

# 大口径钢管原位圆管焊接机器人技术的应用与研究

王雷, 李河伶, 祝冬雪

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都 610213)

**摘要:**焊接是制造业中的重要工艺,广泛应用于各个领域。随着科学技术的发展,焊接自动化与智能化已成为大趋势,特别是在处理大口径、厚管壁金属输水管道时其优势更明显。鉴于野外作业环境恶劣,传统手工焊接方式已无法满足高质量的焊接要求,为了满足这一要求,管道全位置自动焊接技术应运而生,并在众多领域得到了广泛应用。这项新技术不仅能提高焊接质量,还能确保管线使用的稳定性。经过不断研发与创新,现有的全位置管道自动焊接技术已取得了显著的进步,其中手臂式焊接机器人、旋转式焊接机器人等先进设备已在实际工程中得到广泛应用,极大地提高了焊接效率和质量。但旋转式焊接机器人需要笨重的旋转基座进行旋转焊接,其主要适用于在管道加工厂内操作;而手臂式焊接机器人其活动半径易受限;因此,原位圆管焊接机器人技术更能适应大口径输水管道工程钢管焊接作业的需要。依据李家岩水库输水管道工程建设,阐述了对大口径钢管原位圆管焊接机器人技术进行的应用与研究。

**关键词:**李家岩水库输水管道;大口径输水管道;市政工程;管道安装;焊接机器人;野外;施工技术

**中图分类号:**TV672+.2;TV697.4+1

**文献标志码:**B

**文章编号:**1001-2184(2024)06-0055-04

## Application and Research of In-situ Circular Pipe Welding Robot Technology of Large Diameter Steel Pipes

WANG Lei, LI Heling, ZHU Dongxue

(Sinohydro Bureau 7 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610213)

**Abstract:** Welding is one of the traditional important processing methods in manufacturing industry, and its application field is very wide. With the development of modern information and automation technology, welding automation and intelligence have become an inevitable trend, especially for large-diameter and thick-walled metal water pipelines. Because the welding of large water pipelines is generally carried out in the field, relying on traditional manual welding can no longer meet the welding requirements. In order to meet this requirement, the pipeline full-position automatic welding technology comes into being and has been widely used in many fields. This new technology can not only improve the welding quality, but also ensure the stability of pipeline use. After continuous research and development and innovation, the existing pipeline all-position automatic welding technology has achieved certain development results, and rotary welding robots and arm welding robots have been applied in practical projects. However, the rotary welding robot needs heavy pipes for rotary welding, which is mainly suitable for pipeline processing plants. However, the movable radius of arm welding robot is easily limited. Therefore, in-situ round pipe welding automation technology can better meet the needs of field welding of large-diameter water pipelines. Based on the construction of the Lijiayan Reservoir water pipeline project, the application and research of large-diameter steel pipe in-situ round pipe welding robot technology is introduced.

**Key words:** Lijiayan Reservoir Water Pipeline; Large diameter water pipeline; Municipal project; Pipeline installation; Welding robot; Field; Construction technology

### 1 概述

李家岩水库输水管道工程项目Ⅲ标全长为 10.08 km,其中近 30%的管线为 DN3000 钢管安装。该管道线路主要经过成都市温江区、都江堰市和郫都区境内,沿线穿越灌温路、IT大道、成灌

高速、老成灌路、唐玉路等主要道路 5 处;成灌铁路 1 处;穿越江安河、走马河等河流 2 处(穿越河流处采取“围堰明挖+导流明渠”方式)。沿线经过都江堰市的石羊镇、温江的寿安镇、郫县的花园镇、都江堰市的崇义镇、郫县的唐昌镇。

由于工程全线焊接工作量大,而采用传统人

收稿日期:2024-03-01

工焊接技术存在质量不合格、安全风险大等缺点;因此,此次研究考虑将自动化焊接技术应用于该管道安装工程,其目的是既可以突破传统人工焊接存在的局限,消除工作环境对焊接工人的潜在伤害,又能够轻松应对人工难以完成的焊接任务,显著提升焊接效率和质量。

## 2 施工阶段存在的问题

李家岩水库输水管道工程项目Ⅲ标段的特点在于需要完成大工程量、大口径、大壁厚的钢管焊接工作,需要配置较高技术水平的焊工而导致成本显著增加;此外,大口径钢管焊缝对焊接质量的要求严格,平均每2名作业人员在2d内仅能完成一条焊缝;为方便焊接作业,需要搭建较高技术水平的移动式脚手架,进而进一步增加了工程难度和成本。

鉴于人工焊接效率较低且因合格焊工数量不足而导致焊接进度缓慢,在人工焊接过程中存在诸多职业危害,如作业高度达3m,焊接时产生的气体、光线刺眼、长时间蹲坐焊接等。此外,在有限空间内进行焊接作业亦增加了其危险性;加之传统人工焊接作业依赖于手工操作完成,该方式主要以手工操作焊条为主,虽然在一定程度上满足了普通生产生活中的基本焊接需求,但相较于国外80%的自动化焊接水平,我国的焊接技术就显得有些滞后。

## 3 原位圆管焊接机器人技术

### 3.1 焊接自动化技术具有的优点

自动焊接技术凭借自动焊机能够对大口径管道进行高效焊接,该工艺自上世纪70年代起已逐渐崭露头角,现已发展为工艺成熟、返修率低的先进技术。以德国WITZ公司生产的自动焊机为例,其外焊机、内焊机以及内对口器的集成配置满足了各类口径管道的焊接需求。该技术在使用 $\text{CO}_2$ 和 $\text{Ar}_2$ 作为保护气体的情况下展现出卓越的性能。目前,自动焊接技术在国外已得到广泛应用,而在国内的应用也呈现出不断增长的态势,其高效、低返修率以及良好的经济性使其在焊接领域占据了不可或缺的重要地位。

焊接自动化技术具有的优势主要体现在以下几个方面:

(1)焊接质量卓越,得益于全位置自动焊接技术的精湛运用。该技术打造的焊缝形态优美、瑕

疵稀少,焊接流程稳定可靠,消除了焊枪抖动等潜在干扰。整个焊接过程摆脱了对人为因素的依赖,显著提升了焊接过程的稳定性和可靠性,特别适宜于处理大型、厚实的管道,能够确保每一次连接都能达到完美的效果。

(2)生产效率高,全位置自动焊接技术可以实现连续无缝作业,工作效率是手工焊的1.5倍,能够避免人为因素造成的焊缝质量不良。通常,一般手工操作的不良率为20%左右,而采用自动焊接机器人不会产生焊接不良率,因此其综合效益比手工焊提高了近200%。

(3)全位置自动焊接技术以其高效和智能的特点显著降低了工人的劳动强度,同时也极大程度地简化了对工人操作能力方面的要求。该技术借助其自动控制系统精确地操作执行机构完成复杂的焊接任务,使工人的工作变得更简单;只需简单地调整焊接参数,不仅能减少恶劣的焊接环境对人体造成的伤害,而且能最大程度地减轻工人的工作强度。这种变革节省了大量的人力,还为企业带来劳动成本的显著降低,实现了技术与生产力的双重提升。

### 3.2 焊接机器人的移动方式

移动式全位置自动焊接机器人设备分为导轨式和无导轨式两大类。导轨式焊接机器人通过搭载于工件上的轨道,由焊接小车沿着轨道完成全位置行走。由于轨道具有导向作用,其控制系统的设计变得简洁,稳定性表现卓越。行走机构主要采用两种吸附方式:磁性吸附和真空吸附,其中磁性吸附装置以其低廉的成本、结构简单而备受青睐。而且这种磁性吸附装置吸附力强大,经济性能优越,尤其擅长应对各种管壁的表面质量;但这种方式的缺点在于轨道安装过程繁琐,特别是对于大型结构件,安装与其尺寸相匹配的轨道尤为困难。

相较于传统的有导轨焊接机器人,无导轨式焊接机器人彻底摒弃了轨道的尺寸限制和繁琐的安装过程,展现出无与伦比的灵活性和便利性。这种创新的设计使得机器人可以在各种复杂环境中自由移动,不再受固定轨道的束缚,从而大大提高了工作效率和焊接质量。无论是狭窄的空间,还是不规则的工件形状,无导轨式焊接机器人都能轻松应对,展现出其具有的独特优势和更高的

灵活性,以及对各类尺寸工件更好的适应性;但是,其仍存在一定的偏向问题;因此,在焊接大口径管道工程中,这两种技术都被广泛采用,各自发挥着其独特的优势。

该工程致力于开发一套适用于大口径、全方位自动化厚壁管道焊接的机电一体化系统。该系统采用独特的无导轨式设计,利用永磁轮吸附行走的方式替代传统的焊接轨道,使焊枪能够在自动控制系统的精确调控下沿焊缝自由移动,进而实现沿管道壁面的焊缝全位置自动化焊接。但直至目前,大直径厚壁压力管道焊接中全面应用自动焊接技术仍面临诸多挑战,其主要原因为:

(1)在安装大直径厚壁压力管道时,实现环缝组装的均匀性和高精度极具挑战性,其要求全位置自动焊设备不仅需要具备卓越的焊接技术,还需要拥有智能感应和自动调整功能,以便根据坡口的尺寸和潜在的偏差实时调整焊枪的最佳位置,进而实现对焊缝的自动跟踪。然而,由于焊接过程所处的环境恶劣,传感器在弧光、高温、烟尘、飞溅、振动和电磁场等复杂环境下极易受到干扰,使焊缝的自动跟踪变得尤为困难。

(2)随着焊缝空间位置的不断变化,焊接系统必须具备高度的自适应能力,能够精准地感知焊枪的位置并自动、及时地调整焊接工艺参数。只有这样的智能化调整方能确保每一处焊缝的成型都能达到基本一致的高品质标准,从而为焊接过程的精确性和稳定性提供坚实的保障。

(3)对于执行机构,特别是焊枪摆动机构,在需要高频换向的情况下,其传动误差的精确辨识和快速、实时的高精度补偿具有一定的难度。

为了解决这些问题,需要对原位圆管焊接机器人关键技术进行进一步的研究。

目前,国内外已经研发出一些自动焊接设备,例如美国的林肯中小口径管道焊接设备和国内天然气管道专用焊接设备等。这些设备在一定程度上实现了自动化焊接,但其操作均基于一个相同的假设,即:管道环缝的组装一致,同时需确保焊接小车的爬行轨道与焊缝保持平行。

然而,在实际应用过程中,由于各种因素的影响,如管道材料的不均匀性、组装过程中的误差等导致管道环缝的组装很难做到完全一致。此外,焊接小车在爬行过程中由于轨道的磨损、设备的振动

等原因,也很难保证焊枪与焊缝始终保持平行。

在这种情况下,这些自动焊接设备仍然需要人工干预以调整焊枪的角度和位置以确保焊接质量。此外,这些设备不具备焊缝跟踪功能,导致其无法实时检测焊缝的位置和状态并根据需要进行自动调整。

因此,从严格意义上讲,这些设备并不能被视为真正的管道自动焊接设备。而真正的管道自动焊接设备应具备焊缝跟踪功能,能够实时检测焊缝的位置和状态,并根据检测结果自动调整焊枪的角度和位置,实现全自动化焊接。同时,这种设备还应具有强大的控制系统和传感器系统,以实现高精度、高效率的焊接并确保焊接质量。

### 3.3 原位圆管焊接机器人具有的关键技术

在无导轨式管道全位置自动焊接过程中,由于焊接作业缺乏焊接轨道的导向,导致系统必须具备灵活地沿管壁移动行走的能力,并需实时监测焊缝的偏差量,同时实现自动调节修正,以确保管道全位置自动焊接的顺利进行。为了实现这一目标,必须解决移动与吸附、传感器监测以及焊缝闭环跟踪监测与修正控制这三大核心关键技术问题。这些关键技术为无导轨式管道全位置自动焊接提供了坚实的基础,推动着该项技术在各个领域广泛应用。

(1)移动与吸附技术。管道焊接系统全位置实现需要解决两大问题:即合理移动和安全吸附。合理移动能够确保系统在管壁上全方位行走,而吸附技术则是为了保证系统在焊接过程中其焊接机器人能稳定贴附于管壁。

系统的移动方式包括车轮、履带和步行式。而吸附方式包括空气和磁吸附。全位置焊接系统的承载能力在某种程度上与系统的吸附能力相关,但吸附能力过大也会增加运动阻力、降低移动能力。为了确保系统能够稳固吸附于管壁上并实现以最小力矩进行高效灵活的移动,探究系统的最佳承载力和移动能力组合成为管道全位置自动焊接技术研究中的重中之重。这一组合的优化不仅能够保障操作的稳定性和安全性,还能够大幅度提升管道焊接的工作效率和质量。因此,深入研究如何确定这一最佳组合,对于推动管道全位置自动焊接技术的发展和具有重要应用意义。

(2)传感器检测技术。管道全位置自动焊接

面临的是极为复杂的环境,当其所面临的是焊缝形状不规则情况时,整个系统需要适应这种不规则的动态变化。为了实现焊接过程,需要智能识别动态过程以确保焊接质量,故智能传感器技术至关重要,它能够实时监测焊接参数并获取动态信息,从而精确识别系统的动态特性。因此,在焊接自动化研究领域,智能传感器技术具有举足轻重的作用。

为了实现全方位、动态的焊接过程监测,焊接系统需要对焊接作业进行实时动态监测,并根据不同的焊接情况对焊接参数进行调整。为此,焊缝跟踪传感器和焊缝成形传感器的应用成为焊接系统的关键技术。焊缝跟踪传感器能够精确监测焊接对象的位置、焊缝坡口尺寸和焊缝中心线的位置,从而实现自动跟踪焊缝的目的;而焊缝成形传感器则通过控制焊接过程中获得的参数精确调整焊缝成形,旨在提升焊接质量。这两类传感器的协同作用,使得焊接系统得以在实时监测和精确控制的基础上保障焊接过程的顺利进行,进而提升管道的焊接质量。

(3)焊缝闭环跟踪监测与修正控制技术。焊缝闭环跟踪监测与修正控制技术的作用是确保系统焊枪与工件焊缝位置一致。精度越高其焊接质量越好;反之,质量降低。在整个焊接作业过程中,系统焊枪与工件焊缝的中心必须对齐。由于焊缝可能出现变形,系统需实时调整焊枪的中心位置并保持对齐。

### 3.4 原位圆管焊接机器人机械执行的关键机构

原位圆管焊接机器人机械执行的关键机构主要包括行走机构、跟踪调节机构以及焊枪摆动机构。

(1)行走机构。行走机构的作用是实现整体焊接系统沿管壁的全位置移动。

(2)跟踪调节机构。二维调节机构即横向跟踪机构与高度调节机构,其用于调节焊枪相对于焊缝的平行和垂直方向上的位置要求,以保证良好的焊接空间位置。

(3)焊枪摆动机构。原位圆管焊接机器人焊接的对象为大型钢管,其焊接范围广,焊枪只有在横向移动过程中才能完成大坡口焊缝的焊接任务,因此,必须巧妙地设计一个摆动机构,以确保焊枪能够顺畅地进行横向移动。为了实现焊枪在

焊接过程中的多样化摆动需求,全位置焊接控制系统需要精确调控焊接小车的移动速度、摆动速度以及摆动行程等关键参数。这些细致的调控不仅有助于实现多种复杂的焊接工艺,还能确保焊接过程的高效与稳定。通常,焊接工艺对焊枪的摆动模式提出了四种典型要求,分别是:点之形模式、锯齿形模式、弓字形模式和直线形模式。点之形模式:焊枪边行走、边摆动,在坡口两边停留,一般用于填充焊缝。锯齿形模式:焊枪边行走边摆动,两边不停留,一般用于填充盖面焊缝。弓字形模式:焊枪行走时不摆动,摆动时不行走,一般用于盖面焊缝。直线形模式:焊枪行走但不摆动。

### 4 应用效果

该标段穿走马河段由于其坡度较陡,作业面倾斜,人工焊接受场地限制而导致施工难度大;且因走马河水流量大、人工操作易发生安全事故,存在安全隐患。因此,项目部对穿走马河段应用焊接机器人技术进行了测试,产生了以下应用效果:在焊接速度方面,传统的人工焊接一节管道需要30 min,而机器人焊接同样长度的管道仅需20 min,焊接速度提高了33%;在焊接质量方面,机器人焊接的坡口深度更加稳定,焊缝合格率高,相较于人工焊接而言,机器人焊接能够提高焊接质量,减少返工率;同时,应用该技术后能够减少工人的劳动强度,降低安全风险,节省人力成本,消除安全隐患。

### 5 结语

笔者以李家岩水库输水管道工程项目Ⅲ标段施工为依托对象,结合工程特点及现场实际情况,分析并研究了原位圆管焊接机器人技术,其能够较好地保障野外大口径钢管安装的质量。与传统手工焊相比,施工效率高,人力成本减少,所取得的结果对类似工程具有借鉴意义。笔者认为:继续深耕全自动焊接机器人关键技术,进一步开展管道全位置自动焊接系统实际使用性能测试具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 王启玉,陈志强,于青春.我国焊接机器人的发展现状[J].现代零部件,2013,11(3):77-78.
- [2] 林尚扬,陈善本,李成桐.焊接机器人及其应用[M].北京:机械工业出版社,2000.

(下转第67页)

发生塌孔的情况则不使用 PVC 花管,直接进行水泥砂浆灌浆即可。

参考文献:

[1] 才永军,赵晓明.分析岩体工程地质动力学基本原理[J].知识经济,2014,16(15):180.

[2] 赵连三.倾倒岩体边坡稳定性及其防治[J].水文地质工程地质,1979,23(4):10-14.

[3] 徐梓轩.套管跟进法在破碎岩层边坡锚杆钻孔施工中的应用[C]//贵州贵黄高速公路有限公司,《中国公路》杂志社,贵阳至黄平高速公路项目论文集,2022.

[4] 邹博,史亚运.脲醛树脂水泥球结合泡沫泥浆堵漏技术分

析与应用[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第十九届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集,2017:115-117.

[5] 刘智勇,朱良修.“782”速凝剂在基岩帷幕灌浆中的试验应用[J].江西水利科技,1993,19(2):170-173,176.

[6] 丁国强.钻孔窥视在锚杆支护中的应用[J].煤炭与化工,2017,40(7):89-91,95.

作者简介:

彭明(1977-),男,四川南部人,副高级工程师,工程硕士,从事水利水电工程施工技术与管理工作.

(编辑:李燕辉)

(上接第 22 页)

药器械,不应随意丢弃盛装药物的容器和包装物。

(8)进行灌浆施工时,应提前做好三级沉淀池,收集灌浆产生的污水并进行沉淀处理,同时将处理后的污水优先用于堤坝洒水降尘,不得随意将施工污水排至河道内。

5 结 语

鄱阳县堤防加固修复工程白蚁治理项目全线累计普查并挖除堤内蚁穴蚁巢 1 389 个,喷洒药液 496 万 m<sup>2</sup>,布置诱杀桩 2.7 万个。堤身白蚁经系统治理后,通过 8 个月时间的持续监测观察,治理区域未发现白蚁活动迹象,治理效果显著,有效阻止了白蚁对堤坝的挖掘侵害,提高了堤防的防御能力。

河堤治理工程是保障人民群众生命财产安全的重要基础设施工程,通过对堤防工程施工过程中的实践研究,开辟新的施工技术路径和方法,提升工程质量,节约工程成本,对同类工程提供技术参考,推进河堤白蚁治理工程技术发展具有重要意义。我国幅员辽阔,地形复杂,水系发达,特别是在华中、华南地区区域河流密布,水网发达,受白蚁灾害影响导致堤防决堤洪涝灾害经常发生,

给当地人民群众的生命财产安全造成了重大威胁,落后的白蚁治理技术已不能满足更高标准的堤防整治施工需求。笔者系统梳理了白蚁危害、白蚁普查、白蚁治理及防治后期的监测与维护过程,能够有效地促进同类型工程白蚁治理工作的开展,提高对白蚁的消杀效果,减轻白蚁对堤防工程的深度侵害,防止决堤等灾害事故的发生。

参考文献:

[1] 张树田,蔡勤学,屈章彬,等.小浪底水利枢纽蚁害成因分析[J].人民黄河,2022,44(增刊1):264-266.

[2] 廖婷.南宁市水库堤坝白蚁的发生与管理问题及其对策研究[D].广西大学,2014.

[3] 马星霞,蒋明亮,王洁瑛.气候变暖对中国木材腐朽及白蚁危害区域边界的影响[J].林业科学,2015,51(11):83-90.

[4] 丘启胜.家白蚁在贵州省的地理分布与气候关系的探讨[J].白蚁科技,1988,5(4):23-25.

[5] 李彬.广东省水利工程白蚁防治历史与现状[J].广东水利水电,2021,40(12):31-34,41.

[6] 李栋,田伟金,黎明,等.论白蚁管涌(漏)与水利管涌的区别和处理[J].昆虫学报,2004,47(5):645-651.

[7] 余金煌,吴琼.综合物探法探测堤坝白蚁蚁巢技术[J].治淮,2017,36(9):25-26.

作者简介:

张鹏(1986-),男,陕西洛南人,副高级工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作.

(编辑:李燕辉)

(上接第 58 页)

[3] 杜家熙,宁李谱,宁欣.管道爬行机器人结构研究[J].起重运输机械,2010,50(5):58-60.

[4] 郝永臣.管道自动焊接机控制系统的研究[D].哈尔滨理工大学硕士学位论文,2007.

[5] 贾宝丽,王滨,张文明.基于 SOPC 技术的环形焊缝自动焊接机构的研究[J].焊管,2008,31(5):63-65,95.

作者简介:

王雷(1987-),男,四川达州人,项目经理兼项目总工程师,高级工程师,从事市政工程施工技术与管理工作;

李河伶(1988-),男,四川乐山人,助理工程师,从事市政工程施工技术工作;

祝东雪(1985-),女,吉林公主岭人,助理工程师,从事市政工程施工技术与经营管理工作.

(编辑:李燕辉)