

国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国之重器出版工程

国防现代化建设

空间科学与技术研究丛书

Introduction to Space Artificial Environment

空间人工环境概论

方进勇 李立



中国工信出版集团



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

空间人工环境主要是伴随着人类对太空的开发、利用以及空间对抗产生的,是一个全新的技术领域,主要包括空间碎片环境、空间人工等离子体环境、空间人工强电磁环境、空间强激光环境和空间高能粒子环境等。本书全面介绍了空间人工环境发展现状、空间人工环境对航天器的影响及其作用机理、空间人工环境模拟技术、空间人工环境效应实验技术和空间环境防护技术等。

本书适合于空间科学、空间技术和空间安全等领域的教学、科研和管理人员阅读,也可作为高等院校相关专业学生的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空间人工环境概论/方进勇,李立编著. —北京:北京理工大学出版社, 2021. 1

(空间科学与技术研究丛书)

ISBN 978 - 7 - 5682 - 9469 - 0

I. ①空… II. ①方… ②李… III. ①航天器环境 - 概论 IV. ①X21

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第012955号

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京捷迅佳彩印刷有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 25

彩 插 / 2

字 数 / 435千字

版 次 / 2021年1月第1版 2021年1月第1次印刷

定 价 / 126.00元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 张海丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



前 言

空间，这里特指人类从事航天活动的太空领域。在人类没有进入太空以前，太空是一个纯净的自然环境。这个环境是一个高真空环境，也是一个稀薄等离子体环境；这个环境是一个高辐射环境，存在辐射能量从几 eV 量级至百 GeV 量级的各类辐射粒子；这个空间是一个弱磁场环境，磁场强度变化由近地轨道的 30 000 nT 至同步轨道的 100 nT；这个空间是一个高度洁净的空间，除了偶尔有几颗流星划过地球留下几道美丽的“彩虹”；这个空间除了阳光就是星光，除了背景微波辐射，尚存在巨大的电磁频谱间隙。

然而，人类的航天活动几乎改变了这一切。空间密布着各类废弃的航天器及其产生的碎片，已经成为名副其实的垃圾场；空间电磁频谱的宽度很快被占满，以至于开始启用在地面上尚不成熟的太赫兹频段；空间的真空环境也被各类航天器的推进剂所“污染”。更让人感到深深忧虑的是太空将极有可能沦为人类未来的新战场，更多具有特定功能的“人造碎片”将涌入太空，动能反卫已在多个国家陆续开展实验，形似垃圾的大规模微纳卫星星座未来必将成为密布太空的新乌云。人类初期的核活动已经大大污染了太空的电磁环境，但高功率微波武器的发展及其潜在的太空应用将使太空增加新的“死亡”电磁辐射；强激光武器的发展及其太空应用将使阳光不再温暖；粒子束武器的发展使传统航天器粒子辐射效应增添了更多的“死亡”气息。更有人疯狂地想要人工改变空间等离子体环境，如若实现，则人类的空间应用模式必将发生巨大的改变。

空间环境是空间科学研究的重要领域，从学科分类来看应该称之为空间环



境学。人工空间环境是空间环境的一个重要组成部分，随着人类对空间环境的影响越来越大，人工空间环境将成为未来人类利用太空进行航天活动必须研究和认真对待的要素，其也必将发展成为一门独立的学科。限于著者才疏学浅，尚不能对这一新兴学科进行完整的归纳与论述，只能就其中著者认为比较重要的几个人工环境影响要素进行简要的概述，希望能够抛砖引玉，引起广大科研工作者的兴趣，大家共同努力，促进这门新兴学科的研究与发展。

本书共分为6章进行概述。第1章为绪论，简要介绍了空间自然环境及空间人工环境的定义及研究范畴；第2章介绍了空间碎片环境，包括空间碎片的成因、趋势及未来对人类航天活动的影响；第3章介绍了空间强电磁环境，包括人类核活动及高功率微波武器对空间环境的影响；第4章介绍了空间强激光环境，包括激光武器的发展及太空应用趋势，对航天器潜在的损伤效应等；第5章介绍了空间高能粒子环境，详细描述了自然空间粒子效应，在此基础上论述了粒子束武器空间应用对航天器带来的新威胁；第6章介绍了空间人工等离子体环境，重点描述了几种人工影响空间等离子体环境的方法及可能产生的效应，并探索了航天器的初步防护策略。

本书由李立编写第2章内容，其余章节由方进勇编写并对全书进行了统稿。在成书的过程中，秦子浩参与了第1章及第2章部分内容的编写，张浩亮及李奇威参与了第3章部分内容的编写，朱鹏参与了第4章部分内容的编写，古松和孙静参与了第5章部分内容的编写，彭凯参与了第6章部分内容的编写。特别感谢西安交通大学张冠军教授及中国空间技术研究院崔万照研究员对本书的审阅并提出的宝贵建议。本书的编写还得到了空间微波技术国家重点实验室基金的资助，在此一并表示感谢。

在编著本书的过程中，参考了大量国内外有关著作和论文，并引用了部分图表及论述，在此对相关作者表示衷心的感谢，如有引用不当或不能正确表达原著者的表述，敬请作者及时与我们联系，我们将虚心接受并在未来的版本中予以改正，同时也向您表示深深的歉意。虽然我们竭尽全力，但囿于理解水平及能力，书中难免有诸多不妥甚至疏漏之处，敬请广大读者不吝批评指正。

编著者



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 空间自然环境	003
1.2 空间人工环境	008
1.3 研究空间人工环境的意义	011
第 2 章 空间碎片环境	013
2.1 空间碎片概况	015
2.2 空间碎片来源	018
2.2.1 失效的载荷与运载火箭箭体	019
2.2.2 任务相关物体	019
2.2.3 解体碎片	020
2.2.4 固体火箭发动机喷射物	022
2.2.5 NaK 合金冷却液	023
2.2.6 WestFord 铜针	024
2.2.7 表面剥落物与微粒撞击溅射物	025
2.3 空间碎片分类	027
2.4 空间碎片监测	028
2.5 空间碎片环境模型	030
2.6 空间碎片发展趋势	033



2.6.1	空间碎片环境演变的主要表现	035
2.6.2	现有对策及面临的挑战	036
2.6.3	大型小卫星星座对空间碎片环境的影响	039
2.7	空间碎片环境效应分析	051
2.8	空间碎片效应模拟及实验论证	056
2.8.1	轻气炮发射技术	057
2.8.2	定向聚能加速器技术	058
2.8.3	电磁炮发射技术	060
2.8.4	激光驱动加速器技术	061
2.8.5	粉尘静电加速器技术	062
2.8.6	等离子体加速器技术	065
2.8.7	电热炮发射技术	066
2.9	消除空间碎片环境影响的主要手段	067
2.9.1	空间碎片规避措施	068
2.9.2	空间碎片防护措施	070
2.9.3	空间碎片预防措施	071
2.9.4	空间碎片清除措施	074
2.10	各国空间碎片清除计划	090
2.10.1	美国的电动碎片清除器	090
2.10.2	日本的微型清除器	092
2.10.3	德国的制动火箭星	093
2.10.4	瑞士的太空清理星	093
2.10.5	法国的碎片清除器	094
2.10.6	英国的“立方帆”清除器	095
2.10.7	欧空局空间碎片清除计划	097
2.11	中国对空间碎片的影响、贡献及研究进展	099
2.11.1	中国航天活动对空间碎片环境的影响	099
2.11.2	中国对空间碎片环境保护的贡献	101
2.11.3	中国空间碎片清除方法新概念	103
2.12	小结	104
	参考文献	105

第3章 空间强电磁环境 113

3.1 空间核电磁脉冲环境 116



3.1.1	核电磁脉冲	116
3.1.2	空间核电磁脉冲环境效应	119
3.1.3	空间核电磁脉冲环境防护	133
3.1.4	核电磁脉冲环境研究现状概述	138
3.2	窄带高功率微波及其空间环境效应	140
3.2.1	窄带高功率微波武器发展及应用趋势	141
3.2.2	窄带高功率微波空间环境	148
3.2.3	航天器窄带高功率微波空间环境效应分析	150
3.2.4	航天器窄带高功率微波空间环境效应研究方法	160
3.2.5	航天器窄带高功率微波空间环境防护方法	170
3.2.6	航天器窄带高功率微波空间环境效应国内外研究现状 概述	173
3.3	超宽带高功率微波及其空间环境效应	181
3.3.1	超宽带高功率微波武器及其应用趋势	182
3.3.2	超宽带高功率微波空间环境	189
3.3.3	航天器超宽带高功率微波空间环境效应分析	190
3.3.4	航天器超宽带高功率微波空间环境效应研究方法	192
3.3.5	航天器超宽带高功率微波空间环境防护方法	193
3.3.6	航天器超宽带高功率微波空间环境效应国内外研究现状 概述	195
3.4	空间强电磁环境效应对比	198
3.5	小结	199
	参考文献	200
第4章	空间强激光环境	209
4.1	激光武器的发展及应用趋势	211
4.1.1	国际研究现状	211
4.1.2	国内研究现状	231
4.1.3	激光武器应用趋势分析	232
4.2	空间强激光环境形成要素及光场分析	233
4.2.1	激光武器分类及天基激光武器系统组成	233
4.2.2	强激光的产生方法	235
4.2.3	典型空间激光武器光辐射密度分布	238
4.3	航天器强激光空间环境效应	240



4.3.1	高能激光对材料的毁伤机理	240
4.3.2	激光对卫星热控系统的毁伤效应	242
4.3.3	激光对卫星电源系统的毁伤效应	242
4.3.4	激光对卫星光学载荷的毁伤效应	243
4.3.5	强激光对卫星其他电子系统的毁伤效应	244
4.4	航天器强激光空间环境效应模拟及实验方法	244
4.4.1	环境效应模拟和实验的必要性	245
4.4.2	强激光环境效应模拟	245
4.4.3	强激光环境效应实验	253
4.5	航天器强激光空间环境防护	259
4.5.1	空间强激光环境防护现状	259
4.5.2	航天器有效载荷的激光防护	261
4.5.3	航天器整体防护技术	264
4.5.4	其他防护技术	265
4.6	小结	267
	参考文献	268
第5章	空间高能粒子环境	273
5.1	空间自然粒子环境	275
5.1.1	银河宇宙射线	277
5.1.2	太阳粒子事件 (solar particle events)	279
5.1.3	地球俘获带	282
5.1.4	近地空间环境	283
5.2	空间人工高能粒子环境	288
5.2.1	核爆炸形成的空间高能粒子环境	289
5.2.2	粒子束武器形成的空间高能粒子环境	290
5.3	高能粒子效应	298
5.3.1	自然空间粒子效应	298
5.3.2	人工高能粒子效应	311
5.4	空间人工高能粒子环境防护	319
5.4.1	非电离辐射防护	319
5.4.2	电离辐射防护	322
5.4.3	防护挑战	325
5.5	小结	327



参考文献	327
第 6 章 空间人工等离子体环境	333
6.1 等离子体基本特性	335
6.1.1 德拜长度	335
6.1.2 等离子体频率	336
6.1.3 等离子体参数	336
6.2 空间等离子体环境	337
6.2.1 电离层	337
6.2.2 磁层及外层空间	339
6.3 人工产生空间等离子体环境方法	341
6.3.1 电离层人工产生等离子体环境方法	342
6.3.2 磁层及外层空间人工产生等离子体环境方法	347
6.4 人工等离子体环境的可能应用	351
6.4.1 人工电离层的可能应用	351
6.4.2 全人工等离子体环境的可能应用	354
6.5 空间人工等离子体环境效应及防护	355
6.5.1 空间人工等离子体环境效应分析	355
6.5.2 防护策略初探	357
6.6 小结	359
参考文献	359
索引	363



第1章

绪 论

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活动的第四个环境。空间环境中所说的空间通常指地面上几十千米高度以上的广大宇宙区域，其中充满各种各样形态的物质，有各种粒子和场，它们既可以是天然的，也可以是人为的：粒子有中性气体、电离气体、等离子体、各种能量的带电粒子以及各种尺度的流星体及空间碎片（space/orbital

debris)；场有引力场、电场、磁场和各种波长的电磁辐射；深空中还有小行星、行星及彗星等大尺度“粒子”；这些各种各样形态的物质就构成了空间环境。它是人类在开展航天活动以及对自己的生存环境不断地拓展的过程中才逐渐认识到的。



| 1.1 空间自然环境 |

空间自然环境是宇宙中天然形成的航天器飞行环境，主要包括真空环境、空间太阳辐照环境、空间冷黑环境、高能粒子辐照环境、微流星体环境、空间等离子体环境、空间磁场环境、空间微重力环境、空间原子氧环境及空间大气环境等。几乎所有的航天器空间环境参数对航天器都有不可忽视的影响，由空间环境导致的航天事故也不胜枚举。

1. 真空环境

航天器运行轨道高度不同，真空度也不同，轨道越高，真空度越高。海平面大气密度的标准值为 $1.225 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ，压力的标准值为 101 325 Pa。随着高度的增加，大气压力和密度迅速下降。在 90 km 处的高空大气压力约为 10^{-1} Pa ，600 km 处的高空大气压力约为 10^{-7} Pa ，1 000 km 处约为 10^{-8} Pa ，2 100 km 处约为 10^{-9} Pa 。2 000 km 高度以上压力随高度增加而下降的速度变缓。10 000 km 处约为 10^{-10} Pa ；月球表面约为 $10^{-10} \sim 10^{-12} \text{ Pa}$ ，相当于有 100 个氢分子/ cm^3 ；银河系星际空间压力约为 $10^{-13} \sim 10^{-18} \text{ Pa}$ 。高度在 100 km 以上，由于光电离作用，平均温度急剧增加，到 700 km 处，达 1 000 K，大气层的极限温度可达 2 100 K。距地面数百千米的低轨道环境为高真空，距地面数千千米的中轨道环境为超高真空，距地面数万千米的高轨道环境为极高真空。在空间轨道运行

的航天器，环境压力范围是从高真空到极高真空。

宇宙真空是理想的洁净真空，这时气体分子的热传导可以忽略，只有辐射换热。空间真空环境对航天器的影响是多方面的，有由真空状态引起的空间真空效应，也有基于空间真空环境并与其他环境共同引起的所谓协同效应。真空环境效应主要有：压力差效应，真空放电效应，辐射传热效应，真空出气效应，材料蒸发、升华和分解效应，黏着和冷焊效应以及空间大气密度对航天器的阻尼效应等。

2. 空间太阳辐照环境

太阳是个巨大的辐射源，每时每刻都在向空间辐射大量能量，其发出的能量相当于 6 000 K 黑体的辐射能量。太阳能够发射从 10^{-14} m 的 γ 射线到 10^2 m 的无线电波之间各种波长的电磁波，不同波长辐射的能量大小不同，其中可见光的辐射能量最大（能量峰值的波长为 0.48 μm ）。

太阳电磁辐射中的可见光辐射、近红外辐射和远红外辐射共同构成了航天器在空间飞行时所受到的加热源，也称空间外热流。若航天器的热设计处理不当，会造成航天器温度过高或者过低，影响航天器的正常运行。太阳辐照光压能够影响航天器的姿态和自旋速率，在设计航天器的姿态控制系统时，特别在设计高轨道航天器与重力梯度稳定的航天器的姿态控制系统时，必须考虑太阳辐照光压的影响。由于光电效应会产生很多自由电子，太阳辐射中的紫外线辐射能使航天器表面发生静电效应带电和电位升高，对航天器内电子系统和磁元件产生影响。紫外线辐照可以在晶体和玻璃等光学材料中产生色心，使光学材料染上颜色，影响光谱的透过率。此外，紫外线的光量子还能破坏分子聚合物的化学键，引起光化学反应，造成分子量降低、材料分解、裂析、变色、弹性和抗张性降低等。

3. 空间冷黑环境

如果不考虑太阳与附近行星的辐射，那么宇宙空间背景辐射的总剩余能量基本可以忽略不计（能量密度约为 $1 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ ），相当于温度为 3 K 的黑体发出的能量，同时，在太空中航天器的热辐射几乎可以全部被太空所吸收，没有二次反射，即航天器没有同空间其他星体热交换的可能，这一环境称为空间冷黑环境，也称热沉。航天器热设计必须考虑冷黑环境的影响，它是航天器热平衡实验、热真空实验的主要环境之一，考虑不当会造成航天器的温度过高或过低，影响航天器的正常工作与轨道寿命。

航天器上可伸缩的活动机构，如太阳能电池阵、天线等在冷黑环境下由于冷



黑环境影响会使展开机构卡死,影响其伸缩性能。航天器上某些有机材料在冷黑环境下会老化和脆化,影响材料的性能。

4. 高能粒子辐照环境

高能粒子辐照环境主要来自地球辐射带、太阳宇宙射线、银河宇宙射线等,主要成分是电子、质子及少量重离子,它们具有能量高、能谱宽、强度大的特点,共同构成了航天器轨道上的带电粒子环境。带电粒子对航天器材料、微电子器件、光学窗口、温控表面、生物及宇航员均会产生辐射损伤,是目前航天器在轨异常和失效的重要原因。为减少这种影响,提高航天器的可靠性,必须采用合适的抗辐射措施。

粒子辐照环境效应对航天器的影响主要表现为总剂量效应和单粒子事件效应两方面,其他还包括充放电效应及内带电效应等。单粒子事件效应主要有单粒子翻转效应和单粒子锁定效应。单粒子翻转效应是指高能带电粒子轰击微电子器件造成器件瞬时翻转,产生软故障。而在 CMOS (互补性氧化金属半导体) 电路中,带电粒子穿越芯片时,形成的电流会导致导通,造成锁定事件,电流过大会烧毁器件,这种效应称为单粒子锁定效应。另外,带电粒子对航天器还会产生辐照损伤,高能质子和重离子既能产生电离作用,又能产生位移作用,这些作用会导致航天器上的各种材料、电子器件等性能变差,严重时损坏。

5. 微流星体环境

微流星体 (micrometeoroid) 通常是指直径在 1 mm 以下、质量在 1 mg 以下的固体颗粒,它们主要来源于彗星,少数来源于小行星。在太阳引力场作用下,微流星体围绕太阳沿椭圆轨道运行,具有较高的速度,一般在 3 ~ 90 km/s 之间,平均速度为 20 km/s。天然微流星一般分零星微流星 (背景流星) 和雨流微流星 (流星群),其质量范围为 $1 \sim 1 \times 10^{-6}$ g, 平均密度约为 0.5 g/cm^3 。

由于微流星速度很高,当它与航天器相撞时,能够释放出巨大的能量,对航天器有很大危害。质量小的微流星体主要对航天器表面起沙蚀作用,影响光学表面、太阳能电池板的透光性能,造成表面热控涂层特性破坏,引起表面材料的溶化和汽化等。质量较大的微流星体由于其能量大,还能使卫星表面产生裂痕或穿透壳壁。微流星高速撞击航天器的具体危害表现如下: 加压舱、燃料舱和散热器等的穿孔、破裂或漏气; 窗、光学表面和热平衡镜层被打出单坑或打破; 热防护效能减退; 天线系统、推力喷嘴和导线被破坏等。



6. 空间等离子体环境

等离子体是由带电粒子（也包括部分中性粒子）在电磁力作用下表现出集体行为的一种准中性物质，被称为物质的第四态。日地空间等离子体主要由太阳风等离子体、磁层等离子体、电离层等离子体三部分组成，它们是太阳辐射、粒子辐射与地球磁场、地球高层残余大气相互作用的复杂结果。

空间等离子体对航天器影响较大的是磁层亚暴时的等离子体和近地轨道等离子体。在磁层亚暴时，高能等离子体注入地球同步轨道，能使航天器表面被充电到上万伏的电位。当出现不等量带电时，会产生放电现象，强电弧和电磁脉冲（electro magnetic pulse, EMP）严重危害航天器上仪器正常工作。近地轨道等离子体对航天器影响主要有对航天器表面的充电效应、对航天器内部的充电效应、对高压太阳能电池阵的漏电影响、对高压电池阵的弧光放电以及对卫星通信系统的影响。此外，电离层等离子体还会造成在轨航天器电阻力增加或大型无线电增益下降等不良影响。

7. 空间磁场环境

空间磁场环境包括地球磁场和星际磁场，对航天器来说空间磁场一般主要指地球磁场。从地球地心至磁层边界空间范围的磁场为地磁场，是地球磁场的总称。地磁场包括基本磁场（主磁场）和变化磁场两部分。基本磁场可分为偶极子磁场、非偶极子磁场和地磁异常三个组成部分。偶极子磁场是地磁场的基本成分，约占地磁场90%，起源于地核磁流体发电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辽阔地域，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，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。

空间磁场环境对航天器的影响是长期的、潜在的、累积的过程。航天器在轨运行期间，空间磁场环境对其主要会带来如下影响：①影响航天器的轨道姿态，通常航天器由于结构和性能的需要会使用一些永磁材料和感磁材料，故航天器总会有一定的剩磁矩，同时航天器上仪器内和仪器之间连线中的电流也会产生磁矩，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；②影响航天器上磁性仪器的测试精度，有些航天器上带有用来探测空间磁场的高精度



磁性探测器，为估计仪器采集数据的精度，探测器必须处于很低的磁场环境中，否则所测磁场在时间和空间上的变化会被航天器本身的磁场所淹没。

8. 空间微重力环境

空间轨道上航天器上的重力加速度值为 $10^{-3} \sim 10^{-6}g$ ，这种环境称为微重力环境。在微重力条件下，主要有以下物理现象：①自然对流基本消除，由液体表面处热梯度和成分梯度引起的马兰戈尼（Marangoni）对流成为主要因素，扩散过程成为传递的主要过程；②液体中由于物质密度不同引起的沉浮和分层现象消失；③二次作用力成为主要因素，液体因表面张力所束缚，使浸润现象和毛细现象加剧；④液体静压力消失。

微重力对航天器的影响主要有对接与分离、太阳电池阵与天线展开、航天员的生理功能等。同时，微重力环境是一种很有价值的空间资源，是发展空间产业的重要环境条件。

9. 空间原子氧环境

原子氧是太阳辐照中紫外光与氧分子相互作用并使其分解形成的，在低地球轨道中原子氧的密度为 10^9 个/ cm^3 ，温度一般为 $1\,000 \sim 1\,500\text{ K}$ 。在太空 $200 \sim 1\,000\text{ km}$ 的轨道高度内，原子氧是大气中含量最多的成分，大约占 80% ，特别是 $300 \sim 500\text{ km}$ 高度范围内，原子氧占有绝对优势。由于航天器的轨道速度为 8 km/s ，相对于航天器的高速碰撞，原子氧的动能约为 5 eV ，通量为 1×10^{15} 个/ $\text{cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ，使其具有极强的氧化能力。

原子氧主要是通过剥能和辉光放电与材料相互作用的。当原子氧与航天器材料表面发生反应时，可使其氧化形成氧化物，同时导致材料放气加快，质量损失率增加，机械强度下降，光学和电性能改变等。空间原子氧环境还可造成航天器结构材料的剥蚀老化，剥蚀的材料会成为航天器的一种污染源。温控涂层和光学涂层的光学性能对原子氧的作用最为敏感，可使涂层的太阳吸收率变化，使一些材料的镜面反射率减小甚至完全消失，表面电导率降低等。此外，原子氧与紫外辐照组合环境的效应还会加速对材料的剥蚀作用。

10. 空间大气环境

高层大气是航天器活动的重要场所，在一定程度上影响着航天器的轨道和寿命。大气密度随轨道高度的升高而降低，虽然在 200 km 的高空，真空度为 $1 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ ，密度只有 $3 \times 10^{-5}\text{ g/m}^3$ 左右，大气已相当稀薄，但其对航天器的阻尼效应仍不能忽视。大气对航天器作用力的大小与大气密度成正比。在高轨

道上运行的航天器，遇到的大气稀薄，阻尼小，轨道寿命较长，在轨道高度 800 km 以上的航天器，寿命在几十年以上。在低轨道上运行的航天器遇到的大气密度较稠密，受到的阻力大，寿命短，高度在 200 km 左右的航天器寿命只有几天到几十天。同时大气稀薄时，大气分子导热和对流实际上对航天器的热平衡不起作用，因此，航天器的温度远远低于大气分子温度，其温度基本上取决于航天器本身的温控方式和辐射热交换。

| 1.2 空间人工环境 |

空间人工环境学是由于航天技术的发展而产生的新兴学科，它涉及多门学科与技术，主要有热物理学、电学、光学、磁学、力学、空间物理学、真空科学与技术、深冷技术、计算机技术、自动化技术、机械工程技术等。空间人工环境主要是伴随着人类对太空的开发、利用以及空间对抗产生的，是一个全新的技术领域，主要包括空间碎片环境、空间人工等离子体环境、空间人工强电磁环境、空间人工强激光环境和空间人工高能粒子环境等。

1. 空间碎片环境

空间碎片是伴随着人类航天发射活动而产生的太空垃圾，是对地球轨道内（高度约 200 ~ 36 000 km）无任何功能和作用的人造物体及其碎片的统称。它与上述的宇宙天然存在的固体尘埃（微流星体）一起，并称为影响人类航天活动安全的 M/OD（micrometeoroid/orbital debris，微流星体/人造空间碎片）环境。空间碎片的来源包括火箭箭体、失效航天器、任务相关碎片及碎裂碎片等，按其尺寸大小可以大致分为三类：大空间碎片（直径大于 10 cm）、小空间碎片（直径小于 1 mm）和危险碎片（直径介于大小空间碎片之间）。

空间碎片与在轨运行航天器发生碰撞所造成的破坏取决于空间碎片的质量和速度。空间碎片和航天器撞击时的平均相对速度是 10 km/s。不同尺寸的空间碎片对航天器所造成的危害方式不同、程度不同。大碎片一旦撞上航天器将产生灾难性的破坏，毫米级空间碎片有可能穿透数毫米厚的舱壁，而微米级空间碎片因数量庞大，与航天器碰撞概率高，对航天器的长期碰撞累积效应非常严重，尤其对温控涂层、多层绝热毯、光学仪器、太阳电池阵等影响更为突出。概括起来，空间碎片对航天器造成的损伤形式主要有改变航天器表面性能、在航天器表面造成撞击坑、等离子体云效应、动量传递、表面穿孔、容器