http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0753

模拟月壤真空试验装置设计及实现方法

张涛, 安迎和, 丁希仑*

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 我国探月三期需在月面真空环境下钻采 2 m 深的月壤样品,为测试采样器在真空热环境下的性能,需首先在地面模拟一个接近月表的真空热环境.本文设计了一套模拟月壤真空试验装置,研究了模拟月壤真空实现方法.通过使用机械泵对模拟月壤进行抽真空,分析了抽速、样品量、含水量、密实度和温度等因素对模拟月壤真空度的影响情况.此外,分别分析了从容器顶部、底部抽气对模拟月壤抽真空效果的影响,提出了保证样品密实度的可行抽气方法.该试验研究对构建月面真空环境模拟器具备一定的参考价值.

关 键 词: 模拟月壤; 真空装置; 环境模拟; 真空实现; 真空度
中图分类号: TB771
文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2015)11-2110-06

作为“绕、落、回”规划的第 3 步,我国探月工程三期的主要目标是实现无人自动采样返回[1].然而月球环境极其苛刻,近月空间和月表环境中的大气密度只有地球上的 $1/10^{12}$,属于超高真空环境[2].为保证安全采样返回,需在地面模拟月球表面的真空热环境进行测试试验[3].但月表的超高真空在地球上几乎无法达到,因此只能够模拟一个相对较低的真空环境开展试验.

美国在世界范围内最先开展登月采样,但其采用人工采样的方式,直接将采集的样品带回地球研究分析.美国国家航天局(NASA)研究者 Wechsler 和 Glaser 的研究表明:当周围气压低于 1 Pa 时,粉末状玄武岩的热交换不受颗粒间残余气体的影响[4].美国 University of California 的研究者 Tien 和 Nayak 对 Apollo 系列月壤样品进行热导率测量,结果表明:当气压低于 10 Pa 时,随着气压的降低,月壤的热导率变化很小;当气压接近 1 Pa 时,随着气压降低,月壤的热导率基本上不再变化[5].为了等效月表的气压条件,地面试验环境必须保证气压低于 1 Pa[6].

世界各国制作了大量的模拟月壤,用以模拟真实月壤的力学、热学特性[7],开展探月前期研究工作[8].哈尔滨工业大学在国内最早开展钻采模拟月壤月岩的相关研究,近些年来发表了大量研究成果:晏然对真空钻采进行了有限元仿真分析[9];侯佑松在常压下,对模拟月壤进行了低温(-30℃)钻采试验,有效钻进行程 350 mm[10];崔金生等研究了钻具在真空度 1.0×10^{1} ~ 1.0×10^{2} Pa环境中的温升情况[11];史晓萌等设计了一套钻取采样测试装置,在常温常压下对模拟月壤、模拟月岩综合取样进行了测试[3,12].中国地质大学石浩等将钻进过程的热场分布模型视为稳态单层圆柱体导热模型,常压下研究了钻进过程的生热情况[13].

模拟月壤因其特殊性(一般采用经雷蒙磨粉碎的玄武岩火山渣)[14],粉末状颗粒对真空泵叶片损害较大,因此就如何制造真空条件下的模拟月壤、模拟月表月壤的钻采真空环境,国内外尚缺

收稿日期: 2014-12-02; **录用日期**: 2014-12-12; **网络出版时间**: 2015-01-27 15:02
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20150127.1502.008.html
作者简介: 张涛(1990—),男,湖南邵阳人,博士研究生,buaazt@gmail.com
* **通讯作者**: 丁希仑(1967—),男,山东青岛人,教授,xlding@buaa.edu.cn,主要研究方向为空间机器人与空间机构学、仿生机器人、智能控制与自动化检测技术.

引用格式: *张涛, 安迎和, 丁希仑. 模拟月壤真空试验装置设计及实现方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(11): 2110-2115.*
Zhang T, An Y H, Ding X L. Device design and implementation method of lunar soil simulant vacuum test[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(11): 2110-2115 (in Chinese).

乏相关的文献.

本文设计了一套模拟月壤真空试验装置,研究了模拟月壤的不同物理参数对其所能够达到的真空度的影响.

1　试验装置设计

1.1　设计指标

根据月面环境实际情况,试验装置设计指标如下:

1) 空载真空度:空载(不含模拟月壤)情况下,装置真空度可达 1.0×10^{-1} Pa.

2) 密实度:能够对模拟月壤进行压实,密实度不低于 1.9 g/cm^3.

3) 含水量:能够对模拟月壤进行烘干,烘干后含水量不高于 0.1%.

4) 温度:能够对模拟月壤进行 150℃加热.

1.2　试验装置

试验装置主体部分为真空环境模拟器,对模拟月壤进行抽真空试验,制取真空条件下的模拟月壤;此外,还包括模拟月壤干燥、压实与加热设备,分别用于对模拟月壤进行干燥除水、振动压实与加热升温.

真空环境模拟器包含真空泵、真空计与月壤筒及其他相关配件,图 1 为试验装置实物图.

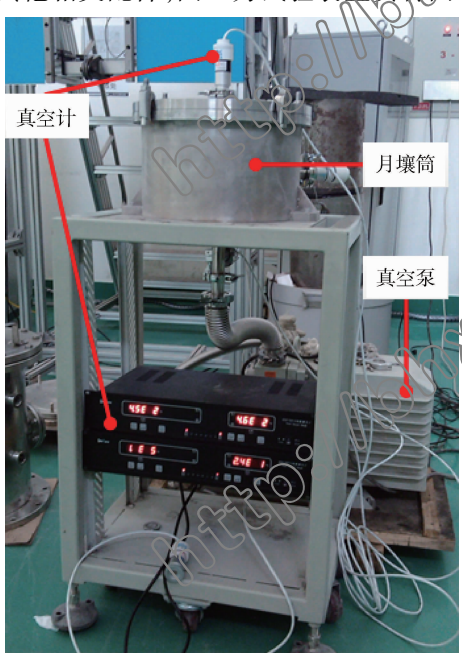


图 1　真空环境模拟器

Fig. 1　Vacuum environment simulator

月壤筒内径 308 mm,高度 200 mm,304 不锈钢材料,密封采用能够耐受高温并容忍粉尘的氟橡胶. 装置使用 800 目的不锈钢网过滤粉尘,避免对泵造成损坏. 月壤筒顶部、底部和侧壁各有一个抽气口,可连接真空泵或真空计测头. 试验过程中采用适合于粗低真空的测量的电阻真空计记录月壤筒内真空度的变化情况,真空计测量范围$1.0\times10^5\sim1.0\times10^{-1}$Pa.

根据设计指标空载(不含模拟月壤)真空度可达 1.0×10^{-1}Pa 的要求,装置选用旋片式机械泵,其极限压力可达 6.0×10^{-2}Pa,根据真空设计手册[15],计算泵需要的抽速.

月壤筒内表面积为

$$S=\pi(d\times h)+2\times\frac{\pi}{4}\times d^2 \tag{1}$$

式中:d 为月壤筒内径;h 为月壤筒内部高度.

真空腔体总出气率为

$$Q=S\times q \tag{2}$$

式中:q 为 304 不锈钢出气率,1h 之后出气率约为 2.3×10^{-5}Pa·L/(s·cm^2).

因为是低真空状态,相比月壤筒的出气率,漏率忽略不计,则抽速为

$$v=\frac{Q}{p} \tag{3}$$

式中:真空室压 $p=1.0\times10^{-1}$Pa. 计算得 $v=0.8$ L/s.

考虑安全系数 1.5 和管道的流导损失(一般泵的有效抽速是泵的额定抽速的 1/3 左右),最终选取抽速为 4 L/s 的旋片式机械泵. 试验表明,在密封空载情况下,使用 4 L/s 真空泵,装置 15 min 可达 1.0×10^{-1}Pa真空度. 试验考虑粉末状模拟月壤出气率高,同时选用一台抽速 15 L/s 的旋片式机械泵用于研究抽气速度对模拟月壤真空度的影响.

高密实度模拟月壤采用振动电机振实,振动电机下端带圆形不锈钢托盘,不锈钢托盘为直径 300 mm、厚度 20 mm 的不锈钢板. 振动电机振动力 2.5 kN,振频 50 Hz,额定功率 0.22 kW,振动体质量 14 kg. 压实策略采用分层方法,测得压实情况下模拟月壤密度为 1.90 g/cm^3. 振动器的实物如图 2 所示.



图 2　振动器实物

Fig. 2　Vibrator entity

http://bhxb.buaa.edu.cn

采用电热鼓风干燥箱对模拟月壤进行干燥，120℃环境中烘干 16 h，测得模拟月壤的含水量低于 0.1%.

采用加热带对月壤筒外壁包裹加热，开启真空泵抽气时开启加热带，每隔 5 min 调高 30℃，30 min后调节到最高温度 150℃，随后保持加热带的加热状态直到试验结束.

2 试验测试方法

模拟月壤由颗粒状粉末组成，在真空抽气的过程中，内部的气体分子流动急剧，从而对模拟月壤的密实度造成影响. 试验分别从月壤筒顶部、底部对模拟月壤进行真空抽气，研究抽气方式对模拟月壤密实度的影响.

影响模拟月壤极限真空度的因素有：样品量、密实度、温度、泵抽速、含水量. 通过设计对照组试验，研究每一个因素对样品极限真空度的影响.

试验完整的流程如图 3 所示.

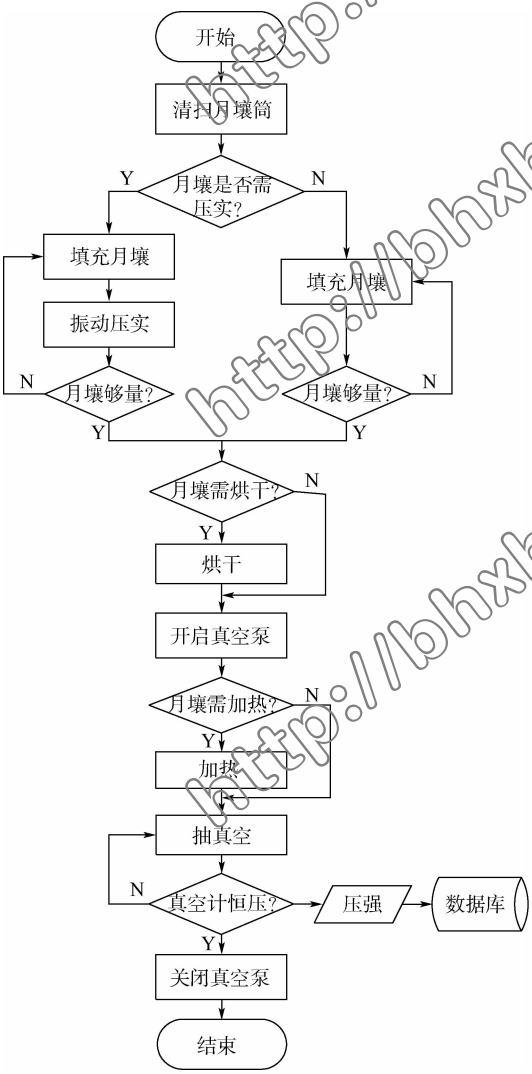


图 3 试验流程

Fig. 3 Test flowchart

试验流程分为如下步骤：

1）准备工作：清扫月壤筒，用纱布蘸酒精将月壤筒内的粉尘清除干净，并擦洗所有密封口，往月壤筒底部铺 4 层直径 308 mm、800 目的不锈钢过滤网. 连接真空计电源，对真空计进行零位校正.

2）装填模拟月壤（模拟月壤由北京卫星制造厂提供）：根据试验设计所需样品的多少装填模拟月壤，如需要对模拟月壤进行压实，则每次填入 40 mm 高度样品，利用振动装置振动压实，直至填充至所需样品量；如不需压实，则填充松散样品至所需量.

3）对模拟月壤样品干燥除水：如需要对样品进行烘干，将装填好样品的月壤筒整体放入 120℃电热鼓风干燥箱中干燥 16 h 后取出.

4）真空抽气与数据记录：开启真空泵抽气，如需对样品在抽气过程中加热，则开启加热带加热，每隔 5 min 记录一个真空计显示真空度数据.

5）试验结束：真空度基本维持不变超过 30 min，则认为已达到恒压状态，关机结束试验.

3 模拟月壤真空试验研究

3.1 抽气方式对样品密实度的影响

月球表层月壤一般处于高密实度状态，试验通过振动装置实现模拟月壤的高密实度. 抽真空的过程中，由于气体分子的流动对样品的密实度产生影响. 月壤筒分别设计了顶部和底部的抽气口，用于探究从不同方位抽气对样品密实度的影响.

压实的模拟月壤初始状态如图 4 所示.

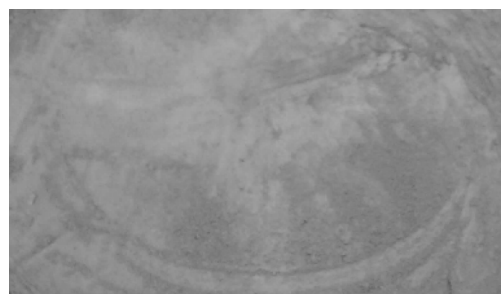


图 4 压实后的月壤表面状态

Fig. 4 Surface condition of lunar soil after compaction

从底部抽气和从顶部抽气后模拟月壤状态分别如图 5、图 6 所示，从图中可以明显地看出从月壤筒底部抽气后的样品四周形成空隙供气流通过，样品能够很好地维持密实度；从月壤筒顶部抽气后的样品侧壁无空隙，样品表面松动成块状，抽气过程中造成扬尘，抽气结束后散落在样

http://bhxb.buaa.edu.cn

品表面.因此,从月壤筒底部抽气,样品上方和内部的气体分子通过样品被真空泵抽走,样品能够很好地保持密实度,是对模拟月壤比较理想的抽真空方式.

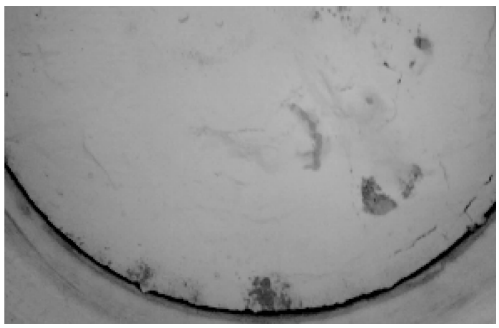


图 5　从月壤筒底部抽气后样品状态

Fig. 5　Sample condition after pumping from bottom of vehicle



图 6　从月壤筒顶部抽气后样品状态

Fig. 6　Sample condition after pumping from top of vehicle

3.2　影响样品极限真空度的因素分析

影响模拟月壤样品极限真空度的因素有:样品量、抽速、温度、含水量和密实度.可以通过试验对比(见表 1),研究这些因素对模拟月壤极限真空度的影响.

列出了 7 组试验,每组试验列出了试验条件和样品的极限真空度,均采用从月壤筒底部抽气的方式,真空计测量位置为月壤筒的顶部.

表 1　试验对比分析

Table 1　Test contrast analysis

试验	月壤量/mm	抽速/(L·s^{-1})	加热	烘干	压实	极限真空度/Pa
1	190	15			√	460
2	190	15	√		√	500
3	80	15				420
4	80	19				23
5	80	19		√		110
6	190	19		√		94
7	190	19		√	√	19

3.2.1　温度对真空度的影响

试验 1 和试验 2 模拟月壤均为压实状态,真空泵抽速 15 L/s,样品在月壤筒内高度 190 mm,均未烘干,试验 2 开始抽真空过程中使用加热带对样品加热.

试验过程中月壤筒内真空度的变化如图 7 所示,从图中可以看出,2 组试验的极限真空度基本相当.因此,抽真空过程中对样品进行 150℃ 的加热,不影响样品所能够达到的极限真空度.

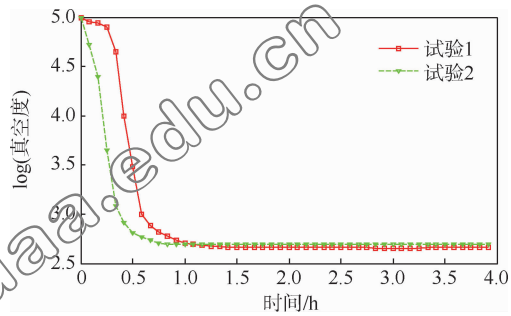


图 7　温度对真空度的影响

Fig. 7　Vacuum degree influenced by temperature

3.2.2　抽速对真空度的影响

试验 3 和试验 4 模拟月壤均为松散状态装填,样品在月壤筒内高度 80 mm,均未烘干,均未在抽气过程中加热,试验 3 真空泵抽速 15 L/s,试验 4 真空泵抽速 19 L/s.

试验过程中月壤筒内的真空度变化如图 8 所示,从图中可以看出,虽然试验 4 比试验 3 的抽速只大 4 L/s,试验 4 的极限真空度比试验 3 的极限真空度高出一个数量级,因此抽速对样品能够达到的极限真空度极为关键,为达到更高真空度可考虑进一步加大真空泵抽速.

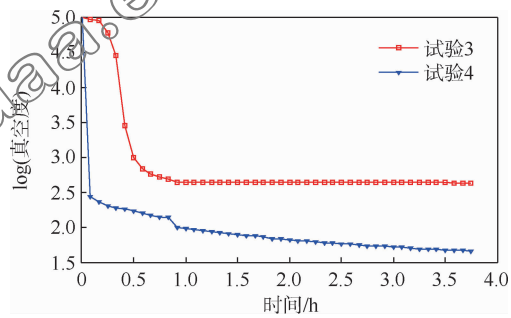


图 8　抽速对真空度的影响

Fig. 8　Vacuum degree influenced by pumping velocity

3.2.3　样品量对真空度的影响

试验 5 和试验 6 模拟月壤均为松散状态装填、烘干,抽速 19 L/s,抽气过程中不加热,月壤筒内的样品高度在试验 5 和试验 6 中分别为 80 mm 和 190 mm.

试验过程中月壤筒内的真空度变化如图 9 所示,从图中可以看出,2 组试验最后的极限真空度基本一样,因此模拟月壤样品量的多少,不影响抽真空的极限真空度.

http://bhxb.buaa.edu.cn

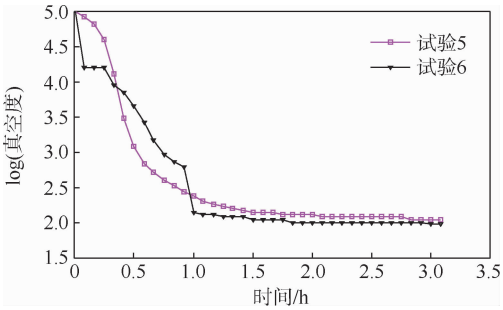


图 9 样品量对真空度的影响

Fig. 9 Vacuum degree influenced by sample volume

3.2.4 含水量对真空度的影响

试验 4 和试验 5 模拟月壤样品在月壤筒内的高度均为 80 mm,抽速 19 L/s,抽气过程中不加热,试验 4 样品不烘干,试验 5 样品烘干.

试验过程中月壤筒内的真空度变化如图 10 所示,从图中可以看出,2 组试验最后的极限真空度烘干组稍低(低 87 Pa). 未烘干的样品可能含有水汽,对空气分子有一定的黏滞性,导致真空度偏低,因此对样品进行干燥后抽气必须考虑干燥造成的影响.

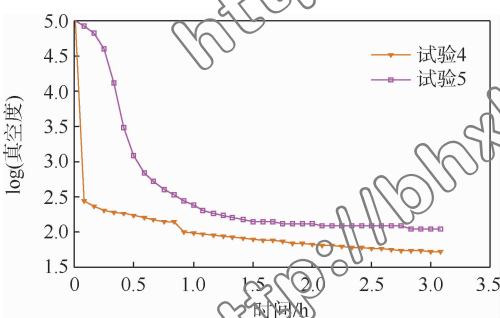


图 10 含水量对真空度的影响

Fig. 10 Vacuum degree influenced by water content

3.2.5 密实度对真空度的影响

试验 6 和试验 7 模拟月壤样品在月壤筒内的高度均为 190 mm,抽速 19 L/s,抽气过程中不加热,样品均烘干,试验 6 采用松散样品,试验 7 采用压实样品.

试验过程中月壤筒内的真空度变化如图 11 所示,从图中可以看出,2 组试验最后的极限真空度压实样品稍低(低 75 Pa). 压实的样品内部含有更少的空气分子,因此导致压实的样品能够具有更高的极限真空度.

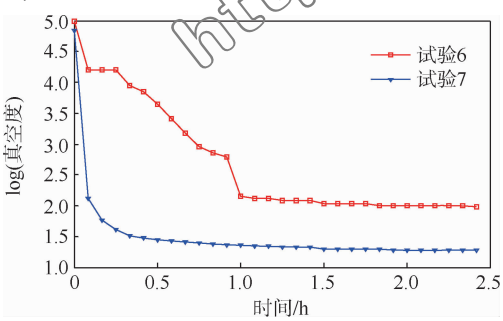


图 11 密实度对真空度的影响

Fig. 11 Vacuum degree influenced by density

4 结 论

本文设计并搭建了一套模拟月壤真空试验系统,对模拟月壤的真空实现方法进行的试验研究得到以下结论:

1) 从月壤筒底部抽气是保证样品密实度的合理抽气方式.

2) 泵的抽速是影响模拟月壤样品极限真空度的关键因素;抽气过程中对样品进行加热、样品量对极限真空度无影响;烘干对极限真空度稍有降低;压实对极限真空度稍有提高.

参考文献(References)

[1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社,2005:315-318.
Ouyang Z Y. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005:315-318(in Chinese).

[2] 叶培建,肖福根. 月球探测工程中的月球环境问题[J]. 航天器环境工程,2006,23(1):1-11.
Ye P J, Xiao F G. Issues about lunar enviromental in lunar exploration project[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(1):1-11(in Chinese).

[3] Shi X M, Quan Q Q, Tang D W, et al. Development of a drilling and coring test-bed for lunar subsurface exploration and preliminary experimental research[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(6):1-10.

[4] Wechsler A E, Glaser P E. Thermal conductivity of nonmetallic materials summary report, NAS 8-1567 [R]. Huntsville: NASA, 1964.

[5] Tien C L, Nayak A L. Analytical models for lunar soil thermal conductivity[C]// AIAA 10th Thermophysics Conference. Reston: AIAA, 1975:27-29.

[6] Cremers C J, Birkebak R C. Thermal conductivity of fines from Apollo 12[C]// Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. Huston: Lunar and Planetary Institute, 1971, 2:2311-2315.

[7] 殷参,陈轮,董志峰. 钻进取样试验用模拟月壤[J]. 地质与勘探,2012,48(1):165-169.
Yin S, Chen L, Dong Z F. Lunar soil simulant for drilling tool research[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(1):165-169(in Chinese).

[8] 张宇,余飞,陈善雄. CAS-1 模拟月壤动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(1):74-82.
Zhang Y, Yu F, Chen S X. Experimental study of dynamic shear modulus and dampingratio of CAS-1 lunar soil simulant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1):74-82(in Chinese).

[9] 晏然. 月球土壤采样钻具钻进过程热特性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
Yan R. Thermal characteristics analysis for drilling process of lu-

http://bhxb.buaa.edu.cn

nar regolith sample drilling Tool[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2012(in Chinese).

[10] 侯佑松.月面钻取采样过程钻具热特性测试系统研制与试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
Hou Y S. Drill thermal characteristics test system development and experiment research of the lunar surface drilling sampling process[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2013(in Chinese).

[11] Cui J S,Hou X Y,Zhao D M,et al. Thermal simulation and experiment of lunar drill bit in vacuum[J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2014, 12(6): 4756-4763.

[12] 史晓萌,节德刚,全齐全.模拟月壤钻进负载分析与试验研究[J].宇航学报,2014,35(6):648-656.
Shi X M,Jie D G,Quan Q Q. Experimental research on lunar soil simulant drilling load analysis[J]. Journal of Astronautics, 2014,35(6):648-656(in Chinese).

[13] 石浩,段隆臣,李天明.螺旋钻进模拟月壤过程的热场分析[J].地质科技情报,2011,30(6):138-141.
Shi H,Duan L C,Li T M. Analysis of thermal field on the process of auger drilling simulative lunar soil[J]. Geological Science and Technology Information,2011,30(6):138-141(in Chinese).

[14] 陈诗吉.月壤热物性特征及其剖面温度垂直分布模拟[D].上海:华东师范大学,2014.
Chen S J. Thermophysical properties of lunar regolith and simulation of its vertical temperature distribution[D]. Shanghai: East China Normal University,2014(in Chinese).

[15] 达道安.真空设计手册[M].北京:国防工业出版社,2004:783-786.
Da D A. Vacuum design manual[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2004:783-786(in Chinese).

Device design and implementation method of lunar soil simulant vacuum test

ZHANG Tao, AN Yinghe, DING Xilun*

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Drilling sample of lunar soil over depth of 2 m is the most important object of the third stage of China's lunar exploration project. For performance test and security validation of the drilling process, it is necessary to simulate a vacuum thermal environment which is close to lunar surface and then to carry out the simulation test. A test device for lunar soil simulant in vacuum condition was designed and the pumping method was studied. The vacuum degree, under the condition of mechanical pump, influenced by pumping velocity, sample volume, water content, density and temperature was analyzed. Furthermore, with comparing the effect of methods which pumped from the top and the bottom of the lunar simulants vessel, the most efficient method to maintain the density of lunar soil simulants was put forwarded. The research makes some contribution to the construction of lunar vacuum thermal environment simulator.

Key words: lunar soil simulant; vacuum device; environment simulation; vacuum implementation; vacuum degree

http://bhxb.buaa.edu.cn