



# 航空材料学

上海科学技术出版社

北京航空材料研究所编

507994

607094

V21  
03

HK61/05

材料科学丛书

# 航空材料学

北京航空材料研究所编

上海科学技术出版社



C0231355

《材料科学丛书》

**航空材料学**

北京航空材料研究所编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

总发行所上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 32.5 插页 4 字数 858,000

1985年6月第1版 1985年6月第1次印刷

印数: 1—5,100

统一书号: 15119·2389 定价: 8.70 元

## 内 容 提 要

本书对航空结构用金属、非金属材料作了较全面的介绍。全书共分十九章,各章着重论述了材料的组成、制造工艺、组织、性能及应用等问题,并扼要地阐明了航空材料的选择、材料有关的故障分析、航空材料的现状及发展趋势。

本书适合于从事航空材料研究、生产、使用的工程技术人员阅读,对从事航空产品设计、工艺、维修人员和航空高等院校师生以及材料工业部门的读者也具有重要的参考价值。



## 《材料科学丛书》编辑委员会

### 金属材料方面

主任委员 周志宏

委 员(以姓氏笔划为序)

马龙翔 王之玺  
王启东 田庚锡  
师昌绪 孙珍宝  
汪 显 许顺生  
吴自良 李恒德  
陈新民 沈华生  
张文奇 杜鹤桂  
邹元炳 张沛霖  
周行健 邵象华  
周惠久 周宗祥  
林栋梁 郁国城  
胡为柏 柯 俊  
徐采栋 钱临照  
郭可信 徐祖耀  
黄培云 顾翼东  
葛庭燧 傅元庆  
魏寿昆 童光照  
谭庆麟

### 无机非金属材料方面

主任委员 严东生

委 员(以姓氏笔划为序)

丁子上  
干福熹  
江作昭  
苏 锵  
吴中伟  
袁润章  
盛绪敏  
黄蕴元  
程继健

### 高分子材料方面

主任委员 钱宝钧

委 员(以姓氏笔划为序)

于 翹  
王孟钟  
方柏容  
孙书棋  
吴人洁  
吴祥龙  
李世璠  
范 棠  
张承琦  
姚锡福  
徐 僖  
钱人元  
郭钟福  
姜书城

## 《材料科学丛书》序

无论在发展农业、工业、国防和科学技术方面，还是在人民生活方面，材料都是不可缺少的物质基础。材料的品种、数量和质量无疑是国家现代化程度的标志之一。随着材料的广泛生产和研究工作的不断深入，以及与材料有关的基础学科的日益发展，对材料的内在规律有了进一步了解，对各类材料的共性初步得到了科学的抽象，从而诞生了“材料科学”这个新的学科领域。

材料科学主要研究材料的组分、结构与性能之间的相互关系和变化规律，它是介于基础科学与应用科学之间的一门应用基础科学，与物理、化学、化工、电子、冶金、陶瓷等学科相互交叉、彼此渗透。热力学、动力学、固体物理、固体化学、化学物理等基础学科为材料科学提供理论基础，而材料科学又为应用科学提供发展新材料、新工艺和新技术的途径。

从当前来看，材料科学的发展大致有下列几方面的趋势：

(1) 高分子材料原料丰富、性能优良，在结构材料中所占的位置日益重要。塑料、合成橡胶和合成纤维比其他传统材料将有更大的发展。

(2) 功能材料显示广阔的发展前景。半导体的广泛应用，集成电路的发展，红外、激光和超导材料的发现和应用，使功能材料犹如异军突起，建立奇功。

(3) 在新能源材料方面，随着太阳能的利用，磁流体发电等的进展，出现了各种换能和储能材料，并已普遍受到重视。

(4) 对结构材料和耐磨、耐蚀等材料提出更高的要求，包括严酷的使用条件、更长的使用寿命等。

(5) 复合材料、定向结晶材料、韧化陶瓷、定向石墨以及各种类型的表面处理与涂层的利用，使材料的效能进一步得到发挥。

(6) 探索材料在极端条件下的性能,例如玻璃态金属、超低温下的金属及金属氢都具有优越的性能。

(7) 改进制备工艺,提高质量,改进设计,更有效地使用材料。

(8) 对材料科学的基础研究趋向于更加深入和细致。尤其在表面,非晶态,原子象,固态中的杂质与缺陷,一维与二维结构,非平衡态,相变的微观机制,变形、断裂和磨损等的宏观规律和微观过程以及点阵结构的稳定性等领域,探索性研究正日益活跃。

人们期望,对材料基本规律的掌握将有助于按预定性能设计材料的原子或分子组成以及结构形态等。

我国在1978~1985年科学技术发展规划中把材料科学列为重点之一。我们必须十分重视和大力发展材料科学。

为了及时传播材料科学的基础理论,总结研究成果并扩大其工程应用,以有助于更快、更广泛地提高我国材料科学技术的水平,我们成立了《材料科学丛书》编辑委员会,由上海科学技术出版社出版这套丛书。

本丛书分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三个方面,选题包括材料科学的基础理论,研究方法和测试技术,研究成果,以及实际应用等方面。热忱地期望我国广大科学工作者,共同策进本丛书的编辑、出版工作,努力为我国早日实现四个现代化贡献力量。

《材料科学丛书》编辑委员会

一九七九年十二月

## 前 言

五十年代以来，航空工业技术的发展以及新型超音速飞机和喷气发动机的研制，对航空材料不断提出许多更为严峻的要求，从而推动和促进了各种航空新材料、新工艺的发展。一大批新的材料相继涌现，逐渐地形成和建立起航空材料的一个较完整的体系。正是这些新材料、新工艺的出现和实际应用，突破诸如“热障”这类航空工程的难题才获得实现。人类多年的梦想，正一个个地变为现实。各种新材料的应用无疑会给设计思想、生产组织、使用维护带来极深刻的影响，改变着以往形成的既定关系。例如，传统上一直把结构设计和材料分属于两个系统，而今天它们却需要互相配合和结合；又如传统上一直是把宏观的工程问题和微观尺度的变化分别予以考虑，但是很多问题（诸如工程的疲劳和断裂等）的解决，却有赖于二者相结合。材料科学和工程正是在这些新的要求下产生和发展起来的学科，而航空材料学又是材料科学和工程的一个重要组成部分。航空材料能够得到高速度的发展，是和材料科学提供的理论上的指导作用分不开的，而航空材料发展的丰富实践，又成为材料科学理论探索中取之不尽的源泉。

近二十年来，材料科学学术的繁荣景象是前所未有的。在这个领域的工作者，面临着需频繁地更新知识的艰巨任务。总之，在进行四个现代化建设的进程中，我们需要在材料领域中的学术发展和技术发展的战略方向上总观全局，使我们的思想更加符合事物发展的客观实际。

《航空材料学》的编写正是在上述形势下进行的。作者都是从事航空材料研究工作多年的同志，希望通过编写本书，总结自己的点滴经验，贡献给设计、生产、使用、科研、教学等部门中从事材料工作的同志，期望对他们的工作能有所裨益；而对非材料专业的同



志，希望本书有助于他们了解航空材料的梗概；对理论研究者，希望本书能提供他们一些参考资料。

限于篇幅，本书着重介绍航空发动机和飞机的主要结构材料。至于航空工业中使用的功能材料和其他一些新材料和新方法，将在相应的专著中加以介绍。

本书各章分别由各该专业的同志负责撰写。颜鸣皋、范堂、朱之棻、玉惠泉、杨大灼、王世伦、刘才穆、王庆绥、沈嗣唐、曹新焕、冯慎田、王祖法等同志参加了审定工作。

由于我们水平有限，编写经验不足，对本书错误、遗漏和不足之处，望读者给予批评和指正，以期在再版时加以补充或订正。

本书在编写过程中，曾得到许多同志的热情支持和帮助，谨此致谢。

编者

一九八四年三月于北京

# 目 录

绪论	王惠泉 朱之槩 杨大灼 王世伦	1
第一章 金属材料的物理化学基础	王庆绥	16
第一节 金属与合金的结构		16
一、金属的结构		16
二、合金的结构		22
三、金属与合金中的界面		35
第二节 扩散与相变		42
一、扩散		42
二、相变		45
第三节 合金的强化		57
一、合金的强化机理		57
二、合金设计原理		63
第二章 金属材料的力学性能	王仁智	70
第一节 金属的塑性变形		70
一、单晶体的塑性变形		70
二、多晶体的塑性变形		76
第二节 金属材料的断裂		81
一、断裂形式		81
二、脆性断裂		82
三、延性断裂		86
第三节 疲劳断裂		89
一、金属材料疲劳断裂的一般特征		89
二、循环硬化与循环软化		91
三、疲劳裂纹的萌生		93
四、疲劳裂纹的扩展		95
五、疲劳性能的一般规律		97
六、影响疲劳强度及疲劳裂纹扩展的因素		101

第四节	蠕变及蠕变-疲劳断裂 .....	106
一、	蠕变断裂的特征 .....	106
二、	蠕变断裂机理 .....	109
三、	蠕变断裂过程中组织结构的变化 .....	111
四、	蠕变速率与应力的关系 .....	111
五、	蠕变速率与温度的关系 .....	112
六、	蠕变裂纹扩展 .....	113
七、	蠕变-疲劳断裂 .....	115
<b>第三章</b>	<b>铝合金</b> .....	<b>程家宁 张守勇 118</b>
第一节	变形铝合金的分类及热处理 .....	118
一、	防锈铝合金 .....	119
二、	锻铝合金 .....	121
三、	硬铝合金 .....	124
四、	超硬铝合金 .....	127
五、	变形铝合金制品的热处理概要 .....	129
六、	变形铝合金的形变热处理 .....	134
第二节	变形铝合金制造工艺对组织和性能的影响 .....	137
一、	LY12型合金制造工艺对组织、性能的影响 .....	138
二、	一些常见冶金缺陷对性能的影响 .....	142
三、	超硬铝合金制造工艺和组织、性能的关系 .....	143
第三节	变形铝合金零件的材料和工艺选择 .....	145
第四节	铸造铝合金的应用和分类 .....	151
第五节	铸铝材料的合金化和热处理特点 .....	153
一、	铸铝材料合金化与性能的关系 .....	153
二、	铸铝合金的热处理特点 .....	154
第六节	铸造铝合金的组织 and 性能 .....	156
一、	铝-硅系合金 .....	156
二、	铝-铜系合金 .....	161
三、	铝-镁系合金 .....	167
四、	铝-锌系合金 .....	168
五、	热强铸造铝合金 .....	169
六、	铝基铸造复合材料 .....	172
第七节	铸造铝合金的凝固过程和质量控制 .....	172

一、铸铝合金的晶粒细化	172
二、铝-硅共晶的变质	173
三、铸铝合金凝固过程的质量控制	177
<b>第四章 镁合金</b>	<b>赵志远 朱慕霞 鲁立奇 192</b>
第一节 合金元素对镁合金的影响	193
第二节 变形镁合金的组织、性能和应用	195
一、镁-锰系合金	196
二、镁-铝-锌-锰系合金	197
三、镁-锌-锆系合金	198
第三节 变形镁合金的常见缺陷及其对性能的影响	204
一、锰偏析的特性及其对性能的影响	204
二、粗晶环和粗晶组织	205
第四节 铸造镁合金的工艺特点和应用	207
第五节 铸造镁合金的成分、组织和性能	209
一、镁-铝-锌系合金	209
二、镁-锌-锆系合金	211
三、镁-稀土-锆系合金	215
第六节 铸造镁合金的常见缺陷、形成机理及其对性能的影响	221
一、显微疏松	221
二、含锆镁合金中的偏析	223
三、镁-铝-锌系合金中的反偏析	225
四、含锆镁合金中的砂夹杂	226
<b>第五章 钛合金</b>	<b>王金友 232</b>
第一节 合金元素分类	232
一、 $\alpha$ 稳定元素对性能的影响	233
二、 $\beta$ 稳定元素对性能的影响	237
第二节 钛合金的分类与性能	239
一、结构钛合金	248
二、热强钛合金	258
三、铸造钛合金	264
第三节 钛合金的热处理	268
一、退火	268

二、强化热处理 .....	272
第四节 钛合金的组织与性能的关系 .....	275
一、显微组织的类型 .....	275
二、钛合金半成品中常见的组织缺陷 .....	282
<b>第六章 结构钢和不锈钢 .....</b>	<b>古宝珠 287</b>
第一节 结构钢 .....	287
一、结构钢的分类 .....	287
二、中碳低合金超高强度钢的合金化 .....	291
三、中碳低合金超高强度钢的热处理和相变特性 .....	295
四、工艺因素对中碳低合金超高强度钢组织和性能的影响 .....	305
五、使用条件对超高强度钢组织和性能的要求 .....	308
第二节 不锈钢 .....	322
一、不锈钢的合金化与分类 .....	322
二、几种不锈钢的特点和用途 .....	325
三、高强度马氏体型不锈钢热处理后的组织和性能 .....	334
四、使用条件对组织和性能的要求 .....	337
五、马氏体不锈钢压气机叶片和压气机盘的组织和性能 .....	340
六、马氏体型不锈钢零件常见的腐蚀破坏形式 .....	344
<b>第七章 高温合金 .....</b>	<b>周瑞发 孙理 354</b>
第一节 高温合金的合金化基础 .....	362
一、合金中元素的作用 .....	363
二、表面稳定化 .....	368
三、相分计算与拓扑密排相控制 .....	369
第二节 叶片用高温合金 .....	371
一、涡轮叶片用高温合金 .....	371
二、导向叶片用高温合金 .....	388
三、叶片合金的新途径——定向共晶 .....	391
第三节 涡轮盘用高温合金 .....	395
一、发动机工作条件及对涡轮盘的要求 .....	395
二、涡轮盘材料的一般发展及应用演变过程 .....	397
三、铁、镍基涡轮盘用合金的成分、组织与性能 .....	397
四、提高高温疲劳强度的途径 .....	418
五、粉末冶金、超塑性锻造涡轮盘的发展 .....	423

第四节	燃烧室用高温合金	425
一、	燃烧室、加力筒体工作条件	425
二、	铁、镍基高温合金板材的合金化	427
三、	板材合金的热处理与组织	432
四、	板材合金的主要性能及其特点	435
五、	板材合金的发展	437
第五节	压气机叶片、轮盘及涡轮轴、机匣用高温合金	442
一、	零件工作条件及对材料的要求	443
二、	使用的高温合金的特点及发展	445
三、	高温合金用于此类零件的性能特点	447
<b>第八章</b>	<b>粉末冶金和金属基复合材料</b>	<b>俞克兰 戴永耀 466</b>
第一节	机轮刹车材料	467
一、	烧结材料	467
二、	碳-碳复合材料	473
第二节	粉末及陶瓷高温结构材料	477
一、	沉淀强化镍基高温合金	477
二、	弥散强化镍基高温合金	492
三、	高温陶瓷结构材料	500
第三节	纤维增强金属基复合材料	504
一、	复合材料设计和制造的基本原理	504
二、	复合材料的界面	506
三、	复合材料的力学性能	509
四、	纤维增强金属基复合材料的主要体系及其性能	512
<b>第九章</b>	<b>金属材料的焊接性能</b>	<b>张延生 524</b>
第一节	焊接裂纹	525
一、	焊接热裂纹和再热裂纹	525
二、	焊接冷裂纹	538
第二节	焊接气孔和缩孔	541
第三节	焊接接头的组织特点	543
一、	组织不均匀性	543
二、	电阻点焊、缝焊的胡须组织	546
三、	点焊和缝焊接头结合线伸入熔核的现象	547
四、	钎焊及扩散焊接头组织的特点	549

第四节	焊接接头的机械性能	550
<b>第十章</b>	<b>金属的腐蚀与防护</b>	<b>肖绪昌 张恩九 558</b>
第一节	闭塞电池	559
第二节	应力腐蚀断裂	560
一、	应力腐蚀的表象规律	561
二、	应力腐蚀断裂的机理	562
三、	影响应力腐蚀断裂的因素	568
第三节	双金属接触腐蚀	573
一、	阴极表面膜的影响	575
二、	溶液电导的影响	575
三、	极性变化	576
第四节	合金的高温氧化	577
一、	理论概述	577
二、	提高合金抗氧化性能的原则	578
三、	氧化作用对材料性能的影响	580
四、	镍基合金的高温氧化	581
第五节	高温合金的热腐蚀	584
一、	热腐蚀机理	585
二、	合金元素对抗热腐蚀性能的影响	587
三、	环境因素的影响	591
四、	评定材料热腐蚀性能的试验方法	592
五、	防止热腐蚀的措施	593
第六节	碳化腐蚀	594
第七节	金属的防护	595
一、	化学、电化学加工对金属材料性能的影响	596
二、	超高强度钢的防护	602
三、	铝合金的防护	604
四、	钛合金的防护	606
五、	中温防护层	607
第八节	高温防护涂层	603
一、	对涂层的要求	603
二、	铝化物涂层	609
三、	多元涂层	614

四、覆层及其他	614
<b>第十一章 高分子材料的特性</b>	沈嗣唐 621
<b>第一节 高分子的成分与结构</b>	622
一、高分子的成分	622
二、高分子的结构	622
三、高分子的分子量及其分布	624
四、高分子的结晶与聚集态	626
五、高分子的玻璃化转变温度	628
六、高分子链的取向	629
<b>第二节 高分子材料的性能</b>	630
一、高分子材料的力学性能	630
二、高分子材料的热学性能	636
三、高分子材料的光学性能	639
四、高分子材料的电性能	640
五、高分子材料的老化	642
<b>第三节 高分子材料的改性</b>	644
一、共聚反应	645
二、高分子的混炼	646
三、高分子的后化学反应	647
<b>第十二章 透明材料</b>	左逢兴、张凤翻 651
<b>第一节 概述</b>	651
<b>第二节 透明塑料</b>	655
一、聚丙烯酸酯	655
二、定向聚丙烯酸酯	660
三、聚碳酸酯透明塑料	668
<b>第三节 层合透明材料</b>	671
一、玻璃-中间层-透明塑料层合材料	672
二、玻璃-中间层-玻璃层合材料	675
三、透明层合塑料	676
<b>第四节 边缘连接</b>	677
一、边缘连接的设计	677
二、胶粘剂	682
<b>第五节 透明涂层</b>	683



一、透明导电涂层	683
二、防雨憎水涂层	684
三、防雾涂层	686
四、其他透明涂层	688
<b>第十三章 树脂基复合材料</b>	<b>黄宪章 690</b>
第一节 复合材料用原材料	691
一、纤维增强体	691
二、树脂基体	697
三、芯材	699
第二节 复合材料的制造工艺	701
一、预浸料的制备	702
二、纤维缠绕法成形工艺	702
三、层压法成形工艺	704
四、拉挤法成形工艺	706
第三节 复合材料力学和铺层设计	707
一、复合材料的微观力学	708
二、复合材料的宏观力学	709
三、复合材料对称层合板的铺层设计	717
第四节 复合材料的力学行为	722
一、复合材料的基本破坏类型	723
二、复合材料的应力-应变行为	724
三、复合材料层合板的疲劳特性	726
四、温度、湿度环境因素对复合材料力学性能的影响	728
第五节 复合材料在航空工业中的应用	729
一、复合材料的机械加工	730
二、复合材料的连接	731
三、复合材料的防护	733
四、构件生产过程的质量控制	735
五、混合复合材料	736
<b>第十四章 结构胶粘剂</b>	<b>郑瑞琪 740</b>
第一节 概论	740
一、飞机用胶发展简况	740
二、胶接的特点	741