

复杂地质条件下地热水钻探关键技术优化研究

苗志田

山西省煤炭地质一一五勘查院有限公司 山西 大同 037000

摘要：地热水作为绿色清洁能源，在供暖、发电及综合利用领域发挥重要作用，对优化能源结构、推动“双碳”目标实现意义深远。本文聚焦复杂地质条件下地热水钻探关键技术优化研究。首先分析了复杂地质条件给地热水钻探带来的地层不稳定、岩石硬度高、地下水位复杂等挑战。接着阐述了复杂地质条件下地热水钻探涉及的关键技术，包括钻井设备、钻井液、井身结构设计、钻进技术及成井工艺。最后，针对这些关键技术提出优化策略，如对钻井设备、钻井液、井身结构设计、钻进技术及成井工艺进行优化，旨在提升复杂地质条件下地热水钻探的效率与质量，为地热资源开发提供技术支持。

关键词：复杂地质条件；地热水钻探；关键技术；优化研究

引言：随着能源需求的增长与环保意识的提升，地热水资源作为一种清洁能源，其开发利用备受关注。然而，在实际钻探过程中，复杂地质条件给地热水钻探带来了诸多难题。地层的不稳定可能导致井壁坍塌，岩石硬度高会增加钻进难度，地下水位复杂则可能引发一系列钻探事故。因此，研究复杂地质条件下地热水钻探关键技术并对其进行优化，具有重要的现实意义。本文旨在深入探讨相关技术，提出切实可行的优化策略，以推动地热资源的有效开发。

1 复杂地质条件对地热水钻探的概述

复杂地质条件是影响地热水钻探作业的关键因素，深刻影响着地热水资源开发的效率与安全性。复杂地质条件涵盖了多种地质特征，如地层岩性多变、构造活动频繁、水文地质条件复杂等，这些因素相互交织，给地热水钻探带来了巨大挑战。从地层岩性来看，复杂地质区域常包含松散的砂土层、坚硬的花岗岩、破碎的页岩等多种岩层，不同岩性的物理力学性质差异显著，导致钻探过程中钻头磨损加剧、钻进效率低下，甚至出现卡钻事故。构造活动频繁的区域，断裂带、褶皱等地质构造发育，使得地层结构破碎、稳定性差，钻孔极易发生坍塌，威胁钻探设备安全与施工进度。在水文地质方面，复杂的地下水位分布与多含水层共存现象，容易引发涌水、漏水等问题，干扰钻井液性能，影响井壁稳定性^[1]。

2 复杂地质条件给地热水钻探带来的挑战

2.1 地层不稳定

复杂地质条件下，地层不稳定问题显著。在断裂构造发育区域，岩层受地质应力作用破碎严重，完整性遭到破坏，钻探过程中极易出现垮塌现象。此外，松散的砂土层、流塑性强的黏土层，自身胶结程度低、承载

能力差，钻孔时孔壁难以维持稳定，易发生缩径甚至塌孔，导致钻具被埋，不仅影响施工进度，还可能造成设备损坏。当遭遇地层中的软弱夹层时，由于其力学性质与周边岩层差异大，在钻井液冲刷和钻具扰动下，夹层易发生滑动变形，进而引发井壁失稳，为钻探作业带来极大安全隐患。

2.2 岩石硬度高

部分复杂地质区域分布着高硬度岩石，如花岗岩、石英岩等，其岩石硬度高、抗压强度大，给地热水钻探带来严峻挑战。常规钻头在钻进高硬度岩石时，磨损速度极快，使用寿命大幅缩短，频繁更换钻头增加了钻探成本与施工时间。而且，高硬度岩石的破碎效率低，普通钻进技术难以实现有效破岩，导致机械钻速缓慢，极大降低了钻探效率。此外，高硬度岩石钻进过程中，钻具承受的阻力和扭矩大，容易引发钻具疲劳损坏，甚至出现钻杆断裂、钻头脱落等事故，严重威胁钻探作业的顺利开展。

2.3 地下水位复杂

复杂的地下水位状况为地热水钻探增添诸多难题。当地层存在多层不同压力的含水层时，各含水层间可能存在水力联系，钻探过程中容易引发涌水、漏水现象。涌水会使钻孔内水位急剧上升，改变钻井液性能，导致其密度、黏度等参数失衡，降低护壁效果；而漏水则会造成钻井液大量流失，孔内压力下降，引发孔壁坍塌。此外，复杂的地下水位还可能导致地层出现流沙、管涌等现象，进一步破坏孔壁稳定性。同时，地下水位的频繁波动，也会影响钻探设备的正常运行，增加了成井工艺的复杂性与不确定性^[2]。

3 复杂地质条件下地热水钻探关键技术

3.1 钻井设备

在复杂地质条件下开展地热水钻探，钻井设备的性能直接关乎作业成败。核心设备钻机需具备强劲动力，其大功率、高扭矩特性，能有效克服高硬度岩石产生的巨大钻进阻力。同时，先进的自动化控制系统不可或缺，可实时监测地层变化，精准调节转速、钻压等钻进参数，减少因参数不当引发的设备故障风险。钻具系统中，钻头的选择需因地制宜。面对花岗岩、石英岩等坚硬地层，金刚石钻头凭借超高硬度，可快速切削岩石；而在中硬地层，牙轮钻头通过独特的滚动破岩方式，显著降低钻进难度。高强度钻杆则是动力传输的关键，能在复杂应力环境下稳定传递动力，减少因疲劳或应力集中导致的断裂事故。辅助设备同样发挥着重要作用。泥浆泵需具备大排量、高压力的性能，确保钻井液以足够速度循环，及时将岩屑携带至地面。固控设备通过振动筛、除砂器等多级处理装置，有效分离钻井液中的有害固相颗粒，维持钻井液性能稳定，为钻探作业的高效、安全进行提供有力保障。

3.2 钻井液

钻井液在复杂地质条件下的地热水钻探中，承担着护壁、冷却、携屑等核心功能。护壁方面，通过添加膨润土、纤维素等材料，可调节钻井液的黏度和切力，使其在孔壁表面形成致密、坚韧的泥饼，阻止地层流体侵入，增强井壁稳定性，有效应对松散、破碎地层易坍塌的问题。冷却与润滑作用对延长钻具寿命、提升钻进效率意义重大。在钻进高硬度岩石时，钻具与岩石剧烈摩擦产生大量热量，钻井液循环可及时带走热量，降低钻具温度；同时，其润滑性能能大幅减少钻具与孔壁、岩屑间的摩擦阻力，降低钻具磨损速度，提高机械钻速。针对复杂地下水位引发的涌水、漏水难题，需对钻井液的密度和失水造壁性进行精准调控。在涌水地层，通过提高钻井液密度，使其液柱压力大于地层压力，平衡地层流体；在漏水地层，则加入堵漏材料，如核桃壳、纤维等，封堵地层孔隙和裂缝，减少钻井液漏失，保障钻探作业顺利推进。

3.3 井身结构设计

井身结构设计是复杂地质条件下地热水钻探的重要环节，需充分考量地层特性、水文地质条件等因素。在不稳定地层区域，多级套管程序是保障钻探安全的有效手段。表层套管用于封固上部松散地层，形成稳定的井口基础；中间套管则可隔离复杂地层，如高承压含水层、易坍塌层，防止不同地层间流体相互干扰，为后续钻进提供安全屏障。井径设计遵循“上大下小”原则，

上部大井径便于表层和中间套管下入，同时为处理复杂情况预留空间；下部小井径则可减少钻头磨损，降低钻井液用量，提高钻进效率。套管鞋位置的选择尤为关键，需避开断裂带、破碎带等不良地质区域，确保套管能够有效封隔地层，增强井壁稳定性。对于深部地热水钻探，高温、高压环境对套管性能提出更高要求。需选用高强度、抗腐蚀的套管材料，并优化套管连接工艺，采用特殊螺纹接头增强密封性能，防止套管泄漏和损坏，为地热水的长期稳定开采奠定基础。

3.4 钻进技术

在复杂地质环境下，多样化的钻进技术是实现高效钻探的关键。复合钻进技术整合了旋转钻进与冲击钻进的优势，在高硬度岩石地层中，螺杆钻具提供高转速，冲击器产生高频冲击力，二者协同作用，降低岩石抗压强度，显著提升破岩效率，解决单一钻进方式效率低下的问题。定向钻进技术借助随钻测量（MWD）和导向工具，能够精准控制钻孔轨迹。当遇到断裂带、溶洞等复杂地质构造时，可灵活调整钻孔路径，确保钻孔准确到达目标层位。此外，定向钻进还能实现一孔多分支，扩大地热水资源的开采范围，提高资源利用率。针对不稳定地层，跟管钻进技术可有效防止孔壁坍塌。该技术使套管与钻头同步跟进，在钻进过程中，套管及时支撑孔壁，阻止地层坍塌和流沙涌入钻孔，为后续钻进、下套管等作业创造安全条件，保障钻探作业顺利进行。

3.5 成井工艺

成井工艺是保障地热水井质量和使用寿命的关键环节。下套管前，必须进行充分的通井、洗井作业，清除孔内残留的岩屑和沉渣，确保套管能够顺利下入设计深度。同时，合理使用套管居中装置和扶正器，保证套管在孔内居中，使水泥浆能够均匀分布，为固井质量提供保障。固井环节中，水泥浆配方和工艺需根据地质条件进行优化。在易漏失地层，采用低密度、高触变性的水泥浆，并配合双级固井或分级注水泥工艺，防止水泥浆漏失；在高温地层，则添加耐高温添加剂，提高水泥石的强度和稳定性。严格控制水泥浆的密度、稠化时间等参数，确保水泥浆充分填充套管与孔壁间的环形空间，形成牢固的水泥环，有效封隔地层，防止层间窜流。成井后，洗井作业可清除残留的钻井液和杂质，疏通含水层，提高地热水井的出水量。抽水试验则通过测定水井的出水量、水位降深等参数，评估水井的开采能力和水质状况，为后续地热水的科学开发和合理利用提供可靠数据支持^[3]。

4 复杂地质条件下地热水钻探关键技术优化策略

4.1 钻井设备的优化

针对复杂地质条件,钻井设备的优化需聚焦智能化与适应性升级。首先,研发集成智能传感与自适应控制系统的钻机,通过实时监测地层应力、扭矩、钻压等参数,利用 AI 算法自动调节钻进参数,提升设备对软硬交替地层的响应速度,降低人为操作失误风险。其次,改进钻具材料与结构设计,采用纳米复合涂层技术增强钻头耐磨性,例如在金刚石钻头表面镀覆碳化钨涂层,可将其使用寿命提升30%以上;优化钻杆螺纹连接强度,采用高强度合金钢与特殊扣型设计,减少因应力集中导致的断裂事故。

4.2 钻井液的优化

钻井液优化以提升复杂工况适应性为核心。一方面,开发智能响应型钻井液体系,通过添加温敏、盐敏高分子材料,使钻井液在高温、高矿化度环境下自动调节黏度与失水性能;针对易坍塌地层,研制兼具封堵与固化功能的复合护壁剂,如纳米硅基材料与纤维的混合体系,快速填充孔隙并增强孔壁强度。另一方面,建立动态监测与实时调配系统,利用在线黏度计、密度仪等设备实时采集钻井液参数,结合地质数据自动计算添加剂配比,通过智能混浆装置精准添加材料,确保钻井液性能始终匹配地层变化。

4.3 井身结构设计的优化

井身结构设计优化需强化对复杂地质的精准适配。首先,引入地质力学建模技术,基于三维地震数据与测井资料,构建地层应力场与岩石力学参数模型,据此优化套管层次与下入深度,例如在断层发育区增加技术套管层数,减少井壁失稳概率。其次,创新变径井身结构,采用可膨胀套管技术替代传统多级套管,通过机械或液压膨胀方式扩大套管外径,简化井身结构,降低固井成本与施工风险。此外,优化套管与水泥环界面设计,开发高黏结强度的界面处理剂,提高水泥环与套管、地层的胶结质量;利用声幅测井与超声成像技术,对固井质量进行精细化评估,及时补注水泥修复薄弱环节,保障井身长期密封性能。

4.4 钻进技术的优化

钻进技术优化着重突破复杂地层的钻进效率瓶颈。一是融合多种破岩方式,研发激光-机械复合钻进技术,利用激光预破碎岩石降低其硬度,再通过机械钻头高效切削,在花岗岩地层中可使钻进速度提升50%以上;推广

井下动力钻具与旋转导向系统的组合应用,实现高造斜率定向钻进,减少起下钻次数。二是开发智能随钻优化系统,整合地层岩性识别、钻头工况监测等功能,通过机器学习算法动态调整钻进参数,如在软硬交互地层自动切换转速与钻压,避免钻头早期磨损。此外,探索非侵入式钻进技术,如微波加热破岩法,利用高频电磁波使岩石内部产生热应力破碎,减少对井壁的扰动,适用于极不稳定地层的钻探作业。

4.5 成井工艺的优化

成井工艺优化以提升井体质量与开采寿命为目标。在固井环节,开发自愈合水泥浆体系,添加微胶囊修复剂,当水泥环出现微裂缝时,修复剂释放后自动封堵裂缝,增强长期密封性能;采用分段注水泥与实时压力监测技术,精确控制水泥浆返高,避免窜槽风险。下套管过程中,引入自动化下套管装置,利用液压机械手精确控制套管下放速度与位置,配合电磁超声测厚仪实时检测套管完整性。成井后,采用高压脉冲射孔与酸化压裂协同技术,增强含水层渗透性;建立井群健康监测系统,通过分布式光纤传感技术实时监测井温、压力变化,及时发现套管泄漏、地层出水等异常,为后期维护与开采方案调整提供数据支持^[4]。

结束语

综上所述,复杂地质条件下地热水钻探关键技术的优化是保障地热能高效开发的核心。通过对钻井设备、钻井液、井身结构设计、钻进技术及成井工艺的系统性优化,可有效克服地层不稳定、岩石硬度高、地下水位复杂等难题。这些优化策略不仅提升了钻探作业的安全性与效率,还降低了开发成本,为地热水资源的可持续利用奠定基础。

参考文献

- [1]李小冰,李冰,李亚洲,等.极地深层热水钻回水软管伴热功率数值模拟研究[J].钻探工程,2024,51(S1):151-160.
- [2]徐浩.滁河、郑庐断裂带地热综合地球物理探测与成藏模式研究[D].中国科学技术大学,2024.188-189
- [3]常志岐,金鑫,高俊,等.可控源音频大地电磁测深法在地热水找矿勘查中的应用[J].能源与环保,2024,46(03):173-177.
- [4]段江飞.山西阳高县地热水地球化学特征及成因分析[J].人民黄河,2023,45(04):96-101.