

引文格式: 张发端, 魏守征, 饶文姬, 等. AZ31 Mg/5A05 Al 脉冲冷弧MIG 焊接头焊缝组织特性[J]. 航空制造技术, 2023, 66(10): 93–98.
ZHANG Fadian, WEI Shouzheng, RAO Wenji, et al. Microstructures of weld seam in AZ31 Mg/5A05 Al joint by pulse current cold arc MIG welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(10): 93–98.

AZ31 Mg/5A05 Al 脉冲冷弧 MIG 焊接头焊缝组织特性*

张发端¹, 魏守征¹, 饶文姬², 杨康¹, 张英乔¹

(1. 中北大学材料科学与工程学院焊接研究中心, 太原 030051;

2. 中北大学能源与动力工程学院, 太原 030051)

[摘要] 采用 SAI5183 焊丝对 AZ31 Mg/5A05 Al 异质对接接头进行脉冲冷弧 MIG 焊接, 采用扫描电子显微镜、X 射线衍射及万能力学试验机等对接头微观组织及拉伸力学性能进行研究。结果表明, 采用脉冲冷弧 MIG 焊可以实现 AZ31 Mg/5A05 Al 异质接头的无裂纹焊接。镁侧焊缝由镁母材至焊缝中部依次形成了 α -Mg 胞状晶、 α -Mg+Al₁₂Mg₁₇ 羽状共晶、Al₁₂Mg₁₇ 树枝晶、Al₁₂Mg₁₇+Al₃Mg₂ 共析组织、颗粒状 α -Al+Al₃Mg₂ 共晶和岛状 α -Al+晶间 Al₃Mg₂ 共晶等复杂结构; 中部焊缝及铝侧焊缝主要为 α -Al 固溶体。焊缝的显微硬度分布不均匀, 其中镁侧焊缝存在 Mg-Al 金属间化合物, 显微硬度较高。在拉伸测试中, 接头断裂于镁侧焊缝中, 呈脆性断裂, 最高抗拉强度可达 93 MPa。

关键词: 镁合金; 铝合金; 异质接头; 冷弧 MIG 焊; 焊缝; 微观组织

Microstructures of Weld Seam in AZ31 Mg/5A05 Al Joint by Pulse Current Cold Arc MIG Welding

ZHANG Fadian¹, WEI Shouzheng¹, RAO Wenji², YANG Kang¹, ZHANG Yingqiao¹

(1. Welding Research Center, College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

[ABSTRACT] The pulse current cold arc MIG welding of AZ31 Mg/5A05 Al heterogenous butt joint is carried out by filling SAI5183 wire. The microstructures and tensile strength of the joint were studied by scanning electron microscope, X-ray diffraction and tensile test. The results show that crack-free AZ31 Mg/5A05 Al heterogeneous joints can be achieved by the operated welding process. Complex weld is formed near the magnesium side. α -Mg cellular crystals, α -Mg+Al₁₂Mg₁₇ feather like eutectics, Al₁₂Mg₁₇ dendrites, Al₁₂Mg₁₇+Al₃Mg₂ eutectoid structure, granular α -Al + Al₃Mg₂ eutectic structure, island α -Al + intercrystalline Al₃Mg₂ eutectic structure are formed orderly from the magnesium base metal side to the middle of the weld. The mid-weld and the weld near aluminum side are mainly composed of α -Al solid solutions. Nonuniform microhardness distribution across the weld is observed. The microhardness of the weld near the magnesium side is much higher than other regions due to the existence of Mg-Al intermetallic compounds. The fracture happened in the weld near magnesium side in the brittle fracture mechanism during the tensile test. The ultimate tensile strength of the joints reaches 93 MPa.

Keywords: Magnesium alloy; Aluminium alloy; Heterogenous joint; Cold arc MIG welding; Weld seam; Microstructure

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.10.093

* 基金项目: 山西省自然科学基金(201901D111174); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0568)。

镁合金和铝合金具有密度低、比强度高、加工性好的特点,作为轻量化结构材料用于航空航天、汽车等领域,可降低运载工具重量、提高推重比,实现节能减排的目的^[1-2]。镁/铝复合结构可充分利用两种材料各自的性能优势,使其在航空航天、汽车工业中具有重要的应用前景。然而镁和铝直接熔焊时,会形成大量脆性 Mg-Al 金属间化合物 (IMCs),甚至导致大量焊接裂纹的产生,影响接头的力学性能,限制镁/铝复合结构的应用。为了实现镁/铝的可靠焊接,国内外采用搅拌摩擦焊^[3]、激光焊^[4]、MIG 焊^[5]、扩散焊^[6]、超声波焊^[7]等加工方式对镁/铝异种金属开展了大量焊接研究。其中, MIG 焊具有效率高、成本低的优势,对实现镁/铝复合结构的可靠焊接具有重要意义。

随着焊接技术的不断进步,目前已开发出冷金属过渡 (CMT)、冷弧 MIG 焊 (CA-MIG) 等先进焊技术。CMT 和 CA-MIG 两种技术具有焊接热输入低的特点,在异种金属的焊接方面具有技术优势。Hu 等^[8]采用 ER5356 铝焊丝进行了 A356 镁与 6005A 铝的脉冲 MIG 焊研究,发现镁侧焊缝、中部焊缝及铝侧焊缝存在较大的组织差异,接头的抗拉强度可达 219 MPa。饶文姬等^[9]采用 ER4047 铝焊丝对 AZ31B Mg 与 5A06 Al 进行了脉冲 MIG 焊研究,获得了成形完整、焊缝微观组织复杂的 Mg/Al 接头。Wang 等^[5]采用 AZ31 焊丝进行了 AZ31B Mg 和 6061 Al 的 CMT 焊接,发现近铝侧焊缝形成复杂的 Mg-Al IMCs 层,拉伸时接头断裂于 Mg₂Al₃ 层内,抗拉强度仅为 38.4 MPa。Shang 等^[10]采用 ER4043 铝焊丝进行了 AZ31B Mg 和 6061 Al 的 CMT 焊接,发现焊缝与镁母材之间存在过渡区,在该区域生成了大量 Mg₂Al₃、Mg₁₇Al₁₂ 和 Mg₂Si 的 IMCs。汪佐瑾等^[11]采用镀锌钢 HDG60 作为过渡金属,对 AZ31B Mg 与 6061 Al 进行了 CMT 焊接,过渡层的使用避免了镁/铝直接反应形成脆性 IMCs,接头抗拉强度超过 180 MPa。综上,国内外主要采用脉冲 MIG 焊与 CMT 焊进行镁与铝的 MIG 焊研究。与镁焊丝相比,采用铝焊丝获得的 Mg/Al 接头抗拉强度较高。

截至目前,尚未检索到采用 CA-MIG 焊技术进行镁与铝的焊接研究,对 CA-MIG 焊所获 Mg/Al 接头组织性能的研究尚处于空白。本文选用 SAI5183 铝焊丝,采用

脉冲 CA-MIG 焊对 AZ31 Mg 与 5A05 Al 进行对接研究,对接头的宏观成形、焊缝区组织结构和力学性能进行了分析,重点研究了镁侧焊缝的微观组织结构特征。研究结果可指导镁/铝 MIG 焊工艺优化,为实现镁/铝复合结构的可靠 MIG 焊接提供可靠数据和理论基础。

1 试验方法

试验所用母材尺寸为 150 mm × 100 mm × 3 mm 的热轧态 AZ31 镁合金板与退火态 5A05 铝合金板。选用型号为 SAI5183 的 Al-Mg 合金焊丝作为填充金属。母材及焊丝的名义化学成分如表 1 所示。焊前用钢刷打磨镁板与铝板表面后, AZ31 Mg 用体积分数 3% 的硝酸溶液酸洗后用无水乙醇冲洗晾干待焊; 5A05 Al 先用 40~70 °C 的 NaOH 溶液 (质量分数 5%) 碱洗,然后用体积分数为 30% 的 HNO₃ 溶液酸洗,再用无水乙醇清洗晾干待焊。

焊接工艺设计如图 1 所示,采用脉冲电流模式 CA-MIG 焊进行镁与铝的焊接,镁、铝板对接装配,焊丝对中,为了减少镁的熔化,避免过量 Mg-Al IMCs 形成,在镁单侧开 30° 的坡口。焊缝正面用 80% Ar+20% He (体积分数) 混合气体保护,流量为 20 L/min; 焊缝背面采用高纯 Ar (体积分数 99.999%) 保护,流量为 15 L/min。其他主要工艺参数如表 2 所示。

焊后静置 24 h 后沿焊缝横向切取样品,机械打磨抛光后采用体积比 HF : HNO₃ : H₂O = 1 : 1 : 10 的混合溶液进行焊缝金相显蚀。采用光学显微镜、日产 JSM-7001F 型场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 对焊缝微观

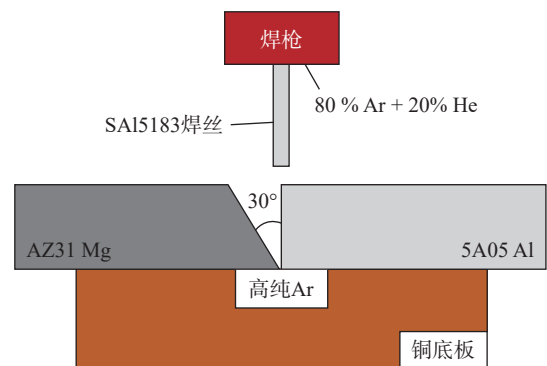


图 1 焊接工艺示意图
Fig.1 Welding process diagram

表 1 母材及焊丝的名义化学成分 (质量分数)
Table 1 Nominal chemical compositions of base metals and filler (mass fraction)

材料	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Zn	Mn
AZ31 Mg	2.50~3.50	余量	0.10	0.005	0.05	0.50~1.50	0.20~0.50
5A05 Al	余量	4.8~5.5	0.50	0.50	0.10	0.20	0.30~0.60
SAI5183	余量	4.3~5.2	0.40	0.40	0.10	0.25	0.5~1.0

组织和断口微观形貌进行分析;采用 X-MAX^N 型能谱仪 (EDS, OXFORD) 对特征区进行元素分析;采用 X 射线衍射仪 (XRD) 对焊缝区进行物相分析;采用 HVS-1000 型维氏显微硬度计测量焊缝的显微硬度分布;采用万能力学试验机对试样进行拉伸力学性能测试。

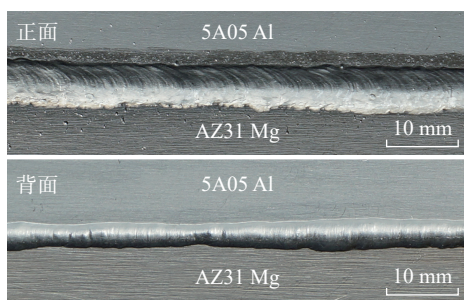
2 试验结果及分析

2.1 接头宏观形貌

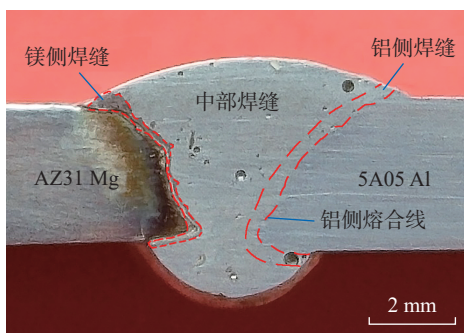
镁/铝焊接接头宏观形貌如图 2 所示。正/背面焊缝成形均匀、连续,未观察到表面气孔和裂纹。正面焊缝宽度约为 6 mm,背面焊缝宽度约为 4 mm。根据接头横截面形貌,虽然镁侧开单侧坡口,距电弧中心较远,但焊接过程中受电弧加热作用,仍发生了少量熔化,熔化的 Mg 与 Al 基液态金属发生反应,与焊缝之间形成了成分复杂的

表 2 主要焊接参数
Table 2 Main welding parameters

焊接参数	值
平均电流 I/A	65
平均电压 U/V	16.3
送丝速率 $v/(m \cdot \min^{-1})$	4.4
焊接速率 $v/(cm \cdot \min^{-1})$	60
焊丝伸出长度/mm	7
焊接热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$	0.8476



(a) 接头正/背面形貌



(b) 接头横截面形貌

图 2 焊接接头宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphology of joint

的过渡区;铝侧受电弧的近距离加热作用发生了大量熔化,与熔融的焊丝金属混合后冷凝形成过渡良好的熔合区。焊缝内部存在较多尺寸不一的气孔,但未发现内部裂纹的存在。分析认为,焊缝气孔可能的来源有两种:一是液态熔池在高温下溶解了大量 H,焊后冷却凝固过程中来不及逸出形成 H 气孔;二是由于镁在电弧的剧烈加热作用下蒸发汽化,来不及上浮逸出形成 Mg 气孔。

2.2 接头焊缝微观组织特征

为了较全面地分析焊缝微观组织特征,将焊缝分为镁侧焊缝、中部焊缝和铝侧焊缝,各特征区划分如图 2 (b) 所示。首先截取接头横截面进行 XRD 分析,如图 3 所示,在试验条件下,除 α -Mg 和 α -Al 外,还检测到 Al_3Mg_2 、 $Al_{12}Mg_{17}$ 两种新相。分析认为,由于镁发生了少量熔化,与 Al 基液态金属混合后,在不同反应驱动力作用下,形成了多种 Mg-Al IMCs。

2.2.1 镁侧焊缝微观组织

图 4 为镁侧焊缝的微观显微组织,由镁侧至焊缝侧可分为 6 个特征区:胞状晶组织、羽状共晶组织、树枝晶固溶体组织、平滑的固溶体组织、颗粒状析出相 + 平滑固溶体共晶组织和岛状 + 晶间双固溶体共晶组织。对 6 个特征区进行 EDS 元素分析,取点位置如图 4 (b)~(g) 中 A~H 点所示,分析结果如表 3 所示。根据 EDS 分析, A 点 Mg 约为 90% (原子数分数),结合 Al-Mg 二元合金相图,推测为胞状 α -Mg; B 点羽状组织中 Mg : Al 原子比约为 7 : 3,结合上文中的研究推测为 α -Mg + $Al_{12}Mg_{17}$ 共晶组织^[12],其中黑色片状组织为 α -Mg,白色片状组织为 $Al_{12}Mg_{17}$; C 点 Mg : Al 原子比约为 3 : 2,结合 XRD 分析结果,推测应为 $Al_{12}Mg_{17}$ 树枝晶; D 点 Mg : Al 原子比约为 48 : 52,符合 $Al_{52}Mg_{48}$ 成分,但根据 XRD 分析结果, $Al_{52}Mg_{48}$ 应发生了分解,形成 $Al_{12}Mg_{17}$ + Al_3Mg_2 共析组织; E 点 Mg : Al 原子比约为 2 : 3,推测应是 Al_3Mg_2 ; F 点 EDS 结果显示颗粒状组织中 Al 含量较高,推测为 Al_3Mg_2 基体上共晶析出的 α -Al,因此 E、F 点所在区域

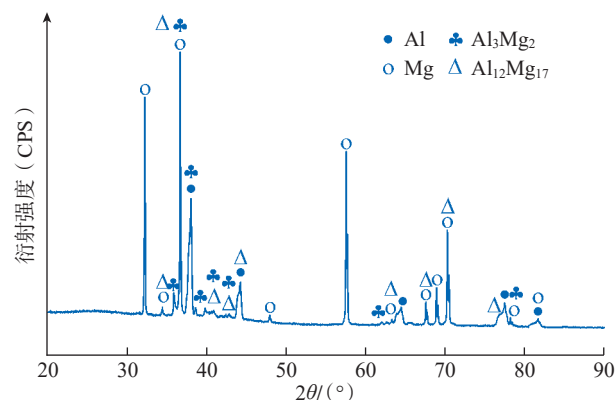


图 3 接头横截面 XRD 分析

Fig.3 XRD patterns of the joint cross-section

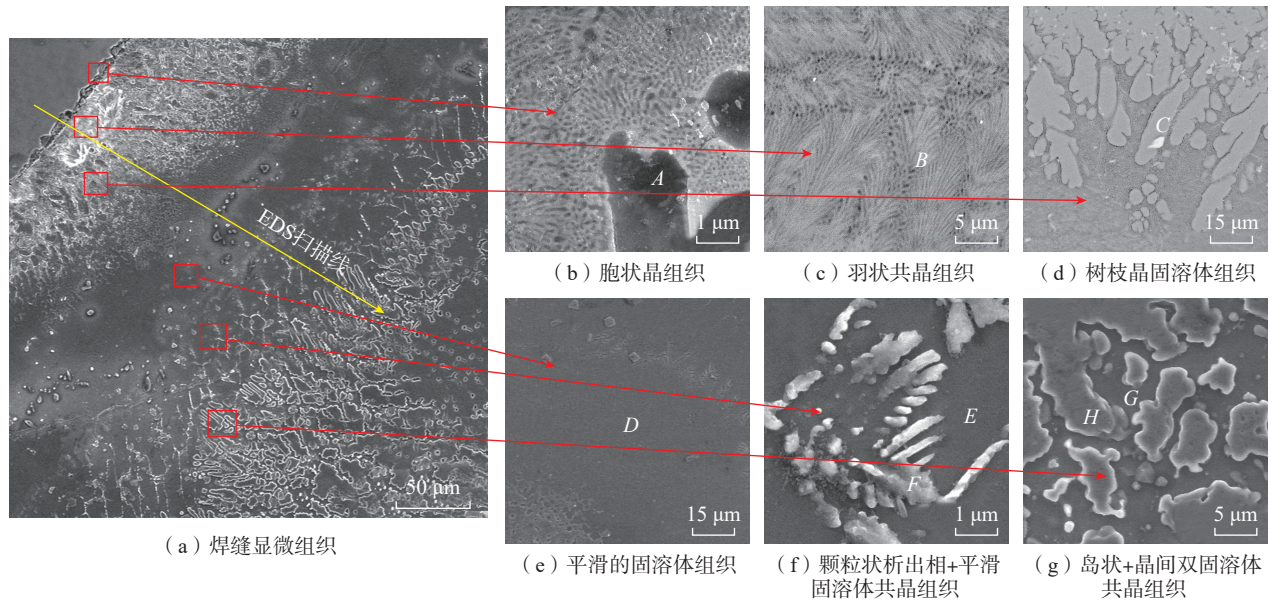


图4 镁侧焊缝显微组织

Fig.4 Microstructures of weld at Mg side

表3 A~H点 EDS 元素分析结果(原子数分数)

Table 3 Results of EDS analysis for regions A~H (atomic fraction) %

点	Al	Mg
A	10.28	89.72
B	32.32	67.68
C	38.02	61.98
D	52.17	47.83
E	64.20	35.80
F	80.90	19.10
G	61.49	38.51
H	92.98	7.02

应是颗粒状 α -Al+Al₃Mg₂ 共晶组织; G点 Mg : Al 原子比约为 2 : 3, 推测晶间相应是 Al₃Mg₂; H区 Al 原子分数约占 93 %, 应是 α -Al 固溶体, 因此 G、H 点所在区域是岛状 α -Al+Al₃Mg₂ 共晶组织。

结合 Mg-Al 二元合金相图, 镁与铝熔合时, 由富 Mg 侧至富 Al 侧可依次形成 α -Mg、Al₁₂Mg₁₇、Al₅₂Mg₄₈、Al₃₀Mg₂₃、Al₃Mg₂ 和 α -Al, 其中 Al₅₂Mg₄₈ 和 Al₃₀Mg₂₃ 为高温亚稳态相, 随温度的下降会发生共析反应形成 Al₁₂Mg₁₇+Al₃Mg₂ 共析组织。分析认为, 在试验工艺下镁发生少量熔化, 与铝基焊缝金属混合反应形成了 6 个特征区: (1) 紧邻镁母材的焊缝中, 温度降至 650 °C 左右时 α -Mg 先凝固, 形成图 4 (b) 所示的胞状组织。(2) 与之相邻的共晶成分区温度降至 438 °C 左右时发生 L→ α -Mg+Al₁₂Mg₁₇ 的共晶反应, 形成图 4 (c) 所示的羽

状共晶组织。(3) 向焊缝中部延伸, Mg 含量减少, Al 含量增加, 在 460 °C 左右形成如图 4 (d) 所示的 Al₁₂Mg₁₇ 树枝晶固溶体组织。(4) D 区液态金属中 Mg 与 Al 成分相近, 冷却过程中首先发生 L→Al₅₂Mg₄₈ 反应, 形成平滑的固溶体; 由于 Al₅₂Mg₄₈ 为亚稳态相, 持续冷却过程中发生共析反应 Al₅₂Mg₄₈→Al₁₂Mg₁₇+Al₃Mg₂, 形成图 4 (e) 所示的 Al₁₂Mg₁₇+Al₃Mg₂ 平滑的固溶体组织。(5) 继续向焊缝中部延伸, 液态金属中 Al 含量略高于 Al₃Mg₂ 的相区, 在 450 °C 左右发生共晶反应 L→ α -Al+Al₃Mg₂, 形成图 4 (f) 所示的颗粒状 α -Al+Al₃Mg₂ 固溶体共晶组织。(6) 靠近中部焊缝的液态金属中 Mg 含量较低, 高熔点的 α -Al 呈岛状率先析出, 剩余液相中 Mg 含量逐渐增大, 当 Al : Mg 原子比接近 3 : 2 时, 发生 L→Al₃Mg₂ 反应, 形成晶间 Al₃Mg₂, 最终形成岛状 α -Al+Al₃Mg₂ 固溶体共晶组织, 如图 4 (g) 所示。

横跨该区域进行 EDS 元素分布分析, 结果如图 5 所示。根据 Mg、Al 元素的分布情况, 焊缝区由镁侧至焊缝中部依次形成了 6 个特征区, 这与 EDS 元素分析结果相吻合。其中胞状 α -Mg 宽度约 2 μm; α -Mg+Al₁₂Mg₁₇ 共晶区宽度约 50 μm; Al₁₂Mg₁₇ 树枝晶宽度约 40 μm; Al₁₂Mg₁₇+Al₃Mg₂ 共析组织宽度约 80 μm; 颗粒状 α -Al+Al₃Mg₂ 共晶组织宽度约 40 μm。

2.2.2 中部焊缝及铝侧焊缝微观组织

根据微观组织结果分析, 中部焊缝及铝侧焊缝微观组织基本一致, 对两个区域进行 EDS 元素分析, Al 原子数分数均超过 92%, 推测其主要由 α -Al 固溶体组织组成。中部焊缝主要由粗大的 α -Al 树枝晶组成, 如图 6

(a)所示。铝侧焊缝区可分为两个特征区,焊缝侧主要由粗大的 α -Al树枝晶组成;紧邻铝母材形成了一定宽度的 α -Al柱状晶区,焊缝与铝母材过渡良好,如图6(b)所示。分析认为,由于采用镁单侧开坡口的工艺,焊接过程中镁仅发生了少量熔化,未大量扩散至中部及铝侧焊缝。中部及铝侧焊缝主要由熔融的焊丝金属及局部熔化的铝母材混合后冷凝形成。冷却过程中,高熔点的 α -Al首先形核并长大,在温度起伏和成分起伏的共同作用下,形成了粗大的树枝晶。合金成分较多的低熔点液相被排挤至 α -Al晶界处,冷凝后形成晶界低熔点共晶组织。紧邻铝母材的液态金属冷凝时,固-液界面提供了异质形核界面,在较大过冷度下沿温度梯度方向发生非自发形核,形成图6(b)所示的柱状晶区。

2.3 焊缝区显微硬度分布

横跨焊缝进行维氏显微硬度分布分析,结果如图7所示。由于镁为单相 α -Mg,热影响区显微硬度与母材基本一致,均在 $40\text{HV}_{0.5}$ 左右。根据微观组织结构分析,镁侧焊缝形成了复杂的Mg-Al IMCs层, Mg-Al IMCs具有其本征脆性,硬度较高,使镁侧焊缝显微硬度显著增大,最高超过 $180\text{HV}_{0.5}$ 。根据接头横截面成形分析,焊缝内部存在气孔,影响了焊缝的显微硬度,中部焊缝及铝侧焊缝硬度起伏较大,在 $70\sim 130\text{HV}_{0.5}$ 之间。由于脉冲CA-MIG焊焊接热输入小,而且5A05 Al属于非

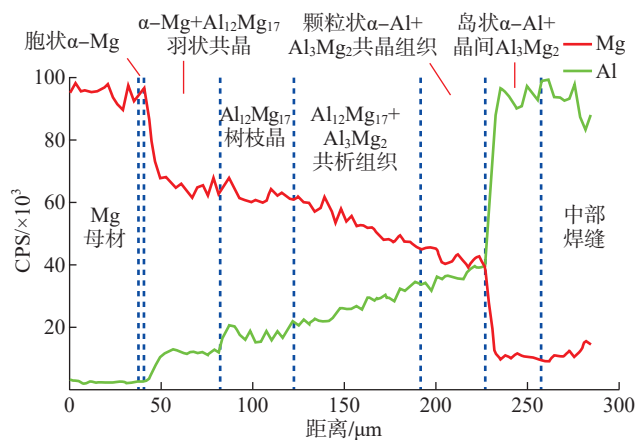
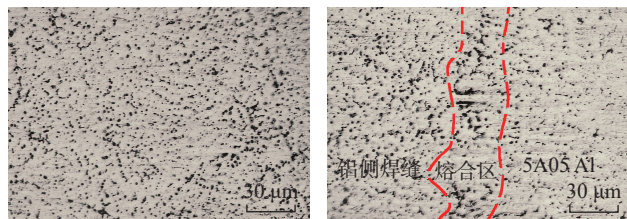


图5 镁侧焊缝EDS线扫描分析

Fig.5 EDS line analysis of the weld at Mg side



(a) 中部焊缝

(b) 铝侧焊缝

图6 中部及铝侧焊缝微观组织

Fig.6 Microstructure of the mid-weld and weld at Al side

热处理强化合金,铝侧焊接热影响区硬度与铝母材基本一致,约为 $60\text{HV}_{0.5}$ 。

2.4 力学性能及断裂分析

保留焊缝余高,沿着焊缝横向截取拉伸试样,尺寸为 $150\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 。获得的应力-应变曲线如图8所示,在试验条件下,接头最高抗拉强度可达 93 MPa ,应力-应变曲线无明显屈服现象,接头断裂时应变仅为 0.65% ,说明接头的塑性较差。

接头断裂于镁侧焊缝中,图9(a)为宏观断口形貌,断面整体呈脆性断裂特征,中间存在少量大小不一的气孔,气孔的存在对接头的力学性能具有不利的影响。断口上部呈密集的台阶状断裂,台阶中存在大量显微裂纹(图9(b));断口中部呈山脊状解离断裂(图9(c));断口下部主要为山脊状解离断裂,其间存在胞状凸起(图9(d))。根据显微组织分析,由于镁侧焊缝中存在大量Mg-Al IMCs,但其IMCs塑性差,拉伸时较小的应力即可引起IMCs内显微裂纹的萌生与扩展,裂纹沿IMCs快速穿晶断裂,呈脆性断裂机制。

3 结论

(1)采用脉冲CA-MIG焊,在焊接热输入为 0.8476 kJ/cm 时,采用SA15183焊丝实现了AZ31 Mg与5A05 Al的无裂纹焊接。镁发生了少量熔化与焊缝形成复杂的过

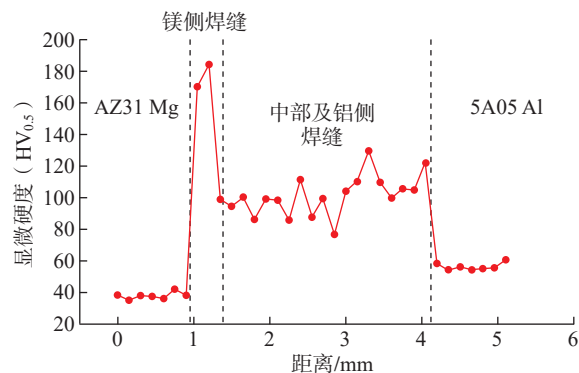


图7 接头显微硬度分布

Fig.7 Microhardness distribution for the joint

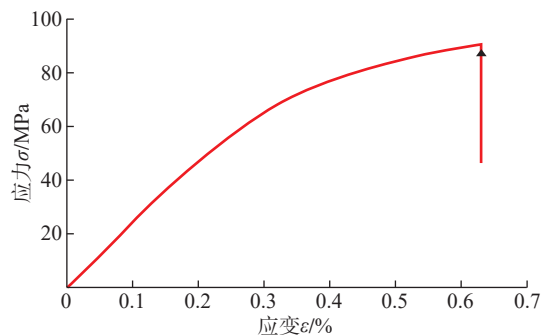
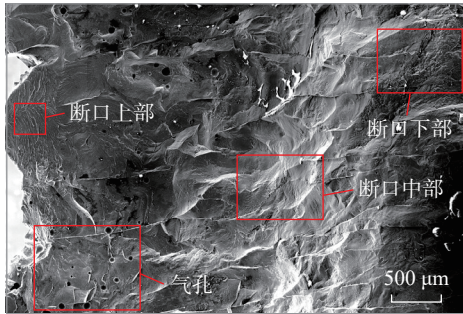
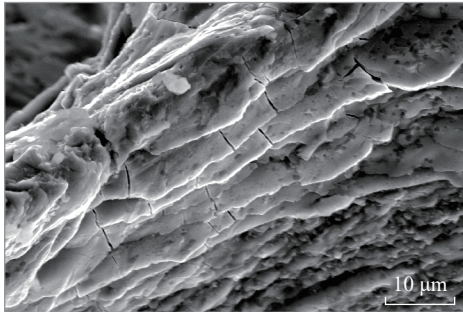


图8 拉伸应力-应变曲线

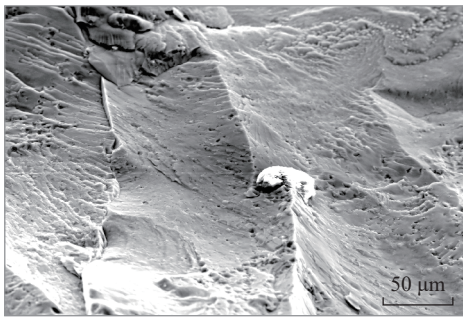
Fig.8 Stress-strain diagram for tensile testing



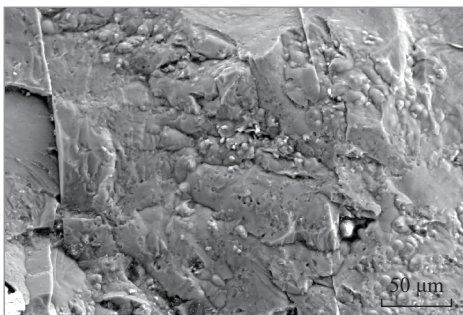
(a) 宏观形貌



(b) 断口上部



(c) 断口中部分



(d) 断口下部

图9 接头断口形貌

Fig.9 Fractography of the joint

渡区; 铝发生了局部熔化与焊缝形成过渡良好的熔合区。

(2) 镁侧焊缝由镁至焊缝中部依次形成了 α -Mg 胞状晶层、 α -Mg+ $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 羽状共晶组织、 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 树枝晶组织、 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}+\text{Al}_3\text{Mg}_2$ 共析组织、颗粒状 α -Al+ Al_3Mg_2 共晶组织和岛状 α -Al+晶间 Al_3Mg_2 共晶组织; 中部焊缝和铝侧焊缝组织主要为 α -Al 树枝晶组织, 晶界存在少量低熔点共晶。

(3) 焊缝的显微硬度分布存在较大的不均匀性, 其中镁侧焊缝由于存在连续的脆性 Mg-Al IMCs, 显微硬度较高。

(4) 拉伸测试中, 镁 / 铝接头断裂于镁侧焊缝中, 断口呈脆性断裂特征, 所获接头最高抗拉强度可达 93 MPa。

参考文献

- [1] PENG H, CHEN D L, BAI X F, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-to-Al dissimilar welded joints with an Ag interlayer using ultrasonic spot welding[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(2): 552-563.
- [2] MD S, BIRRU A K. Mechanical and metallurgical properties of friction stir welded dissimilar joints of AZ91 magnesium alloy and AA 6082-T6 aluminium alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019, 7(2): 264-271.
- [3] NIU S Y, JI S D, YAN D J, et al. AZ31B/7075-T6 alloys friction stir lap welding with a zinc interlayer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 82-90.
- [4] GAO Q, MECO S, WANG K H, et al. Investigation of latest generation pulsed fiber laser in dissimilar joining of Al and Mg alloys[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(6): 061401.
- [5] WANG P, HU S S, SHEN J Q, et al. Microstructure and mechanical behaviour of cold metal transfer welded Mg/Al dissimilar joint using wire AZ31 as filler metal[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22(4): 353-361.
- [6] WANG Y Y, LUO G Q, ZHANG J, et al. Effect of silver interlayer on microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded Mg-Al joints[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541: 458-461.
- [7] FENG M N, LUO Z. Interface morphology and microstructure of high-power ultrasonic spot welded Mg/Al dissimilar joint[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(1): 63-78.
- [8] HU G S, CHENG Y, ZHANG M Z, et al. Microstructures and mechanical properties of butt joint of A356/6005A dissimilar aluminum alloy by pulse MIG welding[C]//Proceedings of China SAE Congress 2018. Beijing: China Machine Press, 2018: 627-635.
- [9] 饶文姬, 魏守征, 李志勇, 等. AZ31B/5A06 脉冲熔化极氩弧焊缝组织特性 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(21): 26-30.
- RAO Wenji, WEI Shouzheng, LI Zhiyong, et al. Microstructures of weld seam during pulsed metal inert-gas welding of AZ31B and 5A06 dissimilar alloys[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(21): 26-30.
- [10] SHANG J, WANG K H, ZHOU Q, et al. Microstructure characteristics and properties of Mg/Al dissimilar metals made by cold metal transfer welding with ER4043 filler metal[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(7): 1337-1341.
- [11] 汪佐瑾, 温宝峰, 曹睿, 等. 镁-铝异种金属冷金属过渡连接焊接性分析 [J]. 焊接, 2019(2): 17-20, 66.
- WANG Zuojin, WEN Baofeng, CAO Rui, et al. Analysis of weldability of Mg-Al dissimilar metal cold metal transfer welding[J]. Welding & Joining, 2019(2): 17-20, 66.
- [12] WANG Y J, LI Z Y, ZHANG Y Q, et al. Cold arc cladding of aluminum coatings on AZ61 magnesium alloy: A comparative study[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 375: 442-457.

通讯作者: 魏守征, 副教授, 博士, 研究方向为先进材料的特种连接技术及增材制造技术。

(责编 晓月)