

特深科学钻探装备技术现状与发展建议

张正^{1,2}, 冉恒谦¹, 张毅^{1*}, 陈思祥³, 刘冬军⁴

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;
3. 宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西宝鸡 721002; 4. 中国石油长庆油田分公司页岩油开发公司, 甘肃庆阳 745000)

摘要: 特深科学钻探是直接获取地球深部信息的唯一技术手段, 对于深入理解地球内部结构、探索地下资源具有重要意义, 已上升为国家战略科技问题。为响应党中央“向地球深部进军”的号召, 需大力推进对特深科学钻探装备技术的研发。本文简要回顾了国内外特深科学钻探装备技术发展历程, 结合我国发展需求, 梳理总结了特深科学钻探中顶驱、绞车、钻井泵等关键装备面临的技术难题, 并在此基础上提出了发展方向及展望, 为我国特深科学钻探工程发展提供参考。

关键词: 特深科学钻探; 钻探装备; 顶驱; 绞车; 钻井泵; 技术难题; 发展方向

中图分类号: P634.3; TE92 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0014-09

Technical status and development suggestions of extra-deep scientific drilling equipment

ZHANG Zheng^{1,2}, RAN Hengqian¹, ZHANG Yi^{1*}, CHEN Sixiang³, LIU Dongjun⁴

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Baoji Petroleum Machinery Co., Ltd., Baoji Shaanxi 721002, China;

4. Shale Oil Development Company, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Qingyang Gansu 745000, China)

Abstract: Extra-deep scientific drilling is the only technical means to directly obtain the deep information of the earth, which is of great significance to deeply understand the internal structure of the earth and explore the underground resources, which has been risen to the national strategic science and technology issue. In response to the call of the Party Central Committee for “march to the deep earth”, it is necessary to vigorously promote the research and development of extra-deep scientific drilling equipment technology. This paper briefly reviews the development of the extra-deep scientific drilling equipment technology at home and abroad, combined with China’s development needs, the key technical problems faced by top drive, winch, drilling pump in extra-deep scientific drilling are summarized, and on this basis, the development direction and prospect are put forward, which provides reference for the development of extra-deep scientific drilling engineering in China.

Key words: extra-deep scientific drilling; drilling equipment; top drive; winch; drilling pump; technical problem; development direction

0 引言

“上天、入地、下海、登极”是人类探索自然奥秘

的四大壮举, 千百年来人类在上天、下海、登极的拼搏中获得巨大成功, 但在入地的探索中却举步维

收稿日期: 2024-05-09; 修回日期: 2024-06-29 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.003

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费项目“特深科学钻探核心技术装备方案预研究”(编号: JKYZD202304)

第一作者: 张正, 男, 汉族, 2001年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为特深科学钻探装备, 北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京), 1797851572@qq.com。

通信作者: 张毅, 男, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 硕士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事科学钻探技术与装备研究工作, 北京市西城区百万庄大街26号, shidazhangyang@163.com。

引用格式: 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.

艰。习近平总书记在2016年5月30日全国科技创新大会上指出:向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题。为响应党中央的号召,全面实施“四位一体”的科技创新战略,需开展深部科学钻探关键技术与装备的研发,为探索地球深部奥秘、勘探深部资源等提供有力的技术装备支撑^[1-3]。

当前,特深科学钻探技术已取得显著进展,如钻探深度的不断突破、钻探效率的显著提升。然而,随着钻探深度的增加,高温、高压、高地应力等极端的地下环境对钻探装备提出了更高的要求,钻探装备必须具备更强的耐用性和可靠性,以保证在恶劣条件下的稳定运行。

本文通过回顾国内外特深科学钻探装备技术的发展历程,结合中国大陆科学钻探发展需求,分析特深科学钻探装备所面临的主要问题,并提出其发展方向,为我国特深科学钻探工程发展提供参考。

1 科学深钻概况

1950年代末,美国启动“莫霍钻探计划”,这是世界上第一个科学钻探计划,目的是要钻透莫霍面(地壳和地幔的界面),从而实现地学研究的重大突破。但该计划由于当时钻探技术水平和高昂的费用,只在海底钻进了315 m,于1966年宣告终止。随后苏联、德国和法国等也相继制定并实施了一系列大陆科学钻探计划,这标志着科学钻探的开始^[4-7]。

1970至1990年代,苏联、德国和美国在科学钻探领域处于领先地位。其中,苏联在古别尔曼院士的带领下,于1970年开始进行科拉超深井(SG-3)的施工,终止于1989年,井深达到12262 m,至今仍保持着全球科学钻探井最深记录,见图1。该井0~7263 m使用“乌拉尔机械-4I”型钻机,7263 m至井底改用“乌拉尔机械-15000”型钻机,并且在施工过程中取得了多项超深井钻井技术成果,如轻质铝合金钻杆、可拆卸的取心筒涡轮钻具一体化取心工具等^[8]。苏联先后共实施了11个深井超深井的钻探项目,除了科拉超深井之外,其他的著名超深井有萨阿特累超深井、乌拉尔超深井、克里沃罗格超深井等^[9-10]。

德国大陆科学钻探(KTB)是德国第一个大规模地学研究计划,该计划正式执行的时间是1985—1994年,先后完成终孔深度为4000.1 m的先导孔和



图1 科拉科学超深井现场^[4]

Fig.1 Kola Science Ultra Deep Well site

9101 m的主孔,并在钻孔现场组建了一个庞大的地表与深井长期观测系统,见图2。KTB施工过程中采用了大量现代化的钻探方法和设备器具,在先导孔施工时,将一套高速回转动力和金刚石绳索取心钻进系统安装在石油转盘钻机上,解决了在深孔、硬岩中进行连续取心施工的技术难题,并专门研制了一套可用于深孔的大直径绳索取心钻杆柱。此外,KTB施工过程中研究与开发的自动垂孔钻进系统和小间隙套管方案等均取得了很好的效果,为钻探和测井技术的发展提供了宝贵的经验^[11]。



图2 德国大陆深钻计划(KTB)主孔^[4]

Fig.2 Main hole of the German Continental Deep Drilling Program (KTB)

美国在这一时期的科学钻探以中、浅井为主,深井与超深井的钻进未纳入计划之中,建立“大陆地壳深部观测及采样团体”,负责大陆科学钻探计划的协调、组织管理和成果出版工作。苏联、德国的科学深钻注重地壳深部的结构、构造、成分等信息,美国的科学深钻则聚焦于地壳浅部正在发生的各种地质作用。SG-3井和KTB主孔是这一时期最具代表性的大陆科学钻探工程,二者均以地壳深部探测为目标,克服了高温高压恶劣井眼环境,系统地开展钻探、测井和长期观测等工作^[12-13]。

1990年代中期,世界各国对大陆科学钻探的投入持续增大,推动了大陆科学钻探进一步发展,国际合作愈加频繁。1996年2月26日,德国、中国和美国共同成立了国际大陆科学钻探计划(ICDP),其总部设在德国波茨坦的德国地学研究中心(GFZ)。迄今为止,全球已有22个国家成为ICDP正式成员国,钻探井位遍布全球各大洲。

国内外典型深钻井见表1。

表1 国内外典型深钻井^[14-15]

Table 1 Typical deep drilling wells at home and abroad

深钻井名称	井深/m	完钻年份	井址
Baden1井	9159	1972	俄克拉荷马(美国)
Rogers1井	9583	1974	俄克拉荷马(美国)
SG-3井	12262	1989	摩尔曼斯克(苏联)
KTB主孔	9101	2008	巴伐利亚(德国)
BD-04A井	12289	2008	拉斯拉夫(卡塔尔)
Tiber探井	10685	2009	休斯敦(美国)
Odoptu OP-11油井	12345	2011	库页岛(俄罗斯)
Z-44chayvo井	12376	2012	库页岛(俄罗斯)
女基井	6011	1976	四川广安(中国)
关基井	7175	1978	四川绵阳(中国)
科钻1井	5158	2005	江苏东海(中国)
马深1井	8418	2016	四川巴中(中国)
松科2井	7018	2018	黑龙江安达(中国)
蓬深6井	9026	2023	四川绵阳(中国)

2 特深科学钻探装备的发展

特深科学钻探装备技术的水平是衡量一个国家科学钻探技术水平的重要标志之一。1990年代末,深井钻机出现,但大部分是以可控硅直流电驱动钻机(AC-SCR-DC)为主,陆地钻机的井口机械化程度较低,受传动限制和环境因素的影响,目前深井钻机都朝着交流变频电驱动(AC-VFD-AC)和满足健康、安全、环境(HSE)的方向发展。美国的深井钻机代表着当今世界钻机最先进水平,其设计制造的大型化、机电液气一体化程度等已经达到全数字化电驱动钻机作业水平,美国及欧洲的超深井钻井技术处于世界领先地位。

1990年代开始,宝鸡石油机械厂先后开发了1500~12000 m的多种规格型号的新型石油钻机,在超深井、特深井钻探装备技术研发方面取得了显

著的成绩,但从前苏联的科拉超深井报道来看,并深超过万米后才是难题的开始。我国现有的最大石油钻机是宝鸡石油机械厂研制的ZJ120/9000DB型钻机,该钻机最大钻井深度为12000 m,见图3。ZJ120/9000DB型钻机是一台交流变频电驱动钻机,具有能耗低、操控性好、超载能力强等特点。以此钻机为基础,其顶驱、钻井泵、循环、固控和井控系统不变,将钻机提升系统能力提高,并配备钻井液冷却系统和连续循环钻井系统等,即可形成13000 m科学特深井钻机^[10]。



图3 ZJ120/9000DB钻机(来源于百度)

Fig.3 ZJ120/9000DB drilling rig

2014年4月,SinoProbe专项研制的“地壳一号”7018 m大陆科学钻探钻机(图4)开始在大庆实施“松科2井”科学钻探。2018年6月2日,“地壳一号”以完钻井深7018 m创亚洲国家大陆科学钻井新纪录,标志着中国成为继俄罗斯和德国之后,世界上第三个拥有实施7018 m大陆科学钻探计划专用装备和相关技术的国家^[16]。“地壳一号”7018 m钻机应用了一套由我国研发的自动化管柱处理系统,其主要包括自动排管装置、自动上卸扣装置、自动“猫道”、大功率综合液动力站以及国内钻深能力最大的一台全液顶驱装置^[17-18]。

2024年3月4日,我国首口设计井深超万米的科学探索井——深地塔科1井钻探深度突破10000 m,成为世界陆上第二口、亚洲第一口垂直深度超万米井^[19]。深地塔科1井使用的是我国自主研发的全球首台12000 m特深井自动化钻机,该钻机是由中国石油塔里木油田、西部钻探、宝石机械等多家单

图4 “地壳一号”钻机^[16]

Fig.4 “Crust One” drilling rig

位共同研发,创新研制了超高钻台、超高压循环系统、万米级管柱自动化处理系统等一系列硬核装备。该钻机的最大亮点是配备了全套的管柱自动化处理系统,基本实现从钻进到管柱起下钻全过程自动化操作,减少了人工劳动强度,大幅提升了安全性能。此外,这口井还采用了全流程的信息物联系统,实现设备状态及运行参数实时监测和远程传输^[20-21]。

3 我国特深科学钻探装备需求和研发要点

3.1 顶驱

顶部驱动钻井系统是1980年代逐渐发展起来的现代化钻井装置,被誉为近代钻井装备的三大革命性技术成果之一^[22]。典型的顶部驱动装置包括美国VARCO公司研发的TDS-11SA顶驱、加拿大TESCO公司生产的TDT500ECI顶驱和中国石油勘探开发研究院研发的DQ70BS型交流变频顶驱。

我国顶驱技术已经取得显著进步,完全实现了国产化,如北石公司研制的DQ150BSD顶驱装置,见图5。该顶驱装置采用双提环+双负荷通道全新结构设计、双电机冗余设计和新型单级减速传动结构、具有自动浮动和实时位置检测功能的新型背钳和自翻转顶驱运移装置等,大幅提高了系统可靠性,降低提升系统作业风险。该顶驱装置在自动化、智能化等多个方面都有显著提升,首创顶驱智能化监测与维护系统,研发多通道复合通讯技术,可确保特深井钻井作业中顶驱信号的可靠传输,同时集成扭摆减阻、软扭矩等北石独创顶驱先进技术^[23]。

随着国内油气勘探不断向深层、超深层挺进,

图5 DQ150BSD顶驱装置^[23]

Fig.5 DQ150BSD top drive device

顶驱驱动装置需要满足更大的承载能力和扭矩;降低长周期作业过程中顶驱的停机概率,提高系统可靠性;与此同时,随着顶驱能力提升和功率的增加,质量越来越大,给顶驱的安装、维护和保养带来相当大的困难,对于大功率顶驱控制质量提出更高的要求。随着顶驱装置在全球的广泛应用,顶驱下套管装置以其作业的高成功率和高效率等优点,也成为顶驱装置发展的一个重要方向^[24-25]。

3.2 绞车

1990年代,美国和德国等将交流变频技术应用在石油钻机上,开发出单轴齿轮传动绞车,其具有体积小、重量轻和可靠性高等优点,突破了多轴传动和链条传动的薄弱环节,提高了现代绞车的技术经济指标,单轴齿轮传动绞车已成为当前钻机的主要发展趋势。

近年来,在中国石油“两年一代、六年三代”自动化钻机发展规划指导下,国内企业开发了系列直驱绞车,在驱动效率、部件集成、维护保养等方面都有了较大提升。根据15000 m科学特深井钻探需求,结合绞车发展现状和发展趋势,开发适用于15000 m科学特深井钻探的绞车,主要有以下技术难题:

(1)超大型绞车模块化设计问题。根据目前国内运输条件限制,绞车必须由铁路和公路运输,需解决绞车部件选型、设备布局、外形尺寸和质量大小之间的矛盾。提高功率质量比,合理划分运输单元,使模块之间的定位连接准确、可靠、快捷。

(2)超大扭矩液压盘式刹车的研究。随着钻井

深度的增加,钻机最大钩载以及游吊系统质量都相应的增大,液压盘刹的驻车制动转矩和工作制动转矩都大大提高,需进一步研究超大型盘刹装置的可靠性和安全性,如盘刹刹车能力自检、关键阀件的自检、刹车间隙的自动调节等功能开发,才能保障钻井的绝对安全。

(3)关键部件的设计和加工制造。15000 m特深钻机较普通钻机的钩载和钻柱质量增加,为满足钻机需求,应探索大功率绞车设计、加工制造和试验。随着绞车提升能力、容绳量的增加,给绞车滚筒体、绳槽的加工带来了巨大的难度,需要研究大功率绞车滚筒体、LEBUS绳槽的设计及加工制造工艺。

(4)智能自动送钻系统的开发应用。受钻井钢丝绳、钻柱、传动等形变、时滞或非线性变化等复杂因素的影响,以及井筒磨擦、钻头磨损、钻井液及水力参数等的影响。给钻压的控制带来困难,导致特深井钻进时效低下,通过开发智能送钻系统来改善钻井质量和时效^[26-27]。

绞车发展经历了一个由复杂到简单、由多轴到单轴、由人力操作到自动化控制的发展过程,随着科技的发展,石油钻机所用绞车将会在以下几个领域有所突破:

(1)发展大功率绞车。随着世界陆地浅层油气井的逐年消减,油气勘探开发向深层、超深层进军,特别是近年来,在我国塔里木盆地、准噶尔盆地等油田发现了资源前景好的深层油气,国内深井钻探记录不断被打破,开展15000 m特深井钻机研究是我国油气勘探开发向超深层发展的必然需求,为进一步提高国内钻井技术,发展大功率绞车的趋势是必然的。

(2)绞车送钻智能化。钻井地层日益复杂,钻井难度不断增加,钻井工艺对绞车送钻的要求越来越高,伴随着全球科技向着数字化、智能化方向的快速发展,智能化送钻已成为钻井研究的新兴领域。装备的智能化是钻井智能化的前提,智能送钻绞车能够解决传统绞车送钻方法难以解决的控制问题^[26]。

(3)完善绞车远程监测与技术服务。为提高绞车可靠性,在绞车关键部位增加相应传感器进行重点监测^[28],开发数据预处理归档模块和后台大数据分析模块等,借助移动网络架构综合实现钻机制造

厂以及钻探公司对目标绞车的实时状态监测、预测性维护与健康管理和故障诊断、统计分析、移动终端人机交互等功能,为钻机的预知维修和按需维修提供可靠的数据。

3.3 井架底座

经过多年发展,我国已具备从1000~12000 m系列钻机研发和制造能力。与12000 m钻机配套的井架相比较,15000 m钻机井架钩载由9000 kN增加到11250 kN。目前国内外钻机井架底座主承载结构材料基本采用Q345及Q420或等同强度级别的材料制造,高性能钢材(Q690及以上)在钻机主承载结构上的应用技术研究尚未大规模展开。研制15000 m钻深能力的钻机,开发承载能力11250 kN的井架底座,主要有以下技术难题:

(1)井架底座结构布局及选型问题。井架底座要满足15000 m特深井的总体布置要求,管柱处理工作流程要求,以及承载能力要求。

(2)井架起升钩载大和井架稳定性问题。与12000 m钻机配套的井架相比较,井架总高度会提升,将极大增加井架的起升质量,为此需开展井架底座起升系统研究,解决起升钩载增加过大问题,确保井架的安全可靠性。

(3)高性能钢材(Q690)应用问题。开展Q690在井架、底座等大型结构件制作中的关键工艺技术研究,通过对材料焊接性能的研究,确定适用于大型结构件生产的材料性能、焊接技术、关键制作工艺措施,解决该类材料在大型结构件应用中的生产难题,降低生产难度和制造成本^[29]。

随着钻探深度的不断增加和国家对一线作业人员HSE要求的提高,采用自动化、智能化设备替代一线工人的作业已是大势所趋,井架底座须满足自动化、智能化设备对空间的要求,开发轻量化井架底座、减少运输模块、提高安装效率、降低维护成本是根本途径^[30]。

3.4 钻井泵

我国石油资源勘探开采作业正向着超深井、特深井方向发展,钻井装备面临储层埋藏深、高温高压、多压力体系、地层坚硬及可钻性差、机械钻速低、钻井周期长等挑战。高温高压井所使用的钻井液密度通常较高,有时甚至会使用钛铁矿粉、四氧化锰、赤铁矿粉等作为加重材料,相应钻井液中的固相含量就会很高,这对钻井泵、水龙头等钻井高

压循环系统装备提出了严峻考验,尤其是对钻井泵液力端易损件和钻井水龙头冲管装置的可靠性和适应性要求更高。开发70 MPa大功率钻井泵以满足特深井的高温高压钻井工艺技术要求^[31]。

提高钻井泵的最高压力,可以使高压喷射钻井技术得到更好的应用。大量的研究和实践表明,喷速越高,钻速和进尺越快越多,到目前为止,尚未找到喷射速度对提高钻速的极限值,但是受地面设备和井下工具的性能所限,当前高压喷射钻井最高压力基本不超过45 MPa,配套额定压力为52 MPa的高压钻井循环系统。当钻井压力达到或接近额定压力52 MPa时,钻井泵液力端的缸套、活塞、阀体、阀座和钻井水龙头的冲管盘根等易损件的使用寿命会急剧下降,严重影响钻井速度,增加钻井成本。

目前,我国的深井平均机械钻速达到5.66 m/h,超深井平均机械钻速达到4.64 m/h。据资料显示70 MPa高压系统能够提高钻井速度1.3~6倍,可有效提高作业效率,应尽快解决70 MPa高压钻井泵动力端、液力端结构形式及疲劳寿命等技术难题。70 MPa高压钻井泵是在现有52 MPa钻井泵的基础上提高承压能力,动力端的输入载荷加大,对钻井泵动力端提出更高要求。一方面需进一步加强动力端箱体、齿轮传动、曲轴、连杆、十字头、拉杆等关键结构的力学性能研究,涉及到结构强度、疲劳寿命;另一方面需对动力端所有运动零件压力循环的润滑系统进一步研究分析,涉及到润滑系统油量分配、油路压力。与此同时,承压件长时间在高压下承受交变载荷的作用,容易疲劳损坏,需要对液力端进行材料、结构形式、疲劳寿命模拟优化设计,以适应超高压作业的需求。

国内外钻井泵正朝着大功率、大排量、高压力的五缸泵组方向发展。为提高钻井泵连续、高压、可靠的作业能力,保证钻井作业的高效率,未来必将加大钻井泵的系统性振动模态研究,进一步优化高压钻井泵的结构、性能特性。如美国LEWCO公司和德国WIRTH公司推出的3000 hp(1 hp=0.735 kW,下同)、69 MPa的钻井泵;宝石机械推出的3000 hp、70 MPa五缸泵等推动高压大功率泵的发展。近年来,钻井泵正朝着机自动化、智能化、信息化方向发展,对钻井泵的十字头、活塞等易损件进行远程实时监测,对钻井泵的润滑系统、冷却系统进行自动控制,成为钻井泵未来发展的方向^[32]。

3.5 铁钻工

铁钻工作为钻柱上、卸扣工具,替代传统液气大钳,实现自动化控制,降低了钻工强度。在全球石油钻具制造商中,美国NOV(National Oilwell Varco)公司的铁钻工产品最为成熟,该公司的铁钻工产品代表了世界先进水平。此外,威德福(Weatherford)和斯伦贝谢(SLB)等厂商也在进行铁钻工的设计与研发,更新迭代速度很快。国内铁钻工正处于发展扩张期,宝石机械公司、宏华集团和三一石油等也都不断研发试验,各家设备均已投入油田现场使用,取得了不错的成果,如宝石机械公司研发的TZG9 3/4—140S1伸缩臂式铁钻工和宏华集团研发的TP100铁钻工等,见图6、图7。



图6 宝石140S1铁钻工(来源于百度)

Fig.6 Gem 140S1 iron roughnyer



图7 宏华TP100铁钻工(来源于百度)

Fig.7 Honghua TP100 iron roughnyer

我国铁钻工相比于国外起步较晚,但经过我国科研人员的不懈努力,取得了可喜的成果。根据铁钻工的发展现状及发展趋势,未来应以以下几点作为发展方向:

(1)轻量、高效化发展。在目前已满足基本性能的提前下,设备的作业效率成为衡量产品优劣的最关键因素。据统计,油田作业现场铁钻工的上、卸扣周期普遍在30 s,作业周期较传统大钳20 s还有一定差距,提速、提效成为发展的关键点。影响设备效率的因素主要有旋扣效率和外部环境,要提升旋扣效率,一方面是要提升旋扣装置作用在钻具上的最大扭矩,另一方面是通过其他方式,减小快速旋扣时钻具的非正常阻力;外部环境会影响动作速度及各部分的衔接,一般采取优化液压和电控系统,增加使用各类检测传感技术,闭环反馈改善^[33]。

(2)自动化、功能多样化发展。为实现钻机系统无人化、一键式全自动作业,铁钻工除需完成动力大钳的全部工作外,还要有效缩短上、卸管柱辅助用时。目前国内铁钻工主要增加钻具接头自动清洗、丝扣油均匀喷涂、下钻时自动对扣、起钻时泥浆防喷等辅助功能。在系统下钻时,铁钻工可完全利用游吊装置立根盒取立根空窗期,无障碍参与钻台面卡瓦支撑端的钻具母接头清理、丝扣油喷涂。以及对接公、母头的自动对扣功能。起钻时,集成的泥浆防喷功能,能最省时、最有效的防止泥浆喷出。

(3)智能化发展。中国智能钻机还处于初级发展阶段,需要继续融合控制工程学、机械力学、数据分析、智能算法、数据传输等理论与前沿技术。铁钻工在智能化方向发展,多为增加机器视觉、升级传感检测技术,优化控制逻辑及软件算法,升级PLC、采样、通讯等硬件模块,显著提高运算速度及抗干扰能力,提高整体作业效率。通过深度学习算法,以实现智能定位、智能识别钻具、夹持力自适应、智能控制实现各类障碍规避等^[34-35]。

3.6 四单根立柱钻机

传统石油钻机多采用三单根立柱进行钻井作业,管柱处理以手工操作为主,已不能满足当前钻井工作要求。四单根立柱钻机提高了钻井效率、缩短了钻井周期、降低了钻井成本,节能降耗、保护环境意义重大,为复杂深井提速提效提供了新的技术支持,应用前景十分广阔,其中最具代表性的是宝石机械研发的ZJ90/6750DB-S型四单根立柱钻机。

宝石机械先后研制了9000 m和8000 m四单根立柱钻机。其中,9000 m四单根立柱钻机于2012年研制成功,并一直在新疆塔里木油田实施钻探作

业,目前已完成7口超深井作业,平均钻井深度超过7300 m,累计进尺51200 m。8000 m四单根立柱钻机重点围绕小钻柱排放技术难题,开发了推扶小钻具三单根立柱和复合式(悬持+推扶)大钻具四单根立柱的立柱组合排放技术,并于2020年2月开始在新疆塔里木地区开展工业性试验。现场应用表明,四单根立柱钻机起下钻综合提速超过15%,钻井周期缩短6%^[36]。四单根立柱钻机未来应以以下几点作为发展方向:

(1)提高安全稳定性。相比于常规三单根立柱钻机,四单根立柱钻机井架高度提升近10 m,在承受钩载、风载荷或外部载荷的作用下极易发生因强度不够而倒塌的现象,应对井架、底座主承载构件进行受力分析、材料优选、结构优化等,解决超高井架、底座结构稳定问题,提高钻机作业安全性和稳定性^[37]。

(2)进一步提高钻井效率与自动化水平。建议在后续四单根立柱钻机上配置全套管柱自动化工具、idriller集成控制系统、电气液一体化集成及设备远程在线监测系统等技术,实现钻机管柱的输送、建立根、排放等作业的机械化,以提高钻机自动化作业水平^[38]。

4 结论

随着科学技术的进步,世界各国在特深科学钻探装备技术方面已经取得一系列显著成就,对顶驱、绞车、钻井泵等装备的研究不断深入。从科拉超深井到德国KTB项目,再到中国深地塔科1井,这些工程不仅加深了我们对地球深部结构的理解,也推动了钻探技术的发展,但面对万米深井的极端条件,特深科学钻探装备技术仍面临着诸多挑战。

未来,特深科学钻探装备技术的发展将更加注重材料的创新、自动化智能化技术的应用、钻井装备的设计、钻探工艺的优化,以及井下监测和测井技术的提升。同时,国际合作与技术交流的加强,将促进全球范围内的技术共享和经验积累,加速特深科学钻探装备技术的发展。期待在不久的将来,特深科学钻探装备技术能够实现更多重大突破,揭开地球深部的神秘面纱,为人类社会的发展贡献新的力量。

参考文献(References):

- [1] 许志琴,杨文采,杨经绥,等. 中国大陆科学钻探的过去、现在和未来——纪念中国大陆科学钻探实施15周年、国际大陆科学钻探委员会成立20周年[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2109-2122.
XU Zhiqin, YANG Wencai, YANG Jingsui, et al. 15 years of hardship and struggle history and the prospects for the future of the Chinese Continental Scientific Drilling Program (CCSD) in memory of the 15 year anniversary of CCSD and 20 year anniversary of ICDP[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(9): 2109-2122.
- [2] ZHANG Xiaoxi, ZHANG Hui. Scientific drilling-to construct the telescopes that inserting to the earth interior[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2020, 94(S1): 87-88.
- [3] 许志琴. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果[J]. 岩石学报, 2004(1): 1-8.
XU Zhiqin. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004(1): 1-8.
- [4] 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.
- [5] 王志刚, 王稳石, 张立焯, 等. 万米科学超深井钻完井现状与展望[J]. 科技导报, 2022(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(13): 27-35.
- [6] 苏德辰, 杨经绥. 国际大陆科学钻探(ICDP)进展[J]. 地质学报, 2010, 84(6): 873-886.
SU Dechen, YANG Jingsui. Advances of international continental scientific drilling program[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(6): 873-886.
- [7] 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.
- [8] 杨明清, 杨一鹏, 卞玮, 等. 俄罗斯超深井钻井进展及技术进步[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(1): 15-20.
YANG Mingqing, YANG Yipeng, BIAN Wei, et al. Drilling progress and technological improvement of ultradeep wells in Russia[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(1): 15-20.
- [9] 莫杰. 科拉超深钻的重大成果[J]. 地质与勘探, 1987(5): 27-28.
MO Jie. Great achievements of ultradeep drilling at Kola Peninsula[J]. Geology and Prospecting, 1987(5): 27-28.
- [10] 张金昌, 刘秀美. 13000 m 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.
- [11] 张伟. 德国大陆深钻计划实施情况介绍[J]. 国外地质勘探技术, 1998(3): 44-46.
ZHANG Wei. Introduction to the implementation of the german continental deep drilling program[J]. Foreign Geoporation Technology, 1998(3): 44-46.
- [12] 石宏仁. 美国大陆科学钻探计划的地壳深部研究项目[J]. 科技导报, 1988(1): 17-20.
SHI Hongren. Dosecc continental scientific drilling program[J]. Science & Technology Review, 1988(1): 17-20.
- [13] 许志琴, 张良弼. 大陆科学钻探的现状 & 展望[J]. 地球物理学进展, 1994(4): 55-65.
XU Zhiqin, ZHANG Liangbi. Present situation of continental scientific drilling in China and its prospects[J]. Progress in Geophysics, 1994(4): 55-65.
- [14] 《中国地质》编辑部. 世界超深井简介[J]. 中国地质, 2019, 46(3): 672.
《Geology in China》Editorial Office. A brief introduction to ultradeep wells in the world[J]. Geology in China, 2019, 46(3): 672.
- [15] 罗志立, 孙玮, 代寒松, 等. 四川盆地基准井勘探历程回顾及地质效果分析[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 9-12, 118.
LUO Zhili, SUN Wei, DAI Hansong, et al. Review of exploration history and geological effect analysis of benchmark wells in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 9-12, 118.
- [16] 《发明与创新》编辑部. 7018米的“地心游记”——“地壳一号”万米钻机诞生记[J]. 发明与创新(大科技), 2018(7): 14-15.
《Invention and Innovation》Editorial Office. Travel to the 7018-meter earth's core[J]: “Crustal No.1” 10000 meter drilling rig. Invention and Innovation, 2018(7): 14-15.
- [17] 白娟. 来自东北的地壳一号[J]. 东北之窗, 2018(13): 19.
BAI Juan. Crustal No.1 from Northeast China[J]. Window of Northeast China, 2018(13): 19.
- [18] 孙友宏, 王清岩, 高科, 等. “地壳一号”万米钻机在松科二井科学钻探工程应用方案[C]//2014年中国地球科学联合学术年会——专题65: 深部探测技术与实验——探测仪器与装备论文集, 2014: 1.
SUN Youhong, WANG Qingyan, GAO ke, et al. Application plan of the “Crustal No.1” ten thousand meter drilling machine in the scientific drilling engineering of Songke No.2 Well[C]//2014 China Earth Science Joint Academic Annual Conference, Topic 65: Deep Exploration Technology and Experiments; Collection of Detection Instruments and Equipment, 2014: 1.
- [19] 《石油管材与仪器》编辑部. 我国首口万米科学探索井钻探深度突破1万米[J]. 石油管材与仪器, 2024, 10(2): 53.
《Petroleum Pipe and Instrument》Editorial Office. The drilling depth of China's first 10000 meter scientific exploration well has exceeded 10000 meters[J]. Petroleum Pipe and Instrument, 2024, 10(2): 53.
- [20] 唐琳. 我国首个万米深地科探井开钻[J]. 科学新闻, 2024, 26(1): 19.
TANG Lin. China's first 10000 meter deep geological exploration well drilling[J]. Science News, 2024, 26(1): 19.
- [21] 王春生, 冯少波, 张志, 等. 深地塔科1井钻井设计关键技术[J/OL]. 石油钻探技术, 2024: 1-15[2024-05-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1763.te.20240407.2008.002.html>.
WANG Chunsheng, FENG Shaobo, ZHANG Zhi, et al. Key technologies for drilling design of Well Shendi Take-1[J/OL]. Petroleum Drilling Techniques, 2024: 1-15[2024-04-24]. [http://](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1763.te.20240407.2008.002.html)

- kns.cnki.net/kcms/detail/11.1763.te.20240407.2008.002.html.
- [22] 雷宇, 谢宏峰, 张红军, 等. 顶部驱动钻井装置标准的发展及建议[J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(03): 19-21, 42.
LEI Yu, XIE Hongfeng, ZHANG Hongjun, et al. Development of standard for top drive drilling equipment and some suggestions [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2021, 37(3): 19-21, 42.
- [23] 《钻探工程》编辑部. 2023年探矿工程十大新闻[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 1-4.
《Drilling Engineering》Editorial Office. Top ten news of exploration engineering in 2023[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 1-4.
- [24] 邓荣, 董毅军, 王德贵, 等. 外夹式顶驱下套管装置的研制及应用[J]. 机械工程师, 2024(4): 105-108.
DENG Rong, DONG Yijun, WANG Degui, et al. Development and application of a new casing running device with top drive[J]. Mechanical Engineer, 2024(4): 105-108.
- [25] 刘士岩, 张宁, 王坤青, 等. 一种液压驱动顶驱下套管装置的研制与应用[J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(3): 116-119.
LIU Shiyan, ZHANG Ning, WANG Kunqing, et al. Development and application of a hydraulic driven casing device with top drive[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2024, 50(3): 116-119.
- [26] 纠松涛. JC150DB 钻机绞车的设计研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
JIU Songtao. Design and research of JC150DB drilling rig winch[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [27] 薛倩冰, 刘凡柏, 张金昌, 等. 特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 8-16.
XUE Qianbing, LIU Fanbai, ZHANG Jinchang, et al. Integration and demonstration of geological core drilling technology and equipment for ultra-deep hole [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 8-16.
- [28] 任启伟, 刘凡柏, 高鹏举, 等. 5000 m 地质钻探绳索取心绞车的研制及应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 40-50.
REN Qiwei, LIU Fanbai, GAO Pengju, et al. Development and application of 5000m wire-line coring winch for geological drilling[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 40-50.
- [29] 刘宏亮, 任小伟, 柳锁贤, 等. 石油钻机井架底座结构用钢的思考和建设[J]. 机械工程师, 2022(7): 81-84, 87.
LIU Hongliang, REN Xiaowei, LIU Suoxian, et al. Considerations and suggestions on steel used in the structure of oil rig derrick substructures [J]. Mechanical Engineer, 2022(7): 81-84, 87.
- [30] 李方坡. 钻机井架底座用高强度钢性能研究[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 541-544.
LI Fangpo. Study on high strength steel for rig derrick and sub-structure[J]. Heat Treatment of Metal, 2019, 44(S1): 541-544.
- [31] 秦永和, 曹晓宇, 张志伟, 等. 油气钻采装备技术发展现状与展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(2): 89-104.
QIN Yonghe, CAO Xiaoyu, ZHANG Zhiwei, et al. Development status and prospects of oil and gas drilling and production equipment technologies [J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2): 89-104.
- [32] 张洪生, 李跃强. 国内外钻井泵发展现状与展望[J]. 化工机械, 2019, 46(1): 1-3, 57.
ZHANG Hongsheng, LI Yueqiang. Development status and prospects of drilling pumps at home and abroad [J]. Chemical Machinery, 2019, 46(1): 1-3, 57.
- [33] 王玉, 范向增, 韩亚洲, 等. 140S1 铁钻工上、卸扣效率的提高及优化[J]. 机械工程师, 2023(4): 71-73.
WANG Yu, FAN Xiangzeng, HAN Yazhou, et al. Improvement and optimization of fastening and unfastening efficiency for iron roughneck 140S1 [J]. Mechanical Engineer, 2023(4): 71-73.
- [34] 王潇潇, 段树军, 范向增, 等. 铁钻工润滑方式的改进与优化[J]. 机械工程师, 2024(3): 115-118, 122.
WANG Xiaoxiao, DUAN Shujun, FAN Xiangzeng, et al. Improvement and optimization of lubrication mode for iron roughneck [J]. Mechanical Engineer, 2024(3): 115-118, 122.
- [35] 张永勤. 论地质钻探技术的担当使命及智能化与绿色发展[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 5-9.
ZHANG Yongqin. Discussion on aspiration and mission and AI & green development of the drilling techniques [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 5-9.
- [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] 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.
- [38] 张益, 陈思祥, 张友会, 等. ZJ90/6750 DB-S 四单根立柱高效钻机关键技术研究[J]. 机械工程师, 2017(7): 117-119.
ZHANG Yi, CHEN Sixiang, ZHANG Youhui, et al. Development of ZJ90/6750DB-S four single column in ultra deep drilling rig [J]. Mechanical Engineer, 2017(7): 117-119.

(编辑 王文)