

# 电动机械取心钻具反扭装置实验台设计及实验

范晓鹏<sup>1,2</sup>, Pavel Talalay<sup>1,2</sup>, 郑治川<sup>1,2</sup>, 张楠<sup>1,2</sup>, 于成凤<sup>1,2</sup>, 宫达<sup>1,2</sup>

(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:**大扭矩反扭装置是研制铠装电缆冰下基岩电动机械取心钻具的主要部分之一,该装置的失效将导致钻进无法进行,甚至将造成钻具脱落等严重的孔内事故。设计了铠装电缆钻具反扭装置实验台,并就实验装置的设计思想、设计原则、主要结构参数及初步实验结果进行了详细介绍。该实验台可以测试反扭装置在不同温度冰层和不同孔径任意组合下所能提供的反扭矩大小以及产生的下滑阻力。初步实验验证,该实验台工作性能良好,可以为更好的选择反扭装置类型及最优的使用参数提供重要依据。

**关键词:**冰下基岩;反扭装置;力学模型;取心钻具

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)12-0018-03

**Design of Experimental Stand of Anti-torque Device for Electromechanical Coring Tool and the Test/FAN Xiaopeng<sup>1,2</sup>, Pavel Talalay<sup>1,2</sup>, ZHENG Zhi-chuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Nan<sup>1,2</sup>, YU Cheng-feng<sup>1,2</sup>, GONG Da<sup>1,2</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** Anti-torque device with high torque is one of the main parts of the electromechanical coring tools of armored cable type for sub-glacial bedrock drilling, the failure of this device will cause the drilling process ceasing, even will lead to the drill falling off and other drilling accidents. The experimental stand of anti-torque device for armored cable assembly is designed; the paper introduces in detail the design concept, design principle, main structure parameters and the preliminary experimental results. This experimental stand can test the anti-torque of the anti-torque device in any combination with ice of different temperature and borehole of different diameter, and can show the sliding down resistance. The preliminary experiments verify that the experimental stand works well, and it can provide an important basis for the better selection of anti-torque device type and optimal operation parameters.

**Key words:** sub-glacial bedrock; anti-torque device; mechanical model; coring tool

## 0 引言

冰心以其分辨率高、记录时间长、信息量大和保真度高等特点而成为过去全球变化研究的重要方法之一<sup>[1]</sup>。而铠装电缆电动机械钻具由于其质量轻、效率高、能耗小等诸多优点成为获取极地冰心和冰下基岩样品最重要的手段<sup>[2-4]</sup>。但是,由于铠装电缆钻具没有钻杆来平衡钻进产生的扭矩,所以必须在钻具上方设计专门的反扭装置,该装置必须产生足够的反扭矩来防止上部钻具的回转,保证钻具正常钻进。一旦反扭装置失效,将造成孔壁破坏、铠装电缆拧结等孔内事故,严重的甚至将导致钻具脱落。同时反扭装置在使用中需要随时根据孔内情况进行调节,如果反扭装置提供的反扭矩太大势必产生很大的下滑阻力,从而对钻压的施加产生影响。因此为了设计工作可靠的反扭装置并对其使用性能做出

评价,有必要设计反扭装置实验台,对设计的反扭装置进行理论化、数据化研究,并根据实验结果为该类型反扭装置的使用提供参考标准。

## 1 设计思想及原则

在实际的冰层及冰下基岩钻探中,影响反扭装置性能的因素有很多,包括孔斜程度、冰层温度、冰层的密实度、钻井液类型等,为了简化设计且考虑到冰层钻进中孔斜一般不是很大<sup>[5-7]</sup>,因此只设计垂直冰孔的实验。设计的反扭装置实验台要求能够在不同温度冰层、不同孔径条件下对同一反扭装置进行最大瞬时反扭矩、连续反扭矩以及下滑阻力测试,并能实现同一条件下对不同反扭装置的比较。因此该实验台应满足以下要求:

(1) 冻制冰块能够很好地模拟极地冰层性质,

收稿日期:2013-10-24; 修回日期:2013-12-03

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目“地质勘查钻探技术综合研究与应用示范”之“极地冰下基岩取心钻具反扭系统研究”(1212011220280)

作者简介:范晓鹏(1986-),男(汉族),河北张家口人,吉林大学博士研究生在读,地质工程专业,从事极地钻探设备及相关工艺研究,吉林省长春市西民主大街938号,heaxe@163.com。

并能根据需要改变冰层的温度以及冰孔的直径以满足在不同温度冰层、不同孔径条件下测试反扭装置的性能;

(2)可以测试反扭装置所能提供的最大瞬时反扭矩、连续反扭矩以及所产生的最大下滑阻力,并能实现反扭矩和下滑阻力的联动测试;

(3)实验台检测的参数能够实现自动采集,并实时地显示和存储在上位机中;

(4)反扭装置实验台结构要简单,能够适应多种类型反扭装置的测试。

## 2 工作原理

反扭装置实验台主要由扭矩检测系统、回转部件、滑动部件、模拟冰筒、下滑阻力检测系统等部分组成,其结构原理参见图 1。模拟冰筒用来冻制冰块模拟极地冰层;回转部件则实现带动反扭装置在冰层中转动,通过扭矩传感器检测其所能提供反扭矩的大小,为了检测瞬时最大反扭矩和连续扭矩,回转部件采用手动控制;滑动部件则使反扭装置可以在冰孔内下滑,并且可以实现扭矩和下滑阻力的同步检测。

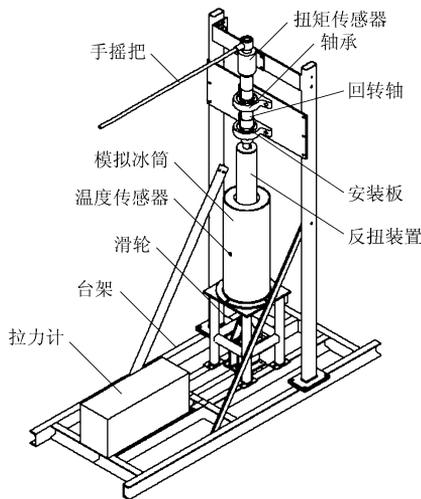


图 1 反扭装置实验台结构原理图

实验时,将反扭装置放入钻好的冰孔内,反扭装置通过键轴与上部回转轴相连,手动转动最顶部的摇杆,可以带动反扭装置一同转动,反扭装置与冰孔孔壁之间产生的扭矩数据将通过扭矩传感器测量并实时的输出和记录在上位机上;当测量下滑力时,则通过控制下方的电动卧式测试机台,使反扭装置在冰孔内缓慢移动,移动速度可实现无级调节,移动反扭装置所需的拉力通过拉力计测量并可以实时的输出和记录在上位机上。

## 3 装置设计

反扭装置实验台各部分结构及技术参数如下。

### 3.1 模拟冰筒

模拟冰筒的设计是反扭装置实验台至关重要的组成部分,冻制的冰块质量如何直接决定了反扭实验数据的准确与否。为此我们设计了组合式模拟冰筒,该冰筒由底盖、密封圈、外管、内管、上端压盖 5 部分组成(见图 2)。冻冰时,将底板和密封圈连接在外管的底部防止水外漏,底盖上部加工有内台阶,该内台阶和上端压盖共同对内管起到扶正作用,保证在冻冰过程中内管始终处于垂直状态,这样将有利于下一步的冰孔成孔。借鉴国际上反扭装置设计的成功经验,其长度大多在 700 mm 以内<sup>[7]</sup>,因此设计该组合式冰筒可冻制高度为 700 mm、直径为 250 mm 的冰块,为了测试反扭装置在不同孔径冰层中的性能,加工了几种不同规格的内管,以获得不同中心孔径的冰孔。冻冰过程需要在特定的冷冻集装箱中进行,通过设定冷冻集装箱的温度来为冻冰提供恒定的低温环境,为了实时的监测冻制冰块的温度,在组合冰筒侧壁安装有 TS401 温度传感器,该传感器测温范围为  $-50 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

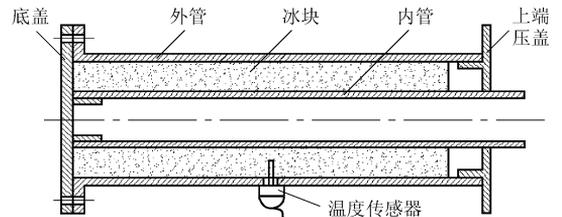


图 2 组合式模拟冰筒设计图

### 3.2 回转部件和滑动部件

回转部件由手动摇杆、回转轴、扭矩传感器等组成,扭矩传感器外壳固定在台架上,中轴上部与手动摇杆相连,下部与回转轴相连,三者可保持同步转动;回转轴由 2 组轴承支撑,保证回转轴在转动时与冰孔具有较高的同轴度,减少摩擦对实验的影响;轴承通过螺钉固定在实验台架上,实验台架的螺栓孔加工为椭圆形,可以对轴承的位置进行微调,从而尽可能保证回转轴与反扭装置处在同一直线上。回转轴与反扭装置之间依靠一根键轴连接,键轴在传递扭矩的同时可以在回转轴内部上下滑动,键轴下部则通过插拔销钉与反扭装置实现快速连接。模拟冰筒支架上面加工有环形槽,所以可以较大范围调整模拟冰筒的位置,配合上部轴承的微调可以大大提高模拟冰筒与回转轴的同轴度,保证实验的可行性和数据准确性。

### 3.3 实验参数检测和采集系统

#### 3.3.1 扭矩检测系统

实验台采用 LKN-205 型扭矩传感器测量扭矩(见图3),扭矩传感器安装在回转轴和手动摇杆之间。LKN-205 型扭矩传感器量程为  $500\text{ N}\cdot\text{m}$ ,测量精度为  $\pm 0.2\%$ ,其原理主要为采用应变片电测技术,将专用的测扭应变片固定在被测弹性轴上组成应变电桥,然后利用特殊设计的环形旋转变压器将测得的信号输出至配套的 XSM-N 型扭矩仪,再经仪表通讯口传输给计算机,实时显示扭矩。



图3 LKN-205 型扭矩传感器

#### 3.3.2 下滑阻力检测

下滑力检测采用 HP-500 型拉力计实现,该拉力计将安装在 AEH 电动卧式测试机台上。AEH 电动卧式机台是专为 HP 系列推拉力计配套用的推拉力负荷实验台,为反扭装置在孔内的下滑提供动力,并可实现无级调速,从而测试反扭装置在不同下滑速度条件下下滑阻力的情况。HP-500 型拉力传感器相关参数为:最大负荷  $500\text{ N}$ ,负荷分度值  $0.1\text{ N}$ ,示值误差  $\pm 0.5\%$ ,工作温度  $5\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ ,通信接口是 RS-232/USB;AEH 电动卧式机台主要参数为:最大负荷  $1000\text{ N}$ ,有效行程  $280\text{ mm}$ ,测试速度  $0\sim 500\text{ mm/min}$ ,工作电压  $\text{AC}220\text{ V}$ ,净重  $35\text{ kg}$ 。图4为测试台和拉力计的组合图。



图4 测试台与拉力计组合图

#### 3.3.3 参数采集及记录

为了实时采集、显示和存储所有的检测参数,开

发了反扭实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,能够对反扭矩、下滑阻力、冰层温度、环境温度等参数进行动态显示及动态曲线模拟,为实验人员提供实时、清晰的实验参数信息;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。

### 4 实验台使用结果

为了验证实验台的实验效果,于 2012~2013 年冬季利用该实验台对滑刀式反扭装置进行了测试。

(1)冻制带有预制孔的冰块,预制孔的直径小于实验所需要的  $\text{Ø}134\text{ mm}$  孔径;(2)对预制孔进行扩孔,得到直径  $134\text{ mm}$  的冰孔;(3)根据实验计划调节反扭装置滑刀外径;(4)将反扭装置放置在冰孔内,并将冰筒和反扭装置安装在实验台架上;(5)旋转手动摇杆,测量反扭装置所能提供的瞬时最大反扭矩和连续反扭矩;(6)连接反扭装置和拉力计,并开动电动卧式测试机台测试使反扭装置移动的拉力值,该力即是反扭装置对钻具钻进造成的阻力。图5为利用该实验台对反扭装置进行实验现场。



图5 对滑刀式反扭装置进行实验

通过对滑刀式反扭装置的实验,测出该类型反扭装置最大瞬时反扭矩可达  $232\text{ N}\cdot\text{m}$ ,连续扭矩为  $109\text{ N}\cdot\text{m}$ ,最大下滑阻力为  $440\text{ N}$ 。实验过程中该反扭装置实验台工作良好,基本能满足设计要求,但也发现了存在的问题。该反扭装置实验台在设计上虽然尽可能的考虑了反扭装置与回转轴同轴度对实验的影响,但是还是无法避免,造成测试结果的不准确;同时在对冰孔进行扩孔操作时由于采用人工扩孔,容易破坏孔壁的光洁度。

(下转第 24 页)

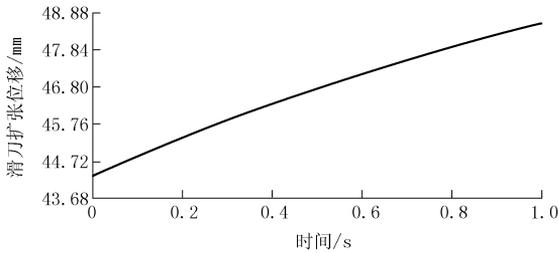


图8 滑刀扩张位移随时间的变化曲线

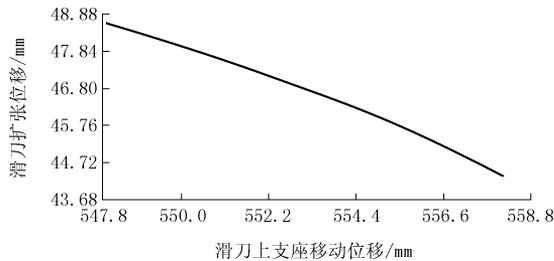


图9 滑刀扩张位移与滑刀上支座移动的位移

扩张位移与滑刀上支座移动位移成非线性关系。表明调整螺母在驱动力的作用下,挤压弹簧向右前行,从而滑刀向外扩张,当扩张到一定程度,由于孔壁的阻挡,滑刀不能继续向外扩张,此时弹簧起到缓冲作用,达到自适应状态,既能保证反扭装置不随钻具回转,同时又能保证反扭装置在冰孔内自动下滑。

通过以上分析可以得知,该反扭装置在设计上更具有科学性、合理性和可实用性,为在南极钻取冰下基岩打下了坚实基础。

(上接第20页)

## 5 结论与建议

(1)设计的反扭装置实验台结构简单,可准确测试反扭装置所能提供的最大瞬时反扭矩、连续反扭矩和下滑阻力,实现多参数测试和采集,并且可以实现对不同类型反扭装置的测试。

(2)设计的组合式模拟冰筒可以根据需要冻制不同温度的冰层和不同孔径的冰孔,冻冰成功率高,结构简单,便于操作。

(3)反扭装置和回转轴的连接部分需要进一步改进,从而保证两者的同轴度,提高实验结果的准确性。

(4)由于深冰心钻探孔内需要灌注钻井液,因此下一步将考虑改进实验台进而研究反扭装置在充满钻井液的冰孔中的性能。

## 3 结论

(1)通过 RecurDyn 软件对反扭装置的运动分析,能够明确的了解到反扭装置实际运动的情况,即通过对反扭装置上的调整螺母施加一个力,可以模拟出滑刀向外扩张的轨迹。

(2)通过反扭装置的仿真结果,如图7~9所示,得出反扭装置各个部件之间的线性、非线性关系,并且反扭装置上支座以及滑刀实现了预定位置的变化要求,能够满足在极地钻探技术领域中,在钻具钻进过程中,反扭装置起到平衡钻进时产生的扭矩的重要作用。

## 参考文献:

- [1] 曹品鲁,刘春鹏,P. G. Talalay,等. 极地冰下基岩取心钻探技术浅析[EB/OL]. 中国科技论文在线,2012-10-12.
- [2] 李芳,廖华丽. 平面六杆机构运动的计算机仿真[J]. 郑州煤炭管理干部学院学报,2000,15(2):89-90.
- [3] 焦晓娟,张潜渭,彭斌彬. RecurDyn 多体系统优化仿真技术[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [4] 王咏雪. 机构运动仿真及运动分析[J]. 机械设计与研究,2002(S):103-104,136.
- [5] 侯敬巍. 基于 RecurDyn 的4自由度液压机器人的动力学建模研究[J]. 起重运输机械,2001,(3):50-53.
- [6] 葛晓忠,詹蔡华,钟克. 基于 ug 的平面连杆机构的运动分析与应用[J]. 东华大学学报(自然科学版),2008,34(3):332-334.

## 参考文献:

- [1] 王宁练,姚檀栋. 冰心对于过去全球变化研究的贡献[J]. 冰川冻土,2003,25(3):275-287.
- [2] P. G. Talalay. Russian Researchers Reach Subglacial Lake Vostok in Antarctica[J]. Advances in Polar Science,2012,23(3):176-180.
- [3] 胡正毅,达拉拉伊·帕维尔,曹品鲁,等. 气体局部反循环电动机冰钻技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(S3):374-378.
- [4] 杨成,曹品鲁,Pavel Talalay,等. 极地冰下基岩取心钻探仿生金刚石钻头实验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):283-286.
- [5] L. Augustin, S. PANICHI, F. FRASCATI. EPICA Dome C 2 Drilling Operations: Performance, Difficulties, Results[J]. Annals of Glaciology,2007,47:68-72.
- [6] Sigfus j. Johnsen, Steffen Bo Hansen, et al. The Hans Tausen Drill: Design, Performance, Further Developments and Some Lessons Learned[J]. Annals of Glaciology,2007,47:89-98.
- [7] Yoshiyuki Fuji, Nobuhiko Azuma, et al. Deep Ice Core Drilling to 2503m Depth at Dome Fuji, Antarctica[A]. Proceedings of the Fifth International Workshop on Ice Drilling Technology[C]. Nagaoka,2002:103-116.