

铝与异种金属激光焊接研究进展

马志华¹, 李娜², 康胜强¹

1. 宁波均普智能制造股份有限公司 浙江宁波 315040

2. 金丰(中国)机械工业有限公司 浙江宁波 315221

摘要: 由于铝与铜、钢等异种材料理化性能存在差异性,使其与异质材料焊接时生成金属间化合物,其硬度高、脆性大的特性会削弱接头的力学性能,使其结构件的焊接可靠性较差。然而,高效、高品质的激光焊接实现铝和异种材料的可靠连接成为焊接学者的研究热点。综述了国内外学者针对铝-铜、铝-钢、铝-镁等不同材质接头激光焊接的研究现状,总结了铝和异种金属材料激光焊接过程中控制金属间化合物的方法。

关键词: 金属间化合物; 激光焊接; 异种金属

Research development of the aluminum and dissimilar metals laser welding

MA Zhihua¹, LI Na², KANG Shengqiang¹

1.Ningbo PIA Automation holding Corp., Ningbo 315040, Zhejiang, China

2.Chin Fong(China) Machine industry Co., Ltd., Ningbo 315221, Zhejiang, China

Abstract: Due to the great difference in chemical compounds and physical properties between aluminum and steel, copper et al dissimilar metals, moreover, intermetallic compounds are easily formed during welding process, and its harden and brittle properties can reduce the mechanical properties of the welding joints, resulting in poor reliability of the structural components. Therefore, efficient and high quality laser welding to achieve reliable connection between aluminum and dissimilar metals has become a research hotspot for welding scholars. In this paper, research development of the aluminum and dissimilar metals laser welding in aluminum and copper, aluminum and steel, aluminum and magnesium is reviewed, and the methods of controlling intermetallic compounds during laser welding of aluminum and dissimilar metals are summarized.

Keywords: intermetallic compound; laser welding; dissimilar metals

1 序言

随着新能源汽车、航空航天等制造领域对结构件设计和制造要求的不断提升,单纯某一种金属材料的结构件难以满足制造领域对轻量化和性能的要求^[1, 2],而铝及铝合金以其优异的导电性和密度小等

特点,是轻量化的理想材料,因此采用铝代替铜、铁等金属可以实现轻量化的需求^[3-6]。由于铝与铜、钢、镁等异种材料理化性能的差异性,导致铝与异种金属之间非常容易形成脆性的金属间化合物^[7-12],会降低焊接接头力学性能。因此,提高铝与异种材

第一作者: 马志华, 硕士, 工程师, 主要从事金属材料MIG/MAG焊、搅拌摩擦焊及激光焊接工艺及智能焊接系统开发,

E-mail: mazhihua0301@163.com。

通信作者: 李娜, 硕士, 工程师, 主要从事冲床结构及可靠性设计研究, E-mail: mzhbky2012@163.com。

料的激光焊接接头的可靠性,对提升其应用具有重要意义。近年来,国内学者对铝和异种金属激光焊接进行了较多研究,但是对铝和异种金属的综述较少。本文总结了铝-铜、铝-钢铝-钛异种金属激光焊接的研究进展。

2 铝与异种材料激光焊接的国内外研究现状

2.1 铝-铜异种金属激光焊接的研究现状

由于铝和铜具有优异的导电、加工等性能,因此在动力电池、储能等新能源汽车领域有着广泛的应用,然而铝-铜异种材料理化特性存在差异,铜的热导性能、熔点等物理性能都高于铝材^[13-16],造成铝或铝合金与铜两种材料的异种金属材料一般采用激光或电子束等高能束焊接方式^[17-20],然而电子束焊因其柔性差、价格昂贵等原因,一般应用在军工及航空航天等领域。因此,研究采用激光焊接实现其可靠连接,对提升其应用具有重要意义。

铝-铜激光焊接时,接头失效主要是由脆性金属间化合物导致的,国内外学者对焊接后产生的金属间化合物的分布及种类,以及其对接头力学性能的影响进行了大量研究。天津大学薛志清等^[21]使用Nd:YAG激光器进行了铜上铝下(0.3mm厚T2纯铜和0.3mm厚1060纯铝)搭接接头的激光焊接试验,通过焊接熔池流体力学数值模拟及焊缝组织性能分析,研究了焊缝组织形貌及其分布。结果表明,铝-铜异种金属在激光焊接过程中,由于其物理和化学性能的差异,导致焊接时液态金属熔池出现比较大浓度梯度和温度梯度,所以两侧母材熔合区之间出现“山丘”过渡层(见图1),且过渡层呈现不同的焊缝金相组织特征,铝-铜接头SEM显微组织如图2所示。

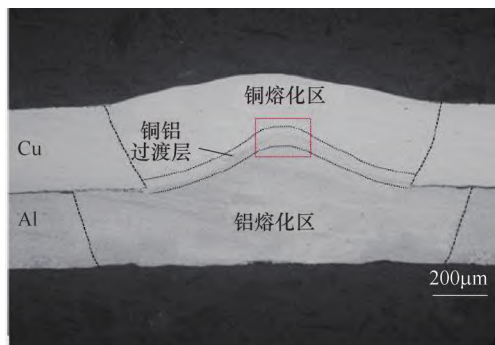


图1 铝-铜激光焊接接头宏观形貌

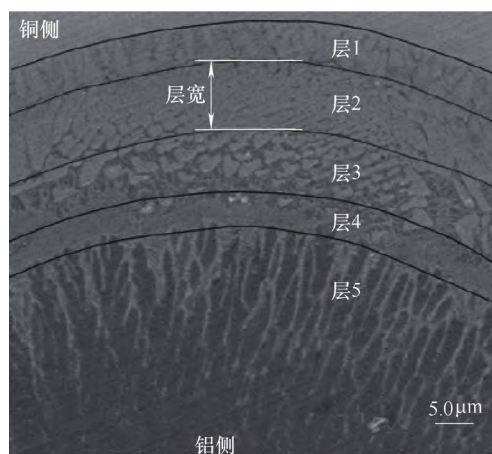


图2 铝-铜接头SEM显微组织

铝-铜在激光焊接过程中,由于熔点的差异较大,所以导致其在焊接过程中发生铝侵入铜的现象,而且随着热输入的增加,这种现象越明显。左迪^[22]采用YAG光纤激光器实施铜上铝下异种材料的激光焊接研究。结果发现,焊接接头呈现“铝侵入铜”的截面形式,而且“铝侵入铜”的程度随焊接热输入的增加而增强。由于铝、铜熔点和导热性能的差异,因此焊缝没有出现像同质材料焊接接头一致的熔合线,且铝侧的焊缝熔宽明显大于铜侧的焊缝熔宽,如图3所示。另外,对断口形貌及其成分分析发现,质量分数为20.08%~54.65%铜含量区对裂纹较为敏感,硬脆的 CuAl_2 金属间化合物是导致断裂的主要相。

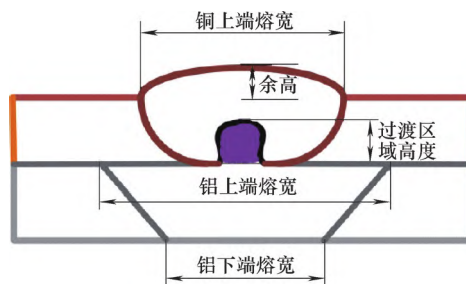


图3 铝-铜激光焊接接头形貌示意

通过控制焊接热输入和增加中间过渡层结合是控制金属间化合物的手段之一。闫胜鸿^[23]采用通快TruDisk4002碟片激光器进行铝上铜下(铝、铜厚度均为1.6mm)搭接接头激光焊接,分析了不同热输入条件下及添加镍箔过渡层后焊接接头的组织分布。结果表明,在不同的热输入条件下金属间化合物分层及其厚度随焊接热输入的增加而增加,如图4所示。这是由于随着热输入增加,焊缝中的铜含

量增加,而且更大的热输入导致焊缝凝固变缓,因此有利于金属间化合物的形成。而添加镍箔作为铜铝过渡夹层后,在焊接接头内可明显看到固溶体,而且焊接接头中铜固溶体随着热输入的增加,界面处的固溶体厚度先增加后减小,究其原因是在一定的热输入范围内Ni抑制了Al向熔池中扩散,但是随着热输入的持续增加,更多的铝-铜基材熔化量,以致熔池中Ni元素的相对含量降低,对元素扩散的抑制效应降低,因此固溶体的含量降低,如图5、图6所示。吴雁等^[24, 25]通过选用IPG YLS-1500光纤激光器进行0.3mm厚TU1镀镍铜和2mm厚6061铝合金搭接接头激光焊接试验(铝上铜下)。结果表明,随

着激光功率增加,焊接接头的剪切力先增后减,在1100W的功率下取得最大剪切力,如图7所示。归其原因是由于随着焊接热输入的增加,导致铝铜之间的混合比增加,因此脆性大、硬度高的金属间化合物在焊接接头中形成,导致铝-铜焊接接头力学性能下降。而随着焊接速度的增加,焊接接头的剪切力也是先升后降,在55mm/s时取得最大值,如图8所示。究其原因是在前期焊接速度低时,热输入较大,焊缝中生产较多的脆性金属间化合物,恶化铝-铜激光焊接接头的剪切性能,但是随着焊接速度的增加,焊接热输入降低,焊缝中铝-铜混合比也随之降低,接头中含有较少的金属间化合物。

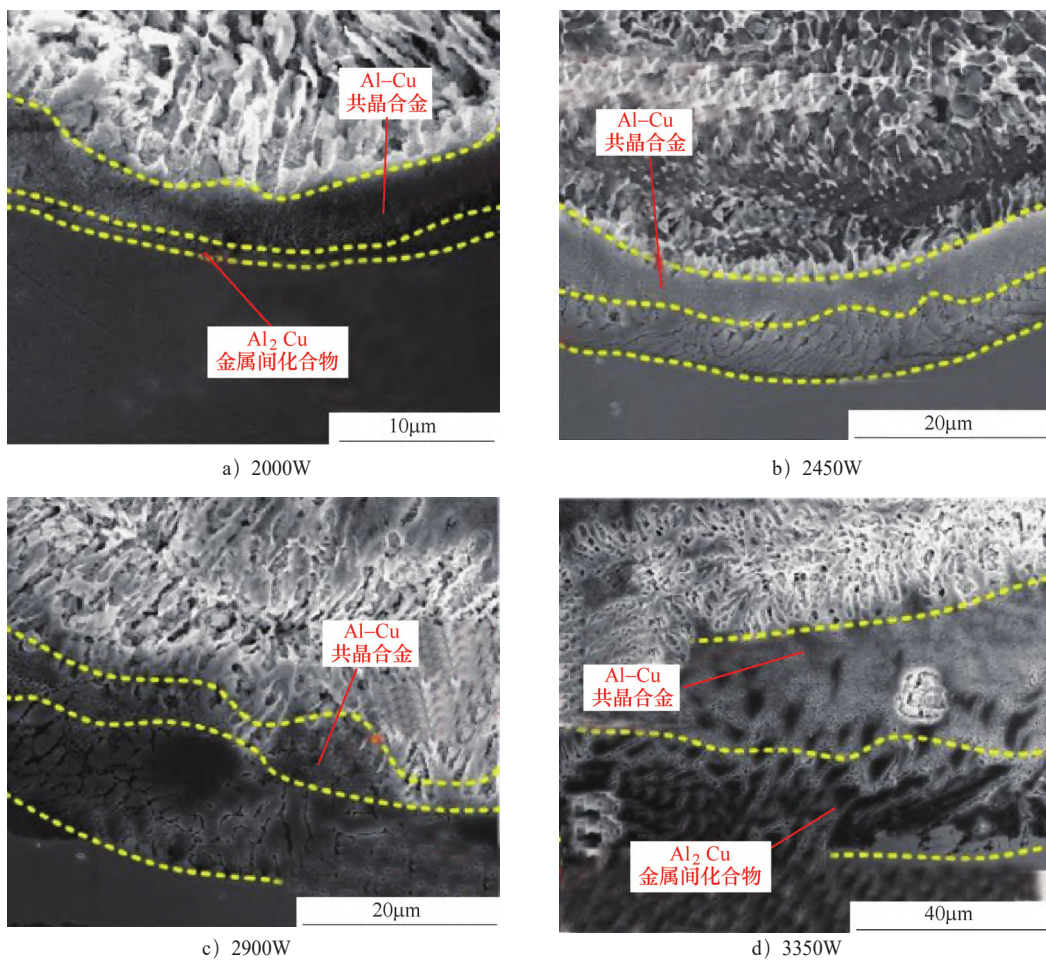


图4 不同功率的铝-铜激光焊接接头微观组织

2.2 铝-钢异种材料激光焊接的研究现状

近年来,由于新能源汽车的发展及汽车减重的要求,铝-钢混合接头的结构件是其研究方向,然而如何实现铝和钢优质、可靠连接是亟待解决的问题^[26-28]。由于铝-钢较大差异的理化性能^[29-32],使其在焊接时

易产生脆硬的金属间化合物等问题,会使焊接接头塑性变差,进而恶化铝钢结构件的可靠性^[33-37]。因此,控制激光焊接时其金属间化合物的生成,对于提升铝-钢激光焊接的应用具有重要意义。

通过控制焊接热输入,进而减少铝-钢接头中金

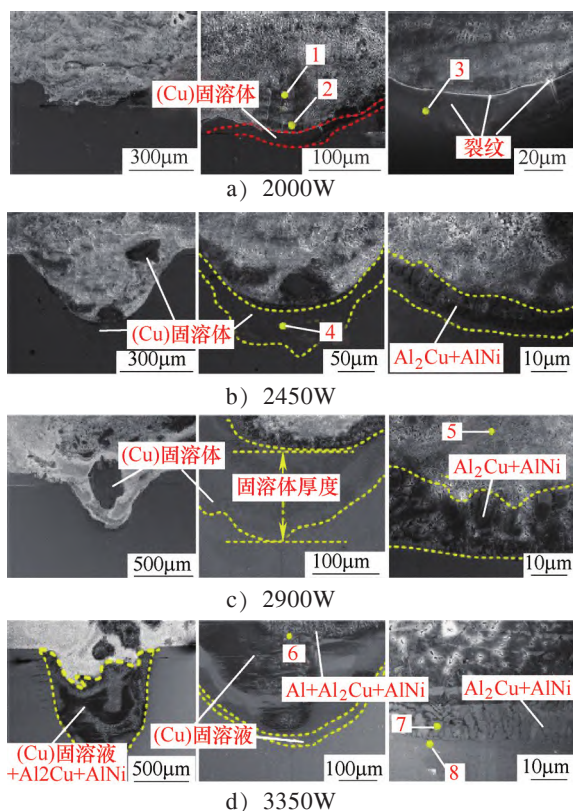


图5 不同功率条件下Ni 箔夹层的铝-铜焊缝区域的微观组织

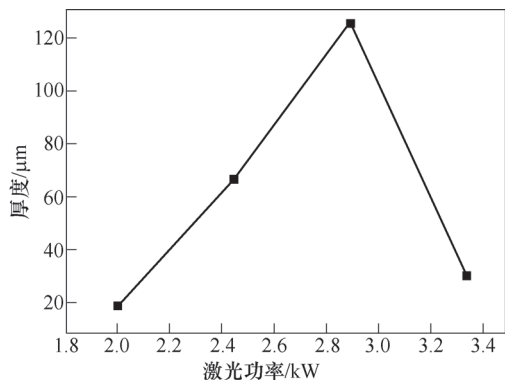


图6 带镍过渡层时激光功率对固溶体厚度的影响

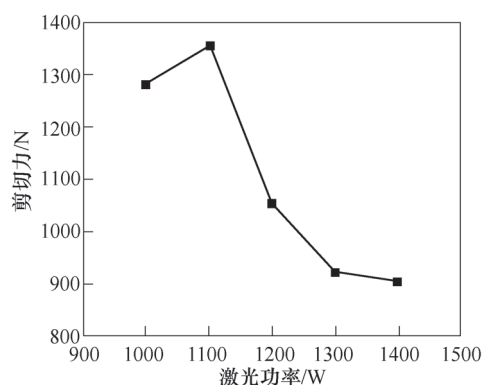


图7 不同激光功率下铝-铜激光焊接接头的剪切力

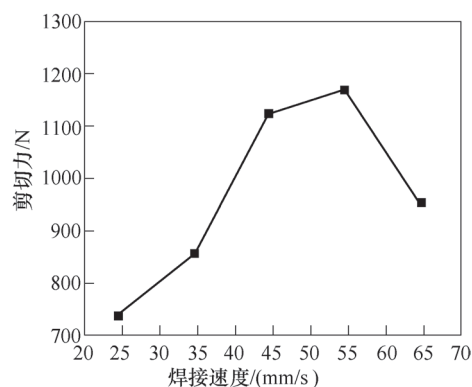


图8 不同速度下铝-铜激光焊接接头的剪切力

属间化合物的产生，国内学者进行了相关研究。闫飞等^[38]采用IPGYLS-4000光纤激光器进行1mm厚的DP590镀镍钢和6061铝合金搭接接头（钢上铝下）激光焊接研究。结果表明，铝-钢异种材料焊接接头中的金属间化合物主要由 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 、 $\text{Fe}_2\text{Al}_{15}$ 、 Fe_3Al 及 FeAl_3 组成，焊接接头XRD分析结果如图9所示。巴一等^[39]采用TruDisk10002碟片激光器对1.3mm厚的双相钢和1mm厚的5083铝合金进行搭接接头激光焊接研究。结果发现，铝-钢激光焊接接头的剪切试验均在铝-钢接头结合面处断裂，如图10所示。究其原因该处存在大量的脆硬钢铝金属间化合物，在外力载荷的作用下失效。而且随着焊接热输入的增加，接头力学性能先增加后减少，主要原因是当激光功率较低时，激光仅熔化铝-钢母材，使得铝-钢未形成较深的熔深，金属间化合物生成受到限制，随着激光功率的增加，铝-钢大量熔化，接头产生较厚的金属间化合物，进而恶化焊接接头力学性能。刘瑞林等^[40]对比不同热源下接头的组织和性能，研究发现金属间化合物的厚度与热输入大小有关。

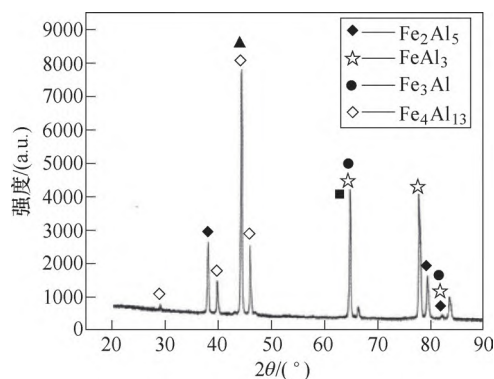
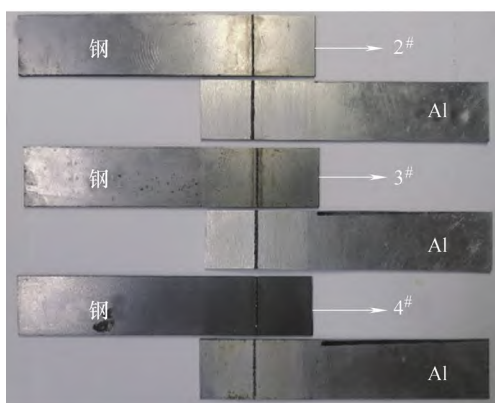
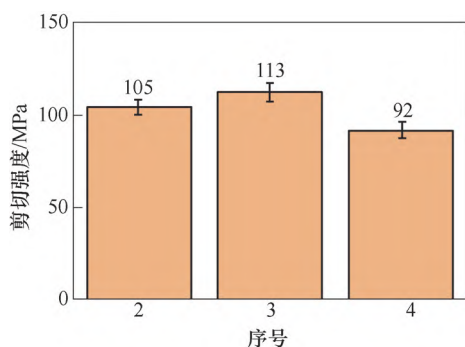


图9 焊接接头XRD分析结果



a) 试样形貌



b) 剪切性能

图10 不同激光功率下接头剪切性能

添加金属过渡层是异种材料激光焊接常用的方法。杨旭东等^[41]通过添加铜箔中间层来改善铝-钢激光焊接接头性能。研究发现,添加的铜箔过渡层后,改善了钢、铝的高温流动性,并抑制了铝向钢的扩散,避免了钢在接头的聚集,进而抑制了脆硬金属间化合物的生成。CAO等^[42, 43]研究了工艺参数和过渡夹层对不锈钢和6061铝合金异种材料激光焊接接头的影响。结果表明,添加0.05mm厚的铜箔和0.1mm厚的镍箔后,通过优化焊接参数,焊缝中 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 等金属间化合物合成量减少。从以上研究可看出,通过控制铝-钢异种材料激光焊接接头的熔深,可以降低铝-钢元素在接头中的混合比,进而降低金属间化合物的形成;通过添加过渡层来改变铝-钢接头的冶金反应,进而抑制焊接接头中的脆硬金属间化合物的形成,未来两者的结合会是抑制金属间化合物的研究方向。

2.3 铝-镁异种金属材料激光焊接研究现状

近年来,随着轻量化要求,部分构件中镁代替铝以实现减重需求,然而铝-镁异种材质理化性能的差异性,导致铝-镁焊接接头的可靠性

成为限制其应用的瓶颈^[44, 45]。而控制铝-镁金属间化合物的含量和分布是提升其可靠性的关键问题之一。

通过添加中间过渡层来抑制铝-镁异种金属材料激光焊接中间化合物的生产。麻丁龙等^[46]采用IPG YLS-4000光纤激光器对AZ31B和5083铝合金进行添加或不添加锌箔焊接试验研究。结果表明,加入锌箔后,铝-镁异种材料的熔池冶金特征由Al-Mg二元冶金体系转变成Al-Zn-Mg三元冶金体系,而且随着锌过渡层厚度的增加,铝-镁接头中脆硬的 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 金属间化合物含量明显减少,且组织分布的均匀性得到改善,焊接接头的剪切性能得到提升。周惦武等^[47, 48]进行高熔点镍、钛夹层对铝/镁异种材料搭接接头激光焊接接头组织性能影响研究,搭接形式为镁上铝下。结果表明,添加镍、钛夹层后,焊接接头的形状由V形变为酒杯状,并对液态铝-镁在焊接熔池的扩散起到一定的阻隔作用,抑制了铝元素扩散到焊接熔池中,使得铝-镁接头的力学性能得到提升。通过以上分析,通过添加过渡层后,镁、铝异种材料的冶金反应由二元体系转变成三元体系,过渡层具有阻隔液态熔池中Al、Mg元素扩散的作用。

2.4 铝-钛异种金属材料激光焊接研究现状

钛及钛合金以其优异的力学性能及耐蚀性而应用广泛,但是其价格较高,限制了其应用。然而铝取代钛合金可以降低成本。由于钛与铝物理及化学性能差异较大,两者在焊接时形成多种复杂的脆性金属间化合物,因此导致接头力学性能较差。

铝-钛异种金属在激光焊接接头力学性能受到金属间化合物影响,因此学者对其产生的种类及对力学性能的影响展开了研究。郭顺等^[49]通过采用4mm厚的钛合金和铝合金进行光纤激光焊接。研究发现,钛元素以突出条状的方式侵入铝中,在钛侵入较多的地方,铝元素含量较低。而且在铝-钛界面处形成具有取向性的多种金属间化合物,包括 TiAl 、 TiAl_3 、 Ti_3Al 等。王佳杰等^[50]研究发现,铝-钛异种接头激光熔钎焊异种接头界面的金属间化合物呈现锯齿状,且分布为絮状的连续层和芽状的非连续层,连续层的厚度约为 $5\mu\text{m}$ 。

金属间化合物的形成受到焊接热输入的影响,主要原因是随着热输入的增加,铝、钛混合比增加,较多的金属间化合物在界面处形成。郭亮等^[51]

研究了焊接速率对铝-钛异种合金接头性能的影响。结果表明,当焊接速率 $<20\text{mm/s}$ 时,即焊接热输入较大时,界面生成 $16\mu\text{m}$ 厚的 Ti_3Al 、 TiAl 、 TiAl_3 等脆性金属间化合物;当焊接速率 $>80\text{mm/s}$,即焊接热输入较小时,界面生成厚 $4\mu\text{m}$ 左右的 TiAl_3 金属间化合物,接头力学性能较好。李永梅等^[52]通过采用 6000W 光纤激光器对TC4钛合金和6系铝合金进行激光熔钎焊,分析焊接热输入对接头的组织和性能的影响。研究发现,当焊接热输入 $>1.33\text{kJ/cm}$ 时,在异种接头界面处生成较多的脆性金属间化合物,且金属间化合物以 TiAl_2 、 TiAl_3 为主,如图11a、b所示;当焊接热输入 $<1.33\text{kJ/cm}$ 时,金属间化合物以 TiAl_3 为主,且厚度较薄,约为 $1\mu\text{m}$,如图11c、d所示。通过以上研究可看出,铝-钛激光焊接可以通过优化焊接热输入达到控制金属间化合物的种类和厚度的目的。

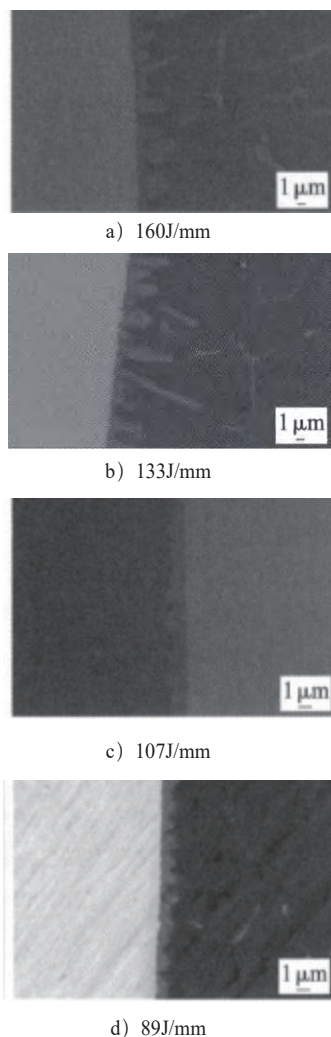


图11 不同热输入的接头界面微观组织

3 未来发展方向及展望

激光焊接以其高效、高品质的焊接特性,成为铝与异种金属连接的不二选择,随着单模激光器和绿光激光器的发展,使激光焊接在铝与异种金属焊接方面具有较大的应用前景。随着新能源电池等领域的发展,对铝-铜、铝-钢等异种材料的可靠性连接提出更高要求。目前,部分学者的研究重点还处于通过添加金属过渡层,如铝-铜接头通过镍过渡层、铝-钢接头通过铜箔过渡层、铝-镁接头通过锌箔过渡层来调控接头冶金体系或者抑制元素扩散等目的达到抑制有害金属间化合物生成的目的。在未来,通过优化激光光束质量来实现控制异种金属激光焊接的热输入,进而控制异种金属之间的元素混合比,达到抑制金属间化合物生成的目的是未来异种金属焊接技术发展的方向之一。

参考文献:

- [1] 李红, 刘旭升, 张宜生, 等. 新能源电动汽车异种材料连接技术的挑战、趋势和进展[J]. 材料导报, 2019, 33 (23): 3853-3861, 3881.
- [2] 檀财旺, 夏鸿博, 宋晓国. 异种金属激光焊接[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2022.
- [3] 张义, 张初琳. 异种金属焊接技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [4] 李亚江, 王娟. 异种难焊材料的焊接及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [5] 冯吉才. 异种材料连接进展[J]. 航空学报, 2022, 43 (2): 1-37.
- [6] 钟素娟, 张丽霞, 龙伟民, 等. 异质材料连接研究进展[J]. 电焊机, 2020, 50 (9): 118-133.
- [7] 栗卓新, 张冬妮, 言奇株, 等. 异种材料激光焊接中金属间化合物形成机理及控制的研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64 (15): 14-23.
- [8] 马军龙. 铝-镍异种金属激光焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2023 (12): 59-61.
- [9] WALLERSTEIN D, LUIS S E, LUSQUINOS F, et al. Advanced characterization of intermetallic compounds in dissimilar aluminum-steel joints obtained by laser welding-brazing with Al-Si filler metals[J]. Materials Characterization, 2021, 179: 111345.
- [10] SELVAMANI S T. Various welding processes for

- joining aluminium alloy with steel: Effect of process parameters and observations-a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part C, 2022, 236 (10) : 5428-5454.
- [11] CHENG Q R, ZHANG P L, SHI H C, et al. Study on microstructure and mechanical properties of aluminum-copper dissimilar metals joints by nanosecond laser spiral welding[J]. Transactions of the Indian Institute of metals, 2022, 75 (10) : 2517-2528.
- [12] DIMATTEO V, ASCARI A, LIVERANI E, et al. Experimental investigation on the effect of spot diameter on continuous-wave laser welding of copper and aluminum thin sheets for battery manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 145: 107495.
- [13] LEE S J, NAKAMURA H, KAWAHITO Y. Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19 (2) : 111-118.
- [14] FORTUNATO A, ASCARI A. Laser welding of thin copper and aluminum sheets: Feasibility and challenges in continuous-wave welding of dissimilar metals[J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2019, 6 (2) : 136-157.
- [15] DIMATTEO V, ASCARI A, FORTUNATO A. Continuous laser welding with spatial beam oscillation of dissimilar thin sheet materials (Al-Cu and Cu-Al) : Process optimization and characterization[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 158-165.
- [16] LERRA F, ASCARI A, FORTUNATO A. The influence of laser pulse shape and separation distance on dissimilar welding of Al and Cu films[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 331-339.
- [17] YAN S H, SHI Y. Influence of laser power on microstructure and mechanical property of laser-welded Al/Cu dissimilar lap joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 312-321.
- [18] HOLLATZ S, HEINEN P, LIMPET E, et al. Overlap joining of aluminium and copper using laser micro welding with spatial power modulation[J]. Welding in the World, 2020, 64 (3) : 513-522.
- [19] 孔德群, 周建, 李轩, 等. 汽车电池铝/铜激光搭接焊接的先进无损检测技术进展[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (6) : 70-74.
- [20] 吴雁, 肖礼军, 郭立新, 等. 铜/铝异种材料激光焊接的研究综述[J]. 应用激光, 2021, 41 (2) : 261-270.
- [21] 薛志清, 胡绳荪, 左迪, 等. 铜铝异种金属激光焊接接头组织特征及力学性能[J]. 焊接学报, 2013, 34 (10) : 51-54.
- [22] 左迪. 铜-铝异种金属激光焊接研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [23] 闫胜鸿. 铝/铜异种金属激光焊接技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [24] 吴雁, 郭立新, 肖礼军, 等. 激光焊接工艺参数对铜/铝异种材料焊缝成形及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50 (17) : 46-49, 58.
- [25] 吴雁, 郭立新, 肖礼军, 等. 铜铝异种金属激光焊接焊缝成形和组织[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45 (1) : 66-69.
- [26] 韩善果. 铝/钢异种金属双光束激光焊接传热与组织性能调控研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [27] 王曼, 于治水, 张培磊, 等. 铝钢激光焊接研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (23) : 10-14.
- [28] 闫玉东, 韩明臻, 延佳铭. 钢/铝异种金属焊接分析[J]. 信息记录材料, 2021, 22 (10) : 18-20.
- [29] 王晓虹, 谷晓燕, 孙大千. 钢/铝异种金属激光焊接接头界面特性的研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53 (4) : 26-33.
- [30] YUAN R, DENG S J, CUI H C, et al. Interface characterization and mechanical properties of dual beam laser welding-brazing Al/steel dissimilar metals[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 40: 37-45.
- [31] ZHOU L, LUO L Y, TAN C W, et al. Effect of welding speed on microstructural evolution and mechanical properties of laser welded-brazed Al/brass dissimilar joints[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 234-246.
- [32] 董显, 董博文, 程亚芳, 等. 铝合金/钢异种金属激光熔钎焊技术研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53

- (4) : 25-33.
- [33] COROADO J, GANGULY S, WILLIAMS S, et al. Comparison of continuous and pulsed wave lasers in keyhole welding of stainless-steel to aluminium[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119 (1/2) : 367-387.
- [34] 刘捷, 王梦飞, 盛兰兵, 等. 铝合金/不锈钢异质金属激光焊接头组织及性能研究[J]. 焊接技术, 2021, 50 (12) : 33-36.
- [35] SHU F Y, NIU S C, ZHU B H, et al. Effect of pulse frequency on the nanosecond pulsed laser welded Al/steel lapped joint[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107355.
- [36] COROADO J, GANGULY S, SUDER W, et al. Selection of parameters in nanosecond pulsed wave laser microwelding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115 (9/10) : 2929-2944.
- [37] WANG X, LI F G, HUANG T, et al. Experimental and numerical study on the laser shock welding of aluminum to stainless steel[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 115: 74-85.
- [38] 闫飞, 周一凡, 唐本刊, 等. 铝钢异种材料激光搭接焊接头组织与性能研究[J]. 应用激光, 2023, 43 (2) : 65-69.
- [39] 巴一, 韩善果, 任香会, 等. 不同功率对激光摆动焊接钢/铝异种材料的影响[J]. 激光技术, 2022, 46 (5) : 636-640.
- [40] 刘瑞琳, 刘云祺, 门正兴, 等. 不同热源作用下钢/铝异种金属对接接头的焊缝成形和性能分析[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (15) : 123-127.
- [41] 杨旭东, 石岩, 刘佳. 铜箔中间层对铝/钢异种金属激光对接焊接头质量的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50 (14) : 143-149.
- [42] CAO X L, WANG G, XING C, et al. Effect of process parameters on microstructure and properties of laser welded joints of aluminum/steel with Ni/Cu interlayer[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (8) : 2277-2286.
- [43] LÜ X Z, LIU L M, SONG G. Laser welding of AZ31Mg alloy with 6061Al alloy via Ti interlayer based on two kinds of bonding mechanisms[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 83: 678-684.
- [44] 李慧, 钱鸣, 李达. 金属间化合物对AZ31B镁/6061铝异种金属激光焊接性的影响[J]. 激光杂志, 2007, 28 (5) : 61-63.
- [45] 李雷, 于治水, 张培磊. 镁铝异种材料激光焊接的研究现状及发展[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (17) : 19-24.
- [46] 麻丁龙, 牛锐锋, 赵宏刚, 等. Zn中间层对镁/铝异种金属激光焊接的影响[J]. 激光技术, 2017, 41 (6) : 858-861.
- [47] 周惦武, 赵蕾, 王新宇, 等. 添加钛箔镁/铝异种金属激光焊接研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66 (11) : 43-48.
- [48] 张书迈, 张福全, 周惦武, 等. Ni夹层对镁合金/铝合金激光熔焊接头组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47 (7) : 314-421.
- [49] 郭顺, 彭勇, 朱军, 等. 钛/铝激光焊接的微观组织及力学性能[J]. 中国激光, 45 (11) : 102-110.
- [50] 王佳杰, 宋晓国, 武鹏博, 等. 铝/钛异种金属激光/激光-CMT复合熔钎焊工艺及其组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2023, 44 (2) : 54-60.
- [51] 郭亮, 吴子华, 陈鱼, 等. 扫描速率对钛/铝异种合金激光焊接质量的影响[J]. 应用激光, 2018, 38 (2) : 230-235.
- [52] 李永梅, 陈利华, 王延龙, 等. 热输入对钛铝异种合金激光自熔钎焊接头组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (9) : 47-50.

MW 20240427