

铜-铝异种箔片纳秒激光扫描点焊成形及组织特征

吴希¹, 张培磊^{1,2*}, 唐满¹, 李明川¹, 于治水^{1,2}, 李绍伟^{1,2}

¹上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620;

²上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620

摘要 利用纳秒脉冲激光及光学振镜系统,对 T2 铜及 1060 铝合金箔片进行螺旋形点焊,分析不同搭接组合形式下的焊点成形及组织特征。结果表明:当搭接组合形式为铝上铜下时,铝侧金属完全熔化,部分区域中铝侵入铜母材形成“V”型微小焊缝;当搭接组合形式为铜上铝下时,焊缝由具有较大深宽比的微小焊缝组成。两种搭接组合形式下,焊缝的组织中形成了 γ_2 -Cu₉Al₄ 区域、过共晶组织区、共晶组织区及亚共晶组织区。接头界面处的 CuAl₂ 金属间化合物层较薄,并未发现明显的微观裂纹,接头的脆性可显著改善。

关键词 激光技术; 铜-铝箔片; 纳秒激光; 焊缝成形; 组织

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0402006

Formation and Microstructure Characteristics in Spot Welding of Dissimilar Cu-Al Foil by Nanosecond Laser Scanning

Wu Xi¹, Zhang Peilei^{1,2*}, Tang Man¹, Li Mingchuan¹, Yu Zhishui^{1,2}, Li Shaowei^{1,2}

¹School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

²Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China

Abstract The T2 copper and 1060 aluminum alloy foil are spiral spot welded by a nanosecond laser and the galvanometer system. The weld formation and the microstructures under different overlapping combination modes are analyzed. The results show that for the overlapping combination mode in which aluminum is on the top of copper, the metal on the aluminum side is completely melted, and in some areas, aluminum penetrates into the copper substrate and the “V” shaped tiny welds are formed. In contrast for the overlapping combination mode in which copper is on the top of aluminum, the weld is composed of tiny welds with high aspect ratios. Under these two overlapping combination modes, there exist four typical areas of γ_2 -Cu₉Al₄, hypereutectic structure, eutectic structure, and hypo eutectic structure within the microstructure of welds. The CuAl₂ intermetallic compound layer is thin and no obvious cracks are found at the joint interface. The brittleness of joints is obviously improved.

Key words laser technique; Cu-Al foil; nanosecond laser; weld formation; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

为了环保和节能,各个国家陆续出台了新能源汽车替代燃油汽车的计划,新能源汽车的发展得到了极大地推动,但是存在着续航里程及能源利用效率低的问题^[1]。其中,电池模组的能量密度、储能效率以及可靠性是主要问题^[2]。因此,新能源汽车动力电池的制造至关重要。

新能源电池包是由大量的电芯连接而成,而电芯则是由外壳、电解液、隔膜和两个电位差不同的金属构成^[3]。对于具有较大能量密度的锂电芯,其极耳通常是铝和铜,而用来连接电极的 Busbar 材料有铝、铜、镀镍铜等。因此,在电池制造过程中,需要将不同厚度的材料以及异种材料连接起来^[4-5]。

铝和铜的物理化学性能(如导热性、热膨胀系数及熔点)差异较大,传统的焊接方法难以实现铝和铜

收稿日期: 2018-11-08; 修回日期: 2018-11-30; 录用日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51605276)、上海市“创新行动计划”基础研究领域项目(17JC1400600,17JC1400601)

* E-mail: peilei@sues.edu.cn

的有效焊接。由于常温下铝、铜之间有限互溶,铝铜熔焊的接头在焊接处形成脆性金属间化合物的界面层,因此,焊接接头强度及塑性减小并容易萌生裂纹^[6-7]。Abbasi等^[8]研究发现,铝铜金属间化合物的厚度小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,接头具有较好的综合性能。铝铜金属间化合物的电阻是母材的8倍,且作为电路元件连接时,接头处的导电性降低^[9]。

近年来,大功率激光焊接逐渐引入到铜-铝异种金属焊接应用中,利用接头较大的冷速及凝固速率的优势来抑制金属间化合物的生成^[10-12]。然而,铜和铝都是具有较大反射率的金属,在较小的热输入下难以被激光熔化,而动力电池中使用的材料厚度一般为 $200\sim 500\ \mu\text{m}$,在焊接的过程中,一般的连续激光器和毫秒脉冲激光器的工艺窗口较小,容易出现焊接变形过大、烧穿、焊接强度较小的问题^[13]。纳秒激光器的单个脉冲持续时间为纳秒量级,能量仅为几毫焦,热输入控制精准^[14-15],有利于控制熔深和抑制铝铜金属间化合物的生成。同时,其具有很大的峰值功率,可以焊接铜和铝等高反射率材料。

本文采用纳秒激光器对厚度为 $0.2\ \text{mm}$ 的T2铜及1060铝合金箔片进行扫描点焊,分析不同搭接组合形式下接头的宏观焊缝成形及微观组织特征,研究其成形机理。

2 实验条件及方法

选择T2铜和1060铝合金箔片作为实验材料,尺寸为 $100\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}\times 0.2\ \text{mm}$ 。焊接前将母材表面的氧化膜及油污清理后放置于乙醇中超声波清洗约 $5\ \text{min}$,然后晾干备用。由于试样的厚度很小,因此采用特制的夹具保证上下板之间无间隙,以提高工艺稳定性。

采用英国SPI公司生产的SP-070P-A-EP-Z-F-Y型光纤纳秒激光器和德国RAYLASE公司生产的

SS-II-15[Y]D2光学振镜进行实验,实验前调节Z向手动平台使激光作用在试样上的离焦量为 $0\ \text{mm}$ 。实验过程中未使用任何保护气。激光扫描路径如图1所示,其中, R_1 为内部轨迹半径, R_2 为外部轨迹半径, b 为轨迹间隔, a 为结束点与螺旋线底部切线的距离。焊接方式为搭接,分别以铜上铝下(Cu/Al)及铝上铜下(Al/Cu)的组合方式进行实验。由于纳秒激光热输入较小,形成的焊缝尺寸过小,因此,为了保证器材的性能及便于研究,使用光学振镜系统进行扫描焊接,激光扫描方式为螺旋线,螺旋线的参数为 $R_1=0.05\ \text{mm}$, $R_2=0.45\ \text{mm}$, $b=0.05\ \text{mm}$, $a=0.7\ \text{mm}$ 。纳秒激光焊接实验参数如表1所示。

通过电火花线切割截出金相试样,将其镶嵌后磨制、抛光,并采用日本KEYENCE公司生产的VHX-5000超景深显微镜和美国FEI公司生产的Quanta 450扫描电子显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)对焊接试样的表面形貌、组织特点和成分进行分析。采用荷兰帕纳科公司生产的X'PERT PRO X射线衍射(XRD)仪对焊缝中相的组成进行分析,利用波长为 $0.154060\ \text{nm}$ 的Cu靶 $K\alpha$ 射线进行扫描,扫描速度为 $4\ (^{\circ})\cdot\text{min}^{-1}$ 。不同搭接组合形式的拉伸-剪切试样如图2所示。由于单个焊点实际直径仅为 $850\ \mu\text{m}$,承载过小,为了保证测试的准确性,利用振镜扫描 3×3 的点阵,点与点的中心间距为 $3\ \text{mm}$ 。结果取3组实验的平均值。

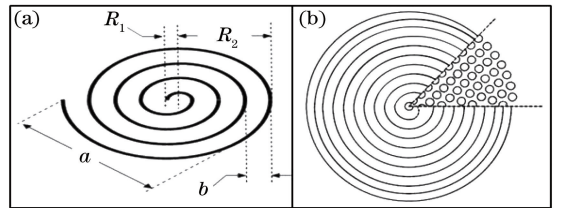


图1 规划的激光扫描路径。(a)螺旋形扫描结构;
(b)焊点成形示意图

Fig. 1 Designed laser scanning path. (a) Spiral scanning structure; (b) schematic of weld formation

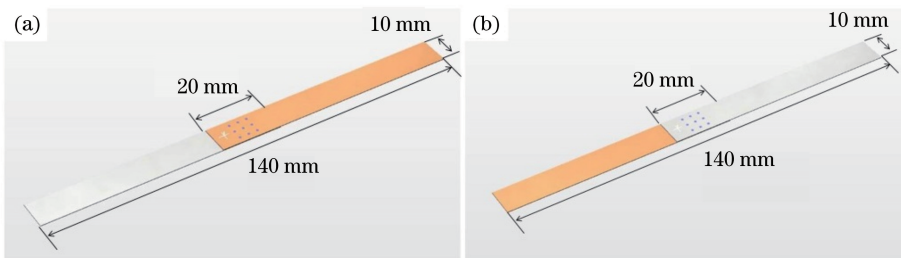


图2 不同搭接组合形式的拉伸-剪切试样。(a) Cu/Al;(b) Al/Cu

Fig. 2 Tensile-shear samples under different overlapping combination modes. (a) Cu/Al; (b) Al/Cu

表 1 纳秒激光焊接参数
Table 1 Parameters for nanosecond laser welding

Combination mode	Average power /W	Velocity /($m \cdot s^{-1}$)	Frequency /kHz	Pulse duration /ns	Defocusing /mm
Cu/Al	70	70	70	240	0
Al/Cu	70	120	70	240	0

3 分析与讨论

3.1 焊点宏观成形

不同搭接组合形式的焊点表面形貌及横截面如图 3 所示。当搭接组合形式为铜上铝下时,螺旋线式的激光扫描方式使得铜表面形成了清晰的激光加工路径。与母材光亮的表面相比,焊点处被部分氧化,这是因为焊接过程中没用使用保护气。不同搭接组合形式下的表面立体成形结构如图 4 所示。结合图 3 和图 4(a)可知,焊点相对原始母材凸起,焊点表面由参差不齐的单个焊缝组成,每个焊缝的上部存在“V”型缺口,铜母材向两侧分开,形成了焊点外观所见的凸起,且部分铜及铝金属在焊接过程中形成了飞溅。不同激光焊接过程如图 5 所示。可以看出,纳秒激光焊接过程中的熔池流动剧烈,易引起

飞溅,该特点常被应用于材料表面处理。从图 3 还可以看出,铜箔和铝箔的界面处具有类似于“钉子”状的焊缝形态,单个焊缝的宽度最大值约为 $50 \mu m$,从宏观上看,铝侵入铜母材形成的微小结构将铜箔及铝箔连接起来。铝母材底部的部分区域出现了细小的孔洞,这可能是因为:1)在纳秒激光高功率密度主导的激光深熔焊接模式下,铜和铝母材瞬间熔化并部分气化,铝蒸发的温度较低导致铝蒸气沿着还未凝固的熔池向上喷射,而下部的铝熔池缺乏熔融金属的填充,导致冷却凝固后留下了孔洞;2)铝侧母材下部的熔穿导致部分焊缝金属从下部溢出形成飞溅。

当搭接组合形式为铝上铜下时,铝母材表面并未形成明显的螺旋线路径,焊点表面显现出不规则的形状,从图 4(b)可以看出,焊点轮廓整体为中间较高、四周较低,并在中间区域形成了部分凹陷。与

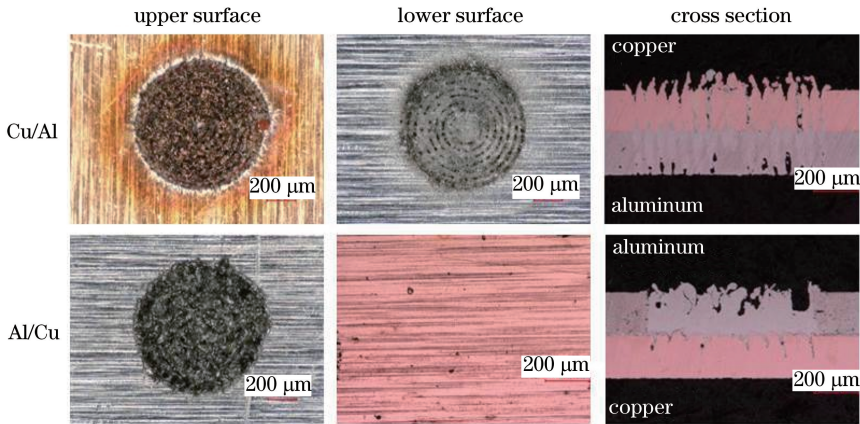


图 3 不同搭接组合形式的焊点成形表面及横截面

Fig. 3 Surface morphologies and cross sections of welds formed under different overlapping combination modes

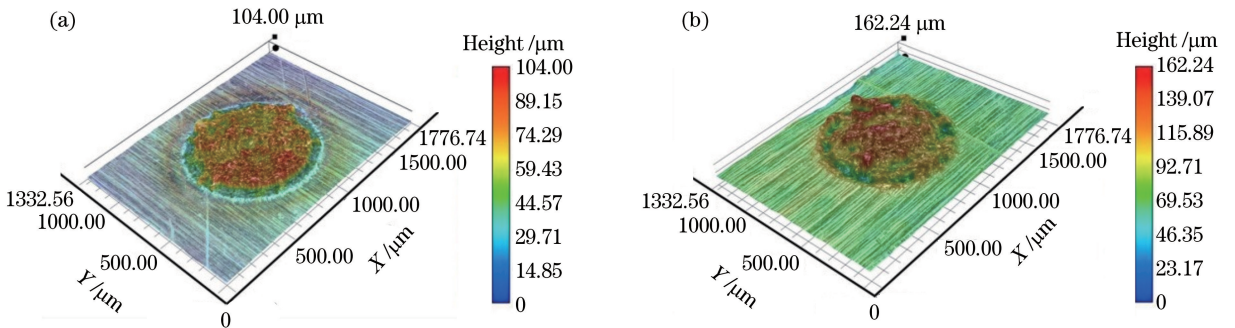


图 4 不同搭接组合形式下的表面立体成形图。(a) Cu/Al;(b) Al/Cu

Fig. 4 Surface stereo formation images under different overlapping combination modes. (a) Cu/Al; (b) Al/Cu

铝母材的光亮表面相比,焊点处的表面氧化程度较大,这主要是因为焊接过程中未使用保护气。焊点的横截面显示铝侧焊缝中间存在不规则的孔洞,并且未形成铜上铝下组合中出现的贯穿整个焊点截面的“钉子”状结构,但整个焊点区域的铝母材都发生了熔化。从焊点的横截面可以看出,在铝和铜的连接处,激光光束入射处的铝金属侵入铜母材形成了小“V”型焊缝,而两侧的铜金属则形成了波浪形的凸起。铜上铝下搭接组合形式下铜侧及铝侧界面的测试结果如图 6 所示。可以看出,界面处无明显缺陷,且发现了铜和铝元素的扩散。因此,母材与焊缝形成了良好的冶金结合。

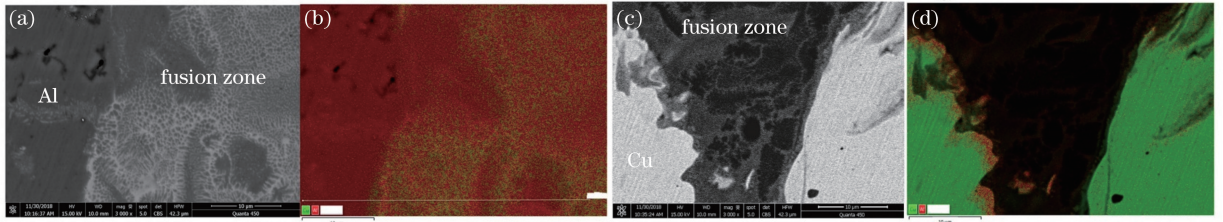


图 6 Cu/Al 搭接组合形式下的铜侧及铝侧界面测试结果。(a) 铝侧界面 SEM 图;(b) 铝侧界面 EDS 图;
(c) 铜侧界面 SEM 图;(d) 铜侧界面 EDS 图

Fig. 6 Test results of interfaces on Al side and Cu side for overlapping combination mode of Cu/Al. (a) SEM image of interface on Al side; (b) EDS mapping on Al side; (c) SEM image on Cu side; (d) EDS mapping on Cu side

铝上铜下搭接组合形式接头的缺陷如图 7 所示。纳秒脉冲激光具有很大的瞬时峰值功率,并且激光光斑较小,瞬时功率密度可以达到 $10^7 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。虽然铜和铝都是高反射率材料,常温下对激光的吸收率较小,但是在一定的温度时会发生突变,吸收率迅速增大^[16-17],纳秒脉冲激光的特性使得铜和铝能够迅速达到深熔焊接模式。同时,纳秒级别的脉冲频率使得单个脉冲的能量小于 1 mJ,这在焊接实验过程中有效控制了焊接的热输入,对周围材料的热影响很小,从而形成了具有较大深宽比的焊缝。对比不同搭接组合形式的焊接可以看出,铜上铝下的焊点结构是由贯穿铜和铝的“钉子”状且具有较大深宽比的微小焊缝组成,而铝上铜下的焊点结构则是上部的铝母材在纳秒激光扫描过程中发生了完全熔化,在连接界面处形成了波浪形的焊缝结构。这主要是因为铜的熔点高于铝,铜的导热性能优于铝,当作用在铜和铝上的能量相同时,铜的熔化量小于铝。因此,当搭接组合形式为铝上铜下,且下层高熔点的铜发生部分熔化时,上层的铝在激光扫描过程中完全熔化,并产生剧烈的气化,冷却凝固后导致焊点表面出现凹坑,若继续增大热输入,甚至会在图 7 所示的界面处产生孔洞。葛志福^[18]的研究表

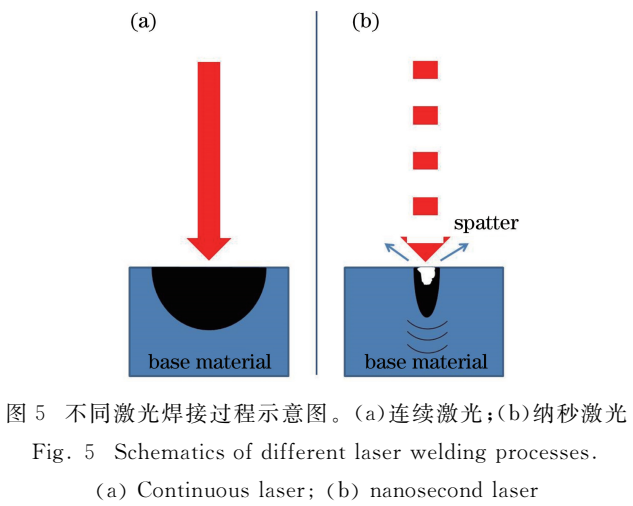


图 5 不同激光焊接过程示意图。(a) 连续激光;(b) 纳秒激光
Fig. 5 Schematics of different laser welding processes.
(a) Continuous laser; (b) nanosecond laser

明,当高强度激光作用在金属表面时,材料迅速熔化并被加热至沸点以上形成金属蒸气,其产生的反冲力可克服液体表面张力,致使熔池中的熔融液体向四周溅射。本实验中出现的孔洞是因为下侧的铜受激光作用,产生的向上的金属蒸气作用于熔融的铝侧金属,当激光作用停止后,熔池迅速冷却留下空隙。

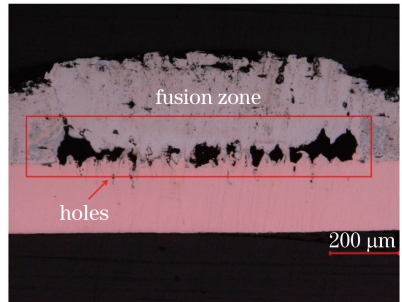


图 7 Al/Cu 搭接组合形式下接头的缺陷
Fig. 7 Defects of joints for overlapping combination mode of Al/Cu

3.2 铝上铜下的微观组织及元素分布

铝上铜下搭接组合形式下的接头形貌如图 8 所示。从图 8(a)、(g)可以看出,铜元素在上部焊缝区域的分布较广,铝元素在铜侧“V”型焊缝区域也有较广的分布,铝和铜在激光瞬间加热熔化后有较显

著的流动及扩散过程。然而, Möller 等^[19]通过单模连续激光焊接得到存在一层均匀金属间化合物层的铝铜焊缝, 铜元素在铝侧没有出现大范围的扩散。

这是由于实验中的纳秒脉冲激光具有较大的峰值功率, 且铝侧的热输入较大, 在铜-铝箔片界面处存在较大的温度梯度及浓度差异引起溶质迁移。

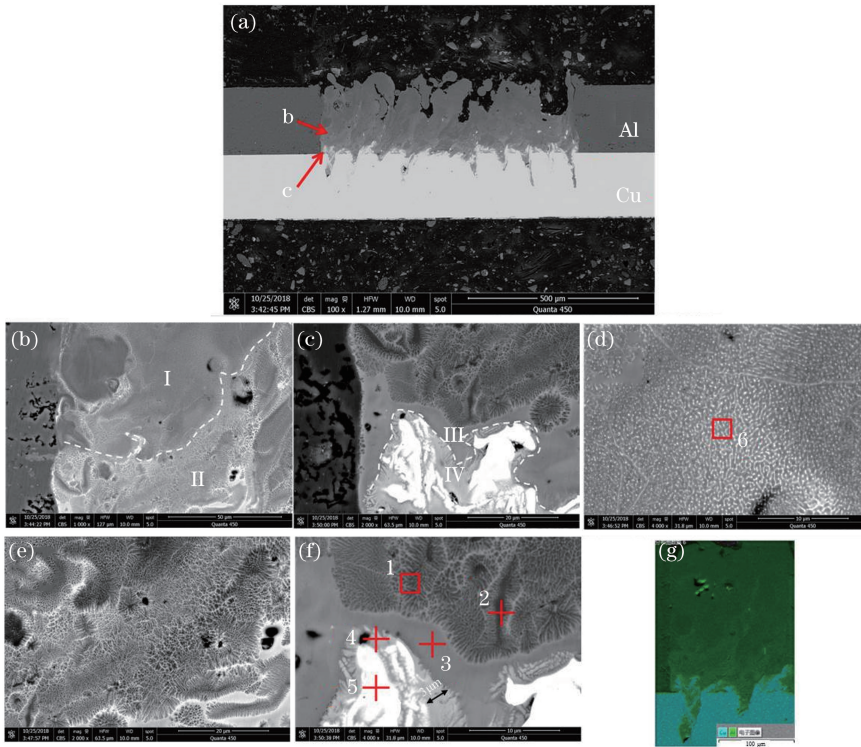


图 8 Al/Cu 搭接组合形式下的接头形貌。(a)整体形貌;(b)铝侧区域;(c)铝铜界面区域;(d)区域 I 的组织;(e)区域 II 的组织;(f)铝铜界面区域放大图;(g)典型区域 EDS 图

Fig. 8 Morphology of joint for overlapping combination mode of Al/Cu. (a) Overall morphology; (b) region on Al side; (c) interface between Al and Cu; (d) microstructure of region I; (e) microstructure of region II; (f) enlarged image of interface between Al and Cu; (g) EDS image of typical region

图 8(b)和图 8(c)分别是图 8(a)中 b、c 区域的放大图像。可以看出, 焊接接头根据形貌和衬度差异分为 I ~ IV 部分, 对图 8 中 1~6 区域的特征组织进行能谱分析, 其结果见表 2。焊缝区域的 XRD 分

析结果和铜-铝二元相图及接头中各物相如图 9 和图 10 所示, 其中 2θ 为衍射角度。结合表 2、图 9 和图 10 可知, 区域 I 和 II 主要是初生 α 相与 α -Al/ CuAl_2 相组成的亚共晶组织, CuAl_2 相以弥散相的形

表 2 图 8 中各点的 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results of points in Fig. 8

Zone No.	Concentration (atomic fraction of Cu)	Concentration (atomic fraction of Al)	Phase
1	10.03	89.97	α -Al α -Al/ CuAl_2
2	7.38	92.62	α -Al α -Al/ CuAl_2
3	16.32	83.68	α -Al/ CuAl_2
4	20.03	79.97	α -Al/ CuAl_2 lump(CuAl_2)
5	72.77	27.23	γ_2 - Cu_9Al_4
6	4.29	95.71	α -Al α -Al/ CuAl_2

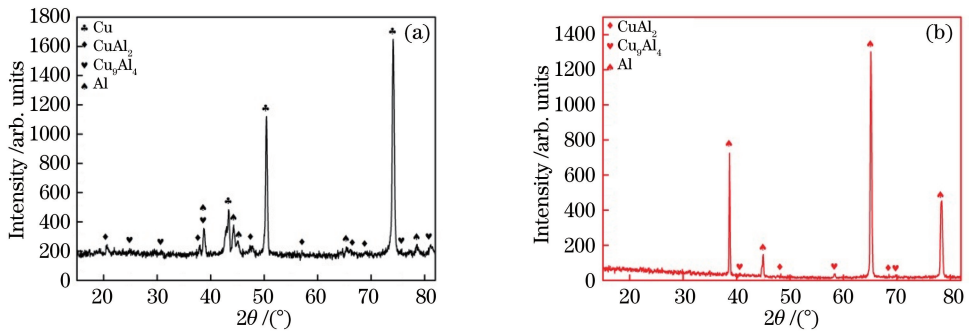


图 9 Al/Cu 焊缝区域的 XRD 测试结果。(a)铜侧;(b)铝侧

Fig. 9 XRD test results of Al/Cu weld region. (a) Cu side; (b) Al side

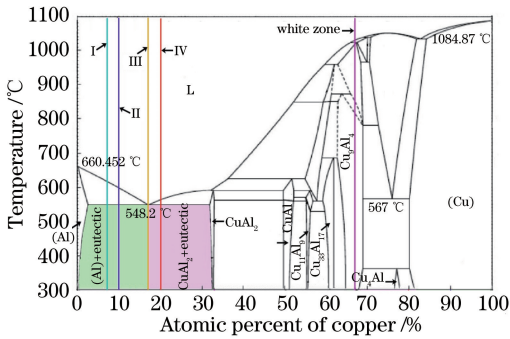


图 10 铜-铝二元相图及接头中的物相分布

Fig. 10 Cu-Al binary phase diagram and phase distribution within joint

式呈网状分布于 α -Al 中,两者主要的区别是初生 α -Al 的相对含量不同所引起的组织形貌差异。 CuAl_2 相作为以金属键和共价键共存的金属间化合物,具有很大的硬度,其以弥散的形式分布于延展性较好的 α -Al 中,可对焊缝起到较好的强化作用。区域 III 的组织形貌为 α -Al/ CuAl_2 共晶组织;区域 IV 为铝铜过共晶组织,灰白色团状区域为体心立方结构的 CuAl_2 相,而灰色的部分主要是由共晶组织 α -Al 与 CuAl_2 组成,并且越靠近铜富集侧,块状 CuAl_2 的尺

寸越大,直到共晶组织完全消失。依据能谱结果可知,图 8(f)中的亮白色区域为 γ_2 - Cu_9Al_4 。

Kah 等^[20-21] 研究发现,铝铜熔焊接头断裂主要发生于过共晶组织处,这是因为此处具有大块且连续分布的 CuAl_2 相,而 CuAl_2 相为金属间化合物,具有很大的室温脆性。本实验中获得的焊接接头中过共晶组织的厚度仅为 $3\ \mu\text{m}$,可以有效改善接头的脆性。

3.3 铜上铝下的微观组织及元素分布

铜上铝下搭接组合形式下的接头形貌如图 11 所示。从图 11(a)、(e) 可以看到,铜上铝下搭接组合形式下,铜元素在铝侧焊缝的分布较少,且主要集中在连接界面处,而铝元素在整个“钉子”状焊缝都有较广的分布。图 11(b)~(d) 分别是图 11(a) 中 b~d 区域的放大图像。可以发现,铜上铝下搭接组合形式下接头的组织形态同样可以分为 4 个区域,区域 I 和 II 为初生 α 相与 α -Al/ CuAl_2 相组成的亚共晶组织,区域 III 为 α -Al/ CuAl_2 相共晶组织,区域 IV 为铝铜过共晶组织,亮白色区域为 γ_2 - Cu_9Al_4 。

3.4 拉伸-剪切测试

经过参数优化后,不同搭接组合形式下纳秒激光扫描点焊的最大拉剪力与横截面尺寸为 $10\ \text{mm} \times$

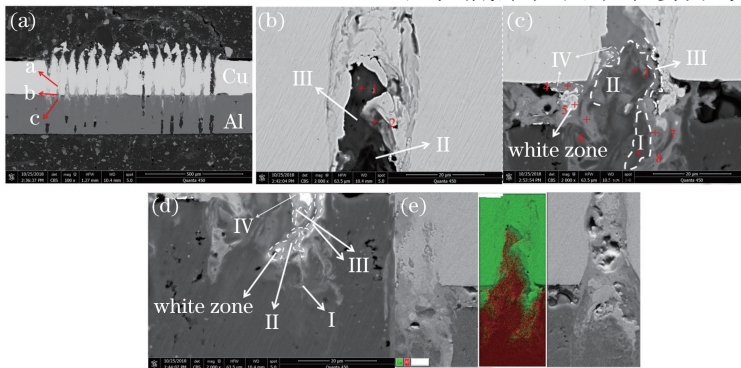


图 11 Cu/Al 组合形式下的接头形貌。(a)整体形貌;(b)铝侧区域;(c)铝铜界面区域;(d)铜侧区域;(e)典型区域 EDS 图
Fig. 11 Morphology of joint for overlapping combination mode of Cu/Al. (a) Overall morphology; (b) region on Al side; (c) interface between Al and Cu; (d) region on Cu side; (e) EDS image of typical region

0.2 mm 的母材拉伸试样的最大拉伸力对比如图 12 所示。可以看出,铜上铝下组合形式下接头的最大拉剪力大于铝上铜下形式,然而两种接头的最大拉伸力都显著小于母材,这是因为焊缝中形成了脆性的金属间化合物 CuAl_2 ,在剪切力的作用下容易产生裂纹并扩展导致断裂。铝上铜下组合形式下接头的最大拉剪力较小的原因可能与铝铜界面处连续分布的 CuAl_2 相有关。

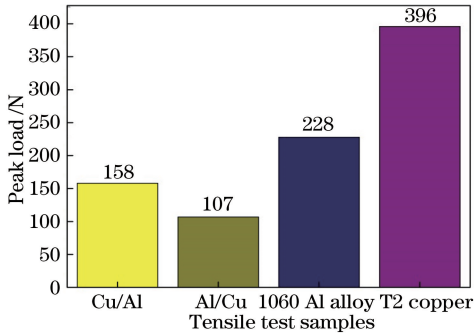


图 12 母材和不同搭接组合形式下接头的拉伸-剪切测试结果
Fig. 12 Tensile-shear test results of substrates and joints under different overlapping combination modes

4 结 论

基于纳秒脉冲激光及光学振镜系统,实现了铜-铝异种金属在不同搭接组合形式下的激光点焊,得到了较优参数下的特征焊接接头。不同搭接组合形式下接头的形貌具有显著的差异性,与纳秒激光特性及铝铜间较大的物理化学性能差异有关。两种搭接组合形式下的接头均存在一定的焊接缺陷,主要是焊缝底部激光匙孔导致的孔洞、焊缝上表面的飞溅及凹陷,后续工作需要研究如何通过合理控制激光的脉宽来抑制缺陷的形成。纳秒脉冲激光焊接铜-铝箔片的组织在两种组合形式下差异不大,由铜侧向铝侧,呈现出 4 个特征区域,分别是 $\gamma_2\text{-Cu}_9\text{Al}_4$ 区域、过共晶组织区、共晶组织区及亚共晶组织区。然而,铜上铝下组合形式下的试样具有更好的拉剪性能,可能与 CuAl_2 相在界面处的分布情况相关。

参 考 文 献

[1] Liu J H, Pu J M, Jiang Z H. Promoting strategy of new energy vehicles collaborative innovation: the case study of Yutong [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 174: 1009-1015.
[2] Kim D H, Kim M J, Lee B K. An integrated battery charger with high power density and efficiency for electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Power*

Electronics, 2017, 32(6): 4553-4565.
[3] Dai Y N, Yang B, Yao Y C, *et al.* Development status of Li-ion batteries [J]. *Battery Bimonthly*, 2005, 35(3): 193-195.
戴永年, 杨斌, 姚耀春, 等. 锂离子电池的发展状况 [J]. *电池*, 2005, 35(3): 193-195.
[4] Wang X, Gu C X, Zheng Y Y, *et al.* Laser shock welding of aluminum/aluminum and aluminum/copper plates [J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 26-30.
[5] Zubiri F, del Mar Petite M, Ochoa J, *et al.* Welding optimization of dissimilar copper-aluminum thin sheets with high brightness lasers [M]. *Cracking Phenomena in Welds IV*, 2016: 219-228.
[6] Dong P, Chen K H, Xiao R S. Mechanical properties of aluminum-copper joint by laser penetration brazing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38 (6): 0603009.
董鹏, 陈凯华, 肖荣诗. 铝-铜异种金属激光深熔钎焊接头力学性能 [J]. *中国激光*, 2011, 38 (6): 0603009.
[7] Qi Y X, Yang R P. The advance of aluminum-copper welding [J]. *Welding Technology*, 2000, 29(5): 4-5.
亓永新, 杨瑞鹏. 铝铜焊接进展 [J]. *焊接技术*, 2000, 29(5): 4-5.
[8] Abbasi M, Karimi Taheri A, Salehi M T. Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2001, 319(1/2): 233-241.
[9] Solchenbach T, Plapper P, Cai W. Electrical performance of laser braze-welded aluminum-copper interconnects [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(2): 183-189.
[10] Zuo D, Hu S S, Shen J Q, *et al.* Intermediate layer characterization and fracture behavior of laser-welded copper/aluminum metal joints [J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 357-362.
[11] Xue Z Q, Hu S S, Shen J Q, *et al.* Microstructure characterization and mechanical properties of laser-welded copper and aluminum lap joint [J]. *Journal of Laser Applications*, 2014, 26(1): 012002.
[13] Lee S J, Nakamura H, Kawahito Y, *et al.* 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] Gao Q, Wang K H, Guo S, *et al.* Effects of nanosecond laser process parameters on Al/Mg dissimilar metal weld formation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0102004.
高琼, 王克鸿, 郭顺, 等. 纳秒激光工艺参数对铝/

- 镁异种焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0102004.
- [15] Ren N F, Lin K, Zhang Z Y, *et al.* Research on light absorption enhancement of copper by nanosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303004.
任乃飞, 林康, 张志研, 等. 利用纳秒激光提高铜表面吸光率的研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303004.
- [16] Chen J, Zhang Q L, Yao J H, *et al.* Study on laser absorptivity of metal material[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 793-798.
陈君, 张群莉, 姚建华, 等. 金属材料的激光吸收率研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 793-798.
- [17] He Y, Wu Q, Zou J L, *et al.* Melting behavior of materials in grooves during fiber laser pressure welding of thin-sheet aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602008.
和岳, 武强, 邹江林, 等. 薄板铝合金光纤激光压焊坡口内材料的熔化行为[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602008.
- [18] Ge Z F. Evolution of liquid/gas interface in high density laser manufacturing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
葛志福. 高密度激光制造过程液/气界面演化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [19] Möller F, Grden M, Thomy C, *et al.* Combined laser beam welding and brazing process for aluminium titanium hybrid structures [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 215-223.
- [20] Kah P, Vimalraj C, Martikainen J, *et al.* Factors influencing Al-Cu weld properties by intermetallic compound formation [J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2015, 10: 10.
- [21] Mian A, Taylor C, Vijwani H. Microstructural analysis of laser micro-welds between copper and aluminum[J]. Microsystem Technologies, 2016, 22(2): 261-267.