doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.051

月壤钻采取样方式对样品层理的影响*

刘天喜　魏　承　马　亮　赵　阳

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对月壤钻采任务,基于离散元月壤模型,分析了硬质管取芯与软袋取芯 2 种取样方式的层理保持特性,提出了曲面斜率法描述月壤样品的层理信息。该方法能够通过拟合曲面直观反映随钻深分布的各层月壤样品变形情况,并能够定量描述各层样品轻微扰动部分与层理破坏部分的分界范围,以及层理破坏趋势与程度。分析结果表明:取样袋能显著保护样品的层理信息,而硬质管取芯对外侧月壤样品层理破坏严重,且破坏层数较多,但层理破坏较轻微的样品直径范围与有取样袋工况差别不大。此外,2 种工况下,表层月壤样品层理信息均破坏严重,说明了表层月壤具有较强的随动性。

关键词: 月壤钻取采样　三维离散元模型　硬质管取芯　软袋取芯　层理保持特性

中图分类号: V447.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)12-0355-07

引言

月壤钻取采样是我国探月三期工程[1]的重要任务,取样方式的设计及样品层理信息保持程度是影响任务质量的关键因素。以美国和前苏联的经验,硬质管取芯和软袋取芯 2 种方式各有利弊,而其对样品层理的保持特性则是评价关键。由于地面试验难以窥探土壤内部形态,因此离散元[2-5]等数学仿真方法成为该领域的重要研究手段。

邹猛等利用 pfc2d 软件研究了月壤力学性质对月球车牵引性能的影响[6-7],蒋明镜等以改进的离散元模型研究了月壤双轴剪切破坏[8-10],但以上模型多为二维模型,较适用于边坡稳定、抗压承载[11]、剪切试验[12]等宏观整体变形工况的仿真分析,对于月壤钻取等涉及颗粒间大范围空间交错运移的情况,难免受限[13-14]。层理保持特性研究方面少有学者研究,仅赵德明[15]、崔金生[16]等进行了一些探索性研究,但提出的层理描述方法比较简单,无法细致、量化地描述层理变化形式和程度。

本文基于月壤离散元模型对硬质管取芯和软袋取芯 2 种月壤钻采取样方式进行仿真设计,提出适合描述样品层理信息的曲面斜率法,量化描述 2 种取样方式下月壤样品层理信息的破坏情况,分析 2 种取样方式的层理保持特性。

1　月壤三维离散元模型

离散元法的关键问题在于模型精准度,即通过建立合适的颗粒接触模型来描述土壤的本构关系,真实地反映目标土壤的宏观性质。而月壤由于其特殊的空间环境与形成过程,具有高内摩擦角、低内聚力的复杂力学性质[17],普通离散元本构关系很难做到精确建模,因此本文采用一种考虑扭转、弯曲力矩及等效引力作用的三维离散元模型。

1.1　颗粒接触碰撞模型

月壤三维离散元模型本构关系如图 1 所示。

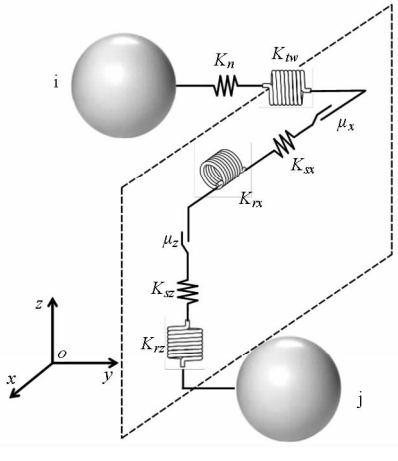

图 1　颗粒接触碰撞三维模型

Fig. 1　Three-dimensional model of particles collision

收稿日期: 2014-08-03　修回日期: 2014-08-27

*国家自然科学基金资助项目(51105100)、教育部博士点基金资助项目(20112302120007)、中国博士后科学基金资助项目(20110491050)和国家重点实验室开放基金资助项目(HIT.KLOF.2011.075)

作者简介: 刘天喜,博士生,主要从事月壤采样动力学与控制研究,E-mail: liutianxi@hit.edu.cn

通讯作者: 魏承,讲师,博士,主要从事多体系统动力学与控制研究,E-mail: weicheng@hit.edu.cn

图 1 中,i、j 代表发生接触碰撞的两颗粒,K_n 为法向接触刚度,K_{tw} 为抗扭转刚度。由于接触平面内的切向、弯曲应变均为平面向量,可将其沿 x 轴与 z 轴方向分解,并定义相应的接触刚度。其中,K_{sx}、K_{sz} 为切向接触刚度,K_{rx}、K_{rz} 为抗弯曲刚度,μ_x、μ_z 为摩擦因数,φ 为颗粒摩擦角,并且有

$$\begin{cases} K_{sx} = K_{sz} = K_s \\ K_{rx} = K_{rz} = K_r \\ \mu_x = \mu_z = \tan\varphi \end{cases} \tag{1}$$

1.2 颗粒法向、切向接触力计算

传统颗粒接触力学模型在法向、切向接触力的计算中大多仅考虑两颗粒相互嵌入时的情况,而对于已分离的两颗粒,则通过添加非张力连接或分离器,忽略颗粒间的相互引力。然而真实月壤颗粒间存在较强的静电引力、范德华力等复杂作用力,因而已分离的月壤颗粒间仍存在一定的相互作用。从静电引力与范德华力的常见公式中可知这 2 个力均与颗粒间距离的若干次方呈反比,且作用范围很小。但在离散元仿真中,考虑到计算效率,粒径通常选取真实月壤的十倍左右,此时如果再用真实的静电引力与范德华力计算公式,则得到的结果将严重失真。因此,为了体现出颗粒间的引力作用,本文采用等效的思想来计算引力。本模型将以上复杂作用力综合考虑为抵抗弹簧拉伸的等效引力作用,并设定最大边界值作为引力失效区。此时法向接触力为

$$\begin{cases} \boldsymbol{F}_n' = \boldsymbol{n}\min\left(K_n\varepsilon_n, C_n\right) \\ C_n = \alpha_n\pi\left(\min\left(r_i, r_j\right)\right)^2 \\ \boldsymbol{F}_n = \left(1 - \lambda_d \operatorname{sgn}\left(\boldsymbol{F}_n'\boldsymbol{v}_i\right)\right)\boldsymbol{F}_n' \end{cases} \tag{2}$$

式中 ε_n——法向应变 $\boldsymbol{n}$——法向单位向量

λ_d——阻尼系数,用来表示模型全局阻尼效应(通过增加反力 $\Delta\boldsymbol{F}_d = -\lambda_d \operatorname{sgn}(\boldsymbol{F}\boldsymbol{v})\boldsymbol{F}$ 实现)

C_n——颗粒间临界法向黏聚力,为等效引力法向分量的最大值

α_n——临界法向黏聚系数

r_i、r_j——相互作用的两颗粒半径

切向接触力则表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{F}_s' = \dfrac{\boldsymbol{\varepsilon}_s}{|\boldsymbol{\varepsilon}_s|}\min\left(|K_s\boldsymbol{\varepsilon}_s|, |\boldsymbol{F}_n|\tan\varphi + C_s\right) \\ C_s = \alpha_s\pi\left(\min\left(r_i, r_j\right)\right)^2 \\ \boldsymbol{F}_s = \left(1 - \lambda_d \operatorname{sgn}\left(\boldsymbol{F}_s'\boldsymbol{v}_i\right)\right)\boldsymbol{F}_s' \end{cases} \tag{3}$$

式中 K_s——切向接触刚度 $\boldsymbol{\varepsilon}_s$——切向应变

C_s——颗粒间临界切向黏聚力,为等效引力切向分量的最大值

α_s——临界切向黏聚系数

当法向或切向接触力达到最大值,即临界法向或切向黏聚力时,根据颗粒间不同的相对位置以及达到最大值的先后顺序可分为 3 种情况,如图 2 所示。

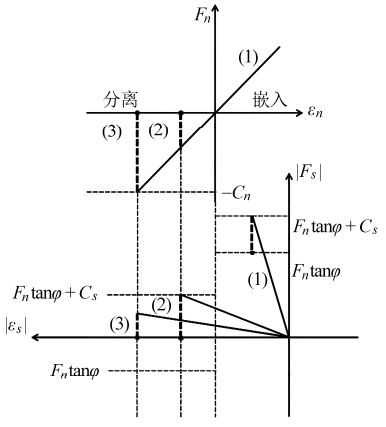

图 2 法向、切向接触力

Fig. 2 Normal and shear contact force

(1)切向接触力先达到最大值且两颗粒仍处于嵌入状态:切向接触力由 $F_n\tan\varphi + C_s$ 变为 $F_n\tan\varphi$,作为切向接触力的增长限制,法向接触力仍按弹簧变形量计算。

(2)切向接触力先达到最大值且两颗粒已处于分离状态:切向接触力由 $F_n\tan\varphi + C_s$ 变为 0,法向接触力同样变为 0,进入等效引力失效区。

(3)法向接触力先达到最大值:此时两颗粒必处于分离状态(因为嵌入状态法向接触力无最大限制),切向、法向接触力同时变为 0,进入等效引力失效区。

1.3 颗粒扭转、弯曲力矩计算

扭转与弯曲作为颗粒间的主要力矩作用形式,对月壤宏观抗剪强度存在巨大影响。首先根据迭代时步建立相对转角与颗粒角速度差的对应关系为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Theta}_{tw} \\ \boldsymbol{\Theta}_{rx} \\ \boldsymbol{\Theta}_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pr j_y \\ \Pr j_x \\ \Pr j_z \end{bmatrix}(\boldsymbol{\omega}_1 - \boldsymbol{\omega}_2)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{\Theta}_{tw}$——颗粒相对扭转角

$\boldsymbol{\Theta}_{rx}$、$\boldsymbol{\Theta}_{rz}$——颗粒相对弯曲角

$\Pr j_i$——在某方向上的分量

然后根据所定义的接触刚度计算出扭转、弯曲力矩

$$\begin{bmatrix} M_{tw} \\ M_{rx} \\ M_{rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tw} & 0 & 0 \\ 0 & K_r & 0 \\ 0 & 0 & K_r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Theta}_{tw} \\ \boldsymbol{\Theta}_{rx} \\ \boldsymbol{\Theta}_{rz} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中 K_{tw}——抗扭转刚度

K_r——抗弯曲刚度

1.4　参数标定

以文献[18]中提及的月壤内聚力和内摩擦角最佳估计值以及 Scott[19] 在地面利用真实月壤样品所做的试验曲线为参考标准，通过三轴仿真试验对上述模型的细观参数进行标定，结果如表 1 所示。

表 1　月壤离散元模型细观参数

Tab. 1　Meso-structure parameter of soil discrete element model

参数	数值
颗粒摩擦角/(°)	60
颗粒弹性模量/MPa	45
切向法向刚度比	0.5
阻尼系数	0.3
颗粒密度/(kg·m^{-3})	2 900
临界法向黏聚系数/Pa	10^{-9}
临界切向黏聚系数/Pa	10^{-9}
抗弯曲系数	10
抗扭转系数	3

以该组细观参数建立的月壤模型，经三轴仿真试验测定，其宏观属性为内摩擦角 42.25°，内聚力 0.90 kPa，满足真实月壤性能要求。

2　月壤钻采取样仿真设计

2.1　取样方式

钻取任务期望得到的月壤样品能够很好地保持其层理信息，而层理保持特性与钻取过程中的取芯方式设计等众多因素有关。目前主流的取芯方式设计思想有：有取样袋和无取样袋。

无取样袋方式以硬质取芯管直插方式取样，钻杆内部通过轴承等部件固定取样芯管，钻进时月壤样品直接进入芯管内，取样结束后通过反转钻具等措施使芯管末端的封口机构闭合，再由专门的芯管拔取设备将芯管拔出，最终芯管与样品一起收回，如图 3 所示。该方法钻具结构简单，可靠性高，但样品会与取芯管内壁持续接触，样品外侧在钻进全过程均受到向下的摩擦力作用。

有取样袋方式以芯管支撑取样软袋，靠软袋的同步翻折释放包裹月壤样品实现取样，钻进之前软袋折叠在芯管与钻杆内壁之间，由软袋拉绳固定其初始位置，钻进过程中芯管随钻杆向下运动，迫使软袋不断向内翻折进而将月壤样品包裹住(图 4)，这期间翻进芯管内部的软袋与月壤样品是相对静止的，所以能对其层理信息起到很好的保护作用。钻进结束后软袋末端的封口组件将软袋口系实，整个软袋样品在拉绳作用下从芯管内被抽出，由整形机构盘绕成为收容样品。该方法钻具结构复杂，可靠性较低，但样品仅与钻头部分发生摩擦，大部分时间会受到取样袋的保护，不与芯管产生摩擦作用。

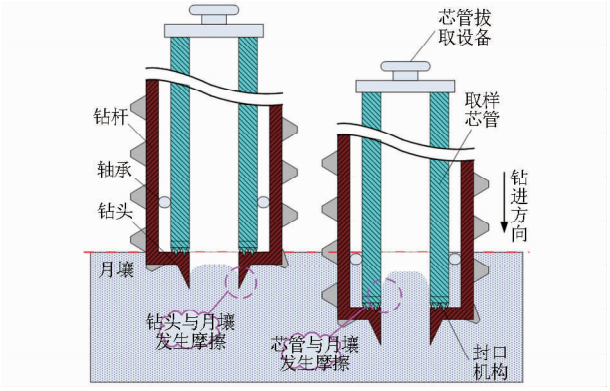

图 3　硬质管取样示意图

Fig. 3　Sampling by hard tube

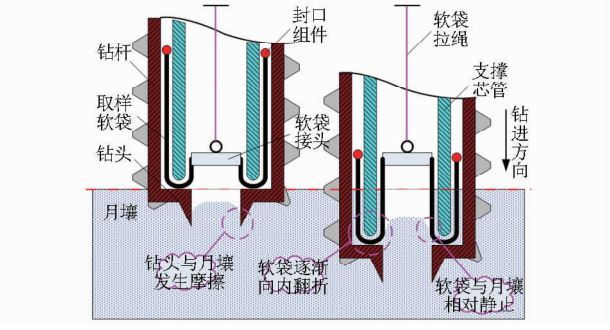

图 4　软袋取样示意图

Fig. 4　Sampling by soft sack

2 种取样方式各有利弊，因此需通过评价样品层理信息的保持情况来分析 2 种方式的特点与优劣。

2.2　取样方式仿真设计

基于离散元的仿真试验须实现有、无取样袋的两种工况设计，区别在于钻具的内部结构。无取样袋工况设计为钻具的钻头与钻杆内径相等，直接以钻杆内壁作为取样芯管的模拟；有取样袋工况设计为钻具的钻杆内径略大于钻头内径，并在空余出的区域内生成代表取样袋的一系列圆柱面，该面的材料参数摩擦属性部分选取为与实际取样袋的材料参数相同，而刚度与无取样袋工况钻杆内壁相同，以模拟支撑芯管。圆柱面的生成方法设计为：生成速度与钻进速度相同，钻具每钻进一定深度就生成一小段圆柱面，如此反复，用以模拟软袋不断向内翻折过程，如图 5 所示。

3　层理信息描述与仿真分析

3.1　样品层理信息描述方法

对层理信息的描述不仅是月壤钻取的重要关注方面，也是地质勘探、原位取样、板壳分析等各领域的关注重点，但由于受到土壤内部观测手段限制，很少有学者提出合适的描述方法进行工程应用。随着

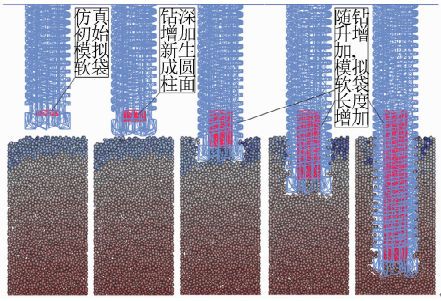

图 5 取样袋生成方法

Fig. 5 Generation method of soft sack

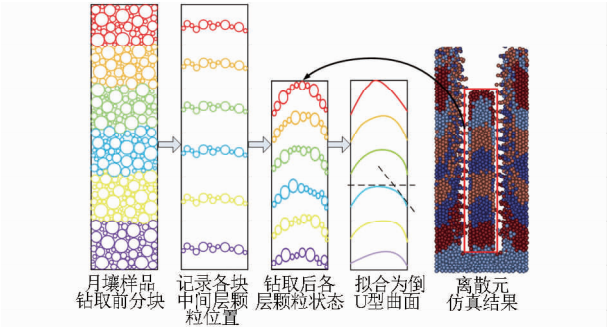

图 6 曲面斜率描述方法

Fig. 6 Description method of surface slope

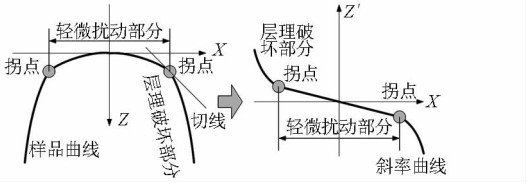

图 7 曲面斜率含义

Fig. 7 Meaning of curved surface slope

离散元在土工学领域的广泛应用,使得土壤样本的内部情况可观测,层理信息描述可以结合离散元方法得到实现。赵德明[15]等针对月壤钻取提出了单颗粒绝对位移、多颗粒绝对位移、多颗粒相对位移等多个层理保持特性的评价指标,但其本质都是一种宏观评价方法,此类方法并不适用于较细致的层理分析。而且该类方法存在明显缺陷:由于钻取过程中的月壤样品受钻具压缩,存在较大范围的整体绝对位移,并且在钻取过程中体现出越接近表面的颗粒绝对位移越大的趋势。这种现象会使得平均绝对位移或平均相对位移的计算数值增大,造成评价指标的虚高,从而无法完成对层理保持特性的准确评价,只能体现出样品整体在纵向上运移的大致趋势。

由目前已有的仿真与试验经验可知,对于芯管内圆柱状的月壤样品,由于其靠外侧的部分与钻具间存在摩擦作用,使得月壤样品的层理保持特性存在由内向外逐渐变差的特点。考虑到这一实际问题,本文提出曲面斜率法来进行样品层理信息描述。首先对钻取前的月壤沿深度进行等距划分,得到若干分块月壤,再从每块中部抽取一层月壤颗粒,记录这些颗粒在钻取结束后的位置,此时颗粒位置为若干个离散点,为准确描述各层颗粒的变形情况,采用非线性拟合方法将离散点拟合为空间曲面,描述过程截面示意图如图 6 所示。钻取后的月壤样品层通常呈现倒 U 字型,即每层中间部分较平滑,而外侧由于受到向下的摩擦作用而迅速向下弯曲,针对此种弯曲特性,空间曲面拟合方程设计为

$$z = a\exp(c(x^2 + y^2)) + b \tag{6}$$

式中 z——深度坐标 x、y——径向坐标

a、b、c——拟合系数

而由于该曲面通常呈轴对称,分析时可仅截取其中间曲线进行分析,对应的曲线方程为

$$z = a\exp(cx^2) + b \tag{7}$$

图 7 所示为样品曲线与其斜率曲线的对应关系。从样品曲线形状可直观看出钻取后每层样品的变形情况,中间部位变形平缓,说明中部样品只在其他颗粒运动影响下受到轻微扰动,而拐点两侧曲线迅速下降,说明外侧颗粒已在钻具摩擦作用下发生明显随动,层理信息破坏严重。样品曲线每处的切线斜率 K 是定量描述样品层理信息的最佳参数。K 值越小说明样品曲面在此处的弯曲趋势越小,反之则弯曲趋势越明显。此外,拐点位置是斜率曲线的重要参数,两拐点之间部分斜率几乎成线性变化,与样品中间轻微扰动部分相对应,而拐点两侧斜率呈现指数变化,代表层理信息从此处开始受到严重破坏。

3.2 不同取芯方式层理保持分析

针对上述有取样袋和无取样袋 2 种取样方式,分别进行了 166 mm 钻深的离散元仿真,所得样品共分 12 层,样品直径 15 mm,2 种工况下的样品颗粒截面图如图 8 所示。从仿真结果可直观看出:在有取样袋工况下,虽然上层月壤外侧颗粒存在一定的向下滑移,但下层月壤基本保持了平直的截面形状。而在无取样袋工况下,上层月壤外侧颗粒的滑移量更大,且发生向下滑移的层数也增多。这说明,取样软袋确实对样品层理信息起到了一定的保护作用。

取 2 种工况前 10 层进行曲面拟合,结果如图 9 所示。有取样袋工况下拟合曲面的弯曲程度小于无取样袋工况,同样说明有取样袋工况下月壤样品的层理特性保持更为完好。同时,从图 8 与图 9 的相互对应中可以看出拟合曲面可以准确地表现各层月壤样品的层理特性,具有较高的吻合度。

采用曲面斜率法将 2 种工况的拟合曲面斜率按

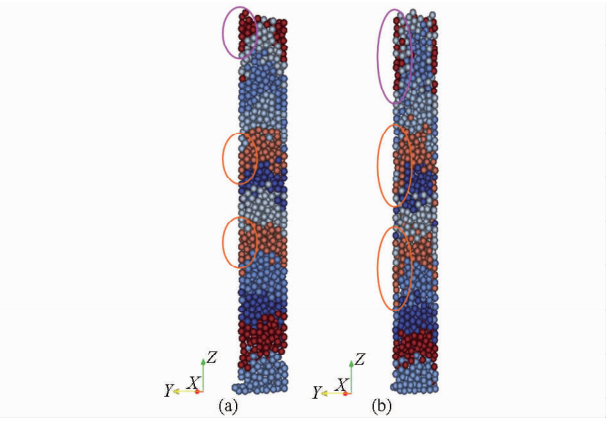

图 8　样品颗粒截面层理特性

Fig. 8　Bedding features of sample particles

（a）有取样袋　（b）无取样袋

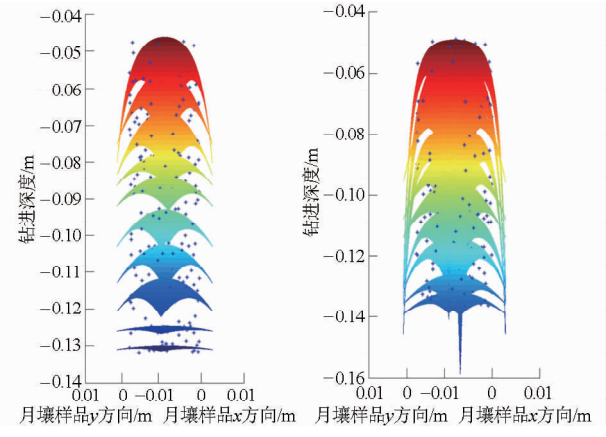

图 9　拟合曲面层理特性

Fig. 9　Bedding features of fitting surface

（a）有取样袋　（b）无取样袋

样品径向方向输出，得到可量化的分析曲线如图 10 所示。

有取样袋工况第 2 ~ 10 层样品斜率均不超过 5，而且呈线性变化，说明从第 2 层往下样品只受到轻微扰动，层理信息并无明显破坏，仅第 1 层样品斜率发生指数弯曲，斜率最高达到 10 左右，拐点位置在径向 ±4.5 mm 处，说明第 1 层样品中部 9 mm 直径范围内层理信息破坏较小，但其外侧颗粒已发生明显的向下滑移，层理信息破坏严重。

无取样袋工况仅刚与钻具接触不久的第 8 ~ 10 层样品斜率仍为线性变化，而第 1 ~ 4 层已发生明显的指数变化，斜率最高达到了 25，拐点基本都发生在径向 ±4 mm 处，说明前 4 层样品中部 8 mm 直径范围内样品仅受到轻微扰动，但其外侧层理信息已遭到严重破坏；第 5 ~ 7 层也开始发生一定的指数弯曲，斜率最高达到 9，拐点发生在径向 ±5.75 mm 处，说明此 3 层样品中部 11.5 mm 直径范围内样品层理信息保持较好，其外侧样品层理已破坏严重。

综上所述，有取样袋工况样品层理信息保持特性整体上优于无取样袋工况。有取样袋时仅表层样品层理信息破坏严重，其他层均受到了很好保护，而无取样袋时 2/3 样品层均有层理严重破坏的部分，说明取样软袋在保护样品层理信息方面作用显著，尤其是样品靠外侧部分。而无取样袋工况虽然多层样品外侧层理信息均破坏严重，但对内侧样品层理信息的扰动程度与有取样袋时差别不大。

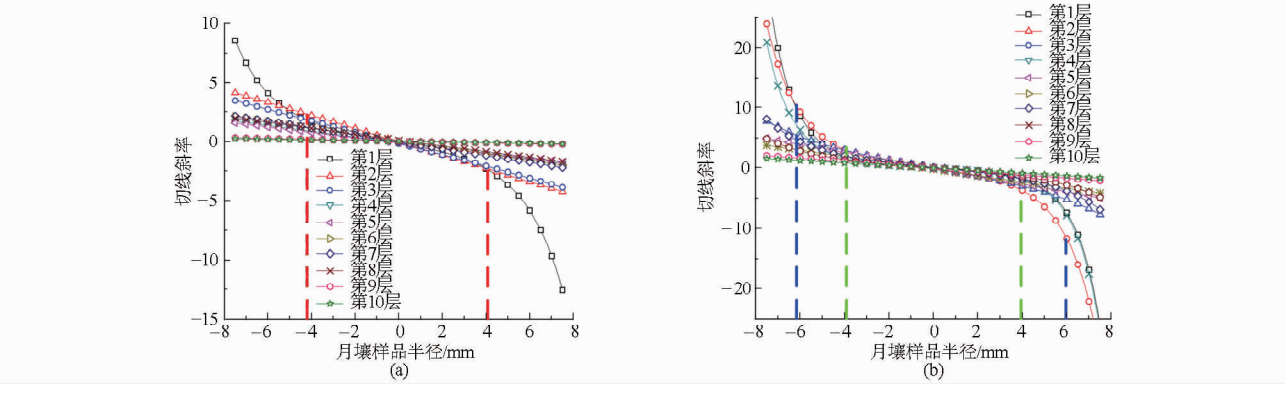

图 10　截面曲线切线斜率

Fig. 10　Tangent slope of section curves

（a）有取样袋　（b）无取样袋

4　结论

（1）基于建立的离散元月壤模型，实现了月壤钻采过程有无取样袋 2 种工况的仿真分析，提出了曲面斜率法描述月壤样品的层理信息。

（2）曲面斜率法能够通过拟合曲面直观反映钻取过程随钻深分布的各层月壤样品变形情况，与离散元仿真结果吻合，并能够定量描述各层样品轻微扰动部分与层理破坏部分的分界范围，以及各层样品的层理破坏趋势与程度。该方法通过改变拟合函数形式也可用于其他地质分析的层理描述中。

（3）仿真结果表明取样袋对样品的整体层理信息保护效果显著，除表层外其他各层样品层理信息均未受到严重破坏。无取样袋的硬质管直插取样方

式对月壤样品尤其是外侧部分层理信息破坏严重，且破坏层数较多，但层理破坏较轻微的样品直径范围与有取样袋工况差别不大。

(4)无论哪种取样方式，表层月壤样品的层理信息均受到严重破坏，说明表层月壤较疏松，颗粒流动性强，极易在钻具摩擦作用下发生随动行为。

参 考 文 献

1 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351 - 358.
Ouyang Ziyuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(3): 351 - 358. (in Chinese)

2 Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47 - 65.

3 Donzé F V, Richefeu V, Magnier S A. Advances in discrete element method applied to soil, rock and concrete mechanics[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 8: 1 - 44.

4 Oida A, Momozu M. Simulation of soil behavior and reaction by machine part by means of DEM[J]. CIGR, E-Journal, 2002, 4: 1 - 7.

5 Obermayr M, Dressler K, Vrettos C, et al. A bonded-particle model for cemented sand[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 299 - 313.

6 李建桥,邹猛,贾阳, 等. 月球车轮与月壤相互作用动力学模拟[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 1 - 4.
Li Jianqiao, Zou Meng, Jia Yang, et al. Research on the interaction between lunar rover wheel and lunar soil by simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 1 - 4. (in Chinese)

7 李因武, 李建桥, 邹猛, 等. 月壤力学性质对月球车牵引性能影响的模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 1 - 4.
Li Yinwu, Li Jianqiao, Zou Meng, et al. Simulation of traction ability of lunar rover with different mechanics of lunar soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 1 - 4. (in Chinese)

8 Jiang M J, Yu H S, Harris D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(5): 340 - 357.

9 Jiang M J, Shen Z F, Thornton C. Microscopic contact model of lunar regolith for high efficiency discrete element analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 54: 104 - 116.

10 蒋明镜, 郑敏, 王闯. 月壤双轴试验的剪切带离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3801 - 3809.
Jiang Mingjing, Zheng Min, Wang Chuang. Distinct element analysis of shear band of lunar soil in biaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3801 - 3809. (in Chinese)

11 蒋明镜, 贺洁, 刘芳. 基于离散元颗粒抗转模型的平移刚性挡墙被动土压力分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2788 - 2795.
Jiang Mingjing, He Jie, Liu Fang. Distinct element simulation of passive earth pressure against a translating rigid wall using a rolling resistance contact model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2788 - 2795. (in Chinese)

12 蒋明镜, 张伏光, 孙渝刚, 等. 不同胶结砂土力学特性及胶结破坏的离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 1969 - 1976.
Jiang Mingjing, Zhang Fuguang, Sun Yugang, et al. DEM simulation of mechanical behaviour and bond breakage of different cemented sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 1969 - 1976. (in Chinese)

13 Zhao C. Computational simulation of frictional drill-bit movement in cemented granular materials[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(8): 877 - 885.

14 Stavropoulou M. Modeling of small-diameter rotary drilling tests on marbles[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(7): 1034 - 1051.

15 赵德明. 月壤在取样管内填充特性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
Zhao Deming. Research on the filling characteristic of lunar soil in sampling pipe[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

16 崔金生. 模拟月壤的填充模型及特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
Cui Jinsheng. Research on filling model and characteristic of lunar soil simulant[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

17 Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar sourcebook[M]. London: Cambridge University Press, 1991.

18 Gromov V. Physical and mechanical properties of lunar and planetary soils[J]. Earth Moon and Planets, 1998, 80(1): 51 - 72.

19 Scott R F. 27th Rankine lecture-failure[J]. Geotechnique, 1987, 37(4): 423 - 466.

20 Liu Tianxi, Wei Cheng, Liang Lei, et al. Simulation and analysis of the lunar regolith sampling process based on the discrete element[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2014,57(6): 309 - 316.

21 刘天喜,魏承,马亮,等. 大颗粒岩块对月壤钻取过程的影响分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(11):2118 - 2126.
Liu Tianxi, Wei Cheng, Ma Liang, et al. Effect of large granular rocks on drilling process of lunar soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(11): 2118 - 2126. (in Chinese)

Influence of Coring Methods on Sample Bedding in Lunar Soil Drill-sampling

Liu Tianxi　Wei Cheng　Ma Liang　Zhao Yang
(*School of Astraunutics*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150001, *China*)

Abstract: Aiming at the lunar soil drill-sampling task, the bedding protection performances of two coring methods, hard tube coring and soft sack coring, are analyzed based on discrete element model. A curved surface slope method is proposed to describe the bedding information of the lunar soil sample. It can directly reflect the deformation of each layer of lunar soil sample distributed with drilling depth by curvefitted surface, and quantitatively illustrate the boundary between the slightly perturbed part and bedding damage part in each layer, and also the trend and degree of the bedding failure. Analysis results show that the soft sack can significantly protect the sample bedding information. The hard tube coring method destroys the bedding of outside sample seriously, and damages more layers, while there is no obvious difference in the scope that is slightly perturbed from the soft sack coring. Additionally, in both work conditions, the bedding information of surface regolith is damaged severely, which indicates that the lunar regolith on the surface has great follow-up property.

Key words: Lunar soil drill-sampling　Three-dimensional discrete element model　Hard tube coring　Soft sack coring　Bedding protection performance