

长输油气管道焊接机器人的技术现状与发展趋势

尹铁^{1,2}, 赵弘^{1*}, 张倩², 吴婷婷¹, 周伦^{1,2}, 王新升²

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2 中国石油天然气管道科学研究院有限公司, 廊坊 065000

* 通信作者, hzhao_cn@163.com

收稿日期: 2020-04-22

中国石油集团工程股份有限公司科学研究与技术开发项目“第三代管道自动焊关键技术研究”(2017ZYGC-01-01)资助

摘要 随着清洁能源需求的快速增长, 管道建设用钢管的钢级、管径、壁厚和输送压力逐步提高, 管道自动焊接技术以其环焊缝强韧性匹配高, 焊接效率高、劳动强度低等技术优点, 在管道建设中日渐成为主流技术。本文阐述了以管道全位置自动焊技术为载体的长输油气管道焊接机器人技术的发展历程及其在我国工程应用情况, 介绍了管道焊接机器人的工程应用特点和技术现状, 列举了多焊炬管道焊接机器人、激光—电弧复合管道焊接机器人、双丝管道焊接机器人、搅拌摩擦焊机器人几种先进管道焊接机器人的技术特点和工程应用情况。通过对管道焊接机器人发展存在的问题进行梳理和总结, 指出焊接运动轨迹的规划、焊缝跟踪、焊接质量在线监测、特殊工况适应性以及配套焊接电源等是目前油气工程应用存在的技术瓶颈。鉴于对油气管道焊接质量一致性和稳定性提出的高要求, 笔者对今后管道焊接机器人智能化研发道路的发展趋势进行了展望, 认为3个方向将是未来管道焊接机器人智能化发展趋势: (1) 焊接路径的自主规划和自适应焊缝跟踪。对坡口和焊缝信息进行提取、识别和分析, 获取理想的路径点和焊枪姿态, 并且能够根据工况实时控制焊枪位置, 实现管道环焊缝的柔性焊接规划和自适应焊缝跟踪; (2) 远程故障诊断。依托大量管道工程应用积累, 建立完备的焊接专家系统, 对焊接机器人实施远程监控及故障实时诊断, 建立网络化的实时监控系统和故障处理系统, 实现焊接质量在线监控; (3) 人机共融的焊接方式。通过系统深度学习将熟练焊工的经验转化为焊接机器人的训练样本, 指导非熟练焊接人员开展焊接培训, 人机关系由主仆变为伙伴, 共同完成管道焊接作业。

关键词 管道焊接机器人; 焊接路径; 焊缝跟踪; 焊接质量在线监测; 人机共融

Current situation and development of welding robots for long distance oil and gas pipelines

YIN Tie^{1,2}, ZHAO Hong¹, ZHANG Qian², WU Tingting¹, ZHOU Lun^{1,2}, WANG Xinsheng²

1 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 China Petroleum and Natural Gas Pipeline Research Institute Co., Ltd., Langfang 065000, China

Abstract With the rapid growth of demand for clean energy, the steel grade, diameter, wall thickness and transportation pressure of steel pipes for pipeline construction have gradually increased in recent years. The technology of automatic pipeline welding has gradually become the mainstream technology in pipeline construction due to its high matching strength

引用格式: 尹铁, 赵弘, 张倩, 吴婷婷, 周伦, 王新升. 长输油气管道焊接机器人的技术现状与发展趋势. 石油科学通报, 2021, 01: 145-157

YIN Tie, ZHAO Hong, ZHANG Qian, WU Tingting, ZHOU Lun, WANG Xinsheng. Current situation and development of welding robots for long distance oil and gas pipelines. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 145-157. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.012

and toughness of girth welds, high welding efficiency and low labor intensity. This paper describes the development process and engineering applications in China of welding robot technology for long-distance oil and gas pipelines. This is based on all-position automatic welding of pipelines, as well as the engineering application characteristics and technical status of pipeline welding robots. Several advanced pipeline welding robots are listed, including a multi-torch pipeline welding robot, laser-arc hybrid pipeline welding robot, double-wire pipeline welding robot and friction stir welding robot. By combining and summarizing the problems existing in the development of pipeline welding robots, it is pointed out that the welding trajectory planning, welding seam tracking, online monitoring of welding quality, the adaptability of special working conditions and supporting welding power supply are the technical bottlenecks in the applications in oil and gas engineering at present. The development of intelligent research and development of pipeline welding robots in the future is examined, and it is believed that three directions will be the development trend of intelligent pipeline welding robots in the future: (1) For the autonomous planning of welding path and adaptive seam tracking technology, the groove and weld information of multi-layer and multi-pass welding of pipeline will be extracted, identified and analyzed to obtain the ideal path point and welding torch posture, and the position of the welding torch can be controlled in real-time according to the working conditions. It will realize flexible welding planning and adaptive seam tracking of pipeline girth welds. (2) For remote fault diagnosis of welding, a complete welding expert system will be established relying on the data accumulation of a large number of pipeline engineering applications, and remote monitoring and real-time fault diagnosis of welding robots will be implemented. Networked real-time monitoring and fault processing systems are established for online monitoring of welding quality; (3) For man-machine integration, the experience of skilled welders will be transformed into training samples for welding robots through deep learning to guide welding training of non-skilled welders. Thus, the man-machine relationship will be changed from master-slave to partnership that will complete pipeline welding work together.

Keywords pipeline welding robot; welding path; seam tracking; online monitoring of welding quality; man-machine integration

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.012

0 引言

随着石油天然气、核能等清洁能源需求的快速增长,对能源装备用钢材和焊接工艺均提出了较高的要求。与常用的金属结构件焊接机器人不同,石油化工管道在石油化工装置中作为输送物料的特种装备,由于输送介质具有易燃易爆、高温、高压、腐蚀、深冷等特点,许多工作需要环境条件比较恶劣的野外现场施工作业中完成,因此,在特定的施工工况下作业,管道焊接机器人具有自身的特点。

1 技术发展背景

长输油气管道输送介质压力高、易燃易爆,一旦发生泄漏将形成严重的后果。例如2017年7月2日和2018年6月10日发生在贵州晴隆的两起天然气管道泄漏爆燃事故均是由于管道环焊缝失效引起。因此,环焊缝焊接作为管道现场施工的重要环节,其质量对于保障管道安全运营至关重要。随着钢级、壁厚、输送压力的不断提高,为获得良好的强韧匹配的焊接接头的难度越来越大,手工焊、半自动焊等焊接方式因质量受人影响大、焊接效率低、一次焊接合格率低、焊接缺陷多、工人劳动强度大,已无法满足管道现场焊接的实际需求。性能更为优越、质量更有保证的先

进焊接技术与装备成为现代化、高效化的工程建设之亟需,管道焊接机器人便应运而生。

管道焊接机器人是一种能够在空间状态下按照一定运动姿态高精度地移动焊枪沿着焊缝进行焊接作业,并能实现最佳的焊接参数和焊接运动参数控制的自动化系统。凭借其焊接热输入量小、环焊接头力学性能稳定、自动化程度高、可以最大限度的减少人为因素影响等优势,目前已成为高钢级、大口径管道焊接施工主要焊接方式^[1]。管道焊接机器人的推广应用,可以大幅提高长输管道焊接质量与焊接效率,保障管道运营安全、提高管道使用寿命;同时,可有效提升施工企业的综合施工能力及核心竞争力,引领石油化工和城市管道的焊接技术变革。

2 技术发展历程

焊接机器人在工业生产应用中占总工业机器人45%以上,具有焊接质量稳定、生产效率高、自动化程度高等优点,是目前实现制造业自动化的重要技术手段。如同工业机器人的发展历程,管道焊接机器人也相似地经历了以下3个发展阶段^[2-5]。

第一代“示教一再现实”管道焊接机器人。主要由执行机构(焊接小车和轨道)、焊接控制系统和人机交互系统(控制面板和手持操控盒)组成,这类机器人操

作不需要建立环境模型，只需由工程师操作完成指定的动作或通过控制系统发出指令，由执行机构完成设定的各个动作。示教时可重复执行指令动作，还可修正执行机构误差。第一代机器人不具备对外界信息进行反馈的能力，对环境变化无法适应。在焊接过程中对管道坡口的制备及对接要求很高，当内壁错边量或坡口宽度发生较大变化时，需要人工通过控制系统进行干预。目前，这类管道焊接机器人由于设备本身稳定可靠、耐用，仍然在工程中得到应用，如图 1 所示，上世纪 90 年代由中国石油天然气管道科学研究院自主研发的 PAW2000 型管道焊接机器人。

第二代具有感知功能的管道焊接机器人。这类机器人具备电信号、视觉等传感功能。在焊接过程中，将纠偏与示教相结合，根据激光或电流、电压等传感器获得的反馈信号，通过运动控制系统调整焊枪运动姿态以实现对接缝进行实时跟踪^[6]。如采用电



图 1 PAW2000 型管道焊接机器人

Fig. 1 PAW2000 pipeline welding robot

流、电压等电信号传感器对焊接过程中坡口尺寸发生变化产生的电弧电压和焊接电流实施反馈，通过控制自动调整以保证坡口侧壁的融合。图 2 所示为美国 CRC-EVANS 公司开发 P625 型管道焊接机器人，利用电流电压传感技术在高焊速下完成焊枪水平和垂直方向跟踪的应用^[7]。

第三代是智能型管道焊接机器人。不仅可以集成多种传感器实现对外部复杂环境变化的适应性，而且还能够自主实现规划决策和预定目标的实现，以完成更复杂的焊接任务。如：通过对管端坡口形状、尺寸、对口间隙等关键参数进行采集、整理、判断，自主进行焊接填充策略规划和焊接工艺参数的自动匹配。很显然，这对钢管坡口的制备精度要求可以大幅降低，焊接过程中还可以通过多种传感信号的采集进行焊接质量监控，当机器人发生故障时同时具有自我诊断、自我处理的功能，目前该类管道机器人尚在技术攻关阶段，未见应用报道。

3 技术研发现状

3.1 应用现状

20 世纪 60 年代末，美国 CRC-Evans 公司率先将管道全位置焊接机器人应用于长输油气管道施工^[8-9]。随着计算机自动控制焊接技术的不断进步，德国 VIETZ、英国 NOREAST、法国 SERIMAX^[10] 等公司也相继开展研发和应用，并拥有较为先进的技术水平。截止目前，美国 CRC-Evans 公司作为油气管道焊接机器人技术研发的引领者，已在全球范围内焊接管道里程达 9.6 万 km^[7]。

1992 年，中国石油管道局开始管道焊接机器人自



图 2 美国 CRC-EVANS 公司的 P625 型管道焊接机器人^[7]

Fig. 2 CRC-EVANS P625 pipeline welding robot^[7]

主研发,并于1998年12月在郑州义马煤气管道取得应用。同时,为引进消化国外先进技术,我国自1999年从英国引进NOREAST管道自动焊接机器人,同年11月,应用于港京输气管道^[1]。历经西气东输、中俄东线等石油天然气管道建设的应用,管道焊接机器人在国内工程建设中占比越来越重,如表1,图3所示。目前,自动焊已成为高钢级、大口径管道焊接施工主要焊接方法,正在建设中的中俄东线(中段)天然气工程、唐山LNG天然气工程使用管道焊接机器人进行自动焊作业的比例更是接近100%。

3.2 设备及工艺

随着长输油气管道建设用钢管强度等级提高至X70、X80级别,管径和壁厚的增大,管道施工管线通常采用U型坡口或复合型坡口,管道内焊接机器人打底焊接,外焊接机器人进行热焊、填充和盖面焊接的工艺进行规模性流水作业。

3.2.1 管道内焊接机器人

管道内焊接机器人主要完成管道根焊工序,图4为中国石油天然气管道科学研究院研制的CPP900-IW

系列管道内焊机器人。国内外研制的管道内焊接机器人从外部结构到工作原理、技术性能均基本相同。设备根据管径的不同,沿圆周分布4~8个焊接单元,整个焊接过程采用对称分步的焊接方式,即焊接单元先完成顺时针方向焊接,回到起始位置后再完成逆时针方向焊接。每个焊接单元按照程序预设好的运动轨迹进行焊接,根焊效率高,以 $\Phi 1219$ 管径为例,完成一道根焊只需90秒,而且焊缝成型一致性好。

管道内焊机器人为定管径专用设备,不同管径需要匹配相应尺寸的设备。在适用管径尺寸方面,最大可应用至 $\Phi 1422$ 管径,最小到 $\Phi 610$ 管径。从技术的重复研发和应用成本方面考虑,这无疑将造成经济浪费。今后,突破管径定型、管径物理空间等因素制约,



图4 管道内焊接机器人

Fig. 4 Pipeline internal welding robot

表1 近年主要工程管道焊接机器人使用情况

Table 1 Application of pipeline welding robot in recent years

工程项目	钢级	管径	壁厚	管道里程/km	半自动焊	机器人焊接里程
		/mm	/mm		里程/km	/km
西气东输一线	X70	1016	14.6, 17.5, 21, 26.2	3900	3230	670
西气东输二线	X80	1219	15.3, 18.4, 22, 26.4	4521	3821	665
西气东输三线	X80	1219	15.3, 16.5, 18.4, 22, 26.4	3207	2968	239
中俄原油二线	X65	813	12.5, 14.3	938	300	652
中俄东线(北段)	X80	1422	21.4, 25.7, 30.8	837	0	837

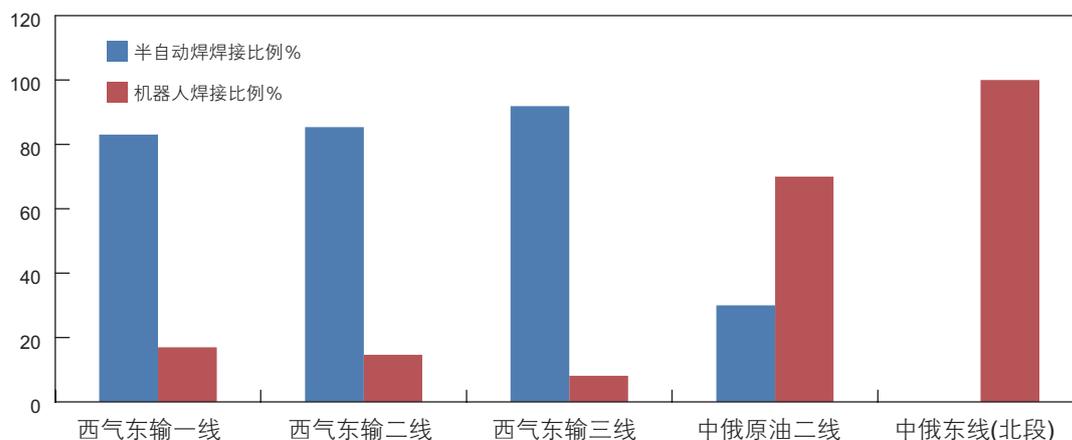


图3 管道机器人焊接工程应用比例

Fig. 3 Pipeline welding robot application ratio in engineering

研制跨管径或适用于中小管径的内焊接机器人将是下一步重点研究方向。

3.2.2 管道外焊接机器人

管道焊接有别于其他金属结构件焊接形式，管道全位置焊接涵盖了平焊、立焊、仰焊全部特征。为减少焊接接头的产生需采用连续施焊，且不能使用点焊固定和防变形工装。受坡口制备精度、组对精度以及局部加热熔化和冷却变形产生的影响，焊缝的轨迹在焊接过程中会发生变化。手工焊或者半自动焊时，有经验的焊工可以根据焊缝的变化和空间位置变化进行焊枪姿态、焊接速度等参数的实时调整。而管道外焊机器人要适应这种变化，必须具备像人一样的感知，然后做出相应改变。空间位置的改变通过安装在机器人本体上的角度传感器进行位置反馈^[12-13]，使用DSP、FPGA或ARM等芯片对焊接机器人的摆动机构进行控制^[14]，控制精度可以达到 $1\ \mu\text{s}$ ，故误差精度 δ 为 $10^{-6}\ \text{s}$ 。此外，机器人根据空间位置的不同可以进行焊接速度、送丝速度、焊接电流等参数的调整，以满足实际焊接需要。

受管道自身施工特点的影响，长输油气管道建设一般采用流水作业施工。焊接作业时将管道外焊接机器人置于防风棚内，为焊接过程提供一个相对密闭的空间，如图5所示。管道外焊接机器人由焊接电源、送丝系统、机器人本体、控制系统组成，其中机器人本体安装有一个焊炬或两个焊炬。焊接操作时将机器人分别置于管道的左右两侧，焊炬从管道的12点或6点位置自上而下或自下而上进行全位置焊接，如图6所示。其中，单焊炬外焊机器人一般采用直流短路过渡(GMAW)，焊炬摆动方式分别为平摆和角摆，其对焊接操作工的要求较低；双焊炬外焊接机器人采用脉

冲直流喷射过渡(PGMW)，摆动方式为平摆，焊接效率是单焊炬机器人的1.5倍，对焊接操作工的要求比单焊炬更为严格。目前工程在用的单/双焊炬机器人均适用管径323~1422 mm，壁厚30.8 mm以内的管道焊接，控制系统大都具备远程无线传输、存储和焊缝跟踪等具有第二代管道焊接机器人特征的功能。美国CRC-EVENS的管道外焊接机器人除此之外，还具有自诊断、卫星定位等功能，技术性更为先进。

3.3 几种先进管道焊接机器人

为了研制更为高效、先进的管道焊接机器人，国内外企业和研究机构多年来从未间断技术探索和工程应用的步伐。

3.3.1 多焊炬管道焊接机器人

多焊炬管道焊接机器人采用全自动焊接控制系统，驱动多个焊炬同时工作。系统采用液压、机械联合定位、旋转驱动方式。其中焊接部分采用弹性转臂结构，可提高管径适应性，焊接操作配备多点焊缝跟踪系统，确保焊缝质量，实现高效焊接，较适用于海洋油气管道铺设，机器人工位固定，钢管流水的焊接作业方式。该类型焊接机器人以八焊炬为例，8套焊接单元同时焊接，每套焊接单元需要4台驱动电机，再有旋转大盘驱动行走及焊缝跟踪控制，整个系统至少需要控制36台电机，因此多焊炬运动控制是关键也是难点，不仅要高度集成运动控制，还需要与焊缝自动跟踪、焊炬自主寻位、以及焊接电源的数据进行高度融合。张锋、苗新刚^[15-16]等人研制的一种基EtherCAT的多焊炬管道全位置自动焊运动控制系统经试验验证能够完成管道焊接。从技术成熟应用角度来讲，还应在多焊炬同步引弧、焊接过程分段时变参数以及焊缝变位置搭



图5 长输管道焊接机器人流水作业

Fig. 5 The mechanized current operation of welding robot for pipeline



图6 机器人焊接过程

Fig. 6 Welding process of robot

接方面进行技术再完善。

法国SERIMAX公司研制成功的四头双炬焊接机器人^[17](见图7),采用左右对称分布布局,每侧2个焊接单元,每个焊接单元上安置2个焊炬,适应于管径36"~48"的近海油气管线铺设。焊接过程中,系统驱动8个焊炬同时工作,每个焊接单元分管圆周的1/4,左侧与右侧的两个焊炬进行向下焊作业。系统采用往复旋转定位和焊缝跟踪技术,并采用焊接专家系统控制焊接过程和复杂的焊接工艺参数,与现有的单/双焊炬焊接机器人相比,可提高焊接效率50%以上。该机器人在英格兰蓝格勒的1200 km海底管线中进行了应用,每道焊口仅需6 min,展现了很高的焊接施工效率。

此外,美国J.Ray Mcdermott公司研制的6焊炬JAWS焊接系统,每个JAWS焊接系统有14个伺服轴,系统通过运动控制、过程控制以及焊接电源的实时协同控制,配备激光焊缝跟踪完成管道全位置自动焊^[18]。

3.3.2 激光—电弧复合焊接机器人

激光—电弧复合焊技术是目前焊接领域研究的热点,与传统焊接工艺相比,激光—电弧复合焊兼具了激光焊焊速快、熔透性好、可以无坡口焊接等优点,同时又弥补了电弧焊熔深不足的问题,具有能量密度高、热输入量小、焊缝深宽比大、变形小等特点^[19-20]。与激光焊相比,激光—电弧复合焊焊缝桥接能力增强,焊接前对管道坡口的制备精度和组对精度要求降低,对错边误差的适应能力增强。焊接冷却速度下降、焊缝硬度降低、焊缝金属韧性得到有效改善^[21]。国内外研究机构开展了一些关于光纤激光—电弧复合焊管道全位置焊接的技术研究,德国焊接教育与培训研究所

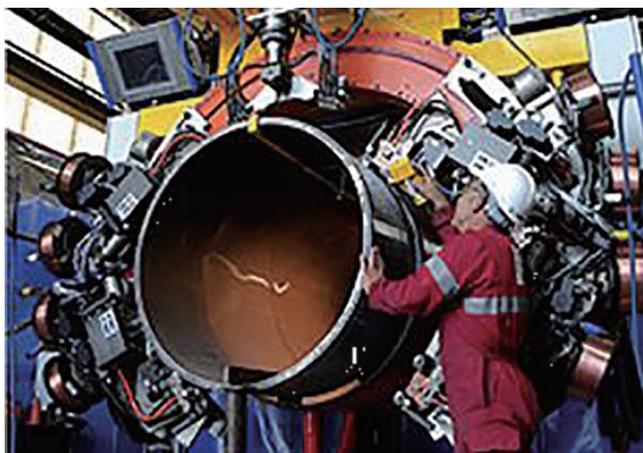


图7 八焊炬自动外焊接机器人^[17]

Fig. 7 Eight torches automatic external welding machine^[17]

国际有限公司哈勒研发部设计具有多自由度的复合焊执行机构,与10 kW光纤固体激光器配合,通过弧形引导机构和焊枪夹持机构调整激光和电弧间的距离和位置,达到最优两者间的最优组合,在管口最对间隙和错变量较大的情况下,可以焊出钝边为8 mm的高质量根焊焊口,其试验结果为管道激光—电弧复合焊接的适应性和全位置工艺参数的选择提供了可借鉴的经验^[22-25]。S.GOOK等^[26]采用激光—电弧复合焊系统焊接X80及X120管线钢,试验表明微硬度值、低温冲击韧性、接头抗拉强度均满足要求。中国石油天然气管道科学研究院研发的激光—电弧复合焊接机器人(见图8),主要由焊接执行机构(焊接小车、导向轨道、复合焊炬)、智能控制系统、激光发生器等组成,智能控制系统根据不同空间位置实时调节激光功率、焊接电流、焊接电压、焊接速度等工艺参数,焊缝跟踪控制系统通过应用激光视觉传感系统与结构光学原理获取焊缝图像信息,经过图像处理、拟合得到焊缝位置信息,实现实时纠正焊炬与焊缝中心偏差,系统协同配合完成管道全位置高效焊接,目前该机器人同样能完成8 mm厚钝边的一次焊接成形。但试验中发现,激光—电弧复合焊根焊过程中仰焊位置容易出现内凹,魏强^[27]等人针对X70管线钢建模并仿真激光—电弧焊全位置复合焊接过程,通过有限元分析得出270°和90°位置敏感度大,容易形成焊漏或者焊塌现象,也进一步印证了该位置容易产生缺陷。

该技术距离工程应用还需要进一步的技术攻关。一方面通过研究离焦量、光—丝间距等焊接工艺参数间的关系,解决焊接接头的内部缺陷和仰焊位置的内凹缺陷;另一方面通过改善焊接小车行走稳定性和激光光束的对中精度,提升现场复杂工况下机器人焊接系统的适用性和稳定性将是实现工业化应用的主要研究工作^[28]。

3.3.3 双丝管道焊接机器人

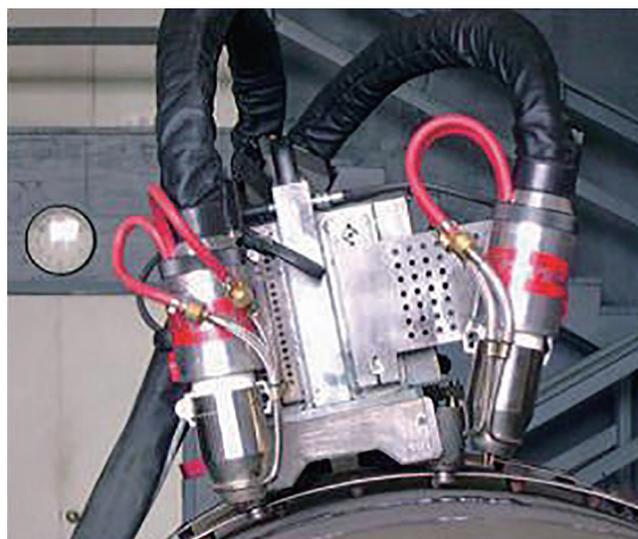
在管道激光复合焊接技术成熟之前,串联双丝焊被认为是最有效提高管道施工焊接效率的焊接方法之一。其中,德国CLOOS公司开发的Tandem串联双丝焊接系统应用较为成熟,系统具有两个独立的电源和送丝机构,在焊接参数调节时可以独立控制,保证了焊接熔池中焊丝与焊丝之间的协调转移,以及焊接过程中电弧稳定和焊接质量,现场应用证实效率明显提高。

双丝管道焊接机器人结合双丝焊接技术,主要由焊接小车、轨道、双丝焊炬、双丝协同控制系统、专家焊接系统等组成,双丝焊将两根焊丝按一定的角度

图 8 激光—电弧复合管道焊接机器人^[28]Fig. 8 Laser-arc hybrid welding robot for pipeline^[28]

前后排列放在一个焊炬里，两根焊丝分别由各自的电源独立供电，相互绝缘，送丝速度及其它所有的参数都彼此独立，两根焊丝的直径、通过送丝协同装置合理的控制电弧，在保证每个电弧稳定燃烧的前提下，将两个电弧的相互干扰降到最低。双丝焊接时，前丝焊接电流较大，有利于形成较大的熔深，后丝电流稍小，两根焊丝互为加热，充分利用电弧的能量，实现较大的熔敷率，使熔池里有充足的熔融金属和母材充分熔合，焊缝成形美观。由于存在前后两个电弧，熔池的几何尺寸加长，熔池中的气体有充足的时间析出，气孔倾向极低。该技术与常见的单丝熔化气体保护焊相比，飞溅小、熔敷率高、焊接速度和质量更高^[29-32]。

美国CRC-Evans、法国SERIMAX、韩国现代重工以及加拿大的RMS公司作为系统集成商已将串列双丝系统集成在管道焊接设备中^[33-35]。其中，美国CRC-Evans研制的P-450 Tandem双焊炬双丝焊(图9)配备奥地利Fronius公司Time-Twin Digital 4000/5000焊接电源，已应用于Stittsville Loop项目^[36]。法国SERIMAX生产的SATURNAX双丝焊接系统，配备米勒电源应用于哥伦比亚Spadeadam项目、中国的荔湾3-1海底管线(管径 $\Phi 762$ mm，壁厚30.2 mm)，焊接效率高，焊缝质量好，返修率低，对于大口径、大壁厚管道而言，焊接优势非常明显^[37-38]。加拿大邮政公司的RMS MOW II型单炬双丝管道全位置焊接机器人集成了Lincoln公司的Tandem MIG Power Wave 455M Robotic系列焊接电源，采用脉冲熔化极气体保护焊方式^[39]。中国石油天然气管道科学研究院于2011年也开发了单焊炬双丝焊焊接机器人，如图10、图11所示^[40]，采用PC+DSP可编程运动控制器的控制模式，进行窄间隙U型坡口，内焊机根焊、双丝焊填充、盖

图 9 P-450 双焊炬双丝管道焊接机器人^[36]Fig. 9 P-450Dual-torches tandem automatic welding robot for pipeline^[36]

面焊接试验，获得了高质量焊口。以上实验和应用证明，双丝管道焊接机器人结合双丝焊接技术已具备规模推广应用条件，应结合野外工况的适用性进行技术完善后，大力推广使用。

3.3.4 搅拌摩擦焊机器人

搅拌摩擦焊(简称FSW)是一种先进的固相连接工艺，目前，利用FSW技术已可以完成管线钢的焊接，与传统的熔化焊相比，接头不会产生熔化焊过程中由于金属凝固产生的裂纹、气孔及合金元素的烧损等焊接缺陷，接头强度高^[41-42]；焊接无需坡口制备、填充材料、保护气体等处理工作，操作环节简单；焊接所需能量仅为传统焊接方法的20%左右，具有更高的能量效率；焊接过程中无弧光辐射、烟尘和飞溅，噪音低，施焊环境友好^[43]。



图 10 单焊炬双丝自动焊接机器人^[40]
Fig. 10 Tandem automatic welding robot for pipeline^[40]



图 11 焊缝成形^[40]
Fig. 11 Weld formation of tandem welding^[40]

美国与日本在管线钢搅拌摩擦焊接方面的研究较领先,但其应用远不如铝镁合金材质。美国 A.Ozekcin 等人用搅拌摩擦焊焊接 X80 钢,焊缝晶粒组织比传统熔焊小很多^[44]。Hakan Aydin 等人研究 X80 钢搅拌摩擦焊,分析了不同焊接热输入对组织的影响^[45]。日本大阪大学 Hidetoshi Fujii 等人研究了不同碳含量的搅拌摩擦焊工艺^[46]。

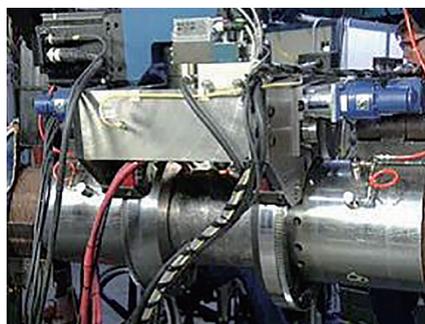
美国 MEGASTIR 公司一直致力于高熔点材料的 FSW 应用开发,该公司研制了配备强制冷却装置的多晶立方氮化硼 PCBN 搅拌头^[47],与美国能源部合作成功开发了用于油气管道焊接的便携式环形搅拌摩擦焊接机器人。设备搅拌头组件环绕在管道圆周上,焊接时采用一个旋转头,FSW 搅拌头在外侧,同时可伸缩的心轴在管道内部对焊缝背面进行支撑,完成焊接。该设备 2003 年应用于 X65、 $\Phi 305$ 、13 mm 壁厚管线钢的焊接^[48],见图 12。美国能源部橡树岭国家实验室 (ORNL) 的管道搅拌摩擦焊接项目致力于复合 FSW 技术和焊接系统开发,用于管道厚壁的多层多道焊,目

前研究成果尚未公开。国内骆宗安^[49]等人研制了油气管道环焊缝搅拌摩擦焊机器人,系统主要由支撑系统、夹持系统、环形运动驱动系统、搅拌头系统与退出孔消除系统组成,利用该设备可以快速、高效地完成 X65 油气管道搅拌摩擦焊接。

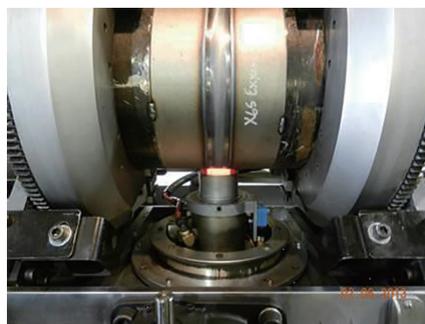
目前,受限于 FSW 管道焊接壁厚和搅拌摩擦焊控制系统可靠性,FSW 技术及装备在油气管道的工业化应用还需要在以下几方面重点研究:适用于管道厚壁焊接的搅拌头设计、集成复杂的测控系统(包括压力测控、温度测控、焊缝跟踪等)的机器人搅拌摩擦焊机头设计、集成多功能控制传感的机器人搅拌摩擦焊控制系统设计,控制搅拌头温度维持稳定的同时,通过焊缝跟踪的设计,提升焊接过程搅拌头轴向压力控制,实现复杂焊接轨迹和姿态的精准控制^[50-51]。

4 存在的问题及挑战

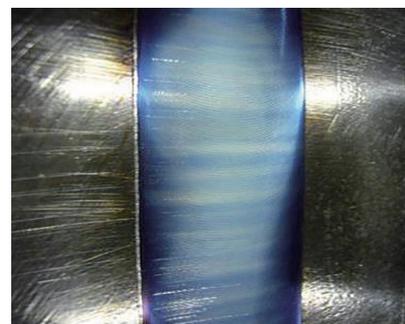
虽然管道焊接技术在高效焊接工艺和焊接机器人



(a) 焊接机器人外形



(b) 焊接过程



(c) 焊缝成形

图 12 搅拌摩擦管道焊接机器人^[48]
Fig. 12 Friction stir welding (FSW) robot for pipeline^[48]

的融合配合下,已经在自动化程度、焊接效率以及焊接质量控制等方面取得了快速发展,但在工艺要求甚高的油气工程实际应用方面仍然存在一定的技术瓶颈,无法完全取代高技能技工,主要表现在以下几个方面。

4.1 焊接运动轨迹的规划

管道现场施工中,管道经常因外界温度变化、运输和装配等因素受到挤压或变形,造成管口对口偏差且偏差都是随机的,针对此种情况,焊工可以根据现场施焊情况,动态调整焊接运动轨迹的规划和选择。而管道焊接机器人只能按照事先设定的焊接程序进行焊接,一旦焊接外界条件发生如错边量超标、对口间隙不一致、热变形、坡口形状变化等偏差出现,将影响机器人精度,且偏差没有稳定的公式。因此,很难找到一种理想的方法来模拟实际被焊管道。

4.2 焊接过程中的焊缝跟踪^[52]

焊工操作仅随着焊缝的走向就能施焊,即使在焊缝上留有预防焊接变形的点焊点固措施都不影响正常焊接。

管道焊接机器人通常采用视觉系统和电弧跟踪系统进行跟踪,从经济性分析,视觉跟踪需要系统额外配置激光器、基于CMOS、基于CCD等传感器,无疑增加了设备体积、重量和固定成本投入。相较之下,采用电弧跟踪仅依据焊接电弧自身的变化情况判断焊炬偏差,结构简单、可达性、实时性好,经济优势明显,在长输油气管道焊接中普遍应用^[53-55]。从技术可靠性分析,由于焊接过程中电弧状态受强烈的弧光、电弧噪声、焊接飞溅、烟尘、大电流引起的磁场变化以及熔滴过渡不稳定造成的焊丝短路等多重因素干扰,机器人要精确地提取和监测焊缝跟踪需要的电信号或视觉信号特征存在一定的困难。特别是在窄间隙大壁厚坡口多层多道焊时,视觉跟踪不仅受上述因素干扰,还往往存在视觉盲区导致跟踪效果欠佳。电弧跟踪除了受电信号采集波动之外,还容易受到坡口制备精度和对接精度的影响,易产生侧壁未熔合缺陷。再者,由于管道实际焊接条件复杂,管件变形、下料误差大(尤其是连头碰死口)等问题都有可能造成焊缝宽度的变化。焊缝的不规则变化更易出现缺陷,这就要求机器人必须能够自适应焊缝宽度的不规则变化,通过判断焊缝的实际宽度,实时调整焊枪的摆动幅度和摆动频率,提高机器人抗干扰能力。为此,需要通过提取焊缝宽度变化信息,建立自适应算法控制模型,计算出焊缝变化后的摆动参数反馈控制系统,驱动焊

枪进行相应的补偿,来提升机器人焊缝宽度自适应能力^[56]。

4.3 焊接质量的在线监测及缺陷预防

目前,管道焊接常见的缺陷如未熔合、气孔、裂纹、焊漏等,更多的是通过力学性能、金相观察试验、射线探伤、超声波等方法进行焊后检验,对焊接的实际内部过程无法真正了解,对出现焊接的缺陷原因难以查找。为此,国内外积极开展机器人在线实时监测、检测及缺陷预防研究。运用电弧传感技术采集电弧的电流、电压、声音、光谱以及温度等信号,通过对这些信号进行综合判断分析达到控制焊接质量的目的。其中,利用光谱信号可以检测熔池振荡、熔滴过渡等^[57-58],电弧信号主要用在熔透控制、焊接缺陷监测等方面^[59-60]。

德国HKS公司研发的TPS(Thermo Profil Scanner)焊缝成形温感扫描系统,可以对焊缝温感轮廓进行测量,随着熔池随电弧不断地移动,通过生成完整的热映图像获取信息,反映焊缝的质量情况。该系统对焊缝热能分布的可视化及参数化描述实现对焊接过程质量精准、有效地控制,具体反映在:对焊缝位置、焊缝宽度、热输入的不对称性、内部气孔及过热裂纹、边缘熔合问题及熔深的波动等缺陷进行信息采集与分析,并且可以实现焊缝过程质量的回放,便于焊后分析。目前该系统主要用于科学研究,在工程现场使用的焊接机器人尚未得到工业应用。

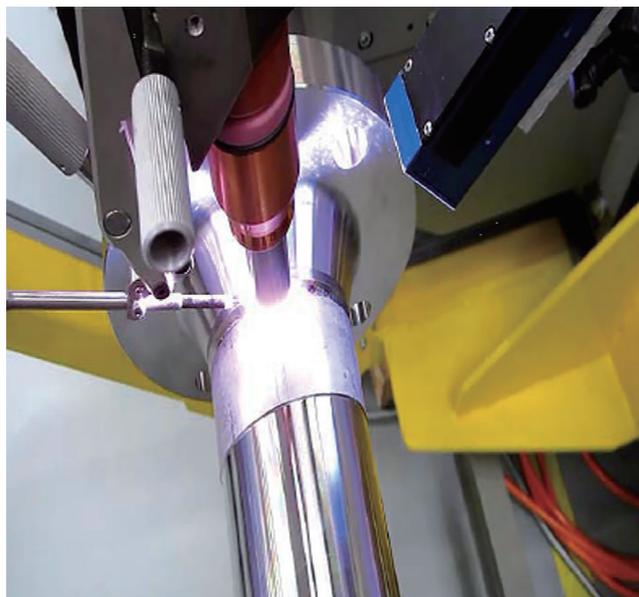


图 13 安装 TPS 系统的管道焊接机器人^[61]

Fig. 13 Welding robot for pipeline by installing TPS system^[61]

4.4 特殊工况下管道焊接机器人适应性

与工厂作业环境清洁、工位固定的机器人焊接方式不同,长输油气管道流动性施工,其作业点随施工进度而不断的发生变化,对保证焊接质量增加了难度。施工工况面临着山区陡坡、水网、沙漠戈壁等地貌迥异的特殊环境,同时又要经历我国从东北地区的严寒到新疆地区的高温考验。作业环境恶劣,对焊接机器人的重复性、稳定性、外界环境温度的适应性均提出了高要求。同时,针对主体管道变壁厚、弯管、连头碰死口、预制管、阀室站场等特殊场合的焊接作业,焊接机器人的适应性明显不足。

4.5 管道焊接机器人的专用焊接电源

管道焊接要求数字控制电源需具有较强的抗干扰性、起弧和收弧的精确控制功能以及故障自检和自处理能力。而目前管道焊接机器人多采用通用型的数字焊接电源,针对管道特点的专用数字控制电源开发较少,显得“大材小用,面广而不精”。管道焊接机器人配套焊接电源,国外进口设备占主导地位,如奥地利FRONIUS公司的TPS*i*系列电源,芬兰KEMPPI公司FASTMIG X系列,这些高端数字电源适应性广,除了金属焊接外还可以进行铝合金、镁合金的焊接。其中,FRONIUS公司的TPS500*i*电源可以提供PMC—多功能脉冲焊工艺,既可以实现长弧长脉冲电弧焊又可以实现短弧长脉冲电弧。国内的四川熊谷公司、山东奥太公司也在加快国产化应用步伐,部分管道焊接专用电源已在工程取得应用。

5 发展趋势

5.1 焊接路径的自主规划和自适应焊缝跟踪

针对多层多道焊的管道环焊缝焊接,采用视觉或触觉传感器对整条坡口和焊缝进行扫描,对管道坡口形状、坡口尺寸、已焊焊缝的特征点以及焊缝位置,包括焊缝长度、宽度和方向等信息进行提取,通过算法运算,识别和分析。管道焊接机器人根据坡口和焊缝的识别分析结果,获取焊接路径点,包括每个点的机器人的位置坐标以及焊枪的姿态,并进行优化,获取更加理想的路径点和焊枪姿态,并以此自主规划机器人的运动路径,实现管道环焊缝的柔性焊接规划。

为最大限度降低管道变形、坡口制备精度以及工

况不确定性等诸多因素影响,自适应焊缝控制技术不仅需要精确的跟踪焊缝轨迹,而且能够根据工况实时的控制焊接过程的变量,实现焊缝高度、宽度的恒定。因此,开发多种自适应PID控制方法、模糊焊接控制,人工神经网络或复合焊接控制等智能焊缝跟踪控制方法,寻求适用于长输油气管道环焊缝焊接条件和坡口类型的智能焊缝跟踪系统成为亟需。

5.2 焊接机器人远程故障诊断

管道焊接机器人在施工作业过程中采用多机协同作业,每一个焊接工作站负责一个1~2个焊层的焊接,一个焊接工作站出现故障,将会直接影响到整体的流水焊接作业。出于安全考虑,管道焊接施工往往处于人口稀少、社会依托差的地区,对焊接机器人的现场故障处理带来了极大的挑战。为此,依托大量工程应用积累、建立的焊接专家系统,对焊接机器人实施远程监控及故障实时诊断,建立起网络化的实时监控系统和故障处理系统是管道焊接机器人发展的一个趋势。

5.3 人工智能、人机共融

目前,管道焊接机器人还得需要熟练的焊工控制机器人完成焊接任务。随着人工智能技术的发展和运用,通过系统学习、深度学习对机器人进行训练,将熟练焊工的经验转化为可以进行训练的样本,使焊接机器人更加智能化,机器人可以指导非熟练焊接人员进行焊接参数的调整、焊接轨迹修正的同时与数字电源进行协作调整电源波形、控制焊接线能量的输入,一定程度上降低熟练焊接人员的培训周期。

人机共融即机人互动、人机互动共同完成管道焊接作业。人机共融将人与机器人由主仆关系变为伙伴关系,开启了与以往工业机器人的人机关系本质不同的新型机器人研究^[62],人机共融是下一代管道焊接机器人的本质特征。

6 结束语

油气管道是国家工业发展的命脉,是实现能源生产和消费革命的重要支撑。今后10—15年,中国油气管道建设仍将处于高峰期,油气管网总里程将超过30万km,预计将基本建成现代油气管网体系^[63-64]。

随着管道自动焊接技术的快速发展,针对不同钢级、不同管径壁厚、不同焊材的多种自动焊接工艺和规范参数也将呈现多样性的应用,这势必对油气管道

焊接质量一致性和稳定性提出越来越高的要求。为此, 研发适用性强的管道焊接机器人, 进一步提高管道焊接质量, 实现焊接自动化生产、减少焊接缺陷为管道焊接机器人智能化研发道路提出了更高的要求。

参考文献

- [1] 闫臣, 王玉雷, 薛振奎. 油气管道自动焊技术的发展及展望[J]. 焊接技术, 2016, 45(5): 83-88. [YAN C, WANG Y L, XUE Z K. Development and prospect of automatic welding technology for oil and gas pipeline[J]. Welding Technology, 2016, 45(5): 83-88.]
- [2] 孙富春, 朱纪洪, 刘国栋, 等译. 机器人学导论——分析、系统及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. [SUN F C, ZHU J H, LIU G D, et al. Introduction to robotics analysis, system, applications [M]. BEIJING: Publishing house of electronics industry, 2004.]
- [3] 唐新华. 焊接机器人技术现状与发展趋势(一)[J]. 电焊机, 2006, 36(3): 6-10. [TANG X H, Situation and development tendency of welding robots(一)[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(3): 6-10.]
- [4] 唐新华. 焊接机器人技术现状与发展趋势(二)[J]. 电焊机, 2006, 36(4): 43-46. [TANG X H, Situation and development tendency of welding robots(二), [J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(4): 43-46.]
- [5] 许燕玲. 基于视觉及电弧传感技术的机器人GTAW三维焊缝实时跟踪控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. [XU Y L. Research on real-time tracking and control technology of three-dimension welding seam during welding robot GTAW process based on vision sensor and arc sensor[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.]
- [6] KANG M G, KIM J H, PARK Y J, et al. Laser vision system for automatic seam tracking of stainless steel pipe welding machine[C]// ICCA 2007—International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul, Korea, 2007: 1046-1051.
- [7] CRC-Evans. P-625 computerized welding machine [EB]. <http://www.crc-evans.com>.
- [8] 吕彦民. 管道CRC全自动焊设备发展与应用[J]. 硅谷, 2010(03): 160. [LV Y M. Development and application of CRC automatic welding equipments for pipeline[J]. Silicon Valley, 2010(03): 160.]
- [9] 刁凤东, 滕毅, 张福强. CRC管道全自动焊接工艺的研究与应用[J]. 焊接技术, 2007(06): 57-58. [DIAO F D, TENG Y, ZHANG F Q. Research and application of CRC automatic welding technology for pipeline[J]. Welding Technology, 2007(06): 57-58.]
- [10] TERDRE, NICK. Serimax investing heavily in R&D and harsh environment welding procedures[J]. Offshore, 2009, 69(5).
- [11] 隋永莉, 吴宏. 我国长输油气管道自动焊技术应用现状及展望[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 13-921. [SUI Y L, WU H. Current and future application of automatic welding technology for long-distance oil/gas pipeline in China[J]. Oil&Gas Storage and Transportation, 2014, 33(9): 13-921.]
- [12] 尹铁, 王金鹏, 周伦, 等. 管道焊接机器人焊枪摆动机构运动控制研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(05): 79-84+8. [YIN T, WANG J P, ZHOU L, et al. Research on the motion control of welding gun swing mechanism of pipeline welding robot[J]. Welding Technology, 2020, 49(05): 79-84+8.]
- [13] 茹珂. 两相混合步进电机伺服控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. [RU K. Research on servo control technology of two-phase hybrid stepping motor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.]
- [14] TING C S, CHANG Y N. Observer-based backstepping control of linear stepping motor[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(7): 930-939.
- [15] 张锋, 苗新刚, 赵勇强, 等. 多焊炬管道全位置自动焊控制系统研究[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(S1): 27-30. [ZHANG F, MIAO X G, ZHAO Y Q, et al. Research of multi-torch all-position welding control system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(S1): 27-30.]
- [16] MIAO X G, et al. Multi-torch pipeline all-position welding system based on multi-agent[C]// The 5th International Conference on Welding Science and Engineering (WSE 2013). Weihai: Harbin Institute of Technology (Weihai), 2013, 10: 350-352.
- [17] SERIMAX. Pipeline welding equipment [EB]. <http://www.serimax.com>.
- [18] JRAYMCDERMOTT. Automatic welding system[EB]. <http://www.jraymcdermott.com>.
- [19] JEFF D. Practical applications for hybrid laser welding[J]. Welding Journal, 2007, (10): 47-50.
- [20] CHO M H, FARSON D, LIM Y C. Hybrid laser/arc welding process for controlling bead profile[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12 (8): 677-688.
- [21] DAVID S H, ROBERT J S, GEOFF S B. Yb fibre laser/MAG hybrid processing for welding of pipelines[C]// CommissionIV(Power Beam Processes)Document at 58th IIW Annual Assembly in Prague, 2005, I: 11-15.
- [22] STEFFEN K, JAN N. Laser GMA Hybrid girth welding technologies for transmission pipelines[C]. Germany: 5th Pipeline Technology Conference, 2010.
- [23] CAO X, WANJARA P, HUANG J. Hybrid fiber laser-arc welding of thick section high strength low alloy steel[J]. Materials and Design, 2011, 32(6): 3399-3413.
- [24] GRUNERNWALDA S, SEEFELD T, VOLLERTSEN F. Solutions for joining pipe steels using laser GMA hybrid welding processes[J].

- Physics Procedia, 2010, 5: 77–87.
- [25] RETHMEIER M, GOOK S, LAMMERS M. Laser-hybrid welding of thick plates up to 32 mm using a 20 kW fiber laser[J]. Quarterly J Japan Welding Society, 2009, 27(2): 74–79.
- [26] GOOK S, GUMENYUK A, RETHMEIER M. Hybrid laser arc welding of X80 and X120 steel grade [J]. Sci Technol Weld Joi, 2014, 19 (1): 15–24.
- [27] 魏强, 王帅, 宋建岭, 等. 管道全位置激光—电弧复合焊接成形有限元研究[J]. 焊管, 2020, 43(05): 12–16. [WEI Q, WANG S, SONG J L, et al. Weld formation simulation study of all-position laser-arc hybrid welding of pipelines[J]. Welded Pipe and Tube, 2020, 43(05): 12–16.]
- [28] 王鲁君, 皮亚东, 闫臣, 等. 长输管道全位置激光—电弧复合焊应用技术研究[J]. 焊管, 2019, 42(09): 20–25. [WANG L J, PI Y D, YAN C, et al. Application technology research of all position laser-arc hybrid welding for long distance pipeline[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(09): 20–25.]
- [29] LIN S B, GANG T. An initial study on welding procedure using tandem MIG welding of high strength aluminum alloy[J]. China Welding, 2004, 13 (2) : 81–85.
- [30] 王振民, 黄石生, 薛家祥, 等. 双电弧共熔池脉冲GMAW电源的复合外特性[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 13–16. [WANG Z M, HUANG S S, XUE J X, et al. Hybrid external characteristics of twin arc pulsed GMAW inverter[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 13–16.]
- [31] WU W H, ZHAO M, WANG H Y, et al. Twin-wire pulsed tandem gas metal arc welding of API X80 steel linepipe[J]. International Journal of Corrosion, 2018, DOI: 10.1155/2018/7284246.
- [32] MIAO X G, et al. Research of one torch double-wire pipeline welding robot[C]// The proceedings of 2014 International Conference on Robotic Welding, Intelligence and Automation (RWIA'2014). Shanghai: Shanghai Jiaotong University & Harbin Institute of Technology, 2014, 10: 178–184.
- [33] HYEONG S M, SUNG H K, JONG J K, et al. Automatic pipeline welding system equipped with six welding carriages, laser vision sensor and arc sensor for offshore pipeline laying[C]// Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver Canada: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008, II: 218–223.
- [34] MOON H S, KO S H, KIM J C. Automatic seam tracking in pipeline welding with narrow groove[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(34): 234–241.
- [35] RMS. MOWII external welder[EB]. <http://www.rmsweldingsystems.com>.
- [36] DAVID D, DAVID T. Developments in tandem pulsed gas metal arc welding for grade 690 pipelines[J]. Canadian Welding Association Journal, 2005, 225: 8–10.
- [37] MILLWOOD N A, JOHNSON J, HUDSON M, et al. Construction of the X100 operational trial pipeline at spadeadam[C]. the International Society of Offshore and Polar Engineers. Maui, USA, 2011: 163–169.
- [38] 栾陈杰, 孙有辉, 彭清华, 等. 全位置自动焊在海管铺设中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2013(02): 33–35. [LUAN C J, SUN Y H, PENG Q H, et al. Application of all-position automatic welding in offshore pipeline laying[J]. MW Metal Forming, 2013(02): 33–35.]
- [39] JANZEN T S. The alliance pipeline—a design shift in long distance gas transmission[C]//Proceeding of International pipeline conference. Calgary Canada: ASME, 1998: 83.
- [40] 张锋, 王长江, 赵勇强, 等. 油气管道全位置单枪双丝自动焊接技术[J]. 焊接学报, 2014, 35(07): 72–74+116–117. [ZHANG F, WANG C J, ZHAO Y Q, et al. Tandem automatic welding technology for oil and gas pipelines[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 5(07): 72–74+116–117.]
- [41] CUI H B, XIE G M, LUO Z A, et al. The microstructural evolution and impact toughness of nugget zone in friction stir welded X100 pipeline steel[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016(681): 426–433.
- [42] XIE G M, CUI H B, LUO Z A, et al. Asymmetric distribution of microstructure and impact toughness in stir zone during friction stir processed a high strength pipeline steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 704(17): 401–411.
- [43] 严铿, 蒋成禹, 李敬勇, 等. 先进的搅拌摩擦焊[J]. 轻合金加工技术, 2003, 31(11): 37–41. [YAN K, JIANG C Y, LI J Y, et al. An advanced friction stir welding[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2003, 31(11): 37–41.
- [44] OZEKIN A, JIN H W, KOO J Y, et al. A microstructural study of friction stir welded joints of carbon steels[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(4): 1053–5381.
- [45] HAKAN A, TRACY W N. Microstructure and mechanical properties of hard zone in friction stir welded X80 pipeline steel relative to different heat input. Materials Science & Engineering, 2013, 586: 313–322.
- [46] HIDETOSHI F, LING C, NOBUHIRO T, et al. Friction stir welding of carbon steels[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 429: 50–57.
- [47] MILES M P, NELSON T W, STEEL R, et al. Effect of friction stir welding conditions on properties and microstructures of high strength automotive steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(3): 228–232.

- [48] 尹长华, 闫臣, 郭瑞杰. 未来十年长输管道焊接技术展望[J]. 电焊机, 2016, 46(4): 105-111. [YIN Z H, YAN C, GUO R J. Development of pipeline high efficiency welding technology in the next decade[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(4): 105-111.]
- [49] 骆宗安, 崔洪波, 谢广明, 等. 油气管道环焊缝搅拌摩擦焊机的研制[J]. 焊管, 2018, 41(06): 43-46+54. [LUO Z A, CUI H B, XIE G M, et al. Research on friction stir welding machine for oil and gas pipeline girth weld[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(06): 43-46+54.]
- [50] 谭锦红, 赵运强, 王春桂, 等. 机器人搅拌摩擦焊应用发展现状[J]. 金属加工(热加工), 2020(01): 8-12. [TAN J H, ZHAO Y Q, WANG C G, et al. Development status of the robotic friction stir welding[J]. MW Metal Forming, 2020(01): 8-12.]
- [51] FLEMING P A, HENDRICKS C E, WILKES D M, et al. Automatic seam-tracking of friction stir welded T-joints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45: 490-495.
- [52] 宋天虎, 刘永华, 陈树君. 关于机器人焊接技术的研发与应用之探讨[J]. 焊接, 2016, 45(8): 1-10. [SONG T H, LIU Y H, CHEN S J. The discussion of the technology development and application on the welding robot[J]. Welding & Joining, 2016(8): 1-10.]
- [53] TIPI A D. The study on the drop detachment for automatic pipeline GMAW system: Free flight mode[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1): 149-161.
- [54] TIPI A D. The study on the drop detachment for automatic pipeline GMAW system: Short-circuit mode[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1): 149-161.
- [55] 张锋, 王新升, 李岩, 等. 脉冲焊接工艺摆动电弧焊缝跟踪技术[J]. 焊接, 2018(02): 39-42+63. [ZHANG F, WANG X S, LI Y, et al. Welding seam tracking technology of pulsed welding with oscillating arc[J]. Welding & Joining, 2018(02): 39-42+63.]
- [56] 陈海初, 袁浩博. 一种不规则焊缝自适应焊接机器人系统研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(02): 227-230. [CHEN H C, XIAN H B. Study on an adaptive welding robot system for irregular welding seam[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(02): 227-230.]
- [57] 顾玉芬, 杜雷明, 李春凯, 等. 弧光法与激光视觉法检测熔池振荡特征的对比分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 16-22. [GU Y F, DU L M, LI C K, et al. Comparison analysis of arc light and laser vision sensing weld pool oscillation characteristic signals[J]. Transactions of the china welding institution, 2016, 37(9): 16-22.]
- [58] 柳钢, 李俊岳, 李桓, 等. 以电弧光谱信号传感MIG/MAG焊熔滴过渡的工艺适应性[J]. 机械工程学报, 2000, 36(10): 50-53. [LIU G, LI J Y, LI H, et al. Adaptability of arc spectrum in sensing droplet transfer of MIG/MAG welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(10): 50-53.]
- [59] 刘立君, 周滨涛, 戴鸿滨, 等. 管道MIG焊双通道电弧声信号采集与特征分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 41-44. [LIU L J, ZHOU B T, DAI H B, et al. Dual-channel signal acquisition and characteristics analysis of arc sound in pipe MIG welding[J]. Transactions of the china welding institution, 2012, 33(8): 41-44.]
- [60] 毕淑娟, 兰虎, 刘立君, 等. 基于电弧声信号特征分析MAG焊熔透状态在线监测[J]. 焊接学报, 2010, 33(5): 17-20. [BI S J, LAN H, LIU L J, et al. On-line monitoring of penetration status based on characteristic analysis of arc sound signal in MAG welding [J]. Transactions of the china welding institution, 2010, 33(5): 17-20.]
- [61] 德国HKS技术有限公司. 焊接扫描仪[EB]. <http://www.veagle-hks.com>. [HKS Prozesstechnik GmbH. Weld Scanner[EB]. <http://www.veagle-hks.com>.]
- [62] 王天然. 机器人技术的发展[J]. 机器人, 2017, 39(4): 385-386. [WANG T R. The development of robotics[J]. Robot, 2017, 39(4): 385-386.]
- [63] 黄维和, 沈鑫, 郝迎鹏. 中国油气管网与能源互联网发展前景[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(1): 1-6. [HUANG W H, SHEN X, HAO Y P. Prospect of China's oil and gas pipeline network and energy internet development[J]. Journal of Beijing institute of technology (social sciences edition), 2019, 21(1): 1-6.]
- [64] 黄维和, 郑洪龙, 李明菲. 中国油气储运行业发展历程及展望[J]. 油气储运, 2018, 38(1): 1-11. [HUANG W H, ZHENG H L, LI M F. Development history and prospect of oil & gas storage and transportation industry in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 38(1): 1-11.]