

文章编号 1004-924X(2015)09-2533-07

真空逸气对复合材料尺寸稳定性的影响

袁 野*, 鲍 赫, 李志来

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为验证聚合物基体在真空环境产生的逸气效应对复合材料尺寸稳定性的影响,对环氧树脂和氰酸脂两种基体的碳纤维复合材料的真空逸气性能进行了试验研究。首先从理论上分析了膨胀系数与逸气系数之间的关系,获得了二者尺寸稳定性存在差异的理论依据。然后设计了能够精确测量尺寸和质量变化的试验组件,按照卫星环境试验条件对多组试验组件进行了 3 轮真空试验,精确测量了试验前后试验组件的尺寸和质量。试验结果表明:环氧树脂基体和氰酸脂基体的复合材料质损率(TML)分别为 0.033%~0.06%和 0.014%~0.029%;环氧树脂基体和氰酸脂基体的复合材料尺寸变化量分别为 2~8 μm 和 1~3 μm 。另外,环氧树脂基试件的质量变化约为氰酸脂基的 2 倍,说明两种材料在真空环境下的尺寸稳定性有差异。

关键词:复合材料;氰酸脂;环氧树脂;真空逸气;尺寸稳定性

中图分类号:V251.2;V257.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2533

Effect of vacuum outgassing on dimensional stability of composite materials

YUAN Ye*, BAO He, LI Zhi-lai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yuanye080888@163.com

Abstract: To verify the influence of outgassing effects of polymer matrix in a vacuum environment on the dimensional stability of composite materials, this paper researches the outgassing properties of carbon fiber composite materials on the epoxy and cyanate resin matrixes. Firstly, the relation between expansion coefficient and outgassing coefficient was analyzed theoretically. Then, the test assemblies were designed to accurately measure their changes in the size and the mass. Finally, vacuum tests were carried out three times for several groups of test assemblies according to the demands of satellite environmental test conditions. Experimental results on the sizes and mass of these test assemblies show that the mass loss rates (TML) of epoxy matrix and cyanate resin matrix composite materials are approximately 0.033%—0.06% and 0.014%—0.029% respectively. Moreover, the size changes of epoxy matrix and cyanate resin matrix composite materials are about 2—8 μm , and 1—3 μm respectively. The mass change of the former is 2 times that of the latter, which means the dimensional stability of two kind of composite materials has different in the vacuum environment.

Key words: composite materials; cyanate resin; epoxy; vacuum outgassing; dimensional stability

收稿日期:2014-12-05;修订日期:2015-01-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7020107)

1 引言

空间科学作为人类认识自然最前沿的科学领域之一,已经成为各科技大国竞相追逐的目标,而空间相机是侦测和探索空间科学最重要的载荷之一。在空间相机领域,人们追求更高的分辨率、更大的覆宽、更广的视场角,导致空间相机向着长焦距、大口径、大曲率半径的方向发展^[1-5],也使得相机的体量越来越大。同时空间相机又对光学系统的稳定性有着越来越高的要求,这就给空间相机的结构设计、选材带来了极大的困难。为减轻相机质量的同时保证相机的稳定性,长焦距空间相机常采用桁架结构进行设计^[6-7],由于碳纤维复合材料具有较高的比刚度、接近零的热膨胀系数等优势,越来越多的被应用于空间相机中^[8-11]。作为主要的支撑材料,碳纤维复合材料在真空环境中的尺寸稳定性对整个系统的稳定起着至关重要的作用。

本文开展了真空逸气对碳纤维复合材料尺寸稳定性影响的研究。针对以氰酸脂、环氧树脂为基体的两种复合材料在常压和真空两种环境下质量和尺寸的变化进行反复试验,验证了两种不同基体的复合材料吸气、逸气对尺寸稳定性的影响,并通过对两种材料试验数据的对比,说明两种材料在真空环境下对尺寸稳定性影响方面的差异。

2 逸气对尺寸的影响方式

空间的特殊环境主要包括轨道高度、真空环境、微重力环境、高低温环境、粒子辐照、微流星体和空间碎片等^[12]。真空环境中气压极低,真空度一般可达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa,这种环境已经影响到复合材料的聚合物基体,导致有机材料中气体的逸出,产生一定的质量损失。而且随着轨道升高,气压降低,这一逸气过程将越发激烈。逸出的气体会在温度较低的物体表面凝结,造成环境和仪器的污染,影响器件的性能,甚至导致整个载荷失效。

2.1 复合材料吸气、逸气方式

当外部环境中气压大于材料内部时,复合材

料开始吸气,反之开始逸气。复合材料产生逸气的气体来源主要有两种:

(1)由于长时间在常压环境下保存而吸附在材料表面上的气体,当环境压力急剧降低后会慢慢从表面脱离;

(2)在聚合物基体的制备过程中,部分气体、水蒸气等会溶解于基体内部,存在于基体的孔隙中,在气压处于真空状态时,气体会从材料内部向外部扩散,最后在界面上释放,脱离材料。

气体在固体中浸透一般有气体与壁面的碰撞、吸附、离解、溶解、扩散、原子重组、解析等步骤^[13-14]。由于非金属材料材质疏松,其孔径常大于气体分子的直径,气体在聚合物中扩散较金属材料容易,而溶解度主要取决于材料与气体分子间的亲和力。对于同一种基体制备的复合材料,除制造工艺外,环境的真空度以及温度是影响气体在材料中扩散的最主要因素。

2.2 单向复合材料逸气膨胀力学分析

复合材料是一种多相不均匀材料,纤维和基体各个方向的膨胀系数和吸气量不同,而且分布不均匀,在纤维方向的膨胀系数较垂直于纤维方向的膨胀系数小得多。这是由于复合材料在纤维方向的膨胀系数是由纤维控制的,在横向的膨胀系数则是由基体起主要作用^[15]。复合材料发生逸气效应后其尺寸的变化不仅与基体材料有关,与复合材料的铺层形式、纤维的缠绕方式也都有着密切的关系。本文采用片状单元模型分析了单向复合材料两个方向的膨胀系数(α)与逸气系数(C)之间的关系。

2.2.1 纵向逸气膨胀

设复合材料、纤维、基体质量分别为 M 、 M_f 、 M_m ,复合材料、纤维、基体逸气后质量变化量分别为 ΔM 、 ΔM_f 、 ΔM_m ,逸气系数定义为:

$$\begin{cases} C = \Delta M / M \\ C_f = \Delta M_f / M_f \\ C_m = \Delta M_m / M_m \end{cases} \quad (1)$$

片状单元模型如图 1 所示,当材料产生逸气而导致质量变化 ΔM 后,其纵向与横向的应变分别为 ϵ_L 和 ϵ_T ,纤维纵向与横向的应变分别为 ϵ_{fL} 、 ϵ_{fT} ,基体纵向与横向的应变分别为 ϵ_{mL} 、 ϵ_{mT} ,纤维与基体中的纵向应力分别为 σ_{fL} 、 σ_{mL} 。纤维与基

体中的体积百分比分别为 V_f, V_m 。

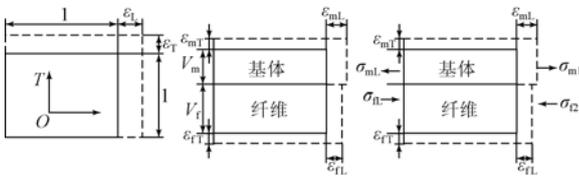


图 1 片状单元模型

Fig.1 Model of plate element

由力的平衡条件可得:

$$\sigma_{fL} V_f + \sigma_{mL} V_m = 0 \quad (2)$$

纤维与基体在纵向上具有几乎相同的应变:

$$\epsilon_{fL}^M = \epsilon_{fL} = \epsilon_{mL} \quad (3)$$

定义复合材料的逸气膨胀系数 α_L, α_T 分别为:

$$\begin{cases} \alpha_L = \epsilon_L / C \\ \alpha_T = \epsilon_T / C \end{cases} \quad (4)$$

可得纤维、复合材料与基体的纵向应变为:

$$\begin{cases} \epsilon_{fL} = \frac{\sigma_{fL}}{E_{fL}} + \alpha_f C_f \\ \epsilon_L = \alpha_L C \\ \epsilon_{mL} = \frac{\sigma_{mL}}{E_m} + \alpha_m C_m \end{cases} \quad (5)$$

纤维与基体的纵向应力经整理可得:

$$\begin{cases} \sigma_{fL} = E_{fL} E_m V_m \frac{\alpha_m C_m - \alpha_f C_f}{E_{fL} V_f + E_m V_m} \\ \sigma_{mL} = E_{fL} E_m V_f \frac{\alpha_f C_f - \alpha_m C_m}{E_{fL} V_f + E_m V_m} \end{cases} \quad (6)$$

纵向应变为:

$$\epsilon_{fL} = \epsilon_{mL} = \frac{E_{fL} V_f \alpha_f C_f + E_m V_m \alpha_m C_m}{E_{fL} V_f + E_m V_m} \quad (7)$$

由式(5)可得纵向逸气膨胀系数为:

$$\alpha_L = \frac{E_{fL} V_f \alpha_f C_f + E_m V_m \alpha_m C_m}{(E_{fL} V_f + E_m V_m) C} \quad (8)$$

2.2.2 横向逸气膨胀

复合材料横向逸气应变为:

$$\epsilon_T = \epsilon_{fT} V_f + \epsilon_{mT} V_m \quad (9)$$

设纤维纵向、基体的泊松比分别为 ν_{fL}, ν_m , 则纤维与基体的横向应变可表示为:

$$\begin{cases} \epsilon_{fT} = -\nu_{fL} \frac{\sigma_{fL}}{E_{fL}} + \alpha_f C_f \\ \epsilon_{mT} = -\nu_m \frac{\sigma_{mL}}{E_m} + \alpha_m C_m \end{cases} \quad (10)$$

将上式(9)、(10)整理并代人 $\alpha_T = \epsilon_T / C$, 可得:

$$\alpha_T = \frac{V_f \alpha_f C_{fm} (1 + \nu_{fLT}) + V_m \alpha_m C_m (1 + \nu_m)}{(\rho_f V_f C_{fm} + \rho_m V_m) C} \rho \quad (11)$$

2.3 氰酸脂基体与环氧树脂基体的区别

氰酸脂基体与环氧树脂基体的根本区别在于氰酸脂内部含有大量的苯环、三嗪环等基团,其交联密度大,固化物结构致密,理论上有助于抑制气体进入材料内部,材料的吸气率相对较小,具有一定的对真空环境的不敏感性,从而拥有较小的质量损失率(TML),即逸气系数(C)较小,由于纤维与基体的逸气系数相比要小得多,即 $C_f \ll C_m$, 所以式(8)可近似表达为:

$$\alpha_L \approx \frac{E_m V_m \alpha_m C_m}{(E_{fL} V_f + E_m V_m) C} \quad (12)$$

由于:

$$C = \frac{\Delta M_m + \Delta M_f}{M_m + M_f} \quad (13)$$

其中: $\Delta M_f \approx 0$, 故式(13)可近似为:

$$C \approx \frac{\Delta M_m}{M_m + M_f} \approx \frac{C_m}{1 + \frac{M_f}{\Delta M_m} C_m} \quad (14)$$

将式(14)代入(12)可得:

$$\alpha_L \approx \frac{E_m V_m \alpha_m}{(E_{fL} V_f + E_m V_m)} \left(1 + \frac{M_f}{\Delta M_m} C_m \right) \quad (15)$$

同理可推出:

$$\alpha_T = \frac{\rho}{\rho_f} \left[\alpha_f (1 + \nu_{fLT}) + \frac{\alpha_m (1 + \nu_m) \rho - \alpha_f (1 + \nu_{fLT}) \rho_m}{\rho_f \frac{V_f}{V_m} \frac{C_f}{(C_m)^2} + \rho_m} \right] \quad (16)$$

由式(15)、(16)可知氰酸脂基体在横向、纵向具有较小的膨胀系数,即在相同工艺条件下,以氰酸脂为基体制备的复合材料能够获得更好的尺寸稳定性。

3 试验方案设计

一般情况下,真空逸气带来的质量损失率(TML)都远低于 1%,带来的尺寸变化应该也是微米量级,因此试验件设计需要能够真实地反应复合材料本身的变化且较少含有其他材料变化带来的干扰,测量精度要足够高,以准确地测量出复

合材料的变化量,并且应能够对比出不同基体复合材料的變化。

3.1 试验组件设计

为模拟复合材料杆件在空间相机中的使用状态,且能够简洁直观地得到预期结果,设计试验组件模型如图 2 所示,长度测量变化试验组件(以下简称试验组件)由碳纤杆(其铺层顺序为: $[(\pm 15^\circ)_4/90^\circ]_2/(\pm 15^\circ)_3$)、直接头、钢球等组成。直接头用结构胶与钢球黏接后,再与碳纤杆黏接。其中碳纤杆内径为 32 mm,外径为 42 mm,长度为 534.3 mm,设计质量为 496 g。

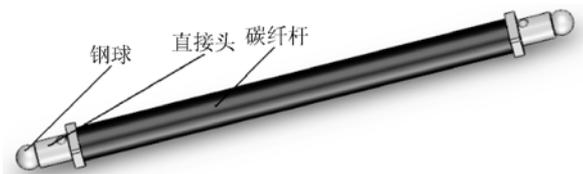


图 2 试验组件模型

Fig. 2 Test component model

试验组件材料如表 1 所示。

表 1 试验组件材料列表

Tab. 1 Test assembly materials

序号	名称	材料	数量	备注
1	钢球	不锈钢	2	精度 16 级
2	直接头	殷钢(4J32)	2	线膨胀系数为 0
3	碳纤杆	M40J	1	基体材料分别为 氰酸酯树脂和环氧树脂

组件中的钢球与直接头的设计是为了能够精确测量出试验组件尺寸的变化。金属材料材质细密,不会产生吸气、逸气,试验前后温度保持不变,且直接头采用线膨胀系数为 0 的殷钢加工,因此试验组件中的钢球与直接头不会造成试验组件质量和尺寸的变化。通过试验验证了上述试验组件中包含的钢球、直接头以及黏接用胶对试验过程中试验组件尺寸和质量的变化影响较小。试验中采用长度和直径与试验组件中碳纤杆一致的氰酸脂光管作为参照对比,如图 3 所示。



图 3 氰酸脂光管

Fig. 3 Cyanate tube

为了降低测试误差、材料差异性对测试结果的影响,加工了多套试验组件进行试验。试验组件的数量如表 2 所示。

表 2 试验组件数量表

Tab. 2 The number of test assemblies

序号	名称	数量	基体材料	数量
1	长度试验组件	6	氰酸酯树脂	3
			环氧树脂	3
2	氰酸脂光管	1	氰酸酯树脂	1

3.2 试验方案及条件

3.2.1 试验方案

试验流程为:

- 试验组件完成装配;
- 进行试验前测量,确定试验件测量的可操作性、重复性以及测量精度;
- 试验组件放入真空罐内进行真空除气试验;
- 对试验组件进行试验后测量;
- 在常压环境中保存,直至试验件质量稳定(可认为吸气饱和);
- 重复(c)~(e)进行 3 轮试验。

3.2.2 试验条件

按照空间相机真空试验标准,试验条件为:

- 容器内环境压力:不大于 1.0×10^{-4} Pa;
- 试验温度: $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$;
- 保持时间:72 h。

3.3 测量方案

试验组件使用高精度三坐标测量仪检测其两侧的高精度钢球的球心,计算两球心的空间距离,并检测 A、B 两轴轴线的角度作为参考。通过检测各试验状态下两球心的空间距离来判断碳纤杆的长度变化情况,并用微量天平测量其质量变化情况。试验组件尺寸如图 4 所示。

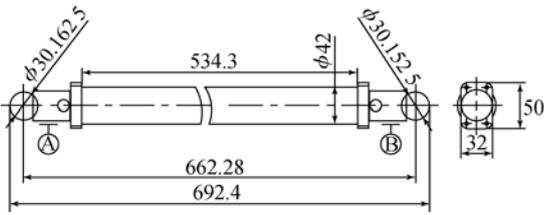


图 4 试验组件尺寸图

Fig. 5 Size of test component

3.3.1 质损率(TML)测量方案

真空除气过程中,试验组件质量会产生相应的变化,且其变化幅度较小。如图 5 所示,选用精度为 10 mg,量程为 4.1 kg 的电子微量天平(型号 BSM4100. 2)对试验组件的质量变化进行测量。

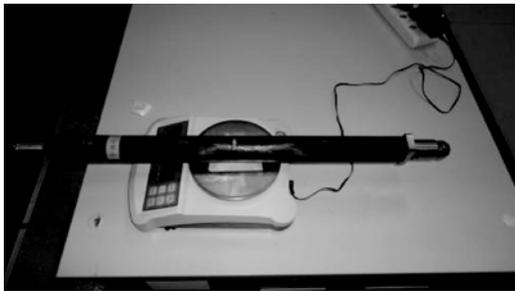


图 5 试验组件重量测量

Fig. 5 Mass measurement of test assembly

3.3.2 尺寸变化测量方案

在真空除气过程中,试验组件长度的变化是本试验主要关注的内容,选用德国蔡司公司生产的高精度三坐标测量仪(型号 Prismo Navigator, 精度为 0.9 μm),通过测量试件两端高精度钢球球心之间的距离监测碳纤杆长度变化。经反复测量验证,该三坐标测量机在测量试验组件长度时重复性在 0.5 μm 以内。

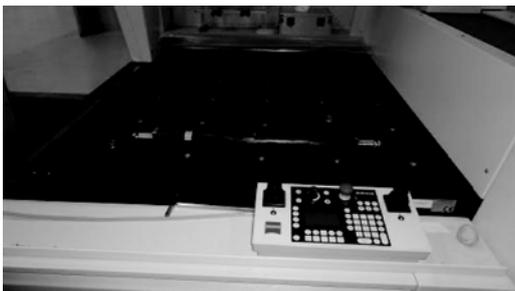


图 6 试验组件长度测量

Fig. 6 Length measurement of test assembly

4 试验测试

对所设计的试验组件进行了试验前的试验有效性验证,并对该试验组件进行了 3 轮真空试验。

4.1 试验有效性验证

虽然复合材料吸气、逸气是一个缓慢过程^[2],但由于测试环境与试验环境不同,试验件在测试环境中一定时间后会导导致试验结果的变化,可能会造成试验失效。为验证试验的时效性以及检测仪器精度的有效性,对该试验组件进行了多时间段的反复测量,以获得复合材料吸气过程中质量和尺寸的变化趋势和规律。质量与长度变化情况如图 7、图 8 所示。

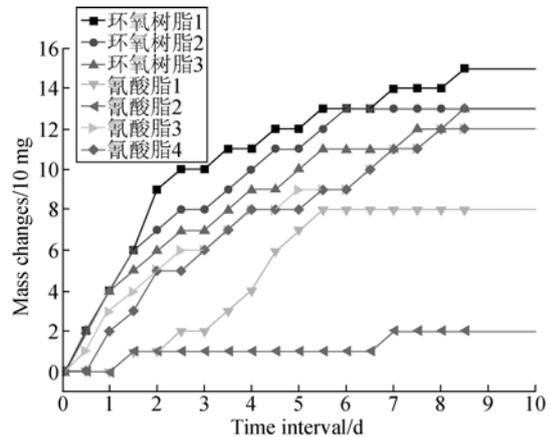


图 7 真空试验后重量变化过程

Fig. 7 Process of mass change after vacuum test

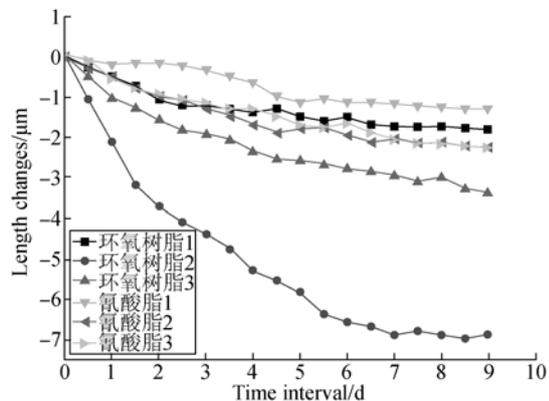


图 8 真空试验后长度变化

Fig. 8 Process of length change after vacuum test

结果表明每一次真空试验试验组件的长度变

化量超过测量重复性,质量变化量也远超过电子微量天平的精度,说明测量工具精度满足试验要求;试验数据在 1 个工作日之内微量变化,约 10~15 d 后趋于稳定,第一个工作日内的质量变化约为总变化量的十分之一左右,长度变化均在 1 μm 以内,说明试验测量的时效性满足试验要求。因此,可以认为该测量值可以代表试验变化真值。

4.2 质损率

采用电子微量天平对 3 轮真空试验前后各试验组件进行了精确的测量,试验结果如表 3 所示。

表 3 试验件真空逸气质损率统计表

Tab. 3 Statistics of mass loss rates

试件	质损率/%		
	第一轮	第二轮	第三轮
环氧树脂 1	0.039	0.042	0.054
环氧树脂 2	0.035	0.042	0.050
环氧树脂 3	0.033	0.046	0.060
氰酸脂 1	0.027	0.025	0.023
氰酸脂 2	0.014	0.027	0.025
氰酸脂 3	0.025	0.029	0.029
氰酸脂 4	0.025	0.019	0.025

可以看出环氧树脂基复合材料的质损率为 0.033%~0.06%,氰酸脂基复合材料的质损率为 0.014%~0.029%,氰酸脂基复合材料的质损率明显小于环氧树脂基复合材料,且一致性较好。

4.3 长度变化量

采用高精度三坐标测量仪对 3 轮真空试验前后各试验组件进行了精确的测量,试验结果如表 4 所示。

环氧树脂基复合材料的长度变化量为 1.87~8.35 μm ,氰酸脂基复合材料的长度变化量为

0.99~3.18 μm 。氰酸脂基复合材料的长度变化量明显小于环氧树脂基复合材料,且在几轮试验过程中氰酸脂基复合材料的尺寸稳定性也好于环氧树脂基复合材料。

表 4 试验件真空尺寸变化量统计表

Tab. 4 Statistics of length changes (μm)

试件	长度变化量		
	第一轮	第二轮	第三轮
环氧树脂 1	1.87	2.62	4.31
环氧树脂 2	6.93	7.99	8.35
环氧树脂 3	3.37	4.43	5.05
氰酸脂 1	1.31	1.18	0.99
氰酸脂 2	2.25	3.18	2.94
氰酸脂 3	2.25	1.93	2.13

5 结 论

本文针对真空环境对碳纤维复合材料的尺寸稳定性影响展开了研究。设计了可有效、精确测量碳纤维复合材料尺寸和质量变化的试验方案,并进行了 3 轮重复性真空试验。试验结果表明在常温常压环境下,吸气逸气是一个较为缓慢的过程,同一基体碳纤维不同试验组件间具有一定差异性,且表现为氰酸脂基较环氧树脂基差异性较小。在不同基体碳纤维杆的比较中,环氧树脂基与氰酸脂基相比质损率相对较大,环氧树脂基复合材料质损率为 0.033%~0.06%,氰酸脂基复合材料质损率为 0.014%~0.029%,环氧树脂基试件的质量变化约为氰酸脂基的 2 倍;环氧树脂基复合材料与氰酸脂基复合材料相比长度变化量较大,长度变化约为氰酸脂基复合材料的 2~3 倍。

(in Chinese).

参考文献:

- [1] 刘磊,曹国华.大视场长焦面光学遥感器双凸轮式焦面调焦机构[J].光学精密工程,2012,20(9):1939-1944.
LIU L,CAO G H. Double cam focusing mechanism of space camera with wide field and long-focal-plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1939-1944.

- [2] 龚大鹏,郭疆,王国良,等.长焦距离轴三反测绘相机的外场立体成像[J].光学精密工程,2013,21(1):137-143.
GONG D P, GUO J, WANG G L, et al.. Outdoor stereoscopic imaging of mapping camera with long-focus off-axis three-mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 137-143. (in Chinese)

- [3] 徐宏,关英俊.空间相机1 m口径反射镜组件结构设计[J].光学精密工程,2013,21(6):1488-1495.
XU H, GUAN Y J. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1488-1495. (in Chinese)
- [4] 苏燕芹,张景旭,杨飞,等.30 m望远镜的三镜Rotator组件轴承概念设计[J].光学精密工程,2013,21(6):1510-1517.
SU Y Q, ZHANG J X, YANG F, *et al.*. Conceptual design of rotator assembly bearing in TMT tertiary mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1510-1517. (in Chinese).
- [5] 白满社,李攀,张晋宽.大曲率半径球面反射镜球面误差的改善[J].光学精密工程,2013,21(3):554-560.
BAI M SH, LI P, ZHANG J K. Improvement on nonuniformity for sphere mirrors with lame radius of curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):554-560. (in Chinese)
- [6] 辛宏伟,关英俊,柴方茂.离轴空间遥感器主支撑结构设计[J].光学精密工程,2012,20(6):1257-1264.
XIN H W, GUAN Y J, CHAI F M. Design of main support of off-axis space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1257-1264. (in Chinese)
- [7] 张雷,姚劲松,贾学志,等.同轴空间相机碳纤维复合材料桁架结构的研制[J].光学精密工程,2012,20(9):1967-1973.
ZHANG L, YAO J S, JIA X ZH, *et al.*. Development of trusses made of carbon fiber composites for coaxial space remote sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):1967-1973. (in Chinese)
- [8] 林再文,刘永琪,梁岩,等.碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J].光学精密工程,2007,15(8):1181-1185.
LIN Z W, LIU Y Q, LIANG Y, *et al.*. Application of carbon fibre reinforced composite to space optical structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1181-1185. (in Chinese)
- [9] 吴清文,王领华,杨献伟,等.炭/炭复合材料在空间光学遥感器热控制中的应用[J].光学精密工程,2012,20(9):1984-1990.
WU Q W, WANG L H, YANG X W, *et al.*. Application of carbon-carbon composites to thermal control of space optical instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):1984-1990. (in Chinese)
- [10] 安源,贾学志,张雷,等.基于碳纤维复合材料的空间相机高比刚度主承力板优化设计[J].光学精密工程,2013,21(2):416-422.
AN Y, JIA X ZH, ZHANG L, *et al.*. Optimizing design of CFRP based backbone with high stiffness ratio for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):416-422. (in Chinese)
- [11] 郭疆,邵明东,王国良,等.空间遥感相机碳纤维机身结构设计[J].光学精密工程,2012,20(3):571-578.
GUO J, SHAO M D, WANG G L, *et al.*. Design of optical mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):571-578. (in Chinese)
- [12] 姜景山.空间科学与应用[M].北京:科学出版社,2001
JIANG J SH. *Space Science and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [13] NUSS H E, STREUFF I. Gassing processes during space simulation and thermal vacuum testing of spacecraft [J]. *Vacuum*, 1996, 47(4):391-395.
- [14] 王晓洁,张炜,惠雪梅,等.碳纤维/氰酸酯树脂复合材料真空逸气性能研究[J].宇航学报,2008,29(1):344-346.
WANG X J, ZHANG W, HUI X M, *et al.*. Study on the vacuum outgassing performance of cyanate ester resin carbon and fiber composite material [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1):344-346. (in Chinese)
- [14] 王震鸣.复合材料力学和复合材料结构力学[M].北京:机械工业出版社,1991.
WANG ZH M. *Mechanics of Composite Materials and Composite Material Structural Mechanics* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1991.

作者简介:



袁野(1984—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2007年、2010年于北京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器结构设计方面的研究。E-mail: yuanye080888@163.com



鲍赫(1980—)男,黑龙江齐齐哈尔人,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构技术及精密机械方面的研究。E-mail: baohe2000@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)