

粉末高温合金

Powder Metallurgy of Superalloys

[瑞士] 格辛格 (G. H. Gessinger) 著
张义文 等译

粉末合金



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

粉末高温合金

Powder Metallurgy of Superalloys

[瑞士] 格辛格 (G. H. Gessinger) 著
张义文 等译



北 京
冶金工业出版社
2017

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2017-7279 号

This edition of Powder Metallurgy of Superalloys: Butterworths Monographs in Materials by G. H. Gessinger is published by arrangement with ELSEVIER Ltd., of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK.

此版本《粉末高温合金》(巴特沃斯材料专著)根据与爱思唯尔有限公司的协议出版,作者为格辛格。爱思唯尔有限公司的地址为英国牛津基德灵顿兰福德巷大街。

图书在版编目(CIP)数据

粉末高温合金/[瑞士]格辛格(G. H. Gessinger)著;
张义文等译. —北京:冶金工业出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5024-7685-4

I. ①粉… II. ①格… ②张… III. ①耐热合金
IV. ①TG132.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第294946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 杜婷婷 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7685-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2017年12月第1版,2017年12月第1次印刷

169mm×239mm; 21.75印张; 419千字; 322页

99.00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)

谨以此书

献给钢铁研究总院粉末高温合金研究
40年

前 言

在 20 世纪 60 年代末期，粉末冶金已成为一种适合批量生产精密零件的低成本制造技术。另一方面，对于粉末冶金工作者而言，高温合金是一门带有几分神秘色彩的学科。在不到 5 年的时间里，一系列全新的技术构成了后来称之为高温合金粉末冶金的基础。惰性气体雾化、热等静压、等温锻造和氧化物弥散强化已被确定为高温合金加工的重要的和新颖的手段。对航空燃气涡轮和工业燃气涡轮的涡轮盘、涡轮工作叶片和导向叶片用高温合金的强度和承温能力不断提高的要求，推动着所有这些新技术的发展。

本书总结了过去 15 年间粉末高温合金领域中最重要进展。这是第一部致力于该学科的专著。撰写本书之际，粉末高温合金技术已经达到成熟阶段，此后的进展步伐将要小得多。

尽管推荐的工艺路线看上去名目繁多，但是通过粉末冶金生产高温合金的基本原理却相对简单。在英国主要采用的最初的工艺路线是以真空烧结为基础的，但是该工艺几乎已被完全放弃。现代工艺路线在微观尺度上可以与变形工艺相媲美，烧结只起到次要的作用。同时，还存在从液滴直接转化成压坯的发展趋势，避开常规的固结技术。

更好地去理解制粉、粉末固结和热机械加工工艺，关键在于显微组织的核心作用及其与力学性能的对应关系。简单地说，在中温区，力学性能与晶粒尺寸关系曲线存在一个交叉点，不同合

金之间略有不同。低于交叉点温度，细晶有利于获得最佳的力学性能，高于该交叉点温度则需要粗晶，通常是柱状晶粒组织。本书阐述了控制显微组织及其相关力学性能的方法。

本书中尽可能采用公制单位。显然，对于温度值，将华氏度转换为摄氏度（例如 1200 °F 转换为 649°C）可以获得一些非常“标准”的数值。

大量的试验合金或工业合金已被开发或正在使用中。此类合金的名称、制造商及其化学成分已被列入本书末尾的附录中。

在编撰本书时，考虑到了冶金工程师、机械工程师以及大学的需求。因此，本书有望可以作为大学高温材料课程使用的必备教科书，也可以作为该领域工作者的参考书。

本书在相对较短的时间内完稿，这在快速发展领域是很有必要的。此事能够促成，主要得益于布朗勃法瑞有限公司（Brown Boveri & Co. Ltd.，BBC，瑞士）的慷慨相助，特别是该公司研究处主任 A. P. Speiser 教授的帮助。作者后来在位于 Baden-Dättwil 的布朗勃法瑞公司研究中心的物理冶金部担任主任，在此特感谢 A. P. Speiser 教授花费了大量时间协助编制本书，同时还感谢他安排我在渥太华的加拿大国家研究委员会（National Research Council，NRC）期间休假。另外还感谢加拿大国家科学研究委员会结构与材料研究室主任 W. Wallace 博士，在图书馆进行重要工作任务阶段为我提供了一间独立的办公室、一名得力助手以及财政资助。此外，特别感谢布朗勃法瑞涡轮增压部和中心实验室总经理 E. Jenny 博士给予的理解和鼓励。

同时，很多同事还通过直接参与、讨论或协助访问给予我诸多帮助。本书各个章节的 3 个主要贡献者完成了大量出色的工作，

这奠定了本书的总体风格。他们分别是 W. Hoffelner 博士、布朗勃法瑞公司的 R. F. Singer 博士以及加拿大国家研究委员会的 R. Thamburaj 先生。

以下各位分别通过不同方式给予我帮助：A. M. Adair, R. Angers, J. S. Benjamin, R. C. Benn, M. G. Benz, M. Blackburn, W. J. Boesch, R. H. Bricknell, P. A. Clarkin, L. F. Coffin, J. A. Domingue, G. R. Dunstan, S. Floreen, Ch. Fox, P. Gilman, M. F. Henry, R. Hewitt, T. Howson, B. Jahnke, G. Jangg, A. Koul, G. W. Meetham, R. V. Miner, M. Nazmy, J. R. Rairden, A. M. Ritter, R. Ruthardt, G. Schröder, R. Spargue, N. S. Stoloff, R. Stoltz, C. Verpoort, C. Wüthrich。

如果没有布朗勃法瑞公司研究中心员工的重要贡献，本书难以顺利完成。其中我特别要提到的是 B. Nowatzek 夫人的工作热情、耐心与持之以恒，她完成了几个版本手稿的打字排版工作，同样优秀的还有 M. Zamfirescu 夫人，她的美工技巧非常出色，时还要诚挚感谢 E. Schönfeld 先生的影印复制工作。

最后一点同样重要，我要感谢我的妻子 Beth 在过去一年里牺牲了很多个夜晚和周末陪伴我工作。

G. H. 格辛格博士 (Dr Gernot H. Gessinger)
 布朗勃法瑞有限公司中心实验室主任，巴登，瑞士
 (Head, Central Laboratory, BBC Brown,
 Boveri & Co. Ltd., Baden, Switzerland)

1984 年 1 月

序 言 一

如果追溯到很久以前，比如，在 1928 年《大不列颠百科全书》出版年代，当时燃气涡轮（喷气发动机）用于航空运输的动力装置被认为是不可行的。当时很少有人相信，能制造出这样的动力装置使航空器飞得足够高、足够快。在第二次世界大战即将结束之时，惠特尔（Whittle）航空燃气涡轮发动机问世，这对英美两国的战事起了助动作用，从此开启了一个飞行器推进的新时代。

航空燃气涡轮发动机时代起始于钴基合金，如 Vitallium（来自一种牙科合金，Co-Cr-Mo 合金）以及 S816 合金。但是很快人们又意识到，碳化物强化合金不具备长期耐久性所需的超温“恢复能力”。因此，尽管钴基合金曾是燃气涡轮应用中的首选材料，但是随后的合金开发工作表明，镍基高温合金具备理想的“恢复能力”，镍基高温合金将在燃气涡轮应用中占据优势。

在 20 世纪 40 年代末期和 50 年代初期，当时的研究人员认识到了有必要推进与该项重要应用相关的科学技术。在这些先行者中，预见到与高温燃气轮机材料相关的前景与冶金需求的人员分别为麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology）的 Nicholas J. Grant 教授、圣母大学（University of Notre Dame）的 Paul J. Beck 教授以及英国的 A. Taylor 博士和 R. W. Floyd 博士。他们开展了一系列基础性研究，特别是针对相图做了大量必要工作。在 20 世纪 50 年代，相计算法（PHACOMP）的概念因

H. J. Beattie, Jr. 以及对此高度重视的研究者而得到了发展，并在制备高温合金的化学控制中发挥了重要作用。

镍基高温合金的高温力学性能得益于 γ' (Ni_3Al) 沉淀物的存在，该沉淀物与基体共格，且在相对较高的温度下能够保持稳定。需要注意的是，在整个 20 世纪 60 年代中期，合金设计者致力于通过提高 γ' 相体积分数来提高高温强度。目前常见 γ' 相体积分数为 60%。遗憾的是， γ' 相体积分数的提高，通常会加剧大型铸锭内的宏观偏析。在这样极端的情况下，导致这些作为新型涡轮盘材料的先进高温合金几乎不可锻造。

从概念上讲，粉末冶金提供了一种可避免出现严重宏观偏析的方法，它可有效地防止锭坯的开裂。由于该材料在其还是均质液体的状态下已被分成了细小的液滴，因此最大的偏析距离受限于固化液滴的大小（假设各单个粉末颗粒含有正确的成分）。早期致力于采用当时传统的粉末冶金技术制造高温合金的努力，因加工过程中的粉末氧化而受阻，由此导致拉伸断裂塑性较差。而突破性改进来自惰性粉末加工工艺的出现，在此工艺中，粉末制取、收集与致密化都在惰性气氛中进行。

普惠公司 (Pratt & Whitney Aircraft, 普拉特·惠特尼航空公司, 简称普惠公司, 美国) 与环球独眼巨人公司 (Universal Cyclops, 美国) 合作, 环球独眼巨人公司拥有可在高纯氩气气氛下运行的加工设备, 在 1965 年, 首次尝试惰性粉末加工, 并取得了显著的成果。首批粉末气体分析显示氧含量不到 100×10^{-6} 。早期的高温合金真空冶金工作已表明, 氧含量小于 100×10^{-6} 的合金具有良好的拉伸塑性和蠕变断裂塑性。通过对显微组织和锻造的研究显示, 宏观偏析确实已被消除, 合金可锻造。该项早期工作

为先进的高温合金粉末冶金技术奠定了基础。制取纯度不断提高的预合金粉末的必需性，带动了当今雾化生产工艺的发展。

几乎与粉末生产同步开发的是新型高温合金的固结及后续成形-挤压+超塑性锻造 (Gatorizing™) 技术。粉末工艺制备的新型高温合金可以获得稳定的超细晶粒，可使材料产生超塑性变形。第一个在喷气发动机中运行使用的粉末冶金压气机盘和涡轮盘，即采用超塑性成形技术制造而成，这得益于 J. B. Moore 和 R. Athey 以及普惠公司同仁的开创性工作。今天，仅在普惠公司的一个工厂，就有超过 20000 个零部件是按照挤压+超塑性锻造这一专利加工方法而生产的，简化了难变形高强度合金的锻造流程。

因此，粉末高温合金的主题专注于综合工艺及方法，本书即致力于该方面的研究。

维斯尼德尔 (F. L. VerSnyder)

联合技术研究中心材料技术研究所副主任，东哈特福德，CT 06108，美国

(Assistant Director of Research for Materials Technology, United Technologies Research Center, East Hartford, CT 06108, USA)

序 言 二

从20世纪60年代早期不断探索开始，高温合金技术与粉末工艺的结合直到20世纪70年代末期才得以完成。这绝对可算作是高性能材料近代发展中最激动人心的大事件。对于高温合金而言，粉末工艺带来了性能水平更高和经济效益更好的前景；对于粉末冶金而言，高温合金已成为精湛技术进步的主要推动力。

然而，仅有热衷于此的小范围的业内先行者们才能够完全知晓这些发展潜力。对工业产权的安全维护妨碍了新思想的自由传播。人们从这些新成果中获得灵感，但很少有人能够充分掌握这两项技术，进而较为容易地接收这些方面的信息。

格辛格博士本人是高温合金粉末冶金工艺的重要贡献者，同时也是当前为数不多的能够编撰该方面书籍的人员之一。基于他在这两个领域的丰富经验以及对技术和经济可行性的合理判断，他完成了这本系统的专著，该书将从基本原理开始引导读者，直至当今的前沿领域。该著作不仅开辟一个材料与工程界中的复杂的新领域，同时是一本激励许多富有想象力的读者去自行探索的书籍。对他们，对该书，这就是最大的成功！

菲施迈斯特教授 (Professor H. F. Fischmeister)

马克斯·普朗克金属研究所主任，斯图加特，原西德

(Director, Max-Planck-Institut für Metallforschung,

Stuttgart, West Germany)

译者前言

粉末高温合金是用粉末冶金工艺生产的高温合金。粉末高温合金按强化方式分为非弥散强化型粉末高温合金（以 γ' 相析出强化为主，即通常所说的粉末高温合金）和氧化物弥散强化型粉末高温合金。

传统的铸锭冶金工艺，由于冷却速度慢，铸锭中某些元素和第二相偏析严重，热加工性能差，并且组织不均匀和性能分散性大，生产高合金化高温合金大型零件很困难。粉末高温合金在制粉过程中粉末颗粒是由微量液体快速凝固形成，成分偏析被限制在粉末颗粒内，消除了常规铸造中的宏观偏析，同时快速凝固粉末具有组织均匀和晶粒细小的突出优点，显著改善了合金的热加工性和组织均匀性，提高了合金的力学性能及其一致性。粉末高温合金是现代高性能航空发动机关键热端部件的必选材料，主要用于航空发动机的盘、轴、环形件等，氧化物弥散强化型粉末高温合金主要用于航空发动机热端静止部件。

粉末高温合金出现于20世纪60年代中期，最初是在铸造或变形高温合金的基础上略加调整成分发展而来。美国于20世纪70年代初首先将粉末高温合金用于军用航空发动机的压气机盘和涡轮盘，从此粉末高温合金进入了实际应用阶段。之后俄罗斯、法国、英国、中国陆续在军用航空发动机上使用了粉末高温合金涡轮盘。20世纪70年代主要为工艺的发展阶段。进入80年代，根据粉末高温合金的工艺特点，通过成分设计，开始研发粉末高

温合金,先后研制出 René88DT、N18、René104、RR1000 等在 700~750℃使用的粉末高温合金。经过近 50 年的发展,粉末高温合金已进入到一个非常成熟的阶段。目前有多种粉末高温合金用于先进的军用和民用航空发动机。

瑞士学者格辛格 (G. H. Gessinger) 所著的《Powder Metallurgy of Superalloys》一书于 1984 年由 Butterworth & Co. 公司出版。这是第一部关于粉末高温合金领域的专著。该书已由俄罗斯学者 В. С. Казанский 翻译成俄文 (Порошковая Металлургия Жаропрочных Сплавов. Челябинск 《Металлургия》, 1988) 出版。

本书分 4 篇,共 9 章。第 1 篇包括 1 章 (第 1 章),第 1 章介绍了高温合金和粉末高温合金的发展历史,以及镍基、镍铁基、钴基高温合金中的组织、强化相和合金元素的作用。第 2 篇包括 5 章 (第 2~6 章),第 2 章概述了惰性气体雾化、熔气雾化 (真空雾化) 和离心雾化等制粉方法的主要特点,以及各种粉末颗粒的组织特性、缺陷控制及消除措施等;第 3 章介绍了高温合金粉末的固结机制,以及作为制造工艺的各种固结技术;第 4 章介绍了粉末高温合金的显微组织特征、热机械加工方式及其加工原理,以及获得不同组织和性能特征所采用的热机械加工工艺;第 5 章介绍了粉末颗粒的显微组织以及微量合金化元素、组织对合金力学性能的影响,并主要论述了粉末高温合金的高温低周疲劳性能、高温疲劳裂纹扩展和蠕变裂纹扩展性能特点;第 6 章简要介绍了粉末高温合金的无损检测方法和质量控制要求,并概述了用于剩余寿命评估的早期疲劳损伤和表面微裂纹的检测方法。第 3 篇包括 1 章 (第 7 章),第 7 章详细介绍了氧化物弥散强化高温合金的

强化机制、粉末制取方法、粉末固结工艺和热机械加工工艺,以及典型氧化物弥散强化高温合金的力学性能、氧化和热腐蚀性能、发展趋势等。第4篇包括2章(第8章和第9章),第8章介绍了粉末高温合金和氧化物弥散强化合金相关的液相连接、固相连接和瞬时液相连接等连接技术,以及连接技术在发动机中的应用情况;第9章简要介绍了粉末高温合金和氧化物弥散强化合金在航空涡轮和地面涡轮中的应用情况,并进行了初步的经济评价分析。

本书主要阐述了欧美等西方国家在粉末高温合金领域的研究进展和成果,其不足之处是没有介绍俄罗斯在粉末高温合金领域的研制及应用情况。实际上,俄罗斯在粉末高温合金领域的研究几乎与欧美同步,但是与欧美采用的工艺路线存在显著区别,俄罗斯采用等离子旋转电极法制粉+热等静压成形工艺制造粉末高温合金盘、轴和环形件,并大批量应用于各种先进的军用和民用航空发动机。1984年俄罗斯学者 Белов А. Ф.、Аношкин Н. Ф.、Фаткуллин О. Х. 出版了《Структура и Свойства Гранулируемых Никелевых Сплавов》一书。该书总结了俄罗斯在粉末高温合金领域的研究成果,主要包括等离子旋转电极制粉工艺参数对粉末颗粒组织的影响,以及热等静压和热处理工艺参数对粉末高温合金组织和力学性能的影响。

从20世纪60年代到80年代初是粉末高温合金从实验室到生产以及应用的阶段,期间,粉末高温合金的制备工艺已经趋于成熟。作为一本粉末高温合金领域的专著,本书系统总结了20世纪80年代以前欧美粉末高温合金领域的重要进展情况。

最近30年,粉末高温合金的应用已经从航空扩展到航天、舰船和能源等诸多领域。围绕粉末高温合金的生产工艺和质量控制,出现了一些新工艺和新方法,但是本书中所阐述的粉末高温合金

的基本原理及工艺路线仍然适用于现代粉末高温合金的生产，具有重要的参考价值。

本书适合于从事粉末高温合金研究工作的科研人员阅读，同时也适合作为大学高年级本科生和研究生的参考资料。需要说明的是，如无特别说明，本书中的粉末高温合金均是指非弥散强化型粉末高温合金（通常所说的粉末高温合金）。

本书的具体翻译分工为：前言、序言一、序言二由韩寿波翻译，张莹、刘小林校对。第1篇的第1章由邢鹏宇翻译，刘明东、刘小林校对。第2篇的第2章由张义文、刘建涛翻译，刘小林校对；第3章由张义文、张莹翻译，贾建、刘小林校对；第4章由韩寿波翻译，孙志坤校对；第5章由李科敏翻译，贾建、黄虎豹、张莹校对；第6章由孙志坤翻译，韩寿波校对。第3篇的第7章由张国星、刘明东、贾建翻译，张莹校对。第4篇的第8章由黄虎豹翻译，李科敏、刘小林校对；第9章由黄虎豹翻译，韩寿波、贾建校对。附录1由邢鹏宇翻译，钟治勇校对。附录2由邢鹏宇翻译，刘明东校对。附录3由邢鹏宇翻译，刘明东校对。索引由邢鹏宇、刘明东、张义文整理。全书由张义文统稿审校。

在本书的翻译过程中，对原书中的一些错误作了修正并采纳于译文中并作了注释。

由于译者水平所限，译文难免有理解偏差乃至错误之处，敬请读者指正并提出宝贵意见。



2017年9月25日于钢铁研究总院

E-mail: yiwen64@cisri.com.cn

目 录

第 1 篇 引 言

1 引言	3
1.1 高温合金的组织 and 化学成分	3
1.1.1 镍基高温合金的组织	3
1.1.2 镍铁基高温合金的组织	5
1.1.3 钴基高温合金的组织	6
1.2 高温合金的发展历史	6
1.3 高温合金粉末冶金技术的发展历史	9
参考文献	13

第 2 篇 预合金粉末

2 粉末的制取及其特性	19
2.1 “正常”凝固速率的预合金粉末	19
2.1.1 惰性气体雾化	21
2.1.2 溶气雾化 (真空雾化)	25
2.1.3 离心雾化	27
2.2 预合金粉末的物理冶金	32
2.2.1 热力学考虑	32
2.2.2 预合金粉末中的凝固组织和偏析	33
2.2.3 粉末的显微组织	34
2.3 预合金粉末成分研发的注意事项	36
2.3.1 影响碳化物析出的措施	37
2.3.2 促进热等静压固结的措施	38
2.4 预合金粉末中缺陷的控制及消除	38
2.4.1 缺陷检测方法	39
2.4.2 缺陷去除技术	41

2.4.3 氩气脱气方法	43
2.5 快速凝固的预合金粉末 (RSR 粉末)	44
2.5.1 粉末制取方法	45
2.5.2 快速凝固粉末的显微组织	49
2.5.3 快速凝固合金的开发	51
参考文献	51
3 粉末固结方法	55
3.1 冷压制和烧结 (传统粉末冶金)	55
3.1.1 冷压制	55
3.1.2 固相烧结	56
3.1.3 液相烧结	58
3.1.4 高温合金实用烧结经验	59
3.2 热固结技术	62
3.2.1 热压	63
3.2.2 热等静压	63
3.2.3 其他相关的成形技术	67
3.2.4 粉末热锻	69
3.2.5 挤压	70
3.3 粉末热固结理论	73
3.3.1 热等静压的基本理论	73
3.3.2 热锻过程中多孔材料的流动	78
3.4 全致密预成形坯的锻造	79
3.4.1 热模锻造	81
3.4.2 模具寿命	83
3.4.3 锻造过程模拟	85
3.4.4 粉末高温合金的锻造实践	86
3.5 熔体—固体直接转化技术	86
3.5.1 喷射锻造 (Osprey 技术)	87
3.5.2 真空电弧双电极重熔工艺	90
3.5.3 激光熔覆工艺	92
3.5.4 快速凝固等离子沉积	93
3.6 动态成形	95
参考文献	97