

Materials Science and Engineering
for Superalloys

(下册)

高温合金材料学

高温合金材料与工程应用

郭建亭 著

高温合金材料学

Materials Science and Engineering for Superalloys

(下册)

高温合金材料与工程应用

郭建亭 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者在从事高温合金研究和开发长达45年并取得重大成果的基础上,经过总结、浓缩和提高,并充分吸取国内外、特别是国内高温合金理论和实践的创新结果,以学科系统为纲,以自己的研究成果为主线,经过长达5年多时间撰写成的。

本书全面系统地介绍高温合金的应用基础理论,制备工艺和工程应用。高温合金的应用基础理论(上册)包括高温合金的强化与韧化,相变、析出相及其作用,蠕变、疲劳及其与环境交互作用,氧化、腐蚀与防护,合金成分确定与设计;高温合金的制备工艺(中册)包括高温合金的冶炼工艺,热加工工艺,精密铸造工艺,粉末冶金工艺,热处理工艺,焊接工艺和机加工工艺;高温合金的工程应用(下册)包括变形和铸造高温合金,铁基、镍基和钴基高温合金,定向凝固高温合金,粉末高温合金,抗热腐蚀高温合金以及涡轮叶片、导向叶片、涡轮盘、燃烧室用高温合金,航天和核工业用高温合金以及民用高温合金等。

本书可供从事高温合金研究和开发的科技人员以及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

高温合金材料学. 下册 / 郭建亭著. - 北京: 科学出版社, 2010. 6
ISBN 978-7-03-027555-4

I. ①高… II. ①郭… III. ①耐热合金—金属材料
IV. ①TG132.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第085135号

责任编辑:侯沈生 责任校对:袁海滨
责任印刷:李延宝 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>

丹东印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

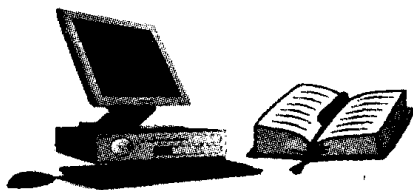
2010年6月第一版 开本:787×1092 1/16
2010年6月第一次印刷 印张:66
印数:1-3000 字数:1600 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303



作者简介

本书作者郭建亭，我国著名的材料科学家和杰出的高温合金专家，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从事高温合金和高温金属间化合物研究长达48年。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，现为课题负责人，主持国家重大项目。同时，兼任中国金属学会高温材料分会副理事长，中国材料学会金属间化合物和非晶分会副理事长，金属间化合物第一届委员会主任委员。曾兼任中国航空学会金属材料专业委员会副主任、主任和辽宁省材料学会副理事长达多年，并曾兼任兰州大学客座教授，现为大连理工大学、昆明理工大学兼职教授，辽宁工业大学、沈阳化工学院和辽宁科技大学荣誉教授，上海大学自强特聘教授。此外，还兼任中国著名科学杂志《金属学报》和《Acta Metallurgica Sinica》编委。

参加研究工作48年来，一直长期稳定地从事高温结构材料研究，先后研制成功10余种高温合金，用于国防工业和国民经济部门，获国家、院部和省级科技成果奖十余项，获国家发明专利6项，在国内外公开发表学术论文700余篇，出版专著4本。

他作为主要负责人，通过控制微量元素Zr，消除纵向热裂纹；控制P和Si含量，提高持久性能；采用热处理，提高细小 γ' 相数量；利用定向凝固工艺，消除横向晶界，研制成功成本低、密度小、综合性能优异的DZ417G定向凝固高温合金，获中国发明专利。该合金用于我国自行研制的第三代高性能航空发动机制作低压一、二级涡轮叶片，已通过长期试车和定型试飞考核，并已投入批量生产。研制成功的DZ417G合金与其他三个合金一道，于2008年获中国工业和信息化部国防科学技术进步奖一等奖，排名第三（证书号：2008GFJBJ1047-R03），目前正在申报国家科技进步一等奖。

他作为主要负责人，通过相计算和热腐蚀微观机制等基础研究，确定了合金最佳成分控制范围，研制成功新型燃气轮机用五种抗热腐蚀高

温合金，即 K435、K444、K446、K452 和 GH4413。2005 年 1 月通过海装组织的技术鉴定，并已制备出全部 6 级涡轮工作叶片和导向叶片以及整流支柱零件。目前已通过 450 小时长期试车考核，准备进行技术鉴定，通过后可立即装备导弹驱逐舰。

作为主要负责人之一和金属研究所负责人。组织开展了一系列技术创新，在国内首次完成难变形高温合金大尺寸涡轮盘饼坯锻造和模锻，生产出合格的新型燃气轮机 I 级 GH4742 合金涡轮盘和 II-VI 级 GH4698 合金涡轮盘，解决了我国特大型涡轮盘受制于国外的困境。提供的 I-VI 级涡轮盘已通过 450 小时长期试车考核。

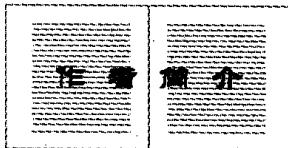
他作为主要负责人之一和金属研究所负责人，深入研究并揭示了微量元素对高温合金力学性能和抗氧化腐蚀性能的影响规律及其作用机理，并成功地应用于高温合金的生产，获得了显著的社会效益和经济效益。1986 年获冶金部科技进步一等奖，1987 年获国家科技进步三等奖，6 个单位共同完成，名列第三（证书号：冶-3-007-03）。

他作为主要负责人之一，通过调整 GH1035 合金中微量元素的成分范围和热处理工艺，解决了合金强度低、塑性差和锻造裂纹多三大技术难题，发展成具有自主知识产权的 GH2035A 合金。已生产 GH2035A 合金几百吨，用于 WJ5A 发动机一级涡轮外环等 11 种零件，装于运七飞机投入商业飞行。1990 年获中国科学院科技进步一等奖，1991 年获国家科技进步三等奖，名列第三（证书号：冶-3-002-03）。

他作为主要负责人之一，系统研究了我国独创的第一个涡轮盘用铁基高温合金 GH2135 中合金元素的作用，给出了元素含量与 TCP 相和碳化物生成关系的相区图，为合金成分最佳含量控制和改善组织稳定性提供了依据；通过控制碳化物形态与分布，解决了缺口敏感性问题；通过调整热处理工艺，解决了生产过程中涡轮盘大量热裂的技术难题。2300 多个 GH2135 合金涡轮盘应用于两种航空发动机，装备了 1000 多架两种不同型号的歼击机，在外场正常飞行，1978 年获全国科学大会奖，排名第三。

他作为主要科研骨干，参加了 GH2984 舰用锅炉过热器管材合金研究，先后研究了合金元素的作用、合金的组织与性能、氧化与腐蚀、热处理制度和长期时效组织稳定性。经过 10 年海上实际使用，证明 GH2984 高温合金管材是大型舰船用过热器的理想材料，1992 年获中国科学院科技进步一等奖，由四个单位共同完成，总排名第八（证书号：92J-1-031-8）。

他作为主要科研骨干，参加循环流化床发电锅炉分课题旋风分离器出口管材及工艺研究，负责研究稀土元素对 602RE 合金组织结构、抗氧化和力学性能的影响，1990 年“35T/H 循环流化床发电锅炉”获中国科学院科技进步一等奖，在金属所名列第五。



他作为主要科技骨干，参加涡扇八发动机用盘材（901）研制，负责热处理制度和合金元素作用研究，1986年获中国科学院科技进步二等奖，名列第五。

他作为科技副县长，主管桓仁县科技工作，与县委主管科技工作的副书记一道领导县科委和县科协，共同组织星火计划人材培训，一年内在全县培训农民技术人员6000余名。1988年获辽宁省星火二等奖，排名第四（证书号：88R-2-01-4）。

他作为主要负责人，研究高温合金在热作模具方面应用，把GH2135合金由航空推广到民用做热成型模具。1986年获中国科学院科技进步三等奖，名列第一。

他作为主要科研骨干，参加鳍片材料FeCrSi合金的研制与生产，1987年获中国科学院科技进步三等奖，名列第五。

他作为主要负责人，开展石油部提出的课题“旧抽油杆检测与修复技术研究”，1990年获中国科学院科技进步三等奖，名列第二。

他作为主要负责人之一，开展了GH3044合金无缝管材研制，研制成功 $\Phi 8-\Phi 18\text{mm}$ 六种规格的无缝管材，2004年获中国一航科技进步三等奖，由三个单位共同完成，获奖证书名列第八。

他作为主要负责人之一和金属研究所负责人，研制低膨胀高温合金GH2903，他负责长期时效组织稳定性和力学性能变化研究。1992年获冶金部科技进步四等奖，名列第四（证书号：92-168-04）。

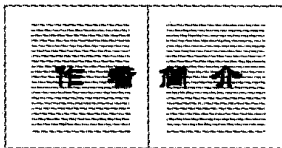
此外，他作为主要负责人之一，研制成功镍基铸造高温合金K4169和钴基铸造高温合金K640S，作为主要负责人研制成功耐蚀镍基高温合金604等。

从“七五”开始，郭建亭研究员除继续研究高温合金外，还开始研究金属间化合物高温结构材料，包括NiAl，Ni₃Al，FeAl，Fe₃Al，TiAl和Nb₅Si₃等合金。他对金属间化合物NiAl及其合金开展了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、力学性能到形变与断裂，从内生颗粒增强NiAl合金、共晶合金到纳米材料，取得了一系列创新性成果：在国际上首先发现NiAl及其合金具有超塑性，阐述了超塑性特点及其机理，为解决低塑性NiAl合金的加工成型提供了一条有效途径，他应邀在国际会议作NiAl合金超塑性报告5次；提出Hf合金强化NiAl-Cr(Mo)共晶合金的思路，利用Hf的固溶强化和Ni₂AlHf纳米颗粒的沉淀强化原理，研制出JJ-3合金，获中国发明专利。该合金1100℃蠕变强度和拉伸性能超过了国内外几乎所有的等轴晶高温合金；发明热压放热反应合成法，将材料反应合成和热压成型过程有机结合，制备出高温强度优异的内生颗粒增强NiAl基复合材料，获中国发明专利；此外，他发现适量Zr可韧化无硼Ni₃Al合金，揭示了Zr偏聚于晶界，提高晶界强度的韧化机制；发现FeAl合金具有反常屈

服现象,其内在机制是由于位错滑移方向的改变;发现 Mg 微合金化可成倍提高 FeAl 和 Fe₃Al 合金的室温塑性,阐明了 Mg 偏聚于晶界,促进位错穿越晶界的物理机制,获中国发明专利。上述创新成果于 2005 年获辽宁省自然科学二等奖,排名第一(证书号:2005Z-2-02-1)。

他先后获国家发明专利 8 项。即一种定向凝固优质铸造高温合金,专利号:ZL95110023.8;一种定向凝固抗热腐蚀镍基铸造高温合金及其制备方法,专利号:ZL200710011098.0;良好塑性的含镁铁铝合金,专利号:ZL93110083.6;一种内生碳化钛弥散强化镍铝合金,专利号:96115292.3;一种豪斯勒相强化的镍铝共晶合金,专利号:00114844.3;一种用稀土元素钆或铈合金化的镍、铝、铬钼共晶合金及其制备方法,专利号:ZL200410028828.4,以上 6 项均为第一发明人。一种铁镍铬基变形高温合金,专利号:ZL90110284.9,排名第四。含铈镍基铸造高温合金 K444 返回料合金真空熔炼工艺,专利号:ZL200510130817.1,排名第六。

他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。他还先后申请并获国家自然科学基金 6 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 700 余篇,其中约一半用英文发表,如 *Metallurgica and Materials Transactions A*(8 篇), *Acta Metallurgica et Materialia*(3 篇), *Scripta Metallurgica et Materialia*(13 篇), *Journal of Materials Research*(6 篇), *Materials Science and Engineering A*(17 篇), *Materials Letters*(34 篇), *Materials Science and Technology*(6 篇), *Journal of Alloys and Compounds*(9 篇), *Intermetallics*(17 篇), *Journal of Materials Science Letters*(7 篇), *Materials& Design*(7 篇), *Int. J. Mat.Res. (formerly Z.Metallkd.)*(11 篇), *Materials Science Forum*(11 篇), *Journal of Materials Science*(4 篇), *Mater.Trans.*(3 篇), 金属学报(134 篇), 物理学报(3 篇), 有色金属学报(8 篇), 机械工程学报(3 篇), 材料研究学报(21 篇), 中国腐蚀与防护学报(9 篇), 金属热处理学报(3 篇), 中国稀土学报(5 篇), 航空材料学报(5 篇), 航空学报(4 篇)等。这些文章中他为第一作者的有 166 篇,为第二作者的有 329 篇,为第三作者的有 104 篇;为通讯作者的有 254 篇;被 SCI 和 EI 同时收录的有 251 篇,被 SCI 收录的有 11 篇,被 EI 收录的有 100 篇;引用率 2000 多次,其中他引 1000 余次。他以唯一作者出版专著 4 本,即有序金属间化合物镍铝合金(108 万字)和高温合金材料学上、中、下三册(300 余万字),主编或合作主



编专业书 2 本，即金属间化合物结构材料和第八届全国高温合金年会学术论文特集。

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 2004 年他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，并正式纳入中国科学院 (CAS) 和意大利国家科学技术委员会 (CNR) 双边科技合作计划。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) 双边科技合作和交流的科技人员有 15 人次，联合发表学术论文 40 余篇。

2005 年他又与俄罗斯科学院强度物理和材料科学研究所 Savitskii A 教授签订了“Ni3Al 合金在高温挤压合成过程中组织演化的理论与实验研究”合作协议。该项目为国家自然科学基金委员会 (NSFC) 和俄罗斯基础研究基金会 (RFBR) 共同资助的合作研究项目，期限为 2006 年至 2007 年，每年双方可安排课题组科研人员互访共 20 人天。2007 年合作任务已顺利完成。

他还多次到意大利 (6 次)，比利时 (5 次)，法国 (3 次)，德国 (3 次)，英国 (1 次)，荷兰 (3 次)，奥地利 (1 次)，西班牙 (2 次)，瑞典 (1 次)，丹麦 (1 次)，俄罗斯 (4 次)，乌克兰 (1 次)，白俄罗斯 (1 次) 等 21 个欧洲国家；美国 (4 次) 和加拿大 (1 次) 等 2 个北美洲国家；巴西 (1 次) 等南美洲国家；澳大利亚 (1 次) 和新西兰 (1 次) 等 2 个大洋洲国家；南非 (1 次) 和埃及 (1 次) 等三个非洲国家和日本 (2 次)，印度 (1 次)，韩国 (1 次)，以色列 (1 次)，土耳其 (1 次)，新加坡 (2 次) 等 11 个亚洲国家，参加国际会议和进行学术访问。在国际会议上应邀做特约报告 14 次，口头报告多次，共发表论文 70 余篇。

他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 39 人，硕士研究生 37 人，其中已获博士学位的有 35 人，已获硕士学位的有 31 人，先后到意大利、美国、日本、加拿大、德国、法国、比利时、瑞典、新西兰、新加坡、以色列和韩国等国家学习和工作的 (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。

序 言(一)

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。从成分设计、生产工艺到工程应用都已步入成熟阶段。特别在工程应用方面，不断扩大，使高温合金有很强的生命力；在航空发动机、航天推进系统乃至工业燃气轮机和舰艇动力等方面都离不开高温合金，如在先进的航空发动机中高温合金所占比重高达 60%；在工业领域仍在不断扩大，如深井采油，高温高压化工装置都将需要不同性能的高温合金。因此，高温合金产业在一定程度上反映一个国家的国防力量和工业水平。

我国高温合金的生产始于 1956 年。随之在工业界、中国科学院和高等院校便开展了高温合金的研究与开发和人才培养。50 多年来，我国生产过的高温合金牌号约 200 个，继美、英等国之后形成了自己的高温合金体系。

郭建亭研究员是我国首批高温合金专业毕业生，1962 年毕业于北京钢铁学院（现北京科技大学）。毕业后即加入了中国科学院金属研究所高温合金研发集体。当时正值推广自行研制的铁基高温合金 808 (GH2135)，郭建亭加入了这一团队后，从合金冶炼、加工成形直到实际应用开展了大量工作，为合金的产业化深入现场，不断总结经验。与此同时，他还深入分析了含镍 40% 的铁基高温合金相的形成规律，为铁基高温合金的成分设计提供理论依据。他分析了国际涡轮盘合金的现状和发展方向，对我国涡轮盘合金的研究与开发有重要参考价值。他公开发表有关高温合金的文章，在当时也是不多见的。他从事变形铁基高温合金工作 10 余年后，又转入镍基和钴基高温合金的研究与开发，从多晶、定向凝固到单晶叶片的研制，为我国先进航空发动机的发展，做出了应有的贡献。不久前他还主持了我国舰艇用发动机全部 6 级涡轮叶片和导向叶片用五种抗热腐蚀高温合金的研制，并亲自工作在第一线，显示出他具有丰富的高温合金研究经

验和很强的组织能力。

除高温合金的研究与开发外，郭建亭研究员从20世纪80年代中期就开始了NiAl中间化合物的研究。NiAl中间化合物具有高熔点、低密度、抗氧化、高热导等特点，是理想的叶片材料，但因脆性问题难以解决而未能广泛应用，对此他锲而不舍地做出了系统而深入的工作，并出版专著，其内容是当前在NiAl方面最为翔实的资料。

郭建亭研究员在分析和总结国内外，特别是国内高温合金理论与实践基础上，并结合他自己和他所领导的研究组多年工作实践与创新性的研究成果，系统地介绍了高温合金应用基础理论与生产实践的各个方面，写出了300余万言的巨著，这是迄今所看到的由一人执笔完成的最为详尽的一本高温合金专著。本书可作为从事高温合金研究和开发的科技工作者和工程技术人员、高等院校从事新材料教学和研究工作的教师，以及材料科学与工程专业学习的研究生、高年级本科生的参考资料。相信本书的出版对我国高温合金的研究、开发与工程应用会发挥重要作用。

师昌绪

2007. 8. 1

序 言(二)

高温合金是目前军用和民用航空发动机以及燃气轮机高温零部件不可替代的关键结构材料，特别是涡轮叶片、导向叶片、涡轮盘和燃烧室更是如此。高温合金质量的好坏，决定发动机和燃气轮机性能的优劣。虽然在20世纪40年代世界上就开始研究高温合金，到现在已有六十多年的历史，但目前仍在对其进行不断的研究。我国高温合金从1956年开始生产，经历了从无到有，从仿制到自主创新的发展历程，使我国军、民用工业所需高温合金立足于国内。从“十一五”开始，国内对新型高温合金仍有很大需求，对已研制成功的高温合金尚需开展大量的工程化研究，《高温合金材料学》一书就是在这种对高温合金材料强烈的需求形势下诞生的，具有非常重要的意义。

这本书的特点之一是非常全面系统，述及到高温合金的方方面面，如从合金到工艺，从理论到应用，从变形合金到铸造合金，从等轴晶到定向柱晶和单晶合金。因此，它适合广大读者的需求，包括科研单位、设计单位、生产单位，高等学校和使用单位，都可从这本书得到教益。

这本书的特点之二是深入浅出。作者把许多复杂的理论模型和繁多的数学式去粗取精，并用通俗易懂的语言介绍给读者，既适合初学高温合金的研究生和大学生，甚至从事高温合金和零部件生产的技术工人，也适合需要深入研究高温合金的科研人员、设计人员和工程技术人员。

这本书的特点之三是先进性。它不仅介绍国外高温合金研究和生产的最新成就，而且大量的内容是介绍国内高温合金取得的进展和最新技术，特别是作者自己创新性的科研成果。由于结合中国高温合金生产、科研和使用的特点，使这本书充满了生机和活力，读者在阅读时可以很快的切入正题，加以消化、理解和应用，了解国内外最新进展。

这本书的特点之四是新材料与新工艺并重。实际上，高温合金发展到

现在，新材料和新工艺的界线已很模糊，如定向凝固技术的发展，才有定向结晶和单晶高温合金的新材料，而后者是新型航空发动机和燃气轮机的首选材料；又如快速凝固技术的发展，使高性能粉末涡轮盘问世。新材料与新工艺的有机结合使高温合金质量水平不断改进，使用温度不断提高。这些在这本书中都有充分的反映。

这本书的特点之五是实用性。每一章都介绍一个独立的内容，一个学科问题，一个工艺内容或者一个合金体系，读者可根据自己的工作，查阅相关章节，即可基本了解有关内容的原理、实例和应用。

这本书的特点之六是反映了作者从事高温合金研究四十五年的生产实践和工作历程。可以说每一章都有作者自己的研究工作或科研成果，都留下了作者刻苦钻研和辛勤劳动的脚印。

总之，这是一本值得推荐的好书！

胡北祺

2007年8月14日

前 言

2003年6月，作者花了两年半时间完成的专著《有序金属间化合物镍铝合金》由科学出版社出版。之后，一直在想，应该写一本高温合金方面的专著。同年7月6日作者到西班牙马德里参加“先进材料加工和制造国际会议”，在会议上发表口头特邀报告和墙展报告各一篇，7月11日会议结束。晚上我就开始撰写这本书的章节提纲。7月12日原计划去巴塞罗拉访问，听说那里不安全，决定不去了。于是就在马德里留学的一位年青中国教授的帮助下，住在郊区一小镇的 ARBA Hotel 302 房间，连续两天，初步写完《高温合金材料学》提纲。

从2001年开始的“十五”期间，我作为项目负责人承担两项重大科研课题研究，即舰船用先进燃气轮机五种抗热腐蚀高温合金的研制和 NiAl 金属间化合物超高温涡轮导向叶片材料研究。作为项目第二负责人还承担了舰船用先进燃气轮机一至六级特大型难变形涡轮盘材料和工艺研究。所以，我还必须工作在第一线，并组织领导全组工作人员和学生 30 余人，全力完成这些科研任务。上班时间十分繁忙，很难挤出整块时间。只好抓紧一切可以利用的时间，周末两天、假节日和晚上约 2 小时，一字一句的撰写《高温合金材料学》，一天一天又一天，一月一月又一月，一年一年又一年，就这样整整过去了四年多，我终于完成了《高温合金材料学》的上卷（高温合金的应用基础理论）和中卷（高温合金的制备工艺），并已交付科学出版社于 2008 年 4 月出版。从 2007 年 5 月开始，到 2009 年 8 月，共花了两年零三个月时间，完成了《高温合金材料学》下册（高温合金材料与工程应用）的最后撰写，2009 年 8 月 18 日正式交给科学出版社，力争在 2009 年年底出版。

1962 年我毕业于北京钢铁学院（现北京科技大学）高温合金专业，分配到中国科学院金属研究所高温合金研究室工作。48 年来，作为项目

或课题负责人、负责人之一和主要科研骨干，先后研制成功十多种高温合金，包括变形铁基高温合金 GH2135、GH2035A、GH2984、GH2903、GH2107、GH2901 和 GH2761；变形镍基高温合金 GH4413、GH4698、GH4742；铸造镍基高温合金 K4169、K452、K444、K435 和 K446；铸造钴基高温合金 K640S；定向凝固柱晶高温合金 DZ417G 和单晶高温合金 DD444 等。在这些合金的研制过程中，积累了高温合金研究和推广应用的经验，同时发现问题，解决问题，不断发表学术论文，在国内外公开发表高温合金和金属间化合物方面的学术论文 700 余篇，不断实践和丰富高温合金的应用基础理论。

研制成功的高温合金在工程化应用研究阶段，作者经常深入工厂，与工程技术人员和工人同劳动，讨论高温合金的生产工艺。曾在抚顺钢厂电弧炉车间参加炼钢生产；在大冶钢厂锻钢车间还掌过锤，锻 GH2135 盘坯；在哈尔滨东安厂热处理车间参加涡轮盘热处理；在沈阳黎明发动机厂参加 GH2135 合金涡轮叶片的顶锻、预锻、终锻和机加工，长达三个月；在西安红旗机械厂参加涡轮叶片的锻造和渗 Al 涂层直到试车的全过程，长达半年之久；在沈阳自行车厂参加精密铸造车间模具精铸工艺研究；在几个空军修理厂跟班参加发动机长期试车试验与检验；直到近几年，作者还先后到抚顺钢厂、西南铝厂和德阳二重参加难变形涡轮盘高温合金 GH4698 和 GH4742 的冶炼、开坯、墩并和模锻的技术讨论和跟班试验。因而对高温合金的生产工艺比较熟悉和了解。

作为博士生导师，作者还先后培养了 3 位博士后、39 位博士生和 37 位硕士研究生，其中 30 位从事高温合金研究；为硕士生和博士生开设了高温合金和金属间化合物专业课，每年都给他们讲课 32~64 学时，把高温合金的理论与实践系统而深入地介绍给学生，因而积累了高温合金和金属间化合物的授课经验。

正是由于上面这些科研实践与活动（详见本书最后），为作者撰写《高温合金材料学》积累了丰富的素材、翔实数据和理论基础。在分析和总结国内外，特别是国内高温合金理论与实践的基础上，结合自己多年的工作实践和经验，特别是自己创新性的研究成果，以学科系统为纲，以自

己的研究成果为主线，全面系统的介绍高温合金的应用基础理论、制备工艺和工程应用。

在本书撰写过程中，曾得到作者的同事及学生的帮助，他们参与了部分章节的资料收集和部分撰写工作：唐亚俊（第30章、31章、32章和33章高温合金的精密铸造）；周兰章（第13章高温合金的蠕变、疲劳和环境损伤交互作用）；袁超（第23篇涡轮盘用高温合金）；侯介山（第11章高温合金的蠕变和第18章高温合金的设计）；淮凯文（第26章高温合金热加工特点和单晶高温合金）；高强（第39章高温合金的焊接性）；李虎田（第48章定向凝固高温合金）；田玉新（第19章、20章、21章、24章和25章高温合金熔炼及第27篇航天和核工业用高温合金）；盛立远（第37章高温合金的正常热处理和第24篇燃烧室用高温合金）；谢亿（第13篇高温合金的切削加工和第22篇导向叶片用高温合金）；王伟（第18篇抗热腐蚀高温合金）；梁永纯（第19篇低偏析高温合金和第20篇中低膨胀高温合金）；秦学智（第21篇涡轮叶片用高温合金）；王振生（第26篇涡轮机匣、涡轮轴和紧固件用高温合金）；彭胜（第73章高温合金的民用）。作者对他们的辛勤劳动表示衷心地感谢。

作者还要衷心感谢作者领导的研究小组的全体成员，包括全体博士后、博士生和硕士生，为完成高温合金所接受的各项课题我们共同奋斗多年，取得多项科研成果，为国家作出了我们应有的贡献，也为本书的撰写增加了丰富多彩的内容。从事高温合金研究作者的博士生和硕士生，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。他们已完成的硕士论文的有：孙超的“硫在铸造镍基合金中的分布及对合金性能的影响”；孙文儒的“P、S、Si对一种高温合金凝固偏析和组织性能的影响”；周兰章的“磷、硫、硅对IN718C合金显微组织和力学性能的影响”；魏标志的“含铝Ni3Al合金焊接性的研究”；廖鄂斌的“定向凝固合金DZ417G的应变疲劳与裂纹扩展行为的研究”；姚俊的“新型铸造镍基合金K452的疲劳行为”；方龙的“镍基高温合金K435氧化行为的研究”；李志军的“新型抗热腐蚀镍基高温合金K444的返回料应用研究”；赵越的“两种高温合金的氧化性能研究”；李友林的“镍基高温合

金 K445 的高温氧化、热腐蚀和热疲劳行为”；张剑的“镍基高温合金 K447 的热腐蚀与热疲劳性能的研究”；郭永安的“热处理对镍基高温合金组织和性能的影响”；彭志江的“含钨的镍基 K444 返回料合金力学行为与组织特征的研究”。已完成的博士论文有：袁超的“定向凝固镍基高温合金蠕变断裂行为的研究”；王铁利的“钴基返回料合金的力学行为与显微组织特征的研究”；李云的“五种镍基高温合金的高温氧化、热腐蚀及其防护涂层的研究”；侯介山的“两种抗热腐蚀镍基合金的微观组织及蠕变性能的研究”；肖旋的“两种高温合金及 NiAl 共晶合金的显微组织和力学性能”；郭晓光的“抗热腐蚀镍基高温合金的疲劳行为及机理”。

作者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和中国工程院院士胡壮麒先生在百忙中为本书亲自作序。感谢高温合金研究部对本书出版的有力支持。

作者感谢侯介山博士，他为本书的编辑和排版花费了大量时间和精力。感谢王丽华和李丽女士，她们为本书的文字输入作了大量工作。

作者感谢妻子李谷松工程师，她不仅在高温合金重大课题研究中作出了重要贡献，而且还在精神上全力支持和鼓励作者完成这本著作，在此书长达六年多的撰写过程中，她主动搜集和整理有关资料，并承担了全部家务劳动，使作者有更多的时间和精力全身心地投入本书的著述。

由于作者水平所限，书中肯定存在很多的不妥和错误之处，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高温合金在新世纪更加蓬勃的发展。

郭永安

2007. 9. 15

(2009年8月27日作了少量修改)

目 录

作者简介

序言(一)

序言(二)

前 言

(下册)

高温合金材料学——高温合金材料与工程应用—高温合金材料
(第十四篇~第二十篇)内容提要 1

第十四篇 变形高温合金和铸造高温合金

第四十三章 变形高温合金	7
43.1 变形高温合金的特点	7
43.1.1 合金化程度较低	7
43.1.2 γ' 相的数量较少	9
43.1.3 热加工塑性高变形抗力低	9
43.1.4 成分均匀组织稳定	11
43.1.5 晶粒细小疲劳强度高	12
43.1.6 产品种类多规格全	13
43.2 变形高温合金的组织与性能	13
43.2.1 变形高温合金的组织	13
43.2.2 变形高温合金的力学性能	14
43.3 难变形镍基高温合金 GH4049	17
43.3.1 合金成分特点	17
43.3.2 热处理和组织的特点	19
43.3.3 热加工特点	21
43.3.4 力学性能特点	22
43.3.5 合金应用	24