

SAI 5183 船用铝合金焊丝工艺焊接性及接头力学性能研究

刘春辉¹, 许立宝², 张振喆², 胡铭汇³, 郑文健³, 杨建国³

(1.中国船级社天津分社, 天津 300457; 2.天津市金桥焊材集团股份有限公司, 天津 300300; 3.浙江工业大学 机械工程学院, 杭州 310023)

摘要:本文以 SAI 5183 新型号船用铝合金焊丝为研究对象, 采用 TIG/MIG 焊接技术对 5083-H116 铝合金分别进行立向上焊、仰焊、平焊以研究该型号焊丝的焊接性能。研究内容包括熔敷金属性能测试、化学成分分析、焊接接头力学性能测试、微观组织分析等。结果显示, 该焊丝熔敷金属抗拉强度达到 291 MPa、延伸率 30%, 其化学成分也均满足 CCS 材料与焊接规范要求。接头拉伸测试表明 MIG 焊接接头的抗拉强度略高于 TIG 焊接接头, 相同焊接技术下立向上焊、仰焊、平焊三种焊接接头力学性能接近且抗拉强度均达到母材抗拉强度的 90%。显微组织检测结果显示, 在不同焊接工艺下焊缝区均观察到了白色弥散相 $Al_6(Fe, Mn)$ 化合物, 其中, 采用 MIG 立向上焊和平焊焊接工艺时, 焊接接头内析出相体积尺寸相对更大, 弥散强化效果更好; 此外, 焊缝区域也观察到了 Mg 元素固溶强化效果, 其中, 采用 MIG 立向上焊、TIG 立向上焊和 TIG 仰焊焊接工艺时, 接头内 Mg 元素分布更加均匀, 固溶强化效果更好; 上述两种强化效果保证了焊接接头良好的抗拉强度。

关键词: SAI 5183 铝合金焊丝; 焊接; 力学性能; 5083-H116 铝合金

中图分类号: **文献标识码:**

Research on the welding process and mechanical properties of joints of SAI 5183 marine aluminum alloy welding wire

LIU Chunhui¹, XU Libao², ZHANG Zhenzhe², HU Minghui³, ZHENG Wengjian³, YANG Jianguo³

(1. Tianjin Branch of China Classification Society, Tianjin 300457, China; 2. China Classification Society, Beijing 100007, China; 3. Tianjin Golden Bridge Welding Materials Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China; Zhejiang University of Technology Mechanical Engineering College, Hangzhou 310023, China)

Abstract: This article takes the SAI 5183 new model marine aluminum alloy welding wire as the research object, using TIG/MIG welding technology to conduct vertical upward welding, overhead welding, and flat welding on 5083-H116 aluminum alloy to study the welding performance of this model of welding wire. The research includes tests on the properties of the deposited metal, chemical composition analysis, mechanical performance testing of the welded joints, and microstructural analysis. The results indicate that the tensile strength of the deposited metal reaches 291 MPa with an elongation of 30%, and its chemical composition meets the requirements of CCS material and welding specifications. Tensile tests on the joints show that the tensile strength of the MIG welded joints is slightly higher than that of the TIG welded joints, while the mechanical properties of the vertical up, overhead, and flat welded joints under the same welding technique are similar, with tensile strengths reaching 90% of the base material's tensile strength. Microstructural examination reveals the presence of white dispersed phase $Al_6(Fe, Mn)$ compounds in the weld zone under different welding processes. Notably, when using MIG flat welding and vertical up welding processes, the size of precipitate phase in the welded joints is relatively larger, resulting in better dispersion strengthening effects. Additionally, the weld zone exhibits the solid solution strengthening effect of Mg elements, with a more uniform distribution of Mg in the joints produced by MIG vertical up welding, TIG vertical up welding, and TIG overhead welding, leading to enhanced solid solution strengthening effects. These two strengthening effects ensure the welded joints possess good tensile strength.

Keywords: SAI 5183 aluminum alloy welding wire; welding; mechanical properties; 5083-H116 aluminum alloy

铝合金由于具有比强度高、密度低、耐腐蚀性能好等优势^{[1]-[2][5]}, 能大幅降低船体质量, 提高船舶能源利用效率, 以铝代钢将铝合金作为结构材料成为未来船舶制造的必然趋势^[6]。然而, 如何实现铝合金材料的高质量焊接是其应用于船舶制造所需重点考虑的问题。与钢材相比, 铝合金材料对焊接的要求更高, 即使是相对容易焊接的 Al-Mg 系铝合金, 也很容易出现焊接质量问题。

MIG 焊(熔化极惰性气体保护电弧焊)、TIG 焊(钨极惰性气体保护电弧焊)凭借生产效率高、工艺适

用性强、焊接耗材成本较低等优势在船舶连接领域应用广泛^{[7][8]-[9][10]}。许良红^[11]等人对 20 mm 厚的高强铝合金进行 MIG 对焊接, 发现接头的抗拉强度只有母材的 60%。李小欣^[12]等人采用合金元素含量不同的三种 ER5183 焊丝作为填充金属, 对 5083 铝合金进行 MIG 焊, 发现焊缝区组织比母材区致密, 晶粒细小、均匀, 随着 Mg 含量增加, $\beta(Al_3Mg_2)$ 相析出增加, 焊缝的抗拉强度增大, 可达母材抗拉强度的 85% 以上。张蜜^[13]等人采用两种焊丝焊接 1.6 mm 的 6061 铝合金试板, 结果表明采用 5 系焊丝的焊接

收稿日期:

作者简介: 刘春辉, 男, 硕士, 工程师, 主要从事船舶与海洋工程用材料和设备的审图和检验工作。

接头的力学性能更佳。王晋^[14]等人采用4种铝合金焊丝进行电弧增材制造,结果显示ER5356的焊丝更适合电弧增材制造铝合金构件。综上所述焊丝的质量对焊接接头的性能有很大的影响,焊丝选择不当会导致接头中氧化膜、氢气孔的生成,同时出现接头变形大、软化严重、强度低等问题。

本文计划采用某SAI 5183新型号船用铝合金焊丝,母材为5083-H116铝合金,分别选用平焊、立向上焊、仰焊这三种常用的焊接方式,运用MIG焊和TIG焊进行实验,以探究该焊丝的焊接性。主要涵盖其力学性能、微观组织以及熔敷金属成分分析等方面。本研究旨在研究新型SAI 5183船用铝合金

焊丝的焊接性能,扩展该新型焊丝在船舶焊接领域的应用工艺范围,为船舶焊接工程提供更多的选择和可能性。

1 试验与方法

1.1 试验材料

在本次试验中,所选用的母材为5083-H116铝合金。该铝合金具有良好的耐腐蚀性和中等强度,广泛应用于船舶制造、汽车工业等领域。后续的试验,准备了两种不同的焊丝材料,其中一种是直径 $\Phi 0.8\text{ mm}\sim\Phi 1.6\text{ mm}$ 的SAI 5183铝合金MIG焊丝。另一种是直径 $\Phi 1.6\text{ mm}\sim\Phi 5.0\text{ mm}$ 的TIG直条焊丝。下表1为5083-H116铝合金的化学成分表^[15]。

表1 5083铝合金化学成分(质量分数%)

Table 1 Chemical Compositions of 5083 Aluminum Alloy (by Mass Fraction %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0~0.40	0~0.40	0~0.10	0.40~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	0~0.25	0~0.15	余量

1.2 焊丝尺寸测量及表面质量检测

按照GB/T 25775-2010所规定的方法对焊丝的直径进行测量。同时,使用光学电镜对焊丝表面进行放大观察,以检验焊丝的表面质量。

1.3 对接焊试件

本研究对规格为350 mm×350 mm×12 mm开有X型坡口的5083-H116铝合金进行多层多道焊对接。采用了平焊、立向上焊、仰焊三种焊接方式,并且分别运用MIG焊接技术和TIG焊接技术。其中,MIG焊接所使用的焊丝为 $\Phi 0.8\text{ mm}$ (打底和填充)和 $\Phi 1.6\text{ mm}$ (盖面)的SAI 5183铝合金MIG焊丝;TIG焊接采用的是 $\Phi 1.6\text{ mm}$ (打底和填充)和 $\Phi 5.0\text{ mm}$ (盖面)的SAI 5183铝合金TIG直条焊丝。保护气为99.99%的高纯度氩气,气体流量为20 L/min。焊前将铝板表面油污、灰尘、氧化膜等清理干净,并用

丙酮擦拭以保证待焊接部位的清洁度。具体的焊接工艺参数如下表2所示,共计六种焊接工艺。通过对不同焊接技术与焊接工艺参数的有机组合展开深入且系统的研究,能够切实地考察该新型焊丝在船舶制造领域中的普适性状况。其中线能量的计算公式如式1所示:

$$E = \frac{\eta UI}{v} \quad (1)$$

式中 E 为线能量,单位为 J/mm ; η 为焊接热效率,其中TIG热效率约为0.7, MIG约为0.8; U 为焊接电压,单位为 V ; I 为焊接电流,单位为 A ; v 为焊接速度,单位为 mm/s 。

表2 5083铝合金焊接工艺参数

Table 3 Welding process parameters of 5083 aluminum alloy

焊接方法	焊道数	焊接位置	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	焊接速度 (mm/s)	线能量 (J/mm)	
MIG 焊接	9	平焊	第一道	116	18.3	5.65	338.28
			其余各道	225~229	23.8~24.0	10.94~12.07	399.29~452.14
	6	立向上焊	第一道	119	18.7	4.73	423.42
			其余各道	155~161	22.7~23.1	4.79~6.73	470.52~698.79
	9	仰焊	第一道	125	18.7	5.74	366.51
			其余各道	167~173	22.8~23.2	10.61~12.07	315.45~378.28
TIG 焊接	8	平焊	第一道	167	16.1	2.04	922.59
			其余各道	281~283	19.3~20.3	3.80~4.12	921.43~1058.27
	8	立向上焊	第一道	166	15.9	2.08	888.258
			其余各道	282~283	19.6~20.2	2.80~3.13	1236.12~1429.15
	8	仰焊	第一道	167	16.1	1.93	975.18
			其余各道	281~283	19.5~20.2	2.54~2.89	1327.21~1575.41

1.4 熔敷金属试件

熔敷金属拉伸试样在熔敷金属试件上进行制备,熔敷金属试件尺寸及坡口大小如下图1所示,其中

板厚 $t=20\text{ mm}$,板宽 $a\geq 125\text{ mm}$,板长 $l\geq 200\text{ mm}$,根部间隙 $b=12\text{ mm}$,坡口面角度 $\beta=22.2\pm 2.5^\circ$ 。焊缝熔

敷金属化学成分试件见图2所示，其具体熔敷试验焊接参数详见下表3。

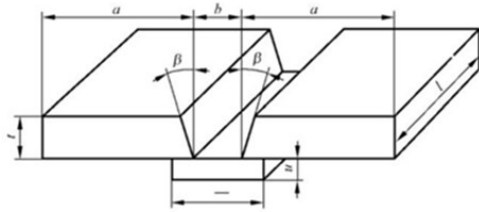


图1 熔敷金属试验板材尺寸与坡口示意图
Fig 1. Schematic diagram of the size and groove of the test plate for deposited metal

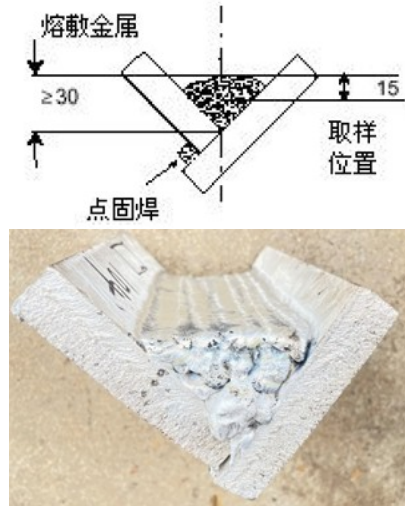


图2 熔敷金属化学成分试件
Fig.2. Specimens of chemical composition of deposited metals

表3 金属熔敷试验焊接参数
Table 3 Welding parameters of metal deposition test

焊接方法	焊丝规格	焊道数	焊接电流(A)	焊接电压(V)	焊接速度(mm/s)
MIG	Φ1.6 mm	58	220~223	24.3-25.3	6.30~7.39
TIG	Φ5.0 mm	24	282~283	19.5~20.3	3.57~4.43

1.5 化学成分检测

铝合金焊丝的化学成分的调整与控制是确保焊丝质量的关键举措。焊丝的化学成分涵盖合金元素、添加的微量元素以及杂质元素。其中，合金元素诸如 Mg、Zn、Mn 等在焊丝化学成分中占据主体地位，对焊丝的使用性能起着决定性作用。采用手工湿法测定 Be 元素含量，运用电感耦合等离子体光谱仪测定焊丝的其他元素含量，使用直读光谱仪测定熔敷金属的其他元素含量。H 元素的含量是炉前运用氧氮氢分析仪测定。

1.6 焊接缺陷检测

本文的焊接缺陷检测包括宏观形貌检测以及 X 射线探伤。X 射线探伤选取了 MIG 平焊和 TIG 平焊接头。

1.7 力学性能检测

本文的熔敷金属试验严格按照 GB/T10858 - 2023 的标准要求制备熔敷金属拉伸试棒。本次接头拉伸试验严格依照 CCS 规范的要求，在对接焊试件上进行截取操作，以制备焊缝横向拉伸试样。弯曲力学性能试验以典型平焊接头作为基准，严格按照 CCS 规范的要求，在对接焊试件上进行截取操作，以制备弯曲试样。在制备过程中，压头设置为板厚的 6 倍，弯曲角度确定为 180°，通过该参数组合有效模拟工程结构中的极限变形工况。

1.8 扫描电镜观察及能谱分析

本文选取不同焊接工艺参数下制备的接头焊缝区域作为 SEM 分析对象。样品经标准金相制样流程进行机械打磨与精细抛光处理后，采用扫描电子显微镜 (SEM) 及其配备的能谱仪 (EDS) 系统进行表征。通过点分析和面扫描分析相结合的方法，系统研究焊接接头元素分布和析出相分布。

2 试验结果及分析

2.1 焊丝尺寸及表面质量

表4为焊丝的直径测量结果，从尺寸测量结果来看，均处于标准允许的范围之内，并且丝径表现出高度的均匀性。图3是在光学电镜下观察的焊丝表面，在对焊丝表面进行观察时，发现其表面光滑，未出现毛刺、锈蚀、氧化皮以及其他不良缺陷。

表4 焊丝尺寸测量结果
Table 4 Measurement results of welding wire size

焊材	测量值/mm
MIG 焊丝 Φ1.2mm	1.186
	1.184
	1.186
	1.183
	1.184
TIG 直条填充丝 Φ3.2mm	3.183
	3.184
	3.186
	3.185
	3.184

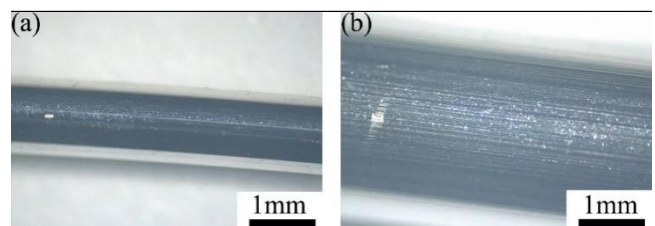


图3 铝合金焊丝表面质量(a)MIG 焊丝(b)TIG 直条焊丝
Fig.3. Surface quality of aluminum alloy welding wire (a), MIG welding wire (b), TIG straight wire welding wire

2.2 熔敷金属拉伸试验分析

熔敷金属拉伸试验结果如表 5 所示。由试验结果可知，MIG 焊丝与 TIG 直条填充丝焊缝熔敷金属的抗拉强度均达到 5083-H116 铝合金抗拉强度（305 MPa）的 90%；且二者的延伸率均在 30% 左右，较高的延伸率充分彰显出该焊丝材料极为卓越的塑性特征。这表明在实际应用场景中，采用这两种焊丝所形成的焊缝熔敷金属不但具备充足的强度，能够确保焊接结构的稳定性与可靠性，而且其出色的延伸率所体现出的优异塑性能够在一定程度上适应各类复杂的受力状况。

表 5 熔敷金属拉伸试验结果
Table 5 Results of tensile test of deposited metal

焊材	抗拉强度 值/MPa	规定塑性延伸强 度/MPa	延伸率 (%)
MIG 焊丝 (Φ 1.2mm)	291	140	30.0
TIG 填充 (Φ 3.2mm)	288	146	29.5

2.3 化学成分分析

表 6、7 为 MIG 焊丝和 TIG 焊丝的化学成分检测结果，该表格详细记录了从焊丝原材料，到拉拔成型再到熔敷金属这三个状态的各个元素含量。主体元素 Mg、Mn 以及微量元素 Ti 等成分被严格控制在标准范围之内，结果表明，MIG 焊丝和 TIG 直条填充丝的化学成分分析结果均符合 CCS 材料与焊接规范要求，从而保证了焊丝的基本性能。与此同时，在铝合金原材料的冶炼过程中，通过精炼手段有效地降低了氢以及其他杂质元素的含量，进而降低了因原材料中氢含量过高而在后续焊接过程中产生氢气孔的概率。

表 6 MIG 焊丝化学成分分析结果

Table 6 Chemical composition analysis results of MIG welding wire

元素 (%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Al	H(ppm)
原材料 (盘条)	0.010	0.110	0.007	0.57	4.79	0.110	0.024	0.071	0.0002	94.15	1.53
焊丝	0.004	0.079	0.003	0.64	4.78	0.061	0.006	0.11	0.0001	94.20	-
熔敷金属	0.007	0.064	0.060	0.66	4.69	0.084	0.008	0.072	0.0001	94.27	-

表 7 TIG 直条填充丝化学成分分析结果

Table 7 Analysis results of chemical composition of TIG straight strip filler filaments

元素 (%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Al	H(ppm)
原材料 (盘条)	0.013	0.080	0.0008	0.67	4.83	0.087	0.013	0.12	0.0002	94.18	1.443
直条填充丝	0.007	0.081	0.008	0.64	4.57	0.096	0.016	0.12	0.0001	94.32	-
熔敷金属	0.010	0.051	0.002	0.66	4.68	0.073	0.008	0.12	0.0001	94.34	-

2.4 接头宏观形貌与 X 射线检测

焊缝成型情况是评估焊接工艺性能的重要指标之一。5083 铝合金焊接接头焊缝成型良好，不同的焊接工艺下，从外观上看无明显的焊瘤、咬边、未焊满、裂纹等缺陷，焊缝呈现出均匀、连续且平滑的特征，如图 4 所示。这表明在焊接过程中，熔池的流动性和凝固过程得到了良好的控制。通过采用 X 射线探伤技术对焊缝进行检测，其探伤结果如图 5 所示。经过仔细分析探伤结果，未发现气孔、裂纹、未熔合及夹杂等缺陷。

综上所述，通过对焊接板宏观形貌的观察以及 X 射线探伤，确定本次试验中的焊缝无上述各类缺陷，外观成形良好。这充分说明了本次选用的新型 MIG 焊丝和 TIG 直条填充丝的焊接工艺性能较为优异，为实际工程应用提供了有力的技术支持。

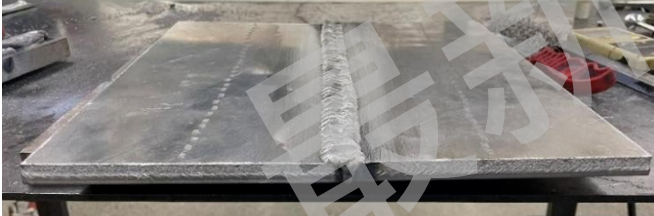


图 4 铝合金接头宏观形貌

Fig.4. Macroscopic morphology of aluminum alloy joints

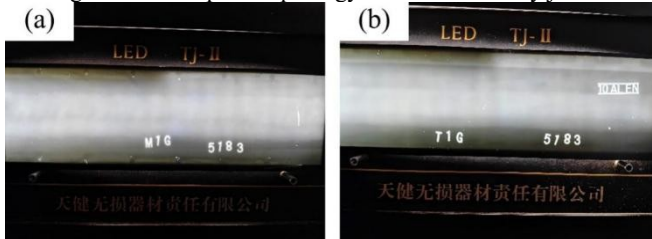


图 5 铝合金焊接接头 X 射线探伤结果(a)MIG 焊接(b)TIG 焊接

Fig.5. X-ray flaw detection results of aluminum alloy welded joints (a) MIG welding (b) TIG welding

2.5 微观组织分析

通过显微电镜对上述不同焊接工艺下的焊接接头进行观察，发现其微观组织良好。其中存在大量白色弥散相，其弥散相 EDS 点扫描结果如下图 6 所示，主要是由 Fe、Mn、Al 组成的化合物，可以推断出其为 $Al_6(Fe, Mn)$ [17][18]，白色弥散相的存在能有效阻碍晶格位错，从而提高合金的力学性能 [19]。从下图 7 为不同接头焊缝区的显微组织，可以看出 MIG 平焊和仰焊的焊接接头相较于 TIG 平焊和仰焊的接头其白色弥散相其颗粒较大，弥散强化效果更好。通过表 2 可知 MIG 焊接技术线能量小于 TIG 焊接技术，通常 MIG 焊接的效能是高于 TIG 焊接，MIG 立向上焊线能量略大于平焊和仰焊，因此断定热输入过大会导致析出相重溶于 Al 基体中，减少了弥散强化效果。

对六种不同焊接接头的焊缝区域进行面扫描，下图 8 为各个接头焊缝区域的面扫描 Mg 元素分布结果，可以看出均存在 Mg 元素固溶强化效果，固溶于 α -Al 基体中，促使晶粒产生一定程度的畸变，阻碍晶格位错运动，从而增强焊接接头的力学性能 [20] [21]。通过图 8(b)、(e)、(f)可以看出其 Mg 含量分布更加均匀，结合表 2 的焊接工艺参数，可知在该系列焊接工艺下其线能量更大，固溶强化效果更好。图 8(a)、(c)、(d)出现了 Mg 元素偏聚现象，相同的焊接方法下，较低的线能量不足以使得 Mg 元素未能完全固溶于 Al 基体中，该现象可能会影响到接头的耐蚀性。

综上所述，上述六种焊接工艺下，其焊接接头的微观组织良好，接头焊缝处都存在弥散强化和固溶强化两种强化机制，保障了焊接接头良好的力学性能。

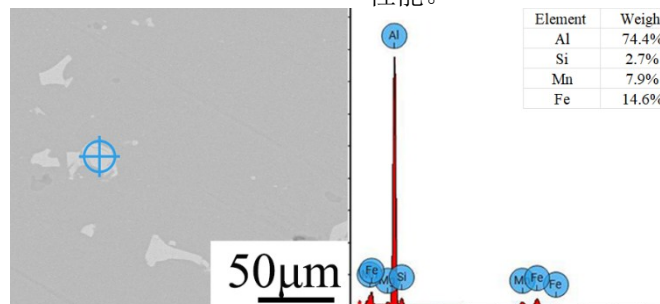


图 6 白色弥散相 EDS 点扫描结果

Fig.6. EDS spot scanning results of white diffuse phase

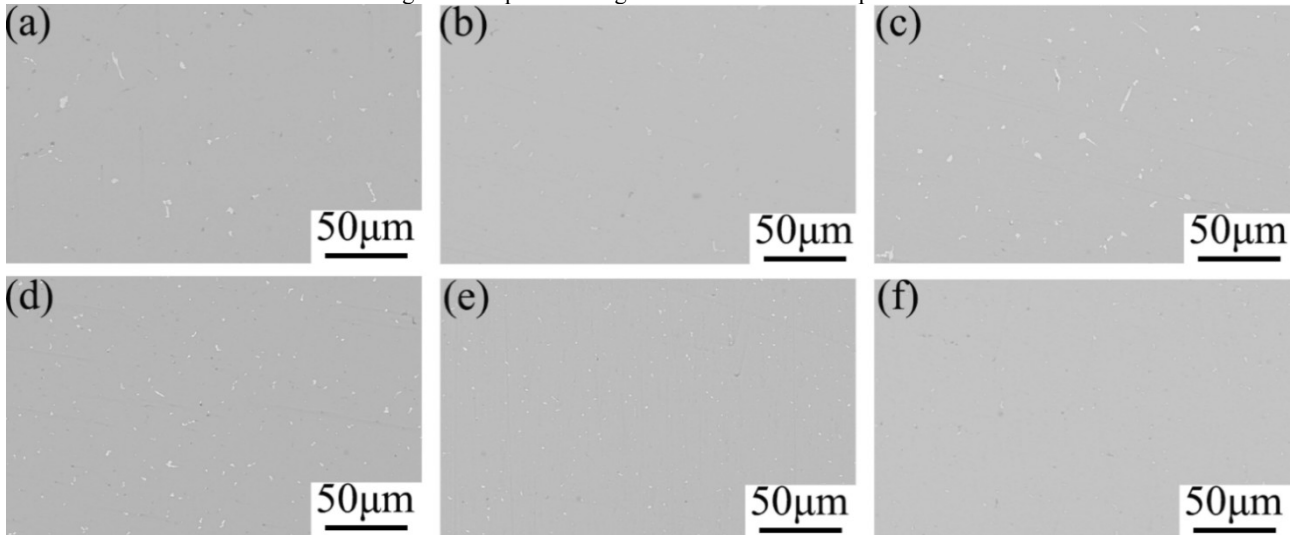


图 7 不同焊接工艺下焊缝区域第二相分布(a)MIG 平焊(b)MIG 立向上焊(c)MIG 仰焊(d)TIG 平焊(e)TIG 立向上焊(f)TIG 仰焊
Fig.7 Distribution of the second phase in the weld area under different welding processes: (a) MIG flat welding (b) MIG vertical upwards welding (c) MIG overhead welding (d) TIG flat welding (e) TIG vertical upwards welding (f) TIG overhead welding

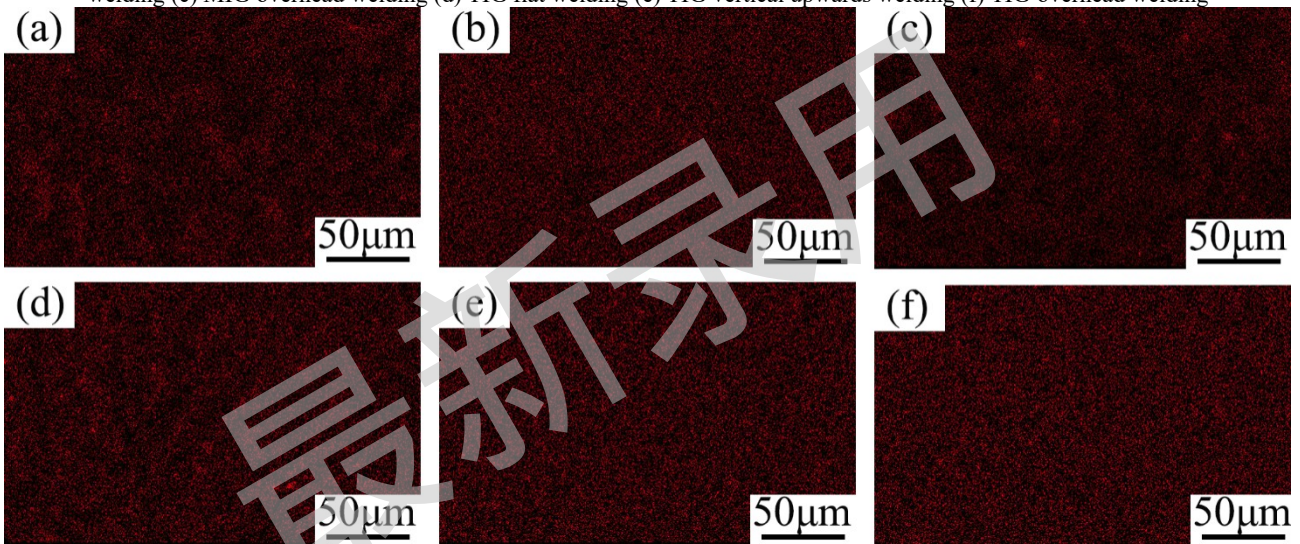


图 8 不同焊接工艺下焊缝区域 Mg 元素分布(a)MIG 平焊(b)MIG 立向上焊(c)MIG 仰焊(d)TIG 平焊(e)TIG 立向上焊(f)TIG 仰焊
Fig.8 Mg element distribution in the weld area under different welding processes: (a) MIG flat welding (b) MIG vertical upwards welding (c) MIG overhead welding (d) TIG flat welding (e) TIG vertical upwards welding (f) TIG overhead welding

2.6 接头力学性能结果及分析

下表 8 所示为对接焊接头的横向拉伸试验的结果。从试验结果来看，MIG 焊丝和 TIG 直条填充丝在横向拉伸试验中抗拉强度值接近，其抗拉强度值均达到母材 5083-H116 的抗拉强度的 90%以上，并且数据呈现出较为稳定的状态，这表明两种焊丝在焊接过程中能够形成具有高一致性及较高强度的焊缝。此外，断裂位置均位于焊缝处，这一现象符合 Al-Mg 系铝合金的特点。一般来说，Al-Mg 系铝合金在焊接后，焊缝处的强度和韧性与母材可能存在一定差异，容易成为断裂的敏感区域。整体上，使用 MIG 焊丝的抗拉强度略高于 TIG 直条填充丝。这可能是由于 MIG 焊丝在焊接过程中具有更好的熔合性能和冶金反应，从而使得焊缝的强度更高。

表 8 对接焊接头横向拉伸试验结果

Table 8 Transverse tensile test results of butt weld joints

焊材	位置	抗拉强度/MPa	断裂位置
----	----	----------	------

MIG 焊丝	平焊	291/292	焊缝
	立向上焊	300/295	焊缝
	仰焊	298/291	焊缝
TIG 焊丝	平焊	284/286	焊缝
	立向上焊	283/282	焊缝
	仰焊	286/287	焊缝

焊接接头弯曲结果如图 9 所示，弯曲角度为 180 度，无论是 MIG 焊丝还是 TIG 直条填充丝，在面弯和背弯测试中的表现均满足规范要求。具体而言，在弯曲试验中，弯曲部分外侧均未出现明显的开口缺陷。这一结果充分满足了 CCS 规范对于弯曲试样的各项要求。

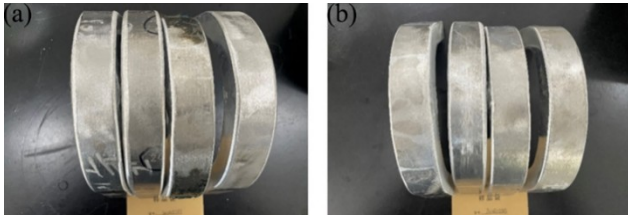


图 9 铝合金接头弯曲试验(a)MIG 焊接技术(b)TIG 焊接技术
Fig. 9 Bending test of aluminum alloy joints(a) MIG welding (b) TIG welding

3 结论

本研究通过对船用 SAl 5183 铝合金焊丝的焊接性和接头力学性能研究,得出以下几点结论:

(1) 通过 MIG 和 TIG 两种焊接方式对焊丝进行熔敷试验,结果显示其元素成分均严格符合 CCS 材料与焊接规范的相关要求。此外,其熔敷金属的抗拉性能以及其延伸率良好。

(2) 通过 MIG、TIG 焊接技术分别采用立向上焊平焊、仰焊三种方式进行焊接,其接头形貌良好,无气孔、夹杂、焊瘤等缺陷,接头的抗拉强度均达到母材抗拉强度的 90% 以上且数据稳定。MIG 焊接接头的抗拉强度略好于 TIG 焊接接头,其焊接构件在弯曲 180° 无任何缺陷、裂纹。新型船用 SAl 5183 铝合金焊丝的接头力学性能良好,满足船舶工程领域的焊接制造需求。

(3) 通过微观组织分析,所有工艺条件下焊缝区域微观组织良好,接头均存在 $Al_6(Fe, Mn)$ 析出相弥散强化和 Mg 元素固溶强化效果,保障了接头优良的力学性能。

(4) 热输入对析出相和 Mg 元素分布产生一定影响。较小的热输入,如 MIG 平焊和仰焊,其接头析出相更大,弥散强化效果更好;但是其 Mg 元素出现了一定程度的偏聚。说明较低的线能量不足以使得 Mg 完全固溶于 Al 基体中,这种偏聚现象可能会影响接头的耐蚀性,值得进一步研究。

综上所述,SAI 5183 铝合金焊丝焊后的接头其弯曲性能、抗拉性能、化学成分、成型焊缝组织形貌等均符合焊接船舶要求,为船舶焊接工程提供了一种新的选择。

4.参考文献:

- [1] Li S S, Yue X, Li Q Y, et al. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023.
- [2] 贾剑平,徐鑫,李田雨.铝合金 CMT 焊接温度场的数值模拟研

- 究[J].金属加工(热加工),2023,(01):19-25.
- [3] 刘国栋,郭小辉.7020 铝合金 MIG 焊后超声消应处理研究[J].材料开发与应用,2013,28(05):25-28.
- [4] 曹鹏,管卫.铝合金搅拌摩擦焊力参量对缺陷的响应规律研究[J].金属加工(热加工),2025,(03):76-82.
- [5] Hwang Y M, Lu C Y, Chen R Y. Influence of Microstructural Changes on Intergranular Corrosion and Stress Corrosion Cracking of 5083-H116 Alloys[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2024, 77(3): 667-676.
- [6] 金聪聪,黄立兵,黄文彬,等.新型铝合金 MIG 焊接头微观组织与力学性能[J].焊接学报,2024,45(07):74-82.
- [7] 武亚鹏.铝合金激光焊接工艺及其应用[J].金属加工(热加工),2020,(09):35-37.
- [8] 祁广斌,郝晓虎,董红刚,等.6082-T651 铝合金板十字接头组织及力学性能[J].焊接,2021,(06):1-8+61.
- [9] .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(04):36-42.
- [10] Wang J, Chen X, Yang L, et al. Sequentially combined thermo-mechanical and mechanical simulation of double-pulse MIG welding of 6061-T6 aluminum alloy sheets[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 77: 616-631.
- [11] 许良红,田志凌,彭云,等.高强铝合金的 MIG 以及激光-MIG 焊接工艺对比[J].焊接学报,2007,(02):38-42+115.
- [12] 李小欣,徐仲勋,王晓贞,等.焊丝对 5754-H111 铝合金焊接接头组织和性能影响[J].上海金属,2019,41(05):14-18.
- [13] 张蜜,程琦,信凯,等.焊丝成分对 6061 铝合金焊接接头微观组织和力学性能的影响[J].热处理,2024,39(05):27-29+35.
- [14] 王晋,虞华森,余祖英,等.四种铝合金焊丝电弧增材制造构件的成形质量和组织性能对比研究[J].电焊机,2024,54(03):36-42.
- [15] 李瑞武,杨青云,邱胜闻,等.船用 5083 铝合金厚板搅拌摩擦焊接工艺研究[J].材料开发与应用,2017,32(06):40-45.
- [16] 杨康,唐瑜,汪鹏举,等.不同气氛对 2219 铝合金 TIG 焊接头组织和性能的影响[J].电焊机,2023,53(12):95-100.
- [17] Tian N, Zhang Y, He Z, et al. The formation of three phases containing Fe and Mn in 5182 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2024, 207: 113497.
- [18] Que Z, Zhou Y, Wang Y, et al. Effects of Mg addition on the $Al_6(Fe, Mn)$ intermetallic compounds and the grain refinement of α -Al in Al-Fe-Mn alloys[J]. Materials Characterization, 2021, 171: 110758.
- [19] Qian X, Parson N, Chen X G. Effects of Mn addition and related Mn-containing dispersoids on the hot deformation behavior of 6082 aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 764: 138253.
- [20] Huskins E L, Cao B, Ramesh K T. Strengthening mechanisms in an Al-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(6): 1292-1298.
- [21] Baek M S, Shah A W, Kim Y K, et al. Microstructures, tensile properties, and strengthening mechanisms of novel Al-Mg alloys with high Mg content[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 950: 169866.