

电流波形对 7A04 铝合金脉冲 TIG 焊接头组织及强度的影响

郭新宇^{1,2}, 王娟¹, 孙宝壮¹, 刘民²

(1. 山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 山东 济南 250061; 2. 山东特种工业集团有限公司, 山东 淄博 255201)

摘要:为研究电流波形对 7A04 铝合金脉冲 TIG 焊接质量的影响,采用 ER5183 焊丝对 8 mm 厚的 7A04 铝合金板进行脉冲 TIG 焊,研究矩形波、正弦波、三角波焊接电流对接头组织及强度的影响。结果表明,不同电流波形的周期性变化引起熔池搅拌效果和热输入不同,影响熔池晶粒细化程度及组织形态。采用脉冲三角波形电流焊接时,可以获得晶粒细小的焊缝组织,接头的屈服强度优于其他两种电流波形获得的接头,屈强比达 0.95。

关键词:7A04 铝合金;TIG 焊;电流波形;组织

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20202844

中图分类号: TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)21-0030-05

Effect of Welding Current Waveform on Microstructure and Strength of 7A04 Aluminum Alloy Pulse TIG Joint

GUO Xinyu^{1,2}, WANG Juan¹, SUN Baozhuang¹, LIU Min²

(1. Key Laboratory of Liquid-solid Structure Evolution and Processing of Materials Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Shandong Special Industry Group Co. LTD, Zibo 255201, China)

Abstract: ER5183 welding wire was used to weld 8 mm thick 7A04 aluminum alloy plates by pulse TIG welding to study the effect of current waveform on the welding quality. The influence of welding current form in rectangular wave, sinusoidal wave and triangular wave on the microstructure and strength of the joint was studied. The results show that the stirring effect of molten pool and heat input are different due to the periodic change of different current waveforms, therefore the grain refinement degree and the microstructure of molten pool are affected. The weld microstructure with fine grain can be obtained by using pulse triangular waveform current welding, and the yield strength of the joint is better than that of the joint obtained by the other two current waveforms, and the yield to strength ratio of the joint is up to 0.95.

Key words: 7A04 aluminum alloy; TIG welding; current waveform; microstructure

高强铝合金由于具有比强度高、加工性能好、断裂韧度高等优点,被广泛用于航空航天、军工国防、轨道交通、造船等领域^[1-3]。常用铝合金熔焊方法中,钨极氩弧焊(TIG)、熔化极惰性气体保护焊(MIG)、激光焊(LBW)等在高强铝合金焊接时存在热裂敏感、合金元素烧损、脆性较大,容易产生焊接裂纹并且有焊缝组织粗大倾向,焊接内应力较大,难以取得较好的焊接效果。为获得高品质细化晶粒的焊接接头,研究者们提出许多新颖的焊接工艺,包括双丝 MIG 焊、双脉冲 MIG 焊 + 机械震动联合、等离子

-MIG 复合焊、搅拌摩擦焊(FSW)等^[4-7]。其中,采用 FSW 方法的焊接效果较佳,但设备成本较高,焊接工件必须刚性固定,大范围的工业推广受到了一定的局限性。而 TIG 焊具有电弧稳定,焊缝成形美观、焊接操作灵活性强等优点,能够有效地补充不适合应用搅拌摩擦焊技术的场合,特别适用于铝合金的修复、难移动构件的焊接检修^[8-9]。

随着数字化逆变电源可靠性的提高和电子技术的快速发展,近些年来国内外开展了许多 TIG 焊电源电流波形的控制研究,已由普通交流、方波交流,发展到变极性矩形波、正弦波、锯齿波及多种波形的复合,且研究方向多为改善和提高焊机性能方面的考虑^[10-16],而关于在 7 系高强铝合金焊接过程中电流波形对接头组织性能影响机理的研究相对较少。本

收稿日期:2020-11-07

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR9MEE17)

作者简介:郭新宇(1987-),男,工程师,硕士,研究方向:高强铝合金焊接;

E-mail:guoxinyu0515@126.com

文采用脉冲矩形波、正弦波和三角波对 7A04 高强铝合金进行 TIG 焊接,研究电流波形对接头组织性能的影响,分析焊缝的组织特征,为提高铝合金的接头质量提供理论依据和试验参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 7A04 铝合金,试板尺寸为 100 mm×120 mm×8 mm。采用 ER5183 焊丝,直径为 $\phi 2.5$ mm。焊接试板加工 60°的 V 形坡口,钝边为 2 mm,接头形式为对接,如图 1 所示。

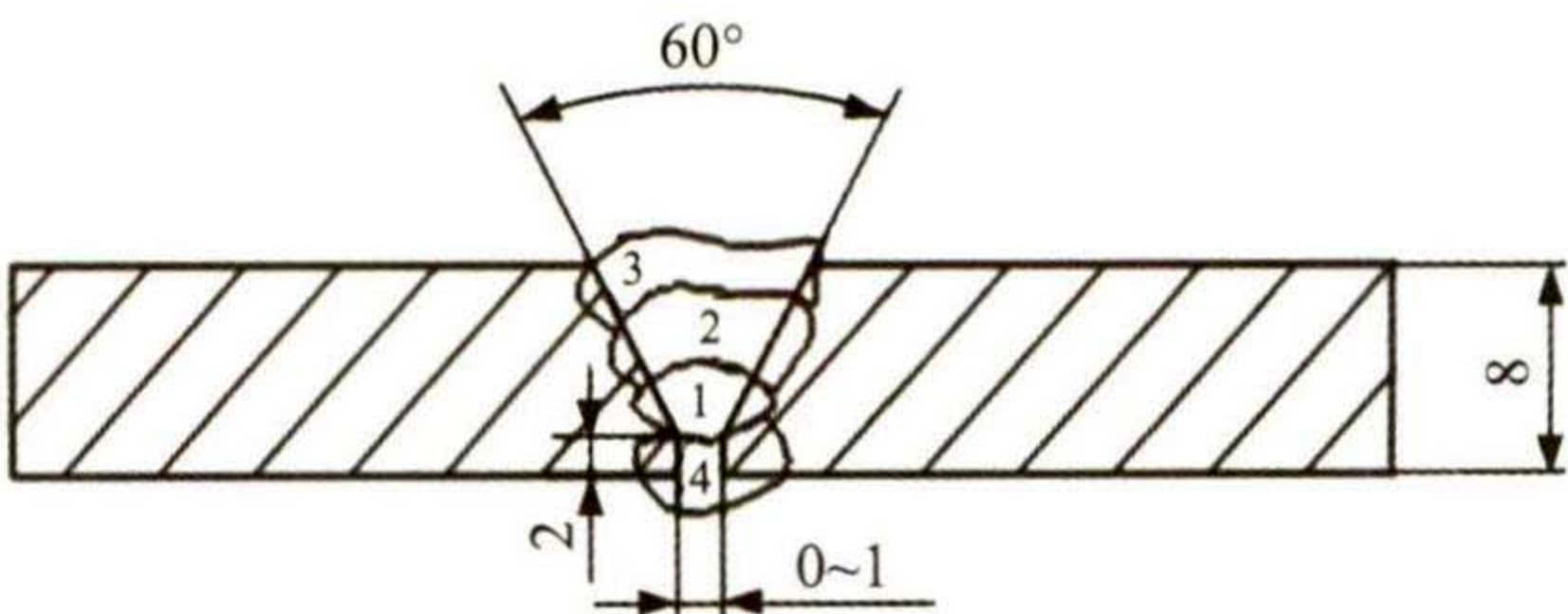


图 1 接头形式(mm)
Fig.1 Joint form(mm)

7A04-T6 铝合金母材及 ER5183 焊丝的化学成分见表 1。7A04-T6 铝合金晶粒在平行于轧制方向被严重拉长,纵横比约达 1:10,晶界倾向于分布在同一个平面内,如图 2 所示。

表 1 7A04-T6 铝合金和 ER5183 焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of 7A04-T6 aluminum alloy and ER5183 wire (wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
7A04-T6	0.50	0.50	1.4~2.0	0.20~0.60	1.8~2.8	0.10~0.25	5.0~7.0	0.10	余量
ER5183	0.40	0.40	0.10	0.50~1.00	4.3~5.2	0.05~0.25	0.25	0.15	余量

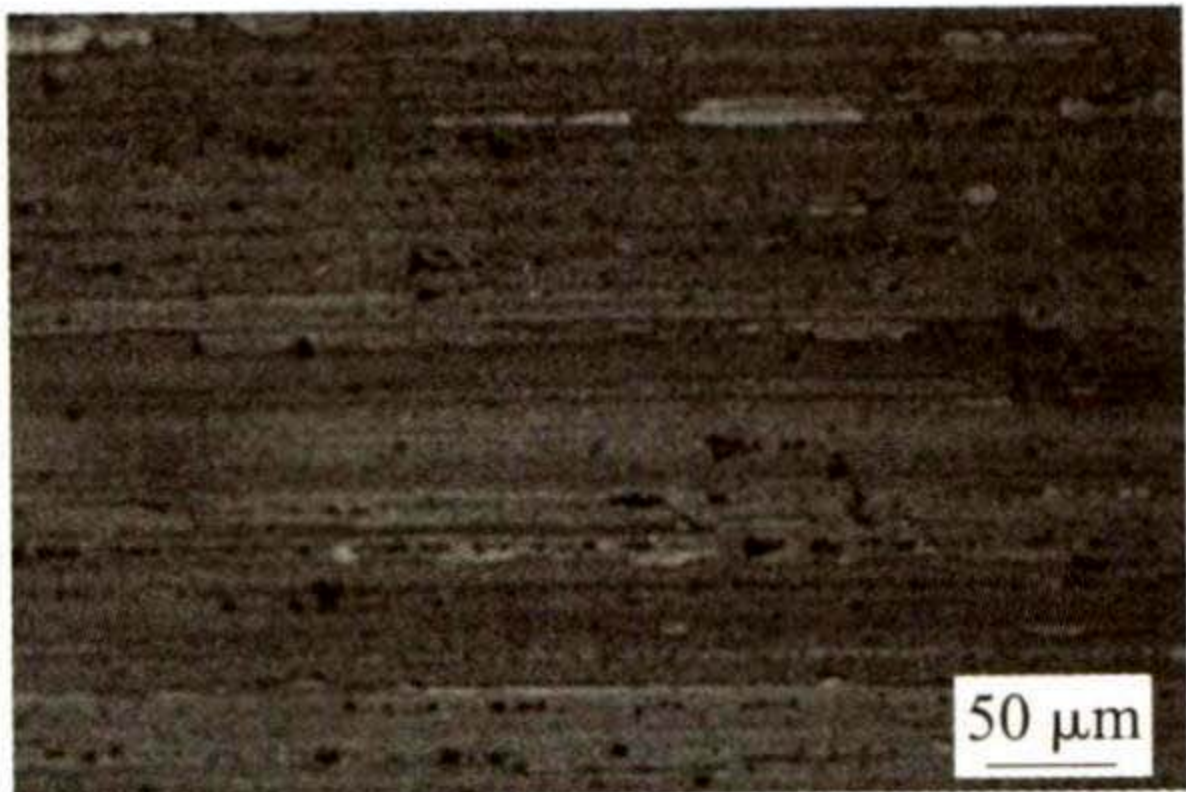
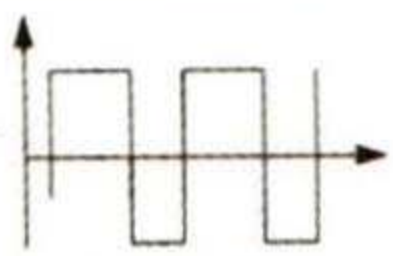
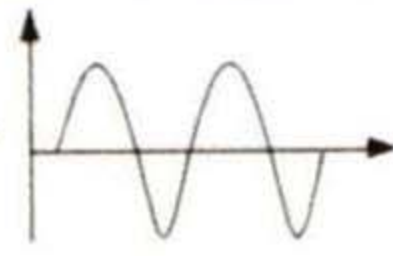
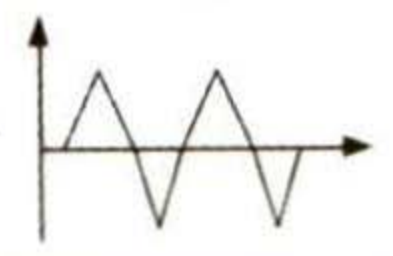


图 2 7A04-T6 铝合金的组织
Fig.2 Microstructure of 7A04-T6 aluminum alloy

1.2 试验方法

焊前用钢丝刷和砂纸对焊件表面进行机械清理,焊缝周围 20 mm 范围内去除表面氧化膜,并用丙酮去除表面油污。采用 TIG 焊接方法,正面和背面同时进行气体保护,保护气体采用纯氩气(99.99%)。焊前采用氧乙炔火焰进行预热,预热温度控制在 60~80℃,并用测温枪进行测温。焊接工艺参数见表 2,施焊次序见图 1。

表 2 焊接工艺参数
Tab.2 Welding parameters

电流波形	起弧电流 /A	缓升时间 /s	峰值电流 /A	基值电流 /A	电压 /V	占空比(%)	衰减时间 /s	收弧电流 /A	脉冲频率 /Hz
脉冲 + 	46	0.6	236	132	自适应	50	0.3	29	1.2
脉冲 + 	45	0.6	236	132	自适应	50	0.3	29	1.2
脉冲 + 	45	0.6	236	132	自适应	50	0.3	29	1.2

焊后对 7A04-T6 铝合金接头进行拉伸试验,试样尺寸见图 3。拉伸试验在 WLAW-5000 型卧式电液伺服拉力试验机上进行,加载速率为 1 mm/min。采用 XJP-6 型金相显微镜和 JSM-7800F 型高分辨场发射扫描电镜对接头组织和拉伸断口进行分析。

2 结果与分析

为便于理解,焊接电源设备输出的电流波形可

简化为图 4 所示的数学模型,在直流正极性阶段(DCEP),其输出时间设定 T_n ,输出电流为 I_n ,在直流负极性阶段(DCEN),输出时间设定 T_p ,输出电流为 I_p 。焊接过程是电流 I 和时间 T 共同作用的累积效应,引入电流时间积 $A=I \cdot T$ 。通过对比焊接电源输出的 I 和 T 变化幅值来进行定性定量的分析。

2.1 焊缝成形

不同电流波形焊接获得的 7A04 焊缝形貌见图

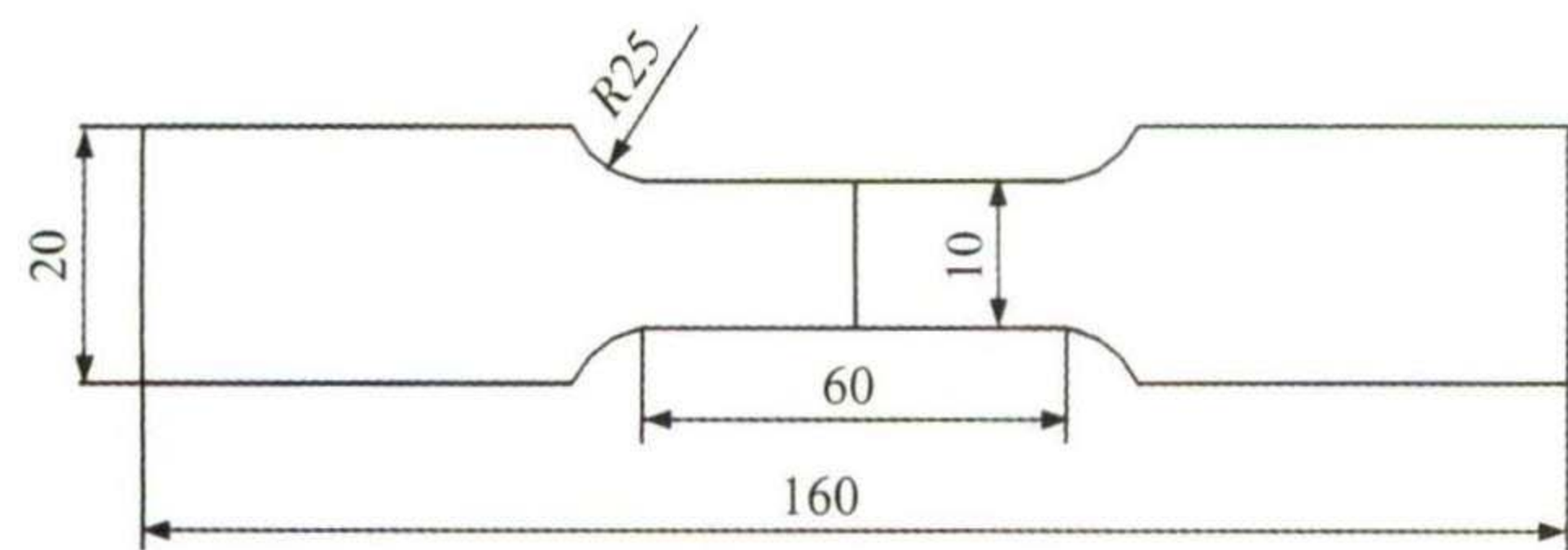


图 3 拉伸试样尺寸(mm)
Fig.3 Sizes of tensile specimen (mm)

5. 在相同电流幅值情况下,电流幅值 I_n 和 I_p 随时间的变化,会使相同时间内作用于横截面的电弧密度

发生变化,进而造成电弧力和熔池搅动,焊缝正面成型的鱼鳞纹密集。因为在脉冲焊接过程中,每次脉冲峰值电流通过焊丝使其熔化,基值稳定维弧,形成点状熔池,电流波形幅值的周期性变化,可形成点状熔池的叠加。同时,周期性变化的电弧力对熔池有着冲击搅拌作用,利于气体从熔池凝固过程中溢出,阴极清理作用也相应地增强。经 RT 检测未发现焊缝中存在气孔、夹渣、裂纹、加钨等缺陷。

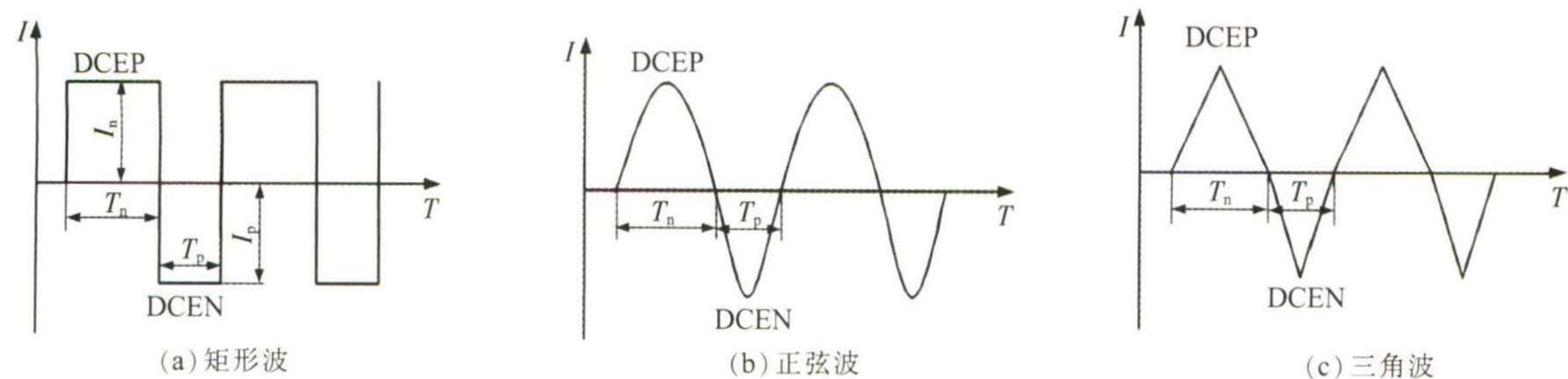


图 4 焊接电源输出电流波形示意图
Fig.4 Waveform diagrams of output current of welding power supply

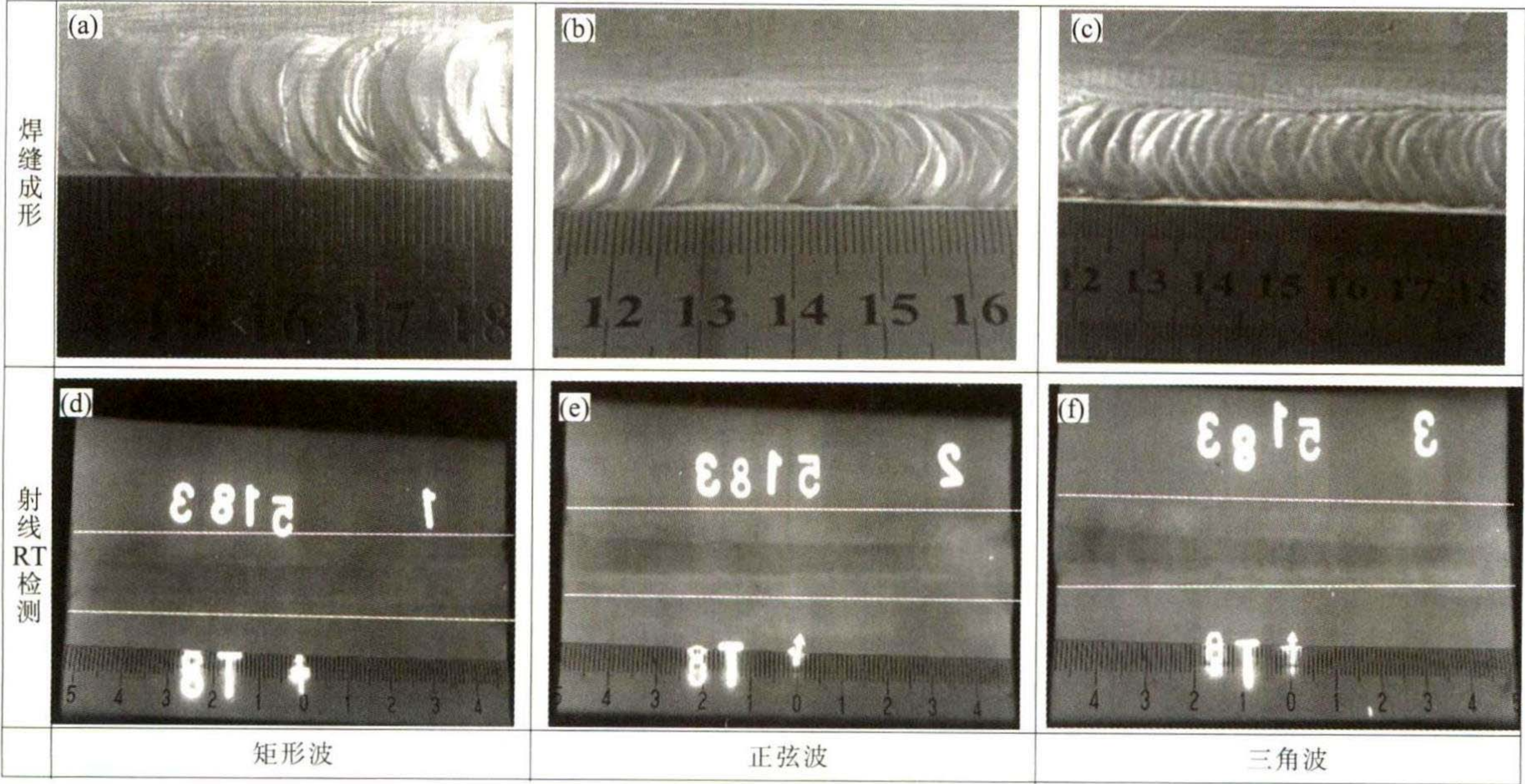


图 5 不同波形焊接的焊缝形貌
Fig.5 Weld morphologies with different waveforms

2.2 接头强度

不同电流波形下接头的准静态拉伸试验结果如图 6 所示。采用脉冲焊时,接头的屈服强度均大于 190 MPa、抗拉强度大于 210 MPa,屈强比最小达到 0.88,其中脉冲三角波形屈强比优于其他两种波形。屈强比可作为材料塑性变形能力的指标,在材料和工艺方法一定的情况下,提高焊接接头的屈服强度能够有效改善焊缝金属的综合性能。

通过 KEYSIGHT 示波器进行定量测量,对比三

种波形的有效电流和交变功率有效值,如图 7 所示。

铝合金焊接过程是 DCEN 和 DCEP 阶段的交互作用,通过调节焊接电源输出波形,既能有效清理铝合金表面的氧化膜,又可减少钨极烧损程度。在相同焊接电流参数下,三种波形的功率有效值和焊接电流有效值存在较大差异,电流有效值呈现 $I_{\text{矩形}} > I_{\text{正弦}} > I_{\text{三角}}$,而功率有效值则呈现 $P_{\text{三角}} > P_{\text{正弦}} > P_{\text{矩形}}$ 。电流有效值是瞬时电流随时间累积的结果,可近似看成电流时间积的有效面积进行比较。DCEN

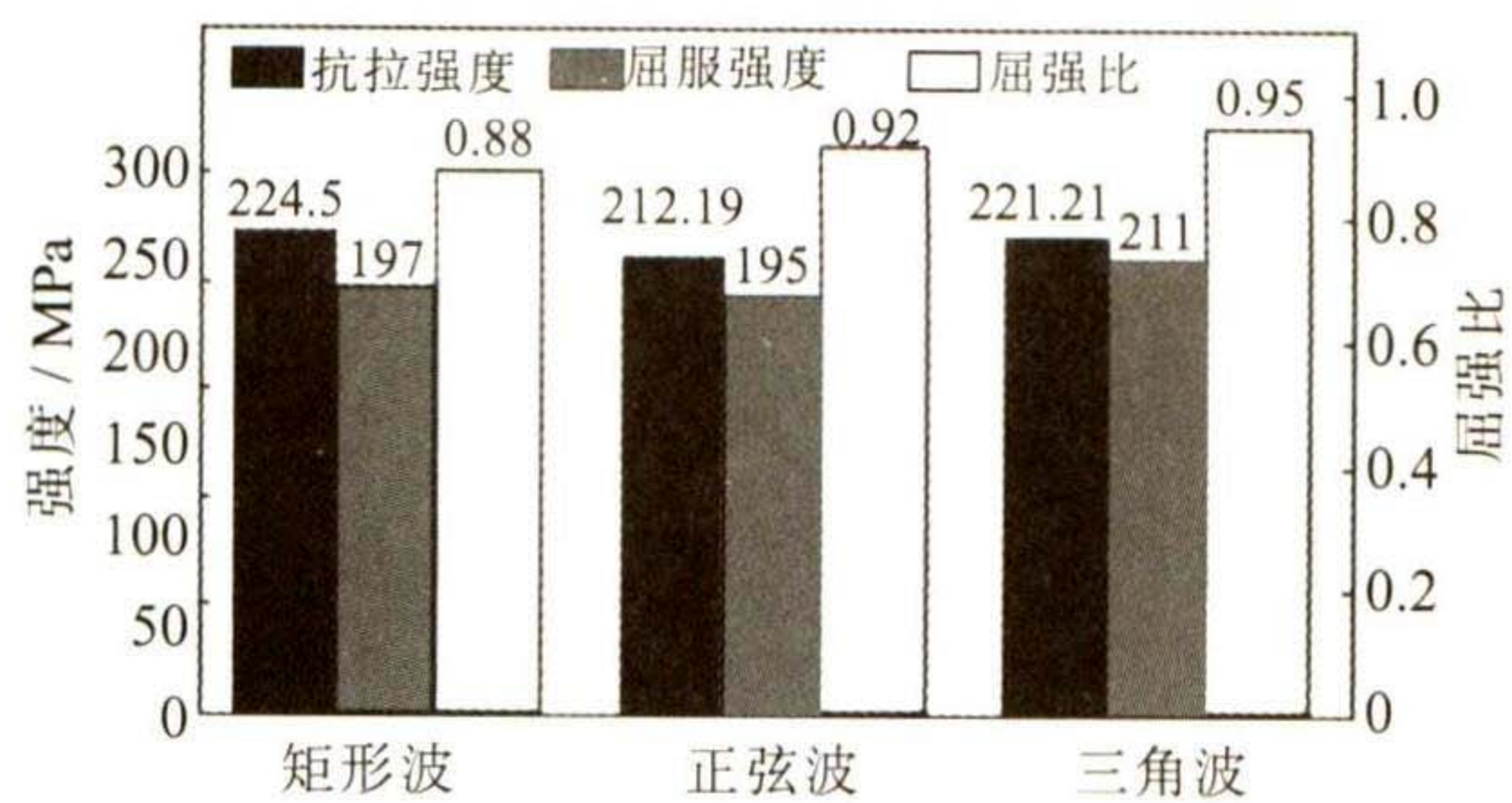


图 6 7A04 铝合金接头的拉伸性能

Fig.6 Tensile properties of 7A04 aluminum alloy joints

半波阶段是阴极雾化和清理阶段，阴极斑点的清理作用是电弧空间的阳离子轰击阴极表面造成的，钨极作为阳极的压降随电流 I_p 值发生变化，矩形波电流值 I_p 恒定，钨极产热耗损较高，且电弧空间的阳离子轰击工件表面起阴极雾化和清理作用的能量较多；同时，在 DCEP 半波阶段，钨极作为阴极，发射电子冷却的能力随 I_n 值成正相关，造成电弧做功和热损失量较多。所以，呈现出矩形波电流有效值 $I_{\text{矩形}}$ 最大，但 $P_{\text{矩形}}$ 较小的现象。

脉冲矩形波的功率有效值为 4.77kW，焊接热输入能量较小，用于熔池搅拌的热量也少；而脉冲三角波的功率有效值为 4.91kW，焊接热输入能量较大，用于熔池搅拌的热量多，熔池细化作用强。因此，相同工艺参数条件下，采用脉冲三角波，可以获得较高屈强比的 7A04 接头。屈强比可作为材料塑性变形能力的指标，在材料和工艺方法一定的情况下，提高焊接接头的屈强比能够有效改善焊缝金属的综合性能。

2.3 接头组织

不同电流波形条件下接头的组织如图 8 所示。焊缝中心区域呈铸态组织，晶粒无变形和取向。

对比三种波形条件下接头由母材到焊缝中心的形貌变化，趋势基本一致。焊接接头均存在垂直于熔合线方向的柱状晶组织，在焊接热影响区靠近熔合线附近的区域由于受到焊接热循环的作用会产生明显的晶粒粗大现象。从焊缝中心区微观组织看出，黑色强化相颗粒弥散于焊缝金属中。相比脉冲矩形波

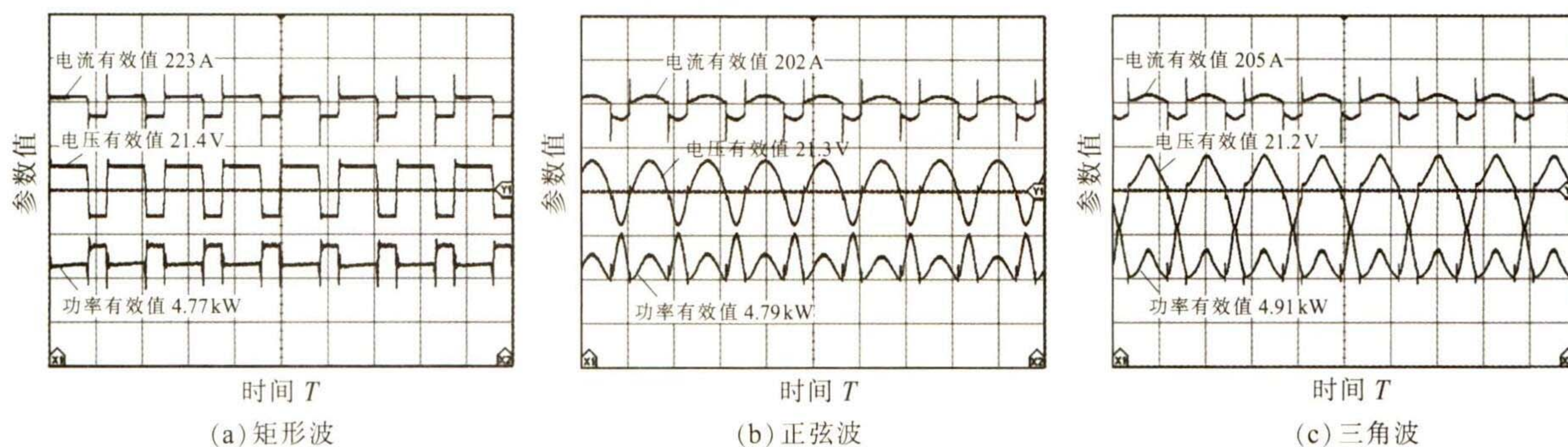


图 7 测量的电流波形

Fig.7 Measured current waveforms

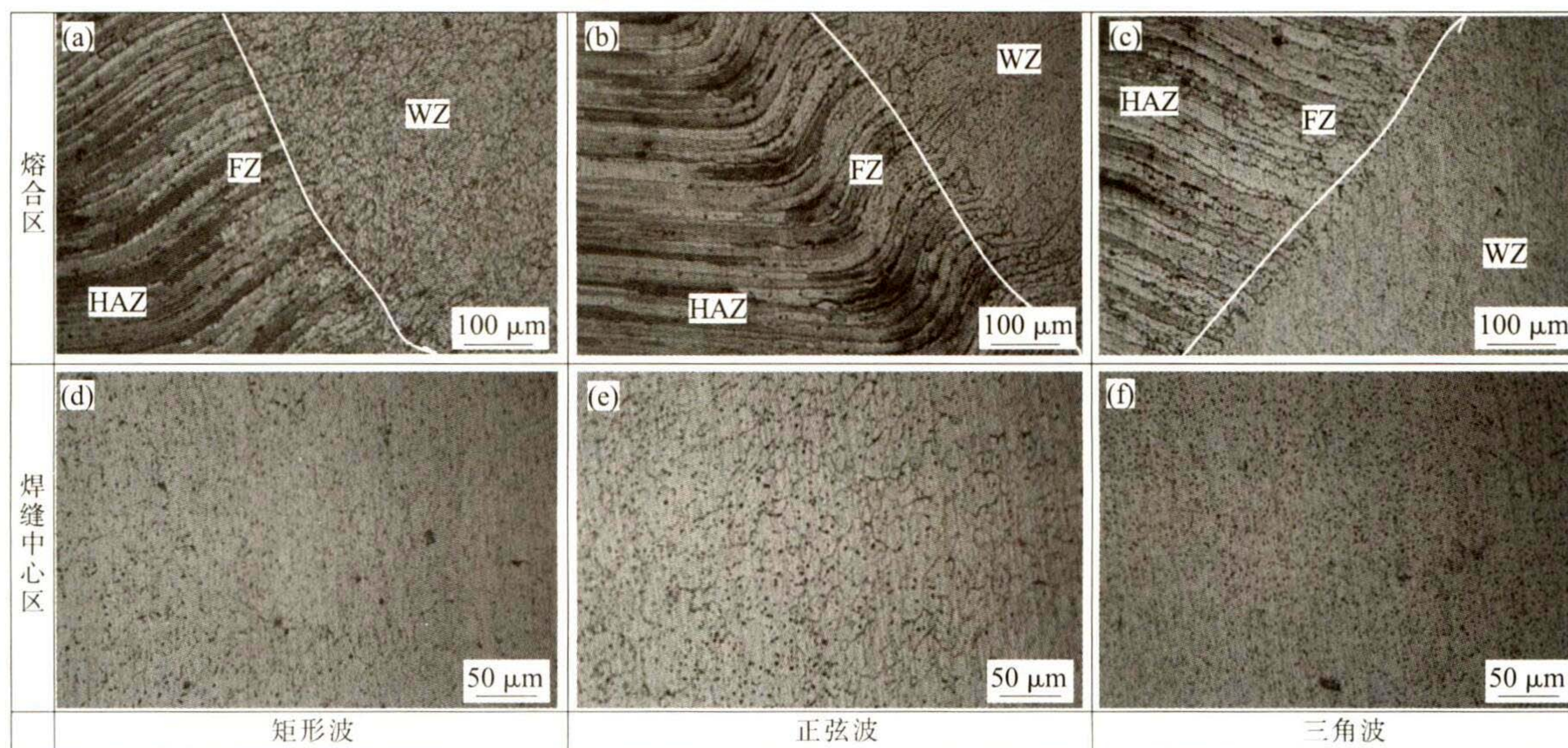


图 8 焊缝熔合区和中心区的组织

Fig.8 Microstructure of weld fusion zone and weld center zone

和正弦波,在脉冲三角波电流条件下,熔池的搅拌作用较强,加之电流变化曲率大于矩形波和正弦波曲率,能够促进焊缝金属的晶粒细化,黑色第二相弥散程度增大。弥散程度越明显,强化相颗粒越细小,对位错和晶界的钉扎和阻碍作用较大,这也是接头屈服强度较高的原因^[17-18]。

2.4 对断口形貌的影响

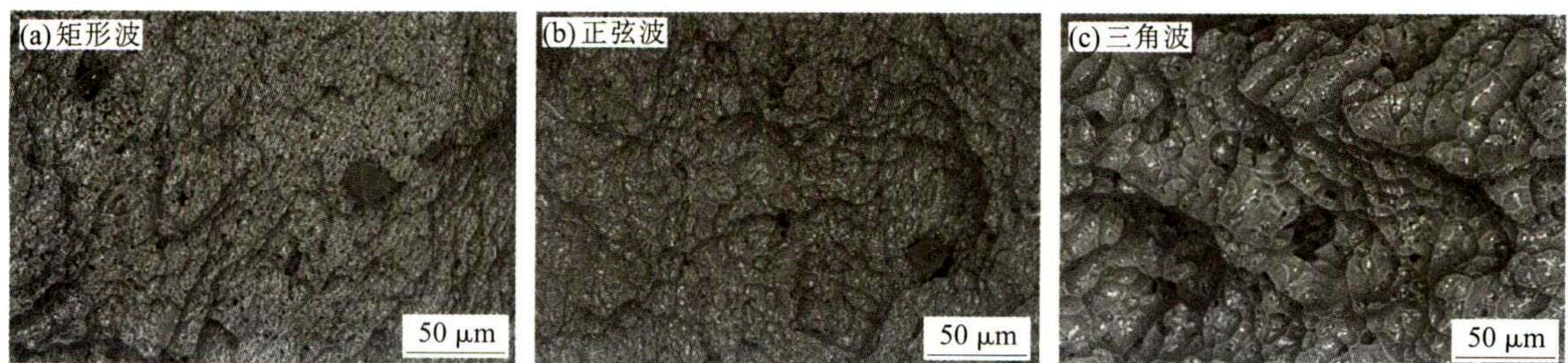


图9 不同波形条件下拉伸断口形貌

Fig.9 Morphologies of tensile fractures under different waveforms

3 结论

(1) 采用脉冲钨极氩弧焊方法,基值电流和峰值电流的周期性变化使三种不同电流波形产生的有效电流值和输出功率不同,脉冲三角波的有效功率最大,获得的7A04接头屈强比达0.95。

(2) 在脉冲电流的作用下,7A04焊缝成形良好,未发现气孔、夹渣和裂纹缺陷。相比脉冲矩形波和正弦波,在脉冲三角波电流条件下,熔池的搅拌作用较强,第二相弥散程度增大。

(3) 7A04接头的拉伸断口表明,脉冲三角波条件下断口韧窝形态深且粗大,拉伸断裂时吸收更多的能量,有利于提高接头屈服强度;而矩形波和正弦波电流获得的接头断口有少量撕裂特征存在。

参考文献:

- [1] 宋友宝,李龙,吕金明,等. 7xxx系铝合金焊接研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报,2018,28(3):492-501.
- [2] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminum alloys [J]. Materials & Design,2014,56:862-871.
- [3] 刘兵,彭超群,王日初,等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报,2010,20(9):1705-1715.
- [4] 张新明,邓运来,张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报,2015,51(3):257-271.
- [5] 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(9):39-42.
- [6] Enz J, Riekehr S, Ventzke V. Laser welding of high-strength aluminum alloys for the sheet metal forming process [J]. Procedia CIRP, 2014, 18: 203-208.
- [7] 张晓云,梅克力,熊文华,等. 7A52铝合金焊接件应力腐蚀性能评价[J]. 材料工程,2013,41(10):86-92.
- [8] 张璐霞,林乃明,邹娟娟,等. 铝合金搅拌摩擦焊的研究现状[J]. 热加工工艺,2020,49(3):1-6.
- [9] Sharma C, Upadhyay V, Dwivedi D K, et al. Mechanical properties of friction stir welded armor grade Al-Zn-Mg alloy joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(3): 493-506.
- [10] 彭小燕,曹晓武,段雨露,等. 7020铝合金MIG焊接接头的组织与性能[J]. 中国有色金属学报,2014,24(4):912-918.
- [11] 盖红德,唐杰,戴家辉,等. 7A52铝合金交流钨极氩弧焊焊接电流对焊接接头组织性能的影响[J]. 材料导报,2013,27(21):329-331.
- [12] 栗慧,邹家生,姚君山,等. 2219高强铝合金活性TIG焊工艺[J]. 材料工程,2018,46(4):66-73.
- [13] 李恒,梁秀娟,宋永伦,等. 铝合金变极性TIG焊电弧行为研究[J]. 兵器材料科学与工程,2006,29(4):32-36.
- [14] 李春旭,王珊,郭学良. 数字化逆变交直流方波脉冲TIG焊机研制[J]. 电焊机,2006,36(10):31-35.
- [15] 韩永全,张世全,庞世刚,等. 铝合金变极性TIG焊接电弧行为[J]. 焊接学报,2015,36(9):51-59.
- [16] 朱强,薛家祥,徐敏,等. 脉冲MIG焊熔滴过渡及电流波形控制[J]. 热加工工艺,2020,49(7):214-220.
- [17] Nguyen C D, Kri S R, Wallace W. A TEM study of microstructural changes during retrogression and reaging in 7075 aluminum [J]. Materials Science & Engineering A, 1983, 14: 1843-1850.
- [18] Katsicha C, Badischa E, Manish R, et al. Erosive wear of hard faced Fe-Cr-C alloys at elevated temperature [J]. Wear, 2009, 267(6):1856-1864. 