

粉体成形力学原理

吴成义 张丽英 编著

冶金工业出版社

粉体成形力学原理

吴成义 张丽英 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2003

内 容 提 要

本书根据粉体成形的力学原理叙述了目前各种成形方法的力学规律。本书共十六章。第一章、第二章介绍了传统的基本理论方程,第三章至第九章总结了近年来有关粉体成形的力学规律和粉末颗粒在成形过程中的运动特征,第十章至第十四章介绍了近年来新的成形技术,第十五章介绍了阴模外径及强度的计算方法,第十六章介绍了纳米粉体成形的特殊问题。

本书可作为粉末冶金专业教材之用,对从事粉末冶金工作的工程技术人员,以及从事功能材料、复合材料、新型陶瓷材料、核工业材料、制药业及水泥业等工作的工程技术人员也有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

粉体成形力学原理/吴成义,张丽英编著. —北京:冶金工业出版社, 2003.9

ISBN 7-5024-3169-1

I. 粉… II. ①吴… ②张… III. 粉末成形—力学
IV. TF124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 037842 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 郭庚辰 美术编辑 李 心 责任校对 栾雅谦 责任印制 牛晓波
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

2003 年 9 月第 1 版, 2003 年 9 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 11.375 印张; 303 千字; 351 页; 1—2500 册

32.00 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 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

粉末冶金成形是粉末冶金工艺中最重要的工序之一。粉末冶金的大多数产品，都是由各种金属、合金或陶瓷粉未经成形和烧结而制成的，特别是由合金粉末直接生产机械零件时，对成形压坯的密度、形状和尺寸要求非常严格。各种粉体都有自己的成形规律，其成形方法也随零件几何形状的不同而不同，近年来，不仅各种成形方法发展很快，而且人们对成形过程中粉体的力学特性也有了较为深入的研究。

作者从事粉末冶金的教学与科研工作多年，深感在成形原理方面没有专门系统的理论书籍可供参考。本书是为北京科技大学粉末冶金专业研究生的教学而编写的，主要是将现有各种成形方法中的理论问题做一系统整理，但因作者知识水平所限，难免有误，望读者及同行多多批评指正。

本书在编写过程中，得到了国家自然科学基金委员会、国家“863”计划基金的支持，深表谢意。

编 著 者

2002.10

目 录

概述	1
第一章 压制压力与压坯密度的关系	4
第一节 压制曲线的测定方法	4
第二节 压制曲线的特征	5
第三节 曲线的数学函数表示法及系数测定	8
第四节 压制曲线的影响因素及曲线的用途	9
参考文献	11
第二章 压制理论	12
第一节 多孔体容积参数的基本概念	12
一、粉末和多孔体的密度	12
二、粉末和多孔体的比容	12
三、粉末或压坯的相对密度	12
四、粉末或多孔体的相对容比	13
五、孔隙度	14
六、孔隙度系数	14
第二节 巴尔申压制方程	15
一、方程式的推导过程	16
二、巴尔申压制理论的假设	20
三、巴尔申压制理论的缺点	20
第三节 巴尔申-麦耶尔松压制方程	21
一、压制压力与粉末硬化程度的关系	25
二、压制压力与粉末物理、工艺性能的关系	27
第四节 川北方程	28
一、川北方程	28
二、川北压缩理论	31

第五节 艾西 (Athy) 方程及与川北方程的关系	34
第六节 黄培云压制方程	36
一、粉末体的应力应变关系	37
二、粉末充分弛豫对应力应变方程的简化	39
三、黄培云压制方程的发展	40
四、常数 n 与 M 的物理意义	43
第七节 其他压制理论及方程简介	45
参考文献	46
第三章 压制过程中压坯的受力计算	49
第一节 压坯受力情况	49
第二节 侧压力的计算与测定	50
一、巴尔申的计算	50
二、其他学者的研究与计算	53
三、两种测定侧压力的试验方法	55
第三节 粉末与模壁的摩擦力计算	59
一、模壁摩擦力的一般计算公式	59
二、摩擦力对正压力的消耗以及对粉末传力极限高度的影响	63
第四节 正压力的损耗对压坯密度的影响	67
一、压力损失的计算	67
二、几种具体情况下的计算	69
第五节 脱模压力的测定与计算	77
第六节 弹性后效现象	81
参考文献	83
第四章 压制过程中粉末的运动规律	85
第一节 等高制品中粉末的运动规律	85
一、理想均匀压缩条件下粉末的运动特征	85
二、压制时实际粉末的位移情况	91
第二节 不等高制品中粉末的运动规律	91
一、台阶制品中粉末的运动规律	91
二、压坯的力学性能 (莫尔特性)	92

三、不等高制品不发生侧向运动的基本条件	104
第三节 不等高制品压制的基本原则	110
一、压制速度相等的原则	110
二、压制速率相等的原则	113
三、台阶制品常用的压制方法	116
参考文献	121
第五章 粉末体的压缩刚度特性	123
第一节 金属粉末的压缩刚度曲线及其相等的条件	124
一、制品的形状因素和装粉量对刚度曲线的影响	124
二、截面形状不同制品刚度曲线相等的条件	126
第二节 不等高制品在压制过程中刚度曲 线的调整与计算原理	131
一、不等高制品各高度区刚度曲线的测定	131
二、不等高制品在压制过程中各区刚度曲线的调整和计算	134
第三节 冲床动力曲线与压坯刚度曲线的选配	137
第四节 其他几种刚度调整机构	141
一、弹簧类型及刚度设计	141
二、气、液浮动式刚度调整机构	152
参考文献	156
第六章 等静力成形	157
第一节 冷等静压成形	157
第二节 等静压传力介质的特性及等静压的分类	159
第三节 冷等静压设备与工艺简介	164
一、冷等静压设备	164
二、冷等静压液压系统	169
三、工艺操作	170
第四节 冷等静压成形规律	170
一、实验曲线	170
二、理论方程	173

第五节 冷等静压成形时压坯的受力及粉末的运动规律	174
一、有刚体支承的等静力压制(单向位移)	174
二、无刚体支承的等静力压制(多向位移)	177
第六节 非准静力压制和简易冷等静压制	182
一、塑料软模非准静力压制	183
二、橡皮模非准静力压制	186
三、粉末充填非准静力压制	187
四、简易冷等静压制	188
第七节 热等静压设备及工艺问题	189
一、热等静压设备简介	191
二、热等静压的工艺简图和工艺问题	193
第八节 热等静压致密化的特征	202
一、致密化的温度	202
二、致密化的速度	204
三、产品的密度分布	205
四、热等静压对晶体结构和制品性能的影响	206
第九节 压坯的质量及控制方法	208
一、压坯的质量要求	208
二、压坯强度及测定方法	211
参考文献	213
第七章 粉末轧制成形	216
第一节 概述	216
第二节 粉末的咬入条件	216
第三节 粉末连续轧制的条件	220
第四节 轧制带材的密度与厚度的关系	221
第五节 粉末粒度和颗粒形状对轧带厚度的影响	225
第六节 轧制气氛对轧制带材密度和厚度的影响	225
第七节 粉末轧制带材的烧结、后处理及发展动态	227
参考文献	228

第八章 楔形压制	229
第一节 压坯的受力与平衡方程.....	229
第二节 粉末的受力分析与运动特征.....	230
第三节 压坯的厚度计算.....	235
第四节 楔形压制总压力计算.....	236
参考文献.....	237
第九章 挤压成形	238
第一节 挤压过程基本原理.....	239
第二节 挤压过程中增塑物料的受力与流动.....	240
第三节 挤压模具参数与挤压压力计算.....	244
一、嘴内物料的受力分析	244
二、单元体剪切应力与剪切角之间的关系	245
三、相对伸长量 ϵ 与剪应力 τ 的关系	246
四、挤压嘴定型带长度 l	248
五、挤压锥角 α	249
第四节 挤压压力理论计算.....	250
第五节 挤 压 工 艺.....	256
一、石蜡加入量	256
二、石蜡与硬质合金的掺和	257
三、预压坯料	258
四、挤压工艺	258
五、临界挤压速度	259
参考文献.....	260
第十章 爆炸成形	261
第一节 爆炸成形装置.....	261
第二节 爆炸能量与压坯密度的关系.....	262
第三节 爆炸压力与时间的关系.....	263
第四节 近年国内外发展情况.....	264
一、常用的粉末爆炸烧结法	265
二、粉末颗粒的变形、碎化及烧结机制	268

参考文献	273
第十一章 喷射成形	275
第一节 喷射成形基本原理及工艺特点	275
第二节 金属液流输送技术	277
第三节 雾化锥体的温度场与质量场	279
第四节 沉积速率和粉碎效率	282
参考文献	288
第十二章 注射成形	289
第一节 注射成形基本工艺	289
第二节 有机熔体的流变特性及测定	293
第三节 混合物熔体的脱脂特性	296
第四节 注射工艺参数对毛坯质量的影响	298
参考文献	300
第十三章 电铸成形	303
第一节 电铸成形基本原理	303
第二节 电铸模的类型及材料	305
第三节 电铸前形模的预处理	306
一、金属形模电铸前的预处理	306
二、非金属形模的表面预处理	307
第四节 电铸溶液及工艺参数	308
一、电铸铜溶液及工艺参数	308
二、电铸镍溶液成分及工艺参数	309
参考文献	310
第十四章 直接凝固注模成形	311
第一节 Si_3N_4 , SiC 陶瓷粉末的直接凝固注模成形	312
一、基本原理	312
二、工艺过程	313
三、主要原料	313
四、主要工艺参数	314
第二节 Al_2O_3 粉直接凝固注模成形	318

一、基本原理	318
二、凝固坯体的性能	321
参考文献	323
第十五章 阴模（高压容器）外径及强度的设计与计算	325
第一节 单层阴模强度计算	325
第二节 双层套筒阴模强度计算	330
一、组合圆筒强度计算	330
二、等强度设计法	335
三、内筒内壁表面无张力设计法	337
第十六章 纳米粉体成形的特殊问题	341
第一节 桥接团粒的分离与观察	342
第二节 “桥接”团粒对粉末及压坯孔隙体积 分布特征的影响	346
第三节 桥接团粒对粉末致密化曲线的影响	347
第四节 3种粉碎方法对桥接团粒的粉碎效果	349
参考文献	351

概 述

一、粉体成形技术研究的内容和意义

以粉体材料(包含天然粉体材料和人造粉体材料)为原料经各种成形技术首先制成具有一定形状、尺寸和密度的毛坯,再经高温烧结最终制成具有特殊性能的产品,这一工艺技术已有 6000 多年的历史。该技术最早被用来制造陶器和瓷器。13 世纪初开始利用金属粉未经模压成形,再经烧结制成各种金属硬币,这一工艺技术很快冠以粉末冶金名称,在冶金和新材料领域广泛应用,并显示出优异的竞争特性。采用粉末冶金技术不仅可以将粉体材料转变成块体材料,而且更重要的是能够使块体材料获得崭新的、特殊的性能,如天然的石墨粉末,人类无法直接应用,但可以将其压制或挤压成形为石墨棒坯、板坯、管坯等再烧结成材。这些块体材料在冶金、能源、电讯、化工、交通等各行业发挥了巨大作用。又如穿甲弹芯,它是由含量达 92% 以上的钨粉经成形、烧结制成的,其密度高达 19.3 g/cm^3 ,具有高动能穿甲特性,而钨粉末的原始松装密度只有 $1\sim 3 \text{ g/cm}^3$ 。

粉体成形技术研究的内容主要是将各种粉体通过各种成形方法制成具有一定形状、尺寸和密度(强度)的毛坯。

由于粉体的物理化学特性、粒度、粒度组成、颗粒形状等不同,采用的成形方法也往往不同。另外要满足毛坯的形状、尺寸、密度或其中一项要求,往往要采用不同的成形方法或几种成形方法,甚至最后还要配合毛坯机械加工才能达到毛坯的全部要求。例如,当生产细长的($\phi(8\sim 40)\text{mm} \times (200\sim 500)\text{mm}$)硬质合金高强度棒材时,用钢模成形方法或挤压、冷等静压方法均难以达到要求,这主要是钢模压制成形的毛坯高径比受限制,密度不够均匀;挤压

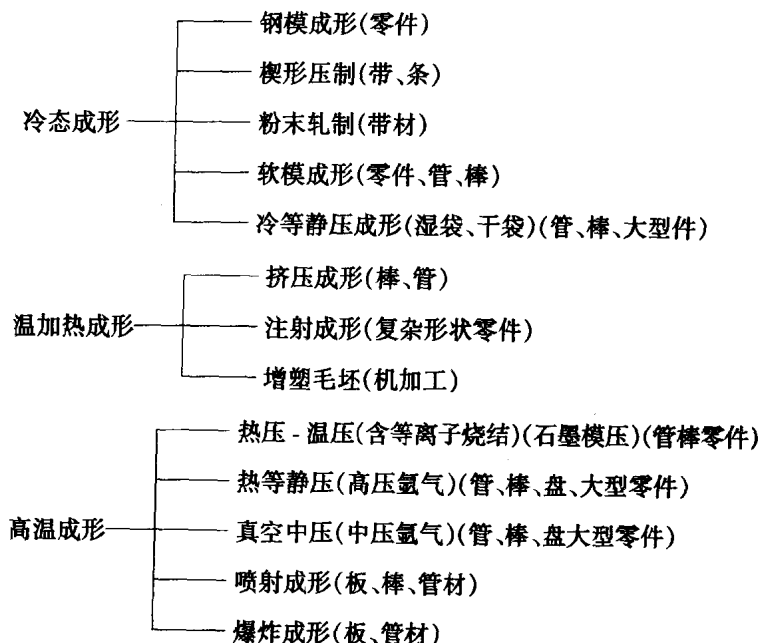
成形由于采用大量的增塑剂,且大截面棒材挤压时物料运动不均匀,产品开裂会影响合金棒材性能;冷等静压虽密度均匀,但尺寸精度不能保证,必须辅助机械加工(车削、研磨)。综上所述,由于产品的形状、尺寸、密度要求是多种多样的,因此可以说没有一种万能的成形方法可以解决所有产品的成形问题。粉末成形工作者必须要研究和了解各种成形方法的优缺点,更重要的是要研究这些成形方法的基本理论。

二、粉体成形技术分类

粉体成形技术可以分为压力成形和无压成形两大类。

(一)压力成形

压力成形就是粉末体在外力作用下在模具内被压缩成形。压力成形按粉末在成形时的加热状态又可分为冷态成形、温加热成形、高温成形几种。



(二)无压成形

无压成形包括泥浆浇注(陶瓷、金属,管、棒、零件);离心浇注(陶瓷、金属,管、棒、零件);塑坯成形(陶瓷、金属,管、棒、零件);泥浆喷射沉积(陶瓷金属、复合材料,管、棒、零件)和电铸成形。

在金属零件或结构件生产中,由于零件较小、尺寸精度、强度及表面粗糙度等要求高、产量大,故多采用钢模成形法。

对形状复杂、批量较大、尺寸精度要求较高的零件,近年来开始采用注射成形方法。但是大型零件,如高压硬质合金柱塞、轧辊、模具、辊环、大型钨管、棒材等大部分均采用冷等静压或冷-热等静压(HIP)组合技术。

第一章 压制压力与压坯密度的关系

压制压力与压坯密度的关系,是压制理论的核心问题。总结几十年来的研究工作,无非是从两方面来研究这一理论问题。

一是通过实验来测定密度与压力的关系曲线,二是从理论上进行数理方程的推导。下面先介绍实验法。

第一节 压制曲线的测定方法

目前对于压制曲线的测定方法并没有统一的规定。一般模具均采用模具钢制造,圆柱形模腔的表面粗糙度在 $\frac{3}{2} \sim \frac{1}{6}$ 以上。表面硬度为 58~62 HRC 或更高。模具在最高实验压力下的径向弹性形变($\epsilon=0$)。压坯的高度与直径的比 $\frac{H}{D}=0.5 \sim 1$ 。粉末原料分为加润滑剂和不加润滑剂两类。一般加润滑剂的较多,但需注明润滑剂成分和含量及混合工艺。压制时采用双向压制。

测量工作一般是在小吨位的材料力学试验机上进行。压力由压力计直接读出;密度可用模内法和模外法相结合测定。模内法,即利用材料力学试验机上的绘制应力应变变曲线的装置,压坯密度按下式计算

$$d = \frac{W}{(H - 2h_k)S} = \frac{W}{\Delta h_n S} \quad (1-1)$$

式中 d ——所测压坯密度, g/cm^3 ;

Δh_n ——在 p_n 压应力下压坯在模内的高度, cm ;

S ——模具内截面积, cm^2 ;

$2h_k$ ——上、下冲头高度之和, cm ;

H ——压应力为 p_n 时冲头和压坯的总高度, cm ;

W ——粉末质量, g 。

欲从曲线上(见图 1-1)求某点 p_n 时的密度,只需从 p_n 点向上作垂线,分别交曲线 H_1 和 H_2 于 a 、 b 点,则将 $ab = \Delta h_n$,代入式(1-1)即可。

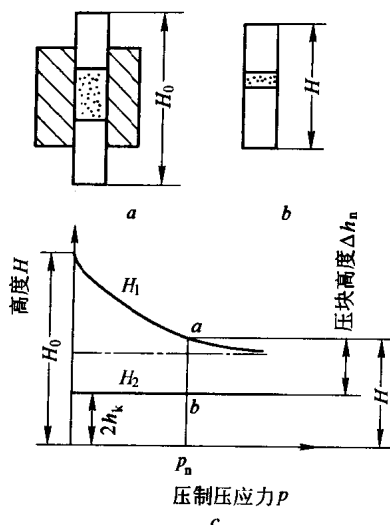


图 1-1 压制压应力-密度曲线

H_0 —松装粉末高度与上、下冲头高度之和;

H —压力为 p_n 时,压坯高度与上、下冲头高度之和

此法在低密度时较为方便,可避免压坯密度过低出模时发生碎裂或缺损现象。而且在压坯密度过低时也不易采用排水法进行测量。

模外法即压坯在脱模后进行测量,一般采用水中失重法(排水法)。但压坯表面必须涂凡士林或黄油,防止水进入压坯。此法在压坯密度较高时适用。

第二节 压制曲线的特征

对于一般金属粉末来说,压坯的密度与压力的关系如图 1-2 所示,此曲线一般称为压制曲线,也称为压制平衡图,其纵坐标也可用相

对密度 = $\frac{\text{压坯密度}}{\text{致密状态密度}} \times 100\%$ 来表示。一定成分和性能的粉末只有一条压制曲线。就每一条曲线来说,可分为 3 个区域(见图 1-3)。

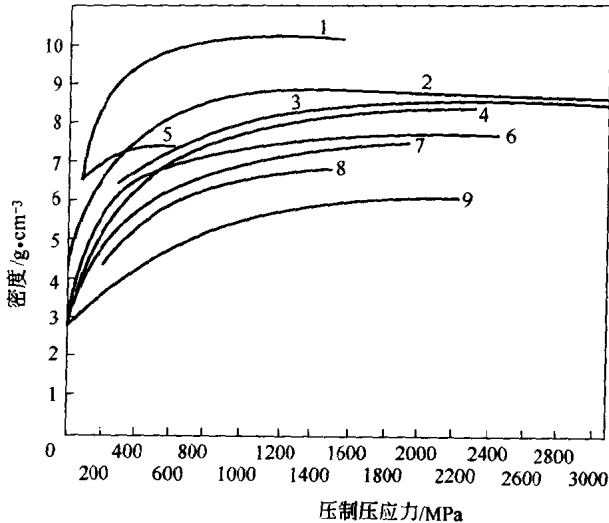


图 1-2 各种粉末压制平衡图

- 1—银粉(小于 0.147 mm(-100 目)); 2—电解铜粉(小于 0.147 mm(-100 目));
 3, 4—电解细铜粉; 5—喷雾锡粉(小于 0.043 mm(-325 目)); 6—电解铁粉;
 7—氢还原铁粉; 8—纯铁粉; 9—退火钢粉(小于 0.147 mm(-100 目))

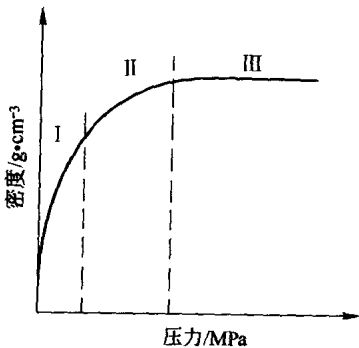


图 1-3 粉末压缩的三个区域

在第 I 区域中,密度随压力的增加而急速增加。这是由于在这一区域内粉末的致密化主要是以充填方式为主。粉末颗粒在外力的作用下很容易充填到原始粉末的孔隙中去,这一阶段称为粉末的充填阶段。充填时所需的外力很小。这是由于原始粉末中存在有 50%~90% 的孔隙。例如,钨粉的松