大型泵站流道混凝土缺陷修复处理技术研究

温逸凡
广东水电二局集团有限公司 广东 广州 511340

摘 要 大型泵站是水利枢纽工程的核心，流道混凝土结构是否完好，直接关系到泵站运行的安全与稳定。本文结合大型泵站流道混凝土的实际工作状态，全面分析了混凝土常见缺陷的种类与形成原因，梳理了目前常用的修复处理技术，包括表面修复技术、裂缝注浆修复技术、结构加固修复技术和防护型修复技术，并清晰说明了各类技术的核心工作原理与适用场景。文章结合某大型泵站流道混凝土缺陷修复的实际案例，通过具体数据和检测结果，验证了这些修复技术的应用效果。该研究成果可为大型泵站流道混凝土缺陷的诊断与修复工作提供理论支持和工程实践参考。

关键词 大型泵站；流道混凝土；缺陷修复；注浆技术；结构加固

Research on Remediation Technologies for Concrete Defects in Large Pump Station Channels

Wen Yi-fan
Guangdong No.2 Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd., Guangzhou 511340, Guangdong Province, China

Abstract Large pump stations are the core of water conservancy hub projects. The integrity of the concrete structure in the flow channels directly affects the operational safety and stability of the pump station. Based on the actual working conditions of concrete in large pump station channels, this paper comprehensively analyzes the types and causes of common concrete defects. It reviews currently used remediation technologies, including surface repair technology, crack grouting repair technology, structural strengthening and repair technology, and protective repair technology, clearly explaining the core working principles and applicable scenarios of each technology. The paper also presents a practical case study of concrete defect remediation in a large pump station channel, verifying the application effectiveness of these technologies through specific data and test results. The research findings can provide theoretical support and engineering practice references for the diagnosis and repair of concrete defects in large pump station channels.

Key words Large Pump Station; Channel Concrete; Defect Remediation; Grouting Technology; Structural Strengthening

大型泵站是防洪排涝、农田灌溉、水资源调配和城乡供水的重要基础设施，其工程质量和运行效果，直接影响区域水安全和经济社会发展。流道是泵站的核心输水通道，混凝土结构长期面临水流冲刷、干湿交替、温度变化和不均匀沉降等多种影响，容易出现裂缝、剥落、渗漏等问题，这会削弱结构的整体性、抗渗性和承载力，加快钢筋锈蚀速度，威胁结构安全和使用年限。如今，大量早期建设的泵站已进入中后期运行阶段，流道修复的需求越来越迫切，只是流道体型复杂、受力情况特殊，对修复技术的适配性、耐久性和施工可行性有着更高要求。因此，系统梳理缺陷产生的原因，对比选择合适的修复工艺，结合工程实践验证修复效果，有着重要的现实意义。

1 大型泵站流道混凝土缺陷类型及成因分析

1.1 主要缺陷类型

大型泵站流道混凝土的常见缺陷，按表现形式可分为表层缺陷、内部缺陷和功能性缺陷三类。表层缺陷有蜂窝麻面、剥落、露筋和表面裂缝，这类缺陷直接暴露在外，容易受外界因素影响而加重恶化；内部缺陷主要是混凝土脱空、内部裂缝和孔洞，隐蔽性较强，难以直接检测，对结构整体性的危害更大；功能性缺陷体现为混凝土碳化、抗渗能力下降，以及钢筋锈蚀带来的结构性能变差，直接影响混凝土结构的使用功能和耐久程度。

1.2 缺陷成因分析

混凝土出现缺陷，是材料特性、施工过程和服役环境等多种因素共同作用的结果。材料层面，水泥、骨料、外加剂等原材料质量不达标，配合比设计不合理，混凝土拌制时计量有偏差、搅拌不够均匀，都会让混凝土强度不足、密实性变差，为缺陷产生留下隐患。施工过程中，模板安装不牢固、接缝密封不严密，容易引发漏浆，进而形成蜂窝麻面；混凝土振捣不密实，内部会出现空隙，造成脱空或孔洞[1]；养护不及时、养护措施不到位，会引发收缩裂缝。服役环境方面，流道混凝

土长期承受水流冲刷和磨损，表面容易剥落；干湿交替和冻融循环，会破坏混凝土内部结构，引发裂缝；环境中的氯离子、二氧化碳等有害介质侵入，会导致混凝土碳化和钢筋锈蚀，此外，泵站运行时的振动荷载、地基不均匀沉降等，也会诱发结构裂缝，影响混凝土结构的稳定性。

2 大型泵站流道混凝土缺陷主流修复处理技术

2.1 表面修复技术

表面修复技术专门用来处理混凝土的表层缺陷，核心目标是恢复表层的完整状态与美观效果，阻止有害介质继续往内部渗透。依据缺陷的不同类型和实际修复需求，这类技术主要分为聚合物砂浆修补法、水泥基材料修补法和表面封闭法三类。聚合物砂浆修补法的核心是在水泥砂浆里掺入聚合物乳液，这样能有效提升材料的黏结强度，增强抗裂性能和耐腐蚀能力，很适合用来修复表层剥落、蜂窝麻面这类常见缺陷，施工时要先把基层有问题的部分凿除，清理干净后再进行湿润处理，接着涂刷界面剂，最后分层抹压聚合物砂浆，确保修补层和基层能紧密贴合没有缝隙。水泥基材料修补法以普通硅酸盐水泥、快硬水泥等作为主要原料，搭配矿物掺和料和外加剂来优化整体性能，它的优势是成本比较低廉，和混凝土基材的相容性也很好，特别适合大面积表层缺陷的快速修复作业[2]。表面封闭法的适用场景则有所不同，主要针对宽度较小的表面静止裂缝，施工时会采用环氧胶泥、水泥基渗透结晶型涂料等材料，通过涂刷或刮抹的方式覆盖在裂缝表面，形成一层致密的防护层，以此阻挡水分和有害介质侵入内部造成更大损坏。

2.2 裂缝注浆修复技术

裂缝注浆修复技术是处理混凝土裂缝的核心方式，核心原理是向裂缝内部注入浆液，填充其中的空隙，进而恢复混凝土结构的整体性，保障其承载能力。修复时需结合裂缝的宽度，深度以及是否具有活动性，选用合适的注浆材料和注浆工艺。对于宽度较小且处于静止状态的裂缝，多采用低黏度环氧树脂浆液进行低压注浆，这种浆液能充分渗透到裂缝深处，固化后还能形成较高的黏结强度；对于宽度较大或者存在活动性的裂缝，宜选用弹性聚氨酯浆液，这类浆液具有良好的变形适应性，可跟随裂缝的开合变化而变化；对于深度较大或者隐藏在内部的裂缝，需采用高压注浆工艺，这样才能确保浆液有效填充裂缝内部的各个部位。注浆施工前要对裂缝进行清理，做好密封处理，再安装注浆嘴，随后通过压力泵将浆液注入裂缝，注浆完成后还需保持一段时间的压力，确保浆液充分固化。这项技术的关键在于注浆材料的精准选型和注浆工艺的严格控制，只有根据裂缝的具体特性做好匹配，才能保障最终的修复效果。

2.3 结构加固修复技术

混凝土结构出现严重缺陷，影响自身承载能力时，需运用结构加固修复技术，恢复结构原有力学性能，甚至进一步提升其性能水平[3]。目前常用的结构加固修复技术有纤维增强复合材料加固法、钢纤维混凝土加固法以及预应力加固法等。纤维增强复合材料加固法的核心是在混凝土表面粘贴碳纤维布、玻璃纤维布这类复合材料，借助这类材料强度高、重量轻的优势，提升结构的抗弯和抗剪能力，该技术适合用于解决因强度不足或钢筋锈蚀引发的结构缺陷问题，它施工起来十分便捷，几乎不会增加结构自身重量，还具备良好的耐腐蚀性。钢纤维混凝土加固法通过在混凝土内部掺入钢纤维，增强材料本身的抗拉强度和韧性，这种方法更适用于大面积破损，或对抗冲击性能有较高要求的部位的修复[4]。预应力加固法则是通过对结构施加预应力，抑制裂缝的进一步扩展，从而提升结构的承载能力和整体稳定性，该技术常用于大跨度结构，或受力情况较为复杂的部位的加固修复工作。

2.4 防护型修复技术

防护型修复技术的核心作用是提升混凝土结构的耐久性，阻挡外界有害物质侵入，减缓结构缺陷的出现与恶化。常见的防护型技术有硅烷浸渍法，环氧涂层防护法，以及渗透结晶型防水防护法。硅烷浸渍法的操作方式是在混凝土表面涂刷硅烷浸渍剂，这种药剂会渗透到混凝土内部，形成一层憎水膜，这层膜能有效隔绝水和氯离子的渗透，该技术适合用于潮湿环境或存在腐蚀性物质的环境中的混凝土防护。环氧涂层防护法通过在混凝土表面涂刷环氧树脂涂层实现防护效果，涂层会形成致密的物理隔离层，这层隔离层可以抵御酸、碱、盐等有害介质的侵蚀，常被用于化工厂、污水处理厂等腐蚀环境中的泵站流道修复[5]。渗透结晶型防水防护法的原理是利用活性化学物质与水泥水化产物发生反应，生成不溶于水的结晶体，这些结晶体能堵塞混凝土内部的毛细孔道，从而提高结构的抗渗性能。该技术适用于长期处于潮湿环境下的流道混凝土防护。

3 大型泵站流道混凝土缺陷修复实践案例

3.1 工程概况

某座大型泵站建于20世纪90年代，主要负责区域防洪排涝，兼顾农田灌溉任务，流道总长度达120 m，混凝土设计强度为C30等级，抗渗等级为P8等级。随着使用年限增加，2024年开展年度安全检测时，发现流道混凝土衬砌段出现多处问题；

具体表现为局部存在脱空情况，运行缝和结构缝有渗水现象，表面出现裂缝，还有少量剥落问题。为确保泵站安全运行，计划结合机组检修的机会，专门开展流道混凝土缺陷修复工作。

3.2 缺陷检测与评估

采用超声波检测法、雷达探测法和裂缝宽度检测仪等设备，对缺陷开展全面排查，明确了缺陷的类型、分布范围和严重程度。检测发现，流道混凝土存在21处脱空区域，脱空面积为0.02 ~ 0.15 m^2，共检出各类裂缝72条，裂缝宽度为0.1 ~ 2.5 mm，其中宽度超过0.5 mm的有害裂缝有23条，最长裂缝长度达到12 m；运行缝和结构缝多处出现渗水现象，部分区域还伴随泥沙析出，表层剥落缺陷主要集中在水流冲刷较严重的进口段，剥落面积累计达3.2 m^2。结合检测结果，参照相关规范完成缺陷评估，确定本次修复范围包含所有脱空区域、有害裂缝、渗水缝以及表层剥落部位。

3.3 修复方案制订与实施

结合缺陷类型和评估结果，针对性地制订以下修复方案：混凝土脱空区域，采用水泥基灌浆材料实施高压固结灌浆处理；宽度≤0.2 mm的表面静止裂缝，采用环氧胶泥表面封闭法修复；宽度0.2 ~ 2.5 mm的裂缝，采用环氧树脂或聚氨酯注浆技术修复，其中活动性裂缝选用弹性聚氨酯浆液；运行缝及结构缝渗水问题，采用注浆堵漏加弹性密封胶嵌缝的组合方案；表层剥落部位，采用聚合物水泥砂浆分层抹压修复，同时对修复表面进行防护处理。修复施工需严格遵循相关规范，重点把控基层处理、材料配比及施工工艺等关键环节：基层处理时，对脱空区域钻孔清理确保孔道通畅，对裂缝开槽清灰去除松散杂物，对剥落部位凿除露出坚实基层并凿毛；材料配制过程中严格控制计量偏差，保障材料性能符合设计要求；施工完成后，对修复部位进行保湿养护，养护时间不少于14 d。

3.4 修复效果检测与数据分析

修复工程全部完工后，采用和修复前相同的检测方法，对整体修复效果开展全面检查，重点关注修复部位的密实性，强度以及抗渗性能，相关检测数据详见表1。由表1数据可知，修复后混凝土脱空区域的密实度检测合格率达100%，脱空缺陷已完全消除；裂缝修复后均未出现再次开裂情况，注浆饱满度合格率为98.6%；运行缝和结构缝的渗水问题已彻底解决，抗渗性能符合设计标准；表层修复部位的抗压强度达到32.5 MPa，高于C30设计强度等级要求，黏结强度达到2.2 MPa，满足修复技术规范。本次修复工程累计完成钻孔211个，对这211个钻孔全部进行了回填及固结灌浆处理，完成100%计划工程量；裂缝刻槽累计完成708.8 m，化学灌浆处理同样完成708.8 m，完成86.44%计划工程量，裂缝处理计划工程量为820 m，未完成部分为宽度小于0.1 mm的微小裂缝，经专业评估无须进行灌浆处理。修复工程通过验收后，泵站已正常运行6个月，在此期间流道混凝土修复部位未出现任何缺陷复发现象，修复效果良好，有效保障了泵站安全稳定运行。

表1 大型泵站流道混凝土缺陷修复前后关键检测指标对比

检测项目	检测指标	修复前检测结果	修复后检测结果	设计要求/合格标准
脱空区域修复	密实度合格率	62.30%	100%	≥95%
裂缝修复	注浆饱满度合格率		98.60%	≥95%
	裂缝复发率		0%	0%
渗水缝修复	抗渗等级	P4	P8	≥P8
表层剥落修复	抗压强度（MPa）	22.8	32.5	≥30 MPa
	黏结强度（MPa）		2.2	≥1.5 MPa

4 结束语

大型泵站流道混凝土缺陷成因复杂，类型多样，严重威胁工程运行安全，科学选用修复技术是保障工程安全的关键。本文系统分析缺陷类型与成因，归纳表面修复、裂缝注浆、结构加固及防护型修复等主流技术，明确它们的适用条件与实施要点。实践表明，高压固结灌浆可有效消除脱空，裂缝注浆能恢复结构整体性，聚合物水泥砂浆适用于表层剥落修复，组合修复方案应对复杂缺陷时效果更优。实际应用中，须强化前期检测评估，精准判识缺陷性质与程度，结合工程特点优选技术与材料，严控施工质量。未来，应加强新型耐久、经济修复材料与工艺的研发，持续提升修复技术水平。

参考文献

[1]顾兴宇,赵龙,张健,等.水工建筑物混凝土缺陷处理施工技术[J].云南水力发电,2022(5):38-39.

[2]李浪,字林,李剑寒,等.大华桥水电站引水流道混凝土缺陷修补技术[J].云南水力发电,2022,38(1):4-5.

[3]李书鑫.大坝混凝土缺陷处理施工技术的实例探析[J].冶金丛刊,2020,5(22):115-117.

[4]姚椰纯.混凝土缺陷处理方案[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(8):84-85.

[5]冯健飞.水利工程混凝土浇筑质量缺陷的修复及过程管理[J].工程建设,2021,4(7):96-97.

（本文编辑 曹 阳）