DOI: 10.3901/JME.2020.06.057

铝合金与高强钢激光-电弧焊铆复合连接机制研究*

韩锐波^{1,2} 王红阳^{1,2} 杨帆^{1,2} 刘黎明^{1,2} 祝美丽^{1,2}

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院 大连 116024;

2. 大连理工大学辽宁省先进焊接与连接重点实验室 大连 116024)

摘要: 为实现 6061 铝合金和 Q460 高强钢的优质连接, 采用激光诱导电弧复合热源对已通过阶梯型铆钉实现预连接的 6061 铝合金板和 Q460 高强钢板进行搭接焊试验。分析焊铆复合连接方法下接头的力学性能, 断裂模式以及横截面的宏观和微观形貌。结果表明, 在铆钉和复合热源的共同作用下, 焊铆复合连接接头由 3 个承载区域组成, 分别为钢板和铆钉形成的对接接头, 钢板, 铆钉以及铝合金板形成的铝-钢连接区以及铆钉侧壁和铝合金板侧壁形成的铝-钢界面。铝-钢连接区的金属间化合物以富 Fe 的 FeAl 相和 Fe₃Al 相为主。在最佳工艺参数下, 焊铆复合连接接头的拉剪载荷达到 6.2 kN。拉伸断口呈现出纽扣式断裂、母材基体断裂以及拉拔式断裂 3 种断裂模式, 后两种断裂具有更高的韧性和塑性。阶梯型铆钉和激光-电弧复合热源的协同作用可以实现铝合金和高强钢的优质连接。

关键词: 高强钢; 铝合金; 铆钉; 复合连接; 力学性能; 界面

中图分类号: TG457

Research on Riveting-laser Arc Welding Hybrid Joining Mechanism of Aluminum Alloy and High Strength Steel

HAN Ruibo^{1,2} WANG Hongyang^{1,2} YANG Fan^{1,2} LIU Liming^{1,2} ZHU Meili^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Key Laboratory of Liaoning Advanced Welding and Joining Technology,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: In order to realize the high quality joining of 6061 aluminum alloy and Q460 high-strength steel, the lap welding experiments are carried out on 6061 Al alloy plates and Q460 steel plates which had been pre-joined by multistep rivets by laser induced arc hybrid welding source. The mechanical properties and fracture modes of the hybrid joints are analyzed. In addition, the macroscopic and microscopic morphologies of cross-section of joint are also explored. The results show that the hybrid joint is composed of three loading bear parts under the actions of steel rivet and hybrid welding source, which are respectively the butt joint formed by steel plate and rivet, the Al-steel joint formed by steel plate, rivet and Al alloy plate, and the Al-Fe interface formed by rivet sidewalls and Al alloy plate sidewalls. The intermetallic compounds in Al-steel joint are mainly Fe-rich Fe₃Al phase and FeAl phase. The hybrid joint had a tensile shear load of 6.2 kN under the optimal parameters. There are three different fracture modes after tensile shear tests: button-type fracture mode, steel base-metal fracture mode and pull-out fracture mode. The latter two show a higher toughness and plasticity. The interaction between stepped rivet and laser-arc hybrid welding source enable a high quality joining between Al alloy and high-strength steel.

Key words: high-strength steel; aluminum alloy; rivet; hybrid welding; mechanics; interface

0 前言

近年来, 环境污染和能源枯竭问题日益严峻, 节能减排成为当下工业发展的重点。汽车轻量化作

为节能减排的关键环节是汽车工业发展所必须面对的课题^[1-2]。铝合金密度低, 比强度高, 耐蚀性能好, 作为车身材料在达到减重目的的同时又能保证车身零部件的刚性。高强钢成形性好, 生产工艺简单^[3], 在保证车身安全性能的前提下可以通过减薄厚度减轻车身重量。因此, 铝合金和高强钢在未来的车身结构中将会得到广泛的应用。然而使用铝合金和高

* 上海市重点实验室开放基金(2019001)和国家自然科学基金汽车联合基金(U1764251)资助项目。20190902 收到初稿, 20191204 收到修改稿

强钢等轻量化材料,就不可避免地要涉及到铝-钢连接的问题。由于铝合金和高强钢巨大的热物理性质差异,传统的焊接方法得到的焊接接头的力学性能较低,已经不能满足工业的需求。因此,越来越多的专家学者开始着手研究连接铝-钢的新方法。

秦国梁等^[4]深入研究了铝合金/钢熔钎焊接技术,为该技术的工程化应用奠定了基础。周惦武等^[5]采用激光胶接的方法焊接双相钢和铝合金,发现胶层的添加改善了铝/钢焊接接头的力学性能。王希靖等^[6]提出了一种搅拌摩擦铆焊方法用于连接 6061 铝合金和 DP600 镀锌钢板,研究了接头的微观组织和力学性能。邱然锋等^[7]采用电阻铆焊的方法对 6061 铝合金和 Q235 钢进行焊接,圆柱钢铆钉的加入使得接头的承载部位由铝-钢接合面转变为钢-钢接合面。LING 等^[8]采用一种新型的电阻单元点焊技术焊接 6061 铝合金和 22MnMoB 高强钢,通过引入钢制铆钉单元获得了能够承受 7 000 N 以上拉伸剪切载荷的焊接接头。由于铆钉的加入改变了接头的主要承载区域,因此焊铆复合连接技术在铝合金和高强钢的连接上具有较大的优势。

激光-电弧焊铆连接技术是一种将低功率激光诱导电弧复合热源应用于铝钢焊铆复合连接上的新型连接技术。激光-电弧复合热源具有能量密度高,热输入小,焊接热影响区窄等特点^[9],并且通过调节激光和电弧的相互作用可以实现对能量的精确调控,是一种连接铝-钢异种金属的有效方法。通过焊铆复合结构,采用激光诱导电弧复合热源,成功实现了铝合金和高强钢的焊铆复合连接。对焊铆复合连接接头进行拉伸剪切测试并研究了断口形貌。观察并分析了接头的连接机理。

1 试验材料与方法

试验材料选用 Q460 高强钢和 6061 铝合金, Q460 钢和 6061 铝合金的化学成分(质量分数)如表 1 所示。Q460 和 6061 的板材尺寸分别为 1 mm×30 mm×100 mm 和 2 mm×30 mm×100 mm。为减少铝合金的熔化量,铆钉选用变直径的 Q460 钢钉,即将铆钉设计成上下直径不同的阶梯状,其结构和尺寸如图 1 所示。

表 1 Q460 钢和 6061 铝合金的化学成分(质量分数)

材料	C	Mn	Si	Mg	Zn	Cr	Ti	Fe	Cu	Al
Q460	0.17	1.07	0.3	—	—	0.7	0.1	余量	—	—
6061	—	0.15	0.5	1.0	0.25	0.14	0.15	0.7	0.25	余量

图 1 变直径铆钉结构及尺寸(mm)

试验设备采用的是由 1 000 W 的 YAG 脉冲激光器与交直流钨极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)弧焊机组成的激光-电弧复合焊接系统。激光-电弧焊铆连接过程如图 2 所示。采用钢板在上,铝合金板在下的搭接结构。在两板搭接区域的中心部位预制工艺圆孔,上下孔径分别为 4 mm 和 5 mm,与变直径铆钉的上下直径相匹配。钢制铆钉自下而上依次穿过两块金属板。装配完成以后在钢板和铆钉的对接部位施焊。焊接时热源保持静止,工件随旋转台转动,转台转速为 38 r/min,施焊部位焊接线速度为 0.518 m/min,施焊时间为 2.2 s。

图 2 激光-电弧焊铆复合连接示意图

本试验主要采用激光-电弧热源进行焊接,这主要是由于低功率激光-电弧复合热源和阶梯铆钉的组合可以保证在得到美观的焊接接头的同时使铝合金少量熔化,焊接接头结合紧密不易松动。基于先前的探索性试验,本次试验固定激光功率为 300 W,直流 TIG 电流分别为 90 A、100 A、110 A、120 A 以及 130 A,保护气采用纯度为 99.99% 的高纯氩气,气体流量为 15 L/min。焊前使用钢刷清除铝合金以及高强钢工件表面的氧化物薄膜,用酒精清洗去除油污。焊后使用万能拉伸试验机对焊接试样进行拉伸剪切测试,室温下拉伸速度为 1 mm/min。每个焊接参数下,选取 3 个焊接试样进行拉伸剪切测试,最终取平均值作为最终的结果。拉伸试样的形状和尺寸如图 3 所示。使用线切割机沿焊点直径切割制取金相试样,将金相试样打磨抛光后腐蚀。使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀钢 2 s,使用凯勒试剂腐蚀铝合金 15 s。采用金相显微镜观察接头的宏观形貌,利用场发射扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观察铝/钢界面的熔合情况,同时利用扫描电镜配备的能谱仪分析界面附近金属间化合物的组成。使用维氏硬度计测试焊铆复合接头不同位置的硬度分布。

图 3 拉伸结构示意图(mm)

2 结果与分析

2.1 接头表面成形及力学性能

对焊铆复合连接接头的表面成形进行观察。图 4 为 TIG 电流为 100 A、110 A 以及 130 A 时焊点的表面成形。从图中可以观察到,焊点成形美观,周围没有飞溅,焊点内部没有明显的缺陷,仅在熄弧处留有收弧坑。130 A 的 TIG 电流下,焊点处收弧坑的尺寸要明显大于前两者。

(a) 100A

(b) 110A

(c) 130A

图 4 焊点表面成形

焊铆复合连接接头拉伸剪切载荷如图 5 所示。随着焊接电流的增加,焊铆复合连接接头的拉伸剪切载荷总体上呈现先升高后下降的趋势。TIG 电流在 100~120 A 变化时,接头的力学性能较稳定,拉剪载荷都保持在 6 000 N 以上。其中 100 A 时接头的拉剪载荷最大,为 6 200 N。

图 5 不同 TIG 电流下铝-钢焊铆复合连接接头的拉剪力

2.2 接头断口形貌

拉剪试验之后的焊铆复合连接接头呈现出三种不同的断口形貌,分别为纽扣式断裂,母材基体断裂以及拉拔式断裂。其中 90 A、110 A 和 120 A 接头表现为拉拔式断裂,100 A 接头表现为钢母材基体断裂,而 130 A 接头表现为纽扣式断裂。图 6 所示为三种断口的宏观形貌。对于纽扣式断裂,断裂发生在钢板与铆钉的对接焊缝,裂纹沿着整个焊缝扩展,最终在钢板表面形成一个形状不规则的孔。对于母材基体断裂,钢板与铆钉的对接焊缝只有小部分被撕裂,裂纹并没有完全沿焊缝扩展,而是在扩展的过程中向钢母材基体延伸,最后造成钢母材基体被撕裂。对于拉拔式断裂,断裂的最终形式表现为铆钉被从铝合金板的工艺圆孔中拔出。由于铆钉帽沿对铝合金板的机械咬合作用,导致拉伸过程中铆钉的帽沿被部分

剪掉而脱落。除此之外,铝合金板的工艺圆孔也发生了明显的塑性变形。

图6 三种断口宏观形貌及其拉伸曲线

观察这三种断口的载荷-位移曲线可以发现,呈现纽扣式断裂的接头在拉伸载荷下的作用下很快就达到峰值,而表现为母材基体断裂和拉拔式断裂的接头在达到峰值载荷时都经受了较大的变形。曲线从开始上升到达到峰值时与横轴所围起的面积对应接头破坏前吸收能的大小,可表征接头的韧性,最大位移对应断后伸长率,可表征接头的塑性^[10]。由曲线可以明显看出表现为母材基体断裂和拉拔式断裂的接头无论是韧性还是塑性都较高。在断口的拉伸曲线上划网格计算三种接头在失效破坏前吸收能的大小。结果显示,130 A 焊接接头失效破坏前吸收能为 16.47 J, 100 A 焊接接头失效破坏前吸收能为 31.96 J, 110 A 焊接接头失效破坏前吸收能为 35.52 J。

2.3 接头横截面形貌

焊铆复合连接接头的宏观截面形貌如图 7 所示。从图中可以看出,在激光-电弧复合热源的作用下,钢板,铝合金板以及铆钉被紧密地连接在一起,焊缝区形状大致呈“漏斗”状。

图7 焊铆复合接头的宏观截面形貌

为了探究不同的焊接电流下焊铆复合接头的

连接状况,利用场发射扫描电子显微镜对 90 A、110 A 以及 130 A 复合接头的横截面进行观察,图 8 所示为观察结果。由图可知,在复合热源的作用下,高强钢板完全熔透,而铝合金板部分熔化。 H 表示铝合金的熔深,随着 TIG 电流的增加,铝合金的熔深逐渐增加,90 A、110 A 和 130 A 电弧电流下,铝合金的熔深分别为 580 μm 、880 μm 和 1 050 μm 。此外,当电弧电流较小时,铝-钢连接紧密且无明显缺陷,金属间化合物(Intermetallic compounds, IMCs)的量也较少。而当电流过大时,可以明显观察到 IMCs 的量大幅度提升,铝-钢连接处也有裂纹产生。

图8 90 A、110 A 以及 130 A 焊铆复合接头的截面形貌

分析焊铆复合连接接头的结构,发现接头由三个区域组成,如图 8b 所示。A 区域为钢板和铆钉的

对接接头, 钢板和铆钉通过该接头连接。区域 A 是同质材料的连接区域, 因此连接质量良好, 无缺陷产生, 是整个焊接接头最主要的承载部位。焊接时由于流体受驱动力的作用而流动, 因此会有部分的 Al 元素被卷入该区域。B 区域为铝-钢连接区, 该区域将铝合金板与钢板, 铆钉连接在一起。该区是铝钢反应最为激烈的地方, 其存在对复合接头的力学性能有着较大的影响。一方面, 铝合金的熔化会导致接头中产生金属间化合物, 另一方面, 热源的作用会使铝合金板局部区域软化, 影响接头的力学性能。因此区域 B 是决定整个焊接接头力学性能的关键因素。C 区域为铝合金板侧壁与铆钉侧壁形成的铝-钢界面, 该界面的存在实现了铝合金板底部与铆钉的连接, 不仅保证了连接的紧密性, 同时也能略微提升接头的力学性能。

图 9 所示为是 110 A 接头 B 区和 C 区铝-钢界面的观察结果, 从图 9a、9b 中可以看出, B 区铝-钢界面参差不齐但连接较为紧密, 没有明显的裂纹产生, 整个界面几乎没有缺陷。部分较厚的 IMCs 在凝固时受收缩应力的影响局部破碎, 从而在其内部产生一些微裂纹, 不过由于裂纹的尺寸较小, 因此对接头的力学性能影响不大。如图 9c 所示, 在区域 C, 铝合金侧壁与铆钉侧壁牢牢地结合在一起, 铝钢界面光滑平直, 连接质量良好。钢侧组织细密, 因此焊接时有经历正火反应, 反应温度在 $AC_3 \sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(a) 区域 B 铝-钢界面

(b) 区域 B 铝-钢界面局部放大图

(c) 区域 C

图 9 B、C 两个区域的 SEM 形貌

利用配备在扫描电镜中的能谱仪 (Energy disperse spectroscopy, EDS) 对图 8b、9b 以及 9c 中所标注的位置进行点分析以及线分析, 点分析结果如表 2 所示。结合图 10 中的 Fe-Al 相图对结果进行分析。区域 A 中较暗部位 Al 的原子分数为 4.77%, 推测此处是 Al 与 α -Fe 形成的固溶体组织^[11]。从 Fe, Al 原子比例来看, 区域 B 铝-钢界面附近的 IMCs 以 Fe_3Al 和 $FeAl$ 为主, 为富 Fe 的金属间化合物相。有文献表明, 铝-钢界面处的富铁 IMCs 相能够提高接头强度^[12]。因此, 合理控制铝-钢界面处 IMCs 的种类, 获得富 Fe 的铁铝相, 对接头强度的提升有促进作用。

表 2 图 8、图 9b 中能谱点分析结果(原子分数) %

位置	Fe	Al	生成相
1	95.23	4.77	Fe(Al)固溶体
2	73.22	26.78	Fe_3Al
3	98.19	1.81	Fe
4	41.84	58.16	$FeAl$
5	98.17	1.83	Fe
6	64.91	34.49	$FeAl+Fe_3Al$

图 10 Fe-Al 相图

图 11 所示为区域 C 铝-钢界面的线扫描结果。从图中可以看出, Al, Fe 元素在界面附近变化剧烈, 从铝侧到钢侧, Al 元素和 Fe 元素含量分别出现陡降和陡升的趋势。

图11 界面主元素线分析结果

2.4 硬度测试

使用维氏硬度计测量了电弧电流为 90~120 A 焊铆复合连接接头铝合金板的硬度分布及焊接接头钢-钢焊接熔池的硬度分布。对于铝合金板,在水平方向上每隔 0.25 mm 取一个点进行硬度测试,共 20 个测试点。对于钢-钢焊接接头,在水平方向上每隔 0.25 mm 取一个点进行硬度测试,共 60 个测试点。测试力为 5 N,压力保持 10 s。

硬度测试结果如图 12 所示。由图 12a 可知,焊后紧靠铝-钢连接界面的位置,存在硬度较铝合金母材硬度(110 HV 左右)低的区域,其宽度随着热输入

(a) 铝合金板硬度测试曲线

(b) 钢-钢接头硬度测试曲线

图12 硬度测试结果

的增加而增加。该区域由熔化区和热影响区组成。紧靠铝-钢界面的熔化区经历再结晶过程,导致硬度降低。而热影响区则由于温度过高而发生时效,致使硬度降低。100 A 和 110 A 电弧电流下,由熔化区和热影响区组成的区域的宽度为 1~1.5 mm。观察图 12b 可知,随着热输入的增加,焊缝处的硬度不断升高。130 A 电弧电流下时,焊缝区域的硬度可达 253 HV。相比之下,硬度有较大的升高,这也表明此处形成了大量的金属间化合物。

2.5 讨论

图 13a 和 13b 所示分别为变直径铆钉的装配结构示意图以及焊接时焊铆复合连接接头的热量分布示意图。

(a) 变直径铆钉装配结构

(b) 焊铆复合连接接头热量分布示意图

图13 复合接头装配结构及热量分布示意图

在阶梯型铆钉和激光-电弧复合热源的共同作用下,焊铆复合连接接头由钢-钢焊接接头,铝-钢连接区以及铝-钢铆钉连接界面这三部分组成。其中钢-钢接头结合牢固,抗载能力强,是整个连接结构的核心承载区域。铝-钢连接区的产生使得焊铆复合接头的连接更为紧密,接头不易松动。但铝合金的熔化带来的 IMC 相以及软化问题会不同程度影响接头的力学性能。铝-钢铆钉连接界面在一定程度上能够促进接头性能的提升,同时也保证了复合接头连接的密闭性。这三个区域中,铝-钢连接区组织受到焊接热输入的变化产生显著影响,并直接影响接头的连接性能,因此需要进一步深入分析。

在低的热输入条件下,在实现钢板与钢铆钉良好焊接的基础上,铝合金板的熔化量少,铝合金板材与钢之间的连接区域也小,因此铝-钢连接区仅小范围存在。此时,由于铝合金的少量熔化,对顶部钢板和铆钉的焊接接头几乎不产生直接影响,因此钢-钢接头牢固可靠。随着热输入的增加,铝合金的焊接熔深逐渐增大,铝-钢连接区也随之扩展。当焊接电流为 110 A 及 120 A 时铝-钢连接紧密,这种情况下,铝-钢连接区的适当扩展会有助于接头承载能

力的提升。对比 90 A、110 A 和 120 A 接头, 靠近铝-钢连接区的铝合金的硬度不同程度的降低, 致使接头在拉伸测试后都表现为拉拔式断裂, 然而, 由于后两者承载区域的增加, 因此抗载能力都较 90 A 接头高。当热输入持续增加时(电弧电流达到 130 A 时), 铝合金板的熔化量越来越大, 焊接时在流体的流动作用下, 大量的铝元素被卷入到接头顶端的钢-钢接头, Al, Fe 元素剧烈反应导致大量脆硬相的生成, 极大地削弱了钢-钢连接强度。因此, 130A 的接头经拉伸后表现为纽扣式断裂。不难发现, 合理地控制铝合金的熔化量对焊铆复合连接接头性能的提升有较大的影响, 铝合金的熔深 H 能够较为科学地表征铝合金的熔化量。由观测结果可知, 当 H 处于 700~900 μm 时, 复合接头的性能最优, 当 H 超过 1 000 μm 时, 接头性能就会恶化。

在铝合金底部, 铝合金侧壁和铆钉侧壁受热连接形成铝-钢界面, 温度在 $\text{AC}_3 \sim 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$, 整个连接过程类似于熔钎焊的连接过程, 如图 14 所示。由于 Al 在铁中溶解度很大, 室温下约 32%, 因此在钢侧会生成 Fe(Al)固溶体。而 Fe 在固态铝中的溶解度很小, 在共晶温度 645 $^\circ\text{C}$ 下也仅为 0.53%, 因此当温度降至共晶温度时, 在铝侧会生成由富 Al 的 IMC 和 Al(Fe)固溶体组成的共晶组织。最终, 当温度降至室温时, 钢侧的 Fe(Al)固溶体与铝侧的共晶组织一道组成了整个铝-钢界面。

图 14 铝-钢界面反应示意图

3 结论

(1) 采用激光诱导电弧复合焊接热源, 以变直径铆钉为辅助单元, 可以实现 6061 铝合金和 Q460 高强钢的优质连接, 在最佳工艺参数下, 焊铆复合连接接头的拉剪力可达 6.2 kN, 吸收能为 31.96 J。

(2) 拉剪测试之后, 焊铆复合连接接头呈现出 3 种不同的断裂形式, 分别为纽扣式断裂, 钢母材基体断裂和拉拔式断裂。其中后两种断裂形式表现出较高的塑性和韧性。

(3) 焊铆复合连接接头由三个部分组成, 分别为钢板与铆钉形成钢-钢焊接接头, 铝合金板, 钢板以及铆钉三者形成的铝-钢连接区以及由铆钉侧壁和铝合金侧壁组成的铝-钢界面。钢-钢焊接接头是主要承载部位, 铝-钢连接区的大小直接影响焊铆复合接头的力学性能, 当铝合金的焊接熔深 H 在 700~900 μm 时, 焊铆复合接头的性能最佳。铝-钢界面保证连接的紧密性的同时进一步促进力学性能的提高。

(4) 受变直径铆钉的影响, 激光-电弧复合热源的作用位置偏向了铆钉, 有效地减小了铝合金板的熔化量, 铝-钢连接区的 IMCs 以富 Fe 相为主。

参 考 文 献

- [1] MESCHUT G, JANZEN V, OLFERMANN T. Innovative and highly productive joining technologies for multi-material lightweight car body structures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(5): 1515-1523.
- [2] 李永兵, 李亚庭, 楼铭, 等. 轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 44-54. LI Yongbing, LI Yating, LOU Ming, et al. Lightweighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 44-54.
- [3] 马宁, 申国哲, 张宗华, 等. 高强度钢板热冲压材料性能研究及在车身设计中的应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 60-65. MA Ning, SHEN Guozhe, ZHANG Zonghua, et al. Material performance of hot-forming high strength steel and its application in vehicle body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 60-65.
- [4] 秦国梁, 武传松. 铝合金/钢异种材料熔钎焊接工艺及其研究现状[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 24-35. QIN Guoliang, WU Chuansong. State-of-art of brazing-fusion welding processes of dissimilar metals between aluminum alloy and steel[J]. Journal of

- Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 24-35.
- [5] 周惦武, 李宁宁, 徐少华, 等. 双相钢/铝合金激光胶接焊胶层作用分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 25-30.
- ZHOU Dianwu, LI Ningning, XU Shaohua, et al. Analysis of the adhesive layer of laser weld bonding joints in dual phase steel/aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 25-30.
- [6] 王希靖, 张亚州, 李经纬, 等. 铝/镀锌钢搅拌摩擦铆焊接头组织与力学性能[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(2): 103-108.
- WANG Xijing, ZHANG Yazhou, LI Jingwei, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir rivet welding joint between aluminum and galvanized steel[J]. Materials Science & Technology, 2015, 23(2): 103-108.
- [7] 邱然锋, 申中宝, 李青哲, 等. 铝合金与钢的电阻铆焊[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 39-42.
- QIU Ranfeng, SHEN Zhongbao, LI Qingzhe, et al. Resistance rivet-welding of aluminum alloy and steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 39-42.
- [8] LING Zhanxiang, LI Yang, LUO Zhen, et al. Resistance element welding of 6061 aluminum alloy to uncoated 22MnMoB boron steel[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(16): 2174-2180.
- [9] WANG Hongyang, FENG Baoqiang, SONG Gang, et al. Laser-arc hybrid welding of high-strength steel and aluminum alloy joints with brass filler[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 33(7): 735-742.
- [10] 凌展翔, 罗震, 冯悦峤, 等. 铝钢点焊铆接复合连接技术[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 101-104.
- LING Zhanxiang, LUO Zhen, FENG Yueqiao, et al. Riveting-spot welding hybrid joining technology of aluminum and steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 101-104.
- [11] 张冬云, 高双欣, 高海芸, 等. 铝/钢异种金属激光填丝熔钎焊连接工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 90-97.
- ZHANG Dongyun, GAO Shuangxin, GAO Haiyun, et al. Wire feeding laser brazing and fusion for Al-Fe dissimilar metal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 91-98.
- [12] CHOI C Y, KIM D C, NAM D G, et al. A hybrid joining technology for aluminum/zinc coated steels in vehicles[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2010, 26(9): 858-864.
-
- 作者简介: 韩锐波, 男, 1995 年出生。主要研究方向为铝合金和高强钢的先进连接。
E-mail: hanrui波@mail.dlut.edu.cn
王红阳(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为异种材料之间的连接。
E-mail: wang-hy@dlut.edu.cn