深空探测学报(中英文)
Journal of Deep Space Exploration

月壤水冰模拟样本SHPB试验及反射波特性分析

肖俊孝，庞宝君，唐钧跃，迟润强，陈圣鹏，刘君巍，田　野，张伟伟，姜生元

SHPB Test of Lunar Water Ice Simulant and Analysis of Reflected Wave Characteristics

XIAO Junxiao, PANG Baojun, TANG Junyue, CHI Runqiang, CHEN Shengpeng, LIU Junwei, TIAN Ye, ZHANG Weiwei, and JIANG Shengyuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210154

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

月球水冰探测
Lunar Water-Ice Exploration
深空探测学报(中英文）. 2020, 7(3): 290-296

月球极区水冰资源原位开发利用研究进展
Reseach Prospects of Lunar Polar Water Ice Resource In-Situ Utilization
深空探测学报(中英文）. 2020, 7(3): 241-247

月球极区探测轨道设计
Orbit Design for Lunar Polar Region Exploration
深空探测学报(中英文）. 2020, 7(3): 248-254

月球极区钻取采样技术
Research of Drilling and Sampling Technique for Lunar Polar Region Exploration
深空探测学报(中英文）. 2020, 7(3): 278-289

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

月球极区探测的主要科学与技术问题研究
Research on the Main Scientific and Technological Issues on Lunar Polar Exploration
深空探测学报(中英文）. 2020, 7(3): 223-231

关注微信公众号，获得更多资讯信息

月壤水冰模拟样本SHPB试验及反射波特性分析

肖俊孝[1]，庞宝君[2]，唐钧跃[1]，迟润强[2]，陈圣鹏[2]，刘君巍[1]，田 野[3]，张伟伟[1]，姜生元[1]

（1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院，哈尔滨 150001；2. 哈尔滨工业大学 空间碎片高速撞击研究中心，哈尔滨 150001；
3. 哈尔滨商业大学 轻工学院，哈尔滨 150001）

摘 要： 高强度的月壤水冰组构通常采用高频冲击钻进、高速动能侵彻等方式实现原位探测，探测机具与月壤水冰组构之间存在复杂的动力学关系，探测机具在设计的过程中应充分考虑月壤水冰的动力学特性。提出一种利用分离式霍普金森压杆（Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB）实现超低温月壤水冰模拟样本的动力学特性测试的试验方法。利用SHPB试验系统，对–170 ℃极低温状态下3种不同含水率的月壤水冰模拟物开展了动态力学特性测试。通过分析试验结果，得到了不同应变率条件下月壤水冰模拟物的强度参数，总结出了月壤水冰模拟物应变率增强效应的规律；结合不同含水率样本SHPB试验的反射波频谱特性存在明显的差异的特性，提出一种基于钻具冲击反射波特性的月壤水冰含量辨识方法。可为月球水物质“探–采–用”探测器系统的研制工作提供有效参考。

关键词： 月球极区探测；月壤水冰模拟样本；低温分离式霍普金森压杆；动态特性；辨识方法

中图分类号： P184.5 **文献标识码：** A **文章编号：** 2096-9287(2022)02-0150-07

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210154

引用格式： 肖俊孝，庞宝君，唐钧跃，等. 月壤水冰模拟样本SHPB试验及反射波特性分析[J]. 深空探测学报（中英文），2022，9（2）：150-156.

Reference format: XIAO J X，PANG B J，TANG J Y，et al. SHPB test of lunar water ice simulant and analysis of reflected wave characteristics[J]. Journal of Deep Space Exploration，2022，9（2）：150-156.

引 言

从1961年Watson等[1-2]首次提出月球上存在水冰的可能性以来，人类针对月球是否存在水、水以何种形态存在、储藏丰度如何等科学问题开展了持续性的探索，来自月球陨坑观测和遥感卫星（Lunar Crater Remote And Observation Sensing Satellite，LCROSS）任务的数据已初步证明月球南极的永久阴影区存在水冰物质[3-5]。月球水冰物质的“探–采–用”技术体系是近年来深空探测领域一个备受关注的焦点[6]。与以往在月球和火星表面的无水区域开展原位探测任务不同，月球极区永久阴影区中含有高强度月壤水冰的剖面，需采用动能侵彻、冲击钻进的方式来实现探测器的高效能潜入[7-9]。在此过程中，潜入机具与月壤水冰组构之间的动力学作用关系极为复杂，月壤水冰的动力学特性将显著影响侵彻式探测器着陆过程的应力状态、峰值载荷、加速度和侵彻深度；冲击钻进过程中应力波在钻具中的传递规律与月壤水冰动态波阻抗特性密切相关。因此，在对探测机具开展动力学建模、结构强度设计的过程中，需要重点关注月壤水冰的动力学特性参数。

在地面针对寒区冻土机械开挖、爆破施工过程中受到的动态载荷问题，对冻土材料的动态力学特性做过相关深入的研究。分离式霍普金森压杆（Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB）试验是一种有效的材料动态力学特性测试的试验方法，美国Sandia实验室采用改进的低温SHPB试验系统，在 −25°C～0 °C条件下对阿拉斯加原状冻土的动态力学参数进行了测试，并引入盖帽模型对其本构关系进行描述[10]。刘志强等[11]利用SHPB装置分析了冻结黏土在不同温度、含水率、应变率条件下的动强度、动弹性模量等动力学性能指标的演变规律。关于月壤水冰的力学特性，大多数集中在静态或准静态力学特性的研究，英国萨里航天中心Gertsch与Leslie等对不同含水率的月壤水冰模拟试样开展了单轴抗压强度测试，总结了月壤水冰强度随含水率变化规律[11]；Atkinson等[12]利用圆锥贯仪在真空和

收稿日期：2021-12-11 修回日期：2022-01-19

基金项目：国家自然科学基金联合基金资助项目（U2013603）；国家自然科学基金青年科学基金资助项目（52005349）；中国博士后科学基金资助项目（2021M690828）；黑龙江省博士后专项基金资助项目（LBH-Z20145）；国家自然科学基金青年科学基金资助项目（52005136）

低温环境状态下对月壤水冰模拟样本开展了贯入试验，研究了不同含水率样本的贯入阻力特性和豫弛特性，为探究月壤水冰的饱和度提供了一种新方法。在极低温环境条件下的月壤水冰动力学特性的强相关研究成果仍然缺乏。

中国拟采用侵彻和冲击回转钻进的方式实现月球南极水冰物质的勘探，月壤水冰动态力学特性参数将作为探测器设计的输入。LCROSS任务的探测结果表明月球极区的月壤水冰主要赋存于永久阴影坑中的冷阱区域，在水冰赋存区内月壤中的水含量超过5%，在水冰物质的富集区甚至高达10%。为获悉不同含水率状态下月壤水冰的动态力学特性，本文以CUG-1A模拟月壤作为矿物基材，制备了5%、7%、10%三种不同含水率的–170°C月壤水冰模拟物测试样本；并对传统的分离式霍普金森压杆进行改进，以适应极低温和高应变率下的月壤水冰模拟物的试验需求。通过对不同应变率条件下月壤水冰应力峰值统计，总结了不同含水率月壤水冰模拟样本强度应变率增强规律；在深入解析试验过程中的反射信号的频谱组成基础上，提出一种基于反射波特性的月壤水冰含量辨识方法；本研究获得的数据可用于验证和开发新材料模型，开展月壤水冰与探测机具之间的动力学相互作用机理。

1　SHPB试验方案设计

1.1　试验原理

SHPB试验技术是Kolsky在总结Hopkinson父子与Davies等工作的基础之上，提出的一种材料动力学特性参数的测试方法。SHPB试验技术建立在一维弹性应力波理论的基础上，成功地将测试样件的应变率效应与应力波效应解耦，是目前实现材料高应变率条件下动态压缩力学特性参数测试的主要技术手段。SHPB试验技术的有效性必须遵循以下两个基本假设：一维应力假设，即试验过程中杆件与试样都处于一维的应力状态；应力均匀假设，即试件的应力分布均匀[13]。

试验过程中，波导杆件处于弹性状态，密度ρ_0、弹性模量E、波速C和波阻抗$\rho_0 C$保持不变，空气炮以速度v_0发射长度为L_0的撞击杆撞击输入杆，输入杆将产生一个沿杆传导的一维入射波ε_i（t），其幅值$\rho_0 C v_0/2$，时程$2L_0/C$，波形特征与整形手段相关；当入射波ε_i（t）传导至试验件时，由于试件与导波杆件波阻抗的差异性，一部分以拉伸反射波ε_r（t）的形式返回入射杆中，另一部分以透射波ε_t（t）的形式通过试样传入透射杆，3种波形可以通过粘贴在波导杆上的电阻应变计记录下来。当试样波前和波后的应力状态一致时，即ε_i（t）+ε_r（t）=ε_t（t），则可认为被测试的样件在试验过程中处于应力均匀状态。此时可根据一维应力波理论，利用电阻应变计记录的应变信号，可以确定加载在试件的应力σ_s（t）、应变ε_s（t）、应变率$\dot{\varepsilon}_s$（t）[14]分别为

$$\begin{cases} \sigma_s\ (t)\ = E\dfrac{A_0}{A_s}\varepsilon_t\ (t) \\ \dot{\varepsilon}_s\ (t)\ = -2\dfrac{C}{L_s}\varepsilon_r\ (t) \\ \varepsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s\ (t)\ \mathrm{d}t \end{cases} \tag{1}$$

其中：E、A_0与c_0分别为波导杆件的杨氏模量、横截面积及纵向波速；A_s、L_s分别为试样的横截面积和长度。

根据式（1）可知，试件的应变率$\dot{\varepsilon}_s$（t）是在完成试样后通过反射波ε_r（t）换算得到，其主要和入射波、试样与杆件阻抗比有关。对于相同的试样而言，反射波仅与入射波特性相关，因此在试验的过程中通过改变撞击杆的发射速度来改变入射波形，进而实现在不同应变率条件下对试验样件进行加载。

1.2　试验样本

选取CUG-1A模拟月壤作为月壤水冰模拟样本的基础原料，其粒径级配参数如图1所示。试验前将模拟月壤基础原料在120°C的干燥机内恒温烘干12 h；烘干后的模拟月壤原料的含水率小于0.3%，将其在密封干燥的环境下冷却至室温；按照不同的含水率需求添加定量的蒸馏水，并充分搅拌均匀；将按定量配比的含水模拟月壤转利用聚乙烯薄膜密封保存，并静置24 h，使得水分充分在模拟月壤基材中充分迁移均一化。SHPB试验系统的波导杆直径40 mm，因此本实验选取Φ = 39.1标准土工制样击实器和饱和器作为试样制备的模具；为保证制备的试样尺寸一致、表面平整，本实验对标准制样工具进行了适当的改进，如图2所示。为在开展单轴动态压缩试验的过程中，试样能满足SHPB试验的应力均一的假设，要求试样的厚度不能太

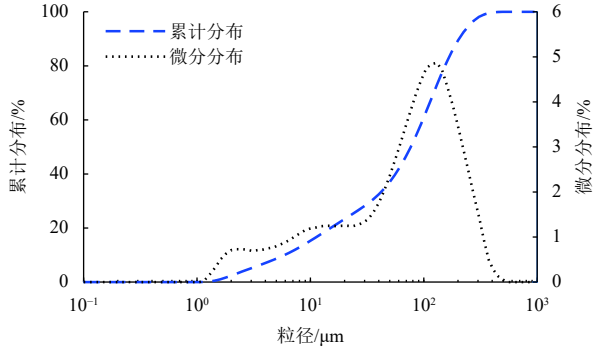
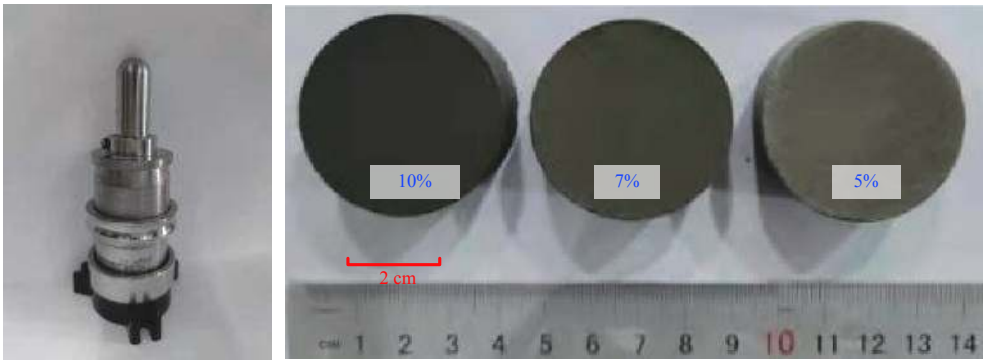


图 1　CUG-1A模拟月壤粒径

Fig. 1　CUG-1A lunar simulant grain size

大，根据与月壤水冰力学特性相似的混凝土类材料的SHPB测试经验，试样的长径比近似取2∶1，即试样尺寸均为Φ 39.1 mm × 20 mm。本试验先采用逐渐冷冻的方法，首先将试验样本在−80°C的超低温冰箱中冷冻24 h后，再采用液氮冷冻降温至−196°C，冷冻过程通过埋入Pt100温度传感器对试样的温度进行实时监测。



（a）制样模具示意图 （b）待冷冻的含水月壤样本

图 2 制样模具及测试样本

Fig. 2 Sample preparation mold and test sample

1.3 试验装置

用于月壤水冰模拟样本动态力学特性的SHPB试验系统如图3所示。由于月壤水冰材料模拟样本的波阻抗较低，采用3根直径40 mm的7075铝合金杆作为波导杆，其中入射杆、透射杆长度2 000 mm、撞击杆长300 mm。通过由两对电阻应变片、两组惠斯通电路、动态应变仪及数据采集仪组成的信号采集系统，以2.5 MHz的采样率记录波导杆中的入射波、透射波和反射波的波形。为满足月壤水冰模拟样本的超低温测试需求，本试验对传统的SHPB试验系统进行了相应的改进，在试件周围增加了低温试验箱来保持较低的试验环境温度，降低试件与环境的热交换速率；此外，在安装试验样本前，利用喷雾工具将液氮喷淋至入射杆、透射杆的试样安装面端，使其温度降至−170°C以下，降低了试样与杆件之间的热传导。通过降低环境温度和波导杆件与月壤水冰模拟试样的温差，有效地降低了试样与测试环境与设备之间的热交换，使得试样在试验的过程中维持相对恒定的低温状态。

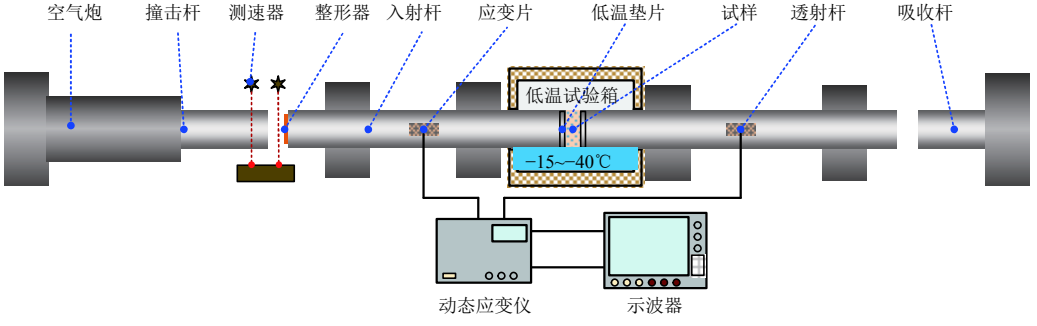


图 3 低温分离式霍普金森压杆试验系统布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the layout of the low-temperature SHPB test system

1.4 测试方案

为测量月壤水冰模拟物试样的温升过程，通过埋入试样的Pt100温度传感器监测安装在试验系统杆件上时试件的温降曲线，如图4所示。从图4中可以看出，在25 s时间内，试件温度快速从−180 °C上升至−160 °C。本试验 ± 10 °C为允许的误差范围内，因此要求在25 s内完成试样的测试试验。

如表1所示，在开展SHPB试验过程中，将利用4种不同的气压发射撞击杆，使得撞击杆以不同的初始速度撞击入射杆，进而实现利用4种不同的应变率对3种不同含水率的月壤水冰模拟样本开展单轴动态压缩测试，进而获悉其力学特性与应变率之间的函数关系。为提高试验的成功率与重复性，本研究中每组试验都开展4次重复性试验。由于发射机构存在一定的误差，且应变率与样本本身的力学特性有关，即使采用相同发射气压条件，也无法保证每次重复试验的应变率值相同，仅能将其控制在某个区间内，但这不影响对因应变率效应对试件的力学特性造成的影响规律进行分析。

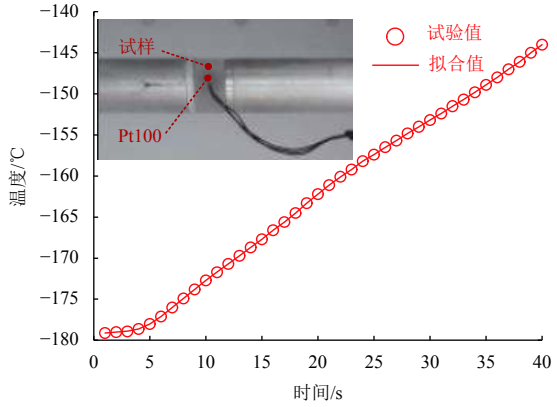


图 4　试验温度变化曲线

Fig. 4　Test temperature curve

表 1　试验矩阵

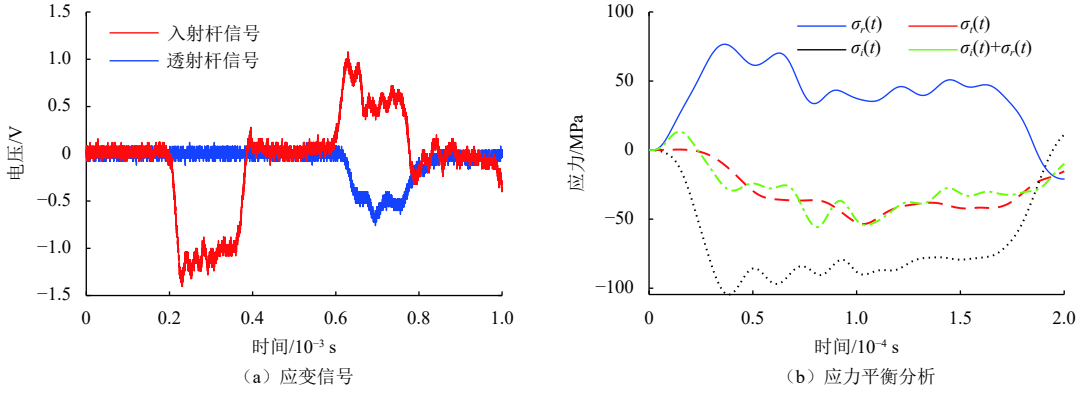
Table 1　Test matrix

发射气压/MPa	速度范围/（m•s^{-1}）	应变率范围/s
0.12	6.5 ～ 7.5	300 ～ 400
0.14	8.5 ～ 9.5	400 ～ 500
0.16	10.5 ～ 11.5	500 ～ 600
0.22	11.5 ～ 12.5	600 ～ 700

2　试验结果分析与应用

2.1　应力平衡分析

SHPB试验的结果成立的一个重要的前提是应力–应变均一化假设。在对试验数据分析的过程中通常采用试样前后端面的应力状态是否相等作为试验数据是否有效的判定准则，即当入射波ε_i（t）、反射波ε_r（t）与ε_t（t）满足ε_i（t）+ε_r（t）=ε_t（t），则认为试样满足应力–应变均一假设，试验数据有效。如图5所示为含水率7%的月壤水冰模拟试样应力平衡的结果。根据应力平衡的判定准则，对48组试验数据进行筛选，结果发现5%含水率试样有14组数据合格，7%含水率试样有10组合格，10%含水率试样9组合格。根据试验数据的有效性判定结果可知，随含水率的增加，试验成功率降低，主要是随着含水率的增加，低温条件下的试样逐渐呈现出脆性，容易在达到应力平衡前就发生断裂失效，造成试验结果的成功率低。



（a）应变信号　　（b）应力平衡分析

图 5　应变信号分析与动态平衡

Fig. 5　Strain signal analysis and dynamic balance

2.2　应变率增强特性分析

将不同含水率模拟月壤水冰样本的有效试验值在应变率–峰值应力坐标中统计，并利用一次函数对试验数据进行最小二乘拟合，结果如图6所示。根据统计结果可知，试验数据存在一定的离散性，由于土工试验存在一定的制样误差，同时在测试过程中环境温度难以严格控制，使得测试过程中温度存在一定的波动造成；但是不同含水率的月壤水冰模拟样本的峰值应力都呈现出随着应变率的增加而增加的趋势，表现出明显的动态增强效应。在动态载荷作用下，破坏应力作用时间较短，因此需要更高的应力才能足以提供损伤

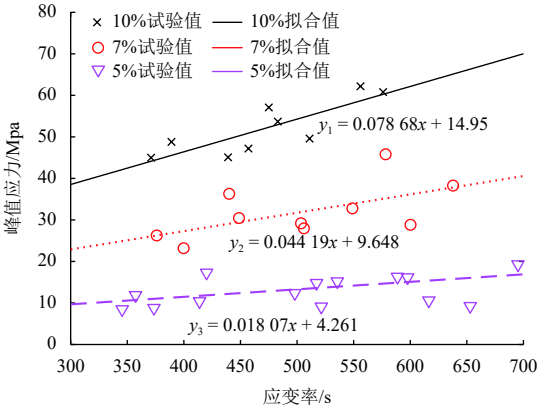


图 6　3种试样峰值应力随应变率的变化

Fig. 6　Variation of the peak stress of the three specimens withstrain rate

裂纹扩展所需要的能量。通过采用一次函数对试验数据点拟合，发现随着样本含水率的增加，强度应变率增强效应的敏感度也随之增大。

2.3 基于反射波的参数辨识方法

由于不同含水率的月壤水冰模拟样本的波阻抗特性不尽相同，在利用SHPB试验系统开展月壤水冰模拟样本动态测试的过程中，反射波形、透射波形也存在较大差异。在开展冲击钻进原位探测、冲击贯入原位探测等实际应用过程中，通常只能采用安装在机具上的力学传感模块对其反射波形进行实时监测。本研究侧重对试验过程中的反射波信号的时域和频域特性进行深入分析。

图7是将不同含水率样本，在不同应变率试验条件下获得的反射波原始信号经过截至频率25 kHz的低通滤波后时域曲线。从图7中可以看出，10%含水率的月壤水冰模拟物试验的反射波形存在明显的差异，但对于7%和5%含水率的月壤水冰模拟物试验的反射波混合在一起，没有明显的界限，因此仅从反射波的时域信号上难以对不同含水率的月壤水冰区分。将多组试验的反射波信号利用傅里叶变换在频域内进行展开，得到的结果如图8所示。从图8可以看出，在0～5 kHz的低频域内，同一含水率的样本在不同的应变率条件下的频谱峰值变化不大，而不同含水率样本的频谱峰值随着样本含水率的增加而显著降低，且存在显著的区域界限。

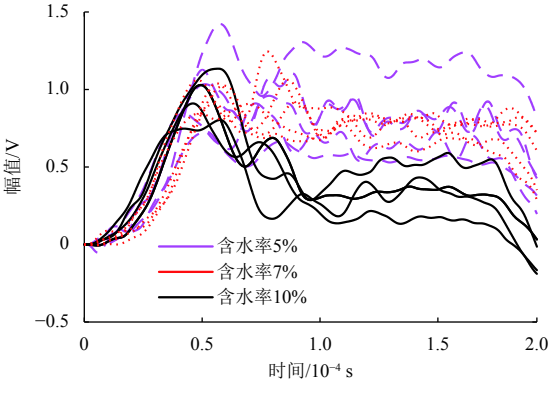


图 7 反射波时域信号

Fig. 7 Reflected wave time domain signal

根据多组试验反射波信号的频谱特性的分析结果可知，SHPB波导杆与不同含水率的月壤水冰组构在冲击动态的作用过程中，其反射波信号的在频域中的低频段内存在着显著的差异，且这种差异对于应变率的敏感度不强。在针对真实月壤水冰组构开展原位“探–采–用”工程任务中，通常采用冲击钻进的方式实现高效能潜入，机具与水冰组构在复杂冲击作用的过程中，也将会有大量的冲击反射波反射回钻采机具中，而这些反射波将有可能蕴含着月壤剖面的含水率信息。因此，在未来的实际工程应用中，本文提出一种反射波信号的剖面参数辨识方法如图9所示，可尝试联合机具中冲击反射波的频谱特性与钻进负载特性，实现月壤水冰含量的状态辨识。

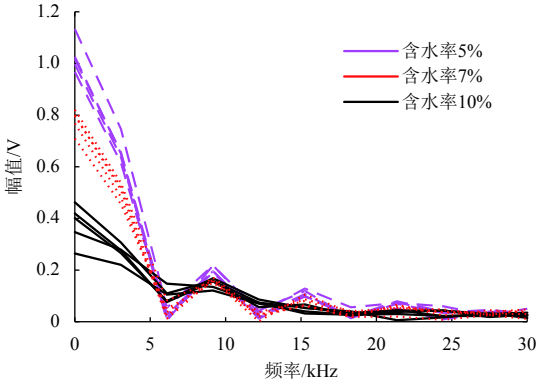


图 8 反射波频域信号

Fig. 8 Reflected wave frequency domain signal

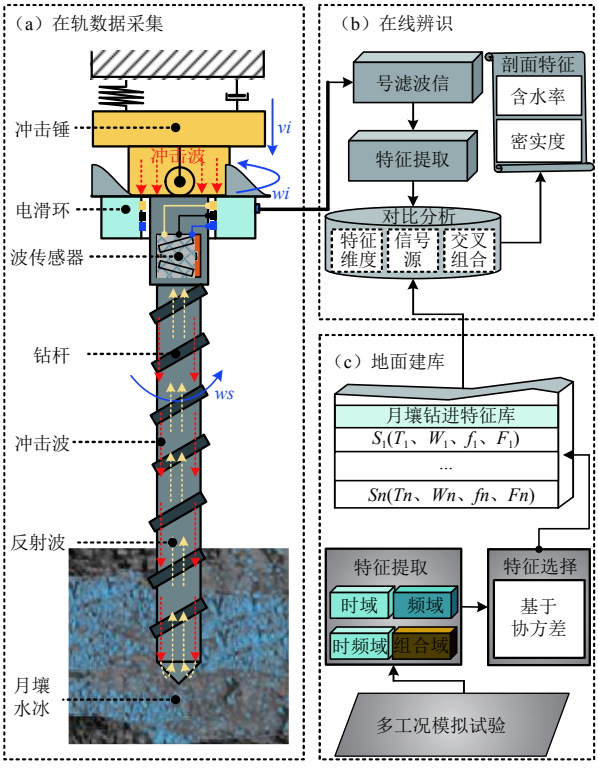


图 9 反射波信号的剖面参数辨识方法

Fig. 9 Identification method of profile parameters of reflected wave signal

3　结　论

本文通过改进的低温SHPB动态力学特性测试系统，针对3类不同含水率的月壤水冰模拟样本，开展了300 ～700 /s应变率条件下的动态力学特性测试，对测试结果进行了深入的规律统计和时–频特性分析，得出如下结论：

1）在−170°C的超低温环境条件下，在300 ～700 /s应变率范围内，月壤水冰模拟试样具有明显的应变率增强效应，因此要求在对探测机具的力学设计过程中，应当充分考虑月壤水冰的应变率增强效应；

2）月壤水冰模拟试样具有明显的应变率且随含水率的增加，强度的应变率敏感度也随之增加；

3）通过多组试验的反射波信号的时–频域特性分析发现，不同含水率的月壤水冰在与机具相互作用过程中，其反射波的频谱在低频域内表现出显著差异，且与机具与月壤水冰相互作用过程中的应变率关系不明显。

在未来针对月球水冰组构“探–采–用”为目标所开展的深空探测任务中，将通过高速动能侵彻、冲击钻进等作用方式实现月壤水冰组构的高效能潜入。在此过程中，不仅要考虑月壤水冰的静态或准静态力学特性，也应当充分考虑其动力学特性。除此之外，本文的研究成果可有效地为探测机具的设计与校核、水冰组构的在线辨识提供参考。

参　考　文　献

[1] WATSON K，MURRAY B C，BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. Journal of Geophysical Research，1961，66(9)：3033-3045.

[2] ANAND M. Lunar water：a brief review[J]. Earth，Moon，and Planets，2010，107(1)：65-73.

[3] 郑永春，张锋，付晓辉，等. 月球上的水：探测历程与新的证据[J]. 地质学报，2011，85(7)：1069-1078.
ZHENG Y C，ZHANG F，FU X H，et al. Water on the Moon：experience and new evidence[J]. Acta Geologica Sinica，2011，85(7)：1069-1078.

[4] 郑永春，邹永廖，付晓辉. LRO和LCROSS探月计划：科学探测的分析与启示[J]. 航天器工程，2011，20(4)：117-129.
ZHENG Y C，ZOU Y L，FU X H. LRO and LCROSS mission：overview and enlightenment for future lunar exploration[J]. Spacecraft and Engineering，2011，20(4)：117-129.

[5] SCHMIDT B E，HUGHSON K H G，CHILTON H T，et al. Geomorphological evidence for ground ice on dwarf planet Ceres[J]. Nature Geoscience，2017，10(5)：338-343.

[6] 王超，张晓静，姚伟. 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展[J]. 深空探测学报(中英文)，2020，7(3)：241-247.
WANG C，ZHANG X J，YAO W. Research prospects of lunar polar water ice resource in-situ utilization[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7(3)：241-247.

[7] 刘德赟，张熇，杨帅，等. 月球极区钻取采样技术[J]. 深空探测学报(中英文)，2020，7(3)：278-289.
LIU D Y，ZHANG H，YANG S，et al. Research of drilling and sampling technique for lunar polar region exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7(3)：278-289.

[8] ZACNY K，PAULSEN G，KLEINHENZ J，et al. Development and testing of a lunar prospecting drill(LPD) to search for water-ice[C]//Earth and Space 2014：Engineering for Extreme Environments. Louis，Missouri：American Society of Civil Engineers，2014.

[9] LEE M Y，FOSSUM A，COSTIN L S，et al. Frozen soil material testing and constitutive modeling：SAND2002-0524[R]. California：Sandia National Laboratories，2002.

[10] 刘志强，柳家凯，王博，等. 冻结黏土动态力学特性的 SHPB 试验研究[J]. 岩土工程学报，2014，36(3)：409-416.
LIU Z Q，LIU J K，WANG B，et al. Dynamic characteristics of frozen clay by using SHPB tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2014，36(3)：409-416.

[11] ROSTAMI J，GERTSCH L，GUSTAFSON R. Properties of frozen soil for excavation on the Moon[C]//ISRM International Symposium-5th Asian Rock Mechanics Symposium. Tehran，Iran：International Society for Rock Mechanics，2008.

[12] ATKINSON J，PRASAD M，ABBUD-MADRID A，et al. Penetration and relaxation behavior of JSC-1A lunar regolith simulant under cryogenic conditions[J]. Icarus，2020，346：113812.

[13] DAVIES R M. A critical study of the Hopkinson bar[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society，1948，240(821)：375-457.

[14] 卢芳云. 霍普金杆试验技术[M]. 北京：科学出版社，2013.
LU Y F. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing：Science Press，2013.

作者简介：

肖俊孝(1996–)，男，博士生，主要研究方向：宇航空间机构及控制。
通讯地址：哈尔滨市一匡街2号哈尔滨工业大学科学园科创大厦K520室(150001)
电话：(0451)86413857
E-mail:19B908106@hit.edu.cn

姜生元(1969–)，男，教授，博士生导师，主要研究方向：地外天体采样探测、星表智能作业机器人、宇航空间机构及控制。**本文通讯作者**。
通讯地址：哈尔滨工业大学科学园科创大厦(150001)
电话：13796621169
E-mail：jiangshy@hit.edu.cn

SHPB Test of Lunar Water Ice Simulant and Analysis of Reflected Wave Characteristics

XIAO Junxiao[1]，PANG Baojun[2]，TANG Junyue[1]，CHI Runqiang[2]，CHEN Shengpeng[2]，LIU Junwei[1]，TIAN Ye[3]，ZHANG Weiwei[1]，JIANG Shengyuan[1]

（1. School of Mechatronics Engineering，Harbin Institute of Technology， Harbin 150001， China；2. Hypervelocity Impact Research Center，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001， China；3. Light Industry College， Harbin University of Commerce， Harbin 150001，China）

Abstract：For the high-strength lunar water ice fabric，it is usually necessary to use high-frequency percussion drilling and penetrator to achieve in-situ detection. There is a complex dynamic mechanical relationship between the detection equipment and the lunar water ice. The submerged equipment should fully consider the dynamic mechanical properties of the lunar water ice during the design process. This study proposes an experimental method for testing the dynamic mechanical properties of ultra-low temperature lunar water ice simulation samples by using a split Hopkinson pressure bar（SHPB）. For three kinds of lunar soil water ice simulants with different water content under extremely low temperature of –170℃，the dynamic mechanical characteristics test was carried out using low temperature SHPB. Through the analysis of the test results，the intensity parameters of the lunar water ice simulants under different strain rates are obtained，and the law of the enhancement effect of the lunar water ice strain rate is summarized；combined with the spectral characteristics of the reflected waves of the SHPB test of samples with different water content rates There are obvious differences in the characteristics，and a method for identifying the water ice content of the lunar regolith based on the characteristics of the impact reflection wave of the drilling tool is proposed. The results provide an effective reference for the development of China's lunar water ice material exploration-collection-using detector system.

Keywords：lunar polar exploration；simulated lunar water ice；SHPB；dynamic characteristics；identification method

Highlights：

- Propose a test method for the dynamic mechanical properties of ultra-low temperature lunar soil water ice simulants.
- Carried out the dynamic mechanical characteristics test of lunar soil water ice with different water content.
- Based on the characteristics of the shock reflection wave of the lunar soil water ice，a method for identifying the water content of the lunar soil water ice is proposed.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：刘勇]