

引用格式:石永华,庞俊杰,詹家通,等.多模态磁控电源研制及EH40/304异种钢磁场辅助K-TIG焊接工艺研究[J].热加工工艺,2026,55(13):26-35.SHI Yonghua, PANG Junjie, ZHAN Jiatong, et al. Development of Multimodal Magnet-controlled Power Supply and Research on Magnetic Field Assisted K-TIG Welding Process of EH40/304 Dissimilar Steels[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(13): 26-35.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.25100092

多模态磁控电源研制及EH40/304异种钢磁场辅助K-TIG焊接工艺研究

石永华, 庞俊杰, 詹家通, 董士玮, 梁焯永

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:为抑制EH40高强钢与304不锈钢异种材料焊接过程中的咬边缺陷,研究了磁场辅助K-TIG焊接技术的应用。研制了一款多模态磁控电源,可输出稳定的直流及10~100 Hz的正弦交流磁场。通过不加磁场、直流纵向磁场、直流脉冲纵向磁场和正弦交流纵向磁场等系列焊接试验,分析了磁场模式对EH40/304异种钢焊缝成形的影响机理。结果表明,直流及直流脉冲磁场产生的洛伦兹力有效平衡了异种材料间的磁化力差异,纠正了熔池金属向EH40侧的偏流,从而显著抑制了咬边。在5 mT、20 Hz的交变纵向磁场作用下,不仅咬边现象得到改善,其周期性电磁搅拌效应还细化了焊缝晶粒,焊接接头的冲击韧性得到显著提升。

关键词:磁控电源;EH40/304异种钢;纵向磁场;K-TIG焊接;焊缝成形

中图分类号: TG434; TG444*.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)13-0026-10

Development of Multimodal Magnet-controlled Power Supply and Research on Magnetic Field Assisted K-TIG Welding Process of EH40/304 Dissimilar Steels

SHI Yonghua, PANG Junjie, ZHAN Jiatong, DONG Shiwei, LIANG Zhuoyong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To suppress the undercut defects during the dissimilar material welding of EH40 high-strength steel and 304 stainless steel, the application of magnetic field assisted K-TIG welding technology was investigated. A multimodal magnet-controlled power supply was developed, which can generate stable DC magnetic field and sinusoidal alternating magnetic field with a frequency ranging from 10 to 100 Hz. A series of welding experiments were carried out under zero magnetic field, DC longitudinal magnetic field, DC pulsed longitudinal magnetic field and sinusoidal AC longitudinal magnetic field. The influence mechanism of magnetic field modes on the weld formation of EH40/304 dissimilar steels was systematically analyzed. The results indicate that the Lorentz force generated by the DC and pulsed-DC magnetic fields effectively balances the magnetization force difference between the dissimilar materials, thereby correcting the deviation of molten pool metal toward to the EH40 side and significantly suppressing the undercut. Under the influence of an alternating longitudinal magnetic field with a strength of 5 mT and a frequency of 20 Hz, the undercut phenomenon is improved. Furthermore, the periodic electromagnetic stirring effect also refines the weld grain, significantly enhances the impact toughness of the welded joint.

Key words: magnet-controlled power supply; EH40/304 dissimilar steels; longitudinal magnetic field; K-TIG welding; weld formation

EH40船用钢兼具高强度和优良的低温韧性,

304不锈钢则具有优异的抗海水腐蚀性,实现二者高效焊接并发挥各自性能优势是当前研究热点。然而,这两种钢的物化性能差异导致焊接咬边,阻碍了其应用。深熔高效的K-TIG焊(keyhole TIG, 锁孔式钨极氩弧焊)具有高能、高穿透特性,可实现单面焊双面成形,降低成本,在船舶制造领域应用前景广阔。为进一步提升质量,研究者将磁场辅助引入K-TIG焊接,利用磁场控制熔池流动,在抑制咬边等

收稿日期:2025-10-24 修回日期:2026-04-06

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科 AB24010123);广西南宁市揭榜挂帅重大科技项目 (20241394);2023年度深圳高新区龙华园区创新平台建设项目(11003a20241221fcb079)

作者简介:石永华,男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向:焊接过程智能视觉检测技术、深熔K-TIG磁控焊接、水下焊接等;E-mail:yhuashi@scut.edu.cn

缺陷上效果显著^[1-2]。王林^[3]在高速熔化极气体保护焊中施加横向磁场,通过洛伦兹力调控熔池,抑制驼峰。陈金荣等^[4]发现增大直流纵向磁场强度会压缩 K-TIG 电弧并使熔池偏移,而合理增加交变磁场频率可稳定电弧并搅拌熔池。Shoichi 等^[5]在热丝 TIG 横焊中施加纵向磁场,利用洛伦兹力抬升熔池金属消除了咬边。Rong 等^[6]在 EH36/316L 焊中应用磁场,结果显示洛伦兹力搅拌熔池,细化了组织、降低了温度梯度/冷却速度,减小了变形。Cao 等^[7]发现 EH36/316L 激光焊存在临界焊接速度 (0.8 m/min),焊接速度过低时出现过熔透现象,过高则出现未熔透和气孔现象。宋浩泽等^[8]在 25 mm 厚 S32101 双相不锈钢多层窄间隙激光填丝焊中施加磁场,利用磁场控制熔池,消除了气孔与未熔合缺陷,接头抗拉强度高于母材且断于母材区,焊缝组织细密均匀。

现有研究表明,磁场辅助技术在异种钢焊接的应用仍面临挑战^[9-10]。磁场辅助焊接技术的深化应用面临双重挑战:一方面,现有的磁控电源功能有限,大多仅提供单一的直流或交流输出,鲜有研究成功实现了交直流复合输出,成为制约该技术发展的主要因素^[11-12]。另一方面,在异种钢焊接领域,因母材磁性不均所诱发的咬边缺陷已成为一个共性工艺难

题^[12-13]。因此,深入探究磁场辅助工艺改善此类缺陷,具有明确的必要性与重要的应用价值。

为解决上述难题,本研究将磁场辅助技术引入 EH40/304 异种钢的焊接工艺中。首先开发了一款新型磁控电源,该电源得益于其主电路与控制系统的协同优化,具备输出多种电流波形(包括直流、直流脉冲及正弦交流)的能力。在此硬件基础上,开展了 EH40/304 异种钢的焊接工艺系统性实验研究。

1 磁控电源及仿真

图 1 为磁控电源系统的总体架构,它由主功率电路与控制单元两部分构成。控制单元负责产生驱动脉冲、采集电压/电流信息并支持人机交互;主功率电路则采用三级级联拓扑:输入级主电路把 220 V 市电经整流桥转换为脉动直流,再由 Boost 拓扑结构实现功率因数校正 (power factor correction, PFC),将电压升至约 390 V,并实现输入电流与电压同相位;第二级半桥 LLC 谐振电路将高压直流逆变为高频方波,经高频变压器降压及整流后得到稳定的低压直流;输出级调制电路依据用户设定的波形(直流、脉冲或正弦)对该低压直流进行实时调制,输出频率、幅值可调的励磁电流,并驱动电磁线圈产生

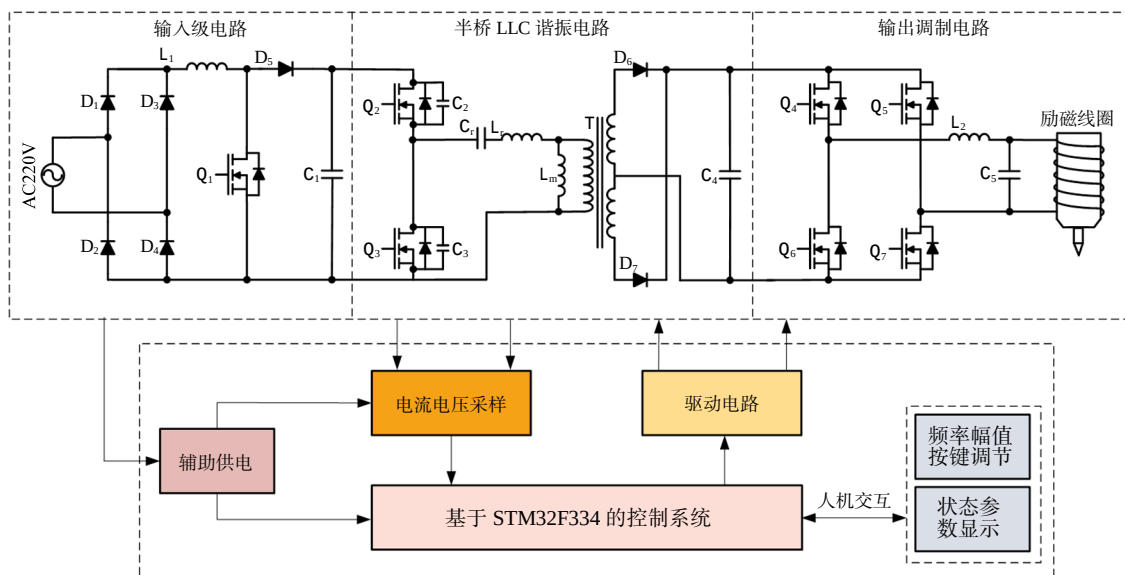


图 1 磁控电源系统的总体架构

Fig.1 Magnet-controlled power system solution

满足磁场辅助焊接需求的可控磁场。

输入级主电路采用整流桥与 Boost PFC 复合拓扑结构,该电源的前置级为 Boost PFC 电路。Boost PFC 电路由电感 L_1 、二极管 D_5 、开关管 Q_1 、电容 C_1

和后端等效电阻 R_1 组成,其中 R_1 为第二级半桥 LLC 谐振电路及输出级电路的等效电阻值。交流输入经整流后得到脉动直流电压 V_g ,然后在开关管 Q_1 的驱动下,将 V_g 稳定提升至低纹波母线电压 $V_{o(pfc)}$,

这一过程具有高功率因数校正功能 (PF>0.98),能显著抑制网侧电流谐波,从而降低对电网的干扰。下文将忽略基础整流环节,重点剖析 Boost PFC 电路的工作机制与动态响应^[6]。

在开关周期 T_s 内,对 Boost PFC 电路进行模式分析,利用状态平均法可求其状态空间方程:

$$\begin{cases} \frac{d\langle i_L(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \frac{i_L(T_s) - i_L(0)}{T_s} \\ = -\frac{1-d}{L_1} \langle v_{o(pfc)}(t) \rangle_{T_s} + \frac{1}{L_1} \langle v_g(t) \rangle_{T_s} \\ \frac{d\langle v_{o(pfc)}(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \frac{v_{o(pfc)}(T_s) - v_{o(pfc)}(0)}{T_s} \\ = \frac{1-d}{C_1} \langle i_L(t) \rangle_{T_s} - \frac{1}{R_1 C_1} \langle v_{o(pfc)}(t) \rangle_{T_s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: d 为开关管占空比; i_L 为电感电流; T_s 为输入级电路开关管开关周期; L_1 为 Boost 电路 L_1 电感值; C_1 为输入级电路的母线电容值。

基于伏秒平衡与安秒平衡原理,对式(1)进行扰动分离及线性化处理,即可推导出系统在稳态工作条件下的电压 $V_{o(pfc)}$ 与电流增益 $I_{o(pfc)}$:

$$\begin{cases} V_{o(pfc)} = \frac{V_g}{1-d} \\ I_{o(pfc)} = (1-d)I_L \end{cases} \quad (2)$$

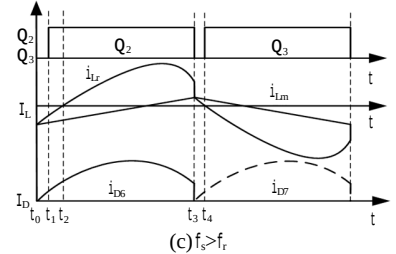
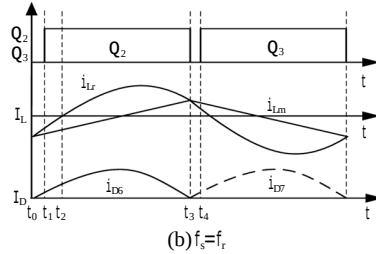
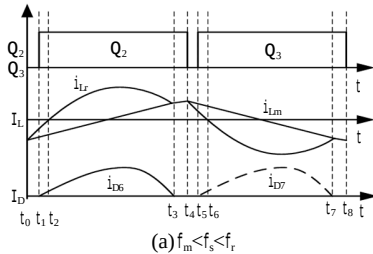


图2 半桥 LLC 谐振电路工作波形
Fig.2 Operating waveforms of LLC resonant circuit

理想工作状态,如图 2(b)所示。

若 $f_s > f_r$,开关管仍可实现零电压导通,但二极管可能出现反向恢复,如图 2(c)所示。

当 LLC 谐振电路的开关频率 $f_m < f_s < f_r$ 时,能够实现零电压开通和零电流关断,确保软开关,并具有较宽的频率调节范围。本文以此频率区间为例,分析半桥 LLC 谐振电路的工作原理:

(1) 工作模式 1 $[t_0, t_1]$:如图 3(a)所示,开关管 Q_2 和 Q_3 关断,谐振电感 i_{Lr} 和励磁电感 i_{Lm} 分别放电和充电,直到 Q_2 体二极管导通,电压被钳位为零,保证了 Q_2 零电压开通。副边二极管 D_6 和 D_7 关断,滤波电容 C_4 向负载提供直流电。

(2) 工作模式 2 $[t_1, t_2]$:如图 3(b)所示, t_1 时刻

式中: i_L 为输入级电路流经 L_1 的电流。

在半桥 LLC 谐振电路的工作过程中,会出现两个谐振频率:一个是当谐振电容 C_r 和谐振电感 L_r 单独谐振时的频率,记作 f_r ;另一个是当谐振电容 C_r 、谐振电感 L_r 和励磁电感 L_m 共同谐振时的频率,记作 f_m 。 f_r 、 f_m 的计算表达式分别为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (3)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m) C_r}} \quad (4)$$

在半桥 LLC 谐振电路中,开关管的工作频率 f_s 根据与谐振频率 f_r 和 f_m 的关系可分为 4 个区间: $f_m < f_s < f_r$, $f_s = f_r$, $f_s > f_r$ 和 $f_s < f_m$ 。其中,当 $f_s < f_m$ 时,谐振网络呈容性,电流相位超前电压,且无法实现零电压开通,在此区间应避免工作。

当 $f_m < f_s < f_r$ 时,谐振网络为感性,谐振电流 i_{Lr} 滞后于电压,开关管 Q_2 和 Q_3 可实现零电压导通。在此区间,变压器副边的二极管可在 $i_{Lr} = i_{Lm}$ 时实现零电流关断,如图 2(a)所示。

当 $f_s = f_r$ 时,电流波形呈正弦状,开关管能够在零电压下导通,二极管在切换时实现零电流关断,这是

Q_2 零电压开通, Q_3 关断。能量通过 Q_2 回流至输入电源,变压器原边电压传输至副边,整流二极管 D_6 导通,励磁电感被输出电压钳位,不参与谐振,谐振只发生在 L_r 和 C_r 之间。

(3) 工作模式 3 $[t_2, t_3]$:如图 3(c)所示,当 i_{Lr} 减小至零并反向增加时,副边二极管 D_6 导通,能量继续传输至副边。励磁电感保持钳位状态,电流线性增加。

(4) 工作模式 4 $[t_3, t_4]$:如图 3(d)所示,谐振电感电流与励磁电感电流相等,变压器原副边电流为零,二极管电流自然降到零,完成零电流关断。励磁电感不再钳位,谐振电感、励磁电感和电容共同工作,滤波电容 C_4 向负载供电。

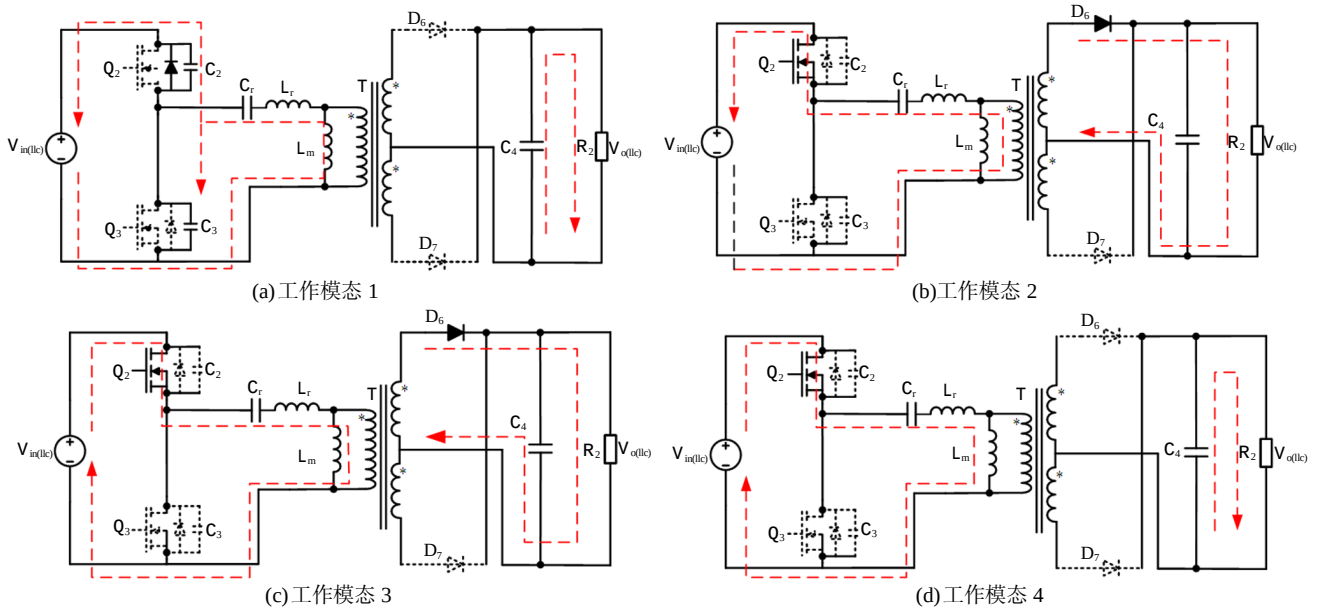


图3 半桥 LLC 谐振电路工作模式

Fig.3 Operating modes of the half-bridge LLC resonant circuit

从 t_4 开始, Q_2 关断, 电路进入下半周期, 工作原理与上半周期类似, 只是电流方向发生改变, 过程不再赘述。

次级半桥 LLC 电路的增益分析采用基波分析法, 通过对半桥 LLC 谐振电路中的开关、谐振网络及整流滤波电路分别实施简化, 可建立如图 4 所示的基波等效电路模型。

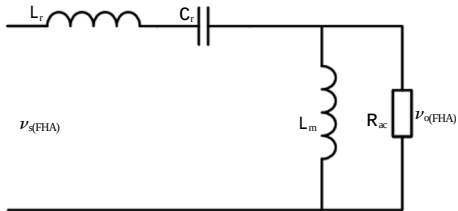


图4 基波等效电路模型

Fig.4 Fundamental harmonic equivalent circuit model

将谐振电路的传递函数转换到频域 $H(j\omega)$, 得:

$$H(j\omega) = \frac{-L_m C_r R_{ac} \omega^2}{-j\omega^3 L_r C_r L_m - \omega^2 C_r R_{ac} (L_m + L_r) + j\omega L_m + R_{ac}} \quad (5)$$

式中: R_{ac} 为等效交流负载电阻。

可以得到直流增益 M_{dc} , 为

$$M_{dc} = \frac{V_{o(IIc)}}{V_{in(pfc)}} = \frac{1}{2n} \cdot$$

$$\left| \frac{-L_m C_r R_{ac} \omega^2}{-j\omega^3 L_r C_r L_m - \omega^2 C_r R_{ac} (L_m + L_r) + j\omega L_m + R_{ac}} \right| \quad (6)$$

式中: $V_{in(pfc)}$ 为 LLC 级输入直流母线电压; $V_{o(IIc)}$ 为 LLC 直流输出电压。

为了分析时计算简洁与方便, 对电压增益进行

归一化处理, 可得增益特性 $M(f_n, k, Q)$:

$$M(f_n, k, Q) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{k f_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}} \quad (7)$$

式中: k 为归一化后电感系数; f_n 为归一化后频率; Q 为品质因素。

基于上述增益特性分析, 为实现最佳性能, 必须将工作频率 f_n 、电感系数 k 及品质因数 Q 纳入综合设计考量。为确保谐振电路运行于增益 M 恒定为 1 的最优状态, 其工作频率 f_n 需被设置在谐振频率附近。这一设定是实现最佳能量传输的关键。据此, 在本设计中, 谐振电路的工作频率被选定为 100 kHz。增益特性表达式分析表明, 在恒定的品质因数 Q 下, 电感系数 k 的取值直接影响增益相对于归一化频率的曲线分布。鉴于 k 值存在一个合理的工程取值范围, 过大或过小均不适宜, 本文在设计中选取 $k=5$ 。当工作频率与电感系数 k 确定时, 可得出实现零电压开关的最大品质因数 Q 为

$$Q_{max} = \frac{1}{k \cdot M_{max}} \cdot \sqrt{k + \frac{M_{max}^2}{M_{max}^2 - 1}} = 0.46 \quad (8)$$

为确保谐振电路从半载至满载的整个工作区间内均能运行于感性状态, 从而实现零电压开通的软开关条件, 其品质因数 Q 的设计值必须低于理论最大值 Q_{max0} 为预留必要的设计裕量, 通常将 Q 值设定在 Q_{max} 的 90%~95%, 最终确定的品质因数 Q 值为

0.42。

图 5 展示了本电源输出三种波形的调制信号曲线。其生成机制相似,区别仅在于调制波函数 V_r 的不同。对于直流输出,其调制信号如图 5(a)所示,在时域上表现为一条不随时间变化的水平直线,对应

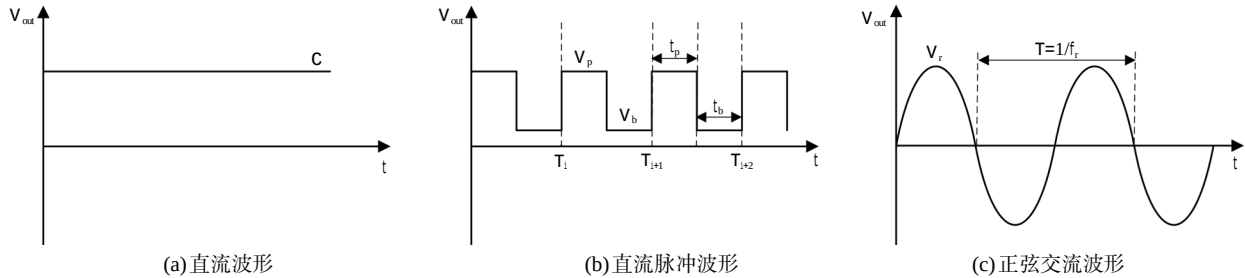


图 5 电源输出的调制信号波形曲线

Fig.5 Modulating signal wave curves of power output

该波形可由式(10)的函数表示。

$$V_{r2} = \begin{cases} V_p, T_i \leq t \leq T_i + t_p \\ V_b, T_i + t_p \leq t \leq T_{i+1} \end{cases} \quad (i=0, 1, 2 \dots) \quad (10)$$

式中: V_p 为脉冲的峰值电压; V_b 为基值电压; T_i 是调制波形的周期; t_p 与 t_b 则分别对应峰值与基值的持续时间。

对于正弦交流输出,其调制波函数由式(11)给出,该函数为标准正弦函数形式,如图 5(c)所示。该函数对应的时域波形呈现一条连续、平滑的正弦

的函数表达式为

$$V_{r1} = C \quad (9)$$

式中: C 为常数。

在直流脉冲输出模式下,其调制波形如图 5(b)所示,其时序特征表现为具有固定周期的脉冲序列。

$$V_{r3} = V_r \cdot \sin(2\pi f_r t) \quad (11)$$

式中: f_r 为正弦波频率。

基于 Matlab/Simulink 平台构建磁控电源主电路虚拟实验框架,如图 6 所示。通过关键波形解析验证其工作原理与动态特性,进而评估电路参数设计的有效性。

输入级电路仿真结果如图 7 所示。输入级 Boost PFC 的输出母线电压 $V_{o(pfc)}$ 先出现短暂超调,

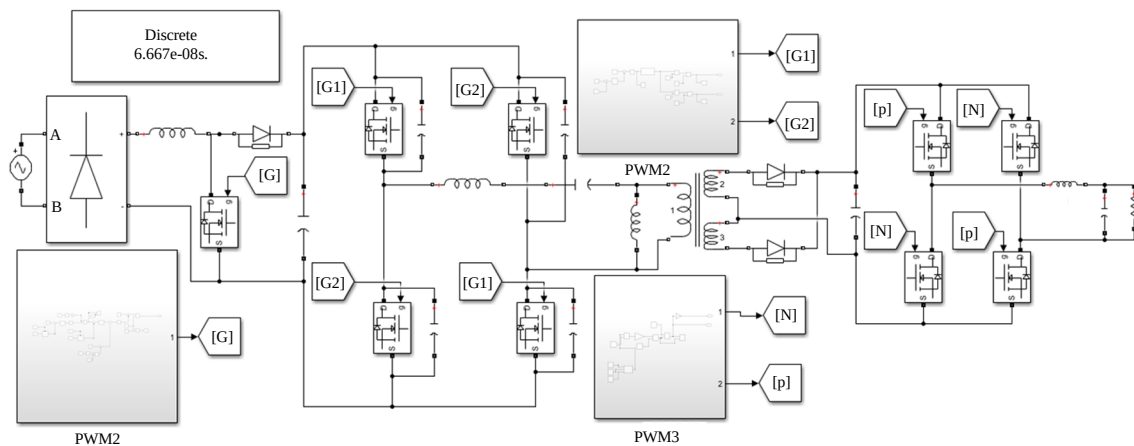


图 6 磁控电源仿真模型

Fig.6 Simulation model of magnetically controlled power supply

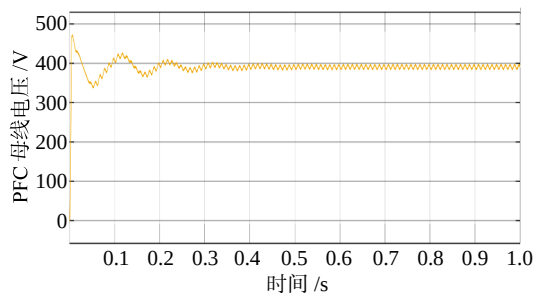


图 7 输入级电路仿真结果

Fig.7 Simulation results of input stage circuit

随后进入缓慢衰减的过渡过程,最终稳定在 390V 附近;其峰-峰纹波约 20V,对应纹波系数约 5%,能够为后级提供低纹波、高稳定的直流母线。

半桥 LLC 谐振电路输出电压仿真结果如图 8 所示。半桥 LLC 谐振级输出电压在极短时间内即锁定至设定值 40V,且脉动幅度极小,可视为无纹波。这一现象说明仿真模型中的信号采样、电压环运算及驱动刷新均工作正常,能够为后续控制策略的制

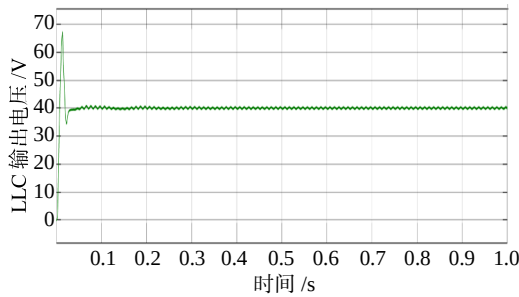
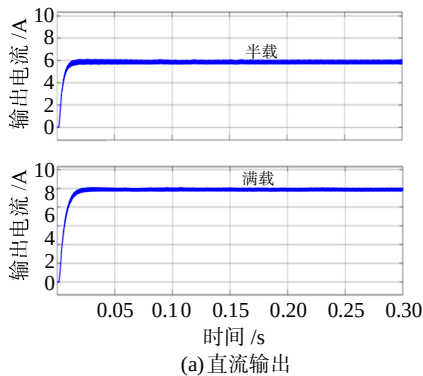
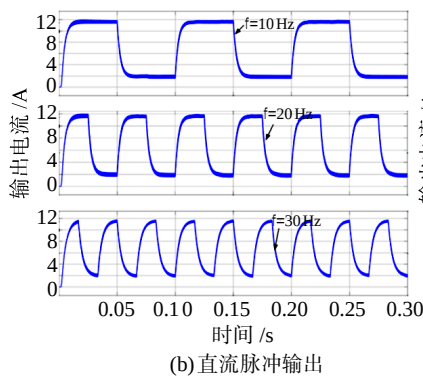


图 8 LLC 级输出电压仿真结果

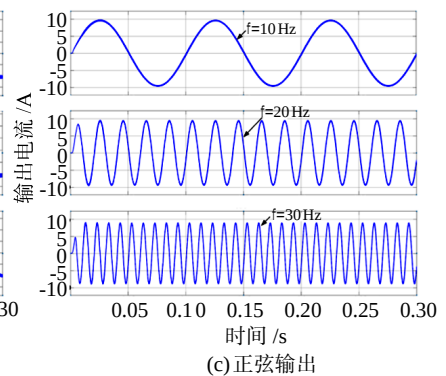
Fig.8 Simulation results of LLC stage output voltage



(a) 直流输出



(b) 直流脉冲输出



(c) 正弦输出

图 9 调制电路输出波形仿真

Fig.9 Simulation of output waveform of the modulation circuit

有谐振而出现显著畸变, 脉冲特征退化, 趋向三角波。图 9(c)显示, 满载时把正弦输出频率分别调到 10、50 与 100Hz, 各频点均能输出标准正弦波, 实现了 10~100Hz 的连续可调。

2 磁控电源控制系统设计及测试

实验系统包含磁控电源本体、励磁线圈、纯阻性负载、散热系统及配套测试仪表等, 如图 10 所示。平台搭建完成后执行分级调试: 首先接入阻性负载进行安全性验证与主电路功能测试, 确认各级工作状态正常后切换至励磁线圈负载, 最终完成输出波形特性检测。



图 10 磁控电源实验平台

Fig.10 Experimental platform for magnetic control power supply

励磁线圈接入后, 通过同步监测 Boost PFC 级的母线电压、LLC 谐振级的输出电压以及加载至励磁线圈的电流, 本研究对磁控电源的综合性能进行

定提供可靠依据。

最后, 在前两级电路输出正常的情况下, 本研究对其直流、直流脉冲及正弦交流三种输出模式进行了仿真。在仿真中, 励磁线圈被等效为阻感性负载 R_3 以模拟真实工作条件, 所得结果如图 9 所示。图 9 (a)表明, 半载与满载时直流输出均保持稳定。图 9 (b) 中, 满载条件下把脉冲频率分别设为 10、20 与 30Hz。当频率升至 30Hz 时, 波形因 LC 滤波器的固

了验证。在直流输出测试中, 通过调节输出电流, 获得了半载与满载工况的波形, 如图 11 所示。母线电压 $V_{o(pte)}$ 稳定于 380 V, LLC 输出电压 $V_{o(IIc)}$ 恒定在 40V; 对应的输出电流 I_o 在半载和满载下分别约为 6、10A, 证明了电源的良好负载适应性。

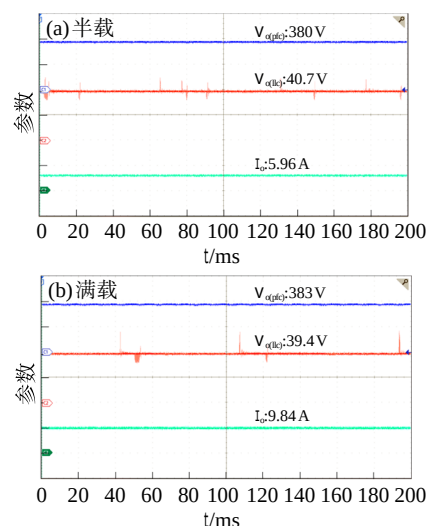


图 11 磁控电源输出直流波形

Fig.11 DC output waveform of magnet-controlled power supply

在完成直流输出测试后, 进一步研究了电源的直流脉冲工作模式。通过改变脉冲频率(10、20、30 Hz)以分析其时序特性, 得到的输出波形如图 12 所

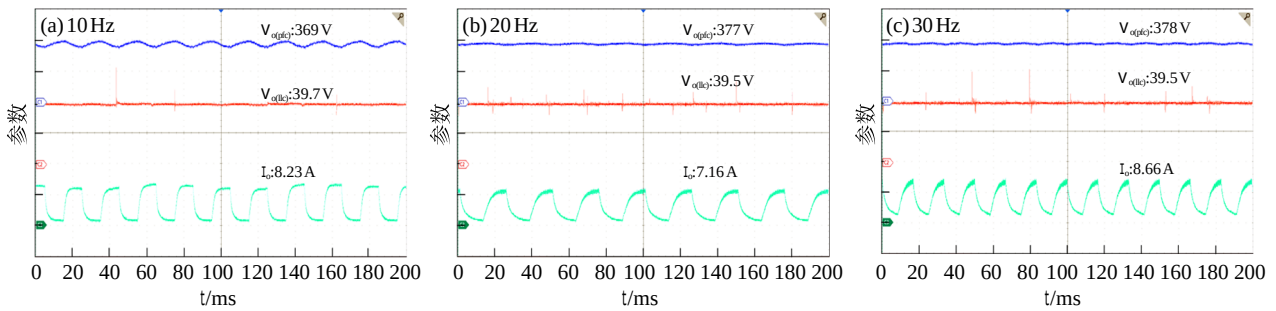


图 12 不同脉冲频率下磁控电源输出直流脉冲波形

Fig.12 DC pulse output waveform of magnet-controlled power supply under different pulse frequencies

示。测试表明:各频率下母线电压 $V_{o(pfc)}$ 稳定维持于 360~380 V, LLC 输出电压 $V_{o(LLC)}$ 恒定约为 40 V, 电流 I_o 有效值稳定在 (8 ± 1) A。当频率 ≤ 20 Hz 时脉冲波形保持规整的基值-峰值平台特征; 频率升至 30 Hz 则出现显著的波形畸变, 趋近三角波, 此现象源于输出调制电路 LC 滤波器的谐振效应。据此确定本磁控电源直流脉冲模式的适用频率上限为 20 Hz。

针对正弦交流波形输出, 本研究同样开展了测试。通过调节频率(10、50、100 Hz)并采用相同检测方法, 得到如图 13 所示的输出波形。测试数据表明: 全频段母线电压 $V_{o(pfc)}$ 稳定维持在 380~390 V, LLC 输出电压 $V_{o(LLC)}$ 恒定于 (40 ± 1) V, 输出电流 I_o 有效值稳定在 (10 ± 1) A。虽 10 Hz 工况存在过零点轻微失真, 但未影响功能实现。

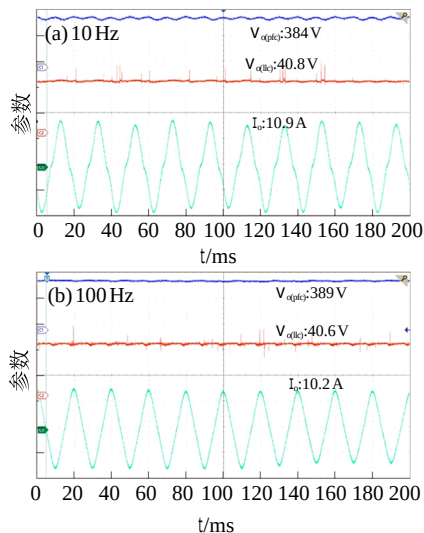


图 13 不同频率下磁控电源正弦交流输出波形

Fig.13 Sinusoidal AC output waveform of magnet-controlled power supply under different frequencies

试验结果证实本磁控电源交流输出满足设计要求, 具备 10~100 Hz 宽频域稳定输出能力, 完全适配磁场辅助焊接应用场景。

3 磁场辅助焊接工艺试验

试验选用 300 mm×100 mm×8 mm 的 EH40 船用结构钢板和 304 奥氏体不锈钢板作为母材, 无坡口、无填充金属。EH40 钢具有优良的 -40 °C 低温韧性, 而 304 不锈钢则具有良好的耐蚀性与成形性, 其具体化学成分和力学性能分别见表 1、2。

表 1 母材的化学成分(质量分数, %)
Tab.1 Chemical composition of base metals (wt%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
304	0.058	0.40	1.16	0.035	0.003	18.10	8.01	余量
EH40	0.13	0.32	1.54	0.015	0.002	0.03	0.01	余量

表 2 母材的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of base metals

牌号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率(%)	冲击吸收功 KV/J
304	300	646	63	-
EH40	440	550	31.5	209

本研究采用对比试验: 首先, 在零磁场条件下确定实现 EH40/304 异种钢单面焊双面成形的基准工艺参数; 随后, 固定此基准参数, 将励磁线圈的激励电流(其波形、幅值与频率)作为变量进行调节, 以探究磁场对焊缝成形的影响规律。试验工艺参数见表 3。

表 3 EH40/304 异种钢磁场辅助焊接工艺参数
Tab.3 Process parameters of magnetic field-assisted welding of EH40/304 dissimilar steels

编号	电流波形	磁感应强度 /mT	磁场频率 /Hz	焊接电流 /A	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	保护气流量 /(L·min ⁻¹)
No.1	不加磁场	0	-	500	210	20
No.2	直流	5	-	500	210	20
No.3	直流脉冲	5	20	500	210	20
No.4	正弦交流	5	20	500	210	20

研究不同磁场波形下 EH40/304 异种钢焊接的焊缝成形效果, 在 5 mT 相同磁感应强度下, 对比分

析了无磁场、直流纵向磁场、直流脉冲纵向磁场及正弦交流纵向磁场的试验结果,见图 14。相较于无磁场的 No.1 试样,施加直流磁场显著改善了焊缝成形:正面平整度与对称性提高,304 侧咬边减轻;横截面显示熔池向 EH40 侧的偏转减弱,咬边明显改善,表明磁场有效抑制了液态金属的不对称流动。直流脉冲磁场作用下焊缝正面平整度更佳,304 侧咬

边大幅改善至基本消除,效果与直流磁场相当。而交流磁场虽使焊缝正面鳞纹细化,304 侧咬边略有减轻,但其改善效果明显弱于直流及直流脉冲磁场。综上,施加 5 mT 纵向磁场均能不同程度地改善 EH40/304 焊缝地咬边缺陷,其中直流与直流脉冲磁场效果最优,可显著抑制熔池偏流并基本消除咬边,交流磁场作用则相对有限。

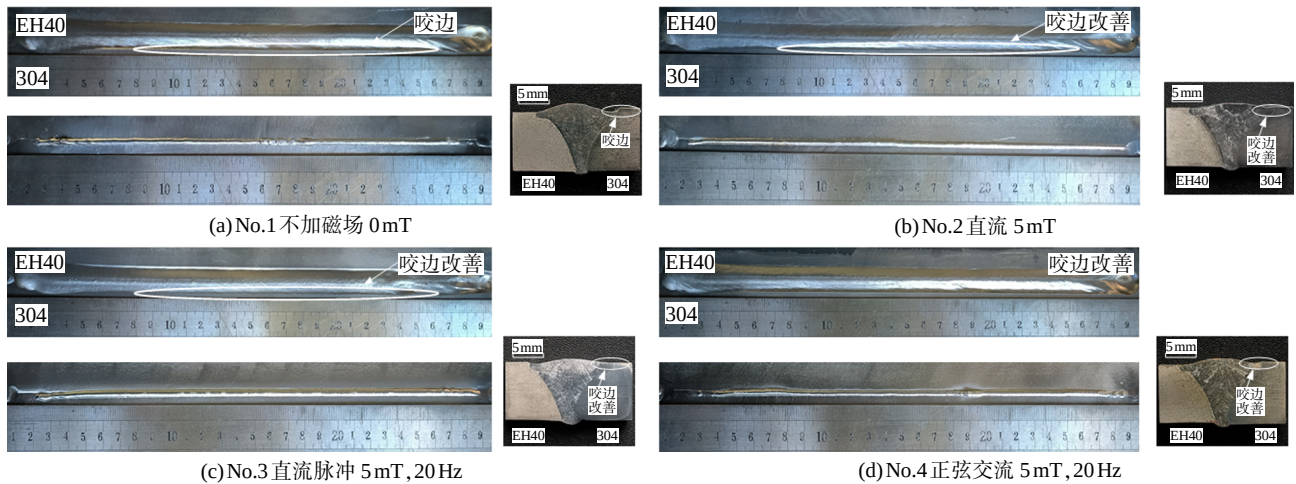


图 14 不同磁场形式下的焊缝成形
Fig.14 Weld bead morphologies under different magnetic field configurations

对两种母材磁性进行分析。EH40 钢主要由铁素体构成,该组织赋予材料明显的铁磁性,在外磁场中易于磁化,其磁化率 χ_f 较高,通常在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$;而 304 不锈钢则以奥氏体为主要组织,其呈现出顺磁性,即对外加磁场的响应极为微弱,顺磁状态的磁化率 χ_p 一般介于 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 。焊接电流及电弧中的带电粒子在熔池区域感应产生背景磁场。在此环境下,铁磁性材料 EH40 因磁化作用发生磁畴重排,在母材内部形成强度显著高于背景磁场的强非均匀磁场;而顺磁性的 304 不锈钢几乎不被磁化,内部磁场微弱,因此在焊接区形成了一个非均匀的梯度磁场。该磁场作用于熔池,会对其中的带电金属粒子产生磁化效应。这种磁化效应宏观表现为驱动粒子定向移动的磁化力 F_M :

$$F_M = V \frac{\chi}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (12)$$

式中: V 为物质的体积; χ 为磁化率,反映材料被磁化的难易程度; μ_0 为真空磁导率; ∇ 为磁感应强度梯度; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度。

针对未施加磁场的 No.1 工况,假定母材内部磁场仅沿 X 方向存在梯度,而在 Y 、 Z 方向上均匀分布。基于该假设,由式(12)可推导出熔池中带电金属粒子所受磁化力的合力 F_v :

$$F_v = V \frac{\chi_f \chi_p}{\mu_0} \mathbf{B}_x \frac{d\mathbf{B}_x}{dX} \quad (13)$$

式中: χ_f 为范弗莱克顺磁磁化率; χ_p 为泡利顺磁磁化率。

二者磁化率的显著差异导致磁化力合力 F_v 沿 $-X$ 方向,促使熔池液态金属向 EH40 侧迁移聚集,造成 304 侧咬边,如图 15(a)所示。

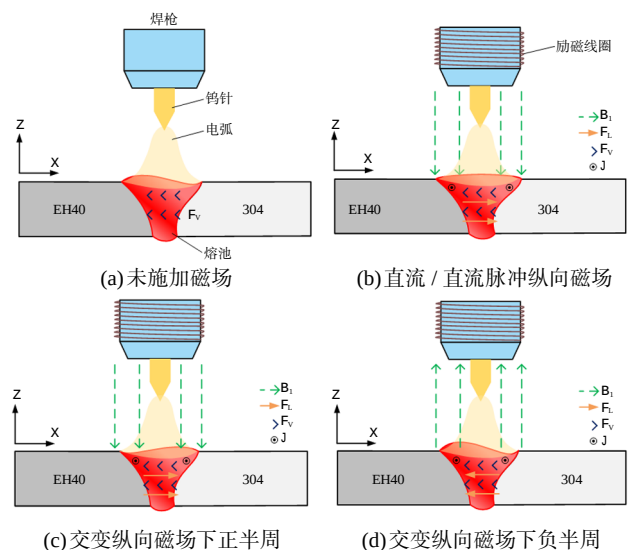


图 15 熔池受力示意图

Fig.15 Schematic diagram of force analysis on a molten pool

施加直流纵向磁场的情况如图 15(b)所示。从试验也观察到熔池金属向 EH40 侧的流动受到明显抑制。当励磁线圈通以磁控电源提供的直流电时,会产生一个稳定的纵向磁场 B_1 。该外加磁场使熔池中的带电金属粒子受到洛伦兹力 F_L 的作用而发生偏转,其表达式为

$$F_L = J \times B_1 = \sigma(v \times B_1) \times B_1 \quad (14)$$

式中: J 为等效电流; σ 为电导率; v 为带电粒子速度; B_1 为外加磁场的磁感应强度。此力与磁化力 F_v 的方向相反而抵消了后者的驱动效应,从而显著减轻 304 侧的咬边。

直流脉冲纵向磁场下,其脉冲电流方向恒定,因此磁场方向及 F_L 方向(+X)与直流纵向磁场的保持一致,仅力幅波动,如图 15(b)所示。在相同磁感应强度(5mT)下,直流脉冲纵向磁场对液态金属偏流的抑制效果及咬边改善程度与直流磁场相近。

对施加正弦交流磁场的熔池受力模型进行分析,如图 15(c)、(d)所示。在该模式下,通过励磁线圈的交变电流产生方向周期性变化的纵向磁场。以一个周期为例:在正半周,假定磁场 B_1 沿 Z 轴负向,根据左手定则,熔池内带电粒子所受洛伦兹力 F_L 指向 X 轴正向,与磁化力 F_v 方向相反而抑制液态金属向 EH40 侧的流动;在负半周,电流及磁场方向反转(B_1 沿 Z 轴正向),导致 F_L 方向变为沿 X 轴负向,此时它与 F_v 同向,共同加剧液态金属向 EH40 侧的流动。在 5mT 的磁感应强度下,这种因洛伦兹力方向交替变化对熔池产生的搅拌作用,使咬边现象较未加磁场时有所改善,但其效果弱于直流及直流脉冲磁场下单向洛伦兹力的作用。此外,交变磁场引起的洛伦兹力不仅影响熔池流动,还会造成熔池的周期性振荡,对焊缝的凝固组织产生影响。对比无外场条件下枝晶沿最大温度梯度方向持续生长的模式,交变磁场的引入改变了这一过程:其产生的周期性洛伦兹力会作用于枝晶前沿的薄弱区域,使其破碎并形成游离晶核。这些晶核的一部分被重熔,其余则作为有效的形核质点,最终通过这种晶粒增殖效应使组织显著细化,该现象已获学界广泛证实^[7]。这有助于提升焊缝的力学性能与韧性,进一步说明磁场调控在改善焊接接头性能方面具有积极效果。

选取焊缝成形良好(无过熔透、未熔合)的 No.1~No.4 四组 EH40/304 异种钢接头,进行线切割加工力学试样,每组包含 3 个拉伸试样用于常温

测试,以及 3 个低温(-20℃)和 3 个常温冲击试样。

试样的拉伸应力-应变曲线见图 16。所有试样均断裂于 EH40 母材区域,而非焊缝。由于 EH40 母材抗拉强度(550 MPa)低于 304 不锈钢(646 MPa),此断裂现象表明:无论是否施加外部磁场,K-TIG 焊接接头的抗拉强度均超过了母材 EH40 的强度。

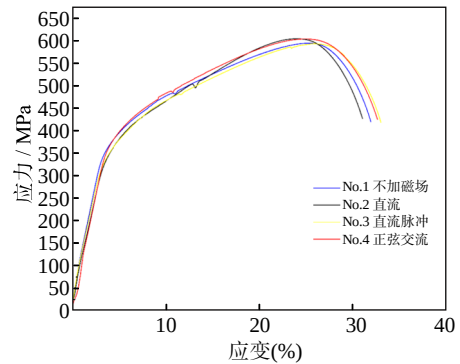


图 16 试样的拉伸应力-应变曲线
Fig.16 Tensile Stress-strain curve of samples

从 EH40/304 异种钢焊接接头中心取样,系统评估了其低温和常温冲击性能,得到的冲击吸收功如图 17 所示。所有冲击试样均断裂于焊缝中心,证实该区域为韧性薄弱环节。低温(-20℃)冲击测试表明:无磁场接头 No.1 的冲击吸收功仅为 26J,低于 GB/T 712—2022《船舶及海洋工程用结构钢》标准要求的 27J;施加外部磁场后冲击吸收功显著改善,直流磁场接头 No.2 提升至 37J,提高了 42.3%;直流脉冲磁场的接头 No.3 达 38.7J,提高了 48.9%,而交变纵向磁场的接头 No.4 冲击吸收功最优,高达 60J,相比 No.1 接头提升 130.8%。常温测试结果呈现相似规律:交变磁场接头仍保持最高冲击吸收功(138J),显著高于无磁场接头 No.1 的 91J;直流和直流脉冲磁场亦有效提升了韧性,分别达到了 113、117J。综上,施加外部磁场,尤其是交变纵向磁场,能

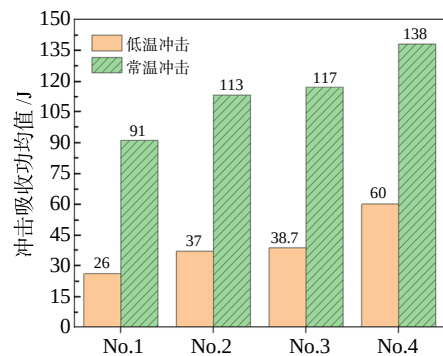


图 17 不同试样的冲击吸收功
Fig.17 Impact absorbed energy of different samples

显著提升 EH40/304 焊接接头在低温和常温下的冲击韧性。

在 5 mT、20 Hz 交变纵向磁场作用下,焊接接头的冲击性能显著提升,这源于独特的熔池动力学机制:周期性变化的洛伦兹力驱动熔池金属产生强烈振荡,其搅拌强度远超直流/直流脉冲磁场,促进了 EH40/304 异种金属的熔合均匀性,更细化了凝固组织晶粒,显著提高了冲击韧性。本研究开发的磁控电源的成功应用,为船舶异种钢焊接冲击韧性不足问题提供了有效解决方案。

4 结论

(1) 本研究设计的磁控电源工作稳定,其直流输出平稳,正弦交流输出则具备 10~100 Hz 的连续可调范围。

(2) 在改善 EH40/304 异种钢焊缝咬边缺陷方面,直流与直流脉冲纵向磁场效果最为突出;而在 5 mT、20 Hz 交变磁场参数下,咬边亦得到有效控制。交变磁场诱导熔池液态金属产生了强烈的周期性电磁搅拌,其效果优于直流与直流脉冲纵向磁场模式,显著提升了焊接接头的冲击韧性。

参考文献:

- [1] 肖明颖,王琪晨,陈增铎,等. K-TIG 焊接单面焊双面成型工艺及其在海洋工程装备制造领域的应用[J]. 电焊机,2020,50(8):22-26.
- [2] 陈金荣. 磁控 K-TIG 焊接电弧形态及焊缝成形研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.
- [3] 王林. 外加横向磁场对高速 GMAW 驼峰焊道抑制机理的研究[D]. 济南:山东大学,2018.
- [4] 陈金荣,石永华,占爱文. 纵向磁场对 K-TIG 焊接电弧形态及焊缝成形的影响[J]. 热加工工艺,2023,52(5):25-29.
- [5] Shoichi M, Yukio M, Koki T, et al. Study on the application for electromagnetic controlled molten pool welding process in overhead and flat position welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining,2013,18(1):38-44.
- [6] Rong Y M, Xu J J, Lei T, et al. Magnetism aided mitigation of deformation and residual stress in dissimilar joint 316L with EH36 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018,259:23-32.
- [7] Cao L C, Shao X Y, Jiang P, et al. Effects of welding speed on microstructure and mechanical property of fiber laser welded dissimilar butt joints between AISI316L and EH36[J]. Metals, 2017,7(7):270.
- [8] 宋浩泽,付娟,赵勇,等. 磁场辅助窄间隙激光填丝焊接工艺研究[J]. 热加工工艺,2024,53(13):89-93.
- [9] Kuznetsov V D. Behaviour of the arc and transfer of electrode metal during welding in a longitudinal magnetic field[J]. Welding Production,1972,19(4):1-4.
- [10] Selyanekov V N. Formation of the weld in a longitudinal magnetic field in argon arc welding [J]. Welding Production, 1975,22 (11):50-53.
- [11] 刘海华,陈豪杰,李亮玉,等. 外加横向磁场对 304 不锈钢焊接熔池影响机理分析[J]. 焊接学报,2019,40(3):71-75.
- [12] 常云龙,贺优优,杜怀周,等. 纵向磁场对低碳钢 MIG 焊焊缝组织及性能的影响 [J]. 沈阳工业大学学报,2007,29(4):385-387.
- [13] 孙清洁,陶玉洁,甄祖阳,等. Si 元素对钛/钢异种金属接头成形及微观组织影响 [J]. 焊接学报,2025,46(1):1-7. 

(上接第 25 页)

- [8] 刘儒军,黄翔,黄海鸿,等. 压合衬套二次冷挤压强化数值仿真与实验研究[J]. 机械科学与技术,2024,43(7):1142-1150.
- [9] Maximov J, Duncheva G, Amudjev I. A novel method and tool which enhance the fatigue life of structural components with fastener holes[J]. Engineering Failure Analysis,2013,31:132-143.
- [10] Geng H, Xu X, Lai Z, et al. A novel non-contacting single-coil electromagnetic hole expansion process to improve the fatigue performance of hole component [J]. International Journal of Fatigue,2022,162:106924.
- [11] Yan W, Wang Y, Liang S, et al. Study on the residual stress distribution of bi-directional cold expansion process performed on open holes [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2023,145(4):041501.
- [12] 王耀伟,闫五柱,梁淑静. 一种新型压合衬套冷挤压工艺研究[J]. 航空制造技术,2024,67(10):107-114.
- [13] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京:清华大学出版社,2013. 