

镍/铜箔回流焊与激光钎焊界面显微组织与性能

孙茜, 王佳乐, 周兴汶, 王晓南

(苏州大学, 苏州, 215021)

摘要: 基于镍箔“桥”替代铝铜直接焊接的背景下, 利用回流焊、半导体激光钎焊对镍铜箔片进行异质连接. 对比分析了接头形貌及界面显微组织的形成机制, 并对其力学性能进行评价. 结果表明, 两种焊接接头成形良好, 且无焊接缺陷产生; 激光钎焊焊缝内由锡的固溶体和具有等轴晶形态的 Cu-Sn 金属间化合物组成, 而回流焊焊缝则为锡的固溶体; 两种焊接接头铜-锡、镍-锡界面均呈现不同形貌, 且铜-锡界面层厚度大于镍-锡界面层. 回流焊在铜-锡界面处显微组织呈扇贝状分布, 其组成为铜固溶体→Cu₃Sn 金属间化合物→Cu₆Sn₅ 金属间化合物; 激光钎焊铜-锡界面处由多种 Cu-Sn 金属间化合物组成. 在镍-锡界面处, 回流焊呈现连续分布的 (Cu, Ni)₆Sn₅ 金属间化合物, 而激光钎焊则是由短棒状 (Cu, Ni)₃Sn₄ 与条状 (Cu, Ni)₆Sn₅ 组成, 两种焊接接头最大剪切力可达 320 N 以上, 远高于实际生产要求. 基于此研究结果, 可进一步明确激光钎焊是替代镍/铜箔片回流焊连接的可行性技术.

创新点: (1) 对比分析了回流焊和激光钎焊镍/铜焊缝形成机理和界面显微组织.
(2) 提出了利用激光钎焊代替回流焊实现高效高质量镍/铜箔连接的可行技术.

关键词: 回流焊; 激光钎焊; 锡钎料; 金属间化合物

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230613016

0 序言

在“双碳”目标背景下, 新能源汽车的需求日益增加, 而锂电池也作为新能源汽车动力电池首选材料^[1-3]. 锂电池的铝极柱与铜基电路板的连接是动力电池蓄电系统制备的必要环节, 如何获得低电阻、高强度等优异性能的铝铜焊接接头是实现动力电池长寿命、高可靠性的重要保障^[4].

铝与铜在物理性能及化学性能方面因存在较大差异而使其焊接性很差^[5-8], 无法满足使用要求, 多采用在铝极柱与铜电路板间搭建镍箔“桥”的方式, 通过实现镍/铜、镍/铝分别连接的形式替代铝铜的直接连接. 一般而言, 镍箔与铜基板的连接常采用回流焊的方式, 通过锡钎料的熔化及与镍、铜界面分别形成金属间化合物的形式获得镍/铜的有效连接^[9-11]. 由于回流焊在钎料熔点以上加热时间相对较长, 且电路板需随焊点同时加热, 要求设备容

量大, 存在产品生产周期长, 加工不灵活, 且生产效率低等问题^[12]. 激光作为一种新型热源, 具有加热冷却速度快、灵活性高等优点^[13-16], 有望解决回流焊存在的不足.

Nishikawa 等人^[17] 利用激光作为热源在铜基板上进行钎焊, 结果表明, 激光作用下界面处金属间化合物厚度极小 (<1 μm), 且接头的冲击可靠性优于传统回流焊接头; Lee 等人^[18] 发现利用激光钎焊在较短时间内可获得锡钎料与铜的有效连接.

文中选用镍、铜箔片作为研究对象, 采用回流焊及半导体激光钎焊技术对其进行连接, 对比研究两种焊接方式下接头形貌、接头界面显微组织的形成机制, 并对两种焊接接头的力学性能进行评价, 从而提出利用激光钎焊替代回流焊的可行性技术.

1 试验方法

试验材料为纯镍 (22 mm × 8 mm × 0.3 mm) 和纯铜 (50 mm × 10 mm × 0.1 mm) 箔片, 焊接前利用乙醇清理母材表面的油污, 再用超声波清洗后吹干待用, 焊接示意图如图 1 所示. 回流焊采用北京七星天禹电子有限公司生产的 TYR108N-C 回流焊

机, 加热方式为红外线 + 热风对流方式, 预热 138 s ($90 \sim 215^{\circ}\text{C}$), 保温 30 s ($215 \sim 238^{\circ}\text{C}$), 焊接时间 248 s ($238 \sim 250^{\circ}\text{C}$), 冷却时间为 180 s. 激光器为武汉锐科光纤激光技术股份有限公司生产的 RFL-A2000D 激光器, 波长为 915 nm, 最大激光功率为 2 000 W. 采用尺寸为 $10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的矩形光斑由左至右扫描, 扫描速度为 10 mm/s, 激光钎焊功率为 400 W, 离焦量和焦距分别为 0 和 300 mm. 两种焊接方式均采用 Sn-3.5Ag-0.5Cu 钎料, 厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$, 且未使用钎剂.

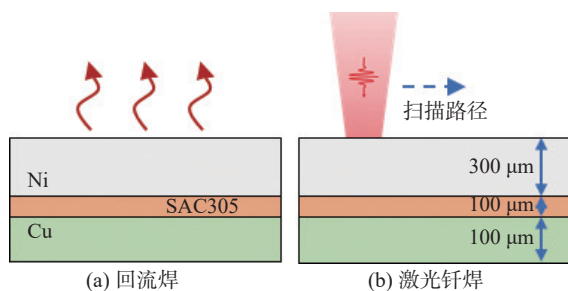


图 1 焊接示意图

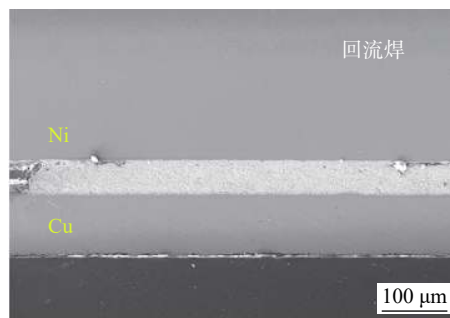
Fig. 1 Welding diagram. (a) reflow soldering; (b) laser soldering

为避免取样过程对焊点界面破坏, 试验首先采用冷镶嵌 (环氧树脂配合固化剂) 方法对焊接试样进行镶嵌, 然后用 400 号砂纸打磨至焊点, 再用 800 号、1000 号、1500 号、2000 号、3000 号及 5000 号砂纸对金相样品由粗到细逐一打磨, 而后使用粒度 50 nm 的 SiO_2 悬浮液对试样进行纳米级抛光, 以达到镜面效果, 利用腐蚀液 ($2.5\% \text{HNO}_3 + 1\% \text{HCl} + 96.5\% \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 对焊接接头横截面进行化学腐蚀 8 ~ 10 s, 采用日本日立公司 (HITACH) 生产的 SU5000 扫描电子显微镜观察焊接接头的横截面形貌, 采用牛津 Oxford EDS X-MAX 20 能谱仪对焊接接头界面组织进行成分分析, 采用微型拉力测试仪测量焊接接头的最大剪切力, 为了保证力学性能测试的准确性, 取 3 次测试后的平均值.

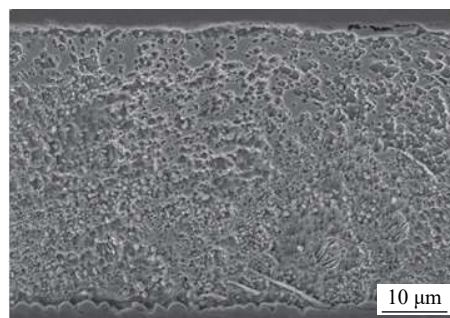
2 结果与讨论

2.1 接头成形及焊缝组织

图 2 为焊后镍/铜接头的横截面形貌. 从图中可以看出, 两种焊接方式所获得的焊缝均连续, 界面处成形良好, 均无明显孔洞及裂纹缺陷. 由此可见, 回流焊、激光钎焊在所选择工艺条件下均可实现镍-铜的有效异质连接.



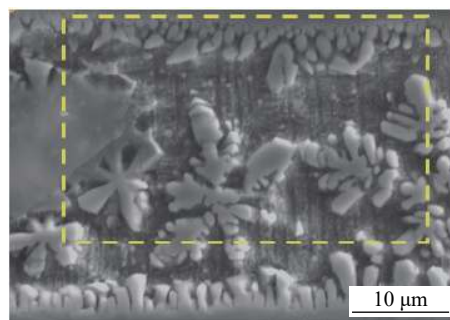
(a) 回流焊宏观形貌



(b) 回流焊界面层显微组织



(c) 激光钎焊宏观形貌



(d) 激光钎焊界面层显微组织

图 2 焊接接头横截面形貌及微观组织

Fig. 2 Cross section morphology and microstructure of welded joints. (a) cross section morphology of reflow soldering; (b) microstructure of reflow soldering; (c) cross section morphology of laser soldering joints; (d) microstructure of laser soldering joints

利用扫描电镜对焊缝的显微组织进行观察可知, 两种焊接方式下接头两侧界面均呈现明显的扩散反应层, 且锡-铜侧界面厚度均明显大于锡-镍侧. 对比而言, 回流焊缝中的显微组织分布均匀, 而激光钎焊焊缝内的显微组织则呈非连续分布, 焊缝中

心处出现等轴晶状凝固态组织. EDS 结果表明, 回流焊缝中心处的元素组成为 97.5Sn-2Cu-1.5Ni(原子分数, %), 可推断是锡的固溶体. 对激光钎焊焊缝处显微组织进行 EDS 分析可知, 焊缝组织由两部分组成, 其一是由成分为 2.9%Ni-50.1Sn-45.8Cu-1.2Ag(原子分数, %) 组成的等轴晶状组织, 可推断为是 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 金属间化合物; 其二则是等轴晶附近的富锡相, 根据 EDS 结果可推断为是锡的固溶体 (图 3).

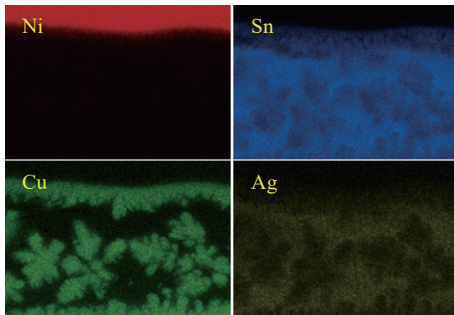


图 3 激光钎焊接头横截面的元素分布

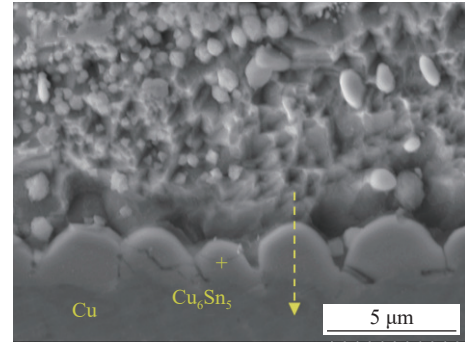
Fig. 3 Elemental distribution in the cross-section of laser soldering joints

在回流焊过程中, 锡钎料在高温下熔化, 此时镍、铜箔金属元素向熔融的锡钎料中发生扩散. 分析表明, 铜原子在熔融钎料内的扩散速度远大于镍原子的扩散速度^[19-22]. 由于回流焊的加热和冷却时间相对较长, 铜原子有充分的时间发生扩散并迁移至镍箔处, 因此铜原子并未在熔融锡钎料中偏聚, 使得焊缝中心处形成锡的固溶体, 尽管如此, 固溶体内铜原子含量仍大于镍原子含量.

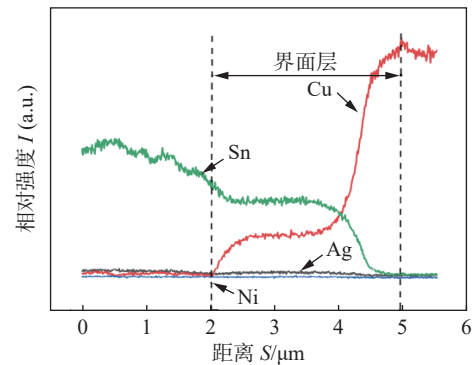
对于激光钎焊而言, 其加热速度远远大于回流焊, 尽管大量铜原子在短时加热过程中可迅速扩散至熔融钎料中, 但在极短的冷却速度下不能够完全到达镍箔处, 导致残留在熔融钎料中形成铜的局部偏聚, 并与周边的熔融锡形成 Cu-Sn 金属间化合物. 因凝固前端具有相似的过冷度, 所形成的化合物在后续的快速冷却过程中呈等轴晶状长大; 而对于附近的熔融锡而言, 则仍形成锡的固溶体, 因此激光钎焊焊缝中心的组织是由锡的固溶体和 Cu-Sn 金属间化合物两部分组成.

2.2 铜-锡侧界面显微组织

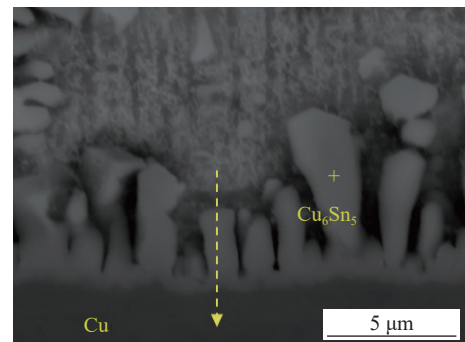
由 2.1 小节可知, 焊接接头两界面处呈现不同的形貌特征, 且铜-锡侧界面厚度明显大于镍-锡侧. 图 4 给出了铜-锡侧界面区域的显微组织及 EDS 线扫描结果.



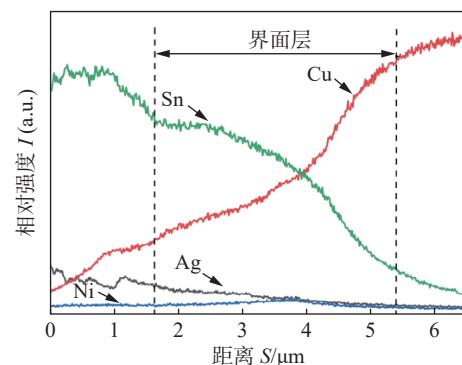
(a) 回流焊界面组织



(b) 回流焊界面元素分布



(c) 激光钎焊界面组织



(d) 激光钎焊界面元素分布

图 4 界面微观组织及元素分布 (铜-锡侧)

Fig. 4 Microstructure and elemental profile of interface (Cu-Sn side). (a) microstructure of reflow soldering; (b) elemental profile of reflow soldering; (c) microstructure of laser soldering; (d) elemental profile of laser soldering

从图 4 中可以看出, 回流焊铜-锡界面层厚度约

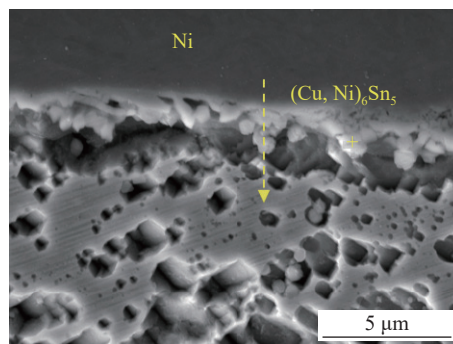
为 $2.8\text{ }\mu\text{m}$, 其呈现扇贝状形貌^[23], 如图 4a 所示. EDS 结果可知, 由铜箔侧到焊缝内元素含量呈现一定的浓度梯度, 即 Cu 元素含量逐渐降低, Sn 元素含量逐渐升高, 其它元素未有明显波动. 结合 EDS 点扫描结果, 界面层的显微组织变化规律为铜固溶体 $\rightarrow\text{Cu}_3\text{Sn}\rightarrow\text{Cu}_6\text{Sn}_5$. 分析表明, Cu 原子在加热阶段瞬时内形成铜的固溶体, 随着 Cu 原子的不断扩散, 与熔融锡钎料在短时间内迅速发生化学反应, 由于此时距离铜箔基板最近, Cu 元素含量浓度最高, 导致在界面处优先形成 Cu_3Sn 金属间化合物; 随着距铜箔基板的距离增加, 在 Cu_3Sn 金属间化合物阻碍下, Cu 原子的扩散速度略微减慢, 且 Sn 元素含量也显著增加, 导致在 Cu_3Sn 金属间化合物的上面又形成 Cu_6Sn_5 化合物^[24-25]. 进一步观察可发现, Cu_6Sn_5 化合物层元素分布均匀, 其层厚度可达 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右.

对于激光钎焊而言, 铜-锡界面厚度较回流焊相比显著提高, 可达 $5\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 且呈现柱状形貌, 并垂直于铜箔基板, 且向着焊缝中心长大, 如图 4b 所示. 此外, EDS 线扫描的结果中可以明显看出, 尽管元素分布与回流焊有着同样的变化规律, 即 Cu 元素从铜箔到焊缝内逐渐降低, Sn 元素逐渐升高, 然而元素分布曲线却非常陡峭, 即元素含量在距离铜箔的任一位置都呈现明显的不同, 且具有较大的浓度梯度. 据此该界面处可推断为形成了多种 Cu-Sn 的金属间化合物, 究其原因, 激光钎焊较回流焊具有快速加热和快速冷却的特征, Cu 原子在加热过程中迅速扩散, 迁移至熔融锡钎料中, 形成金属间化合物, 快速的扩散速度使得金属间化合物的类型多样化. 由于凝固前方具有较大的成分过冷和温度梯度, 使得形成的化合物沿着垂直于铜箔向焊缝中心快速长大, 而两侧生长则受到显著抑制, 因此较回流焊相比, 激光钎焊铜-锡界面处形成柱状晶组织, 使得界面层厚度大于回流焊.

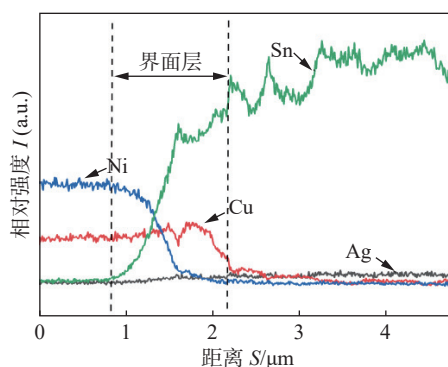
2.3 镍-锡侧界面显微组织

图 5 给出了两种焊接方式镍-锡侧界面显微组织及元素分布. 从图中可以看出, 回流焊接头中界面区宽度约为 $3\text{ }\mu\text{m}$ (图 5a). 结合 EDS 线扫描可知, Ni 和 Cu 两种元素界面层处元素分布较为稳定, 且距离镍基板越远, 其含量逐渐降低, 而 Sn 元素含量则逐渐增加. 在回流焊过程中, 镍在界面处发生扩散, 并与熔融锡发生化学反应后形成 Ni_3Sn_4 金属间化合物. 与此同时, 大量 Cu 原子从铜箔处经过熔

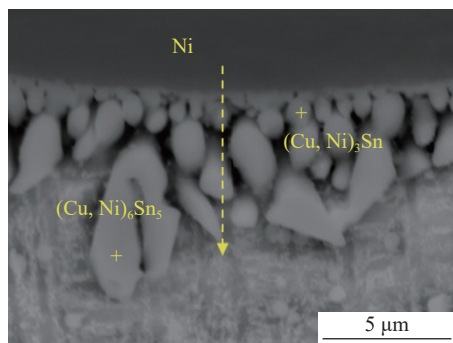
融锡钎料扩散迁移至镍箔界面处, 并溶解至 Ni_3Sn_4 , 从而形成 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 金属间化合物^[19-22].



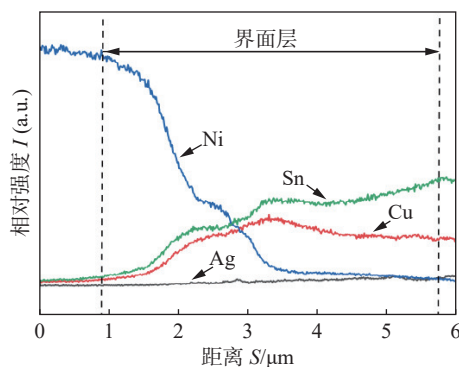
(a) 回流焊界面组织



(b) 回流焊界面元素分布



(c) 激光钎焊界面组织



(d) 激光钎焊界面元素分布

图 5 界面微观组织及元素分布 (镍-锡侧)

Fig. 5 Microstructure and elemental profile of interface (Cu-Sn side). (a) microstructure of reflow soldering; (b) elemental profile of reflow soldering; (c) microstructure of laser soldering; (d) elemental profile of laser soldering

相比而言,在激光钎焊过程中,尽管铜也快速扩散至熔融钎料中,但极快的冷却速度导致铜不能充分扩散至镍箔界面处,使其在焊缝内偏聚(见小节 2.1)。已扩散至镍箔界面处的 Cu 原子的浓度梯度较大,但仍可溶入到 Ni_3Sn_4 金属间化合物,形成 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 或 $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{Sn}$ 化合物的混合组织。与铜-锡界面处相似,凝固前端的成分过冷和温度过冷导致显微组织向焊缝中心处呈柱状晶长大。但与铜-锡界面处仍旧存在不同之处, $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 与 $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{Sn}_4$ 两种化合物之间呈非连续状态,其原因在于镍、锡之间反应形成 Ni_3Sn_4 造成体积收缩所导致^[24]。

2.4 焊接接头力学性能

图 6 给出了两种焊接接头的最大剪切力及宏观断口形貌。从图中可以看出,回流焊及激光钎焊接头的断裂位置都位于铜母材处,且最大剪切力分别为 369 和 320 N。究其原因,与回流焊相比,激光钎焊因具有较高的热输入使得界面处形成了尺寸较大的金属间化合物,可能是导致强度略微下降的原因^[26]。但在实际生产中,镍-铜接头的最大剪切力不低于 100 N 则为符合强度设计要求。对于上述两

种焊接方式,尽管激光钎焊接头的最大剪切力略低于回流焊,但远高于实际生产要求,因此激光钎焊既能够满足实际产线镍-铜焊接的实际生产要求,又具备可选区连接、灵活、易操作等特点,可成为替代回流焊的可行性技术之一。

3 结论

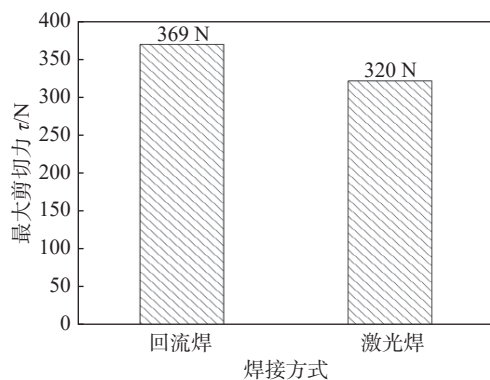
(1) 回流焊及激光钎焊均可实现镍-铜微箔的有效连接,焊缝均匀且成形良好,无明显缺陷;回流焊焊缝中心由锡的固溶体组成,激光钎焊焊缝由锡的固溶体和等轴晶状的 Cu-Sn 金属间化合物混合组织组成。

(2) 回流焊在铜-锡界面处显微组织变化规律为铜固溶体 $\rightarrow\text{Cu}_3\text{Sn}\rightarrow\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 金属间化合物,且呈扇贝状形貌,而在镍-锡界面处则为连续的 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 金属间化合物。激光钎焊在铜-锡界面处形成多种 Cu-Sn 的金属间化合物,且呈现连续的枝晶状形貌;而在镍-锡界面处则形成 $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 与 $(\text{Cu},\text{Ni})_3\text{Sn}_4$,且组织呈现非连续性。

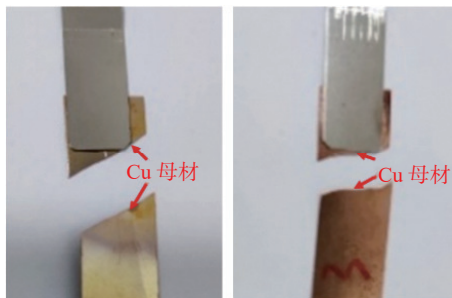
(3) 回流焊及激光钎焊接头的最大剪切力度分别可达 369 和 320 N,均满足实际工程应用需求,激光钎焊有望成为替代回流焊的可行性技术。

参考文献

- [1] 吴博尧,秦磊,张庆茂,等.基于视觉的动力电池焊后质量检测[J].焊接学报,2018,39(9):122-128.
Wu Boyao, Qin Lei, Zhang Qingmao, *et al.* Research on vision-based post-welding quality inspection of power battery[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(9): 122-128.
- [2] Kumar N, Masters I, Das A. In-depth evaluation of laser-welded similar and dissimilar material tab-to-busbar electrical interconnects for electric vehicle battery pack[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70: 78-96.
- [3] Yang P, Tarascon J M. Towards systems materials engineering[J]. Nature Materials, 2012, 11: 560-563.
- [4] 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.
- [5] 李东,赵杨洋,张延松.焊接能量对铝/铜超声波焊接接头显微组织的影响[J].焊接学报,2014,35(2):47-50.
Li Dong, Zhao Yangyang, Zhang Yansong. Effect of welding energy on microstructures of the Al/Cu joints obtained by ultrasonic



(a) 最大剪切力



(b) 回流焊宏观形貌 (c) 激光钎焊宏观形貌

图 6 铜-镍焊接接头性能

Fig. 6 Mechanical properties of Cu-Ni welded joints. (a) maximum tensile force; (b) macro-morphology of fracture for reflow soldering joints; (c) macro-morphology of fracture for laser soldering joints

- welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(2): 47-50.
- [6] 邓呈敏, 程东海, 张华, 等. 焊丝成分对铝/铜激光熔钎焊接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(1): 16-21.
- Deng Chengmin, Cheng Donghai, Zhang Hua, *et al.* Effect of welding wire composition on microstructure and properties on Al/Cu laser welding-brazing joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(1): 16-21.
- [7] 吴小伟, 沈以赴, 李博, 等. 铝—铜搅拌摩擦焊搭接焊缝共晶组织形成与抑制[J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 87-90.
- Wu Xiaowei, Shen Yifu, Li Bo, *et al.* Formation and inhibition of eutectics in Al/Cu dissimilar metal lap joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 87-90.
- [8] Yang J W, Cao B, He X C, *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of Cu—Al joints by ultrasonic welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 19(6): 500-504.
- [9] Chu K, Sohn Y, Moon C. A comparative study of Cu/Sn/Cu and Ni/Sn/Ni solder joints for low temperature stable transient liquid phase bonding[J]. Scripta Materialia, 2015, 109: 113-117.
- [10] Wang S J, Liu C Y. Study of interaction between Cu-Sn and Ni-Sn interfacial reactions by Ni-Sn3.5Ag-Cu sandwich structure[J]. Journal of Electronic Materials, 2003, 32(11): 1303-1309.
- [11] Zhong Y, Zhao N, Dong W, *et al.* Coupling effect of thermomigration and cross-interaction on evolution of intermetallic compounds in Cu/Sn/Ni ultrafine interconnects undergoing TLP bonding[J]. Journal of materials research, 2017, 32(16): 3128-3136.
- [12] Huan P C, Tang X X, Sun Q, *et al.* Comparative study of solder wettability on aluminum substrate and microstructure-properties of Cu-based component/aluminum laser soldering joint[J]. Materials & Design, 2022, 215: 11048.
- [13] Kordás K, Pap A E, Tóth G, *et al.* Laser soldering of flip-chips[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(2): 112-121.
- [14] Yang Z, Li L, Chen W, *et al.* Numerical and experimental study on laser soldering process of SnAgCu lead-free solder[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 273: 125046.
- [15] Kunwar A, An L L, Liu J H, *et al.* A data-driven framework to predict the morphology of interfacial Cu_6Sn_5 IMC in SAC/Cu system during laser soldering[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 50: 115-127.
- [16] Joo H S, Lee C J, Min K D, *et al.* Mechanical properties and microstructural evolution of solder alloys fabricated using laser-assisted bonding[J]. Journal of Materials Science:Materials in Electronics, 2020, 31(24): 22926-22932.
- [17] Nishikawa H, Iwata N, Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn—Ag Cu solder on a Cu pad[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 6-11.
- [18] Lee T Y, Choi W J, Tu K N, *et al.* Morphology, kinetics, and thermodynamics of solid-state aging of eutectic SnPb and Pb-free solders (Sn-3.5Ag, Sn-3.8Ag-0.7Cu and Sn-0.7Cu) on Cu[J]. Journal of Materials Research, 2002, 17(2): 291-301.
- [19] Lai Y, Chen S, Ren X, *et al.* Solid-liquid interdiffusion bonding of Cu/Sn/Ni Micro-joints with the assistance of temperature gradient[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 35(11): 1912-1924.
- [20] Chen L D, Huang M L, Zhou S M. Effect of electromigration on intermetallic compound formation in line-type Cu/Sn/Cu interconnect[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 504(2): 535-541.
- [21] Chung C K, Duh J G, Kao C R. Direct evidence for a Cu-enriched region at the boundary between Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn during Cu/Sn reaction[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(2): 258-260.
- [22] Mo L P, Guo C W, Zhou Z, *et al.* Microstructural evolution of Cu-Sn-Ni compounds in full intermetallic micro-joint and in situ micro-bending test[J]. Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 2018, 29(14): 11920-11929.
- [23] Görlich J, Schmitz G, Tu K N. On the mechanism of the binary Cu/Sn solder reaction[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86: 053106.
- [24] Zhang Z, Hu X W, Jiang X X, *et al.* Influences of mono-Ni (P) and dual-Cu/Ni (P) plating on the interfacial microstructure evolution of solder joints[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 50(1): 480-492.
- [25] Pal M K, Gergely G, Koncz-Horváth D, *et al.* Investigation of microstructure and wetting behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) lead-free solder with additions of 1.0 wt % SiC on copper substrate[J]. Intermetallics, 2021, 128: 106991.
- [26] Zhang L, Gao L L. Interfacial compounds growth of SnAgCu(nano La_2O_3)/Cu solder joints based on experiments and FEM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 635: 55-60.
-
- 第一作者: 孙茜, 博士; 主要研究方向为激光与微纳连接; Email: qiansun@suda.edu.cn.
- 通信作者: 周兴汶, 博士; Email: xingwenzhou@suda.edu.cn.

(编辑: 郑红)