

铝-铜异种金属激光深熔钎焊接头力学性能

董 鹏 陈凯华 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 采用 Yb:YAG 盘式激光器进行 3 mm 厚 1060 铝合金-T2 紫铜异种金属激光深熔钎焊试验,并用显微硬度测试以及静载拉伸试验对接头的力学性能进行评价。由于焊缝中晶粒细小且含有硬度较高的 Al_2Cu 以及 Al_2Cu_3 金属间化合物,其显微硬度要高于铝、铜母材。接头的抗拉强度可以达到铝母材的 94% 以上,拉伸试验的结果具有一定随机性,其中试样最大的抗拉强度为 100.6 MPa,断裂发生在铝合金母材;断裂在焊缝界面处的试样的抗拉强度为 94.5 MPa。由于在过渡层内存在硬度和脆性较大的金属间化合物过渡层,与焊缝其他部分存在硬度梯度,在拉伸过程中过渡层处容易出现裂纹,形成断裂。

关键词 光学制造;激光深熔钎焊;铝;铜;力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603009

Mechanical Properties of Aluminum-Copper Joint by Laser Penetration Brazing

Dong Peng Chen Kaihua Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract 1060 aluminum alloy and T2 copper with the thickness of 3 mm are joined by means of laser penetration-brazing (LPB) with a Yb:YAG disc laser. The mechanical properties of the joint are measured by microhardness and tensile tests. The microhardness of the weld is higher than that of aluminum and copper base metals, respectively, due to the formation of fine grains and hard Al_2Cu and Al_2Cu_3 intermetallic compounds. The results of the tensile tests for welded samples are variational under the same parameters. The maximum failure strength for tensile test is 100.6 MPa. The failure occurs at aluminum side. The minimum failure strength is 94.5 MPa. The failure happens close to the interface due to the hardness gradient and brittle intermetallic compounds.

Key words optical fabrication; laser penetration-brazing; aluminum; copper; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

铜及其合金以其优良的导电、导热性以及耐腐蚀性在电力电子以及空调制冷行业得到广泛的应用。近些年生产成本的压力使得一些企业在产品的设计与制造中逐渐采用一些低成本的材料,例如采用铝及其合金,部分取代铜。在电力电子和制冷构件的设计制造中采用铝-铜复合结构除了可以降低成本外,还可以减轻结构重量,特别是在一些大型构件,例如热沉以及热交汇流排的设计和制造中。因

此,铝-铜复合结构越来越受到人们的重视,而铝-铜异种材料的连接是铝-铜复合结构的设计和制造中的重要环节。

目前工业上一般采用机械连接、超声波焊接以及钎焊等方法进行铝和铜的连接。与这些传统的方法相比,激光焊接提供了更为灵活,非接触式的焊接过程。激光焊接具有热输入量低、能量作用位置精确等特点,在铝-铜异种焊接过程中可以减少或避免铝、铜两种元素物理性质差异以及界面金属间化合

收稿日期: 2011-03-23; **收到修改稿日期**: 2011-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(50875005)和北京市自然科学基金(3102005)资助课题。

作者简介: 董 鹏(1983—),男,博士研究生,主要从事异种材料激光加工方面研究。E-mail: peng852@bjut.edu.cn

导师简介: 肖荣诗(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用、先进材料激光加工、激光加工新工艺、新方法及外围技术与系统等方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(通信联系人)

物的影响^[1~4]。Mai等^[5]在铝-铜焊接试验中发现,采用脉冲激光减小能量输入以及调整激光作用位置可以减少脆性金属间化合物的生成。Gerd等^[6,7]通过在铝、铜界面之间添加镍或银金属中间层以减少界面生成的脆性金属间化合物,提高铝-铜接头的强度及韧性。对于铝、铜此类物理性质差异较大,特别是熔点差异较大的异种合金,肖荣诗等^[8]提出激光深熔钎焊的方法实现了熔点差异大的异种合金的连接。在这种方法中,聚焦激光通过深熔机制熔化低熔点母材,而高熔点母材基本维持固态,低熔点母材铺展浸润高熔点母材形成焊缝。目前,已经采用该方法实现了黄铜-低碳钢以及铝合金-钛合金的连接^[9~11]。

本文采用激光深熔钎焊的方法进行了1060铝合金与T2紫铜的焊接试验。采用显微硬度测试和静载拉伸试验对焊缝的力学性能进行评定。

2 试验条件与方法

试验采用Rofin DS040HQ Yb:YAG盘式激光器,额定输出功率4000 W,试验材料为3 mm厚的1060铝合金以及T2紫铜。焊前采用丙酮擦拭去除油污,并采用化学清洗的方法去除表面氧化膜,砂纸打磨对接面后,清水洗净吹干待焊。

图1为试验布置示意图。焊接过程中,聚焦激光束直接作用在低熔点金属铝一侧以实现深熔,同时铜一侧基本维持固态,液态铝合金铺展浸润铜界面,通过界面元素之间的相互作用形成焊缝。对于低熔点的铝合金一侧为深熔焊,高熔点的铜一侧为钎焊。经过前期的试验研究^[12],得到一组焊缝成形良好的工艺参数,激光功率3500 W,焊接速度2 m/min,光束向铝一侧偏移0.4 mm。

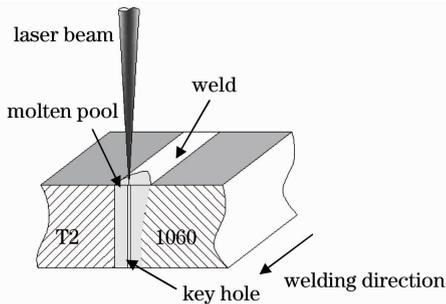


图1 激光深熔钎焊试验示意图

Fig. 1 Schematic illustration for laser penetration brazing experiment

采用显微硬度测试以及静载拉伸试验对铝-铜异种金属激光深熔钎焊接头的力学性能进行评价。接头维氏硬度测量采用Micromet5103显微硬度

计,试验载荷100 g,加载时间15 s;静载拉伸试验采用MTS810.22电液伺服材料试验机,拉伸速度1 mm/min。采用光学显微镜、扫描电子显微镜以及X射线衍射(XRD)仪对断裂机理以及界面显微组织和物相组成进行分析。

3 试验结果

3.1 接头的宏观形貌

图2为焊缝的横截面,铝一侧呈激光深熔焊特点,在垂直于焊缝方向的中部,由于作用能量较小,且通过铝合金母材散热快,因此该区域冷却速度较快,首先凝固。而焊缝的上、下区域由于激光输入能量较大,散热较慢,因此在这两个区域内的冷却速度相对较慢。熔池凝固后,形成了上、下区域熔宽较宽,中部熔宽较窄的形貌。在铜一侧,界面上部由于能量较大有部分铜熔化,界面下部在熔池搅动的作用下也有部分熔化,在焊接过程中液态的铝合金与固态的铜相互作用形成熔钎焊焊缝。

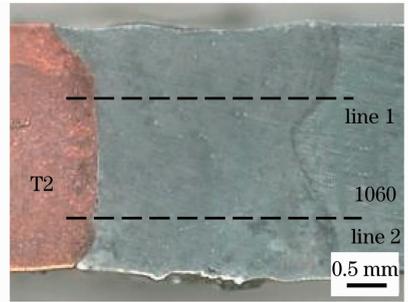


图2 焊缝横截面

Fig. 2 Cross-section of 1060-T2 joint

3.2 接头的显微硬度

图3为图2中line 1和line 2位置的铜母材、焊缝以及铝母材的维氏硬度曲线。铜母材靠近深熔钎焊界面区域在焊接热作用的影响下存在软化区,而焊缝的显微硬度要高于铝和铜母材的硬度,并且在

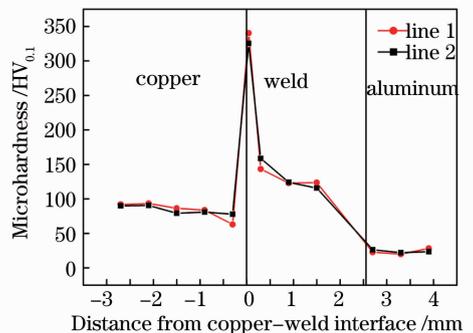


图3 图2 line 1和line 2处的显微硬度

Fig. 3 Micro-hardness at line 1 and line 2 in Fig. 2

靠近界面处存在硬度极高的区域。

3.3 接头的抗拉强度

采用静载拉伸试验对接头的机械性能进行评价,接头的抗拉强度可以达到铝母材的94%以上。在拉伸试验中,接头的断裂位置具有一定的随机性,有的试样断裂发生在铝合金母材,其抗拉强度为100.6 MPa,如图4(a)所示。有的断裂发生在焊缝界面处,如图4(b)所示,强度为94.5 MPa,约为母材强度的94%。图5为断裂在界面处试样的横截面,断裂位置出现在靠近界面的过渡层处。

图6为断裂在界面处的拉伸断口X射线衍射分析结果,在断口处存在的金属间化合物以 Al_2Cu 为主。图7为不同位置的拉伸断口的形貌,呈明显的脆性断裂特征,对断口的观察发现,在断口处存在一些平台,如图7(a)所示,以及以平台为中心的放射状断裂条纹,如图7(b)所示。表1为不同区域的元素含量,在断裂条纹上Al,Cu含量与 Al_2Cu 近似,而平台内的铜含量较高,该区域为 Al_2Cu_3 金属间化合物富集区。

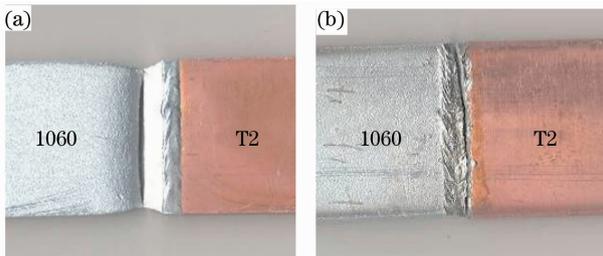


图4 拉伸试验断裂形貌。(a)断裂在母材, (b)断裂在焊缝

Fig. 4 Fractured morphologies for copper-aluminum-tensile test. (a) failure at aluminum parent material, (b) failure at interface

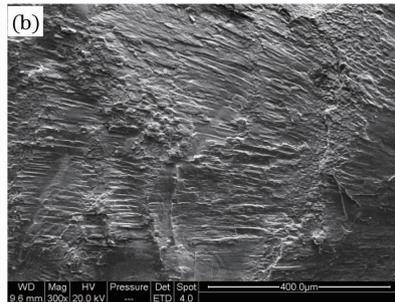
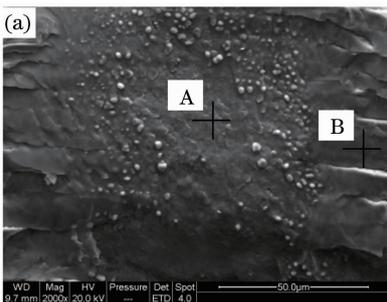


图7 断口形貌。(a)金属间化合物区,(b)撕裂棱

Fig. 7 Fractography of tensile testing sample. (a) intermetallic compounds region, (b) tear ridges

4 分析与讨论

对焊缝的显微组织进行观察发现,由于在激光

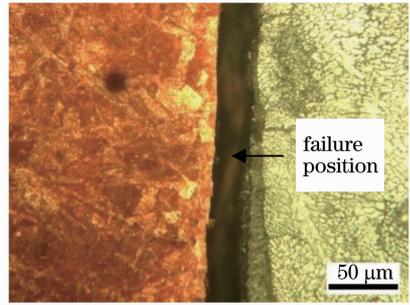


图5 断裂试样横截面

Fig. 5 Cross-section of fractured sample

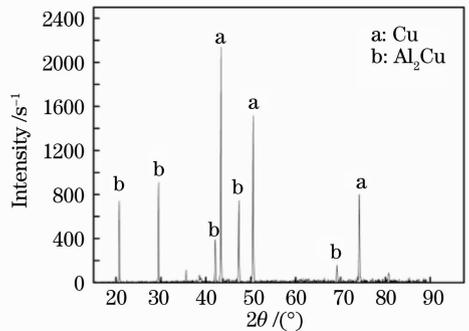


图6 界面断口处X射线衍射分析

Fig. 6 XRD analysis of fractured surface of tensile testing sample

表1 图7A,B处元素含量

Table 1 Elements content of parts A and B in Fig. 7

Element	A		B	
	Al	Cu	Al	Cu
Mass fraction /%	30.23	69.77	46.73	53.27
Atom fraction /%	50.50	49.50	67.38	32.62

深熔钎焊过程中,熔池冷却速度较快,焊缝主要由细小的浅色的等轴晶、树枝晶以及深色的网状组织构

成,如图 8 所示,使得焊缝的硬度要高于铝、铜两种母材。

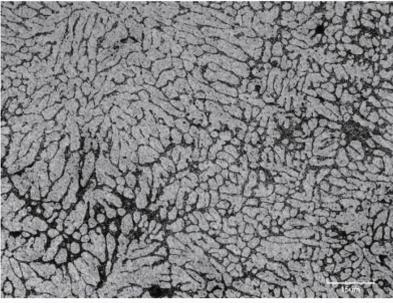


图 8 焊缝显微组织

Fig. 8 Microstructure of weld

对界面进一步观察发现,在铝焊缝和铜母材界面之间的过渡层可以分为两层,如图 9 所示。靠近铜界面处为不连续分布的深色柱状组织,由于界面垂直方向上的温度差异,其厚度分布不均,在 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间。在柱状组织外有一层厚度为 $10\sim 25\ \mu\text{m}$ 灰色过渡层。图 10 为焊缝界面处微区透射 X 射线衍射分析(试验选用 Mo 靶)结果,在界面处存在硬度较高的 Al_2Cu 以及 Al_2Cu_3 金属间化合物。

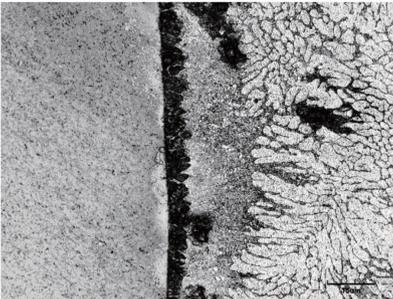


图 9 界面显微组织

Fig. 9 Microstructure of copper-weld interface

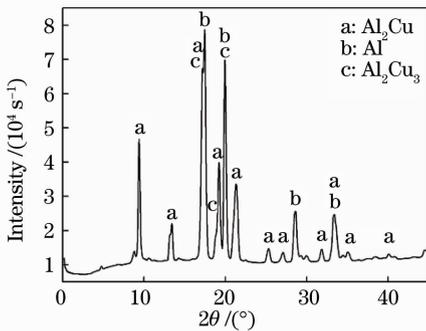


图 10 界面处物相 X 射线衍射分析

Fig. 10 Micro-area XRD analysis of interface

根据 Al-Cu 二元合金相图^[13],并且结合焊接界面区域显微组织以及物相分析,由于靠近铜母材一侧铜含量较高,并且冷却速度较快,在过渡层内侧得黑色柱状组织为 Cu 含量较高的非平衡相 Al_2Cu_3 ;

外侧的灰色过渡层中的铜含量相对较少^[12],为熔池冷却后形成的 Al- Al_2Cu 共晶组织层;界面处 Al_2Cu_3 以及集中分布的 Al_2Cu 金属间物,使得界面和焊缝其他位置之间存在很大的硬度梯度。

在焊接过程中熔池小孔的波动,造成界面处温度的涨落,使得界面处金属间化合物分布不均匀。这些因素导致接头的拉伸试验结果存在一定的随机性,有部分试样断裂发生在铝合金母材处,还有一部分试样断裂发生在界面处。对于断裂在界面处的试样,焊缝界面过渡层处与焊缝其他位置之间的硬度梯度在拉伸过程中容易导致在该区域内应力集中,并且在熔池冷却过程中,共晶层内 Al- Al_2Cu 共晶呈交替片层状凝固^[14],其中 Al_2Cu 脆性较大,在拉伸过程中过渡层处容易出现裂纹并扩展,形成断裂。

5 结 论

铝-铜异种金属的焊缝内晶粒较为细小,且含有硬度较高的 Al_2Cu_3 和 Al_2Cu 金属间化合物,焊缝的显微硬度要高于铝、铜母材,在焊缝过渡层内 Al_2Cu_3 和 Al_2Cu 分布较为集中,使得过渡层与焊缝其他部分之间存在较大的硬度梯度。

接头的抗拉强度可以达到铝合金母材的 94% 以上,接头的断裂位置存在一定的随机性,有的试样断裂发生在铝合金母材处其抗拉强度为 100.6 MPa,有的试样断裂发生在界面处,其抗拉强度为 94.5 MPa。由于焊缝界面过渡层处与焊缝其他位置之间的硬度梯度在拉伸过程中容易产生应力集中,并且过渡层内 Al_2Cu 脆性较大,在拉伸过程中容易出现裂纹,形成断裂。

参 考 文 献

- 1 E. Schbert, M. Klassen, Zerner *et al.*. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry [J]. *J. Mater. Proce. Technol.*, 2001, **115**(1): 2~8
- 2 Z. Sun, J. C. Ion. Review laser welding of dissimilar metal combinations [J]. *J. Mater. Sci.*, 1995, **30**(17): 4205~4214
- 3 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 261~268
虞 钢, 赵树森, 张永杰 等. 异种金属激光焊接关键问题研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 261~268
- 4 Shi Yan, Zhang Hong, Takehiro Watanabe *et al.*. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1132~1137
石 岩, 张 宏, 渡部武弘 等. 连续-脉冲双激光束焊接钢-铝合金 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1132~1137
- 5 T. A. Mai, A. C. Spowage. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2004, **374** (1-2):

- 224~233
- 6 E. Gerd, M. Ithor, S. Michael. Laser micro welding of copper and aluminum using filler materials [C]. *SPIE*, 2004, **5662**: 337~342
- 7 M. Ithor, S. Michael. Laser micro welding of copper and aluminum[C]. *SPIE*, 2006, **6107**: 610703
- 8 R. Xiao, P. Dong, K. Chen. Laser beam welding of dissimilar materials [C]. Proc. ICALEO, 2009, 660~665
- 9 Pi Youdong, Dong Peng, Yang Wuxiong *et al.*. Laser penetration brazing of brass and low carbon steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1562~1566
皮友东, 董 鹏, 杨武雄 等. 黄铜-低碳钢异种金属激光深熔钎焊[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1562~1566
- 10 K. Chen, R. Xiao, Y. Pei *et al.*. Laser penetration brazing of brass and low carbon steel[C]. Proc. ICALEO, 2009, 577~581
- 11 Lan Tian, Dong Peng, Xiao Rongshi. Analysis of laser deep penetration brazing of aluminium and titanium alloys [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(8): 109~112
兰 天, 董 鹏, 肖荣诗. 铝/钛异种合金激光深熔钎焊试验分析[J]. *焊接学报*, 2010, **31**(8): 109~112
- 12 Dong Peng, Chen Kaihua, Xiao Rongshi. Laser welding of dissimilar metals between aluminum and copper[C]. Proceedings of 13th Nationwide Nontraditional Machining Academic Meeting, 2009, 459~462
董 鹏, 陈凯华, 肖荣诗. 铝-铜异种材料激光焊接实验研究[C]. 第13届全国特种加工学术会议论文集, 2009, 459~462
- 13 H. Baker. *ASM Handbook*[M]. USA: ASM, 1992. 291~292
- 14 Xu Yongning. *Principles of Metallography* [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2010. 220~272
徐永宁. *金属学原理* [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010. 220~272