

DOI: 10.3969/j. issn. 1001-3881. 2021. 04. 008

本文引用格式: 蒋琳,徐忠根.基于单片机控制的 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接头组织与性能[J].机床与液压,2021,49(4):37-43.

JIANG Lin,XU Zhonggen.Microstructure and properties of Q890D steel/6061 aluminum alloy MIG welded joint controlled by single chip microcomputer[J].Machine Tool & Hydraulics,2021,49(4):37-43.

基于单片机控制的 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接头组织与性能

蒋琳¹, 徐忠根²

(1. 商丘工学院机械工程学院, 河南商丘 476000; 2. 商丘工学院信息与电子工程学院, 河南商丘 476000)

摘要:选取 TI 公司开发的 MSP430F149 单片机为控制核心的 MIG 焊过程控制系统, 研究焊接电流、焊接速度、焊接方向 & 焊枪角度和钢侧坡口角度等对 Q890D 钢/6061 铝合金焊缝成形的影响, 并在优化焊接工艺下分析焊接电流和焊接速度对 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接头界面区组织和接头力学性能的影响。结果表明: Q890D 钢/6061 铝合金适宜焊接方向为右焊法, 适宜的焊枪角度为 10°, 适宜的钢侧坡口角度为 45°, 焊丝位置宜处于钢侧坡口中部, 适宜的焊接电流和焊接速度分别为 105 A 和 50 cm/min; 不同焊接电流和焊接速度的 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接头的断裂位置都处于界面区, 而 MIG 焊过程中界面区形成的靠近钢侧的 (Fe, Cu)₂Al₅ 和靠近铝侧的 (Fe, Cu)₄Al₁₃ 相的双层金属间化合物层结构有助于改善焊接质量。

关键词: Q890D 钢/6061 铝合金; MIG 焊; 界面区; 微观形貌; 接头组织; 力学性能; 单片机

中图分类号: TG454

Microstructure and Properties of Q890D Steel/6061 Aluminum Alloy MIG
Welded Joint Controlled by Single Chip Microcomputer

JIANG Lin¹, XU Zhonggen²

(1. College of Mechanical Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu Henan 476000, China; 2. School of Information and Electronic Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu Henan 476000, China)

Abstract: The effects of welding current, welding speed, welding direction & welding torch angle and steel side groove angle on the weld formation of Q890D steel/6061 aluminum alloy were studied, and the effects of welding current and welding speed on the interface structure and mechanical properties of Q890D steel/6061 aluminum alloy MIG welding joint were analyzed under optimized welding process. The results show that the suitable welding direction of Q890D steel/6061 aluminum alloy is right welding method, the suitable angle of welding torch is 10°, the suitable angle of steel side groove is 45°, and the welding wire position should be in the middle of the steel side groove, the suitable welding current and welding speed are 105 A and 50 cm/min respectively; the fracture position of MIG welding joint of Q890D steel/6061 aluminum alloy with different welding current and welding speed is in the interface zone; in MIG welding process, the double-layer intermetallic compound layer structure of (Fe, Cu)₂Al₅ near the steel side and (Fe, Cu)₄Al₁₃ near the aluminium side formed in the interfacial zone is helpful to improve the welding quality.

Keywords: Q890D steel/6061 aluminum alloy; MIG welding; Interface zone; Micro-morphology; Interface structure; Mechanical properties; Single chip microcomputer

0 前言

钢/铝异种金属的焊接可以发挥材料各自的物理特性并实现整体结构的轻量化要求, 同时还可以提升材料的综合力学性能和降低生产成本等^[1], 目前, 钢/铝、钢/镁和铝/铜等异种金属焊接在汽车、航空航天和石油化工等领域都有广阔的应用前景^[2]。然而, 实际工程应用中的异种金属焊接常常由于各组成材料的成分和组织性能差异而面临一系列焊接难题,

如连接性较差、焊接接头力学性能降低以及容易出现焊接缺陷等^[3]。熔化极气体保护焊 (MIG) 作为一种焊接效率高、灵活性强、熔池保护效果好和焊接质量稳定的焊接技术, 在大多数的黑色金属和有色金属焊接中都有成熟应用, 然而, MIG 焊在钢/铝异种金属焊接方面的研究报道较少。如何通过选取焊接材料和调节焊接工艺参数等来解决钢/铝异种金属焊接成形、界面处硬脆 Fe-Al 金属间化合物层开裂等问题是亟待

解决的技术难题^[4-5]。在此基础上,本文作者选取 TI 公司开发的 MSP430F149 单片机为控制核心的 MIG 焊过程控制系统,考察了 ER2319 焊丝、焊接方向 & 焊枪角度、坡口位置等对 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊焊缝成形、接头微观组织和力学性能的影响,结果有助于高强钢/铝异种金属的焊接质量提升及其在汽车、交通运输和石油化工等领域的推广应用。

1 材料与方法

试验母材为调质态 Q890D 钢(原始组织为贝氏

表 1 Q890D 钢、6061 铝合金和 ER2319 焊丝的化学成分(质量分数)

单位: %

材料	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Zn	Ti	Fe	Al
Q890D 钢	0.18	0.28	1.33	0.008	0.004	-	0.42	-	-	-	余量	-
6061 铝合金	-	0.52	0.16	-	-	0.92	0.12	0.30	0.24	0.13	0.28	余量
ER2319 焊丝	-	0.19	0.28	-	-	0.31	-	6.12	0.11	0.14	0.19	余量

采用 TI 公司开发的 MSP430F149 单片机为控制核心的 MIG 焊过程控制系统,来实现对 Q890D 钢/6061 铝合金的 MIG 焊中焊接参数、焊接顺序和焊接位置等的控制和调节,最终克服了钢/铝异种金属自动焊过程中常见的回烧和顶丝等问题^[6]。基于单片机控制的 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊的研究共分为两部分:(1)在 6082 铝合金板上进行 MIG 堆焊,通过单片机控制焊接电流和焊接速度等考察其对焊缝成形的影响;(2)熔化极惰性气体保护焊(MIG)Q890D 钢/6061 铝合金,单片机控制 MIG 焊示意图 1,焊接前分别在钢侧与铝侧加工对接方式的坡口(V 形,根部间隙 1 mm)并用砂纸打磨、清洗除油和吹干,用工装夹具夹紧后置于铜质垫板上进行焊接,并通过单片机控制系统调节焊丝位置、焊接电流、焊接速度和焊枪方向(左/右焊法)& 焊枪角度等,同时控制电弧电压为 20 V、保护气氩气流量 13 L/min。

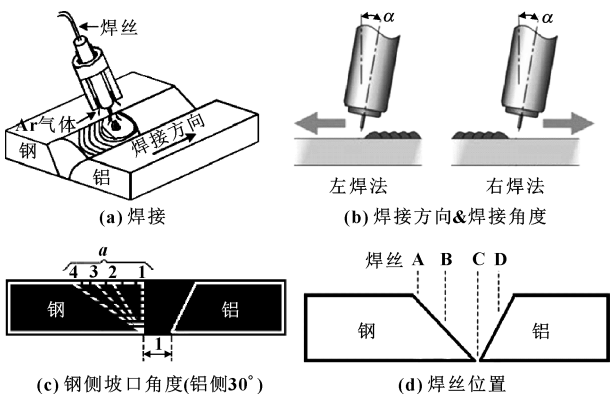


图 1 单片机控制 MIG 焊接示意

焊缝宏观形貌采用尼康 D750 相机进行拍摄;垂直于焊缝截取块状金相试样,60#~1500#砂纸逐级打磨、2.5 目金刚石研磨膏抛光后清洗吹干,分别采用 3.5% 硝酸酒精溶液和 Keller 试剂(95 mL 水、2.5 mL HNO₃、1.5 mL HCl 和 1.0 mL HF 混合溶液)腐蚀钢侧和铝侧试样,清洗和吹干后采用 Olymplus GX51 型

体+珠光体)和热轧态 6061 铝合金(原始组织为 α-Al 固溶态)板材,尺寸都为 160 mm×50 mm×12 mm,填充材料为 φ1.8 mm 的 ER2319 焊丝,Q890D 钢、6061 铝合金和 ER2319 焊丝的化学成分见表 1,Q890D 钢和 6061 铝合金的抗拉强度分别为 1 065 和 305 MPa、屈服强度分别为 970 和 275 MPa,而断后伸长率分别为 14.5%和 13.1%。

金相显微镜和 S-4800 型扫描电镜观察微观组织,并用 EDAX 能谱仪和 Empyrean 锐影 X 射线衍射仪对微区成分和物相进行分析;采用 HVS-1000 型数显维氏硬度计对接头硬度进行测定,载荷 9.8 N、保持载荷时间 15 s;室温拉伸性能测试在 MTS 810 型拉伸试验机上进行,速率为 0.5 mm/min,取 3 个试样的力学性能平均值进行评定。

2 结果与讨论

2.1 焊缝成形

当焊接速度为 50 cm/min 时,不同焊接电流下 6061 铝合金表面堆焊焊缝的表面形貌以及熔宽、熔深和余高测量结果见图 2。

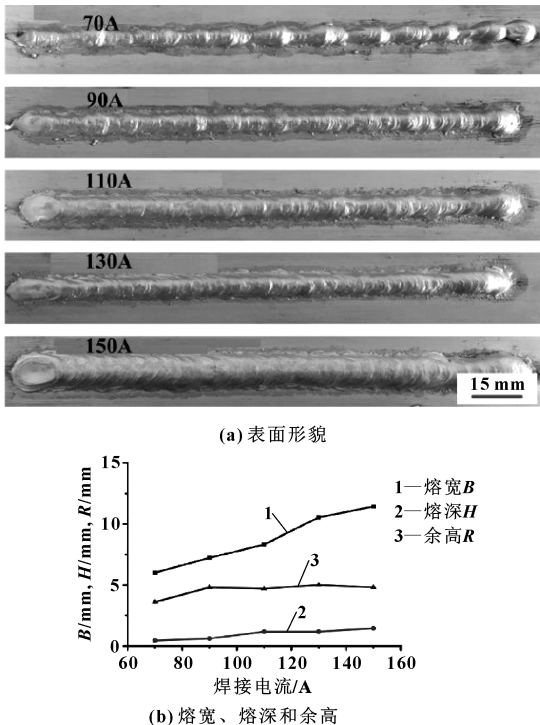


图 2 不同焊接电流下 6061 铝合金焊缝的表面形貌以及熔宽、熔深和余高

从表面形貌中可见，焊接电流为 70 A 时焊缝成形较差，而焊接电流在 90~150 A 时焊缝成形良好；随着焊接电流从 70 A 增加至 150 A，焊缝熔宽 B 、熔深 H 和余高 R 都呈现逐渐增大趋势，且熔宽增加幅度最大。这是因为较小焊接电流时的焊接热输入较低，在较少的熔融金属和较低的熔池温度下造成液态金属流动性不足而影响焊缝成形，而较大的焊接电流提高了焊接热输入，焊缝成形得到改善的同时增加了焊缝熔宽、熔深和余高^[7]。

当焊接电流为 110 A 时，不同焊接速度下 6061 铝合金表面堆焊焊缝的表面形貌以及熔宽、熔深和余高测量结果见图 3。从表面形貌中可见，焊接速度从 30 cm/min 增加至 70 cm/min 时，6061 铝合金焊缝成形良好；从熔宽 B 、熔深 H 和余高 R 测量结果来看， B 、 H 和 R 都有随着焊接速度增大而逐渐减小的特征，且在焊接速度超过 50 cm/min 时 B 和 H 降低幅度较为明显。这是因为焊接速度增加会造成单位长度焊缝热输入的减少，从而造成焊缝熔宽、熔深和余高会发生不同程度减小^[8]。

图 4 为焊枪方向（左/右焊法）和焊枪角度（0°~20°）对 Q890D 钢/6061 铝合金焊缝表面形貌的影响，其中焊接电流和焊接速度分别为 110 A 和 50 cm/min。可见，焊枪角度在 0°~20°变化时，左焊法工艺下的 MIG 焊缝表面都可见随焊枪角度增大而开裂倾向增加的裂纹缺陷；相较而言，右焊法工艺下 MIG 焊缝的成形质量有明显改善，除焊枪角度在 0°、5°和 20°时存在裂纹缺陷外，焊枪角度在 10°和 15°时成形质量较好，未见明显裂纹缺陷存在。由此可见，焊枪方向和焊枪角度都会对 MIG 焊缝成形质量造成

显著影响，且只有在右焊法/焊枪角度 10°和 15°时可以保证具有较好成形质量，这主要是因为左焊法和右焊法焊接过程中电弧作用的主要区域分别对应在焊接试件的未焊部分和液态熔池上，在其他焊接工艺参数相同条件下，能够增加熔池温度、降低冷却速度的右焊法更有助于形成裂纹倾向较小、成形质量较高的焊缝^[9]。

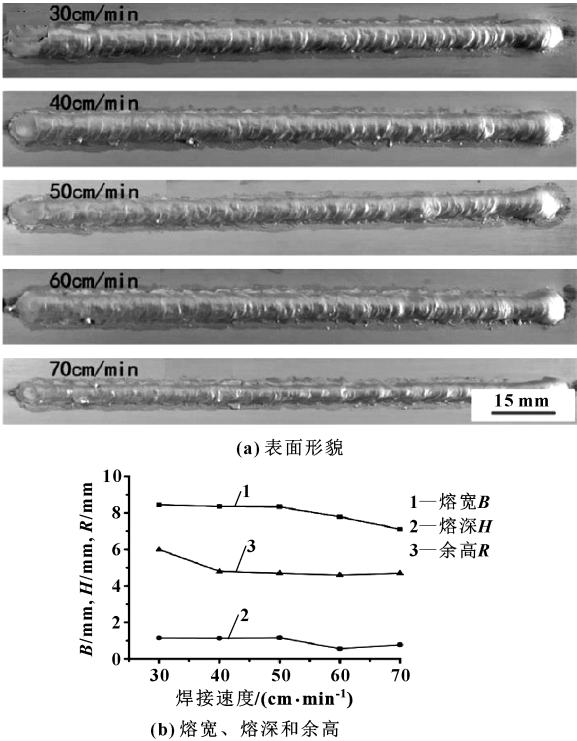


图 3 不同焊接速度下焊缝的表面形貌以及熔宽、熔深和余高

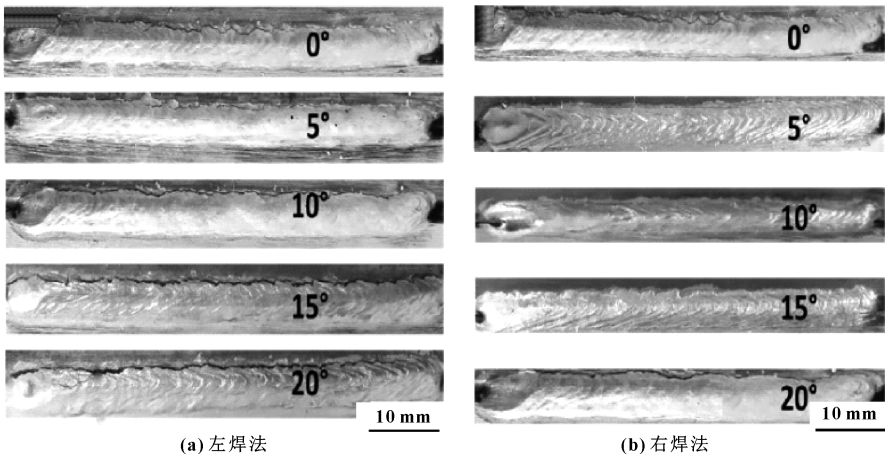


图 4 焊接方向 & 焊枪角度对焊缝表面形貌的影响

进一步对右焊法焊接接头的横截面形貌进行观察，结果见图 5。对比可知，虽然焊枪角度在 10°和 15°时焊缝成形质量较好，但是焊缝区形貌存在明显

差异，具体表现在焊枪角度 10°时焊缝内部无明显裂纹、气孔、未焊透和未熔合等缺陷存在，而焊枪角度 15°时焊缝内部存在较多的尺寸不等气孔缺陷。这主

要是因为较大焊枪角度下的氢会更容易进入焊接熔池形成气泡而降低保护气氩气对焊接熔池的保护^[10]。可见, Q890D 钢/6061 铝合金适宜焊接方向为右焊法, 适宜的焊枪角度为 10°。

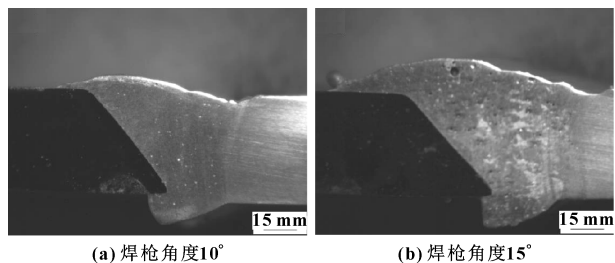


图 5 右焊法焊接接头的横截面形貌

图 6 为不同 Q890D 钢侧坡口角度的焊接接头横截面形貌, 右焊法焊接电流、焊接速度和焊枪角度分别为 110 A、50 cm/min 和 10°。Q890D 钢侧坡口为 0° 时, 钢表面焊缝余高较大, 坡口下部由于润湿和铺展不充分而存在未连接缺陷; 增加 Q890D 钢侧坡口角度为 30°, 焊缝上表面铝侧存在凹陷, 坡口根部的铺展虽有改进但仍然不足; 在 Q890D 钢侧坡口角度达到 45° 时形成了成形良好的焊缝; 如果继续增加 Q890D 钢侧坡口角度到 60°, Q890D 钢/6061 铝合金焊缝成形较差, 钢侧上表面存在明显未填满缺陷。可见, Q890D 钢侧坡口角度不宜过大 (60°) 或者过小 (0° 和 30°), 较小的坡口角度会造成钢侧坡口上、下表面温差较大而影响焊缝熔融金属铺展, 而过大的坡口角度会导致相同焊接工艺下的熔覆量低于坡口要求而造成未填满缺陷^[11]。可见, Q890D 钢/6061 铝合金钢侧坡口角度应选择为 45°。

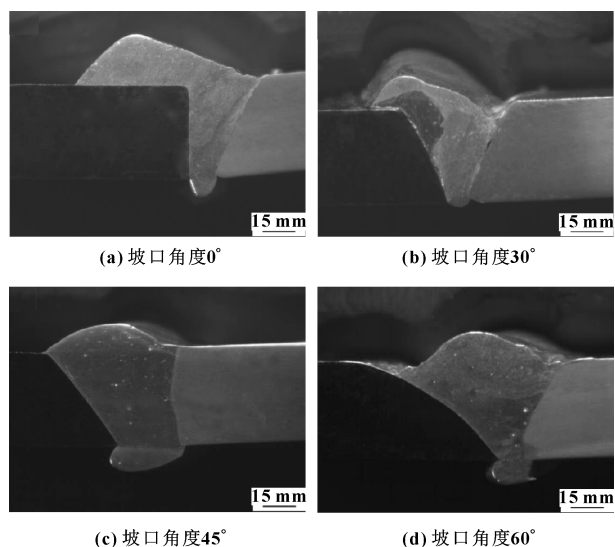


图 6 不同 Q890D 钢侧坡口角度的焊接接头横截面形貌

图 7 为不同焊丝位置的焊接接头横截面形貌, 右焊法焊接电流、焊接速度、焊枪角度和钢侧坡口角度分别为 110 A、50 cm/min、10° 和 45°。对比分析可知, 当焊丝处于位置 B (钢侧坡口中部) 时, 焊接接头成形良好, 而焊丝处于位置 A、C 和 D 时则分别会出现焊缝底部未连接缺陷、上部未填满缺陷和界面未连接等缺陷, 成形质量较差。这主要是因为焊丝位置会影响 MIG 焊接过程中的焊接温度场的缘故, 且只有当焊丝位于钢侧坡口中部时焊缝中温度分布最为均匀、液态金属的润湿铺展最为充分^[12], 能够获得成形良好的焊接接头。可见, Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊的焊丝位置宜处于钢侧坡口中部。

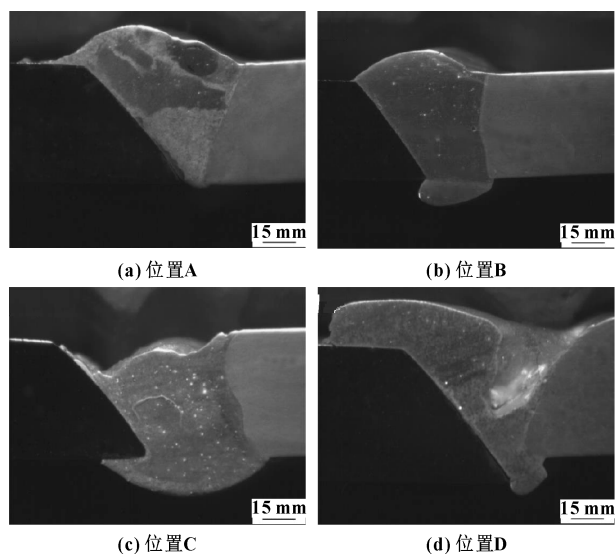


图 7 不同焊丝位置对的焊接接头横截面形貌

2.2 微观组织与力学性能

在上述优化焊接工艺下, 考察了焊接电流和焊接速度对 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接接头界面区 (IZ) 微观形貌的影响。图 8 为焊接电流对焊接接头 IZ 区微观形貌的影响, 对比分析可见: 焊接电流为 95~115 A 时的 MIG 焊接接头界面区都存在厚度不等的金属间化合物层, 如焊接电流为 95、105、110 和 115 A 时金属间化合物层厚度分别约为 1、3、4 和 10 μm , 金属间化合物层厚度有随着焊接电流增加而增大的特征。此外, 对比分析可知: 较小焊接电流 (95 A) 时界面区金属间化合物层较薄且会出现局部未连接现象, 而过高的焊接电流 (115 A) 虽会提高金属间化合物层厚度, 但是同时在界面区形成了较大的内应力并促进了裂纹的形成^[13]。可见, Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊适宜的电流密度为 105 A。

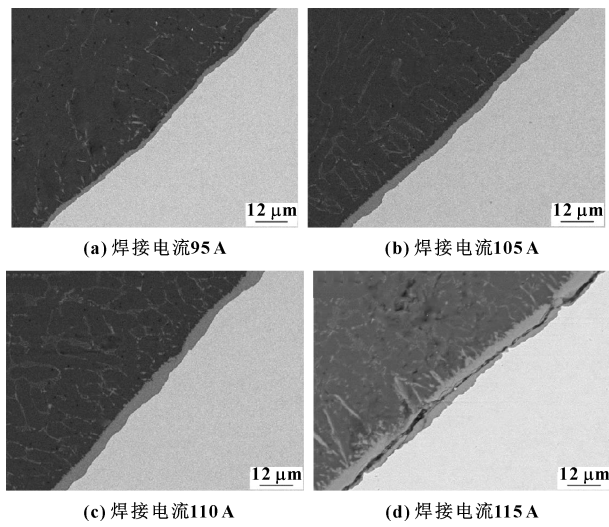


图 8 焊接电流对 IZ 区微观形貌的影响

图 9 为焊接速度对焊接接头 IZ 区微观形貌的影响，其中，焊接电流为 105 A。对比分析可见：焊接速度为 40~55 cm/min 时 MIG 焊接接头界面区都存在厚度不等的金属间化合物层，且金属间化合物层厚度随着焊接速度增加而逐渐减小，在焊接速度为 55 cm/min 时 IZ 区金属间化合物层较薄且局部存在未连接现象，而焊接速度为 40 cm/min 时的金属间化合物层中存在明显裂纹缺陷。

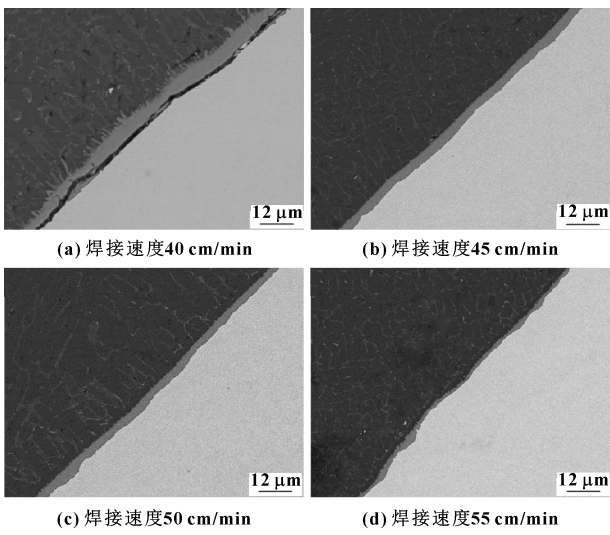


图 9 焊接速度对 IZ 区微观形貌的影响

可见，Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊适宜的电流密度为 105~110 A。MIG 焊接接头中 IZ 区金属间化合物层厚度主要与焊接热输入有关，较低焊接速度下虽然具有较大的焊接热输入，但是同时会增加裂纹敏感性^[14]，Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊适宜的焊接速度为 50 cm/min。

表 2 为不同焊接工艺下 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接接头的室温拉伸性能测试结果。

表 2 不同焊接工艺下 MIG 焊接接头的拉伸性能

参数	焊接电流(焊接速度为 50 cm/min)/A				焊接速度(焊接电流为 105 A)/(m·min ⁻¹)			
	95	105	110	115	40	45	50	55
抗拉强度/MPa	216	238	223	178	168	222	238	203

可见，在其他焊接工艺相同条件下，随着焊接电流从 95 A 增加至 115 A，MIG 焊接接头抗拉强度呈现先增加而后减小特征，在焊接电流为 105 A 时取得最大值；随着焊接速度从 40 cm/min 增加至 55 cm/min，MIG 焊接接头抗拉强度呈现先增加而后减小特征，在焊接速度为 50 cm/min 时取得最大值。此外，不同焊接电流和焊接速度的 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接接头的断裂位置都处于界面区，而不同焊接工艺（焊接电流和焊接速度）下焊接接头的抗拉强度变化主要与焊接热输入以及界面区显微组织有关。较小焊接电流下界面区形成的金属间化合物层较薄且存在局部未连接缺陷，因此抗拉强度会相对较低；而过高的焊接电流会在界面区形成有微裂纹的较厚的硬脆 Fe-Al 金属间化合物层，焊接接头的有效承载面积减小而造成抗拉强度降低^[15]。较小焊接速度下界面区反应更为充分，从而形成较

厚的金属间化合物层并形成裂纹缺陷，抗拉强度较低；而过高的焊接速度会由于焊接热输入不够以及冷却速度过快而在界面区形成未连接缺陷，焊接接头的力学性能因此恶化^[16]。

2.3 分析与讨论

在优化焊接工艺下（焊接电流 105 A、焊接速度 50 cm/min），Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接接头界面区显微形貌及能谱分析结果见图 10。可见，MIG 焊接接头靠近铝侧和靠近钢侧分别形成了针状相和条状相，能谱分析结果表明界面区中 Al 和 Fe 原子发生了互扩散，且针状相 A 主要含有（原子百分数）23.69%Fe、75.47%Fe 和 0.84%Cu，条状相 B 主要含有（原子百分数）25.80%Fe、73.20%Fe 和 1.0%Cu，而界面区微区 XRD 图谱中可见界面区主要含有 Fe₄Al₁₃ 和 Fe₂Al₅ 相。结合 Fe-Al 二元相图^[17]可知，Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接接头界面区形成了近

铝侧 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 金属间化合物层和近钢侧 Fe_2Al_5 金属间化合物层。

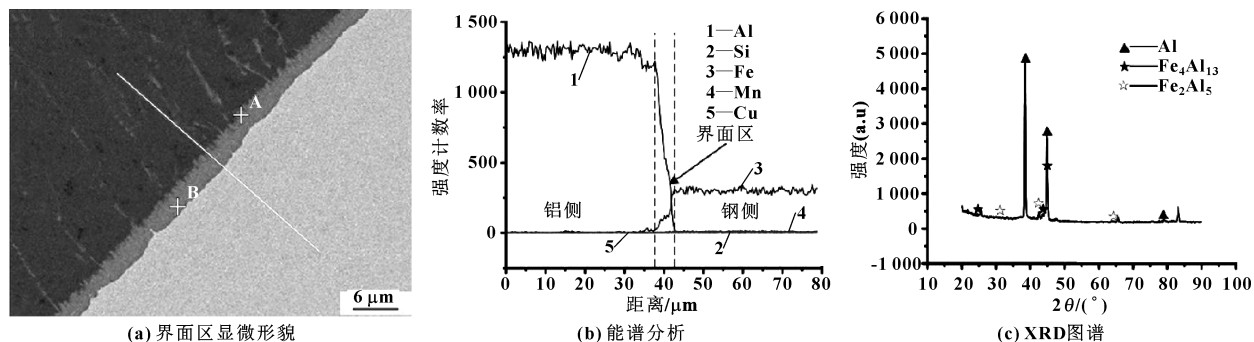


图 10 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接接头界面区显微形貌、能谱分析和 XRD 图谱

上述试验结果表明,在 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊过程中,焊接接头界面区会形成 Fe-Al 金属间化合物层,而 ER2319 焊丝中的 Cu 原子可以在一定程度上抑制 Q890D 钢/6061 铝合金界面区的 Fe、Al 原子互扩散,并部分替换 Fe-Al 金属间化合物中的 Fe 原子而形成 $(\text{Fe}, \text{Cu})_4\text{Al}_{13}$ 和 $(\text{Fe}, \text{Cu})_2\text{Al}_5$ 相,这种韧性更高的金属间化合物的形成有助于降低裂纹敏感性并减小金属间化合物厚度^[18],从而改善焊接接头的抗裂性和综合力学性能。图 11 为 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊过程中金属间化合物生长模型。在开始阶段,焊接热输入作用下的 Fe、Al 和 Cu 原子向界面处扩散,且由于性质相近的 Fe 与 Cu 原子存在相互竞争关系而抑制了 Fe 原子扩散^[19];随着 Fe、Al

原子向界面处聚集, Cu 原子会替代界面处的 Fe_2Al_5 相中的 Fe 原子而在 Q890D 钢侧形成 $(\text{Fe}, \text{Cu})_2\text{Al}_5$ 相;界面处条状 $(\text{Fe}, \text{Cu})_2\text{Al}_5$ 相的形成和生长会在界面区形成致密金属间化合物层,且在焊接熔池冷却过程中, Fe 原子固溶度降低并逐渐在铝侧形成 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 相,同时 Cu 原子不断替换金属间化合物中的 Fe 原子而形成 $(\text{Fe}, \text{Cu})_4\text{Al}_{13}$ 相,这种金属间化合物的形成也有利于抑制 Fe 和 Al 原子扩散以及金属间化合物的生长^[20]。因此, Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接过程中的界面区最终形成了靠近钢侧的 $(\text{Fe}, \text{Cu})_2\text{Al}_5$ 和靠近铝侧的 $(\text{Fe}, \text{Cu})_4\text{Al}_{13}$ 相的双层金属间化合物层结构。

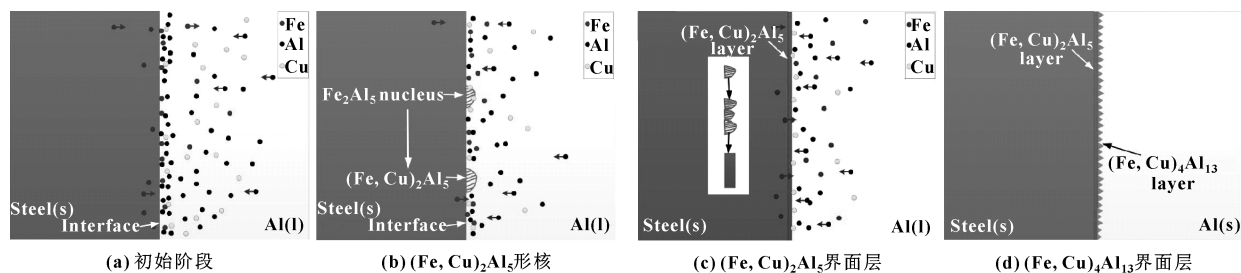


图 11 金属间化合物层的生长模型

3 结论

(1) 焊接速度为 50 cm/min 时,焊接电流在 90~150 A 时 6061 铝合金表面焊缝成形良好;焊接电流为 110 A 时,焊接速度从 30 cm/min 增加至 70 cm/min 时 6061 铝合金表面焊缝成形良好。

(2) Q890D 钢/6061 铝合金适宜焊接方向为右焊法,适宜的焊枪角度为 10° ,适宜的钢侧坡口角度为 45° ,焊丝位置宜处于钢侧坡口中部。

(3) Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊适宜的电流密度为 105 A、焊接速度为 50 cm/min。在其他焊接工艺相同条件下,随着焊接电流从 95 A 增加至 115 A, MIG 焊接接头抗拉强度呈现先增加而后减小特征,在焊接电流为 105 A 时取得最大值;在其他焊接

工艺相同条件下,随着焊接速度从 40 cm/min 增加至 55 cm/min, MIG 焊接接头抗拉强度呈现先增加而后减小特征,在焊接速度为 50 cm/min 时取得最大值;不同焊接电流和焊接速度的 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接接头的断裂位置都处于界面区,这主要与 Q890D 钢/6061 铝合金 MIG 焊接过程中的界面区形成了靠近钢侧的 $(\text{Fe}, \text{Cu})_2\text{Al}_5$ 和靠近铝侧的 $(\text{Fe}, \text{Cu})_4\text{Al}_{13}$ 相的双层金属间化合物层结构有关。

参考文献:

- [1] 崔丽,卢东琪,王国红,等.钢/铝异种合金激光深熔钎焊与深熔焊工艺研究进展[J].航空制造技术,2018,61(3):66-73.

CUI L, LU D Q, WANG G H, et al. Research progress of

- steel/aluminum dissimilar alloys joining using laser keyhole welding-brazing and keyhole welding processes [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(3): 66-73.
- [2] 薛松柏, 王博, 张亮, 等. 中国近十年绿色焊接技术研究进展 [J]. *材料导报*, 2019, 33(17): 2813-2830.
- XUE S B, WANG B, ZHANG L, et al. Development of green welding technology in China during the past decade [J]. *Materials Review*, 2019, 33(17): 2813-2830.
- [3] 朱芙蓉. 单片机控制 6082 铝合金 MIG 焊接性能研究 [J]. *热加工工艺*, 2014, 43(13): 203-206.
- ZHU F J. Study on MIG-welding performance of 6082 Al alloy under SCM control [J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(13): 203-206.
- [4] 刘凤钢. 单片机控制铝合金脉冲 MIG 焊接设备与工艺的研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
- LIU F G. The study of MIG equipment and process welding process for aluminium alloy [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [5] 韦竺施, 崔丽, 贺定勇, 等. 钢/铝异种合金激光深熔焊接头界面金属间化合物的 EBSD 研究 [J]. *材料工程*, 2018, 46(7): 113-120.
- WEI Z S, CUI L, HE D Y, et al. EBSD investigation of inter-metallic compounds at interface of steel/aluminum dissimilar alloy joints produced by laser keyhole welding [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(7): 113-120.
- [6] CHANG Q, SUN D Q, GU X Y, et al. Microstructures and mechanical properties of metal inert-gas arc welded joints of aluminum alloy and ultrahigh strength steel using Al-Mg and Al-Cu fillers [J]. *Journal of Materials Research*, 2017, 32(3): 666-676.
- [7] RUAN Y, QIU X M, GONG W B, et al. Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO₂ flux [J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 20-24.
- [8] CHEN Y C, NAKATA K. Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39(8): 1985-1992.
- [9] 曹润平, 张建飞. 钢/铝异种金属激光-MIG 复合焊接接头组织与性能研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(2): 194-198.
- CAO R P, ZHANG J F. Microstructure and properties of laser welded-MIG steel/aluminum dissimilar metal composite welding joint [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(2): 194-198.
- [10] LIU W, MA J J, MAZAR ATABAKI M, et al. Joining of advanced high-strength steel to AA 6061 alloy by using Fe/Al structural transition joint [J]. *Materials & Design*, 2015, 68: 146-157.
- [11] MAZAR ATABAKI M, MA J, LIU W, et al. Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel to aluminum alloy by using structural transition insert [J]. *Materials & Design*, 2015, 75: 120-135.
- [12] LV J, YANG W X, WU S K, et al. Microstructure and mechanical properties of galvanized steel/AA6061 joints by laser fusion brazing welding [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 27(4): 670-676.
- [13] LI J X, LI H, WEI H L, et al. Effect of pulse on pulse frequency on welding process and welding quality of pulse on pulse MIG welding-brazing of aluminum alloys to stainless steel [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1/2/3/4): 51-63.
- [14] LIN S B, SONG J L, MA G C, et al. Dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to galvanized steel [J]. *Frontiers of Materials Science in China*, 2009, 3(1): 78-83.
- [15] SONG J L, LIN S B, YANG C L, et al. Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 509(1/2): 31-40.
- [16] LI C L, FAN D, WANG B. Characteristics of TIG arc-assisted laser welding-brazing joint of aluminum to galvanized steel with preset filler powder [J]. *Rare Metals*, 2015, 34(9): 650-656.
- [17] 樊丁, 王斌, 李春玲, 等. 铝/钢电弧辅助激光对接熔钎焊开展特性 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(1): 1-5.
- FAN D, WANG B, LI C L, et al. Spreading characteristics of arc-assisted laser welding filler metals for welding-brazing butt joint between aluminum alloy and galvanized steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(1): 1-5.
- [18] WANG X Y, SUN D Q, YIN S Q, et al. Microstructures and mechanical properties of metal inert-gas arc welded Mg-steel dissimilar joints [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(8): 2533-2542.
- [19] JOO S. Joining of dissimilar AZ31B magnesium alloy and SS400 mild steel by hybrid gas tungsten arc friction stir welding [J]. *Metals and Materials International*, 2013, 19(6): 1251-1257.
- [20] WANG X Y, SUN D Q, SUN Y. Influence of Cu-interlayer thickness on microstructures and mechanical properties of MIG-welded Mg-steel joints [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(3): 910-920.