

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.001

管道全位置焊接方法和缺陷控制研究综述

蒋凡¹, 刘元¹, 张国凯¹, 武晓刚², 陈树君¹

(1. 北京工业大学 汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124;

2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

摘要:随着能源输送工程对安全性的要求不断提高,能够适应多焊接姿态、稳定控制熔池的管道全位置焊接技术,已成为保障焊接质量的关键手段。全位置焊接过程中由于焊接姿态多变、熔池受重力影响变化显著,焊接过程中存在根部未熔透、根部内凹、侧壁未熔合等多种典型缺陷。总结钨极惰性气体保护焊、熔化极气体保护焊接、高能束焊接等管道主要焊接方法。从缺陷类型出发,归纳国内外的主要抑制手段:一是基于电流电压波形与热源参数优化的工艺方法实现根部熔透率的大幅提升;二是物理与电磁支撑的被动、主动抑制手段显著抑制根部内凹和烧穿;三是基于电弧运动控制的旋转电弧与摆动电弧技术有效消除侧壁未熔合缺陷。对未来智能化、自动化管道焊接的质量与效率提升进行展望。

关键词:管道全位置焊接;焊接缺陷;缺陷抑制;智能调控

中图分类号:TG444 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0001-10

Overview of Research on All-Position Welding Methods and Defect Control for Pipelines

Jiang Fan¹, Liu Yuan¹, Zhang Guokai¹, Wu Xiaogang², Chen Shujun¹

(1. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components,

Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract:With growing requirements in energy transmission safety, all-position pipeline welding—capable of accommodating various welding postures and stably controlling the molten pool—has become crucial for ensuring weld quality. During all-position welding, the changing welding postures and the significant influence of gravity on the molten pool often cause typical defects, such as lack of root penetration, root concavity, and incomplete sidewall fusion. This paper summarizes the main pipeline welding methods, including Tungsten Inert Gas (TIG) welding, gas metal arc welding (GMAW), and high-energy beam welding. Major control methods from domestic and international research are reviewed: firstly, process methods based on optimization of current/voltage waveforms and heat source parameters, which significantly improve root penetration; secondly, passive and active control methods employing physical and electromagnetic support, which effectively suppress root concavity and burn-through; thirdly, rotating-arc and weaving-arc techniques based on arc motion control, which effectively eliminate incomplete-sidewall-fusion defects. Future prospects for improving the quality and efficiency of intelligent and automated pipeline welding are also discussed.

Keywords:all-position pipeline welding; welding defects; defect control; intelligent regulation

0 引言

在全球能源结构转型与消费升级的背景下,油气运输需求持续增长,从而推动我国油气管网快速扩张^[1]。截至 2023 年,全国长输管道总里程

已突破 16 万 km,跨国管道的贯通标志着“四大能源通道”战略布局基本完成。在这一趋势下,管道焊接技术作为保障输送系统安全性与可靠性的核心工艺环节,其焊接质量直接决定管道的服役寿命与运行效能。尽管我国管道全自动焊接率已提

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB 3407701)

第一作者简介:蒋凡(1987—),男,福建武夷山人,教授,博士生导师,研究方向为电弧焊接、增材智能控制和物理机制,jiangfan@bjut.edu.cn。

通信作者简介:张国凯(1988—),男,山东潍坊人,副教授,博士,研究方向为电弧焊接、增材过程检测和控制,gkzhang@bjut.edu.cn。

升至 68%,但焊缝缺陷仍导致约 43% 的运行事故^[2]。因此对高效率、高质量的管道全位置焊接工艺需求就显得尤为迫切。

为此,本文重点讨论了全位置焊接熔池的受力特征、全位置焊接方法的工艺适应性、不同焊接方法对根部未熔透和侧壁未熔合等缺陷的改善效果这几方面的研究进展和应用现状,并对未来的研究方向提出了展望。

1 管道全位置焊接原理和分类

根据美国 AWS A3.0:2020《标准焊接术语与定义》,1G(水平转动焊)与 5G(水平固定全位置焊)作为管道焊接工艺中两种典型焊接位置^[3],其核心差异体现在工件与焊枪的运动关系上。1G 采用水平转动焊模式,即管道沿水平轴线匀速旋转,焊枪保持在同一位置进行焊接。5G 则采用水平固定焊模式,即管道保持在相对固定的状态,焊枪沿着特定路线完成从平焊、立焊到仰焊的全位置连续作业。

管道全位置焊接包括平焊、立焊(包含立向下和立向上)和仰焊 3 个主要过程^[4]。全位置焊接质量受熔池动态行为的复杂影响,其核心控制难点在于:1)重力矢量随焊接位置改变导致熔池受力失衡。在不同焊接位置中,熔池受到液重力 G 、熔池与焊道接触的吸附力 F_x 、焊道对熔池的支持力 F_d 和电弧力 F_a 的共同作用^[5]如图 1 所示。这些力的方向直接影响熔池的形态和焊接质量。平焊时熔池易受重力下沉,与电弧力联合作用会导致热输入过大;立焊时熔池向上的表面张力无法平衡熔池的重力,熔池容易受重力下坠会导致根部烧穿和侧壁未熔合等缺陷^[6];仰焊时熔池受重力易导致熔池向下流动会导致焊缝根部内凹缺陷的形成。2)不同位置热输入效率差异显著,平焊、45°下向焊、立焊下向焊的速度场明显不同。重力

的作用方向对熔池内液态金属的流场、温度场产生明显的影响^[7],从而导致熔滴过渡稳定性随空间位姿动态变化^[8]。

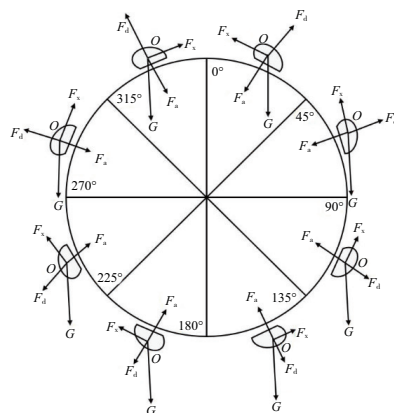


图 1 全位置焊接熔池受力示意图

目前常用的管道全位置焊接技术主要包括手工电弧焊和管道自动焊接技术。在我国早期的管道施工中手工电弧焊管道焊接技术曾是主要应用的焊接方法,其具备操作简单、适应性强的优势^[9]。但受限于效率低下、质量一致性难以保障以及对焊工技能的高度依赖。

随着工业自动化的发展,自动焊技术因其焊接效率高、生产强度小、受人为因素影响小的优势,逐渐得到了广泛应用,在管道建设中具有很大潜力^[10]。将自动化技术应用于全位置焊接以提升焊接效率已成为研究热点。常用的焊接方法^[11]包括钨极惰性气体保护焊(tungsten inert gas, TIG)^[12]、熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)^[13]以及高能束焊接^[14]等焊接技术,如图 2 所示。这些方法能够根据不同的焊接需求提供高效、精确的解决方案,从而提升了生产效率和确保焊接质量。通过精确的控制与实时监测系统的配合,确保了焊接过程的稳定性和一致性,同时也大大减少了人工操作的误差和安全隐患。

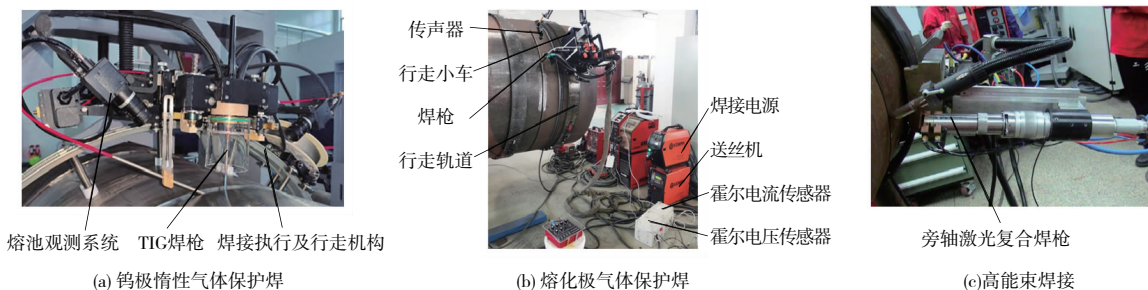


图 2 管道焊接常用技术

钨极惰性气体保护焊是一种高精度焊接工艺,其主要优点包括焊接质量高、焊缝美观、热影响区小、变形小^[15]。它能够提供稳定的电弧和精确控制熔池,适合平焊、立焊、仰焊等多种位置的焊接,被广泛应用于不锈钢、铝合金等材料的焊接。王洪铎等^[16]采用全位置自动 TIG 焊工艺对 QT900 钢管进行了对接焊,并对焊接接头的宏观形貌、显微组织及力学性能进行了分析。结果表明采用该工艺获得的焊缝成形良好。徐龙海等^[17]使用全位置 TIG 自动焊对 20 钢与 304 不锈钢分别进行对接焊,满足无损检测性能要求。此外,他们将打底层焊接方法由直流焊改为脉冲焊,由此有效地解决了管道自动 TIG 焊焊接过程中出现的焊缝内凹问题。朱旻等^[18]使用窄间隙热丝 TIG 焊方法对 TP321 不锈钢管进行全位置焊接,研究了匹配窄间隙坡口的参数并分区域对管道进行焊接。

熔化极气体保护焊具有焊接效率高、焊缝质量稳定、适用范围广的特点^[19],被广泛应用于管道全位置焊接中。其原理是利用电弧将连续送出的焊丝熔化,同时借助保护气体(如二氧化碳或氩气与二氧化碳的混合气体)隔绝空气对熔池的影响,从而形成高质量的焊缝。Mahdjour 等^[20]使用 GMAW 对管道进行焊接,优化了焊接工艺参数,使得焊接接头的性能达到 API 标准。何小东等^[21]采用 GMAW 自动焊对 X80 钢管进行了环焊缝焊接。焊后对接头的力学性能进行了测试。结果表明环焊接头具有较好的低温韧性,接头的拉伸强度满足管道焊接验收标准。

高能束焊因其能量密度高、焊接速度快、穿透能力强等特点被应用于管道焊接领域^[22]。目前使用较多的焊接方法有等离子弧焊和激光焊。刘昂炎^[23]使用全位置等离子弧自动焊接设备对 TC4 钛合金管道进行 I 型坡口、无间隙、不填丝的对接试验。他研究了全位置穿孔熔池,认为重力是造成全位置焊缝熔池失稳的主因,还根据不同焊接位置的力平衡数据总结出焊缝成形良好的焊接参数控制方法。邓平等^[24]采用窄间隙激光焊接的方法焊接了有效厚度 15 mm 的 20 钢管与 Q345C 钢异种钢管,焊后对管接头不同部位的组织进行了观察和分析,对接头的力学性能进行了测试。这种方法焊缝成形良好,无明显缺陷。Cheng 等^[25]使用两组焊接参数在不同焊接位置(平面、垂直向上和垂直向下)对 Inconel 617 镍基高温合金板进行激光焊接试验,分析了激光接头的几何形状、内部缺陷、力学性能和熔池动力学行为。结果表明采用高热输入参数时,焊接位置对激光焊接质量有明显影响:平焊焊缝表面和垂直向下焊缝的背面均略凹;此外,水平焊缝和垂直向下焊缝存在由匙孔引起的气孔缺陷,导致力学性能相对较差。

2 全位置焊接过程中常见缺陷及控制策略

在管道全位置焊接过程中,由于重力影响熔池流动常出现根部未焊透、根部熔深过大、根部内凹及侧壁未熔合等缺陷^[26]。各缺陷剖面如图 3 所示。这些缺陷会显著影响焊缝的结构完整性和服役性能。

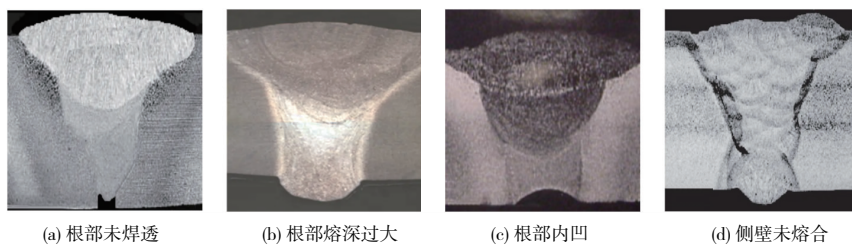


图 3 焊接缺陷剖面图

根部未焊透是指焊接时接头根部未完全熔透的现象,即母材金属之间没有熔化,焊缝金属未能进入接头的根部位置,如图 3(a)所示。根部未焊透主要源自热输入不足、焊速过快、焊丝直径偏大或坡口设计不合理。例如,使用过小的坡口角度或根面间隙过窄,配合电流不足,导致熔深无法到达根部,形成未熔透缺陷^[27]。此类缺陷使焊缝根部有效承载面积减小,形成应力集中,尤其在高压

或循环载荷作用下,容易诱发疲劳裂纹和突发失效。

根部熔深过大是指焊接过程中熔深超过工件厚度,熔化金属自焊缝背面流出的缺陷,如图 3(b)所示。其成因是电流过大、焊接停滞过久,热输入失控或未采取必要的背部冷却措施,导致熔深过大并直接贯穿母材。此缺陷表现为焊道根部出现烧穿,它不仅破坏密封性,还会引发介质泄漏,且

进一步破坏管道的力学性能 and 安全性^[28]。

根部内凹是指在对接焊缝根部出现的浅沟槽状缺陷,表现为焊缝背面中心线位置的下陷,如图 3(c) 所示。此缺陷常出现在立焊、仰焊位置,因熔池金属在重力作用下下坠,会导致背面形成内凹^[29]。此缺陷不仅削弱焊缝的抗拉强度,还会导致接头承载能力下降,在高内压或极限载荷条件下成为潜在失效源^[30]。

侧壁未熔合是指熔敷金属与母材坡口侧壁之间未能完全熔合的现象,如图 3(d) 所示。通常因焊接热输入太低、焊枪角度不准确以及磁弧偏移等因素引起^[31]。熔池不能充分渗透至坡口侧壁,焊缝有效承载截面积减小,焊缝金属与母材之间的结合强度明显下降,并可能形成裂纹。

综上所述,这些缺陷会影响焊缝的力学性能 and 安全性。下文将按缺陷类型依次介绍相应的控制策略与工艺优化方法。

2.1 根部未焊透及双面成形控制策略

根部未焊透是管道全位置焊接中较为严重的安全隐患之一。尤其在海底或高压环境下,一旦根部未能完全熔合,就极易诱发裂纹扩展和介质泄漏。为解决这一问题,研究者一方面通过电流电压波形控制技术对焊接电源进行精细调节;在短路和燃弧阶段,合理设置峰值电流、基值电流和占空比,可同时提升熔深并保持熔池形态稳定。这种方法被广泛应用于管道根焊;另一方面,应用激光-电弧复合焊技术,利用高能量密度的热输入来迅速扩大熔深,实现一次成形的根部熔透。

1) 基于电流电压波形的根部熔透优化

冷金属过渡 (cold metal transfer, CMT) 工艺是 Fronius 于 2005 年基于短路过渡改进而成的一种熔化极气体保护焊方法。冷金属过渡焊接技术因其热输入低、无飞溅、焊缝成形好等优点,在管道根部焊接中得到了广泛的应用^[32]。邹勇等^[33]采用自主研发的新型管道全位置焊接机器人,结合 CMT 焊接电源,研究出一种焊接机器人管道全自动打底焊方法。打底焊整圈一次完成,所焊管道只有一个接头。试验表明,该打底焊方法焊接速度快,焊缝成形美观,背面成形良好,实现了管道全自动打底焊单面焊双面成形。Chen 等^[34]研究了管道立向上 CMT 根部焊中焊接热输入(q)、峰值电流时间比 (PTR) 和背面焊缝宽度 (W_b) 之间的关系,建立了立向上位置 CMT 根焊背面焊缝几何形状预测模型,为背面焊缝几何形状的反馈

控制奠定了坚实的基础。

表面张力过渡 (surface tension transfer, STT) 焊接技术通过高频逆变与波形优化,能够独立调节熔池热输入,使熔池热量精准集中于根部区域,降低杂散热与飞溅,大幅提升根部熔透稳定性及成形质量。Jeong 等^[35]研究了 STT 焊接参数与焊缝背面成形的关系,分析了基值电流、峰值电流、送丝速度等焊接参数与焊缝背面余高和背面宽度的关系。在此基础上建立了多元回归分析模型,该模型是自动控制系统和预测系统的基础。Kim 等^[36]研究了立焊和仰焊中 STT 焊接速度、焊枪角度对焊缝背面形状的影响,发现仰焊的背面宽度更大且余高更小;这一结论与焊接速度和焊枪角度均无显著相关性。刘旺^[37]研究了小钝边、无间隙管道全位置 STT 根焊缝成形工艺,得到了不同位置工艺参数对焊缝背面余高和宽度成形的影响。不同峰值电流下焊缝背面及横截面成形如图 4 所示。

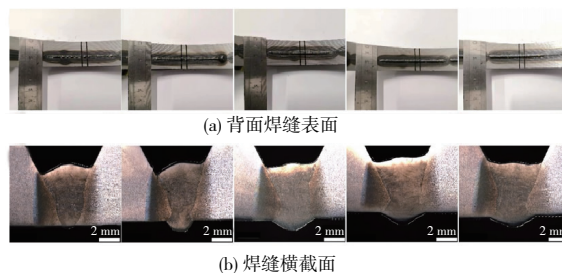


图 4 不同峰值电流下焊缝背面成形示意图

脉冲 TIG 焊通过在高、低电流间周期性切换,这显著减少了热输入与焊接变形,从而精确控制熔池形态并提升了焊接稳定性。该工艺尤其适用于薄壁材料及高精度焊接场合。张雪婷^[38]通过热丝脉冲 TIG 焊在 X65 管道内壁堆焊 Incoloy825 镍基合金的方法,消除了焊接过程中存在的一些成形缺陷,为堆焊工艺参数的确定提供了指导性意见。同时进行了微观组织性能分析和一些力学性能分析,主要包括无损检测、弯曲、硬度、点蚀和电化学腐蚀实验,结果均符合要求。林臻熙等^[39]利用脉冲 TIG 自动焊工艺对 A312 TP316L 不锈钢管道进行了全位置焊接,焊后对接头进行了显微组织和力学性能研究。试验结果表明:熔敷金属成分满足标准要求;未发现焊缝未熔合、未焊透、裂纹等缺陷,成形良好,未发现显微裂纹及异常组织;焊接接头的室温拉伸性能和弯曲性能均满足标准要求。除上述波形控制方法外,陈树君等^[40]

提出采用短路过渡焊接形式,通过自适应调节短路能量与燃弧能量的配比,设计了基于连续击穿法的 CO_2 气体保护单面焊双面成形电源;该电源保证了在超过普通短路过渡负载线的更低电压、更大电流条件下电弧仍能稳定燃烧,有效改善了熔池形状和受力状态,并通过实时反馈调节进一步强化电弧控制。与此同时,为满足小熔池条件下对高能量输入的需求,又研制了专用的电弧能量调节器,利用 IGBT 的高速开关,在短路能量与燃弧能量之间实现自适应分配,保证在更低电压、更大电流环境中稳定熔深,从而实现长输管线全位置立向下自动根焊工艺的高效率与高质量。

2) 基于复合热源的根部熔透优化

近年来,随着对厚壁管道全位置焊接根部熔透质量要求的不断提升,单一热源在满足效率与成形一致性方面已逐渐显露瓶颈。因此,研究者们开始探索将高能量密度的激光或等离子束与传统电弧焊结合的复合热源技术,以实现更深、更均匀的根部熔透和优异的双面成形。此类复合热源不仅能够快速聚焦热输入、抑制熔池失稳,还可通过两种热源的协同作用,提高整体焊接速度与工艺鲁棒性。

张建军^[41]在典型空间位置焊接试验的基础上,开展了 316L 不锈钢管道全位置窄间隙激光焊接试验,获得的焊接接头双面成形良好,未发现明显缺陷。获得的管道全位置焊缝表面成形均匀,无明显缺陷,各项力学性能均符合标准要求;激光电弧复合焊接则结合了激光的高能量密度和电弧焊接的良好填充性能,通过两种热源的协同作用,实现了焊接效率和质量的双重提升。Kim 等^[42]对等离子弧倾斜位置轨道焊接背面熔池成形进行了研究,认为仰焊位置焊缝背面熔池受重力作用下沉,且随着保护气体流速的增加背面熔池倾向于凸起。刘黎明等^[43]进行了高强钢激光电弧复合仰焊成形的研究。结果表明,在电流为 180~220A 的范围内,能够实现仰焊焊缝正反面良好成形,且焊接接头表现出优异的抗拉强度。雷正龙等^[44]针对 X70 钢管道全位置激光—熔化极气体保护电弧复合根焊焊接过程中,管道焊接 4 点位到 6 点位焊缝背面易出现的缺陷开展了试验研究。通过改变参数能量输入方法,从 3 点位到 6 点位逐渐降低激光—电弧复合焊接功率并向上倾斜焊枪角度使激光和焊缝切线方向成 80° 时,可利用保护气吹力和电弧力“托住”熔池,改善焊缝成形。图 5 所示为不同激光功率下 6 点位复合焊接焊缝背面内

凹变化规律($I=130\text{ A}$, $v=1.2\text{ m/min}$)。

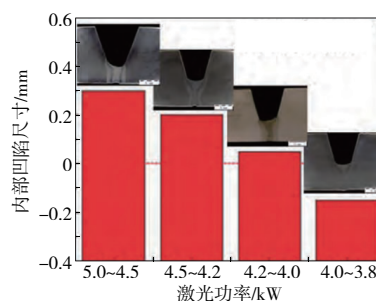


图 5 不同激光功率下内凹变化规律

2.2 根部背凹与烧穿缺陷及控制策略

根部背凹和烧穿缺陷主要发生在焊接 3 点位到 6 点位位置,如图 6 所示。为此,可采用被动与主动两类技术手段来抑制缺陷。被动支撑方面可在管道根部下方放置衬垫装置。主动干预方面,通过外部磁场在电弧或熔池中产生与重力方向相反的电磁力,可实现电弧旋转或偏转以细化熔池组织,或直接在熔池体内形成向上电磁支撑力,从而优化熔池受力状态,抑制背凹及穿透性缺陷。许多学者会用这两种方法在平板试样上进行实验,通过改变平板的倾斜角度来模拟管道焊接的不同位置。

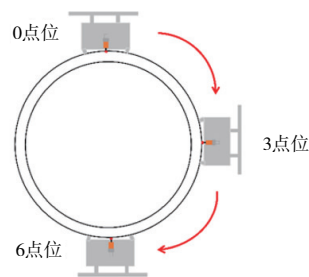


图 6 焊接方向示意图

1) 基于物理支撑的平衡优化

管道焊接衬垫装置作为一种被动支撑与热管理手段,可显著提升全位置焊接的熔透和成形质量:在管道根部下方放置衬垫装置如图 7 所示,不仅可以为熔池提供物理支撑,防止根部下垂或背凹,还可以减少烧穿风险并促进熔深均匀,进而优化全位置焊接过程^[45]。

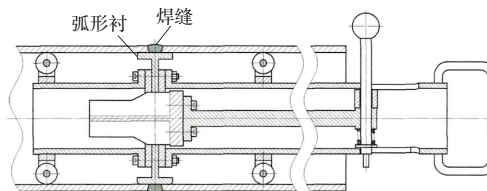


图 7 衬垫装置在管道内封堵焊缝纵向示意图

Fostervoll 等^[46]研究了带铜衬垫的 TIG 焊焊接方法在高压(1.54 MPa)水下管道焊接中提升根部焊接稳定性,结果显示该方法能够有效增强熔池支撑,且不会对焊缝微结构或力学性能产生负面影响,有效提升了全位置焊接工艺的鲁棒性。Han 等^[47]引入激光热源,提出了一种新的仰焊技术,即采用铜衬垫的激光-GMAW 复合焊。与单电弧焊相比,该复合焊不仅可以提高工艺稳健性,而且可以消除背部凹陷缺陷,形成稳定的背部余高,改善焊缝形貌质量,如图 8 所示。卢佳欣^[48]

对添加铜衬垫的 DN50 管道做了焊接工艺研究,与不添加铜衬垫的管道相比较,添加铜衬垫的管道内壁更光滑平整;热影响区、焊缝晶粒更细小均匀。罗雨等^[49]以耐腐蚀管 L450Q-RCB 为试验对象,开展基于铜衬垫背部成形的摆动电弧打底工艺研究,采用单因素分析法,研究了摆动电弧参数、送丝速度、焊接速度对焊缝成形质量的影响规律。试验结果表明,采用铜衬垫背部强制成形的摆动电弧打底方法焊缝成形一致性好,焊缝背部成形连续且平整,无未熔合、未焊透缺陷。

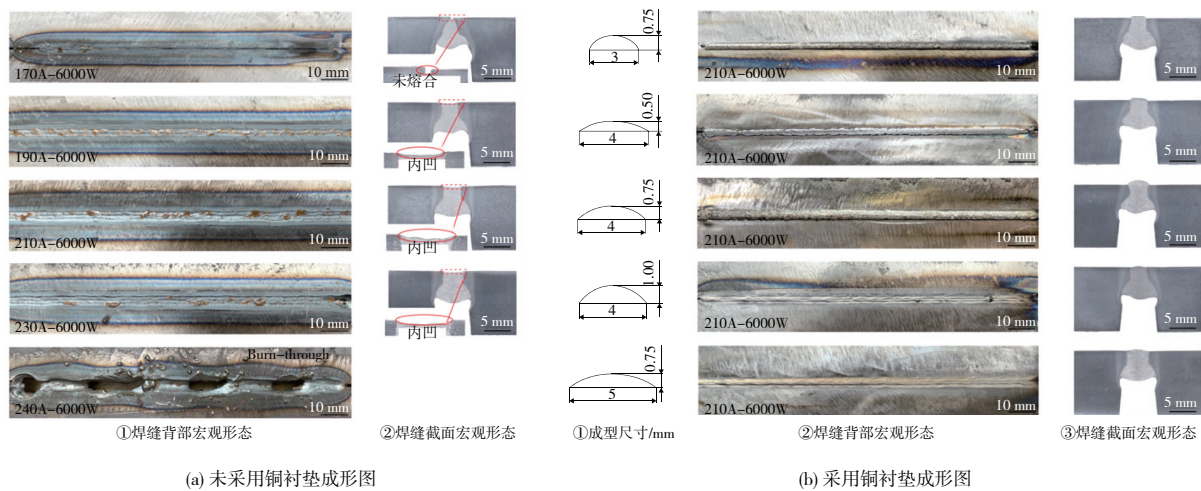


图 8 不同激光功率焊缝背面与横截面成形示意图

2) 基于电磁干预的熔池力平衡优化

焊接电弧是一种高温等离子体,外部磁场对其行为有显著影响。通过施加外部磁场,可以在电弧或熔池中产生与重力方向相反的电磁力以改变熔池受力状态,通过产生向上的电磁力抵消重力,从而改善熔池的整体受力和流动状态,进而改善焊缝质量。

松田等^[50]针对平焊和仰焊姿势,通过垂直磁场产生向上电磁力,有效抑制了重力导致的熔池下坠,改善了熔池背部穿透形貌和背部下凹缺陷,如图 9 所示。Bachmann 等^[51]研究了电磁支撑对奥氏体不锈钢激光焊接过程中熔池的影响。他们的研究表明,这种电磁支撑可以防止熔池下垂和重力引起的剥离。岳建峰等^[52]提出在向下立焊 MAG 焊时向熔池施加高频交变磁场。通过向线圈 0、线圈 1 或线圈 2 施加高频交变电流,产生的磁场作用于熔池,其工作原理如图 10 所示。该磁场产生的涡流效应产生抵消熔融金属重力分量的涡流力,克服重力对熔池形成的不利影响。Shoichi 等^[53]提出了一种施加外部电磁场产生与重力方向相反的电磁力来控制熔池流动的方法,

从而抑制熔融金属向下流动。这种方法不仅增强了熔池的稳定性,而且提高了焊缝的质量和一致性。

B_x	电弧及熔池图像	背部熔池图像	焊缝截面图像
0.0 mT			
3.5 mT			
7.5 mT			

图 9 不同磁通密度对仰焊位置电弧、熔池及剖面影响

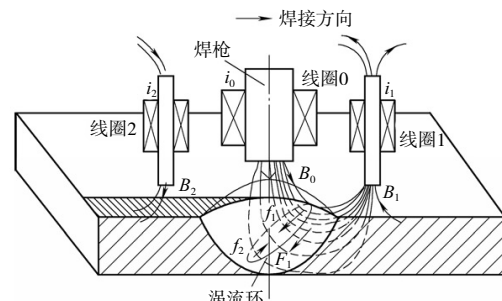


图 10 外加高频交变电磁场的结构原理示意图

在当前电磁辅助焊接研究中,绝大多数实验仍以平板材料为对象,这是因为在平板上布置磁场更为方便,焊接姿态可控、测量手段成熟,研究者能够精准调控磁场强度、频率和方向,并直接观察电弧形态与熔池流动。相比之下,管道焊接不仅涉及全位置多姿态和狭窄空间环境,还需要复杂的磁极布局与环形线圈设计,同时受制于设备成本高昂以及工业应用对焊接稳定性和效率的严格要求,这使得电磁辅助技术在管道中的推广受到限制。因此,相关研究往往先在平板上验证作用机制,再逐步扩展至管道结构^[54]。

2.3 焊道侧壁未熔合及成形控制策略

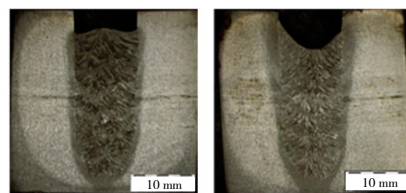
侧壁未熔合是全位置焊接中常见的质量瓶颈,往往因熔池流动失衡或局部热输入不足所致。针对这一问题,研究者主要采取参数优化与混合热源相结合的策略:一方面,通过调整焊枪倾角、送丝速度等工艺参数,精细控制熔池形态,使金属液在重力与电弧力共同作用下均匀覆盖坡口侧壁;另一方面,通过引入旋转、摆动电弧技术,可增强侧壁的加热与熔合效果,显著减少未熔合缺陷。

1) 基于改变工艺参数的侧壁未熔合优化

王瑶伟^[55]对全位置窄间隙 GMAW 焊接工艺进行了研究,对不同焊接位置焊缝成型的主要参数如母材熔深、侧壁熔深和侧壁表观接触角的形成机制进行了分析,给出了焊缝成形的控制措施。措施分为两种:通过改变焊枪角度来控制熔池流动;通过控制焊接热输入保证小的熔池体积和快的凝固速度。利用优化后的焊接参数对多层焊接中容易出现缺陷的 180°位置与 90°位置进行了多层焊接,焊后焊缝横截面宏观照片如图 11 所示,无宏观缺陷。Lassaline 等^[56]结合窄间隙双丝焊接技术,利用弯曲导电嘴,使其各指向窄间隙坡口一侧,双丝为共熔池状态。利用波形控制器使两丝产生交替脉冲电流,从而削弱了两电弧之间的干扰,抑制了侧壁熔合不良的缺陷,并对高强度钢进行了多层焊接。结果显示焊接接头力学性能优良。李启伟^[57]针对管道 5G 位置侧壁未熔合问题,设计了连续变化焊枪后倾角的管道焊接工艺。实验结果表明,相对于固定焊枪后倾角,焊缝成形规整美观,焊缝与母材熔合良好。

2) 基于电弧运动控制的侧壁未熔合优化

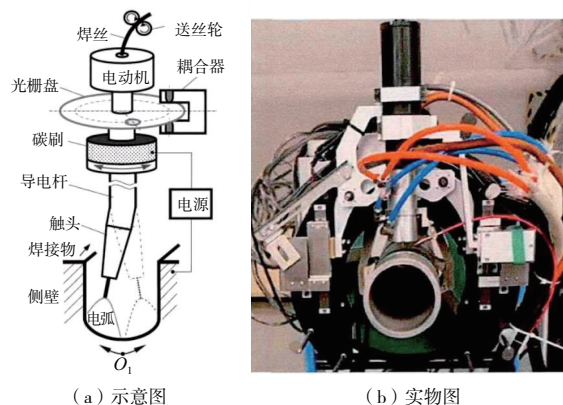
旋转电弧是一种高效焊接技术,其核心在于通过外加磁场或机械装置实现电弧的旋转,焊接装置如图 12 所示^[58]。旋转电弧焊接时,由于电



(a) 180° 位置 (b) 90° 位置

图 11 多层焊缝横截面宏观照片

弧的旋转,热量分布变得更加均匀。这种均匀的热量分布有利于焊接侧壁的熔合,提高了管道全位置焊接质量。



(a) 示意图

(b) 实物图

图 12 旋转电弧焊接装置

徐望辉^[59]将摆动电弧技术应用于窄间隙 MAG 焊接中,开发适用于空间多位置的摆动电弧窄间隙焊接工艺,实现厚壁结构的高效化空间多位置焊接。他们还分析了平焊、立向下焊、仰焊及立向上焊熔池的特征及形成过程,并根据不同位置焊缝的成形特点,建立了焊接参数与焊缝成形尺寸的统计数学模型,优化了多层焊参数。优化参数下的多层焊焊缝如图 13 所示,侧壁熔深较大,多层焊未见层间未熔合和侧壁未熔合缺陷。路浩^[60]分析了立焊位置熔池所受重力、电弧力、表面张力对焊缝成形的影响。他们优化了立焊位置焊接工艺参数,并使用优化后的工艺参数进行了多层焊实验。实验发现:旋转电弧有利于熔滴过渡;适当增加旋转频率有利于增加侧壁熔深,改善侧壁未熔合缺陷。

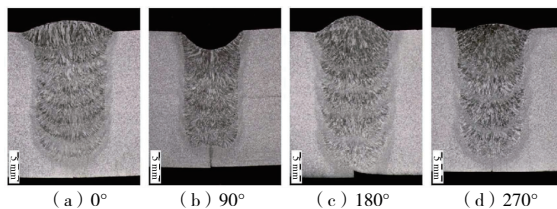


图 13 优化参数下的不同焊接角度多层焊焊缝

摆动电弧在焊接中通过有规律地摆动焊枪,使热输入在焊缝两侧均匀分布,从而显著改善侧壁的熔合效果^[61]。焊接平台及焊炬轨迹如图 14、图 15 所示。电弧摆动时,在焊缝侧壁停留的时间增加,局部热量集中,能够促使母材和填充金属充分熔化,同时增强熔池金属的流动性,破坏界面氧化层,促进冶金结合。

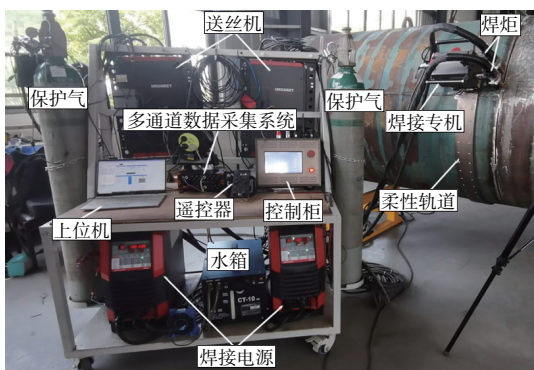


图 14 管道全位置摆动焊接平台实物图

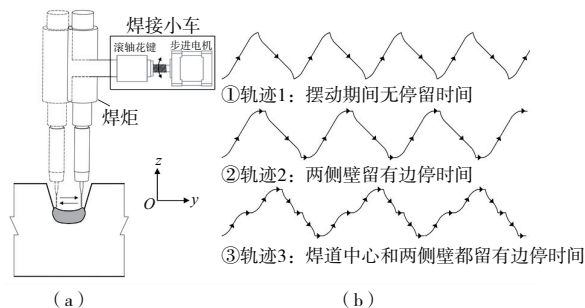


图 15 焊炬轨迹示意图

Bao 等^[62]采用不同摆动宽度参数,对比分析了电弧稳定性、熔滴过渡模式及焊缝成形特征。结果表明:适中的摆动宽度能将电弧从喇叭状收束并驱向坡口侧壁,实现单脉冲单滴过渡,显著提高了侧壁熔深并抑制未熔合和咬边;而过大或过小的摆动宽度则分别导致跳弧、熔池形状失稳或侧壁未熔合;进一步结合 X80 钢坡口尺寸与工艺参数,建议最佳摆动宽度为 2.6 mm。该方法揭示了摆动宽度对窄间隙仰焊熔池流动与凝固机制的影响,同时消除了焊缝侧壁未熔合、咬边等缺陷。Wang 等^[63]开发了一种新型摆动电弧系统,并对低碳钢板进行不同摆动参数的横焊实验。实验结果表明,随着电弧摆动频率和侧壁停留时间的增加,焊缝表面曲率和坡口侧壁熔深增大,焊缝截面厚度减小,焊道底部形状由单峰变为双峰,如图 16 所示。因此,这种摆动电弧工艺明显改善了窄间隙焊缝侧壁熔合质量。

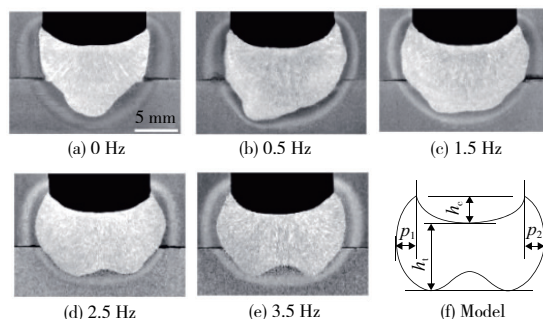


图 16 电弧摆动频率对焊缝成形的影响

3 结语

本文探讨了管道全位置焊接技术的发展现状、关键工艺及质量控制方法,重点分析了不同焊接方法的适用性及其在降低缺陷方面的作用。针对根部未焊透缺陷,可通过 CMT/STT 或脉冲 TIG 等波形参数优化,以及激光与电弧的复合热源协同作用,提高熔深;对于根部背凹与烧穿缺陷,则可引入铜衬垫进行被动支撑或施加外部磁场实现电磁干预,以抑制缺陷;对于侧壁未熔合问题,可通过优化工艺,或采用旋转电弧与摆动电弧控制,以增强侧壁熔合。

全位置焊接过程中,熔池受重力、电弧力等多重因素的影响,其形态和熔合状况随焊接位置变化而发生显著变化,这需要更精确的监控与调控手段。为此,研究者们不断优化焊接工艺参数,探索新的焊接技术和控制方法,未来的研究可从以下几个方面进一步深化与发展。

1) 焊接过程的实时动态调控。尽管现有系统可实时监测熔池,但根据熔池变化动态调整焊接参数仍是难题,未来可结合先进传感器和反馈控制,实现智能自主焊接。

2) 构建针对不同环境和管道接头形式的优化参数专家系统。可开发适用于各种管道工况的全位置焊接专家系统,通过人工智能自动分析管道特性并优化工艺参数,提高焊接效率和适应性。

3) 开发智能焊接机器人与自动化系统。开发智能焊接机器人和自动化系统,可根据实时监控数据精确调整焊接参数,提高全位置焊接的质量与效率。

综上所述,随着传感技术、图像处理技术、深度学习等前沿技术的不断发展,管道全位置焊接将朝着更加智能化、自动化的方向发展。

参考文献:

[1] 李英. 智能化技术在油气长输管道与城市输配网络

- 中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(24):154-156.
- [2] Bolwig S, Bazbauers G, Klitkou A, et al. Review of modelling energy transitions pathways with application to energy system flexibility[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101:440-452.
- [3] AWS debuts 2020 editions of the 01.1 and A3.0 Standards [J]. Welding Journal, 2020, 99(3): 8.
- [4] 方利强. 长输管道焊接技术进展及发展方向[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(14):163-164.
- [5] 岳建锋, 李亮玉, 姜旭东, 等. 全位置 MAG 焊缝成形控制技术 & 研究进展[J]. 中国机械工程, 2012, 23(10):1256-1259.
- [6] 李军兆, 孙清洁, 张清华, 等. 空间多位置摆动激光填丝焊接熔池动态行为及焊缝成形[J]. 焊接学报, 2021, 42(10):35-39, 61.
- [7] 刘文吉, 李亮玉, 岳建锋, 等. 重力对全位置 TIG 焊熔池温度场与流场影响的有限元分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(3):76-79, 84, 5.
- [8] 王定洲, 陈刚, 张宇, 等. 空间焊接位置对熔滴过渡的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(5):633-636.
- [9] 王超. 小坡口手工电弧焊工艺在深水海底管道中的应用研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(增刊1):65-68.
- [10] 李永朝. 自动焊接技术在石油化工管道施工中的应用与发展前景[J]. 工程建设与设计, 2019(18):123-124.
- [11] 苏宝, 李奇伦, 连兵. 探讨石油、天然气管道焊接工艺现状及展望[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(6):109-111.
- [12] 章雅林, 李再金, 高超, 等. P92 钢管道安装焊接接头的窄间隙全位置自动焊[J]. 金属加工(热加工), 2023(4):21-24.
- [13] 梁兴华. 基于电弧声信号的管道 P-GMAW 焊缝熔透状态识别研究[D]. 天津:天津工业大学, 2022.
- [14] 刘文川. X80 管道全位置激光/电弧复合焊接工艺研究[D]. 西安:西安石油大学, 2013.
- [15] Hori K, Watanabe H, Myoga T, et al. Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire - research on pulse heated hot wire TIG welding processes [J]. Welding International, 2004, 18(6):456-468.
- [16] 王洪铎, 石成刚, 孙兴钢, 等. 现场用连续管全位置自动 TIG 焊工艺及接头组织性能研究[J]. 焊接, 2019(6):44-48.
- [17] 徐龙海, 姚寿铭, 闫冬冬. 全位置管道自动 TIG 焊工艺[J]. 焊接技术, 2012, 41(5):31-35.
- [18] 朱旻, 罗晓军, 尹燕, 等. TP321 钢管的窄间隙热丝 TIG 焊[J]. 焊接学报, 2016, 37(9):79-82.
- [19] 刘坤. 管道全位置熔化极氩弧自动焊施工技术探索[J]. 焊接技术, 2020, 49(5):57-58.
- [20] Mahdjour A, El - azzizi A, Meliani M H, et al. Optimization parameters for circumferentially welded pipes [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104:448-461.
- [21] 何小东, 马本特, 孙頔, 等. X80 厚壁管道自动环焊接头性能研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(23):40-44.
- [22] 孙清洁, 李军兆, 刘一搏. 大型厚壁构件窄间隙激光焊接研究现状[J]. 电焊机, 2020, 50(7):9-17, 147.
- [23] 刘帛炎. 钛合金管道全位置等离子弧焊焊缝成形及组织性能研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2019.
- [24] 邓平, 皇甫乐森, 马生肿, 等. 20 钢管-Q345C 钢管窄间隙激光焊接头组织与性能[J]. 焊接技术, 2019, 48(2):8-10, 44.
- [25] Cheng H, Kang L, Pang J C, et al. Effect of the welding position on weld quality when laser welding Inconel 617 Ni-based superalloy [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139:106962.
- [26] 尹立辉. 焊接缺陷的产生原因及防止对策[J]. 金属加工(热加工), 2008(16):62-65.
- [27] 孟家其, 张惠芳, 刘强. 管道焊接缺陷分析[J]. 焊接技术, 2001, 30(6):57-58.
- [28] 安金平, 陈兵辉, 曹战斌. 长输油气管道常见焊接缺陷及预防[J]. 焊管, 2007, 30(2):76-79.
- [29] Zhao M Y, Zou Y Y, Chen D. Research on correlation between weld concavity and weld process parameters in tailored blank laser welding [J]. Advanced Materials Research, 2010, 154/155:553-557.
- [30] 华罗懿, 陆理平, 帅义. 环焊缝根部内凹缺陷对管道内压承载性能的影响[J]. 石油管材与仪器, 2023, 9(1):76-82, 87.
- [31] He Y, Tang X H, Zhu C X, et al. Study on insufficient fusion of NG - GMAW for 5083 Al alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9/10/11/12):4303-4313.
- [32] Nandan G, Kumar G, Arora K S, et al. MIG and CMT brazing of aluminum alloys and steel: a review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56:481-488.
- [33] 邹勇, 梁亚军, 薛龙, 等. 焊接机器人管道全自动打底焊研究[J]. 电焊机, 2008, 38(8):48-50.
- [34] Chen Z D, Wang Z J, Wang F R, et al. Feasibility study on sensing and prediction of backside weld geometry in cold metal transfer welding of X65 pipeline in the vertical - up position [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85:1173-1186.
- [35] Jeong J W, Kim I S, Kim W S, et al. A study on optimized technology for an automatic root-pass welding of girth weldment in pipeline [J]. AIP Conference Proceedings, 2011, 1315(1):813-818.

- [36] Kim J S, Lee J P, Park M H, et al. A study on prediction of the optimal process parameters for GMA root - pass welding in pipeline [J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 723-731.
- [37] 刘旺. X65 管道全位置 STT 自动根焊工艺研究及疲劳性能优化[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [38] 张雪婷. X65 管道内壁热丝脉冲 TIG 堆焊 Incoloy 825 合金工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [39] 林臻熙, 王浩政, 王征, 等. 核电站小径管脉冲 TIG 全位置自动焊工艺及接头性能研究[J]. 金属加工(热加工), 2020(9): 22-25.
- [40] 陈树君, 卢振洋, 任福深, 等. 管道全位置自动焊机的专用电源及焊接工艺[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 13-16.
- [41] 张建军. 不锈钢管道全位置窄间隙激光焊接技术研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2023.
- [42] Kim H W, Cho S M. A study on back bead formation in inclined-up position of plasma an orbital welding[J]. Journal of the Korean Welding and Joining Society, 2009, 27(1): 71-78.
- [43] 刘黎明, 陈亮, 宋刚. 高强钢低功率脉冲激光诱导熔化极活性气体保护电弧仰焊成形[J]. 中国机械工程, 2020, 31(17): 2137-2141.
- [44] 雷正龙, 杨雨禾, 李福泉, 等. X70 钢管道全位置激光-MAG 电弧复合根焊焊缝成形试验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 43-49.
- [45] 孟凡琦, 闫世平, 孟庆武, 等. 管道焊接用的十字滑顶式衬垫装置设计[J]. 炼油与化工, 2019, 30(6): 45-48.
- [46] Fostervoll H, Akselsen O M, Berge J O. Increased robustness in hyperbaric welding of subsea pipelines by introducing copper backing [C]// 2012 9th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada NewYork: ASME, 2013: 257-266.
- [47] Han R H, Fan X Y, Wang J F, et al. Enhancing all-position weldability and weld quality via an innovative laser-GMAW hybrid welding technique with copper liner[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 124: 697-707.
- [48] 卢佳欣. 添加铜衬垫的小口径管道焊接工艺仿真与试验研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [49] 罗雨, 苏佳毅, 祁琪, 等. 耐微生物腐蚀管道全位置焊接铜衬垫打底工艺[J]. 焊接, 2025(2): 8-16.
- [50] 松田 昇, 真鍋 幸, 玉城 光, et al. 熔融池磁氣制御溶接法の適用拡大に関する研究: 上向, 下向姿勢での裏波溶接の磁氣制御[J]. 溶接学会論文集, 2012, 30(2): 116-124.
- [51] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, et al. Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool support system for high power laser beam welding of austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 578-591.
- [52] 岳建锋, 李亮玉, 刘文吉, 等. 基于外加高频交变磁场下向 MAG 焊熔池成形控制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 65-70.
- [53] 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.
- [54] Liu W J, Li Q, Yue J F, et al. Research status and progress of all-position narrow-gap GMAW for pipelines[J]. Applied Sciences, 2025, 15(5): 2270.
- [55] 王瑶伟. 窄间隙双丝 GMAW 焊枪优化及全位置焊接工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [56] Lassaline E, Zajackowski B, North T. Narrow groove twin-wire GMAW of high-strength steel [J]. Weld J, 1989, 68(9): 53-58.
- [57] 李启伟. 带枪角插补随动的全位置焊接机器人及焊接工艺参数研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2022.
- [58] Guo N, Wang M R, Guo W, et al. Effect of rotating arc process on molten pool control in horizontal welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(5): 385-391.
- [59] 徐望辉. 空间多位置摆动电弧窄间隙 MAG 焊熔滴过渡与焊缝成形研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [60] 路浩. 管道全位置旋转电弧窄坡口焊接工艺研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2020.
- [61] 滕彬, 范成磊, 徐锴, 等. 厚板窄间隙焊接技术研究现状与应用进展[J]. 焊接学报, 2024, 45(1): 116-128, 136.
- [62] Bao Y, Xue R L, Zhou J P, et al. Effect of increasing oscillation width on the arc characteristics and droplet transfer behavior of X80 steel in the overhead welding position of narrow gap P-GMAW [J]. Metals, 2023, 13(7): 1314.
- [63] Wang J Y, Zhu J, Fu P, et al. A swing arc system for narrow gap GMA welding[J]. ISIJ International, 2012, 52(1): 110-114.

收稿日期: 2025-09-04