

粉末冶金高温合金论文集

——胡本芙教授从事粉末冶金高温合金研究 30 年

张义文 编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

粉末冶金高温合金论文集

——胡本芙教授从事粉末冶金
高温合金研究 30 年

张义文 编

冶金工业出版社

2013

内 容 简 介

本书总结了胡本芙教授 30 年来从事粉末高温合金研究的科研成果及发表的学术论文。全书由三部分组成:第一部分是胡本芙教授已经公开发表的论文;第二部分是胡本芙教授内部发表的论文;第三部分附录是胡本芙教授与其他人员合作发表的论文标题以及指导的本科、硕士、博士毕业论文标题。

本书可作为从事粉末高温合金研究和开发的科技工作者和工程技术人员以及相关专业的学生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金高温合金论文集:胡本芙教授从事粉末冶金高温合金研究 30 年/张义文编. —北京:冶金工业出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-5024-6449-3

I. ①粉… II. ①张… III. ①耐热合金—合金粉末—文集
IV. ①TG132. 3-53 ②TF123. 7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 265005 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 俞跃春 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6449-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2013 年 11 月第 1 版, 2013 年 11 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 19 印张; 4 彩页; 473 千字; 291 页

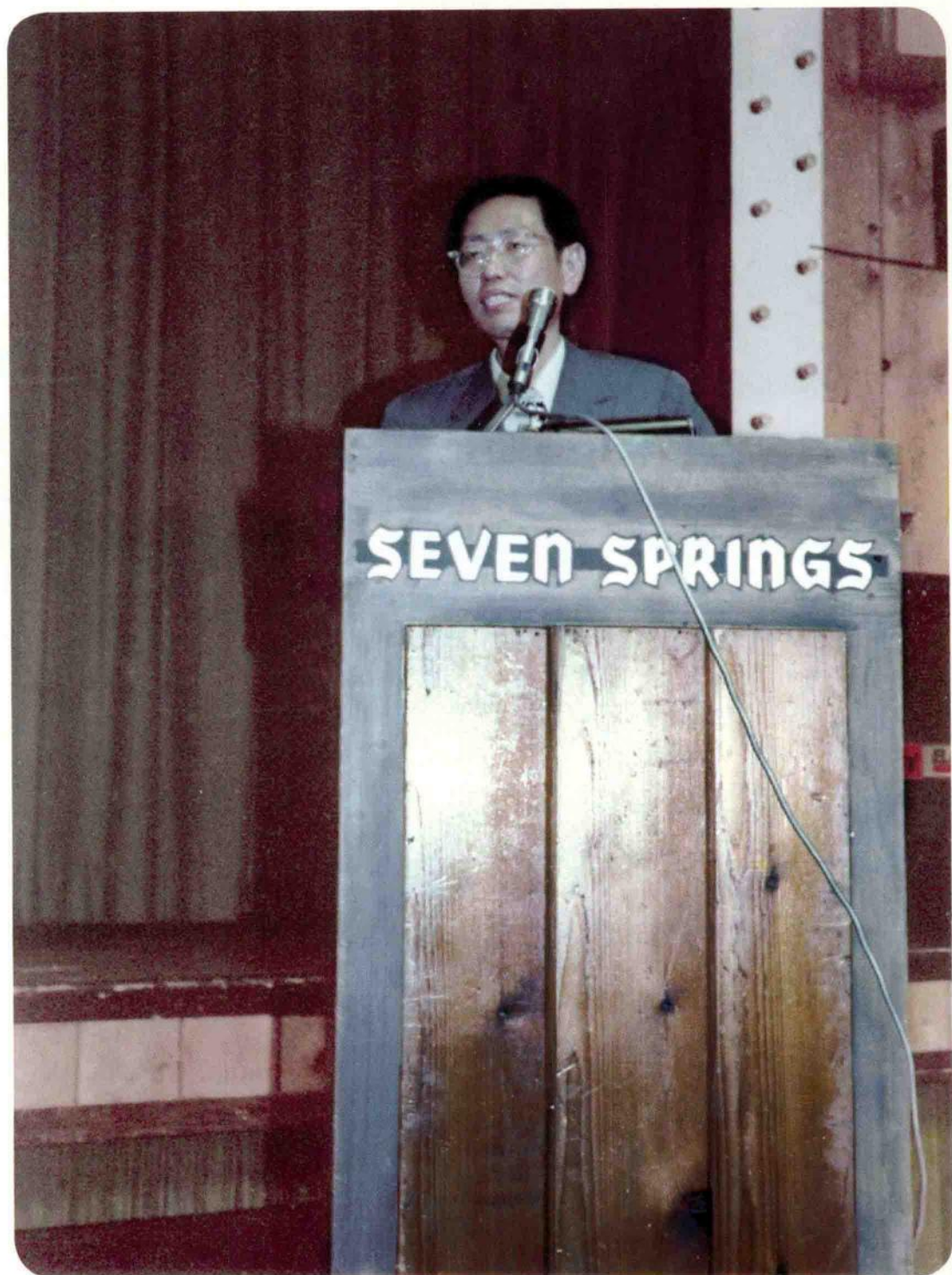
96.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



胡本芙教授 1980 年在美国举行的第四届国际高温合金会议上



胡本芙教授(左一)
出席 1980 年在美国举行的
第四届国际高温合金会议期间代表团成员
与会议主席和田家凯教授
(左五)合影

胡本芙教授(右二)出
席 1980 年在美国举行的第
四届国际高温合金会议期间
代表团参观美国 GE 公司地
面燃气发动机实验室



1986 年胡本芙教授(右一)在北海道大学工学部留学期间与导师在超高压电镜室研究讨论问题



1993 年北海道大学授予胡本芙
(前排右)工学博士学位

胡本芙教授(右)和章守
华教授 1994 年出席在日本东
京举行的国际金属学会、钢
铁协会年会

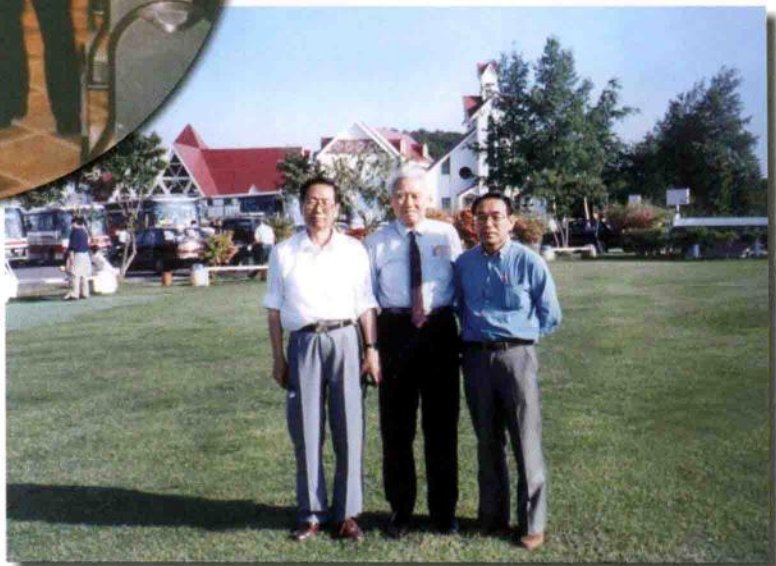


胡本芙教授(左)1994 年出席在日本东京举行的国际高温合金腐蚀会议



胡本芙教授(左一)1994年出席
日本北海道大学工学部成立70周
年学术交流会

2001年胡本芙教授
(左一)与导师章守华教
授(左二)和高桥平七郎
教授在北海道



2001年胡本芙
教授(右一)在武
钢出席中日新材
料技术交流会

2002 年胡本芙教授
(左三) 出席在包头举
行的国际合金稀土应用
研讨会



2002 年胡本芙教授 (前
排右) 和夫人李慧英教授 (前
排左) 与博士研究生合影 (后
排左一余泉茂, 后排左二陈
焕铭)



2005 年 5 月 20 日胡本芙教授 (左二) 出席刘建涛博士 (左五)
论文答辩说明会



2006年胡本芙教授
(右)与博士研究生田
高峰(现工作于北京航
空材料研究院)合影

胡本芙教授(右)
与博士研究生张义文
出席2007年在上海
举行的第十一届中国
高温合金年会



2009年胡本芙教授
在日本北海道大学新能
源研究中心21世纪新材
料中心实验室工作

胡本芙教授(右一)
与博士研究生(左一刘建涛,
左二张义文)出席 2011 年
在成都举行的第十二届中
国高温合金年会



2012年12月10日
胡本芙教授(左二)出
席张义文(右一)博士
论文答辩说明会

2013 年 1 月 4 日
胡本芙教授(右)出
席张义文博士毕业典
礼会





胡本芙教授 1990 年获冶金工业部科学技术进步三等奖



胡本芙教授 2001 年获国家级教学成果奖

(本书照片按时间顺序编排)

序 言

粉末冶金方法在高温合金生产中的应用是20世纪60年代末高温合金生产工艺技术的重要发展时期。这个技术的优点在于能显著地改善合金的化学成分偏析,达到组织的均匀一致性,从而提高产品的质量和性能。粉末高温合金涡轮盘是增高先进飞机发动机推重比,延长寿命,节约原材料的有效途径。世界上先进工业国家在经历第一、二代粉末高温合金后,第三代粉末高温合金的研制也已进入工程化快速发展阶段,相继开发出许多性能优良,使用温度在700℃以上的第三代粉末高温合金如:美国的 Alloy10、ME3 (René104)、LSHR、法国的 NR₃ 系列等,并成功地实现了双晶粒双组织高推重比航空发动机用双性能涡轮盘。

我国粉末高温合金的研制起步较晚,1981年在冶金工业部和航空工业部的领导下,由钢铁研究总院、北京航空材料研究所(现北京航空材料研究院)、北京钢铁学院(现北京科技大学)和北京航空学院(现北京航空航天大学)组成联合科研组正式在我国开展粉末高温合金研究工作。1984年底采用氩气雾化(AA)制粉+热等静压(HIP)成形+包套模锻工艺研制出 $\phi 420\text{mm}$ 涡轮盘件。后于1995年在西南铝加工厂的3万吨水压机上,使用等离子旋转电极(PREP)工艺制取粒度为50~100 μm 粉末,同样采用HIP成形+包套模锻工艺成功地研制出 $\phi 500\text{mm}$ 以上大尺寸FGH95合金粉末涡轮盘,取得了丰硕成果。我国粉末高温合金研制经过艰苦努力地工作,目前可以批量生产压气机盘、涡轮盘、涡轮轴、涡轮挡板等粉末高温合金热端部件。

北京科技大学胡本芙教授是我国首批参加粉末高温合金研发队伍的主要科研骨干成员,他从合金制粉、加工成形直到测试组织性能,亲自工作在科学实验第一线,积累了丰富的粉末高温合金实践、研究经验和具有较强的科研组织能力。北京科技大学粉末高温合金研制工作密切配合联合科研组的工作进程,针对粉末高温合金生产工艺中影响合金质量一些关键因素和基础理论问题进行了探索和研究,寻找其产生的原因和对合金组织性能的影响,以及防止其产生和减少其危害性的途径。在粉末高温合金研制的初期阶段(“六五”、“八五”和“九五”期间),研究内容主要针对提高合金低周疲劳性能影响最大的问题

开展系统地研究工作,如:雾化过程中粉末颗粒凝固及凝固组织;粉末颗粒表面化学成分;金相组织和原颗粒边界(PPB)问题;陶瓷夹杂物的本质及来源;热等静压、锻造及热处理过程中淬火裂纹等工艺对合金组织的影响。这部分研究结果是对粉末高温合金以及其制造工艺初步认识阶段性总结也编辑在本书里。

从“十一五”、“十二五”开始,国内对高性能粉末高温合金的需求日益迫切和增大,对已研究成功的一代(FGH95)、二代(FGH96)粉末高温合金急需开展大量工程化研究,第三代(FGH98)粉末高温合金也得到国家积极地支持立项研究,本书就是在这种对粉末高温合金强烈需求的形势下完成的,具有重要的参考价值。

在分析和总结国内外特别是国内粉末高温合金实践和发展的基础上,新世纪开始,粉末高温合金课题组首先在国内系统地介绍先进工业国家开展第三代粉末高温合金研制双性能涡轮盘开发研究的新成果以及相关工艺技术,同时围绕我国第二代(FGH96)粉末高温合金工程化中一些重要基础性理论问题进行深入研究,如:建立强化相 γ' 相与固溶冷却速度和其尺寸的定量关系,提出 γ' 相多阶段析出模型。揭示热处理固溶冷却过程中 γ' 相形态失稳表现形态和形成机制以及含微量元素铪(Hf)的FGH97合金在长期时效热处理时发现铪元素促进立方状 γ' 相分裂,形成低能稳定的 γ' 相“择优形态”的机理;在开发研究第三代(FGH98)粉末高温合金时对 γ' 相扇形结构这一特殊失稳形态的形成动力学和机理以及消除或改善其形态的有效工艺技术等进行具有创新性研究,对我国粉末高温合金成分优化设计和组织调控都有重要指导作用。

本书总结了胡本芙教授30余年研究粉末高温合金发表的学术论文,也凝集了几届参与粉末高温合金研究的莘莘学子的心血,留下他们刻苦钻研和辛勤劳动的足迹。本书是迄今看到最为详尽介绍粉末高温合金的专集,是一本颇具实用价值的参考书,可作为从事粉末高温合金研究和开发的科技工作者和工程技术人员以及高温合金专业的研究生的参考资料,相信本书的出版对促进我国粉末高温合金生产、研究和工程应用起到积极的作用。

章宇华

2013年8月25日

感 言

30年来,我在北京科技大学材料科学与工程学院粉末高温合金研究过程中,特别是在著名的粉末高温合金教育和研究的先驱者章守华教授领导下,取得了一定成绩。粉末高温合金研究组将本人研究初期未公开发表和公开发表的学术论文进行整理、汇总,编辑出版本书,以此来见证我国粉末高温合金从起步、仿制、消化、独自创新的艰辛曲折的过程,同时也记录着为发展我国粉末高温合金事业,我校的各届众多学子为之所付出的辛勤劳动。

本书出版首先应当感谢钢铁研究总院高温材料研究所粉末高温合金工程中心主任、教授级高工张义文博士,在他的积极倡议和热情支持下本书才得以顺利出版。我特别感谢尊敬的导师章守华教授在百忙中为本书亲自作序,也感谢刘国权教授热情支持和学术梯队中多名博士和硕士生帮助收集整理复印论文工作,对钢铁研究总院高温材料研究所粉末高温合金工程中心刘建涛博士和其他同事为本书出版也付出辛勤劳动表示谢意。

由于作者认识水平所限以及各种条件限制,论文中肯定存在不妥错误之处,恳请各位同行和读者批评指正。

最后希望本书的出版有助于推动我国粉末高温合金领域超越式向前发展。

胡亦美

2013年9月6日

编者的话

时间飞逝，斗转星移。自1989年1月，我于北京科技大学材料科学与工程系金属材料与热处理专业硕士研究生毕业，在钢铁研究总院高温合金研究室（现高温材料研究所）从事粉末高温合金工作，现已近25载。2007年9月重返母校攻读博士研究生，又转瞬即逝，于2013年1月4日取得北京科技大学工学博士学位。回想5年半的博士生活，留恋之情，不禁油然而生，忙碌而充实的学习生活给予我很多，收获颇多。学校是我们成就事业的摇篮，老师是我们起航的风帆。胡老师的谆谆教诲和辛勤培养，使我踏入了粉末高温合金应用基础理论研究的殿堂。胡老师广博的学识，丰富的阅历，独特的视角，扎实严谨的治学态度，实事求是的科学精神，时时刻刻影响着我。

胡本芙教授是我国最早从事粉末高温合金研究的专家学者之一，是国内粉末高温合金领域的知名学者。1981年冶金工业部和航空工业部组织了由钢铁研究总院、北京航空材料研究所（现北京航空材料研究院）、北京钢铁学院（现北京科技大学）和北京航空学院（现北京航空航天大学）参加的联合研制课题组，共同研制FGH95粉末高温合金。从此，胡本芙教授开始从事粉末高温合金的研究工作。胡本芙教授在30年的粉末高温合金领域教学和研究中，培养了近20名硕士和博士研究生，撰写了百余篇学术论文。

为总结胡本芙教授从事粉末高温合金研究30年的科研成果，也为方便从事粉末高温合金研究人员学习和查阅文献，决定编写本书。本书由三部分组成：第一部分是胡本芙教授已经公开发表的论文，对当时公开发表的印刷错误做了修改，参考文献保持原样；第二部分是胡本芙教授内部发表的论文，略去了英文标题、中英文摘要和关键词，参考文献参照GB/T 7714—2005编写；第三部分附录是胡本芙教授与其他人员合作发表的论文标题，以及指导的本科、硕士研究生、博士研究生毕业论文标题。

在本书编写的过程中，胡本芙教授的很多学生给予了积极的支持，在论文整理方面北京科技大学的肖翔博士、马文斌博士和杨万鹏硕士、吕文婷硕士，

钢铁研究总院的刘建涛和黄虎豹做了大量的细致工作，钢铁研究总院的贾建、迟悦、孙志坤及吴超杰参加了论文的校对工作，对此表示衷心感谢！

本书的出版希望能对从事粉末高温合金工作的科技人员，尤其是年轻的科技人员和大专院校的学生有一点帮助和启示。

在本书的搜集和整理过程中，难免有疏漏和不周之处，恳请读者谅解。

本书的出版得到了“国家重点基础研究发展计划”资助（课题编号：2010CB631204），在此表示感谢！



2013年9月9日于钢铁研究总院

胡本芙教授简介

一、教育与研究历程

1960年毕业于原北京钢铁学院（现北京科技大学）工艺系金相热处理专业后，留校任教，担任特冶系高温合金教研组助教和讲师，1985年因军工课题需要调至金相教研组，在章守华教授直接领导下承担国家攻关项目“先进航空发动机用粉末高温合金涡轮盘研制”课题组。先后参加国家“六五”、“八五”和“九五”计划中粉末高温合金盘件研究的专项课题，并承担高温合金学，金属材料及热处理课程教学工作。1986年赴日本北海道大学先进能源材料工学研究中心作为访问学者进修，从事新能源低活性长寿命低肿胀奥氏体型钢研究，于1993年获日本北海道大学工学部工学博士学位和兼职研究员，1995年任北京科技大学材料科学与工程学院博士生导师。曾任物理测试学会常务理事，金属学会会员，核学会会员和河北理工大学客座教授，日本北海道大学先进能源工学中心客座教授。

从1981年开始参与我国粉末高温合金涡轮盘研制专项攻关课题，在章守华教授指导下，通过与钢铁研究总院通力合作，系统地开展我国粉末高温合金应用理论和工业技术基础理论研究，开拓我国粉末高温合金基础理论研究的新局面，取得有创新性的理论研究成果。

1993年开始与日本北海道大学先进能源工学中心开展双边国家课题合作研究，并参加日美联合聚变堆高温结构材料课题研究工作。在低肿胀辐照机理和辐照诱起晶界偏析行为等方面提出创新观点，获得同行的赞许。

二、粉末高温合金理论研究和成果

根据章守华教授的研究思路与指教，胡本芙教授具体带领课题组从应用基础理论出发，通过大量科学实验在粉末颗粒凝固过程、夹杂物分析检测、原粉末颗粒表面成分、PPB析出相的形成、预热处理工艺和组织、最佳热处理工艺制度和盘坯淬火开裂成因以及先进双性能盘件合金中强化相 γ' 的形态演化行为等方面开展系统深入研究，对推动我国粉末高温合金工业技术发展起到有益指导作用。

（一）基元-粉末颗粒凝固及相析出行为研究

首次应用牛顿流体力学微元分析法，描述PREP法熔滴凝固热学参数和对急凝固粉末组织的影响，为制粉工艺参数优化和改进制粉工艺技术提供理论依据。采用一级碳萃取复型先进实验技术（专利），系统研究基元-粉末颗粒（PREP法）表面和内部亚稳碳化物，提出粉末凝固过程中剩余液体成分变化决定合金元素扩散速率，影响和改变亚稳碳化物形态的论点，在国际学术界也未见报道。率先在国内开始系统研究基元粉末预热处理和松散粉末热变形过程，并指出两者是改变亚稳碳化物稳定性和分布的有效技术，为粉末预