

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.11.08

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

付宁宁¹, 周禄军¹, 竺星星¹, 曲宗庆², 刘宇阳², 王文超², 丁成钢², 李宋伟³

1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京 210031
2. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028
3. 鞍钢集团, 辽宁 鞍山 114011

摘要: 采用高频脉冲 MIG 焊进行 6082-T6 铝合金 15 mm 中厚板对接焊, 研究接头成形、微观组织和力学性能。接头条件为: 坡口角度 40°, 焊接间隙 1 mm, 钝边 0.5 mm, 3 层 3 道。结果表明: 与常规脉冲 MIG 焊(深熔焊模式)相比, 在相同的接头条件、焊接热输入降低约 11% 的状况下(常规脉冲 MIG 焊热输入为 17.12 kJ/cm, 高频脉冲 MIG 焊热输入为 15.21 kJ/cm), 高频脉冲 MIG 深熔焊的根部熔深增加约 14%, 两种焊接方法接头的组织类型相同, 均为 α -Al 基体+化合物析出相, 但常规脉冲 MIG 焊接头过热区的晶粒明显较为粗大; 拉伸试样均断在热影响区处, 断口呈典型的韧性断裂形貌, 高频脉冲 MIG 接头的强度系数约为 79%, 较常规脉冲 MIG 焊接头的高出约 4%; 侧弯试样弯曲 180° 后, 受拉面均无裂纹, 焊接接头的塑性及熔合良好。对于 6082-T6 铝合金 15 mm 板厚的对接接头, 高频脉冲 MIG 焊的焊接成形及接头的组织和性能优于常规脉冲 MIG 焊。

关键词: 6082-T6 铝合金中厚板; 高频脉冲 MIG 深熔焊; 焊缝成形; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG434.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2023)11-0051-05

Microstructure and Properties of High Frequency Pulse MIG Butt Joint for 6082 Aluminum Alloy Plate

FU Ningning¹, ZHOU Lujun¹, ZHU Xingxing¹, QU Zongqing², LIU Yuyang², WANG Wenchao²,
DING Chenggang², LI Songwei³

1. CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., Nanjing 210031, China
2. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China
3. Ansteel Group, Anshan 114011, China

Abstract: In this paper, the appearance of weld, microstructure and mechanical properties of the butt joint 6082-T6 aluminum alloy (medium plate thickness is 15 mm) were investigated by high-frequency pulse MIG deep penetration welding (welding heat input $E=15.21$ kJ/cm). The joint conditions: groove angle 40°, welding gap 1mm, thickness of root face 0.5 mm, 3 layers and 3 runs. The research results showed that compared with conventional pulse MIG welding (deep penetration welding mode), under the same joint conditions, less welding heat input (for the conventional pulse MIG, $E=17.12$ kJ/cm, high-frequency pulse MIG deep penetration welding, $E=15.21$ kJ/cm, decreased by about 11%), the root penetration of high-frequency pulse MIG deep penetration welding is increased about 14%. The microstructure types of the joints of the two welding methods were the same, both of which are α -Al matrix+compound precipitated phase, but the grain size in overheated zone of conventional pulse MIG welding was significantly coarser; The tensile specimens were all fractured in the heat affected zone, with typical ductile fracture morphology. The strength coefficient of high-frequency pulse MIG joints is about 79%, which was about 4% higher than that of conventional pulse MIG welded joints; After the side bending samples were bent 180°, the tensile surface of SBB samples were all free of cracks, it showed that the plasticity of the welded joint is

收稿日期: 2023-08-07

作者简介: 付宁宁(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事轨道交通装备制造先进连接技术的研究。E-mail: funing1005@163.com。

better,also the fusion of the welded joint. For the butt joint of 6082-T6 aluminum alloy medium plate (thickness 15mm) , the appearance of weld,microstructure and properties of high-frequency pulse MIG welding were superior to conventional pulse MIG welding.

Keywords: 6082-T6 aluminum alloy medium plate; High frequency pulse MIG deep penetration welding; butt joint; weld appearance; microstructure; mechanical properties

引用格式: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.

Citation:FU Ningning, ZHOU Lujun, ZHU Xingxing, et al. Microstructure and Properties of High Frequency Pulse MIG Butt Joint for 6082 Aluminum Alloy Plate[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(11): 51-55.

0 引言

铝合金地铁车体由底架、侧墙、端墙、车顶组成。作为承载部件的底架最为关键,关系着整车的质量;底架包含边梁、地板、牵枕梁,其中牵枕梁对底架乃至对整车的安全都起着关键作用^[1-3]。牵枕梁结构中包含着多种厚度的铝合金对接接头,其结构复杂、焊缝集中、焊接难度大,用传统的常规脉冲焊接方法进行焊接,难以保证焊接接头质量^[4-5]。

与常规脉冲 MIG 焊相比,高频脉冲 MIG 焊在相近的焊接线能量(热输入)下可获得更大的脉冲电弧能量密度,具有明显的优势^[6-7]:(1)“一脉一滴”的高频、高速熔滴过渡特点,使焊接速度更快,与常规脉冲 MIG 焊相比,焊接速度可提高 30%~40%;(2)弧柱收窄,具有压缩电弧特性,增加了焊接熔深及电弧的穿透力;(3)熔池金属在周期性变化的力的作用下得到了充分的振荡、冲击和搅拌,有效降低焊接气孔的敏感性;(4)基本无焊接飞溅。

本文采用高频脉冲 MIG 深熔焊工艺方法,对 15 mm 厚的 6082-T6 铝合金板进行对接焊,研究了接头的焊接成形、微观组织和力学性能,以期地为地铁铝合金焊接制造的工程化应用提供研究依据。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料及焊接准备

采用常规脉冲 MIG 焊(深熔焊模式)和高频脉冲 MIG 焊两种焊接方法。高频(高速)脉冲 MIG/MAG 焊机的工作原理:利用双芯片精确控制 IGBT 变频焊机的输出电弧工作方式,使焊机输出“不间断”脉冲电弧即高速脉冲弧,从而增大电弧的线能

量,利用芯片高速运算、模拟斩波输出焊接波形,使熔滴过渡频率提高,焊接电流越大,频率提升越大。

试验母材为 2 块规格 300 mm×150 mm×15 mm 的 6082-T6 铝合金,焊材选用直径 1.2 mm 的 ER5356,母材和焊材熔敷金属的化学成分和力学性能见表 1、表 2。接头条件:坡口角度 40°,焊接间隙 1 mm,钝边 0~0.3 mm。为便于对比分析,常规脉冲 MIG 焊接头简称为 O401 接头,高频脉冲 MIG 焊接头简称为 G401 接头。G401 接头焊接线能量为 1521 kJ/cm, O401 接头焊接线能量为 17.12 kJ/cm。保护气体采用纯度 99.999% 的氩气,气流量为 20 L/min。实际施焊的接头条件和工艺参数见表 3。

表 1 主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical compositions (wt. %)

材料		Si	Fe	Cu	Mn	
6082-T6	标称	0.7~1.3	≤0.5	≤0.1	0.4~1	
	实测	1.008 4	0.421 6	0.057 3	0.704 3	
ER5356熔敷金属		0.25	0.40	0.10	0.05~0.20	
材料		Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6082-T6	标称	0.6~1.2	≤0.25	≤0.2	≤0.1	余量
	实测	1.137 2	0.085 8	0.021 4	0.026	余量
ER5356熔敷金属		4.50~5.50	0.05~0.20	0.10	≤0.10	余量

表 2 主要力学性能

Table 2 Main mechanical properties

材料		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
6082-T6	标称	≥255	≥300	≥9
	实测	281	319	17
ER5356 熔敷金属		110	240	17

1.2 试验方法

1.2.1 焊接接头的金相观察和组织分析

参照 EN ISO 17639:2022《焊接接头的宏观和显微检验》标准的规定^[8],截取接头的横向试样,用 DMi8 型莱卡金相显微镜观察和分析 O401 和 G401

表 3 实际焊接工艺参数

Table 3 True welding process parameters

序号/ 工况	焊法	焊层 /焊道 数	电 流 /A	电 压 /V	焊速 /(cm· min ⁻¹)	f/Hz	E /(kJ· cm ⁻¹)	$E_{\text{总}}$ /(kJ· cm ⁻¹)
G401	高频脉 冲MIG	1/1	197	23.8	40	250	5.63	15.21
		2/1	183	23.2	45	250	4.53	
		3/1	195	24.3	45	250	5.05	
O601	常规脉 冲MIG	1/1	213	24	40	200	6.13	17.12
		2/1	203	23.9	40	200	5.82	
		3/1	220	24.5	50	200	5.17	

注: E 为每个焊层(焊道)的焊接线能量, $E=0.8 \times IU/v$; $E_{总}$ 为每个焊层(焊道)焊接线能量之和。

接头的宏观形貌和金相组织,对比分析焊缝成形的宏观形貌、根部的坡口面熔深及焊缝和过热区的微观组织特征。

1.2.2 拉伸断口 SEM 观察和分析

使用 SUPRA-55 场发射扫描电镜观察和分析接头拉伸标准试样断口,判断其断裂特征。

1.2.3 焊接接头力学性能测试和分析

(1) 拉伸试验。参考标准 EN ISO 4136: 2022 《焊接接头的横向拉伸试验》^[9],使用 WDW-300E 微机控制电子式万能试验机,对 G401、O401 接头的标准试样进行拉伸试验,拉伸速度为 2 mm/s。拉伸标准试样的形状、尺寸和规格如图 1a 所示。

(2) 弯曲试验。参照标准 EN ISO 5173: 2016 《金属材料焊缝的有损检验-弯曲试验》^[10],使用 DLGX-E001 万能试验机对接头进行侧弯试验,评定焊缝的塑性及是否存在未熔合的焊接缺陷。弯曲试样的形状、尺寸和规格见图 1b。

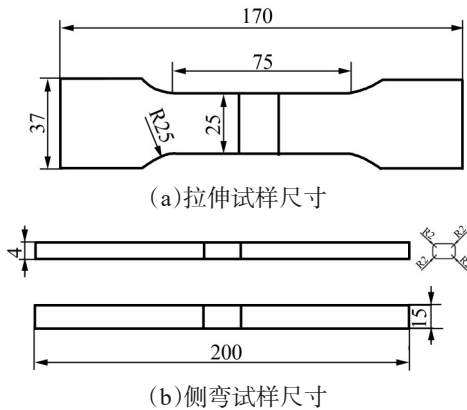


图 1 力学性能试样形状和尺寸

Fig. 1 Shape and Size of Mechanical Property Specimens

2 试验结果与分析

2.1 焊接接头的宏观形貌分析

G401、O401 接头的宏观形貌如图 2 所示。由图可知,在相同的接头条件下,与常规脉冲 MIG 焊相比,采用较小的焊接线能量($E_{G401}=15.21$ kJ/cm, $E_{O401}=17.12$ kJ/cm,焊接热输入减小约 11%),高频脉冲 MIG 深熔焊接头的根部熔深较大,为 4.8 mm,根部熔深增加约 14%(4.2 mm→4.8 mm),且两种接头的焊缝与母材熔合良好,焊接成形良好,焊缝的外观质量达到 EN ISO 10042: 2005《铝及其合金弧焊接头的缺陷评定组别》的 B 级焊缝的要求^[11]。

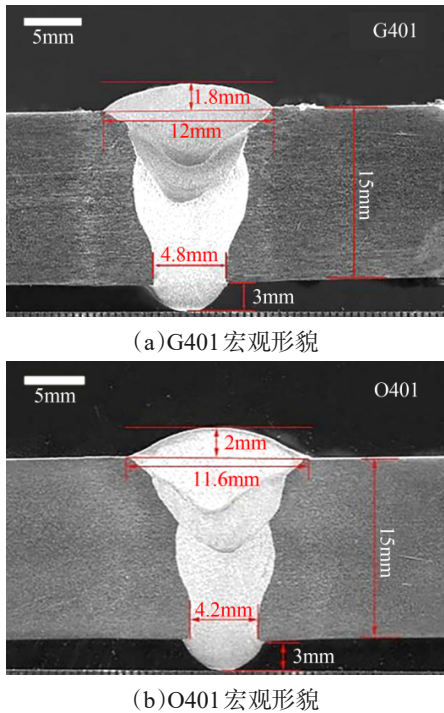


图 2 两种工况下的焊接接头宏观形貌

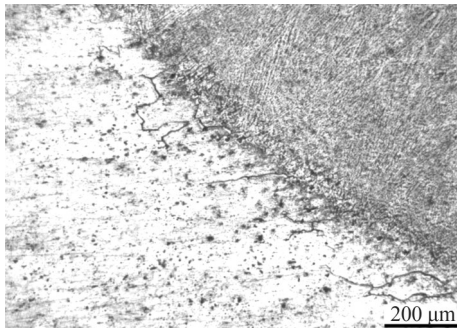
Fig. 2 Macro morphology of welded joints under two working conditions

2.2 焊接接头的微观形貌分析

O401 和 G401 接头盖面熔合区的显微组织如图 3 所示,两种接头的显微组织类型相同,均为 α -Al 固溶体基体+化合物析出相。焊缝靠近熔合线一侧形成了沿着散热方向生长、较为粗大的柱状晶组织。相比 G401 接头,O401 接头过热区的晶粒更为粗大(见图 3b),这可能是常规脉冲 MIG 焊的能量密度集中度不及高频脉冲 MIG 焊,焊接热输入又较大(17.12 kJ/cm)的原因。



(a)G401 盖面熔合线



(b)O401 盖面熔合线

图3 G401与O401接头盖面熔合区金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of the fusion zone of G401 and O401 joint cover

2.3 焊接接头拉伸性能试验结果与分析

G401和O401接头的拉伸试验结果如表4所示, G401和O401工况的平均抗拉强度分别为237.7 MPa和227.8 MPa,接头的强度系数 $T[R_m(W)/R_m(BM)]$,即接头的抗拉强度/母材抗拉强度的下限,分别为79.2%和75.9%。由此可见,G401和O401接头的强度系数都超过了60%,均满足EN ISO 15614-2:2005《铝及其合金弧焊工艺评定》的要求^[12],这是因为焊接填充量较小,热影响区过热软化程度较低,同时选择了40°坡口角度(标准一般为70°坡口角度)。与O401接头相比,G401接头的强度系数提高了约4%,这归因于高频脉冲MIG焊的压缩电弧能量密度较为集中,以及在相同的接头条件下,其热输入较小($E=15.21 \text{ kJ/cm}$)。

两种接头的拉伸试样均断裂于热影响区的软化区。拉伸断口的形貌特征相似,为大量的韧窝形貌,呈现出典型的韧性断裂特征。

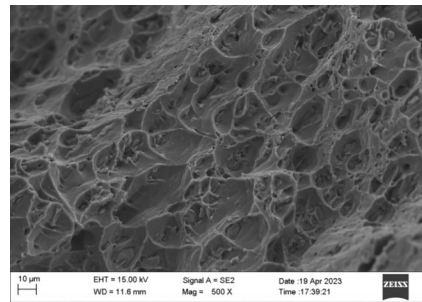
2.4 焊接接头弯曲性能试验结果与分析

O401和G401接头的侧弯试验结果如图5所示。当弯曲角度达到180°时,侧弯试样的受拉面没

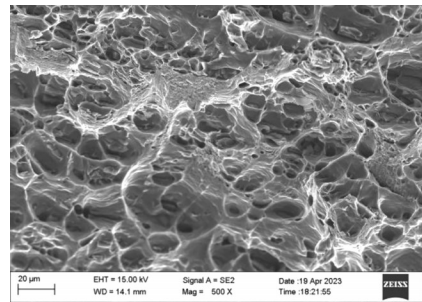
表4 G401和O401接头的拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results of welded butt joints G401 and O401

编号	接头尺寸 /mm(mm ²)	拉伸 载荷 /kN	抗拉 强度 /MPa	平均抗 拉强度 /MPa	断裂 区域	强度 系数 /%
G401	25.1×15.1(376.5)	88.3	234.4	237.7	热影 响区	79.2
	25.0×14.9(372.5)	89.8	241.0			
O401	25.1×14.8(371.5)	84.2	226.7	227.8	热影 响区	75.9
	25.2×15.1(380.5)	87.1	228.9			



(a)G401 断口形貌



(b)O401 断口形貌

图4 拉伸试样断口扫描形貌

Fig. 4 Fracture scanning morphology of tensile specimens

有发现裂纹。这表明两种接头的塑性良好,焊缝根部、层间、焊缝与母材熔合区的熔合情况良好,没有出现未熔合的缺陷。

3 结论和建议

(1)板厚15 mm的6082-T6铝合金G401和O401接头成形良好,质量达到B级焊缝的要求。焊缝金属层间、焊缝金属与母材熔合良好,未出现未熔合等缺陷。高频脉冲MIG深熔焊能显著提高焊缝根部的熔深,与O401接头相比,在焊接热输入降低约11%的情况下,G401接头的根部熔深增加约14%。

(2)G401和O401接头的组织类型相同,均为 α -Al固溶体基体+化合物析出相。与G401接头相比,



Fig. 5 Side bending specimen

O401 接头的焊接热影响区过热区的晶粒较为粗大。

(3)G401 和 O401 接头的拉伸试样呈典型的塑性断裂。与 O401 接头相比,G401 接头的强度系数略高,高出约 4%,达到 79.2%,均满足铝合金焊接工艺评定标准的要求。经 180°弯曲,两种接头的侧弯试样受拉面均未发现裂纹,焊接接头的塑性良好。

(4)高强铝合金进行 MIG 焊接,在现行欧洲(国际)标准的基础上,建议考虑选用新型电弧焊工艺,并适当调整接头条件,如适当减小焊接坡口角度。这样可以减少焊接填充量、焊接线能量(热输入),提高焊接生产效率,同时也能降低焊接热损伤,进而提高接头的强度系数。

参考文献:

- [1] 张子傲,张知航,黄继华,等.高速列车铝合金车体焊接工艺研究进展[J].轨道交通材料,2023,2(01):1-7.
ZHANG Z A, ZHANG Z H, HUANG J H, et al. Advance in the Research of Welding Procedures for Aluminum Car Bodies of High Speed Train[J]. Materials for Rail Transit, , 2023, 2(01): 1-7.
- [2] 但龙. 6XXX 系铝合金车体型材粗晶的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2023, 51(04): 29-36.

DAN L. Research on the coarse grain of 6××× series aluminum profile for rail vehicle body[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2023, 51(04): 29-36.

- [3] Shi T Y, Wang C M, Mi G Y, et al. A study of micro-structure and mechanical properties of aluminum alloy using laser cleaning[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 60-66.
- [4] 王宁. 地铁铝合金车体的局部焊接结构可靠性研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
WANG N. Research on the Reliability of Local Welding Structure of Subway Aluminum Alloy Vehicle Body [D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Technology, 2022.
- [5] 郑长鑫, 蔡明芳. MIG 焊接电流对 6082 铝合金薄板性能的影响[J]. 内燃机与配件, 2023(09): 73-75.
ZHENG C X, CAI M F. Effect of MIG Welding Current on Properties of 6082 Aluminum Alloy Thin Plate [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(09): 73-75.
- [6] 郭超超, 丁成钢, 杨大龙. S355J2W+N 耐候钢板根部大熔深 MAG 对接焊工艺及接头的组织和性能[J]. 电焊机, 2020, 50(11): 50-54.
GUO C C, DING C G, YANG D L. Study on deep penetration root welding proce-dure, microstructure and mechanical properties of S355J2W+N weather-resistant steel MAG butt welded joint[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(11): 50-54.
- [7] 李宋伟. 地铁底架 6082-T6 铝合金中厚板 MIG 深熔焊工艺[D]. 辽宁: 大连交通大学, 2023.
LI S W. MIG deep penetration welding process for 6082-T6 aluminum alloy medium thick plate of subway underframe [D]. Niaoning: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [8] EN ISO 17639: 2022 焊接接头的宏观和显微检验[S]. 2022.
- [9] EN ISO 4136: 2022 焊接接头的横向拉伸试验[S]. 2022.
- [10] EN ISO 5173: 2016 金属材料焊缝的有损检验-弯曲试验[S]. 2016.
- [11] EN ISO 10042: 2005 铝及其合金弧焊接头的缺陷评定组别[S]. 2005.
- [12] EN ISO 15614-2: 2005 铝及其合金弧焊工艺评定[S]. 2005.