

K-TIG 焊接研究现状

石永华, 王天序, 詹家通

(华南理工大学, 机械与汽车工程学院, 广州, 510640)

摘要: 随着科技的不断进步, 锁孔效应钨极氩弧焊 (keyhole tungsten inert gas, K-TIG) 因其中厚板焊接中的显著优势, 成为现代工业中广泛应用的高效焊接技术之一, 在航空航天、核工业、石油化工和船舶制造等对焊接质量要求极高的领域中, 应用前景广阔。文中系统回顾了 K-TIG 焊的发展历程及其在各类材料, 如不锈钢、镍合金和钛合金等应用中的现状, 同时, 智能化焊接技术的发展为 K-TIG 焊带来了新契机, 通过实时监测、自动控制和焊缝跟踪等先进技术, 进一步提升了焊接过程的精确性和可靠性, 还探讨了熔池熔透识别技术和焊缝跟踪技术的发展现状, 这些技术在提高焊接质量和效率方面发挥了重要作用, 通过对 K-TIG 焊的全面分析, 旨在为未来的研究提供参考, 并为实际应用提供指导。

创新点: (1) 系统总结了 K-TIG 焊的优化与发展, 磁控技术在 K-TIG 焊中的应用以及异种材料焊接性能的改进。
(2) 详细论述了熔池识别、焊缝跟踪以及数值模拟在 K-TIG 焊领域的应用。

关键词: K-TIG 焊接; 焊接工艺; 熔池检测; 智能焊接

中图分类号: TG 444+.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240703002

Research status of K-TIG welding

SHI Yonghua, WANG Tianxu, ZHAN Jiatong

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

Abstract: With the continuous advancement of technology, K-TIG welding has become one of the most widely used high-efficiency welding technologies in modern industry due to its significant advantages in medium and thick plate welding. K-TIG welding has broad application prospects in fields with stringent welding quality requirements, such as aerospace, nuclear industry, petrochemical, and shipbuilding. This paper systematically reviews the development of K-TIG welding and its current applications in various materials, including stainless steel, nickel alloys, and titanium alloys. Additionally, the development of intelligent welding technologies presents new opportunities for K-TIG welding. Advanced technologies such as real-time monitoring, automatic control, and seam tracking have further enhanced the precision and reliability of the welding process. The paper also explores the current state of penetration pool recognition technology and seam tracking technology, which play important roles in improving welding quality and efficiency. Through a comprehensive analysis of K-TIG welding technology, this paper aims to provide a reference for future research and offer guidance for practical applications.

Highlights: (1) The optimization and development of K-TIG welding, the application of magnetic control technology in K-TIG welding and the improvement of welding performance of dissimilar materials were systematically summarized.

(2) The application of weld pool identification, weld seam tracking and numerical simulation in K-TIG welding field were discussed in detail.

Key words: K-TIG welding; welding process; weld pool detection; intelligent welding

0 序言

1997 年, 澳大利亚联邦科学与工业研究组织 CSIRO 在传统 TIG 焊的基础上, 开发了一种新型高效的深熔焊接技术, 这种技术因焊接过程中存在显著的锁孔特征, 被命名为 K-TIG 焊. K-TIG 焊通过增大焊接电弧压力, 使其大于熔池中液态金属的表面张力, 在熔池内形成一个锁孔, 该锁孔贯穿整个工件, 锁孔的形成在母材的表面和内部之间形成狭窄的通道, 可以直接将能量传递到背面, 相比传统 TIG 焊, 该方法提高了能量传递效率^[1]. K-TIG 焊作为一种高效的焊接方法, 可以在不开坡口的情况下, 采用大电流进行施焊, 焊接电流可达 1 000 A, 产生的电弧具有能量大、挺度高和穿透力强的特点, 可以直接焊透 16 mm 厚的金属钢板, 实现了单面焊双面成形和大熔深焊接^[2-4]. 在传统 TIG 焊接中, 焊接电流通常低于 250 A, 焊接过程的熔透能力较差, 工艺效率相对较低^[5-6], 对于中厚板工件的焊接, 需要进行多道次焊接, 将附加焊丝熔化填充到坡口中.

K-TIG 焊独特的物理特性使其适用于导热系数低的材料, 例如不锈钢、镍合金、钛合金等并且可以满足高质量和良好的外观的要求, K-TIG 焊适用于厚板、不锈钢、镍合金、钛合金等材料, 广泛应用于航空航天、核工业、石油化工、船舶制造等需要高质量焊接的领域^[7]. 随着加工产业对焊接质量的要求不断提高, 围绕 K-TIG 焊工艺优化以及智能控制的研究得到了越来越多的关注, 文中详细探讨近年来 K-TIG 焊在上述两方面的研究现状及发展趋势.

1 K-TIG 焊接工艺研究现状

1.1 K-TIG 焊接设备与工艺

为达到更大的电弧压力, K-TIG 焊需要配备专门的 K-TIG 焊枪和设备, 需要采用大电流直流电源, 并在焊枪内配备冷却装置, 通过将冷却水通入焊枪内部循环, 带走钨极产生的热量, 降低温度, 该设计使得钨极尖端阴极区收缩, 增加了单位面积阴极区发射电子数量, 从而电流密度得到提高, 电弧的电磁效应和收缩程度得到增强, 可以有效提高 K-

TIG 电弧的能量密度与压力; Liu 等人^[8]通过使用自制的焊枪, 如图 1 所示, 成功实现了 K-TIG 焊接工艺, 在 8 mm 厚的不锈钢板获得了高质量的焊缝, 阐述了 K-TIG 焊中的热物理行为, 为进一步优化焊枪奠定了坚实的基础; Su 等人^[9]对比高硬度装甲钢和轧制均匀装甲钢在奥氏体 GMAW、铁素体 GMAW 和 K-TIG 3 种焊接工艺下的焊接接头力学性能, 利用数字图像技术对接头的应变分布进行分析, K-TIG 焊的焊缝金属在硬度、强度和延展性方面具有显著优势; Zhang 等人^[10]采用激光 K-TIG 复合焊成功实现了 Q235 钢板对接焊, 研究了焊接电流、热源距离、激光功率、激光离焦量、焊接速度等工艺参数对耦合电弧轮廓和焊接过程稳定性的影响. 结果表明, 激光使 K-TIG 电弧发生偏转, 且偏转角度随焊接电流的增大而减小. 近年来, 许多学者和研究人员致力于探索和优化 K-TIG 焊, 以适应不同材料和应用场景的需求.

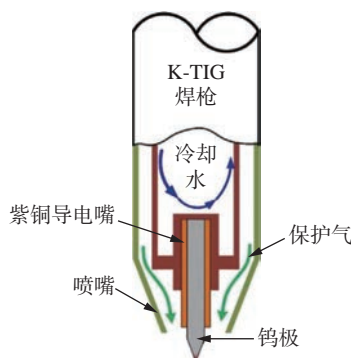


图 1 K-TIG 焊枪

Fig. 1 K-TIG welding torch

1.2 不锈钢材料焊接

在焊接应用中, 不锈钢由于其高强度和耐腐蚀性^[11], 被广泛应用于对焊缝质量要求较高的场合, 然而, 不锈钢焊接也面临一些挑战, 例如热裂纹的倾向、焊接变形以及焊缝金属的腐蚀性能等, 因此, 不锈钢焊接技术和工艺不断发展, 以满足不同应用领域的需求.

Cui 等人^[12]以 4 mm 厚的 304 不锈钢为试验对象, 研究了 K-TIG 焊的锁孔动态行为; Luo 等人^[13]采用钛示踪剂对 304 不锈钢 K-TIG 熔池流动行为进行了表征; Feng 等人^[14]对 316L 中厚不锈钢板材进行了 K-TIG 焊接试验和分析, 焊缝组织主要为奥氏体和 δ -铁素体, 焊缝的抗拉强度和冲击性能与母材基本相同, 而焊缝的耐腐蚀性能甚至优于母材; Huang 等人^[15]采用 K-TIG 焊将 AISI 304 不锈钢与

8 mm 厚的 Q345 低合金钢进行单道连接, 讨论了不同焊接速度下的焊接成形及工艺窗口, 研究了异种接头的组织和焊接性能, 结果表明, 在较高的焊接速度 (大于 300 mm/min) 和 50 A 电流的焊接工艺窗口内, 异种钢 K-TIG 焊可获得高质量的焊缝; Li 等人^[16-17]研究了预应变对 304L 不锈钢 K-TIG 焊接接头氢脆失效机制的影响, 重点讨论了氢充入焊接接头的断裂位置与预应变引起的微观结构变化之间的关系, 研究表明, 焊缝金属中几乎没有先前存在的 α' 马氏体, 而基材中的 α' 马氏体含量随着预应变的增加显著增加; Fei 等人^[18-20]探讨了 K-TIG 焊在 SAF2205 和 AISI316L 异种材料焊接中的可行性, 试验在 5.6 mm 厚的板材上, 以 35 cm/min 的速度进行单道自熔焊接, 其进一步采用带有 AISI309 奥氏体不锈钢中间层的新型 K-TIG 焊, 证明其能够有效改善装甲钢焊缝的防弹性能, 还探讨了焊后热处理对 K-TIG 焊的蠕变强度增强铁素体 CSEF 钢和奥氏体不锈钢 ASS 异种接头的微观结构和力学性能的影响。

双相不锈钢也是焊接工艺中的热门方向^[21-24], 中厚板双相不锈钢 DSS 焊通常采用高效、精确的焊接技术, 包括几种高能密度束焊接技术, 然而, 焊接过程中存在气孔、铁素体含量过高、柱状晶粒粗大等问题. 为了解决这些问题, Han 等人^[25-26]采用 K-TIG 技术对厚度为 8 mm 的 2205 双相不锈钢进行了焊接, 讨论了焊接参数对锁孔稳定时间和熔合区轮廓的影响, 并研究了不同热输入下焊缝金属的显微组织、硬度和点蚀特性. Zmitrowicz 等人^[27]采用 K-TIG 焊在 10 mm 厚的 1.446 2 双相不锈钢板上成功获得了完全熔透的焊接接头, 由于未使用填充材料, 焊缝的微观结构与典型焊接方法所获得的焊缝有明显不同, 尽管焊缝具有较高的铁素体含量 (67%~75%), 但其力学性能仍能满足母材的要求。

这些研究表明, 通过优化 K-TIG 焊接工艺参数和技术, 不仅可以提高不锈钢焊接接头的质量和性能, 还能拓展其应用范围。

1.3 其他金属焊接

Wang 等人^[28]研制了一种新型超声频率双脉冲变极性 TIG 焊 DP-VPTIG 工艺, 应用于 7 mm AA2219 铝合金的锁孔焊接, 通过分析特征电流参数对焊缝成形的影响, 实现了稳定的小孔焊接工艺; Yin 等人^[29]基于视觉感知技术研究了 DP-VPTIG

的锁孔动态演化, DP-VPTIG 过程中低频脉冲的周期性变化激发了熔池中周期性的“开”和“关”锁孔行为; Xu 等人^[30]对 9%Ni 钢接头的焊缝金属 (weld metal, WM) 在焊接后的低温韧性下降问题进行了研究, 采用 K-TIG 技术并加入纯镍板和钼丝, 以提高焊缝金属的低温冲击韧性; Xuan 等人^[31]采用单道 K-TIG 焊接 10 mm 厚 Invar36 合金板材, 焊缝中仅形成 γ -(Fe, Ni) 奥氏体, 未发生相变, 晶粒组织发生显著变化, 焊缝最大拉伸强度为 440.7 MPa, 为母材的 99.9%, 断后伸长率最大为 31.5%, 焊缝区显微硬度略低于母材; Liu 等人^[32]阐述了热输入对 Invar 36 合金 K-TIG 焊焊缝组织和性能的影响, 采用 K-TIG 对接焊连接 10 mm 厚 Invar 36 合金板; Ariasetta 等人^[33-34]研究了一种新型镍基高温合金 G27, 分析了 K-TIG 焊及焊后固熔热处理对焊缝熔合区 (fusion zone, FZ) 显微组织的影响, 并对其在焊后固熔热处理过程中的晶粒生长行为进行了表征, 随后研究了新型高温合金 VDM Alloy 780 的熔合区组织及其固熔热处理过程中基体金属晶粒长大的动力学过程; Cui 等人^[35-36]采用 K-TIG 焊成功焊接了 12 mm 厚 Ti-6Al-4V (TC4) 钛合金板, 并对不同热输入下的焊接过程进行研究, 当热输入为 2.30~2.62 kJ/mm 时, K-TIG 焊缝成形良好, 无明显缺陷, 当热输入逐渐增加时, α 条长度增加, α' 相和残余 β 相减少; Cai 等人^[37]在焊接速度为 650~700 mm/min, 焊接电流为 355~370 A 的条件下, 实现了 3 mm 厚 10MnNiCr 钢板的 K-T; Ou 等人^[38-39]采用分子动力学方法模拟了 TC4-TA17 (Ti6Al4V-Ti4Al2V) 合金的时效相变、K-TIG 焊接过程和力学性能, 将 12 mm 厚的不同类 TC4-TA17 钛合金板无槽焊接在一起, 分析了异种接头的组织演变规律. 此外, 其他研究者也在不断探索和完善 K-TIG 焊接技术, 以进一步提升其应用范围和效果。

1.4 磁控焊接技术

在焊接技术中, 外部磁场的应用可以显著影响焊接过程和结果^[40-44], 通常有 5 种外部磁场: 横向磁场 (transverse magnetic field, TMF)、纵向磁场 (longitudinal magnetic field, LMF)^[45]、旋转磁场 (rotating magnetic field, RMF)、尖角磁场 (cusp magnetic field, CMF) 和轴向磁场 (axial magnetic field, AMF)。

磁控焊接技术易于实现, 且磁场与熔池中流过

的带电金属相互作用产生与重力方向相反的洛伦兹力,从而抑制熔池下淌的趋势,因此磁控技术适用于 K-TIG 横焊^[46].

Cui 等人^[47] 为了研究轴向磁场对 K-TIG 焊的影响,采用专门设计的轴向磁场装置和试样进行试验研究,如图 2 所示. 阐明了 AMF 提高电弧熔透能力的机理: 在没有 AMF 的典型焊接条件下,电弧形状呈现为对称的钟形,当施加 AMF 时,电弧的形状看起来像一个锣,电弧的顶部收缩到钨极,而底部在径向上扩展.Xu 等人^[48] 介绍了不同磁场作用下熔池的电弧形状和洛伦兹力,如图 3 所示,同时,还提出了交变轴向磁场 (alternating axial magnetic field, AAMF) 辅助 K-TIG 焊^[49], 结果表明,该 MF 可以细化先共析奥氏体晶粒,建立明显的富镍晶界. 交变磁场也提高了高密度高角度晶界 (HAGB) 的比例和密度,并使马氏体晶粒在室温下细化,通过阻止低能裂纹穿过细晶扩展和增加 HAGB 来提高低温冲击韧性.

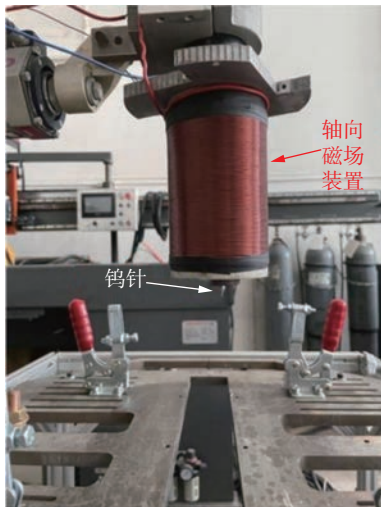


图 2 焊枪配置轴向磁场装置

Fig. 2 A welding torch equipped with an axial magnetic field device

在 CMF 方面,学者们也对此进行了研究, Liu 等人^[50] 设计了一种带水冷永磁磁极的 CMF 装置,通过焊接试验,研究了磁场对电弧形状的影响,进行平板焊接试验,测试了磁场对电弧电压和焊缝形状的影响. 在此基础上, Liu 等人^[51] 研究了磁场配置对 K-TIG 焊接电弧熔透行为的影响,通过改变磁极角度和磁场方向来生成合适的磁场,并观察这些变化如何影响焊接过程中的熔化区域和熔深. 结果表明,在 K-TIG 焊中使用 CMF 后,焊接电弧受到了约束,熔化区面积减小,垂直磁场方向的约束

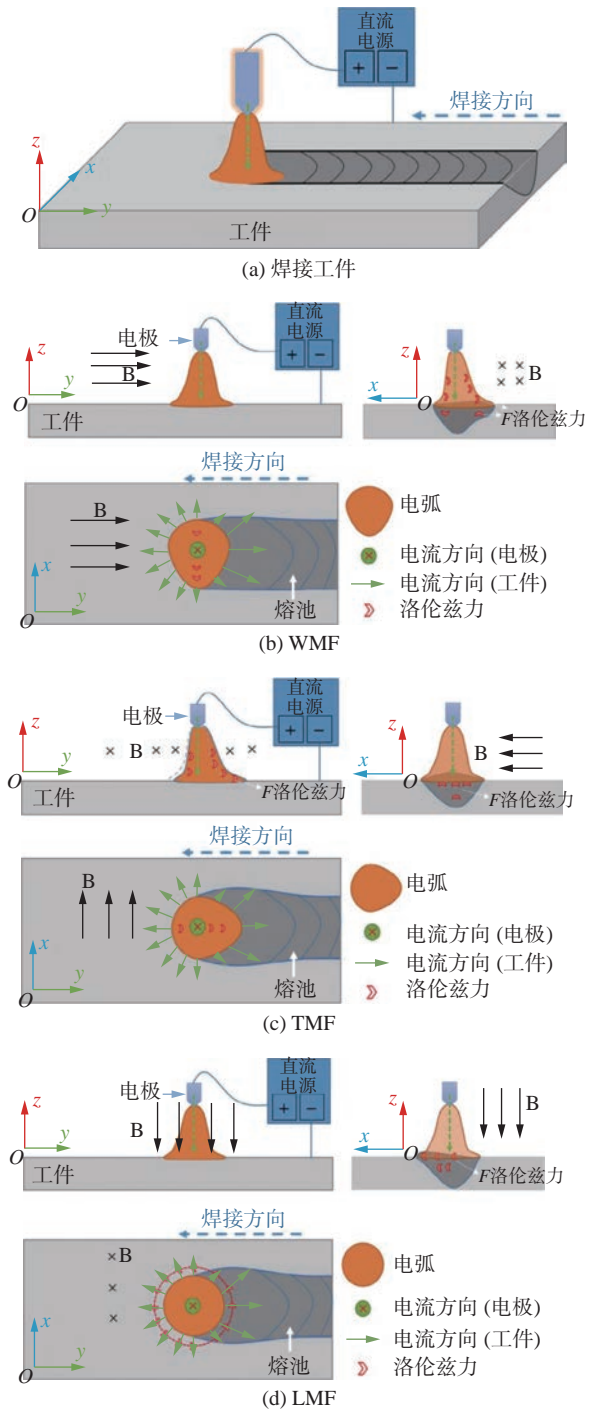


图 3 不同磁场作用下熔池的电弧形状和洛伦兹力示意图
Fig. 3 Schematic diagram of arc shape and Lorentz force of molten pool under different magnetic fields. (a) welding workpiece; (b) WMF; (c) TMF; (d) LMF

效果优于平行方向. 使用较小极角的垂直 CMF 可减小熔化区尺寸,增加熔化深度和电弧电压,极角是控制 K-TIG 焊熔透能力的关键因素.

2 K-TIG 智能化研究现状

随着科技的不断进步,焊接技术正朝着智能化

方向发展, K-TIG 焊作为一种高效深熔焊接技术, 其智能化研究同样取得了长足的发展, 通过引入自动控制^[52]、实时监测^[53]和数值模拟^[54-55]等先进技术, K-TIG 焊的智能化水平得到了极大提升, 以下将深入分析 K-TIG 焊在焊接智能化方面的研究现状.

2.1 熔池熔透识别技术

熔透识别是焊接工艺中的关键问题^[56], 关系到焊缝质量和结构的整体性能, 是焊接领域的重要研究方向之一. Zhu 等人^[57]通过预处理声学信号, 提取了 28 个声学特征和 3 个视觉特征, 并将这 3 个视觉特征的一阶差分作为新特征, 最终得到一个 34 维特征集. 通过试验发现, 不同的焊接电流会导致焊缝接头熔透状态的变化, 从而引起特征的规律性变化, Zhu 等人还提出了粒子群优化—交叉验证—支持矢量机 (PSO-CV-SVM) 模型, 识别准确率达到 97.165 5%, 添加粒子群优化前后的准确率见表 1, 意味着该模型可以用于在线熔透控制.

表 1 添加粒子群优化前后的算法精度
Table 1 Algorithm accuracy before and after particle swarm optimization

模型	最大精度 $Acc_{max}(\%)$	平均精度 $Acc_{mean}(\%)$	精度标准偏差 $\sigma(\%)$
CV-SVM	89.795 9	83.272 2	3.476 5
PSO-CV-SVM	97.165 5	94.646 1	4.650 4

Cui 等人^[58-59]基于电弧声、焊接电流和电弧电压建立了多传感器感知系统, 构建了焊接穿透识别模型, 该模型基于纠错输出编码-支持向量机-网格搜索 (ECOC-SVM-GSCV). 通过分析麦克风采集的声音信号, 采用谱噪减法 (spectral noise subtraction, SNS) 去噪并提取纯净的电弧声信号, 最终得到了准确率为 98.7% 的模型. 在后续研究过程中, 还建立了一个基于钢/玻璃夹层和高动态范围相机的视觉系统, 如图 4 所示, 实时捕捉 K-TIG 焊接过程中的熔池和小孔轮廓图像, 通过图像处理算法, 提取了熔池压缩深度和小孔几何参数, 结果表明, 焊接过程中焊接电流的变化直接影响小孔的几何尺寸和熔池的动态行为, 例如, 从起弧阶段到焊接电流上升到 460 A, 稳定阶段焊接电流保持恒定, 熄弧阶段焊接电流逐渐降至零. 在熄弧阶段, 小孔后端长度和总长度显著减少, 而熔池压缩深度增加, 显示出熔池和小孔动态行为的显著变化.

Li 等人^[60]提出了 OCR-SVM 模型来识别 K-TIG 平板焊接中的穿透状态, 其准确率为 93%, 并

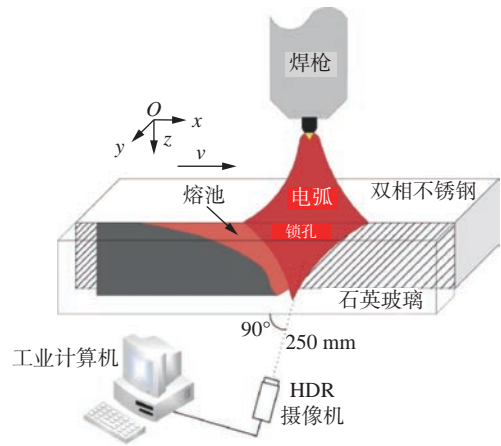


图 4 基于钢/玻璃夹层和高动态范围相机的视觉系统
Fig. 4 Vision system based on steel/glass interlayer and high dynamic range camera

使用统一焦点损失的损失函数以解决收敛慢和难以学习的复杂类别学习表现不佳的问题, 该函数达到了 91.48% 的 mIoU 评分. Shi 等人^[61]提出了一种可在嵌入式系统上实时监测 K-TIG 焊透状态的两阶段模型, 名为分段-LSTM 模型, 如图 5 所示. 该系统利用分割网络提取 9 个焊缝熔池的几何特征, 然后利用传统的算法提取焊缝间隙, 将这些 10 维特征输入到 LSTM 模型中, 预测熔池状态, 包括未熔透、部分熔透、良好熔透和过熔透, 所提出的系统的识别准确率可达 95.2%.

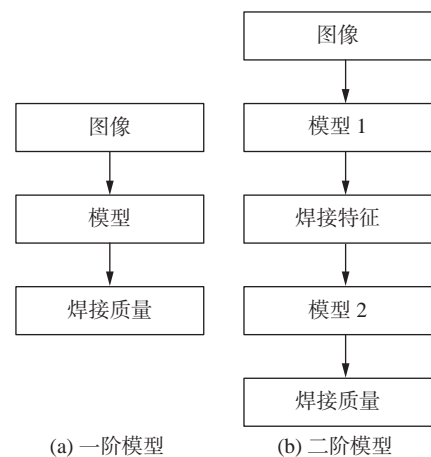


图 5 焊接质量模型
Fig. 5 Welding quality model. (a) one-stage model; (b) two-stage model

Bai 等人^[62]建立了一套传感系统来采集 304 不锈钢焊接过程中的电压信号, 在 36 ~ 37 kHz 发现了一个重要的频谱段, 它代表不同的焊接熔池状态, 包括完全熔透与未完全熔透状态. 特定频率范围作为穿透质量指标的识别是一个显著的贡献, 简化了监控过程; Yang 等人^[63]提出了一种基于

DeepLabV3+ 的实时识别方法,更准确和有效地识别熔池.选择 MobileNetV2 作为特征提取网络以提高检测效率,引入卷积块注意力模以提高模型的分割准确性,结果验证了所提出的模型具有快速的分割速度和更高的分割准确性, mIoU 为 89.89%,推理速度为每秒 103 帧.

通过对熔池状态的检测可有效地进行智能化焊接,焊接系统可自行调整焊枪位置,保证焊接质量.Zhan 等人^[64]在此方向做出了后续研究,根据焊接高度与电弧电压的对应关系,通过实时检测电弧电压并转化为实际焊接高度值,比较实际高度值与所设定的高度标准值,得出机器人运动偏差,实现焊接高度自动控制,并提出一种基于 BP 神经网络的熔透程度在线检测方法.

2.2 焊缝跟踪技术

焊缝跟踪是对焊接过程监测的另一研究方向,在焊接领域应用广泛.在 K-TIG 焊接过程中,工件不需要坡口处理,待焊接的间隙非常窄(0.2~1 mm),由于大电流,焊接弧光非常强,这些因素导致了 K-TIG 焊缝跟踪困难,为了解决 K-TIG 焊接过程中的焊缝跟踪难题,需要准确提取焊缝孔口中心和焊接中心线^[65].

Chen 等人^[66]提出了一种基于 Mask-RCNN 的图像处理算法,以准确提取窄间隙锁孔的中心,如图 6 所示.采用基于 Hough 线拟合的图像处理算法,准确识别焊接图像中的中心线并提取偏差,试验验证了该方法提取的焊接偏差在 ± 0.133 mm 范围内波动,满足实际 K-TIG 焊缝跟踪的要求.

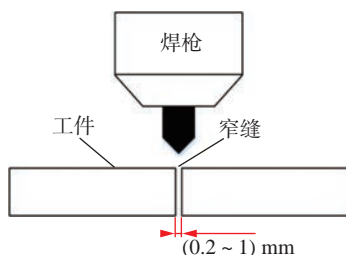


图 6 窄距焊缝系统

Fig. 6 Narrow gap welding system

Wang 等人^[67]设计了一个实时 HDR 系统,并在此基础上提出了一种焊接熔池和焊缝几何特征提取算法,系统包括一个适用于 HDR 的自动曝光算法,和一个使用曝光量而非曝光时间的改进 HDR 融合算法,分析结果表明,在缝宽变化率相同的情况下,按缝宽由大变小的焊接形态与按缝宽由小变大的焊接形态相比较差.

Lin 等人^[68]开发了一种适用于不同焊接形状的窄缝焊缝跟踪算法,该算法基于 You Only Look Once (YOLOv5) 的目标检测算法实现,通过焊缝锁孔的中心确定焊枪的位置,检测结果如图 7 所示.然后,基于自适应 ROI 操作的图像处理算法,提取焊接中心线并获取焊接偏差.试验结果证明,该算法检测到的焊接偏差在 ± 0.122 mm 内波动,平均误差在 ± 0.043 mm 内,算法的实时性能可达每秒 45 帧,足以满足 K-TIG 焊缝跟踪系统的实时性和精度要求.

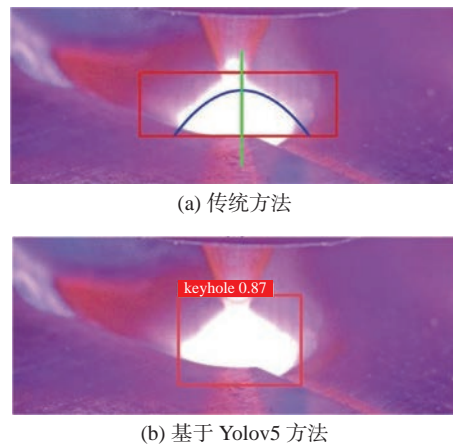


图 7 使用 YOLOv5 方法前后对比

Fig. 7 Comparison of the detection results between the traditional image processing method and the YOLOv5-based method. (a) traditional image processing method; (b) YOLOv5-based method

2.3 数值模拟

在焊接领域,数值模拟是一种强大的工具,可以帮助提高焊接质量、优化工艺参数、设计新型结构,并节约成本和资源^[69-71].

Zhang 等人^[72]在 2012 年就曾利用 Fluent 软件对 K-TIG 焊枪的焊接电弧和保护气体进行了数值模拟和分析,得到了 K-TIG 电弧等离子体的温度、速度、电势和电弧压力分布,为后续 K-TIG 焊枪设计、焊接工艺控制和焊接质量监测等研究奠定了基础; Song 等人^[73]建立了 K-TIG 焊接中电弧等离子体的二维数值模型,对比锁孔状态和未熔透状态的电弧特性,进而研究焊接参数对电弧特性的影响; Chen 等人^[74]建立了三维数值模型,研究了 K-TIG 锁孔与熔池的热耦合机理,提出了一种新颖、合适的组合热源模型,探讨了锁孔对熔池温度的影响.

Cui 等人^[75]对 8 mm 厚的 2205 双相不锈钢板材进行 K-TIG 焊接试验,并采用有限元法进行了数值模拟.对不同焊接速度下的焊接过程进行了模

拟, 并计算了温度场、熔池形状和热循环曲线, 焊接模拟结果显示, 由椭球热源和圆锥热源组成的组合模型更适合 K-TIG 焊, Cui 等人^[76]综合考虑重力、电磁力、表面张力、电弧剪切力、浮力等因素的影响, 建立了 K-TIG 焊熔池三维瞬态数值模型, 如图 8 所示, 结合高速摄像机和仿真技术揭示了熔池行为与锁孔动态行为之间的定性关系。

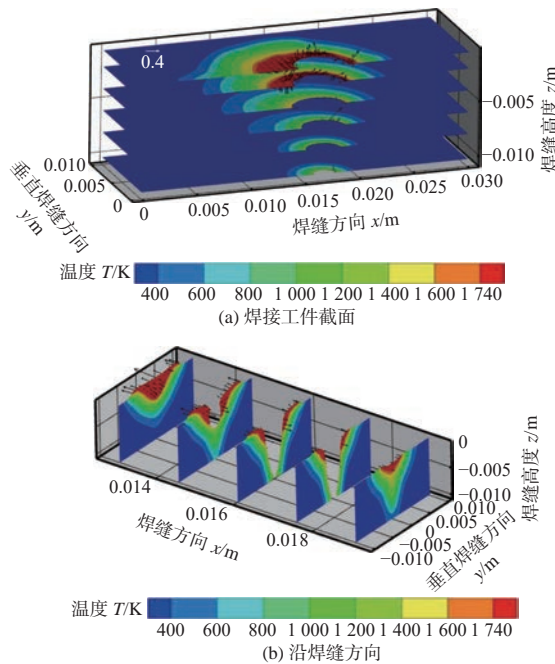


图 8 焊接流场与温度场分布

Fig. 8 Welding flow field and temperature field distribution. (a) section of welding workpiece; (b) distribute along the weld

庞舒文^[77]在此基础上做出了更深入的分析, 同样建立 K-TIG 焊熔池的数学模型, 运用 VOF 捕捉熔池的自由界面, 获得了 K-TIG 焊接过程中熔池流动特性及“锁孔”动态行为的基础数据. 流场仿真结果表明, 在电磁力、表面张力等驱动力的作用下, 熔池熔融金属在锁孔形成过程中的流动趋势主要是由锁孔中心向锁孔周围流动。

3 结束语

(1) 为了进一步提升焊接过程的稳定性和焊缝质量, 智能化焊接控制系统将成为研究的重点, 通过引入先进的传感器技术、实时监控系统和人工智能算法, 可以实现焊接过程的自动化和智能化。

(2) 为了满足不同材料和复杂结构的焊接需求, 将进一步探索 K-TIG 焊在异种材料连接和复杂几何结构焊接中的应用, 通过优化焊接工艺参数和

焊接设备设计, 可以实现更高的焊接质量。

(3) 随着绿色制造和可持续发展的要求, 未来的 K-TIG 焊将更加注重节能减排和环保, 通过开发新的焊接材料、优化焊接工艺参数, 减少能源消耗和焊接烟尘的排放, 实现绿色焊接。

参考文献

- [1] Shi Y H, Cui Y X, Cui S W, *et al.* A novel high-efficiency key-hole tungsten inert gas (K-TIG) welding: principles and practices[J]. *Welding Technology*, 2021: 313 – 367.
- [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.
Chen Jinrong. Research on arc shape and weld formation of magnetic-controlled K-TIG welding [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [3] 占爱文. K-TIG 焊接熔池和锁孔视觉检测与熔透状态识别的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
Zhan Aiwen. Research on visual detection and penetration state identification of K-TIG welding pool and keyhole [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [4] 任冠鹏, 杨青云, 徐家磊, 等. Gr.12 钛合金 K-TIG 焊接接头的组织和力学性能研究 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51(21): 131 – 133.
Ren Guanpeng, Yang Qingyun, Xu Jialei, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of Gr.12 titanium alloy K-TIG welded joint[J]. *Thermal processing*, 2022, 51(21): 131 – 133.
- [5] Kumar K, Kumar C S, Masanta M, *et al.* A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 50(5): 999 – 1004.
- [6] Sharma G, Tyagi R, Priyanshu, *et al.* Variants of TIG welding process for improvement of weld penetration depth-A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 64(3): 1362 – 1366.
- [7] 冯悦娟. 中厚钢板的深熔 TIG 焊工艺研究及温度场数值模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2024.
Feng Yueqiao. Medium plate of research and deep penetrating TIG welding process temperature field numerical simulation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2024.
- [8] Liu Z M, Fang Y X, Cui S L, *et al.* Stable keyhole welding process with K-TIG[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 65 – 72.
- [9] Su L H, Fei Z Y, Davis B, *et al.* Digital image correlation study on tensile properties of high strength quenched and tempered steel weld joints prepared by K-TIG and GMAW[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 827(6): 142033.
- [10] Zhang H C, Yu J, Zhang Z X, *et al.* Arc characteristics and welding process of laser K-TIG hybrid welding [J]. *Metals*, 2022, 12(7): 1139.
- [11] Chudziński M, Krajewski S J, Zmitrowicz P. Application of the keyhole TIG process for high productivity welding of superdu-

- plex stainless steel[C]//International Conference Mechatronics. Springer, Cham, 2022, 377: 26 – 44.
- [12] Cui S L, Liu Z M, Fang Y X, *et al.* Keyhole process in K-TIG welding on 4 mm thick 304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 217 – 228.
- [13] Luo Z, Xie Y, Cui S L. Morphology characterization of molten pool flow behavior during K-TIG welding based on 3D reconstruction techniques[J]. Journal of Tianjin University Science and Technology, 2018, 51(5): 517 – 521.
- [14] Feng Y Q, Luo Z, Liu Z M, *et al.* Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel[J]. Materials & Design, 2015, 85: 24 – 31.
- [15] Huang Y Y, Luo Z, Lei Y C, *et al.* Dissimilar joining of AISI 304/Q345 steels in keyhole tungsten inert gas welding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96: 4041 – 4049.
- [16] Li X G, Gong B M, Deng C Y, *et al.* Failure mechanism transition of hydrogen embrittlement in AISI 304 K-TIG weld metal under tensile loading[J]. Corrosion Science, 2018, 130: 241 – 251.
- [17] Li X G, Gong B M, Deng C Y, *et al.* Effect of pre-strain on microstructure and hydrogen embrittlement of K-TIG welded austenitic stainless steel[J]. Corrosion Science, 2019, 149: 1 – 17.
- [18] Fei Z Y, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* Microstructural characterization and mechanical properties of K-TIG welded SAF2205/AISI316L dissimilar joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 340 – 355.
- [19] Fei Z Y, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* A combination of keyhole GTAW with a trapezoidal interlayer: a new insight into armour steel welding [J]. Materials, 2019, 12(21), 3571.
- [20] Fei Z Y, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of deep penetration autogenous TIG-welded dissimilar joint between creep strength enhanced ferritic steel and austenitic stainless steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(9-10): 3207 – 3229.
- [21] Cui S W, Pang S W, Pang D Q, *et al.* Numerical simulation and experimental investigation on 2205 duplex stainless steel K-TIG welded joint [J]. Metals, 2021, 11(8), 1323.
- [22] 朱加雷, 郭方涛, 李守根, 等. S32101 双相不锈钢 U 形坡口激光填充焊接修复工艺 [J]. 焊接学报, 2019, 45(10): 69 – 78.
- Zhu Jialei, Guo Fangtao, Li Shougen, *et al.* Laser filling welding process for U-shaped groove of S32101 duplex stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 45(10): 69 – 78.
- [23] Cui S W, Yu Y H, Tian F Y, *et al.* Morphology, microstructure, and mechanical properties of S32101 duplex stainless-steel joints in K-TIG welding[J]. Materials, 2022, 15(15): 5432.
- [24] Cui S W, Pang S W, Pang D Q, *et al.* The microstructure and pitting corrosion behavior of K-TIG welded joints of the UNS S32101 duplex stainless steel[J]. Materials, 2023, 16(1): 250.
- [25] Han L H, Han T, Chen G X, *et al.* Influence of heat input on microstructure, hardness and pitting corrosion of weld metal in duplex stainless steel welded by keyhole-TIG[J]. Materials Characterization, 2021, 175: 111052.
- [26] Han L H, Han T, Wang B Y, *et al.* Effects of keyhole tungsten inert gas welding parameters on 2205 duplex stainless steel welded joints[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(2): 1358 – 1372.
- [27] Zmitrowicz P, Kawiak M, Kochmanski P, *et al.* Microstructure and mechanical properties of welded joints of 1.4462 duplex steel made by the K-TIG method[J]. Materials, 2021, 14(24): 7868.
- [28] Wang Y P, Qi B J, Cong B Q, *et al.* Keyhole welding of AA2219 aluminum alloy with double-pulsed variable polarity gas tungsten arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 179 – 186.
- [29] Yin Y H, Wang Y P, Gao H, *et al.* Stimulated pulse keyhole behavior in double-pulsed VPTIG welding of AA2219 high strength aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(10): 3596 – 3601.
- [30] Xu T, Shi Y H, Jiang Z X, *et al.* Improvement of cryogenic toughness for 9% Ni steel keyhole TIG butt-welded joints with a Ni interlayer[J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2022, 835: 142661.
- [31] Xuan Y, Yang J, Liu H B, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Invar36 alloy joints using keyhole TIG welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(8): 712 – 718.
- [32] Liu H B, Lü S H, Xuan Y, *et al.* Effects of heat input on weld microstructure and properties in keyhole TIG welding of INVAR 36 alloy[J]. Materials, 2023, 16(10): 3692.
- [33] Ariasetta A, Khan A K, Andersson J, *et al.* Microstructural study of keyhole TIG welded nickel-based superalloy G27[J]. Materials Characterization, 2023, 204: 113178.
- [34] Ariasetta A, Khan A K, Andersson J, *et al.* Microstructural analysis of K-TIG-welded new Ni-based superalloy VDM alloy 780[J]. Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 2024, 55(8): 2952 – 2976.
- [35] Cui S W, Shi Y H, Zhu T, *et al.* Microstructure, texture, and mechanical properties of Ti-6Al-4V joints by K-TIG welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 418 – 424.
- [36] Cui S W, Shi Y H, Zhang C S. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy K-TIG welded joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2): 416 – 425.
- [37] Cai X Y, Dong B L, Lin S B, *et al.* Keyhole TIG welding of 3-mm-thick 10MnNiCr steel plates[J]. Welding in the World, 2022, 66(7): 1349 – 1356.
- [38] Ou P, Cao Z Q, Rong J, *et al.* Molecular dynamics study on the welding behavior in dissimilar TC4-TA17 titanium alloys[J]. Materials, 2022, 15(16): 5606.
- [39] Ou P, Cao Z Q, Hai M N, *et al.* Microstructure and mechanical

- properties of K-TIG welded dissimilar joints between TC4 and TA17 titanium alloys[J]. *Materials Characterization*, 2023, 196: 112644.
- [40] Jiang S Y, Wang X W, Chen H M, *et al.* The impact of adscitious longitudinal magnetic field on CO₂ welding process[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 538-541: 1447 – 1450.
- [41] Wang X M, Zhang W, Wang Y. The influence of longitudinal magnetic field on DCEN MAG welding[C]//International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, 2012, 217: 1843 – 1846.
- [42] Zhao Z Y, Mi G Y, Zhang X, *et al.* Influence of additional magnetic field on laser hot wire welding of stainless steel[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 270 – 274.
- [43] Gou W J, Xia G H, Feng Z X. Study on low-frequency magnetic radiation of DC arc welding output cable[C]//International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics. 2019.
- [44] Chen J, Chen Q, Wu C S. Study of high-speed pulsed gas metal arc welding assisted by external magnetic-field[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2020, 25(7): 564 – 570.
- [45] 石永华, 宁强, 崔延鑫. Q345R 钢纵向磁场辅助 K-TIG 焊接接头组织和性能研究 [J]. *电焊机*, 2020, 50(9): 87 – 91.
Shi Yonghua, Ning Qiang, Cui Yanxin. Study on microstructure and properties of K-TIG welded joint of Q345R steel assisted by longitudinal magnetic field[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(9): 87 – 91.
- [46] 赵建强, 石永华, 詹家通, 等. 外加轴向磁场 K-TIG 横焊电弧形态及焊缝成形 [J]. *焊接*, 2023(4): 1 – 6.
Zhao Jianqiang, Shi Yonghua, Zhan Jiatong, *et al.* Arc shape and weld formation of K-TIG transverse welding with external axial magnetic field[J]. *Welding & Joining*, 2023(4): 1 – 6.
- [47] Cui Y X, Kang Y P, Shi Y H, *et al.* Investigation into the arc profiles and penetration ability of axial magnetic field-enhanced K-TIG welding by means of a specially designed sandwich[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 32 – 41.
- [48] Xu T, Shi Y H, Cui Y X, *et al.* Effects of magnetic fields in arc welding, laser welding, and resistance spot welding: a review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(5): 2200682.
- [49] Xu T, Shi Y H, Jiang Z X, *et al.* An extraordinary improvement in cryogenic toughness of K-TIG welded 9Ni steel joint assisted by alternating axial magnetic field[J]. *Journal of Materials Research and Technology-JMR& T*, 2023, 25: 3071 – 3077.
- [50] Liu Z M, Chen S Y, Yuan X, *et al.* Magnetic-enhanced keyhole TIG welding process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 99(1-4): 275 – 285.
- [51] 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.
- [52] 陈泓宇. 集装箱自动化焊接系统的轨迹规划和轨迹校正方法研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2020.
Chen Hongyu. Research on trajectory planning and trajectory correction method of container automatic welding system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [53] 张抱日. 基于高动态成像的深熔 K-TIG 熔池状态检测及其变化机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
Zhang Baori. State detection and change mechanism of deep penetration K-TIG welding pool based on high dynamic imaging [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [54] 鹿安理, 史清宇, 赵海燕, 等. 厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟 [J]. *中国机械工程*, 2001, 12(2): 183 – 186.
Lu Anli, Shi Qingyu, Zhao Haiyan, *et al.* Thick plate welding temperature field, stress field, the three-dimensional finite element numerical simulation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(2): 183 – 186.
- [55] 吴言高, 李午申, 邹宏军, 等. 焊接数值模拟技术发展现状 [J]. *焊接学报*, 2002, 23(3): 89 – 92.
Wu Yangao, Li Wushen, Zou Hongjun, *et al.* Welding current situation of the development of numerical simulation technology[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(3): 89 – 92.
- [56] 梁斌, 崔延鑫, 石永华, 等. 深熔 K-TIG 焊接过程的声信号采集及特征分析 [J]. *电焊机*, 2018, 48(10): 94 – 97.
Liang Bin, Cui Yanxin, Shi Yonghua, *et al.* Deep penetrating K-TIG welding process characteristics of acoustic signal acquisition and analysis[J]. *Electric Welding Machine*, 2018, 48(10): 94 – 97.
- [57] Zhu T, Shi Y H, Cui S W, *et al.* Recognition of weld penetration during K-TIG welding based on acoustic and visual sensing[J]. *Sensing and Imaging*, 2019, 20(1): 1 – 21.
- [58] Cui Y X, Shi Y H, Zhu T, *et al.* Welding penetration recognition based on arc sound and electrical signals in K-TIG welding[J]. *Measurement*, 2020, 163: 107966.
- [59] Cui Y X, Shi Y H, Ning Q, *et al.* Investigation into keyhole-weld pool dynamic behaviors based on HDR vision sensing of real-time K-TIG welding process through a steel/glass sandwich[J]. *Advances in Manufacturing*, 2021, 9(1): 136 – 144.
- [60] 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, 68(9): 2281 – 2292.
- [61] Shi Y H, Wang Z H, 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(3): 444 – 461.
- [62] Bai Huizhong, Ni Na, Wu Yingna, *et al.* Real-time penetration recognition based on voltage signal in K-TIG welding[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2023, 13(13): 7412.
- [63] 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]. *Electronics*, 2024, 13(2): 283.
- [64] Zhan B R, Guo S Y, Shi Y H. Robotic deep penetration K-TIG welding system based on weld penetration detection[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(17): 14 – 21.
- [65] 刘炜聪. K-TIG 焊接窄间隙焊缝视觉跟踪系统研究 [D]. 广州:

- 华南理工大学, 2019.
- Liu Weicong. Research on K-TIG welding narrow gap weld visual tracking system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [66] Chen Y K, Shi Y H, Cui Y X, *et al.* Narrow gap deviation detection in keyhole TIG welding using image processing method based on Mask-RCNN model[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112: 2015 – 2025.
- [67] Wang Z S, Shi Y H, Hong X B, *et al.* Weld pool and keyhole geometric feature extraction in K-TIG welding with a gradual gap based on an improved HDR algorithm[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 73: 409 – 427.
- [68] Lin Z L, Shi Y H, Wang Z S, *et al.* Intelligent seam tracking of an ultranarrow gap during K-TIG welding: a hybrid CNN and adaptive ROI operation algorithm[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1 – 14.
- [69] Chu J, Wang X, Ma Y J, *et al.* Numerical simulation of melt pool formation in laser transmission joining PET with microtextured surface pretreated SUS304 stainless steel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 216: 124560.
- [70] Cui C Y, Chen L, Yang J, *et al.* Numerical simulation and testing of laser-MIG hybrid-welding angle-structure sheets[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(23): 6180 – 6193.
- [71] Zhang Y J, Li Y H, Zhang Y L, *et al.* Numerical analysis of the behavior of molten pool and the suppression mechanism of undercut defect in TIG-MIG hybrid welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 218: 124757.
- [72] Zhang R H, Li H X, Li M, *et al.* Numerical analysis on keyhole gas tungsten arc welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2012, 42(12): 7 – 11.
- [73] Song B Y, Dong B L, Cai X Y, *et al.* Numerical simulation of arc characteristics in K-TIG welding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 132(7): 3821 – 3837.
- [74] Chen S Y, Liu Z M, Zhao X C, *et al.* Cathode-focused high-current arc: Heat source development with stable keyhole in stationary welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 143: 118475.
- [75] Cui S W, Pang S W, Pang D Q, *et al.* Influence of welding speeds on the morphology, mechanical properties, and microstructure of 2205 DSS welded joint by K-TIG welding[J]. *Materials*, 2021, 14(12): 3426.
- [76] 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(3): 1195 – 1206.
- [77] 庞舒文. 2205 双相不锈钢 K-TIG 焊数值模拟及接头性能研究 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.
- Pang Shuwen. Numerical simulation and joints performance study of K-TIG welding of 2205 duplex stainless steel[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023.

第一作者: 石永华, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为高效智能焊接技术与装备; Email: yhuashi@scut.edu.cn.

(编辑: 刘启明)