

中国南极昆仑站深冰芯科学钻探工程进展

范晓鹏^{1,2,6}, 张楠^{1,3}, 胡正毅⁴, 安春雷⁴, 史贵涛⁴, 宫达^{1,3}, 李冰⁵,
杨成¹, 李传金⁶, 刘科⁷, 于金海⁴, 刘博文¹, 鲁思宇^{1,3}, 马天明⁴,
孙友宏⁵, Pavel Talalay^{1,3}, 李院生^{*4}

(1. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;
3. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 4. 中国极地研究中心, 上海 200129;
5. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;
6. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
7. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 200136)

摘要:我国于2012年1月在南极Dome A区域正式开展实施了南极昆仑站深冰芯科学钻探工程,截至2021年,钻孔深度已达803.54 m。该工程是我国第一个深冰芯钻探工程,也是国际上第一个在Dome A地区开展的深冰芯钻探项目。本文介绍了昆仑站深冰芯科学钻探工程实施的整体情况,对过去近10年的钻探活动以及取得的成果和经验进行了总结,以为后续的深冰芯钻探工作提供理论和经验指导。

关键词:南极;昆仑站;深冰芯;取芯钻探;Dome A

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)09-0001-09

Progress of the deep ice core scientific drilling project of China at Kunlun Station in Antarctica

FAN Xiaopeng^{1,2,6}, ZHANG Nan^{1,3}, HU Zhengyi⁴, AN Chunlei⁴, SHI Guitao⁴, GONG Da^{1,3}, LI Bing⁵,
YANG Cheng¹, LI Chuanjin⁶, LIU Ke⁷, YU Jinhai⁴, LIU Bowen¹, LU Siyu^{1,3}, MA Tianming⁴,
SUN Youhong⁵, Pavel Talalay^{1,3}, LI Yuansheng^{*4}

(1. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;
2. College of Earth Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;
3. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;
4. Polar Research Institute of China, Shanghai 200129, China;
5. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
6. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China;
7. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 200136, China)

Abstract: China officially implemented the Antarctic deep ice core scientific drilling project within the Dome A area in January 2012, and the drilling depth has reached 803.54m by 2021. It is the first deep ice core drilling project initiated by China, and also the first one of the world in the Dome A area. This paper introduces the implementation pro-

收稿日期:2021-08-18; 修回日期:2021-08-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.09.001

基金项目:国家自然科学基金项目“极地冰盖前沿科学问题及探测技术”(编号:41942047);中国极地环境综合调查与评估项目(编号:CHIN-ARE 201X-02-02)

作者简介:范晓鹏,男,汉族,1986年生,副教授,博士生导师,主要从事极地与海洋钻探技术和装备研究工作,吉林省长春市西民主大街938号, heaxe@163.com, fxp@jlu.edu.cn。

通信作者:李院生,男,汉族,1956年生,研究员,博士生导师,主要从事极地深冰芯钻探和冰川学研究工作,上海市浦东金桥路451号, liyuansheng@pric.gov.cn。

引用格式:范晓鹏,张楠,胡正毅,等.中国南极昆仑站深冰芯科学钻探工程进展[J].钻探工程,2021,48(9):1-9.

FAN Xiaopeng, ZHANG Nan, HU Zhengyi, et al. Progress of the deep ice core scientific drilling project of China at Kunlun Station in Antarctica[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9): 1-9.

cess of the deep ice core scientific drilling project at Kunlun Station, and summarizes the drilling activities and experience gained in the past 10 years, so as to provide theoretical and empirical guidance for subsequent drilling.

Key words: Antarctic; Kunlun Station; deep ice core; core drilling; Dome A

0 前言

冰芯因其分辨率高、信息量大、保真性强、时间序列长和洁净度高而成为研究地球系统中环境、生物、化学和物理过程的最好媒体^[1]。自20世纪50年代以来,世界各国相继在南北极冰盖进行了大量的深冰芯钻探工程,获得了大量宝贵的冰芯^[2-6],其中利用EPICA Dome C冰芯重建了过去80万年的气候变化序列^[7-8]。重建结果表明,南极冰芯记录的气候变化以10万年为主导周期,但大约在90万年前发生了重大转型,从之前的4万年周期为主转为之后的10万年周期为主(中更新世气候转型),这一转变在EPICA Dome C冰芯记录似乎有所体现^[9]。要认识这一气候转型事件,获取更长的冰芯记录是最为关键的。为此,冰芯研究国际合作委员会(International Partnerships in Ice Core Sciences, IPICS)发表的白皮书中提出了最古老冰芯计划用以回答中更新世气候转型与地球气候循环从4万年转换到10万年的起因和验证温室效应假说^[10-11]。美国、欧盟、俄罗斯、澳大利亚、日本都已将寻找最古老冰芯计划列为国家南极科学考察计划,共同致力于寻找和获得超

百万年的冰芯记录。

位于东南极洲冰盖最高点的Dome A具有年平均气温极低($-58\text{ }^{\circ}\text{C}$)、净积累率很小($<25\text{ mm w.e.}/\text{a}$)、冰流速极缓、冰厚度大($>3000\text{ m}$)等特征,其满足了获取超过百万年冰芯记录的必要条件^[12-14],是实现通过冰芯记录辨识中更新世气候转型的理想之地。为此,我国于2012年1月在Dome A区域正式开展实施了南极昆仑站深冰芯科学钻探工程,截至2021年,该钻孔深度已达803.54 m^[15]。该工程是我国第一个深冰芯科学钻探工程,也是国际上第一个在Dome A地区开展的深冰芯钻探项目。本文详细介绍该深冰芯钻探工程实施的整体情况,对过去近10年的钻探活动和经验进行总结,为后续的深冰芯钻探提供理论和经验指导。

1 钻探场地

南极昆仑站深冰芯钻孔位于距离Dome A最高点7 km处的中国南极昆仑站($80^{\circ}25'01''\text{S}$, $77^{\circ}06'58''\text{E}$) (图1),此处海拔近4100 m,冰厚 $>3000\text{ m}$ ^[16]。

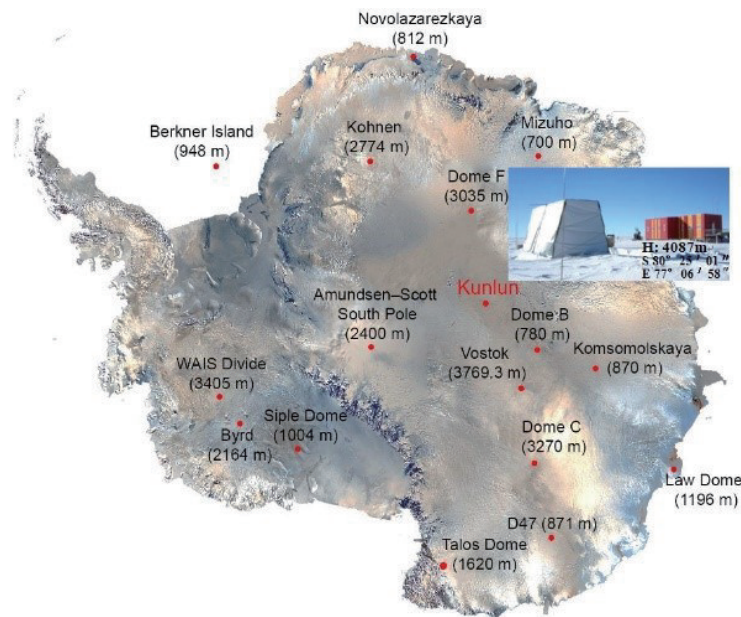


图1 南极昆仑站深冰芯钻孔位置^[16]

Fig.1 Location of the deep ice core borehole at Kunlun Station, Antarctica

为在昆仑站建设使用寿命30年以上的深冰芯钻探场地,中国极地研究中心借鉴了日本Dome Fuji深冰芯钻探的成功经验,场地结构设计为钢结构加强的半地下建筑结构。钻探主场地长×宽×高为40 m×4 m×3 m,采用36 t钢结构螺栓连接为一体

框架支撑,底部由木方、木板和聚乙烯泡沫板夹层形成保温地板,屋顶采用木板和苫布进行遮挡。场地从2009/2010考察季开始建设,于2010/2011考察季建成主钻探场地,随后又于2015/2016考察季建成冰芯储藏室,从而形成了如图2所示的钻探场地。

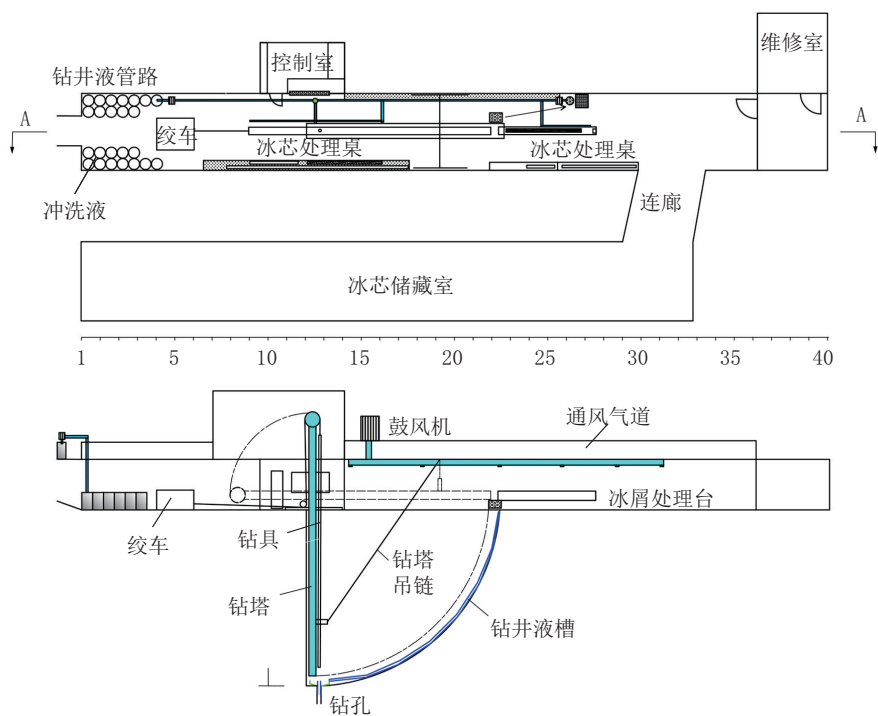


图2 钻探场地平面布置

Fig.2 Layout of the drilling site

2 钻探设备及钻具

深冰芯钻探装备主要包括日本Geo Teecs公司生产的D-3型粒雪层干孔取芯钻机和中国极地研究中心与日本Geo Teecs公司联合研制的CHINARE/JARE型深冰芯钻机。其中粒雪层干孔取芯钻主要用于在冰盖上覆粒雪层中形成先导孔,随后扩孔下入套管,为后续需填充钻井液的深冰芯钻探做准备;深冰芯钻机则用于进行粒雪层以下的冰层取芯钻进。以上2种钻机均采用孔底动力钻具,由铠装电缆进行钻具供电和提放。

粒雪层干孔取芯钻具(图3)在钻进过程中不需要添加钻井液,钻进切削的冰屑沿旋转冰芯管外表面的螺旋翼片由内外管间隙上返至冰芯管上方窗口处,并由此落入冰芯管内部,冰芯则从钻头处直接进入冰芯管内。提钻时,冰芯和冰屑均随钻具一起由

铠装电缆提升至地表进行移除。当钻进至指定深度后,则可将钻具下方冰芯管和外管替换为扩孔钻具进行扩孔钻进,扩孔钻具下部空心管深入先导孔内充当导向管,防止出现分支孔。冰屑则直接由导向管上方刀头处设置的窗口进入导向管内,实现冰屑收集。扩孔钻进共分3级将钻孔扩大至设计直径。

深冰芯钻探需更换为深冰芯钻机,孔内需填充钻井液以辅助排屑和维持孔壁稳定。图4为采用的深冰芯钻具。

该钻具的孔底动力电机安装于测控舱内。钻进时,电机通过减速器驱动冰屑室中心管、冰芯管和钻头回转钻进,而钻具外管则不回转。钻进产生的冰屑在冰芯管外壁上螺旋翼片的驱动下,沿内外管间隙上返至冰屑室,冰屑被冰屑室外管阻挡在冰屑室内,钻井液则经由冰屑室外管上均布的直径为1 mm的小孔流入钻具和钻孔环状间隙,并再次流动至钻

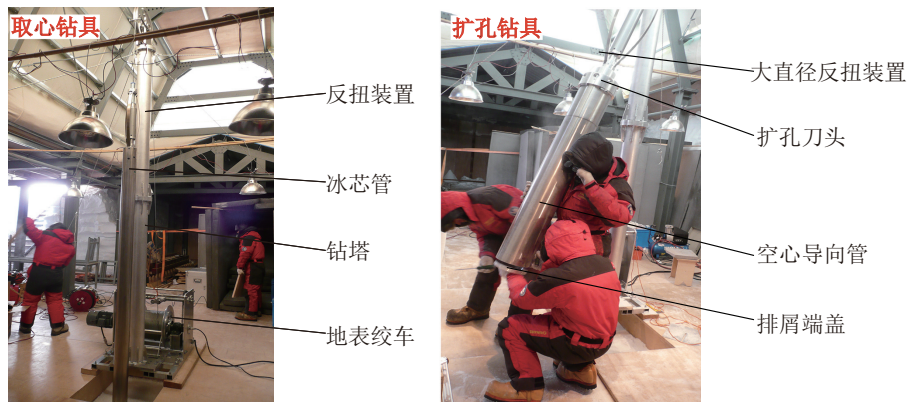


图3 D-3型粒雪层干孔取心钻具和扩孔钻具

Fig.3 D-3 shallow ice core drill and reamer for firn drilling

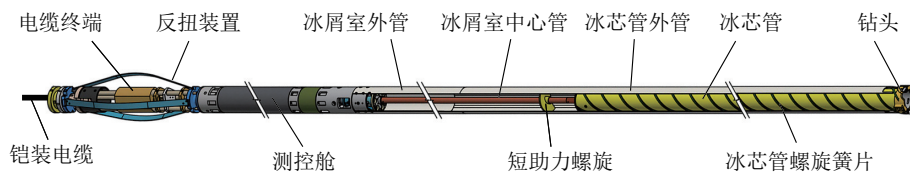


图4 CHINARE/JARE型深冰芯取芯钻具结构

Fig.4 Structure of CHINARE/JARE deep ice drill

头处实现循环。为了提高冰屑收集率,冰屑室中心管上安装了多个短助力螺旋,可辅助运输冰屑。钻具顶部电缆终端内安装有弹簧和位移传感器,通过弹簧压缩量即可测得电缆张力,结合钻具自重即可得到钻压。该钻机最大钻进深度为4000 m,成孔直径为135 mm,取芯直径为95 mm,最大取芯长度为3.9 m,井下钻具转速为0~50 r/min。图5为深冰芯钻机实物图。



图5 深冰芯钻机实物

Fig.5 Deep ice drilling rig

护作业,孔深达到了803.54 m。图6为深冰芯钻孔结构图。由于中国南极昆仑站每个工作季的工作天数在20 d左右,而去除钻探前准备和收尾工作后,每个工作季的纯钻进天数只约为15 d,6个工作季的实际纯钻进天数仅60 d。

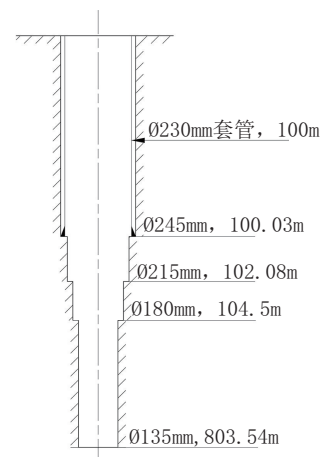


图6 深冰芯钻孔结构

Fig.6 Structure of the Kunlun's deep ice hole

3 钻探工程进展

中国昆仑站南极深冰芯科学钻探工程于2012年1月7日正式开始实施,至2021年8月,已经成功地进行了5个工作季的钻探施工和1个工作季的维

各工作季具体任务如下。

3.1 2011/2012工作季

主要采用D-3型粒雪层干孔取芯钻具和扩孔钻

具进行先导孔施工。此次钻探共完成了118回次取芯钻进,取芯钻进深度为120.79 m,平均回次取芯长度为1.02 m,平均钻进速度为6.9 m/h,钻孔直径为135 mm。随后,分3次扩孔将钻孔直径依次扩大至180、215和245 mm。最后,向孔内下入了100 m长的 $\text{O}230$ mm玻璃纤维套管以保护粒雪层孔壁。

3.2 2012/2013工作季

主要进行钻探槽挖掘、深冰芯钻机安装和调试工作。在深冰芯钻机就位后,向孔内灌注了醋酸丁酯作为冲洗液,并成功钻进了3个回次,总钻进深度为10.45 m,平均回次进尺约为3.48 m,最长取芯长度为3.83 m。钻进中钻压控制在钻具自重的30%~60%,钻头回转速度为50 r/min。本工作季同时修建了控制室和挖掘了长 \times 宽 \times 高为30 m \times 5 m \times 3 m的冰芯储藏室。

3.3 2014/2015工作季

共完成54回次钻进,总钻进深度为172.52 m,平均回次进尺为3.20 m,平均钻进速度为5.65 m/h,钻进中共向孔内灌注冲洗液3000 L。在钻进11 d天后,由于冲洗液不足而中止钻进。

3.4 2015/2016工作季

首次采取了两班作业模式(白班5人,夜班4人),每天工作16~18 h(8:00~24:00或次日2:00),每班工作8~9 h。本次深冰芯钻探共钻进了119个回次(包括打捞冰屑5个回次),总进尺为350.9 m,总孔深为654.66 m,平均回次进尺2.95 m。每天平均可以进行8~9个回次钻进。随着深度增加,回次时间从1.5 h逐渐增加到2 h。钻进中共收集冰屑 3.6 m^3 ,共灌注冲洗液约6400 L。此外,在该工作季对冰芯储藏室进行了内部底板铺设和冰芯储存架搭建。

3.5 2016/2017工作季

继续沿用两班作业模式,共完成了55回次取芯钻进和18回次冰屑打捞,钻进深度为146.1 m,总孔深达到了800.76 m,平均回次进尺为2.65 m。在该工作季的钻探中,由于钻具老化和脆冰层的出现使得钻进中出现了许多问题:(1)钻具频繁出现故障,其中钻具电机和谐波减速器均损坏并进行了更换;(2)打捞冰屑过程中,钻具螺钉落入孔内;(3)钻遇脆冰区,冰芯破碎,回次进尺短;(4)冰屑移除困难,当钻进超过2 h时,冰屑室中心管难以从冰屑室中拔出,大大增加了地表作业时间,降低了回次钻进效

率。处理以上事故占用了一定现场钻进时间,因此该工作季整体钻进效率较低。

3.6 2018/2019工作季

派遣3人对已有钻孔和钻机进行了简单的维护作业。在对钻机进行维护时,发现绞车变频器损坏,且由国内携带至钻探场地的钻具驱动部分内部锈蚀严重,无法正常回转,最终在更换了新的绞车变频器和钻具驱动部分后,钻机功能恢复正常。在将钻具下入钻孔过程中,同样遭遇了困难,钻具分别在下放至120、150和170 m深度处发生卡顿,经过调松反扭板簧和慢速回转拆除刀头的冰芯管,钻具顺利通过卡顿孔段,并到达800.73 m深度处的孔底。在此过程中,钻具内收集到约4 kg冰屑。怀疑是由于冰屑在冲洗液表面堆积形成冰塞造成钻具下放困难。在确认钻具和钻孔均处于较好状态时,仅进行了1个回次钻进,进尺深度为2.78 m,钻孔总深度达到803.54 m。

3.7 小结

6个工作季的整体钻进深度和日进尺量随时间变化曲线如图7所示。6个工作季共钻进约547回次,其中取芯钻进340回次、扩孔钻进170回次、冰屑打捞23回次、零件落孔打捞5回次,其他丢芯打捞或无效回次共9回次。日平均钻进回次数2011/2012工作季为15回次,2014/2015工作季为5回次,2015/2016工作季为8回次,其中2015/2016工作季采用了两班作业模式,因此日平均钻进回次数高于2014/2015工作季(日工作时间是10 h),日进尺深度最高达到了36.39 m。

4 钻进参数

4.1 回次进尺和机械钻速

图8为前5个工作季回次进尺、机械钻速、纯钻进时间随孔深变化曲线。从图8中可以看出,2011/2012工作季取芯长度随孔深增加呈线性下降,这主要是由于第一季度采用了浅钻钻具,其冰芯管内由位置可调的圆形泡沫隔板分割为冰屑室和冰芯室两段,初始钻进时,表层雪密度低、孔隙度大,冰屑所占体积比例小于冰芯,冰芯长度可达到1.3 m以上,但随着钻孔深度增加,粒雪密度变大,冰屑所占体积比例大于冰芯,因此冰芯长度逐渐减小至1 m以下。而第2~5个工作季中,采用深冰芯钻机进行钻进,冰屑管和冰芯管各为独立腔室,因此回次进尺长度

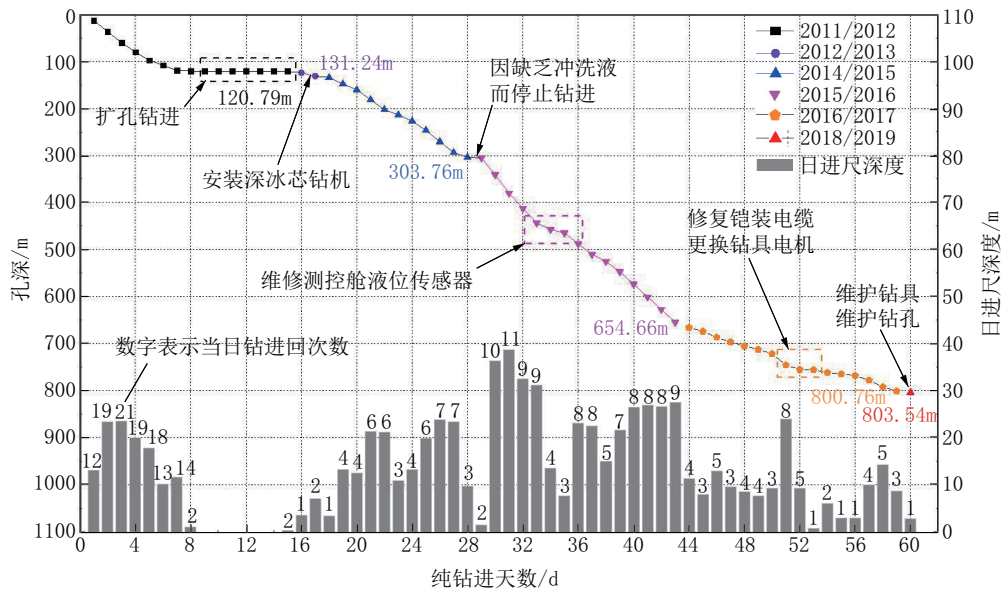


图7 各工作季深冰芯钻孔深度和日进尺随纯钻进天数变化曲线

Fig.7 Curve of deep ice core drilling depth and daily footage as a function of net drilling days in each working season

仅受钻进参数和冰物理性质影响,且基本稳定在3 m左右。在第4个工作季中,当钻进至500 m孔深左右时,由于孔内残留冰屑堆积,造成回次进尺有所降

低,且井下钻具回转电流增大较快,经过3个回次冰屑打捞后,回次进尺恢复正常。

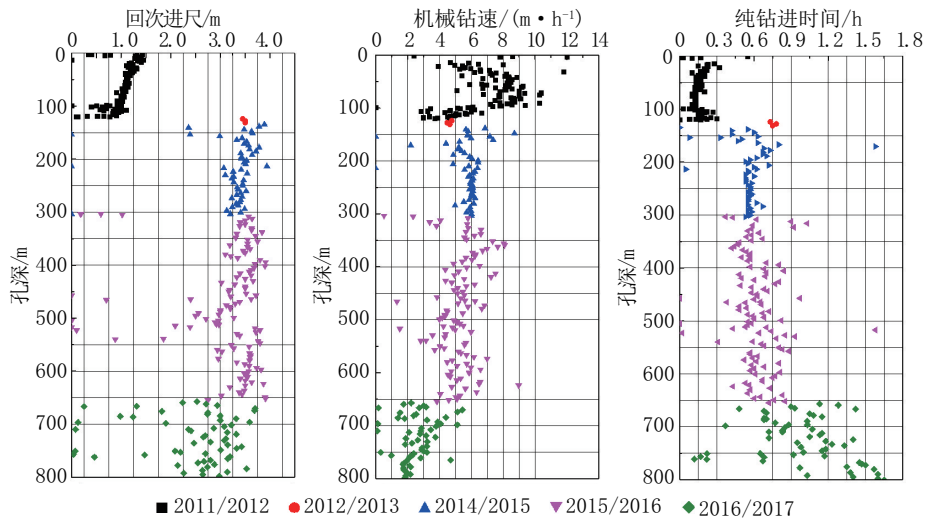


图8 回次进尺、机械钻速和纯钻进时间随孔深变化曲线

Fig.8 Curve of footage per run, ROP, and net drilling time as a function of borehole depth

从机械钻速来看,采用粒雪层干孔钻进最大机械钻速可达12 m/h,而采用深冰芯钻的机械钻速均小于8 m/h,其中2014/2015工作季基本稳定在6 m/h,2015/2016工作季大部分集中在4~7 m/h。2016/2017工作季,受到脆冰区的影响,钻进速度明显降低,在2~4 m/h。从回次纯钻进时间也可看

出,深冰芯钻的纯钻进时间多数集中在30~50 min之间,而2016/2017工作季则明显高于其他工作季。深冰芯钻探的回次钻进时间平均为1.5~2 h。

4.2 钻进电流和钻压

钻进过程中钻具内电机工作电流的变化是深冰芯钻探的重要指示指标。正常钻进时,钻进电流为

2~3.4 A,多数在2.5 A以上。在同一回次中,随着钻进深度增加,电流值将缓慢增大,当钻进至最大长度时,电流将超过3.4 A,此时需及时停钻,否则易造成冰屑管内冰屑堆积过于密实,在地表拔出冰屑管将异常困难。在钻进过程中,钻进电流主要受进尺量和钻压影响较大。其中采用大进尺量钻进时,钻进电流明显大于小进尺量钻进电流,图9为采用不同进尺量和不同前角刀头组合钻进时的电流随钻进深度变化曲线,从图中可以看出,采用前角为35°刀头和40°刀头的钻进电流无明显差异,但采用3 mm进尺量的钻进电流明显大于2 mm进尺量的电流,当尝试采用4 mm进尺量钻进时,回次开始的钻进电流值已经达到3.3 A,因此该回次仅钻进0.88 m,随即被迫停止钻进。

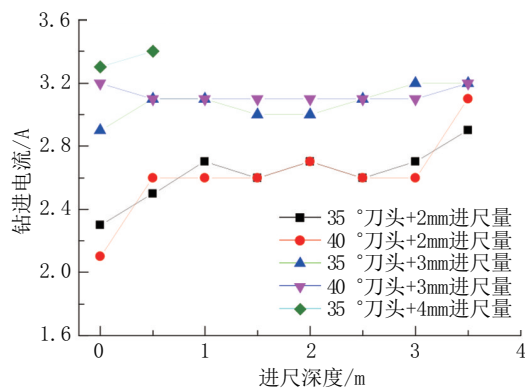


图9 不同刀头和进尺量的钻进电流随进尺深度变化曲线
Fig.9 Curve of drilling current with different cutter heads and footage as a function of drilling depth

钻压是钻进的重要参数,钻进过程中需根据实际情况随时调整,当钻进电流增大,钻头转速降低时,应采用小钻压钻进,反之,则采用较大钻压。在深冰芯钻具中,钻压通过电缆终端处的弹簧变形量进行监测,并以占钻具质量百分比的形式显示。正常钻进情况下,钻压多采用30%~50%,钻头转速为40~50 r/min。当钻压>50%时,钻头扭矩增大,转速将急剧降低,钻进电流增大;钻压<30%时,钻具因无法切入冰层而空转,电流<1.6 A,钻头转速将急剧上升。

5 钻探中遇到的问题

深冰芯钻探中先后出现了反扭系统失效、冰屑管拔出困难、冰芯卡断器磨损和刀头磨损等问题。

5.1 反扭装置失效

深冰芯钻具采用板簧式反扭装置,该反扭装置提供的反扭矩大小可通过改变板簧铰点之间距离来调节。当反扭板簧调节过紧时,钻具下放速度变慢,且在钻孔孔径较小孔段,容易造成钻具下放受阻;同时若出现钻具在大钻压下的钻进电流仍较小时,也应尝试调松反扭装置。但若反扭装置调节过松,反扭装置不足以提供钻进所需的反扭矩,则容易造成上部钻具在孔底打滑而无法钻进,这种情况主要表现为钻进电流较小,同时孔内电缆将出现轻微晃动。因此将反扭装置调节至合适位置对于顺利钻进至关重要,在现场通常采用内径与孔径相同的套管放置在反扭装置处进行调节,并依靠钻工经验通过移动套管的难易程度来判断板簧松紧度是否合适。图10为调节反扭装置。



图10 调节反扭装置

Fig.10 Adjustment of the anti-torque system

5.2 冰屑管拔出困难

2015/2016工作季钻进至第80回次后,当回次进尺>3 m时,地表冰屑管出现拔出困难现象。分析原因为当回次进尺>3 m后,冰屑室内冰屑密实度较大,且经过地表的拉拔作用,冰屑在冰屑室内密实度进一步增大,导致冰屑管拔出困难。为了解决该问题,尝试将冰屑室内最下方1圈螺距为50 mm的短助力螺旋更换为3/4圈短螺旋,但效果不明显。一些回次中,最下方一段短螺旋之间未出现冰屑,而上方两段则有冰屑,分析认为可能是短螺旋对冰屑推动力较大,因此将3个3/4短螺旋更换为2个3/4短螺旋,更换后效果良好,冰屑管拔出容易,但回次进尺明显变短。因此将最下方3/4短螺旋更换为1圈螺距为100 mm的长螺旋,回次进尺基本恢复到原来长度,冰屑管拔出也较为容易。图11为冰屑管内助力螺旋布置图。

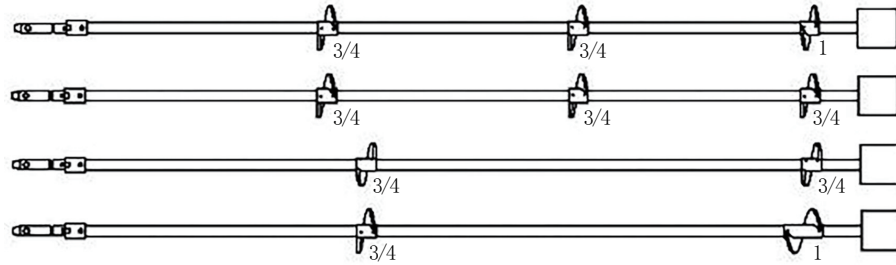


图 11 冰屑管内助力推螺旋布置

Fig.11 Booster arrangement in the chip chamber

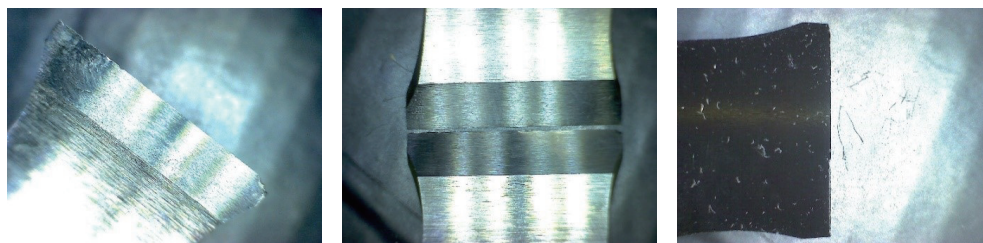
2016/2017工作季大部分回次均出现了冰屑管拔出困难的问题,即使优化助力螺旋的搭配方式也未能解决。出现该问题可能的原因是:由于该工作季中钻具钻进速度慢,刀头在井下切削时间长,因此钻进产生的冰屑颗粒尺寸较细,导致冰屑室内冰屑密实度增加,从而造成冰屑室拔出阻力增大。

5.3 冰芯卡断器磨损

钻进中,偶尔会出现获取的冰芯长度远小于进尺深度,这意味着冰芯并未从根部拔断,此时应及时检查冰芯卡断器是否有磨损,磨损后的卡断器由于刃口变钝而无法切入冰芯。冰芯卡断器在钻进过程中更换频率较小,平均约钻进 200 m 更换一次即可。

5.4 刀头磨损

切削刀头是深冰芯钻具中的主要易损件,当钻进中出现机械钻速变慢、钻进电流减小时,应优先检查刀头的磨损情况。对刀头磨损情况进行显微观察,发现刀头损坏存在 2 种型式,一种为钻进过程中自然磨损,一种为钻具下放过程中刀头的碰撞损坏。刀头的自然磨损多发生在刀头刃角中间,磨损样式包括凹坑形、线形和卷刃。图 12 为刀头的自然磨损产生的不同形状,其中凹坑形磨损最大尺寸达到 1.3 mm,线形磨损最长达 7.8 mm,卷刃磨损最长为 5.6 mm。刀头的碰撞损坏主要发生在刃角边缘。根据近 700 m 的深冰芯钻探经验,刀头的平均使用寿命约为 100 m。



(a) 凹坑形

(b) 线形

(c) 卷刃

图 12 刀头的磨损形式

Fig.12 Different wear forms of the cutter head

6 总结与建议

中国南极昆仑站深冰芯科学钻探工程是我国在南北极冰盖独立进行的第一个深冰芯钻孔,对我国极地冰层钻探技术的发展意义重大。但从总体进度来看,钻探进展较为缓慢,且从 2019 年之后基本处于停滞状态。而反观国际上则呈现出如火如荼的景象,目前欧盟、俄罗斯、澳大利亚、日本已完成最古老冰芯钻探地点选址工作,欧盟和澳大利亚计划在东

南极 Little Dome C 进行深冰芯钻探,并已于 2020 年完成了场地建设^[17-18];俄罗斯拟在距离东方站 50 km 的 Ridge B 进行深冰芯钻探;日本拟在东南极 Dome F 附近重新选择孔位进行深冰芯钻探^[19];美国还在选址准备阶段,预计在 2025 年开始进行最古老冰芯选址初勘工作^[20]。因此我国也应在近期适时重启昆仑站深冰芯钻探任务。为了更好地进行后续钻探施工,提出如下建议:

(1)冰屑打捞作业对回次钻探进尺具有显著影

响,在实际钻探工作中应每周定期进行冰屑打捞作业,防止冰屑在孔内大量堆积。

(2)2016/2017工作季中钻机故障频发,很可能是钻机各部件在极低温度下性能下降所致,因此应对深冰芯钻机进行彻底的维护保养,确保钻机各部件处于良好的工作状态,并清点和补充易损配件。

(3)提前布局规划,确保冲洗液储备充足,防止深孔钻进中因冲洗液不足影响工期,甚至造成孔内缩径卡钻事故。

(4)推动昆仑站科考航空保障的发展,延长昆仑站深冰芯钻探单季工作时长,以加快昆仑站深冰芯钻探进度。

(5)利用虚拟仿真技术或在实验室搭建深冰芯钻探模拟试验台,以对钻探人员进行先期培训,从而提高现场钻探效率和降低操作失误率。

参考文献(References):

- [1] 王宁练,姚檀栋.冰芯对于过去全球变化研究的贡献[J].冰川冻土,2003(3):275-287.
WANG Ninglian, YAO Tandong. Contributions of ice core to the past global change research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003(3):275-287.
- [2] 张楠,王亮,Pavel Talalay,等.极地冰钻关键技术研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):1-16.
ZHANG Nan, WANG Liang, Pavel Talalay, et al. Advances in research on key technology for ice drilling in the polar regions [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):1-16.
- [3] Pavel G. Talalay. Mechanical Ice Drilling Technology[M]. Beijing, Geological Publishing House, 2016.
- [4] Fuji Y, Azuma N, Tanaka Y, et al. Deep ice coring at Dome Fuji Station, Antarctica [J]. ANTARCTIC RECORD-TOKYO-O, 1999,43:162-210.
- [5] Shturmakov A J, Lebar D A, Bentley C R. DISC drill and replicate coring system: A new era in deep ice drilling engineering [J]. Annals of Glaciology, 2014,55(68):189-198.
- [6] Souney J M, Twickler M S, Hargreaves G M, et al. Core handling and processing for the WAIS Divide ice core project [J]. Annals of Glaciology, 2014,55(68):15-26.
- [7] Augustin L., Barbante C., Barnes, PRF., et al. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core [J]. Nature, 2004,429(6992):623-628.
- [8] Barbante C., Barnola J. M., Becagli S., et al. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica [J]. Nature, 2006,444(7116):195-198.
- [9] 秦大河,姚檀栋,丁永建.冰冻圈科学概论[M].北京,科学出版社,2017.
QIN Dahe, YAO Tandong, DING Yongjian. Introduction to Cryosphere Science[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [10] H. Fischer, J. Severinghaus, E. Brook, et al. Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS "Oldest Ice" ice core [J]. Climate of the Past Discussions, 2013, 9(3):2771. DOI: 10.5194/cpd-9-2771-2013.
- [11] Wolff E, Brook E, Dahl-Jensen D, et al. The oldest ice core: A 1.5 million year record of climate and greenhouse gases from Antarctica [R]. International Partnerships in Ice Core Sciences, 2005, 1-4. https://pastglobalchanges.org/sites/default/files/download/docs/working_groups/ipics/white-papers/ipics_oldaa.pdf.
- [12] Xiao C., Li Y., Hou S., et al. Preliminary evidence indicating Dome A (Antarctic) satisfying preconditions for drilling the oldest ice core [J]. Chinese Sci. Bull., 2008,53,102-106.
- [13] Tang X., Sun B., Zhang Z., et al. Structure of the internal isochronous layers at Dome A, East Antarctica [J]. Sci China Earth Sci., 2012, 54:445-450. DOI: 10.1007/s11430-010-4065-1,2011.
- [14] Liyun Zhao, John C. Moore, Bo Sun, et al. Where is the 1-million-year-old ice at Dome A? [J]. The Cryosphere, 2018, 12:1651-1663.
- [15] Zhengyi Hu, Guitao Shi, Pavel Talalay, et al. Deep ice-core drilling to 800m at Dome A in East Antarctica [J]. Annals of Glaciology, 2021:1-12. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.2>.
- [16] Nan ZHANG, Chunlei AN, Xiaopeng Fan, et al. Chinese First Deep Ice-Core Drilling Project DK-1 at Dome A (2011-2013) [J]. Annals of Glaciology, 2014,55(68):88-98.
- [17] BEYOND EPICA OLDEST ICE [EB/OL]. <https://www.beyondepica.eu/en/about/field-diary/field-campaign-202021/december-2020/>.
- [18] Van Liefferinge B, Pattyn F, Cavitte M G P, et al. Promising oldest ice sites in East Antarctica based on thermodynamical modelling [J]. The Cryosphere, 2018,12(8):2773-2787.
- [19] Hideaki Motoyama, Atsushi Furusaki, Morimasa Takata, et al. Drill system for the third deep ice coring project around Dome Fuji, Antarctica [Z]. 8th Ice Drill Symposium, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, 2019.
- [20] IDP Ice Core Working Group. Paleoclimate ice core research priorities in Antarctica [R]. 2020. https://icedrill.org/sites/default/files/Antarctica%20White%20Paper_7-13-2020.pdf.

致谢:中国深冰芯钻探项目得到了中国第27次、28次、31次、32次、33次和35次南极科学考察队的大力支持,尤其是昆仑站全体队员均对物资运输和现场施工给予了力所能及的帮助。感谢南极中山雪冰和空间特殊环境与灾害国家野外科学观测研究站给予的人力和物力支持。感谢日本极地研究中心的H. Motoyama和日本Geo Tecs公司的Y. Tanaka、M. Miyahara和A. Takahashi给予的技术指导和帮助。最后感谢所有参加过南极昆仑站深冰芯科学钻探的科考人员。

(编辑 李艺)