

# 地外天体采样任务特点及关键技术发展建议

郑燕红, 邓湘金, 赵志晖, 姚 猛

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:**地外天体采样是研究地外天体起源、演变的重要手段。详细介绍了国内外地外天体采样技术的发展情况, 从资源约束、对象特性、重力与温度环境等方面, 分析了地外天体采样任务的特点, 梳理了钻取采样、铲挖采样、地面验证等方面的关键技术, 研究结果可以为我国地外天体采样技术的发展提供参考。

**关键词:**地外天体; 采样; 关键技术

**中图分类号:** P634; V476.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-7428(2014)09-0071-04

**The Character and Key Technology Suggestion of Extraterrestrial Sampling Mission/ZHENG Yan-hong, DENG Xiang-jin, ZHAO Zhi-hui, YAO Meng** (Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Extraterrestrial Sampling is an important method to research the origin and evolutionary process. The development of extraterrestrial body sampling mission was introduced in detail. The characters, such as resource constraints, sampling object, gravity, temperature, of sampling mission was analyzed. And then the key technology of drill, excavation, and verification were proposed. The results provide advisory opinion for China extraterrestrial sampling mission.

**Key words:** extraterrestrial body; sampling mission; key technology

## 0 引言

我国探月工程确定了“绕、落、回”三步走的发展思路<sup>[1]</sup>, 嫦娥一号和嫦娥三号任务的圆满成功, 标志着我国已突破“绕”、“落”关键技术, 嫦娥五号任务的研制, 标志着我国已进入月球采样返回任务实施阶段。

我国目前深空探测主要集中在月球探测, 同时也开展了对火星探测、小行星探测、金星探测等总体方案和关键技术研究工作。地外天体采样是研究地外天体起源、演变的重要手段, 目前美国、俄罗斯、日本、欧洲等主要航天组织都已实施过地外天体采样任务, 探测的主要形式包括就位采样、分析采样、返回等, 未来一段时间内, 地外天体采样仍将是深空探测任务中的热点之一。

本文首先简要介绍国内外地外天体采样的发展现状, 然后分析地外采样任务的主要特点, 最后结合我国地外采样技术的发展情况, 探讨相关关键技术发展需求。

## 1 地外天体采样发展现状

美国是开展地外天体采样任务次数最多、目标天体最丰富、成果最显著的国家。20 世纪六、七十年代, 先后实施的勘查者 (Surveyor) 任务、阿波罗

(Apollo) 任务开展了月球采样<sup>[2,3]</sup>, 阿波罗任务获取了约 381.7 kg 月球样品, 发射了海盗 (Viking) 1、2 探测器登陆火星, 成功实现了火星土壤铲挖任务; 20 世纪 90 年代末, 发射了星尘 (Stardust) 探测器, 通过气凝胶样品采集器成功实现了对 81P/wild-2 彗星慧核粒子的采集。进入 21 世纪, 先后发射了凤凰号 (Phoenix)、好奇号 (Curiosity) 对火星进行土壤样品采集与原位探测, 并计划于 2016 年左右发射洞察号着陆器对火星深层土壤进行钻探, 计划于 2024 年左右开展火星无人采样返回 (MSR) 任务, 同时以小行星 1999RQ36 为目标天体, 正在开展欧西里斯 (OSIRIS) 小行星采样返回任务研究。火星和小行星将成为美国未来一段时间内地外天体采样任务的重要目标。

苏联是首个实现地外天体无人采样返回的国家。20 世纪六、七十年代, 月球任务 (Luna Program) 先后发射了多个探测器, 开展了月球采样返回任务, 月球 16/20/24 三次任务成功获取了约 0.32 kg 月球样品。进入 21 世纪后, 俄罗斯实施了火卫一 (Phobos Grunt) 采样任务, 由于发动机无法开启, 未能进入预定轨道; 随后俄罗斯调整了其地外天体探测计划, 预计于 2016~2017 年发射月球 25, 配置机械臂与钻取机构, 对月球土壤进行探测; 计划于 2020、2021 分两次先后发射月球 28 巡视器与着陆

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 国家重大科技专项工程

作者简介: 郑燕红 (1982-), 男 (汉族), 重庆人, 北京空间飞行器总体设计部工程师, 控制科学与工程专业, 博士, 从事为地外天体采样封装技术、航天器总体设计等方面的工作, 北京市海淀区友谊路 104 号 5142 信箱 373 分箱, 2006prospect@163.com。

器,实现约 1 kg 水冰土样品采集。月球将成为俄罗斯未来一段时间内地外天体采样任务的重要目标。

日本是首个实现小行星采样返回任务的国家。2003年,日本发射了隼鸟(Hayabusa)1号探测器,利用射弹造成的土壤溅射完成了对小行星 25413(丝川)的样品采集<sup>[4]</sup>,获取了约 1500 个粒径 < 1 mm 的颗粒,成为第一个将小行星样品带回地球的国家。目前,日本在继承隼鸟 1 号采样装置的基础上开展隼鸟 2 号研制工作,原计划于 2014 年发射,飞往小行星 1999JU3。日本在今后一段时间内将力争保持其在小天体采样返回领域的领先地位。

欧洲航天局(ESA)也开展了多种目标的地外天体采样任务。在火星探测方面,2003年,猎兔犬(Beagle)2号随火星快车(Mar Express)一同升空,其配置的机械臂与岩心研磨器拟开展火星样品采集工作,由于着陆失败,未能完成预定任务。目前欧空局计划在 2016~2018 年发射火星生物学计划(Exo-Mars)的探测器,拟实现多钻杆火星钻探采样任务。在小天体探测方面,2004年,菲莱(Philae)着陆器携带钻探采样装置随同罗塞塔(Rosetta)探测器<sup>[5]</sup>前往 67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星,预计将在 2014 年 11 月开展彗星采样任务;欧空局同时计划在 2022 或 2023 年实施马可波罗(Marco Polo-R)计划<sup>[6]</sup>,对小行星 2008EV5 开展采样返回任务。

嫦娥一号、嫦娥二号和嫦娥三号任务均取得圆满成功,随后我国将在 2020 年前后发射探测器实现月球样品采样返回任务。

## 2 地外天体采样任务的主要特点

目前地外天体采样的主要对象为天体表层或浅层物质,主要的采样方式有:钻探采样、铲挖采样、溅射采样(如射弹轰击、高压气体吹拂、轮刷卷扬)等,地外天体采样任务主要存在如下几方面的特点。

### 2.1 多重资源约束

深空探测器可以分为载人探测器和无人探测器两类。载人探测器在采样任务实施过程中,宇航员利用采样机构,开展采样工作;无人探测器则依靠采样控制器与采样机构的密切配合实现样品采集。无论在哪一种探测方式下,所有采样机构和采样控制器均需进行尽可能的减小质量,降低功耗,优化布局。

由于运载火箭发射能力及成本的原因,探测器的重量资源紧张,如月球 24 采样装置质量 > 55 kg,凤凰号铲挖机械臂质量 > 9.7 kg。此外,在产品设计和研制过程中,还需尽可能采用低功耗技术。

其次,受限于探测器构形布局设计,采样机构本身的构形需根据探测器布局情况进行适应性设计,

无论是原位分析,还是采样返回任务,采样机构均需考虑布局空间大小、采样工作范围需求、与科学仪器或样品舱的接口方式等约束,实现优化的布局设计。

### 2.2 采样对象具有一定的不确定知性

迄今为止,人类开展的所有地外天体采样工作,其主要目标是进一步认识采样对象,从而研究目标天体的起源和演化。因此,在进行采样之前,我们对采样对象的很多特性和特点的认识不是非常充分。

此外,当确定采样的目标天体后,天体不同着陆点、不同深度下的土壤特性也存在较大差异和不确定性,这对采样方式的选择、采样过程的实施均有重要影响。研究表明,地外天体的化学成分、颗粒形态、粒径级配、相对密度等是影响采样效果的重要因素。通过对已获取的月壤样品分析发现,月海土壤化学特性与地球上的玄武岩或玄武质火山渣接近,月陆土壤化学特性则接近于富钙钙长石或斜长石,在颗粒形态方面多为棱角状或次棱角状。然而不同采样点、不同采样深度下的月壤粒径级配、相对密度则存在较大差异,这对采样机构设计带来较大难度。

表 1 为阿波罗任务中,不同区域获得的铲挖月球样品的粒径级配统计情况。从表 1 中可见,不同区域的粒径构成尤其是大颗粒含量存在一定的差异。其中大于 1 cm 颗粒质量百分比偏差 > 3%。大颗粒对铲挖采样的铲斗开口大小、钻探采样的螺旋槽间距与钻具内径、溅射采样的起尘方式等均有直接影响。根据阿波罗现场拍摄的图片可以看出,即使同样都在月海或月陆区域,不同地点的月球表面物质,其粒径分布差异也较大,有些地点表面有大量漂石,有些地点表面没有大块石头。

表 1 不同区域月壤样品粒径级配情况(质量百分比)/%

区域	粒径/mm				
	<1	1~2	2~4	4~10	>100
月海	89.12	3.09	2.31	1.60	3.89
月陆	85.75	5.59	3.90	3.85	0.91
交界	84.31	3.87	3.41	3.74	4.67

表 2 为研究人员汇集阿波罗、月球计划数据对月面撞击坑内相对密度的估计值。可见月球风化层不同深度下月壤相对密度存在一定差异,从表中数据来看随着深度的增加,相对密度存在增加的趋势,阿波罗 15 在位置 9A 获取的 30~65 cm 月球样品相对密度更是达到了 97%。由于溅射采样主要获取地外天体表面样品,其受相对密度变化影响较小,但表层土壤越密实,起尘难度越大,需在任务实施前对目标天体表层土壤状态有较为细致的了解;对于铲挖采样,浅表层土壤的相对密度直接影响机械臂各关节力矩、末端作用力需求;对于钻探采样,钻进土壤

的深度远大于溅射采样与铲挖采样,钻进机具、钻取控制系统需适应不同相对密度下的土壤负载特性。

表2 月面撞击坑相对密度估计数据<sup>[8]</sup>

月壤深度/cm	平均相对密度/%	月壤深度/cm	平均相对密度/%
0~15	65±3	30~60	92±3
0~30	74±3	0~60	83±3

### 2.3 低重力/极低重力环境约束

目前,各国主要针对月球、火星、近地小行星或彗星开展采样任务。火星重力约为地球的1/3,月球重力约为地球的1/6,小行星、彗星的重力场则更弱,如丝川小行星表面重力加速度约为 $0.0001\text{ m/s}^2$ ,可见地外天体采样主要是在低重力/极低重力环境下完成的。需要采用反作用相对较小的采样方式,以便采样机构能够在低重力/极低重力状态下完成土壤样品采集;对于小行星、彗星等极低重力天体,需通过特殊设计实现探测器与天体表面的固定,实现一系列采样动作,或通过探测器与天体的交会过程,实现短时接触获取表层样品。

### 2.4 严酷的温度环境约束

月球表面为真空环境,表面温度约为 $-180\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ ,变化范围较大;火星表面大气也十分稀薄,火星赤道的地面温度为 $-113\sim 7\text{ }^\circ\text{C}$ ,全年平均温度约为 $-58\text{ }^\circ\text{C}$ ;菲莱着陆器将实施采样任务的67P/Churyumov-Gerasimenko彗星表面压力约为 $10^{-5}\text{ mbar}$ ,需在 $-140\text{ }^\circ\text{C}$ 下完成采样过程;金星表面被稠密的二氧化碳包覆,表面温度高达 $470\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,采样机构设计过程中,需要考虑其对严酷温度的适应能力。

在工作过程中,由于溅射采样、铲挖采样深度较小,采样机具与土壤相互作用时间较短,采样过程中的温度变化不明显。但对于钻探采样,由于钻具与土壤较长时间内相互作用,且散热困难,高速回转可能导致钻杆、钻具温度可能急剧上升,采样机具可能无法正常工作甚至损坏。因此,钻探采样需重点关注良好的导热设计和排屑散热,在保护钻取目标尽量不受高温影响时,还需严格控制进给速度和回转速度。

## 3 我国地外天体采样关键技术建议

根据我国2030年前深空探测整体规划,未来一段时间内无人深空探测的采样就位分析和采样返回目标天体主要是月球、小行星、火星等。

从地外天体采样的特点来看,探测器资源约束和目标天体特性对采样任务的实施具有重要影响,很难有一种采样机构可以完全同时适应月球、火星、小行星、彗星土壤样品的采集。我国在地外天体采样技术方面,起步相对较晚,与航天强国还有一定差

距,应针对如下几方面关键技术开展攻关,推动我国地外天体样品采集技术的发展。

### 3.1 可靠高效钻取采样技术

钻取采样技术是获取地外天体浅表层、深层样品的重要手段,前苏联月球16/20/24三次任务、阿波罗表面螺旋钻机均采用了钻取采样方式,它们让人类有机会了解月球风化层约3 m深度内的月壤特性。目前,国外研究机构已开展了多种10 m及以深的钻取采样样机研制,以获取更深层的土壤特性。

目前国内开展了具有约2 m钻取采样能力的钻取采样机构研制,可实现玄武岩颗粒物质在100%相对密度条件下的钻进采样。哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、中国地质大学(武汉)等国内高校均开展了较为深入的月球钻取采样技术研究和原理样机研制工作。上述钻取采样工作主要集中在单杆钻进方式,并且工作对象主要是月球表面的风化物质。单杆钻进方式对构形布局资源需求相对较大,钻头和钻杆等机具主要适应类月球风化物质。

我国在钻取采样技术方面的重点应是:可靠高效钻具技术、可靠集约化级联杆钻机技术、高效轻量化回转驱动机构技术等。

(1)可靠高效钻具技术的研究目标是获得高可靠性、高效率的钻具产品,该技术应具有:较好破碎能力、较高钻进能效比、较优散热能力、最低限度破坏样品关注特性、宽温度适应范围等特征。

(2)可靠集约化级联杆钻机技术的研究目标是获得体积高度优化的级联杆钻机产品,该技术应具有:高可靠性、钻进长度数倍于钻机安装的最大尺寸、宽温度适应范围等特征。

(3)高效轻量化回转驱动机构技术的研究目标是获得机电转换效率高、机械传动效率高、轻量化的回转驱动组件产品,该技术应具有:高效率电机、低摩擦力减速器、优化的构形、宽温度适应范围等特点。

### 3.2 轻量化铲挖采样技术

在铲挖采样、溅射等采样方式中,机械臂扮演了重要的角色。美国的勘查者、海盗、凤凰等任务中均使用机械臂开展了铲挖工作,凤凰探测器机械臂具有4个自由度,伸展长度约2.35 m,可对冰水混合物进行铲挖,质量仅为9.7 kg。

目前国内开展了具有4个自由度的表取采样机构研制,伸展长度 $>3.5\text{ m}$ ,质量 $>18\text{ kg}$ ,可实现玄武岩颗粒物质在85%相对密度条件下的铲挖采样。

哈尔滨工业大学、重庆大学等高校均开展了较深入的月球表面采样技术研究,并研制了表取采样原理样机。

采样机械臂的主要难点是在苛刻的重量约束条

件下应仍能保持较高的性能需求。在实际任务中,为了满足一定范围的倾斜姿态等环境,机械臂应尽可能具有多自由度和较大的采样可达区域<sup>[8]</sup>。并且在样品倾泻等位置,机械臂应具有较高的重复定位精度,确保样品倾泻等动作正确完成。但是,由于深空探测器非常紧张的重量资源约束,用于铲挖采样任务的机械臂重量应尽可能轻,苛刻的重量约束条件下,机械臂不可避免地具有较大柔性,在工程中需采取很多措施和方法,才能满足预期的重复定位精度。此外,对于月面铲挖采样任务而言,另外一个高难挑战是高温适应性。为了应对高温环境,需要选用质量相对较大的高温电机、高温传感器等部件,同时还需要采用高效散热组件或主动温控措施,这些措施的采用均将导致重量增加,为轻量化产品研发带来了更大困难。

我国在表取采样技术方面的重点应是:轻量化大扭矩关节技术、轻量化高刚度机械臂杆技术、轻量化采样器技术等。

(1)轻量化大扭矩关节技术的研究目标是获得轻重量的大扭矩关节组件产品,该技术应具有:质量轻、大扭矩输出、定位精度高、高效率电机、低摩擦力减速度器、优化的构形、宽温度适应范围等特点。

(2)轻量化高刚度机械臂杆技术的研究目标是获得轻质量的高刚度机械臂杆产品,该技术应具有:质量轻、高刚度、宽温度适应范围、优化的构形等特点。

(3)轻量化采样器技术的研究目标是获得轻质量的采样器组件产品,该技术应具有:质量轻、适应铲/挖/夹取颗粒物质、低功耗、宽温度适应范围、优化的构形等特点。

### 3.3 采样地面验证技术

钻取采样和铲挖采样机构需要通过系统、规范的地面试验验证,才能确认是否能够适应目标天体的工作环境,能否顺利完成预定的采样任务。

前苏联月球任务和美国阿波罗任务中,均建立了庞大的月面环境模拟系统,确认采样机构和其他设备能够在月球表面正常工作。

目前国内构建了能够实现多种模拟月壤、多种倾斜姿态、多种着陆高度、月面高温、月球低重力(1/6地球重力)等环境模拟能力的采样过程试验验证系统。

哈尔滨工业大学、重庆大学、中国地质大学(武汉)、北京航空航天大学、北京工业大学等国内高校,开展了针对性的采样地面验证技术研究,并开展了实际产品研发工作。

我国在采样地面验证技术方面的重点应是:目

标采样物质模拟技术、低重力或零重力补偿技术、遥操作技术等。

(1)目标采样物质模拟技术的研究目标是获得关注特性与目标采样物质相近的模拟物,该技术应具有:能够准确选择关键特性参数、现有技术可实现设定的关键参数、可大规模生产制备模拟物质等。

(2)低重力或零重力补偿技术的研究目标是获得高精度补偿能力的低重力或零重力补偿装置,该技术应具有:补偿精度高、结构优化、负载适应能力强、较强容尘能力、宽温度适应范围等。

(3)遥操作技术的研究目标是获得地面远距离准确操作采样设备的遥操作系统,该技术具有:快速准确的场景分析和建模、快速准确的动作任务规划与分析、快速准确的指令生成和验证等。

## 4 结语

地外天体采样已成为未来一段时间内深空探测任务的热点领域,我国在地外天体采样技术方面起步较晚,与国际先进水平还存在一定差距,通过相关预先研究项目和探月工程的实施,我国已基本掌握月球表面的钻取采样和铲挖采样等关键技术,将建立一套初级的月球采样地面验证系统,为火星、小行星等地外天体的采样技术积累基础和条件。本文根据地外天体采样技术的目前状况和相关特点,针对我国后续地外采样发展,提出了应重点关注的关键技术。

## 参考文献:

- [1] 叶培建,邓湘金,彭兢.国外深空探测态势特点与启示(上)[J].航天器环境工程,2008,25(5):403-405.
- [2] NASA. Apollo program summary report synopsis of the Apollo program activities and technology for lunar exploration[R]. Houston: Lyndon B. Johnson Space Center,1975.
- [3] John C. Craf. Lunar soils grain size catalog[J]. NASA,1993:12-326.
- [4] Hitoshi Kuninaka, Jun'ichiro Kawaguchi. Deep space flight of Hayabusa asteroid explorer[J]. Proc. of SPIE. 2008:696002-1~696002-10.
- [5] YOSEPH B C, KRIS Z. Drilling in extreme environments - penetration and sampling on Earth and other planets[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2009. 499-501.
- [6] Michel P, Barucci M. A, Cheng A. F et al. MarcoPolo - R; near earth asteroid sample return mission selected for the assessment study phase of the ESA program cosmic vision[J]. Acta Astronautica, 2012:530-538.
- [7] 郑燕红,邓湘金,庞彧,等.着陆姿态对地外天体表层采样的影响研究[J].航天器工程,2013,22(5):28-33.
- [8] GRANT H H, DAVID T V, BEVAN M F. Lunar sourcebook - a user's guide to the moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 497-500.