嫦娥五号采样封装系统设计与实现

邓湘金¹, 郑燕红^{1*}, 金晟毅¹, 姚猛¹, 赵志晖¹, 李昊璘², 姜水清¹, 王国欣³

1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

2. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000;

3. 北京卫星制造有限公司, 北京 100080

* E-mail: zhengyhsince2018@hotmail.com

收稿日期: 2021-03-17; 接受日期: 2021-05-07; 网络版发表日期: 2021-07-09

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 嫦娥五号探测器成功实现了中国首次月球无人采样返回任务, 采样封装是任务的重要环节之一, 先后获取了深度剖面 and 多点表面月球样品, 并完成了月球样品的极低漏率密封. 本文首先分析了嫦娥五号采样封装工作的任务特点, 论述了高可靠采样、非定结构封装、关键环节测量、系统集成验证、在轨操控等关键技术的实现方案, 阐述了采样封装产品的技术特点, 并对月面采样封装期间的钻取采样、表取采样、密封封装等在轨实施情况进行了总结. 月面采样封装工作结果表明, 采样封装系统方案设计正确、地面验证充分、器地一体化操控高效, 圆满完成了我国首次月面采样封装工作.

关键词 嫦娥五号, 采样封装, 钻取采样, 表取采样, 密封封装

1 引言

2020年11月24日, 长征五号运载火箭成功发射嫦娥五号探测器, 实施我国首次月球无人采样返回任务, 经地月转移、近月制动、环月飞行、动力下降等飞行过程, 着陆在月球北纬43.1°、西经51.8°的风暴洋西北地区. 嫦娥五号探测器着陆后, 于12月2日完成了月面钻取采样、表取采样与密封封装任务, 为我国首次获取了月球样品, 增加了人类拥有月球样品的丰富性; 起飞上升前, 于12月3日完成了探测器状态检查, 获得了探测器及邻近着陆区域的大量图像数据, 为嫦娥五号任务科学研究提供了支持.

目前, 世界上仅有美国、苏联和中国成功实施过月球采样返回. 美国勘察者(Surveyor)任务通过伸缩机构进行了无人月面铲挖测试, 但未进行样品的收集与封装工作, 阿波罗(Apollo)任务通过宇航员进行了有人月球样品采集. 苏联月球任务(Luna)采用无人钻进方式. 与美国、苏联的采样方式不同, 中国首次采用了钻取与表取两种无人异构采样方式, 通过一次任务成功获取了月球最高纬度区域的剖面样品与表面样品, 完成了极低漏率密封, 完好保护了返回地球的月球样品.

本文结合嫦娥五号探测器采样封装任务目标, 分析了采样封装任务可能面临的月面复杂工作环境, 提

引用格式: 邓湘金, 郑燕红, 金晟毅, 等. 嫦娥五号采样封装系统设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 753–762

Deng X J, Zheng Y H, Jin S Y, et al. Design and implementation of sampling, encapsulating, and sealing system of Chang'e-5 (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 753–762, doi: 10.1360/SST-2021-0093

出了采样封装系统设计方案和关键技术, 介绍了采样封装产品设备, 并对采样封装在轨实施情况和结果进行了总结。

2 任务分析

探月工程三期的目标是实现月球无人采样返回^[1], 嫦娥五号采样封装系统的任务目标是获取月球样品。在有限的月面工作期间, 将面临复杂着陆环境与地质特性等方面的挑战。

2.1 着陆环境的不可确知性

嫦娥五号选定的着陆区域位于月球正面西北角风暴洋北部, 着陆点的范围为北纬 $41^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 、西经 $49^{\circ}\sim 69^{\circ}$, 该区域远离美国、苏联月球着陆探测任务以及我国嫦娥三、四号的着陆点^[2], 如图1所示, 尚无人类探测器着陆到该区域, 着陆环境可能与以往的着陆区域有较大差异。

对于月面采样封装任务, 着陆环境的不可确知性将给采样机构控制、成像控制等采样封装策略带来不确定性。从已实施的历次月球探测任务来看, 月球表面的地形较为复杂, 且差异性较大, 一般情况下, 无人采样返回任务中采样区域通常只有几平米大小, 并且, 月面采样的局部地形状态在着陆前无法准确预知, 因此, 采样封装系统的工作程序必须具有充分的柔性, 在轨操控工作必须具有高效动态调整能力。其次, 由于探测器着陆缓冲过程复杂, 探测器的着陆姿态在着陆前无法精确预知, 在月球重力场的影响下, 如何确保轻量化采样机构的定位精度是一个必须解决的难题。此外, 探测器着陆姿态的不确定性, 将导致采样封装相关设备的光照环境不能提前精确预知, 可能影响成像观测质量与视觉测量精度, 对采样封装设备的温度适应性、工作程序调整的灵活性、快速性提出了更高的要求。

2.2 地质特性的不可预知性

嫦娥五号任务实施前, 人类获取的月球样品主要来自苏联月球任务和美国阿波罗任务, 如图2所示。分析结果表明, 月壤在不同区域、不同的深度具有不同的粒径、级配、密实度等特性。人类虽然针对月面地质特性开展了大量的研究工作^[3~8], 由于风化层的浅层月壤, 尤其是具有一定深度剖面的月壤, 具有多样性和

图1 (网络版彩图)月球正面人类探测器着陆点分布

Figure 1 (Color online) The landing sites of spacecraft on front of the Moon.

图2 (网络版彩图)风化层月球样品。(a) 月球16; (b) 月球20; (c) 月球24; (d) 阿波罗15

Figure 2 (Color online) The lunar regolith soil. (a) Luna 16; (b) Luna 20; (c) Luna 24; (d) Apollo 15.

复杂性, 嫦娥五号月面采样过程面临较大的不确定性。

从图1可以看到, 嫦娥五号着陆区域远开展过采样活动的勘察者、阿波罗、月球等任务着陆区, 采样对象的地质特性也不可完全预知, 这就要求采样机构的工作参数能根据地质特性进行现场调整, 这对采样机构的样品获取能力、工作策略的自主适应性、在轨实施调整的快速性都提出了挑战。

2.3 工作时间的有限性

根据地面着陆场、月面着陆区、运载能力等约

束, 嫦娥五号任务在月面工作总时间约2个地球日, 实施月面采样封装及多项科学探测活动, 并完成月面起飞上升准备等工作, 采样封装的工作时间约28 h. 在采样封装过程中将开展环境感知、钻取采样、表取采样、密封封装等工作, 时间资源十分宝贵.

苏联月球16, 20, 24在月面工作时间分别约为26.5, 28, 23 h^[9], 采样封装工作中仅完成了与嫦娥五号钻取采样类似的剖面样品采集与封装工作, 美国勘察者3将约18.4 h的表层铲挖任务分布在10个地球日中进行, 单日最长采样工作时间约3 h^[10], 与之类似, 勘察者7将约36.5 h的表层铲挖任务分布在13个地球日中, 单日最长采样工作时间提升至约6.5 h^[11]. 嫦娥五号将在28 h内完成一定深度的剖面样品采集、转移与初级封装, 一定广度的多点表面样品采集、转移与初级封装以及高纯环境密封封装工作, 任务中对样品类型要求更多, 涉及区域更广, 样品封装要求更高, 工作环节更为复杂, 需采用连续方式实施. 这种短期高集中工作模式加大了产品热设计、操控设计的难度, 工作时间的有限性对采样封装的感知、规划、操控以及天地链路信息传递的快速性、正确性、可靠性提出了更高的要求.

3 系统设计

嫦娥五号采样封装系统设计主要包含钻表异构采样设计、非定结构封装设计、采样封装视觉测量设计、集成验证设计及器地一体化操控设计.

3.1 钻表异构采样设计

面对人类探测器未曾到达过的着陆区与采样点不确定的地质特性, 嫦娥五号提出了钻取采样与表取采样两种异构采样方式, 如图3所示, 通过一次任务同时获得深度剖面 and 多点表面月球样品.

嫦娥五号设计了纵贯着陆器与上升器的复杂构型钻取采样装置, 获取具有一定深度的剖面月球样品, 采用进尺-回转-冲击驱动形式实现月壤钻进, 利用双管单动-柔性内翻方式实现剖面取芯.

嫦娥五号设计了4自由度长臂展表取采样机械臂, 获取一定区域内的表面月球样品, 设计铲挖与旋挖两种异构采样器实现多点表面样品采集.

假设钻取采样的失败概率为 f_d , 表取采样的失败概率为 f_s , 密封封装的失败概率为 f_a , 则采用单一采样

图3 (网络版彩图)钻表异构采样产品布局示意. (a) 钻取采样设备; (b) 表取采样设备

Figure 3 (Color online) The layout of drill and surface sampling device. (a) Drill sampling device; (b) surface sampling device.

方式、复合异构采样方式的采样封装失败概率 f_{t1} 和 f_{t2} 为

$$\begin{cases} f_{t1} = \begin{cases} 1 - (1 - f_d)(1 - f_a), & \text{仅钻取采样,} \\ 1 - (1 - f_s)(1 - f_a), & \text{仅表取采样,} \end{cases} \\ f_{t2} = 1 - (1 - f_d f_s)(1 - f_a), & \text{复合异构采样.} \end{cases} \quad (1)$$

从式(1)可见, 采用复合异构采样设计, 采样封装任务的失败概率将显著下降. 钻取采样与表取采样两种方式互相独立, 不仅可独自完成采样活动, 获取月球样品, 在特殊情况下, 还具备表取协同钻取完成样品整理、转移对准状态确认及展开避让辅助支持能力.

3.2 非定结构封装设计

面对嫦娥五号不同采样方式获取的月球样品差异, 嫦娥五号提出了两次封装方式, 通过对钻取月球样品与表取月球样品分立式初级封装, 实现两类样品的分别存放, 确保飞行及回收过程中两类样品不混杂. 通过月面现场密封封装, 实现钻取样品与表取样品的集中式极低漏率样品存储. 在实际工程实施过程中, 由于钻取月球样品及初级封装容器, 或者表取月球样品及初级封装容器, 存在与否, 具有不确定性, 导致密封封装前的内部结构接口状态存在不确定性, 因此需要具有非定结构的封装能力.

嫦娥五号设计了表取初级封装容器对多点表面月球样品进行装盛与一次封装, 设计了钻取初级封装对

剖面月球样品进行缠绕与一次封装。通过表取初级封装容器、钻取初级封装容器、密封封装装置的多段止口和嵌套式设计, 实现了密封封装装置可在单个表取初级封装容器及样品、单个钻取初级封装容器及样品或同时兼顾钻取表取初级封装容器及样品等结构不确定场景下的密封封装。同时, 通过钻取初级封装容器的环形中空设计, 为特殊情况下表取月球样品直接进入密封封装装置提供条件, 如图4所示。

设钻取初级封装及样品进入密封封装装置为状态 p_1 , 表取初级封装及样品进入为状态 p_2 , 表取样品直接进入为状态 p_3 , 则密封封装装置可能的封装结构有如式(2)定义的6种状态:

$$P = \{\phi, p_1, p_2, p_3, p_1p_2, p_1p_3\}, \quad (2)$$

式中, ϕ 表示无钻取和表取初级封装及样品进入状态, P 为非定结构封装状态集合。

非定结构的封装设计极大地提高了采样封装任务的可靠性。通过一次封装设计, 避免了样品转移过程可能发生的撒落情况对探测器器表敏感设备的污染; 通过软金属挤压与橡胶圈双密封二次封装设计为月球样品提供了极低漏率的高纯环境; 通过分段稳固接口设计实现了钻取采样或表取采样初级封装容器未进入密封封装装置时正常密封。

3.3 关键环节视觉测量设计

嫦娥五号采样封装产品将经历地月往返飞行过程中的各类环境, 并且在月面低重力影响下, 需对采样、放样、初级封装抓取与转移释放等环节进行高精度对准控制, 嫦娥五号提出了视觉测量设计方案。在重量资

图4 (网络版彩图)非定结构封装产品示意

Figure 4 (Color online) The sketch map of unfixed structure encapsulating & sealing device.

源和布局资源受限的情况下, 需要妥善解决长臂杆机械臂在月面环境下的柔性形变与高精度控制的矛盾。

由于月面采样区光照不均匀、纹理相似度高, 结合多场景下利用摄影测量原理获取的立体相机内外参数与图像, 提出了月表图像弱纹理特征点鲁棒匹配的方法, 实现特征点快速提取, 并保证分布的均匀性, 设计了基于视差插值平面限制的自适应搜索范围方法, 降低了匹配过程计算量, 可获得表取采样区稠密三维数字地形, 确保采样过程的视觉测量具有高效率和高质量。

根据表取放样、初级封装抓取、转移释放时的构型和探测器的布局约束, 开展合作目标设计和布局, 视场内可用轮廓特征选用设计, 提出光致结构变化的高稳定性、高精度视觉标识制作方案, 提出多维度视觉位姿解算方法, 实现覆盖采样封装过程的高精度视觉测量。

3.4 采样封装集成验证设计

嫦娥五号是我国首个地外天体采样返回探测器, 采用了异构采样与非定封装方式的采样封装方案, 研制过程中设计了采样封装集成验证系统与试验方案, 完成采样封装系统功能性能验证、环境适应性验证、故障设置和应对措施演练、知识库积累和数字模型训练等, 采样封装集成验证平台如图5所示。

采样封装集成验证试验系统由数据服务、数字分析、综合决策、物理验证、环境模拟、状态呈现及辅助支持等7个子系统组成, 其相互关系如图6所示。

为确保采样封装专项试验的有效性, 在试验系统中设计了与探测器采样封装相关设备状态一致的验证器。试验系统具备探测器、验证器遥测与图像数据解析、存储、分发与查询能力, 具备图像评估、三维重构、规划仿真、位姿解算、遥测驱动数字仿真等分析能力, 可实现探测器着陆姿态、月壤、低重力、光照、地形等环境物理模拟, 并可通过数字分析与物理验证相结合, 实现采样封装过程验证实施。

针对月面采样封装复杂环境, 利用集成验证系统在模拟低重力、采样封装时段光照环境等状态下, 设计开展如表1所示试验项目。

3.5 器地一体化操控设计

月面采样封装任务一方面有较强的时间约束, 另

图 5 (网络版彩图)采样封装集成验证平台

Figure 5 (Color online) The sampling, encapsulating & sealing integrated verification platform.

图 6 采样封装集成验证系统组成示意

Figure 6 The composition of sampling, encapsulating & sealing integrated verification system.

一方面又需面对复杂的工作环境, 采用传统的天地协同设计, 难以在短时间内安全、正确地完成采样封装在轨操控工作。嫦娥五号提出了“地面提前验证, 月面精准实施”的采样封装器地一体化操控方案。月面采样封装器地一体化操控实施过程由探测器、验证系统、任务支持系统及测控系统协同完成, 如图7所示。

在器地一体化采样封装操控过程, 设 O_t 为月面探测器时刻 t 的操控期望目标, C_b 为操控约束条件, ζ_o 为探测器采样封装策略。根据前述方案, 需先在验证系统中开展提前验证工作, 设提前时间为 t_0 , S_t 为验证系统在 $t-t_0$ 时刻的状态变量, 其状态可观, 验证系统根据高逼真场景模拟下的环境感知分析, 制定验证系统采样封装策略 ζ_g , 实现操控期望目标, F 为验证状态变量

表 1 采样封装试验项目

Table 1 The test items of sampling, encapsulating & sealing system

序号	试验名称
1	无月壤采样封装过程试验
2	标称采样封装过程试验
3	非标结构封装容器转移试验
4	非标着陆状态采样封装过程试验
5	非标称月壤状态采样封装过程试验
6	复杂地形状态采样封装过程试验
7	组合工况采样封装过程试验
8	采样封装故障与应对措施演练
9	月面采样封装过程协同演练

图 7 (网络版彩图)采样封装器地一体化操控示意

Figure 7 (Color online) The cooperating framework of sampling, encapsulating & sealing with spacecraft and ground system.

到验证策略的映射函数。在经过地面验证的策略 ζ_g 的基础上, 考虑到月面场景与验证系统的细微差异, 以及这些差异所引入的精调量 $\delta_i (i=1,2,\dots)$, 形成了针对月面探测器的采样封装策略 ζ_o 。从而实现采样封装器地一体化操控, 该过程可描述为

$$\begin{cases} \zeta_g(t-t_0) = F(S_t(t-t_0), O_t, C_b), \\ \zeta_o(t) = \zeta_g(t-t_0) + \sum \delta_i(t). \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可见, 采样封装器地一体化操控设计通过前置验证与现场实施双线并行, 确保了在轨操控策略、指令的正确性与安全性, 对关键动作进行现场环境相关的精调控制, 消除月面环境与验证场景的细微差异影响, 相对于传统操作模式, 提升了应对复杂环

境的安全性, 减少了任务实施时间, 提高了在轨操控效率和质量.

4 产品实现

4.1 钻取采样产品

嫦娥五号钻取采样由钻取控制单元和钻取采样装置两台产品实施. 其中钻取控制单元为电控单元, 钻取采样装置为剖面采样机构. 钻取采样装置产品状态如图8所示.

嫦娥五号钻取采样针对一定深度剖面下变密实度^[12]、大摩擦角、级配离散的月球样品钻进过程, 将非标称变化作为扰动量 ω , $\mathbf{x}$ 为钻进过程状态量, $\mathbf{z}$ 为调节输出, $\mathbf{u}$ 为控制输入, 钻进过程中系统可描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\omega + \mathbf{B}_2\mathbf{u}, \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_1\mathbf{x} + \mathbf{D}_{11}\omega + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u}, \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$, $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{D}_{11}$, $\mathbf{D}_{12}$ 为相应维数的系数矩阵, 考虑参数摄动情况时, 可在各名义系数矩阵基础上附加摄动矩阵组成.

针对式(4)所示负载波动与参数摄动并存的钻取采样过程, 提出了自适应钻进规程, 采用了进尺-回转-冲击共轴驱动型式, 单机最大功率超过800 W, 成功实现了剖面月壤钻进控制, 并巧妙地实现了长度接近8 m的软质取芯袋及内部样品的提芯与初级封装集成化设计, 利用月面低重力效应, 实现了初级封装与样品转移, 采用无源式驱动方案, 实现上升器起飞通道避让, 为轻量化设计提供了借鉴.

4.2 表取采样产品

嫦娥五号表取采样由表取控制单元、表取采样机械臂、表取初级封装装置三台产品实施. 其中表取控制单元为电控单元, 表取采样机械臂为表面采样机构, 表取初级封装装置为一次封装机构. 表取采样机械臂、初级封装装置产品状态如图9所示.

表取采样机械臂包含肩偏航、肩俯仰、肘俯仰、腕俯仰4个转动关节, 表取样品采集、样品转移、放样、容器抓取、容器转移、容器对准与释放过程中, 均需对运动路径进行规划^[13], 利用视觉信息进行状态分析^[14,15], 并将位置、姿态信息转换为关节角度, 控制机械臂运动, 根据表取采样位姿 (x, y, z, α) 需求, 可

按式(5)确定各关节转角 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$:

$$\begin{cases} \theta_1 = \begin{cases} \arctan\left(-\frac{a_x}{a_y}\right), & a_x \geq 0, \\ \pi + \arctan\left(-\frac{a_x}{a_y}\right), & a_x < 0, \end{cases} \\ \theta_2 = \begin{cases} \arcsin(m_2), \\ \pi - \arcsin(m_2), \end{cases} \\ \theta_3 = \begin{cases} \arccos(m_1), \\ -\arccos(m_1), \end{cases} \\ \theta_4 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{n_z}{o_z}\right) - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3, & o_z \geq 0, \\ \pi + \arctan\left(\frac{n_z}{o_z}\right) - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3, & o_z < 0, \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中,

$$m_1 = \frac{x^2 + y^2 + (z - d_1)^2 - A_1^2 - A_2^2 - d_{234}^2}{2A_1A_2},$$

$$m_2 = \frac{(z - d_1)(A_1 + A_2m_1) - A_2s_3(xc_1 + ys_1)}{(z - d_1)^2 + (xc_1 + ys_1)^2},$$

图8 (网络版彩图)嫦娥五号钻取采样装置示意

Figure 8 (Color online) The drill device of Chang'e-5.

图9 (网络版彩图)嫦娥五号表取采样机械臂和初级封装装置示意. (a) 机械臂; (b) 初级封装装置

Figure 9 (Color online) The surface sampling manipulator and junior encapsulation device of Chang'e-5. (a) Manipulator; (b) junior encapsulation device.

其中, a_x, a_y, n_z, o_z 分别为采样器坐标系 a, n, o 轴在机械臂参考系 X, Y, Z 轴的分量; A_1, A_2 为机械臂第一、二段臂杆长度, d_1 为关节 1 部位偏置, d_{234} 表示关节 2, 3, 4 部位偏置之和; s_1, c_1 分别表示 θ_1 的正弦、余弦值, s_3 表示 θ_3 的正弦值.

嫦娥五号表取采样采用了多自由度、轻小型、大臂展、大负载机械臂, 根据式(5)进行位姿与关节角度转换, 实现了灵活的路径规划和触月感知, 采样器在抓罐、放罐等位置的重复定位精度优于 1 mm, 集成了铲、挖、吸、纳、抓等多种功能, 提出了多组构非定量样品初级封装、机械臂抑振、大长径比薄壁臂杆控形控性等关键技术.

4.3 密封封装产品

嫦娥五号密封封装由密封控制单元、密封封装装置两台产品实施. 其中密封控制单元为电控单元, 密封封装装置为二次封装机构, 为月球样品提供高纯环境. 密封封装装置产品状态如图 10 所示. 密封封装装置返回地球过程中, 其内部处于真空状态, 外部受大气影响, 可看作真空抽气的逆过程, 则有

$$Q = V \frac{dP}{dt}, \quad (6)$$

式中, Q 为密封封装装置漏率, V 为密封封装装置内部容积, P 为内部压强, t 为从月面返回时间.

嫦娥五号密封封装采用了弹性体与金属挤压相结合的密封技术, 可适应飞行过程真空、温度与月尘等复杂环境, 密封漏率优于 $4.5 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$, 可防止月球样品经历 $38 \times 10^4 \text{ km}$ 的空间飞行及回收过程中力、热等复杂环境受污染, 根据嫦娥五号飞行过程, 按式(6)可确保返回地球后内部气压不大于 5 Pa. 此外, 在密封封装装置外部一体化设计了导向与棘齿, 协同完成月球轨道交会对接过程中样品容器从上升器转移至返回器中, 如图 10 所示.

4.4 视觉标识产品

嫦娥五号采样封装合作视觉标识共有 4 个部分, 两两分布在着陆器和上升器上, 如图 11 所示. 其中着陆器顶面的视觉标识主要支持完成月面表取放样、表取容器抓取等过程的位姿测量, 上升器顶面的视觉标识主要支持完成向密封容器直接放样、表取初级封装容器

向密封封装装置内部转移过程的位姿测量.

受器上布局与重量约束, 嫦娥五号视觉标识采用了分布式平面对角型设计, 采用光纤激光器实现视觉标识高精度刻蚀, 对角点位置精度优于 0.01 mm, 具有结构简单、重量轻、精度高、性能稳定等特点.

5 实施结果

嫦娥五号探测器着上组合体成功着陆于月球表面后, 按照飞行程序在月面开展了采样封装工作, 先后完成了钻取采样、表取采样以及密封封装工作, 成功获取约 1731 g 月球样品.

2020 年 12 月 2 日 1 时 47 分至 4 时 54 分, 历时约 3.12 h

图 10 (网络版彩图)嫦娥五号密封封装装置示意
Figure 10 (Color online) The sealing device of Chang'e-5.

图 11 (网络版彩图)嫦娥五号采样封装视觉标识示意. (a) 着陆器视觉标识; (b) 上升器视觉标识

Figure 11 (Color online) The vision markers of Chang'e-5. (a) The vision on lander markers; (b) the vision on ascender markers.

完成了月面钻取采样与密封开盖工作。正常完成了月面钻进取芯、提芯整形、密封开盖、分离转移、展开避让过程,如图12所示,期间钻取采样装置钻进运动约1.68 m,月壤有效钻进行程约为1 m,密封封装装置169 s开盖到位,钻取初级封装容器及样品成功进入密封封装装置。

2020年12月2日6时33分至22时22分,历时约15.82 h完成了月面表取采样、密封闭盖与金属密封工作。正常完成了机械臂展开、初级封装开盖、多次触月/非触月采样、多次样品转移、样品观测、初级封装闭盖、抓罐、提罐、放罐及表取避让过程,如图13所示,期间开展2次触月采样及放样、10次非触月采样及放样,表取初级封装容器及样品成功进入密封封装装置,密封封装装置正常完成月面密封。

2020年12月3日14时6分至14时46分,历时约40 min完成了嫦娥五号上升器月面起飞前状态检查,对着上组合体相关部位进行了成像检查,表取采样机械臂上的远摄相机、近摄相机获取了着上组合体与着陆点邻近区域图像,如图14所示,为嫦娥五号着陆区及着陆状态分析提供了直观的图像数据。

6 结论

本文根据嫦娥五号任务特点,分析了月面采样封装的难点,论述了钻表异构采样、非定结构密封封装、复杂场景高精度视觉测量、器地一体化操控以及集成验证方案,阐述了产品研制实现情况,并通过嫦娥五号月面采样封装实施情况,对采样封装设计的正确

图12 (网络版彩图)嫦娥五号月面钻取采样与密封开盖图像。(a) 钻进取芯;(b) 提芯整形;(c) 密封开盖;(d) 整形状态检查;(e) 分离转移;(f) 展开避让

Figure 12 (Color online) The images of drill and sealing device work process. (a) Drilling and coring process; (b) winding and packing process; (c) open the lid of sealing device; (d) check the state of packing; (e) separation and transfer process; (f) deploy and avoidance process.

图13 (网络版彩图)嫦娥五号月面表取采样与密封工作图像。(a) 机械臂展开;(b) 初级封装开盖;(c) 触月;(d) 铲挖;(e) 样品观测;(f) 抓罐;(g) 放罐;(h) 密封闭盖;(i) 金属密封;(j) 避让

Figure 13 (Color online) The images of surface sampling and sealing device work process. (a) Manipulator deploy; (b) open the lid of junior encapsulation device; (c) touch the Moon; (d) excavation; (e) sample observation; (f) grasp the container; (g) release the container; (h) close the lid of sealing device; (i) metal sealing; (j) manipulator avoidance.

图 14 (网络版彩图)嫦娥五号月面起飞前状态检查图像。(a) 近摄相机; (b) 远摄相机

Figure 14 (Color online) Check the state of spacecraft before flying off. (a) Near camera; (b) far camera.

性进行了确认。

嫦娥五号经过约19 h的月面采样封装工作, 成功获取了深度剖面 and 多点表面月球样品约1731 g, 实现

了两类月球样品的初级封装与高纯环境密封, 经过约40 min的起飞前状态检查, 获取了大量着陆区图像数据, 可为嫦娥五号着陆点科学分析提供支持。

参考文献

- 1 Yang M F, Zhang G, Zhang W, et al. Technique design and realization of the circumlunar return and reentry spacecraft of 3rd phase of Chinese lunar exploration program (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 111–123 [杨孟飞, 张高, 张伍, 等. 探月三期月地高速再入返回飞行器技术设计与实现. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45: 111–123]
- 2 Heiken G H, Vaniman D T, French B M. *Lunar Source Book: A User's Guide to the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 5–6
- 3 Hill E, Mellin M J, Deane B, et al. Apollo sample 70051 and high- and low-Ti lunar soil simulants MLS-1A and JSC-1A: Implications for future lunar exploration. *J Geophys Res*, 2007, 112: E02006
- 4 Matsushima T, Katagiri J, Uesugi K, et al. 3D shape characterization and image-based DEM simulation of the lunar soil simulant FJS-1. *J Aerosp Eng*, 2009, 22: 15–23
- 5 Brunskill C, Lappas V. The effect of relative soil density on microrover trafficability under low ground pressure conditions. In: 11th European Regional Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems. Bremen, 2009. 331–341
- 6 Oravec H A, Zeng X, Asnani V M. Design and characterization of GRC-1: A soil for lunar terramechanics testing in earth-ambient conditions. *J TerraMech*, 2010, 47: 361–377
- 7 Spray J G. Generation of a lunar regolith agglutinate simulant using friction welding apparatus. *Planet Space Sci*, 2010, 58: 1771–1774
- 8 LaMarche C Q, Curtis J S, Metzger P T. Permeability of JSC-1A: A lunar soil simulant. *Icarus*, 2011, 212: 383–389
- 9 NASA. Papers presented to the conference on Luna 24. In: A Lunar Science Institute Topical Conference, 1977. 148–152
- 10 Surveyor Project Staff. Surveyor III Mission Report Part I: Mission Description and Performances. Technical Report. National Aeronautics and Space Administration, 1967. 169–170
- 11 Surveyor Project Staff. Surveyor VII Mission Report Part I: Mission Description and Performance. Technical Report. National Aeronautics and Space Administration, 1969. 102–103
- 12 Zheng Y H, Deng X J, Pang Y, et al. Research on classification of relative density in lunar regolith drilling (in Chinese). *Acta Aeronaut Astron Sin*, 2020, 41: 223391 [郑燕红, 邓湘金, 庞勇, 等. 月球风化层钻取采样过程密实度分类研究. *航空学报*, 2020, 41: 223391]
- 13 Zheng Y H, Deng X J, Peng J, et al. Lunar surface sampling device collision avoidance planning based on artificial potential field method (in Chinese). *Chin Space Sci Tech*, 2015, 35: 67–68 [郑燕红, 邓湘金, 彭兢, 等. 基于人工势场法的月球表层采样装置避障规划. *中国空间科学技术*, 2015, 35: 67–68]
- 14 Chen L P, Gu Z, Zheng Y H, et al. Coverage-enhancing method for view of micro camera on spacecraft (in Chinese). *Infrar Laser Eng*, 2020, 49(S1): 20200200 [陈丽平, 顾征, 郑燕红, 等. 一种航天器微小相机的视场覆盖增强方法. *红外与激光工程*, 2020, 49(S1): 20200200]

- 15 Zheng Y H, Deng X J, Yao M, et al. An intelligent approach for identification of lunar surface sampling soil (in Chinese). *J Astronaut*, 2020, 41: 1095–1096 [郑燕红, 邓湘金, 姚猛, 等. 月球表层采样样品智能确认方法. *宇航学报*, 2020, 41: 1095–1096]

Design and implementation of sampling, encapsulating, and sealing system of Chang'e-5

DENG XiangJin¹, ZHENG YanHong¹, JIN ShengYi¹, YAO Meng¹, ZHAO ZhiHui¹, LI HaoLin², JIANG ShuiQing¹ & WANG GuoXin³

¹ *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;*

² *Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;*

³ *Beijing Spacecrafts, Beijing 100080, China*

Chang'e-5 explorers realized the first extraterrestrial body sample return mission of China. The sampling, encapsulating, and sealing processes are one of the critical links in Chang'e-5 mission. The depth-section samples of lunar subsurface and multipoint samples of the lunar surface were acquired successively, and all the lunar samples were sealed using very low leaking-rate encapsulation. Here, we first analyze the task characteristics of lunar sampling, encapsulation, and sealing. Then, we discuss the important approaches on high reliable sampling, unfixed structure encapsulation, measurement of key manipulation, system integrated verification, and teleoperation on the lunar surface. The technology features in the flight-model development process are presented. Then, the implementation of lunar drilling, surface sampling, sealing, and state checking during Chang'e-5 mission is summarized. It is confirmed that the scheme of the sampling, encapsulation and sealing system is correct, and the teleoperation approach is efficient.

Chang'e-5, sampling and encapsulation, drilling, surface sampling, sealing

doi: [10.1360/SST-2021-0093](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0093)