面板堆石坝新型表层止水与聚脲辅助防渗组合技术在抽水蓄能工程中的应用

汪筱童

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘　要】：混凝土面板堆石坝的防渗可靠性取决于面板接缝表层止水系统的完整性，传统"SR 填料+盖片"锚固型止水存在盖板与混凝土面缝隙渗水、螺栓锈蚀与冰拔破坏等缺陷，运行期修复困难。依托河南天池抽水蓄能电站上、下水库面板堆石坝工程，研究应用"GB 塑性填料+SK 刮涂聚脲复合胎基布"涂覆型表层止水与刮涂聚脲辅助防渗组合技术，系统阐述了该组合技术的结构原理、施工工艺流程、操作要点与质量控制标准。工程应用表明：涂覆型止水实现了机械化挤出成型，施工进度由传统工艺的 2.5m/h 提高至 8m/h，班组人员由 16 人减至 10 人；上、下库 8731m 表层接缝止水施工累计节约人工 5620 个工日，扣除设备进出场费用后净节约 137.34 万元；聚脲辅助防渗系统黏结强度不小于 2.5MPa，潮湿环境适应性与抗冲刷磨蚀性能优异，显著提高了面板防渗的可靠性与运行期可修复性，可为同类面板堆石坝工程提供参考。

【关键词】：面板堆石坝；表层止水；塑性填料；聚脲涂层；辅助防渗

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.064

引言

自 1985 年引进现代面板堆石坝技术以来，我国面板堆石坝工程数量已超过全球总数的一半，成为土石坝中的主导坝型。面板接缝表层止水是面板防渗体系的关键环节，一旦失效将危及坝体渗流安全。传统"SR 填料+盖片"锚固型止水长期运行暴露出盖板底面缝隙渗水、扁钢及螺栓锈蚀、螺栓冰拔破坏等缺陷，且失效后修复困难[1]。河南天池抽水蓄能电站上、下水库大坝均为钢筋混凝土面板堆石坝，原设计采用该型式止水；经各参建方商讨并组织专家咨询会论证，变更为"GB 塑性填料+SK 刮涂聚脲复合胎基布"涂覆型止水与刮涂聚脲辅助防渗组合方案。本文结合工程实践，阐述该组合技术的结构原理、施工工艺流程、操作要点与质量控制标准，并分析应用效果。

1 技术原理与系统构成

"GB 塑性填料+SK 刮涂聚脲复合胎基布"涂覆型止水将面板与趾板、防浪墙等单项混凝土结构连接为整体，同时在面板死水位以下刮涂聚脲作为辅助防渗，形成一套完整的面板表层止水系统。

涂覆型止水在结构上与锚固型盖板的根本区别在于取消了金属锚固体系：接缝底部嵌填氯丁橡胶棒，其上采用挤出机连续挤出成型的 GB 塑性填料充填缝槽，塑性填料表面整体刮涂 SK 聚脲并复合胎基布增强，依靠聚脲层与混凝土基面的黏结实现封闭，从而消除了盖板底面的渗水缝隙，也不存在螺栓、扁钢等金属件的锈蚀与冰拔问题。GB 塑性填料常温下具有黏弹塑性，能够适应接缝的大变形往复运动，保证水密性；表面聚脲-胎基布复合层抗拉强度高、与填料及混凝土黏结可靠，形成柔性封闭保护层，运行后期局部破损时可直接补刮修复，修复简便快捷[2]。

聚脲是近年来研发的新型无溶剂、无污染绿色材料，由异氰酸酯组分与氨基化合物组分快速反应成膜，分子结构致密且不含挥发性溶剂，涂覆后可在潮湿基面固化，低温固化性能良好，抗冲刷磨蚀与耐候性能优异。作为辅助防渗层，聚脲渗入并封闭混凝土表面毛细孔与微细裂缝，阻断水分及有害介质侵入通道，与表层止水协同工作，大幅提高面板防渗的可靠性[3]。主要材料技术指标为：SK 刮涂聚脲拉伸强度不小于 15MPa，扯断伸长率不小于 300%，撕裂强度不小于 40kN/m，黏结强度不小于 2.5MPa，吸水率小于 5%；GB 塑性填料流动止水长度不小于 135mm，密度 1.5±0.1g/cm³，经 300 次冻融循环后断裂伸长率不小于 125%且粘接不破坏；界面剂表干时间不大于 6h；双组分聚脲固含量不小于 90%。

2 工程概况

河南天池抽水蓄能电站位于河南省南阳市南召县境内，下水库区经马市坪至南召县城公路里程 33km。电站由上水库、输水系统、地下厂房系统、下水库及地面开关站等建筑物组成，地下厂房安装 4 台单机容量 300MW 的混流可逆式水泵水轮发电机组，总装机容量 1200MW。上、下水库大坝均为钢筋混凝土面板堆石坝，上库大坝最大坝高 118.4m，下库最大坝高 100.6m。上、下库表层接缝止水总长 8731m，辅助防渗涂层设于面板死水位以下区域。

3 施工工艺流程与操作要点

3.1 面板接缝表层止水施工

面板接缝按变形特征分为张性缝与压性缝两类：张性缝以接缝张开变形为主，要求止水材料在拉伸状态下保持水密；压性缝以挤压变形为主，要求材料具备足够的抗压流变适应性。GB 塑性填料兼具高伸长率与自愈合黏弹特性，对两类缝型均可适应。施工条件要求为：环境温度宜控制在 5～35℃，低温时段采取保温措施避免填料挤出成型后骤冷开裂；基面应干燥或无明水，雨后作业面须经晾晒或吹风处理达到含水要求后方可涂胶；面板混凝土强度及表面平整度经作业面验收合格后，止水施工方可开始。工艺流程为：混凝土面板接缝表面清理→安放氯丁橡胶棒→涂刷 SK 底胶→挤出机挤出成型 GB 塑性填料→涂刷界面剂→刮涂聚脲→贴胎基布→刮涂聚脲→贴胎基布→刮涂聚脲→养护。

（1）基面处理。以接缝为中心，按缝型确定两侧打磨范围：张性、压性垂直缝及防浪墙底水平缝两侧各 60cm，周边缝、面板周边垂直缝及趾板结构缝两侧各 70cm；采用磨光机打磨除去表面污物，并用清水或吹风机将缝槽内灰尘、污物清理干净[4]。

（2）安放氯丁橡胶棒。氯丁橡胶棒直径按设计断面选用，与缝槽宽度匹配；安放时将橡胶棒依次压入坡口底部并逐段张直，使棒壁与缝壁嵌紧、棒体无扭曲，棒轴心与垂直缝中心线一致。橡胶棒接头采用现场硫化连接，硫化后检查接头应平整牢固、无气泡和裂口，并沿缝全线检查确认无漏放、无悬空段。

（3）涂刷底胶。底胶用于增强 GB 塑性填料与混凝土槽面的黏结，涂刷前确认基面洁净干燥，用毛刷沿顺缝方向均匀涂刷，不漏涂、不堆积，宽度至塑性填料边缘处；已涂区域防止污染，被污染部位铲除后重涂。

（4）GB 塑性填料施工。挤出模口断面须与设计断面尺寸一一对应，每换一种断面规格先进行试挤，实测成型体断面尺寸合格后方可正式施工。张性、压性垂直缝及面板周边垂直缝：在坝顶对应垂直缝位置安放 1 台 3t 卷扬机配合挤出台车，挤出机连续铺料，卷扬机牵引台车的上升速度与挤出机出料速度实时匹配，防止填料堆积拉扯或悬空断裂，一次性施工至设计高程；周边缝、防浪墙底水平缝及趾板结构缝：挤出成型的填料按合适长度切断后，人工放入缝槽上部，放入时注意保持填料原状，不得弯折扭转。

（5）涂刷界面剂。界面剂用于增强聚脲与基面的黏结，采用滚筒配合毛刷人工涂刷，薄而均匀、无漏涂、无堆积；已涂区域在刮涂聚脲前做好遮挡防护，雨天停止作业。

（6）刮涂聚脲复合胎基布。界面剂表干后刮涂第一遍聚脲，厚度大于 1mm 并粘贴第一层胎基布，胎基布铺贴应平整无褶皱，搭接宽度不小于 50mm，搭接处用刮刀压实赶出气泡；表干后依次刮涂第二、三遍，第三遍表面再粘贴第二层胎基布，表干后刮涂第四、五遍聚脲，聚脲与胎基布总厚度不小于 4mm。每遍刮涂厚度宜控制在 0.5～1.0mm，一次成型，避免来回涂刷产生包块；表干判定以指触不粘为准，未达表干不得进行下一遍施工。

（7）养护。聚脲表干前严禁触碰，之后自然养护至实干；养护期间设置围挡和警示标识，禁止踩踏、碰撞及焊渣溅落，后续作业经过时铺设保护层，大风降雨天气提前遮盖。

3.2 聚脲涂层辅助防渗系统施工

工艺流程为：混凝土基面处理→涂刷界面剂→刮涂聚脲涂层(两遍)→养护。基面处理采用磨光机打磨除去浮浆、油污，用水或高压吹风机清理浮灰，基面含水率过高时先行干燥处理；对破损、孔洞、裂缝等部位用修补材料修补，修补后目测并敲击检查，表面应无裂纹、孔洞、空鼓、松动、蜂窝麻面等缺陷，修补部位养护至强度满足要求后再进行下道工序。界面剂待基面干燥后涂刷，要求薄而均匀、无漏涂无堆积，涂刷范围大于聚脲涂层范围。界面剂表干后 1～4h 内刮涂第一遍聚脲，表干后刮涂第二遍，直至涂层厚度达到 2mm。每遍刮涂后采用侧光目视检查针孔、漏刮等缺陷，发现后随即用同料补刮。刮涂结束后 12h 内不允许水浸泡，之后自然养护，防止踩踏扰动。

3.3 质量控制

组合技术施工质量控制执行《混凝土面板堆石坝接缝止水技术规范》(DL/T 5115-2016)和《水电水利工程聚脲涂层施工技术规程》(DL/T 5317-2014)[5]。

表层止水方面，塑性填料嵌填完成后以 30～50m 为一段，用模具检查几何尺寸是否符合设计要求，并抽样切开检查填料与 V 形槽表面的黏结牢固程度及密实性，对黏结质量差的部位返工处理，验收合格后及时覆盖保护盖片，盖片固定螺栓的紧固性抽样检查；安全环保方面，坡面作业人员全程佩戴安全带，聚脲施工时作业人员穿劳保鞋、工作服并佩戴防护口罩与乳胶手套，现场禁止明火作业并配备足量灭火器，废弃物与清洗液集中回收处理，避免污染库周水体。施工过程中安排专人全程旁站监控，GB 塑性填料施工保持粘贴面洁净干燥，挤出机连续送料速度与铺料速度匹配，坝顶卷扬机上升速度与挤料速度协调，保证成型体密实并一次性就位；聚脲分层刮涂、厚度均匀，总厚度不小于 4mm。

聚脲涂层质量检测执行三项内容：外观要求颜色均匀、平

整，无流挂、漏涂、针孔、起泡、开裂及异物混入，全部目测检查；涂层黏结强度不小于 2.5MPa 或呈基层非界面破坏，每 400 ㎡检测一组；涂层平均厚度符合设计要求，检测最小厚度不小于设计厚度的 90%，且低于设计厚度的比例不超过 5%，按每 100～400 ㎡一组抽样测定。

4 应用效果分析

4.1 施工效率与经济效益

与传统"SR 填料+盖片"型式相比，涂覆型止水将人工挤压填料与盖片吊装工序改为成型机连续挤出，复合胎基布由人工携带至工作面，机械化程度显著提高，两种型式的施工参数与经济效益对比见表 1。由表 1 可知，上、下库 8731m 表层接缝止水施工共节约人工 5620 个工日，按 320 元/工日计节约劳务费用 179.84 万元，扣除切胶机进出场费 2.5 万元、塑性材料挤出机进出场费 40 万元后，净节约 137.34 万元。同时，每小时进度由 2.5m 提高至 8m，工期优势显著，有力保障了大坝度汛与蓄水节点目标。

表 1 两种表层止水型式施工参数与经济效益对比

对比项目	"SR 填料+盖片"锚固型	涂覆型止水
每班组人员投入(人)	16	10
施工进度(m/h)	2.5	8.0
表层止水总量(m)	8731	8731
节约人工(工日)	—	5620
节约劳务费用(万元)	—	179.84
新增设备进出场费(万元)	—	42.50
净节约费用(万元)	—	137.34

4.2 防渗可靠性效益

从长期运行看，涂覆型止水消除了锚固型盖板的渗水缝隙与金属构件病害源，止水失效模式由"多点薄弱环节"转变为"面层整体可控"，配合聚脲辅助防渗层，可有效降低面板渗透破坏发生概率；聚脲涂层潮湿适应、低温固化、抗冲刷磨蚀与高耐候的性能特点，适应了抽水蓄能电站库水位频繁涨落、含砂水流冲刷与北方寒冷地区冻融交替的运行条件，大幅提高了面板防渗的可靠性，降低了运营后期检修成本。在运行维护方面，建议蓄水初期加强接缝部位的巡视与渗漏量观测，建立聚脲涂层外观与黏结强度的定期检测档案，对泄槽区、水位变动区等冲刷强烈部位适当缩短检测周期；局部破损部位按"清理—界面处理—补刮聚脲"的工序修复，无需拆除原止水结构，修复工作量与成本均显著低于锚固型盖板。

5 结语

本文结合河南天池抽水蓄能电站工程，系统阐述了"GB 塑性填料+SK 刮涂聚脲复合胎基布"涂覆型表层止水与刮涂聚脲辅助防渗组合技术的原理、工艺与效果。该技术克服了传统锚固型表层止水缝隙渗水、螺栓锈蚀与冰拔破坏的缺陷，实现了机械化连续施工，8731m 接缝止水净节约费用 137.34 万元，施工进度提高 2.2 倍；聚脲辅助防渗系统性能优异，运行期修复简便，显著提升了面板防渗系统的可靠性与可维护性。面板表层止水的选型应结合工程气候条件、运行方式与检修条件综合确定，对于高寒、水位频繁涨落及含砂水流冲刷工况的抽水蓄能电站面板坝，该组合技术具有较好的适用性。

参考文献：

[1] 王静雯.面板坝涂覆型结构止水施工工艺的分析及应用[J].水利科学与寒区工程,2022,5(2):78-81.

[2] 郦能惠,等.高混凝土面板堆石坝接缝止水试验研究和应用[J].岩土工程学报,2024,46(1):31-39.

[3] 孟天一,刘小楠,李炳奇,等.水工建筑物封缝防渗结构中聚脲和聚脲砂浆变形能力和强度特性的试验研究[J].水利学报,2025,56(11):1492-1503.

[4] 邹彦艺,戴俊.高性能改性聚合物修补砂浆和单组分聚脲防水涂料在小型水库防渗加固处理中的应用[J].红水河,2024,43(2):53-56+62.

[5] 杨刚.聚脲注浆防渗和聚合物防水砂浆补强维修技术探讨[J].化肥设计,2023,61(6):17-19+22.