

抽水蓄能电站混凝土施工技术及质量控制探讨

李燕子

中国水利水电第十一工程局有限公司，河南郑州，450000；

摘要：抽水蓄能电站是清洁能源体系的核心组成部分，兼具调峰填谷、储能备用、应急调频等关键功能，其工程建设质量直接决定电站运行的安全性、稳定性与耐久性。混凝土结构作为电站挡水大坝、输水隧洞、地下厂房等核心构筑物的主体材料，受施工环境复杂多变、结构受力条件严苛、运行工况交替变化等多重因素影响，对施工技术精度与质量管控水平提出了极高要求。本文结合抽水蓄能电站工程建设的典型特性，系统梳理混凝土施工的关键技术要点，深入剖析质量控制的核心环节与优化路径，结合实际工程案例验证技术应用成效，为同类工程的施工技术优化与质量管控提升提供理论参考与实践借鉴。

关键词：抽水蓄能电站；混凝土施工技术；滑模施工

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.026

引言

在双碳战略推进背景下，抽水蓄能电站凭借大容量储能、高可靠性、长寿命优势，成为构建新型电力系统、保障能源安全的关键设施。近年来，我国抽水蓄能电站建设进入规模化、高难度阶段，工程规模扩大，复杂地质施工挑战加剧。混凝土因强度高、耐久性好、可塑性强，被广泛用于电站关键部位，其施工质量是保障电站安全高效运行的核心。与常规水利水电工程相比，抽水蓄能电站混凝土施工有显著特殊性与复杂性：一是水位变幅大，对混凝土抗渗、抗裂及抗冻融性能要求高；二是施工环境严苛，山区峡谷地形险峻、气候多变，制约混凝土施工各环节；三是结构形式多元，不同结构受力特性与施工技术要求差异大。因此，深入研究其混凝土施工核心技术，构建全流程质量控制体系，对保障工程质量、提升电站可靠性与经济性有重要意义和价值。

1 抽水蓄能电站混凝土施工关键技术

1.1 施工前期准备技术

施工前期准备是保障混凝土施工质量的前提基础，主要涵盖施工总体布置、原材料制备与混凝土配合比优化三大核心环节。在施工总体布置方面，需结合工程地形地貌特征与施工进度需求，科学规划施工平台、供水供电系统、物料运输道路及混凝土拌和站等关键设施的布局。例如，某抽水蓄能电站上下库大坝施工中，在坝顶区域搭建专用施工操作平台，配置 2 套智能滑模设备及配套卷扬机提升系统，同步布设 DN100 主供水管网与坡面 PVC 花管洒水系统，实现混凝土养护全覆盖；同时配备 150kW 应急柴油发电机组，保障极端天气下

施工供电稳定，为后续施工的顺利推进奠定了坚实基础。

原材料制备环节需严格执行质量管控标准，重点把控水泥、骨料、外加剂等核心材料的性能指标。针对抽水蓄能电站混凝土高抗裂、高防渗的核心需求，优先选用低热硅酸盐水泥，降低混凝土水化热峰值，减少温度裂缝风险；采用级配连续、颗粒圆润的骨料，降低骨料空隙率，提升混凝土密实度。在外加剂选型与应用方面，创新采用 VF 防裂剂与玄武岩纤维双掺技术，构建微膨胀补偿收缩+纤维拉结增韧的双重防裂体系，经试验验证，可使混凝土极限拉伸值提升 20% 以上，有效抑制早期裂缝的产生与发展。混凝土配合比优化需结合不同工程部位的功能需求开展针对性试验，确定合理的水胶比、胶凝材料用量及外加剂掺量；例如高水头输水部位混凝土需重点提升抗渗等级至 W12 以上，大体积混凝土则需优先控制水化热温升，确保内外温差不超过规范限值。

1.2 核心施工工艺技术

滑模施工技术：在大坝面板混凝土施工中，滑模技术因具备施工效率高、混凝土表面平整度好、连续浇筑无施工缝等优势，成为主流施工工艺。施工前需完成坡面修整与验收，确保坡面平整度偏差控制在 50mm 以内，随后通过精密测量放样，精准界定浇筑范围与滑模运行轨迹。滑模系统采用卷扬机同步牵引方式，遵循从中间块向两侧推进、分两序跳仓浇筑的原则，单块面板连续浇筑完成后立即转入下一块施工，避免出现施工缝缺陷。施工过程中需严格控制滑模提升速度（通常为 1.5-2.0m/h），确保与混凝土浇筑、振捣节奏协同同步；振捣作业采用插入式振捣器，振捣深度控制在 30-50cm，

振捣频次以混凝土表面泛浆、无气泡逸出为宜，避免出现漏振、过振导致的蜂窝、麻面、空洞等质量缺陷。

堆石混凝土施工技术：作为一种低碳环保型施工技术，堆石混凝土凭借水泥用量少、水化热低、施工效率高、工程造价低等优势，在抽水蓄能电站主坝施工中逐步推广应用。湖北平坦原抽水蓄能电站率先将小粒径堆石混凝土技术应用于主坝建设，通过开展多组工艺性试验，确定合理的堆石级配（粒径 5-30cm）与自密实混凝土配合比；采用 AI 图像识别技术实时检测堆石摊铺粒径分布与空隙率，确保堆石空隙率控制在 35%-40% 的合理范围。浇筑施工遵循先堆石、后灌浆的原则，先采用大型机械进行堆石摊铺与碾压密实，再浇筑高流动性自密实混凝土填充堆石空隙，形成密实均匀的整体结构。该技术的应用不仅大幅缩短了主坝施工工期，还降低了 30% 以上的水泥用量，实现了质量、效率与环保效益的协同提升。

止水施工技术：止水结构是保障混凝土构筑物防渗性能的关键防线，需严格把控各环节施工工艺质量。在面板张性缝、压性缝等关键部位，先铺设 2-3cm 厚水泥砂浆垫层，采用挖槽法或贴层法施工，确保垫层密实平整、表面光滑。止水带安装需精准定位，采用专用钢质固定夹具进行固定，间距控制在 50-80cm，防止混凝土浇筑过程中出现移位、变形；止水带接头部位采用热硫化焊接方式，焊接温度控制在 200-220℃，焊接完成后进行气密性试验，确保接头无渗漏。混凝土浇筑完成后，及时对缝面进行清理、干燥处理，采用聚脲弹性涂层进行封闭防护，提升止水结构的耐久性与防渗可靠性。

1.3 养护与防护技术

混凝土养护是抑制早期裂缝产生的关键环节，需结合环境温度、湿度条件及工程部位特性，制定差异化养护方案。常规部位采用全覆盖洒水养护方式，通过坝顶主供水管网与坡面 PVC 花管形成立体洒水系统，每块面板单独设置控制阀门，确保养护水分均匀充足；养护周期不少于 28 天，高温季节需每 2-3 小时洒水一次，避免混凝土表面水分快速蒸发产生塑性收缩裂缝；寒冷季节采用保温被+塑料薄膜双层覆盖措施，必要时采用蒸汽养护，防止混凝土受冻破坏。

对于水位变化区、溢洪道等受水流冲刷、冻融循环作用强烈的特殊部位，需加强后期防护处理。采用聚脲弹性涂层进行防护处理，施工前需对混凝土表面进行打磨、除尘、干燥处理，确保表面平整度偏差不大于 2mm；

涂层涂刷宽度不小于 25cm，厚度控制在 2.0-3.0mm，涂刷过程中采用湿膜测厚仪实时监测厚度，确保涂层均匀连续。针对施工过程中已产生的裂缝，需根据裂缝宽度与深度采取针对性处理措施：缝宽大于 0.2mm 的结构性裂缝采用化学灌浆+聚脲涂层封闭的复合处理方案，缝宽不大于 0.2mm 的非结构性裂缝采用环氧砂浆进行表面封闭处理，确保混凝土防渗性能不受影响。

2 抽水蓄能电站混凝土质量控制核心环节

2.1 施工过程质量控制

施工过程质量控制需构建事前预防、事中控制、事后核查的全流程闭环管控体系。事前预防阶段重点开展技术交底与人员培训，针对滑模施工、止水安装等关键工艺召开专题技术研讨会，明确质量控制要点、技术参数与验收标准；对施工人员进行岗前培训与实操考核，确保具备相应的技术能力。事中控制阶段需加强施工现场巡查与智能化监测，采用温度传感器、应变传感器等设备实时采集混凝土浇筑温度、内部温升、应力应变等数据，例如在大体积混凝土浇筑过程中，通过布设分布式温度监测系统，控制混凝土内外温差不超过 25℃；借助 AI 视频监控系统对施工过程进行实时研判，提前预判振捣不密实、养护不及时等质量风险，并发出预警提示。

关键工序质量控制需严格执行三检制（自检、互检、专检）验收制度：钢筋制安前需清理表面铁锈、油污等杂质，钢筋焊接接头需按规范要求抽样进行力学性能试验，合格率需达到 100%；混凝土浇筑前需全面检查模板平整度、刚度、支撑稳定性及止水装置安装质量，验收合格后方可签发浇筑令；浇筑过程中需控制振捣深度与频次，避免漏振或过振；滑模提升过程中需安排专人实时检查混凝土表面质量，发现蜂窝、麻面等缺陷及时进行修补处理。

2.2 裂缝防控质量控制

裂缝是抽水蓄能电站混凝土结构的主要质量隐患，按成因可分为结构性裂缝与非结构性裂缝，其中非结构性裂缝占比达 95% 以上，主要包括塑性收缩裂缝与温度收缩裂缝。裂缝防控需采取材料优化+施工管控+养护强化的综合措施：一是材料层面，通过优化混凝土配合比，选用低热水泥、掺加复合防裂剂与纤维材料，从源头上提升混凝土抗裂性能；二是施工层面，严格控制混凝土入仓温度，高温季节采用预冷骨料、加冰拌和、冷水搅拌等措施，将入仓温度控制在 15℃ 以下；大体积混凝土

采用分层浇筑（分层厚度 2-3m）、布设冷却水管等方式，加速水化热散发；三是养护层面，延长早期养护周期，确保混凝土强度增长阶段表面湿度充足，避免因体积收缩产生裂缝。

针对结构性裂缝，需从设计优化与施工管控两方面协同防控：设计阶段合理设置分缝分块，在结构受拉区域设置张性缝，受压区域设置压性缝，选用高弹性、高耐久性的填料填充缝隙；施工阶段严格控制坝体堆石填筑质量，采用大型振动碾分层碾压，确保坝体压实度符合设计要求；待坝体沉降稳定（沉降速率小于 0.5mm/月）后再进行面板混凝土施工，避免坝体不均匀沉降导致面板产生结构性裂缝。

2.3 质量监督与验收管理

建立健全层级分明的质量监督管理体系，实行项目经理为第一责任人，质量副经理、安全总监为直接责任人，各施工班组、质检部门协同配合的管理机制，明确各层级、各岗位的质量职责与考核标准。施工过程中，加强对原材料、构配件的进场检验验收，每批次材料均需提供出厂质量合格证明，按规范要求抽样复检，不合格材料严禁进场使用；对混凝土试块进行标准养护与同条件养护，定期检测混凝土抗压强度、抗渗等级等性能指标，确保符合设计要求。

分部分项工程验收需严格遵循相关规范标准与设计要求，隐蔽工程必须经监理单位、建设单位联合验收合格，并签署验收记录后，方可进入下道工序施工；单位工程完工后，需组织专业检测机构对混凝土结构的外观质量、尺寸偏差、强度等级、抗渗性能、内部缺陷等指标进行全面检测评估，确保各项指标符合设计与规范要求。同时，建立质量问题追溯与闭环整改机制，对检测发现的质量缺陷，明确整改责任人、整改措施与整改时限，整改完成后进行复核验收，避免同类质量问题重复发生。

3 工程案例应用分析

浙江天台抽水蓄能电站是国内单机容量最大（350MW）、额定水头最高（700m 级）的抽水蓄能电站之一，工程建设面临高水头压力作用与日均 15℃ 剧烈温差变化的双重技术挑战。为解决混凝土抗裂防渗难题，工程采用低热硅酸盐水泥+VF 防裂剂+玄武岩纤维的双掺防裂技术方案，在大坝面板施工中应用智能滑模系统，

并配套建立智能化温度监测与精准养护体系：通过布设 120 余个温度传感器实时监测混凝土温度变化，根据监测数据动态调整养护洒水频次与保温措施。该技术方案的应用，成功打造了国内首个低热水泥堆石坝面板工程，实现了百米级面板混凝土零裂缝的突破，混凝土抗渗等级达到 W14，大幅提升了结构的耐久性与防渗可靠性，为高水头抽水蓄能电站混凝土施工提供了宝贵经验。

湖北平坦原抽水蓄能电站下库主坝施工中，创新性采用小粒径堆石混凝土施工技术，通过与科研单位联合开展专项试验研究，优化确定了堆石级配与自密实混凝土配合比参数；引入 AI 图像识别技术与智能压实监测系统，实现堆石摊铺质量与混凝土浇筑过程的实时管控。该电站主坝首仓堆石混凝土顺利浇筑完成，标志着国内首座小粒径堆石混凝土主坝施工取得关键性突破。与传统混凝土施工工艺相比，该技术不仅使施工工期缩短 20%，还减少了 30% 的水泥用量，降低了水化热排放与工程投资，实现了工程质量、施工效率与生态环保效益的协同提升，为低碳化抽水蓄能电站建设提供了新路径。

4 结论与展望

抽水蓄能电站混凝土施工技术与质量控制是保障电站安全稳定运行的核心要素，直接关系到工程建设质量与长期运行效益。本文通过系统分析得出以下核心结论：一是施工前期准备需聚焦施工布置优化、原材料质量管控与配合比精准设计，为后续施工质量奠定基础；二是核心施工工艺需结合不同结构特性选型应用，滑模技术、堆石混凝土技术等新型工艺的合理应用可显著提升施工质量与效率；三是质量控制需构建全流程闭环管控体系，重点强化施工过程管控、裂缝防控与验收管理；四是智能化技术与新型材料的融合应用，是提升混凝土施工质量与管控水平的重要方向。

参考文献

- [1] 王新龙. 大体积混凝土施工质量控制与裂缝防治技术在抽水蓄能电站中的应用研究[J]. 城市情报, 2024 (24).
- [2] 余雪祥, 朱小飞. 惠州抽水蓄能电站水道混凝土施工质量控制[J]. 水力发电, 2010(9): 36.
- [3] 余雪祥, 朱小飞, Yu, 等. 惠州抽水蓄能电站水道混凝土施工质量控制[J]. 水力发电, 2010. DOI: CNKI: SUN: SLFD. 0. 2010-09-007.