

ICDP 西藏纳木错湖泊钻探前期施工关键技术 研究与应用

单文军¹, 田凤贺², 龚江彪³, 汪 伟⁴, 黄卫东²

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 青海晶诚地矿有限责任公司, 青海 西宁 810003; 4. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要: 西藏纳木错湖泊钻探是中国科学院青藏高原研究所联合国际大陆科学钻探计划(ICDP)实施的一项科学钻探工程, 主要目的是获取纳木错湖泊湖相沉积岩心, 研究和监测气候变化和全球环境。该项目钻孔施工水深约100 m, 最深的1个钻孔的湖底沉积物钻进深度为700 m。本文对纳木错湖泊钻探的主要技术难点进行研究, 开展湖泊钻探水上工作平台及施工程序设计: 水上工作平台设计、搭建拼装、锚固定位, 钻探设备选型, 聚合物防塌冲洗液, P口径绳索取心钻具, 深水套管及气囊式套管扶正系统设计等。围绕最大钻深能力800 m(含水深100 m)的湖泊钻探需求, 以孔深250 m(含水深100 m)为例, 开展了相关钻探技术和钻探设备研究, 为中国科学院青藏高原研究所开展全球气候变化、生物进化、构造演化、古地磁变化以及水文循环等研究提供了技术支撑。

关键词: 湖泊钻探; 水上工作平台; 聚合物防塌冲洗液; 深水套管; 气候环境; 纳木错科考

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)05-0093-07

Research and application of key technologies for pre-construction of ICDP Nam Co Drilling Project, Tibet

SHAN Wenjun¹, TIAN Fenghe², GONG Jiangbiao³, WANG Wei⁴, HUANG Weidong²

(1. Oil & Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin Heilongjiang 150086, China; 3. Qinghai Jingcheng Geology and Mineral Co., Ltd., Xining Qinghai 810003, China; 4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Nam Co Drilling Project in Tibet is a scientific drilling program implemented by the Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, in collaboration with the International Continental Scientific Drilling Program (ICDP), which is a scientific drilling initiative aimed at retrieving lacustrine sediment cores from Nam Co to study and monitor climate change and global environmental dynamics. During this project, drilling operations were conducted at a water depth of approximately 100 meters, with the deepest borehole penetrating lakebed sediments to a depth of 700 meters. This paper investigates the primary technical challenges of lake drilling in Nam Co by examining the design and operational procedures for lake drilling platforms, including: platform design and modular assembly; anchor positioning; drilling equipment selection; polymer anti-collapse drilling fluids; P-diameter wireline coring tools; deepwater casing systems; and airbag-type casing centralizer designs. Centered on the demand for lake drilling capabilities with a maximum depth of 800 meters (including water depth of 100 meters), this study develops relevant drilling technologies and equipment using a case example of a 250 meters borehole (including water depth of 100 meters). The

收稿日期: 2025-01-15; 修回日期: 2025-04-26 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.05.012

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 41802196); 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20242067)

第一作者: 单文军, 男, 汉族, 1985年生, 正高级工程师, 探矿工程专业, 博士, 主要从事地质找矿、钻探等技术研究工作, 北京市海淀区北四环中路267号, 82675667@qq.com。

引用格式: 单文军, 田凤贺, 龚江彪, 等. ICDP 西藏纳木错湖泊钻探前期施工关键技术研究与应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 93-99.

SHAN Wenjun, TIAN Fenghe, GONG Jiangbiao, et al. Research and application of key technologies for pre-construction of ICDP Nam Co Drilling Project, Tibet[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 93-99.

research provides critical technical support for the Institute of Tibetan Plateau Research, CAS in advancing studies on global climate change, biological evolution, tectonic evolution, paleomagnetic variations, and hydrological cycles.

Key words: lake drilling; waterborne working platform; polymer anti-collapse flushing fluid; deepwater casing; climatic environment; Nam Co scientific expedition

0 引言

纳木错地处西藏当雄县与班戈县境内,背靠南部的念青唐古拉山脉,是世界上海拔最高的咸水湖,是中国第三大咸水湖(但湖水矿化度低)^[1-5]。中国科学院青藏高原研究所于2005年6月在当雄县纳木错乡纳木错东南岸建立中国科学院纳木错多圈层综合观测研究站(简称纳木错站,位置见图1),重点研究大气圈、生物圈、岩石圈各圈层互相作用^[6-8]。纳木错作为高原湖泊,以内陆封闭湖泊为主,是一个相对独立的地理系统,气候和环境的变化影响湖泊的形成、演化和消亡,湖泊底部的湖泥中存在能反映大气沉降和地表径流等的重要信息。科学家通过钻探获取湖底沉积物,并开展相关的成分分析和研究,可以反推气候环境状况,开展古气候环境研究,并以此为依据预测未来一定时间范围内气候变化趋势,从而为应对未来气候极端变化提供科学依据^[9-11]。



图1 纳木错站地理位置

Fig.1 Geographical location of Nam Co

2024年,国际大陆科学钻探计划(ICDP)西藏纳木错水上科学钻探项目在纳木错湖盆中选取3个点布设7个钻孔,开展取心钻探工作,其中5个钻孔的湖底沉积物钻探深度为150 m,最深1个钻孔的湖底沉积物钻进深度为700 m,施工水深约100 m。

1 纳木错湖泊岩心钻探的主要技术难点

(1)水上风大,钻探平台不易稳定。多风是纳木错流域及其附近地区气候的显著特点,纳木错水

面风力尤为猛烈,主导风向为西南风。风大水深,钻探平台不易稳定,是湖上钻探的主要难点^[12-14]。

(2)地层松散软,易坍塌、掉块。2020年度已完成钻孔及实际钻遇地层见表1。纳木错湖底沉积地层含砂层,尤其是粗砂地层结构松散,孔壁稳定性较差,坍塌、掉块现象比较严重^[15-17],特别是遇到风浪无法施工时,冲洗液停止循环,井筒空置冲洗液沉淀,易出现孔壁失稳、坍塌、掉块等现象^[18-19]。自湖底起153.44 m以深无地层资料。

(3)湖水深度约100 m,套管难以稳定^[20-22]。

(4)地层压力不清,可能存在涌水地层。

(5)湖泊钻探环保要求高,禁止使用沥青类含荧光材料,增加了护壁的难度。

2 纳木错湖泊岩心钻探主要关键技术

2.1 水上钻探平台设计及工作程序

2.1.1 平台设计关键参数

针对此次ICDP纳木错水上科学钻探工程需求,沿用2020年度在纳木错使用的“一种用于深水湖泊的取心钻探系统装置”专利技术,结合湖泊钻探设备布置与施工特点^[23-24],设计了满足深孔钻探800 m(含水深100 m)和浅孔钻探250 m(含水深100 m)作业需求的水上钻探平台^[25](见图2)。

浅孔钻探孔深250 m,平台设计规格9 m×9 m,采用国产JD350型机械动力头钻机,桅杆高度6.5 m,使用PQ钻杆钻进,完成平台重建并补充新设备及工具。浅孔钻探平台浮力及安全系数见表2。

深孔钻探孔深800 m,平台设计规格12 m×12 m,采用国产改进型CSD1800型全液压钻机,桅杆高度13.5 m,使用PQ或HQ钻杆。通过浮筒尺寸加大、数量增多,同时加大框架的结构强度和平台面积,将平台浮力提高至1430 kN。经计算,平台自重和所承载设备及材料的重力约为427 kN,主卷扬及动力头提升力合计324 kN,平台总载荷(最大起重状态)为751 kN,浮力安全系数为1.85,可以保证平台的安全运行。平台浮力及安全系数见表3,局部结构如图3所示。

表 1 2020 年度纳木错水上钻遇地层岩性描述

Table 1 Lithology description of formation drilling in Nam Co in 2020

序号	孔深/m		层厚/ m	岩心采 取率/%	岩 性 描 述
	自	至			
1	0	4.86	4.86	100	淤泥质粉质黏土,黑色,流塑,手搓污手
2	4.86	8.70	3.84	96	淤泥质粉质黏土,深灰黑色,软塑,手搓污手
3	8.70	15.03	6.33	100	粉质黏土,灰黑—浅灰色,软塑—可塑
4	15.03	17.53	2.50	100	顶部为粉砂质黏土;底部为细砂,浅灰色,含水饱和
5	17.53	19.77	2.24	98	上部 1 m 为粗砂,灰白色,含水饱和;下部为粉质黏土,黑—灰黑色,可塑
6	19.77	22.27	2.50	100	粉质黏土,黑色,可塑—硬塑
7	22.27	27.00	4.73	100	粉质黏土,黑色,硬塑,含细砂—粉砂夹层
8	27.00	29.16	2.16	100	粉质黏土,黑色,可塑—硬塑
9	29.16	31.66	2.5	86	粉质黏土,黑色,硬塑;中下部含粗砂夹层
10	31.66	36.32	4.66	100	粉质黏土,黑色,硬塑;中下部含砂层
11	36.32	38.55	2.23	73	上部为粉砂层,灰色含水;下部为粗砂层,灰白色,松散,含水饱和
12	38.55	43.36	4.81	98	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—硬塑
13	43.36	45.87	2.51	92	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—硬塑;下部粗砂层,灰白色,松散,含水饱和
14	45.87	48.37	2.50	100	上部粗砂层,灰白色,松散,含水饱和;下部粉质黏土,黑灰色,硬塑
15	48.37	65.57	17.20	98.77	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—硬塑
16	65.57	70.33	4.76	100	粉质黏土,黑色,可塑—软塑;底部为粉砂层,黑色,含水饱和
17	70.33	72.62	2.29	100	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—硬塑
18	72.62	75.02	2.40	92	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—软塑;中部含砂层,层厚 1 m,黑灰色,含水饱和
19	75.02	126.55	51.53	94.48	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—硬塑
20	126.55	128.35	1.8	67	上部砂层,黑灰色,含水饱和;下部粉质黏土,黑—黑灰色,软塑—可塑
21	128.35	148.64	20.29	95.87	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—硬塑
22	148.64	151.14	2.50	98	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—硬塑;底部砂层,灰黑色,含水饱和
23	151.14	153.44	2.30	98	粉质黏土,黑—黑灰色,可塑—硬塑,终孔
24	153.44				以下地层无资料

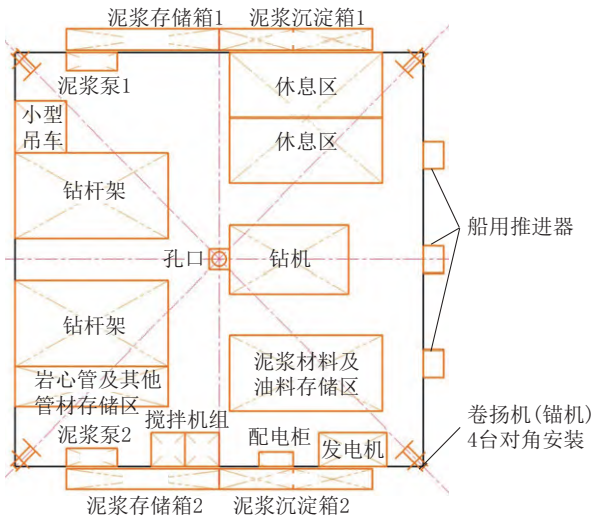


图 2 水上钻探平台布置

Fig.2 Layout of waterborne working platform

表 2 浅孔钻探水上钻探平台浮力计算

Table 2 Buoyancy calculation of 9 m×9 m waterborne drilling platform

项 目	参 数	备 注
单个浮筒浮力/kN	1.96	标准油桶式铁制浮筒
使用浮筒数量/只	209	14 排,每排 15 只,中心 1 只留空
平台浮筒总浮力/kN	409.64	
平台含设备自重/kN	234.92	含浮筒、平台及设备工 具总重力
钻机起重最大荷载/kN	83.30	油缸提升力+卷扬提升 力
平台总荷载/kN	318.22	
平台荷载安全系数	1.29	

表3 深孔钻探水上钻探平台浮力计算
Table 3 Buoyancy calculation of 12 m×12 m
waterborne drilling platform

项 目	参 数	备 注
单个浮筒浮力/kN	4.31	标准油桶式铁制浮筒
使用浮筒数量/只	323	
平台浮筒总浮力/kN	1392.13	
平台含设备自重/kN	427.07	含浮筒、平台、设备工具总重力
钻机起重最大荷载/kN	324.00	油缸提升力+卷扬提升力
平台总荷载/kN	751.07	
平台荷载安全系数	1.85	

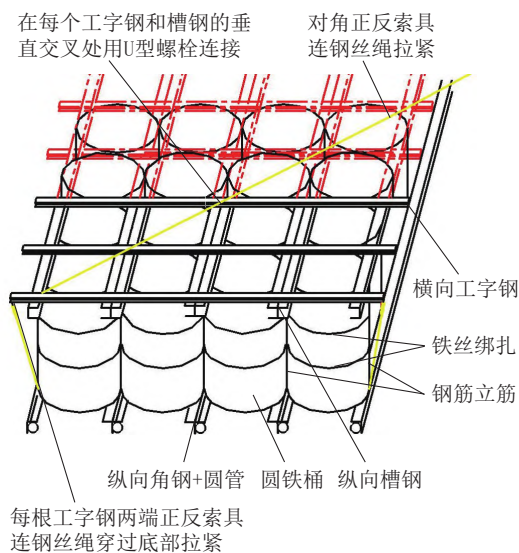


图3 水上钻探平台桶排框架局部结构示意图

Fig.3 Local structure of the barrel frame of the waterborne drilling platform

2.1.2 平台搭建工作程序

2.1.2.1 平台搭建拼装

平台采用桶排框架结构。首先搭建拼装桶排,然后将桶排逐排并拢,用“U”型螺栓连接工字钢和桶排,并且用花篮螺丝将平台顶面对角钢丝绳和连

接在工字钢两端兜底钢丝绳绷紧^[21-22]。

2.1.2.2 工作平台驶入孔位并锚固定位

平台在码头搭建拼装完成后,用80 t(800 kN)吊车整体吊装下水,并将钻探施工设备吊装固定在平台上,所用钻杆、钻具及部分冲洗液材料和油料均装载在平台上,利用安装在平台上的船用推进器驶入预定钻孔位置。平台就位后,平台锚固系统按照图4所示实施^[23]。

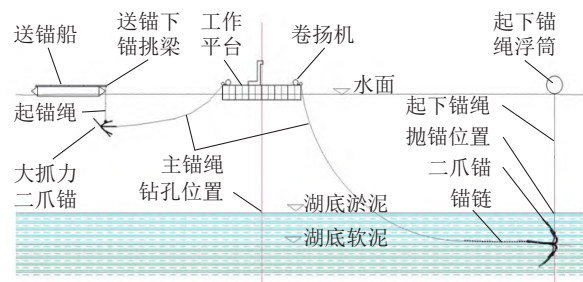


图4 一种用于深水湖泊水上钻探工作平台锚固定位的大抓力二爪锚装置

Fig.4 A large-grip two-claw anchor device for waterborne drilling platform in deep water

2.1.2.3 安装深水套管及气囊式套管扶正系统

为保证冲洗液循环和钻杆回转时的扶正限位,平台锚固定位完成后安装深水套管及气囊式套管扶正系统。采用3个气囊成品字形,绑扎在套管周围(水下20~30 m处),气囊承压 ≥ 0.3 MPa,实施方法见文献[24],安装见图5,浮力计算见表4^[24]。

2.1.3 水上钻探平台的优势

平台结构设计合理,受力均衡,遇到风浪时,桶排式结构的结构间隙可有效分散和消解波浪的水平推力,在同等风力和波浪条件下桶排式平台所受的推力明显小于集装箱式平台。且安装时无需水下作业,可自主航行,安全可靠。

平台设计为正方形,其对角线与锚固定位的大抓力二爪锚主锚绳在同一直线上,受力合理,平台

表4 气囊式套管扶正系统浮力计算

Table 4 Buoyancy calculation of balloon casing centralizer system

名 称	外径/mm	内径/mm	壁厚/mm	高度/m	重力/kN	体积/m ³	浮力/kN	备注
套管	168	156	6	40	9.59	0.1221	1.22	
套管	146	137.4	4.3	71	10.67	0.1359	1.36	
气囊	310			5	0	0.3772	3.17	3个
管组剩余水中重力					8.17			

注:管组剩余水中重力=两种套管重力-两种套管所受浮力-单个气囊浮力×3。

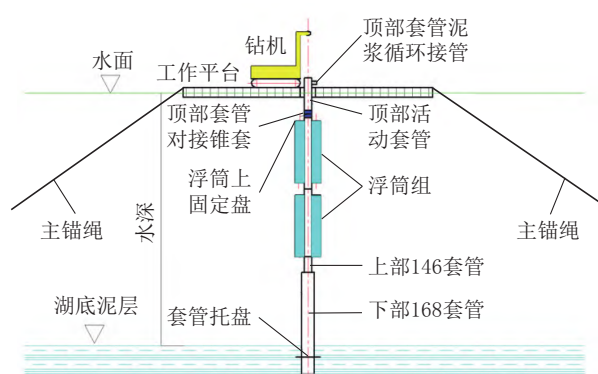


图5 深水套管及气囊式套管扶正器

Fig.5 Deepwater casing and airbag casing centralizer

平面变形小。桶排框架使用专用连接件连接,底部用钢丝绳和正反螺丝围绕拉紧,对角线用钢丝绳正反螺丝拉紧。

9 m×9 m规格水上平台在2019—2020年度曾用于中国科学院纳木错水深38.2~94.5 m的水上钻探,对角采用4只大抓力二齿锚对平台进行锚固的条件下,2019、2020年度全天候连续停泊湖面的时间分别为88、67天。期间湖面最大风力7~8级,平台在行驶和停泊期间工作状态始终平稳,未发现任何异常现象,平台最大位移<2 m,深水套管连续稳定,直至工作结束。2020年度,在湖底沉积物存在砂层和砂砾石层的条件下,顺利钻穿砂层和砂砾石地层,钻进深度达到153.44 m,实现了预期效果。

2.2 水上科学钻探施工工艺设计

以2020年ZK-1孔设计为例,孔深253.44 m(含水深100 m),湖底沉积物钻探深度153.44 m,Ø168 mm套管下入深度111 m。

2.2.1 钻探设备及配套

研发配套了动力头垂直位移补偿系统,该系统可用于补偿平台因海浪、潮汐等引起的垂直位移,减少动力头垂直位移,使钻头持续作用于地层,提高钻探质量;可保护钻探设备避免因动力头过度位移导致钻杆、钻头等受到过大的拉力、压力或扭矩;使钻探过程更加平稳,减少因位移引起的钻探中断和调整时间,提高整体钻探效率。其工作原理为被动式补偿,由张紧器、蓄能器和钢缆等组成。当钻探平台随波浪上升时,钢缆拉力增加,张紧器压缩,释放钢缆,补偿负载位移,同时补偿油缸中液压油进入蓄能器存储能量;浮体随波浪下降时,反向补偿。系统相当于一个液压弹簧,对波浪影响起缓冲

作用,可保证浪高<1 m时正常钻进。

配套提下钻杆的自动加减杆系统,可以降低高原作业的劳动强度。深钻孔钻探(12 m×12 m平台)主要配套设备见表5。

表5 湖泊钻探ZK-1孔主要设备

Table 5 Main equipment of ZK-1 well

设备分类	设备名称	规格型号	单位	数量
钻探及泥浆净化、固控设备	全液压钻机	CSD1800型	台	1
	柴油动力泥浆泵	WB320	台	1
	泥浆搅拌机	立式1000升	台	2
	电动泥浆除砂器	ZQJ300×2×1.4×0.6	台	1
	测斜仪	XJL-42	台	2
水上钻探平台	桶排式水上钻探平台	9×9×1.2	台套	1
发电设备	XG-50KW发电机组	玉柴C4A100 Z-D20	台	4

2.2.2 钻孔结构

浅孔湖底沉积物钻深150 m,钻进前下入上部Ø146 mm套管,采用PQ钻具钻取孔底沉积物岩心。

深孔湖底沉积物钻深300~700 m,钻进前下入Ø146 mm套管,一开钻进采用PQ钻具,当钻遇厚度>5 m、结构松散、有塌孔风险的砂砾石层后,应在钻穿松散砂砾层后继续钻入泥岩层6~8 m,然后下入Ø127 mm技术套管,改用HQ钻具钻取孔底沉积物岩心至终孔。

钻孔结构设计:

(1)水下套管Ø146 mm×5 mm,套管接头Ø150 mm×7.5 mm,加焊加强筋后最大外径Ø170 mm。套管长度为水深+11 m,底部加焊套管托盘,套管托盘以下缠绕海带止水,套管上部采用气囊或浮筒组利用浮力扶正套管。

(2)技术套管Ø127 mm×4.5 mm,套管接头Ø130 mm×6.5 mm。技术套管长度为自套管顶部起至底层砂砾石层底板的长度+6 m,并用水泥浆封固技术套管和砂砾石地层之间的间隙,见图6。

2.2.3 钻探工艺

250 m浅孔施工采用P口径绳索取心钻具:钻头直径127.3/78.5 mm,扩孔器直径127.6 mm,钻杆规格Ø114.3 mm×6.35 mm。

700 m深孔施工时,在平台到达孔位锚固定位

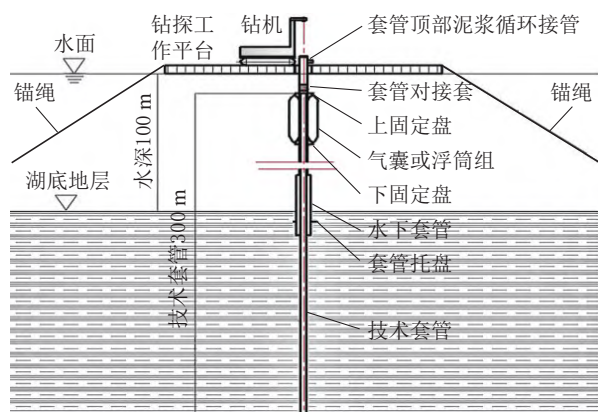


图6 ZK-1井技术套管安装示意

Fig.6 Schematic diagram of technical casing installation in ZK-1 well

后先安装深水套管。一开采用P口径绳索取心钻具:钻头直径127.3/78.5 mm,扩孔器直径127.6 mm,钻杆规格 $\Phi 114.3 \text{ mm} \times 6.35 \text{ mm}$ 。钻遇厚层砂砾层及卵石层,钻孔易发生坍塌,需下入 $\Phi 127 \text{ mm}$ 技术套管,改用H口径绳索取心钻具钻进,钻头直径99.6/63 mm,扩孔器直径99.8 mm,钻杆规格 $\Phi 89 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ 。

2.2.4 冲洗液设计

根据地层、邻孔情况及湖泊钻探环保要求^[25-28],上部地层由于地层松散、胶结性差,易分散剥落引起孔壁坍塌,采用聚合物防塌冲洗液和成膜冲洗液体系。

2.2.4.1 聚合物防塌冲洗液(0~120 m)

配方:1 m³水+1.5~2 kg纯碱+0.5~1 kg烧碱+0~50 kg钠土+2~3 kg包被剂(GBBJ)+0~20 kg防塌随钻堵漏剂(GPC)+10 kg降失水剂(GPNH)+0~5 kg增黏剂(GTQ)。

配制方法:在泥浆搅拌机中放入清水,加纯碱、烧碱,搅拌使其溶解,再依次加入钠土、GPC、GPNH及GTQ,搅拌20~30分钟。

冲洗液性能:漏斗黏度20~30 s;API滤失量 $\leq 15 \text{ mL}$;泥皮 $\leq 0.5 \text{ mm}$,有韧性;pH 10~12。

2.2.4.2 成膜冲洗液(120 m以深)

配方:1 m³水+1.5~2 kg纯碱+0.5~1 kg烧碱+10~30 kg钠土+30~50 kg成膜A剂+0~50 kg成膜B剂+3~5 kg增黏剂(GTQ)+2~3 kg包被剂(GBBJ)+20~30 kg封堵剂(GFD-1)。成膜B剂加量据地层情况而定。

配制方法:在泥浆搅拌机中放入清水,纯碱(除去钙、镁等离子),烧碱(调整pH>10),搅拌使其充分溶解;加入成膜A剂和成膜B剂搅拌5~10 min,待其分散均匀;加入GTQ搅拌10~15 min,使其分散均匀不结团;最后再加入包被剂、封堵剂搅拌10~20 min后即可使用。

冲洗液性能:漏斗黏度25~50 s;密度1.04~1.12 g/cm³(根据现场需要调整);API滤失量5~10 mL;泥皮厚度 $\leq 0.5 \text{ mm}$,有韧性;pH 10~12。

2019年6—9月,累计钻探3个月,总共获取岩心样品34.45 m,该区域沉积物具有很好的成层性,基本为黑色淤泥,底部含有粉砂、细砂,均含有大量砾石,后核实地震剖面数据,该深度有很强的反射面,对应此砾石层,厚度较厚。

3 结论

(1)研发了可适用于深孔钻探800 m(含水深100 m)和浅孔钻探250 m(含水深100 m)的水上工作平台、扶正装置及相关施工工艺,桶排式平台结构合理、抗湖泊风浪能力强、锚定稳定、安全可靠,可为湖泊钻探工艺提供技术支撑。

(2)针对湖泊地层松散软,易坍塌、掉块且环保要求高等特点,采用了环保聚合物防塌冲洗液和成膜冲洗液体系,保证深水湖泊钻探孔壁稳定和施工安全。

参考文献(References):

- [1] 吴艳红,郭立男,范兰馨,等.青藏高原纳木错湖冰物候变化遥感监测与模拟[J].遥感学报,2022,26(1):193-200.
WU Yanhong, GUO Linan, FAN Lanxin, et al. Lake ice phenology of the Nam Co at Tibetan plateau: remote sensing and modelling [J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 26 (1): 193-200.
- [2] 殷秀峰,康世昌,张强弓,等.青藏高原内陆大气污染物科学研究——以纳木错站为例[J].自然杂志,2020,42(5):373-378.
YIN Xiufeng, KANG Shichang, ZHANG Qiangong, et al. Study of air pollutants in the inland Tibetan plateau (Nam Co Station)[J]. Chinese Journal of Nature, 2020, 42(5): 373-378.
- [3] 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.
- [4] Gohn G S, Koeberl C, Mille K G, et al. Chesapeake bay impact structure deep drilling project completes coring [J]. Scientific Drilling, 2006, 3: 34-37.

- [5] Ariztegui D, Thomas C, Vuillemin A. Present and future of sub-surface biosphere studies in lacustrine sediments through scientific drilling[J]. International Journal of Earth Sciences, 2015, 104(6):1655-1665.
- [6] Verschuren D, Van Daele M, Wolff C, et al. ICDP project DeepCHALLA: reconstructing East African climate change and environmental history over the past 250,000 years[J]. Geophysical Research Abstracts, 2017, 19: EGU-2017-4082.
- [7] Wagner B, Wilke T, Krastel S, et al. The SCOPSCO drilling project recovers more than 1.2 million years of history from Lake Ohrid[J]. Scientific Drilling, 2014, 17:19-29.
- [8] Litt T, Krastel S, Örcen S, et al. Lake van drilling project: a long continental record in eastern Turkey[J]. Scientific Drilling, 2007, 4:40-41.
- [9] Stein M, Ben-Avraham Z, Goldstein S, et al. Deep drilling at the Dead Sea[J]. Scientific Drilling, 2011, 11:46-47.
- [10] Neugebauer I, Brauer A, Schwab M J, et al. Lithology of the long sediment record recovered by the ICDP Dead Sea Deep Drilling Project (DSDDP)[J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 102:149-165.
- [11] Migowski C, Agnon A, Bookman R, et al. Recurrence pattern of Holocene earthquakes along the Dead Sea transform revealed by varve-counting and radiocarbon dating of lacustrine sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 222(1):301-314.
- [12] 许青海,刘维鹏,白宝云,等.湖泊相沉积地层大陆环境科学钻探技术探索[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(5):20-22.
- XU Qinghai, LIU Weipeng, BAI Baoyun, et al. Research on continental environment scientific drilling technology in lake facies deposit strata[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(5):20-22.
- [13] 朱立平,王君波,林晓,等.西藏纳木错深水湖芯反映的8.4ka以来气候环境变化[J].第四纪研究,2007,27(4):588-597.
- ZHU Liping, WANG Junbo, LIN Xiao, et al. Environmental changes reflected by core sediments since 8.4ka in Nam co, central Tibet of China[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(4):588-597.
- [14] Brigham-Grette J, Melles M. Complex drilling logistics for Lake El'gygytyn, NE Russia[J]. Scientific Drilling, 2009, 7:38-39.
- [15] Zolitschka B, Anselmetti F, Ariztegui H, et al. The Laguna Potrok Aike scientific drilling project PASADO (ICDP expedition 5022)[J]. Drilling Program, 2009, 8:29-34.
- [16] Scholz C A, Cohen A S, Johnson T C, et al. The 2005 Lake Malawi scientific drilling project[J]. Scientific Drilling, 2006, 2:17-19.
- [17] Scholz C A, Cohen A S, Johnson T C. Southern hemisphere tropical climate over the past 145ka: Results of the Lake Malawi Scientific Drilling Project, East Africa[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2011, 303(1/4):1-2.
- [18] Hodell D, Anselmetti F, Brenner M, et al. The Lake Petén Itzá scientific drilling project[J]. Scientific Drilling, 2006, 3:25-29.
- [19] Xu Z, Yang J, Wang C, et al. Fifteen years of the Chinese continental scientific drilling program[J]. Scientific Drilling, 2017, 22:1-18.
- [20] Wilke T, Wagner B, Van Bocxlaer B, et al. Scientific drilling projects in ancient lakes: Integrating geological and biological histories[J]. Global and Planetary Change, 2016, 143:118-151.
- [21] Cohen A, Campisano C, Arrowsmith R, et al. The hominin Sites and paleolakes drilling project: inferring the environmental context of human evolution from eastern African rift lake deposits[J]. Scientific Drilling, 2016, 21:1-16.
- [22] Haberzettl T, Daut G, Schulze N, et al. ICDP workshop on scientific drilling of Nam Co on the Tibetan plateau: 1 million years of paleoenvironmental history, geomicrobiology, tectonics and paleomagnetism derived from sediments of a high-altitude lake[J]. Scientific Drilling, 2019, 25:63-70.
- [23] 刘宝林,何跃文,司敬成.湖泊环境科学钻探施工技术[J].探矿工程,1999(2):47-49.
- LIU Baolin, HE Yuewen, SI Jingcheng. Drilling technology of environmental scientific drilling on lake[J]. Exploration Engineering, 1999(2):47-49.
- [24] 王君波,黄卫东.一种用于深水湖泊取心钻探的系统装置:CN202011251304.7[P].2020-11-11.
- WANG Junbo, HUANG Weidong. A system device for core drilling in deep water lakes: CN202011251304.7[P]. 2020-11-11.
- [25] 姚彤宝,刘宝林,李国民.湖泊环境科学钻探取样技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(4):17-19.
- YAO Tongbao, LIU Baolin, LI Guomin. Environmental scientific drilling sampling in lake[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(4):17-19.
- [26] 赵俊峰,刘满才,程志忠,等.浅水湖泊水上煤田钻探施工关键技术[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2014(2):55-59.
- ZHAO Junfeng, LIU Mancai, CHENG Zhizhong, et al. Key technology of coal field drilling above water in shallow lake[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2014(2):55-59.
- [27] 丁同福,程志忠,肖柏青,等.浅水湖泊水上煤田钻井液污染分析[J].中国煤炭地质,2014(5):63-67.
- DING Tongfu, CHENG Zhizhong, XIAO Baiqing, et al. Analysis of drilling fluid pollution from coal drilling upon shallow lake surface[J]. Coal Geology of China, 2014(5):63-67.
- [28] 赵洪波,梁涛,何远信.ICDP湖泊科学钻探进展[J].地质科技通报,2020,39(2):204-214.
- ZHAO Hongbo, LIANG Tao, HE Yuanxin. Advances of ICDP lake scientific drilling program[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2):204-214.

(编辑 王跃伟)