

JSC-1A 模拟月壤气动开挖试验研究

白云^{1,2}, 蔡国栋^{1,2}, 郑彦龙^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 鉴于月球表面高真空、低重力, 以及月壤颗粒极强摩擦性的环境特征, 地球上常规的重力式开挖设备在月球上很难完全地发挥其工作性能。而利用高压气体在进入真空膨胀的性质来进行月表土壤的开挖, 则可避开开挖设备过多的机械摩擦, 以及巧妙地利用了月球表面的高真空环境。压缩气体的脉冲喷气方式、开挖设备挖掘管的插入深度、压缩气体的气压值等因素都会影响到气体质量效率, 为了研究上述影响因素对于气体质量效率的影响, 基于高压气体开挖月表土的理论, 自主研发了一套模拟月壤在真空环境下开挖的试验装置。通过对影响气体质量效率的因素进行多工况试验发现: 气体质量效率在脉冲喷气方式为开 0.5 s、关 0.5 s 时最大; 气体质量效率与挖掘管的插入深度在一定范围内成正比, 即挖掘管插入深度越大, 气体质量效率越高; 气压值则需要设定合理的值才能使气体质量效率最大。

关键词: 气动开挖; 气体质量效率; JSC-1A 模拟月壤
中图分类号: TU941 **文献标志码:** A

Experimental Study of Pneumatic Excavation of Lunar Regolith Simulant JSC-1A

BAI Yun^{1,2}, CAI Guodong^{1,2}, ZHENG Yanlong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Because of harsh environment on the lunar surface, the conventional terrestrial excavation equipments on the earth can't perform perfectly on the moon. On the contrary, the utilization of high pressure gas which will expand sharply on the condition of vacuum eliminate the mechanical friction of terrestrial equipment and use the hard vacuum environment intelligently at the same time. The frequency of high pressure gas injection, burial depth of excavation tube and pressure of high pressure gas will make a difference in the mass efficiency (the quality of lunar regolith

simulant excavated by 1 g gas), in order to analyze the affection of these three factors to mass efficiency, we invent a test device which work under the vacuum circumstance based on the utilization of high pressure gas. Results of orthogonal test on the factors affecting the efficiency show that the maximum mass efficiency occurs when the frequency of high pressure gas injection was 0.5 s open and 0.5 s closed; the mass efficiency is in direct proportion to burial depth of excavation tube; a reasonable pressure value is in need for maximum quality efficiency.

Key words: pneumatic excavation; mass efficiency; JSC-1A lunar regolith simulant

我国目前处于“嫦娥工程”探月计划的第二个阶段, 预计在 2040 年左右建立短期有人值守的月球基地。探测并开发月球资源, 建立一个永久的月球基地都不可避免地需要采集、开挖以及运输月壤。而在月球表面进行开挖是十分困难的。白云等^[1]总结了国内外月壤开挖技术以及未来在月球开挖时将会遇到的一些恶劣的施工环境, 比如高真空(白天和夜晚的气压分别为 10^{-7} Pa 和 10^{-10} Pa)、低重力(仅 1/6 地球重力的低重力环境)、月表土壤颗粒的高磨损性、剧烈的昼夜温差变化、强辐射、潜在流星体的撞击等。

Schaefer 等^[2]于 1994 年首次提出了在火星上利用压缩气体采集土样, 并分析了气体压力、气体脉冲形式对采集效果的影响。Zacny 等^[3-5]2005 年之后提出了将压缩气体用于高真空环境下取样、开挖月壤, 该方法巧妙地利用了月球的高真空环境, 并且实现了开挖的目的。其原理表述为压缩气体进入真空环境时快速膨胀, 压缩气体间的分子势能转变为气体分子动能, 当气体分子运动到挖掘管内部时, 气体分

收稿日期: 2010-11-23

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20120072110025); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1029)

第一作者: 白云(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为沉管隧道的设计和施工、盾构隧道设计和施工。

E-mail: baiyun1958@tongji.edu.cn

子通过与月壤颗粒的能量交换,气体分子的部分动能转变为月壤颗粒的动能,促使固态相的颗粒流态化,从而实现月壤的开挖.其基本原理见图 1.

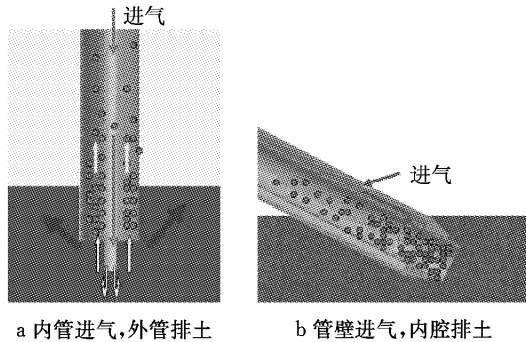


图 1 气动开挖原理示意图
Fig.1 The theory of pneumatic excavation

Zacny 等^[6]利用 NASA(National Aeronautics and Space Administration)的试验飞机在模拟月球环境($g/6$)和地球环境(g)以及完全失重环境中对模拟月壤 JSC-1A 进行了多组气动挖掘试验.在特定的试验环境下,挖掘效率最大达到了 1:5 500,即 1 g 土体能够挖掘 5 500 g 的月壤,这说明气动挖掘能力是十分巨大的.

脉冲式喷气方式、压缩气体的气压值、进气管的进气速率、挖掘管插入月壤的深度等因素会影响压缩气体的开挖效率,为了使气体质量效率最优,即单位质量的气体所能挖掘到的月壤土体质量最大,必须事先在地球环境下科学地进行试验模拟,分析众多影响因素.为此,作者自主研发了一套用于模拟在月球环境下测试气体质量效率的试验系统,用于分析挖掘管深度、压缩气体的气压值以及喷气方式对最终气体质量效率的影响.本文将重点介绍利用该系统所得的相关试验结论.试验对象为 JSC-1A 模拟月壤.

1 JSC-1A 模拟月壤参数

JSC-1A 是由一种富含玻璃的玄武岩质火山灰经简单加工研制而成.主要结晶矿物相是长石、辉石和橄榄石,副矿物包括钦铁矿、铬铁矿和痕量黏土,玄武质玻璃体积分数大约为 50%.其化学成分、矿物组成、粒度分布和力学性质(压缩系数、内聚力 c 、内摩擦角 φ 等)与阿波罗 14 号登月点的低钛月海月壤相似,特别是与月球样品 14163 的化学成分非常近似^[7].故本文中采用 JSC-1A 模拟月壤.文献[8-9]详细介绍了 JSC-1A 系列模拟月壤的工程性质. JSC-

1A 型模拟月壤的物理力学性质见表 1.

表 1 JSC-1A 物理力学性质指标^[9]

Tab.2 Mechanical properties of JSC-1A^[9]

密度/($g \cdot cm^{-3}$)	熔点/ $^{\circ}C$	内摩擦角/ $(^{\circ})$	黏聚力/kPa
2.9	1 100~1 125	45	1.0

2 模拟月壤气动开挖试验系统简介

整套试验装置由以下五大系统组成:供气系统、气体调节与测量系统、控制系统、真空制造系统、开挖与输送系统.供气系统主要由压缩氮气钢瓶组成;气体调节与测量系统负责控制与测量挖掘所需气体的气压值、质量流量,以及测量真空箱体内部的气压值;控制系统则是负责控制压缩气体的脉冲喷气形式、试验的开始和结束;真空制造系统即一个真空泵和有机玻璃的箱体,该系统主要负责为模拟月壤开挖提供一个低压的环境;开挖与输送系统主要是由挖掘管、集土箱、以及连接挖掘管和集土箱的输土软管组成.试验装置具体形式见图 2.

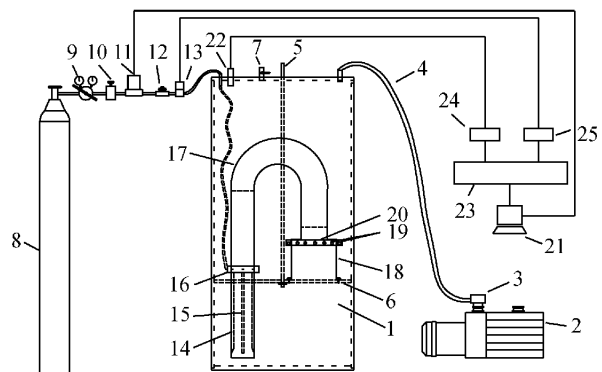


图 2 气动开挖和输送模拟月壤的试验装置
1—真空箱;2—真空泵;3—精密过滤器;4—波纹管;5—导杆;6—隔板;7—泄压球阀;8—气体钢瓶;9—双极调压阀;10—精密调压阀;11—气体质量流量计;12—节流阀;13—电磁脉冲阀;14—挖掘管;15—进气管;16—配气环箍;17—输土软管;18—集土箱;19—过滤器;20—布袋除尘器;21—计算机;22—真空计;23—可编程控制器;24—A/D 及 D/A 转换模块;25—控制开关

图 2 气动开挖和输送模拟月壤的试验装置

Fig.2 The test device of pneumatic excavation and conveying of lunar regolith simulant

试验系统由气体钢瓶提供压缩氮气,经由软管进入真空箱内,然后由配气环箍将压缩气体分配到挖掘管壁的四根进气管,由于挖掘管已经插入到模拟月壤之中,当压缩气体在内外压差之下高速运动,带动处于挖掘管内的模拟月壤,经过输土软管到达集土箱,在气土分离之后,气体经过滤器排出,土体便收集在集土箱内.

3 试验结论

3.1 试验指标与试验工况

在气动开挖和输送模拟月壤的过程中,影响模拟月壤颗粒流态化和运移特性的因素很多,其中包括进气速度、进气压力、出口气压、管道长度、管道直径、管道插入深度、颗粒粒径、颗粒密度和重力加速度等.本试验中,管道长度、管道直径和材料物性均为定值,考虑到具备的条件,本试验将进气压力、管道插入深度和喷气方式作为试验因素,重点考察三者对气动开挖和输送模拟月壤的气体质量效率的影响.

因为月球上空气非常稀薄,作为动力的压缩气体将是十分稀缺的资源.早期月球探测活动中的压缩气体只能是从地球上运输,因此如何利用最少的压缩气体挖掘到最多质量的月壤有非常高的经济效益.气体质量效率作为本试验中的主要试验指标,定义如下:

$$M = \frac{m_1}{m_2} \quad (1)$$

式中: m_1 和 m_2 分别为开挖到的(模拟)月壤质量和消耗的压缩气体质量.

正交试验选取如下试验工况:气体压力分别为 100,170,200,230,300 kPa,由于压力控制不能很精确,实际压力值以测到的为准;管道插入深度分别为 5,10,15,20,25,30,35,40,45,50 cm;喷气方式为连续、开 3 s 关 1 s、开 1 s 关 1 s、开 0.8 s 关 0.2 s、开 0.2 s 关 0.3 s、开 0.5 s 关 0.5 s、开 0.2 s 关 0.8 s.

图 3 展示了喷气方式为开 0.5 s、关 0.5 s 时,瞬时流量随时间的变化.

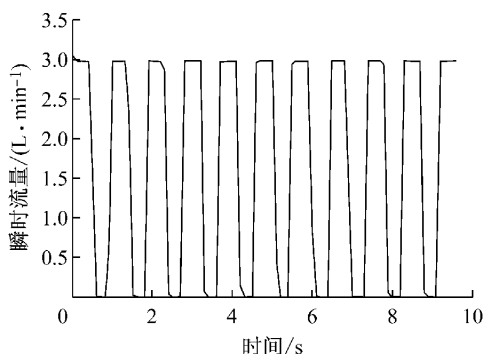


图 3 每秒开 0.5 s、关 0.5 s 时脉冲式喷气效果图

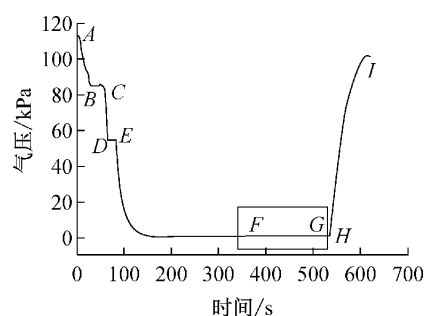
Fig.3 The picture of 0.5 s on and 0.5 s off per second pulse injection

3.2 试验结论

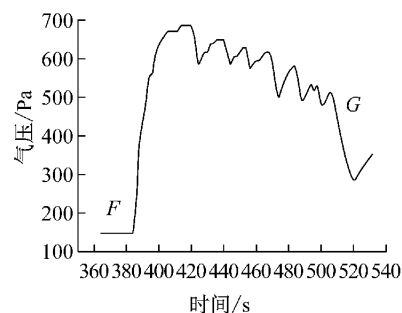
一组试验过程中真空箱内气压随时间的典型变化见图 4a.抽气过程为 AB 段、CD 段和 EG 段.从图中可以看出,开始抽气后气压迅速降低,至 100 s 之后气压下降速度逐渐减慢.因为开始抽气时真空箱底部和挖掘管内部的 JSC-1A 型模拟月壤内部含有一定量的气体,如果抽气过程中不采取任何措施,模拟月壤会产生“沸腾”现象,将严重影响真空箱内的可视性,并可能威胁真空泵的正常运转.因此如图中 BC 段和 DE 段所示,试验过程中除了调整真空泵抽速外,还应短暂关闭真空泵.这样做的主要目的是允许 JSC-1A 型模拟月壤内的气体有足够的时间逃逸到上部空间内,从而抑制“沸腾”现象的发生.

进气阶段为图中 FG 段.如图 4b 所示,开始进气后,气压明显增大,但仍处于较低的水平.

HI 段为试验结束后,打开泄压球阀后真空箱内的气压变化.



a 整个试验阶段



b 进气开挖阶段(FG段)

图 4 试验过程中真空箱内气压变化

Fig.4 The pressure variation in the process of experiment

3.2.1 气体质量效率随气体质量消耗的关系

本试验过程中,最关键的两个参数是开挖到的模拟月壤质量和消耗的压缩气体质量.后者的准确测量和用量控制对试验结果影响巨大.以压力为 290 kPa,电磁脉冲阀常开的工况为例,气体消耗 5.69 g 时开挖 907.5 g 模拟月壤.试验中做了消耗气体质量

25%,50%,75%,100%的试验,得到了在 0~25%, 25%~50%,50%~75%,75%~100%这四个阶段压缩气体分别开挖掉了挖掘管内所有模拟月壤的 67%,13%,11%和 1%。这四个阶段的气体质量效率分别为 405,97,75 和 10。如图 5 所示,气体的质量效率随着试验的进行迅速下降。下文所得到的气体质量效率都是基于完成整个开挖过程即消耗掉 100%的气体。压缩气体刚好不能继续挖掘到更多模拟月壤的那个时刻作为试验终止时刻。

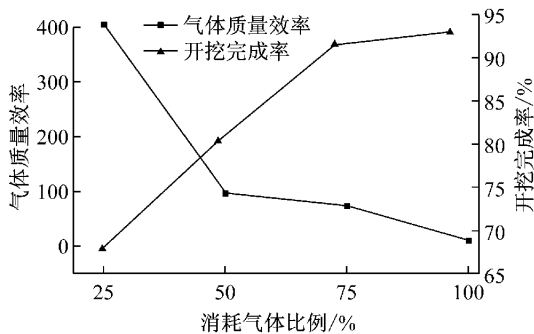


图 5 气体质量效率、开挖完成率与气体质量消耗关系图
Fig. 5 The relationship between mass efficiency and completion rates with quality of high pressure gas

3.2.2 气体质量效率与喷气方式的关系

已有的不少研究成果证明,脉冲式喷气方式对气力输送效率有一定的提升。图 6 为插入深度分别为 5 cm 和 10 cm 时,气压 p 为 170,230 和 290 kPa 时,在不同的喷气方式下得到的气体质量效率。

据文献[2]可得出气体质量效率在本试验脉冲式喷气开 0.5 s、关 0.5 s 最大的推论,本试验做了三组插入深度为 30 cm,气体压力为 100,200 和 300 kPa,采用脉冲式喷气(开 0.5 s、关 0.5 s)时的气动开挖试验。如图 7 所示,脉冲式喷气对气动开挖气体质量效率有一定改善,能提高 1.5%~17%。

从图 6 和图 7 可以看出,在相同的气压与脉冲方式下,插入深度为 10 cm 时气体质量效率明显高于插入深度为 5 cm 时气体质量效率。在所尝试的所有喷气方式中,每个循环中电磁脉冲阀开 0.5 s、关 0.5 s 的效果最佳,能普遍提升气体质量效率。

3.2.3 气体质量效率与插入深度的关系

因为振捣后的模拟月壤密实度较高,加上模拟月壤的内摩擦角很大,故直接将挖掘管插入模拟月壤时阻力较高,难度较大,如不采取其他如冲击等措施,依靠人工只能将挖掘管插入 12 cm 左右。故本试验采用了两种形式:挖掘管直接插入模拟月壤中,将模拟月壤灌入挖掘管(工况中挖掘管埋入深度大于

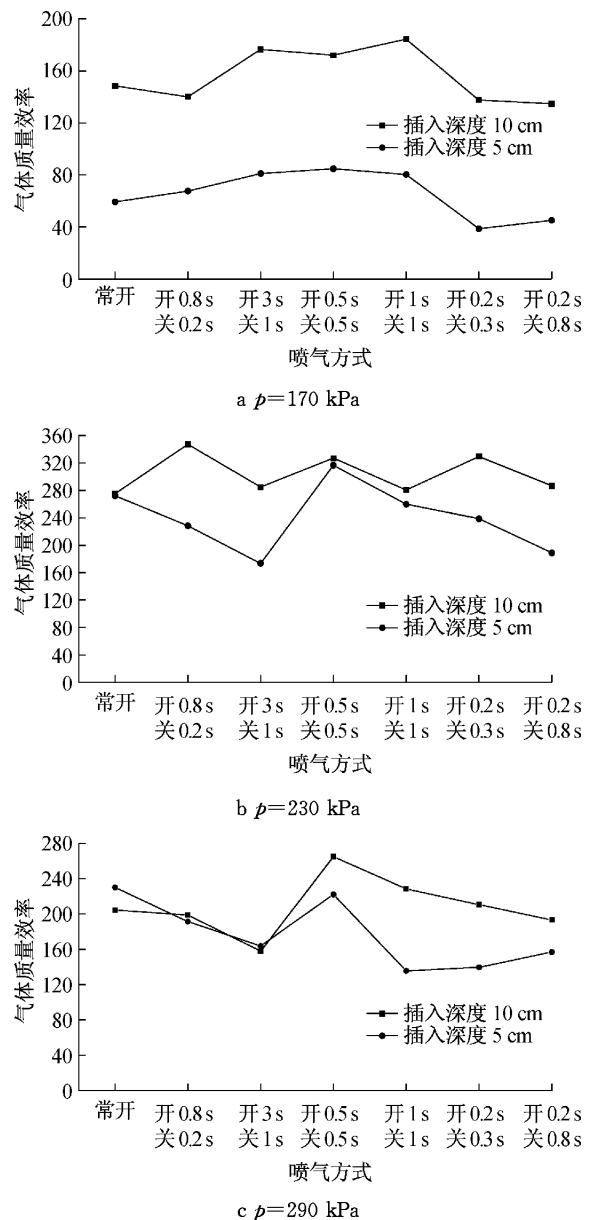


图 6 气压为 170,230,290 kPa 时不同喷气方式下的气体质量效率

Fig. 6 The mass efficiency with different pulse injection when the gas pressure is 170,230,290 kPa

10 cm 均为第二种试验手段),如图 8 所示。方法不同导致气体质量效率也略有不同,后者的气体质量效率有所降低。具体原因可能是制造真空的过程中,进气管内的气体被抽出时沿挖掘管形成了气体通道。试验过程中,沿进气管进入的压缩气体可能沿此通道直接进入模拟月壤上部真空环境,产生了流化时的所谓“沟流现象”。大量气体短路,没有起到液化模拟月壤的效果。这一点在试验中被观测证实。

(1) 挖掘管插入模拟月壤内

本节将介绍挖掘管插入深度分别为 5 cm 和 10 cm 时气体的开挖和输送效率。由图 9 可知,插入深

度为 10 cm 时的气体质量效率较 5 cm 时的质量效率有明显提高。

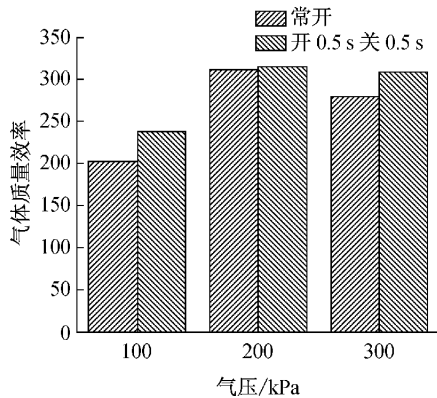


图 7 插入深度为 30 cm 时脉冲喷气对质量效率的影响
Fig. 7 The affection of pulse injection way to mass efficiency when the burial depth is 30 cm

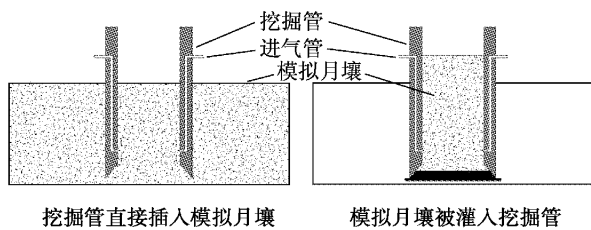


图 8 两种试验方式示意图
Fig. 8 The diagram of two type tests

(2) 模拟月壤注入挖掘管内

为了模拟插入深度更大的情况,本试验将真空箱底部的模拟月壤清出,并将挖掘管底部封堵,模拟月壤直接从挖掘管顶部注入,其密度被振捣至 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右。

图 10 显示了挖掘管插入深度为 5~50 cm 时,不同气压下开挖和输送 JSC-1A 型模拟月壤的气体质量效率。可以看出,随着插入深度的增加,气体的质量效率呈现出单调递增的趋势。图 11 对图 10 中的三条曲线进行线性拟合,拟合曲线自变量(挖掘管插入深度)的取值范围为 5~50 cm。由图可知相关系数 R^2 均在 0.92 以上,说明插入深度与气体质量效率高度线性相关。

3.2.4 气体质量效率与气体压力的关系

(1) 挖掘管插入模拟月壤内

气动开挖和输送模拟月壤的气体质量效率跟气体的状态(速度、压力、流量等)密切相关。图 12 显示了采用多种喷气方式、相对流量为 $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右时,三种不同压力下的气体质量效率。试验的土样制备采用第一种方法。由两图可知,当挖掘管插入深度为 5 cm 和 10 cm,压力调节范围为 170 kPa~290

kPa 时,气体质量效率随着压力的增加而增加。

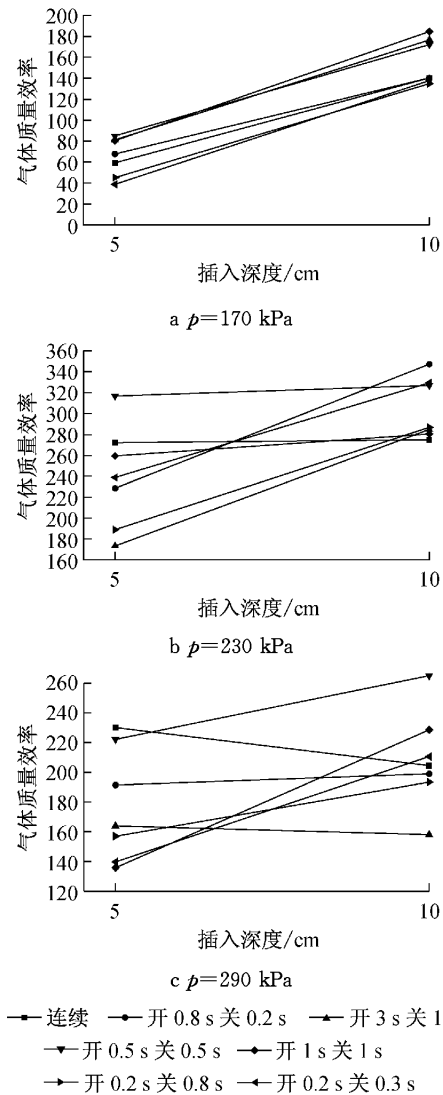


图 9 气压为 170, 230, 290 kPa 时挖掘管插入深度对气体质量效率的影响
Fig. 9 The mass efficiency with different burial depth when the gas pressure is 170, 230, 290 kPa

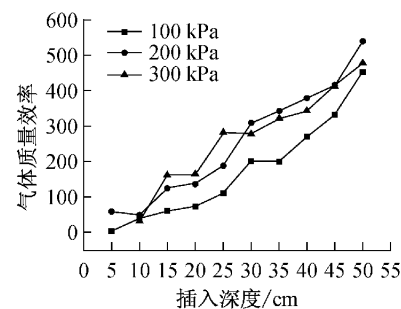


图 10 不同气压下气体质量效率与挖掘管插入深度的关系
Fig. 10 The relationship between mass efficiency with burial depth

(2) 模拟月壤注入挖掘管内

图 13 显示了挖掘管插入深度为 5~50 cm,相对

流量为 $3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右时,三种不同压力下的气体质量效率. 试验的土样制备采用第二种方法. 由该图可知,当挖掘管插入深度为 5 cm 和 50 cm,压力调节范围为 100~300 kPa 时,气体质量效率随着压力的增加先增加后降低,气体的压力在 200 kPa 时的气体质量效率较高.

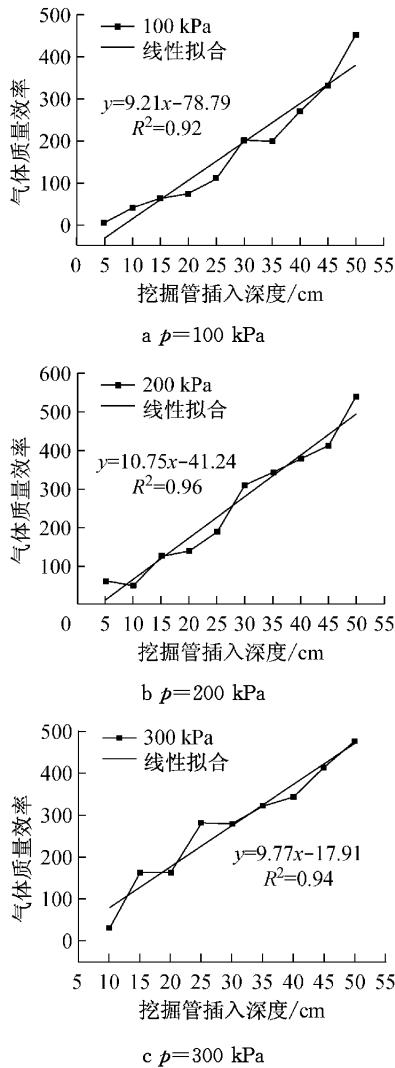


图 11 气压为 100,200,300 kPa 时气体质量效率与挖掘管插入深度关系的拟合曲线

Fig.11 The fitted curves of relationship between mass efficiency with burial depth when the gas pressure is 100, 200, 300 kPa

分析其原因,压缩气体经由进气管进入挖掘管内部,由于气体压力较大时,气体在进入处于真空环境的挖掘管内的气体流速比较大,一旦气体流速过大之后,气体直接将冲破土层进入到挖掘管内,而没能有效地带动挖掘管内的土壤.

3.3 颗粒运移机理

挖掘管插入深度不同时,模拟月壤颗粒的运移

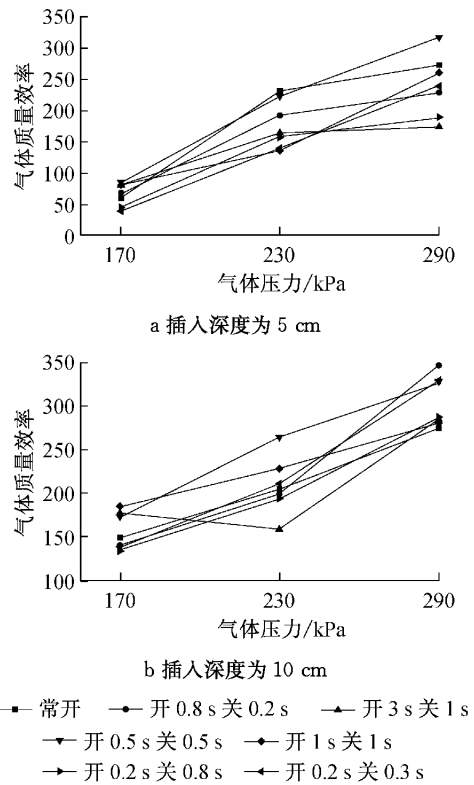


图 12 插入深度为 5,10 cm 时气压对气体质量效率的影响

Fig.12 The affection of gas pressure to mass pressure when the burial depth is 5 and 10 cm

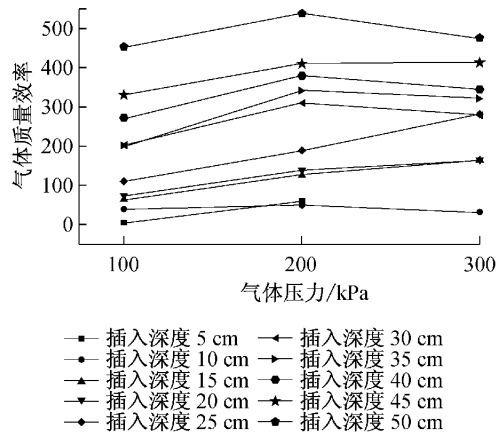


图 13 插入深度为 5~50 cm 时气压对气体质量效率的影响
Fig.13 The affection of gas pressure to mass pressure when the burial depth changes from 5cm to 50 cm

特性也截然不同. 当插入深度较小时(如 5 cm 或 10 cm),挖掘管内部的模拟月壤迅速被流化,模拟月壤颗粒的运动速度很高. 本试验中,挖掘管和排土软管的长度约为 1.2 m,模拟月壤颗粒最快在 0.2 s 内进入集土箱,若将此过程视为匀加速运动,运用运动学方程可知,颗粒的平均运动速率为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,颗粒的加速度约为 $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 模拟月壤颗粒的运动速度主

要来自压缩气体在真空中的快速膨胀带来的“爆炸”效果. 此过程虽为密相气力输送, 但已具备稀相气力输送的特点. 高速气体沿输土软管迅速自集土箱上的过滤器逃逸到真空箱内, 因此气体的能量消耗较大, 气体质量效率处于较低的水平.

当挖掘管插入深度较大时(30~50 cm), 模拟月壤流态化的现象不明显. 模拟月壤将在上下界面压差的作用下被整层托起, 呈现出柱塞式密相输送的状态. 此时, 气体和模拟月壤颗粒的速度较低, 固气比很高, 气体的能量大部分被转化为模拟月壤颗粒的动能, 因此气体的能耗小, 气体质量效率明显提高. 图 14 为颗粒柱塞式密相输送示意图.

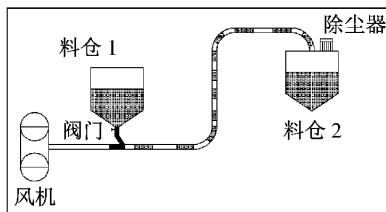


图 14 颗粒密相输送示意图

Fig. 14 Particles dense-phase transporting system

当挖掘管插入深度介于中间值时, 模拟月壤颗粒的流态化处于中相气力输送的状态, 气体和模拟月壤颗粒的速度处于中间值. 相应地, 气体质量效率也处于中间水平.

综上所述, 如果输送距离较短, 应尽量增大挖掘管的插入深度以提高气体质量效率, 减少气体质量消耗. 当输送距离较大时, 可适当减少挖掘管插入深度以获得较高的输送速度.

4 结论

(1) 脉冲喷气方式为开 0.5 s、关 0.5 s 时在其他试验指标相同(压缩气体气压值相同、挖掘管插入深度相同)时各脉冲喷气方式中气体质量效率往往最大.

(2) 气体质量效率与挖掘管的埋入深度成高度的线性相关.

(3) 气体质量效率有随气体气压值呈现先增加

然后降低的趋势. 在压缩气体气压值较高的情况下, 由于气体进入挖掘管内速度较大, 直接冲破土层, 没有将月壤有效地流化, 因此气体质量效率有降低的趋势.

(4) 挖掘管在插入深度较大时, 呈现柱塞式的密相输送现象, 此时输送效率较高. 如果挖掘管插入深度较小, 则为稀相输送状态, 气体沿月壤之间缝隙“逃逸”较多, 此时输送效率较小.

参考文献:

- [1] 白云, 郑彦龙, 寇磊, 等. 月壤开挖技术研究现状综述[J]. 中国科技论文在线, 2013, 21(2): 97.
BAI Yun, ZHENG Yanlong, KOU Lei, *et al.* The research review of lunar regolith excavation[J]. Sciencepaper Online, 2013, 21(2): 97.
- [2] Schaefer L J, Neathery K J, Stencil M J. Evaluation of a pneumatic Martian soil sampler concept [R]. Lexington: University of Kentucky, 1994.
- [3] Zacny K, Mueller R, Galloway G, *et al.* Novel Approaches to Drilling and Excavation on the Moon [C]//AIAA Space 2009 Conference & Exposition. Pasadena: AIAA, 2009: 6431-6443.
- [4] Zacny K, Huang K, McGehee M, *et al.* Lunar soil extraction using flow of gas [C]//Revolutionary Aerospace Systems Concepts-Academic Linkage (RASC-AL) Conference. Cocoa Beach: National Aeronautics and Space Administration, 2004.
- [5] Zacny K, Mungas G, Mungas C, *et al.* Pneumatic excavator and regolith transport system for lunar ISRU and construction [C]//AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition. San Diego: AIAA, 2008: 9-11.
- [6] Zacny K, Craft J, Hedlund M, *et al.* Investigating the efficiency of pneumatic transfer of JSC-1a lunar regolith simulant in vacuum and lunar gravity during parabolic flights [C]//AIAA Space 2010 Conference & Exposition. Anaheim: AIAA, 2010: 1097-1106.
- [7] Carter L J, McKay S D, Allen C C, *et al.* New lunar root simulants: JSC-2 (JSC Clone) and JSC-3 [R]. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2005.
- [8] Simulant Working Group of the Lunar Exploration Analysis Group and Curation and Analysis Planning Team for Extraterrestrial Materials. Status of lunar regolith simulants and demand for Apollo lunar samples[R]. Berkeley: NAC Planetary Science Subcommittee, 2010.
- [9] Arslan H, Batiste S, Sture S. Engineering properties of lunar soil simulant JSC-1A [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2010, 23(1): 70.