

中国高温合金五十年

师昌绪 仲增璜 主编

1956~2006

冶金工业出版社

中国高温合金五十年

师昌绪 仲增墉 主编

1956~2006

北 京

冶金工业出版社

2006

内 容 简 介

本书介绍了近 10 年来我国高温合金体系的发展、研究重点和最新成就、高温合金产品的应用状况、企业批产过程中产品的质量问题的企业重组和技术优势以及高温合金加工技术的发展等内容,反映了我国 50 年来在高温合金领域所取得的重大研究进展和应用成果。

图书在版编目(CIP)数据

中国高温合金五十年/师昌绪等主编. —北京:冶金工业出版社, 2006. 8

ISBN 7-5024-4073-9

I. 中… II. 师… III. 耐热合金—冶金工业—经济发展—中国—文集 IV. F426.3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 085949 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 张 卫(联系电话:010-64027930; 电子信箱:bull2820@sina.com)

王雪涛(联系电话:010-64062877; 电子信箱:zbs@cnmip.com.cn)

美术编辑 王耀忠 责任校对 刘 倩 李文彦 责任印制 牛晓波
北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版

2006 年 8 月第 1 版, 2006 年 8 月第 1 次印刷

210 mm×285 mm; 14.75 印张; 4 彩页; 473 千字; 227 页; 1—620 册

為我國國防建設及經
濟發展艱苦奮鬥五十
載，取得令人矚目的成
就。願高溫合金界同仁
繼續努力，加強團結，
做出更大貢獻！

師昌緒



二〇〇六年八月



中国

高温合金五十年

祝贺中国高温合金五十年出版

坚持艰苦奋斗的光荣传统
弘扬独立自主的创新精神
为促进我国航空工业腾飞
再铸辉煌！

颜山泉



空天基石 材料超星

贺我国高温合金发展
五十周年纪念

傅立本
2006.8.



中国

高温合金五十年

高温合金五十年硕果累累，

业绩辉煌，

全国同仁新世纪齐心协力，

再攀高峰。

敬贺中国高温合金艰苦创业五十年！

胡北祺

2006年8月14日

自主创新
协同发展
持续展
再创辉煌

贺高温合金五十年纪念

陈永良
2016.8



中国
高温合金五十年

自主创新地发展 我国的高温合金 材料

仲增埭

2006.8.

《中国高温合金五十年》编委会

主 编 师昌绪 仲增墉

副主编 冯 滌 郭建亭 韩雅芳 谢锡善 张国庆
张玉春 王治政

顾 问 颜鸣皋 傅恒志 胡壮麒 陈国良

委 员 (以姓氏笔画为序)

王治政	王剑志	田树森	冯 滌	仲增墉
孙晓峰	张玉春	张国庆	张 继	李嘉荣
金 鑫	杨洪才	赵明汉	郭建亭	董建新
韩雅芳	谢锡善			

编 辑 袁 英 庄景云 童金涛 陈惠霞

序

XU

今年是我国生产出第一炉高温合金的 50 周年。10 年前,在我国高温合金界同仁共同努力下,曾编写过一本《中国高温合金四十年》(中国科技出版社出版)。如今 10 年过去了,10 年来,航空工业的需求、航天工业的发展及燃气轮机的兴起,促使几乎停滞不前的我国高温合金的研制与生产有了突飞猛进的发展,特别是我国经济的高速增长及钢铁工业的蓬勃发展,以及企业体制的重大改革,使有些企业的高温合金的生产装备明显改善,生产能力与产品质量控制能力大幅度提高,因此有必要在庆祝“中国高温合金五十年”之际,再次总结我国高温合金的发展历程,并展现我国当前高温合金研制与生产的现状,以使我国高温合金工作者了解过去、策划未来,以期在我国中长期科技规划和国民经济和社会发展规划指导下,为使我国成为创新型国家做出应有的贡献!

众所周知,材料是高新技术的物质基础和先导,高温材料则是提高动力力学性能、节约能源、降低污染关键之所在。以航空发动机为例,其性能的改善(包括推力的提高,推重比的增加)80%以上靠材料,其中高温合金、钛合金、金属间化合物是关键;在现在航空发动机中,高温合金占有特殊重要地位。因此,我国高温合金工作者任重道远,必须团结起来,像 20 世纪六七十年代一样,做到军民结合,薄名利、重奉献,一心为国家的繁荣昌盛而努力奋斗。与此同时,为了实现跨越发展,还要做到科研—设计—制造相结合;为了达到未雨绸缪,必须做到材料先行,这就要求材料科学工作者既要重视基础性研究工作,充分发挥首创精神,又要实事求是,把工作做深做透,使我们所开发出的新材料、新技术立于不败之地。

今年是中国金属学会高温材料分会正式成立一年,特此祝贺,同时并感谢分会为出版《中国高温合金五十年》所做的多项努力!

师昌绪

2006. 4. 17

前 言

QIAN YAN

为了庆祝和纪念我国第一炉高温合金研制成功 50 年,以及 50 年来我国在高温合金领域取得的重大进展和成就,庆祝中国金属学会高温材料分会的成立,我们在 1996 年出版《中国高温合金四十年》的基础上,撰写了《中国高温合金五十年》专集。本专集由从事高温合金研究、试制、生产、应用的研究和设计院所、高等院校、生产与制造厂、应用与管理部門的专家和科技工作者共同撰写。这两本专集较全面地反应和汇总了我国高温合金 50 年的发展和成就。

《中国高温合金五十年》专集主要汇总了近十年来我国高温合金领域科研、生产技术创新和发展方面取得的成就。在这 10 年中,我国航空、航天、舰船、石化和电站等国民经济领域快速发展,高温合金产品的市场需求随之增长。在国家财力支持和企业自身调整改革的基础上,企业通过引进先进的生产制造设备,加大了技术改造的力度。另外,通过国际交流、外包加工等渠道获得的高温合金技术信息和先进的管理经验,促进了高温合金新工艺和新技术的开发与应用。

《中国高温合金五十年》收录了近 10 年来有关高温合金体系的发展、领域研究重点和最新成就、高温合金产品的应用状况、企业批量生产过程中产品的质量問題、企业重组和技术优势以及高温合金加工技术的发展等综述性文章。本专集的不妥之处,恳请读者指正。

《中国高温合金五十年》编委会

2006 年 7 月

目 录

MU LU

大力协同 努力创新

——纪念中国高温合金五十年 仲增墉 师昌绪	1
我国高温合金体系的发展 赵明汉 张国庆 孙晓峰 杨洪才	8
高温合金在航空发动机上的应用 韩雅芳 郭建亭 冯 滌	17
高温合金在航天领域中的应用 赵光普 李俊涛 冯 滌	29
高温合金国际交流及展望 谢锡善	40
我国高温合金标准的发展 王 晔 刘志盈 戴 强	43
我国变形高温合金生产技术近十年的发展 田树森 金 鑫 王剑志 庄景云	52
高温合金冶炼新技术 冯 滌 陈希春 孙晓峰 杨玉军	57
我国 GH4169 合金的发展与应用 杜金辉 邓 群 董建新	66
我国高温合金细晶铸造技术和应用 燕 平 汤 鑫 刘 林	72
定向凝固柱晶高温合金的发展 胡壮麒 殷克勤 孙家华	81
定向凝固高温合金工程化应用研究 刘庆琼 张世东 马凌霄 何继绥	87
单晶高温合金的发展 李嘉荣 金 涛 燕 平	95
发动机叶片近净形熔模精密铸造技术 曹腊梅 张 勇 薛 明	103
我国粉末冶金高温合金研究成果及进展 张义文 陶 宇	110
粉末冶金高温合金与制造技术在航空上的应用与发展 邹金文 汪武祥	118
高温合金快速凝固雾化与沉积技术 张国庆 李 周 田世藩	126
Ni-Al 系金属间化合物研究的最新进展 韩雅芳 郭建亭 骆合力	133
Ti-Al 系金属间化合物研究与应用 张 继 张建伟 林均品	141
ODS 高温合金的应用与发展 柳光祖 田 耘 杨 峥	149
低膨胀高温合金的应用与发展 韩光炜 赵宇新	155
燃气轮机大型涡轮盘研究进展 赵光普 张北江 郭建亭 袁 超	164
重型燃气轮机热端零件用铸造高温合金的研究 郭建亭 周兰章 袁 超 李俊涛	172
高温合金的电磁场制备及其对合金组织和性能的影响 杨院生 胡壮麒	181
微量元素在高温合金中分布与作用的研究进展 徐庭栋 孙文儒	186

我国高温合金领域若干基础问题研究 董建新 刘 林 王 磊	198
高温合金加工技术的应用和近年来的发展 王 良	206
高温合金焊接近十年进展 毛 唯 郭德伦	212
高温防护涂层的发展 宫声凯 徐惠彬 陆 峰 张春刚	216
高温合金材料和制件的无损检测 史亦韦 李家伟	219

大力协同 努力创新

——纪念中国高温合金五十年

仲增墉 师昌绪

自1956年第一炉高温合金GH3030试炼成功,迄今为止,我国高温合金的研究、生产和应用已经历了五十年的发展历程。回顾五十年的历史,我国的高温合金从无到有,从仿制到自主创新,合金的耐温性能从低到高,先进工艺得到了应用,新型材料得以开发,生产工艺不断改进和产品质量不断提高,并建立和完善了我国的高温合金体系,使我国航空、航天工业生产和发展所需的高温合金材料立足于国内,也为其他工业部门的发展提供了需要的高温材料(图1)。

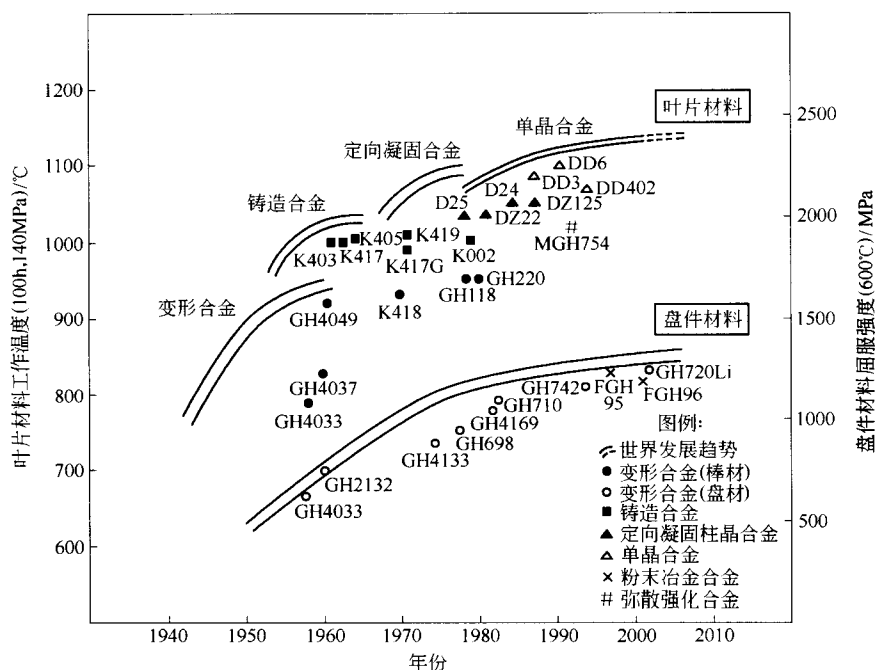


图1 世界高温合金(涡轮叶片、盘件)的发展趋势和我国主要合金的研制

根据2002年出版的《中国航空材料手册》,我国目前可供航空选用的高温合金牌号89个,其中铁基变形合金14个,镍基变形合金30个,钴基变形合金3个,等轴铸造镍基合金26个,定向凝固镍基合金9个,单晶镍基合金5个,金属间化合物镍基铸造合金2个。在2005年7月发布的《高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号》国家标准中,列入了包括可供航空、航天及其他工业部门选用的高温合金牌号共177个。

历经五十年的发展,我国高温合金生产已形成了生产装备比较先进、具有一定规模的生产基地,其中变形高温合金生产厂有:东北特殊钢集团抚顺特殊钢公司(简称抚钢),宝钢股份公司特殊钢分公司(简称宝钢特钢)和攀钢集团长城特殊钢公司(简称攀长钢);锻件的热加工厂有:西南铝业公司(简称西南铝),第二重型机械集团万航模锻厂(简称二重),红原航空锻铸公司(简称红原)和安大航空锻造公司(简称安大);有生产精密铸件的各航空发动机公司的精密铸造厂(车间),也形成了一批研究水平较高,研究手段较齐备的研究单

位:钢铁研究总院、北京航空材料研究院、中国科学院金属研究所、北京科技大学、东北大学、西北工业大学等;形成了一支产学研相结合、有较高技术水平、有自主创新能力的专业技术队伍。在此基础上,我国已具备了高温合金新材料、新工艺自主开发和研究的能力,进行应用研究和对材料进行评估的能力以及进行故障分析的能力,可以解决航空、航天及其他工业部门生产和发展中所遇到的各种高温合金材料问题。

1 我国高温合金发展的三个阶段

五十年来我国高温合金的发展可以分为三个阶段:

第一阶段,从1956年至20世纪70年代初是我国高温合金的创业和起始阶段。在苏联专家的指导下炼出的第一炉高温合金GH3030(ЭИ435)拉开了我国研制和生产的序幕。1960年后,当时的国际形势要求我国必须独立自主地研制和生产主要歼击机发动机WP-5、WP-6、WP-7和WP-8等所需的各种高温合金材料。为此,必须建立和完善我国高温合金的生产基地和研究基地,配备相应的生产、检测设备和科研仪器设备。这一阶段的主要成果是仿制苏联高温合金为主体的合金系列,如GH4033、GH4037、GH4049、GH2036、GH3030、GH3039、GH3044、K401、K403、K406等。然而,这些合金的生产工艺主要是靠我们自己通过实践来探索,因为高温合金的生产在苏联被列为绝密,不但得不到书面资料,就是购买合金材料也受到限制。为此,在“自力更生、大力协同”的方针指导下,根据国内航空发动机研制与生产的需求,在十分艰苦的条件下,开展了所需高温合金的试制工作,开发了有我国特色的工艺,形成了与我国装备相适应的生产路线,原合金的性能也得到了改善。与此同时还自主开发了一批新合金,特别针对我国缺镍少铬的资源情况,研制出一批铁镍基高温合金,以其代替当时用量较大的GH4033(GH2135)、GH4037(GH2130, GH2302)等,其中用量最大的是替代GH3030板材的GH1140合金。

在这个阶段,值得一提的是在1964年讨论为歼八配套的发动机时,提出了开发空心涡轮叶片的大胆构想,以满足提高涡轮前温度100℃的需求。当时调动全国科研力量,采取科研-设计-制造三结合的形式,提出锻造、铸造与细丝编网三个方案并进。用了不到两年的时间,前两个方案都完成了任务,而编网方案由于积碳烧蚀问题难以解决(国际上至今也没解决)。但是10余年后这项技术作为丝网多孔发散面板材料在航天液氢-液氧发动机上,找到更重要的用途。采用以K417合金制出的空心铸造涡轮叶片,当时是很先进的,落后于美国五年,而英国罗罗公司认为铸造涡轮叶片不够安全而没有发展,我国采用真空技术解决了这一难题,40多年来已生产35万片,装备了几乎所有先进歼击机,未曾产生过重大事故。

第二阶段,从20世纪70年代中至90年代中期,是我国高温合金研发的提高阶段。随着试制和生产一些仿欧美型号的航空发动机,引进了一系列欧美体系的合金,特别是在WS9、WZ6和WZ8等发动机所需高温合金材料的研制中,全面引进欧美技术,按国外的技术标准进行研制和生产,对材料的纯洁度、均匀性和综合性能提出了比过去更高的要求。为此,增添了一批新的生产工艺设备,如大型真空冶炼设备、快锻机、精锻机等和先进检测设备,进一步改进了生产工艺,在生产中建立了质量管理体系和更严格的质量管理程序,按照国外的规范加强质量控制和质量检测工作。这一阶段的工作,不但研制成功一系列新的合金,包括高性能变形合金、铸造合金、定向凝固和单晶合金,而且更重要的是,使我国高温合金在生产工艺技术和产品质量控制等方面上了一个新台阶,基本达到或接近西方工业发达国家的水平。

第三阶段,从20世纪90年代中至今,是我国高温合金研发的新阶段。这一阶段的特点是应用和开发出一批新工艺,研制和生产了一系列高性能、高档次的新合金。随着新型先进航空发动机的设计、研制和生产,要求研制和发展高性能的新材料。为此,建立和完善了旋转电极制粉工艺粉末高温合金生产线,研制了粉末涡轮盘材料FGH4095、FGH4096;采用机械合金化工艺技术,研制了氧化物弥散强化高温合金MGH4754、MGH2756;研制了第一代、第二代单晶高温合金DD402、DD408、DD406等和新型定向凝固柱晶合金DZ4125、DZ4125L、DZ604M和DZ417G以及低膨胀系数合金GH2907、GH2909以及耐热腐蚀、可锻可铸的高铬合金GH4648等。

与此同时,我国主要生产品种GH4169盘件的生产有了进一步发展,表现为合金的应用面不断扩大,盘件和锭型尺寸增大,锭型从过去的 $\phi 406$ mm扩大至 $\phi 610$ mm,质量明显改善且得到稳定。

航天和导弹用高温合金也有了新的发展,舰用和地面燃气轮机用高温合金的研制也得到了重现,除耐热腐蚀铸造涡轮叶片外,大型难变形合金盘件,如 GH4742、GH4698 等的制造也取得了重要进展。

在新发展期中,还进行了企业组织结构调整,变形高温合金的生产集中到抚钢、宝钢特钢和攀长钢三个企业。在国家和企业共同努力下,进一步改善了生产工艺设备,抚钢新建了一台 6/12 t 真空感应炉,12 t 真空自耗炉,3000 t 快锻设备;宝钢特钢新建了 12 t 真空感应炉,10 t 真空自耗炉,5/20 t 保护气氛电渣炉,4000 t 快锻设备,1300 t 精锻机,3000 t 等温锻设备和 8000 t 压力机(也可用于等温锻造);攀长钢新建了一台 6 t 真空感应炉,改进了管材生产装备。航空发动机公司的精密铸造厂建立了定向凝固和单晶炉。西南铝、二重、红原和安大等锻造厂也都进一步改进了原有的工艺及装备,并开展了热模锻和等温锻造等新工艺方面的工作。装备和工艺的改善,有力地推动了高温合金材料的研制和质量的提高。

2 新发展阶段中的科技进步与创新

2.1 冶炼工艺的进步

冶炼工艺进步的标志之一是合金锭型大型化。为了生产大尺寸盘件,必须熔炼优质的大锭型,同时需要解决大锭型中出现的严重偏析和其他缺陷。过去我国在 GH4169、GH4698 合金生产的最大锭型是 $\phi 406$ mm 锭,目前已扩大至 $\phi 610$ 和 $\phi 660$ mm 锭。为了得到优质的大锭型,采取了一系列技术措施,如真空自耗炉采用氦气冷却,采用真空感应+电渣重熔+真空自耗熔炼三联工艺,真空自耗熔炼采用先进的熔炼控制方法等。

为了改善电渣重熔效果,宝钢特钢还采用了惰性气体保护电渣重熔,有利于进一步降低合金中的气体和夹杂物。

2.2 热加工工艺的创新

由于高温合金的难变形特性以及我国尚无大型挤压机和先进的大型热模锻、等温锻造等设备,我国高温合金材料的热加工面临很大的困难。为此,研究开发了一系列结合我国国情的、有特色的热加工工艺技术。

大锭型高温合金锭的开坯在我国只能通过快锻机上的自由锻造进行,为防止开坯锻造时出现裂纹甚至断裂,必须采取有效措施,防止锭表面的大幅度降温。简易的方法是在锭表面覆盖一绝热保温层,但此法在操作时劳动条件恶劣,而且在锻造时,保温层脱落,影响保温效果。近年来,开发了一种绝热材料软包套技术,用一种玻璃料作为黏结剂,将绝热保温层材料黏结在锭的表面,以防止温降,而且在锻造时也不会脱落,取得了良好的保温效果。实践表明,用此技术可对 GH4742、GH4698、GH4586 等难变形合金的大型锭和特难变形的 GH4720Li 合金顺利地进行自由锻开坯。

难变形合金饼材的墩粗和盘件的模锻至今一直采用我国开发的用不锈钢薄板和硅酸铝纤维包套技术以及模锻时采用圆饼中心掏空的工艺,以解决模锻设备压力不足的问题,近年来包套技术得到进一步改进和完善。

为了减少冷模具对模锻盘件上下底部组织的不利影响,研究开发了热模具模锻工艺,将模具温度加热到 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$,对 GH4169 盘件进行了试验,取得了较好的结果。对等温锻造也进行了试验研究,效果良好,能够降低锻造压力并改善模锻件的组织。目前采用的等温锻模具为铸造高温合金材料,因此可以不用惰性气体保护,但模具的寿命和成本将会是今后等温锻工艺应用和推广的主要障碍之一。

目前,国内的条件已完全可以生产直径为 1 m 以上的大型盘件,工艺也已比较成熟。

2.3 变形高温合金生产和质量水平显著提高

最突出、最典型的范例是 GH4169 合金的研究和生产取得的全面进展。无论在国外,还是在国内, GH4169 合金是用量最多,应用范围最广的一个主要品种。在我国,该合金主要用于涡轴发动机的甩油盘、鼓筒轴、涡轮螺栓等各种重要零件,先进歼击机发动机用盘件等各种关键部件以及航天火箭发动机的关键热部件,这些应用领域对材料质量提出了严格的要求。为此,特别在以下 4 方面进行了大量工作: