

空间光学载荷探测器组件粘接胶层设计与验证

赵岳 李佳骏 付兴

Design and verification of adhesive layer for detector assembly of space optical payload

ZHAO Yue, LI Jia-jun, FU Xing

引用本文:

赵岳, 李佳骏, 付兴. 空间光学载荷探测器组件粘接胶层设计与验证[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0048

ZHAO Yue, LI Jia-jun, FU Xing. Design and verification of adhesive layer for detector assembly of space optical payload[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0048

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0048>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计

Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 578 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0194>

空间引力波探测望远镜集成结构的胶接方法研究

Study of bonding layer for integrated structure of space gravitational wave detector telescope

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 715 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0025>

纳秒脉冲激光对背照式CMOS探测器组件损伤机理研究

Investigation of laser-induced damage mechanisms in back-illuminated CMOS detector modules under nanosecond pulsed irradiation

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1277 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0090>

离轴超构透镜设计与特性分析

Design and characteristic analysis of off-axis meta-lens

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 52 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0039>

探测器噪声对光斑中心定位精度的影响分析及实验验证

Analysis and experimental verification of the influence of detector noise on the precision of spot center positioning

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 650 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0021>

基于通道光谱色散的拼接探测器平整度检测方法

Flatness detection method of splicing detector based on channel spectral dispersion

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 889 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0026>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

空间光学载荷探测器组件粘接胶层设计与验证

赵岳, 李佳骏, 付兴*

(中国科学院西安光学精密机械研究所 装校技术研究中心, 陕西, 西安 710119)

摘要: 为满足空间光学载荷高分辨率成像需求, 解决探测器与结构外框在空间极端环境下的粘接可靠性难题, 本文提出一种探测器组件协同优化粘接方案。首先, 结合光学载荷空间环境适应性要求, 系统对比常用粘接剂核心性能, 确定环氧树脂胶为主粘接剂实现探测器与结构外框刚性可靠粘连, 并辅以硅橡胶缓冲应力, 构建复合粘接体系; 其次, 建立多物理场耦合仿真模型, 分析静态力学载荷及 PCB 焊接热传导 (200 °C) 对探测器感光面的应力应变与位移影响, 并实现点胶量精准量化; 最后, 通过环境试验验证方案可靠性与稳定性。结果表明, 该方案经闭环设计, 有效解决高精度粘接难题, 环境试验前后经显影三坐标测量仪检测探测器共面精度为 0.019 mm、直线精度 0.0021 mm, 搭接精度优于 0.005 mm, 满足空间光学载荷对于探测器组件拼接精度的要求, 为该类型探测器组件精密粘接提供标准化技术基础, 具有重要工程应用价值。

关键词: 空间光学载荷; 探测器组件; 环氧粘接; 仿真分析; 拼接精度

中图分类号: TP73; V461

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2026-0048

CSTR: 32171.14.CO.2026-0048

Design and verification of adhesive layer for detector assembly of space optical payload

ZHAO Yue, LI Jia-jun, FU Xing*

(Assembly and Calibration Technology Research Center, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

* Corresponding author, E-mail: fuxing@opt.ac.cn

Abstract: To meet the high-resolution imaging requirements of space-based optical payloads and address the challenge of ensuring reliable bonding between detectors and structural frames under extreme environmental conditions, this paper proposes a collaborative optimization scheme for the bonding of detector assemblies. Firstly, in accordance with the space environmental adaptability requirements of optical payloads, a systematic comparison of the core performance characteristics of commonly used adhesives was conducted. Epoxy resin was adopted as the primary bonding agent to ensure rigid and dependable attachment between the imaging unit and the support frame, while silicone rubber was employed to provide stress-buffering capability, forming a composite adhesion architecture. Subsequently, a multiphysics coupled simulation model was developed to investigate the influences of static mechanical loads and PCB soldering thermal conduction

收稿日期: 2026-03-24; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 基金项目国家重点研发计划“引力波探测”重点专项 (2021YFC2202100)。

This research was funded by the National Key Research and Development Program of China (Grant No.2021YFC2202100), “Gravitational Wave Detection” Key Project.

(200°C) on the stress, strain, and displacement of the photosensitive surface of the device while achieving quantitative control of adhesive. Finally, the reliability and stability of the scheme were verified through environmental testing. The results demonstrate that the closed-loop design effectively resolves the challenge of high-precision assembly. Pre- and post-test inspection using a coordinate measuring machine confirmed a coplanarity precision of 0.019 mm, a linearity precision of 0.0021 mm, and an overlap precision better than 0.005 mm. These performance levels satisfy the splicing accuracy requirements for detector components in space optical applications, providing a standardized technical foundation for the precision bonding of this type of detector component and holding significant engineering application value.

Key words: space optical payload; detector assembly; epoxy bonding; simulation analysis; splicing accuracy

1 引言

随着我国航天技术在空间领域持续突破的背景下,空间光学载荷作为航天器实现对地观测的核心组件,其性能升级与技术革新直接关系到观测任务的成像质量。当前,大视场覆盖、宽画幅成像、高分辨率探测已成为该领域的核心发展方向,引领着空间光学载荷技术的迭代更新。作为空间光学载荷成像链路的关键核心器件,探测器的性能参数对光学载荷整体观测能力起着决定性作用^[1-3]。然而,受限于当前加工工艺水平与核心技术瓶颈,现有探测器的物理尺寸远无法匹配大视场、高分辨率光学系统所需的像面尺寸。这一局限直接制约了光学载荷的视场拓展,使得探测器有效尺寸成为破解光学系统“长焦距与大视场”固有矛盾的核心制约因素,也为后续技术攻关明确了关键方向。

像面拼接技术已成为突破探测器有效尺寸局限、实现大靶面成像的行业主流方案。其中,机械拼接以高效实用的技术特性获得广泛应用。作为机械拼接核心技术中的关键环节,探测器组件粘连工艺的精度与可靠性直接决定多片小尺寸探测器组装形成大面积感光阵列的最终效果,更是破解光学系统核心矛盾、保障空间光学载荷观测性能的重要基石,其技术优化与工艺创新在航天对地观测领域的发展具有重要意义。

目前针对探测器的固定方式是通过压板进行紧固限位的^[4-5]。然而,当探测器对外力耐受度低或处于装配精度有严苛要求的应用场景时,采用压板压紧的紧固限位方式,容易导致探测器产生变形,进而影响大靶面的拼接精度与光学载荷的成像性能。借鉴与光学透镜组粘接相近的装配方

式^[6-7],将探测器内嵌至结构外框中,以接触面为基准,在探测器外部轮廓上采用连续点胶粘接、等间距多点点胶粘接以及连续点胶与多点点胶相结合的复合点胶方式固定。

本文针对某空间光学载荷探测器组件粘接开展粘接胶层设计与验证。结合光学载荷在轨空间环境要求,选取以环氧树脂胶为主、硅橡胶为辅的复合粘接体系,并通过多物理场耦合仿真量化点胶量,最终经环境试验与拼接精度检测验证该方法的可靠性。

2 探测器组件结构设计

2.1 原理分析

高光谱相机对目标推扫成像时,空间分辨率所提供的信息为一维分布,而光谱特性经光栅色散后在垂直方向展开,形成一个二维像面。受限于制造工艺的约束,传统单一探测器在上述成像应用时,易产生有效成像像元丢失与光谱范围覆盖不足的问题。而“品”字形拼接,正是有效解决上述这一核心瓶颈的突破性架构,即通过对相机在焦面位置上二维空间的精密排列,将原本需要复杂工艺确保的探测面分解为三个在不同维度上协同作用的子系统,如图 1 所示。“品”字形拼接架构允许具有不同波段的探测器组件优化后独立成像于焦平面,并在共用光路的协调工作下,从物理层面上实现全谱段、高分辨率的数据获取,进而提升高光谱相机的成像质量。

然而,这种设计远非简单的物理位姿校正,而是一种通过光、机、电的相互协同作用实现“功能重组”,即如何确保三个独立探测器在复杂工况下,始终保持彼此之间相对于光学基准的微米级

位置稳定性。作为探测器与结构外壳之间连接的粘接剂是影响系统性能成败的关键因素。粘接结构不仅需要承受力学振动与热循环载荷,还必须保证探测器在宽温范围下不产生位移与形变,否则将导致探测器感光面通道存在较大的配准误差,进而降低“品”字形拼接的精度。因此,粘接剂的选取已不再是简单的装配问题,而是直接关系到光学系统整体性能与可靠性的核心设计要素,必须进行系统性的评估与优化。

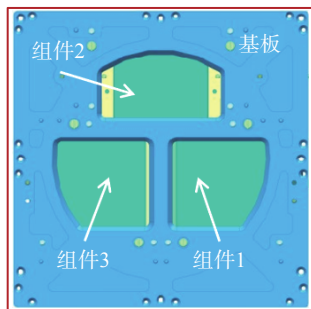


图 1 拼接示意图

Fig. 1 Splicing schematic diagram

2.2 粘接原理

上文中所述的“品”字形探测器拼接是通过三个独立探测器组件的空间排布形成稳定支撑结构,其应用核心是采用轴向注胶与底部注胶配套结合而成的复合粘接体系。该结构的关键技术难点在于胶层界面的匹配性设计,即胶粘剂的热力学强度与探测器组件的精密粘接以保证粘接界面的长期可靠性。

针对这一需求,结构外壳在其周向区域均匀

布设置 14 个主注胶点,利用周向环绕式粘接提供探测器径向的刚性约束,是承载主要装配应力的核心粘接单元;同时,在探测器与外壳的安装贴合面增设 8 个辅助注胶点,通过面接触式粘接补充轴向支撑,并优化界面应力分布。两种注胶点位的协同作用形成了“周向约束与端面辅助”支撑的复合粘接体系,有效提升了探测器与结构外壳粘接的稳定性,可满足复杂工况下的力学与环境适应性要求。

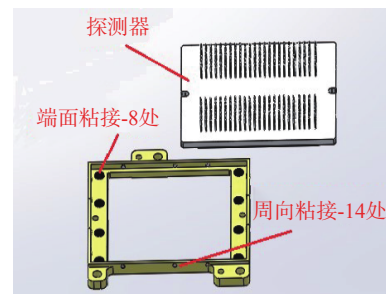


图 2 粘接示意图

Fig. 2 Bonding schematic diagram

3 探测器组件胶粘设计

3.1 粘接剂的选择

探测器与结构外壳是通过胶粘剂进行有效粘连的。为了使探测器组件具备良好的粘接性能,对目前常用的粘接剂性能进行有相关分析,包括环氧树脂胶、UV 胶、聚氨酯胶、硅橡胶等,结果如表 1 所示。

表 1 粘接剂性能比对

Tab. 1 Comparison of adhesive properties

名称	性能优点	固化方式	适用场景
环氧树脂胶	粘接强度高,固化收缩率低,耐候性好	常温固化	环境适应性要求较高的光学设备
UV胶	粘接强度高,固化速度可控,透明度高	紫外线照射	光学仪器中需快速固化的透镜耦合粘接
聚氨酯胶	粘接强度高,透明度高,耐低温	常温或加热固化	需要承受一定机械应力或在低温环境下工作的光学元件粘接
加拿大胶	天然树脂胶,透明度良好,折射率匹配范围宽	加热固化	传统光学镜头胶合等对性能要求相对不高的场景
硅橡胶	高强度与良好的柔韧性,耐高低温、防震	常温固化	适用非承重辅助粘接

综合实际工程应用场景、长期实践经验及粘接组件的性能需求,本文选取硅橡胶与环氧树脂胶作为探测器组件的核心粘接剂,并基于二者性能互补性设计复合粘接方案。硅橡胶具有优异的耐冲击性能与宽温域适应特性(适用温度范围为

-60 °C~200 °C),可有效应对探测器在复杂工况下的温度波动与力学冲击载荷,但其胶层厚度偏大、线胀系数偏高,在长期使用时易产生应力累积;而环氧树脂胶的胶层厚度较薄(通常推荐为 0.03 mm~0.25 mm)、线胀系数小且粘接强度高,能

实现探测器组件的紧密贴合与结构加固,不过其耐热性能相对有限,适用温度区间为 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,难以单独满足高温环境下的粘接可靠性要求。

基于上述各粘接剂性能差异并结合工程实际应用需求,在探测器核心功能区域及需承受高力学载荷的关键粘接部位,优先采用环氧树脂胶实现高强度固定,利用其低线胀系数的特点减少温度变化引发的界面变形,保障结构稳定性;在探测器与外壳接触部位、易受冲击或温度波动剧烈的非核心区域,选用硅橡胶进行辅助粘接与缓冲防护,通过其宽泛的温度适应性与抗冲击性抵消环氧树脂胶的耐热短板及应力集中问题。两种胶粘剂的协同作用,既规避了单一材料的性能局限,又实现了粘接强度、环境适应性与结构兼容性的综合优化,为探测器在复杂工况下的长期稳定运行提供技术保障。

3.2 探测器组件胶层解算

按照上文中对探测器组件结构的分析,将探测器组件胶层解算分解为侧面胶粘与底面胶粘两部分,而侧面胶粘则作为探测器与结构外壳固定的主要方式。由于探测器组件粘接工作是在实验室恒温恒湿环境中进行,且粘接件之间的热膨胀系数不同,当真实使用环境温度发生变换时,不可避免地使胶层产生内应力,从而造成探测器感光面发生形变。

针对上述问题,Bayar^[8]首次在光学透镜与结构镜框的粘接中提出基于无热粘接的胶层厚度计算方法,被广泛应用于光学透镜与金属结构件的入框密封胶粘接。而探测器与结构外壳的粘接也类似于光学透镜入框密封胶。图3为探测器组件参数示意图^[9],建立右手标系:以胶层厚度方向(指向结构外壳)为X轴正方向;以探测器感光面反向(即从感光面指向基板)为Y轴正方向;根据右手定则,可确定Z轴正方向垂直纸面向内。

根据上图所示,在探测器组件粘接胶层解算时,仅将径向的热膨胀作为主要约束条件,通过消除粘接胶层产生的内应力实现无热化粘接。而X轴向,作为探测器组件粘接的主要区域,由探测器、胶层、结构外壳相互关联而成。在实际工程中,会因各部件材料的热膨胀系数差异产生热应力,由胡克定律可知^[10],其径向热应力为

$$\sigma_x = \frac{E[(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)]}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (1)$$

式中 E 为粘接胶的弹性模量; ν 为粘接胶的泊松比; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 为粘接胶在X轴向、Y轴向、Z轴向的应变。

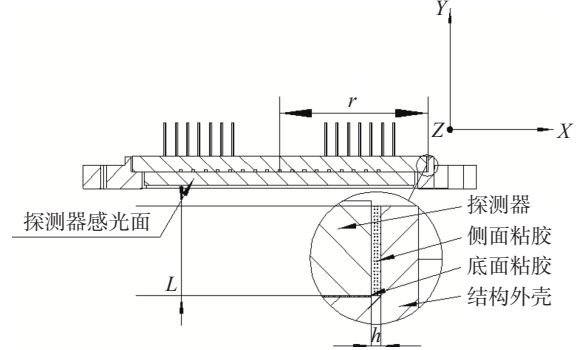


图3 探测器组件参数示意图

Fig. 3 Detector assembly parameter diagram

为了实现无热化粘接,要求粘接剂在X轴向的应力为0,即

$$(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z) = 0, \quad (2)$$

由公式(1)可知,粘接剂在X轴向的应力主要由探测器与结构外壳之间的间隙来确定,而其余两个方向的应力则需要通过构建新的约束假设条件,即当X轴向的偏差函数 δh 数表示为温度变化时胶层厚度的非约束变化与实际变化之差,则

$$\delta h = h\alpha_{\text{胶}}\Delta T - [(r+h)\alpha_{\text{座}}\Delta T - r\alpha_{\text{探}}\Delta T], \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\delta h}{h} = \frac{h\alpha_{\text{胶}}\Delta T - [(r+h)\alpha_{\text{座}}\Delta T - r\alpha_{\text{探}}\Delta T]}{h} \\ &= \Delta T(\alpha_{\text{胶}} - \alpha_{\text{座}} - \frac{r}{h}(\alpha_{\text{座}} - \alpha_{\text{探}})), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\alpha_{\text{胶}}$ 、 $\alpha_{\text{座}}$ 、 $\alpha_{\text{探}}$ 分别为粘接胶、结构外框以及探测器的热膨胀系数; r 为探测器的外形尺寸(如图3所示); ΔT 为温度变化量; h 为粘接胶层的厚度。

然而,上述过程只存在于理想状态,范志刚^[11-12]等将粘接过程中所涉及的各零部件结构参数引入Bayar方程中,得到不同胶宽比下的胶层厚度解算方程。由于本文中所涉及的胶层高宽比小于1/10时,则其厚度解算方程为

$$h = \frac{r(\alpha_{\text{座}} - \alpha_{\text{探}})}{\alpha_{\text{胶}} - \alpha_{\text{座}} + \frac{\nu}{1-\nu} \left[\left(2 - \frac{h}{2L} \right) \alpha_{\text{胶}} - \frac{3}{4}(\alpha_{\text{探}} + \alpha_{\text{座}}) \right]}, \quad (5)$$

其中, L 表示粘接面的宽度。按照上文所述,在进行探测器与结构外壳粘接前,使用三坐标测量仪

对各粘接零件的外部尺寸进行测量, 最终确定探测器与结构外壳的粘接高宽比为 0.029, 符合公式(5)作为探测器组件胶层厚度解算方程的相关使用约束条件。

由于探测器组件随高光谱相机由运载火箭发射至相关预定轨道, 在此过程中不可避免地会承受各种力学响应。为了进一步确保探测器组件粘接的牢固度及光电性能, 需对探测器与结构外壳的最小粘接面积进行求解, 即

$$Q_{\min} = Wa_g f_s / J \quad (6)$$

公式(6)中, 探测器组件的重量 W 为 0.04 kg; 恶劣条件下的瞬间冲击加速度 a_g 为 200 g; 为了确保探测器组件的粘接牢固度, 安全系数 f_s 为 4; J 为粘接剂的剪切强度。计算可知当粘接剂为环氧树脂胶时, 最小粘接面积为 1.52 mm²; 当粘接剂为硅橡胶时, 最小粘接面积为 27.82 mm²。

环氧树脂胶作为探测器与结构外壳的主粘接剂, 其胶层厚度与粘接强度的对应关系如图 4 所示, 当胶层厚度大于 0.2 mm 时, 环氧树脂胶的剪切强度明显下降。根据公式(5)、公式(6)的计算得到各点注胶量为 4.7 μ l。同理, 得到硅橡胶的注胶量为 20.7 μ l。

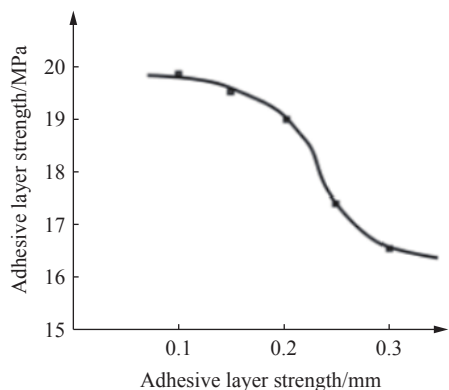


图 4 胶层厚度与剪切强度关系^[13]

Fig. 4 Relationship between adhesive layer thickness and shear strength

3.3 探测器组件粘接的可靠性分析

探测器组件作为高光谱相机成像系统的核心, 其感光面的形变直接决定系统成像精度等关键指标, 而微米级甚至纳米级的形变偏差即可能导致光学性能大幅衰减, 因此感光面形变控制是组件粘接的核心约束条件。探测器通过环氧树脂胶与结构外壳粘接固定后, 静力学环境下会通过粘接

界面形成复杂力学传递路径, 还易因装配操作偏差产生粘接偏心问题, 使探测器与结构外壳的中心轴线不重合, 导致胶层厚度沿周向分布不均, 造成胶层收缩应力分布失衡, 从而在胶层固化收缩存在非线性特征的基础上进一步加剧力学载荷的非对称传递导致感光面产生非对称翘曲、局部凹陷或倾斜形变。为了避免上述问题在实际粘接时发生, 确保结果的真实性, 有限元仿真分析需满足两项核心建模要求: 一是仿真模型需完全复刻实际粘接零部件的关键特征, 包括探测器与结构外壳的几何尺寸、材料属性等, 以及胶粘剂的力学参数与实际粘接界面形态, 确保模型能精准映射真实结构的力学传递特性; 二是在模拟探测器组件粘接过程中, 需通过预设约束条件强制探测器始终处于结构外壳的中心位置, 严格保证胶层沿周向厚度均匀分布, 消除装配偏心带来的应力分布失衡干扰, 使仿真结果能真实反映粘接胶层对感光面形变的影响^[14-15]。将探测器组件进行网格划分, 如图 5 所示, 其中针对胶层采用更密的网格进行表征处理, 总计设置节点 328 071 个, 单元 196 862 个。

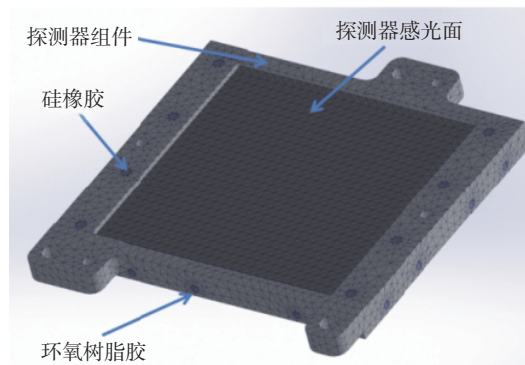


图 5 探测器组件网格划分

Fig. 5 Detector assembly meshing

探测器与结构外壳固定时, 除采用标准塞尺实现探测器居中定位、保证胶层周向厚度均匀外, 还需通过专用工装限制探测器轴向位移, 避免粘接过程中因胶层流动或外力扰动导致轴向位置偏移。仿真建模时, 需在探测器背部施加轴向约束载荷, 建议取值 10N(可根据实际粘接面积进行相应配准), 精准复刻工艺层面的轴向限位条件, 确保仿真模型与实际粘接过程的力学边界完全一致。最终仿真结果显示, 探测器组件在静力学状态下的感光面未发生明显的位移变化, 且表面的应力应变均处于较低的水平, 如图 6 所示。

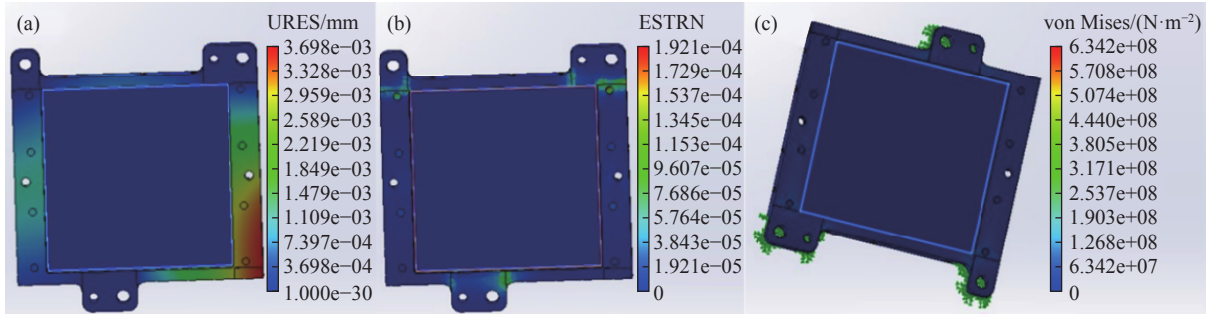


图 6 静态力学仿真结果

Fig. 6 Static mechanical simulation results

QJ3117A-2011《航天电子电气产品手工焊接工艺技术要求》作为探测器针脚与 PCB 焊接的工艺标准,规定焊接温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,单点时长 $2\sim 3$ 秒,总时长约 30 秒,单引脚焊料体积约 0.5 mm^3 ,环境温度 $25\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,并通过自然对流在焊接时进行散热。然而, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热源会通过多引脚与壳体构成热传导网络,使探测器组件内部温度快速持续变化,进而导致感光面、壳体与胶粘剂因热膨胀系数差异而产生应力应变与位移,从而引发不可逆形变。为严谨评估上述热传导的影响,依据实际边界条件建立探测器组件与 PCB 板的

有限元仿真模型(如图 7 所示),并对探测器感光面开展瞬态热-结构耦合仿真,结果如图 8 所示。

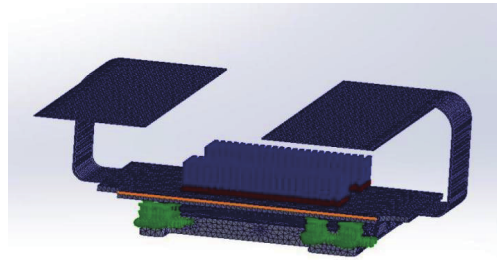


图 7 热传导有限元模型

Fig. 7 Finite element model of heat conduction

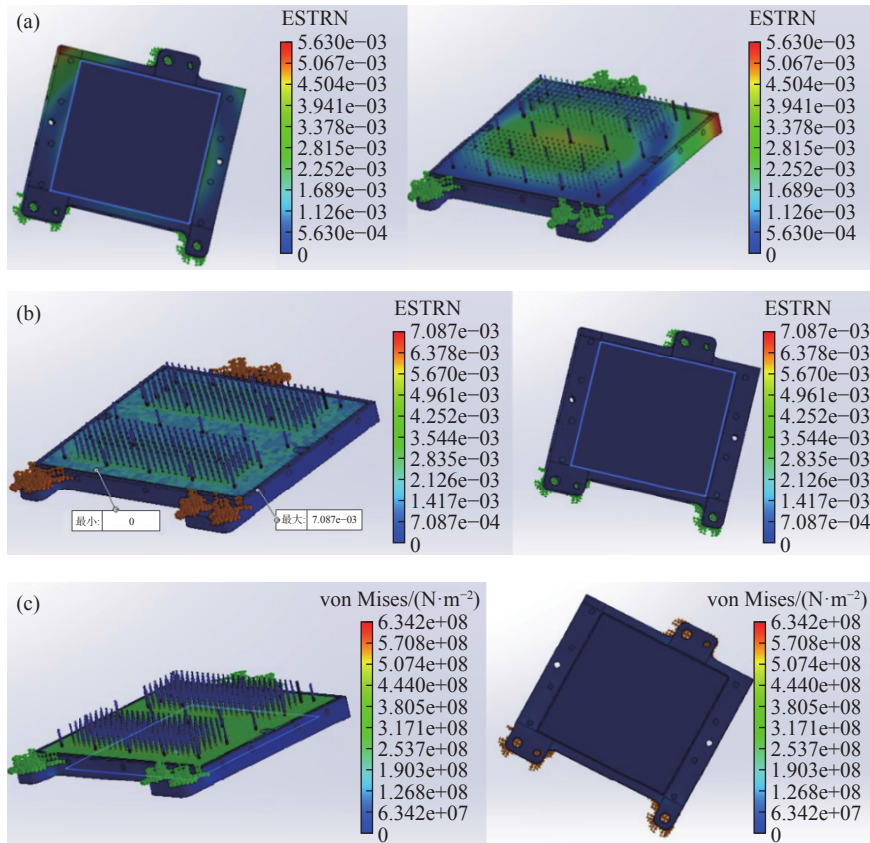


图 8 热传导仿真

Fig. 8 Heat conduction simulation

仿真结果显示:在探测器针脚焊接过程中,热传导的影响主要集中于探测器背部外壳区域,该区域的最大位移达 5.63×10^{-3} mm,最大应变为 7.087×10^{-3} ;而应力则显著集中在针脚与探测器基底的连接部位。反观探测器的感光面,其位移、应变及应力均未出现明显波动。上述结果表明,本文所采用的环氧胶与硅橡胶构成的复合粘接体系不会引发感光面的不可逆形变。

4 试验验证与分析

4.1 探测器组件粘接

根据仿真分析结果,按照上述步骤完成探测器组件的粘接。首先,使用三坐标测量仪测量结构外壳与探测器安装贴合面的平面度需满足 0.01 mm 偏差;在此基础上,使用环氧树脂胶与硅橡胶按照图 2 所示胶粘方法,完成探测器与结构外壳的最终粘接。图 9 为实际粘接的探测器组件。

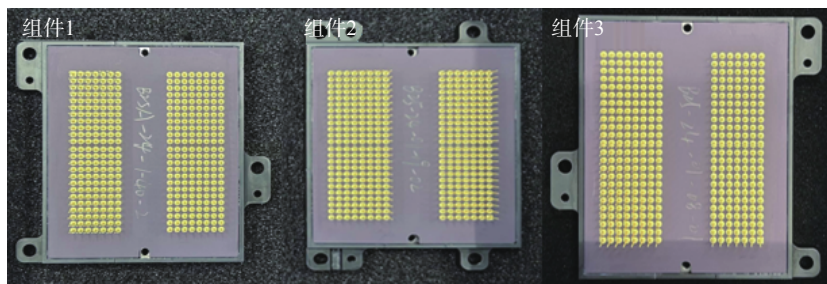


图 9 探测器组件

Fig. 9 Detector assembly

4.2 试验前姿态测量

为保障探测器组件位姿参数匹配高光谱相机焦面系统设计指标,实现“品”字形精密拼接,将经高精度粘接固定的三块探测器组件按图 10 空间排布基准依次装配至拼接基板预设工位,完成初步定位。然后采用高精度三坐标测量仪(精度 ± 0.001 mm)对组件空间姿态进行测量。针对直线度优于 0.003 mm 的指标要求,该测量设备单次精度虽处于公差带临界值,但可通过多次重复测量取算术平均值,并对基准面进行最小二乘

拟合等误差分离的数据处理方法,能将有效测量不确定度控制在 ± 0.0005 mm 以内,实现对探测器组件拼接精度的有效控制。

共面精度测量作为探测器组件焦面拼接的核心,其测量精度直接决定焦面拼接质量与光学系统整体成像性能,针对该核心指标的测量数据解析,以单片探测器组件四角特征点为基准,通过对目标信息的采集与数据处理,解算得到特征目标的对比度^[16-17],最后根据公式(9)得到对比度与传递函数的对应关系,完成最终特征目标信息高效、精准提取, I 表示为灰度值。

$$MTF(f) = \frac{\pi}{4} \times \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (7)$$

实际图像信息提取与测量环节,根据视觉相机检测镜头的焦深构建统一采样区间,通过扫焦试验绘制扫焦曲线,从曲线特征中提取 MTF 最优值;借助检测镜头在显影三坐标测量仪中的精准定位,完成特征目标的位置标定,进而实现探测器组件四角的共面性测量,该测量过程如图 11 所示。以此次测量结果为基准,对探测器组件开展精密调整,最终实现探测器四角共面度小 0.02 mm,满足小于 0.025 mm 指标要求;基于上述方法,完成其余两块探测器组件的共面性一致性测量与验证。

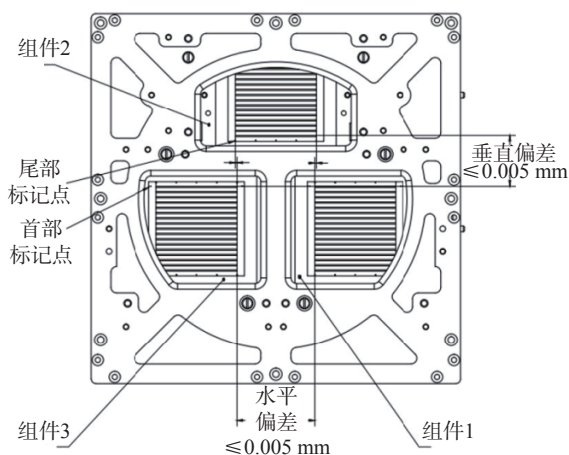


图 10 拼接示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the splicing

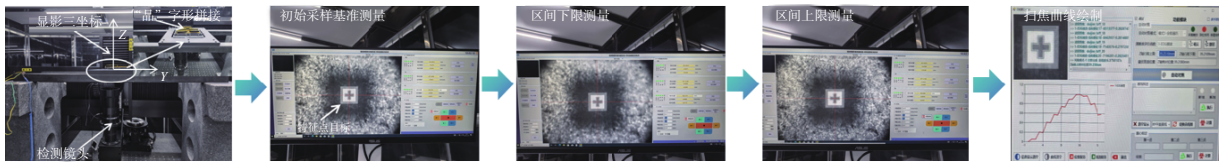


图 11 共面精度测量流程

Fig. 11 Coplanarity accuracy measurement process

针对探测器组件的直线度测量,选取探测器感光面边缘像素点为测量基准,构建显影三坐标测量仪空间坐标系,并定义测量仪

Z轴为垂直方向、Y轴为水平运动方向、X轴垂直纸面向外。将探测器组件的测量基准引入至Y轴,通过检测镜头对探测器感光面沿Y轴方向进行直线推扫,以X轴方向的偏移量表征推扫后探测器组件的直线度偏差,最终依据偏差值完成组件的精密调整,进而使得探测器组件的直线度精度可达0.0021 mm,满足小于0.003 mm指标要求,为后续多组件拼接奠定高精度直线基准。

完成三块探测器组件的共面性、直线度精密检测与调整后,依据图10中标定的特征点在水平、垂直方向的理论偏差量,结合前期测量得到的精度参数进行补偿修正,并在此基础上对三块探测器组件进行空间位置的精准排布与固定,最终实现探测器组件的“品”字形高精度拼接,如图12所示。

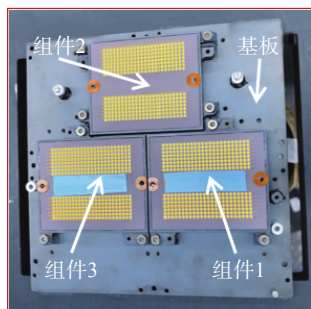


图 12 “品”字形拼接

Fig. 12 “Pin” shape splicing

4.3 试验验证

探测器组件“品”字形高精度拼接在微振动的实验室环境下完成(隔振等级为VC-D级),其拼接精度完全满足设计指标。该组件作为高光谱相机成像系统的核心器件,其结构稳定性与拼接精度直接决定相机在轨成像质量。实际应用中,“品”字形探测器组件采用专用热控系统,可实现 ± 0.2 °C的高精度控温,能够将组件工作温度稳

定控制在适配温区(-15 °C ~ +50 °C)内。该控温精度属于较高工程要求,需通过精密热控设计方可实现,可有效抑制热变形对探测器拼接精度的影响。尽管热控条件可靠,火箭发射阶段的强振动环境仍是影响组件粘接结构稳定性的关键因素,易引发粘接界面微变形,导致探测器空间位姿偏移,使共面度、直线度等核心装配指标超出设计允许范围,最终造成拼接精度衰减失稳。为确保探测器组件始终具有良好的结构稳定性与高精度,同时消除振动工况下的不确定性,必须开展系统性力学环境试验,为其在轨应用提供核心保障。

为了更好地监测振动过程中的力学响应反馈,在基板中心位置设置监测点,如图13所示。将拼接完成的探测器组件与专用试验工装精准连接,随后整体安装于振动试验台,按照表2先进行低量级的特征扫频,在此基础上,按照表3力学试验条件完成X轴、Y轴以及Z轴三个方向的随机振动。试验过程如图14所示。

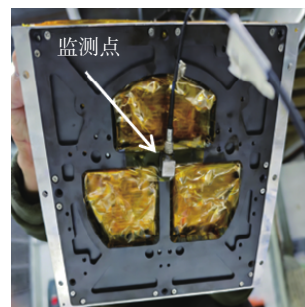


图 13 试验前准备

Fig. 13 Pre-test preparation

表 2 低量级特征扫频试验条件

Tab. 2 Low-Level characteristic sweep test conditions

频率范围(Hz)	5 ~ 500
振动量级(O-P)	0.5 g
加载方向	X、Y、Z向
扫频速率	4 Oct/min

表 3 随机振动试验条件
Tab. 3 Random vibration test conditions

频率范围(Hz)	20 ~ 100	100 ~ 600	600 ~ 2000
功率谱密度	+3dB/Oct	0.04g ² /Hz	-6dB/Oct
总均方根加速度	6.23g rms		
试验方向	X轴、Y轴、Z轴		
试验时间	2min / 轴向		

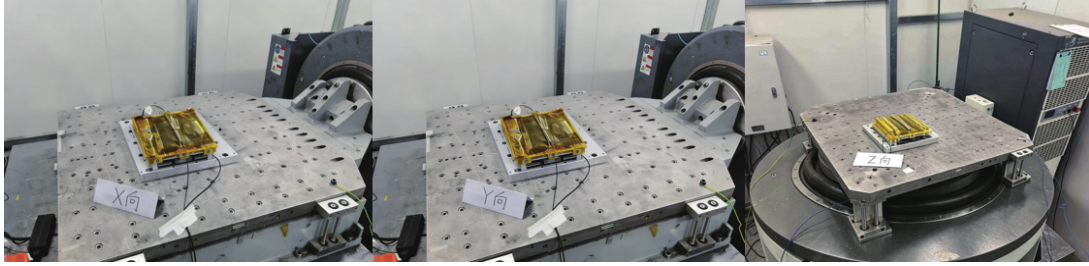


图 14 试验现场

Fig. 14 Test Site

4.4 拼接精度复测

试验结束后,将探测器组件装夹至显影三坐标测量仪并置于原实验环境中静置,待其各项性能参数恢复至稳定状态,并严格复现试验前的定位姿态与测量工况。在此基础上,完成组件共面性与直线精度的复测工作,测得共面(探测

器四角特征点)精度小于 0.019 mm、直线精度为 0.0021 mm,满足指标设计要求,具体数据如表 3 所示。上述复测结果表明,该探测器与结构组件的粘接工艺具备良好的结构稳定性与可靠性,能够确保“品”字形拼接探测器组件在经历环境试验后,仍具有较高的装调精度及稳定性。

表 4 数据复测
Tab. 4 Data verification by re-measurement

	共面测量/mm		直线度测量/mm				拼接精度/mm	
			X ₁₁	Y ₁₁	X ₁₂	Y ₁₂	X方向	Y方向
组件1	39.2549	39.2609						
	39.2609	39.2589	0.0019	-43.0149	0	0		
组件2	39.2499	39.2509	X ₂₁	Y ₂₁	X ₂₂	Y ₂₂		
	39.2429	39.2499	-26.9462	-85.1684	-26.9459	-42.1519	0.0039	0.0024
组件3	39.2619	39.2559	X ₃₁	Y ₃₁	X ₃₂	Y ₃₂		
	39.2599	39.2599	-26.9483	-0.8560	-26.9504	42.1616		
最大偏差	0.019		0.0021				0.0011	0.0026

5 结 论

针对空间光学载荷高分辨率成像需求,为解决探测器与结构外框粘接可靠性在极端环境下的应用难题,本文提出并验证一种探测器组件复合粘接方案。首先完成粘接剂选型,构建以环氧树脂胶为主体、硅橡胶为辅助的复合粘接体系;结

合静力与热传导仿真分析,精准确定环氧树脂胶点胶量 4.7ul、硅橡胶点胶量 20.7ul 的量化控制参数。以显影三坐标测量仪为标定基准,经环境试验验证,该方案成功实现“品”字形探测器组件的高精度拼接,其共面精度 0.019 mm、直线度 0.0021 mm,搭接精度 0.005 mm,组件整体稳定性满足设计指标。此方案建立了标准化技术框架,为同类型探

测器组件的精密粘接提供了数据积累,特别是“品”字形探测器组件高精度拼接。本文采用设计、仿真与验证的全流程技术方案,对空间光学组件精密测量技术研发具有重要工程应用价值。

参考文献:

- [1] SAKO T, SEKIGUCHI T, SASAKI M, *et al.*. MOA-cam3: a wide-field mosaic CCD camera for a gravitational microlensing survey in New Zealand[J]. *Experimental Astronomy*, 2008, 22(1): 51-66.
- [2] 徐江涛, 王欣洋, 王廷栋, 等. 光学视觉传感器技术研究进展[J]. *中国图象图形学报*, 2023, 28(6): 1630-1661.
XU J T, WANG X Y, WANG T D, *et al.*. Review on optical visual sensor technology[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2023, 28(6): 1630-1661. (in Chinese).
- [3] 龚大鹏. 航天遥感相机焦平面技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
GONG D P. *Research on focal plane technology of space remote-sensing camera*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese).
- [4] 曾戈虹, 史衍丽, 庄继胜. II类超晶格红外探测器的机理、现状与前景[J]. *红外技术*, 2011, 33(6): 311-314.
ZENG G H, SHI Y L, ZHUANG J SH. Principles, status and prospect of type II superlattice infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(6): 311-314. (in Chinese).
- [5] 马小梅, 董吉洪, 李延春, 等. 空间光学遥感器 CCD 焦面组件的设计与分析[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(7): 321-324.
MA X M, DONG J H, LI Y CH, *et al.*. Design and analysis of CCD focal plane for space optical remote sensor[J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(7): 321-324. (in Chinese).
- [6] 杨利伟, 李志来, 薛栋林. 结构胶固化收缩对反射镜面影响的分析与试验[J]. *光学技术*, 2014, 40(4): 307-312.
YANG L W, LI ZH L, XUE D L. Analysis and test for effect of structural adhesive shrinkage during curing on mirror surface[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(4): 307-312. (in Chinese).
- [7] 熊健, 张之敬, 陈骁, 等. 精密光学元件胶接装配性能研究进展[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(22): 364-384.
XIONG J, ZHANG ZH J, CHEN X, *et al.*. Review for assembly performance of precision optical elements subjected to adhesive bonding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(22): 364-384. (in Chinese).
- [8] AHMAD A. *Handbook of Optomechanical Engineering*[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [9] 李金辉, 朱英博, 丛杉珊, 等. 空间遥感相机轻型探测器组件粘接方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(6): 202400.
LI J H, ZHU Y B, CONG SH SH, *et al.*. Research on bonding method of light detector assembly of space remote sensing camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(6): 202400. (in Chinese).
- [10] 范志刚, 常虹, 陈守谦. 透镜无热装配中粘结层的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2573-2581.
FAN ZH G, CHANG H, CHEN SH Q. Design of bonding layer in lens athermal mount[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2573-2581. (in Chinese).
- [11] 张家齐, 郭艺博, 张友建, 等. 机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(3): 578-586.
ZHANG J Q, GUO Y B, ZHANG Y J, *et al.*. Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 578-586. (in Chinese).
- [12] BAYAR M. Lens barrel optomechanical design principles[J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(2): 202181.
- [13] 刘强, 何欣. 反射镜用光学环氧胶粘接固化工艺研究[J]. *机械设计与制造*, 2011(2): 118-120.
LIU Q, HE X. Investigation on solidification technics of pastern in space mirror[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(2): 118-120. (in Chinese).
- [14] 赵天骄, 乔彦峰, 孙宁, 等. 经纬仪主镜在支撑系统下的面形变化[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 477-483.
ZHAO T J, QIAO Y F, SUN N, *et al.*. Surface deformation of theodolite primary mirror under the support system[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 477-483. (in Chinese).
- [15] 韩旭, 吴清文, 董得义, 等. 室温硫化胶层建模在透镜结构分析中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 118-125.
HAN X, WU Q W, DONG D Y, *et al.*. Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 118-125. (in Chinese).
- [16] 张黄轲, 李子凡, 施文恺, 等. 基于哈特曼探测器的光学传递函数测量方法研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(4): 819-829.

ZHANG H K, LI Z F, SHI W K, *et al.*. Optical transfer function measurement based on Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 819-829. (in Chinese).

[17] 郭乃菲, 孙亮, 何玲平, 等. 基于紫外增强空间光调制技术的单光子计数成像探测系[J]. *光学精密工程*, 2026, 34(1): 44-52.

GUO N F, SUN L, HE L P, *et al.*. Single-photon-counting imaging detection system based on UV-enhanced spatial light modulation technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2026, 34(1): 44-52. (in Chinese).

作者简介:



赵岳 (1990—), 男, 陕西西安人, 硕士 (毕业于西安电子科技大学), 现为中国科学院西安光学精密机械研究所工程师, 主要研究方向: 复杂光学系统精密装调工艺技术研究。E-mail: zhaoyue900403@163.com



付兴 (1982—), 男, 陕西西安人, 硕士 (毕业于西安工业大学), 现为中国科学院西安光学精密机械研究所正高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 大口径复杂光学系统超精密测量技术。E-mail: fuxing@opt.ac.cn