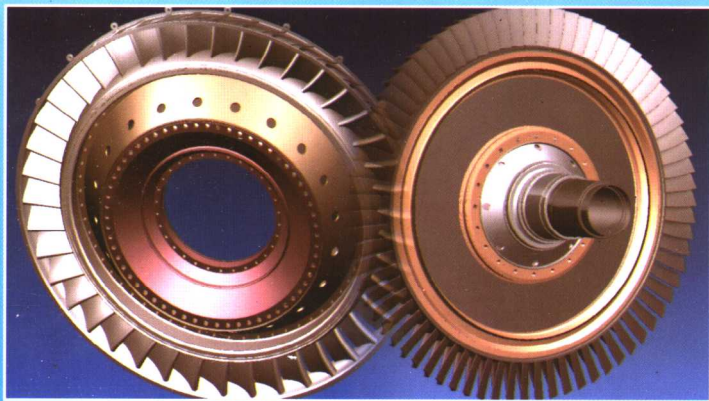


高温结构材料

High Temperature Structure Materials

周瑞发 韩雅芳 李树索 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

高温结构材料

High Temperature Structure Materials

周瑞发 韩雅芳 李树索 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高温结构材料 / 周瑞发, 韩雅芳, 李树索编著. — 北京: 国防工业出版社, 2006. 4
ISBN 7-118-04342-7

I. 高... II. ①周...②韩...③李... III. 高温材料: 结构材料 IV. TB35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 007345 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 456 千字

2006 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	王 峰	张涵信	程洪彬	
秘 书 长	程洪彬			
副 秘 书 长	彭华良	蔡 镭		
委 员	(按姓氏笔画排序)			
	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参
	杨星豪	李德毅	吴有生	何新贵
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民
	舒长胜			

序 言

高温结构材料是 20 世纪中叶发展起来的一种新兴材料。伴随航空、航天、能源、机械等领域对其所需先进发动机及所用高温结构材料的严格需求,高温结构材料经历了从无到有、从低温到高温、从低比强到高比强、从金属到非金属、从单一材料到复合材料结构等不同的发展阶段,在经过半个世纪的努力后,现已初步形成系列,成为结构材料家族中的重要成员。高温结构材料因其是先进发动机的关键材料,是飞机、火箭、导弹、飞船等所用动力装置的重要物质基础,受到世界各国普遍重视,成为竞争的焦点,日显其重要地位与作用。

作者以我国高温结构材料研究和开发取得的成果、经验和积累的资料为基础,通过广泛收集国内外的文献、资料,经过整理、精选、总结,大胆开辟新章,撰写了这本专著。该书较为系统、全面地论述其中各类材料的组成、原理、制备、性能、应用的要点和特点,运用理论联系实际、深入浅出、图文并茂的方法,重点介绍新材料、制备新工艺、新结构、新材料应用准则及防护新方法等。显然,这本书在一定程度上反映高温结构材料在现阶段的水平、存在的问题和对未来发展前景的看法。同时,对促进高温结构的发展、对先进发动机及高新技术的发展具有重要影响,对科研、生产、应用具有明示作用。

颜鸣皋

2005/3/11

前 言

高温结构材料是当今航空、航天、能源、化工、机械、冶金等领域的关键材料,广泛用于制造飞机、火箭、导弹、机车、舰船等的动力装置——发动机的高温承力结构件。在结构材料中,高温结构材料是一个新兴发展起来的重要成员,是适应建设现代化工业需要,高新技术发展的重要物质基础。该材料始终得到世界各国的重视,材料科学与工程学科中的重点发展方向,已初成系列,日显其重要地位与作用。

本书编写的目的是适应该领域的高新技术发展需求,推动高温结构材料的发展,提供在该领域中从事先进发动机、新型结构材料的科研、设计、制造、应用、管理、教学人员,作为专业基础参考资料和高等院校专业课教材。作者在广泛收集国内外相关文献、著作、资料、研究成果基础上,结合实践经验,进行归纳、分析、整理、总结而成。是目前内容较为全面、新颖、系统、完整的高温结构材料专著。

本书共分 10 章,包括概述,轻质高温结构材料,先进高温合金,难熔金属与合金,金属间化合物,金属基和化合物基复合材料,先进陶瓷基复合材料,先进 C/C 复合材料,特种高温材料、结构与成型,高温氧化、腐蚀与防护。简单扼要地介绍各类材料的组成、强化化原理、制备、性能、应用,重点介绍了新型材料、制备新技术、新结构、应用准则和防护方法,具有知识面宽,理论联系实际,深入浅出,图文并茂,内容新颖、丰富等特点。

为编写体例的需要,书中所引资料部分作了取舍、补充、变动,

对于部分贻误作了订正,因涉及数量较多未作详细说明,望作者或原资料引用者谅解。在此诚挚感谢提供资料,给予帮助的学友、同事们,特别是颜鸣皋院士的指导,韩雅芳教授的主审,对提高本书质量、水平起了重要作用。该书涉及学科广泛,作者学识有限,尽管学习、工作甚是努力,但错误缺点仍在所难免。如有错误唯作者是负,并请读者视作参考,给予谅解,不吝赐正,是为至幸。

作者谨识

2004年12月30日

目 录

第一章 绪论	1
1.1 高温结构材料的发展背景、历程与需求	1
1.1.1 高温结构材料的发展背景、地位与作用	1
1.1.2 高温结构材料的发展历程	1
1.1.3 航空航天高温结构材料使用特点与需求	3
1.2 高温结构材料的分类	8
1.3 高温结构材料的发展趋势与目标	10
1.3.1 高温结构材料的发展趋势	10
1.3.2 高温结构材料的发展目标	11
参考文献	16
第二章 轻质高温结构材料	18
2.1 高温镁合金	18
2.1.1 变形镁合金	19
2.1.2 铸造镁合金	21
2.1.3 镁基复合材料	25
2.1.4 合金应用与发展	26
2.2 高温铝合金	27
2.2.1 铸造高温铝合金	28
2.2.2 粉末、变形高温铝合金	29
2.2.3 合金的应用与发展	30
2.3 高温钛合金	32
2.3.1 $\alpha+\beta$ 型高温钛合金	32
2.3.2 近 α 型高温钛合金	33
2.3.3 金属间化合物基高温钛合金	35
2.3.4 高温钛合金的应用与发展	38

2.4 高温聚合物基复合材料	40
2.4.1 高温聚酰亚胺(PI)树脂	41
2.4.2 碳纤维/PI 基复合材料	44
2.4.3 高温聚合物基复合材料的应用	45
参考文献	48
第三章 高温合金	49
3.1 高温合金的强化与韧化原理	51
3.1.1 高温合金的强化原理	51
3.1.2 拓扑密排(TCP)相析出与相分计算	64
3.2 先进高温合金及其特性	68
3.2.1 铁基高温合金	68
3.2.2 钴基高温合金	71
3.2.3 镍基高温合金	73
3.3 高温合金的应用	91
3.3.1 航空、航天用高温合金	91
3.3.2 其他工业用高温合金	106
3.4 高温合金在接近使用条件下的力学性能	115
3.4.1 高温合金主要使用性能及表征	115
3.4.2 模拟典型构件的使用性能	121
3.4.3 零件的寿命计算	131
参考文献	133
第四章 难熔金属与合金	135
4.1 概述	135
4.1.1 难熔金属与合金的一般特性	135
4.1.2 难熔合金的合金化与制坯方法	137
4.1.3 难熔金属在工业中的用途	138
4.2 钨基合金	139
4.2.1 钨基合金分类及丝材的典型性能、用途	140
4.2.2 高密度钨合金	142
4.3 钼基合金	143
4.3.1 钼基合金的组成与制备	144
4.3.2 典型钼基合金的性能与用途	145

4.4 钽基合金	146
4.4.1 钽基合金的制备	146
4.4.2 钽基合金的组分及性能	147
4.5 铌基合金	150
4.5.1 铌基合金的成分、分类及性能对比	150
4.5.2 铌基合金的特性	152
4.5.3 铌基合金的应用	153
4.6 铬基合金	154
4.6.1 铬基合金的制备	155
4.6.2 铬基合金的分类与性能	156
4.7 钒合金	156
4.7.1 钒的制备与用途	157
4.7.2 钒合金的制备与应用	157
参考文献	158
第五章 金属间化合物结构材料	160
5.1 概述	160
5.1.1 金属间化合物结构材料的特点	160
5.1.2 金属间化合物结构材料的塑化与强化方法	162
5.1.3 金属间化合物制备的新工艺技术	162
5.2 Ni-Al 系合金	165
5.2.1 Ni_3Al 合金的发展	165
5.2.2 NiAl 合金的发展	168
5.3 Ti-Al 系合金	174
5.3.1 Ti_3Al 合金的发展	174
5.3.2 TiAl 合金的发展	176
5.4 Fe-Al 系合金	180
5.4.1 Fe_3Al 合金	180
5.4.2 FeAl 合金	183
5.5 难熔金属硅化物材料	187
5.5.1 MoSi_2 合金及复合材料	188
5.5.2 Nb_5Si_3 合金及复合材料	191

5.5.3 其他难熔金属硅化物	192
参考文献	193
第六章 金属基复合材料	195
6.1 概述	195
6.1.1 金属基复合材料的种类与一般特性	195
6.1.2 增强体及其典型性能	198
6.2 复合材料制备工艺	202
6.2.1 纤维增强金属基复合材料制备方法	202
6.2.2 颗粒增强金属基复合材料制备方法	205
6.2.3 晶须增强金属基复合材料制备方法	207
6.2.4 自生型金属基复合材料制备方法	208
6.2.5 金属基复合材料二次加工技术	209
6.3 金属基复合材料复合机理问题	212
6.3.1 纤维增强金属基复合材料复合机理	212
6.3.2 颗粒增强金属基复合材料复合机理	214
6.3.3 晶须增强金属基复合材料复合机理	216
6.3.4 自生型复合材料反应机理	216
6.3.5 金属基复合材料的增强、增韧	218
6.4 金属基复合材料及其性能	219
6.4.1 铝基复合材料及其性能	219
6.4.2 镁基复合材料及其性能	230
6.4.3 钛基复合材料及其性能	232
6.4.4 金属间化合物基复合材料及其性能	235
6.4.5 高温合金基复合材料及其性能	239
6.4.6 金属基复合材料的力学性能表征	240
6.5 金属基复合材料的应用	246
6.5.1 铝基复合材料的应用	247
6.5.2 钛基复合材料的应用	251
6.5.3 扩大应用需注意的问题	253
参考文献	255
第七章 高温结构陶瓷及其复合材料	258
7.1 概述	258

7.1.1	结构陶瓷材料的发展历程与主要目标	258
7.1.2	国内外发展现状	259
7.1.3	典型结构陶瓷材料及其应用	265
7.2	陶瓷材料用粉末、增强剂及其制备工艺	268
7.2.1	陶瓷粉体材料的制备与性能	268
7.2.2	陶瓷增强纤维、晶须制备与性能	272
7.2.3	陶瓷材料的制备工艺	276
7.2.4	陶瓷材料及其与金属间的连接技术	284
7.3	陶瓷材料的增强增韧、使用优化与性能表征	289
7.3.1	陶瓷材料的增强增韧	289
7.3.2	陶瓷材料的优化使用	298
7.3.3	陶瓷及陶瓷基复合材料的性能表征	301
7.3.4	陶瓷材料及构件质量检验与无损检测	308
7.4	高温结构陶瓷及其复合材料	311
7.4.1	高温结构陶瓷	312
7.4.2	高温结构陶瓷基复合材料	328
7.4.3	高温结构陶瓷及其复合材料的发展前景	338
	参考文献	343
	第八章 C/C 复合材料	345
8.1	C/C 复合材料的发展概况	345
8.1.1	C/C 复合材料的发展历程	346
8.1.2	C/C 复合材料的发展目标	347
8.1.3	先进 C/C 复合材料研制进展	348
8.2	C/C 复合材料制备工艺及致密化工艺	351
8.2.1	液相浸渍工艺	351
8.2.2	化学气相沉积工艺	354
8.2.3	快速低成本致密化工艺	358
8.3	树脂浸渍与碳化	359
8.3.1	几种常用的浸渍碳化的特点	360
8.3.2	浸渍压力对碳化的影响	363
8.3.3	基体的碳结构及影响因素	364
8.4	石墨化处理及其表征	369

8.4.1	石墨化处理及其模型	369
8.4.2	石墨化度及其表征	371
8.4.3	不同前驱体及工艺的石墨化度	372
8.4.4	石墨化机理	373
8.4.5	石墨微晶参量与石墨化关系	374
8.4.6	C/C 复合材料微观观察方法与形貌	375
8.5	C/C 复合材料抗氧化涂层体系	377
8.5.1	C/C 高温抗氧化涂层体系的确定原则	378
8.5.2	C/C 防氧化涂层制备方法	379
8.5.3	C/C 防氧化方法	379
8.5.4	C/C 高温抗氧化涂层材料体系	380
8.5.5	C/C + C + TiC + SiC + MoSi ₂ 涂层的制备与性能	384
8.6	C/C 复合材料的性能	387
8.6.1	C/C 复合材料的物理性能	388
8.6.2	C/C 复合材料的力学性能	392
8.6.3	C/C 复合材料的特殊使用性能	396
8.7	C/C 复合材料的应用	417
8.7.1	烧蚀、热结构方面的应用	418
8.7.2	制动器方面的应用	419
8.7.3	在先进发动机方面的应用	420
8.7.4	在发热元件方面的应用	420
8.7.5	在热压模方面的应用	421
8.7.6	在生物医学方面的应用	421
	参考文献	422
第九章	特种高温结构材料、结构成型	425
9.1	高温结构材料的特种熔铸成型	425
9.1.1	真空感应熔模精密铸造	426
9.1.2	喷射成型	439
9.1.3	钛合金凝壳熔铸	445
9.2	多孔发汗冷却材料	447
9.2.1	发汗冷却机理及对材料的要求	447
9.2.2	多孔发汗材料的制备	450

9.2.3 多孔发汗材料的性能	453
9.2.4 多孔发汗材料的应用	459
9.3 高温混合式材料结构	463
9.3.1 混合式陶瓷静子叶片材料结构	463
9.3.2 带叶梁和叶壳的转子叶片材料结构	468
9.3.3 组合式陶瓷火焰筒材料结构	469
9.3.4 组合式扩散连接整体高温材料结构	470
9.4 超塑性合金与成型	471
9.4.1 超塑性合金的一般特性	472
9.4.2 超塑性合金及其特性参数	474
9.4.3 超塑性现象的微观机制	481
9.4.4 超塑合金的应用	481
9.5 快速凝固与粉末冶金合金的制备与成型	484
9.5.1 快速凝固的一般特性	484
9.5.2 快速凝固技术与粉末制备	485
9.5.3 粉末合金的成型与应用	489
参考文献	497
第十章 高温氧化、腐蚀与防护	499
10.1 高温氧化与腐蚀	499
10.1.1 高温氧化	499
10.1.2 高温热腐蚀	503
10.2 高温防护涂层	510
10.2.1 对涂层的要求	510
10.2.2 涂层制备的通用方法	513
10.2.3 高温防护涂层的种类与特性	515
10.3 热障涂层及制备工艺的组织特性	525
10.3.1 热障涂层的设计	526
10.3.2 热障涂层材料体系	527
10.3.3 热障涂层的制备工艺	528
10.3.4 热障涂层的失效机理与延寿措施	531
10.3.5 热障涂层的应用	534
参考文献	541

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Development background, history and requirement of high temperature structure materials	1
1.1.1	Development background, position and action of high temperature structure materials	1
1.1.2	Development course of high temperature structure materials	1
1.1.3	Service character of high temperature structure materials for aviation and airspace	3
1.2	Classification of high temperature structure materials	8
1.3	Development trend and objective of high temperature structure materials	10
1.3.1	Development trend of high temperature structure materials	10
1.3.2	Development objectives of high temperature structure materials	11
	References	16
Chapter 2	Light high temperature structure materials	18
2.1	High temperature magnesium alloy	18
2.1.1	Wrought magnesium alloy	19
2.1.2	Cast magnesium alloy	21
2.1.3	Magnesium matrix composite	25
2.1.4	Development and application of alloy	26
2.2	High temperature aluminum alloy	27
2.2.1	Cast high temperature aluminum alloy	28
2.2.2	P/M high temperature aluminum alloy	29
2.2.3	Development and application of alloy	30