

粉末增塑

近净成形技术及 致密化基础理论

范景莲 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

粉末增塑近净成形技术 及致密化基础理论

范景莲 著

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书共分为四篇,第一篇为粉末注射成形基础理论与技术,侧重于黏结剂组元有机物的物理化学性质以及各有机物组元的相溶性,黏结剂的设计基础以及黏结剂与粉末的相互作用力,黏结剂与粉末体混合流变学、模具设计、脱脂及强化烧结原理等关于粉末注射成形中的最关键基础性问题。第二篇为粉末体增塑挤压成形,区别于粉末注射成形过程的特殊问题,侧重于阐述挤压过程流变行为分析与控制、成形剂脱除以及挤压模具设计,重点针对硬质合金棒材的挤压成形这一最敏感的制备技术进行了详细分析。第三篇为热压力增塑近净成形技术,包括热压、热等静压和低压热等静压技术,重点分析阐述了几种技术的理论基础、设备、工艺过程及应用。第四篇为大压力下粉末体热压力成形技术的理论基础,包括粉末热锻、粉末热挤压、粉末热轧以及热挤压等热增塑致密大变形技术。

本书既可供材料专业的师生参考阅读,也可供从事相关专业的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

粉末增塑近净成形技术及致密化基础理论/范景莲著.

—北京:冶金工业出版社,2011.1

ISBN 978-7-5024-5297-1

I. ①粉… II. ①范… III. ①粉末成型 IV. ①TF124.37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 124322 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5297-1

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011 年 1 月第 1 版,2011 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;22 印张;533 千字;334 页

66.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

尖端技术的不断进步使得一些高新科技领域,如航空航天、核能、新式武器制备、汽车工业、计算机等,对零部件提出了更高要求,给传统的粉末冶金模压成形带来了巨大挑战:(1)零部件尺寸向极小和极大方向发展:零件尺寸可以达到0.55mm或更小,如光纤通信上光纤连接器所用的陶瓷插针(外径1.25mm,内孔125 μ m,长10mm),尺寸极大的制品有一维尺寸超过1m的各种板材、带材、棒材、管材以及二维尺寸很大的各种板材或三维尺寸很大的零部件,如飞机发动机涡轮叶片,大型涡轮增压器转子等。(2)零部件形状趋向于复杂化:如发动机涡轮盘、调速控制器的执行元件、植入牙陶瓷螺杆及阀门等;(3)零部件具有更高的服役性能:如核聚变反应堆中的面向等离子元件(PFC)、分流电阻器及燃气轮发动机中的关键部件等。传统模压成形由于其自身的局限性在精密的小型零部件及大型的结构件制备上不具有优势,同时无法满足这些领域对制品形状复杂性、高精度、高性能的要求。

“粉末增塑”包括成形过程通过引入低熔点有机物组元使粉末体增塑和在高温高压下使粉末体软化形成黏流体而增塑,粉末增塑成形技术是近年来发展速度非常快的制备高性能粉末冶金材料的近净成形技术,它包括添加有机黏结剂作为粉末载体,利用黏结剂在一定温度下呈现的黏流特性,在一定压力下使粉末成形为致密压坯的增塑近净成形技术,如粉末注射成形,粉末挤压成形;在高温与外压同时作用下,由于粉末表面产生软化形成黏流体,产生黏性流动而成形的热压力增塑近净成形技术,如粉末热压、粉末热等静压以及低压热等静压(又称气压烧结);以及在高温作用下使粉末体软化,同时施加较高压力使得粉末体发生黏性流动及塑性变形的大压力下粉末体热压力半固态加工技术,如粉末热锻,粉末热挤压,粉末热轧等。粉末增塑成形技术可以制备形状复杂性较高的制品、小尺寸的零部件以及一维或二维尺寸较大的管、带、板等异形材。另外,此技术可以一次成形所需形状的零部件,材料的利用率高,生产自动化程度高,可以有效降低生产成本,提高生产效率,适用于大规模生产。

粉末注射成形与粉末挤压成形有着很大的相似性,是将固体粉末与低熔点有机物均匀混合,在粉末体成形的过程中,利用高分子有机物在加热到较低温度(300 $^{\circ}$ C以下)时产生软化或熔融,形成低黏度黏流体的特性,以此作为载体而充填进入形状非常复杂的型腔,成形为由有机物和黏结剂组成的复杂形状的压

坯,然后利用物理化学方法(热脱除、溶剂浸入脱除等)将致密坯体中的有机物脱除形成多孔体,最后将多孔坯体烧结致密获得高性能零件的方法,可见,粉末注射成形与粉末挤压成形是多学科渗透与交叉的产物,涉及塑料成形工艺学、高分子化学、粉末冶金工艺学和金属材料学等。粉末注射成形与粉末挤压成形的不同之处在于注射成形适用于制备三维形状非常复杂、三维方向尺寸较小的制品,形状设计自由,其在黏流体增塑成形过程中的增塑充模行为较为复杂,所采用的压力较大,黏结剂黏度较高,对粉末要求较高;而粉末挤压成形技术适用于成形一维或二维形状的棒材、带材、管材、板材或带内螺纹的硬质合金棒材,制品长度不受限制,成形压力较小,黏结剂黏度较低,粉末挤压成形技术对硬脆材料体系,如硬质合金和钨基高密度合金等棒材挤压成形应用非常广泛,是制备管、带、棒等异形产品的有效方法。

粉末热压力增塑近净成形是利用高温和高压的共同作用,使得粉末体软化产生黏性流动发生致密化而制备粉末冶金零部件的一种近净成形方法,其特点在于成形与烧结致密化过程同时进行。粉末热压力增塑近净成形技术制备的制品密度可以达到近全致密,且组织可控,晶粒细小均匀,形状复杂,物理力学性能接近甚至超过普通铸造生产的制品,该技术所制备的高性能粉末冶金结构材料具有独特的优势,因此越来越受到人们的重视。粉末热压力增塑近净成形包括最初的热压,后来发展的热等静压以及最近几年发展迅速的低压热等静压,这些技术在国防、航空航天等高尖端领域中发挥了十分重要的作用。

大压力下粉末体热压力半固态加工技术是指金属/合金粉末或其粉末毛坯在加热至再结晶温度以上,粉末体发生软化时,沿一个方向或几个方向施以高压,使粉末体产生强烈的黏性流动和塑性变形而达到近全致密,同时得到所需制品的一种技术。该技术最大优势在于适合制备传统粉末冶金无法制备的大棒坯和大块材以及大尺寸薄板等,它包括粉末热锻、粉末热挤压、粉末热轧以及预成形坯热挤压等。粉末体热压力半固态加工技术有利于改善粉末塑性和流动性以及降低加工过程所出现的加工硬化现象,大大提高制品的密度(可达到99%以上),使材料的强度、延性等力学性能大大提高,与熔炼和压力加工所制备的材料性能接近,而且组织结构呈现一定的取向。另外,粉末体经热压力加工后所制备的制品一般不需要后续热处理,减少了生产工序,提高了生产效益,降低了生产成本。近年来,此技术被广泛应用于制备弥散强化复合材料、超合金、铁合金、硬质合金、快速凝固粉末复合材料等材料体系,是一种具有较大发展潜力的成形加工技术。

近几年来,随着国家尖端技术对材料的成形与性能等多方位的要求,粉末冶金材料制备技术得到快速发展,其特点是粉末冶金与加工、机械制造和化学等学科出现多学科交叉。以上几种成形技术就是以多学科交叉为基础而产生

的,它们在粉末近净成形过程中利用了黏流体增塑产生黏性流动而形成压坯,或在成形与烧结致密化、粉末冶金制品大变形加工过程中利用了黏流体产生的黏流流动或/和塑性变形的综合效果而达到近全致密,其最大的共同点就是某一过程中黏流体增塑产生黏性流动起到了关键作用。因而作者在本书中将它们作为粉末冶金近净成形技术与方法而统一起来,形成《粉末增塑近净成形技术及致密化基础理论》一书,供广大科研工作者,广大本科生、硕士生和博士生参考。

本书共分为四篇,第一篇为粉末注射成形基础理论与技术,覆盖了注射成形技术原理与优势、注射成形粉末制备、黏结剂的性质与设计、粉末-黏结剂混合料的流变学、粉末注射成形计算机模拟、模具设计、黏结剂的脱脂方法、烧结等内容(第1~第8章),与以前出版的关于粉末注射成形的书相比,涉及黏结剂组元有机物的物理化学性质以及各有机物组元的相容性,黏结剂的设计基础以及黏结剂与粉末的相互作用力,黏结剂与粉末体混合流变学、模具设计、脱脂及强化烧结原理等基础性问题的阐述更为深刻和详尽,对丰富粉末注射成形基础理论及进一步优化其技术做了很好的补充,为企业、科研工作者提供更为完善的理论和工艺指导。另外,本篇对当今生产实践应用较多的几种典型材料体系的注射成形进行了较为详尽的分析阐述(第9章),还介绍了近几年来粉末注射成形发展前沿的一些新技术如粉末微注射成形(第10章),以期对这些材料产品的注射成形产业化能起很好的指导作用。第二篇粉末体增塑挤压成形,主要包括基本工艺介绍、黏结剂设计与脱除以及产品的设计(第12~第14章),成形剂设计与制备、挤压过程流变行为分析与控制、成形剂脱除以及挤压模具设计,并重点针对硬质合金的棒材的挤压成形这一最敏感的制备技术进行了详细分析。第三篇包括热压、热等静压和低压热等静压技术等方面,重点分析阐述了热压力增塑近净成形技术。第四篇为大压力下粉末体热压力成形技术的理论基础,包括粉末热锻、粉末热挤压、粉末热轧以及热挤压等热增塑致密大变形技术,从原理、方法、制备工艺与材料性能方面详尽阐述了这一当今和未来粉末冶金制备高性能大制品的很有潜力很有发展前景的新型近净成形技术,介绍了该技术近年来的发展动态和新技术。

本书作者从1990年以来一直从事粉末冶金近净成形与新材料、新技术的研究,从1996年以来一直从事粉末注射成形技术的研究,于1999年开始一直承担粉末冶金专业硕士研究生及博士研究生的专业课《粉末注射成形技术》授课。作者及其课题组老师,硕士、博士研究生等近20人组成的学术团队在进一步开展粉末注射成形技术研究的同时,开展了大量钨、钼等难熔金属与合金,金属陶瓷复合材料的纳米制备技术的研究以及极端服役条件下的高性能材料的研究,以粉末注射、挤压成形、热压、等静压、低压等静压等方法为主要成形与致密化

研究方法,同时对加工、形变强化等方面也开展了大量的研究工作。本书是作者根据多年来开展的研究和长期授课积攒的大量国内外相关文献的报道撰写而成的。

参加本书撰写的还有:卢明园、高建祥、韩勇、成会朝、刘涛、祁美贵、刘拼拼、银锐明、龚星(排名不分先后),对他们的工作表示感谢。

由于作者水平有限,谬误之处敬请读者赐正。

作 者

2009年11月

目 录

第一篇 粉末注射成形基础理论与技术

1 粉末注射成形原理与技术优势	1
1.1 概述	1
1.2 粉末注射成形基本工艺	2
1.3 技术优势	3
2 注射成形粉末颗粒特征与注射成形粉末制备	6
2.1 粉末颗粒松装密度	6
2.1.1 影响松装密度的因素	6
2.1.2 提高松装密度的方法与途径	7
2.2 注射成形粉末体的颗粒特征	7
2.2.1 粉末颗粒的粒度	7
2.2.2 粉末颗粒的形状	8
2.2.3 粉末颗粒的比表面积	8
2.2.4 粉末颗粒间的摩擦	9
2.3 注射成形粉末的制备	9
2.3.1 雾化法	9
2.3.2 还原法	16
2.3.3 羰基物热离解法	16
3 粉末注射成形黏结剂设计基础	17
3.1 PIM 黏结剂概述	17
3.2 黏结剂设计基本原则	17
3.2.1 复合组元设计原则	17
3.2.2 低分子有机物组元	18
3.2.3 高分子聚合物组元	19
3.2.4 添加剂组元	23
3.3 黏结剂组元的选择原则	25
3.3.1 PIM 对黏结剂组分相容性的要求	25
3.3.2 溶解度参数	25

3.3.3 Huggins - Flory 相互作用参数	27
3.3.4 相容性测定方法	28
3.4 黏结剂分类及应用举例	28
3.4.1 蜡基黏结剂	28
3.4.2 油基黏结剂	29
3.4.3 聚醛基黏结剂	29
3.4.4 水溶性黏结剂	29
3.4.5 凝胶水基体系黏结剂	30
3.4.6 丙烯酸基黏结剂	30
3.4.7 热固性黏结剂	31
3.4.8 油 + 蜡基多组元黏结剂	31
3.4.9 热塑 - 热固性黏结剂	31
3.5 黏结剂设计举例	32
3.5.1 油 + 蜡半固态黏结剂	32
3.5.2 一种水溶性黏结剂的设计	35
4 粉末颗粒之间及粉末颗粒与黏结剂的相互作用	39
4.1 细粉末颗粒之间的相互作用	39
4.1.1 表面原子的自行调整	39
4.1.2 外来因素的调整	39
4.2 喂料中粉末颗粒的相互作用	40
4.3 喂料中有机物黏结剂与粉末颗粒之间的相互作用	42
4.3.1 重力势能和浮力势能	43
4.3.2 吸附层位阻效应引起的作用能	43
4.4 黏结剂与粉末共混的热力学	45
4.4.1 基本颗粒的分散过程	45
4.4.2 杨氏方程和最小润湿角	46
4.5 表面活性剂对混合料物理化学性质的影响	46
4.5.1 表面活性剂对粉末颗粒相互作用的影响	46
4.5.2 表面活性剂对黏结剂和粉末相互作用的影响	48
4.5.3 增强表面活性剂的作用	50
5 黏结剂 - 粉末混合料流变学行为	52
5.1 概述	52
5.2 流体的黏度定义及流体分类	52
5.2.1 牛顿流体	52
5.2.2 非牛顿流体	53
5.3 粉末喂料的流变学行为	54
5.3.1 流场表达式	54

5.3.2 喂料流变测量学	55
5.3.3 PIM 粉末喂料的本构方程	60
5.4 粉末喂料流变行为的影响因素	62
5.4.1 粉末装载量的影响	62
5.4.2 剪切速率的影响	64
5.4.3 黏结剂组成和黏结剂类型的影响	66
5.4.4 表面活性剂、增塑剂等的影响	66
5.4.5 温度的影响	67
5.4.6 压力的影响	68
5.4.7 粉末特性的影响	68
5.5 粉末喂料流变行为的标准模型	70
5.5.1 粉末喂料黏度模型必须满足的基本原则	70
5.5.2 粉末喂料黏度行为的模型化公式	70
5.6 喂料的最佳黏性行为 and 综合流变学评价因子	72
5.6.1 喂料最佳黏性行为	72
5.6.2 综合流变学评价因子	72
6 粉末注射成形充模流动计算机模拟	73
6.1 PIM 充模流动计算机模拟概述	73
6.2 PIM 充模流动数学模型分类	73
6.2.1 单相流模型	73
6.2.2 两相流模型	74
6.3 PIM 充模流动数学模型	74
6.3.1 单流体数学模型	74
6.3.2 双流体数学模型	75
6.3.3 欧拉-拉格朗日数学模型	76
6.4 粉末喂料流变本构方程的选择	77
6.5 PIM 充模过程的模壁边界和传热边界条件	78
6.5.1 模壁边界条件	78
6.5.2 传热边界条件	78
6.6 数值计算方法	78
6.7 PIM 充模过程计算机模拟常用软件	79
6.7.1 Phoenix 软件	79
6.7.2 Fluent 软件	80
6.7.3 ANSYS 软件	80
6.7.4 ANSYS - CFX 软件	80
6.7.5 STAR - CD 软件	81
6.8 PIM 充模过程计算机模拟发展展望	81

7 粉末注射成形模具设计基础	82
7.1 注射成形模具组成及设计步骤	82
7.1.1 注射成形模具的组成部分	82
7.1.2 模具设计步骤	82
7.2 模腔尺寸设计	83
7.3 流道系统	84
7.3.1 主流道	85
7.3.2 分流道	86
7.4 浇口	86
7.4.1 浇口的作用和设计原则	87
7.4.2 浇口的形状和尺寸	87
7.5 分型面	88
7.6 模腔设计	89
7.6.1 模腔数目设计	89
7.6.2 模腔流道设计	89
7.7 模具排气	90
7.7.1 模具中气体的来源	90
7.7.2 模具中容易困气的位置	90
7.7.3 模具排气的分类和方式	90
7.8 制品的顶出机构	91
7.9 模具材料的设计	92
7.10 模具加工	92
7.11 模具装配和试模	93
7.12 计算机辅助工具在模具设计中的应用	93
8 黏结剂脱脂基础与方法	94
8.1 引言	94
8.2 脱脂基础	94
8.2.1 黏结剂的作用	94
8.2.2 黏结剂的热行为和热分解特性	94
8.2.3 脱脂缺陷与控制	96
8.3 脱脂方法	96
8.3.1 热脱脂	97
8.3.2 溶剂脱脂	102
8.3.3 催化脱脂	106
8.4 脱脂过程中碳的控制	109
8.4.1 热脱脂过程碳的产生	109
8.4.2 热脱脂过程中的脱碳反应	109

8.4.3 脱脂坯碳的控制	109
9 烧结变形控制与强化烧结	112
9.1 粉末装载量对烧结变形的影响	112
9.1.1 粉末装载量与线收缩率的关系	112
9.1.2 提高粉末装载量的方法	113
9.2 强化烧结	113
9.3 (固+液)二步烧结	114
9.3.1 液相烧结	114
9.3.2 (固+液)二步烧结控制变形	115
9.3.3 二步烧结工艺对PIM产品烧结变形的影响	116
9.4 添加合金元素强化烧结(烧结助剂强化烧结)	117
9.4.1 强化准则	117
9.4.2 合金元素的选择	118
9.4.3 烧结助剂强化烧结在PIM中的应用	119
9.5 超固相线液相烧结	122
9.5.1 致密化理论	122
9.5.2 温度对合金性能和变形程度的影响	123
9.6 压力强化烧结	127
9.7 粉末活化烧结	130
9.8 烧结气氛	131
10 粉末注射成形技术应用	134
10.1 钨合金注射成形技术	134
10.1.1 粉末改性	134
10.1.2 黏结剂设计	135
10.1.3 脱脂工艺的研究	136
10.1.4 烧结工艺研究与变形控制	138
10.1.5 钨合金注射成形的优势与发展趋势	139
10.2 硬质合金注射成形技术与应用	140
10.2.1 黏结剂与注射工艺	140
10.2.2 脱脂和烧结的碳含量控制与性能研究	143
10.2.3 硬质合金注射成形技术应用	145
10.2.4 硬质合金注射成形发展趋势	146
10.3 陶瓷注射成形技术	147
10.3.1 CIM技术特点	147
10.3.2 CIM用粉末的特点	147
10.3.3 CIM黏结剂的研究	148
10.3.4 注射成形	149

10.3.5 脱脂	150
10.3.6 烧结	152
10.4 不锈钢注射成形技术	154
10.4.1 PIM 不锈钢技术特点	154
10.4.2 PIM 不锈钢合金成分体系与特性	154
10.4.3 PIM 不锈钢用黏结剂设计与研究	156
10.4.4 脱脂、烧结与缺陷控制	159
11 粉末注射成形技术新工艺	164
11.1 粉末微注射成形	164
11.1.1 粉末微注射成形技术的特点	164
11.1.2 粉末微注射成形技术的研究现状	165
11.1.3 粉末微注射成形技术的发展趋势和应用前景	169
11.2 粉末共注技术	170
11.3 造孔-注射成形(PSH-PIM)技术	170
11.4 低压注射成形技术	172
11.5 气体/液体辅助注射成形技术	173
参考文献	175

第二篇 粉末体增塑挤压成形基础理论与技术

12 粉末挤压成形特点与技术要求	195
12.1 粉末挤压成形技术的发展历史	195
12.2 增塑粉末挤压成形技术的特点及影响因素	196
12.3 挤压成形的基本过程	196
12.4 挤压过程中的影响因素	197
12.4.1 挤压模具	197
12.4.2 粉末	197
12.4.3 成形剂	197
12.4.4 挤压温度	197
12.4.5 挤压速度	197
13 粉末增塑挤压成形成形剂的设计与脱除	199
13.1 成形剂设计及其脱除机理与方式的研究	199
13.2 粉末挤压成形剂设计原理	200
13.2.1 成形剂组元的选择原则	200
13.2.2 成形剂各组元间的可混性	203
13.3 成形性能及成形剂黏度	203

13.4 成形剂与喂料的制备	205
13.4.1 熔融法	205
13.4.2 溶剂法	205
13.4.3 喂料的制备	206
13.5 粉末挤压流变学	207
13.5.1 流变学原理概述	207
13.5.2 螺杆挤压输运过程流变行为	207
13.5.3 喂料熔体在流动区的流动	207
14 产品设计	210
14.1 形状设计	210
14.1.1 对称性	210
14.1.2 断面面积的差	210
14.1.3 断面过渡	210
14.1.4 断面形状	212
14.1.5 圆角半径	212
14.2 模具的典型要素	213
14.2.1 模角 α	213
14.2.2 定径带长度 $h_{\text{定}}$ 和直径 $d_{\text{定}}$	213
14.2.3 出口直径 $d_{\text{出}}$ 或出口喇叭锥	214
14.2.4 入口圆角半径 $r_{\text{入}}$	214
14.2.5 其他结构要素	214
14.3 几种典型的挤压产品	214
参考文献	216

第三篇 粉末热压力增塑近净成形理论与技术

15 粉末热压力增塑成形技术概述	219
15.1 热压技术	219
15.2 热等静压技术	220
15.3 低压热等静压技术	220
15.4 粉末热压力增塑成形技术的发展趋势	221
16 粉末热压原理与工艺	223
16.1 粉末热压致密化过程与理论	223
16.1.1 粉末热压原理	223
16.1.2 热压致密化理论	223
16.2 粉末热压设备及其工艺	226

16.2.1	热压设备	226
16.2.2	热压烧结工艺参数	230
16.3	粉末热压制备材料的研究应用	231
16.3.1	陶瓷材料热压	231
16.3.2	硬质合金热压	233
16.3.3	金属陶瓷复相材料热压	234
16.3.4	热压制备合金材料	238
17	粉末热等静压原理与应用	241
17.1	前言	241
17.1.1	热等静压技术的工作原理	241
17.1.2	热等静压技术的发展	241
17.1.3	热等静压致密化理论	242
17.1.4	热等静压的优点	242
17.2	热等静压设备装置	244
17.2.1	热等静压设备的分类	244
17.2.2	热等静压的压力介质	245
17.3	热等静压工艺	247
17.3.1	热等静压工艺种类	247
17.3.2	热等静压加压加热方式	250
17.3.3	热等静压工艺参数和选择	252
17.4	热等静压工艺的应用	253
17.4.1	在硬质合金中的应用	253
17.4.2	在陶瓷材料中的应用	256
17.4.3	在高温合金中的应用	257
17.4.4	在金属陶瓷中的应用	258
18	低压热等静压原理与应用	261
18.1	低压热等静压技术	261
18.2	低压热等静压设备装置及工艺	261
18.2.1	低压热等静压设备装置	261
18.2.2	低压热等静压工艺	263
18.3	低压热等静压的应用	266
18.3.1	硬质合金的应用研究	266
18.3.2	在陶瓷材料中的应用研究	269
18.3.3	金属陶瓷的应用研究	271
	参考文献	273

第四篇 大压力下粉末体热压力塑性加工成形技术

19 粉末体热压力塑性加工原理概述	277
19.1 前言	277
19.2 粉末体热压力塑性加工原理	277
19.2.1 基本假设	277
19.2.2 金属粉末体屈服准则的建立	278
19.2.3 加热状态下金属粉末体塑性变形的特点	278
19.3 粉末体热压力塑性加工技术的发展趋势	279
20 粉末热锻	283
20.1 粉末热锻基本原理	283
20.1.1 前言	283
20.1.2 粉末热锻致密化变形规律	283
20.1.3 热锻孔隙变形规律	284
20.1.4 热锻时颗粒变形机构	286
20.2 粉末热锻分类	287
20.2.1 自由锻	287
20.2.2 模锻	287
20.3 粉末热锻模具的设计及影响因素	290
20.3.1 锻模设计	290
20.3.2 影响因素	290
20.4 粉末热锻有限元分析	292
20.5 粉末热锻的应用	294
21 粉末热挤压	302
21.1 概述	302
21.2 粉末热挤压相对于其他成形方法的优势	302
21.3 热挤压方法	302
21.4 粉末热挤压对包套的要求	303
21.5 粉末热挤压工艺的流程	303
21.6 包套挤压过程粉末体的致密化过程及包套变形	305
21.7 挤压参数对粉末热挤压过程的影响	306
21.7.1 挤压比对挤压过程的影响	306
21.7.2 挤压温度对挤压过程的影响	307
21.8 利用粉末热挤压工艺生产钨铜材料	309
21.8.1 不同加工方式对相对密度的影响	309
21.8.2 微观结构变化	309

21.8.3 热挤压 W - Cu 材料电导率的变化	310
22 粉末热轧	312
22.1 粉末轧制的基本概念	312
22.2 粉末轧制的特点	312
22.3 粉末轧制原理	312
22.4 影响粉末轧制带材性能的因素	314
22.4.1 金属粉末性能	314
22.4.2 轧制工艺参数	315
22.4.3 生带材的烧结及后处理工艺	316
22.5 粉末热轧法	317
22.6 钨板和钨合金的热轧工艺	317
22.6.1 钨板的热轧工艺	317
22.6.2 钨合金的热轧变形工艺	318
23 热挤压	320
23.1 热挤压及其挤压方式	320
23.2 热挤压工作原理	321
23.3 热挤压工艺的特点	321
23.4 热挤压工艺的要求	322
23.5 热挤压工艺的应用	323
23.5.1 变形镁合金	324
23.5.2 铝、铜及其合金	324
23.5.3 钛及钛合金	324
23.5.4 新型复合材料	325
23.5.5 热挤压钨合金	325
23.6 静液挤压在难熔金属材料挤压中的应用	328
参考文献	330