

西藏羌塘盆地中深孔岩心钻探质量控制体系与工程实践

胡吉祥^{1,2,3}, 葛晓华^{1,2,3*}, 李 博^{1,2,3}, 孙飞飞^{1,2,3}, 翟育峰^{1,2,3}

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264004; 2. 浅海与陆域深部地质钻探山东省工程研究中心, 山东 烟台 264004; 3. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东 烟台 264004)

摘要: 针对西藏羌塘盆地高海拔、高寒缺氧、膏盐-灰岩互层易漏失缩径、高原生态敏感等特殊条件, 以QS6孔901.50 m中深孔岩心钻探工程为依托, 构建“钻前策划—过程严控—核验归档—闭环改进”全流程质量控制体系。从岩心采取率、钻孔弯曲度、孔深精度、简易水文观测、原始资料、封孔作业及质量监督7个维度建立控制指标与技术措施。工程实践表明: 该孔岩心采取率98.44%, 全孔最大顶角 2.0° , 孔深校正误差 ≤ 2 cm, 无孔内事故与机械故障, 原始资料规范、封孔质量合格, 各项指标均优于设计及《地质岩心钻探规程》要求。所形成的高原中深孔钻探质量控制模式, 可有效保障复杂地层条件下钻探成果可靠性, 为青藏高原矿产调查评价钻探提供技术支撑。

关键词: 高原钻探; 中深孔; 岩心钻探; 质量控制; 绳索取心; 羌塘盆地

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0222-06

Quality control system and engineering practice of medium-deep core drilling in Qiangtang Basin, Xizang

HU Jixiang^{1,2,3}, GE Xiaohua^{1,2,3*}, LI Bo^{1,2,3}, SUN Feifei^{1,2,3}, ZHAI Yufeng^{1,2,3}

(1. Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China; 2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Neritic and Continental Deep Geological Drilling, Yantai Shandong 264004, China; 3. Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Bureau of Geology and Mineral, Yantai Shandong 264004, China)

Abstract: In response to the special conditions in the Qiangtang Basin, Xizang, such as high altitude, severe cold and oxygen deficiency, prone to loss and diameter reduction in the interbedded potash-limestone formations, and ecologically sensitive plateau environments, a full-process quality control system of "pre-drilling planning, strict in-process control, verification and archiving, closed-loop improvement" was established based on the 901.50 m medium-deep core drilling project of QS6 drilling hole. The control indicators and technical measures were established from seven dimensions, including core recovery, borehole deviation, depth accuracy, simple hydrological observation, raw data, hole sealing operations, and quality supervision. The engineering practice shows that the core recovery rate of this drilling hole reached 98.44%, the maximum hole inclination was 2.0° , the depth calibration error was ≤ 2 cm, and no in-hole accidents or mechanical failures happened, in addition, the raw data were standardized, the drilling hole sealing met the quality requirements and all indicators surpassed the design specifications and the requirements of the

收稿日期: 2026-05-18; 修回日期: 2026-06-18 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.026

基金项目: 国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1003106); 山东省地矿局科技攻关项目(编号: KY202501, KY202602); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(编号: 2026CXGC010901)

第一作者: 胡吉祥, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 从事矿产资源勘查与钻探工程技术研究工作, 山东省烟台市芝罘区机场路271号, 340074564@qq.com。

通信作者: 葛晓华, 男, 汉族, 1979年生, 工程师, 探矿工程专业, 从事矿产资源勘查与钻探工程技术研究工作, 山东省烟台市芝罘区机场路271号, 804854421@qq.com。

引用格式: 胡吉祥, 葛晓华, 李博, 等. 西藏羌塘盆地中深孔岩心钻探质量控制体系与工程实践[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 222-227.

HU Jixiang, GE Xiaohua, LI Bo, et al. Quality control system and engineering practice of medium-deep core drilling in Qiangtang Basin, Xizang[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 222-227.

"Geological Core Drilling Code". The resulting quality control model for medium-deep drilling in the plateau can effectively ensure the reliability of drilling results under complex strata conditions, providing technical support for mineral survey and evaluation drilling in the Qinghai-Xizang Plateau.

Key words: plateau drilling; medium-deep hole; core drilling; quality control; wire-line coring; Qiangtang Basin

0 引言

羌塘盆地是我国青藏高原北部矿产重点调查区,岩心钻探是揭示地层结构、获取实物岩心、验证资源潜力的关键技术手段。藏北向阳湖地区平均海拔5000 m以上,具有高寒、低氧、强风、冻土发育、生态环境脆弱等特征,地层以灰岩、泥页岩、膏盐岩互层为主,易发生漏失、缩径、掉块、造浆等孔内复杂情况,对岩心采取率、孔斜控制、孔深精度及资料完整性提出极高要求。

目前高原钻探研究多集中于浅孔钻进工艺、堵漏技术、装备适配等方面,针对 ≤ 1000 m中深孔、以质量管控为核心的系统性工程实践研究相对薄弱^[1]。QS6孔属羌塘盆地矿产调查评价项目,设计孔深800 m,实际完钻901.50 m,以高取心质量成孔、全过程规范可控为目标。本文基于该孔施工实践,建立适用于高原复杂地层的钻探质量控制体系,明确关键控制点与技术措施,总结应用成效,为同类高原钻探工程提供可复制的质量管控方案。

1 工程概况与质量控制难点

1.1 工程概况

QS6孔位于羌塘盆地北羌塘坳陷,施工海拔5000~5200 m,由山东省第三地质矿产勘查院承担施工,完钻深度901.50 m。采用四开结构:一开 $\varnothing 175$ mm金刚石双管提钻取心;二、三、四开分别采用 $\varnothing 150$ 、 $\varnothing 122$ 、 $\varnothing 98$ mm绳索取心钻进。终孔孔径 ≥ 95 mm,设计岩心采取率 $\geq 85\%$,施工严格执行《固体矿产勘查钻孔质量要求》(DZ/T 0486—2024)。

1.2 地质概况

羌塘盆地地处青藏高原腹地,是我国陆域最大的侏罗纪海相盆地,构造上呈“两坳夹一隆”格局,北邻可可西里-金沙江缝合带,南接班公湖-怒江缝合带,中部以龙木错-双湖缝合带为界,划分为北羌塘坳陷、中央隆起、南羌塘坳陷三大一级单元。盆地基底为前寒武纪结晶变质岩系,盖层以中生代海相沉积为主,上三叠统肖茶卡组、侏罗系雀莫错组

—夏里组及下白垩统雪山组构成主要沉积序列,经历了晚三叠世海侵开启、早—中侏罗世稳定浅海沉积、晚侏罗世—早白垩世海退陆相化的演化过程^[2]。构造运动以印支期盆地奠基、燕山期强烈挤压褶皱、喜马拉雅期陆内抬升为特征,发育逆冲推覆、分层滑脱等典型构造样式。成矿地质条件优越,侏罗系布曲组、夏里组为优质烃源岩,碳酸盐岩与砂岩构成孔隙-裂缝型储集层,泥岩、膏盐岩盖层封盖性能良好,具备巨大勘探潜力^[3]。

1.3 钻孔结构

一开 $\varnothing 175$ mm金刚石双管提钻取心钻进工艺,穿过第四系至基岩顶界,钻至8.40 m,下 $\varnothing 168$ mm套管。二开 $\varnothing 150$ mm绳索取心工艺钻进至106.30 m,下 $\varnothing 140$ mm套管。三开 $\varnothing 122$ mm绳索取心工艺钻进至400.20 m,下 $\varnothing 114$ mm套管。四开 $\varnothing 98$ mm绳索取心工艺钻进至901.50 m完钻(见图1)。

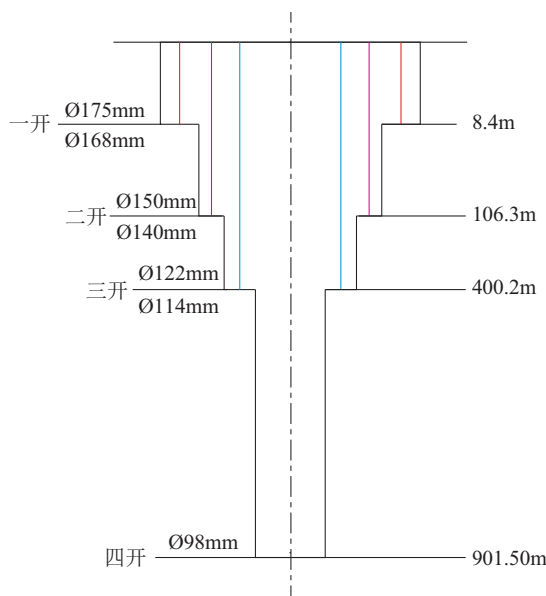


图1 实钻钻孔结构

1.4 质量控制难点

(1)高原环境约束:空气含氧量仅为内地40%左右,长期低氧高寒环境,易导致施工人员出现高原反应,钻探施工设备操作精度与作业效率大幅下降;同时低温低压环境会降低设备运行效率,设备

仪、冲洗液密度计、漏斗黏度计、含砂量测定仪、孔深丈量钢尺全部校验合格;防喷器、便携式H₂S检测仪、空气呼吸器检测合格,确保应急可靠^[9]。

(3)专项培训。内容包括:高原施工安全、绳索取心操作、膏盐层护壁堵漏、测斜规范、原始报表填写、封孔作业、环保要求、高原病防护。明确项目经理、技术负责、机长、班长、安全员等岗位职责,签订质量责任书。考核上岗,所有人员经理论+实操考核合格后方可进场作业。

(4)质量目标分解。将取心率、孔斜、孔深误差、资料合格率、封孔质量等指标分解至班组与机台^[10]。

2.2 人员质量培训

鉴于高原钻探环境与工艺复杂性,构建“理论筑基(岗前培训)—实操强能—应急演练—考核上岗”四级培训体系,确保全员适配高原钻探质量管控要求。

(1)理论培训聚焦三大核心:一是高原环境适应,讲解5000 m以上低氧高寒环境对人体的影响、高原病防治及钻探设备低温启动与运行维护技术,规避缺氧操作风险;二是预测地层与钻探工艺,解读羌塘盆地膏盐与灰岩互层特性,讲解绳索取心、提钻取心工艺原理、冲洗液调配方法及不同地层质量控制要点;三是规范标准,重点学习《地质岩心钻探规程》《固体矿产勘查钻孔质量要求》中岩心采取、孔斜测量等强制性条款,分配岗位质量责任。

(2)实操培训采用“传帮带+分组演练”模式,强化关键工序操作:绳索取心钻具组装与取心、膏盐层冲洗液黏度调控、存储式陀螺测斜与钢尺孔深校准、封孔水泥浆配比及灌注工艺,确保操作规范达标。

(3)应急演练针对四类高频场景:孔内漏失随钻堵漏、缩径卡钻解卡、高原病突发急救及燃油冲洗液泄漏环保应急处置,提升协同应对能力。

(4)培训后实施“理论笔试+现场实操+应急考核”综合测评,重点考查规范标准、工艺参数及实操熟练度,筑牢人员质量管控基础。

2.3 现场施工与质量目标分解

现场指标分解至机台与班组:岩心采取率 $\geq 85\%$ (目的层98%以上),钻孔顶角 $\leq 2.0^\circ$,孔深校正误差 ≤ 2 cm,原始资料合格率100%,封孔密实率100%,孔内事故为0。

2.3.1 岩心采取质量控制

岩心采取是钻探质量核心,采取“优选钻具+适配参数+精细操作”组合控制^[11]。

(1)钻进工艺。一开 $\varnothing 175$ mm金刚石双管提钻取心钻进工艺,二开 $\varnothing 150$ mm绳索取心钻进工艺,三开 $\varnothing 122$ mm绳索取心钻进工艺,四开 $\varnothing 98$ mm绳索取心钻进工艺至终孔。

(2)钻进参数。破碎地层执行高转速、小泵量、小钻压,避免冲蚀与破碎;完整地层适当加长钻具,提高回次进尺(见表1)。

表1 钻进参数

钻进方法	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·min ⁻¹)
$\varnothing 175$ mm 金刚石 提钻取心钻进	5~10	50~100	110
$\varnothing 150$ mm 金刚石 绳索取心钻进	8~15	80~200	110
$\varnothing 122$ mm 金刚石 绳索取心钻进	14~19	250~400	95
$\varnothing 98$ mm 金刚石 绳索取心钻进	12~15	250~300	95

(3)岩心保护。合理选用卡簧、拦簧,防止岩心脱落;起下钻及时回灌浆液,减少孔壁垮塌对岩心的扰动。

(4)现场整理(见图4)。岩心按顺序编号、装箱、标记,严禁颠倒、拉长,及时描述、拍照、交接,实现全程可追溯。



图4 岩心现场整理

2.3.2 钻孔弯曲度控制

实行定点监测、及时纠偏^[12]。

(1)监测频次:每钻进100 m进行1次单点测斜,全孔共测斜9次。

(2)孔斜控制工艺:安装保证天车、回转器、孔口三点一线;发现顶角偏大立即采用轻压慢钻纠偏,严控孔斜发展。

(3)仪器保障:采用存储式陀螺测斜仪(见图5),适应高原低温低气压环境,数据稳定可靠。



图5 XBY-2GW型存储式陀螺测斜仪

2.3.3 孔深精度控制

以地层分层与地质对比需求为导向,执行逐段校正、双人复核。

(1)校正规则:每钻进100 m校正1次孔深,采用钢尺丈量钻具总长,逐根复核。

(2)误差控制:全孔9次校正,最大误差 ≤ 2 cm,满足规范要求。

(3)现场记录:校正数据及时填入专用表格,技术负责审核签字,归档留存^[13]。

2.3.4 简易水文观测与原始资料控制

(1)水文观测:每班组提钻后、下钻前各观测1次水位,间隔 ≥ 5 min,记录水位、漏失量、孔内异常情况。

(2)原始报表:钻探班报表、冲洗液报表、测斜记录表、孔深校正表现场即时填写,做到真实、齐全、清晰、规范。

(3)资料归集:建立“一孔一档”,专人整理、审核、归档,确保资料完整可查。

2.3.5 终孔封孔质量控制

遵循分段封孔、精准计量、全程监管,保护地下水与高原生态。

(1)分段封堵:按0~8.4 m、8.4~106.3 m、106.3~400.2 m、400.2~901.5 m四段分别灌注水泥浆。

(2)配比与计量:严格按水灰比0.5:1配制,记录理论用量、实际用量、导管规格,确保灌注密实^[14]。

(3)联合验收:地质、技术、机长三方签字确认,封孔资料完整归档。

2.3.6 质量监督与管理保障

(1)组织体系:建立项目经理、技术负责、机长、安全员四级质量管控,责任到人^[15]。

(2)过程检查:每日巡查设备、入孔钻具、钻进技术参数、取心、报表等^[16];每周召开质量例会,如实填写问题整改清单。

(3)标准化作业:推行机场布置、施工操作流程、钻探原始资料填写、安全环保标准化,减少人员流动。

3 工程应用效果

通过本次全流程质量控制体系的落地实施,实现了高质量、高效率、零故障安全成孔,各项施工指标、质量指标均优于设计及规范标准,工程应用成效显著。

(1)施工效率:实际完钻深度901.50 m,总施工工期36 d,纯钻进作业时长566.5 h,辅助作业时长297.5 h,施工全程无孔内事故、无设备故障停机情况,综合机械钻速达1.59 m/h,施工效率稳定可控。

(2)岩心质量:完钻901.50 m,取心长度887.40 m,岩心采取率98.44%,远高于85%设计要求,任务完成率100%。

(3)成孔精度:全孔9次测斜数据显示,钻孔倾角整体稳定,全孔最大顶角仅 2.0° ,孔身规整无明显偏斜;全程孔深校正最大误差 ≤ 2 cm,孔深测量精度、孔斜控制精度均远超规范要求,成孔质量优异,具体测斜数据如表2所示。

表2 钻孔弯曲度测量记录

测深/m	顶角/(°)	方位角/(°)	垂深/m
101.80	0.20	256.00	101.80
200.70	0.20	264.00	200.70
304.20	0.30	261.00	304.20
400.20	1.00	262.00	400.19
500.70	1.20	261.00	500.67
602.70	0.40	257.00	602.66
700.20	2.00	260.00	700.14
802.50	0.80	259.00	802.40
901.50	1.50	261.00	901.38

(4)资料与环保:原始记录完整规范,封孔质量合格,实现泥浆不落地、机走场清,生态接近零扰动。

(5)成果交付:岩心222箱规范转运至指定地点,全部资料通过验收。

4 结论与建议

(1)本文构建的适配青藏高原高海拔、高寒缺氧及膏盐-灰岩互层复杂地层的中深孔岩心钻探全流程质量控制体系,覆盖岩心采取、孔斜控制、孔深校核、资料整理及封孔作业全施工环节,搭配绳索取心为主、提钻取心为辅的钻具组合、分段适配钻进参数及无固相聚合物冲洗液关键技术,能够有效提高复杂地层钻探质量,实现钻探施工提质增效。

同时,依托定点测斜、逐段校正、即时记录审核的全过程管控模式,可大幅降低施工质量波动,保障钻探成果的稳定性与可靠性,具备良好的高原工程推广应用价值。

(2)整套高原中深孔岩心钻探质量控制体系可在保障施工效率的前提下,实现高质量成孔作业,适配青藏高原特殊环境与复杂地层钻探施工需求,突破了传统高原钻探质量管控碎片化、针对性弱的瓶颈,形成了适配高原工况的系统化、闭环式质量管控方案,可为区域同类中深孔钻探工程提供技术参考。

(3)后续可进一步推进高原钻探工程数字化转型升级,优化膏盐层、破碎地层专用钻探设备与抗盐、防漏、抑制造浆冲洗液配方,同时完善机台标准化建设与作业人员专业技能培训,搭建标准化、可复制、可推广的高原钻探质量智能化管控体系,持续提升高原复杂地层钻探施工的精细化、规范化水平。

参考文献:

- [1] 王志祥,陈冲,郭如伦,等.羌塘盆地油气地质调查井地层条件与施工难点[J].钻探工程,2025,52(4):111-120.
- [2] 王剑,付修根.论羌塘盆地沉积演化[J].中国地质,2018,45(2):237-259.
- [3] 李才,翟庆国,董永胜,等.青藏高原龙木错-双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录[J].地质通报,2007,26(1):13-21.
- [4] 翟育峰,仲崇龙,刘峰.羌塘盆地羌资-14井钻探施工技术[J].钻探工程,2016,43(7):92-95.
- [5] 吴纪修,尚玉虎,李鑫森,等.羌塘盆地岩石物理力学特性分析及其孔壁稳定技术[J].钻探工程,2018,45(3):9-13.
- [6] 吴纪修,张永勤,梁健,等.羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程井壁稳定性分析[J].钻探工程,2014,41(6):8-13.
- [7] 王剑,王忠伟,付修根,等.青藏高原羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)新发现[J].科学通报,2022,67(3):321-328.
- [8] 牟程江,廖麟祥,孙昌伟,等.藏北无人区高原冻土复杂地层钻探施工实践[J].钻探工程,2025,52(2):65-71.
- [9] 汤小仁,王庆晓,古卫鹏.“羊D1”油气勘探井井控装置的连接设计[J].钻探工程,2016,43(12):63-67.
- [10] 杨芳,曹凡,刘振新,等.川西甲基卡锂矿3000 m科学深钻高效钻进措施分析[J].钻探工程,2025,52(1):48-54.
- [11] 罗龙,何军,廖麟祥,等.西藏高海拔工作区复杂地层岩心钻探施工难点与对策[J].钻探工程,2026,53(1):118-125.
- [12] 时志兴.洛宁程家沟-沙沟银多金属矿中深斜孔钻探技术[J].钻探工程,2013,40(9):9-13.
- [13] 童强,杨丕祥,吴博,等.贞丰烂泥沟金矿井下钻探施工工艺探讨[J].钻探工程,2021,48(9):93-99.
- [14] 陈师逊,翟育峰,王鲁朝,等.西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J].钻探工程,2012,39(11):1-3,9.
- [15] 刘治,江国会,姜春晓,等.基于4M1E分析法的地勘行业安全生产管理探讨[J].钻探工程,2024,51(S1):422-429.
- [16] 薛倩冰,刘凡柏,张金昌,等.特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范[J].钻探工程,2023,50(2):8-16.

(编辑 王文)