

冰硬度试验台设计与试验

范晓鹏^{1,2}, Pavel Talalay^{1,2}, 张楠^{1,2}, 刘刚^{1,2}, 张奇¹, 刘旭超³, 冯敏强³

(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; 3. 吉林省探矿机械厂, 吉林 长春 130012)

摘要: 极地冰层硬度特性对铠装电缆电动机械取心钻具反扭装置设计和使用具有重要意义。针对冰层特殊的物理性质, 结合材料硬度测试原理, 设计了一套可在模拟极地冰层低温条件下测量冰硬度特性的硬度试验台。该试验台由低温冷柜、硬度测试台和数据采集及控制系统 3 部分组成, 其中, 数据采集及控制系统隔离在常温环境中, 降低了元器件对环境温度的要求。利用该试验台对硬度压头压入冰层的压力和深度进行数据检测, 换算得到相应的硬度值。对设计的试验台进行初步实验表明, 该试验台工作状态良好, 数据准确, 可满足对低温材料硬度特性的检测。

关键词: 冰硬度; 极地冰层; 检测方法; 冰层钻探

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)09-0067-04

Design of Experimental Stand and Experimental Study for Hardness of Ice/FAN Xiao-peng^{1,2}, Pavel Talalay^{1,2}, ZHANG Nan^{1,2}, LIU Gang^{1,2}, ZHANG Qi¹, LIU Xu-chao³, FENG Min-qiang³ (1. College of Constructional Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 3. Jilin Institute of Geology Technical Equipment, Changchun Jilin 130012, China)

Abstract: Hardness of polar ice has important significance for designing and using of antitorque system of armored cable-suspended electromechanical drill. By analyzing the physical properties of polar ice sheet and hardness testing principle, designed a set of hardness test stand which can measure the hardness of ice in cold conditions. This test stand was formed by low freezer, hardness test rig and data acquisition and control system. The data acquisition and control system was placed in normal temperature environments to reduce the low temperature requirements for electronic components. The test stand can measure the force applied on hardness head and penetration depth by sensors. The preliminary experiments for this test stand showed that the test stand was in good working condition, and can measure the hardness of polar ice in low temperature condition.

Key words: hardness of ice; Polar ice; detection method; ice drilling

0 引言

硬度是钻探碎岩理论的重要考虑因素。根据岩石破碎学理论, 岩石压入硬度决定了钻头在一定钻压下能否有效地吃入岩层从而回转实现岩石的破碎和钻进, 岩石压入硬度更是作为岩石可钻性等级划分、切削具底唇面形状选择的重要依据^[1]。冰作为一种特殊的岩石, 其破碎机理与岩石类似, 研究冰的硬度, 可以为合理选择冰钻钻头切削角、钻压提供指导。其次, 冰硬度是铠装电缆电动机械钻具反扭装置设计中的重要参数。铠装电缆电动机械钻具由于没有钻杆平衡钻进产生的扭矩, 必须在钻具上部设计专门的反扭装置来抵抗钻进扭矩, 同时防止上部

钻具回转^[2]。反扭装置可提供反扭矩的大小与反扭翼片切入冰层的深度有关, 在反扭翼片与孔壁挤压力一定条件下, 冰硬度越大, 反扭翼片切入冰层的深度越小, 可抵抗的反扭矩就越小。在同一极地冰孔中, 冰层温度随孔深有很大变化, 冰硬度也有很大差异。研究冰硬度随冰温度变化规律对反扭装置在不同深度冰孔中使用具有重要指导意义。

冰硬度对极地钻探相关理论研究具有重要作用, 但目前针对冰硬度的研究较少, 国外仅有的相关文献也是在 20 世纪 50 年代^[3], 因此有必要利用现代先进检测手段对冰硬度进行试验研究, 弥补国内在此方面的研究空白, 同时为极地钻探机具钻头和

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 中国极地专项经费“南北极环境综合考察与评估专项”(CHINARE2014-04-02); 国家自然科学基金仪器设备重大专项“极地冰下基岩无钻杆取心钻探装备研究”(3A113AS24424)

作者简介: 范晓鹏(1986-), 男(汉族), 河北张家口人, 吉林大学讲师, 地质工程专业, 博士, 从事极地钻探设备及相关工艺研究工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, heaxe@163.com; 张楠(1981-), 男(汉族), 吉林长春人, 吉林大学讲师, 地质工程专业, 博士, 从事钻探装备及工艺研究工作, znan@jlu.edu.cn。

反扭装置设计提供指导。

1 原理分析

1.1 设计思想与设计原则

由于冰材料性质较软,同时在一定条件下表现为塑性,因此选用布氏硬度作为衡量冰硬度的指标。同时冰作为一种特殊材料,必须在低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中才能存在,冰硬度测量过程需要在低温环境下进行。目前现有的布氏硬度测试设备不能满足冰硬度测试要求,因此需要设计特殊的冰的布氏硬度试验台。该试验台应满足以下要求:

(1)根据南极冰层温度特性,从地表到冰岩界面,冰盖的温度范围为 $-60\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此试验台需要提供最低 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境,并且温度可控,可对不同温度冰样的硬度特性进行测量;

(2)根据硬度测试原理,冰硬度试验台需要对施加在硬度压头上的力以及压头压入冰层的深度进行测量,并可以对压头压入冰层的速度进行无级调速,测量不同压入速度下冰的硬度特性;

(3)对冰硬度试验台的控制实现自动化,并设计参数采集软件,所有检测数据需实时显示和存储在上位机上,试验数据可随时查看和导出;

(4)冰硬度试验台需设计为可拆装式,结构简单,便于维修。

1.2 布氏硬度检测原理

根据国家规范给出的布氏硬度检测方法,布氏硬度值可由以下公式计算^[4]:

$$HB = 0.102 \times 2F / [\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})]$$

式中: HB ——布氏硬度值; F ——施加在压头上的力, N ; D ——压头球直径, mm ; d ——压痕直径, mm 。

公式中 F 和 d 为测量结果,其中压痕直径 d 可根据压头压入冰样的深度和压头球直径 D 进行计算:

$$d = 2 \sqrt{D^2 - (D - h)^2}$$

式中: h ——压头压入冰样的深度, mm 。

根据以上分析,设计的冰硬度试验台需要能够检测布氏硬度压头压入冰层的深度 h 以及相应的压力值 F 。

2 装置设计

根据提出的设计原则和布氏硬度测量原理对冰硬度试验台进行了设计,该试验台主要由低温冷柜、硬度测试台、参数采集及控制系统3部分组成。其

布置简图如图1所示。低温冷柜内温度最低可达 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要为测试样品提供低温环境;硬度测试台为具体执行单元,安装有压力传感器和位移传感器,用来对冰硬度进行测试;参数采集及控制系统主要控制硬度测试台的动作以及相应的参数采集和结果输出。硬度测试台放置在低温冷柜中,控制部分则放置在常温环境下,降低对电子元器件耐温能力的要求,降低成本。硬度测试台的低温压力传感器和低温位移传感器的数据线和电动升降机的电源线通过低温冷柜侧面小孔引至低温冷柜外,并与控制箱连接。

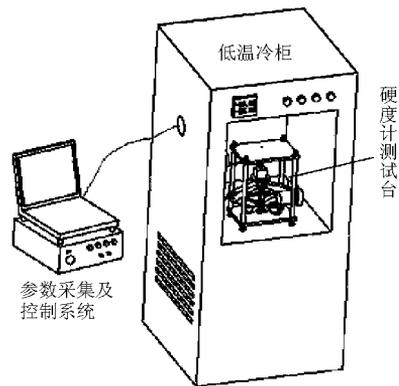


图1 冰硬度测试装置布局图

2.1 低温冷柜

低温冷柜采用北京中科研制的低温冷柜,其最低温度可达到 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。低温冷柜内温度控制采用PID算法控制,可根据需要在可调的温度范围内任意调节,温度控制精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。低温冷柜内部长 \times 宽 \times 高为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 。在冷柜前端门中间位置设计有透明玻璃窗,可对冷柜内硬度试验过程进行观测。

2.2 硬度测试台

硬度测试台为试验台的主体部分,主要用于对冰样硬度进行测试。由于硬度试验台将放置在低温冷柜内进行操作,因此其总体尺寸必须小于低温冷柜内部尺寸,设计的硬度试验台外形尺寸长 400 mm ,宽 250 mm ,高 400 mm ,其结构原理图如图2所示。

硬度测试台是由第一定位螺钉、顶板、转接接头、支撑杆、电动升降机、位移传感器安装板、底脚螺帽、低温压力传感器、紧固螺钉、标准硬度压头、样品托盘、低温位移传感器、第二定位螺钉和底板构成,顶板和底板分别安装在四根支撑杆的上下部,各支撑杆的上下端以螺母固定顶板和底板,各支撑杆的

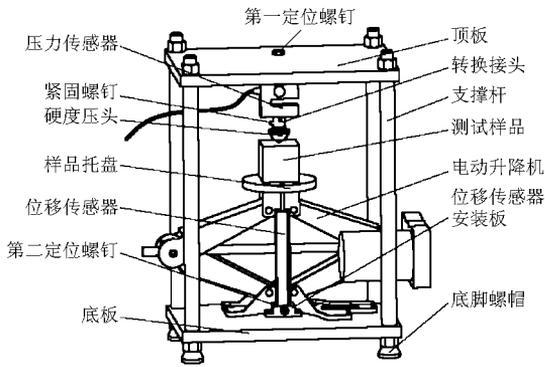


图 2 低温材料硬度测试台



图 3 参数采集与控制系统

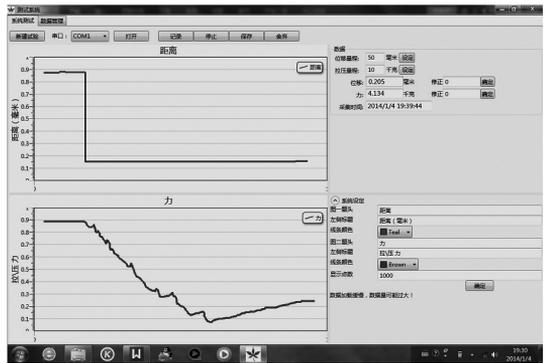


图 4 参数采集软件

底部螺接有底脚螺帽,电动升降机安装在底板上,样品托盘固定在电动升降机顶部,样品托盘可随着电动升降机上下运动,位移传感器安装板固定在底板上,低温位移传感器的底部通过第二定位螺钉固定在位移传感器安装板中,低温位移传感器的上端与样品托盘边缘连接,低温压力传感器通过第一定位螺钉固定在顶板的底部,转接接头固定在低温压力传感器的底部,标准硬度压头插接在转接接头下部并通过紧固螺钉固定。

硬度测试台采用的压力传感器为 S 形拉压低温传感器,该传感器量程为 10 kg (100 N),综合精度 3%,其使用温度范围可达 -60 ~ 70 ℃。位移传感器采用 BWN - 50 低温传感器,根据冰样升降距离确定传感器量程为 50 mm,分辨率为 2%,工作温度范围为 -60 ~ 150 ℃。

2.3 参数采集与控制系统

该试验台参数采集与控制系统主要完成对硬度试验台中样品升降速度的控制,用来测量在压头不同压入速率下冰的硬度特性。为了实时采集、显示和存储所有的检测参数,开发了冰硬度试验台参数检测软件系统,该软件具有直观、友好的人机交互界面,能够对压头压力和压头压入冰层的深度等参数进行动态显示及动态曲线模拟,为试验人员提供实时、清晰的试验参数信息;检测的参数统一存入数据库,并保存于上位机硬盘,可随时调取、回看和打印各参数的历史数据及其历史曲线图。图 3 为设计完成的参数采集与控制系统,图 4 为设计的软件界面。

3 冰硬度试验台试验

2013 ~ 2014 年冬季利用设计好的试验台对冰硬度进行了初步实验。测试开始前先将试验台放入低温冷柜中,封闭低温冷柜工作空间,将低温冷柜调节至试验温度,到达试验温度后再等待 10 min,目的

是将试验台充分冷却至试验温度,降低试验台温度对冰样测试结果产生影响。

考虑到极地冰盖为早期降雪在上覆雪层重力作用下经年累月压实形成,因此具有明显的层理特性^[5],为了较为真实的模拟极地冰层性质,冰样采用分层冻制法冻制,每层厚度选择 2 mm,冻制温度为 -20 ℃,冻制压力为大气压(为了简化试验,未考虑极地冰层压力对硬度的影响),图 5 为冻制完成的冰样。由于冰样冻制和保存温度均在 -20 ℃冰箱中,冰样的初始温度与试验温度不同,因此冰样从冰箱中拿出放入试验台托盘后,必须在低温冷柜内放置 1 h,目的是将冰样的温度冷却或上升至试验温度。1 h 后,冰样冷却至试验温度后,开始对冰样进行试验。

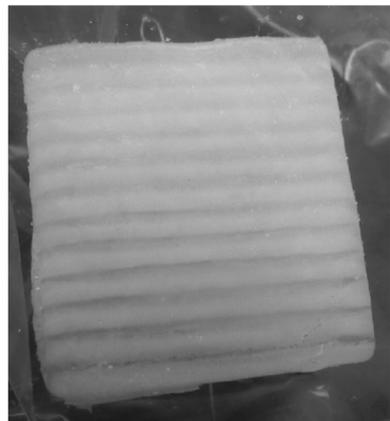


图 5 冻制完成的冰样

试验开始后通过操作台的升降开关控制冰样托盘向上移动,待冰块将要接触压头时,将升降速率调节至缓慢上升,同时观察软件界面压力曲线图,当压力出现数值时,证明压头已接触并开始挤压冰样,此时对软件中显示的位移进行修正,设定测试位移值为零。接通升降台电源,使冰样继续上升,当软件显示压力达到 50 N 时,关闭升降台电源,静置 30 s 后读取软件显示的压力和位移值即为压头挤压冰层的压力和压入深度。

利用以上方法采用 5 mm 布氏硬度压头,在 $-40 \sim -10$ °C 温度条件下对 2 mm 层理冰垂直层理方向硬度进行了测试。相同测试条件下,在冰样表面选取 5 个点进行重复测试,取 5 组测试数据平均值作为该条件下的测试结果,测试数据如表 1 所示。

表 1 2 mm 层理冰样垂直层理方向硬度测试数据

测试温度点 /°C	压入深度 h /mm	压力 F /N	压痕直径 d /mm	HB
-10	0.14	33.5	1.67	1.50
-20	0.14	39.2	1.69	1.71
-30	0.13	42.6	1.64	1.97
-40	0.11	43.0	1.49	2.43

从表 1 中可以看出,2 mm 层理冰样在垂直层理方向的布氏硬度值随着温度的降低而增大;当冰样温度为 -40 °C 时,垂直层理方向布氏硬度为 2.43,比 -10 °C 硬度大 62%。总体来看,布氏硬度值在 1.50~2.43 之间。将此测试结果与国外测试结果对比发现,该测试结果偏小,分析原因认为主要是在

冰样压入深度检测上存在一定误差,下一步考虑在软件编程中设置一旦压头与冰样接触,即压力传感器检测压力开始上升时,位移自动清零,从而实现压头压力和位移的联动检测,提高测量精度。

4 结语

(1)设计的硬度试验平台很好地解决了低温环境下冰硬度检测问题,在更换其他标准硬度压头后可以测试材料不同种类硬度值,如布氏硬度、压入硬度等。

(2)根据试验结果得出不同温度冰层的硬度值,结合冰孔温度分布,可以对反扭装置在不同孔段的使用和调节提供指导,降低反扭装置在孔内失效概率,提高钻进效率。

(3)设计的硬度试验台测量结果偏小,下一步考虑进一步完善检测软件,使压头压力和位移实现联动检测,提高测量精度。

参考文献:

- [1] 李世忠. 钻探工艺学[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [2] 范晓鹏, Pavel Talalay, 郑治川, 等. 电动机械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, 24.
- [3] T. R. Butkovich. Hardness of Single Ice Crystals [J]. THE AMERICAN MINERALOGIST, 1958, 43: 48-57.
- [4] GB 231-84, 金属布氏硬度试验方法[S].
- [5] 崔祥斌, 孙波, 张向培, 等. 极地冰盖冰雷达探测技术的发展综述[J]. 极地研究, 2009, 21(4): 322-325.

(上接第 48 页)



图 18 海洋石油 981 的护卫舰海洋深水工程钻探船 708 号

3000 m,海底以下可钻 7000 m。

6 结语

中国是一个具有 300 万 km^2 的海洋大国,我们要走进海洋,托起中国崛起的梦想,快速地向海洋强国迈进。因此,我们要做好以下几件事:

(1)应尽快研究中国主导的大洋钻探船、钻机和取样技术。

(2)应尽快研究具自主知识产权的天然气水合物深水钻探的保温保压取样工具。

(3)应尽快研究深水多金属硫化物钻探技术。

(4)应尽快研究海洋深水钻探工艺。

参考文献:

- [1] 左汝强,李常茂,赵尔信,等. 国际海洋科学钻探进展[M]. 北京:地质出版社,2005.
- [2] 赵尔信,蔡家品,贾美玲,等. 海洋深水随钻天然气水合物取样钻探设备关键技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(S1): 40-44.
- [3] 段宝生,何繁,蒋卫焱,等. 海底沉积地层保真取样钻具的设计及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(2): 12-14.
- [4] 郭友钊. 走向海洋[M]. 北京:民族出版社,2002.
- [5] 姜泓冰. 打下“金钉子”探获南海“芯”[N]. 人民日报, 2014-4-3(22).
- [6] 陈仁泽. 珠江口钻获高纯度“可燃冰”[N]. 人民日报(海外版), 2013-12-18(01).