# 抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制技术研究

赵江涛，赵　能

（中国水利水电建设工程咨询西北有限公司，陕西 西安 710100）

**摘　要**　抽水蓄能电站输水隧洞具有埋深大、洞线长、地质条件复杂等特点，施工质量直接关系到电站长期运行安全。本文结合工程实践，系统分析输水隧洞开挖、初期支护、衬砌混凝土及灌浆等关键工序的质量控制要点，提出光面爆破参数优化、支护及时性管控、衬砌混凝土温控防裂及分时段固结灌浆等技术措施，并构建以“三检制”为核心的全过程质量管控体系，以期为类似抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制提供有益参考。

**关键词**　抽水蓄能电站；输水隧洞；施工质量控制；衬砌混凝土；固结灌浆

**中图分类号**：TV543+.3　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.033

## 0　引言

随着新型电力系统建设加速推进，风电、光伏等间歇性新能源大规模并网，抽水蓄能作为技术最成熟、经济性最优的大规模储能方式，近年来迎来快速发展期。输水隧洞是抽水蓄能电站的关键构筑物，承担上、下水库间双向水流输送功能，其施工质量直接影响电站安全稳定运行。由于输水隧洞通常具有埋深大、洞线长、穿越地层复杂等特点，施工过程中易出现围岩失稳、衬砌开裂、渗漏等质量问题[1]。因此，系统研究输水隧洞施工质量控制技术，对保障工程质量和电站长期安全运行具有重要的现实意义。

## 1　抽水蓄能电站输水隧洞施工特点与质量控制难点

### 1.1　工程特点

抽水蓄能电站输水隧洞一般由进/出水口、上平段、斜井或竖井、中平段、下平段等部分组成，洞线总长可达数千米。隧洞通常穿越多种岩性地层，围岩级别以Ⅲ、Ⅳ级为主，局部存在断层破碎带、岩溶发育区及地下水富集带[2]。与常规引水隧洞不同，抽水蓄能电站输水隧洞承受双向水流作用，发电工况和抽水工况下水流方向相反，高水头条件下衬砌需承受较大内水压力，对结构整体性、抗渗性和抗冲磨性能要求更为严格[3]。

### 1.2　质量控制难点

一是开挖轮廓控制难度大，钻爆法施工中超欠挖直接影响衬砌厚度均匀性和结构受力状态；二是初期支护时效性要求高，围岩变形若不能及时约束，可能引发塌方或大变形；三是衬砌混凝土裂缝控制困难，水化热温升与洞内温湿度变化共同作用易产生温度裂缝和干缩裂缝；四是高压灌浆参数控制复杂，灌浆压力、浆液配比与注入率需根据围岩条件动态调整；五是长距离隧洞施工通风、出渣和材料运输组织复杂，多工序交叉作业对质量管控协调性提出较高要求；六是输水隧洞通常布置有调压井、岔管等特殊结构段，断面变化频繁，模板适配和混凝土浇筑质量控制难度大。施工支洞的合理布置与结构设计直接影响主洞施工效率和作业安全[4]。

## 2　抽水蓄能电站输水隧洞开挖施工质量控制技术

### 2.1　光面爆破参数优化

输水隧洞开挖宜采用光面爆破技术，以减少对围岩的扰动并获得平整的开挖轮廓。周边眼间距宜控制在 40 cm～50 cm，抵抗线取 50 cm～60 cm，装药不耦合系数不小于 2.0。通过现场爆破试验优化炮眼布置、装药量和起爆顺序，确保开挖轮廓线超挖量不大于 10 cm、欠挖量不大于 5 cm。对于断层破碎带等不良地质段，应适当缩小周边眼间距、减少单孔装药量，必要时采用预裂爆破先行减震。同时应严格控制爆破振动速度，在邻近已衬砌段或建筑物部位爆破时，质点振动速度不得超过设计允许值，一般不大于 10 cm/s。

### 2.2　开挖断面检测与修整

每循环开挖完成后，采用全站仪或三维激光扫描仪对开挖断面进行检测，对比设计断面计算超欠挖值。欠挖部位必须在支护前处理完毕，超挖部位采用与衬砌同强度等级的混凝土回填，严禁用石渣或低强度材料填充。断面检测结果应及时反馈至爆破参数调整环

作者简介：赵江涛（1989-），男，本科，工程师，研究方向：抽水蓄能电站隧道施工。

节，形成“检测—分析—优化”的闭环控制。对于关键断面（渐变段、岔管段），应适当提高检测频率，确保开挖线形准确过渡。

### 2.3 不良地质段开挖控制

穿越断层破碎带时，遵循“短进尺、弱爆破、强支护、勤量测”原则。循环进尺控制在0.5 m～1.0 m，必要时采用超前小导管或管棚预支护。超前小导管采用Φ42 mm热轧无缝钢管，长度3.5 m～5.0 m，外插角10°～15°，注浆材料采用水泥水玻璃双液浆。TBM施工适用于地质条件相对均一的小断面长距离隧洞，需配合超前地质预报及时调整掘进参数[5]。施工中应坚持“先探后挖、不探不挖”，通过地质雷达、超前钻孔等手段查明前方围岩情况。

## 3 抽水蓄能电站输水隧洞初期支护施工质量控制技术

### 3.1 喷射混凝土质量控制

初期支护喷射混凝土应优先采用湿喷工艺，以降低回弹率和粉尘浓度。混凝土配合比通过试验确定，水泥用量不小于400 kg/m$^3$，砂率控制在45%～55%，速凝剂掺量根据现场试验确定，初凝时间不大于5 min。喷射作业分段、分片、分层进行，一次喷射厚度边墙不超过10 cm、拱部不超过6 cm，后层喷射应在前层混凝土终凝后进行。喷射混凝土表面应平整，无空鼓、裂缝和脱落，平整度用2 m靠尺检查，允许偏差不大于50 mm。喷射混凝土厚度采用钻孔法或地质雷达检测，每10延米至少检查一个断面，每个断面从拱顶中线起每间隔2 m布设一个检测点。

### 3.2 锚杆与钢拱架施工质量控制

系统锚杆采用全长黏结型砂浆锚杆或中空注浆锚杆，锚杆间距、排距及插入角度严格按设计执行。锚杆钻孔深度偏差不大于±50 mm，孔位偏差不大于±100 mm。注浆应饱满，注浆压力控制在0.3 MPa～0.5 MPa，锚杆抗拔力检测抽样率不低于5%且每300根不少于一组。长斜井段锚杆施工需特别关注角度控制，确保锚固段进入稳定围岩。Ⅳ、Ⅴ级围岩段应设置钢拱架或格栅钢架，拱架间距按设计执行，一般为0.6 m～1.2 m，拱架间用纵向钢筋连接，拱脚必须落在坚实基岩上，必要时设置钢垫板扩大受力面积。

### 3.3 支护及时性与变形监测

开挖后应尽快施作初期支护，围岩自稳时间短的地段要求在开挖后2 h内完成初喷。建立洞周收敛和拱顶下沉监测体系，监测频率在开挖后1天～15天为1次/天，16天～30天为1次/2天，变形稳定后调整为1次/3天。当监测数据显示变形速率持续增大或累计变形接近允许值时，立即启动应急支护措施，如增设钢拱架、加密锚杆、补喷混凝土等。监测数据应及时整理分析，反馈指导支护参数调整和施工工序安排。

## 4 抽水蓄能电站输水隧洞衬砌混凝土施工质量控制技术

### 4.1 配合比优化与原材料控制

衬砌混凝土配合比设计应兼顾强度、抗渗性、抗裂性和施工和易性。水胶比宜控制在0.42～0.50，砂率取38%～44%，掺入粉煤灰或矿粉降低水化热，粉煤灰掺量可提高至30%以降低温度应力。抗渗要求较高的区段可掺入膨胀组分或聚丙烯纤维，纤维掺量约0.9 kg/m$^3$可显著减少早期塑性收缩裂缝。原材料进场严格执行检验制度，水泥、钢材、砂石骨料和外加剂均须抽样检测合格后方可使用，建立原材料质量追溯体系。骨料含泥量控制在1%以内，细度模数控制在2.4～2.8范围内。衬砌混凝土强度等级一般不低于C25，抗渗等级不低于W6，高水头段抗渗等级可提高至W8或W10。

### 4.2 浇筑工艺控制

衬砌混凝土采用钢模台车浇筑，台车就位后校核中心线、高程和断面尺寸，模板表面清理干净并涂刷脱模剂。混凝土采用溜管或泵送入仓，分层厚度控制在30 cm～50 cm，振捣棒插入下层混凝土5 cm～10 cm，振捣时间20 s/点～30 s/点，以混凝土表面不再显著下沉、不出现气泡、开始泛浆为准，避免漏振和过振。浇筑过程中设专人看护模板，发现变形或漏浆及时处理。施工缝设置应避开结构受力最大部位，缝面按规范进行凿毛处理，设置止水铜片或橡胶止水带，止水带安装应居中、固定牢固，浇筑时注意保护止水带不被移位或损坏。

### 4.3 温控防裂措施

衬砌混凝土裂缝是输水隧洞最常见的质量缺陷之一。温控措施包括：一是降低入仓温度，夏季施工采用冷水拌合、骨料喷淋降温，入仓温度控制在28 ℃以下；二是埋设冷却水管，通水流量15 L/min～20 L/min，控制混凝土内外温差不大于20 ℃；三是加强养护，拆模后立即洒水或喷涂养护剂，养护时间不少于14天。通过埋设温度传感器实时监测混凝土内部温度，动态调整冷却水流速和通水时长。对于已出现的表面裂缝，应根据裂缝宽度采取表面封闭或注浆处理；贯穿性裂缝须经设计单位确认后制定专项处理方案。

## 5 抽水蓄能电站输水隧洞灌浆施工质量控制技术

### 5.1 固结灌浆质量控制

固结灌浆用于提高围岩整体性和防渗能力，灌浆孔按梅花形布置，孔排距根据围岩级别确定，Ⅲ类围岩宜采用 2 m 排距。灌浆压力按设计要求分级升压，浆液浓度由稀到浓逐级变换。长距离有压引水隧洞可采用分时段固结灌浆工艺，根据围岩透水率和注入率动态调整灌浆参数，避免串浆和冒浆[6]。灌浆结束标准为在设计压力下注入率不大于 1 L/min，延续灌注 30 min。固结灌浆质量检查以压水试验为主，检查孔数量不少于灌浆孔总数的 5%，透水率应满足设计要求。

### 5.2 高压固结灌浆参数优化

对于高水头抽水蓄能电站输水隧洞，高压固结灌浆是关键工序。通过现场灌浆试验验证 10 MPa 级超高压灌浆的可行性，优化灌浆压力、浆液配比和段长参数。试验表明，Ⅲ类围岩采用 2 m 排距水泥灌浆后原孔扫孔化学灌浆的复合工艺，平均单位注灰量高于 3 m 排距方案，且不增加串漏风险。灌浆施工中严格控制孔斜，孔底偏差不大于孔深的 1%。高压灌浆前应对衬砌混凝土强度和厚度进行检查确认，防止灌浆压力导致衬砌抬动或开裂。

### 5.3 回填灌浆与接缝灌浆

衬砌混凝土达到设计强度 70% 后进行回填灌浆，灌浆采用水泥浆，水灰比 0.8:1 ～ 1:1，分序施工（先周边后中间），灌浆压力 0.5 MPa ～ 1.0 MPa，确保回填密实度不低于 95%。回填灌浆质量检查采用钻孔注浆法或声波检测法，检查孔数量为灌浆孔总数的 3% ～ 5%。伸缩缝和施工缝的接缝灌浆在两侧混凝土温度稳定后进行，灌浆压力以不抬动衬砌为原则。灌浆完成后及时封孔，封孔采用水泥砂浆填塞密实，孔口抹平。

## 6 抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制体系与管理措施

### 6.1 全过程质量管控体系

建立以“三检制”（自检、互检、专检）为核心的施工质量管控体系，每道工序经班组自检、工序间互检、专职质检员专检合格后方可进入下道工序。关键工序和隐蔽工程实行监理旁站制度，未经监理签认不得覆盖或进行后续施工。制定质量奖罚细则，将质量指标与作业班组绩效挂钩。单元工程质量评定按《水利水电工程施工质量检验与评定规程》执行，优良率作为项目质量管理的重要考核指标。定期开展质量大检查和专项检查，对发现的质量问题建立台账，明确整改责任人、整改措施和整改期限，实行闭环管理。

### 6.2 信息化质量管理

引入施工质量管理信息系统，对原材料检测、工序验收、监测数据等进行数字化采集和实时上传，实现质量数据可追溯。利用 BIM 技术进行隧洞三维建模和施工模拟，提前预判施工难点和质量风险点。灌浆施工采用智能灌浆记录仪，自动记录灌浆压力、注入率和浆液量，杜绝人为篡改数据。监测数据接入预警平台，当变形或应力指标超过阈值时自动发出预警信息。

### 6.3 人员培训与技术交底

施工前对作业人员进行“理论 + 实操”双轨培训，重点强化光面爆破、喷射混凝土、衬砌浇筑和灌浆等关键工序的标准化操作。每项工序开工前进行书面技术交底，明确质量标准、控制要点和验收程序，确保施工人员准确掌握技术要求。特种作业人员必须持证上岗，爆破工、焊工、电工等关键岗位人员须经考核合格后方可作业。

## 7 结束语

本文针对抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制问题，从开挖、初期支护、衬砌混凝土和灌浆四个关键工序入手，系统提出了光面爆破参数优化、支护及时性管控、衬砌温控防裂及高压固结灌浆参数优化等技术措施，并构建了以“三检制”为核心、信息化管理为支撑的全过程质量管控体系。工程实践表明，上述技术措施可有效控制超欠挖、衬砌裂缝和渗漏等常见质量缺陷，保障输水隧洞结构安全和防渗性能。未来可进一步研究智能化施工技术在输水隧洞质量控制中的应用，提升质量管控的精细化和自动化水平。

## 参考文献：

[1] 黄勇,宋春华,路威,等.阳江抽水蓄能电站高压固结灌浆现场试验设计及参数优化 [J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(02):8-12,50.
[2] 侯炼.抽水蓄能电站引水长斜井扩挖及支护施工技术[J]. 水利水电科技进展,2024,44(z1):159-163.
[3] 陈捷平,张彪,林紫婕,等.钟祥抽水蓄能电站输水系统设计 [J]. 水利水电快报,2025,46(03):65-70.
[4] 刘畅,臧玉燚.垣曲抽水蓄能电站输水上平段施工支洞结构设计 [J]. 水电与抽水蓄能,2025,11(04):116-120.
[5] 胥杰,施椿燕,杜文杰,等.抽水蓄能电站小断面隧洞 TBM 施工技术 [J]. 甘肃水利水电技术,2024,60(03):60-64.
[6] 陈海.长距离有压引水隧洞分时段固结灌浆施工技术探讨 [J]. 水利技术监督,2026(02):268-270.