

引文格式: 赵时湛, 石永华, 李博涵, 等. 基于 OCR-SVM 模型的 K-TIG 横焊变参数对熔透状态及识别的影响[J]. 焊接学报, 2026, 47(1): 1 - 10. ZHAO Shizhan, SHI Yonghua, LI Bohan, *et al.* Impact of variable parameters in K-TIG horizontal position welding on penetration state and its recognition based on OCR-SVM model[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2026, 47(1): 1 - 10.



基于 OCR-SVM 模型的 K-TIG 横焊变参数 对熔透状态及识别的影响

赵时湛¹, 石永华¹, 李博涵¹, 许维冬²

(1. 华南理工大学, 机械与汽车工程学院, 广州, 510640; 2. 中国国际海运集装箱(集团)股份有限公司, 深圳, 518067)

摘要: 匙孔非熔化极惰性气体钨极保护焊 (keyhole tungsten inert gas welding, K-TIG) 具有不开坡口单面焊双面成形的焊接优势, 是自动化焊接的理想选择. 然而, 由于重力影响, K-TIG 在进行大型立式不锈钢储罐环焊缝横焊过程中由于维持匙孔的力的动态平衡被打破, 影响焊缝质量. 为了拓展应用场景, 实现 K-TIG 环焊缝横焊中熔透状态的实时调整, 基于光学字符识别-支持向量机 (optical character recognition-support vector machine, OCR-SVM) 熔透识别模型研究了不同变化幅度的焊接电流和焊接速度, 对 K-TIG 横焊熔透状态及识别的影响, OCR-SVM 模型在变参数工况下对熔透状态的识别能力, 揭示影响熔透识别的关键几何特征, 为 K-TIG 横焊自动化控制提供依据. 结果表明, 焊接电流和焊接速度的变化会直接影响 K-TIG 横焊熔透状态, 且焊接电流的变化对熔透状态的影响更明显. 基于 OCR-SVM 的熔透识别模型在变电流和变速度工况下的识别准确率分别为 92.29% 和 91.50%, 熔池和匙孔的宽度和面积是其识别的关键几何特征.

创新点: (1) 研究了 K-TIG 横焊中焊接电流与速度变化幅度对熔透状态的影响, 并分析内在机理.

(2) 使用了基于 OCR-SVM 的熔透识别模型进行变参数工况下的熔透识别, 揭示了对于识别的关键几何特征.

关键词: 匙孔非熔化极惰性气体钨极保护焊; 横焊; 变参数焊接; 熔透状态; 熔透识别

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20241115003

Impact of variable parameters in K-TIG horizontal position welding on penetration state and its recognition based on OCR-SVM model

ZHAO Shizhan¹, SHI Yonghua¹, LI Bohan¹, XU Weidong²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, China;

2. China International Marine Containers (Group) Co., Ltd. Shenzhen, 518067, China)

Abstract: Keyhole tungsten inert gas welding (K-TIG) offers the advantage of single-sided welding with double-sided formation without the need for groove preparation, making it an ideal choice for automated welding processes. However, due to the influence of gravity, the dynamic balance of forces required to sustain the keyhole is disrupted during the horizontal position welding of circumferential welds in large vertical stainless steel storage tanks using K-TIG, which adversely affects weld quality. In order to expand its application scenarios and achieve real-time adjustment of penetration state during the horizontal position welding of circumferential welds with K-TIG, the impact of varying welding current and welding speed with different amplitudes on both the penetration state and its recognition in K-TIG horizontal position welding was investigated based on an optical character recognition-support vector machine (OCR-SVM) penetration recognition model. Key geometric features influencing penetration recognition were identified by the recognition capability of the OCR-SVM model under variable parameter conditions, thereby

收稿日期: 2024-11-15; 录用日期: 2025-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC2809800); 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).

providing a foundation for the automated control of K-TIG horizontal position welding. Experimental results indicate that variations in welding current and welding speed directly affect the penetration state in K-TIG horizontal position welding, with changes in welding current exerting a more pronounced influence. The penetration recognition model based on OCR-SVM achieves recognition accuracies of 92.29% and 91.50% under conditions of varying current and varying speed, respectively. Key geometric features for recognition are identified as the width and area of the weld pool and the keyhole.

Highlights: (1) How variation amplitudes in welding current and speed affect the penetration state was examined during K-TIG horizontal position welding, and the underlying mechanisms were analyzed.

(2) An OCR-SVM-based penetration recognition model was employed to identify penetration states under variable parameter conditions, revealing the key geometric features for recognition.

Key words: keyhole tungsten inert gas welding; horizontal position welding; variable-parameter welding; penetration state; penetration recognition

0 序言

K-TIG 焊凭借着能量密度高、穿透力强的电弧, 能实现单面焊双面成形, 在大型储罐、船体等中厚板焊接中发挥着重要作用, 是实现自动化焊接的理想选择^[1-3]. 熔透状态作为影响焊接质量的重要因素, 是自动化焊接中重要的焊接信息^[4]. 良好的熔透确保了焊接材料的充分熔合, 使焊缝具备高强度和韧性, 保证良好的焊接质量^[5]. 要实现大型立式储罐环焊缝自动横焊, 关键任务是实时对熔透状态进行监测并调整焊接参数使焊缝处于良好的熔透状态下. 此外, K-TIG 焊通过小孔效应进行焊接^[6-7], 其小孔由电弧力、熔融金属表面张力以及重力等多种力构成的动态平衡维持稳定^[8]. 当焊接角度由平焊变为横焊时, 动态平衡被打破, 重力会使熔融金属向下流淌, 导致咬边缺陷的发生, 严重损害了焊接接头的焊接质量. 因此, 在进行 K-TIG 横焊时需要抑制该现象的发生.

熔池图像是判断熔透状态最直接的方式, 有经验的焊工可以通过对熔池的位置及形态的直接观察来及时调整焊接工艺参数, 从而控制形成优良的焊缝^[9]. XIONG 等人^[10]设计了一种新型主动视觉传感系统, 通过图像计算背面焊缝宽度, 并提出了一种模糊控制器, 通过调节焊接电流来解决未熔透问题. 燕旭^[11]通过被动视觉采集熔孔正背面图像, 探究了主要焊接工艺参数对熔孔的影响, 设计了模糊 PID 控制器通过调节送丝速度使熔孔稳定. 李柳熠等人^[12]搭建视觉传感系统来构建 FFP-TIG 焊熔池图像数据集, 开发熔透识别模型并设计了模糊控制器实时调整快频基值电流. 潘琼^[13]通过视觉实时监测焊接过程, 建立了以送丝速度为控制量的模糊

控制系统, 实现了焊接过程的熔透控制. CHEN 等人^[14]利用视觉方法提取三维熔池表面特征的关键特征, 分析得出熔池宽度、拖尾长度和表面高度在预测背面宽度方面起着主要作用. 目前, 对焊接熔透状态的研究主要集中在平焊上, 为了扩大焊接的应用场景, 促进其自动化进程, 研究横焊焊接中的焊接参数对熔透状态及识别的影响势在必行.

文中使用基于 OCR-SVM 模型的熔透识别方法作为熔透状态识别方法, 其对于 K-TIG 横焊熔透状态的识别准确率达到 93%, 满足工业上对熔透识别的要求^[15]. 设计了一系列 K-TIG 横焊变电流和变速度试验, 研究了不同变化幅度的焊接电流和焊接速度对不锈钢环缝横焊熔透状态及熔透识别的影响.

1 试验参数选择

1.1 变焊接参数选择

影响熔透状态的焊接参数主要包括焊接速度、焊接电流和磁场强度. 磁场强度有着抑制熔池下淌和压缩电弧, 增加电弧熔透能力的作用^[16], 但是磁场强度过小, 会使熔池下淌现象再度出现, 导致焊缝咬边缺陷; 磁场强度过大可能会使电弧不稳定, 降低焊接质量. 因此, 磁场强度不是控制熔透状态的理想参数. 而焊接速度和焊接电流是目前工业生产中常用于调整熔透状态的焊接参数^[17]. 两者都是通过调整焊接的热输入来控制焊接状态, 并且都可以通过精度较高的焊接设备进行控制: 前者由搭载焊枪的机械臂实现精确控制, 而后者由焊机控制其大小. 根据 NOWACKI 等人^[18]和 SHI 等人^[19]的研究, 焊接的热输入与焊接速度和焊接电流的关系为

$$Q = \frac{\eta UI}{v} \quad (1)$$

式中: Q 为热输入, J/mm ; η 为电弧效率, 在 K-TIG 焊接中常取 0.9; U 为电弧电压, V ; I 为焊接电流, A ; v 为焊接速度, mm/s .

1.2 熔池和匙孔的几何特征选择

从能量和力学的角度分析, 焊接电流和焊接速度都是通过改变焊接热输入来影响熔透状态, 熔池

和匙孔在不同熔透状态下的动态行为, 如图 1 所示. 当焊接电流较低或焊接速度较高时, 电弧的热输入不足以熔透焊件, 熔透状态处于未熔透状态. 未熔透状态下, 轴向和径向熔池呈凹形, 轴向表面张力和径向表面张力一起抵抗匙孔的扩张, 此时熔池与匙孔的面积相对较小, 此时熔融金属下渗能力较弱, 大部分熔融金属汇聚在焊接上表面, 熔池形状偏向近椭圆形, 如图 1(a) 所示.

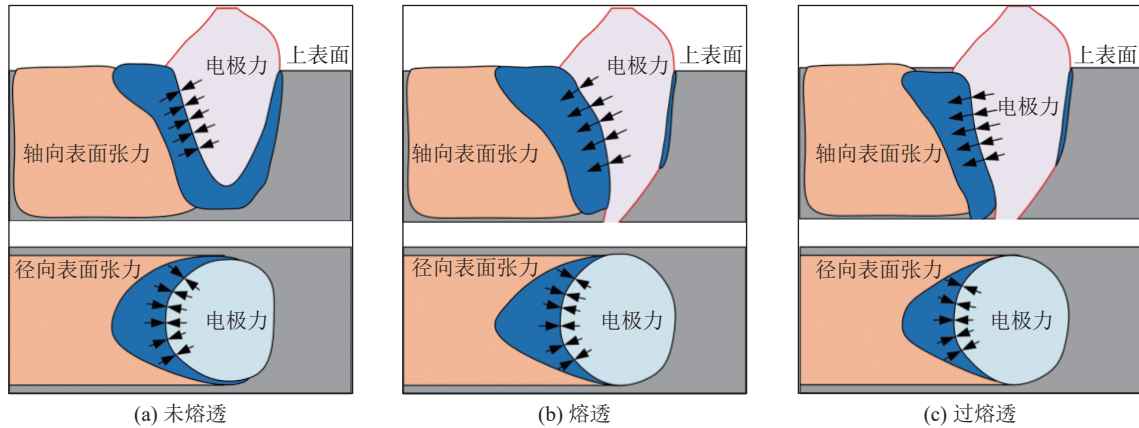


图 1 熔池和匙孔在不同熔透状态下的动态行为示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the dynamic behavior of the weld pool and keyhole under different penetration states. (a) under penetration; (b) good penetration; (c) over penetration

当焊接电流增加或焊接速度降低时, 热输入增加, 更多母材被熔化, 更多熔融金属涌入间隙中, 轴向截面熔池与匙孔界面由凹变为凸, 轴向表面张力由抵抗匙孔的扩张变为推动匙孔扩张, 匙孔面积增大, 在深度方向上, 匙孔往背部焊缝方向扩张, 直到在背部焊缝形成稳定的匙孔出口, 此时, 熔透状态由未熔透变为熔透. 在熔透状态下, 在宽度方向上, 匙孔排开熔融金属, 到达母材处, 匙孔宽度增大, 熔池形状从近椭圆形向近圆形变化, 如图 1(b) 所示. 随着焊接电流进一步增加或焊接速度进一步降低, 上表面的熔融金属下渗作用继续增强, 由于匙孔深度已到达最大值, 下渗金属在匙孔出口处形成悬挂液滴, 熔透状态由熔透转变为过熔透. 由于熔宽并未增加, 上表面的熔融金属持续向下渗透, 导致了过熔透状态下, 匙孔面积变化不大, 熔池的面积大幅度减小, 并在宽度方向上收缩, 如图 1(c) 所示.

从上述分析可以看出, 在熔透状态分别处于未熔透、熔透和过熔透时, 在焊接图像中直接变化的特征是熔池及匙孔的大小及形状. 因此, 选择了 9 个与熔池及匙孔表面面积大小相关的几何特征, 分别为匙孔长度 l_k 和熔池长度 l_w 、匙孔宽度和熔池

宽度 w_k , w_w 、匙孔面积和熔池面积 A_k , A_w 、匙孔和熔池偏心率 e_k , e_w 以及熔池和匙孔的面积比 K , 如图 2^[15] 所示. 偏心率 e 及面积比 K 分别为

$$e = \frac{l}{w} \quad (2)$$

$$K = \frac{A_k}{A_w} \quad (3)$$

式中: l 和 w 分别对应匙孔或熔池的长度和宽度.

匙孔和熔池的长度、宽度以及面积能够直观的反映熔池和匙孔的形态变化. 偏心率则用于描述匙孔或熔池的类圆程度, 偏心率越接近 1, 则越接近圆形, 反之则越接近非圆. 而熔池与匙孔的面积比则反映了熔池与匙孔的相对大小.

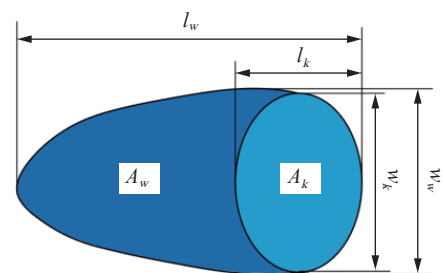


图 2 熔池和匙孔特征示意图^[15]

Fig. 2 Schematic diagram of the weld pool and keyhole characteristics

2 试验方法

文中搭建的焊接系统如图 3 所示, 其中焊机和 K-TIG 焊枪用于进行高质量的焊接工艺. 焊接机器人用于精确控制焊枪的运动. 焊件倾斜 60° 来进行横焊, 针对于 K-TIG 横焊的熔池下淌问题, 引入了

磁控装置, 通过磁控电源产生磁场, 在熔池中产生安培力, 通过安培力减弱了重力的影响, 抑制了熔池下淌. 为了解决 K-TIG 焊接过程中亮度过高导致的拍摄图像过曝光问题, 采用了高动态范围 (high dynamic range. HDR) 相机, 其分辨率为 1920×1080 , 帧率为 25 帧/s, 动态范围大于 120 dB, 信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 大于 24 dB.

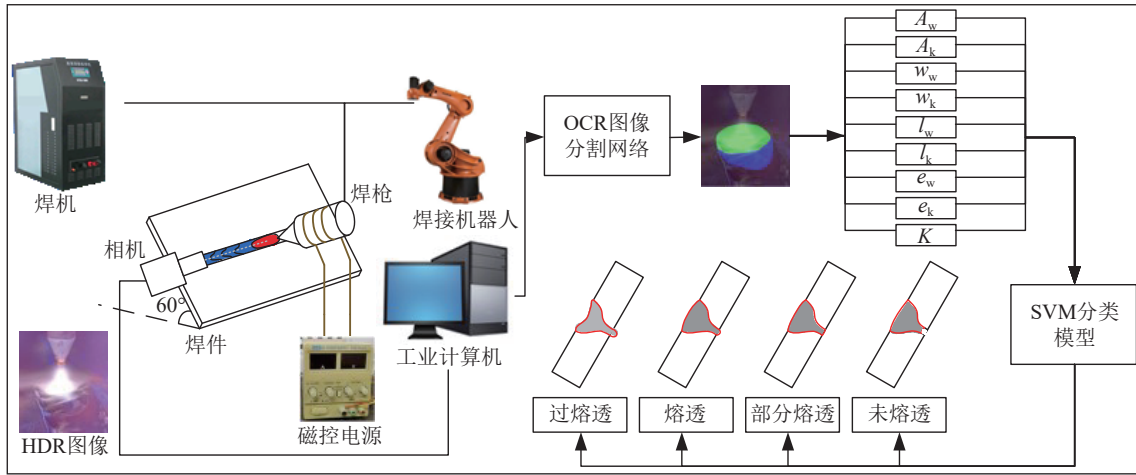


图 3 磁控 K-TIG 横焊试验平台

Fig. 3 Magnetically controlled K-TIG horizontal position welding experimental platform

试验所用材料为厚度 12 mm 的 304 不锈钢, 采用焊接角度为 60° , 焊接间隙为 1 mm, 磁场强度为 15 mT, 保护气类型为氩气, 保护气流速为 20 L/mm, 焊件示意图如图 4 所示. 试验过程中把 HDR 相机安装在机器人上跟随运动, 调整位置以便准确获取熔池和匙孔的视野. 相机采集到的焊接图像采用均值滤波及将原始数据转换为符合标准正态分布的数据 (Z-Score 归一化) 的预处理, 然后输入至基于 OCR-SVM 的熔透识别模型中, 根据熔池和匙孔的几何特征判断当前的熔透状态, 输出识别结果.

文中设计了 8 组熔透试验, 其中试验 $A_1 \sim$ 试

验 A_4 为变电流熔透试验, 试验 $B_1 \sim$ 试验 B_4 为变速度熔透试验, 具体试验参数如表 1 所示. 在变电

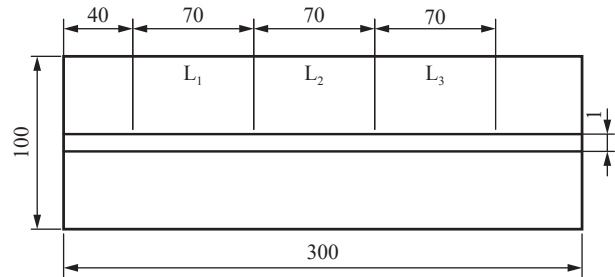


图 4 焊件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the workpiece

表 1 磁控 K-TIG 横焊熔透试验参数

Table 1 Experimental parameters for penetration testing in magnetically controlled K-TIG horizontal position welding

试验	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$			焊接电流 I/A			电流变化幅度 I_0/A	焊接速度变化幅度 $v_0/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
	L_1 段	L_2 段	L_3 段	L_1 段	L_2 段	L_3 段		
A_1	3.6	3.6	3.6	460	450	440	-10	—
A_2	3.6	3.6	3.6	460	470	480	10	—
A_3	3.6	3.6	3.6	460	440	420	-20	—
A_4	3.6	3.6	3.6	460	480	500	20	—
B_1	3.6	3.4	3.2	460	460	460	—	-0.2
B_2	3.6	3.8	4.0	460	460	460	—	0.2
B_3	3.6	3.3	3.0	460	460	460	—	-0.3
B_4	3.6	3.9	4.2	460	460	460	—	0.3

流熔透试验中, 以焊接电流为 460 A 为基准, 分别选取了 10 A 和 20 A 作为焊接电流的变化幅度, 在焊接位置到达焊件中的 L_1 段、 L_2 段和 L_3 段时分别调整焊接电流为对应值. 在变速度熔透试验中, 以 3.6 mm/s 焊接速度为基准, 分别选取了 0.2 mm/s 和 0.3 mm/s 作为焊接速度的变化幅度, 在焊接位置到达焊件中的 L_1 段、 L_2 段和 L_3 段时分别调整焊接速度为对应值. 每组试验中, 在焊接过程稳定后, 取从 L_1 段到 L_3 段中每段各 200 张样本图片、共计 600 张样本图片采用基于 OCR-SVM 的熔透识别模型进行熔透状态识别, 并将识别结果与真实结果进行对比.

3 试验结果与分析

3.1 变电流焊接熔透状态识别

变电流焊接试验的熔透状态识别结果如图 5 所示, 其中 0 表示未熔透, 1 表示部分熔透, 2 表示熔透, 3 表示过熔透. 4 个试验的熔透状态识别的准确率分别为 91.33%, 92.00%, 89.67% 和 96.17%, 4 个试验的熔透状态识别的平均准确率为 92.29%. 变电流焊接的实际效果如图 6 所示. 首先从上表面观察焊缝. 从熔宽来看, 图 6 的 4 组试验经过电流变化后, 上表面焊缝熔宽没有明显变化. 从外观质量来看, 在试验 A_1 和试验 A_3 中, 焊接电流降低后, 焊缝表面由平整表面变为中间高, 两边低的凸面. 在试验 3 中, 当焊接电流降低到 420A 时, 甚至出现了一段表面坍塌的焊缝.

为了更加清晰地阐明焊缝不均匀现象是如何出现, 选取了 4 个试验组在 3 个不同电流强度下的焊接图像, 如图 7 所示. 从图 7 中可以看出, 当电流降低时, 熔池收缩, 熔池及匙孔的面积 A_w 、 A_k 和宽度 w_w 、 w_k 减小, 熔融金属汇聚在中间, 熔池表面由平面向凸球面变化, 在电流降低到 420 A 时, 熔池表面变为了凸球面. 这是因为电流降低, 热输入下降, 导致了熔池的深度减小, 熔融金属向下渗透作用减弱, 无法下渗的熔融金属汇聚于焊件上表面, 熔池宽度 w_s 和匙孔宽度 w_k 增加, 形成凸球面的熔池. 而出现表面坍塌的焊缝, 主要是因为电流突然下降到 420 A 时, 电弧力无法维持此时匙孔的动态平衡, 一部分熔融金属涌入匙孔. 再经过一段时间的力再平衡后, 电弧重新构建了新的匙孔平衡, 熔池与匙孔恢复稳定, 上表面熔融金属恢复平稳, 焊

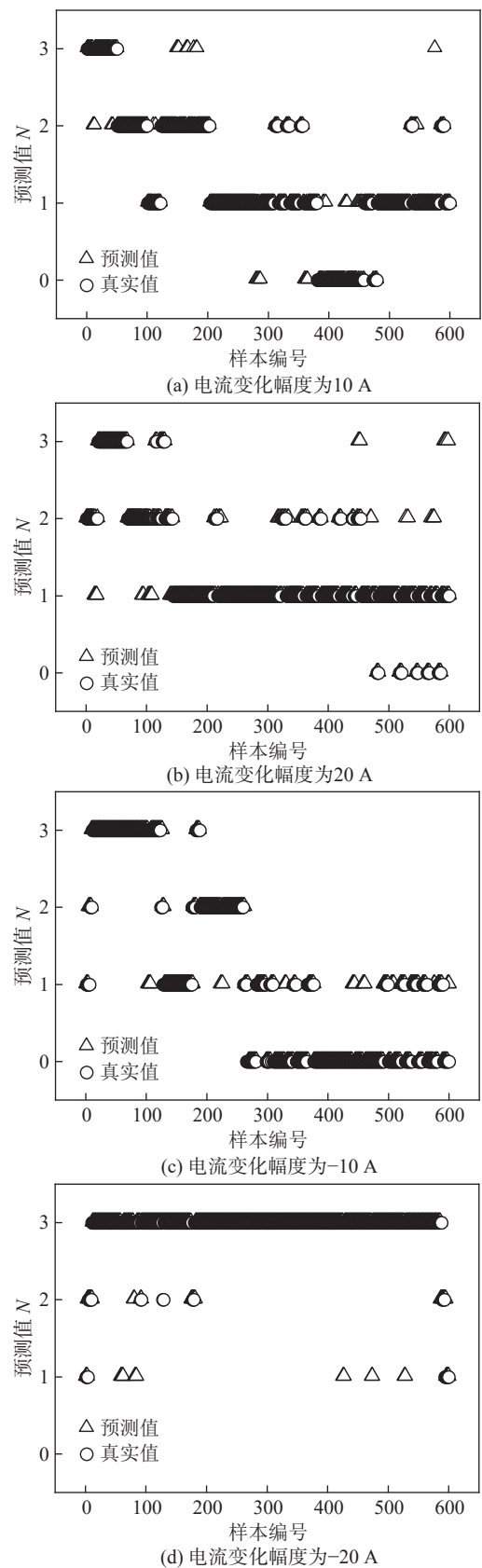


图 5 变电流焊接熔透识别结果

Fig. 5 Penetration recognition results under variable current welding conditions. (a) amplitude of current variation is 10 A; (b) amplitude of current variation is 20 A; (c) amplitude of current variation is -10 A; (d) amplitude of current variation is -20 A

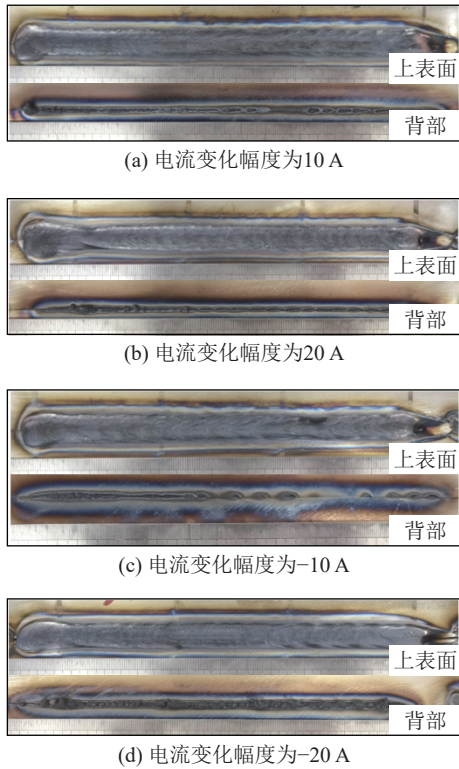


图 6 不同电流变化幅度下的焊缝成形

Fig. 6 Weld bead formation under different amplitudes of current variation. (a) amplitude of current variation is 10 A; (b) amplitude of current variation is 20 A; (c) amplitude of current variation is -10 A; (d) amplitude of current variation is -20 A

缝成形质量提高. 在试验 A_2 和试验 A_4 中, 当焊接电流升高到 500 A 时, 此时焊接状态为过熔透, 左侧和右侧出现波纹状焊缝. 从图 7 中观察此时的熔池形态可以看出, 在 500 A 时, 熔融金属向下渗透形成金属液滴, 上表面熔池在宽度方向上收缩, 熔池面积 A_w 和熔池宽度 w_w 减小, 最终这种形态的熔池凝固后, 形成了左侧和右侧为波纹状的焊缝.

然后从图 6 中的背部焊缝观察熔透状态. 从试验 A_1 和试验 A_3 焊件背部焊缝中可以看出, 当电流由 460 A 下降到 450 A 时, 熔透状态由熔透转变为部分熔透, 背部焊缝宽度和高度有所减小. 当电流下降到 440 A 时, 背部焊缝在较大范围内出现了未熔透状态的焊缝. 当电流下降到 420 A 时, 熔透状态已经完全由部分熔透转变为未熔透, 焊缝基本处于未熔透状态. 在试验 A_2 中, 当电流上升到 470 A 时, 背部焊缝的熔宽反而减小, 熔透状态由熔透转变为部分熔透, 当电流继续上升到 480 A 时, 熔宽没有增大的趋势, 并保持在部分熔透状态. 而在试验 A_4 中, 当电流上升到 480 A 时, 背部焊缝出现焊瘤, 熔宽和高度显著提高, 熔透状态由熔透变

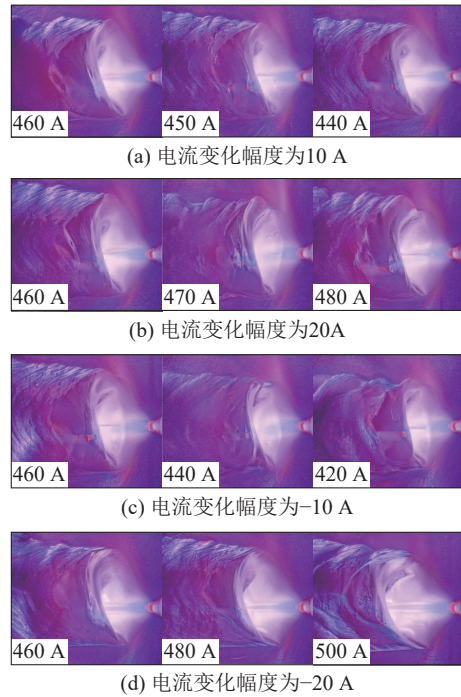


图 7 变电流试验组焊接图像选取

Fig. 7 Selected welding images from the variable current test group. (a) amplitude of current variation is 10 A; (b) amplitude of current variation is 20 A; (c) amplitude of current variation is -10 A; (d) amplitude of current variation is -20 A

为过熔透.

同样为 480 A 电流, 出现这样的差异的原因可以归结为, 首先由于加工误差, 导致试验 A_2 的间隙有前宽后窄的趋势, 焊接中后段需要熔化更多的金属以达到熔透状态. 其次, 在焊接过程中, 由于电弧持续加热母材, 母材受热膨胀导致间隙变小, 进一步增加了试验 A_2 中达到熔透的难度. 当焊接电流上升到 500 A 时, 背部焊缝的高度和宽度明显增加且出现焊瘤, 是过熔透状态的标志性特征, 说明此时完全达到了过熔透状态. 综上所述, 电流对电弧稳定性具有直接影响, 当电流波动过大时, 电弧会变得不稳定, 影响匙孔的动态平衡, 进而影响焊缝的成形质量; 当电流过低或过高时, 焊缝外观质量会变差, 影响焊接质量, 削弱焊接接头的机械性能. 电流的变化对熔透状态有显著的影响, 即便是电流变化幅度仅为 10 A 和 -10 A 的调整, 按式 (1) 计算焊接热输入大概变化 2%, 也有可能导致熔透状态发生变化.

3.2 变速度焊接熔透状态识别

变速度焊接试验的熔透状态识别结果如图 8 所示, 其中 0 表示未熔透, 1 表示部分熔透, 2 表示熔透, 3 表示过熔透. 4 个试验的熔透状态识别的准

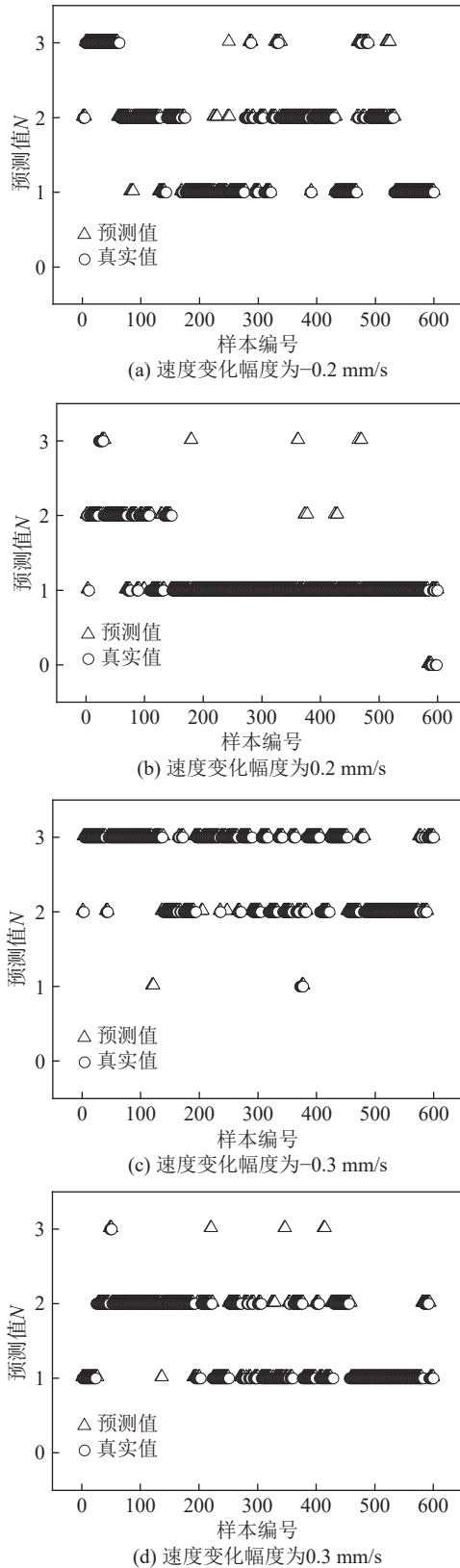


图 8 变速度焊接熔透识别结果

Fig. 8 Penetration recognition results under variable travel speed welding conditions. (a) amplitude of welding speed variation is -0.2 mm/s; (b) amplitude of welding travel speed variation is 0.2 mm/s; (c) amplitude of welding travel speed variation is -0.3 mm/s; (d) amplitude of welding travel speed variation is 0.3 mm/s

准确率分别为 90.67%, 93.33%, 91.50% 和 90.50%, 4 个试验的熔透状态识别的平均准确率为 91.50%. 变速度焊接的实际效果如图 9 所示. 首先, 从上表面观察焊缝. 在试验 B₃ 中, 当焊接速度降低到 3.3 mm/s 时, 焊缝熔宽有明显增加, 当继续降低至 3 mm/s 时, 熔宽增加的幅度更大, 相似的情况也发生在试验 B₄ 的上表面焊缝中. 焊缝熔宽之所以会出现幅度如此之大的变化, 是因为焊接速度的降低, 增加了焊接时间, 使得电弧有更多的时间加热母材, 热能传播时间增加, 导致热传播的范围扩大, 热影响区扩大, 熔融金属增多, 熔池宽度 w_w 及面积 A_w 明显增加, 使冷却后焊缝熔宽随之增加, 试验 A₄ 则相反. 因此, 焊接速度调整幅度较大会使上表面焊缝的熔宽在速度变化处出现突变, 导致应力分布变得不均衡, 进而增加应力集中的可能性, 降低焊接接头的力学性能. 此外, 在试验 B₁ 和试验 B₃ 中, 当焊接速度减小到 3.3 mm/s 和 3.2 mm/s 时, 出现了咬边现象. 当焊接速度减小到 3 mm/s

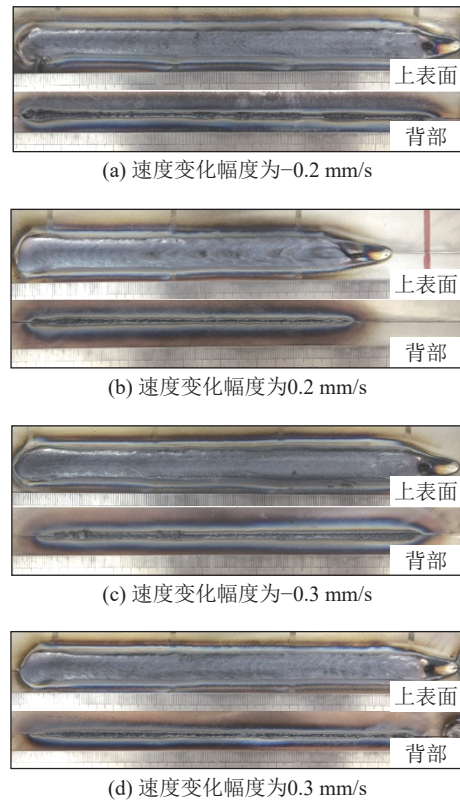


图 9 不同速度变化幅度下的焊缝成形

Fig. 9 Weld bead formation under different amplitudes of travel speed variation. (a) amplitude of welding speed variation is -0.2 mm/s; (b) amplitude of welding travel speed variation is 0.2 mm/s; (c) amplitude of welding travel speed variation is -0.3 mm/s; (d) amplitude of welding travel speed variation is 0.3 mm/s

时,咬边现象加重。

为了探究咬边现象为何会重新出现,选取了 4 个试验组在其 3 个不同速度下的焊接图像,如图 10 所示。从图 10 中可以看出,当焊接速度处于 3.6 mm/s 时,熔池分布均衡,两侧焊缝均无熔融金属囤积的现象;当焊接速度下降到 3.3 mm/s,熔池分布开始失衡,熔融金属往较低的焊缝一侧汇集,熔池的偏心率 e_w 减小,出现熔池下淌现象,并在凝固后形成了轻微咬边;当焊接速度下降到 3 mm/s 时,大量的熔融金属囤积于该侧,熔池偏心率 e_w 进一步减小,咬边现象加剧。在焊接速度降低后,咬边现象重新出现的原因主要包括,首先,文中通过施加直流纵向磁场,在熔池中产生安培力来抵消部分重力,抑制熔池下淌。但是其不能完全抵消重力的影响,只是减弱重力影响,减缓熔池下淌的速度,熔池仍有向下流淌的趋势。随着焊接时间的增加,重力对熔池作用开始逐渐显现,熔池下淌现象再度发生^[20]。其次,焊接速度的降低增加了焊接热输入,增大了热影响区,使更多的金属被熔化,增加了熔池质量,导致重力的作用增强,加速了熔池下淌的出现。而

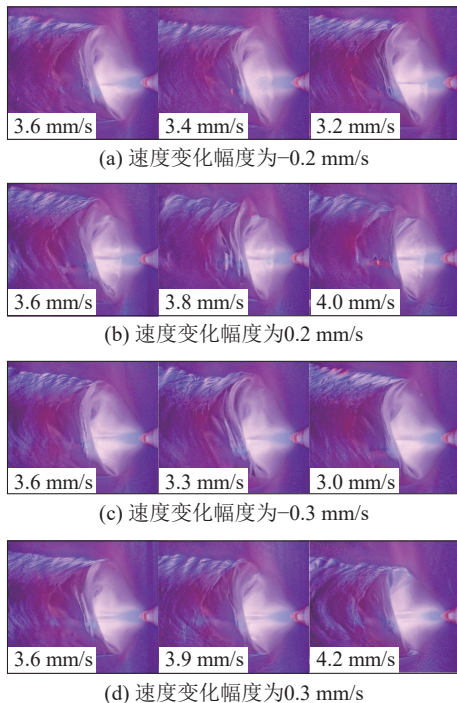


图 10 变速度试验组焊接图像选取

Fig. 10 Selected welding images from the variable travel speed test group. (a) amplitude of welding speed variation is -0.2 mm/s; (b) amplitude of welding travel speed variation is 0.2 mm/s; (c) amplitude of welding travel speed variation is -0.3 mm/s; (d) amplitude of welding travel speed variation is 0.3 mm/s

焊接速度增加时,焊接时间减少,熔池分布均衡,没有产生熔融金属囤积,熔池下淌被安培力抑制。但焊接速度增加会使母材熔化后缺少时间来混合、向下渗透,而停留于上表面快速凝固,导致了熔池层层相叠凝固,造成了焊缝起皱,降低了焊缝的外观质量。

从图 9 中的背部焊缝观察熔透状态。从试验 B₂ 和试验 B₄ 焊件的背部焊缝中可以看出,当焊接速度下降到 3.3 mm/s 时,背部焊缝开始出现焊瘤,熔透状态由熔透转变为过熔透,背部焊缝宽度和高度显著增加。但是,当焊接速度下降到 3 mm/s 时,背部焊缝宽度无明显变化,焊瘤却消失了。在过熔透状态下,熔融金属向下渗透抵达焊缝背部时,由于表面张力的作用,熔融金属会附着于焊缝背部,不断囤积后形成悬挂金属液滴,并在凝固后形成焊瘤。当焊接速度下降时,热输入增大,导致更多的熔融金属向下渗透,形成的悬挂金属液滴体积增大。同时,焊接时间增加,悬挂液滴附着于焊缝背部的时间更长,其表面张力受到保护气流的扰动而减小。当表面张力不足以维持悬挂液滴附着在焊缝背部平面时,悬挂液滴会随着保护气流一同脱离焊件。因此,焊接速度较慢时,过熔透状态下的焊瘤特征有可能会消失。

在试验 B₂ 和试验 B₄ 中,当焊接速度上升到 3.8 mm/s,焊缝由熔透转变为部分熔透,焊缝熔宽减小,并且随着焊接速度的继续上升,而继续减小。当焊接速度上升至 4.2 mm/s 时,熔宽到达最小值,但仍处于部分熔透状态。因此,虽然焊接速度的变化会对熔透状态产生一定的影响,但是如果通过调整焊接速度将熔透状态从未熔透调整至完全熔透,可能需要超过 0.6 mm/s 的速度调整量,按式 (1) 计算即焊接热输入大概变化 15%。综上所述,焊接速度对焊缝成形质量有显著影响,焊接速度过慢会引发咬边问题,降低焊缝的力学性能;焊接速度过快,焊缝会出现明显的起皱,降低焊缝的外观质量。焊接速度的变化幅度也应该合理选择,变化幅度过大会引起上表面焊缝熔宽的突变,导致焊缝宽度不一致,增加了应力集中的风险,进而削弱接头的机械强度。而熔透状态对焊接速度的变化并不敏感,实现其改变需较大幅度的速度调整。

3.3 变参数工况不同特征对熔透识别的影响

为了探究 OCR-SVM 熔透识别模型如何识别变参数工况下的熔透状态,采用控制变量法测试了

9 个不同特征对于变参数工况下 K-TIG 横焊的熔透识别的重要性.长度 (l_k , l_w)、宽度 (w_k , w_w)、面积特征 (A_k , A_w)、偏心率 (e_k , e_w)、熔池和匙孔的面积比 (K)、熔池特征 (h_w , w_w , A_w , e_w , K) 和匙

孔特征 (h_k , w_k , A_k , e_k , K) 分别被移除以测试 OCR-SVM 熔透识别模型在输入特征减少的情况下识别的准确性,其中变电流工况下的识别准确率和变速度工况下的识别准确率,如表 2 所示.

表 2 变参数焊接下不同特征的熔透识别准确率

Table 2 Penetration recognition accuracy for different characteristics under variable-parameter welding conditions

参数组合	输入的特征									变电流识别准确率 k_1	变速度识别准确率 k_2
C ₁	l_k	w_k	A_k	e_k	l_w	w_w	A_w	e_w	K	0.922	0.919
C ₂	—	w_k	A_k	e_k	—	w_w	A_w	e_w	K	0.921	0.916
C ₃	l_k	—	A_k	e_k	l_w	—	A_w	e_w	K	0.904	0.897
C ₄	l_k	w_k	—	e_k	l_w	w_w	—	e_w	K	0.906	0.887
D ₁	l_k	w_k	A_k	—	l_w	w_w	A_w	—	K	0.926	0.915
D ₂	l_k	w_k	A_k	e_k	l_w	w_w	A_w	e_w	—	0.921	0.919
D ₃	l_k	w_k	A_k	e_k	—	—	—	—	—	0.734	0.691
D ₄	—	—	—	—	l_w	w_w	A_w	e_w	—	0.741	0.743

通过对比参数组合 C₁、参数组合 C₂、参数组合 D₁ 和参数组合 D₂ 的结果可以看出,在分别移除长度 (l_k , l_w)、偏心率 (e_k , e_w)、熔池和匙孔的面积比 (K) 后,OCR-SVM 熔透识别模型在变电流工况和变速度工况下识别熔透状态的准确率并没有太大变化,可以认为长度、偏心率、熔池和匙孔的面积比并不是该模型进行熔透状态识别的关键几何特征.而对比参数组合参数组合 C₁、参数组合 C₃ 和参数组合 C₄ 的结果可以看出,在移除宽度 (w_k , w_w)、面积 (A_k , A_w) 后,模型识别熔透状态的准确率有小幅下降,说明在这 9 个几何特征中,宽度和面积是其中相对更重要的特征.该结果也与前文中的分析一致,在不同的熔透状态下,变化的主要特征是熔池及匙孔的大小.另外,通过对比参数组合参数组合 D₂~参数组合 D₄ 的试验结果,可以看出在分别移除熔池特征 (h_w , w_w , A_w , e_w , K) 和匙孔特征 (h_k , w_k , A_k , e_k , K) 后,模型识别熔透状态的准确率都有较大幅度的减小,而相比匙孔特征,移除熔池特征后的准确率下降幅度相对更大.这说明匙孔特征与熔池特征相辅相成,都是进行熔透识别的重要特征,而相对于匙孔,熔池特征在熔透识别中发挥着更重要的作用,这可能与熔池大小与形状直接影响焊缝成型有关.

4 结论

(1) 焊接电流和焊接速度的变化都对焊缝成形

质量有直接影响.电流波动过大会导致电弧不稳定,影响匙孔的动态平衡,进而影响焊缝的成形质量;焊接速度的变化会影响热影响区大小,引起上表面焊缝熔宽的突变,导致前后焊缝宽度不一致,增加了应力集中的风险,削弱焊接接头的机械强度.

(2) 焊接电流的变化对熔透状态有着显著的影响,即便是仅 10 A 的调整,也可能导致熔透状态发生变化,但熔透状态对焊接速度的变化并不敏感,要实现熔透状态的改变需较大幅度的速度调整.

(3) 基于 OCR-SVM 的熔透识别模型在变电流工况下的识别准确率为 92.29%,在变速度工况下的识别准确率为 91.50%.熔池和匙孔的宽度和面积是其识别变参数焊接熔透状态的关键几何特征.

参考文献

- [1] 石永华,王天序,詹家通. K-TIG 焊接研究现状[J]. 焊接学报, 2024, 45(11): 35-44.
SHI Y H, WANG T X, ZHAN J T. Research status of K-TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(11): 35-44.
- [2] 刘亚伟,黄琼,李博文,等. 船舶 316L 不锈钢管 K-TIG 焊试验及应用[J]. 金属加工(热加工), 2025(3): 63-69.
LIU Y W, HUANG Q, LI B W, et al. The K-TIG welding test and application of 316L stainless steel pipe in ship[J]. MW Metal Forming, 2025(3): 63-69.

- [3] LIANG Z Y, WU L L, HU W H, *et al.* Enhanced corrosion resistance of K-TIG welded DH32 steel joints with a Ni interlayer: a comprehensive electrochemical and microstructural investigation[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 36: 570 – 579.
- [4] SHI Y H, WANG Z S, CHEN X Y, *et al.* Real-time K-TIG welding penetration prediction on embedded system using a segmentation-LSTM model[J]. *Advances in Manufacturing*, 2023, 11: 444 – 461.
- [5] BAI H Z, NI N, WU Y N, *et al.* Real-time penetration recognition based on voltage signal in k-tig welding[J/OL]. *Applied Sciences-Basel*, 2023, 13: 7412. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/13/7412>.
- [6] LI Y, LI Y B, LIU Q, *et al.* Development and numerical simulation on heat source of k-tig deep penetration welding for titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(3): 692 – 700.
- [7] CUI S W, DAI P H, MA R, *et al.* Mechanism study of flow characteristics of molten pool and keyhole dynamic behavior of K-TIG welding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 130: 1195 – 1206.
- [8] ZHAN J T, YE X Y, LIU Z Z, *et al.* Numerical investigation of dynamic arc behavior in K-TIG welding enhanced by an external sinusoidal alternating longitudinal magnetic field[J/OL]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2025, 212: 109774. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072925000675>.
- [9] YANG D Y, DAI P H, CUI S W, *et al.* Real-time recognition of molten pools based on improved DeepLabV3 + in keyhole tungsten inert gas welding applications[J/OL]. *Electronics*, 2024, 13(2): 283. <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/2/283>.
- [10] XIONG J, ZOU S. Active vision sensing and feedback control of back penetration for thin sheet aluminum alloy in pulsed MIG suspension welding[J]. *Journal of Process Control*, 2019, 77: 89 – 96.
- [11] 燕旭. 熔孔型 TIG 单面焊双面成形视觉检测及控制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
YAN Xue. Study on visual inspection and control technology of fusion hole TIG single side welding with back formation[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [12] 李柳熠, 陈浩宇, 董荧, 等. 304 不锈钢高频脉冲 TIG 焊的熔透识别与闭环控制 [J]. *电焊机*, 2023, 53(9): 47 – 54, 60.
- LI L Y, CHEN H Y, DONG Y, *et al.* Penetration recognition and close-loop control method of fastfrequency pulsed TIG welding process for 304 stainless steel[J]. *Electric Welding Machine*, 2023, 53(9): 47 – 54, 60.
- [13] 潘琼. 薄板高频脉冲 TIG 焊接熔孔视觉检测及熔透闭环控制[D]. 济南: 山东大学, 2023.
PAN Q. Visual sensing of fusion hole and penetration closed-loop control in thin plate high frequency pulsed TIG welding[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [14] CHEN Z, CHEN J, FENG Z. Welding penetration prediction with passive vision system[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36: 224 – 230.
- [15] LI B H, SHI Y H, WANG Z S. Penetration identification of magnetic controlled keyhole tungsten inert gas horizontal welding based on OCR-SVM[J]. *Welding in the World*, 2024, 126: 48 – 59.
- [16] LIU S, LIU Z M, ZHAO X C, *et al.* Influence of cusp magnetic field configuration on K TIG welding arc penetration behavior[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 53: 229 – 237.
- [17] 马可, 薛龙, 黄军芬, 等. GMAW 自动焊熔透影响因素分析及多元回归预测 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(18): 55 – 61.
MA K, XUE L, HUANG J F, *et al.* Analysis of influence factors and multivariable regression prediction of penetration for automatic GMAW[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(18): 55 – 61.
- [18] NOWACKI J, RYBICKI P. The influence of welding heat input on submerged arc welded duplex steel joints imperfections[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164: 1082 – 1088.
- [19] SHI Y, CUI S, ZHU T, *et al.* Microstructure and intergranular corrosion behavior of HAZ in DP-TIG welded DSS joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 256: 254 – 261.
- [20] FEI Z, PAN Z, CUIURI D, *et al.* Effect of heat input on weld formation and tensile properties in keyhole mode TIG welding process[J/OL]. *Metals*, 2019, 9(12): 1327. <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/12/1327>.

作者简介: 赵时湛, 硕士研究生; 主要研究方向为 K-TIG 焊接自动化; Email: shizhanzhao@foxmail.com.
石永华 (通信作者), 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: yhuashi@scut.edu.cn.

(编辑: 汤明日)