

水工结构冲蚀病害防护新材料及修复应用

何怀民

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 水工结构冲蚀病害直接影响水利工程安全稳定运行,传统材料及技术存在抗冲蚀性差、耐久性不足等短板。本文分析冲蚀病害类型、特征及影响因素,对比新材料与传统材料的核心性能差异,分类阐述无机基、有机基及复合基新材料的特性,详解修复工艺、施工技术及质量控制要点,结合水库大坝、水闸、渠道等场景说明应用逻辑。研究表明,新材料在强度、抗冲蚀性及适配性上优势显著,配套施工技术可有效提升修复效果。本文成果为水工结构冲蚀病害防护修复提供技术参考,助力水利工程长效运维。

关键词: 水工结构; 冲蚀病害; 防护新材料; 修复技术; 应用

引言: 水利工程是国民经济基础设施,水工结构长期受水流冲刷、空蚀及磨蚀-腐蚀耦合作用,易产生冲蚀病害,引发结构损伤甚至安全事故。当前传统防护修复材料及技术难以适配复杂水工工况,使用寿命短、运维成本高。随着材料技术发展,无机基、有机基及复合基新材料逐步应用于工程实践。本文围绕水工结构冲蚀病害防护与修复需求,系统研究新材料特性、施工技术及应用,旨在解决传统技术瓶颈,为提升水工结构抗冲蚀能力、保障工程安全提供理论与实践支撑。

1 水工结构冲蚀病害类型及影响因素

1.1 水工结构冲蚀病害类型及特征

水工结构冲蚀病害主要分为三类,各具鲜明特征。

(1) 水流冲刷型病害多发生于大坝下游消力池、水闸闸室等区域,表现为结构表面混凝土逐层剥落、骨料裸露,形成深浅不一的冲坑,严重时会导致结构厚度减薄、承载力下降。(2) 空蚀破坏型常见于高速水流区域,因水流局部压力低于饱和蒸汽压产生气泡,气泡溃灭时释放瞬时冲击力,使结构表面出现蜂窝状凹坑,随时间推移逐步扩大为连片损伤,对金属及混凝土结构均有极强破坏性。(3) 磨蚀-腐蚀复合型病害由水流携带泥沙磨损与水质腐蚀共同作用形成,泥沙颗粒的切削、摩擦加剧表面损伤,水质中的酸碱离子进一步侵蚀材料内部,呈现表面粗糙、裂缝扩展、强度衰减等特征,在含沙量高、水质复杂的渠道及泄水建筑物中尤为突出。

1.2 冲蚀病害的主要影响因素

冲蚀病害受水文水力、材料特性及环境工况多因素影响。(1) 水文水力因素中,水流流速是关键,流速超过临界值后,冲蚀强度呈指数增长;含沙量、泥沙粒径及硬度直接决定磨蚀程度,粗颗粒泥沙的磨蚀作用远大于细颗粒。(2) 材料特性方面,混凝土的强度、密实

度及抗冻性,金属材料的硬度、韧性及耐腐蚀性,直接决定其抗冲蚀能力,低强度、高孔隙率材料更易发生损伤。(3) 环境与工况因素中,水质酸碱度、温度变化影响腐蚀速率,干湿交替工况会加速材料开裂;结构体型设计不合理形成的局部高速水流区,也会诱发集中冲蚀,加剧病害发展^[1]。

2 新材料与传统材料性能对比分析

相较于传统材料,新材料在核心性能上优势显著。传统防护材料如普通混凝土、环氧涂层,抗冲蚀性差、耐久性不足,普通混凝土易被水流冲刷剥落,环氧涂层在强紫外线与水流冲击下易老化开裂,使用寿命通常仅5-8年。新材料中无机基改性材料抗压强度提升30%以上,抗冲蚀能力较普通混凝土提高2-3倍;有机-无机复合涂层耐老化性大幅增强,使用寿命可达15年以上。传统材料粘结力较弱,水下修复效果不佳,而新型复合粘结材料水下粘结强度可达2.5MPa以上,适配复杂修复场景。新材料施工效率更高,无需复杂养护工艺,综合成本虽略高于传统材料,但长期运维成本降低40%以上,性价比优势突出。且新材料适配性更广,能应对不同水文工况,为水工结构防护修复提供多元选择。

3 新材料分类及核心特性

3.1 无机基防护修复新材料(改性混凝土、陶瓷基材料等)

无机基防护修复新材料以无机非金属材料为核心组分,依托成分改性与工艺优化,适配水工结构长期浸泡、强冲蚀的严苛工况,核心特性贴合实际应用需求。其基体多选用水泥、陶瓷、石英砂、矿渣等天然或工业无机原料,来源广泛且与水工传统基材相容性良好,能快速融入原有结构体系。改性混凝土类材料通过调整骨料级配、添加硅灰、矿渣粉等掺合料,提升密实度与力

学强度，减少内部孔隙，降低水流及腐蚀性介质侵入风险，同时具备良好的抗冻融、抗碳化性能，适配北方寒冷地区及干湿交替工况。陶瓷基材料则凭借高硬度、高耐磨性的固有属性，表面结构致密，能抵御含沙水流的磨蚀作用，且耐高温、抗老化，不易因长期日照或水温变化发生性能衰减。

3.2 有机基防护修复新材料（高分子涂层、复合材料等）

有机基防护修复新材料以高分子聚合物为基体，可通过化学改性、组分调控优化特性，适配水工结构表面防护及裂缝修复场景，核心特性兼具适配性与施工便捷性。高分子涂层类材料多为液态或膏状，固化后形成连续致密的防护膜，质地柔韧，能适应基材轻微变形，不易开裂脱落，且具有良好的防水、防渗性能，可有效阻隔水体与基材接触。其基体主要包括环氧树脂、聚氨酯、聚脲等，通过调整聚合物分子量、交联度，可调控材料粘度、固化速度，适配涂刷、喷涂等不同施工方式，满足水下、高空等复杂施工需求。有机类复合材料则以高分子材料为粘结相，搭配轻质填料形成，整体密度较小，施工时无需重型设备，便于局部修补作业。

3.3 复合基防护修复新材料（有机-无机复合、金属-非金属复合等）

复合基防护修复新材料通过多相材料协同复合，融合不同类型材料的优势，弥补单一材料性能短板，核心特性更契合水工复杂冲蚀工况的综合需求。有机-无机复合类材料以无机材料为增强相、有机材料为粘结相，无机组分提供高硬度、高耐磨性，提升抗冲蚀能力，有机组分赋予材料柔韧性与粘结力，改善与基材的结合效果，避免刚性材料易开裂的问题，同时兼顾防水性与耐久性，适配多类型冲蚀病害修复。金属-非金属复合类材料多以金属薄片、纤维为增强体，搭配陶瓷颗粒、高分子涂层等非金属材料，金属组分提升材料抗拉强度与抗冲击性，非金属组分强化耐腐蚀性与耐磨性，整体综合性能均衡，可应用于高速水流、强空蚀等极端工况部位^[2]。

4 水工结构冲蚀病害修复工艺及施工技术

4.1 冲蚀病害预处理工艺

冲蚀病害预处理核心在于清除受损部位、优化基面状态，为后续新材料铺设提供适配条件，具体工艺要点如下：（1）病害区域清理，先排查确定冲蚀病害的范围、深度及损伤程度，剔除表面疏松、剥落的材料层，清除基面附着的泥沙、青苔、腐蚀产物等杂质，必要时采用高压水射流、机械打磨等方式处理，确保基面洁净。（2）基面平整与修整，对凹凸不平的基面进行找平

处理，针对深度冲蚀坑槽，采用过渡材料填补至设计标高，同时修整基面边角，避免尖锐棱角影响修复层结合稳定性。（3）基面活化处理，根据基材类型选用对应方式，混凝土基面可进行拉毛处理增加表面粗糙度，金属基面可采用除锈、除油工艺，提升修复材料与基面的粘结能力，处理后及时清理基面粉尘，避免二次污染。

4.2 新材料对应的修复施工技术

结合不同类型防护修复新材料的特性，匹配针对性施工技术，确保材料性能充分发挥，具体技术要点如下：（1）无机基材料施工，采用浇筑、喷射两种核心方式，浇筑施工需控制材料坍落度，分层浇筑并振捣密实，避免气泡残留；喷射施工需调节喷射压力、距离及角度，确保材料均匀覆盖基面，分层喷射时控制层间间隔时间，保障层间粘结牢固。（2）有机基材料施工，以涂刷、喷涂为主，施工前调节材料粘度至适配范围，涂刷施工采用顺向均匀涂抹方式，避免出现漏涂、流挂现象；喷涂施工需控制喷枪压力与移动速度，保证涂层厚度均匀，多道喷涂时待前一道固化至规定状态后再进行下一道。（3）复合基材料施工，采用分层铺设与压实结合工艺，先铺设底层材料并压实找平，再按设计厚度铺设复合层，控制各层铺设顺序与搭接宽度，压实过程中避免材料颗粒脱落，确保复合体系结构致密。

4.3 施工质量控制要点与检测方法

施工质量控制贯穿全程，聚焦关键参数与核心指标，通过科学检测手段保障修复质量达标，具体要点如下：（1）施工过程控制，严格把控材料配比、搅拌时间等参数，确保材料性能稳定；控制施工环境温湿度、风速，避开雨雪、高温、低温等恶劣天气，水下施工需控制水流速度，做好防水、防扰动措施。（2）外观质量检测，修复完成后检查表面平整度、完整性，无裂缝、气泡、剥落、起砂等缺陷，边角部位线条顺直，修复层与原结构衔接平顺，无明显色差。（3）性能指标检测，采用无损检测与抽样检测结合方式，检测修复层厚度、粘结强度等核心指标，借助超声波、回弹仪等设备排查内部缺陷，抽样检测材料力学性能与耐久性能，确保符合设计要求。

4.4 复杂工况下施工技术优化

针对水工结构复杂工况，优化施工技术以适配环境需求，保障施工质量与安全，具体优化要点如下：（1）水下施工优化，选用水下固化型材料，配备水下施工专用设备，优化作业流程缩短水下作业时间，采用水下定位装置确保施工精度，同时做好水下清淤、防泥沙淤积措施。（2）高空及狭窄空间施工优化，搭建稳固的作业

平台,采用小型化、便捷式施工设备,简化施工工序,针对狭窄空间采用手工涂刷与机械辅助结合方式,确保材料均匀覆盖,做好高空作业安全防护。(3)极端温湿度工况优化,高温环境下缩短材料初凝时间,采取遮阳、降温措施防止材料失水过快;低温环境下采用保温养护工艺,选用低温固化剂提升材料固化效率,避免冻害影响修复层质量,干湿交替工况下强化基面防水处理,优化修复层密封性能^[3]。

5 新材料及修复技术在水利工程中的应用

5.1 在水库大坝冲蚀病害修复中的应用

水库大坝冲蚀病害多集中于坝面、消力池、泄洪道等部位,新材料及修复技术需适配大坝高水位、强水流冲击的服役环境,应用要点如下:(1)材料选型适配,根据大坝冲蚀类型选用对应新材料,水流冲刷区域选用高耐磨无机基改性材料,空蚀严重部位搭配有机-无机复合涂层,实现强度与抗空蚀性能兼顾。(2)修复技术应用,针对坝面表层冲蚀,采用喷射修复技术铺设无机基材料,分层作业确保与原坝体基面粘结紧密;消力池深层冲蚀部位,先通过预处理工艺清理受损区域,再采用浇筑与压实结合技术填充复合基材料,强化结构整体性。(3)防护与修复结合,在修复受损部位的同时,对大坝易冲蚀区域预先铺设防护新材料,形成“修复+防护”双重保障,降低后续冲蚀病害发生率。

5.2 在水闸及泄水建筑物冲蚀修复中的应用

水闸及泄水建筑物受高速水流、含沙水流冲击影响大,冲蚀病害集中于闸室、闸墩、泄水槽等关键部位,应用核心在于适配频繁过流工况,要点如下:(1)针对性修复作业,闸室底板及闸墩边角冲蚀部位,采用有机基涂层与无机基材料复合修复技术,底层用无机基材料填补损伤,表层涂刷有机基涂层提升抗冲蚀与密封性能。(2)施工工艺适配,考虑到水闸及泄水建筑物结构紧凑的特点,选用小型化施工设备,采用喷涂、手工铺设结合的方式作业,确保新材料均匀覆盖边角、缝隙等隐蔽部位。(3)工况适配调整,针对泄水槽高速水流特性,优化新材料铺设厚度与固化工艺,提升修复层抗冲击能力,同时做好修复后养护工作,适配过流前的工期

要求。

5.3 在渠道及渡槽冲蚀防护工程中的应用

渠道及渡槽多为长距离线性结构,冲蚀以水流磨蚀、干湿交替侵蚀为主,新材料及修复技术需兼顾防护效果与施工便捷性,应用要点如下:(1)防护材料铺设,渠道内壁采用大面积喷涂有机基防护涂层,提升表面光滑度与抗磨蚀性,渡槽承重部位选用高强度复合基材料,兼顾防护功能与结构承载需求。(2)修复技术适配,针对渠道局部冲蚀坑槽,采用便携式设备进行局部修补,选用快固化型无机基材料缩短修复周期,不影响渠道正常输水;渡槽接口部位冲蚀,采用柔性复合材料填充,适配接口轻微变形,避免因应力集中引发二次冲蚀。(3)长效性保障,结合渠道及渡槽露天服役特点,选用耐紫外、耐干湿交替的新材料,同时优化施工工艺,确保防护层与基材紧密结合,减少环境因素对防护效果的影响^[4]。

结束语:本文针对水工结构冲蚀病害问题,完成新材料特性、修复施工技术及工程应用的系统梳理与分析。三类新材料各有优势,配套施工工艺及质量控制措施可有效适配不同水工场景,弥补传统技术不足。但极端工况下新材料长效性仍需持续观测,智能化施工技术融合有待深化。未来应聚焦高性能、绿色低碳新材料研发,优化施工工艺与监测体系,推动技术产业化应用,为水利工程冲蚀病害防护修复提供更可靠的解决方案,助力水利工程高质量发展。

参考文献

- [1]帅华军.水工结构冲蚀病害防护新材料及修复应用[J].科学技术创新,2024(21):179-182.
- [2]赵雪瑜,张贵金,刘杰,崔懂文,范明.水工金属结构新型环氧防护涂料性能及应用研究[J].工程技术研究,2023,8(3):1-5.
- [3]崔懂文.水工结构典型病害修复与防护新材料及应用[D].湖南:长沙理工大学,2021(2):23-24.
- [4]方媛,冯小妮.水工建筑物典型病害修复与防护新材料及应用[J].农业开发与装备,2023(3):203-204.