

机械维护对铸管管道长期可靠性影响研究

郭丽 刘刚 任勇军 李珂 王艳军

安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455133

[摘要]铸管管道是城市生命线工程建设的基础设施,长期稳定的安全性能关乎公众生命安全以及能源输送效率。围绕铸管管道机械维修和可靠性的联系展开研究,系统的分析机械维护对于铸管管道可靠性的内在作用机理,基于失效模式的研究,阐述预防性维护、纠正性维护以及维护间隔对管道失效频率以及服役期数的影响机制,结果表明管线的使用年限受设计、制造、施工、运行、检验以及保养等多种因素影响,发生故障的概率呈“浴盆曲线”,前期失效阶段与磨损失效阶段的维护要求截然相反。

[关键词]铸管管道;机械维护;长期可靠性;失效模式;全周期管理

DOI: 10.33142/ec.v9i3.19239

中图分类号: TU991.38

文献标识码: A

Research on the Long-term Reliability Impact of Mechanical Maintenance on Cast Pipe Pipelines

GUO Li, LIU Gang, REN Yongjun, LI Ke, WANG Yanjun

Angang Group Yongtong Ductile Cast Iron Pipe Co., Ltd, Anyang, He'nan, 455133, China

Abstract: Cast pipes are the infrastructure of urban lifeline engineering construction, and their long-term stable safety performance is related to public life safety and energy transmission efficiency. Research is conducted on the relationship between mechanical maintenance and reliability of cast pipe pipelines, systematically analyzing the inherent mechanism of mechanical maintenance on the reliability of cast pipe pipelines. Based on the study of failure modes, the impact mechanism of preventive maintenance, corrective maintenance, and maintenance intervals on the frequency and service life of pipelines is elaborated. The results show that the service life of pipelines is affected by various factors such as design, manufacturing, construction, operation, inspection, and maintenance, and the probability of failure follows a "bathtub curve". The maintenance requirements in the early failure stage and wear failure stage are completely opposite.

Keywords: cast pipes and pipelines; mechanical maintenance; long term reliability; failure mode; whole-cycle management

铸管(球墨铸铁管)以高强度、高韧性、耐腐蚀、抗地基沉降等多种优势成为市政给排水、水利灌溉、燃气输送等工程的首选管材,但是深埋地底的管道系统经年累月受到内部压力、外侧土压力、循环应力以及外界环境腐蚀等因素综合作用下,其可靠性能逐渐下降有渐进性、隐蔽性的特点,在此过程中积累了很多问题。国务院办公厅发布《城市燃气管道等老化更新改造实施方案》中明确提出要尽快对材质落后、使用时间较长、存在安全隐患等问题的管道进行更新改造,2025年底前城市燃气管道等老化更新改造任务基本完成。面对我国众多管道已步入“老龄化”的现状,怎样进行合理维修来保证管道的安全有效运行是迫在眉睫的工程问题。而机械维修又是管道财产管理的重要方式,它的作用绝非仅仅是一味的“修修补补”,而是要涉及到维护方案制定、维护周期确定、方法适用性等一系列繁复的选择的庞大工程。错误的维护不但不会提高可靠性反而会使管道老化速度提前,所以弄清机械维护对铸管管道可靠性的机制,构建理想的维护模式有着极大的研究价值及实践意义。

1 机械维护的基本概念与分类

机械维护指为了维持以及修复设备规定的使用性能

而开展的各种技术管理和措施。依据国际电气委员会(IEC)的规定,机械维护分为两大类即:①预防性保养:针对事故发生之前所实施的一种有计划性的保养行为,如周期性巡查、检修、更换磨损零件等,它遵循的原则就是提前防范,在故障刚露头之时就将其制止。在铸管管道中预防性保养包含防腐涂层检验、法兰连接部位防水测试、阴极防护装置试验等。西北油田从2022年开始研发及应用智慧清管技术,自主研发在线智慧清管系统,截至2025年已经完成清管作业达2594.2公里,油气输送效能提高5.2%,减少天然气放空约4000万方、原油倒运量7360吨。②补救性维修:事后对设备故障实施的补救性维修行为,也叫事后维修。特点是对故障反应及时却缺乏主动性,用于辅助性的次要机械设备或是故障影响较小的地方,在管道使用了一段时间以后,主要是由于操作失误或者背离设定参数、软件或硬件变动未能及时更新、维修不到位等方面造成的,其效果直接决定了维修后的可靠程度。

2 铸管管道的主要失效模式与维护需求

2.1 铸管管道的常见失效机理

铸管管道损坏的主要方式可以概括为四种分别是腐

蚀、疲劳、机械损伤以及接口破坏。

腐蚀是最主要引起铸管管道损坏的原因，在经历15~20年的运行之后，逐步增多的问题称之为管道腐蚀老化期，该期包括腐蚀减薄、应力腐蚀开裂、机械破坏（疲劳破坏、蠕胀）以及材料脆化等现象。埋地铸铁管外部腐蚀主要是由土壤电阻率、含水率、杂散电流等因素造成；内部腐蚀是由流动介质所引起的。尤其要对包覆层下腐蚀这一现象加以重视，它已经导致过很多国内国外的管线事故的发生，而其隐蔽性强以及检测困难使其变得愈发可怕。

疲劳破坏是由于反复出现的压力应力的作用结果，管道承受着压力的变化，温度的变化以及路面车辆的载荷反复循环，产生微小的裂纹进而发展成为较大的裂纹直至发生破裂情况，在住建部管网事故数据库中统计发现冬季（12月至次年2月份）发生的事故数量最多占比全年42%，低于零下五摄氏度时事故为常温下的3.2倍；建设时间大于三十年的老城区管网事故频发程度为新城区的5.8倍。

接口损坏主要是指承插橡胶圈接口损坏，在施工过程中质量问题或者橡胶圈老化以及地表沉降都可能导致接口漏水甚至造成接口脱落的现象，其中中等管径DN400~DNN800的管径爆管率为67%左右，主要是由于管材材质的强度及水锤波传播特性所造成的。

2.2 维护需求与可靠性关联分析

铸铁管管线可靠度不是不变量，而是具有明显的阶段性特征。“早期失效期间”，劣化较为严重，主要是因为设计/施工不足、焊接不良、材质选择差或者错选材质、操作生手等原因造成的。这一时间段的维修以查找并纠正质量问题为主；而“平稳运行时期”，失效概率很小，检修的需求主要是偶然的操作疏忽或者是工况变化引起的。这一时期的故障原因主要是由于误操作或偏离设计规定以及软件、硬件的改动没有进行相应的变更管理、修理不当等。到了“磨损失效阶段”，腐蚀磨损、疲劳损伤等老化问题突出，维修需求激增，在这个时期维修是否及时有效直接影响到管线的剩余寿命。研究结果证明，积极检修可以使管系服役时间增加30%~50%，而消极维护不仅费用高企而且很难回复到原有的可靠度状态。以胜利油田油气集输总厂为例，在2022年开始应用智能三维检测系统后依靠管道巡检，院落检查等功能模块的应用，孤罗东管线已经实现连续第1056日无事故记录，东辛胜利管线达到了连续554d无事故记录等效果。

3 机械维护对铸管管道可靠性的影响机制

3.1 预防性维护对故障率的抑制效应

预防性维修通过对设备进行周期性的检查、修理，在故障发生之前将其排除掉，从而达到减少故障的目的。预防维修的作用原理可以总结为“先期监测-倾向预测-干预选择-实施处理”的循环模式^[1]。如对铸管防腐层的维修就是对管道包裹层以及涂层进行定期的修整和查看工作

可以有效的防止破裂出现后及时修补，中断氧化过程的发生。对于包覆层内部腐蚀的处理应该采用综合对策的方式，在设计、制造、使用保养三个环节都要有所考虑。西北油田顺北油气田管线穿越沙漠，途经地形高差达30~80m，传输液体中有硫化氢、二氧化碳及氯离子等腐蚀性物质，在应用智能化清管系统的基础上建设起的信息实时共享+在线专家咨询+节点联动处理的清管机制，在安装了28个增补信号点以后，清管速度提高了20%，并且清管时间缩短了80%。

3.2 纠正性维护对功能恢复的作用

矫正性维护的主要目的是对损坏管道进行修理使其达到可以接受的功能水平。作用效果受到三个条件的影响：反应速度、修复技术和水平、修理部分是否完整。矫正性维护的要点就是防止“修复诱导劣化”。即错误的修复方式可能会造成二次破坏。比如焊接修复时如果热输入量控制不好会使得焊接热影响区硬度增大或者出现内应力集中导致材料脆化从而加快再次失效的速度。所以错误修复也是稳定运行期问题的一个主要原因，在当前的紧急修理工程技术当中非开挖修复技术的应用大大提高了矫正性维护的效果。

3.3 维护周期与强度对寿命的影响

维护周期及频率是制定维护策略的重要变量，二者会对管线使用寿命产生非线性的效应。过频维护会频繁的打开检查，从而导致接口处密封面磨损或损坏，防腐层破损，带来新的失效源。维护不足，发生腐蚀减薄以及疲劳裂纹，累积的劣化状态得不到处理，可能会造成一次性的突然失效。寿命周期费用管理越来越受到人们的重视，在资产管理系统中新增加了基于寿命周期费用管理的管线资产管理系统的的功能，研究发现铸铁管的最优维护周期有个窗格，小于这个窗格就会出现边际效率下降的现象，大于此窗格就会有陡峭的故障率增长趋势。以石拉乌素煤矿为例，在2022年每年都有损坏报废 $\phi 250$ PE排水管200余根，金额约22万，使用PE管路熔覆技术，一根修复费用为160元代替新的购买费用1100元。从2025年4月份使用至今已节省20.6万元，估计每年能省下购买管道的钱超过50万元。

3.4 维护技术选择与可靠性关联

保证技术的有效性决定着修复之后的管道的安全等级高低，铸铁管维修技术分为传统技术和高新技术两部分，传统技术主要包括防腐层局部修复、不锈钢套筒修复和内衬环氧粉末喷涂等，优点是投入少、工艺简单，缺点是效果的好坏依赖操作者技术水平较高^[2]；高新技术主要包括不开挖内衬修复、智能堵漏以及光缆探测等。给每一根铸铁管赋予唯一的“电子身份证”，从熔炼成分，铸造参数一直到水压试验、防腐层测定，每一个重要工序的质量指标都被精确地记录下来。胜利油田油气集输总厂自行研发的视频智能化识别算法，累积了1000多个小时的视频素材，

以及超过 20 万次的对比实验，在研发过程中形成了六套智能分析模型，视频监控报警自动报警识别精确率达到 95%，小流量泄漏定位技术解决了以往 $4\text{m}^3/\text{h} \sim 6\text{m}^3/\text{h}$ 难以定位的情况，报警精准率达到 95%，定位精准度提升了 30%，采用的技术要符合“适合性”要求，维修技术的性能参数应该适合原有管道系统，防止出现“局部加强、全面减损”的问题。

4 维护策略优化与可靠性提升路径

4.1 基于风险的全周期维护规划

RBI 是用一个相对统一的方式对机械物的危害进行评价，在其基础上选出一个工厂中高危的重要设备或者管道，以此为基础制定相应的检查方案。风险大小取决于发生故障的概率和故障结果两方面，而故障结果严重程度又包含泄漏后带来的危害情况（火势蔓延可能性、毒性大小及爆炸可能）、停工时间长短、经济损失大小以及环境污染程度等。

以风险管理为核心的全过程运维方案应该覆盖从设计到施工，再到使用直至报废的整个过程：设计与安装环节需要引入机械完整性（MI）的理念，规定管道的设计、施工、安装、检验以及试压都必须达到现行的标准，即“公认良好的工程实践”（RAGAGEP）。运维环节针对不同风险水平实行差异化运维模式，高危区域采取高强度、多元化的组合方式来加强巡检力度，而较低风险管道可以适当延长巡查间隔期从而减少维护开销。西宁城投水务公司在国家示范项目创建过程中对现有供水管网进行了更新和修复，共更新改造了 24.4km 供水管网并安装了 47 块流量计，并将 DMA 分区漏失预警系统接入了 155 个压力监测器和 22 座市政加压站的数据，做到精细化管理。

4.2 状态监测与智能维护技术应用

通过智能化进行质量管理，延伸到铸管出厂端，喷码机器人给每根铸管打印唯一的管号以及二维码，“数字基因”让整个生命周期都可以追溯。

智能化检修的优势在于：一是在线维修人员只需要通过手机对管道表面进行扫描就可以实现对其产品的规格、力学性能以及管道接口形式等相关的重要属性进行及时了解^[3]；二是通过大数据对故障进行预测，利用深度学习模型反向求取最优方案，在检测到壁厚超差的情况下可以反推出相应的工艺缺陷所在；三是维修策略改进，垂直大模型的应用场景已经达到了 49 项，在生产过程中的改进、产品质量把控、设备管理以及能源利用等方面都得到了应用。

4.3 维护资源配置与成本可靠性平衡

维护资源分配就是以有限的资金为基础来获得最大

的系统可靠性的过程。而整个期间费用控制—管材的选择、维护、升级现有的老旧管线等，方便顾客以及各相关方能够选择并使用易于安装以及耐腐蚀性好、使用寿命长久的球墨铸铁管件产品。创建维护成本-可靠性敏感系数模型，寻找效益高的维护活动；推广状态维修的理念，数据驱动代替定期预防维修，避免频繁无用干涉；开展分区式的维养资源共享，节约每米管道的维护开支。

4.4 标准化与规范化管理体系建设

规范化是保证产品质量稳定的保障措施之一。目前，《球墨铸铁管道系统应用指南 储存、修补和安装》国家标准正在拟定之中，修改采用 ISO 21051:2020^[4]。它规定了球墨铸铁管系统应用中储存以及修补和安装过程及方式，包括供水和供燃气用球墨铸铁管、排水工程用球墨铸铁管道系统等。

5 结束语

机械设备检修是保持铸管管线可靠性的必要措施，并非事后维修。本文研究结果显示：铸管管线失效具有很强的时间段属性，在不同的时间段有不同的维护需求，预防性维护通过降低故障发生率来减少故障次数，纠正性维护通过恢复功能状态来减小对系统的损伤，维护间隔时间和强度通过控制劣化速度来决定可靠性高低，三者构成了影响可靠性的三个因素，基于风险分析的维修计划、状态检测及智能化维修、全寿命周期成本最优、标准化建设是提高维修有效性的重要方式。未来铸管管线腐蚀速率预测模型的应用实践、基于数字孪生的维修决策支持系统研发、维修作业质量和标准制定等内容。基于智能传感器技术和大数据分析手段的应用，铸管管道维修正在由传统的“经验主导”向现代化“数据主导”的转变，对城市的生命线工程安全稳定运行也将更有助益。

[参考文献]

- [1]牛兴国.浅议管道工程机械设备维护管理[J].中国设备工程,2020,10(6):50-52.
- [2]贺万锋.基于大数据的炼油机械设备维护策略优化分析[J].中国设备工程,2026,15(6):72-74.
- [3]王荣.石油机械的日常维护与保养方法研究[J].模具制造,2026,26(3):243-245.
- [4]张建菲.石油机械设备管理与维护问题及优化策略[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(24):16-18.

作者简介：郭丽（1994.12—），毕业学校：郑州大学，专业：电气工程及其自动化，单位：永通球墨铸铁管有限责任公司运行维检车间，职务：机修钳工，职称：机械助理工程师。