

文章编号:1007-2853(2025)03-0025-05

5754 铝合金 MIG 焊 T 型接头组织性能研究

高玉珍,余彬,张伊航,王遵广,程艳艳*

(吉林化工学院 机电工程学院,吉林 吉林 132022)

摘要: 采用熔化极惰性气体保护焊开展 2 mm 厚的 5754 铝合金 T 型焊接工艺试验,分析了焊接电流、电压、速度对焊接接头的宏观形貌、显微组织和各区域显微硬度变化的规律。结果表明:增大焊接电流、电压或者降低焊接速度都会使焊接热输入增大,焊缝处的熔深会增大甚至产生熔透现象,也会导致焊缝和热影响区的组织发生不均匀粗化或者产生裂纹,使焊接接头大部分区域的硬度降低,从而降低焊接质量;而热输入较低时,焊接接头会产生未熔合现象和大量气孔,从而使接头硬度降低,影响焊接性能。通过试验分析,采用优化后的工艺参数进行焊接后,接头硬度分布均匀,宏观缺陷显著减少,显微组织细化,综合性能得到提升。

关键词: MIG 焊;T 形接头;微观组织

中图分类号: TG 442 **文献标志码:** A **DOI:**10.16039/j.cnki.cn22-1249.2025.03.005



随着现代工业的发展,轻量化设计已成为车辆制造、航空航天、轨道交通等领域的重要趋势^[1]。铝合金作为一种轻质、高强度、耐腐蚀的金属材质,在轻量化设计中扮演着举足轻重的角色。其中,5754 铝合金因其优异的力学性能和良好的焊接性,被广泛应用于汽车制造、航空航天和建筑装饰等领域。特别是在汽车行业中,全铝空间框架车身结构因其重量轻、碰撞安全性好、性能优良和耐腐蚀等特点,已成为许多汽车制造商的首选材料^[2-4]。

MIG(熔化极惰性气体保护焊)作为铝合金焊接的主要方法之一,具有对装配精度要求低、适应性强、保护效果好和焊接生产率高等优点,是目前汽车行业铝合金焊接工艺中应用最广泛的技术之一^[5-6]。考虑到铝合金 MIG 焊接过程中会产生焊接缺陷,如焊接接头软化、焊缝易出现气孔、裂纹等,这些问题严重影响了焊接接头的质量和力学性能,进而影响到产品的服役安全性和使用寿命^[7-8]。为了改善铝合金 MIG 焊接接头的质量,国内外学者进行了优化焊接参数方面的研究。其中付宁宁^[9]等利用高频脉冲 MIG 深熔焊技术,主要研究焊接接头的形成、微观结构,以及其力学性能。Sakri A 等^[10]进行了数值模拟 MIG 型电弧焊接在薄铝合金板中引起的残余应力和变形的研究。黄绍服^[11]等通过 ANSYS 对焊接温度场进行

模拟,随着热输入的增加,熔池的最高加热温度和停留时间也增加,这有助于气泡逸出并减少杂质气孔的形成。王家威^[12]等对 6 mm 厚的 5083-H111 铝合金热轧板进行 MIG 焊的工艺试验中,通过调整工艺参数,实现了接头的良好宏观成形和优异的力学性能。因此,优化焊接参数对焊缝质量和接头硬度的提高尤为重要。

本文采用 MIG 焊对 2 mm 的 5754 铝合金进行 T 型焊接试验,通过对焊接接头微观组织的表征和显微硬度的测量,研究焊接工艺参数对焊缝成形、显微组织和硬度的影响规律。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

文中所用母材是 2 mm 的 5754-H111 的铝合金板材,其主要的合金元素为 Mg 元素,具有适中的强度及延展性和良好的耐腐蚀性。焊接过程中采用 ER5356 铝合金焊丝作为焊缝填充材料,直径为 1.2 mm,母材和焊丝的化学成分如表 1 所示。母材的扫描电镜组织如图 1 所示,5754 铝合金的主要组成为 α -Al 固溶体和 Mg_2Si 等金属间化合物。焊接保护气采用高纯氩气(99.9%)保护,保护气流量为 20 L/min。

收稿日期:2024-10-29

基金项目:吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20240307CY)

* 通信作者:E-mail:chengyanyan1980@sina.com

表 1 常用 5754 铝合金和 ER5356 焊丝的化学成分 (质量分数%)

	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
母材	0.40	2.6~3.6	0.40	0.10	0.50	0.30	0.20	0.15	余量
ER5356	0.25	4.5~5.5	0.40	0.10	0.50~0.20	0.05~0.20	0.10	0.06~0.20	余量

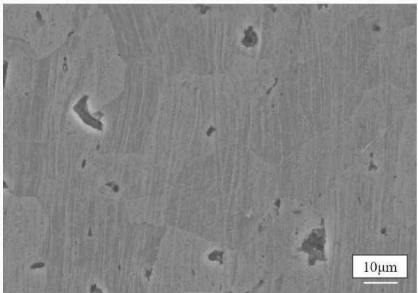


图 1 5754-H111 铝合金的微观组织

1.2 试验方法

焊接试验所用设备为 YA-1VAR81F00 型号 6 轴焊接机器人,可以提供高精度的焊接操作,实现 5754 铝合金的 T 型焊接。在焊接后,选择 3 个关键焊接参数作为独立的控制变量,即焊接电流、焊接电压及焊接速度。通过这 3 个参数的调整,深入探究了它们对焊缝成形、显微组织,以及硬度的影响。为了确保实验结果的准确性和可靠性,按照单一变量法的原则进行了 3 组试验设计,在每次试验中都严格控制其他参数保持不变,只针对其中一个参数进行调整,如表 2 所示。采用 MEF-3 型光学显微镜和 JSM6490 LV 型扫描电子显微镜观察试样微观组织;使用 HVS-1000 维氏硬度计从一端母材起,每隔 0.2 mm 间距选取一个硬度采样点,每个区域 3 个硬度取样点进行硬度试验。

表 2 5754 铝合金的焊接参数

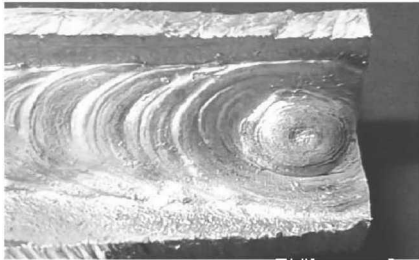
试件号	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)
<i>I</i> ₁	125	16	55
<i>I</i> ₂	127	16	55
<i>I</i> ₃	129	16	55
<i>U</i> ₁	127	15	55
<i>U</i> ₂	127	16	55
<i>U</i> ₃	127	17	55
<i>v</i> ₁	127	16	50
<i>v</i> ₂	127	16	55
<i>v</i> ₃	127	16	60

2 结果与讨论

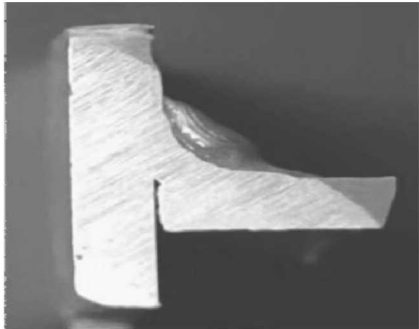
2.1 焊接接头宏观形貌

在不同焊接热输入下,5754 铝合金 T 型焊接

头的焊缝表面形貌和横截面形貌如图 2~4 所示。试验表明,当热输入不足时,即焊接电流和焊接电压较低,或者焊接速度较快时,在表面张力效应的影响下,熔融的金属在未能充分流动展开之前便开始凝固,导致焊缝呈现狭长且不连续的状态,见图 2(a),甚至接头出现未熔合、未焊透等焊接缺陷,见图 2(b)。反之,当热输入过大时,熔池金属流动剧烈,飞溅明显增多,焊缝成形较为粗糙,见图 3(a),熔深会不断加深或者产生熔透现象,见图 3(b)。

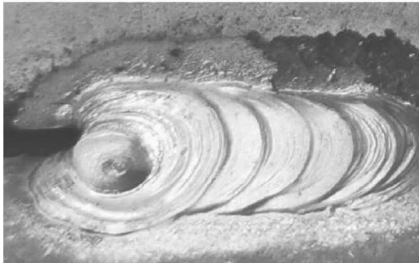


(a) 表面形貌

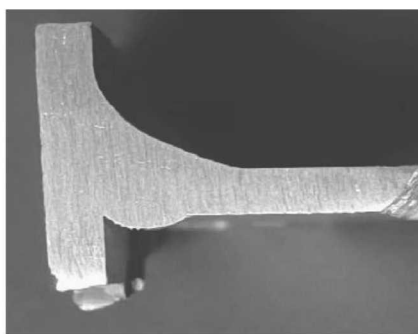


(b) 横截面形貌

图 2 热输入不足的焊接接头宏观形貌

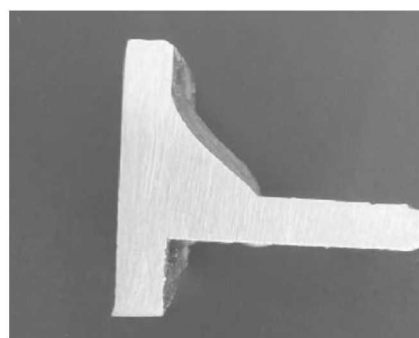


(a) 表面形貌



(b) 横截面形貌

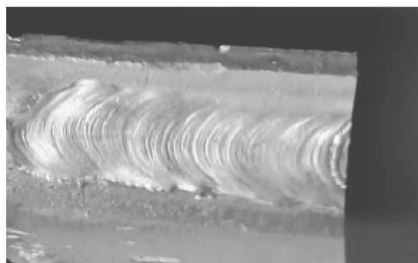
图3 热输入过多的焊接接头宏观形貌



(b) 横截面形貌

图4 焊接良好下的焊接接头宏观形貌

在对不同焊接工艺参数下的焊缝截面形貌进行对比分析后,发现在特定的焊接参数组合下,即焊接电流为 127 A,焊接电压为 16 V,焊接速度为 55 cm/min 时,T 型焊缝表面形貌成型良好,呈现平整连续的鱼鳞纹,见图 4(a);而 T 型焊缝横截面熔合良好,未出现未熔合或熔透现象,见图 4(b)。



(a) 表面形貌

2.2 不同焊接参数下接头微观组织分析

图 5 为不同焊接电流下焊缝的金相,可以看出随着电流的增大,焊缝内部气孔的数量和偏析情况随之变化。当电流较小时,可以观察到大量气孔。原因是一方面在铝合金焊接时,气体的主要来源是铝合金母材及焊接过程中外界气体的入侵,残留在母材表面的高熔点氧化膜在焊接时未能完全熔化,附着在氧化膜中的水因受热分解会析出氢,从而产生气孔;另一方面是焊接电流热输入较低时,焊缝液态金属的凝固速度快,给予气泡浮出的时间短,造成气泡的浮出率降低而产生气孔;而焊接电流过大时,会出现焊缝晶粒尺寸变大和形状分布不均匀现象,从而降低焊接接头的整体性能。

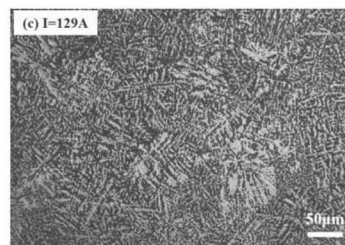
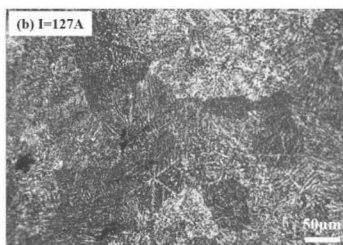
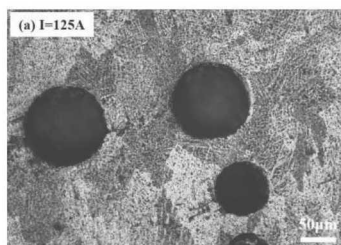


图5 不同焊接电流下的焊缝金相

由图 6 可以看出,电压偏小时,会导致电弧不稳定,使焊缝区域产生气孔;电压偏大时,会导致熔池对流增加,气体逸出困难,增加气孔产生的风

险;电弧也会变得不稳定,甚至产生飞溅,不利于熔滴平稳过渡,造成热量分布不均匀,焊缝呈现明显组织不均匀。

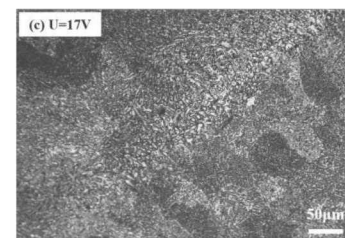
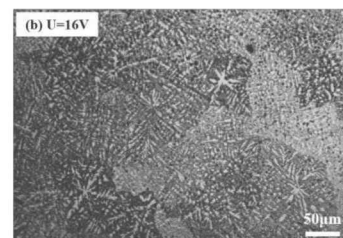
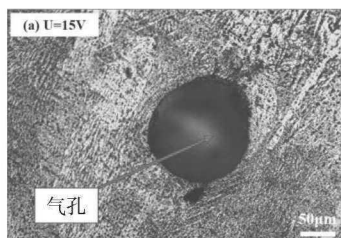


图6 不同焊接电压下的焊缝金相

由图 7 可见,焊接速度过快时,会减少热输入,导致熔池冷却速度过快而增加气孔产生,也会使焊缝金属结晶不充分,晶粒细化不足,导致焊接

接头性能下降;而焊接速度较慢时,焊接区过热,晶粒粗大,从而可能引起气孔和热裂纹等缺陷,影响接头性能。

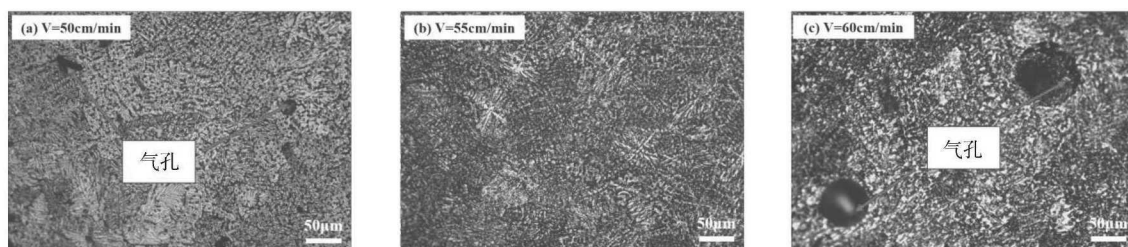


图 7 不同焊接速度下的焊缝金相

故当焊接电流为 127 A,焊接电压为 16 V,焊接速度为 55 cm/min 时,焊缝区域组织均匀,为典型的树枝状晶粒,未见气孔和热裂纹等焊接缺陷,其焊接头整体性能最好,见图 8。

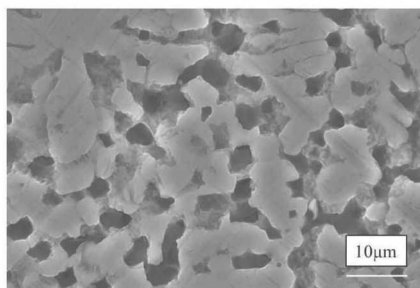
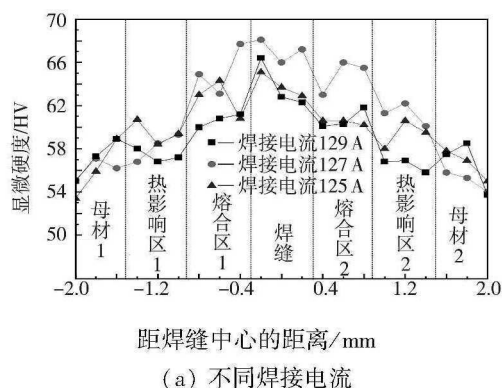


图 8 优化焊接参数后的焊缝扫描电镜图

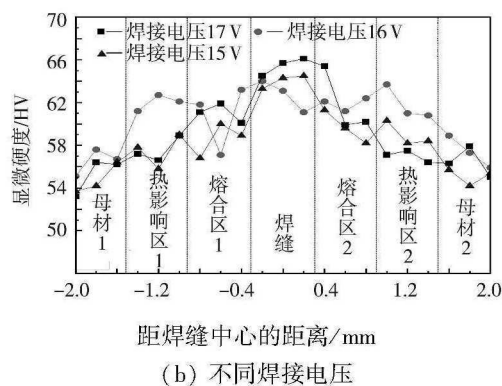
2.3 不同焊接参数接头硬度分析

不同的焊接参数下接头的显微硬度曲线如图 9 所示。较低电流下,焊缝与熔合区的硬度较低,因为电流的减少导致母材不能充分吸热熔化的,焊缝降温只通过热传导和少量热辐射,凝固速度变得缓慢,从而会影响到焊缝的均匀性、硬度及焊缝内部晶粒尺寸的放大和晶界间隙的增大,还会产生焊接缺陷,使得焊接硬度降低,见图 9(a);电流的增加可能会使焊接接头固化的速度提升,从而使焊缝晶体更加细小,缩减晶界之间的间距,并进一步增加焊接的硬度;但电流过大时,焊接热输入较高,会烧损合金中的 Mg 元素,并且导致焊缝、熔合区的晶粒粗大,也会产生气孔、热裂纹等焊接缺陷,使得焊缝的硬度降低。实验数据见图 9(b),17 V 电压的焊缝区域硬度最高,为 66 HV,电压大则焊接热输入大,电弧功率的增加会提高熔池的温度,加速焊缝金属的熔化和凝固过程,且更高的电压会加强对熔池的对流和搅拌作用,有利于焊缝金属中各种元素的均匀分布,这促使焊

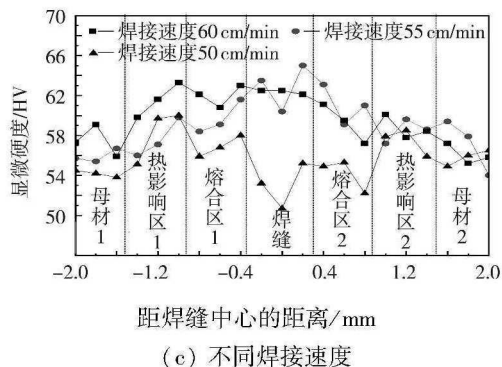
缝金属的晶粒尺寸变细小和相分布更均匀,从而使焊缝的组织结构致密,所以其硬度大。



(a) 不同焊接电流



(b) 不同焊接电压



(c) 不同焊接速度

图 9 不同焊接参数下焊接接头各区域硬度分布图

而在熔合区和热影响区其硬度相比 16 V 对应区域偏低,是由于过大的热量传输,致使热影响区和热影响区附近的熔合区温度偏高,热影响区晶粒粗大,硬度低。所以低电压造成的焊缝缺陷与组织不均匀,高电压造成的合金元素烧损与晶粒不均匀粗化都会降低显微硬度,分析接头整体性能可知 16 V 电压较为合适。从图 9(c)可以看出焊接速度为 60 cm/min 时,相比于 55 cm/min 的焊接速度,其焊缝的硬度更小,热影响区硬度更大,这是由于焊接速度过快,热影响区的冷却速度也可能加快,这可能使热影响区的组织变得不均匀,出现硬化现象。焊接速度为 50 cm/min 的硬度分布较为特殊,焊缝与熔合区硬度并未有上升再下降趋势,而是呈现出下凹形状,结合金相分析,是由于焊接热输入过大、温度过高,造成熔透母材,部分母材掺杂于焊缝,过热过烧造成熔合区和焊缝晶粒粗大,硬度降低。而焊接速度为 55 cm/min 的焊缝和熔合区的硬度都大于另外两者,证明在适当的焊接速度情况下,焊接熔滴过渡平稳均匀,焊缝成型性好,熔池形成平稳迅速,从熔合到凝固的速度快,这会使得熔池金属在高温环境下停留的时间减少,形成较细小的晶粒,获得较高的硬度。

3 结 论

(1) 焊接电流、电压较小时,即热输入较小,焊缝内部气孔数量多,组织不均匀,导致接头硬度较低;而焊接速度较快时,热输入不足,不利于气体逸出,会导致未熔合现象和气孔产生。

(2) 焊接电流较大时,焊缝处的熔深增大或产生熔透现象;焊接电压偏大时,焊缝区域有大量气孔,焊缝组织不均匀;焊接速度过慢时,会造成热量分布不均匀,熔合区会产生裂纹,而焊缝呈现明显组织不均匀。

(3) 适当的焊接参数下,焊缝金属的晶粒尺寸细小且分布均匀,焊缝和熔合区的硬度较高。通过接头整体分析,采用焊接电流为 127 A、焊接电压为 16 V、焊接速度为 55 cm/min 时,焊缝成形质量最佳,接头硬度接近母材且波动最小,且显微

组织细化,热影响区软化现象减轻,焊接质量显著改善。

参考文献:

- [1] 汤蓉蓉,唐学帮.铝合金汽车轻量化与焊接技术探究[J].机电工程技术,2021,50(12):105-107,121.
- [2] 陆江旭.5A06 铝合金 TIG 焊焊接接头性能研究与高韧性高强度铝合金焊丝研制[D].杭州:浙江大学,2016.
- [3] 房洪杰,刘慧,孙杰,等.5xxx 系铝合金研究现状及发展趋势[J].材料导报,2023,37(21):211-220.
- [4] GUO N, FU Y L, WANG Y Z, et al. Microstructure and mechanical properties in friction stir welded 5A06 aluminum alloy thick plate [J]. Materials and Design, 2017, 113: 273-283.
- [5] 石磊,聂甫恒,许晨玲,等.6082 铝合金 MIG 焊接头力学性能与微观组织研究[J].焊接技术,2017,46(5):54-57.
- [6] 乔建毅,赵天光,王文权,等.轨道客车铝车体用 6005A-T6 铝合金 MIG 焊接头的微观组织和力学性能[J].材料热处理学报,2022,43(10):196-202.
- [7] 曹鑫.铝合金薄板双脉冲 MIG 焊气孔形成研究与工艺优化[D].淮南:安徽理工大学,2020.
- [8] 段金龙.探析铝合金焊接接头中气孔产生的机理与控制方法[J].中国金属通报,2019,1078(8):276-277.
- [9] 付宁宁,周禄军,竺星星,等.6082 铝合金中厚板高频脉冲 MIG 对接焊接头的组织和性能分析[J].电焊机,2023,53(11):51-55.
- [10] SAKRI A, GUIDARA M, ELHALOUANI F. Numerical simulation of MIG type arc welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of S235 steel [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2010, 13(1):12-20.
- [11] 任泽良,项肇,余细平,等.6061 铝合金 MIG 焊接头的组织和力学性能研究[J].热加工工艺,2023,52(3):139-141,148.
- [12] 王家威,吴巍,马月婷,等.5083 铝合金 MIG 焊接头微观组织与力学性能[J].焊接,2022,51(11):20-28,53.

(下转第 62 页)

Research and Simulation of a Reduced-Order Observer-based State-Feedback Control System for First-Order Inverted Pendulum

LI Siming¹, DONG Wenqi², CAO Yubo^{1*}

(1.School of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin City 132022, China; 2.Equipment Kinetic Energy Department, CEC Compound Semiconductor Co., Ltd., Ningbo 315336, China)

Abstract: The inverted pendulum system is a typical unstable nonlinear system. A mathematical model for a first-order inverted pendulum was established using Newtonian mechanics, and system simulation was implemented through the Simulink module in MATLAB. Building upon state feedback control, to reduce the settling time of full-order observer-based state feedback control. This study proposed a reduced-order observer-based state feedback control method. This approach converts high-dimensional data into low-dimensional data, simplifying system structure while demonstrating improved efficiency and faster settling speed compared with full-order observers.

Keywords: first-order inverted pendulum; mechanical modeling; reduced-order observer; simulink simulation

(上接第 29 页)

Microstructure and Properties of MIG Welded T-joint of 5754 Aluminum Alloy

GAO Yuzhen, YU Bin, ZHANG Yihang, WANG Zunguang, CHENG Yanyan^{*}

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin City 132022, China)

Abstract: The T-shaped welding process of 5754 aluminum alloy with 2 mm thickness was carried out by melting inert gas shielded welding. The changes of macroscopic morphology, microstructure and microhardness of welded joint were analyzed by welding current, voltage and speed. The results show that increasing the welding current, voltage or reducing the welding speed will increase the welding heat input, increase the weld penetration or even produce penetration phenomenon, and lead to uneven coaling or cracking of the weld and heat affected zone, which will reduce the hardness of most areas of the welded joint, thereby reducing the welding quality. However, when the heat input is low, the welded joint will produce non-fusion phenomenon and a large number of pores, so that the joint hardness is reduced and the welding performance is affected. Through the test analysis, the joint hardness distribution is uniform, the macroscopic defects are significantly reduced, the micro structure is refined, and the comprehensive performance is improved after the optimized process parameters are used for welding.

Keywords: MIG welding; T-joint; micro structure