工程管理

泄水建筑物抗冲耐磨混凝土施工技术研究

闫芳芳
新疆兵团水科院（有限公司） 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000

【摘 要】高水头泄洪洞、溢洪道、护坦等泄水建筑物长期承受高速挟沙水流冲磨、空蚀、脉动荷载作用。抗冲耐磨混凝土凭借高强度、高韧性、低磨耗、优良温控抗裂性能，成为泄水建筑物过流面核心防护材料。本文结合拉哇水电站泄洪洞工程实例，从原材料优选、配合比优化、现场浇筑、温控养护、质量检测五大维度梳理成套施工工艺，梳理施工高频质量缺陷并提出全过程管控措施。

【关键词】泄水建筑物；抗冲耐磨混凝土；冲磨破坏；浇筑工艺；温控防裂
【中图分类号】TV431 【文献标识码】A

Research on Construction Technology of Anti-Corrosion and Wear-Resistant Concrete for Spillway Structures

Yan Fangfang
Xinjiang Corps Water Conservancy Research Institute (Co., Ltd.) Urumqi City, Xinjiang Uygur Autonomous Region 830000

【Abstract】High-head flood discharge tunnels, spillways, stilling basins, and other water discharge structures are subjected to prolonged erosion, cavitation, and pulsating loads from high-speed sand-laden flows. Anti-erosion and wear-resistant concrete, with its high strength, toughness, low wear, and excellent thermal control cracking resistance, has become the core protective material for flow surfaces in water discharge structures. This paper, based on the example of the Lava Hydropower Station's flood discharge tunnel project, systematically organizes a complete set of construction techniques from five dimensions: raw material selection, mix ratio optimization, on-site pouring, thermal control curing, and quality inspection. It also identifies common construction quality defects and proposes comprehensive process control measures.

【Key words】Spillway structure; Abrasion-resistant concrete; Erosion damage; Pouring process; Temperature control and crack prevention

引言

我国西南山区水电工程普遍具备高水头、大泄量、河道含沙量高特征，泄水建筑物过流面水流流速可达 30～50m/s，高速水流裹挟砂石持续撞击、切削混凝土表层，同时空化空蚀加剧结构损伤，大量已建水库泄洪道运行 3～8 年即出现大面积冲蚀破损，维修成本高、停机检修周期长。基于此，本文依托拉哇水电站泄洪洞工程实测数据，系统研究抗冲耐磨混凝土全套施工关键技术，建立全流程质量控制体系，提升泄水构筑物长期运行稳定性。

1 泄水建筑物混凝土冲磨破坏机理与抗冲耐磨混凝土技术原理

1.1 高速水流冲磨、空蚀破坏机理

其一，高速水流携带推移质、悬移质砂石持续撞击、切削混凝土表层，骨料与水泥石界面率先剥离，逐步形成凹坑；其二，水流低压区产生空泡，空泡溃灭瞬间形成高压冲击波，撕裂混凝土表层微裂缝，扩大冲蚀损伤范围。普通混凝土界面过渡区疏松、强度低、极限拉伸值小，在循环水力荷载下极易发展贯通裂缝，耐磨层整体脱落。抗冲耐磨混凝土通过三大路径提升耐久性能：选用高硬度玄武岩骨料降低磨耗；掺入硅粉、HF 外加剂优化骨料–水泥石界面结构，密实内部孔隙；低热胶凝材料体系控制水化热，减少温度裂缝，从材料层面同步解决冲磨、开裂双重病害。

1.2 工程案例概况与基础检测数据

本文研究依托拉哇水电站泄洪洞工程，泄洪洞断面 16m×19m，最大泄水流速 42m/s，汛期河道含沙量均值 3.8kg/m^3，过流面设计采用 C50 抗冲耐磨混凝土，厚度 60cm。项目同步设置对比试验区：一侧采用常规 C50 水工混凝土，另一侧采用优化硅粉玄武岩抗冲耐磨特种混凝土，完工后开展 28d 力学、耐久、抗冲磨指标检测，形成量化对比数据。

表 1 常规混凝土与抗冲耐磨混凝土 28d 性能指标对比

检测指标	规范限值（DL/T 5207–2021）	普通 C50 水工混凝土	特种抗冲耐磨 C50 混凝土	性能提升幅度
抗压强度 /MPa	≥50	52.6	61.3	16.5%
抗冲磨强度 /[h/(kg·m^{-2})]	≥12.0	12.8	17.4	35.9%
极限拉伸值 /×10^{-6}	≥120	126	158	25.4%
28d 抗渗等级	≥W14	W14	W18	提升两级
表面平整度 /mm	≤5	4.2	1.8	57.1%
有害裂缝发生率	—	0.31%	0.03%	降低 90.3%

由表 1 数据可见，优化后的抗冲耐磨混凝土各项核心耐久指标显著优于常规水工混凝土，尤其抗冲磨强度、抗裂性能提升明显，可适配高流速挟沙水流长期冲刷工况。

2 泄水建筑物抗冲耐磨混凝土核心成套施工工艺

2.1 配合比现场优化与拌合管控

抗冲耐磨混凝土属于高密实、低水胶比特种水工混凝土，对拌合均匀性、原材料稳定性、动态适配性要求远高于普通混凝土。工程实践表明，固定试验室配合比无法完全适配施工现场温湿度、骨料含水率波动、砂石料级配偏差等动态因素，因此必须建立试验室基准配合比+现场动态微调的双控机制。拌合系统采用强制式拌合设备，严格执行延时拌合工艺，相较于普通混凝土 90s 拌合时长，抗冲耐磨混凝土统一延长至 150s 以上，确保硅粉、粉煤灰、高效减水剂在胶凝体系中均匀分散，彻底消除局部胶材团聚、外加剂富集、拌合不均等缺陷。同时严格执行计量精细化管控，水泥、硅粉、外加剂属于高精度粉料，计量误差严格控制在 ±1%以内，粗细骨料计量误差控制在 ±2%以内，每台班开展三次计量校准，杜绝计量偏差造成配合比失真。出机坍落度稳定控制在 160～180mm，和易性、保水性优良，无离析、泌水现象，从拌合源头保障混凝土内部致密结构。

2.2 模板、浇筑与精细化振捣工艺

过流面模板体系直接决定混凝土表层平整度、光洁度与整体耐磨基础性能，是抗冲磨施工的前置关键工序。工程全部采用高精度镜面复合钢模板，进场前逐块校正平整度、刚度，对变形模板调直修复，单块模板平面平整度误差控制在 1mm 以内，模板拼缝设置止浆海绵条与错台限位装置，彻底杜绝漏浆、错台、砂线缺陷。模板内侧统一涂刷专用水性脱模剂，均匀薄涂、无堆积、无流淌，严禁使用机油、黄油等油性脱模剂，避免污染混凝土表层、降低表层粘结强度与耐磨性能。浇筑施工严格遵循分层、分段、连续、单向原则，沿水流方向布设浇筑仓面，分层浇筑厚度控制在 30cm，杜绝超厚浇筑导致振捣盲区。仓面浇筑坚持连续作业，尽量缩短层间间隔时间，严控层间间歇不超过 4h，避免产生冷缝破坏整体耐磨结构整体性。振捣采用“插入式为主、附着式为辅”的组合振捣工艺，插入式振捣器遵循快插慢拔、均匀布点原则，振捣间距不大于 40cm，重点加密模板边角、钢筋密集区、仓面边缘等薄弱位置振捣，彻底消除蜂窝、麻面、空洞、骨料架空缺陷。混凝土初凝前开展二次精工收面，人工反复抹压平整，闭合表层塑性收缩微裂隙，形成致密光滑的耐磨表层，大幅提升抵抗高速水流切削、空蚀冲击的能力。

2.3 温控防裂专项施工技术

高标号抗冲耐磨混凝土胶凝材料含量高，水化热集中释放，极易产生温度应力裂缝，一旦出现贯通性温度裂缝，将直接破坏耐磨防护体系完整性，成为水流渗透、空蚀破坏的薄弱通道。为此项目搭建原材料预冷、入仓控温、通水降温、智能养护四位一体温控体系，实现全周期精准控温。夏季高温施工时，对粗细骨料搭设遮阳棚、喷淋预冷水降温，避开正午高温时段集中浇筑，严格控制混凝土出机温度、入仓温度不高于 18℃，从源头降低水化热基数。仓面内部预埋Φ32 薄壁冷却水管，按照 1.0m×1.0m 间距均匀布设，浇筑同步持续通水循环降温，根据光纤测温系统实时数据动态调节通水流量与水温，严格控制混凝土内部最高温度不超过 40℃、内外温差稳定小于 15℃、日降温速率不大于 1.5℃，杜绝温差应力引发结构性裂缝。仓面表层随浇随盖，初凝后立即开展保温保湿覆盖，避免表层快速散热产生表层龟裂，通过内外协同温控，实现温度应力平稳释放，全方位保障混凝土结构完整致密。

2.4 分阶段保湿养护工艺

养护是决定抗冲耐磨混凝土后期强度增长、耐磨性能稳定提升的核心工序，超长周期、分梯度精细化养护可有效降低干缩裂缝，密实表层结构。项目摒弃传统简单洒水养护模式，建立三阶段梯度养护体系。第一阶段初凝保湿期（浇筑后 6～48h）：全覆盖土工布，智能喷雾不间断保湿，保持表层长期饱和湿润，封闭塑性微裂缝；第二阶段强度增长期（3～14d）：持续保湿养护为主，辅以保温覆盖，规避昼夜温差影响，保障胶凝材料充分水化，稳步提升密实度与耐磨强度；第三阶段耐久防护期（14～28d 及后期）：加厚保温保湿覆盖，28d 龄期后统一涂刷专用耐磨封闭防护剂，封堵表层毛细孔隙，有效提升混凝土抗渗、抗冲磨、抗老化性能，

实现结构长效耐久稳定。

3 施工常见质量缺陷成因、数据统计与全过程优化管控策略

3.1 现场施工质量缺陷统计与成因分析

从缺陷数据分布可以看出，表层外观缺陷、温控裂缝缺陷、平整度超标缺陷占据绝大多数，整体缺陷成因集中在现场精细化管控不到位、工序标准化执行不严、养护体系落实不彻底三大方面。其中模板密封不严、振捣精细化不足直接导致表层蜂窝麻面、砂线漏浆，属于操作层常态化不规范施工问题；温控监测不及时、养护断水断湿、保温覆盖滞后，是温度裂缝、干缩微裂隙频发的核心诱因；收面时机把控不准、模板轻微变形、仓面浇筑不均匀，造成过流面平整度超标，直接降低水流流态，加剧局部紊流冲磨与空蚀损伤。此外少量强度、抗冲磨指标波动问题，多集中在夜间施工、低温施工时段，受拌合精度下降、养护环境差、施工班组责任心弱化影响，是现场动态管控的薄弱盲区。

3.2 事前预控

为从根源遏制各类施工缺陷，项目建立标准化前置预控体系。施工前完成专项工艺试验与样板引路，通过试验仓浇筑验证拌合参数、振捣工艺、温控指标、养护方案的可行性，统一全项目施工标准。严格落实原材料“三检三验”制度，所有玄武岩骨料、硅粉、抗冲磨外加剂进场必须附带合格证、检测报告，现场抽样复检合格后方可入库使用，杜绝不合格材料进场造成性能衰减。同时开展全员专项技术交底，针对抗冲耐磨混凝土特殊性，对管理人员、班组操作人员、监理人员分层交底，明确每道工序控制标准、风险点位、禁止行为。实行定岗定责管理制度，固定拌合操作员、振捣班组、养护班组、质检人员，杜绝人员轮换导致工艺标准变形。编制图文结合标准化作业指导书，张贴施工现场，实现施工全过程有据可依、有标可查。

3.3 事中过程管控

施工过程实行全工序三检制+关键工序旁站制，每道工序必须经过班组自检、工区互检、质检专检合格后，方可报请监理验收，验收不合格严禁进入下道工序。重点对模板安装、拌合计量、入仓浇筑、分层振捣、冷却水管布设、界面凿毛、精工收面、保湿养护八大关键工序实施 100%旁站监督，全过程影像留存、数据记录，实现施工质量可追溯、可复盘。施工现场配备平整度检测仪、温湿度监测设备、回弹检测仪、测温光纤系统，实时动态监测施工质量数据，一旦出现温差超标、平整度超限、养护不到位等问题，立即现场整改纠偏。严格管控层间施工质量，旧混凝土界面必须彻底凿毛至露出新鲜骨料，清理浮浆、积水、杂物后再行浇筑，保障层间粘结紧密，杜绝分层脱落隐患。针对夜间、雨季、低温等不利施工工况，增设专职管理人员值守，加密质量巡查频次，消除薄弱时段质量盲区。

3.4 事后验收与长效运维防护

混凝土达到龄期后，开展全方位竣工验收，通过外观检查、平整度检测、回弹检测、芯样取样、室内抗冲磨试验多维度核验施工质量，对照规范与试验数据逐项验收，建立单元质量评定台账。对局部微小麻面、细微裂缝采用专用环氧耐磨砂浆精细修补打磨，恢复过流面完整光滑形态，避免局部流态紊乱引发次生冲磨空蚀破坏。工程竣工投运后，建立长效运维巡检机制，定期排查过流面表层状态，汛期前后开展专项检测，及时修复微小病害，防止缺陷持续扩张。同步搭建数字化施工运维档案，完整留存配合比参数、温控数据、施工记录、检测结果、运维检修记录，为后续同类工程施工优化、老旧泄水建筑物维修加固提供数据支撑与经验借鉴。

4 结束语

本文结合拉哇水电站泄洪洞工程实测数据，系统阐释泄水建筑物高速水流冲磨破坏机理，梳理抗冲耐磨混凝土原材料优选、配合比优化、分层浇筑、智能温控、长效养护全套施工工艺，通过对比试验数据证实玄武岩硅粉特种混凝土在抗冲磨、抗裂、防渗性能上远优于常规水工混凝土。研究表明，严格落实原材料管控、精细化浇筑与智能温控养护，可将混凝土有害裂缝发生率降至 0.03%以内，大幅提升泄水建筑物耐磨耐久性能，对同类高水头泄水工程施工具备工程推广价值。

参考文献

[1]陈云,李红心,胡志刚,等. 高原严寒地区泄水建筑物抗冲耐磨混凝土配合比设计及性能试验研究[J].西北水电,2025,(3):45–50.
[2]何克. 水电站泄洪隧洞抗冲耐磨混凝土施工技术研究[J].科技创新与应用,2022,12(16):174–177.
[3]尚立珍,张华,刘博阳. 溢洪道抗冲耐磨混凝土温控防裂施工[J].人民黄河,2020,42(S2):167–168.
[4]李文祥,张维. 卡洛特水电站溢洪道抗冲耐磨混凝土配合比试验[J].人民长江,2020,51(S2):220–222+269.