

引用格式: 华果, 刘骁, 李小平, 等. 7075 铝合金 MIG/FSW 复合焊接头性能研究[J]. 热加工工艺, 2026, 55 (4): 69-74+82. HUA Gao, LIU Xiao, LI Xiaoping, et al. Performance Study of 7075 Aluminum Alloy MIG/FSW Composite Welding Joint [J]. Hot Working Technology, 2026, 55 (4): 69-74+82.
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232304

7075 铝合金 MIG/FSW 复合焊接头性能研究

华果, 刘骁, 李小平, 朱彬

(江苏理工学院 江苏省先进材料设计与增材制造重点实验室, 江苏 常州 213000)

摘要:采用 MIG/FSW 复合焊,使用 ER5356 焊丝进行 3 mm 厚 7075 铝合金对接焊,再对接头进行 T6 热处理(480 °C /1 h+ 水淬 +120 °C/24 h)。通过光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)与能谱仪(EDS),结合室温拉伸、显微硬度,分析接头组织与力学性能。结果表明:MIG/FSW 复合焊后,焊缝组织为细小的等轴晶,粗大、连续分布的晶界析出相由于搅动作用转变为细小、弥散分布,显微硬度升高,但由于搅拌摩擦焊后在 MIG 焊原母材位置产生新的搅拌摩擦焊热影响区,导致接头整体强度较 MIG 焊并没有明显提升。热处理后,热影响区大部分析出相溶入基体,达到固溶强化+时效强化效果,区域软化问题得到改善,接头抗拉强度可达 345 MPa,断后伸长率为 11.5%。

关键词:7075 铝合金焊接;MIG/FSW 复合焊;力学性能;T6 热处理

中图分类号: TG457.14

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)04-0069-06

Performance Study of 7075 Aluminum Alloy MIG/FSW Composite Welding Joint

HUA Gao, LIU Xiao, LI Xiaoping, ZHU Bin

(Jiangsu Key Laboratory of Advanced Materials Design and Additive Manufacturing, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213000, China)

Abstract: ER5356 welding wire was utilized for MIG/FSW composite welding to butt weld 3 mm-thick 7075 aluminum alloy plates, followed by T6 heat treatment (480 °C /1 h+water quenching +120 °C /24 h) for the welding joint. The microstructure and mechanical properties of the welding joint were analyzed using optical microscopy(OM), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer(EDS), room temperature tensile tests, and microhardness tests. The results show that after MIG/FSW composite welding, the weld microstructure exhibits small equiaxed crystals. The large, continuously distributed grain boundary precipitates transform into small, dispersed distributions due to stirring, resulting in increased microhardness. However, after FSW, a new heat-affected zone is generated in the region, which corresponds to the base material during MIG welding. Consequently, the overall strength of the composite welding joint does not exhibit significant improvement compared to the MIG-welded joint. After heat treatment, the majority of precipitates in the heat-affected zone dissolve into the matrix, achieving solid solution strengthening and aging strengthening. The problem of regional softening is improved, the tensile strength of the welding joint can reach 345 MPa and elongation after fracture is 11.5%.

Key words: 7075 aluminum alloy welding; MIG/FSW composite welding; mechanical properties; T6 heat treatment

7 系高强铝合金为 Al-Zn-Mg-Cu 合金,以 Zn、Mg 元素作为强化相元素加入,其具有极高的强度^[1-4]。同时 Al-Zn-Mg-Cu 合金易于加工、耐腐蚀性突出,越来越多地被用于制造乘用车前纵梁、碰撞环车门、

防撞梁等对强度要求较高的汽车零件^[5-9]。

当前 7 系铝合金的焊接方法主要有电弧焊、激光焊、搅拌摩擦焊等。然而,7 系铝合金有着较高的热导率,进行 7 系铝合金 MIG 焊接时通常采用较大的热输入,而 Mg、Zn 元素沸点较低,在焊接过程中会发生烧损,导致强化相 MgZn₂ 减少,焊缝强度下降;热影响区晶粒受热胀大粗化,从而使接头发生软化^[10-11]。为解决 7 系铝合金焊接时接头软化的问题,国内外进行了许多研究。Reyna-Montoya 等^[12]在对 7075 板材进行单道焊接时加入了电磁场的作用,结

收稿日期:2023-09-20 修回日期:2024-06-11

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52103281)

作者简介:华果,男,硕士,主要研究方向:铝合金成形工艺、铝合金焊接工艺;E-mail:920961697@qq.com

通讯作者:刘骁,讲师,博士,从事高强铝合金焊接与异种金属连接的研究工作;E-mail:lx051103151@126.com

果表明:在电磁场作用下热影响区的析出相减少,晶粒细化,成功提升了焊缝力学性能;Liu 等^[13]通过焊接后进行 T6 热处理($480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+120\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ h}$),将抗拉强度从热处理前的 274 MPa 提升至 512 MPa,伸长率从 6.3%提升至 13.76%,大幅提高了焊缝的力学性能;而焊丝中的合金元素也能够对焊缝烧损的强化相元素进行补充,目前研究主要以 Mg 含量较高 ER5356 焊丝为主,Mg 含量升高能够使 Zn 的烧损减少,从而提供力学性能^[14]。

由于 7 系铝合金的低塑性,导致其焊丝无法进行工业化大批量生产^[15-16]。7 系铝合金的焊接目前仍多采用 5 系焊丝,其中以 ER5356 居多。提高 5 系铝合金焊丝的强度是 7 系铝合金焊接研究中重要的一步。搅拌摩擦焊是铝合金焊接的方式之一,在 MIG 焊道基础上进行搅拌摩擦焊,理论上能使 MIG 焊缝晶粒细化,提高力学性能。对接头进行 T6 热处理,在消除热影响区软化现象的同时进一步提升接头的强度。

本文使用 ER5356 焊丝焊接 7075 高强铝合金,尝试采用可熔化极惰性气体保护焊/搅拌摩擦(MIG/FSW)复合焊解决接头焊缝与母材强度不匹配的问题,再对接头进行 T6 热处理以消除搅拌摩擦焊后的残余应力与热影响区软化问题。如图 1 所示,MIG 焊接在前,搅拌头在后,对焊缝进行搅拌摩擦加工强化。通过对比研究 MIG、MIG/FSW、MIG/FSW/T6 热处理接头金相组织、析出相与力学性能,验证通过复合焊工艺提高接头力学性能的可行性。

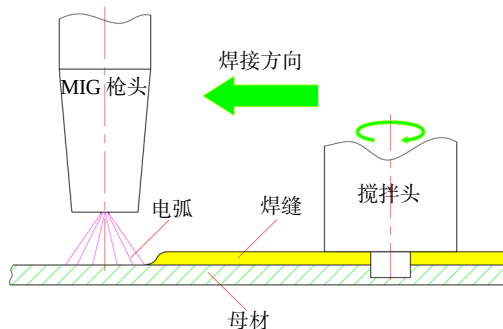


图 1 MIG/FSW 复合焊示意图
Fig.1 MIG/FSW composite welding diagram

1 实验材料与方法

母材选用 $3\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ 的 7075 铝合金轧板,抗拉强度 524 MPa、伸长率 8%。焊材采用 ER5356 焊丝,直径 $\phi 1.2\text{ mm}$ 。母材与焊丝化学成分

见表 1。

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他元素	Al
7075-T6	0.08	0.20	1.41	0.06	2.55	0.20	5.60	0.02	≤ 0.05	余量
ER5356	0.04	0.09	0.001	0.15	4.8	0.12	0.002	0.09	≤ 0.05	余量

焊前不预热,不开坡口,焊缝背部设置铜衬垫强制成形;焊接时 MIG 焊在前,搅拌摩擦焊在后,MIG 焊枪与搅拌头相距 200 mm 进行同步焊接,其中 MIG 焊参数见表 2,搅拌摩擦焊工艺参数见表 3。焊后接头整体进行 T6 热处理参数为: $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶 1 h $\rightarrow$ 水淬 $\rightarrow 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 人工时效 24 h。

表 2 MIG 焊工艺参数
Tab.2 MIG welding process parameters

电源接法	基值电流/A	峰值电流/A	保护气纯氩(%)	保护气流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	焊速/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	干伸量/mm
交流单脉冲	95	102	99.99	20	0.5	12

表 3 搅拌摩擦焊工艺参数
Tab.3 Friction stir welding process parameters

搅拌针直径/mm	轴肩直径/mm	搅拌头转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	焊速/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	搅拌头倾角/($^{\circ}$)	轴肩下压量/mm
6	20	1000	0.5	3	1.5

MIG/FSW 复合焊接头宏观形貌如图 2 所示。MIG 焊后焊缝成形系数(B/H)为 1.93,无宏观缺陷,接头成形良好;MIG/FSW 复合焊时,为了充分发挥搅拌头旋转下压时对 MIG 焊道的搅动、顶锻作用,轴肩端面设置为与母材表面齐平,致使 MIG 焊道余高金属全部被轴肩挤出最终以飞边的形式存在。

对接头进行 T6 热处理后线切割截取 $40\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 矩形试样,进行组织观察与分析。采用标准抛光方法制备金相样品,用 Keller 试剂腐蚀,使用 Leica-DMi8 型金相显微镜观察接头显微组织;使用 Sigma 500 型扫描电镜(SEM)并结合能谱仪(EDS)观察分析接头析出相;使用 LECOAMH43 显微硬度仪对接头横截面进行维氏显微硬度测量,载荷 200 g、保压 12 s。

对热处理前后焊接接头按国家标准 GB6397—86,线切割切取标准拉伸试样,试样标距 23.97 mm,标准拉伸试样尺寸如图 3 所示。使用 WDW3200 型电子万能拉伸试验机进行室温拉伸实验,加载速度 2 mm/min ,每个焊件测试 6 个平行试样后计算平均值。

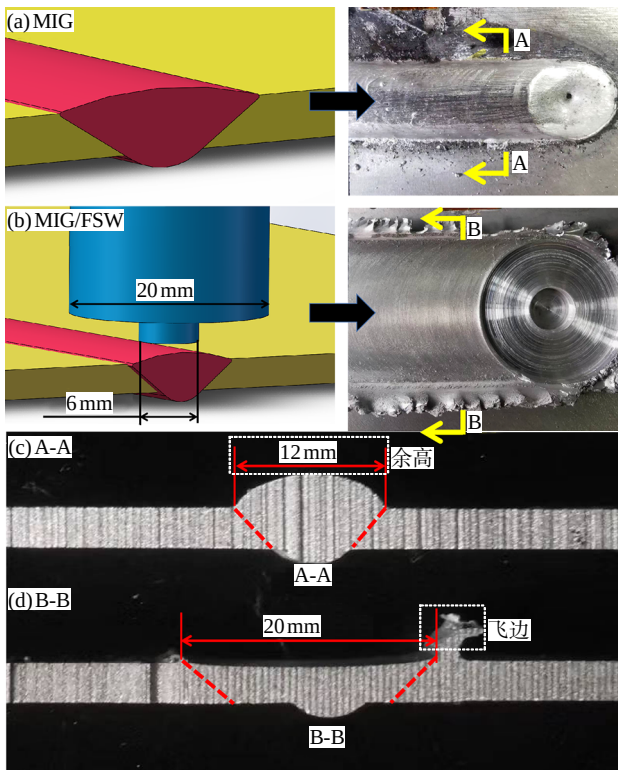


图2 MIG/FSW 复合焊接头宏观形貌
Fig.2 Macromorphologies of MIG/FSW composite welding joint

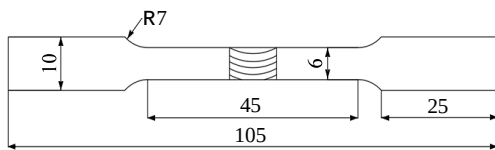


图3 拉伸试样示意图(mm)
Fig.3 Diagram of tensile test specimen (mm)

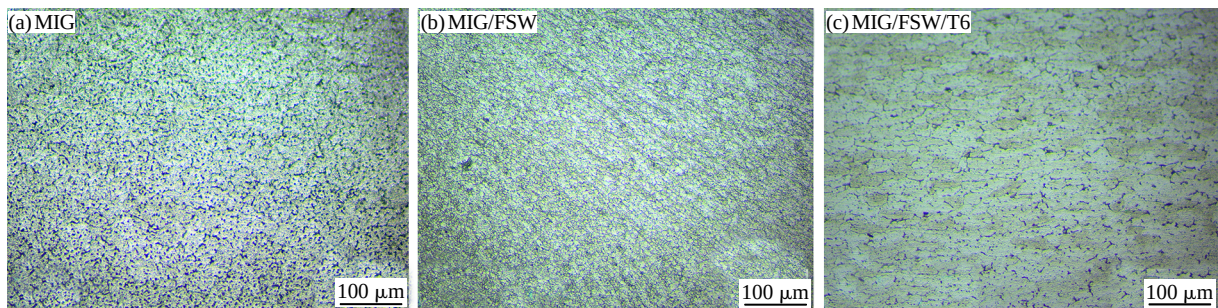


图4 焊缝中心金相组织
Fig.4 Microstructure of weld center

接头热影响区(HAZ)金相组织如图5所示。图5(a)为MIG焊接头热影响区组织。由于熔合区(FZ)相较其他区域过冷度最大,晶粒沿散热方向生长时间短,形成了细小的等轴晶。受热循环影响,热影响区(HAZ)发生部分再结晶。由于合金元素与杂质在热影响区近焊缝区偏聚严重,阻止了晶界迁移进而阻碍晶粒长大,导致距离焊缝越近,晶粒越细小,在远离焊缝位置晶粒较粗大。图5(b)为MIG/FSW复

2 结果与分析

2.1 接头金相组织

图4为焊缝中心金相组织。由图4(a)可看出,MIG焊缝为枝晶结构,呈铸态组织特征,晶间分布着不连续的网状析出物,在 α -Al基体上也存在若干析出相颗粒。图4(b)为MIG/FSW复合焊后焊缝中心焊核区中部晶粒组织。与MIG焊相比,MIG/FSW复合焊相当于对原MIG焊缝进行搅拌摩擦加工,焊缝组织在搅拌针高速旋转作用下经历机械搅拌而产生了剧烈塑性变形和高温,达到再结晶的条件,在轴肩顶锻力的作用下发生了动态再结晶,使焊缝原来铸态枝晶组织转变成细小的等轴晶组织,析出颗粒由于搅拌头搅动作用被打碎,变得更加细小且弥散分布,在图中难以分辨。图4(c)为MIG/FSW复合焊后经T6热处理的焊缝组织。搅拌摩擦焊后焊缝细小的晶粒导致再结晶的形核位置增多,且晶界系数增大造成界面储能大,致使焊缝组织热处理时发生了充分再结晶并且长大,得到均匀但粗大的等轴晶组织。与图4(a)相比,晶界分布的网状析出物大部分固溶,黑色的析出物减少,且感官上热处理后析出相较为粗大。这是因为热处理后析出相主要为 $Al_{13}Fe_4$ 等大块难溶相,固溶时大块分布的 $MgZn_2$ 、 $AlCu$ 、 $AlCuMg$ 等相溶入基体,少部分已溶相在时效中从过饱和基体中以小块点状再次析出,而 $Al_{13}Fe_4$ 等大块难溶相则依旧存在。

合焊热影响区。热机影响区(TMAZ)由于紧挨搅拌针,组织同时受到机械搅拌与焊接热循环作用,在机械搅拌的作用下可以看到明显的塑性流动痕迹,在热循环的作用下发生动态回复和再结晶,最终呈现出排布呈河流趋势的细小的等轴晶。MIG/FSW在原母材位置产生新的热影响区(HAZ)受热循环影响晶粒组织有所长大,晶粒度与原MIG焊热影响区组织相比没有明显区别。图5(c)为MIG/FSW复合焊接

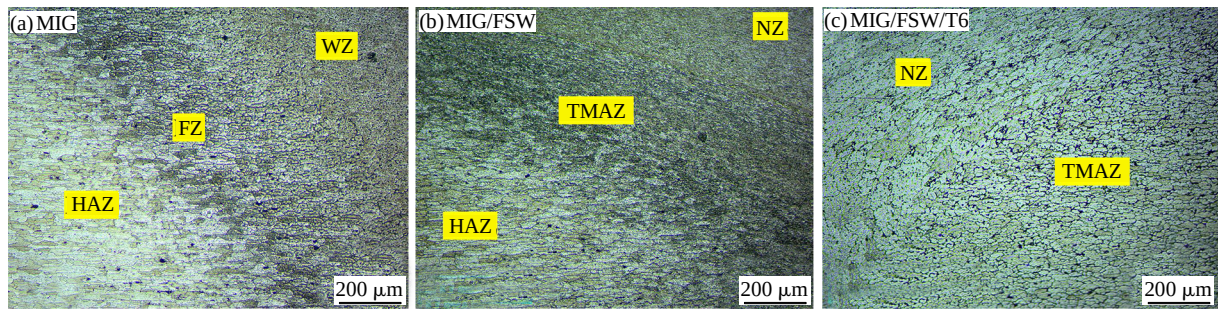


图5 接头热影响区金相组织
Fig.5 Microstructure of welding joint of HAZ

头经 T6 热处理后热机影响区(TMAZ)。与焊缝热处理后情况相似,原细小的晶粒发生了充分再结晶并长大,粗化明显,值得注意的是,MIG 焊熔合区(FZ)与 MIG/FSW 复合焊热机影响区(TMAZ)腐蚀发黑,证明杂质偏聚严重,热处理后得以改善。

2.2 第二相析出与分布

图 6 为接头不同区域的 SEM 图像,图中浅色部分为析出相。由图 6(a)、(b)可以看出,MIG 焊与 MIG/FSW 复合焊缝中心存在大量弥散分布的第二相颗粒,以颗粒状(A、D 相)与条状(B、C 相)为主。图 6(d)显示 MIG 焊热影响区由于严重的元素偏聚与偏析,除了颗粒状析出相 G,还存在沿晶界连续分布的相 F 以及块状相 H,导致该区性能薄弱。图 6 (e)显示 MIG/FSW 复合焊后,原 MIG 焊热影响区连续分布的大量析出相被搅碎,呈块状(I 相)或条状(J 相)分布,且具有明显的线性运动痕迹,这是由于搅拌头搅动作用导致材料产生塑性流动所造成的。图

6(f)显示 MIG/FSW 接头热处理后,无论焊缝中心或热影响区,大部分析出相已溶入基体,剩下少量析出相呈颗粒状(E 相,图 6(c))与块状(K 相)。同 MIG 焊相比,MIG/FSW 复合焊搅拌头强烈的搅动作用使得接头各区析出相形态细小化、分布均匀化,同时,细小、弥散分布的析出相颗粒会更有利于热处理过程的进行。

图 7 为 MIG 焊接头、MIG/FSW 复合焊接头与热处理后 MIG/FSW 复合焊接头的 XRD 图谱。焊接接头中合金元素含量较低,除了 α -Al 基体显示出的(111)、(200)、(220)等强峰外,表征其他相的 3 强峰无法被明显观测到。根据晶面特征的标定结果参考合金平衡图,结合 SEM 析出相分布图与 EDS 定量分析结构推测,热处理前有 Mg_2Si 、 $MgZn_2$ 、 $AlCuMg$ 、 $AlCu$ 与 $Al_{13}Fe_4$ 等相存在,搅拌摩擦焊的搅动虽使晶粒细化,但是无法使原有析出相溶入基体,热处理后 $MgZn_2$ 相与 $AlCuMg$ 相溶入基体中。

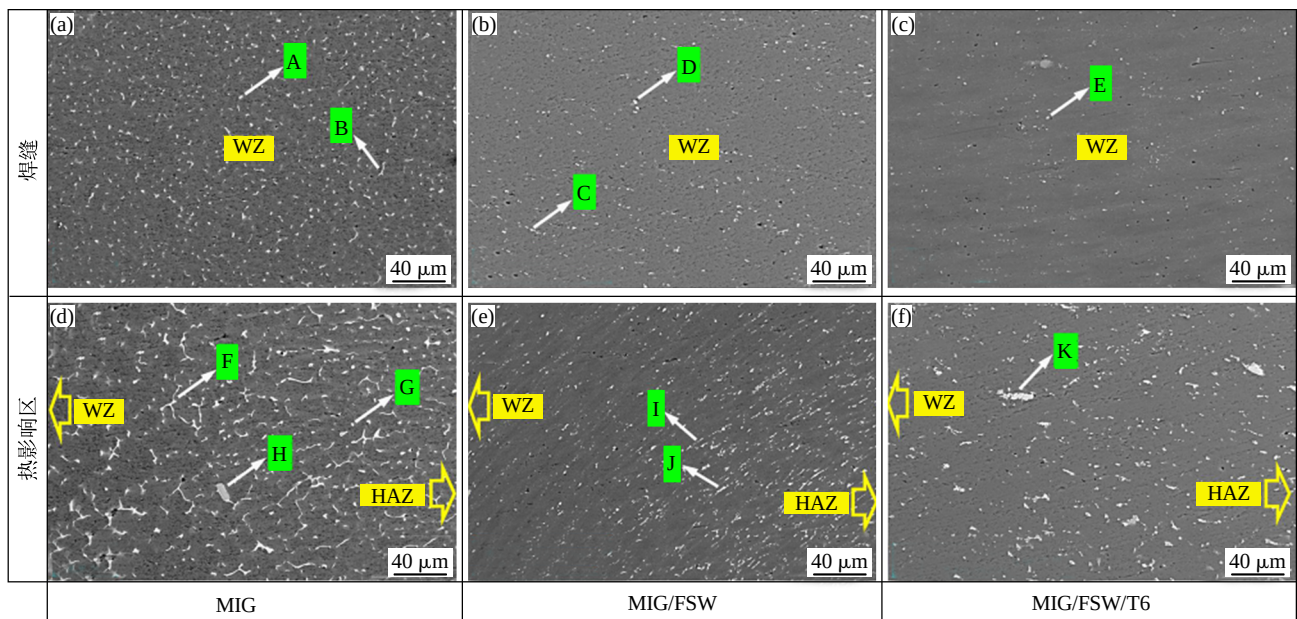


图6 接头不同区域析出相分布
Fig.6 Distribution of precipitates of different zone in the joint

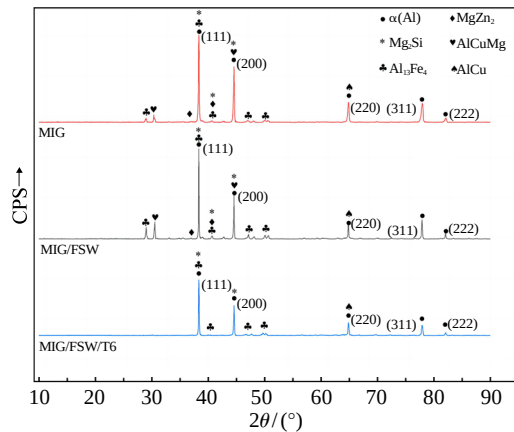


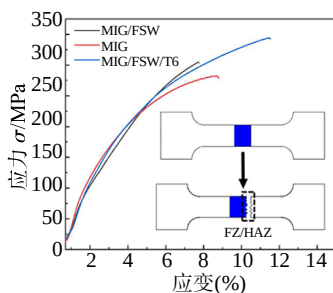
图7 焊接接头的 XRD 图谱
Fig.7 XRD pattern of welding joints

表 4 为图 6 中典型析出相 EDS 定量分析结果。由于高合金成分共晶相很复杂,而第二相中又会溶解其他元素,更因为焊接时合金元素的偏聚受焊接热循环影响析出的第二相依附长大并且连结,所以只能判断具有哪些相或以某个相为主^[17]。根据 EDS 分析结果可以推测,热处理前 MIG 与 MIG/FSW 复合焊焊缝中心析出相(A、B、C、D)主要以 $MgZn_2$ 、 $AlCuMg$ 、 Mg_2Si 或以上三者的混合相为主,MIG 焊时熔池流动将部分熔化母材中的 Zn 元素带入焊缝,

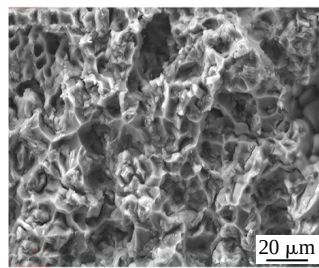
表 4 析出相 EDS 定量分析结果(原子分数,%)

Tab.4 EDS quantitative analysis results of precipitated phases (at%)

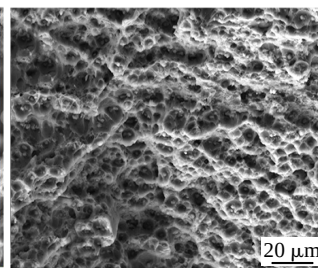
相	Al	Zn	Cu	Mg	Fe	Mn	Si
A	78.9	4.3	3.6	13	0.1	0.1	0
B	85.8	2.1	1.2	9.1	0	0.1	0.1
C	88	3.0	0.7	7.6	0.1	0.5	0.1
D	94.5	1.5	0.3	3.2	0.3	0.1	0
E	80.4	1.0	0.2	11.5	0.1	0	6.7
F	72.9	11.4	6.1	8.2	1.2	0.5	0.2
G	49.8	21.3	15	12.7	1	0.2	0
H	89.4	0.8	0.9	3.9	4.6	0.4	0.1
I	88.6	4.5	1.7	3.9	1	0.2	0
J	78.1	1.9	2.4	2.3	14.1	1.2	0
K	76.3	2.0	3.1	3.5	13.3	1.6	0.3



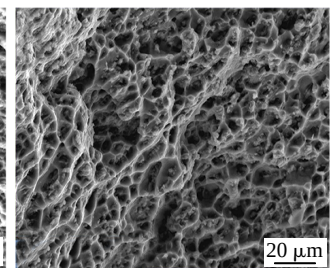
(a)应力-应变曲线



(b)MIG 焊接接头断口



(c)MIG/FSW 复合焊接接头断口



(d)MIG/FSW/T6 复合焊
热处理接头断口

图 8 接头室温拉伸结果与断口 SEM 形貌

Fig.8 Tensile results of joint at room temperature and SEM images of fracture

FSW 过程中材料塑性流动加剧了焊缝金属与母材的混合程度,导致 5 系焊缝中出现了 $MgZn_2$ 等 7 系合金中的析出相,使得焊缝金属具备了一定热处理强化的基础。热处理后焊缝中心析出相的大量减少证实了此推测。热处理前 MIG 与 MIG/FSW 复合焊热影响区相组成与焊缝中心类似(F、G、I、J),但由于焊缝的联生结晶方式导致此区域元素偏聚严重,除了形成沿晶界连续分布的析出相(F)外,还出现若干块状含 Fe 杂质相(H);热处理后, $MgZn_2$ 、 $AlCuMg$ 等相溶入基体形成固溶+时效强化,由于含 Fe、Si 的等难溶相已先前析出,不能通过热处理去除,导致仍有较多块状析出相(K)残留。

2.3 接头力学性能分析

焊接头室温拉伸应力-应变曲线与断口 SEM 形貌如图 8 所示。MIG 焊与 MIG/FSW 试样均在 MIG 焊熔合线位置附近断裂。由图 8(a)可以看出,MIG/FSW 复合焊相较于 MIG 焊对接头整体力学性能的提升并不明显,强度极限虽然由 278.5 MPa 提升至 308 MPa(升幅 10.6%),但断后伸长率由 8.6% 降低至 7.7%(降幅 10.5%)。通过前文分析可知,MIG/FSW 复合焊缝与热影响区晶粒虽然得到细化、第二相也更加细小,但搅拌摩擦焊后在原 MIG 焊母材位置产生新的热影响区,区域软化现象依然存在,导致接头整体力学性能并无明显提升。热处理后,残余应力消除,且由于 FSW 搅拌头搅动使得 7 系母材与 5 系焊缝充分混合,部分 7 系第二相($MgZn_2$ 、 $AlZnMgCu$)固溶入基体再析出形成固溶+时效强化,MIG/FSW 复合焊缝晶粒细小的优势得以发挥,使得接头力学性能得到有效提升。图 8(a)显示复合焊再经热处理接头强度极限达到 345 MPa,断后伸长率提升至 11.5%。

图 8(b)为 MIG 焊接头断口形貌。可以看到断面上存在沿晶裂纹与孔洞等缺陷,断面以刻面状初

窝结构为主,兼有少量穿晶解理平面,表现为韧性断裂为主的韧性+脆性混合型断裂。韧窝边缘尖棱亮度较大,底部可以观察到粗大的第二相粒子存在,可以推测试样在拉伸变形时,基体界面与第二相粒子首先裂开形成裂纹源,随着应力增大,变形量增大韧窝逐渐撕开,韧窝周边形成较大突起撕裂棱。图 8(c)为 MIG/FSW 复合焊接头断口形貌。与 MIG 焊断口具有相同的结构特点,但其韧窝尺寸明显较小,韧窝分布更加均匀,解理平面占比减小的同时消除了裂纹与孔洞缺陷。图 8(d)为 MIG/FSW 复合焊经热处理后的断口形貌。断口上有大量韧窝,呈微孔聚集型断裂,属于韧性断裂。在 MIG/FSW 复合焊的基础上由于热处理后部分析出相溶入基体,导致韧窝中可观察到的析出相颗粒数量明显减少,力学性能提升。

接头横截面维氏显微硬度分布如图 9 所示。由于焊丝为 ER5356,导致焊缝硬度远低于 7075 母材,接头硬度呈“U”形分布,焊缝平均硬度只有 90 HV; MIG/FSW 复合焊相当于在 MIG 焊缝的基础上对焊道进行了搅拌摩擦加工,焊缝平均硬度提升至 119.6 HV,与 ER5356 硬度相当。值得注意的是, MIG/FSW 复合焊虽然提升了焊缝硬度,但由于搅拌头轴肩直径较大(20 mm),会在原焊道基础上产生更宽的搅拌摩擦焊热影响区,使得靠近焊缝位置母材硬度下降,接头硬度分布由“U”形转变为“M”形。复合焊接头热处理后,搅拌摩擦焊产生的热影响区组织受固溶+时效强化作用,硬度恢复至 7075 母材水平,而焊缝由于是 5 系合金无法通过热处理强化,接头硬度分布恢复为“U”形,但整体硬度较 MIG 焊得到提升,证明热处理确实改善了复合焊热影响区软化问题。

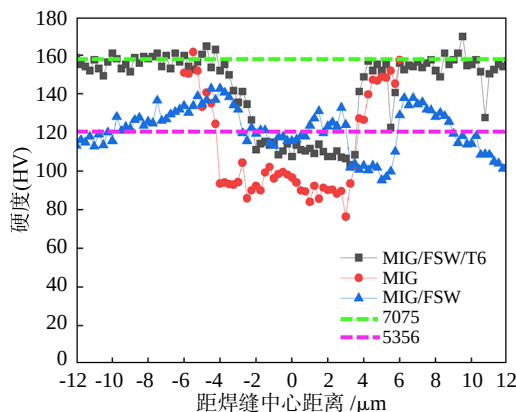


图 9 接头维氏显微硬度分布

Fig.9 Vickers micro-hardness distribution of joints

3 结论

(1) MIG/FSW 复合焊接头的焊缝组织由 MIG 焊枝晶铸态组织转变为均匀细小的等轴晶,析出颗粒由于搅拌头机械作用而碎化,焊缝平均硬度由 90 HV 提升至 119.6 HV。

(2) MIG/FSW 复合焊后在靠近原 MIG 焊道的母材位置产生新的搅拌摩擦焊热影响区,热影响区软化现象依然存在,接头整体抗拉强度相较 MIG 焊并没有明显提升;且由于 MIG 焊道余高金属在复合焊后被轴肩挤出以飞边的形态存在,影响了接头力学性能与美观。

(3) 固溶+时效热处理可有效改善 MIG/FSW 复合焊接头的热影响区软化问题,接头平均抗拉强度达到 345 MPa,断后伸长率为 11.5%;热处理后焊缝、热影响区硬度分别与 ER5356、7075 母材持平,证明 MIG/FSW/T6 接头已经接近了使用 ER5356 焊丝焊接 7075 铝合金接头的力学性能上限。

参考文献:

- [1] 陈轩,李萌葵,卜恒勇,等. 7 系铝合金焊接技术的研究现状及展望[J]. 材料导报,2023,37(13):200-208.
- [2] 邢艳辉. 挤压速度对 Al-Zn-Mg-Cu 高强铝合金显微组织与硬度的影响[J]. 热加工工艺,2021,50(21):88-90.
- [3] 陈芙蓉,李国伟. 7075 铝合金的研究现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册),2019(1):1-7.
- [4] 倪加明,陈梦凡,刘思余,等. 高强铝合金焊丝摆动电弧熔丝成形工艺 [J/OL]. 热加工工艺:1-4. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20213439.
- [5] 张丽娇. 航空航天高强铝合金材料应用及发展趋势研究[J]. 新材料产业,2021(3):7-11.
- [6] 翟靖,邓沛然,吴恺威,等. 7A04 高强铝合金的热拉深性能[J]. 中国有色金属学报,2017,27(9):1768-1774.
- [7] Abeens M, Muruganandhan R, Thirumavalavan K. Effect of Low energy laser shock peening on plastic deformation, wettability and corrosion resistance of aluminum alloy 7075 T651 [J]. Optik, 2020, 219: 165045.
- [8] 管仁国,娄花芬,黄晖,等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学,2020,22(5):68-75.
- [9] 顾恺迪,高志良,李世江,等. 7 系铝合金在上海轨道交通车辆的应用现状及适用性分析 [J]. 城市轨道交通研究,2022,25(9):141-145.
- [10] Kang M, Kim C. A review of joining processes for high strength 7xxx series aluminum alloys[J]. Journal of Welding & Joining, 2017, 35(6):79-88.

(下转第 82 页)

- [24] Sun J, Sheng C, Wang D, et al. Influence of pulsed magneto-oscillation on microstructure and mechanical property of rectangular 65Mn steel ingot[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(8): 862-866.
- [25] 魏荣祥, 张华, 李仁兴, 等. PMO 对硬线钢小方坯凝固组织和中心偏析的影响[J]. 中国冶金, 2023, 33(12): 115-121.
- [26] 王海洋, 滕力宏, 赵阳, 等. PMO 作用对连铸轴承钢凝固组织及碳化物的影响[J]. 连铸, 2018, 43(6): 32-35.
- [27] 朱富强, 任振海, 陈志亮, 等. PMO 作用对 60Si2Mn 弹簧钢凝固组织的影响[J]. 上海金属, 2020, 42(4): 100-104.
- [28] 仲红刚, 刘海宁, 徐智帅, 等. 脉冲磁致振荡凝固均质化技术及装备[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 174-180.
- [29] 何庆文, 王宝, 王福明, 等. 大方坯轴承钢中心偏析的成因及预防措施[J]. 钢铁, 2009, 44(8): 39-41.
- [30] 姬颖伦, 左秀荣, 洪良, 等. 连铸坯中心偏析控制技术的新进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(7): 17-20.
- [31] 刘海宁, 王郢, 李仁兴, 等. PMO 凝固均质化技术在 20CrMnTi 齿轮钢上的应用[J]. 钢铁, 2019, 54(6): 69-78.
- [32] 石昊, 李莉娟, 王海洋, 等. PMO 对 GCr15 钢棒材中带状碳化物评级及分布的影响[J]. 上海金属, 2020, 42(5): 57-62.
- [33] 李祺欣, 俞基浩, 梁冬, 等. 脉冲磁致振荡细化工业纯铝机制研究[J]. 上海金属, 2015, 37(4): 48-51.
- [34] 张云虎, 仲红刚, 翟启杰. 脉冲电磁场凝固组织细化和均质化技术研究与应用进展 [J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(4): 249-260.
- [35] 孙德润, 张宏, 门正兴, 等. 冷却速度对铸件二次枝晶臂间距影响的模拟研究[J]. 大型铸锻件, 2014(4): 1-3.
- [36] 王璐, 孙彦辉, 焦帅, 等. 轴承钢大方坯二次枝晶臂间距数值模拟[J]. 钢铁, 2018, 53(7): 50-59.
- [37] 李涛, 李莉娟, 李开创, 等. PMO 对定向凝固 GCr15 轴承钢枝晶臂间距的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(5): 62-69.
- [38] 赵静, 秦红星, 刘国超, 等. PMO 脉冲参数对钢液内电磁场和流场分布的影响[J]. 上海金属, 2020, 42(1): 68-76.
- [39] 杨阳, 黄雁, 刘海宁, 等. 采用 PMO 改善 20CrMnTi 钢的凝固组织和偏析研究[J/OL]. 上海金属: 1-9(2025-01-22).
- [40] Wang Y, Chen Y, Yu W. Effect of Cr/Mn segregation on pearlite-martensite banded structure of high carbon bearing steel [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(4): 665-675.
- [41] Wang M, Sun Z Q, Li L F. Research of martensite bands in the core of 82B wires [J]. Advanced Materials Research, 2014, 3140(915): 619-622.
- [42] 纪元. 连铸坯偏析及其铸轧遗传性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [43] Ji Y, Tang H, Lan P, et al. Effect of dendritic morphology and central segregation of billet castings on the microstructure and mechanical property of hot-rolled wire rods[J]. Steel Research International, 2017, 88(8): 1600426. 

(上接第 74 页)

- [11] 张王军, 李云, 吴玉娜, 等. 超高强 7XXX 系铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 现代交通与冶金材料, 2023, 3(3): 52-60.
- [12] Reyna-Montoya J S, Garcia-Renteria M A, Cruz-Hernandez V L, et al. Effect of electromagnetic interaction on microstructure and corrosion resistance of 7075 aluminium alloy during modified indirect electric arc welding process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(3): 473-484.
- [13] Liu X, Wang C Y, Li X P, et al. Investigation of 7075 aluminum alloy TIG welding joint using 7075 aluminum alloy wire before and after heat treatment[J]. Materials Research Express, 2023, 10: 046512.
- [14] 宋友宝, 李龙, 吕金明, 等. 7xxx 系铝合金焊接研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 492-501.
- [15] 陕倩, 李振亮, 赵帆, 等. 连铸连轧法生产的铝合金焊丝表面质量及影响因素分析[J]. 内蒙古科技大学学报, 2021, 40(1): 20-24.
- [16] 刘红伟, 王法科, 马冰, 等. 铝合金焊丝的拉拔及刮削工艺[J]. 焊接技术, 2011, 40(1): 36-39.
- [17] Mondal C, Mukhopadhyay A K. On the nature of T (Al₂Mg₃Zn₃) and S (Al₂CuMg) phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 391(1/2): 367-376. 