

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.005

光学元件激光热导钎焊连接变形及接头组织性能研究

尚康^{a,b}, 乔晓旭^{a,b}, 王晓东^{a,b}, 罗怡^{a,b}

(大连理工大学 a. 机械工程学院; b. 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对 40Cr 光学元件调整座和光路组件安装板在装调过程中快速连接问题, 对传统焊接结构进行改进。通过提前钎焊铜片, 并采用激光间接辐照热导钎焊技术, 成功减小焊接变形, 并在未对调整座进行夹持的条件下, 将其相对于安装板 3 个方向的位移偏差控制在 20 μm 以内, 角度偏差小于 0.05°, 并且钎焊接头的抗拉强度达到 289 MPa。实验中采用膏状银基钎料 (AgCuZnSn), 在激光束倾角 60°、离焦量 20 mm、功率 0.12 kW、加热时间 10 s 的工艺条件下进行焊接。通过扫描电镜和能谱仪对焊接接头进行测试分析。结果显示: 所获得的钎缝组织均匀致密, 连续完整。40Cr 钢母材区、钎料区及铜片区之间界面清晰, 且 40Cr 钢和钎料之间仅在界面结合处存在 2~3 μm 的主要元素扩散, 表明焊接过程中组织变化和应力集中较小。

关键词: 光学元件; 激光热导钎焊; 40Cr 钢; 焊接变形; 组织性能

中图分类号: TG454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)04-0024-05

Research on Connection Deformation and Joint Microstructure Properties of Optical Components by Laser Thermal Conduction Brazing

Shang Kang^{a,b}, Qiao Xiaoxu^{a,b}, Wang Xiaodong^{a,b}, Luo Yi^{a,b}

(a. School of Mechanical Engineering; b. National Key Laboratory of High Performance

Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To address the challenge of rapid connection between the 40Cr optical component adjustment mount and the optical path assembly mounting plate during alignment and assembly, the conventional welding structure was improved. By pre-brazing copper sheets and employing laser indirect irradiation thermal conduction brazing technology, welding deformation was successfully reduced, and without clamping the adjustment mount, the displacement deviations relative to the mounting plate in three directions was controlled within 20 μm , the angular deviation was less than 0.05°, and the tensile strength of the brazed joint reached 289 MPa. The experiments used a paste-form silver-based filler metal (AgCuZnSn) under the process conditions of a laser beam inclination of 60°, defocusing amount of 20 mm, power of 0.12 kW, and heating time of 10 s. Scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy were employed to test and analyze the brazed joints. The results show that the obtained brazing seam structure is uniform, dense, continuous, and intact. The interfaces between the 40Cr steel base material, filler metal zone, and copper sheet zone are distinct, and elemental diffusion between the 40Cr steel and the filler metal is limited to a 2~3 μm zone only at the interface bond, indicating minimal microstructural changes and stress concentration during the welding process.

Keywords: optical component; laser thermal conduction brazing; 40Cr steel; welding deformation; microstructural performance

0 引言

40Cr 是一种合金结构钢, 经过调质处理后, 其具有较低的缺口敏感性和较高的低温冲击韧性, 综合力学性能良好, 因此被广泛应用于机械制造业^[1]。光学测量对光学设备性能有着极高的要求, 其中对光学元件的选择和光学元件的装配尤

为重要, 而 40Cr 钢因其优异的力学性能常被用于制造光学元件及其配件^[2]。本研究旨在实现 40Cr 材质的光学元件调整座和光路组件安装板的快速可靠连接, 以确保连接的精度, 从而实现光学元件在光学系统中的高精度装配。

精密光学系统中最常用的连接技术为胶粘接, 胶接装配具有装配力小、结构简单、成本低等

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目 (XLYC2002020)

第一作者简介: 尚康 (1999—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为光学元件激光钎焊装配, 1307802236@qq.com。

通信作者简介: 王晓东 (1967—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 研究方向为精密测量、微小器件装配, xdwang@dlut.edu.cn。

优点。然而,粘接需要较长的固定时间,且胶层容易老化脱落,稳定性差,不符合本研究快速永久固定的要求^[3]。焊接虽然能提高焊接效率和稳定性,但 40Cr 钢的传统焊接方法,如电弧焊工艺、焊钨极惰性气体保护焊、埋弧焊及电阻焊等^[4-5]热输入大,热影响区大,可能会导致焊接接头区域的组织不均匀、晶粒粗大,甚至形成脆硬相、裂纹等问题,影响其综合力学性能。然而,采用激光作为热源进行钎焊,则可以有效地克服这些问题^[6-7]。相比传统熔焊工艺,激光钎焊具有热影响小、变形小、效率高等的特点,焊接过程中的热量集中,减少了对工件的无效热输入,从而使热影响区减小,焊后工件产生的残余应力和热变形也相应减小^[8-11]。由于待装配的光学元件与光路组件安装板对焊接变形控制要求较高,而不需要承受较大载荷,因此可以采用钎焊进行连接。

肖荣诗等^[12]总结了最早由德国不莱梅应用射线研究所提出激光间接辐照热导熔钎焊技术。即激光主要作用于高熔点母材上,经加热后通过热传导方式使低熔点母材或钎料加热熔化。Chen 等^[13]提出了一种新的电子束混合焊接方法,对 WC-Co 硬质合金头和 40Cr 钢基座进行电子束焊接,获得了环形熔合接头以确保高强度的有效焊接,同时 WC-Co 和 40Cr 钢的底面通过热传导形成钎焊接头,保证了工作过程中的散热。结果表明:焊缝主要由 Cu-Ti 化合物、Ag-Cu 共晶相和少量 Ni-Ti 和 Co-Ti 化合物组成。熔焊的最大剪切强度和显微硬度分别达到 586 MPa 和 HV 812。王立忠等^[14]研制了动态视觉检测系统,结合立体视觉原理、图像处理技术等实现了对高强钢薄板焊接条件下屈曲变形的准确测量。实验结果表明与位移传感器获得的测量结果基本吻合,平均位移误差为 0.034 mm。

基于上述分析,本文通过激光间接辐照热导钎焊技术对 40Cr 光学元件调整座和光路组件安装板进行了连接试验研究。即激光主要作用于导热结构(铜片)上,经加热后通过热传导方式使低熔点膏状银基钎料(AgCuZnSn)加热熔化。通过电感测微仪对焊接变形引起的整体装配误差进行测算,并对接头的宏观微观形貌、组织结构以及抗拉强度进行分析,通过改进焊接结构和采用热导钎焊技术,减小焊接变形,控制位移偏差和角度偏差,以提高光学元件的装配精度。

1 试验

1.1 焊接工艺

本研究旨在实现 40Cr 材料光学元件调整座与光路组件安装板的快速可靠连接。安装板上光学元件种类繁多、布局紧凑、结构复杂,不适合采用传统的走丝机构来进行钎料的填充。研究需保证焊接精度,即焊接前后调整座与安装板位移角度偏差最小,在满足焊接强度的前提下,确保焊接质量可靠性。

因此,对焊接结构进行改进,在安装板待焊接位置进行线切割处理,并通过添加焊接钉减小调整座与安装板连接区域,即焊接钉通过螺纹连接调整座,再通过钎料与安装板连接,在保证焊接强度的条件下尽量减小热影响区。焊接工艺设计中,在安装板 4 个待连接位置预先钎焊铜片作为中间层,利用激光间接辐照热导钎焊技术,依次对 4 个标定位置的铜片加热,通过热传导使低熔点钎料熔化,实现焊接钉与安装板连接,进一步减小热影响区(如图 1 所示)。整体通过焊接钉和钎料完成调整座与安装板连接,最大程度减小热变形引起的整体装配误差。

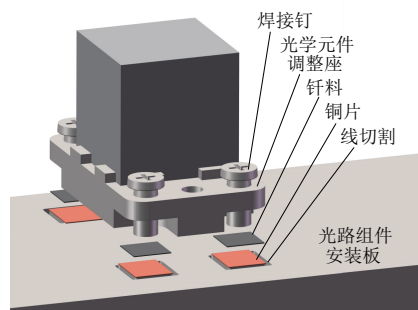


图 1 焊接工艺示意图

1.2 试验方法与材料

试验所用试样零件中的待安装元件调整座、焊接钉和光路组件安装板材质均为 40Cr 钢。安装板整体尺寸为 70 mm×36 mm×6 mm,待安装元件底座最大尺寸为 23 mm×15 mm×4 mm,连接钉规格为 M3,铜片尺寸为 4.0 mm×5.0 mm×0.1 mm,材质为 T2 紫铜,激光束作用在铜片上,图 2 为激光钎焊示意图;试验钎料为膏状银基钎焊料(AgCuZnSn),熔点 620 ℃~670 ℃,其主要化学成分详见表 1。

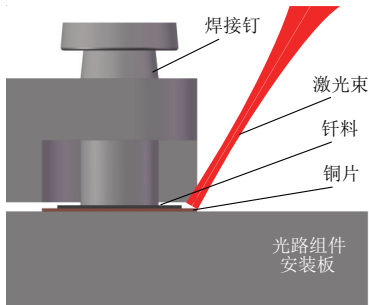


图2 激光钎焊示意图

表1 钎料的化学成分

化学成分	Ag	Cu	Zn	Sn
质量分数/%	56	22	17	5

选用波长 1 070 nm,最大功率为 1 000 W 的大族 YLR1000 型光纤激光器作为焊接热源,激光钎焊工艺参数详见表 2。将激光焊接头固定在 AUBO-i5 型协作机器人末端,通过控制机器人的位置和姿态,将激光焊接头移动到各标定位置进行加热。焊接过程实时观察通过同轴相机进行,焊接试验系统如图 3 所示。

表2 激光钎焊工艺参数

参数	激光功率/kW	离焦量/mm	激光束倾角/(°)	钎焊时长/s
数值	0.12	20	60	10

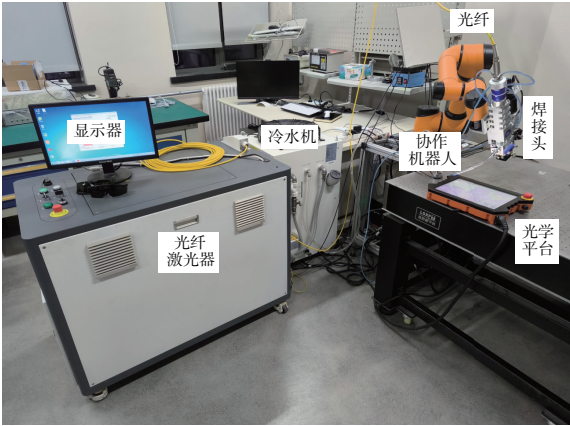


图3 焊接试验系统

焊接前,使用砂纸和乙醇清理被焊材料表面,将膏状钎料均匀涂抹在清理好的待焊接位置;焊接试验中,使用接触式电感测微仪测量焊接前后待安装元件底座与光路组件安装板之间的相对位移量;焊接完成后,采用线切割方式取样 4 mm×5 mm×2 mm 的试样,经过打磨、抛光处理后,使用

4%硝酸酒精溶液腐蚀试样。在 MtsE43 电子万能试验机上对试样进行强度测试。采用蔡司 GeminiSEM360 场发射扫描电镜,对样品表面微观形貌进行观察分析;同时,采用配备的牛津 Xlpore30 能谱仪进行微区成分分析。

2 试验结果与分析

2.1 焊接变形检测

激光焊接过程中,热应变、塑性应变和相应变的混合变形会影响最终的连接精度。试验过程中,安装板固定不动,通过电感测微仪来检测待安装元件测量点相对于安装板的位移变化,测点位于待安装元件上方的顶点位置,对 x 轴方向、 y 轴方向、 z 轴方向分别进行了检测,每个方向均设置了两个测点(如图 4(a)箭头标注)。通过协作机器人将激光焊接头依次移动到 4 个标定位置进行加热(顺序如图 4(b)数字标注),每次加热后记下电感测微仪的变化值。总共进行 3 组试验,表 3 为第 1 组试验中 x 轴、 y 轴、 z 轴 3 个方向上两个测微仪在 4 个焊接点位依次焊后所测数值。

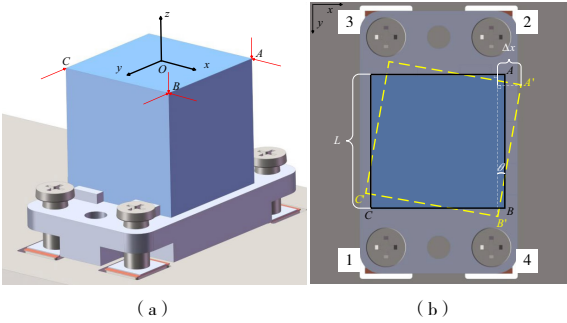


图4 变形测量示意图

表3 第1组试验测微仪所测数值 单位:μm

方向	测点	焊点 1	焊点 2	焊点 3	焊点 4
x 轴	1	0.020 8	0.048 1	0.033 1	0.022 9
	2	0.009 0	0.026 1	0.021 2	0.012 2
y 轴	1	-0.026 7	-0.017 8	-0.012 1	-0.010 8
	2	-0.047 1	-0.041 4	-0.033 8	-0.020 5
z 轴	1	-0.022 1	-0.015 6	-0.029 9	-0.019 8
	2	-0.011 2	-0.003 2	-0.015 7	-0.012 0

根据所测得的数据计算各方向的位移和偏转。如图 4 所示,以 x 轴方向变形测量为例,此时测微仪对 A 点、 B 点 x 轴方向位移值进行检测,通过测值推算得出待安装元件在 x 轴方向的位移和

偏转:根据4次焊接完成后两个测头所测数据之差 Δx 与光学元件顶部边长 L 的三角关系可以求出偏转角 θ ,而位移 d 取两侧头中点的位移值,公式如下

$$\theta = \arcsin \frac{\Delta x}{L} \quad (1)$$

$$d = \frac{|x_1 + x_2|}{2} \quad (2)$$

同理,待安装元件在 y 轴方向、 z 轴方向的位移和偏转分别由测点 B 、测点 C 在 y 轴方向的位移值和测点 A 、测点 B 在 z 轴方向的位移值推算得出。由表4可知,待安装元件相对于安装板的位移偏差控制在 $20\mu\text{m}$ 以内,角度偏差小于 0.05° 。

表4 位移测量结果

试验编号	方向	位移/ μm	偏转/ $(^\circ)$
1	x 轴	17.6	0.048 3
	y 轴	15.7	0.043 8
	z 轴	15.9	0.035 2
2	x 轴	17.1	0.043 3
	y 轴	17.8	0.009 9
	z 轴	18.3	0.019 8
3	x 轴	17.4	0.049 6
	y 轴	19.4	0.036 9
	z 轴	14.0	0.013 5

2.2 接头组织形貌

焊接接头试样截断面形貌如图5所示,可见钎料全部熔化,与40Cr钢母材及紫铜结合良好未见缺陷,并且呈现较明显的层状结构,其中钢侧部分熔化,和钎料混合后形成类似熔焊焊缝。

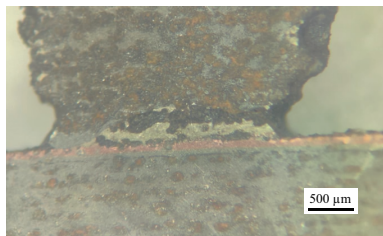


图5 接头截断面形貌

进一步对接头截面的微观形貌进行观察,如图6所示。从图6中可以看出,接头组织均匀无缺陷,接头形成40Cr钢母材区、钎料区及铜片区3个区域,钎料区与两侧母材区边界清晰明显。

图7显示了沿着图6箭头指示进行的EDS线扫描的结果。通过图中可知,Fe、Cr元素主要分布在40Cr钢母材侧,Ag及Zn元素主要分布在钎缝区域。说明在焊接过程中,40Cr钢的主要元素与钎料扩散不明显,仅在界面结合处存在 $2\sim 3\mu\text{m}$ 的扩散区域,减小了对40Cr钢化学成分和性能的影响,同时较小的扩散区域可以减少焊接过程中可能发生的组织变化和应力集中。而钎料中含有Cu元素,因此Cu在40Cr钢母材/钎料/Cu母材含量呈逐渐上升的趋势。

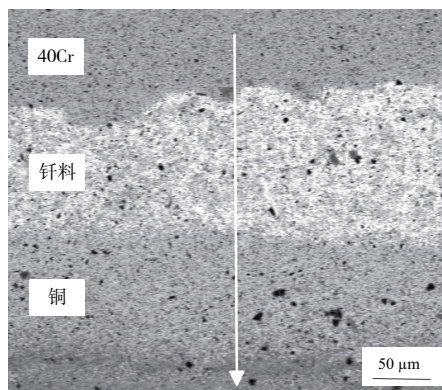


图6 钎焊接头的微观形貌

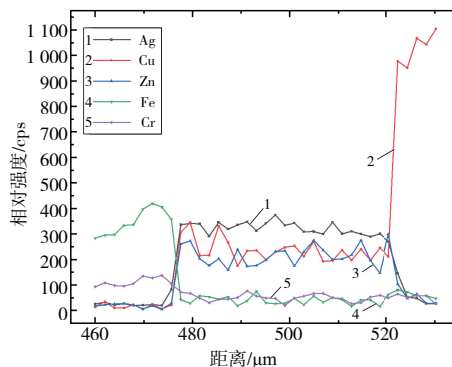


图7 接头反应区的EDS分析

2.3 接头连接强度

焊接接头的强度是评价材料焊接接头可靠性的重要标准。在室温条件下,使用在MtsE43电子万能试验机进行测试,图8展示了测试3组试样所得的拉伸应力-应变曲线。常见的光学胶粘剂,如环氧树脂、丙烯酸类、硅胶等,在正常条件下的抗拉强度通常在 $20\sim 100\text{MPa}$ 之间,而根据曲线分析可知钎焊试样的拉伸强度最高达到 289MPa ,远超胶粘接的强度。试验所得延伸率为 17.1% ,断裂发生在钎缝处,说明钎焊接头具有良好的延性和韧性。总的来说,钎料与母材之间形

成了可靠的结合,适合用于 40Cr 的钎焊连接。

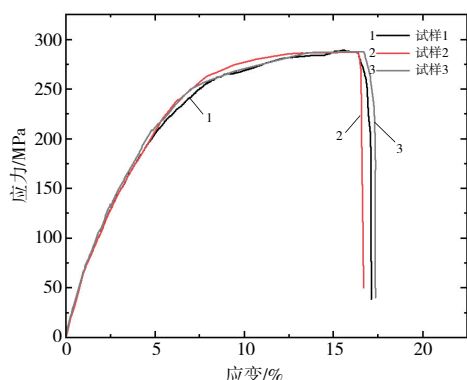


图8 钎焊试样应力-应变曲线图

3 结语

本研究通过改进焊接结构、采用激光间接辐照热导钎焊技术,并匹配优化的焊接工艺参数,解决了 40Cr 光学元件调整座与光路组件安装板快速连接的问题,具体结论如下。

1) 通过激光间接辐照热导钎焊技术,在满足焊接强度的条件下减小了热影响区,将光学元件调整座相对于安装板 3 个方向的位移偏差控制在 $20\ \mu\text{m}$ 以内,角度偏差小于 0.05° 。

2) 在激光间接辐照热导熔钎焊接头的拉伸试验中,最大拉伸强度达到了 289 MPa,显著高于粘接强度。此外,其延伸率为 17.1%,并且断裂通常发生在钎缝上。这表明接头具有良好的韧性,并且钎料与母材之间形成了可靠的结合。

3) 试验获得的钎缝组织均匀致密,连续完整,40Cr 钢母材区、钎料区及铜片区之间界面清晰,40Cr 钢主要成分和钎料元素之间扩散不明显,仅在界面结合处存在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 的扩散,说明焊接过程中可能发生的组织变化和应力集中较小。

参考文献:

[1] 黄廷杰. 40Cr 钢强韧化处理后的力学性能[J]. 热加工工艺, 2006, 35(14): 56-57.
[2] Leers M, Winzen M, Liermann E, et al. Highly precise and robust packaging of optical components[J]. Laser-Based Micro- and Nanopackaging and Assembly VI, 2012, 8244: 824404.

[3] 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.
[4] 邹增大卷主. 焊接手册-第3卷-焊接结构[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 2008.
[5] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
[6] Seltzman A H, Wukitch S J. Brazing characteristics, microstructure, and wettability of laser powder bed fusion additive manufactured GRCop-84 compared to CuCrZr and OFC, and brazing to titanium-zirconium-molybdenum alloy limiters[J]. Fusion Engineering and Design, 2022, 180: 113185.
[7] Bunaziv I, Akselsen O M, Ren X B, et al. A review on laser-assisted joining of aluminium alloys to other metals[J]. Metals, 2021, 11(11): 1680.
[8] Bojestig E, Cao Y, Nyborg L. Surface chemical analysis of copper powder used in additive manufacturing[J]. Surface and Interface Analysis, 2020, 52(12): 1104-1110.
[9] Saida K, Ohnishi H, Nishimoto K. Fluxless laser brazing of aluminium alloy to galvanized steel using a tandem beam-dissimilar laser brazing of aluminium alloy and steels[J]. Welding International, 2010, 24(3): 161-168.
[10] Pan L M, Gu J, Zou W J, et al. Brazing joining of Ti_3AlC_2 ceramic and 40Cr steel based on Ag-Cu-Ti filler metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 181-187.
[11] Zhang L J, Pei J Y, Zhang L L, et al. Laser seal welding of end plug to thin-walled nanostructured high-strength molybdenum alloy cladding with a zirconium interlayer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267: 338-347.
[12] 肖荣诗,董鹏,赵旭东. 异种合金激光熔钎焊研究进展(邀请论文)[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 601004.
[13] Chen G Q, Shu X, Liu J P, et al. Electron beam hybrid welding-brazing of WC-Co/40Cr dissimilar materials[J]. Ceramics International, 2019, 45(6): 7821-7829.
[14] 王立忠,赵建博,谈杰,等. 高强钢薄板高温焊接变形的视觉测量[J]. 光学精密工程, 2020, 28(2): 283-295.

收稿日期: 2024-04-08