

# 载人深空探测任务的空间环境工程关键问题

沈自才<sup>1</sup>, 代巍<sup>1</sup>, 白羽<sup>1</sup>, 刘荣强<sup>2</sup>, 丁义刚<sup>1</sup>, 刘业楠<sup>1</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 对载人深空探测过程中将遭受的太阳宇宙射线、银河宇宙射线、微重力、尘与尘暴、深空微生物等环境进行分析。对不同深空环境给航天员带来的威胁进行了探讨。从物理屏蔽防护、辐射风险的监测和预警、辐射防护药物、航天员选拔等角度对采取的措施进行了阐述。从空间辐射对航天员的损伤机理、抗辐射和微重力药物开发、空间辐射屏蔽防护结构与材料、航天服自清洁、抗微生物侵蚀材料的研发等多个角度对需要进一步开展的工作进行了讨论。

**关键词:** 载人; 深空探测; 空间环境工程

**中图分类号:** V41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2016)02-0099-09

**DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.02.001

**引用格式:** 沈自才, 代巍, 白羽, 等. 载人深空探测任务的空间环境工程关键问题[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 99-107.

**Reference format:** Shen Z C, Dai W, Bai Y, et al. Key problems of space environmental engineering for manned deep space exploration mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 99-107.

## 0 引言

随着航天活动的持续深入, 人类空间探索的目标逐渐向地球以外的星体延伸。继发射了地球卫星和载人航天实施之后, 人类开展深空探测是航天活动的必然选择, 也将是进一步认识太阳系、探索地球和生命的起源及演化、获取更多科学知识的必须手段。

随着我国空间站建设、月球探测工程“绕”“落”“回”的逐步实施以及世界各国火星探测任务的逐步开展, 长期的月面基地驻留以及载人火星探测将成为各航天大国未来载人深空探测的主要发展研究的方向。与无人空间探测相比, 载人深空探测将遇到各种新的挑战, 包括长期在轨空间辐射、尘及尘暴及驻留舱的微生物等环境对航天器或航天员的威胁<sup>[1]</sup>。

对载人深空探测, 国外航天大国和机构开展了大量的研究。针对航天员在执行火星探测任务过程中可能遭受的长达一年多的低剂量率银河宇宙射线威胁, 美国国家航空航天局(NASA)的研究人员对空间辐射对人体的影响进行了研究, 对低剂量率的中子辐射、伽马射线辐射等对人体的损伤如痴呆、记忆力衰退、癌症等进行了评估。NASA等研究结构的研究人员指出, 少量的高能粒子辐射可造成航天员的大脑遭受损伤, 引起大脑神经细胞的结构发生变化, 主要表

现为树突细胞数量大幅减少, 这可造成记忆力衰退、神经错乱等, 降低航天员对新情况的反应能力和解决问题的能力<sup>[2-6]</sup>。我国的航天科技人员也已经开展相关的研究, 但仍处于起步阶段。

本文将首先对以火星和月球为目标的载人深空探测将遭遇的特殊环境进行介绍, 对这些空间环境对航天员的威胁进行分析, 并对对应采取的措施进行阐述。最后, 对载人深空探测需要进一步解决的问题进行了探讨。

## 1 深空特殊环境

载人深空探测环境主要包括真空、温度、空间辐射、微重力、尘与尘暴以及载人探测器内的微生物等环境。这里, 对真空和温度环境及其对载人探测的影响不再赘述。

### 1.1 空间辐射

在载人深空探测任务过程中, 航天器及航天员将遭受空间辐射环境威胁<sup>[7-8]</sup>。因此, 空间辐射环境主要由太阳宇宙射线、银河宇宙射线和星体辐射带组成。

太阳宇宙射线是指太阳耀斑爆发期间发射的大量高能质子、电子和重核粒子流, 其中绝大部分由质子

组成，能量范围一般从10 MeV到几十GeV。1989年9月29日太阳粒子事件时的月球表面环境见图 1<sup>[9-12]</sup>。

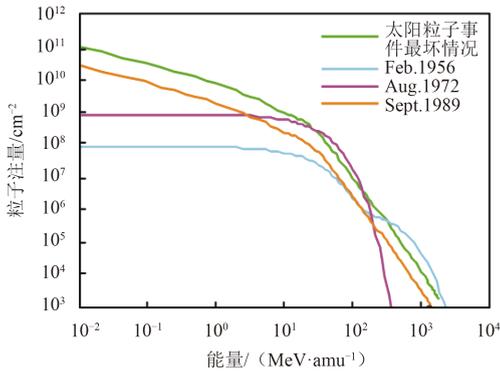


图1 自由空间太阳粒子事件质子光谱<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Free space solar particle event proton spectra at 1 AU<sup>[11]</sup>

银河宇宙射线主要来自太阳系以外的带电粒子，其特点是能量很高、通量很低，其中质子占85%， $\alpha$ 粒子占14%，重离子占1%。银河宇宙射线粒子的能谱范围都很宽，在几十 eV到10 MeV之间。在太阳低年和太阳高年的月表银河宇宙射线见图 2<sup>[13]</sup>。

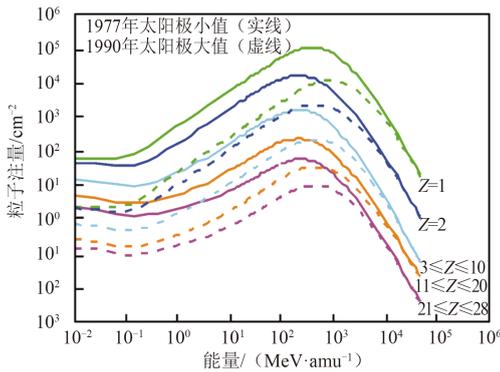


图2 自由空间银河宇宙射线环境<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Free space GCR environments at 1 AU<sup>[11]</sup>

此外，在具有磁场的星体周围，受到磁场的俘获作用，带电粒子将在星体周围形成俘获辐射带。地球、木星、土星等星体周围存在星体俘获辐射带。

### 1.2 微重力

在深空探测过程中，由于受到星体引力的改变及其航天器的运动，材料或生物所处不同位置的重力将极大地减小，甚至接近于微重力，从而可以对航天员或空间生物带来较大的威胁<sup>[14-16]</sup>。

根据牛顿引力理论，当航天器绕地球或其他星体运动时，假设星体质量为 $M$ ，航天器质量为 $m$ ，航天器与星体质心之间的距离为 $R$ ，其受到的重力加速度 $g$ 为

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

其中： $G$ 为引力常数，其值大小为 $6.67 \times 10^{-11}$ ，单位为 $N \cdot m^2/kg^2$ 。

在深空探测过程中，有的环境重力远达不到微重力的量级，如月面的重力加速度约为地球表面重力加速度的1/6，这种情况下的重力环境，有时也称为“微重力”或“低重力”环境。

### 1.3 尘与尘暴

在载人深空探测过程中，月球表面将主要是月壤，而火星表面除了火星尘之外，还存在由于稀薄气体而导致的火星尘暴。

月球表面覆盖了一层厚度不等的月壤、岩石等<sup>[17]</sup>，如图3所示（引自《航天器环境工程》2004年第1期封二）。暴露的月壤遭受来自空间的作用，包括陨石和微陨石撞击、太阳风和高能宇宙射线轰击等而引起风化。在空间风化的作用下，岩石逐渐被粉化，使得月尘成精细的粉尘状。因此，月球表面覆盖着一层厚度不同的月尘<sup>[18-20]</sup>。月壤物理特性分析表明：月壤中95%的颗粒尺度小于1 mm，大约50%小于60  $\mu m$ ，10%~20%小于20  $\mu m$ ，月壤颗粒度分布非常宽。

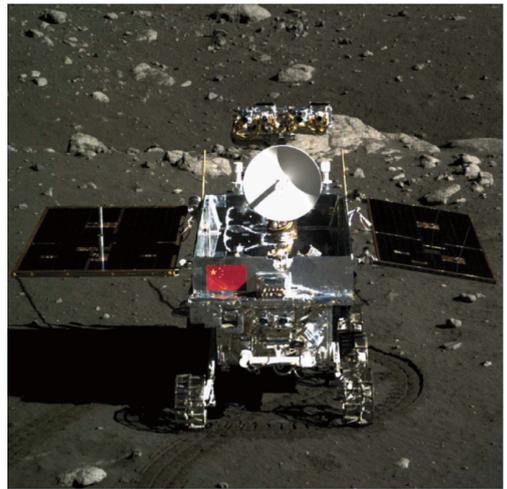


图3 “嫦娥3号”着陆器地形地貌相机拍摄的巡视器近景图<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Close range map of rover by Chang'e three lander topography camera<sup>[17]</sup>

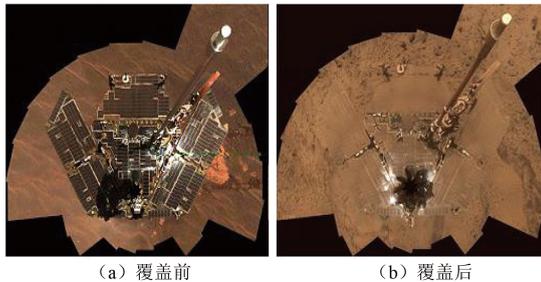
火星表面沉积了厚厚的火星尘埃，火星大气中也充满着尘埃，它们都是火星岩石风化的产物，成分主要是硅酸盐(>60%)还有磁铁矿(1%)等其他成分。而火星上面的干燥大气和风可以把火星尘埃从表面扬起，从而形成火星尘暴。如图4<sup>[21]</sup>所示。尘暴可以是局部性的或全球性的，区域性尘暴的持续时间一般为几周，可以覆盖大片区域；全球性尘暴则几乎每年就发生一次，持续时间长达几个月。全球性尘暴通常

是在火星南半球为夏季时的火星近日点从南半球爆发，进而吞没整个星球，致使尘埃悬浮在大气中，并最终降落回火星表面。火星尘可导致航天器损伤或功能无法实现。“勇气号”探测器在火星表面就曾被火星尘覆盖，如图5<sup>[22-23]</sup>所示。



图4 火星全球勘测者拍摄的火星尘暴<sup>[21]</sup>

Fig. 4 Mars dust storm by Mars Global Surveyor (MGS)<sup>[21]</sup>



(a) 覆盖前

(b) 覆盖后

图5 火星尘覆盖前后的NASA火星车“勇气号”<sup>[22-23]</sup>

Fig. 5 NASA's Mars exploration rover Spirit is dusted by Mars dust or not<sup>[22-23]</sup>

## 1.4 深空微生物

载人深空探测任务执行过程中，航天员大部分时间将位于生活舱中。而生活舱将处于一定的压力，具有适宜的温度、湿度和气体，同时，也可能存在航天员培植的植物。

航天器舱内合适的温度和湿度为细菌等一些微生物的繁殖创造了相对适宜的条件，通过分析“和平号”和空间站上的微生物分布发现，冷凝水沉积严重的地方或者航天员洗漱的区域，微生物污染的情况相对较为严重<sup>[13]</sup>。此外，航天员活动及空气的流动可引起微生物在航天器的各个角落的分散传播，从而使得航天器舱内的微生物污染会比较严重。航天员的活动将给微生物在空间航天器舱内的生存和生长带来契机，也会引起一些细菌等大量的繁殖。图6给出了空间站俄罗斯舱段的烟感探测器的真菌生长情况<sup>[24]</sup>。



图6 受真菌污染的俄罗斯空间站烟感探测器<sup>[24]</sup>

Fig. 6 Fungal-contaminated Russian smoke detector<sup>[24]</sup>

## 2 深空环境对航天员的威胁

### 2.1 深空辐射环境对航天员的威胁

尽管有电磁场与防护材料的原子核相互作用的削弱或防护，航天员仍将受到来自初级和次级核子的辐射威胁，例如，穿过防护材料的重粒子可能会引起生物体严重的生物学效应，引起皮肤、肠、骨髓等组织的急性损伤以及白内障等，杀死人体细胞或改变DNA的排序，降低人的免疫力，增加癌症的发病率<sup>[2-6]</sup>。

#### 2.1.1 深空辐射对航天员的作用机制

电离辐射是深空辐射环境对航天员威胁的主要机制，它能够促使物质的分子或原子产生电离，对航天员来说，电离可引起组织细胞的原子或分子的变化，从而引起受照细胞被杀伤或发生变异，导致对人体的健康危害。电离辐射危害的性质和严重程度与辐射的物理特性和机体的生物学特点有关。电离辐射通常是经过两个途径对航天员活性物质尤其是生物大分子产生损伤，例如对细胞核中的脱氧核糖核酸（deoxyribonucleic acid, DNA）：一是辐射电离直接作用于活性物质的DNA而使其受到损伤；二是与细胞中水分子发生作用，产生可使生物活性物质受到损伤的自由基。电离辐射可以造成染色体畸变、DNA基因突变、细胞死亡、细胞凋亡、细胞变异等变化。

##### 1) DNA双链断裂

作为生命体的遗传物质，DNA分子是银河宇宙射线辐射的重要靶分子。高线性能量传输（linear energy transfer, LET）辐射粒子可引起高频率、复杂的DNA双链断裂，并很难被修复，进而导致细胞的死亡。重离子辐射诱发的DNA双链断裂与辐射注量呈线性关系。

DNA双链断裂的机制主要有两种：一是辐射直接作用于DNA，其电离和激发机制使其受损；二是自由基的间接作用。靠近DNA的分子电离形成的自由基向DNA扩散，并将能量传递给DNA使其受损。在液体状

态环境下,间接作用是诱发DNA损伤的主要原因,可造成细胞死亡,引起细胞变异,异常增殖,导致正常细胞变成恶性细胞,最后形成癌症。

### 2) 染色体畸变

高LET射线照射细胞产生的主要是等点染色单体断裂,低LET射线作用于细胞则主要是诱发染色单体断裂;染色单体断裂比等点染色单体断裂易修复。

高LET的辐射还会引起染色体间的互换,造成无端粒染色体的出现,而染色体端粒区域的重排则与染色体的不稳定性相关。这种不稳定性可导致基因组的不稳定,是引起重离子致癌的早期事件之一。

空间辐射可引起淋巴细胞染色体失常出现显著增加,简单易位增加,长期的空间飞行可导致双着丝粒染色体和着丝粒环的出现,随着空间辐射时间的增加,DNA损伤加重,染色体畸变增加<sup>[1]</sup>。

### 3) 基因组不稳定性

基因组不稳定性包括一系列生物系统的变化,例如细胞死亡的延迟、基因扩增和突变的延迟等。研究表明,重离子辐射是诱导子代基因组不稳定的主要原因,可以使基因组处于一种损伤易感态,进而加速了其他损伤的发生和累积,从而产生恶性转化的倾向<sup>[8]</sup>。

### 4) 细胞周期改变

空间辐射可引起细胞周期活动的阻断及细胞周期的延长,其中G1期、S期和G2/M期细胞周期检查点分别通过不同的信号对辐射所致损伤进行调控,诱发不同的辐射生物学效应。

## 2.1.2 深空辐射对航天员的损伤效应

空间辐射诱发航天员或生物体的损伤主要表现为癌症、造血功能障碍、白内障,引起辐射遗传效应等。

### 1) 癌症

当受到电离辐照后,人体细胞会出现DNA的错误修复或不完全修复,导致细胞变异。变异细胞的增殖失控,并对周围组织的侵入或向远离部位转移,其显著的特点是增殖失控和分化不完全。除了与电离辐照有关外,癌症还与遗传特性、生活因素和激素水平等因素有关,其严重程度与辐射剂量的大小没有关系,但辐射致癌的概率与辐射剂量相关。大量的实验和人类经验证明,小剂量和低剂量率辐射下的癌症诱发量比大剂量和高剂量率下所观察到的要相对的低。

### 2) 辐射遗传效应

电离辐射可对生殖细胞的遗传物质DNA产生损伤,进而导致突变,并且这种生殖细胞变异可以向后代传递,引起遗传性异常或疾病。辐射诱发遗传性效应主要基因突变和染色体畸变两类。基因突变的概率

随受照剂量的增高而增加。染色体畸变可分为整条染色体丢失和增多、部分染色体重复、染色体部分缺失和不同染色体的片段交换等。

### 3) 白内障

人眼主要由眼晶体、角膜、结膜、视网膜、视神经等构成。其中,对辐照最敏感的为眼晶体,它是由晶体上皮产生的晶体纤维构成。辐射可导致抑制其上皮细胞的有丝分裂和死亡,受损细胞及其分解产物发生沉积。受到辐照后,晶状体后极首先出现点状浑浊,进而浑浊向中央方向和前极扩展,形成白内障。研究证明,随着辐照剂量的增加,白内障的发生率增加,其潜伏期缩短<sup>[1]</sup>。

### 4) 造血器官损伤

造血器官包括胸腺、骨髓、脾脏和淋巴结等,造血器官中的造血细胞通过不断增殖和分化产生白细胞、红细胞和血小板。当受到辐照后,这些造血细胞的增殖能力受到抑制或丧失,进而引起造血器官的功能降低或丧失<sup>[7]</sup>。

此外,深空辐射还可引起航天员的其他器官的损伤,包括免疫系统机能降低、皮肤损伤、中枢和周围神经系统损伤、视网膜图像改变或脑电图节律失常、恶心呕吐、食欲不振等。

为此,美国物理学家网站在2014年4月4日报道称<sup>[25]</sup>,一个医学组织通过研究表明:航天员在飞往火星的过程中,可能将遭受超过美国航空局目前所设定允许范围的辐射风险。这是因为飞往火星的旅程将需要长达18个月,将可能让航天员暴露于超出允许范围的辐射健康风险,而这些风险是了解不多,或者不确定,甚至是无法预料的。

## 2.2 微重力对航天员的威胁<sup>[26-34]</sup>

在重力的减小或消失的情况下,积聚于人体下肢的血液发生头向转移,直接导致头面部水肿;同时,经神经—体液调节,可引起行为性饮水减少。在失重环境,长期可造成骨质丧失,抗重力骨骼肌萎缩,心血管系统功能紊乱,血液与免疫功能改变,以及女航天员的特殊问题。失重条件也可能导致体内潜伏病毒生长速度加快,复合应激与细胞免疫功能受限等因素,可诱发在地面不会引起机体疾病的病毒致病。

空间微重力对航天员的威胁,除了微重力本身之外,主要是与空间辐射的协同效应。空间辐射将导致航天员产生辐射损伤,而重力的改变将导致很多损伤无法及时修复,或者微重力环境下,辐射损伤呈现加重的趋势。因此,需要加强空间微重力对血液系统、肌肉代谢、骨骼代谢、脑功能以及免疫系统等因素的影响的研究。

### 2.3 尘与尘暴对航天员的威胁

航天员在执行深空探测任务时，月尘或火星尘中的颗粒物或尖状物可引起航天服的磨损或破裂，引起航天服中的防护镜视野模糊，进而对航天员的在轨生命安全带来威胁，同时也对任务的执行带来严重障碍<sup>[35-39]</sup>，尤其是月球表面或火星表面行走过程中，引起了航天服受月尘或火星尘的严重污染，如图7和图8<sup>[40-41]</sup>所示。



图7 Apollo12任务中被月尘污染的航天服<sup>[40]</sup>

Fig. 7 Spacesuit contaminated by lunar dust in Apollo 12 mission<sup>[40]</sup>

而在完成2次月球行走后则上升至17 kPa/min。2位Apollo12的航天员在完成月球行走后，其航天服的微流星保护层就被磨穿，由于航天服头盔视窗的玻璃划痕，导致航天员看到的東西变模糊。Pete Conrad曾报告其航天服经过8 h的月面行动后出现磨损，而在地面训练时，则需要100 h的使用后才会出现明显磨损。后来至发现他们的航天服靴子处的微流星体保护层已经被磨穿到了Mylar纤维绝缘层。Harrison Schmitt的航天服面罩也因月尘磨损而模糊不清，以致于不能从某些角度向外观察<sup>[42-48]</sup>。

### 2.4 空间微生物对航天员的威胁<sup>[49-51]</sup>

除了水以外，微生物的生存还需要一定的有机或无机营养物质。航天器上表面涂层、航天员新陈代谢产物、以及橡胶圈和纺织物等为微生物的生存和繁殖提供了大量的营养物质。例如，微生物的分泌物可以对航天器金属结构的密封胶和表面防护涂层产生破坏作用。一方面，防护涂层的有机物可以作为微生物的营养源，微生物在其上附着并生长繁殖，其分泌物可对其进行腐蚀，从而使其失去防护作用；第二，来自于微生物的代谢产物会对防护涂层产生腐蚀作用，进而将腐蚀基体金属，造成结构或功能材料的失效。



图8 “Apollo 17”航天服各个部位的月尘污染情况<sup>[40]</sup>

Fig. 8 Views of Apollo 17 spacesuit contaminated by lunar dust<sup>[40]</sup>

由于月尘的磨损等作用，执行Apollo12任务的航天员的航天服的密封性遭到了破坏，其内压力的下降速度超出预期设定值。Charles Conrad的航天服在第一次月球行走后就发生了严重破损，泄漏率约为1 kPa/min，

Novikova ND研究了1986–2000年间俄罗斯载人航天中微生物污染问题，阐述了微生物对空间站通信设备上钛、铜线及橡胶的腐蚀问题。空间站上FGB纤维板受到霉菌侵蚀污染的照片如图9所示。



图9 空间站上受到霉菌侵蚀污染的FGB纤维板<sup>[61]</sup>

Fig. 9 Fabric panel in FGB potentially contamination with fungus<sup>[61]</sup>

随着水或空气中微生物的长期繁殖,大量的微生物及其分泌物和腐蚀产物凝结成团状或絮状的黏稠物质,进而可造成空气或水循环系统的堵塞,最终导致生命保障系统的正常运行受到影响。此外,空气中漂浮的微生物也会对航天员的呼吸系统带来比较大的危害。

### 3 采取的措施

深空探测环境可对航天员的健康和安全带来严重危害。因此,需要对深空探测环境对航天员的危害进行防护。通常,可从以下几个方面采取措施<sup>[1]</sup>。

#### 3.1 物理屏蔽防护<sup>[52-62]</sup>

针对空间电离辐射生物学效应的物理屏蔽防护可以分为主动屏蔽和被动屏蔽。主动屏蔽防护主要是用强磁场使带电粒子偏离飞行器,到目前为止,其在轨可靠性有待进一步研究。被动屏蔽主要是利用一定质量厚度的物质可以减弱或阻止一定能量的粒子辐射的质量屏蔽防护原理,以飞行器、登月舱、居住舱或航天服的结构材料或其他防辐射材料对高能辐射粒子进行屏蔽。被动屏蔽的优点是技术简单、可靠性高、造价低廉,缺点是航天器相当笨重。

通过增加飞行器舱体厚度的被动防护方法将会增加飞行器的重量,这将对航天器运载带来极大的挑战。因此,可以通过建立容积较小的应急屏蔽室,利用飞行器舱内各种仪器设备、燃料、食物等物质进行科学布局,使各个方向上有大体均匀的质量屏蔽厚度,对航天员的若干重要器官进行局部防护等来实现对空间生物的更好防护。

#### 3.2 辐射风险的监测与预警<sup>[63-70]</sup>

对辐射风险进行监测和预警是实现空间辐射生物学效应的一种重要方法,可以通过建立空间辐射风险性分析与预警模型和空间辐射剂量监测来实现。其中空间辐射剂量监测包括太阳质子事件的预报和监测系统、舱内辐射环境监测系统以及个人剂量监测系统。

建立辐射风险性分析与预警模型,通过分析辐射效应和分子机理,构建生物辐射损伤模型,对空间辐射生物学效应进行风险分析和预测;太阳质子事件的预报和监测主要监测太阳的活动,提出长期、中期和短期太阳质子事件发生的可能性,监测太阳质子事件的到达时间及事件的有关参数。根据预测预报的结果,适当调整飞行计划,尽量选择太阳活动谷年进行深空飞行或选择太阳活动平静期开展舱外活动;建立舱内辐射环境监测系统,实时提供舱内辐射剂量的有关信息,包括辐射成分、能量和剂量率以及舱内的剂量分布等;建立个人剂量监测系统,对航天员在任一时刻的累积剂量、身体不同部位的剂量等进行实时监测,以评估人体所受辐射剂量和损害情况,为航天员辐射危险评价提供数据。

在这方面,美国NASA、欧洲ESA和俄罗斯航天局做了大量工作,在每次飞行任务中,均配备了个人辐射剂量测量仪和总辐射剂量监测仪,以对飞行中航天员所受到的辐射剂量进行监测。同时,也通过一系列地面模拟实验和空间搭载实验对空间辐射生物学效应进行研究。

#### 3.3 辐射防护药物

采用航天辐射防护药物进行防护是航天员辐射防护的部分,研制高效低副作用的航天抗辐射药物也是载人航天防护的重要方向<sup>[71-72]</sup>。

辐射防护药物可以分为抗辐射药物和生物防护药物两类。抗辐射药物能降低辐射危害,但存在一定的毒副作用,且只有在大剂量辐射后才能发挥最大效果,如氮硫基类化合物、色氨酸类化合物等;生物防护药物则是通过增强机体对外界不良因素的抵抗力,从而达到减轻辐射损伤的目的,优点是无毒副作用,如维生素类药物、人参等中成药<sup>[73]</sup>。

目前,辐射防护药物尚远远不能满足航天员的需要,因此,加强针对质子、重离子、X射线和 $\gamma$ 射线等辐射粒子具有良好防护效果、较低毒副作用的辐射防护药物是研究的方向。

#### 3.4 航天员的选拔

由于不同的生物个体对相同的辐射环境及剂量有着不同的敏感度,因此,可以从遗传学、基因工程角度入手,研究辐射敏感性较低、不易产生辐射生物学效应或耐受空间辐射效应的生物个体的筛选方法,以用于航天员选拔的参考<sup>[74]</sup>。

同时,也要考虑长期在轨飞行过程中,密闭环境、通讯延迟、乘员异质性、跨文化等应激因素对航天员的影响,为此,由来自中国、法国、俄罗斯等国

家的6名试验人员,在火星-500(MARS 500)项目中利用模拟的密闭舱内,对从飞船发射、飞向火星、登陆火星到返回地球的全过程进行了模拟飞行,以了解长期密闭环境下乘组人员的健康状态及工作能力,探索人类模拟登陆火星过程中所能够耐受的一切。2011年11月4日,经过长达520 d的模拟试验,6名志愿者结束了往返火星与地球旅程“返回地球”<sup>[75-76]</sup>。

## 4 结束语

长期有人参与的深空探测是未来国际航天领域的发展趋势。目前,国际上载人深空探测任务主要是以阿波罗登月为代表,但航天员深空活动的时间较短,而长期有人参与的深空探测,如载人月球基地、载人火星探测等,则需要重点考虑航天员长期在轨可能遭受的空间环境效应,尤其是空间辐射环境威胁。同时,需要注意微重力或低重力环境、在轨行走的尘埃环境、舱内的微生物环境可能带来的潜在威胁。

针对长期深空探测任务过程中深空环境对航天员的潜在威胁,需要进一步开展以下工作:

1) 加强空间辐射对航天员器官损伤机理的研究。尤其需要研究低剂量率高能粒子或射线环境下,航天员敏感器官或机体功能的损伤机制。

2) 加强抗辐射和微重力药物的开发。利用药物中的化合物来有效抵御空间辐射在航天员机体内产生的自由基,同时加强对航天员机体损伤的修复。

3) 加强空间辐射的屏蔽防护。通过对空间辐射环境进行预警预报,建设航天员休息或防护屏蔽舱,尽量减少空间辐射对航天员的威胁与伤害。

4) 采取措施控制执行任务过程中的尘埃威胁。研究航天服关键位置的尘埃自清洁装置,提升自清洁能力。

5) 控制深空微生物对航天员的威胁。研究利用药物或者采用抗侵蚀材料来降低微生物对航天员的影响。

## 参 考 文 献

- [1] 沈自才.空间辐射环境工程[M].北京:宇航出版社,2013.  
Shen Z C. Space radiation environment engineering[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2013.
- [2] Eleanor A B, Polly Y C. A review of ground-based heavy ion radiobiology relevant to space radiation risk assessment: Cataracts and CNS effects[J]. Adv. Space Res., 2007 (40): 1307-1319.
- [3] Eleanor A B, Polly Y C. A review of ground-based heavy-ion radiobiology relevant to space radiation risk assessment. Part II: Cardiovascular and immunological effects[J]. Adv. Space Res., 2007 (40): 461-469.
- [4] Vazquez M E. Neurobiological problems in long-term deep space flights[J]. Adv. Space Res., 1998, 22 (2): 171-183.
- [5] Grigoriev A L, Potapov A N. Vital biomedical problems of exploration of the far space[C]// The 53rd International Astronautical Congress, the World Space Congress. Houston, Texas: IAC, 2002.
- [6] Cucinotta F A, Schimmerling W, Wilson J W, et al. Space radiation cancer risks and uncertainties for Mars Missions[J]. Radiat. Res., 2001 (156): 682-688.
- [7] 沈自才,丁义刚.抗辐射设计与辐射效应[M].北京:国防工业出版社,2015.  
Shen Z C, Ding Y G. Anti radiation design and radiation effect[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015.
- [8] 黄本诚,童靖宇.空间环境工程学[M].北京:中国科学技术出版社,2010.  
Huang B C, Tong J Y. Space environment engineering[M]. Beijing: China Science and Technology Publishing House, 2010.
- [9] Wilson J W, Cloudsley M S, Cucinotta F A, et al. Deep space environments for human exploration[J]. Adv. Space Res., 2004 (34): 1281-1287.
- [10] Wilson J W, Nealy J E, Angelis G D, et al. Deep space environment and shielding[J]. AIP, 2003 (654): 993-1010.
- [11] Wilson J W, Francis A C, Tai H, et al. Galactic and solar cosmic ray shielding in deep space[R]. NASA Technical report, [S. 1]: NASA, 1997.
- [12] William A. Radiation environments for deep-space missions and exposure estimates[C]//AIAA Space Conference & Exposition. [S. 1]: AIAA, 2007.
- [13] 沈自才.深空辐射环境及其效应的分析与比较[J].航天器环境工程,2010,27(3):313-341.  
Shen Z C. Comparison and analysis of the deep space radiation environment and its effects[J]. Spac. Envir. & Engi. 2010, 27 (3): 313-341.
- [14] 杨彪,胡添元.空间站微重力环境研究与分析[J].载人航天,2014,20(2):178-183.  
Yang B, Hu T Y. Study and analysis of microgravity environment onboard manned space station[J]. Manned Spaceflight. 2014, 20 (2): 178-183.
- [15] 胡文瑞.空间微重力概论[M].北京:科学出版社,2010.  
Hu W R. Introduction to space microgravity[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [16] Penly N J, Schafer C P, Bartoe J D E. The international space station as a microgravity platform[J]. Acta Astronautica, 2002, 50 (11): 691-696.
- [17] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005.  
Ouyang Z Y. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2005.
- [18] 童靖宇,李蔓,白羽,等.月尘环境效应及地面模拟技术[J].中国空间科学技术,2013,33(2):78-83.  
Tong J Y, Li M, Bai Y, et al. Research for lunar dust effects and its ground simulation methods[J]. Chinese Space Science and Technology, 2013, 33 (2): 78-83.
- [19] Lawrence A T, Harrison H S. The lunar dust problem: From liability to asset, AIAA2005—2510[C]//AIAA SPACE 2005 Conference and Exposition. [S. 1]: AIAA, 2005.
- [20] Gaier J R. The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo

- missions[R]. [S. I]: NASA, 2005.
- [21] Recent mars and earth dust storms compared [EB/OL] (2000-9-12) [2016-04-16]. [http://www.msss.com/mars\\_images/moc/9\\_12\\_00\\_dust\\_storm/](http://www.msss.com/mars_images/moc/9_12_00_dust_storm/).
- [22] Paul M S, Jennifer A H. The Mars surface environment and solar array performance[C]//The 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). [S. I]: IEEE, 2010.
- [23] Dust storm cuts energy supply of NASA Mars rover Spirit [EB/OL] (2008-11-10) [2013-04-16]. [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/mer/news/mer-20081110.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/mer/news/mer-20081110.html).
- [24] Macatangay A V, Bruce R J. Impacts of microbial growth on the air quality of the international space station[R]. [S. I]: AIAA, 2010.
- [25] Health risks of Mars mission would exceed NASA limits[EB/OL] (2014-04-05) [2016-04-16]. <http://phys.org/news/2014-04-health-mars-mission-nasa-limits.html>.
- [26] 孙喜庆, 张舒, 耿捷, 等. 对长期飞行任务中航天员医学防护问题的思考[J]. 载人航天, 2013, 19 (4) : 69-80.  
Sun X Q, Zhang S, Geng J, et al. The medical problems and protective strategies in long-term space flight[J]. Manned Spaceflight, 2013, 19 (4) : 69-80.
- [27] Moore E C, Ryder J. Planning for crew exercise for deep space mission scenarios[R]. [S.I]: NASA, 2014.
- [28] Rucker M A, Anderson M. Issues and design drivers for deep space habitats[R]. [S.I]: NASA, 2012.
- [29] Larocco M T, Pierson D L. Deep space exploration: will we be ready infectious diseases, microgravity and other forces affecting health pose challenges for humans planning to explore space[R]. [S.I]: NASA, 2000.
- [30] Riley D A, Bain J L, Thompson J L, et al. Decreased thin filament density and length in human atrophic soleus muscle fibers after spaceflight[J]. J. Appl. Physiol, 2000, 88 (2) : 567-572.
- [31] Felice S. Adaptation of the human endocrine system to microgravity in the context of integrative physiology and ageing[J]. Eur.J. Physiol, 2000, 441 (Suppl) : 85-90
- [32] Sonnenfeld G, Shearer W T. Immune function during space flight[J]. Nutrition, 2002, 18 (10) : 899-903.
- [33] Gashev A A, Delp M D, Zawieja D C. Inhibition of active lymph pump by simulated microgravity in rats[J]. Am. J. Physiol. Heart Circ Physiol, 2006, 290 (6) : 2295-2308.
- [34] Baeovsky R M, Baranov V M, Funtova II, et al. Autonomic cardiovascular and respiratory control during prolonged spaceflights aboard the international space station[J]. J. Appl. Physiol, 2007, 103 (1) : 156-161.
- [35] Roy J F, Sarah K. Lunar dust effects on spacesuit systems insights from the Apollo spacesuits[R]. [S.I]: NASA, 2009
- [36] Maurizio B. Human exploration of the moon: multi- stage lunar dust removal system[C]// The 41st International Conference on Environmental Systems. [S. I]: AIAA, 2011
- [37] Nima A M, Brian D. Efficiency evaluation of an electrostatic lunar dust collector[C]// The 41st International Conference on Environmental Systems. [S. I]: AIAA, 2011.
- [38] Metzger P. Protecting the lunar heritage sites from the effects of visiting spacecraft[R]. [S.I]: NASA, 2012.
- [39] Kawamoto H. Electrostatic cleaning system for removing lunar dust adhering to space suits[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2011, 24 (4) : 442-444.
- [40] Taylor L A. Living with astronomy on the moon: Mitigation of the effects of lunar dust[C]// The 60st International Astronautical Congress. [S.I]: IAC, 2009.
- [41] O'Brien B. Direct active measurements of movements of lunar dust[J]. Journal Article, 2009.
- [42] Maurizio B. Human Exploration of the Moon: multi- stage lunar dust removal system [C]// The 41st International Conference on Environmental Systems. [S. I]: AIAA, 2011
- [43] Nima A M, Brian D. Efficiency evaluation of an electrostatic lunar dust collector [C]//The 41st International Conference on Environmental Systems. [S. I]: AIAA,
- [44] Metzger P. Protecting the lunar heritage sites from the effects of visiting spacecraft[R]. [S.I]: NASA, 2012.
- [45] Kawamoto H. Electrostatic cleaning system for removing lunar dust adhering to space suits[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2011, 24 (4) : 442-444.
- [46] Liao Z R. Research of detection and control system for lunar dust effects simulator[J]. Advanced Materials Research, 2012 (426) : 126-140.
- [47] Taylor L A. Living with astronomy on the moon: Mitigation of the effects of lunar dust[C]//The 60st International Astronautical Congress. [S. I]: IAC, 2009.
- [48] O'Brien B. Direct active measurements of movements of lunar dust[J]. Eophysical Research Letters, 2009 (36) : 1-5.
- [49] Macatangay A V, Bruce R J. Impacts of microbial growth on the air quality of the international space station[R]. [S. I]: AIAA, 2010.
- [50] Castro V A, Thrasher A N, Healy M, et al. Microbial diversity aboard spacecraft: evaluation of the international space station[R]. [S.I]: NASA, 2011.
- [51] Novikova N D. Review of the knowledge of microbial contamination of the Russian manned spacecraft[J]. Microbial Ecology, 2004 (47) : 127-132.
- [52] Kim M Y, Wilson J W, Sheila a performance study of galactic cosmic ray shield materials[R]. [S.I]: NASA, 1994.
- [53] Bhat B N. Materials challenges in space exploration[R]. Bangalore, India: NASA, 2005.
- [54] Kiefer R, Orwoll R A. Shielding materials for highly penetrating space radiations[J]. [S.I]: NASA, 1997.
- [55] Willy Z S, Marvin E C. Inflatable structures-a concept for lunar and Martian structures[R]. [S. I]: AIAA, 1993.
- [56] Willy Z S, Marvin E C. Inflatable structures for a lunar base[R]. [S. I]: AIAA, 1993.
- [57] Jenine E A, Willy Z S, Marvin E C. Computer visualization analysis of a generic inflatable structure for a lunar Martian base[R]. [S. I]: AIAA, 1995.
- [58] John F C. BASE - bubble architecture space environments[R]. [S. I]: AIAA, 2006.
- [59] Cock F H. Magnetic shielding of interplanetary spacecraft against solar flare radiation final report[R]. [S.I]: NASA 1992.
- [60] Stephen H J, Brad J M. Magnetic shielding for interplanetary spacecraft[R]. [S.I]: Space Congress, 1991.
- [61] 许峰, 白延强, 吴大蔚, 等. 载人航天空间辐射主动防护方法[J]. 航天医学与医学工程. 2012, 25 (3) : 225-229.  
Xu F, Bai Y Q, Wu D W, et al. Active shielding methods against

- radiation in manned spaceflight[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*. 2012, 25 (3) : 225-229.
- [62] 薛玉雄, 马亚莉, 杨生胜, 等. 火星载人探测中辐射防护综述[J]. *航天器环境工程*. 2010, 27 (4) : 437-443.
- Xue Y X, Ma Y L, Yang S S, et al. Radiation protection for human missions to Mars[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27 (4) : 437-443.
- [63] Horneck G, Facius R, Reichert M, et al. HUMEX, a study on the survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions, part II: missions to Mars[J]. *Adv. Space Res.*, 2006 (38) : 752-759.
- [64] Hajekl M, Berger T, Fugger M, et al. Dose distribution in the Russian segment of the International Space Station[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2006, 120 (1-4) : 446-449.
- [65] Hajekl M, Berger T, Fugger M, et al. BRADOS-Dose determination in the Russian segment of the International Space Station[J]. *Ajp Heart & Circulatory Physiology*, 2005, 288 (5) : 2465-2475
- [66] Camanzi B, Crawley H B. The BaBar RadFET monitoring board[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2002, 49 (3) : 1275-1280.
- [67] Kimoto Y, Jaksic A. RADFET utilization for spacecraft dosimetry[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2004, 43 (6) : 657-659.
- [68] Jaksic A, Kimoto Y, Ogourtsov V, et al. The effect of different biasing configurations on RADFET response measured by automated read-out system[C]//*Proceedings of RADECS*. [S.l]: ESA, 2003, 489-492.
- [69] Akopovaa A B, Manaseryana M M, Melkonyana A A, et al. Radiation measurement on the International Space Station[J]. *Radiation Measurements*, 2005, 39 (2) : 225-232.
- [70] 薛玉雄, 马亚莉, 杨生胜, 等. 载人航天器舱内辐射剂量监测技术综述[J]. *航天器环境工程*. 2010, 27 (2) : 210-214.
- Xue Y X, Ma Y L, Yang S S, et al. An overview of spacecraft inner-cabin radiation dose measurement in manned spaceflight missions[J]. *Spacecraft Environment Engineering*. 2010, 27 (2) : 210-214.
- [71] Cloudsley M S, Nealy J E, Wilson J W, et al. Radiation protection for lunar mission scenarios[R]. [S. l]: AIAA, 2005.
- [72] Wilson J W, Shinn J L, Tripathi R K, et al. Issues in deep space radiation protection[J]. *Acta Astronautica*, 2001, 49 (3-10) : 289-312.
- [73] 黄伟芬. 航天员出舱活动医学基础[M]. 北京: 中国宇航出版社. 2008.
- Huang W F. The medical foundation of astronaut's cabin activity[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2008.
- [74] Coyle E F, Gonzalez-Alonso J. Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives[J]. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 2001 (29) : 88-92.
- [75] Wang Y, Jing X L, Lv K, et al. During the long way to Mars: effects of 520 days of confinement (Mars500) on the assessment of affective stimuli and stage alteration in mood and plasma hormone levels[J]. *Plos One*, 2014, 9 (4) : 107-114.
- [76] Carole T, Alla V, Angelina C, et al. Correlation of etho-social and psycho-social data from "Mars-500" interplanetary simulation[J]. *Acta Astronautica*, 2015 (111) : 19-28.

作者简介:

沈自才(1980-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 航天器空间环境效应及深空探测技术。

通信地址: 北京市5142信箱39分箱(100094)

联系电话: (010) 68746671

E-mail: zicaishen@163.com

## Key Problems of Space Environmental Engineering for Manned Deep Space Exploration Mission

SHEN Zicai<sup>1</sup>, DAI Wei<sup>1</sup>, BAI Yu<sup>1</sup>, LIU Rongqiang<sup>2</sup>, DING Yigang<sup>1</sup>, LIU Yenan<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Space Environment Engineering, Beijing 100094;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** Space environments such as solar cosmic ray, galactic cosmic ray, microgravity, dust and dust storm, deep space microbe and so on, which will be encountered during the course of manned deep space exploration, are firstly introduced. Then, the threat of different deep space environments to the astronauts is discussed, and some countermeasures such as physical protection, monitoring and early warning of radiation risks, radiation protection drugs, astronaut selection, etc, is given. Finally, the further work should be done for manned deep space mission, which includes damage mechanism of space radiation on the astronaut, development of drug against space radiation and microgravity, protection of structure and material from space radiation environments, self cleaning materials and technology for space suit, research and development of materials against microbial erosion, etc, are discussed.

**Key words:** manned; deep space exploration; space environment engineering

[责任编辑: 杨晓燕]