

海域地质岩心钻探关键技术分析与应用

杨 芳^{1,2}

(1.山东省第三地质矿产勘查院,山东烟台 264004; 2.山东省地矿局钻探工程技术研究中心,山东烟台 264004)

摘要:海域固体矿产资源勘探、开发是海洋开发和利用的重要组成部分。本文主要从钻探设备、工艺、安全等方面对海域地质岩心钻探工程技术进行分析,总结了相关技术措施:一是除依据地质要求选择常规钻探设备外,要依据海域环境特点,选择安全可靠的钻探平台;二是钻孔结构设计、钻进方法、冲洗液等均应符合海域特点和要求;三是必须坚持安全第一原则,编制安全应急预案等。通过山东莱州三山岛北部海域金矿勘探项目应用实例,证实了海域地质钻探工程技术的适应性。

关键词:海域地质岩心钻探;钻进工艺;钻孔结构;钻探平台;海水冲洗液

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)07-0023-07

Analysis and application of the key technology in geologic drilling in shallow sea

YANG Fang

(1.*The Third Geological Team of Shandong Bureau of Geology and Mineral, Yantai Shandong 264004, China;*
2.*Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China*)

Abstract: Exploration and development of marine solid mineral resources is an important part of marine development and utilization. Some technical measures are summarized and discussed on drilling projects in shallow waters in terms of drilling equipment, technology, safety, etc. First, apart from selection of the conventional drilling equipment based on geological requirements, it is necessary to choose a safe and reliable drilling platform based on the characteristics of the marine environment. Second, the drilling structure design, drilling method and drilling fluid should copy with the characteristics and requirements of the sea area. Third, the safety first principle should be observed with the safety emergency plans put in place. The gold exploration project in the northern sea area of Sanshandao has proven the adaptability of marine geological drilling technology, providing experience and references for related shallow sea geological drilling projects.

Key words: geological core drilling in shallow sea; drilling technology; hole structure; drilling platform; seawater-drilling fluid

0 引言

海域地质勘探是海洋开发和利用的重要组成部分,地质岩心钻探是主要手段之一,广泛应用于海域的地质调查、资源勘探、大陆架科学研究、工程地质勘察等多个领域。海域地质钻探工程有其自身的特点,与陆地钻探相比,环境差别较大,需要有施工平台;而与海洋油气钻探相比,由于其勘探方式不同,地质勘探钻孔的密度大、口径小,海洋油气钻井用设

备庞大、移动不方便、成本高昂等,与地质钻探不相适应,利用油气钻井设备与技术施工地质勘探钻孔显然是不合理的。我院自 2006 年开始,先后完成了多个浅海地质钻探项目,涵盖固体矿产勘探、科学钻探、工程勘察等^[1-3],进行了较广泛的技术研究和创新,积累了一定的经验。为此,本文从技术、装备、安全等方面出发,分析总结浅海地质钻探工程技术,以期给相应海域地质钻探工程提供一些技术参考。

收稿日期:2020-03-04; **修回日期:**2020-04-22 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.07.004

基金项目:2019 年度山东省地质矿产勘查开发局地质勘查和科技创新项目“浅海地质钻探关键技术研究与应用”(编号:KY201906)

作者简介:杨芳,女,汉族,1987 年生,工程师,地质工程专业,硕士,从事深部地质岩心钻探及浅海地质钻探技术、装备研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路 271 号, fangxin0911@126.com。

引用格式:杨芳.海域地质岩心钻探关键技术分析与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):23-29.

YANG Fang. Analysis and application of the key technology in geologic drilling in shallow sea[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7): 23-29.

1 施工设备

1.1 施工平台的选择

海域地质钻探施工需要有钻探平台的支持,这是与陆地地质钻探的一大不同。钻探平台的选择一般根据孔深、施工海域环境条件(水深、风力、海浪、海流、潮汐、海底地层状况、特殊天气状况、距陆地距离等)、施工周期、平台建设的可行性与经济性等因素综合考虑^[2-6]。钻探平台类型及适用范围可参考表1内容。

表1 钻探平台类型及适用范围

Table 1 Types and applicable scope of the drilling platforms

类	型	特	点	适用范围
浮式平台	钻探船	单体式 (含专业 钻探船)	包括专用勘探船和设计改装船。移动方便,作业水深大,具有自航能力和锚泊定位功能	满足船体吃水要求,适用于50 m内的不同水深
		双体式		
	浮筏式		结构简单,造价低,组装移动方便	风平浪静的水深5 m以浅海域
接 地 式 平 台	坐底式		施工时坐落于海底,移位时浮到海面上,稳定性好,但作业水深受限	海床地表承载力低,海底潮流较小的区域
	插桩式		稳定性好,承载能力大,受风、浪、潮、涌等影响小,受海底环境的制约	适用水深30 m内
	桁架式		稳定性较好,作业水深浅,安装方便,结构灵活,造价低	不便于土方作业且水深较浅(<5 m)的近岸区域
	筑岛式		稳定性好,承载能力大,作业水深浅	水深较浅,土方量不大且便于施工的近岸区域

注:表中各类型平台适用范围仅作参考,具体情况应根据现场环境决定。

1.2 钻探设备

浅海海域地质钻探工程设备应根据生产任务、安全要求、自然条件、经济适宜等合理选择,设备类型与陆地地质钻探大致相同,包括钻机、泥浆泵、钻塔、动力设备及其他附属设备等^[7-8]。除参照相关标准选择钻探设备外,主要应注意以下几个问题:

(1)因施工环境影响,钻探设备的性能要求对海水有较好的耐腐蚀性。

(2)为了分散平台荷载,在海域内施工,不选择质量集中的柴油机直联式动力钻机。

(3)钻塔的选择要考虑风力的影响,在风力较大的海域施工应适当降低钻塔高度。海域内施工机台选择A型矮塔或桅杆式钻塔,不使用高塔(大于11 m)和四角塔。

(4)海域内钻孔均采用发电机组供电。

(5)在高温、高压热储和含油气海域钻探施工,应根据高温、高压流体或含油气压力,选择井控装备。

(6)钻探设备需维修方便,易损设备、机具需备份。

2 钻探工艺

2.1 钻孔结构

钻孔结构主要考虑的因素包括:地层条件预测、工程要求(孔深、终孔口径等)、地质设计、现有设备和钻具能力、孔内试验测试设备需求等^[9-10]。具体应注意以下几点:

(1)在保证钻孔安全和提高生产效率,同时满足终孔直径要求前提下,尽量简化钻孔结构。

(2)钻孔直径应按照现有标准钻孔口径系列确定,以便于管材的选择和各级口径间隙的配合。

(3)参考工区以往施工经验。若工区无相关施工经验,深孔施工时,终孔口径施工段宜缩短或终孔孔径加大一级,以利于应对深部复杂情况可能导致的孔内事故。

(4)若钻孔需要安装井控装备,钻孔结构的设计应满足井口装置的口径要求。

(5)套管结构设计除技术套管外,还要考虑上层隔水管,隔水管和技术套管的规格与数量应根据钻孔结构和冲洗液上返流速等确定^[11-12]。

2.2 钻进方法

浅海海域地质钻探钻进工艺可参照《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227-2010)及相关标准,一般浅层地层较软钻进采用硬质合金钻头钻进工艺,深部硬岩钻进时采用金刚石钻头钻进工艺。若开口口径较大,宜采用提钻取心钻进^[13-14]。

2.3 取心(样)技术

取心(样)根据钻探工程类型与任务要求,可按照陆地固体岩心钻探相关标准执行。有特殊取心(样)要求时,根据合同或设计进行。若对取心有特殊要求如不扰动等,常规取心技术不能满足要求,可以采用特种取心工具,如半合管(三层管)钻具、超前钻具、底喷或侧喷钻头、压入或冲击式钻具等^[15-16]。

3 冲洗液

冲洗液的选择可根据现场条件,若淡水供给经济、方便、充足,可采用淡水型冲洗液,冲洗液类型及

注意事项等均可参考《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227-2010)。工区离岸较远等淡水取用不便的环境下,冲洗液宜选择海水冲洗液。海水冲洗液的选择除了要满足常规的维护孔壁、携带岩粉等要求外,最主要是要考虑海水中的电解质与各类冲洗液处理剂的相互影响,尽可能减少海水对处理剂性能的破坏^[17]。冲洗液的配置主要考虑以下几点:

(1)海水冲洗液尽可能采用抗盐土,若需要使用膨润土,则要对其进行预水化,或先利用处理剂处理海水中的钙、镁离子后再配浆。

(2)海域地质钻探施工区上部地层一般为松软、疏松的泥沙质沉积物,应注意保持冲洗液的密度和粘度,以维护孔壁稳定。

(3)易坍塌、掉块地层如碳酸盐岩地层,要注意冲洗液密度,可加强其封堵和胶结性能。造浆地层如泥岩地层,要采用强抑制性冲洗液,保持较低滤失量和较低粘度。

(4)使用绳索取心钻进工艺时,要考虑冲洗液在大口径钻杆内部易因流速低而产生内壁结泥皮现象,尽量使冲洗液保持低固相,并保证其具有良好的流变性能和润滑性能。

(5)因冲洗液主要为现场配置,要考虑现场配置及转换方便,特别是在钻进盐岩地层时,要利于将海水冲洗液转化为饱和盐水冲洗液。

(6)冲洗液循环系统应按平台形式、钻孔深度等合理布设,包括泥浆池、循环槽、沉淀池等。主平台不能满足布设时,应增加辅助平台进行布设。

4 施工安全

4.1 安全管理

海域地质钻探因施工环境特殊,与陆地相比,安全尤为重要。钻探工程要坚持安全第一的原则,制定相应的安全措施和应急处理方案。建立安全应急指挥小组,设立应急值班,保持与现场指挥联络畅通。当接受到大风预警或其他恶劣天气状况或发生其它安全和应急情况时,立即启动相应应急预案。施工作业前,应向所在海区主管安全生产的政府部门报告并备案^[18]。

4.2 安全措施

海域钻探施工安全除执行通用安全用电、用火、各类设施安全防护技术,配备消防器材满足消防安全要求外,依据海域特点,可采取以下措施:

(1)提前对海上作业人员进行安全培训,考试合格后,方可上岗。

(2)钻探平台安装、使用前均应对其进行评估。使用时,应每日对其稳定性、可靠性进行检查。

(3)现场 24 h 配备值班辅助船,以备紧急情况下撤离,陆上备有值班车辆。

(4)在有船舶活动的海域施工时,按照相关海域海事管理规定设置航行交通警示标志。

(5)现场施工区所有临空临海位置均设置防护措施。

(6)配置必要的应急资源,包括应急食物、饮用水、简易医疗箱等,并准备一份应急通讯录,主要针对应急救援服务机构,如专门救援、抢险和医院等机构,政府机构和联系部门,其他相关单位与承包商等。

(7)平台、辅助船均应配备足量的安全救生器材,离岸较远时,还应配备足量的救生食品与饮用水。

(8)安排专门人员,提前了解海事情况,一旦风浪等条件不适合施工,平台停止作业,人员及时撤离,若为钻探船则回港避风^[19-20]。

5 案例分析

山东莱州三山岛北部海域金矿勘探项目为我单位成功实施的一项大型海上固体矿产资源勘探项目。项目位于莱州三山岛北部海域,工区海水深度一般在 5~12 m,海底较为平坦,钻遇地层一般上部为第四系海相沉积岩,下部基岩多为花岗岩、闪长岩等。该项目实施钻孔 130 余个,钻孔深度大部分在 1000~1500 m,终孔直径要求不小于 75 mm,水文勘探孔终孔直径要求不小于 95 mm,其中大部分钻孔为海域钻孔^[21]。

5.1 施工设备

项目钻孔数量大,多数为海域施工,施工根据地质设计及现场情况,钻探主要设备以立轴钻机为主,现场最多同时开动机台数量为 52 台套。根据现场施工设备状况和设计钻孔的深度,单个机台钻探设备配备表如表 2 所示。对海域内施工钻孔,均使用钻探平台,钻探平台采用了筑岛平台及三院自行研制的海上钻探平台(如图 1 所示)两种类型^[21]。其中,对于部分正进行围海造地工程的施工区内钻孔,因其无法进行桩式平台施工,采用了填土筑岛修筑施工平台(如图 2 所示)。

表2 单个机台钻探设备配备表

Table 2 List of drilling equipment and accessories for a drilling unit

序号	名称	型号规格	单位	数量	备注
1	钻机	XY-6、XY-44、XY-5、XDF-5A、XDF-6等	台	1	
2	泥浆泵	BW160/ BW250/ BW300	台	2	备用1台
3	钻塔	12.5 m 人字塔	套	1	
4	泥浆搅拌机	M3000	台	1	
5	取心绞车	S3000	台	1	
6	发电机	150 kW	台	1	
7	电焊机	NT-600	台	1	
8	拧管机	SQ114/8	台	1	
9	潜水泵	3 kW	台	2	
10	角磨机	100 型	台	1	



图1 海域施工钻探平台

Fig.1 Offshore drilling platform for shallow sea



图2 筑岛式平台施工

Fig.2 Artificial island drilling platform

除机台钻探设备常规配备外,施工钻探平台时,统一使用了包括平台安装设备如吊装船、振动锤等,大型运输车、交通船、上下班班车等在内的辅助设备,辅助设备由工程指挥部统一调配。

5.2 钻进工艺

因项目钻孔数量多,钻孔深度不一,根据孔深和终孔口径要求,钻孔结构为:

终孔孔深 <1000 m 的钻孔结构主要采用 $\text{O}130$ mm- $\text{O}110$ mm- $\text{O}95$ mm- $\text{O}75$ mm 的结构形式;

终孔孔深 >1000 m 的钻孔结构主要采用 $\text{O}150$ mm- $\text{O}130$ mm/ $\text{O}122$ mm- $\text{O}95$ mm- $\text{O}75$ mm 的结构形式;

水文孔则根据抽水(压水)实验的需要采用 $\text{O}170$ mm- $\text{O}150$ mm- $\text{O}122$ mm- $\text{O}96$ mm 的结构形式^[14-15]。

对海岸和人工筑岛钻孔,因其为陆地钻孔,钻孔结构与钻进方法与常规陆地钻孔一致。对海域钻孔来说,钻孔结构设计还需考虑上层隔水管,海域施工区钻孔结构如图3所示。海域钻孔钻进工艺如表3所示。

表3 海域钻孔钻进工艺

Table 3 Drilling processes for sea area

钻孔结构	钻进方法
$\text{O}130$ mm(桩管底部 10~15 m)- $\text{O}110$ mm(稳定基岩 1~2 m)- $\text{O}95$ mm(穿过主断裂带)- $\text{O}75$ mm(终孔孔深)	$\text{O}130$ mm、 $\text{O}110$ mm 硬质合金钻头提钻取心, S95、S75 金刚石钻头绳索取心
$\text{O}150$ mm(桩管底部 10~15 m)- $\text{O}130$ mm/ $\text{O}122$ mm(稳定基岩 1~2 m)- $\text{O}96$ mm(穿过主断裂带)- $\text{O}76$ mm(终孔孔深)	$\text{O}150$ mm 硬质合金钻头提钻取心, S122、S95、S75 金刚石钻头绳索取心

5.3 冲洗液

海域内钻孔冲洗液主要使用海水冲洗液,上部第四系使用海水粘土固相冲洗液,下部基岩地层使用低固相或无固相海水冲洗液^[21],使用的冲洗液配方及其基本性能指标如表4所示。

表4 海域钻孔冲洗液配方及性能指标

Table 4 Make-up and properties of drilling fluids for shallow sea

冲洗液类型	配方	基本性能指标
海水粘土固相泥浆	1 m ³ 海水 + 0.5~1.0 kg 烧碱 + 0.5~1.0 kg 纯碱 + 60~100 kg 钠膨润土 + 5~10 kg 抗盐 GTQ	密度 1.10~1.30 kg/L, 漏斗粘度 25~45 s, 滤失量 <10 mL/30 min
海水低固相冲洗液	1 m ³ 海水 + 0.5~1.0 kg 烧碱 + 1.0~2.0 kg 纯碱 + 20~50 kg 膨润土 (MBM) + 5.0~10 kg 抗盐 GTQ + 10~15 kg 降失水剂 (GPNA) + 5~10 kg 接枝淀粉 (GSP) + 2~3 kg 包被剂 (GBBJ)	密度 ≥ 1.02 g/cm ³ ; 固相粒度 <15~20 μ m; 视粘度 <35 mPa·s, 滤失量 <15 mL/30 min
海水无固相冲洗液	1 m ³ 海水 + 0.5~1.0 kg 烧碱 + 1.0~2.0 kg 纯碱 + 0.7~1.0 kg 水解聚丙烯酰胺 (PHP) + 2~5 kg 抗盐 GTQ + 10~15 kg 降失水剂 (GPNA) + 10~20 kg 极压润滑剂 (GLUB 或石蜡乳液)	密度 ≥ 1.02 g/cm ³ ; 固相粒度 <15~20 μ m; 视粘度 <35 mPa·s, 滤失量 <15 mL/30 min

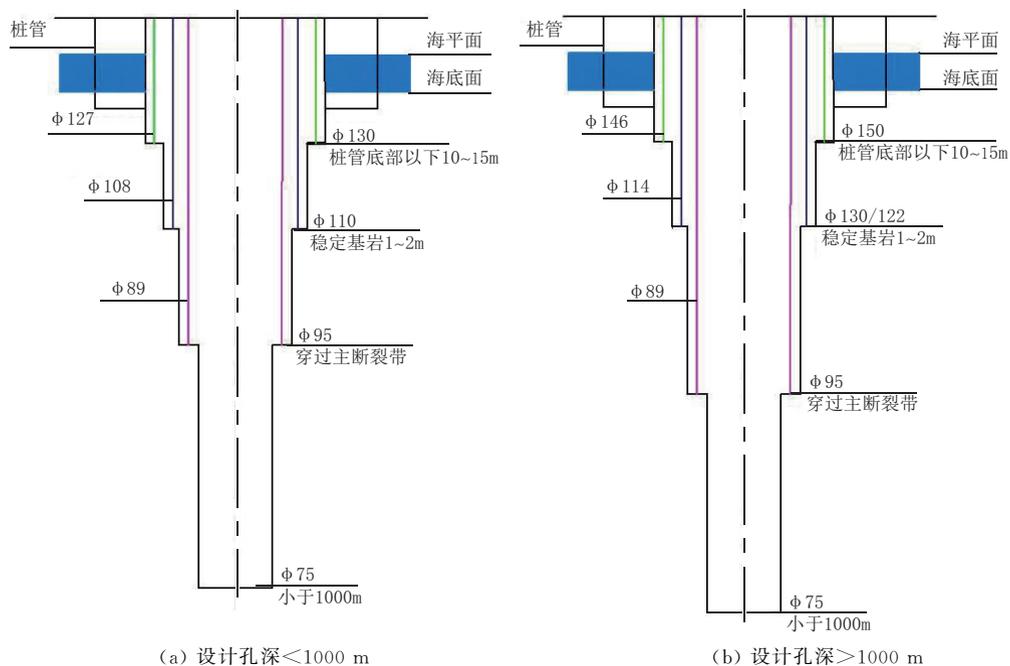


图 3 海域施工区钻孔结构示意图

Fig.3 Hole structures for shallow sea

5.4 安全管理

该项目规模大,多为海域施工,因其涉海,施工环境、交通运输、实施手段等都较陆地钻探不同,安全管理要求高。根据项目具体情况,成立了项目组,项目组根据施工程序及施工关键点,制定了安全管理工作方案。对平台搭建与拆除、钻探生产施工、海上交通运输、天气因素等几个方面危险源进行评价,并根据作业条件危险性评价结果,相比陆上小口径钻探,安全管理方面重点地对涉海危险源制定了防范措施。同时,成立了应急指挥部,详细制定了海域施工安全预案,并组织施工人员进行安全培训和演练。落实安全生产责任制,确定安全生产责任人,并严格执行岗前培训与新工人的三级安全教育,特殊工种作业必须持证上岗。坚持安全第一原则,确保了项目的顺利实施^[22-23]。

5.5 实施效果

项目累计完成 138 个钻孔,钻探工作量达 15 万余米,探获海底超大型金矿床一处。项目历时 3 年,施工周期长,工作量大,施工机台多,施工管理难度大。因涉海,对施工设备、钻探技术、安全管理等方面均提出了很高的要求。经过周密组织、设计、研究,圆满完成了设计任务,且施工过程中无一例安全事故发生。同时,利用我院自主研发的海上钻探平

台,成功实施了大量海域钻孔,其中,海上钻孔最深孔深 1973.46 m,最远离岸 3.5 km,最深水深 15.7 m。莱州三山岛北部海域金矿为目前国内发现的最大规模金矿床,探获黄金储量达 470 多吨,为超大金矿^[1,21]。

6 海域地质钻探技术存在问题及建议

海域地质岩心钻探因工程量少,可供参考技术经验有限。目前尚无专门的浅海领域地质岩心钻探标准可参照执行,一般都沿用地质岩心钻探、工程勘察、水利工程等领域相关标准,执行标准不统一。安全隐患大,资源浪费,无法有效管理是目前该行业发展的弊端。此外,因海域环境特殊,对生态环境保护提出了较高要求。我院经过多年浅海海域地质钻探作业,积累了一定经验可供参考,但实际应用范围大多在水深 50 m 以浅的浅海海域,水深 50 m 以深的海域的地质钻探工程技术还需加强研究。

(1)海域内地质钻探工程施工前,要做好工程设计,特别是涉海方面,要重点考虑海域环境对设备、工艺、安全、管理等方面的影响。

(2)选择经济可靠的钻探平台是项目成功实施的前提,钻探平台要依据孔深、施工海域环境条件、施工周期、平台建设的可行性与经济性等因素综合

考虑。

(3)浅海海域地质钻探工艺可参考陆地地质岩心钻探,取心(样)技术要依据工程特点合理选择,冲洗液最好采用海水冲洗液。

(4)海域钻探要坚持安全第一原则,施工前,做好安全应急预案和安全演练,确保工程顺利实施。

(5)要加强海域环境保护措施,针对海洋环境和生态保护,制定专门的环保措施及应急计划。施工过程中,严防冲洗液、污水外溢,妥善存放冲洗液材料和化学处理剂,严格废弃物利用及排放。钻探平台施工时,要确保对海洋生态环境和近海生物群落的保护,禁止钻探作业人员乘船或下海采集珊瑚、捕捞海洋生物。

7 海域钻探技术发展趋势展望

海域矿产资源勘探开发为近年来新兴的一大地质产业,目前的海域钻探技术还是以沿用陆地地质岩心钻探技术为主,自动化、智能化作业欠缺。从施工设备到钻探技术、方法,均有很大的发展空间。

(1)海域钻探平台研发。海域施工离不开钻探平台的支持,目前专门用于海域地质勘探的钻探平台研发还处于初级阶段,其适用水深、抗风浪等级能力较小,要适应大规模的海上地质勘探要求,必须要加强海域地质钻探平台的研发,促进其标准化、产业化。

(2)海域地质钻探技术的研究。海域深部地质岩心钻探时,使用最多的还是传统绳索取心钻进工艺,如何在现有设备、机具基础上,引进新工艺、新方法如孔底动力技术、定向钻进工艺等,提高钻进效率,仍是海域钻探技术发展的一大重点。

(3)海域深部地质岩心钻探装备研发。深部钻探时,如何在保证安全前提下,提高钻探效率是整个海域地质勘探产业面临的一大难题。应加强高效长寿命钻头、特种取心钻具、孔内处理事故工具等的研发和应用,提高钻探效率。探索自动化、智能化装备应用,优化钻进参数。

(4)海域地质岩心钻探风险管控及环境保护。海域钻探环境特殊,从钻探平台建设、设备、人员等运输到施工中面临的避风避浪,要坚持以人为本,安全至上,探索适合海域地质钻探特点的管理体系。还要始终坚持环保理念,适应新常态下的环境保护、绿色低碳^[24-25]。

参考文献(References):

- [1] 张军进,丁正江,刘殿浩,等.山东莱州三山岛北部海域超大型金矿勘查实践与找矿成果[J].黄金科学技术,2016,24(1):1-10.
ZHANG Junjin, DING Zhengjiang, LIU Dianhao, et al. Exploration practice and prospecting results of super-large gold mine of Sanshandao northern sea area in Laizhou City, Shandong Province[J]. Gold Science and Technology, 2016,24(1): 1-10.
- [2] 宋宝杰,王鲁朝,栾东平,等.多功能地质勘察平台关键结构设计与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):46-49,56.
SONG Baojie, WANG Luzhao, LUAN Dongping, et al. Design and application of the key structures of multi-function geological survey platform[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(11):46-49,56.
- [3] 陈师逊,杨芳.海上工程平台的设计与应用分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(4):46-50.
CHEN Shixun, YANG Fang. Design and application of the offshore engineering platform [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(4):46-50.
- [4] GB 50021-2001,岩土工程勘察规范[S].
GB 50021-2001, Code for investigation of geotechnical engineering[S].
- [5] 杜奕宏.浅海工程勘察钻探施工探讨[J].西部探矿工程,2001(3):108.
DU Yihong. Discussion on the drilling work for engineering prospecting in shallow sea water[J]. West-China Exploration Engineering, 2001(3):108.
- [6] 王光辉,陈必超.浅海水域工程勘察钻探方法和技术措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2003,30(4):9-11.
WANG Guanghui, CHEN Bichao. Drilling methods and technical measures of geo-technical investigation in neritic area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2003,30(4):9-11.
- [7] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.
WANG Da, HE Yuanxin, et al. Geological drilling handbook [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [8] 胡辰光.钻探工程技术及标准规范实务全书[M].合肥:安徽文化音像出版社,2003:58-63.
HU Chenguang. Encyclopedia of drilling techniques and standards[M]. Hefei: Anhui Culture Audio Gvisual Press, 2003:58-63.
- [9] 李世忠.钻探工艺学[M].北京:地质出版社,1992.
LI Shizhong. Drilling technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [10] 鄢泰宁.岩土钻掘工程学[M].武汉:中国地质大学出版社,2001:22-26.
YAN Taining. Rock and soil drilling and excavation engineering [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 2001:22-26.
- [11] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):21-26.
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and con-

- struction of deep geo-drilling boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):21-26.
- [12] 汤凤林, 等. 岩心钻探学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
TANG Fenglin, et al. Core drilling[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1997.
- [13] 孙丙伦, 等. 深部找矿钻探技术与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
SUN Binglun, et al. Study and practice on drilling technology of deep mine prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [14] DZ/T 0227-2010, 地质岩心钻探规程[S].
DZ/T 0227-2010, Geological core drilling regulations[S].
- [15] 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.
- [16] 宋世杰, 张英传, 田志超, 等. 三层管底喷取心钻具在海相第四系和新近系中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(3):10-13.
SONG Shijie, ZHANG Yingchuan, TIAN Zhichao, et al. Application of sampling drilling tools of three layer pipes in the marine quaternary system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(3):10-13.
- [17] 宋世杰, 李晓东, 陈师逊. 南黄海大陆架科钻 CSDP-02 井第四系、新近系地层海水冲洗液研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(4):10-13.
SONG Shijie, LI Xiaodong, CHEN Shixun. Study on seawater flushing fluid and its application in quaternary and neogene strata for CSDP-02[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4):10-13.
- [18] 孙宏晶, 刘治. 小口径岩心钻探海上施工安全风险管控[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(10):88-89, 92.
SUN Hongjing, LIU Zhi. Safety risk control of offshore construction for small-diameter core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(10):88-89, 92.
- [19] 许启云, 周光辉, 洪炉, 等. 浅谈海洋风电勘察安全风险控制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(1):81-84.
XU Qiyun, ZHOU Guanghui, HONG Lu, et al. Discussion of safety risk control of drilling prospecting for marine wind power generation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(1):81-84.
- [20] 陈师逊, 杨芳, 等. 浅海地质钻探作业规程编制研究报告[R]. 山东省第三地质矿产勘查院, 2018.
CHEN Shixun, YANG Fang, et al. Research report on technical specification for neritic region geological drilling[R]. The Third Geological Team of Shandong Bureau of Geology and Mineral, 2018.
- [21] 陈师逊, 杨芳, 张军进. 三山岛北部海域金矿海上钻探施工关键技术[J]. 黄金科学技术, 2016, 24(1):17-22.
CHEN Shixun, YANG Fang, ZHANG Junjin. Key technology of offshore drilling for gold mine in the northern sea area of Sanshandao[J]. Gold Science and Technology, 2016, 24(1):17-22.
- [22] 陈师逊, 朱金凤. 龙口海上煤田钻探施工平台的设计与应用[J]. 地质调查与研究, 2008, 31(3):256-259.
CHEN Shixun, ZHU Jinfeng. Design and application of coal mine drill platform on the sea in Longkou, Shandong Province[J]. Geological Survey and Research, 2008, 31(3):256-259.
- [23] 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.
- [24] 刘建奎, 陈师逊. 科技创新推动深部钻探技术不断前行——山东地矿局深部钻探技术发展综述[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集, 北京:地质出版社, 2019:1-11.
LIU Jiankui, CHEN Shixun. Technological innovation drives forward deep cobalt exploration technology—summary of the development of deep drilling technology of Shandong Geological and Mineral Bureau[C]// Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Drilling and Tunneling) Academic Conferences, Beijing: Geological Publishing House, 2019:1-11.
- [25] 王达, 李艺, 周红军, 等. 我国地质钻探现状和发展前景分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(4):1-9.
WANG Da, LI Yi, ZHOU Hongjun, et al. Analysis on present situation of geological drilling in China and the development prospects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(4):1-9.

(编辑 韩丽丽)