

复杂断裂带下抽水蓄能竖井结构渗漏控制关键技术研究

李训臣

中国水电基础局有限公司 天津武清 301700

摘要:针对复杂断裂带高压富水条件下抽水蓄能竖井结构长期渗漏与围岩失稳问题,系统研究了超前深孔环形帷幕注浆、机械化掘进与预应力锚索协同支护,以及“钢衬-高强韧自密实混凝土”复合衬砌等多项关键技术。通过在高承压断层带实施复合注浆,大幅降低围岩渗透性,实现高效涌水封堵。引入全断面掘进机与多级支护体系,有效控制破碎带围岩变形及塌方风险。复合衬砌结构经高压充水试验表现出优异的防渗性能,优于规范限值。研究结果为高水头、复杂断裂带下抽水蓄能竖井工程的结构安全与渗漏控制提供理论支撑与工程范例。

关键词:断裂带;抽水蓄能竖井;渗漏控制;帷幕注浆

引言

随着新能源消纳需求的增长,抽水蓄能电站在我国西南地区大规模建设。高压竖井作为核心构筑物,其结构安全与防渗性能直接决定电站的长期运行安全。由于地质条件复杂、断裂带发育、岩体水力联系强,竖井施工面临高压富水、围岩失稳和高地应力等多重挑战^[1]。传统支护与防渗措施难以满足极端地质环境下的技术需求,急需创新性的系统解决方案^[2]。本文以某500MW抽水蓄能电站竖井工程为对象,围绕复杂断裂带高承压水渗漏治理及结构安全保障,开展关键技术研究与应用。

1 项目概况

本工程为装机容量500MW、水头超600m的高压竖井项目,地处中国西南山区。其地质围岩为灰岩与砂岩互层结构,层理发育且含软弱夹层。井身穿越多条密集断层,其中F12断层破碎带宽达50m,致使岩体完整性系数低于0.35,稳定性极差。地下水渗透性强,渗透系数高达10~4cm/s,导致施工期实测围岩水压达2.5MPa。掘进至F12断层时曾发生瞬时200m³/h的高压涌水,且井壁南侧出现深度3.2m的局部塌方。

2 抽水蓄能竖井结构渗漏控制关键技术

2.1 超前深孔环形帷幕注浆

为有效封堵F12断层带2.5MPa高承压水并控制200m³/h的大流量涌水,设计采用超前深孔环形帷幕注浆对围岩进行预加固与隔水处理。实际施工中,在井筒开挖轮廓线外3.5m处,沿环向布置双排注浆孔,孔深设计为35m,形成

一个具备足够厚度和强度的隔水加固圈。由于地质条件变化剧烈,施工采用分段下行式“探-注-检”循环作业模式,确保每一开挖循环(约30m)均处于帷幕保护范围内^[3]。针对岩体破碎且裂隙发育不均的特性,注浆材料采用复合体系:对渗透系数大于10~3cm/s的强径流通道及大型裂隙,使用凝胶时间可控的水泥-水玻璃双液浆快速封堵;对渗透性较弱的微细裂隙,则采用平均粒径小于5μm的超细水泥浆液进行渗透加固,具体浆材配比详见表1:

表1 复合注浆浆液配比设计

浆液类型	适用裂隙宽度(mm)	主要材料	水灰比(W/C)	关键外加剂	初凝时间(s)
水泥-水玻璃双液浆	>2.0	P.O 42.5水泥,38.2Be'水玻璃	1.2:1	-	35~65
超细水泥浆液	0.1~2.0	R.UCEM 525超细水泥	0.85:1	高效减水剂	>4h

注浆过程实行压力与流量双控,实时监控Q-P-t(流量-压力-时间)曲线以动态调整参数。针对F12断层带,初期采用2.8MPa低压与80L/min大流量模式,注入水泥-水玻璃双液浆快速填充主裂隙。当压力稳定上升且流量显著衰减时,升压至4.0MPa终压,并更换为超细水泥浆进行小流量渗透。注浆终止标准为终压下注入率持续10min低于0.5L/min。

2.2 TBM掘进与预应力锚索系统支护

为规避钻爆法对F12断层带的二次扰动及深井岩爆风险,采用全断面竖井掘进机(SBM)进行机械化掘削。掘进与支护工序紧密衔接,SBM护盾脱出后立即安装系统性砂浆锚杆,以快速约束浅层围岩变形。锚杆采用Φ25mm、长

4.5m 的 HRB400 级钢筋，按 $1.5m \times 1.5m$ 矩形间距布置。随即施作 100mm 厚 C30 钢纤维喷射混凝土封闭岩面，构成初期支护壳体。针对 F12 断层带岩体破碎（完整性系数低于 0.35）且已发生局部塌方的状况，为有效控制深部围岩的塑性变形，在初期支护基础上增设高强度预应力锚索进行深部补强。锚索由 5 根 $\Phi 15.24mm$ (1860MPa 级) 钢绞线组成，长 12m，以穿过破碎带锚固于相对完整的岩体内^[4]。锚索沿井周环向布置，间距 2.5m，施加 450kN 锁定预应力，在围岩深部形成环状承压区，提高岩体自承能力。最后，整体覆盖一层 50mm 厚 C30 钢纤维喷射混凝土，将锚索承压板完全包裹^[5]。

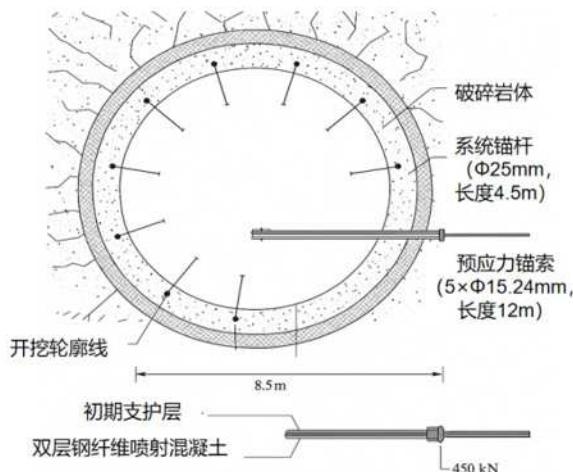


图 1 协同支护体系在 F12 断层带应用剖面示意图

2.3 “钢衬 – 高强韧自密实混凝土”协同承压复合衬砌

针对竖井运营期将承受超 600m 水头（约 6.0MPa）的超高内水压力，且 F12 断层带围岩承载力不均的现状，为确保衬砌结构的长期抗裂与防渗性能，设计采用“钢衬 – 高强韧自密实混凝土”协同承压复合衬砌方案。内层 16mm 厚的 Q550D 高强度钢板作为绝对防渗屏障，所有焊缝均执行 100% 超声波无损检测，以杜绝渗漏通道。外包 800mm 厚的 C60 高强韧自密实混凝土作为主要承压结构^[6]。为抑制高压下的混凝土收缩及受拉开裂，混凝土中复合掺入 1.2% 体积率的钢纤维与 0.9kg/m³ 的聚丙烯纤维，形成三维乱向纤维网，大幅提升其韧性和抗裂性^[7]。采用自密实工艺确保混凝土与钢衬及初期支护间紧密贴合，无空腔缺陷。为确保协同承压理论的实现，在混凝土养护完成后，对衬砌与初期支护间进行二次接触灌浆，以填充可能存在的微小间隙。

3 工程应用效果分析

3.1 围岩稳定与涌水控制效果

3.1.1 涌水封堵效果

为定量评估超前深孔环形帷幕注浆对 F12 断层带高压大流量涌水的封堵效果，在注浆帷幕圈内布设检查孔进行压水试验，并于 TBM 掘进期间直接监测掌子面及井壁的出水量^[8]。压水试验结果与掘进实测数据，同注浆前地勘阶段获取的原始水文地质参数进行对比分析。验证过程显示，经过复合浆材注浆后，原先渗透性极强的断层破碎带岩体质量得到根本性改善。具体数据对比详见表 2：

表 2 F12 断层带注浆前后水文参数对比

监测参数	单位	注浆前（地勘数据）	注浆后（检查孔实测）	改善幅度
岩体渗透系数	cm/s	1.0×10^{-4}	2.1×10^{-6}	约 50 倍
平均吕荣值	Lu	> 50	1.2	> 97%
掘进期最大涌水量	M3/h	200 (瞬时)	7.5 (稳定)	> 96%

数据表明，注浆后岩体的渗透系数降低两个数量级，平均吕荣值由大于 50Lu 降至 1.2Lu，低于 1.5Lu 的设计控制目标。TBM 掘进穿越整个断层带期间，最大稳定涌水量仅为 $7.5\text{m}^3/\text{h}$ ，与治理前的 $200\text{m}^3/\text{h}$ 瞬时涌水形成鲜明对比，消除突水突泥风险，证明帷幕注浆技术方案具备高度的可靠性与有效性。

3.1.2 变形控制能力

为评估该复合支护体系的变形控制能力，在 F12 断层带塌方重点区段沿井周布设多点位移计，对围岩深部径向位移进行长期监测。监测数据显示，浅层围岩（距井壁 1.0m）的位移在系统锚杆与初喷混凝土支护完成后 48h 内即迅速收敛。施加 450kN 预应力的 12m 长锚索安装后，深部围岩（距井壁 5.0m 及 9.0m）位移基本停止发展，有效控制围岩塑性区扩展。整个监测周期内，该段最大累计径向位移为 38.5mm，远小于 80mm 的设计预警值，且位移在掘进面通过后 25 天内达到稳定。监测结果证实，该支护体系能为破碎围岩提供及时且足够的支护抗力，有效控制围岩变形，保障竖井结构整体稳定。

3.2 结构防渗性能分析

为检验“钢衬 – 高强韧自密实混凝土”复合衬砌在超高内水压力下的防渗性能，对竖井结构进行全井段高压充水试验。试验压力按设计水头 6.0MPa 的 1.25 倍施加，即 7.5MPa，并持压观测 24h，期间连续监测压力降与渗流量。关键指标

的实测结果与设计规范要求对比详见表3:

表3 复合衬砌结构充水试验结果

监测参数	单位	设计规范限值	实测结果
试验压力	MPa	7.5	7.5
持压时间	h	24	24
压力降允许值	MPa/24h	≤ 0.075	0.018
渗流量允许值	L/(min · 1000m ²)	≤ 2.5 (微渗等级)	0.35

试验数据显示，在7.5MPa高压下持压24h后，实测压力降仅为0.018MPa，远低于规范限值。井壁平均渗流量为0.35 L/(min · 1000m²)，优于“微渗”等级标准。结果表明，16mm厚的Q550D钢衬提供了可靠的防渗屏障，外包高强韧自密实混凝土与围岩协同承压，有效抑制结构在高压下的变形开裂。

4 结语

研究系统总结了复杂断裂带下抽水蓄能竖井渗漏与稳定性控制的关键技术路径，实证证明超前帷幕注浆可大幅降低断层带围岩渗透性，复合支护体系有效约束破碎带变形，复合衬砌则确保竖井在极端水头下的密水与耐久性能。工程实践显示，所提措施可彻底消除高压突涌及塌方隐患，极大提升竖井整体安全等级。后续建议针对多断裂带和复杂应力耦合条件，继续优化材料体系与数字化监测手段，推动深部地下水工构筑物防渗与结构安全技术持续进步。

参考文献：

- [1] 胡长浩, 刘璐瑶, 夏帆, 等. 水电站出线竖井渗漏治理 [J]. 水电与新能源, 2024,38(11):6–8+11.
- [2] 曾理, 崔冬冬, 李应周, 等. 顶管法穿河电缆隧道渗漏原因检测及处理措施研究 [J]. 陕西水利, 2024,(10):163–166.D
- [3] 马喜强. 机械掘进悬吊拼装竖井施工 (SAM) 工法中的防水施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2024,9(12):103–105.
- [4] 陈伟. 水利工程放水涵洞渗漏水处理方法的研究 [J]. 陕西水利, 2024,(06):175–177.
- [5] 崔皓东, 周宁, 井向阳, 等. 复杂地质条件下超深竖井的渗控措施及效果分析 [J]. 人民长江, 2024,55(10):166–172+181.
- [6] 苏宇. 软土地区超深竖井施工风险管理及应急预案 [J]. 山西建筑, 2022,48(21):85–88.
- [7] 王智, 张建坤, 梁春, 等. 竖井锁口圈突变原因分析及处置措施探讨 [J]. 城市勘测, 2022,(01):184–188.
- [8] 高广义. 富水风化花岗岩铁路深大竖井涌水治理施工技术——以大理至瑞丽铁路高黎贡山隧道1#竖井为例 [J]. 隧道建设 (中英文), 2020,40(S1):358–363.

作者简介：李训臣（1992—），男，汉族，江苏沛县，本科，工程师，研究方向为水利施工。