

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.09

电流波形对304不锈钢TIG焊接电弧物理特性及组织性能的影响

邢森瑶^{1,2}, 刘玉泽^{1,2}, 赵洪磊^{1,2}, 李逸文^{1,2}, 董 豪^{1,2}, 徐澳冬^{1,2}, 常云龙^{1,2*}

1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870
2. 辽宁省先进焊接技术及自动化重点实验室, 辽宁 沈阳 110870

摘 要: 针对304不锈钢中厚板TIG焊接中熔深不足的问题,通过高速摄像、电信号同步采集及微观组织表征等手段,系统研究了普通直流波、高频三角波与高频梯形波三种电流波形对电弧物理特性及接头组织性能的影响规律。结果表明,高频梯形波因其更陡峭的电流变化率,相较于普通直流波和高频三角波产生了更显著的电弧收缩效应和更集中的电弧能量分布特征。当采用高频梯形波进行304不锈钢TIG焊接时,在210 A的焊接电流下接头熔深与熔宽分别达到4.01 mm与7.78 mm,较普通直流波分别提升34%与19%;由于高频梯形波对熔池更显著的搅拌作用,相较于其它两种波形高频梯形波接头的熔合区更窄,同时焊缝区域的晶粒组织得到显著细化,从而有效提升了接头的力学性能。当电流波形为高频梯形波时,焊接接头的抗拉强度达到710.4 MPa,延伸率为54.4%。

关键词: 电流波形; 304不锈钢; TIG焊接; 电弧物理特性; 组织性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0070-08

Effects of Current Waveform on Arc Physical Characteristics and Microstructure-Properties of 304 Stainless Steel in TIG Welding

XING Senyao^{1,2}, LIU Yuze^{1,2}, ZHAO Honglei^{1,2}, LI Yiwen^{1,2}, DONG Hao^{1,2}, XU Aodong^{1,2}, CHANG Yunlong^{1,2*}

1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China
2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology and Automation, Shenyang 110870, China

Abstract: To address the issue of insufficient penetration in TIG welding of 304 stainless steel medium-thick plates, this study systematically investigates the effects of conventional direct current, high-frequency triangular wave, and trapezoidal wave on the arc physical characteristics and joint microstructure properties by using high-speed imaging, synchronous electrical signal acquisition, and microstructural characterization. The results indicated that the high-frequency trapezoidal wave, due to its steeper current change rate, exhibited a more pronounced arc constriction effect and a more concentrated arc energy distribution compared to the conventional direct current and high-frequency triangular wave. When the high-frequency trapezoidal wave was applied in TIG welding of 304 stainless steel at a welding current of 210 A, the joint penetration and weld width reached 4.01 mm and 7.78 mm, respectively, representing increase of 34% and 19% over the conventional direct current. The more significant stirring effect of the high-frequency trapezoidal wave on the molten pool resulted in a narrower fusion zone and finer grain structure in the weld region compared to the other two waveforms. Consequently, the mechanical properties of joints produced with the high-frequency trapezoidal wave were superior to those obtained with the other two current waveforms. Specifically, when the high-frequency trapezoidal wave was used, the tensile strengths of the welded joint reached 710.4 MPa, respectively, with an elongation of 54.4%.

Keywords: current waveform; 304 stainless steel; TIG welding; arc physical characteristics; microstructure and mechanical

收稿日期: 2025-05-07 修回日期: 2025-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51575362)

作者简介: 邢森瑶(2000—),女,硕士研究生,主要从事焊接电弧物理研究。E-mail: 1511152570@qq.com。

通讯作者: 常云龙, E-mail: sychyl@126.com。

properties

引用格式:邢森瑶,刘玉泽,赵洪磊,等. 电流波形对 304 不锈钢 TIG 焊接电弧物理特性及组织性能的影响[J]. 电焊机,2026,56(6): 70-77.

Citation: XING Senyao, LIU Yuze, ZHAO Honglei, et al. Effects of Current Waveform on Arc Physical Characteristics and Microstructure-Properties of 304 Stainless Steel in TIG Welding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 70-77.

0 引言

304 不锈钢因其优异的耐腐蚀性、高温力学性能及加工成形性,在石油化工、食品加工及核能装备等关键领域得到广泛应用^[1-3]。钨极惰性气体保护焊(TIG)凭借其电弧稳定性高、焊缝成形美观等优点,已成为不锈钢焊接领域的主流工艺^[4]。然而,采用常规 TIG 焊接进行不锈钢中厚板焊接时,普遍存在熔透深度不足、热影响区过宽等问题,难以满足高承载结构件的性能需求^[5]。为此,国内外学者相继开发了活性剂 TIG (A-TIG)、匙孔 TIG (K-TIG)、双钨极 TIG (T-TIG)等深熔焊接技术^[6-9],但上述改进工艺仍存在设备复杂、活性剂污染风险大及工艺窗口狭窄等局限性。

近年来,高频脉冲 TIG 焊因其独特的电弧收缩效应成为研究热点。Anbarasan 等^[10]人通过研究脉冲频率对 Inconel 718 电弧物理特性的影响,发现提高脉冲频率可促进电弧形态收缩,从而增加焊缝熔深并细化晶粒。Krivtsun 等^[11]人采用数值模拟分析对比直流和高频脉冲 TIG 焊的电磁力分布,结果表明高频脉冲产生的电弧力能够促进熔池流动,进而提升接头熔深。Wang 等^[12]将高频脉冲引入不锈钢焊接过程,试验表明高频脉冲电流可有效收缩电弧并改善熔池流动,在增加接头熔深的同时降低焊缝气孔率。现有高频脉冲电流波形主要涉及正弦波,梯形波(HFPT)和三角波(AGPT),电流波形变化会显著影响 304 不锈钢的焊缝成形和接头性能^[13-15]。然而,现有研究多聚焦于 304 不锈钢 TIG 焊接工艺参数的优化,关于在 304 不锈钢高频 TIG 焊接中电流波形对接头电弧行为特性和组织性能的影响缺乏系统研究。

本文针对 304 不锈钢 TIG 焊接,系统研究普通直流波、高频三角波、高频梯形波三种波形对电弧物理特性及接头组织性能的影响规律,为 304 不锈

钢高频 TIG 深熔焊接工艺优化提供理论依据。

1 试验材料、设备与方法

本试验选用 304 奥氏体不锈钢作为焊接母材,试样尺寸为 200 mm×90 mm×6 mm,采用堆焊方式研究电流波形对其电弧物理特性和组织性能的影响,母材的化学成分如表 1 所示。

表 1 304 奥氏体不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel (wt. %)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
0.05	1.64	0.42	18.46	8.28	0.012	余量

焊前采用机械打磨去除 304 不锈钢表面氧化层,并用酒精溶液进行超声清洗去除油污,干燥后置于干燥箱中保存备用。如图 1 所示,试验采用 TIG 焊接平台进行 304 不锈钢的堆焊。其中,高频脉冲波形主要由 IMFT-400 高频脉冲焊接电源输出,频率固定为 20 kHz,可输出三角波和梯形波,脉冲均值电流的调节范围为 0~300 A;普通直流波由 OTC 焊接电源输出,电流调节范围为 0~400 A。在焊接过程中,采用信号转换器和 UTD-2152s 型示波器采集电流动特性数据,并利用 FASTCAM-Ultima 512 高速摄像系统实现电弧动态行为的捕捉。具体试验参数如表 2 所示。

焊后利用线切割制取不同电流波形下接头的

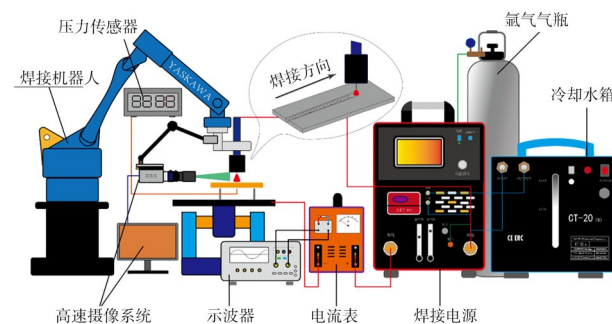
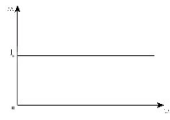
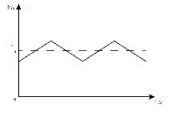
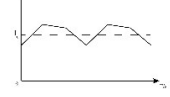


图 1 TIG 焊接平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the TIG welding platform

表2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters

电流波形	焊接电 流/A	焊接电 压/V	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	脉冲频 率/kHz	起弧高 度/mm
	210	自适应	2	0	4
	210	自适应	2	20	4
	210	自适应	2	20	4

横截面试样,经SiC砂纸逐级打磨至3000#,金刚石抛光后采用王水(HNO₃:HCl=1:3)腐蚀105 s,使用OLYMPUS SZX16体式显微镜观测接头宏观形貌并测量熔深/熔宽,通过MC-4XC三目倒置金相显微镜观察接头的金相组织。利用MHVS-1A显微维氏硬度计对焊接接头进行硬度测试,载荷为0.98 N,保载时间为15 s,每个焊接接头在焊缝区、热影响区和母材区各取五个测试点进行连续测试。参照国家标准GB/T 228.1—2021,采用WDW-100W微机控

制电子万能拉伸实验机对不同电流波形下的焊接接头进行拉伸试验,拉伸速率为2 mm/min,拉伸试样尺寸如图2所示。

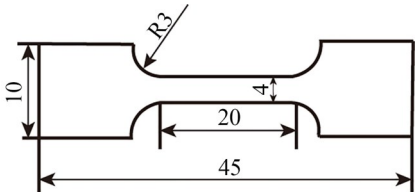
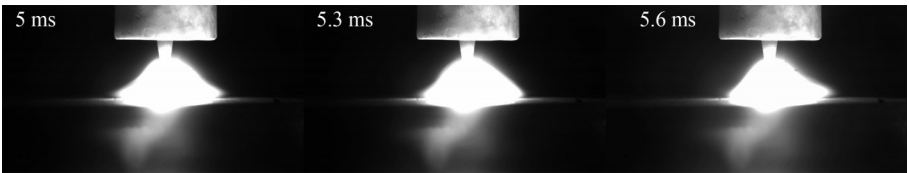


图2 拉伸试样尺寸(mm)
Fig. 2 Drawing of size of tensile specimens (mm)

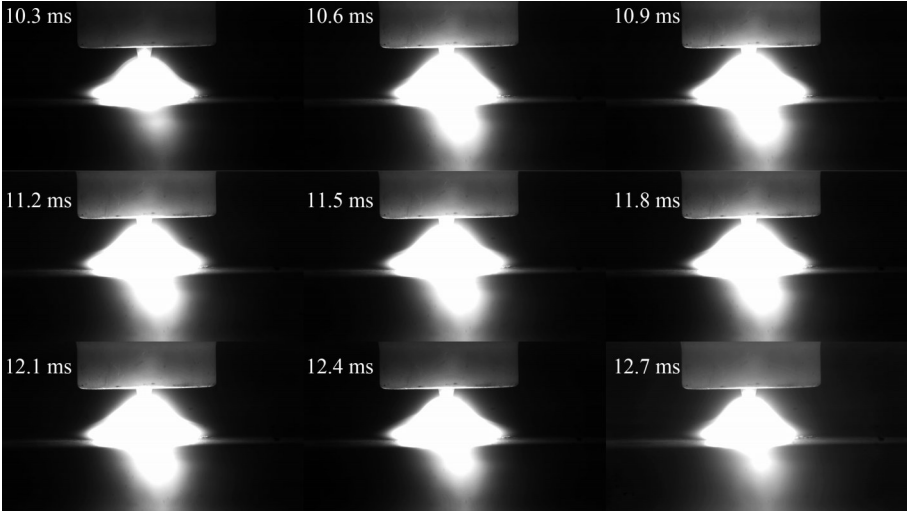
2 试验结果与讨论

2.1 接头电弧物理特性

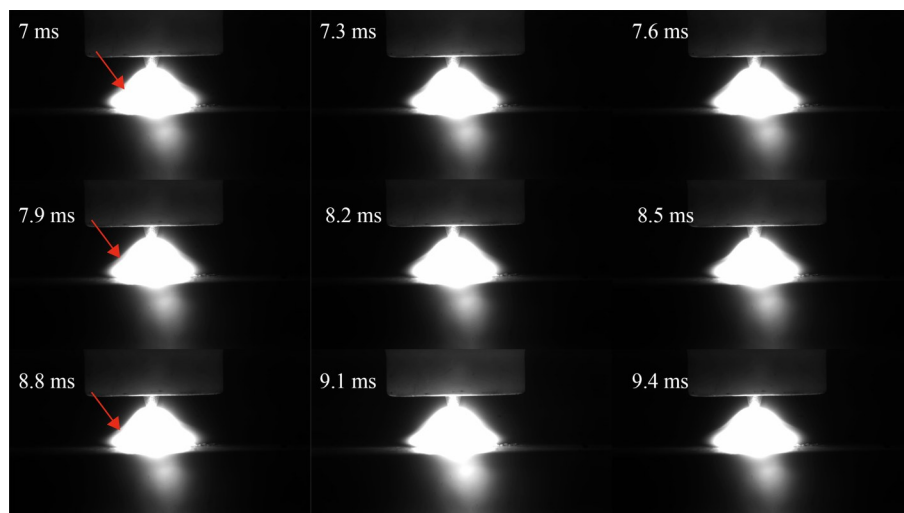
图3为不同电流波形条件下TIG焊接的电弧动态行为特征。从图3a可以看出,采用普通直流波形时,电弧轴线出现显著偏移,表明其稳定性较差,电弧较为扩散。相比之下,图3b、3c分别对应高频三角波和



(a)普通直流



(b)高频三角波



(c)高频梯形波

图3 不同电流波形下TIG焊接电弧形态

Fig. 3 Arc morphology of TIG welding under different current waveforms

缩效应较弱,说明阴极斑点附着区域未发生剧烈波动,这一特征表明其具有更优的电弧稳定性。较高的电弧稳定性意味着在高频脉冲电流波形作用下,等离子体流动受到更有效的约束,电弧能量在洛伦兹力的作用下进一步向中心区域聚集,从而形成更高的能量密度。这一特性使得高频脉冲电流波形更适用于深熔焊工艺,因其能够提供更集中的热输入,促进熔池的深穿透能力,同时减少焊缝成型的不稳定性。

为了进一步研究电弧的动态行为特征,对普通直流以及三角波和梯形波下的电弧宽度及面积进行了定量统计,如图4所示。可以看出,在相同电流条件下,高频脉冲梯形波的电弧宽度与面积均小于普通直流波和三角波。这主要是由于梯形波特有的高电弧功率密度及其动态稳定性优势,两者共同作用下使其产生更显著的电弧收缩效应与更集中的能量分布特征。

为系统研究不同电流波形所引致的电弧收缩效应对电弧能量分布特性的影响,测试了210 A电流下不同波形的电弧压力,如图5所示。结果发现梯形波的压力峰值最高,达到1.52 kPa,直流的峰值最低,为0.65 kPa。电弧压力峰值越大,表明TIG焊接电弧中心区域的能量越高,从而产生更深的熔深。由于高频脉冲梯形波在电流上升阶段具有更陡峭的电流变化率,其瞬时功率密度显著高于高频

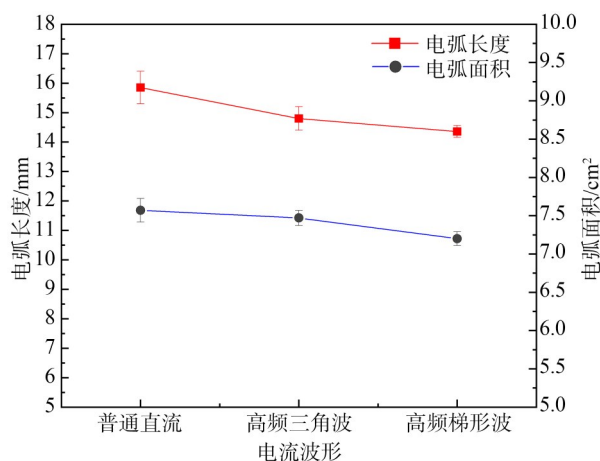


图4 不同电流波形下304不锈钢TIG焊接电弧宽度与面积的变化规律

Fig. 4 Variation patterns of arc width and area in 304 stainless steel TIG welding under different current waveforms

三角波,能够在极短时间内向等离子体注入大量能量,形成更高的压力冲击。同时,等离子体以更高的速度喷出,导致高频脉冲梯形波的电弧压力电弧压力作用区域扩大,使电弧压力分布范围更大,从而获得更宽的熔宽。

电弧的动态特性曲线面积是评估电弧功率的重要参数,图6为不同电流波形下304不锈钢TIG焊接的电弧动特性曲线。可以看出,高频梯形波的电弧功率显著高于高频三角波与普通直流波。电弧功率的提升会导致焊接过程中的热输入增加并降低液态金属的粘度,从而共同促进热量向熔池底部的

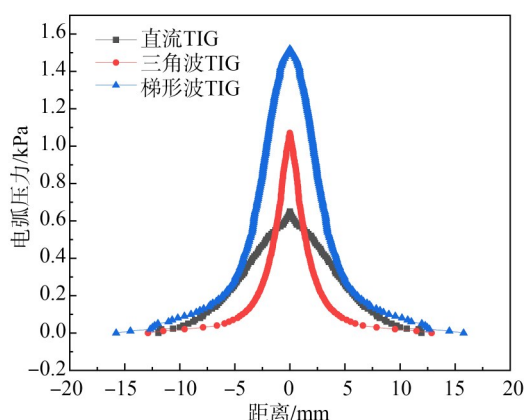


图5 不同电流波形下TIG焊接电弧压力

Fig. 5 Arc pressure characteristics in TIG welding with different current waveforms

高效传递,并显著增强母材的熔化效率。

2.2 接头宏观成形

不同电流波形下 304 不锈钢 TIG 焊接接头的焊缝成形如图 7 所示,图 8 为三种电流波形下焊缝的熔深和熔宽数据。可以看出,当电流波形从普通直流波变为高频三角波、梯形波时,熔宽与熔深呈现逐渐递增趋势。当电弧波形为高频梯形波时,由于

电弧功率的显著提升有效抑制了熔融金属的温度衰减,从而增强了对熔池侧壁区域的持续熔化作用,最终形成更宽的焊缝形貌;同时,高频梯形波电弧更显著的高压效应促进了熔池表面高温金属的熔化过程,驱动熔融金属产生从中心区域向底部的定向流动,进而实现熔深的大幅提升^[16]。当电流波形为高频梯形波时,焊接接头的熔宽和熔深达到最大,分别为 7.78 mm 和 4.01 mm。

2.3 微观组织性能

图 9 为不同电流波形下 304 不锈钢 TIG 焊接接头的金相组织。如图 9a、9b、9c 所示,三种电流波形下焊接接头主要由焊缝区、熔合区以及热影响区组成。随着电流波形从普通直流波转变为高频三角波、梯形波,因电弧能量集中度的逐步提升,熔合区宽度呈现逐渐减小的趋势。如图 9d、9e、9f 所示,对三种电流波形下接头焊缝区组织进行放大,焊缝区组织均由骨架状的铁素体和奥氏体组成,其生长方向垂直于熔合线并向焊缝中心延伸。

由于在高频脉冲电流下,电弧半径显著减小,电流密度增加,电弧的等离子流力和电弧压力随之

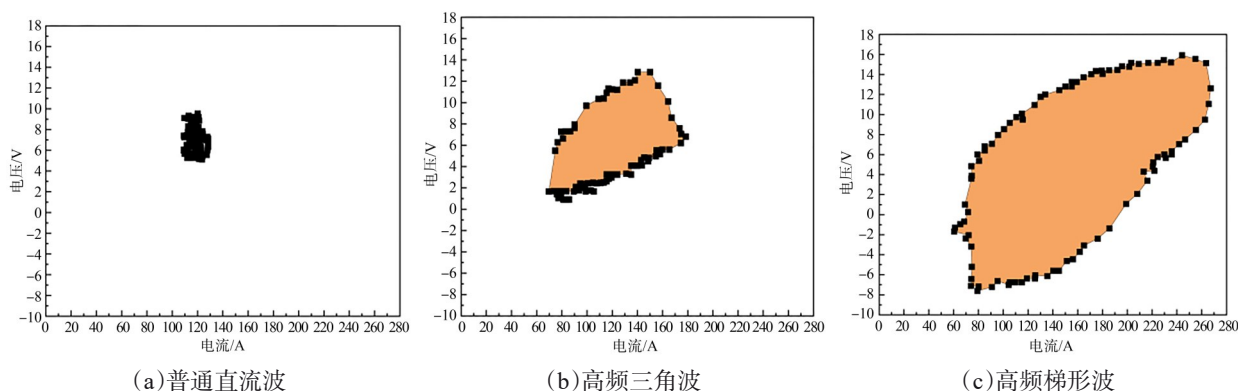


图6 不同电流波形下304不锈钢TIG焊接电弧功率

Fig. 6 Arc power in 304 stainless steel TIG welding under different current waveforms

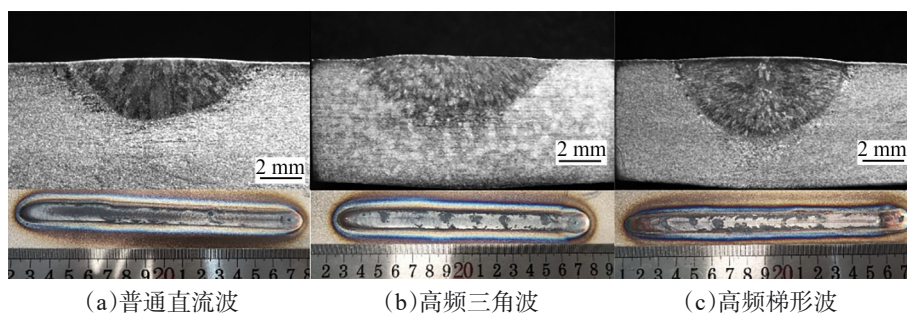


图7 不同电流波形下304不锈钢TIG焊接接头宏观形貌

Fig. 7 Macroscopic morphology of 304 stainless steel TIG welded joints under different current waveforms

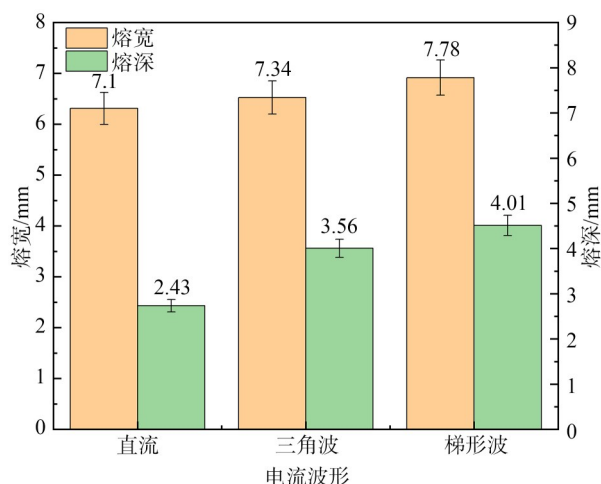


图8 不同电流波形下304不锈钢TIG焊接接头熔宽与熔深统计结果

Fig. 8 Statistical results of weld width and depth in 304 stainless steel TIG welded joints under different current waveforms

增大,进而增强了对熔池的冲击作用。这种冲击作用加速了熔池内液态金属沿焊缝表面向熔池中心的流动。当高频脉冲电流以快速且有规律的方式变化时,在熔池及其周围区域产生电磁力,从而加速熔池内液态金属的流动。此外,高频脉冲电流在焊缝熔池内引发超声振动,产生“机械搅拌”效应。这种振动能够将凝固过程中形成的大晶粒打碎,增

加形核数量,降低晶粒尺寸,减少粗大柱状晶的比例,从而起到细化晶粒的作用。由于高频梯形波相比高频三角波产生的电磁力更大,熔池流动速度更快,搅拌速率显著提高,从而使得焊缝晶粒进一步细化。

2.4 接头力学性能

图10为不同电流波形下304不锈钢TIG焊接接头显微硬度分布。从图中可以看出,电流波形为直流时焊缝区硬度低于母材和热影响区,高频三角波和梯形波时焊缝区和热影响区的硬度均得到提高,且硬度最大值均位于焊缝区。当电流波形由普通直流波转变为高频三角波、梯形波时,焊接接头的硬度呈现递增趋势。这主要是由于高频梯形波的高电流变化率显著增强了电弧熔池的搅拌作用,促使焊缝区晶粒细化及晶界密度增加,从而提高了焊接接头的整体硬度^[17-18]。当电流波形为高频梯形波时,焊接接头区的平均显微硬度值达到228.4 HV。

图11为不同电流波形下304不锈钢TIG焊接接头的拉伸性能结果。母材抗拉强度为695.8 MPa。当电流波形为普通直流波时,接头的抗拉强度为695.6 MPa,延伸率达到45.2%;当电流波形变为高频三角波时,脉冲搅拌作用使熔合区宽度缩减并细

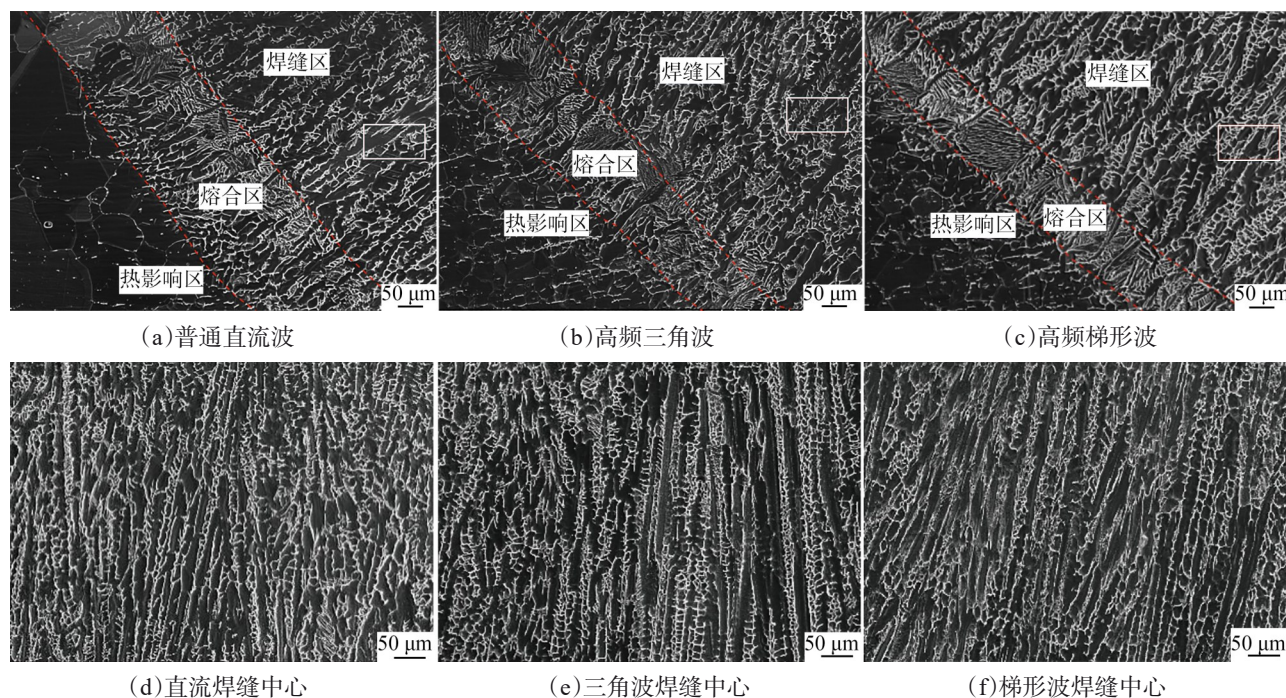


图9 不同电流波形下304不锈钢TIG焊接接头显微组织

Fig. 9 Microstructure of 304 stainless steel TIG welded joints under different current waveforms

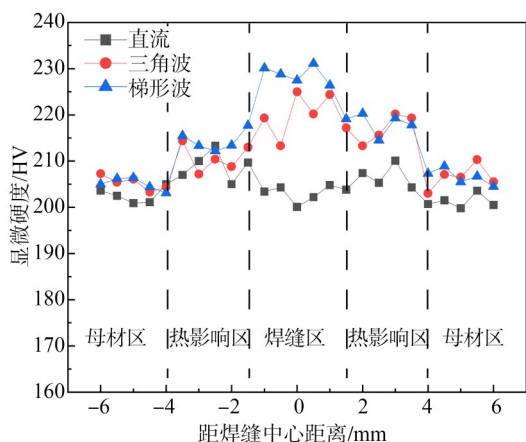


图 10 不同电流波形下 304 不锈钢 TIG 焊接接头显微硬度分布

Fig. 10 Microhardness distribution of 304 stainless steel TIG welded joints under different current waveforms

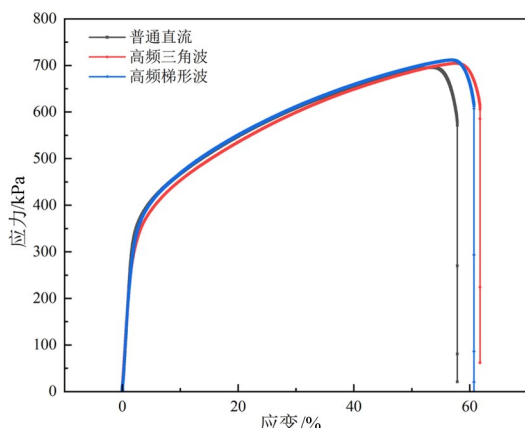
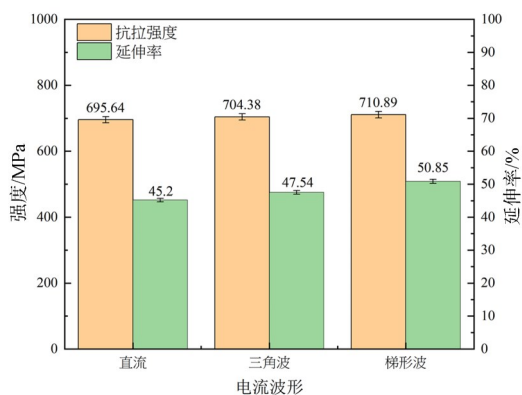


图 11 不同电流波形下 304 不锈钢 TIG 焊接接头拉伸性能

化晶粒,接头的抗拉强度提高到 704.4 MPa,延伸率增加到 47.5%;随着电流波形变为高频梯形波时,其上升/下降沿的高电流变化率进一步强化熔池搅拌作用,使熔合区宽度更小、晶粒更细,从而显著提升

了 304 不锈钢焊接接头的力学性能,高频梯形波焊接接头的抗拉强度达 710.4 MPa,延伸率达 54.4%。

3 结论

本文采用普通直流波、高频三角波和梯形波对 304 不锈钢进行了 TIG 焊接,并系统研究了接头的电弧物理特性和组织力学性能,主要结论如下:

(1)高频梯形波相较于普通直流波和高频三角波,展现出更为显著的电弧收缩效应及更高的电弧功率密度。

(2)在三种电流波形中,高频梯形波 TIG 焊接接头呈现最大熔宽(7.78 mm)和熔深(4.01 mm)。

(3)高频梯形波 TIG 焊接接头的熔合区宽度最小,焊缝组织呈现更优异的晶粒细化效果和显微结构均匀性,其接头显微硬度值较其他两种波形显著提升。

(4)高频梯形波 TIG 焊接接头相较于普通直流波和高频三角波焊接接头展现出更优的力学性能,其抗拉强度分别达到 710.4 MPa,延伸率为 54.4%。

参考文献:

- [1] 宋白钰,胡奉雅,蔡笑宇,等. 6 mm 厚不锈钢板 K-TIG 焊接小孔行为与接头组织及性能[J]. 焊接, 2025(01):1-7.
SONG B Y, HU F Y, CAI X Y, et al. K-TIG welding keyhole behavior and microstructure and properties of welded joints of 6 mm thick stainless steel plates [J]. Welding & Joining, 2025(01):1-7.
- [2] 葛浩,李绍伟,卢博,等. 采用 BNi2 钎焊 304 不锈钢/纯铜工艺及机理研究[J]. 焊接技术, 2025, 54(2):46-49.
GE H, LI S W, LU B, et al. Study on the brazing process and mechanism of 304 stainless steel/red copper by BNi2 [J]. Welding Technology, 2025, 54(2):46-49.
- [3] 陈寒松,梁怀志,王霄. SUS304 不锈钢与 PCCF30 的激光连接增强工艺参数建模与优化[J]. 热加工工艺, 2024, 53(24):67-75.
CHEN H L, LIANG H Z, WANG X. Modeling and Optimization of Laser Connection Enhancement Process-Parameters for SUS304 Stainless Steel and PCCF30 [J]. Hot Working Technology, 2024, 53(24):67-75.
- [4] 鲍庆臣,渠怀志,史建强,等. 中低温热处理对 SUS304 不锈钢 TIG 焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 电

- 焊机,2022,52(2):63-68.
- BAO Q C, LIANG H Z, SHI J Q, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of SUS304 Stainless Steel TIG Welded Joint[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 63-68.
- [5] 熊操,吴智,黄上甫,等.核电用316L不锈钢中厚板焊接工艺研究[J].金属加工(热加工),2025(1):51-57.
- XIONG C, WU Z, HUANG S F, et al. Research on the welding process of 316L stainless steel medium thick plate for nuclear power[J]. MW Metal Forming, 2025 (1): 51-57.
- [6] 刘元昊,任昌敬,向彦君,等.活性剂对A-TIG接头熔深、电弧形貌及组织性能的影响[J].材料导报,2025, 39(1):254-258.
- LIU Y H, REN C J, XIANG Y J, et al. Influence of Activator on the Penetration Depth, Arc Morphology, Microstructure and Properties of A TIG Joints[J]. Materials Reports, 2025, 39(1): 254-258.
- [7] 刘自刚,梅亚泽,张建峰,等.深熔TIG焊研究现状与展望[J].热加工工艺,2023,52(1):6-11.
- LIU Z G, MEI Y Z, ZHANG J F, et al. Research Status and Prospect of Deep Penetration TIG Welding[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(1): 6-11.
- [8] 张建晓,樊丁,黄勇.单枪耦合电弧AA-TIG焊[J].焊接学报,2017,38(10):47-50.
- ZHANG J X, FAN D, HUANG Y. Single welding torch coupled arc AA-TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 47-50.
- [9] 韩庆麟,何澳,李鑫磊,等.双钨极TIG电弧增材熔敷道成形特性研究[J].电焊机,2023,53(2):97-103.
- HAN Q L, HE A O, LI X L, et al. Study on Forming Characteristics for Double-tungsten TIG Arc-based Additive Manufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(2): 97-103.
- [10] Anbarasan N, Jerome S, Suresh G, et al. Effect of pulse frequency on microstructural and corrosion properties of inconel 718 gas tungsten arc weldments[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(1): 1299-1311.
- [11] Krivtsun I, Demchenko V, Krikent I, et al. Comparative numerical analysis of electromagnetic forces in DC and HFPC TIG welding[J]. Applied Mathematical Modelling, 2024, 127(1): 366-378.
- [12] Wang Z M, JIANG D H, WU J W, et al. A review on high-frequency pulsed arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60(02): 503-519.
- [13] Liu X, Wei Y, Wu F, et al. Research on Microstructure and Mechanical Properties of Square Wave Alternating Current Tungsten Inert Gas Welded Joints in 2219-T6 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(04): 1558-1575.
- [14] 郭新宇,王娟,孙宝壮,等.电流波形对7A04铝合金脉冲TIG焊接头组织及强度的影响[J].热加工工艺, 2022, 51(21): 30-34.
- GUO X Y, WANG J, SUN B Z, et al. Effect of Welding Current Waveform on Microstructure and Strength of 7A04 Aluminum Alloy Pulse TIG Joint[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(21): 30-34.
- [15] 宾坤,唐贺清,姚屏,等.不同脉冲、频率下的双丝匹配对焊缝的影响研究[J].精密成形工程,2022(6): 123-130.
- BIN K, TANG H Q, YAO P, et al. Influence of Double Wire Matching with Different Pulse and Frequency on Welds[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022(6): 123-130.
- [16] 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.
- ZHANG Y, DAI Z C, LI D F, 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.
- [17] 张猛,陈庆城,徐晓萍,等.高频脉冲大电流深熔MAG焊接工艺研究[J].金属加工(热加工),2024, 12(8): 66-72.
- ZHANG M, CHEN Q C, XU X P, et al. Research on high-frequency pulse accompanied by large current deep penetration MAG welding technology[J]. MW Metal Forming, 2024, 12(8): 66-72.
- [18] 王燮阳,曹彪,庞世炫,等.高频脉冲微TIG焊接电弧基值效应研究[J].热加工工艺,2024, 53(5): 91-96.
- WANG X Y, CAO B, PANG S X, et al. Research on Base Value Effect of High-frequency Pulse Micro-TIG Welding Arc[J]. Hot Working Technology, 2024, 53 (5): 91-96.