

“超万米特深井钻探工艺与钻具专题”编者按:向地球深部进军,是保障国家能源资源安全、推动深地科学探测的战略方向。特深井钻探,是解锁万米地层信息、实现深部资源勘探的关键工程手段。近年来我国相继实施了多项超万米特深井钻探工程,同时取得了一系列具有自主知识产权的工艺与钻具创新成果。及时总结和系统报道这些阶段性进展,对于凝聚行业共识、促进技术迭代具有重要意义。为此,编辑部策划组织了“超万米特深井钻探工艺与钻具专题”,特邀岳文教授、梁健正高级工程师、徐良教授担任客座主编。经严格审稿,择优刊发10篇论文,聚焦特深井取心技术与器具、高温高压环境钻进机理、井斜控制技术、钻柱动力学、金刚石钻头及其镀层强化工艺、钻杆高温力学性能及表面防护涂层等核心方向,集中展示我国在该领域的新理论、新认识、新技术,力求体现学术前沿与工程实践的深度融合。希望本专题的出版能为特深井钻探技术进步提供有益借鉴。

特深井大陆科学钻探绳索取心技术挑战与展望

岳文^{1,2}, 梁健³, 张恒春³, 朱丽娟⁴, 朱丽娜^{1,2}, 王志乔^{1,2},

王瑜^{1,2}, 贾建波⁵, 薛启龙^{1,2}, 刘凡⁶, 徐良^{1,2}, 王金印²

(1. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 4. 中国石油集团工程材料研究院有限公司油气钻采输送装备全国重点实验室, 陕西 西安 710077; 5. 中海油田服务股份有限公司, 天津 300459; 6. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 北京 102206)

摘要:特深井大陆科学钻探是揭示地球深部物质组成、构造演化与资源潜力的关键途径,岩心是解读地层信息的第一手实物证据。绳索取心作为高效获取岩心的核心技术,直接决定取心质量与钻探效率。然而,超万米钻探受超高温、超高压、高应力与复杂地层的共同作用,易造成钻头寿命缩短、密封失效、岩心卡堵、丢心风险加剧,同时还存在钻杆强重比差、孔壁摩阻大、井底动力钻具输出扭矩不足、送钻精度低等诸多难题。本文系统综述了绳索取心技术的挑战、进展与趋势,剖析了深部极端工况下取心钻具、钻柱、动力钻具、垂钻系统、随钻测井系统及动态测试平台等方面的技术瓶颈,总结了国内外在这些领域的最新进展。结果表明,尽管各项关键技术已取得重要突破,但仍亟待解决材料在极端环境下的适应性、井下密封传动可靠性及智能测控协同等问题。未来需依托多学科交叉融合创新,重点攻关可耐受300℃、175 MPa工况的钻具材料,推进智能取心钻头、耐高温机械式垂钻与取心工艺的智能化融合,构建多场耦合动态测试与评价标准体系,实现从传统取心技术向智能绳索取心技术的战略升级,为万米级科学钻探提供坚实的技术保障。

关键词:特深井;大陆科学钻探;绳索取心;钻柱系统;井底动力钻具;垂钻系统;随钻测井;动态测试平台

中图分类号:P634.5;TE245 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)04-0001-13

Challenges and prospects of wireline coring technology for ultra-deep continental scientific drilling

YUE Wen^{1,2}, LIANG Jian³, ZHANG Hengchun³, ZHU Lijuan⁴, ZHU Lina^{1,2}, WANG Zhiqiao^{1,2},

WANG Yu^{1,2}, JIA Jianbo⁵, XUE Qilong^{1,2}, LIU Fan⁶, XU Liang^{1,2}, WANG Jinyin²

(1. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083,

收稿日期:2026-05-08; 修回日期:2026-06-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.04.001

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:2024ZD1000906)

第一作者:岳文,男,汉族,1981年生,教授,地质工程专业,博士,研究方向为特深井科学钻探工艺与钻具,北京市海淀区学院路29号, yw@cugb.edu.cn。

引用格式:岳文,梁健,张恒春,等.特深井大陆科学钻探绳索取心技术挑战与展望[J].钻探工程,2026,53(4):1-13.

YUE Wen, LIANG Jian, ZHANG Hengchun, et al. Challenges and prospects of wireline coring technology for ultra-deep continental scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2026,53(4):1-13.

China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China; 4. State Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an Shaanxi 710077, China; 5. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China; 6. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China)

Abstract: Continental scientific drilling in ultra-deep wells is a crucial approach to revealing the deep Earth's material composition, tectonic evolution, and resource potential, and cores serve as the first-hand physical evidence for interpreting stratigraphic information. As the core technology for highly efficient core acquisition, wireline coring directly determines coring quality and drilling efficiency. However, drilling beyond 10,000 meters, subjected to the combined effects of ultra-high temperature, ultra-high pressure, high stress, and complex formations, is prone to causing shortened bit life, seal failures, core jamming, and an increased risk of core loss. Meanwhile, numerous challenges persist, such as the poor strength-to-weight ratio of drill pipes, high wellbore friction, insufficient output torque of downhole motors, and low feed delivery accuracy. This paper systematically reviews the challenges, advances, and trends of wireline coring technology. It analyzes the technical bottlenecks of coring tools, drill strings, downhole motors, vertical drilling systems, logging-while-drilling (LWD) systems, and dynamic testing platforms under deep extreme working conditions, and summarizes the latest global advances in these fields. The results indicate that although significant breakthroughs have been made in various key technologies, urgent issues still remain to be resolved, including the adaptability of materials to extreme environments, downhole sealing and transmission reliability, and intelligent measurement and control synergy. Future development should rely on multidisciplinary cross-integration and innovation, focusing on developing drilling tool materials capable of withstanding 300 °C and 175 MPa, promoting the intelligent integration of smart coring bits, high-temperature-resistant mechanical vertical drilling systems, and coring processes, and constructing a multi-field coupled dynamic testing and evaluation standard system. This will achieve a strategic upgrade from traditional coring technology to intelligent wireline coring technology, providing a solid technical guarantee for 10,000-meter-level scientific drilling projects.

Key words: ultra-deep well; continental scientific drilling; wireline coring; drill string system; downhole motor; vertical drilling system; logging while drilling; dynamic test platform

0 引言

随着我国“向地球深部进军”战略的深入推进,特深井(通常垂深超过9000 m)大陆科学钻探成为揭示地球深处物质组成、构造演化、深部热能与矿产资源潜力的重要途径。2018年完钻的松科二井终孔深度达7108 m,成为亚洲最深的大陆科学钻井,突破了高温钻探与大口径连续取心等关键技术,为白垩纪陆相古气候重建和地球深部构造研究提供了地层信息支撑^[1]。工程实践与研究表明,超万米钻探将受到超高温、超高压、高应力等极端环境联合作用,加之地质条件的复杂性及不确定性,导致钻头寿命低、钻具材料蠕变老化、系统密封失效、岩心破碎堵塞、打捞丢心风险剧增,同时绳索取心钻杆强重比差、连续取心极易中断、孔壁摩阻大、地表驱动困难、井底动力钻具输出扭矩不足、送钻精度低等一系列工程难题,给绳索取心技术在特深井科学钻探领域应用带来严峻挑战。随着钻探深度不断增加,传统绳索取心技术已难以独立满足超高温、高压及复杂地层条件下的连续取心需求。为提高取心效率、保障井眼

质量、实现井下信息实时获取并验证关键钻具可靠性,绳索取心技术正逐步与井底动力钻具、垂钻系统、随钻测量及动态测试平台等技术深度融合,形成面向特深井钻探的新型技术体系。井底动力钻具、垂钻系统、测井与随钻测量等技术与绳索取心钻进技术耦合融合、一体化和智能化趋势逐渐显现,其相互作用、相互影响,推动或制约特深井取心技术的演化迭代。钻具动态性能测试平台为特深井科学钻探钻柱及井下钻具实现工程化应用提供支撑和保障。基于此,本文以特深井大陆科学钻探绳索取心技术为主线,围绕绳索取心钻具及其配套关键技术展开综述,分析其面临的挑战、发展现状及未来趋势,以期为我国超万米科学钻探工程提供技术参考。

1 特深井绳索取心技术面临的挑战

1.1 深部地层的复杂环境

深部钻探过程中,地层温度与压力随井深增加而不断升高,且岩性组合复杂多变、非均质性增强,这些因素共同制约着绳索取心的稳定性与取心质

量。复杂岩性地层中,岩石的强度、硬度及研磨性差异显著,钻进过程中易引发钻头受力不均、井底振动增强及岩心扰动加剧等现象,进而造成岩心破碎、堵塞及岩心采取率下降等问题。在高温高压地层环境下,钻具材料易发生性能退化,密封系统可靠性下降,钻柱承载和取心作业面临更大挑战。钻进中钻柱承受动态拉伸、压缩、弯曲、扭转、振动等载荷和温度载荷的复合作用,增加井下钻具断裂风险^[2]。绳索取心存在环空面积小、钻井液排量低的特点,在深井段极易引发卡钻事故,同时存在钻井液高温稳定性控制困难、地层破碎易失稳、环空循环压耗大、上部井段上返速度低等关键技术问题,进一步加剧了井下工程风险^[3-5]。

1.2 绳索取心钻具系统的技术挑战与要求

1.2.1 技术挑战

特深井科学钻探绳索取心系统首先面临的是内管总成超长距离投放和打捞的可靠性问题,目前国内成熟应用的绳索取心钻具钻进深度普遍在3000 m左右,与万米的目标差距巨大,深度跃升带来的技术鸿沟是巨大的难题^[6]。其次,高温、高压极端环境与高频高强振动等恶劣工况耦合作用下,如何有效解决取心钻具材料性能退化、结构失效风险带来的井下安全隐患是另一难题^[7]。最后,面对深部极坚硬、强研磨、易破碎等复杂地层,取心钻具如何保证岩心“进得去、损耗少、取得出”是又一大难题。

1.2.2 技术要求

(1)绳索取心系统内管总成可在超万米钻柱内顺利投放到位,并具有可靠的到位报信功能,且回次钻进结束后,打捞器可顺利、快速回收内管总成。

(2)钻具外管总成,特别是连接螺纹、扩孔器、钻头的关键部件应具有较高的力学性能,避免发生诸如钻具断裂、切削齿崩落等事故^[8]。

(3)绳索取心系统钻头、扩孔器应具有合理的结构强度和进尺寿命,兼具优良的热稳定性、广谱性和机械钻速指标^[9]。

(4)绳索取心钻具应采用低摩阻岩心管,同时优化钻头结构,降低岩心进入岩心管的阻力,提高回次进尺。

(5)绳索取心钻具单动机构应具备高可靠性,防止单动失效导致岩心磨损;针对破碎地层,优化卡取机构、钻具流场;同时具备堵心报警功能。

(6)优化岩心卡取结构材料性能,提高卡簧性

能和高温稳定性、普适性、承托力,确保岩心卡取机构可靠性^[10]。

(7)钻具应具有较长的岩心容纳能力,以提高回次进尺,减少打捞次数。

(8)绳索取心钻具需具备良好的现场适应性、易维护性与易操作性,适用不同的钻井液体系和工况条件,同时便于井口操作和维护。

1.3 钻柱系统的技术挑战与要求

1.3.1 技术挑战

钻杆连接地表钻机与井底钻具,传递动力,为钻井液循环建立通道,面临的工况极为严苛^[11],这对钻杆材料、结构和性能提出了前所未有的挑战^[12]。主要包括:(1)超高静载与交变载荷的复合作用;(2)高温环境下的力学性能衰减与蠕变效应;(3)复杂井下振动与动态失稳;(4)钻井液腐蚀与高温-应力腐蚀失效。

1.3.2 技术要求

(1)轻质高强特性。钻杆需具备高比强度以减轻钻柱自重^[13]。传统材料(如30CrMnSiA、XJY850)强度不足,需研发高性能低密度合金或复合材料^[14]。轻质高强度钻杆能提高特深井钻探能力,缓解拉伸应力,降低钻机设备提升载荷。复合钻柱技术^[15]能显著减轻钻具总重,满足特深井钻深要求。

(2)优异的高温力学性能。传统铝合金钻杆因软化温度较低,在高温下力学性能衰退明显^[16],容易导致钻杆在深部高温地层过早失效。通过引入特殊合金材料,可显著提升钻杆在高温环境下的力学性能。因此,开发和应用高性能合金钻杆是实现高效钻探的重要保障。

(3)卓越的抗疲劳与耐腐蚀性能。钛合金因其密度低、比强度高、耐腐蚀性能优异等特点,已成为超深井钻柱轻量化设计的重要候选材料,其较低的密度能够有效降低钻柱自重和井口悬挂载荷,同时良好的耐腐蚀和疲劳性能有助于提高钻杆在复杂工况下的服役寿命^[17]。

1.4 动力钻具的技术挑战与要求

动力钻具是特深井钻探的重要井下工具,其性能直接影响钻头破岩效率、钻进稳定性及取心质量。随着井深增加和地层条件复杂化,常规钻进方式已难以满足特深井绳索取心作业需求,动力钻具在提高钻进能力、改善复杂地层适应性等方面的作用日益突出。同时,动力钻具与取心系统在结构匹

配、动力传递和工况适应等方面也面临更高的挑战。因此,有必要结合特深井绳索取心工艺特点,研制新型动力钻具。

1.4.1 技术挑战

特深井井下超高温环境会使传统螺杆钻具的橡胶热老化、膨胀、硬化乃至脱胶,进而引起容积效率下降、漏失增大和输出扭矩衰减等现象^[18]。涡轮钻具对钻头类型、流量和井底负载极为敏感,若钻头与涡轮钻具匹配不当,极易出现启动困难、制动工况增多等问题^[19]。同时,涡轮钻具对钻井液清洁度和循环压降更为敏感^[20]。液动锤内部配流机构、冲击发生机构和冲击传递机构同时面临高频循环载荷和高速流体冲蚀的双重作用,易产生阀件失效、运动件卡滞、冲击效率衰减和钻具疲劳损伤等问题。综上所述,动力钻具与绳索取心工艺的结构耦合,是特深井应用中区别于常规井底动力钻进的关键难点,其技术挑战已不再局限于单一工具,而是演化为从动力输出到循环系统、取心结构及钻柱动力学多因素耦合的系统性难题^[21]。

1.4.2 技术要求

(1)耐高温高压与长寿命的工作要求。螺杆钻具应重点突破定子材料、轴承密封和润滑体系的高温失效问题,应向高温弹性体增强、全金属马达方向发展。涡轮钻具与液动锤则应重点提升关键承载件、叶片、阀件和冲击副的耐热疲劳、耐冲蚀和耐腐蚀能力。

(2)输出特性与岩层匹配的要求。螺杆钻具应保持低转速、大扭矩输出优势,并通过定子与转子的型线优化与泄漏控制提高高温条件下的容积效率。涡轮钻具应围绕叶片优化、多级串联和减速等技术,提升输出扭矩、转速匹配和抗制动能力。液动锤钻具则需具备冲击频率与冲击功的井下调节能力。

(3)动力钻具与绳索取心工艺的兼容性要求。动力钻具必须具备适宜的中空通道,保证内管总成、打捞器及配套部件能够顺利投放、悬挂和回收。同时,动力段与取心段之间的连接结构应尽量简单,避免局部缩径、流道突变或复杂台阶引发内管卡滞和流动附加阻力。

(4)水力效率与井筒循环适配要求。动力钻具应在较宽流量范围内保持稳定工作,并尽可能降低无效压降和附加泵压损失。特别是涡轮钻具与液

动锤,应增强对钻井液清洁度和固相含量的适应性。

(5)耐磨、抗振与易维护要求。动力钻具关键零部件应具备良好的抗磨损、抗疲劳和抗冲击性能,同时采用模块化、可更换式结构设计,降低现场维护成本,提高寿命与重复利用率。

(6)复合化与可控化发展要求。应加强螺杆钻具、涡轮钻具与液动锤之间的复合应用,并与长筒取心、同径取心、连续定向取心等工艺协同优化,形成可按地层特征灵活切换的多模式动力取心技术体系。

1.5 垂钻系统的技术挑战与要求

特深井绳索取心过程中,随着井深增加和地层非均质性增强,钻柱受力状态更加复杂,井斜与井眼轨迹控制难度明显提高。井眼偏斜不仅会加剧钻柱摩阻与振动,还会影响取心工具投放、岩心完整性及钻进稳定性。因此,垂钻系统在特深井绳索取心中的作用突出,其控斜能力、环境适应性及其与取心系统的匹配性,已成为影响复杂地层取心效果的重要因素。

1.5.1 技术挑战

垂钻系统主要分为电控式和机械式两类,二者在纠斜精度与耐温耐压能力之间存在难以兼顾的矛盾:电控式精度较高但耐温($<200^{\circ}\text{C}$)耐压差,机械式耐温(300°C)耐压强,但纠斜精度易受井下振动和摩擦的影响而降低。现有电控式垂钻系统难以满足深部钻井高温、高压、强振动要求,关键部件性能亟待提升^[22]。面对特深井科学钻探的极端高温环境,机械式垂钻系统耐温优势明显,已成为超高温条件主动防斜打直工具的唯一选择^[23]。

1.5.2 技术要求

(1)高温环境下的可靠性与稳定性。轴承、密封、执行机构等关键部件材料需具备优异的抗高温、抗蠕变、抗氧化性能和尺寸稳定性^[24]。

(2)主动纠斜能力。机械式垂钻系统需具备高分辨率、高重复性和高抗冲击能力,纠斜执行机构需输出足够大的纠斜力,响应速度快,动作精准可靠^[24]。

(3)高温高压下的结构完整性。承压外壳需厚壁设计或采用高强度材料(如高强度合金钢),密封件需针对超高压环境进行特殊设计和验证^[24]。

1.6 随钻测井系统的技术挑战与要求

随钻测井系统在特深井绳索取心过程中承担井下参数测量、井眼轨迹监测及地层信息获取等功能。随着井深增加和井下工况复杂化,高温、高压、强振动等环境因素对测井系统稳定性与信号传输能力提出了更高要求,其环境适应能力与系统可靠性直接影响取心作业效果。

1.6.1 技术挑战

测井系统在特深井中面临的工况与挑战表现在:(1)高温失效;(2)高压密封失效;(3)振动与冲击损伤;(4)信号传输深度瓶颈;(5)井眼轨迹控制困难;(6)系统集成空间受限。

1.6.2 技术要求

(1)要求电子元器件可在230℃、250 MPa环境下连续工作500 h以上,需采用SiC/GaN宽禁带芯片、绝缘体上硅(SOI)工艺和高温共烧陶瓷(HTCC)金属封装。

(2)微型化耐高温传感器受绳索取心钻具内径及井下工具组合尺寸限制,需在28 mm空间内集成测量伽马、电阻率、密度、井径、声波等参数的传感器,伽马计数率 >5 cps/API,电阻率覆盖 $0.1\sim 10000\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

(3)超高速遥测实现需10 Mbps有线钻柱或12 bps连续波泥浆脉冲,并保证光纤在随钻300℃环境中衰减 $<0.4\text{ dB/km}$ 。

2 绳索取心关键技术的研究进展

2.1 绳索取心钻具的研究进展

2.1.1 常规绳索取心钻具的研究进展

国内外绳索取心钻具的主体结构类似,典型组成如图1^[25]所示。国外绳索取心成熟应用最深纪录为5422.70 m,由加拿大Heath & Sherwood钻探公司在南非Witwatersrand盆地金矿勘探中创造并一直保持。国内绳索取心技术水平与国外相当,没有明显技术差距。国内绳索取心钻进应用深度纪录为4006.17 m^[26],由山东省第三地质矿产勘查院在三山岛岩金勘探科学钻探中创造。

2.1.2 大直径绳索取心钻具的开发和应用

由于科学钻探、水文水井、煤层气等领域的特殊需求,在传统绳索取心技术的基础上,国内外学者研发了大直径绳索取心钻具(150 mm井径以上),并在部分深井科学钻探工程成功应用。

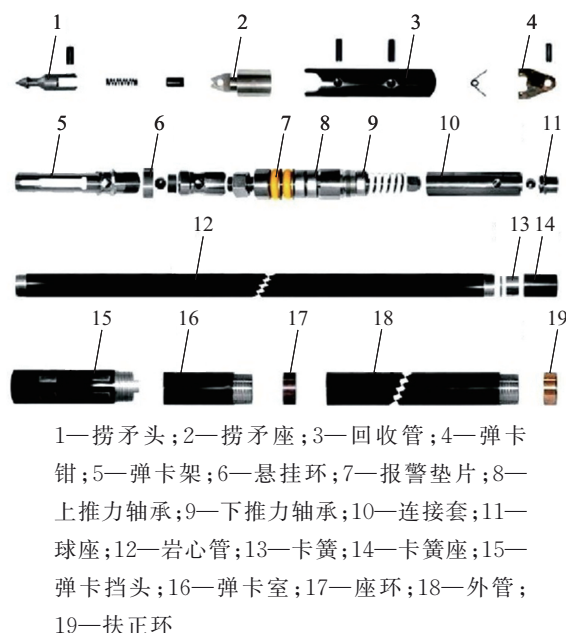


图1 绳索取心钻具基本组成^[25]

Fig.1 Basic components of wireline coring tool

(1)德国KTB先导孔。德国KTB先导孔孔深4000.1 m,上部孔段采用“石油钻杆+提钻取心”的工艺取心钻进,480~3893 m孔段采用了绳索取心钻进工艺进行连续取心。绳索取心钻杆和钻铤外径均为139.7 mm;绳索取心钻具外管外径140.5 mm,内径110 mm;岩心管外径106 mm,内径97.5 mm;钻头外径152.4 mm,岩心直径94 mm。共使用71只金刚石绳索取心钻头,钻进3142.6 m,获取岩心3055.7 m,岩心采取率97.23%^[25]。

(2)中国大陆科学钻探科钻1井(简称科钻1井)。科钻1井以井底动力驱动的提钻取心为主要取心工艺,并在157 mm井眼开展了顶驱驱动绳索取心钻进、螺杆马达驱动绳索取心钻进、顶驱驱动液动锤绳索取心钻进、螺杆马达驱动液动锤绳索取心钻进四种绳索取心工艺试验,其中以螺杆马达液动锤驱动绳索取心钻进工艺效果最佳,具体如表1所示^[27]。

(3)松科2井。松科2井针对深度大、口径大的特点,设计了一种新型“三合一”取心钻具,即中空井底动力绳索取心钻具:中空螺杆(或中空涡轮)+中空液动锤+绳索取心。使用时,中空螺杆(或中空涡轮)、中空液动锤随钻头一起下钻到井底,钻具内管总成通过钻柱及中空井底动力钻具的中间通道投放到位。另外,针对大口径及高温特点,设计了涡轮钻具+绳索取心、液动锤+绳索取心的“二

表1 科钻1井绳索取心试验情况
Table 1 Wireline coring test results of the CCS-1

工 艺	进尺/m	平均回次进尺/m	纯钻时间/h	钻速/(m·h ⁻¹)	岩心长度/m	岩心采取率/%
顶驱驱动绳索取心钻进	7.62	1.52	12.02	0.63	1.05	13.8
螺杆马达驱动绳索取心钻进	6.72	2.24	20.59	0.33	4.83	71.9
顶驱驱动液动锤绳索取心钻进	8.27	2.76	9.25	0.89	8.23	99.5
螺杆马达驱动液动锤绳索取心钻进	71.73	7.17	62.57	1.15	69.72	97.2

合一”取心钻具,以及涡轮钻具+液动锤+绳索取心“三合一”取心钻具。松科2井围绕大口径深井取心需求,共进行了12回次不同类型的绳索取心试验,涉及311、216、152 mm等不同口径井段,最深绳索取心试验深度达6451 m^[28]。

2.2 钻柱系统的研究进展

2.2.1 钻杆材料与制造工艺的优化

我国已突破XJY950级冷拔无缝钢管技术^[29],通过优化材料与制造工艺,满足深孔、特深孔绳索取心需求,显著提升钻杆强度与寿命。对特深孔钻杆管材残余应力的系统研究,进一步提升了钻杆在复杂工况下的稳定性^[30]。直连绳索取心钻杆采用“两端强化、中部柔性”的分区热处理工艺:两端调质硬度达38~42 HRC时,耐磨性提高9.1%;中部调质硬度33~38 HRC,强度提升37.7%,抗冲击性提高46.7%,同时保持管体延伸率。该技术实现钻杆高强度与柔性的平衡,尤其适合全液压钻机及深孔施工^[31]。

2.2.2 钻杆复合结构的优化

在钻柱下部采用钛合金钻杆(仅为钢密度的56%、弹性模量的52%),上部保留高强度钢钻杆,形成梯度复合结构。该结构对静态强度井口拉伸裕度提升170~362 kN(全钢钻杆基准960 kN),显著提升超深井钻柱安全性;动态特性方面,钛钻杆段刚度低,使旋转速度下降15~30%,振动加速度峰值降低40%,有效抑制黏滑振动;位置优化方面,钛钻杆段置于6000 m以深,井壁碰撞风险最低,动态应力较全钢方案降低28%^[32]。通过复合钻杆柱技术(钢+钛/铝基合金),钻柱总重减少18~25%,下部钻柱重力减轻30%以上。万米科学钻探钻柱设计应采用轻量化、高强度及分级优化配置思路,以提高钻柱承载能力和服役可靠性^[33]。在钻杆接头结构优化方面,通过双复合锥度设计使最后啮合处应力集中降低35%,并采用柱面-锥面复合密封

结构,使密封压力提升至175 MPa(常规设计极限约140 MPa)^[34]。

2.3 动力钻具的研究进展

近年来绳索取心动力钻具在螺杆钻具、涡轮钻具及复合钻具等方面取得了显著技术进展,其具体技术进展与代表性成果如表2所示。总体上看,动力钻具技术正沿着螺杆钻具高温全金属化、涡轮钻具减速增矩与中空化、液动锤复合化增强破岩的路线发展。但从特深井大陆科学钻探的需求看,动力钻具在250~300℃长期稳定工作、长行程绳索取心工艺兼容及关键轴承密封等方面仍存在明显短板。

2.4 垂钻系统的研究进展

2.4.1 国外垂钻系统的研究进展

国外已形成以电控式、机械式及旋转导向兼垂钻功能为代表的多类型技术体系。贝克休斯VertiTrak/AutoTrak V系统采用静态推靠式设计,配合电控稳态式稳定平台,由MWD控制单元、高性能动力马达单元及导向机构组成,如图2所示,适用于大尺寸井眼垂直钻井作业,其耐温能力由150℃逐步提升至175℃^[40-41]。斯伦贝谢PowerV系统采用动态推靠式结构,哈里伯顿V-Pilot及VertiSteer系统、Scout Downhole公司Vertical Scout系统和威德福Revolution-V系统则分别在机械稳定平台、重力感应纠斜和指向式纠斜等方面形成了不同技术路线^[42-44]。总体来看,国外垂钻系统在商业化应用和井斜主动控制方面较为成熟,但多数电控式系统耐温能力仍在150~200℃范围,难以完全满足特深井绳索取心对300℃高温环境、长时间工作稳定和取心通道兼容性的要求。

2.4.2 国内垂钻系统的研究进展

(1)兼具垂钻功能的国产旋转导向系统。中石油的CG STEER旋转导向系统(推靠式)、中海油“璇玑”旋转导向系统(推靠式)、中石化IB Plus旋转

表 2 井底动力钻具的主要技术进展与代表性成果

Table 2 Major technical advances and representative achievements of downhole motor

技术类型	代表性钻具	关键技术特点	应用效果
涡轮钻具	TDR1-127 减速涡轮钻具 ^[35]	集成减速机构,实现低转速、大扭矩输出	在塔河油田超深井试验中表现良好
	小尺寸涡轮钻具 ^[36]	转速 100~1200 r/min,扭矩 400~1300 N·m	地质勘探定向孔硬岩钻进,钻速提高 50~100%
	全金属涡轮钻具	耐温>260℃,制动扭矩最大 1300 N·m	适用于高温硬岩地层的绳索取心作业
螺杆钻具	中石化纳米复合橡胶螺杆 ^[37]	材料耐温 215℃	已应用 17 井次,国产螺杆钻具耐温性能重大突破
	全金属螺杆马达 ^[38]	耐温目标 300℃,金属定子-转子摩擦副	解决超高温问题,处于研发试验阶段
复合钻具	三合一组合钻具 ^[39]	绳索取心、液动锤、螺杆马达集成	CCSD-1 井 5129.33 m 深处成功取心
	液力举升绳索取心钻具	正循环钻进、反循环液力打捞	解决水平孔和大深度直孔下入难题

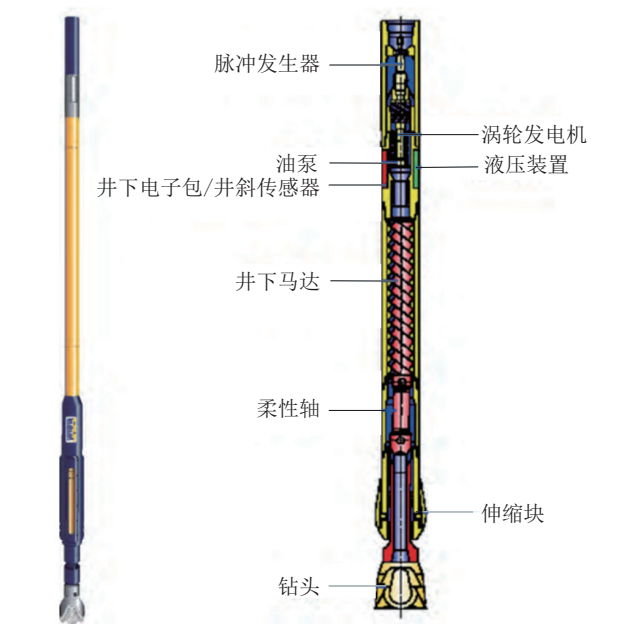


图 2 VertiTrak 结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of VertiTrak structure

导向系统在常规工况下的垂直钻井控制方面表现良好,但在超高温($>200^{\circ}\text{C}$)特深井环境下的适应性仍受限于电子元件耐温能力。

(2)电控式垂钻系统。中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院研制的捷联式自动垂钻系统(SL-AVDS)采用捷联式结构,最高工作温度 100°C ^[42]。中国石油集团工程技术有限公司与武汉科技大学联合研发的CGVDS垂钻系统利用钻柱机械能驱动液压系统,实现主动纠斜控制。渤海钻探工程有限公司与德国智能钻井公司合作开发的BH-VDT5000垂钻系统适用于大尺寸井眼。西部钻探工程有限公司 $\varnothing 311\text{ mm}$ 垂钻系统具备自

主发电、井下闭环控制及井斜实时传输等功能。中国地质大学(北京)研发的电机驱动式垂钻工具为小井眼地质钻探提供了新的技术方案。

(3)机械式垂钻系统。中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院在SL-AVDS基础上研制出UPC-VDS垂钻系统^[42],如图3所示。该系统采用机械式稳定平台取代电控式稳定平台,耐温能力得到显著提高。中国石油大学(北京)设计的具有外偏置机构的机械式自动垂钻系统,西部钻探工程有限公司设计的含液压系统的自动垂钻系统等,均为机械式垂钻系统的发展提供了新的设计思路。宝鸡石油机械有限责任公司与西安石油大学联合研制了具有自主知识产权的全旋转推靠式自动垂钻系统。

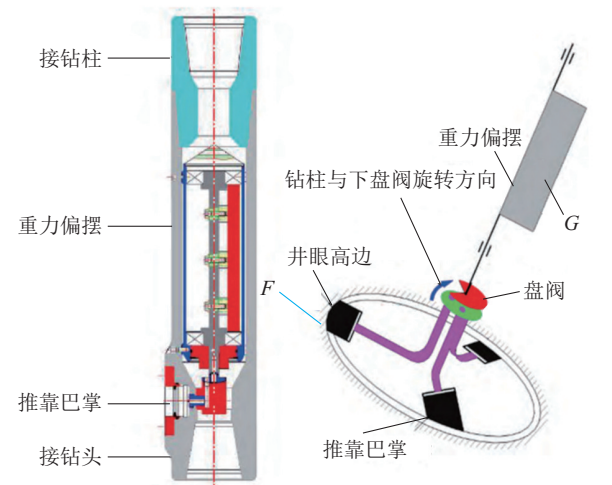


图 3 UPC-VDS 系统结构及纠斜原理

Fig.3 Structure of UPC-VDS system and its deviation correction principle

综上所述,国外在垂钻系统的商业化应用方面处于领先地位,国内虽然在电控式和机械式垂钻系统方面均取得了一定进展,但在稳定性、可靠性、耐高温性和使用寿命等方面与国际先进水平仍存在较大差距,尤其在井斜控制精度和重力感应灵敏度方面差距明显,尚无法满足超万米特深井垂直钻井的工程需求。

2.5 测井系统的研究进展

2.5.1 电缆测井系统的研究进展

近十年来,美、欧、中、日等在电缆测井系统方面竞相取得突破。德国KTB采用200℃有线电缆LWD实现0.5 m分辨率电阻率成像,英国Weatherford通过175℃EM-MWD+中继短节在结晶岩7000 m井深实现5 bps连续传输^[45]。

技术进展集中体现在:(1)仪器微型化,测井仪外径需适配绳索取心钻杆内径(通常为73 mm),集成自然伽马、电阻率、井径等参数采集功能^[46];(2)存储式记录,摒弃实时电缆传输,采用井下存储模式,耐高温耐压性能达150℃、60 MPa级别^[47];(3)水力输送匹配性,仪器浮力与钻井液泵量(100~160 L/min)精确匹配,确保在水平段稳定移动^[48]。此类技术已形成小口径超长水平孔综合测井技术体系,

成为绳索取心钻孔测井的重要补充手段^[49]。

2.5.2 随钻测井系统的研究进展

中石化石油工程技术研究院185℃绳索取心-MWD在顺北53-2H井8874 m处连续工作168 h无故障^[46]。中国地质调查局300℃微型声波绳索取心系统在8000 m井段试验,通过相变蓄热内管使岩心冷却速率 $<3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,微裂缝密度降低60%^[47,50]。日本JAMSTEC正研制300℃光纤随钻系统,计划用于2028年南海海槽万米科学钻探^[51]。

技术进展集中体现在:(1)前探测能力,电磁波远探测距离达30~60 m,可提前识别断层与目标层界面^[49];(2)井下自主化,集成智能决策模块,实现压力异常时自动调整钻井参数^[52];(3)小型化适配,针对绳索取心钻杆73 mm内径,研发短节距、模块化LWD工具,实现与取心钻具的无干扰轮换作业。此外,随钻测量系统的振动与冲击监测^[53-54]、姿态测量与传感器校准^[55-57]、电源与能量管理技术及高温电子系统可靠性等方面也取得了重要进展^[58]。

2.6 超深井钻探动态测试平台的研究进展

2.6.1 国内外现有钻具测试平台

关于国内外模拟高温高压井筒/釜体装置的研究进展如表3^[59-65]、表4^[66-71]所示。

表3 国外典型钻具测试平台
Table 3 Typical foreign drilling tools test platforms

测试平台/机构	最高温度极限	最高压力极限	主要测试功能
TerraTek/NETL Ultra-Deep Drilling Simulator(UDS) ^[59]	250℃	207 MPa	模拟超深井井底高温高压环境,开展单齿/PDC切削齿、岩石和钻井液相互作用测试
TerraTek Wellbore Simulator ^[60]		围压140 MPa,孔隙压力83 MPa	可在较大尺寸岩样上开展钻井模拟、井壁稳定性、钻头-岩石相互作用及井筒环境模拟试验
Sandia High Operating Temperature(HOT)Drilling Facility ^[61]	300℃	以高温开放式钻进模拟为主,未见高压釜指标	用于高温地热钻井工具测试,重点评价高温潜孔锤、耐热材料、涂层、润滑及钻进参数响应
NORCE Ullrigg Test Centre ^[62-63]	依赖具体试验井和测试工况	部分试验井可加压至30 MPa	具备全尺寸海洋钻机试验环境和多口试验井,可开展钻井工艺、井控、控压钻井、自动化钻井和井下工具工程化验证
GFZ KTB Depth Laboratory ^[64-65]	约265℃井底原位温度	随井深变化的原位压力条件	依托德国KTB主孔和先导孔,开展深部原位测井、井下仪器、地应力、流体和地球物理测试

近年来针对高温高压钻具测试平台的技术进展主要集中体现在:(1)钻具测试平台研究主要围绕井下环境模拟及钻具力学行为分析等方面展开,极端环境模拟能力普遍提升,可实现高温高压多参数协同模拟,能精准评估动力钻具综合性能、失效

机理与工作特性^[72];(2)现有钻具测试平台已逐步向实验与仿真结合的方向发展,多场耦合模拟技术升级,突破单一参数模拟局限,大幅提升井下工况复现保真度;(3)测控体系向智能化、高精度发展,配备多维度传感器阵列与自动化控制系统,实现测

表 4 国内典型钻具测试平台

Table 4 Domestic typical drilling tools test platforms

研制单位	平台/设备名称	主 要 功 能	核心技术参数
西南石油大学	DTTS-200-140 高温高压井下工具试验系统 ^[66]	高温高压下井下工具及橡胶制品的功能、强度、力学、老化及可靠性综合试验	140 MPa、200 ℃, 轴向载荷 0~300 kN, 扭矩 0~10 kN·m, 井筒内径 225 mm, 有效工作高度 6 m
四川大学	保真取心高温高压综合测试平台 ^[67]	测试深部原位保压取心器关键部件的耐温耐压性能	150 ℃、140 MPa, 测试舱可旋转 90°, 可实现取心器中心杆的抽拉动作
长江大学	井筒环境模拟实验平台 ^[68]	模拟全过程井筒环境, 开展录井测试及井下工具高温高压性能验证	140 MPa、200 ℃, 井筒长度 12 m
中国科学院地质与地球物理研究所 (怀柔深地平台)	高温超高压综合试验系统 ^[69]	模拟万米井深环境, 验证井下仪器的环境适应性、可靠性、机械强度和密封性	250 ℃、220 MPa, 工作腔内径 330 mm, 工作腔长度 12 m
中海油服新疆实钻测试基地	探索者号实钻测试平台 ^[70]	实钻工况模拟, 井下工具可靠性全尺寸实井验证	158 ℃、120 MPa
深圳市亿威仕流体控制有限公司	井下工具性能试验装置 ^[71]	模拟井下高温高压环境, 实时测控温度与压力, 检测封隔器、胶筒等工具及密封元件的耐温、耐压与密封性能, 并支持新型井下工具的研制试验	350 ℃、210 MPa

试参数的实时采集、数据预处理及闭环调控, 提升测试数据的准确性^[73]。

2.6.2 面向绳索取心的动态测试平台

由表 5^[74-78]可知, 国内外面向绳索取心的测试平台呈现出明显的“工程装备化+试验验证并行发

展”特征。国内研究主要集中于取心过程模拟及绳索取心力学性能测试, 如密闭取心试验系统和绳索加载装置, 能够实现取心效率及力学响应的实验分析, 但整体仍以单一功能验证为主。

表 5 面向绳索取心动态测试平台研究进展

Table 5 Research progress on dynamic testing platform for wireline core drilling

研制机构	装 置 描 述	主要性能与参数	主要应用方向与特点
哈尔滨工业大学	超声辅助取心测试平台 ^[74]	可测钻压、扭矩、进尺	模拟取心过程, 提高取心效率
中煤科工西安研究院	绳索密闭取心试验系统 ^[75]	提升取心气体保持能力, 提升速度 60 m/min	模拟井下取心与快速打捞过程
加拿大/美国工程公司	绳索取心工程测试系统(现场+实验) ^[76]	深度>500 m, 连续取心	强调真实地层条件下性能验证
国际科研机构(IODP 等)	深海/深地科学钻探绳索取心系统 ^[77-78]	高保真取心+压力保持	面向极端环境与高质量岩心获取

总体来看, 现有研究虽已覆盖取心过程模拟、绳索力学测试及工程化应用平台, 但仍存在明显不足: (1) 实验平台多与实际工程系统分离; (2) 缺乏针对“投放—取心—打捞”全过程的动态模拟能力; (3) 多场耦合(振动、温压、流体)测试手段仍较薄弱。因此, 构建面向全过程与复杂工况的系统级动态测试平台仍是该领域的重要发展方向。

3 对绳索取心关键技术的未来展望

面向超万米特深井大陆科学钻探的工程目标,

未来科学钻探工艺与关键钻具的发展将高度聚焦于新材料新工艺的突破、智能化与信息化的深度融合, 以及依托大科学装置协同验证。基于此, 未来以绳索取心钻进为主体, 融合井底动力、随钻测量等技术的超深井绳索取心钻探体系将逐渐成熟并完成万米科学钻探工程应用。在地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项的支持下, 聚焦科学钻探工程关键技术问题及面临的挑战, 近期应重点在以下方面实现突破。

(1) 实现新材料与新工艺的集成创新。亟需研

发屈服强度 ≥ 900 MPa的轻质钛合金钻杆、耐高温密封与卡取机构、低摩阻岩心管和长寿命金刚石取心钻头,并配套研发适应 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境的低滤失水基钻井液,保障超深井复杂地层条件下岩心采取率稳定在90%以上,提高绳索取心系统的作业效率与长期可靠性。

(2)推动智能化与信息化的深度融合。重点研发长效机械式耐高温垂钻系统,实现超深复杂工况下井斜 $\leq 3^{\circ}$ 的精准主动控制;攻克智能取心钻头关键技术,通过在钻头本体集成测量单元与微型处理芯片,实现对近钻头工况、岩性等参数的实时感知与反馈优化;突破耐高温电子元器件瓶颈,开发集成温度、压力、振动等参数的高精度随钻测量短节,以及长时间作业的超万米电缆测井系统,提升井下原位环境感知与参数优化能力。

(3)构建大科学装置与评价标准体系。亟需搭建 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、175 MPa高温高压多场耦合动态测试平台,模拟投放、取心、堵心识别、打捞和回收全过程,制定绳索取心钻具、动力钻具、测控短节和钻柱系统的测试评价与寿命预测标准,形成从特深井科学钻探工程装备研发、试验验证到工程应用的技术闭环。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 蔡明杰,罗鑫,付强,等.深地川科1井超大尺寸井眼钻柱失效力学机制及对策[J].机械设计与研究,2025,41(1):57-62.
CAI Mingjie, LUO Xin, FU Qiang, et al. Mechanical mechanism and countermeasures of drilling string failure in ultra-large holes in Well SDCK-1[J]. Machine Design & Research, 2025, 41(1): 57-62.
- [3] 孙金声,刘伟,王庆,等.万米超深层油气钻完井关键技术面临挑战与发展展望[J].钻采工艺,2024,47(2):1-9.
SUN Jinsheng, LIU Wei, WANG Qing, et al. Challenges and development prospects of oil and gas drilling and completion in myriametric deep formation in China[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 1-9.
- [4] 王明华,贺立勤,卓云,等.川渝地区9000 m级超深超高温超高压地层安全钻井技术实践与认识[J].天然气勘探与开发,2023,46(2):44-50.
WANG Minghua, HE Liqin, ZHUO Yun, et al. Practices and understandings on safe drilling technologies for 9000-m-level super deep and ultra high temperature and pressure strata, Sich-

- uan-Chongqing area[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2023, 46(2): 44-50.
- [5] 余朝毅.四川盆地超深层钻完井技术进展及其对万米特深井的启示[J].天然气工业,2024,44(1):40-48.
SHE Chaoyi. Progress in ultra-deep drilling and completion technology in the Sichuan Basin and its implications for extra-deep wells of more than ten thousand meters in depth[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 40-48.
- [6] 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.
- [7] 韩成,罗鸣,刘忠宝,等.莺琼盆地半潜式平台超高温高压钻并取心技术[J].钻采工艺,2021,44(4):28-30.
HAN Cheng, LUO Ming, LIU Zhongbao, et al. Ultra-HPHT drilling coring technology for semi-submersible platform in Yingqiong Basin[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(4): 28-30.
- [8] 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.
- [9] 孙晓东,蔡知,刘洪亮.深覆盖层地面沉降监测地质鉴别孔绳索取心钻进技术研究与实践[J].安徽地质,2025,35(4):310-315,348.
SUN Xiaodong, CAI Zhi, LIU Hongliang. Research and practice of wireline coring drilling for geological identification boreholes in deep overburden ground subsidence monitoring[J]. Geology of Anhui, 2025, 35(4): 310-315, 348.
- [10] 张恒春,王稳石,李宽,等.KT178型取心钻具在共和干热岩钻井中的应用[J].钻探工程,2021,48(2):29-34.
ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, LI Kuan, et al. Application of the Kt178 core tool in Gonghe hot dry rock exploratory wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 29-34.
- [11] 尹浩,梁健,孙建华,等.万米科学钻探钻杆柱的优化配置发展趋势[J].科技导报,2023,41(6):108-120.
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Development trend of drill string optimal configuration in myriametre scientific drilling[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(6): 108-120.
- [12] 林瀚.超深井钻具组合优化及安全评价方法研究[D].荆州:长江大学,2018.
LIN Han. The research of optimization and safety evaluation on drilling tools in ultra deep wells[D]. Jinzhou: Yangtze University, 2018.
- [13] 梁健,刘秀美,王汉宝.地质钻探铝合金钻杆应用浅析[J].勘察科学技术,2010(3):62-64.
LIANG Jian, LIU Xiumei, WANG Hanbao. Application analysis of aluminum alloy drilling rods in geologic drilling[J]. Site Investigation Science and Technology, 2010(3): 62-64.
- [14] 宋杨,祁永顺,李勇.科学超深井铝合金钻杆优化设计与腐蚀防护工艺研究[J].中国设备工程,2025(6):109-111.
SONG Yang, QI Yongshun, LI Yong. Research on the opti-

- mal design and corrosion protection technology of aluminum alloy drill pipes for scientific ultra-deep wells[J]. China Plant Engineering, 2025(6):109-111.
- [15] 李立鑫,张丰琰,张恒春,等.深井复合钻柱技术在特深科学钻探中的应用探讨[J].中国地质,2019,46(5):1200-1208.
LI Lixin, ZHANG Fengyan, ZHANG Hengchun, et al. A discussion on deep-well combined drill string technology for ultra-deep drilling engineering[J]. Geology in China, 2019, 46(5):1200-1208.
- [16] 张弛.钻杆用耐高温短碳纤维铝基复合材料组织与力学性能研究[D].长春:吉林大学,2020.
ZHANG Chi. Investigation on the microstructure and mechanical properties of heat-resistant short carbon fiber/Al composites applied in drill pipe[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [17] Wang L, Zhao X H, Wang X D, et al. Current status review of corrosion resistance applications of titanium alloys in the petroleum industry[J]. Coatings, 2024, 14(8):941.
- [18] 刘岩生,张佳伟,黄洪春.中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J].石油学报,2024,45(1):312-324.
LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1):312-324.
- [19] 谭春飞.深井超深井涡轮钻具复合钻井提高钻速技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
TAN Chunfei. The ROP technical research on turbo-drill composite drilling in deep&ultra-deep well[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [20] 朱旭明.松科2井井底涡轮钻具工况采集与分析系统研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
ZHU Xuming. Research on acquisition and analysis system for bottomhole turbodrill operating condition in Well Songke-2[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Qu J, Xue Q L, Wang J, et al. From design to experimental validation of the fully mechanical gravity tool face measurement-while-drilling system[J]. SPE Journal, 2024, 29(6):2971-2987.
- [25] 李鑫森,李宽,孙建华,等.国内外绳索取心钻具研发应用概况及特深孔钻进问题分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020, 47(4):15-23,39.
LI Xinmiao, LI Kuan, SUN Jianhua, et al. Development and application of wireline coring tool and diagnosis of ultra-deep hole drilling problems[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4):15-23,39.
- [26] 董海燕,王鲁朝,杨芳,等.国产CNH(T)绳索取心钻杆在中国岩金勘查第一深钻工程中的应用分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):49-53.
DONG Haiyan, WANG Luchao, YANG Fang, et al. Analysis on the application of China-made CNH(T) wire-line drill pipe in the first deep drilling engineering; construction by china rock gold exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(1):49-53.
- [27] 王达,张伟,张晓西.中国大陆科学钻探工程科钻一井钻探工程技术[M].北京:科学出版社,2007.
WANG Da, ZHANG Wei, ZHANG Xiaoxi. Drilling Engineering Technology of the CCS-1 well in the Chinese Continental Scientific Drilling Project[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [28] 张恒春,朱永宜,王稳石,等.特深科学钻探大口径绳索取心技术的可行性——来自松科2井的试验验证[J].钻探工程, 2026, 53(4):94-102.
ZHANG Hengchun, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, et al. Feasibility of large-diameter wireline coring technology for ultra-deep scientific drilling: Experimental verification from the CCS-2 east borehole [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4):94-102.
- [29] 肖红,孙建华,高申友,等.XJY950高钢级精密绳索取心钻杆用无缝钢管的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(6):12-15.
XIAO Hong, SUN Jianhua, GAO Shenyue, et al. Development of seamless steel pipe for XJY950 high-grade steel precision wire-line coring drilling pipe[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(6):12-15.
- [30] 孙建华,梁健,刘秀美.高钢级特深孔绳索取心钻杆管材残余应力试验研究[C]//2015中国地球科学联合学术年会论文集(九)——专题26深部资源探测技术与矿集区立体探测、专题27变质作用过程的观察与模拟.北京:中国地球物理学会, 2015:19-20.
SUN Jianhua, LIANG Jian, LIU Xiumei. Experimental study on residual stress of wireline coring drill pipe materials for high-grade and ultra-deep holes[C]//Proceedings of the 2015 Chinese Geoscience Union Annual Conference (Volume 9) — Session 26: Deep Resource Exploration Technology and 3D Detection of Ore Concentration Areas; Session 27: Observation and Simulation of Metamorphic Processes. Beijing: China Geophysical Society, 2015:19-20.
- [31] 何蕙岚,王久全,李秋玥,等.直连绳索取心钻杆分区热处理技术研究[J].钻探工程,2024,51(3):125-130.
HE Huilan, WANG Jiuquan, LI Qiuyue, et al. Research on zone heat treatment technology of straight-connected wire-line core drill pipe[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3):125-130.
- [32] Liu Q, Zhou B, Chen F, et al. Optimal design and nonlinear dynamic characteristics of titanium/steel drill pipe composite drill string for ultra-deep drilling[J]. Scientific Reports, 2023,

- 13(1):20491.
- [33] 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.
- [34] 张幼振,石智军,田东庄,等. 高强度大通孔钻杆接头圆锥梯形螺纹的有限元分析及改进设计[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1219-1223.
- ZHANG Youzhen, SHI Zhijun, TIAN Dongzhuang, et al. Finite element analysis and improved design for taper trapezium joint threads of high-strength drilling rod with big hole[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1219-1223.
- [35] 谭春飞,王甲昌,郑卫建,等. TDR1-127 减速涡轮钻具在塔河油田超深井的试验研究[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2): 93-96.
- TAN Chunfei, WANG Jiachang, ZHENG Weijian, et al. Test of reduction turbodrill TDR1-127 at ultra-deep wells in Tahe Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(2): 93-96.
- [36] 闫家,王稳石,张恒春,等. 松科2井带涡轮钻具取心钻进探索[J]. 钻采工艺, 2019, 42(1): 31-34.
- YAN Jia, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Songke well 2 core drilling exploration with turbine drill tools[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(1): 31-34.
- [37] 赵金海,张洪宁,王恒,等. 中国石化超深层钻完井关键技术挑战及展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 28-34.
- ZHAO Jinhai, ZHANG Hongning, WANG Heng, et al. Key technical challenges and prospects of drilling and completion in ultra-deep reservoirs, Sinopec[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 28-34.
- [38] 刘璐,王瑜,王镇全,等. 全金属螺杆钻具研究现状与关键技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(4): 24-30.
- LIU Lu, WANG Yu, WANG Zhenquan, et al. Research status and key technology of metal-to-metal screw PDM drills[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 24-30.
- [39] 王年友,谢文卫,冯起赠,等. 绳索取心、液动潜孔锤、螺杆马达“三合一”钻具[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, 32(S1): 45-47.
- WANG Nianyou, XIE Wenwei, FENG Qizeng, et al. 'Three into One' drilling tool which combined wire line core, hydro-hammer and PDM[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(S1): 45-47.
- [40] Reich M, Oesterberg M, Montes H, et al. Straight down to success: Performance review of a vertical drilling system[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: Society of Petroleum Engineers, 2003: SPE-84451-MS.
- [41] Bone G, Janwadkar S, John W, et al. Mature field benefits from application of high-end technology[C]// SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE/IADC Drilling Conference, 2005: SPE-92624-MS.
- [42] 柴麟. 准静态推靠机械式垂直钻进系统工作特性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2022.
- CHAI Lin. Research on the working characteristics of quasi-static push-the-bit mechanical vertical drilling system[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2022.
- [43] Jones S, Feddema C, Castro J, et al. Fully mechanical vertical drilling system delivers RSS performance in vertical drilling applications while providing an economical alternative to conventional rotary steerable systems set-up for vertical hold mode[C]// IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Fort Worth: Society of Petroleum Engineers, 2016: SPE-178788-MS.
- [44] Jones S, Sugiura J, Feddema C, et al. A new rotary-steerable system designed for vertical and nudge applications in North America pad development drilling [C]// IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Fort Worth: IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 2018: SPE-189705-MS.
- [45] Lu C H, Wang R J, Zhao H B, et al. Working mechanism and experimental study of electromagnetic measurement while drilling systems based on a relay station[J]. Geophysical Prospecting, 2021, 69(4): 878-890.
- [46] 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.
- ZHU Zhitong, WU Chuan, WEI Hairui, et al. Design of a near-bit downhole measurement system while drilling for wire-line coring[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 24-30.
- [47] Tang S, Gao W K, Liu K. Design and numerical study of active cooling system of measurement while drilling for high temperature based on supersonic[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 50: 103460.
- [48] Li Z M, Pang Y Y, Liu Y, et al. Design of positive pulse measurement while drilling system for mine rotary valve mud[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2782(1): 012019.
- [49] 王小波,张鹏. 无线电波随钻测量系统的发展与展望[J]. 地质装备, 2024, 25(1): 11-17.
- WANG Xiaobo, ZHANG Peng. Development and prospects of wireless electromagnetic wave measurement while drilling system [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024, 25(1): 11-17.
- [50] 樊懿锋,毛为民,艾维平,等. 超高温随钻测量系统中的电源技术[J]. 测井技术, 2024, 48(2): 198-203.
- FAN Yifeng, MAO Weimin, AI Weiping, et al. Power supply technology in ultra-high temperature MWD system [J]. Well Logging Technology, 2024, 48(2): 198-203.
- [51] 周建华. 高温LWD随钻仪器电子系统失效机理分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(22): 122-124.
- ZHOU Jianhua. Analysis of the failure mechanism of the electronic system of high-temperature LWD while-drilling instruments[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2024, 44(22): 122-124.
- [52] 徐军,陈凡,刘丰富,等. 工程地质勘察钻孔参数的随钻智能测量系统[J]. 山西建筑, 2024, 50(5): 59-62.
- XU Jun, CHEN Fan, LIU Fengfu, et al. Drilling performance measurement system for drilling parameters for geological exploration[J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(5): 59-62.
- [53] 李蒙. 随钻振动与冲击测量系统设计[D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
- LI Meng. Design of vibration and shock measurement system while drilling[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.
- [54] Wang L, Gou W C, Wang J, et al. Anti-vibration method for the near-bit measurement while drilling of pneumatic down-the-hole hammer drilling[J]. Applied Sciences, 2024, 14(18): 8565.

- [55] 石明江,曹人文,秦连升,等.全旋转随钻姿态测量系统的研制[J].仪表技术与传感器,2024(5):60-65.
SHI Mingjiang, CAO Renwen, QIN Liansheng, et al. Development of fully rotating attitude measurement system for follow drilling[J]. Instrument Technique and Sensor, 2024(5):60-65.
- [56] Malekizadeh A, Afarideh H, Mohamadian M, et al. Calibration of accelerometer and magnetometer sensors of MWD systems in directional drilling application[J]. Measurement Science and Technology, 2024,35(5):055111.
- [57] Liu Z W, Lei K, Song J C, et al. A designed calibration approach for the measurement-while-drilling instrument[J]. Applied Sciences, 2023,13(1):61.
- [58] Du T L, Dong F Y, Xu R J, et al. A drill pipe-embedded vibration energy harvester and self-powered sensor based on annular type triboelectric nanogenerator for measurement while drilling system[J]. Advanced Materials Technologies, 2022,7(11):2200003.
- [59] Jason L. Ultra-deep drilling cost reduction; design and fabrication of an ultra-deep drilling simulator(UDS): 1131938[R]. Salt Lake City: TerraTek, Inc., 2011.
- [60] Li Y H, Xie H P, Zhang R, et al. Design and development of the deep-rock in-situ condition-preserved coring calibration platform[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023,33(11):1377-1395.
- [61] Su J, David R, Somuri P, et al. Advanced percussive drilling technology for geothermal exploration and development; SAND-2017-4612[R]. Golden: Golden Field Office, 2017.
- [62] Cayeux E, Daireaux B, Ambrus A, et al. Autonomous decision-making while drilling[J]. Energies, 2021,14(4):969.
- [63] Mihai R, Cayeux E, Daireaux B, et al. Demonstration of autonomous drilling on a full-scale test rig [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers, 2022:SPE-210229-MS.
- [64] Harms U, Kück J. Superdeep tests and experiments at 9.1 km and 4 km [J]. Journal of Large-scale Research Facilities JL-SRF, 2016,2:A75.
- [65] Emmermann R, Lauterjung J. The German continental deep drilling program KTB: Overview and major results[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997,102(B8):18179-18201.
- [66] 刘辉,马辉运,曾立新,等.高温高压井下工具试验系统的研制与应用[J].石油机械,2019,47(12):100-105.
LIU Hui, MA Huiyun, ZENG Lixin, et al. High temperature and high pressure downhole tool test system[J]. China Petroleum Machinery, 2019,47(12):100-105.
- [67] Huang W, Li J N, Yang Y, et al. Design and experimental performance evaluation of high-temperature and high-pressure test platform for deep in-situ fidelity coring tools[J]. Advances in Geo-energy Research, 2025,15(1):55-67.
- [68] 朱柏宇,陈恭洋,毛敏,等.录井基础实验平台建设与应用[J].录井工程,2022,33(1):1-10.
ZHU Baiyu, CHEN Gongyang, MAO Min, et al. Construction and application of experimental platform based on mud logging[J]. Mud Logging Engineering, 2022,33(1):1-10.
- [69] 郭清滨,葛盛权,袁超,等.万米深地测井技术探索与实践——以深地塔科1井测井采集为例[J].深地能源科技,2025,1(1):117-127.
GUO Qingbin, GE Shengquan, YUAN Chao, et al. Exploration and practice of logging technology in ten thousand-meter deep formations: A case study of logging data acquisition in the Well Shendi Take 1[J]. Deep Earth Energy Science & Technology, 2025,1(1):117-127.
- [70] 王智明,贾立鹏,李刚,等.高速泥浆脉冲遥传系统推广适应性研究[J].西部探矿工程,2022,34(3):57-60.
WANG Zhiming, JIA Lipeng, LI Gang, et al. Study on the extension and adaptability of high speed mud pulse teleoperation system[J]. West-China Exploration Engineering, 2022,34(3):57-60.
- [71] 杨祥祥.动态模拟试验装置测控系统设计[D].青岛:中国石油大学(华东),2014.
YANG Xiangxiang. Design of measurement and control system for dynamic simulation test device[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2014.
- [72] 纪昌桂.小尺寸动力钻具测试平台设计及测试评价研究[D].荆州:长江大学,2023.
JI Changgui. Research on design of test platform and test evaluation for small size down hole motor[D]. Jinzhou: Yangtze University, 2023.
- [73] 刘岩.涡轮钻具试验台架检测控制系统的设计与实现[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
LIU Yan. Design and implementation of turbodrill test bench detection and control system[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016.
- [74] 王印超,全齐全,于红英,等.一种单压电叠堆驱动的回转冲击超声波钻[J].北京航空航天大学学报,2018,44(9):1850-1859.
WANG Yinchao, QUAN Qiquan, YU Hongying, et al. A rotary-percussive ultrasonic drill driven by single piezoelectric stack[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018,44(9):1850-1859.
- [75] 龙威成,孙四清.煤层气含量测定用绳索密闭取心装置及技术研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(3):133-139.
LONG Weicheng, SUN Siqing. Research on wireline sealed coring equipment and technology for coalbed methane content determination[J]. Coal Geology & Exploration, 2021,49(3):133-139.
- [76] Warren T, Powers J, Bode D, et al. Development of a commercial wireline retrievable coring system [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: Society of Petroleum Engineers, 1996:SPE-36536-MS.
- [77] Schultheiss P, Holland M, Humphrey G. Wireline coring and analysis under pressure: Recent use and future developments of the HYACINTH system[J]. Scientific Drilling, 2009,7:44-50.
- [78] Graber K K, Pollard E, Jonasson B, et al. Overview of Ocean Drilling Program Engineering Tools and Hardware [M]. College Station: Ocean Drilling Program, 2002.

(编辑 王跃伟)