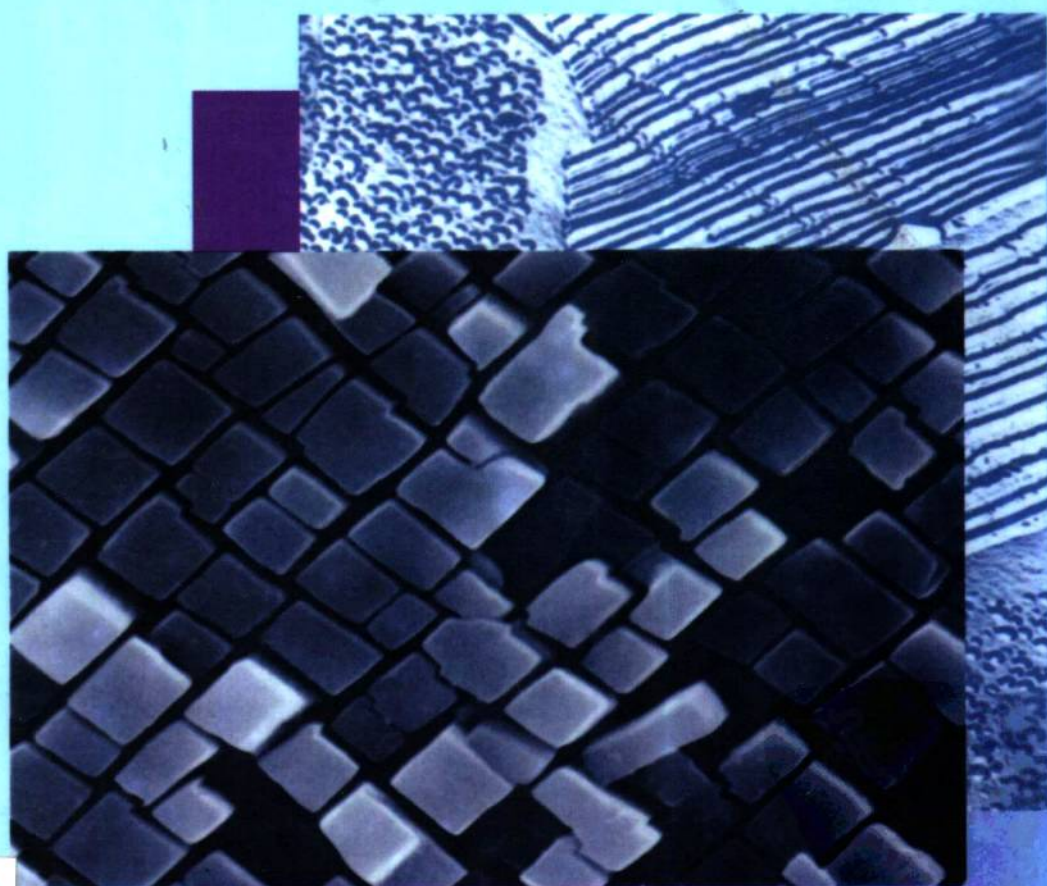


特 殊 钢 丛 书

高温合金

黄乾尧 李汉康 等编著



冶金工业出版社

特殊钢丛书

高温合金

黄乾尧 李汉康 等编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2000

内 容 简 介

《高温合金》是由中国金属学会特殊钢专业学会组织编写的《特殊钢丛书》之一,它是我国第一本全面介绍高温合金专业科技知识的实用参考书。内容包括高温合金发展简史;高温合金强化原理及其成分、组织和性能;高温合金熔炼、塑性变形和精密铸造工艺;高温合金表面稳定性和强韧化;航空、航天和民用高温合金系列以及计算机材料辅助设计等。本书可供冶金、航空、航天、动力机械、石油化工、能源等工业部门的广大科技人员和高等院校的有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温合金/黄乾尧,李汉康等编著. —北京:冶金工业出版社,
2000.4

(特殊钢丛书)

ISBN 7-5024-2481-4

I. 高… II. ①黄… ②李… III. 耐热合金 IV. TG132.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 66196 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 王成蓓 王雪涛 美术编辑 李 心 责任校对 王贺兰

北京昌平百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2000 年 4 月第 1 版,2000 年 4 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;13 印张;345 千字;401 页;1—2000 册

30.00 元

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

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《特殊钢丛书》编辑工作委员会

(按姓氏笔画为序)

主任委员	刘嘉禾	杨 栋	
委 员	马绍弥	王洪发	王建英
	关玉龙	刘福魁	那宝魁
	范小媛	林慧国	侯树庭
秘 书 长	林慧国		

序

特殊钢是钢铁工业的一个重要领域。特殊钢的品种繁多,性能各异,质量要求高,应用范围广,国家的经济建设、国防建设乃至人民的日常生活都与特殊钢有密切关系。因而通常把特殊钢品种、质量、产量作为衡量一个国家钢铁工业科学技术和工业化水平的重要尺度。

当前,我国的四化建设和改革开放正向深广方向发展,中共中央和国务院作出关于加强科学技术进步的决定,广大职工积极要求掌握科学技术专业知识。在这样的形势下,中国金属学会特殊钢专业学会发起并组织编写一套具有自己特色的《特殊钢丛书》,是有时代意义的。

这套丛书分卷撰写,陆续出版。本丛书是由中国金属学会特殊钢专业学会及其15个专业学术委员会组织国内冶金与材料界的知名专家教授编写的,因此具有一定的权威性。编写这套丛书是为了介绍中国特殊钢工业的发展情况和科学研究成果以及国外在这方面的进展情况,总结和整理国内老一辈专家们的丰富学识和实践经验。这套《特殊钢丛书》将重点介绍特殊钢的现代生产工艺技术、特殊钢各大钢类钢种的性能特点和应用指南,为特殊钢生产、科研和使用部门的科技人员在职学习提供素材,为有关大专院校师生提供教学参考。

组织编写特殊钢方面的系列图书,在国内尚属首次,在国外也不多见,难免存在疏漏和不足之处,欢迎指正。期望这套《特殊钢丛书》能在普及提高科学知识、合理生产和合理使用钢材方面发挥积极作用。

《特殊钢丛书》编委会

前 言

高温合金于 20 世纪 40 年代问世,最初主要是为满足喷气发动机对材料的苛刻要求而研制的。今天,先进的航空发动机中,高温合金用量所占比例高达 50% 左右。可以毫不夸张地说,没有高温合金,就不可能有高速、高效率、安全可靠的现代航空事业。此外,在航天、核工程、能源动力、交通运输、石油化工、冶金等领域,高温合金也有广阔的用途。

我国高温合金起步于 1956 年。40 多年来,我国的高温合金从无到有,从仿制到独创,至今已研制和生产了百余种牌号的高温合金,建立了我国高温合金体系,保证了我国国防工业及民用工业对高温合金的需求。

我国高温合金所取得的成就举世瞩目,主要有:(1)开发和研制了一批新的铁基和镍基高温合金,特别是 60 年代研制成的 GH1140、GH2135、GH761 和 K214 等铁基高温合金,成功地代替相应的镍基合金,在我国得到广泛应用,具有国际水平。(2)结合国情,在 60 年代就创造性地发展和应用了高温合金生产新工艺和新技术,如电渣重熔工艺、电渣熔铸涡轮盘技术、难变形高温合金的包套挤压、包套轧制和包套锻造、模锻的热加工工艺以及多孔空心叶片精铸工艺等。(3)全面、系统地研究了镁、磷、硅等微量元素的作用,广泛有效地采用了镁微合金化技术,发现了磷、硅等元素在高温合金中的偏析作用,并开发出低偏析高温合金系列。

本书以我国高温合金的研究、生产和使用实践为基础,结合国外最新研究成果,对高温合金专业技术知识作了全面介绍,为从事高温合金研究、开发、生产和使用的技术人员及其相关院校师生提供基础理论和生产实用知识。

本书共 13 章,分别由下列人员撰写:第 1、8、12 章由黄乾尧执笔,第 2、4、13 章由陈国良执笔,第 3、5 章由郭建庭执笔,第 6、11

章由李汉康执笔,第7章由张舒声和黄乾尧执笔,第9章由周瑞发和丁桂山执笔,第10章由柳光祖执笔,全书最后由黄乾尧做了必要的修改和补充。

在全书写作过程中,高温合金学术委员会和在高温合金领域长期共同工作的同事们给予了大力支持和帮助,在此一并致谢。由于作者水平所限,书中错误和不足之处,敬请指正。

编 者

目 录

1 高温合金概述	(1)
1.1 国外高温合金发展简史	(1)
1.2 我国高温合金发展历程	(2)
1.3 高温合金的性能特征及其用途	(4)
1.4 高温合金分类和牌号表示法	(6)
参考文献	(8)
2 高温合金强化原理	(9)
2.1 高温合金中基体元素的作用	(9)
2.2 高温合金的固溶强化	(11)
2.3 高温合金的第二相强化	(18)
2.4 高温合金的晶界强化	(32)
2.5 高温合金的强化工艺途径	(41)
参考文献	(46)
3 高温合金韧化途径与机理	(47)
3.1 控制 TCP 相的析出	(48)
3.2 加入适量有益微量元素	(53)
3.3 控制晶粒尺寸与形状	(57)
3.4 提高合金纯洁度	(62)
参考文献	(65)
4 高温合金显微组织	(67)
4.1 高温合金的典型显微组织	(67)
4.2 异常的显微组织	(69)
4.3 高温合金中的成分偏析	(70)
4.4 高温合金中各类第二相的典型金相形态	(72)
4.5 平衡态组织与实用相图	(83)
4.6 高温合金中过渡态组织与相间转化	(89)

4.7	高温合金显微组织的识别与显示	(93)
	参考文献	(99)
5	高温合金表面稳定性及表面强韧化	(100)
5.1	高温合金的氧化	(100)
5.2	高温合金的热腐蚀	(110)
5.3	高温合金的涂层防护	(122)
5.4	表面残余应力与喷丸处理	(125)
5.5	粗晶与表面晶粒细化	(129)
5.6	表面损伤与改性	(130)
	参考文献	(132)
6	高温合金热处理	(134)
6.1	铁基和镍基合金热处理	(134)
6.2	铸造高温合金热处理	(140)
6.3	钴基高温合金热处理	(146)
6.4	高温合金的退火热处理	(147)
6.5	弯曲晶界热处理	(150)
7	高温合金熔炼工艺	(153)
7.1	电弧炉熔炼	(154)
7.2	感应炉熔炼	(160)
7.3	电渣重熔	(162)
7.4	真空感应炉熔炼	(169)
7.5	真空电弧炉重熔	(186)
7.6	其他重熔工艺	(190)
	参考文献	(193)
8	高温合金铸造技术	(194)
8.1	熔模精密铸造	(194)
8.2	定向凝固及单晶铸造	(213)
8.3	细晶铸造	(227)
8.4	喷涂铸造	(236)
	参考文献	(245)

9 高温合金热加工	(246)
9.1 高温合金热加工基础	(246)
9.2 高温合金的锻轧生产	(264)
9.3 热加工对高温合金组织的影响	(276)
9.4 热加工对性能的影响	(284)
10 粉末高温合金	(299)
10.1 绪言	(299)
10.2 粉末的制备	(303)
10.3 粉末的固实	(308)
10.4 粉末高温合金的组织与性能	(310)
10.5 粉末高温合金的缺陷及其控制	(315)
参考文献	(316)
11 航空、航天用高温合金	(318)
11.1 燃烧室用高温合金	(318)
11.2 导向器用高温合金	(320)
11.3 涡轮叶片用高温合金	(321)
11.4 涡轮盘用高温合金	(322)
11.5 航天火箭发动机用高温合金	(324)
12 民用高温合金	(345)
12.1 柴油机和内燃机用增压涡轮	(346)
12.2 烟气轮机	(348)
12.3 工业燃气轮机	(350)
12.4 内燃机阀座用高温合金	(355)
12.5 玻璃工业应用	(356)
12.6 冶金工业应用	(359)
12.7 石化工业应用	(360)
参考文献	(361)
13 高温合金的设计与选用	(363)
13.1 高温合金显微结构计算机辅助设计	(364)
13.2 蠕变和持久强度数据的获得、分析和外推	(380)

13.3	接近使用条件下的力学性能与寿命·····	(388)
13.4	计算机辅助材料选择·····	(396)
	参考文献·····	(400)

1 高温合金概述

1.1 国外高温合金发展简史

高温合金的发展与航空发动机的进步密切相关。1929 年, 英美的 Merica、Bedford 和 Pilling 等人将少量的 Ti 和 Al 加入到 80Ni-20Cr 电工合金, 使该合金具有显著的蠕变强化作用, 但这并未引起人们的注意。1937 年德国 Hans von ohain 涡轮喷气发动机 Heinkel 问世, 1939 年英国也研制出 Whittle 涡轮喷气发动机。然而, 喷气发动机热端部件特别是涡轮叶片对材料的耐高温性和应力承受能力具有很高要求。1939 年英国 Mond 镍公司(后称国际镍公司)首先研制成一种低 C 且含 Ti 的镍基合金 Nimonic 75, 准备用作 Whittle 发动机涡轮叶片, 但不久, 性能更优越的 Nimonic 80 合金问世, 该合金含铝和钛, 蠕变性能至少比 Nimonic 75 高 50℃。1942 年, Nimonic 80 成功地被用作涡轮喷气发动机的叶片材料, 成为最早的 $Ni_3(Al, Ti)$ 强化的涡轮叶片材料。此后, 该公司在合金中加入硼、锆、钴、钼等合金元素, 相继开发了 Nimonic 80A、Nimonic 90……等合金, 形成 Nimonic 合金系列。

美国的 Halliwell 于 1932 年开发了含铝、钛的弥散强化型镍基合金 K42B, 该合金在 40 年代初被用以制造活塞式航空发动机的增压涡轮。美国开始发展航空燃气涡轮是在 1941 年以后。Hastelloy B 镍基合金 1942 年用于 GE 公司的 Bellp-59 喷气发动机及其后的 I-40 喷气发动机, 1944 年西屋公司的 Yan Kee19A 发动机则采用了钴基合金 HS 23 精密铸造叶片。美国对精密铸造叶片情有独钟, 主要是由于其生产效率高于锻造叶片。1950 年美国出兵朝鲜, 由于钴的资源短缺, 镍基合金得到发展并被广泛用作涡轮叶片。在这一时期, 美国的 PW 公司、GE 公司和特殊金属公司分别开发出了 Waspalloy、M-252 和 Udmit 500 等合金, 并在这些

合金发展基础上,形成了 Inconel、Mar-M 和 Udmit 等牌号系列。

在高温合金发展过程中,工艺对合金的发展起着极大的推进作用。40 年代到 50 年代中期,主要是通过合金成分的调整来提高合金的性能。50 年代真空熔炼技术的出现,合金中有害杂质和气体的去除,特别是合金成分的精确控制,使高温合金前进了一大步,出现了一大批如 Mar-M 200、In 100 和 B 1900 等高性能的铸造高温合金。进入 60 年代之后,定向凝固、单晶合金、粉末冶金、机械合金化、陶瓷过滤等温锻造等新型工艺的研究开发蓬勃发展,成为高温合金发展的主要推动力,其中定向凝固工艺所起的作用尤为重要,采用定向凝固工艺制出的单晶合金,其使用温度接近合金熔点的 90%,至今,各国先进航空发动机无不采用单晶高温合金涡轮叶片。上述高温合金的发展过程如图 1-1 所示。

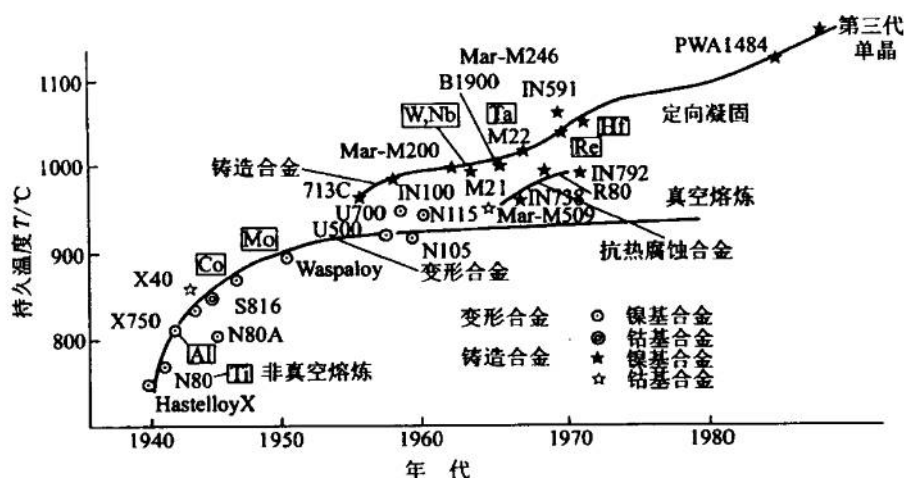


图 1-1 高温合金的发展历程
(在 137MPa、100h 的持久温度)

1.2 我国高温合金发展历程

和国外一样,航空喷气发动机生产的需要是我国高温合金发展的动力。1956 年我国正式开始研制生产高温合金,第一种高温合金是 GH3030(ЭИ435),用作 WP-5 火焰筒,由抚顺钢厂、鞍山钢

铁公司、冶金部钢铁研究总院、航空材料研究所和 410 厂共同承担试制任务,1957 年顺利通过长期试车后投入生产。到 1957 年底,继 GH3030 合金之后,WP-5 发动机用的 GH4033 (ЭИ437Б)、GH34(ЭИ415)和 K412 合金相继试制成功。

60 年代初,全国在“独立自主、自力更生”的方针指引下,先后研制成功 GH4037、GH3039、GH3044、GH4049、GH3128、K417 等高温合金,至 70 年代初,我国高温合金的生产试制和研究已初具规模,在这一阶段通过仿制、消化和发展苏联高温合金为主体的合金及其工艺,质量达到或超过苏联标准和实物水平,航空发动机所需材料全部立足于国内。

由于我国资源缺镍少钴,又有国外的封锁,铁基高温合金的研制、生产和应用成为六七十年代的一道绚丽的风景线。至 70 年代初,研制生产的铁基高温合金牌号达 33 个,其中我国独创的达 18 种之多。大量应用至今的有 GH1140、GH2135、GH35A 和 K213 等 4 种合金。

70 年代以后,我国开始引进欧美发动机 WS-8、WS-9、WZ-6、WZ-8,并研制生产 WP-13 等发动机,相应引进和试制了一批欧美体系的高温合金,并按欧美标准进行质量管理和生产,使我国高温合金生产水平接近西方工业国家的水平。与此同时,我国自行研究和开发了一批新的镍基合金,如 GH4133、GH4133B、GH3128、GH170、K405、K423A、K419 和 537 等。

40 多年来,我国在自力更生的基础上,学习和吸收外国先进技术,结合我国航空发动机研制和生产的需要,研究、试制和生产了 100 多种高温合金,总计产量达 6 万 t 左右。用于生产高温合金的装备有大型真空感应炉,不同容量的电渣炉,1~7t 大型真空电弧炉,200kg 真空电子束炉以及大型快锻、精锻机、挤压机、水压机等设备。

在高温合金体系建立过程中,还研究开发了一系列有特色的工艺技术,其中低偏析新技术和加镁微合金化两项水平之高,为国际公认。通过低偏析技术,控制杂质元素磷、硫、硅等的低含量,创

制了一系列低偏析合金,其承温能力比原型合金高 $20^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 。在国外加 Mg 净化材质和改善热加工性能基础上,我国七八十年代进一步发现 Mg 的偏聚晶界、改变晶界行为可显著提高合金的持久强度和塑性等性能。

从 60 年代开始,为适应我国航天工业的发展,先后为各种火箭发动机研制了一批高温合金,其中有些是专为航天工业的需要而开发的。1964 年,高温合金开始推广应用到民用工业部门,如柴油机增压涡轮、地面燃气轮机、烟气轮机、核反应堆燃料空位格架等等。在民用工业的推广应用,除传统的高温高强度的高温合金外,还相继开发出一批高温耐磨和高温耐蚀的高温合金。

1.3 高温合金的性能特征及其用途

高温合金是指以铁、镍、钴为基,能在 600°C 以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属材料。高温合金具有较高的耐高温强度,良好的抗氧化和抗热腐蚀性能,良好的疲劳性能、断裂韧性、塑性等综合性能。高温合金为单一奥氏体基体组织,在各种温度下具有良好的组织稳定性和使用的可靠性,基于上述性能特点,且高温合金的合金化程度很高,故在英美称之为超合金(Super-alloy)。

高温合金从一开始就主要用于航空发动机,在现代先进的航空发动机中,高温合金材料用量占发动机总量的 $40\% \sim 60\%$,可以说高温合金与航空喷气发动机是一对孪生兄弟,没有航空发动机就不会有高温合金的今天,而没有高温合金,也就没有今天的先进航空工业。在航空发动机中,高温合金主要用于四大热端部件,即:导向器、涡轮叶片、涡轮盘和燃烧室。

除航空发动机外,高温合金还是火箭发动机及燃气轮机高温热端部件的不可替代的材料。鉴于高温合金用途的重要性,因此对高温合金质量之严,检测项目之多,是其他金属材料所没有的。高温合金外部质量要求有外部轮廓形状、尺寸精度、表面缺陷清理方法等。如锻制圆饼应呈鼓形且不能有明显歪扭;锻制或轧制棒

材不圆度不能大于直径偏差的 70%，其弯曲度每米长度不能大于 6mm；热轧板材的不平度每米长度不能大于 10mm 等等。高温合金内部质量要求有化学成分、合金组织、物理和化学性能等。高温合金的化学成分除主元素外，对气体氧、氢、氮及杂质微量元素铅、铋、锡、锑、银、砷等的含量都有一定的要求。一般高温合金分析元素达 20 多种，单晶高温合金分析元素达 35 种之多。如铋、硒、碲、铊等微量有害元素的含量要求在 10^{-6} 以下。合金组织有低倍和高倍要求外，还要提供其高温下的组织稳定性的数据，其检测项目有晶粒度、断口分层、疏松、晶界状态，夹杂物的大小和分布，纯洁度等等。高温合金力学性能检测项目有室温及高温拉伸性能和冲击韧性，高温持久及蠕变性能，硬度，高周和低周疲劳性能，蠕变与疲劳交互作用下的力学性能，抗氧化和抗热腐蚀性能。为了说明合金的组织稳定性，不仅对合金铸态、加工态或热处理状态进行上述力学性能测定，而且合金经高温长期时效后仍需进行相应的力学性能测定。高温合金物理常数的测定通常包括密度、熔化温度、比热、热膨胀系数和热导率等。

为了保证高温合金生产质量和性能稳定可靠，除上述材料检验和考核外，用户还必须对生产过程进行控制，即对生产中的原材料、生产工艺、生产设备和测量仪表、操作工序和操作人员素质，生产和质量管理水平等进行考核和“冻结”。合金转厂生产除具备考核条件外，经有关航空生产工程来源批准后，生产出的合金必须检验三炉批全面性能，并检查主要生产工序中半成品质量。新研制的合金还需经地面台架试车和空中试飞，作出能否应用的鉴定结论。

70 年代以来，高温合金在原子能、能源动力、交通运输、石油化工、冶金矿山和玻璃建材等诸多民用工业部门得到推广应用，这类高温合金中一部分主要仍然利用高温合金的高温高强度特性，而另有一大部分则主要是开发和应用高温合金的高温耐磨和耐腐蚀性能。据资料报导，目前美国高温合金总产量约为每年 2.3~3.6 万 t，大约 1/2~1/3 应用于耐蚀的材料。高温耐磨耐蚀的高