

着陆器足垫冲击特性模型试验

黄 焱¹, 李建桥¹, 陈百超², 吴宝广¹, 邹 猛¹

(1. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室,长春 130022;2. 中国空间技术研究院,北京 100094)

摘要:本文探讨了着陆器在星球表面降落冲击过程中土壤类型和密实度、冲击高度和足垫直径对冲击深度、加速度峰值和冲击力峰值的影响。分析结果表明,土壤类型和密实度对冲击深度的影响最大,其次为足垫直径,冲击高度的影响最小。相较于冲击高度,土壤的密实度对足垫在冲击过程中的加速度峰值的影响较冲击高度的大。建立了足垫冲击力峰值模型,模型的拟合相关系数 R^2 均达到 0.9 以上,结果表明该模型能较好的预测足垫冲击力峰值。

关键词:工程仿生;着陆器足垫;冲击特性;模拟月壤;模拟火星壤

中图分类号:TU435 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2017)04-1194-07

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201704026

Experiment of impact performance of space lander footpad

HUANG Han¹, LI Jian-qiao¹, CHEN Bai-chao², WU Bao-guang¹, ZOU Meng¹

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The impact effect emerged during the touch down process of space lander may influence the safety of detection equipment and the reliability of the exploration mission. The effects of soil type and compactness, footpad diameter and impact height on the impact performance of the footpad, including impact depth, peak acceleration and force are investigated. Results show that the soil type and compactness have the maximal influence on the impact depth, followed by footpad diameter, then the impact height. The model of peak impact force was established, and the square of correlation coefficient R^2 was above 0.9, which verifies that the proposed model can accurately predict the footpad peak impact force.

Key words: engineering bionics; lander foorpad; impact performance; lunar simulant; martian simulant

0 引言

中国正进行以月球软着陆采样为目标的探月三期工程以及即将开展的火星探测任务^[1,2]。实

现着陆器软着陆是深空探测工程的关键环节。着陆器着陆过程中会产生巨大的冲击作用,影响其内部精密仪器的正常工作^[3,4]。因此,研究着陆器足垫与土体相互作用对着陆器软着陆具有重要

收稿日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(50875107);吉林大学国防预研基金项目(201303042);工程仿生教育部重点实验室开放基金项目(K201406).

作者简介:黄焰(1989-),男,博士研究生。研究方向:车辆地面力学。E-mail:huanghan452012@163.com

通信作者:李建桥(1953-),男,教授,博士生导师。研究方向:车辆地面力学。E-mail:jqli@jlu.edu.cn

意义。郝飞等^[5]开展了着陆器足垫在模拟月壤上的承载特性试验,以研究加载速度对模拟月壤承载力的影响,结果表明加载速度会对模拟月壤地基的弹性模量产生影响。该研究未考虑足垫对模拟月壤的冲击特性。吴晓君等^[6]利用独立研发的垂直冲击模型试验装置,探讨了足垫冲击过程中土壤密实度、冲击速率和冲击质量等对足垫刺入深度、最大轴力和最大加速度等的影响,结果表明,足垫冲击深度和最大轴力都随着冲击能量的增大而增大,并且逐渐趋于平稳。但该研究未考虑土壤类型对足垫冲击特性的影响。文献[7]阐述了3种月球重力场模拟器的原理和装置,并对各自的优缺点进行了评述,给出了在地面上进行着陆模式模拟试验方法。但由于在试验中对月壤没有合适的模拟方法,该方法得到的试验数据与真实着陆时数据仍存在一定差异。凌道盛等^[8]建立了着陆器足垫垂直冲击模拟月壤三维动力有限元仿真模型,分析了足垫冲击荷载作用下的轴力、速度和位移的实时动力响应,与室内模型试验结果进行对比,验证了该模型的合理性,但未对足垫尺寸对冲击响应的影响进行进一步研究。

针对上述情况,本文研制了着陆器足垫垂直冲击试验装置,在不同类型土壤条件下,以足垫冲击深度、加速度峰值和冲击力峰值为试验指标、足垫直径和冲击高度为试验因素进行足垫冲击特性试验。分析了试验因素对足垫冲击特性影响规律,建立了冲击力峰值模型,以期为着陆器足垫在星球表面冲击特性提供基础数据和技术方法。

1 试验条件

1.1 试验设备

为了研究不同试验土壤上着陆器足垫冲击特性,吉林大学工程仿生教育部重点实验室研制了着陆器足垫模型垂直冲击试验系统,如图1所示。该试验系统主要由土槽、冲击装置和控制采集系统3部分组成。该系统可实现足垫从不同高度沿导轨垂直冲击土槽中试验土壤。土槽尺寸长、宽和高分别为300、300和400 mm;最大冲击高度和载荷分别为1.5 m和500 N;最大理论垂直冲击速度约为5 m/s。

冲击装置主要由导轨、起吊平台、电磁铁、冲击平台、足垫模型、标尺、吊索和手轮等组成。起吊平台通过电磁铁将冲击平台吸附,通过吊索和手轮起吊至预定试验高度后,电磁铁控制开关关

闭电磁铁电源,启动冲击平台,足垫模型从静止悬停状态迅速转变为自由落体运动,沿垂直导向立柱自由下落冲击土槽中土体。

控制采集系统包括加速度传感器(型号为CA-YD-180C,灵敏度为0.509 mV/(m·s⁻²))、移动数据采集器(型号为MDR-81)和控制PC,其中,足垫冲击加速度信号通过安装在足垫上方的压电式加速度传感器和移动数据采集器记录,控制PC用于试验控制、数据采集和存储。



1-吊索;2-标尺;3-导向立柱;4-手轮;5-土槽;6-电磁铁控制开关器;
7-数据采集器;8-控制PC;9-起吊平台;10-电磁铁;11-冲击平台;
12-指针;13-加速度传感器;14-足垫模型

图1 着陆器足垫冲击试验系统

Fig. 1 Lander footpad impact test system

1.2 试验介质

本文试验介质共有6种,如图2所示,包括:吉林大学研制的面向月面巡视探测器的模拟月壤TYII-1(粗大颗粒)和TYII-2(细小颗粒);面向火星探测器的JLU Mars-1型模拟火星壤^[9,10];采集自敦煌戈壁滩(巡视器试验外场)的戈壁砂壤;国内外普遍采用的成本较低的石英砂;同济大学研制的面向月球着陆器的CE-3型模拟月壤^[5]。6种试验土壤中,模拟月壤和模拟火星壤均以火山灰和火山岩为原料,通过去除杂质、研磨、筛分、配比加工而成^[9]。石英砂颗粒粒径分布范围较窄,属于均匀材质,主要用于对比试验。

试验土壤的主要力学性能参数如表1所示,含水率均不超过1%,属于干性砂壤。容重范围为土壤自然和密实状态下的上限和下限值,其中两种状态下CE-3和JLU Mars-1的容重变化较大。中值粒径 D_{50} 为土壤的累计粒度分布百分数达到50%时所对应的粒径;不均匀系数 C_u 用来衡量土壤中颗粒的均匀程度,若 $C_u < 5$,则土壤颗粒分布均匀;曲率系数 C_c 用来衡量土壤中粒度分配

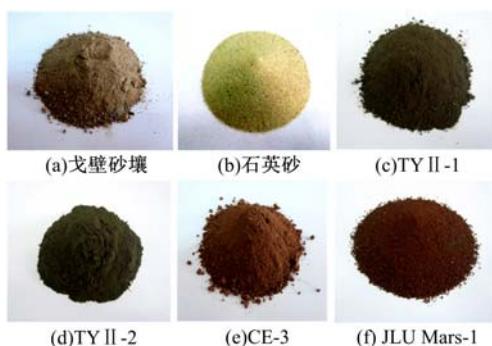


图 2 试验土壤

Fig. 2 Test soils

范围形状的指标,其数值为 1~3,认为土壤的级配是合适的。由表 1 可知,TYII-2 的中值粒径最小,颗粒总体较细,石英砂的其次,TYII-1、JLU Mars-1 的在 $200 \mu\text{m}$ 左右,戈壁砂壤和 CE-3 的较大;4 种模拟星壤不均匀系数 C_u 均大于 5,说明土壤颗粒分布不均匀,而戈壁砂壤和石英砂则属于相对均匀介质;6 种土壤中仅模拟月壤 TYII-2 的曲率系数 C_c 为 1~3,表明其级配较其他土壤的好。

表 1 试验土壤参数
Table 1 Parameters of test soils

土壤类型	含水率 /%	容重 γ / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	中值粒径 $D_{50}/\mu\text{m}$	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
戈壁砂壤	0.78	1.32~1.47	217	2.85	0.76
石英砂	0.17	1.42~1.49	140	1.79	0.96
TY II-1	0.25	1.29~1.35	202	12.9	0.58
TY II-2	0.32	1.36~1.45	45	6.68	1.56
CE-3	0.22	1.02~1.64	260	21.5	0.92
JLU Mars-1	0.19	0.95~1.13	194.5	5.16	0.94

2 试验方案

本试验中,足垫冲击载荷为固定值 10 kg,以土壤种类、容重、足垫直径和冲击高度为试验因素,足垫垂直冲击深度、加速度峰值和冲击力峰值为试验指标,开展足垫冲击特性试验研究。

2.1 因素水平

(1) 足垫直径:考虑到土槽尺寸和足垫边界效应,基于相似理论足垫采用了缩尺寸模型^[5],足垫模型采用高度为 10 mm 的圆板代替,直径为 60~140 mm,采用等间距 5 水平。

(2) 冲击高度:着陆器在星球表面降落过程中分为减速、悬停和自由下落 3 个阶段,其中自由下落阶段为垂直冲击过程,其初始速度约 4 m/s,对

应冲击高度约为 800 mm,因此为考察冲击高度对足垫冲击特性影响,试验中冲击高度水平还包括 600 mm 和 1000 mm。

(3) 土壤状态:土壤在不同密实度下呈现的物理力学特性会对试验产生不同的结果^[11],综合考虑试验需要以及整备方法的稳定性和效率,选择 2 种整备方法,使得土壤达到自然状态和密实状态 2 种不同状态,分别对应表 1 容重数值的最小值和最大值。

综上所述,试验因素水平表如表 2 所示,试验方案中将土壤种类和状态作为单独考虑的试验因素。6 种土壤 2 种不同状态下对每个试验点进行 3 次重复试验,试验总次数为 540 次。

表 2 试验因素水平表

Table 2 Levels of factors for soil bin test

因 素	水 平				
	1	2	3	4	5
足垫模型直径/mm	60	80	100	120	140
冲击高度/mm	600	800	1000	—	—

2.2 数据获取

为获取足垫冲击深度,试验前,降落冲击平台,使得足垫下表面与土壤平面刚接触,记录标尺读数;冲击过程结束后,再次记下标尺读数,二者差值则为冲击深度。

为提高测量精度,冲击加速度信号由对称安装在足垫上方的 2 个加速度传感器测量,采样频率为 256 Hz,采集时间为 8 s。通过 DDP 动态信号处理软件(见图 3)提取加速度峰值,取 2 个加速度传感器均值作为足垫的加速度数值。冲击力峰值则通过瞬时加速度和相互作用时间计算得到。

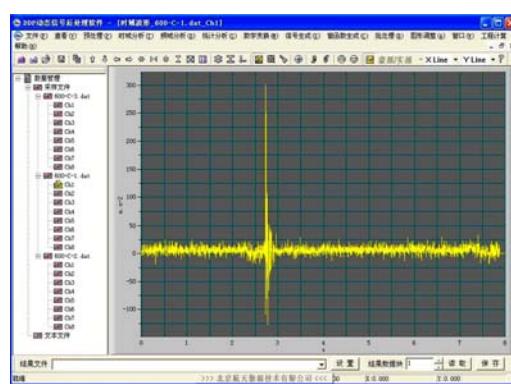


图 3 加速度数据处理软件

Fig. 3 Data processing software for acceleration

3 结果与分析

3.1 冲击深度

6种土壤试验条件下,冲击深度随冲击高度和足垫直径变化如图4所示。由图4可知,TY II-1、TY II-2 和 CE-3 型模拟月壤的冲击深度明显较大,JLU Mars-1 型模拟火星壤和石英砂的其

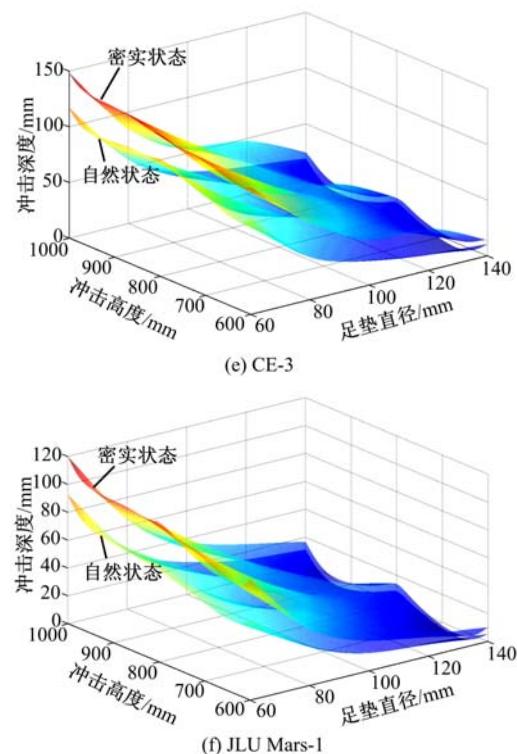
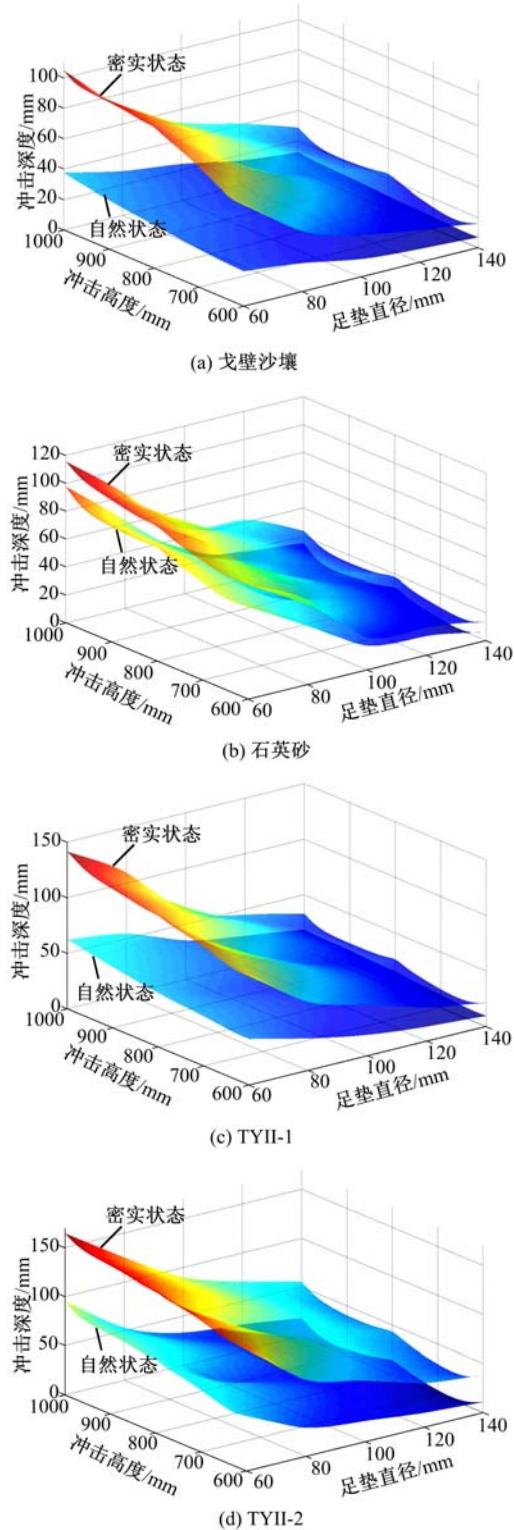


图4 不同土壤条件下冲击深度

Fig. 4 Impact depth under different testing soil condition

次,戈壁砂壤的最小。相同试验条件下,对比6种土壤冲击深度最大差值达61 mm(自然状态)和79.3 mm(密实状态),最大值较最小值平均提高了1.49倍(自然状态)和1.09倍(密实状态)。

(1) 土壤状态对冲击深度的影响

自然状态下,TY II-1、TY II-2 和 CE-3 型模拟月壤的足垫冲击深度最大值明显较其他3种土壤的大,石英砂和 JLU Mars-1 型模拟火星壤的其次,戈壁砂壤的最小;密实状态下,最大冲击深度从大到小排序依次为:CE-3、TY II-2、石英砂、JLU Mars-1、TY II-1 和戈壁砂壤,其中戈壁砂壤冲击深度仍为最小。

土壤由自然状态变为密实状态时,冲击深度的变化率如表3所示。对比发现,戈壁砂壤、TY II-1 和 TY II-2 的变化率较为明显,均值达到50%以上,而 CE-3、JLU Mars-1 和石英砂的平均变化率约为35%。由于戈壁砂壤为自然条件下形成,颗粒粒径分布较广,同样,TY II-1 和 TY II-2 的粒径分布范围较 CE-3 和 JLU Mars-1 的大,而石英砂的颗粒粒径相同属于匀质材料,因此,粒径分布较广的土壤,其冲击深度对土壤状态的变化更为敏感。

表 3 不同土壤密实度下冲击深度变化率

Table 3 Change rate of impact depth under different soil compactness

变化率	戈壁砂壤	石英砂	TY II-1	TY II-2	CE-3	JLU Mars-1	%
最大值	69.42	54.40	59.42	71.93	61.52	46.67	
最小值	52.94	15.28	42.22	41.90	17.23	22.84	
平均值	60.35	32.27	51.27	61.31	35.69	37.01	

(2) 足垫直径对冲击深度的影响

不同土壤条件下,冲击深度随着足垫直径的增大逐渐减小。足垫直径的改变主要引起足垫与土壤的接触压强的变化,试验中足垫直径平均变化率为 23.75%,对应的接触压强平均变化率为 34.21%。不同足垫直径条件下,冲击深度变化率最值和均值如表 4 所示。6 种土壤条件下冲击深度的变化率均值分别为 31.28%(自然状态)和 33.5%(密实状态),由此可知,自然和密实土壤状态下足垫直径的影响不明显。对比表 3 发现,足垫直径对冲击深度的影响较土壤状态的小。

表 4 冲击深度随足垫直径的变化率

Table 4 Change rate of impact depth with footpad diameter

土壤状态	戈壁砂壤	石英砂	TY II-1	TY II-2	CE-3	JLU Mars-1	%
自然	27.76	34.00	30.07	22.66	36.04	37.16	
密实	27.16	40.91	27.16	30.44	35.50	39.84	

(3) 冲击高度对冲击深度的影响

不同土壤条件下,冲击深度随着冲击高度的增大而增大。冲击深度随着冲击高度条件变化率最值和均值如表 5 所示。6 种土壤条件下冲击深度的变化率均值为 25.40%(自然状态)和 30.73%(密实状态),自然状态下冲击高度的影响更明显。对比表 4 发现,足垫直径对冲击深度的影响较冲击高度的大,平均变化率分别为 32.4% 和 28.1%。

表 5 冲击深度随足垫直径的变化率

Table 5 Change rate of impact depth with footpad diameter

土壤状态	戈壁砂壤	石英砂	TY II-1	TY II-2	CE-3	JLU Mars-1	%
自然	27.76	34.00	30.07	22.66	36.04	37.16	
密实	27.16	40.91	27.16	30.44	35.50	39.84	

综上所述,相同试验条件下,6 种土壤冲击深度差异明显,TY II-1、TY II-2 和 CE-3 型模拟月壤的冲击深度明显较大;JLU Mars-1 型模拟火星

壤和石英砂其次;戈壁砂壤的最小。土壤状态对冲击深度的影响最大,其次为足垫直径,冲击高度的影响最小。

3.2 加速度峰值

冲击高度的改变使得冲击能量发生变化,本文重点研究冲击高度对足垫冲击加速度的影响。在 6 种土壤条件下,足垫直径为 100 mm,冲击高度分别为 600、800 和 1000 mm 时,对足垫冲击的动态加速度数据进行采集。试验中,足垫冲击能平均变化率为 29.17%。

图 5 为不同土壤条件下加速度峰值随冲击高度的变化规律,由图 5 可知,试验条件下,加速度峰值为 16.7~42g(自然状态)和 27.5~50.8g(密实状态),其中 $g=9.8 \text{ m}^2/\text{s}$ 。不同土壤条件下,自然和密实状态下加速度峰值均值如表 6 所示,土壤由自然状态变为密实状态时,加速度峰值

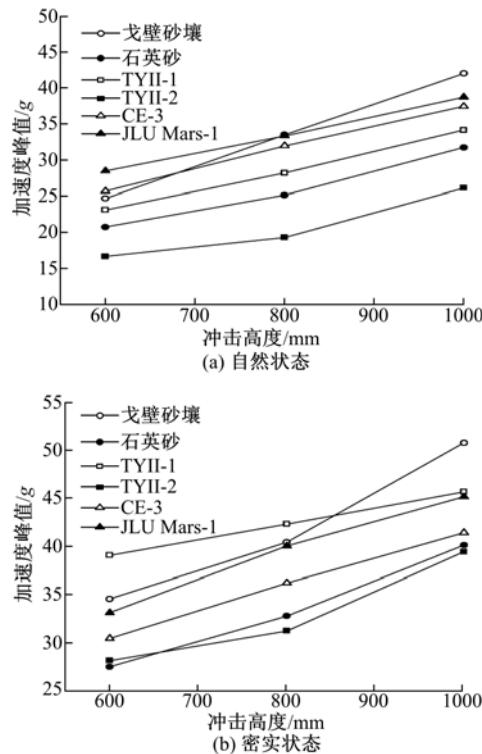


图 5 加速度峰值随冲击高度变化规律

Fig. 5 Mean peak acceleration versus with impact height

平均增加率为 33.3%。由表 6 可知,自然状态下,TY II-2 的加速度峰值最小,其次为石英砂和 TY II-1,JLU Mars-1、戈壁砂壤和 CE-3 相接近;密实状态下,石英砂和 Y II-2 的加速度峰值较小,其次为 CE-3,JLU Mars-1、戈壁砂壤和 Y II-1 的则较大。

表6 不同土壤条件下加速度峰值均值

Table 6 Mean peak acceleration under different soil state

土壤状态	戈壁砂壤	石英砂	g			
			TY II-1	TY II-2	CE-3	JLU Mars-1
自然	33.4	25.9	28.5	20.7	31.7	33.5
密实	41.9	33.5	42.3	32.9	36.0	39.4

3.3 冲击力峰值

试验条件下,冲击力峰值随冲击高度的变化规律与加速度峰值变化趋势保持一致,足垫垂直冲击力峰值为1.73~4.22 kN(自然状态)和2.80~5.08 kN(密实状态),相较于土壤自然状态,密实状态下冲击力峰值平均提高了32.1%。不同土壤条件下,冲击力峰值平均值如表7所示。自然和密实状态下,TY II-1和TY II-2的冲击力峰值差异较明显,而CE-3的则较小。不同土壤状态下,戈壁砂壤的冲击力峰值始终最大,主要原因是戈壁砂壤颗粒分布较广,且存在较大粒径的石块,在与足垫相冲击的过程中冲击力峰值较大;TY II-2模拟月壤的冲击力峰值始终最小,原因是由于其颗粒较细,流动性明显,能较好的“缓冲”吸收足垫的冲击能。

表7 不同土壤条件下冲击力峰值均值

Table 7 Mean peak acceleration under different soil state

土壤状态	戈壁砂壤	石英砂	kN			
			TY II-1	TY II-2	CE-3	JLU Mars-1
自然	3.39	2.64	2.89	2.13	3.21	3.38
密实	4.25	3.38	4.21	3.33	3.63	3.97

基于美国在2013年公开了Apollo探月计划中着陆器着陆时的部分数据,George^[12]给出了月球着陆器足垫受到的垂直力模型如下:

$$F_v = K_v \times A \times Z_p \quad (1)$$

式中: F_v 是月壤对足垫的垂直反作用力,N; K_v 为承载强度系数,Pa/m; A 为足垫面积,m²; Z_p 为垫的冲击深度,m。参照土体静态承压模型,引入冲击深度指数n对模型(1)进行修正:

$$F_v = K'_v \times A \times Z_p^n \quad (2)$$

式中: K'_v 为修正的承载强度系数,与土壤类型和密实度相关,MPa/mm; n 为足垫的冲击深度指数,无量纲。

结合试验数据,不同试验条件下的模型拟合系数值如表8所示,相关系数R²均达到0.9以上,表明修正的冲击力模型能较好地预测足垫冲

击力峰值。由表8可知,承载强度修正系数K'_v范围为1.30~18.32 MPa/mm,足垫的冲击深度指数n的范围为0.24~1.33。不同的土壤类型和状态,K'_v值变化明显,与土壤类型和状态对加速度峰值影响规律一致。

表8 模型系数值

Table 8 Value of model coefficients

土壤状态	模型系数	戈壁砂壤	石英砂	TY II-1	TY II-2	CE-3	JLU Mars-1
自然	K'_v	5.66	2.55	18.32	6.33	12.74	3.35
	n	0.58	0.80	0.60	1.33	1.22	1.13
密实	K'_v	4.31	5.67	1.30	6.11	6.69	3.94
	n	0.52	0.69	0.24	0.74	0.75	0.51

4 结论

(1)相同试验条件下,6种土壤冲击深度差值最大达61 mm(自然状态)和79.3 mm(密实状态)。TY II-1、TY II-2和CE-3型模拟月壤的冲击深度明显较大,JLU Mars型模拟火星壤和石英砂其次,戈壁砂壤的最小。

(2)试验条件下,足垫直径对冲击深度的影响较冲击高度的大,平均变化率分别为32.4%和28.1%。

(3)试验条件下,土壤的密实度对足垫在冲击过程中的加速度峰值的影响较冲击高度的大,土壤密实状态下的加速度峰值较自然状态下平均增加了33.3%。

(4)不同土壤状态下,戈壁砂壤的冲击力峰值始终最大,而TY II-2模拟月壤的冲击力峰值最小,土壤密实状态下的冲击力峰值较自然状态下平均增加了32.1%。建立了冲击力峰值修正模型,该模型能较好地预测足垫冲击力峰值。

参考文献:

- [1] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005.
- [2] Liang D, Chai H, Chen T. Landing dynamic analysis for landing leg of lunar lander using Abaqus/Explicit[C]// IEEE International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), Harbin, China, 2011: 4364-4367.
- [3] Zupp G A. An analysis and a historical review of the Apollo program lunar module touchdown Dynamics [R]. Houston:NASA Johnson Space Center, 2013.
- [4] Huang B, Jiang Z, Lin P, et al. Research on impact

- process of lander footpad against simulant lunar soils [J]. Shock and Vibration, 2015(6):1-24.
- [5] 郝飞, 蒋明镜, 孙德安, 等. TJ-1 模拟月壤承载特性室内试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1953-1958.
Hao Fei, Jiang Ming-jing, Sun De-an, et al. Indoor experimental research on bearing behavior of TJ-1 lunar soil stimulant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1953-1958.
- [6] 吴晓君, 钟世英, 凌道盛, 等. 着陆器足垫垂直冲击模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1045-1050.
Wu Xiao-jun, Zhong Shi-ying, Ling Dao-sheng, et al. Model test study of vertical impact of space lander footpad[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1045-1050.
- [7] Zhang Z, Nie H, Chen J, et al. Investigation on the landing-impact tests of the lunar lander and the key technologies[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(2): 267-276.
- [8] 凌道盛, 蒋祝金, 钟世英, 等. 着陆器足垫冲击模拟月壤的数值分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2013, 47(7): 1171-1177.
Ling Dao-sheng, Jiang Zhu-jing, Zhong Shi-ying, et al. Numerical study on impact of unar lander footpad against stimulant lunar soil[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(7): 1171-1177.
- [9] 邹猛, 李建桥, 张金换, 等. 月球车驱动轮在不同介质上的牵引性能[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(1): 25-29.
Zou Meng, Li Jian-qiao, Zhang Jing-huan, et al. Traction ability of lunar rover's driving wheel on different soils[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(1): 25-29.
- [10] 李建桥, 薛龙, 邹猛, 等. 已有模拟火星壤力学性质分析及新火星壤研制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(1): 172-178.
Li Jian-qiao, Xue Long, Zou Meng, et al. Terramechanics characters and development of Martian stimulant regolith[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1): 172-178.
- [11] 李建桥, 黄晗, 党兆龙, 等. 轻载荷条件下的筛网轮沉陷[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(1): 167-173.
Li Jian-qiao, Huang Han, Dang Zhao-long, et al. Experimental study on the sinkage of wire mesh wheel under light load[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1): 167-173.
- [12] George A Z. An analysis and a historical review of the Apollo Program lunar module touchdown dynamics[C]// NASA Paper, NASA/SP-2013-605.