

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.03.10

高温钎焊和电阻钎焊纯铝接头的微观组织及性能对比

李 翠, 董晓利, 武晓军, 肖 磊

新疆工业职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要: 铝具有强度高、塑性好、抗腐蚀性能优异等特点, 广泛应用于汽车工业中, 但是传统的钎焊并不能实现纯铝的有效连接, 因此考虑电阻钎焊的方法。对比高温钎焊和电阻钎焊纯铝接头的微观组织形貌和力学性能, 采用两步电阻钎焊方法, 在第一步施加 1 s+3 kA 的电流, 在第二步施加 6 s+6 kA 的电流, 以获得连接性能良好的钎焊连接层。结果表明, 高温钎焊接头的连接层中晶粒呈现粗大的树枝状晶, 电阻钎焊接头的连接层晶粒则呈现圆形的等轴状晶; 且电阻钎焊接头的断面是韧性断裂和解理断裂交杂的混合型断裂模式; 同时由于电场的施加, 增多了连接层中异质形核结点, 抑制了枝晶的生长, 最终得到晶粒细小的钎焊接头, 抗拉强度达到 65.79 MPa。

关键词: 电阻钎焊; 韧性断裂; 解理断裂; 异质形核

中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)03-0072-06

Comparison of Microstructure and Properties of High Temperature Brazed and Resistance Brazed Pure Aluminium Joints

LI Cui, DONG Xiaoli, WU Xiaojun, XIAO Lei

Xinjiang Industrial Vocational and Technical College, Urumqi 830000, China

Abstract: Aluminum is widely used in the automotive industry due to its high strength, good plasticity, and excellent corrosion resistance. However, traditional brazing cannot achieve effective connection of pure aluminum, so resistance brazing is considered. Compare the microstructure morphology and mechanical properties of high-temperature brazing and resistance brazing aluminum alloy joints. Two-step resistance brazing method is adopted. In the first step, a current of 3 kA is applied for 1 s, and a current of 6 kA is applied for 6 s in the second step. In order to obtain a brazing connection layer with good connection performance. The results show that the grains in the connecting layer of high-temperature brazing joints present coarse dendrites, while the grains of the connecting layer of resistance brazing joints present round equiaxed crystals; and the section of resistance brazing joints is ductile fracture. The mixed fracture mode of reconciliation and cleavage fracture; at the same time, due to the application of electric field, the heterogeneous nucleation nodes in the connecting layer are increased, the growth of dendrites is inhibited, and the brazed joints with fine grains are finally obtained, and the ultimate tensile strength reaches 65.79 MPa.

Keywords: resistance brazing; ductile fracture; cleavage fracture; heterogeneous nucleation

引用格式: 李翠, 董晓利, 武晓军, 等. 高温钎焊和电阻钎焊纯铝接头的微观组织及性能对比[J]. 电焊机, 2022, 52(3): 72-77.

Citation: LI Cui, DONG Xiaoli, WU Xiaojun, et al. Comparison of Microstructure and Properties of High Temperature Brazed and Resistance Brazed Pure Aluminium Joints[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 72-77.

* 收稿日期: 2021-10-07 修回日期: 2021-10-31

作者简介: 李 翠(1984—), 女, 本科, 讲师, 主要从事机械制造及自动化的研究工作。E-mail: 44142422@qq.com。

0 前言

铝表面存在的致密 Al_2O_3 氧化膜阻碍了其与填充钎料之间形成有效的冶金连接,而传统的连接方法如弧焊、高温钎焊、真空钎焊等,都需要使用助焊剂去除母材和焊料表面的氧化物,但助焊剂的残留会造成接头界面钎剂残留腐蚀等问题。电阻钎焊是钎焊与电阻焊相结合的一种新型焊接方法,兼具电阻焊与钎焊的特点。电阻钎焊的热量来源是电流通过工件接触面产生的电阻热,焊接过程中需要电极头对工件施加压力,在电阻热和电极压力作用下使钎料熔化并流入固态母材之间的间隙,并依靠毛细作用保持在间隙内并渗透进母材,冷却凝固而形成致密的焊接接头。通过电阻产生的焦耳热可以有效破坏铝表面的致密氧化膜,促进焊料在基材上的润湿^[1-2]。

电阻钎焊具有加热速度快、生产率高、加热集中、热影响区小等优点,主要应用于金属连接和精密加工领域。俞伟元等^[3]采用两步超声波钎焊方法,使用 Al-Si-Mg 钎料对铝合金进行超声辅助电阻钎焊,研究表明,在高密度电流作用下,电阻产生的焦耳热和相互作用力会使得钎焊过程中产生爆破现象,而通过超声作用能去除母材表面的氧化膜,消除爆破现象。王希靖等^[4]采用 AlZn 薄带钎料进行铝合金和紫铜的搭接试验,发现在最佳工艺下,

熔融钎料的温度能保持在 450~520 °C,而在靠近铜侧钎缝处容易产生聚集的硬脆相。杨金龙等^[5]采用火焰钎焊的方法实现铝合金与钢的良好冶金连接,研究表明,选用 Zn-xAl 钎料的同时辅助使用 CsF-RbF-AlF₃ 钎剂,能够有效去除铝合金和钢材表面氧化膜,提高钎焊接头力学性能,伴随 Al 元素含量的提升,钎料铺展性和填缝性也相应增大,值得注意的是钎焊接头强度呈现先升后降的规律,当 Al 元素含量为 15% 时,钎焊接头力学性能最佳。

许多学者已经对电场作用金属凝固^[6]的过程及钎料在基板润湿性能变化展开了深入探究,而对于电场作用下钎焊接头的性能改变和连接机理还很缺乏,因此本研究选择纯铝作为母材,Zn-Al 合金作为填充钎料,通过电阻钎焊的方法研究电场作用下焊接接头的微观组织演变规律及连接机理。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验母材为 1060 纯铝,尺寸为 20 mm×10 mm×6 mm,填充钎料为箔片状 Zn-Al 钎料(厚 0.6 mm),其为中温钎料,在电阻钎焊过程中能够达到熔点而不至于造成母材软化,有利于得到良好冶金连接的钎焊接头。母材和钎料的化学成分及力学性能如表 1 所示。

表 1 1060 纯铝和 Zn-Al 的化学成分及性能

Table 1 Chemical composition and performance of 1060 pure aluminum and Zn-Al

材料	化学成分(wt.%)							力学性能		
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	延伸率 A /%
1060 Al	0.07	0.0	0.1	0.01	0.01	0.01	99.8	≥75	≥35	5
Zn-Al	0.2	—	—	—	0.16	95	4.64	≥221	≥205	—

1.2 试验方法

试验前,先用 400 目砂纸打磨铝基体,用机械方法去除表面致密氧化膜及杂质,然后放在 20%NaOH 溶液中清洗 2 min,再在 20%HNO₃ 中清洗 2 min,进一步消除基体表面的氧化膜和杂质;随后用丙酮彻底冲洗,最后用蒸馏水清洗。将箔片状的 Zn-Al 钎料放置在上下基体之间,依靠机械装置施加 100 N 的恒定压力使其紧密连接,检查无误后开启开关通以大电流,最后空冷至室温。所用电阻焊机电源电

压 380 V,最大焊接功率为 80 kW,实验装置原理如图 1 所示。

为了研究施加电场的作用效果,分别进行了高温钎焊和电阻钎焊两组试验。在高温钎焊试验中,将高温炉分别升温至 400 °C、450 °C 和 500 °C,并用高温热电偶实时监测,随后将试样放入高温炉中持续加热 10 min,完成后将样品快速取出,并置于空气中淬灭。在电阻钎焊过程中使用两步电阻钎焊方法^[7],第一步加载 3 kA 电流,加载时间 1 s,实现上下

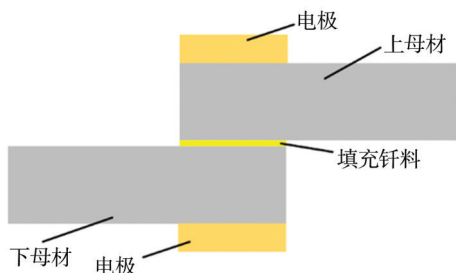


图1 电阻钎焊搭接接头示意

Fig. 1 Schematic diagram of resistance brazing joint

母材之间的预热及接触条件的改善,从而改善钎焊接头表面的显微结构组成,提升接头性能;第二步选择电流为6 kA,加载时间为6 s,电阻钎焊结束后将试样取出并在空气中淬灭。电阻钎焊过程中电流的变化曲线如图2所示。为了减小试验误差,每个试验参数分别准备5个样品。

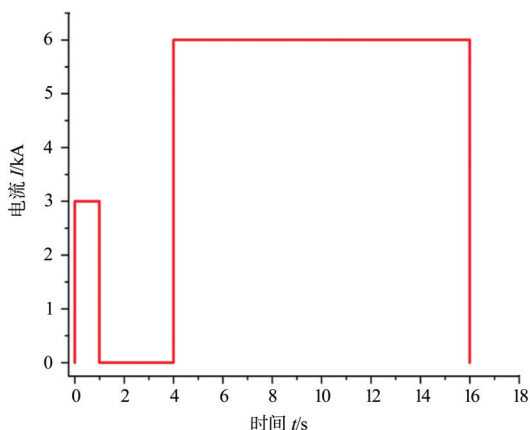


图2 电阻钎焊过程中的电流分布状况

Fig. 2 Current distribution during resistance brazing

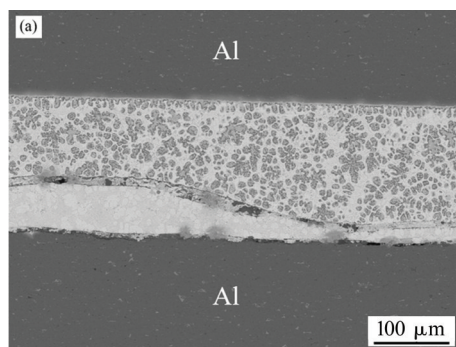
钎焊结束后,将钎焊接头沿横向剖开,用金相砂纸(80#, 400#, 8000#, 2000#, 4000#, 6000#)逐级打磨,并通过金刚石喷雾剂以及精细抛光布进行抛光处理,用NaOH腐蚀剂腐蚀后做成标准金相试样。使用Axio Scope A1光学显微镜观察,通过QUANA-FEG450型场发射扫描电镜开展更深入的研究。

2 试验结果与分析

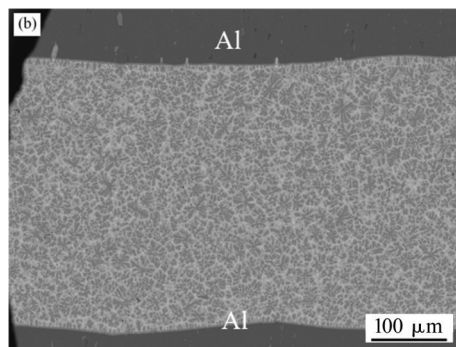
2.1 接头微观组织

高温钎焊时由于400℃温度较低,无法形成有效的连接;而在500℃及以上温度,母材靠近钎焊接头处会出现局部软化,影响接头性能,因此选择

450℃条件下的钎焊接头与电阻钎焊接头进行微观组织形貌对比,如图3所示。图3a为450℃高温钎焊接头微观组织,可以观察到有两条裂纹及少量夹杂物,这是纯铝表面致密的氧化膜($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$)^[8]所致。虽然氧化膜很薄,但是连续且致密,同时是不导电的,这时Al电极两端加上电势差后仍然能激发Al内的电子作定向移动。此外,连接层中白色相的Zn含量较多,而灰色相Al的含量相对少一些,表明母材中的Al元素在高温钎焊过程中有熔入至连接层中,连接层中的Al元素呈现长条形的树枝状晶结构,晶粒尺寸较大。图3b为两步电阻钎焊接头微观组织,相较图3a,电阻钎焊接头连接层的宽度大于高温钎焊接头,且Al含量也明显提高,晶粒得到了明显的细化,呈现出圆形的等轴晶状结构。



(a) 高温钎焊



(b) 电阻钎焊

图3 接头微观组织形貌

Fig. 3 Microstructure and morphology of joint

2.2 接头力学性能

高温钎焊在不同温度下和电阻钎焊在不同电流下得到的抗拉强度如图4所示。可以看出,在高温钎焊时,随着温度从400℃增加到450℃,钎焊接头的抗拉强度由12.78 MPa提升至36.97 MPa,而随

着温度进一步升至 500 ℃, 抗拉强度反而下降为 30.14 MPa, 这是因为 400 ℃ 时温度较低, 连接层所获得的能量不足而未能形成有效连接, 当温度升高至 500 ℃ 时, 由于温度过高, 在连接界面处反而出现烧蚀现象, 靠近连接层的母材也出现局部软化, 使得抗拉强度反而降低。对于电阻钎焊接头而言, 随着第二步电流强度的提升, 接头抗拉强度先增大后减小, 这是由于电流的进一步增大, 产生的焦耳能量过高, 一方面使得晶粒粗大, 恶化接头性能, 另一方面也会导致接头的烧蚀软化, 降低接头强度。而在电流为 6 kA 时获得最高抗拉强度 65.79 MPa, 相较于高温钎焊时的最高抗拉强度提升了 26.82 MPa。这表明电场的施加不仅能够明显减少缺陷, 还能有效提升接头的力学性能。

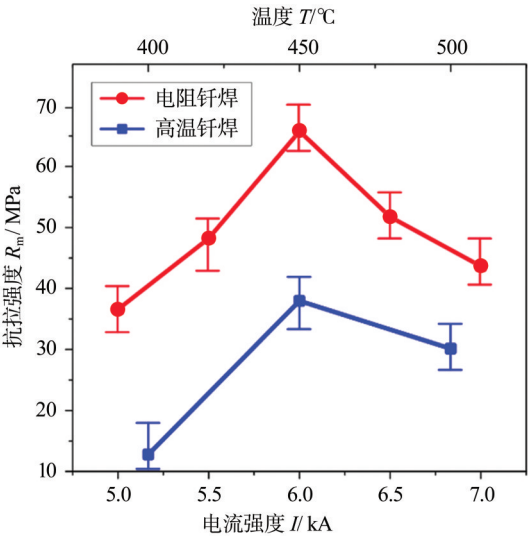


图4 钎焊接头抗拉强度对比

Fig. 4 Comparison of the tensile strength of brazed joints

2.3 电子探针分析

使用电子探针分析钎焊接头连接层中不同相的元素含量, 检测区域如图 5 所示, 成分分析结果如表 2 所示。由图 5 可知, 不同相在各钎缝中占比不同, 在各个相的元素含量分布也不均匀, 枝晶边缘处出现元素偏析现象^[9]。结合表 2 可知, 图 5a 中的点 2 为深色的初晶 α -Al 相, 其 Al 含量较高, 相对应的在外层会包裹着灰色的共析 α -Al 相, 而在枝晶之间则填充着白色的 η -Zn 相。同时也可以看出, 高温钎焊的相组织较电阻钎焊的相组织明显粗大。而图 5b 中 I 和 II 区域的 Al 含量有较明显的提高, 表明

母材处有更多的 Al 在电阻钎焊过程中熔解进入连接层中, 形成了占比更大、含量更高的 Al 相, 由于 Zn 相较于 Al 更软, 因而 Al 含量的提高有利于提升接头力学性能。

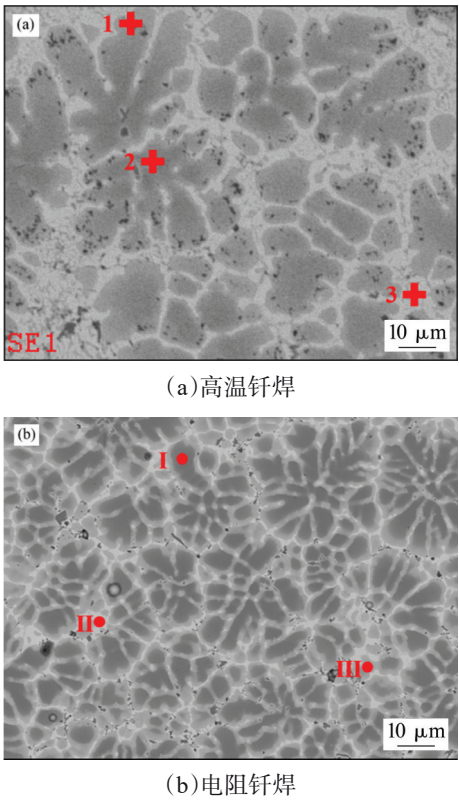


图5 钎焊接头局部放大图像

Fig. 5 Partial enlarged image of brazed joint

表2 图5各标记点的电子探针成分分析结果(质量分数, %)

Table 2 Electron probe component analysis results of each marker point of Figure 5 (wt. %)

区域	Al	Zn
1	29.42	70.58
2	43.54	56.46
3	2.70	97.30
I	82.53	17.47
II	6.27	93.73
III	38.61	61.39

2.4 接头断面分析

高温钎焊和电阻钎焊接头断口微观组织形貌如图 6 所示, 拉伸试验时断裂均发生在钎焊接头连接层处。由图 6a 可以看到类似于河流花样的曲线断裂形态, 为典型的解理断裂模式^[10], 是一种脆性断裂形态, 分析认为这是由于 Al 和 Zn 的晶体结构

属于密排六方晶体,在拉伸过程中更容易产生解理断裂。图6b的中心区域分布着凹陷状的韧窝,这是典型的韧性断裂,同时在局部韧窝最深处能够观察到第二相粒子的存在,而第二相粒子通常是钎焊接头在拉伸过程中由于拉应力的不断升高并在第二

相粒子处形成扩展,最终形成断裂,在韧窝边缘同样存在河流花样的曲线形态,由此可推断电阻钎焊接头拉伸过程中所产生的断裂是韧性断裂和解理断裂混合型断裂模式,因此相比于高温钎焊,电阻钎焊的抗拉强度得到了明显的提高。

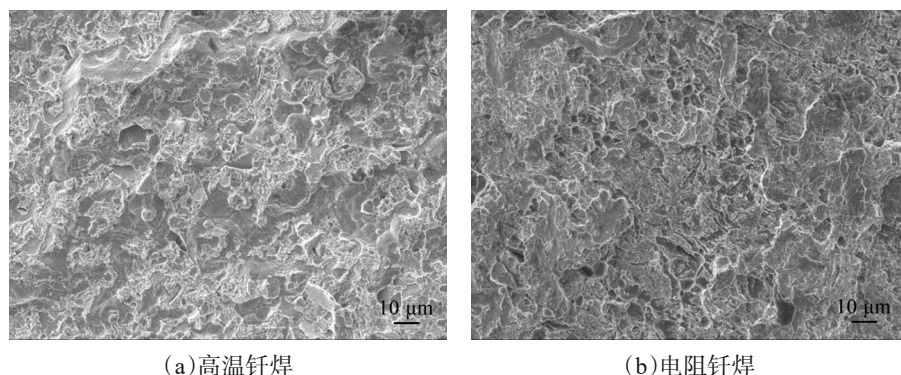


图6 钎焊接头断面微观组织形貌

Fig. 6 Microstructure of the cross-section brazing joints

2.5 电场在钎焊过程中的细化晶粒机制

由2.1节的分析可知,当电场被引入施加在钎焊过程中时,晶粒结构由树枝状枝晶结构转变为圆状的等轴晶结构,其面积和形貌表现出较强的一致性。在高温钎焊时,母材中间的熔融钎料温度较高,凝固时连接层的温度梯度大,保温时间长,凝固时晶粒完全生长形成发达的粗大树枝晶(见图7a),若是降低钎焊炉中的保温温度,又会导致出现熔融钎料流动性差、破除氧化膜不彻底以及母材和钎料结合不完全等问题,造成细化晶体结构和降低钎焊温度的矛盾。在电阻钎焊初期,由于第二步施加的大电流流经母材与钎料的接触界面,产生焦耳热熔化钎料促使其与母材连接,而相较于高温钎焊,电阻钎焊加热时间短,瞬时温度高,高强度大密度电流的流动路径会随着连接层的熔化而发生改变,因而在熔融的钎料中形成收缩力梯度以及在熔体中产生流速差,进而生成熔体中的剪切应力。此外,大电流的施加使得更多母材中的Al进入到钎缝中,增加了溶质含量,溶质的富集会生成异质形核并由此产生大量的晶核,这些异质形核结点在凝固过程中逐渐长大,抑制了树枝晶的生长,使得晶粒细化,同时熔融钎料与母材表面相接触,在靠近母材处也会生成较大的过冷度,由均质和非均质形核产生了

大量形核结点,一些依附于母材与钎料的接触面生长,而另一些进入至熔融的钎料中,最终形成大量的等轴晶核心。这就使得电阻钎焊接头的晶粒更加细小(见图7b)。

3 结论

(1)使用两步电阻钎焊的方法进行铝钎焊接头的连接,当第二步钎焊电流为6 kA,持续时间为6 s时,能够获得缺陷较少,力学性能优异的钎焊接头。

(2)高温钎焊时,钎料通过高温炉进行加热,形成粗大的树枝状晶,钎焊接头的力学性能较差;电阻钎焊时,大电流短时间流经连接层而产生焦耳热,形成圆形等轴晶,接头力学性能得到较大提升。

(3)高温钎焊接头的断面呈现河流花样的曲线断裂形态,是典型的解理断裂模式,是一种脆性断裂形态;电阻钎焊接头在拉伸过程中的断裂以韧性断裂为主,局部区域也产生解理断裂的混合型断裂。

(4)在高温钎焊接头中,由于凝固时连接层的温度梯度大,保温时间长,凝固时晶粒完全生长而形成发达的粗大树枝晶;电阻钎焊接头中由于电场的施加增多了溶质含量,同时在接触面上形成较大的过冷度,提高了异质形核结点,抑制了枝晶的生

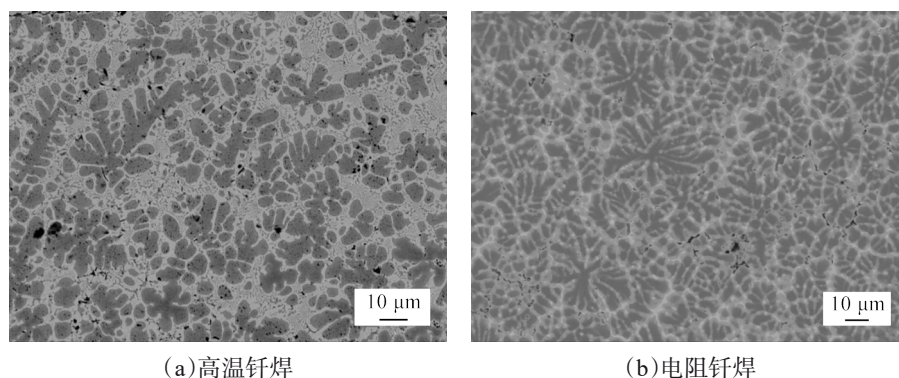


图7 钎焊接头放大图像

Fig. 7 Magnified image of brazed joint

长,最终得到了晶粒细小的钎焊接头。

(5)采用电阻钎焊焊接纯铝接头能够有效提高接头质量,但对于设备和工艺的要求更高,因此如何设计与之相匹配的钎焊设备以及进一步提高接头的性能是下一步的研究的重点。

参考文献:

- [1] Sun C, Zhang X J, Li L, et al. The Brazing Behavior of Aluminum-Steel Cladding Strip with Pre-Cladded Brazing Layer Used in Air Cooling System of Power Plants[C]. Matec Web of Conferences, 2016, 67: 05017.
- [2] Luo C, Zhang Z, Shan J. Simulation of filler metal's flow and shaping during Aluminum brazing process of heat exchanger cruciform joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(7): 88-92.
- [3] Wy Y, Ty Z, Yu W, et al. Formation and elimination of burst phenomenon in ultrasonic-assisted resistance brazing - ScienceDirect[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(3): 485-494.
- [4] 王希靖, 刘勇, 郁志勇. 铜/铝异种金属的电阻钎焊技术研究[J]. 热加工工艺, 2016(17): 74-77.
Wang X J, Liu Y, Yu Z Y. Study on Resistance Brazing Technology of Copper/Aluminum Dissimilar Metals [J]. Hot Working Technology, 2016(17): 74-77.
- [5] 杨金龙, 薛松柏, 薛鹏, 等. 铝/钢异种金属火焰钎焊接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2015(1): 63-66.
YANG Jinlong, XUE Songbai, XUE Peng, et al. Microstructure and mechanical properties of aluminum/stainless steel brazed joint with torch brazing [J]. Transactions of the Chinawelding, 2015(1): 63-66.
- [6] 赵静, 刘国超, 秦红星, 等. 脉冲波形对金属熔体内部电磁场分布的影响[J]. 铸造技术, 2020, 41 (02): 31-34.
- ZHAO Jingi, LIU Guochao, QIN Hongxing, et al. Effect of Pulse Waveform on the Distribution of Electromagnetic Field in Melt[J]. Foundry Technology, 2020, 41(02): 31-34.
- [7] 刘勇, 韩晓辉, 叶结和, 等. 异种金属 Al-Cu 电阻钎焊接头微观组织研究[J]. 电焊机, 2018(03): 92-96.
LIU Yong, HAN Xiaohui, YE Jiehe, et al. Study on microstructure of Al-Cu dissimilar metal joint by resistance soldering [J]. Electric Welding Machine, 2018 (03): 92-96.
- [8] 许志武, 李政玮, 罗潇雨, 等. 铝合金表面液态钎料声致铺展前沿氧化膜行为及其破除机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (11): 180-186.
Xu Zhiwu, Li Zhengwei, Luo Xiaoyu, et al. Oxidation Behavior at the Frontier of Ultrasonic-induced Solder Spreading on the Aluminum Alloy Surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(11): 180-186.
- [9] 于洵, 王琳琳, 欧美琼, 等. 一种新型高温合金凝固组织和元素偏析行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(05): 1488-1496.
Yu Xun, Wang Linlin, Ou Meiqiong, et al. Solidification Characteristic and Segregation Behavior of a New Nickel Base K4750 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(05): 1488-1496.
- [10] 李志勇, 周利, 何至正, 等. 激光功率对铝/黄铜熔钎焊接头组织和性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021(3): 669-681.
LI Zhiyong, ZHOU Li, HE Zhizheng, et al. Influence of laser power on microstructure and mechanical properties of Al/brass welding-brazing joints [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021(3): 669-681.