

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.11.11

船用5083铝合金MIG焊工艺适应性及组织性能分析

孙桂阳¹, 王雷¹, 邵丹丹¹, 张亮¹, 李武凯¹, 夏希玮²

1. 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东 广州 510715

2. 中国船级社广州分社, 广东 广州 510220

摘要: 为获得符合中国船级社要求的铝合金焊接接头, 选用ER5356铝合金焊丝进行5083铝合金MIG焊对接试验。采用微观金相观察及力学性能测试等方法对6 mm厚焊接接头进行了焊接间隙和错边适应性研究, 以获得5083铝合金MIG焊对母材间隙和错边的适应窗口区, 同时对焊接接头力学性能和微观组织进行分析。结果表明, 在板厚6 mm的情况下, 铝合金MIG焊对接间隙的容忍性较强, 达到母材厚度的66.6%, 对于错边量的容忍性可达母材厚度的50%; 焊缝区组织均匀细小, 主要由 α -Al相和 β -Al₃Mg₂相组成, 热影响区组织相较焊缝区有一定的粗化; 焊接接头的平均抗拉强度为263.5 MPa, 达到母材的94.1%, 并具有良好的抗弯曲性能, 焊接接头熔合线处硬度值最低, 为70 HV, 满足船级社的标准要求。

关键词: 5083铝合金; MIG焊; 工艺适应性; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2022)11-0075-07

Analysis of Adaptability, Microstructure and Properties of MIG Welding Process of 5083 Aluminum Alloy for Ship

SUN Guiyang¹, WANG Lei¹, SHAO Danan¹, ZHANG Liang¹, LI Wukai¹, XIA Xiwei²

1. CSSC Huangpu Wenchong Ship Building Company Limited, Guangzhou 510715, China

2. China Classification Society Guangzhou Branch, Guangzhou 510235, China

Abstract: In order to obtain aluminum alloy welded joints that meet the requirements of China Classification Society, this paper selects ER5356 aluminum alloy welding wire for 5083 aluminum alloy MIG welding butt test. The welding gap and misalignment adaptability of 6 mm thick welded joints were studied by means of microscopic metallographic observation and mechanical property test. The gap and misalignment adaptation window area of 5083 aluminum alloy MIG welding to base metal were obtained, and the mechanical properties and microstructure of welded joints were analyzed. The results show that the tolerance of the butt gap of aluminum alloy MIG welding is strong, reaching 66.6 % of the thickness of the base metal, and the tolerance of the butt error variable of the base metal can reach 50 % of the thickness of the base metal. The microstructure of the weld zone is uniform and fine, mainly composed of α -Al phase and β -Al₃Mg₂ phase, and the microstructure of the heat affected zone is coarser than that of the weld zone. The average tensile strength of the welded joint is 263.5 MPa, reaching 94.1 % of the base metal, and has good bending resistance. The hardness value of the fusion line of the welded joint is the lowest, which is 70 HV, meet the requirement of China Classification Society.

Keywords: 5083 aluminum alloy; MIG welding; microscopic structure; mechanical property

引用格式: 孙桂阳, 王雷, 邵丹丹, 等. 船用5083铝合金MIG焊工艺适应性及组织性能分析[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 75-81.

Citation: SUN Guiyang, WANG Lei, SHAO Danan, et al. Analysis of Adaptability, Microstructure and Properties of MIG Welding Process of 5083 Aluminum Alloy for Ship[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 75-81.

* 收稿日期: 2022-02-15 修回日期: 2022-06-17

作者简介: 孙桂阳(1984—), 男, 学士, 工程师, 主要从事管道加工焊接的研究工作。

通信作者: 王雷(1984—), 男, 学士, 工程师, 主要从事船舶管道焊接、加工制作和管子集配送工作。

0 前言

“中国制造 2025”提出的轻量化、低能耗已成为焊接领域的主要发展方向之一^[1]。铝合金密度为钢铁的 1/3,在保证结构化设计需求的强度条件下,铝合金具有十分突出的减重效果,是促进轻量化、低能耗最有效的材料之一。5083 铝合金是 Al-Mg 系非热处理强化铝合金,中等强度,当与适当成分的填充金属配合时,可焊性很好,具有强度高、抗切削性良好等特点,广泛用于制造船体以及飞机、车辆的钣金件等,常用的焊接方法有氩弧焊、搅拌摩擦焊、激光焊等。焊接薄板时宜选用 TIG 焊,焊接大、中厚板时一般选用 MIG 焊^[2-4]。但船用铝合金 MIG 焊时由于热输入量偏大会产生较大的焊接变形和接头软化现象,影响船舶制造质量,且需要较长的矫正时间,生产效率低。国内外学者对 5083 铝合金的焊接工艺进行了大量研究^[5-7]。

朱达新等人^[8]开展 TIG 焊接工艺试验,同时对焊接方法、焊材的选择、保护气体、焊前准备、工艺要求等进行了研究,获得了最佳的焊接工艺参数。研究表明,通过采用 ER5183 焊丝、多功能氩弧焊机、开 V 型坡口、焊前预热以及采用小线能量操作,试验所获得的焊缝在无损探伤及力学性能等方面均能满足 CCS 标准的要求。喻亮等人^[9]采用 5183 焊丝作为填充材料,对 3 mm 厚的 5083 铝合金对接接头进行光纤激光填丝焊接实验,结果表明,采用离焦量 0 mm,激光功率 4 100 W,焊接速度 4.2 m/min,送丝速度 3 m/min 的工艺参数焊接 3 mm 厚 5083 铝合金,可获得高质量焊缝,焊缝硬度达 HV60 以上,未出现接头软化,拉伸试验断裂位置为母材,焊缝强度高于母材。雷小伟等人^[10]采用冷金属过渡焊接技术对 5083 铝合金进行平板堆焊试验,分析脉冲熔化极气体保护焊、直流/变极性冷金属过渡焊、直流/变极性冷金属混合脉冲过渡对焊缝成形的影响,结果显示,采用冷金属过渡混合脉冲焊得到的焊缝成形美观,微气孔数量最低,焊缝力学性能略优,焊缝组织均为 α (Al)、颗粒状析出相和弥散相组织。李瑞武等人^[11]研究了 30 mm 厚铝合金 5083 板材双面对接焊不同焊接速度和旋转速度的焊接参数组合对焊接接头成型质量及力学性能的影响,结果表

明,当焊接参数处于旋转速度为 400~600 r/min,焊接速度为 80~120 mm/min 的工艺参数窗口内时,可以获得焊缝成型质量与抗拉性能优异的焊缝。

目前,有关 5083 铝合金 MIG 焊的工艺适应性、微观组织和力学性能的系统性研究鲜有报道^[12-14]。本文选用 5083 铝合金,采用 MIG 焊进行工艺适应性研究,通过焊接接头宏观形貌、金相组织、力学性能,不同焊接间隙和错边量对 MIG 焊工艺适应性的影响,进一步得出 5083 铝合金 MIG 焊对母材间隙和错边的要求,对指导铝合金工程化应用具有重要意义。

1 试验材料及设备

母材为退火(O)状态的 5083 铝合金,尺寸为 300 mm×150 mm×6 mm,填充材料为直径 1.2 mm 的 ER5356 铝合金焊丝。母材的力学性能如表 1 所示,母材和焊丝的化学成分如表 2 所示。

表 1 母材的力学性能

Table 1 Mechanical properties of base metal

牌号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
5083	280	156	23

表 2 母材及焊丝的主要化学成分(质量分数,%)

Table 2 Main chemical composition of base metal and welding wire (wt. %)

材料	Mg	Fe	Si	Zn	Ti	Mn	Cu	Al
5083	4.57	0.21	0.083	0.05	0.01	0.65	0.029	余量
ER5356	5.12	0.15	0.052	0.001	0.082	0.148	0.011	余量

焊接设备为自主研发的焊接夹具和 Fronius TPS-4000 CMT 焊机,使用内置专家数据库,整合送丝速度、焊接电流、电弧电压形成一元化弧焊参数进行调控,最大送丝速度 22 m/min。工作台以及夹具等如图 1 所示。保护气体为 99.999% 的高纯氩气,采用表 3 工艺参数实现了 6 mm 厚对接板单层单道 MIG 焊接。焊接接头坡口形式如图 2 所示,其中 b 为间隙尺寸。

焊后制取金相及力学性能试样,取样位置及数量如图 3 所示。拉伸和弯曲试验标准分别按照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》和 GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验》执行。拉伸试样从垂直于焊缝方向截取,焊缝位于试样中心,拉伸



图 1 焊接示意
Fig. 1 Welding diagram

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters

焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	送丝速度 /(m·min ⁻¹)	气体流量 /(L·min ⁻¹)
205	24.8	0.4	12.5	20

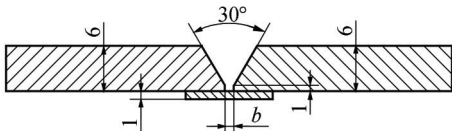


图 2 焊接接头示意
Fig. 2 Schematic diagram of welded joints

试样尺寸如图 4 所示。弯曲试样从垂直于焊缝方向截取,分别取背弯和正弯各一组,试样尺寸如图 5 所示。射线探伤参照标准 GB/T 3323.1《焊缝无损检测 射线检测 第 1 部分: X 和伽玛射线的胶片技术》。硬度试验参照标准 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》,所有测试点位置均位于母材厚度的 1/2 处,如图 6 所示。具体如下:点 1 位于焊缝中心,点 3 位于熔合线,点 2 位于点 1 与点 3 中间,点 3 之后每间隔 1 mm 取一个测试点。

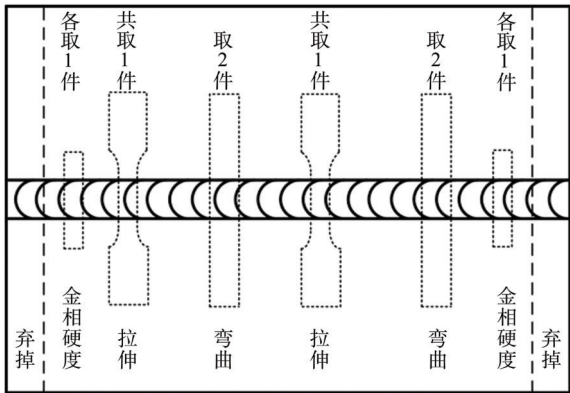


图 3 焊接接头取样位置示意
Fig. 3 Sampling position of welded joints

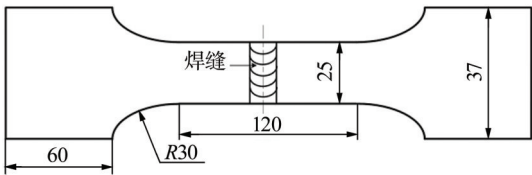


图 4 焊接接头拉伸试样尺寸(单位:mm)
Fig. 4 Tensile specimen size of welded joints

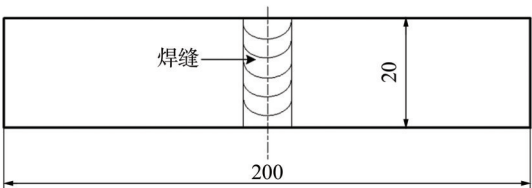


图 5 焊接接头弯曲试样尺寸(单位:mm)
Fig. 5 Size of bend specimen of welded joint

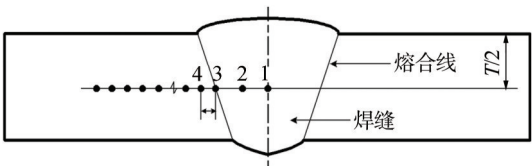


图 6 显微硬度示意(单位:mm)
Fig. 6 Microhardness Diagram

2 试验结果与分析

2.1 宏观形貌及 X 射线检测分析

间隙为 0 时的焊接接头宏观形貌如图 7 所示,焊缝成形均匀美观、一致性较好,无裂纹、咬边等缺陷。焊接接头 X 射线检测结果如图 8 所示,未出现气孔、裂纹、夹渣和未熔合等缺陷。

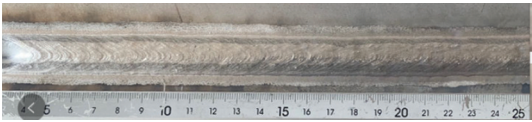


图 7 焊接接头宏观形貌
Fig. 7 Macro morphology of welded joint

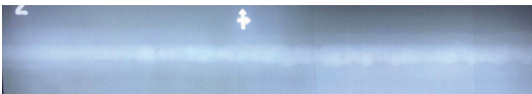


图 8 焊缝 X 射线检测结果
Fig. 8 X-ray inspection results of welds

2.2 工艺适应性

2.2.1 间隙适应性试验

为探究 5083 铝合金 MIG 焊对接接头间隙适应性,在焊接工艺参数不变的情况下,通过点焊预置

对接间隙分别为 1 mm、2 mm、3 mm 和 4 mm, 研究对接间隙对焊缝成形的影响。不同间隙下的焊接接头宏观形貌如图 9 所示, 试板间隙为 1~4 mm 时, 焊丝均能良好填充, 焊缝表面成形均匀, 无夹渣、未熔合、未焊透等缺陷。这是因为随着焊接间隙的增大, 焊缝余高逐渐降低, 当试板间隙 3~4 mm 时完全填充, 导致正面余高较低, 背部成形较差, 不能形成稳定焊道。随着间隙尺寸的增大, 电弧作用于工件的面积也增大, 维持电弧的稳定性难度增大, 从而导致焊接过程稳定性变差, 同时在焊接过程中熔池受到重力和表面张力的共同作用, 间隙过大使得液态熔融金属最终受到向下的合力引起液态熔池金属下流, 从而导致焊缝背面难以成形。可见 5083 铝合金 MIG 焊具有良好的间隙工艺适应性, 板厚 6 mm 情况下对焊缝间隙容忍能力可达母材厚度的 66.6%。

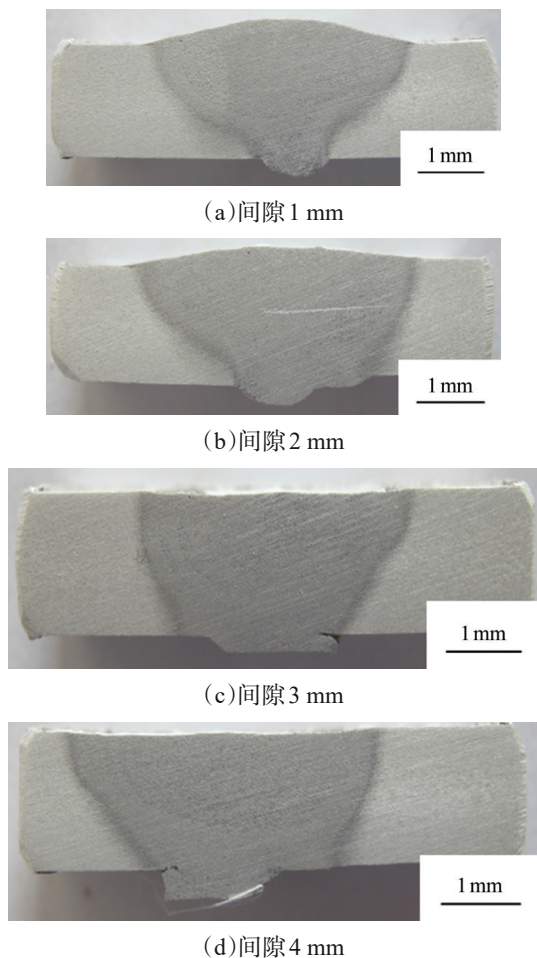


图 9 不同装配间隙下的焊接接头宏观形貌

Fig. 9 Macro morphology of welded joints under different assembly clearances

2.2.2 错边适应性试验

通过点焊预置对接错边分别为 1 mm、2 mm 和 3 mm, 在焊接工艺参数不变的情况下, 研究对接错边对焊缝成形的影响。不同错边量的焊接接头宏观形貌如图 10 所示, 在试板间隙 1~2 mm 范围内, 焊丝能良好填充, 焊缝表面成形均匀, 无夹渣、未熔合、未焊透等缺陷。随着错边量的增大, 焊缝余高逐渐降低, 试板错边量为 3 mm 时完全填充, 导致正面余高较低, 背部成形较差。这是因为随着错边量的增大, 焊缝两侧高度差异增大, 当电弧攀爬到焊缝某一位置高处时发生短路过渡, 会需要更多的能量来维持电弧的稳定性, 因而电弧电压升高导致电弧被拉长, 电流数值下降, 但此时的焊接电流和电压并不是电弧稳定工作需要的参数, 在等速送丝的电弧调节作用下, 焊丝熔化速度小于焊丝送进速度, 最终导致焊缝背部成形变差。可见 5083 铝合金 MIG 焊具有良好的错边工艺适应性, 板厚 6 mm 情况下, 对焊缝间隙容忍能力可达母材厚度的 50 %。

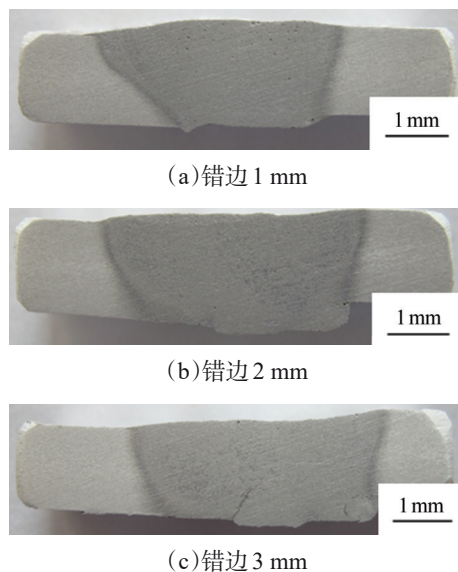


图 10 不同错边量下的焊接接头宏观形貌

Fig. 10 Macro morphology of welded joint under different unfitness

2.3 焊接接头组织性能

0 间隙、0 错边条件下焊接接头显微组织如图 11 所示。结合 Al-Mg 相图可知, 焊缝区显微组织主要为 α -Al 相和 β -Al₃Mg₂ 相, 强化相分布较为细小均匀, 这是因为在焊接过程中焊缝区金属吸收大量的热量而熔化, 凝固时由于铝合金导热系数大, 散热

较快,加快了焊缝区液态金属的凝固速度,从而导致焊缝区晶粒细化。熔合区显微组织如图 11c 所示,焊接接头熔合区与焊缝区相比,其晶粒更加粗大,这可能是因为熔合区紧靠熔合线,受到高温作

用后晶粒发生聚集长大^[15]。母材组织如图 11d 所示,呈纤维状,主要由 α -Al 相和少量的析出强化相组成,原因是母材轧制加工使得晶粒沿变形方向拉长,形成纤维组织^[16]。

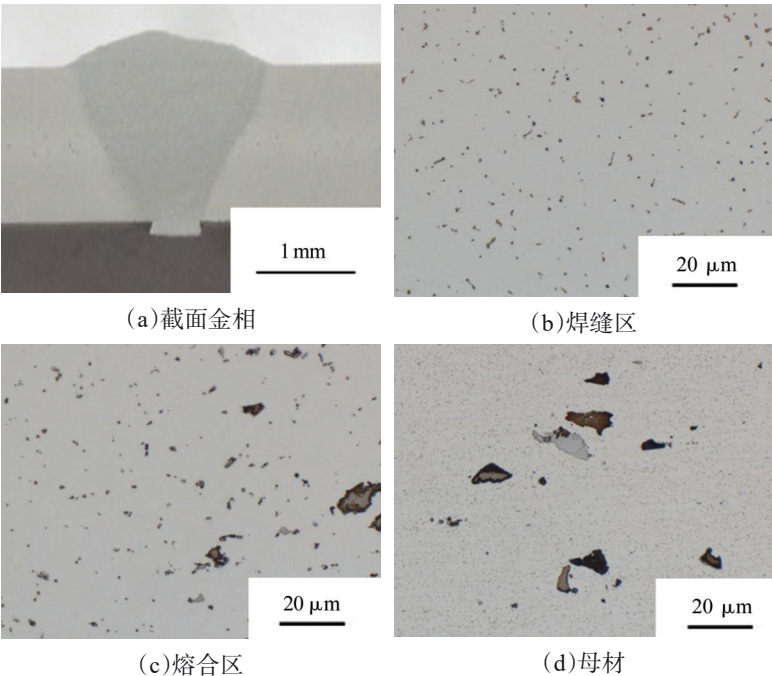


图 11 焊接接头显微组织

Fig. 11 Microstructure of weld joint

2.4 焊接接头(0 间隙)力学性能

2.4.1 拉伸性能

5083 铝合金焊接接头的拉伸性能如表 4 所示,两个试样均断裂在熔合区。熔合区为焊缝细晶区和热影响区粗晶区的过渡区,易出现应力集中,且显微硬度在熔合区附近最低,此位置为低强度向高强度过渡的薄弱区,在拉应力的作用下易发生断裂。试样抗拉强度分别为 271 MPa 和 256 MPa,平均抗拉强度 263.5 MPa,达到母材强度的 94.1%,满足船级社使用标准。

表 4 焊接接头拉伸测试结果

Table 4 Tensile test results of welded joints

试验编号	抗拉强度/MPa	平均抗拉强度/MPa	强度系数	断裂位置
1-1	271	263.5	0.941	熔合区
1-2	256			熔合区

2.4.2 弯曲性能

焊接接头弯曲试验结果如图 12、表 5 所示。弯曲试样表面较光滑,经 180°正弯和背弯试验均未出

现明显的裂纹,焊接接头仅存在小于 1 mm 的微裂纹,弯曲性能良好,满足船级社使用标准。



图 12 弯曲试样

Fig. 12 Bending sample

表 5 焊接接头弯曲测试结果

Table 5 Bending test results of welded joints

试验编号	弯曲形式	压头直径/mm	弯曲角度/(°)	结果
2-1	正弯	24	180	有<1 mm 的微裂纹
2-2	背弯	24	180	有<1 mm 的微裂纹

2.4.3 显微硬度

焊接接头显微硬度分布曲线如图13所示,加载载荷为1 N,加载时间10 s。由图13可知,焊接接头经过热循环作用后,沿焊缝中心处向母材方向,硬度值呈现出先降低后增大的现象,到母材处较为稳定,焊缝熔合区最低硬度值低于70 HV,焊缝中心位置硬度均值为73 HV,母材硬度均值约为78 HV。焊缝中心硬度值低于母材是由于在焊接过程中,温度较高的ER5356焊丝中的Mg元素发生烧损,导致主要强化的合金元素含量降低;熔合区处和近焊缝热影响区的硬度值低可能为:热影响区受到高温热循环的作用,显微组织中的强化相会重新固溶回到基体中,使得强化效果减弱,热影响区出现软化现象;热影响区硬度值较母材低的原因可能为:热影响区受热循环的作用,发生回复再结晶,使轧制态产生的位错消失,从而导致硬度值降低。相较于热处理强化铝合金焊接接头,接头软化现象不太明显^[17]。

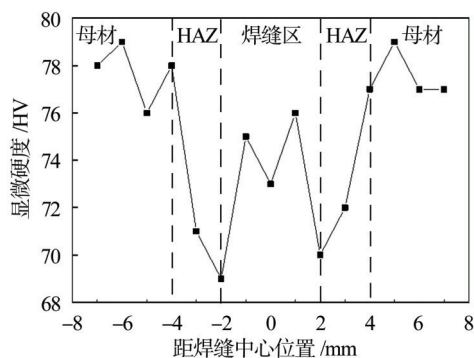


图13 显微硬度分布曲线

Fig. 13 Microhardness distribution curve

3 结论及展望

(1)通过对不同装配间隙和错边5083铝合金MIG焊工艺适应性研究,得到工艺适应性区间:当接头间隙在1~4 mm范围内,错边在1~3 mm范围内,焊缝成形良好。5083铝合金MIG焊接方法工艺适用性较好,生产效率较高,除可以复合激光进行焊接外,进行TIG-MIG双电弧共熔池进行铝合金焊接也是未来的发展方向。

(2)焊接接头各区域显微组织分布较为明显,焊缝区主要为 α -Al相和 β -Al₃Mg₂相,热影响区组织相比于焊缝区出现一定的粗化长大现象。

(3)焊接接头的硬度值以焊缝为中心呈对称分布,熔合线附近硬度值最低约为70 HV,远离熔合线硬度值逐渐增大达到母材处稳定约为78 HV。焊接接头抗拉强度较好,强度系数为0.941,并具有良好的抗弯曲能力。

参考文献:

- [1] 徐锴,武鹏博,梁晓梅,等. 铝合金激光-多股绞合焊丝MIG复合焊特性分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(01): 16-23.
XU K, WU P B, LIANG X M, et al. Analysis of characteristics of aluminum alloy laser multi-stranded welding wire MIG hybrid welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(01): 16-23.
- [2] 段昊. 船用铝合金MIG焊接工艺制订要点[J]. 中国船检, 2012(10): 98-99.
DUAN H. Key points of MIG welding process for marine aluminum alloy [J]. China Ship Survey, 2012(10): 98-99.
- [3] 刘晓莉,王建,王勇,等. 铝合金中厚板双丝CMT单面焊双面成形焊接工艺[J]. 焊接技术, 2018, 47(11): 44-47.
LIU X L, WANG J, WANG Y, et al. Double-wire CMT single-sided welding and double-sided forming welding process for aluminum alloy plate [J]. Welding Technology, 2018, 47(11): 44-47.
- [4] 丁洁琼,火巧英,金文涛,等. 轨道车辆铝合金MIG焊搭接接头应力及变形研究[J]. 电焊机, 2018, 48(05): 47-53.
DING J Q, HUO Q Y, JIN W T, et al. Research on stress and deformation of aluminum alloy lap joint by MIG of railway vehicles [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(05): 47-53.
- [5] 武鹏博. 5A06铝合金激光-多股绞合焊丝GMAW复合焊接工艺研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2021.
WU P B. Study on GMAW hybrid welding process of 5A06 aluminum alloy laser-multi-stranded wire [D]. Beijing: General Institute of Mechanical Science Research, 2021.
- [6] Gong Lihua, Guo Weimin, Pan Feng. The corrosion behavior of marine aluminum alloy MIG welded joints in a simulated tropical marine atmosphere [J]. Materials Testing, 2021, 63(2): 151-156.
- [7] Shiming Gan, Yongquan Han, Xiaoyan Bao. 7A52 Aluminum Alloy MIG Welding Residual Stress Reliable

- Measurement based on Hole-Drilling Method[J]. International Journal of Performability Engineering, 2019, 15(7):1905-1911.
- [8] 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(03):449-454.
ZHU D X, TANG J P. Study on TIG Welding Process of 5083 Aluminum Alloy [J]. Materials Research and Application, 2022, 16(03):449-454.
- [9] 喻亮,赵云,祁小勇,等. 5083 铝合金光纤激光填丝焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2018, 38(02):222-229.
YU L, ZHAO Y, QI X Y, et al. Study on Fiber Laser Welding with Filler Wire of 5083 Aluminum Alloy [J]. Applied Laser, 2018, 38(02):222-229.
- [10] 雷小伟,马照伟,陈利阳,等. 不同 CMT 焊接工艺对 5083 铝合金焊缝成形及性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(09):39-44.
LEI X W, MA Z W, CHEN L Y, et al. Effect of Different Cold Metal Transfer Welding Technology on WeldForming and Properties of 5083 Aluminum Alloy [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(09):39-44.
- [11] 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.
LI R W, YANG Q Y, QIU S W, et al. Study on Friction Stir Welding Process for Marine 5083 Aluminum Alloy Thick Plate [J]. Development and Application of Materials, 2017, 32(06):40-45.
- [12] 解旭,翟鑫钰. 铝合金焊接方法综述[J]. 有色金属加工, 2022, 51(04):4-11.
XIE X, ZHAI X Y. Summary of Aluminum Alloy Welding Methods [J]. Nonferrous Metals Processing, 2022, 51(04):4-11.
- [13] 陈澄,薛松柏,孙乎浩,等. 5083 铝合金 TIG 焊接头组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(01):37-40.
CHEN C, XUE S B, SUN H B, et al. Microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy joint by TIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(01):37-40.
- [14] 罗健,蹇海根,徐国新,等. 退火态 5083 铝合金焊接接头组织与性能分析[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(04):59-64.
LUO J, JIAN H G, XU G X, et al. An Analysis of Micro-Structure and Properties of Welded Joints of Annealed 5083 Aluminum Alloy [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(04):59-64.
- [15] 吴双虎,国旭明,韩善果,等. 5083 铝合金填丝等离子弧焊接头组织及力学性能[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2020, 37(04):54-60.
WU S H, GUO X M, HAN S G, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Plasma Arc Welding Joint of 5083 Aluminum Alloy [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2020, 37(04):54-60.
- [16] 方乃文,刘鑫宇,黄瑞生,等. 6061-T6 铝合金 MIG 焊接接头根部间隙对其化学成分及组织演化的影响[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(12):53-57.
FANG N W, LIU X Y, HUANG R S, et al. Effect of root clearance on chemical composition and microstructure evolution of MIG welded joint of 6061-T6 aluminum alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48(12):53-57.
- [17] 罗传孝,王少刚,翟传国. 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.
LUO C X, WANG S G, ZHAI C G. Microstructure and mechanical properties of welded joint of 6082 aluminum alloy forrail transportation [J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(11):68-72.