



中国科学技术
经·典·文·库

粉末冶金基础理论与新技术

黄培云 金展鹏 陈振华 著



科学出版社

www.sciencep.com

中国科学技术经典文库

粉末冶金 基础理论与新技术

黄培云 金展鹏 陈振华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在作者多年从事粉末冶金教学与科研工作所获成果的基础上撰写而成的。全书共分三篇。第一篇介绍了作者创立的最为重要的两个基础理论——粉末压型理论和烧结理论；第二篇介绍了相图与粉末冶金材料设计的关系，以及相图的测定、计算、动力学通道等；第三篇介绍了粉末冶金研究领域涌现的一些新技术、新工艺和新材料。

本书适合粉末冶金专业及材料专业的研究生、高年级本科生，从事粉末冶金及相关工作的教师、科研人员和工程技术人员参考阅读，同时也可作为大专院校相关专业的选修教材。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金基础理论与新技术/黄培云, 金展鹏, 陈振华著. —北京: 科学出版社, 2010

(中国科学技术经典文库)

ISBN 978-7-03-029185-1

I. ①粉… II. ①黄… ②金… ③陈… III. ①粉末冶金-研究
IV. ①TF12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 196577 号

责任编辑: 牛宇锋/责任校对: 陈玉凤

责任印制: 赵 博/封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年10月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2010年10月第一次印刷 印张: 11 1/2

印数: 1—2500 字数: 212 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

销售部门电话: 010-62134988 编辑部电话: 010-62135763

黄培云院士简介

黄培云教授，博士生导师，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年底毅然放弃在麻省理工学院的工作机会回国报效，1947年任武汉大学矿冶系主任、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分会副理事长，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。1994年当选中国工程院院士，任中南工业大学学术顾问，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、金属材料和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的一些最重要科学研究，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，他们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, 世界上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, 国家自然科学奖四等奖一项, 省部级以上奖励近 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、中央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 年该所被国家教委确认为粉末冶金国家实验室, 后来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也取得了重大成就。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做是扩散机制还是看做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呈线性关系。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 20 年的潜心研究, 20 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, 粉末变形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。目前黄培云压制理论已经成为国际上粉末压制理论的重要学派之一，获得了 1989 年国家自然科学奖四等奖、1986 年国家教委科技进步奖一等奖、1986 年湖南省十大科技成果奖。

老骥伏枥，壮心不已。最近 10 多年来，黄培云教授还与他的学生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，他还与贺安安（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）等合作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，黄培云教授组建了中南工业大学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。先后有美国、英国、法国、德国、日本、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）院士曾两次亲自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。他们的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麻省理工学院的超声雾化技术、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术。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凝固装置，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 International* 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 年湖南省十大科学成果，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* 和俄罗斯冶金文摘、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 Metallurgica 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。

1995 年 12 月

金展鹏院士简介

金展鹏院士，广西荔浦人，1963 年中南矿冶学院研究生毕业，1978~1981 年瑞典皇家工学院访问学者。金展鹏院士所从事的专业为材料科学、相图与相变。2003 年 11 月当选为中国科学院院士，曾任国际合金相图委员会委员、中国材料研究学会理事、国际相图计算杂志副主编、美国相平衡杂志顾问编委、亚太材料科学院成员。

金展鹏院士长期从事相图计算以及相变动力学的研究，发展了合金相的热力学模型，提出了高效研究相图的扩散偶微区成分分析方法，合作提出了阶段性亚稳相转变理论和推导亚稳相组织图的方法，评估和计算预测了一系列合金体系、氧化物体系的陶瓷和人工晶体等材料的相图，并建立了相应体系的热力学和相图数据库，以不同热力学变量为坐标的相图为背景来研究各类动力学通道，建立了模拟材料组织演化过程的理论框架，并用于预测和阐明合金的非晶形成区、复合材料的界面反应过程及热腐蚀产物的形成条件。所发表的论文被涉及物理学、化学、材料学以及计算机应用等方面的 50 多种国外期刊广泛引用，并作为建立新理论、发展新方法、设计新材料、阐明新现象和制定新工艺的依据。1991 年，金展鹏教授获国家自然科学三等奖。他所培养的研究生已成为欧洲、亚洲和美洲材料相图与相变学术界的卓越人才。

陈振华简介

陈振华，男，汉族，1945年10月出生于江西南昌，祖籍江苏溧阳。1969年毕业于中南矿冶学院粉末冶金专业，1981年在中南工业大学材料专业取得工学硕士学位，1986年在中南工业大学取得工学博士学位，是黄培云院士培养的第一个博士生。1991~1992年在日本东北大学金属材料研究所任客座研究员，1998~1999年在日本东京工业大学任客座研究员。1988年任中南工业大学粉末研究所教授，1994年被国务院学位委员会批准为博士生导师。1994~2000年担任中南工业大学非平衡材料研究所所长，2001~2007年担任湖南大学材料科学与工程学院院长。

陈振华学风正派、治学严谨、教书育人、学术水平高，长期从事金属材料和粉末冶金领域高技术和新材料研究工作，发表论文600多篇（国际学术论文近200篇），SCI收录200多篇，被引400多次，EI收录400多篇，CSTPCD收录2000多次。培养了30多名博士生和40多名硕士生。主持过国家级重大项目9项、部省级项目15项，获得国家级奖励2项（国家科学技术发明奖三等奖、国家自然科学基金四等奖）、部省级奖励11项。申报国家发明专利19项（已批准13项，正在公告6项）。出版著作10部，分别是：《粉末冶金基础理论与新技术》（合著，1995年），《多层喷射沉积技术》（2003年），《镁合金》（2004年），《变形镁合金》（2005年），《钛及钛合金》（译著，2005年），《机械合金化》（2006年），《耐热镁合金》（2007年），《现代粉末冶金技术》（2007年），《机械力化学》（2008年），《快速凝固粉末铝合金》（2009年）等。1989年被国务院学位委员会和国家教委联合授予“在社会主义建设中作出突出贡献的中国博士”荣誉称号，1990年被评为湖南省优秀教师，1991年首次享受国务院政府特殊津贴，1997年被人事部授予“国家级有突出贡献的中青年专家”称号，2002年被湖南省委、省政府授予首批“湖南省优秀专家”。

目 录

第一篇 粉末压型与烧结理论

第 1 章 粉末体压型理论	1
1.1 非线性粉体的数学模型	3
1.2 充分弛豫下的粉末恒压压型	13
1.3 非充分弛豫的粉末恒压压型	21
1.4 粉末压制功	25
1.5 粉末压型理论在粉末振动压型中的应用	30
1.6 粉末压型理论在粉末冲击成形中的应用	35
第 2 章 粉末烧结的综合作用理论	42
2.1 烧结理论研究概况	42
2.2 综合作用烧结理论	44
2.3 温度影响烧结过程的理论分析与验证	46
第 3 章 粉末热压理论	51
3.1 前言	51
3.2 标准非线性固体流变模型在热压中的应用	51

第二篇 相图与粉末冶金材料设计

第 1 章 发展新材料与相图的关系	57
1.1 相图知识是发展材料的方法的基础之一	57
1.2 开发新材料对相图提出了新的要求	57
1.3 相图在粉末冶金中的作用	58
第 2 章 测定相图的多元扩散偶的方法	59
2.1 三元扩散偶及其在相图研究中的应用	59
2.2 扩散四	64
第 3 章 实测的等温相图	66
第 4 章 相图的计算	75
4.1 相图计算的一般过程	75
4.2 Gibbs 自由能 G 的解析表达式	75

4.3	相平衡的计算方法	79
4.4	相互作用的参数的优化	80
第5章	计算的合金相图	82
第6章	计算的氧化物相图	89
第7章	相图的动力学通道	101
7.1	三元系中的扩散通道	102
7.2	相图在合成超导材料中的应用	103
7.3	相图在表面处理中的应用	105

第三篇 粉末冶金高技术与新材料

第1章	快速凝固-粉末冶金技术的发展综述	110
1.1	快速凝固制备粉末的主要方法	111
1.2	快速凝固粉末冶金金属材料的制备方法	117
1.3	快速凝固-粉末冶金技术的发展	119
第2章	制取快速凝固微细金属粉末的装置和原理	123
2.1	问题的引入	123
2.2	问题的深入	124
2.3	多级快速凝固制粉装置的工作原理及其过程分析	125
2.4	多级快速凝固制粉装置的工作特性	127
第3章	准晶粉末和大块准晶材料的制备	132
3.1	实验装置和方法	132
3.2	实验结果和讨论	133
第4章	铝基多元系准晶合金形成规律的研究	140
4.1	多元系准晶合金的加和原则	140
4.2	多元系准晶合金的形成方式	144
4.3	铝基多元系准晶构成规律的解析	145
4.4	准晶加和原则的讨论	146
第5章	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	148
5.1	Al-Li 合金快速冷凝粉末的热致密化过程	148
5.2	微晶状态 Al-Li 合金的特性	152
5.3	粉末热致密化过程对材料性能影响	153
第6章	一种新型的喷射成形工艺的研究	156
6.1	喷射沉积工艺的发展及现状	156
6.2	喷射沉积工艺的原理和特点	158

6.3 一种新型的喷射沉积工艺	160
6.4 耐热铝合金的喷射成形工艺的研究	161
第7章 一种新的镀层技术的研究	164
7.1 粉末高能冲击镀层技术的工作原理和装置	164
7.2 粉末高能冲击镀层技术的应用	165
常用单位表	167

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。长期以来，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。

第 1 章 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。粉末成形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，40 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，本书限于篇幅，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 Бальщин 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。

表 1.1 粉末体压型方程

理论公式	经验公式	注 释	作 者	提出时间
	$\beta=k_1-k_2\lg p$	β : 相对体积; k_1, k_2 : 系数; p : 压制压力	E. E. Walker ^[1]	1923 年
$\frac{dp}{d\beta}=-Lp$ $\ln p_{\max}-\lg p=L(\beta-1)$ $\ln p_{\max}-\lg p=m\lg \beta$		$p_{\max}$: 对应于压至最紧密状态 ($\beta=1$) 时的压力; L : 压制因素; m : 系数	М. Ю. Бальшин ^[5~7]	1938 年
$\frac{1-D}{1-D_0}=e^{-kp}$		D : 压块相对密度; D_0 : 压块原始相对密度; k : 系数	I. Shapiro ^[8] C. Torre ^[9]	1944 年 1948 年
$\frac{dD}{dp}=k(1-D)$ $p=k\ln \frac{\pi_0}{\pi_p}$		π_0 : $p=0$ 时的孔隙体积的外推值; π_p : 压制压力为 p 时的孔隙体积;	K. Konopicky ^[10]	1948 年
$\frac{dD}{dp}=k(1-D)$		k : 系数	E. Voce ^[11]	
	$\gamma=D'+k(p)^{1/3}$	γ : 压块密度; D' : 粉末松装密度	G. B. Smith ^[12]	1948 年
	$\gamma=a\lg p+\lg b$	a, b : 系数	Rutkowski ^[13]	1949 年
	$p=\frac{kx}{1-x}$	x : 模冲行程	C. Ballhausen ^[14]	1951 年
	$\gamma=kp^{1/n}+D'$ $\gamma=kp^{1/n}+D''$	D' : 粉末摇实密度; n : 系数, 粉末颗粒为: 5 μm $n=4$ 200~300 μm $n=3$ 300 μm ~1mm $n=2$	C. Agte ^[15] M. Petrdlik	1951 年
	$\ln \pi'=kp+\ln \pi'_0$	π' : 压块孔隙度; π'_0 : 粉末松装时的孔隙度; k : 系数, 对 Cu-石墨粉末组分, $k=1.34\times 10^{-2}$	Т. Н. Зვაгокова ^[16] В. И. Лихтман	1954 年

续表

理论公式	经验公式	注 释	作 者	提出时间
	$\ln p = -m \lg \beta + C$	m : 系数, 对于 TiB_2 , GrB_2 , $(\text{TiCr}) \text{B}_2$ $m = 10.5 \sim 11.3$; C : $3.02 \sim 3.24$	В. И. Бабин ^[17] К. И. Портной Г. В. Самсонов	1960 年
	$\ln \frac{1}{1-D} = kp + A$	A, k : 常数	R. W. Hecke ^[18]	1961 年
	$p = \sigma_s C D \ln \frac{D}{1-D}$	C : 系数; σ_s : 粉末金属的屈服 极限	А. Н. Николоев ^[19]	1962 年
	$\lg(p+k)$ $\simeq -n \lg \beta + \lg p_k$	k, n : 系数; p_k : 金属最大压密时的 临界压力	Г. А. Меерсон ^[20]	1962 年
	$\gamma = \gamma_{\max} - \frac{k_0}{a} e^{-\varphi}$	$\gamma_{\max}$ 压力无限大时的极 限密度; a, k : 系数	И. Ф. Кувив ^[21,22] Б. Д. Юрценко	1963 年
	$\frac{p}{C^*} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} p$	C^* : 体积变化程度 (压 缩体积比); a, b : 常数	川北公夫 ^[23]	1963 年
	$\gamma^* = \varphi^{-1} s^{\beta} / t^k$	γ^* : 体积应变; s : 压缩应力; t : 时间; φ, β, k : 常数	Nutting, 引自 ^[23]	
	$\frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{\beta}{\varphi} t^k f_1^{\beta-1} \right)$ $\frac{df_1}{dt} = \left(\frac{k}{\varphi} t^{k-1} f_1^{\beta-1} \right) f_1$	f_1 : 外力; ε : 应变; φ, β, k : 常数	平井西夫 ^[24]	1963 年

1.1 非线性粉体的数学模型

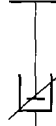
一般粉末体在压型过程中, 其应力 σ 与应变 ε 不服从 Hooke 定律已经被所有的粉末压型实践和压型方程式所证实。其实, 对于一般粉末体不仅线性 Hooke 弹体 (简称 H 体) 的 $\sigma = M\varepsilon$ 规律不适用, 而且其他线性体规律, 如线性 Newton 粘体 (简称 N 体) 的 $\sigma = \mu \dot{\varepsilon}$ 规律、线性 Maxwell 体 (简称 M 体) 的 $\sigma + \tau_1 \dot{\sigma} =$

$\mu\dot{\epsilon}$ 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。

表 1.2 流变模型基本象征符号

名称	线性弹体	线性(粘)流体	非线性弹体	非线性(粘)流体
象征符号				
	(a)	(b)	(c)	(d)
数学模型	$\sigma = M\epsilon$	$\sigma = \eta\dot{\epsilon}$	$\sigma = M\epsilon^m$	$\sigma = M(\tau\dot{\epsilon})^k$

1.1.1 非线性弹体 (非线性 H 体)

最单纯的非线性弹体 (即非线性 H 体) 服从 $\sigma = M\epsilon^m$ 规律。它可用表 1.2 中 (c) 的符号代表。当 $m > 1$ 时, 单纯非线性 H 体呈硬化现象, 即当 ϵ 继续增大时, 对应所需的 σ 值增加更大。在材料力学中有时称 m 为硬化指数。但是值得指出: 当 $m > 1$ 时, 这种硬化现象只有在 $\epsilon > 1$ 后才出现, 从方程 $\sigma = M\epsilon^m$ 看到; 当 ϵ 值很小, 即 $\epsilon \ll 1$ 时, 由于高次方的作用, 对应所需 σ 值将更小, 因而当 $m > 1$, $\epsilon \ll 1$ 时体系不但不出现硬化现象, 而且还出现软化现象。实际体系一般不呈现这种先软化然后硬化现象, 而呈现先服从线性规律然后逐渐改为服从非线性规律。描述这种变形规律可用一个线性弹体与一个非线性弹体并联所组成的非线性弹体。这非线性弹体如图 1.1 (a) 所示, 其中应力-应变关系如下:

$$\begin{aligned}\epsilon_T &= \epsilon_1 = \epsilon_2 \\ \sigma_T &= \sigma_1 + \sigma_2 = M_1\epsilon_1 + M_2\epsilon_2^m \\ \sigma_T &= M_1\epsilon_T + M_2\epsilon_T^m\end{aligned}$$

当 $m > 1$ 而 $\epsilon \ll 1$ 时, 线性弹体起主要作用, 而非线性弹体的作用可以忽略。当 $\epsilon \gg 1$ 时, 非线性弹体起主要作用, 而线性弹体的作用可以忽略。由于这种非

线性体与为数众多的实际材料比较接近,因此是非常重要的。下面介绍的各种复合非线性体,如果需要克服“先软化,然后硬化”现象,都可在并联结构中用图 1.1 (a)中模型代替表 1.2 中 (c) 模型。

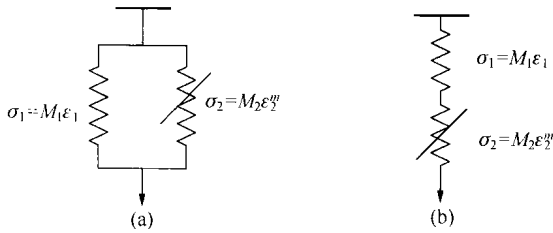


图 1.1 两种复合非线性弹性体模型图

另一种复合非线性弹性体,如图 1.1 (b) 所示,可由一个线性弹性体与一个非线性弹性体串联组成。其应力-应变关系为

$$\begin{aligned}\epsilon_T &= \epsilon_1 + \epsilon_2 \\ \sigma_T &= \sigma_1 = \sigma_2 \\ \epsilon_T &= \epsilon_1 + \epsilon_2 = \frac{\sigma_1}{M_1} + \left(\frac{\sigma_2}{M_2}\right)^{1/m} \\ \epsilon_T &= \frac{\sigma_T}{M_1} + \left(\frac{\sigma_T}{M_2}\right)^{1/m}\end{aligned}$$

当 $m > 1$ 时,这种体系先(当 $\epsilon_2 \ll 1$)呈现非线性软化现象,然后由线性弹性体起主要作用。

1.1.2 非线性粘体 (非线性 N 体)

最单纯的非线性粘体可用表 1.2 中 (d) 的符号代表,但是有关它的数学模型则有待商榷。非线性粘体的数学模型可选用下列三种之一:

$$(1) \sigma = \eta_1 (\dot{\epsilon})^K$$

$$(2) \sigma = (\eta_{II} \dot{\epsilon})^K$$

$$(3) \sigma = M(\tau \dot{\epsilon})^K$$

上列三种数学模型各有优缺点。第一种 $\sigma = \eta(\dot{\epsilon})^K$ 模型是由线性模型 $\sigma = \eta\dot{\epsilon}$ 很自然演变而来,某些国际文献也已采用,但是由于 $\dot{\epsilon}$ 是有因次的,其量纲为时间的倒数,因此 $(\dot{\epsilon})^K$ 的量纲为时间倒数的 K 次方, σ 的量纲式相同于压强的量纲式,应为 $[L^{-1}MT^{-2}]$, η_1 的量纲式只能为 $[L^{-1}MT^{-(2-K)}]$ 。由于 K 是变化的,因而 η_1 的量纲也是变化的,只有 $K=1$ 时, η_1 的量纲才同物理学中公认的粘性系数量纲 $[L^{-1}MT^{-1}]$ 相同,当 $K \neq 1$ 时, η_1 的量纲是否仍能被接受为一种非线性粘体系数是值得研究的。第二种 $\sigma = (\eta_{II} \dot{\epsilon})^K$ 数学模型在 η_{II} 的量纲上存