

大陆科学钻探工程技术发展动态及趋势分析

薛倩冰¹, 梁楠¹, 韩丽丽², 马莎莎¹, 汪凯丽¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要: 钻探是直接获取地下实物资料 and 提供测量通道的唯一技术方法, 科学钻探是人类解决所面临的资源、灾害、环境等重大问题不可或缺的重要手段。本文简要回顾了大陆科学钻探技术发展概况, 通过对大陆科学钻探新技术发展动态前沿问题及发展路线进行调研, 梳理总结了大陆科学钻探工程面临的高温、高压、高地应力、井斜、取心等技术难题, 并提出了以高度集成化、智能化的绿色钻探技术为研究方向的发展路线图, 为大陆科学钻探工程进一步发展及组织实施提供参考。

关键词: 大陆科学钻探; 智能钻探; 绿色钻探; 科学超深井; 发展路线图

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)12-0001-06

Development trend of continental scientific drilling technology

XUE Qianbing¹, LIANG Nan¹, HAN Lili², MA Shasha¹, WANG Kaili¹

(1. *The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China)

Abstract: At present, drilling is the only technical method that can directly obtain subsurface physical data and provide measurement channels, and scientific drilling is an indispensable and important means for human beings to solve the major problems about resources, disasters and the environment. This paper briefly reviews the development of continental scientific drilling technology and equipment. Through the investigation of the frontier issues and development routes of new technology development in continental scientific drilling, summarization is made of the main technical problems which continental scientific drilling faces with the development roadmap of highly integrated, smart green drilling technology put forward for ultra-deep scientific drilling in China, which can provide reference for further development and organization of scientific drilling projects in China.

Key words: continental scientific drilling; smart drilling; green drilling; ultra deep well; development roadmap

0 引言

地球深部既蕴含着丰富的资源, 又是重要的战略空间, 也是重大地质灾害的策源地^[1]。钻探是目前唯一能直接获取地下实物资料并提供测量通道的技术方法。科学钻探被誉为“观测地球内部的望远镜”, 通过科学钻探这一重要手段, 可以解决人类所面临的资源、灾害及环境等重大问题。大陆科学

钻探自开展以来, 在全球许多领域取得了举世瞩目的成就, 人们也越来越认识到, 通过科学钻探来直接观察地球, 深入认识地球的内部结构、构造及动力学过程, 是充分开发、利用及有效地保护地下资源、减轻地质灾害极为有效的科学途径^[2-6]。本文简要回顾了大陆科学钻探技术与装备发展概况, 通过对大陆科学钻探新技术发展动态前沿问题及发展

收稿日期: 2021-11-07; 修回日期: 2021-12-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.12.001

基金项目: 中国地质科学院勘探技术研究所科研项目“大陆科学钻探井新技术发展动态前沿及发展路线研究”(编号: YB202013); 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”(编号: 2018YFC0603400)

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, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 913311690@qq.com。

引用格式: 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.

路线进行调研,梳理总结了大陆科学钻探工程面临的主要技术难题,并提出了我国特深科学钻探井发展趋势路线图,为我国大陆科学钻探工程进一步发展及组织实施提供参考。

1 大陆科学钻探工程国内外发展概况

1968年由美国等多个国家启动的深海钻探计划、国际大洋钻探计划、综合大洋钻探计划及正在实施的国际大洋发现计划是地球科学领域内迄今规模最大、影响最深、历时最久的大型国际合作研究计划^[7-10]。与大洋钻探相比,大陆科学钻探起步较晚,始于20世纪70年代的苏联,其中最深也是最著名的为SG-3井,终孔最深达到12262 m。德国于1987—1994年间,在德国中部进行了举世闻名的KTB科学钻探项目,终孔孔深约为9101 m。1996年2月26日ICDP宣告成立,中国、美国和德国亦成为ICDP的3个发起国。1999年,国家计委批准了“中国大陆科学钻探工程”项目建议书。2005年,中国完成了第一口超过5000 m的科学深井,在具有全球地学意义的大别-苏鲁超高压变质带东部(江苏省东海县),完钻井深约为5158 m。中国白垩纪大陆科学钻探工程——松辽盆地国际大陆科学钻探工程是由SK-1、SK-2和SK-3井组成的系统工程,通过获取的岩心实物资料,用于古环境、古气候变化和大规模烃源岩成因机制研究、建立白垩系陆相地层标准,以及通过深孔科学钻探工程推动行业技术进步。SK-1井自2006年8月19日—2007年10月29日,完钻井深1811.18 m;SK-2井自2014年4月13日—2018年5月16日,完钻井深7018 m;SK-3井自2020年9月24日开钻,设计井深为3600 m。SK-1井和SK-2井相继成为我国地质钻探史上具有里程碑意义的标志性工程。SK-3井的开工,也预示着在全球将首次获得整个白垩纪连续完整的陆相地质记录^[11-14]。

2 科学钻探工程关键技术难题

科学钻探在技术上必须克服的关键技术问题包括:地质条件复杂(高温、高压、高地应力)、井斜、取心、钻井器材对超长井深的适应性、装备等难题^[15-23]。

(1)高温:地壳的平均地温梯度为3℃/100 m,千米以深的科学超深井的预计井底温度为300℃以

上,这种温度条件下将使孔底马达、震击器、减震器、测井仪器等的绝缘材料、电子元器件、橡胶密封等失效。同时,高温对钻井液及固井水泥带来影响,当温度达到一定极限后携带岩屑能力降低、失效从而对井壁的稳定产生重大影响。

(2)高压:往往在地质条件越复杂的地区存在越复杂的压力系统,地层压力系数高,更易造成深井或超深井井下测量工具的失效。

(3)高地应力:高地应力会诱发井壁失稳导致井壁垮塌、缩径、漏失、卡钻等一系列复杂情况,地应力随着井深加大而增高,取心越困难、井壁失稳的可能越大。

(4)井斜问题:井斜是不可避免的,随着钻井深度加大,井斜一般也会加大。井斜加大后,会给钻井施工带来很多困难,诸如:因为摩擦而导致过高的磨阻及扭矩;在下入和提出测量仪器时遇阻;下套管困难;套管及钻具、特别是稳定器及钻头出现严重的磨损;钻进施工中往往采用低钻压来防斜,其结果导致低的施工效率;井斜加大后,实现钻井目标的深度加大,施工难度加大。

(5)取心问题:深井或超深井钻探取心技术难题主要有2个方面:一是随着井深加大,地应力相应加大,井壁岩石失稳风险加大,同时岩心采取率显著降低且易发生岩心堵塞,使回次进尺及施工效率受到影响;二是由井深不断加大及频繁取心带来的井壁稳定风险和经济管理风险。

(6)超长钻杆柱:超长钻杆柱是深井或超深井钻探技术的核心与关键,钻杆柱将在钻进中承受拉伸、弯曲、扭转、振动等各项载荷和温度载荷的复合作用,复杂工况致使其失效是施工过程中最为常见且代价昂贵的孔内事故,当钻井超过特定深度后,即使采用目前强度最高的钢级,钢钻杆的自重仍然能将自身拉断,现有的铝合金钻杆存在耐温、抗腐蚀能力不足等问题。

3 科学钻探工程关键技术对策

自20世纪70年代以苏联SG-3井为代表的国际大陆科学钻探实施以来,国内外大陆科学钻探工程技术专家在解决科学钻探关键工程问题上积累了丰富的经验,形成了大量的研究成果,在应对以上工程关键技术难题上也提出了新的认识。

3.1 高温对策

(1)研制耐高温有机材料如螺杆马达定子、各类井下钻具密封件、抗高温聚合物泥浆材料及高温稳定剂等,研制金属密封件、螺杆马达金属定子或者全金属低速大扭矩涡轮钻具等高温硬岩降本增效器具;

(2)研制耐高温电子器件,当前晶体管、电阻、电容等原件的最高使用温度约为225℃,普通绝缘层失效温度约为200℃,因此需要研制出耐300℃以上的电子器件,以满足万米科学钻探的需求;

(3)降温,采用低温泥浆循环钻井系统降低井底温度,提高井底动力钻具的使用寿命。KTB主孔的施工经验表明,在8000 m井深条件下,低温泥浆循环可使井底钻具内的温度降低80~100℃^[24];低温泥浆循环钻井系统由中国地质科学院勘探技术研究所共和盆地干热岩钻探工程示范团队研制成功,并在共和盆地干热岩钻探中取得了很好的应用效果,井底循环温度远低于常规电子元器件、聚合物材料的耐温极限。

3.2 高压对策

需要着重解决钻具、仪器的密封及外壳的承压能力,解决钻井液体系在高压下的流变性^[16]。

3.3 高地应力对策

需要着重解决井身结构问题,超深井地质构造、地层压力体系复杂,地层层序和压力预测精度差,同时随着井深的增加,井下复杂情况多,不可预见因素多,给井身结构设计带来极大的难度。尤其是山前高陡构造带超深井钻井,几乎集中了所有的超深井钻井技术难点,地层层序预测误差大,复杂地层井段难于确定,因此需要采用大直径的井身结构,逐级进行套管隔离,减少裸眼井段,避免因处理井内事故或者侧钻增加的井内安全隐患和钻井成本的风险。此外,应采用封堵效果好的钻井液或者采用膨胀套管技术,但目前国内膨胀套管技术在深井超深井应用方面还不成熟。

3.4 井斜对策

一是采用自动垂钻系统进行主动式防斜,但是由于井比较深,垂直钻井系统参数的要求与地面设备的能力及打捞工具不完全匹配,因此,垂直钻井系统对深部大倾角地层的适应性还有待于提高。二是采用被动防斜技术即井底动力马达+液动锤,研制抗高温井底马达及高压高能射流液动潜孔锤。

3.5 取心对策

为解决极破碎地层岩心采取率低的问题,应改进取心钻具,采用井底局部反循环的取心方法。科拉超深井的实践证明了该措施的有效性^[25]。此外,由中国大陆科学钻探工程SK-2井形成的大口径同径取心与长钻程钻进系统也取得了显著的成果。

3.6 超长钻杆柱对策

由于目前钢钻杆强度及自重问题以及铝合金钻杆耐温能力不够等,还不能满足万米超万米特深科学钻井施工的要求,因此可开发应用具有耐腐蚀、耐高温、抗疲劳、质量轻、弹性好、强度高的钛合金钻杆。

4 前沿发展趋势

科学钻探工程技术的发展在未来将以高度集成化、智能化的绿色钻探技术为方向。

需要创新特深科学钻探工程技术及管理顶层设计,研发智能化特深科学钻探装备及配套的高效环保钻探工艺技术,构建15000 m特深科学钻探技术与装备。

4.1 特深科学钻探顶层设计

针对15000 m特深科学钻井基础准则与依据缺失,油气钻井与地质岩心钻探技术均无法直接应用,需将2项技术紧密结合,制定钻进工艺、井身结构、钻具级配、装备配置等技术规范,补充完善特深科学钻探顶层设计。

4.2 特深科学钻探地面装备

针对特深科学钻井连续取心、频繁起下钻、钻井周期长等特点,开展快速起下钻系统、连续循环钻进系统等装备关键技术研发,创新研制特深井智能钻机(具有15000 m钻深能力)、井口作业自动化设备、钻场全流程一体化控制系统、智能钻进控制系统等关键装备,构建特深科学钻井装备体系。地面装备总体机构如图1所示。

4.3 智能钻探技术及仪器

研制智能钻探设备主要包括:基于多元信息融合的信息采集系统、井下信息(实时在线与岩心快速测试信息)数据接收系统、钻场智能监测控制系统等;研制井下智能钻探钻具,主要包括:超高温参数测量存储系统(顶角、振动、角速度、温度、压降、岩心堵塞等)、耐高温数据信息传输系统,基于智能钻杆、泥浆脉冲和岩心信息的数据传输技术;超高温垂直

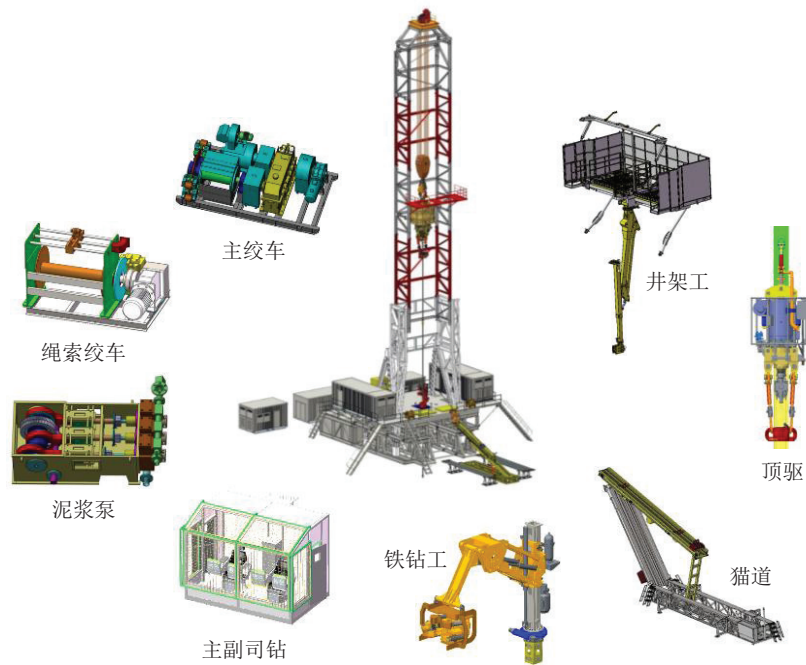


图1 地面装备总体结构

Fig.1 Overall layout of the surface equipment

钻进系统及高精度井斜控制工艺技术,包括:基于光纤陀螺随钻测斜技术、纠偏执行机构、闭环控制驱动系统等。

4.4 特深科学钻探井下机具

研制多工艺高效系列钻具解决特深科学钻探井超长钻杆柱、井斜、复杂地层岩心易卡堵脱落、钻进效率低、井壁摩阻大、地表动力传递衰减大等问题,开展大深度绳索取心钻具、高效井底动力钻具和钻头、高精度垂钻系统研究,解决取心钻具卡堵脱落、组合钻具参数匹配,协调优化动力钻具容积效率与机械效率,降低取心成本、提高取心质量与作业效率。高效孔底动力取心钻具方面包括:超高温螺杆和全金属动力钻具设计理论研究及新型减震稳扭/旋冲/扭冲工具等提速工具开发,超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,减速器、支承系统等关键部件研制,配套单动双管取心、强制取心系统等研制。

4.5 绿色环保钻井液体系与废浆处理技术

针对特深科学钻探井超高温高压等苛刻工况条件下,面临的复杂地层井壁失稳、压力平衡、护心困难等问题,开展环保钻井液体系与井壁安全研究,实现循环泥浆过程的绿色环保和无害化处理、保障孔壁稳定与安全。

5 发展路线图

未来,大陆科学钻探工程技术与装备发展应以高度集成化、智能化的绿色钻探技术研发为主要方向,重点是根据国家需求形成万米以深科学钻探技术与装备体系,主要应包括特深科学钻井顶层技术设计、地面钻探装备、井内机具、取心工艺等部分,具体研究内容则是瞄准关键装备、关键技术进行攻关,既考虑到技术的创新性,又考虑到可行性、实效性^[25-27]。特深科学钻井技术与装备发展路线图如图2所示。

6 结语

(1)科学钻探工程是带动当今地球系统科学发展的大科学工程,虽然目前国内取得了显著的成果,但受当前材料工艺、加工制造工艺、设计理念的限制,还没有形成满足超万米级特深科学钻探工程的理论、装备、技术的储备。

(2)未来,大陆科学钻探工程技术与装备发展应以高度集成化、智能化的绿色钻探技术研发为主要方向。重点是根据国家需求形成万米以深科学钻探技术与装备体系。同时,培养具有全球视野的顶级科学团队及学科带头人。

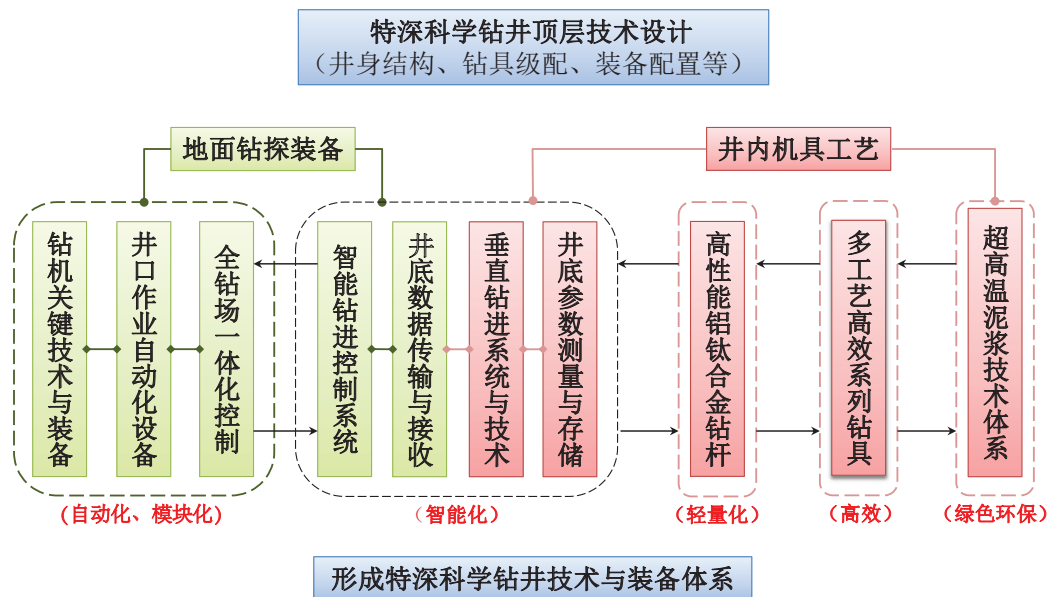


图2 特深科学钻井技术与装备发展路线图

Fig.2 Development roadmap of extra-deep scientific drilling technology and equipment

参考文献 (References):

- [1] 贾凌霄,马冰,田黔宁,等.中美地球深部探测工作进展与对比[J].地质通报,2020,39(4):582-597.
JIA Lingxiao, MA Bing, TIAN Qianing, et al. Progress and comparative study of deep earth exploration in China and the United States[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(4): 582-597.
- [2] 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,2004,20(1):1-8.
XU Zhiqin. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1):1-8.
- [3] 张晓西,杨经绥,张惠,等.科学钻探——深化岩石学研究的金钥匙[J].中国地质,2013,40(3):681-693.
ZHANG Xiaoxi, YANG Jingsui, ZHANG Hui, et al. Scientific drilling—The golden key to in-depth petrologic study[J]. Geology in China, 2013, 40(3):681-693.
- [4] 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.
- [5] 曹双兰,林君,杨泓渊,等.用于深部探测的地震检波器低频拓展技术[J].地球物理学进展,2012,27(5):1904-1911.
CAO Shuanglan, LIN Jun, YANG Hongyuan, et al. Low frequency expansion technologies applied in deep seismic exploration geophones[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 1904-1911.
- [6] 谢和平,张茹,邓建辉,等.基于“深地—地表”联动的深地科学与地灾防控技术体系初探[J].工程科学与技术,2021,53(4):1-12.
XIE Heping, ZHANG Ru, DENG Jianhui, et al. A preliminary study on the technical system of deep earth science and geo disaster prevention-control based on the “Deep Earth-Surface” Linkage Strategy[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 1-12.
- [7] 罗飞,王大洲.中国大陆科学钻探工程的历史考察[J].自然辩证法通讯,2019,41(8):71-80.
LUO Fei, WANG Dazhou. A survey of the history of the China Continental Scientific Drilling Project[J]. Journal of Dialectics of Nature, 2019, 41(8):71-80.
- [8] 郭慧,李亚萍,王学明,等.国际大洋科学钻探计划简介[J].中国地质,2018,45(3):638-639.
GUO Hui, LI Yaping, WANG Xueming, et al. A brief introduction to the International Ocean Drilling Program[J]. Geology in China, 2018, 45(3):638-639.
- [9] 张伟.国际大陆科学钻探计划(ICDP)实施十年的进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1):26-29.
ZHANG Wei. The progress of the ten years of International Continental Scientific Drilling Program[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(S1):26-29.
- [10] 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.

- [11] 王成善,冯志强,吴河勇,等.中国白垩纪大陆科学钻探工程:松科一井科学钻探工程的实施与初步进展[J].地质学报,2008,82(1):9-20.
WANG Chengshan, FENG Zhiqiang, WU Heyong, et al. Preliminary achievement of the Chinese Cretaceous Continental Scientific Drilling Project-SK-I [J]. Acta Geologica Sinica, 2008,82(1):9-20.
- [12] 侯贺晟,王成善,张交东,等.松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J].中国地质,2018,45(4):641-657.
HOU Hesheng, WANG Chengshan, ZHANG Jiaodong, et al. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Resource discovery and progress in earth science research [J]. Geology in China, 2018,45(4):641-657.
- [13] 许志琴,杨经绥,张泽明,等.中国大陆科学钻探终孔及研究进展[J].中国地质,2005,32(2):177-183.
XU Zhiqin, YANG Jingsui, ZHANG Zeming, et al. Completion and achievement of the Chinese Continental Scientific Drilling [J]. Geology in China, 2005,32(2):177-183.
- [14] Youhong Sun, Feiyu Zhang, Qingyan Wang, 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 尹国庆,梁艺苇,琚岩,等.石油钻井中影响井壁稳定性因素分析[J].长春工程学院学报(自然科学版),2016,17(3):89-93.
YIN Guoqing, LIANG Yiwei, JU Yan, et al. The affecting factors analysis of borehole wall stability in petroleum drilling [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2016,17(3):89-93.
- [18] 张伟.我国“十二五”期间的科学钻探活动[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):18-23.
ZHANG Wei. Scientific drilling activities of China during the "12th Five-year Plan" period [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(4):18-23.
- [19] 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.
- [20] 李玮,李梅,白云龙,等.高温高压下钻头破岩及磨损规律研究[J].中国煤炭地质,2020,32(11):73-78.
LI Wei, LI Mei, BAI Yunlong, et al. Study on drill bit rock cutting and wearing pattern under high temperature and pressure [J]. Coal Geology of China, 2020,32(11):73-78.
- [21] 李韶利,宋韶光.松科2井超高温水泥浆固井技术[J].钻井液与完井液,2018,35(2):92-97.
LI Shaoli, SONG Shaoguang. Cementing technology for ultra-high temperature Well Songke-2 [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018,35(2):92-97.
- [22] 瞿雪姣,杨立伟,薛璇,等.松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科2井:井段温度、地层压力预测[J].地学前缘,2017,24(1):257-264.
QU Xuejiao, YANG Liwei, XUE Xuan, et al. Prediction of the bottom hole geotemperature, formation pressure and formation fracture pressure of the Continental Scientific Drilling of Cretaceous Songliao Basin (SK2) [J]. Earth Science Frontiers, 2017,24(1):257-264.
- [23] 梁健,李鑫森,王汉宝,等.连续循环系统在科学超深井中的需求分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):1-5.
LIANG Jian, LI Xinmao, WANG Hanbao, et al. Requirement analysis on continuous circulation system for scientific ultra-deep drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(4):1-5.
- [24] Engeser B, Wohlgemuth L. Das kontinentale Tiefbohr Programm der Bundesrepublik Deutschland: KTB-Bohrtechnische Dokumentation [R]. Stuttgart, Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 1996:4-95.
- [25] 王达,张伟,汤松然.俄罗斯科学深钻技术概况和特点——技术考察系列报道之一[J].探矿工程,1995(1):53-55,57.
WANG Da, ZHANG Wei, TANG Songran. Russian scientific deep drilling technology overview and features: Technical investigation of a series of reports [J]. Exploration Engineering, 1995(1):53-55,57.
- [26] 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.
- [27] 冉恒谦,梁健,梁楠,等.定向钻井技术引领,聚焦深地深海探测——勘探技术所“十三五”科技创新回顾及“十四五”业务展望[J].钻探工程,2021,48(1):7-14.
RAN Hengqian, LIANG Jian, LIANG Nan, et al. Directional drilling technology takes lead with focus on deep earth and deep sea exploration—Review of science and technology innovation by Institute of Exploration Techniques, CAGS during the 13th FiveYear Plan and an outlook to the 14th FiveYear Plan [J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):7-14.

(编辑 李艺)