

空间微生物控制技术综述

李飞¹ 袁辉² 赵辉²

(1. 航天神舟生物科技集团有限公司航天工程育种研究室, 北京 100190;

2. 航天神舟生物科技集团有限公司, 北京 100081)

摘要: 空间微生物是长期载人航天面临的一个重大安全性问题, 严重威胁航天员的生命健康和航天器的长期安全运行。载人航天器内微生物滋生会污染环境, 导致航天员感染或生病, 腐蚀材料, 导致设备故障, 在空间发生变异的微生物如被带回地球, 还会威胁地球生态安全。空间微生物来源途径多样, 种类复杂, 且种群在航天环境下不断演变, 控制难度大。空间微生物控制是在航天器的设计建造、在轨运行各阶段采取适当的监测、控制和防护措施, 控制航天器的微生物水平, 防范其风险。介绍了国际空间站飞行前和飞行阶段的微生物控制标准与监测要求, 以及国外在载人航天器设计、消毒灭菌、洁净组装、发射及在轨飞行等阶段的微生物控制技术发展现状, 并对我国空间微生物控制技术的发展提出建议。

关键词: 空间微生物; 载人航天; 微生物控制技术; 发展建议

中图分类号: V57; R854 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2014)05-0465-09

Review of Microbiological Control Technologies in Space and Development Proposals

LI Fei¹, YUAN Hui², ZHAO Hui²

(1. Space breeding laboratory, Shenzhou Space Biotechnology Group Company, Beijing 100190, China;

2. Shenzhou Space Biotechnology Group Company, Beijing 100081, China)

Abstract: Microbiological risk is a major concern in long-term manned missions, threatening the safety and health of astronauts and integrity of spacecrafts. Microbial contamination in manned spacecrafts may pollute the cabin environment, cause infection or sickness in crews, and induce biodegradation of critical materials which may result in system failure. Moreover, undesired returning of microorganisms which have mutated under space environment could cause serious damages to ecosystem of the earth. Microbial contamination may come from many sources and be introduced during the processes of spacecraft assembly and launch preparation. A great variety of microorganisms have been identified in space. These microorganisms were thriving and evolving in the closed environments within space vehicles and were hard to remove. Microbiological control tasks for manned spaceflight involve monitoring, control and preventive measures for microbial contamination during the whole space missions, with which to counteract or mitigate the microbiological risks. The pre- and in-flight microbiological specifications and monitoring requirements of the International Space Station, and the recent advances in microbiological control technologies during the design, sterilization, clean assembly, launch and on-orbit flight of manned spacecrafts were reviewed in this paper. Also, a suggestion for the development of space microbiological control technologies in China was proposed.

Key words: space microbiology; manned spaceflight; microbiological control technologies; development proposals

收稿日期: 2013-12-18; 修回日期: 2014-08-19

作者简介: 李飞(1979-) 男, 博士, 工程师, 研究方向为空间生物学。E-mail: lifei@cast.cn

1 引言

随着我国载人航天工程发展战略的逐步实施,未来将面临长期载人飞行中的微生物安全问题。国外经验表明,空间载人环境非常有利于微生物的生存^[1-3]。登上过“和平”号空间站的太空人都曾在控制器后、空气调节器及空间站的各个角落发现许多变种真菌。这些真菌在太空环境下变得极具破坏力,能释放酸性腐蚀性物质,甚至会在空气中释放毒素^[4]。在长期载人飞行任务中,如果不对这些微生物加以控制,将会对航天员的生命健康和航天器的长期安全运行造成以下风险。

首先,微生物的滋生会产生毒素,污染舱内空气、水源和食物,致病微生物会导致航天员生病或造成感染。在长期飞行条件下,航天员免疫功能会受到一定程度的抑制,某些致病微生物的感染毒性可能会增强。美国研究表明,鼠伤寒沙门氏菌在搭载航天飞机飞行12天后,对小鼠的毒性几乎增为地面对照菌的3倍^[5]。绿脓杆菌,一种能够引起伤口感染的常见细菌,在太空培养环境下可以形成一种具有独特结构的生物膜,其拥有的活细胞数、生物量和厚度都明显高于地面对照,这种改变可能会对病原菌的致病能力和耐药性产生重要影响^[6]。

其次,微生物能够腐蚀破坏空间材料,形成生物膜堵塞管道,导致技术设备故障。“和平”号空间站在长达15年的运行期间曾发生多次由微生物导致的设备故障。例如,其第3批航天员曾发现一扇舷窗因为霉菌的生长造成能见度降低,光学性能下降。第5批航天员进驻期间氧气电解装置因真菌的繁殖而出现堵塞。第14、15批宇航员在轨期间其温控系统曾发生故障,经调查发现是被真菌繁殖形成的胶状物质堵塞了管道。第24批宇航员进驻期间曾发生由于真菌腐蚀造成的电子通讯设备故障^[1]。在国际空间站的运行期间,也曾多次报道发生微生物腐蚀事件。如,在2001年,俄罗斯舱的一个烟感器故障,返回地面后调查发现是由真菌对电子部件的降解引起的^[7]。俄罗斯在“和平”号空间站上的实践表明,真菌和细菌经空间飞行后,其对材料的腐蚀破坏能力会显著增强^[1]。

此外,在太空孤立环境下发生变异的微生物变种,如果被活着带返地球,可能会对人类和地球生态构成威胁。在“和平”号空间站坠毁之时,其携带的各种变异真菌是否会逃脱被销毁的命运,而进入地球的生物圈,曾引起科学界的广泛关注^[8]。

因此,为保障长期载人飞行人员健康和系统的运行安全,需要对空间微生物及其风险进行控制。俄美等国在“和平”号空间站和国际空间站的建造及运营过程中非常重视微生物控制工作,并针对空间微生物的监测、控制、防护等技术开展了大量研究,已经积累了大量的技术和经验^[1,2,9]。我国载人航天事业开展较晚,在前期神舟系列飞船任务中,由于飞行时间短,微生物控制的重要性未得到体现,导致我国空间微生物控制技术水平相对薄弱。随着我国空间站工程的启动实施,在2020年前后,我国将建成和运营空间站,并将独立开展长期有人参与的空间科学实验^[10]。空间微生物控制已成为我国空间站工程面临的一个重大挑战^[11],开展空间微生物控制技术研究是我国载人航天工程发展的重大需求。

2 空间微生物控制

空间微生物控制是指通过在航天器设计、建造和飞行过程中采取一系列的微生物监测、控制、防护措施,控制空间飞行环境中的微生物水平,防范微生物可能对航天员或飞行系统造成的潜在风险^[1,9]。(对于一些需要返回地球或着陆外星球的航天器,其携带的微生物可能会对地球或外星球的生态或环境造成潜在威胁,因属于“行星保护”考虑范畴^[12],不在本文讨论之列。)

2.1 空间微生物来源和特点

航天员的活动,以及航天器组成和地面建造发射过程的复杂性,造成空间微生物的来源途径多样,控制难度大。空间微生物最主要来源是航天员的自体微生物,在航天员体表和体内通常生活着大量微生物,它们是人体微生态平衡系统的重要组成部分,在正常情况下,有益于人体健康。航天员在轨期间,这些微生物会通过呼吸或其他途径源源不断地传播到舱内环境^[1,11]。其次,航天器的结构组件、设备载荷,携带的货物、食品和水等,以及地面总装测试、发射准备过程都可能引入微

生物污染^[1,11]。许多环境微生物的生命力非常顽强,特别是一些细菌的芽孢和真菌的孢子,一般的消毒灭菌措施很难完全消除,这些逃脱并进入太空舱的微生物或孢子,遇到适宜的条件,就会继续生长繁殖,并扩散到舱内各个角落^[13]。

舱内的微生物种类复杂,且一直处于动态变化之中。俄罗斯生物医学研究中心曾先后从“和平”号空间站分离出234种微生物,包含126种真菌和108种细菌^[1]。与地面相对一致的微生物生活环境不同,舱内的微生物通常生活在各种局部微环境中,如,控制面板背面、通信设备内部、空调管道系统、各种材料表面等。这些局部微环境中生存条件差异很大,且经常发生变化,如温度、湿度波动,冷凝水形成,材料老化和有机物累积等。造成适宜生活微生物种群的多样性,及种类、数量的经常性变化^[1]。在舱内密闭环境下,这些生活在不同生境中的微生物群落,一方面发生自身演变,群落内不同种群相互依存、相互竞争,优势种群不断演替;另一方面,不同的微生物群落之间通过空气以及其他传播途径进行种群交流,最终演化形成一种独立的空间微生物生态系统。这种微生物生态系统也是动态变化的,当发生环境变化或外源种群进入时,原有生态平衡即被打破,并向新的平衡演变。此外,微生物处于太空辐射、微重力等环境下,还可能会发生菌群性状和生理遗传等方面变化,如,生物膜的形态结构,微生物的生长速度、适应性和抗性,真菌的腐蚀性和破坏性,病原菌的致病性和毒性等^[1,5-6]。这些变化会导致空间微生物风险和控制难度的增大。

2.2 空间微生物控制任务分析

空间微生物的以上特点,决定了空间微生物控制的复杂性。按航天工程的不同阶段微生物控制任务可划分为:①航天器设计阶段。在舱内环境设计、材料选择等过程中,需要尽量减少有利于微生物生长的环境或表面,避免使用易受微生物腐蚀破坏的工程材料,对可能发生的微生物风险采取预先防护或对抗措施。②地面建造阶段。在航天器的总装测试、发射准备过程中,需要采取消毒灭菌、洁净组装、微生物监测等一系列措施,严格控制航天器和设备载荷等携带的微生物污染。③在轨飞行阶段。需要定期监测飞行中舱内环境的微生物污染及变化,并通过清洁消毒等操作降

低微生物水平,以及在发现微生物风险后采取应对措施。

由于不同航天任务的微生物危害性不同,微生物控制任务要求也不尽相同。①人造卫星、月球或行星探测器等无人航天器。由于内部无大气存在,微生物不能生长,不会对航天器造成危害,无需进行飞行微生物风险防护。但是,如果航天器需返回地球或着陆外星球,需考虑“行星保护”相关要求。②神舟飞船等短期载人航天器。由于在轨时间短,微生物对材料设备的危害较小,主要风险是病原微生物对航天员的感染。所以,微生物控制重点为地面阶段的消毒灭菌和病原微生物的检验检疫,以及在轨微生物采样监测。③空间站等长期载人航天器。由于在轨时间长,微生物的滋生不仅威胁航天员的生命健康,还会对舱内材料设备造成潜在危害。所以,不仅需要在航天器地面阶段严格控制微生物污染的引入,在轨阶段对舱内微生物水平进行长期监测和控制,还需要在航天器的设计阶段对潜在的微生物风险采取预先防护措施。④与空间站对接的载人或货运飞船。主要防范对接过程中将外源微生物引入空间站舱内。所以,其地面阶段应执行与空间站类似的微生物控制标准,并在发射前进行采样检测。

3 国外空间微生物控制发展现状

3.1 国际空间站发射前和在轨运营微生物控制要求

国际空间站是一个长期在轨飞行的近地载人航天器,在国际空间站医学操作要求文件(ISS MORD)中,包含了对空间站发射前和在轨运营期间微生物控制的相关要求^[14]。

国际空间站各舱段在发射前,需依据ISS MORD“国际空间站飞行前微生物控制和监测要求”对舱内的表面、空气和水进行微生物采样检测,分析细菌、真菌的数量和种类。与空间站对接的航天飞机、“联盟号”飞船和“进步号”货运飞船在发射前也需要进行微生物检测。如果发现细菌或真菌水平超标,需采取适当措施进行处理,将其降低到允许范围之内。

国际空间站在轨运营期间,需按照ISS MORD“国际空间站在轨飞行微生物控制和监测要求”对舱内表面和空气进行定期微生物采样,

并对舱内表面材料和金属部件受微生物腐蚀破坏的情况进行评估。

表1 国际空间站飞行前微生物控制标准(ISS MORD)
Table 1 Pre-flight microbial specifications of ISS (ISS MORD)

样品种类	细菌的最大限量	真菌的最大限量
空气	300 CFU/m ³	50 CFU/m ³
内表面	500 CFU/100m ²	10 CFU/100m ²
水	50 CFU/100mL	0 CFU/100mL

需要同时采用两种手段对微生物样品进行分析:

1) 在轨微生物计数,分析细菌和真菌的数量与动态变化;

2) 返回地面分析,将飞行期间和人员返回前采集的样品带回地面,在实验室中对样品中的微生物进行分离鉴定,分析微生物的种类和性状变化。

表2 国际空间站在轨飞行微生物控制标准和监测要求
Table 2 In-flight microbial specifications and monitoring requirements of ISS (ISS MORD)

微生物控制标准		
样品种类	细菌的最大限量	真菌的最大限量
空气	1000 CFU/m ³	100 CFU/m ³
内表面	10000 CFU/100m ²	100 CFU/100m ²
水	100 CFU/mL	<1 CFU/mL
在轨监测要求		
采样地点	表面监测 采样数及频率	空气监测 采样数及频率
节点舱	2个采样点/每舱段;	1个采样点/每模块;在
服务舱	在轨运营前90天,一	轨运营前90天,一月采
实验舱	月采样一次;以后每90	样一次;以后每90天采
居住舱	天采样一次。	样一次。

如果发现舱内空气或表面微生物水平超标,可通过向地面传送视频或照片,由美国 NASA/JSC 和俄罗斯 RSA/IBMP 的微生物专家对微生物风险进行评估,并将结果通知参与飞行任务的医生;同时,尝试鉴定污染源,并协调相关人员采取适当的控制措施。对于表面微生物污染,可根据情况采用清洁或消毒拭巾进行擦拭。

3.2 国外空间微生物控制技术介绍

3.2.1 航天器设计微生物防护技术

在航天器设计中,常用的微生物防护措施有:在舱内空气循环系统中加入 HEPA(高效空气粒子过滤)装置,用以去除空气中的微生物和颗粒物;调整舱内环境设计,控制空气相对湿度及均匀度,防止湿气在某些部位积累并形成冷凝水^[15]。

“和平”号空间站和国际空间站还装备了等离子发生装置,用于净化空气和杀灭微生物^[16]。美国 NASA 还十分重视航天工程材料的抗菌防霉性能筛选和抗菌涂料研究,在上世纪70年代曾委托哥伦布实验室开展抗菌材料和涂料的实验研究^[17]。

3.2.2 航天器硬件消毒灭菌技术

航天器零部件在出厂前,需要进行清洗消毒,NASA 常用的方法有:70%异丙醇或超纯水擦拭法、多重有机溶剂清洗法等^[18]。航天器部组件在组装完成后,还需要进行灭菌处理。干热灭菌为 NASA 早期“行星保护”计划的主要灭菌方法^[19-20],但是,长时间热处理会引起某些材料的降解,影响材料设备的性能或可靠性,仅适用于航天器一些耐热金属零部件的灭菌^[21]。航天飞机等现代航天器,含有大量有机合成材料和电子元器件等热敏感部件,干热灭菌法很难完全适用。所以,NASA 一直在积极寻找可以替代的常温灭菌技术,已报道的有:环氧乙烷(ETO)、低温甲醛蒸汽、过氧化氢蒸汽(VHP)、低温等离子体等气体灭菌技术^[22-24]。其中,VHP 是最新经过 NASA 认可的常温灭菌技术,NASA 喷气推进实验室(JPL)已完成了 VHP 与系列航天材料的兼容性试验,并对过氧化氢浓度、灭菌时间、温度等各项灭菌参数进行了系统优化研究^[24-25]。现代 VHP 灭菌技术由于灭菌温度低、无害无残留、对大部分航天材料有很好的兼容性,非常适合载人航天器表面及组件设备的灭菌处理。

3.2.3 航天器洁净组装技术

经过消毒灭菌的航天器零部件需要在洁净环境中进行总装测试和发射准备,以避免微生物二次污染。在国际空间站的地面组装过程中,装配车间对微生物控制的要求远高于外科手术间的要求,以避免人员或环境对航天器硬件的污染^[26]。目前,国外航天器装配车间通常采用层流系统控制空气微生物水平,并制定例行的清洁消毒、微生物监测和人员操作规程。例如,在 JPL 的灭菌组装与研发实验室(SADL),进入人员必须经过鞋子清洁处理和风淋除菌后,才能进入实验室前厅(更衣室),然后穿上实验室提供的全套无菌操作装备,包括鞋子、袜子、外罩、帽子、手套等才能进入实验室进行操作。实验室同时配有专业的微生物控制人员,包括:微生物工程师、微生物技师、质

控工程师等,定期进行清洁消毒和检测防护,以保证实验室的洁净度^[26]。

3.2.4 航天器装配及发射前微生物监测技术

NASA 制定了一系列的标准方法和程序,用于对航天器装配环境和硬件设备的微生物监测^[27]。对装配车间的空气沉降微生物水平,一般采用灭菌不锈钢片或灭菌特氟龙条带法进行监测。其中,灭菌不锈钢片法是将一系列灭菌不锈钢片放置于待检测区,每隔一段时间,回收部分钢片,检测上面的微生物水平。这种检测方法已证明比传统的容积式空气取样器更灵敏可靠。灭菌特氟龙条带法与灭菌不锈钢片法操作类似,区别在于用特氟龙条带替代了不锈钢片。对地板和工作台面等坚硬平整表面,采用 RODAC 接触平板印压法进行采样,对航天器硬件或其他表面使用无菌棉签或无菌布擦拭法进行采样。对装配车间空气微生物样品,采用狭缝撞击法进行采样,对一些狭小空间,如飞船指挥舱内及周围区域的空气微生物样品,则采用过滤膜取样器进行采集^[27]。在样品分析方面,琼脂平板培养法仍然是最常用的微生物检测方法,其他的方法还有 ATP 荧光检测法、内毒素水平检测法(LAL)、PCR 检测法等^[28]。

航天器在发射前,还需对其携带的微生物水平进行监测。在航天飞机项目(SSP)中,要求分别在航天飞机到达发射场(通常为发射前15-25天)和发射前2天对驾驶舱、中舱和空间实验室的空气和表面进行采样^[3]。空气微生物采样使用一种带电池的小型便携式采样器,表面采样需与空气采样同时进行。除了检测细菌和真菌的水平之外,还需对微生物的种类进行分析。在早期航天飞机项目中,还要求在航天飞机着陆后立即在同样部位进行采样,但在后来的项目中,着陆后和发射2天前采样都被取消了^[3]。

3.2.5 在轨微生物监测技术

在载人航天发展的早期阶段,人们即已认识到飞行中微生物监测对保证航天员健康的重要性。自人类首次载人航天飞行起(尤里·加加林,1961),美苏就开始采用传统的培养方法对飞行舱内的微生物进行监测。在美国航天飞机项目中,宇航员常用一种小型便携离心式采样器对舱内空气进行采样,空气中的微生物被撞击到琼脂

平板上,细菌和真菌分别采用不同的培养平板。10年间14次任务的监测结果表明:飞行中,空气中的细菌水平通常随飞行时间的延长趋于增加,并经常会超过1000 CFU/m³,真菌水平一般会很低,并在飞行中呈降低趋势,可能受低湿、缺乏自由态水等因素影响。空气中的常见细菌为金黄葡萄球菌、微球菌、芽孢杆菌和肠杆菌,主要为人和环境相关的典型菌群;常见的优势真菌为曲霉、青霉和丝孢菌^[3]。“和平”号空间站运营近15年,为研究长期载人飞行环境下微生物组成、种群选择和适应的动态变化提供了绝佳的机会。1995—1998年间,作为美俄国际空间站合作计划的一部分,美国共有7名宇航员登上“和平”号空间站。美俄合作开展了从75天到209天在轨飞行发射前、在轨和返回后的微生物采样分析工作,采样对象包括机组人员、“和平”号空间站和航天飞机环境等。其中,空气微生物采样用的是 Burkard 撞击式采样器,“和平”号空间站内四个取样点空气细菌平均水平为200~425 CFU/m³(俄罗斯限值为500 CFU/m³),空气真菌平均水平为175~325 CFU/m³(俄罗斯限值为100 CFU/m³)。空气中常见细菌为金色葡萄球菌、芽孢杆菌和棒状杆菌,常见真菌为青霉、曲霉和枝孢霉。“和平”号空间站表面微生物采样用的是拭子和接触培养板,平均细菌水平不高于2700 CFU/100cm²,平均真菌水平不高于500 CFU/100cm²。表面常见细菌为金色葡萄球菌、芽孢杆菌和微球菌,常见真菌为青霉、念珠菌和曲霉^[2]。目前在国际空间站,每90天,宇航员就要用一种在轨工具包对各舱段的空气、水和表面进行采样,工具包中含有多种基于培养的采样分析工具,包括表面采样工具(SSK),空气微生物采样器(MAS),水样收集工具(WSCK)等。样品分析主要有两种方式:①在轨培养,通过观察进行菌落计数;②样品返回地面,在实验室中进行更复杂的分析^[29]。

国外前期经验表明,基于传统培养方法的在轨微生物检测技术简单实用、稳定可靠,可以为分析空间环境微生物的种类和分布提供重要数据。但是,由于这些方法主要基于微生物在培养基上的生长能力,所以存在一些不足:①超过95%的微生物种类不能在传统的培养基上生长,不能被培养法检测;②分析时间长,在轨培养分析需3—

5天,返回地面分析则要长达几个月;③培养板内容易结雾,不利于菌落观察统计;④培养可能会导致有害微生物的生长,用完必需进行安全处理,以防造成污染。

因此,近年来欧美等国一直在积极改进或研究免培养基的在轨微生物检测技术。在“和平”号空间站的EuroMir95项目中,意大利航天局开展的“MIRIAM-T2”空间站微生物监测实验的主要目的之一,就是验证两种简单快速的在轨微生物检测技术。①荧光分析仪,是一种半自动、实时的分析技术,利用一种“生物荧光”反应测定样品中的ATP(三磷酸腺苷,细胞反应的主要能源分子)水平,来评价微生物生物量。②“微培养”技术,这种技术基于传统的菌落培养方法,用浸有营养液的灭菌纸片代替琼脂培养基。先用一种滤膜采集微生物样品,然后放在营养纸片上,再用无菌的透明样品袋密封后直接在轨培养。优点为:方便在轨操作,培养菌落半径小,易于计数,污染风险低^[30]。在国际空间站,目前正在使用一种手持式微生物检测设备“LOCAD-PTS”,它是从用于制药和卫生行业的一种便携式内毒素检测系统(Endosafe-PTS)发展而来,NASA的Marshall空间飞行中心联合相关研究机构将其改进以适应空间环境使用。检测器自身重2.2磅,集成了分光光度计、加热器、微泵等功能,可以与多种可互换的测试卡配合使用,用于检测多种微生物分子。目前在国际空间站上有三种不同的LOCAD-PTS测试卡,分别用于检测内毒素、葡聚糖和脂磷壁酸,相对应于革兰氏阴性细菌、真菌和革兰氏阳性细菌的水平。“LOCAD-PTS”系统还附加有与之相配合的表面采样、样品处理工具。宇航员可以利用这些工具进行表面采样和样品处理,然后在轨利用LOCAD-PTS对其定量分析,整个过程15分钟内即可完成。LOCAD-PTS于2006年12月由“发现号”航天飞机送往国际空间站,并于2007年3月开始第一次使用,之后,被广泛地用于空间站内微生物污染的监测^[29]。

3.2.6 在轨微生物控制和防护措施

在轨微生物控制措施主要分为两大类:①主动控制,主要包括使用空气过滤装置去除空气浮游微生物,使用吸尘器和浸有去污剂或消毒液的抹布清洁舱内表面等。“和平”号空间站在轨运

行期间,每周会安排一天进行大扫除(通常为周日),所有人员必须参与。在国际空间站美国舱段,每周会安排4个小时进行清洁,使用一种便携式吸尘器,6种消毒湿巾(消耗型,每次任务补充),以及去污剂和擦布等,对舱内环境进行清洁消毒。但是,并非舱内的所有部位或表面都可以用擦布进行清洁消毒,如一些死角或设备内部。这些部位必需在设计建造时采取一些防护措施^[31]。②被动控制,主要通过优化舱内环境设计、选择抗菌防霉材料、对舱内表面进行处理等措施,抑制微生物生长,防范微生物可能导致的风险。

3.2.7 水微生物控制技术

航天器饮用水微生物污染会严重威胁航天员健康,并诱导对硬件的生物腐蚀。微生物可以在饮用水储箱或输送管道内形成生物膜,这些附着的微生物菌落可以提高致病菌的持留性和微生物对消毒剂的抗性。因此,需要采用适当的消毒措施对其进行控制^[32]。美国航天飞机饮用水主要通过添加碘离子进行消毒。航天飞机飞行前,水箱中饮用水来自于城市用水,先使用 $0.1\ \mu\text{m}$ 滤膜滤除微生物污染,然后添加 $2\sim 3\ \text{ppm}$ (终浓度)的碘离子作为消毒剂。航天飞机空间飞行阶段,饮用水主要由燃料电池提供,并添加 $2\sim 3\ \text{ppm}$ 的碘离子进行消毒^[3]。俄罗斯“和平”号空间站饮用水采用银离子作为消毒剂,其饮用水主要来自于经水处理系统净化的空气冷凝水,也有部分来自于地面,需要在地面运送之前或在轨添加银离子($0.5\ \text{mg/L}$)进行消毒^[2]。国际空间站饮用水有多种来源,包括:地面运送的饮用水,航天飞机飞行阶段燃料电池产生的水,以及空间站在轨回收再生的饮用水(主要来自于空气冷凝水、尿液的蒸馏水等)。国际空间站饮用水主要通过在地面运送之前或在轨添加 $0.5\ \text{mg/L}$ 银离子进行消毒,航天飞机飞行阶段燃料电池产生的水,则先添加碘离子($2\sim 5\ \text{mg/L}$)进行消毒,在输送至空间站饮用水系统之前,去除碘离子,再添加银离子代替。航天飞机在飞行前和返回后,需对饮用水的细菌总数和大肠杆菌数进行检测,细菌总数限量为 $50\ \text{CFU}/100\text{mL}$,大肠杆菌为低于 $1\ \text{CFU}/100\text{mL}$ ^[3]。国际空间站需定期对不同来源的饮用水质量进行检测,利用美国提供的水微生物分析

试剂盒,在轨对水的异养微生物进行定量,美国舱段饮用水还需额外检测大肠杆菌数量。国际空间站还要定期对水微生物样品进行存档,供返回地面后分析^[32]。

由于碘离子作为消毒剂与国际空间站的银离子消毒系统不兼容,所以,航天飞机燃料电池产生的水在输送至国际空间站之前,需要通过离子交换去除碘离子。此外,碘离子会使饮用水产生一种不好的味道,并可在甲状腺中积累,导致有机化合物卤化形成细胞毒性物质,对长期飞行的航天员健康造成风险。因此,NASA已决定以氟化银替代碘离子作为下一代航天器饮用水系统的消毒剂。但是,氟化银会在溶液或湿润金属表面发生离子相互作用,银离子会快速从溶液中析出,并逐渐失去抗菌作用^[33]。由于当前国际空间站使用的饮用水消毒剂(银离子、碘离子)存在的缺点,如:对人的毒性限量低,杀菌持效时间短,需要再补充,具有不好的味道等^[34,35]。NASA正在研究新一代的饮用水系统抗菌技术,如:使用具有杀菌作用的UV-C发光二极管作为点端消毒装置;联合使用UV-A发光二极管与光催化材料(TiO₂等)对饮用水系统进行消毒;采用多种抗菌或具有表面拓扑结构的材料,杀死水中微生物,阻止生物膜的形成;保持银离子的溶解性,延长其杀菌持效时间等^[34-36]。

4 对我国空间微生物控制技术发展的建议

空间微生物控制技术是长期载人航天的关键技术之一,是保障航天器长期安全运行和航天员生命健康的重大需求。美俄等航天大国在航天技术发展的早期(上世纪50-60年代)即已开始重视航天活动相关的微生物控制工作。经过长期实践,已经积累了大量的技术与经验,并建立了较完善的空间微生物控制技术体系^[1-3]。我国由于载人航天事业发展较晚,相关研究和技术试验开展较少,技术基础薄弱,目前尚未建立空间微生物控制的基本技术体系。为促进我国空间微生物控制技术的快速发展,尽快满足我国载人航天工程的微生物控制需求,我国应立即开展空间微生物控制技术体系建设和相关技术研究。

4.1 空间微生物控制技术体系建设

空间微生物控制是一项非常复杂的系统工

程,贯穿于载人航天器设计、建造和运营的整个过程,涉及微生物监测、控制、防护等多种技术手段,任何一个环节上的纰漏,都可能导致严重的安全问题。只有建立系统全面的微生物控制技术体系,才能有效保障载人航天工程安全。美国NASA虽未明确提出统一的微生物控制技术体系,但在航天器设计、建造和运营的相关技术文件中包含了对微生物的控制要求或技术标准(表3)^[14,15,27,31,37-44],并针对微生物的监测、控制和防护建立了标准化的技术流程或规范,实际上形成了比较完备的空间微生物控制技术体系。我国在航天器设计、建造和运营过程中涉及微生物控制内容较少。为了快速建立系统有效的技术体系,以满足当前载人航天工程对微生物控制的迫切需求,需要进行系统性设计、统一规划。根据对载人航天工程微生物控制任务的分析,空间微生物控制技术体系的基本构成如图1所示^[1-3]。除了应围绕航天工程各阶段的各项微生物控制任务,建立标准化的技术流程和控制标准,还需要建立一个统一的空间微生物风险管理系统,对航天工程中发现或潜在的微生物风险问题进行分析、鉴定和评价,并提出相应控制方案,同时为空间微生物控制技术规范 and 标准的制定或修改提供依据。

4.2 空间微生物控制技术研究

空间微生物控制涉及多种不同的专业技术,如抗菌防霉、消毒灭菌、洁净组装、微生物监测、微生物分析鉴定等,这些技术或产品在载人航天工程中应用,还必需考虑载人航天工程环境及约束条件。空间微生物控制涉及的各项技术或产品,在技术复杂度、应用成熟度,及工程需求的迫切程度等方面存在显著差异。所以需要优先发展那些技术较为简单、成熟度高、开发周期短,航天工程迫切需要的技术或产品,满足近期工程需求。这类技术包括:航天材料抗菌防霉性能评价技术、地面微生物采样监测技术、航天器硬件的消毒灭菌技术等。同时,还要逐步研究和开发一些具有一定前瞻性、先进性,难度较高、研发周期较长的关键技术或产品,以满足载人航天工程未来发展的更高需求。目前国外研究较多的有:在轨微生物快速检测技术、在轨消毒灭菌技术、航天材料抗菌防霉技术等^[16,29,30,33-36,45]。

表3 美国航天工程微生物的控制要求或技术标准
Table 3 Microbiological control requirements and specifications of NASA space programs

技术文件	包含微生物控制相关内容
载人航天器设计	<p>NASA-STD-3001^[15] 空间飞行人机系统标准</p> <p>NASA/SP-2010-3407^[31] 人机系统设计手册</p> <p>NASA-STD-6012^[37] 空间飞行硬件腐蚀防护标准</p> <p>NASA-STD-6016^[38] 航天器标准材料与处理要求</p>
地面建造阶段	<p>NHB5340.2^[39] 洁净室和洁净工作台微生物控制标准</p> <p>NASA-SP-5076^[40] 污染控制手册</p> <p>NASA-HDBK-6022^[27] 航天器硬件微生物监测手册</p>
在轨飞行阶段	<p>NASA-SSP-50260^[14] 国际空间站医学操作要求文件</p> <p>SSP41172^[41] 发射前微生物监测要求</p> <p>JSC63828^[42] 生物安全评价操作与要求文件</p> <p>JSC16888^[43] 空间飞行微生物操作计划</p> <p>JSC11859^[44] 微生物污染控制计划</p>

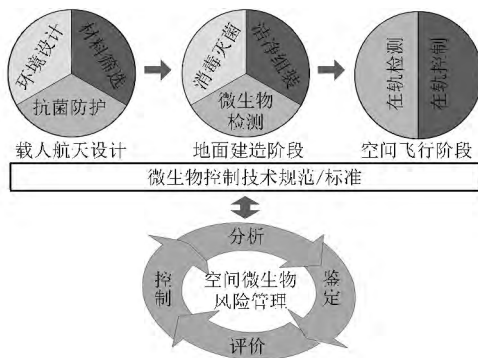


图1 空间微生物控制技术体系构成
Fig. 1 Technical components of space microbiological control system

5 结束语

空间微生物控制技术是我国载人航天工程未来发展所必需具备的关键技术之一,开展空间微

生物控制技术研究 and 体系建设对于保障我国空间站长期安全运行,及未来载人登月、载人火星等航天任务的微生物安全有重要意义。此外,为空间微生物控制研发的一些新技术或产品也可在其他行业进行应用,如:空气、水源、食品、药品等的微生物污染检测,医疗卫生和公共场所的病原菌监测和消毒灭菌,环境设施、家居用品的抗菌防霉等。

[参考文献]

[1] Novikova N D. Review of the knowledge of microbial contamination of the Russian manned spacecraft[J]. Microbial ecology, 2004, 47(2): 127-132.

[2] Pierson D L. Microbial contamination of spacecraft[J]. Gravitational and Space Research, 2007, 14(2): 1-6.

[3] Pierson D L, Ott C M, Bruce R, et al. Microbiological Lessons Learned From the Space Shuttle[J]. Space, 2011, 5: 6.

[4] 新浪科技. 和平号可能携带太空细菌 专家恐引发大灾难

- [EB/OL]. [2001] <http://tech.sina.com.cn/o/57530.shtml>.
- [5] Wilson J W, Ott C M, Honer zu Bentrup K, et al. Space flight alters bacterial gene expression and virulence and reveals a role for global regulator Hfq[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2007, 104(41): 16299-16304.
- [6] Kim W, Tengra F K, Young Z, et al. Spaceflight promotes biofilm formation by *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *PloS one*, 2013, 8(4): e62437.
- [7] Pierson D L, Botkin D J, Bruce R J, et al. Microbial Monitoring of the International Space Station[J]. 2013.
- [8] BBC news. Mutant fungus from space [EB/OL]. 2001. http://news.bbc.co.uk/2/hi/not_in_website/syndication/monitoring/media_reports/1209034.stm.
- [9] Duane L. Pierson. Microbial environment of spacecraft [EB/OL]. (2007). http://www.tsgc.utexas.edu/meetings/S07/presentations/7_Pierson_TSGC.pdf.
- [10] 周建平. 我国空间站工程总体构想[J]. *载人航天*, 2013(2): 1-10.
- [11] 杨宏, 侯永青, 张兰涛. 微生物控制—我国空间站面临的新挑战[J]. *载人航天*, 2013(2): 38-46.
- [12] Rummel J D. Planetary protection policy overview and application to future missions[J]. *Advances in Space Research*, 1989, 9(6): 181-184.
- [13] 宋富强. 微生物生态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 41-72.
- [14] NASA-SSP-50260. International space station medical operations requirements documents[S]. NASA: 2003.
- [15] NASA-STD-3001. NASA space flight human-system standard, Volume 2: Human factors, habitability, and environmental health[S]. NASA: 2011.
- [16] Potok Inter. Biological safety and devices for air decontamination[EB/OL]. www.inno-russia.com/katalog_china/.../2/Potok_Inter.ppt.
- [17] Kemp H T, Cooper C W. Laboratory microbiology of spacecraft coatings[J]. *Developments in Industrial Microbiology*, 1971, 12: 312-330.
- [18] Venkateswaran K, Chung S, Allton J, et al. Evaluation of various cleaning methods to remove bacillus spores from spacecraft hardware materials[J]. *Astrobiology* 2004 4(3): 377-90.
- [19] Bruch C W. Dry-heat sterilization for planetary-impacting spacecraft[J]. *NASA Special Publication*, 1966, 108: 207.
- [20] Beyerle F J, Snow E B. Sterilization of unmanned planetary spacecraft, a report on current [R]. NASA-TM-X-53884, NASA, 1970.
- [21] Roper W D. Effects of decontamination, sterilization, and thermal vacuum on polymeric products [R]. NTIS 6921 JPL, 1970.
- [22] Bionetics Corporation. Advances in Sterilization and Decontamination: A Survey [M]. National Aeronautics and Space Administration, Technology Utilization Office, 1978: 19-106.
- [23] Fraser S J, Olson R L, Leavens W M. Plasma sterilization technology for spacecraft applications [J]. Final Report Boeing Co., Seattle, WA. Aerospace Group., 1975, 1.
- [24] Chung S, Barengoltz J, Kern R, et al. The validation of vapor phase hydrogen peroxide microbial reduction for planetary protection and a proposed vacuum process specification [R]. JPL Publication 06-6, JPL 2006.
- [25] Rohatgi N, Schubert W, Koukol R, et al. Certification of vapor phase hydrogen peroxide sterilization process for spacecraft application [R]. SAE Technical Paper, 2002.
- [26] Botan E A, Lunney E J. Sterilization Assembly Development Laboratory—Routine cleaning and decontamination of the SADL facility (Procedures for preparing cleaning and germicidal solutions and cleaning equipment for spacecraft sterilization) [R]. NASA-CR-94381, JPL, 1967.
- [27] NASA-HDBK-6022. Handbook for the microbial examination of space hardware [S]. NASA: 2010.
- [28] La Duc M T, Kern R, Venkateswaran K. Microbial monitoring of spacecraft and associated environments [J]. *Microbial ecology*, 2004, 47(2): 150-158.
- [29] Maule J, Wainwright N, Steele A, et al. Rapid culture-independent microbial analysis aboard the International Space Station (ISS) [J]. *Astrobiology*, 2009, 9(8): 759-775.
- [30] Guarnieri V, Gaia E, Battocchio L, et al. New methods for microbial contamination monitoring: an experiment on board the MIR orbital station [J]. *Acta astronautica*, 1997, 40(2): 195-201.
- [31] NASA/SP-2010-3407. Human integration design handbooks [S]. NASA: 2010.
- [32] Van Houdt R, Mijndonckx K, Leys N. Microbial contamination monitoring and control during human space missions [J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 60(1): 115-120.
- [33] M Birmele, L McCoy, M Roberts. Disinfection of Spacecraft Potable Water Systems by Passivation with Ionic Silver [R]. AIAA 2011-5278. 2011.
- [34] M Birmele, J Caro, G Newsham, et al. Antimicrobial Materials for Advanced Microbial Control in Spacecraft Water Systems [R]. KSC-2012-247. 2012.
- [35] M Birmele, M Roberts, M Morford. Antimicrobial Resources for disinfection of potable water systems for future spacecraft [R]. AIAA2012-3507. 2012.
- [36] J. A. O'Neal, M. N. Birmele, M. S. Roberts. Disinfection of Spacecraft potable water systems by photocatalytic Oxidation Using UV-A light Emitting diodes [R]. NASA: 2011.
- [37] NASA-STD-6012. Corrosion protection for space flight hardware [S]. NASA: 2012.
- [38] NASA-STD-6016. Standard materials and processes requirements for spacecraft [S]. NASA: 2008.
- [39] NHB5340.2, NASA Standard for Clean Room and Work Stations for Microbially Controlled Environment, publication [S]. NASA: 1967.
- [40] NASA-SP-5076. Contamination control handbook [S]. NASA: 1969.
- [41] SSP 41172. International space station program, qualification and acceptance environment test requirements [S]. NASA: 2003.
- [42] JSC63828. Biosafety review board operations and requirements document [S]. NASA: 2007.
- [43] JSC 16888. Microbiology Operations Plan for Space Flight [S]. NASA: Not publicly available.
- [44] JSC 11859. Microbial Contamination Control Plan [S]. NASA: Not publicly available.
- [45] Gu J D. Microbial colonization of polymeric materials for space applications and mechanisms of biodeterioration: a review [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, 59(3): 170-179.