



国防科技图书出版基金



航天材料工程学

Aerospace Material Engineering

■ 沈自才 欧阳晓平 高 鸿 韩 然 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

航天材料工程学

Aerospace Material Engineering

沈自才 欧阳晓平 高 鸿 韩 然 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

航天材料工程学/沈自才等编著. —北京:国防工业出版社,2016.8

ISBN 978 - 7 - 118 - 10778 - 4

I. ①航… II. ①沈… III. ①航天材料 IV. ①V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 165532 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 插页 1 印张 27 $\frac{3}{4}$ 字数 526 千字

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 168.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

沈自才(1980.03—)

男,博士,高级工程师,祖籍山东省临沂市临沭县。先后于中国科学院研究生院和中国科学院上海光学精密机械研究所获得材料学硕士学位和光学工程博士学位。现在中国空间技术研究院北京卫星环境工程研究所从事航天器空间环境效应及深空探测技术研究工作。先后承担或主持国家自然科学基金、国防基础科研、国防技术基础、863、973 等国家重大课题。对空间环境下卫星长寿命评估与保障技术、空间辐射环境与效应地面模拟试验技术、航天器加速实验与寿命预示技术等进行了研究。参与多颗型号卫星的关键技术、研制保障条件的系统论证工作,主持多项型号用关键材料与器件的地面模拟试验评价与鉴定工作,参与深空探测等多项国家航天发展规划的编写工作。出版学术专著 2 部,主持编写航天行业标准 2 项。发表期刊论文和会议论文 100 余篇,其中 SCI、EI 收录 50 余篇。



欧阳晓平(1961.01—)

中国工程院院士,湘潭大学材料学院院长,西北核技术研究所,研究员,辐射探测科学研究中心主任,首席专家。国家 863 计划先进能源领域主题专家,中国核学会常务理事,中国辐射防护学会副理事长,中国辐射物理学会副理事长,中国空间仪器学会副理事长。主要从事脉冲辐射探测与诊断技术研究,在辐射探测方法、探测技术和器件研发方面取得系统性创新成果,累计获国家发明奖,进步奖 5 项,部委级一、二等奖 10 项,发明专利 30 余项,论文、报告 200 余篇,出版专著 1 部。先后获中国青年科技奖、中国科协求是杰出青年奖、何梁何利科学与技术进步奖、全国优秀博士论文、全国优秀博士后、全国优秀科技工作者等荣誉。



高鸿(1980.10—)

高级工程师,祖籍吉林省敦化市。于吉林大学高分子化学与物理专业获得化学博士学位。2008年作为访问学者就职于日本东京工业大学。现于中国空间技术研究院从事航天器材料选用、材料国产化需求研究、材料质量及可靠性评价技术研究工作。先后参研总装“十二五”可靠性课题、科技部973、863等国家重大课题。对航天器材料选用技术、航天器材料在地面工艺环境、贮存环境、在轨服役环境以及寿命预估、可靠性分析等方面开展了系列的研究工作。参与以载人空间站为代表的多个型号用材料选用与可靠性评价工作,制定了航天器材料选用目录和选用标准。主持多项型号用新材料、关键材料性能验证和可靠性验证试验。参与航天器材料发展等多项宇航材料发展规划的编写工作。发表期刊和会议论文50余篇,其中SCI、EI收录20余篇。



韩然(1980.02—)

女,博士,高级工程师,祖籍山东省菏泽市曹县。2008年毕业于北京大学物理学院,获粒子物理与核物理专业博士学位,曾先后在法国里昂核物理研究所、美国布鲁克海文实验室和日本理化研究所工作和学习。现在北京卫星环境工程研究所从事核辐射探测、空间辐射环境及地球中微子物理研究。曾先后主持和参加国家973、863、国家自然科学基金等重大课题10余项。目前主要参与高能环形正负电子对撞机(CEPC)大型国际合作项目和江门地下中微子实验。先后出版著作2部,发表学术论文20余篇。



致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

自人类第一颗人造卫星上天开始,以美国、苏联/俄罗斯、欧洲航天局为代表的航天大国或机构就非常重视航天材料及航天材料工程工作,一直把航天材料作为国家的基础技术和关键技术大力发展,安排了一系列计划支持相关研究,开展了大量的航天材料空间环境效应地面模拟试验、航天材料在轨飞行试验和空间材料科学试验,积累了丰富的第一手数据,建立了一系列航天材料评价标准、规范,构建了航天材料及性能的数据库并定期召开研讨会。以美国为代表的航天强国的航天材料及应用技术体系已经相对成熟,材料性能和质量稳定性达到了很高水平,轻质、高强、高韧的结构材料和功能材料已成功应用于航天任务中,并对纳米材料、智能材料、超材料以及 3D/4D 打印等新材料新技术在航天领域的应用开展了系统研究。

我国航天材料研制自 20 世纪 50 年代末至今,已经过近 60 年的发展,我国在航天材料研制方面取得了可喜的成绩,初步形成了相对系统的材料应用体系。但我国航天材料大多是在地面应用材料的基础上发展而来的,与国际先进水平和航天技术发展需求相比,无论是基础研究还是应用研究,仍然存在较大差距。我国新一代航天背景型号的研发对航天材料技术提出了迫切的要求。航天器长寿命、高可靠的需求,新型空间基础设施的环境适应性,新的轨道环境及其效应,以及人的长期在轨驻留等,对我国航天材料提出了高性能、多功能、智能化、低成本和复合化等多方面的进一步要求。在开展航天材料研制、选用和评价的过程中,相关科技人员缺乏航天材料工程相关论著作为参考和指导。

作者在多年从事航天材料空间环境适应性相关的预先研究、航天材料鉴定与评价及参与相关规划制定的基础上,对航天材料领域的国内外现状进行系统梳理、分析和总结,并结合个人的研究成果,着眼于我国航天科技发展的趋势和挑战编写了本书。本书首先对航天材料及航天材料工程学的内涵,航天对材料的基本要求和需求,航天材料的发展历程、分类,国内外的现状和我国的差距、发展趋势等进行阐述;接着对航天结构机构材料和功能材料的分类、现状和性能进行了较为系统的介绍;然后从航天器的发射、在轨运行、再入返回等不同阶段对航天材料的空间环境及效应进行分析;进而对航天材料的空间环境适应性评价、航天材料在轨飞行试验技术和空间材料科学试验进行论述;之后对与航天器研制密切相关的航天材料

保证的内容、方法和原则给出建议;最后对纳米材料、智能材料、超材料、3D/4D 打印等新材料新技术在航天上的应用给予了论述和展望。

本书在编写的过程中,得到了刘宇明博士、姜海富博士、李蔓博士、武博涵博士、丁义刚高级工程师、徐坤博工程师、牟永强工程师、赵春晴工程师等同事的帮助,奚日升研究员为本书提供了部分关于空间材料试验炉的资料,李蔓博士为本书提供了部分月尘环境及其效应的资料,徐坤博工程师为本书提供了部分空间碎片和功能梯度材料的资料,刘宇明博士为本书提供了部分石墨烯与碳纳米管的相关资料。本书的部分研究成果得到了国家自然科学基金(41174166)的支持。作者参阅了大量国内外科技论著、文献并努力在书中规范引用,在此,对所引用论著文献的作者表示感谢;如有引用不周之处,请予谅解并指正。本书在出版过程中,得到了中国空间技术研究院副院长兼科技委主任李明研究员、“实践”十号卫星总指挥邱家稳研究员、北京卫星环境工程研究所所长刘国青研究员、科技委主任向树红研究员、科技委副主任童靖宇研究员、《航天器环境工程》杂志主编龚自正研究员、《航天器环境工程》编辑部闫德葵主任的支持和帮助,“神舟”飞船总设计师戚发轫院士、航天复合材料专家李仲平院士给予了大量宝贵的意见和建议,在此,一并表示衷心感谢!

航天材料工程学是一门多学科交叉的系统性工程科学,涉及材料科学、光学、电磁学、力学、热学、空间环境工程学、微生物学等多个学科与领域。随着新型航天器、新一代探测平台、新的运行轨道、新材料和新技术的开发与应用,航天材料和航天材料工程学在理论认识、研究方法和应用领域上将不断深化、拓展。由于作者水平有限,书中不尽完善之处在所难免,恳请广大同行批评指正。

作者

2016 年 1 月于北京航天城

CONTENTS | 目录

第1章 概论	001
1.1 概述	001
1.1.1 航天材料工程学	001
1.1.2 航天发展趋势与挑战	002
1.1.3 航天材料的特殊性	003
1.2 航天器及其组成	004
1.2.1 航天器的分类	004
1.2.2 航天器的组成	006
1.3 航天器对材料的基本要求	007
1.3.1 性能要求	007
1.3.2 工艺要求	008
1.3.3 其他要求	009
1.4 航天材料的发展历程	009
1.5 航天材料分类	010
1.5.1 结构与机构材料	010
1.5.2 功能材料	012
1.6 航天材料的需求	013
1.7 航天材料的发展方向	014
1.8 航天材料工程的现状	016
1.8.1 国外航天材料工程的现状	016
1.8.2 我国航天材料工程的现状	018
1.8.3 我国航天材料工程的差距	018
参考文献	019

第2章 航天结构与机构材料	020
2.1 金属材料	021
2.1.1 铝合金	021
2.1.2 镁合金	022
2.1.3 钛合金	023
2.1.4 超高强度钢	025
2.1.5 难熔金属材料	025
2.1.6 金属材料的未来需求	028
2.2 复合材料	028
2.2.1 玻璃/环氧复合材料	031
2.2.2 硼/环氧复合材料	031
2.2.3 碳/环氧复合材料	031
2.2.4 凯芙拉/环氧复合材料	031
2.2.5 C/C、C/SiC 陶瓷基复合材料	032
2.2.6 金属基复合材料	032
2.2.7 复合材料的未来需求	033
2.3 薄膜材料	035
2.4 航天结构机构材料的发展	037
参考文献	038
第3章 航天功能材料	040
3.1 热控材料	040
3.1.1 热控涂层	041
3.1.2 隔热材料	051
3.1.3 导热填充材料	058
3.1.4 相变热控材料	059
3.1.5 热控材料胶黏剂	062
3.1.6 热管	062
3.1.7 热控材料的发展方向	064
3.2 润滑材料	065
3.2.1 液体润滑材料	068
3.2.2 润滑脂	071
3.2.3 固体润滑材料	072

3.2.4	固-液复合润滑材料	076
3.2.5	润滑材料的选用	077
3.2.6	润滑材料的发展方向	077
3.3	密封材料	078
3.3.1	橡胶类密封材料	080
3.3.2	金属密封材料	083
3.3.3	复合密封材料	084
3.3.4	碳密封材料	084
3.3.5	密封材料在航天上的应用	086
3.4	光学材料	086
3.4.1	光学玻璃材料	088
3.4.2	光学晶体材料	089
3.4.3	光学薄膜材料	089
3.4.4	光纤材料	090
3.4.5	透明陶瓷材料	090
3.4.6	玻璃陶瓷材料	090
3.4.7	SiC 光学材料	090
3.5	烧蚀材料	091
3.6	纺织材料	093
3.7	黏结剂材料	095
3.8	防护材料	096
3.8.1	结构防护材料	096
3.8.2	空间天然辐射防护材料	100
3.8.3	激光辐射防护材料	101
3.8.4	隐身防护材料	103
3.8.5	电磁防护材料	104
3.8.6	微小颗粒防护材料	105
3.9	能源材料	105
3.9.1	太阳能电池材料	105
3.9.2	蓄电池材料	106
3.9.3	核推进材料	106
	参考文献	107

第4章 航天材料的空间环境效应 109

4.1	空间环境与效应	109
-----	---------	-----

4.2	真空环境与效应	112
4.2.1	真空环境	112
4.2.2	真空环境效应	113
4.3	空间温度环境与效应	115
4.3.1	空间温度环境	115
4.3.2	空间温度效应	117
4.4	空间微重力环境与效应	119
4.4.1	空间微重力环境	119
4.4.2	空间微重力效应	120
4.5	空间等离子体环境与效应	122
4.5.1	空间等离子体环境	122
4.5.2	空间等离子体环境效应	125
4.6	空间粒子辐射环境与效应	127
4.6.1	空间粒子辐射环境	127
4.6.2	空间粒子辐射效应	132
4.7	空间太阳电磁辐射环境与效应	142
4.7.1	空间太阳电磁辐射环境	142
4.7.2	空间太阳电磁辐射效应	143
4.8	空间大气环境与效应	148
4.8.1	空间大气环境	148
4.8.2	空间中性大气效应	149
4.9	空间碎片及微流星体环境与效应	152
4.9.1	空间碎片及微流星体环境	152
4.9.2	空间碎片及微流星体撞击效应	153
4.10	空间污染环境及效应	157
4.10.1	空间污染环境	157
4.10.2	空间污染效应	159
4.11	航天动力学环境与效应	164
4.11.1	航天动力学环境	164
4.11.2	航天动力学环境效应	164
4.12	腐蚀环境及效应	165
4.12.1	腐蚀环境	165
4.12.2	腐蚀效应	166
4.13	空间生物环境与效应	170
4.13.1	空间生物环境	170
4.13.2	空间生物学效应	170

4.14 空间环境协同效应	172
参考文献	178

第5章 航天材料空间环境适应性评价 181

5.1 加速试验方法	182
5.2 航天材料真空环境适应性评价	184
5.2.1 真空冷焊效应评价	184
5.2.2 真空中材料挥发性能测试方法	185
5.3 航天材料温度环境适应性评价	186
5.4 表面材料带电粒子辐射环境适应性评价	186
5.4.1 剂量深度分布法	186
5.4.2 等效能谱法	189
5.4.3 金属薄膜散射法	192
5.4.4 试验参数的选取	192
5.5 体(块)材料带电粒子辐射环境适应性评价	194
5.6 航天材料紫外辐射环境适应性评价	196
5.6.1 紫外曝辐量分析方法	197
5.6.2 紫外波长的选择方法	199
5.6.3 紫外光源选择	201
5.6.4 加速倍率选择	202
5.6.5 温度选择	202
5.6.6 总曝辐量设计	203
5.7 航天材料表面充放电效应评价	203
5.8 航天材料内带电效应评价	207
5.8.1 电子束内带电效应试验方法	207
5.8.2 介电强度测试试验方法	208
5.8.3 辐射诱导电导率测量试验方法	208
5.9 航天材料原子氧环境适应性评价	209
5.9.1 原子氧束流分布标定技术	209
5.9.2 原子氧积分通量计算方法	210
5.9.3 原子氧剥蚀率计算方法	211
5.9.4 航天材料原子氧效应试验方法	211
5.10 航天材料空间碎片环境适应性评价	213
5.10.1 空间碎片轻气炮发射模拟技术	213
5.10.2 空间碎片炸药爆轰发射模拟技术	214

5.10.3	空间碎片电炮发射模拟技术	215
5.10.4	空间碎片定向聚能加速器模拟技术	216
5.10.5	激光驱动飞片模拟技术	217
5.10.6	空间碎片静电加速器模拟技术	218
5.10.7	空间碎片等离子体加速模拟技术	219
5.11	航天材料腐蚀效应评价	221
5.12	航天材料空间环境协同效应评价	223
	参考文献	225

第6章 航天材料飞行试验技术 228

6.1	航天材料被动暴露试验技术	229
6.1.1	被动暴露试验装置设计	229
6.1.2	典型被动暴露试验	230
6.2	航天材料主动暴露试验技术	247
6.2.1	主动暴露试验装置设计	247
6.2.2	典型主动暴露试验	248
	参考文献	253

第7章 空间材料科学实验 255

7.1	空间材料科学内涵	256
7.1.1	空间材料科学的研究目的	256
7.1.2	空间材料科学的研究内容	256
7.1.3	空间材料科学的研究对象	257
7.1.4	空间材料科学的研究范围	258
7.1.5	空间材料科学的研究方法	258
7.2	国外空间材料科学实验现状	259
7.2.1	苏联(俄罗斯)空间材料科学实验	260
7.2.2	美国空间材料科学实验	261
7.2.3	欧洲空间材料科学实验	263
7.2.4	其他国家空间材料科学实验	264
7.2.5	部分典型空间材料科学实验	265
7.2.6	国际研究的主要结果	267
7.3	我国空间材料科学实验现状	269
7.3.1	我国空间材料科学研究概况	269

7.3.2	实验设备和实验技术	272
7.4	典型空间材料科学实验装置	274
7.4.1	空间材料科学实验设备的现状	274
7.4.2	材料科学研究机柜	276
7.4.3	材料科学手套箱	281
7.4.4	空间材料科学加工实验炉	285
7.5	空间材料科学发展趋势	290
7.6	空间材料科学发展方向	291
	参考文献	292

第8章 航天材料保证

8.1	航天材料保证标准规范	294
8.1.1	NASA 的航天材料保证	294
8.1.2	ESA 的航天材料保证	296
8.1.3	我国航天材料保证	299
8.2	航天材料的功能保证	299
8.3	航天材料的环境保证	301
8.4	航天材料的选用原则	304
8.5	材料空间环境适应性的评价与认定	305
8.5.1	选材阶段的评价试验	305
8.5.2	采购、使用阶段的验收试验	305
8.5.3	空间环境适应性的认定	305
8.6	航天限用材料	306
8.6.1	金属(合金)材料	306
8.6.2	聚合物材料	307
8.6.3	光学材料	307
8.7	航天禁用材料	307
8.8	航天材料的研制和选用流程	308
8.8.1	航天材料的研制流程	308
8.8.2	航天材料的选用流程	309
8.8.3	应用示例	309
	参考文献	311

第9章 航天新材料与新技术

9.1	纳米材料及其航天应用	313
-----	------------------	-----