

地应力监测孔钻进效率统计与分析研究

张建杰, 李海明, 刘春生, 段石敦

(北京市矿产地质研究所, 北京 101500)

摘要: 随着地应力监测台站的不断建设, 地应力监测孔钻探施工技术在实践中不断得到改进。本文简要介绍了地应力监测孔的钻探技术要求、钻探设备选型及钻进工艺, 对施工完成的地应力监测孔的钻进时间和钻进效率进行了系统的统计和分析。通过分析研究, 总结了影响地应力监测孔钻进效率的几个因素, 包括监测孔选址、钻进过程管理、钻进工艺和试验配合等。并针对这些影响因素, 提出了通过强化钻进过程管理、利用技术套管和分级扩孔等关键技术、加强开孔和测斜等重要环节的技术管理、做好试验配合等措施提高钻进效率的建议, 为今后实施类似钻探工程项目提高钻进效率提供了参考依据。

关键词: 地应力监测孔; 钻进效率; 钻进时间; 统计分析

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)01-0120-06

Statistics and analysis of drilling efficiency of geostress monitoring holes

ZHANG Jianjie, LI Haiming, LIU Chunsheng, DUAN Shidun

(Beijing Institute of Mineral Geology, Beijing 101500, China)

Abstract: With the continuous construction of geostress monitoring stations, the drilling technology of geostress monitoring holes has been continuously improved in practice. This paper briefly introduces the drilling technical requirements, selection of drilling equipment and drilling technology of geostress monitoring holes, systematic statistics and analysis were conducted on the drilling time and drilling efficiency of the completed geostress monitoring holes. Through analysis and research, several factors affecting the drilling efficiency of geostress monitoring holes are summarized, including location selection for monitoring holes, management of drilling process, drilling technology, and test cooperation, etc. According to these influencing factors, suggestions were put forward to improve drilling efficiency by strengthening management of drilling process, utilizing key technologies such as technical casing and graded reaming technology, strengthening technical management of important links such as drilling and inclination measurement, and doing well in test cooperation, it provides reference bases for the implementation of similar drilling projects in the future to improve drilling efficiency.

Key words: geostress monitoring holes; drilling efficiency; drilling time; statistic analysis

0 引言

20世纪30年代, 美国垦务局在哈佛大坝泄水隧道采用表面应力解除法进行了世界首次地应力测量。20世纪50年代, 瑞典人Hast在斯堪的纳维亚

半岛进行了大规模的地应力测量试验, 首次测得浅部地层水平应力高于垂直应力^[1-2]。20世纪60年代以后, 地应力测量得到了迅速的发展, 受到了世界各国的广泛关注, 地应力测量理论和方法呈现多样

收稿日期: 2023-05-23; 修回日期: 2023-11-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.01.016

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“北黄海及东南沿海海岸带地应力测量与监测钻探工程及试验配合服务”(编号: 1212011220122); “京津冀协同发展区活动断裂地应力测量与实时监测钻探工程及试验配合服务”(编号: 0716-1641DK900365/01)

第一作者: 张建杰, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业, 硕士, 主要从事地质勘探、钻探工程技术研究工作, 北京市密云区园林东路6号, zhangjianjiefeng@163.com。

引用格式: 张建杰, 李海明, 刘春生, 等. 地应力监测孔钻进效率统计与分析研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 120-125.

ZHANG Jianjie, LI Haiming, LIU Chunsheng, et al. Statistics and analysis of drilling efficiency of geostress monitoring holes[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 120-125.

化发展趋势。

我国地应力测量试验和研究开始于20世纪50年代后期,李四光和陈宗基为主创始人^[1-2]。20世纪60年代,李四光教授开始引进压磁电感法地应力测量监测方法,在河北省隆尧县尧山建立了第一个地应力监测台站,开始连续监测地应力相对变化和地震的关系,并在理论上取得了重大进展^[3-4]。在其后的几十年间,我国的地应力测量技术及应用研究得到了迅速的发展,并将地应力测量技术和方法应用于地震预测预报和国家重大工程建设等领域,取得了大量研究成果^[5-7]。

但与世界发达国家相比,我国在地应力测量与监测技术领域还存在一定的差距,主要表现在缺乏统一的标准和规范、测量与监测的深度还不够等^[5]。近十余年来,我所实施了大量地应力测量与监测钻探工程项目,施工地点分布在全国多个省份,为构建和完善地应力测量与实时监测台网,揭示关键构造部位现今地应力状态随深度变化规律,不断提高地应力测量与监测技术水平提供了有力的技术支撑。

1 地应力监测孔简介

地应力测量方法包括压磁应力解除法、空芯包体应力解除法、水压致裂法、钻孔崩落法、岩石声发射法等。其中,水压致裂法是在岩体中钻一个垂直的孔,将其封住后向孔中注入高压液体,直至这个孔产生裂缝。岩体中主应力大小和方向可以根据岩石的力学性质、裂缝方位及出现裂缝的压力来确定^[8-9]。可见,要完成地应力测量与监测工作,最为基础又很重要的一个工作就是施工地应力监测孔,以提供地应力测量与监测的基础场所。

地应力监测孔一般布置在以完整花岗岩为主的地层,岩石可钻性级别为8~10级。首先要按地应力测量和实时监测要求完成一定深度的钻探工程,然后开展地应力实时监测适宜深度的扩孔工作,以及随深度系统的地应力测量和实时监测工作。地应力监测孔对钻孔垂直度、基岩地层综合取心率、钻孔同心度、钻孔孔径误差、扩孔尺寸误差等技术质量指标要求较高,以保证地应力测量及仪器安装的效果,还需按相关技术标准存放岩心并做详细编录。

地应力监测孔一般采用三开结构,开孔段用 $\varnothing 150$ mm钻头开孔,随后用 $\varnothing 130$ mm钻头钻进至一定深度,最终运用 $\varnothing 76$ mm钻头钻至设计深度。钻

进至设计孔深后,开展水压致裂地应力测量试验,根据试验结果确定监测仪器安装深度,然后完成地应力监测仪器的安装工作。最后,在监测孔所在位置建设监测站,监测屋的尺寸要满足一定要求,监测站周围安装好防护设施,后期有专人对监测站进行维护,以保证监测站的正常运行。地应力监测孔结构及监测站示意图1。

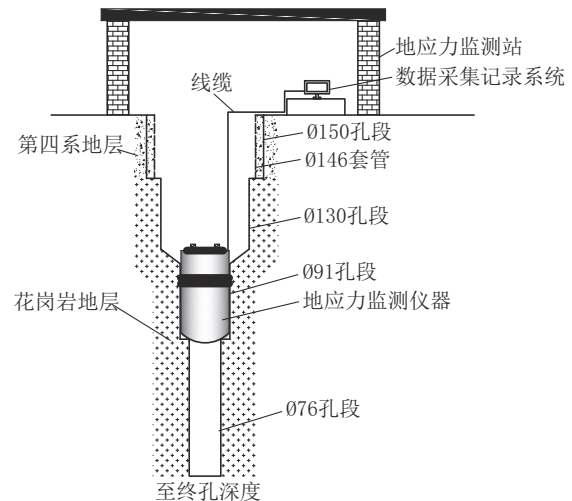


图1 地应力监测孔结构及监测站示意

Fig.1 Structure of geostress monitoring hole and monitoring station

2 地应力监测孔施工钻探设备及工艺

2.1 钻探设备

地应力监测孔一般孔深都在1000 m以浅,根据监测孔深度和口径及施工条件,地应力监测孔钻探施工一般选用设备见表1,具体选用的设备根据孔深适当做出调整。

2.2 钻进工艺

2.2.1 取心方法

为保证监测孔的岩心采取率、钻孔垂直度、同心

表1 主要钻探设备

Table 1 Main drilling equipment

序号	设备名称	型号	数量
1	钻机	XY-4型	1台
2	钻塔	SG-18型	1付
3	泥浆泵	BW250型	1台
4	搅拌机	NJ600型	1台
5	绳索绞车	SJ1000型	1台
6	测斜仪	XJL-42型	1套

度和孔径等技术参数,满足地应力测量与监测要求,采用上部提钻取心,下部绳索取心钻进形式^[10]。在钻进施工过程中,开孔采用 $\varnothing 150$ mm金刚石普通单管钻具钻进至完整基岩,下入 $\varnothing 146$ mm套管后,采用 $\varnothing 130$ mm单动双管钻具钻进至一定深度,换 $\varnothing 130/95$ mm金刚石外导向钻具钻进至适当深度后下入 $\varnothing 89$ mm技术套管,再采用 $\varnothing 76$ mm金刚石绳索取心钻具钻进至设计深度。完成钻进取心任务后,再进行试验配合、扩孔和监测仪器安装等工作。

2.2.2 钻进技术参数

钻进过程中,不同区域钻遇地层情况会有所差别,具体的钻进参数可参照《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227—2010)及相关区域经验参数,根据实际的地层情况和钻进方法、监测孔口径选择合理的

钻进参数。

2.2.3 冲洗液

开孔用 $\varnothing 150$ mm金刚石普通单管钻具钻进至较完整地层之前,为保证钻孔稳定,防止孔壁坍塌,使用优质粘土泥浆。见基岩后 $\varnothing 130$ mm和 $\varnothing 76$ mm孔段钻进中,由于地层较为完整,故使用清水钻进,在微漏地层使用PHP无固相冲洗液。

3 钻进效率统计分析

3.1 钻进时间及效率统计

近十余年来,我单位在国内多个省份施工地应力监测孔累计数十眼,取得了丰富的生产数据资料,部分具有代表性的孔深为600 m的地应力监测孔钻进孔深及钻进时间和效率见表2^[11-14]。

表2 600 m深地应力监测孔钻进时间及效率统计

Table 2 Statistics of drilling time and efficiency of 600m deep geostress monitoring hole

监测孔位置	终孔深度/ m	总台时/ h	台月时间/h			其他工作 时间/h	机械钻速/ (m·h ⁻¹)	台月效率/ m	钻月效率/ m
			纯钻	辅助	停待及事故				
河北石家庄	600.33	1461	290	181	118	872	2.07	732.11	295.73
河北邢台	600.20	1622	288	211	195	928	2.08	625.21	266.76
河北张家口	600.15	1080	247	249	0	584	2.43	869.78	400.10
河北迁安	602.05	1681	265	262	90	1064	2.27	702.55	258.39
山东临沂	600.60	2808	261	340	853	1354	2.30	297.33	154.00
辽宁盖州	600.10	1512	375	354	166	617	1.60	483.95	285.76
福建泉州	600.14	1776	302	237	165	1072	1.99	612.39	242.97
福建莆田	600.46	1392	255	176	18	943	2.35	968.48	311.12
平均	600.50	1666	285	251	201	929	2.11	588.73	259.96

经统计,600 m深地应力监测孔全部钻探工作完成平均总台时1666 h,其中平均纯钻时间285 h,占总时间的17.11%;平均辅助时间251 h,占总时间的15.07%;平均停待及事故时间201 h,占总时间的12.06%;平均其他工作时间929 h,占总时间的55.76%(图2)。钻进过程中,平均机械钻速为2.11 m/h,平均台月效率为588.73 m,平均钻月效率为259.96 m。

3.2 钻进效率分析

通过对不同地区地应力监测孔钻探数据的统计分析,可以看出其他工作时间和停待及事故时间波动较大,而纯钻和辅助时间变化较为平稳(图3)。

(1)其他工作时间占比较大,平均达到了55.76%,且在不同地区波动较大。原因是由于配合

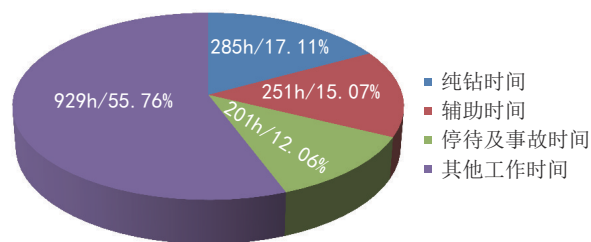


图2 600 m深地应力监测孔不同钻探时间占比

Fig.2 The proportion of different drilling time of 600m deep geostress monitoring hole

孔内水压致裂地应力测量试验时间较长,该项工作进度主要受地应力测量进度的影响,地应力测量试验时间延长会导致完工时间推迟。另外,与地应力测量工作完成后扩孔及仪器安装是否顺利也有

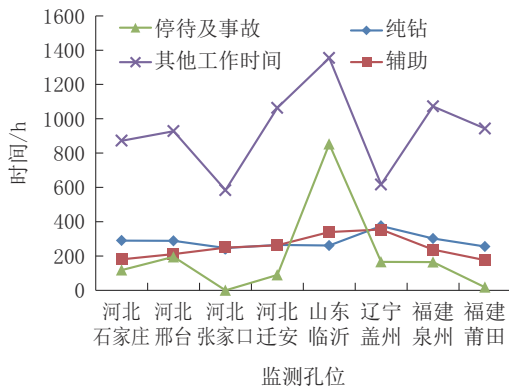


图3 不同地区地应力监测孔钻探时间变化

Fig.3 Change of drilling time of geostress monitoring holes in different regions

关系。

(2)平均停待及事故时间占比为12.06%,在不同地区差异较大。主要原因是不同地区地层条件有所不同,如钻遇岩心较为破碎,钻进过程中发生和处理孔内事故几率增加,会相对增加钻进时间,从而使台月效率和钻月效率也相应降低。

(3)平均辅助时间占比为15.07%。地应力监测孔对钻孔孔径、孔深测量和钻孔垂直度要求高,钻进过程中检查更换钻头、孔深校正和钻孔测斜次数增多使得辅助时间相应增加。

(4)平均机械钻速、台月效率都比较高,分别为2.11 m/h、588.73 m。原因是钻进地层整体相对比较完整,选用钻头与地层硬度比较匹配,钻进技术参数比较合理。但是,平均钻月效率比较低,只有259.96 m,主要是因为配合试验、扩孔和安装仪器等其他工作时间较长,占用了整个工程时间的50%以上,降低了钻月效率。

3.3 提高钻进效率的建议

根据以上分析及我所多年的施工经验,要进一步提高地应力监测孔钻进效率,建议做好以下几方面的工作。

(1)做好监测孔选址工作。为了更好地满足地应力测量的需求,便于后期地应力长期监测,地应力监测孔位置一般应选在地层较为完整的花岗岩地区。在监测孔选址前,要充分收集监测区域的基础地质资料,并进行对比分析和研究,在此基础上做好场地实地踏勘工作,尽量选择利于监测孔施工的位置。适合的位置既便于后期钻探施工,也便于后期监测站的建设与维护,随之也提高了钻进效率。

(2)规范钻进操作过程。明确机台各岗位的职责,机长为现场施工负责人,直接负责现场的施工组织,班长、钻工、炊事员等人员要听从机长的指挥。开工前认真做好安全和技术方面交底,交底内容应包括钻探工艺和安全规程,尤其生产人员要熟悉钻进过程中采用的钻进方法及参数,操作设备时要严格遵守操作规程^[15-17]。做好交接班工作,设备运转情况,钻具、钻杆、孔深、孔内情况及原始记录等要交接清楚,避免因交接不清造成孔内事故的发生。加强各班组及组内成员之间的协调配合,以提高时间利用率。

(3)强化安全管理工作。生产安全事故对监测孔钻进效率的影响无疑将是无法预期和估量的,安全工作应作为地应力监测孔施工的重中之重。施工过程中进行岗前安全专门培训,新工人必须在班长或熟练工人指导下进行操作,每天及时检查并解决存在的问题。机台人员工作时必须穿戴工作服和安全帽,在塔上工作时必须系安全带。钻探操作严格执行钻探操作规程及有关安全管理制度,防止人身、机械、孔内、钻探质量等方面的事故发生。另外,地应力监测孔位于沿海地区的,要做好大风及台风防范措施,时刻关注天气变化和预报。

(4)加强钻探技术管理。地应力监测孔对钻孔垂直度、岩心采取率、钻孔孔径等技术质量要求较高,在钻进过程中要有针对性的技术管理措施。做好开孔前的准备工作,钻机安装要水平、周整,底座固定牢固,开孔要反复校正立轴垂直度,确保立轴顶角误差不得超过 $0^{\circ}20'$ ^[18]。钻进过程中,每50 m测斜一次,特殊情况下及时测斜,发现超斜要及时纠斜。根据监测孔孔径和地层特性选择参数适合的金刚石钻头,每次提钻仔细检查金刚石钻头的磨损情况,钻头和扩孔器磨损要及时更换^[19]。通过加强对以上几个关键步骤的技术管理,能够有效保证监测孔钻进质量,避免因技术管理问题导致钻进效率降低。

(5)优化钻进工艺流程。我所经过多年的地应力监测孔钻进实践,摸索出了一些有效提高地应力监测孔钻进效率和质量的工艺方法。地应力监测孔由 $\varnothing 130$ mm孔径变径为 $\varnothing 76$ mm孔径时,下入 $\varnothing 89$ mm技术套管再进行 $\varnothing 76$ mm金刚石绳索取心钻进,有效地保护了孔壁,提高了钻进效率和质量。扩孔段采用 $\varnothing 76/95$ mm和 $\varnothing 95/130$ mm两级金刚石扩孔钻进技术,扩孔钻进阻力减小,钻探设备负荷降

低,提高了扩孔钻进效率,同时保证了监测孔的同心度和垂直度^[19-20]。

(6)提升试验配合水平。做好地应力测量试验相关技术和设备方面的准备,准备好单根长度大于4 m、能够承受高压且密封性好的 $\varnothing 42$ mm 钻杆,用于水压致裂地应力测量,提供现场试验工作用水和用电。供电要求380 V 动力电,功率不小于30 kW。现场试验配合过程中,每台班不少于5人,主要操作人员必须熟练和平稳地操作钻机,通过钻杆升降井下测量设备,安全、准确地把测量和监测仪器安装到要求的深度(图4、图5)^[11-14]。试验准备工作做的充分,配合试验的操作人员技能熟练,能够保障试验及仪器安装工作的顺利完成,提高试验的效率。



图4 水压致裂印膜试验

Fig.4 Hydraulic fracturing printing film test



图5 地应力监测仪器安装

Fig.5 Installation of geostress monitoring instrument

4 结语

地应力测量与监测技术在地震预报、地壳稳定性研究、工程建设等领域的应用越来越广泛,地应力监测孔钻探工作任务也随之增加,现有的钻探设备和工艺基本能够满足地应力测量与监测的技术需求,钻探技术服务地应力研究取得了一定的成绩。

今后的钻探工作中,应坚持贯彻绿色低碳发展理念,在降低钻探成本,提高钻进效率的同时,研究绿色钻探新工艺和新技术,不断提升地应力监测孔钻探技术水平,更好地支撑地应力测量与监测技术研究。

参考文献(References):

- [1] 景锋,盛谦,张勇慧,等.我国原位地应力测量与地应力场分析研究进展[J].岩土力学,2011,32(S2):51-58.
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Study advance on in-site geostress measurement and analysis of initial geostress field in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (S2):51-58.
- [2] 张重远,吴满路,陈群策,等.地应力测量方法综述[J].河南理工大学学报(自然科学版),2012,31(3):305-309.
ZHANG Chongyuan, WU Manlu, CHEN Qunce, et al. Review of in-situ stress measurement methods[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2012, 31(3):305-309.
- [3] 谭成轩,张鹏,丰成君,等.探索首都圈地区深孔地应力测量与实时监测及其在地震地质研究中应用[J].地质学报,2014,88(8):1436-1452.
TAN Chengxuan, ZHANG Peng, FENG Chengjun, et al. An approach to deep borehole crustal stress measuring and real-time monitoring and its application in seismogeology research in capital Beijing region[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(8):1436-1452.
- [4] 李海亮,李宏.钻孔应变观测现状与展望[J].地质学报,2010,84(6):895-900.
LI Hailiang, LI Hong. Status and developments of borehole strain observations in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84 (6):895-900.
- [5] 陈群策,李宏,廖椿庭,等.地应力测量与监测技术实验研究-SinoProbe-06项目介绍[J].地球学报,2011,32(S1):113-124.
CHEN Qunce, LI Hong, LIAO Chunting, et al. An experimental study of the technique for in-situ stress measurement and monitoring: An introduction to the Project SinoProbe-06 [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(S1):113-124.
- [6] 吴满路,张春山,廖椿庭,等.青藏高原腹地现今地应力测量与应力状态研究[J].地球物理学报,2005,48(2):327-332.
WU Manlu, ZHANG Chunshan, LIAO Chunting, et al. The recent state of stress in the central Qinghai-Tibet Plateau according to in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2):327-332.
- [7] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等.中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J].地球物理学报,2004,47(4):654-662.
XIE Furen, CUI Xiaofeng, ZHAO Jiantao, et al. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4):654-662.

- [8] 纪志久,卢国斌,李岚.地应力测量方法及工程应用研究[J].现代矿业,2009,25(11):67-69.
JI Zhijiu, LU Guobin, LI Lan. Study on in-situ stress measurement method and engineering application [J]. Modern Mining, 2009, 25(11): 67-69.
- [9] 马凤良,何绍勇,尹向阳.水压致裂法测量地应力[J].西部探矿工程,2009,21(1):86-88.
MA Fengliang, HE Shaoyong, YIN Xiangyang. In-situ stress measurement by hydraulic fracturing method [J]. West-China Exploration Engineering, 2009, 21(1): 86-88.
- [10] 陈师逊,宋世杰.中国东部海区科学钻探施工技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):1-5.
CHEN Shixun, SONG Shijie. Discussion of scientific drilling construction technology in eastern sea area of China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(12): 1-5.
- [11] 北京市地质工程设计研究院.我国东部沿海核电站区域地壳稳定性与地质灾害研究地应力测量与监测钻孔钻探工程竣工报告[R].北京:2014.
Beijing Institute of Geological Engineering Design and Research. Completion report of study on crustal stability and geological hazards of nuclear power stations in the east coast of china geostress measurement and monitoring drilling project [R]. Beijing: 2014.
- [12] 北京市地质工程设计研究院.北黄海及东南沿海海岸带地应力测量与监测钻探工程及试验配合服务项目竣工报告[R].北京:2016.
Beijing Institute of Geological Engineering Design and Research. Completion Report of geostress measurement and monitoring drilling project and test coordination service project in the North Yellow Sea and Southeast Coastal Zone [R]. Beijing: 2016.
- [13] 北京市地质工程设计研究院.京津冀协同发展区活动断裂地应力测量与实时监测钻探工程及试验配合服务项目竣工报告[R].北京:2016.
Beijing Institute of Geological Engineering Design and Research. Completion report of active faults geostress measurement and real-time monitoring drilling project and test coordination service project in Beijing-Tianjin-Hebei Coordinated Development Region [R]. Beijing: 2016.
- [14] 北京市地质工程设计研究院.京津冀协同发展区活动断裂地应力测量与实时监测钻探工程及试验配合服务竣工报告[R].北京:2017.
Beijing Institute of Geological Engineering Design and Research. Completion report of active faults geostress measurement and real-time monitoring drilling project and test coordination service project in Beijing-Tianjin-Hebei Coordinated Development Region [R]. Beijing: 2017.
- [15] 翟育峰,张英传,田志超.中国东部海区科学钻探工程CSDP-02井钻探效率统计分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):13-17.
ZHAI Yufeng, ZHANG Yingchuan, TIAN Zhichao. Statistical analysis of drilling efficiency for Well CSDP-02 of the eastern sea scientific drilling project of China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12): 13-17.
- [16] 刘晓阳,李博.地浸砂岩型铀矿钻探现状及提高钻探效率的技术措施[J].钻探工程,2021,48(1):35-41.
LIU Xiaoyang, LI Bo. Current status of in-situ leachable sandstone-type uranium drilling and technical measures of improving drilling efficiency [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 35-41.
- [17] 刘治,孙宏晶.三山岛北部海域金矿海上钻探施工管理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):85-92.
LIU Zhi, SUN Hongjing. Offshore drilling construction management of gold deposit in the northern sea area of Sanshan Islands [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 85-92.
- [18] DZ/T 0227—2010,地质岩心钻探规程[S].
DZ/T 0227—2010, Geological core drilling regulations [S].
- [19] 张建杰,李海明.京津冀协同发展区地应力监测孔钻探施工技术[J].钻探工程,2022,49(6):48-53.
ZHANG Jianjie, LI Haiming. Drilling technology for geostress monitoring holes in Beijing-Tianjin-Hebei Collaborative Development Region [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 48-53.
- [20] 张建杰,刘春生.分级扩孔技术在地应力钻孔施工中的应用[J].西部探矿工程,2017,29(10):19-22.
ZHANG Jianjie, LIU Chunsheng. The application of graded reaming technology in geostress drill hole construction [J]. West-China Exploration Engineering, 2017, 29(10): 19-22.

(编辑 荐华)