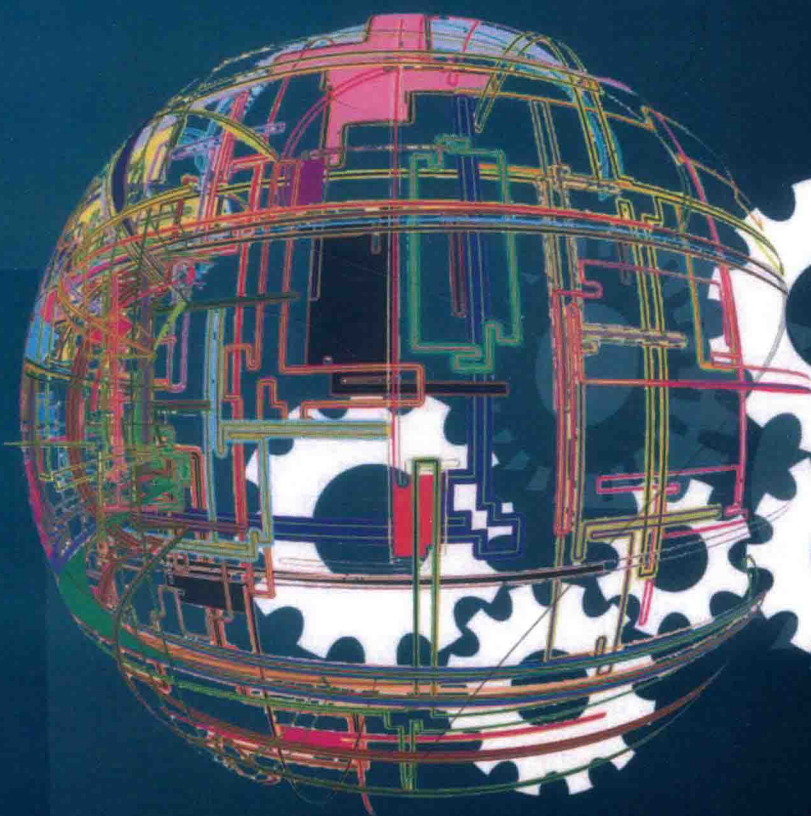




先进高温结构材料的 制备与加工技术研究

项宏福 著



国家一级出版社



中国纺织出版社

全国百佳出版单位

先进高温结构材料的制备 与加工技术研究

项宏福◎著

 中国纺织出版社

内容提要

Nb-si 系金属间化合物基高温结构材料以及先进高温结构材料紧密铸造技术, 变形高温合金、液态金属雾化高温合金粉末制备与喷射成形技术、粉末高温合金等内容。本书有计算推导公式算法原理等理论内容, 也有工艺技术实践方面的介绍, 亦有行业发展展望和国内外研究成果。本书内容深入浅出, 编排结构合理, 可用于高等院校师生教学参考, 也可以作为结构材料科研院所人员的参考读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进高温结构材料的制备与加工技术研究 / 项宏福. — 北京: 中国纺织出版社, 2018.11

ISBN 978-7-5180-5732-0

I. ①先… II. ①项… III. ①高温结构材料—制备②

高温结构材料—加工 IV. ①TB35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 280493 号

责任编辑: 闫 星

特约编辑: 王佳新

责任印制: 王跃杰

中国纺织出版社出版发行

地 址: 北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码: 100124

销售电话: 010-67004422 传真: 010-87155801

<http://www.c-textile.com>

E-mail: faxing@c-textile.com

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 <http://weibo.com/2119887771>

虎彩印艺股份有限公司印刷 各地新华书店经销

2018 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 880mm × 1230mm 1/16 印张: 12.75

字 数: 195 千字 定价: 36.00 元

凡购买本书, 如有缺页、倒页、脱页由本社图书营销中心调换

前 言

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。高温合金的发展水平在一定程度上反映了一个国家的科技力量和工业水平。今天，在先进的航空发动机中，高温合金所占的比重高达 60% 以上；高温合金在航天、核工业、能源动力、石油化工、交通运输等领域也有广泛的应用。高温合金是目前军工和民用航空发动机及地面燃气轮机热端部件不可替代的关键结构材料。可以毫不夸张地说，没有高温合金，就不可能有高性能的航空发动机。

我国高温合金起步于 1956 年。50 多年来，我国的高温合金从无到有，从仿制到自主创新，合金的承温能力从低到高，我国已研制和生产了百余种牌号的高温合金，建立了自己的高温合金体系，使我国高温合金材料在世界也有了立足之地。

北京航空材料研究院自 1956 年建院就设置了高温合金专业，参加了我国第一个高温合金的研制，逐步形成了包括变形高温合金、铸造高温合金、粉末高温合金及超高温结构材料在内的完整的高温结构材料专业体系，并于 2002 年成立了先进高温结构材料重点实验室。至今，北京航空材料研究院高温结构材料专业已走过了 56 年的历史。在此期间，创业的艰辛、事业的发展、人才的成长、成果的涌现，令世人瞩目。目前，北京航空材料研究院的先进高温结构材料重点实验室已成为我国最大的高温结构材料与技术研究发展中心之一，为我国航空发动机的研制与生产作出了重大贡献。

本书以高温结构材料的研究实践为基础，结合国内外研究成果，较全面地介绍了高温结构材料的专业知识与最新进展。由于作者水平有限，书中的瑕疵在所难免，诚挚地希望读者批评与指正。

2018 年 10 月

项宏福编著

目 录

第一章 绪论.....	1
第一节 高温结构材料的起源.....	1
第二节 高温结构材料的作用与地位.....	3
第三节 高温结构材料的发展.....	4
第四节 高温结构材料的发展前景.....	13
第二章 Ni_3Al 基和 Nb-Si 系金属间化合物基高温结构材料.....	16
第一节 概述.....	16
第二节 Ni_3Al 基高温结构材料.....	22
第三节 Nb-Si 系超高温结构材料.....	37
第三章 先进高温结构材料精密铸造技术.....	47
第一节 概述.....	47
第二节 涡轮叶片精密铸造技术.....	51
第三节 陶瓷超高温结构材料及其精密铸造技术.....	81
第四章 变形高温合金.....	89
第一节 概述.....	89
第二节 变形高温合金的强化机理与成分设计.....	90
第三节 变形高温合金的制造工艺.....	99
第四节 变形高温合金的热处理与组织.....	107
第五节 变形高温合金的缺陷控制.....	117
第五章 液态金属雾化高温合金粉末制备与喷射成形技术.....	124
第一节 概述.....	124
第二节 液态金属雾化.....	128

第三节 氩气雾化高温合金粉末制备 133

第四节 高温合金喷射成形技术 144

第五节 液态金属雾化高温合金粉末制备与喷射成形技术的未来发展

..... 155

第六章 粉末高温合金.....157

第一节 概述 157

第二节 粉末高温合金的成分设计与强化机理 166

第三节 粉末制备技术 177

第四节 粉末高温合金盘件制造技术 178

第五节 粉末高温合金的组织与性能 186

第六节 粉末高温合金的冶金质量控制 188

参考文献.....195

第一章 绪论

第一节 高温结构材料的起源

高温合金 (Superalloys) 是指以铁、镍、钴为基, 能在 600℃ 以上的高温环境下抗氧化或耐腐蚀, 并能在一定应力作用下长期工作的一类金属材料。

最先出现的高温合金是以冷、热变形方式加工成形的高温合金。随着时代的发展、技术的进步, 在变形高温合金之后, 相继发展了铸造高温合金、粉末高温合金, 从而逐渐形成了以成形方式分类的变形高温合金 (Wrought Superalloys)、铸造高温合金 (Cast Superalloys)、粉末高温合金 (Powder Metallurgy Superalloys) 体系。

英国是最早研究高温合金的国家。1939 年, 英国 Mond 镍公司首先在 80Ni-20Cr 电热合金中加入了 0.3% 的 Ti 和 0.1% 的 C, 成功研制出了镍基合金 Nimonic75, 用于制造火焰筒等零件。为了提高蠕变强度, 该公司又将 Nimonic75 合金的 Ti 含量提高到 2.5%, 并加入 1% 左右的 Al, 发展成 Nimonic80 合金, 1942 年被成功地用作涡轮喷气发动机的叶片, 成为最早的 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 强化的涡轮叶片材料。1944 年, 对 Nimonic80 合金的 Al 和 Ti 含量稍加调整, 并改进生产工艺, 发展成 Nimonic80A 合金。1945 年, 用 20% 的 Co 替代 Ni, 由 Nimonic80A 发展成 Nimonic90 合金。1951 年, 把 Nimonic90 合金的 Al 和 Ti 含量进一步提高, 发展成了 Nimonic95 合金。此后, 该公司在合金中加入 B、Zr、Co、Mo 等合金元素, 相继开发了 Nimonic100、Nimonic105 等合金, 形成 Nimonic 合金系列。

美国变形高温合金的发展晚于英国。1942 年, 美国钴业公司开发出了

Hastelloy 镍基变形高温合金，用于通用电器公司研制的 Bell-59 和 I-40 喷气发动机。1950 年，由于钴资源短缺，镍基合金得到了迅速发展并广泛用作涡轮叶片。同期，美国的 P&W 公司、GE 公司和特殊金属公司分别开发出了 Waspalloy、M-252 和 Udimet500 等合金，并在这些合金基础上，形成了 Inconel、Mar-M 和 Udimet 等合金系列。20 世纪 50 年代初期，国际镍公司成功研制 Inconel718 合金，该合金用 γ'' 和 γ' 强化，用途越来越广，用量越来越大，目前仍被广泛应用。

国外铸造高温合金的发展始于 20 世纪 40 年代。由于受当时的锻造设备过载和变形高温合金可锻性限制，因此各国开始寻求采用铸造成形方式制备高温合金构件，首次研制的是钴基铸造高温合金。铸造的 Vitallium 钴基合金增压涡轮叶片于 1942 年由 Austenal 公司制成，精密铸造部件于 1945 年用于美国第一台燃气涡轮发动机。后来，由于钴资源短缺，促使转而研究镍基高温合金。20 世纪 50 年代后期，铸造镍基高温合金的开发超过钴基高温合金，这主要是由于发现了稳定的、共格的金属间化合物 γ' 相强化，镍基高温合金显示出了优异的强度。工业用真空感应熔炼和真空精密铸造两种新技术的出现，为进一步开发铸造镍基高温合金提供了可能。二十世纪六七十年代，相继出现了许多高性能铸造镍基高温合金。促使铸造高温合金发展的主要因素有：精密铸造工艺比精密锻造工艺更经济；高强度、高合金化变形高温合金难以锻造成形，更难以制成具有复杂内腔的空心叶片，而铸造高温合金能实现复杂内腔气冷结构，在获得高温强度的同时，能把复杂内腔气冷涡轮叶片直接铸造成形。

随着航空发动机的发展，对涡轮盘用高温合金工作温度及性能的要求日益提高。由于合金化程度提高，铸锭偏析严重、冷热加工工艺性能变差，采用传统变形工艺制备高合金化的变形高温合金已不能满足要求；并且由于粉末冶金方法制备的高温合金较变形高温合金成分均匀、晶粒细化，力学性能得到提高，粉末冶金作为一种生产难变形合金的方法用于高温合金的研制，从而形成的粉末冶金高温合金成为主流。英国率先采用水雾化技术制备了第一批高温合金——预合金粉末。20 世纪 60 年代，美国在英国之后进一步发展了粉末制备技术，改用惰性气体雾化制取预合金粉末，避免了粉末的氧化和污染，由此高纯预合金粉末制备技术开始兴起。1972 年，美国 P&W 公司采用热等静压、热挤压和超塑性等温锻造

等现代成形工艺，成功研制出第一种涡轮盘用粉末高温合金 IN100，并用于航空发动机的涡轮盘和压气机盘等部件。目前，粉末高温合金已广泛应用于先进航空发动机。

航空发动机的发展要求不断提升涡轮前温度，这对材料提出了越来越高的要求。目前，航空发动机中广泛应用的镍基高温合金材料接近其最高使用温度极限，发展潜力有限，难以满足未来高推重比航空发动机的需要。因此必须寻求承温能力高、比强度优越的替代材料。作为镍基高温合金的替代材料，由于 Nb-Si 系金属间化合物基高温结构材料等具有高熔点、低密度以及优良的高温强度，有希望被开发成为用于航空发动机涡轮叶片的高温结构材料。

第二节 高温结构材料的作用与地位

航空发动机工作环境十分苛刻，承受着高温、高速、高载和氧化腐蚀的共同作用。单晶高温合金涡轮叶片等甚至长期工作在“极限”状态，因而对材料有着更加特殊严格的要求。高温合金不仅拥有优良的高温强度、良好的抗氧化和耐腐蚀性能，而且还拥有良好的综合性能，如蠕变性能、疲劳性能、断裂韧性、组织稳定性、工艺性能等。

高温合金出现伊始就用于航空发动机。在现代航空发动机中，高温合金材料主要用于热端部件，如涡轮叶片、涡轮盘、燃烧室、压气机盘，还用于机匣、环形件、尾喷管及紧固件等部件。在先进航空发动机中，高温合金的重量占航空发动机重量的 60% 以上。高温合金研制与生产能力体现了一个国家航空工业的发展水平。可以说没有高温合金，就没有先进的航空工业。

高温合金不仅主要用于航空发动机，而且还用于火箭发动机、舰船与地面燃气轮机。目前，高温合金在核工业、能源动力、交通运输、石油化工、冶金矿山、玻璃建材等领域得到广泛应用。高温合金是国防建设和国民经济发展不可替代的关键材料。

第三节 高温结构材料的发展

一、变形高温合金的发展

变形高温合金是最先研制出的高温合金，自其出现以来，发展很快，牌号众多，应用广泛。变形高温合金通常有三种分类方法，即按合金基体元素种类、合金强化类型和合金应用品种分类。

变形高温合金按合金基体元素可分为铁基、镍基和钴基合金。20世纪60年代，中国开始自主研制第一个铁基板材变形高温合金 GH1140，这是至今仍在生产和应用的铁基高温合金之一，该合金具有中等的热强性、高塑性、良好的热疲劳性能、组织稳定性和焊接工艺性能，适宜于制造工作温度在 850℃ 以下的高温部件。英国 Nimonic80A 为镍基变形高温合金，我国于 80 年代初发展了相近牌号 GH80A 合金，该合金使用温度在 700℃ ~ 800℃，在 650℃ ~ 850℃ 具有良好的抗蠕变性能和抗氧化性能，加工性能良好。美国 Haynes Alloy188 为钴基变形高温合金，我国仿制形成了相近牌号 GH5188 合金，该合金具有优良的高温热强性，良好的高温抗氧化性，同时具有令人满意的成形、焊接等工艺性能，适于制造 980℃ 以下要求高强度和 1100℃ 以下要求抗氧化的零件。

变形高温合金按合金强化类型可分为固溶强化合金和沉淀强化合金。美国 Hastelloy X 为固溶强化变形高温合金，我国发展了相近牌号 GH3536 合金，该合金具有良好的抗氧化和耐腐蚀性能，在 900℃ 以下有中等的持久和蠕变强度，冷、热加工成形性和焊接性能良好。GH1016 是我国自主研制的固溶强化变形高温合金，该合金具有较高的热疲劳性能，冷冲压成形和焊接工艺性能良好，适宜制造工作温度 950℃ 以下的燃料室板材结构件。Inconel718 是美国于 1959 年公开的沉淀强化变形高温合金，我国于 1968 年开始仿制并形成相近牌号 GH4169 合金，该合金在 -253℃ ~ 650℃ 温度范围内具有良好的综合性能，650℃ 以下的屈服强

度居变形高温合金的首位，并具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化、耐腐蚀性能以及良好的加工性能、焊接性能和长期组织稳定性，该合金不仅可用变形方法制备构件，也可用铸造或粉末冶金的方法制备构件，主要用于制备盘件，也用于制备紧固件与叶片，应用十分广泛，已成为世界上产量最大、应用最广的高温合金。GH2302 为我国自主研发的沉淀强化变形高温合金，可在 700℃ 以下长期使用，组织与性能稳定，用于制造加力燃烧室零件。

变形高温合金按应用品种可分为板材用合金、叶片及紧固件用合金、盘件用合金、环形件用合金等。GH3128 合金为我国于 1958 年开始自主研发的板材用变形高温合金，该合金具有高塑性、较高的持久强度以及良好的抗氧化性和冲压、焊接性能，主要产品为冷轧薄板，适合制造 950℃ 下长期工作的高温零部件。Inconel718、Nimonic80A 合金综合性能好，用于制造涡轮叶片与压气机叶片。GH159(美国相近牌号 MP159) 为紧固件用高温合金，该合金具有超高强度、良好的塑性和高应力腐蚀抗力，并在 650℃ 下仍能保持高强度的特性。盘件用合金多数是沉淀强化的铁基或镍基变形高温合金，主要有 Inconel718、GH4133B、Waspaloy、U720Li 合金。我国镍基盘件用合金是从仿俄 ЭИ437Б 合金开始的，并形成了相近牌号 GH4033 合金。在 GH4033 合金基础上，我国创新性地发展了 GH4133 合金。为消除 GH4133 合金 750℃ 以下存在的缺口敏感性，由 GH4133 合金改型而成 GH4133B 合金，使材料的使用寿命成倍增加，大幅度地提高了持久强度和塑性，GH4133B 是我国在涡轮盘上应用的主要高温合金。GH738(美国相近牌号 Waspaloy) 合金具有良好的耐燃气腐蚀能力、较高的屈服强度和疲劳性能，工艺塑性良好，组织稳定，使用温度不高于 815℃。美国的 U720Li 合金是在 U720 的基础上发展而来的，U720Li 是合金化程度较高、变形较困难的高水平变形高温合金。美国航空发动机上的环形件大量采用了 Incoloy909 和 Inconel783 等系列低膨胀变形高温合金。Incoloy909 合金(我国相近牌号 GH909) 是在 Incoloy907 的基础上提高了 Si 含量，从而得到强度、韧性、抗应力加速晶界氧化(SAGBO) 及膨胀系数等性能良好的合金 Incoloy909 合金，成为目前国外 650℃ 以下高压压气机机匣等间隙控制构件广泛使用的低膨胀高温合金。但由于 Incoloy900 系列合金中不含 Cr，所以合金的抗氧化性能较差，因此国外又为推重

比为 10 的发动机 F119 的压气机机匣及间隙控制用零件研制了抗氧化型 Inconel 783（我国相近牌号 GH6783）低膨胀高温合金，该合金在 800℃仍可完全抗氧化。美国 Inconel706（我国相近牌号 GH706）合金在 700℃以下具有较高的强度、良好的抗氧化及耐腐蚀能力，主要用于环形件。

50 多年来，我国已发展了 70 多个变形高温合金，并在航空发动机上获得广泛应用，变形高温合金已成为用量最大的一类高温合金。但变形高温合金在发展过程中牌号繁多，材料的通用化、系列化、标准化长期未得到应有的重视。

在高温合金发展历程中，工艺进步始终与合金研制并行发展。20 世纪 50 年代出现的真空熔炼技术是工艺技术发展的里程碑，该技术消除了阻碍高温合金发展的有害杂质，可对合金元素进行精确控制。事实上，真空熔炼是高温合金发展最初 30 年中取得的最重要的工艺突破，是高温合金领域最重大的一项技术进步。

二、铸造高温合金的发展

继发明变形高温合金之后，20 世纪 40 年代开始发展铸造高温合金。铸造成形的特点，允许在铸造高温合金中添加多种合金元素，从而显著提高了合金性能。20 世纪 50 年代出现的真空熔炼技术和 60 年代出现的定向凝固技术是铸造高温合金发展历程中的重要里程碑，进一步提高了合金性能，极大地促进了铸造高温合金的应用。

铸造高温合金通常可以按合金基体元素和凝固结晶组织来分类。按合金基体元素种类不同，铸造高温合金可以分为铁基、镍基、钴基和铬基高温合金。按凝固结晶组织不同，铸造高温合金可以分为等轴晶铸造高温合金（Conventional Cast Superalloys）、定向凝固柱晶高温合金（Directionally Solidified Superalloys）和单晶高温合金（Single Crystal Superalloys）。

（一）等轴晶铸造高温合金

等轴晶铸造高温合金指用传统的熔模铸造方法制备铸件的高温合金，其晶粒组织为等轴晶。等轴晶铸造高温合金是铸造高温合金中种类最多的，已发展了铁基、镍基、钴基和铬基等轴晶铸造商温合金。

1. 概述

铸造高温合金是由母合金锭重熔后直接浇注成零件的高温合金，是在高温氧化腐蚀环境中长期稳定工作的金属结构材料。铸造高温合金最重要的用途是制造航空发动机、航天火箭发动机和各种工业燃气涡轮发动机涡轮叶片、导向叶片、整铸涡轮和导向器、增压器、涡轮机匣、尾喷管调节片等零部件。

铸造高温合金按凝固结晶组织分类，有等轴晶铸造高温合金、定向凝固柱晶高温合金和单晶高温合金。等轴晶高温合金铸件的晶粒组织呈多边形（二维方向）或多面体（三维方向）。

按照合金的基体元素分类，等轴晶铸造高温合金分为铁基等轴晶铸造高温合金（或铁-镍基）、镍基等轴晶铸造高温合金和钴基等轴晶铸造高温合金。

目前，铁-镍基和镍基等轴晶铸造高温合金的应用最广泛。铁-镍基等轴晶铸造高温合金由于价格便宜，在航空航天、地面和海洋等武器装备上得到了一定程度的应用。目前，除了 K4169 和 K213 两个牌号的合金还在被广泛应用以外，其他铁-镍基等轴晶铸造高温合金在航空和航天发动机以及地面燃气轮机上的应用日趋减少。K4169 合金主要用于制作航空发动机扩压器和机匣等大型复杂结构件以及航天火箭发动机涡轮泵等相关部件；K213 合金主要用于制作地面坦克用燃气轮机转子叶片和导向叶片。

镍基等轴晶铸造高温合金工作温度高、组织稳定、有害性少、抗氧化抗腐蚀性能好，是目前航空发动机用牌号最多、使用最广的铸造高温合金，如 K4648、K418（K418B）、K423A、K438G、K424、K417（K417G）、K4002、K403、K465、K447A、K419 等合金，广泛用于制造航空发动机的涡轮转子叶片、导向叶片、整体涡轮、整体导向器、扩压器和机匣等其他结构件。

2. 等轴晶铸造高温合金发展前景

随着航空发动机和地面燃气轮机的发展，要求等轴晶铸造合金不断提高使用温度和高温强度，这主要依赖于合金成分优化设计和工艺进步，发展方向如下：

（1）研制新型等轴晶铸造高温合金材料，根据合金化理论和冶金原理，采用计算机模拟技术设计出具有低密度、抗氧化和耐热腐蚀性好、抗高温蠕变疲劳、高损伤容限、高断裂韧性的等轴晶铸造高温合金新型材料。

(2) 改进和提高合金的熔炼工艺和设备, 将合金 O、N、S 等杂质元素的含量控制在 0.0005% 以下, 以提高合金的冶金质量水平。

(3) 采用快速凝固工艺可以降低合金元素偏析度, 使合金的成分、组织和性能稳定, 提高发动机批生产的可靠性。

(4) 应进一步加强高温合金大型复杂薄壁铸件的热控凝固技术 (TCS) 和细化工艺研究, 提高铸件的冶金质量和性能水平。

(5) 传统等轴晶铸造高温合金的改进改型。对有些传统等轴晶铸造高温合金进行改进改型研究, 如 IN718C (国内 K4169) 合金在发动机上的所占重量比较大, 目前美国已经发展到了 ALLVAC® 718PLUS 第二代合金, 合金中增加了 Co 和 W, 其他合金元素含量均进行了调整, 合金的性能得到了大幅度提高。我国根据需要, 已开展有关合金的改进改型研究。

3. 定向凝固柱晶高温合金

定向凝固柱晶高温合金指用定向凝固技术制备铸件的高温合金, 合金的组织是按照 [001] 方向生长排列的柱状晶, 基本上消除了垂直于晶体生长方向的横向晶界。与等轴晶铸造高温合金相比, 其平行于晶体生长方向 (纵向) 的高温蠕变强度较高, 尤其是中高温强度和塑性以及高温热疲劳性能显著提高, 零件的壁厚效应减小, 但其力学性能具有明显的各向异性。按承温能力区分, 定向凝固柱晶高温合金已发展了四代, 目前第一代和第二代定向凝固柱晶高温合金在航空发动机上获得了广泛应用。

定向凝固柱晶高温合金发展前景:

(1) 发展更高性能水平的定向凝固柱晶高温合金。随着航空发动机的发展, 第一代定向凝固柱晶高温合金已经普遍得到应用。目前国内正在研制第二代定向凝固柱晶高温合金 DZ406 等, 该合金已用于涡轴发动机的空心无余量叶片。随着 Re、Ru 和 Ir 等合金元素在高温合金中的应用, 有可能发展更高性能水平的第三代和第四代定向凝固柱晶高温合金, 以用于先进航空发动机涡轮转子叶片与导向器叶片。

(2) 发展抗腐蚀定向凝固柱晶高温合金。地面燃气轮机的发展方向是大容量、高效率、高性能, 其重要途径是提高涡轮进口温度, 这对燃气涡轮高温部件 (涡

轮叶片、喷嘴)使用材料提出了更高的要求。所以,发展抗腐蚀定向凝固柱晶高温合金是一个重要方向。近年来,我国地面燃气轮机得到较快发展,而燃气轮机的涡轮叶片和喷嘴部件未能完全自主保障,影响了我国燃气轮机的推广使用。因此,研制和生产抗腐蚀定向凝固柱晶高温合金涡轮叶片和喷嘴是今后一个重要的发展方向。

(3) 发展定向凝固柱晶高温合金双性能整体叶盘。采用定向凝固技术铸成柱晶组织的叶片与细晶组织的轮盘,从而获得双性能整体叶盘。目前,定向凝固柱晶高温合金双性能整体叶盘已获得实际应用。

(4) 采用定向凝固柱晶高温合金制作单晶导向叶片扇形段。单晶高温合金由于消除了所有晶界,因而具有比定向凝固柱晶高温合金更优异的蠕变性能与抗疲劳性能,但单晶高温合金对晶界敏感。

4. 单晶高温合金

单晶高温合金是在定向凝固柱晶高温合金基础上发展而来的,它不含或少含晶界强化元素,完全消除了晶界,合金的组织是按照预定的方向生长而形成的单一柱状晶,合金的热强性能显著提高,综合性能优异。按承温能力区分,单晶高温合金已发展了四代,目前第一代和第二代单晶高温合金在航空发动机上仍然获得广泛应用。

单晶高温合金发展前景:过去几十年,许多国家对用于航空发动机涡轮叶片的其他高温结构材料进行过大量研究,如定向共晶合金、难熔金属基合金、陶瓷材料等。然而,这些材料都因某些关键问题未获根本解决而不能付诸实际工程应用。对先进航空发动机涡轮叶片来说,迄今为止,还没有一类材料能像单晶高温合金这样具有优良的综合性能。从 20 世纪 80 年代起,单晶高温合金便进入蓬勃发展的阶段,技术不断进步,性能持续提高,应用越来越广。截至目前,美国已发展了四代单晶高温合金。21 世纪初期,单晶高温合金将以难以完全替代的综合优势而将继续得到广泛应用。

5. 发展新型单晶高温合金的设计理论与方法

随着单晶高温合金的强化理论和合金设计理论的发展,出现了多种合金设计方法。建立在电子空穴理论和 d 电子理论基础上的相计算 (PHACOMP) 和新相

计算 (NewPHACOMP) 方法, 可以进行合金成分设计, 预测合金是否出现 TCP 相, 评价现有合金在高温长期暴露后的组织稳定性。

合金设计过程中, 很多问题都无法建立确切的数学模型。为建立模型, 获得规律, 常采用某种回归方式对现有试验数据进行处理, 然而回归方法存在局限性。人工神经网络具有自动学习功能, 能从试验数据中获得数学模型, 它无需预先给定公式的形式, 而是以试验数据为基础, 经过训练后获得反映试验数据内在规律的数学模型, 训练后的神经网络能直接进行推理。近年来, 人工神经网络在合金设计和成分优化以及材料性能预测等方面日益受到重视。

基于密度泛函理论的第一原理计算是一种很有希望从源头开始设计材料的物理学工具, 这对单晶高温合金材料设计的试验研究具有一定的指导意义, 但对实际合金的简化与大量的计算制约着该方法的应用。

设计复杂合金化的单晶高温合金, 上述设计理论与方法涉及大量的数据以及计算, 人工难以完成。将计算机技术与单晶高温合金的设计理论与方法相结合, 发展单晶高温合金的计算机辅助设计方法及其技术, 可进行十分复杂深入的设计计算, 克服了经验设计中试验工作量大、性能综合平衡难、成本高、周期长等问题, 因此可设计新型单晶高温合金。

6. 发展新型单晶高温合金

发展综合性能优异的单晶高温合金。随着航空发动机的发展, 为了满足高推重比、高功重比发动机的要求, 单晶高温合金仍将继续发展。通过合金设计水平的提高、熔炼工艺的进步、定向凝固工艺的发展, 将研究出超过现有合金强度和承温能力的新型单晶高温合金。

发展耐腐蚀的单晶高温合金。随着地面燃机与舰船发动机的发展, 要求单晶高温合金具有优异的抗环境性能, 所以高性能的耐腐蚀单晶高温合金将是未来重要的研究方向之一。

7. 发展高纯单晶高温合金

单晶高温合金中含有多种有害杂质元素, 如 O、H、N、S、P、Bi、Si、Sb、Pb、Sn、As 等, 这些有害杂质元素对合金的塑性、韧性和其他力学性能有不利影响。为了减轻甚至消除这些不利影响, 必须尽可能去除有害杂质元素, 提高单晶高温

合金的纯净度。单晶高温合金正在向高纯合金方向发展，在发展新型单晶高温合金和应用已有单晶高温合金时，应不断提高合金的纯净度。

提高合金纯净度主要可以从原材料控制和冶炼工艺控制两个方面入手。采用优质原材料进行单晶高温合金的研制与生产，特别是控制原材料中的 Bi、As、Te、Cd、Pb 等；还可应用预先处理的方法提高原材料的纯净度。采用高水平的真空冶炼方法可以有效去除合金中的气体元素，如 O、H、N 等，主要方法有提高精炼温度和真空度、控制精炼时间、充分搅拌合金熔液。为了净化合金，可以采用挡渣和陶瓷过滤网去除熔液中的多种夹杂物。除对母合金进行过滤外，还可以在浇注时过滤合金熔液。据报道，电子束冷炉精炼和冷壁坩埚顺序凝固方法等先进冶炼工艺可以研制纯净度很高的合金。

8. 发展高温度梯度定向凝固技术

据国外报道，温度梯度对 CMSX-2 合金组织与性能的影响如表 1-1 所列。可以看出，温度梯度对单晶合金的组织 and 性能有较大的影响。高温度梯度对合金成分、显微组织均匀性和致密度有明显的改善，可以使同一种材料最大限度发挥材质的潜力，也可以提高单晶叶片的合格率与生产率，使叶片可靠安全使用。因此，应发展高温度梯度定向凝固技术。

表 1-1 温度梯度对 CMSX-2 合金组织与性能的影响

性能	温度梯度		50℃ /cm	250℃ /cm
	持久寿命 /h	760℃ /750MPa	711	1048
		1050℃ /139MPa	238	269
	870℃高周疲劳应力 (10 ⁷) /MPa		500	700
组织	一次枝晶间距 /μm		350 ~ 500	160
	显微疏松 /%		1.3 ~ 0.5	< 0.1

三、粉末高温合金的发展

采用粉末冶金的方法研制生产高温合金，从而形成粉末冶金高温合金，是 20 世纪 60 年代出现的一项技术。粉末冶金技术消除了由于合金化程度高带来的铸件偏析严重、冷热加工工艺性能差的问题；粉末高温合金成分均匀，晶粒细化，力学性能得到提高。近 50 年来，已经发展了三代粉末高温合金：高强型第一代