



# 航空航天材料定向凝固

DIRECTIONAL SOLIDIFICATION  
PROCESSING OF AERO-HIGH  
TEMPERATURE MATERIALS

傅恒志 等 / 著

(TB-0487.01)

责任编辑：吴凡洁 罗娟

封面设计：黄华斌



傅恒志，中国工程院院士，我国著名材料及冶金学家，西北工业大学、哈尔滨工业大学、河南理工大学教授，1984~1992年为西北工业大学校长，国际高校科学院院士，俄罗斯宇航科学院外籍院士。曾任中国航空学会副理事长、中国材料研究学会常务理事、陕西省航空学会理事长、西安市科协名誉主席。长期从事高温材料和凝固科学技术的教学及研究工作。曾获国家科技进步奖及国家技术发明奖3项、省部级奖11项，发表学术论文800余篇，出版专著6部。

科学出版社 能源与动力分社

编辑部电话：010-64003151

E-mail: wufanjie@mail.sciencep.com

地址：北京市东黄城根北街16号

销售分类建议：材料科学

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-045733-2



9 787030 457332 >

定价：198.00元

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 航空航天材料定向凝固

Directional Solidification Processing of Aero-High  
Temperature Materials

傅恒志等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书涉及定向凝固理论、技术以及典型航空航天材料三部分内容。分为绪论、多元多相合金定向凝固特性、定向凝固晶体生长取向与界面各向异性、电磁约束成形定向凝固、电磁冷坩埚定向凝固、高温合金定向凝固、金属间化合物结构材料定向凝固和陶瓷材料定向凝固共八章,介绍航空航天材料的凝固特点及其制备技术的特点和发展趋势,首次全面系统展示晶体生长取向控制、电磁约束成形和冷坩埚定向的研究成果及其独特优势,分析高温合金、高温金属间化合物和氧化物共晶陶瓷等材料的定向凝固制备技术、组织和力学性能。

本书为原创性学术著作,兼具基础性和工程性,主要读者对象为材料领域的相关科研人员、研究生及高年级本科生。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

航空航天材料定向凝固=Directional Solidification Processing of Aero-High Temperature Materials/傅恒志等著. —北京:科学出版社,2015.9  
ISBN 978-7-03-045733-2

I. ①航… II. ①傅… III. ①航空材料-定向凝固 ②航天材料-定向凝固 IV. ①V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 223263 号

---

责任编辑:吴凡洁 罗 娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年9月第一次印刷 印张:39

字数:896 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 本书主要撰写人员

傅恒志 沈 军 骆良顺 刘 林  
杨劼人 张 军 李双明

# 序 一

自从 20 世纪 50 年代以来,人们对液固相转变过程微观特性进行了系统、深入的研究,并将传热、传质、对流及界面科学应用于固相微观形貌演变过程的分析和描述以及最终凝固组织的预测,先后发展了固相形核理论、胞晶及枝晶生长理论、共晶凝固理论、包晶凝固理论和偏晶凝固理论等,形成了一个较为完整的理论体系,即凝固理论。这些理论持续发展和完善,成为材料科学的一个重要分支,并成功用于工业实践。当今凝固理论已成为金属材料锭坯质量控制、机械行业铸件和锻件毛坯制造以及非平衡组织、各向异性组织乃至非晶、纳米晶等先进材料制备的共性理论基础,层出不穷的凝固控制技术支撑着各种现代工业技术的发展。

定向凝固采用单向的传热条件,并辅助以特殊的加热方式、强制冷却、物理场等,可实现晶体取向、枝晶取向乃至多相组织定向控制,从而获得各向异性的材料组织和性能,并使材料在特定方向上的性能超常规地大幅度提高。航空发动机用定向及单晶高温合金叶片的应用带动了航空发动机技术跨时代的发展,成为定向凝固技术应用的典型范例。

傅恒志院士是材料界凝固学大师,多年来他指导西北工业大学凝固技术国家重点实验室取得了多项突出成果。近年来,他虽年事已高,仍在西北工业大学及哈尔滨工业大学科研一线带领学生从事定向凝固创新性研究,并取得了一批成果。他是材料界同行值得尊敬和学习的楷模。

这本书是他近期定向凝固理论研究和实践总结,全书共 8 章,其中多元多相合金定向凝固特性及定向凝固晶体生长取向与界面各向异性是对定向凝固理论的完善与发展;电磁约束定向凝固及电磁冷坩埚定向凝固是对定向凝固技术的创新。另外,针对航空发动机几种典型材料的定向凝固技术,包括高温合金、金属间化合物及陶瓷材料,都进行了详尽的介绍和评述,特别是后两者,可能成为下一代航空发动机的关键材料。因此,本书必将推动凝固科学及材料科学的发展,特别是对航空发动机当前使用的高温结构材料的研制及下一代结构材料的发展具有重要的指导意义。

当前,随着难熔金属、耐热金属、金属间化合物和陶瓷材料等多种航空航天新材料体系的研发,为定向凝固技术提供了新的发展空间和机遇,不论从技术上,还是基本原理研究上都期待着新的突破。本书为原创性学术著作,兼具基础性和工程性,主要对象为航空航天领域的相关科研人员、研究生及高年级本科生,同时也适用于材料学科、冶金学科的相关科研人员和研究生。



中国材料研究学会名誉理事长

中国工程院院士

2014 年 11 月

## 序 二

航空航天材料在高温、高应力、强腐蚀等极端环境中服役，具有特殊的性能与功能，一直是材料科学与工程研究的前沿和热点。随着对航空发动机、燃气轮机和天地往返飞行器需求的不断提高，高温材料仍然是航空航天材料中的难点和“瓶颈”，备受决策者和学界的关注。本书系统地介绍了自第一个铸造涡轮叶片在航空发动机上试验成功和以成分过冷理论为代表的定量凝固科学出现以来，定向凝固理论、技术、材料、应用，定向凝固四要素互动及实践-理论演绎的成果与状况。

半个多世纪以来，傅恒志院士带领他的弟子及研究团队不懈地耕耘在定向凝固科研一线，为定向凝固理论、技术、材料及其在航空发动机上的应用作出了卓越贡献。用大量实验数据取得了多元多相合金的定向生长、晶体取向、组织演化与控制等领域的新认识，凝结了新观点，充实并发展了定向凝固理论；创新高温梯度超细化定向凝固、电磁冷坩埚定向凝固、电磁约束成形、晶体生长及单晶取向控制等定向凝固技术，开辟了以高温合金、单晶合金、金属间化合物、难熔金属、先进陶瓷为代表的新型材料制备；研制的超细化组织新型材料的高温、超高温蠕变，持久强度提高几倍、十几倍甚至更高，预示了令人向往的前景。研究成果涉及技术领域之广、水平之高在国内外可谓独树一帜。本书共8章，翔实地阐述了各项研究成果，对定向凝固科学技术研究和航空航天高温材料创新发展都具有重要的指导作用与实用价值，该书的出版将推动我国定向凝固技术到达更高水平。

《航空航天材料定向凝固》是一部难得的教科书。它为研究和应用高温合金的工程技术人员、高等院校的材料科学与工程专业教师和研究生带来理论、技术知识和研究方法教益。我与傅恒志院士有较多接触，读《航空航天材料定向凝固》如见其人，智慧、刚毅、追求。一位八十多岁高龄老人奉献了如此巨著，如此的研究和如此的成果，他是一位令我敬佩的、真正的教授和博士生导师。

赵振业

中国热处理学会理事长

中国工程院院士

2014年12月

## 前 言

定向凝固技术在航空涡轮叶片制备上的成功应用及以成分过冷理论为代表的定向凝固科学的出现,使定向凝固工艺的实验研究逐步进入精确定量阶段并与先进的航空航天材料相结合,开辟了金属间化合物、高温合金、单晶合金、难熔合金以及先进陶瓷材料为代表的新型材料的凝固加工。同时,为适应先进航空航天动力系统对高温构件冶金质量和性能的苛刻要求,一批具有创新特点的定向凝固技术,如高梯度超细化定向凝固、电磁约束成形、电磁冷坩埚定向凝固、晶体生长及单晶取向控制等在国家自然科学基金、863、973等项目支持下先后被开发探索,进行了较深入的研究并取得成功。虽然从应用服役角度看,这些新的成果尚不能称谓成熟与完善,但许多唯象的规律和机制,如多元多相复杂合金的定向生长与晶体取向演化及相应的组织选择等均已有了初步结论。特别是近十年来在大量博士生参与的创造性研究中获得了不少突破性进展。作者认为,为加速我国航空航天科技的发展,应不揣浅陋及时介绍有关方面的进展,请广大读者指正。

全书共8章,由傅恒志院士提出构思与体系框架。第一章绪论由傅恒志撰写,第二章多元多相合金定向凝固特性由傅恒志、骆良顺撰写,第三章定向凝固晶体生长取向与界面各向异性由傅恒志撰写,第四章电磁约束成形定向凝固由沈军、李双明撰写,第五章电磁冷坩埚定向凝固由杨劭人、傅恒志撰写,第六章高温合金定向凝固由刘林撰写,第七章高温金属间化合物定向凝固由沈军、李双明、傅恒志撰写,第八章陶瓷材料定向凝固由张军撰写。李晓历副教授整理了全部图、表、文字、文献。沈军与李双明教授审校了全部书稿。面对一系列具有高熔化熵特性的新型结构材料和先进定向凝固技术,由于可供参考印证的资料有限,开发建立的新的实验研究装置也并非全如所期,研究分析的结果与结论也未必都是全面正确的,我们衷心欢迎读者和专家批评指正,不吝赐教。

本书撰写中得到有关老师和研究生的帮助,书稿形成过程中郭景杰教授、李金山教授、陈瑞润教授等提供许多素材,并提出宝贵意见。赵振业院士、仲增墉教授、黄卫东教授审阅全部书稿并向出版社提出推荐。书稿中许多内容均取自西北工业大学与哈尔滨工业大学相关学科近年所承担的国家重大及重点科研项目。应特别提及的是,中国工程院周廉院士及赵振业院士对本书的撰写、出版给予了大力支持,提出了不少珍贵建议并为本书作序。对以上各位专家和同学对本书所做的贡献,谨在此表示衷心的感谢。

作 者

2015年3月



# 目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 航空航天先进产品与先进材料	1
1.2 材料凝固加工的先进技术——定向凝固	5
1.3 超常条件定向凝固过程	9
1.4 定向凝固过程面临的新挑战	10
参考文献	18
第 2 章 多元多相合金定向凝固特性	23
2.1 多元系组成相凝固热力学	23
2.1.1 多元体系的自由能	23
2.1.2 多元系结晶过程的热力学平衡条件	24
2.1.3 化合物材料热力学	24
2.1.4 含有金属间化合物的相图	26
2.2 多元合金凝固过程中的溶质分凝	30
2.2.1 多元合金凝固时的溶质分凝系数	30
2.2.2 多元合金定向凝固时的溶质分凝	32
2.3 定向凝固阵列柱晶的稳态生长	36
2.4 共晶定向凝固	40
2.4.1 共晶合金类别	40
2.4.2 共晶相变的基本特征	42
2.4.3 共晶合金的生长	44
2.4.4 规则共晶的定向凝固	52
2.4.5 不规则共晶定向凝固	61
2.5 包晶定向凝固	72
2.5.1 包晶二元相图与凝固中的相变	72
2.5.2 多元系包晶	76
2.5.3 多元包晶合金的生长	79
2.5.4 包晶合金定向凝固初始过渡阶段	83
2.5.5 包晶合金稳态定向凝固	94
2.5.6 包晶合金定向凝固的共生生长	99
2.6 包晶定向凝固中的 TGZM 效应及分离式包晶反应	104

2.7	包晶合金定向凝固组织形态演化	115
2.7.1	包晶合金定向凝固形态特征	115
2.7.2	纯扩散条件下包晶合金定向凝固组织形态演化机制	122
2.7.3	非纯扩散条件下包晶合金定向凝固组织形态演化	143
2.7.4	包晶合金凝固理论研究展望	157
	参考文献	157
<b>第3章</b>	<b>定向凝固晶体生长取向与界面各向异性</b>	<b>165</b>
3.1	晶体取向与材料各向异性	165
3.2	定向凝固中的界面各向异性	167
3.3	多晶生长的竞争淘汰与定向凝固选晶机制及单晶形成	172
3.4	不同取向晶粒定向凝固的竞争生长	179
3.5	晶体生长方向、择优取向与热流方向的关系及定向凝固控制参量的影响	192
3.6	晶体生长取向与界面各向异性	200
3.7	凝固组织与界面各向异性	210
3.8	界面各向异性对胞-枝转变的影响	220
	参考文献	233
<b>第4章</b>	<b>电磁约束成形定向凝固</b>	<b>238</b>
4.1	电磁场在材料加工中的应用	238
4.1.1	电磁悬浮技术	238
4.1.2	冷坩埚感应熔炼技术	239
4.1.3	磁悬浮熔体处理技术	240
4.1.4	电磁铸造技术	241
4.2	电磁约束成形定向凝固理论及模型	242
4.2.1	电磁约束成形定向凝固过程	242
4.2.2	电磁场分布特征	244
4.2.3	电磁压力模型	254
4.2.4	熔体的热力比及熔体成形控制	257
4.3	电磁约束成形定向凝固过程数值分析	259
4.3.1	电磁场及电磁压力的数值模拟	259
4.3.2	电磁压力分布与熔体形状关系的模拟计算	264
4.3.3	电磁成形与温度场的耦合计算	266
4.4	金属材料的电磁无接触成形定向凝固	279
4.4.1	低比重合金的电磁成形定向凝固	279
4.4.2	高比重合金的真空电磁成形定向凝固	287
4.4.3	电磁成形定向凝固组织	296
4.5	电磁软接触成形定向凝固	301
4.5.1	单频电磁软接触成形定向凝固	302

4.5.2	双频电磁软接触成形定向凝固 .....	303
4.5.3	电磁软接触成形定向凝固中磁场分布 .....	304
4.5.4	电磁软接触成形定向凝固中温度场的分布 .....	306
4.5.5	电磁软接触成形定向凝固宏微观组织 .....	307
4.5.6	本章小结 .....	308
	参考文献 .....	310
<b>第5章</b>	<b>电磁冷坩埚定向凝固</b> .....	<b>313</b>
5.1	冷坩埚定向凝固技术发展 .....	313
5.1.1	冷坩埚技术发展 .....	313
5.1.2	定向凝固制备 TiAl 合金 .....	317
5.1.3	电磁冷坩埚定向凝固原理与过程 .....	319
5.2	电磁场分布特征与定向凝固用冷坩埚优化设计 .....	321
5.2.1	电磁场作用 .....	321
5.2.2	电磁场分布特征 .....	322
5.2.3	磁场均匀性 .....	329
5.2.4	定向凝固用冷坩埚设计发展 .....	332
5.3	冷坩埚定向凝固传热过程 .....	334
5.3.1	冷坩埚定向凝固过程传热状态演变 .....	334
5.3.2	糊状区传热物理模型 .....	337
5.3.3	轴向传热数学模型 .....	340
5.3.4	径向传热数学模型 .....	341
5.3.5	理想传热状态分析 .....	343
5.3.6	糊状区轴-径热流密度比分析 .....	344
5.3.7	凝固界面形状函数与影响因素分析 .....	345
5.4	冷坩埚定向凝固温度场 .....	348
5.5	冷坩埚定向凝固 TiAl 合金 .....	355
5.5.1	成形性分析与表面质量控制 .....	355
5.5.2	宏观组织生长与控制 .....	359
5.5.3	硼元素细化柱状晶机制分析 .....	363
5.5.4	$\alpha_2/\gamma$ 片层取向 .....	365
5.5.5	成分偏析 .....	369
5.5.6	熔体流动与组织相关性 .....	371
5.5.7	冷坩埚定向凝固 TiAl 合金性能 .....	375
5.6	冷坩埚定向凝固 Ti 合金 .....	378
5.7	冷坩埚定向凝固 Nb-Si 合金 .....	379
5.8	总结与展望 .....	381
	参考文献 .....	382

<b>第 6 章 高温合金定向凝固</b> .....	387
6.1 铸造高温合金概述 .....	387
6.1.1 定向柱晶高温合金 .....	389
6.1.2 单晶高温合金 .....	391
6.2 单晶高温合金的制备 .....	394
6.2.1 选晶法 .....	394
6.2.2 籽晶法 .....	398
6.3 高温合金的凝固特性 .....	398
6.3.1 凝固路径 .....	398
6.3.2 凝固温度 .....	401
6.3.3 凝固分配系数 .....	406
6.3.4 微观偏析 .....	412
6.4 高温合金定向凝固组织 .....	417
6.4.1 凝固界面形态 .....	417
6.4.2 $\gamma$ 枝晶/胞晶组织 .....	420
6.4.3 $\gamma$ - $\gamma'$ 共晶 .....	423
6.4.4 初生碳化物和硼化物 .....	427
6.4.5 固态相变组织 .....	429
6.4.6 熔体状态对高温合金组织的影响 .....	432
6.5 定向和单晶高温合金的常见凝固缺陷 .....	436
6.5.1 取向偏离 .....	438
6.5.2 雀斑(通道偏析) .....	438
6.5.3 杂晶 .....	445
6.5.4 小角度晶界 .....	448
6.5.5 缩松 .....	450
6.5.6 热裂 .....	453
6.6 定向凝固和单晶高温合金的力学性能 .....	455
6.6.1 定向凝固和单晶高温合金的性能特点 .....	455
6.6.2 晶体取向对高温力学性能的影响 .....	458
6.6.3 定向凝固工艺对高温力学性能的影响 .....	462
6.7 高温合金定向凝固技术的发展 .....	464
参考文献.....	467
<b>第 7 章 金属间化合物结构材料定向凝固</b> .....	477
7.1 金属间化合物材料的应用 .....	477
7.2 Ti-Al 金属间化合物及其定向凝固 .....	479
7.2.1 Ti-Al 金属间化合物的结构与性能 .....	479
7.2.2 定向凝固 TiAl 合金 .....	487
7.2.3 $\gamma$ -TiAl 合金的晶体生长与晶向控制.....	493

7.3 NiAl 系金属间化合物定向凝固	499
7.3.1 NiAl 系金属间化合物材料概况	499
7.3.2 NiAl 合金特点	500
7.3.3 NiAl 基合金的强韧化方法及机理	501
7.3.4 NiAl 基定向凝固共晶合金组织和性能	503
7.3.5 共晶成分 NiAl 基共晶合金的定向凝固特征	507
7.3.6 非共晶成分 NiAl-Cr(Mo)共晶合金的定向凝固及组织特征	516
7.3.7 凝固条件对片层间距和强化相体积分数的影响	529
7.3.8 NiAl 基定向凝固共晶合金的性能	530
7.3.9 $Ni_3Al$ 合金的组织性能及其定向凝固	541
7.4 难熔合金金属间化合物材料定向凝固	551
7.4.1 Laves 相金属间化合物材料	551
7.4.2 $Cr_3Si$ 金属间化合物结构材料	554
7.4.3 $Nb_3Si/Nb_5Si_3$ 基金属间化合物高温结构材料	557
参考文献	561
<b>第 8 章 陶瓷材料定向凝固</b>	567
8.1 概述	567
8.2 共晶陶瓷材料体系	569
8.2.1 氧化物共晶陶瓷	569
8.2.2 硼化物共晶陶瓷	571
8.2.3 碳化物共晶陶瓷	574
8.3 共晶陶瓷定向凝固技术	576
8.3.1 改进的 Bridgman 方法	577
8.3.2 边界外延生长方法	578
8.3.3 微抽拉法	578
8.3.4 悬浮区熔法	579
8.3.5 激光水平区熔法	581
8.3.6 其他:三维打印(选区熔覆,立体成形等)	583
8.4 氧化物共晶陶瓷的凝固组织	585
8.4.1 凝固组织特征及其相组成	585
8.4.2 凝固条件对组织的影响	588
8.4.3 氧化物共晶界面特征及晶体学取向关系	593
8.5 氧化物共晶陶瓷的物理和力学性能	594
8.5.1 强度	594
8.5.2 抗氧化性	596
8.5.3 蠕变性能	596
8.5.4 断裂韧性	597
8.5.5 变形机理	599

8.6 发展趋势与应用前景 .....	600
8.6.1 目前存在的主要问题 .....	600
8.6.2 发展趋势 .....	600
8.6.3 应用前景 .....	600
参考文献 .....	601
索引 .....	604

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 航空航天先进产品与先进材料

自古以来,人类就怀有翱翔天空、遨游宇宙的愿望。在生产力和科学技术低下的时代,这种愿望只能停留在幻想阶段。1903年,美国莱特兄弟首次把有动力、可操纵和可持续飞行的飞机送上天空。1957年,苏联发射了世界上第一颗人造卫星并随后在1961年成功发射了世界上第一艘载人飞船,标志着航空航天科学技术获得了巨大的成功,揭开了人类航空航天事业的新纪元<sup>[1,2]</sup>。

航空航天高技术产业的发展虽然与军事应用密切相关,但更重要的是人类在这个产业部门所取得的巨大进展,对国民经济的众多部门和社会生活的诸多方面都产生了重大而深远的影响,推动并改变着世界的面貌。进入21世纪之后,航空航天高技术产业将为人类认识和驾驭自然注入新的强大动力,航空航天活动的作用将远超科学领域,对政治、经济、军事乃至人类社会生活都会产生更加广泛而深远的影响,并不断地创造出崭新的科技成果和巨大的经济效益<sup>[2-4]</sup>。

航空航天飞行器在超高温、超低温、高真空、高应力、强腐蚀等极端条件下工作,除了依靠优化的结构设计,还依赖于材料所具有的优异特性和功能。由此可见,航空航天材料在航空航天产品发展中的极其重要的地位和作用。

航空航天产品在追求轻质和减重方面可以说是“克克计较”,图1-1为飞行器每减重1kg所取得的经济效益与飞行速率的关系<sup>[1,2,5]</sup>。例如,对航天飞机来说,每减重1kg的经济效益将近10万美元。新型材料及改型材料在军机结构减重中的重要性及发展趋势如

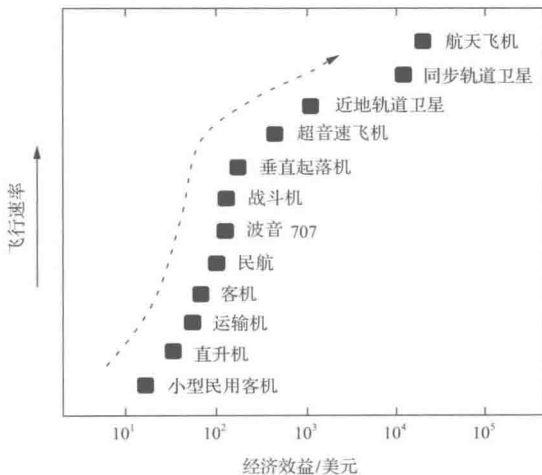


图 1-1 减轻结构所得经济效益(相对值)  
飞行器每减重 1kg 后所得经济效益与飞行速率的关系

图 1-2 所示。由图可见,新型材料和改进型材料与主动载荷控制、颤振抑制、自动化设计及先进结构概念等相比,在飞行器结构减重中占有主导地位,也正因为这个原因,比强度和比模量这些概念在航空航天领域具有更为重要的意义。

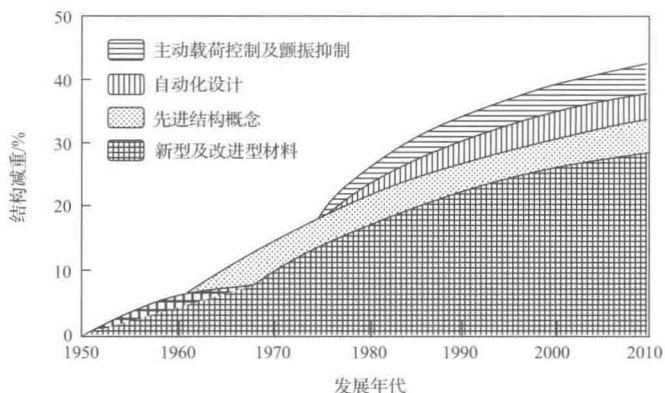


图 1-2 新型材料及改进型材料在军机结构减重中的重要性及发展趋势

高温材料是制约航空航天产品性能的另一类关键材料。飞机和发动机的发展对服役温度的需求如图 1-3 所示。由图可见,目前飞机蒙皮的最高温度达 1000℃ 以上,而发动机的工作温度则高达近 2000℃,不同的航空航天材料的耐温性如图 1-4 所示。由图可见,为了支撑航空航天产品提高工作温度的要求,许多新型材料如金属间化合物、陶瓷、碳-碳及各种复合材料正在加速发展之中<sup>[1,4]</sup>。

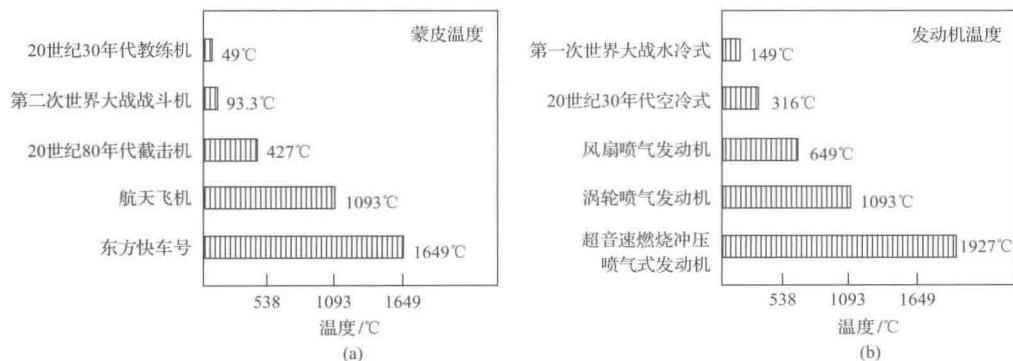


图 1-3 飞机和发动机发展对服役温度的需求

高性能航空航天结构材料对于减轻结构质量和提高飞行器的结构效率、服役可靠性及延长寿命具有极为重要的作用,是航空航天材料的主要发展趋势。航空航天结构材料的高性能主要是轻质、高强、高模、高韧、耐高温、耐低温、抗氧化、耐腐蚀等<sup>[3,5]</sup>。近来在航空航天产品设计中引入损伤容限设计的概念,意味着对材料的韧性要求更高了,有时宁可牺牲一点强度,也要确保韧性的要求,这是由于对航空航天产品已发展到高可靠性、高耐久性和长寿命的要求。对航空航天飞行器的动力装置来说,特别重要的是耐高温、耐低温、抗氧化、耐腐蚀等性能要求,这几乎是结构材料中最高性能要求。高性能材料在新一代飞行器动力装置中起到了关键性的作用,如航空发动机中的单晶涡轮叶片材料和航天固体发动机中的高能推进剂材料等。



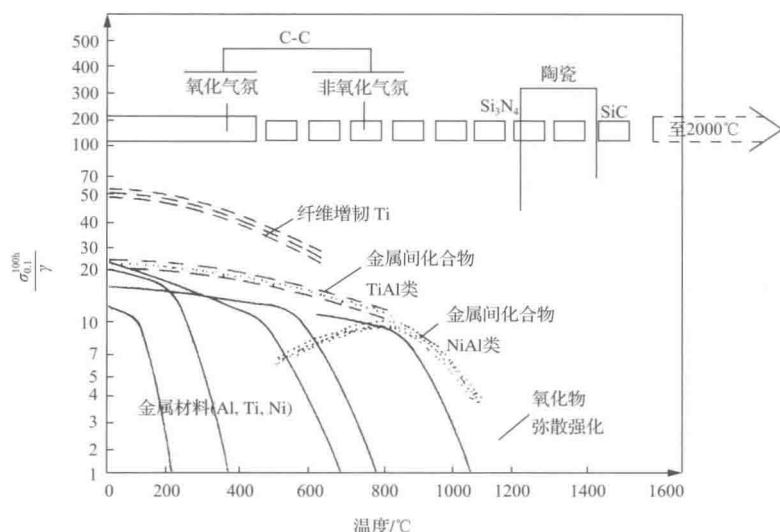


图 1-4 航空航天材料的耐温性

航空发动机相当于飞机的心脏,是确保飞机使用性能、可靠性和经济性的决定因素。与第四代战斗机配套的推重比 10 发动机已投入广泛使用,如美国的 F119 发动机已装备了 F22 战斗机。民用大推力涡轮风扇发动机如 GE90、PW4073/4084、Trent800 等为 B777、A380 等大型宽体客机所选用。提高推重比或功率重量比、提高涡轮前进口温度、提高压气机平均级压比和降低油耗是高性能军用发动机的发展方向。与军用发动机相比,民用发动机的推重比虽增加不大,但其涡轮前温度、涵道比和总增压比的增加,已促使耗油率大幅度下降,仅为军用发动机的  $1/4 \sim 1/3$ 。发达国家航空发动机的产值已占整个航空工业产值的  $25\% \sim 30\%$ ,其性能水平很大程度上依赖于高温材料的性能水平,如新型高温合金和高温钛合金、金属间化合物及其复合材料、热障涂层材料、金属基复合材料、陶瓷基和碳-碳复合材料等<sup>[1,2,4,5]</sup>。在一台先进发动机上,高温合金和钛合金的用量分别要占发动机总结构质量的  $55\% \sim 65\%$  和  $25\% \sim 40\%$ 。发动机材料的发展目标和重点见表 1-1。

表 1-1 航空发动机对航空材料发展的需求目标和重点

特点	对材料要求	重点发展的材料与技术
1. 发动机主要特征参数 压气机出口温度: 908K (635℃) 高压涡轮进口温度: 1988K (1751℃) 加力燃烧室温度: 2050K (1777℃) 压气机总增压比: 25	1. 某些部件必须采用轻质高温材料 2. 大量采用高温、轻质、高比强、高比模材料 3. 需要大量钛合金构件 4. 材料抗氧化能力要求更高 5. 密封、隔热、润滑、轴承要求更高	1. 单晶叶片材料 2. 粉末冶金涡轮盘材料 3. 金属基复合材料 4. 高温高分子材料及其复合材料 5. 高温、高强钛合金 6. 金属间化合物及其复合材料 7. 高温无机材料 8. 高温密封、润滑、隔热材料
2. 寿命要求 冷端部件: 4000h 热端部件: 2000h		9. 超高温结构复合材料(陶瓷、碳-碳)及难熔金属材料 10. 高温材料损伤容限数据测试及方法
3. 采用推力矢量喷管		11. 材料无损检测技术