

行星采样返回任务的样品防护技术研究进展

徐侃彦¹, 温博¹, 印红², 马珺¹, 张兰涛¹, 邹乐洋¹, 彭兢¹

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100194; 2. 航天神舟生物科技集团有限公司, 北京 100094)

摘要: 采样返回任务人类研究宇宙重大科学问题最有效的任务形式。然而采样返回任务的科学意义是建立在保护样品免遭地球污染的基础上的, 同时, 从地球安全考虑, 还需要防止来自可能存在地外生命的天体的返回样品对地球的生物风险, 因此采样返回任务需要对样品采取严格的防护措施。首先梳理了采样返回任务对样品防护的需求; 回顾了国外主要采样返回任务对样品采取的防护措施, 其中重点分析了正在进行的火星2020任务的样品防护技术; 进而, 针对典型采样返回任务提炼出四条与样品防护有关的关键技术, 包括: 飞行硬件的清洁和灭菌技术、发射前和发射后的二次污染防护技术、返回样品的密闭封装技术, 以及返回样品的地面隔离和处理技术, 并梳理了任务各阶段所需要开展的样品防护工作; 最后, 对中国未来火星采样返回任务的样品防护工作提出了建议。

关键词: 采样返回任务; 行星保护; 清洁灭菌; 二次污染防护; 切断接触链

中图分类号: V41; V57

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)03-0241-11

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20220098

引用格式: 徐侃彦, 温博, 印红, 等. 行星采样返回任务的样品防护技术研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(3): 241-251.

Reference format: XU K Y, WEN B, YIN H, et al. Review of sample protection of sampling return mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(3): 241-251.

引言

深空探索活动的主要目标之一就是探寻包括宇宙生命起源、地外生命探索等重大科学问题的答案。自从人类进入深空探测时代以来, 已经利用轨道器、着陆器和巡视器(星球车)上搭载的科学仪器, 对包括月球、金星、小行星、火星等地外天体进行了大量的科学探测和研究, 但由于科学载荷重量、体积以及功耗的限制, 探测器实地研究得到的科学成果有限, 甚至得到模棱两可的结论。与此相比, 采样返回任务从地外天体采集样品返回地球, 再在地面实验室内进行研究, 既可以充分利用最先进的仪器设备和人力资源, 又能在现有技术无法满足研究要求的情况下, 对样品进行长期保存, 等待更先进的技术的发现, 从而更充分的利用样品的科学价值。采样返回任务相比在地外天体表面的原位探测任务具有更高的投入产出比, 因此, 近年来, 国内外航天界对于采样返回任务日益重视。

人类第一次自地外天体采集样品是1969年美国的“阿波罗11号”(Apollo 11)任务, 从那以后, 美国、前苏联、日本等国先后针对月球、小行星、彗星和星

际尘埃开展了10余次采样返回任务(表1)^[1-2], 从地球外的天体采集了上百千克的样品。并从中得到了大量有价值的科学成果^[3-7]。中国也于2020年成功开展了“嫦娥五号”月球采样返回任务, 从而成为继美国和前苏联之后第3个自主获取月球样品的国家。

表1 国外采样返回任务一览表

Table 1 The list of foreign sampling return mission

序号	任务	样品返回时间	目标天体	实施国家	任务状况
1	阿波罗11	1969	月球	美国	成功
2	阿波罗12	1969	月球	美国	成功
3	阿波罗13	1970	月球	美国	失败
4	月球16	1970	月球	苏联	成功
5	阿波罗14	1971	月球	美国	成功
6	阿波罗15	1971	月球	美国	成功
7	阿波罗16	1972	月球	美国	成功
8	阿波罗17	1972	月球	美国	成功
9	月球20	1972	月球	苏联	成功
10	月球24	1976	月球	苏联	成功
11	起源号	2001发射	星际尘埃	美国	失败
12	星尘	2006	彗星81P/Wild 2	美国	成功
13	隼鸟1号	2010	小行星25143Itokawa	日本	成功
14	福布斯土壤	2011发射	火卫一	俄罗斯	失败
15	隼鸟2号	2020	小行星162173Ryugu	日本	成功

收稿日期: 2022-11-09 修回日期: 2022-12-23

基金项目: 载人航天领域第四批预先研究项目

火星是太阳系中与地球环境最接近的地外天体,也是目前公认的最可能存在地外生命的星球,因此对火星返回样品的研究具有极其重要的宇宙生物学意义。美国和欧洲早在20世纪末就开始对火星采样返回进行论证,并于2019年确定合作开展火星采样返回任务系列,该任务系列的第一阶段——火星2020任务已经发射并在火星表面成功采集到样品,按项目的时间表样品将于2031—2033年返回地球^[8]。

1 采样返回任务对样品防护的需求

采样返回任务的科学意义是建立在对样品有效防护的基础上的。一旦样品在采集、封装、返回以及地面储存和研究过程中,受到地球物质的污染,则针对该样品的大部分科学研究成果都将受到质疑,采样返回任务的科学意义也将大大降低^[9-10]。为此,对于采样返回任务,针对样品的防护技术是确保任务科学目标实现的关键。

对样品防护的等级要求是由任务的科学目标决定的。如果科学目标包括寻找样品中的地外生命形式,则应采取生物污染防治措施,避免地球生物对地外生命探测的干扰;如果任务需要通过寻找样品所在天体中生物大分子或有机分子存在的证据来研究宇宙生命的化学进化过程,则除了生物污染防治以外,还需对样品采取有机污染防治措施;如果任务需要研究样品所在天体的物质或元素组成,则还需要对样品采取无机污染防治措施。因此为确定采样返回任务对样品的防护等级和具体防护措施,需要首先明确任务的科学目标。

除了科学研究的需要以外,采样返回任务对样品的防护也是为了满足行星保护的需求。所谓行星保护,是指在太空探索过程中,为避免地球生物污染太阳系其它星球(包括行星、月球、彗星等),以及保护地球免遭来自太阳系其它星球的生物侵袭所采取的行为^[11-12]。其中对地球微生物污染其他星球的防护被称为前向污染防治,而防护地外生物污染地球的行为被称为返向污染防治^[13]。联合国委托空间研究委员会(Committee for Space Research, COSPAR)负责行星保护政策的制定。1967年生效的“外太空条约”为行星保护提供了法理依据,其中第九条明确规定“开展包括对月球和其它行星在内的外太空研究和探索时,……要避免地球外的物质导致地球环境产生有害变化,在必要时应采取适当的措施达到上述目的。”由于地球环境对人类生存的重要性,开展针对火星等可能存在地外生命的天体的采样返回任务必须对返回样品采取严

格的隔离防护措施^[14]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)针对即将开展的火星采样返回任务,从20世纪末就开始规划以行星保护为目的的样品生物污染防治技术研究^[15-17],分别形成了一系列符合COSPAR政策要求的行星保护执行文件以及针对返回样品的处理计划^[18-20]。

随着中国小行星采样返回任务的正式启动,以及后续火星采样返回任务规划论证的推进,研究开发必要的样品防护技术的必要性和紧迫性日益彰显。本文主要通过回顾国外主要采样返回任务的样品防护工作,从中提炼出开展样品防护所必须研究的关键技术,并梳理了采样返回任务不同阶段样品防护所需要开展的工作,最后对中国未来采样返回任务的样品防护提出了建议。

2 主要采样返回任务的样品防护措施举例

2.1 “阿波罗”(Apollo)计划对月球样品的防护

美国的“阿波罗”(Apollo)计划是人类历史上第一次从地外天体采集样品并返回地球,由于当时对月球环境的认识有限,出于对地球生物圈安全的重视,阿波罗计划对从月球返回的样品采取了在当时技术条件下可实现的最严格的防护措施^[21]。

2.1.1 月球样品接收实验室的建立

为确保月球样品处于“严格管理、无污染、无菌的环境”之中,NASA专为“阿波罗”计划建造了一个“月球样品回收实验室”(Lunar Receiving Laboratory, LRL),LRL的3个主要目标包括:①防止地球环境不被任何由任务携带回来的月球生命体污染;②防止月球样品不被地球大气以及微生物污染,确保样品检测结果的可信度;③评估月球样品是否能与地球环境接触。

LRL的主要功能设施包括:用于接收和处理月球样品的真空舱、双向生物隔离间、能实现双向空气消毒的空气调节系统,以及用于分析样品辐射特性、理化特性和生物风险的多种样品分析实验室。除了接收月球样品以外,LRL还负责对航天员和返回后的隔离和健康观察。

LRL于1966年正式开始建造,1967年完工,在1969年“阿波罗11号”发射之前,LRL已经完成了所有设施的调试,做好了接收月球样品的准备。

2.1.2 月球样品返回后的隔离运输

为确保月球样品在地球着陆回收后的密闭隔离,

NASA将一款家用拖车改造成为一台移动隔离设施(Mobile Quarantine Facility, MQF),MQF所采取的隔离条件包括:内部负气压、流动空气过滤、固定性废物存储罐、防泄露阀门转运系统等。

在“阿波罗11号”的指令舱回收后,回收组用转移通道连接指令舱和MQF,装有月球样品的容器通过转移管运进MQF中进行隔离。为确保尽快对月球样品进行分析,样品容器在MQF中初步消毒处理后,将通过空运运输到LRL,样品容器从MQF转出时,先在MQF双层转移门中用次氯酸对容器表面进行浸泡消毒处理,再从外部打开阀门取出。

2.1.3 月球样品的初始处理

月球样品容器到达LRL后,先用紫外辐照和过氧化乙酸进行两次消毒处理,再用无菌水清洗,在氮气环境下干燥后,最后通过真空阀送入真空手套箱,手套箱内的气压与月球表面相同。研究人员利用操作手套打开样品容器,对月球样品进行初步观测、分析、摄影和记录归档。由于真空手套箱难以对样品进行精细操作,后期技术人员用洁净干燥氮气代替了真空条件。

2.1.4 月球样品的隔离和风险评估

月球样品按规定在LRL需要隔离50~80 d,期间研究人员对样品进行了大量的生物检测和生物风险评估试验,包括:显微观测、细菌学分析,病毒学分析,动物和植物感染试验,等等。在所有实验数据均确认月球样品中不含有地外生命形式且不会对地球环境带来危害后,月球样品才被解除隔离防护。

2.1.5 对后续深空探测任务的影响

通过对“阿波罗11号”返回的月球样品的研究,人们认识到月球样品对地球生物圈不构成威胁,因此从第2次发射任务之后,对于月球样品的隔离管理逐渐放松,并于1971年被取消。1984年COSPAR开始按任务分类制定行星保护政策之后,月球采样返回任务被归类为“非限制性地球返回”任务,这意味着月球样品返回地球不需要采取任何返回污染防治措施^[14]。但“阿波罗”计划中对返回样品的防护措施以及所采取的技术,为未来采样返回任务的样品的着陆后防护打下了坚实的技术基础。20世纪末NASA开始规划火星采样返回任务之时,明确建议火星返回样品在返回地球后的隔离防护和生物风险评估方案可在参考“阿波罗”计划的样品防护措施的技术上制定^[22]。

2.2 非限制性采样返回任务的样品防护

“阿波罗”计划结束之后,国外又陆续开展了多次针对不同天体的采样返回任务,按照COSPAR行星保护政策中的任务类别划分,这些任务均属于行星保护

等级V中的非限制性地球返回任务,不需要采取返回污染防治措施,但为了满足任务的科学目标,这些任务均对返回样品采取了严格的防护措施。

2.2.1 “隼鸟1号”(Hayabusa 1)的样品防护

日本的“隼鸟1号”任务实现了对小行星25143的采样返回。为了避免样品被地球物质污染,采用高纯度的异丙醇和甲醇/二氯甲烷溶液对样品收集器进行了超声清洁,返回样品在着陆后被保存在日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)的ISO 6洁净室中^[23-25]。但即便采集了上述严格的防护措施,一些污染事件仍难以避免,例如,对“隼鸟1号”返回样品的分析结果发现部分富碳颗粒和含铝的颗粒是源自样品容器的地球污染物,为此JAXA在“隼鸟2号”(Hayabusa 2)的设计中更换了样品采集容器的材料^[10]。

2.2.2 “星尘”(Stardust)任务的样品防护

NASA的Stardust项目的目标是捕捉彗星“Wild 2”的颗粒样品并返回地球,该项目最终收集到了数千个小于头发丝直径的彗星样品颗粒,以及24个肉眼可见的大颗粒,并于2006年返回地球。

“星尘”任务的样品采集方式为撞击式,即使彗星上有生命存在,速度达到子弹速度的6倍的高速撞击也足以杀死任何生命形式,因此NASA把该项目的行星保护等级定为第V级的非限制地球返回任务。然而,由于“星尘”任务的科学目标是分析彗星样品的物质组成,因此对样品的污染防控要求很高,为此NASA的团队在处理返回的彗星样品时,研究人员需身穿全套防护服,在ISO 4洁净间中对样品进行分析^[10]。

2.2.3 欧西里斯任务的样品防护

NASA正在进行的欧西里斯(Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer, OSIRIS-REx)任务是非限制性返回任务为满足科学研究需要进行样品防护的典型示例,欧西里斯任务的目标是收集碳质小行星Bennu的风化层样品,并研究其组成矿物和有机物质的性质和分布。因此需要对样品进行有机和无机污染防治以确保返回样品的“原始性”,为实现这一防护需求,任务团队必须确保样品在密封隔离的状态下返回地球,并在着陆回收之后继续保持隔离,防止与地面污染物发生接触从而干扰对样品的科学分析。任务团队通过污染源分析,认为对样品的污染风险主要来自于样品采集设备、样品收集过程中使用的气体、以及与样品储存、处理和加工相关的设备和操作。针对这些污染风险,任务团队设计了贯穿总装、集成和测试(Assemble, Integrate, and

Test, AIT)全周期的样品防护措施:在探测器材料选择方面,为了防止氨基酸污染样品收集设备,任何能分解生成氨基酸的聚合物材料,诸如尼龙和乳胶都被禁止使用;探测器的AIT过程在ISO7洁净环境中进行,并采取了必要措施使采样相关硬件尽量不暴露在环境中;如因操作需要必须使采样相关硬件暴露时,洁净室内严格控制操作人员数量,只允许执行工作所必需的人员进入;在AIT过程中,所有操作人员均穿着不含尼龙成分的洁净操作服;通过NASA标准的精细清洁程序对探测器表面进行清洁处理,去除表面包括氨基酸在内的有机分子;等等。通过上述防护措施,“欧西里斯号”的采样头上总有机碳水平最终达到了 281 ng/cm^2 ,其中氨基酸水平为 0.96 ng/cm^2 ,远低于任务有机污染防控所要求的 180 ng/cm^2 的指标^[26]。

2.2.4 中国“嫦娥五号”任务的样品防护

作为中国首个采样返回任务,“嫦娥五号”在月球表面实现了全自动采样,并带回重达两千克的月壤样品回地球。虽然“嫦娥五号”任务属于非限制性采样返回任务,但为了确保样品的科学价值,“嫦娥五号”仍采用了大量的样品防护措施,其中,对可能与月球样品接触的产品,包括表取初级封装装置、选取采样装置以及密封封装装置,这些装置用无水乙醇进行了多次清洁操作,从而减少了月球样品被探测器系统污染的可能。为了满足月球样品的隔离密封要求,研制方设计了特殊的样品封装系统,整个封装系统重约 1.5 kg ,样品罐只有 360 g ,该系统通过漏斗式设计将样本倒入样本罐内,从而减少了样品收集过程对罐身的污染。此外,锁罐前会扫走溢出罐口的月壤,确保罐盖能妥善关好,以将罐内的样本密封锁紧。样品容器在返回地球的全过程,以及着陆后的运输期间完全处于真空密封状态,从而避免了样品被地球环境污染。此外,在地面处理阶段,专门设计的月壤解封系统避免了样品在容器解封和样品传递过程中遭到污染。

2.3 火星采样返回任务的样品防护

火星采样返回任务是人类历史上第一次实行星保护分类中的V类限制性返回任务。针对火星返回样品,NASA和ESA制定了前所未有的严格防护方案。

2.3.1 任务概述

火星采样返回任务系列由NASA和ESA合作进行,按最初制定的计划,任务将分3个阶段进行,第一阶段即NASA的火星2020任务,发射的“毅力号”(Perseverance)火星车负责采集和储存火星样品;第二阶段由ESA在2022年或2024年发射一个地球返回轨道器(Earth Return Orbiter, ERO),该轨道器将绕火星飞

行等待接收火星样品;第三阶段将在2026年或2028年发射一个样品回收着陆器,回收火星2020任务所采集的样品,再通过所携带的火星上升飞行器将样品容器(OS)发射到火星环绕轨道,被在轨道上等待的ERO捕获后返回地球。样品预计在2031—2033年返回地球^[27-28]。最近,NASA公布了火星采样返回任务的计划调整,取消样品回收着陆器上携带的火星车,改由“毅力号”火星车把样品管送到样品回收着陆器附近,再由样品回收着陆器的机械臂将样品转移到火星上升飞行器中,作为备用方案,样品回收着陆器携带的小型直升机将在毅力号无法完成样品转移任务时执行样品转移的工作^[29]。

作为任务的第一阶段,火星2020任务的科学目标是寻找火星上古代生命的迹象,识别、采集、记录和储存火星样品,为后续任务中样品返回地球进行分析创造条件。任务于2020年7月30日发射,2021年2月19到达火星,截至2022年8月,“毅力号”巡游器已经采集和封装了13个火星土壤样品和一个火星大气样品。

2.3.2 火星2020任务对样品防护的需求

根据NASA无人深空探测行星保护政策对V类限制性地球返回任务的行星保护要求,火星采样返回任务需要对返回的火星样品进行密闭隔离防护^[12,24]。同时,为满足任务的科学目标,还对样品提出了以下防护要求^[9]:

1) 有机污染防护:火星样品中具有生物学意义的有机化合物(如DNA)的污染水平小于 1 ppb ,总有机碳污染水平小于 10 ppb 。

2) 无机污染防护:火星样品的无机污染防护要求包括34种特定的元素,某一特定元素可允许的污染浓度不能超过3种已知火星陨石(辉玻岩(Shergotty)、辉橄岩(Nakhla)和纯橄岩(Chassigny))中该元素平均浓度的 0.1% 或 1% 。

3) 生物污染防护:封装返回样品的每个样品管中存活的地球生物小于1个。

2.3.3 火星2020任务的样品防护措施

火星2020任务对样品的多重防护需求使NASA在以往任务中使用的一些技术不能满足要求,例如:曾经用于“海盗号”(Viking)的整器级生物防护罩或用于“凤凰号”(Phoenix)采样臂的组件级生物防护罩^[22],虽然能有效防止灭菌后的探测器不会被二次污染,但却忽略了防护罩材料的释气效应对探测器硬件的有机污染。因此,NASA在以往污染防治的经验和教训基础上,结合最新开发的污染防治技术,形成了针对火星2020任务的污染防治技术方案,主要防护措施包括:

1) 设定硬件污染防治等级

火星2020任务团队首先评估了“毅力号”火星车上不同硬件对火星样品的潜在污染风险, 根据评估结果设定了3个污染防治等级, 见图1^[30]。由于火星样品在采集、封装和储存过程中最容易受到污染, 因此样品采集和处理系统(SCS)的硬件是重点污染防治对象, 其中与火星样品直接接触的硬件(SIH)的污染防治等级最高, 包括: 样品管、封装组件、体积测量探针和采样钻头; 其它参与样品处理的硬件(SHH), 包括钻头转盘、储存样品管的架子、体积测量探针外壳等, 由于距离样品非常近, 因此处于污染防治第二等级; SCS其它硬件和火星车平台属于污染防治第三等级, 仅需达到火星科学实验室(Mars Science Laboratory, MSL)任务火星车的污染防治水平。设定污染等级的做法最大程度的减少了污染防治对任务的影响, 在实现污染防治总体目标的同时, 降低了污染防治的难度和成本。

2) 硬件的清洁

对硬件表面的清洁是NASA满足硬件有机、无机和生物污染防治要求的常用手段, 任务团队针对不同防护等级的硬件提出不同的清洁度要求(表2), 并将清洁操作融入了硬件装配流程, NASA标准清洁程序是先通过粗清洁清除硬件表面的加工油和可见污染物, 再通过不同级别的精细清洁将表面污染物降到相应的清洁标准^[30]。团队在后续装配过程中, 还需要通过保持环境洁净度及洁净操作措施维持清洁后硬件的清洁度, 并定期进行清洁度检查, 对未达标的硬件重新进行清洁。

表2 关于SIH、SHH和ACA硬件的洁净度要求

Table 2 Cleaning requirements of SIH, SHH and ACA

硬件名称	平均原始表面清洁度/ (ng·cm ⁻²)	颗粒物/ 个	除气(放气)率/ (ng·cm ⁻² ·h ⁻¹)
SIH	<0.3	50	1
SHH	100	100	1
通用硬件	100	300	1

3) 350 °C烘烤

所有SIH和部分SHH硬件在清洁度达到表2的要求后, 还需进行350 °C“烘烤”处理。高温可以分解硬件表面上的有机污染物, 同时杀死所有活生物体。为确保烘烤不会对硬件造成损害, 任务团队对需要烘烤的硬件材料进行了精心选择, 以确保它们能够承受350 °C高温。飞行硬件被放置在一个内部充洁净氮气的存储箱中进行烘烤, 并在烘烤完成后继续在存储箱中密封存储。在此期间, 火星车上安装的是一个同样经过烘烤处理的“测试硬件”, AIT过程中所有测试均由该“测

试硬件”完成, 直到在肯尼迪航天中心(Kennedy Space Center, KSC)的最后装配阶段, 任务团队才用飞行硬件将“测试硬件”从火星车上替换下来。这样的操作最大程度避免了AIT阶段对飞行硬件的二次污染^[30]。



图1 身穿洁净防护服的操作人员利用辅助设施将样品管安装到“毅力号”火星车上

Fig. 1 Operators in clean protective clothing use auxiliary facilities to install the sample tube on the Mars Perseverance

4) AIT操作过程中的洁净操作

为了保持硬件的洁净度, 清洁完毕后的硬件都在洁净室进行组装和测试。其中SIH和大多数SHH硬件的组装是在ISO 5洁净室内完成的, 火星车其余硬件的组装则在ISO 8以上的洁净室内完成。为了避免AIT过程中操作人员与硬件的直接接触, 任务团队还为部分硬件设计了特殊的地面支持设备(GSE), 通过将硬件固定在预先清洁的GSE上, 避免了操作人员的直接接触, 这使AIT过程中硬件受到污染的风险大大降低。如遇到不能使用GSE的情况, 则组装需要在洁净室内的ISO 5流动工作台上进行, 操作人员需要使用特定材料的无菌手套, 以同时满足生物污染、有机污染以及无机污染防控的需求^[30]。

SIH和SHH硬件在不需操作时采用了3层保护性包装进行保存: 最内层的UHV铝箔(超高真空铝箔)和两个热封层静电防护袋, 这样的包装处理能有效防止硬件长期储存期间有机化合物、生命物质或颗粒污染物转移到SIH和SHH硬件表面。

5) AIT过程中环境和硬件洁净检测

为了随时掌握环境和AIT操作对硬件造成的生物和有机污染, 以便及时对被污染的硬件进行清洁和灭菌处理, 确保硬件的洁净度水平满足任务的要求。NASA在火星2020任务探测器AIT阶段定期对AIT所在环境和探测器进行微生物和有机物水平的检测。NASA通过热激培养法检测硬件表面芽孢的数量来实现对硬件表面微生物水平的检测^[33], 对于有机污染和无机污染水平的检测, NASA通常通过包括高压液相色谱、质谱法等技术实现^[28]。至2017年, 火星2020探测器的微生物

物水平检测采集了478个擦巾, 1 107个拭子以及155个空气样品, 共得到了16 633个平板的检测结果。对于经过350 °C烘烤或其它灭菌处理的硬件, NASA采用了对验证片(Witness Plate)进行检测的处理方法, 在验证烘烤有效性以及烘烤处理后硬件洁净度的同时, 避免了对已灭菌硬件的二次污染^[30]。验证片同样也用于一些不适用于常规采样操作的硬件, 以及超洁净环境的表面采样。

6) 流体机械颗粒屏障(FMPB)

为了避免直接接触火星样品的样品管、密封组件、体积测量探针等硬件在采样之前被二次污染, 任务团队开发了一种全新的生物防护罩技术——流体机械颗粒屏障(Fluid Mechanical Particle Barrier, FMPB), FMPB不同于“海盗号”和“凤凰号”在探测器整器或关键硬件外面简单套一层物理屏障的设计, 它以流体力学为原理(见图2), 设计了三重屏障, 首先, 在FMPB入口处设计环形的细小孔径, 利用流体黏度降低进入孔径的颗粒物的流速, 减少已进入的颗粒物的气动力, 当流速降低到足够低时, 颗粒物本身的重力将阻止颗粒物进入环形孔径的深处; 其次, 由于环形孔径内部颗粒物流速的降低, 孔径内狭小的空间逐渐被不断进入的颗粒物“填满”, 由此导致内部气压的上升将阻止外部空气的继续进入; 最后, 环形孔径的末端连接一个内部腔室, 对于极少数通过环形孔径进入内部腔室的细小颗粒, 突然扩大的截面积将进一步降低进入颗粒的流速, 从而使细小颗粒受重力影响沉降在腔室的底部。流动速度和空气动力学建模分析和实验室测试证明, 这一设计可以将所有直径大于0.15 μm的颗粒物阻止在FMPB深度的10%之内^[31]。

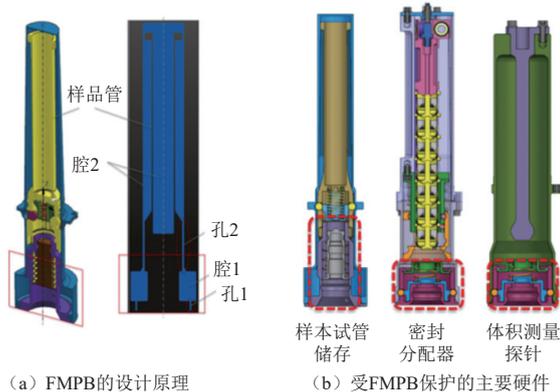


图2 FMPB的设计原理以及受FMPB保护的主要硬件
Fig. 2 The design principle of FMPB and the main hardware protected by FMPB

任务团队为样品管、密封组件和体积测量探针设计了独立的FMPB, FMPB和样品管一起进行最后的

“烘烤”处理, 因此可以在最后的清洁灭菌处理完成后立即实现对样品管的二次污染防治。

7) 其它有机污染防治措施

除了清洁和高温烘烤能有效清除硬件表面的有机物以外, 任务团队还通过对材料的优化, 为SIH硬件提供额外的有机污染防治措施: 样品管和密封组件表面有一层惰性材料涂层, 能有效抑制有机分子的化学吸附^[32]; 最早用于“火星探路者”(Mars Pathfinder, MPF)任务的有机分子吸附材料MAC和Tenax能在真空以及火星大气环境中吸附捕获释气中的有机污染物, 从而避免在地火飞行和火星表面活动期间火星车其它硬件的释气污染SIH硬件^[33]; 此外, 任务团队还通过优化系统设计, 提高样品采集和处理系统在火星表面展开后的通风性, 以减少释气产物中的有机污染物在系统内部的聚集。

8) 无机污染防治措施

钻头取样采集过程(通过旋转冲击运动)的机械转移是样品无机污染的最大来源之一, 任务团队发现在样品采集过程中大多数无机污染物保留于钻进过程激起的周围粉末中, 而不在样品中, 任务团队根据这一结果优化了采样钻头的设计, 使采样钻进过程中周围的粉末远离样品, 从而起到了无机污染防治的作用。

9) 发射前和发射后的二次污染防治措施

尽管烘烤处理的硬件是在发射前的最后阶段安装到火星车上的, 但由于火星车平台的洁净度较低, 因此仍然存在被二次污染的风险。任务团队采用超净氮气流的高速吹扫来维持硬件的洁净度, 超净氮气以大约1 L/s的速度流过整个样品采集和储存系统, 最大限度地减少发射前有机污染物和微粒沉降物在硬件表面的积累, 这一措施将一直延续到发射。

发射后阶段的污染防治措施除了上面提到的流体颗粒屏障和有机物吸附分子以外, 任务团队还利用火星表面着陆期间产生的高达146 m/s的风速清除火星车表面的颗粒污染, 避免附着在颗粒上的有机物和生物体污染样品采集和处理系统。

2.3.4 小结

由于火星采样返回任务仅仅实施了第一阶段, 因此有关返回样品在地面回收和处理阶段的防护措施目前还没有公布, 但相关技术的研究工作NASA正在进行(详见本文第3节)。仅从任务第一阶段——火星2020已经执行的样品防护工作就可以看出NASA对火星样品防护的重视, 火星2020的样品防护技术对于中国即将开展的火星采样返回任务具有很好的参考价值。

3 样品防护相关的关键技术

通过调研上述国外主要采样返回任务的样品防护工作,对于未来中国火星采样返回任务的样品防护,梳理得到如下4条关键技术。

3.1 飞行硬件的清洁和灭菌技术

对样品的污染防护首先需要确保样品采集和储存相关的硬件的洁净度,降低这些飞行硬件的生物污染、有机污染以及无机污染的水平,而开发有效的清洁和灭菌技术是实现这一目标的关键。大多数地面常用的清洁和灭菌技术并不能适用于探测器和其所携带的科学载荷,NASA从20世纪60年代开始研究不同航天材料所适用的灭菌方法,并不惜为特定灭菌技术开发新型材料,经过几十年的研究才建立了成熟的航天器灭菌技术体系,NASA的火星采样返回任务所采用的350℃烘烤灭菌,是航天材料科学研究和微生物防控技术研究长期积累的产物,因此开发能适用于样品采集和储存相关硬件的清洁和灭菌技术,是采样返回任务样品防护的关键技术。目前已知国外航天领域常用的灭菌技术有干热灭菌、伽马辐照灭菌、过氧化氢蒸汽灭菌、低温等离子体灭菌、环氧乙烷气体灭菌等,其中仅有前两种灭菌技术可以有效杀灭硬件表面和内部的微生物,其余灭菌方法只对表面微生物灭菌有效。常用的清洁技术包括醇类擦拭、清洁剂擦拭、超声洗脱处理等^[34]。

3.2 发射前和发射后的二次污染防治技术

开发二次污染防治技术的目的是为了清洁和灭菌处理后的硬件再次发生生物污染、有机污染或无机污染,由于污染事件在AIT、发射场以及发射后直至目标天体表面活动期间都可能发生,因此二次污染防治需要涵盖任务的全过程,并针对不同污染源和防护对象、根据不同的防护等级,在不同任务阶段制定针对性二次污染防治技术。例如,针对污染防治要求最高的样品容器和样品采集钻头,可通过生物防护罩的设计,为硬件提供从灭菌后直至地外天体表面工作期间全流程的防护,同时还需要避免防护罩材料本身可能造成的二次污染;对于防护要求稍低的硬件,如火星车平台,可以通过创造一个比周围环境气压较高的局部洁净环境,或采取持续的洁净气流吹扫的方式维持硬件的洁净度;针对AIT过程中人员和操作设备造成的污染,可以通过构建洁净的AIT环境、制定洁净操作规范,以及对操作设备和地面辅助设施进行清洁灭菌等措施进行二次污染防治;对于探测器硬件材料释气造成的污染,可以通过优化探测器设计、开发

释气较少的新型航天材料、对防护要求高的硬件进行表面处理等方式进行防护,等等。

3.3 返回样品的密闭封装技术

开发对返回样品的密闭封装技术的目的既是为了保护样品不被外界环境污染,又是为了避免样品污染和危害地球环境。这里的密闭封装包括两层含义,首先是对样品容器的密封性设计,其次是对携带样品容器的返回器的隔离防护设计。由于行星保护对V类限制性返回任务有“切断接触链(BTC)”的要求,即与目标天体物质发生直接/间接接触的硬件,如未经过杀菌处理,均因在密闭隔离的条件下返回地球,而火星样品容器外表面很可能被火星尘埃污染,因此对携带样品容器的返回器的隔离防护既可以避免被火星物质污染的样品容器直接接触地球环境,同时还可以为样品提供双层保护,以防因返回着陆失败导致的样品容器破损和样品泄漏。NASA正在开展的火星采样返回任务对返回污染采取了严格的行星保护要求:规定对直径50 nm以上的颗粒污染地球的概率不超过 10^{-6} ,为了实现这一目标,NASA采用了在轨钎焊的方法“切断与火星的接触链”:首先在地面制造阶段,制造双壁BTC容器的下半部分,其中容器外壁是返回舱的一部分,外壁和内壁之间的空间是洁净环境;在火星轨道上当火星样品容器(OS)被捕获以后,通过在轨钎焊将OS密封在BTC容器中,密封过程中钎焊材料被加热到高于500℃,假设火星生命是由碳键组成的,这一操作将对容器暴露部分可能污染的火星生物进行消杀,从而实现同步完成火星样品的转移,样品容器的密封以及对容器暴露部分的灭菌处理^[35]。

3.4 返回样品的地面隔离和处理技术

返回样品在回收以后,应在样品接收实验室的洁净环境内继续进行隔离防护。对于限制性返回任务的样品,按照行星保护政策的标准,返回样品在使用最先进的技术证明其对人类和地球无害之前,都应被视为潜在生物危险源,因此对返回样品的隔离应至少在BSL4级实验室中进行。然而现有的以研究传染病和病原体为目标的BSL4级实验室并不能完全满足样品防护的要求,因为这类实验室的安全防护着重于通过负压防止有害物质逸出,这样的设计容易导致外界地球物质对返回样品的污染,目前国内外没有一个实验室能够满足隔离和处理限制性返回任务样品的要求,因此,针对返回样品的地面隔离和处理技术是限制性采样返回任务样品防护的关键技术之一。

国外针对火星采样返回任务的地面样品隔离防护设施的设计,提出了3种方案(见图3,其中箭头显示

气体随压力差流动和泄漏的方向,阴影部分是可能被火星物质污染的区域)。其中方案1是在一个BSL4的生物安全实验室内设立一个正压的洁净间;方案2是在一个正压的洁净环境中设立一个BSL4的操作间;方案3是一个3层墙体设计方案,在样品操作空间和外围洁净环境之间设计双层墙体,两层墙体之间为真空或气压均低于内外环境的空间。这3种方案中,方案1对人员防护的要求较高,但实施和操作较其他两种方案难度更大,方案2相对简单,但较易引发操作人员的生物安全风险,方案3虽然比前两种方案复杂,但样品和操作人员之间双重墙体的保护使操作人员的安全性大大提高^[36]。

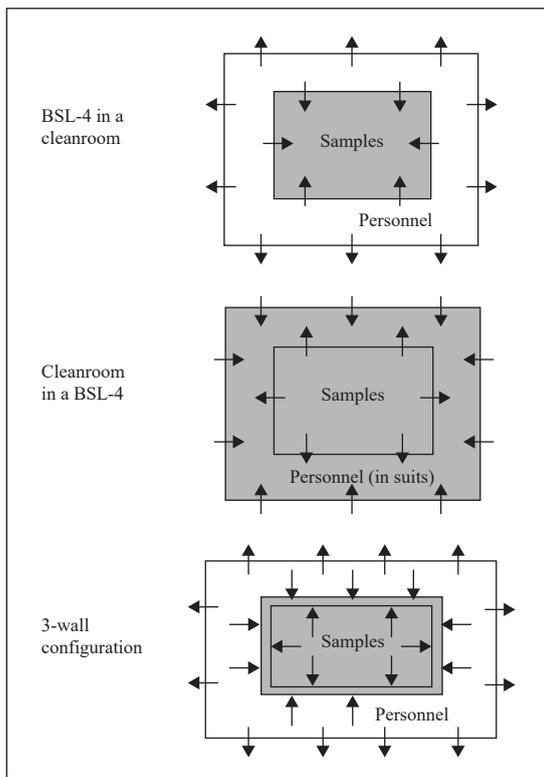


图3 NASA对火星样品接收设施的3种隔离方案^[20]

Fig. 3 Three containment options for Mars sample receiving facility suggested by NASA^[20]

火星样品容器到达样品接收实验室后,在隔离期间需通过一系列物理、化学和生物的方法,对样品中可能存在的生命体或生命痕迹进行检测,并评估火星样品对地球生物体或生态系统的威胁。样品接受实验室应具备在隔离条件下开展这些工作的技术条件和硬件设施。样品处理过程主要包括:初始处理、地外生命探测和生物风险评估三个阶段,不同阶段处理对隔离防护和所在环境有不同的要求。在初始处理阶段,为尽可能地保持火星样品的原始状态,样品应尽量保

持在与火星相似的环境条件下,并做到与地球环境完全隔离,样品容器的开封、样品取出和分装都应该在这种环境条件下进行。初始处理完成后,地外生命探测和部分生物风险评估的工作可在地球大气条件下进行,但由于不确定样品的生物风险,因此样品处理环境的生物安全等级仍应维持BSL4的水平。在初步的生物风险评估结果显示地外样品对地球生物和生物圈不会造成明显的损害之后,为便于进一步的样品分析,可以将后续生物风险评估工作移到其它较低一级生物安全等级(BSL3)的实验室中进行。

4 采样返回任务各阶段的样品防护工作

总结国外历次采样返回任务的防护经验和教训,发现对样品的防护工作贯穿了采样返回任务的全过程,且防护工作规划越早,参与范围越广,防护的效果越好,防护成本越低。下面按照中国采样返回任务的典型阶段划分,梳理各阶段样品防护需要开展的工作。

4.1 论证阶段

在任务的论证阶段,应首先确定任务的科学目标和行星保护类别,作为确定样品防护需求的基础;其次,应由任务工程各大系统共同参与,根据任务科学目标和行星保护类别,确定样品防护需求;进而应明确各大工程系统针对样品防护需要开展的工作和经费需求,确保样品防护所需的资源足以满足任务全周期的需要;最后,各大工程系统应建立样品防护管理和工作组织并确定职责。

采样返回任务中与样品防护相关的工程大系统主要包括:①探测器系统,负责研制满足样品防护需要的硬件产品,并对地面总装与在轨实施过程的样品采样、封装、传递和返回过程的防护采取措施;②发射场系统,负责提供能满足样品防护所需要的发射场环境;③着陆回收系统,负责确保着陆回收过程中返回样品的隔离处理流程得到正确实施;④地面应用系统:负责提供能对返回样品进行接收、储存、初步分析和风险评估的返回样品接收实验室,提供既能避免样品被污染,又能确保样品中的有害物质不危害地球环境的双重隔离环境。

4.2 设计阶段

在设计阶段,首先各大工程系统应尽早开展样品防护相关的工作策划,根据需求制定样品防护大纲,编制样品防护工作计划,并确保工作计划中的样品防护相关活动与型号(任务)管理、工程技术活动相协调。具体工作包括:

- 1) 提出样品防护相关的基本技术方法;

2) 确定样品防护工作对探测器选用原材料、元器件的约束要求;

3) 对设计研制人员进行样品防护相关的知识培训,对主要操作人员进行样品防护操作培训;

4) 依据样品防护要求对样品采集、密封、转移过程提出设计要求;

5) 开展样品防护专业技术方案设计、试验与验证;

6) 对样品防护相关的关键技术进行攻关。

4.3 研制阶段

在研制阶段,样品防护管理和工作组织应重点确保对分承制方实施样品防护要求的传递、监督和控制活动:

1) 进行单机研制环境和探测器AIT环境定期检测和污染评估;

2) 开展样品防护关键硬件产品的清洁灭菌及验证:①结合探测器研制流程,识别样品防护的要素,主要包括人员、产品、过程、环境等方面,确保污染防治方法的实施和有效性验证。②开展样品防护技术评审以及样品防护工作审核,进行文件与数据管理并归档;③编制研制阶段样品防护报告。

各大工程系统应按照样品防护方案开展工作,其中探测器系统应在产品的研制和AIT过程中严格开展样品防护工作,对飞行硬件的生产、贮存、运输、交付验收、探测器AIT阶段等环节的环境、微生物负荷、人员着装/操作等进行严格、规范的控制,采取必要的防护措施,确保探测器和关键产品满足样品防护相关技术指标要求。发射场系统应提供能满足二次污染防治要求的AIT环境和地面支持设备。着陆回收系统和地面应用系统应开始进行样品防护相关的硬件设施和设备改造工作,包括研制样品着陆回收和转运必须的设备,设计建造或改建返回样品接收实验室,等等。

4.4 在轨实施阶段

在轨实施阶段的主要样品防护工作包括:

1) 对样品的采样、封装、转移及返回过程进行监控,评估样品采集和封装硬件以及样品采集目标被污染的可能性和污染程度;

2) 利用空间环境和目标天体表面环境对样品采集和封装硬件进行灭菌处理;

3) 对于V类限制性返回任务,需采取“切断接触链”的措施对返回样品进行密封隔离处理;

4) 在返回地球前对样品的密封性进行评估,确保样品在密闭隔离的状态下返回地球;

与此同时,地面应用系统应在样品返回地月系统之前完成返回样品接收实验室的建造和试运行,并确

保实验室处于正常运行状态。

4.5 样品地面处理阶段

在返回舱着陆以后,着陆回收系统应在找到返回舱的第一时间对样品容器表面进行消毒处理,检查样品容器的密闭状态,并用隔离运输箱尽快将样品容器运输到回收样品接收实验室。地面应用系统应在样品接收实验室的洁净和密闭环境中对样品进行初步处理、分装和储存,对于V类限制性返回任务的样品,还需要进行生物风险评估,在评估显示样品对地球环境和生物不会造成危害后才能解除对火星样品的隔离。

在样品隔离结束后,样品防护管理和工作组织应编写任务全周期样品防护报告。

5 总结和建议

采样返回任务是研究宇宙生物学重大科学问题的最有效的任务形式,对样品的有效防护是在确保地球安全同时,实现采样返回任务科学目标的关键,美国从“阿波罗”计划以外就开展返回样品的防护技术研究,至今已形成完备的防护技术体系,并为正在进行的火星采样返回任务提供技术支持,中国作为新兴的航天大国,在样品防护方面的技术基础薄弱,且缺乏样品防护的工作经验。随着小天体采样返回任务和火星采样返回任务的论证和实施,中国未来深空探测采样返回任务正从论证起步阶段走向实施阶段,这对样品防护的技术和管理提出了重大的挑战。通过对国内外采样返回任务样品防护情况的调研,本文开展了样品防护相关的关键技术梳理和任务全流程防护工作分析,对中国未来实施采样返回任务的样品防护提出以下建议:

1) 样品防护是一项复杂的工程,需要各工程大系统的共同参与和密切配合,才能满足任务样品防护需求,建议未来采样返回任务应尽早形成一支由各工程大系统成员组成的样品防护团队,具体负责样品防护工作的组织和管理,各大工程总体应明确相关责任和具体工作,共同制定样品防护计划;

2) 样品防护的最终目的是为了更好的保护科学研究,样品防护的要求是由任务的科学目标决定的,建议未来采样返回任务尽早确定项目的科学目标和行星保护类别,确定样品防护的技术指标和经费需求;

3) 鉴于中国在样品防护技术和硬件基础方面的不足,应尽早梳理限制性采样返回任务与样品防护相关的关键技术,启动关键技术攻关和相关地面设施的改造工作,尤其是针对返回样品的隔离防护和分析处理设施,以满足未来采样返回任务对样品防护的高等级

需求;

4) 建议应根据科学技术的进步对样品防护的方法进行迭代更新, 在确保返回样品的科学价值的同时, 选取更具成本效益的样品防护方式;

5) 建议加强任务全流程的样品防护的监督管理, 确保样品防护工作的顺利实施。

参考文献

- [1] MENEGHIN A, BRUCATO J B. Preservation of sample[J]. *Sample Return Mission*, 2021, 41: 343-360.
- [2] FRANCIS M, ALLTON H, CORRIGAN M, et al. Advanced curation of astromaterials for planetary science[J]. *Space Science Reviews*, 2019, 215(8): 48-52.
- [3] CHAN Q H S, STEPHANT A, FRANCHI A, et al. Organic matter and water from asteroid Itokawa[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(11): 1-12.
- [4] XING L. China space mission retrieves lunar samples[J]. *Physice World*, 2021, 34(1): 12-16.
- [5] BANKS M. Japanese asteroid sample returns safely[J]. *Physics World*, 2021, 34(1): 11-15.
- [6] EMILY L. Hayabusa 2 touches asteroid, collects sample[J]. *Sky and Telescope*, 2019, 137(6): 10-16.
- [7] LAURETTA D S, ADM C D, ALLEN A J, et al. Spacecraft sample collection and subsurface excavation of asteroid (101955) Bennu[J]. *Science*, 2022, 377(6603): 285-291.
- [8] MUIRHEAD B K, KARP A C, DUVET L, et al. Mars sample return conceptual mission overview[C]//*Proceedings of the 69th International Astronautical Congress (IAC)*. Germany: [s.n.], 2018.
- [9] WHITE L, ANDERSON M, BLAKKOLB B, et al. Organic and inorganic contamination control approaches for return sample investigation on Mars 2020[C]//*Proceedings of IEEE Aerospace Conference*. California: IEEE, 2017.
- [10] CHAN Q H S, STROUD R, MARTINS Z, et al. Concerns of organic contamination for sample return space missions[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(4): 56-60.
- [11] CRAVEN E, WINTERS M, SMITH A L, et al. Biological safety in the context of backward planetary protection and Mars sample return: conclusions from the sterilization working group[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2021, 20: 1-28.
- [12] NASA. NPR 8715.24, Subject: planetary protection provisions for robotic extraterrestrial missions[S]. USA: NASA, 2021.
- [13] COSPAR. COSPAR Policy On Planetary Protection[Z]. USA: COSPAR, 2021.
- [14] UNITED NATIONS. Res 222(XXI)-1967, The treaty on principles governing the activities of states in the exploration and use of outer space, including the Moon and other celestial bodies[S]. United States: United Nation, 1966.
- [15] BARENGOLTZ J B. Planetary protection issues for Mars sample acquisition flight projects[J]. *Advances in Space Research*, 2000, 26(12): 1911-1916.
- [16] DONALD D V, JOHN B, MARGARET R, et al. Mars sample quarantine protocol workshop: NASA/CP-1999-208772[R]. USA: NASA, 1999.
- [17] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Evaluating the biological potential in samples returned from planetary satellites and small solar system bodies: framework for decision making[M]. USA: National Research Council, 1998.
- [18] KMINEK G. Mars sample return planetary protection specification for phase A2 system study: Aurora/GK/EE/005.04[R]. USA: NASA, 2006.
- [19] BRUCATO R J, MENEGHIN A. Euro-cares: a plan for European curation of returned extraterrestrial samples: INAF-PP-REQ-WP2-TN001[R]. [S.l.]: ESA, 2016.
- [20] NASA. NASA/CP-2002-211842, A draft test protocol for detecting possible biohazards in martian samples returned to Earth[S]. USA: NASA, 2002.
- [21] UHRAN B, CONLEY C, SPRY J A. Updating planetary protection considerations and policies for Mars sample return[J]. *Space Policy*, 2019, 49: 101322.
- [22] SALINAS Y, ZIMMERMAN W, KULCZYCKI E, et al. Bio-barriers: preventing forward contamination and protecting planetary astrobology instruments[C]//*Proceedings of IEEE Aerospace Conference*. California: IEEE, 2007.
- [23] YOSHIKAWA M, KAWAGUCHI J, FUJIWARA A, et al. The Hayabusa mission[J]. *Sample Return Mission*, 2021, 21: 123-146.
- [24] FUJIWARA A, KAWAGUCHI J, UESUGI K. Planetary protection policy for Muses-C[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34: 2325-2327.
- [25] YADA T, ABE M, UESUGI M, et al. A nature of particles in the Hayabusa sample catcher and contamination control for Hayabusa 2 sample containers[C]//*Proceedings of 77th Annual Meteoritical Society Meeting*. Japna: JASA, 2014.
- [26] DWORKIN J P, ADELMAN L A, AJLUNI T, et al. Osiris-Rex contamination control strategy and implementation[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214: 1-10.
- [27] MUIRHEAD B K, KARP A C, DUVET L, et al. Mars sample return conceptual mission overview[C]//*Proceedings of the 69th International Astronautical Congress (IAC)*. Germany: IAC, 2018.
- [28] MUIRHEAD B K, KARP A C. Mars sample return lander mission concepts [C]//*Proceedings of IEEE Aerospace Conference*. California: IEEE, 2019.
- [29] FARLEY K A, WILLIFORD K H, STACK K M, et al. Mars 2020 mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216: 142-146.
- [30] WHITE L, ANDERSON M, BOEDER P, et al. Mars 2020 sample catching system contamination: How to clean hardware and keep it clean[C]//*Proceedings of IEEE Aerospace Conference*. California: IEEE, 2017.
- [31] MIKELLIDES I G, ROBINSON A. The viscous fluid mechanical particle barrier for the prevention of sample contamination on the Mars 2020 mission[J]. *Planetary and Space Science*, 2017, 142: 53-68.
- [32] WETTERER, S. Energetics and kinetics of the physisorption of hydrocarbons on Au(111)[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1998, 102(46): 9266-9275.
- [33] ABRAHAM, N S. The use of the Molecular Adsorber Coating technology to mitigate vacuum chamber contamination during Pathfinder testing for the James Webb Space Telescope[J]. *SPIE Optical Engineering Applications*, 2016: 1-47.
- [34] FRICK A, MOGUL R, STABEKIS P, et al. Overview of current capabilities and research and technology developments for planetary protection[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54: 221-240.

- [35] BAR-COHEN Y, BADESU M, SHERRIT S, et al. Sample containerization and planetary protection using brazing for breaking the chain of contact to Mars[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. United States: [s.n.], 2019.
- [36] MENEGHIN A, BRUCATO J B. Preservation of sample[J]. Sample Return Mission, 2021: 343-360.

作者简介:

徐侃彦(1973-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向: 航天器微生物防护技术、深空探测行星保护、空间环境生物效应。

通信地址: 北京市海淀区友谊路104号院383分箱(100094)

电话: (010)68744695

E-mail: xukanyan@sina.com

Review of Sample Protection of Sampling Return Mission

XU Kanyan¹, WEN Bo¹, YIN Hong², MA Jun¹, ZHANG Lantao¹, ZOU Leyang¹, PENG Jing¹

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100194, China;

2. Shenzhou Space Biology Science and Technology Cooperation, Ltd., Beijing 100094, China;)

Abstract: The sample return mission is the most effective mission form for human beings to study major scientific problems in the universe. However, the scientific significance of a sample return mission is based on the effective protection of the sample from being contaminated by earth substances. Meanwhile, from the perspective of Earth safety, it is also necessary to prevent the biological risks of returning samples from celestial bodies that may have extraterrestrial life to the Earth. Therefore, strict sample protective measures need to be applied for a sample return mission. In This paper, we first outlined the sample protection requirements for a sample return mission; reviewed major sample protection measures of previous sample return missions taken by foreign countries, with a focus on the ongoing Mars 2020 mission; Next, we extracted four key technologies related to sample protection, including cleaning and sterilization technology for flight hardware, recontamination prevention technology before and after launch, sealed packaging technology for returned samples, and ground isolation and processing technology for returned samples. Further, we sorted out major sample protection works required in different phases of a sample return mission, and finally puts forward suggestions on sample protection for China's future Mars sample return mission.

Keywords: sample return mission; planetary protection; clean and sterilization; recontamination control; break the chain

Highlights:

- This paper analyzes the necessity of sample protection for sampling return mission.
- This paper reviews major sample protection measures of sampling return missions taken by foreign countries.
- This paper analyzed the key technologies related to sample protection of sampling return mission.
- This paper sorts out the works related to sample protection in different stages of a restricted sampling return mission.
- This paper put forward some suggestions on the sample protection of China's future Mars sampling return mission.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]