

千米级弱胶结涌砂地层小口径钻探技术研究与应用

黄 杨, 孔卫开, 段 毅, 蒋清燕, 林俊宇, 钟伦法,
向文斌, 成 周, 夏 东, 王梓宇

(四川华锋钻探工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要:针对国内小口径固体矿产岩心钻探长期存在的千米级松散地层条件下施工难以开展的技术瓶颈,以青海某矿区 YZK01 钻孔为工程实例,通过产学研联合攻关,形成了一套完整的小口径绳索取心钻探施工技术体系。该孔终孔深度 1120 m,全孔均为弱胶结泥砂层且伴随涌水涌砂现象,创新性地提出了“泥浆回灌+分步加重”的精准控压泥浆工艺思路,通过分层差异化设计和动态调控,将泥浆密度控制精度提高至 0.02 g/cm^3 ,泥浆胶体稳定率由原来的 65% 提升至 98% 以上;自主研发了负压抽吸清砂钻具总成,利用单向阀在打捞时形成瞬时负压,有效清除孔底细颗粒岩粉(0.75 mm 以下),相比传统干抓清渣方式效率提高 3 倍以上;同时建立了“低速、低压、小进尺”的精细化钻进参数体系,钻压、转速和回次进尺分别控制在常规值的 50%、60% 和 30% 左右。现场应用结果表明,采用这套技术后,日均进尺从最初的 3.2 m 提高到 24.25 m,提高了约 658%,钻孔垂直度和岩心采取率等关键指标全部满足规范要求。查新报告显示,该研究成果填补了国内千米级弱胶结涌砂地层小口径钻探技术空白,对西部复杂覆盖区深部找矿具有重要的工程应用价值。

关键词:千米级弱胶结地层;涌砂地层;小口径钻探;精准控压泥浆;负压清砂;精细化钻进

中图分类号:P634.5 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0236-05

Research and application of small-diameter drilling technology for kilometer-scale weakly cemented sand-bursting strata

HUANG Yang, KONG Weikai, DUAN Yi, JIANG Qingyan, LIN Junyu, ZHONG Lunfa,
XIANG Wenbin, CHENG Zhou, XIA Dong, WANG Ziyu

(Sichuan Huafeng Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China)

Abstract: Aiming at the long-term technical bottleneck of difficult construction of small-diameter core drilling for solid mineral resources in kilometer-scale loose strata in China, this study takes the YZK01 borehole in a mining area of Qinghai Province as the engineering example. Through industry-university-research collaborative study, a complete set of small-diameter wireline coring drilling construction technology system is established. The borehole reaches a final depth of 1120 m, and the entire hole section consists of weakly cemented mud-sand strata with continuous water and sand bursting phenomena. An innovative precise pressure-controlled drilling fluid technology of "drilling fluid recharge + stepwise weighting" is proposed. Through differentiated layered design and dynamic regulation, the control accuracy of drilling fluid density is improved to 0.02 g/cm^3 , and the drilling fluid colloidal stability rate is increased from 65% to more than 98%. A self-developed negative pressure sand cleaning drilling tool assembly is adopted, which forms instantaneous negative pressure through a one-way valve during fishing operations to effectively remove fine-grained rock powder (less than 0.75 mm) at the bottom hole, with the cleaning efficiency more than three times higher than that of the traditional dry grabbing deslagging method. Meanwhile, a refined drilling parameter system characterized by "low speed, low pressure and small footage" is established, in which the weight on bit, rotational speed and run footage

收稿日期:2026-06-29; 修回日期:2026-09-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.028

第一作者:黄杨,男,汉族,1988年生,高级工程师,勘查技术与工程专业,主要从事钻探工艺与钻孔冲洗液工艺研究与现场应用的工作,四川省成都市青羊区青羊工业总部基地G区8C,493150023@qq.com。

引用格式:黄杨,孔卫开,段毅,等.千米级弱胶结涌砂地层小口径钻探技术研究与应用[J].钻探工程,2026,53(S1):236-240.

HUANG Yang, KONG Weikai, DUAN Yi, et al. Research and application of small-diameter drilling technology for kilometer-scale weakly cemented sand-bursting strata[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1):236-240.

are controlled at approximately 50%, 60% and 30% of the conventional values, respectively. Field application results show that the average daily drilling footage is increased from the initial 3.2 m to 24.25 m, increased by about 658%. All key indicators including borehole verticality and core recovery rate meet the specification requirements. The novelty search report verifies that the research results fill the domestic technical gap of small-diameter drilling in kilometer-scale weakly cemented sand-bursting strata, and possess important engineering application value for deep mineral exploration in complex overburden areas of western China.

Key words: kilometer-scale weakly cemented strata; sand-bursting strata; small-diameter drilling; precise pressure-controlled drilling fluid; negative pressure sand cleaning; refined drilling

0 引言

随着新一轮找矿突破战略行动的持续推进,我国矿产勘查工作重心逐渐向西部复杂覆盖区和深部隐伏矿转移^[1-3]。巨厚的弱胶结松散沉积层,给钻探施工带来了极大挑战,孔壁失稳、涌水涌砂、清渣困难等问题频发,在很大程度上制约了深部找矿工作的顺利开展^[4]。

从目前公开的文献和工程案例来看,国内小口径固体矿产岩心钻探领域,在千米级的松散地层中开展小口径岩心钻探施工难度极大^[5],甚至被一些同行视为技术禁区。深度超过千米的施工案例尚未见公开报道^[6-7]。石油行业虽然有大口径钻井的成熟经验,但其技术路线、取心质量标准和护壁要求与小口径绳索取心钻探存在本质区别^[8-9]。

青海某勘查项目中YZK01钻孔设计深度1120 m,施工过程中发现全孔都没有揭露到完整的坚硬基岩。该钻孔同时面临着千米级弱胶结地层、地下暗河涌水涌砂和高海拔极端环境这三重困难的叠加影响,施工难度在国内小口径钻探领域罕见。

为了攻克这一技术难题,四川华锋钻探工程有限责任公司联合成都理工大学组建了专项攻关团队,经过半年多的技术方案重构和现场试验,最终形成了一套适用于千米级弱胶结涌砂地层的小口径绳索取心钻探成套技术。

1 工程条件

1.1 工程概况

项目工区位于青海省海西蒙古族藏族自治州,海拔3200~3800 m,常年低温多风,冬季最低气温可达-32℃,自然条件相当恶劣^[10]。

YZK01钻孔是该矿区的重点勘查钻孔,设计孔深1120 m,采用绳索取心工艺施工。该孔于2025年9月正式开孔,于2026年6月顺利终孔,终孔深度1120 m。

1.2 地层岩性特征

根据钻探揭露情况,YZK01钻孔全孔1120 m范围内均未见到完整的坚硬基岩,整个孔段都是泥砂层,岩体胶结程度很差,流动性很强,业内有人形象地称之为“地下流砂层”。按照岩性组合特征可分为:0~926 m以泥质粉砂岩为主,夹薄层砂层;926~1000 m以中粗砂层为主,胶结性极差;1000~1120 m为砂砾石与泥质互层,结构松散。

1.3 水文地质条件

工区的地下暗河和层间水比较发育。含水层水位变化幅度大,各含水层之间的水力联系也比较复杂。孔底与地下暗河连通,高压涌水会裹挟着大量的流砂和岩粉往上返,最高的时候涌入套管达40 m深,这些泥砂凝结之后会形成坚硬的“砂塞”,处理起来十分困难。

2 施工难点分析

该地层施工难点主要体现在三个方面:

(1)护壁防塌问题。弱胶结地层的孔壁自稳能力本来就差,常规的泥浆护壁效果不理想,孔壁垮塌十分常见。且整个孔都没有坚硬基岩作为支点,套管下进去固定不住,想要实现千米深孔孔壁的长期稳定,难度很大^[11-12]。

(2)地下暗河涌水量大、水压高,如何在持续涌水的条件下实现快速有效的稳定孔壁,是第二个难点。

(3)清渣携砂问题。千米深孔的砂层段沉砂量很大,传统的正循环清渣方式清不干净,孔底积砂多了容易引发卡钻、埋钻等事故。如何高效地把孔底的细颗粒岩粉清理出来,保障深孔钻进安全,也是个棘手的问题^[13]。

2025年刚开始施工的时候,采用常规的钻探工艺,实践证明未能有效应对上述难题主要表现在:(1)套管护壁因为没有坚硬基岩做支撑,多层套管

下进去根本固定不住,跟着地层一起往下沉,非常危险。(2)水泥封堵,在涌水涌砂的条件下,水泥浆打进去还没来得及凝固就被水流稀释冲走了,前后试了多次水泥封堵,效果都不理想。单一泥浆配方也不行,防塌的不防漏,防漏的不携砂,携砂的又抗不了盐污染,始终找不到一个能同时满足多种需求的配方。(3)干抓清渣的方式效率很低,而且清渣不彻底,反复提钻还容易扰动孔壁,引发二次垮塌。

常规钻进参数在这种地层里也不适用,钻压大、转速快对孔壁的扰动大,孔壁更容易失稳,形成“效率与稳定性负相关”的恶性循环。

3 核心施工技术

3.1 总体技术思路

针对常规工艺的局限性,重新梳理思路,针对以上的极端复杂复合工况条件,确立了“先稳孔、再清渣、后推进”的核心施工原则。

整个技术体系的架构:以精准控压泥浆技术为核心,主要解决孔壁稳定和涌水涌砂的问题;以负压抽吸清砂技术为重要支撑,解决深孔清渣和沉砂堆积的问题^[14];以量化钻探参数为基础,最大限度地减少对地层的扰动;辅以加密测斜纠偏和标准化作业流程,形成一套完整的施工技术体系。

3.2 精准控压泥浆工艺

3.2.1 基本原理

根据不同深度段的地层特点,设计差异化的泥浆体系,再配合“泥浆回灌+分步加重”的动态调控机制,实现泥浆性能的精准稳定控制。核心逻辑是:用精准的液柱压力平衡地层的孔隙压力;用动态的泥浆循环抵消清水稀释带来的影响;用科学的加料顺序保障泥浆胶体的稳定性。

需要说明的是,本研究提出的“精准控压”与石油钻井领域的“精细控压钻井(Managed Pressure Drilling, MPD)”存在本质区别。石油钻井精细控压依赖井口回压控制、自动节流管汇和连续循环系统等专用装备,通过实时调节井口回压实现井底压力精确控制;本研究的“精准控压”则是在小口径绳索取心钻探装备条件下,通过分层段差异化泥浆配方设计、“泥浆回灌+分步加重”动态调控和“半小时一测”参数监测,将泥浆密度控制精度稳定在±0.02 g/cm³,以液柱压力精准平衡地层孔隙压力,无需专用控压装备,更适用于固体矿产勘查小口径

钻探场景。

3.2.2 分层段泥浆体系设计

根据不同孔深段的地层特征,设计了四种不同的泥浆体系,实现了“一层一配方、一段一参数”,具体的设计参数见表1。其中基础体系主要以土粉与活化重晶石为主,高触变体系加入了纤维素等高分子材料,在其基础上增加防塌护壁材料形成防塌体系,通过高目数的碳酸钙等材料的加入提高了体系的复合堵漏效果。

表1 分层段泥浆体系设计参数

孔段/m	泥浆体系类型	密度/(g·cm ⁻³)	核心功能
0~926	基础护壁体系	1.15~1.20	抑制泥页岩水化膨胀,保障浅层井壁稳定
926~1000	高触变护壁体系	1.20~1.25	快速形成致密弹性护壁膜,阻隔地层水侵入
1000~1120	加重防塌体系	1.23~1.32	精准平衡地层孔隙压力,防止井壁垮塌与漏失
暗河漏失段	复合堵漏体系	1.30~1.35	高强度桥接封堵,快速止住暗河通道漏失

3.2.3 泥浆回灌+分步加重工艺

泥浆配制加料严格按照“土粉→纯碱→加重剂→聚合物”这个顺序来加,才能构建起致密的网架结构,保证泥浆体系始终均匀稳定。

常规添加重晶石都是一次性倒入很多,易导致加重材料分散不均匀,容易分层沉降,泥浆性能波动也大。本研究采用“少量多次、循环回灌、科学排序”的分步加重方式,每批加重剂加入后循环均匀并检测参数,测完参数没问题再加下一批,以便保证加重材料均匀分散,泥浆性能也更稳定。

循环回灌是把从孔里返出来、经过净化处理的泥浆直接补回泥浆罐里,而不是直接加清水。这样能最大程度地减少新浆对原有泥浆体系的稀释和冲击,维持泥浆性能的连续性和稳定性^[15]。通过这套工艺,泥浆密度的调控精度稳定在±0.02 g/cm³,即使持续有清水混入,泥浆的各项指标也不会出现异常波动;胶体稳定率能保持在98%以上。

3.3 负压抽吸清砂技术

3.3.1 技术原理

对于弱胶结地层,孔内是否干净会直接影响孔

内循环压力与孔壁稳定,所以对孔内的岩粉岩屑清除至关重要。传统的干抓清渣方式在浅孔有一定效果,但千米深孔效率极低。自主研发了一套专用的负压抽吸钻具总成,利用负压产生的吸附力直接作用于孔底,把沉砂和岩粉都吸上来,从机理上解决了传统方法清渣不彻底的问题^[16]。与传统干抓清渣相比,其本质区别在于:干抓是靠机械抓取,只能抓得住比较大的颗粒,无法抓取细颗粒岩粉;而负压抽吸是靠流体的吸附作用,可清除0.75 mm以下细颗粒岩粉,清渣效果显著提升^[17]。

负压抽吸钻具总成如图1所示,主要由PQ悬挂环、锥套、弹卡片、销、PQ钻杆、弹簧、回收管、堵头及底部单向阀组件(钢球、底阀、挡销)构成。钻具总长约3.5 m(PQ内管1.5 m+PVC管1.5 m+阀组组件),外径适配PQ/HQ口径钻具。其工作原理为:正常钻进时单向阀开启,泥浆循环通道畅通;打捞时内管上行,单向阀在弹簧作用下关闭,内管与孔底之间形成密闭腔室,随内管继续上提产生瞬时负压,将孔底沉砂和岩粉吸入回收管。该钻具已申请实用新型专利。

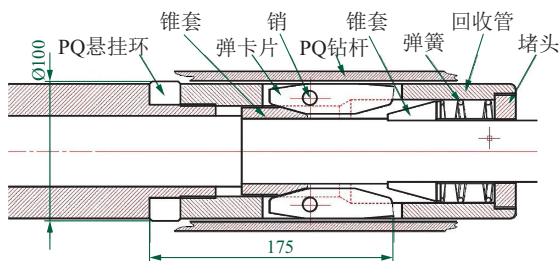


图1 负压抽吸清砂钻具总成结构示意图

3.3.2 技术特点

这套负压抽吸清砂技术有几个明显的优势:

(1)清渣效率高,与传统的干抓或者正循环清渣相比,通过孔内含砂率试验测定,达到相同含砂率的情况下,使用负压抽吸清砂技术效率能提高3倍以上,大大节省了辅助作业的时间。

(2)不用反复提钻,清渣过程连续,对施工进度的影响比较小。

(3)清渣比较彻底,孔底的细颗粒岩粉能清理干净,减少了卡钻、埋钻的风险^[18]。

(4)对孔壁的保护作用好,负压抽吸不像正循环那样会冲刷孔壁,所以不容易引发垮塌。

3.4 精细化钻进参数体系

针对地层脆弱特性,摒弃了常规的快速钻进思路,在钻进参数上做减法,用参数的“减法”来换取成孔质量的“加法”。对关键的施工参数实行了严格的量化管控,具体的参数对比见表2。

表2 精细化钻进参数与常规参数对比

参数类型	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	回次进尺/m
常规值	6~10	80~120	3~5
本项目控制值	3~5	40~60	≤1.5
控制比例	50%	60%	30%
控制目的	降低钻具对孔底的冲击载荷,保护孔底结构	减少钻具旋转产生的剪切力,降低孔壁摩擦扰动	分段轻压慢进,实现对孔壁的“微扰动”作业

钻压控制在3~5 kN,大概是常规值的一半,这样能降低钻具对孔底的冲击载荷;转速控制在40~60 r/min,是常规值的50%左右,减少钻具旋转对孔壁的剪切和摩擦;回次进尺控制在1.5 m以内,只有常规值的30%,通过分段轻压慢进,把对孔壁的扰动降到最低。

4 现场应用效果

4.1 施工历程

项目的施工过程大致可以分成两个阶段,是一个典型的“实践—认识—再实践—再认识”的技术迭代过程。

第一阶段是2025年,属于探索和受挫的阶段。当时投入了LF230型钻机(该钻机2024年在纳木措创下了国内高原湖泊最深纪录,动力足够)进场施工,钻到590 m左右的时候,遇到了大规模的孔壁垮塌和涌水涌砂,之后连续两个月都没有有效进尺,孔深不增反减。

经过全面复盘和深刻反思,意识到:在千米级弱胶结的复杂地层里,常规的钻探技术体系已经全面失效,必须从根本上重构整个施工技术体系。为了保证工程质量、避免钻孔报废造成更大的损失,决定停工,启动技术重构和产学研联合攻关。

第二阶段是2026年,属于攻坚和突破的阶段。联合成都理工大学的专家团队组建专项攻关专班,采用全新的“精准控压泥浆+负压抽吸清砂+精细化钻进”成套工艺,施工效率显著提升,到6月10日顺利终孔。

4.2 施工进度对比

2026年复工之后,采用新技术体系的施工效率有了跨越式提升,对比数据见表3。

表3 施工进度粗略对比

年份(工艺)	日均进尺/m	月均进尺/m	孔内事故率	有效作业时间占比/%
2025年(常规工艺)	3.2	约96	频发(每月2~3次重大事故)	约40
2026年(新技术体系)	24.25	约728	零重大事故	约85
提升幅度	+658%	+658%	-100%	+112.5%

日均进尺从原来的3.2 m提高到了24.25 m,提升幅度达658%;月均进尺也从约96 m提高到了728 m左右。值得关注的是孔内事故率,原来每个月都要出两三次重大事故,复工之后一直到终孔,一次重大事故都没出过。有效作业时间的占比也从40%左右提高到了85%以上。

上述提升除三大核心技术外,还得益于“每25 m加密测斜与孔底导向纠偏、每钻进3 m彻底清孔”的标准化作业流程以及设备优化配置等配套措施的协同作用。钻孔质量关键指标见表4。

表4 钻孔质量关键指标

对比项	钻孔垂直度/ [(°)·(100m) ⁻¹]	岩心采取率/%	孔深误差/%	终孔直径/mm
规范要求	≤3	≥75	≤1	≥96
实测值	≤2	≥85	0.5	96.5
符合性	符合	符合	符合	符合

5 结论

通过YZK01钻孔的工程实践,可以得出以下几点结论:

(1)千米级弱胶结涌砂地层的小口径绳索取心钻探在技术上完全可行。该项目成功完成了1120 m全孔无完整基岩的钻探施工,证明了“精准控压泥浆+负压抽吸清砂+精细化钻进”成套技术体系的有效性和可靠性。

(2)这套技术在国内具有首创性。经过国内文献和工程案例的检索,这个项目是国内小口径固体

矿产岩心钻探领域第一个千米级全孔无完整基岩的施工工程,填补了国内这个领域的技术空白,打破了行业内长期存在的固有认知,整体技术水平达到了国内领先。

(3)从经济角度看也是合理的。虽然单米成本比常规地层要高一些,但是考虑到工期大幅缩短、没有重大事故、避免了钻孔报废这些综合效益,技术经济指标还是合理的,推广应用的价值很大。

(4)应用范围很广。这套成套技术可以推广应用到西部巨厚沉积区、盐湖覆盖区、深厚覆盖层等各种复杂地质勘查工程中,应用前景很广阔。

参考文献:

[1] 许启云,牛美峰,方意平,等.绳索取心钻进技术在水平钻孔中应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):34-36.

[2] 常江华,凡东,刘庆修,等.水平孔绳索取心钻进技术在金矿坑道勘探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):40-43.

[3] 王良书,施央申.油气盆地地热研究[M].南京:南京大学出版社,1989.

[4] 朱福建.复杂地层深孔钻探泥浆护壁技术分析[J].中国高科技,2019(8):12-14.

[5] 林俊宇,黄杨,向文斌.抑制性封堵泥浆在煤系地层钻探施工中的应用[J].西部探矿工程,2025,37(6):27-29.

[6] 林俊宇,黄杨,孔卫开,等.西藏纳木错湖泊钻探项目施工概述[J].四川地质学报,2025,45(S1):183-186.

[7] 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.

[8] 田志超,于森,翟育峰,等.甘肃张掖三岭湾ZC1井超厚沉积层岩心钻探施工技术[J].钻探工程,2025,52(1):54-61..

[9] 李增梁,陈永平,穆元红,等.甘肃杨岭铁矿区复杂地层岩心钻探技术[J].钻探工程,2024,51(S1):287-291.

[10] 张席芝,杨亚平,寇永渊,等.金川矿区复杂地层钻探孔壁失稳机理与对策研究[J].钻探工程,2023,50(6):69-76.

[11] 屠厚泽,高森.钻探工程学[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.

[12] 青海省有色第二地质勘查院.青海某外围铬多金属矿勘查设计[R].西宁:青海省有色第二地质勘查院,2024.

[13] 四川华锋钻探工程有限责任公司.某项目施工总结报告[R].成都:四川华锋钻探工程有限责任公司,2026.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程岩体分级标准:GB/T50218—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

[15] 国土资源部.地质岩心钻探规程:DZ/T0227—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.

[16] 王胜,潘安邦,向杰,等.基于响应面试验的深厚覆盖层植物胶成膜冲洗液体系研究[J].钻探工程,2026,53(5):124-133.

[17] 雒焕祯,张席芝,张永昇,等.金川矿区复杂地层钻探冲洗液配方研究与应用[J].钻探工程,2026,53(1):126-134.

[18] 熊正强,李晓东,付帆.环保多功能一袋化冲洗液技术[J].钻探工程,2026,53(1):157-158.

(编辑 王文)