

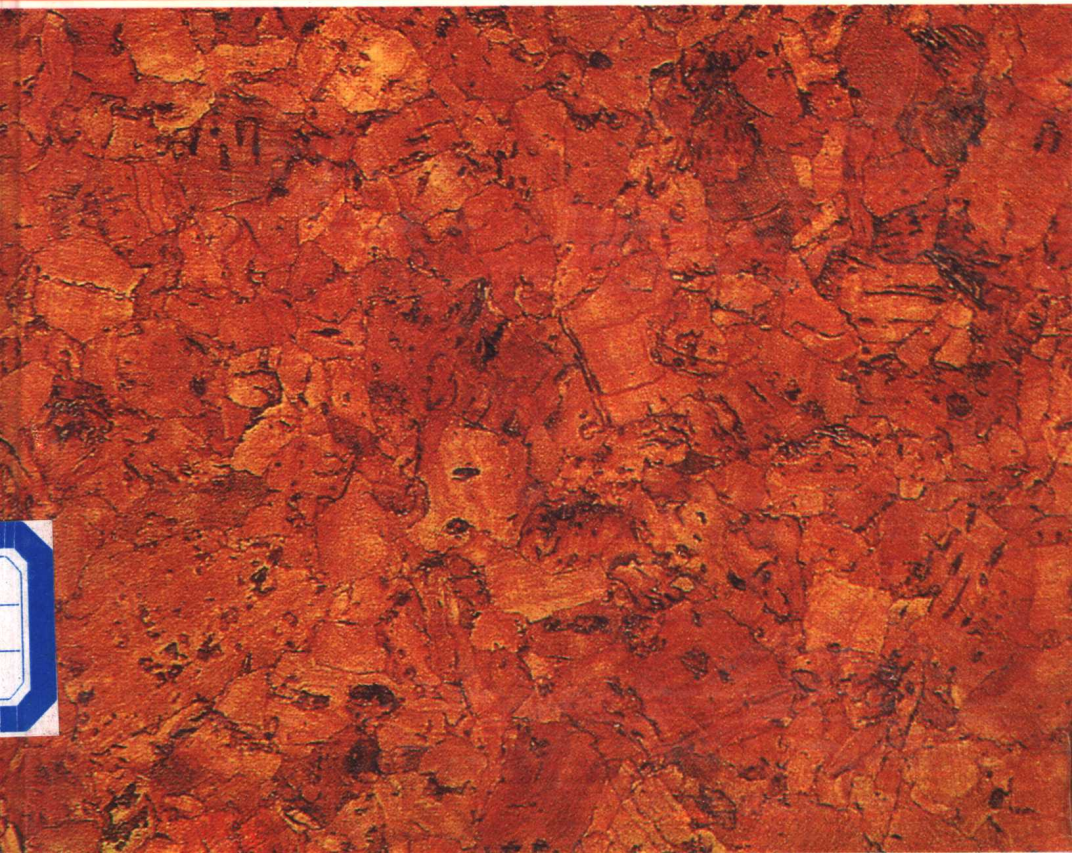


粉末冶金基础 理论与新技术

黄培云 金展鹏 陈振华 著

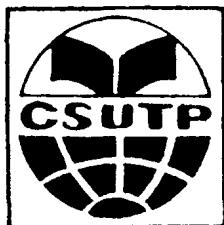
● 国家“八五”规划重点图书 ●

● 中南工业大学出版社 ●



● 国家“八五”规划重点图书 ●

● 有色金属材料丛书 ●



粉末冶金基础 理论与新技术

黄培云 金展鹏 陈振华 著

● 中南工业大学出版社 ●

内 容 简 介

内 容 简 介

本书为中国工程院院士黄培云教授在多年从事粉末冶金学科教学与科研成果的基础上撰写而成的,是高层次的专门著作。全书共分三篇,包括粉末压型与烧结理论、相图与粉末冶金材料设计及粉末冶金高技术与新材料等重要内容。是攻读粉末冶金专业与材料专业的研究生、从事粉末冶金及材料学科工作的教师、科研人员和工程技术人员难得的参考书。

粉末冶金基础理论与新技术

黄培云 金展鹏 陈振华 著

责任编辑:田荣璋

*

中南工业大学出版社出版发行

中南工业大学出版社印刷厂印装

湖南省新华书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:8 字数:192千字 插页 1

1995年12月第1版 1995年12月第1次印刷

印数:0001—2000

*

ISBN 7-81020-827-6/TF·033

定价:20.00元

本书如有印装质量问题,请直接与生产厂家联系解决

粉末冶金丛书编委会

主任委员 黄培云

委 员 黄培云 吕海波

黄伯云 王零森

姚德超 马福康

田荣璋



作者近照

黄培云教授简介

黄培云教授,生于1917年8月,福建省福州市人,1938年毕业于清华大学化学系,1945年获美国麻省理工学院科学博士学位,毕业后在美国麻省理工学院进行博士后研究,1946年底毅然放弃在MIT的工作机会回国报效,1947年在武汉大学矿冶系任系主任、教授,1952年任中南矿冶学院副院长,曾先后担任中国金属学会、中国有色金属学会副理事长,中国机械工程学会粉末冶金学会副理事长,中国科学院矿冶研究所副所长,中南工业大学粉末冶金研究所所长,湖南省科协主席,还曾被选为中共十二大代表。现任中国工程院院士,中南工业大学学术顾问,博士生导师,中南工业大学学术委员会主任委员,中南工业大学粉末冶金研究所名誉所长,湖南省科协名誉主席等职务。黄培云教授长期从事冶金物理化学、金属材料 and 粉末冶金等领域的科学研究和教学工作。他学识渊博、思想敏锐、治学严谨,在这些领域都有很深的造诣和重要的建树。他是中南矿冶学院的创始人之一,对我国有色冶金、稀有金属冶金、有色金属材料等学科建设作出了重要贡献。他1956年参加过我国“12年科学发展规划”的制定工作,多次主持和参加制定我国金属材料和粉末冶金学科的发展规划,多次组织国内外材料科学和粉末冶金学科的一些重要的学术活动,并且亲自领导和参加了这些学科一些最重要的科学研究,如原子能工业用乙种分离膜,军用重合金(高比重)材料,航空

摩擦材料,航空和航天用特种陶瓷,雷达用固体润滑材料,固体火箭用微细铝粉等。这些科学研究成果对我国航空、航天、原子能和兵器工业的发展起了重要作用。

黄培云教授是我国粉末冶金学科的创始人之一。他从美国学成归国之后,在我国创办了第一个粉末冶金专业,创建了第一个粉末冶金研究所,并且建立校办粉末冶金实习工厂。他亲自撰写教材,开设课程,制定教学计划,并培养研究生。现在已毕业本科生约 1800 人,博士、硕士研究生 80 余人,这些人大多数都成为我国粉末冶金领域的骨干力量。他创建和领导的粉末冶金研究所,现已成为我国粉末冶金的学科中心,该所有近 200 名专业研究人员,其中正、副教授(正、副研究员)100 余人,拥有几千万元的专用设备和仪器,世界几种著名粉末冶金刊物都载文对该所进行过介绍。该研究所在他的直接领导下,共完成国家重点科研项目近 300 项,其中获得国家科技进步奖一等奖两项、三等奖两项、国家发明奖三等奖一项、国家自然科学基金四等奖一项、部省级以上奖励近 50 项。这些科研成果被广泛应用于我国原子能反应堆、火箭喷管喉衬、反坦克导弹、歼 7、歼 8、运 7、运 8、巨浪等 60 多项重点工程上。该所受到过中共中央、国务院、中央军委通电嘉奖,并且被国家科委、国家计委、军委评为军工先进单位。1990 年被评为全国高校科技先进单位。经过黄培云教授几十年的辛勤努力,中南工业大学粉末冶金研究所面目一新,研究水平被国内外同行所公认。1988 年该所又被国家教委确认为粉末冶金国家实验室,最近又被国家计委确认为粉末冶金国家工程中心。他所创建的粉末冶金校办工厂,有几十项研究成果,在国内粉末冶金

行业颇有影响。

黄培云教授不仅在我国粉末冶金学科创立和建设作出了卓越贡献,而且在粉末冶金的科学研究中取得了重大成就。粉末压制理论和烧结理论是粉末冶金学科最为重要的两个基础理论。70年来世界各国有数百名学者对这两个理论进行过详细的研究,产生过众多的流派和数以百计的理论或经验公式,但是这些研究结果都难于对粉末的压制过程或烧结过程进行正确的定性描述和精确的定量计算。3/4个世纪以来,世界各国学者在把烧结过程看作是扩散机制还是看作流动机制起作用方面一直争论不休,黄培云教授自1958年开始研究烧结理论,在1961年10月的沈阳金属物理学术会议上发表了综合作用烧结理论,总结和回顾了关于烧结机构的各种学派的论点和争论后,提出烧结是扩散、流动及物理化学反应(蒸发凝聚、溶解沉淀、相变、活化、结晶、再结晶、化学反应)等综合作用的观点,并由扩散、流动、物理化学反应这三个基本过程引起烧结物质浓度的变化的数理方程建立了综合烧结理论方程,得出密度变化的双对数值与烧结温度的倒数成线性关系。这个理论现已被国内外学者提供的烧结数据所验证。黄培云综合烧结作用的理论方程式不仅能适用于一般冷压成形烧结,而且能适用于松装烧结、热压烧结与活化烧结,该理论具有深刻的物理意义和广泛的应用价值。从60年代中期到80年代初期,黄培云教授对粉末压制理论进行了近二十年的潜心研究,二十年的艰辛使他的理论成为国际上著名的粉末压制理论之一。与当今国际上提出的许多压制理论和方程相比较,黄培云教授的压制理论不仅是目前最精确的粉末压制定

量模型,而且是具有深刻物理含义的理论模型。黄培云教授是国际上最早采用粉末流变学理论来研究粉末压制的学者之一,他所提出的粉末体应变推迟,应力松弛,粉末体变形充分弛豫,粉末体的非线性流变模型,粉末变型的对数应变表示方式,粉末压制功的计算方法,粉末动压理论等一系列新概念和新理论不仅对粉末冶金学具有重大贡献,而且对力学、流变学也具有重要价值。黄培云压制理论引起了国际粉末冶金学界的重视和高度评价。目前黄氏压制理论已经成为国际上粉末压制理论的重要学派之一。它获得了1989年国家自然科学奖四等奖、国家教委1986年科技进步奖一等奖、湖南省1986年10大科技成果奖。

老骥伏枥,壮心不已。最近十多年来,黄培云教授还与他的学生们合作扩大了研究领域。他与吕海波(教授、博士生导师)合作开展了粉末压制和粉末动压成形的应变行为研究,他与曾德麟(教授)合作开展了水静压制研究,他与杨守植(高级工程师)等人合作开展了粉末振动热压研究。他与金展鹏(教授、博士生导师)等人合作开展了难熔化合物(碳化物、氧化物)系统的相图计算和非平衡材料研究工作(参见本书第二篇),他与陈振华(教授、博士生导师)合作开展了快速凝固、超微粉末、喷射沉积等研究(参见本书第三篇)。另外他与贺安安(博士、副教授)、曲选辉(博士、教授)、邱才安(博士)、杜勇(博士、副教授)、曾科军(博士)、陈康华(博士)等人合作也开展了大量的研究工作。特别是近年来在合金设计、相图计算和快速凝固及其合金材料两个领域,黄培云教授和他的学生们取得了重大进展。在合金设计和相图计算方面,黄培云教授组建了

我校合金设计及相图计算研究室,并且亲自领导和指导该研究室的研究工作,近 10 年来他在合金相图计算方面精心培养了 10 多名硕士和博士研究生。在理论研究方面,他提出了非规则溶液活度系数的计算模型、二元参数计算三元系相图的方法和模型,在国内外著名杂志上发表近 20 篇论文。黄培云教授和他的学生金展鹏教授等人在陶瓷相图计算方面的工作引起了国外陶瓷材料界的极大关注,他们在美国陶瓷学会会志上发表了一系列文章,美国陶瓷学会会志的论文评阅人认为他们的研究成果极大地推动了 ZrO_2 基三元相图的测定工作。许多国外学者纷纷要求跟踪此项研究,开展 ZrO_2 基相平衡的研究工作。先后有中、美、英、法、德、日、澳大利亚、西班牙、捷克、荷兰、印度等国学者来函索取论文。他们的研究成果在 11 种著名国际刊物上刊登过,并为国际学术界所瞩目。瑞典科学院希拉德(M. Hillert)院士曾亲自两次到中南工业大学了解有关科研进展情况,并不时派助手到长沙联系工作。黄培云教授和他的学生金展鹏等人在合金设计和相图计算方面的研究工作,得到国内外相图诸界的高度赞扬,并且荣获 1991 年国家自然科学奖三等奖。在快速凝固及其合金材料研究方面,黄培云教授在粉末冶金研究所组建了快速凝固和超微粉末研究室。他认为现有的快速凝固制粉技术都存在一定局限性,并且亲自出国考察了美国 MIT 的超声雾化技术、普拉特惠尼公司的旋转圆盘雾化技术和英国上喷法制粉技术,与他的学生陈振华等人一起经过充分的论证和研究,提出和创立了多级快速凝固制取非晶、准晶、微晶和微细金属粉末的理论和技術。这项理论和技术的产生在国内外金属材料 and 粉

末冶金界引起了反响和注目。采用这个理论制备的一系列快速冷凝装置,能够大规模制备上百种非晶、准晶、微晶和微细金属粉末。该项技术的产生引起了国内外快速冷凝界的极大重视。国际著名刊物 Powder Metallurgy Inter National 杂志评阅人认为多级快速凝固制粉方法“非常新颖”,“在粉末工程领域中具有重大意义的工作”;Less-Common Metals 评阅人认为多级冷凝制粉方法是“神奇的联合过程”,“很新颖”。国内在由国家计委、国防科工委、航天部、中国有色金属工业总公司联合组织的鉴定中,27 名专家认为这种制粉技术是“国内外首创的新法,具有国际先进水平”。这项理论和技术被评为 1990 年湖南省 10 大科学成果,其理论研究获国家教委科技进步奖二等奖。采用这些装置制备固体火箭推进剂用微细铝粉的研究获中国有色金属工业总公司科学技术进步奖二等奖。另外黄培云教授和他的学生在制备大块非晶、准晶材料方面也进行了大量研究工作,现已发现在超高压下与准晶相关的晶体可以转变为准晶相、准晶体,其在超高压下能够产生塑性变形和热稳定性提高等一系列特殊行为。有关这一研究工作,在国内外著名杂志和学术会议上发表了大量学术论文,这些工作被 Science Citation Index, Engineering Index, Chemical Abstracts, Metals Abstracts, World Aluminium Abstract, Aluminium Industry Abstract 和俄国冶金文摘、日本科技文献速报等重要文摘上成百次刊登,Scripta Metallurgica et Materialia 评阅人评论有关准晶粉末超高压固结的工作“具有重要的价值”。最近,黄培云教授和他的学生们对于准晶的构成又进行了一些新的研究工作,提出了一项配制新型多

元系准晶态合金的成分加和原则。根据这个加和原则已在 20 多个合金中发现了新的准晶,这些结果已在 Scripta Metallurgice et Materialia 等国内外杂志刊载。加和原则的提出,给探寻新准晶提出了新的思路,具有重要的科学意义,并且得到国内外一些著名学者高度评价。黄培云教授所领导的快速冷凝及其材料的研究工作和他所领导的相图计算研究工作一样,均为国际学术界所瞩目。

中南工业大学出版社

1995 年 12 月

目 录

第一篇 粉末压型与烧结理论

- 1 粉末体压型理论 (1)
 - 1.1 非线性粉体的数学模型 (2)
 - 1.2 充分弛豫下的粉末恒压压型 (21)
 - 1.3 非充分弛豫的粉末恒压压型 (33)
 - 1.4 粉末压制功 (41)
 - 1.5 粉末压型理论在粉末振动压型中的应用 (49)
 - 1.6 粉末压型理论在粉末冲击成型中的应用 (55)
- 2 粉末烧结的综合作用理论 (64)
 - 2.1 烧结理论的研究概况 (64)
 - 2.2 综合作用烧结理论 (67)
 - 2.3 温度影响烧结过程的理论分析与验证 (69)
- 3 粉末热压理论 (79)
 - 3.1 前言 (79)
 - 3.2 标准非线性固体流变模型在热压中的应用 (79)

第二篇 相图与粉末冶金材料设计

- 1 发展新材料与相图的关系 (87)
 - 1.1 相图知识是发展材料的方法的基础之一 (87)
 - 1.2 开发新材料对相图提出了新的要求 (88)
 - 1.3 相图在粉末冶金中的作用 (88)
- 2 测定相图的多元扩散偶的方法 (89)
 - 2.1 三元扩散偶及其在相图研究中的应用 (89)
 - 2.2 扩散四 (96)

3 实测的等温相图	(98)
4 相图的计算	(108)
4.1 相图计算的一般过程	(108)
4.2 Gibbs 自由能 G 的解析表达式	(108)
4.3 相平衡计算方法	(114)
4.4 相互作用的参数的优化	(115)
5 计算的合金相图	(117)
6 计算的氧化物相图	(124)
7 相图的动力学通道	(137)
7.1 三元系中的扩散通道	(138)
7.2 相图在合成超导材料中的应用	(139)
7.3 相图在表面处理中的应用	(142)

第三篇 粉末冶金高技术与新材料

1 快速凝固—粉末冶金技术的发展综述	(151)
1.1 快速凝固制备粉末的主要发展综述	(152)
1.2 快速凝固粉末冶金金属材料的制备方法	(159)
1.3 快速凝固—粉末冶金技术的发展	(164)
2 制取快速凝固微细金属粉末的装置和原理	(170)
2.1 问题的引入	(170)
2.2 问题的深入	(171)
2.3 多级快速凝固制粉装置的工作原理及其过程分析	(172)
2.4 多级快速凝固制粉装置的工作特性	(175)
3 准晶粉末和大块准晶材料的制备	(184)
3.1 实验装置和方法	(184)
3.2 实验结果和讨论	(187)
4 铝基多元准晶合金形成规律的研究	(196)
4.1 多元素准晶合金的加和原则	(196)

4.2	多元素准晶合金的形成方式	(202)
4.3	铝基多元素准晶构成规则的解析	(202)
4.4	准晶加和原则的讨论	(205)
5	在保持亚稳结构下快速冷凝 Al—Li 合金粉末的 热致密化研究	(207)
5.1	Al—Li 合金快速冷凝粉末的热致密化过程	(207)
5.2	微晶状态 Al—Li 合金的特性	(212)
5.3	粉末热致密化过程对材料性能影响	(214)
6	一种新型的喷射成形工艺的研究	(219)
6.1	喷射沉积工艺的发展及现状	(219)
6.2	喷射沉积工艺的原理和特点	(222)
6.3	一种新型的喷射沉积工艺	(226)
6.4	耐热铝合金的喷射成形工艺的研究	(226)
7	一种新的镀层技术的研究	(231)
7.1	粉末高能冲击镀层技术的工作原理和装置	(231)
7.2	粉末高能冲击镀层技术的应用	(233)

第一篇 粉末压型与烧结理论

粉末冶金是一种由粉末经压型与烧结制取金属和复合材料制品的工艺过程。在压型和烧结过程中,粉末体逐渐向制品转变,其几何形态、内部组织结构和各种物理、力学与化学性能发生相应变化。这些变化构成了粉末冶金技术的基本特征和应用基础。深入了解和掌握这些变化的规律对于粉末冶金技术的发展无疑是十分必要的。另一方面,粉末体作为一种物质的存在形式,广泛出现于各种自然和人工过程中,压型和烧结规律的研究也应有助于对这些过程的认识和控制。

在粉末压型和烧结过程中,粉末体孔隙度的变化是最基本的。长期来,人们将此作为成形与烧结理论研究的主要方面开展了大量研究。但因粉末体系及其性质的多样性,对压型和烧结过程的本质的认识不够系统全面,理论还不很成熟。作为对现有理论的发展,作者从新的角度概括了粉末压型与烧结过程的特征,提出了新的理论模型,并在各种条件下进行了实验验证和实际应用。

1 粉末体压型理论

在粉末冶金过程中,粉末压型是仅次于粉末烧结的一个重要问题。近年来,粉末冶金技术与应用有了迅速的发展。粉末成型工艺的研究也很活跃。但有关粉末压型理论的研究还与形势需要不相适应。因此,加强对粉末压型问题的探讨有着十分重要的意义。

自从1923年Walker^[1]最先提出在粉末压型时,粉末相对体积与压制压力的对数呈线性关系的经验公式以来,四十年间许多科学工作者对粉末压型问题进行了一系列的研究。若干专著^[2-5]已有较系统的

介绍,本文限于篇幅,不准备重复赘述。表 1.1 列举了文献上有关主要压型理论研究(包括主要经验公式)的结果,其中尤以 Бальшин 方程式与 Konopicky 方程式在粉末冶金压型研究中被广泛引用。

从表 1.1 看出,有关粉末压型理论的研究虽然为数不少,但是至今还存在许多不足之处。例如,多数理论都把粉末体作为弹性体处理并忽略硬化影响,而且目前所有理论都忽略了时间因素等等。这些显然都是不够正确的,因而使这些理论的准确性与应用范围受到限制。近年来,人们开始运用流变学模型研究粉末体的非线性行为^[25-27],但研究工作尚欠深入系统。

本章是作者多年来对粉末压型规律,特别是对现有粉末压型理论中所忽略的重要问题——粉末体的非线性粘弹性质与大程度变形问题所作研究的总结。

1.1 非线性粉体的数学模型

一般粉末体在压型过程中,其应力 σ 与应变 ϵ 不服从 Hooke 定律已经被所有的粉末压型实践和压型方程式所证实。其实,对于一般粉末体不仅线性 Hooke 弹体(简称 H 体)的 $\sigma = M\epsilon$ 规律不适用,而且其他线性体规律例如线性 Newton 粘体(简称 N 体)的 $\sigma = \mu\dot{\epsilon}$ 规律、线性 Maxwell 体(简称 M 体)的 $\sigma + \tau_1\dot{\sigma} = \mu\dot{\epsilon}$ 规律、线性 Kelvin 体(简称 K 体)的 $\sigma = M(\epsilon + \tau_2\dot{\epsilon})$ 规律和标准线性固体(简称 SLS 体)的 $\sigma + \tau_1\dot{\sigma} = M(\epsilon + \tau_2\dot{\epsilon})$ 规律都不适用。

一般粉体在应力、应变行为上表现出明显的非线性变化规律。有关粉末体非线性系统及其数学模型的研究一直不多,尽管近年来在这方面出现一些较好的文献,但总的来说,人们对与粉体有关的非线性系统缺乏深入系统的研究,甚至对某些基本定义和基本认识都不统一,因此开展粉末体非线性系统的研究是十分必要的。

本书沿用和规定的基本象征符号如表 1.2 所示。