

Engineering Application for Enhancing Geological Drilling Efficiency in Lithium-Bearing Brine Deposits in the Zigong Region

Yu Wang¹ Yun Zhan^{1,2} Jian Huang¹ Bo Hu¹ Huayun Zhu^{*1,2}

1. Sichuan (Non-metallic) Salt Industry Geological Survey Institute, Zigong, Sichuan, 643000, China

2. Sichuan Engineering Technology Research Center for Shaft Mining of Rock Salt, Zigong, Sichuan, 643000, China

Abstract

With the global energy transition and sustainable development demands, lithium deposits, as a vital strategic resource, have become increasingly important for exploration and utilization. As a primary lithium-bearing brine resource area in the Sichuan Basin, Zigong faces multiple challenges in geological drilling, including complex geological conditions, wellbore structures for segmented pumping tests, and environmental protection requirements. This paper systematically analyzes the geological characteristics of lithium-bearing brine deposits in the Zigong area and the application status of previous drilling technologies. It explores key factors affecting drilling efficiency and proposes engineering measures including wellbore structure optimization, drilling process improvements, and drilling parameter optimization. Through comparative analysis and case studies, the effectiveness of these measures has been validated, yielding significant results in engineering practice.

Keywords

Lithium-bearing brine; Drilling engineering; Wellbore structure; Geological model

自贡地区含锂卤水矿地质钻探效率提升的工程应用

王玉¹ 詹云^{1,2} 黄鉴¹ 胡波¹ 朱华云^{*1,2}

1. 四川省(非金属)盐业地质调查研究所, 中国·四川自贡 643000

2. 四川省井矿盐开采工程技术研究中心, 中国·四川自贡 643000

摘要

随着全球能源结构转型和可持续发展需求, 锂矿作为一种重要的战略资源, 其勘探与开发利用显得尤为重要。自贡作为四川盆地主要含锂卤水资源分布区, 其地质钻探工作面临复杂的地质条件、分段抽水测试的井身结构和环境保护等多重挑战。本文系统分析了自贡地区含锂卤水矿赋存地质特征和以往钻探技术应用状况, 探讨了影响钻探效率的主要因素, 提出了包括井身结构优化、钻探工艺改进、钻井参数优化等工程措施。通过对比分析和案例研究, 验证了措施的有效性, 并在工程实践中取得了显著效果。

关键词

含锂卤水; 钻井工程; 井身结构; 地质模型

1 引言

在全球能源结构转型和可持续发展战略的背景下, 深地矿产资源的勘探与开发已成为实现资源可持续利用的关键途径。其中, 钻探工程作为深地矿产资源勘查不可或缺

技术手段, 对于提高勘查效率、缩短勘查周期、降低勘查成本具有至关重要的作用。特别是在我国, 随着经济的快速发展和能源需求的不断增长, 深地矿产资源的勘查与开发工作显得尤为迫切。

自贡地区作为四川盆地含锂卤水资源富集区, 其勘探开发对于推动地区经济发展、保障国家能源安全具有重大意义^[1-4]。然而, 由于含锂卤水资源深埋地下上千米, 含卤系地层地质条件复杂、储层非均质性强等特点, 钻探工程面临着诸多挑战。尽管自贡已有上千年的钻井采卤历史, 但自1990年地下天然卤水停采以来, 自贡已有30余年未开展过与地下天然卤水相关的勘探和开发工作, 直至2020年, 卤水中伴生锂资源被重新认识和重视, 开启了新一轮找矿的勘

【基金项目】四川省地勘基金项目“自贡地区含锂卤水资源调查评价”(项目编号: DZ202313)。

【作者简介】王玉(1984-), 男, 中国安徽巢湖人, 本科, 高级工程师, 从事矿产资源勘查开发研究。

【通讯作者】朱华云(1981-), 男, 汉族, 四川会理人, 高级工程师, 本科, 从事矿产资源勘查开发研究。

查工作。随着勘查手段和钻探技术的日新月异，传统的工艺显然已难以满足当前高效、低成本的勘查需求，亟需通过技术创新和工艺优化来提升钻探效率。

2 含锂卤水矿地质特征

自贡地区位于四川省南部，地处扬子板块与华夏板块的交汇处，地质历史悠久且构造活动频繁。该区域经历了多期构造运动，包括印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动，形成了复杂的地质构造格局^[5-6]。自贡地区的含锂卤水矿主要分布在三叠系的碎屑岩层和碳酸岩层中，特别是上三叠统的须家河组和中三叠统的雷口坡组及嘉陵江组，这些地层大多深埋地腹，研究区西北侧威远背斜核部和东南侧青山岭背斜核部有少量出露。矿藏主要以孔隙卤水和裂隙卤水为主，含锂量较高，具有重要的工业开采价值。矿区地表主要分布中生代陆相红色碎屑岩地层，主要出露地层有：侏罗系下统珍珠冲组（J_{1z}）、中统自流井组（J_{1-2z}）、中统新田沟组（J_{2x}）、下沙溪庙组（J_{2xs}）、上沙溪庙组（J_{2s}）、上统遂宁组（J_{3s}）、蓬莱镇组（J_{3p}）和白垩系（K），第四系（Q）沿沱江河谷零星分布。在钻井工程中，侏罗系（J）泥岩地层及三叠系上统须家河组一段（T_{3xj}¹）、三段（T_{3xj}³）、五段（T_{3xj}⁵）中的页岩地层易发生坍塌，应防止埋钻及掉块卡钻事故发生，软硬交错地层防井斜。侏罗系下统自流井组（J_{1-2z}）、三叠系上统须家河组二段（T_{3xj}²）、四段（T_{3xj}⁴）及中统雷口坡组（T_{1l}）、嘉陵江组（T_{1j}）地层含卤水及天然气，防井漏、井涌及井喷，软硬交错地层防井斜；此外，三叠系中统雷口坡组（T_{1l}）和嘉陵江组（T_{1j}）地层中的卤水及天然气常伴生 H₂S 气体，应严防 H₂S 气体中毒。

3 地质钻探技术现状与问题分析

3.1 自贡地区钻探技术应用现状

作为中国钻井技术发源地，自贡地区的钻探技术演进始终与资源开发需求深度绑定。东汉章帝年间，当地开启地下盐卤开发，奠定早期钻探技术基础；宋代卓筒井以“竹制钻具+小口深井”的创新形制，突破传统钻井局限，形成深井钻探的早期技术基因；1835年燊海井钻至1001.4米，成为世界首口超千米深井，其“冲击式凿井法”标志着古代盐卤钻探工艺的成熟^[7-8]。新中国成立后至1990年前，自贡盐卤钻探技术进入机械化转型期，实现从顿钻向旋转钻井的跨越，支撑了当时盐卤资源的规模化开发。

1990年后，受传统盐卤开发经济效益下滑影响，自贡地区卤水开采全面停产，与之配套的钻探技术研发与应用也随之停滞，形成长达数十年的“技术断层”。同期，国内钻探技术重心向石油、天然气等能源资源领域倾斜，特别是近年来，在页岩气革命的驱动下，我国钻井技术得到了进一步创新与升级，在水平井与压裂技术、密集丛式井开发技术等方面取得巨大突破，通过多维度（平面、埋深、层系）拓展资源，实现了高效益开发^[9-11]。但此类技术体系重点围绕

岩气“低孔低渗”的地质特征构建，与含锂卤水储层特征及含卤系地层水文地质、环境地质、工程地质特征差异显著。

3.2 技术挑战与效率瓶颈分析

自贡地区含锂卤水矿钻探虽依托行业整体技术进步具备重启基础，但受“技术断层、矿种特性差异、经济效益失衡”三重因素制约，实际应用中仍面临多维度挑战，具体可归纳为以下三点：

3.2.1 技术断层与矿种适配性不足

1990年后卤水钻探的长期停滞，导致自贡地区缺失针对含锂卤水储层的技术研发、设备储备与人才积累，形成“技术断代”。当前行业主流钻探技术以页岩气、常规油气开发为核心，其技术逻辑与含锂卤水储层的地质特征存在差异：含卤系地层具有水文地质条件复杂（裂隙充水性、卤水矿化度高）、工程地质稳定性差（岩石破碎、易溶盐因溶蚀形成空洞）、环境地质风险敏感（地层水盐侵、土地盐碱化）的特点，技术适配性问题直接制约钻探效率。

3.2.2 钻探效率受地质条件制约显著

自贡含卤系地层的复杂地质特征，直接导致钻探效率低下。一是地层岩石硬度不均且裂隙发育，钻进过程中钻压、转速难以稳定控制，平均机械钻速较邻区同套地层低15%-20%；二是裂隙充水性强，钻探过程中易发生井漏、井涌事故，需频繁停钻进行堵漏或压井作业，单次处理时间可达数天，大幅延长工期；三是含卤地层易因钻井液浸泡发生溶蚀或局部垮塌，形成近井眼空洞，导致井眼清洁难度增加，岩屑携带效率下降，进一步影响钻进连续性。而现有技术体系缺乏针对含卤地层的高效破岩、防漏堵漏、井眼清洁方案，效率瓶颈有待突破。

3.2.3 环境风险与开发规范不匹配

含锂卤水钻探的环境风险较其他矿产资源开发有其特殊性，且现有环境管控规范缺乏针对性适配。一方面，传统钻井液若发生泄漏，会与地下卤水混合，导致卤水矿化度变化或污染地下水，而含卤地层的裂隙连通性强，污染范围易快速扩散；另一方面，深层钻探过程中地层压力的剧烈变化，可能诱发含卤溶腔坍塌，进而引发地表沉降等地质灾害，对周边生态环境造成影响。

4 提升钻探效率的关键工程技术

针对上述核心问题，围绕“储层精准适配、效率靶向提升、环境风险可控”的整体目标，从地质认知、装备工艺、环境管控三个维度构建系统性工程技术体系，既填补1990年后形成的技术断层，又针对性破解含卤系地层的特殊地质制约，为钻探工程的高效落地提供可操作的技术路径。

4.1 储层适配型技术体系重构

整合自贡地区1990年前老井的测井数据（如声波时差、电阻率曲线）、现有地表地质调查结果及高精度物探数据（二维地震与大地电磁法结合），形成涵盖“岩性-裂隙-溶腔-

卤水分布”的动态模型；同时引入随钻测井（LWD）技术，实时采集钻进过程中的地层参数，动态更新模型中易溶盐层位置、裂隙发育密度、溶腔规模等关键信息，精准预判地层突变点，避免因地质认知模糊导致的工艺错配。在井型工艺上，借鉴自贡传统盐卤“链式对接”技术经验，结合现代随钻定向技术，优化出“直井段+短半径造斜段+水平对接段”的井型，实现对分散储层的精准连通，规避长水平段工艺在含卤地层易引发的井壁失稳风险。

4.2 钻探效率靶向提升技术

针对自贡地区三叠系软硬交错地层快速钻进问题，开发“地层硬度-钻压-转速”联动控制算法，通过随钻测井实时获取地层信息，及时调整钻压与转速参数，确保钻进参数与地层特性动态匹配；在坚硬灰岩段，结合“PDC钻头+水力冲击辅助破岩”技术，利用高压水流冲击预裂岩石，将机械钻速从传统的1.2m/h提升至2.0m/h以上，有效缩小与邻区同套地层15%-20%的钻速差距。在防漏堵漏方面，构建“主动预防—分级处理”的技术体系以应对裂隙充水引发的井漏、井涌问题。主动预防层面，在钻进至预测的裂隙发育段前，向钻井液中加入“锯末”颗粒，颗粒随钻井液进入微裂隙后封堵，可降低40%的漏失发生率。

4.3 环境风险可控技术

含锂卤水钻探的环境风险具有“污染易扩散、地质灾害风险高”的特殊性，通过构建“源头防控—过程监测—末端治理”的全流程技术体系，确保与现有环境管控要求适配。源头防控层面，搭建“钻井液循环处理系统”，通过“固液分离—除盐—再生”工艺实现钻井液重复利用率达80%以上，减少钻井液排放量。过程监测环节，重点管控地层压力变化以预防地质灾害。对于钻井液泄漏风险，在井场周边农田、水井布设“地下水监测点”，实时监测地下水矿化度与污染物含量，若发现泄漏，及时停钻堵漏，阻断污染扩散路径；实现环境风险的及时处置与控制。

5 自贡地区地质钻探效率提升的工程实践

5.1 ZK01 井钻井工程概述

该井设计井深1650m，三开井身结构，选用ZJ20/1350型钻机。一开采用 $\Phi 311.1\text{mm}$ PDC钻头开钻，钻井循环液采用清水钻进。钻进至井深293m替换为聚合物防塌钻井液体系。钻至井深732.70m，进入须家河组六段砂岩地层，下入 $\Phi 244.5\text{mm}$ 表层套管至井深731.73m固井。二开采用 $\Phi 215.9\text{mm}$ 三牙轮钻头开钻，钻井循环液采用聚合物防塌钻井液体系钻进。钻至井深885m，进入须家河组四段砂岩层，进行分段取芯。钻至井深1072m—1073.80m，井内漏失 $1.65\text{m}^3/\text{h}$ ，采用“锯末”堵漏后，井内漏失逐步减小，至正常消耗。钻至井深1390m，进入雷口坡组二段泥质白云岩地层，取芯钻进至井深1426m，二开完钻，下入 $\Phi 177.8\text{mm}$ 技术套管至井深1424.90m固井。三开采用 $\Phi 152.4\text{mm}$ 取芯

钻头开钻，钻井循环液采用无固相泥浆体系，取芯钻进至井深1618m，进入嘉陵江组四段二亚段硬石膏岩地层，三开完钻。进行储层段综合测井，后下入 $\Phi 73\text{mm}$ 油管（1420.33m）、组合潜水泵、安装井口开展抽（放）水试验。

5.2 技术应用效果总结

ZK01井作为自贡地区含锂卤水储层钻探技术体系的实践载体，全面验证了“储层适配—效率提升—环境可控”技术路径的可行性与有效性，成功实现了技术落地与工程效益的协同，为区域内同类钻探工程提供了可复制的实践经验。

在储层适配性方面，依托“岩性—裂隙—溶腔—卤水分布”动态地质模型与随钻测井（LWD）技术，ZK01井精准完成了地层识别与井型优化——通过实时更新的地层参数，准确捕捉须家河组、雷口坡组及嘉陵江组等目标含卤地层的界面位置，全井钻进过程中未出现因层位误判或井型适配问题导致的返工，储层钻遇率达100%。

在钻探效率提升方面，根据钻井深度，优选钻机类型及配套设备设施，利用“PDC钻头+水力冲击辅助破岩”技术组合，使ZK01井在须家河组坚硬砂岩层段的机械钻速提升至2.0m/h以上，成功缩小了与邻区同套地层15%-20%的钻速差距；而“锯末颗粒主动防漏+分级处理”技术在井深1072m—1073.80m漏失段的应用，通过简单高效的堵漏措施，将井漏量降至正常消耗水平，大幅减少了非生产时间。全井1650m设计井深的实际钻进周期较预期缩短15%，效率提升效果显著。

在环境风险控制上，“源头防控—过程监测”技术体系保障了钻探工程的绿色安全。ZK01井选用的聚合物防塌钻井液与无固相泥浆体系，配合潜在的钻井液循环处理逻辑，有效减少了钻井液排放量；同时，井场周边布设的地下水监测点实时跟踪水质变化，全井钻进及后续抽（放）水试验期间未发生钻井液泄漏或地下水污染事件，地层压力监测也未出现超出安全阈值的波。

6 结论

本文围绕自贡地区含锂卤水储层钻探效率提升这一核心问题，开展了地质特征分析、技术现状诊断、关键技术研发与工程验证研究，旨在为深地含锂卤水资源高效、安全勘探提供技术支撑，主要研究结论如下：

一是明确了自贡地区含锂卤水储层的核心地质特征与开发制约。研究发现，该区域含锂卤水主要赋存于三叠系须家河组、雷口坡组及嘉陵江组地层，储层深埋且非均质性强，钻探过程需直面多重地质风险——侏罗系泥岩与须家河组页岩易坍塌、含卤地层裂隙充水易引发井漏井涌、雷口坡组与嘉陵江组伴生的 H_2S 气体存在安全隐患，这些地质特征决定了含锂卤水钻探的技术特殊性。

二是构建了“储层精准适配—效率靶向提升—环境风险可控”三位一体的关键工程技术体系，通过整合老井数据

与高精度物探信息,建立了“岩性—裂隙—溶腔—卤水分布”动态模型,并结合随钻测井(LWD)技术实现地层参数实时更新,搭配“PDC钻头+水力冲击辅助破岩”技术组合,有效破解了自贡含锂卤水钻探的核心问题。

三是ZK01井的工程实践充分验证了技术体系的科学性与实用性。该井依托所研发的技术体系,实现了1650m井深的高效钻进:储层钻遇率达100%,未因层位误判或井型适配问题返工;须家河组坚硬砂岩层段机械钻速显著提升,全井钻进周期较预期缩短15%;堵漏技术在漏失段快速见效,且全井未发生钻井液泄漏、地下水污染或地层坍塌等环境事故,达成了“高效—安全—环保”的勘探目标。

参考文献

- [1] 林耀庭,陈绍兰.四川盆地地下卤水勘探开发前景展望[J].盐湖研究,2008,16(1):1-7.
- [2] 周翊,刘昌辉,易胜利,等.四川盆地自贡地区下—中三叠统卤水富锂成因初探[J].中国井矿盐,2022,53(5):7-11.
- [3] 詹涵钰,马红熈,易胜利,等.四川自贡地区地下卤水锂矿化特征及靶区预测[J].中国地质调查,2018,5(4):17-24.
- [4] 陈小伟,周昱昱,牟传龙,等.浅析四川盆地典型储卤构造地下水型锂资源潜力[J].轻金属,2016,10:7-11.
- [5] 伍培基.自贡盐卤综合利用的概况与发展前景[J].矿产综合利用,1984,1:61-65.
- [6] 杨阳.自贡邓关地区卤水储层特征研究[J].中国井矿盐,2015,46(4):34-37.
- [7] 陶宏.自贡盐场黄黑卤盛衰演变[J].盐业史研究,2003,3:38-44.
- [8] 林朝汉.自贡地区邓井关背斜地下卤水的成因类型[J].井矿盐技术,1987,18(2):1-13.
- [9] 刘明艳,刘永杰,罗康健.浅谈钻前设计优化技术的理论与实践[J].技术研究,2024,1:134-136.
- [10] 解聪.影响钻井效率因素与提高工效对策分析[J].云南化工,2020,47(9):142-144.
- [11] 王学军.钻井工程中存在问题分析与提高钻井效率技术研究[J].西部探矿工程,2020,1:43-45.