



## 侵彻式月壤探测地面模拟试验研究

孙淼, 张鸿宇, 迟润强, 庞宝君, 肖俊孝, 范锦彪, 钱成, 卢孜筱, 姜生元

### Ground Simulation Test of Penetrator for Lunar Soil Exploration

SUN Miao, ZHANG Hongyu, CHI Runqiang, PANG Baojun, XIAO Junxiao, FAN Jinbiao, QIAN Cheng, LU Zixiao, and JIANG Shengyuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210149>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 无轴螺旋式模拟月壤主动填充装置研制

Development of Platform for Active Filling Lunar Soil Simulants

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(1): 57-62

#### 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展

Research Prospects of Lunar Polar Water Ice Resource In-Situ Utilization

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 241-247

#### 月球水冰探测

Lunar Water-Ice Exploration

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(3): 290-296

#### 基于颗粒单向流动效应的手持式月壤取心装置设计

Design of Handheld Corer for Lunar Regolith Based on Particle Directional Flow Method

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(2): 164-170

#### 深层月壤钻取冗余绕组电机控制方法

Control Method of Redundant Winding BLDC for Deep Lunar Soil Drilling

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(3): 259-268

#### 着陆器足垫冲击月壤动态行为离散元仿真分析

Simulation Analysis of Dynamic Behavior of Lander Footpad Impact on Lunar Regolith

深空探测学报(中英文) . 2020, 7(2): 171-177



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

# 侵彻式月壤探测地面模拟试验研究

孙 淼<sup>1</sup>, 张鸿宇<sup>1</sup>, 迟润强<sup>1</sup>, 庞宝君<sup>1</sup>, 肖俊孝<sup>2</sup>, 范锦彪<sup>3</sup>, 钱 成<sup>4</sup>, 卢孜筱<sup>5</sup>, 姜生元<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学宇航空间机构及控制研究中心, 哈尔滨 150001; 3. 中北大学电气与控制工程学院, 太原 030051; 4. 四川航天技术研究院, 成都 610100; 5. 国家纳米科学中心, 北京 100190)

**摘要:** 月面通常由细颗粒粉末状月壤覆盖, 利用侵彻器可实现次表层月壤的探测。在侵彻器与月壤相互作用的过程中, 为研究侵彻器结构及科学载荷缓冲结构的抗冲击性能、不同剖面组构的抗侵彻性与辨识性, 以及侵彻后对月壤的扰动强弱, 开展了100~260 m/s全尺寸侵彻器对3类月壤模拟样本的侵彻试验。试验结果表明, 约 $3 \times 10^4$  g过载下侵彻器结构完好, 载荷运行正常; 侵彻无硬层月壤模拟样本靶标时, 滤波后侵彻器过载峰值约1 000 g; 侵彻月岩或水冰模拟样本靶标时, 滤波后侵彻器过载峰值为无硬层月壤模拟样本靶标的5倍以上, 弹载记录仪可对不同强度成层模拟样本靶标进行辨识; 在弹道终点处, 距侵彻器约20 mm范围内的颗粒类模拟样本靶标表现为扰动破碎, 中值粒径最多降低约70%。可为探月四期探测工程探测器设计提供参考。

**关键词:** 侵彻器; 模拟月壤; 月壤水冰; 颗粒破碎

**中图分类号:** V11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2022)02-0141-09

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210149

**引用格式:** 孙淼, 张鸿宇, 迟润强, 等. 侵彻式月壤探测地面模拟试验研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 141-149.

**Reference format:** SUN M, ZHANG H Y, CHI R Q, et al. Ground simulation test of penetrator for lunar soil exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 141-149.

## 引言

将高速撞击或侵彻方式应用于星壤探测具有较大的潜力, 主要分为撞击器(Impactor)和侵彻器(Penetrator)两大类<sup>[1]</sup>。撞击器是以动能撞击的方式为星壤探测创造条件, 通过引起表面星壤的溅射或汽化进行遥感分析, 月球坑观测与感知卫星(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS)探测任务利用空燃料舱撞击了月球南极Cabeus陨石坑内的永久阴影区, 证实了月球极区存在水冰<sup>[2]</sup>。撞击后会形成人造撞击坑<sup>[3]</sup>, 暴露出次表层星壤以供主器分析或采样<sup>[4]</sup>, 并可通过成坑机理评估深层星壤与表层星壤的差异<sup>[5]</sup>。撞击器获得动能的方式主要有两种, 一种是轨道加速, 例如“深空撞击”(Deep Impact)任务<sup>[6]</sup>和“双小行星重定向试验”(Double Asteroid Redirection Test, DART)<sup>[7]</sup>, 利用推进系统将撞击器送入预定轨道。撞击器材料应选择简单的惰性物质, 以最大程度地减少对目标材料的任何污染, 通常选择铜等<sup>[4, 6]</sup>。撞击器速度一般达到数千米每秒, 引起足够大的溅射幕, 甚至发生电离, 以便用于光谱分析。除利用推进

器或轨道加速以外, 撞击器也可拥有自己的动力源, 即化学能加速。“隼鸟2号”(Hayabusa-2)携带的小型撞击器(Small Carry-on Impactor, SCI)<sup>[8]</sup>, 利用聚能装药结构, 在高能炸药驱动下形成爆炸成型弹丸, 成功使小行星“龙宫”(Ryugu)暴露出次表层物质<sup>[5]</sup>。

侵彻器与撞击器之间的本质区别是撞击器无需在高速撞击后执行任何功能, 不需要对撞击器的存活性、功能性等进行设计。侵彻器为百米量级着陆速度的硬着陆器, 与表面星壤相互作用消耗动能, 最终停止于星壤内部并开展进一步的探测任务。与传统着陆器相比, 侵彻器的优点除了造价较低外, 还可直接侵彻至星壤内部, 目标为更具有科学价值的、空间风化相对较弱的次表层星壤区域; 另一优点是降低了高速撞击可能带来的冲击相变, 也减少了热环境引起的背景噪声。历史上有多次侵彻器研究热潮, 其中开展了试验研究或执行了发射任务的项目主要包括: 针对火星的探测任务, 美国的Mars<sup>[9]</sup>和DS-2(Deep Space-2)<sup>[10]</sup>、俄罗斯的Mars-96<sup>[11]</sup>; 针对月球的探测任务, 日本月球-A(Lunar-A)<sup>[12]</sup>和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)月光(MoonLITE)<sup>[13]</sup>。但遗憾的是,

收稿日期: 2021-12-08 修回日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11772113)

以上任务或因为发射任务失败,或因为经费问题而终止,均未成功实现探测目标,唯一成功着陆的DS-2探测器也在着陆后失联,但不能因此而否定侵彻式探测的应用潜力。针对地外天体水冰物质的次表层探测,开展月球极区次表层月壤侵彻式探测任务可拓宽对极区月壤物性的认知,也为月球基地建设选址及地质勘探提供依据。

对于天然土壤、岩石和混凝土等<sup>[14-18]</sup>材料的侵彻规律具有一定的研究基础,但对于颗粒类<sup>[19]</sup>及成层分布<sup>[20]</sup>的模拟星壤低速侵彻规律研究及侵彻试验开展较少。地面模拟试验的开展将有助于提高对侵彻式探测方法的认知,从而降低任务风险。本文利用155 mm一级气体炮进行了探索性全尺寸侵彻器模拟月壤侵彻试验,主要目标:①验证侵彻器结构、科学载荷缓冲结构的抗冲击性能;②评估不同模拟样本靶标的抗侵彻性与辨识可能性;③评估侵彻过程对星壤模拟物的扰动;④为数值仿真提供可对比的试验验证结果。

## 1 地面模拟试验

### 1.1 试验平台及设备

深空探测任务的侵彻器正在向小型化发展<sup>[20]</sup>,当质量过小时,既给科学载荷设计带来困难,又会造成更高的侵彻过载,这对于保障科学载荷不被破坏具有极大的技术挑战。考虑航天任务的巨大成本,侵彻器总体质量一般控制在15~20 kg,侵彻器的直径接近80~120 mm。侵彻器并不以高侵彻深度为目标,而是将科学载荷安全送至目标深度。为减小科学载荷的抗过载设计负担,着壤速度控制在300 m/s以下较为合理。与火药炮相比,低速发射采用一级气炮更为稳定,目前哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心搭建了155 mm一级气体炮,同时配备了 $\Phi 2.4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 的大型试验靶舱,如图1所示。设备可满足各类侵彻器100~300 m/s的着壤速度地面模拟试验需求。试验现场布置如图2所示,可应用于全尺寸试验的测试系统包括测速与着靶姿态观测模块和侵彻历程记录模块。



图1 155 mm一级气体炮  
Fig. 1 155 mm one-stage gas gun

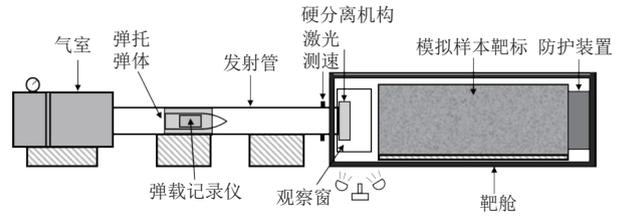


图2 试验布置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of experiments

测速与着靶姿态观测模块主要由激光测速、高速摄影和通断网靶构成,可根据测试需求选取不同模块联合检测,如图3所示。高速摄影采用Photron SA5摄影机,通过观察窗对弹托分离后的侵彻器着靶姿态进行观测,也可更换镜头实现模拟物溅射影像观测,同时记录侵彻器着靶与溅射物飞溅速度;通断网靶由0.1 mm铜箔制成,固定于支撑板和钢靶架,既可置于侵彻器着靶前,与激光测速联合测量侵彻器速度,又可置于模拟样本靶标中,获取侵彻器最终位置便于回收。置于样本中的通断靶应注意绝缘处理,并开发了小间距多触发通断电路。

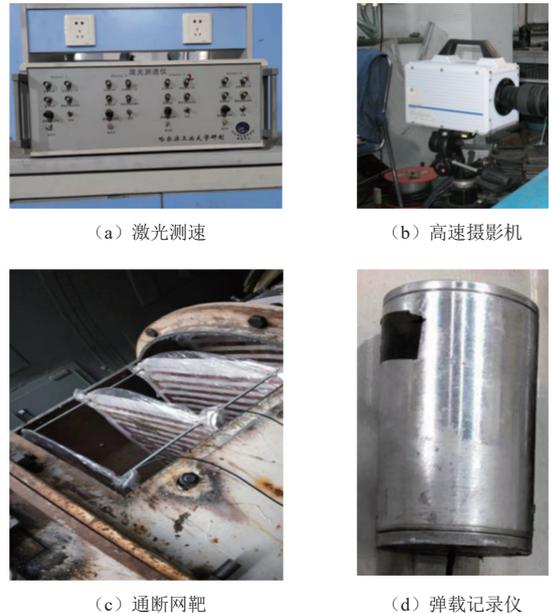


图3 155 mm一级气体炮测试系统  
Fig. 3 155 mm one-stage gas gun testing system

侵彻历程记录模块即弹载记录仪,主要由过载传感器、温度传感器、应变传感器、存储模块和电源模块等组成,记录模块和电源模块在真空条件下整体灌封,增加抗过载能力,采用橡胶泡沫复合缓冲器缓冲。记录模块最大可测8个通道,分辨率12 bit,采样率200 kHz/channel,记录容量256 kByte。过载测量采用国产三维压阻加速度传感器,工作频率0~30 kHz;温度测量采用热电偶传感器,响应时间小于1 ms;应变测量采用半导体应变计。传感器在使用前经过校

准, 加速度传感器依据GB/T 20485.13-2007, 采用激光干涉冲击绝对法进行, 校准的不确定度小于6% ( $k=2$ ); 热电偶传感器采用黑体炉进行校准, 校准不确定度小于5% ( $k=2$ )。

针对同一类月壤模拟样本多物性差异引起的抗侵入特性影响研究, 一般基于缩比弹进行侵入试验。由于小型侵入器以相同着靶速度侵入模拟样本靶标时, 应变率明显升高, 当模拟样本靶标为率不相关材料时, 可尝试相似的分析方法建立全尺寸与缩比弹的联系<sup>[21]</sup>, 但在面对月壤水冰或月岩等脆性材料时, 通常是率敏感材料<sup>[22-23]</sup>, 缩比弹侵入试验并不是为了等效全尺寸侵入器的侵入深度等信息, 而是掌握样本物理参数的改变引起的抗侵入特性差异与规律。另外, 随着科学载荷抗冲击设计的发展, 侵入器尺寸设计向小型化逐渐成为可能, 因此缩比侵入试验结果也可作为未来探测计划的数据储备。



(a) 闪光X射线照相系统



(b) 真空靶舱

图5 57 mm一级气体炮测试系统

Fig. 5 57 mm one-stage gas gun testing system

## 1.2 月壤模拟样本靶标选取

由于着陆区月壤特性具有一定的随机性, 月壤模拟样本靶标选取应具有包容性, 本文选取了5种具有代表性的月壤模拟样本开展试验研究, 如图6所示。对月壤模拟样本静态力学强度进行测试, 并将其分类, 具体信息见表1。Atkinson等<sup>[24]</sup>对不同含水率的JSC-1a模拟月壤, 在253 K ~ 77 K开展了单轴抗压强度测试。77 K温度条件下, 随着含水量的增加, 模拟样本的单轴抗压强度逐渐增大。当含水率约10%时, 模拟样本的单轴抗压强度接近40 MPa。因此, 以低强度混凝土和红砂岩两种不同强度的靶标, 作为不同含水率的月壤水冰模拟样本<sup>[25]</sup>。

## 1.3 侵入器及试验工况

所用的侵入器如图7所示, 侵入器长度均为500 mm, 使用后端盖螺纹将弹载记录仪及其他载荷轴向压紧于弹体内部, 详细信息见表2。除混凝土外, 其余模拟样本靶标置于内径 $\Phi 630$  mm  $\times$  4 m靶舱。

全尺寸侵入试验共模拟了3类月球极区月壤剖面,

后续将同步开展缩比弹侵入试验, 发射平台为57 mm一级气体炮, 如图4所示, 可满足千克级侵入器发射工况, 试验测试系统除上文已提及的之外, 试验靶舱可改造为真空舱, 同时搭配8通道闪光X射线照相系统, 记录侵入器在模拟样本靶标内的运动姿态、靶体扰动等信息, 如图5所示。



图4 57 mm一级气体炮

Fig. 4 57 mm one-stage gas gun



(b) 真空靶舱

分别为: ①无硬层, 以玄武岩颗粒作为模拟样本靶标, 尽管所采用的靶标预计会与极区月壤存在差异, 但作为系列试验的一部分, 仍然对侵入器侵入干燥颗粒靶标提供一定的预示效果; ②表面硬层, 表面存在小型月岩或永久阴影坑内可能存在月壤水冰表面霜冻层, 采用混凝土过渡至玄武岩颗粒作为成层模拟样本靶标; ③次表硬层, 月面以下存在不可见的月岩或永久阴影坑次表层10%含水率月壤水冰。采用泡沫水泥或火山石颗粒过渡至红砂岩作为成层模拟样本靶标; 图8为各试验工况的模拟月壤剖面示意图, 详细尺寸信息见表2。

## 2 试验结果及分析

试验完成后, 通过逐层去除靶标材料, 确定侵入器最终停留位置和姿态, 如图9所示。提取弹载记录仪过载信息, 选取合适的截止频率对过载峰值进行了识别<sup>[25-26]</sup>, 结果汇总于表3。试验结果显示155 mm一级气体炮具有较好的低速发射能力, 其着靶速度偏差2% ~ 7%。

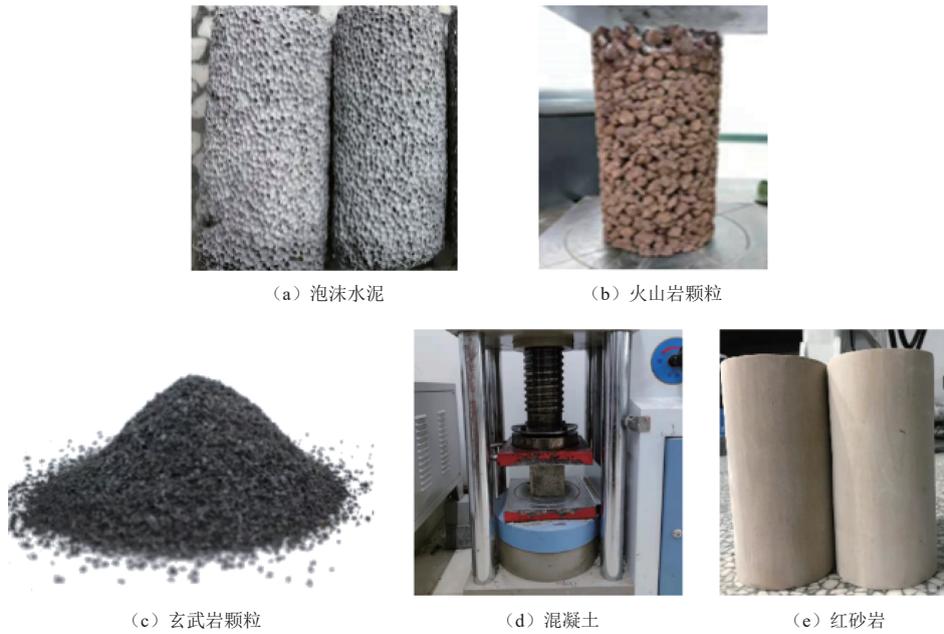


图6 月壤模拟样本

Fig. 6 Simulated lunar soil samples

表1 月壤模拟样本靶标基本特性

Table 1 Basic characteristics of simulated lunar soil sample targets

样本类型	样本属性	粒径/mm	体密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	抗压强度/MPa
发泡水泥	多孔骨架结构	—	0.63	0.4	0.10
火山岩颗粒	无胶结大颗粒	10 ~ 30	1.25	0.7	0.96
玄武岩颗粒	无胶结细颗粒	0.1 ~ 1	1.42	0.5	—
混凝土	胶结大颗粒	0.35 ~ 0.5细沙5 ~ 10骨料	2.21	—	23.00
红砂岩	胶结细颗粒	—	2.50	—	40.00

注：“—”表示无法测量或未测量该数据。

根据高速摄影和侵彻器标记点显示，发射和侵彻过程中，侵彻器转动可忽略不计。部分试验回收后的侵彻器及头部如图10和图11所示，侵彻器结构均未发生破坏，主要的磨蚀现象发生于弹头部分，并附着了

一层致密靶标材料。所搭载的传感设备在试验后均开展通电测试并运行良好。弹载记录仪获取了每次试验的侵彻器全弹道过载数据。

图12显示了4#试验的侵彻器加速、弹托分离和侵彻过载历程曲线。对1 ~ 6#试验过载数据进行了截取，仅显示侵彻过程，如图13~17所示。对过渡界面的过载数据进行了放大，弹载记录仪可以较清晰的反映不同靶标间的过载差异。

### 2.1 无硬层月壤靶标试验结果及边界效应分析

所采用的侵彻器在侵彻低密度玄武岩颗粒时，表现出较低的过载峰值。1#试验中仅使用通断靶记录了侵彻器位置信息，以两次微分的方式近似获得了侵彻器过载峰值的计算结果，被用于沙的侵彻效应研究<sup>[27-28]</sup>，但由于颗粒类材料具有压缩或剪胀效应，可能造成通断信号触发时刻的干扰，两次微分也会丧失过载连续变化中的特征信号，在后续试验中均采用弹载记录仪携带加速度计对侵彻器过载进行测量。



注：(a) 尼龙弹托，(b) 弹载记录仪，(c) SAW读取电路与热电触探针结构，(d) 后端盖，(e) 侵彻器头部，(f) 壳体

图7 侵彻器

Fig. 7 Photo of the penetrator

表 2 试验工况及侵彻器信息

Table 2 Test conditions and penetrator information

编号	模拟样本	样本尺寸/(m × m)	侵彻器直径/mm	弹头形状	侵彻器质量/kg	侵彻器头部/壳体材料	目标着靶速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1#	玄武岩颗粒	Φ 0.63 × 4	90	尖卵形	11.5	45#钢/45#钢	150
2#	玄武岩颗粒	Φ 0.63 × 4	90	尖卵形	13.6	45CrMSi/45CrMSi	100
3#	混凝土—玄武岩颗粒	Φ 1 × 0.2 Φ 0.63 × 2	90	尖卵形	11.5	1Cr18Ni12Mo3Ti/ 1Cr18Ni12Mo3Ti	230
4#	混凝土—玄武岩颗粒	Φ 1 × 0.2 Φ 0.63 × 2.5	90	截卵型	11.4	1Cr18Ni12Mo3Ti/ 1Cr18Ni12Mo3Ti	200
5#	泡沫水泥—砂岩	1.35 × 0.41 <sup>①</sup> 1.05 × 0.41 <sup>①</sup>	80	尖卵形	6.5	45CrMSi/7075Al	260
6#	火山石颗粒—砂岩	Φ 0.63 × 0.9 1.05 × 0.41 <sup>①</sup>	80	尖卵形	6.5	45CrMSi/7075Al	150

注：①表示该模拟样本靶标截面为正方形。

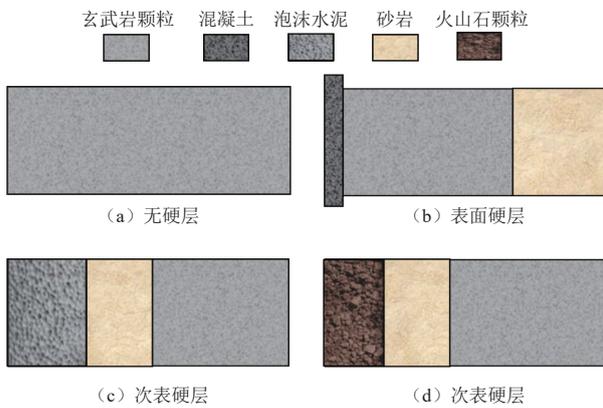
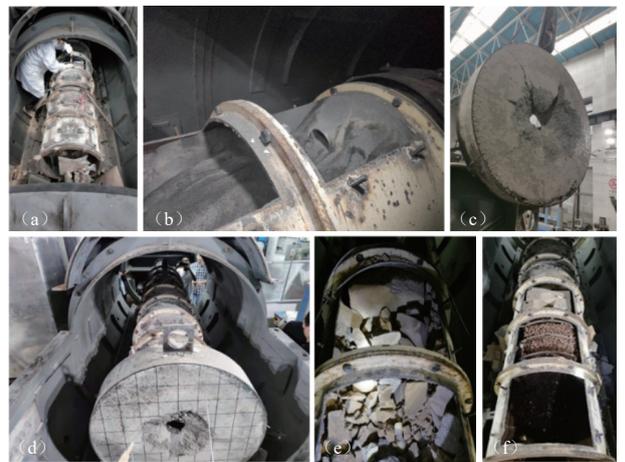


图 8 模拟极区月壤剖面

Fig. 8 Simulated lunar polar-region soil cross-section



注：(a) ~ (f) 分别对应1~6#试验。

图 9 试验后现场照片

Fig. 9 Post-test photos

表 3 试验结果

Table 3 Trial results

编号	入射角/(°)	着靶速度/(m·s <sup>-1</sup> )	侵彻深度*/m	轴向峰值过载(滤波后)/g	弹道描述
1#	0	159	2.1	1 205 <sup>a</sup>	未发生明显偏转
2#	1	107	2.1	733	向上偏移至距离靶舱20 mm
3#	1	239	2.2	6 584	击中中舱壁偏转90°
4#	0	208	1.4	7 377	未发生明显偏转
5#	0	258	1.9 <sup>b</sup>	16 650	击中保护层砂岩角偏转与舱壁碰撞
6#	0	154	1.2 <sup>c</sup>	8 485	未发生明显偏转

注：“\*”表示以靶标前表面至侵彻器头部计算侵彻深度；“a”表示过载由通断靶信号计算获得；“b”表示其中红砂岩侵彻0.5 m；“c”表示其中红砂岩侵彻0.3 m。



图 10 试验后回收的侵彻器

Fig. 10 Recovered penetrators after test



图 11 试验后弹头表面

Fig. 11 Head surfaces of penetrators after test

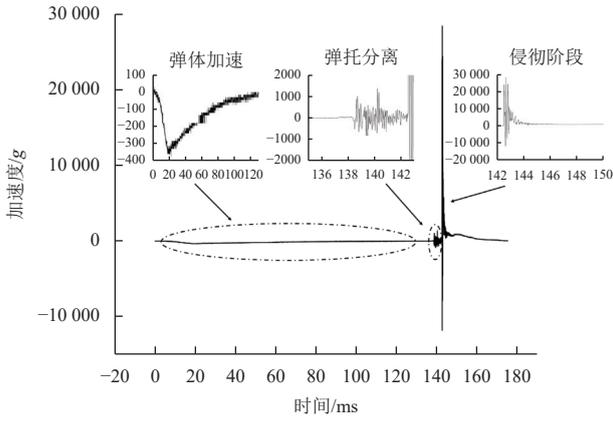


图 12 混凝土-玄武岩颗粒 (4#) 侵入器全弹道过载历程曲线  
 Fig. 12 Full trajectory overload curve of penetration test of cement-red sandstone (#4)

2#试验的侵入器轴向过载曲线如图13所示, 滤波后过载信号仍呈现出规律的波动。通过对侵入弹道的仔细挖掘, 基本排除了侵入器撞击靶舱和装填样本造成的影响, 初步分析这种波动可能与靶舱的尺寸相关。当前靶舱尺寸参考Glöbner等<sup>[29]</sup>的试验设计, 靶舱直径约为侵入器直径7倍, 但从过载信息看出, 靶舱尺寸仍然对玄武岩颗粒样本的侵入阻力产生了影响。

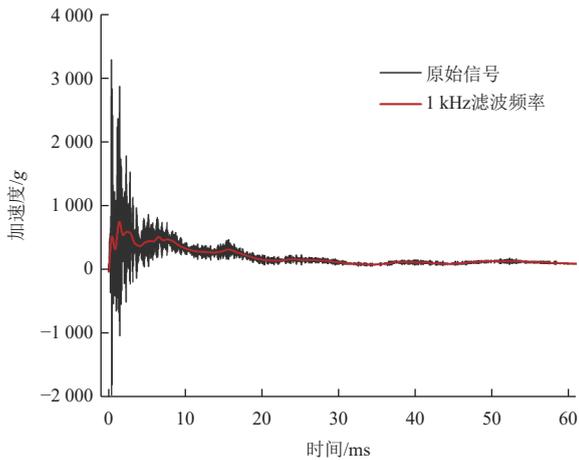


图 13 玄武岩颗粒 (2#) 侵入器过载曲线  
 Fig. 13 Basalt particles (2#) overload curve of penetrator

在颗粒材料受到侵入器冲击后, 其内部应力波向周围扩散, 遇到钢靶舱边界会反射压缩波, 这种往复的震荡对颗粒材料侵入阻力似乎产生了实质的影响, 表现为刚体过载的规律波动。但颗粒材料未受压缩时体波速通常小于300 m/s<sup>[30]</sup>, 在体积密度较低时, 波速会进一步降低, 所以样本内应力波对于侵入器峰值过载影响程度较小, 仅对后续侵入过程中过载信号造成一定的影响。

在验证科学载荷的存活性或样本特征峰值过载分析时, 当前装填玄武岩颗粒的靶舱尺寸已满足要求,

但对最终侵入深度研究时, 可能引起一定误差。针对该问题的详细研究, 将在后续的试验中解决。

### 2.2 表层月岩/霜冻层靶标试验结果及侵入器头部形状优选分析

3#和4#试验侵入过载历程曲线如图14和图15所示。两次试验中混凝土靶标在钢箍约束下, 呈现出典型的薄靶破坏现象, 混凝土的抗压强度远大于抗拉强度, 因此背面发生崩落, 形成比撞击面更大的破坏坑。

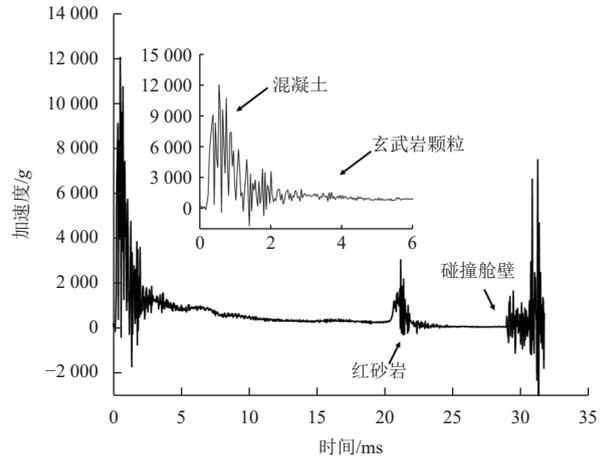


图 14 混凝土-玄武岩颗粒 (3#) 侵入器过载曲线  
 Fig. 14 Concrete-basalt particles (3#) overload curve of penetrator

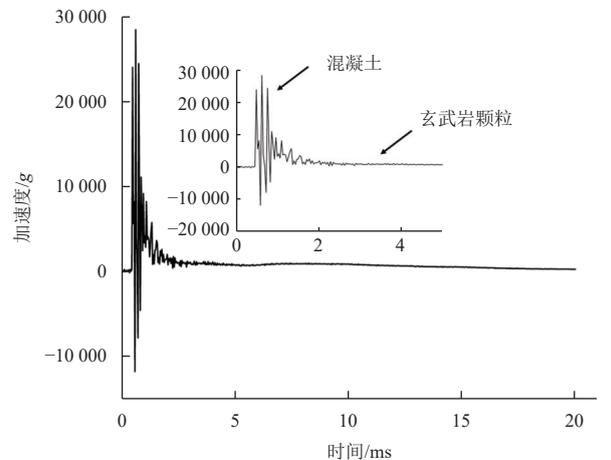


图 15 混凝土-玄武岩颗粒 (4#) 侵入器过载曲线  
 Fig. 15 Concrete-basalt particles (4#) overload curve of penetrator

3#试验侵入器最终侵入至作为保护层的红砂岩边缘位置, 同时发生接近90°的偏转, 随后穿透Φ 630 mm靶舱上盖后停止, 而4#试验侵入器弹道非常稳定, 终态位置几乎位于玄武岩颗粒样本的弹道中心, 这表明截卵型头部形状有助于弹道稳定。

但是, 4#试验着靶速度低于3#试验, 未滤波过载峰值却为3#试验的2.3倍, 滤波后刚体过载峰值增加790 g。因此, 弹头构型的优选需要在弹道稳定性与过

载强度间做出综合考虑，对于深侵入，应首先考虑弹道稳定性，选择截卵形头部，增加科学载荷的抗过载设计；而对于3倍弹长以内的浅侵入，弹道一般较为稳定，相同着壤的速度下，尖卵形头部由于具有较低的过载峰值应被优先考虑。

2.3 次表层月岩/月壤水冰试验结果及多层介质辨识验证

5#泡沫水泥试验中由于强度仅依赖水泥弱骨架承载，几乎不具备抗侵入性，侵入后发生破碎，图16中显示侵入泡沫水泥的过载信号弱于弹托分离。红砂岩块抗压强度较高且未进行边界加固，被侵入后发生比泡沫水泥更严重破碎。弹载记录仪清晰记录了侵入每层红砂岩的过载信号，随着侵入速度的降低，过载强度逐渐降低。

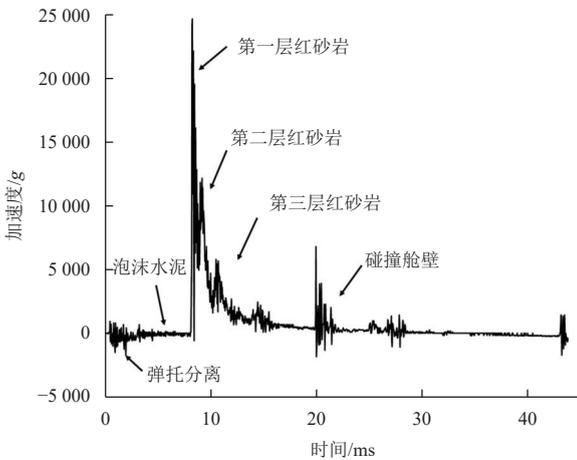


图 16 泡沫水泥-红砂岩 (5#) 侵入器过载曲线  
Fig. 16 Foamed cement-Red sandstone (5#) overload curve of penetrator

6#试验侵入过载曲线如图17所示，火山岩颗粒尽管颗粒尺寸相对较大，但由于颗粒自身存在孔隙，颗粒强度较弱，当前工况下过载峰值仍小于1 000 g。对比2#试验过载信号，弹载记录仪对颗粒尺寸差异也具有一定的辨识性。

通过对比以上3类工况的试验结果，表明弹载记录仪具备识别不同强度靶标的能力，在实际探测任务中具有较高的应用价值。

2.4 颗粒扰动破碎分析

除5#试验不含颗粒类样本外，在其余试验中均发现颗粒类靶标在侵入后发生颗粒破碎现象。以4#试验为例，清除靶舱内侵入器上方的玄武岩颗粒后，可以清晰地看到侵入器径向区域玄武岩颗粒发生破碎。将侵入器取出后，在侵入器终态位置靶标处，以10 mm 间隔采集3份靶体材料。另外，注意到靶舱边界处发生类似颗粒固结现象，因此也收集1份靶体材料。均采用

激光粒度分布仪 (BT-2001) 进行粒径分析与原始颗粒进行对比。破碎扰动区域约20 mm，根据距侵入器远近，可分为破碎区、过渡区及原始区，如图18所示。随着距侵入器距离的增加，颗粒的破碎程度逐渐降低。与原始区相比，破碎区中值粒径降低约70%，距离侵入器20 ~ 30 mm的靶体与原始靶体颗粒级配一致。靶舱边界处颗粒尽管发生一定固结，但颗粒级配与原始样本相比并未发生明显变化。

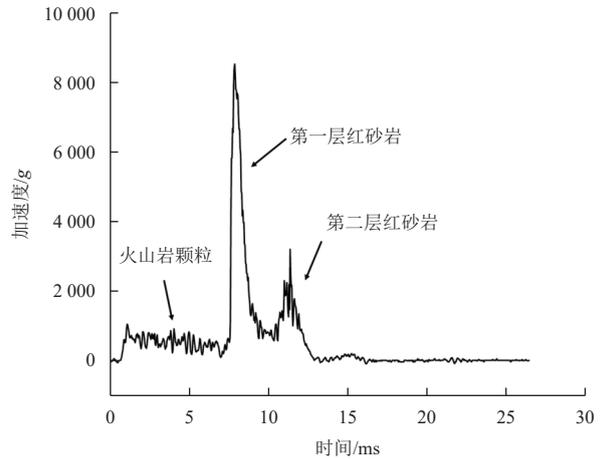


图 17 火山岩颗粒-红砂岩 (6#) 侵入器过载曲线  
Fig. 17 Volcanic rock particles-red sandstone (6#) overload curve of penetrator

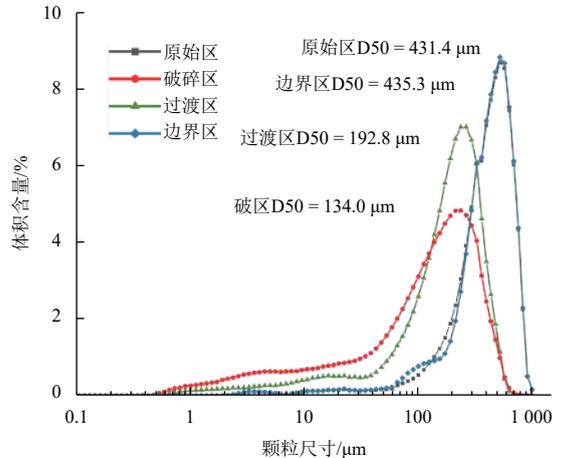


图 18 弹道径向区域粒径分布 (4#)  
Fig. 18 Ballistic radial area particle size distribution (4#)

侵入式探测属于接触式探测，当侵入器终止于星壤次表层后，通过分布于侵入器内部、外壳或伸展触探的科学载荷开展探测任务。颗粒破碎可有助于星壤中微挥发分的检测，但星壤发生扰动破碎后，对星壤热、电等物性测量造成影响。探测结果需要考虑颗粒破碎带来的差异，历史上的侵入式探测任务中均未考虑该事实。开展更详细的全弹道颗粒扰动破碎分析，

有助于建立弹道终点处的扰动影响区域与原始星壤物性之间联系,并建立具有包络性的数据库,是提高数据反演可信度的有力保障。

### 3 结论

本文开展了3类月球极区月壤剖面模拟样本全尺寸侵彻器低速侵彻试验,但侵彻器可能面临更复杂的月壤剖面组构,因此本次试验应总结为系列试验的开端。基于当前试验结果,主要结论如下。

1) 侵彻试验后,侵彻器结构均保持完好,所搭载的科学载荷在侵彻试验后正常运行,滤波前最高过载值接近 $3 \times 10^4 g$ 。

2) 在开展针对颗粒材料侵彻试验时,由靶舱引起的边界效应会影响颗粒材料的抗侵彻性。预计靶舱直径为侵彻器直径的7倍时,在亚声速侵彻试验中,过载峰值受边界影响较小,但仍对最终侵彻深度造成一定的影响。

3) 弹载记录仪对不同强度的月壤模拟样本靶标具有良好的辨识性。当靶标强度接近时,结合其他科学载荷联合评定,可进一步提高辨识物质构成的可行性。

4) 试验中采用具有相似单轴抗压强度的混凝土或砂岩作为模拟月壤水冰靶标,但仍需对月壤水冰的动态力学特性开展更深入的研究,以此明确这种等效方式的可行性,特别是在超低温环境下不同含水率带来的力学特性差异。

5) 颗粒材料受弹体侵彻扰动后会发​​生颗粒破碎,破碎区中值粒径约降低70%。需采用更拟实的极区月壤模拟样本对该问题进行深入分析,以建立原始样本与扰动样本之间的关系,为科学载荷物性探测解译提供支持。

### 参 考 文 献

- [1] DACHWALD B, ULAMEC S, POSTBERG F, et al. Key technologies and instrumentation for subsurface exploration of ocean worlds[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(5): 1-45.
- [2] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 463-468.
- [3] SAIKI T, SAWADA H, OKAMOTO C, et al. Small carry-on impactor of Hayabusa 2 mission[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 84: 227-236.
- [4] TSUDA Y, YOSHIKAWA M, ABE M, et al. System design of the Hayabusa 2—asteroid sample return mission to 1999 JU3[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 91: 356-362.
- [5] ARAKAWA M, SAIKI T, WADA K, et al. An artificial impact on the asteroid(162173)Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime[J]. *Science*, 2020, 368(6486): 67-71.
- [6] KELLER H U, JORDA L, KUPPERS M, et al. Deep impact observations by OSIRIS onboard the Rosetta Spacecraft[J]. *Science*, 2005, 310(5746): 281-283.
- [7] CHENG A F, MICHEL P, JUTZI M, et al. Asteroid impact & deflection assessment mission: kinetic impactor[J]. *Planetary and Space Science*, 2016, 121: 27-35.
- [8] SAIKI T, IMAMURA H, ARAKAWA M, et al. The small carry-on impactor(SCD)and the Hayabusa 2 impact experiment[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 208(1-4): 165-186.
- [9] LORENZ R D. Planetary penetrators: their origins, history and future[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(3): 403-431.
- [10] LORENZ R D, MOERSCH J E, STONE J A, et al. Penetration tests on the DS-2 Mars microprobes: penetration depth and impact accelerometry[J]. *Planetary and space science*, 2000, 48(5): 419-436.
- [11] SURKOV Y A, KREMNEV R S. Mars-96 mission: Mars exploration with the use of penetrators[J]. *Planetary and space science*, 1998, 46(11): 1689-1696.
- [12] SHIRAIISHI H, TANAKA S, FUJIMURA A, et al. The present status of the Japanese penetrator mission: LUNAR-A[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(2): 386-393.
- [13] GOWEN R, SMITH A, WINTER B. An update on MoonLITE[C]// Proceedings of the 59th IAC International Astronautical Congress. Glasgow: IAC, 2008.
- [14] YOUNG C W. Penetration equations: SAND97-2426[R]. Albuquerque: Sandia Labs, 1997.
- [15] FORRESTAL M J, LUK V K. Penetration into soil targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 3(12): 427-444.
- [16] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1997, 31-32(34): 4127-4146.
- [17] FORRESTAL M J, FREW D J, HICKERSON J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(5): 479-497.
- [18] 刘润涛. 星壤撞击器侵彻特性及其影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
LIU R T. Research on penetration characteristics and influencing factors of asteroid soil penetrator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [19] 蒋建伟, 门建兵, 万丽珍, 等. 动能弹侵彻土壤混凝土复合介质的试验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2001, 21(4): 420-423.  
JIANG J W, MEN J B, WAN L Z, et al. Experimental study on a kinetic energy penetrator penetrating a soil-and-concrete multi-Layer target[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(4): 420-423.
- [20] AHRENS C J, PAIGE D A, EUBANKS T M, et al. Small penetrator instrument concept for the advancement of lunar surface science[J]. *The Planetary Science Journal*, 2021, 2(1): 38.
- [21] 蒋东, 史文卿, 黄瑞源, 等. 高速/超高速侵彻的尺度效应及相似规律[J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2021, 51(10): 106-113.  
JIANG D, SHI W Q, HUANG R Y, et al. Scale effects and similarity laws on high/hypervelocity impact penetration[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica Sciencechina Physics, Mechanics Astronomy*, 2021, 51(10): 106-113.
- [22] ATKINSON J, ZACNY K. Mechanical properties of icy lunar regolith: application to ISRU on the Moon and Mars[C]//16th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Cleveland, Ohio: ASCE, 2018.
- [23] 李尚昆, 冯晓伟, 谢若泽, 等. 高应变率下纯水冰和杂质冰的动态力学行为[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 76-83.  
LI S K, FENG X W, XIE R Z, et al. Dynamic compression property of distill-water ice and impurity-water ice at high strain rates[J]. *Explosion*

- and Shock Waves, 2019, 39(9): 76-83.
- [24] GERTSCH L, GUSTAFSON R, GERTSCH R. Effect of water ice content on excavatability of lunar regolith[C]//AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics. [S. l.]: AIP, 2006.
- [25] 李玲玲, 范锦彪, 王燕. 弹体侵彻过程中刚体过载实时提取的滤波方法[J]. *中国测试*, 2015, 41(11): 106-109.  
LI L L, FAN J B, WANG Y. Filtering method for real-time extraction of rigid body overload in penetration process[J]. *China Measurement & Test*, 2015, 41(11): 106-109.
- [26] 范锦彪, 祖静, 徐鹏, 等. 弹丸侵彻混凝土目标减加速度信号的处理原则[J]. *探测与控制学报*, 2012, 34(4): 1-5, 9.  
FAN J B, ZU J, XU P, et al. Impact deceleration signal processing for concrete target penetration[J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(4): 1-5, 9.
- [27] ALLEN W A, MAYFIELD E B, MORRISON H L. Dynamics of a projectile penetrating sand[J]. *Journal of Applied Physics*, 1957, 28(3): 370-376.
- [28] COOPER W L, BREAU B A. Grain fracture in rapid particulate media deformation and a particulate media research roadmap from the PMEE workshops[J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 162(1-2): 137-150.
- [29] GLÖBNER C, MOSER S, KÜLLS R, et al. Instrumented projectile penetration testing of granular Materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(2): 261-272.
- [30] LAINE L, LARSEN O P. Implementation of equation of state for dry sand in Autodyn[C]//83rd Shock and Vibration Symposium. New Orleans, Louisiana: [s. n.], 2012.

作者简介:

孙淼(1989-), 男, 博士生, 主要研究方向: 颗粒材料动态响应、材料与结构高速冲击。

通讯地址: 哈尔滨工业大学科学园2C栋后楼(150001)

电话: (0451)86417978

E-mail: sunmiaols@hit.edu.cn

迟润强(1979-), 男, 副教授, 主要研究方向: 空间碎片防护、材料与结构高速冲击行为。**本文通讯作者。**

通讯地址: 哈尔滨工业大学科学园2C后楼(150001)

电话: (0451)86417978

E-mail: chirq@hit.edu.cn

## Ground Simulation Test of Penetrator for Lunar Soil Exploration

SUN Miao<sup>1</sup>, ZHANG Hongyu<sup>1</sup>, CHI Runqiang<sup>1</sup>, PANG Baojun<sup>1</sup>, XIAO Junxiao<sup>2</sup>, FAN Jinbiao<sup>3</sup>,  
QIAN Cheng<sup>4</sup>, LU Zixiao<sup>5</sup>, JIANG Shengyuan<sup>2</sup>

(1. Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Research Center of Aerospace Mechanism and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

4. Sichuan Institute of Aerospace Systems Engineering, Chengdu 610100, China;

5. National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The lunar surface is mostly covered with fine-grained powdered regolith. Penetration tests are carried out on the full-scale penetrator penetrating at 100 ~ 260 m/s into three types of simulated lunar soil samples, to study the impact resistance of penetrator structure and scientific devices, the penetration resistance and identification of different cross-sectional structures, and the perturbation intensity after penetration. The test results show that the penetrator structure was intact and worked well under an overload of about 30 000 g. When the penetrator penetrated the simulated sample target of lunar soil without hard layers, the peak value of the overload after filtering was about 1 000 g. When the penetrator penetrated the simulated samples target of lunar rock or water-ice, the overload peak after filtering was more than five times that of lunar soil without hard layers. The missile-borne recorder could identify the layered samples of different strengths; at the end of the trajectory, the granular simulated sample target within about 20 mm from the penetrator showed disturbance and fragmentation, and the median granular size was reduced by about 70% at most. The lunar surface is usually covered by fine-grained powdered regolith and the penetrator can realize subsurface lunar soil detection. The results will provide the reference for the design of detectors in the fourth phase of lunar exploration project.

**Keywords:** penetrator; lunar soil simulant; water ice; particle breakage

**Highlights:**

- It was tested by launching full-scale penetrator at 100 ~ 260 m/s into three types of lunar soil simulants.
- Penetrator structure and scientific devices are intact under an overload of about 30 000 g.
- The existence of the hard layer increases the overload peak value of the penetrator after filtering more than five times.
- The missile-borne recorder can identify the layered samples of different strengths.
- The median particle size in the crushing zone is reduced by about 70%.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]