

包钢黄河暗渠综合治理技术研究

周振宇¹, 邸兴盛²

- 包头冶金建筑研究院, 内蒙古 包头 014010;
- 包钢勘察测绘研究院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:针对包钢引水暗渠运行65年以上凸显的淤积、渗漏、结构老化等复合病害,通过现场精细化检测,精准研判病害特征,采用“水平定向钻机+高压水射流清淤车”协同清淤技术、分级复合注浆堵漏技术,结合全过程闭环施工监测体系,构建系统综合治理方案。该方案实施后,暗渠输水功能全面恢复,过流能力从治理前的30%提高至设计输水流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$,结构使用寿命延长15年以上,为黄河流域高龄水利设施治理提供了可复制、可推广的技术范式。

关键词:高龄暗渠;协同清淤;分级堵漏;结构加固;施工监测

中图分类号: TU992.4

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)02-0085-05

Research on Comprehensive Treatment Technology for Closed Conduit of Yellow River in Baotou Steel

Zhou Zhenyu¹, Di Xingsheng²

- Baotou Metallurgical Construction Research Institute, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
- Baotou Steel Surveying and Mapping Research Institute, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The disease characteristics are accurately studied and judged through refined detection on site aiming at such composite diseases as sedimentation, leakage and structural aging that have become prominent during the operations of closed conduit for diversion closed conduit of Baotou Steel for over 65 years. The systematic comprehensive treatment scheme is established by adopting the collaborative dredging technology of “horizontal directional drilling machine + dredging vehicle with high-pressure water jet” and graded leaking stoppage technology of composite grouting as well as combining with the full-process closed-loop construction monitoring system. The water transfer function of closed conduit is fully recovered, conveyance capacity is increased from 30% before treatment to $5\text{ m}^3/\text{s}$, the designed flow rate of water transfer and service life of structure is extended by over 15 years after implementing this scheme, which provides the reproducible and propagable technological paradigm for treating aged water conservancy facilities in the Yellow River basin.

Key words: aged closed conduit; collaborative dredging; graded leaking stoppage; structural reinforcement; construction monitoring

水利基础设施的安全稳定运行是工业生产连续性与区域社会发展的重要保障。包钢 1 号系统引水暗渠作为厂区生产用水核心输配通道,自 1958 年投用以来已连续服役 65 年,受黄河水高含泥沙特性、水体长期侵蚀、混凝土材料老化等多重因素叠加影响,功能退化问题日益突出,直接威胁包钢生产用水安全。据测算,治理前暗渠日输水量仅为生产设计值的 30%,若持续恶化将导致钢铁生产主线停产。目前,国内外水利工程修复领域已形成多元技术体系,但针对运行超 65 年的高龄暗渠,其病害类型复杂、结构稳定性差、施工空间受限等问题,导致综合治理面临“清淤效率低、堵漏不彻底、结构易失稳”的技术瓶颈。本文结合包钢引水暗渠工程实例,细化治理技术参数,适配关键设备工况与监测标准,形成完善的综合治理方案,为同类高龄水利设施修复提供技术支撑。

1 工程概况与病害特征

1.1 工程基本情况

包钢 1 号系统引水暗渠始建于 1958 年,为现浇钢筋混凝土箱涵式结构,全长 1 430 m,内净高、净宽均为 2 m,壁厚 0.3 m,每 20 m 设置 1 条伸缩缝,埋深 2.5 ~ 4 m,设计输水流量 $5 \text{ m}^3/\text{s}$,主要承担包钢厂区生产用水输送任务。经第三方专业检测,渠内淤泥淤积高度达 1.2 ~ 1.5 m,内壁渗漏点密集,伸缩缝漏水严重,结构完整性受损,已无法满足正常输水需求。

1.2 主要病害

(1) 严重淤积。黄河水泥沙含量高,多年运行

导致渠底淤泥沉积厚度达 1.2 ~ 1.5 m,局部断面过水面积缩减超 70%,输水能力大幅衰减,无法满足包钢生产用水需求。

(2) 多处渗漏。点状渗漏点共计 368 处,按直径分级: $\leq 5 \text{ mm}$ 的小型漏点 279 处(占比 75.8%), $5 \sim 10 \text{ mm}$ 的中型漏点 76 处(占比 20.7%), $> 10 \text{ mm}$ 的大型漏点 13 处(占比 3.5%)。混凝土箱涵内侧壁线状裂缝共计 46 条,长度 0.6 ~ 1.2 m,宽度 0.15 ~ 2.8 mm,其中贯穿性裂缝 8 条,非贯穿性裂缝 38 条。伸缩缝渗漏 71 条,伸缩缝均存在不同程度老化破损,其中 28 条原始止水材料(止水橡皮、油麻)老化碳化深度 12 ~ 25 mm,连接钢板锈蚀面积占比为 68%,锚固螺栓脱落 42 颗,衍生形成 213 条疲劳性、变形性裂缝,部分裂缝宽度达 3 mm。

(3) 结构损伤。暗渠内腔壁混凝土多处出现裂缝、剥落等老化现象,凝土结构完整性受损,承载能力与稳定性受到严重威胁。

(4) 基础侵蚀。渗漏水体长期侵蚀暗渠土基基础,导致对应区域土体密实度下降,进一步加剧混凝土结构变形与裂缝发展,形成“渗漏 - 侵蚀 - 结构失稳”的恶性传导循环。

2 综合治理技术方案

2.1 清淤疏通技术

采用“水平定向钻机 + 高压水射流清淤车 + 真空抽吸系统”协同作业模式,实现非开挖式高效清淤,较传统“人工 + 机械辅助”清淤效率提高 5 ~ 10 倍,施工扰动小、安全性高。表 1 为清淤核心设备、配件及功能。

表 1 核心设备、配件及功能

设备/工具名称	型号规格	核心配件	功能说明
水平定向钻机	徐工 XZ320D	$\Phi 114 \text{ mm}$ 导向钻头(带扶正器),双作用泥浆马达,GPS 定位模块	最大回拖力 320 kN,钻进深度 15 m,GPS 定位精度 $\pm 5 \text{ cm}$,精准导向并扰动淤泥结构
高压水射流清淤车	GYS - 80 型	360° 旋转喷射枪头(孔径 2.8 mm),压力调节阀门	工作压力 15 ~ 25 MPa,流量 80 L/min, 360° 切割淤泥,转化为悬浮液
真空抽吸系统	ZWY - 120 型真空泵 + LS - 50 型分离器	300 mm 口径耐磨软管,120 目固液分离筛网	抽吸功率 120 kW,速度 $18 \text{ m}^3/\text{h}$;分离效率 $\geq 96\%$,清水达标排放,淤泥固化外运

严格遵循《有限空间作业安全技术规范》(GB 30871—2022)^[1],流程如下:

(1) 降水排水。通过临时排水泵将暗渠内水位

降至淤泥表面以下 0.5 m,确保淤泥暴露。

(2) 气体检测。作业前 30 min 检测暗渠内气体浓度, O_2 浓度 $\geq 19.5\%$,有毒有害气体浓度低于限

值方可进入。

(3) 稀释淤泥。高压水射流喷洒清水,将淤泥含水率调节至 65% ~ 70%,降低抽吸阻力。

(4) 导向钻进扰动。水平定向钻机沿渠底轴线钻进,钻头旋转扰动淤泥结构,破坏淤泥团聚性。

(5) 高压切割悬浮。高压水射流枪头 360° 旋转切割,将扰动后的淤泥转化为均匀悬浮液。

(6) 真空吸淤。真空抽吸泵通过软管将悬浮淤泥抽送至地表分离器,实现固液分离。

(7) 清洗疏通。高压水枪冲洗渠壁残留淤泥,确保渠壁清洁,过水断面恢复设计尺寸。

清淤作业流程如图 1 所示。图中用箭头标注钻进方向、喷射方向、抽吸方向,清晰展示设备协同逻辑。

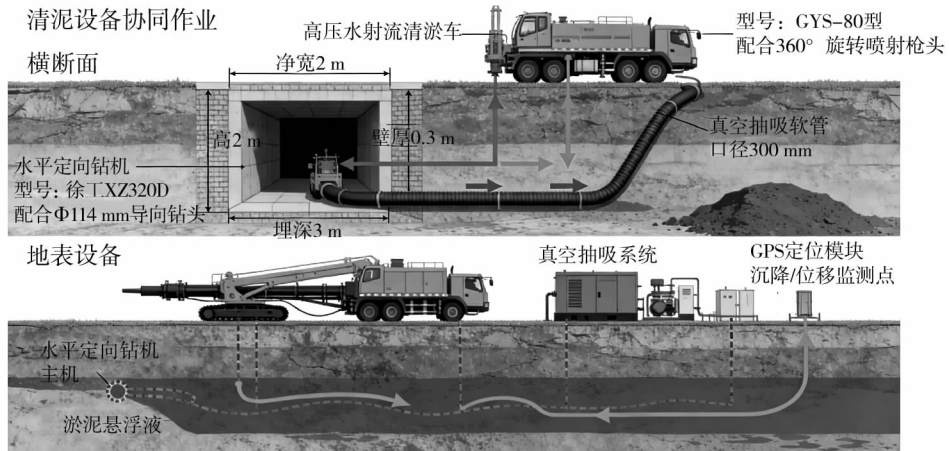


图 1 清淤设备协同作业示意图

2.2 堵漏修复技术

遵循“分类施策、靶向封堵、逐层加固”原则,针对不同渗漏缺陷采用差异化方案,确保封堵密实、耐久可靠。

2.2.1 分级堵漏工艺

针对不同类型渗漏缺陷,采用差异化堵漏方案,确保封堵密实、耐久。

(1) 点状渗漏处理。选用符合 JC/T 2041—2020 标准^[2]的 PU-800 型高分子油性聚氨酯注浆材料,该材料遇水膨胀率为 300% ~ 500%,初凝时间为 2 ~ 5 min。注浆压力控制在 0.3 ~ 0.5 MPa,低压慢注避免原结构二次破坏,注浆量按漏点实际体积的 1.2 倍控制,小型漏点(≤ 5 mm)注浆后 3 ~ 5 min 止住明流,7 min 完全封堵;中型漏点(5 ~ 10 mm)注浆后 5 ~ 8 min 止住明流,10 min 完全封堵;大型漏点(> 10 mm)采用“分层注浆法”,先注入底层材料(占总注浆量的 60%),固化 3 min 后补注上层材料,12 ~ 15 min 完全封堵。

(2) 线状裂缝处理。选用丙烯酸盐化学浆液(渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-9}$ cm/s,断裂伸长率 $\geq 200\%$),采用“开槽-清理-封缝-注浆”工艺,沿裂缝开槽

(宽度 10 mm、深度 15 mm),高压气(0.8 MPa)吹扫槽内杂物,涂刷界面剂后用堵漏灵封闭槽口两侧,预留注浆孔(间距 300 mm),注浆压力从 0.2 MPa 逐步提高至 0.6 MPa,注浆后 8 ~ 12 min 裂缝填充密实,形成柔性防水帷幕。

(3) 伸缩缝处理。采用“老化材料清除-基层强化-多重防护”工序,先用高压水射流(压力 5 MPa)清除老化止水材料及钢板锈蚀,钢丝刷打磨缝隙内壁至露出新鲜混凝土基面(打磨深度 2 ~ 3 mm),涂刷环氧底漆;分层填充油麻(填充厚度 20 mm,压实密度 ≥ 1.85 g/cm³),外侧涂抹堵漏灵(厚度 15 mm,抗压强度 ≥ 28 MPa);最后采用聚氨酯压力注浆,注浆压力 0.3 ~ 0.8 MPa,注浆量为缝隙体积的 1.5 倍,注浆后 20 ~ 25 min 完全封堵,无渗漏。

2.2.2 基础加固与结构补强

(1) 土体空洞填充。向衬砌背后及渠体周边掏空土体区域,灌注水泥基复合灌浆材料(抗压强度 ≥ 35 MPa,初凝时间 6 ~ 8 h),采用分段注浆法(每段 5 m),注浆压力为 0.8 ~ 1.0 MPa,确保土体密实度恢复至设计要求。

(2)混凝土破损修复。对内壁疏松破损部分,采用不小于 C35 水泥基修补砂浆局部修补,修补厚度为 5~12 mm,修复后通过“敲击法”检测密实度(空鼓率<5%),采用回弹仪检测混凝土强度(实测强度 ≥ 30 MPa)。

2.2.3 整体防水处理

暗渠内壁整体涂刷符合 GB 50108—2022 标准^[3]的渗透结晶防水涂层,涂刷厚度 1.5 mm,分两道施工(第一道干燥时间 ≥ 6 h),形成“点-缝-

面”全方位防水体系。所有材料进场前均进行抽检,聚氨酯注浆材料合格率达到 100%,防水涂层性能达标率为 100%。

2.3 施工监测方案

实时监控施工过程中暗渠结构变形、土体状态、渗漏量及作业环境安全,确保施工安全与治理效果,及时预警结构失稳风险,为施工参数动态调整提供数据支撑。表 2 为施工监测项目、仪器与布置。

表 2 监测项目、仪器与布置

检测类别	监测项目	仪器型号	量程与精度	监测点布置
结构变形监测	沉降监测	徕卡 TS60 全站仪	测角精度 0.5", 测距精度 $\pm(1 + 1.5 \times 10^{-6} D)$ mm	沿暗渠轴线每 50 m 布设 1 个,伸缩缝两侧、土体空洞对应区段各增设 1 个,共 32 个点
	裂缝宽度监测	JMZX-212 型测缝计	量程 0~5 mm,精度 ± 0.01 mm	46 条线状裂缝中点位置,共 46 个点
渗漏监测	渗漏量监测	LS-10 型流量计	量程 0~50 L/min,精度 $\pm 1\%$ FS	大型点状漏点、长距离线状裂缝、伸缩缝渗漏处,共 22 个点
作业环境监测	气体浓度监测	CD4 型多参数检测仪	O ₂ : 0~25%, CO: 0~1 000 mg/m ³	暗渠内每 50 m 布设 1 个检测点,作业人员随身携带便携式检测仪,共 30 个检测点

清淤阶段每 1 小时监测 1 次结构沉降、气体浓度;每 2 小时监测 1 次裂缝宽度;注浆修复阶段每 30 分钟监测 1 次裂缝宽度、渗漏量;每 1 小时监测 1 次结构变形。施工结束后持续监测 72 小时,每 4 小时监测 1 次所有项目。

结构变形沉降预警值为 5 mm,裂缝宽度扩展预警值为 0.3 mm;环境安全:O₂<19.5% 或 >23.5%、CO>30 mg/m³ 时预警。

监测数据达到预警值时,立即暂停施工,撤离作业人员,采用“临时支撑加固+参数调整”措施(如降低注浆压力、减小清淤扰动强度),待数据恢复至安全范围后,经复核确认方可恢复施工。

3 治理效果分析

治理后通过第三方检测与 72 小时持续监测,暗渠功能全面恢复。所有渗漏点完全修复,防水性能满足一级防水标准;裂缝、伸缩缝缺陷彻底修复加固,经第三方鉴定,使用寿命延长 15 年以上;淤泥完全清除,过流能力恢复至设计值的 100%,满足生产

用水需求;土基密实度显著提高,结构稳定性大幅增强,规避失稳风险。暗渠渗漏修复前后效果对比见图 2。

施工全过程无监测数据超限情况,设备运行参数稳定,结构状态可控,验证了治理方案的科学性与安全性。

从图 2 看出,暗渠渗漏修复治理后内壁平整完好,各类渗漏缺陷彻底消除。

4 现存问题与改进建议

4.1 核心遗留问题

暗渠伸缩缝漏水严重区段正上方存在长约 60 m、水深约 3 m 的积水塘,为历年洪水溢流及流凌冲刷形成,该段暗渠上方已无有效覆土,呈悬浮状态,受水体扰动存在结构断裂风险,需专项处理。

4.2 改进建议

采用“混凝土排桩+冠梁+回填压实”复合支护体系,首先封堵积水塘进水通道并抽干积水,清除淤泥;其次在暗渠两侧布设 $\Phi 600$ mm 混凝土排桩

(桩长 8 m, 间距 1.5 m), 顶部浇筑 800 mm × 500 mm 冠梁形成整体支护; 最后周边回填级配砂石

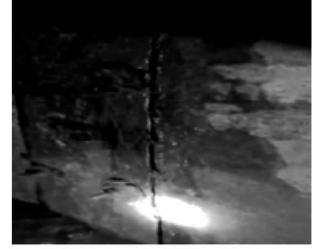
并分层压实(压实度 $\geq 95\%$), 确保暗渠结构长期稳定。



点状渗漏修复前



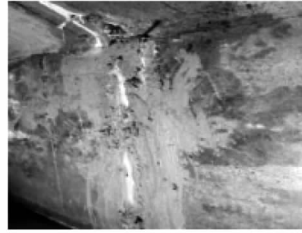
结构裂缝渗漏修复前



伸缩缝渗漏修复前



点状渗漏修复后



结构裂缝渗漏修复后



伸缩缝渗漏修复后

图2 暗渠渗漏修复前后效果对比图

5 结束语

针对包钢黄河暗渠运行 65 年出现的淤积、渗漏、结构老化等复合病害, 通过“精准检测 - 高效清淤 - 分级堵漏 - 全程监测”的综合治理思路, 采用水平定向钻机与高压水射流协同清淤、复合注浆分级堵漏技术, 结合完善的施工监测体系, 实现了暗渠功能的全面恢复。该方案细化了设备参数、工艺指标与监测标准, 有效解决了高龄暗渠治理中“清淤效率低、堵漏不彻底、结构稳定性差”的技术难题, 治理效果经工程实践验证显著。该技术成果为黄河流域同类高龄水利设施治理提供了可复制的技术范式, 对推动区域水利基础设施高质量发展、保障工业

生产安全具有重要实践意义。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国应急管理部. 有限空间作业安全技术规范: GB 30871—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 聚氨酯灌浆材料: JC/T 2041—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地下工程防水技术规范: GB 50108—2022 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.