

飞行器敏感系统在轨分子污染沾染量 预估方法研究

王 鷁 王先荣 姚日剑

(兰州物理研究所真空低温技术与物理国防科技重点实验室,兰州 730000)

文 摘 空间环境下,材料出气引起的分子污染效应是影响飞行器寿命和可靠性的重要因素之一。本文就材料出气分子经历的出气、在空间的传播输运和沉积三个过程及有诸多污染出气源存在时,对敏感表面沉积量的影响等进行了研究。建立了针对飞行器敏感系统功能表面在轨分子污染沾染量的预估模型。并利用该理论模型,结合相机镜头结构和空间环境的使用条件,模拟计算其镜头表面在轨飞行期间的分子污染物沾染量随时间变化的结果,同时理论计算结果结合试验测试数据评估相机镜头的在轨使用业绩。结果表明,镜头由于分子污染物沉积引起光学透过率的衰减达 30%以上。所得到的结论对完善飞行器的防污染设计,提高飞行器在轨期间安全和性能保障具有重要的参考意义。

关键词 出气,分子污染,预估,模型

Method Predicting Molecular Contamination on Sensitive Surface of Spacecraft on Orbit

Wang Yi Wang Xianrong Yao Rijian

(National Key Laboratory of Vacuum & Cryogenics Technology and Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract In space environment, molecular contamination is an important influence factor on spacecraft life and reliability. The influence of deposition on sensitive surface is studied with existence of the processes of outgassing, transferring and deposition experienced by outgassing molecules of the material and multi-contamination sources. A model and software of outgassing, transferring and deposition is established. Camera lens molecular contaminative deposition is calculated. It can be used to predict camera lens performance on orbit with experiment data. The results indicate that transmittance of the camera lens is attenuated by 30% due to molecular contaminative deposition. It is very important for spacecraft's structure design and material protection.

Key words Outgassing, Molecular contamination, Predicting, Model

1 前言

飞行器各系统及部器件所用大量非金属材料,在轨道环境下出气逸出形成的星载光学系统的污染,或引起的那些对异物沉积有敏感反应的敏感传输系统的污染,多年来始终影响和制约飞行器寿命和可靠性。20世纪90年代以来,国外在分子污染的成因和传输沉积过程等方面的研究成为主流。在此期间,建立了许多分子污染理论预估模型,为飞行器分子污染防治与控制技术研究提供参考。1996年发射的MSX

(中期试验卫星)专门就卫星敏感系统分子污染效应进行飞行实测,所得的飞行数据与模型的预估结果相吻合。这说明,污染量的预估研究在国外已较成熟,在轨运行卫星的污染预估的数据可作为卫星防污染设计的依据。

本文基于单源传输模型^[1],研究污染分子的产生、传播和沉积过程。

2 问题的提出与假设

飞行器在轨运行期间的污染出气作用,包括固态

收稿日期:2006-06-21;修回日期:2006-08-30

作者简介:王鷁,1974年出生,硕士,主要从事空间环境效应防护与控制方面的研究工作

分子传播到表面,随后被解吸到高真空环境中去。当那些分子到达敏感表面时,会带来相应的污染效应。图 1 为污染源表面出气分子的传输和沉积机理示意图。其过程非常复杂,可作出如下简化和假设:(1)各个出气源为单一组分材料出气;(2)分子之间无碰撞;(3)不考虑由敏感表面逸出的出气分子。

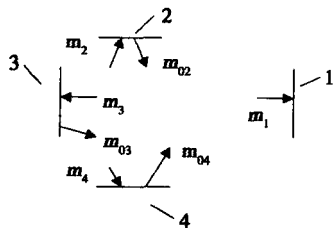


图 1 出气分子传输和沉积示意图

Fig 1 Transferring and deposition of outgassing molecule
1 为敏感表面; 2, 3, 4 为出气表面; m_{02} 、 m_{03} 、 m_{04} 为出气速率;
 m_2 、 m_3 、 m_4 为周围污染源的影响。

3 分子污染的产生和传播沉积过程

3.1 分子污染源的产生

非金属材料在空间的出气行为,是敏感表面受污染的来源。研究污染源的出气速率是建立模型的一个重要参数。出气行为受降解方式(热、辐射诱发、催化)动力学调节以及受穿过体材料和可能的表面附着层的扩散速率控制,温度对这种出气行为有加速作用。对于不同组分组成的聚合物,出气速率更难估计。以下利用化学出气率理论和有关定理来讨论材料的出气速率。对材料的每种成分,其质损率由(1)式^[2]表示:

$$\dot{m}_{0i} = k_{0i} e^{-kt} \quad (1)$$

式中: \dot{m}_{0i} 为质损率, k 比例常数, m_{0i} 为出气前的初始质量, t 为出气时间。

$$k = A e^{-E/RT} \quad (2)$$

式中: A 为常数, E 为材料分子的激活能, T 为温度。

由(1)式可知,用一般方法很难得到质损率与出气时间和温度关系的有关参数,只能通过地面实验测定其近似的平均出气速率。利用已有的非金属材料出气性能地面模拟测试设备,测试整个污染周期内的星用非金属材料质量损失量和出气前的初始质量,并根据测试结果计算近似出气源的平均出气速率。

其平均出气速率可由(3)式表示:

$$u_i = \frac{m_i}{t} \quad (3)$$

式中: m_i 为质量变化量, t 为出气时间。

表 1 所列的为部分非金属材料出气参数。

宇航材料工艺 2007年 第3期

表 1 星用部分非金属材料的出气参数

Tab 1 Outgassing rate of nonmetal materials

样 品	测前质量 /mg	测后质量 /mg	总质量损失 /mg	平均出气速率 / $10^{-5} \text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$
空间级硅橡胶	221.65	219.94	1.71	1.98
纳米黑漆	191.29	182.09	9.2	10.4
硅橡胶片	177.89	177.22	0.67	0.775
丙稀酸树脂(热控涂层)	214.09	212.25	1.84	2.13
丁晴橡胶	197.53	183.81	13.72	15.9
有机硅胶黏剂	194.75	191.58	3.17	3.67
聚氨酯胶	190.88	188.59	2.29	2.65
PBT	189.78	187.21	2.57	2.97
二苯基硅橡胶	191.33	189.08	2.25	2.60

3.2 出气分子在敏感系统内部的传输

所谓出气分子在敏感系统内部的传输,指污染源与敏感表面、污染源之间、污染源与其它表面对应的视角关系。即由污染源逸出的出气分子在空间传播过程中,到达敏感表面或其他表面的分子数占逸出分子的比率。本文利用蒙特卡罗方法计算视角因子。其基本思路是:以单个分子为研究对象,随机给出该分子在材料表面的出气位置和方向,模拟追踪其自逸出出气表面后的运动轨迹,若该分子到达敏感表面,则计数,当出气分子足够多时,就可得到具有统计意义的结果。

3.2.1 出气分子位置的描述

以随机形式脱离出气表面的单个分子,其在出气表面的起始(脱离)位置是分布均匀的,如图 2 所示。假设任意出气表面的方程由(4)式确定。

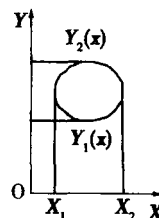


图 2 出气表面示意图

Fig 2 Outgassing surface

$$\begin{cases} X_1 & x & X_2 \\ Y_1(x) & y & Y_2(x) \end{cases} \quad (4)$$

则随机产生的出气位置由下列关系式表示:

$$R_x = \frac{\int_{x_1}^x \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} dy dx}{\int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} dy dx} = \frac{\int_{x_1}^x [Y_2(x) - Y_1(x)] dx}{\int_{x_1}^{x_2} [Y_2(x) - Y_1(x)] dx} \quad (5)$$

$$R_y = \frac{\int_{y_1}^y dy}{\int_{y_1}^{y_2} dy} = \frac{y - Y_1(x)}{Y_2(x) - Y_1(x)} \quad (6)$$

式中, R_x 与 R_y 分别为两独立的在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数, 可由随机函数产生。 R_x 与 R_y 产生后, 利用式 (5)、式 (6) 可确定出气分子发射位置的坐标 (x, y) 。

$$F_{i,j} = \frac{N_j}{N_i} \quad (11)$$

为达到统计模拟的目的, 要求出气表面发生的出气分子数具有足够的数量。 N_i 由计算精度决定, 一般取值在 $10^4 \sim 5 \times 10^5$ 就可保证计算要求。

3.2.2 出气分子的方向

如图 3 所示, 出气分子的位置为坐标原点, 出气分子的方向由 θ 和 ϕ 确定。

3.3 分子污染的沉积

对于在敏感表面上冷凝沉积来说, 污染取决于入射分子的特性、敏感表面的特性及后者的热力学温度。为了停留在表面上, 撞击分子就必须失去它的动能, 转变成分子在表面上的振动能, 形成的键可能是一种范德瓦尔斯键 (物理吸附) 或者是一种较强的键 (化学吸附)。凝聚与否要用统计学的方法衡量, 对物理吸附采用冷凝吸收 c , 对化学吸附则用黏着几率 s 。它们都随着敏感表面温度的降低而增加。凝结在表面的出气分子, 也并非永久, 而是有一定的滞留。当形成的键断裂时, 可能释放出分子来。物理吸附一般很不稳定, 易脱附。因此, 着重讨论化学吸附引起的黏着系数。

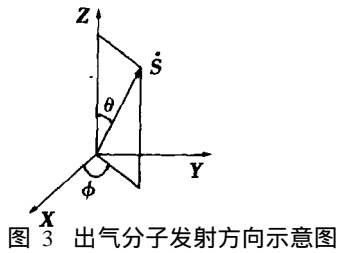


图 3 Outgassing direction

出气分子从表面的发射方向遵循余弦定理, 设 d_s 为半径 $r=1$ 球面上的一个面积元素, 那么由 dA 上发射的分子到达 d_s 的分子数占总发射分子数的几率 dp 由 (7) 式表示:

对碰撞表面的单一组分气体的宏观分子沉积不同公式, 在稀有气体环境中能够被表达为:

$$dp = \frac{d}{r^2} \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$m_d = (1 - S) m_i - \frac{m_d}{S} \quad (12)$$

即脱离表面的分子位于立体角 $d\Omega$ (与表面法线成角 θ) 中的几率正比于夹角的余弦。

因为 $d\Omega = r^2 \sin \theta d\theta d\phi$, (7) 又改写为

式中: m_d 为沉积流率, m_i 为入射流率, m_d 为在时间 t 内的沉积量, τ 为表面沉积滞留时间, S 为反射系数。

黏着系数的定义为:

$$dp = \frac{\cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{2} \quad (8)$$

$$S = \frac{m_d}{m_i} \quad (13)$$

因此, 可推出出气分子的发射方向与随机数 R_x 、 R_y 的关系式:

我们从 (12) 和 (13) 式可得:

$$\theta = \sin^{-1} \sqrt{R_x} \quad (9)$$

$$\phi = 2 R_y \quad (10)$$

式中, R_x 、 R_y 是 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数。公式 (9) 和 (10) 用于确定出气分子从出气表面发射的方向。

$$S = (1 - S) \exp(-\frac{t}{\tau}) \quad (14)$$

(14) 式为稀有气体环境中, 清洁表面单组分中性分子时间 t 内的黏着系数公式。上式亦写为:

3.2.3 出气分子运动轨迹的跟踪

跟踪出气分子运动轨迹时, 对于出气分子是否落在某一表面需要对具体的出气分子与表面的几何关系进行判断。对于有限表面, 出气分子只有落在界限内才能判断有效。而这种几何关系, 只能通过特定的表面间几何求解。

$$S = (1 - S) \exp[-\frac{t}{\tau} \exp(-\frac{E_d}{RT})] \quad (15)$$

如果 H_{vap} 在此能看成有效的表面沉积激活能, 那么对于冷凝问题, 解吸附热 E_d 能被替换为 H_{vap} 。

3.2.4 视角因子的获得

对于 i 、 j 两个表面, 假设 i 为出气表面, j 为敏感表面; N_i 为出气表面逸出的出气分子数, N_j 为敏感表面接受的出气分子数。 $F_{i,j}$ 两个表面的视角因子即为:

在时间 t 内的平均黏着系数是更实用的参数, 得:

$$S = \frac{\int_0^t S dt}{\int_0^t dt} = (1 - S) \frac{1 - \exp(-\frac{t}{\tau})}{t} \quad (16)$$

3.4 分子污染沉积量的预估计算方法

就敏感表面周围存在多污染源而言, 出气效应变得更为复杂。不仅与材料本身的特性和所处的温度有关, 而且各个污染源的出气行为都会受到其他污染

源的相互影响,从客观上起到增强出气的作用及对出气分子在空间传播的影响。

就出气分子空间传输而言,一部分出气分子可直接运输到敏感表面沉积形成污染,称为直接输运量。一部分出气分子通过二次表面反射作用改变出气分子的传播路径后运输到敏感表面形成污染,称为二次表面反射效应量。

就污染物分子在敏感表面的沉积而言,到达敏感表面的污染物分子会受到表面解吸附作用的影响,一部分分子会凝结于表面上形成污染,而另一部分分子将逸出表面,弥散于敏感表面的周围。最终敏感表面的污染物沉积量包括上述几部分之和。

3.4.1 直接流量

直接流量指污染源出气分子逸出后,在一定的视角范围内可直接到达敏感表面后沉积,而在传输过程中不发生任何碰撞的那部分出气分子^[3]。在空间传输期间,只与污染源和敏感表面的视角因子有关。因此,敏感表面 S 上接受任一污染源 i 面直接发射出来的污染分子量由下式确定:

$$\dot{m}_d = \sum_i F_{i-s} m_{0i} \quad (17)$$

式中: \dot{m}_d 为直接流量, m_{0i} 为出气速率, F_{i-s} 为污染源面与敏感表面的视角因子。

3.4.2 二次表面反射对沉积量的影响

多出气源表面的出气分子在空间传输过程中的二次表面反射示意图,如图 4 所示。图中由出气源逸出的出气分子,一部分到达敏感表面周围的其它表面,引起二次表面反射效应^[3]。这部分被反射的分子在一定的视角范围内也可能运动至敏感表面,引起沉积量的变化。如(18)式:

$$\dot{m}_{re} = \sum_j F(m_j r_{fj}) \quad (18)$$

式中: \dot{m}_{re} 为二次表面反射后对沉积量的贡献值, m_j 为周围表面的入射率, r_{fj} 为各表面反射系数。所以在建立的理论模型中必须考虑此效应对沉积量的贡献。



图 4 二次表面反射示意图

Fig 4 Second reflection surface

3.4.3 多污染源之间的相互影响

由于敏感表面周围存在多个污染出气源,它们之间的相互影响会改变一部分出气分子的传播路径,从而影响敏感表面的污染物沉积量。

各个污染出气源表面的出气分子,在一定的视角范围内,一部分出气分子可传播到其他污染源表面形成再出气行为,传播到该污染源的出气分子无疑增加了该表面的出气速率^[4],由图 1 表示。假设到达其它污染源表面的出气分子将全部逸出,形成再出气,由图 1 可知:

$$m_2 = F_{3-2} m_{03} + F_{4-2} m_{04} \quad (19)$$

式中: m_2 是 2 出气面的出气分子入射率, F_{3-2} 、 F_{4-2} 是各面对 2 面的视角。式(19)表示由 3、4 污染源的出气影响,给 2 污染源出气带来的增强效应量。

3.4.4 敏感表面沉积量的预估

考虑多污染源出气、空间传输、敏感表面吸附等物理过程提出敏感表面入射率的理论公式如(20)式:

$$m_i = \dot{m}_d + \dot{m}_{re} \quad (20)$$

式中, m_i 为敏感表面沉积率^[5]。其敏感表面沉积量的理论公式由(21)式表示:

$$M_d = \dot{m}_i S t = \dot{m}_i [1 - \exp(-t)] \quad (21)$$

4 相机镜头在轨沾染量的模型计算结果及讨论

4.1 相机镜头的的污染分析

4.1.1 污染源的分析

由设计条件和使用条件得知,该相机在轨使用期间,受到的分子污染主要是由系统自身的胶粘剂产生的。XM23胶和 GHJ-01(乙)胶即为主要的污染源。各个光学镜头存在自污染和相互污染的可能。

4.1.2 污染传输路径分析

污染源的出气分子在相机镜筒的传输包括直接的传输和经过镜筒内壁的二次表面反射传输,传输路径主要与相机的结构参数有关,利用已建立的分子污染传输沉积模拟软件进行计算。

4.1.3 受污染表面的分析

相机内的三组光学镜头由于自身材料出气的影响,其所有的光学表面上都会存在分子沾染的潜在威胁,产生的污染效应影响其在轨的使用功能,本次计算的目的是通过模型软件的模拟方法,预估镜头在轨期间的分子污染沉积量,以及预测其在轨寿命期间使用功能的降低。

4.2 模拟计算过程

4.2.1 建立结构计算模型

主要由图 5 所示的三组镜头组成,镜头 2、镜头 3 为胶合的光学玻璃。为了便于计算,现对设计结构进

行相应的简化。

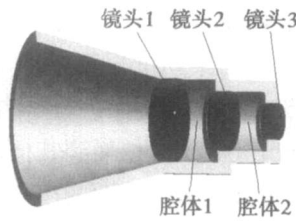


图 5 结构模型示意图

Fig 5 Structure model

4.2.2 污染源出气速率计算

系统使用了 XM - 23胶、GHJ - 01 (乙)胶进行光学片的固定,两种光学胶在空间的出气效应都会引起污染物的沾染,从而引起相机光学性能的降低。

根据相机的装配要求,在光学镜片外圆与内镜筒之间均布 4 个 XM - 23胶点,三个胶合镜组用 GHJ - 01 (乙)光学环氧胶胶合。考虑到胶黏剂的出气效应非常复杂,为了便于计算,作了相应的假设,出气源被简化为点出气和圆环出气。

考虑到卫星的实际环境温度,两种胶黏剂出气速

表 3 各面直接的视角因子

Tab 3 Direct viewfactor of surfaces

出气源	表面 1	1 与 2 之间的圆柱面	2 面	2 面上的圆环	2 与 3 之间的圆柱面	3 面
1 面上的点	无	0.57923	0.05697	0.3638	无	无
1 与 2 之间圆柱面	0.45963	无	0.54037	无	无	无
2 面上的点	0.82463	0.17537	无	无	0.62949	0.37051
2 面上的圆	0.78473	0.21527	无	无	0.884	0.116
2 面上的圆环面	0.62723	0.37277	无	无	无	无
2 与 3 之间圆柱面	无	无	0.44637	无	无	0.55363
3 面上的点	无	无	0.62174	无	0.37826	无
3 面上的圆	无	无	0.62892	无	0.37108	无

4.2.4 在轨寿命期内光学成像探测系统立体相机镜头的分子污染沉积量的计算

利用 4.2 节的结果,结合污染传输沉积理论模型,计算光学成像探测系统立体相机 3 个镜头在轨寿命期内的污染物沉积量。相机的设计寿命为 1 年,输入出气速率、视角因子等参数,经过以上计算可得:

镜头 1 上的污染物沉积量: $3.6459 \times 10^{-7} \times 3.1536 \times 10^7 = 11.4977 \text{ mg}$

镜头 2 上的污染物沉积量: $3.6895 \times 10^{-7} \times 3.1536 \times 10^7 = 11.6352 \text{ mg}$

镜头 3 上的污染物沉积量: $7.8475 \times 10^{-8} \times 3.1536 \times 10^7 = 2.4748 \text{ mg}$

由以上计算结果可知,设计的相机镜头 1 和 2 的污染物沉积量较高,在轨运行期间有被污染的风险,建议设计师在材料选择和结构设计中进行适当的考虑,减少污染引起的负面影响。

4.3 相机被污染后的光学效应分析

率测试的温度设定为 45 。测试所得的平均出气速率作为计算模型的输入参数。测试数据如表 2 所示:

表 2 两种胶的出气速率测试数据

Tab 2 Outgassing rate of two glues mg

材料名称	空舟质量	舟样测前质量	舟样测后质量
XM - 23胶	101.21	151.94	151.72
GHJ - 01 (乙)胶	71.82	193.09	190.37

经计算,平均出气速率如下: GHJ - 01 (乙)胶为 $3.148 \times 10^{-7} \text{ mg/s}$, XM - 23胶为 $2.546 \times 10^{-8} \text{ mg/s}$

4.2.3 污染传输路径

在出气分子的传输过程中,包括直接的传输和经过二次表面反射传输。腔体 1 和 2 周围的面都为光滑的钛合金表面,假定其落入该表面的分子都能被反射,反射系数是 1。镜头 1、2、3 有自污染和相互污染的可能,取决于污染源的传输路径。出气表面逸出的分子在相机内部的传输路径由出气源与各面之间的几何关系即视角因子确定,如 3.2.4 所述,各面之间的视角因子计算结果如表 3 所示。

为了进一步评估污染物对镜头在轨使用业绩的影响,我们利用地面污染测试设备和光学测试仪器,对相机镜头的空间污染效应进行测试分析,结果如图 6 所示,相机镜头表面在轨寿命期间因为污染引起可见光谱段的透光率衰减达 30% 以上,与环境试验的结果相当。综上所述,本文建立的污染效应理论计算和试验评估方法是一种有效的空间污染效应控制手段。

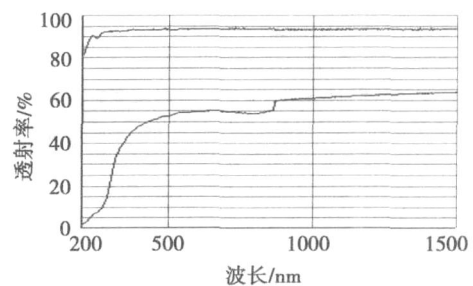


图 6 透射率衰减

Fig 6 Transmission attenuation

(下转第 31 页)

(1)利用分子的振动与转动能级的跃迁可以共振吸收微波的能量。

(2)700与1000 制备出的材料其结构与吸波性能均不同,因此研究材料结构随制备温度的变化,结合结构与吸波性能的关系,可以建立宏观与微观的联系,指导实验研究。

(3)采用短切纤维可以有效地减少反射,且降低短切纤维的长度可以增大填充量,便于在更大范围内调节复合材料的宏观电磁参数进行匹配设计。

(4)采用多层结构的设计,可以实现良好的匹配,本文制备出的三层吸波材料厚度小于2mm,在X波段具有较好的吸波性能,是一种具有较高实用价值的电损耗吸波材料。

致谢 感谢四川大学轻纺学院姚永毅老师提供的红外光谱表征以及有意义的指导。

参考文献

- 1 孙晶晶,李建保,张波等.陶瓷吸波材料的研究现状.材料工程,2003;(2):43~47
- 2 范学伟,姚敏琪等.GHz铁氧体电磁波吸收材料的研究.宇航材料工艺,2004;34(3):30~33

- 3 胡传妍.隐身涂层技术.北京:化学工业出版社,2004:285~302

- 4 朱正和.平面环状碳团簇的微波吸收特性.原子与分子物理学报,1995;12(1):11~14

- 5 朱正和,曾蓉,张明荣等.研制碳团簇型微波隐身材料的参考准则.化学研究与应用,1995;7(2):147~153

- 6 周清一.微波测量技术.北京:国防工业出版社,1964:12~20

- 7 Zhang Wangxi, Liu Jie, Wu Gang Evolution of structure and properties of PAN precursors during their conversion to carbon fibers Carbon, 2003; 41: 2 805 ~ 2 812

- 8 贺福.碳纤维及其应用技术.北京:化学工业出版社,2004:84~86

- 9 Usami T, Itoh T et al Structural study of polyacrylonitrile fibers during oxidative thermal degradation by pyrolysis-gas chromatography, solid-state ¹³C nuclear magnetic resonance, and fourier transform infrared spectroscopy Macromolecules, 1990; 23: 2 460 ~ 2 465

- 10 罗杰,徐国亮,蒋刚等.双层结构碳团簇型微波隐身材料的吸波性能研究.功能材料,2002;33(4):401~402

(编辑 李洪泉)

(上接第24页)

5 结论

根据材料出气分子经历的出气、在空间的传播运输、沉积和多污染出气源的相互影响等几个重要机理过程,对空间分子污染效应进行了研究,建立了一套针对飞行器敏感系统功能表面在轨分子污染沾染量的预估方法。该方法的建立,为飞行器敏感系统在轨污染量的预估提供了一种理论方法,在工程上,可作为一种实用的分子污染控制手段。同时本文在立体相机的防污染设计的事例中,利用此方法预估计算了相机各个镜头的污染物沉积量,并结合地面试验,得出相机镜头表面在轨寿命期间因为污染引起可见光谱段的透光率衰减达30%以上,与环境试验后实测的结果相当。取得的结果大大超出相机的设计指标,建议设计师针对相机的材料和结构进行改进,选择低出气率的胶黏剂,在结构上尽量避免出气面直接面对光学镜头等控制措施,来减少空间污染效应产生的危

害。

参考文献

- 1 王先荣.蒙特卡罗模拟方法研究.载人航天,1996;(4):20~23

- 2 Rantanen R O. Spacecraft Contamination Modeling Martin Marietta Aerospace, Denver, Colorado, June, 1977, AIAA 77-0739

- 3 Arnold G S Spacecraft contamination model development In: Proc SPIE 3427, 1998: 227~289

- 4 Rios E R, Rodriguez R T Molflux Molecular Flux User's Manual NASA JSC - 22496, Rev 1, February 1989, NASA Johnson Space Center, Houston, Texas

- 5 王鸪.航天器非金属材料出气分子空间污染传输沉积模型方法研究.卫星环境工程技术研讨会,2003:20~27

(编辑 吴坚)