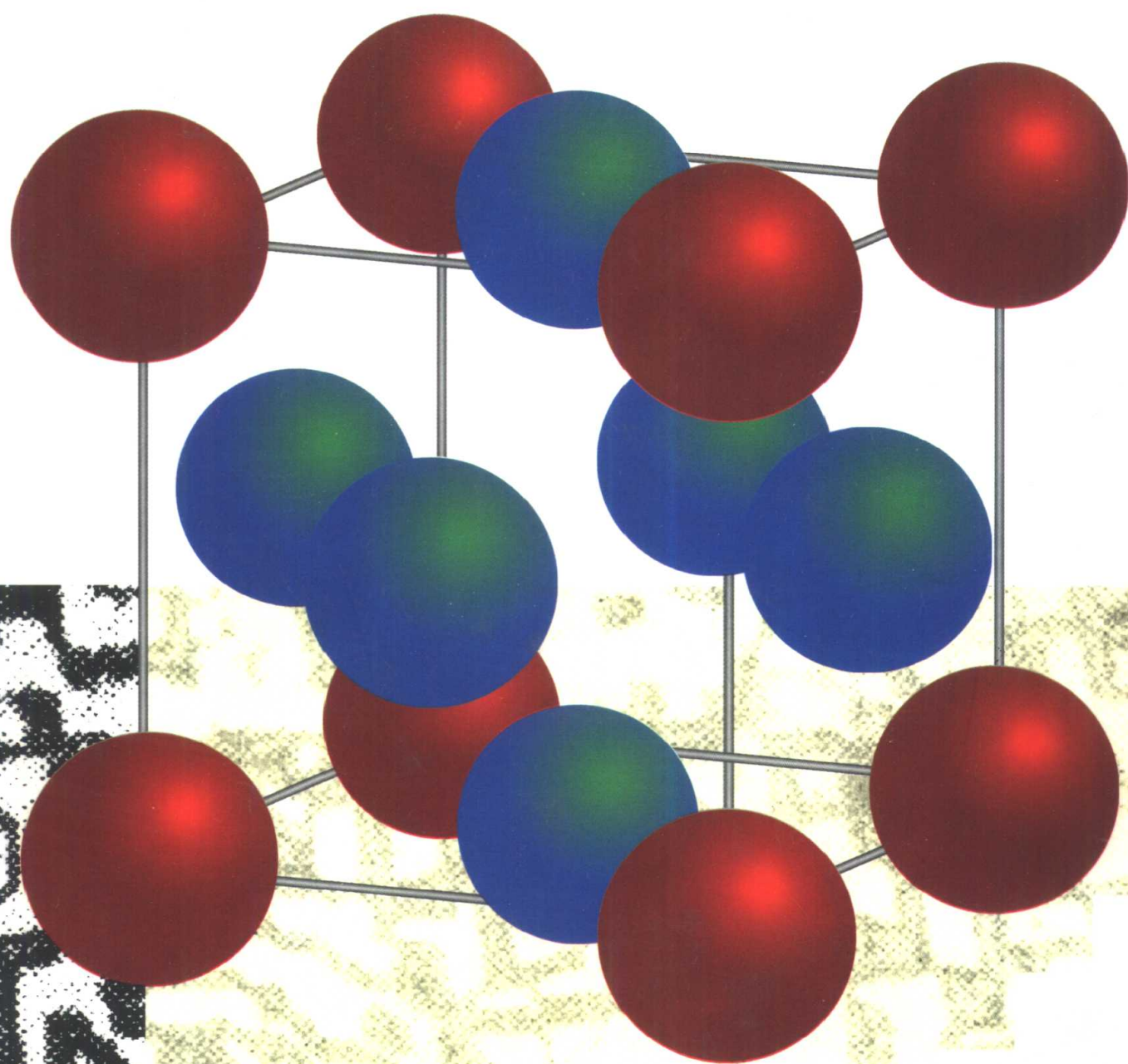




张永刚 韩雅芳 陈国良 郭建亭 万晓景 冯涤 主编

金属间化合物结构材料

STRUCTURAL INTERMETALLICS



国防工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

金属间化合物结构材料

张永刚 韩雅芳
陈国良 郭建亭 主编
万晓景 冯 涤

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

金属间化合物结构材料/张永刚等主编. —北京:国防工业出版社, 2001.1

ISBN 7-118-02321-3

I. 金… II. 张… III. 金属间化合物结构-金属材料-基本知识 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 26932 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 67¼ 1558 千字

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:180.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《金属间化合物结构材料》

编 委 会

(按姓氏笔画为序)

主任委员 师昌绪

副主任委员 石力开 仲增墉 陈昌麒 林栋梁

委 员 万晓景 叶恒强 冯 涤 孙祖庆

张永刚 陈国良 周 廉 郭建亭

黄伯云 韩雅芳 靳达申

《金属间化合物结构材料》
编写人员名单
(以姓氏笔画为序)

上 卷 万晓景 田文怀 李建国 李铁藩
吴维蚩 张永刚 陈昌麒 陈国良
林均品 林栋梁 孟长功 顾有松
高克玮 褚武扬

下 卷 冯 涤 邢占平 曲士昱 曲恒磊
朱玉斌 仲增墉 刘 咏 孙祖庆
李孙华 李世琼 李 辉 杨王玥
杨 锐 邹敦叙 张卫军 张永刚
张津徐 张 继 陈世朴 陈国良
周科朝 周 廉 胡庚祥 郭建亭
黄伯云 黄原定 曹春晓 崔传勇
韩光炜 韩雅芳

序 言

金属间化合物作为功能材料已得广泛应用,如化合物半导体、超导体、储氢材料、记忆合金及磁性材料等。作为结构材料,因其存在难以克服的缺点,如脆性和环境敏感性等而长期停留于学术研究阶段,未能在工业应用中发挥应有的作用。到 20 世纪 70 年代,人们发现通过合金化(或添加某些微量元素),适当的形变或相变,可以使某些金属间化合物在一定程度上克服上述困难,从而引发了全世界科技人员的研究与开发热潮。因为金属间化合物作为结构材料具有十分诱人的特点:首先,由于其键合力强,可用于比合金更高的工作温度;其次,在很多情况下,金属间化合物具有比合金更高的比强度、比刚度及抗氧化能力。所以,在合金化程度已接近极限的情况下,材料科学工作者的注意力便转向金属间化合物。在 90 年代除了出版《INTERMETALLIC COMPOUNDS》及创刊《INTERMETALLICS》杂志外,在世界范围内每年都不只一次地有国际会议召开;仅在我国就先后召开了三次国际性专业会议。这一方面说明我国从事金属间化合物研究与开发的科技人员较多,也说明我国在这方面取得了令人瞩目的成果,特别是我国已出现了一些可供实用的材料,是值得我们骄傲的。

尽管国际上已出现权威性专著和每年成百上千篇的论文发表,并不能满足我国广大科技人员、教师和学生的要求:一是我国图书馆的藏书量不足,很少人能接触到这些原版书刊,特别是以外文为主的这些文献,对很多读者存在很大困难;二是国内很难找到对金属间化合物系统性的论著,特别对我国在这方面的成就很难有一个全面的了解。为此,韩雅芳研究员等希望我出面把我国从事金属间化合物研究与开发的学科带头人组织起来,共同编写一本《金属间化合物结构材料》,由国防工业出版社出版。经过两年的努力,终于完成了 150 多万字的一本专著。本书分上、下两卷,上卷主要阐述了金属间化合物的基本原理及作为结构材料所涉及的物理、化学与力学性质。下卷则较全面地反映了金属间化合物结构材料 20 年来的研究成果,特别强调了我国学者在这方面的重要贡献。本著是当前由我国专家共同编写的唯一的一本有关金属间化合物结构材料的专著。这本书的出版,不但对我国金属间化合物的研究与开发有促进作用,而且对金属间化合物成果的推广和正确使用也会有很大帮助。在此,我特别感谢各位主编及作者所付出的辛勤劳动,感谢国防工业出版社杜豪年责任编辑为本著的出版所做的努力。

师昌绪
2000.4.1

前 言

金属间化合物是由两种或两种以上金属元素或金属元素与类金属元素按照一定的原子比组成的化合物,通常构成化合物的原子有序地排列在两个或两个以上亚点阵中,构成一个超点阵。原子间的键合不再仅仅是金属键,而且也包括离子键和共价键。金属间化合物在键合和结构上的这些特点使其具有完全不同于组成元素金属的特性,从而很早以来就得到了广泛重视。自 70 年代以来,某些具有优良高温性能的金属间化合物,如 Ni-Al、Ti-Al、Fe-Al 和 Mo-Si 等系中的化合物,不仅在基础理论上,而且在开发应用方面得了广泛地研究,形成了一个世界范围内的研究开发热潮,导致了一种高技术新材料的兴起,即金属间化合物结构材料(Structural Intermetallics)。它特有的优异的高温强度和刚性预示着其在航空、航天和汽车等高技术领域的广泛应用前景,同时它的低温脆性又阻碍其推广应用,这一矛盾吸引了世界范围内广大科技工作者的联合攻关,并取得了巨大进展。

随着科研工作的广泛开展和深入,有关金属间化合物的科技文献迅速膨胀。但这些文献大都出现在学术期刊或会议文集中,还缺少即包括基本原理,又包括最新研究成果的系统性、综合性书籍,使从事金属间化合物研究的科技工作者,特别是那些初步该领域的人们,包括大量在校研究生,面对大量文献而茫然不知所措。面对这一形势,美国科学家 Westbrook 和 Fleischer 自 1993 年起组织世界范围内的科学家撰写了两卷本的《INTERMETALLIC COMPOUNDS—Principles and Practice》一书,并于 1995 年出版。共有 100 多位科学家参加了编写工作。该书是自 1967 年由 Westbrook 等人编写的金属间化合物专著后 30 年以来的又一次综合性力作。该书从 1967 年版的 27 章扩展到目前的 75 章,反映出过去 30 年中该领域的活跃和富有成果。然而,虽然该书的出版为我们提供了丰富的学习素材,它还不完全适合我国学者,特别是那些初涉该领域的科技工作者学习参考。其原因有两个方面。其一,该书用英语出版,共计 1800 多页,我国科技工作者阅读需耗费大量时间。其二,该书由国外学者写成,尽管一定程度上反映了我国学者对该领域的贡献,但相对于我国科技工作者的实际贡献,该书是远远不够的。因此,非常有必要组织我国学者撰写一本即能满足我国科技工作者参考学习的需求,又能充分反映我国学者在这一领域取得的成果的专门性著作,同时填补我国在该领域的书籍空白。正是基于这一现状和背景,自 1997 年 4 月以来,经过多方协商和在国防工业出版社杜豪年编辑的帮助下,我们开始计划并着手组织我国金属间化合物研究领域的专家学者对我国近二十年来,特别是过去十年中在金属间化合物研究领域在理论和实践两个方面取得的成果进行总结,在充分吸收国外研究成果的基础上撰写一本高水平的专著。其基本设想和宗旨是,包括基本原理和应用实践两个方面,以满足那些渴望这方面知识的初学者的需求;同时将包括各个方面的最新研究成果和进展,以便为本领域的科技工作者了解他们研究方向之外的方面提供基本的参考素材。此外也希望为相关领域的科技工作者(如航空发动机设计师)提供一本

具有较高参考价值的学习参考书。这就是我们现在奉献给读者的两卷本专著。

鉴于金属间化合物结构材料仍处在一个不成熟的、快速发展的时期,内容新,范围广,采取国际上惯用的邀请各方面专家共同撰写最为适宜。本书邀请的撰写专家是经过再三筛选,几乎包括了该领域各个方面的最优秀的专家学者。本书的主编都是我国目前工作在金属间化合物研究领域最前沿的专家,上卷的主编来自于高等院校,而下卷的主编则来自于科研院所。为了保证本书按时、高水平、高质量的出版发行,组成了由来自国内从事金属间化合物研究的主要单位专家组成的编委会,师昌绪先生任编委会主任委员。我们特别感谢师昌绪先生对本书的编写和出版所给予的自始至终的关怀和为本书所写的序。

本书分上下卷共 25 章。上卷 10 章主要介绍与金属间化合物结构材料原理相关的基础知识;下卷 15 章则介绍了主要金属间化合物结构材料及其加工工艺的研究成果。全书基本反映了该领域国内外最新研究成果和发展趋势。上卷绪论和第 2,3 章由林栋梁撰写;第 1 章由田文怀、顾有松、孟长功撰写;第 4 章由陈国良、林均品撰写;第 5,14 章由张永刚撰写;第 6 章由褚武扬、高克玮撰写;第 7 章由陈昌麒撰写;第 8 章由万晓景撰写;第 9 章由李铁藩、吴维叟撰写;第 10 章由李建国撰写;下卷绪论由仲增墉撰写;第 11 章由韩雅芳、邢占平撰写;第 12 章由冯涤、韩雅芳、李辉、郭建亭、韩光炜、李孙华撰写;第 13 章由郭建亭撰写;第 15 章由陈国良、邹敦叙、张卫军、张继撰写;第 16 章由曹春晓、杨锐、李世琼撰写;第 17 章由张津徐、陈世朴、胡庚祥撰写;第 18 章由孙祖庆、黄原定、杨王玥撰写;第 19 章由韩雅芳、曲士昱撰写;第 20 章由周廉、曲恒磊、朱玉斌撰写;第 21 章由郭建亭、崔传勇撰写;第 22 章由邢占平、韩雅芳撰写;第 23 章由李世琼撰写;第 24 章由黄伯云、周科朝、刘咏撰写;第 25 章由崔传勇、郭建亭撰写。

我们特别感谢参加本书编写工作的全部编写人员,正是他们以饱满的热情和辛勤的工作才保证了本书及时地、高质量地与读者见面。同时我们也感谢编写人员所在单位所给予的积极支持。王天民、文矛、郝士民、周自强、吴建生应邀参加了本书的审阅工作,在此表示衷心地谢意。此书还得到国家 863 高技术新材料领域专家委员会和国家自然科学基金委员会的资助,在此一併表示衷心的感谢。

我们要特别感谢国防工业出版社的杜豪年编辑,他为本书的出版付出了巨大的心血和劳动,正是他的热情支持和大力的帮助,本书才得以顺利出版发行。本书得到了国家科学技术著作出版基金的资助,在此深致谢意。

由于时间和水平的限制,书中一定存在着不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

最后,希望本书的出版将进一步促进我国金属间化合物结构材料研究的蓬勃发展。

编著者

2000 年 9 月

内 容 简 介

本书分上下两卷。上卷较全面地阐述了金属间化合物的基本原理及作为结构材料所具有的基本物理、化学和力学性能。下卷则较全面反映了金属间化合物结构材料研究领域在过去二十年中取得的成果,从材料、工艺和工程应用等几方面阐述了主要进展。

上卷包括十章。深入细致地阐述了金属间化合物的键合特征、晶体结构和特有的晶体缺陷结构及其行为特点。进一步讨论了有序-无序相变及其相关的相图、原子扩散和相稳定性问题。用了较大篇幅讨论了金属间化合物的塑性形变、断裂、疲劳和蠕变行为和特点。针对金属间化合物对环境特有的敏感性特点,分析阐述了环境效应及高温氧化和腐蚀特性。最后,简要讨论了金属间化合物的电、磁、热和弹性等物理性能,以便使读者对金属间化合物的特性有一个较全面的了解。上卷为读者阅读下卷提供了基础理论知识。

下卷包括十五章,全面总结了过去二十年在主要金属间化合物合金系,如Ni-Al、Ti-Al、Fe-Al、硅化物和难熔金属间化合物等研究方面取得的进展和成果,特别强调了我国学者的突出贡献。对每一合金系的合金化和相变规律、性能特点及与显微组织的关系,相应的加工工艺和工程应用现状及前景,都做了较全面的阐述。此外,针对金属间化合物难加工的特点,进一步介绍了熔铸、变形加工、粉末冶金和复合材料加工等加工工艺和技术。

本书是目前由全国有关专家学者共同参与编写的唯一一本关于金属间化合物结构材料的系统性、综合性专著。本书可供从事金属间化合物研究的科技工作者和其他从事新材料研究和开发的工程技术人员阅读,也可供其他相关专业从事高技术新材料工程应用的工程技术人员学习参考。同时,本书也可作为大学高年级学生和研究生学习参考书。

目 录

上卷 原理

绪论	2
第一章 键合与结构稳定性	8
1.1 金属间化合物稳定性的电子理论	8
1.1.1 简介	8
1.1.2 合金有序化的电子结构方法	11
1.1.3 合金的基态性质	20
1.1.4 有限温度下合金的稳定性	22
1.1.5 应用	25
1.1.6 结论	32
1.2 第一性原理的计算	32
1.2.1 金属间化合物内聚能的物理基础	33
1.2.2 第一性原理计算方法	36
1.2.3 金属间化合物的第一性原理计算结果	38
1.2.4 小结	55
1.3 晶体形态和键合表征	56
1.3.1 引言	56
1.3.2 晶体习性的表征	58
1.3.3 晶体习性的几何分类	68
1.3.4 结论	70
1.4 弹性性质的第一性原理计算	71
1.4.1 引言	71
1.4.2 理论基础和计算过程	72
1.4.3 弹性系数的计算	76
1.4.4 计算结果	81
1.4.5 小结	86
1.4.6 附录	87
1.5 热力学性能与键合特征	89
1.5.1 引言	89
1.5.2 基本关系	90
1.5.3 热力学状态函数的确定及其与相平衡的关系	91
1.5.4 金属间化合物稳定性的一般概念	97

1.5.5 Hume-Rothery(H-R)相的稳定	98
1.5.6 Laves 相	106
1.5.7 金刚石键化合物	109
1.5.8 Zintl 相	109
1.5.9 Ni_2In 和 NiAs 化合物	112
1.5.10 Ni_2Al_3 化合物	112
1.5.11 相图与生成焓	114
1.5.12 偏原子体积和偏生成焓之间的关系	116
1.5.13 热容和多形转变	118
1.5.14 有序-无序现象	119
1.5.15 金属间化合物的生成熵	120
1.5.16 金属间化合物和溶解熵	121
1.5.17 三元金属间化合物的热力学性质	122
1.5.18 小结	123
1.6 键合特征与电荷密度及环境脆性	124
1.6.1 电荷密度与键合特征	124
1.6.2 环境脆性与键合特征	130
1.6.3 小结	135
参考文献	135
第二章 晶体结构	138
2.1 长程有序结构(超结构)	139
2.1.1 无序结构为 A1 有序化后可能出现的结构	139
2.1.2 无序结构为 A2 有序化后出现的超结构	140
2.1.3 无序结构为 A3 有序化后可能出现的结构	141
2.1.4 长周期超点阵或称反相超点阵, 亦称 CuAu II 结构	141
2.2 典型铝化物和硅化物的晶体结构	142
2.2.1 Ni_3Al 及 NiAl 的晶体结构	142
2.2.2 Fe_3Al 及 FeAl 的晶体结构	143
2.2.3 Ti_3Al , TiAl 和 TiAl_3 的晶体结构	144
2.2.4 Ti_5Si_3 的晶体结构	145
2.2.5 MoSi_2 型相的晶体结构	147
2.3 拓扑密排相(TCP 相)的晶体结构	149
2.3.1 TCP 相晶体结构特征	149
2.3.2 $\text{Cr}_3\text{Si}(\beta\text{-W})$ 结构	154
2.3.3 Laves 相晶体结构	156
2.3.4 σ 相晶体结构	163
参考文献	166
第三章 晶体缺陷	168
3.1 点缺陷	168

3.1.1	L1 ₂ 超结构的有序金属间化合物	169
3.1.2	B2 超结构的有序金属间化合物	172
3.1.3	L1 ₀ 超结构的有序金属间化合物	177
3.2	超点阵位错	179
3.2.1	反相畴界和反相畴结构	180
3.2.2	L1 ₂ 结构中的超位错	181
3.2.3	L1 ₀ 超结构中的位错	184
3.2.4	B2 结构中的位错	191
3.2.5	DO ₃ 结构中的位错	193
3.2.6	DO ₁₉ 结构中的位错	195
3.3	晶界结构	195
3.3.1	L1 ₂ 合金的晶界结构	196
3.3.2	NiAl 中的晶界结构	200
	第三章附录:金属间化合物中反相畴界能	205
	参考文献	209
第四章	金属间化合物的相图、相结构与相变	212
4.1	含有金属间化合物的相图	212
4.1.1	含有金属间化合物的二元相图	212
4.1.2	含有金属间化合物的三元相图	218
4.1.3	金属间化合物的伪二元及伪三元相图	223
4.2	金属间化合物的相结构	226
4.2.1	金属间化合物相的特性与分类	226
4.2.2	面心立方结构的有序衍生相结构	231
4.2.3	密排六方结构的有序衍生相结构	234
4.2.4	体心立方结构的有序衍生相结构	235
4.2.5	TCP 相的相结构	237
4.3	金属间化合物相的结构稳定性	243
4.3.1	化合物的相形成图和结构图	243
4.3.2	亚稳相分析	251
4.3.3	合金化与相结构稳定性	254
4.3.4	形变诱导相结构变化	256
4.4	有序相的有序无序转变	260
4.4.1	有序无序相变理论基础	260
4.4.2	多体势作用下的二元系有序无序转变	261
4.4.3	连续有序化与合金元素的作用	265
4.4.4	有序无序转变过程动力学	267
4.5	金属间化合物的固态相变	269
4.5.1	马氏体相变及形状记忆效应	269
4.5.2	贝氏体转变	272

4.5.3 片层状组织和魏氏组织的形成	276
4.5.4 块状组织的形成	277
参考文献	278
第五章 塑性形变与塑性	279
5.1 引言	279
5.2 塑性形变机理	280
5.2.1 位错及其分解	280
5.2.2 滑移系与位错心核结构影响	286
5.2.3 孪生	294
5.3 强度与流变应力	300
5.3.1 屈服反常现象	300
5.3.2 屈服反常现象的微观机理	304
5.3.3 高温强度与蠕变	309
5.3.4 偏离化学计量比的影响	309
5.3.5 晶粒尺寸的影响	311
5.3.6 第二相弥散强化	312
5.4 塑性与脆性	315
5.4.1 影响塑性的各种因素	315
5.4.2 晶界脆性	319
5.4.3 环境与氢脆	321
5.4.4 改善塑性的措施	321
5.5 小结	323
参考文献	324
第六章 断裂	326
6.1 断裂过程的位错理论	326
6.1.1 微裂纹形核方式	326
6.1.2 位错发射和无位错区	328
6.1.3 微裂纹形核的位错理论	332
6.1.4 韧-脆转变的位错理论	335
6.2 金属间化合物的断裂与韧化	337
6.2.1 金属间化合物的断裂特征	337
6.2.2 金属间化合物的脆性原因	345
6.2.3 金属间化合物的韧化方法	348
参考文献	353
第七章 蠕变与疲劳	356
7.1 金属间化合物的蠕变行为	356
7.1.1 $L1_2$ 型结构金属间化合物的蠕变行为	356
7.1.2 $B2$ 型结构金属间化合物的蠕变行为	360
7.1.3 $L1_0$ 型结构金属间化合物的蠕变行为	364

7.1.4	DO ₁₉ 型结构金属间化合物的蠕变行为	367
7.2	金属间化合物的疲劳行为	368
7.2.1	L1 ₂ 型结构金属间化合物的疲劳行为	368
7.2.2	B2型结构金属间化合物的疲劳行为	370
7.2.3	L1 ₀ 型结构金属间化合物的疲劳行为	372
7.2.4	DO ₁₉ 型结构金属间化合物的疲劳行为	374
	结束语	376
	参考文献	376
第八章	金属间化合物的环境脆性	378
8.1	体心立方型金属间化合物的环境氢脆	378
8.1.1	FeAl 金属间化合物的环境脆性	378
8.1.2	Fe ₃ Al 金属间化合物的环境脆性	380
8.2	面心立方型金属间化合物的环境氢脆	387
8.2.1	Ni ₃ Al 的环境脆性	387
8.2.2	Co ₃ Ti 的环境氢脆	394
8.2.3	Ni ₃ Si 的环境氢脆	398
8.2.4	(Co, Fe) ₃ V 的环境氢脆	399
8.2.5	Ni ₃ Fe 的环境氢脆	399
8.3	Ti ₃ Al, TiAl 的环境氢脆	400
8.3.1	Ti ₃ Al	400
8.3.2	TiAl	402
8.4	金属间化合物在氢气中的脆化	403
8.5	金属间化合物室温环境氢脆机理	407
8.5.1	表面反应	408
8.5.2	氢的扩散	411
8.5.3	氢脆机理	412
8.6	金属间化合物的中温脆性	413
8.6.1	L1 ₂ 型合金的中温脆性	414
8.6.2	Ti ₃ Al 基合金的高温脆性	417
8.6.3	中温脆性机理	419
	结束语	420
	参考文献	421
第九章	高温氧化与水溶液腐蚀	423
9.1	高温氧化的一般概念	423
9.1.1	高温氧化的定义	423
9.1.2	高温氧化的基本过程	425
9.1.3	影响抗高温氧化性能的主要因素	425
9.1.4	高温氧化的试验方法	426
9.2	高温氧化的基本概念	430

9.2.1 氧化热力学基本概念	430
9.2.2 氧化动力学基本概念	433
9.3 Ti-Al 系高温氧化	438
9.3.1 Ti-Al 系与通常高温合金氧化有基本差别	440
9.3.2 TiAl 系的恒温氧化	441
9.3.3 TiAl 的循环氧化	443
9.3.4 氮对 TiAl 氧化行为的影响	443
9.3.5 TiAl 氧化期间贫 Al 区及微结构	443
9.3.6 合金元素对 TiAl 氧化行为的影响	444
9.3.7 预氧化处理对 TiAl 氧化行为的影响	445
9.3.8 Ti-Al 系工程合金的高温氧化行为	446
9.4 Ni-Al 系高温氧化	448
9.4.1 Ni_3Al	450
9.4.2 NiAl	454
9.5 Fe-Al 系高温氧化	457
9.6 硅化物的高温氧化	460
9.6.1 MoSi_2 的氧化	461
9.6.2 MoSi_2 的 pest 效应	462
9.6.3 TiSi_2 的氧化	463
9.7 金属间化合物基复合材料的氧化	464
9.8 金属间化合物的水溶液腐蚀	467
9.8.1 腐蚀基本原理与测量方法	467
9.8.2 铁铝化合物	470
9.8.3 镍铝化合物	475
9.8.4 钛铝化合物	479
参考文献	480
第十章 物理性能(电、磁、热和弹性)	482
10.1 电学行为	482
10.1.1 引言	482
10.1.2 金属中的电导	483
10.1.3 金属间化合物的电导	486
10.1.4 小结	498
10.2 磁性原理	499
10.2.1 引言	499
10.2.2 基本磁原理	500
10.2.3 磁性种类	501
10.2.4 Fe-Al 系、Ti-Al 系和 Ni-Al 系金属间化合物的磁特性	504
10.3 弹性	510
10.3.1 引言	510

10.3.2 单晶体的弹性常数	510
10.3.3 单晶体弹性的各向异性	514
10.3.4 多晶体金属间化合物的弹性模量	519
10.3.5 弹性模量的特征	522
10.3.6 小结	529
10.4 热效应	529
10.4.1 引言	529
10.4.2 热容	531
10.4.3 热膨胀	534
10.4.4 热导率	538
10.4.5 热学特性的实用意义和结论	542
参考文献	543

下卷 材料与工艺

绪论	546
第十一章 Ni-Al 二元系及其化合物	551
11.1 Ni-Al 二元系中各种相的形成及转变规律	551
11.2 典型 Ni-Al 化合物的晶体结构和性能特点	556
11.2.1 NiAl	556
11.2.2 Ni ₃ Al	556
11.3 Ni-Al 系化合物研究开发和工程应用的现状与前景	557
参考文献	558
第十二章 Ni ₃ Al 及其合金	560
12.1 Ni ₃ Al 的晶体结构和晶体缺陷	560
12.2 单晶 Ni ₃ Al 的变形与断裂行为	563
12.2.1 反常强度—温度关系	563
12.2.2 流变应力非对称性及循环硬化行为	566
12.2.3 室温及高温变形行为	568
12.3 合金元素对 Ni ₃ Al 变形行为和屈服现象的影响	572
12.4 Ni ₃ Al 晶界脆性及其改善	582
12.4.1 化学当量成分对 Ni ₃ Al 晶界结构及断裂行为的影响	582
12.4.2 硼对 Ni ₃ Al 的强韧化作用	586
12.4.3 锆对 Ni ₃ Al 的强韧化作用	589
12.4.4 镁和稀土对 Ni ₃ Al 的强韧化作用	595
12.4.5 Ni ₃ Al 合金的环境脆性	596
12.5 Ni ₃ Al 合金抗氧化腐蚀行为与抗汽蚀性能	599
12.5.1 Ni ₃ Al 合金抗氧化腐蚀行为	599
12.5.2 Ni ₃ Al 合金抗汽蚀性能	603
12.6 Ni ₃ Al 工程化合金	604

12.6.1 IC 系列合金	604
12.6.2 定向凝固 Ni_3Al 基合金 IC6	610
12.6.3 MX246 铸造 Ni_3Al 基合金	615
12.7 Ni_3Al 基合金生产工艺	619
12.7.1 真空冶炼	619
12.7.2 Ni_3Al 非真空感应熔炼和重熔	621
12.7.3 Ni_3Al 基合金铸造工艺与技术	622
12.8 Ni_3Al 基合金应用前景展望	624
12.8.1 Ni_3Al 基高温结构材料	624
12.8.2 Ni_3Al 基复合材料	627
参考文献	630
第十三章 NiAl 及其合金	632
13.1 物理性能	632
13.1.1 NiAl 的电子结构与成键特征	632
13.1.2 NiAl 的晶体结构与相的稳定性	633
13.1.3 NiAl 的熔点与密度	634
13.1.4 NiAl 的导热率与线膨胀系数	635
13.1.5 NiAl 的弹性模量与泊松比	636
13.1.6 NiAl 的电磁性质与热力学性质	637
13.2 化学性质	639
13.2.1 NiAl 的抗氧化性	639
13.2.2 NiAl 的抗热腐蚀性	640
13.3 力学性能	641
13.3.1 缺陷结构与形变机理对力学性能的影响	641
13.3.2 单晶 NiAl 及其合金的力学性能	642
13.3.3 多晶 NiAl 及其合金的力学性能	652
13.3.4 颗粒增强 NiAl 复合材料的力学性能	660
13.3.5 定向凝固 NiAl 基共晶合金的力学性能	668
13.3.6 纳米晶 NiAl 及其复合材料的力学性能	671
13.4 NiAl 合金的制备方法	674
13.4.1 单晶制备	674
13.4.2 粉末冶金	675
13.4.3 燃烧合成法	676
13.4.4 机械合金化方法	676
13.5 改善 NiAl 合金的途径	677
13.5.1 宏观合金化	677
13.5.2 微观合金化	678
13.5.3 微观组织调整	679
13.6 NiAl 合金的应用	680