

分子凝结与凝结表面温度的关系机理研究

王先荣 颜则东 王 肖 强

(兰州物理研究所,兰州 730000)

文 摘 基于相关理论研究,并借助新近研究的“分子污染低温凝结效应设备”,就我国飞行器型号设计密切相关的分子凝结与凝结表面温度的关系机制进行了四个多月的试验研究,取得了相关的二千余个数据。在此基础上,结合相关的理论对数据进行了拟合和分析,得到了分子凝结与凝结表面温度广泛遵循的一般关系——指数关系。对型号设计具有重要的参考价值。

关键词 分子污染,低温凝结,机理,试验

Mechanism Research Upon Relationship Between Molecular Condensation and Sensitive Surface Temperature

Wang Xianrong Yan Zedong Wang Yi Xiao Qiang

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract Molecular condensation contamination from outgassing behavior of non-metal materials of spacecraft will cause some problems. For the optical and sensitive surfaces in lower temperature state the problem is especially serious and dangerous because the condensation quantity increases as the surface temperature decreases. To look for the mechanism upon the relationship between molecular condensation and sensitive surface temperature, tests and researches are being taken and more than 2000 data have been obtained. The analysis on the data shows that the relationship between molecular condensation and sensitive surface temperature observes exponential law. This result is important and possesses reference value.

Key words Molecular contamination, Cryogenic temperature condensation, Mechanism, Test

1 引言

飞行器所用大量非金属材料在轨道环境下将发生出气逸出行为。逸出的分子极易沉积凝结于光学系统表面或其它敏感表面形成分子污染,且这种分子凝结行为的量级和附着强度与凝结表面的温度有最为直接的关系。尤在凝结表面处于低温状态时,这种凝结造成的飞行器在轨安全隐患为甚;为此,极有必要澄清分子凝结与凝结表面的温度关系机制,并以此机制为依据,进行飞行器与分子凝结相关的光学表面或敏感表面温度场设计。

2 概念

飞行器非金属材料轨道环境下的出气逸出物在一般情况下服从如下规律^[1]:

$$A = A_0(T_c) \cdot (1 - e^{-t}) \quad (1)$$

式中, A 为 t 时间内材料的逸出释放总量; A_0 为由材料自身物性和材料受热出气温度决定的常数; A_0 为由材料本身物性和材料受热出气温度决定的材料可出气总量; T_c 表示材料出气受热温度。

非金属材料出气逸出释放后在凝结表面的凝结量在一般情况下服从如下规律:

收稿日期:2003-07-10

王先荣,1958年出生,研究员,主要从事空间环境防护与控制工程及空间流体力学的研究工作

$$B = A_0(T_c) \cdot f(T_n, x_1, x_2, \dots, t) \quad (2)$$

式中, B 为 t 时间内在凝结表面上沉积凝结的出气逸出释放物总量; T_n 表示凝结表面凝结温度; x_1 、 x_2 、分别表示与凝结表面物性、表面能、表面结构及出气凝结物分子物性相关的一些函数因素; $f(T_n, x_1, x_2, \dots, t)$ 则表示凝结函数。在上述与凝结相关的诸多因素中, 最为直接和密切相关的因素为凝结表面温度 T_n ^[2], 且其它相关因素亦常受制于凝结表面温度 T_n , 故在一般考虑下, 可将(2)式中凝结函数仅表示为 T_n 的函数 $f(T_n)$ 。从而(2)式可记为:

$$B = A_0(T_c) \cdot f(T_n) \quad (3)$$

(3)式满足: 当 $T_n = 0$ 时, $f(T_n) = 1$ 。

本文的目的在于通过对凝结与凝结表面温度的关系机制的试验研究, 基于上述理论公式, 找寻 $f(T_n)$ 所遵循的一般函数形式, 即通过大量的试验得到的试验数据和图表, 分析找寻 $f(T_n)$ 的实验函数。

3 试验思路及过程

(1) 为找寻凝结函数的一般函数 $f(T_n)$ 形式, 以(3)式为理论依据, 选择“低温凝结效应设备”^[3], 在很宽的低温凝结范围内就所选多种飞行器非金属材料进行出气逸出物在凝结表面上的凝结测试试验。

(2) 就所选某种非金属材料, 给定其确定的材料出气温度, 试验找寻出(3)式中的 $A_0(T_c)$ 。

(3) 就所选某种非金属材料, 依次对控制在不同凝结温度的敏感表面进行出气凝结试验, 分别得到对应的沉积凝结量 B 的数据, 同时连续完整地记录整个试验测试数据, 绘出试验图, 并进而分析和拟合出相应的实验函数 $f(T_n)$ 。

(4) 为保证所找寻的实验函数 $f(T_n)$ 的一般性, 依次更换所选出气材料的出气温度 T_c , 重复(1)~(3)所述的试验内容, 看所得的 $f(T_n)$ 是否具有同一性和一致性。如一致则最佳, 如不一致, 则对实验函数做相应修正。

(5) 更换所选非金属材料, 重复(1)~(4)所述试验内容。

4 结果

(1) 所试验的材料服从:

$$A_0(T_c) = 0.091 \exp(T_c/75.69)$$

其一般形式为:

$$A_0(T_c) = a \exp(T_c/b) \quad (4)$$

宇航材料工艺 2003年 第6期

(2) 所试验某种材料的凝结数据见表1。

表1 凝结试验数据

$T_n/$	Tab.1 Data of condensate experiment		
	$B/\text{Hz} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($T_c=75$)	$B/\text{Hz} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($T_c=100$)	$B/\text{Hz} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($T_c=125$)
25	1.31	34.89	45.89
0	3.11	31.37	56.30
-25	4.84	40.62	75.52
-50	18.18	101.06	120.27

(3) 试验材料凝结量的试验拟合函数与曲线。

当 $T_c = 75$

$$B = 5.505 \times$$

$$\{0.305 + 2.994 \exp[-(T_n - 233)/15.82]\}$$

当 $T_c = 100$

$$B = 11.22 \times$$

$$\{2.932 + 6.007 \exp[-(T_n - 233)/15.82]\}$$

当 $T_c = 125$

$$B = 22.58 \times$$

$$\{1.696 + 3.626 \exp[-(T_n - 233)/32.14]\}$$

图1~图4给出了几组凝结试验拟合曲线。

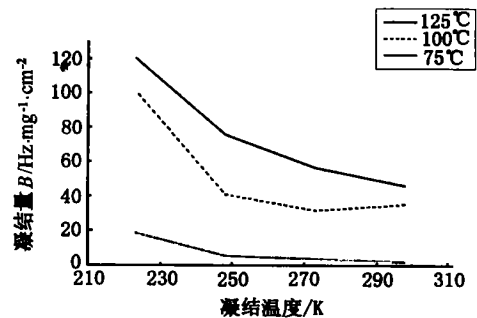


图1 凝结试验曲线图

Fig.1 Curve of condensate experiment

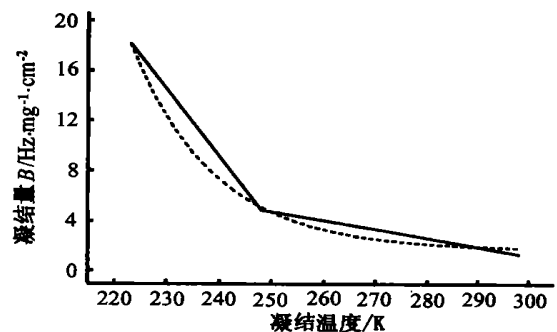


图2 在75°C下凝结试验拟合曲线图

Fig.2 Fit curve plot of condensate experiment at 75°C heating

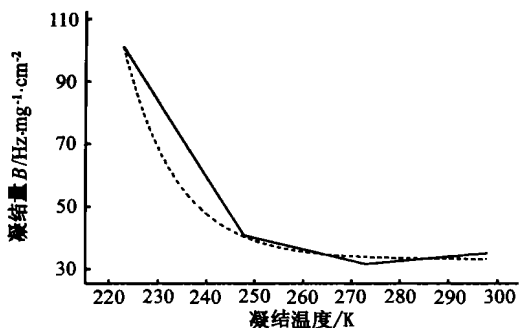


图3 在100下凝结试验拟合曲线图

Fig. 3 Fit curve plot of condensate experiment at 100 heating

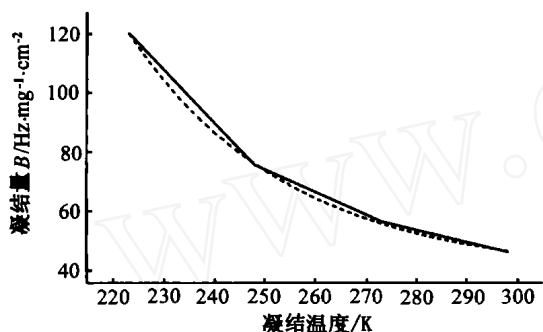


图4 在125下凝结试验拟合曲线图

Fig. 4 Fit curve of condensate experiment at 125 heating

(4) 凝结函数的试验拟合函数:

当 $T_c = 75$

$$f(T_n) = 0.305 + 2.994 \exp[-(T_n - 233)/15.82]$$

当 $T_c = 100$

$$f(T_n) = 2.932 + 6.007 \exp[-(T_n - 233)/15.82]$$

当 $T_c = 125$

$$f(T_n) = 1.696 + 3.626 \exp[-(T_n - 233)/32.14]$$

从上述试验数据及拟合函数可见,凝结函数 $f(T_n)$ 服从如下的函数形式:

$$f(T_n) = a + b \exp[-(T_n - 233)/c] \quad (5)$$

式中, a 、 b 、 c 为与材料出气温度、凝结表面物性及表面能等相关的量^[4,5]。

5 结论

本文在理论分析和大量试验基础上,取得了两千余条试验数据。对试验数据的分析和拟合表明,分子凝结与凝结表面的温度关系机制一般服从如(5)式描述的指数函数规律。此结论告诉我们:凝结函数 $f(T_n)$ 与凝结温度成指数变化关系,且 $f(T_n)$ 的大小相关于凝结表面物性及表面能等相关因素;在进行飞行器光学表面和敏感表面设计时,表面本身及其附近的温度场设计在满足其功能和使用要求前提下,不是简单地把温度设计得较高就能解决表面凝结问题,更有必要考虑上述指数规律,进行相应地综合计算,才能明显降低 $f(T_n)$,有效抑制凝结函数指数规律所决定的大凝销量出现。

参考文献

- 1 王先荣.空间材料质损过程的数学分析与理论的实验验证.中国空间技术,1989;(3):8~21
- 2 Martin D J. The influence of commonly used materials and compounds on spacecraft contamination. In: 43rd, IAF, International astronomical congress, Washington, 1992:19
- 3 王先荣.污染低温凝结效应设备的研制.宇航学报,2002;(3):66~71
- 4 Peckham D B, Worden E A. Space station water recovery management system design. In: Space Programs and Technologies Conference, AIAA, 1994/ Huntsville, AL
- 5 Shaarma R K, Mahajan R L. Experimental study of laminar film condensation on bank of horizontal tubes with stefan number greater than unity. In: 8th AIAA/ ASME joint thermophysics and heat transfer conference, 2002

(编辑 任涛)