

深长斜井施工关键技术研究

薛春生

中国水利水电第八工程局有限公司, 中国·湖南 长沙 410000

摘要: 高寒复杂区域深长斜井施工受破碎地质构造、高水压与高地应力耦合作用及极端低温环境多重制约, 施工过程易发生围岩失稳、涌水坍塌等病害, 整体管控难度极大。依托高寒区域多项典型斜井工程, 系统梳理施工核心技术难题, 构建涵盖围岩动态管控、机械化施工、低温防冻适配的成套施工技术体系。工程实践表明, 多元地质预报配合动态支护技术可有效加固破碎围岩, 精细化机械化施工与低温适配工艺, 能够显著提升复杂工况下的施工安全性与井筒成型质量。研究成果可为高寒复杂区域深长斜井的安全高效施工提供技术参考。

关键词: 深长斜井; 复杂地质; 低温施工

Research on Key Technologies for Deep Inclined Shaft Construction

Xue Chunsheng

China Water Conservancy and Hydropower Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., China Hunan Changsha 410000

Abstract: The construction of deep inclined shafts in alpine and complex regions is restricted by fractured geological structures, coupled effects of high water pressure and ground stress, and extreme low-temperature environments, which is prone to engineering diseases such as surrounding rock instability and water inrush collapse, bringing great difficulties to construction management. Based on several typical inclined shaft projects in alpine regions, this paper systematically sorts out the core technical difficulties of construction, and establishes a complete construction technology system covering dynamic surrounding rock control, mechanized construction and low-temperature anti-freezing adaptation. Engineering practice shows that multi-element geological prediction combined with dynamic support technology can effectively reinforce fractured surrounding rock, and refined mechanized construction and low-temperature adaptation processes can significantly improve construction safety and shaft forming quality under complex working conditions. The research results can provide technical references for the safe and efficient construction of deep inclined shafts in alpine and complex regions.

Keywords: Deep inclined shaft; Complex geology; Low-temperature construction

0 引言

深长斜井是水利水电、交通隧道、矿山开采等地下工程的核心附属构筑物, 主要承担施工现场通风排水、物料输送、工作面连通等功能, 直接关乎整体工程的施工进度与运行安全。当前, 我国地下工程建设逐步向高寒山区、深部地层拓展, 深长斜井普遍呈现大埋深、长距离、大倾角的建设特征, 施工面临的地质条件与自然工况愈发复杂严苛。

高寒复杂区域地质构造运动活跃, 褶皱、断裂构造密集发育, 地层以软弱板岩、页岩为主, 岩体节理裂隙发育、整体性差、自稳能力薄弱。区域表层广泛分布巨厚松散沉积层, 土体透水性强、富水性好, 深埋条件下高地应力与高水压耦合效应显著, 施工过程极易诱发突泥涌水、围岩坍塌、支护变形等地质灾害^[1]。同时, 高寒区域低温持续时间长、昼夜温差大, 低温环境易造成施工设备冻损故障、

建筑材料力学性能劣化、作业面施工条件恶劣, 大幅压缩有效施工窗口期, 严重影响斜井工程的施工质量与建设效率。

目前, 国内常规地质条件下的斜井施工技术已趋于成熟, 但针对高寒、高水压、破碎围岩叠加的极端复杂工况, 尚未形成系统完善的成套施工技术体系, 存在施工适配性差、安全管控难度大等突出问题。为此, 本文依托多项高寒区域深长斜井工程实践, 系统剖析特殊工况下的施工技术难点, 优化整合围岩稳定控制、机械化高效施工、低温施工适配等核心技术, 形成一套适配高寒复杂恶劣工况的施工技术方案, 可为同类地下工程建设提供工程实践参考与技术支撑。

1 深长斜井工程施工核心难题

1.1 构造破碎带围岩稳定性差

研究区域地处板块碰撞活跃地带, 地质构造运动强

烈,褶皱、断裂构造密集发育。区域地层岩性差异大,软弱岩层与硬质岩层交替分布,岩体节理裂隙、层理结构极为发育,整体完整性较差。在建斜井工程开挖过程中,揭露多处破碎断层带与裂隙密集带,此类围岩结构松散、自稳能力极差,受施工扰动后极易出现剥落、掉块、坍塌问题。同时,构造带内地下水富集,渗水、滴水现象普遍,水岩耦合作用进一步弱化岩体强度,大幅提升突泥涌水、围岩失稳的施工风险,对开挖支护施工提出极高要求。

1.2 深厚表土层高压高地应力扰动

西部多数能源富集盆地周边均覆盖巨厚松散沉积表土层,地层土质软弱、孔隙率高、透水性强,承压水赋存丰富。深长斜井施工需长距离穿越此类含水软弱地层,随着埋深增加,地应力与静水压力急剧增大,不仅易出现流沙、涌泥、管涌等地质灾害,还会导致井筒结构承受不均匀荷载作用^[2]。常规支护结构与施工工艺难以适配高地压、高压水工况,易引发支护变形超限、井壁开裂、地层沉降等病害,是深厚表土层段斜井施工的核心技术瓶颈。

1.3 高寒气候导致施工效能大幅降低

高寒区域冬季持续时间长、极端低温突出,低温环境对地下工程施工的设备运行、材料性能、作业效率、施工质量均产生显著负面影响。低温工况下,作业面水汽易凝结结冰,造成混凝土输送管路堵塞、施工设备滑轮与传动系统冻堵、钢材及设备构件性能劣化。同时,低温会延缓混凝土凝结硬化速度,降低支护结构成型质量与强度,极易出现支护开裂、粘结不密实等问题。此外,低温冻害导致设备故障率升高、施工工序衔接受阻,有效施工时长大幅缩减,整体施工效率与工程进度难以保障。

2 深长斜井施工关键技术体系

2.1 破碎围岩稳定性动态控制技术

针对构造破碎带围岩稳定性差、地质灾害风险高的问题,需构建“超前预报、动态开挖、实时支护、全程监测”的围岩控制技术体系。施工前期综合运用超前地质钻探、瞬变电磁法、TRT地质探测等多元预报技术,精准探明工作面前方围岩岩性、裂隙发育情况、地下水富集范围及断层破碎带分布特征,为施工方案调整提供精准地质依据。多手段综合预报可有效弥补单一探测技术的局限性,大幅提升不良地质体识别精度,提前规避突泥涌水、围岩坍塌等风险。

支护设计与施工方面,斜井非圆形断面受力特征与立井存在显著差异,井筒承受不均匀地压荷载,传统对称支护设计理论与参数难以适配实际工况。基于荷载结构法构建“地层-结构”协同受力模型,充分考虑围岩自身约束作用,精准分析井筒受力分布规律,优化支护结构形式与

参数。施工过程中建立动态管控机制,结合每循环爆破效果、围岩揭露状态、监测数据反馈,实时调整钻孔参数、爆破药量、支护间距及支护强度,实现“一循环一优化、一工况一调整”,最大限度适配破碎围岩施工工况,保障围岩长期稳定。

2.2 反井钻机机械化成套施工技术

对于围岩条件中等及以上的深长斜井,反井钻机施工法具备安全系数高、施工效率高、作业成本低的优势,是实现斜井机械化施工的核心工艺^[2]。该技术核心流程为:首先自上而下施工小直径导孔,再自下而上反向扩挖形成标准导井,构建稳定的溜渣、通风、排水通道,后续自上而下分层扩挖成型,大幅优化出渣效率,减少人工高空作业风险。

针对戈壁、高寒等偏远复杂工况,通过多方案工艺比选,优化反井钻机施工参数、设备选型及工序衔接流程,形成适配复杂野外工况的机械化施工体系。在超长、极硬岩斜井施工中,智能化反井施工技术可有效控制井筒偏斜度,实测偏斜率远低于规范控制标准,相较于传统爆破施工工艺,可大幅缩短工期、降低施工扰动、提升成井精度,广泛适用于引水隧洞、矿山溜井、通风斜井等高精度要求的地下工程^[3]。

2.3 高寒环境施工适配与保温防冻技术

针对高寒区域低温冻害引发的设备冻堵、材料失效、施工效率低等问题,从作业环境管控、设备防冻、建材优化、施工组织四个维度构建适配技术体系。作业面通过布设封闭防风保温设施、配置供暖设备,减少冷空气对流,提升作业面局部温度,杜绝作业面结冰积水。

针对长距离喷射混凝土堵管、输送效率低的问题,优化管路铺设方案,减少管路弯折与接头阻力,同时适配低温环境调整混凝土配合比,添加适配外加剂,提升浆液流动性与低温适配性,有效降低堵管故障频次。对提升卷扬机、钢丝绳、滑轮组等核心运输设备,采取保温包裹、定时除冰、设备预热、空载试运行等防冻运维措施,杜绝设备冻损、打滑、失效等安全隐患,保障低温环境下施工连续稳定开展。

3 典型工程应用分析

3.1 大倾角深埋压力管道斜井工程

某水利枢纽压力管道斜井工程总长237.37m,井筒倾角60°,开挖直径8m,垂直埋深46~258m,井身围岩以Ⅲ2、Ⅳ类软弱岩体为主^[4]。该工程施工存在三大难点:一是60°大倾角接近无轨运输施工极限,扒渣及物料运输工程量大,施工循环周期长、整体效率低;二是围岩破碎、节理裂隙发育,钻孔施工易出现卡钻、塌孔问题,成孔质

量难以保障；三是高寒低温环境下作业面易结冰，喷射混凝土堵管问题频发，严重制约支护施工质量与工程进度。

针对上述施工难题，项目开展全方位工艺优化与精细化参数管控。钻孔施工阶段，更换适配破碎岩层的专用钻头，增设空压机与储气稳压装置，有效解决卡钻、塌孔问题，显著提升成孔质量与钻孔效率。爆破施工采用中部矩形掏槽光面爆破技术，实施分级精细化爆破管控：统一炮孔直径 42mm，差异化设置钻孔深度，Ⅱ、Ⅲ 1、Ⅲ 2 类围岩掏槽孔深度 3.5m，Ⅳ类围岩掏槽孔深度 2.2m；光爆不耦合系数控制为 1.0~2.5，光爆孔间距 50~55cm、最小抵抗线 50~60cm；炸药单耗依据围岩等级控制在 1.27~1.46kg/m³，可随断面尺寸动态微调。施工选用 ϕ 32 乳化炸药，炮孔利用率取 0.9，按围岩等级精准匹配装药系数，光爆孔药量严格控制为辅助孔的 1/3~1/4。采用数码电子雷管联合导爆索起爆，严控单响药量与飞石安全距离，结合现场试爆、振动监测、成型检测动态优化爆破参数，最大限度减小围岩扰动，精准控制超欠挖量。

低温支护施工阶段，优化混凝土原材料选型与配合比设计，选用 42.5 级及以上优质硅酸盐水泥、级配合格砂石骨料及低碱无氯速凝剂，所有原材料指标均满足规范标准。通过室内试验与现场试配确定最优配合比，严格把控原材料计量精度、搅拌时长与混合料存放时间，保障混凝土拌和质量。输送管路遵循“短距离、少弯头、低阻力”原则布设，施工前全面排查调试，保证管路通畅、风压稳定，有效解决低温堵管、浆液离析等问题。同时规范管控石渣粒径与工作面存渣量，降低出渣施工难度。

通过全套技术优化与动态闭环管控，该斜井较计划工期提前 9 天顺利贯通，创下高寒区域大倾角深长斜井高效施工纪录，井筒成型质量、围岩稳定性均满足设计及规范要求，可为同类大倾角、破碎围岩斜井工程施工提供成熟的工艺借鉴。

3.2 长距离隧道通风斜井工程

某山区公路隧道配套通风斜井，全长 1180m，最大纵坡 11%，属于超长小断面斜井工程。该斜井穿越多条断层破碎带，围岩破碎松散、地下水富集，同时井筒断面尺寸小，作业空间狭窄，施工扰动极易引发围岩失稳、突泥涌水灾害，施工安全管控难度极大。

工程施工期间，采用超前地质钻探与瞬变电磁法相结合的综合预报体系，精准预判前方围岩状态与地下水分布情况，提前制定支护加固与排水泄压方案。通过全过程动态围岩监测、分级支护优化、工序精细化管控，有效规避

了各类地质灾害风险，顺利实现斜井精准贯通。该斜井建成后，为主隧道施工提供了新增通风通道与施工工作面，有效改善了主隧道施工环境，大幅提升了整体工程施工进度。

4 结论与展望

本文依托高寒复杂区域多项深长斜井工程实践，系统梳理了特殊工况下斜井施工的核心技术难题，构建了适配破碎围岩、富水地层及高寒低温环境的成套施工技术体系，且通过工程实践验证了该体系的可行性与工程实用性。研究表明，高寒复杂区域深长斜井施工主要存在破碎围岩稳定性差、高压高地应力耦合诱发结构病害、低温环境制约施工质量与效率等技术难题。通过搭建多元超前地质预报前置、动态支护优化与信息化监测协同的闭环管控体系，可有效抑制破碎围岩变形，规避突泥、涌水、坍塌等灾害，保障施工安全稳定。智能化反井钻机机械化施工工艺，可有效降低施工对围岩的扰动、提升成井精度、压缩施工工期，高度适配高寒野外复杂作业条件。同时，通过作业环境改造、设备防冻运维、建材性能优化、施工工序统筹的全方位管控，可有效解决低温冻害引发的各类施工问题，保障高寒季节施工连续性与结构成型质量。整套技术体系精准解决了高寒复杂地质条件下深长斜井施工的重点难点问题，可为同类地下工程安全高效建设提供可靠技术支撑。

随着我国深部资源开发、山区交通水利基础设施持续建设，深长斜井逐步向超长距离、大埋深、超复杂恶劣工况方向发展。未来可重点开展智能化施工装备适配、数字化实时监测仿真技术、低温高性能新型建材、绿色高效施工工艺等方向的研究，持续提升复杂工况下深长斜井施工的智能化、精细化、安全化水平，为深部地下工程高质量建设提供有力技术保障。

参考文献：

- [1] 王乃国，韩涛，杨维好等. 208m 深厚表土大倾角斜井冻结法凿井关键技术研究[Z]. 鄂托克前旗长城五号矿业有限公司，2025.
- [2] 孔德谦，柴韬，何陶. 新疆 JH 一级水电站引水发电系统工程长斜井开挖施工技术[J]. 四川水利，2021(005):042.
- [3] 张曦彦，李敬，刘武超等. 极硬岩超 400m 长斜井智能化施工关键技术研究[J]. 中国施工企业管理协会，2025.
- [4] 王淑晶. 天山下的攻坚答卷——霍尔古吐压力管道斜井提前 9 天贯通[N]. 中国水利水电第八工程局，2025-03-26.