

微合金元素改性对 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 合金 TIG 焊接头组织及性能影响

谷宁杰, 吴浩, 毛晓东, 宋小雨, 邹立颖, 董学光, 史晓成

(中铝材料应用研究院有限公司, 北京, 102209)

摘要: 采用 5B71 合金焊丝对添加不同微合金成分的 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 合金进行 TIG 焊接试验, 系统研究微合金元素 Zr, Er, Sc 对焊接接头的微观组织、显微硬度和力学性能的影响。结果表明, AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 基材为变形条带组织, TIG 焊缝区为等轴凝固组织。微量元素 Zr, Er, Sc 的添加可在基材中形成纳米析出相, 起钉扎位错, 抑制合金再结晶的作用。相比单独添加 Zr 元素, 复合添加 Zr, Er 和 Zr, Sc 元素能够更有效地抑制焊缝热影响区再结晶行为, 降低焊接过程基材软化。5 组接头显微硬度均沿焊缝中心呈 W 形对称分布, 在热影响区达到最低, 相应地, 力学拉伸试样均断在热影响区, 随着微合金元素种类及添加量的增加, 接头强度逐渐提高; 当 Er 元素提高到 0.35% 时, 焊缝抗拉强度达到 274 MPa, 焊接系数为 83.3%; 复合添加 Zr, Sc 元素的 5 号试样接头抗拉强度最大为 293 MPa, 焊接系数为 89.7%。

创新点: (1) 提出通过微合金元素的添加调控铝合金在焊接过程中的再结晶行为。

(2) 揭示了 Zr, Er, Sc 微合金元素对 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321TIG 焊接头组织性能的影响机理。

关键词: AlMg4.3Mn0.6Cr0.12 合金; TIG 焊接; 再结晶行为; 焊接强度

中图分类号: TG 457.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231204003

Effect of micro-alloying elements modification on the microstructure and properties of TIG welded joints of AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 alloy

GU Ningjie, WU Hao, MAO Xiaodong, SONG Xiaoyu, ZOU Liying,
DONG Xueguang, SHI Xiaocheng

(Chinalco Material Application Research Institute Co., LTD. td, Beijing, 102209, China)

Abstract: Tungsten inert gas (TIG) welding tests were conducted on AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 alloy with varied micro-alloying elements using ER5B71 filler wire. The influence of micro-alloying elements Zr, Er, and Sc on the microstructure, microhardness, and mechanical properties of welded joints was systematically investigated. The results indicate that the base material exhibits a deformed band structure, while the weld zone exhibits an equiaxed solidification microstructure. The addition of micro-alloying elements Zr, Er, and Sc forms nanoscale precipitates in the matrix, which effectively pin dislocations and inhibit alloy recrystallization. Compared with adding Zr element alone, adding Zr, Er, or Zr, Sc elements can more effectively suppress recrystallization behavior in the weld heat-affected zone (HAZ) and reduce base material softening during welding. All five groups of joints show W-shaped symmetrical microhardness distributions along the weld centerline, reaching minimum values in the HAZ. Correspondingly, tensile samples all fractured in the HAZ. The butt joint strength gradually increases with the variety and content of micro-alloying elements. When the Er content is 0.35%, the samples achieve the tensile strength of 274 MPa with a joint efficiency of 83.3%. The Zr-Sc co-doped samples (#5) achieve the maximum tensile strength of 293 MPa, corresponding to a joint efficiency of 89.7%.

Highlights: (1) It was proposed to regulate the recrystallization behavior of aluminum alloy during welding process by adding micro-alloying elements.

(2) The influence of Zr, Er, and Sc micro-alloying elements on the microstructure and properties of AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321TIG welded joints was revealed. Mn0.6Cr0.12-H321TIG welded joints was revealed.

Key words: AlMg4.3Mn0.6Cr0.12 alloy; TIG welding; recrystallization behavior; welding strength

0 序言

AA5083 铝合金具有常温和低温韧性高、耐腐蚀性能好、重量轻、成形性高等特点,广泛应用于航空航天、船舶制造、现代交通制造、高压输配电、建筑等行业^[1-2]. 该合金主要合金元素为中等水平的 Mg 元素 (4.0% ~ 4.9%)、Mn 元素 (0.4% ~ 1.0%) 以及 Cr 元素 (0.05% ~ 0.25%)^[3-4], 此外, 合金中还含有少量的 Si, Fe, Zn 等杂质元素, 能够有效细化晶粒组织及提高合金的强度. AA5083 铝合金通过冷加工获得较高的强度和良好的延展性, Mg 是 AA5083 铝合金的主要强化元素, 在 AA5083 基体中的存在方式主要有 2 种, 一是固溶于 Al 基体中形成固溶体; 二是与基体中的 Al 形成 β 相 (Al_2Mg_3), Mn 元素和 Cr 元素对合金组织调控、力学性能及耐蚀性能有改善作用^[5-6].

对于船舶、轨道交通、LNG 等应用领域, 在制造过程中材料的焊接工序必不可少. 对于铝合金, 目前主要的焊接方法包括熔化极惰性气体保护焊、钨极氩弧焊、激光焊以及搅拌摩擦焊等^[7-9], 其中钨极氩弧焊 (tungsten inert gas, TIG) 具有自动化程度高、焊接电弧和熔池观测性高、熔池稳定的特点, 是焊接质量较高的一种熔焊方法^[10-13], 同时, TIG 焊还具有电弧热量稳定、焊缝冶金质量好、焊接接头强韧性高等优点, 是一种应用广泛的铝合金焊接方法.

铝合金在进行电弧焊接时, 由于较高的焊接热输入, 会使焊接热影响区发生一定程度的回复和再结晶, 使合金基材发生一定的软化, 降低材料强度. 而微合金元素 (Zr, Er 和 Sc 等) 的添加可在基材中生成细小弥散的纳米析出相, 提高铝合金材料的焊接性能^[14-18]. 苏丹等人^[19] 采用不同 Sc, Zr 含量的 5356 焊丝对 5083 板材进行焊接, 表明当使用 0.2%Sc 和 0.1%Zr 改性焊丝时, 焊缝熔化区平均晶粒尺寸为 15 μm , 是使用未改性焊丝制得熔化区晶粒尺寸 (62 μm) 的 24%, 抗拉强度为 343 MPa, 焊接系数达到 85.5%; 吴浩等人^[20] 研究了微量 Er 和 Zr 元素对 Al-Mg 合金再结晶行为及组织演变的影响, 同时探讨 Er 和 Zr 元素对稳定化态合金的 FSW 和 MIG 焊接接头组织和力学性能的影响, 结

果表明, Er 和 Zr 元素的复合添加能够有效削弱由于焊接热量输入产生的板材形变组织再结晶软化作用, 减小热影响区再结晶组织宽度, 改善合金焊接接头组织, 提高焊接接头性能. 以上研究针对微合金元素 (Zr, Er 和 Sc 等) 对铝合金焊接性能进行了相关研究, 但对于不同微合金元素的作用机理、影响程度、影响位置等未深入开展研究. 基于此, 文中拟采用 TIG 焊对 2 mm 厚、添加不同微合金成分的 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 铝合金板材进行焊接试验, 研究微合金元素对焊接接头组织及力学性能的影响规律, 为 5 系铝合金材料的成分设计改进提供理论依据.

1 试验方法

试验材料为 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 铝合金, 先将铝锭进行熔化, 此后加入 Al-Mn, Al-Zr, Al-Cr 中间合金, 搅拌均匀后分别加入 Al-Er, Al-Sc 中间合金, 最后加入纯镁锭, 经过扒渣、精炼后, 采用半连续铸造制备相应的合金铸锭, 经均匀化处理后进行多道次热轧、冷轧, 制备厚度 2.0 mm 的冷轧板材, 再对板材进行 220 $^{\circ}\text{C}$ 、2 h 的稳定化退火, 得到成品板材, 用于 TIG 焊接试验. 采用 5B71 合金焊丝作为焊缝填充材料, 直径为 1.2 mm, 不同基材及焊丝成分见表 1.

焊接试验所用设备为 Fronius 公司的 Magic Wave 型 TIG 焊机, 焊接基板规格 300 mm \times 100 mm, 接头形式为对接焊, 对接间隙为 0 mm, 不开坡口. 焊接前, 使用钢丝刷打磨基材表面氧化膜, 并用无水乙醇或丙酮清理表面油污, 焊接过程中全程采用 99.99% 的高纯氩气进行保护, 根据焊接板材厚度及热输入的初步计算, 主要 TIG 焊接工艺参数见表 2.

依据国家标准 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》和 GB/T 2651—2023《焊接接头拉伸试验方法》, 测试合金基材及焊接接头的力学性能, 力学拉伸试样尺寸, 如图 1 所示. 拉伸速率为 2 mm/min, 每组设置 3 个平行试样, 取平均值, 对不同成分基材及焊接接头进行阳极覆膜, 并在光学显微镜下进行组织观察. 采用 Fisher HM 2000 型显微维氏硬度仪测量焊接

表 1 母材和焊丝化学成分 (质量分数, %)
 Table 1 Chemical compositions of base metals and welding wire

材料	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zr	Er	Sc	Al
焊丝	0.07	0.12	—	6.22	—	0.11	—	0.33	余量
1号	0.06	0.08	0.59	4.3	0.12	—	—	—	余量
2号	0.05	0.07	0.61	4.3	0.12	0.1	—	—	余量
3号	0.06	0.06	0.60	4.3	0.12	0.1	0.15	—	余量
4号	0.05	0.08	0.59	4.3	0.12	0.1	0.35	—	余量
5号	0.06	0.08	0.60	4.3	0.12	0.1	—	0.15	余量

表 2 TIG 焊接工艺参数
 Table 2 Parameters of TIG welding process

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(m·min ⁻¹)	板材间隙 d/mm	氩气流量 Q/(L·min ⁻¹)
110~130	12~15	0.16~0.18	0	12~15

接头横截面不同区域的显微硬度,加载载荷为 0.98 N,保载时间为 15 s,由焊缝中心向两侧每隔 0.5 mm 取点测试.采用 JEM-7800F 型场发射扫描电镜对断口形貌、第二相成分以及焊缝处晶粒组织进行观察.对焊缝及热影响区组织进行背向散射电子衍射技术 (electron backscattered diffraction, EBSD) 分析,样品经研磨、机械抛光后,进行电解抛光,腐蚀液为 HClO₄ + CH₃OH(体积比为 1:9).采用 JEM-F200 型透射电镜 (transmission electron microscopy, TEM) 对基材及焊接热影响区析出相形貌进行观察,并利用能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 对析出相成分进行测试.

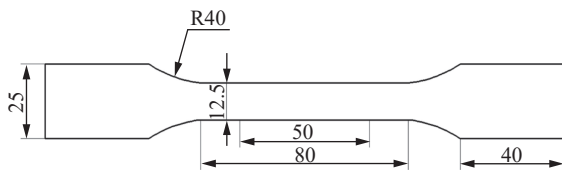


图 1 拉伸试样尺寸 (mm)
 Fig. 1 Dimensions of tensile test specimen

2 试验结果与分析

2.1 接头截面形貌

AlMg4.3Mn0.6Cr0.12 板材经过稳定化退火后的金相覆膜组织,如图 2 所示,可以看到,合金板材经过低温稳定化退火后仍保留典型的变形纤维组织,组织呈条带状.对于 5 系铝合金材料,其冷轧板进行低温稳定化处理后,具有稳定的拉伸性能和优良的抗腐蚀性能,既可以最大程度地保留冷作硬化强度,同时产生的部分回复和再结晶可以一定程度

提高材料的塑性和耐蚀性.

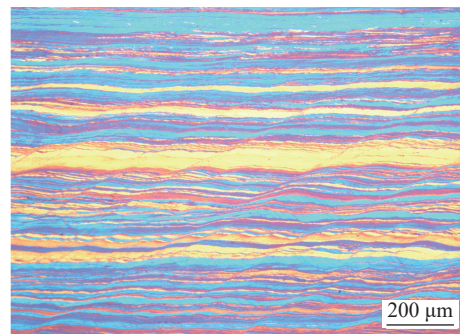


图 2 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 合金基材金相覆膜组织
 Fig. 2 Metallographic coating microstructure of AlMg4.3-Mn0.6Cr0.12-H321 alloy base metals

不同微合金化的 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 合金 TIG 焊接头的焊缝横截面金相组织形貌,如图 3 所示.可以看出,在相同的 TIG 焊接工艺下,合金基材均完全熔透,焊接接头成形良好,具有适当的熔深和熔宽,焊缝区无明显气孔缺陷,冶金质量良好,由于焊丝中含有 Sc 元素,焊缝凝固组织晶粒细小;熔合区存在明显的柱状晶区.从图 3 中还可以看出,由于基材微合金成分的差异,不同 TIG 焊接头热影响区再结晶程度有明显的区别.

2.2 接头微观组织

为了系统比较不同基材焊接接头热影响区的再结晶行为,选取距离焊缝中心 5mm 位置的热影响区 (hot affected zone, HAZ) 为研究对象见图 3 黑框位置,对 5 组接头的焊缝中心区 (welding seam center, WSC) 及热影响区进行 EBSD 组织观察.焊缝中心区 EBSD 组织,如图 4 所示,可以看出,1 号~4 号基材试样焊缝中心组织差异较小,晶粒大

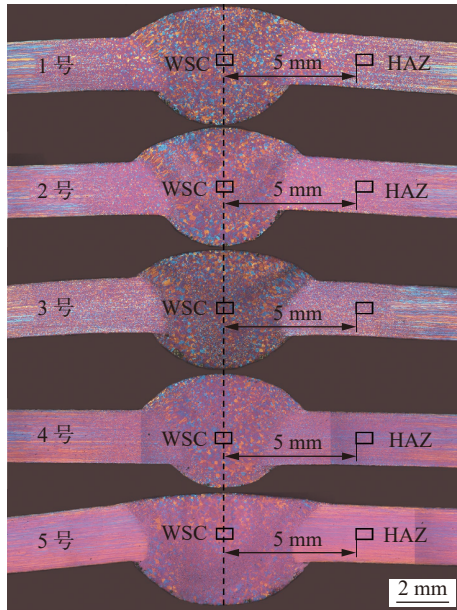


图3 焊缝横截面金相组织

Fig. 3 Metallographic microstructure of cross-sections of the weld seams

小均匀, 约为 $40\ \mu\text{m}$; 5号基材试样焊缝区晶粒不均匀, 出现了大、小晶粒的不均匀分布; 平均晶粒尺寸显著降低, 约为 $20\ \mu\text{m}$.

5组焊接接头的热影响区 EBSD 组织, 如图 5 所示. 从图中可以看出, 1号接头热影响区为

完全再结晶组织, 晶粒呈等轴分布, 直径约为 $26\ \mu\text{m}$; 2号接头由于 Zr 元素的添加, 组织中存在明显的小角度晶界及亚结构, 再结晶程度降低; 随着基材中 Zr, Er 元素的复合添加及 Er 元素的提高 (3号、4号接头), 热影响区再结晶行为进一步受到抑制, 再结晶程度进一步降低. 由图 5(f) 可以看出, 复合添加 Zr, Sc 元素的 5号接头热影响区基本保留原始条带状变形组织, 表明在焊接过程中, TIG 焊产生的热输入未使该区域产生明显的再结晶行为. 对 5组接头热影响区的小角度晶界比例进行统计, 如图 6 所示. 可以明显看出, 1号接头再结晶程度最大, 小角度晶界比例约为 25.9%; 随着 Zr, Er 元素的添加, 热影响区小角度晶界比例逐渐提高, 当 Er 含量增加到 0.35% 时, 小角度晶界比例显著提高, 达到 49.7% (4号接头); 当复合添加 Zr, Sc 元素后 (5号接头), 接头热影响区再结晶行为抑制程度最高, 小角度晶界比例显著提高, 达到 64.2%. 通过以上结果可以看出, 单独添加 Zr 元素, 可在一定程度上抑制冷变形组织的再结晶行为; 复合添加 Zr, Er 元素及 Zr, Sc 元素可显著抑制合金的再结晶行为, 提高再结晶温度; 通过对比可以看出, Sc 元素的抑制作用明显高于 Er 元素.

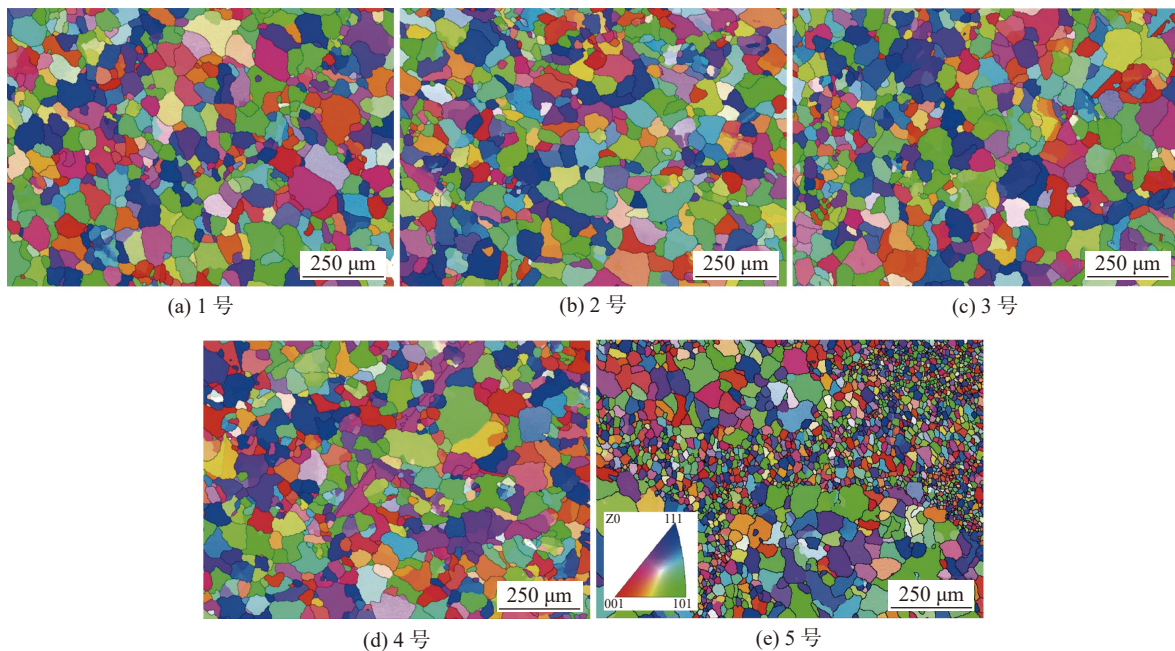


图4 焊缝中心横截面 EBSD 组织

Fig. 4 EBSD microstructure of cross-section of the weld seam centers. (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5

1号、4号、5号3组接头基材及热影响区 TEM 明场像图谱, 如图 7 所示, 可以看出, 1号试样

由于未添加微合金元素, 未观察到纳米析出相. 经过稳定化退火后, 组织中位错密度较低, 基材再结

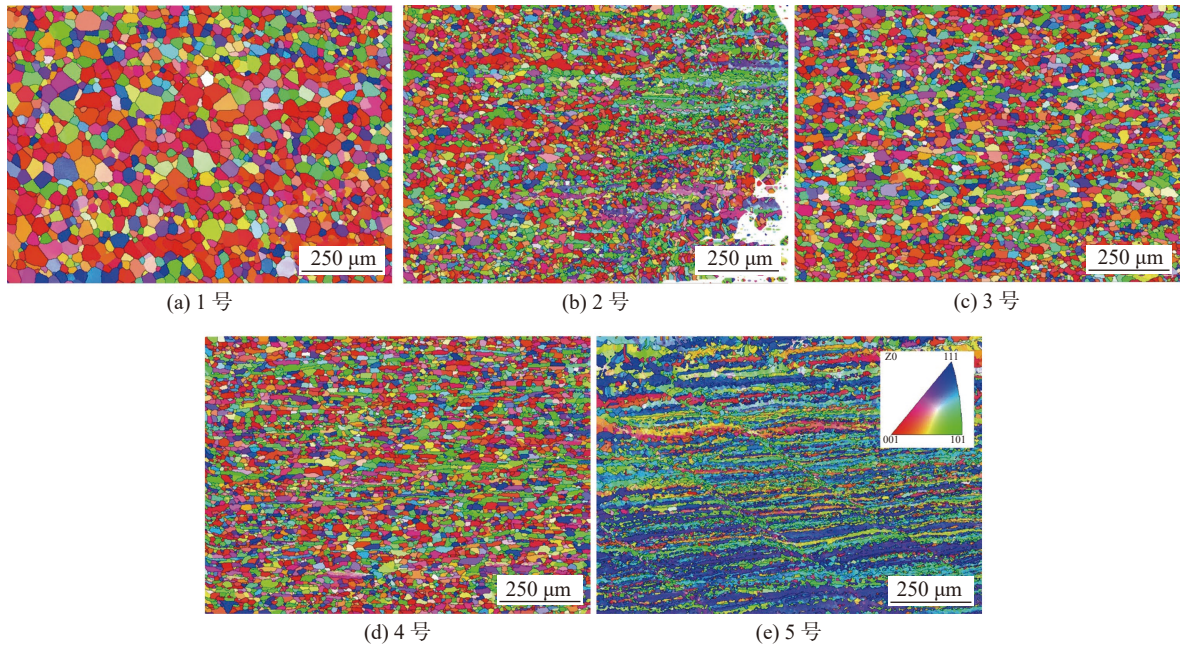


图 5 热影响区横截面 EBSD 组织

Fig. 5 EBSD microstructure of cross-section of the heat affected zones. (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5

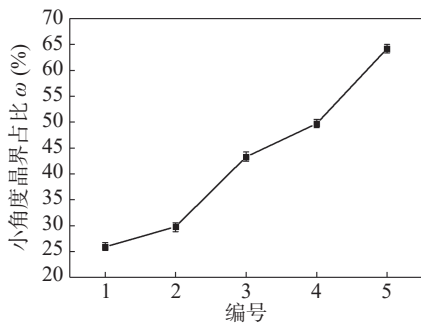


图 6 热影响区小角度晶界比例

Fig. 6 Proportions of small angle grain boundaries in the heat affected zones

晶程度较大;焊接后热影响区再结晶程度进一步提高,位错密度进一步降低.4号试样接头由于含有 Zr 元素和较高的 Er 元素,在基材中可以明显看到析出的球形弥散相,与基体共格,经衍射斑及成分测试见图 8(a),确认为 $Al_3(Er,Zr)$ 纳米析出相,能够起到钉扎位错、抑制位错移动的作用,显著抑制合金在焊接过程热影响区的再结晶行为^[20],如图 7(e)所示.同理,5号试样接头在基材及热影响区均能观察到大量的弥散分布的纳米析出相,经衍射斑及成分测定见图 8(b),主要为 $Al_3(Sc,Zr)$ 纳米析出相,沿晶界及晶内均匀分布,钉扎位错,强烈抑制合金的再结晶行为.

2.3 接头力学性能与断裂分析

不同微合金成分的基材形成的焊接接头横截面显微硬度,如图 9 所示.结果显示,5组焊接接头

显微硬度变化趋势基本相同,沿焊缝中心呈 W 形对称分布.在焊缝区,1号~4号接头硬度接近,显微硬度在约为 70 HV,5号接头显微硬度略高,约为 78 HV.这是由于 5号试样基材中含有 Sc 元素,晶粒细化效果显著,显微硬度有明显提升.沿焊缝中心向熔合线移动,硬度逐渐下降.当到达热影响区后,由于焊接热输入的影响,基材发生了不同程度的再结晶,热影响区发生了一定程度的软化,硬度逐渐下降;当逐渐远离焊缝中心区后,焊接热输入的影响逐渐降低,基材硬度逐渐提高,一直达到与基材相当.相较于焊接热影响区,焊缝中心硬度值略高,这是由于焊缝区为凝固组织,主要体现 Mg 元素的固溶强化和细晶强化.试验 TIG 焊填充焊丝为 5B71 合金, Mg 含量较高,焊缝区 Mg 元素的固溶强化作用明显,焊缝区硬度较高,从图中可以明显看出,5组接头的显微硬度差异主要在热影响区的最低硬度和热影响区宽度,1号接头热影响区硬度最低,且热影响区宽度最大;5号接头热影响区硬度最大,热影响区宽度最小.

不同微合金成分基材及 TIG 焊接头的室温拉伸力学性能,如图 10 所示.结果显示,在相同的塑性加工及稳定化退火工艺下,随着微合金元素种类及添加量的提高,合金的屈服强度及抗拉强度逐渐提高,从 230、308 提高到 273、342 MPa,断后伸长率逐渐降低,从 14.5% 降低到 11.0% 见图 10(a);

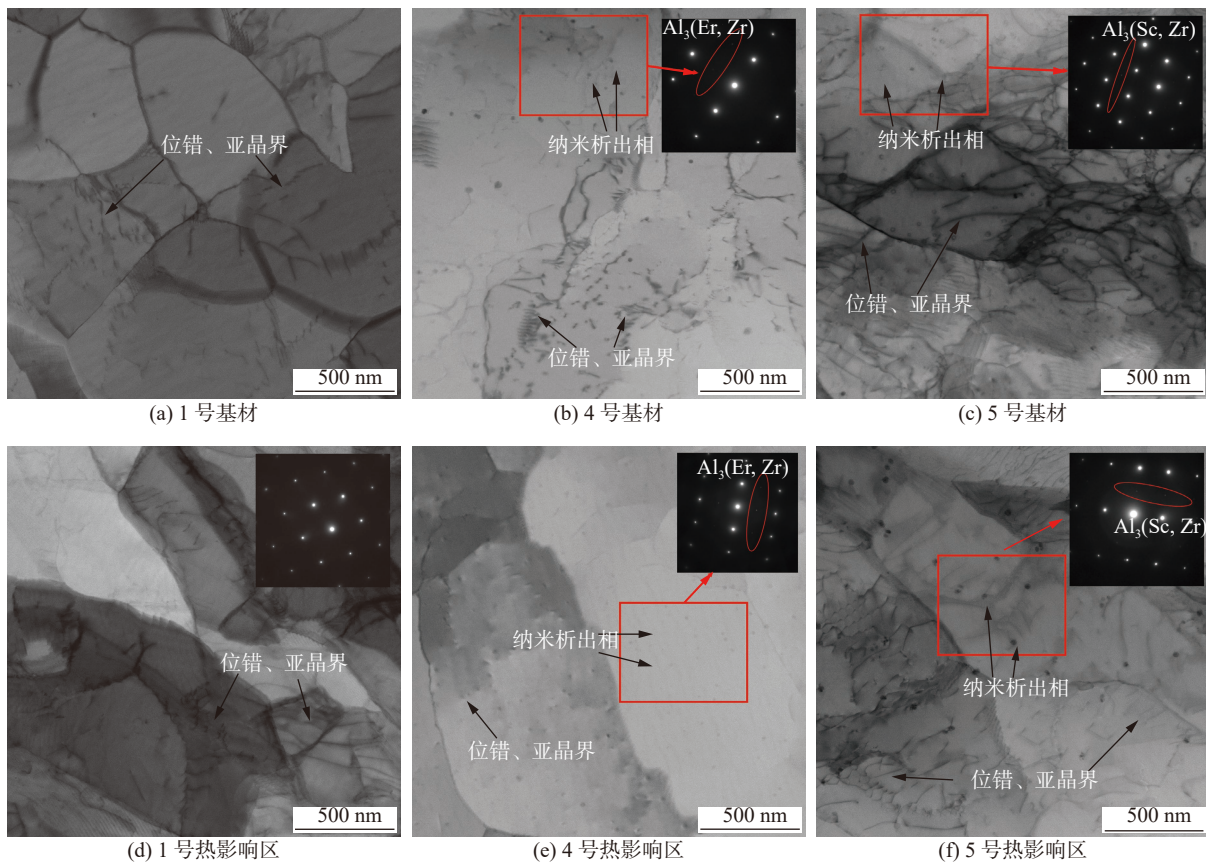


图 7 焊接接头 TEM 组织

Fig. 7 TEM microstructures of welded joints. (a) 1#BM; (b) 4#BM; (c) 5#BM; (d) 1#HAZ; (e) 4#HAZ; (f) 5#HAZ

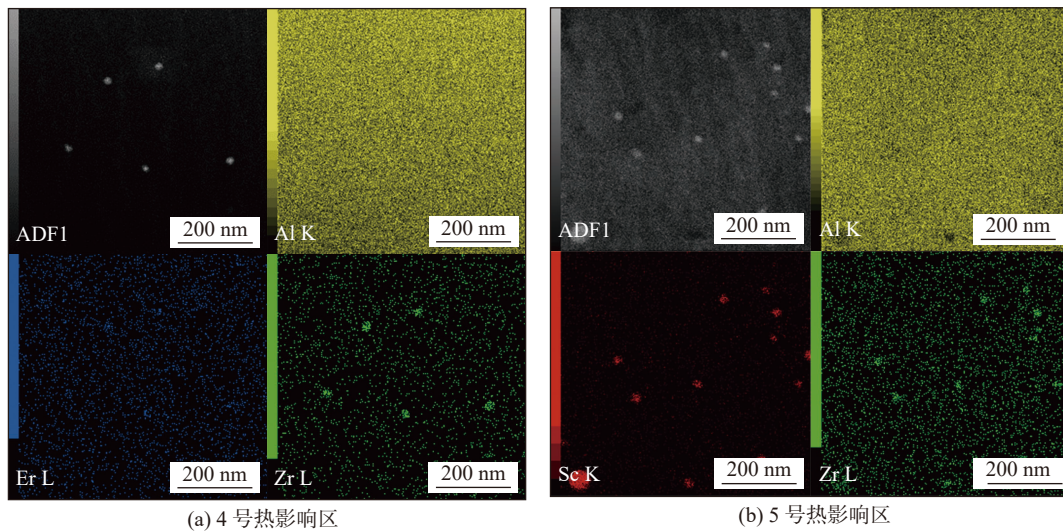


图 8 焊接接头 STEM 图像和面扫描元素分布

Fig. 8 STEM images and scanning element analysis mapping of welded joints. (a) 4#HAZ; (b) 5#HAZ

复合添加 Zr, Sc 元素的 5 号试样强度最高, 断后伸长率最低, 表明 5 号基材的再结晶程度最低. 从图 10(b)、图 10(c) 中还可以看出, 随着微合金元素种类及添加量的增加, 焊接接头的屈服强度及抗拉强度均显著提高, 焊接系数 (焊缝抗拉强度/基材抗

拉强度) 也相应增大, 从 76.6% 提高到 85.7%. 以上结果表明, Zr, Er, Sc 微合金元素的添加, 抑制了 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 合金板材热影响区的再结晶软化行为, 提高了焊接接头的强度.

图 11 为不同焊接接头力学拉伸宏观断裂位

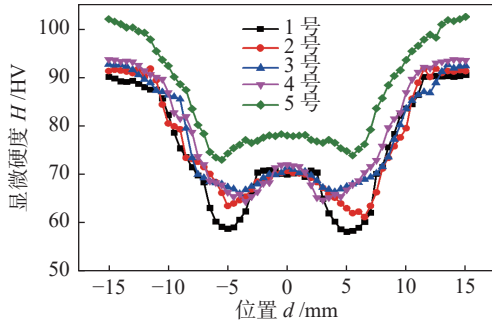


图9 焊接接头显微硬度

Fig. 9 Microhardness of Welded Joints

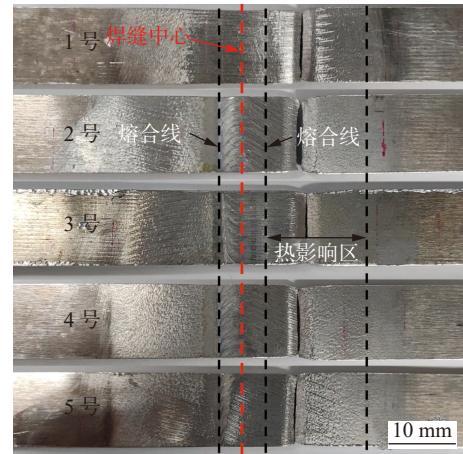
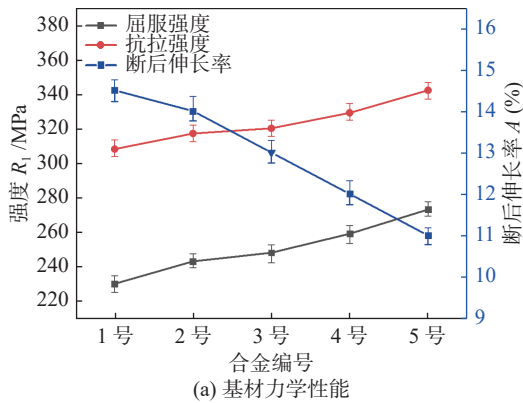
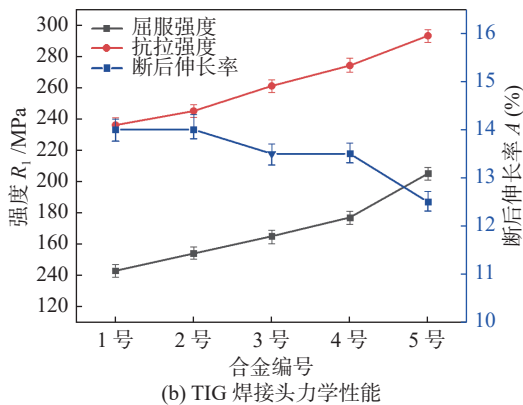


图11 焊接接头断裂位置

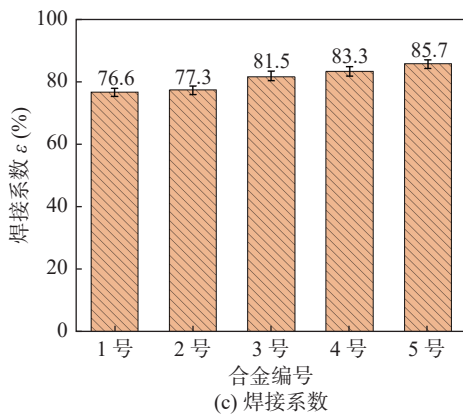
Fig. 11 Fracture locations of welded joints



(a) 基材力学性能



(b) TIG 焊接头力学性能



(c) 焊接系数

图10 不同微合金成分基材及 TIG 焊接头的拉伸力学性能
Fig. 10 Tensile mechanical properties of substrates with different microalloy compositions and TIG welded joints. (a) mechanical properties of BM; (b) mechanical properties of TIG welded joints; (c) welding coefficients

置. 由图9焊接接头显微硬度可以看出,热影响区宽度约为12 mm,结果表明,5组接头均断裂在热影响区,表明焊缝冶金质量良好,未出现明显的未焊合及气孔缺陷.对断口处形貌进行SEM观察,如图12所示.可以看出,拉伸断口表面有大量的韧窝,韧窝深度较大,材料韧性较好;同时由于断裂在热影响区,不存在焊接气孔缺陷.在韧窝内部可观察到第二相粒子,经成分测试主要为 $\beta(\text{Al}_2\text{Mg}_3)$ 相和 $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ 相见表3.在拉伸塑性变形过程中,第二相粒子相较于基体塑性较差,硬度较高,在拉伸的过程中,二者塑性和强度的差异导致第二相粒子与基体脱离,局部发生应力集中,形成微空洞,这些微空洞随着拉伸的进行逐渐长大并与其它微空洞聚集形成大量韧窝,使接头断裂.

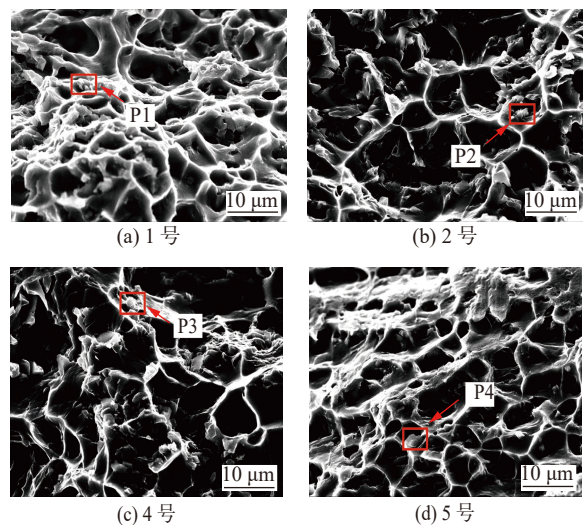


图12 焊接接头断口SEM形貌

Fig. 12 SEM morphologies of fractures of welded joints. (a) 1; (b) 2; (c) 4; (d) 5

表 3 EDS 测试结果 (原子比, %)
Table 3 EDS test results

位置	Al	Mg	Fe	Mn	可能物相
P1	86.10	6.17	2.45	5.28	β 相、 $Al_6(Fe,Mn)$
P2	82.23	13.98	1.12	2.67	β 相、 $Al_6(Fe,Mn)$
P3	87.77	8.23	2.35	1.65	β 相、 $Al_6(Fe,Mn)$
P4	84.77	9.95	2.13	3.15	β 相、 $Al_6(Fe,Mn)$

3 分析与讨论

在铝合金 TIG 焊接过程中, 由于焊接电弧对焊接接头各区域作用机理不同, 焊接接头不同位置的微观组织与力学性能存在明显差异. 对于 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 合金来讲, 文中采用的焊丝为 5B71 高镁合金焊丝, 焊缝处 Mg 元素固溶程度高, 加之焊丝中 Sc 元素的细晶效果^[21], 焊缝冶金质量及强度较高, 超过了热影响区强度, 最终导致 5 组焊接接头断裂在热影响区. 对于以上 5 组成分的基材, 在相同焊接工艺下, 焊接热输入相同, 基材热影响区再结晶程度差异的主要原因在于微合金元素形成的纳米弥散相. 相比于未添加微合金元素的 1 号试样, 单一添加 Zr 元素的 2 号试样会在合金基体中生成 Al_3Zr 纳米粒子, 在一定程度上抑制了焊接接头热影响区的回复和再结晶软化行为, 提高了热影响区硬度及接头强度, 但效果并不明显. 而对于复合添加 Zr, Er 元素的 3 号和 4 号试样, 合金基体中会形成大量均匀分布的 $Al_3(Er,Zr)$ 纳米析出相, 这些纳米析出相与基体共格, 对形变位错产生钉扎作用见图 7(e), 削弱了焊接热输入产生的再结晶软化作用, 保留了形变组织的亚结构强化作用, 提高了焊接接头的力学性能. 可见, 微量 Zr, Er 元素的复合添加, 可以有效抑制合金形变组织的再结晶软化行为, 减小热影响区宽度, 提高焊接强度. 而对于复合添加 Zr, Sc 的 5 号试样, 同样会在基体中形成大量的 Al_3Zr , Al_3Sc , 及 $Al_3(Sc,Zr)$ 复合析出相, 而 Al_3Sc 及 $Al_3(Sc,Zr)$ 相较于 Al_3Zr 和 $Al_3(Er,Zr)$ 纳米析出相, 与基体的错配度更低, 基本共格, 其钉扎位错、抑制再结晶的能力更强^[22-25], 稳定变形组织的亚结构, 阻碍位错重新排列成亚晶界及后续演变成大角度晶界的过程, 抑制再结晶形核, 导致热影响区宽度显著减小, 基本保留变形条带组织见图 5(e).

以上结果表明, 微合金元素 Zr、Er 和 Sc 的添加, 可在基材中生成相应的纳米析出相, 有效抑制 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 合金形变组织再结晶及晶粒长大, 提高合金的再结晶温度, 降低焊接热影响区软化程度; 同时有效细化焊缝凝固组织, 提升焊缝冶金质量, 最终提高 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 合金的焊接强度.

4 结论

(1) 在相同的焊接工艺下, 不同微合金成分的 AlMg4.3Mn0.6Cr0.12-H321 TIG 焊接接头成形良好, 焊缝区无明显气孔缺陷, 冶金质量良好.

(2) 焊接接头显微硬度沿焊缝中心呈 W 形对称分布, 在热影响区达到最低, 焊接力学拉伸试样均断在热影响区.

(3) 随着微合金元素种类及添加量的增加, 接头强度逐渐提高, 焊接系数也相应提高; 当 Er 元素提高到 0.35% 时, 焊缝抗拉强度达到 274 MPa, 焊接系数为 83.3%; 复合添加 Zr, Sc 元素的 5 号试样接头抗拉强度最大为 293 MPa, 焊接系数为 89.7%.

参考文献

- [1] 朱达新, 唐菊萍. 5083 铝合金 TIG 焊接工艺研究 [J]. 材料研究与应用, 2022, 16(3): 449 - 454.
Zhu Daxin, Tang Juping. Study on TIG welding process of 5083 aluminum alloy [J]. Materials Research and Application, 2022, 16(3): 449 - 454.
- [2] 王家威, 吴巍, 马月婷, 等. 5083 铝合金 MIG 焊接接头微观组织与力学性能 [J]. 焊接, 2022(11): 20 - 28.
Wang Jiawei, Wu Wei, Ma Yueting, et al. Study on TIG welding process of 5083 aluminum alloy [J]. Welding & Joining, 2022(11): 20 - 28.

- [3] 高翔, 许祥平, 刘兆龙, 等. 厚板 5083 铝合金 MIG 焊工艺与性能研究 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2024, 38(4): 36 – 42.
Gao Xiang, Xu Xiangping, Liu Zhaolong, *et al.* Research on MIG welding process and performance of thick plate 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 38(4): 36 – 42.
- [4] 远方方, 张华. 厚板 5083 铝合金搅拌摩擦焊接头沿厚度方向组织与力学性能 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 94 – 101.
Fang Yuanfang, Zhang Hua. Microstructure and mechanical properties for thick plate 5083 aluminum alloy friction stir welding joint along the thickness direction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 94 – 101.
- [5] 庞凌志, 陆泽鹏, 苏天, 等. Mg、Mn 成分优化对 5083 铝合金组织和性能的影响 [J]. 有色金属工程, 2023, 13(1): 57 – 65.
Pang Lingzhi, Lu Zepeng, Su Tian, *et al.* Effect of Mg and Mn composition optimization on microstructure and properties of 5083 aluminum alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 57 – 65.
- [6] 王华春, 韦孙飞, 何建贤, 等. Cr 含量对 5083 高镁铝合金组织和性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(3): 17 – 21.
Wang Huachun, Wei Sunfei, He Jianxian, *et al.* Effect of Cr content on microstructure and properties of 5083 aluminum alloy with high magnesium[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48(3): 17 – 21.
- [7] Tamasgavabari R, Ebrahimi A, Abbasi S M, *et al.* Effect of harmonic vibration during gas metal arc welding of AA-5083 aluminum alloy on the formation and distribution of intermetallic compounds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 49: 413 – 422.
- [8] Zhu C, Tang X, He Y, *et al.* Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 214 – 224.
- [9] 张欣萌, 高士康, 李高辉, 等. 6005A-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头疲劳性能分析 [J]. 焊接学报, 2023, 44(9): 30 – 36.
Zhang Xinmeng, Gao Shikang, Li Gaohui, *et al.* Study on the fatigue performance of bobbin tool friction stir welding of 6005A-T6 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(9): 30 – 36.
- [10] 尹玉环, 曾才有, 高焱, 等. 热处理对 2219 铝合金双频复合脉冲 TIG 焊接头组织演变及力学性能影响 [J]. 焊接学报, 2022, 43(4): 42 – 49.
Yin Yuhuan, Zeng Youcai, Gao Han, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure evolution and mechanical properties of 2219 aluminum alloy joint as fabricated by double-pulsed TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(4): 42 – 49.
- [11] 孙佳孝, 杨可, 王秋雨, 等. 5356 铝合金 TIG 电弧增材制造组织与力学性能 [J]. 金属学报, 2021, 57(5): 665 – 674.
Sun Jiaxiao, Yang Ke, Wang Qiuyu, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 5356 aluminum alloy fabricated by TIG arc additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(5): 665 – 674.
- [12] 毛晓东, 谷宁杰, 宋小雨, 等. 焊丝成分对 5E61 铝合金 TIG 焊接头组织和性能的影响 [J]. 焊接学报, 2022, 43(4): 86 – 93.
Mao Xiaodong, Gu Ningjie, Song Xiaoyu, *et al.* Effect of welding wire composition on microstructure and properties of 5E61 aluminum alloy TIG welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(4): 86 – 93.
- [13] Huang Yong, Wang Boyang, Guo Jianhang, *et al.* The effect of activating fluxes on the cathode spots in the activating TIG welding[J]. China Welding, 2023, 32(1): 7 – 17.
- [14] Ding Yusheng, Gao Kunyuan, Guo Shanshan, *et al.* The recrystallization behavior of Al-Mg-0.4Mn-0.15Zr-xSc (x = 0.04-0.10 wt%) alloys[J]. Materials Characterization, 2019, 147: 262 – 270.
- [15] Wu Hao, Wen Shengping, Huang Hui, *et al.* A study of precipitation strengthening and recrystallization behavior in dilute Al-Er-Hf-Zr alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 639: 307 – 313.
- [16] Deng Y, Peng B, Xu G F, *et al.* Effects of Sc and Zr on mechanical property and microstructure of tungsten inert gas and friction stir welded aerospace high strength Al-Zn-Mg alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 639: 500 – 513.
- [17] 苟国庆, 黄楠, 陈辉, 等. 高速列车 A7N01S-T5 铝合金焊接接头盐雾腐蚀行为分析 [J]. 焊接学报, 2011, 32(10): 17 – 20.
Gou Guoqing, Huang Nan, Chen Hui, *et al.* Analysis on corrosion behavior of welded joint of A7N01S-T5 aluminum alloy for high-speed train[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 17 – 20.
- [18] 孟立春, 康旭, 孙延军, 等. 7N01 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能 [J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 90 – 92.
Meng Lichun, Kang Xu, Sun Yanjun, *et al.* Mechanical properties of 7N01 aluminum friction stir welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(2): 90 – 92.
- [19] 苏丹, 张嘉艺, 王维, 等. Sc、Zr 微合金化对 5356 铝合金焊材组织及焊接性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(19): 11 – 16.
Su Dan, Zhang Jiayi, Wang Wei, *et al.* Effects of Sc, Zr microalloying on microstructure and weldability of 5356 aluminium alloy welding material[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(19): 11 – 16.
- [20] 吴浩, 郑志凯, 任思蒙, 等. 微量 Er 和 Zr 对 Al-Mg 合金再结晶

- 行为和焊接性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 289 – 297.
- Wu Hao, Zheng Zhikai, Ren Simeng, *et al.* Effects of Er and Zr micro-additions on recrystallization behavior and welding properties of Al-Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 289 – 297.
- [21] Li B, Pan Q L, Chen C P, *et al.* Effect of aging time on precipitation behavior, mechanical and corrosion properties of a novel Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(9): 2263 – 2275.
- [22] Lu J T, Huang H, Wu H, *et al.* Mechanical properties and corrosion behavior of a new RRA-treated Al-Zn-Mg-Cu-Er-Zr alloy[J]. Rare Metals, 2023, 42(2): 672 – 679.
- [23] Subbaiah K. Microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas welded joints of cast Al-Mg-Sc alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 16: 248 – 253.
- [24] Zhang W, Xing Y, Jia Z H, *et al.* Effect of minor Sc and Zr addition on microstructure and properties of ultra-high strength aluminum alloy[J]. Rare Metals, 2014, 24: 3866 – 3871.
- [25] Liu C Y, Zhang B, Ma Z Y, *et al.* Effects of pre-aging and minor Sc addition on the microstructure and mechanical properties of friction stir processed 7055 Al alloy[J]. Vacuum, 2018, 149: 106 – 113.

第一作者: 谷宁杰, 硕士; 主要从事铝合金材料开发、焊接技术及检测分析工作; Email: guningjie185@126.com.

通信作者: 毛晓东, 博士研究生, 高级工程师; Email: 18600180450@163.com.

(编辑: 刘启明)

[上接第 50 页]

- [15] 李梦楠, 韩红彪, 李世康, 等. 旋转电极接触力对电火花沉积放电过程参数和材料转移的影响 [J]. 焊接学报, 2023, 44(1): 71 – 77
- Li Mengnan, Han Hongbiao, Li Shikang, *et al.* Effect of rotating electrode contact force on discharge parameters and material transfer in electric-spark deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(1): 71 – 77.
- [16] 侯玉杰, 韩红彪, 杨鑫, 等. 电火花沉积的放电参数闭环控制系统研制 [J]. 焊接学报, 2023, 44(9): 53 – 59.
- Hou Yujie, Han Hongbiao, Yang Xin, *et al.* Development of a closed loop control system for discharge parameters of electro-spark deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(9): 53 – 59.
- [17] Lian Y, Cui M, Han A, *et al.* Multi-Criteria optimization of automatic electro-spark deposition TiCrNiVSi0.1 multi-principal element alloy coating on TC4 alloy[J]. Coatings, 2023, 13(1): 214.
- [18] Hou Y, Han H, Zheng G, *et al.* Effect of discharge parameters on electric-spark deposition material transfer[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part c-Journal of Mechanical Engineering Sciences, 2024(4): 1142 – 1148.
- [19] 韩红彪, 郭敬迪, 焦文清. 旋转电极电火花沉积/堆焊的放电机理 [J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 67 – 72.
- Han Hongbiao, Guo Jingdi, Jiao Wenqing. Discharge mechanism of electro-spark deposition with rotary electrode[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 67 – 72.

第一作者: 郑广振, 硕士研究生; 主要从事电火花沉积及表面工程的研究工作; Email: zgz12468@163.com.

通信作者: 韩红彪, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: lyhbb7157@163.com.

(编辑: 刘启明)