

# 地外天体潜入式探测典型案例分析及展望

姜生元, 朴松杰, 张伟伟, 沈毅, 侯绪研, 全齐全, 邓宗全

(哈尔滨工业大学 宇航空间机构及控制实验室, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 针对地外天体星壤剖面的潜入式探测任务, 对星球表面热场、星壤剖面原位力学特性等科学目标探测的基本原理、实现方案和典型案例进行了资料调研与分析, 并阐明了国际上开展地外天体星壤剖面潜入式探测活动的目的和科学意义。在此基础上, 提出了我国月面采样科学目标拓展方案以及我国开展潜入式探测的预先研究规划, 对蠕动掘进和冲击贯入式探测方案的基本原理和应用前景进行了分析。

**关键词:** 地外天体; 星壤剖面; 潜入式探测; 科学目标; 星表热场; 原位力学特性

**中图分类号:** V11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2016)01-0068-09

**DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.01.011

**引用格式:** 姜生元, 朴松杰, 张伟伟, 等. 地外天体潜入式探测典型案例分析及展望[J]. 深空探测学报, 2016, 3(1): 68-76.

**Reference format:** Jiang S Y, Piao S J, Zhang W W, et al. Typical cases analysis and prospects for extraterrestrial subsurface boring exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(1): 68-76.

## 0 引言

自20世纪60年代末, 美国的Apollo计划和前苏联的Luna系列探测器成功实施月球采样返回任务以来, 美国、欧空局和日本先后成功实施了火星着陆探测和小行星采样返回任务, 各航天大国针对月球、火星、小行星的着陆探测和采样返回探测活动越来越频繁, 对探测活动科学价值的重视程度也越来越高。人类针对地外天体的着陆探测, 主要目的是探测星壤的物理化学性质以及星壤剖面的演化形成过程。星壤剖面的探测, 传统的探测方式有钻探采样、机械臂表层采样、静力触探等方式。

1996年, 俄罗斯发射了“Mars-96号”潜入式探测器<sup>[1]</sup>, 探测器从轨道器释放后飞向被测天体表面, 经空中减速, 撞击天体并侵入到一定深度, 开展就位探测。之后, 潜入式探测又发展出了多种实现方式, 如仿生型的接力排土式潜入、机械作动冲击贯入式潜入、蠕动掘进式潜入等。相比于传统的探测方法, 潜入式探测方案具有质量小、功耗低、潜入深度不受探测器构型制约等优势, 并且在能源供应有限的条件下, 可以长时间开展探测工作。此外, 潜入式探测方式更加适应于星壤剖面物理特性的探测任务, 如星表热流场、潜入路径原位力学参数探测等。从国际上近

20年的研究发展趋势分析, 潜入式探测已成为深空探测的一个热点研究方向。

## 1 潜入式探测任务的科学目标

Apollo计划中, 宇航员在月表进行了一系列科学实验, 其中月壤力学特性原位探测实验和月球表面热流密度探测是其重要的组成部分。日本Lunar-A潜入器上面载有热流计和加速度传感器, 计划探测月球表面的热流密度和月壤的力学特性<sup>[2]</sup>。“Rosetta号”搭载的MUPUS-PEN冲击贯入器的主要任务为探测彗星表面热流密度和星壤力学特性。NASA的InSight计划将使用HP<sup>3</sup>潜入器探测火星表面的热流密度。从上述信息可以看出, 目前已经实施和计划实施的潜入式探测任务的主要目标有星表热流密度和星壤剖面物理力学参数探测两类。

在开展星表热流密度探测过程中, 为了消除太阳辐射对探测结果的扰动, 传感器宜布置在星表以下深度大于3 m的部位<sup>[3]</sup>。相比于传统的探测手段, 潜入器能够自动潜入到星球表面较深处, 较为适合天体深层热流密度的科学探测, 获取的深层星壤剖面物理力学特性更具有科学价值。

此外, 在潜入器内部可搭载地震检波器、密度

计、湿度计等仪器对天体的星质活动、星层结构、磁场、湿度等多种科学目标进行探测。地震检波器可通过星表振动、震源的位置、地震波的传播路径和传播介质的特性等信息，分析星壳的厚度、星幔和星核的结构<sup>[4]</sup>。而星壳厚度、板块构造等信息对初始星幔温度、板块的形成时间的推断至关重要。Rosetta MUPUS PEN上的放射性同位素密度计内设有放射性同位素辐射源<sup>[5]</sup>。放射性辐射在透过一定厚度的被测样品后被射线检测器所接收。一定厚度的样品对射线的吸收量与该样品的密度有关，根据该原理测出星壤样品的密度。“凤凰号”火星探测器上的TECP带有相对湿度传感器，传感器的敏感元件是一种薄膜电容，利用其

介电常数随环境的相对湿度线性变化的原理对星壤湿度进行探测。

综合国际先行案例，地外天体潜入式探测的科学目标主要分为三大类：

- 1) 星表热流密度探测；
- 2) 星壤物理力学参数探测；
- 3) 星质活动监测、磁场探测、星壤水分探测等。

相比于第一、二类科学目标，第三类科学目标的测量方法较为直观，可通过传感器直接测量，本文着重针对前两类科学目标的探测方法进行介绍。地外天体潜入式探测科学目标、实现方法以及探测任务汇总如表1所示。

表1 地外天体潜入式探测科学目标汇总表

Table 1 Scientific targets of subsurface boring exploration

| 科学目标     | 潜入式探测器名称   | 探测方法及设备          |
|----------|--|------------------|
| 星表热流密度   | Lunar-A <sup>[4]</sup> 、Deep Space2、Rosetta MoonLITE | 热流计、热电偶          |
| 星壤物理力学参数 | HP <sup>3</sup> 、Rosetta MUPUS PEN/anchor            | 静力触探法、动力触探法、加速度计 |
| 星质活动     | Mars 96 <sup>[1]</sup> 、Lunar-A、MoonLITE             | 地震检波器            |
| 着陆区磁场强度  | Mars 96、MoonLITE                                     | 磁强计              |
| 星壤水分量    | TCEP   | 湿度传感器            |
| 星壤密度     | Rosetta MUPUS PEN <sup>[5]</sup>                     | 密度计              |

## 2 星壤剖面潜入探测的实现方式

潜入式探测任务的首要目标是通过探测器的机械作用实现一定深度的潜入。潜入实现的方式可归纳为：

### 1) 回转钻进式潜入

利用地质勘探中的钻进方法，由钻具的回转和进给运动，实现对目标星壤的破碎和钻屑排除，实现一定深度的钻进作业。典型案例之一是前苏联的Luna16、Luna20和Luna24任务，利用无人自动采样装置，采回了月壤样品。典型案例之二是美国的Apollo载人登月计划，宇航员曾使用450 W的手动冲击钻，直径为25.5 mm的空心螺旋钻杆，钻出了2.4 m的深孔。钻进结束后，将热传感器阵列放入到空心钻杆内，实现了月表热流密度的探测。回转钻进式潜入，钻探负载和动力需求大，钻进深度受制于钻具的长度。

### 2) 动能体侵彻式潜入

依靠弹道式飞行过程中的动能，由探测器侵彻作用星壤剖面实现下潜的探测方式。典型案例是1996年俄罗斯发射的“Mars-96号”潜入探测器，该探测器分为上下两部分，下半部分的侵彻体为细长型的圆柱形状，最前端为圆锥状；上半部分为倒锥型，直径较

大。当潜入器以高速撞击星体表面时，两部分分离，上部由于截面积较大且为倒锥形，使得撞击时星壤对其阻力较大而减速并停留在地表外。在轨道器环绕星体运动过程中，可选择不同区域释放多个潜入器，用来探测星体多个落区情况。由于潜入过程需与被测星体发生强烈撞击，该探测器本体需要有良好的减震功能、科学仪器的设计及安装也需考虑其防震特性。

### 3) 机械作动式潜入

机械作动式潜入有很多种具体方式，特指着陆星体表面以后，利用探测器的电力能源，利用挖掘、冲击等机械动作实现潜入的探测形式。从目前的资料分析，一般有螺旋排土式潜入、冲击贯入式潜入、蠕动掘进式潜入等具体形式。这些采用非常规钻进的潜入方式，能实现更大深度的潜入，能开展更为丰富的科学探测任务。其中，冲击贯入式潜入器通过对侵彻体内部的冲击锤进行蓄能，释放后冲击锤撞击潜入头，将冲击锤的动能转化为侵彻体的潜入动能，实现间歇性潜入。加速度传感器、热传感器等可以安装在潜入器本体，也可以放在潜入器后端的拖拽线缆上；螺旋排土式潜入器通常由钻头和本体两部分组成，钻头与本体之间无垂向相对运动，通过外排屑或内排屑的形式破坏星壤结构，将星壤切屑排出潜入器轮廓外，置

换出可供潜入器下潜所需的空间；蠕动掘进式潜入器由钻头、本体及可延伸机构组成，通过钻头破坏土层，本体将排出的切屑储存在缓存区并以某种将其排出体外的方式腾出潜入空间，实现潜入功能。潜入方式汇总及对比分析见表2。

表2 星壤剖面潜入方式对比分析表

Table 2 Methods of subsurface boring exploration

| 潜入方式     | 工作原理                             | 优点               | 缺点                  |
|----------|----------------------------------|------------------|---------------------|
| 钻具<br>钻孔 | Apollo 15~17由宇航员操作钻具，在钻出深孔中放入探测器 | 可行性已被验证，方法简单可靠   | 需要人操作，需要的负载和功率大     |
| 冲击<br>贯入 | 由内部的冲击锤冲击作<br>用下实现潜入             | 质量更轻且结构紧凑、可靠性高   | 很难潜入密度很高的星壤         |
| 螺旋<br>排土 | 钻头破坏星壤结构，通过潜入器本体上的外螺旋将星壤排到潜入器后方  | 通过螺旋排屑将星壤排到潜入器后端 | 潜入正压力较小，不利于潜入       |
| 蠕动<br>掘进 | 潜入器分为本体和钻头两部分，拥有延伸机构，可实现接力式螺旋排土  | 仿生蠕动的结构提供足够潜入正压力 | 运动复杂，结构设计难度大，处于试验阶段 |
| 高速<br>冲击 | 内部携带多种传感器，从高空下落                  | 无需着陆器，是一种简单的潜入方式 | 需要承受侵彻过程中很大的冲击载荷    |

### 3 星球表面热流密度探测技术

#### 3.1 热流密度探测原理

研究天体的热演化过程，导热系数和热流密度是两个重要的物理参数。物体或系统内存在的温度差将产生热传导，可用傅里叶定律表示

$$\vec{F} = -\lambda \Delta T$$

其中： $\lambda$ 为导热系数，单位为 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ； $\vec{F}$ 为热流密度，单位为 $\text{Wm}^{-2}$ 。热流密度的大小和方向可以表征热量转移的程度和方向。在均匀的介质中的温度变化可以用热扩散方程来描述

$$\rho C_M \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + g(\vec{r}, t)$$

其中： $g(\vec{r}, t)$ 表示由于电流加热或化学变化等引起的热量的流失或增加量； $\rho$ 为密度； $C_M$ 表示比热容量单位为 $\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ； $C_V$ 表示体积比热。导热系数使用热线法探测，测试原理是基于温度均匀、常物性且无限大的介质内部由无限长线热源加热时的温度分布模型。

当接通加热丝，假设加热丝瞬间释放有限大小的热量，在介质中形成以加热丝为轴心的长圆柱体瞬态导热，介质内的温升满足以下导热微分方程<sup>[6]</sup>

$$C_V \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + g(\vec{r}, t)$$

这是个非稳态导热问题，可应用格林函数-狄拉克函数进行求解得到公式

$$\frac{dT}{d \ln t} = \frac{Q}{4\pi\lambda}$$

该公式提供了一种确定导热系数的很容易的方法。只需探测在单位长度热线热功率 $Q$ 为常数的情况下传感器探测头温度的时间响应即可。图2为导热系数探测探头，1为热电阻，2为热线，通过探测3和4之间的温度差随时间的变化确定介质的导热系数，4的温度作为参考值认为恒定不变。

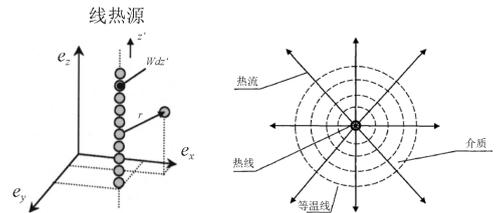


图1 热线法的热量传播

Fig. 1 Sketches of a line-like heat source

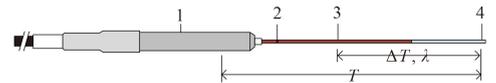


图2 导热系数探测探头结构

Fig. 2 Thermal conductivity sensors

#### 3.2 热流密度探测典型案例分析

“Apollo15号”和“Apollo17号”首次进行了月球热流密度和导热系数的探测实验。如图3所示，Apollo计划中使用的探测探头由相同两段组成，每一段长度为50 cm，装有热传感器和热源。使用两个相同的导热系数探测探头相隔10 m安放在月球表层，探测了两组数据。试验过程主要分成两部分：首先，宇航员手持钻具钻一个深孔(两次任务钻孔深度均未达到预定的目标3 m，最深“Apollo 17号”达到过2.54 m)，钻孔完成后钻杆留在孔内以保持深孔的稳定性。由于所使用的钻杆为空心杆，可以将导热系数探测探头安装到空心钻杆内进行月壤导热系数的探测。“Apollo 17号”热流计探测的月壤的导热系数为 $1.72\sim 2.95 \times 10^{-4} \pm 20\% \text{WK}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ，其中的误差范围与月壤的密度值的精度有关。从“Apollo 15号”和“Apollo17号”探测数据得出的月球的热流密度分别为 $21 \text{ mWm}^{-2}$ 和 $16 \text{ mWm}^{-2}$ 。Keihm和Langseth估计月球平均热流密度为 $14\sim 18 \text{ mWm}^{-2}$ 。但是仅仅通过探测月球两个地点导热系数远不足以解

整个月球的热流密度, 月球不同地点的热流密度也有很大的区别。未来还需要更多的月球热流密度的探测数据来确定月球热演化历史和放射性元素在月壳中的蕴含量。

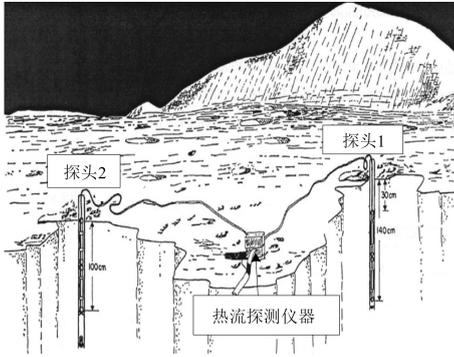


图3 Apollo计划的热探测方法

Fig. 3 Setup of the lunar heat flux and thermal conductivity experiment performed on the Apollo missions

图4为Apollo任务获得的沿深度方向月壤的温度变化曲线。由于昼夜交替在表层30 cm范围产生极大的温度变化, 在图4中没有画出。深度30~70 cm范围阴影部分表示昼夜温度的波动范围。月表50 cm深度以下温度基本不随昼夜变化产生波动, 温度梯度是由于月球内部热流产生的。

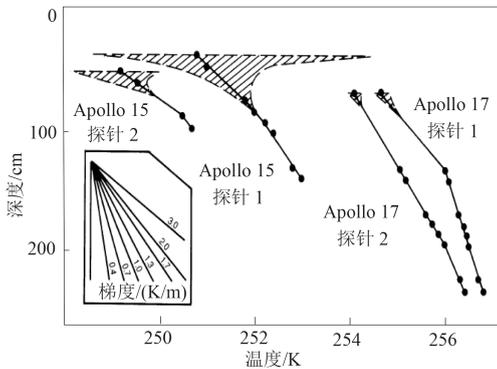


图4 月壤沿深度方向的温度分布

Fig. 4 Temperature fluctuations in the lunar regolith as a function of depth

Apollo计划探测结果有较大的误差, 探测过程中很多因素会影响探测的精确性。导热系数探测时用到了安装在探测探头末端的热源。由于使用的热源的形状为短圆桶状而不是理想的无限长细线, 所以使用热线法探测时无法直接获得准确的结果。接触良好的两物体直接接触的实际面积只是交界面的一部分, 其余部分都是缝隙, 热量依靠缝隙内气体的热传导和热辐射进行传递, 而它们的传热能力远不及一般的固体材料。Apollo计划的导热系数探测探头与月壤并不直接

接触, 所以中间空心钻杆的存在带来额外的热阻<sup>[8]</sup>。

2008年美国“凤凰号”探测器成功在火星北极地区着陆。TECP(thermal and electrical conductivity probe)安装在“凤凰号”探测器上的机械臂上, 机械臂使仪器能够到达着陆器附近的区域。TECP能完成多种探测任务, 除了可以探测星壤的导热系数之外, 还可以完成电导率、介电常数、湿度的探测。其外形尺寸如图5所示, 长15 mm、圆锥底面直径3 mm的4个锥形钢质探针以间隔7 mm排列在盒状壳体外面。

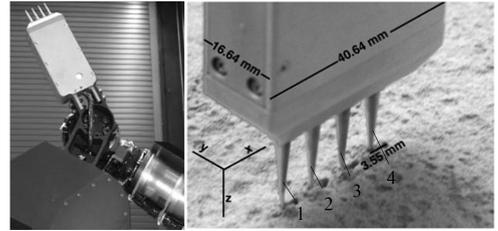


图5 星壤热特性和电导率探测器 (TECP)

Fig. 5 Thermal and electrical conductivity probe (TECP) for Phoenix

探测过程中, 探针刺入表层星壤, 1号探针作为热源, 检测探针2和3的温度变化, 离热源最远的4号探针的温度作为参考温度。因为TECP的探针短而粗的外形不适合用热线法去探测, 所以使用热脉冲法进行探测导热系数探测。热脉冲法探测时分别记录加热阶段探针随时间的温度变化和热源关闭后冷却阶段的温度变化。加热阶段探针的温度变化量 $\Delta T(t)$ 的公式为<sup>[9]</sup>

$$\Delta T(t) = -\frac{Q}{4\pi\lambda} Ei\left(\frac{-r^2 C_V}{4\lambda t}\right)$$

冷却阶段温度变化量公式为

$$\Delta T(t) = -\frac{Q}{4\pi\lambda} \left[ -Ei\left(\frac{-r^2 C_V}{4\lambda t}\right) + Ei\left(\frac{-r^2 C_V}{4\lambda(t-t_1)}\right) \right]$$

探针在 $t$ 时刻的温度变化量 $\Delta T_i(t)$ 为

$$\Delta T_{i,t} = (T_{i,t} - T_{4,t}) - (T_{i,0} - T_{4,0})$$

公式中体积比热 $C_V$ 和导热系数 $\lambda$ 是需要确定的量, 可通过循环迭代拟合探测数据来确定。

2004年欧空局发射了“罗塞塔号”彗星探测器, 并于2014年释放“菲莱”着陆器, 并成功登陆代号为67P的彗星。“菲莱号”是第一个实现彗星软着陆的航天器, 上面搭载有多种探测仪器, 其中MUPUS(multi-purpose sensor for surface and subsurface science)用于彗星表面的热学性能和力学特性的探测。MUPUS由三部分组成, 热探头PEN、安装在登陆器上探测地表温度的红外传感器TM、锚固装置上的传感器ANC, 在登陆器上的布置如图6所示。

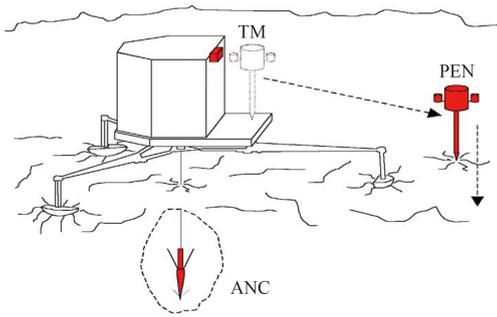


图6 MUPUS探测设备在菲莱登陆器上的布置

Fig. 6 Deployment of MUPUS instruments on the Philae lander

图7为“罗塞塔号”上的热探头PEN，是MUPUS里对彗星星壤探测的最主要的仪器。它通过一个释放机构送到离登陆器大约1 m远的地点，在上端冲击机构的冲击作用下将一个带有金属锥尖的空心管贯入到彗星星壤中。空心管为玻璃纤维复合材料，长32 cm，直径10 mm，壁厚1 mm，导热系数为 $0.5 \text{ mWm}^{-2}$ 。这种设计既能保证有足够的强度能够贯入地面，其较小的导热系数还能减少沿着探针的热传递<sup>[10]</sup>。热探头上使用的温度传感器使用激光溅射沉积工艺，在聚酰亚胺薄膜上附上 $0.5 \mu\text{m}$ 厚的钛薄膜。钛的电阻随温度的变化特性与铂热电阻PT1000相近，其阻值随温度呈线性变化。该传感器共设置了16个单元，深度越大，传感器的单元尺寸就越长，长度从1 cm逐渐增大到4 cm。这是因为接近地表的温度变化梯度较大，数据采集点也比较密。当增大电流时传感器单元还可以作为一个热源，用于导热系数探测的实验。这种设计使传感器能够探测竖直方向上探头长度范围内的多个点的热学参数。

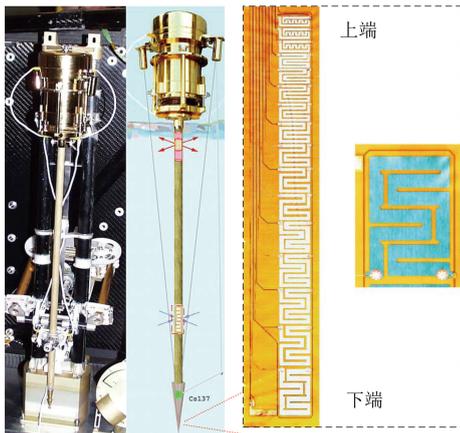


图7 MUPUS PEN热和机械特性探测器

Fig. 7 MUPUS PEN thermal and mechanical properties probe

2004年，日本太空和航空科学研究所ISAS联合日本宇宙航空研究开发机构JAXA研发一颗针对月球探测

的Lunar-A潜入探测器。Lunar-A携带三颗无人自动潜入器，当其与探测器分离后，分别飞向月球表面，预期与月球的撞击速度约为 $285 \text{ m/s}$ ，潜入深度约为 $1\sim 3 \text{ m}$ 。一旦发射成功，该探测器所能提供的数据将比阿波罗载人登月工程得出的数据更强大，但该项目由于其潜在的推进器故障被一再推迟最终取消。探测月球表面的温度梯度和月壤的导热系数是Lunar-A的一项主要探测目标。与Apollo计划不同的是，Lunar-A采用无人自动探测的方式，使用7个铂热电阻探测潜入器内部温度，并在外壳上安装11个K型热电偶用于外部环境探测。其中5个热电偶还可以用在热导率的探测，每个热电偶上均贴有一个薄片形状的加热装置，可以看作一个点热源。传感器与铜片一同嵌入在空心玻璃微球填充环氧树脂复合材料中，安装在潜入器壳体的外表面。铜片的下表面与热源相接触，另一面在潜入器潜入后与月壤直接接触。Lunar-A的热传感器设计的优势在于去除侵入月壤过程产热外，内部没有机械作动产生额外的热传到介质而破坏原位月壤的热学特性<sup>[11]</sup>。

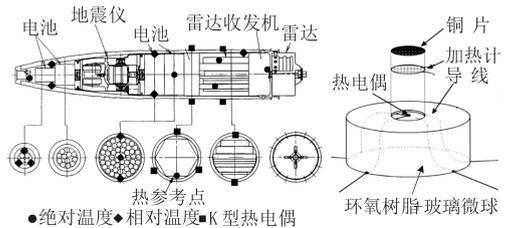


图8 Lunar-A热导系数探测方案

Fig. 8 Measurement scheme of thermal conductivity on Lunar-A penetrator

## 4 星壤原位力学参数探测技术

Apollo计划宇航员采集并带回了月壤样本，并且原位探测了月壤的力学特性。俄罗斯“Luna 17号”和“Luna 21号”探测器携带的月球车“Lunokhod 1号”和“Lunokhod 2号”通过十字板剪切试验探测了月表月壤的抗剪强度。过去的十多年里人们向地外天体发射了更多无人探测器，NASA的“勇气号”“机遇号”和“好奇号”火星探测器、欧空局发射的“Rosetta号”彗星探测器、未来还有NASA的InSight计划和ESA的ExoMars火星探测计划。它们的主要任务之一就是探测地外天体星壤的力学特性，InSight计划和Rosetta计划均使用潜入器执行这一探测任务。

### 4.1 星壤原位力学参数探测原理

通常岩石和星壤的力学特性主要由以下参数确定：密度 $\rho$ 、孔隙率 $p$ 、内摩擦角 $\phi$ 、内聚力 $c$ 。抗剪强

度关系到星壤的承载能力、斜坡稳定性、星球车的通过性。因此探测星壤的内摩擦角和内聚力成为深入研究的对象。颗粒状的星壤的抗剪强度通常用Mohr-Coulomb方程来定义

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

其中： $\tau$ 为抗剪强度； $\sigma$ 为正应力； $c$ 为内聚力； $\varphi$ 为内摩擦角。可以看出抗剪强度有两部分组成，独立于正应力的内聚力部分和与正压力成比例关系的摩擦部分。星壤力学探测方法有多种，大致可以分为三类：地球物理方法、原位探测方法、采样返回分析探测。针对地外天体星壤力学探测，以上方法应该联合使用，如首先利用地球物理方法对星球表面进行探测，指导选择合适的探测地点并钻探取芯获得层理结构没被破坏的星壤样本供实验研究。

使用潜入器探测星壤的力学参数是一种原位探测方法，与钻具采样方式相比成本低、负载小、方法简单。可以选择多个地点进行探测，避免因选取的样本不具代表性而引起的对星壤力学特性的估计的偏差。针对月球表面风化层松散颗粒状样本，相比于传统的采样返回探测，原位探测的优势比较明显。岩土工程领域中代表性的原位探测方法有静力触探测试 (cone penetrometer test, CPT)、动力触探法。静力触探法使用液压钻机将锥形探头以恒定速率推入土壤中，并同时记录穿透土壤所遇阻力。通过分析作用于锥形探头上的贯入阻力，可以求出星壤抗剪强度。Apollo计划和前苏联“月球车1号”和“月球车2号”探测月壤力学特性都用到了静力触探法。动力触探法可以求出星壤的加州承载比CBR(california bearing ratio)，进而获取被测星壤的力学参数。上述这些探测方法因设备质量较大而无法直接应用在地外天体的星壤力学特性参数探测。冲击贯入式潜入器的工作方式与动力触探计相似，可以应用于探测星壤承载能力的探测。

#### 4.2 星壤力学参数探测典型案例分析

图9为“Apollo 15号”和“Apollo 16号”任务里用到的静力触探计，能自动记录压入的深度和贯入阻力。宇航员对它上端施加压力时，锥头被压入月壤。前端的参考平板留在月球表面，记录仪能够记录贯入深度和压力信息<sup>[12]</sup>。图10为Apollo计划和苏联“月球车1号”和“月球车2号”静力触探计测得的贯入阻力数据。

获得贯入阻力数据后，可用下面的公式求取月壤的抗剪强度等参数<sup>[13]</sup>

$$q = cN_c \zeta_c + \rho g_m B N_{\gamma q} \zeta_{\gamma q}$$



图9 Apollo计划使用的SRP静力触探计  
Fig. 9 Self-recording penetrometer

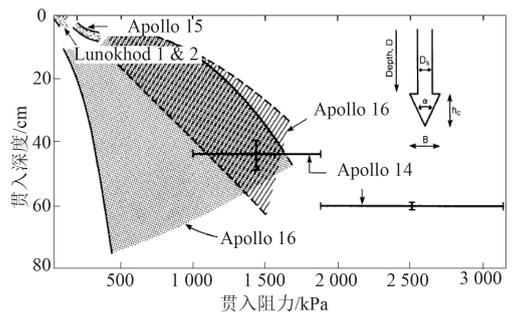


图10 “月球车1号”“月球车2号”和Apollo计划静力触探计原位探测数据  
Fig. 10 Penetration resistance of lunar regolith measured by the Lunokhod 1 and 2 automated rovers and Apollo self-recording penetrometer

式中： $q$ 代表贯入阻力； $c$ 为内聚力； $\rho$ 为月壤的密度； $g_m$ 为月球重力加速度； $B$ 为触探计锥头的直径； $N_{\gamma q}$ 、 $N_c$ 是土的承载能力系数，是内摩擦角 $\varphi$ 的函数<sup>[14]</sup>； $\zeta_{\gamma q}$ 、 $\zeta_c$ 为形状因素。虽然式中两个未知参数内聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 不能直接计算获得，但是可利用图11中的方法进行近似估算。图11中实线为利用“月球车1号”静力触探计贯入阻力数据，通过往公式中代入不同内摩擦角求出的内摩擦角和内聚力关系曲线。图11中虚线为模拟月壤不同密度时的内摩擦角和内聚力之间的关系，虚线和实线的交点值作为月壤的参数估计值。

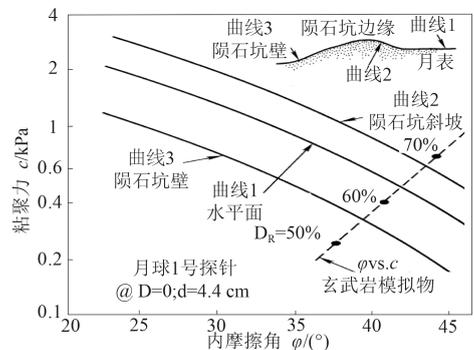


图11 内摩擦角和内聚力确定方法

Fig. 11 Solutions of calculate the shear strength parameters for lunar soil

图12为动力触探计与冲击贯入式潜入器运动过程对比。动力触探测试(DPT)使用重锤从一定高度自由落下将配有锥形探头的触探计贯入地面。记录下每触探一定深度的土层所需要的冲击次数,并将其转换为每次冲击下的平均贯入深度,可以以此表征星壤的承载能力。冲击贯入式潜入器提升冲击锤过程中通过压缩弹簧储能,达到释放位置后冲击锤下落锤击在潜入杆上,撞击后冲击锤复位并产生二次冲击,实现潜入。通过冲击贯入器每次冲击作用下的贯入深度和冲击力的关系同样可以定性确定出星壤类型及承载能力<sup>[15]</sup>。未来对月球或邻近行星探测任务中星壤承载能力是一项重要的工程属性,例如月壤能否将月球基地稳定地支撑在月球表面而不发生沉降等问题<sup>[3]</sup>。此外,冲击贯入器还可作为星壤密度的原位探测设备。星壤的相对密度越高,单次冲击作用下贯入的深度越小,图13为K. zanny等(2013)<sup>[3]</sup>利用冲击贯入器探测星壤密度的实验结果。图13中数据表示密度与贯入阻力、潜入单位深度需要的冲击锤冲击次数间的关系。星壤的密度信息同时可以用在导热系数的探测。

Rosetta计划中“菲莱”登陆器的锚固装置也是一种星壤力学特性探测装置。图14为“菲莱”登陆器的锚固装置,直径15 mm,长154 mm,质量0.1 kg,头部60 mm长的圆锥上面分布多个倒刺。

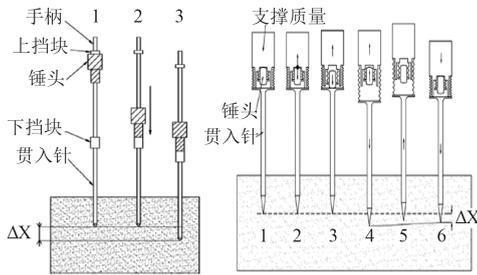


图12 动力触探计、冲击贯入式潜入器运动过程对比

Fig. 12 Comparison of the dynamic cone penetration and hammer-driven mole

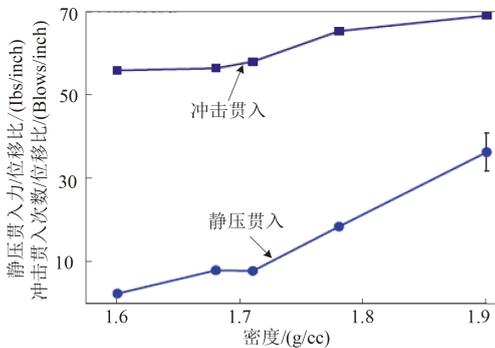


图13 密度与贯入阻力和潜入单位深度需要的冲击次数之间的关系

Fig. 13 The data showing required push force gradient and number of hammer blows/inch, as a function of regolith density

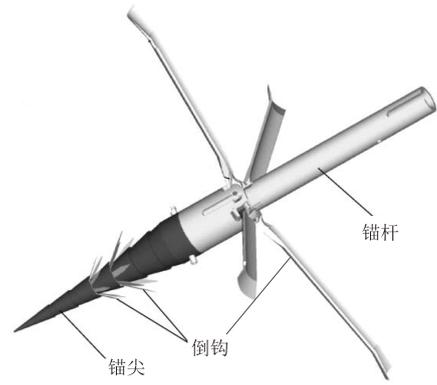


图14 菲莱登陆器的锚固装置<sup>[16]</sup>

Fig. 14 Anchor harpoon of the Rosetta lander

冲击矛通过火工装置发射并侵彻到彗星表层,起到固定着陆器的作用。在贯入过程中,冲击矛还可以作为星壤力学特性的探测设备,其上装有加速度传感器会记录下侵彻过程的加速度。通过测得的加速度数据,并利用力学模型分析获得星壤的力学特性参数。图15为地面模拟实验加速度传感器测得的实验数据与数学模型计算出的加速度曲线<sup>[17]</sup>。通过调整数学模型中的土壤力学参数(冲击矛与星壤的摩擦系数 $\mu_f$ 、抗剪强度 $\sigma_d$ 、粘滞系数 $C_D$ )使理论分析加速度曲线逼近实验所测加速度曲线,进而求出星壤的力学参数<sup>[17]</sup>。从图16可以看出,当力学参数取第4组数值时,冲击加速度理论分析值与实验值能较好吻合,利用此方法,可以通过传感器反馈的加速度数据对星壤的力学参数进行实时探测与辨识。

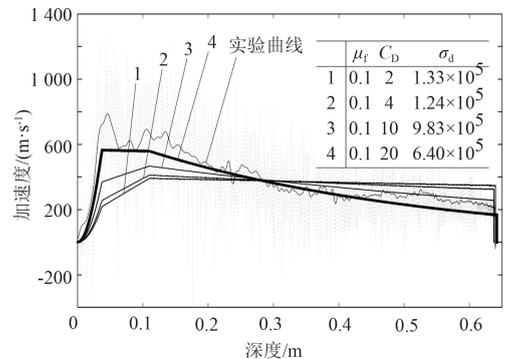


图15 加速度传感器数据与理论模型对比

Fig. 15 Comparison of acceleration data with theoretical results

## 5 地外天体潜入式探测的未来展望

综合上述地外天体潜入式探测技术资料,作者认为我国及时开展潜入式探测方案研究、潜入机构创新设计、潜入式探测科学目标及有效载荷研究具有重要意义。到目前为止,国内各研究单位在该方面的预先研究成果尚不多见。哈尔滨工业大学宇航空间机构及

控制研究中心跟踪国际研究前沿，开展了蠕动掘进式、冲击贯入式潜入器的预先研究工作，研制了原理样机和试验验证环境，证明了潜入方式的有效性。但还有很多机理性的关键技术需要深化研究，潜入机具与星壤相互作用建模、潜入特性量化评估、潜入机具集成一体化设计、潜入过程的减阻增效方法研究、基于潜入动力反馈参量的原位星壤参数反演、潜入功能与有效载荷的集成等研究内容，是值得关注的基础性、前沿性科学问题。其中蠕动掘进式和冲击贯入式潜入器的潜入能力已经试验证明，能搭载种类丰富的有效载荷，实现更有科学价值的探测任务，是对我国未来的地外天体潜入式探测任务具有重要参考价值的研究方向。基于蠕动掘进式潜入器，设计针对次表层星壤剖面科学目标探测方案如图16所示。蠕动掘进式潜入器实施自主潜入，辅助设备安装在着陆器平台为潜入器提供能源和支撑保障。探测过程中，蠕动掘进式潜入器内部可搭载地震检波器、磁强计等科学仪器对星体地质构造、物理特性进行探测。科学系统从潜入器末端连接至星体表面设备，为掘进器供应能源，以线缆为基体在其上布置测温传感阵列，探测星壤沿深度剖面的温度场分布情况。针对星壤力学参数探测，基于潜入器自身的潜入机具开展钻掘试验和胀孔滑移试验，利用机具-星壤相互作用力学模型开展辨识试验。

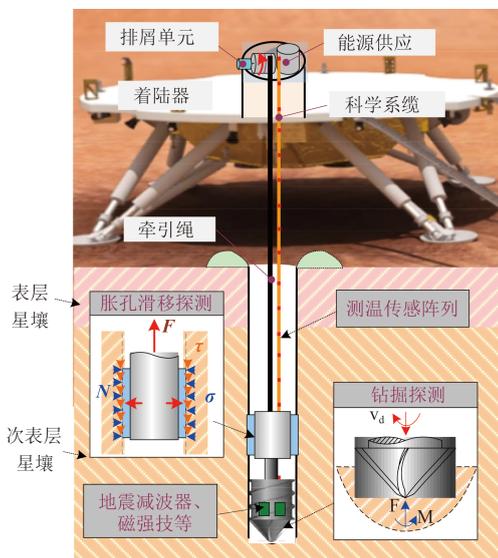


图 16 基于蠕动掘进式潜入器科学目标探测方案

Fig. 16 Detection scheme of scientific targets based on the creeping boring penetrators

蠕动掘进式潜入器的预先研究方向：“潜得深、探得巧”已经成为国际上开展地外天体星壤剖面探测的前瞻性热点研究目标。针对“潜得深”这一目标，可以通

过原位星壤的钻进式破碎、次生星壤的接力式运移方式来实现，核心是解决潜入机具与星壤相互作用的基本力学模型的建立问题，工程应用前景是为潜入机具的优化设计提供理论依据。针对“探得巧”这一目标，主要体现在对原位星壤力学参数开展辨识的代价要小，利用潜入机具潜入星壤过程中的运动及负载反馈参量作为星壤力学参数辨识的数据来源，可在不增加系统复杂度的前提下，经济地实现辨识。从技术成果上分析，潜得深和探得巧，都有一些可以借鉴的方法，但能同时兼顾潜入和辨识双重目标的研究成果还未发表。

冲击贯入式潜入器预先研究方向：综合分析地外天体星壤剖面的侵彻式贯入器的研究现状和技术发展趋势，可以看出，具有集成化、轻巧型、智能型、高工效特点的冲击式贯入器，更加适合于地外天体星壤剖面的无人自主探测，通过搭载其内部的多类传感元件，可用于开展星壤剖面地质信息、物理和力学特性、星表热流特性等探测任务。从实现冲击式贯入的具体方案来说，可行途径有很多种；从技术方案的实现方法方面，又有多种具体实现形式。可以说，目前已经出现的冲击式贯入器种类繁多、形式多样。针对冲击式贯入器的具体研究过程，多数都关注了贯入器的构型设计和冲击传递特性研究，但还没有形成统一模型，核心技术没有上升到共性科学问题的高度。从这个角度出发，建立脱离具体形态的统一物理模型，开展有限冲击能量优化传递、贯入器侵彻过程减阻增效机制和方法等基础性研究工作，具有重要科学意义和工程实用价值。

## 6 结论

相较于较传统的钻取采样探测、表层采样探测等方式，地外天体潜入式探测具有探测成本低、探测深度大、探测目标丰富、科学价值更高等突出优势。针对潜入式探测的科学目标、实现原理和具体实现方式，本文调研分析了地外天体剖面热流密度以及星壤原位力学参数探测方面的典型案例，梳理出了这两类科学探测方法的技术发展脉络。依据国际发展趋势以及我国目前的预先研究进展，提出了我国开展地外天体潜入式探测预先研究的主要方向、关键技术及解决措施。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Shiraishi 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.
- [3] Zaczny K, Nagihara S, Hedlund M, et al. Pneumatic and percussive penetration approaches for heat flow probe emplacement on robotic lunar missions[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2013, 111(1–2): 47–77.
- [4] Yamada R, Yamada I, Shiraishi H, et al. Capability of the penetrator seismometer system for lunar seismic event observation[J]. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(7): 751–763.
- [5] Ball A J, Gadowski S, Banaszekiewicz M, et al. An instrument for in situ comet nucleus surface density profile measurement by gamma ray attenuation[J]. *Planetary and Space Science*, 2001, 49(9): 961–976.
- [6] Kömle N I, Hütter E S, Macher W, et al. In situ methods for measuring thermal properties and heat flux on planetary bodies[J]. *Planetary and space science*, 2011, 59(8): 639–660.
- [7] Langseth Jr M G, Clark Jr S P, Chute Jr J L, et al. The Apollo 15 lunar heat-flow measurement[J]. *The Moon*, 1972, 4(3–4): 390–410.
- [8] Hagermann A. Planetary heat flow measurements[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 363(1837): 2777–2791.
- [9] Zent A P, Hecht M H, Cobos D R, et al. Thermal and electrical conductivity probe (TECP) for Phoenix[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991–2012), 2009, 114(E3).
- [10] Spohn T, Seiferlin K, Hagermann A, et al. MUPUS–A thermal and mechanical properties probe for the Rosetta lander Philae[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128(1–4): 339–362.
- [11] Kömle N I, Kaufmann E, Kargl G, et al. Development of thermal sensors and drilling systems for lunar and planetary regoliths[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(2): 363–368.
- [12] Heiken G, Vaniman D, French B M. *Lunar sourcebook: a user's guide to the moon*[M]. England: Cambridge University Press, 1991.
- [13] Mitchell J K, Houston W N, Carrier W D. Apollo soil mechanics experiment S-200[R]. Berkeley: NASA, 1974.
- [14] 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.
- [15] Seweryn K, Skocki K, Banaszekiewicz M, et al. Determining the geotechnical properties of planetary regolith using low velocity penetrometers[J]. *Planetary & Space Science*, 2014, 99(1):70–83.
- [16] Kargl G, Macher W, Kömle N I, et al. Accelerometry measurements using the Rosetta lander's anchoring harpoon: experimental set-up, data reduction and signal analysis[J]. *Planetary and Space Science*, 2001, 49(5): 425–435.
- [17] Kömle N I, Ball A J, Kargl G, et al. Using the anchoring device of a comet lander to determine surface mechanical properties[J]. *Planetary and Space Science*, 1997, 45(12): 1515–1538.

作者简介:

姜生元(1969–), 男, 博士, 博士生导师, 教授。主要研究方向: 深空采样探测技术、宇航空间机构及控制。

通信地址: 哈尔滨市一匡街2号哈尔滨工业大学科学园2F栋403室(150001)

电话: (0451)86413857

E-mail: jiangshy@hit.edu.cn

## Typical Cases Analysis and Prospects for Extraterrestrial Subsurface Boring Exploration

JIANG Shengyuan, PIAO Songjie, ZHANG Weiwei, SHEN Yi, HOU Xuyan, QUAN Qiquan, DENG Zongquan

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** For the mission of extraterrestrial subsurface boring exploration, the basic principles, implementation schemes and typical cases of the scientific targets investigations such as heat flow and mechanical properties of the regolith profile were studied and analyzed. The significance of the exploration was clarified, therefore the expanding scheme for the regolith sampling of China's 3<sup>rd</sup> lunar exploration mission and research plan in advance of extraterrestrial subsurface boring exploration were further proposed. Besides, the basic principles and application prospects were analyzed for the creepy-boring scheme and the impact type penetrating scheme.

**Key words:** extraterrestrial body; regolith profile; subsurface boring exploration; scientific targets; heat flow; regolith mechanical properties

[责任编辑: 杨晓燕]