

文章编号 1004-924X(2015)06-1657-07

精密光学胶结件的快速脱胶

闫 勇*, 姚劲松, 张 雷, 王 栋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要:研究了采用 GHJ-01 光学环氧胶胶结光学件的脱胶工艺,提出了适合精密光学胶结件快速脱胶的方法。归纳总结了光机胶结时,黏接胶层的厚度计算公式,以便确定适宜的光机胶结间隙;梳理了胶结固化的操作流程及固化原则,指出实施该方法的技术难点在于依据不同的胶结剂和胶结结构选择合理的热剥离温度及升温速度。利用某高精度胶结镜进行了脱胶试验研究。通过选择合适的热剥离加热工艺实现了该光学件的快速、微应力脱胶。相关试验表明,经过胶结后的熔石英镜面产生了严重变形,变化量约为原始面形值的 6 倍(原始面形值 0.02λ ,变形后面形值 0.14λ),经脱胶修研后其面形精度达到 0.018λ ,满足设计要求,脱胶时间为 105 h。该方法可满足光学件脱胶时对完整性和微应力的要求,避免了成本的浪费和光学件的弃用,其脱胶处理方式也适用于其它同类型光学元器件的研制。

关键词:光学环氧胶;胶层厚度;胶结固化;脱胶试验;热剥离;快速脱胶

中图分类号:V261.35;TH706 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1657

Fast degumming of high-precision optical cemented elements

YAN Yong*, YAO Jin-song, ZHANG Lei, WANG Dong

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: cclyy911@163.com

Abstract: A degumming process for optical cemented elements by using a GHJ 01 optical epoxy adhesive bond was researched, and a rapid degumming method suitable for precision optical cementing was proposed. Combined with the actual engineering application requirements, the formula of the adhesive layer thickness for the adhesive cementation was summarized to determine a proper optical-mechanic cementing clearance. The operation processes and cementation curing principle were discussed and the technical problems during the curing were concerned carefully. It points out that the technical points of degumming experiments for a high-precision optical cemented element is to choose a reasonable hot strip temperature and a heating speed according to the different cementing agents and cementation structures. A degumming experiment was performed by using a high precision cemented lens and the quick and microstress degumming of the optical parts was implemented by choosing an appropriate hot strip heating process. The experiment shows that the fused silica mirror has been deformed seriously after the cementation, and it is about 6 times that of the original surface value (The original surface value is 0.02λ and that is 0.14λ after deformation). However the surface value

收稿日期:2014-08-10;修订日期:2014-10-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z113)

of the fused silica mirror has achieved 0.018λ after the degumming experiments and reworked process finally. The surface value meets the design requirement very well, and the degummed time is 105 h. The new degumming method meets the integrity and micro-stress requirements of the optical elements and avoids the cost of waste and discarding optical elements. It could also been applied to the other same type optical components.

Key words: optical epoxy glue; adhesive layer thickness; cementation curing; degumming experiment; thermal releasing; fast degumming

1 引言

现代光学仪器的研制和发展与光学用胶的开发和发展息息相关。目前,通过不断的研究开发和生产实践,我国的光学用胶已经取得了长足的进步,其逐步由天然树脂胶向合成树脂光学用胶过渡,目前应用比较普遍的有光学环氧树脂、光固化胶、有机硅凝胶、聚氨酯胶等。

近些年,光学环氧树脂由于色浅透明、黏接强度高、收缩率小、韧性高、应力小、毒性低、可常温固化等突出优点而被广泛应用于航空航天光学仪器的研制中,不仅大大地简化了光机结构和机械加工工工艺,提高了生产效率,其良好的耐高低温、耐冲击振动、良好的密封特性,还极大地促进了其在航空航天领域的应用,在高精度光学仪器装配中表现出良好的应用前景。本文对胶结件的脱胶工艺尤其是采用 GHJ-01 光学环氧树脂胶结的胶胶工艺进行了研究,并对其脱胶工艺进行了理论分析和操作规范化,探索了一条适合精密光学胶结件快速脱胶的方法。试验表明,该方法可实现精密光学胶结件安全、无应力的快速脱胶。

2 光学环氧树脂应用现状

传统光学系统多采用隔圈压圈方式进行装配,为保证光学元件的位置精度,在设计时透镜和镜框留有较小间隙,这种设计方式在温度发生变化时会由于两者材料热膨胀系数不匹配而造成光学镜面变形,影响整个光学系统的成像性能。而采用胶黏结技术后,理论上讲其间隙可控制在 $0.05\sim 1.00$ mm 或者更大,由于胶层的隔离作用,当存在温度差时,镜筒和透镜不会因为收缩量不同产生挤压,因此避免了因透镜和镜筒之间的接触产生的热应力^[1]。

在实际操作中,胶层固化会产生收缩应力,温

度变化时胶层也会产生热应力,综合作用下对透镜面形的影响也不容忽视。在选择胶黏剂时,一般选用室温固化胶黏剂,同时为了解决材料膨胀系数不匹配问题,收缩力低、韧性好、应力小的光学环氧树脂黏剂就成为了较佳选择。目前,在航空航天的有效载荷中,反射镜与镶嵌件的黏接大多采用光学环氧树脂^[2]。

在无热化设计中首先需解决黏接胶层厚度的问题。当胶层厚度较小时,胶层尚不能形成连续胶膜,不连续之处相当于张开型裂纹;当胶层较厚时,则会引起胶层中缺陷密度上升、固化程度不均、高弹性模量金属对胶层的拘束强化作用下降、内应力情况复杂等问题,使得黏接强度下降。目前航空航天领域采用光学环氧树脂进行光机胶结的胶层厚度一般控制在 $0.03\sim 0.25$ mm^[3],在胶层黏接厚度的确定上可参考范志刚等给出的高宽比小于 1/10 的 L 方程^[4-7]。

L 方程:

$$h = \frac{r_0(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{\nu}{1-\nu} \left[\left(2 - \frac{h}{2L} \right) \alpha_b - \frac{3}{4}(\alpha_0 + \alpha_c) \right]}, \quad (1)$$

其中: r_0 为镜框内光学件半径, α_0 为光学件热胀系数, α_c 为镜框热胀系数, α_b 为环氧树脂热胀系数, ν 为环氧树脂泊松比;若光学件内镶机械件时, r_0 、 α_0 分别为镶嵌件的半径及热胀系数, α_c 为光学件热胀系数。

考虑实际黏接时,黏接基准面的垂直度公差 t 和结构件圆柱度公差 c 对胶层厚度的影响,可选 L 方程的修正公式^[8]进行迭代求解,以确定胶层的最佳黏接厚度。

L 方程的修正公式:

$$h = \frac{r_0(\alpha_c - \alpha_0)}{\alpha_b - \alpha_c + \frac{\nu}{1-\nu} \left[\left(2 - \frac{h}{2L} \right) \alpha_b - \frac{3}{4}(\alpha_0 + \alpha_c) \right]} + \Delta h, \quad (2)$$

其中: $\Delta h = \frac{t_0 + t_c}{2} + \frac{c_0 + c_c}{2}$, t_0 为光学件垂直度公差, t_c 为镜框的垂直度公差, c_0 为光学件圆柱度公差, c_c 为镜框圆柱度公差; 若光学件内镶机械件时; t_0 为镶嵌件垂直度公差, t_c 为光学件镶嵌孔垂直度公差, c_0 为机械镶嵌件圆柱度公差, c_c 为光学件镶嵌孔圆柱度公差。

3 胶结工艺及存在的问题

在光学环氧胶的实际使用过程中, 胶结工艺对胶结件的强度和胶结镜的面形精度具有决定性作用, 合适的工艺是实现无应力或微应力黏接的重要保障, 而且由于光学件面形精度较高且易受黏接条件影响而发生不可逆变形, 光学环氧胶一旦固化, 目前尚无有效方法实现快速无损的脱胶, 这使光学件直接面临加工失败的风险。

3.1 胶结步骤^[9-11]

为确保光机件胶结的稳定性, 尽可能避免各种不确定因素的影响, 在实际操作中需严格遵守胶结工艺流程, 在长期的生产实践中大体形成的胶结步骤如下:

(1) 试装配。对胶结件进行初装试装配, 确定设计的正确性与合理性, 及时发现胶结过程中可能遇到的问题, 并提前做好防范措施;

(2) 胶结件清洗及表面处理。通过脱脂、除油、打磨、清洗等手段对需胶结的接触表面进行清洗及预处理;

(3) 上胶。按工艺要求调制胶结剂, 在最佳使用期内给胶结表面上胶, 按照要求严格控制胶层厚度;

(4) 精度调整。调整连接工装, 确保胶结件达到设计精度要求, 利用力矩扳手螺钉预紧;

(5) 固化。除掉胶结件其余部位多余的胶结剂, 按工艺要求进行胶层固化;

(6) 复检。拆除工装, 校核精度。

3.2 固化原则^[12-15]

在光学件胶结固化过程中需尽量避免胶结应力的产生, 因此, 在实际胶结固化过程中需遵循以下原则:

(1) 减小固化温度与实际使用环境温度之间的温差;

(2) 固化过程应保证充足的固化时间, 固化温度不宜骤冷骤热;

(3) 固化后期可将胶结件放置在一定温度下保持一段时间进行内应力释放, 提高黏接强度。

3.3 存在问题

近年来, 采用光学环氧胶胶结的光机件越来越多, 尤其是在航空航天领域, 环氧胶可使仪器的结构更加简易, 大大地简化了光机结构和机械加工工艺, 提高了生产效率, 但也暴露出了一些问题, 值得引起足够的重视。

目前, 由于胶结工艺对光学件的胶结精度影响较大, 为尽可能避免胶结过程对镜面面形的不利影响, 在实际面形精度要求较高的光学件加工中, 往往在光学件粗加工至一定精度后即进行光机件的胶结, 待其固化以后再进行精加工, 其加工流程如图 1 所示。

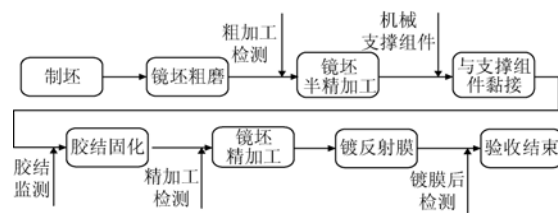


图 1 胶结固化流程图

Fig. 1 Flowchart of cementation curing

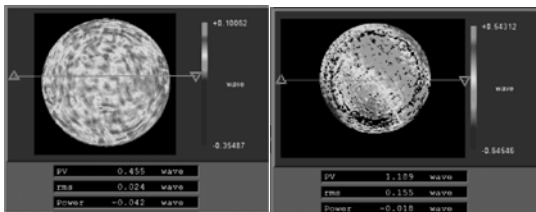
该方案在操作过程中需克服 2 个难题:

(1) 变形量的控制。在胶结固化后, 镜面面形变形量过大, 超出实际光学件允许加工范围, 造成镜面膜层损坏或镜面出现加工障碍/缺陷, 无法完成正常加工;

(2) 影响后续改性、镀膜等工序。胶结件在完成精加工后, 若有特殊要求, 还需对其进行改性、镀膜等工艺处理, 期间将经历较高、复杂多变的温度变化, 极易引起镜面变形, 在胶结件方案设计初期必须予以考虑, 但由于环境工况复杂, 在实际操作中往往难以有效控制镜面变化。

图 2 所示为某高精度熔石英次镜按图 1 胶结固化流程胶结前后镜面变化情况, 在操作中发现,

胶结后光学件镜面面形由 $1/50\lambda$ 变为 $1/7\lambda$, 超出了预期修研加工余量, 在光机黏接局部形成明显凸起, 如图 2(b) 所示, 分析判定为胶层固化不均导致镜面变形, 且光机件黏接牢固, 难以分离, 该凸非球面镜面临加工失败的风险。



(a) 胶结前 (b) 胶结后
(a) Before cementation (b) After cementation

图 2 胶结前后镜面变化

Fig. 2 Mirror surfaces before and after cementations

4 快速脱胶法

精密光学胶结件往往在加工或使用过程中需要将光机件进行脱胶处理, 以便于光学件的返修。在实际操作中, 由于光学件脱胶难度大, 元件受损风险极高, 常常导致某些重要光学件被放弃使用或降等级使用, 造成了成本浪费和周期延长。

项目组在对某高精度熔石英凸非球面的加工中遇到了类似问题, 该凸非球面镜口径为 140 mm, 为凸双曲面反射镜, 采用背部补偿检验法进行光学加工及检测, 镜面 RMS 要求优于 $1/50\lambda$ ($\lambda=628.3 \text{ nm}$), 在裸镜精度满足设计要求后利用光学环氧胶进行了光机件的胶结, 图 3 所示为胶结后的熔石英凸非球面镜组件, 由于处理不当, 胶结后熔石英镜面产生严重变形, 如图 2 所示, 变化量约为原始面形值的 6 倍 (原始面形值 0.02λ , 变形后面形值 0.14λ), 重新修研凸非球面镜面形为唯一解决途径, 但出于惧怕光学环氧胶剥离带来的严重镜面变形和光学件损坏的巨大风险及保障项目研制周期的需要等, 对备份件进行了加工, 将该凸非球面镜改为试验件进行相关摸底试验, 这一方面造成了加工成本的增加和加工周期的延长, 另一方面也严重影响了项目的进展, 光学件的弃用也造成了极大的成本浪费。

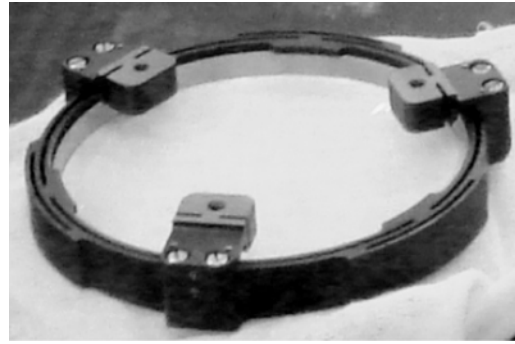


图 3 胶结后的熔石英凸非球面镜组件

Fig. 3 Fused silica convex aspherical lens components after cementation

利用该凸非球面镜试验件进行了光机黏接件脱胶试验。目前主要有热剥离法和溶剂浸泡剥离法, 由于光学环氧胶具有良好的耐介质性 (耐酒精、醇醛混合液、汽油、10% NaOH、香柏油等), 研究认为热剥离法是最佳的脱胶法, 图 4 所示为该凸非球面镜热剥离试验流程。

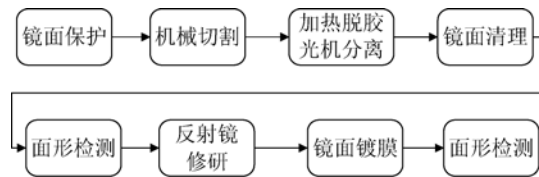


图 4 凸非球面镜热剥离试验流程

Fig. 4 Thermal releasing flowchart of convex aspherical lens

胶结热剥离的关键是确保胶层与胶结件的有效分离, 由于胶层结构中的碳碳键、醚键的键能较小, 高温下容易降解, 一般通过高温软化或碳化胶层降低或破坏其胶结强度, 热剥离的温度及时间主要取决于胶结剂的耐热性及胶层厚度, 热剥离遵循的主要原则有:

(1) 热剥离温度。为达到微应力脱胶目的, 结构件热剥离温度应略高于胶结剂软化/碳化降解温度约 $10\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$, 该温度多由厂家产品数据或实际经验确定;

(2) 保温时间。目前光学环氧胶进行光机胶结的胶层厚度一般控制在 $0.03\sim 0.25 \text{ mm}$, 为确保脱胶光学件的安全性和较小的热变形量, 脱胶保温时间以热浸透胶层厚度, 胶层完全软化或碳化降解为宜, 一般取固化时间的 $3\sim 5$ 倍;

(3) 升降温速度。一般热剥离温度较高, 为了保证脱胶的安全性, 减小脱胶应力, 在低温段应保

持低的升降温速度,高温段可适当增加升降温速度,在接近热剥离温度时应适当降低升降温速度,其值一般介于高温段与低温段升降温速度之间;

(4)为了减小热剥离过程中热应力对光学件面形的影响,保持结构件内应力的稳定性,在热剥离阶段其升降温速度及过程应保持对称性。

由于光机件热胀系数不匹配,在试验前,先利用线切割将机械件分成独立的6个部分,确保光学件在加热时的安全性,然后利用一体化程控高温炉加热组件实现光机件的脱胶和分离,图5所示为一体化程控高温炉脱胶加热温度曲线图,图6所示为光学件脱胶情况。

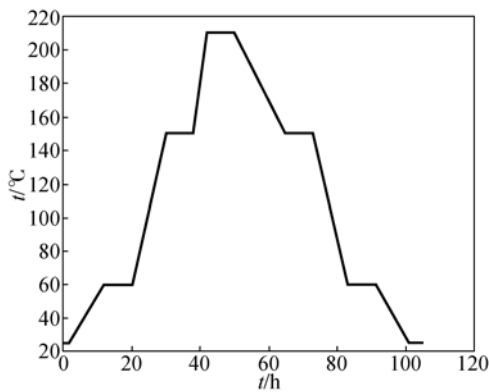


图5 一体化程控高温炉脱胶加热温度曲线图

Fig. 5 Temperature graph of degumming thermal releasing speed

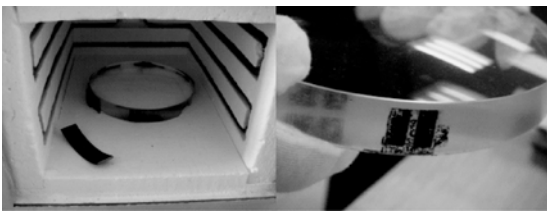


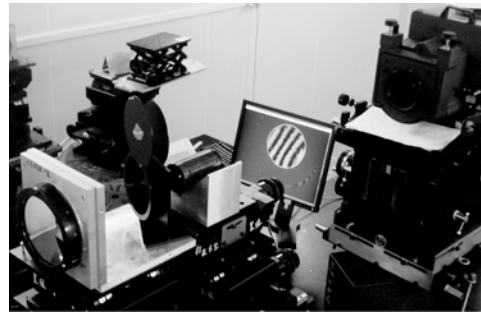
图6 光学件脱胶情况

Fig. 6 Situation of optical element degumming

图5所示熔石英胶结镜脱胶试验。该试验利用GHJ-01光学环氧胶在200℃以上时胶层开始碳化降解的特点进行微应力脱胶,出于安全性及微应力要求,脱胶温度保持在210℃,又由于胶层厚度介于0.02~0.03mm,故其保温时间设定为10h。热剥离时温度的升降过程分为低温段、高温段和热剥离段3个阶段,其速率分别为3.5、9.0和6.0℃/h,降温段与升温段执行相同操作。

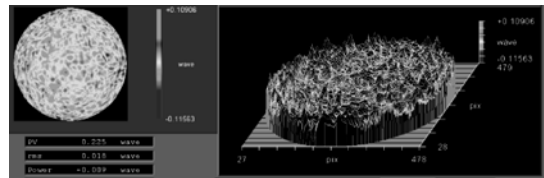
一体化程控高温炉加热脱胶实现光机分离

后,对镜面进行了清理、修研和面形检测,并在凸非球面镜表面镀铝反射膜,利用Zygo干涉仪对其面形进行实时检测,其实际检测光路及检测结果如图7所示,面形精度为0.018λ。



(a)实际检测光路

(a) Actual detection optical path



(b)Zygo干涉仪实测干涉图

(b) Actual detection Zygo interferogram of mirror

图7 实际检测光路及检测结果

Fig. 7 Actual detection optical path and detection result

从检测结果可以看出,通过合理地控制脱胶温度和脱胶工艺,可以实现精密光学胶结件的安全、无应力快速脱胶,该光学件经简单适当处理后可重新应用于相关项目的研制,在节约成本的同时也保障了项目的顺利进行。该项试验为后续工程研制积累了实际工程经验,实现了光学环氧胶结件的脱胶并保证了光学件的完整性和微应力要求,其脱胶处理方式也适用于其它同类型光学元器件的研制。

5 结论

本文归纳总结了光机胶结时,黏接胶层的厚度计算公式,同时对实际胶结固化操作流程进行了总结,指出了实际存在的2个技术难题,并针对目前某高精度熔石英凸非球面镜在胶结固化过程中遇到的类似问题进行了实验研究。

对胶结件的脱胶工艺尤其是采用GHJ-01光学环氧胶胶结的脱胶工艺进行了研究,并对其脱

胶工艺进行了理论凝练和操作规范化,给出了适合精密光学胶结件快速脱胶的方法。相关试验表明该方法可实现精密光学胶结件的安全、无应力快速脱胶,该工艺特别适用于胶层厚度在 0.03~0.25 mm 间金属与微晶玻璃、金属与 SiC 镜体、玻璃与玻璃等系列胶结件的脱胶,可有效提高脱胶的成功率,降低光学件受损或降等级使用风险,实现微应力脱胶,其胶结规范也同样适用于其它

胶结件的脱胶工艺。

该方法可作为其他胶结件脱胶工艺的参考,其脱胶处理方式适用于其它同类型光学元器件的研制过程,可成功实现光学环氧胶结件的脱胶并保证光学件的完整性和微应力要求,脱胶后的光学件经简单适当处理后可重新应用于相关项目的研制,在节约成本的同时也可保障项目的顺利进行,具有广泛的应用前景和借鉴意义。

参考文献:

- [1] 王汝冬,田伟,王平,等. 温度变化对胶粘结透镜面形精度的影响[J]. 中国激光,2011,38(8): 0808002-1-5.
WANG R D, TIAN W, WANG P, *et al.*. Effect of temperature change on the surface accuracy of bonded Lens [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(8): 0808002-1-5. (in Chinese)
- [2] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 118-125. (in Chinese)
- [3] 赵伶丰,白光明. 复合材料胶接头分析研究[J]. 航天器环境工程,2007,24(6):393-396.
ZHAO L F, BAI G M. Analysis of adhesive bonded composite joints [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, 24(6): 393-396. (in Chinese)
- [4] 范志刚,常虹,陈守谦,等. 透镜无热装配中粘层的设计[J]. 光学 精密工程,2011,19(11): 2573-2581.
FAN ZH G, CHANG H, CHEN SH Q, *et al.*. Design of bonding layer in lens athermal mount [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2573-2581. (in Chinese)
- [5] RYABOV V M. Analysis of thermal stress and deformation in elastically bonded optics [J]. *SPIE*, 2007, 6666: 66650K.
- [6] VUKOBRATOVICH D, FETTERHOFF K A, *et al.*. Bonded mounts for small cryogenic optics [J]. *SPIE*, 2000, 4131: 228-239.
- [7] 范志刚,常虹,陈守谦. 胶粘光学元件的热应力和变形分析[J]. 光学技术,2011,37(3):363-369.
FANG ZH G, CHANG H, CHEN SH Q. Thermal stress and deformation analysis of bonded optics [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 363-369.
- [8] 刘强,何欣,张峰,等. 反射镜无热装配中胶层厚度的计算机控制[J]. 光学 精密工程,2012,20(10): 2229-2236.
LIU Q, HE X, ZHANG F, *et al.*. Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2229-2236. (in Chinese)
- [9] 程刚,蒋世磊,陈华强. 环氧树脂胶在光学部件粘接上的应用[J]. 中国粘接剂,2004,13(4):1-4.
CHEN G, JIANG SH L, CHEN H Q. Application of epoxy resin adhesive in optical instruments [J]. *China Adhesives*, 2004, 13(4): 1-4. (in Chinese)
- [10] 陆汉民. 透镜的粘接固定技术[J]. 光学技术,1991(3):29-34.
LU H M. Technique for lens fixing by adhesive [J]. *Optical Technology*, 1991(3): 29-34. (in Chinese)
- [11] 侯瑞祥. 光学仪器胶粘剂应用现状及进展[J]. 光学技术, (1): 49-55.
HOU R X. Application and development of optics adhesive used in optical instruments [J]. *Optical Technology*, (1): 49-55. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 王奇侠,程刚,蒋世磊,等. 环氧树脂胶在光学部件粘接中的应用[J]. 粘接,2003,24(3):33-35.
WANG Q X, CHEN G, JIANG SH L, *et al.*. Application of epoxy resin structural adhesive in optical instruments [J]. *Adhesives*, 2003, 24(3): 33-35. (in Chinese)

- [14] 刘玖. 光机系统胶结结构的力学行为分析[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
LIU J. *Mechanical behavior on bonding structure of optical-mechanical system* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2011. (in Chinese)
- [15] 赵红振, 齐暑华, 周文英, 等. 光学用透明胶粘剂的研究进展[J]. 中国粘接剂, 2006, 15(7): 39-44.
ZHAO H ZH, QI SH H, ZHOU W Y, *et al.*. Research progress of transparent adhesive for optical appliance [J]. *China Adhesives*, 2006, 15(7): 39-44. (in Chinese)

作者简介:



闫 勇(1981—),男,山西吕梁人,博士,副研究员,硕士生导师,2004年于吉林大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感器光机系统设计、空间可展机构分析与设计等方面的研究。E-mail: cclyy911@163.com



王 栋(1982—),男,山东聊城人,博士,副研究员,硕士生导师,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航天器热控制、空间相机结构设计等方面的研究。E-mail: simest@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)