

Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr 合金板材 MIG 焊接接头的显微组织和性能

王海彬

(东北轻合金有限责任公司, 哈尔滨 150060)

摘要: 对一种 4 mm 厚 Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr 合金退火态板材进行 MIG 焊接, 并研究焊接接头的显微组织、力学性能和耐腐蚀性能。结果表明, 焊缝中心为枝晶组织, 熔合线附近为柱状晶而且存在一层细晶组织, 焊缝中的主要析出相为 Al_6Mn 。焊缝区和焊接热影响区的硬度均低于母材, 焊缝中心硬度值最低为 70.8~72.5 HV。焊接接头的抗拉强度为 322 MPa, 焊接强度系数为 0.9, 焊接性能良好。焊接接头的剥落腐蚀等级为 PB 级, 晶间腐蚀值为 4.6~4.7 mg/cm², 与母材耐蚀性能相当, 具有良好的耐腐蚀性能。

关键词: Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr 合金; MIG 焊接; 显微组织; 力学性能; 腐蚀性能

中图分类号: TG146.21, TG339

文献标识码: A

文章编号: 1005-4898 (2022) 03-0069-05

doi: 10.3969/j.issn.1005-4898.2022.03.16

0 前言

Al-Mg-Mn 合金因具有质轻、比强度高、成形性好、中强可焊、耐腐蚀性能好等优点而被广泛应用于大型舰船的上层结构和舾装件中^[1-2]。考虑到船体结构承载及腐蚀环境这两个主要因素, 铝镁锰合金是最基本的船用焊接结构材料^[3-4]。而船舶用材料的焊接在提高船舶性能、减重等方面起着决定性的作用。船舶用铝合金的焊接方法较多, 如 MIG、TIG、FSW 焊接等。经过几十年的发展, MIG 焊在焊接设备、焊接工艺等各方面都日趋成熟, 是目前船舶焊接铝合金中用得最多的一种焊接方法, 国内外 90% 以上的铝合金焊接采用 MIG 焊^[5]。

为进一步提高船用铝镁锰系合金的强度, 本文针对一种 Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr 合金退火态板材开展 MIG 焊接实验, 并对焊后板材的接头组织、力学性能及耐腐蚀性能开展研究工作, 旨在开发出能够兼顾耐蚀性能和强度性能的焊接用铝合金材料。

1 实验方法

焊接实验用板材为经过 320 °C/2 h 退火处理后

的退火态板材, 其规格为 4 mm × 150 mm × 300 mm, 化学成分如表 1 所示。采用与母材成分相同的合金焊丝进行焊接, 焊丝直径为 1.6 mm。MIG 焊接主要焊接参数为: 保护气体 99.999%Ar, 流量 20 L/min, 单脉冲 90A, 0.75 m/min。焊接时试板不开坡口、对接间隙 1~2 mm, 采用单道次焊接, 单面焊接双面成形, 焊接前用钢丝刷去除待焊接区域的氧化膜。MIG 焊接设备为 Fornius TPS 5000 型焊机。

表 1 实验合金板材化学成分 (质量分数/%)

Si	Fe	Mg	Mn	Zr	Al
0.06	0.16	6.01	0.90	0.12	余量

焊接后以焊缝为中心垂直于焊缝对称截取组织观察试样、拉伸性能检测试样、硬度测试试样以及剥落腐蚀和晶间腐蚀试样。采用 HW187.5 型维氏显微硬度计进行焊接接头不同区域的硬度测试, 硬度载荷为 100 kg, 每隔 1 mm 测一个硬度值, 从一侧的基材区一直测到另一侧的基材区域。在 WDW-100A 型电子拉伸试样机上进行拉伸试验, 测试焊接接头的拉伸力学性能。采用型号为 Sirion200 的扫描电子显微镜 (带能谱仪) 进行第二

作者简介: 王海彬 (1981-), 男, 内蒙古人, 高级工程师, 主要从事变形铝及铝合金加工研究。

收稿日期: 2021-12-20

相粒子形貌及分布等分析。按照 ASTM G66 标准对焊后板材进行剥落腐蚀性能检测,按照 ASTM G67 标准对焊后板材进行晶间腐蚀性能检测。

2 试验结果与讨论

2.1 拉伸性能

Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr 合金板材及其 MIG 焊接接头的拉伸力学性能如表 2 所示。

表 2 试验板材及其 MIG 焊接接头的拉伸力学性能

材料	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	焊接强度系数
母材	356	161	24.8	—
MIG 焊接头	322	117	10.4	0.90

从表 2 中可以看出,板材经过 MIG 焊接后其接头强度和延伸率与基材相比均有所下降。通常用焊接强度系数来评价焊接性能的优劣,由于焊接接头的性能一般低于母材,通常情况下,焊接强度系数的值介于 0 和 1 之间,焊接强度系数值越大,代表该接头的焊接性能越好。本试验采用 MIG 焊接的接头强度系数为 0.90。

2.2 显微硬度

图 1 所示为 Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr 合金板材 MIG 焊接接头距焊缝中心不同距离处的硬度分布曲线。

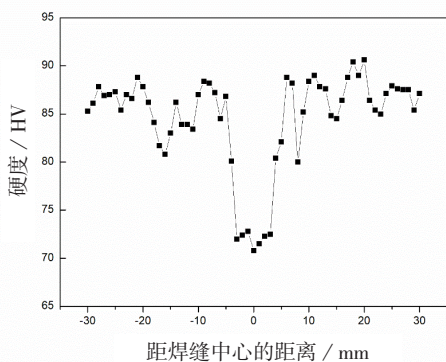


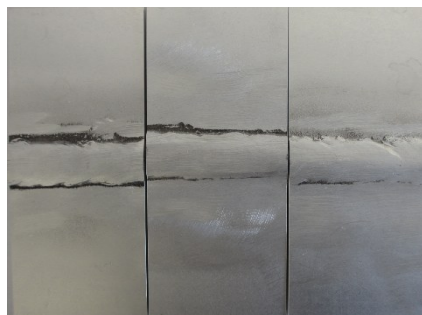
图 1 试验板材 MIG 焊接接头硬度分布

从图 1 可以看到,焊接接头显微硬度以焊缝为中心呈近似对称分布。其中,焊缝中心的硬度最低,为 70.8~72.5 HV,低于母材硬度,这是由于焊丝中的 Mg 元素在焊接过程中发生烧损减弱了 Mg 的固溶强化效果所致。距焊缝中心 5 mm 的热影响区处的硬度低于母材,其原因在于焊接过程中热影响区的组织发生了再结晶粗化,也出现了接头软化现

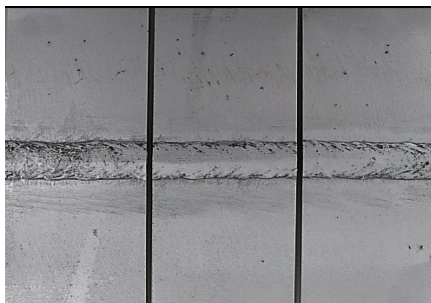
象。但与可热处理强化铝合金焊接接头相比,其接头软化现象不明显^[6-7]。距离焊缝中心越远,硬度值越大,直至到达母材区域,硬度为 83~88.8 HV。这是因为距离焊缝中心越远,受焊接热影响造成的软化程度也越小。总体说来,焊接接头的硬度值波动较小,硬度在 70.8~88.8 HV 范围内。

2.3 耐腐蚀性能

按照 ASTM G66 标准检测板材焊接接头的剥落腐蚀,剥落腐蚀前后的试样宏观形貌如图 2 所示。



(a) 腐蚀前



(b) 腐蚀后

图 2 焊接接头的剥落腐蚀宏观形貌

从图 2 可以看到,焊接接头经过剥落腐蚀后,其焊接区与母材区均没有出现严重的剥落腐蚀现象,仅出现零散的点蚀坑,腐蚀等级可评为 PB 级。

按照 ASTM G67 要求对焊接接头进行晶间腐蚀试验。对焊接接头试样进行酸、碱处理后在 70%~72% 的硝酸溶液中放置 24 h,然后将试样清洗称重,计算单位面积内的重量损失,测试结果见表 3。

表 3 焊接接头晶间腐蚀结果

试样号	表面积 /cm ²	腐蚀前重量/g	腐蚀后重量/g	重量损失/g	腐蚀速率 / (mg·cm ⁻²)
1	10.38	3.0964	3.0488	0.0476	4.6
2	10.34	3.0833	3.0362	0.0471	4.6
3	10.31	3.0635	3.0149	0.0486	4.7

已有研究表明^[8], Al-Mg 合金的耐蚀性能主要

取决于组织中 β (Al_2Mg_3) 相的分布状态和数量, 如果析出的 β (Al_2Mg_3) 相呈连续分布, 会大大降低合金的耐腐蚀性能。因此, 在高镁船用Al-Mg合金生产中, 保证合金组织中没有连续分布的 β (Al_2Mg_3) 相、控制 β (Al_2Mg_3) 相均匀分布是关键控制点之一。本试验采用的板材是经过320 °C稳定化退火处理后的板材, 大部分Mg元素以固溶的形式存在, 其焊缝金属在焊接过程中重熔并在急冷条件下形成铸态组织, 且组织中均不存在连续分布的

β (Al_2Mg_3) 相 (见图4和图5)。因此, 实验板材焊接接头具有较好的耐剥落腐蚀和耐晶间腐蚀性。

2.4 显微组织

图3为试验合金板材焊缝的金相组织形貌。

由图3可见, 焊缝中心区域为晶粒较粗大的枝晶组织 (见图3 (a))。这是由于焊接过程中熔池内各区域的冷却速度和溶质浓度不同以及温度与成分的不均匀性导致了焊缝区内形成粗晶组织。在熔

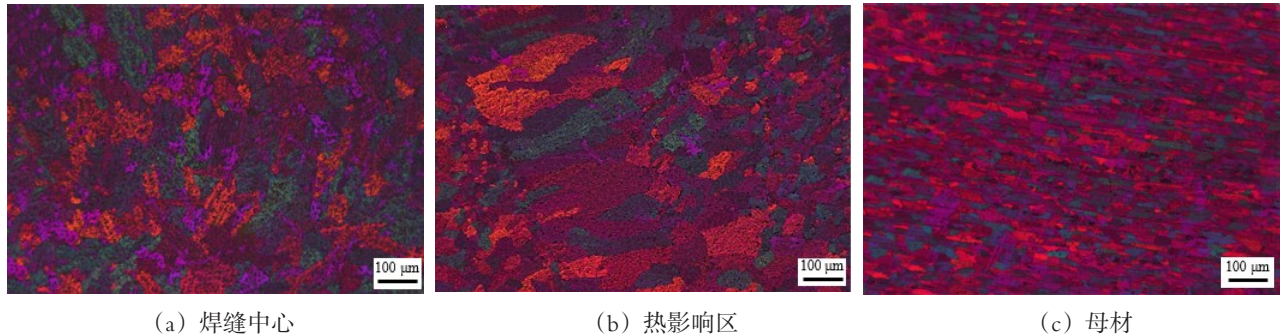


图3 焊接接头金相组织

合线附近靠近焊缝一侧存在大量粗大的柱状晶组织, 在母材一侧靠近柱状晶区有一层较细小的等轴细晶区 (见图3 (b))。这是由于焊接时金属液呈过热状态使附近母材融化, 在靠近母材部分, 熔体温度相对较低, 母材中 Al_6Mn 、 Al_6 (FeMn) 等第二相粒子成为非均质形核的核心, 形成了一层类似激冷层的细晶层; 在远离母材一侧的熔体温度较高, 熔体的大部分热量通过细晶层再经母材向外扩散, 散热的方向性增强。由于垂直母材横截面方向散热最快, 细晶层中主轴与其垂直的枝晶就优先长大, 并且可能超越取向不利的相邻晶粒长大, 形成较粗大的柱状晶组织^[9]。图3 (c) 为焊接用母材的组织, 为扁长形的再结晶组织。图4为焊缝的SEM形貌观察结果。

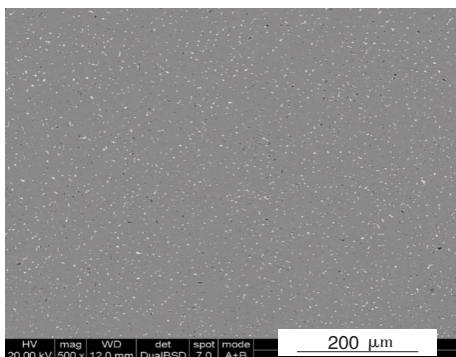


图4 焊缝区SEM形貌

由图4可以看到, 焊缝区的组织中存在大量白色形状不规则的第二相粒子。对组织中的第二相粒子进行能谱分析, 其结果见图5。

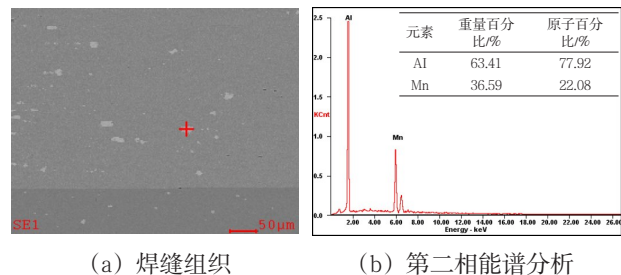


图5 焊缝组织中的第二相及能谱分析

图5为焊缝组织中的第二相及第二相的能谱分析, 通过能谱分析可以确定组织中的白色第二相粒子主要是由Al和Mn两种元素组成的 Al_6Mn 相。焊缝组织中弥散分布的 Al_6Mn 相对焊缝起到第二相强化的作用 (图5 (a))。在焊缝的扫描组织中没有观察到 β 相 (Al_2Mg_3)。由于焊缝是在焊接热的影响下形成的铸态重熔组织, 在焊接过程中一部分Mg元素发生烧损, 其余的Mg元素主要以固溶的形式存在于焊缝组织中, 焊缝组织中没有形成 Al_2Mg_3 相 (见图5 (b))。焊缝组织中不存在连续分布的 Al_2Mg_3 相, 这也是焊接接头具有较好的耐剥落腐蚀和耐晶间腐蚀的原因。

3 结论

(1) 采用 MIG 焊接的 Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr 合金退火态板材具有较好的焊接性能, 焊接接头的抗拉强度为 322 MPa, 焊接强度系数达到 0.9。

(2) 焊接接头具有优异的耐剥落腐蚀和耐晶间腐蚀性能, 剥落腐蚀为 PB 级, 晶间腐蚀结果为 4.6~4.7 mg/cm²。

(3) 焊缝中心为枝晶组织, 熔合线附近为柱状晶而且存在一层细晶组织, 焊缝中的主要析出相为 Al₆Mn。

参考文献

- [1] POLMEAR I J. Light Alloys [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005: 97-204.
- [2] 路丽英. 稳定化退火温度对 Al-6Mg-0.3Mn-0.13Sc-0.13Zr 合金板材组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47 (8): 61-65.
- [3] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent

Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280 (1): 37-49.

- [4] DURSUN T, SOUTIS C. Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [5] 蹇海根, 王业东, 杨孝梅, 等. 铝镁合金焊接接头组织与力学性能的不均匀性研究[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34 (1): 92-97.
- [6] 罗传孝, 王少刚, 翟伟国. 轨道交通用 6082 铝合金焊接接头组织与性能[J]. 电焊机, 2011, 41 (11): 68-72.
- [7] Shigematsu I, Kwon Y J, Suzuki K, et al. Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding[J]. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22 (5): 353-356.
- [8] 李念奎. 船用铝合金的耐腐蚀性能 (1) [J]. 轻金属, 1994 (10): 41-47.
- [9] 陈苏里, 姜锋, 尹志民, 等. 含钕与不含钕铝镁钕合金焊接接头的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16 (5): 835-840.

Microstructure and properties of MIG welding joint of Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr alloy sheet

Wang Haibin

(Northeast Light Alloy Co., Ltd., Harbin 150060, China)

Abstract: The Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr alloy annealed sheet was welded by MIG welding, and the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of the welded joint were studied. The results show that the center of the weld is dendrite structure, columnar crystal near the fusion line and there is a layer of fine crystal structure. The main precipitated phase in the weld is Al₆Mn. The hardness of the weld zone and heat affected zone is lower than that of the base metal, and the minimum hardness value of the weld center is 70.8~72.5HV. The tensile strength of the welded joint is 322 MPa, and the welding strength coefficient is 0.9 %, with good welding performance. The exfoliation corrosion grade of the welded joint is PB grade, and the intergranular corrosion value is 4.6~4.7 mg/cm², which is equivalent to the corrosion resistance of the base metal and has good corrosion resistance.

Key words: Al-6Mg-0.9Mn-0.12Zr alloy; MIG welding; microstructure; mechanical properties; corrosion performance

铝合金异质形核机理新认识与晶种新技术获重要突破

近日, 山东大学刘相法教授团队与南京理工大学等单位开展联合研究, 通过十多年的系统研究, 终于在 TiCx 对 α-Al 形核机理与掺杂型晶种应用研究方面取得了双突破。这一重要突破不仅从根本上破解了 Zr 致细化“中毒”堵点, 而且彻底消除了 Si 致细化“中毒”难题。为超高强变形铝合金和高端铸造铝合金及其加工技术的发展提供了有效“抓手”。相关技术获授权国家发明专利 8 项, 申请国际发明专利 1 项, 主持制定国家团体标准 1 项, 注册商标权 1 件; 获山东省技术发明一等奖 1 项。创新产品及应用技术在上市较短时间内, 已在国内外 60 余家先进铝加工企业推广应用, 其中包括多家行业领先的国际公司。