

深部大陆科学钻探取心技术现状与发展趋势

曹龙龙^{1,2,3}, 梁健^{1,2*}, 张恒春^{1,2,3}, 朱芝同^{1,2}, 李小洋^{1,2}, 李宽^{1,2},
吴纪修^{1,2}, 闫家^{1,2,3}, 施山山^{1,2}, 赵俊杰^{1,2}, 许权威^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 天津 300399; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 针对万米级特深钻探取心技术发展需求, 本文结合国内外典型钻探工程实践, 系统分析了深部取心面临的极端工况、长井段连续取心装备适配、取心效率、井斜控制四大难题, 梳理了国内外取心装备、钻头、井底动力、绳索取心、防堵、防斜等技术的应用现状, 对比分析了不同工艺的优劣与工程应用效果。研究表明, 我国在深部取心领域取得了显著进展, 但在特深部极端环境下长井段高效与高质量连续取心核心技术仍存在短板。研究指出, 未来取心技术将以高效、高质量获取深部岩心为基本目标, 向自动化、智能化深度融合方向发展, 通过构建“测量+控制+取心”一体化系统、攻克耐高温井底动力、突破特深绳索取心及长回次岩心防堵解堵技术与智能诊断预警技术, 形成新一代深部取心技术体系, 为我国深地探测提供技术支撑。

关键词: 科学钻探; 取心技术; 绳索取心; 取心钻头; 井底动力; 岩心堵塞; 井斜控制; 特深钻探

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0024-12

Status and development trend of coring technology for deep continental scientific drilling

CAO Longlong^{1,2,3}, LIANG Jian^{1,2*}, ZHANG Hengchun^{1,2,3}, ZHU Zhitong^{1,2}, LI Xiaoyang^{1,2}, LI Kuan^{1,2},
WU Jixiu^{1,2}, YAN Jia^{1,2,3}, SHI Shanshan^{1,2}, ZHAO Junjie^{1,2}, XU Quanwei^{1,2}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China; 2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Tianjin 300399, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: To meet the development requirements of coring technology for 10000-meter ultra-deep drilling, this paper systematically analyzes four major challenges faced by deep coring-extreme working conditions, equipment adaptability for continuous coring in long well sections, coring efficiency, and well deviation control-based on typical drilling engineering practices both domestically and internationally. It reviews the application status of technologies concerning coring equipment, drill bits, downhole motors, wireline coring, anti-jamming, and deviation control, and comparatively analyzes the advantages, disadvantages, and engineering application effects of different processes. The research indicates that China has made significant progress in the field of deep coring; however, core technologies for efficient and high-quality continuous coring over long well sections under ultra-deep extreme environments still have shortcomings. The study points out that future coring technology will take the efficient and high-quality recovery of deep cores as its fundamental objective, and develop towards the deep integration of automation and intelligence. By

收稿日期: 2026-05-18; 修回日期: 2026-05-28 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.003

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000901); 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20240205512)

第一作者: 曹龙龙, 男, 汉族, 1989年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 主要从事科学钻探、取心工艺与器具方面研究工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, 13833686142@163.com。

通信作者: 梁健, 男, 汉族, 1980年生, 中国地质学会探矿工程专业委员会秘书长, 自然资源部科技领军人才, 正高级工程师, 探矿工程专业, 博士, 长期从事地质找矿技术装备研发工作, 天津市东丽区锦鲤道23号, liangjian_cniet@qq.com。

引用格式: 曹龙龙, 梁健, 张恒春, 等. 深部大陆科学钻探取心技术现状与发展趋势[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 24-35.

CAO Longlong, LIANG Jian, ZHANG Hengchun, et al. Status and development trend of coring technology for deep continental scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 24-35.

constructing an integrated "measurement+control+coring" system, developing high-temperature-resistant downhole motor technologies, and making breakthroughs in ultra-deep wireline coring, core anti-jamming and plug-releasing technologies for long-run coring, as well as intelligent diagnosis and early warning technologies, a new generation of deep coring technology system will be established, providing technical support for China's deep earth exploration.

Key words: scientific drilling; coring technology; wireline coring; coring bit; bottom-hole power; core blocking; deviation control; ultra-deep drilling

0 引言

大陆科学钻探是探索地球深部奥秘、获取地下实物样品的重要手段,对于实现重大地球科学目标具有重要意义。获取高质量岩心样品是大陆科学钻探的重要目标之一。国外大陆科学钻探起步较早,苏联科拉超深钻 SG-3 井完钻井深 12262 m,但全孔岩心采取率仅约 40%,岩心原状性差;德国 KTB 主孔完钻井深 9101 m,主孔段连续取心不足 84 m,深部取心技术受限^[1-3]。近年来,国内大陆科学钻探取得了显著进展:中国大陆科学钻探科钻 1 井在超硬变质岩地层中,主要采用井底动力取心工艺,累计取心进尺 5004.95 m,岩心采取率 85.7%;松辽盆地科学钻探松科 2 井完钻井深 7108 m,井底温度 241 ℃,取心进尺 4279.73 m,岩心采取率高达 96.61%,实现了深部高质量连续取心^[4-5]。

随着钻探深度向万米级特深部发展,如表 1 所示,取心技术面临诸多核心难题:(1)超高温、超高压、高地应力极端环境导致钻具材料性能退化、疲劳失效加剧,井壁失稳与卡钻风险增加^[6-7];(2)长井段连续取心面临钻压精细控制、长回次钻具拆装与运移、岩心原状出筒等装备适配难题^[8-10];(3)深部极坚硬地层中钻头寿命短、井底动力技术不成熟、岩心频繁堵塞及提钻耗时长等问题交织,制约取心效率与质量;(4)取心过程中的井眼轨迹控制仍以被动防斜为主,主动纠斜手段缺乏,深部井斜问题突出^[10-14]。突破上述关键技术难点,将为特深科学钻探工程的实施提供重要技术支撑。

1 深部大陆科学钻探取心面临的难题

1.1 深部极端环境与复杂工况挑战

在深部高温高压及高地应力极端地层环境下,取心钻具的性能受诸多因素影响:(1)材料性能退化是关键难题之一,在高温高压条件下,材料可能因蠕变出现强度下降,在井内交变载荷作用下腐蚀和疲劳损伤加剧,导致取心钻具寿命缩短、性能不稳定。(2)取心钻具的大通道结构特征致使其极限

表 1 深部科学钻探取心技术问题统计
Table 1 Statistics of coring technical issues in deep scientific drilling

类 别	问 题
环境工况	超万米地层多变,地应力、温度高,压力系统复杂,岩石各向异性
钻进风险	钻具黏滑、振动,超长钻柱屈曲、井斜,钻具磨损、疲劳,井壁垮塌、漏失
连续取心	岩石可钻性差,连续取心耗时长,大口径井段取心难,岩心堵塞、磨损

强度低于钻铤及钻杆,在高压环境中其所受轴向压力和扭转应力增加,钻具易发生疲劳失效^[15-17]。(3)高地应力环境中井壁易垮塌、掉块,使得钻具在钻进过程中承受的动态载荷显著增加,易引发钻具断裂或卡钻事故,钻具的极限性能面临严峻考验。

深部取心钻进过程中上部超长钻柱的涡动、振动效应,使得底部取心钻具回转过程中的动态交变应力增加,进而影响钻具的稳定性和安全性^[18-21]。例如,科拉超深钻 SG-3 井因深部井壁坍塌、卡钻、钻具断裂等事故导致绕障侧钻 12 次,德国 KTB 主孔钻进中也因深部地应力大、井壁失稳和高温问题,导致提前完钻。在我国施工的亚洲最深科学钻探松科 2 井钻进过程中,累计发生井内故障 17 次,尤其是五开 Ø152 mm 口径 5908~5916 m 井段,由于高地应力释放与高温环境下泥浆长期浸泡导致井壁持续严重坍塌,处理井内故障累计 33 个回次,耗时 98.5 d。

1.2 长井段连续取心钻进装备适配问题

1.2.1 取心钻进过程中钻压精细控制

取心钻头切削面积较小,所需钻压相应也小,因而要求更高的送钻精度,以确保取心钻具在高转速下的稳定性。同时,在深部取心钻进过程中,超长钻柱因回转发生屈曲,导致钻柱与井壁间摩擦力增大,传递至钻头的钻压呈交变载荷状态^[22-25]。在此交变载荷作用下,取心钻具易发生涡动,钻压过

大、控制精度不足,均会加剧钻具涡动效应,进而增加钻具对岩心的机械扰动,阻碍岩心顺利入筒,尤其在破碎地层中极易诱发岩心堵塞。

1.2.2 长回次钻具的井口拆装与运移

在深部科学钻探实施过程中,为了提高长井段综合取心效率,采用长回次取心技术,但超长取心筒直接上下钻台难度大,如图1所示。在井口以单筒或双筒为单元进行拆卸、组装和维保,需要提引设备与多鼠洞协同,在此过程中因取心钻具管体薄、螺纹非标等,导致标准化拧卸设备适配性差、长回次钻具提升空间受限、钻具组装维保工序繁琐、长筒带岩心下钻台效率低等问题^[26]。



图1 长回次取心钻具下钻台及转运困难

Fig.1 Difficulties in tripping and handling of long coring run tools

1.2.3 深部科学钻探连续取心岩心出筒

在科学钻探取心作业中,采用传统钻台岩心出筒方式,不仅占用生产时间,而且岩心出筒后常发生碎裂、乱序,导致岩心原状性较差,获取的地层信

息不够准确。以往科学钻探中,利用钻具拆装台架辅助岩心出筒或采用水力退心等方法,如图2所示,可在一定程度上实现出心与井口并行作业,但尚未形成标准化的工序流程,一旦遇到岩心在筒内挤压堵塞等情况,岩心出筒仍较困难。



图2 钻具拆装台架辅助机械式岩心出筒

Fig.2 Mechanical core unloading assisted by drill tool rack

1.3 深部取心效率难题

1.3.1 取心钻头寿命短

深部地层取心钻进过程中,高地应力致使岩石硬度显著增大,岩石弹塑性增强、断裂韧性提高,钻头碎岩效率明显下降。与此同时,超长钻柱在回转中易发生非线性涡动与黏滑振动,使钻头承受剧烈的冲击与交变载荷,局部切削齿出现崩裂、严重磨损,造成钻头提前失效,不仅导致回次进尺缩短,还大幅增加提下钻辅助作业时间,严重制约取心效率^[27-28]。松科2井取心钻头统计如表2所示,主要以金刚石钻头为主,钻探深度越深金刚石钻头寿命越短,Ø152 mm口径平均单只钻头寿命仅为34.03 m^[29]。

表2 松科2井入井取心钻头指标

Table 2 Specifications of the coring bit deployed in Well Songke-2

钻头规格/mm	钻头类型	井段/m	钻头数量/只	累计进尺/m	回次数	平均寿命/m
311	金刚石	491.12~4513.74	26	1700.09	117	65.39
	PDC	3409.13~3593.02	2	9.02	2	4.51
216	金刚石	556.27~5859.91	41	1549.00	128	37.78
	PDC	1086.00~4863.39	2	10.67	3	5.34
152	金刚石	5905.43~7108.88	34	1156.97	82	34.03

1.3.2 高温井底动力取心技术不成熟

为提高钻头切削效率、增强钻具回转稳定性并降低长钻柱高速回转对井壁的扰动,可采用井底动力取心技术。目前,螺杆钻具驱动技术相对成熟,

但常规螺杆钻具受深部高温条件限制,而耐高温的全金属螺杆马达、涡轮钻具等井底动力取心技术尚处于工程试验阶段^[30-32]。在松科2井6800 m以深井段,井温已超过200℃,受高温环境制约,主要采用

地表驱动取心技术,钻进中钻柱摩阻大、托压严重,金刚石钻头难以实现高转速驱动,钻进效率较低,为提升钻进速度而增大钻压后,井斜角急剧增大。

1.3.3 岩心防堵及解堵难

深部取心过程中,岩心因高地应力卸荷作用而极易碎裂,易在岩心管内发生积聚并堵塞,阻碍后续岩心顺利进入岩心管,进而影响取心钻进速度。同时,堵塞的岩心相互磨损,导致获取的岩心质量下降,岩心采取率不足。松科2井4500 m以深井段取心过程中,四开 $\varnothing 216$ mm口径岩心堵塞回次占62%,五开 $\varnothing 152$ mm口径占46%,如图3所示,严重影响了取心钻进效率。当前工程应用中,表面减阻技术、迭代式岩心管、低功耗高频冲击振动及填充滑移流体覆膜工艺等,仅能在一定程度上缓解堵心问题,尚无法有效解决岩心堵塞的根本难题^[3,6,33]。

1.3.4 深部取心提钻耗时长

在深部取心过程中,为减少提下钻辅助时间、提高取心综合效率,常采用长筒及超长筒钻具以实现长回次取心。然而,工程应用中长回次取心的满筒率(取心进尺达到长筒钻具可取心长度的80%,即判定为满筒)高度依赖于地层条件、钻头寿命及设备可靠性。若钻进中遭遇破碎地层岩心堵塞、钻头提前磨损失效或设备故障等异常情况,回次将提

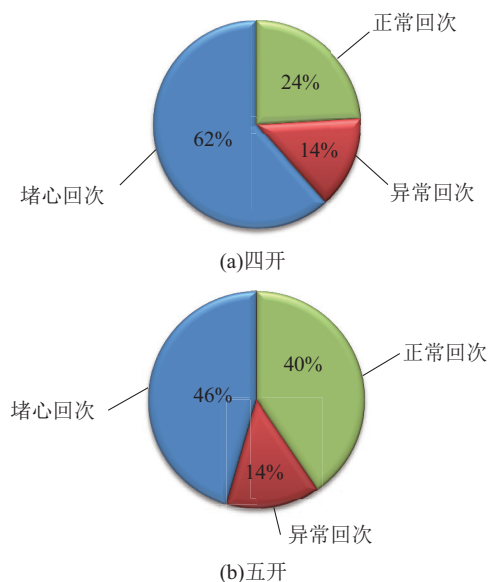


图3 4500 m以深井段取心回次情况统计

Fig.3 Statistics of coring runs in the well section below 4500 m

前终止,从而无法实现长筒取心效果。松科2井以长筒取心为主要技术手段,虽已显著提升综合效率,但各开次长回次取心的满筒率仍较低,在5900 m以深的五开 $\varnothing 152$ mm井段,长回次取心效果如表3所示,即使四筒联装的长回次钻具(单回次可取心42 m)平均回次进尺也仅有18.75 m。

表3 5900 m以深井段长回次取心钻进数据统计

Table 3 Statistics of long-run coring drilling data in the well section below 5900 m

钻具长度	进尺/m	回次数	平均回次进尺/m	岩心长度/m	回次时间/h	纯钻时间/h	岩心采取率/%	钻速/(m·h ⁻¹)
单筒	76.89	10	7.69	68.96	537.58	112.08	89.69%	0.69
双筒	329.78	24	13.74	321.23	1553.92	472.75	97.41%	0.70
三筒	454.35	26	17.48	446.53	1947.33	706.75	98.28%	0.64
四筒	224.98	12	18.75	224.25	847.42	344.92	99.68%	0.65
合计	1086.00	72	15.08	1060.97	4886.25	1636.50	97.70%	0.66

深部绳索取心受限于钻杆柱中心通道尺寸,大直径井段绳索取心钻头因唇面厚度大,在硬岩地层钻进效率低。松科2井初步建立了超深井绳索取心钻杆及钻具序列,在6000 m以深井段也开展了超深绳索取心可行性试验,如表4所示。但因绞车钢丝绳断裂、泥浆比重大及钻杆过早磨损、腐蚀等因素,未开展大量工程应用试验。深部绳索取心内总成超长距离投放运移、坐卡与打捞可靠性及硬岩地层绳索取心钻进效率等仍待工程应用验证,目前尚未

形成深部绳索取心技术工程应用体系。

1.4 科学钻探中的取心防斜难题

在科学钻探的不取心井段,可采用垂直钻井系统或弯外壳螺杆钻具实现主动防斜与纠斜。然而,在取心钻进工况下,主动纠斜与防斜工具尚无成熟应用案例,主要沿用地质岩心钻探中预防钻孔弯曲的常规方法:(1)采用满眼钻具组合,提高井底钻具的刚度和回转稳定性;(2)采用冲击回转井底动力工艺,并配套小钻压“吊打”参数以达到防斜目的。

表 4 6000 m 以深井段绳索取心技术实验情况

Table 4 Wireline coring test data for the section below 6000 m						
序号	井段/m	进尺/m	岩心长度/m	岩心采取率/%	钻速/(m·h ⁻¹)	钻头类型/mm
1	6419.01~6420.08	1.07	0.00	0.00	0.51	152/92 金刚石
2	6420.08~6430.80	10.72	10.46	97.57	0.80	152/92 金刚石
3	6430.80~6441.65	10.85	10.31	95.02	1.15	152/92 金刚石
4	6441.65~6451.77	10.12	9.30	91.90	0.63	152/92 金刚石
合计		32.76	30.07	91.79		

但在易偏斜地层中,依靠上述被动式防斜措施难以有效控制井眼轨迹,取心过程中的主动式纠斜手段仍较为缺乏。科拉超深钻 SG-3 井在 8700 m 以深,因井斜问题先后进行了 6 次纠斜;德国 KTB 主孔在 7500 m 以深井段受高温限制,转而采用传统被动防斜方法,至 8880 m 处井斜角迅速增至 21°,导致钻柱阻力增加,这也是该井提前完井的原因之一。松科

2 井上部井段井斜控制良好,6067 m 处井斜仅为 3.7°,随后井斜迅速增大,至 7018 m 处达 25.3°,该阶段取心钻进过程中钻柱摩阻及托压现象明显。上述科学钻探工程完钻井眼轨迹如图 4 所示。当前,在深部超高温高压井段,常规螺杆钻具及垂直钻井工具均无法使用,因此钻进防斜仍是深部科学钻探面临的一大难题^[34-38]。

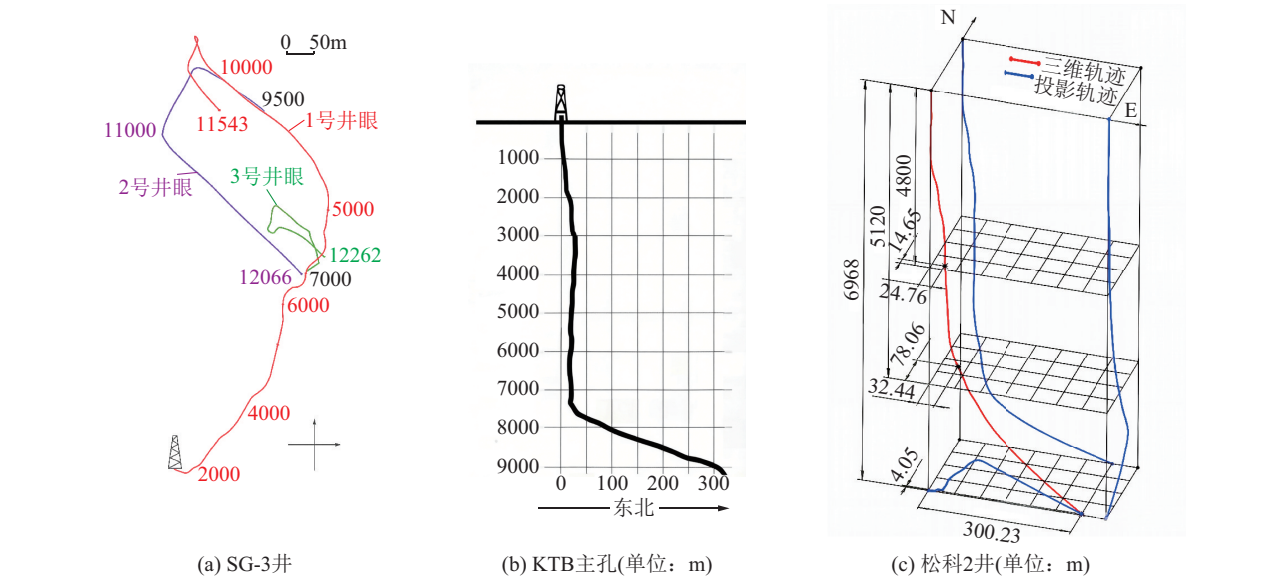


图 4 典型科学钻探井眼轨迹
Fig.4 Typical scientific drilling well path

2 深部大陆科学钻探取心技术发展现状

针对深部大陆科学钻探面临的核心技术挑战,国内外科研团队依托科学钻探工程实施与技术预研究,已在多个关键技术领域取得显著进展,主要包括深部取心技术的应用可靠性、科学钻探装备的适配性、高效低成本金刚石钻头、长回次取心与深部绳索取心、岩心防堵与解堵技术及取心井眼轨迹控制方法等。

2.1 深部科学钻探取心技术应用现状

目前世界最深的科学钻探 SG-3 井完钻深度为 12262 m,在片麻岩、闪长岩及花岗岩混合岩层中,采用 Ø216 mm 牙轮取心钻头并配套“水力输送岩心取样器”,累计完成 1217 个取心回次,平均机械钻速 1.8 m/h,平均回次进尺 7.6 m,全孔使用牙轮钻头取心,岩心采取率仅约 40%。德国 KTB 主孔完钻深度 9101 m,在 4000 m 以深井段采用提钻取心工艺,配套牙轮钻头与金刚石钻头累计取心仅 83.34 m,

且 8085.1 m 以深因技术问题未再实施取心。我国实施的松科 2 井完钻深度 7108 m, 取心进尺 4279.73 m, 岩心采取率达 96.61%。该井成功克服了 241 ℃ 的高温环境^[39], 研发了井底动力驱动长回次取心钻具, 显著提高了深部科学钻探综合效率, 但在深部高温井段仍只能采用地表驱动常规取心技术, 存在效率低、井斜发展快等问题。中石油实施的深

地塔科 1 井完钻深度 10910 m, 实现了万米以深井段的取心作业, 两回次累计取心 12.64 m。以上所列举深部科学钻探取心具体情况见表 5。综上所述, 尽管工程上已实现万米以深钻探取心, 但在深部极端环境下进行长井段连续取心, 并在极坚硬地层中高效、高质量获取深部岩心, 仍面临诸多技术挑战。

表 5 深部科学钻探取心情况
Table 5 Coring status in deep scientific drilling

井号	完钻井深/m	取心井径/mm	钻头类型	取心进尺/m	岩心采取率/%
SG-3 井	12262	216	牙轮	9235	40.06
KTB 主孔	9101	374、311	牙轮、金刚石	187.2	44.56
科钻 1 井	5158	157	金刚石	5004.95	85.7
松科 2 井	7108	311、216、152	金刚石	4279.73	96.61
塔科 1 井	10910	168	金刚石	12.64	97.3

2.2 科学钻探装备应用现状

我国自主研发的“地壳一号”万米钻机高效完成了松科 2 井 7108 m 的钻进任务, 并配套研发了顶部驱动、井口拧卸及地表自动化装备, 地表钻压控制精度可达 2 kN^[40-44]。该装备的高可靠性为长井段连续取心提供了重要保障, 但在长回次取心、井口钻具连续监测、超长取心钻具组装与转运、岩心出筒等方面仍存在适配性不足的问题。深地塔科 1 井钻探装备在自动化作业水平等方面已达到国际先进水准, 在顶驱系统、井口自动化装备及泥浆智能调控等环节取得了重要突破, 然而, 该装备仍主要针对石油钻井工艺设计, 未充分考虑科学钻探长井段连续取心的工况与需求。

在科学钻探中, 岩心出筒是取心过程的重要环节, 常规的钻台面及猫道旁悬吊出心方法不仅耗时耗力, 且难以保障破碎岩心的原状性。松科 2 井实施过程中, 通过研制泵送式水力出心装置及改造螺杆钻具拆装台架, 在一定程度上实现了大批量岩心的高效与原状出心, 但仍存在取心钻具适配规格受限、岩心堵塞时出心困难等问题。上述实践为后续超万米特深科学钻探取心装备的配套设计提供了有益经验与思路。

2.3 高效与高质量取心技术现状

2.3.1 深部绳索取心技术

绳索取心相较于提钻取心可大幅减少取心辅助时间, 但其需配套大通道水眼专用绳索取心钻

杆, 因其特殊结构使得强度低于同规格 API 钻杆, 且通常采用满眼钻具组合, 钻柱外环空循环通道呈“小环隙”特征, 难以满足大排量循环需求。因此, 绳索取心技术多应用于 4000 m 以浅的小口径科学钻探工程, 在深部科学钻探大直径井眼中尚无成熟技术体系^[43-45]。德国 KTB 先导孔 479.5~4000.1 m 钻进中采用了绳索取心技术, 但其口径为 Ø152 mm 以下; 此前南非完成的绳索取心钻探世界最深钻孔为 5424 m, 同样为 Ø152 mm 以下口径。我国松科 2 井基于 API 标准研发了大直径绳索取心钻柱序列, 并在 6500 m 以深井段开展了多回次绳索取心技术试验, 包括中空井底动力型绳索取心, 如图 5 所示, 验证了深部绳索取心技术的可行性, 但在钻进效率及长距离投放打捞方面仍存在诸多技术困难。

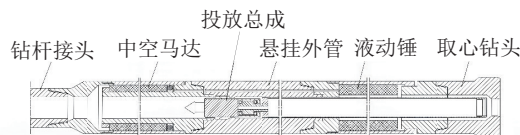


图 5 中空井底马达液动锤取心钻具
Fig.5 Hollow bottom-hole motor hydraulic hammer coring tool

2.3.2 科学钻探取心钻头技术

苏联 SG-3 井及德国 KTB 主孔的 Ø216 mm 井眼均采用牙轮取心钻头, 虽可获得较高钻速, 但因牙轮钻头的跳钻现象, 所取岩心柱状形态易遭破

坏,岩心磨损明显,导致岩心采取率不足。我国通过已实施的大陆科学钻探工程研发及应用验证,形成了以 $\varnothing 152$ 、 $\varnothing 216$ 、 $\varnothing 311$ mm为主要规格,适配井底动力与长回次取心的金刚石钻头技术,如图6所示。该技术以胎块二次镶焊孕镶金刚石钻头为主体,通过单胎块烧结与镶焊工艺的有机结合,显著提升了胎块强度。胎块磨损后,钻头刚体可再次进行镶焊并重复利用,有效降低了大直径孕镶金刚石钻头的工程应用成本。根据地层条件合理选配金刚石粒径、浓度等参数,底唇面设计有多种异型结构,在科学钻探长井段软硬交错地层取心中,表现出良好的广谱适应性。然而,在深部极端环境下,钻头寿命短仍是制约长回次取心与绳索取心技术应用效果的关键因素。

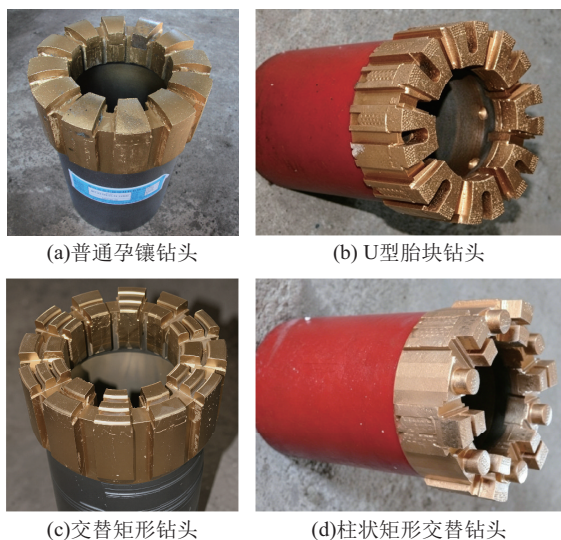


图6 各种类型的 $\varnothing 216$ mm取心钻头
Fig.6 Various types of $\varnothing 216$ mm coring bits

2.3.3 井底动力取心工艺

当前,应用于取心钻进的井底动力钻具主要包括螺杆钻具、涡轮钻具及液动锤。国外科学钻探中有关井底动力取心的应用数据较少,国内大陆科学钻探1井率先应用了井底动力取心技术,形成了转盘+螺杆钻具复合回转驱动与转盘+螺杆钻具+液动锤复合冲击回转两种取心工艺,如图7、图8所示。该技术在榴辉岩、片麻岩、角闪岩等硬脆及易破碎地层中累计取心4042.73 m,平均机械钻速1.13 m/h,平均回次进尺6.34 m,岩心采取率85.45%,在提高钻进速度及岩心解堵方面取得了良好效果。松

科2井采用螺杆钻具驱动KT型长回次取心钻具,在 $\varnothing 311$ mm口径同径连续取心1679.01 m,岩心采取率达98.02%,在 $\varnothing 216$ mm口径采用螺杆钻具及螺杆钻具+液动锤长回次取心工艺,累计取心1368.86 m,岩心采取率为93.22%。此外,还开展了多规格涡轮钻具取心工艺试验,如图9所示,为高温地层取心提供了井底动力钻具的可选方案。

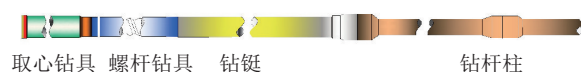


图7 井底动力螺杆钻具长筒取心钻具组合

Fig.7 Long barrel coring assembly with PDM (screw drill)

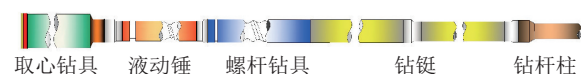


图8 井底动力螺杆钻具液动锤长筒取心钻具组合

Fig.8 Long barrel coring assembly with PDM plus hydraulic hammer

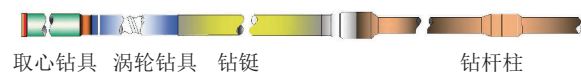


图9 井底涡轮钻具长筒取心钻具组合

Fig.9 Long barrel coring assembly with turbine drill

螺杆钻具及螺杆钻具+液动锤取心技术已趋于成熟,在螺杆钻具与液动锤的选型、取心钻具性能匹配等方面均形成了系列化技术体系。相比之下,涡轮钻具输出转速高,驱动孕镶金刚石钻头在极硬致密地层提速效果显著,但高转速易加剧取心钻具回转涡动,钻具及钻头外径易发生异常磨损失效,钻遇破碎地层时,岩心易磨损、岩心采取率偏低。因此,涡轮钻具取心工艺仍需进一步研究、完善与试验验证,以提升其工程应用可靠性。

2.3.4 岩心防堵及解堵技术

岩心堵塞已成为影响取心钻进效率的一大难题,在科学钻探长井段连续取心作业中,其影响尤为突出。目前,岩心防堵与解堵技术主要分为两个方面。(1)取心钻具防堵设计,包括在岩心管内表面涂覆减阻耐磨涂层、在钻具总成中增设液力振动机构、采用多层级遇阻迭代岩心管结构等。这些方法仅能在一定程度上缓解堵塞问题,且增加了钻具的复杂性与加工成本,工程中推广应用的数据较为有限。(2)在取心钻具组合中加入低频高功液动锤,利用其轴向冲击振动实时改变碎裂岩心的积聚形态,

从而实现解堵^[46-48]。科学钻探中基于冲击回转取心工艺的解堵技术已在中国大陆科学钻探科钻1井中得到验证,如表6所示,在榴辉岩、片麻岩地层中,平

均回次进尺明显增加,破碎地层中的岩心解堵效果较好。

表6 科钻1井冲击回转取心与其它工艺数据对比

Table 6 Data comparison between percussive-rotary coring and other coring methods in CCSD-1

取心钻进方法	钻进回次	进尺/m	回次进尺/m	钻速/(m·h ⁻¹)	岩心采取率/%
转盘取心	12	19.55	1.63	0.47	58.2
顶驱取心	8	5.87	0.73	0.36	5.1
顶驱+绳索取心	5	7.62	1.52	0.63	13.8
顶驱+液动锤+绳索取心	3	8.27	2.76	0.89	99.5
螺杆马达+绳索取心	8	6.72	0.84	0.33	71.9
螺杆马达取心	398	908.36	2.28	0.74	88.2
螺杆马达+液动锤取心	640	4038.88	6.31	1.13	85.8

2.3.5 取心防斜技术

取心钻进中主动防斜与纠斜技术的工程应用案例较少。当前,取心钻进的防斜措施主要沿用地质岩心钻探中预防钻孔弯曲的常规方法,并结合井底动力工具以实现工程防斜效果,钻具组合如图10所示。根据我国大陆科学钻探1井及松科2井的实践经验,深部取心防斜技术主要采用满眼取心钻具组合,配合螺杆钻具、液动锤等工具,钻进过程中采用较常规偏小的钻压参数,同时保持井底动力钻具以上钻柱低速回转,以提高钻柱回转稳定性,从而减少底部取心钻具的涡动效应^[49-50]。我国大陆科学钻探1井应用“螺杆钻具+液动锤”组合,取得了良好的钻进与防斜效果。此外,松科2井在五开之前采用井底动力长回次满眼取心钻具,在6000 m以浅井段井斜角控制在4°以内,达到了较好的防斜效果。



图10 典型的满眼取心钻具组合

Fig.10 Typical packed-hole coring assembly

3 取心技术发展趋势

近些年,我国通过系列大陆科学钻探工程实施,在科学钻探取心装备适配与长井段硬岩连续高效、高质量取心方面取得了巨大进步。例如,“地壳一号”钻机的高精度自动送钻和摆排管系统等,极大提升了科学钻探连续取心的效率。井底动力

311 mm大直径同径长回次取心技术的成功应用,是科学钻探大口径井段高效取心技术的重要突破,胎块二次镶焊孕镶金刚石钻头技术为科学钻探高性价比钻头应用开辟了新的途径,涡轮钻具驱动取心钻具与工艺的研发与应用试验,为深部高温环境工况井底动力取心储备了技术。高频低功冲击、液力振荡与取心钻具嵌套融合应用,是解决岩心堵塞问题的重要突破方向,基于API钻杆序列的超深绳索取心技术探索,是深部科学钻探取心的变革尝试,有望解决特深科学钻探中长井段取心效率低、频繁起下钻扰动大、综合成本高等核心难题。此外,地质钻探突破了传统定向钻进在造斜段难以连续获取高质量岩心的技术瓶颈,实现了钻孔轨迹精准控向与绳索取心的同步作业,并结合随取心测量(图11)、随钻传输技术及钻探多元数据汇聚系统等,初步形成了“测量+控制+取心”一体化的绳索取心精准导向钻进工艺^[51],为后续深部科学钻探安全高效、精准与高质量取心研究奠定了思路与基础。

未来,我国大陆科学钻探取心技术将以高效、高质量获取深部岩心为基本目标,推动自动化与智能化在工程实践中的深度融合。例如,推广适配科学钻探长井段取心的高精度自动化钻压控制、井口连续监测及长回次钻具安全高效拆装、转运与出心标准化装备,提升科学钻探实施综合效率;突破取心钻进工况钻具狭小环隙与特殊通道限制,集成取心工况下环境、地层、井眼轨迹、钻柱力学及钻具动态等参数的测量与数据传输功能,实现取心过程中的井下工况实时诊断与风险预警、钻进参数智能分

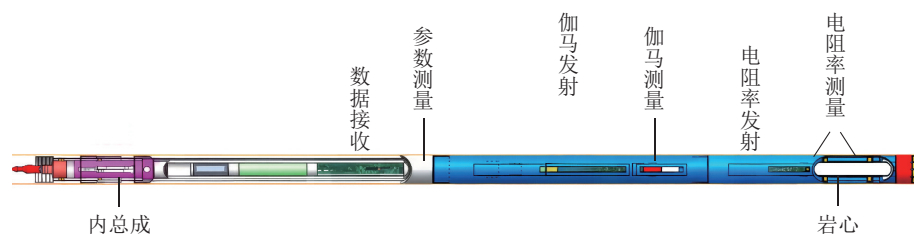


图 11 绳索取心随钻测量方案示意

Fig.11 Schematic diagram of wireline coring and measurement-while-drilling solution

析优化,降低深部科学钻探中的工程风险,结合取心控向技术,解决取心钻进中的井眼轨迹精准控制难题,通过特深绳索取心及长回次岩心防堵与解堵

技术的研发与工程应用试验(图12),逐步推动科学钻探取心技术的迭代与进步。

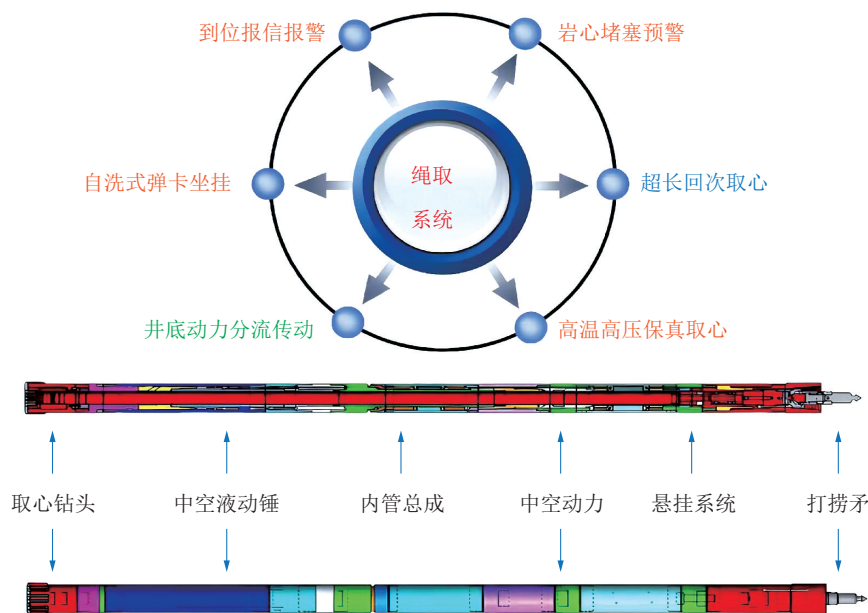


图 12 特深绳索取心系统构建

Fig.12 Construction of an ultra-deep wireline coring system

4 结语

取心是科学钻探工程实施的关键,然而特深部取心将面临超高温、超高压的极端环境,极坚硬与强研磨性地层,以及特深井传压传扭困难、长钻柱涡动导致破岩效率低、破碎地层岩心频繁堵塞、取心辅助工序耗时多、长裸眼井段风险大等系列难题。立足特深科学钻探工程目标,依托深地国家科技重大专项,着力解决特深部极端环境下长井段高效与高质量连续取心这一核心难题,并从核心装备适配攻关、智能与信息化井下系统集成、特深绳索取心技术探索与大工程成本控制等多维度协同推

进,构建新一代深部科学钻探工程取心技术体系,推动我国深部大陆科学钻探取心技术跨越式发展,为地球深部探测与矿产资源勘探提供关键技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 张晓西.论中国大陆科学钻探工程项目实施对我国钻探技术的推动作用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2001(S1):233-236.
ZHANG Xiaoxi. On the driving effect of the execution of CCSD on the drilling technology of China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2001(S1):233-236.
- [2] 薛倩冰,梁楠,韩丽丽,等.大陆科学钻探工程技术发展动态及趋势分析[J].钻探工程,2021,48(12):1-6.

- XUE Qianbing, LIANG Nan, HAN Lili, et al. Development trend of continental scientific drilling technology[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(12):1-6.
- [3] 张伟. 科学深孔复杂地层钻进技术难题与对策[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(9):7-12.
- ZHANG Wei. Technical problems and countermeasures for the drilling operation in complex formations of scientific deep drilling projects[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(9):7-12.
- [4] 王达, 张伟, 贾军. 特深科学钻探的关键问题[J]. *科学通报*, 2018, 63(26):2698-2706.
- WANG Da, ZHANG Wei, JIA Jun. The key problems of ultra-deep drilling engineering[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(26):2698-2706.
- [5] 朱永宜, 王稳石, 张恒春, 等. 我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J]. *地质学报*, 2018, 92(10):1971-1984.
- ZHU Yongyi, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Implementation overview of Chinese continental scientific drilling (CCSD) project and technical systems of core boring[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(10):1971-1984.
- [6] 孙宇宸. 钻杆横向振动对取心过程的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2022.
- SUN Yuchen. Influence of transverse vibration of drill pipe on coring process[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2022.
- [7] 王志刚, 梁健, 刘秀美. 深部地质取心钻探钻柱失效行为分析[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(12):28-31, 46.
- WANG Zhigang, LIANG Jian, LIU Xiumei. Analysis of failure behavior of drill string in deep geological core drilling[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(12):28-31, 46.
- [8] 高科, 郭京坤, 吕兰, 等. 深部大陆科学钻探装备关键技术发展综述[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2026, 56(1):295-314.
- GAO Ke, GUO Jingkun, LV Lan, et al. Review on the development of key technologies for deep continental scientific drilling equipment[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2026, 56(1):295-314.
- [9] 赵甜, 张毅, 徐绍涛, 等. 地质岩心钻探钻机与取心技术的研究进展及智能化发展趋势[J]. *中国地质调查*, 2026, 13(2):152-165.
- ZHAO Tian, ZHANG Yi, XU Shaotao, et al. Research progress and intelligent development trends of geological core drilling rigs and core sampling techniques[J]. *Geological Survey of China*, 2026, 13(2):152-165.
- [10] 杨海军, 王春生, 杨宪彰, 等. 深地塔科1井万米特深井钻探关键技术进展与科学意义[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(5):1180-1188.
- YANG Haijun, WANG Chunsheng, YANG Xianzhang, et al. Technological progress and scientific significance of the drilling of the ten-thousand-meter ultra-deep well TK1, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(5):1180-1188.
- [11] 李振祥, 蔡家品, 沈立娜, 等. 地外天体取心钻头技术研究进展及关键突破[J]. *钻探工程*, 2026, 53(3):10-23.
- LI Zhenxiang, CAI Jiapin, SHEN Lina, et al. Research progress and key breakthroughs of coring drill bits for extraterrestrial bodies[J]. *Drilling Engineering*, 2026, 53(3):10-23.
- [12] 孙友宏, 徐良, 薛启龙, 等. 海洋深层钻井关键理论与技术发展现状及展望[J]. *石油钻探技术*, 2025, 53(3):1-10.
- SUN Youhong, XU Liang, XUE Qilong, et al. Current status and prospects of key theories and technologies for marine deep drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2025, 53(3):1-10.
- [13] 张金昌, 刘秀美. 13000m 科学超深井钻探技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(9):1-6.
- ZHANG Jinchang, LIU Xiumei. 13000m drilling technology of super-depth scientific drilling-well[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(9):1-6.
- [14] 田志超, 翟育峰, 林彬, 等. 西藏甲玛3000米科学深钻施工技术[J]. *钻探工程*, 2022, 49(3):100-108.
- TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIN Bin, et al. Drilling technology for 3000m deep scientific drilling in Jima, Tibet[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(3):100-108.
- [15] 郁红露. 圆筒内考虑接头影响的细长杆稳定性问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- YU Honglu. Investigation on the buckling problem of thin and long bars with connectors in a circular cylinder[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [16] 石小磊, 黄文君, 高德利. 考虑屈曲和摩擦力的高温高压井管柱力学分析[J]. *石油机械*, 2020, 48(11):111-118.
- SHI Xiaolei, HUANG Wenjun, GAO Deli. Mechanical analysis of tubular in high temperature and high pressure well considering buckling and friction[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(11):111-118.
- [17] 李昱焱, 贺明敏, 王泽东, 等. 超深井不同工况下钻具伸长量计算方法及其应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2025, 48(5):123-131.
- LI Yuyao, HE Mingmin, WANG Zedong, et al. A method for calculating drill string elongation under various operating conditions in ultra-deep wells and its application[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2025, 48(5):123-131.
- [18] 郭威, 王元. 复杂条件钻采技术研究现状与发展趋势[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2025, 55(6):1904-1922.
- GUO Wei, WANG Yuan. A review and outlook on drilling and production technology under complex conditions[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2025, 55(6):1904-1922.
- [19] 郭刚, 赵宽心, 叶翔. 塔深5井超深复杂井眼破碎性地层取心技术[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2023, 43(18):139-141.
- GUO Gang, ZHAO Kuanxin, YE Xiang. Core sampling technology for ultra-deep and complex wellbore fractured formations in Well No. 5 of the Ta project[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2023, 43(18):139-141.
- [20] 杨柳青, 陈文才, 曾欣. 深层超深层取心技术进展与未来解决方案[J]. *钻采工艺*, 2024, 47(2):113-120.
- YANG Liuqing, CHEN Wencai, ZENG Xin. Progress and future solutions of deep and ultra-deep coring technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 2024, 47(2):113-120.
- [21] 白云勃, 高亮, 李婕, 等. 破碎地层取心技术研究与应用[J]. *钻探工程*, 2025, 52(2):144-150.

- BAI Yunbo, GAO Liang, LI Jie, et al. Research and application of coring technology in broken formations[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 144-150.
- [22] 朱江龙, 张伟, 黄洪波, 等. 深孔取心钻进用高速顶驱式钻机[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 114-119.
- ZHU Jianglong, ZHANG Wei, HUANG Hongbo, et al. High-speed top-drive rig for deep core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 114-119.
- [23] 王志刚, 王稳石, 张立烨, 等. 万米科学超深井钻完井现状与展望[J]. 科技导报, 2022, 40(13): 27-35.
- WANG Zhigang, WANG Wenshi, ZHANG Liye, et al. Present situation and prospect of drilling and completion of 10000 meter scientific ultra deep wells[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(13): 27-35.
- [24] 张英传, 王鲁朝, 宋世杰, 等. 罗布莎科学钻探工程技术及应用[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(6): 84-88, 90.
- ZHANG Yingchuan, WANG Luchao, SONG Shijie, et al. Robessa scientific drilling engineering technology and applications[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(6): 84-88, 90.
- [25] 尹浩, 梁健, 李宽, 等. 万米科学钻探关键机具优化措施研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 16-24.
- YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 16-24.
- [26] 王稳石, 隆东, 闫家, 等. 松科2井二开大口径同径取心钻进技术[C]//第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集. 哈尔滨: 中国地质学会探矿工程专业委员会, 2015: 761-766.
- WANG Wenshi, LONG Dong, YAN Jia, et al. The large-diameter same-diameter core drilling technology for the second stage of the Songke 2 well[C]//The 18th National Technical Academic Exchange Conference on Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Proceedings. Harbin: Exploration Engineering Professional Committee of the Geological Society of China, 2015: 761-766.
- [27] 高科, 王金龙, 赵研, 等. 仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 16-24.
- GAO Ke, WANG Jinlong, ZHAO Yan, et al. Bionic self-compensating integrated high-matrix impregnated diamond coring bit[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 16-24.
- [28] 沈立娜, 李春, 赵义, 等. 金刚石取心钻头干钻热特性试验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 62-67.
- SHEN Lina, LI Chun, ZHAO Yi, et al. Experimental study on the thermal characteristics of dry drilling of diamond coring bits[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 62-67.
- [29] 曹龙龙, 朱永宜, 王稳石, 等. 松科2井三、四开次取心钻头技术对策与应用效果[C]//第十九届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 乌鲁木齐: 中国地质学会探矿工程专业委员会, 2017: 224-227.
- CAO Longlong, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, et al. Technical countermeasures and application effects of core drilling bits for the third and fourth stages of Songke 2 well[C]//Proceedings of the 19th National Conference on Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Excavation Engineering) Academic Exchange. Urumqi: Exploration Engineering Professional Committee of the Geological Society of China, 2017: 224-227.
- [30] 闫家, 朱永宜, 王稳石, 等. 松科2井涡轮钻取心钻进现场试验[C]//第十九届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会. 乌鲁木齐: 中国地质学会探矿工程专业委员会, 2017: 228-231.
- YAN Jia, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, et al. Field test of turbine drilling for core sampling in Songke 2 well[C]//The 19th National Academic Exchange Conference on Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling). Urumqi: Exploration Engineering Professional Committee of the Geological Society of China, 2017: 228-231.
- [31] 闫家, 梁健, 王文, 等. 深井高速涡轮钻配套同径取心技术研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 23-30.
- YAN Jia, LIANG Jian, WANG Wen, et al. Research on the same diameter coring drilling technology used by high-speed turbodrill for deep well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 23-30.
- [32] 曹龙龙, 张恒春, 王稳石, 等. 准噶尔盆地玛页1井长筒取心技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 94-99.
- CAO Longlong, ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, et al. Long barrel coring technology for Well Maye-1 in Junggar Basin[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 94-99.
- [33] 曹龙龙, 张恒春, 闫家, 等. 提钻取心岩心堵塞形态分析与防堵方法探讨[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 78-84.
- CAO Longlong, ZHANG Hengchun, YAN Jia, et al. Analysis of core blockage morphology and exploration of anti-blockage methods in trip round coring[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 78-84.
- [34] 滕学清, 刘洪涛, 李宁, 等. 塔里木博孜区块超深井自动垂直钻井难点与技术对策[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 11-15.
- TENG Xueqing, LIU Hongtao, LI Ning, et al. Difficulties and technical countermeasures for automatic vertical drilling in ultra-deep wells in the Bozi Block of the Tarim Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 11-15.
- [35] 张恒春, 曹龙龙, 王文, 等. 万米科学特深井防斜纠斜技术方案及研究建议[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 31-37.
- ZHANG Hengchun, CAO Longlong, WANG Wen, et al. Technical scheme and research suggestion of deviation prevention and correction for myriametric extra-deep scientific well[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 31-37.
- [36] 程红文, 朱恒银, 刘兵. 南岭科学钻探NLSD-1孔防斜及纠斜技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 109-117.
- CHENG Hongwen, ZHU Hengyin, LIU Bing. Deviation prevention and correction technology for NLSD-1 hole of Nanling scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 109-117.
- [37] 高德利, 黄文君. 超深井工程理论与技术若干研究进展及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 1-11.
- GAO Deli, HUANG Wenjun. Research and development suggestions on theory and techniques in ultra-deep well engineering[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 1-11.
- [38] 柴麟, 张凯, 张耀澎, 等. 小直径垂钻工具推力执行机构性能测

- 试[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):87-93.
- CHAI Lin, ZHANG Kai, ZHANG Yaopeng, et al. Performance test of the pushing actuator of the small diameter vertical drilling tool[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):87-93.
- [39] 许洁.超高温水基钻井液技术及其流变模型研究——以松科二井为例[D].武汉:中国地质大学,2015.
- XU Jie. Research on ultra-high temperature water-based drilling fluid and its rheological model—Take the case of well CC-SD-SK2[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [40] 佚名.“地壳一号”万米钻机施工“松科2井”科学钻探工程[J].钻探工程,2024,51(4):178.
- Anon. The "Crust 1" 10000-meter drilling rig is undertaking the scientific drilling project of the "Songke 2 well" [J]. Drilling Engineering, 2024,51(4):178.
- [41] 张飞宇.全液压排管机动力学特性研究[D].长春:吉林大学,2016.
- ZHANG Feiyu. Research on dynamic characteristics of hydraulic pipe handler[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [42] 张正,冉恒谦,张毅,等.特深科学钻探装备技术现状与发展建议[J].钻探工程,2024,51(4):14-22.
- ZHANG Zheng, RAN Hengqian, ZHANG Yi, et al. Technical status and development suggestions of extra-deep scientific drilling equipment [J]. Drilling Engineering, 2024, 51 (4) : 14-22.
- [43] 尹浩,梁健,孙建华,等.地质特深孔绳索取心钻杆机械性能研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):58-64.
- YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Research on mechanical properties of wireline coring drill pipe for geological ultra-deep hole[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):58-64.
- [44] 杨芳,张明德,王勇军,等.深部钻探绳索取心跨口径钻具的应用研究与拓展[J].钻探工程,2023,50(4):25-31.
- YANG Fang, ZHANG Mingde, WANG Yongjun, et al. Research and development of cross-diameter wire-line coring system in deep drilling [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (4) : 25-31.
- [45] 曾思敏,杨永顺,张秉强,等.深孔地质岩心钻探中跨口径绳索取心钻具运用[J].中国地质调查,2024,11(6):15-21.
- ZENG Simin, YANG Yongshun, ZHANG Bingqiang, et al. Application of cross-diameter wireline corer drilling tool in deep hole geological core drilling [J]. Geological Survey of China, 2024,11(6):15-21.
- [46] 张泽国.SYZX金刚石绳索取心液动锤冲击回转钻进技术应用探讨[J].中国设备工程,2020(17):187-188.
- ZHANG Zeguo. Discussion on the application of SYZX diamond drill string self-priming hydraulic hammer impact rotary drilling technology [J]. China Plant Engineering, 2020 (17) : 187-188.
- [47] 夏建湘.深孔钻探防斜纠斜技术措施探究[J].资源信息与工程,2019,34(4):58-59.
- XIA Jianxiang. Exploration of anti-skid and correction measures for deep hole drilling [J]. Nonferrous Metals Abstract, 2019,34(4):58-59.
- [48] 杨泽英,齐力强,崔淑英,等.深孔绳索取心液动锤钻具的研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):66-70.
- YANG Zeying, QI Liqiang, CUI Shuying, et al. Development and application of wire-line coring hydro-hammer for deep hole [J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(12):66-70.
- [49] 王跃伟,刘秀美,李得新,等.YZX108型液动潜孔锤的研制与试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):85-88.
- WANG Yuewei, LIU Xiumei, LI Dexin, et al. Development and test of YZX108 hydraulic DTH hammer [J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44 (8):85-88.
- [50] 李文斌,于泽瑞,杨文彬.绳索取芯液动锤冲击回转钻进技术及其在钻探施工中的应用[J].西部探矿工程,2017,29(1):58-61.
- LI Wenbin, YU Zerui, YANG Wenbin. Hydraulic hammer impact rotary drilling technology with rope core and its application in drilling construction [J]. West-China Exploration Engineering, 2017,29(1):58-61.
- [51] 罗光强,李扬,周策,等.深孔智能化钻井参数远程监控及工况识别系统研究[J].地质与勘探,2022,58(3):696-702.
- LUO Guangqiang, LI Yang, ZHOU Ce, et al. Intelligent remote monitoring and the work-condition identification system for deep drilling [J]. Geology and Exploration, 2022, 58 (3) : 696-702.

(编辑 王跃伟)