

抽水蓄能电站竖井支护关键施工技术创新与应用

冯 晓

中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司 四川 成都 611100

摘要：抽水蓄能电站竖井工程支护面临复杂地层、狭小施工空间及地下水影响等难题。为此，需创新支护设计理念，采用动态设计与信息化反馈机制、构建联合支护体系，并考虑长期运营的安全性储备设计。施工工艺上，研发高效钻孔成孔技术、精准注浆工艺控制及高质量喷射混凝土施工技术。同时，建立全过程质量监控体系、安全防护标准化作业流程，以及应急管理预案与救援体系，全方位保障竖井工程的质量、安全与进度，确保电站长期稳定运行。

关键词：抽水蓄能电站；竖井支护；施工技术；创新；应用

引言：抽水蓄能电站竖井工程作为能源基础设施建设的关键环节，其施工过程面临着复杂且严峻的挑战。竖井需穿越断层破碎带、软弱煤系地层等复杂地质，围岩稳定性差，自稳能力弱，同时竖井深度大、直径小，施工空间受限，地下水丰富且水压高，进一步加剧了支护难度。在此背景下，传统的支护设计与施工工艺已难以满足工程需求。因此，亟需从支护设计理念、施工工艺、质量管理与安全保障等多维度进行创新，构建科学合理、高效可靠的支护体系，以保障竖井工程的质量与安全，推动抽水蓄能电站建设的高质量发展。

1 竖井支护难点分析

抽水蓄能电站竖井工程在建设过程中，面临着诸多棘手的支护难题。这些难题主要源于其所穿越地层的复杂特性以及施工环境的严苛要求，多种因素相互交织，共同构成了竖井支护的主要难点，对工程的质量与进度产生了严重的制约。（1）从地质条件层面分析，竖井常常需要穿越多种复杂地层。断层破碎带便是常见的地质问题之一，其内部岩体破碎不堪、结构极为松散，完整性极差。这种状况导致围岩的自稳能力大幅降低，极易引发坍塌、掉块等严重事故，给施工人员的生命安全带来了极大的威胁。与此同时，软弱煤系地层同样不容小觑。这类地层强度较低、变形较大，在竖井开挖过程中，围岩容易产生较大的塑性变形，难以维持自身的稳定状态，这无疑进一步增加了支护的难度。（2）竖井自身的结构特点也为支护作业带来了巨大的挑战^[1]。其深度较大，而直径相对较小，这使得施工空间极为有限。在如此狭小的空间内进行支护作业，不仅操作难度极大，而且施工效率极为低下。大型支护设备的进入和使用受到严重限制，只能依靠小型、灵活的施工机械，这在很大程度上影响了支护的质量和速度。（3）地下水的影响同样不容忽视。抽水蓄能电站所在区域地下水往往较为

丰富，且水压较高。长期的渗流作用会不断削弱围岩的强度，水流会带走围岩中的细小颗粒，导致围岩内部结构变得疏松，承载能力显著下降。同时，水压的存在还会对支护结构产生额外的压力，增加支护结构的受力，使其更容易发生破坏，从而进一步加剧了竖井支护的难度。

2 支护设计理念创新

2.1 动态设计与信息化反馈机制

在竖井工程领域，需摒弃传统静态设计思路，积极引入先进的动态设计理念。（1）施工前，借助高精度的地质勘探技术，如三维地震勘探、地质雷达探测等，精准获取竖井围岩的地质构造、岩性分布等信息。同时，运用数值模拟软件，对围岩的力学特性展开深入分析，评估其在不同工况下的稳定性，为初始设计提供科学依据。（2）施工过程中，构建完善的实时监测体系，对围岩变形、应力变化、渗流等关键参数进行全方位、不间断监测。监测数据通过信息化手段及时、准确地反馈至设计端。设计人员依据反馈信息，迅速对支护参数进行动态调整，包括锚杆长度、间距、注浆压力以及钢架型号、间距等，确保支护方案能够实时贴合实际围岩状况，实现个性化、精准化支护，有效保障竖井施工安全与质量。

2.2 联合支护体系构建

在竖井等地下工程施工中，鉴于不同地层具有迥异的地质特性，构建多元化联合支护体系至关重要。（1）对于破碎松散地层，鉴于其稳定性差、易坍塌的特点，采用超前管棚预支护结合系统锚杆、喷射混凝土的组合支护方式。超前管棚可提前对前方围岩进行加固，形成稳固的承载拱，有效阻止围岩的进一步破碎和坍塌；系统锚杆能深入围岩内部，增强其整体性；喷射混凝土则可及时封闭围岩表面，防止风化。（2）在软弱岩层地段，为增强支护结构的刚度和抗变形能力，需增设钢拱

架。同时，合理配置钢筋网，其不仅能与喷射混凝土紧密结合，提高支护结构的整体性，还可防止混凝土剥落和碎屑飞溅，保障施工安全。这种多层次、多材料协同作用的联合支护体系，充分发挥了各组件的优势，显著提升了整体支护效果。

2.3 考虑长期运营的安全性储备设计

在电站竖井等关键结构的支护设计中，不能仅聚焦于施工期间的短期稳定性，更要将目光放长远，充分考虑电站长期运营过程中可能遭遇的复杂工况。（1）在开展支护设计工作时，需科学预留一定的安全系数。这一系数犹如一道坚固防线，能够从容应对未来可能发生的地震、水位大幅波动等极端情况所引发的附加荷载，为结构安全提供可靠缓冲。（2）要高度重视支护结构的耐久性专项设计。精心挑选耐腐蚀、高性能的优质材料，从根源上提升结构的抗侵蚀能力。并且，对材料表面进行专业的防腐涂层处理，形成一层坚韧的保护膜，有效隔绝外界侵蚀因素。通过这些举措，显著延长支护结构的使用寿命，确保电站在漫长的全生命周期内，始终保持安全稳定的运行状态，为电站的可靠供电提供坚实保障^[2]。

3 施工工艺创新

3.1 高效钻孔成孔技术

在竖井工程中，钻孔成孔的质量与效率直接关乎后续锚固等工序的成效以及整体工程的安全与进度。（1）需大力研发适用于竖井特殊工况的新型钻机设备。此类钻机应具备自动定位功能，能借助先进的传感器与定位系统，精准确定钻孔位置，减少人工定位误差；同时，要保证极高的垂直度，通过精密的导向与控制装置，使钻进方向严格垂直，确保钻孔质量。此外，钻进速度快也是关键指标，以缩短施工周期。（2）在钻孔工艺方面，采用跟管钻进工艺。该工艺通过在钻杆外部套设套管，随钻进同步跟进，能有效隔离孔壁与周围地层，防止因地层松散、破碎等导致的塌孔现象，同时避免钻具与孔壁的直接接触，大大降低卡钻事故的发生概率。（3）钻孔过程中，要借助高精度的测量仪器，严格控制钻孔角度和深度偏差，确保锚杆能够准确无误地打入预定位置，充分发挥其最佳锚固效果。并且，合理优化钻孔顺序，依据现场实际情况与施工逻辑，科学规划各孔的钻进先后顺序，减少孔与孔之间的相互干扰，进而提高整体钻孔效率，保障竖井工程顺利推进。

3.2 精准注浆工艺控制

在竖井等地下工程的注浆作业中，精准的工艺控制是确保注浆质量、提升工程稳定性的关键。为此，需积极开发智能注浆系统，该系统集成先进的传感器、自动

化控制技术以及数据分析算法，能够实现对注浆量、注浆压力、注浆速度等核心参数的精确把控。（1）不同地层具有独特的吸浆特性，智能注浆系统可依据实时获取的地层信息，自动且精准地调节注浆参数。如此一来，浆液便能充分填充地层中的裂隙和空洞，形成稳固的固体，有效增强地层的整体性和承载能力。（2）在注浆方法上，采用分段后退式注浆。此方法将注浆区域划分为若干段落，从一端开始逐段注浆并后退，能够逐段封闭注浆区域，有效避免浆液在注浆过程中的流失与浪费，提高浆液的利用率。（3）为保证注浆密实度，需合理设置止浆塞和排气管。止浆塞可阻止浆液向非注浆区域流动，确保浆液集中在目标区域；排气管则能及时排除注浆过程中混入的空气，减少孔隙，使浆液充分填充空间，最终达到理想的注浆效果，为竖井工程的安全与稳定提供坚实保障。

3.3 高质量喷射混凝土施工技术

在竖井等地下工程支护中，高质量喷射混凝土施工技术是保障结构安全与稳定的关键环节。（1）为提升混凝土性能，需精心改进喷射混凝土配合比。通过科学添加纤维增强材料，如钢纤维、聚丙烯纤维等，可有效提高混凝土的抗拉强度和韧性，使其在承受复杂应力时不易开裂，增强对围岩的约束能力。（2）施工工艺上，采用先进的湿喷工艺。配备强制搅拌机，能确保混凝土各组分充分混合，搅拌均匀度大幅提升。同时，安装速凝剂添加装置，可根据实际施工需求精准控制速凝剂用量，保证混凝土喷射后能迅速凝结，减少回弹量，获得良好的喷射效果。（3）在喷射作业时，要严格控制喷射厚度和平整度。采用分层喷射的方式，每层喷射之间设置适当的间隔时间，待前一层混凝土具备一定强度后，再进行下一层喷射，避免因混凝土自重导致脱落。（4）加强喷射混凝土养护管理至关重要。通过洒水养护或喷涂养护剂等方式，为混凝土创造适宜的湿度和温度环境，保证混凝土强度正常增长，从而形成高质量的支护层，有效保障竖井工程的安全^[3]。

4 质量管理与安全保障措施

4.1 全过程质量监控体系

在竖井等工程项目的建设过程中，构建健全的全过程质量监控体系是确保工程质量的核心举措。该体系全面覆盖从原材料进场检验、工序质量验收直至成品保护的每一个环节，形成环环相扣的质量管控链条。（1）为保障体系有效运行，专门设立专业且经验丰富的质检小组。质检人员秉持严谨负责的态度，对每一道工序展开严格细致的检查，一旦发现不符合质量标准的情况，立

即责令返工，绝不姑息迁就，从源头上杜绝质量隐患。（2）针对关键原材料，如水泥、钢材、锚杆等，加大质量检测频率。通过先进的检测设备与科学的检测方法，精准测定其各项性能指标，确保其完全符合设计要求与相关规范标准。（3）积极引入无损检测技术，对已完成的支护结构进行全面深入的内部缺陷检测。该技术能在不破坏结构的前提下，精准发现潜在的质量问题，为及时采取有效的处理措施提供可靠依据，从而全方位保障竖井工程的质量。

4.2 安全防护标准化作业流程

在竖井施工过程中，构建一套完备且严谨的安全防护标准化作业流程，是保障施工人员生命安全和工程顺利推进的关键。（1）需制定详细且具有针对性的竖井施工安全防护标准和操作规程，内容全面涵盖人员防护装备佩戴规范，确保施工人员配备合格的安全帽、安全带等；明确设备安装调试流程，保证各类施工设备安全稳定运行；规定高处作业安全要求，设置可靠的防坠落措施。（2）在竖井口，应设置坚固的防护栏和醒目的安全警示标志，为人员和设备提供基础防护。同时，配备性能可靠的提升运输设备，并建立定期检查维护制度，及时排除设备故障隐患。（3）加强通风除尘管理至关重要，通过合理布置通风设备和除尘装置，有效改善井下作业环境，降低粉尘浓度，防止粉尘爆炸和职业病危害。此外，还应开展经常性的安全教育培训和应急演练，强化施工人员的安全意识，提升其自我保护能力和应急处置水平，确保施工安全有序进行^[4]。

4.3 应急管理预案与救援体系建设

在竖井工程施工中，鉴于其复杂且高危的特性，构建科学完备的应急管理预案与救援体系至关重要。（1）针对透水、坍塌、火灾等可能出现的突发情况，需精心编制全面且细致的应急管理预案。预案应深入分析各类事故的成因、发展过程及可能造成的后果，制定出具

有针对性和可操作性的应对措施。（2）明确应急救援组织机构及职责分工是关键。设立指挥协调组、抢险救援组、医疗救护组等，确保在紧急时刻各小组能迅速行动、协同作战。同时，配备充足的应急救援物资和设备，如大功率排水设备以应对透水事故，各类支护材料用于坍塌救援，高效灭火器材防范火灾蔓延。（3）建立与外部救援力量的紧密联系机制，与消防、医疗、专业救援队伍等保持实时沟通。一旦发生紧急情况，能迅速启动联动机制，外部救援力量可及时抵达现场，与内部救援力量紧密配合，最大限度地减少人员伤亡和财产损失，保障竖井工程施工安全。

结束语

抽水蓄能电站竖井工程支护工作挑战重重，从复杂地质条件带来的围岩稳定难题，到竖井结构特点引发的施工限制，再到地下水对支护的侵蚀影响，均需谨慎应对。通过创新支护设计理念，采用动态设计与联合支护体系，并预留安全储备；运用施工工艺创新，实现高效钻孔、精准注浆与高质量喷射混凝土；构建质量管理与安全保障体系，涵盖全过程质量监控、安全防护标准化作业及应急管理预案与救援体系。多管齐下，才能有效解决竖井支护难题，确保竖井工程在施工及长期运营中安全稳定，为抽水蓄能电站的可靠运行筑牢根基。

参考文献

- [1]蒋建伟,谭峰,车向群,刘启明.仙居抽水蓄能电站上水库施工新技术研究与应用[J].红水河,2019,38(01):14-17.
- [2]韩飞.蓄能电站两级超深竖井施工技术研究[J].建筑技术开发,2024,51(10):21-25.
- [3]晏安平,邵北涛,王博.黄金峡水利枢纽泵站出水洞竖井施工技术研究[J].水利建设与管理,2023,43(11):101-109.
- [4]王志晓,陈振国,陈龙.抽水蓄能电站斜井导孔施工关键技术研究[J].水力发电,2021,47(04):84-87+101.