

# 超声波钻探设备的研究进展及建议

王建明<sup>1,2</sup>, 崔东茂<sup>1</sup>, 陆洪智<sup>3</sup>

(1. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053; 2. 河南省地矿局第一地质勘查院, 河南 南阳 473000; 3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

**摘要:**传统钻探技术受限于高轴向力和扭矩的需求, 高功率的消耗和沉重的设备。超声波钻探作为一种新型钻探方法, 弥补了传统钻探技术的诸多不足, 有着广阔的应用前景。尤其在低重力、设备质量限制严格的外星探测领域体现出巨大的优势。首先介绍了超声波钻探设备的发展, 然后通过分析现有的超声波钻探设备, 重点分析一种外星探测方案的超声波钻探设备, 总结出超声波钻探技术方法在外星探测的可行性及应用发展方向。

**关键词:**超声波钻探; 外星探测; 超声波/声波取样器; 土层夯实贯入器; 超声波锚; 自由质量

**中图分类号:** P634    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2010)09-0022-05

**Research Progress of Ultrasonic Drilling Instruments and the Suggestion/WANG Jian-ming<sup>1,2</sup>, CUI Dong-mao<sup>1</sup>, LU Hong-zhi<sup>3</sup>** (1. Henan Engineering Research Center of Geologic and Scientific Drilling, Zhengzhou Henan 450053, China; 2. No. 1 Geological Exploration Institute of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Nanyang Henan 473000, China; 3. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Traditional drilling techniques are limited by the need for large axial forces & holding torques, high power consumption and heavy equipment. Ultrasonic drilling, as a new drilling method, remedies these defect of traditional drilling techniques with broad application prospects, especially in the field of extraterrestrial exploration which demands the low gravity and strict limit on equipment weight. This paper introduced the development of ultrasonic drilling device; and by the analysis on the existing ultrasonic drilling equipment, emphatically analyzed a kind of ultrasonic drilling equipment for extraterrestrial exploration program. The feasibility of ultrasonic drilling technology applied in the extraterrestrial exploration and the application development trend were summarized.

**Key words:** ultrasonic drilling; extraterrestrial exploration; ultrasonic/acoustic sampler; soil compacting penetrometer; ultrasonic anchor; free weight

超声波钻探技术是超声工程的应用之一, 是由超声加工衍变而来的一种新型钻探采样技术。超声波钻探设备需要的轴向力低, 它克服了在低重力环境中用传统钻头进行行星取样的主要局限之一。此优点是用相对小的荷载和相对轻的金属器具, 能够在硬岩、冰和密实土壤中进行艰难的钻探和取心任务。已经证实, 超声波钻探设备可钻探冰和各种岩石; 不需要钻头磨尖; 在低温和高温下均可运行; 在较低的平均功率下能循环工作运作。目前, 正研究的性能包括: 探测地面以选择取样点来采集各种形式的样品(包括岩心和钻屑), 使用低功率采取硬玄武岩长岩心和测量各种属性的传感器。进行超声波钻探设备基本装置的一系列改进, 推动了超声波岩石磨损工具、深冰层钻探等的超声波钻探设备的发展。

随着我国航空航天事业的发展和技术进步以及

综合国力的增强, 深空探测已经在进行中, 如月球探测工程的实施就是一个重要的标志。在月球探测, 乃至在未来其他星球深空探测任务中, “采样”是一个必不可少的重要任务。特别是在外星球表面或表下直接钻探并要得到样品, 无论是进行实时分析, 还是将样品带回地球后再作进一步研究, 都具有重要的研究和分析价值。但是, 在外星球上钻探和采样, 必然会受到各种各样条件的限制, 如采样装置的体积、质量、能耗的大小、特殊的环境条件(真空、高温或低温、失重)、较小的工作平台(如月球车或专用机器人)等等。超声波钻探设备由于其所需轴向力小、质量轻、能耗少等突出的特性, 能克服以上的各种限制, 在外星探测中占据巨大优势。

## 1 超声波钻探设备的工作机理及发展

### 1.1 超声波钻探设备的工作机理

收稿日期: 2010-07-18

**作者简介:** 王建明(1964-), 男(汉族), 河南许昌人, 河南省地矿局第一地质勘查院院长兼河南省深部探矿工程技术研究中心技术推广部主任、高级工程师, 探矿工程专业, 从事钻探工程和钻探机具方面的研究工作, 河南省南阳市文化路 1096 号省地矿局第一地质勘查院, wangjm2004@yahoo.com.cn。

国内现有的钻探装置如电钻、冲击钻、电锤等,它们的工作原理都是利用传动机构在带动钻头做旋转运动的同时,还有一个方向垂直于钻头的往复锤击运动来致使被钻介质破碎。它们还有一个共同的特点就是往复锤击运动的频率不高,都在声频范围内,冲击频率不高对于脆性介质来说意味着使其疲劳破碎的难度不小。理论上,高频的冲击更容易使脆性介质发生疲劳破碎。

砖头、水磨石、混凝土和花岗岩等材料,它们被钻探时都在承受变动载荷作用,它们的破碎形式主要是疲劳破坏。被钻材料在变动载荷和应变长期作用下,因累积损伤而引起的断裂现象,称为疲劳。交变载荷的交变频率越高,应变越大,材料越容易发生疲劳。疲劳的破坏过程是材料内部薄弱区域的组织在变动应力作用下,逐渐发生变化和损伤累积,开裂,当裂纹扩展达到一定程度后发生突然断裂的过程,是一个从局部区域开始的损伤累积,最终引起整体破坏的过程。

超声波钻探设备正是运用超声波发生装置产生超声波频率,通过换能器将能量放大来带动钻头进行高频振动,使脆性材料产生疲劳破坏,进而达到破碎岩石的功能。

### 1.2 超声波钻探设备的发展

超声波钻探技术 20 世纪末在美国发展起来,其设备需要的轴向力低,能用相对小的荷载和相对轻的金属器具,在硬岩、冰和密实土壤中进行艰难的钻探和取心任务。由于其质量轻、所需轴向力低等优势,因此进入了外星探测机械设计者们的视野。

尽管欧美等国的深空探测器已经登陆火星,但对外星球钻探、采样技术的研究仍在继续,他们正在寻求更合适的钻探采样方法和装置。例如,美国国家航空航天局及其下属的喷气推进实验室正在致力于研究一种新型的超声波/声波钻探采样装置,德国的帕德博恩大学也在进行类似的研究,并已取得初步的成果。在国内南京航空航天大学 and 苏州职业大学已经开展了用于深空钻探采样的超声波钻探采样技术的研究。

## 2 各种超声波钻探设备

### 2.1 超声波/声波取样器

使用超声波取心装置,研发与  $\phi 6.4$  cm 钻头一样大,直径比驱动器大的取样器。设备示意图如图 2 所示,当岩心达到钻头内部长度时,从钻孔移走,不断反复这个过程,直到理想深度(图 1)。在今后

的研究中,自动进行钻探时,将努力实现 100 m 深。

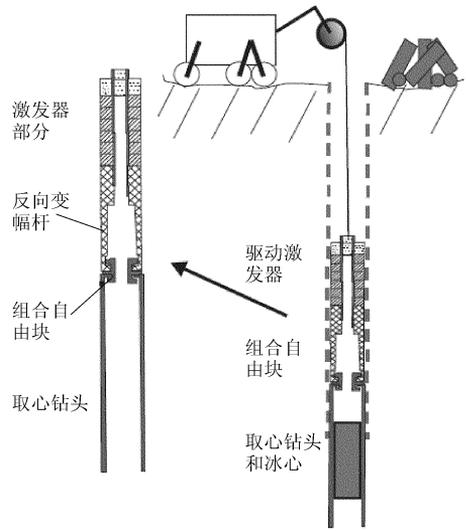


图 1 钻孔内超声波取样器示意图

### 2.2 土层夯实贯入器

最近,有人提出使用低轴向荷载、直径在  $1/8 \sim 3/16$  in ( $\phi 3.18 \sim 4.76$  mm) 的探针,贯入大约 1 m 厚的夯实土。使用推杆需要几百磅的力,很容易导致探针弯曲。目前研发一种新型超声波冲击贯入器,并且验证它极大地减小了所需的推力。新型超声波冲击贯入器所体现的性能表明,贯入约 1 m 厚夯实土所需的推动力,从 200 磅减小到 7 磅。研发的单元示意图如图 2 所示。结果包括模态和冲击分析,模态分析确定变幅杆的直径和共振频率范围内的衬垫。也用该分析结果来调整超声波变幅杆的直径,以便中性面与安装面匹配,避免驱动器支撑结构上传感器振动的影响。决定自由块和变幅杆之间相互作用的冲击分析,用于确定自由块的最佳质量。

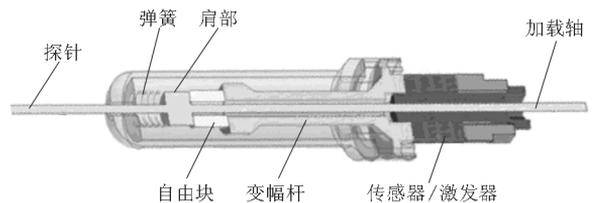


图 2 超声波冲击贯入器示意图

### 2.3 超声波锚

为了满足锚固腿式和轮式漫游车的需要,超声波钻探设备提供了在低轴向荷载下运行的充气结构和着陆器。在外星球低重力环境下和地形崎岖的陡峭高山上,必须使用这种轻质量和相对低功率性能的设备来提供平台。用改进的超声波取样器装置设计并制造超声波锚。相反,运行超声波取样器锤击可以取出被锚固在介质上的锚,并避免了可能的人

为干扰。

## 2.4 深空探测用超声波钻探采样器

### 2.4.1 钻探采样器的结构

基于脆性介质的破碎机理,确立了新型超声波钻探器的基本结构,它是由超声波换能器、自由质量和钻杆3部分组成(见图3)。其中,超声波换能器是一个兰杰文振子,它包括头部(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(见图4)作为能量积蓄/转换部件,压电陶瓷片为PZT-8的纵振片(见图5)。

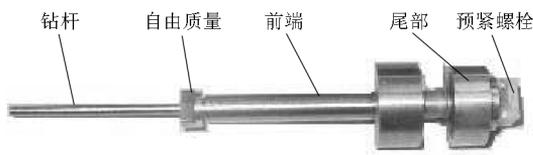


图3 超声波钻探器大致结构



图4 自由质量



图5 压电陶瓷片

该装置的工作原理是:在电极片上施加超声波频率的高频交流激励电压,利用压电陶瓷材料的逆压电效应,驱使超声波换能器产生超声频率的共振(主要指纵振),并通过其变截面设计使头部(前端)振幅得到放大;自由质量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;自由质量的碰撞与冲击,通过钻杆传递到钻头与岩石接触界面。当这种冲击强度超过岩石的压溃强度时,钻头与岩石接触部位的岩石就破碎了。

钻探器的主体结构是一种兰杰文振子,兰杰文振子是法国学者 Paul Langevin 为水下声波探测而在1992年开发的,是一种利用压电陶瓷的纵向效应构造的压电振子,具有极高的变换效率。在功率超声技术应用中,兰杰文振子的主要作用有2个:一是将机械振动位移或速度振幅放大,同时把能量集中在较小的辐射面上,即聚能作用;另一个作用是作为机械阻抗的变换器,使超声能量由超声聚能器更有效地向负载传输。兰杰文振子有如下特点。

(1)效率高。将压电陶瓷组设置在应变最大的位置附近,利用其受交变电压产生形变的驱动作用。压电陶瓷两端用机械品质因素高得多的金属块作配

重块代替压电陶瓷起到惯性质量作用;同时由于金属散热性能好,降低了压电陶瓷组的工作温度,从而提高效率。

(2)允许输入较大的电功率。压电陶瓷材料的抗压强度较大,而抗拉强度则小得多。在大的电功率驱动下,往往造成压电陶瓷的破坏。兰杰文振子用紧固螺栓给压电陶瓷施加了较大的预压力,确保在大功率驱动下压电陶瓷片处于压缩状态,使压电陶瓷的强度极限得到充分利用,提高功率质量比。

(3)在振子的输出端具有较高振动速度的位移振幅。由动量守恒定律知,截面的两边动量相等,因而速度与密度成反比。所以用轻金属制成的前配重块的前端速度较大,能辐射出振子中储存的振动能的较大部分。

(4)结构简单。由于振子由2个金属块、压电陶瓷以及连接用的螺栓组成,不涉及到压电陶瓷的胶粘问题,所以制作起来简便,易于实现。

(5)聚能作用。为提高振子末端的振动速度,前配重块可采用变截面的结构,即靠近压电陶瓷的一端为大截面,靠近负载的一端为小截面,从而产生聚能作用。

正是由于兰杰文振子具有这些特点,在超声加工中得到了广泛的应用,因此新型超声波钻探器的结构设计采用了这一元件。

已有的大部分超声加工技术都是直接利用变幅杆放大的兰杰文振子的振动,这样的振幅太小(通常不到 $1\ \mu\text{m}$ ),通过变幅杆传递的能量有限,故在设计中采用了一个能量积蓄/转换部件——自由质量。虽然自由质量体积小,质量轻,但其作用可以通过实验来验证。

### 2.4.2 钻探采样器的模拟分析

新型超声波钻探器的钻探过程包括碰撞和接触,是非线性的。为了模拟碰撞和接触的过程,采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行分析。在新型超声波钻探器(有螺纹连接)中,自由质量在钻杆和换能器之间的碰撞过程是接触问题,在采用 LS-DYNA 进行此处的仿真分析时,将自由质量当作刚体,将钻杆和换能器当作柔性体,从模态分析和谐响应分析中可以得出:

(1)确定了钻探器的工作频率大小;

(2)在陶瓷片两端施加电压峰值为400 V时,输出端的位移大小。在 ANSYS 分析中,无法给模型施加速度载荷和位移载荷,但在谐响应分析后,可以通过后处理模块提取所需端面的位移,即振幅。

通过对该单元体(模拟被钻介质)定义材料各项性能参数,根据后面拟采用实验对象的性能参数来定义单元体的性能参数,这样才能得到应有的仿真效果。模拟实验将有自由质量与无自由质量的模型进行了模拟比较(见图 6)。

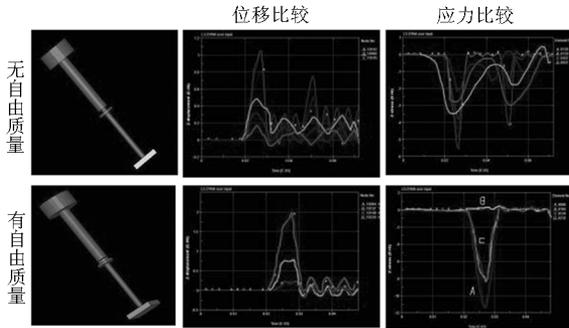


图 6 有限元模拟分析自由质量有无的对比图

从图 6 位移曲线比较可以看出,在其他条件相同的情况下,无自由质量的模型中,被钻介质与钻杆接触部位节点的位移最大为 0.5  $\mu\text{m}$ ,而在有自由质量的模型中,相同部位节点的位移最大为 2  $\mu\text{m}$ 。从应力比较图中应力曲线可以看出,在其他条件相同的情况下,无自由质量的模型中,被钻介质与钻杆接触部位节点所受的应力最大为  $4\text{E} + 6$ ,而在有自由质量的模型中,相同部位节点(Node)所受的应力最大为  $10\text{E} + 10$ 。从综合位移图和应力图可见自由质量的作用很大,符合设想时自由质量所起到的积蓄并传递能量的作用,这个作用还有待后面的实验研究去进一步验证。

2.4.3 超声波采样器的样机钻探实验

南京航空航天大学郭俊杰等人在 3 种不同条件下进行了钻探实验。

实验条件 1:65Mn 钻头,经过调质处理,无自由质量,即是变幅杆的前端与钻杆相连的部分没有套上自由质量,紧固螺栓所施加的预紧力为 6000 N,压电陶瓷上所施加的激励电压的峰值为 400 V。

实验条件 2:65Mn 钻头,经过调质处理,套上自由质量,紧固螺栓所施加的预紧力是 6000 N,压电陶瓷上所施加的激励电压的峰值为 400 V。

实验条件 3:65Mn 钻头,经过调质处理,套上自由质量,紧固螺栓所施加的预紧力是 12000 N,压电陶瓷上所施加的激励电压峰值为 400 V。

实验对象为砖头,混凝土,水磨石,花岗岩。

已有的实验对象用材料力学性能测试设备测量,可以得到它们的各项力学性能参数。但由于实验条件所限,只能通过相关资料查询。

砖头的技术指标为:砖块密度为  $1200 \text{ kg/m}^3$ ,抗压强度 7.5 MPa;

低密度轻珠混凝土:密度约为  $300 \sim 600 \text{ kg/m}^3$ ,抗压强度约在 0.3 ~ 3 MPa,导热系数约在 0.08 ~ 0.140 w/mgk 左右;

普通密度轻珠混凝土:密度约为  $600 \sim 1200 \text{ kg/m}^3$ ,抗压强度约在 2 ~ 8 MPa;

中密度轻珠混凝土:以 EPS 轻珠取代部分砂、石集料配制而成的轻珠混凝土,密度约为  $1200 \sim 1800 \text{ kg/m}^3$ ,抗压强度约在 5 ~ 30 MPa。

本次实验所用的水磨石即是混凝土材料,但其形状不太规则,经测试得其密度约为  $1700 \text{ kg/m}^3$ ,抗压强度为 10 MPa。花岗岩的种类很多,本次实验所用花岗岩的抗压强度为 120 MPa,抗弯强度为 15 MPa,密度为  $2600 \text{ kg/m}^3$ 。

有机玻璃的物理性能:密度为  $1190 \text{ kg/m}^3$ ,冲击强度大于 16 MPa,拉伸强度大于 61 MPa。

钻探后所得的实验结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 实验结果 1

材料	时间/min	钻孔深度/mm		
		条件 1	条件 2	条件 3
砖 头	10	4	9	15
混凝土	20	1	2	3
水磨石	20	6	10	15
花岗岩	60	0.8	2	3

表 2 实验结果 2

材料	时间/min	钻孔深度/mm		
		条件 1	条件 2	条件 3
砖 头	10	4	9	15
混凝土	10	0.4	0.8	1
水磨石	10	2	4	7
花岗岩	10	0	0.5	1

表 1 中,对比条件 1 和条件 2 下的实验数据可以看到,加上自由质量后,钻探效率显著提高,这正好与当初的设计思想相符合。在钻探过程中,自由质量边旋转边上下跳动,频率较高。自由质量在上下往复碰撞的过程中,可以积蓄和转换能量,再通过钻杆传递到钻头和被钻介质的接触界面,碰撞的频率虽在声波频率范围内,但也比较高,因而看起来虽小但是能有效地传递能量,这也是新型超声波钻探器区别于普通超声钻探器的不同之处。对比条件 2 和条件 3 下的实验数据,我们可以看到,预紧力对钻探效率影响比较大,螺栓的预紧力越大,整个装置的纵向激振效果越好,钻探效率越高。当然,研究表明预紧力加大到一定程度,对激振效果没太大影响。

表2中,对比4种材料的实验数据可以看到,从砖头、水磨石、混凝土到花岗岩,抗压强度越来越大。在相同的时间内,分别对它们钻探时,抗压强度大的,钻探效率低,这也符合被钻介质的破碎机理。同时,还做了对比实验,在钻探器上施加向下的轴向力,让其钻探,发现10 min后能将砖头钻孔4 mm深,这与实验结果2(表2)中条件3下的数据比较可以得出:若给钻探器施加轴向力,钻探效率会更高。

在钻探器进行钻探实验时,通过示波器能测到钻探器的输入电压和电流,输入电压的峰值大约为400 V,此时电流约为0.3~0.5 A,经简单计算,耗能大约为40~60 W,高于设想的低耗能(5~30 W)。钻探器在工作时,陶瓷片受电压激励会发热,钻头由于与被钻介质接触也会释放大量的热,所以钻探一段时间后,金属易导热使得整个钻探器都会发热,钻探效率会降低。钻探器持续工作一段时间后,钻头会磨损变形,大大降低了钻探效率,可以更换材料进一步设计分析。

### 3 特点及建议

#### 3.1 特点

通过参考国外相关钻探器文献,对钻探器的结构特征及其钻探机理进行了浅析,借助南京航空航天大学设计出并加工出了原型样机的新型超声波钻探器,进行一系列的实验研究,总结出超声波钻探设备的主要特点:

- (1)结构简单、体积小、质量轻;
- (2)能耗低(10 W左右);
- (3)无需提供轴向力;
- (4)整个装置无旋转运动,无需保持旋转力矩;
- (5)不存在运动副,不需要润滑;
- (6)钻头无需刃口,因而不存在钻头磨钝问题;
- (7)根据钻头材料的不同,可在高温或低温条件下工作;
- (8)可用于硬度大的物质,如花岗岩、玄武岩、砂岩、凝灰岩等;也适应于中等硬度的物质,如闪长岩和石灰石等;
- (9)可钻取任意截面形状样品或孔洞。

#### 3.2 下一步的研究建议

鉴于目前新型超声波钻探器的研究现状,要想早日实现该钻探器的实用化,笔者认为尚需进一步加强研究工作:

- (1)进一步对钻探器的结构进行优化设计,更换其各部分的材料,再用有限元方法对其进行结构

动力学分析,重新确定其工作模态、工作振幅和结构设计参数;

- (2)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)利用高速摄像机拍摄自由质量块的运动状况,研制超声波钻探器的微型驱动电源;

- (4)考虑超声波与其他技术相结合的混合钻探取样设备,不断优化其性能。

#### 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.