

“十一五”国家重点图书出版规划项目

空间医学与生物学研究

Research in Space Medicine
and Biology

主编 孙喜庆 姜世忠



第四军医大学出版社

空间医学与生物学研究

Research in Space Medicine
and Biology

ISSN 1671-9236

中国空间医学杂志编辑部

“十一五”国家重点图书出版规划项目

空间医学与生物学研究

主 编 孙喜庆 姜世忠

副主编 李莹辉 张 舒 姚永杰

编 者 (以姓氏笔画为序)

万玉民	马 进	王 冰	王永春
王林杰	仓怀兴	冯岱雅	刘志恒
刘炳坤	刘朝霞	江丕栋	孙喜庆
杨长斌	李志利	李勇枝	李莹辉
严 洪	吴 斌	沈美云	宋锦苹
张 舒	张 鹏	陈晓萍	郑慧琼
姜世忠	姚永杰	耿 捷	袁 明
郭双生	高 原	唐 雷	曹新生
虞学军			

图书在版编目 (CIP) 数据

空间医学与生物学研究/孙喜庆,姜世忠主编.—西安:
第四军医大学出版社,2010.10

ISBN 978 - 7 - 81086 - 883 - 9

I.空… II.①孙… ②姜… III.航空航天医学—研
究;航天生物学—研究 IV.R85;Q693

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 210067 号

空间医学与生物学研究

主 编 孙喜庆 姜世忠

责任编辑 土丽艳

出版发行 第四军医大学出版社

地 址 西安市长乐西路 17 号 (邮编: 710032)

电 话 029 - 84776765

传 真 029 - 84776764

网 址 <http://press.fmmu.sn.cn>

印 刷 陕西金德佳印务有限公司

版 次 2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷

开 本 889×1194 1/16

印 张 21.75

字 数 570 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 81086 - 883 - 9/R · 766

定 价 49.00 元

版权所有 盗版必究

购买本社图书,凡有缺、倒、脱页者,本社负责调换

《空间医学与生物学研究》

编写人员

(以姓氏笔画为序)

万玉民	研究员	中国航天员科研训练中心
马 进	教授	第四军医大学航空航天医学系
王 冰	副教授	第四军医大学航空航天医学系
王永春	讲师	第四军医大学航空航天医学系
王林杰	研究员	中国航天员科研训练中心
仓怀兴	研究员	中国科学院生物物理研究所
冯岱雅	讲师	第四军医大学航空航天医学系
刘志恒	研究员	中国科学院微生物研究所
刘炳坤	研究员	中国航天员科研训练中心
刘朝霞	副研究员	中国航天员科研训练中心
江丕栋	研究员	中国科学院生物物理研究所
孙喜庆	教授	第四军医大学航空航天医学系
杨长斌	副教授	第四军医大学航空航天医学系
李志利	助理研究员	中国航天员科研训练中心
李勇枝	研究员	中国航天员科研训练中心
李莹辉	研究员	中国航天员科研训练中心
严 洪	研究员	中国航天员科研训练中心
吴 斌	研究员	中国航天员科研训练中心
沈美云	研究员	中国航天员科研训练中心
宋锦苹	副研究员	中国航天员科研训练中心
张 舒	副教授	第四军医大学航空航天医学系
张 鹏	助理研究员	中国航天员科研训练中心
陈晓萍	研究员	中国航天员科研训练中心
郑慧琼	研究员	中国科学院上海生命科学研究院 植物生理生态研究所
姜世忠	研究员	中国航天员科研训练中心
姚永杰	副教授	第四军医大学航空航天医学系
耿 捷	讲师	第四军医大学航空航天医学系
袁 明	副研究员	中国航天员科研训练中心
郭双生	研究员	中国航天员科研训练中心
高 原	助教	第四军医大学航空航天医学系
唐 雷	高级工程师	南方医科大学基础部
曹新生	副教授	第四军医大学航空航天医学系
虞学军	研究员	中国航天员科研训练中心

前 言

仰望星空，浩瀚无垠的宇宙群星璀璨，它寄托着人们对空间拓展的渴望，吸引着人们对空间探索孜孜不倦地追求。从远古“嫦娥奔月”的传说到莫高窟壁画上的“飞天”，从战国时期诗人屈原的“天问”到明朝幻想家万户的火箭升天尝试，中国人的飞天梦几乎与我们这个古老民族的沧桑历史一样悠远。经过几代航天人的不懈努力，终于实现了中国人的飞天梦想，我国载人航天事业飞速发展：2003年“神舟”5号首次载人航天飞行成功，2005年“神舟”6号多人多天飞行，2008年“神舟”7号航天员太空漫步……中国航天探索中这一个又一个的第一次，见证了中国载人航天技术在勇攀高峰的道路上不断前行。

伴随着人类航天事业的发展，一门新兴的学科——空间医学与生物学也悄然兴起并逐渐发展成熟，取得了丰硕的成果。空间医学与生物学和空间技术相伴而生并互相推动，它的主要任务是面向载人航天需求开展空间生命保障前瞻性理论和技术研究，开展空间特殊环境条件对航天员健康的影响、机制和防护措施研究，为载人航天工程提供理论基础和技术支持。近年来，我国在空间医学与生物学领域的研究成果显著，愈来愈受到国际同行的关注和重视。因此，我们精心编写了《空间医学与生物学研究》一书，以全面总结和反映近年来国内外在空间医学与生物学领域的研究成果及进展。

全书共分五篇26章，系统介绍了国内外空间医学与生物学研究概况及进展，重点论述了空间环境的生物学效应与防护技术，扼要阐述了未来空间医学与生物学的发展方向。本书内容新颖，技术先进，理论性与实用性并重，不仅可供空间医学与生物研究人员、医学工作者及生物医学工程专业人员参考学习，而且对于广大航天爱好者来说也具有重要价值。

为了突出本书的科学性和适用性，我们专门邀请了国内长期从事空间医学和生物学研究的专业研究人员共同编写。由于章节较多，涉及编者较多，因此编书过程本身也是一个学习、交流的过程，在此一并对各位编者和相关工作人员严谨、谦虚的工作态度和辛勤的劳动表示衷心的感谢！

由于我们知识水平和实践能力有限，书中难免有不足或欠妥之处，恳请各位读者给予批评指正！

编 者
2010年8月

目 录

第一篇 空间医学与生物学概况

第1章 空间环境概况	(2)
第2章 空间医学发展概况	(22)
第3章 空间生物学发展概况	(38)

第二篇 空间生物学基础

第4章 失重的细胞生物学效应	(46)
第5章 空间飞行的植物生物学效应	(52)
第6章 空间辐射的生物学效应	(59)

第三篇 空间基础医学

第7章 失重对心血管系统的影响	(78)
第8章 失重对前庭神经功能的影响	(93)
第9章 失重对骨骼系统的影响	(102)
第10章 失重对肌肉系统的影响	(118)
第11章 失重对血液系统的影响	(128)
第12章 失重对免疫系统的影响	(135)
第13章 失重生理影响的防护措施	(147)
第14章 空间飞行胸-背向超重对机体的影响与防护	(158)
第15章 空间飞行冲击性加速度对机体的影响与防护	(171)

第四篇 空间实施医学

第16章 航天员医学选拔与训练	(180)
第17章 航天员医学监督与医学保障	(201)
第18章 空间飞行中医监及医学设备的研究与应用	(212)
第19章 空间飞行应急救生问题	(232)
第20章 舱外活动医学问题与安全措施	(239)
第21章 空间受控生态生命保障系统研究	(262)

第五篇 空间医学与生物学展望

第22章 计算机仿真在空间医学中的应用	(274)
---------------------------	---------

第23章 数字人技术在空间医学中的应用 (282)

第24章 人工重力生物医学问题及应用前景 (292)

第25章 空间生命科学发展与展望 (301)

第26章 深空探测面临的医学问题与对策 (315)

索 引 (337)

第一篇 空间医学与生物学概况

第1章 空间环境概况

第2章 空间医学发展概况

第3章 空间生物学发展概况

第1章 空间环境概况

人类的活动范围,经历了从陆地到海洋,从海洋到大气层,再从大气层到外层空间的逐步扩展过程。人类在规划和实施航天活动中,为了合理地设计航天器,设计保障人生存和工作能力的空间系统,必须了解宇宙知识,了解航天器和人在飞行过程中可能遇到的空间环境。

空间是指地球大气层以外的宇宙空间,由于大气层的边界不清楚,所以通常是指离地球表面 100 km 以上的空间。它包括太阳系以内空间和太阳系以外空间。太阳系以内空间可分为行星空间(太阳系行星引力作用范围内或行星磁层、大气层所及范围的空间)和行星际空间(除行星空间外的太阳系行星之间的空间)。太阳系以外空间可分为恒星际空间、恒星系空间和星系际空间等。“深空”一般指距地球等于或大于地-月距离的空间,约 38.4×10^4 km。地球静止卫星轨道高度以下的空间有时则称为近地空间。

空间环境是指航天器在轨道上运行时所遇到的自然环境和人为环境,是除陆地、海洋和大气以外人类生存的第四个环境。空间环境与人类生活的近地空间环境相比,是十分复杂的,其中充满着各种形态的物质,有各种粒子(中性气体、电离气体、等离子体和各种能量的带电粒子)和场(引力场、电场、磁场和各种波长的电磁辐射),也有各种大小的流星体及空间碎片,深空中还有小行星、行星及彗星等大型的“粒子”,它们对载人航天器的设计和材料选择提出了很高的要求。因此,要实施人类的航天活动就必须了解空间环境的特点。

在太阳系内航行属于航天范畴。目前,载人航天技术的发展现状主要在近地球轨道航行,21 世纪将实现重返月球和飞往火星。为了实现载人飞行,首先必须了解近地轨道的空间环境和行星际空间环境,这是本章介绍的主要内容。

超出太阳系的航行属于航宇范畴,那是较为遥远的事,有待于更高速度的飞行器和更精良的医学工程保证才能实现,在本章中不涉及。

一、轨道飞行环境

(一) 大气环境

包围在地球周围的空气,通常称为大气。这是航空器唯一的飞行活动环境,同时也是火箭、导弹和航天器的重要飞行环境。地球大气是地球上一切生物生存的必要条件,它对航空航天和生物机体都有重要影响。为了研究这种天然大气环境的一切可能作用并制订相应的防护措施,首先应该对地球大气的物理特性有全面的了解。

1. 地球大气的形成

地球大气的分布范围极为广泛,其底界为地面,但没有明显的上界,不存在与星际气体截然分开的界线。鉴于大气结构的复杂性,为便于说明,可以把大气看做是由若干个具有不同特点的同心层所组成。例如,以温度的垂直分布可将大气划分为对流层、平流层、中间层、热层和外逸层五个层次。

地球大气层气体的形成主要受两种力的作用:将它约束在地球上的地球引力和使气体扩散的太阳热辐射。由于这两种力相对的稳定与平衡,使大气层呈现出清晰的密度和压力垂直分布。海平面上的大气密度标准(ρ_0)为 1225 kg/m^3 ,由于地球引力的变化,随着距地高度的增加大气密度逐渐降低,其降低的典型情况见表 1-1。载人航天器通常运行的 300~400 km 高度处的大气密度,只有地面大气密度的千亿分之一。同时,随着大气高度的增加,气压逐渐降低,其变化关系可以用指数函数形式表示(图 1-1)。大气压的大小决定了真空程度,据此将真空分为五种:粗真空(大气压高于 $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$),低



真空 ($1.33 \times 10^3 \sim 1.33 \times 10^{-1}$ Pa), 高真空 ($1.33 \times 10^{-1} \sim 1.33 \times 10^{-6}$ Pa), 超高真空 ($1.33 \times 10^{-6} \sim 1.33 \times 10^{-12}$ Pa), 极高真空 (低于 1.33×10^{-12} Pa)。由表 1-1 可知, 载人航天器运行高度处于“超高真空”中, 大气压为地面的千亿分之一。

表 1-1 大气密度随高度变化情况

高度(km)	大气密度(e)	高度(km)	大气密度(e)
0	1	125	10^{-8}
18	10^{-1}	165	10^{-9}
33	10^{-2}	245	10^{-10}
49	10^{-3}	370	10^{-11}
67	10^{-4}	540	10^{-12}
82	10^{-5}	730	10^{-13}
96	10^{-6}	980	10^{-14}
110	10^{-7}	1600	10^{-15}

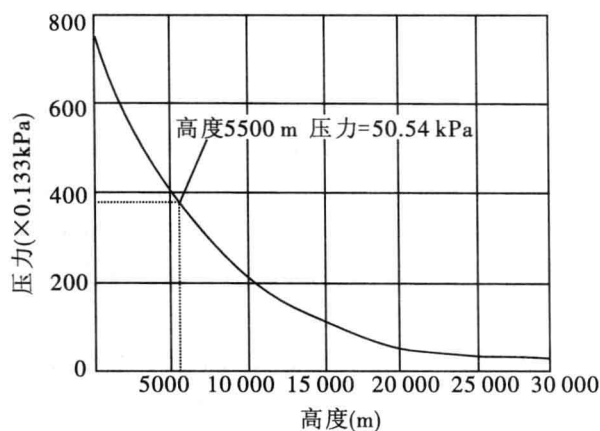


图 1-1 大气高度 - 气压变化关系图

载人航天中, 从地球大气层到空间的过渡区里, 有三点对人体防护和航天器设计有特殊意义: ①在大约 20 km 的高空, 由于低压和缺氧, 这里是人体的生理耐受极限; ②在大约 80 km 以上高空, 会遇到冯·卡曼线, 这里是空气动力学的最低有效高度, 由此高度再向上, 则要通过喷射气流控制航天器的方向; ③在 180~200 km 以上高空, 空气阻力接近于零, 大气的力学作用已基本消失。表 1-2 列出了一些有意义的过渡高度。

高层大气环境是受太阳活动控制的, 当太阳活动剧烈时, 高层大气的温度和密度也随之发生剧烈变化, 在太阳活动高年和低年时, 高层大气的密度有很大差异。高度越高差异也越

表 1-2 地球大气层在空间过渡区内的有意义高度

极 限	大约高度 (km)
氧极限——最大维持高度, 需要人工供氧	13
对流层顶——大气层多数天气效果的上限	15
生理极限——需穿着航天服和用密闭座舱保护人体	20
冯·卡曼线——空气动力学控制开始失效	80
力学边缘——空气阻力可以忽略不计	200
碰撞极限——高度真空, 基本无空气分子碰撞	700

大, 在 200 km 高度上可相差 3~4 倍, 500 km 高度上相差 20~30 倍, 1000 km 高度上相差可以达到 100 倍。

当某一范围内气体压强 (或密度) 小于某一特定数值时就产生了所谓的“真空”。航天器运行的轨道越高, 其真空度也越高。大气层边缘被定义为空气分子碰撞极罕见的区域, 它在距地球表面约 700 km 处。超出这个水平就是外大气圈, 即空气粒子自由运动的区域, 在那里空气逐渐变稀薄, 直至变成真正的真空。这时气体分子的热传导可以忽略, 只有辐射换热。但是, 即使在那里, 气体粒子密度也约有 $1 \sim 10/\text{cm}^3$ 。

2. 大气的组成

大气是一种混合气体, 主要是由氮、氧、二氧化碳、氩和微量的稀有气体组成。其比例如表 1-3 所示。在 90 km 高度的范围内, 空气这种组成的百分比基本保持不变, 可以粗略地认为大气是由 79% 的氮气和 21% 的氧气所组成。在 20~50 km 高度, 由于太阳紫外线辐射, 大气中臭氧含量丰富, 又称臭氧层; 在 100 km 以上高度, 由于受到粒子辐射和太阳电磁辐射作用, 大气各成分开始扩散分离, 氧分子开始部分地解离成氧原子。从 100 km 至 200 km, 氮分子的密度从 $10^{13}/\text{cm}^3$ 下降至 $10^9/\text{cm}^3$; 氧分子从 $10^{13}/\text{cm}^3$ 下降至 $10^8/\text{cm}^3$; 氧原子从 $10^{11}/\text{cm}^3$ 下降至 $10^9/\text{cm}^3$; 氮原子的数量不超过氮分子的 2%~5%; 一氧化氮的密度为 $6 \times 10^6/\text{cm}^3$ 。在这一区间内, 大气各成分的密度还随着太阳的活动、季节、纬度等而变化, 变化率可达 7~10 倍。在 300 km 以下高度, 大气的主要成分是氧原子、



表 1-3 大气的成分

气体	干燥气体中的浓度 (体积的%)	气体	干燥气体中的浓度 (体积的%)
氮	7.809×10	氦	5.20×10^{-4}
氧	2.095×10	氖	1.10×10^{-4}
氩	9.3×10^{-1}	氙	8.70×10^{-8}
二氧化碳	3×10^{-2}	氢	5.00×10^{-5}
氟	1.80×10^{-3}		

氮分子和氧分子。在 600~1000 km 以上高度，大气的主要成分是氮和氧。

(二) 温度环境

在太阳系内，太阳是一个巨大的能源，其表面温度高达 6×10^3 K，中心温度为 2×10^7 K。它每时每刻都在向空间辐射大量的能量，地球表面及大气层的温度也主要是依赖吸收太阳辐射能量形成的。由于纬度和地形高度的差异，地球表面温度有很大的不同，最低温度达 -87 °C，最高 60 °C，平均温度为 21 °C。大气层的温度与离地面的高度有关：离地面 10~20 km，逐渐下降至 -70 °C~ -60 °C；离地面 40~50 km，由于大气层中臭氧吸收太阳光中的紫外线，使温度上升到 -50 °C~ -40 °C；离地面 50 km 以上，下降到 -95 °C；从 100 km 以上到 300 km，其间所有的紫外线均被大气吸收，温度又迅速升高，到 400 km 以上温度可达到 1000 °C 以上。但在这一高度上，空气已极度稀薄，传热方式主要依靠辐射，而通常以分子传导和对流方式的热交换已不起作用。在生理意义上，这种高温对人体也无意义了。因此，载人飞船或航天员在空间环境中活动也就不受周围环境温度的影响，热平衡主要取决于飞行器自身的温控方式和辐射热交换。

冷黑环境是航天器在飞行轨道中经历的主要环境之一。太空的“冷”是由于宇宙空间的能量密度约为 10^{-5} W/m²，只相当于 3 K (-270 °C) 的黑体辐射能量密度，太空的“黑”是由于当航天器进入地球本影区时，本身的热辐射全部被太空吸收，没有二次反射，即航天器没有同空间其他星球进行热交换的可能，所以太空可以被看做理想的黑体。冷黑环境除影响航天器的温度外，还会影响航天器部分材料的性能，使其老化、脆化，进而使有伸缩活动的部位出

现故障。

(三) 引力场

引力场是普遍作用于所有物体间相互吸引的宇宙力，又称为万有引力。它无处不在地影响着宇宙万物，大至恒星、银河系及整个宇宙的形成结构与演化，小到飞行中的航天器，都无法将它阻断和增减。所有的行星和恒星都具有引力场，只是场强有所不同，随着天体间距离的增大，场强下降。地球引力圈向外扩展的距离约为地球半径的 1000 倍，随着距离增大，逐渐融合到其他天体的引力场中。

人类要飞离地球进入宇宙空间之所以困难重重，其根本原因在于地球表面的万物都处于地球的引力场中，每时每刻都受着地球引力的束缚，要想飞离地球必须克服这种束缚。

根据牛顿的万有引力学说，任何物体之间都存在着相互作用的引力，它们的关系为：

$$\text{引力} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

式中， m_1 和 m_2 分别为两个物体的质量， d 为两物体质心之间的距离， G 为万有引力常数。从式中可以看出，引力的大小与两个物体质量的乘积成正比，而与两个物体质心距离的平方成反比。地球的质量和半径是一定的。地球表面的万物有大有小，质量和密度也不同，它们与地球之间的相互引力也就千差万别。为了方便地表述地球的引力，采用牛顿著名的力学演化公式 $F=mg$ 来表示，其中 g 约是 9.81 m/s²，它可以方便地表示地球与它表面上任何一个物体（不管它的质量大小）之间的引力关系。

地球上的物体要飞离地球，必须克服地球对它的引力。克服这种引力最直接最简单的办法是对物体施加一个大于 mg 并与其方向相反的外力。但是这种方法有一个致命的缺点，就是这个外力作用一旦停止，物体就又被地球的引力拉回地面。另外一种办法是沿与地面切线平行的方向施加一个外力，使物体达到一定的速度，使它沿地面弧度运行而产生一个向心加速度。这时， $a=v^2/r$ ，式中 a 为外力作用产生的向心加速度， v 为沿地面弧度切线方向的速度， r 为地球半径。

物体离开地面的高度与地球半径相比非常



小,因而可以忽略不计。从这个式子中可以看出,如果物体达到的速度 v 恰好使向心加速度 a 等于 g ,物体离心的惯性力恰好与 mg 方向相反而数值相等,物体就可以围绕地球运行,既不离开地球飞向远方,又不会被地球拉回地面。一旦该物体达到这一速度,即使外力作用停止,物体仍可按照这一速度继续绕地球飞行。如果没有其他外力阻止物体,物体就将永不停止地围绕着地球飞行。通过简单的计算就可知这个速度为 7910 m/s ,这个速度只能实现近地轨道飞行,只是迈向宇宙空间的第一步,所以称为第一宇宙速度;如果要挣脱地球的引力场,飞向太阳系内的其他天体,大约需要 $11\,180 \text{ m/s}$ 的速度,这称为第二宇宙速度;如果要摆脱太阳系的引力场而飞向其他星系,就需要大约 $16\,700 \text{ m/s}$ 的速度,这称为第三宇宙速度。

由于航天器的运行轨道是椭圆轨道,航天器不但要受到外界和本身某些力的干扰,而且还受到某些微重力的作用,空间轨道上航天器上的重力加速度值为 $10^{-6} \sim 10^{-3} G$,这种环境称为微重力环境。微重力环境是影响航天器飞行轨道和航天员生理状态的主要因素。

(四) 磁场

磁场环境包括地球磁场和星际磁场,对近地轨道飞行的航天器有影响的主要是地球磁场。从地心至磁层边界空间范围的磁场为地磁场。地磁场分布近似于偶极子分布,随位置和高度不同而变化,地球两极磁场强,赤道磁场弱,高度越高,磁场越弱。地磁场是非常弱的磁场,但却延伸到很远的空间,保护着地球上的生物和人类免受宇宙辐射的侵害。地磁场主要来源于地球内部,来自外层空间的成分还不到 1%。

地磁场包括基本磁场和变化磁场两个部分,它们在成因上完全不同。基本磁场是地磁场的主要部分,起源于地球内部,比较稳定,变化非常缓慢。它可分为偶极子磁场、非偶极子磁场和地磁异常几个组成部分。偶极子磁场是地磁场的基本成分,其强度约占地磁场总强度的 90%,起源于地核磁流体发电机过程和地壳中的磁性岩石,它有稳定的空间结构和缓慢的长期变化。非偶极子磁场主要分布在亚洲东部、非洲西部、南大西洋和南印度洋等几个地域,平

均强度约占地磁场的 10%,场源在地球内部何处目前还有争议。地磁异常又分为区域异常和局部异常,是由地壳内具有磁性的岩石和矿体等所形成。变化磁场起源于磁层、电离层的各种电流体系、粒子流和等离子体流及其地球内部的感应电流,它的强度虽然只有地磁场的百分之几,但这部分磁场随时间变化大,对航天器的工作状态有直接的影响。

太阳风磁场对地球磁场施加作用,好像要把地球磁场从地球上吹走似的。尽管这样,地球磁场仍有效地阻止了太阳风的长驱直入。在地球磁场的阻止下,太阳风绕过地球磁场,继续向前运动,于是形成了一个被太阳风包围的、彗星状的地球磁场区域,这就是磁层,其边界为磁层顶。在向阳面,磁层顶距地球约有十余个地球半径。在背阳面,磁层有一个很长的柱形尾巴,称为磁尾(图 1-2)。磁层是地球控制的最外层区域,它直接与太阳风、行星际磁场接触。太阳和行星际磁场的扰动及变化首先影响磁层,导致磁扰,严重时将产生磁暴、磁层亚暴等。这一变化的扰动还将耦合给电离层和高层大气,如发生电离层暴等。磁层是航天器的主要活动区域,因此它与航天事业有着极为密切的关系。

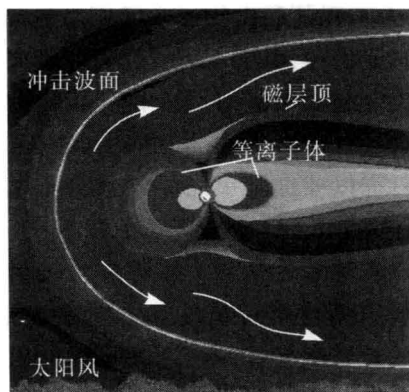


图 1-2 地球磁场

太阳系其他行星的磁场测定结果表明月球实际上无磁场,但从岩浆分析得出远古时期曾有弱磁场,强度为 $0.07\,958 \text{ A/m}$ 。金星、火星、土星均无强磁场,强度仅为 3.979 A/m 。木星的磁场比地球磁场强 4000 倍,强度高达 $79\,580 \sim 159\,160 \text{ A/m}$ 。在行星际空间,磁场强度仅有 $(159.16 \sim 397.90) \times 10^{-5} \text{ A/m}$,最高可达 $477.48 \times 10^{-5} \text{ A/m}$,空间磁场强度受太阳活动影响而变化。



(五) 空间辐射

地球外层空间的辐射环境包括电磁辐射和电离辐射,它们是威胁载人航天安全的重要物理因素之一。电磁辐射贯穿物质的能力低,对人体的伤害较小;电离辐射贯穿物质的能力很强,能直接或间接地电离或激发物质,损伤物体材料和生物细胞,对载人航天的影响较大。

1. 电磁辐射

地球周围空间的电磁波主要来自太阳,太阳表面发出强烈的电磁辐射,频谱极宽,按波长由长至短划分为:无线电波、微波、红外辐射、可见光、紫外辐射、X射线和能量极高的伽马射线。其中紫外射线、X射线的能量高、流量大,可以使地球高层大气温度增高,大气密度上升,同时使大气的分子、原子电离而形成电离层。其强度变化也很大,太阳爆发时的强度可达到平静时的数百倍,是近地空间和地球高层大气扰动的根源。

2. 电离辐射

电离辐射包括各种带电粒子、中子或X、 γ 射线。电离辐射源包括天然辐射环境(银河宇宙辐射、地磁捕获辐射、太阳耀斑辐射)和人工辐射环境(高空核爆炸、飞行器上的核装置等)。航天工程师和生物医学家们对电离辐射特别关心的原因是因为地磁捕获辐射和太阳耀斑辐射是决定载人航天时间安排和轨道的重要因素,每次飞行前必须预测它们的辐射强度。同时,它们可以使细胞里的原子和分子电离,造成细胞的死亡,影响到航天员的健康。

(1) 银河宇宙辐射 银河宇宙辐射是载人航天必然遇到的辐射源之一,它来自银河系,可能起源于超新星爆炸,是被星际间磁场加速而到达地球空间的高能带电粒子流。银河宇宙线是来源于太阳系以外银河系的通量很低但能量很高的带电粒子流,它的主要成分是质子(约占83%)、 α 粒子(约占13%)、重离子(1%)、电子和介子(3%)。其中各种重离子能量在 $10^2 \sim 10^{12}$ MeV之间,电子能量在0.5~100 GeV之间,强度约为几个粒子/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。由于银河宇宙线粒子能量甚高,贯穿能力极强,故难以防护。应引起特别注意的是银河宇宙线的高能重离子,虽然它们的通量比质子低得多,剂量也很小,

但其电离辐射能力强,沿粒子径迹会发生很大的能量沉积(高LET),从而可对生物细胞造成损伤或使微电子器件发生误动作(异常翻转或锁定)。同时,它可与屏蔽材料中的原子发生核作用而产生次级粒子,如次级中子和质子,一定条件下,屏蔽不但不能降低辐射的剂量,反而随着屏蔽材料的加厚,因次级粒子的贡献致使剂量增加。

银河宇宙线的强度与太阳活动高低成反比:太阳活动最高年,宇宙线强度降低;太阳活动最低年,强度增加。一般变化范围是2~4.5粒子/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。银河宇宙线的高能粒子,虽然能量很高,但通量较低。由于其通量很低,一般不会造成显著的短期效应,但长期暴露在银河宇宙线中,会增加不育和癌症的风险。在近地载人轨道上,地磁场屏蔽了大部分的银河宇宙线,其剂量贡献主要集中在极区附近,轨道越高,倾角越大,影响越大。比如国际空间站的飞行高度距离地面400 km,倾角 51.6° ,银河宇宙线对它造成的辐射剂量占辐射总剂量的一半以上。而“神舟”飞船轨道的高度和倾角都比较低,银河宇宙线的剂量贡献只占辐射总剂量的30%。

还有部分辐射来自太阳,叫做太阳宇宙线,能量从10 MeV至150 GeV不等。太阳爆发时,其强度可达 10^5 粒子/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。这种太阳突然发射高能带电粒子的现象,称为太阳质子事件。

在远离地球的外层空间,银河宇宙线的空间分布基本上是各向同性的。但是,当银河宇宙线进入地磁作用范围时,由于受到地磁场强烈的偏转,它将显示出空间分布的不均匀性和各向异性,即地磁效应。例如,高纬度处银河宇宙线强度大于低纬度处(纬度效应)。尽管如此,仍可认为银河宇宙线在近地空间的空间分布近似整个空间。

太阳宇宙线(太阳质子)的地磁效应十分明显,其分布空间为磁纬 50° 以上的高纬度区域和赤道几千千米以上的高度。观测表明,大于2 MeV的太阳质子就能全部进入同步轨道高度。可以看出,太阳宇宙线的空间分布恰好与辐射带粒子相反。

宇宙线的主要成分是质子,其次是 α 粒子,其他重核成分则不到1%。太阳宇宙线中还有少量的电子。根据资料统计,较大的太阳质子事



件在太阳活动峰年可达十多次，而低年仅为几次，甚至更少。太阳宇宙线具有较高的能量，而且强度又相当大，因此，它对空间飞行危害较大。

(2) 地磁捕获辐射 (范艾伦带) 地球磁场捕获了大量的高能带电粒子，形成大约 6~7 个地球半径的粒子辐射区域，称为地球辐射带。辐射带分为靠近地球的内辐射带和距地球远些的外辐射带，主要由高能电子与高能质子构成，内外带之间是一个低辐射强度区域 (图 1-3)。

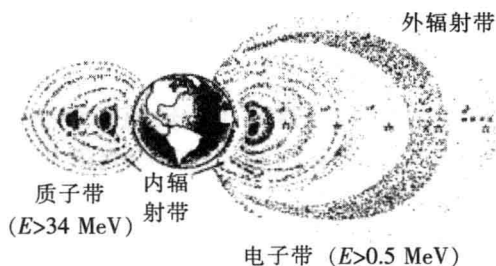


图 1-3 地磁捕获辐射分布示意图

内辐射带是距地球最近的捕获带电粒子区域，主要由质子和电子组成；质子能量在 4~50 MeV 之间，电子能量在 0.5 MeV 左右。内带在赤道上空约 600~10 000 km，南北纬度边界约为 45°。它有两个强辐射区域，一个位于 3600 km 高度，另一个位于 7000~8000 km 高度。内辐射带有两个异常区，它们是南大西洋上空 (西经 40°) 的负磁异常区和我国上空 (东经 100°) 的正磁异常区。在负磁异常区内辐射带下边界下降到 200 km 左右，在正磁异常区内辐射带下边界上升至 1500 km 左右。南大西洋负磁异常区的地磁捕获辐射是低地球轨道飞行的重要辐射环境，载人航天器短时 (10~20 min) 通过内辐射带，航天员所受剂量不超过几十毫戈 (瑞)。由于航天器的舱壁起到了很好的屏蔽作用，航天员基本上不会受到辐射的影响。但航天员出舱活动时，应尽可能避开南大西洋异常区，以降低航天员受到的辐射剂量。

内带电子包括天然电子和人工电子。天然电子能量低些，人工电子是高空核爆炸所产生的电子被磁场捕获后形成的，能量一般高于 0.7 MeV。由于内带电子贯穿物质的能力较差，故容易防护，但应考虑其在舱内所产生的韧致辐射。

外辐射带由电子和低能质子组成，其空间

范围延伸很广，分布于赤道上空 $(1\sim6)\times 10^4$ km 高度范围内的广大空间，中心位置为 $(2\sim2.5)\times 10^4$ km 高度，纬度边界为 55°~70°。外带下边界降至 300 km 高度。外辐射带受太阳活动的影响很大，磁扰时，外带粒子的强度和位置都有显著变化。外带电子的能量是内带的 10 倍左右，由于低能电子的贯穿能力较差，可以充分地被航天器的舱壁屏蔽，对载人航天的影响不大。

(3) 太阳质子事件 太阳色球层有时发生局部区域的短暂增亮现象，称为太阳耀斑。由于这种带电粒子流的主要成分是质子，故也称为太阳质子事件或太阳爆发。小的太阳质子事件持续数小时，大的太阳质子事件可持续数天。太阳质子事件的发生和强度与太阳活动周期有关。在太阳活动频繁的年份，发生的可能性较大。因此根据太阳活动周期，可对太阳质子事件进行一定程度的预测。

太阳质子事件发射的带电粒子绝大多数是质子，其次是 α 粒子，电荷数大于 3 的粒子很少。每次事件的质子能谱及通量各不相同。能量大于 0.5 GeV 的称为相对论事件，能量小于 0.5 GeV 的称为非相对论事件。太阳粒子事件发生后，可观测到粒子强度迅速增加，达到峰值以后缓慢地衰减。有时短时间内相继发生几次太阳爆发，当这系列太阳爆发伴有星际间磁场冲击波时，常常发生异常大的太阳粒子事件。一般来说，发生很大太阳质子事件的几率并不大。

(六) 陨星和微陨星体

1. 陨星

在太阳系的广袤空间中，存在着由彗星或流星崩解成碎片或整块的陨星。它们有的进入地球大气层未被烧毁而坠落到地面，落到地面的残骸被称为“陨石”，按它们的组成可分为：石陨星、铁陨星和石铁陨星，并分别占总数的 61%、35% 和 4%。因为飞行器与陨星相撞的几率很小，故对航天不构成威胁，但研究这些陨星对于太阳系的形成和演化以及生命起源均有着重要的科学价值。

2. 微流星体

微流星体是太阳系中自然存在的天体，几乎所有的微流星体都源自彗星和小行星。其中，保持母体轨道并形成较高通量的微流星体叫做



雨流, 没有明显分布特征的随机流则称为偶发粒子。微流星体在太阳系轨道上运动具有较高的速度, 一般在 3 km/s 至 90 km/s 之间; 其数量随质量的增加而迅速减小, 但质量没有明显的分界; 一般认为其形状为球体, 密度为 $0.5\sim 2.0\text{ g/cm}^3$ 。在太空中, 特别是在地球的附近, 普遍存在着微流星体。这些微粒对太空风化过程起主要作用。当它们撞击月球或者没有大气层的天体(水星或小行星等)表面时, 会造成这些天体表面的熔解与蒸发, 导致模糊、变暗等光学变化。

微流星体对太空探测有着重大威胁。它们相对于地球轨道上的飞行器, 其速度大约为每秒数千米, 抵抗微流星体的撞击是航天器和航天服设计所面临的重要难题。微流星体虽然体积很小, 但数量多时仍会对太空船造成难以估量的伤害, 高速撞击会对太空船的外壳造成类似喷砂的效果, 长期暴露会危害到太空船各系统的性能。

(七) 空间碎片

空间碎片是指分布在地球轨道上并已丧失功能的空间物体。按其大小可以分为三类: 大空间碎片是指 10 cm 以上的空间碎片; 小空间碎片是指 1 cm 以下的空间碎片; 介于大、小空间碎片之间的为中等碎片, 其数量比大空间碎片多, 航天器躲避困难, 是十分危险的碎片。

人类空间活动 50 余年, 产生的空间碎片数以亿计, 其主要来源是: ①运载火箭和航天器产生的碎片; ②航天器表面材料的脱落; ③火箭和航天器爆炸、碰撞过程中产生的碎片; ④航天员遗落在太空的物品。这些垃圾的总重量已经达到 5500 kg , 仅直径超过 10 cm 的物体就有 9000 块之多, 小于 10 cm 的则不计其数。其中碎片最密集的位置为离地面 $885\sim 1005\text{ km}$ 的空间。这些太空垃圾, 昼夜不停地飘浮在地球轨道上, 时刻威胁着航天员的生命和航天器的寿命。而且, 随着航天事业的发展, 它们的队伍会越来越壮大。据预测, 在未来的几年内, 还将有几百个甚至上千个小卫星升空。同时, 完成使命的、越来越大的空间站也是太空垃圾的制造者。据推测截至 2010 年, 太空垃圾至少会达到 $10\,000\text{ kg}$, 约苹果大小的碎片就会有

7500 kg 。在距地球较近的空间里如此多的太空垃圾在游荡着, 它们有可能与航天器相撞, 也可能彼此相撞。如果这些垃圾相互撞击, 爆炸的碎片还可能击中其他垃圾, 以至达到无法控制的地步, 碎片总数将会成倍增加。

二、空间环境与航天

航天器在太空运行时, 遇到的真空、太阳电磁辐射、高能粒子辐射、等离子体、微流星体、行星大气和磁场等空间环境, 均会对航天器和人的健康、安全产生显著影响, 主要表现在以下几方面。

(一) 影响航天器的飞行轨道和姿态

近地空间环境影响航天器飞行轨道和姿态的主要因素如下。

1. 高层大气

高层大气的阻力是造成航天器轨道衰变、姿态变化、寿命减少的主要原因。大气对航天器作用力的大小与大气密度成正比。在高轨道上运动的航天器, 遇到的大气稀薄, 阻尼小, 轨道寿命较长, 低轨道上运行的航天器则相反。例如, 轨道高度 800 km 以上的航天器, 寿命在几十年以上; 200 km 左右高度的航天器寿命只有几天到几十天。

太阳活动对高层大气密度有明显影响, 高度越高, 受太阳活动的影响越大, 对航天器的运行轨道、姿态和寿命的影响也越大。例如, 以圆形轨道为例, 一个轨道高度为 300 km 的卫星, 如果质量面积比为 100 kg/m^2 , 在太阳活动较高时(例如太阳黑子数为 200), 其寿命约为 10 d ; 在太阳活动较低时(例如太阳黑子数为 6), 卫星的寿命约为 50 d , 是前者的 5 倍。

2. 太阳光压

太阳射线辐照在航天器表面时, 对航天器产生作用力, 这就是太阳光压, 它能够严重影响航天器的姿态和自旋速率。决定太阳光压效应的因素包括: ①航天器结构表面的光学特性; ②航天器相对于太阳的位置(地球公转位置); ③太阳辐照压力中心相对于航天器质心的位置和航天器受照面积; ④太阳光子流强度、频谱及方向。

3. 天体引力

所有物体之间都存在万有引力, 航天器在



空间运行的轨道主要由天体的引力场决定。除了地球引力外,近地空间内可对航天器构成影响的还有太阳和月球的引力。行星大气、太阳电磁辐射和等离子体对航天器的作用力远小于天体的引力,但是长期的影响不可忽略。

4. 地球的非球形

地球形状并不规则:赤道半径大于极半径;南北半球也不对称,北极略突出,南极略扁平。这种不规则性导致了地球质量的不均匀,进而影响重力加速度。加速度的不规则将对航天器轨道产生摄动作用,其中地球扁率是主要影响项。

5. 近地磁场环境

航天器在磁层中运行时与等离子体相互作用,其表面会产生充电电位:在磁层宁静时,向阳面电位可达正几伏,背阳面则为负几十伏;在磁层亚暴时,向阳面可达几百伏至几千伏的正电位,背阳面可达几千伏至几万伏的负电位。等离子体和表面充电后的航天器相互作用,会增大航天器飞行阻力,进而影响航天器的飞行姿态。

近地空间磁场环境也可影响航天器轨道姿态,例如,卫星上使用一些永磁材料和感磁材料,故航天器总会有一定的磁矩。轨道上航天器的磁矩和空间磁场相互作用会产生干扰力矩,从而影响航天器的轨道姿态。

在不同高度飞行影响航天器的轨道和姿态的因素不同。例如,离地面越近,大气密度的影响越大,2000 km以上的大气对航天器的影响可忽略不计;在飞行高度大于5000 km时,航天器受日月引力的影响会大于地球非球形形状的影响。

(二) 造成航天器材料损伤的因素

空间的不同环境,对航天器的表面材料和内部器件产生不同的损伤作用。

1. 高真空环境

航天器中的一些材料和器件长期处在高真空中,会发生一些特殊的物理和化学变化。真空环境会加速其他环境条件对材料和器件的影响。在真空环境下,各种材料会失去内部的溶解气体和表面的吸附气体,材料产生出气现象。在材料出气、辐射损伤和其他环境效应的长期共同作用下,材料的重量会逐渐减小,即

材料重损。材料的重损率与材料的性能有密切的关系,它是鉴定材料空间性能的重要指标。

同时,在空间高真空条件下,固体表面会失去所吸附的气体,固体表面相互接触时便发生不同程度的黏合现象,称为黏着。如果除去氧化膜,使表面达到原子清洁程度,在一定的压力负荷下可进一步整体黏着,即引起冷焊。这种现象可使航天器上的一些活动部件出现故障,如加速轴承磨损、电气活动触点卡住、太阳电池翼伸展困难等。

2. 低气压环境

航天器在发射过程中,往往要经历1~1000 Pa的低气压环境,航天器入轨后,由于结构材料出气,也可使某些部件的空间维持上述气压范围,一些高压器件和电路可能发生气体放电击穿,造成功能减退或永久性损伤。

3. 原子氧

氧原子是最具活性的气体粒子之一,原子氧对航天器的影响包括如下几个方面:①造成航天器结构材料的剥蚀和老化;②损耗航天器的温控材料;③损耗太阳电池的连接件;④污染和侵蚀遥感探测器或其他光学材料。

4. 冷黑环境

冷黑环境除影响航天器的温度外,还会影响航天器部分材料的性能,使其老化、脆化,进而使有伸缩活动的部位出现故障。

5. 太阳电磁辐射

太阳电磁辐射中的可见光和红外部分主要影响航天器的温度,长期的紫外辐照会使航天器的一些表面材料受到辐射损伤,例如增加温控涂层的吸收率、降低太阳电池片的效率。另外太阳辐照作用产生的二次辐照(即地球反射)及部分地球红外辐射都是影响航天器温度的因素,紫外线、X射线等对有机材料的光化学腐蚀效应足以改变材料的性质。

6. 宇宙高能带电粒子流

宇宙射线、地球辐射带和银河宇宙线均属于高能带电粒子流。高能带电粒子流不仅对航天器的表面材料有影响,而且在航天器内部形成内辐射环境,使一些材料和器件的性能发生变化,甚至造成永久性辐射损伤。易受损伤的材料和器件有太阳电池、光学表面、有机材料、半导体器件和集成电路等。高能粒子的注入影