

冰层取心回转钻进模拟实验台的设计与测试

陈云望^{1,2}, 曹品鲁^{1,2}, 龙翔¹, 陈宝义¹, 杨成^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026)

摘要: 极地钻探实践表明, 冰盖底部冰岩交界附近地质情况异常复杂, 不但可能存在暖冰、基底融水, 甚至还可能存在厚度不等的冰岩夹层, 取心钻探异常困难, 而优选钻头类型、确定合理的钻进参数是保证其安全、快速钻进的重要因素。本文设计了一套能够模拟冰层回转钻进的实验台, 其技术参数为: 钻压、转速分别可在 0~10 kN、0~300 r/min 范围内调节, 最大扭矩约 100 N·m。该实验台能够测量钻头切削具温度、钻孔深度及钻进速度等参数, 为深入研究钻头类型及结构参数、钻进参数对扭矩、钻速和切削温度的影响规律提供了手段。采用 PDC 复合片钻头进行了冰钻实验, 结果表明, 实验台能够准确调节钻压和转速, 可满足实验要求。

关键词: 极地钻探; 冰层取心钻进; 冰钻; 冰岩夹层; 切削热; 实验装置

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)05-0031-06

Design and Test on Experimental Table of Stimulated Rotary Drilling for Ice Coring/CHEN Yun-wang^{1,2}, CAO Pin-lu^{1,2}, LONG Xiang¹, CHEN Bao-yi¹, YANG Cheng^{1,2} (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Jilin Changchun 130026, China; 2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Polar drilling practice reveals the complicated geological conditions near the bottom of ice sheet and the ice-rock interface; warm ice, basal melt water and even the debris-rich ice with unequal thickness may exist, these conditions make coring drilling extremely difficult. The optimization of bit types and the determination of reasonable drilling parameters become important factors to ensure safe and rapid drilling. In this paper, an experimental table is introduced, which can stimulate rotary drilling in ice with adjustable bit pressure and rotation speed of 0~10kN and 0~300r/min respectively and the maximum torque about 100N·m. By this experimental table, the temperature of bit, borehole depth, drilling speed and some other parameters can be measured to provide means for further research on the influence of bit type and structure parameters on torque and cutting temperature. Ice drilling experiment was carried out with PDC bit; the results show that the experimental requirements can be met by this table with accurately adjusted drilling pressure and speed.

Key words: polar drilling; ice core drilling; ice drilling; debris-rich ice; cutting heat; experimental device

0 引言

地球南北两极不仅是全球气候变化的驱动器, 而且是全球气候变化的冷源, 在全球气候变化研究中具有不可替代的作用。极地钻探是极地科学考察的重要手段, 通过钻取冰心和冰下地质样品, 获取冰心数据, 对重建全球气候历史演化、阐述气候变化机制, 从而预测全球气候变迁具有重要意义^[1-4]。深冰心和冰下基岩钻探还为研究冰川运动, 探知冰下环境, 研究冰下沉积物的变形特征及其与冰下水力体系、冰下地质和构造之间的耦合作用提供了机会, 并为地热研究提供了空间。深冰心钻探和冰下基岩取心钻探已成为极地科学的重要研究方向之一。

实践表明, 极地冰盖底部地质条件异常复杂, 不但可能存在暖冰区, 而且冰岩交界处可能存在厚度可达数十米的冰碛物和冰岩夹层^[5-10]。冰中包裹的岩石颗粒尺寸较大, 通常具有几厘米的直径, 硬度高、研磨性强, 常规冰钻钻头不再适用。而若采用地质岩心钻探用钻头, 则需要较高的钻压或者高转速, 破碎冰碛物或冰岩夹层的扭矩和能量大幅增加。而且, 由于钻压增加、转速加快, 钻头切削具摩擦产生的热量易导致冰屑融化, 致使其粘附在钻头切削具或钻具局部位置, 影响钻进效率, 甚至会发生糊钻、卡钻等严重钻探事故。如由丹麦主导十余个国家参与的 NEEM 深冰心钻探工程, 采用 Hans Tausen 电

收稿日期: 2016-04-05

基金项目: 国家自然科学基金面上基金“冰层取芯钻探暖冰破碎机理及冰屑运移规律研究”(编号: 41576184)

作者简介: 陈云望, 男, 壮族, 1991年生, 研究生在读, 地质工程专业, 主要从事极地钻探方面的研究, 吉林省长春市西民主大街938号, chenylw15@mails.jlu.edu.cn。

通讯作者: 曹品鲁, 男, 汉族, 1979年生, 副教授, 博士后, 主要从事复杂条件钻探技术研究及教学工作, 吉林省长春市西民主大街938号, jlucpl@jlu.edu.cn。

动机械取心钻具和金刚石取心钻头钻进冰下沉积物,获得的冰心里包裹着岩石颗粒和碎屑,最大岩石颗粒直径达到了2 cm。此后试图继续钻进,由于切削具磨损严重,终止钻进^[11]。在南极 Berkner Island 深冰心钻探工程中,多次尝试采用 PICO 电动机械取心钻具和硬质合金钻头钻取冰下沉积物均未成功,最终仅获得了约0.05 m 的含有碎屑岩样品的冰碛物^[12]。破碎冰-岩夹层或冰碛物究竟需要消耗多少功率,铠装电缆式电动机械钻具反扭系统能否平衡钻头切削产生的高扭矩,怎样降低切削热量等是深冰心钻探工程急需解答的关键问题。

显然,钻压、转速、钻头类型及切削具结构参数、钻井液类型及参数、冰岩地层的物理力学性质等对扭矩、功率消耗和切削热量有着重要的影响,理论计算分析较为复杂,需要诸多简化、假定,且难以兼顾诸多因素,有必要建立模拟实验台进行实验。为此,本文设计了一套回转钻进模拟实验系统,能够准确测量钻压、扭矩、转速、钻头切削具温度、钻井液流量、钻头进尺及钻进速度等参数,可用来优选钻头结构类型,研究钻速、扭矩、功耗、切削热量与钻进参数、钻头结构参数、冰层性质等参数之间的相互关系。

1 冰层取心回转钻进模拟实验台设计

冰层取心回转钻进模拟实验台主要由钻进系统、液压控制系统和参数采集系统构成。钻进系统由台架、给进油缸、回转马达、钻具、岩石箱等部件组成,主要实现给进和回转功能。液压控制系统主要用于驱动给进油缸上下运动以及供液压马达回转。参数采集系统主要由压力传感器、扭矩传感器、位移传感器、温度传感器、流量计、数据采集组件及上位机软件组成,可以实现各参数的实时记录、输出和保存工作。其工作原理如图1所示,液压马达固定在滑板上,带动扭矩传感器、水龙头、滑环、岩心管和钻头回转;液压给进系统控制给进油缸活塞上下往复运动,带动滑板沿台架立柱上下自由运动,实现钻进和提钻;冰样或冰岩样品固定在岩石箱内,通过夹持器夹紧;当需要采用钻井液循环时,可利用泥浆泵将钻井液经水龙头、滑环、钻杆、钻头输送至岩石箱,然后携带岩屑经岩石箱上设置的钻井液出口排出;实验时,各传感器实时测量钻进参数,经采集模块处理后输送至计算机,由上位机软件显示和保存。

1.1 钻进系统设计

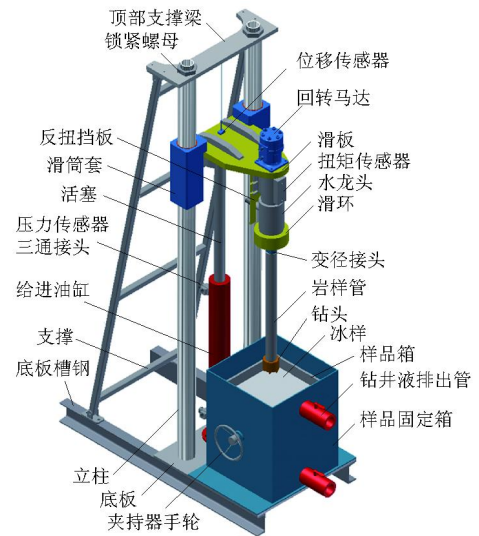


图1 室内钻进模拟实验台结构原理示意图

如前所述,铠装电缆式电动机械取心钻进技术是目前极地冰层钻进的主要手段。该技术采用铠装电缆将电动机械钻具(孔底动力钻具)送到孔底,并供电驱动马达带动钻具回转切削钻进。电动机械钻具上部设有反扭系统支撑到冰层孔壁上,以平衡切削产生的扭矩,避免铠装电缆扭结或断裂。钻进所需的钻压由钻具自重提供,一般为1.5~4 kN,转速通常为50~120 r/min^[13-16]。电动机械钻具反扭系统一般采用叶片式、滑刀式或组合式,其原理是依靠一定的径向力将反扭刀片或叶片压入冰层一定深度来抵抗钻进产生的扭矩,能够承受的扭矩相对较小,另一方面为保证钻具在自重作用下顺利下行,反扭系统提供的反扭矩亦不能太大^[17-18]。

鉴于上述冰钻参数,本实验装置主要技术参数设计范围为:给进行程500 mm,钻压0~10 kN,转速0~300 r/min,扭矩100 N·m,最大给进速度30 mm/s,钻井液排量40 L/min,样品尺寸350 mm×350 mm×500 mm。

1.1.1 液压给进系统设计

如图1所示,给进油缸活塞杆顶端固定在台架滑板上,滑板上安装回转马达和钻具。滑板两端设计有导滑筒,与台架立柱通过铜套配合。在液压控制系统驱动下,油缸活塞杆带动台架滑板沿立柱上下往复运动,实现钻进功能。

根据实验台行程设计要求并考虑钻具长度,选用HSG系列工程油缸,其缸径为63 mm,活塞杆直径35 mm,油缸行程800 mm。若要满足最大给进速

度 30 mm/s,最大钻压 10 kN,则给进系统所需最大工作压力、流量和功率分别为:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_1 - A_2} = \frac{4 \times 10 \times 10^3}{\pi(0.063^2 - 0.035^2)} \approx 4.7 \times 10^6 \text{ Pa} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q &= vA \\ &= v(A_1 - A_2) \\ &= 0.03 \times 60 \times (\pi/4)(0.063^2 - 0.035^2) \times 10^3 \\ &\approx 4 \text{ L/min} \end{aligned} \quad (2)$$

$$N = pQ = \frac{4.7 \times 4}{60} \approx 0.32 \text{ kW} \quad (3)$$

式中: P ——系统压力,Pa; F ——钻压,N; A ——有效作用面积, m^2 ; A_1 ——油缸无杆腔面积, m^2 ; A_2 ——油缸有杆腔面积, m^2 ; Q ——流量,L/min; v ——活塞杆运行速度,mm/s; N ——功率,kW。

根据上述计算,给进系统选用 CBT-E-306 型齿轮泵,电机功率为 1.0 kW。

1.1.2 液压回转系统设计

本实验台采用液压马达驱动钻具回转,根据实验台回转速度和扭矩需求,选用 BM1-80 型液压马达,其主要技术参数为:排量 80.5 mL/r,转速 10 ~ 750 r/min,最大扭矩 152 N·m,最大流量 60 L/m,质量 6.9 kg,最大输出功率 10 kW。

根据实验台要求转速和扭矩要求,可按下式计算系统所需的流量、压力和功率消耗等参数:

$$Q_m = v_m n_m = 80.5 \times 10^{-3} \times 300 = 24.15 \text{ L/min} \quad (4)$$

$$\Delta P_m = \frac{0.002 \pi T_m}{v_m} = \frac{0.002 \times 3.14 \times 100}{80.5 \times 10^{-3}} \approx 7.80 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$N_m = \frac{\Delta P_m Q_m}{60 \eta} = \frac{7.80 \times 24.15}{60 \times 0.90} \approx 3.49 \text{ kW} \quad (6)$$

式中: Q_m ——马达进口理论流量,L/min; v_m ——液压马达排量,L/r; n ——马达转速,r/min; ΔP_m ——系统压差,MPa; T_m ——马达工作扭矩,N·m; η ——马达效率; N_m ——马达消耗功率,kW。

根据上述计算,回转系统选用 CBT-E-325 型齿轮泵,电机功率为 4.0 kW。

如前所述,回转马达固定在实验台架滑板上,由油缸活塞杆直接推动滑板上下往复运动。回转马达输出轴直接与扭矩传感器连接,扭矩传感器与水龙头、滑环、岩心管和钻头螺纹联接。

1.1.3 其它辅助结构设计

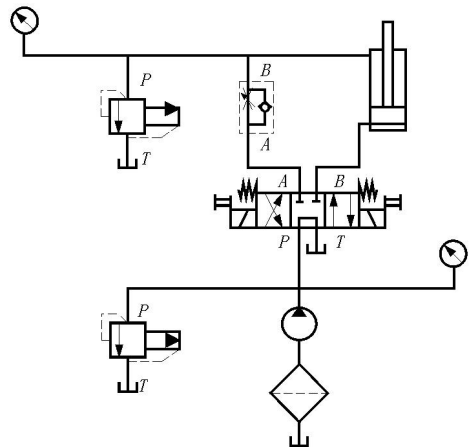
其它辅助结构包括实验台架、岩石箱及水龙头等。实验台架又包括立柱、支架、底板和滑板,其整体尺寸约 1200 mm × 600 mm × 2000 mm。岩石箱主要由箱体、调节丝杠、万向接头和钻井液排出管等组成,主要用于固定冰-岩样品,其尺寸约为 450 mm × 400 mm × 600 mm。

1.2 液压控制系统

液压控制系统由给进控制系统和回转控制系统组成。为充分利用实验室现有设备,两套系统独立设计。

1.2.1 给进控制系统

给进控制系统主要控制油缸的往复运动,根据实验要求该控制系统能够精确调整系统压力(保证钻压调整范围 0 ~ 10 kN),并根据需要调整油缸活塞运行速度。给进控制系统工作原理及其实物如图 2 所示,主要由电机、CBT 型齿轮泵、给进油缸、溢流阀、节流阀和电磁换向阀组成。



(a) 原理图



(b) 实物图

图2 给进系统液压图及实物照片

1.2.2 回转控制系统

回转控制系统主要用于控制液压马达带动钻具回转,由电机、CBT 齿轮泵、BM 型液压马达、溢流阀、调速阀和电磁换向阀组成,如图 3 所示。溢流阀用于调节系统压力,从而调节液压马达的工作扭矩。电磁换向阀和调速阀分别用于控制液压马达正反转和回转转速,转速范围为 $0 \sim 300 \text{ r/min}$ 。

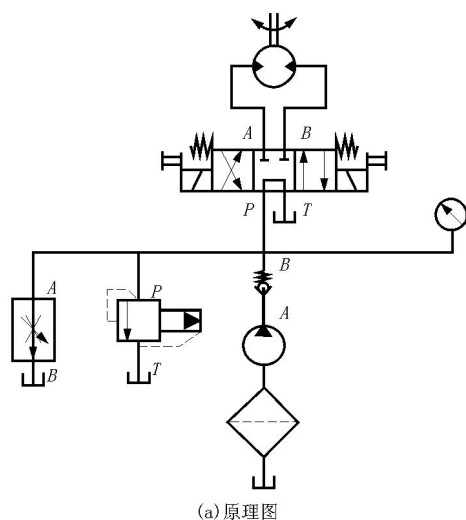


图 3 回转控制系统原理图

1.3 参数采集系统

实验台需要采集的参数包括钻压、转速、扭矩、钻进速度、进尺、钻头切削具温度等。

1.3.1 钻压

将 CYYZ11 型压力传感器分别安装在给进油缸的上下腔,根据活塞杆作用面积计算出上下腔压力差,该压力差即为钻压。该传感器量程为 $0 \sim 20 \text{ MPa}$,测量精度为 $0.1\% \sim 0.25\% \text{ FS}$ 。

1.3.2 扭矩及转速

在液压马达与岩心管之间安装 TH4803A 型扭

矩传感器测量扭矩,其定子通过螺栓固定在台架反扭挡板上,如图 4 所示。

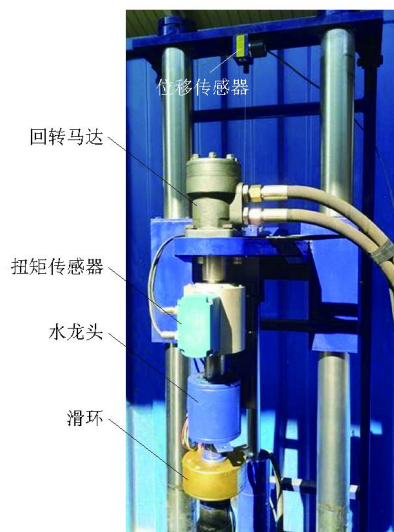


图 4 扭矩、位移等传感器安装图

TH4803A 型扭力传感器主要采用应变片电测技术,将专用的扭矩测速变速器固定在被测弹性轴上,利用变电测技术组成应变电桥,测得扭力信号,放大、转换后形成与扭应变相同的频率信号,然后传输至计算机实时显示。其量程为 $0 \sim 200 \text{ N} \cdot \text{m}$,精度为 $\pm 0.2\% \text{ FS}$ 。

为了同时测得转速,在扭矩传感器内部旋转轴一端安置有测速轮,传感器外壳上安装有光敏元件,采用光电、码盘原理,通过测速电路及相应的处理电路,将转速信号转换成脉冲信号输出。扭矩传感器旋转轴设计有直径约为 20 mm 的中心通道,以循环钻井液。

1.3.3 钻进进尺及平均机械钻速

采用 WXY-30-1000 型拉绳位移传感器测量钻进进尺和平均机械钻速。将位移传感器固定在台架顶板支撑梁上,拉绳末端安装在滑板上。钻进时,拉绳随着滑板上下运行伸展和收缩,产生与拉绳拉伸长度成比例的电信号,经信号输出、转换后可获得钻进进尺。根据进尺及相应时间,可计算得到实时的机械钻速。

WXY-30-1000 型拉绳位移传感器量程为 $0 \sim 1000 \text{ mm}$,测量精度为 $0.13\% \text{ FS}$,其安装方式如图 4 所示。

1.3.4 切削具温度

切削具温度采用 PT1000 型铂电阻温度传感器

测量,其测量范围为 $-50 \sim 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度为 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该传感器芯片尺寸约 $2 \text{ mm} \times 2.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$,其连接导线直径为 2 mm 。

在切削具靠近工作面处设计直径 3 mm 、深度 15 mm 的圆孔,将铂电阻芯片置于其中,然后用导热硅脂充填以保证切削具与温度传感器接触良好^[15]。为方便拆卸采用玻璃胶封闭温度传感器,防止钻井液干扰。温度传感器导线沿钻头、岩心管外表面上设计的沟槽与滑环转子结构联接,测量信号由滑环定子结构用信号线输送到采集系统,信号转换处理后由电脑软件实时动态显示。切削具温度检测原理如图 5 所示。

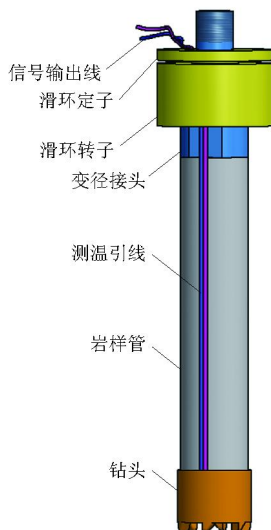


图 5 切削具温度检测原理图

1.3.5 参数采集及软件系统

数据采集系统包括信号采集模块、计算机软件模块。信号采集模块是将各个传感器传来的信号处理成能被计算机识别接收的信号进而传给计算机进行处理。为了实时监控、动态显示、采集和存储所有检测数据,开发了冰层取心回转钻进数据采集系统软件,如图 6 所示。该系统既可以直接显示钻压、扭矩、转速、切削具温度、钻进速度等参数的实际数值,也可以以动态曲线的形式显示,方便操作者直接观察,检测的参数统一存入数据库,必要时可调取、回看和打印。

2 实验台可靠性测试

为测试实验台可靠性,采用 PDC 钻头(内外径 $104/136 \text{ mm}$)进行了冰钻实验。实验转速为 100

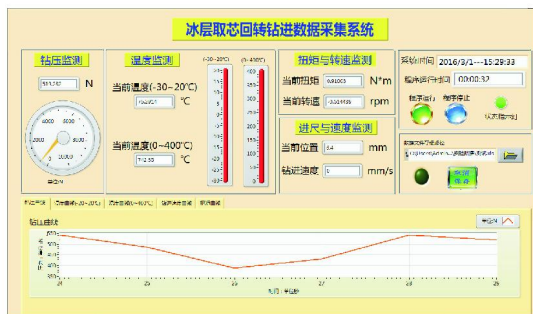


图 6 计算机测试软件操作面板

r/min ,冰样尺寸为 $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,室外自然冻结而成,钻井液采用航空煤油,流量 $40 \text{ L}/\text{min}$,实验照片如图 7 所示。



图 7 实验照片

当钻压从 500 N 增大到 2000 N 时,其平均机械钻速由 $1.8 \text{ mm}/\text{s}$ 增大到 $4 \text{ mm}/\text{s}$,而扭矩由 $23 \text{ N} \cdot \text{m}$ 增大到 $41 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右,钻进过程中,钻速比较平稳,而扭矩波动比较大,如图 8 所示。

实验钻取的冰心样品如图 9 所示。

3 结论

(1)冰岩夹层是一种特殊的地层,常赋存于极地冰岩交界处,取心钻探极其复杂,为确定其钻进参数,研究钻压、转速、钻头类型等参数与钻进速度、回转扭矩、功率消耗及切削热量之间的关系,本文设计了一套回转钻进模拟实验台,钻压调节范围 $0 \sim 10 \text{ kN}$,转速调节范围 $0 \sim 300 \text{ r}/\text{min}$,最大扭矩约 $100 \text{ N} \cdot \text{m}$,能够实时测量钻头切削具温度、钻孔深度及钻进速度等参数。

(2)采用 PDC 钻头对实验台的可靠性进行了初步测试,在转速 $100 \text{ r}/\text{min}$,钻压由 500 N 增大到 2000 N 时,纯冰钻进速度由 $1.8 \text{ mm}/\text{s}$ 增大到 $4 \text{ mm}/\text{s}$,扭矩由 $23 \text{ N} \cdot \text{m}$ 增大到 $41 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右,实验台

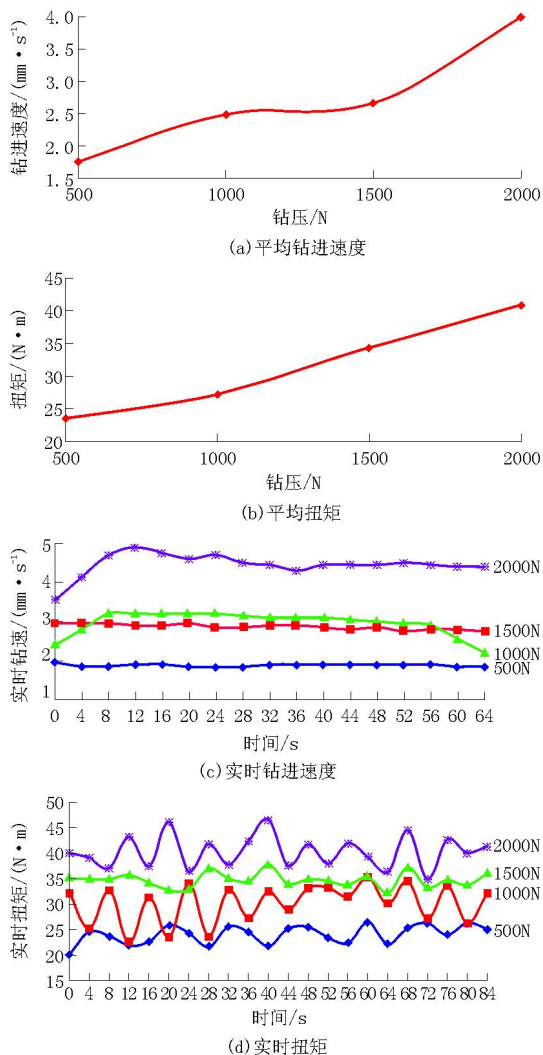


图8 纯冰层钻进实验结果



图9 钻取的冰心样品

能够满足参数检测要求。

(3) 建议今后冻制冰岩样品,并优选钻头类型、优化钻头结构参数,进行冰岩夹层实验。

参考文献:

[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,2003,25(3):275-287.

[2] 唐学远,孙波,李院生,等. 冰穹A冰川学研究进展及深冰芯计划展望[J]. 极地研究,2012,24(1):77-84.

[3] 任贾文,效存德,侯书贵,等. 极地冰芯研究的新焦点:NEEM与Dome A[J]. 科学通报,2009,54(4):399-401.

[4] 韩丽丽. 南极冰钻超低温钻井液技术研究[M]. 吉林长春:吉林大学,2013:1-10.

[5] Pinlu Cao, Baoyi Chen, Chungpeng Liu, et al. Experimental investigation of cutting temperature in ice drilling[J]. Cold Regions Science and Technology,2015,116:78-85.

[6] Pinlu Cao, Cheng Yang, Baoyi Chen, et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice[J]. Cold Regions Science and Technology,2015,120:138-144.

[7] Augustin L., Motoyama H., Wilhelms F., et al. Drilling comparison in "warm ice" and drill design comparison[J]. Annals of Glaciology,2007,47:73-78.

[8] 王士猛,效存德,谢爱红,等. NEEM计划2537.36m透底深冰芯的钻取与成果概述[J]. 冰川冻土,2011,33(3):589-594.

[9] Popp T. J., Hansen S. B., Sheldon S. G., et al. Drilling into debris-rich basal ice at the bottom of the NEEM (Greenland) borehole[J]. Annals of Glaciology,2014,55(68):199-206.

[10] Popp T. J., Hansen S. B., Sheldon S. G., et al. Deep ice-core drilling performance and experience at NEEM, Greenland[J]. Annals of Glaciology,2014,53(68):53-64.

[11] Talalay, P. G.. Review on Subglacial Till and Bedrock Drilling[R]. Technical Report PRC 01-2011,2011:1-50.

[12] Mulvaney R., Alemany O., Possenti P. The Berkner Island (Antarctica) ice-core drilling project[J]. Annals of Glaciology,2007,47:115-123.

[13] 曹品鲁,陈宝义,刘春朋,等. 极地深冰心钻探“暖冰”层钻进技术难点及对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):58-62.

[14] 范晓鹏. 极地冰下基岩取心钻具反扭装置与钻压平衡关系研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2014.

[15] 胡正毅. 空气孔底部局部反循环电动机冰层取心钻具研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2015.

[16] 范晓鹏, Pavel Talalay, 郑治川, 等. 电动机取心钻具反扭装置实验台设计及实验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(12):18-20.

[17] 刘春朋,曹品鲁,白杨,等. 极地冰层回转钻进切削热量测试装置的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(12):13-17.

[18] 刘春朋. 冰层回转钻进切削热分析与实验研究[M]. 吉林长春:吉林大学,2014:30-51.