

红外光学材料胶粘剂力学性能研究与试验

张楠^{1,2}, 王跃¹, 张志飞¹, 李庆林¹, 常君磊¹

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;
2. 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094)

摘要: 胶接是一种较为常用的支撑方式, 经常被用于红外透镜和镜框之间的连接, 因此研究胶粘剂在各种环境下的力学性能对提高红外光学遥感器的环境适应能力具有极其重要的价值。选择锗和钛合金、硅和殷钢作为两组研究对象, 使用环氧树脂进行胶接, 通过拉伸和剪切测试试验研究其力学性能。首先, 介绍了力学性能测试的方法和流程。之后, 在仿真分析的基础上, 在三种不同环境下对两组测试对象分别进行拉伸和剪切强度测试, 试验数据离散性较小, 可信度较高。最后, 对试验数据进行总结, 发现环氧树脂拉伸强度是剪切强度的 1.4 倍, 可满足不同材料间胶接固定, 具有良好环境适应性。所得测试数据可作为红外光学遥感器的设计依据使用, 应用价值较高。

关键词: 红外光学材料; 胶粘剂; 拉伸试验; 剪切试验

中图分类号: V443⁺.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210295

Research and test on mechanical properties of adhesive for infrared optical materials

Zhang Nan^{1,2}, Wang Yue¹, Zhang Zhifei¹, Li Qinglin¹, Chang Junlei¹

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;
2. Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Adhesive bonding is a commonly used support method, which is often used for the connection of infrared lenses and frames. Therefore, it is of great value to research the mechanical properties of adhesive in various environments to improve the environmental adaptability of infrared optical remote sensors. Germanium and titanium alloy, silicon and invar were selected as two groups of research objects, epoxy adhesive was used for bonding, and its mechanical properties were studied by tensile and shear tests. Firstly, the test method and process of mechanical properties were introduced. Then, on the basis of simulation analysis, the tensile and shear strengths of the two groups of test objects were tested in three different environments, and the test data were less discrete and more reliable. At last, the test data were summarized, and it was found that the tensile strength of epoxy adhesive was 1.4 times the shear strength, which could meet the requirements of bonding and fixing between different materials, and had good environmental adaptability. The test data obtained can be used as the basis for the design of infrared optical remote sensing, which has high application value.

Key words: infrared optical materials; adhesive; tensile test; shear test

收稿日期: 2021-05-04; 修订日期: 2021-05-31

作者简介: 张楠, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事空间遥感相机光机结构设计与研究。

0 引言

近年来,红外探测系统因其环境适应性好,抗干扰能力强,可识别伪装目标,具有较强的穿透烟、雾、霾、雪、尘埃等限制的能力等特点,应用越来越广泛,受到众多相关科研人员的关注^[1]。

随着传感器镜头轻量化程度的提高以及口径的增大,给光机结构设计带来了极大的挑战。既要保证支撑结构的刚度,又要降低支撑结构对面形精度的影响,因此红外光学传感器透镜常用胶粘剂与支撑结构进行胶接。相对于机械连接,胶接具有优势方面:(1)可实现其他连接方式难以解决的不同材料间的连接;(2)可降低安装界面的复杂性,结构更加紧凑,利于减重;(3)通过选择适当的粘接剂可满足耐温和抗振等方面的要求。因此,越来越多的工程师选择胶接的方式来固定光学元件^[2-3]。拉伸和剪切强度作为胶粘剂

的重要力学性能指标,对传感器的设计至关重要,但目前针对红外光学材料胶粘剂的研究并不充分,尤其在低温下的研究更少,因此有必要研究适用于红外光学材料胶粘剂的力学性能。

DP460 胶是 3M 公司研制的一种高性能环氧胶,其粘接材料类型广泛,具有高韧性、高强度、耐高温等优点。在常温环境下,该环氧胶的重叠剪切强度为 31 MPa。粘接后对产品无污染,在红外传感器研制中得到越来越多的应用。文中对该环氧胶力学性能进行研究测试,为红外光学传感器的设计提供设计依据。

1 力学性能测试方法

1.1 试验对象

硅、锗和硒化锌都是常用的红外光学材料,广泛地用于红外光学传感器的研制,三种材料的基本力学性能如表 1 所示。

表 1 红外材料力学性能

Tab.1 Mechanical properties of infrared materials

Material	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	E/GPa	$\text{CLTE}/^{\circ}\text{C}^{-1}$
Si	2.32	190.0	2.5E-6
Ge	5.35	102.7	6.0E-6
ZnSe	5.42	67.2	7.6E-6

文中选择单晶锗 (Ge) 与钛合金 (TC4) 镜框、单晶硅 (Si) 与殷钢 (Invar) 镜框作为两组胶接对象进行研究。首先需要考虑的是透镜与镜框的间隙大小,即胶层厚度,其计算公式为^[4]:

$$h = \frac{(\alpha_c - \alpha_o)\alpha_o / \sqrt{\pi}}{\alpha_b - \alpha_o + \frac{\nu}{1-\nu} \left[\left(2 - \frac{h}{2L} \right) \alpha_b - \frac{3}{4}(\alpha_c + \alpha_o) \right]} \quad (1)$$

式中: h 为胶层厚度; L 为粘接宽度; α_o 为透镜的热膨胀系数; α_c 为镜框的热膨胀系数; α_b 为弹性胶的热膨胀系数; ν 为胶的泊松比。综合两组粘接测试对象,通过计算以及兼顾注胶工艺和以往的工程经验,最后确定厚度为 0.1 mm。

1.2 试件以及工装设计

每组试验装置由红外材料试件、金属试验块和试验机接头组成。红外材料试件分为 Ge 试件和 Si 试件,外形尺寸为 25 mm×15 mm×15 mm;金属试验块分为 TC4 试验块和 Invar 试验块。

在每组试验装置中,两个金属试验块将红外材料试件夹在中间,使用环氧胶将三者胶接。试验机接头一端与测试设备相连,另一端与金属试验块相连。为避免测试时出现试验机两端连线与大地水平面存在夹角而对测试数据造成影响的情况,试验机接头和试验机通过向心关节轴承连接,以确保试验机提供的拉力始终正交于胶层。进行拉伸试验时,金属试验块为方形试验块,如图 1 所示,将红外材料试件居中放置在两个金属方形试验块中间,并在其连接处注 0.1 mm 厚的环氧胶斑,待胶固化后,分别进行 Ge 试件和 TC4 试验块、Si 试件和 Invar 试验块的拉伸测试。

剪切试验时,金属试验块为“L”形试验块,如图 2 所示,将红外材料试件放置在两个“L”型试验块的缺口处,使得红外试件与“L”型试验块的接触面积相同,并在其连接处注 0.1 mm 厚的环氧胶斑,待胶固化后,分别进行 Ge 试件和 TC4 试验块、Si 试件和 Invar 试验块的剪切测试试验。

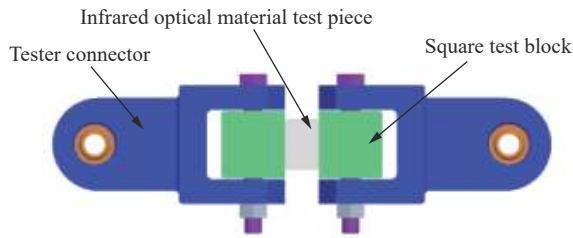


图 1 拉伸试验三维模型

Fig.1 3D model of tensile test

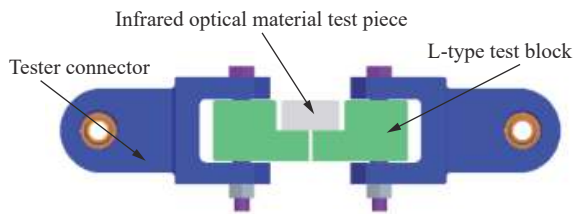


图 2 剪切试验三维模型

Fig.2 3D model of shear test

在温度 20 ℃ 且湿度 30%~40% 的环境下进行注胶。胶斑直径为 (8 ± 2) mm, 可通过控制注胶时间来控制直径尺寸。胶斑厚度则通过等厚塞尺将误差限制在 ± 0.02 mm 以内。金属试验块和红外材料试件胶接面在胶接前应用酒精或丙酮清洗干净, 粘接表面不允许打磨。

胶接面粗糙度需按照金属、胶粘剂对界面的要求进行处理, 处理方法可参照 GB/T 21526 或胶粘剂说明书执行。文中的光学试件胶接面粗糙度为 $Ra0.012$, 金属试块胶接面粗糙度为 $Ra0.4$, 其余粗糙度根据试验需要而定。

1.3 试验条件及目的

(1) 在常温环境下 (RT), 进行拉伸和剪切试验时, 温度要求 (20 ± 2) ℃, 湿度要求 30%~50%, 测试环氧胶在常温下的力学强度, 以获得在地面装调测试时可提供的强度。

(2) 热循环试验后常温环境下 (TCRT), 进行拉伸和剪切试验。热循环试验在热真空试验设备内进行, 循环的温度为 $-115\sim 30$ ℃, 压力优于 1×10^{-4} Pa, 变温率小于 30 ℃/h, 达到温度后保温 0.5 h, 循环 10 次, 测试热冲击对粘接强度的影响。

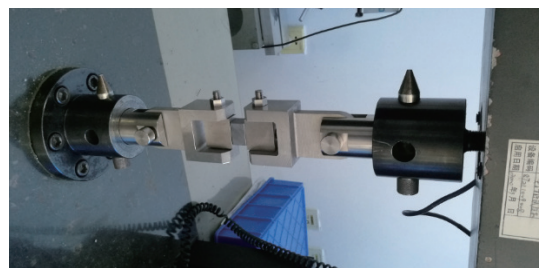
(3) 在低温环境下 (LT), 进行拉伸和剪切试验时, 试验温度为 -130 ℃, 达到温度后保温 10 min 之后开始进行测试试验。红外传感器通常在低温环境下工

作, 而装调和测试一般在常温环境下进行, 因此有必要测试低温对胶粘剂的影响, 以校核在低温下的胶接力是否依然满足复杂力学环境的要求, 同时也可根据测试结果适当增加设计裕度, 提高产品环境适应能力和可靠性。

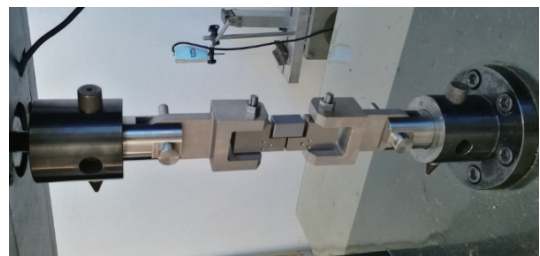
1.4 试验方法及流程

将制作好的试件依据 GB/T 3354—2014 和 GJB 1709—93 在微机控制电液伺服万能试验机上进行试验^[5], 速率为 1 mm/min, 直到红外材料试件与金属试验块间完全脱胶后方可停止试验, 并记录试验力-位移数据^[6], 试验设备如图 3 所示, 常温试验在控温试验室内进行, 低温试验则在带有控温功能的低温试验箱中进行。

将相应试件组、夹具、连接件及工具准备完毕, 进行常温或者低温环境下的拉伸或剪切试验, 流程如图 4 所示。



(a) 拉伸试验
(a) Tensile test



(b) 剪切试验
(b) Shear test



(c) 低温试验箱
(c) Low temperature test case

图 3 胶粘强度试验

Fig.3 Adhesive strength test

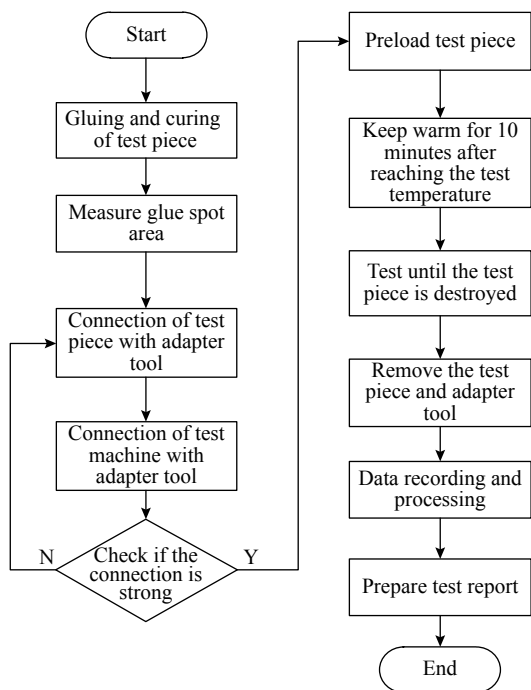


图 4 试验流程
Fig.4 Test process

2 有限元仿真分析

在简化模型基础上建立有限元模型, 根据实际情况为各零部件赋予不同的材料属性, 各连接处采用共节点方式连接。将直径 8 mm 的圆形胶层当作各向同性材料, 在厚度方向划分三层网格单元, 可近似模拟出胶层性能^[7], 文中建模采用这一方法。针对 Ge 试件和 TC4 试验块计算拉伸强度和剪切强度之间的关系以指导试验。在常温下, 加载 0.1 mm 位移, 去掉由于共节点而导致的应力集中点, 拉伸试验约为剪切试验胶层应力的 2.7 倍, 仿真结果如图 5 所示。

由于光学试件、金属试件和胶层的热膨胀系数有所差异, 在温度变化时胶层会产生热应力和热应变^[8]。从室温变化至 -130 °C 的环境下, 加载 0.1 mm 位移, 去掉由于共节点而导致的应力集中点, 拉伸试验约为剪切试验胶层应力的 2.5 倍, 仿真结果如图 6 所示。

用该方法针对 Si 试件和 Invar 试验块进行仿真分析。在常温下, 加载 0.1 mm 位移, 拉伸试验约为剪切试验胶层应力的 2.8 倍; 在温度从常温变化至 -130 °C 的环境下, 加载位移 0.1 mm, 拉伸试验约为剪切试验胶层应力的 2.6 倍。

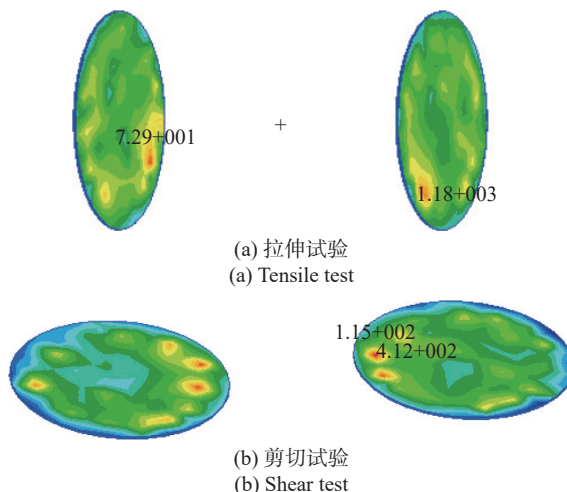


图 5 常温下应力分布

Fig.5 Stress distribution at room temperature

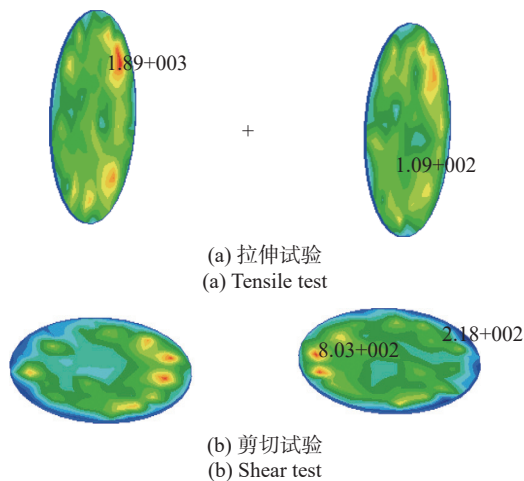


图 6 低温下应力分布

Fig.6 Stress distribution at low temperature

3 试验结果及分析

3.1 数据处理方法

试验测试误差主要有两大类: 一类是由试件差异性引入的误差; 另一类是由测试设备引入的误差。测试设备引入的误差主要包括仪器自身的测量误差和测试环境引入的误差。但设备引入误差占总误差的百分比极小, 因此试件差异性引入的误差是主要部分^[9]。

为减小误差, 在对试件筛选的基础上, 常温和低温下拉伸和剪切试验各进行三次, 由于加载初期存在位移空程以及加载速率不稳等原因, 试验起始阶段通常会有台阶状非线性段, 进行数据处理时应舍

去^[10]。标准差是一组数据平均值分散程度的一种度量,在概率统计中表征数据的离散程度,是表示数据精确程度的重要指标。标准差越大表示试验结果的离散性越大,误差越大,数据越不精度。反之,数据越精确^[11]。胶粘剂粘接强度平均值计算公式为:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} \quad (2)$$

胶粘剂粘接强度标准差计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \mu)^2} \quad (3)$$

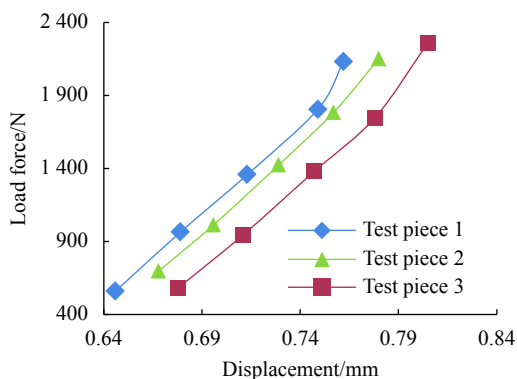
式中: P_i 为第 i 个试件的粘接强度; μ 为平均强度; N 为试验次数; σ 为粘接强度标准差。

3.2 试验结果

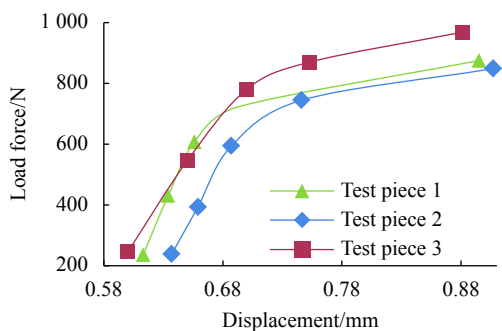
3.2.1 Ge-TC4 试验组合测试结果

(1) 常温下测试结果

按照图 4 所示的试验流程进行 Ge 试件和 TC4 试验块的粘接强度测试,在常温环境下,拉伸剪切试验力-位移曲线如图 7 所示。



(a) 拉伸试验结果
(a) Tensile test results



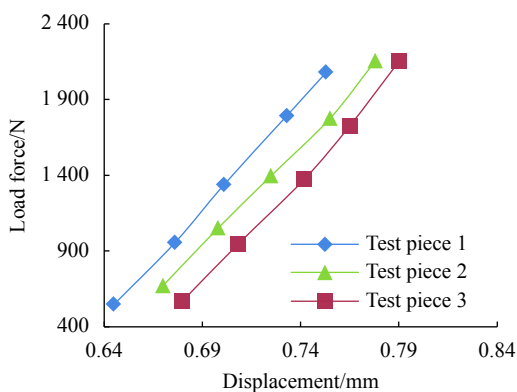
(b) 剪切试验结果
(b) Shear test results

图 7 常温下试验结果

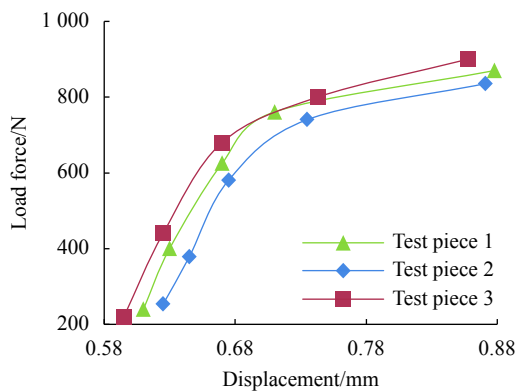
Fig.7 Test results at room temperature

(2) 热循环试验后,常温下测试结果

先经历 10 次温度从 $-115 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热循环试验后,在常温下,拉伸剪切试验力-位移曲线如 8 所示。



(a) 拉伸试验结果
(a) Tensile test results



(b) 剪切试验结果
(b) Shear test results

图 8 热循环后常温下试验结果

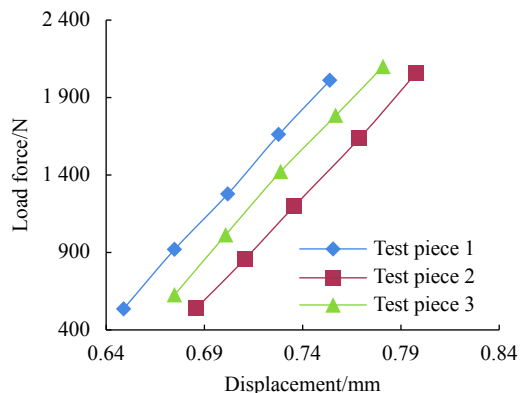
Fig.8 Test results at room temperature after heat cycle

(3) 低温下测试结果

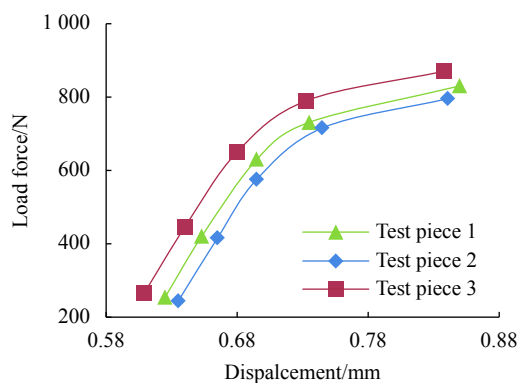
将试件置于低温箱中降温至 $-130 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 10 min 之后进行测试,拉伸剪切试验力-位移曲线如 9 所示。

在试验中,胶接在彻底被破坏的瞬间有轻微响声,Ge 试件和 TC4 试验块未损坏。随着加载位移的增加,三种试验环境 (Environment) 下,拉伸试件载荷基本呈线性增大直到胶层与金属件分离,包含位移均值 (D)、强度均值 (S) 和强度标准差 (SD) 的拉伸试验结果如表 2 所示。

剪切试件的载荷在试验初期基本呈线性增大,但接近破坏时,约总载荷的 90% 时发生突变,位移较试验初期增加明显,直至试验件破坏。经计算后,包含位移均值 (D)、突变强度均值 (MS) 和强度均值 (S) 的试验结果如表 3 所示。



(a) 拉伸试验结果
(a) Tensile test results



(b) 剪切试验结果
(b) Shear test results

图 9 低温下试验结果

Fig.9 Test results at low temperature

表 2 Ge-TC4 拉伸试验结果

Tab.2 Ge-TC4 tensile test results

Environment	D/mm	S/MPa	SD/MPa
RT	0.118	36.124	1.381
TCRT	0.109	35.106	0.799
LT	0.107	34.072	0.411

表 3 Ge-TC4 剪切试验结果

Tab.3 Ge-TC4 shear test results

Environment	D/mm	MS/MPa	S/MPa	SD/MPa
RT	0.261	22.946	26.198	0.564
TCRT	0.259	22.092	25.393	0.741
LT	0.220	21.779	24.314	0.605

3.2.2 Si-Invar 试验组合测试结果

按照试验流程, Si 试件和 Invar 试验块分别在常温下、热循环试验后常温以及低温下进行强度测试试验。与 Ge-TC4 试验组合试验现象基本相同, 在彻底

破坏瞬间有轻微响声, Si 试件和 Invar 试验块未发生损坏。不同环境的拉伸试验, 随着加载位移的增加, 试件载荷基本呈线性增大直到破坏, 试验结果如表 4 所示。

表 4 Si-Invar 拉伸试验结果

Tab.4 Si-Invar tensile test results

Environment	D/mm	S/MPa	SD/MPa
RT	0.112	37.052	1.341
TCRT	0.106	36.652	1.470
LT	0.103	33.719	1.351

在三种试验环境下, Si-Invar 剪切试件组合的载荷在试验初期也基本呈线性增大, 加载至总载荷的 80%~90% 时位移发生突变, 位移较试验初期增加明显, 直至试验件破坏。经计算后, 试验结果如表 5 所示。

表 5 Si-Invar 剪切试验结果

Tab.5 Si-Invar shear test results

Environment	D/mm	MS/MPa	S/MPa	SD/MPa
RT	0.223	23.070	27.253	1.306
TCRT	0.208	21.934	26.627	0.948
LT	0.202	21.375	25.716	1.036

3.3 试验结果分析

根据上述两种试验组合分别在三种环境下进行测试后得到的试验数据可以看出以下几点:

(1) 试验测试结果的标准差均较小, 表明强度测试数据总体离散性较小, 可信度较高, 可作为空间红外遥感器的设计及校核依据使用;

(2) 在不同环境下的试验中, 拉伸强度均高于剪切强度, 前者约是后者的 1.4 倍, 与仿真结果基本一致, 表明采用拉伸受力粘接形式的可靠性高于剪切受力粘接形式;

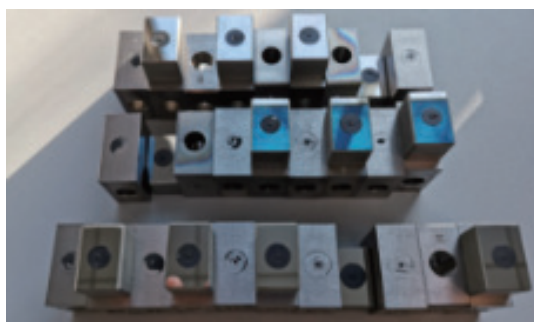
(3) 从热循环试验后的测试发现, 热循环后胶粘剂的拉伸和剪切强度虽略有降低, 但变化不大, 相似度 90% 以上, 表明胶粘剂承受住了热冲击考核, 可在温度变化较大环境下使用;

(4) 与之前两个环境条件相比, 低温下试验, 试件的拉伸和剪切强度没有明显变化, 约为常温环境下的

92%, 说明该环氧胶可在低温环境下使用, 环境性适应性较高, 但是在进行结构设计时需要适当加大设计裕度;

(5) 与拉伸试验相比, 剪切试验所加载的位移量较大, 约为拉伸试验的 1.8 倍。剪切试验临近破坏时, 位移变化急剧增加时粘接强度急剧下降, 因此, 对于位置度敏感且只能采用剪切受力支撑形式的系统来说, 除增加一定设计裕度外, 可通过其他辅助限位支撑来提高可靠性。

(6) 从胶粘界面破坏形式上看, 拉伸试验和剪切试验胶层破坏形式基本上均是胶层从金属面上脱开, 如图 10 所示。这是由于金属件粘接面粗糙度高于红外材料试件粘接面, 表明粗糙度也是影响胶粘剂强度的因素之一, 即粗糙度越低, 表面越光滑, 越有利于胶接, 这与 A.Boesza 和 F. Grupp 等学者关于粘接强度研究中的发现一致^[12], 即粘接强度与界面粗糙度平方根的倒数成正比。因此, 可通过提升粘接面光滑度的方式提高胶接强度。



(a) 拉伸试验
(a) Tensile test



(b) 剪切试验
(b) Shear test

图 10 试验破坏界面

Fig.10 Test destroy interface

(7) 在三种试验环境下, Ge-TC4 试验组合与 Si-Invar 试验组合所测试的胶粘强度基本相同, 表明文

中所论述的环氧胶可用于锆和钛合金镜框、硅和殷钢镜框之间的粘接, 适用范围较广, 其他红外材料透镜与金属镜框可按照该法验证胶接强度是否满足使用要求。

(8) 测试中均是胶层发生破坏而导致试验终止, 锆、硅两种红外光学试件没有发生损坏, 说明这两种红外光学材料的强度大于环氧胶的粘接强度。即使因受到较大负载而导致胶接失效, 也不会破坏锆、硅本身, 可安全使用。其他红外光学材料和金属材料的组合也可依照文中论述的试验方法进行测试验证。

4 结束语

胶接是红外遥感器透镜和镜框的常用连接方式。作为胶粘剂的两个重要力学指标, 拉伸和剪切强度是影响红外遥感器成像质量的重要因素, 因此很有必要对其进行研究和测试。文中选取锆和硅作为研究对象, 将锆和钛合金、硅和殷钢使用环氧胶进行胶接, 测试胶接后的拉伸和剪切强度。在完成试件和试验工装设计的基础上确定了三种试验环境、制定试验方法和流程, 通过试验得到了可信度较高的测试数据。

通过数据对比可以发现, 在不同环境下, 胶粘剂的拉伸强度均高于剪切强度, 剪切试验位移量均大于拉伸试验, 因此, 需针对不同的使用场景和光学系统的特点选择适合的胶接形式。另外一方面, 热循环试验前后以及低温环境下, 胶粘剂的力学性能均变化较小, 表明文中的环氧胶具有良好的环境适应能力。此外, 试验过程中也没有对红外光学材料造成损坏。

综上, 通过试验获取的大量数据可为遥感器的设计校核提供参考, 也可为测试其他红外材料胶接强度提供方法, 具有较大的应用价值。

参考文献:

- [1] Bai Yu, Xing Tingwen, Li Hua, et al. Advances in foreign MWIR lens with high ratio [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 795-802. (in Chinese)
- [2] Lu Yuting, Wang Weizhi. Alignment of large aperture gluing primary mirror with finite element method [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(1): 38-44. (in Chinese)
- [3] Dong Deyi, Li Zhilai, Li Ruigang, et al. Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10):

- 2698-2707. (in Chinese)
- [4] Liu Qiang, He Xin, Zhang Feng, et al. Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2229-2236. (in Chinese)
- [5] Huang Caifei, Chen Guoping, Wang Yu. Study on the influence of thickness of adhesive layer on mechanical properties of polypropylene reinforced with carbon fiber cloth [J]. *Engineering Plastic Application*, 2020, 48(11): 102-105. (in Chinese)
- [6] Zhang Yu, Lou Guobiao, Li Guoqiang, et al. Experimental study of bond strength of anchorage adhesive after heating [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(11): 1723-1728. (in Chinese)
- [7] Guo Junli, An Yuan, Li Zongxuan, et al. Bonding technique of mirror components in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0313002. (in Chinese)
- [8] Li Mengqing, Zhang Lei, Xing Lina, et al. Optimization design of athermal adhesive for rectangular space mirror [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 704-712. (in Chinese)
- [9] Zhou Xiaohua, Xing Hui, Yang Jukui. Epoxy selection for reflect mirror assembly in space remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, 40(3): 65-72. (in Chinese)
- [10] Gao Chao, Luo Shikui, Chen Fang, et al. Young's modulus determination and selection for XM23 glue used in space camera optics [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(2): 48-54. (in Chinese)
- [11] Feng Wei, Xu Fei, Yuan Jialei. Tensile behavior and effect factors of double scarf-repaired composite laminates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(6): 1421-1427. (in Chinese)
- [12] Boesza A, Gruppbc F, Mottaghbonab A. et al. Analytic results for high precision and cryogenic lens holders [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8125: 81250G.