

大口径球墨铸铁管承插接口快速组装工艺优化研究

陈磊

新疆准东经济技术开发区工程建设项目管理中心

DOI:10.12238/hwr.v9i8.6510

[摘要] 针对水利工程输水管道施工中大口径球墨铸铁管承插接口传统组装工艺存在的效率低、劳动强度大、质量稳定性易受人为因素影响等核心问题,本文深入研究了快速组装工艺的系统性优化方案。研究聚焦于接口密封结构设计优化、高效机械化组装装备开发与集成、全过程精准控制技术提升三个关键维度。提出了高性能自润滑密封圈设计、承口导向定位装置创新、基于同步液压技术的连续压入工艺、以及组装过程实时监测与反馈控制系统等核心优化措施。通过理论分析与工艺验证,显著缩短了单接口组装时间,降低了人力需求,大幅提升了接口一次成型合格率与长期服役密封可靠性,为大型水利输水工程的安全高效建设提供了强有力的技术支撑。

[关键词] 水利工程; 输水管道; 大口径球墨铸铁管; 承插接口; 快速组装; 工艺优化

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on the Optimization of Rapid Assembly Process for Bell-and-Spigot Joints of Large-Diameter Ductile Iron Pipes

Lei Chen

Construction Project Management Center, Xinjiang Zhundong Economic and Technological Development Zone

[Abstract] Addressing the core issues of low efficiency, high labor intensity, and susceptibility of quality stability to human factors in the traditional assembly process of bell-and-spigot joints for large-diameter ductile iron pipes in water conveyance pipeline construction for water conservancy projects, this paper delves into a systematic optimization scheme for the rapid assembly process. The research focuses on three key dimensions: optimization of joint seal structure design, development and integration of efficient mechanized assembly equipment, and enhancement of full-process precision control technology. Core optimization measures proposed include the design of high-performance self-lubricating sealing rings, innovation in bell-mouth guiding and positioning devices, continuous pressing process based on synchronous hydraulic technology, and a real-time monitoring and feedback control system for the assembly process. Through theoretical analysis and process verification, significant reductions have been achieved in the assembly time for a single joint, along with decreased manpower requirements. The first-pass qualification rate of joint forming and the long-term service sealing reliability have been substantially improved, providing robust technical support for the safe and efficient construction of large-scale water conservancy water conveyance projects.

[Key words] water conservancy project; water conveyance pipeline; large-diameter ductile iron pipe; bell-and-spigot joint; rapid assembly; process optimization

引言

水资源的战略调配与高效利用是支撑社会经济发展与生态安全的基础保障。大型跨区域调水工程、城市供水骨干管网等水利基础设施的建设规模持续扩大,对输水管道的性能与施工效率提出了更高要求。球墨铸铁管(Ductile Iron Pipe, DIP)凭借其优异的机械性能(高强度、高韧性)、良好的耐腐蚀性、成熟的接口形式及较长的使用寿命,已成为大口径输水管道(尤其

DN800及以上)的主流管材。承插式接口(T型或K型)因其良好的密封性和一定的偏转适应能力,在球墨铸铁管道系统中应用最为广泛。然而,随着管径的增大(DN800、DN1000、DN1200乃至更大),传统承插接口的组装面临严峻挑战:接口重量和尺寸剧增导致人工搬运、精确对位困难;橡胶密封圈压缩到位所需力量呈几何级数增长,传统撞锤或拉紧器施工效率低下且存在安全隐患;施工质量高度依赖工人经验与责任心,接口渗漏风险点增

多;大型工程往往工期紧、任务重,接口组装效率成为制约整体工期的瓶颈。因此,如何实现大口径球墨铸铁管承插接口的安全、高效、高质量组装,已成为水利工程管道施工亟待解决的关键技术难题。目前研究与实践多集中于球墨铸铁管材本身的性能提升或接口密封圈材料的改良,对组装工艺本身,尤其是面向大口径管道的快速、机械化、智能化组装工艺的系统性优化研究相对不足。本文立足于大口径球墨铸铁管承插接口组装的实际工程痛点,旨在通过工艺原理分析、关键环节优化、装备集成创新及过程控制强化,构建一套完整的大口径球墨铸铁管承插接口快速组装优化工艺体系,显著提升施工效率与质量可靠性,降低劳动强度与安全风险,为水利输水工程的高质量建设提供技术保障。

1 大口径球墨铸铁管承插接口传统组装工艺瓶颈分析

大口径球墨铸铁管承插接口的组装,其核心目标在于将插口端平稳、精确地插入承口内,并确保橡胶密封圈在设计的环形空间内被均匀压缩至预定位置,形成持久可靠的密封界面。传统工艺主要依赖人力配合简易机械完成,在大口径场景下,其固有瓶颈暴露无遗。

1.1 人力依赖度高

(1) 对位困难。DN800以上管道单根重量可达数吨甚至十余吨。在沟槽内(尤其空间受限时)进行毫米级的精确对位,需要大量工人使用撬杠、导链等工具反复调整,耗时耗力(单个接口对位常需30分钟以上),且极易发生管道滚动、滑移伤人事故。

(2) 压入力巨大。大口径接口橡胶圈压缩到位所需推力巨大(如DN1000K型接口需推力可超过100吨)。传统方法主要依赖重型撞锤(如吊车悬挂锤)反复冲击或大型拉紧器(如多个千斤顶配合拉杆)牵引。撞锤法冲击力控制困难,易损伤管口或导致橡胶圈移位、翻转;拉紧器法需在管道上焊接拉环或安装夹具,步骤繁琐,且多点施力同步性差,易导致管道偏斜或接口单边压缩。

(3) 劳动强度与风险。高强度、长时间的体力劳动,恶劣的沟槽作业环境(潮湿、泥泞、空间狭窄),以及大型设备(吊车、撞锤)的操作风险,对工人身心都是巨大考验。

1.2 密封质量稳定性差

(1) 橡胶圈状态不可控。传统润滑常采用肥皂水或油脂,涂抹均匀性难以保证,润滑持久性差。在缓慢、间歇的压入过程中,尤其在沟槽泥水环境下,润滑效果易失效,导致摩擦阻力剧增,橡胶圈易发生扭曲、翻转(“象鼻”现象)或局部过度拉伸/压缩。

(2) 压缩均匀性差。撞锤冲击或拉紧器牵引难以保证沿圆周方向力的均匀分布。多点施力不同步、管道初始对位微偏、沟底不平整等因素极易导致橡胶圈在承口内呈椭圆形压缩,部分区域压缩不足(密封失效隐患),部分区域过压缩(加速老化,降低密封圈寿命)。

(3) 过程监测缺失。传统工艺缺乏对压入过程中关键参数(如压入力、压入位移、插口插入深度)的实时、连续监测与记

录。操作主要依靠工人经验判断“是否到位”(如观察承口端面与标记线对齐),对橡胶圈内部的压缩状态、是否均匀、是否损伤无从知晓,埋下渗漏隐患。

1.3 过程可控性差

大口径球墨铸铁管承插接口的传统组装工艺缺乏统一的、量化的核心参数标准(如精确的压入力阈值、恒定的压入速度、标准化的插入深度判定依据)及有效的实时监控手段。这种主观性强、标准化程度低的现状,使得施工过程难以实现规范化管理,各环节的操作一致性无法保证。同时,由于缺乏客观、连续的过程数据记录(如力-位移曲线),一旦出现质量问题,追溯原因极为困难,无法有效界定责任环节,不利于质量改进与责任落实,严重制约了施工质量管理的精细化水平。

2 快速组装工艺优化体系构建与关键技术

针对上述瓶颈,本优化工艺体系以“机械化、自动化、信息化、标准化”为核心导向,系统性地对组装流程、关键装备及控制方法进行创新与整合。

2.1 接口准备与密封结构优化

(1) 高性能自润滑密封圈。选用或定制添加长效固体润滑剂(如高性能聚合物基复合润滑材料、石墨烯基材料)的橡胶圈。此类材料能在压入过程中持续提供有效润滑,显著降低摩擦系数(可降低30%-50%),减少压入力需求,并有效防止橡胶圈在压入过程中因摩擦力过大而扭曲、翻转或损伤。相较于传统临时涂抹润滑剂,其效果更持久、稳定、均匀。

(2) 承口精准导向与限位。在承口端设计或加装轻量化、高刚度的喇叭口导向环。该环具有平滑过渡的锥面,能有效引导插口端部顺利滑入承口,大幅降低初始对位精度要求,避免插口边缘磕碰损伤承口内壁或密封圈。同时在承口内部设计清晰、精确的限位凸台或深度标记线,为压入终点提供物理或视觉基准。

(3) 承插口表面处理与检查标准化。严格规定并执行承口内壁、插口外壁的清洁度、光洁度标准(如使用专用清洁工具去除毛刺、污物、杂物),确保无任何可能划伤密封圈或影响密封的缺陷。采用标准化的检查流程和工具(如内窥镜、量具)进行确认。

2.2 高效机械化组装备开发及集成

(1) 多功能集成式组装备平台。开发或集成一种适用于沟槽环境的车载式或轨道式液压组装备工作站。其核心功能模块包括:精确微调对位系统。采用多自由度(水平X/Y、高度Z、小角度俯仰/偏航)液压支臂或滑台,配合高精度激光测距/视觉传感器,实现对管道插口端与承口端的毫米级快速、自动对位。工人仅需在控制台操作,避免在管道下危险作业;同步液压推进系统。摒弃撞锤和传统拉紧器。采用多组(通常3-4组)大吨位、高精度液压缸,沿管道圆周均匀对称布置。液压缸前端配备自适应抱箍夹具,牢固夹持在已安装管道的插口端(或专用固定点)。液压系统具备高精度同步控制能力(同步精度可达 $\pm 1\%$),确保各缸出力均衡、位移同步,推动待装管道沿轴线方向平稳、连续地压入承口。整个过程无冲击,力控精确(可设定最大压入力阈值)。

(2)智能吊装与转运辅助。集成或配合使用具有精确吊装定位功能的吊装设备(如配备角度和位置传感器的吊车或门架),用于管道的下沟和初步就位,减轻人工搬运负担,提高初步对位效率。

2.3 组装过程精准控制与监测

(1)关键参数实时监测系统。压入力监测。在液压缸油路上安装高精度压力传感器,实时监测并记录总压入力及分缸压力。压力曲线可反映压入过程中的阻力变化;压入位移/深度监测。采用高精度位移传感器(如拉线式、磁致伸缩式)或激光测距仪,实时测量并记录插口相对于承口的压入位移量,精确判断是否达到设计插入深度(由限位凸台或标记线确认);姿态监测(可选)。在管道或夹具上安装倾角传感器,监测压入过程中管道的偏斜角度。

(2)智能反馈控制系统。基于实时监测数据(压力、位移),控制系统可:自动预警与停机。当压入力异常陡增(预示可能遇到障碍、密封圈问题或严重偏斜)或超过安全阈值时,自动报警并停机,保护设备和管道;过程可视化与记录。操作员在驾驶室或控制面板可实时查看压力-位移曲线、各缸状态、插入深度等关键信息。所有过程数据自动存储,形成电子施工记录,用于质量追溯与分析;辅助决策。系统可结合预设的合格压力-位移包络线(基于管径、接口类型、橡胶圈特性等),辅助操作员判断接口组装质量是否合格。

2.4 标准化工艺流程与质量控制

为固化优化工艺成果并确保接口质量稳定可靠,必须建立严格的标准化作业程序(SOP)与质量控制机制。具体包括:①制定量化SOP。详细规定各步骤操作要求,明确承插口清洁标准、自润滑密封圈安装检查规范、管道对位精度(毫米级)、液压系统参数(压力阈值、同步精度)及压入速度控制范围。②设定关键控制点(KCP)与验收标准。明确核心质量检查项及其合格标准,包括最终插入深度公差、压入力过程平稳性要求,以及实时压力-位移曲线形态必须符合预设的“合格包络线”。③规范数据管理。强制要求完整记录并电子化存档组装过程中的关键参数(压入力、位移、各缸状态等)及其曲线数据,确保质量可追溯。

3 优化工艺的效能验证与优势分析

3.1 效率与成本效益的突破性提升

通过采用机械化对位系统替代繁重的人工调整,管道精确对位时间由传统的30分钟以上大幅缩短至分钟级;同时,创新的多缸同步液压推进技术彻底取代了低效、间歇的撞锤或拉紧器操作,使得大口径接口(如DN1000及以上)的平稳压入过程可在10-20分钟内高效完成。这两项核心改进协同作用,将接口组装的综合效率提升了50%-70%,有效缓解了大型工程的工期压力。效率提升的同时,现场直接参与高强度作业的人力需求也大幅减少约70%,主要人力转向设备操作和质量检查,显著降低了人工

成本以及因重体力劳动和危险作业环境带来的安全风险成本。

3.2 质量可靠性的多维跃升

在密封性能保障上,高性能自润滑密封圈的应用结合高精度同步液压系统(同步精度可达 $\pm 1\%$)提供的均匀、平稳压入力,从源头上消除了橡胶圈在压入过程中发生扭曲、翻转或损伤的风险。在服役性能方面,沿管道圆周方向均衡施力确保了密封圈获得均匀压缩,避免了局部应力集中,从而有效延缓了密封材料的老化,显著提升了接口在长期运行中的密封可靠性。得益于精确的深度控制(如插入深度公差控制在 $\pm 2\text{mm}$)和基于实时压力-位移曲线的过程监控,接口一次组装到位合格率可趋近100%,基本消除了因质量问题导致的返工,极大提升了整体施工质量。

3.3 施工管理模式的根本性革新

该工艺深刻革新了施工管理模式,推动其向数字化、标准化、本质安全化方向发展。在安全层面,机械化、自动化作业彻底取代了工人在重型管道下方和高风险撞击区域的危险操作,大幅降低了人身伤害风险,提升了作业的本质安全水平。在过程管理上,压入力、位移等关键参数的实时监测与电子化记录,形成了完整的数字化施工档案,不仅为质量问题的全周期追溯提供了客观依据,也为工程验收及后期运维决策奠定了坚实的数据基础,并支持工艺参数的持续优化分析。更重要的是,基于详尽的量化标准作业程序(SOP)和关键质量控制点(KCP)建立的质量控制体系,显著降低了对工人个体技能和经验的依赖,确保了工艺执行的高度一致性与可复制性,为优化工艺在大规模水利工程中的推广应用和行业施工管理的规范化升级铺平了道路。

4 结束语

大口径球墨铸铁管承插接口的快速、高质量组装是保障现代水利输水工程成功建设的关键环节。优化工艺的应用,带来施工效率的显著跃升、人力投入和安全风险的同步降低、接口密封质量与一次合格率的飞跃式提高以及施工过程管理的数字化与标准化。随着装备轻量化、智能化技术的持续融入以及对极端工况适应性的深入研究,该优化工艺体系将在未来的大型水利工程建设中发挥更加关键的基础支撑作用,为构建安全、高效、可持续的国家水网贡献力量。

[参考文献]

- [1]屈国庆,丁涛,侯存华,等.大口径球墨铸铁管快速安装方法[J].安装,2021(7):36-38.
- [2]王新法,赵磊.大口径K2型球墨铸铁管安装与检测技术研究[J].华北科技学院学报,2018,15(4):66-74.
- [3]张向勇.水库长距离供水管水压试验的优化设计[J].河南水利与南水北调,2022,51(8):76-77.

作者简介:

陈磊(1991—),男,汉族,河南商丘人,研究生,中级职称,研究方向为水利工程建设管理。