

“特深钻探装备关键技术专题”编者按:特深钻探装备作为应对地下高温、高压及高地应力极端复杂工况,突破千米科学钻探技术瓶颈的核心关键装备,是我国挑战深地极限、实现深地探测科技自立自强的“国之重器”。近年来,我国相继实施了多项超千米特深井钻探工程,在特深钻探装备关键技术与核心装置研发方面取得了显著进展,为深地探测战略实施提供了有力保障。及时总结和系统报道相关阶段性进展,对凝聚行业研究共识、加速特深钻探装备技术迭代、提升国产化自主研发水平具有重要意义。为此,编辑部策划组织了“特深钻探装备关键技术专题”,特邀高科教授、张毅高级工程师、吕兰正高级工程师担任客座主编。经严格审稿,择优刊发10篇论文,紧密围绕特深大陆钻探装备发展、大深度绳索取心装备、井筒热管理及泥浆降温调控、钻井液流动传热与流变参数在线测量、井筒压力扰动传播与响应,以及关键部件力学行为、材料失效机理与装备智能运维等核心方向,集中展示我国在特深钻探装备领域的新认识与新技术,充分体现学术前沿理论、仿真研究与工程实践的深度融合。希望本专题能为特深钻探装备技术升级、国产化创新及工程应用提供有益借鉴。

特深大陆钻探装备关键技术的发展现状与展望

高科^{1,2}, 李宇丰^{1,2}, 宋维^{1,2}, 于永平^{1,2}, 王治刚^{1,2*}, 赵研^{1,2},
贾瑞^{1,2}, 赵焕峰³, 刘松赫^{1,2}, 曹家顺^{1,2}, 张毅⁴, 韩丽丽⁴,
张彪⁵, 康玉国⁵, 李红叶⁵, 张博⁶

(1. 深部探测与成像全国重点实验室, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 3. 吉林大学人工智能学院, 吉林 长春 130012; 4. 中国地质科学院, 北京 100037; 5. 矿山钻探救援应急管理部重点实验室, 北京 100040; 6. 中石化海洋石油工程有限公司, 上海 201208)

摘要:随着钻探深度向千米级乃至更深部延伸, 高温、高压、高地应力、超长管柱及长周期连续施工等因素相互耦合, 特深大陆钻探装备面临的主要矛盾已由单一载荷、功率等装备性能指标提升, 转变为复杂极端工况下装备体系综合作业能力与系统可靠性的协同提升。本文从装备体系演进角度出发, 分析特深大陆钻探装备的发展需求, 系统梳理自动化钻机、管柱移运及存储、节能与储能、智能安全运维等关键技术的发展现状, 并兼顾科学钻探高质量取心装备的特殊需求。当前特深大陆钻探装备已由大载荷、大扭矩等单机性能强化逐步向自动化、成套化、智能化方向发展, 但面向千米级乃至更深部钻探, 仍存在多装备协同能力不足、超长管柱连续处理与状态感知能力薄弱、能量动态优化水平不高等问题。面向未来, 特深大陆钻探装备应由“单机能力提升”向“系统能力重构”转变, 以全过程高效、安全、连续和低耗作业为目标, 重点发展以“一键式”多装备协同控制、软硬件模块化集成、自动化与智能化融合及井下自主驱动技术为核心的高效钻探装备系统, 推动特深大陆钻探由“地面装备主导、分环节作业”向“地面-井下协同、全过程闭环控制、自主连续作业”演进, 为未来特深大陆钻探装备体系建设与关键技术攻关提供参考。

关键词:特深大陆钻探; 超千米科学钻探; 钻探装备; 自动化钻机; 高质量取心; 智能运维; 节能储能; 新概念钻探技术

中图分类号: P634.3; TE92 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)05-0001-16

收稿日期: 2026-07-02; **修回日期:** 2026-08-12 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2026.05.001

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: 2024ZD1000806); 中国煤炭地质总局科技项目(编号: ZMKJ-2025-ZX06-1)

第一作者: 高科, 男, 汉族, 1977年生, 吉林大学特深钻研究中心主任, 教授, 地质工程专业, 博士, 主要从事仿生钻探机具、科学钻探装备、地热钻探等方面的研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民大街938号, gaokenm@jlu.edu.cn。

通信作者: 王治刚, 男, 汉族, 1971年生, 副教授, 机电一体化专业, 博士, 主要从事具身智能装备、智能集群海底钻采装备、自主作业工程装备等方面的研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民大街938号, zgwang@jlu.edu.cn。

引用格式: 高科, 李宇丰, 宋维, 等. 特深大陆钻探装备关键技术的发展现状与展望[J]. 钻探工程, 2026, 53(5): 1-16.

GAO Ke, LI Yufeng, SONG Wei, et al. Development status and prospects of key technologies for ultra-deep continental drilling equipment[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 1-16.

Development status and prospects of key technologies for ultra-deep continental drilling equipment

GAO Ke^{1,2}, LI Yufeng^{1,2}, SONG Wei^{1,2}, YU Yongping^{1,2}, WANG Zhigang^{1,2*}, ZHAO Yan^{1,2},
JIA Rui^{1,2}, ZHAO Huanfeng³, LIU Songhe^{1,2}, CAO Jiashun^{1,2}, ZHANG Yi⁴, HAN Lili⁴,
ZHANG Biao⁵, KANG Yuguang⁵, LI Hongye⁵, ZHANG Bo⁶

(1. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Changchun Jilin 130026, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 3. School of Artificial Intelligence, Jilin University, Changchun Jilin 130012, China; 4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. Key Laboratory of Mine Drilling and Rescue, Ministry of Emergency Management, Beijing 100040, China; 6. Sinopec Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

Abstract: As drilling depths extend to the 10000-meter level and beyond, factors such as high temperature, high pressure, high in-situ stress, ultra-long drill strings, and long-period continuous operations are coupled. The principal challenge facing ultra-deep continental drilling equipment has shifted from improving individual equipment performance indicators, such as load capacity and power, to the synergistic enhancement of comprehensive operational capability and system reliability under complex and extreme working conditions. From the perspective of equipment system evolution, this paper analyzes the development requirements of ultra-deep continental drilling equipment and systematically reviews the state-of-the-art of key technologies, including automated drilling rigs, pipe handling and storage, energy saving and storage, and intelligent safety operation and maintenance, while also addressing the special requirements of high-quality coring equipment for scientific drilling. Currently, ultra-deep continental drilling equipment has gradually evolved from stand-alone performance enhancement, such as high load and high torque, toward automation, complete-set configuration, and intelligence. However, for drilling at 10000 m and beyond, prominent problems remain, including insufficient multi-equipment collaboration capability, weak capability for continuous handling and condition monitoring of ultra-long drill strings, and inadequate dynamic energy optimization. Looking ahead, ultra-deep continental drilling equipment should shift from "stand-alone capability improvement" to "system capability reconstruction." Targeting full-process efficient, safe, continuous, and low-consumption operations, priority should be given to developing high-efficiency drilling equipment systems centered on "one-button" multi-equipment collaborative control, software-hardware modular integration, automation-intelligence fusion, and downhole autonomous driving technology. This will promote the evolution of ultra-deep continental drilling from "surface-equipment-dominated, stepwise operation" to "surface-downhole collaboration, full-process closed-loop control, and autonomous continuous operation," providing a reference for the system construction and key-technology breakthroughs of future ultra-deep continental drilling equipment.

Key words: ultra-deep continental drilling; scientific drilling exceeding 10000 m; drilling equipment; automated drilling rig; high-quality coring; intelligent operation and maintenance; energy saving and storage; new-concept drilling technology

0 引言

随着全球深地科学研究与深部资源开发需求的日益增长,深井、超深井乃至特深井钻探技术已成为地球科学前沿探索的关键手段^[1]。我国自“向地球深部进军”战略提出以来,先后实施了包括松辽盆地国际大陆科学钻探工程松科2井、万米级油气勘探井“塔科1井”与“川科1井”等系列钻井工程,这标志着我国钻探能力正由深层向特深层跨越式迈进^[2-5]。其中,钻探装备(图1^[6])作为实施特深钻探的物质基础与核心载体,其技术水平直接决定了钻探深度极限、作业安全性与综合效率。因此,围绕特深大陆钻探关键装备与核心技术开展系统

性攻关,已成为支撑我国深地战略实施、突破深部资源开发技术瓶颈的核心要务。

相较于常规钻探,特深大陆钻探受高温、高压、高地应力等地下极端地质条件约束,同时存在井斜控制、岩心取样、超长管柱作业等关键工程难点,致使施工周期长、非生产时间占比高、安全风险与综合成本显著增加^[7]。基于上述严苛工况条件,特深大陆钻探装备的发展既需持续提升关键单机装备的服役性能,还需向全井、全流程、全系统的整体化与系统化升级转变,以此实现钻探效率、运行可靠性、作业安全性和成本可接受的协同提升。

面向特深大陆钻井工况挑战与装备发展需求,

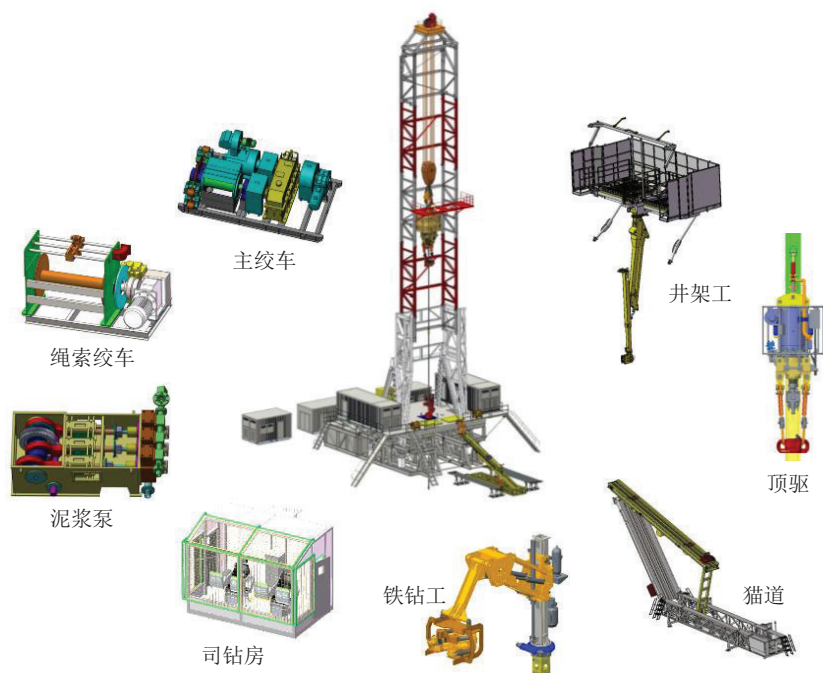
图1 钻探装备组成^[6]

Fig.1 Composition of drilling equipment

本文系统梳理了国内外特深大陆钻探装备关键技术的发展现状,分析了当前特深大陆钻探装备关键技术重点和存在的问题,进一步提出未来特深大陆钻探装备技术整体化与系统化升级建议,以及新概念钻井理念,以期为我国特深大陆科学钻探装备体系建设与关键技术攻关提供参考。

1 特深大陆钻探发展概况

目前,国内钻井界大都对垂深超过9000 m的井统称为特深井^[8],也有将特深井归类到超深井中^[9-10]。这种归类差异主要源于国内分级标准长期沿用的“深井-超深井”二级分级体系,未单独划分特深井范畴,而是将垂深超过6000 m的钻井统一归为超深井^[11]。需要明确的是,本文将井深超过9000 m的钻井界定为特深井。

此外,对于特深大陆钻探中的科学钻探井与油气勘探井(油气科钻),目前相关研究和工程实践中常存在概念交叉。需要指出的是,科学钻探井与油气勘探井不完全等同。前者通常以获取地球深部物质组成、结构特征及演化信息为主要目标,更强调连续取心、地质资料完整和科学观测精度^[12];而后者虽同样具有科学研究属性,但其工程实施往往服务于油气勘探开发需求,在取心规模、钻进目的

层位、井身结构设计、起下钻频次、测试评价方式及工程成本控制等方面均具有明显的油气钻井特征^[13]。因此,在讨论特深大陆钻探时,有必要对科学钻探与油气勘探加以区分。本文将“特深大陆钻探”作为统称使用,其内涵包括科学钻探与油气勘探,在后续讨论中,若涉及二者在目标任务、工程实施或技术需求方面的差异,将结合具体语境予以区分。

特深大陆钻探的实践始于20世纪70年代。1972年,美国完成了世界第一口特深油气勘探井——Baden1井,完钻井深9159 m,该井首次验证了9000 m级地层极端高温、高压工况下的钻井可行性,为后续特深大陆钻探工程积累了宝贵的经验^[14]。此后,全球特深大陆钻探正式进入探索阶段,苏联、德国等国家相继开展特深井工程实践,其中最具代表性的是苏联的特深科学钻探SG-3井。该井于1989年完钻,完钻井深达12262 m,至今仍保持着世界最深垂直井的纪录。相较于国际特深井工程的早期探索,我国特深大陆钻探起步相对较晚,但发展势头迅猛,截至目前国内实施的万米深井已达到6口。其中包括两口超万米特深科学探索井——深地塔科1井和深地川科1井,进一步突破特深井钻探深度极限,成为我国特深大陆钻探开发历程中的重要里程碑^[15]。国内外典型特深大陆钻探工程见表1^[16]。

表 1 国内外典型特深大陆钻探工程^[16]
Table 1 Typical ultra-deep drilling wells at home and abroad

名 称	井深/m	井 址	完钻时间	类 型
Baden1 井	9159	俄克拉荷马(美国)	1972	油气勘探
SG-3 井	12262	摩尔曼斯克(苏联)	1989	科学钻探
KTB 主孔	9101	巴伐利亚(德国)	1994	科学钻探
蓬深 6 井	9026	四川绵阳(中国)	2023	油气勘探
满深 8-H6 井	9047	新疆阿克苏地区(中国)	2024	油气勘探
深地塔科 1 井	10910	新疆阿克苏地区(中国)	2025	油气勘探
深地川科 1 井*	>10000	四川广元(中国)		油气勘探
新安 1 井	11156	新疆准噶尔盆地(中国)	2026	油气勘探

*截至 2025 年 10 月 15 日的最新报道,尚未完钻,井深已突破 10000 m。

2 特深大陆钻探装备发展需求

特深大陆钻探作为探索地球深部结构、获取深部资源和开展基础地质学研究的关键技术手段,其作业深度、环境条件与工程难度均远超常规钻探工程。随着钻探目标不断向地球深部延伸,高温、高压、高地应力、复杂岩性、超长井段及长周期连续施工等因素相互耦合,使特深大陆钻探装备面临的主要问题逐渐由单一载荷、功率等,转变为复杂工况下装备体系综合作业能力和系统可靠性不足^[17-18]。

从工程目标来看,油气勘探与科学钻探虽然在取心规模、测试评价方式及施工组织等方面存在一定差异,但对装备的大载荷承载、长周期稳定运行、高效起下钻及复杂工况适应能力均具有较强的共性需求。其中,科学钻探还承担深部取心、测井及原位科学观测等任务,对作业连续性、过程稳定性及科学信息获取质量提出了进一步要求。因此,面向未来特深大陆钻探工程,装备发展需要由单机性能提升逐步向全过程、全系统能力提升转变,重点满足综合作业性能、作业效率、管柱自动化处理与存储、能量高效利用及高质量取心等方面的发展需求。

2.1 钻探装备作业性能需求

当前,在特深大陆钻探条件下,装备能力的需求已不再主要体现在某一单项参数的提高上,而更多表现为对钻井全过程综合作业性能的支撑能力^[19]。如图 2^[20]所示,已有工程统计表明,美国墨西哥湾典型万米级特深油气钻井完钻周期已达到 120~160 d,但与之相匹配的是面对更高的温度和压力等复杂工况,表明特深大陆钻探已不是单纯突破目标深度的问题,而是演变为对长周期、重载荷和多工况耦合条件下装备体系持续作业能力的系

统考验^[20]。对于科学钻探,这种综合作业性能还体现在工程钻进与科学探测任务的同步实施。科学钻探除完成目标井深外,还需根据科学目标开展取心、测井和原位测试等作业,涉及钻进方式及井下工具的多次转换。因此,装备除了具有足够的承载与动力能力外,还需要保证不同作业状态下较高的控制稳定性和工序适应能力,避免装备状态波动影响岩心获取及井中科学观测。

在这一工程需求牵引下,国内外特深大陆钻探装备的发展重点也由单机能力增强逐步转向系统化、成套化升级,其中大载荷、高扭矩、高承压等能力成为装备迭代的主要方向。以顶驱为例,作为全球首台 15000 m 钻机配套顶驱,北京石油机械有限公司研发的 DQ150BSD 型顶驱整机功率 2200 kW,提升能力达 11250 kN,其意义在于单机性能水平提升的同时,保证整机系统的协同适配,服务于特深大陆钻探全过程作业能力的整体增强。

由此可见,顶驱装备的发展所反映的,并非单一关键设备能力的孤立提升,而是特深大陆钻探装备由点到面的系统化升级。换言之,特深大陆钻探装备作业性能的提升,是以高性能关键装备为基础,推动提升、旋转及控制保障等关键环节的协同优化,从而满足油气勘探与科学钻探等不同特深大陆钻探工程实施要求。

2.2 钻井作业效率需求

随着井深持续增加,钻井效率已成为制约特深井工程实施的重要因素。相较于常规深井,特深井在高温高压、复杂多压力体系及超长管柱等条件下,机械钻速下降、井下复杂情况增多、起下钻次数增加等问题更为突出,导致非钻进作业时间持续上

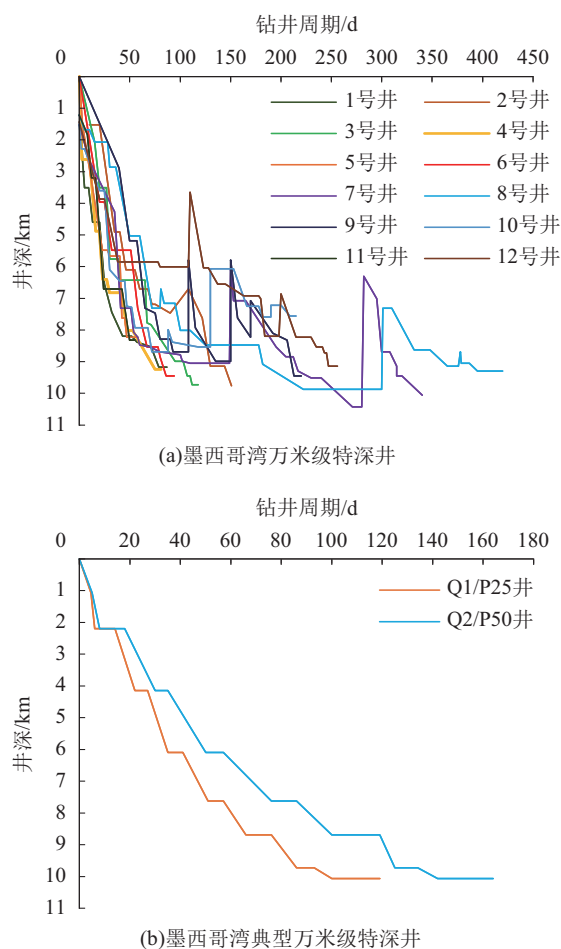
图2 墨西哥湾典型万米级特深井钻井进度统计^[20]

Fig.2 Statistical results of drilling progress of typical 10000-meter ultra-deep wells in Gulf of Mexico

升、施工周期明显拉长,尤其是井深超过万米后,起下钻时间占比超过80%,起下钻作业由常规深井中的辅助作业逐步演变为主导施工周期的关键环节^[21]。此外,科学钻探还需要频繁开展取心、测井及原位测试,其效率不能简单以日进尺衡量,而应兼顾岩心和科学数据获取质量。由此可见,特深井钻井效率不足并非单一技术短板所致,而是复杂地层条件、工具性能衰减与高负荷作业持续叠加形成的系统性结果。因此,提升复杂工况下的全过程作业效率与协同能力,已成为提高特深井工程实施水平的关键方向。

2.3 管柱自动化处理与存储需求

特深井钻探过程中,管柱数量随井深增加持续累积,起下钻频率高、单次作业周期长,使管柱处理与存储也逐渐成为制约作业连续性的关键环节。当前,管柱处理作业占整个钻井过程的时间超过

30%,而采用自动化机械装备进行管柱排放后,能够显著提高作业效率并降低劳动强度和安全风险^[22]。从国内中石化胜利石油工程公司在8口井应用其自研的DREAM50型钻井管柱自动化处理系统效果来看,采用管柱自动化处理可以增效15~20%^[23]。四川宏华石油设备有限公司自主研发的中国首台12000 m深智钻机,通过集成“一键联动”自动化管柱处理技术,提升了万米级特深井钻探中管柱作业的自动化水平。然而,在提高管柱处理效率的同时,管柱的存储同样值得关注。由于管柱在搬运、堆放及重复连接过程中易产生磨损、弯曲等损伤,其状态变化难以及时识别,进而影响到后续作业顺利进行。由此,构建高效、连续的管柱自动化处理与存储系统,融合在线检测与状态评估能力,已成为保障特深井作业安全性与连续性的关键需求^[24-25]。

2.4 钻探装备能量利用效率提升与智能安全运维需求

特深大陆钻探作业周期长、井深大、地层条件复杂,要求钻机、顶驱及泥浆泵等关键装备在全过程中保持连续、高负荷稳定运行,装备对电能的需求极大。以宝鸡石油机械有限责任公司研制的12000 m特深井自动化钻机为例,为满足特深井钻井作业需求,该钻机配备了7台功率1200 kW的柴油发电机^[26]。根据这一配置,钻机在作业过程中每天消耗的电能可达到数万甚至十数万千瓦时。与此同时,起下钻、旋转钻进和泥浆循环等不同工况下负荷波动明显,加之装备数量增加、协同关系增强及连续作业时间延长,使传统依赖人工巡检、经验判断和事后维修的运维方式已难以满足特深钻探安全高效运行需求。因此,未来特深大陆钻探装备需要在提高能量利用效率的同时,加强装备状态感知、故障诊断与风险预警能力,推动高效供能、能量优化利用与智能安全运维协同发展,以提升整个钻探装备系统的运行效率、可靠性和安全性。

2.5 特深科学钻探高质量取心需求

岩心是科学钻探直接获取地球深部物质组成、结构特征及演化信息的重要实物载体,其连续性、完整性和代表性直接关系科学目标的实现。因此,特深科学钻探不仅要求突破钻探深度,还需要实现深部岩心的连续、高质量和高效率获取。已有深部科学钻探工程表明,长井段连续取心和高岩心采取率是保障深部地质研究的重要基础^[27]。但随着钻

探深度进一步向万米级延伸,高温、高压、高地应力、复杂岩性及超长钻柱等因素相互叠加,岩心破碎、堵心丢心、取心效率下降及工具可靠性降低等问题将更加突出,同时频繁的岩心提取还会进一步增加起下钻时间,对钻探连续性和工程周期产生不利影响。因此,特深科学钻探要求取心装备在极端工况下兼具较高的环境适应性、运行可靠性和作业连续性,以保障特深科学钻探深部实物样品的高质量获取。

3 特深大陆钻探装备关键技术发展现状

针对特深大陆钻探在高温高压、高地应力、长周期重载运行及高频起下钻等条件下面临的装备承载、作业效率、管柱处理、能源利用、运行安全及科学取心等问题,国内外持续开展相关装备与关键技术研究。目前,已形成以自动化钻机、管柱移运及存储、节能与储能、智能安全运维及科学钻探取心等为代表的技术发展方向,部分装备和技术已通过工程应用验证,并逐步由单机性能提升向多装备协同、作业流程集成和系统智能控制方向演进。其中,自动化钻机、管柱处理、能源利用和智能运维主要面向特深大陆钻探的共性工程需求,取心技术则重点服务于科学钻探对深部岩心连续、高质量获取的特殊需求。因此,本文结合不同装备的功能定位、工程应用及技术特点,对上述关键技术的发展现状分别进行梳理,以分析当前特深大陆钻探装备的技术基础及其主要发展特征。

3.1 自动化钻机技术

自动化钻机技术源于钻井工程对高效率、本质安全和复杂工况稳定控制的持续需求。随着井深不断增加,起下钻频次、管柱处理规模及设备联合作业强度显著提升,传统依赖人工协同和单机分散控制的作业方式已难以适应特深井施工要求。因此,自动化钻机技术逐步由单机装备自动控制,发展为面向接单根、起下钻、排管和井口操作等关键工序的流程自动化,并进一步向整机协同控制和智能化管理演进^[28]。

由Nabors公司研发的PACE-R801型(图3^[29])钻机是世界首台全自动陆地钻机,在美国二叠纪盆地完成了第一口水平井全自动化作业,完钻井深6071 m,通过全自动化的钻机作业流程,使钻井周期缩短了4 d,碳排放量降低了15%~20%^[30]。我国在

大庆油田页岩油项目施工中应用的ZJ70DB型“一代”自动化钻机,相比常规钻机可减员30%以上,大大降低了劳动强度。同时,从作业效率来看,以接1根立柱为例,相较于常规钻机平均可节省2 min。不难看出,随着井深的增加,自动化钻机技术的应用是必然趋势^[31]。对于特深井工况,中石油集团自主研发的全球首台陆上12000 m自动化钻机(图4^[32]),通过自动化作业处理,减少人工重体力劳动超过80%。该钻机形成了覆盖管柱输送、排管、立根处理及井口操作的全流程自动化系统,并通过集成控制实现多设备协同运行,为特深井的安全高效施工提供了装备支撑。



图3 PACE-R801型全自动陆地钻机^[29]

Fig.3 PACE-R801 fully automated land drilling rig



图4 深地塔科1井12000 m自动化钻机^[32]

Fig.4 The 12000-meter automated drilling rig for Well Shendi Take 1

在全流程自动化系统基础上,四川宏华石油设备有限公司自主研发的中国首台12000 m深智钻机进一步推动了特深井钻机向数字化、智能化和协同化方向发展。该钻机核心部件和控制系统均由四川宏华自主研发,实现了钻机关键装备与控制系统的“全链条自研”。通过搭载UNISON 2.0控制系统

和视觉识别系统,该钻机能够实现钻井作业过程的数字化感知、集中控制和多装备协同,并基于“一键联动”技术提升起下钻等复杂工况的作业效率和连续性,为万米级特深井安全高效钻探提供了装备支撑^[33]。

总体来看,自动化钻机技术已由单机自动控制逐步向全流程、多装备协同方向发展。对于特深科学钻探,未来还需进一步将取心、测井及原位测试等科学作业纳入钻机统一控制体系,提高不同作业工序之间的自动衔接能力,从而兼顾钻探效率与科学信息获取质量。

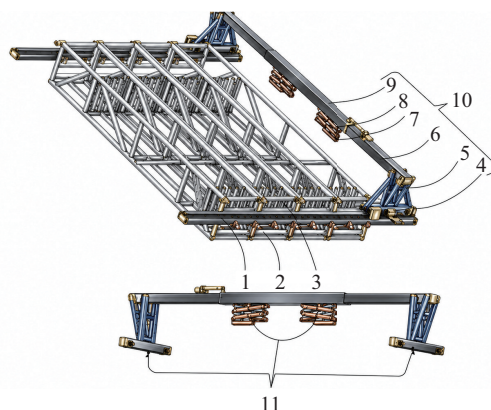
3.2 管柱移运及存储技术

在特深大陆钻探中,受井深和作业需求影响,超长管柱的应用正逐渐成为常态^[34-36]。因此,针对管柱的移运及存储技术的研究日益成为特深大陆钻探领域的重点,以应对高频次作业和极端工况的挑战。

在管柱移运方面,尤其是针对四单根的超长管柱移运,近年来,国内钻探装备企业开展了系列研究,并在现场实践中取得了良好的应用效果。例如,宝鸡石油机械有限责任公司研制的9000 m四单根立柱高效钻机,通过采用超高K型井架、优化设计立柱台及二层台的排放区域,并针对四单根立柱作业需求,创新设计了绞车容绳量及排绳方式,成功实现了四单根超长管柱的整体移运与排放作业^[37]。但是,该钻机无法实现小钻具四单根立柱施工,降低了整体提速效果。为此,后续宝鸡石油机械有限责任公司重点围绕小钻具排放的技术难题,提出了“悬持+推扶”的方法保证超长管柱的移运^[38]。

在管柱存储方面,由于当前钻井作业过程中需要对管柱进行大量往复操作,尤其是面对特深大陆钻探的情况,为此,各钻探公司都尝试在加快进尺的同时,减轻工人的劳动强度^[39]。河北华北石油荣盛机械制造有限公司通过研制PG-160+型自动排管系统(图5^[17]),一键式操作对管柱进行投递和回收,应用现场工程可将一次管柱投递循环控制在89 s,实现了管柱的高效存储。南阳二机石油装备集团股份有限公司则通过模块化和自动化的钻机管具处理系统,在澳大利亚某油田开展了现场应用,通过对管柱存储过程的高效管理,将施工人员由4~5人减少至1~2人,实现了管具处理的井架无人化和井口无人化作业^[40]。

综上所述,围绕管柱移运及存储技术,国内相



1—行吊轨道; 2—钻杆盒; 3—工位列档; 4—驱动装置; 5—倒三角形稳定支架; 6—横梁; 7—电磁吊具; 8—升降机; 9—滑套; 10—行吊; 11—传感器系统

图5 PG-160+型自动排管系统^[17]

Fig.5 PG-160+ automated pipe-racking system

关装备企业已在超长立根移运和管柱智能存储管理等方面形成了一定技术积累,并通过工程应用验证了其在提升管柱处理效率、降低人工投入和增强现场作业安全性方面的技术优势,为未来特深大陆钻探条件下管柱作业的自动化、连续化和高效化发展奠定了良好基础。

3.3 钻探装备节能与储能技术

钻探装备长期处于长周期、高功率的连续作业状态,尤其在特深大陆钻探条件下,更面临负荷波动大、动力保障难度高等问题,是油气井场能耗与碳排放的重要来源^[41]。为此,通过应用钻探装备的节能与储能相关技术,可有效提升系统运行的可靠性与能效水平,如图6^[42]所示。

在钻井作业中,实现动力系统高效节能运行的关键是如何保障柴油发电机组稳定运行^[43]。中石化钻井三公司针对钻井作业“区域分散、工况复杂、能源需求多样”的特点,通过优化动力驱动模式,把传统柴油驱动全面升级为油电混合驱动或网电直驱模式,在累计施工的73口井中,能源利用效率提升30%以上,单井能源成本降低25%^[44]。此外,相关工程实践中亦有采用电气化改造等技术的应用案例。应用结果表明,单台钻机每月可减少碳排放约405 t,直接油耗成本下降超过20%,说明该类技术在节能降耗与低碳转型方面具有显著效果^[45]。电气化改造通过优化供能结构、减少对单一柴油能源的依赖,有助于提升动力系统的稳定性与连续作业能力。同时,已有大量工程将主刹车改为能耗制

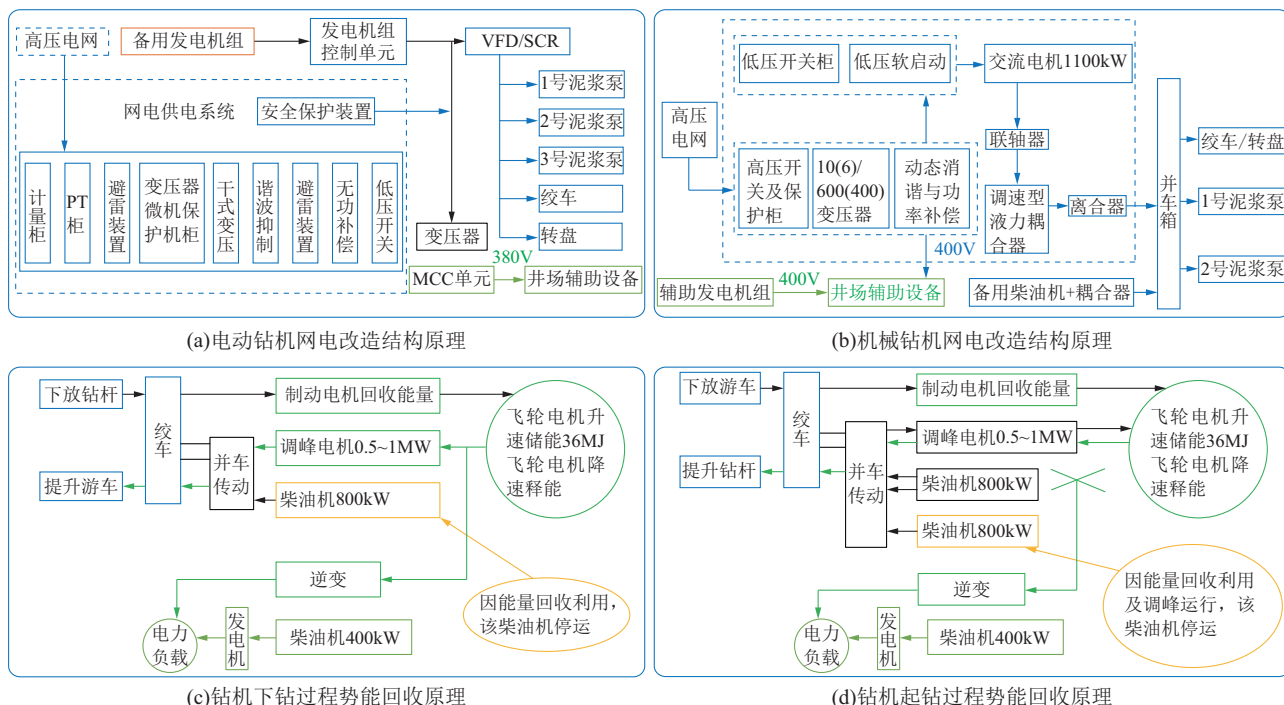
图6 钻机节能和储能技术^[42]

Fig.6 Energy-saving and energy-storage technologies for drilling rigs

动,进一步降低电能消耗。

储能方面,已有工程应用引入电池储能系统对钻井作业能量进行调节与管理,Patterson UTI 钻井公司利用锂电池存储和分配钻井作业所需能量,利用电池的削峰填谷的特性维持柴油发电机组运行稳定,降低油耗^[46]。四川宏华石油设备有限公司通过引入多源融合智能感知技术,进一步将能量消耗节约 10% 以上^[47]。除上述储能方式外,在钻机作业过程中,引入飞轮储能调峰运行系统,可对起钻下钻等工况下释放的势能,以及绞车非工作阶段动力机组处于轻载状态时的富余功率进行吸收与转化^[48]。总体而言,钻探装备节能与储能技术在提升能效、平抑负荷波动及降低碳排放方面具有显著潜力,是实现未来特深大陆钻探作业绿色发展的重要技术方向。

3.4 钻探装备智能安全运维技术

面对钻探装备系统规模扩大、设备协同关系增强及长周期连续作业带来的运行可靠性要求,传统依赖人工巡检、经验判断和事后维修的运维方式已难以满足装备安全高效运行需求^[49]。围绕钻探装备安全运行与连续作业保障,智能安全运维技术已逐步应用于关键装备状态监测、故障诊断预警、远

程运维管理、设备健康评估及维修决策支持等环节,并成为提升钻探装备可靠性和作业安全性的重要手段(图 7^[49])。

安徽省地质矿产勘查局 313 地质队研制的“5000 m 新型能源勘探智能钻探装备”采用全数字交流变频控制技术,集成参数采集、预警、控制及分析处理等数字化功能,支撑了钻探作业的智能化安全运维。该装备在实际工程应用中,创下了深度超过 4000 m 单井最短施工周期 37.75 d 的纪录^[50]。南阳二机石油装备集团股份有限公司结合其在钻修装备方面的研发经验,成功在 ZJ15/750Y 型液压钻机中融入智能安全运维技术,实现全程无人操作,最大一次性连续下钻超过 500 m,取得了显著的应用效果^[51]。中国地质科学院勘探技术研究所基于数据驱动的孔底状态动态模型,开展钻进参数智能优化与控制技术研究,通过实时感知钻压、转速、泵量及孔底响应等运行状态信息,实现异常工况识别、风险预警、参数自适应调控和作业状态在线优化,为钻探装备安全运行、故障预防和连续作业提供智能运维支撑^[52]。然而,目前,面向特深大陆钻探装备的智能安全运维实际工程案例较少;随着井深进一步增加,装备协同控制难度加大,数据采集

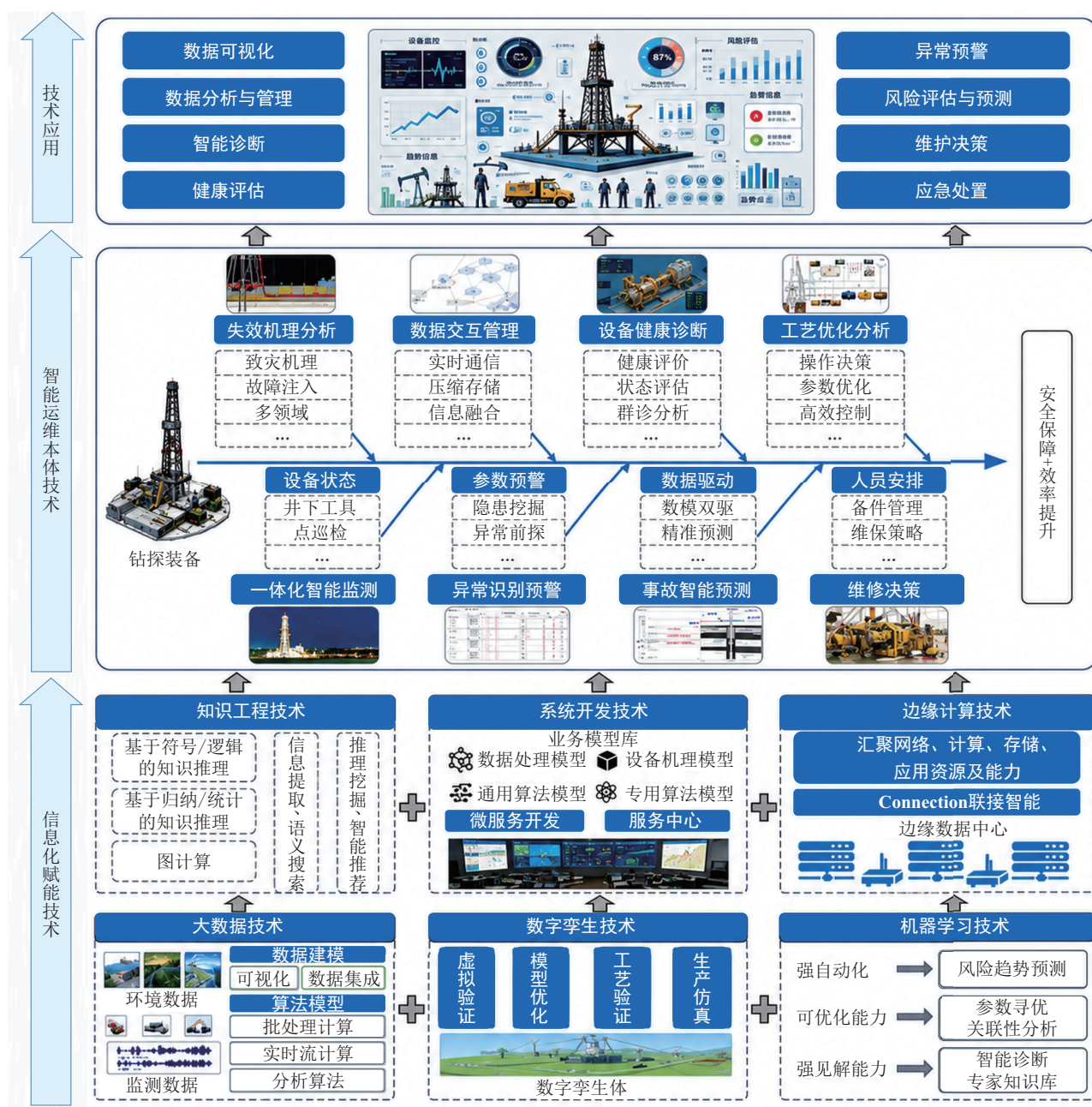
图7 钻探装备智能安全运维技术体系^[49]

Fig.7 Technical framework for intelligent safety operation and maintenance of drilling equipment

量呈几何级增长。为此,还需进一步匹配更高效的数据处理及控制算法,以满足特深大陆钻探的需求。特别是在科学钻探条件下,还需进一步将钻机状态、取心工具状态及井下工况信息进行关联分析,实现由单装备故障监测向钻探全过程健康管理转变,从而保障工程作业与科学探测任务连续实施。

3.5 特深科学钻探高质量取心装备技术

高质量岩心获取是科学钻探实现地质目标的核心环节,其对取心装备的要求不仅体现在岩心采

取率,还包括岩心的连续性、完整性及原始地层信息保持能力。围绕上述目标,深部科学钻探取心装备逐步由传统提钻取心向长回次、绳索取心及特殊取心方向发展,并通过取心钻具、井底动力、钻柱及测控系统的协同配套,提高复杂地层条件下的取心质量和作业稳定性^[53]。以我国自主研制的“地壳一号”万米大陆科学钻探钻机为例,该钻机额定钻深10000 m,并在松科2井科学钻探工程中得到应用。针对长井段高质量取心任务,工程设计连续取心井

段约 3535 m、岩心采取率超过 95%、岩心直径超过 100 mm,对钻机提升、循环、动力及取心作业协同能力进行了系统验证,为进一步发展万米级科学钻探高质量取心装备积累了工程基础^[2]。目前,面向万米级特深科学钻探的高质量取心装备正在由以“取得岩心”为主要目标,向高采取率、高完整度、低扰动和连续获取方向发展。

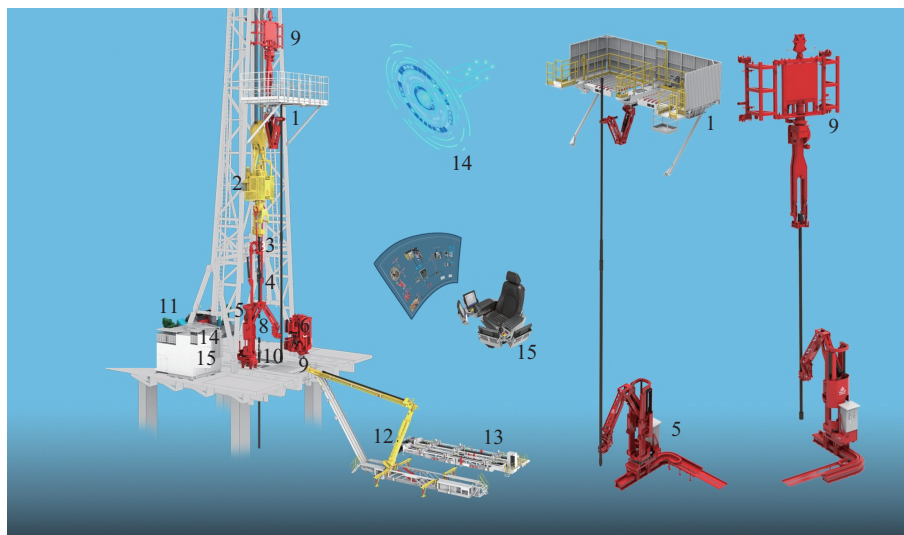
4 特深大陆钻探装备关键技术展望

面向特深大陆钻探,装备技术的发展重点已由单机能力提升逐步转向全流程、全系统能力重构。在满足油气勘探等特深钻探共性工程需求的同时,特深大陆科学钻探还承担深部岩心获取、测井及原位科学观测等任务,因此未来装备体系不仅要追求高效、安全和低耗,还应兼顾科学作业连续性、过程稳定性及岩心与原位数据获取质量。基于此,特深大陆钻探装备可重点从“一键式”协同操作、软硬件模块化集成、自动化与智能化融合及井下自驱动等方向开展技术升级。

4.1 特深大陆钻探装备系统“一键式”操作

随着特深大陆钻探井深不断增加,作业工况日益复杂,传统依赖单一装备独立运行的作业模式已

难以满足高效、安全钻井的现实需求。为应对这一挑战,石油钻井企业逐步开发并应用成套自动化系统,实现“一键式”操作,保证钻探装备之间的高效协同,从而提升整体作业效率并降低作业成本。如图 8 所示,四川宏华石油设备有限公司应用的“一键联动”自动化系统,能够实现对现场作业状态的实时监测,并基于预设执行程序对钻机台面设备进行协同控制,从而完成相关钻井流程操作。然而,随着钻井工况复杂程度的持续提升,现有钻探装备系统在“一键式”操作上还存在不足,在实际运行中仍然需要大量人工辅助操作,这不仅增加了钻井作业的安全风险,也在一定程度上制约了作业效率。面向特深大陆钻探工程,有必要进一步优化钻探装备系统的“一键式”操作逻辑与联动控制流程,减少人工干预环节,推动钻井作业由单工序自动化向多装备协同“一键化”操作转变,从而提高特深大陆钻探装备系统的运行效率、安全性和工况适应能力。此外,对于特深大陆科学钻探,由于钻进过程中还需穿插取心、测井和原位测试等科学作业,“一键式”操作的内涵还应进一步由常规钻井工序扩展到工程钻进与科学探测工序的统一协调,提高不同作业状态之间的自动衔接能力,避免对岩心获取及井中科学观测产生不利影响。



1—二层台排管机;2—顶驱;3—液压吊卡;4—缓冲机械手;5—举升机械手;6—铁钻工;7—丝扣油涂抹装置;8—泥浆防溅盒;9—离线机械手;10—动力卡瓦;11—绞车;12—动力猫道;13—动力钻杆盒;14—智能感知系统;15—集控系统

图8 “一键联动”自动化机具系统

Fig.8 “One-button linkage” automated equipment system

4.2 集成软、硬件模块化的特深大陆钻探装备

特深大陆钻探作业周期长、工况复杂,装备的

高效控制、维修和快速更换将逐渐成为保障作业连续性和减少停机时间的重要环节。软、硬件模块化

的特深大陆钻探装备设计是当前解决此类问题的首选方案。其中,软件模块化的代表是中国石油组织自主研发的地下地面一体化(油气藏-井筒-管网)动态仿真引擎软件HiSimPro(图9^[54]),集成了多种功能模块,支持油气田开发从方案设计到生产运行全生命周期、从地下到地面全栈式仿真模拟和优化业务。硬件模块化的代表如CANRIG公司研发的2000HP模块化绞车(图10),其通过模块化的设计使整体结构质量降低了25%,尺寸缩小了20%,在降低运输、安装和现场布置难度的同时,也提升了关键部件的可达性和更换效率。

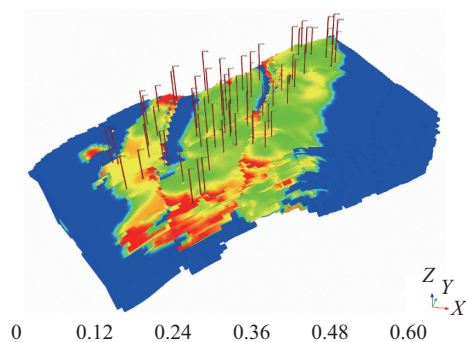


图9 动态仿真引擎软件HiSimPro^[54]

Fig.9 HiSimPro dynamic simulation engine software

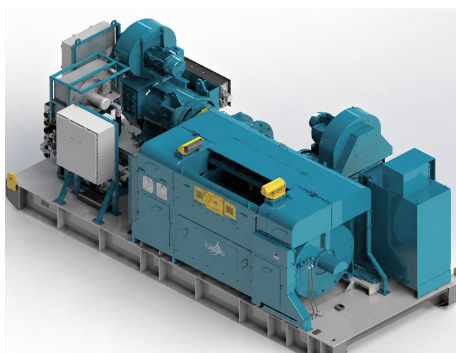


图10 CANRIG 2000HP模块化绞车

Fig.10 CANRIG 2000 horsepower modular drawworks

然而,当前特深大陆钻探装备的模块化发展仍主要停留在软件模块化与硬件模块化分别推进阶段,二者之间尚未形成深度融合的系统集成模式。软件模块化侧重于控制、仿真、数据处理和智能决策功能的灵活配置,硬件模块化则强调装备结构、执行机构和关键部件的标准化、轻量化与快速更换。因此,未来特深大陆钻探装备的发展重点应由单一模块优化转向软、硬件模块的系统集成,还应

面向取心、测井、原位测试等不同科学任务形成可快速配置和切换的专用功能模块,实现装备状态实时监测、故障快速定位、模块高效替换和作业流程协同控制,从而进一步提升特深大陆钻探装备的连续作业能力、作业安全性与智能化水平。

4.3 融合自动化、智能化为一体的高效钻探装备系统

融合自动化、智能化为一体的高效钻探装备系统,是面向未来特深大陆钻探复杂工况、超长周期连续施工和高效低耗作业需求构建的系统级装备发展理念(图11)。该系统以现有自动化钻机装备及相关单元技术为基础,进一步融合管柱状态智能检测、装备能效优化、作业流程重构、多装备协同控制和平台集成化设计等关键技术,探索推动钻探装备向全过程连续化作业和数据驱动智能决策方向发展。目前,该系统总体上仍处于技术融合与方案探索阶段,相关内容主要用于阐述未来特深大陆钻探装备的发展方向及潜在应用价值。

该系统的技术主要包括以下方面:(1)连续移运自平衡猫道通过带式传送方式移运管柱,改变传统猫道依靠反复举升、翻转和下放完成管柱输送的作业模式,既把空载返程的时间利用起来节省作业周期,又避免了频繁起升过程中所产生的大量电能消耗;(2)自平衡双起升系统改变了传统钻井作业中单一提升系统承担全部起下钻任务的模式,通过设置两套对称耦合的起升系统,使一侧钻具下放过程中释放的重力势能能够对另一侧钻具起升过程形成势能补偿和载荷平衡,充分利用下放钻具过程中所产生的重力势能,实现起下钻过程中的动态自平衡,进而实现高效起下钻无空载连续作业和减少能量消耗;(3)自平衡双绞车采用扭矩自平衡技术,通过抱闸或电磁离合、变频驱动和扭矩控制系统实现两台绞车之间的动态连接与分离,使不同作业状态下的绞车载荷能够进行实时耦合和调节,实现动态扭矩内部平衡效果;(4)智能管柱存储系统通过设置存储模块、检测模块、排序模块和筛选模块,对钻井作业中所应用的管柱进行全流程健康检测,对不满足安全要求的管柱进行及时淘汰、更换和调序等处理,以保证钻井作业的安全性;(5)智能钻机平台通过对钻台面装备、管柱处理系统和控制系统等进行重新布局 and 协同设计,简化钻机平台上机器人数量和井口管柱处理动作设置,缩短机器人之间的

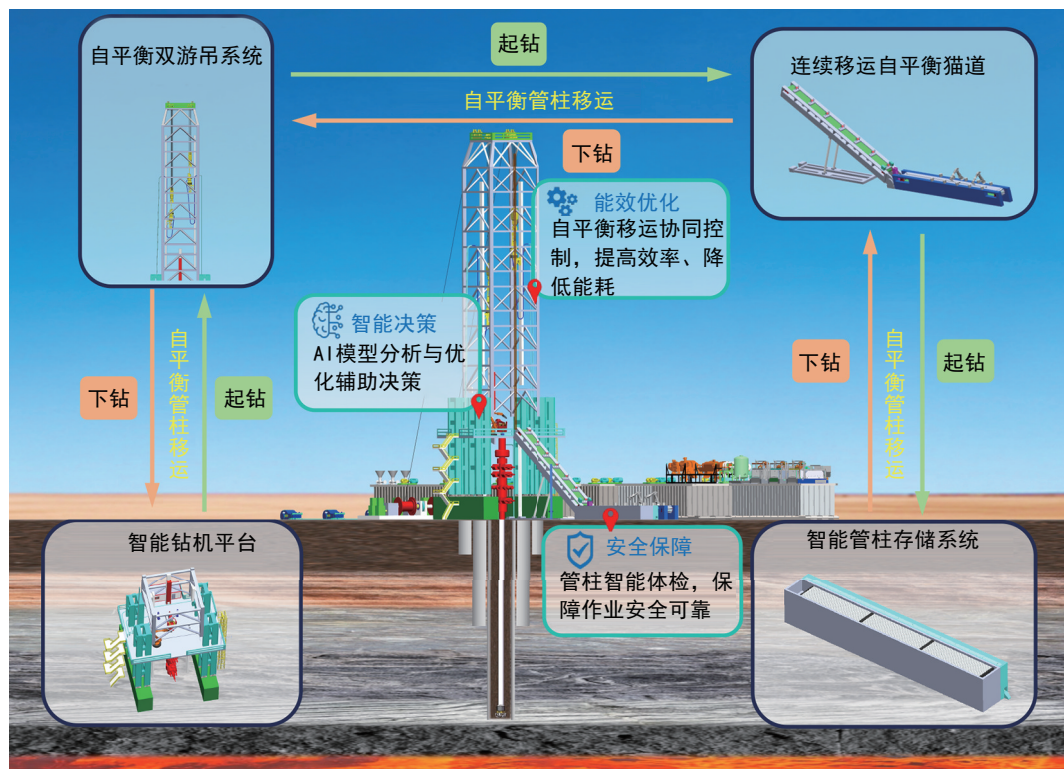


图 11 融合自动化、智能化为一体的新概念钻探系统

Fig.11 New-concept drilling system integrating automation and intelligence

动作衔接时间,提高多机器人系统整体健康作业时间占比,使钻机平台转变为集管柱自动处理、能量优化调配、作业流程控制和高效健康运行于一体的综合运行平台。

从发展潜力来看,融合自动化、智能化为一体的高效钻探装备系统有望进一步释放特深大陆钻探装备的系统效能,在高载荷、高频次、长周期和复杂工况条件下,提升管柱处理的连续作业能力、起下钻过程的能量利用水平、装备运行的协同调控能力和钻机平台的集成化程度。随着相关单元技术完善及系统级验证推进,融合自动化、智能化的高效钻探装备系统有望缩短非钻进时间、降低综合能耗、减少人工干预并提高作业安全性,同时提升科学钻探中取心、测井和原位测试等任务的连续实施能力,实现由“工程效率优先”向“工程效率与科学信息质量协同优化”转变。

4.4 无钻机井内自平衡驱动技术

随着钻探深度的不断加深,为了满足特深大陆钻探装备的需求,传统钻机技术将面临着更大的体积和质量,以及更多的能源消耗等方面的限制。在此背景下,如图 12^[28]所示,课题组提出的无钻机井

内自平衡驱动技术作为一种新型钻探装备与作业方式,旨在探索区别于传统地面钻机主导模式的新型钻探装备与作业方式。该技术的核心在于弱化地面钻机在钻进过程中的主导作用,将动力供给、钻进推进、姿态调节和参数控制等功能更多地集成到井下钻进系统中,使井下装备具备自主驱动和连续钻进能力。与传统钻机依靠地面设备带动钻柱旋转、提升和施加钻压的方式不同,该技术通过井下自平衡驱动装置直接作用于井底钻具或钻头,在没有大型地面钻机持续支撑的情况下完成钻进和高质量取心。同时,通过融合地层前探预测、岩性智能识别与深度学习反演方法,进一步实现对未钻地层岩性特征及其变化规律的提前判识。

目前,无钻机井内自平衡驱动技术总体处于原理验证和样机试验阶段。课题组已围绕部分关键功能开展样机研制与试验测试,对相关技术原理及局部功能进行了初步验证。该技术进一步工程化仍需重点解决高温高压环境下的持续可靠供能、井下传感器与控制元件的长期可靠性、长距离信息传输、卡钻和遇阻等复杂工况识别等问题。此外,还需开展长周期运行试验及复杂地层条件下的系统

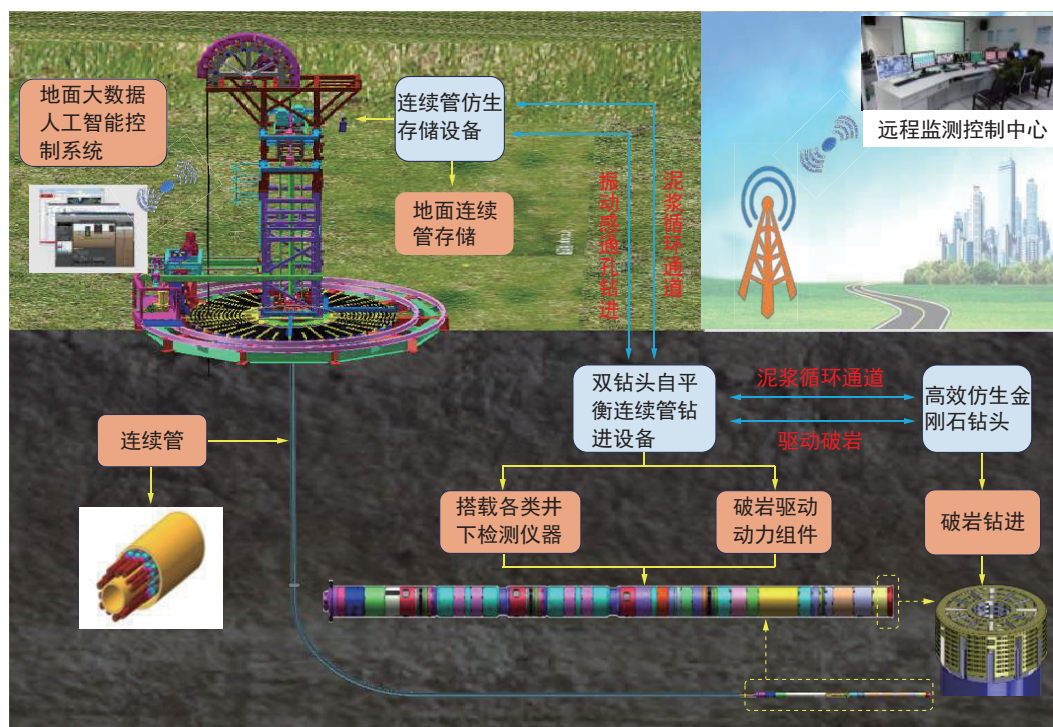
图 12 无钻机双钻头仿生自平衡钻探技术示意^[28]

Fig.12 Schematic diagram of drill rig-free dual-drill-bit bionic self-balancing drilling technology

验证,以进一步评估其可靠性、环境适应性和工程应用可行性。

随着智能控制、传感监测和高可靠材料等技术的不断发展,无钻机井内自平衡驱动系统有望在特深和极深钻探开发中发挥更大作用,并为特深极深钻探装备向高效、绿色和安全方向发展提供全新的技术支撑。

5 结论

(1)国内外特深大陆钻探领域已形成较为完整的万米级钻探装备与技术基础。当前,大载荷、大扭矩钻机及顶驱等关键装备的承载与动力能力持续提升,自动化钻机、管柱移运与存储、节能储能、智能安全运维及科学钻探高质量取心等技术均取得不同程度进展。总体来看,特深大陆钻探装备已在性能提升、自动化作业、管柱处理、节能储能、智能运维及高质量取心等方面形成较为系统的技术积累,为万米级乃至更深部钻探工程实施奠定了较好的装备与技术基础。

(2)随着井深增加和作业链条延长,现有装备仍存在多装备之间协同控制能力不足、超长管柱状态感知与健康评估薄弱、复杂工况下控制精度和自

适应能力有限等问题。对于特深科学钻探,取心、测井和原位测试等科学作业与钻进流程之间的自动衔接能力仍有待提高,工程效率与科学信息获取质量之间尚未形成充分协同。

(3)面向万米级乃至更深部钻探,特深大陆钻探装备的发展重点应由“单机能力提升”转向“系统能力重构”。未来应以钻探全过程为对象,推动钻机、管柱处理、能源、感知、控制和运维等功能由相对独立运行向系统融合转变,通过统一感知、协同控制、流程重构与状态反馈,提升复杂极端工况下装备体系的连续作业能力、运行可靠性和工况适应能力。对于特深科学钻探,还应进一步将取心、测井和原位测试等科学作业纳入统一装备与控制体系,实现工程钻进、装备运行与科学信息获取的协同优化,形成面向特深大陆钻探全过程的系统化装备体系。

(4)未来关键技术突破应重点聚焦地面装备系统协同与井下自主作业两个层级。地面装备层面,应重点突破多装备“一键式”协同与自适应控制、硬件模块化集成、超长管柱连续移运及全流程状态检测、起下钻过程能量动态平衡与高效利用、装备健康状态感知与智能运维等关键技术,并进一步构

建自动化与智能化深度融合的高效钻探装备系统。井下装备层面,应前瞻性发展自驱动等新概念井下钻探技术,推动特深大陆钻探由“地面装备主导、分环节作业”逐步向“地面-井下协同、全过程闭环控制、自主连续作业”演进。

参考文献(References):

- [1] 王兆明,温志新,贺正军,等.全球近10年油气勘探新进展特点与启示[J].中国石油勘探,2022,27(2):27-37.
WANG Zhaoming, WEN Zhixin, HE Zhengjun, et al. Characteristics and enlightenment of new progress in global oil and gas exploration in recent ten years [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(2): 27-37.
- [2] Sun Y H, Zhang F Y, Wang Q Y, et al. Application of "Crust 1" 10k ultra-deep scientific drilling rig in Songliao Basin Drilling Project (CCSD-SKII)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 145: 222-229.
- [3] Chen Z L, Chen W H, You Z H, et al. Research on key technologies of 260°C/210 MPa ultra-deep logging equipment[J]. Applied Sciences, 2024, 14(24): 11817.
- [4] 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.
- [5] 王春生,冯少波,张志,等.深地塔科1井安全高效钻井关键技术[J].深地能源科技,2025,1(1):110-116.
WANG Chunsheng, FENG Shaobo, ZHANG Zhi, et al. Key technology for safe and high-efficiency drilling of the Well Shendi Take 1 [J]. Deep Earth Energy Science & Technology, 2025, 1(1): 110-116.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 曾义金,金衍,周英操,等.深层油气钻采技术进展与展望[J].前瞻科技,2023,2(2):32-46.
ZENG Yijin, JIN Yan, ZHOU Yingcao, et al. Progress and prospect of deep oil&gas drilling and production technologies [J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2): 32-46.
- [9] 孙健.超深井钻井技术进展研究[J].西部探矿工程,2023,35(7):71-73,76.
SUN Jian. Research on the development of ultra-deep well drilling technology [J]. West-China Exploration Engineering, 2023, 35(7): 71-73, 76.
- [10] 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.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.石油天然气钻井工程术语:GB/T 28911—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Vocabulary of drilling engineering for the petroleum and natural gas: GB/T 28911—2012 [S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [12] 邹长春,王成善,彭诚,等.中国大陆科学深钻发展的若干思考与建议[J].现代地质,2023,37(1):1-14.
ZOU Changchun, WANG Chengshan, PENG Cheng, et al. Development of the Chinese continental scientific deep drilling: perspectives and suggestions [J]. Geoscience, 2023, 37(1): 1-14.
- [13] 张文昭.关于我国油气勘探程序及管理的探讨[J].石油学报,1984(3):1-7.
ZHANG Wenzhao. On the procedure and management of exploration for oil and gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 1984(3): 1-7.
- [14] 闫光庆,张金成.中国石化超深井钻井技术现状与发展建议[J].石油钻探技术,2013,41(2):1-6.
YAN Guangqing, ZHANG Jincheng. Status and proposal of the sinopec ultra-deep drilling technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 1-6.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王坤青,张宁,陈艳东,等.PG-160⁺型自动排管系统的研制与应用[J].内蒙古石油化工,2022,48(5):22-25.
WANG Kunqing, ZHANG Ning, CHEN Yandong, et al. Development and application of automatic pipe handing system [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2022, 48(5): 22-25.
- [18] Yang Z, Zou C N, Gu Z D, et al. Geological characteristics and main challenges of onshore deep oil and gas development in China [J]. Advances in Geo-Energy Research, 2022, 6(3): 264-266.
- [19] Wang H G, Huang H C, Bi W X, et al. Deep and ultra-deep oil and gas well drilling technologies: progress and prospect [J]. Natural Gas Industry B, 2022, 9(2): 141-157.
- [20] 汪海阁,张佳伟,黄洪春,等.墨西哥湾万米级特深井钻完井实

- 践与启示[J].石油钻探技术,2024,52(2):12-23.
- WANG Haige, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun, et al. Inspiration and practice of drilling and completion in 10000-meter ultra-deep wells in the Gulf of Mexico[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2):12-23.
- [21] 王定亚,叶强,张强,等.7000 m连续起下钻及连续循环智能钻机技术研究[J].石油机械,2017,45(6):1-4.
- WANG Dingya, YE Qiang, ZHANG Qiang, et al. 7000 m continuous motion intelligent drilling rig[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(6):1-4.
- [22] 裴学良,黄哲.胜利工程智能钻井关键技术探索与建议[J].石油钻探技术,2024,52(5):62-68.
- PEI Xueliang, HUANG Zhe. Exploration and suggestion of key technologies for intelligent drilling in Sinopec Shengli Oil-field service corporation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5):62-68.
- [23] 石钻.中石化胜利石油工程公司研制成功钻井管柱自动化处理系统[J].石油钻探技术,2018,46(4):35.
- SHI Zuan. Sinopec Shengli petroleum engineering Co., Ltd. has successfully developed an automated drilling tubing handling system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4):35.
- [24] 白尚懿,杨小亮,何生兵,等.自动化钻机管柱处理系统研究现状与发展趋势[J].机械研究与应用,2020,33(5):203-207.
- BAI Shangyi, YANG Xiaoliang, HE Shengbing, et al. Research status and development trend of pipe handling system for automated drilling rig[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(5):203-207.
- [25] 康亮,李亚伟,黎善猛,等.石油钻机管柱处理系统研究现状和发展趋势分析[J].液压气动与密封,2019,39(5):1-5,10.
- KANG Liang, LI Yawei, LI Shanmeng, et al. Research present situation and development trend analysis of pipeline handling system for drill rig[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2019, 39(5):1-5,10.
- [26] 王维旭,曹晓宇,马继光,等.12000 m特深井自动化钻机研制与应用[J].钻探工程,2024,51(4):7-13.
- WANG Weixu, CAO Xiaoyu, MA Jiguang, et al. Development and application of automatic drilling rig for 12000 m extra-deep wells[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):7-13.
- [27] 曹龙龙,梁健,张恒春,等.深部大陆科学钻探核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.
- [28] 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.
- [29] NABORS. Nabors announces world's first fully automated land rig has successfully drilled its first well[EB/OL]. (2021-10-07) [2026-08-12]. <https://www.nabors.com/?s=PACER801>.
- [30] 第十三届中国页岩油气发展大会.石油工程高层论坛揭秘:页岩油气高效勘探开发密码[EB/OL].(2024-08-06)[2026-08-12].<http://shalegas.zhenweievents.com/cn/news/2024/0805/653.html>.
- The 13th China Shale Oil and Gas Development Conference. Petroleum engineering high-level forum unveils the secrets of efficient shale oil and gas exploration and development [EB/OL]. (2024-08-06) [2026-08-12]. <http://shalegas.zhenweievents.com/cn/news/2024/0805/653.html>.
- [31] 李文强.自动化设备在石油钻机中的应用[J].中国设备工程,2022(14):172-174.
- LI Wenqiang. The application of automated equipment in oil drilling rigs[J]. China Plant Engineering, 2022(14):172-174.
- [32] 新华社.掘地一万里 中国深度在“死亡之海”创下新纪录[EB/OL].(2025-02-27)[2026-08-12].<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588139/c32917644/content.html>.
- Xinhua News Agency. Drilling 10000 meters: "China depth" sets new record in the "sea of death"[EB/OL]. (2025-02-27) [2026-08-12]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588139/c32917644/content.html>.
- [33] 中国工业报.国内首台12000米深智钻机成功交付[EB/OL].(2024-10-17)[2026-08-12].<https://www.cinn.cn/zb/2024/10-17/LkvP73qr.html>.
- China Industry News. China's first 12000-meter deep-sea intelligent drilling rig has been successfully delivered [EB/OL]. (2024-10-17) [2026-08-12]. <https://www.cinn.cn/zb/2024/10-17/LkvP73qr.html>.
- [34] 王定亚,孙娟,张茄新,等.陆地石油钻井装备技术现状及发展方向探讨[J].石油机械,2021,49(1):47-52.
- WANG Dingya, SUN Juan, ZHANG Jiaxin, et al. Discussion on technical status and development direction of land oil-field drilling equipment[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(1):47-52.
- [35] 蔡克军,张力,张天临,等.ZJ90/6750 DB-S陆地四单根立柱超深钻机井架稳定性分析[J].能源与环保,2022,44(5):298-305.
- CAI Kejun, ZHANG Li, ZHANG Tianlin, et al. Analysis on stability of ZJ90/6750 DB-S land four single columns ultra-deep drilling derrick[J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(5):298-305.
- [36] 李亚辉,陈思祥,周天明,等.陆地超深井四单根立柱高效钻机[J].石油机械,2019,47(4):19-23.
- LI Yahui, CHEN Sixiang, ZHOU Tianming, et al. High efficient four-joint stand drilling rig for onshore ultra-deep wells[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(4):19-23.
- [37] 徐小鹏,王定亚,邓勇,等.四单根立柱钻机关键技术研究及提效分析[J].石油机械,2018,46(12):17-23.
- XU Xiaopeng, WANG Dingya, DENG Yong, et al. Key technologies and efficiency improvement analysis of four-joint stand drilling rig[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(12):17-23.
- [38] 张强,王定亚,邹涛,等.8000 m四单根立柱自动化钻机研制[J].石油矿场机械,2021,50(4):66-70.
- ZHANG Qiang, WANG Dingya, ZOU Tao, et al. Research and development of 8000 m four-joint stand drilling rig[J]. Oil

- Field Equipment, 2021, 50(4):66-70.
- [39] 张秋浩. 一种新型钻机管具自动化处理系统[J]. 产品可靠性报告, 2026(2):54-56.
- ZHANG Qiuhao. A new type of automated processing system for drilling rig tools[J]. Reliability Reports, 2026(2):54-56.
- [40] 任行, 郝丽军, 牛永超, 等. 钻机自动化管具处理系统研究[J]. 石油机械, 2016, 44(4):17-22.
- REN Hang, HAO Lijun, NIU Yongchao, et al. Research on automatic pipe handling system of drill rig[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(4):17-22.
- [41] 刘斌, 檀朝东, 高小永, 等. 采油气井场多能互补能源系统优化技术进展与展望[J]. 石油钻探技术, 2026, 54(2):211-222.
- LIU Bin, TAN Chaodong, GAO Xiaoyong, et al. Progress and prospects of optimization technologies for multi-energy complementary energy systems in oil and gas production well sites [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2026, 54(2):211-222.
- [42] 高迅. 石油钻机节能与储能改造技术的研究与应用[J]. 科技与创新, 2018(14):52-54.
- GAO Xun. Research and application of energy saving and energy storage retrofit technology for oil drilling rigs [J]. Science and Technology & Innovation, 2018(14):52-54.
- [43] 蒋安全. 基于储能技术的石油钻机高效节能供能系统研究[D]. 成都: 西华大学, 2024.
- JIANG Anquan. Research on high efficiency and energy saving energy supply system of oil drilling rig based on energy storage technology[D]. Chengdu: Xihua University, 2024.
- [44] 中国石油长城钻探工程公司. 钻三“动力革命”推动绿色转型[EB/OL]. (2026-02-06) [2026-08-12]. <http://gwdc.cnpc.com.cn/gwdc2020/gsxw/202602/d3c71aed03744fc0a6c741ddab8e9c51.shtml>.
- China Petroleum Great Wall Drilling Company. Drilling station No. 3's "power revolution" drives green transformation [EB/OL]. (2026-02-06) [2026-08-12]. <http://gwdc.cnpc.com.cn/gwdc2020/gsxw/202602/d3c71aed03744fc0a6c741ddab8e9c51.shtml>.
- [45] 张富坤, 曹培. 石油钻井设备的节能降耗的有效措施研究[J]. 石化技术, 2025, 32(8):374-376.
- ZHANG Fukun, CAO Pei. Research on effective measures for energy conservation and consumption reduction of petroleum drilling equipment [J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, 32(8):374-376.
- [46] Bilgin M, Donen J, Scaini V, et al. World's first hybrid drilling rig[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition. Galveston: SPE, 2020:SPE-199573-MS.
- [47] 红星新闻网. 时代光影 百部川扬|智能钻机1.0引领油气装备新时代[EB/OL]. (2024-06-06) [2026-08-12]. https://www.sohu.com/a/784066753_120237.
- Red Star News. 100 Films of the era: Sichuan Yang|intelligent drilling rig 1.0 leads a new era of oil and gas equipment [EB/OL]. (2024-06-06) [2026-08-12]. https://www.sohu.com/a/784066753_120237.
- [48] 李春, 颜波, 胡文俊. 飞轮储能技术在海洋钻井平台应用可行性分析[J]. 节能与环保, 2023(10):68-73.
- LI Chun, YAN Bo, HU Wenjun. Feasibility analysis of application of flywheel energy storage technology in offshore drilling platform [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2023(10):68-73.
- [49] 孙雪皓, 张凤丽, 张毅, 等. 高端油气钻探装备智能安全运维关键技术研究[J/OL]. 地球科学: 1-25 (2026-04-21) [2026-08-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20260421.1354.014>.
- SUN Xuehao, ZHANG Fengli, ZHANG Yi, et al. Research on key technology of intelligent and safe operation and maintenance of high-end drilling equipment [J/OL]. Earth Science: 1-25 (2026-04-21) [2026-08-12]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20260421.1354.014>.
- [50] 朱恒银, 王强, 刘兵, 等. 5000 m 新型能源勘探智能钻探装备与技术研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):110-119.
- ZHU Hengyin, WANG Qiang, LIU Bing, et al. Research on 5000 m new energy exploration intelligent drilling equipment and technology [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):110-119.
- [51] 周林帅, 张勇, 余利军, 等. ZJ15/750Y 型智能液压钻机研制[J]. 石油机械, 2025, 53(7):89-94.
- ZHOU Linshuai, ZHANG Yong, YU Lijun, et al. Research and development of ZJ15/750Y intelligent hydraulic drilling rig [J]. China Petroleum Machinery, 2025, 53(7):89-94.
- [52] 张金昌, 刘凡柏, 黄洪波, 等. 5000 米智能地质钻探技术与装备研发[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(4):1-8.
- ZHANG Jinchang, LIU Fanbai, HUANG Hongbo, et al. Research and development of 5000 m intelligent geological drilling technology and equipment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4):1-8.
- [53] 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.
- [54] 中国石油报. 国产首套! 关键性突破! [EB/OL]. (2025-07-30) [2026-08-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/HoP-glS55FsWj9J4vmcKJNw>.
- China Petroleum Daily. First domestically produced system! A key breakthrough! [EB/OL]. (2025-07-30) [2026-08-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/HoP-glS55FsWj9J4vmcKJNw>.

(编辑 王跃伟)