

智能化自动化钻探技术与装备发展概述

薛倩冰, 张金昌

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:持续开展大深度智能地质钻探关键技术与装备的研发是当前钻井技术发展的主要方向,同时也是实现深地开拓必要的科技手段之一。本文简要回顾了钻探技术与装备发展概况,介绍了智能化自动化钻井技术与智能化自动化钻井工具。并结合现阶段我国 5000 米智能化自动化钻探技术与装备的研究进展,重点介绍了项目研究目标、研究内容和预期成果,提出了我国现阶段智能化自动化钻探技术与装备发展目标,以期探索地球深部奥秘、勘探深部资源提供技术装备支撑。

关键词:智能化自动化;钻探技术;钻探装备;深部钻探

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0009-06

Advances in intelligent automatic drilling technologies and equipment

XUE Qianbing, ZHANG Jinchang

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Continuous research and development of the key technology and equipment for deep intelligent geological drilling is the main trend of drilling technology development, and also the necessary scientific and technological means to realize deep exploration. This article briefly looks back the evolution course of the geological core drilling technologies and equipment, and describes intelligent automatic drilling technology and intelligent automatic drilling tools. In regard to the progresses made in the research project of “intelligent and automatic 5000m drilling technologies and equipment” in China, this article introduces in detail the research objectives, research contents and expected results of the project with proposal on the development goals of intelligent automatic drilling technology and equipment so as to provide technology equipment support for us to explore both the mystery in the deep earth and the deep resources.

Key words: intelligent and automatic; drilling technologies; drilling equipment; deep drilling

0 引言

深地探测是地球科学的最前沿,是探索地球深部奥秘、解决人类能源、资源和生存空间问题的必由之路。持续开展大深度智能地质钻探关键技术与装备的研发是实现深地开拓必要的科技手段之一。国外智能化自动化钻井技术整体得到了较快的发展,在钻机设备、井下工具、控制系统、通讯系统、决策系统、标准及认证等方面取得了长足的进步,并逐步走向协同。国内在地面自动化控制技术、传感检测技术、机器人技术、智能钻柱、测量系统和远程作业计

算机支持系统方面都有研究并取得了一定的进展^[1-4]。但是,我国在石油钻井和地质岩心钻探装备制造企业的科研投入普遍不足,基础技术开发力度不够,同时也未形成合力,致使我国在石油和地质岩心钻探智能化自动化钻井技术与装备的发展方面明显落后于国外。随着材料、电子、信息、液压和变频技术的引入和广泛应用^[5-6],为弥补我国大深度地质岩心钻探智能技术与装备发展的不足,同时,为响应党中央“向地球深部进军”的号召,全面实施深地、深海、深空对地观测和土地工程科技“四位一体”

收稿日期:2020-02-16; **修回日期:**2020-03-23 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.04.002

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题一“大深度地质钻探技术装备集成及示范”(编号:2018YFC0603401)

作者简介:薛倩冰,女,汉族,1987 年生,工程师,地质工程专业,硕士,主要从事钻探工艺技术与地质调查项目管理工作,河北省廊坊市广阳区金光道 77 号,913311690@qq.com。

引用格式:薛倩冰,张金昌.智能化自动化钻探技术与装备发展概述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):9-14.

XUE Qianbing, ZHANG Jinchang. Advances in intelligent automatic drilling technologies and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):9-14.

的科技创新战略,我国在2018年启动的5000米智能钻探技术与装备研发项目,针对智能油气钻井技术与装备和地质岩心钻探差异大无法直接应用等问题,从构建大深度绳索取心钻孔口径系列、钻具级配、装备配置入手,开展了复杂地层钻进智能控制、岩心钻机关键技术、大深度高性能铝合金钻杆等钻探技术装备的集成研究。通过系统的创新和研发,突破智能控制、自动化、轻量化与模块化等关键技术,形成以绳索取心工艺为主体的特深孔岩心钻探技术体系,提高我国资源勘探的深度和勘查效率,同时推动我国智能化自动化钻探技术与装备和国际接轨。

1 地质岩心钻探技术与装备发展概况

岩心钻机最早出现在19世纪中叶。在长达一个半世纪的发展过程中,岩心钻机经历了人力驱动,蒸汽机驱动,内燃机或电动机驱动等不同驱动方式。给进形式经历了人力给进、螺旋给进和液压给进等给进方式。操控方式经历了人力机械操控、液压伺服操控、弱电按钮操控以及电子触摸屏操控等不同形式。硬岩钻进也由最初的天然金刚石钻头经历了钢粒、硬质合金、人造金刚石钻头发展到现在的各种形式的复合片钻头。

20世纪三四十年代,液压技术开始用于钻机的给进系统,而有多种调速范围的变速箱也开始应用于岩心钻机,这才形成了当今市场上流行的常规金刚石岩心钻机的前身。机械传动手把给进式钻机,这类钻机最早由人力驱动,蒸汽机驱动,最后发展到柴油机或电动机驱动。到上世纪四五十年代才比较成熟,但是转速低,只适用于合金钻进和钢粒钻进。随着合金钻进工艺技术的日渐成熟,金刚石钻进工艺应用面的逐渐增大以及液压传动技术的不断进步,诞生了液压给进式立轴钻机(转速范围达到500~2000 r/min,调速级数达到6~12挡,既适合合金钻头钻进也适合金刚石钻头钻进)。上世纪六十年代末七十年代初随着液压传动技术的进一步发展,金刚石钻探工艺技术的发展特别是绳索取心技术的推广使用,诞生了全液压力头式钻机。如瑞典Atlas Copco公司开发成功的Diamec系列全液压顶驱式自动化钻机,适用于地表或巷道内工作,为全液压力头式,配备机、电、液一体化的操作系统。

在钻机的研发过程中,一方面随着勘探深度的

不断加深,回转长达数百米甚至数千米的钻杆/柱要消耗大量无用功率,因此科学家又探索研究了多种形式的潜孔钻机:涡轮钻、螺杆钻、潜孔锤和潜孔电钻等;另一方面随着钻机应用领域的不断拓展,开发研究了应用于矿山救援、环境取样、工程勘察等方面的全液压钻机和声频震动钻机等^[7-8]。另外钻机的操纵控制形式也由最初的机械杠杆人力操控、液压阀操控、电控发展到目前的触摸屏数控。

现在进入了钻机发展的智能化(自动化)阶段。国外智能化钻机研制起始于上世纪九十年代中期,已研发了三代并在实际生产中应用。加拿大JKS Boyles公司开发成功的B系列(B-10、B-15和B-20型等)坑道自动化钻机,也是采取全液压力头结构,机、电、液一体化和计算机控制钻进方式。RDSAS公司研制了系列自动化设备如:钻杆操作机器人(双人)、铁钻工机器人、起升机器人、甲板机器人、升降机器人和机器人滑轨等。瑞典海格比(HAGBY)公司开发成功的ONRAM系列全自动岩心钻机(Computer Controlled Drill),该系列钻机可以采集和记录钻进过程中的13种参数,根据这些参数对钻进过程进行实时控制,实时显示钻速和其他钻进参数为科学钻探提供了保障,为各种新工艺及器具的进一步优化提供了科学依据^[9-14]。

2 智能化自动化钻井技术与装备

人工智能(Artificial Intelligence),英文缩写为AI。它是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的技术科学^[15]。世界钻井技术发展一般分为经验钻井、科学钻井、自动化和智能化4个阶段,根据这种划分和发展趋势,智能钻井技术是在自动化钻井技术的基础上发展起来的,将人工智能的理论、方法和技术应用于钻井过程,通过计算模型和智能决策技术形成控制指令,达到自治式闭环控制技术^[1-2,16]。它是将人工智能与自动化钻井技术相结合,通过地面监控系统、双向通讯系统等实现数据采集、双向高速信息传输、实时分析决策、自动控制的钻井技术^[17]。主要包括智能化自动化钻井系统和智能化自动化钻井工具。

2.1 智能化自动化钻井系统

智能钻井系统是智能钻井的核心,主要包括:地面计算机智能专家系统、井下智能工具、井下供电装置等,集成使用电子联系管、高智能机器人、井下闭

环电子智能控制和智能通信网络系统等学科的综合是智能钻井系统的显著特征^[18-19],所必须具备的功能包括:数据采集、数据传递、数据分析、指令执行等 4 大功能。

自动化钻井技术主要由地面自动化钻井技术和井下自动化钻井技术两大部分组成^[20]。地面自动化钻井技术包括:司钻系统、地面管柱自动上下钻台装置、钻井机器人、井口自动化工具、钻台管柱自动排放装置和固控系统^[21-22]。井下自动化钻井技术是将井下旋转导向系统、地质导向钻井系统、随钻测量、短程通讯等井下钻井技术结合在一起,形成由地面司钻集成控制系统、井下测量系统、通讯系统和井下工具等构成的井下闭环钻井技术^[23-24]。

2.2 智能化自动化钻井工具

智能钻井工具的出现使精确钻井能力大幅度提高,同时使智能化钻井成为了可能。智能钻井工具主要包括智能钻柱、智能钻头、旋转导向工具等^[25]。

智能钻柱主要应用在复杂地质条件下,可概括为热、高、长、大,即井温高、压力高、管柱长、井径大,采用常规钻井机具难以满足钻井要求的,陆海复杂结构井、特殊工艺井、深井、科学超深井等^[26-31]。主要优点包括:降低钻井成本、减轻井眼失稳问题、提高钻头寿命、在大位移井中减少卡钻等。

智能钻头是评价钻头动态工作情况和动力学参数的一种工具,在钻井作业过程中,能够自动感知地层压力、地层温度、钻头角度和深度等信息是智能钻井中的一个重要方面^[32]。

旋转导向技术代表了当今钻井工程技术的最高水平^[33]。旋转导向工具是旋转导向系统中的核心,是旋转导向钻技术的核心,目前按照指向方式主要为推靠式和指向式^[33-35]。钻井过程中,旋转导向钻井系统中所装的测控系统,实现了井眼轨迹的随钻测量及自动控制;地质导向系统以所开发的油气层为最终控制目标,该系统集井眼轨迹测量控制技术和随钻测井技术为一体,可以根据井下实时地质参数及时调整及修改原钻井设计^[22,36],使钻头沿着油气层目标安全有效地钻进,直至钻达目的层。旋转导向闭环系统如图 1 所示。

3 我国地质岩心钻探技术与装备的智能化自动化“5000米智能地质钻探关键技术与装备研发”

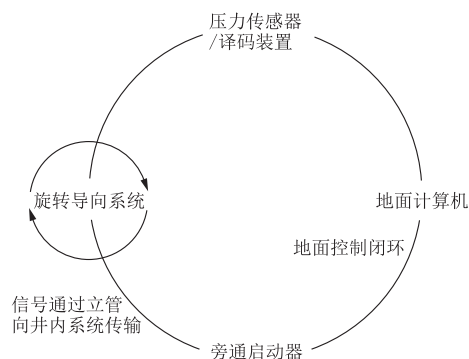


图 1 RCLS - rotary steering close-loop system

项目充分发挥“产学研用”综合优势,集合了国内地质钻探领域主要研究机构和龙头企业,以形成大深度智能钻探技术,创新地质岩心钻探方法,推动地质勘查领域正在发生的智能、绿色为特征的技术创新为宗旨,主要包括:工程设计准则与技术体系构建;轻量化、自动化、全流程一体化设备研制;管柱口径系列构建,管柱优化设计、抗蚀防护技术;大深度绳索取心钻具,高效孔底动力取心钻具,高效长寿命金刚石钻头研制;孔内数据测量传输技术,智能钻进控制技术,垂直钻进系统研制。各项研究内容之间的关系如图 2 所示。

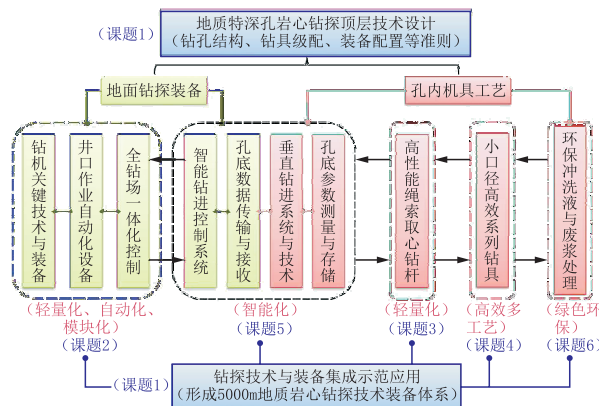


图 2 5000 米智能地质钻探关键技术与装备研发结构图

Fig.2 Research plan for the project “the Intelligent and Automatic 5000m Drilling Technologies and Equipment”

3.1 工程设计准则与技术体系建立

3.1.1 地质特深孔钻探工程准则的建立

主要为基于地质钻探共性技术问题与工程应用典型问题,为钻孔结构、套管程序、孔内机具、钻探装备及泥浆体系设计提供理论基础依据,综合多方面因素建立地质特深孔钻探工程设计准则。

3.1.2 大深度地质钻探装备技术体系的建立

对大深度钻探工程的组织管理形式、合作方式、技术成果应用情况等进行全面梳理总结,系统分析深部地质钻探工程技术特征,厘定基本外界条件及相互关联要求,形成较完备的特深孔地质钻探技术体系。

3.2 轻量化、自动化、全流程一体化控制设备研制

3.2.1 地质钻探设备轻量化设计

为满足地质钻探野外环境特征、绿色钻探技术需求,通过地质岩心钻探多工况载荷的组合特征分析,建立模块化、轻量化、易运性、快装性、占地小的大深度地质钻机机构形式,研制自带动力、原位起升的平台、井架和轻质顶驱导轨。

3.2.2 井口作业自动化设备研制

针对具有绳索取心工艺特征的地质薄壁钻杆,对自动加杆、钻柱提吊、孔口夹持、钻杆拧卸、二层台排放等具体执行机构进行研究,并在整体作业流程的系统化控制方面进行攻关。

3.2.3 钻机高效钻进自动控制模式研制

通过监控与分析钻压、钻速、扭矩、泵压等钻进主参数及机具反馈参数,在主机自动控制模式下,最优地调整钻压、转速、泵量等可控参数,达到钻进工艺与机具参数监测、钻进参数控制与钻进速度效果之间的最优化匹配和实时动态平衡,多快好省地实施快速取心钻进。

3.2.4 全钻场全流程的一体化集成控制系统

通过 PLC 技术、总线通讯技术及电气系统控制技术,以人性化操作为设计目标,研究一体化集成控制系统,加强工艺工序、安全互锁及逻辑指令的系统研究,突破一键作业的自动化智能化系统的安全性、功能性等难题。

3.3 管柱口径系列构建,管柱设计、抗蚀防护技术等优化

3.3.1 管柱设计技术优化

满足 5000 m 钻深强度要求,优化取心钻杆柱组合设计,进行新型钻杆的结构设计。

3.3.2 管柱抗腐蚀技术优化

进行多因素协同作用下绳索取心钻杆的破坏规律与失效机理研究,优化防护工艺参数,提高防护层的致密性和力学性能,使其组织结构特性优于传统防护工艺。

3.3.3 管柱精密制造技术优化

优化合金钢材料的纯净度与化学组分,调控管

材残余力,探究多次冷拔、初级冷轧工艺及后矫直工艺技术,全面升级绳索取心钻杆制造加工技术。

3.4 大深度绳索取心钻具,高效孔底动力取心钻具,高效长寿命金刚石钻头研制

3.4.1 大深度绳索取心钻具研制

主要包括:取心钻具结构优化设计理论研究、到位报信结构等关键部位设计、大深度绳索取心钻具、组合型绳索取心钻具与取心工艺示范研究等。

3.4.2 高效孔底动力取心钻具研制

主要包括:全金属动力钻具设计理论研究,高温高压密封及可靠性研究,水力部件设计与流固耦合仿真研究,孔内减速器、支撑系统等研究。

3.4.3 不提钻换钻头钻具研制

主要包括:钻具整机设计、关键部件可靠性研究以及现场示范研究等。

3.4.4 高效长寿命金刚石钻头研制

主要包括:金刚石胎体配方、关键参数设计、切削结构设计、制造工艺研究,以及钻进示范研究等。

3.5 孔内数据测量传输技术,智能钻进控制技术,垂直钻进系统研制

3.5.1 孔内数据测量传输技术

主要包括:针对钻进过程中孔底数据难以获取的问题,研究深孔数据监测方法,研制随钻采集储存式测量仪与打捞式测量仪、随内管进行孔内信息参数的采集与储存系统、孔内信息传输系统、自适应脉冲发生器和地面接收机构。

3.5.2 智能钻进控制技术

主要包括:针对深部小口径取心钻探,研究钻进过程智能控制技术,以实现钻进数据的监测与融合,钻进参数优化与控制,钻进过程智能判别与安全预警。

3.5.3 垂直钻进系统

包括:钻进轨迹参数智能计算模型、钻进轨迹参数智能计算方法及钻进轨迹多目标优化方法、平台测斜响应及控制精度优化研究等测控技术。

4 结语

(1)自动化装备与技术在未来的钻井技术发展是智能化钻井技术的执行机构,人工智能与钻井行业的结合必然是钻井行业发展的方向之一,智能化钻井装备与技术的应用可以优化钻井方案设计、提高作业效率、减少井下复杂事故率、降低钻井成

本、提高钻井质量,并且在大幅减少作业人员以及防范风险方面具有明显的优势。

(2)国外新型钻机的自动化、智能化已从理论变为现实并得到了较为广泛的应用,而国内大深度地质岩心钻探装备与技术的发展缓慢,我国实施的 5000 m 智能地质钻探装备与技术将通过多学科技术融合发展,形成大深度智能钻探技术,创新地质岩心钻探方法,推动地质勘查领域正在发生的智能、绿色为特征的技术创新。带动行业的进步,使钻探技术行业的总体水平与国际基本同步。

参考文献 (References):

- [1] 杨传书,张好林,肖莉.自动化钻井关键技术进展与发展趋势[J].石油机械,2017,45(5):10-17.
YANG Chuanshu, ZHANG Haolin, XIAO li. Key technical progress and development trend of automated drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(5):10-17.
- [2] 刘选朝,张绍槐.智能钻柱信息及电力传输系统的研究[J].石油钻探技术,2006,34(5):10-13.
LIU Xuanchao, ZHANG Shaohuai. Study on information and power transmission based on an intelligent drill string[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006,34(5):10-13.
- [3] 栾苏,梁春平,于兴军,等.现代先进技术在石油钻机中的应用及展望[J].石油机械,2014,42(11):1-5.
LUAN Su, LIANG Chunping, YU Xingjun, et al. Application and prospects of advanced technologies on the drilling rig[J]. China Petroleum Machinery, 2014,42(11):1-5.
- [4] 周英操,刘伟.PCDS 精细控压钻井技术新进展[J].石油钻探技术,2019,47(3):68-74.
ZHOU Yingcao, LIU Wei. New progress on PCDS precise pressure management drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019,47(3):68-73.
- [5] 刘凡柏,高鹏举,任启伟,等.4000m 交流变频电驱动岩心钻机的研制及其在地热井的工程应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):40-46.
LIU Fanbai, GAO Pengju, REN Qiwei, et al. Development and application of 4000m AC frequency-conversion core drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):40-46.
- [6] 黄洪波,朱江龙,刘跃进.我国钻探技术装备“十一五”回顾与“十二五”展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(1):8-14.
HUANG Hongbo, ZHU Jianglong, LIU Yuejin. Review of drilling technology and equipment for the Eleventh Five-year Plan Period and envisioning of same for the Twelfth Five-year Plan Period in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(1):8-14.
- [7] 王瑜,刘宝林,周琴,等.基于双偏心轴驱动的声频振动钻机设计研究[J].中国机械工程,2013,24(17):2386-2389.
WANG Yu, LIU Baolin, ZHOU Qin, et al. Development and research of sonic drilling rig driven by dual-eccentric shaft[J]. China Mechanical Engineering, 2013,24(17):2386-2389.
- [8] 王瑜,丁伟.连续循环钻井技术及其应用前景[J].石油矿场机械,2008,37(11):94-97.
WANG Yu, DING Wei. Development and application prospect of continuous circulation drilling technology[J]. Oil Field Equipment, 2008,37(11):94-97.
- [9] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业 70 年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.
WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The development and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):1-31.
- [10] 张金昌.地质钻探技术与装备 21 世纪新进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):10-17.
ZHANG Jinchang. New development of the 21st Century geological drilling technology and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(4):10-17.
- [11] 张金昌,谢文卫.科学超深井钻探技术国内外现状[J].地质学报,2010,84(6):887-894.
ZHANG Jinchang, XIE Wenwei. Status of scientific drilling technology for ultra-deep well[J]. Acta Geologica Sinica, 2010,84(6):887-894.
- [12] 谢文卫,张金昌,冉恒谦.矿产资源勘查中钻探新技术的应用[C]//中国地质学会青年工作委员会.第一届全国青年地质大会论文集.地质学报编辑部,2013:993-995.
XIE Wenwei, ZHANG Jinchang, RAN Hengqian. Application of New Drilling Technology in Mineral Resources Exploration[C]// Youth Working Committee of Geological Society of China. Proceedings of the first national youth geological congress. Editorial Department of Acta Geologica Sinica, 2013:993-995.
- [13] 刘凡柏,张金昌,谢文卫,等.2000 米地质钻探关键技术与装备的应用示范[J].地质装备,2013,14(6):15-22.
LIU Fanbai, ZHANG Jinchang, XIE Wenwei, et al. Application demonstration of key technology and equipment for 2000m geological drilling[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2013,14(6):15-22.
- [14] 冉恒谦,张金昌,谢文卫,等.地质钻探技术与应用研究[J].地质学报,2011,85(11):1806-1821.
RAN Hengqian, ZHANG Jinchang, XIE Wenwei, et al. Applications study of geo-drilling technology[J]. Acta Geologica Sinica, 2011,85(11):1806-1821.
- [15] 林命彬.智能机器的哲学思考[D].长春:吉林大学,2017.
LIN Mingbin. The philosophical thinking of intelligent machine[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [16] 王以法.人工智能钻井系统展望[J].石油钻探技术,2000,28(2):36-38.
WANG Yifa. Prospect of artificial intelligence on drilling system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000,28(2):36-38.
- [17] 姜大巍.关于自动化智能化钻井新技术的应用发展研究[J].科技创新导报,2015(6):69.
JIANG Dawei. Research on the application and development

- of new automatic intelligent drilling technology[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015(6):69.
- [18] 张晓东,朱正喜.智能钻井技术研究[J].石油钻采工艺,2010,32(1):1-4,16.
ZHANG Xiaodong, ZHU Zhengxi. Study of intelligent drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010,32(1):1-4,16.
- [19] 张绍槐.论智能钻井理论与技术及其发展[J].天然气工业,2008,28(11):3-7.
ZHANG Shaohuai. Smart drilling technologies and their development[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(11):3-7.
- [20] 张增年.我国在用陆地石油钻机自动化配套方案探讨[J].西部探矿工程,2017,29(1):41-42,47.
ZHANG Zengnian. Discussion on the automation plan for Land oil rig[J]. West-China Exploration Engineering, 2017,29(1):41-42,47.
- [21] 张绍槐,张洁.21世纪中国钻井技术发展与创新[J].石油学报,2001,22(6):63-68.
ZHANG Shaohuai, ZHANG Jie. The development and creation of drilling technology in China during the 21st century[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001,22(6):63-68.
- [22] 方太安,周志雄,吴昊亮,等.自动化与智能化钻井技术应用综述[J].机械研究与应用,2019,32(4):213-216.
FANG Taian, ZHOU Zhixiong, WU Haoliang, et al. Automatic and intelligent drilling technology[J]. Mechanical Research & Application, 2019,32(4):213-216.
- [23] 魏培静,于兴军,刘向军,等. idriller 石油钻机集成控制系统研制概要[J].石油矿场机械,2016,42(11):88-92,93.
WEI Peijing, YU Xingjun, LIU Xiangjun, et al. Development summary of idriller integration control system of oil drilling rig[J]. Oil Field Equipment, 2016,42(11):88-92,93.
- [24] 王定亚,王耀华,于兴军.我国管柱自动化钻机技术研究及发展方向[J].石油机械,2017,45(5):23-27.
WANG Dingya, WANG Yaohua, YU Xingjun. Research and development trend of domestic automated drilling rig[J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(5):23-27.
- [25] 周方成,么秋菊,张新型,等.智能钻井发展现状研究[J].石油矿场机械,2019,48(6):83-87.
ZHOU Fangcheng, MO Qiuju, ZHANG Xinyi, et al. Research on the development status of intelligent drilling[J]. Oil Field Equipment, 2019,48(6):83-87.
- [26] 石崇东,张绍槐.智能钻柱设计方案及其应用[J].石油钻探技术,2004,32(6):7-10.
SHI Chongdong, ZHANG Shaohuai. Scheme design and application of intelligent drill string[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004,32(6):7-10.
- [27] 梁健,顾艳红,岳文,等.科学超深井钻探铝合金钻杆的腐蚀失效分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):60-66.
LIANG Jian, GU Yanhong, YUE Wen, et al. Analysis on corrosion failure of aluminum alloy drill pipe for scientific ultra-deep well drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(2):60-66.
- [28] 梁健,岳文,孙建华,等.超声表面滚压处理铝合金钻杆的高温摩擦学性能[J].中国表面工程,2016,29(5):129-137.
LIANG Jian, YUE Wen, SUN Jianhua, et al. High temperature tribological properties of aluminum alloy drill pipe processed by ultrasonic surface rolling[J]. China Surface Engineering, 2016,29(5):129-137.
- [29] 梁健,孙建华,张永勤,等.绳索取心钻杆管材的模糊综合评价[J].地质与勘探,2014,50(3):572-576.
LIANG Jian, SUN Jianhua, ZHANG Yongqin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of steel pipe used to wire-line drill rod[J]. Geology and Exploration, 2014,50(3):572-576.
- [30] 梁健,岳文,孙建华,等.超声波冷锻与阳极氧化处理铝合金钻杆摩擦学性能研究[J].地质与勘探,2016,52(3):576-583.
LIANG Jian, YUE Wen, SUN Jianhua, et al. Study on tribological properties of aluminum drill pipes under ultrasonic cold forging and anodic oxidation treatment[J]. Geology and Exploration, 2016,52(3):576-583.
- [31] 梁健,尹浩,孙建华,等.特深孔地质岩心钻探钻孔口径及管柱规格研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):36-46.
LIANG Jian, YIN Hao, SUN Jianhua, et al. Research on hole diameter, drill string specification and casing program for ultra-deep geological core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(8):36-46.
- [32] 王以法.新型智能钻头的设计[J].石油学报,2003,24(1):92-95.
WANG Yifa. A new intelligent bit design[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(1):92-95.
- [33] 杨明清,杨凡,杨一鹏.俄罗斯旋转导向系统研发进展[J].录井工程,2019,30(2):79-82,135-136.
YANG Mingqing, YANG Fan, YANG Yipeng. Progress in research and development of Russian rotary steerable system[J]. Mud Logging Engineering, 2019,30(2):79-82,135-136.
- [34] 唐志军,韩来聚,刘新华.自动化智能化钻井技术进展[J].石油地质与工程,2009,23(1):93-97.
TANG Zhijun, HAN Laiju, LIU Xinhua. Advance of automatic intelligent drilling techniques[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009,23(1):93-97.
- [35] 付天明. Geo-Pilot 旋转导向系统发展与应用研究[J].石油矿场机械,2014,43(5):77-80.
FU Tianming. Study of development and application of Geo-Pilot rotary steering drilling system[J]. Oil Field Equipment, 2014,43(5):77-80.
- [36] 张绍槐.现代导向钻井技术的新进展及发展方向[J].石油学报,2003,24(3):83-85,89.
ZHANG Shaohuai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(3):83-85,89.

(编辑 王建华)