对低温罩表面温度的影响

以来流空气速度 1.2 m/s,相对湿度 30%,低温罩表面温度-123 ℃为条件,分析来流空气温度变化时的结霜情况。分别取来流空气温度分别为-20 ℃、-10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃,那么霜层表面温度的变化如图 2 和图 3 所示。

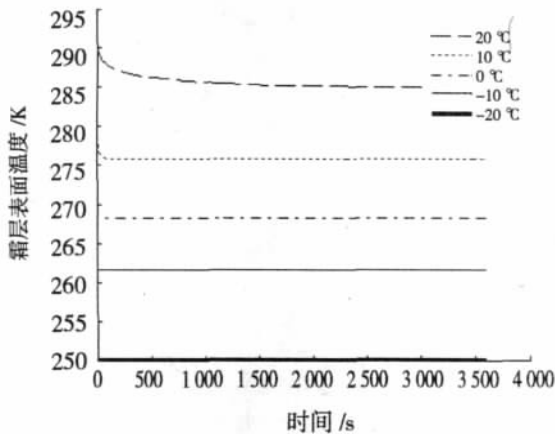


图2 霜层表面温度随来流空气温度的变化

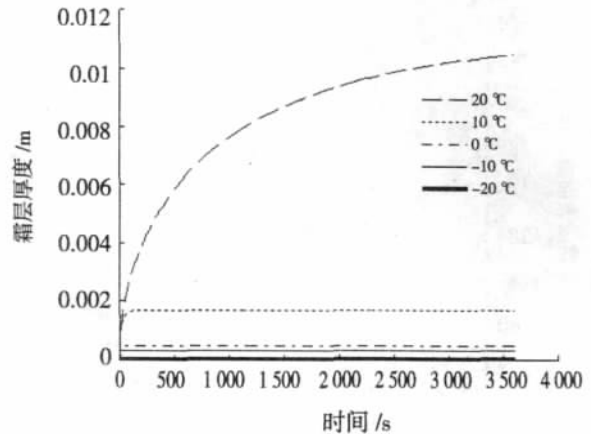


图3 霜层厚度随来流空气温度的变化

从图2和图3可以看出,来流空气温度对霜层表面温度和霜层厚度的影响存在一个临界值,即水的三相点温度。结霜初始阶段,若来流空气温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,则霜层表面温度会迅速下降,并且在低于来流空气温度的某一温度处达到平衡,霜层厚度则随着时间而不断增长,增长速度会逐渐趋缓,达到平衡需要的时间很长;当来流空气温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,则霜层表面温度保持不变,等于来流空气温度,而霜层厚度相比较薄,在 $(0\sim 2)\text{ mm}$ 之间,且达到平衡的时间较短,之后随着时间增加不再增长。

3.2 冷壁面温度对低温罩表面温度的影响

以来流空气温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,速度 1.2 m/s ,相对湿度 30% 为条件,分析低温罩冷壁面温度变化时的结霜情况。取低温罩冷壁面温度分别为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,那么霜层表面温度和厚度的变化如图4和图5所示。

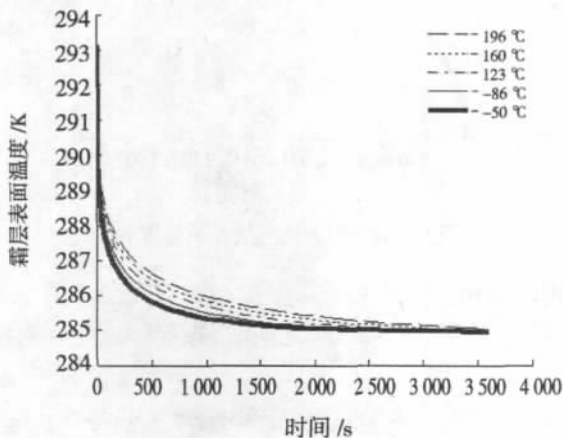


图4 霜层表面温度随壁面温度的变化

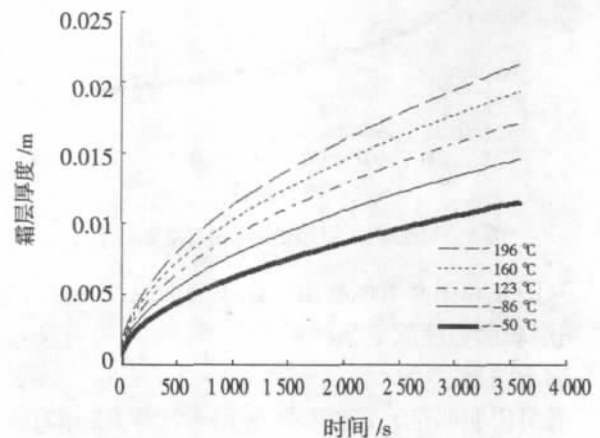


图5 霜层厚度随壁面温度的变化

从图4和图5可以看出,霜层表面温度和霜层厚度受冷壁面温度的影响比较大,霜层表面温度随着冷壁面温度的降低而降低,霜层厚度增长速度则随着冷壁面温度的降低显著变大。这是因为冷壁面温度的降低,加强了冷壁面和来流空气的传热传质过程。

3.3 来流空气速度对低温罩表面温度的影响

以来流空气温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 30% ,壁面温度为 $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为条件,分析来流空气速度变化时的结霜情况。分别取空气速度分别为 1.2 m/s 、 12 m/s 、 60 m/s 、 120 m/s ,那么霜层表面温度和厚度的变化如图6和图7所示。

可以看出,在选定的空气流动速度范围内,该模型获得的霜层表面温度随来流空气速度的增大而增大,霜层厚度随来流空气速度增大而变化不明显,反映出霜层表面与湿空气之间的对流换热系数受空气流动速度变化的影响较小。

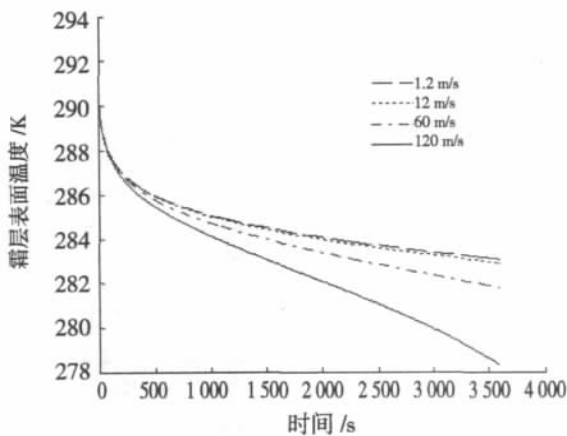


图 6 霜层表面温度随空气速度的变化

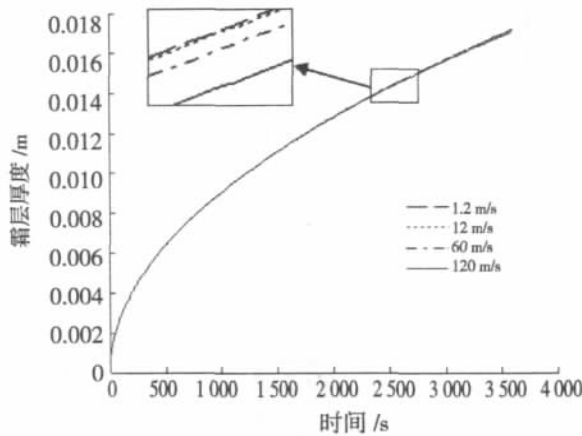


图 7 霜层厚度随空气速度的变化

3.4 空气相对湿度对低温罩表面温度的影响

以来流空气温度 20 ℃,来流空气速度 1.2 m/s,低温罩壁面温度-123 ℃为条件,分析相对湿度变化时的结霜情况。取空气相对湿度分别为 10 %,30 %,50 %,70 %,90 %,那么霜层表面温度和厚度的变化如图 8 和图 9 所示。

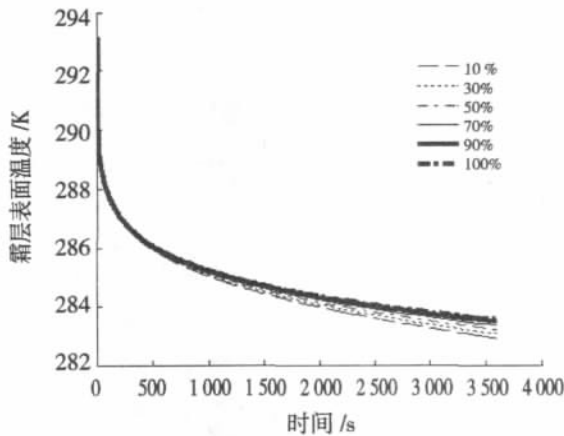


图 8 霜层表面温度随空气相对湿度的变化

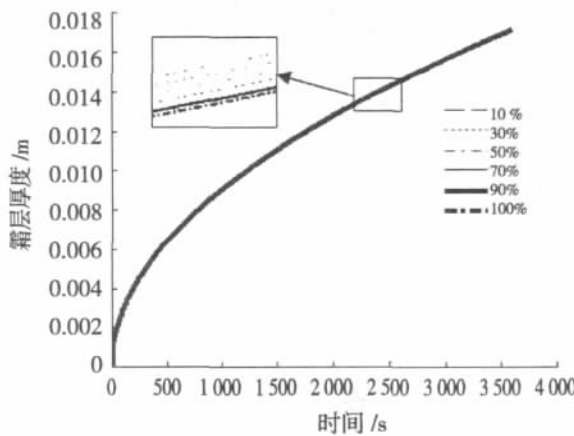


图 9 霜层厚度随空气相对湿度的变化

从图 8 和图 9 可以看出,由于壁面温度与空气温度相比很低,温差对霜层厚度的影响完全占据主导地位,霜层表面温度随空气相对湿度增加而略有升高。在相对湿度为 10%~100%之间时,霜层厚度受相对湿度的影响不明显。

需要说明的是,该模型不能用于计算 0%相对湿度的结霜过程,因为霜层的平均密度和热导率由式 (4) Sanders 关联式计算,该式表明“霜层密度只与温度有关,而与空气湿度无关”,显然不是普适的,那么作者提出模型的适用范围与 Sanders 关联式的使用范围相同。

4 结 论

由数值模拟计算结果可知,表面结霜后霜层表面温度和厚度随影响因素变化的规律如下:

- (1) 在温度较低的大气中,大气温度仍然远高于低温罩壁面温度,低温罩表面会形成结霜现象,虽然霜层表面温度和周围环境温度接近,但霜层与低温罩材料反射率的差异会影响低温罩的红外特性。
- (2) 在大气常温环境下向低温罩加注低温液体,低温罩表面结霜的速度快,霜层达到平衡的时间长,霜层厚度厚。
- (3) 低温罩表面结霜过程受来流空气温度和冷壁面温度的影响较大,而受来流空气的速度和相对湿度的影响较小,但该模型不适用于相对湿度为 0%的结霜过程。

综上所述,低温罩在大气环境下加注低温液体期间,必须采取隔热防霜措施,防止 (下转第 237 页)

度,得到结论如下:

(1) TiO₂ 薄膜的光谱透过率峰值随真空度降低而增大,折射率和消光系数随真空度降低而减小;TiO₂ 薄膜表面形貌随真空度的降低,薄膜表面由光滑致密到出现孔隙和不平整的颗粒,薄膜表面由致密变粗糙。

(2) 制备在可见光谱区透过率高、折射率高且成膜质量好的 TiO₂ 薄膜,当真空度为 2.0×10^{-3} Pa 时,最大透过率 92%,折射率在 2.45~2.20 之间,消光系数在 10^{-4} 以下。拟合曲线和采用包络法计算结果的相关系数平方为 0.999 9,折射率的 Cauchy 色散公式为 $n(\lambda) = 2.12 + 5.69 \times 10^4 / \lambda^2 + 8.07 \times 10^7 / \lambda^4$ 。

参考文献:

- [1] MENG FANMING, SONG XUEPING, SUN ZHAOQI. Photocatalytic activity of TiO₂ thin films deposited by RF magnetron sputtering [J]. Vacuum, 2009, 83 (9): 1147~1151.
- [2] MIYATA TOSHIHIRO, TSUKADA SATOSHI, MINAMI TADATSUGU. Preparation of anatase TiO₂ thin films by vacuum arc plasma evaporation [J]. Thin Solid Films, 2006, 496 (1): 136~140.
- [3] SAINI K K, SHARMA, SUNIL DUTTA, *et al.* Structural and optical properties of TiO₂ thin films derived by sol-gel dip coating process [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2007, 353 (24-25): 2469~2473.
- [4] SANTUCCI A, BERETTA S, REVERBERI G, *et al.* Optical and structural properties of e-beam evaporated TiO_{2-x} films [J]. Vacuum, 1990, 41 (4-6): 1479~1480.
- [5] 潘永强,施洋.离子束辅助沉积 TiO₂ 薄膜近红外光学特性分析[J]. 西安工业大学学报, 2009, 29 (4): 307~310.
- [6] WANG F X, HWANGBO C K, JUNG B Y, *et al.* Optical and structural properties of TiO₂ films deposited from Ti₃O₅ by electron beam [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201: 5367~5370.
- [7] CHIAO SHU-CHUNG, BOVARD B G, MACLEOD H. Repeat-ability of the Composition of Titanium Oxide Films Produced by Evaporation of Ti₂O₃ [J]. Appl Opt, 1998, 37 (22): 5284~5287.
- [8] KOJI IJIMA, MASAKO GOTO, SHOGO ENOMOTO, *et al.* Influence of oxygen vacancies on optical properties of anatase TiO₂ thin films [J]. Journal of Luminescence, 2008, 128: 911~913.
- [9] DIANA MARDARE, TASCA M, DELIBAS M, *et al.* On the structural properties and optical transmittance of TiO₂ r.f. sputtered thin films [J]. Applied Surface Science, 2000, 156: 200~206.
- [10] 钟迪生. 真空镀膜——光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001.
- [11] 熊玉卿, 罗崇泰, 王多书, 等. 离子束辅助沉积碲化铅薄膜的 AFM 研究[J]. 真空与低温, 2008, 14 (1): 11~14.
- [12] 夏志林, 薛亦渝, 赵利, 等. 基于包络线法的薄膜光学常数分析[J]. 武汉理工大学学报·信息与管理工程版, 2003, 25 (5): 73~77.
- [13] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

(上接第 218 页)

低温罩表面结霜,例如降低加注环境温度、提高低温罩隔热效果、减少蒸发和汽化等。

参考文献:

- [1] 张周卫, 厉彦忠, 汪雅红, 等. 空间低红外辐射液氮冷屏低温特性研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (2): 111~118.
- [2] 赵兰萍, 徐烈, 任世瑶, 等. 冷壁面上结霜机理研究中的几个问题[J]. 制冷学报, 2000, 2: 45~48.
- [3] ROBINSON C. M., JACOBI A. M., A Study of Frost Formation on a Plain Fin[R], ACRC TR-188, 2001, 8: 8~35.
- [4] 徐成海, 郝璐, 熊富仓. 冻干机补水器结构与特性[J]. 真空与低温, 2002, 8 (3): 162~164.
- [5] 刘斌, 杨永安, 杨昭, 等. 低温结霜模型及影响因素的分析[J]. 制冷学报, 2004, 4: 40~42.
- [6] HAYASHI, Y., AOKI, K., YUHURA, H.. Study of frost properties correlating with frost formation [J]. Journal of Heat Transfer, Trans, ASME, 1977, 6 (3): 79~94.
- [7] HAYASHI, Y., AOKI, K., YUHURA, H.. Study of Frost Formation Based on a Theoretical Model of the Frost Layer [J]. Trans. Japan Soc, Mech Eng. 1976, 40: 885~899.