

引文格式: 田志杰, 孙宇明, 杜 晗, 等. 薄板5B70铝合金TIG焊接接头组织与性能[J]. 航空制造技术, 2025, 68(13): 72–76.

TIAN Zhijie, SUN Yuming, DU Han, et al. Microstructures and mechanical properties of thin sheet 5B70 aluminum alloy welded joints by TIG welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(13): 72–76.

薄板5B70铝合金TIG焊接接头组织与性能*

田志杰, 孙宇明, 杜 晗, 米海明, 郝双喜

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)

[摘要] 以牌号 5B71 焊丝为焊接填充材料, 采用钨极惰性气体保护焊(TIG)工艺, 对 1.5 mm 厚 5B70 合金板材进行焊接, 并对焊接接头力学性能和显微组织进行研究。结果表明, 采用合理的焊接参数, 可获得力学性能优良的焊接接头, 接头的抗拉强度达到 342~350 MPa, 接头强度系数为 0.82~0.84, 接头延伸率为 9.5%~13%; 焊缝区硬度为 87HV~93HV, 硬度值最小值位于焊缝熔合线附近, 硬度曲线呈双 V 型; 断口断裂截面呈 45° 剪切形态, 断口表现出韧窝和解理组织复合性质, 部分韧窝内发现强化相颗粒。焊接接头熔合线清晰, 焊缝区、熔合线、热影响区、母材区组织各异, 其中焊缝区呈现细化的等轴晶粒组织, 大小不均匀。

关键词: 5B70 铝合金; 钨极惰性气体保护焊(TIG); 焊缝; 焊接接头组织; 力学性能

中图分类号: V25; TG44

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.13.072

Microstructures and Mechanical Properties of Thin Sheet 5B70 Aluminum Alloy Welded Joints by TIG Welding

TIAN Zhijie, SUN Yuming, DU Han, MI Haiming, HAO Shuangxi

(Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] 5B70 aluminum alloy plates with a thickness of 1.5 mm were welded using tungsten inert gas (TIG) welding with 5B71 filler wire. The mechanical properties and microstructures of the welded joints were investigated. The results show that under appropriate welding parameters, joints with excellent mechanical properties could be achieved. The tensile strength reached 342–350 MPa, the joint strength coefficient was 0.82–0.84, and the elongation at fracture was 9.5%–13%. The weld hardness ranged from 87HV to 93HV, with the minimum hardness located near the fusion line. The hardness profile exhibited a double V-shape. The fracture surface displayed a 45° shear morphology, characterized by a mixed mode of dimples and cleavage facets, with strengthening phase particles observed within some dimples. The fusion line of the joint was distinct, and the microstructures differed across the weld zone, fusion line, heat-affected zone, and base metal. The weld zone consisted of refined equiaxed grains with nonuniform sizes.

Keywords: 5B70 aluminum alloy; Tungsten inert gas (TIG) welding; Weld; Welded joint microstructures; Mechanical properties

苏联学者最早开展含 Sc 铝合金的研制及工艺性能研究^[1], 并研究开发出牌号 1570 型 Al-Sc 合金。美国也将牌号 C557 铝镁钪合金应用在空天结构器中。我国研制的 5B70 合金是在 5A06 合金基础上添加 Sc 元素和 Zr 元素形成的新型铝镁钪合金。由于 Sc 和 Zr 的

晶粒细化、弥散强化和抑制再结晶作用, 5B70 合金板材的力学性能(如屈服强度、抗拉强度等)比 5A06 合金提高约 20%, 且保持了良好的耐蚀性、耐热性及焊接性能。国内外众多学者对此展开了持续研究, 尤其在俄罗斯、美国等国家的航天、航空及舰船等领域的焊接结构件应

* 基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2023903A001); 湖南省科技重大专项(2021GK10402)。

用方面,取得了显著成果^[2]。

Sc 元素对改善铝合金组织及性能有积极的作用,可细化组织,降低铝合金晶粒尺寸。组织内均匀析出的 Al_3Sc 粒子能产生沉淀强化,并与铝基体共格^[3-5],弥散分布的 Al_3Sc 难熔质点能钉扎位错,阻止合金再结晶,产生亚结构强化^[6-8]。用 Sc 元素合金化的铝镁钪合金,正逐步应用到我国新一代载人飞船、低温液体推进剂贮箱,以及深空探测器的主体结构中,在航空航天领域具有广阔的应用前景。

某型号产品计划采用 5B70 合金材料制造。鉴于对产品质量的严格要求,且该型号中分布着较多角接类零件和对接类零件,目前的工艺方案以手工钨极惰性气体保护焊(Tungsten inert gas, TIG)为基础,开展相关试验。本文从力学性能和微观组织层面研究薄板 5B70 焊接接头的拉伸性能,以及 Sc 元素对其焊接性能的影响,从而为铝镁钪合金焊接构件在航天领域的广泛应用提供理论基础和实践依据。

1 试验与方法

1.1 试验材料

试验材料采用东北轻合金有限责任公司生产的 5B70 铝合金,厚度为 1.5 mm。焊接前,采用化学表面处理方法进行试板表面清理,清洗介质为氢氧化钠,浓度为 100~200 g/L。表面处理完成后,用刮刀刮去试验板材表面氧化膜,使其露出金属光泽。焊丝采用手工 5B71 型号,直径为 $\Phi 3$ mm,5B70 铝合金及 5B71 焊丝具体成分如表 1 所示。

1.2 焊接设备及耗材

焊接设备采用 MILLER 公司生产的 350 型变极性焊接电源,其中钨极直径 $\Phi 3.0$ mm,陶瓷质保护罩直径 $\Phi 10$ mm,钨极伸出保护罩 3.5 mm,氩气纯度为 99.999%,保护气流量为 6~8 L/min。

1.3 焊接夹具及工装

采用铝基不锈钢垫板,不锈钢焊漏槽宽度为 8 mm,深度为 2.0 mm,压板为合金工具钢材质,垫板、试件、压板用弓形夹固定,装夹状态如图 1 所示。

1.4 焊接参数

焊接方法采用手工 TIG 焊,试验参数如表 2 所示。

表 1 5B70 铝合金和 5B71 焊丝的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 5B70 Al alloy and 5B71 filler wire (mass fraction) %

材料	Mg	Mn	Sc	Zr	Cu	Zn	Al
5B70	6.17	0.39	0.23	0.13	<0.05	<0.05	余量
5B71	5.8~6.8	0.3	0.3~0.4	0.05~0.15	<0.05	<0.05	余量

1.5 试验仪器

焊接完成后,使用线切割机沿垂直于焊缝方向从试板上截取 5 件拉伸试样,随后采用 AG-IS 型电子万能材料试验机测试拉伸力学性能,确定焊接接头的抗拉强度和强度系数;采用维氏显微硬度测试仪,沿焊接接头垂直焊道方向中心位置进行硬度测试,测量焊接接头各部位的硬度值,并分析其变化规律;采用光学显微镜观察焊缝成形及各区的晶粒形态;采用 FEI Sirion 扫描电子显微镜对断口进行显微分析,并确定断裂性质和第二相质点的分布;采用扫描电子显微镜和能谱仪对焊缝细晶区成分元素种类与含量进行分析。

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头外观形貌

采用合理的焊接参数,可获得成形优良的焊接接头。用卡尺测量焊缝,正面的宽度为 $7\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$,背面宽度为 $6\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 。焊缝成形均匀、饱满,未发现表面缺陷,焊缝正面阴极保护效果良好,雾化带完全覆盖焊缝区域。对焊接接头进行 X 射线无损检测,未发现内部缺陷,如图 2 所示。

2.2 拉伸试验结果分析

对 X 射线无损检测合格的焊接接头取样,室温下测试其抗拉强度 R_m 和延伸率 A 。

图 3 为接头拉伸试样拉断后的宏观照片。可以看出,焊接接头在有正面余高的情况下,均在靠近熔合线区域的热影响区位置发生断裂,断裂方向与拉应力方向呈 45° ,说明焊缝能够承受的断裂载荷高于热影响区。此外,在试样断裂位置处,沿焊缝方向有明显的缩颈现象。接头拉伸性能如图 4 所示,结果显示,焊接接头抗拉强度值为 342~350 MPa,接头延伸率为 9.5%~13%。母材



图 1 试件焊接工装及装配情况

Fig.1 Welding fixture and assembly setup of the test specimen

表 2 1.5 mm 铝合金 TIG 手工焊参数

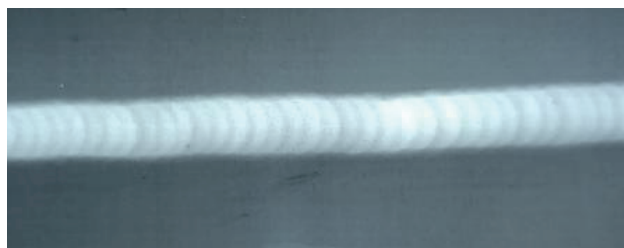
Table 2 TIG hand welding parameters of 1.5 mm Al alloy

电流/A	钨极直径/mm	保护气流量/(L/min)	速度/(mm/s)
55~65	3.0	6~8	2~3

抗拉强度值为 417 MPa, 接头强度系数为 0.82~0.84。板材和焊丝中 Sc 元素的加入, 使焊接熔池在凝固过程中析出含 Sc 的第二相粒子, 并起到非均匀形核质点的作用^[9-10]。由于 Sc 和 Zr 的电化学性质和原子半径相差较大, 二者在 Al-Mg 合金中固溶度极低^[11-13]。在焊缝中, Sc 和 Zr 以两种形式存在, 一部分形成少量固溶体, 另一部分在固溶后析出的细小弥散相 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子^[14-16]。这些弥散分布的 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子, 一方面通过钉扎位错和晶界抑制再结晶^[9, 12, 17]; 另一方面, 这些难熔质点作为熔池液体中异质形核所需的现成界面, 充当焊缝熔池形核点, 促使形成更细小的等轴晶, 进而细化焊缝区域的晶粒^[16-18]。这种微观结构的优化对提升焊缝强度和增强抗裂能力有积极作用。



(a) 外观形貌



(b) 无损检测底片

图2 焊接接头的外观形貌和无损检测底片

Fig.2 Appearance morphology of welded joint and non-destructive testing radiograph

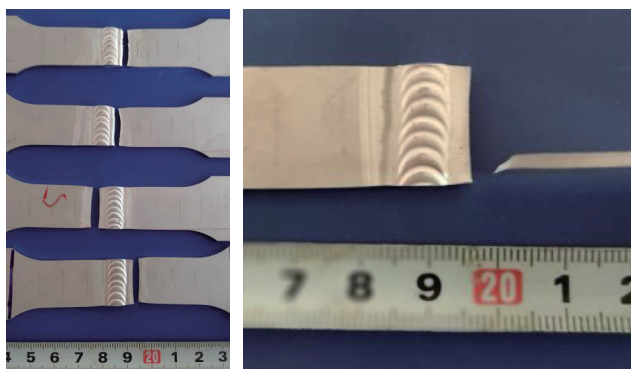


图3 拉伸断裂试样及断裂位置

Fig.3 Failed tensile samples and fracture position

2.3 接头硬度试验结果

2.3.1 焊缝截面

取试片横截面试样进行显微硬度与金相分析, 硬度测试范围为焊缝中心 ± 10 mm, 焊缝截面及硬度测量点分布如图 5 所示。

2.3.2 硬度结果分析

焊接接头各区域显微硬度的分布规律如图 6 所示。硬度值以焊缝中心为对称轴呈近似对称状态, 母材至焊缝区的过渡区域硬度值变化明显。焊缝中心的硬度值低, 距焊缝中心距离越远, 硬度值快速增大, 焊缝熔合区硬度值呈现“双波谷”现象^[15-16]。试验结果表明, 母材硬度值约为 115HV, 焊缝区硬度为 87HV~93HV, 焊缝主要由树枝晶及等轴晶组织构成, 所以硬度值较低。热影响区的组织发生部分晶粒再结晶及粗化现象, 呈现比母材硬度值偏小的现象, 最小值为焊缝中心两侧 3 mm 左右, 位于熔合线与热影响区的分界处。

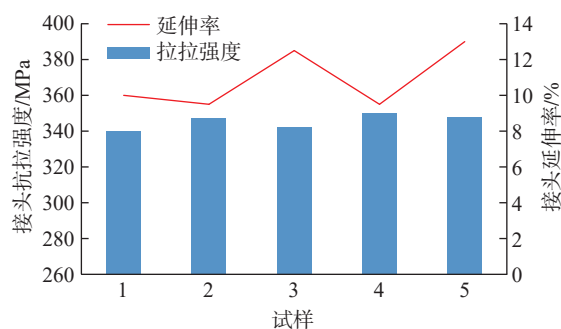


图4 接头力学性能

Fig.4 Mechanical properties of the welded joints



图5 焊接接头截面及硬度测量位置

Fig.5 Cross-section of the welded joint and hardness measurement positions

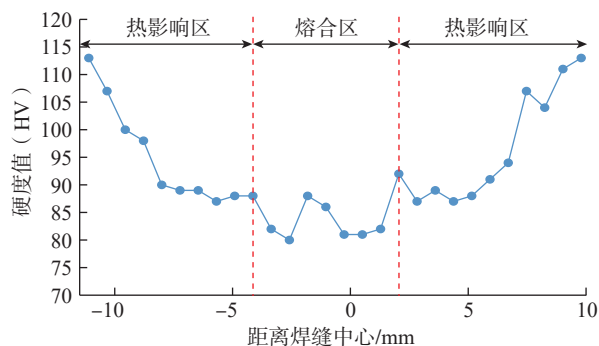


图6 焊接接头硬度值分布

Fig.6 Hardness values distribution of the welded joint

2.4 断口及显微组织

2.4.1 断口分析

图7为焊接试片断口形貌,断裂截面呈现45°剪切断裂形态。从拉伸试件的宏观断口可以看出,断裂面上有细小的凹凸,呈纤维状。由于试件厚度为1.5 mm,在断面厚度方向未发现明显的剪切唇。启裂处位于熔合线,断口平齐,呈“结晶状”,但是断面存在明显的撕裂棱,属于典型的韧窝组织,低熔点共晶表面光滑圆润,部分韧窝发现强化相颗粒,因此可以确定该断口属于切断型塑性韧窝断口。整个断面为韧性及解理复合型断裂。

2.4.2 组织分析

图8为焊缝内部组织。可以看出,焊接接头熔合线清晰,焊缝区、熔合线、热影响区、母材区组织各异。焊缝主要由等轴晶组成,呈铸造组织形态,相比于母材的细长轧延纤维状晶粒,焊缝晶粒短粗且无取向。熔合线处的组织经过演变,变得更加细小致密,热影响区晶粒尺寸未发生明显的生长。

相比于焊缝组织,熔合线区的等轴晶组织更加细小,这是由于在焊接热量作用下,Sc元素的加入使联生结晶形成的晶粒在生长过程中发生畸变,有效抑制了柱状晶的生长趋势,枝晶数量减少。此外,Sc与Al形成的第二相粒子,其晶格类型及尺寸与基体相似,所以在熔合线区出现细小等轴晶层^[3,13,19]。

热影响区范围很窄,熔点为1300℃的含Sc第二相粒子以对位错钉扎的形式形成亚结构,这种回复后的亚晶组织,提高了再结晶温度,抑制了合金的再结晶。焊

接过程熔池传导过来的热量使粒子发生部分回溶现象,所以热影响区部分晶粒发生再结晶及粗化现象^[9,19-20]。

取焊缝组织区域进行EDS分析,能谱测试结果中包含析出相和焊缝晶粒基体,表3为细晶区位置各元素含量,富含O、Mg、Al、Sc、Mn、Cu等。Sc的化学性质活泼,零件熔化过程中,Sc会剧烈氧化,因此成分中测量到O元素。与母材元素相比,Mn含量减少,Cu含量增加。Sc的含量高于母材,是母材的1.7倍。随着Sc含量的增加,晶粒细化程度愈高。

焊接时,熔池冷却速度快,结晶速度也快,一般情况下,焊缝晶粒多表现为枝晶组成的铸造组织。采用低速焊接及缓冷方式后,5B70材料TIG焊缝区晶粒以等轴晶分布为主,晶粒尺寸约40 μm,同时局部区域存在10~20 μm的晶粒,这是由于Sc和Zr元素对晶粒细化有一定改善。晶界处共晶呈短条状分布,晶粒内部存在弥散相,以“豆状”“柱状”状析出,弥散度较高,弥散相长度较小,约1 μm^[6,10,13]。焊缝凝固过程中,弥散析出含Sc的微米级强化相粒子,使焊缝合金具备了较显著的析出强化性能,这些Al₃(Sc, Zr)粒子弥散在α(Al)固溶体基体上,部分区域内出现光滑的三角晶界^[5,20],焊缝的强度得到提高。

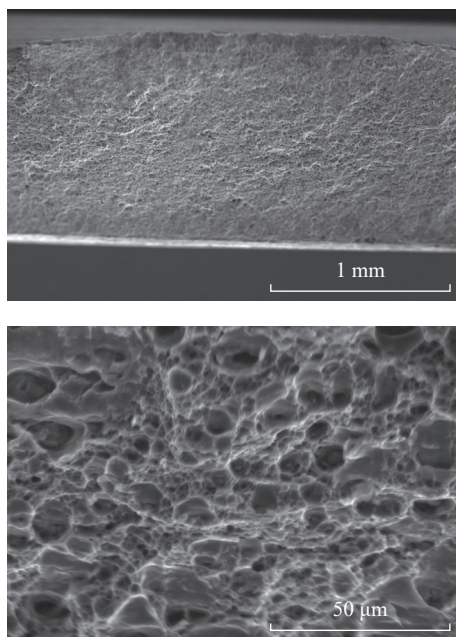


图7 焊接接头断口SEM形貌

Fig.7 SEM morphology of the fracture surface of the welded joint

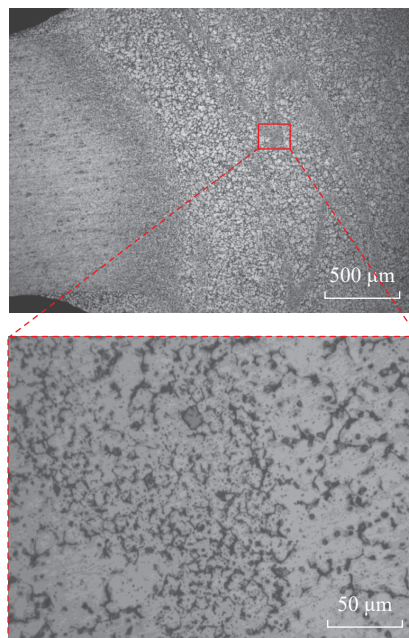


图8 焊缝微观组织

Fig.8 Microstructure of the weld

表3 EDS测试结果(质量分数)

Table 3 Results of EDS test (mass fraction)

%

O	Mg	Al	Sc	Mn	Cu
0.46	5.58	93.11	0.39	0.21	0.25

3 结论

(1) 采用合理的焊接参数,可获得成形优良的焊接接头,焊缝正面宽度尺寸为 $7\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$,焊缝背面宽度尺寸为 $6\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$,成形均匀一致,焊缝内部质量未发现缺陷。

(2) 5B70 手工对接 TIG 焊接试片拉伸结果表明,焊接接头抗拉强度值为 $342\sim 350\text{ MPa}$,接头延伸率为 $9.5\%\sim 13\%$,接头强度系数为 $0.82\sim 0.84$,焊缝能够抵抗断裂的载荷高于热影响区。

(3) 5B70 手工对接 TIG 焊接接头硬度结果表明,焊缝区硬度为 $87\text{HV}\sim 93\text{HV}$,母材至焊缝区硬度值逐渐降低,数值变化明显,硬度值最小值为焊缝熔合线附近。

(4) 断口位置在热影响区,断裂截面为 45° 剪切断裂,板材厚度方向未发现明显的剪切唇,但是断面存在明显的撕裂棱,低熔点共晶表面光滑圆润,部分韧窝发现强化相颗粒,显示为韧性和解理复合型断裂。

(5) 焊缝内部组织显示,焊接接头焊缝区、熔合线、热影响区、母材区组织各异,Sc 和 Zr 元素对晶粒细化有一定改善作用,其中焊缝区晶粒组织大小不均匀,广泛存在 $10\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 的晶粒,同时存在一定数量 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 的晶粒。

参考文献

- [1] 陶辉锦,李绍唐,刘记立,等. Sc在铝合金中的微合金化作用机理[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13(5): 249–259.
- [2] TAO Huijin, LI Shaotang, LIU Jili, et al. Micro-alloying mechanism of Sc in aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2008, 13(5): 249–259.
- [3] 魏华凯,胡芳友,管仁国. Al–Mg–Sc 合金的组织 and 性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(11): 739–741, 679.
- [4] WEI Huakai, HU Fangyou, GUAN Renguo. Microstructure and properties of Al–Mg–Sc alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(11): 739–741, 679.
- [5] 苏志强,刘娟,李延民,等. 5B70 铝合金变极性等离子焊接接头组织与性能的研究[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2014(4): 12–16.
- [6] SU Zhiqiang, LIU Juan, LI Yanmin, et al. Microstructures and mechanical properties of Al–Mg–Sc alloy 5B70 welded joints by variable polarity plasma arc welding[J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2014(4): 12–16.
- [7] 苏志强,张玉芝,田志杰,等. 5B70 铝镁钎合金搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. 焊接技术, 2017, 46(11): 32–35.
- [8] SU Zhiqiang, ZHANG Yuzhi, TIAN Zhijie, et al. Microstructures and mechanical properties of Al–Mg–Sc alloy 5B70 welded joint by friction stir welding[J]. Welding Technology, 2017, 46(11): 32–35.
- [9] XU P, JIANG F, MENG S, et al. Microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Sc–Zr alloy variable polarity plasma arc welding joint[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(9): 4783–4790.
- [10] BURANOVA Y, KULITSKIY V, PETERLECHNER M, et al. $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ -based precipitates in Al–Mg alloy: Effect of severe

deformation[J]. Acta Materialia, 2017, 124: 210–224.

- [7] XU P, JIANG F, TANG Z Q, et al. Coarsening of Al_3Sc precipitates in Al–Mg–Sc alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 209–215.
- [8] ALLIPUDI S R, NALLU R. Effect of scandium and zirconium additions on mechanical properties of Al–Mg–Mn alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(1): 227–238.
- [9] MUÑOZ A C, RÜCKERT G, HUNEAU B, et al. Comparison of TIG welded and friction stir welded Al–4.5Mg–0.26Sc alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1–3): 337–343.
- [10] MOGUCHEVA A, YUZBEKOVA D, KAIBYSHEV R, et al. Effect of grain refinement on jerky flow in an Al–Mg–Sc alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(5): 2093–2106.
- [11] TAENDL J, POLETTI C. Influence of $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ precipitates on deformability and friction stir welding behavior of Al–Mg–Sc–Zr alloys[J]. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2016, 161(7): 330–333.
- [12] CHEN J Q, LI S C, CONG H L, et al. Microstructure and mechanical behavior of friction stir-welded Sc-modified Al–Zn–Mg alloys made using different base metal tempers[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2): 916–925.
- [13] ZHAO J, JIANG F, JIAN H G, et al. Comparative investigation of tungsten inert gas and friction stir welding characteristics of Al–Mg–Sc alloy plates[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 306–311.
- [14] SUN F F, NASH G L, LI Q Y, et al. Effect of Sc and Zr additions on microstructures and corrosion behavior of Al–Cu–Mg–Sc–Zr alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(9): 1015–1022.
- [15] MALOPHEYEV S, MIRONOV S, KULITSKIY V, et al. Friction-stir welding of ultra-fine grained sheets of Al–Mg–Sc–Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 624: 132–139.
- [16] PENG Y Y, YIN Z M, LEI X F, et al. Microstructure and properties of friction stir welded joints of Al–Mg–Sc alloy plates[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(2): 201–205.
- [17] 陈显明,潘清林,范莹莹. Al–Mg–Sc–Ti 合金中 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Ti}_{1-x})$ 粒子的析出行为[J]. 材料研究学报, 2020, 34(10): 737–743.
- [18] CHEN Xianming, PAN Qinglin, FAN Yingying. Precipitation of $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Ti}_{1-x})$ particles in Al–Mg–Sc–Ti alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2020, 34(10): 737–743.
- [19] 周巍,姜锋,赖松柏,等. 不同应变速率下 5B70 铝合金的拉伸断口分析[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 231–234.
- [20] ZHOU Wei, JIANG Feng, LAI Songbai, et al. Tensile fracture analysis of 5B70 aluminum alloy under different strain rates[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(3): 231–234.
- [21] JIANG J Y, JIANG F, ZHANG M H. Microstructure evolution and mechanical properties of Al–Mg–Sc–Zr alloy sheet after friction stir welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(6): 1687–1700.
- [22] VIGNESHWARAN S, SIVAPRASAD K, NARAYANASAMY R, et al. Microstructure and mechanical properties of Al–3Mg–0.25 Sc alloy sheets produced by cryorolling[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 740: 49–62.

通信作者: 田志杰, 研究员, 研究方向为运载器研制、先进焊接技术及工程应用。

(责编 七七)