

高压输水管道施工期水锤效应控制技术优化分析

文 / 何 玄 新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司云南分院

摘要：本文聚焦高压输水管道施工期水锤效应控制技术的优化议题，水锤效应由水流突变引发压力波动的形成机理及其对管道接头、结构完整性造成的渗漏、变形等危害的解析，可明晰施工期针对性控制技术对工程风险规避的核心价值。当前水力调控、结构防护、工艺调控及监测预警等技术的应用现状值得系统梳理，技术适配动态施工工况能力欠缺、多技术协同防控体系不够完善是其中突出问题。适配施工场景的技术选型优化、贴合施工流程的工艺改进、覆盖关键节点的监测系统升级及全流程管理机制完善等维度的具体优化策略提出，可为施工期水锤效应防控精准度提升提供技术参考，切实保障施工过程中管道结构安全与输水系统稳定运行。

关键词：高压输水管道；施工期；水锤效应；控制技术优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.007

引言

近年来，国家对水安全保障尤其是城乡及农村供水保障安全的重视，一大批城乡供水工程已陆续开工实施。在我国西南地区地形起伏大，长距离输水工程往往同样面临高水头的问题，其安全性和可靠性受到广泛关注。系统运行中发生的水锤会引起管道的压力剧烈波动，对输水管道及其附属构件造成破坏，尤其是在施工期的试运行调试阶段。传统的定性分析和系统中单独某个节点的风险分析不足以体现整个输水系统应对水锤的能力，高压输水管道作为核心设施，施工期水流状态随闸门启闭易催生水锤效应，由此引发的压力波动可能造成管道接头渗漏、结构变形乃至爆裂，直接危及施工安全与工程质量。施工期管道处于动态组装进程，工况复杂且稳定性不足，水锤防控难度较运营阶段明显增加，当前施工期水锤控制技术存在不少局限，难以与复杂施工环境相适配，深入探究施工期水锤控制技术的优化路径，对工程安全性提升、运维风险降低具备重要现实价值。

一、高压输水管道施工期水锤效应的形成机制

(一) 水锤效应的基本原理

水锤效应属封闭管道内液体流动时流速骤变引发压力剧烈波动的水力现象，阀门操作、泵机启停等因素致管道内水流速度突变，液体动量瞬间改变促使压力以波的形式在管道内传播，压力波于管道壁面与流体界面反复反射叠加形成周期性压力波动（见图1）^[1]。高压输水管道内水流本身承压较高，流速变化引发的压力波动幅度更大且传播速度更快，传播过程中管道局部区域可能出现超压或负压状态，超压易突破管道结构承载极限，负压可能诱发管道内水汽化产生气蚀，两类情形均会对管道系统造成损害。

(二) 施工期水锤效应的诱发因素

施工期管道系统尚未形成完整闭合回路，各段管道处于分段安装与调试阶段，水流状态调控面临较大困难，

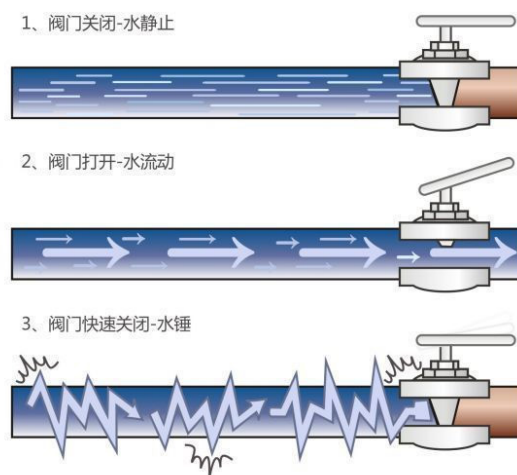


图1 水锤效应形成过程示意图

连接部位密封性能未达稳定状态，水流通过时易产生局部阻力突变进而成为水锤效应触发点。施工过程中泵机启停操作较为频繁，每次操作都会造成管道内水流速度突然变化引发压力波动，管道阀门启闭操作节奏控制不当则会使水流通道突然改变形成压力冲击，管道敷设路径上的高程变化、转弯角度等地形因素，施工阶段因临时支撑不够稳固可能加剧水流扰动提升水锤效应发生概率，临时输水方案调整导致的水流方向改变同样会诱发压力波动。

二、高压输水管道施工期水锤效应控制技术应用现状

(一) 水力控制技术应用情况

水力控制技术通过调节水流状态抑制水锤效应，施工期应用较为普遍，缓闭式阀门依托启闭时间梯度控制降低水流速度变化率，缩减压力波动幅度，气压罐借助罐内气体压缩性吸收压力波能量缓解压力冲击，调压塔凭借连通大气的竖向结构在压力波动时提供水流缓冲空间平衡管道内压力。这些技术施工中多以临时

装置形式布设，依据施工阶段管道工况设定参数，安装位置需结合施工进度动态调整，常因场地限制难以达至最优布设位置，临时装置运维保养缺乏系统开展，设备性能易随施工时间推移下降，对水锤效应的抑制效果存在局限。

（二）管道结构防护技术应用情况

管道结构防护技术从增强管道自身抗冲击能力着手应对水锤效应，材质选择上优先采用高强度钢材或复合材料提升抗压力性能，接口采用柔性连接方式借助接头弹性变形吸收部分压力波能量降低渗漏风险，支吊架设计强化稳定性通过增加支撑密度与强度限制压力冲击下的位移变形，施工中对焊接部位开展无损检测确保焊缝强度符合抗冲击要求。施工阶段管道多为露天放置或临时埋置，温度变化、土壤沉降等外部环境因素可能影响结构稳定性削弱防护技术实际效果，分段施工中不同批次材料性能一致性难以完全保障同样会导致防护效果出现差异。

（三）施工工艺调控技术应用情况

施工工艺调控技术依托施工流程优化减少水锤效应诱因，管道分段安装时严格把控接口密封质量，避免局部泄漏引发水流状态紊乱，泵机与阀门操作制定标准化流程明确启闭速度与顺序要求，充水阶段采用阶梯式升压方式逐步提升管道内水流压力降低压力突变风险，施工期间实时监测管道内水流状态并依据数据调整施工节奏。施工环节交叉作业频繁，不同工序团队对水锤防控要求理解存在偏差，工艺调控措施执行连贯性易受干扰，进度压力常导致工艺步骤简化、预定调控节奏被打乱，技术效果因此呈现不稳定状态^[2]。

（四）监测预警技术应用情况

监测预警技术依托压力变化感知提前捕捉水锤效应征兆，压力传感器布设管道关键节点实时采集压力数据传输至控制系统，控制系统连续分析压力数据，压力波动超出设定阈值时发出预警信号，施工人员依据预警信息采取应急调控措施降低水锤效应危害。施工期管道表面常覆盖保护层或临时支护结构，传感器安装需破坏局部结构影响管道整体性，信号传输线路沿施工区域布设易受机械作业干扰造成线路损坏或信号中断，监测数据准确性与及时性难以得到保证。

三、高压输水管道施工期水锤效应控制技术存在的问题

（一）技术适配性不足

当前水锤控制技术大多围绕运营阶段展开设计，对施工期动态场景适配性欠佳，管道的长度、直径及走向处于持续变动中，设定固定参数的装置难以达成实时匹配效果，临时配备的设备因场地条件制约，往往难以实

现最优配置状态。不同技术手段间协同程度不足，仅依靠单一方法很难全面覆盖多样化的诱发因素，导致防控过程中存在疏漏区域。技术参数的确定常依赖过往经验，缺少与施工各阶段相契合的量化调整模式，精准调控目标因此难以达成。

（二）施工工艺衔接不畅

施工工艺与水锤控制技术的衔接存在脱节问题，管道安装流程未充分纳入水锤效应防控需求，快速连接管道接口等施工步骤易造成局部水流阻力突变，泵机与阀门操作未完全依照预设调控流程执行，操作人员为追赶进度可能缩短操作时间引发不必要的压力冲击，管道充水与试压环节工艺参数设置不合理，未结合分段长度与材质特性调整升压速率，易在施工关键阶段诱发水锤效应。施工各环节技术交底不够充分，操作人员对水锤控制技术原理与操作要求理解不足，影响技术措施的实际落地效果^[3]。

（三）监测系统功能局限

当前监测系统在施工期水锤感知上表现乏力，传感器布设密度偏低，临时接驳这类薄弱环节存在监测空白，响应速率跟不上实际需求，数据采集的间隔超出压力波周期，很容易错过峰值数据，预警总是慢半拍，算法未结合施工复杂场景做针对性优化，对机械振动这类干扰信号难以区分，误报和漏报情况经常出现。系统与控制设备之间协同不佳，预警信息没法快速转化为调控操作，使得防控的关键时机被错失。

（四）管理机制不完善

当前水锤防控管理机制不完善，施工单位无专职管理团队，技术责任分散，统筹协调困难，施工方案缺细化要求，仅做原则性规定，未针对各阶段制订具体措施，培训重理论轻实操，施工人员对水锤危害认识不足，防控意识薄弱，应急预案可操作性差，未明确不同压力波动等级应对举措，突发情况难快速有效处置，易致事态扩大。

四、高压输水管道施工期水锤效应控制技术优化策略

（一）优化技术选型与适配性

施工期管道实际运行状态变化时，相应调控技术指标需随之调整，适配性强的临时调控装置同步开发，让技术指标与管道延展尺度、口径规格的变动保持即时适配。不同调控技术的协同配合需强化，水力调控、结构防护与工艺调节共同构成综合防范体系，囊括施工全过程可能引发水锤现象的各类因素，着眼施工阶段临时管道的特性，专项研发小型化、模块化调控设备，设备装设与调试的效率由此得到提升，技术选用评价框架逐步构建，施工进度与管道运行状况作为参考，各阶段适宜

的调控技术类别及配置方式得以合理确定。设备选用环节融入动态匹配算法, 传感器即时传回的管道压力信息成为依据, 设备运行指标自行调整, 调控成效得以持续维持在理想水平, 控制设备的临时养护规范同步制定, 设备性能指标定期查验, 老化构件及时更替, 施工期间设备运行的稳定性获得保障。

(二) 改进施工工艺衔接流程

水锤效应防控要求需融入施工流程设计环节, 一套标准化工艺路线由此确立, 覆盖管道安装、设备调试、充水试压等各个施工步骤, 泵机与阀门的操作流程持续优化, 自动化控制设备支撑下启闭动作的精准度得以提升, 人为操作可能出现的偏差相应减少。施工环节的交接检验制度逐步建立, 管道分段连接、设备安装等关键节点上, 水锤防控措施的实际落实状况得到严格核查^[4]。施工技术交底工作不断强化, 各工序涉及的水锤防控重点得以明确, 工艺要求能够有效传递至每个具体操作环节, 管道接口施工过程中采用预压密封工艺, 提前施加的合理压力保障接口具备良好密封性, 水流扰动的可能性随之降低。泵机启动前需完成空载调试, 设备运行参数保持稳定后方可接入管道系统, 设备异常导致水流波动的风险得到规避, 充水过程中布设多级压力监测点, 压力变化曲线实时呈现, 为工艺参数的动态调整提供可靠参考。

(三) 升级监测预警系统功能

加密压力传感器布设密度, 重点覆盖管道转弯处、接口部位等易发生压力波动的关键节点, 提升监测数据的空间完整性, 优化监测系统响应速度, 采用高频数据采集与传输技术缩短压力异常识别时间, 改进数据处理算法结合施工期管道结构特征建立压力波动分析模型提高预警准确性。构建监测与控制联动机制, 实现预警信号触发后控制设备自动调控形成闭环防控体系, 传感器安装采用无损固定方式避免破坏管道结构完整性, 同时配备防护外壳抵御施工环境干扰。数据传输采用无线 Mesh 网络技术确保复杂施工环境下信号稳定传输, 开发施工期专用压力波动识别算法剔除施工振动等干扰信号, 精准捕捉水锤效应特征波形实现早期预警。

(四) 完善技术管理机制

成立专门水锤效应防控管理团队明确技术责任分工统筹协调施工期防控工作, 制定详细技术实施细则针对不同施工阶段明确控制技术应用标准与操作要求, 强化施工人员技术培训结合理论讲解与实操演练提升水锤效应防控技术掌握能力, 修订应急处置预案明确突发状况处置流程与技术措施, 定期开展演练提升应急响应效率^[5]。管理团队定期召开防控例会分析施工期压力监测

数据评估防控效果并优化措施, 培训内容结合典型场景设计案例教学通过模拟压力波动处置强化操作技能。预案演练采用虚实结合模式依托 BIM 模型还原管道系统状态, 模拟不同水锤场景应急处置流程提升团队协同应对能力, 建立技术档案管理制度详细记录施工期压力波动数据与处置措施为后续工程提供参考。

(五) 建立施工期水锤防护模型

针对城乡供水长距离输水管道施工期工况复杂、地形多变的特点, 可引入 Hammer 或 KYPIPE 这类专业水力仿真软件搭建水锤防护模型, 模型要精准录入施工阶段管道分段参数、临时支撑条件、地形高程数据及设备运行特性, 模拟分段充水、泵机调试、阀门启闭等工序的水流状态变化, 对压力波动幅值、传播路径及影响范围做出预测。借助仿真分析找出高风险操作环节, 把操作参数对水锤的影响程度加以量化。在此基础上提出精细化要求: 闸门启闭依照最优时间梯度, 高差超过 50 米的管段设置分级程序, 单次幅度不超过 15%; 泵机启停前通过模型验算确定预充水压力; 临时路径切换时根据压力波传播时差制定阀门联动方案, 施工过程中定期用现场监测数据校准模型参数, 动态优化操作指令, 形成“仿真预测-现场执行-数据反馈-模型优化”的闭环防控机制, 从技术源头避免因操作不当引发的水锤灾害。

结语

高压输水管道施工阶段的水锤控制技术优化, 对工程安全意义重大, 当下技术适配性欠缺、工艺衔接存在断层等状况, 都在制约防控成效, 优化技术选型以动态调节参数, 改进施工流程来强化协同, 升级监测系统以提升预警效能, 完善管理机制并明确分工, 尤其是搭建专业软件防护模型且制定操作规范, 能够切实增强城乡供水长距离管道施工期的水锤防控水平, 减轻压力波动造成的损害, 保障施工顺利推进与管道长期稳定运行。

参考文献

- [1] 边少康. 长距离、多起伏、重力流输水工程关阀水锤特性及防护措施研究 [D]. 新疆农业大学, 2024.
- [2] 李源. 给水管网多级增压泵站水锤分析及防护措施优化研究 [D]. 青岛理工大学, 2024.
- [3] 路翰. 基于多目标优化方法下的水锤泵设计与控制方法研究 [D]. 兰州理工大学, 2023.
- [4] 宗琦. 泵站加压输水管道系统应对水锤的韧性研究 [D]. 湖南大学, 2022.
- [5] 范锡冉. 有压输水工程电动调节阀动态过流特性研究 [D]. 华北水利水电大学, 2022.

作者简介: 何玄(1993.03-), 男, 新疆石河子, 汉族, 本科, 工程师 研究方向: 水利工程与农田水利工程。