

行星采样返回返回污染风险分析及防控方案设计

孙威, 张倍铭, 叶建设

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 国际上关于行星采样返回任务素有返回污染防控要求, 其中返回器的搜索回收处置阶段是实现返回污染防控的重要一环。从保护地球生物圈和科学研究的严谨性出发, 基于航天器飞行阶段、任务执行情况, 分析了行星采样返回过程中的污染风险, 发现正常返回或出现异常情况均存在生物安全风险。基础上述原因首次提出了航天器的搜索、回收、现场处置和转运移交过程的污染防控方案; 创新设计了以无人化、智能化为突出特征的搜索回收流程和装备, 实现着陆场区返回器的地面安全处置, 保证处置回收过程中航天器对地球环境不造成污染, 和航天器携带的样本不受污染。为未来中国行星采样返回任务返回污染防控提供了技术支撑。

关键词: 行星保护; 采样返回; 污染防控; 隔离密封

中图分类号: V4

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)05-0505-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230112

引用格式: 孙威, 张倍铭, 叶建设. 行星采样返回返回污染风险分析及防控方案设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(5): 505-512.

Reference format: SUN W, ZHANG B M, YE J S. Research on integral technology of reverse pollution prevention and control for planetary sample return mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(5): 505-512.

引言

随着人类深空探测技术的不断发展, 行星探测活动已逐步进入科学探测的视野。行星探测的科学目标是为了研究生命的起源演化和地外天体是否存在生命。为此, 人类已经进行超过200次的行星探测活动, 实现了火星^[1-3]、金星^[3]、木星^[4]、土卫六等有大气天体的无人绕飞和软着陆探测, 同时也实现了月球、彗星“维尔德2号”(Wild 2)^[5]、“龙宫”(Ryugu)^[6]等星体的地外物质采样返回。随着深空探测技术的成熟和规模化, 未来的探测目标将逐渐转向行星、行星的卫星以及其他可能存在生命的天体。根据美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)深空探索发展路线, NASA和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)计划2033年前后返回火星采样返回。

对于可能存在生命的行星采样返回任务, 行星双向保护的生物安全问题正在成为关注的焦点。1967年, 联合国发布《外空条约》, 该条约对月球和其他天体探测提出了保护要求。中国于1983年正式签署《外空条约》, 承诺遵守条约规定的相关内容。

1958年国际科学联盟理事会(International Council for Scientific Unions, ICSU)成立了国际空间研究委员会(Committee on SPace Research, COSPAR), 提出了行星保护基本原则: 地外生命探测必须服从行星保护需求^[7-9]。中国于1993年正式加入了该组织。

2021年6月, COSPAR发布最新的行星保护政策。基于探测对象和任务形式, COSPAR将行星保护需求划分为5类(I~V)^[10]。其中, 对于可能存在生命痕迹的行星采样返回任务划分为第5类限制性返回任务。该条政策重点针对航天器着陆后生物安全方面, 提出了返回行星要求, 具体为坚决消除采样返回器可能携带的对地球产生破坏性的影响物质, 对与行星直接接触的返回器必须进行严格管控。

目前为止, 尚没有限制性返回任务航天器采样返回的先例, 因此, 如何满足返回行星保护要求成为了新的挑战 and 方向。具体需要防止返回器污染地球和保护样品不受污染, 保护地球生态环境和样品研究的科学性、严谨性。本文结合行星探测返回飞行任务, 分析了采样航天器返回地球后的污染风险环节, 设计了返回器搜索、回收、处置和转运新模式, 初步提出了污染防控总体方案。

1 污染风险分析

针对深空探测中航天器采样返回的完整过程,包括样品采集、封装、隔离、转移到返回器返回地球等,从微生物和尘埃沾染携带角度出发,针对返回飞行的各环节,按照正常返回和突发故障两种情况进行分析。

1.1 返回回收环节定义

1) 行星采样段。是指行星表面采样至样品转移至返回器的过程,基于返回行星保护要求,在整个阶段对样品采取了两次密封,来保证样品不受污染和返回器内外部不沾染行星尘埃。采样方式可以分为表取、钻取、挖取等。采样完成后,在行星表面对样品进行第一次密封,密封在样品容器内,密封方式可选用金属密封、非金属密封、钎焊焊接密封等。如“阿波罗11号”(Apollo 11)月球采样返回,在月球表面采取的具有3层密封结构的铝制箱体月球样品返回封装箱对样品进行密封,最外层为刀口挤压钢银(90%钢与10%银)合金密封圈,里面两层为氟硅橡胶O形圈;箱体和盖体用铝合金块体加工而成,如图1所示。



图1 月球样品返回封装箱
Fig. 1 Lunar sample sealed in container

样品容器转移到上升器后,随上升器到达行星轨道,在行星轨道对样品容器进行二次密封。从而进一步保证样品不受污染和返回器内外部不沾染行星尘埃。

2) 返回转移段。是指返回机动开始至主探测器和返回器分离的过程。返回转移段的返回时间受航天器速度增量、有限的着陆点选择等多种因素限制,轨道通常较为固定。如“隼鸟2号”(Hayabusa 2)完成小行星“龙宫”样品采集后,开始从行星轨道返回地球,到达地球附近后,“隼鸟2号”探测器与返回器在标称点分离,“隼鸟2号”探测器继续向1998KY26小行星飞行,返回器则再入地球大气层^[11-14]。

3) 再入段。是指主探测器和返回器分离开始至返回器开伞的过程。分离后,返回器以接近第二宇宙速度高速进入地球大气层,然后经历气动减速直至开伞。如“隼鸟2号”探测器与返回舱分离,返回器以12 km/s

速度进入大气层,在约10 km高空打开降落伞,降低速度着陆^[11-14]。

4) 下降段。是指返回器开伞至返回器着陆地面的过程。航天器通常采用降落伞系统等减速措施,使其从亚声速减至10 m/s速度附近。如“隼鸟号”返回器在10 km高度时,抛伞舱盖、拉出主伞、同时抛防热大底;当防热大底与仪器装置分离时,主伞打开,返回器以10~8 m/s的速度着陆,着陆到地面后脱主伞,降落伞系统与返回器分离^[12]。

5) 搜索回收段。是指航天器安全着陆至转运的过程,地面人员搜索返回器并进行现场处置和回收。如“隼鸟2号”返回器,在澳大利亚南部沙漠着陆,搜寻团队通过返回舱上的无线电信标寻找返回器。返回器着陆后立即被严格包装,先被装入氮气球进行密封,然后放入小箱中,小箱则被装入塞有抗冲击材料的大箱之中,再空运至指定地点,如图2所示^[11-14]。



图2 “隼鸟2号”现场处置回收
Fig. 2 Recovery of Hayabusa 2 capsule

6) 转运移交段。是指将航天器从着陆现场转运至指定实验室的过程。“隼鸟2号”探测器,将样品容器放在专用的运输箱中,连同返回舱的零件一起空运至日本地外样本管理中心,如图3所示。日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)通过对从“龙宫”带回的样品进行分析,发现了被称为“生命之源”的氨基酸^[11-14]。



图3 “隼鸟2号”转运
Fig. 3 Transport of Hayabusa 2 capsule

1.2 正常返回生物安全问题分析

本节基于上述返回飞行环节,对返回器正常返回

至着陆场区后,是否携带微生物等生物安全问题进行分析。

1) 行星采样段。着陆器通过表面提取、挖掘、钻探进行表面采样,采样完成后密封在样品容器内,样品密封动作是在行星表面完成,完成后随上升器到达行星轨道。在行星轨道进行二次密封和消杀,密封在密封容器内,整个过程采用断裂密封的方式,使得密封容器外部没有沾染行星尘埃,然后将密封容器转移到返回器,保证返回器内部和返回器外部都不沾染行星尘埃。

2) 返回转移段。航天器在返回转移段会经历3个过程。一是36 000 km的地球静止轨道到行星之间的星际飞行轨道,航天器外表主要受到高能带电粒子、太阳电磁辐射的影响;二是1 000~36 000 km的近地球轨道,主要有范艾伦射线、紫外辐射;三是100~1 000 km的低地球轨道,主要有原子氧、真空紫外辐射等因素。

空间环境是由空间高能粒子辐射、微重力、高真空、温度骤变等复杂因素组成的独特环境。空间高能粒子辐射是制约人类开展长期深空探索的关键因素,主要由各种能量以及随时空变化的粒子组成。对于近地轨道任务,辐射主要来源于银河系辐射和地磁捕获粒子;对于月球探测等深空任务,由于脱离了地磁保护,辐射主要来源于银河系辐射和太阳射线。高能粒子辐射能量高且贯穿力强,可以直接作用于微生物的脱氧核糖核酸,使其双链断裂而造成严重损伤。所以,航天器从行星轨道返回到地球过程中,经历的比较严酷空间环境,若航天器外表面携带微生物,也会导致其微生物存活的几率大幅度降低。

3) 再入段。再入过程中必然经历黑障阶段,即距地面35~80 km高度,航天器以超高速进入大气层产生激波,使返回器表面与周围气体分子呈黏滞和火烧状态,热量不易散发,在迎风面预计形成一个温度高达2 000 °C的高温区,且时间长达4 min。

目前大部分已知微生物在温度超过110 °C时无法存活,仅有少数能在极端温度下存活,例如硫化杆菌属、铁质菌属、金属球菌属、硫化叶菌属、灼热球菌属等嗜热微生物可以在41~122 °C环境下存活。因此,当温度达到上千摄氏度,且持续时间达数分钟,微生物存活的可能性极低。在日常生活中,高温常作为不可逆杀灭微生物的强有力手段。所以,航天器再入阶段经历的高温环境,能够杀灭返回器外表面可能存在类似地球碳基生命的微生物。但在背风面及结构缝隙处,高温环境并不一定十分严酷,可能存在未被

高温消杀潜在区域。

4) 下降段。航天器下降过程中,返回器携带的部分组件会抛出,如伞舱盖、减速伞等。根据返回器的构型,伞舱盖、减速伞等组件在返回器固定区域存放。对于采样样品,进行了行星表面样品容器密封、行星轨道密封容器密封,因此,在正常返回情况下,返回器内部及外部没有沾染行星尘埃,伞舱盖、减速伞携带行星微生物几率较低。

5) 搜索回收阶段和转运移交阶段。正常回收过程中,通过消杀、回收、密封、隔离等措施,这两个阶段产生附加的生物安全问题可能性不大。

综上,行星表面采样至返回器着陆回收过程中,由于采取了两次密封和消杀,并经历了严酷的空间环境和黑障等阶段,返回器外表面携带的微生物的概率较低。但由于人类认识的局限性、微生物种类繁多以及检测技术有限,对于返回器是否携带未知微生物是目前尚无法下定论,无法完全排除返回器携带未知生物的可能性。

因此,针对探寻地外天体生命痕迹的限制性返回任务,我们应持谨慎态度。在证实其无危险性之前,仍需要制定严格的返回污染防控方案,即返回器着陆后,返回器的现场处置、回收、转运与移交过程中所采取的返回行星保护控制措施。

1.3 突发故障样品泄露风险分析

行星探测活动中,采样返回航天器技术难度大,出现的故障模式多,最终导致返回器样品泄露的风险。本节针对限制性返回任务,对出现的故障与事故进行分析。

1) 行星采样段。在该阶段,样品完成了行星表面的样品密封和行星轨道的密封容器密封,然后将密封容器转移到返回器中。整个过程若样品容器和密封容器密封指标不严,或者密封操作、转移操作不当,均可导致返回器内部和外部沾染行星尘埃。

2) 返回转移段。综合考虑返回窗口、控制能力、返回器故障模式等,对于飞行距离较远的深空探测采样返回任务,返回过程中可能出现无法返回地球和故障导致坠落地球两种突发事故。

3) 再入段。航天器在再入过程中,飞行力学和大气环境条件变化大,故障发生概率高。如航天器在再入过程中会受到很大的气动力、气动加热以及过载。若气动加热和过载超过安全值,会使得航天器在再入过程中解体,从而发生样品的泄露。例如前苏联的宇宙系列核动力卫星曾失控落在加拿大,造成了一定核污染;“哥伦比亚”号航天飞机在再入过程中失事,部

分耐高温部件完整地掉落至地面^[13]。

4) 下降段。航天器减速系统出现故障, 将导致返回器非正常减速, 使航天器以异常速度着陆撞击, 导致航天器结构破损、返回器内部存放的密封容器等密封结构破坏, 发生样品泄露。例如美国“起源”号太阳采样返回探测器于2004年重返地球时, 由于降落装置未能正常打开, 返回器直接坠落在沙漠戈壁并破损, 导致携带的太阳风样本直接暴露在外^[14]。

5) 搜索回收阶段。返回器着陆后, 进行现场处置, 包括切伞、危险源、扶正、抓取密封等现场处置。若处置不当, 会造成返回器的破损、自燃等事故发生, 从而发生样密封容器密封结构损坏或开裂。另外, 若任务中参试人员出现操作失误或处置过程中出现异常情况也可能会造成返回器结构破损, 从而导致样品泄露。

6) 转运移交阶段。将返回器转运至指定地点的过程中, 由于距离较远和路程颠簸, 返回器系固不牢, 或减震不当等, 存在转运过程中对返回器结构二次损坏的可能。

综上, 返回转移段和再入段发生突发事故, 处置难度大, 严重程度较高, 航天器直接解体或烧毁, 难以采用地面手段救护目标星体样本。返回采样段、下降段、搜索回收阶段和转运移交阶段导致着陆后发生样品泄露等突发事故, 地面系统可以采取一定的返向行星保护措施保护行星样本和地球生物圈。图4为返回过程各阶段的污染风险分析图。因此, 需要针对返回过程中突发故障与事故制定合理的返向污染防控总体方案, 降低污染地球生物圈的概率和样本受到污染的概率。

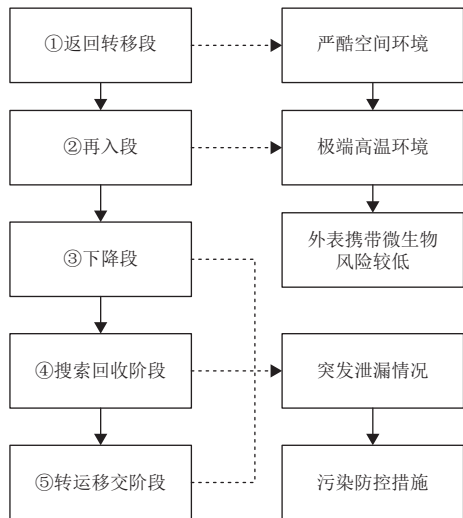


图4 污染风险分析

Fig. 4 Analysis of pollution risk

2 国外行星保护实施情况

2.1 “阿波罗11号”

1969年7月24日, “阿波罗11号”返回地球, 在维克岛以东降落。这是人类第一次行星采样返回, 对于月球是否存在生命并不清楚, 所以美国制定了严格的防控措施。建造了月球样品接收实验室和移动隔离设施。移动隔离设施用来将月球样本从落区转运到月球接收实验室, 月球接收实验室用来对月球样本进行分析。

月球样品从“阿波罗11号”取出, 放入移动隔离设施中, 再空运至月球接收实验室。为了确保地球生态环境和月球样本免受污染, 美国制定了检疫计划, 要求返回舱和月球样品着陆地球的那一刻起进行隔离。

2.2 “星尘号”

2006年1月15日, 美国“星尘号”(Stardust) 彗星采样返回^[15]。“星尘号”返回舱在美国犹他州大盐湖沙漠着陆, 接近美军试验场公路, 以方便样品物质运输。

在着陆点的首要目标是保护返回舱内部状态, 返回舱本身的洁净度和物理完整性。直升机和车辆从侧风方向接近太空舱, 以避免太空舱可能受到污染。工作人员佩戴防护手套, 清除返回舱外部泥浆后, 将其双层包装放置在搬运装置上, 进行空运。

彗星是一种体积小、温度低的天体, 形成于太阳系边缘, 是远离太阳的冰冻天体, 这些环境导致了彗星上没有生命存在。因此NASA把该项目的行星保护分类为V类非限制性返回任务, 不需要进行任务行星保护措施, 但为了防止地球环境和生物对样品的污染, 取出星尘号返回的样品仍然采取了严格的防护措施。研究人员在取出样品收集器时身穿全套防护服, 对样品的分析是在约翰逊航天中心(Johnson Space Center, JSC)进行的。

2.3 “隼鸟2号”

2020年12月5日, 日本“隼鸟2号”龙宫采样返回。“隼鸟2号”回收舱在澳大利亚沙漠的南部沙漠着陆, 由日本宇宙航空研究开发机构工作人员, 借助澳洲空军对其进行回收。返回器落地后, 该团队人员首先将回收舱放置在氮气球内进行密封, 再放入小箱之中, 然后再装入塞有抗冲击材料的大箱直接, 然后空运至指定地点。

“隼鸟2号”的科学目标之一就是收集样本容器中的挥发性气体, 挥发性气体采样操作必须在回收舱重新进入地球大气层后100 h内进行。在快速检测设备中, 有专用的气体取样系统以提取挥发性气体样品。将样品容器从回收舱中拆卸下来后, 连接至气体取样系

统,并抽真空以提取挥发性气体。再将样品容器放在专用的运输箱中,和回收舱的零件一起空运至日本地球样本管理中心。JAXA对从龙宫带回地球的样本进行分析,发现了生命之源——氨基酸。

另外,该团队针对返回后突然事故制定应急故障预案,即若“隼鸟2号”回收舱未正常着陆,出现回收舱结构出现破裂情况,则要采取消毒措施,以防止可能未知的微生物污染地球生物圈。

2.4 启示

“阿波罗11号”“星尘号”“隼鸟号”均为非限制性返回任务。但为了避免行星样品被地球微生物污染,并减少由行星样品将地外天体污染引入地球生物圈的可能性,上述任务均制定了严格的污染防控方案,主要包括人员防护、返回舱隔离密封以及消杀。尤其是“阿波罗11号”,为第一次行星采样返回任务,人们并不清楚月球表面是否存在生命,因此采取了较为严格的返回行星保护措施。

目前为止,尚没有限制性返回任务航天器采样返回的先例,世界各国还未详细展开返回后的风险防控研究。因此,返回式航天器的风险防控方案及技术途径暂处于研究空白阶段,缺乏可以借鉴的经验。从目前开展的研究分析,限制性返回任务比非限制性返回任务要求更加严格。面向未来行星探测取样返回任务,亟需针对性开展相关的风险防控方案和装备研究。

3 返回污染防控总体方案

本节针对限制性采样返回任务,基于返回行星保护要求,对返回器着陆后的搜索、现场处置、回收和转运开展初步设计,为未来行星探测采样返回任务的返回舱地面处置、回收、转运提供支撑。

3.1 防控策略

目前限制性采样返回任务的污染返回控制方面工程实施尚处于空白,相关研究还未展开,难以直接指导开展方案设计。本文基于实施最高安全防护的理念,提出了行星采样返回的返回污染防控需遵循的基本准则:一是避免返回器携带地外天体物质污染地球,确保地球生物圈的安全。二是保护人类的安全优于样本的科学研究;三是污染防控应基于地面防控污染源最严格手段;四是消毒灭菌应基于目前消杀地面最具抗性的陆生生物所需的方法。

基于以上准则,针对返回器搜索、现场处置、回收和转运移交过程提出防控策略,以保护地球生物圈安全。

1) 返回器消杀。返回器着陆后,第一时间需要对

返回器和返回器周边环境进行消杀,防止污染扩散。现在比较成熟的消杀包括干热灭菌、紫外辐照灭菌、过氧化氢低温等离子体灭菌、含氯消杀剂等。结合着陆环境和返回行星保护要求,研究分析消杀方式。

2) 污染源隔离。建立返回器与外界环境之间的物理屏障,防止返回器与外界环境直接接触或者发生物质交换。返回器着陆后,对返回器回收采用隔离密封装置回收,从源头实施风险防控。在返回器外围构筑安全的物理屏障,防止污染因子向外部环境中扩散,进而保护地球的环境安全,同时也能够保护行星样本免受地球环境污染。

近年来随着科学技术的应用发展,隔离密封技术在航天器、航空器、潜艇和生物安全等领域得到了广泛应用,为返回器隔离密封技术研究提供借鉴。典型的污染源隔离实施例,如“阿波罗”采样返回任务中,用于样品存放的容器均采用刀口挤压银合金式密封结构实现污染源隔离^[16-18],为地面返回器隔离密封提供借鉴。但是,样品密封装置等实施例在空间体积、污染源对象及适用场景方面,与返回器隔离存在一定差异,因此还需要针对返回器自身特点开展物理防护屏障设计及相应的密封技术研究。

3) 人员保护。建立现场搜索作业人员与返回器之间的防护屏障。对于可能直接接触返回器的人员,需穿戴相应的个体隔离防护装备,对人员头部、躯干和四肢等全方位进行隔离防护,避免人员操作过程中吸入或者沾染微生物污染因子,并防止其作为载体传播扩散微生物。

随着重大疫情等突发性公共卫生事件频繁发生,国内外对高危生物污染作业人员的个体防护技术研究、装备研制愈发重视。国外Delta、3M等公司均研制了生物安全4级防护服,国内军事医学科学院等单位在防护服面料、正压保持和高效过滤等方面取得了研究成果^[19]。从安全性角度分析,现有生物安全防护装备能够为返回器现场搜索作业人员提供有效的防护保障。但从舒适性和环境适应性方面,现有个体防护产品特别是正压防护装备,主要针对实验室内活动设计,后续还需针对着陆场环境特点及人员现场作业特点,进行优化改进。

4) 自动化操作。利用自动化操作协助或者替代人工操作,降低现场搜索作业人员与返回器直接接触的几率。针对返回器的现场处置、回收和转运过程的关键风险环节,开展无人自动化设计。采用机械臂等方式实现返回器的自动化吊装、转运和装卸,实现对人员的保护。

利用无人化、自动化操作代替传统人工操作是目前多个领域的发展趋势,包括智能仓储、矿下资源勘探、深海资源开发等。例如,利用体积小、重量轻、运动灵活的仿生机器人实现深海无人群体化协同作业被认为是深海施工作业降本增效的重要解决方案^[20-21];利用无人运输系统如智能矿用自卸车提高生产安全、生产效率^[22]。上述实施例及相关技术开发,均为返回器现场回收处置的自动化操作提供了借鉴。

5) 环境监测。实施返回器及其周边环境生物安全水平监测,丰富返回器状态和污染扩散风险研判手段。当返回器在再入、着陆、回收处置和转运移交等过程中发生破损、泄露等突发情况时,还需对返回器及其周边环境的生物安全水平加以监测和控制。图5为防控策略图。

常见的污染物监测主要包括大气中有机污染物和颗粒污染物在线监测。针对特征污染物特征,选取傅里叶变换红外光谱、粒度分析等手段检测污染物的含量。另外漏率在线监测通常利用待测点前后压差的变化评估监测对象空气泄漏情况。返回器转运过程中,其自身及其周边环境的生物安全水平监测可以借鉴相关产品和技术进行设计。

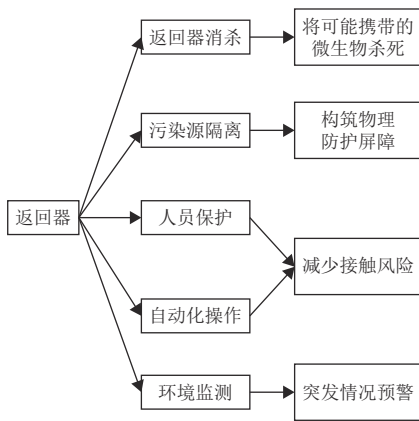


图5 防控策略

Fig. 5 Prevention and control strategy

3.2 防控方案与装备研究

本节基于污染防控策略,对返回器现场处置、回收和转运过程中的人员力量、操作流程及处置方案进行初步设计。

1) 增强返回器探测搜索能力。在任务飞行阶段至下降段时,空中或地面的搜索回收力量实施返回器合作信标捕获和非合作信标探测识别。一是非合作信标。可通过光学手段快速捕获和远距离识别返回器。二是合作信标。接收返回器标位信号,为空中或地面搜索人员提供方向性或位置性的指引。空中或地面搜

索回收力量向返回器落点靠拢,返回器着陆后,空中或地面搜索回收力量应及时到达,并立即开展返回器的现场处置、回收等工作,尽可能缩短返回器直接暴露在地球环境中的时间。

因此,要求着陆场系统应有直接获取标位信号以快速搜索定位的能力,以及增强利用光学、SAR成像等非合作信标的返回器探测识别能力。

2) 增加适用于返回器回收的无人回收密封防护措施。在搜索回收阶段,着陆场系统需要完成返回器的现场处置和返回器回收两个方面的工作。为满足行星保护返向防控策略中的污染源隔离、人员保护以及自动化操作要求,需要在传统的航天器现场处置与回收基础上,增加无人回收密封防护措施。例如,采用专门的返回器隔离密封装置将返回器与地球环境隔离,解决传统回收方式中返回器直接暴露于外部环境而可能造成污染扩散的问题;采用自动化操作完成或者协助完成返回器处置工作,替代完全依靠现场人员手动作业的传统处置方式,解决人员高频率接触风险源的问题。

综合考虑返回器的体积、重量和固定安装要求,设计隔离密封装置的主体结构 and 接口,借鉴样品密封装置和生物安全实验室采取的隔离密封措施,选用合理的隔离形式和密封性材料。另外,还可以在装置内填充惰性气体。在取样返回器与外界环境之间形成物理隔离屏障,从源头实现微生物污染风险防控。

根据返回器的现场处置程序及安全处置要求,设置自动化模块与返回器隔离密封装置配套使用,通过遥控和自动化作业完成返回器现场处置和回收阶段的各项工作。例如,返回器着陆后,返回器隔离密封装置及其配套的机械臂组合可自动抵近返回器,借助机器视觉完成返回器的状态确认、电源断电、切伞、抓取吊装、装箱固定等系列操作。现场作业人员可在安全区域内遥控作业,尽可能减少直接接触。其中,自动化模块设计的关键在于与返回器隔离密封装置的相互配合,机械臂组合对返回器切伞、断电和抓取等操作的实现,以及自行走模块对着陆场复杂地形的感知与环境适应性等。

3) 现场作业人员安全防护能力。任务实施的实际情况仍然可能需要人员参与。例如,搜索回收过程的部分环节或者突发情况,包括返回器危险源现场处置等。另外,综合考虑工程实现的可行性、可靠性,传统的航天器处置、回收和转运主要依赖于人员操作,直接采取全程无人进行替代风险较大,因此建议搜索人员参与协助。由于限制性返回任务中保护人类的安

全优于样本的科学研究,并且现场人员可能成为潜在的生物污染传播载体,所以需要增加对现场人员的个体防护保障措施。

着陆场现场人员主要开展户外作业,需要综合考虑个体防护装备的生物安全性、穿着舒适性以及现场操作的便利性,参照生物全等级分类,配套必要的防护服、防护头罩、防护靴和防护手套等,通过物理防护实现人员与外界环境的隔离。当生物安全风险较大时,可选用正压式个体防护装备,通过防护服与人体之间建立的正压环境,防止外部的生物污染因子进入沾染,同时为人员提供洁净安全的空气。目前,生物安全个体防护装备种类较多、应用成熟,可根据任务实施的实际情况选用相关产品,并结合现场作业特点对舒适性和操作便利性设计加以改进。

4) 增强转运过程中返回器状态监测措施。传统的返回器转运移交过程无需隔离密封装置,可通过陪同人员随时观察判断返回器状态。对于限制性返回任务而言,返回器在转运移交阶段,全程在隔离密封装置内进行密封,外界无法掌握装置内返回器的状态。另外,返回器移交到指定地点时,需要在其取出前确认返回器没有发生样品泄露等突发事件。因此,需要对转运与移交过程中返回器或者隔离密封装置的安全状态进行全程监测,确保返回器在转运移交过程中安全可控。

状态监测主要对转运移交过程中返回器的结构完好性以及隔离密封装置的密封完好性提出了在线监测需求。可针对返回器结构完好性监测需求,设置实时图像采集模块,分析研判返回器是否发生破损;针对隔离密封装置密封完好性监测需求,可在隔离密封装置上配套必要的漏率及生物安全检测模块,分析综合研判装置的隔离密封性是否有效,避免污染物不受控制扩散。一旦发生意外泄漏情况,应及时采取微生物消杀措施,通常以消毒剂灭菌法为主,包括含氯消毒剂、过氧化物消毒剂等。

4 结束语

随着人类深空探测技术不断发展,行星采样返回将成为各大国重点发展的航天活动之一,将带来新的空间返回向污染防控的现实问题。无论是保证科学研究的严谨性,还是秉承对地球现有生物圈安全的负责任态度,都要求提早开展返回式航天器着陆地球后的污染防控设计,研制无人回收隔离密封系统,在探测行星的同时做好地球生物圈的保护,人类才能更好开展更远深空的探测活动。

然而,从中国现有的较为完善的着陆现场处置、回收和转运体系来看,返回式航天器的风险防控方案及技术途径均处于研究空白阶段。未来,中国航天强国的建设,必然将实施更频繁的行星采样返回任务,将带回火星及其他行星的大量样本。出于行星保护原则和人类命运共同体的建设需要,设计返回向污染防控方案、研制返回器无人回收密封系统都将势在必行。

针对未来深空探测采样返回任务,基于下行生物污染防控的迫切需求,建议加快开展污染防控方案设计和返回器无人回收密封技术等关键技术的预先研究,支撑适应行星采样返回等深空探测任务的着陆场处置、回收和转运的模式创新,指导相关系统和设备研制建设,为中国实施行星采样返回任务提供有力保障。

参 考 文 献

- [1] MELTZER M. When biospheres collide: a history of NASA's planetary protection programs[M]. Washington, DC, USA: NASA, 2011.
- [2] KAZARIANS G A, BENARDINI J N, STRICKER M C, et al. The evolution of planetary protection implementation on Mars landed missions[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2017
- [3] ZHAO Y S, LIU J Z, ZOU Y L, et al. Progress and future prospects of Venus exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(9): 2703-2724.
- [4] BOLTON S J, ADRIANI A, ADUMITROAIE V, et al. Jupiter's interior and deep atmosphere: the initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft[J]. Science, 2017, 356(6340): 821-825.
- [5] SANDFORD-SCOTT A. Samples Returned to Earth from Comet 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft[C]//Proceedings of Abstracts of Meeting of the Geochemical Society of Japan. Tokyo, Japan: Geochemical Society of Japan, 2008.
- [6] WATANABE S I, TSUDA Y, YOSHIKAWA M, et al. Hayabusa 2 mission overview[J]. Space Science Reviews, 2017, 208(1-4): 1-14.
- [7] United Nations. The treaty on principles governing the activities of states in the exploration and use of outer space, including the Moon and other celestial bodies. RES 2222(XXI)-1967[S]. USA: United Nations, 1966.
- [8] CYPSEER D A. International law and policy of extraterrestrial planetary protection[J]. Jurimetrics, 1993, 33(2): 315-339.
- [9] SPRY J A, RUMMEL J, RACE M, et al. Unanswered questions in the development of planetary protection policy and implementation for the human exploration of Mars[C]//Proceedings of Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2016: 1-9.
- [10] KMINEK G, CONLEY C, HIPKIN V, et al. COSPAR's planetary protection policy[J]. Space Res Today, 2017, 200: 12-25.
- [11] TSUDA Y, NAKAZAWA S, KUSHIKI K, et al. Flight status of robotic asteroid sample return mission Hayabusa2[J]. Acta astronautica, 2016, 127: 702-709.
- [12] 孙元. 星尘号首携彗核物质天外归来[J]. 国际太空, 2006(3): 1-9.
- [13] SHI Y. Stardust returns from space with its first comet nuclear material Stardust returns from space with its first comet nuclear material[J]. Space International, 2006(3): 1-9.
- [13] KAWAGUCHI J. The Hayabusa mission—its seven years

- flight[C]//Proceedings of IEEE Symposium on VLSI Circuits (VLSIC). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2011.
- [14] 吴国兴. 对哥伦比亚号失事原因的思考[J]. 国际太空, 2003(3): 14-19.
- WU G X, Reflections on the causes of the Columbia crash[J]. Space International, 2003(3): 14-19.
- [15] SHARMA S K, MISRA A K, LUCEY P G, et al. Lunar and planetary science XXXVI[M]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2005.
- [16] 张斌, 俞敏, 杨华勇. 深空样品密封技术综述[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(1): 26-33.
- ZHANG B, YU M, YANG H Y, Overview of sealing technology for deep space samples[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2013, 30(1): 26-33.
- [17] LOFGREN G E, ALLTON J H. Special unopened lunar samples: is it time to examine them[C]//Proceedings of The 39th Lunar and Planetary Science Conference. League City, Texas, USA: [s. n.], 2008.
- [18] ALLTON J H. Catalog of Apollo lunar surface geological sampling tools and containers: NASA JSC Report JSC-23454[R]. Washington DC: NASA, 1989.
- [19] HENRY N W. Four decades of protective clothing development and standardization[J]. J Chem Health Safety, 2007, 5: 135-136.
- [20] 袁凯. 水下电动机械臂设计及运动控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- YUAN K, Research on the design and motion control method of underwater electric motor arm[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [21] 邱锐, 姜扬敏. 中国深海智能机器人将迈向“更深的海”[J]. 高科技与产业化, 2018, 8, 24-28.
- QIU R, JIANG Y M, China's deep-sea intelligent robots will move towards the "deeper sea"[J]. High-Technology & Commercialization, 2018, 8, 24-28.
- [22] 李志国. 我国无人驾驶矿用自卸车发展现状和未来展望[J]. 铜业工程, 2019(2): 1-6.
- LI Z G, Development status and future prospect of unmanned mine dump trucks in China[J]. Copper Engineering, 2019(2): 1-6.

作者简介:

孙威(1974-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 航天搜集回收总体技术。

通信地址: 北京市5131信箱1号(100094)

电话: (010)66361252

E-mail: sunwei@bittt.cn

Research on Integral Technology of Reverse Pollution Prevention and Control for Planetary Sample Return Mission

SUN Wei, ZHANG Beiming, YE Jianshe

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Currently, there are international requirements for the prevention and control of return pollution in planetary sampling and return missions, among which the search, recycling, and disposal stage of the return device is an important part of achieving return pollution prevention and control. Starting from protecting the Earth's biosphere and the rigor of scientific research, this paper analyzed the pollution risks during the planetary sampling and return process based on the flight phase and task execution of spacecraft. It is found that there are biosafety risks in both normal return and abnormal situations. Therefore, a pollution prevention and control plan for the search, recycling, on-site disposal, and transfer process of spacecraft was proposed for the first time. Innovative design of search and recycling processes and equipment with unmanned and intelligent features has been made to achieve ground safety disposal of landers in the landing area, ensuring that the spacecraft does not cause pollution to the Earth's environment during the disposal and recycling process, and that the samples carried by the spacecraft are not contaminated. This paper provides technical support for future planetary sampling and return missions in China to prevent and control pollution.

Keywords: planetary protection; sample return; pollution prevention and control; isolation and seal

Highlights:

- For the first time, the pollution prevention and control requirements for the return device search and recycling process were identified.
- For the first time, a pollution prevention and control plan was proposed for the search, recycling, on-site disposal, and transfer process of the return device.
- The pollution prevention and control strategy for the planetary sampling return mission landing site system was proposed for the first time.
- For the first time, the sealing of the return device, unmanned on-site disposal, and isolation protective clothing equipment were demonstrated.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]