

粉末金属成形过程

计算机仿真与缺陷预测

董林峰 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

主要内容

粉末金属成形过程 计算机仿真与缺陷预测

董林峰 著

北 京

冶金工业出版社

2011

内 容 提 要

本书系统地诠释了粉末金属成形过程计算机仿真和成形过程中缺陷预测原理,详细介绍了粉末金属成形过程模型建模方法与途径,推导了粉末金属成形过程计算机仿真模型和成形过程中缺陷预测模型,并对它们进行了验证。全书共分7章,主要包括:粉末金属成形数值模拟关键技术、粉末金属成形过程模型建模途径、粉末金属成形过程密度分布不均匀引起的缺陷预测模型、粉末金属成形过程的损伤与裂纹预测模型、粉末金属成形过程的计算机仿真与缺陷分析等。

本书可供从事粉末冶金专业粉末金属成形工艺与模具设计方向的高等学校教师、研究生和大学生以及现场的工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉末金属成形过程计算机仿真与缺陷预测/董林峰著.
—北京:冶金工业出版社,2011.2
ISBN 978-7-5024-5475-3

I. ①粉… II. ①董… III. ①计算机仿真—应用—
粉末成型 IV. ①TF124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 006200 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 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 李 新 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5475-3

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011 年 2 月第 1 版, 2011 年 2 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 5.5 印张; 146 千字; 165 页

20.00 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

压制成形是粉末冶金生产工艺的一个重要环节,它是将粉末体加工成具有一定尺寸、形状以及一定密度和强度的零件或待烧结的坯件。成形制品(待烧结压坯)的质量严重影响粉末冶金最终产品的质量。传统的压制成形工艺设计依赖设计人员和操作人员的工作经验及反复试模,即经验性的试错法。这种方法有设计周期长、成本高等缺点。为了缩短设计周期、降低产品成本、提高粉末冶金制品的质量以及优化模具和工艺参数,将计算机仿真技术引入粉末冶金模具和工艺设计并对粉末金属成形过程中缺陷进行预测是必然的趋势。

粉末金属成形过程计算机仿真和成形过程中缺陷预测是塑性加工、粉末冶金、计算力学、损伤力学、CAD技术、材料科学等多个学科相互交叉渗透的研究方向,涉及到材料非线性、几何非线性、边界条件非线性三种非线性问题。特别是粉末成形过程中压坯致密化和损伤的机理非常复杂,用确定的数学模型描述压坯致密化和损伤行为难度非常大,虽然很多专家在该方向进行了大量研究,但在实际应用中都还不够成熟,有待进一步发展与完善。本书是在前人研究的基础上,系统阐述粉末金属成形过程的建模方法,建立计算机仿真模型,实现粉末金属成形过程的计算机仿真和成形过程中的缺陷预测,以期对该领域的发展有所裨益。

本书共分7章。第1章介绍本书涉及的有关概念,国内外研究状况。第2章主要介绍粉末金属成形数值模拟关键技术,分析粉末成形过程的材料非线性、几何非线性以及边界条件非线性特性,在有限变形理论的基础上,建立描述粉末

体屈服的理论框架；分析大变形弹塑性有限元方程的列式和求解特点，建立用于粉末成形数值模拟的大变形 U.L 法的有限元列式；分析研究有限元离散误差评估、自适应网格划分技术及接触和摩擦问题。第 3 章介绍粉末金属成形过程中缺陷预测模型建模途径，分析粉末压坯内部密度分布不均匀和产生裂纹的原因，研究目前描述粉末成形的两种主要途径（及三种方法）和描述损伤状况的两种途径，确定基于烧结多孔材料塑性力学建立的粉末金属压制模型，基于细观损伤力学建立压坯的损伤模型。第 4 章介绍粉末金属成形过程密度分布不均匀引起的缺陷预测模型建立与验证，研究粉末烧结多孔材料的成形与粉末金属成形之间的差别和粉末金属成形过程中的几何硬化和应变硬化行为及其影响因素，基于粉末金属单向压制实验数据，建立适于粉末金属成形从低密度到高密度全区域、并考虑粉末颗粒度和制粉方式影响的粉末金属成形过程中密度分布不均匀引起缺陷的预测模型，最后对密度分布不均匀引起缺陷预测模型进行实验验证和评价。第 5 章介绍粉末金属成形过程的损伤与裂纹预测模型建立及验证，分析金属粉末成形的损伤现象，根据粉末金属的成形和裂纹形成特点，提出粉末金属成形裂纹形成的能量条件。根据本书提出的金属粉末压制模型，推导出新的韧性损伤准则。使用圆柱形压坯镦粗压制实验，对新准则进行了实验验证。第 6 章，基于本书提出的新损伤准则，对圆柱形压坯成形过程压坯内的损伤进行数值仿真分析，比较不同摩擦条件、高径比条件下压坯的损伤状况，分析生坯脱模时阴模倒角对形成裂纹的影响。第 7 章，对全书进行总结并对粉末金属成形过程的计算机仿真与成形中的缺陷预测今后发展进行展望。

本书是作者多年来在该领域研究和实践的积累，比较同行的研究成果，本书在建立新的描述粉末成形的数学模型和压坯损伤模型方面有所突破。书中参考了大量国内外同行的

研究成果,这里对他们表示感谢。在此还要特别感谢上海交通大学阮雪榆院士、李从心教授、邢渊教授和汪俊博士在作者研究期间的无私帮助。最后感谢海南大学 2009 年科研项目对本书出版的资助(项目编号:hd09xm44)。

本书作者在书中尽可能全面阐述粉末金属成形过程计算机仿真和成形过程中缺陷预测最新成果,并力求创新。但由于计算机仿真技术发展迅速,加之作者水平所限,时间较紧,书中如有不足之处,敬请广大专家和读者批评指正。

作 者

2010 年 10 月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 粉末金属成形中的缺陷	2
1.3 粉末金属成形过程的计算机仿真	3
1.4 国内外研究现状	4
1.4.1 粉末金属成形仿真建模	4
1.4.2 金属粉末成形过程中裂纹预测	8
1.4.3 粉末成形过程仿真的数值计算方法	13
1.5 目前计算机仿真与缺陷预测应用	14
2 粉末金属成形数值模拟关键技术	15
2.1 基于有限变形理论的粉末体成形屈服理论	15
2.1.1 粉末颗粒的本构方程	16
2.1.2 粉末团聚体的本构方程	17
2.1.3 宏观量与颗粒量的联系	19
2.1.4 关联或非关联本构关系	20
2.2 粉末成形的有限元计算方法	22
2.2.1 弹塑性有限元方程的建立	22
2.2.2 几何非线性有限元方程的建立	30
2.3 误差评估与网格重新划分	34
2.3.1 自适应有限元网格重划分	34
2.3.2 离散误差评估	35
2.3.3 自适应网格改进方法	35
2.4 接触与摩擦处理	36
2.4.1 模具系统表面的描述几何与接触搜索	36

2.4.2	接触力计算	40
2.4.3	摩擦与摩擦单元处理	42
3	粉末金属成形过程中缺陷预测模型建模途径	46
3.1	粉末金属体变形特征与粉末金属成形过程中 形成缺陷的分类	46
3.1.1	粉末金属体变形特征	46
3.1.2	压坯密度分布不均匀及影响因素	49
3.1.3	压坯强度与损伤现象	50
3.1.4	粉末金属成形过程中形成缺陷的分类	51
3.2	密度不均匀所造成缺陷预测模型及建模途径	51
3.2.1	基于连续介质力学途径	52
3.2.2	基于非连续介质力学的途径	69
3.2.3	建模途径的评价与本书建模途径	73
3.3	粉末金属成形过程中裂纹预测模型及建模途径	74
3.3.1	粉末金属成形过程的细观损伤现象	75
3.3.2	韧性损伤准则	76
3.3.3	方法评价	80
4	粉末金属成形过程密度分布不均匀引起缺陷的 预测模型	81
4.1	引言	81
4.2	粉末金属成形过程中密度分布不均匀引起的 缺陷预测模型	81
4.2.1	现有主要模型	81
4.2.2	现有主要模型精度不够的解决方法	83
4.2.3	粉末金属成形过程中密度分布不均匀引起的 缺陷预测模型	86
4.3	粉末金属成形过程中密度分布不均匀引起的缺陷 预测模型的验证和评价	96

4.3.1 使用新模型和其他模型的计算结果及与 实验结果的比较	96
4.3.2 密度分布实验	99
4.3.3 简单形状压坯模拟及与实验比较	105
4.3.4 复杂形状压坯成形数值模拟及与实验 结果比较	111
5 粉末金属成形过程的损伤与裂纹预测模型	119
5.1 金属粉末成形的损伤现象	119
5.2 基于细观处理的韧性损伤准则	120
5.3 基于金属粉末成形数学模型的韧性损伤准则建立	123
5.3.1 韧性损伤准则建立的难点	123
5.3.2 金属粉末成形裂纹形成能量阈值	123
5.3.3 基于金属粉末成形数学模型的韧性损伤准则	124
5.4 损伤准则的实验验证	127
6 粉末金属成形过程的计算机仿真与成形中的缺陷分析	135
6.1 圆柱压坯成形数值模拟与结果分析	135
6.1.1 数值模拟计算条件	136
6.1.2 压坯成形数值模拟与损伤状况分析	136
6.2 二台阶压坯成形数值模拟与结果分析	140
6.2.1 二台阶压坯闭模压制数值模拟与压坯韧性 损伤发展分析	141
6.2.2 二台阶生坯脱模时损伤状况和结果分析	147
6.3 多台阶复杂形状压坯成形数值模拟与结果分析	149
6.3.1 三台阶压坯	149
6.3.2 皮带轮类零件	153
7 结论与展望	159
参考文献	161

1 绪 论

1.1 引言

粉末冶金是现代机械零件先进制造技术，是用金属粉末（或金属粉末与非金属粉末的混合物）作为原料，经过成形和烧结制造金属材料、复合材料以及各种类型制品的工艺过程。它能生产出用普通熔炼法无法生产的、具有特殊性能的材料，能比普通熔炼法生产出材料性能更加优越的材料。同时，它还具有材料利用率高，劳动生产率高，生产成本低，工艺线路简单，少切削或无切削加工，适于大批量生产等一系列的特点。所以，粉末冶金呈现加速发展的势态，并已经成为制取各种高性能结构材料、特种功能材料和极限条件下工作材料的有效途径。

压制成形是粉末冶金生产的一个重要环节，它是将粉末压制成为具有一定尺寸、形状、密度和强度的待烧结坯体或零件。成形一般分为普通模压法和特殊成形方法。前者是将粉末或混合粉末装在压模内，用压机将金属粉末或混合料在模具内压制成形。特殊成形方法是指各种非模压成形，如：等静压成形、连续成形、无压成形、注射成形、高能成形等。粉末成形制品（待烧结压坯）的微观结构和质量对金属（或陶瓷）材料烧结动力学有严重影响，因此也就严重影响粉末冶金最终产品的质量。

对成形制品质量影响最大的是工艺和模具设计，目前产品工艺和模具设计一般仍以图表、资料、近似公式和设计人员的经验为依据，即“经验设计”（Empirical Design）。这种设计方法往往依据大量的经验，进行设计，经过费时、费力、费财试制，再设计等过程，才能最终达到目的。在实际开发新零件和产品时，往往不得不以多种工艺方案进行多次试制，不断总结经验，改进

设计,这无疑造成了很大浪费,延长了产品设计和生产周期。

随着世界范围内粉末制品行业竞争加剧,各国都在积极采用更为有效的方法,降低产品成本,提高产品质量,缩短产品开发周期。目前,国外粉末冶金行业已经将计算机仿真技术运用于金属粉末烧结体成形和粉末等静压成形。对粉末压制成形过程的数值模拟也在积极研究,但尚未得到有效应用。主要是因为粉末金属压制过程中的零件实际形状复杂多变,加载条件多样,同时粉末压制成形机理没有定论,现有的数学模型还不可能完全正确地描述真实的粉末成形过程,预测缺陷出现。因此,很有必要对金属粉末成形理论进行深入研究,以得到更加精确描述粉末金属成形过程的数学模型,对粉末金属压制过程进行计算机仿真,预测由密度不均匀分布所造成的缺陷,并在此基础上建立粉末金属成形过程中裂纹预测模型,对粉末金属成形过程中形成的缺陷进行预测。

1.2 粉末金属成形中的缺陷

在粉末金属成形过程中,粉末受到压力的作用,颗粒发生变形、颗粒间发生相对移动,粉末体的密度逐渐增大,体积逐渐减小,最终形成具有一定尺寸、形状和强度的压坯。在此过程中,施加于粉末体上的力主要为消耗于使粉末体变形与致密的净压力,和用于克服粉末与模壁之间摩擦的外摩擦力。粉末体在压制压力的作用下,同时产生侧压力和约束反力,使粉末体在模具中呈三向压应力状态。但由于压制压力大于侧压力和反向模冲的约束反力,所以粉末颗粒一般在受载模冲的推动下沿模冲移动方向产生柱式流动,使粉末体在压制方向上大量压缩,而横向运动很小。由于粉末体在压制过程中遵循质量不变条件,同时产生致密和变形,并且具有弹塑性变形和粉末介质的非连续性特点,以及粉末性能悬殊和加载类型的多样化,故使粉末压制中粉末的致密化行为十分复杂,并很容易使压坯密度分布不均匀且使粉末制品不符合设计要求,形成由密度分布不均匀造成的缺陷。这种由密



度不均匀分布造成的缺陷不仅给后续烧结工艺带来潜在的危害,在成形过程的不均匀密度分布还可能造成压制和脱模工序形成裂纹。

裂纹可以出现在粉末成形过程的任何一个阶段,压制初期,粉末为分散的颗粒,随着压制的进行,坯体密度逐渐增加,形成具有一定形状和强度的坯体,但在载荷和其他外界因素,及材料中所含杂质、润滑剂、颗粒间空气、发生化学变化的颗粒(如表面氧化颗粒)以及粉末晶体位错等内部因素作用下,坯体局部可能不黏合,同时黏合的坯体中会产生许多微空洞、微裂纹以及其他形式的微缺陷,随着载荷和变形程度的增加,如果不黏合部位仍不黏合或微空洞、微裂纹以及其他形式的微缺陷逐渐积累,最终导致成形制品产生宏观裂纹。在坯体脱模阶段,由于约束解除过程中各部分膨胀不同,造成局部应力集中,形成剪切断裂裂纹(微孔聚集型或纯剪切断裂裂纹),甚至穿晶或沿晶断裂裂纹。尤其是多台阶零件,通常使用浮动模双向压机,这种多动压制系统针对不同台阶使用相对多个独立的冲头,虽然这些冲头及芯棒可有效控制零件的密度和材料流动。但冲头的不同运动组合对整个压坯密度分布和裂纹出现影响很大。

1.3 粉末金属成形过程的计算机仿真

粉末金属成形过程的计算机仿真是基于有限元方法、计算机图形学和塑性力学等技术,对粉末金属材料成形过程进行模拟。通过计算机模拟,得到粉末金属成形过程中的所有宏观力学参数、变形参数以及工件中的应力应变分布、密度分布、温度场、速度场、粉末颗粒流动规律等,将整个实际生产过程都模拟出来。通过有限元数值模拟可以观察到在成形过程中会有哪些问题出现,哪些部位需要重点观察,并提出改进措施,从而做到了早期评价,可及时改进加工过程,优化工艺参数。图 1-1 所示为一个典型的粉末金属成形计算机仿真系统。

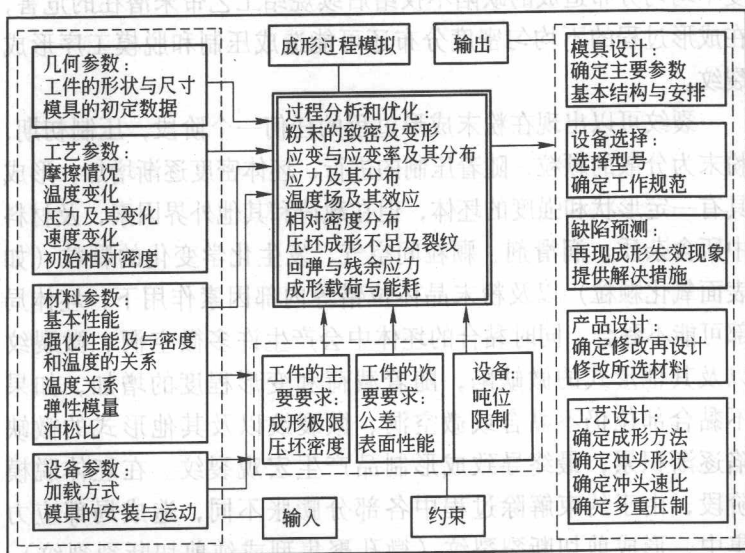


图 1-1 粉末金属成形计算机仿真系统

1.4 国内外研究现状

1.4.1 粉末金属成形仿真建模

粉末金属成形过程的计算机仿真成功的关键，主要在于描述材料流动的模型的准确性。粉末金属是由大量颗粒材料组成的，每个颗粒均可视为完全致密体，而这些颗粒组成的粉末体，其中含有一定的空隙，是非连续体。这种非连续体的变形需要从各个颗粒的变形以及各个颗粒之间的协调关系，研究其整体变形。在建模时不仅要考虑粉末成形的特性，即：（1）粉末体变形时体积变化；（2）粉末体流动应力随着粉末体相对密度变化而变化；（3）静水应力粉末体屈服的影响。同时，由于压制工艺、条件及粉体颗粒参数不同，也影响模型的建立，要找到一个十分精确、严格的数学模型来描述它是非常困难的。学术界对粉末压制



成形机理也还没有定论。目前,粉末金属成形过程建模基本上沿两个途径进行,即:基于连续介质力学途径和非连续介质建模。从各模型所基于的理论基础上看,又可划分为几类:(1)基于粉末烧结体塑性力学方法。(2)基于广义塑性力学(土塑性力学)方法。(3)基于密集堆积球形颗粒的微观力学方法。

1.4.1.1 基于连续介质力学的研究

从本质上看,粉末体在压制初期是非连续体,但由于非连续介质力学的基本理论还不完善,若将粉末体视为非连续体来研究其变形,将会给问题带来很大不便。基于连续介质力学对粉末成形研究是将粉末体作为连续体,即将粉末体视为“可压缩的连续体”。这样就可应用连续体塑性力学的知识来处理粉末体的变形行为。基于连续介质力学方法主要有基于粉末烧结体塑性力学方法和基于广义塑性力学(土塑性力学)方法。

基于粉末烧结体塑性力学方法基本上都是在完全致密体求解的基础上进行假设,然后通过实验进行修正。Kuhn 和 Downey 最早由烧结铁粉(MH-100)实验得出基于金属塑性力学的模型,即:金属粉末压制的屈服面为一椭球面,塑性泊松比是相对密度的函数,而屈服准则中的参数为泊松比的函数,虽然该模型为半定量模型,但它对随后的研究产生了重大影响。Green 假设一个刚塑性材料的厚壁球壳模型,在纯剪切及纯等静压条件下推出屈服准则。Oyane 是根据立方体单元胞模型推导出屈服准则。Gurson 假设多孔体材料为含孔的刚塑性单元胞,使用上限逼近方法获得一种屈服准则。Doraivelu 等基于材料屈服过程中能量守恒原理,通过一系列不同初始相对密度材料的压制实验,经验地建立了多孔材料屈服应力与其基体材料屈服应力的关系,并结合塑性泊松比与相对密度的显示关系建立了多孔材料屈服准则。Spitsig 通过修改 Gurson 模型,建立了自己的模型。Kim 通过实验,补充了两个实验参数,对 Shima-Oyane 准则进行了修改。Lee 通过修改 Doraivelu 模型中粉末体流动应力与基体材料流动应



力关系,建立了新的模型。汪俊针对用基于粉末烧结多孔材料模型描述粉末金属成形在低密度区域不准确,根据闭模压制实验数据对粉末压制密度变化全区域进行了拟合,并据此建立了自己的模型。S. J. Park 和 C. H. Park 则在 Lee 模型基础上通过修改材料几何硬化参数,建立了自己的模型。另外还有一些屈服准则,由于理论上的缺陷或者是公式形式过于复杂,实际运用较少,如: Roman 屈服准则、Tabata 屈服准则、Duszczyk 屈服准则、Hwang 屈服准则等。目前看来,基于粉末烧结体塑性力学方法对粉末多孔体材料成形进行研究的解析算法还不成熟,主要因为:其一,可压缩连续体假设与实际情况有差别;其二,基于实验的半经验数学模型只实用于特定材料的特定压制情况,不普遍适用;其三,粉末烧结多孔材料成形与粉末金属成形有一定的区别,影响了模型计算精度,如粉末烧结多孔材料的成形过程中材料硬化没有考虑粉末颗粒度和颗粒制取方法影响,而粉末金属成形过程中材料硬化不考虑粉末颗粒度和颗粒制取方法影响,就会造成一定误差;其四,世界上众多学者沿不同途径对粉末金属成形理论进行研究,粉末体的屈服准则还没有形成一个统一的意见。

粉末体与土体有极其相似的性质,即:它们都含有孔隙并且屈服过程中体积可变。因而,一些学者试图从土塑性力学理论出发,寻找建立金属粉末压制成形模型的方法。Mohr-Coulomb 最早提出了土体屈服准则,近来也被用来描述金属粉末压制过程。该准则在主应力空间的屈服表面为一棱锥面,其中心轴线与等倾线重合。Drucker 和 Prager 提出主应力空间屈服表面为一圆锥面, π 平面内,其屈服线为 Mohr-Coulomb 屈服线的内切圆。因为金属粉末压制过程的压力远大于土塑性力学中的压力,所以 Drucke 等在锥形屈服面加上一簇强化帽型屈服面。而 Jenike 和 Shield 则用平底来封闭 Mohr-Coulomb 屈服锥面。Suh 在研究塑性、摩擦和加工硬化材料时,提出一个屈服表面为旋转双曲线的屈服准则,由于该准则中未包含相对密度影响,并且公式形式过于复杂,因而在粉末金属成形过程分析中运用较少。Roscoe 和



Sandler 在假设土体是加工硬化材料时, 根据能量方程, 提出剑桥模型 (Cam-Clay 模型)。后来又提出修正的剑桥模型, 该模型在主应力空间的屈服表面为一锥面加上一椭球面帽子, 椭球面帽子屈服表面随着加工硬化不断向外扩大。Burland 认为屈服表面中的帽子应由球面代替。DiMaggio 和 Sandler 提出 DiM. -S. 帽子模型, 一般认为 D-P 屈服准则是 DiM. -S. 模型的精简。此外 Wilde、Nemet-Nasser 和 Shokooh 提出了各自的模型。Vermeer 针对砂子提出了双硬度模型, Broese van Groenou 曾将其运用于粉末材料。Brekelman 研究了两种 D-P 模型, 即: 屈服表面为圆锥加平底模型和椭圆形屈服表面模型, 借助试验, 认为模型中应含有足够多的调整参数, 以便可通过实验来修正模型。土塑性力学仍在发展中, 运用土塑性力学理论来描述金属粉末成形过程是很有前途的方向, 但是土塑性力学模型包含有很多试验参数, 对于粉末金属而言, 这些参数需要经过大量深入的试验获得。

1.4.1.2 基于非连续介质力学的研究

虽然用连续体理论分析金属粉末压制过程已进行了很久, 在描述粉末体成形宏观行为方面取得了一定的效果, 但是为了研究粉末的微观特性对成形性能的影响, 就要运用非连续介质方法, 这种方法是将粉末体视为颗粒的集合体, 并建立单个颗粒行为与粉末集合体宏观行为的联系。采用这种途径的方法主要是基于密集堆积球形颗粒的微观力学方法。

基于密集堆积球形颗粒的微观力学方法是将粉末体视为颗粒的集合体, 粉末颗粒被近似视为弹性形 (2D) 或球形 (3D), 并建立单个颗粒行为与粉末集合体宏观行为的联系。Bathurst 假定颗粒间满足线性接触规律 (Hooke 定律), 颗粒为各向同性, 用二维圆盘来表示单元, 研究了粉末堆积行为。Kotera 考虑了压制时颗粒形状变化, 利用三维颗粒模型描述了粉末压制过程。O'Donnel 研究压制时孔隙的形状对粉末孔隙度-压力关系的影响, 研究在二维平面上进行, 并考虑了颗粒的塑性变形。另外,



Chang 等对颗粒的各向异性进行了研究。

1.4.2 金属粉末成形过程中裂纹预测

1.4.2.1 金属粉末成形过程中产生的裂纹

在粉末成形过程中,影响裂纹产生的因素很多,粉末材料组成和制粉工艺、压制工艺、模具结构、脱模工艺不适当都可能引起裂纹产生。对粉末体压制过程中产生裂纹的主要原因,目前说法不一。Kabayashi 认为,粉体材料在压制过程中有一个相对密度的极限,在这个极限之下,材料承受拉应力的能力为零,如果某个点相对密度接近该极限,并具有进一步下降的趋势,就会产生裂纹。而 Lewis 则认为应力集中、应变集中而引起体积应变为正是产生裂纹的主要原因。Okimoto 则认为横截面变化分界处介质之间相对滑动(尤其是成形最后瞬间)是产生裂纹的主要原因。David 认为粉末成形裂纹应分为压制时粉末颗粒未黏合和颗粒之间黏合后又开裂两大类,他按照裂纹形成的原因对金属粉末成形过程中产生的裂纹进行如图 1-2 所示分类。

1.4.2.2 裂纹预测研究现状

目前,粉末成形过程中产生的裂纹主要基于损伤力学方法进行研究。损伤力学主要研究材料内部微缺陷的产生和发展引起的宏观力学效应及最终导致材料破坏的过程和规律,它采用金属物理学、材料力学、连续介质力学等统一起来的观点进行研究,不仅描述了含有大量细微空隙材料即损伤材料的性质,而且研究直到宏观裂纹出现的整个过程,并在此基础上把材料的损伤破坏和裂纹扩展统一了起来。从研究方法上,损伤力学研究学派可分为两大类:宏观方法和细观方法。

唯象的宏观方法是一种典型的场论方法,它的理论基础是宏观的连续介质力学和连续介质热力学,因此又称为连续介质损伤力学。它通过引进表征材料内部各类微缺陷的损伤内变量,建