

异种合金激光熔钎焊研究进展

(邀请论文)

肖荣诗 董鹏 赵旭东

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 激光熔钎焊是利用两种合金熔点的差异,通过激光加热使低熔点材料(母材和填充材料)熔化,在接头界面与固态高熔点母材相互作用达到冶金结合的异种合金连接方法。按激光能量吸收机制对激光熔钎焊进行了分类,并结合所做工作,阐述了激光熔钎焊方法的发展及研究进展。

关键词 激光技术; 异种合金; 激光熔钎焊; 分类; 反应层; 接头性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0601004

Progress in Laser Fusion Welding-Brazing of Dissimilar Alloys

Xiao Rongshi Dong Peng Zhao Xudong

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

Abstract Laser fusion welding-brazing processes are methods to metallurgically join dissimilar alloys with different melting points by laser heating to melt materials (substrate and filler material) with lower melting point, and by the interaction between the weld pool and the solid substrate with higher melt point at the joint interface. Laser fusion welding-brazing processes of dissimilar alloys are classified according to the laser energy absorption mechanisms. The development and state of the art of laser fusion welding-brazing processes are reviewed.

Key words laser technique; dissimilar alloys; laser fusion welding-brazing; classification; reaction layer; joint properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

为了满足现代装备轻量化、高性能化、结构功能一体和低成本制造的发展要求,将不同特性材料组成各种复合结构必将得到越来越广泛的应用。例如,现代汽车、舰船结构设计和制造希望采用铝/钢复合结构,而现代飞机结构设计和制造则希望将钛合金和铝合金组合在一起。在电力电子和空调制冷等行业中,以铝代铜正成为一种趋势,铝/铜复合结构越来越受到关注。新型陶瓷材料快速发展,应用日益广泛。但是陶瓷材料的可加工性能差、延性和冲击韧性低、耐热冲击能力弱以及制造尺寸大而形状复杂的零件较为困难等,因此通常需要与金属材料组成复合结构来应用。

但是,不同材料的热物理性质往往存在很大差

异,而且有些材料冶金相容性差,熔焊会产生大量金属间化合物,接头性能差,或者根本无法采用熔焊方法进行连接,因此通常采用钎焊和扩散焊等方法。但是,传统钎焊和扩散焊一般需要对连接件进行整体加热,效率低、柔性差、能源浪费大,且连接件的尺寸大小受加热设备的限制,应用上存在很多局限性。

利用激光能量、光斑大小和作用位置的精确可控性和异种合金熔点的差异,激光熔钎焊工艺技术近年来得到快速发展,为难焊异种材料的高效、优质连接提供了新的机遇。激光熔钎焊是利用两种母材熔点的差异,通过激光加热使低熔点母材局部熔化,而高熔点母材基本维持固态,熔化的低熔点母材浸润高熔点母材界面并发生冶金反应从而实现材料的永久连接,亦即在低熔点母材一侧为熔化焊,而在高熔点母材一侧为钎焊。根据激光能量吸收机制的不

收稿日期: 2011-04-14; **收到修改稿日期**: 2011-04-30

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: 肖荣诗(1965—),男,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 & 外围技术与系统等方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(中国光学学会会员号: S040111702)

同,本文将激光熔钎焊接分为激光热导熔钎焊和激光深熔钎焊两大类并结合自己的工作,介绍在这一领域国内外研究的进展。

2 激光热导熔钎焊

激光热导熔钎焊是指通过材料(工件、焊丝)表面吸收激光能量,依靠热传导方式加热/熔化被焊工件和焊丝以实现异种材料连接的熔钎焊方法。激光热导熔钎焊接时,最高温度不能超过高熔点母材的熔点,因此激光功率密度较低,通常采用离焦光束。根据低熔点母材受激光辐照加热熔化方式的不同以

及焊接过程中是否同时施加压力,激光热导熔钎焊又可分为激光间接辐照热导熔钎焊、激光滚压焊和激光直接辐照热导熔钎焊。

2.1 激光间接辐照热导熔钎焊

激光间接辐照热导熔钎焊最先由德国不莱梅应用射线研究所提出^[1~3],通常只适合于薄板搭接接头,激光束全部或大部分主要作用于高熔点母材上,经激光加热后通过热传导方式使低熔点母材加热熔化,如图1所示。根据需要,可以选择是否添加填充材料。当采用填充焊丝时,则必须有一部分激光能量作用于焊丝和低熔点母材上。

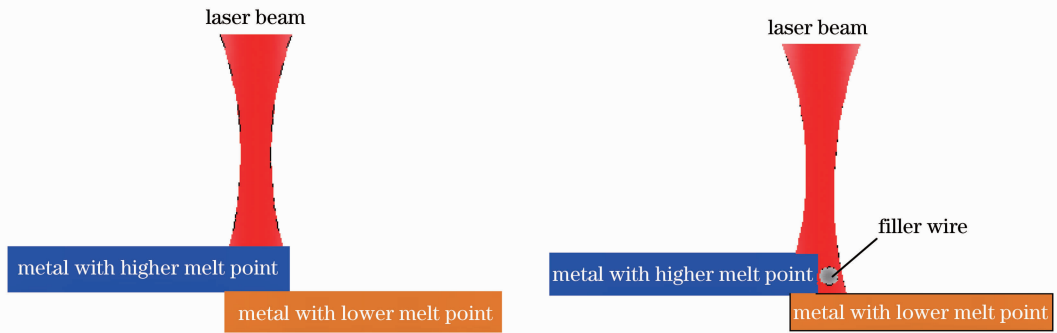


图1 激光间接辐照热导熔钎焊接原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser thermal conduction fusion-brazing by indirect irradiation

采用这种方法,Wagner等^[2]成功实现了0.8 mm厚Ti6Al4V与1 mm厚AlMg0.4Si1.2及0.9 mm厚St14低碳钢与1.0 mm厚6000系列铝合金搭接接头的连接,其中Fe/Al接头强度平均达到170 MPa,而Ti/Al接头强度则超过了AlMg0.4Si1.2母材的强度,达到220 MPa。实验采用Nd:YAG激光器,激

光功率1.6 kW,光斑直径8 mm。在进行Fe/Al接头焊接时,在接头界面上事先涂覆了一层无腐蚀性钎剂。进行Ti/Al接头焊接时,添加了直径为 $\phi 1$ mm的AlSi12焊丝,以改善焊缝成形和接头机械性能。图2为接头焊缝成形及界面组织^[2],金属间化合物层厚度约为3 μm 。

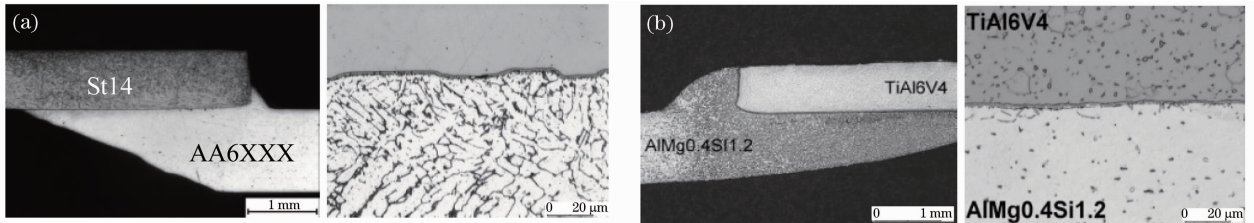


图2 Fe/Al和Ti/Al激光熔钎焊接焊缝截面成形。(a) Fe/Al接头,(b) Ti/Al接头

Fig. 2 Cross section of Fe/Al and Ti/Al joints. (a) Fe/Al joint, (b) Ti/Al joint

丁健军等^[4]采用类似的方法,通过使用钎剂实现了1.2 mm厚XC18低碳钢与0.9 mm厚AA6056铝合金搭接接头的连接,研究发现即使金属间化合物层厚度达到30 μm 也不会产生裂纹。Borrisutthekul等^[5]采用不同冷却热沉,同时改变焊接速度,研究了1.2 mm厚Duel-Ten 590高强钢与1.6 mm厚AA6022-O铝合金激光熔钎焊接界面金属间化合物层厚度与机械性能的关系。研究结果表

明,金属间化合物层厚度随焊接速度的增加和采用高热导率冷却热沉而减小,接头强度与金属间化合物层厚度之间有良好的对应关系,如图3所示^[5]。随着金属间化合物层厚度增加,接头强度降低。当金属间化合物层厚度较厚时,剪切拉伸断裂发生在金属间化合物与钢之间的界面上,而当金属间化合物层厚度较薄时(小于5 μm),断裂发生在金属间化合物与铝之间的界面上。

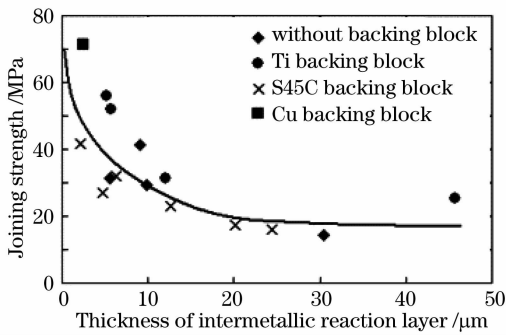


图3 Fe/Al 异种合金接头强度与金属间化合物层厚度之间的关系

Fig. 3 Relationship between joining strength and thickness of intermetallic reaction layer

Takemoto 等^[6]通过在钢和铝板之间添加 0.2 mm 厚的金属 Zn 或 ZnAl5 合金,实现了 1 mm 厚 IF 钢与 1mm 厚 AA6061-T6 铝合金的无钎剂连接。研究发现,采用纯锌时的接头性能优于 ZnAl5 合金,这是由于锌合金中的铝易于氧化,使得浸润性不如纯锌。

2.2 激光滚压焊

Rathod 等^[7~10]在激光间接辐照法的基础上提出了激光滚压焊方法,其原理如图 4 所示。在热和力的共同作用下,成功实现了板厚为 0.5 mm 的 SPCC 低碳钢与板厚为 1.0 mm 的 AA5052 铝合金^[7,8]、板厚为 0.5 mm 的 H4600 工业纯铝与板厚为 1.0 mm 的 AA5052 铝合金^[9]、板厚为 0.55 mm 的镀锌钢与板厚为 1.0 mm 的 6000 系列铝合金 (Al-0.5Mg-1.0Si)^[10]的连接。实验采用 CO₂ 激光器或光纤激光器,激光功率 1.2~2.0 kW。为了增加材料对激光的吸收,焊前在钢或钛表面激光辐照区喷涂了石墨涂层。在优化工艺条件下,当金属间化合物层厚度小于 10 μm 时,静力剪切拉伸均断裂

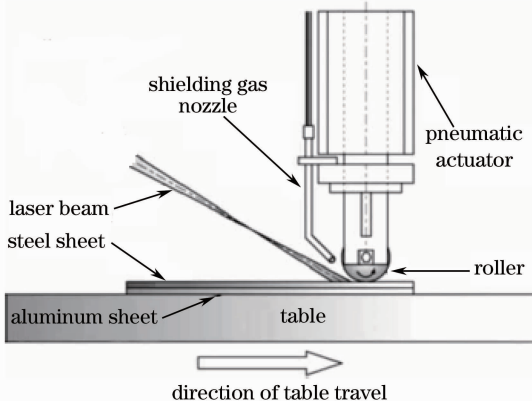


图4 激光滚压焊示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser roll welding

在低碳钢、钛或镀锌钢一侧。杯凸实验结果显示破坏发生在铝合金热影响区,Ericksen 值为母材的 90%左右。实验同时发现,光纤激光滚压焊工艺窗口较 CO₂ 激光更宽,焊接速度更快^[8];而使用钎剂则可显著拓展工艺窗口,改善焊缝成形。图 5 为有无钎剂时 H4600/AA5052 激光滚压焊接头的成形对比^[9]。

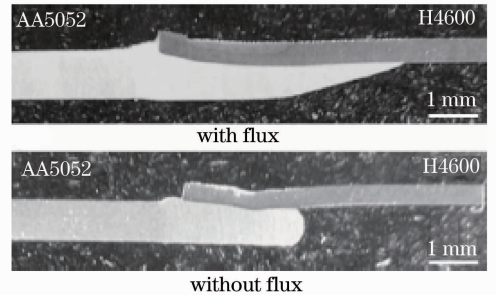


图5 H4600/AA5052 激光滚压焊焊缝成形

Fig. 5 Cross section of H4600/AA5052 laser roll welded joints with and without flux

2.3 激光直接辐照热导熔钎焊

激光间接辐照热导熔钎焊要求被焊材料之间必须紧密贴合,否则很难实现两种材料的可靠连接。激光直接辐照熔钎焊时,低熔点母材直接受激光辐照加热熔化,因此可以容许存在一定的装配间隙,而且除搭接接头外,还可用于对接、角接和卷边对接等多种接头形式,因此应用范围更宽,研究也最为活跃。

搭接仍然是目前研究最多的一种接头形式,激光束或垂直入射,或以一定的角度倾斜入射,根据需要可以采用填充焊丝,如图 6 所示。

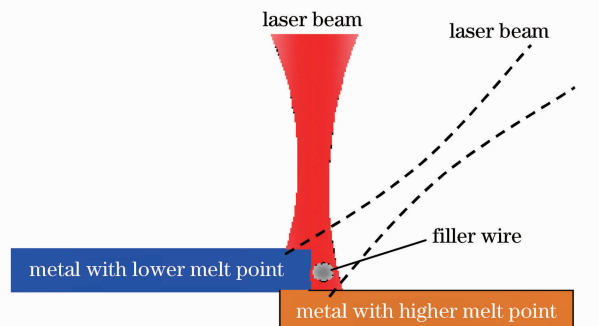


图6 激光直接辐照热导熔钎焊接原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of laser thermal conduction fusion-brazing by direct irradiation

目前,搭接接头激光直接辐照热导熔钎焊的研究集中在铝/钢异种合金。Peyre 等^[11,12]研究了镀锌层及钎剂对 1 mm 厚 AA6016-T4 铝合金与 1.2 mm 厚 DC04 低碳钢搭接接头熔钎焊焊缝成形、界面组织、焊接缺陷及接头性能的影响。实验采用 3 kW

Nd:YAG激光器,激光束与水平面的夹角为 30° ,产生的椭圆形光斑大小为 $2.3 \sim 1.8 \text{ mm}$ 。图 7 为不同焊接速度时浸润角的对比^[11]。可见,镀锌层能够改善铝在钢板表面的铺展浸润性,使用钎剂反而会增大铝在镀锌板表面的浸润角。在相同焊接工艺参数条件下,不使用钎剂的铝合金/镀锌钢钎焊界面金属间化合物层最厚,并且在铝合金焊缝中会存在裂纹和气孔缺陷,接头性能也最差;使用钎剂可显著抑制金属间化合物、裂纹和气孔的生成,原因是在焊接过程中液态钎剂起到了热障作用,限制了镀锌层的蒸发。使用钎剂时铝合金/镀锌钢接头拉伸强度最高,断裂发生在铝合金热影响区。

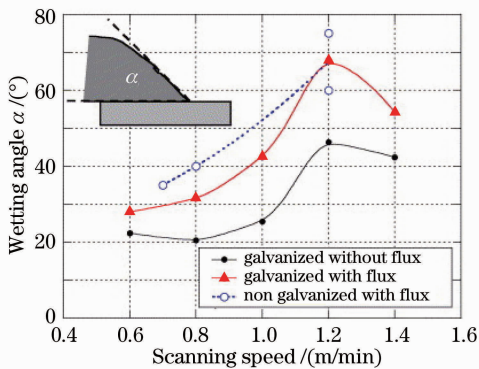


图 7 镀锌层和钎剂对铝/钢激光熔钎焊接浸润角的影响
Fig. 7 Wetting angle for galvanized and non-galvanized steels with or without fluxing

Mathieu 等^[13~17]研究了填充材料对铝/钢激光熔钎焊界面金属间化合物及接头性能的影响。采用锌基焊丝(如 ZnAl15、ZnAl10)时,界面金属间化合物层硬度较低^[13,14,17],有利于防止裂纹的产生。原因是铝同锌的亲合力大,优先形成 Al-Zn 相,剩余的铝与铁形成韧性较好的 FeAl 和/或 Fe₃Al 相^[14]。接头机械性能与界面金属间化合物层厚度有关。当厚度在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 时,接头机械抗力(即单位长度焊缝所能承受的最大拉伸载荷)最高^[14]。当采用铝基焊丝(如 AlSi12、AlMg6Mn)时,界面金属间化合物层硬度很高^[17],接头机械抗力低于锌基焊丝^[14,15,17]。同时,焊接铝合金/镀锌钢时,采用锌基焊丝时接头耐蚀性能也优于铝基焊丝^[16,17]。但是,采用铝基焊丝时,焊缝的硬度较低,接头的弯曲成型能力优于锌基焊丝^[17]。

除了界面金属间化合物及其厚度之外,焊缝几何参数也会影响接头机械抗力。很显然,焊缝搭接宽度(铺展宽度)越大,接头机械抗力越高^[13,15]。采用双光束可以有效改善浸润性,增加焊缝搭接宽

度^[13,17,18]。研究发现,接头机械抗力同焊缝铺展宽度 L 与浸润角 θ 之比存在线性正比关系^[13,14]。图 8 为采用 ZnAl15 焊丝(直径 1 mm)时 AA6016 铝合金(板厚 0.77 mm)/DP600 镀锌低碳钢(板厚 1.2 mm)激光熔钎焊接接头机械抗力与焊缝形成参数(L/θ)的关系。实验采用 Nd:YAG 激光器,光束倾斜入射,光斑直径 $1.5 \sim 2.0 \text{ mm}$,通过改变激光功率、焊接速度和送丝速度来获得不同的焊缝形状参数。

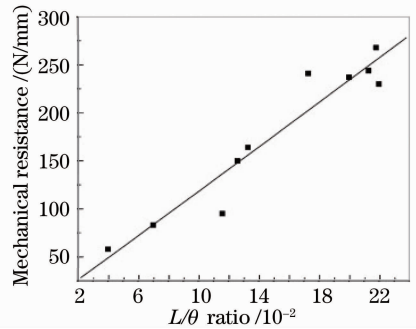


图 8 接头机械抗力与焊缝成形参数的关系
Fig. 8 Relationship of mechanical resistance with joint geometry

雷振等^[19~21]针对异种材料搭接接头提出了激光-脉冲惰性气体保护焊(MIG)复合热源熔钎焊接方法,并采用该方法进行了 T2 紫铜(板厚 1.0 mm)/SECC 冷扎热镀锌钢(板厚 1.2 mm)、5A02 铝镁合金(板厚 1.5 mm)/SECC 冷扎热镀锌钢(板厚 1.2 mm)、5A02 铝镁合金(板厚 1.5 mm)/SAID 镀铝钢(板厚 1.2 mm)以及 5A02 铝镁合金(板厚 1.5 mm)/Q235 非镀层钢(板厚 1.5 mm)熔钎焊接试验,取得较好效果。

陈彦宾课题组^[22~28]采用激光熔化焊丝填充坡口的方法进行了 1.5 mm 厚 5000 系铝合金/Ti6Al4V 钛合金对接接头的连接试验,图 9 为实验布置及焊缝成形。作者详细研究了接头特性、温度分布及界面和焊缝组织特点、气孔形成机理以及坡口形式、光斑形状和辅助电流的影响。认为采用矩形光斑有利于改善接头界面温度分布特性,焊接适应性更好;而辅助电流对焊丝和接头界面的加热作用可以降低焊接所需的激光功率,同时促进液态金属的浸润铺展和界面反应。Mathieu 等^[29]在 2006 年也曾报道了类似的结果,但研究的对象是铝/钢角接接头的焊接。

虽然通过优化坡口、光斑形状、激光入射方式及采用辅助电流等措施可以改善界面温度分布,但单面激光辐照不可避免地存在温度不均匀分布,导致接头不同部位组织性能各不相同。Vaidya 等^[30]采用两侧对称双光束的方法进行了 AA6056 铝合金与

Ti6Al4V 钛合金激光熔钎焊,如图 10 所示。在铝合金一端加工出 U 型槽,铝合金板插入铝合金的 U 型槽内,两束相同功率的激光同时作用于接头两侧,

通过热导焊机制使铝合金加热熔化,浸润铺展在钛合金界面形成熔钎焊缝。这种形式的对接焊,实质上是搭接焊的一种变种。

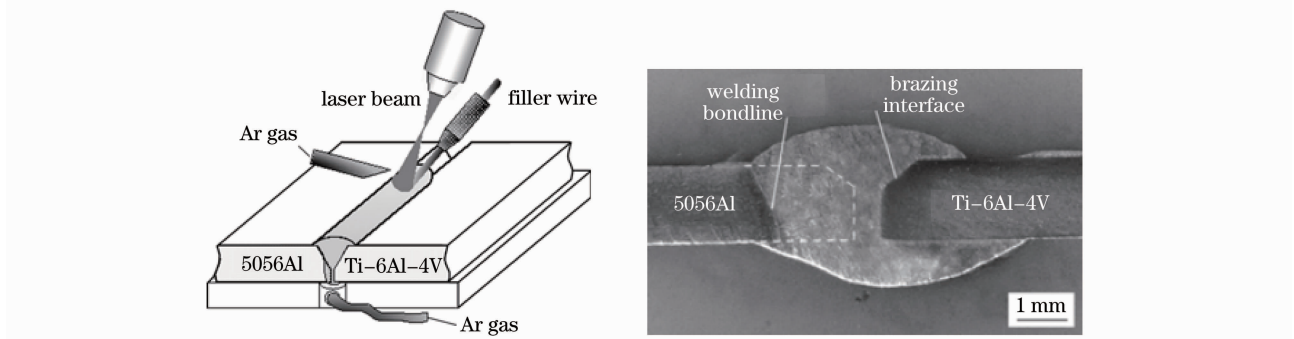


图 9 铝/钛异种合金对接接头激光热导熔钎焊实验布置及焊接成形

Fig. 9 Schematic diagram and a weld cross section of laser thermal conduction fusion-brazing for Al/Ti butt joint with filler wire

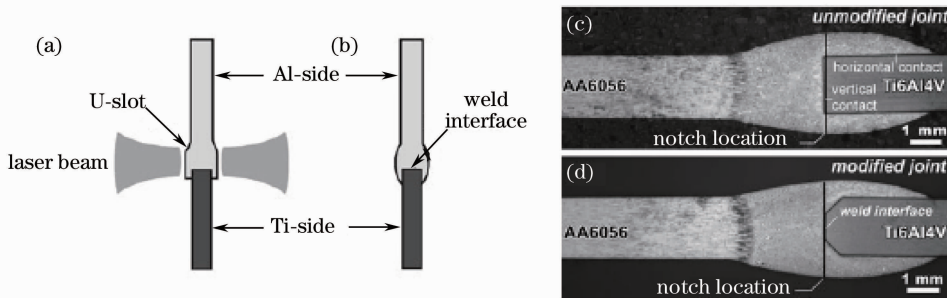


图 10 铝/钛对接接头双面双光束激光热导熔钎焊

Fig. 10 Laser thermal conduction fusion welding-brazing of Al/Ti butt joint by both sides with two beams

3 激光深熔钎焊

受热传导的限制,激光热导熔钎焊接仅适合于薄板焊接。同时,热导焊接模式下金属材料对红外激光的吸收率很低,激光能量的利用率和焊接效率不高。

2005 年北京工业大学提出了一种基于深熔模式的激光熔钎焊工艺方法,并将这种方法称之为激光深熔钎焊。激光深熔钎焊时,聚焦激光束作用于

低熔点母材一侧进行深熔焊接,熔化的低熔点母材金属在接头界面处与高熔点母材通过合金元素的溶解与扩散等相互作用而形成钎接头,即在低熔点母材一侧为激光深熔焊,而在高熔点母材一侧为钎焊,如图 11 所示。采用该方法,在不使用任何钎剂的情况下,目前已实现了 1.2 mm 厚 18-8 奥氏体不锈钢/W-Cu 粉末冶金材料、2 mm 厚 HPb59-1 黄铜/低碳钢、3 mm 厚 AA1060 工业纯铝/T2 紫铜、3 mm 厚 AA6061 铝合金/Ti6Al4V 钛合金对接接头的高效连接^[31~37]。苗玉刚等^[38]采用这种方法也实现了 2.4 mm 厚 AZ31 镁合金与 1.7 mm 厚 Q235 低碳钢不等厚板的对接焊。这些成功的事例说明激光深熔钎焊方法具有较好的普适性。由于材料的熔化是通过激光深熔焊接机制实现的,因此,与激光热传导熔钎焊工艺相比,激光深熔钎焊方法具有以下明显的优势:1) 可以实现具有一定厚度异种合金的连接;2) 激光能量的利用率和焊接效率大大提高;3) 接头钎焊界面不同部位温度不受热传导的限制,易于获得组织性能相对均匀的钎焊接头。

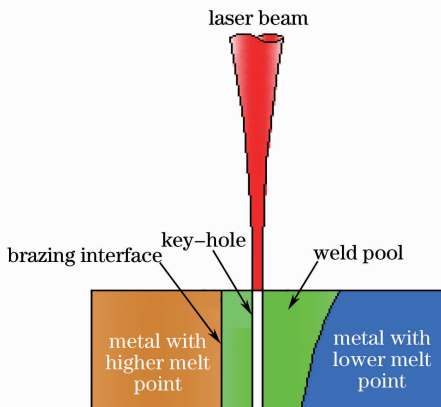


图 11 激光深熔钎焊原理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of laser penetration brazing

图 12 为制冷系统视液窗部件黄铜/低碳钢接头

激光深熔钎焊缝成形及界面显微组织,实验采用 Nd:YAG 激光器,激光功率 1 kW,光斑直径 0.3 mm,焊接速度 1 m/min。由于铜和铁两种元素在固相形成固溶体,虽然从金相组织上看,黄铜焊缝与钢之间没有明显的过渡层,X-射线能谱(EDS)分析结果表明,在界面处存在厚度小于 5 μm 的扩散过渡层^[32]。

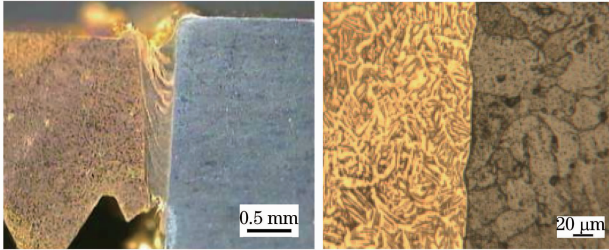


图 12 黄铜/低碳钢激光深熔钎焊缝成形及界面显微组织

Fig. 12 Cross section and interface microstructure of brass/steel joint

图 13 为 AA1060 纯铝/T2 紫铜接头的焊缝成形及界面显微组织,实验采用 Yb:YAG 碟片激光器,激光功率 3 kW,光斑直径 0.3 mm,焊接速度 2 m/min。可见,铝焊缝与铜之间存在厚度为 25 μm 的过渡层,按形貌又可以分为两层:靠铜一侧为不连续分布的柱状晶组织,靠焊缝一侧为连续分布的过渡层。微区透射 X 射线衍射分析结果显示,不连续分布的柱状晶组织为 Al_2Cu , Al_2Cu_3 和 Al_4Cu_9 金属间化合物;靠焊缝一侧为 $\alpha(\text{Al}) + \text{Al}_2\text{Cu}$ 共晶组织^[37]。

图 14 为 AA6061 铝合金/Ti6Al4V 钛合金接头的焊缝成形及界面显微组织,实验采用扩散冷

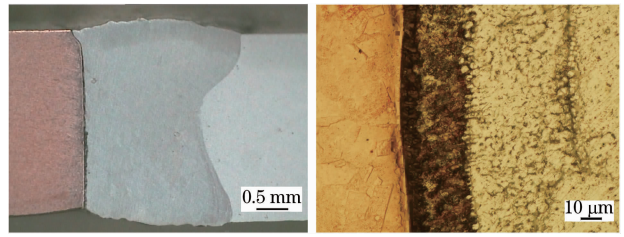


图 13 铝/铜激光深熔钎焊缝成形及界面显微组织

Fig. 13 Cross section and interface microstructure of Al/Cu joint

却 CO_2 激光器,激光功率 3.5 kW,光斑直径 0.27 mm,焊接速度 3 m/min。在焊缝与钛合金之间存在厚度小于 5 μm 的过渡层。在优化焊接参数条件下,接头拉伸强度可达 210 MPa 以上。图 15 为拉伸试验截荷-位移曲线及断裂试样局部照片,断裂虽然发生在焊缝与钛合金的界面处,但靠近焊缝的铝合金母材出现明显颈缩。对断口观察发现界面存在局部未熔合现象,这可能是由于焊接过程波动造成界面温度涨落影响了液态铝在钛合金界面的浸润铺展^[37],同时也提示接头强度还有进一步提升的空间,相关研究尚需要深入。

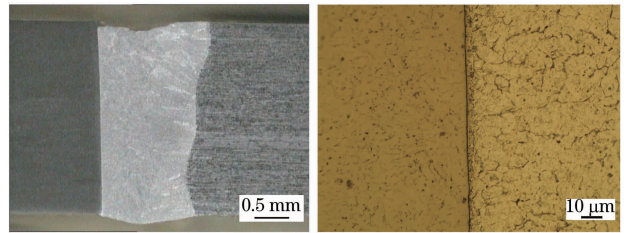


图 14 AA6061/Ti6Al4V 激光深熔钎焊缝成形及界面显微组织

Fig. 14 Cross section and interface microstructure of AA6061/Ti6Al4V

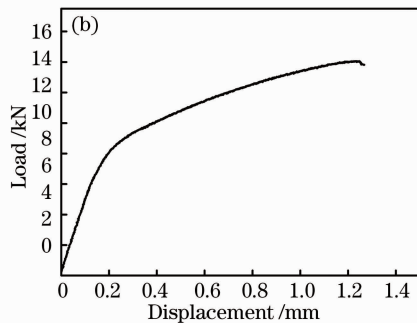
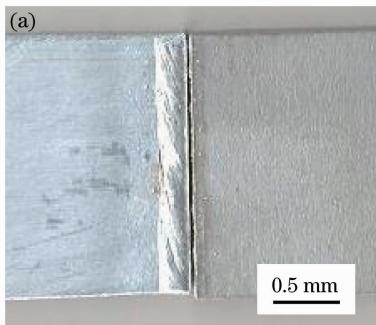


图 15 AA6061/Ti6Al4V 激光深熔钎焊接头拉伸曲线及断裂试样

Fig. 15 Tensile test curve and fractured sample of AA6061/Ti6Al4V

4 结 论

异种材料激光熔钎焊工艺技术的研究已有十余

年的历史,各种方法和技术不断发展,可焊材料组合和接头形式不断拓宽,已取得的研究结果显示出这

种工艺技术良好的应用前景。但是,目前的研究尚处于实验探索阶段,理论和技术都不成熟。针对不同材料体系和接头形式,不断完善工艺技术,揭示界面反应机制和金属间化合物层及焊接缺陷产生的规律、探索接头质量控制新方法等是需要研究的重点和面临的挑战。

参 考 文 献

- 1 C. R. Radschet. Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl[D]. Bremen: Universität Bremen, 1996
- 2 F. Wagner, I. Zerner, M. Kreimeyer *et al.*. Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe/Al and Ti/Al-sheet materials [C]. Munich: Proceedings of the 1st International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, 2001
- 3 E. Schbert, M. Klassen, I. Zerner *et al.*. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry[J]. *J. Mater. Processing Technol.*, 2001, **115**(1): 2~8
- 4 Jianjun Ding, Feiqun Li, Feng Qu *et al.*. Investigation on laser brazing AA6056 Al alloy to XC18 low-carbon steel[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1): 31~34
- 5 R. Borrisutthekul, T. Yachi, Y. Miyashita *et al.*. Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2007, **467**(1-2): 108~113
- 6 T. Takemoto, S. Kimura, Y. Kawahito *et al.*. Fluxless joining of aluminium alloy to steel by laser irradiation method[J]. *Weld. Internat.*, 2009, **23**(5): 316~322
- 7 M. J. Rathod, M. Kutsuna. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding [J]. *Weld. J.*, 2004, **83**(1): 16s~26s
- 8 H. Ozaki, M. Kutsuna. Laser-roll welding of a dissimilar metal joint of low-carbon steel to aluminium alloy using 2 kW fibre laser [J]. *Weld. Internat.*, 2009, **23**(5): 345~352
- 9 H. Ozaki, S. Hayashi, M. Kutsuna. Laser roll welding of a dissimilar metal joint of titanium to aluminium alloy[J]. *Weld. Internat.*, 2009, **23**(7): 501~509
- 10 H. Ozaki, M. Kutsuna, S. Nakagawa *et al.*. Laser roll welding of dissimilar metal joint of zinc coated steel to aluminium alloy [J]. *J. Laser Appl.*, 2010, **22**(1): 1~6
- 11 P. Peyre, G. Sierra, F. Deschoux-Beaume *et al.*. Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2007, **444**(1-2): 327~338
- 12 G. Sierra, P. Peyre, F. Deschoux-Beaume *et al.*. Galvanised steel to aluminium joining by laser and GTAW processes [J]. *Mater. Characterization*, 2008, **59**(12): 1705~1715
- 13 A. Mathieu, R. Shabadi, A. Deschamps *et al.*. Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire)[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, **39**(3): 652~661
- 14 C. Dharmendra, K. P. Rao, J. Wilden *et al.*. Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2011, **528**(3): 1497~1503
- 15 G. Sierra, P. Peyre, F. Deschoux-Beaume *et al.*. Steel to aluminium braze welding by laser process with Al-12Si filler wire [J]. *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2008, **13**(5): 430~437
- 16 J. Wloka, H. Laukant, U. Glatzel *et al.*. Corrosion properties of laser beam joints of aluminium with zinc-coated steel [J]. *Corrosion Sci.*, 2007, **49**(11): 4243~4258
- 17 H. Laukant, E. Guimaraens, U. Glatzel. Laser beam aluminium-steel joints-mechanical and dynamical properties and detailed microstructural analysis of intermetallic FeAl-phases[C]. Proc. ICALEO, 2007. 588~595
- 18 K. Saida, H. Ohnishi, K. Nishimoto. Fluxless laser brazing of aluminum alloy to galvanized steel using tandem beam-dissimilar laser brazing of aluminium alloy and steels[J]. *Weld. Internat.*, 2010, **24**(3): 161~168
- 19 Lei Zhen, Qin Guoliang, Wang Xuyou *et al.*. Brazing welding for dissimilar metals between copper and steel by Nd:YAG laser pulsed MIG hybrid welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(12): 18~25
- 20 Lei Zhen, Yu Ning, You Aiqing *et al.*. Fusion brazing joining between 5A02 aluminium alloy and Q235 steel by Nd:YAG laser pulsed MIG hybrid welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(6): 21~24
- 21 Lei Zhen, Qin Guoliang, Lin Shangyang *et al.*. Fusion-brazing joining for dissimilar metals between 5A02 aluminium alloy and Zn-coated steel based on laser-MIG hybrid welding [J]. *J. Mechanical Engineering*, 2009, **45**(3): 94~98
- 22 Ni Jiaming, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Interface characteristic and property of Ti/Al dissimilar alloys joint with laser welding-brazing[J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2007, **17**(4): 617~622
- 23 Chen Shuhai, Li Liqun, Chen Yanbin. Welding characteristics of Al/Ti dissimilar alloys by laser welding-brazing with different spot[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(6): 49~52
- 24 Chen Shuhai, Li Liqun, Chen Yanbin. Interface characteristic and property of Ti/Al dissimilar alloys joint with laser welding-brazing[J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2008, **18**(6): 991~996
- 25 Feng Xiaosong, Chen Shuhai, Li Liqun *et al.*. Temperature distribution of Al/Ti dissimilar alloys joint in laser welding-brazing [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, **30**(10): 9~16
- 26 Chen Shuhai, Li Liqun, Chen Yanbin. Formation mechanism of porosity in laser welding-brazing of Ti/Al dissimilar alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, **39**(1): 32~36
- 27 Chen Shuhai, Li Liqun, Tao Wang *et al.*. Laser welding-brazing characteristics of Ti/Al dissimilar alloy with assistant current[J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2009, **19**(11): 1942~1947
- 28 Chen Shuhai, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process [J]. *J. Alloys Compounds*, 2011, **509**(3): 891~898
- 29 A. Mathieu, S. Pontevicci, J. Viala *et al.*. Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si) [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2006, **435-436**: 19~28
- 30 W. V. Vaidya, M. Horstmann, V. Ventzke *et al.*. Improving

- interfacial properties of a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications[J]. *J. Mater. Sci.*, 2010, **45**(22): 6242~6254
- 31 Kai Chen, Zhiyong Wang, Rongshi Xiao *et al.*. Mechanism of laser welding on dissimilar metals between stainless steel and W-Cu alloy[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5): 294~296
- 32 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
- 33 Chen Kai, Xiao Rongshi, Pi Youdong *et al.*. Laser penetration brazing of brass and low carbon steel[C]. Proc. ICALEO, 2007
- 34 Xiao Rongshi, Dong Peng, Chen Kai. Laser beam welding of dissimilar materials[C]. Proc. ICALEO, 2009. 660~665
- 35 Dong Peng, Chen Kaihua, Xiao Rongshi. Laser welding of dissimilar metals between aluminum and copper[C]. Harbin: Proc. 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]. 哈尔滨: 第13届全国特种加工学术会议论文集, 2009. 459~462
- 36 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
- 37 Dong Peng. Investigation on Laser Penetration Brazing of Dissimilar Alloys[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011
董 鹏. 异种合金激光深熔钎焊机理及技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011
- 38 Miao Yugang, Han Duanfeng, Yao Jingzhen *et al.*. Welding characteristics of laser penetration welding-brazed Mg/steel dissimilar alloys [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, **32**(1): 45~48
苗玉刚,韩端锋,姚竞争 等. 镁/钢异种合金激光深熔钎焊工艺特性[J]. *焊接学报*, 2011, **32**(1): 45~48