

文章编号: 1672-8785(2021)03-0017-08

RTV566 硅橡胶在航天红外低温镜头中的应用研究

童卫明 白绍竣 邢 辉 聂云松

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘 要: 为了验证 RTV566 硅橡胶用于航天红外低温镜头的可行性, 测试了它的低温力学性能, 并开展了基于该胶的试验透镜低温面形测试研究。首先, 设计和制作了 RTV566 硅橡胶拉伸试验件, 并通过静力拉伸试验获得了该胶与锗、钛合金的粘接强度及其弹性模量。然后设计并投产了低温透镜试验件。利用 RTV566 硅橡胶将透镜粘接到镜框内, 并在镜框粘接面周围设计柔性结构, 且通过 ZYGO 干涉仪测试透镜的低温面形。拉伸试验结果表明, 从常温到 180 K 时该胶的弹性模量基本没有变化, 其平均值约为 6 MPa; 剪切强度和拉伸强度在从常温到 200 K 时基本没有变化, 到 180 K 时有一定的增加。透镜组件的低温面形测试结果表明, 从常温到 200 K 时平面面形基本没有变化, 其精度优于 $1/30\lambda$ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。这说明卸载结构和 RTV566 硅橡胶的共同作用很好地卸载了热应力, 保证了透镜面形。本文的研究工作表明, RTV566 硅橡胶可用于 200 K 及以上的空间红外低温镜头支撑结构。

关键词: RTV566; 航天; 低温镜头; 红外

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.03.004

Research on the Application of RTV566 Adhesive in Space Infrared Cryogenic Lens

TONG Wei-ming, BAI Shao-jun, XING Hui, NIE Yun-song

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to verify the application feasibility of RTV566 adhesive in space infrared cryogenic lens, the low temperature mechanical properties of RTV566 are tested, and the low temperature surface shapes of the experimental lens based on RTV566 are tested and studied. Firstly, RTV566 adhesive tensile test samples are designed and manufactured. And the bonding strength with germanium and titanium alloy, as well as the elastic modulus of the adhesive are obtained through static tensile test. Then the cryogenic lens test sample is designed and put into production. RTV566 adhesive is used to bond the lens into the frame, and a flexible structure is designed around the adhesive surface of the lens frame. The low temperature surface shapes of the lens are tested by ZYGO interferometer. The tensile test results show that the elastic modulus of the adhesive almost does not change from room temperature to 180 K, and the average value approximates to 6 MPa. The

收稿日期: 2020-10-25

作者简介: 童卫明(1989-), 男, 河南信阳人, 工程师, 主要研究方向为光机结构设计与分析。

E-mail: TWM08Acoustics@163.com

shear and tensile strength almost do not change from room temperature to 200 K, but increase at 180 K. The test results show that the surface shape of the lens almost does not change from room temperature to 200 K, whose accuracy is better than $1/30\lambda$ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$). It indicates that the flexure structure and RTV566 adhesive reduce thermal stress, and ensure the surface shape of the lens. The research in this paper shows that RTV566 adhesive can be used in the support structure of space infrared cryogenic lens at 200 K and above.

Key words: RTV566; space; cryogenic lens; infrared

0 引言

采用红外相机探测目标的温度特性时, 如果镜头与目标的温度接近, 那么探测到的目标信号就会十分微弱。此外, 为了抑制视场外杂光, 红外光学系统通常要求冷光阑匹配。当像面尺寸较大时, 光学系统的设计十分困难。采用低温光学技术可以使镜头光学元件在低于 270 K 的温度下工作, 从而有效解决上述两个问题。近年来, 对地观测和天文观测相机都大量采用了红外低温光学技术^[1-2]。当镜头工作在低温下时, 反射镜或透镜材料与支撑结构材料的线膨胀系数不一致, 导致它们从常温到低温时的形变不一致。因此需要采用特殊的支撑方式来消除该问题对反射镜或透镜面形的影响。

目前, 低温镜片支撑结构主要包括无热化支撑、弹簧预载支撑和柔性支撑三种^[3]。其中, 无热化支撑一般采用装框结构形式。通过设计胶层厚度, 使得常温到低温时镜框、胶和镜片的收缩量一致。这样不会有应力传递到镜片上, 从而保持了镜片面形^[4-5]。采用弹簧预载支撑设计时, 需要根据弹簧刚度精确计算从常温到低温过程中弹簧所需的形变量, 然后在常温装调时进行预紧。这样在低温工作时就不会有收缩应力传递到镜片上, 从而保持了镜片面形^[6]。柔性支撑一般采用胶粘剂来将镜片固定到支撑结构上。在支撑结构与胶的粘接位置上设计柔性结构。当低温工作时, 利用柔性结构的形变卸载热应力, 从而保持镜片面形^[7]。由于不需要预置间隙, 柔性支撑可以减小地面装调误差, 同时还具有较好的力学性能, 能够在高温区下工作。因此它在航天红外低温镜头

支撑结构中的应用最为广泛。

在低温镜头柔性支撑结构中, 胶粘剂起到非常重要的作用。它需要具备真空质损小、粘接强度高以及注胶工艺性较好等特点。结构胶和硅橡胶都已应用到低温镜头支撑结构中。由于缺乏它们在低温下的力学性能数据, 利用常温数据进行设计时会降低准确性。目前, 国外在低温镜头胶粘剂选型前都会进行一定的工艺试验, 从而获得胶的力学性能和可行的注胶工艺。文献[7]测试了结构胶 3M2216、Epibond 1210、Lord 7450 与 ZnSe、BaF₂、LiF 的粘接性能, 获得了 35 K 工作温度下的应力特性, 并测试了它们对面形的影响。文献[8-9]研究了结构胶 DP490、EP21TCHT-1 与结构材料、光学材料的粘接性能以及低温下拉伸试验和粘接面对粘接性能的影响。文献[10]研究了结构胶、硅橡胶与熔石英的粘接特性。采用结构胶且工作到 80 K 时, 支撑结构会因粘接处应力过大而损坏镜片; 采用硅橡胶时能够减小镜片应力。文献[11-12]将 RTV566 硅橡胶应用到 TESS 载荷的低温镜头中, 并在 200 K 工作温度下测试了 RTV566 胶的粘接工艺性和低温下的力学性能。国内则主要进行了镜头胶粘剂(包括光学镜片粘接用结构胶和硅橡胶)的常温性能测试^[13-14]。

为降低光学设计的难度, 某型号红外相机的中继透镜组采用低温光学技术, 且工作温度为 200 K。采用柔性支撑技术固定透镜。RTV566 硅橡胶已在国内航天型号中应用多年, 并已成功应用于国外的低温镜头。本项目中, 低温透镜组的胶粘剂选用该胶。在产品装配前, 进行了 RTV566 硅橡胶低温拉伸

和透镜低温面形试验, 以验证其用于低温透镜支撑结构的可行性。

1 RTV566 硅橡胶的常温和低温力学性能测试

在低温镜头支撑结构的设计中, 胶粘剂的弹性模量对保证透镜面形十分重要。此外, 胶粘剂与光学材料、结构材料要有一定的粘接强度, 以保证顺利通过地面振动试验。首先制备 RTV566 硅橡胶拉伸试验件, 然后进行常温和低温拉伸试验, 并通过处理试验数据获得其剪切强度、拉伸强度以及弹性模量。

1.1 试验件设计

弹性模量测试一般采用哑铃形试件, 并需要专用模具和设备来制作试件。一般采用国标 13936 两板法或 12830 四板法来测试剪切模量和剪切强度。拉伸强度测试一般采用国标 11211 两板法。室温下硫化硅橡胶为近不可压缩材料, 其泊松比接近 0.5。获得剪切模量后, 根据胡克定律即可获得弹性模量。

在设计试件时, 需综合考虑注胶工艺、粘接对象和试件制作难度。设计了锆-RTV566-钛合金二板法剪切试件和拉伸试件。在静力拉伸时, 剪切试件和拉伸试件的胶层分别受纯剪切和纯拉伸作用。为保证拉伸试验机加载时胶层受纯剪切或纯拉伸作用, 在试件与拉伸试验机的连接处设计了关节轴承。剪切试件模型和拉伸试件模型分别如图 1 和图 2 所示。

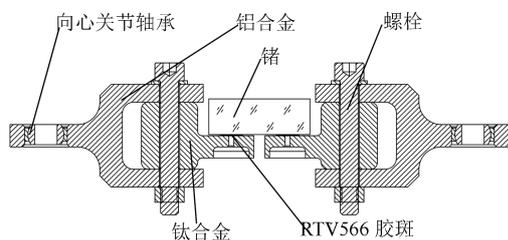


图 1 剪切试件模型

RTV566 为双组分硅橡胶, 其 A、B 组分按照 100:0.1 配比并充分混合后, 通过钛合金试件上的注胶孔注入来形成圆胶斑。在注胶前, 需要在钛合金与锆试件的粘接面上涂抹底涂 SS4415。利用塞尺调整锆与钛合金之间的

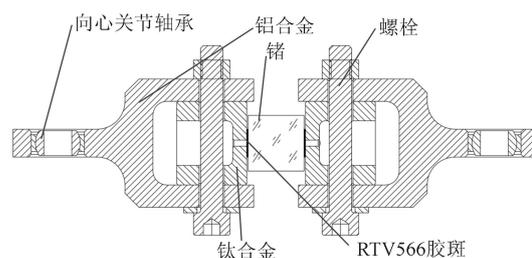


图 2 拉伸试件模型

间隙, 以保证胶斑厚度一致。通过气泵控制注胶压力和时间, 以保证胶斑直径一致。拉伸试件和剪切试件的胶斑直径均为 12 mm, 胶层厚度均为 0.3 mm。根据目前加工的光学件与结构件的表面特性, 钛合金粘接面的粗糙度为 $3.2 \mu\text{m}$, 锆粘接面的粗糙度为 $0.05 \mu\text{m}$ 。完成注胶后, 将其置于常温下固化 7 天。图 3 和图 4 分别为剪切试件和拉伸试件的实物图。



图 3 剪切试件的实物图



图 4 拉伸试件的实物图

1.2 拉伸试验

拉伸试验在中国科学院理化技术研究所的低温物性检测中心进行。测试温度点分别为 293 K、220 K、200 K 和 180 K, 每个工况共包括 5 组试件。利用试验机的力传感器采集拉力数据, 并通过固定到钛合金-钛合金上的引伸计得到位移信息。剪切试件的破坏形式主要为胶层剪切破坏, 拉伸试件的破坏形式主要为粘接面脱粘。由于拉伸试件受力不可能完全均

匀, 它会从某个局部开始脱粘。剪切试件和拉伸试件的破坏形式分别如图 5 和图 6 所示。



图 5 剪切试件的破坏形式



图 6 拉伸试件的破坏形式

1.3 数据处理方法

图 7 所示为通过拉伸试验测得的剪切试件和拉伸试件的加载力-位移曲线。

剪切试件和拉伸试件的单个胶斑直径为 d , 胶斑厚度为 c , F_{max} 为试件破坏最大拉力。剪切强度和拉伸强度为

$$S = \frac{4F_{max}}{\pi d^2} \quad (1)$$

利用剪切试件的加载力-位移曲线的线性段来计算 RTV566 硅橡胶的剪切模量和弹性模量。线性段的起始位移 ΔL_1 对应加载力 F_1 , 线性段的结束位移 ΔL_2 对应加载力 F_2 。

剪切应变为

$$\gamma = \frac{\Delta L_2 - \Delta L_1}{2c} \quad (2)$$

剪切应力为

$$\tau = \frac{4(F_2 - F_1)}{\pi d^2} \quad (3)$$

剪切模量为

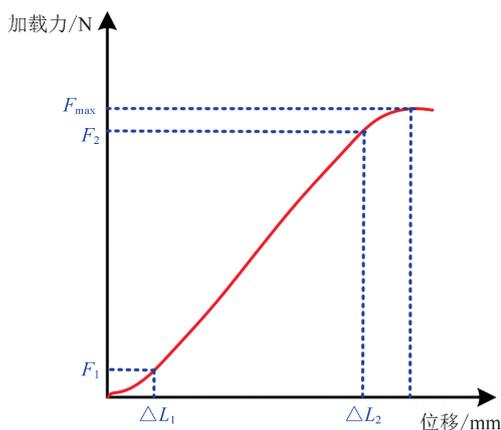


图 7 试件加载力-位移曲线

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{8c(F_2 - F_1)}{\pi d^2(\Delta L_2 - \Delta L_1)} \quad (4)$$

由胡克定律可知, 弹性模量为

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (5)$$

对于 RTV566 硅橡胶, 泊松比 μ 可近似取 0.47^[15]。

1.4 试验结果

在不同温度下, 分别通过剪切试件和拉伸试件测得 RTV566 胶的剪切强度和拉伸强度(见表 1 和表 2)。

表 1 剪切强度测试结果(单位为 MPa)

温度	293 K	220 K	200 K	180 K
1	5.7	8.3	7.6	11.0
2	5.6	6.8	8.0	11.6
3	5.6	6.9	7.2	12.8
4	5.2	8.0	7.8	13.4
5	5.2	6.4	8.1	11.7
平均值	5.46	7.28	7.74	12.10
标准差	0.24	0.82	0.36	0.97

表 2 拉伸强度测试结果(单位为 MPa)

温度	293 K	220 K	200 K	180 K
1	3.6	6.6	4.9	6.9
2	4.4	6.4	4.7	8.3
3	3.7	4.3	5.3	10.5
4	2.7	5.9	5.3	10.1
5	4.2	4.1	4.9	6.5
平均值	3.72	5.46	5.02	8.46
标准差	0.66	1.18	0.27	1.81

从表 1 和表 2 中可以看出, RTV566 硅橡胶与锆、钛合金的粘接性能非常好。在常温下, 剪切强度的平均值达到 5.5 MPa, 拉伸强度的平均值达到 3.7 MPa。

293 K、220 K、200 K 和 180 K 温度下剪切试件的加载力-位移曲线分别如图 8、图 9、图 10 和图 11 所示。

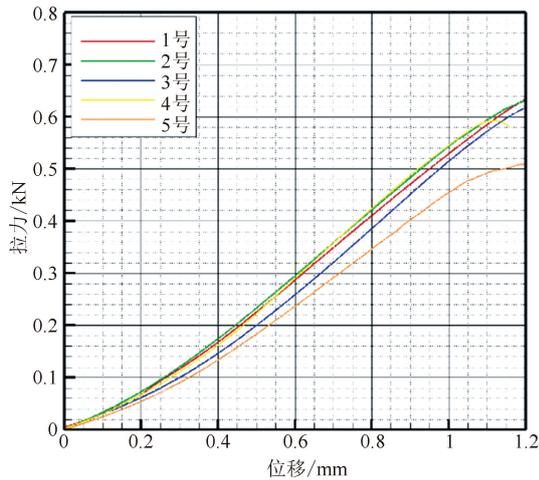


图 8 293 K 温度下试件的加载力-位移曲线

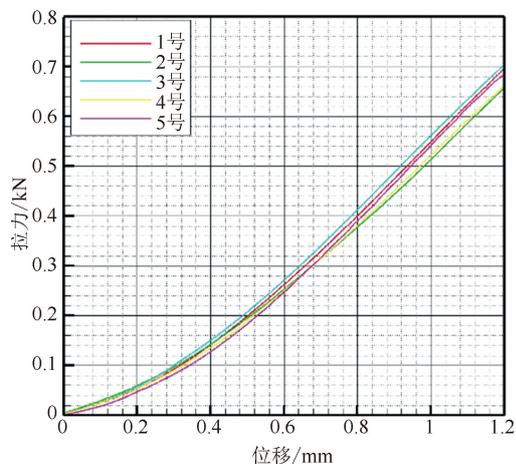


图 9 220 K 温度下试件的加载力-位移曲线

试件的拉伸曲线在常温和 220 K 下的一致性较好, 在 200 K 和 180 K 下有一定的波动。根据 1.3 节中的计算方法, 选取线性段来计算不同温度下 RTV566 硅橡胶的弹性模量(结果见表 3)。

剪切强度、拉伸强度以及弹性模量的平均值随温度的变化曲线如图 12 所示。剪切强度和拉伸强度从常温到 200 K 时变化较小, 在 180 K 时有一定的增量。这可能与 180 K 接近 RTV566

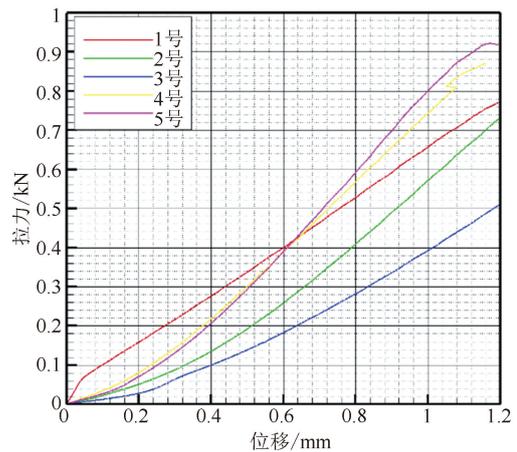


图 10 200 K 温度下试件的加载力-位移曲线

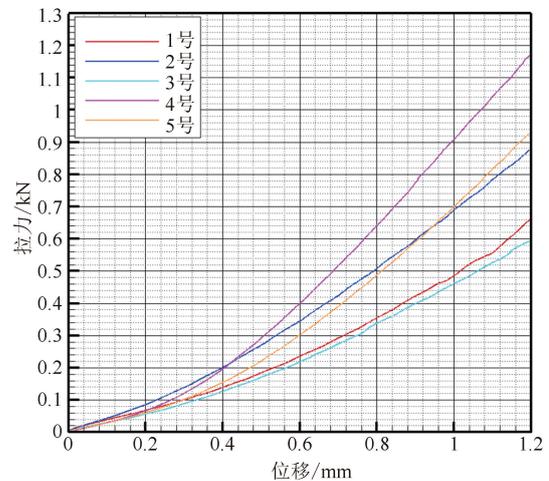


图 11 180 K 温度下试件的加载力-位移曲线

表 3 弹性模量测试结果

温度	293 K	220 K	200 K	180 K
1	5.9	6.4	6.4	5.4
2	6.0	5.8	6.7	7.8
3	5.8	6.5	4.7	5.2
4	6.1	6.0	8.5	10.8
5	5.5	6.3	9.4	8.2
平均值	5.86	6.20	7.14	7.48
标准差	0.23	0.29	1.85	2.3

硅橡胶的工作温度下限, 此时其硬度有一定的增加有关。弹性模量从常温到 180 K 时变化不大。

2 RTV566 硅橡胶在低温透镜支撑结构中的应用研究

前面完成了常温和低温下 RTV566 硅橡胶

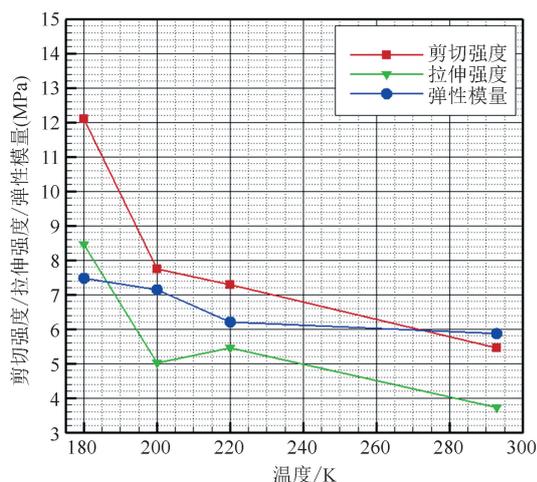


图 12 剪切强度、拉伸强度和弹性模量的平均值随温度的变化曲线

的力学性能测试，并获得了剪切强度、拉伸强度和弹性模量。该胶对钛合金和锗具有较好的粘接性能，从常温到 200 K 时仍然具有较好的弹性。此外，根据产品数据可知，其真空质损为 0.14%，说明它非常适合作为固定低温透镜的胶粘剂。根据获得的弹性模量、剪切强度以及该胶产品数据给出的线膨胀系数等，设计了低温透镜组件试验件，并对其进行了低温面形测试。获得了从常温到 200 K 时的面形变化，并进一步验证了将该胶用于空间红外低温镜头的可行性。

2.1 低温透镜支撑结构设计

低温透镜采用柔性支撑结构，其圆周方向通过 9 个直径为 10 mm 的胶斑与镜框直沾。在镜框的胶斑直沾位置上设计卸载槽。透镜的口径为 100 mm，材料为锗。它的一面被加工成 R400 的凹球面，另一面被加工成平面。镜框材料为钛合金。图 13 所示为试验件的三维模型和实物图。

2.2 低温面形仿真

建立测试透镜组件的有限元模型，并分析从常温 293 K 到低温 200 K 时的结构变形所引起的透镜面形变化。平面面形测试能够同时准确测出面形中的 Power 和像散，进而更加合理地评价透镜支撑结构。仿真时给出平面面形的变化，并通过测试低温平面面形进行后续试验

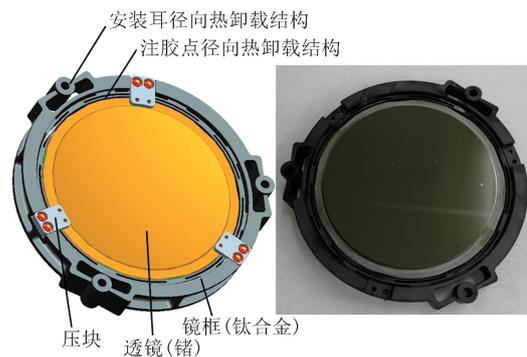


图 13 测试透镜模型与实物图

验证。透镜和镜框采用二阶四面体单元，胶层采用二阶五面体单元，并沿厚度方向设置 5 层单元。RTV566 硅橡胶的弹性模量设置为 7 MPa。透镜组件有限元模型及其从常温到 200 K 时的变形结果如图 14 所示。提取平面节点位移，并进行面形拟合。去除平移和倾斜后的面形 RMS 值为 0.0165λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。图 15 为平面面形云图。仿真结果表明，从常温到 200 K 时测试透镜平面面形的变化较小。

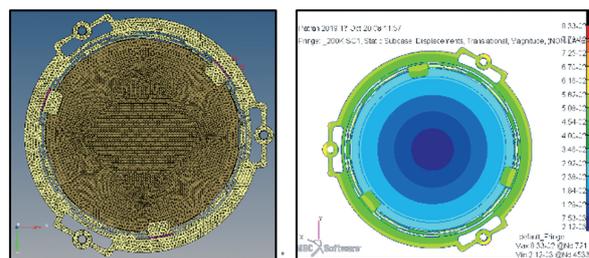


图 14 有限元模型及低温变形结果

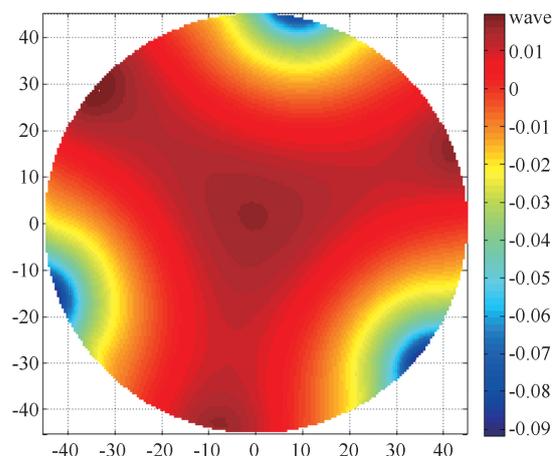


图 15 平面面形云图

2.3 低温面形测试

在平面低温面形测试中，将待测试的透镜

组件放置到真空罐内, 并通过控温小仓加热回路对透镜进行控温。将工作波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$ 的 ZYGO 平面干涉仪放置在真空罐外。在前期测试中已标定过真空罐窗口, 引入的额外像差可以忽略不计。测试原理和过程分别如图 16 和图 17 所示。测试透镜的温度变化曲线如图 18 所示。

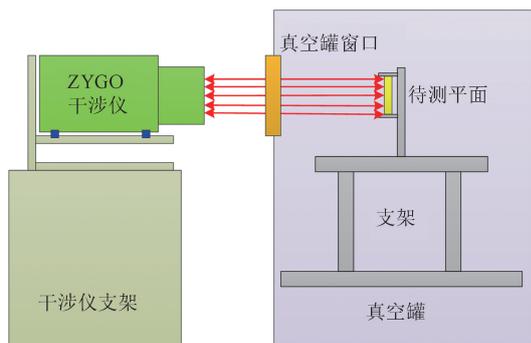
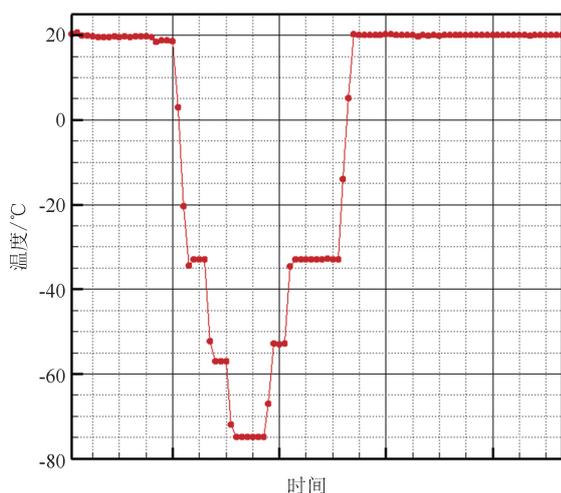


图 16 低温面形测试的原理图



图 17 低温面形测试的实物图



而很好地保证了透镜的面形。

3 结论

本文进行了 RTV566 硅橡胶在航天红外低温镜头中的应用研究。首先测试了 RTV566 硅橡胶在常温和低温下的力学性能,并获得了它在常温和低温(220 K、200 K 和 180 K)下的剪切强度、拉伸强度以及弹性模量。弹性模量的平均值为 6 MPa,且从常温到 180 K 时基本没有变化。剪切强度和拉伸强度在从常温到 200 K 时基本没有变化,到低温 180 K 时有一定的增加。这可能与 180 K 已接近 RTV566 硅橡胶的工作温度下限,此时其硬度有一定的增加有关。力学性能测试结果表明,RTV566 硅橡胶的力学性能在从常温到低温 200 K 时变化不大,比较适合作为航天红外低温镜头的胶粘剂。为进一步验证 RTV566 硅橡胶用于低温镜头的可行性,进行了单透镜低温面形测试试验。结果表明,透镜平面面形在从常温到低温 200 K 时基本没有发生变化,面形精度优于 $1/30\lambda$ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$)。卸载结构和 RTV566 硅橡胶的共同作用很好地卸载了热应力,保证了透镜面形。本文的研究工作表明,RTV566 硅橡胶可用于 200 K 及以上的航天红外低温镜头支撑结构。

参考文献

- [1] Otero V, Mosier C, Neuberger D. Thermal infrared sensor (TIRS) instrument thermal subsystem design and lessons learned [C]. Colorado: 43rd International Conference on Environmental Systems, 2013.
- [2] Matthews G, Scorse T, Kennard S, et al. JWST telescope integration and test status [C]. *SPIE*, 2014, **9143**: 914305.
- [3] Smee S A. A precision lens mount for large temperature excursions [C]. *SPIE*, 2010, **7739**: 77393O.
- [4] Doyle K B, Michels G J, Genberg V L. A thermal design of nearly incompressible bonds [C]. *SPIE*, 2002, **4771**: 296–303.
- [5] Leahy Z N, Magner A J. A thermal mounting of optics in metallic housings [C]. *SPIE*, 2013, **8836**: 88360P.
- [6] Barrera S, Villegas A, Fuentes F J, et al. E-MIR optomechanics [C]. *SPIE*, 2004, **5495**: 611–621.
- [7] Hom C L, Holmes H C, Lapicz D N, et al. Cryogenic bonding for lens mounts [C]. *SPIE*, 2009, **7439**: 743910.
- [8] Reutliner A, Mottaghibonab A, Gal C, et al. Glue test results for high-precision large cryogenic lens holder [C]. *SPIE*, 2012, **8450**: 845028.
- [9] Mottaghibonab A, Thiele H, Gubbini E, et al. Gluing interface qualification test results and gluing process development of the EUCLID near-infrared spectro-photometer optical assembly [C]. *SPIE*, 2016, **9912**: 991260.
- [10] Foud T R, I. Tosh A J, Edeson R L, et al. Cryogenic mounts for large fused silica lenses [C]. *SPIE*, 2006, **6273**: 627321.
- [11] Primeau B, Balonek G, MacDonald R, et al. Tolerancing, alignment and test of the transiting exoplanet survey satellite (TESS) optical assembly [C]. *SPIE*, 2016, **9951**: 995103.
- [12] Mower T M. Thermomechanical behavior of aerospace-grade RTV (silicone adhesive) [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, **87**: 64–72.
- [13] 杨利伟,李志来,薛栋林. 结构胶固化收缩对反射镜面形影响的分析与试验 [J]. *光学技术*, 2014, **40**(4): 307–312.
- [14] 高超,罗世逵,陈芳,等. 空间相机光学件用 XM23 胶的杨氏模量测定和选用 [J]. *航天返回与遥感*, 2017, **38**(2): 48–54.
- [15] 闻邦椿. *机械设计手册* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.