

# 粉末高温合金论文集

## 钢铁研究总院粉末高温合金 40 年

---

■ 粉末高温合金论文集编写组 编



冶金工业出版社  
[www.cnmip.com.cn](http://www.cnmip.com.cn)

# 粉末高温合金论文集

——钢铁研究总院粉末高温合金 40 年

粉末高温合金论文集编写组 编



北京  
冶金工业出版社  
2017

## 内 容 简 介

本书集中反映了钢铁研究总院 40 年来在粉末高温合金方面的研究成果。全书由 3 部分组成：第一部分是期刊发表的学术论文；第二部分是会议论文和论文集收录的论文；第三部分是附录，罗列了相关研究人员指导的研究生毕业论文题目、发表的论文题目及有关著作名称等。

本书可作为从事粉末高温合金研究和开发的科技工作者以及高等院校相关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

粉末高温合金论文集：钢铁研究总院粉末高温合金  
40 年 / 粉末高温合金论文集编写组编. —北京：冶金  
工业出版社，2017. 8

ISBN 978-7-5024-7538-3

I. ①粉… II. ①粉… III. ①耐热合金—文集  
IV. ①TG132. 3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 171542 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 俞跃春 贾怡雯 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7538-3

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；固安华明印业有限公司印刷

2017 年 8 月第 1 版，2017 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16；56 印张；1357 千字；883 页

298.00 元

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

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

# 前 言

用粉末冶金方法来生产高温合金，是20世纪60年代产生的新技术。粉末高温合金改善了多组元高温合金的化学成分偏析，具有晶粒细小、组织均匀以及性能一致性好的显著优点。粉末高温合金涡轮盘力学性能优异，具有显著的长寿命和高可靠性特征。从20世纪80年代开始，粉末高温合金开始批量在军用航空发动机上获得应用，并随后在民用航空发动机上获得推广。粉末高温合金的应用已经成为先进航空发动机的重要标志。为了在我国开辟粉末高温合金这一新的研究领域，1977年钢铁研究总院成立了研究课题组，从德国Heraeus公司引进了雾化制粉、粉末筛分、静电去除夹杂以及脱气装套等设备，并自行设计一台 $\phi 690\text{mm}$ 的热等静压机和500T的等温锻造机，开始研究FGH4095合金。在“六五”期间，粉末高温合金纳入了国家科研规划，在1981年成立了冶金工业部和航空工业部的联合研制组，有钢铁研究总院、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，共同研制FGH4095合金。

在40年的发展过程中，钢铁研究总院始终以型号需求为导向，开展粉末高温合金的研制和生产，在1995年建成的国内第一条粉末高温合金中试生产线的基础上，于2006年建成国内第一条粉末高温合金生产线，并于2015年建成第二条粉末高温合金生产线。经过三代人的努力，钢铁研究总院在粉末高温合金领域取得了丰硕的成果，研制成功FGH4095、FGH4096、FGH4097、FGH4098和FGH4091等牌号的粉末高温合金，制备的盘、轴、环等粉末高温合金制件满足了多个型号发动机的研制和生产需求。其中，FGH4095挡板是国内第一种获得应用的粉末高温合金制

件,已批量用于多个型号的发动机;FGH4096 挡板已应用于某型号发动机,并形成了批量生产能力;FGH4097 盘、轴和环等制件已应用于多个型号发动机,并形成了批量生产能力;FGH4091 合金+K418B 合金制备的双合金盘已经应用于某飞机辅助动力装置,并形成了批量生产能力。最近几年,立足于未来需求,课题组自主开展了 FGH4102、FGH4013 和 FGH4104 等新型粉末高温合金的研制,并取得可喜的进展。

粉末高温合金属于关键结构材料,制备工艺复杂,技术门槛高。在国际上开展粉末高温合金研究的国家有十余个,但是真正掌握关键技术并应用于生产的国家仅仅有美国、英国、法国、俄罗斯和中国。鉴于粉末高温合金的重要性和复杂性,钢铁研究总院历来重视粉末高温合金的研究。在各级领导的关怀和大力支持下,钢铁研究总院始终有一支稳定的粉末高温合金研发队伍,这支队伍以国家任务为己任,敢于担当,紧密围绕研究和生产中出现的问题,扎实地开展研究工作,公开发表了大量学术论文,涵盖了粉末高温合金合金设计、制备工艺、装备、组织与性能分析以及理化检验等多个方面,为国内粉末高温合金的研究和发展提供了重要的技术支持。

本论文集梳理了 1977~2016 年期间,钢铁研究总院的技术人员公开发表的粉末高温合金领域的相关文章。本论文集由三个部分组成:第一部分是期刊发表的学术论文(68 篇);第二部分是会议论文和论文集收录的论文(40 篇);第三部分是附录,罗列了本论文集未录入全文的期刊发表的论文、会议论文和论文集收录的论文的标题,研究生在读期间发表的论文标题,研究生毕业论文标题以及出站博士后报告标题。对原论文发现的印刷等错误进行了修正,文后参考文献保持原样。

在出版本论文集的过程中,张义文教授倾注了大量的心血,刘建涛高工做了大量细致的工作,课题组博士生侯琼,硕士生瞿宗宏和邢鹏宇以及刘小林和孙志坤工程师参加了部分论文的录入和校对工作,课题组

多位同志对文集的编排提出了宝贵意见，对此表示衷心感谢！

本论文集是对钢铁研究总院 40 年来公开发表的粉末高温合金领域学术论文的一次汇总，凝聚了三代“粉末盘人”的心血和智慧，是他们刻苦钻研和辛勤劳动的见证。希望本论文集的出版对促进我国粉末高温合金研究、生产和工程应用起到积极的作用。

在本论文集文章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。

《粉末高温合金论文集》编写组  
2017 年 6 月 28 日于钢铁研究总院

# 目 录

## 第一部分 期刊发表的学术论文

1.1 综述 .....	3
燃气涡轮发动机应用的粉末高温合金 .....	3
俄罗斯粉末冶金高温合金 .....	13
俄罗斯粉末高温合金涡轮盘的生产工艺 .....	17
我国粉末高温合金的研究现状 .....	28
粉末高温合金的研究与发展 .....	35
热等静压技术新进展 .....	54
俄罗斯粉末冶金高温合金研制新进展 .....	66
粉末高温合金研究进展 .....	78
俄罗斯新型粉末高温合金研制进展 .....	96
1.2 组织与性能研究 .....	114
热挤压粉末 IN100 合金的超塑性 .....	114
IN-100 粉末热等静压初步研究 .....	122
IN100 高温合金粉末在加热过程中的相转变和原始颗粒边界问题 .....	128
热等静压及其加锻造和热挤压粉末高温合金 FGH95 的组织 and 性能 .....	138
FGH95 粉末冶金高温合金的超塑性 .....	144
氩气雾化镍基高温合金粉末的 SEM 观察与俄歇分析 .....	149
FGH95 粉冶高温合金涡轮盘锻造工艺研究 .....	154
等离子旋转电极法所制取的镍基高温合金粉末中异常颗粒的研究 .....	159
高温合金粉末内部孔洞的研究概况 .....	166
固溶温度对 FGH95 粉末高温合金性能的影响 .....	172
不同粒度的镍基高温合金粉末及其对 PM 成形件组织性能影响的研究 .....	177
不同 HIP 温度下镍基粉末高温合金的组织形貌 .....	183
Effect of Powder Particle Size on Microstructure and Mechanical Property of Ni-based PM Superalloy Product .....	190
镍基粉末高温合金中的夹杂物 .....	196
夹杂物在 PM 镍基高温合金中的变形行为及对低周疲劳性能的影响 .....	204
FGH95 粉末高温合金原始颗粒边界及其对性能的影响 .....	212

俄罗斯 EP741NP 粉末高温合金的研究 .....	219
“黑粉”对 PM 镍基粉末高温合金组织性能的影响 .....	227
FGH96 合金锻造盘坯热处理过程中的晶粒长大行为 .....	233
FGH96 合金动态再结晶行为的研究 .....	241
FGH97 粉末冶金高温合金热处理工艺和组织性能的研究 .....	249
FGH96 合金的热塑性变形行为和工艺 .....	257
Microstructures and Mechanical Properties of As-HIP PM Superalloy FGH98 .....	265
时效制度对粉末冶金高温合金 FGH95 组织和性能的影响 .....	271
粉末冶金高温合金 FGH97 的低周疲劳断裂特征 .....	279
FGH96 合金双性能盘的组织与力学性能 .....	290
热等静压冷却速度对粉末冶金高温合金组织及性能的影响 .....	297
Microstructure Characterization and Mechanical Properties of FGH95 Turbine Blade Retainers .....	306
FGH97 合金的显微组织研究 .....	314
热处理工艺对一种镍基 PM 高温合金组织性能的影响 .....	321
铪对 FGH97 合金平衡相影响的评估 .....	332
等离子旋转电极雾化工艺制备 FGH96 合金粉末颗粒的组织 .....	345
Hf 在粉末冶金镍基高温合金中相间分配及对析出相的影响 .....	354
金属包套与镍基粉末冶金高温合金之间连接区的研究 .....	366
预处理过程中 FGH96 合金粉末中的碳化物演变 .....	374
Hf 含量对 FGH97 合金 $\gamma/\gamma'$ 晶格错配度的影响 .....	383
Hf 含量对镍基粉末高温合金中 $\gamma'$ 相形态的影响 .....	392
FGH96 合金粉末颗粒的俄歇分析与预热处理 .....	403
FGH95 合金长期时效过程中二次 $\gamma'$ 相的“反粗化”行为 .....	415
颗粒间断裂在一种 PM 镍基高温合金低周疲劳断口上的特征 .....	423
微量元素 Hf 消除 FGH96 合金中原始粉末颗粒边界组织机制的探讨 .....	436
制粉方式对粉末高温合金 FGH98 热变形特性的影响 .....	446
700℃ 长时效对 FGH97 合金组织与力学性能的影响 .....	456
热诱导孔洞对粉末冶金高温合金性能的影响 .....	465
镍基粉末高温合金中微量元素 Hf 的作用 .....	471
微量元素 Hf 对镍基粉末高温合金 FGH97 显微组织的影响 .....	485
拓扑密堆 $\mu$ 相对含 Hf 的镍基粉末高温合金组织和性能的影响 .....	496
Hf 在 FGH4097 粉末高温合金中相间分配行为 .....	510
预变形对 FGH97 粉末高温合金热处理组织的影响 .....	524
<b>1.3 工艺研究 .....</b>	<b>530</b>
用等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末 .....	530
用两种方法制造的镍基高温合金粉末 .....	537
静电分离去除高温合金粉末中陶瓷夹杂的研究 .....	544



PREP 制取高温合金粉末的特点 .....	549
镍基高温合金粉末筛分工艺的研究 .....	555
优化等离子旋转电极工艺提高 FGH95 合金粉末的收得率 .....	560
特殊用途球形镍基高温合金粉末生产工艺研究 .....	565
PREP 工艺参数对 FGH95 高温合金粉末特性的影响 .....	570
用等离子旋转电极工艺生产高氮钢 .....	577
静电分离去除高温合金粉末中非金属夹杂物 .....	585

## 第二部分 会议论文和论文集收录的论文

2.1 综述 .....	599
高温合金粉末的热等静压 .....	599
我国粉末冶金高温合金研究成果及进展 .....	603
粉末高温合金产业发展状况 .....	613
粉末冶金高温合金的现状与发展趋势 .....	622
2.2 组织与性能研究 .....	641
热等静压温度对 PREP 粉末高温合金组织和性能的影响 .....	641
镍基粉末高温合金中缺陷的分析研究 .....	646
镍基粉末高温合金中的缺陷及其控制 .....	653
PREP 高温合金粉末中的孔洞 .....	661
The Effect of Cooling Media on Properties of FGH95 PM Superalloy Manufactured with PREP .....	666
FGH96 粉末高温合金的组织演变 .....	670
用等离子旋转电极工艺制取人体植入物表面 多孔涂层用球型 Co-Cr-Mo 和 Ti-6Al-4V 合金粉末 .....	675
The Effect of HIP Temperature on Microstructure and Property of PM Superalloy .....	683
一种消除粉末高温合金中 PPB 的方法 .....	689
Microstructure of Nickel-base PM Superalloy at Different HIP Temperature .....	697
粉末冶金高温合金的组织 and 性能研究 .....	704
晶粒度对 FGH4096 合金性能的影响 .....	712
FGH4096 合金在控制冷却过程中 $\gamma'$ 相析出行为的研究 .....	718
粉末冶金高温合金中粉末颗粒间断裂的形貌特征 .....	727
一种粉末冶金镍基高温合金中的缺陷分析 .....	734
Effect of Cooling Rate after Hot Isostatic Processing on PM Superalloy .....	739
时效处理对 FGH4096 合金的显微组织和拉伸性能的影响 .....	748
第三代粉末冶金高温合金 FGH4098 的热力学行为研究 .....	754
Zr 含量对 FGH4096 合金组织和性能的影响 .....	759

长时效后 FGH4097 合金的组织稳定性与力学性能 .....	765
不同淬火冷却方式对 PM FGH4097 合金组织和性能的影响 .....	771
Hf 含量对 FGH4097 粉末冶金高温合金 PPB 的影响 .....	776
FGH4097 合金大型盘件的组织性能研究 .....	782
异种镍基高温合金热等静压扩散连接性研究 .....	789
Microstructure and Properties of Powder Metallurgy Superalloys .....	795
Evaluation of Mechanical Properties of a Superalloy Disk with a Dual Microstructure .....	804
Microstructure and Mechanical Properties of FGH97 PM Superalloy .....	811
Discussion on the Mechanism of Micro-Element Hf Eliminating PPBs in Powder Metallurgy Superalloy .....	819
Effects of High Temperature Treatments on PPBs in a PM Superalloy .....	829
微量元素 Hf 对 FGH4097 粉末高温合金力学性能的影响 .....	835
<b>2.3 工艺研究 .....</b>	<b>841</b>
静电分离去除高温合金粉末中陶瓷夹杂物的研究 .....	841
用等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末工艺的研究 .....	846
等离子旋转电极制粉工艺 .....	853
用等离子旋转电极法生产球形金属粉末的工艺研究 .....	857
粉末涡轮盘温度梯度热处理工装设计研究 .....	862
FGH4096 合金盘件双组织热处理的数值模拟及试验验证 .....	868

### 第三部分 附 录

附录 1 本文集未录入全文的期刊发表的论文标题 .....	875
附录 2 本文集未录入全文的会议论文和论文集收录的论文标题 .....	878
附录 3 研究生在读期间发表的论文标题 .....	880
附录 4 研究生毕业论文标题 .....	881
附录 5 出站博士后报告标题 .....	882
附录 6 著作 .....	883

# 第一部分 期刊发表的学术论文

QIKAN FABIAO DE XUESHU LUNWEN



## 1.1 综 述

# 燃气涡轮发动机应用的粉末高温合金

李 力

### 1 引言

现代喷气推进技术的不断发展,对高温合金的工作温度及性能的要求日益提高,一般的变形和铸造合金已难以满足要求,其原因是由于合金化程度不断提高,造成了铸锭偏析严重、加工性能差和成形困难。而采用粉末冶金工艺,由于粉末颗粒细小,凝固速度快,合金成分均匀,无宏观偏析,性能稳定,允许进一步提高合金化程度,而且合金晶粒细小,加工性能好,金属利用率高,成本低,这就是粉末高温合金得以迅速发展的重要原因。目前粉末高温合金的生产工艺已经成熟,质量能满足飞机发动机转动部件的要求,已大量生产使用。这种合金可用来制造压气机盘、涡轮盘和涡轮轴套等部件。产量逐年增加。据报道美国 1979 年估计生产粉末高温合金涡轮部件 450 多吨<sup>[1]</sup>, 20 世纪 80 年代中期每年用量将超过 2000 多吨<sup>[2]</sup>。其用途不断扩大,最初粉末高温合金只用于军用飞机作为高推重比发动机盘件的材料。近年来由于节约金属和降低成本的要求,一些民用飞机发动机也逐渐采用粉末高温合金取代铸锻合金。此外,地面燃气轮机工业也对它产生了很大的兴趣。因此粉末高温合金是一个具有发展前途、富有生命力的领域,研究工作活跃,工艺在不断创新和改进,对材料的组织性能以及与工艺有关的基础理论都正在深入地开展研究。

### 2 粉末高温合金的应用概况

在粉末高温合金领域中,美国研究得最早,处于领先地位。它为发展先进涡轮发动机的材料,制定了一项 MATE (Materials For Advanced Turbine Engine Programme) 计划。美国国家宇航局研究中心根据该项计划于 20 世纪 60 年代开始研制粉末高温合金,并与发动机制造厂、金属生产和加工厂签订合同,共同研制。

美国 Pratt Whitney 飞机公司首先于 1972 年研制成功粉末 IN100 合金,作成 F100 发动机的压气机盘和涡轮盘等十一个部件,装在 F15 和 F16 飞机上,经历了上万小时的飞行试验,没有发生任何故障<sup>[3]</sup>,现已大量生产。该公司又于 1976 年完成了 JT8D-17R 发动机粉末 Astroloy 合金涡轮盘的研制,以取代原来的铸锻 Waspaloy 合金,其目标是减少金属消

耗 55kg(30%)，最终产品成本降低 20%。合金性能已满足要求。在通过 JT8D-17R 发动机地面试车后已生产使用<sup>[4]</sup>。JT9D 发动机涡轮盘也采用了粉末 Astroloy 合金。近年该公司又研制成功一种新合金——粉末 MERL76 涡轮盘，计划用在 JT10D 发动机上，其目标是降低成本，减轻零件重量，提高轮缘使用温度 20℃。盘件性能已达到要求，目前正交付旋转试验和地面试车。

美国通用电气公司于 1972 年开始研制粉末 René95 合金盘件，首先成功地用在军用直升飞机的 T-700 发动机上。1978 年又完成了 F404 发动机压气机盘、涡轮盘和涡轮轴套的研制，均采用直接热等静压粉末 René95 合金。F404 发动机装在最新的强击机 F/A-18 型飞机上。据报道 1979 年提交给海军第一批产品，1980 年交 24 台，估计 20 世纪 90 年代总生产量为 7000 台<sup>[5]</sup>。近年来通用电气公司还完成了另外两项工程，即热等静压粉末 René95 高压涡轮轴套，用在 CF6 发动机上取代普通锻造的 Inconel718 合金，可以减少金属消耗 50%，降低成本 40%<sup>[4]</sup>；CFM-56 涡轮风扇发动机的 5~9 级压气机盘也采用粉末 René95 合金代替普通铸锻的 René95 合金。CF6 及 CFM-56 均为民用发动机。

美国应用粉末高温合金的情况列于表 1。英国的 Rolls-Royce 公司与 Henry Wiggin 公司合作，研制成功 APK-1 粉末合金涡轮盘，用在 RB211 发动机上。西德 MTU 公司研制成功 MV1460 粉末合金涡轮盘，在 RB199 发动机上通过了地面试车。

表 1 美国粉末高温合金的应用情况

公司名称	发动机	部件	应用合金	1979 年用量/kg
GE	T700	6	René95	45000
	F404	12	René95	45000
	CFM56	12	René95	180000
	CF6		René95	
	MISC			45000
PWA	JT8D-17	1	LC Astroloy	23000
	F100	11	IN100	180000
	JT9D(Dev)	2		9000
	MISC			23000
Air Reseach	TRUCK(Dev)	2		450
	TFE 731	1		450
	IGT	1		2250

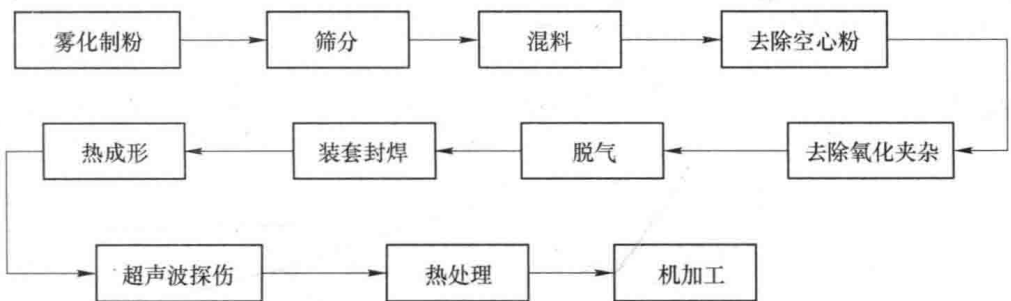
### 3 工艺和性能

研制成功的粉末高温合金牌号有十余种，目前比较成熟和应用较广的有 IN100、René95、Astroloy 和 APK-1 等。合金的化学成分列于表 2。

表 2 粉末高温合金的化学成分 (质量分数)<sup>[6]</sup> (%)

合金	C	Cr	Mo	Fe	Co	Al	Ti	B	Cb	V	Hf	W	Zr	Ni
IN100	0.1	10.0	3.5	1.0	14.0	5.5	1.0	0.01	—	1.0	—	—	0.05	余
René95	0.1	14.0	3.5	—	8.0	3.5	—	0.01	3.5	—	—	3.6	0.05	余
Astroloy	0.05	15.0	5.0	—	18.0	—	—	0.03	—	—	—	—	—	余
MERL76	0.025	12.5	3.0	—	18.5	1.4	—	0.02	1.4	—	0.4	—	0.06	余
AF-115	0.05	10.5	2.8	—	15.0	1.8	—	0.02	1.8	—	0.8	5.9	0.05	余
APK-1	0.02	14.8	5.0	—	17.0	—	—	0.02	—	—	—	—	0.04	余

粉末高温合金所采用的生产工艺流程是:



下面分别叙述几种粉末高温合金的工艺和性能。

### 3.1 IN100 合金

Pratt Whitney 公司曾对粉末 IN100 合金进行过大量的研究工作, 研究了不同制粉工艺和成形工艺对合金组织和性能的影响<sup>[7,8]</sup>。目前大量采用的是氩气雾化粉末, 粒度为-100 目 (150 $\mu\text{m}$ ), 用热挤压工艺获得超塑性坯料, 然后超塑性锻造涡轮盘件。最大的用途是 F100 发动机的压气机盘和涡轮盘, 盘件直径为 420~480mm。锻至超声波检验形, 加工余量为 1.5~2.5mm。生产工艺先进, 质量稳定。美国 Wyman-Gordon 公司用此工艺已生产了数千个盘件。

热挤压工艺可以分两步进行: 先墩实, 然后挤压, 也可以直接挤压。前者的力学性能较好, 尤其缺口塑性好。压实温度选择 1010 $^{\circ}\text{C}$ , 挤压温度为 1080 $^{\circ}\text{C}$ , 可以避免形成 PPB (原始粉末颗粒边界), 粉末表面 MC 型碳化物是在高于 1093 $^{\circ}\text{C}$  形成的<sup>[8]</sup>。挤压比大于 6:1。一般认为热挤压工艺可以使粉末剪切变形, 有助于破碎粉末颗粒表面的碳化物和氧化物膜, 增进粉末之间的扩散和固结, 消除 PPB。挤材的晶粒细小 (小于 10 $\mu\text{m}$ ), 具有超塑性。热等静压粉末 IN100 盘件工艺也在研制中。

合金的热处理制度是: 1122 $^{\circ}\text{C}$ , 2h, 油冷+871 $^{\circ}\text{C}$ , 40min, 空冷+982 $^{\circ}\text{C}$ , 45min, 空冷+650 $^{\circ}\text{C}$ , 24h, 空冷+760 $^{\circ}\text{C}$ , 4h, 空冷<sup>[6]</sup>。晶粒度为 ASTM 13 级。

对挤压+超塑性锻造和热等静压+超塑性锻造两种不同工艺制造的粉末 IN100 合金涡轮盘的性能进行了对比, 其数据列于表 3。从表中可以看出, 两种工艺所得的合金性能是相似的。

表 3 两种工艺的粉末 IN100 合金涡轮盘的性能

工艺	拉伸性能				
	试验温度/℃	$\sigma_{0.2}/\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	$\sigma_b/\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	$\delta/\%$	$\psi/\%$
挤压+超塑性锻	室温	112~113	162~163	24.2~27.8	17.6~28.5
	704	106.5~110	128~131.9	17.2~19.3	18.6~21.7
HIP+超塑性锻	室温	110~113.4	162.3~163.1	25~27.8	24.6~30.2
	704	105.4~107.6	128~130.5	16.5~22.1	21.7~23.6

工艺	持久性能				蠕变性能			
	t/℃	$\sigma/\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	寿命/h	$\delta/\%$	t/℃	$\sigma/\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	0.1%/h	0.2%/h
挤压+超塑性锻	732	66.8	30.1~43.1	10.3~15.9	704	56.2	87~117	119.5~149
HIP+超塑性锻	732	66.8	25.5~37.0	11~16.6	704	56.2	91~140.5	125~193.5

### 3.2 René95 合金

合金成分是在变形 René95 合金的基础上略加调整,适当降低碳、铬含量,以防止形成 PPB。母合金采用真空感应炉熔炼,制粉工艺可用氩气雾化、旋转电极雾化或真空雾化。早期采用-60 目(-250 $\mu\text{m}$ )粉,粒度较粗,发现大颗粒夹杂较多,容易引起疲劳裂纹而降低合金性能。为改进质量,采取的措施是降低粉末粒度,改用-150 目(-106 $\mu\text{m}$ )粉,氧化物夹杂和空心粉问题均显著改善<sup>[6]</sup>。该合金采用热等静压成形工艺及热等静压+热模锻工艺。GE 公司和 Crucible、Cartech 公司合作研究过热等静压工艺参数、粉末粒度和热处理制度对合金组织和性能的影响<sup>[10]</sup>。确定了最佳热等静压工艺参数为 1120℃, 1050kg/cm<sup>2</sup>, 大于 2h。

F404 发动机的涡轮盘、压气机盘和涡轮轴套均采用直接热等静压工艺,压到超声波检验形状,加工余量为 2.5~5mm,采用金属包套,盘件尺寸达  $\phi 480\text{mm}$ 。CF6 发动机的高压涡轮轴套则采用陶瓷模直接热等静压,而 CFM-56 发动机的压气机盘采用的是热等静压+热模锻的工艺。

盘件的热处理建议在低于  $\gamma'$  溶解的温度进行固溶处理,油淬或盐浴淬,然后多级时效。根据用途不同,所采用的热处理制度也不同,对性能的要求也不一样。

(1) 热等静压涡轮轴套。1120℃, 1h, 816℃ 盐浴淬火或空冷+870℃, 1h, 空冷+650℃, 16h, 空冷<sup>[4]</sup>。

(2) 热等静压+热模锻压气机盘。1095℃, 1h, 油淬+760℃, 16h, 空冷<sup>[4]</sup>。

(3) 热等静压或热等静压+等温锻造涡轮盘。1120℃, 1h, 油淬+870℃, 1h, 空冷+650℃, 24h, 空冷<sup>[6]</sup>。

不同工艺的粉末 René95 合金的性能列于表 4 和表 5。从表 4 和表 5 数据看出,该合金在 650℃ 以下具有很高的拉伸强度和持久强度。热等静压+等温锻造或热模锻的持久强度、蠕变性能和低周疲劳性能都比直接热等静压的有所提高。据文献报道,该合金具有较高的强度,但有缺口敏感性,而且在 650℃ 以上,其性能下降较快。



表 4 不同工艺和部件的粉末 René95 合金的性能 (1)<sup>[4,6]</sup>

工艺和部件		拉伸性能					持久性能	
		t/°C	$\sigma_{0.2}$ /kg·cm <sup>-2</sup>	$\sigma_b$ /kg·cm <sup>-2</sup>	$\delta/\%$	$\psi/\%$	650°C, 105kg/mm <sup>2</sup>	
							h	$\delta/\%$
热等静压 涡轮轴套	性能指标	20	105	130	10	12	25	2
		650	88	102	8	10		
	实际性能	20	124	170	16	15	70	2
		650	114	154	16	17		
热等静压+锻 造压气机盘	性能指标	20	126	162	10	12	25	2
		650	117	145	8	10		
	实际性能	20	120	160	18	23	278	2
		650	114	151	14	13		
热等静压 涡轮盘	性能指标	20	126	162	10	12	25	2
		650	117	145	8	16		
	实际性能	20	126	168	18	20	28.4~	4.7~
		650	112	152	10	13	29.5	5.4
热等静压+等 温锻造涡轮盘	实际性能	20	126	169	18	18	37.7~62	3.4~6.1
		650	115	148	19	11		

表 5 不同工艺和部件的粉末 René95 合金的性能 (2)

工艺	蠕变性能 (100h)			低周疲劳性能		
	t/°C	应力/kg·mm <sup>-2</sup>	总变形/%	控制应变	t/°C	至断裂的循环数
热等静压	593	105.5	0.143~0.161	0.78	538	(1.8~3.2)×10 <sup>4</sup>
				0.66	538	(6.8~12)×10 <sup>4</sup>
热等静压+ 等温锻造	593	105.5	0.054~0.098	0.78	538	(5.8~6.6)×10 <sup>4</sup>
				0.66	538	(1.1~2.2)×10 <sup>5</sup>

### 3.3 Astroloy 合金

Astroloy 原为铸锻合金，作涡轮盘用，由于变形困难，容易产生裂纹，后来采用粉末冶金工艺。Pratt Whitney 飞机公司曾用热等静压+锻造工艺生产涡轮盘，用在 TF-30 发动机上，最近又用直接热等静压工艺制造涡轮盘，用在 JT8D-17R 发动机上，盘子直径为 470mm。热等静压温度为 1190°C 或 1215°C。盘件的热处理制度采用：1120°C，4h，空冷+871°C，8h，空冷+982°C，4h，空冷+650°C，24h，空冷+760°C，8h，空冷<sup>[4]</sup>。

合金的性能列于表 6。数据说明，热等静压+锻造的拉伸强度和持久性能均比直接热等静压的有很大的提高。热等静压盘件的性能还与断面尺寸有关，薄断面部位的性能高于厚断面的。