

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.12.12

## 6082 铝合金中厚板高频脉冲MIG对接焊工艺 及接头的残余应力

张 亚<sup>1</sup>, 戴忠晨<sup>1</sup>, 李东风<sup>2</sup>, 曲宗庆<sup>2</sup>, 刘宇阳<sup>2</sup>, 王文超<sup>2</sup>, 丁成钢<sup>2</sup>, 冯 寒<sup>3</sup>

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焊和常规脉冲MIG焊进行了6082-T6铝合金8 mm厚板的对接焊工艺试验(焊接接头条件: 焊接间隙1 mm, 钝边为0.5 mm、坡口角度分别为50°和60°), 对比分析了焊缝成形规律及焊后焊趾处的残余应力值。研究表明: 两种焊接方法的焊缝成形质量良好, 与常规脉冲MIG焊相比, 高频脉冲MIG焊根部熔深较大, 坡口角度为50°时, 在相同的热输入(10.7 kJ/cm)条件下, 根部熔宽增加约20%, 坡口角度60°时, 根部熔宽增加约16%; 与常规脉冲MIG焊相比, 高频脉冲MIG焊的气孔敏感性较小, 焊接残余应力较小。坡口角度为60°时, 横向残余应力( $\sigma_y$ )降低约为18.5%, 纵向残余应力( $\sigma_x$ )下降约为8.3%; 坡口角度为50°, 横向残余应力( $\sigma_y$ )降低约为18%, 纵向残余应力( $\sigma_x$ )下降约为7%; 坡口角度由60°减小为50°, 高频脉冲焊焊趾处的残余应力下降约6%。

**关键词:** 6082-T6铝合金中厚板; 高频脉冲MIG深熔焊; 对接焊工艺; 焊接残余应力; 焊接气孔

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2023)12-0076-05

## Welding Procedure & Residual Stress of 6082 6082-T6 Aluminum Alloy Medium Plate Butt Welded Joint by High-frequency Pulse MIG Welding Process

ZHANG Ya<sup>1</sup>, DAI Zhongchen<sup>1</sup>, LI Dongfeng<sup>2</sup>, QU Zongqing<sup>2</sup>, LIU Yuyang<sup>2</sup>, WANG Wenchao<sup>2</sup>,

DING Chenggang<sup>2</sup>, FENG Han<sup>3</sup>

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, welding procerure test of 6082 aluminum alloy medium plate butt joint were done using high-frequency pulse MIG welding and conventional pulse MIG welding processes with a 1 mm gap, plate thickness 8 mm, and a groove angle of 50° and 60° respectively; The macroscopic morphology of welded joints(welding appearance)and the residual stress at welding toe after welding were studied. The experimental results showed that welding appearance were better for two welding processes, compared with conventional pulse MIG welding process,high-frequency pulse MIG welding process possessed deeper penetration,wider fusion width,lower porosity sensitivity and welding residual stress. Compared with conventional pulse MIG welding process,when groove angle was 50°,at the same welding heat input(10.7 kJ/cm),root fusion width increased about 20% by high-frequency pulse MIG welding process,about 16% when 60° groove angle.Transverse residual stress( $\sigma_y$ ) at welding toe decreased about 18.5% when groove angle was 60° by high-frequency pulse MIG welding process,about 8.5% for longitudinal residual stress( $\sigma_x$ ). When groove angle was 50°,transverse residual stress( $\sigma_y$ ) at welding toe decreased about 18% ,7% for longitudinal residual stress( $\sigma_x$ ) by high-frequency pulse MIG welding process.Decreased from 60° to 50° for groove angle ,residual stress at welding toe decreased about 6% by high-frequency pulse MIG welding.

收稿日期: 2023-10-05 修回日期: 2023-11-12

作者简介: 张 亚(1982—),男,高级工程师,主要从事轨道交通车辆制造相关研究。E-mail:csrzhangya@163.com。

**Keywords:** 6082-T6 aluminum alloy medium plate; high frequency pulse MIG deep penetration welding; butt welding procedure; welding residual stress; welding porosity

**引用格式:**张亚,戴忠晨,李东风,等. 6082 铝合金中厚板高频脉冲 MIG 对接焊工艺及接头的残余应力[J]. 电焊机, 2023, 53(12): 76–80.

**Citation:**ZHANG Ya, DAI Zhongchen, LI Dongfeng, et al. Welding Procedure & Residual Stress of 6082 6082-T6 Aluminum Alloy Medium Plate Butt Welded Joint by High-frequency Pulse MIG Welding Process[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(12): 76–80.

0 前言

6082 高强铝合金由于具有比强度较高、优良的抗腐蚀以及良好的焊接性,被广泛地应用于轨道交通装备的焊接制造,可以实现结构制造轻量化的目的。相对于其他钢铁材料,铝合金具有较特殊的理化性能,如熔融温度较低,热膨胀系数、导热系数较大,这对铝合金的焊接,尤其是电弧熔化焊带来了难题<sup>[1]</sup>。首先,当铝合金进行焊接时,由于其独特的物理、化学特性,将会产生一系列的焊接缺陷。其中,气孔是铝合金最常见的焊接缺陷,气孔缺陷会降低接头的有效承载能力及疲劳性能,对接头的力学性能影响较大<sup>[2-3]</sup>。其次,铝合金接头较大的焊接残余应力,会增加焊接热裂纹的敏感性并降低工件后续加工的尺寸稳定性<sup>[4-7]</sup>。

目前,铝合金城轨车体“牵枕缓”及“底架”中厚板部件采用常规脉冲 MIG 焊工艺方法进行焊接制造,在焊接制造过程中,存在诸多问题:(1)焊接填充量较大,生产效率较低;(2)焊接残余应力较大;(3)焊接未熔合及气孔缺陷较为敏感;(4)接头的失强(软化效应)较为突出。这严重制约了高强铝合金在轨道交通装备制造行业中的使用。

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<sup>[8-9]</sup>:(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,焊接可提高约 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,焊接气孔的敏感性得以有效的降低;(4)基本无焊接飞溅。

正是在这种背景下,为解决轨道交通装备铝合金结构焊接制造中存在的问题,本文采用高频脉冲

MIG 焊新工艺方法,进行了 8 mm 厚 6082-T6 铝合金板对接焊工艺试验,对接头的焊接残余应力进行了测试、分析,为焊接新工艺在地铁铝合金焊接制造中工程化的应用提供研究依据。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验母材及焊接材料

母材选用 350 mm×150 mm×8 mm 的 6082-T6 铝合金板,焊材选用 $\varnothing$ 1.2 mm 规格的 ER5356 焊丝,焊接保护气体采用 EN ISO14175 II 型气体(100%Ar, 纯度 99.999%)。母材、熔敷金属的化学成分如表 1 所示,其力学性能如表 2 所示。

表 1 6082-T6 母材、ER5356 熔敷金属主要化学成分(质量分数,%)

| Table 1 6082-T6, ER5356 main chemical components (wt. %) |    |           |           |       |           |
|----------------------------------------------------------|----|-----------|-----------|-------|-----------|
| 材料                                                       |    | Si        | Fe        | Cu    | Mn        |
| 6082-T6<br>(8 mm)                                        | 标称 | 0.7~1.3   | ≤0.5      | ≤0.1  | 0.4~1.0   |
|                                                          | 实测 | 1.006     | 0.342     | 0.028 | 0.534     |
| 熔敷金属 ER5356                                              |    | 0.25      | 0.40      | 0.10  | 0.05~0.20 |
| 材料                                                       |    | Mg        | Cr        | Zn    | Ti Al     |
| 6082-T6<br>(8 mm)                                        | 标称 | 0.6~1.2   | ≤0.25     | ≤0.2  | ≤0.1 余量   |
|                                                          | 实测 | 0.824     | 0.133     | 0.026 | 0.01 余量   |
| 熔敷金属 ER5356                                              |    | 4.50~5.50 | 0.05~0.20 | 0.10  | ≤0.10 余量  |

表 2 6082-T6 铝合金母材及 ER5356 熔敷金属的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of 6082-T6 aluminum alloy and ER5356

| 材料                |    | 屈服强度<br>/MPa | 抗拉强度<br>/MPa | 断后伸长率<br>/% |
|-------------------|----|--------------|--------------|-------------|
| 6082-T6<br>(8 mm) | 标称 | ≥240         | ≥295         | ≥8          |
|                   | 实测 | 253~257      | 312~315      | 11~13       |
| 熔敷金属 ER5356       |    | 110          | 240          | 17          |

1.2 焊接工艺试验

选用全数字化 IGBT 逆变式高频脉冲 MIG 焊机 and 常规脉冲 MIG 焊机,进行对接试板的焊接,焊接试板的尺寸为 350 mm×300 mm×8 mm,拟定的焊接

表3 拟定的焊接工艺参数  
Table 3 Proposed welding process parameters

| 序号/<br>工况 | 焊法          | 接头条件                    |            |            | 焊接参数       |          |          |                                | $E$<br>/(kJ·cm <sup>-1</sup> ) | $E_{\text{总}}$<br>/(kJ·cm <sup>-1</sup> ) |
|-----------|-------------|-------------------------|------------|------------|------------|----------|----------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|
|           |             | 坡口角度<br>$\alpha/^\circ$ | 间隙<br>b/mm | 钝边<br>c/mm | 焊层/<br>焊道数 | 电流<br>/A | 电压<br>/V | 焊速<br>/(cm·min <sup>-1</sup> ) |                                |                                           |
| G601      | 高频脉冲<br>MIG | 60                      | 1          | 0.5        | 1/1        | 205      | 24       | 50                             | 4.72                           | 10.82                                     |
|           |             |                         |            |            | 2/1        | 220      | 26       | 45                             | 6.1                            |                                           |
| G501      | MIG         | 50                      | 1          | 0.5        | 1/1        | 200      | 24       | 50                             | 4.6                            | 10.7                                      |
|           |             |                         |            |            | 2/1        | 220      | 26       | 45                             | 6.1                            |                                           |
| O601      | 常规脉冲<br>MIG | 60                      | 1          | 0.5        | 1/1        | 215      | 25       | 45                             | 5.73                           | 12.09                                     |
|           |             |                         |            |            | 2/1        | 225      | 26.5     | 45                             | 6.36                           |                                           |
| O501      | MIG         | 50                      | 1          | 0.5        | 1/1        | 210      | 24       | 50                             | 4.83                           | 10.7                                      |
|           |             |                         |            |            | 2/1        | 220      | 25       | 45                             | 5.87                           |                                           |

注： $E$ —每个焊层(焊道)的焊接线能量； $E_{\text{总}}$ —每个焊层(焊道)焊接线能量之和。

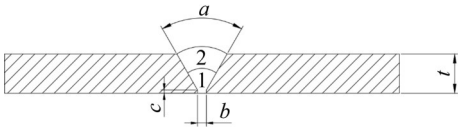


图1 接头示意  
Fig. 1 Joint condition sketch map

工艺参数如表3所示,焊接接头示意如图1所示。

1.3 接头的宏观形貌/焊缝成形分析

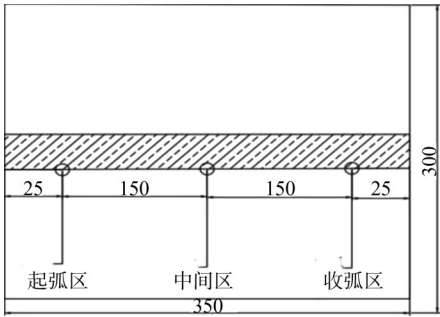
参照 EN ISO 17639:2022《焊接接头的宏观和显微检验》标准的规定<sup>[10]</sup>,截取接头的横向试样,用平板扫描仪,对4种工况接头的宏观形貌进行扫描、观察和分析,对比焊缝成形的宏观形貌、根部的坡口面熔深以及焊接气孔缺陷形成的敏感性。

1.4 焊接接头残余应力的测试

使用KJS-3压痕应力应变测试仪(见图2a),参照 GB/T 24179—2023《金属材料残余应力测定压痕应变法》标准的规定<sup>[11]</sup>,对接头焊趾处的残余应力进行测试,残余应力布点示意图2b,分别在焊缝的起弧、中间和收弧区进行测试;测试结果中的 $\sigma_x$ 为纵向残余应力, $\sigma_y$ 为横向残余应力。



(a)KJS-3压痕应力应变测试仪



(b)应力测试布点示意

图2 焊接接头残余应力的测试

Fig. 2 Rresidual stress test of welded joints

表4 焊缝成形数据

Table 4 Weld forming data

| 工况   | 焊缝成形系数 $\Phi$<br>( $B/H$ ) | 余高系数 $\psi$<br>( $B/h$ ) | 盖面熔宽<br>$B/\text{mm}$ | 根部熔宽<br>$B_r/\text{mm}$ |
|------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| G501 | 1.6                        | 5.81                     | 12.8                  | 6.0                     |
| O501 | 1.4                        | 4.67                     | 11.2                  | 5.0                     |
| G601 | 1.95                       | 7.80                     | 15.6                  | 5.0                     |
| O601 | 1.88                       | 6.82                     | 15.0                  | 4.3                     |

2 试验结果与分析

2.1 焊接接头的宏观形貌/焊缝成形

G601、O601、G501 和 O501 工况的接头宏观形貌如图3所示,焊缝成形数据如表4所示。

不难发现,与常规脉冲 MIG 焊接头相比,高频脉冲 MIG 焊接头的成形质量较好,表现为以下两个方面:(1)成形系数 $\Phi$ 、余高系数 $\psi$ 较大。坡口角度为

50°时, $\Phi$ 高出约14%, $\psi$ 高出约24%;60°坡口时, $\Phi$ 高出约4%, $\psi$ 高出约26%, $\Phi$ 、 $\psi$ 值越大,表明盖面的熔宽越大、盖面焊缝与母材金属间的过渡愈加平滑;

(2)根部熔宽(坡口面熔深)较大。坡口角度为 $50^{\circ}$ 时, $B_R$ 值高出约20%, $60^{\circ}$ 坡口时, $B_R$ 值高出约16%。

值得注意的是,对于G501、O501工况,在其接头条件(板厚、坡口形状和角度以及焊接间隙和钝边尺寸)相同,焊接热输入亦相同( $10.7\text{ kJ/cm}$ )的状况下,与O501工况相比,G501工况的根部熔宽(坡口面熔深) $B_R$ 值增加约20%,由此可见,高频脉冲MIG焊可显著增加高强铝合金的焊接熔深,可实现地铁6082铝合金中厚板的深熔焊。

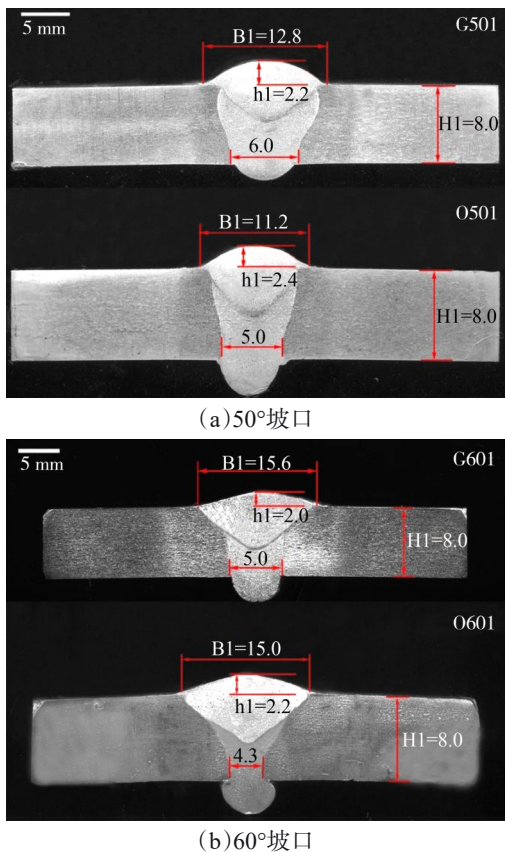


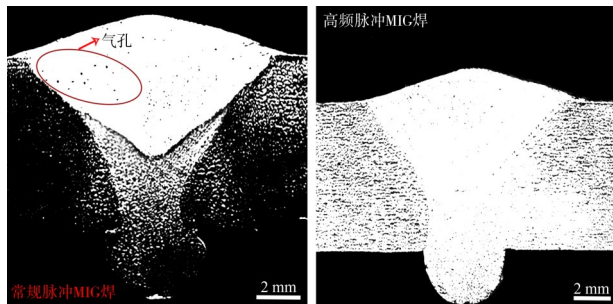
图3 焊接接头的宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of welded joints

与常规脉冲MIG焊相比(见图4a),高频脉冲MIG焊铝合金焊接气孔的敏感性明显降低,气孔数量较少(见图4b),而常规脉冲MIG焊焊缝气孔数量较多,且多集中在第二层(盖面)。这是由于高频脉冲电弧具有较高的频率( $200\sim 250\text{ Hz}$ ),对焊接熔池具有较强烈的搅拌作用,这使液态金属内形成的气泡得以排除,从而使气孔的敏感性显著降低<sup>[12]</sup>。

## 2.2 焊接接头残余应力结果与分析

接头焊后焊趾处的焊接残余应力测试结果见



(a)脉冲MIG焊 (b)高频脉冲MIG焊

图4 铝合金MIG焊接接头气孔敏感性对比

Fig. 4 Comparison of aluminum alloy welding pores with different welding process methods

表5。可以发现:(1)坡口角度相同时,高频脉冲MIG焊的残余应力值较低。坡口角度为 $60^{\circ}$ 时,与常规脉冲MIG相比,横向残余应力 $\sigma_y$ 均值下降约18.5%,纵向残余应力 $\sigma_x$ 值下降约8.3%;坡口角度为 $50^{\circ}$ ,横向残余应力 $\sigma_y$ 均值下降约15%,纵向残余应力 $\sigma_x$ 值下降约7%;(2)即坡口角度减小时,焊接残余应力值降低。与 $60^{\circ}$ 坡口角度相比,无论高频脉冲MIG焊还是常规脉冲MIG焊,选用 $50^{\circ}$ 坡口角度,焊趾处残余应力均值降低约为6%~7%。

表5 对接接头焊趾处残余应力值

Table 5 Residual stress value at weld toe of butt joint

| 工况                             | 测试区域 | 残余应力/MPa         |    |                  |     |
|--------------------------------|------|------------------|----|------------------|-----|
|                                |      | ( $\sigma_y$ )横向 | 平均 | ( $\sigma_x$ )纵向 | 平均  |
| G601<br>$E=10.82\text{ kJ/cm}$ | 起弧   | 51               |    | 118              |     |
|                                | 中间   | 57               | 53 | 125              | 120 |
|                                | 收弧   | 50               |    | 116              |     |
| O601<br>$E=12.9\text{ kJ/cm}$  | 起弧   | 61               |    | 124              |     |
|                                | 中间   | 72               | 65 | 139              | 130 |
|                                | 收弧   | 62               |    | 128              |     |
| G501<br>$E=10.7\text{ kJ/cm}$  | 起弧   | 49               |    | 113              |     |
|                                | 中间   | 53               | 50 | 119              | 114 |
|                                | 收弧   | 48               |    | 110              |     |
| O501<br>$E=10.7\text{ kJ/cm}$  | 起弧   | 57               |    | 118              |     |
|                                | 中间   | 68               | 61 | 132              | 123 |
|                                | 收弧   | 59               |    | 120              |     |

值得注意的是,对于G501、O501工况,在相同的焊接热输入状况下( $10.7\text{ kJ/cm}$ ),高频脉冲MIG焊接头的焊接残余应力降低较为明显, $\sigma_y$ 均值下降约15%, $\sigma_x$ 值下降约7%。这是由于高频脉冲MIG焊电弧较为集中,呈压缩电弧形态,焊接热循环的温度峰值较低,作用的尺寸范围较小的原因,这已被笔者的相关试验研究工作所证实<sup>[9]</sup>。

### 3 结论

(1)与常规脉冲MIG焊接头相比,高频脉冲MIG焊接头的焊缝成形质量较好,成形系数 $\Phi$ 、余高系数 $\phi$ 较高,盖面焊缝与母材金属间的过渡较为平滑;坡口角度无论为 $50^\circ$ 还是 $60^\circ$ ,6082-T6铝合金板厚8 mm的对接接头,焊缝层间、焊缝金属与母材金属间均实现了良好的熔合。

(2)与常规脉冲MIG焊相比,高频脉冲MIG焊根部熔深较大。坡口角度为 $50^\circ$ 时,在相同的热输入(10.7 kJ/cm)条件下,根部熔宽增加约20%,坡口角度 $60^\circ$ ,根部熔宽增加约16%。

(3)与常规脉冲MIG焊接头相比,高频脉冲MIG焊的焊缝气孔敏感性较小。

(4)与常规脉冲MIG焊相比,高频脉冲MIG焊的残余应力值较小。坡口角度为 $60^\circ$ 时,焊趾处的横向残余应力 $\sigma_y$ 值降低约为18.5%,纵向残余应力 $\sigma_x$ 值下降约为8.3%;坡口角度为 $50^\circ$ ,在相同的热输入时(10.7 kJ/cm),横向残余应力 $\sigma_y$ 值降低约为18%,纵向残余应力 $\sigma_x$ 值下降约为7%;坡口角度由 $60^\circ$ 减小为 $50^\circ$ ,高频脉冲焊焊趾处的残余应力值下降约为6%。

#### 参考文献:

- [1] 杜则裕. 焊接科学基础—材料焊接科学基础[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [2] 应岳峰,陈琪昊,王卫东,等. 焊丝超声振动对铝合金GMA焊缝成形及气孔的影响[J]. 航空学报, doi: 10.7527/S1000-6893.2023.28711.  
YING Y F, CHEN Q H, WANG W D, et al. Effect of ultrasonic vibration of welding wire on weld formation and pore in GMA welding of aluminum alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, doi: 10.7527/S1000-6893.2023.28711.
- [3] 马明明,廖宁宁,张弛. 激光-MIG电弧复合焊接6082-T6铝合金气孔抑制机理研究[J]. 机车车辆工艺,2023,(02):1-6.  
MA M M, LIAO N N, ZHANG C. Research on pore restraining mechanism for 6082-T6 aluminum alloy welded by Laser-MIG arc hybrid welding[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2023, (02): 1-6.
- [4] Cui S W, Tian F Y, Ma R, et al. Study on the Morphology, Microstructure, and Properties of 6082-T6 Aluminum Alloy Joints in MIG Welding[J]. Metals, 2023, 13(7):1245.
- [5] 孙宏坤,陈毅腾,李超. 铝镁合金双丝脉冲MIG焊接头组织与力学性能分析[J]. 广东造船,2022,41(04):66-69.  
SUN H K, CHEN Y T, LI C. Analysis on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum-magnesium Alloy Double-wire Pulsed MIG Welding[J]. Guangdong shipbuilding, 2022, 41(04): 66-69.
- [6] 郭帅. 6082-T6铝合金工字形梁局部稳定性与设计方法研究[D]. 陕西:西安工业大学,2023.  
GUO S. Research on Local Stability Performance and Design Method of 6082-T6 Aluminum Alloy I-shaped Beam[D]. Shanxi: Xi'an Technological University, 2023.
- [7] 姜影,郑业方,王玉才,等. 动车组用铝镁合金电机端盖的残余应力分析[J]. 冶金与材料,2023,43(02):70-71+74.  
JIANG Y, ZHENG Y F, WANG Y C, et al. Residual stress analysis of aluminum magnesium alloy motor end caps for high-speed trains[J]. Metallurgy and Materials, 2023, 43(02): 70-71+74.
- [8] 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 procedure, microstructure and mechanical properties of S355J2W+N weather resistant steel MAG butt welded joint[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(11): 50-54.
- [9] 冯寒. 6082-T6铝合金中厚板高频脉冲MIG焊工艺研究[D]. 辽宁:大连交通大学,2023.  
FENG H. Research on High Frequency Pulse MIG Welding Process for 6082-T6 Aluminum Alloy Medium and Thick Plate[D]. Liaoning: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [10] EN ISO 17639:2022, 焊接接头的宏观和显微检验[S].2022.
- [11] GB/T24179-2023 金属材料 残余应力测定 压痕应变法[S].2023.
- [12] 戴为志. 影响钢结构焊接技术进步的几个重要因素[J]. 电焊机,2020,50(09):207-211.  
DAI W Z. Several important factors affecting welding technology progress of steel structure [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(09): 207-211.