

# 7075 超高强铝合金脉冲 MIG 焊接头组织与性能

陈大军, 李忠盛, 戴明辉, 付扬帆, 代野

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:**目的 研究 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头组织与性能。方法 通过对 5 mm 厚 7075 铝合金进行脉冲 MIG 焊接, 采用 OM、SEM、万能试验机及显微硬度仪对接头的微观组织及性能进行表征。结果 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头中, 无咬边、裂纹、未熔合等焊接缺陷; 接头显微硬度分布呈现中间低两头高的特征, 平均抗拉强度高达 370 MPa 以上, 达到母材强度的 70% 以上; 焊缝区为晶粒尺寸约 25~45  $\mu\text{m}$  的等轴晶组织, 靠近熔合线的焊缝区域为柱状晶组织, 热影响区靠近熔合区一侧为类似等轴晶组织; 焊缝区为韧窝断裂, 热影响区为脆性沿晶断裂和少量韧窝断裂的混合断裂模式。结论 采用脉冲 MIG 焊技术可实现 7075 铝合金的高强连接。

**关键词:** 7075 铝合金; 脉冲 MIG 焊; 微观组织; 力学性能

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.029

**中图分类号:** TG44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0170-05

## Microstructure and Properties of 7075 High Strength Al-alloy Pulsed MIG Welding Joints

CHEN Da-jun, LI Zhong-sheng, DAI Ming-hui, FU Yang-fan, DAI Ye

(Southwest Institute of Technique and Engineering, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the microstructure and properties of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints. The 5 mm thick 7075 Al-alloy was welded with pulsed MIG welding, and the characterization of the microstructure and properties of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints was studied with OM, SEM, universal testing machine and microhardness tester. The undercut crack and incomplete fusion were not found in zone of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints. The microhardness curve of welding joint was low in the middle and high at the two ends. The average tensile strength of the joints in the experiment was higher than 370 MPa, which was over 70% of the base metal tensile strength. The microstructure of weld zone was isometric crystal of grain size of 25~45  $\mu\text{m}$ ; weld zone near fusion line was columnar crystal; and heat affected zone near fusion line was similar isometric crystal. Weld zone shows dimple fracture and the heat affected zone characterize with brittle intergranular fracture and a small amount of dimple fracture. 7075 Al-alloy could be welded with high-strength by pulsed MIG welding.

**KEY WORDS:** 7075 Al-alloy; pulsed MIG welding; microstructure; mechanical properties

7075 铝合金是一种 Al-Zn-Cu-Mg 系可热处理强化的超硬铝合金材料, 具有密度低、比强度和比刚度高、耐腐蚀性能好、塑性好、易于成形等优点, 是轻量化的首选材料, 已被广泛应用于航空航天、

兵器、船舶汽车、高速列车等军民品领域。由于铝合金极易氧化、导热率和热膨胀率大, 焊接时热裂倾向大、气孔敏感性高、焊接性很差, 采用传统熔焊工艺极易产生裂纹、气孔等焊接缺陷, 严重降低

收稿日期: 2017-09-11

作者简介: 陈大军 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为异种金属摩擦焊以及轻合金焊接。

接头的焊接强度<sup>[1-8]</sup>。脉冲 MIG 焊技术是在较低的基值电流上, 周期性地叠加高峰值的脉冲电流, 使熔滴实现稳定喷射过渡, 能显著提高铝合金的焊接质量, 是一种先进的铝合金焊接方法, 已成为国内外超硬铝合金等难焊材料焊接研究的热点<sup>[9-16]</sup>, 文中采用脉冲 MIG 焊, 对 5 mm 厚的 7075 铝合金进行焊接, 分析脉冲 MIG 焊接头的微观组织和力学性能。

## 1 试验

试验母材为 7075 铝合金, 尺寸为 300 mm×100 mm×5 mm, T6 态, 焊前试板经 410 °C×1 h、随炉冷却处理。焊丝为 IA5356, 直径为  $\Phi 1.2$  mm, 7075 铝合金含有质量分数为 0.4% 的 Si, 0.5% 的 Fe, 1.2%~2.0% 的 Cu, 0.3% 的 Mn, 2.1%~2.9% 的 Mg, 0.18%~0.28% 的 Cr, 5.1%~6.1% 的 Zn, 0.2% 的 Ti, 余量为 Al; IA5356 焊丝含有质量分数不大于 0.25% 的 Si, 不大于 0.40% 的 Fe, 不大于 0.10% 的 Cu, 0.05%~0.20% 的 Mn, 4.5%~5.5% 的 Mg, 0.05%~0.20% 的 Cr, 不大于 0.10% 的 Zn, 不大于 0.20% 的 Ti, 余量为 Al。

试验设备为福尼斯 Transpuls Synergic 5000 型脉冲 MIG 焊机, 保护气流量为 16~18 L/min, 焊接速度为 50 cm/min, 焊接电流为 160 A, 送丝速度为 20 cm/min。试验采用对接接头, 开 60° 的 V 型坡口, 根部间隙为 0.5 mm, 焊前对板材接缝两侧进行表面清理, 除去氧化层及油污, 选择体积分数为 75% 的 Ar 和 25% 的 He 作为焊接保护气体。焊后对焊接试样进行固溶+双级时效, 热处理制度为固溶温度为 475 °C, 固溶时间为 40 min, 一级时效温度为 125 °C, 一级时效时间为 5 h, 二级时效温度为 163 °C, 二级时效时间为 15 h。

采用 DX-2500 型 X 射线衍射仪进行物相分析, X 射线衍射仪工作条件为: CuK $\alpha$ , 管压为 35 kV, 管流为 20 mA, 扫描速度为 0.04 (°)/s, 扫描范围为 10°~120°; 采用 XXQ-2005 型 X 射线探伤仪进行全焊缝探伤; 采用 CSS44100 电子万能试验机测试焊接接头的拉伸性能; 采用 HM-MT1000 显微维氏硬度计测试焊接接头的显微硬度; 采用 OLYMPUS-BX60M 光学金相显微镜观察焊接接头的微观组织; 采用 Quanta200 型扫描电镜(SEM)观察焊接接头的断口形貌。

## 2 结果及分析

### 2.1 抗拉强度

7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的宏观形貌见图 1。可见, 焊缝正面外观呈漂亮的鱼鳞状, 焊缝宽度为 9~10 mm, 宽度均匀适中, 成形良好, 焊缝背面全焊透, 整条焊缝未发现咬边、宏观开裂等缺陷, X 射线

无损探伤测试表明焊接质量达到 I 级。

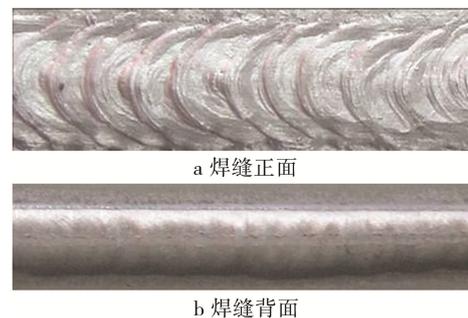


图 1 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的宏观形貌  
Fig.1 Macro morphology of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints

7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的抗拉强度见图 2。可见, 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的抗拉强度处于 359~375 MPa 之间, 平均抗拉强度为 371 MPa, 达到母材强度的 70% 以上; 拉伸试验结果还表明, 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的断后伸长率仅为 2.5%~3%, 且拉伸断口均断裂在焊接接头的热影响区部位, 说明热影响区是脉冲 MIG 焊接头的薄弱环节。

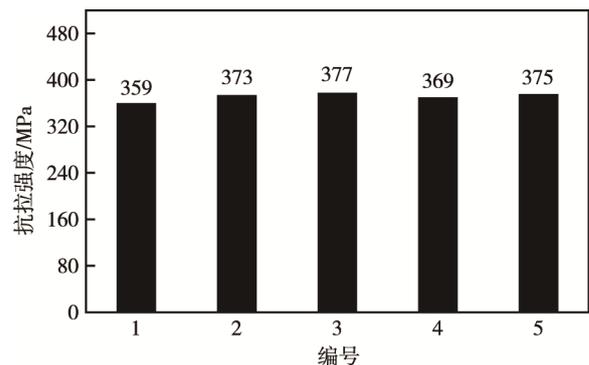


图 2 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的抗拉强度  
Fig.2 Tensile strength of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints

### 2.2 显微硬度

7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的显微硬度见图 3。

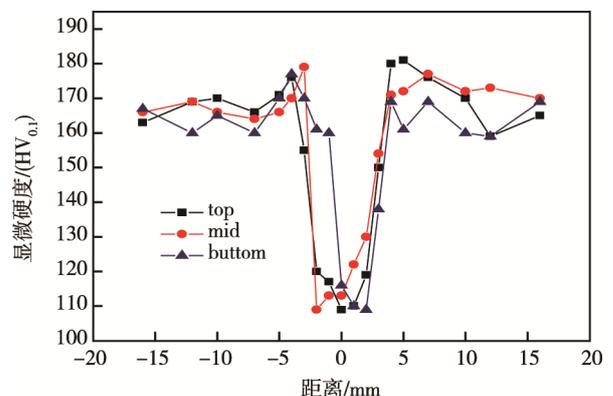


图 3 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的显微硬度  
Fig.3 Micro-hardness of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints

可见,整个接头部位上中下3条测试线硬度值均呈现中间低两头高的“马鞍形”特征,焊缝中心区域显微硬度最低,最低值为109HV;由中心往熔合线方向,硬度值逐渐增加,在熔合线附近区域达到最高值,最高值为183HV;再往母材方向硬度值小幅降低,并趋于稳定,硬度值在160HV~180HV之间波动。

### 2.3 物相组成

7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的 X 射线衍射谱见图 4。可见,母材的 XRD 衍射谱含有 Al 峰、MgZn<sub>2</sub> 峰、Al<sub>6</sub>Mn 峰、Mg<sub>32</sub>(Al,Zn)<sub>49</sub> 峰;焊缝区的 XRD 衍射谱含有 Al 峰、MgZn<sub>2</sub> 峰、Al<sub>6</sub>Mn 峰,说明母材区和焊缝区的物相组成基本相同。由于焊缝区的 MgZn<sub>2</sub> 等强化相峰值低,说明焊缝区的强化相数量较母材少。这主要是由于焊接过程液态熔池在脉冲搅拌作用下,熔化的母材金属与 IA5356 焊丝金属相互混合,致使焊缝内部物相组成基本相同,但由于焊缝区处于高温时间较长,损失了少量强化相,致使焊缝区 MgZn<sub>2</sub> 等强化相数量较母材少,这也是导致焊缝区显微硬度低于母材的原因之一。

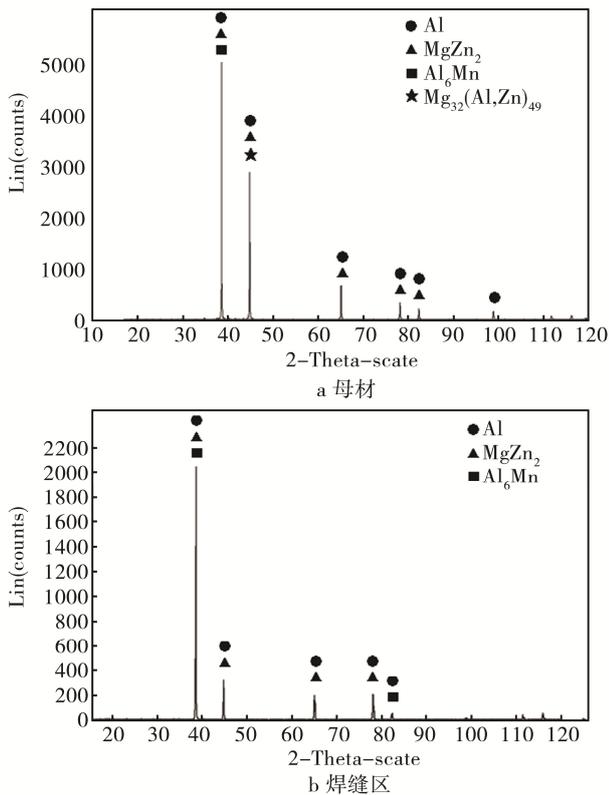


图4 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的 X 射线衍射谱  
Fig.4 XRD patterns of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints

### 2.4 微观组织

7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的微观组织见图 5。从母材微观组织(见图 5a)看出,7075 铝合金母材

为沿轧制方向排列的细小板条状组织,黑色的强化相颗粒沿压延方向弥散均匀分布;从焊缝区微观组织(见图 5b)看出,焊缝区为典型的铸造组织,表现为晶粒尺寸约 25~45 μm 的粗大等轴晶,靠近熔合线的焊缝区域为沿散热方向生长的较粗大柱状晶;热影响区为较疏松的类似等轴状的微观组织(见图 5c)。这主要是由于 7075 铝合金板厚度大,采用了较低焊接速度的工艺实现全焊透,导致焊接热输入能量较高,焊缝区处于高温时间相对较长,致使焊缝区晶粒快速生长为粗大的等轴晶,焊缝区晶粒粗化也是导致其显微硬度低于母材的原因之一。随着焊接热量的热传导,热影响区受焊接热作用,温度的升高使靠近熔合区一侧的原母材细小板条状组织发生局部再结晶,其组织形貌表现为较疏松的类似等轴状的微观组织,在拉应力作用下,极易萌生微裂纹并长大、扩展和开裂,导致 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头拉伸试验时在热影响区断裂。

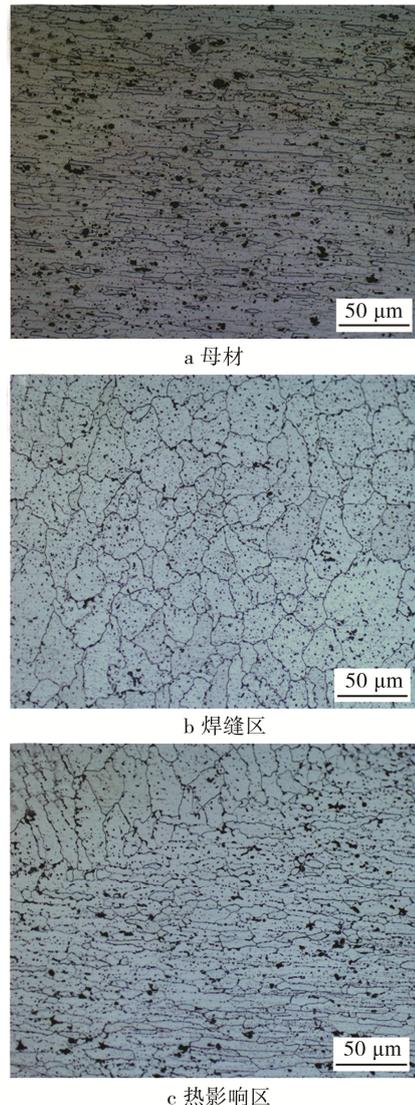


图5 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的微观组织  
Fig.5 Microstructure of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints

## 2.5 拉伸断口扫描电镜分析

7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的拉伸断口 SEM 照片见图 6。从宏观断口形貌 (见图 6a) 看出, 拉伸断口沿热影响区边缘开裂, 并向焊缝内部扩展, 也说明热影响区是 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的薄弱环节; 从焊缝区断口形貌 (见图 6b) 可以看出, 焊缝区为典型韧窝状断口, 韧窝数量多且细小均匀, 尺寸约 5~30  $\mu\text{m}$ , 部分韧窝底部含有颗粒状物质, 呈现微孔聚集型断裂特征。这主要是由于受拉应力作用发生塑性变形时, 在硬脆析出相粒子与基体的边界上会塞积许多位错, 从而产生应力集中, 当拉应力集中达到一定程度时, 在两者的边界处产生孔洞、孔隙, 萌生出微细裂纹, 随着拉应力进一步增加, 当裂纹尖端附近局部区域内的应力超过材料的断裂强度后, 基体沿硬脆析出相粒子周围发生局部断裂, 由于硬脆析出相粒子数量很多, 形成了数量多和细密的坑状韧窝。从热影响区断口形貌 (见图 6c) 看出, 热影响区断口

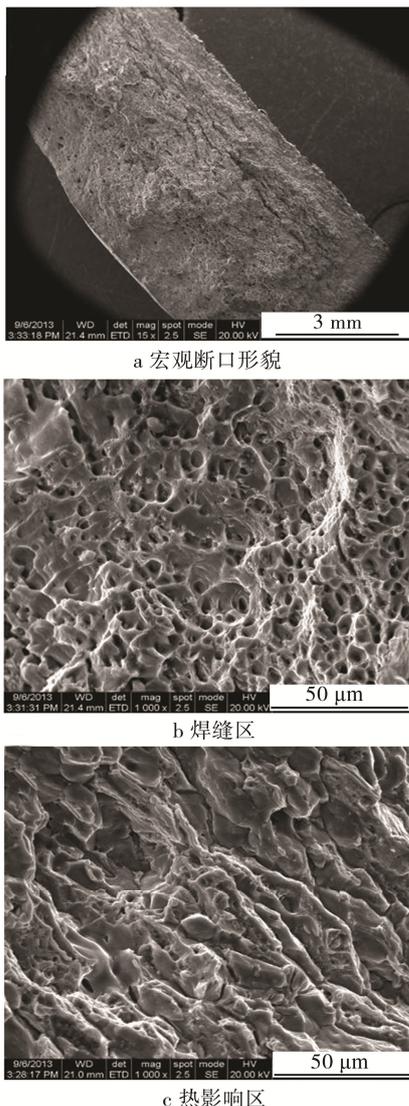


图 6 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头的断口 SEM 形貌  
Fig.6 SEM photographs of fracture of 7075 Al-alloy pulsed MIG welding joints

纹理清晰, 棱角较分明, 主要是由沿轧制纤维方向的脆性沿晶断裂和少量韧窝断裂组成, 热影响区整体上属于脆性断口。从拉深断口分析可知, 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头断裂前塑性流动少, 导致了接头断后伸长率较低。

## 3 结论

1) 采用脉冲 MIG 焊技术实现了 7075 铝合金的高强连接。

2) 脉冲 MIG 焊接头显微硬度分布呈现中间低两头高的特征, 平均抗拉强度高达 370 MPa 以上, 达到母材强度的 70% 以上。

3) 7075 铝合金脉冲 MIG 焊接头焊缝区主要包含 Al,  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{Al}_6\text{Mn}$  等物相, 基本与母材相同。脉冲 MIG 焊接头焊缝区为粗大的等轴晶组织, 靠近熔合线的焊缝区为柱状晶组织, 热影响区靠近熔合区一侧为较疏松的类似等轴晶组织。

4) 脉冲 MIG 焊接头焊缝区为韧窝断裂, 热影响区为由沿轧制纤维方向的脆性沿晶断裂和少量韧窝断裂的混合断裂模式。

## 参考文献:

- [1] 肖永清. 铝合金是现代汽车轻量化的首选材料[J]. 铝加工, 2005(5): 36—39.  
XIAO Yong-qing. Aluminium Alloy—the Optimum Material for Modern Light Weight Automobile[J]. Aluminium Fabrication, 2005(5): 36—39.
- [2] 王元良, 周友龙, 胡久富. 铝合金运载工具轻量化及其焊接新技术的发展[J]. 电焊机, 2005, 35(9): 14—15.  
WANG Yuan-liang, ZHOU You-long, HU Jiu-fu. Al-alloy Lighten Vehicle and Its Development of New Welding Technology[J]. Electric Welding Machina, 2005, 35(9): 14—15.
- [3] 许良红, 田志凌, 张晓牧, 等. 保护气体对高强铝合金的焊缝组织及气孔敏感性的影响[J]. 焊接学报, 2006, 27(12): 69—73.  
XU Liang-hong, TIAN Zhi-ling, ZHANG Xiao-mu, et al. Effects of Shielding Gas on Microstructure and Number of Gas Pore in High Strength Aluminum Alloys Weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(12): 69—73.
- [4] 李敬勇, 章明明, 赵勇, 等. 铝合金 MIG 焊焊缝中气孔的控制[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2004, 18(5): 78—81.  
LI Jing-yong, ZHANG Ming-ming, ZHAO Yong, et al. Control of Porosities in Aluminium Alloy Welds and Research of Welding Joint Property[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute(Natural Science Edition), 2004, 18(5): 78—81.
- [5] 张传臣, 陈芙蓉, 高云喜. 高强铝合金 7A52 焊缝中焊

- 接缺陷的产生及控制[J]. 热加工工艺, 2007, 36(11): 18—20.
- ZHANG Chuan-chen, CHEN Fu-rong, GAO Yun-xi. Production & Control of Welding Defects of High-strength 7A52 Aluminium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(11): 18—20.
- [6] 殷春喜, 黄军庆, 熊震东, 等. 铝及铝合金 TIG 焊接特性[J]. 热加工工艺, 2011, 40(1): 129—131.
- YIN Chun-xi, HUANG Jun-qing, XIONG Zhen-dong, et al. Character of TIG Welding for Aluminium and Aluminium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(1): 129—131.
- [7] 朱军, 王有祁, 陈东高, 等. 单丝、双丝 MIG 对 7A52 铝合金焊缝性能和变形的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(5): 39—42.
- ZHU Jun, WANG You-qi, CHEN Dong-gao, et al. Distortion and Properties of 7A52 Aluminium Alloy Welded Joint by Single and Twin Wire MIG Welding[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(5): 39—42.
- [8] 汪洪峰, 左敦稳, 王宏宇, 等. 5554 铝合金 TIG 焊缝组织与性能[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(6): 753—757.
- WANG Hong-feng, ZUO Dun-wen, WANG Hong-yu, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 5554 Aluminium Alloy TIG-Welded Seam[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(6): 753—757.
- [9] 丁高剑, 朱锦洪, 宋书中, 等. 新型 MIG 焊接技术的发展[J]. 电焊机, 2010, 40(10): 21—25.
- DING Gao-jian, ZHU Jin-hong, SONG Shu-zhong, et al. Development of Innovative MIG Welding Technology[J]. Electric Welding Machina, 2010, 40(10): 21—25.
- [10] 姚屏, 薛家祥, 蒙万俊, 等. 工艺参数对铝合金双脉冲 MIG 焊焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 73—78.
- YAO Ping, XUE Jia-xiang, MENG Wan-jun, et al. Influence of Processing Parameters on Weld Forming in Double-pulse MIG Welding of Aluminum Alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 73—78.
- [11] 国旭明, 杨成刚, 钱百年, 等. 高强 Al-Cu 合金脉冲 MIG 焊工艺[J]. 焊接学报, 2004, 25(4): 5—10.
- GUO Xu-ming, YANG Cheng-gang, QIAN Bai-nian, et al. Pulsed MIG Welding Process of High Strength Al-Cu Alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(4): 5—10.
- [12] 高宝杰, 吉华, 樊云杰, 等. 脉冲 MIG 焊对 7N01 铝合金焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(15): 138—140.
- GAO Bao-jie, JI Hua, FAN Yun-jie, et al. Effect of Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joint of 7N01 Alloy by Pulse MIG Welding[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(15): 138—140.
- [13] 梁志敏, 李亚博, 赵双双, 等. 7N01 铝合金脉冲 MIG 焊与直流 CMT 焊多次补焊试验[J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 27—32.
- LIANG Zhi-min, LI Ya-bo, ZHAO Shuang-shuang, et al. Multiple Repair Welding of 7N01 Aluminum Alloy with Pulsed MIG and DC CMT Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(9): 27—32.
- [14] 石玕, 黄岸, 樊丁, 等. 铝合金脉冲 MIG 焊动态过程辨识[J]. 焊接学报, 2006, 27(3): 14—18.
- SHI Yu, HUANG An, FAN Ding, et al. Identification of Aluminium Alloy Pulsed Metal Inert-gas Welding Dynamic Process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(3): 14—18.
- [15] 陆志强, 华学明, 李芳, 等. 铝合金 P-MIG 焊接技术的研究现状[J]. 电焊机, 2009, 39(7): 1—8.
- LU Zhi-qiang, HUA Xue-ming, LI Fang, et al. Research Status of P-MIG Welding Technology of Aluminium Alloy[J]. Electric Welding Machina, 2009, 39(7): 1—8.
- [16] 杨春利, 刚铁, 林三宝, 等. 高强铝合金厚板双丝 MIG 焊工艺的初步研究[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 259—264.
- YANG Chun-li, GANG Tie, LIN San-bao, et al. Tandem MIG Welding of High-strength Thick Aluminum Alloy Plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 259—264.