

CMT 熔钎焊工艺对铝/钢异种金属焊接接头组织及性能的影响

余腾义¹, 李伟¹, 喻高扬², 李岩², 陈树海², 刘珂¹

(1. 攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川攀枝花 617000; 2. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用厚度均为 2 mm 的 Q235 钢与 5052 铝合金板进行 CMT 电弧对接熔钎焊, 研究焊接速度、送丝速度对接头焊缝形成、界面微观组织与力学性能的影响。试验结果表明, 在送丝速度为 5.6 m/min、焊接速度为 0.48 m/min 时背部成形良好, 钎料在母材的润湿铺展较好。界面处生成了平均厚度小于 10 μm 的金属间化合物层, 其成分以针状向钢侧生长的 Fe_2Al_3 和靠近铝侧的较为均匀的 FeAl_3 为主。当钎料润湿铺展较好且有背部成形时, 接头强度较高, 接头在铝母材处发生颈缩, 接头承载强度可达 158.3 MPa。其余试样均断裂在铝/钢界面处, 随着界面处金属间化合物厚度的降低, 强度有所提高。铣除余高后, 接头强度明显降低, 接头最高抗拉强度仅为 67.9 MPa。

关键词: 钢铝焊接; CMT 电弧; 工艺参数; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG444

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)05-0188-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.05.028

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Processing parameters, microstructures and mechanical property of Al/steel dissimilar metals butt joint made by CMT welding-brazing

Yu Tengyi¹, Li Wei¹, Yu Gaoyang², Li Yan², Chen Shuhai², Liu Ke¹

(1. Pangang Group Research Institute Co., Ltd, State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. School of Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A 2 mm thick Q235 steel plate and a 5052 aluminum alloy plate had been used for CMT arc butt welding-brazing. The effects of welding speed and wire feeding speed on joint weld formation, interface microstructure and mechanical properties were studied. The results show that when the wire feeding speed is 5.6 m/min and the welding speed is 0.48 m/min, the back weld formation, the wetting and spreading of filler in the base metal can be achieve at satisfied level. A interfacial reaction layer with average thickness less than 10 μm forms. The intermetallic compound layer is mainly composed of needle like Fe_2Al_3 growing towards the steel side and FeAl_3 near the aluminum side. When the filler is well wetted and spread, and had back forming, the joint strength can reach 158.3 MPa and the joint fractured at the aluminum base metal. For the rest of the samples, they were broken at the brazing interface, and the joint strength increased with the decrease of the thickness of intermetallic compound at the interface. After removing the joint reinforcement, the joint strength decreased obviously and the highest tensile strength of welding joints is only 67.9 MPa.

收稿日期: 2022-05-06

作者简介: 余腾义, 1973 年出生, 男, 四川隆昌人, 教授级高工, 主要研究方向为金属材料焊接性及焊接工艺研究, E-mail: 1090700481@qq.com。

Key words: Al/steel joint, CMT arc, processing parameters, microstructures, mechanical property

0 引言

铝合金和钢以其优越的性能在工业生产中被广泛运用, 实现两者的可靠连接, 可以充分发挥两者不同的优越性, 既可以降低工件的重量, 也能更好地节约材料, 在汽车、船舶等行业具有优越的经济效益和环境保护的理念^[1-3]。但是, 由于铝与钢的物理化学性能相差较大, 采用传统熔焊方法容易在焊缝中形成大量的脆性金属间化合物, 导致接头力学性能降低, 增加了铝/钢异种金属焊接的难度^[4]。近年来, 国内外很多焊接工作者^[5-6]对铝/钢熔钎焊的焊接工艺、焊接材料、界面层控制等方面展开了研究并取得了一定的成果。普通的电弧焊^[7-8]由于热输入量较大, 在焊接过程中容易形成粗大的金属间化合物, 影响焊接接头性能。而摩擦焊、扩散焊等固相焊方法虽然也能得到性能优良的焊接接头, 但是对工件的形状有很高要求, 所以应用范围小^[9-10]。与传统的电弧焊相比, Fronius 公司推出了一种新的 MIG 焊技术—Cold Metal Transfer (CMT), 该技术具有焊丝回抽机构和反馈机构, 可以显著提高焊接速度、减少热输入、提高工艺稳定性^[11-14]。对于钢/铝异种金属 CMT 熔钎焊, 国内外主要针对于搭接接头形式。对于对接接头形式, 由于焊缝背部润湿困难, 成形较

差, 研究较少。为解决该问题, 笔者采用 CMT 并添加加热脉冲形式提高焊接过程热输入, 促进焊缝背部润湿铺展, 拟对对接形式的钢/铝异种金属在不同的工艺参数下进行焊接试验, 研究工艺参数对焊缝成形、界面反应、接头力学性能的影响规律。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验中所选用母材为 5052 铝合金板与 Q235 低碳钢板, 尺寸均为 150 mm×75 mm×2 mm。焊丝选用 ER5356 开展研究, ER5356 是含镁 5% 的铝镁合金焊丝, 熔点为 575 ~ 633 ℃。母材与焊丝的化学成分见表 1。焊接前先将铝合金放在 20% 氢氧化钠溶液中浸泡 5 min, 经清水冲洗后再放入 30% 硝酸溶液中浸泡、清洗, 最后用清水冲洗干净, 以去除表面氧化膜。钢母材用砂纸对表面进行打磨后, 再用丙酮擦拭表面, 处理后的工件应尽快进行焊接, 以避免洁净工件被污染, 影响焊接效果。由于铝钎料在钢母材的润湿铺展效果不佳, 难以得到优质接头, 所以为了改善钎料在钢母材上的润湿性, 试验还采用了 Noclock 无腐蚀钎剂, 有助于提高钎料在钢母材上的润湿铺展。

表 1 焊接母材与焊丝的化学成分
Table 1 Chemical compositions of base metals and filler wire

牌号	C	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5052		0.1	0.25		<0.01	2.46	0.22		0	Bal
Q235	0.01	0.1	Bal	0.1	0.44		0.7	0.1	0.1	
ER5356		≤0.25	≤0.4	≤0.1	0.05~0.2	4.4~5.5		≤0.1		Bal

1.2 试验设备与方法

试验中使用了 Fronius 公司研发的 TPS5000 系列数字化 CMT 焊机。在进行 CMT 焊接时, 使用夹具将待焊金属板固定在工作台上, 接头形式为对接。固定样品时借助垫片使钢板与铝板的接头保持在同一水平线上, 并且较为严密地接触, 并在试样下方中间垫开槽较大的铜垫板, 大开槽使得焊缝自然成形, 如图 1 所示。添加脉冲能够加大电弧的冲击力, 有利于去除氧化膜以及增加熔深, 因此本试验选用 CMT+P 焊接模式。由于 CMT 焊机系统自带经过优化的专家系统数据库, 所以通过焊机的控制面板选择焊丝种类、焊丝直径、保护气类型进入到专家

数据库中, 专家库里的参数经过大量试验优化得到, 其焊接电流、电压和送丝速度为一元化调节, 通过选择合适的送丝速度来调节焊接电流, 并通过使用 Kuka 机器人调整焊枪位置与焊接速度等参数完成焊接。

1.3 微观分析及性能测试

采用型号为 JSM-6510A 扫描电子显微镜对接头界面以及断口形貌微观组织形貌进行观察, 分析金属间化合物的厚度以及生长状态, 并利用能谱对界面附近微观组织进行成分分析, 通过进行点扫描, 分析元素分布特征及确定元素分布情况。拉伸试验所用万能拉力试验机记录试样拉断的峰值拉力, 依

据峰值拉力与母材截面积计算抗拉强度。拉伸试样尺寸如图 2 所述。取三个试样强度的平均值作为最终结果记录。拉伸试验所用设备型号为 MTS810 拉伸试验机, 拉伸速率为 0.02 mm/s。为研究焊缝余高对接头抗拉强度的增强作用, 每一个试验参数均使用铣除余高与未铣除余高的接头进行测试。



图 1 焊接台及夹具

Fig. 1 Welding table and fixture

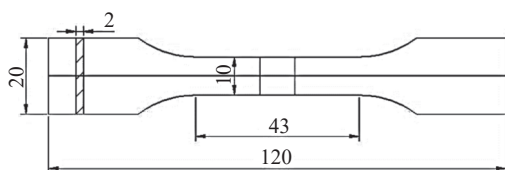


图 2 拉伸试样规格示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 焊接工艺对焊缝成形的影响

2.1.1 焊接速度对焊缝成形的影响

为了研究焊接速度对 CMT 焊接接头的影响规律, 使其他工艺参数保持恒定, 送丝速度设定在 5.6 m/min, 此时专家数据库给出的电压值为 13.3 V, 电流值为 96 A, 试验参数以及线能量如表 2 所示。

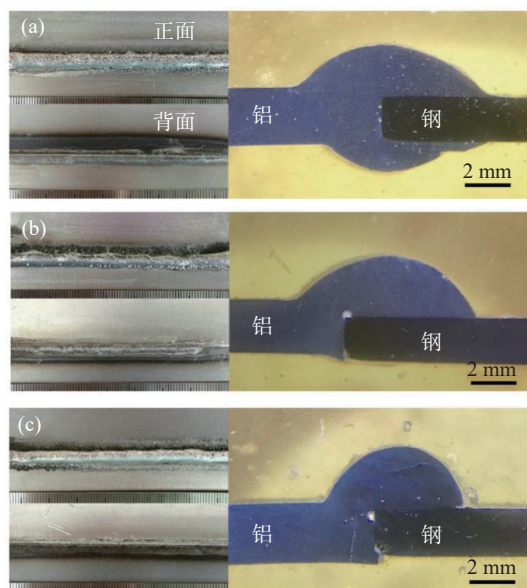
表 2 不同焊接速度的焊接参数

Table 2 Welding parameters of CMT with different welding speeds

编号	焊接速度 (m·min ⁻¹)	焊接电压 /V	送丝速度 (m·min ⁻¹)	焊接电流 /A	线能量 (kJ·m ⁻¹)
1 [#]	0.48	13.3	5.6	96	159.6
2 [#]	0.54	13.3	5.6	96	141.9
3 [#]	0.60	13.3	5.6	96	127.7

图 3 是焊接速度对焊缝成形的影响, 可以看出采用前文设定的工艺参数以及 CMT 专家数据库中

相应的电压电流值焊接得到了表面光滑、无明显缺陷的焊缝表面成形, 铝钎料与母材均能够结合, 且焊接过程中电弧稳定, 飞溅较小。在送丝速度一定的情况下, 随着焊接速度的提高, 电弧在单位距离停留的时间变短, 导致线能量减小, 焊缝的熔宽逐渐减小, 铝钎料在钢母材上的润湿铺展变差。此外, 在背部成形方面, 在焊接速度为 0.48 m/min 时背部有了一定程度的余高, 进一步提高焊接速度后, 背部余高消失。从不同焊接速度下的焊缝截面图来看, 随着焊接速度的提高, 钎料在母材上的润湿角在增加, 原因是由于焊接速度提高, 热输入降低, 导致钎料在母材上的润湿铺展变差。在低焊接速度时, 钎剂蒸发产生的气体能够及时的从焊缝中排出, 使得气孔等缺陷有所减少。此外, 低焊接速度时, 单位时间的热输入量增大, 熔池冷却时间延长, 液态钎料在电弧作用力以及重力作用下, 下沉到焊缝底部, 在母材上润湿铺展。综上所述, 选择合适的速度可以使钎料在母材上有较好的润湿性, 得到正面和背面皆成形良好的接头。



(a) 0.48 m/min; (b) 0.54 m/min; (c) 0.60 m/min

图 3 焊接速度对焊缝成形的影响

Fig. 3 Influence of welding speed on the weld formation

2.1.2 送丝速度对焊缝成形的影响

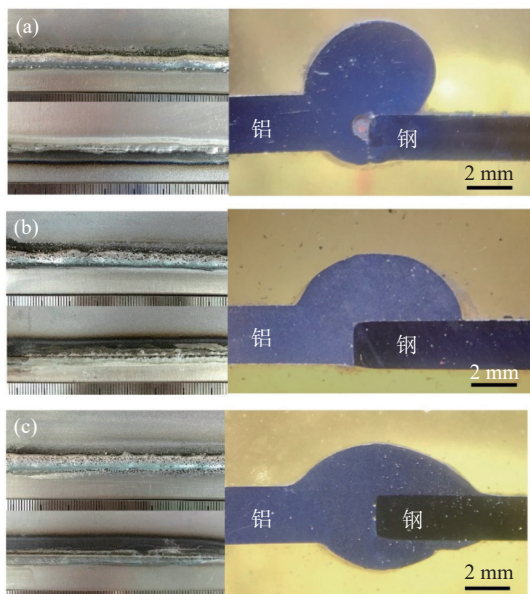
送丝速度代表着固定速度下填充量的改变, 其他工艺参数保持恒定的情况下, 焊接速度保持在 0.48 m/min, 此时专家数据库根据送丝速度的不同而给出的对应的电压值、电流值, 试验参数以及线能量如表 3 所示。

表 3 不同送丝速度的焊接参数

Table 3 Welding parameters of CMT with different wire feeding speeds

编号	送丝速度 /(m·min ⁻¹)	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	线能量 /(kJ·m ⁻¹)
1 [#]	4.6	78	12.3	0.48	119.9
2 [#]	5.1	86	12.8	0.48	137.6
3 [#]	5.6	96	13.3	0.48	159.6

图 4 为不同送丝速度条件下的接头焊缝成形。与仅改变焊接速度时相类似, 送丝速度改变仍可以得到光滑连续、无明显缺陷的焊缝表面形貌。随着送丝速度的增加, 线能量在增大, 熔宽在明显地增大, 当保持焊接速度为 0.48 m/min, 送丝速度达到 5.6 m/min 时有较为明显的背部成形。在送丝速度较低时, 由于填充减少且线能量较低, 导致钎料在母材上润湿铺展性较差, 送丝速度为 4.1 m/min 时在钢母材侧润湿角大于 90°, 影响焊缝成形并容易造成应力集中, 使性能恶化, 随着送丝速度的增加, 钎料的润湿铺展有所提高, 焊接速度低或送丝速度较大时拥有较大的热输入, 使钎料润湿铺展提高, 但导致钎料的填充量较大, 使焊缝正背面余高过大。应控制参数在保证钎料润湿铺展的同时, 尽可能减小填充量, 使焊接接头性能良好, 成形美观。



(a) 4.6 m/min; (b) 5.1 m/min; (c) 5.6 m/min

图 4 送丝速度对焊缝成形的影响

Fig. 4 Influence of wire feed speed on the weld formation

2.2 接头的界面微观组织

图 5 是典型金属间化合物层组织, 通过扫描电

镜对中心界面区进行观察, 可以看出在钢铝界面处生成了厚度小于 10 μm 的金属间化合物层, 近铝侧呈相对平整的板条状组织向铝的侧面生长。靠近钢的侧面则参差不齐, 呈舌状向钢的侧面生长。金属间化合物层厚度比较均匀。分别在靠近钢侧和靠近铝侧选择两点进行能谱分析, 结果如表 4 所示。靠近铝侧原子比约为 3 : 1, 推测为 FeAl₃ 相, 而靠近钢侧约为 2.7 : 1, 推测为 Fe₂Al₃ 相。

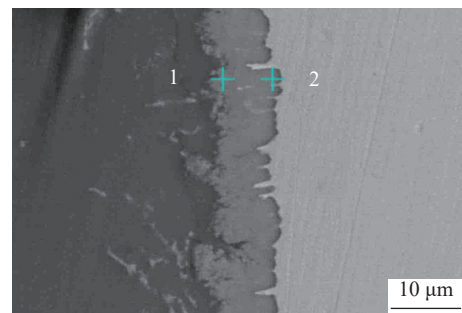


图 5 界面区微观组织

Fig. 5 Microstructure of interfacial area

表 4 界面区不同区域成分

Table 4 Different regional components of interface area %

编号	Fe	Al
1	24.68	75.32
2	26.93	73.07

由 Fe-Al 二元相图和相关热力学知识可知, 在电弧熔钎焊的过程中可能反应生成的化合物总共有以下 5 种: Fe₃Al、FeAl、FeAl₂、Fe₂Al₃、FeAl₃。并且在熔钎焊过程中, 其可能发生如下反应:



但是, 由于反应自身需要满足的热力学和动力学条件等方面的限制, 并非以上所有的物质均会在实际的焊接过程中生成。一个物质是否能够生成, 首先应该取决于其反应条件下的吉布斯自由能变化, 即 ΔG 值, 只有当 ΔG 的值小于 0 时, 该物质才可能生成。而在电弧熔钎焊条件下, 出于熔池温度等条件的限制, Fe₃Al 的 ΔG 大于 0, 因此在钢—铝熔钎焊的过程中不会生成 Fe₃Al。而 FeAl₂ 是一个亚稳相, 生成后会立即与 Al 反应, 从而转变成 Fe₂Al₃, 因此该相也不可能存在。综上所述, 在实际的试验过程中, 可能存在的相有以下三种: FeAl、Fe₂Al₃、

FeAl_3 , 他们各自的 ΔG 随温度变化的表达式分别为:

$$\Delta G^\theta(\text{FeAl}) = -58\,854.4 + 15.97T \text{ (J/mol)}$$

$$\Delta G^\theta(\text{Fe}_2\text{Al}_5) = -253\,559 + 85.5T \text{ (J/mol)}$$

$$\Delta G^\theta(\text{FeAl}_3) = -142\,538 + 50.5T \text{ (J/mol)}$$

因此在电弧熔钎焊的过程中,最可能的生成顺序为 $\text{Fe}_2\text{Al}_5 > \text{FeAl}_3 > \text{FeAl}$ 。但是上述热力学计算只是在平衡条件下进行的仅为理论上的可能情况。该分析必须与实际的电弧熔钎焊动力学过程相结合,才能得到最终的结果。整个熔钎焊过程中的界面反应可以大致分为3个阶段:

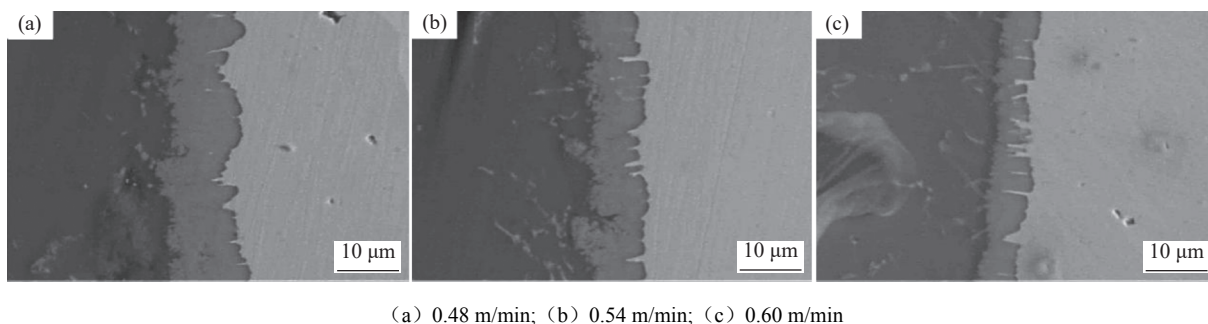
第一阶段,熔融状态的铝合金在低碳钢表面实现润湿和铺展,钢中的Fe原子向焊缝中溶解扩散,当界面附近液相区的Fe原子达到饱和时,首先在界面处结晶析出,形成自由能最低的 Fe_2Al_5 晶核。

第二阶段,晶核逐渐长大便形成了 Fe_2Al_5 金属间化合物,随着扩散反应区内的Al元素浓度增大,由于Al原子的半径比Fe原子半径小,所以铝沿晶界扩散速率比铁大得多,因而在晶界处铝元素浓度

要比平均浓度高得多,含铝低的化合物就与铝结合生成含铝更高的化合物,即 Fe_2Al_5 与Al反应生成了 FeAl_3 金属间化合物,由于 FeAl_3 受Fe原子溶解控制,在液态铝中结晶析出,所以 FeAl_3 在界面区各处厚度较为均匀。

第三阶段,反应扩散为主形成的 Fe_2Al_5 的厚度主要受Al原子继续向钢侧扩散,形成 Fe_2Al_5 ,并且由于电弧中心温度高于边缘温度,铝原子在中心界面区扩散速度最快,因此其形态为中间厚、边缘薄且以细条状向钢侧扩展。综上所述,可以初步推测出整个界面化合物层由靠近钢侧的 Fe_2Al_5 相和靠近铝侧的 FeAl_3 相组成。

图6是送丝速度为5.6 m/min时焊接速度对界面区微观组织的影响,金属间化合物层厚度随着焊接速度的增加而降低。当焊接速度较慢时,热输入较高,形成较厚的金属间化合物层。焊接速度提高后,热输入降低,金属间化合物层厚度降低,金属间化合物层呈现向钢基体舌状生长的特征。



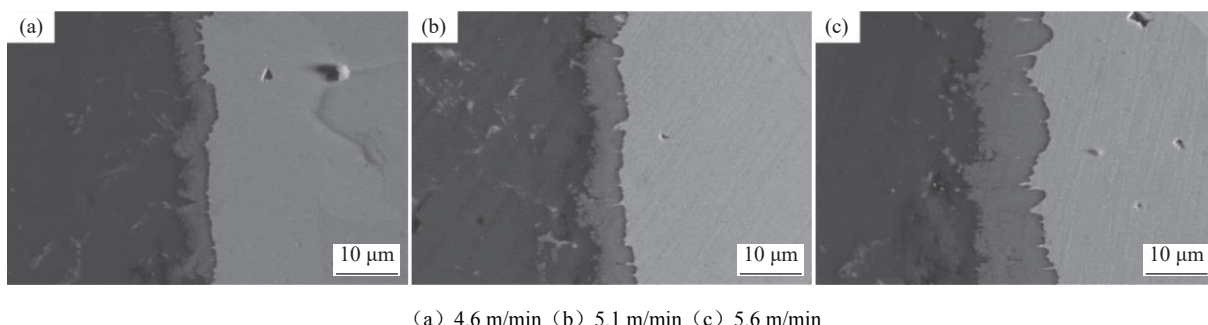
(a) 0.48 m/min; (b) 0.54 m/min; (c) 0.60 m/min

图6 焊接速度对界面区微观组织的影响

Fig. 6 Influence of welding speed on the interfacial microstructures

图7是焊接速度为0.48 m/min时送丝速度对界面区微观组织的影响,可以看出界面处生成了5~14 μm厚的金属间化合物层,金属间化合物层厚度随着送

丝速度的增加而增加,原因是送丝速度的增加导致电流电压增加,进而提高了热输入,加剧了钢铝之间的固液界面反应,使得金属间化合物生成增多。



(a) 4.6 m/min (b) 5.1 m/min (c) 5.6 m/min

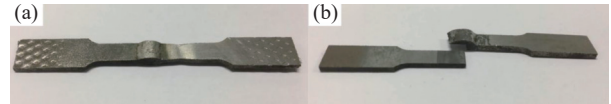
图7 送丝速度对界面区微观组织的影响

Fig. 7 Influence of wire feed speed on the interfacial microstructures

2.3 接头的断裂特征及力学性能

对焊接接头进行拉伸试验,发现当送丝速度为 5.6 m/min,焊接速度为 0.48 m/min 时,接头余高较高且钎料在母材背部有较多的润湿铺展,拉伸过程中,在铝母材靠近焊缝处出现颈缩,如图 8(a)所示,此时抗拉强度接近于铝母材的强度;当热输入量减小时,试验断裂位置发生在钢铝界面处,如图 8(b)所示,整个接头具有明显的脆性断裂的特征,断口光滑平整,无颈缩现象的产生。图 9 为断口微观组织,

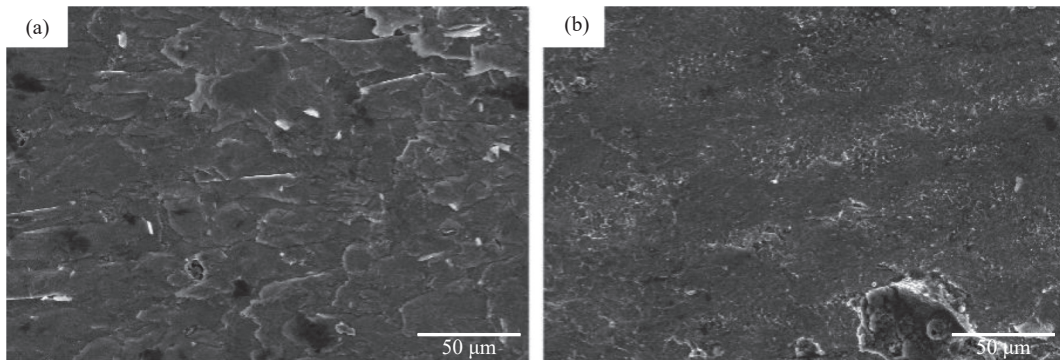
断裂位置在钢铝界面结合区,整个断口界面平整光滑,为脆性断裂,这是由于钢侧的界面处有脆性金属间化合物的存在,是焊接的薄弱区域。



(a)断裂在母材;(b)断裂在界面层

图 8 接头的不同断裂位置

Fig. 8 Different fracture positions of joints



(a)铝侧;(b)钢侧

图 9 接头断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of joint

图 10 是单因素变量对接头强度的影响,结果表明随着焊接速度的提高,接头的强度下降,原因是焊接速度降低使线能量增加,改善了钎料在母材上的润湿铺展,增大了结合面积,使得接头强度有所提高。在焊接速度为 0.48 m/min 时,背部出现了一定程度的余高,背面润湿铺展良好,进一步加强了接头的强度,接头在铝侧发生颈缩。随着送丝速度的增加,接头强度也在逐渐增加,原因是送丝速度增加相应增

加了电压和电流,使电弧的冲击力提高,并增加热输入,促进钎料在背部的润湿铺展。此外,铣除余高与未铣除余高的试样相比,接头强度明显下降,在热输入较大,正背部余高较明显时,强度下降更为明显,证明接头余高提供较大的剪应力对抗拉强度影响较大,当余高较高焊缝较宽时,接头在铝母材发生颈缩,强度接近于铝母材。

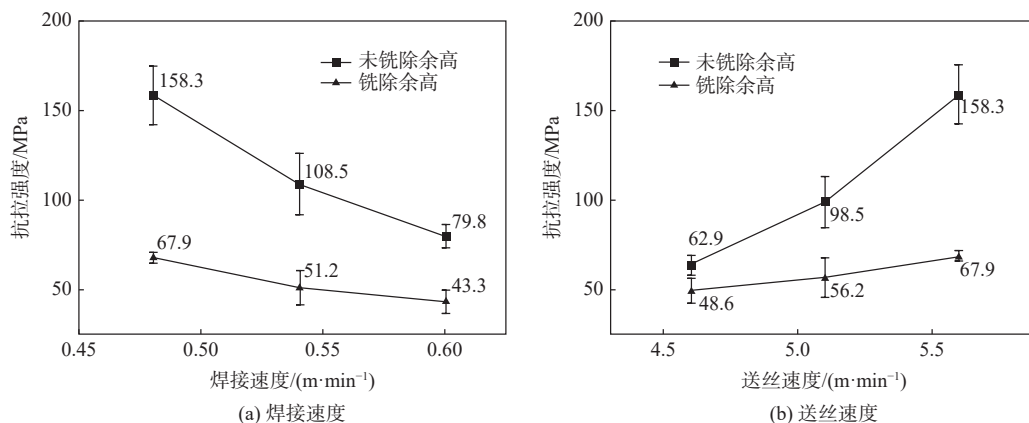


图 10 工艺参数对接头强度的影响

Fig. 10 Influence of processing parameters on the joint strength

3 结 论

1) 采用脉冲 CMT 焊接方法, 可以实现 5052 铝合金和 Q235 低碳钢的有效连接, 获得较好的宏观形貌。

2) 在送丝速度为 5.6 m/min、焊接速度为 0.48 m/min 时背部成形良好, 钎料在母材的润湿铺展较好。

3) 界面处生成了平均厚度在 10 μm 的金属间化合物层, 其成分以舌状向钢侧生长的 Fe_2Al_5 和靠近铝侧的较为均匀的 FeAl_3 为主。

4) 当钎料润湿铺展较好且有背部成形时, 接头强度较大, 接头在铝母材处发生颈缩; 其余试样均断裂在钢/铝界面处, 随着界面处金属间化合物厚度的降低, 强度有所提高。铣除余高后, 接头强度明显减小, 表明焊缝余高能够提高接头承载能力。

参考文献

- [1] Chen Shuhai, Yang Dawei, Yang Jian, *et al.* Nanoscale structures of the interfacial reaction layers between molten aluminium and solid steel based on thermophysical simulations[J]. *Journal of Alloy and Compounds*, 2018, 739: 184–189.
- [2] Chen Shuhai, Yang Dongdong, Zhang Minxin, *et al.* Interaction between the growth and dissolution of intermetallic compounds in the interfacial reaction between solid iron and liquid aluminum[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47A: 5088–5100.
- [3] Long Jiangqi, Lan Fengchong, Chen Jiqing. New technology of lightweight and steel-aluminum hybrid structure car body[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(6): 27–35.
(龙江启, 兰凤崇, 陈吉清. 车身轻量化与钢铝一体化结构新技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(6): 27–35.)
- [4] Springer H, Kostka A, Payton E J, *et al.* On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(4): 1586–1600.
- [5] Maoud M, Nima Y, Yang Guang, *et al.* Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 98(1): 214–228.
- [6] Yu Gaoyang, Chen Shuhai, Huang Jihua, *et al.* Technology and microstructure for laser welding-brazing assisted by transporting flux with shielding gas between steel and aluminum[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(6): 50–56.
(喻高扬, 陈树海, 黄继华, 等. 气载钎剂辅助钢/铝激光熔钎焊工艺与组织[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(6): 50–56.)
- [7] Lin Sanbao, Song Jianling, Yang Chunli, *et al.* Microstructure analysis of interfacial layer with tungsten inert gas welding-brazing joint of aluminum/stainless steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(10): 1211–1216.
(林三宝, 宋建岭, 杨春利. 铝合金/不锈钢钨极氩弧熔-钎焊接头界面层的微观结构分析[J]. *金属学报*, 2009, 45(10): 1211–1216.)
- [8] Shi Yu, Wen Junxia, Huang Jiankang, *et al.* Study on DE-GMAW MIG-brazing method for bonding steel with aluminum[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(16): 25–29.
(石玟, 温俊霞, 黄健康, 等. 基于旁路耦合电弧的铝钢MIG熔钎焊研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(16): 25–29.)
- [9] Wagner F, Zerner I, Kreimeyer M, *et al.* Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe/Al and Ti/Al-sheet materials[C]//Proc. ICALEO'01 (CD-ROM), 2001.
- [10] Chen Shuhai, Huang Jihua, Chen Yanbin, *et al.* The present situation and prospect of laser weld-brazing technology of dissimilar alloys[J]. *Welding and Joining*, 2011, 4: 27–31.
(陈树海, 黄继华, 陈彦宾, 等. 异种合金激光熔钎焊技术的现状与展望[J]. *焊接*, 2011, 4: 27–31.)
- [11] Cao R, Huang Q, Chen J H, *et al.* Cold metal transfer spot plug welding of AA6061-T6-to-galvanized steel for automotive applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 585: 622–632.
- [12] Yin Chuanya, Xing Yanfeng, Jin Guangcan, *et al.* Study on CMT plug welding process of AA6061-T6 aluminum sheet and DP590 galvanized steel sheet[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(15): 49–52.
(殷传亚, 邢彦峰, 金光灿, 等. AA6061-T6铝板和DP590镀锌钢板的CMT点塞焊工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(15): 49–52.)
- [13] Jaivindra S, Kanwer S A, Diesh K S. Dissimilar MIG-CMT weld-brazing of aluminum to steel: A review[J]. *Journal of Alloy and Compounds*, 2019, 783: 753–764.
- [14] Lei Zhen, Qin Guoliang, Lin Shangyang, *et al.* Fusion-brazing joining for dissimilar metals between 5A02 aluminium alloy and zinc-coated steel based on laser-MIG hybrid welding[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 94–98.
(雷振, 秦国梁, 林尚扬, 等. 基于激光—MIG复合热源的5A02铝合金/镀锌钢熔—钎焊[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 94–98.)