



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

先进高温结构 材料与技术(上)

Advanced structural materials and technology

李嘉荣 熊继春 唐定中 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划
精品项目

先进航空材料与技术丛书

先进高温结构 材料与技术(上)

李嘉荣 熊继春 唐定中 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了先进高温结构材料及其制备技术。全书分为上、下两册:上册主要介绍等轴晶铸造高温合金、定向凝固柱晶高温合金、单晶高温合金、 Ni_3Al 基和 Nb-Si 系金属间化合物基高温结构材料以及先进高温结构材料精密铸造技术;下册主要介绍变形高温合金、液态金属雾化高温合金粉末制备与喷射成形技术、粉末高温合金。

本书以北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室多年来的研究实践为基础,结合国内外研究成果,较全面地介绍了高温结构材料的专业知识与最新进展。

本书可供从事先进高温结构材料科研与管理的人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进高温结构材料与技术. 上/ 李嘉荣,熊继春,唐定中著.

—北京:国防工业出版社,2012.6

(先进航空材料与技术丛书)

ISBN 978-7-118-08148-0

I. ①先... II. ①李... ②熊... ③唐... III. ①航空材料—高温结构材料 IV. ①V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 124896 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 23¼ 字数 440 千字

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776

发行业务:(010)88540717

《先进航空材料与技术丛书》

编 委 会

主 任 戴圣龙

副主任 王亚军 益小苏

顾 问 颜鸣皋 曹春晓 赵振业

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁鹤雁	王志刚	王惠良	王景鹤
刘 嘉	刘大博	阮中慈	苏 彬
李 莉	李宏运	连建民	吴学仁
张庆玲	张国庆	陆 峰	陈大明
陈祥宝	周利珊	赵希宏	贾泮江
郭 灵	唐 斌	唐定中	陶春虎
黄 旭	黄 敏	韩雅芳	骞西昌
廖子龙	熊华平	颜 悦	

序

一部人类文明史从某种意义上说就是一部使用和发展材料的历史。材料技术与信息技术、生物技术、能源技术一起被公认为是当今社会及今后相当长时间内总揽人类发展全局的技术,也是一个国家科技发展和经济建设最重要的物质基础。

航空工业领域从来就是先进材料技术展现风采、争奇斗艳的大舞台,自美国莱特兄弟的第一架飞机问世后的 100 多年以来,材料与飞机一直在相互推动不断发展,各种新材料的出现和热加工工艺、测试技术的进步,促进了新型飞机设计方案的实现,同时飞机的每一代结构重量系数的降低和寿命的延长,发动机推重比量级的每一次提高,无不强烈地依赖于材料科学技术的进步。“一代材料,一代飞机”就是对材料技术在航空工业发展中所起的先导性和基础性作用的真实写照。

回顾中国航空工业建立 60 周年的历程,我国航空材料经历了从无到有、从小到大的发展过程,也经历了从跟踪仿制、改进改型到自主创新研制的不同发展阶段。新世纪以来,航空材料科技工作者围绕国防,特别是航空先进装备的需求,通过国家各类基金和项目,开展了大量的先进航空材料应用基础和工程化研究,取得了许多关键性技术的突破和可喜的研究成果,《先进航空材料与技术丛书》就是这些创新

性成果的系统展示和总结。

本套丛书的编写是由北京航空材料研究院组织完成的。19 个分册从先进航空材料设计与制造、加工成形工艺技术以及材料检测与评价技术三方面入手,使各分册相辅相成,从不同侧面丰富了这套丛书的整体,是一套较为全面系统的大型系列工程技术专著。丛书凝聚了北京航空材料研究院几代专家和科技人员的辛勤劳动和智慧,也是我国航空材料科技进步的结晶。

当前,我国航空工业正处于历史上难得的发展机遇期。应该看到,和国际航空材料先进水平相比,我们尚存在一定的差距。为此,国家提出“探索一代,预研一代,研制一代,生产一代”的划代发展思想,航空材料科学技术作为这四个“一代”发展的技术引领者和技术推动者,应该更加强化创新,超前部署,厚积薄发。衷心希望此套丛书的出版能成为我国航空材料技术进步的助推器。可以相信,随着国民经济的进一步发展,我国航空材料科学技术一定会迎来一个蓬勃发展的春天。



2011 年 3 月

前 言

高温合金自 20 世纪 40 年代问世以来,至今已有半个多世纪了。高温合金的发展水平在一定程度上反映一个国家的国防力量和工业水平。今天,在先进的航空发动机中,高温合金所占的比重高达 60% 以上;高温合金在航天、核工业、能源动力、石油化工、交通运输等领域也有广泛的应用。高温合金是目前军用和民用航空发动机及地面燃气轮机热端部件不可替代的关键结构材料。可以毫不夸张地说,没有高温合金,就不可能有高性能的航空发动机。

我国高温合金起步于 1956 年。50 多年来,我国的高温合金从无到有,从仿制到自主创新,合金的承温能力从低到高,已研制和生产了百余种牌号的高温合金,建立了我国的高温合金体系,使我国高温合金材料立足于国内。

北京航空材料研究院自 1956 年建院就设置了高温合金专业,参加了我国第一个高温合金的研制,逐步形成了包括变形高温合金、铸造高温合金、粉末高温合金及超高温结构材料在内的完整的高温结构材料专业体系,并于 2002 年成立了先进高温结构材料重点实验室。至今,北京航空材料研究院高温结构材料专业已走过了 56 年的历史。在此期间,创业的艰辛、事业的发展、人才的成长、成果的涌现,令世人瞩目。目前,先进高温结构材料重点实验室已成为我国最大的高温结构材料与技术研究发展中心之一,为我国航空发动机的研制与生产做出了重大贡献。

本书以北京航空材料研究院高温结构材料的研究实践为基础,结合国内外研究成果,较全面地介绍了高温结构材料的专业知识与最新进展。全书分为上、下两册,共 9 章。上册:第 1 章绪论,由李嘉荣执笔;第 2 章等轴晶铸造高温合金,由李相辉、曹腊梅、汤鑫执笔,刘发信审稿;第 3 章定向凝固柱晶高温合金,由谭永宁、李志强、王帅执笔,张宏伟、黄朝晖审稿;第 4 章单晶高温合金,由熊继春、李嘉荣执笔,刘世忠、殷克勤审稿;第 5 章 Ni_3Al 基和 $\text{Nb}-\text{Si}$ 系金属间

化合物基高温结构材料,由宋尽霞、康永旺、黄强、李明执笔,韩雅芳审稿;第6章先进高温结构材料精密铸造技术,由曹腊梅、薛明、张勇执笔,汤鑫审稿。下册:第1章变形高温合金,由赵宇新、曾维虎、付书红执笔,张绍维审稿;第2章液态金属雾化高温合金粉末制备与喷射成形技术,由李周,高正江,袁华,张国庆执笔,田世藩审稿;第3章粉末高温合金,由田高峰、邹金文、王旭青、汪煜、周晓明执笔,罗学军审稿。全书由李嘉荣、熊继春统稿、修改和补充,并由李嘉荣、熊继春、唐定中审定。

本书是集体智慧的结晶,凝聚了众多科研人员多年来的研究成果。作者感谢为本书出版做出贡献的所有科技工作者。

由于作者水平有限,书中的瑕疵在所难免,诚挚地希望读者批评与指正。

作者

2012年1月

目 录

上 册

第 1 章 绪论	1
1.1 高温结构材料的起源	1
1.2 高温结构材料的作用与地位	2
1.3 高温结构材料的发展	3
1.3.1 变形高温合金的发展	3
1.3.2 铸造高温合金的发展	5
1.3.3 粉末高温合金的发展	8
1.3.4 新型高温结构材料的发展	11
1.4 高温结构材料的发展前景	11
1.4.1 发展新型高温结构材料	11
1.4.2 发展高纯高温结构材料	12
1.4.3 发展高温结构材料构件制备技术	12
参考文献	13
第 2 章 等轴晶铸造高温合金	16
2.1 概述	16
2.1.1 国外等轴晶铸造高温合金的发展	16
2.1.2 我国等轴晶铸造高温合金的发展	17
2.2 等轴晶铸造高温合金成分及其组织	19
2.2.1 元素作用	19

2.2.2	铸态组织	22
2.2.3	固溶组织	25
2.2.4	时效组织	25
2.3	等轴晶铸造高温合金的应用	26
2.3.1	整体结构件上的应用	26
2.3.2	涡轮叶片上的应用	28
2.3.3	整体涡轮上的应用	30
2.4	等轴晶铸造高温合金发展前景	32
	参考文献	33
第3章	定向凝固柱晶高温合金	34
3.1	概述	34
3.1.1	国外定向凝固柱晶高温合金的发展	34
3.1.2	国内定向凝固柱晶高温合金研究现状	37
3.1.3	典型定向凝固柱晶高温合金介绍	39
3.2	定向凝固工艺及设备	40
3.2.1	发热铸型法	41
3.2.2	功率降低法	41
3.2.3	高速凝固法	42
3.2.4	液态金属冷却法	43
3.2.5	流态床冷却法	45
3.2.6	区域熔化液态金属冷却法	46
3.3	定向凝固柱晶高温合金的热处理	47
3.3.1	固溶热处理	47
3.3.2	涂层热处理	50
3.3.3	时效热处理	52
3.3.4	长期时效	53
3.3.5	修复热处理	59
3.3.6	典型合金的热处理制度	60
3.4	我国定向凝固柱晶高温合金的应用研究	62

3.4.1	Hf 对合金的影响	62
3.4.2	Re、Ti、Ta 等对合金性能的影响	67
3.4.3	定向凝固工艺	68
3.4.4	薄壁性能	71
3.4.5	可铸性	73
3.4.6	再结晶	77
3.4.7	合金返回料	88
3.5	定向凝固柱晶高温合金发展前景	93
	参考文献	96
第4章	单晶高温合金	100
4.1	概述	100
4.1.1	国外单晶高温合金的发展	100
4.1.2	我国单晶高温合金的发展	103
4.1.3	典型单晶高温合金介绍	104
4.2	单晶高温合金的强化机理与成分设计	107
4.2.1	强化机理	107
4.2.2	合金元素作用	114
4.2.3	成分设计	117
4.3	单晶高温合金的定向凝固	126
4.3.1	定向凝固基本原理	127
4.3.2	定向凝固铸造方法	128
4.3.3	定向凝固工艺	129
4.3.4	定向凝固过程数值模拟	139
4.4	单晶高温合金的热处理与组织	144
4.4.1	铸态组织	145
4.4.2	热处理制度	146
4.4.3	固溶热处理与组织	147
4.4.4	时效热处理与组织	149
4.4.5	固溶 + 时效热处理与组织	150

4.4.6	长期时效热处理与组织	151
4.5	单晶高温合金的性能	153
4.5.1	物理及化学性能	153
4.5.2	力学性能	156
4.5.3	工艺性能	160
4.6	单晶高温合金的缺陷	160
4.6.1	小角度晶界	160
4.6.2	杂晶	171
4.6.3	冶金缺陷	174
4.6.4	再结晶	177
4.7	单晶高温合金发展前景	189
4.7.1	发展新型单晶高温合金的设计理论与方法	189
4.7.2	发展新型单晶高温合金	190
4.7.3	发展高纯单晶高温合金	190
4.7.4	发展高温度梯度定向凝固技术	190
	参考文献	191
第5章	Ni_3Al 基和 $\text{Nb}-\text{Si}$ 系金属间化合物基高温结构材料	199
5.1	概述	199
5.1.1	国外金属间化合物基高温结构材料的发展	200
5.1.2	我国金属间化合物基高温结构材料的发展	202
5.1.3	典型金属间化合物基高温结构材料介绍	203
5.2	Ni_3Al 基高温结构材料	204
5.2.1	Ni_3Al 晶体结构和晶体缺陷	204
5.2.2	Ni_3Al 晶界脆性及其改善	205
5.2.3	合金元素的作用	207
5.2.4	Ni_3Al 基合金制备工艺	210
5.2.5	Ni_3Al 基合金组织与性能	213
5.3	$\text{Nb}-\text{Si}$ 系超高温结构材料	230
5.3.1	Nb_5Si_3 的晶体结构	231

5.3.2	第一原理计算	232
5.3.3	合金化元素作用	239
5.3.4	Nb-Si 系超高温结构材料制备工艺	240
5.3.5	Nb-Si 系超高温结构材料的组织与力学性能	247
5.3.6	Nb-Si 系超高温结构材料的抗氧化性能及其涂层	261
5.4	金属间化合物基高温结构材料发展前景	265
5.4.1	Ni ₃ Al 基合金应用前景展望	265
5.4.2	Nb-Si 系超高温结构材料发展前景展望	267
	参考文献	268
第 6 章	先进高温结构材料精密铸造技术	277
6.1	概述	277
6.1.1	国外高温合金精密铸造技术的发展	277
6.1.2	我国高温合金精密铸造技术的发展	279
6.2	涡轮叶片精密铸造技术	282
6.2.1	陶瓷型芯材料与制备方法	282
6.2.2	陶瓷型壳材料与制备方法	300
6.2.3	等轴晶叶片精密铸造技术	310
6.2.4	定向凝固涡轮叶片精密铸造技术	313
6.3	导向器类结构件精密铸造技术	319
6.4	整体涡轮叶盘控晶精密铸造技术	321
6.5	大型复杂结构件整体精密铸造技术	330
6.5.1	大型复杂结构件整铸技术	330
6.5.2	高温合金大型复杂结构件热控凝固整铸技术	333
6.6	陶瓷超高温结构材料及其精密铸造技术	341
6.6.1	熔融生长共晶陶瓷超高温结构材料	341
6.6.2	熔融生长共晶陶瓷超高温结构材料精密铸造技术	350
6.6.3	熔融生长共晶陶瓷超高温结构材料构件的制造和使用	353
6.7	高温结构材料精密铸造技术发展趋势	353
	参考文献	354

下 册

第 1 章 变形高温合金	1
1.1 概述	1
1.1.1 国外变形高温合金的发展	1
1.1.2 我国变形高温合金的发展	4
1.1.3 典型变形高温合金介绍	5
1.2 变形高温合金的强化机理与成分设计	18
1.2.1 合金元素作用	19
1.2.2 强化机理	20
1.2.3 成分设计	25
1.3 变形高温合金的制造工艺	27
1.3.1 合金的冶炼	27
1.3.2 合金的变形工艺	31
1.3.3 合金焊接制造技术	35
1.3.4 计算机技术应用	36
1.4 变形高温合金的热处理与组织	43
1.4.1 合金组织	43
1.4.2 固溶热处理	45
1.4.3 中间处理	46
1.4.4 时效热处理	47
1.4.5 热机械处理	48
1.4.6 退火热处理	49
1.4.7 弯曲晶界热处理	50
1.4.8 变形高温合金的热处理参数	51

1.5	变形高温合金的性能	67
1.5.1	物理及化学性能	67
1.5.2	力学性能	68
1.5.3	工艺性能	70
1.6	变形高温合金的缺陷控制	71
1.6.1	冶金缺陷	71
1.6.2	锻造缺陷	74
1.6.3	热处理缺陷	76
1.7	变形高温合金发展前景	80
	参考文献	81
第2章	液态金属雾化高温合金粉末制备与喷射成形技术	84
2.1	概述	84
2.2	液态金属雾化	87
2.2.1	液态金属雾化原理	87
2.2.2	金属熔滴的粒度分布	89
2.2.3	金属熔滴的传热与凝固	90
2.3	氩气雾化高温合金粉末制备	92
2.3.1	高温合金粉末制备的主要方法	92
2.3.2	氩气雾化高温合金粉末制备的工艺流程	94
2.3.3	粉末的形貌特征	97
2.3.4	粉末的组织特征	99
2.3.5	非金属夹杂物控制技术	117
2.3.6	氧含量控制技术	119
2.4	高温合金喷射成形技术	122
2.4.1	喷射成形高温合金制备工艺的原理与特点	122
2.4.2	喷射成形技术的雾化喷嘴	125
2.4.3	喷射成形装置沉积器的配置	127
2.4.4	喷射成形雾化沉积过程	129
2.4.5	喷射成形高温合金组织特征和力学性能	137

2.5 液态金属雾化高温合金粉末制备与喷射成形技术的未来发展	147
参考文献	148
第3章 粉末高温合金	152
3.1 概述	152
3.1.1 粉末高温合金的起源和特点	152
3.1.2 国外粉末高温合金的发展历程	154
3.1.3 我国粉末高温合金的研究及应用	160
3.2 粉末高温合金的成分设计与强化机理	162
3.2.1 粉末高温合金成分设计	162
3.2.2 合金主要元素作用及强化相	162
3.2.3 新一代粉末高温合金成分设计特点	172
3.3 粉末制备技术	173
3.4 粉末高温合金盘件制造技术	174
3.4.1 粉末盘件成形工艺的发展回顾	174
3.4.2 粉末高温合金盘件主要制造技术	176
3.5 粉末高温合金的组织与性能	184
3.6 粉末高温合金的冶金质量控制	190
3.6.1 粉末原始颗粒边界	190
3.6.2 热诱导孔洞	191
3.6.3 非金属夹杂物	193
3.7 粉末高温合金发展前景	202
3.7.1 粉末高温合金发展趋势	202
3.7.2 双性能盘制造技术	203
参考文献	213

第 1 章 绪 论

1.1 高温结构材料的起源

高温合金 (Superalloys) 是指以铁、镍、钴为基,能在 600℃ 以上的高温环境下抗氧化或耐腐蚀,并能在一定应力作用下长期工作的一类金属材料。

最先出现的高温合金是以冷、热变形方式加工成形的高温合金。随着时间的推移、技术的进步,在变形高温合金之后,相继发展了铸造高温合金、粉末高温合金,从而逐渐形成了以成形方式分类的变形高温合金 (Wrought Superalloys)、铸造高温合金 (Cast Superalloys)、粉末高温合金 (Powder Metallurgy Superalloys) 体系。

英国是最早研究高温合金的国家。1939 年,英国 Mond 镍公司首先在 80Ni-20Cr 电热合金中加入 0.3% Ti 和 0.1% C,研制成功镍基合金 Nimonic75,用于制造火焰筒等零件。为了提高蠕变强度,将 Nimonic75 合金的 Ti 含量提高到 2.5%,并加入 1% 左右的 Al,发展成 Nimonic80 合金,1942 年被成功地用作涡轮喷气发动机的叶片,成为最早的 $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$ 强化的涡轮叶片材料。1944 年,对 Nimonic80 合金的 Al 和 Ti 含量稍加调整,并改进生产工艺,发展成 Nimonic80A 合金。1945 年,用 20% Co 替代 Ni,由 Nimonic80A 发展成 Nimonic90 合金。1951 年,把 Nimonic90 合金的 Al 和 Ti 含量进一步提高,发展了 Nimonic95 合金。此后,该公司在合金中加入 B、Zr、Co、Mo 等合金元素,相继开发了 Nimonic100、Nimonic105 等合金,形成 Nimonic 合金系列^[1,2]。

美国变形高温合金的发展晚于英国。1942 年,美国铝业公司发展了 HastelloyB 镍基变形高温合金,用于通用电器公司研制的 Bellp-59 和 I-40 喷气发动机。1950 年,由于钴资源短缺,镍基合金迅速发展并广泛用作涡轮叶片。同期,美国的 P&W 公司、GE 公司和特殊金属公司分别开发出了 Waspalloy、M-252 和 Udimet500 等合金,并在这些合金基础上,形成了 Inconel、Mar-M 和 Udimet 等合金系列。20 世纪 50 年代初期,国际镍公司研制成功 Inconel718 合金,该合金用 γ'' 和 γ' 相强化,用途越来越广,用量越来越大,目前仍在广泛应用^[2]。

国外铸造高温合金的发展始于 20 世纪 40 年代。由于当时的锻造设备过载