

准,允许 $\pm 5\%$ 偏差裕度,全时段按可发电能力申报;②在汛期高弃水风险日,系统水电大发、负荷低谷、电网发布弃水预警,采用低谷时段(如01:00-07:00)主动低报;高峰时段(如19:00-22:00)尽量满报(争取高价+消纳空间);若有调节库容,提前腾库为高峰蓄能;③在枯期电力紧缺日,来水偏枯、火电顶峰、西电东送压力大,采用全时段按最大可调出力申报;优先保障优先分配送电分解曲线;配合调度参与调峰,提升信用评级;④在极端天气事件日(暴雨/干旱),气象台发布红色预警、上游水库泄洪、入库流量突变,采用启动应急申报机制,向调度中心提前报备不可抗力,争取偏差免责;⑤在电网关键断面阻塞日,某输电通道接近热稳定极限,局部水电受限,采用策略为通过昆明电力交易中心获取日前阻塞预警;在受限时段主动压减申报出力(即使可发);避免因“申报了但发不出”导致负偏差考核。在多场景申报策略中,系统能够基于市场需求和气候变化适时调整申报策略,尤其在汛期与枯期的极端情境下,灵活的电力申报模式使得水电站能够在避免弃水的同时,平衡电力供需。

3.3 滚动出力预测技术

利用日前、日内多个申报窗口动态调整出力计划,实时采集水位、流量、发电数据,获取最新气象预报和本地降雨数据,可做到逐15分钟申报未来48h或更长时间的出力预测信息。预测曲线符合机组技术约束(最小出力、爬坡率、振动区等);支持日前(D-1)、日内(D-0)多轮滚动更新;利用鲁棒优化、概率分布等技术,提供概率区间,支撑风险决策。

滚动出力预测技术结合实时数据和历史趋势分析,通过每15分钟更新预测信息,能够快速响应来水量的变化。系统不仅支持在日前和日内多个窗口进行动态调整,还通过算法优化确保预测结果的稳定性。利用概率分布模型,系统能够提供一个置信区间,为风险管理提供重要依据,确保电站能够在不同环境条件下灵活调节发电计划。

3.4 内部偏差分析闭环机制

建立内部偏差分析闭环机制,形成一个完整的“预测-申报-执行-评估-优化”全自动闭环,实现精准报量、降低考核、持续优化预测模型;

建立结构化归因框架,具体类别包含水文气象因素(降雨预报偏差、上游突发事件等)、设备和运行限制(机组故障/检修、振动区避让、闸门卡滞、输电受限等)、预测模型缺陷(参数漂移、未考虑新工况、极端时间泛化差等)、申报策略失误(多度保守/激进、忽略弃水预警、日内修正不及时等);

具备日、月、季度复盘分析能力,触发相应模块完成业务闭环,并形成复盘分析报告。

4 工艺流程

如图2所示。

5 结语

我厂的基于水电站现货交易辅助系统的新型水情自动

测报系统通过构建“电力(发电曲线)-水文(流域河道自建雷达水位站)-气象(红河流域短期、中长期及年度降雨预报、流域代表站实测降雨)-市场”四维感知矩阵,实时接入以上异构数据源,通过时空对齐与特征工程,生成统一的“场景特征向量”。引入模糊逻辑处理边界场景,利用模糊规则,允许场景重叠,策略权重按隶属度动态分配。系统通过深度融合物理水文过程与数据智能方法,显著提升0-12天来水预测的精度、鲁棒性与可解释性。机理模型提供水量平衡、产汇流结构等物理骨架;数据模型学习残差或修正因子,捕捉机理未建模的复杂扰动(如水库调度、极端气候),实现“1+1>2”的协同增益。将气象预报数据同时输入机理模型与数据模型,避免信息割裂;在机理模型关键节点(如产流、汇流)嵌入神经网络模块,物理方程作为损失函数约束;输出层融合采用贝叶斯加权、动态权重组合两类输出。可输出概率预测,为报量策略提供风险边界。

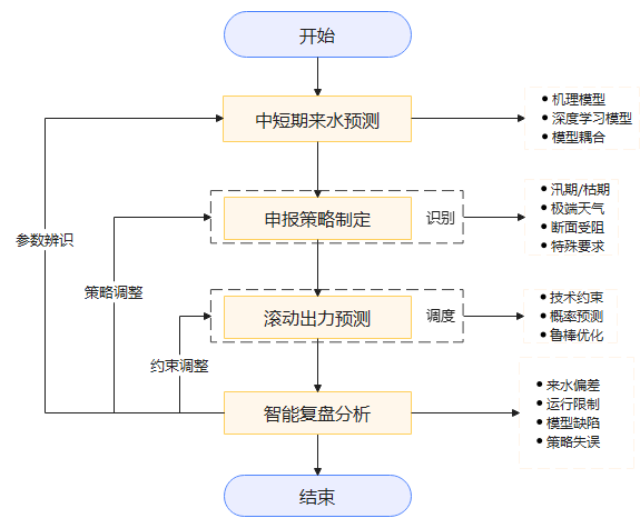


图2 系统工艺流程

我电站基于现货运行辅助系统的新型水情测报系统,提高了系统运行的可靠率、数据通讯的保障率、运行效率和安全性,延长洪水预见期,提高洪水预报精度,保障了水电站的防洪及发电安全,不仅促进水电站在现货市场中多维一体的智能化发展,同时提升了电站的竞争力。

参考文献

- [1] 裴少拓,余斌. 浅谈桃源水电站水情自动测报系统升级改造[J]. 今日制造与升级,2025,(05):175-177.
- [2] 郁婷,邹巍. 华光潭水电站水情测报升级改造[C]//河海大学,武汉大学,长江水利委员会网络与信息中心,湖北省水利水电科学研究院. 2023(第十一届)中国水利信息化技术论坛论文集. 水利部南京水利水文自动化研究所;江苏南水科技有限公司;2023:733-737.
- [3] 李德清,贺伟,申升腾. 落水洞水电站水情自动测报系统设计[J]. 云南水力发电,2022,38(02):24-28.
- [4] 陈向群,罗朝春. 电力市场化交易必读[J]. 中国电力出版社,2023.
- [5] 王珂珂,牛东晓,许晓敏. 计及新能源的电力现货市场交易优化管理[J]. 中国电力出版社,2022.

Research on the Application of New Materials in Water Conservancy Engineering and the Improvement of Structural Durability

Xuesong Wu

Yellow River Estuary Management Bureau Lijin Yellow River Affairs Bureau, Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

With the challenges of extended service life, complex environmental conditions, and diverse functional requirements faced by water conservancy projects, traditional materials have gradually become difficult to meet the engineering requirements of high strength and high durability. The promotion and application of new engineering materials have become an important path to improve the structural performance and service life of water conservancy projects. This article is based on the actual needs of current water conservancy engineering, focusing on the typical applications of new concrete, composite materials, high-performance sealing materials, etc. in water conservancy facilities, and analyzing their mechanisms and practical effects in improving structural durability, corrosion resistance, environmental adaptability, and other aspects. By summarizing typical engineering cases, scientific strategies and technical paths for selecting materials for water conservancy engineering are proposed, providing theoretical basis and engineering reference for the upgrading and sustainable construction of water conservancy engineering materials.

Keywords

water conservancy engineering; New materials; Structural durability; Corrosion resistance performance; Engineering Application

水利工程新型材料应用与结构耐久性提升研究

吴雪松

黄河河口管理局利津黄河河务局, 中国·山东 东营 257000

摘要

随着水利工程面临服役年限延长、环境条件复杂化以及功能需求多样化的挑战, 传统材料已逐渐难以满足高强度、高耐久性的工程要求。新型工程材料的推广应用成为提升水利工程结构性能与使用寿命的重要途径。本文立足于当前水利工程的实际需求, 围绕新型混凝土、复合材料、高性能密封材料等在水利设施中的典型应用展开研究, 分析其在提升结构耐久性、抗蚀能力、环境适应性等方面的作用机理与实践效果。通过对典型工程案例的总结, 提出水利工程材料选用的科学策略及技术路径, 为水利工程材料升级与可持续建设提供理论基础和工程参考。

关键词

水利工程; 新型材料; 结构耐久性; 抗蚀性能; 工程应用

1 引言

水利工程是保障社会生产与人民生活的重要基础设施, 其结构的安全与耐久性能直接影响运行的稳定性与服务周期。本文从工程实际出发, 分析水利工程新材料应用的必要性、关键技术与典型实践, 探讨在确保工程质量与长寿命运行方面的材料技术路径。

2 水利工程结构耐久性面临的挑战

2.1 自然环境条件日益严苛

我国地域辽阔, 水利工程广泛分布于多种复杂地质和

多变气候区域, 从东部沿海到西部高原, 从南方湿热地区到北方严寒带, 环境条件差异显著, 对工程结构的稳定性和材料耐久性提出了极高要求。大量水利工程长期暴露在户外, 常年承受强日照、高湿、强风、雨水侵蚀等外部自然作用, 尤其在沿海与南方丘陵地区, 湿热与盐雾交替循环, 极易造成混凝土表面碳化、钢筋锈蚀、电化学腐蚀等问题。而在西北及东北等高寒或风沙区, 冻融循环作用成为破坏结构表层与内部孔隙系统的主要因素, 不仅导致混凝土剥落、表面开裂, 还加剧了水汽渗透和内部应力集中, 进而加速结构老化。特别是在青藏高原等超高海拔地区, 低压、低温、高紫外辐射等多重极端环境共同作用, 使得传统材料难以满足“高原适应性”的要求, 造成部分水工结构在使用初期即出现性能下降的趋势, 严重影响工程寿命与运行安全。因此, 自然环

【作者简介】 吴雪松 (1992-), 男, 中国山东东营人, 本科, 工程师, 从事自动化专业研究。

境的不确定性与极端性,使水利工程的耐久性设计面临前所未有的挑战,迫切需要通过新型材料技术手段提升结构的长期稳定性与适应能力。

2.2 传统材料性能限制明显

目前我国水利工程中仍普遍采用普通硅酸盐混凝土、钢筋、水泥砂浆、防渗膜、聚氯乙烯等传统建材。这些材料虽然在早期强度、成型便捷性和施工成本方面具有一定优势,已广泛应用于大坝、闸门、水渠、泵站及涵洞等结构中,但其在长期服役过程中逐渐暴露出多种性能短板。例如,普通混凝土内部存在一定数量的毛细孔与微裂缝,易在运行过程中受到应力集中、水汽渗透、化学侵蚀等影响,导致裂缝扩展、钢筋暴露、生锈膨胀等一系列结构劣化问题。钢材虽然强度高,但在潮湿、高盐环境中极易腐蚀,尤其在接触水体部位如钢闸门、护栏和金属构件处,常因电化学反应引发锈蚀穿孔,进而影响结构安全性。而传统聚氯乙烯等高分子材料则存在老化快、紫外线敏感、柔韧性下降等问题,长期使用后容易发生脆裂、脱层、渗漏等隐患,难以保障防水与密封功能的持续有效。综合来看,传统材料在面对严苛水环境与长周期使用背景下,难以满足现代水利工程“高耐久、低维护”的发展要求。

2.3 工程维护与更新周期长

水利工程作为重大基础设施,其建设周期长、投入成本高、结构体量大,建成后基本处于“全天候服役”状态,维护工作受限于运行负荷与环境条件,难以进行频繁更换与结构重构。因此,相较于普通建筑工程,水利工程对材料的耐久性和维护间隔提出了更高要求,即“少维护、长寿命、低干预”。然而目前多数工程仍依赖于传统的周期性维护方式,如定期检查、表层补强、裂缝封堵、表面涂层修复等。这些方法虽然在短期内能减缓结构性能退化,但治标不治本,难以从根源上遏制裂缝发展、钢筋锈蚀及材料老化等长期问题,且维护成本高、作业周期长、施工干扰大,特别是在对连续运行的输水系统、水库大坝等核心设施上,维修工作往往存在技术风险与安全隐患。

因此,提升材料本身的耐久性、抗裂性、自愈性与环境适应能力,已成为保障水利工程运行安全与延长结构服役寿命的关键路径。必须通过新材料、新技术、新工艺的引入,从材料层面增强结构体系的“免维护”能力,实现由“依赖维护”向“耐久本体”转变,满足水利工程新时代高质量发展的要求。

3 新型水利工程材料类型及性能优势

3.1 高性能混凝土材料

高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)因其出色的力学性能、优良的耐久性和良好的施工适应性,已逐渐取代普通混凝土,成为水利工程结构构造与改造中的主流材料。HPC不仅具备较高的抗压强度和早期强度,还表现

出低渗透性、低收缩性和强抗裂性能,能有效抵抗水利工程中长期存在的水力冲刷、冻融循环和化学腐蚀等环境因素的侵蚀。其性能的提升主要得益于掺入高活性的矿物掺合料,如硅灰、矿粉、粉煤灰、纳米氧化物及超细粉体等,这些组分可显著改善水泥浆体结构,填补毛细孔隙,提高浆体与骨料界面结合力,从而大幅提升混凝土整体密实度与耐久性。同时,聚羧酸系高效减水剂的应用,可在保持工作性的前提下减少用水量,进一步优化水胶比,提升混凝土的抗碳化、抗氯离子渗透及抗裂性能。

在此基础上,自愈合混凝土作为近年来材料科学的前沿方向,其技术潜力正逐步在水工领域得到验证。通过在混凝土中引入微胶囊、膨胀矿物、化学反应剂或可产生碳酸钙沉淀的细菌类微生物,当结构出现微裂缝时,这些“活性填充体”可在裂缝界面释放愈合物质或诱导结晶反应,实现自动封闭修复,延缓裂缝扩展,降低渗透性和维护需求。这种材料特别适用于水坝、水闸、输水隧洞等关键部位,可大幅提高结构在服役过程中的自维持能力与安全裕度。

3.2 复合材料与纤维增强材料

在现代水利工程结构耐久性设计与加固过程中,复合材料,尤其是纤维增强材料的应用越来越广泛。其中,碳纤维(CFRP)、玻璃纤维(GFRP)及玄武岩纤维(BFRP)等新型高分子复合材料,因其具备轻质高强、耐腐蚀、抗老化、易施工等优点,被广泛应用于边坡护砌、闸门加固、渠道衬砌、坝体封闭等多个领域。纤维增强塑料(FRP)材料可直接替代传统钢筋,在不需预应力的结构中提供良好的抗拉性能,不仅延长了混凝土构件的使用寿命,也降低了运维成本,特别适用于高腐蚀、高温环境下的水利构筑物。

此外,在老旧水利工程维修与功能升级方面,碳纤维布、玻璃纤维布等材料被广泛应用于表层加固与裂缝封闭处理。这类材料在与结构表面结合后,能有效提高其整体抗震性能与裂缝扩展控制能力,具有良好的延性与变形协调性,特别适合用于坝体、溢洪道、闸墩等受力复杂部位的局部修复补强。其施工便捷、粘结牢固、适应性强,为水工结构“无损更新”提供了高效路径。

3.3 新型防水与密封材料

水利工程中防渗系统的稳定性直接影响整体运行安全,尤其在输水渠道、引水隧洞、地下泵站、水工缝等部位,密封材料的性能优劣关系到是否能长时间有效防止渗水、渗漏与水压渗透失稳。传统材料如橡胶止水带、水泥基封缝料在极端环境中易老化、开裂,防护能力有限。近年来,聚氨酯密封胶、改性沥青密封带、橡胶-高分子复合材料等新型密封材料逐渐替代传统材料,成为工程密封的首选。其特点包括柔韧性强、耐水解性能好、可粘结多种基层表面、不易脱落等,尤其在温差大、结构运动频繁的部位表现出优越的应变适应性与长期稳定性。

同时,随着纳米材料与高分子技术的发展,高弹性纳

米密封胶等新型智能材料也开始应用于对防水性能要求极高的水工结构中。此类材料不仅在低温与高温环境中均能保持良好延展性和复原力，还具备一定的自愈合与阻水性能，可在微裂缝或界面开合中实现自动延展和闭合。其优异的气候适应性及界面亲和性，使其成为极端气候条件下新建或修复水利结构的重要辅助材料。

4 新型材料在提升结构耐久性方面的应用分析

4.1 提高抗裂抗渗能力

裂缝是水利工程结构最常见且影响最大的耐久性问题之一。一旦混凝土出现裂缝，不仅削弱了结构整体性，还会形成水流通道，加剧渗漏现象，导致内部钢筋腐蚀、结构性能退化，最终影响工程安全运行。为提升抗裂能力，可优先采用高强、低收缩性能良好的混凝土材料，如微膨胀混凝土、钢纤维混凝土等，其低水胶比与纤维增强特性有助于缓解内部约束应力、抑制裂缝萌生。同时，采用复合纤维材料（如碳纤维、聚丙烯纤维）可在混凝土中形成多向加筋效果，对裂缝扩展起到有效的阻滞作用，提升结构的韧性和延展性，使其具备更强的抗裂与抗冲击能力。

4.2 增强化学腐蚀与水蚀防护能力

水利工程常年处于复杂水环境中，面临硫酸盐侵蚀、氯离子渗透、有机物分解产物腐蚀等多种化学破坏因素。为此，在混凝土材料中掺入粉煤灰、矿粉、硅灰等高活性矿物掺合料，可有效优化孔隙结构、填补毛细孔道，显著降低侵蚀性离子的渗透速率，增强材料的抗化学侵蚀能力。在金属结构方面，采用玻璃纤维增强塑料（FRP）替代传统钢构件，能够有效避免电化学腐蚀问题，特别适合应用于闸门、边墙等高腐蚀风险区域。同时，在结构表层使用纳米级防水涂层，可在表面形成致密疏水保护膜，不仅能有效防止水蚀，还具有一定的抗紫外老化与抗污染附着功能，大幅提升了构件的环境适应性。

4.3 延长服役周期与降低维护成本

材料性能的显著提升直接带来结构寿命的延长与维护强度的降低。例如，在大坝、溢洪道等长期受冲击部位采用复合纤维网状加固技术，不仅提升了抗裂能力，还有效防止表层因风化或冻融造成的剥蚀损伤。再如在地下涵洞、水池等难以定期检修的构筑物中应用自愈合混凝土材料，其内掺微胶囊或微生物成分能在裂缝出现后自动激活修复机制，封闭细微通道，减少水分渗入，从而延缓结构退化进程。这类“主动修复型”材料的应用不仅提升了结构的使用年限，也

显著降低了后期维修的人力投入与经济成本，体现出极高的工程性价比与推广价值。

5 工程实践案例与应用成效

5.1 典型工程示范

在南水北调中线干渠衬砌中，大量采用了掺合矿物粉体与聚合物改性材料制成的高致密混凝土，有效抑制了渠段干裂与渗漏问题。在西部高寒地区引水隧洞工程中，FRP管道与保温复合衬层的应用显著改善了结构耐冻胀与抗水解性能，保障了水流通畅与结构完整性。

5.2 应用效果评价

通过多项对比试验与现场检测，新型材料应用的结构，其碳化深度、钢筋锈蚀率、渗透系数等指标优于传统材料，表现出更低的变形率与更长的失效周期。例如，在广东某水库溢洪道改造项目中，采用高性能纤维混凝土后，五年内未出现明显裂缝及表层剥落，维修次数减少75%，节省运维费用超过30%。

6 结语

水利工程作为国家重要的生命线工程，其结构耐久性直接关系到防洪减灾、水资源配置及生态调节功能的正常发挥。随着新型材料在工程实践中的不断推广，其在提高结构强度、延长使用年限、提升耐蚀性等方面的优势日益显著。通过高性能混凝土、复合材料与新型密封材料的组合应用，可为水利工程提供更具适应性与可持续性的技术保障。未来，应进一步强化材料基础研究与现场工程应用结合，建立材料性能数据库与生命周期评估体系，推动智能化、绿色化的水利工程材料技术发展，全面提升工程结构的服役可靠性与运维效率。

参考文献

- [1] 银丽彩.河道生态护坡施工技术要点及其在水利工程中的应用研究[J].水上安全,2024,(24):25-27.
- [2] 李敏.水利工程中调蓄水池施工工艺及质量要求分析[J].水上安全,2024,(24):100-102.
- [3] 傅良.水利工程施工中安全风险评估与控制策略分析[J].水上安全,2024,(24):151-153.
- [4] 肖晓婷.水利工程改进单向排水逆止阀的设计与性能分析[J].水利科技与经济,2024,30(12):42-47.
- [5] 李超,张卫平.预应力混凝土波浪桩在水利工程中的应用——以卫河干流（淇门—徐万仓）治理工程为例[J].海河水利,2024,(12):83-86+90.