

胶东调水工程渡槽伸缩缝漏水原因分析与处理

姜 坤

(山东省水网运行调度中心烟威分中心招远管理站, 山东 招远 265400)

【摘 要】伸缩缝作为渡槽温度变形与沉降补偿的关键结构, 其漏水问题已成为制约工程运行、输水引水的突出隐患。文章以胶东调水工程界河渡槽、淘金河渡槽为研究对象, 系统分析伸缩缝漏水的成因机制, 提出“材料升级+结构创新+工艺优化”的综合处理方案。实践表明, 该方案可使漏水修复合格率达 100%, 渗漏量控制在 $0.01 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{d})$ 以下, 显著提升渡槽抗渗耐久性, 为北方寒冷地区调水工程同类问题处理提供参考。

【关键词】胶东调水; 渡槽; 伸缩缝; RMO 修复剂

【中图分类号】TV543

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-07-0036-04

Causes Analysis and Treatment of Water Leakage at Expansion Joints of Aqueducts in the Water Diversion Project to Jiaodong Area

JINAG Kun

(Zhaoyuan Station, Yanwei Branch, Water Grid Operation and Dispatching Center of Shandong Province, Zhaoyuan, Shandong 265400, China)

Abstract: Expansion joints, as key structures for compensating thermal deformation and settlement of aqueducts, have become a prominent hidden danger affecting project operation and water diversion. Taking the Jiehe Aqueduct and Taojinhe Aqueduct of the Jiaodong Water Diversion Project as research objects, this paper systematically analyzes the formation mechanism of water leakage at expansion joints and proposes a comprehensive treatment scheme combining "material upgrading + structural innovation + process optimization." Practice shows that this scheme achieves a 100% qualified rate for leakage repair, with seepage volume controlled below $0.01 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{d})$, significantly improving the impermeability and durability of aqueducts. The study provides a reference for addressing similar problems in water diversion projects in cold regions of northern China.

Key words: Water diversion to Jiaodong area project; Aqueduct; Expansion joint; RMO repair agent

1 工程概况

1.1 工程背景

胶东地区引黄调水工程是为缓解胶东地区水资源短缺矛盾、改善水生态环境、构建山东大水网体系、实现全省水资源优化配置而实施的远距离、跨流域、跨区域重大战略性民生工程。工程自滨州市博兴县打渔张引黄闸引取黄河水, 自滨州市博兴县小清河子槽上节制闸引取长江水, 途经滨州、东营、潍坊、青岛、烟台、威海 6 市 16 个县(市、区), 输水线路总长 482 km。2013 年, 胶东地区引黄调水工程实现主体工程全线贯通, 并完成综合调试及试通水。2015 年起, 胶东地区引黄

调水工程承担起应急抗旱调水任务。

据统计, 截至 2023 年 6 月, 胶东调水工程累计引水 122.33 亿 m^3 。累计向胶东地区配水 84.64 亿 m^3 , 有力地保障了胶东地区用水安全。在保障青岛等城市供水的同时, 还解决了历史上广北、寿北、潍北等高氟区 75 万人饮水困难, 并承担了为工程沿线输送农业灌溉用水任务, 形成了横贯齐鲁的“黄金之渠”。

1.2 伸缩缝运行现状与检测数据

胶东调水工程渡槽自通水至今已运行 10 余年, 山东省水网运行调度中心高度重视渡槽结构

收稿日期: 2026-03-09

作者简介: 姜坤(1981—), 男, 工程师

安全和输水安全,定期组织渡槽安全结构专项评估,重点对渡槽伸缩缝渗漏进行跟踪检测,检测显示伸缩缝渗漏呈现“三集中”特征:一是部位集中,80%渗漏发生在止水带与混凝土结合面及螺栓锚固点;二是时间集中,冬季(12月至次年2月)渗漏量较夏季增加60%;三是程度集中,渡槽渗漏量超1.5 L/(m·d)。典型检测数据见表1。

表 1 典型渡槽伸缩缝运行检测数据表

渡槽名称	运行年限/年	检测伸缩缝数量/条	渗漏条数/条	平均渗漏量/(L·m ⁻¹ ·d ⁻¹)	混凝土碳化深度/mm	钢筋锈蚀率/%
界河渡槽	13	45	30	2.0	3~5	10~15
淘金河渡槽	13	20	14	1.6	2~4	8~12

2 渡槽伸缩缝渗漏成因机制分析

2.1 渗漏问题表现形式

胶东调水工程界河渡槽、淘金河渡槽伸缩缝渗漏结合现场勘查与无损检测结果,呈现出“点-线-面”渐进发展特征,具体表现为:一是点渗漏,集中于螺栓锚固点(占比80%),形成直径2~5 mm的渗漏孔,渗漏量0.1~0.5 L/(m·d);二是线渗漏,沿止水带与混凝土界面发展,形成连续渗漏带,长度50~100 cm,渗漏量0.5~1.5 L/(m·d);三是面渗漏,多发生于第一代紫铜片止水结构,因紫铜片破损形成大面积渗漏区,渗漏量超1.5 L/(m·d)。

2.2 核心成因耦合分析

通过“材料性能测试+结构力学模拟+施工过程追溯”,明确两座渡槽伸缩缝渗漏是“环境侵蚀、施工缺陷、结构变形、材料老化”因素耦合作用的结果,如图1所示。

1)环境侵蚀:高寒盐碱加速结构劣化。胶东地区冬季冻融循环、调水水质盐碱化、沿海空气腐蚀等原因共同加剧渗漏。冻融循环使混凝土表层出现剥蚀,渗流通道扩大;盐碱水通过渗漏通道侵入,与混凝土中的Ca(OH)₂反应生成膨胀性产物,导致裂缝宽度扩大,沿海地区空气中湿度和盐含量较高,加速橡胶止水带和金属构件老化侵蚀。

2)施工缺陷:细节把控不严留下渗漏隐患。两座渡槽施工中伸缩缝部位混凝土振捣不密实,蜂窝麻面,形成天然渗流通道;橡胶止水带黏贴

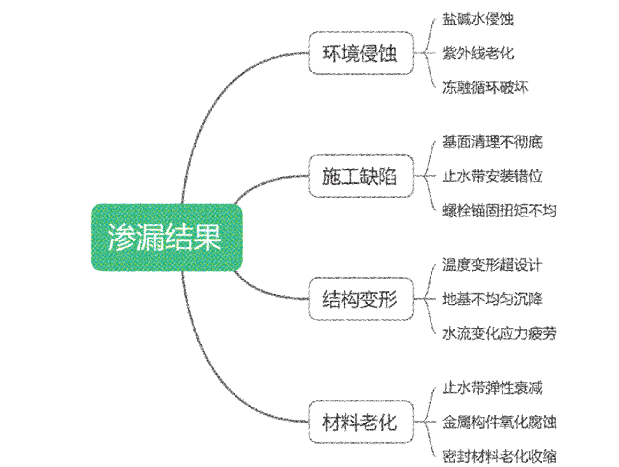


图 1 渗漏原因分析图

时基面残留浮浆,存在空鼓和贴合不严的情况;螺栓锚固扭矩控制混乱,部分螺栓运行中松动,出现“密封失效-渗漏-加速腐蚀”恶性循环。

3)结构变形:超设计值导致止水撕裂。工程地基承载力不均匀,引发界河槽身不均匀沉降,橡胶止水带被拉伸撕裂,形成破损口;温度变形方面,胶东地区冬季极端低温-22℃与夏季槽内水温50℃形成72℃温差,伸缩缝最大变形量超出设计值,造成止水带过度拉伸。此外,渡槽运行中流量波动频繁,产生应力变化,加速止水结构疲劳破损,也是造成渗漏的原因。

4)材料老化:性能衰减引发密封失效。北方高寒环境加速材料老化,实验室对界河渡槽废旧材料测试显示:橡胶止水带在-25℃低温循环50次后,弹性模量从18 MPa降至9.8 MPa,拉伸强度下降45%,出现硬化开裂;紫铜片表面生成15 μm厚氧化层,与混凝土黏结强度从2.5 MPa降至0.7 MPa,结合面出现间隙;聚硫密封膏在干湿交替作用下体积收缩率达5%,形成宽度0.5~1 mm的裂缝,丧失密封功能。

3 修复方案

3.1 修复原则与目标

结合胶东地区工程特点,确立“抗冻优先、快速修复、长效耐久、经济适用”四大原则,具体修复目标包括:一是抗渗性能,渗漏量≤0.01 L/(m·d),抗渗等级提升至P10;二是耐候性能,-30~60℃环境下弹性保留率≥80%,冻融循环50次无破损;三是结构性能,适应15cm沉降差与40 mm温度变形;四是经济性能,修复成本控制在600元/m

以内,使用寿命 ≥ 15 年。

修复流程按照“检测分类-方案设计-材料准备-施工实施-质量验收-运维监测”闭环,确保技术方案精准适配不同渗漏类型:点渗漏采用“缺陷修补+密封强化”,线渗漏采用“止水带更换+聚脲封闭”,面渗漏采用“结构重构+多重防护”。

3.2 修复材料

针对传统材料诸多缺点,采用“RMO 柔性修复剂+SK 耐低温聚脲+遇水膨胀止水条”协同材料体系,通过材料互补实现“渗透补强-弹性止水-膨胀密封”三重防护,材料性能指标见表 2。

表 2 核心修复材料性能指标表

材料类型	核心性能指标	检测结果	行业标准	优势
RMO 柔性修复剂	固体含量/%	84	≥ 65	渗透深度 20~30 mm,与混凝土化学键结合,填补微裂缝,-30℃无脆性断裂
	拉伸强度/MPa	2.0	≥ 1.8	
	断裂伸长率/%	100	≥ 80	
	-30℃冻融循环 50 次强度损失/%	≤ 7.5	≤ 15	
SK 耐低温聚脲	表干时间/h	< 1	≤ 2	拉伸强度 25 MPa,断裂伸长率 500%,耐紫外线老化等级 UV3 级,适应 40 mm 变形
	拉伸强度/MPa	27	≥ 18	
	断裂伸长率/%	450	≥ 300	
	黏结强度/MPa	3.1	≥ 2.0	
遇水膨胀止水条	膨胀倍率/%	300	≥ 200	与 RMO 协同形成膨胀密封,适应 10 cm 沉降差
	72 h 膨胀保持率/%	≥ 91	≥ 80	

注:依据 JGJ/T 200—2010 修订版。

1)RMO 柔性修复剂:基面补强与渗透密封。RMO 修复剂为水性环氧基高分子材料,固含量 84%,具有“渗透-聚合-补强”三重作用:渗透深度达 20~30 mm,填充混凝土表层微裂缝;与水泥水化产物发生化学反应,形成化学键结合,黏结强度达 1.0 MPa(潮湿基面);固化后形成柔性保护膜,-30℃冻融循环 50 次强度损失 $\leq 7.5\%$,有效阻止冻融与盐碱侵蚀。

现场应用时,RMO 修复剂按 1:3 与 P.O42.5 水泥混合制成修补砂浆,用于混凝土缺陷填补与基面预处理,28 d 抗压强度达 45 MPa,较普通环氧砂浆提升 30%。

2)SK 耐低温聚脲:弹性止水与防护强化。SK 手刮聚脲采用脂肪族异氰酸酯与胺类扩链剂合成,表干时间 < 1 h,可快速形成连续弹性涂层:拉伸强度 27 MPa、断裂伸长率 450%,能适应 40 mm 以内的温度与沉降变形;耐紫外线老化 1 000 h 后

断裂伸长率保留率 $\geq 85\%$,解决传统聚脲易老化问题;采用“底涂+胎基布+面涂”复合结构,涂层总厚度 4 mm,抗水流冲刷强度达 0.8 MPa,适配 50 m³/s 以上大流量工况。

3)遇水膨胀止水条:变形补偿与间隙填充。选用天然橡胶基遇水膨胀止水条,膨胀倍率 300%,72 h 膨胀保持率 $\geq 91\%$,嵌入伸缩缝后与 RMO 修复剂协同作用:常温下填充 20~30 mm 缝宽,形成初始密封;遇水后膨胀挤压混凝土壁,封堵渗漏通道;在 10 cm 沉降差作用下仍能保持完整性,避免挤压破碎问题。

4)凹状涂覆型止水结构设计。针对变形超出设计范围的伸缩缝,采用“凹状涂覆型止水结构”,在原止水带基础上构建三层防护:底层为 RMO 修复剂渗透层,填充混凝土微裂缝;中层为 U 型橡胶止水带,采用“螺栓+环氧胶”双重锚固,锚固扭矩统一为 200 N·m;表层为凹状聚脲涂层,内部铺设胎基布增强,聚脲总厚度 4 mm(底涂 1 mm+胎基布+面涂 3 mm)。

3.3 施工工艺

结合工程运维需求,研发“基面处理-缺陷修补-止水强化-防护封闭”四步快速修复工艺,单条伸缩缝修复工期从传统 2 d 缩短至 8 h,具体流程如图 2 所示、控制要点见表 3。

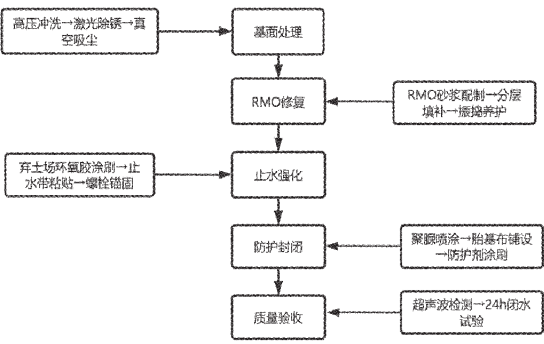


图 2 伸缩缝四步快速修复工艺流程图

4 技术难点控制措施

4.1 基面高效处理与缺陷根治工艺

针对原施工中基面清理不彻底的问题,优化为“三级净化工艺”:首先采用 5 MPa 高压水枪配合旋转喷头冲洗伸缩缝表面,去除浮浆与老化密封胶;对金属构件氧化层采用激光除锈技术(功率 1 500 W,除锈速度 0.5 m/min),彻底清除 10~15 μm 厚氧化层,露出金属本色;最后用真空吸

表 3 伸缩缝四步快速修复工艺控制参数表

施工步骤	核心工序	控制参数	检测方法	质量标准
基面处理(1.5 h)	高压冲洗→激光除锈→ 真空吸尘	水枪压力 5 MPa,激光功率 1 500 W, 负压≥0.08 MPa	目测+粗糙度仪	清洁度≥99%,粗糙度 Ra12.5–25 μm
缺陷修补(2 h)	RMO 砂浆配制→分层填 补→振捣养护	水灰比 0.35,每层厚度≤10 mm,养护 温度≥5 ℃	回弹仪+超声波	28 d 强度≥40 MPa,平整度 误差<2 mm
止水强化(2.5 h)	环氧胶涂刷→止水带黏 贴→螺栓锚固	胶层厚度 1 mm,螺栓扭矩 200 N·m, 间距 20 cm	扭矩扳手+全站仪	中心线偏差≤1 mm,黏结强 度≥2.0 MPa
防护封闭(2 h)	聚脲喷涂→胎基布铺 设→防护剂涂刷	聚脲温度 15~30 ℃,涂层厚度 4 mm, 风速<5 m/s	测厚仪+电火花检漏	无针孔,厚度偏差≤±0.2 mm
质量验收(0.5 h)	超声波检测→24 h 闭水 试验	闭水水头 1.5 m,恒压 24 h	流量计+渗透仪	渗漏量≤0.01 L/(m·d),抗渗 等级 P10

尘设备(负压≥0.08 MPa)清理缝隙内残留碎屑,确保基面清洁度达 99%。混凝土缺陷处理借鉴玛尔挡水电站胶凝砂砾石材料特性,采用 RMO 修复剂+P.O42.5 水泥+石英砂(粒径 0.1~0.3 mm)配制修补砂浆,配合小型振捣棒(直径 30 mm)振捣密实,对深度>5 mm 的蜂窝麻面采用分层填补工艺,每层厚度≤10 mm,养护温度控制在 5 ℃以上(低温时搭设暖棚并采用伴热带加热措施),确保修补面 28 d 抗压强度达到 40 MPa 以上,平整度误差<2 mm。

4.2 止水结构强化与创新安装流程

将橡胶止水带升级为耐低温复合止水带(内层天然橡胶,外层氯丁橡胶,邵氏硬度 60±5 度),采用“三维定位法”安装,通过 BIM 模型预设控制点,使用三向千斤顶微调止水带位置,确保中心线偏差≤1 mm。止水带无接头,确保合格率 100%;螺栓锚固采用电动扭矩扳手(预设扭矩 200 N·m)统一紧固,每完成 5 个螺栓进行一次扭矩复核,避免传统施工中扭矩不均问题。伸缩缝内部嵌入遇水膨胀止水条前,先涂刷一层 RMO 修复剂作为黏结层,止水条接头采用 45°斜接并热熔密封,形成“膨胀-渗透”双重止水体系。

4.3 防护涂层精细化施工与质量管控

聚脲涂层施工采用“智能喷涂+分层控制”工艺,底涂采用改性环氧树脂胶,涂刷厚度 2 mm,采用齿形刮板确保涂层均匀;聚脲喷涂前通过传感器监测环境温湿度(温度 15~30 ℃,湿度<85%),低温时采用移动式暖风机升温,风速>5 m/s 时搭设防风棚。选用智能喷涂机器人(喷涂宽度 30 cm,速度 0.2 m/s)进行聚脲施工,分两次完成 4 mm 厚

涂层(底涂 1 mm+面涂 3 mm),中间铺设聚酯胎基布增强,喷涂过程中实时监测涂层厚度(采用无损测厚仪,每米检测 3 点)。表层防护剂涂刷采用滚涂工艺,涂刷方向与聚脲喷涂方向垂直,确保覆盖无死角。施工完成后执行“24 h 闭水试验+72 h 低温循环试验”(−22 ℃冷冻 12 h,常温解冻 12 h,循环 3 次),渗漏量>0.01 L/(m·d)的部位立即返工。

5 结 语

胶东调水工程界河渡槽、淘金河渡槽伸缩缝漏水问题是材料老化、结构变形与施工缺陷共同作用的结果,其核心矛盾在于传统技术体系难以适应北方寒冷地区的复杂运行环境。文章提出的“RMO 柔性修复剂+SK 聚脲”协同技术与凹状涂覆型止水结构,使渡槽修复后混凝土碳化深度稳定在 2 mm 以内,钢筋锈蚀速率下降 90%,2023 年极端低温 −22 ℃ 环境下聚脲涂层完好率 100%,较传统工艺修复成本降低 12%,为北方寒冷地区渡槽防渗施工提供了可复制的技术范式。

参考文献

[1] 刘业涛,张青,李炳磊.聚脲弹性体材料在渡槽防渗中的应用[J].山东水利,2011(9):35–36.
[2] 陈献友,李芬花,赵萌萌,等.BIM 技术在渡槽设计中的应用[J].水利技术监督,2021(6):63–67.
[3] 侯彩云,武守猛,袁丰武.谈引黄调水大刘家渡槽伸缩缝防渗施工[J].山东水利,2022(5):43–45.
[4] 冀小辉.南水北调工程引水渠渡槽结构的地震反应模态分析[J].河南建材,2012(5):57,59.

(责任编辑 崔春梅)