

基于试验的模拟月壤表层取样理论修正及其应用

李 谦¹, 段隆臣², 高 辉²

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:月球探测对于我国各方面综合实力的提升均具有巨大的推动作用。当前我国各研发机构对月球采样的研发重点集中于采样机具的设计制造上,对采样机具和月壤之间相互作用却研究较少。与地球土壤相比,月壤的形成环境与条件完全不同,从而造就了其较为特殊的物理力学性质。在利用与真实月壤类似的模拟月壤进行的薄壁圆筒贯入试验中,发现存在月壤滞留和月壤附壁现象,从而分析得出在采样机具表面与月壤相互作用的理论分析中,除了传统的摩擦力理论外,还可通过最大抗剪强度进行分析。通过对试验现象和数据对比摩擦力理论和最大抗剪强度理论发现,最大抗剪强度理论更加符合实际情况。故将最大抗剪强度理论引入已有的月球螺旋钻进采样的理论模型中,通过计算得出基于最大抗剪强度理论计算的螺旋临界转速低于基于摩擦力理论计算的临界转速,在一定程度上能够降低采样机具的能耗。

关键词:月球采样;模拟月壤;理论分析;摩擦力;最大抗剪强度

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)09-0075-06

Correction and Application of Lunar Soil Simulation Surface Sampling Based on Experiments/LI Qian¹, DUAN Long-chen², GAO Hui² (1. College of environment and civil engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Lunar exploration plays a huge role in enhancing China's comprehensive strength in all aspects. At present, the researches on lunar sampling are focused on designing and manufacturing the sampling devices instead of the interaction between sampling device and lunar soil. Compared with the Earth's soil, the different conditions and environment during the formation process make the lunar soil become more special in mechanical properties. During the thin-walled cylinder penetration experiments with lunar soil simulation two phenomena (including lunar soil retention and lunar soil adhesion) were observed, and it was indicated that besides the traditional theory of friction, the theory of maximum shear strength also could be used in analyzing the interaction between sampling devices and lunar soil. Through analyzing of experimental phenomena and data, maximum shear strength theory is closer to actual practice than friction theory. As a result, the maximum shear strength theory is introduced to an existing lunar spiral drilling theoretical model, according to the calculation results, the spiral critical speed based on maximum shear strength is lower than that based on friction, which means lower energy consumption for lunar sampling devices.

Key words: Lunar sampling; Lunar soil simulation; theoretical analysis; friction; maximum shear strength

0 前言

我国“嫦娥工程”计划将于2017年左右发送无人值守的航天器登陆月球^[1],完成采样后自动返回地球。参考其他国家已完成的月球采样任务,美国Apollo系列每次任务均有宇航员人工协助;而前苏联的Luna系列任务无人值守,由于工艺及机构的复杂性导致可靠性降低,3次任务仅获得0.321 kg样品,远低于美国Apollo系列的381.7 kg^[2],由此可见我国设计的无人值守采样航天器必须经过精确的设计和大量的地表试验。

目前国内在该领域内的研发上比较突出的研究成果包括南京航空航天大学研发的超声波钻探采样

器^[3],北京航空航天大学研发的多杆深层采样器^[4],中科院沈阳自动化研究所将钻取和铲取功能合二为一的机器人化月表采样机器人^[5],东南大学研发了卷簧式自动月壤采样器^[6]以及哈尔滨工业大学更是完成了滑轨式、多杆组接式、绳驱式、导轨摆臂式等多种不同的月壤采样装置^[7-10]。针对目前国内各大研究机构的研发现状,可归纳为当前研究的重点集中在采样机具的研发和设计上,深层采样机具无一例外采用的是钻取式结构,区别仅在于取样方式和钻杆的结构设计;而表层采样机具多种多样,包括挖取、铲取、夹取、研磨等形式。但无论是深层采样还是表层采样均侧重于采样机具结构和运

收稿日期:2014-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目“模拟月壤物理力学特性对钻进过程的影响机理研究”(51204151)

作者简介:李谦(1987-),男(汉族),四川德阳人,成都理工大学教师,地质工程专业,博士,从事检测技术在地质工程中的应用相关教学与科研工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,ql_eye@163.com;段隆臣(1967-),男(汉族),江西九江人,中国地质大学(武汉)教授,博士生导师,地质工程专业,博士,从事钻探工艺与岩石破碎相关的教学与科研工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,duanlongchen@163.com。

动设计,对采样机具和月壤(月岩)之间相互关系研究较少。尽管各研究机构在采样机具的研发设计过程中均会进行该机具的计算机模拟计算,但在缺乏理论支撑的条件下进行的计算机模拟计算精确程度还值得商榷。

本文根据相关资料的调研,首先对月壤(模拟月壤)进行了其自身物理力学性质的特征分析,对薄壁圆筒贯入试验中出现的试验现象进行了理论分析,针对月壤与机具接触面的相互作用提出了有别于当前常规摩擦力理论的最大抗剪强度理论并进行了一定的验证和理论应用分析。

1 月壤及模拟月壤特征分析

相比地球土壤在空气、水、不同的气候以及生物活动的共同作用下由岩石风化而成的形成过程,月壤的形成在与地球完全不同的月球环境条件下,则是由陨石撞击、宇宙射线的不断轰击、月表大幅度的温差变化等因素共同形成的,其主要的形成过程是由机械破碎过程主导的^[11]。通过历年来世界各国对月球的探测,可知月球表面除了极少数地区可能有基岩出露外,绝大部分地区均由厚度不同的月壤层覆盖,其最低的厚度也达4~5 m。对比当前国内外公认的表层取样1 m的深度范围^[12],可以认为当前月球表层取样的主要对象为月壤。相比地球土壤,月壤的特殊形成过程导致了其较为特殊的性质,其主要性质可描述如下^[11]。

(1) 粒度分布特征:粒度较小,绝大部分小于1 mm,但分布范围很宽,最大也有超过10 mm的月壤颗粒出现,根据相关资料,将美国 Apollo 11~17 和前苏联 Luna 16、20 登月取回的样品进行分析可知各次采样的中值粒径在41~802 μm 范围内均有分布。

(2) 颗粒形态特征:月壤形成环境中没有受到流水或刮风等风化作用影响,使其形成高度变化的颗粒形态,从球形至极端棱角状均有出现。各种颗粒形状之间相互搭接锁死,使月壤尽管粒径较小,但抵抗外部机具侵入的能力提高。

(3) 天然容重:月壤天然容重变化范围较大,同

一采样点的容重随深度增长而增长,不同采样点之间的样品容重差距较大没有可比性。

(4) 颗粒比重:月壤的颗粒比重与其自身的矿物成分密切相关,最小比重仅1.0,而最大比重可达3.32,绝大部分月壤颗粒比重在2.9以上,明显高于地球土壤的2.6~2.7。

(5) 孔隙比和孔隙率:一般地球粘性土的孔隙率为30%~60%,无粘性土的孔隙率为25%~45%,而对月壤而言,根据相关理论进行分析计算的结果为随着深度的变化,在60 cm的深度范围内,月壤的孔隙度将从表面的52%下降至46%,在一定程度上说明了月壤的高压缩性特征。

(6) 粘聚力和内摩擦角:作为月壤抗剪强度的2个重要指标,经过 Apollo 和 Luna 计划中月球车在月表数以千次的分析,可得粘聚力和内摩擦角的参数将随着深度的增加而显著增加,其最佳估计值如表1所示。

表1 月壤抗剪强度指标随深度变化估计值^[2]

深度 /cm	粘聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
0~15	0.44~0.62	0.52	41~43	42
0~30	0.74~1.1	0.9	44~47	46
30~60	2.4~3.8	3.0	52~55	54

由于真实月壤极其珍贵,但月球探测工程的模型试验需要大量的基础材料,因此国内外先后研发了大量的与真实月壤化学组成和物理力学性质相似的岩土材料,称之为模拟月壤。本论文所述的试验数据源自于中国地质大学(武汉)提供的 CUG_1.50 型模拟月壤。其原材料选自于吉林省辉南县大椅子山乡龙岗火山群的火山灰(主要矿物成分为橄榄石、辉石、斜长石以及少量的磁铁矿、磷灰石等)以及江苏省南京市六合县八百桥镇的塔山玄武岩(主要矿物为普通辉石、斜长石、橄榄石、磁铁矿和玻璃)。将原材料烘干、粉碎筛分出不同粒径的颗粒,再结合真实月壤粒度分布特点将其进行混合得到最终的模拟月壤 CUG_1.50^[13],该模拟月壤与真实月壤的物理性质对比如表2所示。

表2 CUG_1.50 型模拟月壤与真实月壤物理性质对比^[2]

样品	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率/%	孔隙比	颗粒比重	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
Apollo11	1.36~1.80	40.12~54.75	0.67~1.21	3.01	1.3~3.4	10~27
Apollo14	0.89~1.55	46.52~69.33	0.87~2.26	2.90	1.3~3.4	10~27
Apollo14	0.87~1.51	48.45~70.33	0.94~2.37	2.93	1.3~3.4	10~27
Apollo15	1.10~1.89	41.52~65.99	0.71~1.94	3.24	1.3~3.4	10~27
CUG_1.50	1.40~1.90	29~58	0.33~1.40	2.88	0.2~1.7	18~29

2 修正理论的提出

2.1 修正理论的提出

当使用模拟月壤进行未施加振动和旋转的薄壁圆筒贯入阻力试验时,发现存在如图 1 所示反常试验现象,主要可归纳为月壤滞留和月壤附壁现象。对月壤滞留现象而言,在机具达到试验设定的贯入位移后将其从模拟月壤中向外抽出时,易发生模拟月壤滞留在贯入筒内一起被携带出月壤槽的现象,月壤槽内则形成与贯入圆筒外径相等的孔洞,如图 1 中下方模拟月壤上出现的圆柱形的坑(原本应在坑中的月壤此时在上方的贯入圆筒内)就是月壤滞留现象。而月壤附壁现象则是在机具完成试验完全抽出模拟月壤后,可观察到在机具内外表面附有一层极薄的模拟月壤,该层模拟月壤在机具表面的高度等于机具贯入模拟月壤的深度(图 1 上方机具外部附上的一个月壤薄层)。

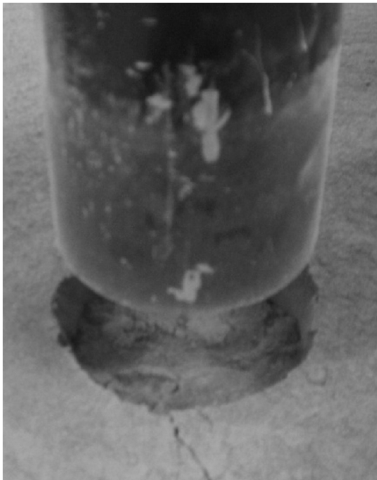


图 1 月壤滞留和月壤附壁试验现象

若将月壤(模拟月壤)视为一种特殊的地球土壤,则可利用经典土力学理论进行分析。常规分析中认为试验中出现的现象可用机具与月壤之间的摩擦力进行解释,但笔者认为这种现象可以用月壤内部最大抗剪强度理论进行更加精确的描述和分析,其最主要的证据就来自于月壤附壁现象。月壤附壁现象可认为是由于模拟月壤颗粒较细且颗粒间胶结力较小,而机具表面本身不光滑,导致细小颗粒镶嵌于表面的微孔隙中,类似于粉笔在黑板写字的形式粘附于机具表面。如图 2 所示,由于月壤附壁作用的存在,在贯入模拟月壤的过程中,附在机具壁上的模拟月壤随机具一起向下运动,故认为贯入机具内/外接触面机土相互作用力为附壁的模拟月壤与周围模拟月壤之间剪应力的宏观表现。模拟月壤只有在达到最

大抗剪强度后才能发生剪切滑动,因此可通过最大抗剪强度理论计算机具内/外接触面的相互作用力。

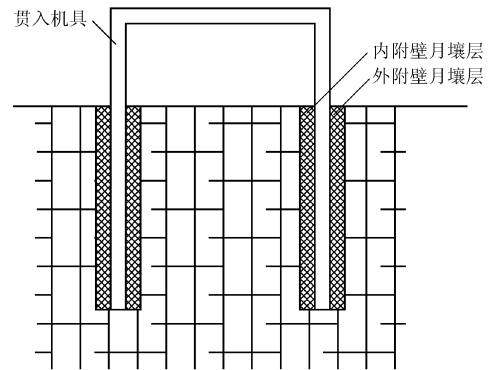


图 2 月壤附壁现象示意

常规的摩擦力理论和最大抗剪强度理论两种理论的核心区别在于紧贴机具表面的一层模拟月壤是否跟随机具一起运动。若该月壤层保持原始位置不变,不跟随机具一起运动则两者之间的作用力为摩擦力,直接可用于计算机具与月壤之间的相互作用力。相反若该月壤层与机具之间没有相对运动,跟随机具一起运动,则用于计算机具与月壤之间相互作用力的理论需要修正为最大抗剪强度理论,机具运动的阻力可视为附壁月壤层和其他月壤层之间的最大抗剪强度的宏观表征。下文通过计算来证明两者间的精确程度。

2.2 修正理论与原理论的对比验证

2.2.1 定性对比验证

若对月壤滞留现象进行受力分析,则滞留在贯入圆筒中的月壤柱仅承受四周向上的反力和自身的重力作用。常规的摩擦力理论和最大抗剪强度理论则分别用于计算月壤柱四周向上的反力,判断是否该反力能够平衡其自身重力。

令贯入圆筒内径为 r ,月壤密度为 ρ ,重力加速度为 g ,滞留在贯入圆筒内的月壤柱高度为 h ,则可计算滞留的月壤柱自身重力 G 为:

$$G = \rho gh \pi r^2 \quad (1)$$

令月壤静止土压力系数为 K_0 ,月壤与机具内壁的摩擦系数为 f ,内摩擦角为 φ ,则根据静止土压力的定义可得滞留的月壤柱与机具内壁之间产生的静摩擦力 F_f 为:

$$F_f = \rho gh^2 \pi r K_0 f \quad (2)$$

令月壤粘聚力为 c ,同样以静止土压力作为其抗剪滑动力的竖直作用力,由最大抗剪强度的定义可知滞留的月壤柱与机具内壁之间产生的最大抗剪滑动力 F_s 为:

$$F_s = c + \rho gh^2 K_0 \pi r \tan \varphi \quad (3)$$

结合式(1)~式(3)可对2种不同理论进行定性的比较。若用摩擦力理论进行月壤滞留现象的分析,则滞留的月壤柱自身重力 G 必须与滞留的月壤柱与机具内壁之间产生的静摩擦力 F_F 平衡,有 $G = F_F$,则可得月壤柱滞留长度 h 和贯入圆筒内壁半径 r 需满足以下关系:

$$hK_0 f = r \quad (4)$$

根据静止土压力的定义,静止土压力系数 $K_0 = 1 - \sin \varphi < 1$,而摩擦力系数 f 一般也有 $f \leq 1$ (经测量,试验用模拟月壤 $f=0.45$),故若等式(4)成立则需要滞留月壤柱的长度 h 大于贯入圆筒的半径 r ,而根据试验的观察所有滞留现象发生并不只发生在贯入深度大于贯入圆筒半径的条件下,如图1所示月壤滞留的现象发生时其滞留长度 h 就小于贯入圆筒内径 r ,因此可认为用摩擦力理论对月壤滞留现象进行解释存在误差。若用最大抗剪强度的理论进行月壤滞留现象的分析,由于月壤粘聚力 c 的存在,则可能满足月壤滞留的条件。

2.2.2 定量对比验证

除以上分析外,试验过程中通过传感器记录了贯入圆筒的贯入深度和阻力,故可直接将2种理论代入进行定量的分析对比。将薄壁贯入圆筒试验条件简化为如图3所示,可简化为长度为 L 、外径为 D 、厚度为 T 的薄壁圆筒向模拟月壤进行贯入试验,贯入运动位移为 s ,令贯入圆筒距月壤表面高度为 H ,则机具贯入模拟月壤的垂直深度 Z_i 为:

$$Z_i = \begin{cases} 0, & s \leq H - L \\ s - (H - L), & s > H - L \end{cases} \quad (5)$$

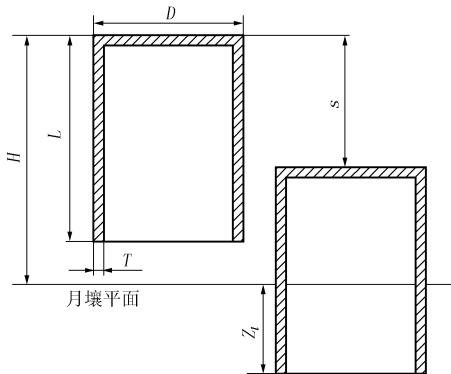


图3 贯入试验运动示意

由机具及运动模型可知,在贯入过程中机具与模拟月壤的接触面分为内/外接触面 S_i/S_o 和端面 S_B ,因此可将机具贯入月壤的受力分为内/外接触面机土相互作用力 F_i/F_o 以及端面机土相互作用力

F_B ,则在整个贯入过程中机具受到的贯入阻力 F 为:

$$F = F_i + F_o + F_B \quad (6)$$

在贯入过程中机具与模拟月壤平面垂直,故机具内/外接触面除面积不同外受力完全类似,因此可合并进行分析。根据摩擦力理论,机具内/外接触面受到的作用力均为月壤静止土压力导致的摩擦力,则根据相关定义,根据式(2)可将基于摩擦力理论的内外接触面受力 F_{if}/F_{of} 表达为:

$$\begin{cases} F_{if} = \pi(D - 2T)(Z_i^2/2)K_0 \rho g f \\ F_{of} = \pi D(Z_i^2/2)\rho g K_0 f \end{cases} \quad (7)$$

若用最大抗剪强度理论进行分析,根据土力学中莫尔-库伦剪切破坏理论^[14],在垂直深度 Z 处模拟月壤单位面积的剪切应力 τ 来源于该深度下模拟月壤的自重,故有:

$$\tau = c + K_0 \rho g Z \tan \varphi \quad (8)$$

设在该深度位置存在半径为 R 、高度为 dz 的环形接触面,则整个环形接触面的剪切力 E 为:

$$E = \tau S_c = (c + K_0 \rho g Z \tan \varphi) 2\pi R dz \quad (9)$$

则在深度 Z_i 的范围内,剪切力 F_T 为:

$$F_T = \int_0^{Z_i} E = 2\pi r [Z_i c + (Z_i^2/2)K_0 \rho g \tan \varphi] \quad (10)$$

由式(10)可将基于最大抗剪强度理论的内外接触面受力 F_{is}/F_{os} 表达为:

$$\begin{cases} F_{is} = \pi(D - 2T)[Z_i c + (Z_i^2/2)K_0 \rho g \tan \varphi] \\ F_{os} = \pi D[Z_i c + (Z_i^2/2)K_0 \rho g \tan \varphi] \end{cases} \quad (11)$$

与机具端面接触的月壤在机具作用下不断向下运动,可视为模拟月壤达到了其极限承载力后失效滑移造成的,因此使用极限承载力理论计算机具端面的机土相互作用力。根据土力学中的普朗德尔-瑞纳斯理论^[14]可知,模拟月壤单位面积的极限承载力 p_u 为:

$$p_u = \rho g Z_i N_q + c N_c \quad (12)$$

式中: N_q ——极限承载力系数, $N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$; N_c ——承载力系数, $N_c = (N_q - 1) \tan \varphi$ 。

根据机具模型可知机具贯入端面积 S_B 为:

$$S_B = \pi[D^2 - (D - 2T)^2]/4 \quad (13)$$

因此可得机具端面机土相互作用力 F_B 为:

$$F_B = p_u S_B \quad (14)$$

分别将式(14)、式(11)和式(7)代入式(6)可得基于摩擦力理论和最大抗剪强度理论的贯入阻力计算方法,可得2种理论算法的主要区别在于最大抗剪强度理论考虑了月壤的粘聚力的影响,而摩擦力理论中没有考虑其影响。将两种理论与实测值对比图4所示,可得摩擦力理论的计算数据与实测数据存在较

大的误差,尽管随着贯入深度的增加摩擦力理论的计算数据也在增长,但增长幅度仅为 5.25 N;尽管最大抗剪强度理论的计算数据同实测值仍然存在误差,但在粘聚力 c 的作用下显然呈现出比摩擦力更快的增长趋势。至于最大抗剪强度中仍然与实测值存在误差,且根据计算曲线的发展趋势,该误差将会随着贯入位移的增长而增长。这种误差主要来自于计算过程中粘聚力 c 取为固定值导致的,根据本文第二节中对月壤的特征分析,月壤在自重和固结作用的影响下,其粘聚力和内摩擦角将随深度的增加而增加,故考虑这种增加的趋势在一定程度上能够弥补最大抗剪强度理论的模型误差。而对于摩擦力理论来说,由于缺乏对粘聚力 c 的影响分析,其理论误差仍然巨大。综上所述,对月壤和机具之间相互作用力的分析过程中,基于最大抗剪强度理论进行分析的结果比摩擦力理论进行分析的结果更加准确可靠。

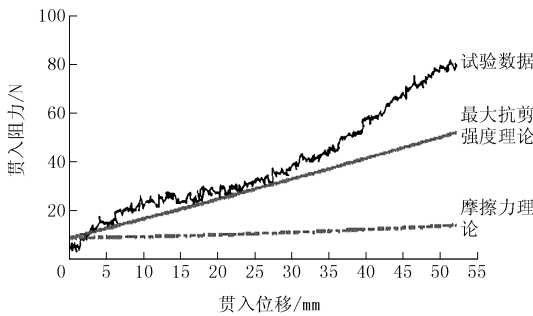


图 4 两种理论与实测数据的对比验证

3 修正理论的应用

前文将摩擦力理论和最大抗剪强度理论分别进

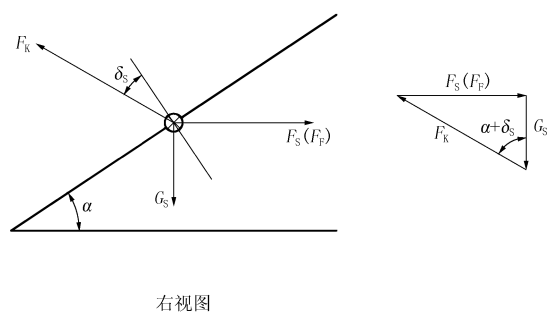
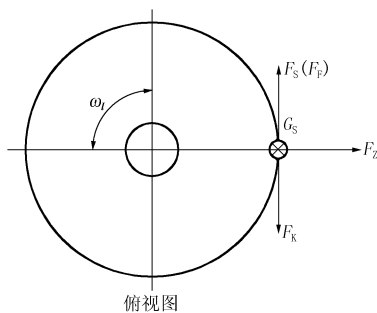


图 5 临界转速条件下月壤颗粒在螺旋叶片上的受力分析

令月壤颗粒质量为 m , 螺旋的临界角速度为 ω_l , 螺旋半径为 r_s , 由离心力的定义可得月壤颗粒在螺旋上受到的离心力 F_z 为:

$$F_z = m\omega_l r_s \quad (15)$$

月壤颗粒自重 $G = mg$, 螺旋对月壤的反力 F_k 与螺旋叶片法向方向偏斜角度为 δ_s 有:

行定量和定性的对比,得出结论为最大抗剪强度理论的计算结果比摩擦力理论的计算结果更加精确。基于此,现有的月球取样设备理论推演中月壤与机具之间的相互作用力均可由最大抗剪强度理论进行修正,用以获得更加准确可靠的计算结果。目前国内在月球取样机具的理论模型建立方面哈尔滨工业大学的研究成果较为领先,其中针对钻进取样可能采用的硬质取样管和内翻式软袋取样管 2 种取心方式进行对比,离散元模拟和实物结果均显示与硬质取样管相比,内翻式软袋取样管能够获得更大的取心率,且能有效的保持采样的层理性^[15,16];针对钻进取样用于排除钻屑的空心外螺旋钻杆建立钻进规程参数、月壤参数和钻具参数之间的解析模型并进行了三者之间影响关系的分析^[17,18];针对表层采样可能采用的挖取式采样方式同样进行了离散元模拟分析,得到了在挖取过程中月壤颗粒运动规律及随时间的速度和应力分布^[19]。下文以哈尔滨工业大学在基于螺旋的多功能表层月壤采集装置中进行的外螺旋机具与月壤颗粒的受力分析为例进行最大抗剪强度理论的修正^[20]。

外螺旋机具采集月壤的临界转速即为机具能够携带月壤颗粒的最小转速,此时作用在月壤颗粒上的力如图 5 所示(括号中的受力为原文基于摩擦力理论进行的受力分析),月壤颗粒在外螺旋上受到的力包括离心力 F_z 、月壤颗粒自重 G_s 、螺旋叶片对月壤颗粒的反力 F_k 以及螺旋叶片与月壤颗粒之间的剪切力 F_s (原文中为螺旋叶片与月壤颗粒之间的摩擦力 F_F)。

$$\tan \delta_s = f_s \quad (16)$$

式中: f_s ——月壤颗粒与螺旋面之间的摩擦系数。

原文中将月壤颗粒与周边的作用力视为摩擦力,则离心力为其摩擦力的来源,故有摩擦力 F_F 为:

$$F_F = F_z f_o \quad (17)$$

式中: f_o ——月壤颗粒与管壳之间的摩擦系数。

月壤颗粒在螺旋叶片上受到的剪应力源自于离

心力,由式(8)可得在当前条件下月壤颗粒受到的剪切力 F_s 为:

$$F_s = c + F_z \tan \varphi \quad (18)$$

由力的多边形可推出基于摩擦力理论的表达式为:

$$\tan(90^\circ - \alpha - \delta_s) = mg/F_F = g/(\omega_l^2 r_s f_o) \quad (19)$$

可得基于摩擦力理论的临界转速为:

$$\omega_{IF} = (30/\pi) \sqrt{(g/r_s f_o) \tan(\alpha + \delta_s)} \quad (20)$$

同理,由力的多边形可推出基于最大抗剪强度理论的表达式为:

$$\tan(90^\circ - \alpha - \delta_s) = \frac{mg}{F_s} = \frac{mg}{c + m\omega_l^2 r_s \tan \varphi} \quad (21)$$

可得基于最大抗剪强度理论的临界转速为:

$$\omega_{IS} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{mg - c \tan(\alpha + \delta_s)}{mr_s \tan(\alpha + \delta_s) \tan \varphi}} \quad (22)$$

若将该月壤颗粒视为单位体积,则式(22)可改写为:

$$\omega_{IS} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{\rho g - c \tan(\alpha + \delta_s)}{\rho r_s \tan(\alpha + \delta_s) \tan \varphi}} \quad (23)$$

参考原文中对相关参数的定义取值,取月壤密度 $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$,重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,粘聚力 $c = 2.0 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 26.39^\circ$,螺旋角 $\alpha = 15^\circ$,月壤颗粒与螺旋面的摩擦系数 $f_o = 0.6$,由式(16)可得偏斜角度 $\delta_s = \arctan f_o = 30.96^\circ$ 。将上述参数分别代入式(20)和式(23)可分别计算得到基于摩擦力理论的临界转速 $\omega_{IF} = 179.13 \text{ r/min}$,相比之下基于最大抗剪强度理论的计算得出的临界转速 $\omega_{IS} = 174.34 \text{ r/min}$ 取值小于基于摩擦力理论的计算结果。尽管区别不大,但对于月球采样而言,更小的临界转速直接意味着更小的能耗,能够在一定程度上提高取样任务的工作效率。

4 结论

通过对相关试验的观察和理论分析,并与相关文献进行对比验算后可得出以下结论:

(1)利用同月壤物理力学性质相近的模拟月壤进行薄壁圆筒的贯入试验时发现存在月壤滞留和月壤附壁现象,结合对月壤物理特征的考虑,认为这两种现象说明最大抗剪强度可用于描述和定义月壤与机具表面相互作用力;

(2)通过对月壤滞留现象的定性分析以及基于薄壁贯入圆筒的贯入阻力实测值的定量计算,可得基于最大抗剪强度理论的数学模型比基于摩擦力理论的数学模型更加符合实际情况;

(3)将哈尔滨工业大学在基于螺旋的多功能表层月壤采集装置中进行的外螺旋机具与月壤颗粒的受力分析中的摩擦力替换为最大抗剪强度,通过计算得出基于最大抗剪强度理论计算的螺旋临界转速小于基于摩擦力计算的螺旋临界转速,有利于降低月球采样设备的能耗,在一定程度上能够提高其任务成功率。

参考文献:

- [1] 胡英才. 基于神经网络融合技术的钻井事故诊断方法研究[D]. 陕西西安:西安石油大学,2011.
- [2] 欧阳自远,邹永廖,李春来. 月球——人类走进深空的前哨战[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [3] 陈超,黄卫清,郭俊杰,等. 深空探测用超声波/声波钻探采样器的研究[A]. 第三届全国压电和声波理论及器件技术研讨会[C]. 江苏南京,2008.
- [4] 丁希仑,李可佳,尹忠旺. 面向月壤采集的多杆深层采样器[J]. 宇航学报,2009,(3):1189-1194.
- [5] 左志坚,李斌. 机器人化月表采样器的研制[J]. 机械设计与制造,2009,(12):157-159.
- [6] 卢伟,宋爱国,凌云. 面向浅层月壤的小型取样器研究[J]. 宇航学报,2011,(9):2065-2073.
- [7] 沈进进. 多杆组接式月壤钻取采样技术研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [8] 张禹. 滑轨式月壤钻取采样装置关键技术研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [9] 杨帅,董礼港,殷参,等. 导轨摆臂式表层月壤采样机构的研究[A]. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会[C]. 浙江杭州,2012.
- [10] 王印超,赖小明,杨学宁,等. 绳驱式表取采样机械臂的设计研究[A]. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会[C]. 浙江杭州,2012.
- [11] 郑永春,欧阳自远,王世杰,等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石,2004,(4):14-19.
- [12] Anttila M E. Concept evaluation of Mars drilling and sampling instrument[D]. Holland: Helsinki University of Technology, 2005.
- [13] 肖龙,贺新星,吴涛,等. 月壤的性质与模拟月壤 CUG-1A [A]. 中国空间科学学会第七次学术年会[C]. 辽宁大连,2009.
- [14] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [15] 崔金生. 模拟月壤的填充模型及特性研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [16] 赵德明. 月壤在取样管内填充特性的研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [17] 刘飞. 基于钻具—月壤相互作用模型的钻进取心性能研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [18] 刘飞,侯绪研,全齐全,等. 空心外螺旋钻杆与月壤相互作用力学模型研究[J]. 机械制造,2011,(11):29-34.
- [19] 刘天喜. 浅层月壤采样过程的机土耦合作用研究[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [20] 史晓萌,谭强,杨学宁,等. 基于螺旋输送原理的多功能表层月壤采集装置的设计研究[A]. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会[C]. 浙江杭州,2012.