水利工程结构耐久性与加固新技术研究

李 芮 李 冰
山东中鲁技术服务集团有限公司 山东 菏泽 274000

摘 要：国内水库、涵闸、灌区等水利工程长期受渗流、冻融、水体侵蚀作用，混凝土、砌体、金属、岩土四类水工结构耐久病害频发，传统防护加固工艺存在粘结差、水下施工难、服役周期短等缺陷。本文结合水工现场服役工况，梳理传统加固技术优缺点，重点分析高分子涂层、UHPC表层防护、水下FRP加固、装配式模块等八大新型防护补强技术，明确各类技术材料参数、施工要点及适用边界。研究表明，新技术适配临水特殊施工环境，结构补强与耐久防护效果优于传统工艺，可结合结构材质、病害类型择优选用，可为存量水利工程长效运维加固提供实操参考。

关键词：水利工程；结构耐久性；病害补强；加固新技术；水工结构

引言：我国中小型水利工程建成年限跨度大，老旧水工结构病害逐年加剧，钢筋锈蚀、结构开裂、坡面坍塌、金属构件腐蚀等问题，直接降低工程服役年限，威胁防洪输水运行安全。以往工程多采用砂浆抹面、增大截面、普通注浆等传统工艺修复，难以适配干湿交替、长期浸水的水工环境，加固后结构易二次破损。为提升水工结构耐久性能，适配差异化病害加固需求，行业逐步落地多款新型防护加固技术。本文分类研判主流水工结构病害特征，对比新旧技术适配性，探究新技术工程应用价值，解决老旧水利加固耐久性不足的工程痛点。

1 水利工程主流结构类型

结合国内水库、河道、灌区、防洪枢纽等工程建设及服役现状，现阶段水利工程常用主流结构，依托受力形式、用材类型、使用功能划分四大类别，各类结构服役环境、病害特点、耐久短板差异明显，适配加固防护方案各不相同，具体分类如下：（1）水工混凝土结构。为目前应用范围最广结构，涵盖大坝坝体、水闸闸室、引水隧洞、泵站机房、防洪挡墙等构件，多采用现浇钢筋混凝土施工，长期处于干湿交替、水体盐分侵蚀、冻融循环环境，核心病害为表面剥落、钢筋锈蚀、贯通裂缝，耐久性损耗速度最快，是加固改造重点对象。（2）水工砌体结构。多见于中小型老旧灌区、河道护坡、小型溢流坝、渠道挡墙，以浆砌石、干砌石砌筑为主，建设年限久，整体整体性较差，易出现砂浆风化脱空、砌体错位渗水、坡面坍塌问题，抗水流冲击能力弱，传统加固整改难度较大。（3）水工金属结构。包含闸门、拦污栅、启闭机构件、输水压力钢管，材质以碳素钢、合金钢为主，长期接触水环境，极易发生电化学腐蚀、构件形变、焊缝开裂，临水衔接部位锈蚀损耗最为严重，直接影响水利枢纽启闭运行安全。（4）岩土复合水工结构。主要为堤防土坝、堆石坝、岸坡锚固支护结构，依托土体、石料复合成型，病害集中表现为坝体渗透破坏、边坡滑移、土体风化流失，耐久性受地下水、降雨入渗影响极大[1]。

2 现有水利结构耐久性防护与传统加固技术优劣性分析

现阶段国内水利存量工程运维，依旧依托常规耐久防护工艺、传统结构加固技术开展病害处置，此类技术工艺成熟、造价偏低，适配普通陆上水工结构修复，但受水环境、冻融、长期渗流工况制约，应用局限性突出，结合现场施工及服役表现，分类优劣分析如下：（1）表层砂浆防护耐久技术。该技术以水泥砂浆、防水砂浆抹面为主，多用于砌体结构、混凝土表层风化防护。优势为取材便捷、施工门槛低、短期防渗效果达标；劣势为砂浆与原结构粘结性较差，干湿交替环境下易空鼓脱落，抗冻融、抗氯离子侵蚀能力弱，防护服役年限仅3-6年，后期返修频次高。（2）增大截面加固技术。属于水工混凝土主流加固工艺，通过浇筑现浇混凝土加厚结构截面提升承载力。优势为结构整体性强，加固后力学稳定性好，适配坝体、挡墙大件破损加固；劣势为施工工程量大，占用过水断面，水下施工支模难度大，新旧混凝土结合面易渗水，耐久性协同性较差。（3）化学注浆裂缝加固技术。采用普通环氧注浆料封堵结构裂缝，阻断水体渗透。优势为施工便捷，可针对性处理浅表、中型裂缝；劣势为普通注浆材料耐水稳定性不足，低温水环境易固化失效，深层裂缝注浆密实度难以把控，后期易二次开裂渗水。（4）外包型钢加固技术。通过型钢包裹构件补强受力性能。优势为加固工期短，结构承载力提升明显；劣势为型钢临水极易锈蚀，需反复做防腐处理，后期运维成本高，无法适配长期浸

水水工构件加固[2]。

3 适配水工工况结构耐久性提升新型防护技术

3.1 水性防腐抗渗高分子涂层防护技术

该技术专为涵闸侧墙、渠道混凝土坡面、水闸外露构件等浅水干湿交替区域研发，采用改性环氧水性高分子基材，搭配无机耐蚀填料复合制成涂层材料，适配水下潮湿基面直接施工，无需基面完全干燥，适配水工露天临水施工条件。（1）材料基本参数：固含量 ≥ 82%，粘结基面抗拉强度 ≥ 2.8MPa，耐淡水溶蚀系数0.91，低温-25℃环境无开裂脆化，符合水利工程水工混凝土防护材料行业检测标准。（3）技术适用范围：适用于老旧混凝土表层风化、浅表麻面、表层微裂隙封闭防护，不适用于结构深层破损、动水流速大于2.5m/s的坝体迎水面防护。

3.2 水工专用UHPC表层改性耐久加固防护技术

超高性能混凝土（UHPC）经水工级骨料、抗冻外加剂改性优化后，区别于民用建筑UHPC，降低水化热、提升抗水流冲磨性能，属于刚性表层耐久防护技术，多用于大坝迎水面、溢洪道、消力池高强耐磨防护。（1）材料结构特性：水工改性UHPC孔隙率低于3.2%，内部无连通渗水孔隙，抗冻融循环次数可达450次以上，抗压强度130-150MPa，与老旧普通混凝土界面剪切粘结强度 ≥ 4.2MPa。（2）现场施工管控：施工前对原结构表层凿毛深度 ≥ 8mm，高压清水冲洗清灰，涂刷专用界面粘结剂，采用现浇薄层摊铺工艺，防护层厚度30-50mm即可满足耐久防护要求，冬季水工低温环境可添加促凝组分，缩短养护周期。（3）技术优缺点：适配高速水流、砂石磨蚀严苛工况，结构协同性强；材料造价偏高，自重较大，不可用于薄壁水工砌体结构表层防护[3]。

3.3 微生物自修复混凝土内生耐久补强技术

该技术属于内生式被动耐久防护技术，依托芽孢杆菌类水工专用菌种，复合缓释营养骨料掺入混凝土拌合料中，多用于新建坝体、隧洞衬砌同步防护，也可拌制修补料用于老旧结构裂缝内生封堵，区别于外涂层防护，从结构内部提升抗渗耐久能力。（1）修复作用机理：水环境渗入结构裂缝后，激活休眠菌种代谢反应，析出碳酸钙结晶沉淀，自主填充0.05-0.4mm微细裂缝，封堵内部渗水通道，抑制钢筋锈蚀、基体溶蚀发展。（2）工况适配要求：适配恒温淡水、中性水质水工环境，水体PH值6.5-8.5区间菌种活性最优，高寒冻融区域需搭配防冻载体，高盐滨海水利工程菌种活性受限，适用性较差。（3）施工适配形式：分为预制掺加式、表层抹制式两类，新建构件直接拌合掺加，老旧结构采用微生物修补砂浆抹面防护，后期无需人工运维修补，降低全周期防护成本。

3.4 钢筋阴极保护长效防腐耐久改性技术

针对临水钢筋混凝土构件、水工钢结构配筋锈蚀问题研发，属于电化学长效防护技术，主要解决水位变动区钢筋电化学锈蚀、胀裂剥落病害，是水工配筋结构专项耐久防护工艺。（1）技术分类形式：一是牺牲阳极阴极保护，采用锌铝合金阳极模块，焊接固定于闸门配筋、坝体预埋钢筋点位，依靠金属电位差自主中和腐蚀电流；二是外加电流阴极保护，布设惰性钛合金阳极网，外接稳压弱电装置，适配大面积库区水工配筋防护。（2）施工约束条件：施工前需检测钢筋连通率，保证结构体钢筋整体导电连通，混凝土保护层破损位置需提前修补封闭，避免电流外泄失效；阳极构件预埋深度贴合水位变动层，提升防腐利用率。（3）应用边界：适配闸室底板、坝体水位变动区、泵房水下配筋构件，单套防护系统有效服役年限可达25年，后期仅需定期检测电流参数，无需频繁更换防护耗材[4]。

4 水利工程结构病害补强新型加固技术

4.1 水下专用FRP复合材料免固化加固技术

区别于陆上建筑碳纤维加固工艺，该技术采用水工耐水浸渍胶、玄武岩纤维布复合补强，无需干燥基面，可直接静水、浅流动水环境施工，多用于水闸墩墙、坝体水位变动区混凝土破损补强，解决常规碳纤维浸水脱粘、胶体失效问题。（1）主材性能指标：采用Ⅲ级水工玄武岩纤维布，抗拉强度 ≥ 3200MPa，配套水下浸渍胶粘结强度 ≥ 3.5MPa，胶体长期泡水体积膨胀率小于1.2%，-20℃低温环境胶体无粘结失效。（2）标准化施工流程：水下基面高压冲毛→基面空洞找平修补→纤维布裁剪贴合→分层涂刷水下专用浸渍胶→压辊排气固结，无需加温固化，常温静水环境48h达到设计受力强度。（3）适用范围与局限：适配混凝土浅表缺损、非贯通裂缝、构件抗弯承载力补强；不适用于动水流速 ≥ 3m/s区域、结构受压承重大件核心补强，纤维外层需做抗冲磨防护层。

4.2 预应力复合锚固微创加固技术

属于水工边坡、坝肩、闸室墩柱结构性补强微创技术，整合树脂锚杆、预应力钢绞线、密封止水组件一体化施工，相较于普通锚杆，可抵消结构渗压荷载、土体侧压力，减少结构形变开裂，多用于土石坝坝坡锚固、闸墩侧向位移加固。（1）构件组成参数：采用防腐镀锌低松弛钢绞线，配套水下环氧锚固砂浆，钻孔孔径控制70-110mm，钻孔深度依托结构破损等级定为3-8m，端头设置止水密封锚具，杜绝孔内渗水锈蚀钢绞线。（2）施

工管控要点：定点钻孔清孔→孔底排水除湿→灌注锚固砂浆→钢绞线植入张拉→锚头密封防腐，采用分级张拉工艺，避免一次性张拉造成原结构次生开裂，孔口加装止水垫圈阻断渗流通道。（3）工艺适配特点：钻孔施工体量小，无需大面积破除原有结构，对原有水工建筑过水断面无改动；高寒地区需优化锚具防冻构造，盐碱水质区域需升级合金防腐锚头。

4.3 低压发泡环氧精细化裂缝注浆加固技术

针对水工混凝土贯通裂缝、施工缝渗水裂缝、砌体结构砂浆脱空病害研发，改良传统高压注浆劈裂基体弊端，采用低压稳压注浆设备，适配宽窄不一裂缝填充，兼顾结构密实补强与止水防渗双重施工要求，是涵闸隧洞主流裂缝补强工艺。（1）注浆材料分类：窄缝0.1-0.3mm选用低粘度发泡环氧浆料；宽缝0.3-2mm选用改性环氧混合骨料浆料，材料固化后抗压强度 ≥ 75MPa，泡水固结收缩率低于0.8%。（2）施工工艺控制：裂缝开槽封缝→布设注浆嘴→稳压低压注浆（压力0.2-0.4MPa）→闭孔养护→表面打磨处理，低压压力可控，不会撑开老旧脆弱混凝土基体。（3）工艺优缺点：可实现深层裂缝饱满灌注，止水补强一体化完成，施工工期短；浆料造价高于普通水泥注浆，不可用于大体积空洞缺损单独补强，需配合回填材料联合施工。

4.4 装配式预制补强模块快速加固技术

为近年灌区、河道、小型水闸应急加固新型装配式工艺，工厂预制水工高强混凝土补强模块、浆砌石定型模块，现场吊装拼接止水，替代现场现浇加固工艺，适配汛期应急抢修、渠道挡墙、河道护坡批量病害加固施工。（1）模块生产标准：预制模块采用抗冻抗渗C45水工混凝土预制，预留拼接止水槽、灌浆孔，模块厚度40-60mm，边角配置预埋连接钢筋，适配现场拼接锚固。（2）现场施工流程：原结构破损基面清理找平→模块吊装对位拼接→拼接缝嵌填止水胶→孔道注浆回填→外露接缝防护处理，全天候临水可施工，不受天气、基面干湿条件限制。（3）适用工况与短板：适配渠道边坡、岸坡挡墙、小型闸外墙整体性补强，标准化程度高，现场湿作业量少；非标异形水工结构无法适配预制模块，定制模块施工成本偏高[5]。

结束语：本文完成四类水工结构病害机理梳理，对比传统防护加固技术应用短板，系统研究四类耐久防护新技术、四类结构补强新技术，分析每类技术用材标准、施工管控要求及适用局限。综合分析得出，新型加固防护工艺具备微创性、耐水性、长效耐久优势，能够弥补传统工艺过水断面占用大、水下施工不便、后期运维成本高的不足。现阶段新技术仍存在造价偏高、异形结构适配性弱等问题，后续可结合区域水质、气候条件，优化改性水工加固材料，完善低成本装配式加固工艺，适配全域水利工程低成本耐久改造施工。

参考文献

[1]王凤龙.水利工程结构耐久性与加固新技术研究[J].现代工程科技,2025,4(6):65-68.

[2]赵扬扬.水利工程混凝土结构防腐技术优化与长效耐久性提升研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(3):415-417.

[3]习敏芬.水利工程混凝土结构耐久性检测技术应用研究[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2026(3):144-147.

[4]范飞.水利工程中病险水库加固工程技术的应用探究[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2026(1):065-068.

[5]刘庆,黄文,黄杰.水利工程除险加固工程中灌浆施工技术应用研究[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2026(1):127-130.