

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.030

# 用于砂土层连续采样的柔性软袋式钻取采样技术研究

田野<sup>1</sup> 陈萌萌<sup>1</sup> 杨飞<sup>2</sup> 侯绪研<sup>2</sup> 唐钧跃<sup>2</sup> 邓宗全<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨商业大学轻工学院, 哈尔滨 150028; 2. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150006)

**摘要:** 砂土是地球表面常见的一种覆盖物,由于风力和水力的搬运作用导致传统浅层采样器所采集的样芯信息量不足,并且由于砂土颗粒之间的内聚力小流动性大,传统环刀压入方法无法采集到长度大于20 cm并且具备连续层序信息的样品。为此提出一种柔性软袋式取芯技术,采用内置柔性袋取芯机构的外螺旋钻具对砂土进行钻取采样,以提高采样的样芯长度并保持层序信息。分析了取芯钻具与砂土相互接触的机理以及对采样样芯的扰动情况,通过仿真模拟的对比揭示了传统环刀压入法对样芯扰动的原因。搭建了试验台并针对传统环刀压入法与柔性软袋式取芯方法的采样率进行了对比试验,结果显示后者取芯率随转速增加下降10.4%,前者随压力增加提高16.4%,使用柔性软袋方法取芯率均值从13.08%提高到84.08%,并能保持连续的样芯层序信息。

**关键词:** 砂土层; 连续采样; 柔性软袋; 取芯率

**中图分类号:** TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0246-07

## Technology of Coring Drill with Flexible Tube for Sand Layers Continuous Sampling

TIAN Ye<sup>1</sup> CHEN Mengmeng<sup>1</sup> YANG Fei<sup>2</sup> HOU Xuyan<sup>2</sup> TANG Junyue<sup>2</sup> DENG Zongquan<sup>2</sup>

(1. Department of Light Industry, Harbin Commercial University, Harbin 150028, China

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

**Abstract:** Sand layer is a common covering material on the surface of earth. The sample can provide more information for geological analysis in the area. Sand particles were carried by water and wind easily. Therefore, the shallow sample obtained by traditional cutting ring method would lose some important characters. For the high fluidity and low cohesive of sand, the traditional cutting ring sample method cannot collect the samples from the length greater than 20 cm with continuous layers information. A new sample drilling technology with flexible tube mechanism was proposed to resolve this problem. It was composed by flexible tube which was fixed in the auger. The sample drilling technology had ability to increase coring length and protect layers. The contact principle and disturbance between the coring drill and sand were analyzed. Based on the simulation results analysis, the reasons for the failure of continuous sampling were revealed. An experimental bench was built to test the difference between the traditional cutting ring and flexible tube drilling method on sampling rate. The results showed that the coring rate was decreased by 10.4% and increased by 16.4% to the flexible tube and traditional cutting ring, respectively. The sampling rate and efficiency of flexible tube were much higher and less adverse the sequence of sand layers. The coring rate of flexible tube was increased from 13.08% to 84.08%.

**Key words:** sand layer; continuous sampling; flexible tube; coring rate

## 0 引言

农业、建筑以及环境污染研究等领域中,为了分

析砂土层的天然形成结构、含水率并测定其容重、天然孔隙比等物理力学性质指标,需要对砂土层进行采样。取土器的结构形式有皮切尔(Pitcher)、丹尼

收稿日期: 2018-04-22 修回日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772387)、哈尔滨商业大学青年创新人才支持项目(2016QN067)和哈尔滨商业大学博士启动基金项目(2016BS07)

作者简介: 田野(1981—),男,副教授,博士,主要从事星球探测采样技术研究,E-mail: tian8154@126.com

通信作者: 杨飞(1985—),男,副教授,博士,主要从事星球探测采样技术研究,E-mail: 378357009@qq.com

森 (Denison) 型、双管单活门型等<sup>[1-3]</sup>, 但其采样原理均属于环刀压入式, 即借助人或机械、液压等动力在轴向上产生压力, 将环刀或末端取样器压入地表以下。由于砂土颗粒与环刀的相互摩擦阻力作用, 以及颗粒物质进入管内形成的力链效应, 导致传统取土采样方法每次采集的深度有限, 无法保持样品连续的层序信息, 采样效率低、成本高。

目前对于砂土采样的方法及设备研究主要围绕传统环刀压入式硬质管采样方式对原位砂土的扰动影响。吴跃东等<sup>[4]</sup>通过观测取土器贯入过程中土体扰动的变形, 得到取土器内径和贯入速率对土样扰动影响规律; 李艳洁等<sup>[5]</sup>基于离散元仿真模拟方法, 研究了圆锥形设备贯入砂土时, 贯入力和圆锥结构尺寸对周边砂土的原始状态产生的破坏和扰动影响及范围; WUEST 等<sup>[6]</sup>提出了一种采集浅层 (0~30 mm) 砂土样品的采样器, 可将圆柱采样器内部样品推出, 减小样品出管后的直线膨胀, 提高砂土采集效率。但上述研究均未能解决传统环刀压入方法无法采集长度大于 20 cm 且具备连续层序信息样品的问题。砂土层颗粒之间内聚力小, 极易产生相对滑动, 采用传统环刀压入采样方法会影响其原位状态, 因此, 本文基于我国探月采样任务的钻取装置研究基础<sup>[7-11]</sup>, 提出一种针对砂土层连续采样的柔性软袋式取芯技术。建立砂土颗粒与钻具相互作用模型, 结合仿真模拟对比两种取芯方法, 通过砂土取芯试验验证理论分析及钻进取芯方案的可行性。

## 1 采样装置结构与工作原理

针对砂土层连续采样的柔性软袋式钻取装置由取芯钻头、螺旋钻杆、取芯机构、钻机及进尺驱动装置、导轨和支撑座等组成, 如图 1 所示。

取芯机构由柔性软袋、保持心管、柔性软袋接头和拉绳组成, 钻杆末端与回转钻机相连, 在进尺电机的作用下, 钻具对砂土层进行破碎钻进。

如图 2 所示, 柔性软袋包覆在保持心管的外壁并安装在空心钻杆内部, 其上端通过柔性软袋拉绳与固定吊点相连接, 当钻进到指定深度后, 提拉柔性软袋拉绳进行封口, 拉绳的末端事先交织在柔性软袋上以系扣的方式进行封口, 为提高采样成功率, 采用两级封口。继续提拉软袋拉绳, 可将装有砂土样品的柔性软袋提出。

## 2 柔性软袋式取芯钻具与砂土相互作用机理分析

### 2.1 砂土切削的失效模型

假设砂土的失效满足莫尔-库伦破坏准则, 成分

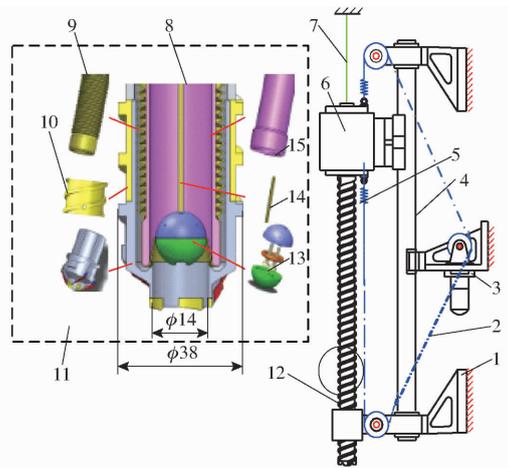


图 1 采样钻具结构示意图

Fig. 1 Structure composition of sampling drilling tool

1. 支撑座 2. 牵引钢丝绳 3. 进尺驱动装置 4. 导轨 5. 拉力传感器 6. 回转电机 7. 柔性软袋拉绳 8. 取芯机构 9. 柔性软袋 10. 螺旋钻杆 11. 取芯钻头 12. 取芯钻具 13. 柔性软袋接头 14. 拉绳 15. 保持心管

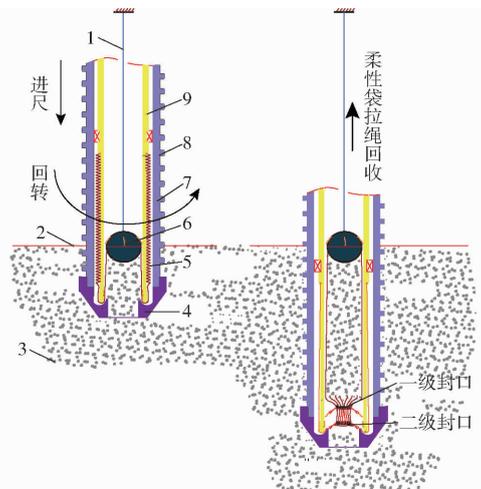


图 2 柔性软袋式采样装置工作过程示意图

Fig. 2 Work process of flexible bag type sample device

1. 柔性袋拉绳 2. 地表 3. 砂土 4. 钻头 5. 柔性袋 6. 柔性袋接头 7. 螺旋钻杆 8. 封口系扣 9. 保持心管

均一、各向同性且忽略砂土的惯性力。单一切削具切削砂土过程中, 通过二维受力分析即可求解中心失效区所对应的切削力  $P_c$ , 中心失效区的受力分析如图 3 所示,  $d$  为切削深度 (底出刃);  $q$  为法向压力;  $\delta$  为钻具-砂土摩擦角;  $\beta$  为砂土失效角, 即切削具前端砂土破坏线  $BC$  与土体表面所呈的夹角;  $\alpha$  为切削具切削角;  $\varphi$  为砂土内摩擦角;  $c$  为砂土内聚力;  $R_c$  为砂土破坏面所受压力。

根据极限平衡原理得到平衡方程, 求得  $P_c$  在水平方向的分量  $H_c$ , 即水平切削力

$$H_c = \frac{\frac{\gamma dr}{2} + cd(1 + \cot\beta\cot(\beta + \varphi)) + qr}{\cot(\alpha + \delta) + \cot(\beta + \varphi)} w \quad (1)$$

式中  $w$ ——切削具宽度  $\gamma$ ——砂土容重

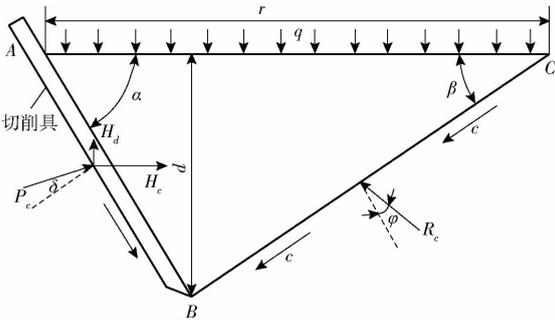


图3 中心失效区受力模型

Fig.3 Stress model of central failure zone

$r$ ——样芯中心到钻头内侧的距离

由于砂土颗粒之间相互粘结和嵌入,导致钻头的切削刃在破碎砂土时,除了切削刃前刀面砂土产生中心破碎区外,在其侧面还会产生侧向失效区<sup>[12]</sup>,该区域会对样芯边缘的颗粒原始位置产生影响,如图4所示。图5所示为沿取芯钻具回转中心线方向的投影示意图,切削刃的水平切削力会使砂土形成中心失效区ABCD和两侧失效区AED、BCF 3部分。位于切削刃内侧的侧向失效区AED部分与砂土样芯产生重叠进而扰动样芯。

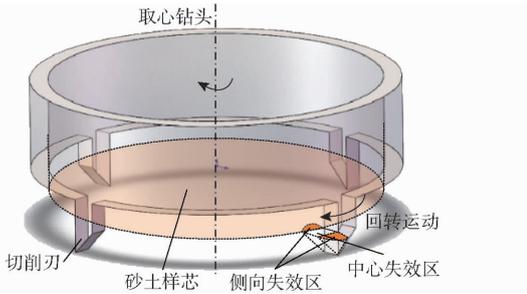


图4 侧向失效区对样芯的影响关系示意图

Fig.4 Schematic of influence of lateral failure zone on sample center

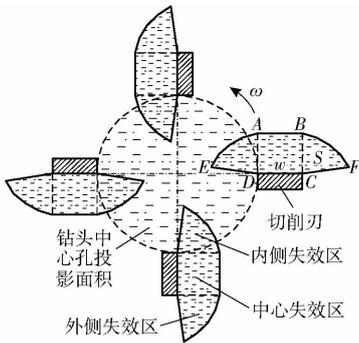


图5 副切削刃导致侧向失效的俯视图

Fig.5 Top view of secondary cutting edge causing lateral failure

失效表层近似为扇形,由已知的中心破坏区长度 $r$ 可以近似得到侧向失效区面积

$$S_l = \frac{\arccos\left(\frac{\cot\alpha}{\cot\beta + \cot\alpha}\right) \pi r^2}{360} \quad (2)$$

## 2.2 取芯方式对砂土样芯的影响分析

图6a所示为去掉外层螺旋钻杆的柔性软袋取芯机构工作原理图,外层钻具的功能是破碎样芯周围的土壤,形成圆柱状的样芯,利于柔性软袋包裹样芯。如图6b所示,在柔性软袋上固定1~7个点,随着钻头、钻杆和保持心管的钻进动作,保持心管下降,柔性软袋从外部翻入保持心管内部包裹钻头破碎砂土后形成的砂土样芯。柔性软袋与土壤样芯不产生任何相对滑动,因此能够保持样芯的原始状态和层序信息。

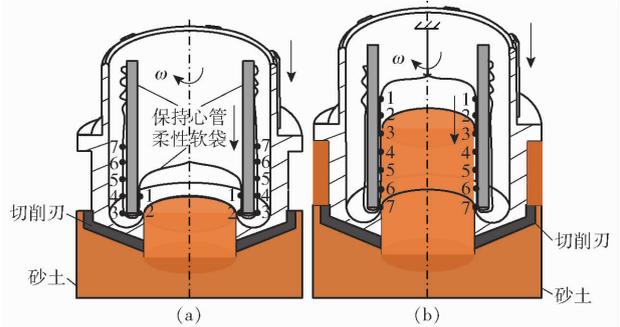


图6 柔性软袋取芯原理图

Fig.6 Flexible tube working principle

砂土颗粒具有离散性,使取芯钻头在钻进过程中仅能破碎样芯外侧砂土,而对进入其内部的土样,由于钻头内壁与砂土颗粒接触,且对样芯产生平面剪切作用<sup>[13]</sup>,使靠近阻隔环内壁的颗粒随其转动而运动,剪切力时刻与钻头内壁相切,因此不会对样芯的原始结构产生轴向应力。

由于砂土在被钻头切削后进入钻头内部时形成圆柱状样芯,因此以钻头底面进样口圆面的中心为原点,以其中心轴线为 $Z$ 方向,建立圆柱坐标系<sup>[14]</sup>,如图7所示。

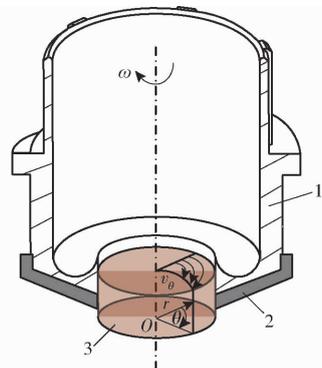


图7 钻头内部砂土微元旋转运动示意图

Fig.7 Sketch of rotational motion of sand micro-element in bit

1.取芯钻头 2.切削刃 3.砂土

砂土在受迫运动时会表现出类似流体的特性,因此对进入到钻头内部的小部分砂土建立连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (3)$$

式中  $v_r$ ——砂土径向速度

$v_\theta$ ——砂土周向速度

径向和周向的动量方程  $M_r$  和  $M_\theta$  为

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \frac{v_\theta^2}{r} \right) = \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) \right] + \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right\} \quad (4)$$

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} +$$

$$\mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right\} \quad (5)$$

式中  $p$ ——砂土样芯应力

由于中心对称性,则  $\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0$ ,  $\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} = 0$ 。且  $rv_r$  仅是  $\theta$  的函数,与  $r$  无关,  $v_r$  恒等于 0。

由于场量分布与  $\theta$  无关,  $M_\theta$  可写为二阶常微分方程。根据欧拉定理结合边界条件,可得

$$v_\theta = \omega_r r \quad (6)$$

式中  $\omega_r$ ——砂土颗粒转动角速度

当  $r=0$  时,  $v_\theta=0$ , 表示位于中心线处的样芯颗粒速度为零; 当  $r=r_0$  时,  $v_\theta=\omega_r r$ , 表示位于样芯最外侧与样芯接触的颗粒速度。

垂直土压力  $\sigma_z$  表达式为

$$\sigma_z = \frac{D \left( \gamma + \frac{2c}{D} \right)}{2K \tan \varphi} \left( e^{2k \frac{H}{D} \tan \varphi} - 1 \right) + q e^{2k \frac{H}{D} \tan \varphi} \quad (7)$$

式中  $D$ ——软袋直径  $H$ ——软袋长度

$\varphi$ ——砂土内摩擦角

$K$ ——砂土压力系数

柔性软袋式取芯方法能够保持样品的原有状态,而环刀式压入方法在样品进入的过程中砂土颗粒与样品管内壁会产生相对滑动,并且颗粒与颗粒之间相互挤压传递外力,使环刀式取芯装置的内外砂土中力链<sup>[15-16]</sup>效应明显。外形几何形态非规则的颗粒普遍客观地存在于自然界,无论环刀压入式或柔性软袋式取芯方式均会遇到非规则形态颗粒对样芯产生扰动情况,并且该影响随机性较大,因此为对比两种采样方式优劣,在对颗粒建模并仿真的过程中忽略了非规则形态颗粒影响。

为了减少取土器的结构对仿真对比结果的影响,本文采用了外螺旋式硬质环刀取土器,其结构参数与柔性袋取土器相同,两者不同的是环刀式内径光滑,而柔性软袋式的钻杆内部内置柔性软袋机构。仿真模拟时在柔性袋式取土器的内径上设置了“平移面模型”(moving plane)来等效柔性袋结构<sup>[17]</sup>,设

定好平移面与颗粒的摩擦因数和速度(与进给速度大小相等、方向相反)。柔性袋式取土方法的原理是利用逐步内翻的柔性袋包裹住钻头切削后形成的砂土样芯,若从物理学的相对运动角度来看,样芯内的砂土颗粒相对于外界砂土是静止的,而相对于钻进的钻具是运动的,在采用 EDEM 进行仿真模拟时,需要对进入软袋的颗粒施加一个速度使其相对于外界颗粒静止、相对钻具运动,因此施加 moving plane 特征等效模拟柔性袋取土方法的原理。

分别对传统环刀与柔性软袋式进行对比仿真模拟,仿真参数如表 1。其中颗粒的密度通过与实际砂土密度对比测量得到,剪切模量和泊松比参考文献[18-19],接触参数如颗粒与颗粒间的恢复系数、静/动摩擦因数,颗粒与钻具之间的恢复系数、静/动摩擦因数,参照文献[20-21]。

表 1 离散元模型仿真参数

Tab. 1 Parameters of discrete element model

参数	数值
颗粒直径/mm	1.0
颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2.65 × 10 <sup>3</sup>
颗粒剪切模量/Pa	1 × 10 <sup>8</sup>
颗粒泊松比	0.3
取样深度/mm	240
颗粒数量/个	1.0 × 10 <sup>6</sup>
钻具材料 65Mn 泊松比	0.3
钻具材料 65Mn 剪切模量/Pa	1.92 × 10 <sup>6</sup>
钻具材料 65Mn 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 800
仿真时间/s	12
土壤颗粒剪切模量 $G_1$ /Pa	1 × 10 <sup>6</sup>
颗粒与颗粒间恢复系数 $e_1$	0.2
颗粒与颗粒间静摩擦因数 $e_2$	0.4
颗粒与颗粒间动摩擦因数 $e_3$	0.3
颗粒与钻具间恢复系数 $f_1$	0.3
颗粒与钻具间静摩擦因数 $f_2$	0.5
颗粒与钻具间动摩擦因数 $f_3$	0.05
钻杆外螺旋大径/mm	38
环刀内径/mm	14
柔性袋直径/mm	14
进给速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	10
钻杆转速/(r·min <sup>-1</sup> )	100

图 8 是传统环刀式和柔性袋式砂土取样仿真始末时刻的剖视图,在开始仿真之前,对砂土进行分层(深度 40 mm)并标定了不同的颜色以便于观察,如图 8a 所示。从图 8b、8c 的对比可以看出,进入环刀式取土器内部的砂土样芯高度明显低于柔性袋式取土方式内部的样芯高度,并且传统环刀内的砂土样

芯与外部土层产生了“错层”现象,砂土样芯体积减小,说明该方法对样芯产生了压缩并有部分样芯被排出,因此该方法取土相对于柔性袋方法对砂土样芯扰动影响较大。

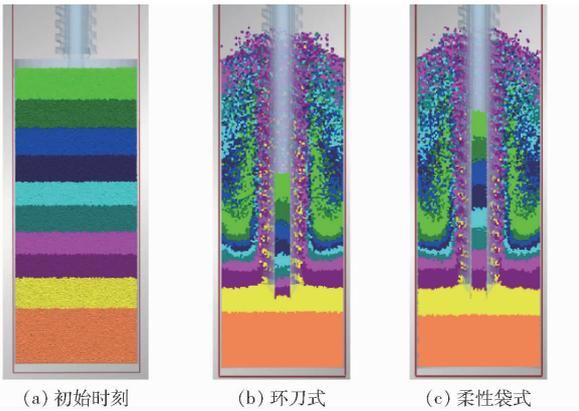


图8 砂土取样仿真始末时刻剖视图

Fig.8 Simulation of drilling sand

### 3 试验验证

为了验证理论分析的正确性,通过综合采样试验台对砂土采样的取芯率进行对比。取芯率是样芯的长度除以实际钻进深度。试验台组成如图9所示<sup>[22]</sup>,装有回转电机和进尺电机为采样机具提供回转和直插运动,装有的回转力矩和进尺力传感器可实时采集采样过程中的力载信号。图10为综合采样试验台实物及钻进采样工作过程。图11为采样结束后柔性软袋装满砂土样芯的柔性软袋实物。图12、13为3次重复试验中某次试验的进尺力曲线,两幅数据曲线对比可知,柔性软袋式钻取采样所需的轴向力随深度增加趋于平稳,而环刀法的轴向力随深度的增加而增加。

试验对两种采样方式的采样率进行了对比,传统的环刀压入法采样压入压力分别为80、90、120、

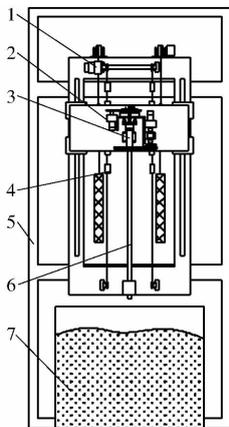


图9 试验台结构原理图

Fig.9 Test bench composition chart

- 1. 进尺电机 2. 回转电机 3. 力矩传感器 4. 进尺力传感器
- 5. 机架 6. 采样取芯机具 7. 砂土

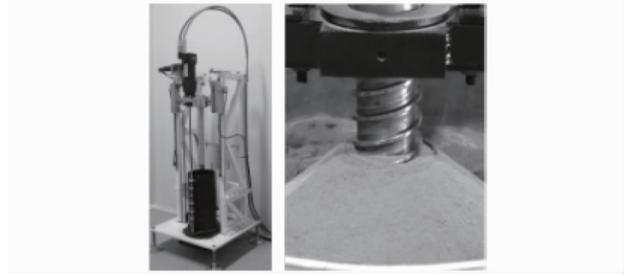


图10 试验台实物及钻进采样过程

Fig.10 Test rig and drilling sampling process



图11 装满砂土样芯的柔性软袋实物

Fig.11 Flexible bag filled with sand sample core

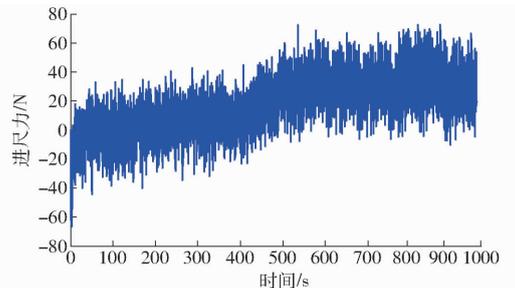


图12 柔性软袋式取芯方式进尺力曲线

Fig.12 Feed force curve of flexible tube sample method

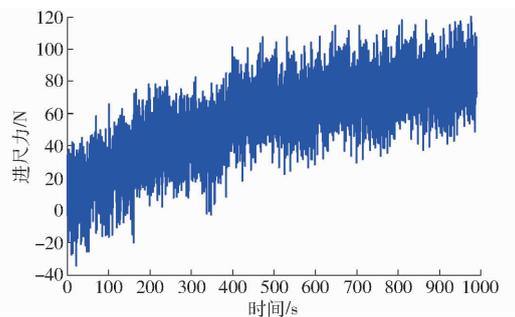


图13 环刀压入式进尺力曲线

Fig.13 Feed force curve of ring cut

180 N,压入速度为0.001 m/s,压入深度为1 m;柔性软袋钻取采样以60、80、100、120 r/min 回转速度,0.001 m/s的进尺速度钻进2 m深。

两类试验分别以运动参数划分成组,每组参数做3次试验,将取芯率取平均值,如图14所示。从图中可以看出,使用柔性软袋方法的取芯率明显高于环刀压入法。柔性袋方法取芯率随转速增加降幅10.4%,而环刀压入法随压力增加涨幅16.4%,说明柔性袋方法的砂土取芯采样受转速影响较小,方法稳定。这是由于柔性软袋方法对样芯的扰动小,样芯颗粒与采样器内部无相对运动,因此,可以保持

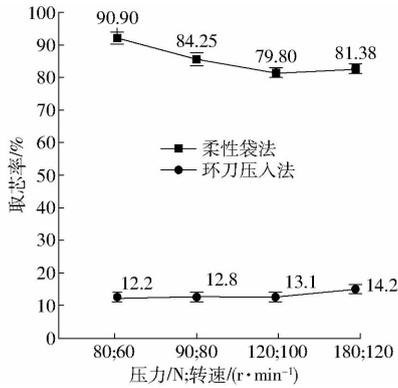


图 14 取芯率对比

Fig. 14 Comparison diagram of coring rate

样品的层序信息,明显提高取芯率,取芯率均值从 13.08% 提高到 84.08%。

## 4 结论

(1) 提出了柔性软袋式钻取采样技术,可实现针对砂土的连续钻进采样。通过在取芯率及采样深度方面与传统环刀压入法进行对比,验证了柔性袋式取芯技术的可行性及其理论分析的正确性。

(2) 分析了柔性软袋式采样技术的工作机理,解释了对砂土样芯扰动影响相对小的原因。

(3) 通过对比试验,柔性袋方法的取芯率随转速的增加降低 10.4%,环刀压入法随压力的增加提高 16.4%,数据表明前者受转速影响较小,方法稳定。采用柔性袋方法取芯率均值可从传统方法的 13.08% 提高到 84.08%。

## 参 考 文 献

- 曹秒艳,董国疆,赵长财. 基于离散元法的固体颗粒介质传力特性研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 62-69.  
CAO Miaoyan, DONG Guojiang, ZHAO Changcai. Research on pressure-transfer characteristics in the solid granule medium forming based on the discrete element method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 62-69. (in Chinese)
- 李爽,刘洋,吴可嘉. 砂土直剪试验离散元数值模拟与细观变形机理研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(4): 104-110.  
LI Shuang, LIU Yang, WU Kejia. Exploring mesoscopic deformation mechanism of sand in direct shear test by numerical simulation using discrete element method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(4): 104-110. (in Chinese)
- 蒋军,徐正红,徐凌峰. 颗粒体材料中的力链压曲变形[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1931-1937.  
JIANG Jun, XU Zhenghong, XU Lingfeng. Buckling deformation of force chain of granular material[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 1931-1937. (in Chinese)
- 吴跃东,罗如平,刘坚,等. 基于透明土的取土管贯入扰动变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1507-1512.  
WU Yuedong, LUO Ruping, LIU Jian, et al. Soil disturbance deformation induced by penetration of sampler tube based on transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1507-1512. (in Chinese)
- 李艳洁,刘翼晨,林剑辉,等. 圆锥指数仪贯入沙土过程的三维离散元法模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 63-68.  
[http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120711&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120711&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.011.  
LI Yanjie, LIU Yichen, LIN Jianhui, et al. 3D DEM simulations of the cone penetration tests in sandy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 63-68. (in Chinese)
- WUEST S B, SCHILLINGER W F. Small-increment electric soil sampler [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(6): 1554-1556.
- 田野,邓宗全,唐德威,等. 月球次表层取芯钻具功耗特性及地面模拟实验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(1): 166-120.  
TIAN Ye, DENG Zongquan, TANG Dewei, et al. Power consumption of lunar subsurface coring driller and earth environment stimulant experiments[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1): 166-120. (in Chinese)
- 邓宗全,田野,唐德威,等. 用于地外星球探测的一种新结构取芯钻头研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 104-110.  
DENG Zongquan, TIAN Ye, TANG Dewei, et al. Research on new structure coring bit for extraterrestrial bodies exploration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 104-110. (in Chinese)
- 田野,邓宗全,唐德威,等. 土壤钻探采样装置中的钻杆结构参数优化设计及模拟试验[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 10-15.  
TIAN Ye, DENG Zongquan, TANG Dewei, et al. Structure parameters optimization and simulation experiment of auger in lunar soil drill-sampling device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 10-15. (in Chinese)
- TIAN Ye, DENG Zongquan. Coring bit with enhanced structural parameters for improved lunar soil sampling and reduced mechanical disturbance[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2016, 29(4): 04016015.
- TIAN Y, TANG D, DENG Z, et al. Drilling power consumption and soil conveying volume performances of lunar sampling auger [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3): 451-459.
- MAKANGA J T, SALOKHE V M, GEECLOUGH D. Effect of tine rake angle and aspect ratio on soil failure patterns in dry loam soil[J]. Journal of Terramechanics, 1996, 33(5): 233-252.

- 13 王瑞麟,张贞良,喻谷源. 土槽中剪切元件的试验和剪应力计算[J]. 农业机械学报, 1979, 10(4):23-40.  
WANG Ruilin, ZHANG Zhenliang, YU Guyuan. Test and shear stress calculation of shear element in soil tank[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(4): 23-40. (in Chinese)
- 14 尹振宇. 土体微观力学解析模型:进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6):993-1008.  
YIN Zhenyu. Micromechanics-based analytical model for soil: review and development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6):993-1008. (in Chinese)
- 15 孙其诚,辛海丽,刘建国,等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊1): 83-87.  
SUN Qicheng, XIN Haili, LIU Jianguo, et al. Skeleton and force chain network in static granular material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp. 1): 83-87. (in Chinese)
- 16 孙其诚,金峰,王光谦,等. 二维颗粒体系单轴压缩形成的力链结构[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 30-37.  
SUN Qicheng, JIN Feng, WANG Guangqian, et al. Force chains in a uniaxially compressed static granular matter in 2D[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 30-37. (in Chinese)
- 17 崔金生. 采样钻具与月壤作用热力特性及温度场预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
CUI Jinsheng. Research on mechanics-thermotics characteristics of drill-lunar regolith interaction and prediction of the temperature field[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2016. (in Chinese)
- 18 杨望,蔡敢为,杨坚. 土壤直剪试验的动力学仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 96-100.  
YANG Wang, CAI Ganwei, YANG Jian. Dynamics simulation of direct shear test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 96-100. (in Chinese)
- 19 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49-54. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170306&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170306&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006.  
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49-54. (in Chinese)
- 20 邓佳玉,胡军,李庆达,等. 基于 EDEM 离散元法的深松铲仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报,2016, 37(4):14-19.  
DENG Jiayu, HU Jun, LI Qingda, et al. Simulation and experimental study on the subsoiler based on EDEM discrete element method[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4):14-19. (in Chinese)
- 21 黄玉祥,航程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7):80-85. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160712&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012.  
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):80-85. (in Chinese)
- 22 陈崇斌. 模拟月壤钻进取芯的负载特性及作业控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
CHEN Chongbin. Load characteristics of drilling and coring in lunar regolith simulant and drilling control investigation[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)