

# 超声波/声波钻头/取心器装置

韩博<sup>1,2</sup>, 蒋国盛<sup>1,3</sup>, 陆洪智<sup>1,3</sup>, 范勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)研究生院, 湖北武汉 430074; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:**目前,对宇宙中生命迹象的探索是世界各国所关注的最重要的目标之一。美国宇航局研制了由超声波或者声波驱动器驱动的一系列超声波/声波钻头/取心器(USDC),用来进行空间探测并提取岩石、冰与土壤样品,以及进行原位分析。此设备在声波频率下,超声波压电驱动器驱动中间的自由质量块进而冲击钻头来进行采样。目前所制造的超声波钻头/取心器(USDC)装置能够取出岩心和岩屑,在未来的行星探测中,有着非常重要的优点。主要介绍 USDC 的优点、各装置的结构及其性能特点,以供我国月球探测工程及未来深空探测参考借鉴。

**关键词:**超声波/声波;钻头;取心器;压电驱动器;自由块;行星探测

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)11-0076-04

**Ultrasonic/Sonic Driller and Coring Device/HAN Bo<sup>1,2</sup>, JIANG Guo-sheng<sup>1,3</sup>, LU Hong-zhi<sup>1,3</sup>, FAN Yong<sup>1,2</sup>** (1. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China; 2. Graduate Faculty, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China)

**Abstract:** At present, the search for existing or past life in the universe is one of the most important objectives of international society. Instruments USDC that are driven by an ultrasonic/sonic actuator are developed for rock, ice and soil probing and sampling to conduct in-situ astrobiology analysis. Through the use of an intermediate free-mass, this mechanism is driven by an ultrasonic piezoelectric actuator that impacts a bit at sonic frequencies. Ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) can deliver both core and rock cuttings. This paper mainly introduces USDC about the advantages, the mechanism and the property; and discusses the lunar exploration project and future deep space exploration.

**Key words:** ultrasonic/sonic; drilling bit; coring sampler; piezoelectric actuator; free-mass; planetary exploration

## 1 概述

近年来,美国宇航局(NASA)的探测任务逐渐涉及到太阳系内各个行星的原位取样和分析。因此,科学家们一直在研发可以进行取样和原位天文生物分析的有效工具。而目前的钻探技术受到高轴力和保持扭矩的需求、不能有效循环工作的大功率消耗的限制,并且这些技术需要沉重的设备。为了解决这些问题,JPL高级技术组和来自Cybersonics公司的工程师们联合研发了超声波/声波钻头/取心器(USDC)<sup>[1,2]</sup>,如图1所示。

USDC装置需要的轴向力很低,因此它克服了在低重力环境中使用传统钻头进行行星取样的主要限制——高轴向力。这种能力可以表现为下面的优势:使用相对较小的力和相对较轻的金属工具,就能在硬岩、冰和密实土壤中进行艰难的钻进和取心任务。

USDC具有以下功能:(1)钻探冰和各种岩石,

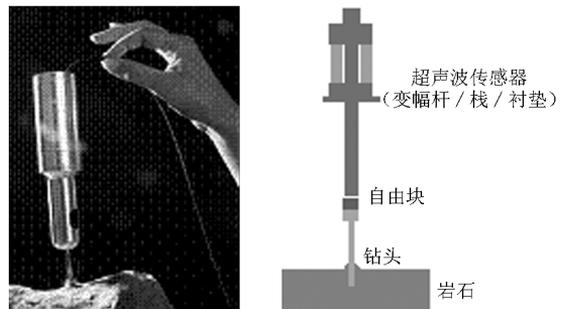


图1 USDC在最小轴向力下的取心摄影图(左)和它的横截面示意图(右)

包括花岗岩、闪长岩、玄武岩和石灰岩;(2)钻头不需要削尖;(3)在低温和高温下可以运行;(4)在平均功率较低的情况下循环工作。

目前,正在进行研究的性能包括:探测地面以选择取样点,采集各种形式的样品(包括岩心和钻屑),在低功率下采集硬玄武岩的长岩心,为测量各种性能研究传感器。对USDC基本构造进行的一系

收稿日期:2010-05-25

作者简介:韩博(1984-),男(汉族),陕西西安人,中国地质大学(武汉)在读研究生,地质工程专业,从事天然气勘探、钻机开发研究,湖北省武汉市鲁磨路中国地质大学(武汉)研究生院08-10信箱,hanbo1984@126.com。

列的改进,导致了超声波/声波岩石磨损工具(URAT)、深冰钻探的超声波/声波取心器等等工具的发展。

我们研究这样的取心器,以供我国月球探测工程及未来深空探测参考借鉴。

### 2 USDC 的组成

该装置主要由超声波驱动器、自由质量和钻头 3 部分组成(见图 1)<sup>[2]</sup>。其中,超声波驱动器是一个兰杰文振子,包括头部(前端)、尾部、压电片和电极片等零部件,通过一根螺栓紧固而成;自由质量作为能量积蓄/转换部件;压电陶瓷片为 PZT-8 的纵振片。该装置在电极片上施加超声波频率的高频交流激励电压,利用压电材料的逆压电效应,驱使超声波驱动器产生超声频率的共振(主要指纵振),并通过其头部(前端)将振幅放大;自由质量块依靠驱动器的激励和振动耦合作用,在头部和钻杆之间产生声波频率的往复碰撞;自由质量块的碰撞与冲击,传递到钻头与岩石接触界面,致使被钻介质破碎,达到钻取样品的目的<sup>[3]</sup>。

### 3 各种构造的 USDC

#### 3.1 超声波/声波取样器

使用 USDC 装置,要研发一个取样器,它与 6.4 cm 的钻头一样大,直径比驱动器大。设备示意图如图 2 所示,当在钻头内部形成岩心时,从钻孔中移走岩心,不断反复进行这个过程,直到钻探到理想的深度(见图 2)。

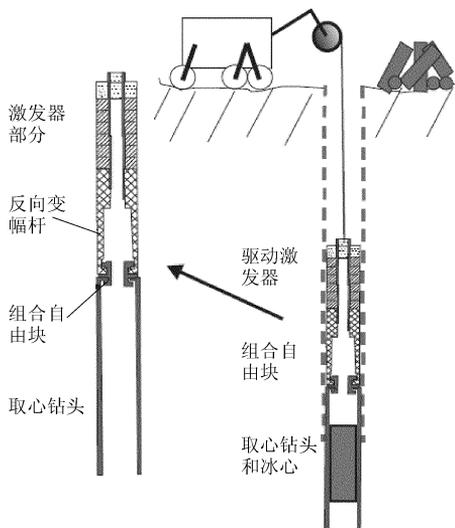


图 2 钻孔内超声波取样器的示意图

#### 3.2 密实土层穿透器

最近,有人提出通过低轴向荷载,使用直径在

1/8 ~ 3/16 in (Ø3.18 ~ 4.76 mm) 的探针,穿透大约 1 m 厚的密实土。但是使用推杆需要几百磅的力,这很容易使探针弯曲。目前研发了一种新型的超声波冲击穿透器(USIP),并且已经证实它能极大地减小所需的推力。在证实 USIP 性能过程中<sup>[4]</sup>,显示穿透大约 1 m 厚的高密实土所需的推动力,从 200 lbf(890 N) 被减小到 7 lbf(31.15 N)。所研发的 USIP 如图 3 所示。进行的工作包括模态和冲击分析,模态分析确定在所需的共振频率范围内变幅杆和衬垫的直径。此分析结果也被用来调整超声波变幅杆的直径,使中性面与安装面吻合,避免在驱动器支撑结构上传感器振动的影响。而确定自由质量块和变幅杆之间相互作用的冲击分析,被用于获取自由质量块的最佳质量。

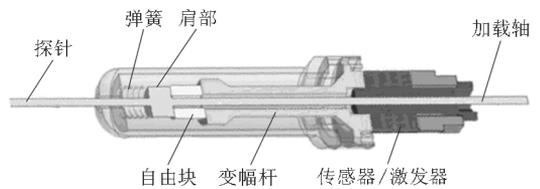


图 3 USIP 示意图

#### 3.3 超声波/声锚

为了锚固腿式和轮式漫游车、充气式结构和着陆器,USDC 可以在低轴向荷载下运行。在外星球低重力环境下和地形崎岖的陡峭高山上,为钻探平台必须提供这种轻质量和相对低功率的设备。用改进的、钻探法线与表面成一定角度的 USDC 装置进行设计并制造 U/S 锚<sup>[5,6]</sup>。相反,进行 USDC 的锤击活动可以使它从被锚固在的介质上取出来,避免了可能的人为干扰。

### 4 USDC 的各种新型变幅杆

变幅杆是 USDC 驱动器的重要组成部分,放大产生的振幅。一般来说,变幅杆被做成阶梯状。

#### 4.1 “狗骨”状变幅杆

为了提高钻探的性能,设计了“狗骨”状变幅杆。分析并验证各种变幅杆设计,与常规的实变幅杆相比较,结果表明,“狗骨”状设计具有更优越的性能。为了演示“狗骨”式变幅杆的性能,采用有限元模型来确定控制参数,并且显示了顶端位移和速度的励磁。图 4 给出了“狗骨”状变幅杆的 U/S 取样器的示意图(图的底部)<sup>[7,8]</sup>。

#### 4.2 折叠式变幅杆

当在 USDC 驱动器中有体积限制和变幅杆尺寸减小对作为取样器的单元一体化至关重要时,要考

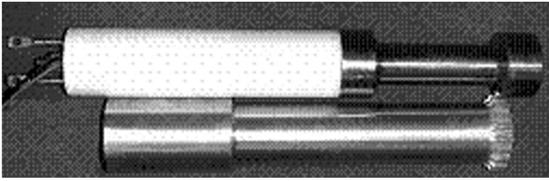


图4 新型“狗骨”式变幅杆 USG 示意图

考虑 USDC 驱动器中变幅杆的长度。研发的紧压状变幅杆<sup>[11]</sup>如图 5 所示,它是能放大高功率驱动装置的振动的空心构造。该折叠式变幅杆可以设置为轴对称平面形状,以供制造选择。在褶皱下使用反射器要考虑到反射应变波的相位控制和增大驱动振幅的构造弯曲振动的引入。

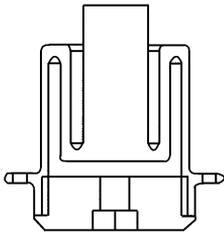


图5 折叠式变幅杆横截面的示意图

## 5 USDC 的各种钻头

### 5.1 超声波/声波岩石磨损工具

在钻探过程中,要进行岩石表面磨蚀,以移除岩石表面的风化层并且露出岩石的原状部位。常规的旋转器需要较高的轴向力并且它们与污染源有关,比如来自它们马达变速箱的润滑剂和地面挫屑。使用 USDC 具有非常重要的优点,即它需要的轴向力很低、平均功率很小、零部件很少而且能够移除钻屑。为了满足磨蚀工具的需要,研发了超声波岩石磨损工具(URAT)。因此,磨损钻头设计为类似肉类嫩化机的锤击面。钻齿加工在磨损钻头部分的圆盘底部。这些钻齿增大了钻探压力并且提高了 URAT<sup>[13]</sup>的性能。URAT 的组成结构横截面示意图如图 6 所示。磨损工具由一个直径为 1.6 in (Ø40.6 mm) 的圆盘组成,其附着在连接变幅杆的长杆上。

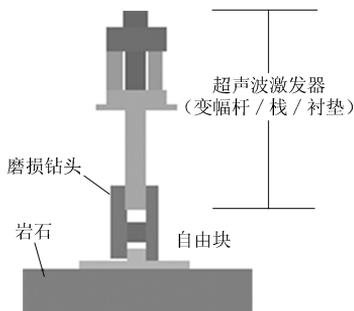


图6 超声波岩石磨损工具(URAT)示意图

自由质量块放置在变幅杆与钻头内部孔底之间的长杆里面。圆盘底部钻齿被加工成凸出圆盘的针状。

### 5.2 活钻头

USDC 最有前景的优势之一是它具有简单的界面和钻头本身形状简单。因为利用 USDC 完成大量可行的预想任务是不切实际的,所以有必要使用多个钻头<sup>[11,12]</sup>。这些任务可由利用多钻头进行钻进、取心、表面处理 and 取样的单驱动器来完成,驱动器中的钻头可以根据实际需要进行更换。但是,钻头不需要削尖,如果钻头的哪个部分由于某种原因受损,可以仅仅进行更换钻头。

### 5.3 全能钻头

使用多个钻头需要一个操纵系统控制,根据需要来更换钻头。但是,如果操纵系统不可用时,最理想的做法是尽可能使用一个钻头来完成多种功能。因此,研发了全能钻头。如图 7 所示,钻头由其内表面顶端的一个楔形管、尖端附近的一系列弹簧和插到钻头中心孔的推杆组成。一旦岩心占满整个钻头,楔形管就会在岩心顶部产生横向力,从而会产生接近剪切破坏的最大应力。侧面的弹簧保证使产生的岩心从钻孔移走,有必要时可用钻头顶部的推杆提取岩心。

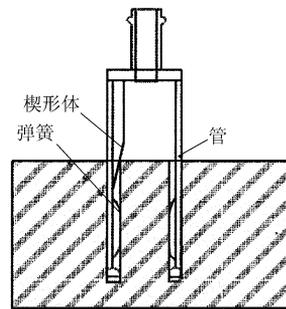


图7 取心提取钻头示意图

### 5.4 粉屑取样器

先前研发的钻屑取样器已经具有 USDC 所具有的重要优点,即需要的轴向力低、平均功率低、少量零部件以及能够直接从岩石中产生粉状样品<sup>[10]</sup>。但是,以前的设计要利用插入到设备的粉碎部分的岩石碎片<sup>[14]</sup>或者利用压缩气来传输样品岩石的粉屑<sup>[16]</sup>。而在改进的设计中,利用了设陷孔,捕获向上移动的并进入钻头中空部分的粉屑,并且保存起来直到需要被移除为止。

对平面折叠式变幅杆构造,利用模态分析,研发出如图 8 所示的重 265 g 的紧凑型取样器<sup>[15,16]</sup>。考虑到产生的钻屑侵入钻头的空心部分,在钻头底部设孔。这样一旦粉屑进入陷阱,逃出的机会就会减小。

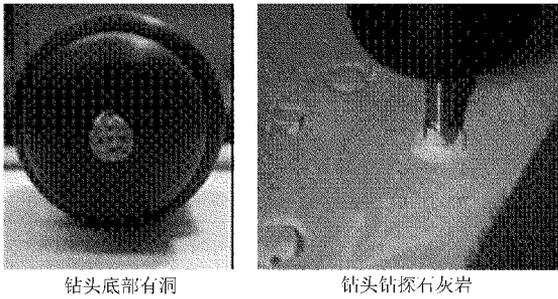


图 8 钻头的各种方位图

### 6 应用

为了验证取样器的性能,在 Mt. Hood 进行冰川冰钻探。在设计中吸取经验,并在南极洲对改进的取样器进行测试。该单元成功钻达 1.76 m 深,因为这比带有支撑元件的取样器长度更长,所以这是一个重要的里程碑。图 9 为在低温条件下测试 USDC 装置的温度-时间曲线图。在今后的研究中,当自动钻进时,将努力实现 100 m 深<sup>[16]</sup>。

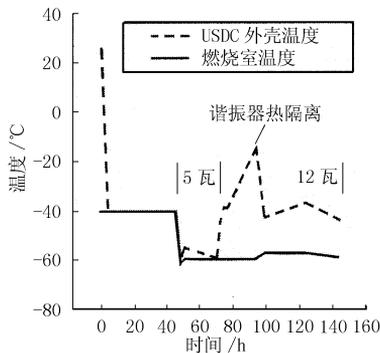


图 9 在低温下测试 USDC 装备(在 JPL 的地外材料模拟实验室的指导下)

### 7 结论与建议

(1)为了将来进行地外行星探测与原位分析,我们对超声波/声波钻头/取心器(USDC)进行了研究。为了能够有效地进行设计、改进并优化 USDC 性能,还需进一步开发分析模型以预测其功能。

(2)还需研发并展示各种设计性能,包括超声波钻头、土层贯入器、变幅杆各种构造和多功能钻头。建立超声波换能器与自由质量块、自由质量块、与钻杆(钻头)、钻头与被钻介质之间相互作用的数学模型,用以分析能量的耦合、转换和传递的过程,从而进一步揭示钻探采样器的工作机理。

(3)超声波取样器在取心、加载、岩心贮存与卸载的周期模式下运行。利用高速摄像机拍摄自由质量块的运动状况,研制超声波/声波钻探器的微型驱动电源。以后将继续研究 USDC 的潜在目标,为将来行星取样作进一步的探索。

### 参考文献:

- [1] Bar-Cohen Y., S. Sherrit, B. Dolgin, et al. Smart-ultrasonic/sonic driller/corer; USA, 6863136[P]. 2005-03-08.
- [2] Bao X., Y. Bar-Cohen, Z. Chang, et al. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) [J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control (UFFC), 2003, 50(9):1147-1160.
- [3] 郭俊杰,黄卫清,李志荣.一种新型的超声波/声波钻探器[J]. 压电与光电, 2008, 30(5):579-581.
- [4] Bao X., Y. Bar-Cohen, Z. Chang, et al. Ultrasonic/Sonic Impacting Penetrator (USIP) [Z]. NTR Docket No. 41666 (December 22, 2004). 2004.
- [5] Bar-Cohen Y., S. Sherrit. Self-Mountable and Extractable Ultrasonic/Sonic Anchor (U/S-Anchor) [Z]. NTR Docket No. 40827 (December 9, 2003c). 2003.
- [6] Bar-Cohen Y., S. Sherrit. Thermo couple on the-bit a real time sensor of the hardness of drilled objects [Z]. NTR Docket No. 40132 (February 1, 2003a). 2003.
- [7] Bar-Cohen Y., J. Randolph, C. Ritz, et al. Sample Preparation, Acquisition, Handling and Delivery (SPAHD) System using the Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) with Interchangeable Bits [Z]. NTR Docket No. 30640 (May 1, 2002). 2002.
- [8] Bar-Cohen Y., S. Sherrit, J. L. Herz. Ultrasonic/Sonic Jackhammer (USJ) [Z]. NTR Docket No. 40771 (Oct. 31, 2003b). 2003.
- [9] Bar-Cohen Y., S. Sherrit, B. Dolgin, et al. Ultrasonic/Sonic Mechanism of Deep Drilling (USMOD) [Z]. NTR Docket No. 30291 (July 17, 2001). 2001.
- [10] Bar-Cohen Y., S. Sherrit, B. Dolgin, et al. Ultrasonic/Sonic Mechanism of Deep Drilling (USMOD): USA, 6968910 [P]. 2005-11-29.
- [11] Sherrit S., S. A. Askins, M. Gradziel, et al. Novel Ultrasonic Horns for power ultrasonics [J]. NTR, submitted on (December 6, 2001), Docket No. 30489. NASA Tech Briefs, 2003, 27(4):54-55.
- [12] Dolgin B., S. Sherrit, Y. Bar-Cohen, et al. Ultrasonic/Sonic Vibrating/Rotating Tool [Z]. NTR Docket No. 30370 (Sept. 5, 2001a). 2001.
- [13] Dolgin B., S. Sherrit, Y. Bar-Cohen, et al. Ultrasonic Rock Abrasion Tool (URAT) [Z]. NTR Docket No. 30403 (Oct. 12, 2001b). 2001.
- [14] Sherrit S., Y. Bar-Cohen, B. Dolgin, et al. Ultrasonic Crusher for Crushing, Milling, and Powdering [Z]. NTR Docket No. 30682 (June 21, 2002). 2002.
- [15] 毛志新,刘宝林,等.一种便携式重力取样器的研制[J]. 地质科技情报, 2006, 25(6):105-106.
- [16] Sherrit S., Y. Bar-Cohen, X. Bao, et al. Ultrasonic/Sonic Rock Powdering Sampler and Delivery Tool [Z]. NTR Docket No. 40564 (August 13, 2003). 2003.

敬请登录探矿工程在线(www.tkgc.net)关注本刊优秀读者申领活动!