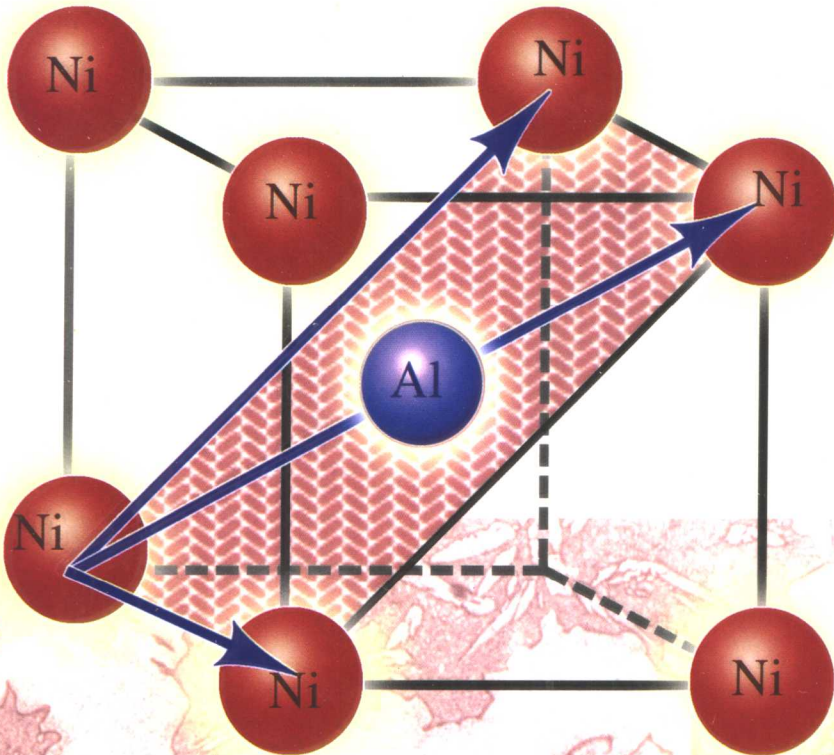


ORDERED INTERMETALLIC COMPOUND NiAl ALLOY

郭建亭 著

有序金属间化合物镍铝合金



有序金属间化合物镍铝合金

ORDERED INTERMETALLIC COMPOUND NiAl ALLOY

郭建亭 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者及作者领导的研究小组,在长达16年的对NiAl合金进行研究并取得重大成果的基础上,经过总结、浓缩和提高而撰写成的。

本书系统介绍了NiAl的电子结构与成键特征、晶体结构与缺陷、相图与相变、形变与断裂、蠕变与疲劳等基础研究方面的科研成果,同时也系统介绍了NiAl的合金化、物理化学性能、超塑性行为与机理等应用基础研究方面的科研成果,最后还系统介绍了NiAl单晶合金、内生颗粒增强NiAl基复合材料、NiAl共晶合金、纳米晶NiAl及其纳米复合材料、NiAl合金的制备方法和应用等应用研究方面的研究成果。

本书是目前世界上惟一一本介绍有序金属间化合物NiAl合金研究成果的专著。

本书可供从事新材料研究和开发的科技人员和工程技术人员阅读和参考,也可作为高等院校材料科学与工程专业的教师、研究生和高年级学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

有序金属间化合物镍铝合金/郭建亭著. —北京: 科学出版社, 2003
ISBN 7-03-012501-0

I. 有… II. 郭… III. 镍铝合金—研究
IV. TG146

中国版本图书馆CIP数据核字 (2003) 第104718号

责任编辑:王红萍 侯沈生 责任校对:袁海滨
责任印制:任继革 封面设计:张祥伟

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>

沈阳新华印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年12月第一版 开本:16(787×1092)
2003年12月第一次印刷 印张:45 3/4
印数:1—3 000 字数:1080千字

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



NiAl 合金涡轮叶片毛坯照片



本书作者简介

郭建亭 中国科学院金属研究所研究员，中国科学院研究生院教授，博士生导师，男，汉族，1938年5月20日生于湖南省汉寿县，1962年毕业于北京钢铁学院(现北京科技大学)高温合金专业，毕业后一直在中国科学院金属研究所工作。1981年10月至1982年11月，以访问教授身份在意大利国家科学技术委员会(CNR)米兰特种金属研究所(ITM)工作和进修。长期担任高温合金研究室副主任、主任达14年，现任高温合金和金属间化合物研究组组长，主持国家重大科研项目多项，同时兼任中国航空学会金属材料专业委员会主任，中国金属学会高温合金学术委员会副主任，辽宁省材料学会副理事长，兰州大学客座教授，大连理工大学兼职教授，辽宁工学院和沈阳化工学院名誉教授，英国诊断工程学会终身高级会员。

参加工作41年来一直长期稳定地从事高温结构材料研究。作为课题负责人或主要科研骨干先后研制成功10多种合金，已用于国防建设和国民经济发展部门。其中有航空或舰艇发动机用铁基高温合金GH135、GH35A、GH984、GH761、GH901和GH903，先进航空发动机用定向凝固镍基高温合金DZ17G、镍基合金K4169和钴基高温合金K640S，耐热耐磨耐蚀合金602RE、FeCrSi和604。目前正在

研究的有先进燃气轮机用涡轮叶片和导向叶片抗热腐蚀高温合金 K35、K44、K46、K52、GH413 和涡轮盘用难变形高温合金 GH698 和 GH742 等, 以及长程有序金属间化合物 NiAl、Ni₃Al、FeAl、Fe₃Al 和 TiAl 等。先后获国家、院部和省级科技成果奖 10 多项。其中“GH135 合金”制成涡轮盘装于两种歼击机在外场正常使用的有 1000 多架, 是我国研制成功的第一个铁基涡轮盘合金, 研制时间最长, 数据最丰富, 理论研究深入, 使用品种多, 使用量大, 于 1978 年获全国科学大会重大科研成果奖; 系统研究了硼、碳、硅、硫、钇、镧、铈和镁等微量元素对 GH135、GH35A、K24、801 和 310 等合金力学性能和抗氧化性能的影响规律及其作用机理, “该成果获得了显著的经济效益和社会效益”, “对我国高温合金进一步发展和合金质量水平的提高有积极作用”, “高温合金中微量元素的控制及其作用研究”这一成果于 1986 年获冶金部科技进步奖一等奖, 1987 年获国家科技进步奖三等奖; 在 GH35 基础上, 应用正交设计方法, 通过研究确定了合金的最佳成分、最佳热处理制度和适合工业生产的各项工艺参数, 发展成一种新合金 GH35A, 用于“WJ5A1 发动机一级涡轮外环等 11 种零件, 于 1990 年获中国科学院科技进步奖一等奖, 1991 年获国家科技进步奖三等奖; “GH984 舰用锅炉过热器高温管材合金”, 长期组织稳定, 抗热腐蚀性能优异, 经过 10 年海上实际使用, 证明 GH984 高温合金管材是大型舰船用过热器的理想材料, 于 1992 年获中国科学院科技进步奖一等奖。还先后获得国家发明专利 4 项, 即一种铁镍铬基变形高温合金 (ZL90110284.9), 良好塑性的含镁铁铝合金 (ZL93110083.6), 一种定向凝固优质铸造镍基高温合金 (ZL95110023.8), 一种内生碳化钛弥散强化镍铝基合金 (ZL96115292.3)。

对高温合金和金属间化合物的基础和应用基础研究课题, 包括合金的强化与韧化, 合金元素的作用和相变, 蠕变、疲劳及其与环境的交互作用, 氧化、腐蚀与防护等开展了深入研究。先后获国家自然科学基金 5 项面上项目、1 项重点项目、1 项重大项目资助, 在高温合金和金属间化合物基础研究和应用基础理论研究方面取得创新性研究成果, 在国内外杂志和会议发表研究论文近 500 篇, 其中用英文发表 200 余篇(见附录), 如 Applied Physics Letters(1 篇),

Oxidation of Metals(1 篇), Acta Metallurgica et Materialia(3 篇), Inter-metallics(5 篇), Journal of Materials Research(5 篇), Metallurgica and Materials Transactions A(6 篇), Journal of Alloys and Compounds(5 篇), Scripta Metallurgica et Materialia(13 篇), Materials Science and Engineering A(9 篇), Materials Letters(18 篇), Materials Science and Technology(3 篇), Journal of Materials Science Letters(6 篇), 金属学报(118 篇)等, 通过 SCI 和 EI 检索, 引用次数达 1000 多次。出版专著(即此书)1 本, 主编或与他人合作出版专著 6 本(金属间化合物结构材料, 高温合金, 第八届全国高温合金论文集等)。

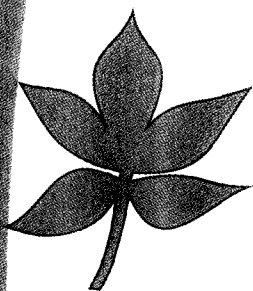
郭建亭研究员为我国国防建设以及高温合金和金属间化合物的发展及应用基础理论的提高和创新作出了突出贡献, 1992 年 10 月获中华人民共和国国务院颁发的政府特殊津贴及证书。

长期以来, 郭建亭研究员一直重视国际合作与国际学术交流, 从 1995 年至 2003 年与意大利国家科学技术委员会(CNR)米兰特种金属材料研究所(ITM)签订双边科技合作协议, 连续 3 个 3 年计划开展 NiAl、TiAl 和高温合金的组织结构与力学性能关系研究。双方参加长期(1 年)和短期(3 个月)双边科技交流的科技人员有 15 人次, 联合发表学术论文 40 余篇。并多次到意大利、比利时、法国、德国、英国、荷兰、奥地利、西班牙、瑞典、丹麦、俄罗斯等 21 个欧洲国家, 美国和加拿大等 2 个北美洲国家, 澳大利亚和新西兰等 2 个大洋洲国家, 南非和埃及等 3 个非洲国家和日本、韩国、以色列等 6 个亚洲国家参加国际会议和进行学术访问, 在国际会议上做特邀报告和发表论文 60 余篇。

在科研战线辛勤耕耘的同时, 为我国材料研究领域培养了一批优秀人才。他先后指导的博士后有 3 人, 培养博士研究生 33 人, 硕士研究生 22 人, 其中已获博士学位的有 20 人, 已获硕士学位的有 16 人, 先后到意大利、美国、日本、加拿大、德国、法国、比利时、新西兰、新加坡、以色列和韩国等国学习和工作的(含已回国)有 24 人次。在国内工作的大多已成为教授或副教授级高级人才, 在国民经济建设中发挥骨干作用或走上领导岗位。

贺 词

四十春科研耕耘硕果满园 二十秋言传身教桃李天下



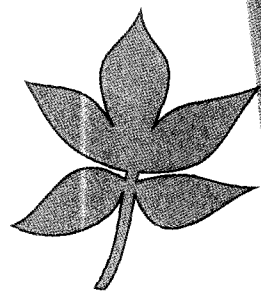
在《有序金属间化合物镍铝合金》一书出版之际，我们全体学生向本书作者、我们的恩师——郭建亭先生表示衷心祝贺。

郭建亭先生在高温材料领域辛勤耕耘40余载，无论在基础理论还是在实际应用方面都造诣深厚。《有序金属间化合物镍铝合金》一书凝聚了先生从1988年至今16年来从事金属间化合物研究的奉献与智慧，也记录了我们在先生指导下成长的历程。

先生宽阔的胸襟，坦荡无私的高尚情怀，不遗余力扶持学子们的长者风范深受每一个学子的爱戴。先生严谨的治学态度，渊博的学识，创新的思维，敏锐的眼光，常常带领我们走出科研道路上的迷津，领略成功的喜悦。对于在科学海洋中蹒跚学步的年轻学子们来说，一个高瞻远瞩循循善诱的导师意味着事业成功的一半。先生正是这样一位受人尊敬的从事材料科学研究的引路人，在先生的悉心指导与关怀下，一批批博士生和硕士生学有所成，走向全国，走向世界。先生指导的博士后有陈荣石、杜兴蒿和齐义辉等3人；博士研究生有孟长功、谷月峰、李刚、邢占平、刘志光、殷为民、吕刚、周兰章、姜东涛、盖伟、袁超、陈荣石、王铁利、齐义辉、廖鄂斌、周文龙、杨福宝、徐春梅、崔传勇、杜兴蒿、周健、任维丽、张光业、李玉芳、李云、肖林久、侯介山、肖旋、郭晓光、姚俊、高强、李虎田和淮凯文等33人，其中已获博士学位的有20人；硕士研究生有孙超、李辉、殷为民、金瓯、孙文儒、鲁玉祥、吕刚、周兰章、秦瑞平、魏标志、廖鄂斌、崔传勇、周健、夏东生、李玉芳、侯介山、张仕臻、方龙、姚俊、李志军、李友林和伍春兰等22人，已获硕士学位的有16人。先后到意大利、美国、日

本、加拿大、德国、法国、比利时、新西兰、新加坡、以色列和韩国等国家学习和工作的有 24 人次。在国内工作的大多已成为教授或副教授级高级人才，在国民经济建设中发挥骨干作用或走上领导岗位。

今年适逢郭建亭先生 66 华诞，我们衷心祝愿恩师生日快乐，身体健康。让我们携手共勉，勇于开拓，积极进取，创造更加灿烂辉煌的明天，不辜负先生对我们的殷切期望。



学生：

殷为民 周萍 袁超 任传勇 陈京石 壶长功 齐义辉
王在涛 复东升 吕刚 周健 王铁利 魏世忠 杨洁宗
曹海 姚立需 孙冠 李钢 李辉 曹峰 徐春梅
于越 李鄂斌 邢占平 金凤 谷明 周成
盖伟 杜兴蒿 李玉芳 张光业 任维丽 李云
肖林 侯介山 郭晓光 姚俊 李志军
张红臻 高强 肖璇 淮凯文 李虎田
李友林 任春兰

序 言

有序金属间化合物由于晶体结构长程有序以及金属键和共价键共存,因而具有一系列独特的优异性能,如熔点高、高温强度高、比刚度高、密度低以及抗氧化性能优异等,是一类很有应用前景的高温结构材料,可以填补高温合金与高温结构陶瓷材料之间使用温度的空白。

自20世纪70年代末发现微量硼可使 Ni_3Al 韧化以来,在全世界范围逐渐掀起了研究金属间化合物作为高温结构材料的热潮。人们的兴趣主要集中在最有实用价值和近期可能实用化的铝化物系列,其中 $\text{Ni}-\text{Al}$ 系和 $\text{Ti}-\text{Al}$ 系金属间化合物最受青睐,研究的焦点是提高高温强度和改善常温塑性。为此,各发达国家都投入了大量人力和物力开展深入研究。我国从“七五”期间开始,把金属间化合物高温材料列入“863”计划开展重点研究,同时,国家自然科学基金委员会先后受理了金属间化合物面上基金项目,并资助了重点和重大项目,开展基础理论研究,在“七五”和“八五”研究的基础上,“九五”期间将一些应用前景明朗的金属间化合物课题正式列入国家预研项目,开展应用研究。

长程有序金属间化合物 NiAl 是最受重视的铝化物之一。它的熔点高达 1638°C ,比一般镍基高温合金高 $300\sim 350^\circ\text{C}$,比 Ni_3Al 高 250°C , NiAl 合金的使用温度可望达到 1250°C 。而它的密度($5.86\text{g}/\text{cm}^3$)仅及镍基高温合金的 $2/3$,比 Ni_3Al 还轻 $1.64\text{g}/\text{cm}^3$,即使合金化,其密度也在 $6.0\text{g}/\text{cm}^3$ 左右,从而可有效地提高比强度,制作涡轮导向叶片或涡轮叶片预期可减重 $30\%\sim 40\%$ 。同时, NiAl 的导热率大,为一般镍基高温合金的 $4\sim 8$ 倍,可使零件温度梯度减小,热应力降低,冷热疲劳性能提高,可提高空心气冷叶片的冷却效率,这是涡轮导向叶片求之不得的良好物理性能。此外, NiAl 还具有优异的抗氧化性能,作为镍基高温合金的抗氧化涂层至今仍在广泛应用。当前,常温脆性和较低的高温强度是限制其实用化的主要障碍,

也是各国科学家研究的最主要的课题。

本书作者,中国科学院金属研究所郭建亭研究员,1962年从北京钢铁学院(现北京科技大学)毕业后,一直长期从事高温合金研究。1988年开始,除继续研究镍基高温合金涡轮叶片材料等课题外,还开始了Ni-Al系金属间化合物的研究。他和他领导的研究小组,连续获得国家“863”计划“七五”、“八五”和“九五”三个五年计划资助,是全国惟一获得“863”计划资助研究NiAl合金的研究小组;同时,还先后获得国家自然科学基金委员会5项自然科学基金(其中面上基金项目3项,重点项目1项,重大项目1项),是全国惟一获得如此多基金项目研究NiAl合金的研究小组。“九五”和“十五”期间,NiAl合金的实用化研究已列入国家计划进行重点预研。

本书作者和他领导的研究小组,包括作者的24位博士研究生和16位硕士研究生,从1988年至今的16年中,对NiAl及其合金开展了全面、深入而系统的研究工作,从电子结构、晶体结构到合金化与相变,从物理化学性能与力学性能,到形变与断裂,从超塑性变形到蠕变行为与断裂,从内生颗粒增强NiAl合金、NiAl共晶合金到NiAl纳米材料,取得了一系列创新性成果,如NiAl合金超塑性的发现及其机理研究;NiAl合金韧脆转变行为及其机理;NiAl合金的蠕变断裂行为及其机理;纳米晶NiAl材料制备和亚稳相的相变以及纳米材料的高温稳定性;用第一原理研究的NiAl成键特征和用正电子湮没技术测定的NiAl键组成、点缺陷和合金元素对电子密度的影响;用高分辨电镜研究NiAl基体与各种沉淀析出相和增强相之间的界面精细结构和NiAl合金的氧化、热腐蚀行为及NiAl微晶涂层等。在NiAl材料方面,作者和他的研究小组研制成功内生颗粒增强NiAl基复合材料,其中NiAl-20TiC室温和1000℃以上高温强度比NiAl基体提高2倍,具有良好的综合性能,这一合金和它的合成方法(HPES)已获中国发明专利。同时郭建亭等还研制成功NiAl-Cr(Mo)-Hf等轴晶共晶合金,其1100℃高温蠕变强度和高温拉伸性能优异,超过了目前国内外几乎所有的等轴晶高温合金,并用普通精密铸造工艺制成了燃气轮机涡轮叶片。此外,作者及其小组用机械合金化方法制成了NiAl纳米晶及其复合材料,块体材

料的强度和塑性同时获得明显提高,而且在 1000℃ 高温纳米晶粒稳定,使纳米晶 NiAl 材料在高温应用成为可能。这些成果撰写成 200 多篇学术论文(见附录)发表在国内外学术杂志和国际会议文集中,其中包括“Journal of Materials Research”(4 篇),“Metall. Mater. Trans A”(3 篇)、“Intermetallics”(4 篇),“Journal of Alloys and Compounds”(3 篇),“Scripta Metall. Mater.”(6 篇),“Materials Science and Engineering A”(5 篇),“Materials Letters”(14 篇)等 30 余种知名杂志。作者领导的研究小组已成为在国际上有较高知名度的研究 NiAl 金属间化合物的研究小组。

本书作者对 16 年来 NiAl 合金方面取得的研究成果,和他在国内外发表的 200 余篇学术论文,以及他的 40 位研究生的学位论文,进行了全面系统的总结、浓缩和提高,以学科为纲,写成此书。这是迄今为止,全国乃至全世界惟一的一本系统地介绍 NiAl 研究成果的专著,也是从事金属间化合物研究的科技工作者和工程技术人员,高等学校从事高技术新材料教学的教师,以及材料科学与工程专业学习的高年级大学本科生及研究生的一本参考书。相信此书的出版能够为推动 NiAl 乃至整个金属间化合物的研究和开发,为加快金属间化合物实用化的步伐贡献一份力量。

师昌绪
2003. 6. 10

前 言

《有序金属间化合物镍铝合金》一书正式由科学出版社出版,作者感到非常欣慰。因为在两年半左右的时间中,作者几乎用去了所有的业余时间、公休日和节假日全身心地投入到撰写本书的辛勤劳动中,对16年来作者在NiAl科研方面的成果进行深入、系统、全面的总结和理论提高,这本国内外惟一的NiAl金属间化合物专著今天终于有了结果,划上了句号。

此书的正式出版,首先作者要衷心感谢国家科委(现科技部)和“863”专家委员会,是他们从“七五”到“九五”连续三个五年计划对Ni-Al系合金研究给予资助,使作者领导的研究小组成为全国惟一获得“863”计划资助研究NiAl合金的科研小组;作者还要衷心感谢国家自然科学基金委员会,是他们给予作者领导的研究小组5项自然科学基金(其中面上基金项目3项、重点项目1项、重大项目1项),使作者的研究小组成为全国惟一获得多项基金研究NiAl合金的科研小组;作者也要衷心感谢国家计委和国防科工委,是他们把NiAl合金的实用化列入国家计划进行重点研究。没有上述这些资助,没有中国科学院军工办和金属研究所领导对实施这些项目所提供的各项保证,作者不可能对NiAl合金连续16年开展基础研究、应用基础研究和应用研究,不可能取得本书中所反映的各项研究成果。因此,在此书出版之际,我衷心地感谢上级科研机构多年来给予的有力支持和具体的指导与帮助。

国家“863”计划资助的课题有:“七五”期间“Ni₃Al基合金加工工艺及提高高温塑性的研究(715-16-02-01)”;“八五”期间“耐高温、耐磨、耐蚀Ni₃Al应用及NiAl基合金强韧化研究(715-16-01-01)”;“九五”期间“NiAl基合金的实用化研究(715-005-0030)”。

国家自然科学基金委员会资助的项目有:面上基金项目“B2型NiAl基合金与韧化的研究(59071017)(1991.1~1993.12)”;面上基金项目“用量子化学方法进行金属间化合物的合金设计(59271003)(1993.1~1995.12)”;面上基金项目“颗粒增强NiAl基复合材料超塑性及其变形机理的研究(59801010)(1999.1~2001.12)”;重点项目“合金元素及微量元素改善金属间化合物韧性的机制(59331012)(1994.1~1996.12)”;重大项目“颗粒增强NiAl合金及其纳米材料强韧化机理研究(59895152)(1998.3~2001.12)”。

国家计委重大预研项目有:“颗粒增强NiAl基合金涡轮导向叶片材料和

工艺的研究(95-I-C-100)(1997.1~2001.12)”和国防科工委“十五”重大项目有：“高性能燃气涡轮动力技术用 NiAl 基材料及导向叶片的研制(2001.1~2005.12)”。

其次,作者要衷心感谢作者领导的研究小组的全体成员,包括我的硕士和博士研究生,是他们与我风雨同舟 16 年,战斗在 NiAl 科研工作的第一线,顺利完成 NiAl 合金的各种科研项目,取得了丰硕的科研成果,包括我在 NiAl 研究方面发表的二百多篇论文(见附录*)。从事 NiAl 金属间化合物研究的硕士和博士研究生以及博士后,他们都从一个个具体课题开展了深入的研究,他们的研究成果对本书作出了具体贡献。他们都非常成功地完成了学位论文。已完成的硕士论文有:崔传勇的“多相 NiAl 共晶合金的组织结构与力学性能”;周健的“B、Mg、Hf、Zr 对 NiAl-Cr 合金组织和力学性能的影响”;夏东生的“NiAl (Co) 系及原位内生 TiC 纳米复合材料的机械合金化及强韧化的研究”。已完成的博士论文有孟长功的“化学键理论在金属间化合物合金设计中的作用”;邢占平的“颗粒增强 NiAl 基内生复合材料的界面结构及力学性能”;刘志光的“金属间化合物和机械合金化研究——反应机理、合金元素的影响及性能”;吕刚的“金属间化合物和多层膜中物理化学过程的从头计算”;周兰章的“机械合金化制备 NiAl 合金及复合材料的研究——反应机理、热稳定性及力学性能”;姜东涛的“原位内生多相 NiAl 基复合材料的反应合成、组织结构与性能”;陈荣石的“Cr、Mo、Hf、Co 对 NiAl 金属间化合物组织结构、力学行为的影响”;齐义辉的“NiAl 基多相金属间化合物的显微组织与高温力学行为”;周文龙的“NiAl 系金属间化合物的超塑性和高温变形及机理”;杨福宝的“NiAl 合金及其复合材料的机械合金化研究”;徐春梅的“NiAl 基共晶合金的定向凝固组织、力学性能及高温氧化研究”;崔传勇的“定向凝固 NiAl 基金属间化合物的微观组织、界面与力学性能”;杜兴嵩的“NiAl 及其合金的超塑性及高温流变行为的研究”;周健的“Ag、P、Cr 对 NiAl 及其合金组织和性能的影响”;任维丽的“NiAl 基共晶合金的组织和力学性能及稀土合金化研究”以及陈荣石的博士后出站报告“NiAl 基金属间化合物显微组织与力学性能研究”等。

作者还要衷心感谢作者的科研合作伙伴,他们为我们之间开展极其有益的合作研究与学术讨论创造了有利条件,他们之中有胡壮麒院士,我俩共同培养了三位从事 NiAl 金属间化合物研究并取得优异成绩的博士研究生;他们之中还有叶恒强院士、李斗星研究员和贺连龙研究员及他们的博士研究生。由于我们的精诚合作,在 NiAl 金属间化合物界面精细结构研究中作出了创新性的结果;还有与吴维安研究员和曾潮流研究员的合作,使我们在一些 NiAl 合金氧化、热腐蚀和保护涂层的研究中作出了有实际应用价值的研究成果;与熊良

钺研究员以及广西大学邓文教授合作,在用正电子湮没技术研究NiAl合金中空位型缺陷及电子密度的研究方面,我们共同作出了有重要理论意义的研究成果。

在本书撰写过程中得到了作者学生的具体帮助,他们分别参与了部分章节的部分撰写或修改工作,他们是周兰章博士(第十三章,纳米晶NiAl及其纳米复合材料);袁超博士(第九章,蠕变与疲劳);杜兴蒿博士(第八章,超塑性行为及其机理);齐义辉博士(第十二章,NiAl共晶合金);周健博士(第十五章,NiAl合金的应用)。在书稿打印过程中,杜兴蒿博士为全书校对作了很多卓有成效的工作。陈书风工程师为全书的文字输入、编辑及插图的加工制做等方面贡献了力量,在此一并表示感谢。

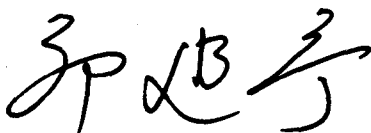
作者要感谢中国科学院金属研究所领导对本书出版给予的支持和帮助,感谢中国科学院和中国工程院院士师昌绪先生为本书作序。感谢中国科学院金属研究所叶恒强院士、北京科技大学陈国良院士和中南大学校长黄伯云院士对本书给予的高度评价和热情推荐。

感谢妻子李谷松,她不仅在机械合金化制备NiAl纳米材料、颗粒增强NiAl复合材料和定向共晶NiAl合金的研究工作中参与实验工作,作出了重要的贡献,而且在作者撰写此书的过程中几乎承担了全部家务,使作者有足够的时间和精力完成此书。

由于作者水平所限,书中肯定存在很多不妥和错误之处,恳请各位同行和读者批评指正。

最后,希望本书的出版将有助于推动我国金属间化合物高温结构材料研究的蓬勃发展。

本书作者



2003年6月8日

目 录

作者简介	(i)
贺 词	(iv)
序 言	(vii)
前 言	(xi)
第 1 章 电子结构与成键特征	(1)
1.1 成键特征	(2)
1.1.1 计算方法	(2)
1.1.2 成键特征分析	(2)
1.2 微观参数 H	(3)
1.3 键密度	(4)
1.3.1 键密度与硬度	(4)
1.3.2 键密度与杨氏模量	(5)
1.4 键组成确定	(5)
1.5 化学计量比及合金元素对 Ni - Al 合金电子密度的影响	(8)
1.5.1 试样制备	(8)
1.5.2 实验方法	(9)
1.5.3 实验结果与讨论	(9)
1.6 结语	(13)
参考文献	(13)
第 2 章 晶体结构与缺陷	(15)
2.1 晶体结构	(15)
2.2 晶体缺陷	(16)
2.2.1 点缺陷	(16)
2.2.2 线缺陷	(19)
2.2.3 面缺陷	(21)
2.3 结语	(28)
参考文献	(28)
第 3 章 相图与相变	(30)
3.1 Ni - Al 二元相图	(30)
3.2 马氏体相变	(31)

3.3	等温相变	(35)
3.4	共晶反应	(35)
3.5	沉淀析出	(39)
3.5.1	NiAl - Cr - Mo - Hf 系	(39)
3.5.2	NiAl - Fe 系	(46)
3.6	亚稳相分解	(49)
3.6.1	β - NiAl 亚稳相	(49)
3.6.2	类非晶 NiAl 合金的无序—有序转变	(50)
3.6.3	无序 NiAl(Cr) 合金的相分解	(53)
3.6.4	过饱和固溶体分解	(55)
3.7	结语	(56)
	参考文献	(56)

第4章 NiAl 的合金化 (58)

4.1	NiAl 合金化研究进展	(59)
4.1.1	合金元素对 NiAl 基合金组织的影响	(59)
4.1.2	合金化对室温塑性的影响	(61)
4.1.3	合金化对室温韧性的影响	(63)
4.1.4	合金化引起的相关缺陷	(64)
4.1.5	合金化对固溶硬化率的影响	(65)
4.1.6	合金化对蠕变强度的影响	(65)
4.1.7	结语	(66)
4.2	Ag 对 NiAl 合金显微组织、力学性能和电学性能的影响	(66)
4.2.1	实验材料和方法	(67)
4.2.2	实验结果和分析	(67)
4.2.3	结语	(73)
4.3	稀土元素 Y、Ce 和 Nd 对共晶合金 NiAl - 28Cr - 5.5Mo - 0.5Hf 组织和力学性能的影响	(73)
4.3.1	实验方法	(74)
4.3.2	稀土元素对 NiAl - 28Cr - 5.5Mo - 0.5Hf 共晶合金组织和力学性能的影响	(75)
4.3.3	稀土元素在 NiAl 基合金中的作用机理	(82)
4.3.4	NiAl - 28Cr - 5.5Mo - 0.5Hf(0.05Y, 0.05Nd) 合金高温流变行为	(86)
4.3.5	结语	(89)
4.4	P 对 NiAl 合金组织和性能的影响	(90)
4.4.1	实验方法	(90)
4.4.2	结果和讨论	(91)
4.4.3	结语	(95)