



# 航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——· 中文核心期刊 中国科技核心期刊

## 基于气体扩散方程的分子污染仿真与污染效应试验研究

宫向华 周岩 李杨 李佳 郭志昌 吴晓宏

## Simulation of molecular contamination based on gas diffusion equation and experimental study of contamination effect

GONG Xianghua, ZHOU Yan, LI Yang, LI Jia, GUO Zhichang, WU Xiaohong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023028>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 多层分子污染膜光学效应建模分析与试验测量

Modelling of optical effect of multi-molecular contaminated films and experimental measurement

航天器环境工程. 2021, 38(1): 31-37 <https://doi.org/10.12126/see.2021.01.005>

#### 玻璃钢空间碎片防护构型性能的实验研究与仿真分析

Experimental and analytical studies of the performance of FRP protective configuration against space debris

航天器环境工程. 2019, 36(2): 120-125 <https://doi.org/10.12126/see.2019.02.003>

#### 沸石分子筛材料在航天器污染控制中的应用与发展

Application and development of zeolite molecular sieve materials in contamination control of spacecraft

航天器环境工程. 2020, 37(3): 228-234 <https://doi.org/10.12126/see.2020.03.003>

#### 宇航电源脉宽调制器单粒子效应试验研究

Experimental study of single event effect on pulse width modulation controller applied in aerospace power

航天器环境工程. 2020, 37(6): 596-601 <https://doi.org/10.12126/see.2020.06.010>

#### 空间微小颗粒对卫星光学器件的污染研究

The contamination of satellite optical device by space microparticles

航天器环境工程. 2017, 34(5): 566-570 <https://doi.org/10.12126/see.2017.05.020>

#### 复合相变热沉在电子设备热管理中的应用

Application of composite PCM in thermal management of electronic equipment

航天器环境工程. 2017, 34(2): 150-155 <https://doi.org/10.12126/see.2017.02.007>

# 基于气体扩散方程的分子污染仿真与污染效应试验研究

宫向华<sup>1</sup>, 周岩<sup>1</sup>, 李杨<sup>1</sup>, 李佳<sup>2</sup>, 郭志昌<sup>2</sup>, 吴晓宏<sup>1\*</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 化工与化学学院; 2. 哈尔滨工业大学 数学学院: 哈尔滨 150001)

**摘要:** 随着空间光学技术的飞速发展, 高性能空间光学载荷对分子污染防控提出了更高要求, 必须在载荷设计初期开展分子污染传输与沉积的仿真分析, 以更好地提供反馈并指导载荷设计。针对利用传统 Monte Carlo 方法进行空间分子污染仿真对复杂结构处理耗时长的问題, 基于气体扩散方程创新性地开展空间分子污染传输与沉积行为的仿真分析, 得到了敏感镜面的污染物沉积量分布数据, 并结合地面试验对污染效应进行测试分析, 结果表明分子污染可导致敏感镜面在轨 3 年后的光学性能衰减量达 5.3%。研究结果可为空间光学器件的设计和开发提供指导。

**关键词:** 空间分子污染; 光学载荷; 气体扩散方程; 仿真分析; 污染效应; 试验研究

中图分类号: V411.8; V416.5; V520 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2023)02-0162-08

DOI: [10.12126/see.2023028](https://doi.org/10.12126/see.2023028)

## Simulation of molecular contamination based on gas diffusion equation and experimental study of contamination effect

GONG Xianghua<sup>1</sup>, ZHOU Yan<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, LI Jia<sup>2</sup>, GUO Zhichang<sup>2</sup>, WU Xiaohong<sup>1\*</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology;

2. School of Mathematics, Harbin Institute of Technology: Harbin 150001, China)

**Abstract:** With the rapid development of space optics technology, high-performance space optical payloads raise higher requirements for the mitigation of molecular contaminations. It is necessary to carry out simulation analysis of molecular contamination transmission and deposition at the initial stage of payload design, so as to provide better feedback and to guide payload design. In view of the time-consuming feature of conventional Monte Carlo method to deal with complex structures when simulating space molecular contamination, an innovative simulation analysis on molecular contamination transmission and deposition in space based on gas diffusion equations was carried out to obtain the distribution data of contamination deposited on the sensitive lens in this work. The contamination effects were also investigated by ground experiments and the results indicated that molecular contamination can lead to an attenuation of 5.3% in the optical performance of sensitive lens after three years in orbit. The results may provide some guidance for the design and development of space optical devices.

**Keywords:** space molecular contamination; optical payloads; gas diffusion equations; simulation analysis; contamination effect; experimental study

收稿日期: 2023-01-20; 修回日期: 2023-03-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2022YFB3806300); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号: 2022FRFK060020)

引用格式: 宫向华, 周岩, 李杨, 等. 基于气体扩散方程的分子污染仿真与污染效应试验研究[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(2): 162-169

GONG X H, ZHOU Y, LI Y, et al. Simulation of molecular contamination based on gas diffusion equation and experimental study of contamination effect[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(2): 162-169

## 0 引言

随着航天器向高性能、高可靠性及长寿命方向发展,分子污染对航天器上光学系统、热控装置、太阳能电池及电子器件等的影响越来越受到重视<sup>[1-2]</sup>。航天器广泛使用的环氧基碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)、热控涂层、环氧胶及硅橡胶等非金属材料会在空间环境作用下缓慢放气,产生小分子碳氢类、邻苯二甲酸酯类及硅氧烷等有机分子污染物<sup>[3-5]</sup>,并沉积于航天器敏感部件表面,可导致航天器性能下降,甚至造成载荷失效。因此,航天器非金属材料空间分子污染控制已成为高性能航天器研制中亟待解决的关键问题<sup>[6-8]</sup>。

污染仿真分析是空间分子污染控制的重要环节。近年来,国内外开展了一系列围绕污染产生、传输与沉积评估方法的研究。例如, NASA 开发了 NASAN 污染分析软件,用于国际空间站的污染分析与评估<sup>[9]</sup>,并在 1996 年发射了 MSX 中期试验卫星,专门对卫星敏感系统的分子污染效应进行飞行实测,获得了航天器在轨污染的沉积量数据<sup>[10]</sup>;通过实测与仿真数据的对比发现,两者良好的数据吻合性证明了污染仿真可以用于航天器整星或载荷的分子污染评估,进而指导航天器设计与载荷性能优化。国内对污染仿真评估的研究起步较晚,模块化仿真软件的开发和测试也不够系统。现有研究工作主要是基于 Monte Carlo 方法对简单结构进行污染模拟预估,但难以进行大尺寸复杂结构的系统级污染预估计算,而且污染分析结果相关的地面试验数据或在轨试验数据的验证较少<sup>[11-12]</sup>。

Monte Carlo 方法是最常用的分子污染仿真分析手段,主要利用射线追踪的方式对分子从放气源表面出射,在航天器周围运动、碰撞,在敏感表面沉积等过程进行模拟仿真<sup>[13-14]</sup>。但由于载荷结构通常比较复杂, Monte Carlo 方法计算耗时长,可能带来昂贵的设计成本,因此有必要研究新的仿真分析方法,实现精准快速的仿真分析。

本文以某空间相机光学系统为研究对象,提出利用扩散方程创新性地构建能够准确描述放气分子扩散及沉积过程的偏微分方程模型,利用高精度偏微分方程数值解法进行模拟仿真,获得放气污染分子沉积的定量分析结果,并结合地面试验对污染效应进行研究。

## 1 典型光学载荷结构及其污染特性分析

### 1.1 典型光学载荷结构

本文所研究的光学载荷所采用的是卡塞格林反射式物镜系统,相机结构及尺寸如图 1 所示,结构中包括 4 个敏感面——杜瓦窗口、主镜、次镜和扫描镜,污染物分子在敏感面上的沉积将会极大影响系统成像质量,是污染物仿真分析与试验研究的关键表面。

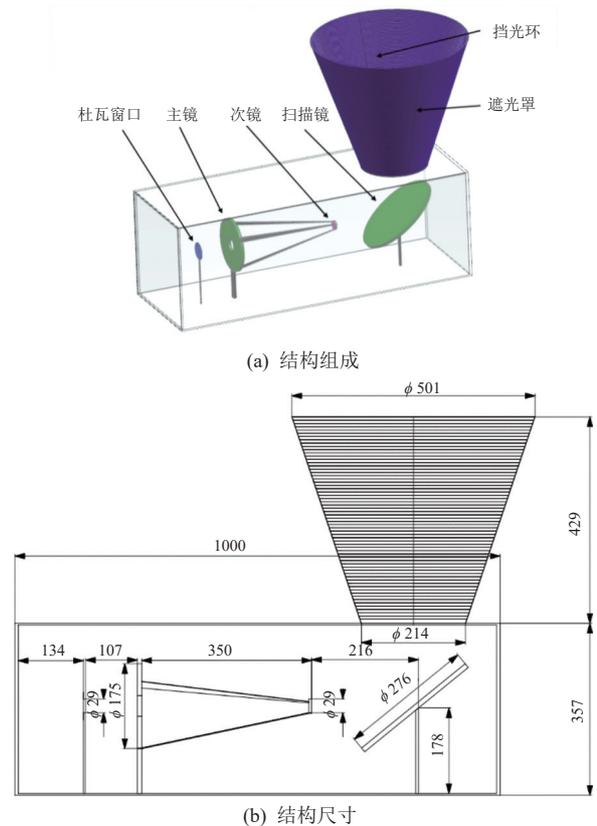


图 1 某空间相机光学系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system structure of a space camera

### 1.2 材料的污染物放气特性

材料的放气过程包括解吸、扩散和解离 3 种过程,这 3 种过程除了与放气时间有不同的对应关系,还与材料的活化能( $E_a$ )和温度( $T$ )密切相关,如表 1 所示。其中活化能是指分子从常态转变为活跃状态所需要的能量。由表 1 可知:解吸过程所需的活化能相对很小,持续的时间较短,且通常只发生在污染物表面,对在轨航天器的污染贡献相对较小;虽然解离与时间无关,但需要很高的活化能并且活化对应温度也很高,在航天器实际在轨工作过程中发生的概率很低,因此,解离过程不是空间分

子污染的主要来源;与解离过程相比,扩散过程具有中等活化能和活化对应温度且过程发生所需的时间较长,因此成为在轨航天器材料污染分子放气的主要过程和关键机制<sup>[15-16]</sup>。

表1 材料放气过程的典型数据<sup>[17]</sup>  
Table 1 Typical data of material outgassing process<sup>[17]</sup>

放气机制	时间	活化能 $E_a$ /(kJ·mol <sup>-1</sup> )	活化对应温度 $T_0$ /K ( $T_0=E_a/k_B$ )
解吸	$t^{-1} \sim t^{-2}$	4~42	500~5000
扩散	$t^{-1/2}$	21~63	2500~7500
解离	不相关	84~335	10 000~40 000

由扩散过程导致材料质量损失量可表示为<sup>[17]</sup>

$$\frac{dm}{dt}(t, T) = Cm \frac{e^{-T_0/T}}{t^{1/2}}, \quad (1)$$

式中: $C$ 为需通过试验确定的气体常数; $m$ 为产生污染分子的材料的的质量, g;  $T_0$ 为活化对应温度( $T_0=E_a/k_B$ ), K;  $E_a$ 为材料的活化能, J;  $k_B$ 为 Boltzmann 常数,  $k_B=1.380\ 649 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$ 为热力学温度, K;  $t$ 为时间, h。

对式(1)进行积分,所得到的积分式给出了 $t_1 \sim t_2$ 时间段内释放出的气体质量 $\Delta m$ 的表达式

$$\frac{\Delta m}{m} = 2Ce^{-T_0/T}(t_2^{1/2} - t_1^{1/2}); \quad (2)$$

由材料放气速率的定义(单位面积下单位时间内释放出的气体质量)可知,

$$v = \frac{\Delta m}{m} \times \frac{\rho_s}{\Delta t}, \quad (3)$$

式中: $v$ 为放气材料的放气速率, (g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>);  $\rho_s$ 为放气材料的面密度, (g·m<sup>-2</sup>)。将式(2)代入式(3),当 $t_1=0$ 时可得:

$$v = 2\rho_s Ce^{-T_0/T} \Delta t^{-1/2}. \quad (4)$$

式(4)描述的是放气速率与放气时间和放气材料温度的关系,因此,需要先通过相关试验来获得材料的气体常数 $C$ 和活化能 $E_a$ ,再将已知的放气材料面密度 $\rho_s$ 、温度 $T$ 以及放气时间 $\Delta t$ 代入式(4),便可求出材料的放气速率。根据式(2)可知,在固定放气时间内且在两个不同放气温度条件下,分别测定放气材料的初始质量和最终质量,计算质量变化 $\Delta m$ 便可获得该材料的 $C$ 和 $E_a$ 值。

本文中光学相机采用环氧基 CFRP 作为箱体结构材料,依据国家航天行业标准 QJ 1558B—2016《真空条件下材料挥发性能测试方法》对环氧基

CFRP 进行放气测试,结果得到其真空条件下的放气总质量损失(TML)在 373.15 K 和 398.15 K 下分别为 0.050% 和 0.097%;据此可由式(2)计算出环氧基 CFRP 的气体常数 $C$ 为 1.954;活化能 $E_a$ 为 $5.436 \times 10^{-20}$  J;活化对应温度为 3 937.279 K。那么,已知环氧基 CFRP 的面密度 $\rho_s$ 为 $1.648 \times 10^3$  g·m<sup>-2</sup>,根据式(4)计算其单位面积放气速率为

$$v_s = 6\ 440.384e^{(-3\ 937.279/T)} \Delta t^{-1/2}. \quad (5)$$

### 1.3 污染物黏附特性

当气体污染分子与接触面碰撞时,可以黏附在接触面上,也可以被反射出去,其黏附的质量与总入射质量的比值称为黏附系数。现有黏附理论表明,污染分子撞击敏感表面会黏附在其上并建立热平衡,直到获得足够的能量才能克服分子间作用力并逃离表面<sup>[18-20]</sup>。因此,污染分子在敏感表面上的停留时间主要与敏感面的温度有关。光学相机镜头是成像的关键敏感表面,相应温度条件下分子污染物在镜头表面的黏附系数是影响污染物沉积的关键因素之一。

根据现有航天器分子污染物分析,邻苯二甲酸酯类物质是空间典型分子污染物之一,主要来自环氧树脂、聚氨酯类电缆、复合材料和黏结剂等<sup>[21-22]</sup>,对光学系统影响极大。本文中光学载荷的环氧基 CFRP 箱体结构材料是主要的放气来源,其产生的主要污染物是环氧树脂中添加的增塑剂——邻苯二甲酸二辛酯(DEHP)。因此,本文选取 DEHP 作为污染源进行敏感镜面上污染物沉积量的仿真计算,依据 ASTM E1559 *Standard Test Method for Contamination Outgassing Characteristics of Spacecraft Materials*, DEHP 的黏附系数在 293.15 K 时的测定值为 0.011。

## 2 仿真方法及计算结果

分子污染物在高真空环境进行无规则热运动,此时流场速度为 0,可用布朗运动模型来描述分子的热运动。扩散方程是从宏观角度描述分子因布朗运动形成的扩散现象的偏微分方程,可以用来描述污染物扩散以及吸附等物理过程,是解决复杂构型污染仿真分析难题的有力手段<sup>[23-25]</sup>。

## 2.1 扩散方程

当污染物分子在指定区域  $\Omega$  内进行布朗运动时, 分子由高密度向低密度方向运动。这一过程可以用偏微分方程中的扩散方程(热方程)描述<sup>[25]</sup>, 其简要导出过程如下:

根据质量守恒, 物质的密度流  $\mathbf{F}$  与其密度  $u$  之间的关系可表示为

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} u dx = - \int_{\partial\Omega} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS, \quad (6)$$

式中:  $x$  为空间位置;  $t$  为时间;  $\partial\Omega$  为区域  $\Omega$  的边界;  $\mathbf{n}$  为  $\partial\Omega$  的外法向。

由式 (6) 可知,  $u=u(x, t)$  表征空间位置  $x$  处在  $t$  时刻的物质密度, 是构建扩散方程的关键变量。由  $\Omega$  的任意性, 根据 Gauss-Green 公式, 可将式 (6) 改写为

$$u_t = -\text{div}\mathbf{F}. \quad (7)$$

式 (7) 的物理意义是区域内物质质量随着时间的变化率, 等于每一时刻经过区域表面流出的物质质量。物质扩散特性决定了密度流  $\mathbf{F}$  在密度场中与密度  $u$  分布的负梯度成正比关系, 故可用密度负梯度的常数倍  $-a\nabla u$  表示, 其中  $a$  为扩散系数, 且  $a \geq 0$ 。因此, 扩散方程可以表述为

$$u_t = a\text{div}(\nabla u) = a\Delta u. \quad (8)$$

在仿真计算中, 扩散系数  $a$  的取值为 0.27, 文献 [26] 中给出了 DEHP 的各项相关参数。扩散方程单纯描述了物质的扩散, 而污染物分子的产生需要引入源项, 可用  $f(x, t)$  表示, 则本文使用的扩散方程为

$$u_t = a\Delta u + f(x, t), (x, t) \in \Omega \times (0, T]. \quad (9)$$

在处理实际问题的过程中, 式 (9) 中: 密度函数  $u(x, t)$  的量纲为  $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ ,  $u_t$  表示密度的时间导数, 则时间以小时(h)为单位的情况下方程左侧的量纲为  $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1})$ ; 方程右侧, 源项  $f(x, t)$  表示密度生成或灭失的速率, 故其量纲为  $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1})$ ; 而描述扩散的密度二阶空间导数项  $\Delta u$  的量纲与  $u(x, t)$  的量纲相同, 亦为  $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ , 扩散系数  $a$  的量纲为  $\text{h}^{-1}$ , 故  $a\Delta u$  的量纲为  $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1})$ 。可见, 式 (9) 左右两侧的量纲匹配, 可用来描述区域  $\Omega$  中污染物分子密度随时间的变化情况。

## 2.2 模型建立与边界条件

在求解扩散方程的过程中, 需要使用边界条件使方程定解, 相机箱体内部壁上污染物的反弹和黏附情况是必须考虑的边界条件, 本文通过 Gmsh 软件对相机箱体结构进行网格剖分, 先对一维线进行离散, 再利用曲线剖分的网格对曲面进行二维剖分, 然后通过曲面的网格对体网格进行划分, 最终生成具有规则三角网结构的网格剖分图, 如图 2 所示。遮光罩的放气污染大部分会直接逸散到结构开口外部, 对结构内镜片的污染沉积量影响相对较小, 因此本文在仿真计算中未考虑遮光罩部分的放气。完成剖分之后得到计算区域中的四面体网格, 即计算单元。基于此网格, 结合有限元法对扩散方程进行数值计算, 进而完成模拟仿真。本文采用开源的有限元计算软件 FreeFEM, 计算中采用了线性元, 即每个单元上的有限元空间基函数次数为 1, 同时时间离散采用具有较高计算效率的二阶隐式迭代格式。此计算策略在保证精度的同时也能够保持较高的计算效率。

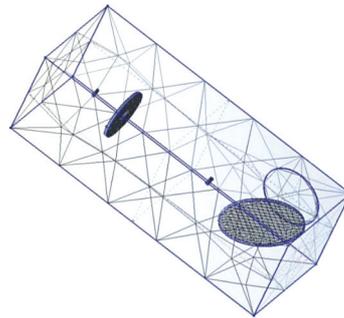


图 2 相机箱体结构的网格剖分三维图  
Fig. 2 Three dimensional mesh splitting of the camera box structure

材料分子污染的出气特性对应于式 (9) 中的源项  $f(x, t)$ , 该源项只在边界处有值且与出气特性相同。计算中, 边界处产生污染物, 即边界处的污染物密度升高; 而扩散项描述污染物在整个空间中的扩散情况。源项放气和扩散项扩散的过程随着时间导数项  $u_t$  迭代同时进行, 由此可利用偏微分方程数值解法获得任意时刻区域中的密度分布和敏感镜面的污染物沉积情况, 实现对复杂光学结构中分子传输与沉积行为的快速仿真。

## 2.3 污染物沉积量预估

设结构整体的温度均为  $T=293.15 \text{ K}$ , 则 4 个敏感面历经 3 年的污染物沉积量如表 2 所示。

表 2 敏感面污染物沉积数值模拟结果

Table 2 Simulation results of contamination deposited on the sensitive lens surfaces

敏感面		敏感镜面污染物沉积量/(mg·m <sup>-2</sup> )		
		8 766 h (1 a)	17 532 h (2 a)	26 298 h (3 a)
杜瓦窗口	最大值	7.1	25.0	43.0
	最小值	3.2	12.0	21.0
主镜	最大值	14.0	29.0	42.0
	最小值	0.5	3.3	6.1
次镜	最大值	11.0	35.0	63.0
	最小值	7.2	26.0	48.0
扫描镜	最大值	13.0	21.0	30.0
	最小值	2.5×10 <sup>-3</sup>	2.8×10 <sup>-2</sup>	3.4×10 <sup>-2</sup>

由图 3 至图 6 所示的污染沉积量分布计算结果,图中: $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标轴为敏感镜面的尺寸, mm; 右侧等值线为污染物沉积量, (g·m<sup>-2</sup>)。由结果可知, 4 个敏感面的污染沉积量呈现边缘位置较高、中心附近位置较低的特点, 这是敏感镜面边缘与污染源的距离较近所导致的。杜瓦窗口和次镜的污染沉积厚度范围分布较窄, 这是由于它们的尺寸较小导致污染物分布梯度较小; 而主镜和扫描镜的尺寸较大, 导致其边缘污染物较厚, 而镜面中心污染物较薄。

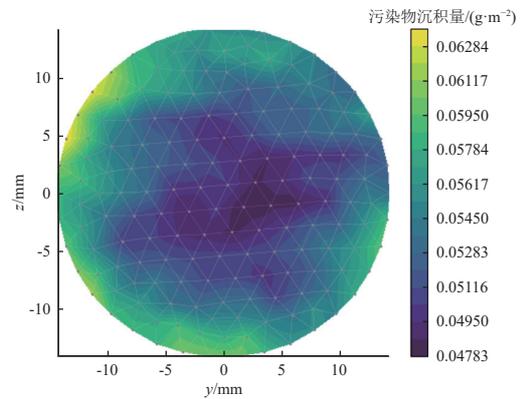


图 5 次镜 3 年污染沉积量分布

Fig. 5 Distribution of contamination depositions on the surfaces of secondary lens

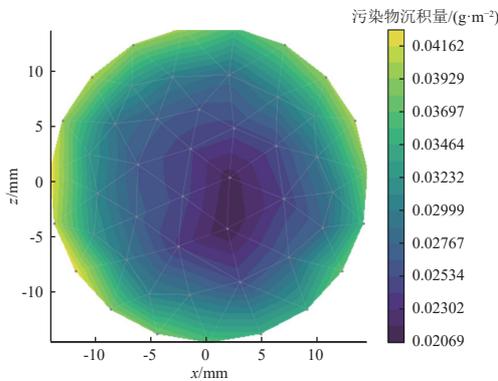


图 3 杜瓦窗口 3 年污染沉积量分布

Fig. 3 Distribution of contamination depositions on the surfaces of Dewar window

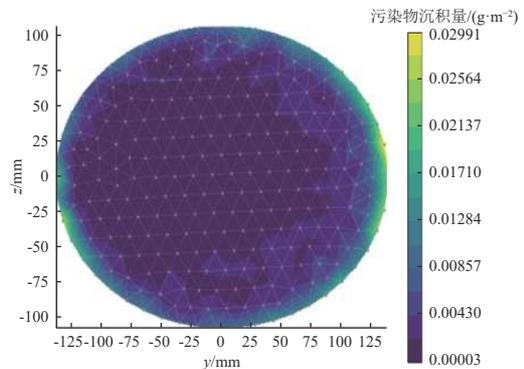


图 6 扫描镜 3 年污染沉积量分布

Fig. 6 Distribution of contamination depositions on the surfaces of scanning lens

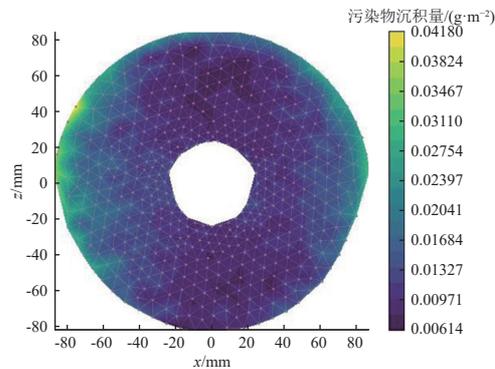


图 4 主镜 3 年污染沉积量分布

Fig. 4 Distribution of contamination depositions on the surfaces of primary lens

另外, 由表 2 的数据可以看出, 随着时间的延长, 沉积量的变化趋势逐渐平缓, 符合真空环境下污染物挥发的特性<sup>[27-30]</sup>。

### 3 光学载荷污染效应分析

为验证污染物对光学载荷的污染效应, 本文以 DEHP 作为污染源, 利用真空加热设备对其沉积量、沉积厚度以及敏感镜面的光学性能进行了地面污染效应试验研究。真空舱体内置的加热台上放置

盛有 DEHP 的铝盒，将镜片固定在铝盒上方抽真空并加热，使 DEHP 蒸发并冷凝在光学镜片表面，通过控制试验时间得到不同厚度的污染，使用椭偏仪测量 DEHP 污染的厚度，并利用紫外-可见-近红外分光光度计对污染镜片在 250~1750 nm 波段的平均透过率和反射率进行测试，通过计算得出光学性能变化率，结果见表 3。

表 3 光学镜片的污染量与光学性能衰减情况

Table 3 Contamination deposition and attenuation of optical properties of lens

DEHP污染的厚度/nm	DEHP污染的面密度/(mg·m <sup>-2</sup> )	透过率变化率/%	反射率变化率/%
9.5	9.3	0.3	0.9
19.0	18.7	0.5	1.4
28.5	28.0	1.3	2.3
37.9	37.3	2.6	4.1
47.4	46.7	3.2	5.6

由上述所得测试数据，将不同污染厚度对应的透过率和反射率相对衰减变化的数据进行线性拟合，结果如图 7 和图 8 所示。

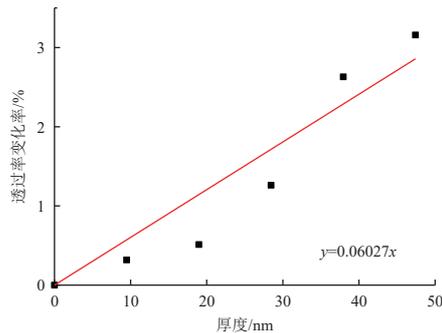


图 7 污染厚度与透过率变化率的线性拟合( $R^2=0.954$ )

Fig. 7 Linear fit chart of contamination thickness and rate of transmittance change ( $R^2=0.954$ )

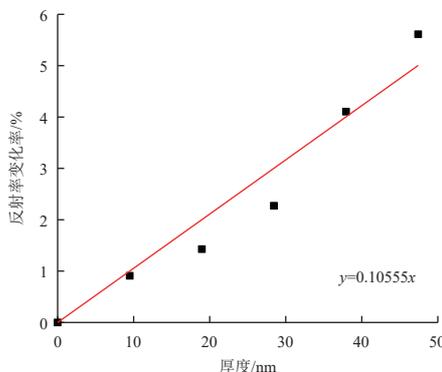


图 8 污染厚度与反射率变化率的线性拟合( $R^2=0.978$ )

Fig. 8 Linear fit chart of contamination thickness and rate of reflectance change ( $R^2=0.978$ )

依据表 2 污染模拟结果以及污染厚度与镜片光学性能的线性拟合关系，可计算出各镜片 3 年后的光学性能变化情况，见表 4。

表 4 3 年后各镜片的光学性能衰减量

Table 4 Transmittance and reflectance attenuation of each lens after three years

敏感面	污染物沉积厚度/nm		透过率衰减量/%	反射率衰减量/%
	范围	平均值		
杜瓦窗口	21.3~43.7	32.5	1.8	—
主镜	6.2~42.7	24.4	—	2.3
次镜	48.8~64.0	56.4	—	5.3
扫描镜	0.0~30.5	15.3	—	1.4

由表 4 可知：杜瓦窗口的透过率衰减量为 1.8%；主镜、次镜和扫描镜的反射率衰减量分别为 2.3%、5.3% 和 1.4%。以上数据表明，沉积在镜片表面的污染分子对光学性能具有一定的衰减作用，可见光学载荷在轨运行期间存在被污染进而影响其性能的风险，建议设计师在材料选择和结构设计中予以适当的考虑，减少污染引起的负面影响。

以上结果是污染物在敏感面表面形成均质膜层的理想条件下所得，而当污染厚度达到一定阈值后可能会形成液滴，导致敏感面光学性能衰减的实际值大于理论分析值，而这种液滴的形成很难预测，取决于污染物的种类及其与敏感面的亲和力，甚至光化学反应也会引发液滴的形成<sup>[31]</sup>。

#### 4 结束语

本文基于气体扩散方程，根据具体的光学载荷结构，建立了空间分子污染物传输与沉积的理论模型，并开展了地面污染效应试验，通过仿真分析与污染效应相关研究，得到以下结论：

- 1) 气体扩散方程可以应用于复杂光学结构中污染物传输和沉积行为的仿真；
- 2) 由仿真结果可知，光学系统敏感部件表面的污染物厚度分布与其尺寸相关，其特点为边缘厚、中心薄；
- 3) 由地面污染效应试验可知，空间分子污染物对敏感部件光学性能的衰减可达 1.4%~5.3%，对光学性能影响较大，必须加以防护；
- 4) 利用气体扩散方程解决污染仿真问题还需要进一步深入开展复杂结构的精细化仿真研究。

本文研究结果可为空间光学器件的设计和开发提供指导。

#### 参考文献 (References)

[1] SULIGA A, BRAS B, ERGINCAN O, et al. Transmission loss of spacecraft optical materials due to ultraviolet-

- induced contamination[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2022, 59(3): 773-781
- [2] BUTENKO Y, BRAS B, MARTINS R, et al. Effect of space environment on NV14 ceramic white coating of high gain antenna of BepiColombo spacecraft: long duration test[J]. *Ceas Space Journal*, 2021, 13(3): 445-473
- [3] SHIMAZAKI K, MIYAZAKI E, KIMOTO Y. Optical changes of molecular contamination thin-film outgassed from epoxy-based resin during deposition and desorption process[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 152: 10-17
- [4] SNITKA V, BATIUSKAITE D, BRUZAITE I, et al. Surface-enhanced Raman scattering sensors for biomedical and molecular detection applications in space[J]. *Ceas Space Journal*, 2021, 13(3): 509-520
- [5] RIOLAND G, HUBERT M, HOURET B, et al. Outgassing of three space materials from -75 to 25 °C[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2022, 59(4): 1357-1365
- [6] ROYLE S, WATSON J, ZHANG Y, et al. Solid phase micro extraction: potential for organic contamination control for planetary protection of life-detection missions to the Icy Moons of the outer solar system[J]. *Astrobiology*, 2019, 19(9): 1153-1166
- [7] PASTORE R, DELFINI A, ALBANO M, et al. Outgassing effect in polymeric composites exposed to space environment thermal-vacuum conditions[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 466-471
- [8] RABINOVITCH J, KATZ I. Surface deposition of molecular contaminants in the Mars 2020 rover wake[J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 168: 1-14
- [9] MIKATARIAN R, SOARES E, FARRELL L, et al. International Space Station external contamination environment[C]//1999 Space Technology and Applications International Forum (STAIF-99) - Opportunities and Challenges for the New Millennium. Albuquerque, NM, USA, 1999: 58-63
- [10] WOOD B, HALL D, LESH O J, et al. Quartz crystal microbalance (QCM) flight measurements of contamination on the MSX satellite[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2864: 187-194
- [11] 焦子龙, 庞贺伟, 杨东升. 真空热试验返回流分子污染建模计算[J]. *航天器环境工程*, 2009, 26(增刊 1): 50-54  
JIAO Z L, PANG H W, YANG D S. Molecular contamination modeling of using parallel DSMC method in vacuum thermal test[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(Sup1): 50-54
- [12] 院小雪, 庞寿成, 杨东升, 等. “新技术验证一号”卫星在轨污染探测数据分析[J]. *宇航学报*, 2016, 37(2): 240-244  
YUAN X X, PANG S C, YANG D S, et al. Space contamination effect analysis of on orbit detection data for “XY-1” satellite[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(2): 240-244
- [13] LEE K. Plume simulation of liquid apogee engine for GEO satellite using parallel DSMC method[J]. *Computer and Fluids*, 2020, 208: 104512
- [14] 焦子龙, 胡松林, 姜利祥, 等. 基于蒙特卡罗射线追踪的航天器空间环境因素暴露通量统一计算方法[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(4): 350-356  
JIAO Z L, HU S L, JIANG L X, et al. General algorithm for calculating space environmental exposure flux based on Monte-Carlo ray tracing[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(4): 350-356
- [15] DEVAUD G, SCHWEICKART B, WALTHER B, et al. Europa ultraviolet spectrograph: contamination transport modeling to predict mission performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10748. doi: [10.1117/12.2320331](https://doi.org/10.1117/12.2320331)
- [16] SHIMAZAKI K, MIYAZAKI E, URAYAMA F, et al. Outgassing test methodology for contaminant emission model based on diffusion theory[J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems*, 2021, 7(1): 018001
- [17] TRIBBLE A, BOYADJIAN B, DAVIS J, et al. Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2864: 4-15
- [18] BRIEDA L, HELOU E, ZHAO T, et al. Experimental investigation of QCM-derived sticking coefficients for use in molecular transport simulations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12224: 1222400
- [19] DAI W, SHEN Z, QIU J, et al. Experimental research of ultraviolet radiation enhancement effect on molecular contamination of sensitive optical device[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11912: 119120L
- [20] ROUSSEL J, LANSADE D, LECLERCQ L, et al. Molecular characterization of polyimide film and silicone adhesive outgassing using mass spectrometry[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2022. doi: [10.2514/1.A35465](https://doi.org/10.2514/1.A35465)
- [21] ABRAHAM S, JALLICE E. Preliminary testing of NASA’s molecular adsorber coating technology for future missions to Mars[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10748. doi: [10.1117/12.2320400](https://doi.org/10.1117/12.2320400)

- [22] KILBOURNE A, ADAMS S, ARSENOVIC P, et al. Design, implementation, and performance of the Astro-H soft X-ray spectrometer aperture assembly and blocking filters[J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems*, 2018, 4(1): 011215
- [23] 杨梁. 流场中微纳颗粒受力特性的分子动力学模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 1-2
- [24] JANAVICIUS J, JURGAITIS D. Analytical solution of nonlinear diffusion equation describing interdiffusion of gases[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2009, 116(6): 1025-1028
- [25] EVANS L. *Partial differential equations*[M]. 2nd ed. RI Providence: American Mathematical Society, 2010, 44-84
- [26] STEWART T, ARNOLD G, HALL D, et al. *Photolysis of spacecraft contaminants: SD-TR-89-45*[R]. El Segundo: the Aerospace Corporation, 1989: 25-26
- [27] LUEY T, OLSON R, COLEMAN J, et al. Optical system contamination: formation of films and droplets[J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems*, 2018, 4(3): 036001
- [28] HARRIS E. Unstructured continuum-kinetic solver with fluid-particle interaction for in-space propulsion contaminant dispersal[J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 373: 64-90
- [29] MOUKHAMEDIEVA L, OZEROV D, PAKHOMOVA A. The distribution of trace contaminants in the manned space station atmosphere[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 201: 597-601
- [30] DWORKIN P, ADELMAN A, AJLUNI T, et al. OSIRIS-REx contamination control strategy and implementation[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(1): 19
- [31] ROUSSEL J, TONDU T, PAULMIER T, et al. Progress on the physical approach to molecular contamination modeling[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2011, 48(2): 246-255

(编辑: 武博涵)

一作简介: 宫向华(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事空间分子污染仿真与控制研究。E-mail: 17B925099@stu.hit.edu.cn。  
\*通信作者: 吴晓宏(1977—), 女, 博士学位, 教授, 主要从事空间极端环境用功能材料构筑、性能调控及应用关键技术研究。E-mail: wuxiaohong@hit.edu.cn。