基于多因素优化的花岗岩型铀矿绳索取心钻头寿命提升技术

王 康，曾令*，侯江楠，谭湘兵，余伟，邵永浩，唐中恩
（核工业二九〇研究所，广东 韶关 512029）

摘要：针对花岗岩型铀矿区绳索取心钻进中金刚石钻头磨耗快、早期失效多、换钻频繁等问题，结合诸广南矿集区12个钻孔施工资料及岩样可钻性、压入硬度、压缩强度、耐磨度和化学成分测试结果，对钻头磨损形态、孔段岩性、钻进参数、冲洗液状态和现场操作记录进行综合分析。通过岩性分段选型、钻压-转速-泵量参数窗口控制、冲洗液冷却携粉能力优化、新钻头初磨、破碎带低扰动钻进等技术措施，形成适用于花岗岩地层的钻头寿命延长技术。应用结果显示，平均机械钻速由2.02 m/h提高至2.61 m/h，平均单只钻头进尺由91.2 m提高至109.2 m，非正常报废率由32.7%降至14.3%。

关键词：花岗岩型铀矿区；绳索取心；金刚石钻头；钻头寿命；钻进参数
中图分类号：P634.4 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9686(2026)S1-0168-09

Bit life enhancement technology for wireline coring in granite-hosted uranium deposits based on multi-factor optimization

WANG Kang, ZENG Ling*, HOU Jiangnan, TAN Xiangbing, YU Wei, SHAO Yonghao, TANG Zhong'en
(*Research Institute No.*290, *CNNC*, *Shaoguan Guangdong* 512029, *China*)

Abstract: To address the problems of rapid diamond bit wear, frequent premature failure, and excessive bit replacements during wire-line coring drilling in granite-hosted uranium deposits, a comprehensive analysis was conducted using construction data from 12 boreholes in the Zhuguangnan ore concentration area together with laboratory measurements of rock drillability, indentation hardness, compressive strength, abrasion resistance, and chemical composition. The analysis covered bit wear morphology, lithology of intersected intervals, drilling parameters, flushing fluid conditions, and on-site operational records. A set of technical measures was developed, including lithology-adapted bit selection, controlled windows of weight-on-bit, rotary speed, and pump rate, cooling and chip-carrying capacity of the flushing fluid enhancement, initial run-in treatment for new bits, and low-disturbance drilling through fractured zones. Field application results show that the average rate of penetration increased from 2.02 m/h to 2.61 m/h, the average footage per bit rose from 91.2 m to 109.2 m, and the abnormal bit failure rate decreased from 32.7% to 14.3%.

Key words: granite-hosted uranium ore district; wire-line coring; diamond bit; bit service life; drilling parameters

0 引言

地质钻探是获取地下实物地质资料的唯一手段，钻头作为核心钻具，其性能直接影响钻探效率和成孔质量。钻探过程中，钻头与地层直接接触，

收稿日期：2026-07-08；**修回日期**：2026-09-15 **DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.S1.019
基金项目：中国核工业地质局项目（编号：202436）

第一作者：王康，男，汉族，1994年生，工程师，探矿工程专业，硕士，现从事钻探工程技术管理方面工作，广东省韶关市武江区工业园区广前路，605755529@qq.com。
通信作者：曾令，男，汉族，1989年生，高级工程师，主要从事地质钻探生产管理与技术研究工作，广东省韶关市武江区工业园区广前路，305399005@qq.com。。

引用格式：王康，曾令，侯江楠，等.基于多因素优化的花岗岩型铀矿绳索取心钻头寿命提升技术[J].钻探工程，2026，53(S1)：168-176.
WANG Kang, ZENG Ling, HOU Jiangnan, et al. Bit life enhancement technology for wireline coring in granite-hosted uranium deposits based on multi-factor optimization[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 168-176.

极易磨损。取心钻头类型主要包括聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact)钻头,简称PDC钻头、表镶金刚石钻头、孕镶金刚石钻头[1]。目前,绳索取心技术已在小口径岩心钻探中广泛使用,但在花岗岩型铀矿区钻孔中,由于花岗岩硬度高、抗压强度大、研磨性强,对钻头胎体的磨损大,钻头寿命短,导致提下钻频繁,增加了人力成本和时间成本。因此,如何针对花岗岩型铀矿区岩石力学特征和绳索取心钻进工况,延长钻头使用寿命已成为业内的关键问题。

近年来,铀矿地质钻探逐步向深部化、绳索取心化、装备轻便化和绿色施工方向发展,提升台月效率的关键已由单一提高机械钻速转向钻机能力、钻具可靠性、冲洗液性能、孔内事故控制和组织管理等多因素协同[2]。针对铀矿复杂地层,已有研究分别从冲洗液护壁携粉、施工工艺与设备适配以及金刚石钻头结构与地层匹配等方面开展优化,表明合理的冲洗液体系和适岩钻头是改善钻进效率与钻头寿命的重要路径[3-5]。然而,花岗岩型铀矿区仍具有硬度高、石英质成分多、局部硅化强、构造破碎与漏失并存等特点,单一更换钻头型号或单项调整钻压难以稳定控制早期失效。尤其是钻头胎体自锐、孔底温升与排粉、破碎带冲击载荷之间存在耦合关系,仍需建立“岩性-钻头-参数-冲洗液-操作”联合控制方法。因此,本文基于诸广南矿集区12个钻孔施工记录,对失效形态和关键工况进行归纳,并开展多因素协同优化。

1　施工区域及钻孔条件

矿区位于花岗岩型铀矿勘查区,钻探目的层为深部构造蚀变型铀矿化带。选取工区12个钻孔进行统计,设计孔深400～880 m,终孔工作量560.48～880.63 m,累计终孔工作量8565.67 m。终孔口径以N规格为主,局部上部孔段采用H规格。钻进设备以XY-44A型岩心钻机为主,配套BW-250型泥浆泵、N规格绳索取心钻具和孕镶金刚石钻头,具体施工数据如表1所示。

为定量表征工区花岗岩的钻进难度与磨损特征,在代表性岩样上开展可钻性、耐磨度与压缩强度、压入硬度及化学成分测试。测试岩样覆盖细粒、中粒、粗粒黑云母花岗岩以及中细粒、中粗粒二云母花岗岩,可从钻进阻力、局部硬度、整体强度和主要化学组成等方面对现场岩性进行补充表征。

表1　试验钻孔工程地质与钻进条件统计

钻孔编号	机台编号	设计孔深/m	终孔工作量/m	施工天数/d	台月效率/(m·台月$^{-1}$)
ZK207-4	290-1	740	880.63	34	777.03
ZK8-10	290-3	880	830.34	29	858.97
ZK24-6	290-3	790	820.26	25	984.31
ZK14-11	290-2	790	790.53	32	741.12
ZK203-5	290-1	720	720.61	30	720.61
ZK67-1	290-3	600	700.13	20	1050.20
ZK75-1	290-2	500	700.11	26	807.82
ZK69-1	290-1	600	670.61	21	958.01
ZK77-6	290-2	660	660.53	22	900.72
ZK22-10	290-2	600	620.52	18	1034.20
ZK0-5	290-3	510	610.92	18	1018.20
ZK0-6	290-2	400	560.48	16	1050.90

可钻性试验结果见表2,6个样品钻孔深度均为2.4 mm,可钻性级别为8.4～9.1。其中,细—中细粒花岗岩为8.8～9.1,中粗粒花岗岩为8.4～8.8,两类岩样总体均处于8级以上。

表2　可钻性级别试验结果

岩石性质	编号	钻孔时间/s	钻孔深度/mm	可钻性级别
细粒—中细粒花岗岩	样品1	544	2.4	9.1
	样品2	521	2.4	9.0
	样品3	440	2.4	8.8
中粗粒花岗岩	样品4	398	2.4	8.6
	样品5	450	2.4	8.8
	样品6	332	2.4	8.4

为进一步分析岩石对钻头胎体磨耗和承载状态的影响,对代表性样品进行了耐磨度和压缩强度测试,结果见表3。表3显示,4组岩石样品耐磨度平均值为32～40 cm^{-3},压缩强度为101～112 MPa。中细粒二云母花岗岩压缩强度最高,为112 MPa;两组中粗粒黑云母花岗岩的耐磨度平均值分别为36和40 cm^{-3}。该组结果反映出工区花岗岩在较高整体强度条件下仍存在一定岩性差异。

压入硬度测试结果见表4。表4中,完整细粒、中粒和粗粒黑云母花岗岩样品的压入硬度为4280.7～4624.3 MPa,可钻性级别为8～9;裂隙发育

表3 岩石样品耐磨度、压缩强度统计

样品性质	耐磨度平均值/cm^{-3}	压缩强度/MPa
中粗粒黑云母花岗岩	36	105
中细粒二云母花岗岩	32	112
中粗粒二云母花岗岩	37	107
中粗粒黑云母花岗岩	40	101

表4 压入硬度测试结果

岩心编号	岩性	压入硬度/MPa	可钻性级别	备注
1	细粒黑云母花岗岩	4624.3	9	
2	细粒黑云母花岗岩	4280.7	8～9	
3	中粒黑云母花岗岩	2658.1	7	裂隙发育
4	中粒黑云母花岗岩	4333.8	9	
5	粗粒黑云母花岗岩	4281.7	8～9	
6	粗粒黑云母花岗岩	1720.5	6	裂隙发育

的3号和6号样品压入硬度分别降至2658.1 MPa和1720.5 MPa，可钻性级别分别为7和6。由此可见，岩石完整性对局部抗压入能力和钻进响应影响明显，裂隙发育段更易出现切削载荷波动与碎块冲击。

为分析岩石主要化学组成，进一步开展了样品成分（质量分数）测试，结果见表5。表5显示，4组花岗岩样品SiO_2含量为67.89%～73.87%，Al_2O_3为12.40%～13.86%，K_2O为4.45%～6.31%，Na_2O为2.34%～3.84%。

结合表2～4的可钻性、强度和压入硬度结果，工区钻遇花岗岩总体表现为强度高、硬度高、硅质组分较高，而裂隙发育后局部力学响应明显弱化。完整硬岩段的主要问题是持续切削下的端面钝化和胎体磨耗，破碎带则更易出现冲击、掉块、排粉不畅和受力突变，为后续钻头失效分析及分段选型提供了定量依据。

表5 岩石样品成分分析统计 单位：%

样品性质	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	Na_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO	Fe_2O_3	H_2O	总量
中粗粒黑云母花岗岩	0.72	13.23	71.33	0.15	5.3	2.88	1.98	0.38	0.08	2.1	0.42	1.21	99.78
中细粒二云母花岗岩	0.34	12.4	73.87	0.12	4.45	2.34	2.43	0.34	0.06	2.31	0.32	0.97	99.95
中粗粒二云母花岗岩	0.24	13.34	69.76	0.33	6.31	3.84	1.76	0.68	0.18	1.11	0.23	1.53	99.31
中粗粒黑云母花岗岩	1.42	13.86	67.89	0.23	6.12	2.58	1.88	0.56	0.1	2.23	0.54	1.44	98.85

2 钻头失效特征及原因分析

2.1 钻头失效类型

对原施工阶段出孔钻头进行外观检查和使用记录核对，钻头失效类型主要包括胎体过快磨损、金刚石钝化、金刚石异常脱落、内外径保径磨损、水口堵塞烧蚀和冠部崩裂[6]。结合表2～5的岩石测试结果，磨耗型失效与岩石硬度、强度、硅质组分及冲洗液含砂量、胎体匹配有关；冲击型失效与孔底残心、破碎岩块、钻压突变和钻具稳定性相关[7]。两类失效可在同一只钻头上连续出现，部分钻头进入破碎带前仍处于正常磨损状态，穿越破碎带后出现冠部局部掉块，随后在完整岩段中快速扩大为偏磨和保径失效。

对表6中具有完整出孔照片和磨损描述的11只典型钻头按主导形态统计：正常/均匀磨耗3只（27.3%），拉槽或内外缘偏磨7只（63.6%），水口/胎体热损伤1只（9.1%）；在8只异常样本中，拉槽/偏磨占87.5%。该结果说明排粉不畅与局部受力异常是典型早期损伤的主要表现，统计结果见图1。

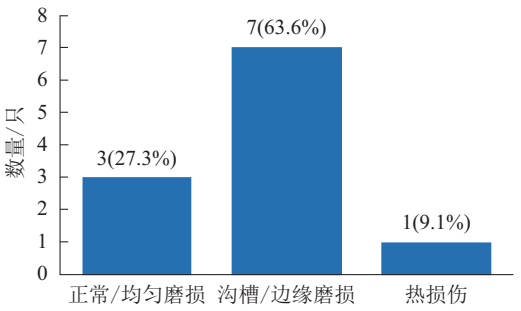


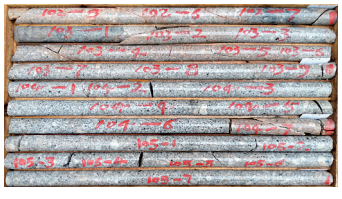
图1 典型出孔钻头主导形态统计

2.2 失效原因分析

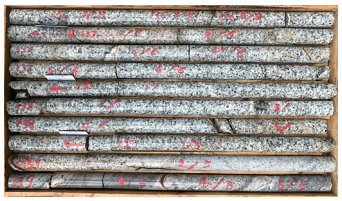
从表6中钻头出孔磨损情况看，钻头磨损并非单一由岩石硬度造成，而是岩性条件、冲洗液排粉能力、泵量控制和孔底受力状态共同作用的结果。表2～5进一步表明，工区岩样可钻性级别达到8.4～9.1，压缩强度为101～112 MPa，完整黑云母花岗岩压入硬度多在4280～4620 MPa，SiO_2含量为67.89%～73.87%，说明钻头长期处于较高切削负荷和磨耗环境。1-1、2-3和2-8表现为唇面形状较

好、磨损平整或正常磨损,说明在泵量充足、孔底清洁、钻压和转速匹配的条件下,钻头能够形成相对稳定的切削面,金刚石出刃和胎体消耗较为协调,属于较理想的正常磨耗状态[8]。

表6　原施工阶段钻头失效类型统计

序号	钻头照片	钻取岩心	磨损情况
1-1			未完全磨损,唇面磨损形状较好
1-2			内缘拉槽,泵量太小,岩屑堵在内缘,持续磨损
1-3			唇面内锥形磨损
1-4			中间拉槽严重,平均深度6.1 mm
2-2			中间拉槽最深2.88 mm,最浅2.38 mm,平均2.66 mm,无金刚石,拉槽后导致堵水
2-3			唇面磨损平整
2-4			中间拉槽严重,平均深度7.9 mm,岩屑堵在拉槽内,随着钻头在沟槽内滚动磨损钢体

续表

序号	钻头照片	钻取岩心	磨损情况
2-5			缺水引起的胎体与水口微烧熔结
2-6			外缘轻微拉槽1.38 mm,堵水
2-7			内缘磨损严重,泵量过低,冲渣能力弱
2-8			未磨损完,唇面形状较好

异常磨损主要集中在拉槽、堵水、内外缘偏磨和烧蚀等方面。1-2、2-7均出现内缘磨损严重或内缘拉槽,表明泵量偏低、冲渣能力不足时,岩屑不能及时排出,容易滞留在钻头内缘和孔底环空处,形成反复研磨,导致内缘持续磨损。2-2、1-4和2-4均出现中间拉槽,其中2-4拉槽平均深度达7.9 mm,且岩屑堵塞在拉槽内,说明孔底岩粉堆积后会改变钻头唇面受力状态,使钻头局部区域长期承受集中磨蚀,进一步发展为沟槽磨损,甚至磨损钢体[9]。2-6外缘轻微拉槽并伴随堵水,反映出过水通道不畅会造成局部冷却不足和边缘偏磨。

此外,2-5出现胎体与水口微烧熔结,说明缺水或循环不稳定会使钻头冷却能力下降,孔底温度升高,胎体局部发生热损伤。1-3的唇面内锥形磨损则可能与钻压分布不均、钻具偏摆或孔底接触状态异常有关[10]。总体来看,钻头异常磨损的主因是泵量不足、排粉不畅、岩屑堵塞水口及拉槽、孔底受力不均和冷却条件不足。因此,现场应重点稳定泵量,增强冲洗液携粉能力,及时清孔扫孔,并根据出孔磨损形态调整钻压、转速和回次进尺,以减少拉槽、堵水和烧蚀类早期失效。

3 钻头寿命延长技术措施

3.1 岩性分段选型

表2~表5显示,工区花岗岩整体可钻性级别和强度较高,完整岩样压入硬度高,而裂隙发育样品局部硬度与可钻性级别明显下降。因此,花岗岩型铀矿区绳索取心钻头选型采用岩性、磨蚀性、完整性和水力条件四项控制。完整硬花岗岩段宜采用出刃能力较好的中硬偏软胎体,避免端面钝化;强磨蚀硅化花岗岩段宜提高胎体耐磨性并加强内外径保径,降低胎体过快消耗;构造破碎带宜采用韧性较好的胎体并适当增大过水断面,提高排粉和通过破碎岩屑的能力[11]。软硬互层段应控制底唇面轮廓平顺、内外径保径连续,降低孔底受力突变对钻头冠部的影响。现场执行时,机台根据地质编录、上一回次岩心形态、返浆岩粉粒度和钻头出孔状态确定下一只钻头的胎体硬度、保径和水口配置[12]。钻头配置确定后,同步确定相应参数窗口,避免同一钻头在不匹配参数下工作。

为将选型原则落实到可检查的钻头结构控制项,表7列出不同岩性条件下的胎体硬度、金刚石参数、水口/过水断面和保径配置。完整硬岩强调自锐与稳定出刃,强磨蚀岩段强调胎体耐磨与保径,构造破碎带侧重胎体韧性和抗冲击,软硬互层及漏失段则优先保持循环稳定和结构过渡平顺。

表7　不同岩性条件下钻头结构与选型控制参数

岩性/工况	胎体控制	金刚石参数	水口/过水断面	保径设计	现场控制说明
完整硬花岗岩	中硬偏软,自锐优先;20～25 HRC	浓度:100%;粒度:40/60目	常规开放式;泵量55～65 L/min	内外径连续保径	防止端面发亮钝化
强磨蚀硅化花岗岩	较高耐磨性;35～40 HRC	浓度:100%;粒度:40/60目	适当增大过水断面;60～70 L/min	加强内外径保径	控制胎体过快消耗并强化排粉
构造破碎带	韧性优先;35～40 HRC	浓度:100%;粒度:40/60目	较大过水断面;50～60 L/min	连续保径、抗冲击	降低冠部崩裂和掉块风险
软硬互层/漏失段	兼顾自锐与韧性;25～30 HRC	浓度:100%;粒度:40/60目	先保证循环;漏失段45～55 L/min	过渡圆顺、保径连续	稳返水后再恢复正常参数

3.2　钻进参数窗口控制

钻进参数控制以钻压、转速、泵量三项为核心。钻压决定金刚石切入深度,转速决定切削频率,泵量决定孔底冷却和携粉能力。三项参数按孔段状态联合控制,如表8所示,参数控制以孔底切削稳定为准则[13]。钻速突然下降且泵压稳定时,多为钻头钝化或岩性变硬,应检查钻压匹配并进行轻度修整开刃。泵压上升且返水含砂量增加时,多为岩粉排出不畅,应提高排粉效率并缩短回次。扭矩波动并伴随钻具跳动时,多为孔底残心或破碎块影响,应停止强压钻进,进行扫孔清孔。

表8　绳索取心钻进参数窗口

工　　况	钻压/kN	转速/(r·min^{-1})	泵量/(L·min^{-1})	回次进尺/m	控　制　要　点
新钻头磨合	4～6	320～420	48～55	0.3～0.5	低压接触孔底,稳定出刃
完整硬花岗岩	8～12	520～680	55～65	2.0～3.0	防止钝化,保持连续切削
强磨蚀硅化花岗岩	7～10	480～600	60～70	1.5～2.5	控制胎体消耗,强化排粉
构造破碎带	4～7	300～450	50～60	0.8～1.5	降低冲击,防止冠部崩裂
漏失孔段	3～6	260～380	45～55	0.5～1.2	先稳循环,再恢复钻进
扫孔清孔	2～4	220～320	60～70		清除残心和沉粉

上述参数窗口依据“单颗金刚石切入-单位时间切削频率-孔底水力清洁”的耦合平衡。钻压提高会增加单颗金刚石的切入深度和接触应力,过低易使端面发亮钝化,过高则会放大金刚石脱落、胎体崩损及破碎岩块冲击;因此完整硬岩可采用较高钻压,而破碎带必须降低钻压。转速提高能够增加单位时间切削次数,但同时增加摩擦生热和钻具动态扰动,完整孔段可在稳定冷却条件下采用较高转速,破碎带和漏失段则降低转速以减小跳动和冲击。泵量决定钻头冷却、岩粉悬浮与环空输运能力,强磨蚀硅化花岗岩产生的硬质岩粉多,需提高排粉能力;漏失孔段若返水尚未恢复,单纯提高泵量不能形成有效孔底循环,故先稳漏失再恢复参数。现场调整应保持三者联动:提高钻压或转速时同步确认泵量、泵压和返水状态;出现泵压升高、扭矩波动或返水含砂量突增时,优先降低机械参数并清孔,而不是继续强压追求瞬时钻速[14]。

3.3　冲洗液冷却携粉控制

冲洗液控制重点为冷却钻头、清洗孔底、携带岩粉和稳定孔壁。花岗岩完整孔段岩粉颗粒硬,岩粉在孔底滞留会形成反磨层。破碎孔段细粉含量高,循环液携粉能力不足时易造成水口堵塞。现场采用低固相冲洗液体系,漏斗黏度控制在18～24 s,含砂量控制在2%以内,pH值控制在8～9。循环槽

和沉淀池每班清理一次，强磨蚀孔段增加除砂频次。为提高细粒岩粉去除效率，现场在循环槽与沉淀池后设置离心除砂装置（见图2），对回流冲洗液进行二级净化。该装置处理能力≮1 m^3/h，转速范围0～3000 r/min（可自动调节），分离粒度5～15 μm，分离效率≮95%，配套功率15 kW，主机重量约300 kg。完整硬岩段保持55～65 L/min泵量，返浆连续且岩粉粒度均匀时进入正常参数。破碎漏失段先处理返水条件，再恢复正常钻进[15]。发现返水量持续减少、泵压异常升高或岩粉浓度突然增大时，立即降低钻压和转速，进行循环观察。漏失段采用细颗粒惰性堵漏材料和低黏度护壁液配合处理，避免在无稳定返水条件下继续钻进。冲洗液管理需综合观察返水连续性、岩粉粒度、泵压波动和孔内漏失情况。水口烧蚀钻头出孔后，必须复核泵量、漏失量和循环液含砂量。试验孔中，循环液含砂量由原施工阶段平均3.6%降至1.7%，水口堵塞烧蚀钻头数量由7只降至2只。



图2 离心机

离心除砂前后的主要指标见表9。循环液平均含砂量由3.6%降至1.7%，相对下降52.8%；水口堵塞烧蚀钻头由7只降至2只，相对减少71.4%。现场班报未采用统一的进液质量与回流时间基准称量岩粉，因此携粉效果以循环液含砂量和水口堵塞烧蚀数量表征，以反映孔底清洁与排粉条件的改善。

表9 离心除砂与冲洗液管理优化前后主要指标

	循环液平均含砂量/%	水口堵塞烧蚀钻头/只
优化前	3.6	7
优化后	1.7	2
变化	相对下降52.8%	相对减少71.4%

低固相材料根据返浆状态动态补加，各岩性均以漏斗黏度18～24 s、含砂量＜2%、pH值8～9为基础控制。完整硬花岗岩孔段以低黏度冲洗液为主，以强化冷却和快速排粉；强磨蚀硅化花岗岩提高除砂频次，携粉不足时在总体范围内适度提高黏度，但不以增加固相换取携粉；破碎带在保持低固相的前提下兼顾悬浮与护壁；漏失段先采用细颗粒惰性材料处理漏失，恢复有效返水后再恢复正常泵量。上述控制与表2～表5反映的高强度、高硬度及裂隙影响相对应，可减少岩粉滞留、局部温升和水口堵塞。

3.4 新钻头初磨与孔底清洁

新钻头早期损伤多发生在入孔后的初始进尺阶段，因此，初磨前检查钻头端面、水口、内外径保径和丝扣连接。钻具下至距孔底1～2 m时开泵循环，待返水稳定后缓慢接触孔底。初磨段进尺控制在0.3～0.5 m/h，钻压4～6 kN，转速320～420 r/min，使金刚石逐步出刃并形成稳定切削面。初磨期间严禁快速加压，严禁在孔底残心未清除时直接钻进。孔底清洁控制包括扫孔、清粉和残心处理。起下钻后恢复钻进前，先以低钻压、低转速和较大泵量扫孔，观察泵压和返水含砂量[11]。遇岩心堵塞、回次进尺异常变短、钻速突然下降时，检查内管和岩心状态，禁止强行压入。破碎带后进入完整岩段前，进行短时间清孔，清除孔底碎块和沉粉，防止新钻头在不平整孔底上承受冲击。

3.5 破碎带低扰动钻进

构造破碎带是钻头非正常报废的集中孔段，进入破碎带的识别依据包括岩心短柱化、返水含砂量增大、机械钻速波动、扭矩变化和泵压异常。进入该类孔段后，钻压控制在4～7 kN，转速控制在300～450 r/min，回次进尺控制在0.8～1.5 m。钻进过程中以连续、平稳切削为主，避免大幅加压追求瞬时钻速[12]。破碎岩心堵塞时及时提取内管，检查岩心管、卡簧和卡簧座状态。软硬互层孔段采用分级加压，由软弱蚀变带进入完整花岗岩时，先维持较低钻压，待扭矩稳定后逐步提高参数。由完整岩段进入破碎带时，立即降低钻压并缩短回次。孔内掉块明显时，先扫孔，必要时采用护壁堵漏措施。该控制方式减少钻头端面冲击和保径条偏磨，降低冠部崩裂概率。

4 现场应用效果

4.1 应用方案

本次应用选择6个钻孔作为对照孔，6个相邻钻

孔作为试验孔。对照孔采用原钻头选型和经验参数,试验孔采用岩性分段选型、参数窗口、冲洗液管理、初磨制度和钻头分级复用。对比评价指标包括平均单只钻头进尺、平均机械钻速、非正常报废率、单位进尺钻头成本、岩心采取率和孔内异常次数。统计范围为孔深120～840 m,主要岩性为花岗岩、硅化花岗岩和构造蚀变岩。试验期间,机台每日填写钻头使用记录。记录项目包括钻头编号、规格、入孔深度、出孔深度、回次进尺、累计进尺、钻压、转速、泵量、泵压、冲洗液状态、岩心形态和钻头出孔状态,对比结果如表10所示。

表10　优化前后钻头使用效果对比

评价项目	统计钻孔数量/个	统计进尺/m	使用钻头数量/只	平均单只钻头进尺/m	平均机械钻速/(m·h^{-1})	非正常报废率/%	单位进尺钻头成本/(元·m^{-1})	岩心采取率/%	孔内异常次数/次
对照孔	6	4742.5	52	91.2	2.02	32.7	5.48	91.6	9
试验孔	6	3823.2	35	109.2	2.61	14.3	4.58	94.8	4
变化幅度/%			−32.7	+19.7	+29.2	−18.4	−16.4	+3.2	−55.6

试验孔平均机械钻速由2.02 m/h提高至2.61 m/h,平均单只钻头进尺由91.2 m提高至109.2 m。岩心采取率由91.6%提高至94.8%,说明寿命延长措施未以降低取心质量为代价。从失效结果看,试验孔钻头失效形式由早期非正常损坏转变为以均匀磨耗为主,非正常报废率由32.7%降至14.3%,说明孔底排粉、冷却和受力状态得到控制。非正常报废减少后,起下钻次数降低,辅助时间减少。单位进尺钻头成本按单只钻头约500元估算,试验孔虽仍需采用适配性更好的钻头,但由于使用寿命提高,单位进尺成本由5.48元/m降至4.58元/m。图3直观显示,优化后单只钻头进尺和机械钻速同步提高,而非正常报废率与单位进尺钻头成本同时下降,说明寿命提升并非以牺牲钻速换取,且技术措施对效率与成本具有一致改善作用。

4.2　典型孔段应用分析

(1)在ZK203-5孔328.0～486.0 m完整硅化花岗岩段,原施工同类孔段钻头端面常出现发亮钝化,机械钻速低于2.0 m/h。优化后采用适配完整硅化花岗岩段的中硬偏软胎体孕镶金刚石钻头,跑合段累计进尺控制0.5 m,正常钻进阶段采用9～11 kN钻压、560～640 r/min转速和60～65 L/min泵量。钻进过程中返浆连续,岩粉粒径均匀,钻头出孔后端面出刃状态稳定,单支钻头完成进尺约108.6 m,平均机械钻速2.68 m/h。

(2)在ZK77-6孔512.0～569.5 m构造破碎带,岩心以短柱状和块状为主,原施工同类孔段钻头多出现局部掉块。优化后采用韧性胎体、过水断面较大的孕镶金刚石钻头,钻压控制在4.5～6.5 kN,转速控制在320～420 r/min,回次进尺控制在1.0 m以内。遇泵压波动和返水含砂量突然增大时,及时提取内管并扫孔。钻头出孔检查未见明显冠部裂纹,保径条磨损均匀,平均机械钻速1.58 m/h。

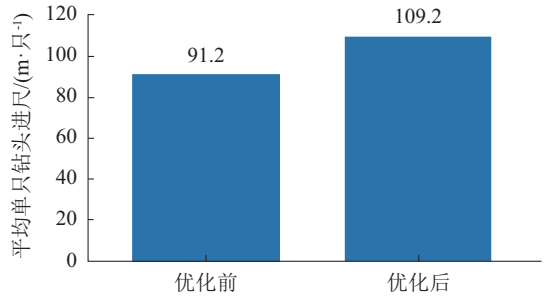
(3)在ZK207-4孔642.0～718.0 m漏失破碎孔段,返水量由正常状态的60 L/min左右降至35～42 L/min。现场暂停正常参数钻进,采用低钻压低转速循环观察,加入细颗粒惰性堵漏材料后返水恢复至52 L/min以上。恢复钻进后采用过水断面较大、排粉能力较强的孕镶金刚石钻头,泵量控制在55～60 L/min。该孔段未出现水口烧蚀,单只钻头完成进尺约103.2 m。

5　结论

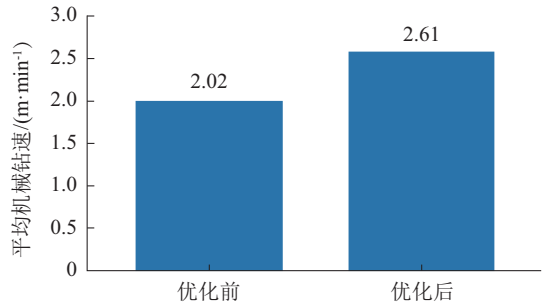
(1)岩样测试表明,工区花岗岩可钻性级别为8.4～9.1,压缩强度为101～112 MPa,完整黑云母花岗岩压入硬度多为4280～4620 MPa,SiO_2含量为67.89%～73.87%;裂隙发育样品压入硬度和可钻性级别明显降低。钻头失效主要表现为胎体过快磨损、金刚石钝化、保径损伤、水口烧蚀和冠部崩裂,其主控因素为高强度岩层、破碎孔底、参数波动和冲洗液排粉不足。

(2)岩性分段选型、钻压-转速-泵量窗口控制、冲洗液冷却携粉优化、新钻头初磨、破碎带低扰动钻进和钻头分级复用,可降低钻头早期失效。

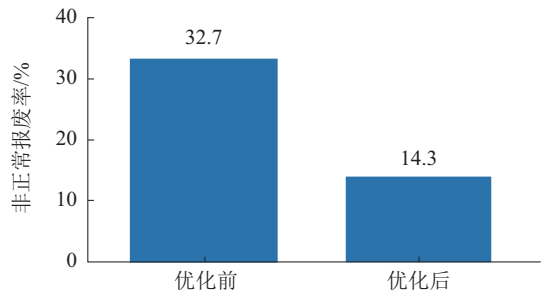
(3)应用统计显示,平均机械钻速由2.02 m/h提高至2.61 m/h,平均单只钻头进尺由91.2 m提高



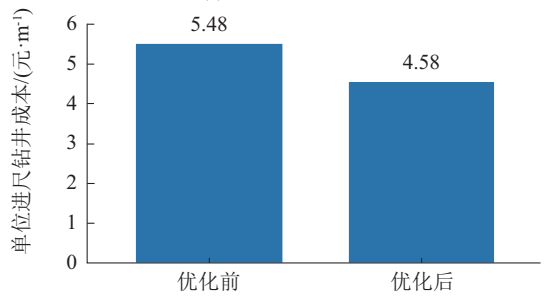
(a)平均单只钻头进尺



(b)平均机械钻速



(c)非正常报废率



(d)单位进尺钻井成本

图3 优化前后主要指标对比

至109.2 m，非正常报废率由32.7%降至14.3%，单位进尺钻头成本降低16.4%。

参考文献：

[1] 蔡迎千，陈龙，冯涛，等．坚硬地层绳索取心钻进用孕镶钻头与PDC钻头应用效果对比[J]．地质装备，2026，27(1)：16-21.

[2] 李柏军，童俊涛，王琳，等．铀矿地质钻探钻月效率影响因素分析及提升建议[J]．钻探工程，2023，50(3)：44-53.

[3] 龚美鑫，汪成勇，陈擎，等．柴达木盆地石圈滩地区铀矿钻探冲洗液研究与应用[J]．钻探工程，2023，50(4)：57-63.

[4] 刘俊辉，陈跃，李晓东，等．广西向阳坪铀矿床钻探施工技术及改进措施[J]．钻探工程，2021，48(8)：59-67.

[5] 李俊萍，吴金生，胡立，等．若尔盖铀矿田金刚石钻头的研究与应用[J]．探矿工程(岩土钻掘工程)，2017，44(1)：79-83.

[6] 鲁飞飞，沈显鸿，熊诗伦，等．随钻工程参数对钻头磨损影响规律的试验研究[J]．石油机械，2026，54(2)：14-19，59.

[7] 营志军，彭枧明，王智明．PDC钻头旋冲钻井技术研究及应用现状[J]．地质装备，2025，26(6)：1-9.

[8] 朱芝同，吴川，韦海瑞，等．绳索取心近钻头随钻测量系统设计与试验[J]．钻探工程，2025，52(1)：24-30.

[9] 陈岳，张杰丰，董凯飞，等．大口径绳索取心钻探技术在煤层气参数井勘探中的应用[J]．地质装备，2024，25(4)：28-33.

[10] 姬海东，刘郡，陈力．花岗岩地层新型取芯钻头设计与试验研究[J]．机械设计与研究，2024，40(3)：189-193.

[11] 杨联锋，彭志平，宋振杰，等．深厚覆盖层绳索取心钻探工艺实践[J]．钻探工程，2023，50(S1)：274-280.

[12] 杨展，谭松成，杨凯华，等．基于有限元分析的组合式金刚石钻头磨损规律与设计研究[J]．煤田地质与勘探，2023，51(9)：164-170.

[13] 王光胜，岳小磊，岳中文，等．基于数字钻孔的钻头磨损与随钻参数关系研究[J]．矿业研究与开发，2023，43(10)：180-187.

[14] 康鑫，段隆臣，刘卫卫，等．孕镶金刚石钻头钻进花岗岩岩屑特性室内试验研究[J]．金刚石与磨料磨具工程，2023，43(1)：23-28.

[15] 苏力才，李永卫，李明星，等．孕镶金刚石钻头选择及高效钻进实践探讨[J]．西部探矿工程，2022，34(6)：91-94，97.

(编辑 王文)