

国家杰出青年科学基金项目
国家自然科学基金重点项目
国家“863”高技术计划项目
广东省自然科学基金团队项目

金属粉末成形 力学建模 与计算机模拟

Mechanical Modeling and Numerical Simulation
of Metal Powder Forming Processes

周照耀 李元元 著

华南理工大学出版社

金属粉末成形力学建模 与计算机模拟

**Mechanical Modeling and Numerical Simulation of
Metal Powder Forming Processes**

周照耀 李元元 著

华南理工大学出版社

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

金属粉末成形力学建模与计算机模拟 / 周照耀, 李元元著. —
广州: 华南理工大学出版社, 2011. 2
ISBN 978-7-5623-3412-5

I. ①金… II. ①周… ②李… III. ①粉末成形-力学-系统建模-研究 ②粉末成形-力学-计算机模拟-研究 IV. TF124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 025811 号

总发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail: scutcl3@scut.edu.cn <http://www.scutpress.com.cn>

责任编辑: 詹志青 王建洲

印刷者: 广东省农垦总局印刷厂

开本: 889mm × 1194mm 1/32 印张: 9.5 字数: 221 千

版次: 2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

定价: 33.00 元

版权所有 盗版必究

前 言

基于资源节约和环境友好的粉末冶金技术顺应了全球制造业的发展趋势，不仅能生产具有特殊性能的结构材料、功能材料和复合材料，更能近净成形廉价优质的机械零件，在机械制造、汽车、航天航空和国防等工业领域得到了广泛应用和飞速发展。

成形高密度、分布均匀且高精度的生坯是生产高质量粉末冶金零件的关键所在，如果生坯密度不高，所制成的粉末冶金零件强度就不高，其中密度较低的区域，更会在烧结后成为零件强度的薄弱环节；如果生坯密度分布不均匀，会导致后续烧结工艺中不同区域有不同的收缩率，从而影响零件的尺寸精度和质量。

在金属粉末成形领域，长期以来人们主要采用基于经验的试错法进行工艺及模具设计，这导致新产品和新工艺开发周期长、材料消耗大、费用高，并且也不能完全保证零件的质量。近年来，随着粉末冶金零件向着复杂形状、高性能和高精度方向发展，对其内在质量和尺寸精度的要求越来越高，因此传统的方法已不能满足需要。

随着计算机技术和科学计算技术的飞速发展, 计算机模拟技术在金属粉末成形的理论研究和实际生产中得到了一定的应用。它为研究粉末成形提供了灵活高效的途径, 可以根据需要引入不同的工艺条件、力学模型、材料本构模型、摩擦模型以及边界条件等, 不仅能实时描述粉末成形过程中粉末的变形和流动状态, 还能得出各种物理量, 特别是密度的分布规律和详尽的力学参数, 这些都是通过实验方法难以得到的。因此, 计算机模拟技术成为对粉末成形工艺进行预测、优化和控制的有效方法, 逐渐成为科研人员和工程技术人员从事研究和设计工作的必要手段。

不同于致密金属的成形过程, 粉末成形是一个非常复杂的非连续非线性力学过程, 在模具压制力的作用下粉末颗粒相互接触、摩擦和挤压, 发生重排和塑性变形, 从而使生坯的孔隙率越来越小, 最后接近致密。实际上, 由于粉末成形的复杂性, 其致密机理尚无定论, 因此针对粉末成形过程的力学建模方法也多种多样, 既有基于粉末烧结体塑性力学方法 (金属塑性力学方法) 和广义塑性力学方法 (岩土力学方法) 等连续体力学方法, 也有离散单元法等非连续介质方法, 还有孔洞模型法和无网格法等非常规方法。

全书共分六章。第一章首先对计算机模拟技术在粉末冶金中的作用进行了分析, 然后对粉末成形过程力学建模和计算机模拟, 包括压制曲线方法、连续体力学方法和非连续介质方法三类方法进行了归纳和介绍, 最后

对未来的发展进行了展望；第二章详细推导金属粉末模压成形过程中的力学模型及算法，介绍弹塑性力学问题的基本方程、椭球形屈服曲面的弹塑性本构关系的推导过程、本构关系的积分、模型等相关问题与参数以及有限元算法的建立；第三章采用第二章推导得到的力学模型对四种典型粉末成形零件即平衡块、齿轮、同步器轮轂和同步带轮进行计算机模拟；第四章介绍一种金属粉末轧制设备及其测试系统的研制过程，然后对粉末轧制过程进行计算机模拟，最后在该设备上对粉末轧制过程进行实验研究并与数值模拟结果进行对比；第五章采用离散单元法对粉末成形过程的数学建模和算法进行归纳，并对其中的几个关键问题如球形颗粒假设、动态松弛法、接触检测方法以及离散元方法中的参数选择进行探讨，最后对开发的基于离散单元法的 ParticleSim 粉末成形模拟软件系统的前后处理器、求解过程和程序的提交与运行进行介绍；第六章采用离散单元法对不同粒径和不同密度两种典型二元粉末颗粒填充过程进行模拟，对填充过程中的能量转换进行研究。

在本书的资料收集、图文编排过程中，得到了夏伟教授、陈维平教授、邵明教授、倪东惠教授、肖志瑜教授、屈盛官教授、董守斌教授、汤立群教授、刘允中教授、李小强教授、何克晶副教授、龙雁副教授、张大童副教授、张文高工、朱权利高工、温利平高工、王郡文高工、盛佩珍高工、杨超副研究员、吴苑标工程师、潘国如工程师、邱诚工程师、郑振兴博士后、李风雷博士

后、陈普庆博士、赵伟斌博士、黄春曼博士、钟文镇博士、宋毅博士、胡俊文硕士、何晖硕士、王芬硕士、杨建志老师、姜明老师等的大力支持和帮助，在此表示深深的感谢。本书还借鉴或引用了一些前人的研究成果或经验，在此对相关人员也表示由衷的感谢！

由于粉末成形力学建模和计算机模拟涉及相当深度和广度的多个学科领域，更因作者水平所限，书中定会有疏漏和不妥，不尽如人意之处在所难免，敬请读者不吝指正。

作 者

2010 年 12 月

主要符号表

一、单一英文字母符号

符号	名称或表达意义	单 位
A	(参考文献) 椭球形屈服函数的第一参数	
A'	(本书) 椭球形屈服函数的第一参数	$1/(\text{Pa})^2$
B	(参考文献) 椭球形屈服函数的第二参数	
B'	(本书) 椭球形屈服函数的第二参数	$1/(\text{Pa})^2$
c	阻尼系数	kg/s
D	轧辊直径	m
D_{ijkl}	弹性刚度张量	Pa
D_{ijk}^e	粉末材料弹性刚度张量	Pa
D_{ijkl}^{ep}	弹塑性切线刚度张量	Pa
D_{ijkl}^{cs}	致密金属的弹性刚度张量	Pa
D_{ijkl}^{p}	塑性刚度张量	Pa
D_{ijkl}^{T}	小变形弹塑性刚度张量	Pa
$\bar{D}_{ijkl}^{\text{ep}}$	有限变形弹塑性刚度张量	Pa
E	粉末弹性模量	Pa
E_s	致密金属弹性模量	Pa
E_{ij}	Green 应变张量	
f	(本书) 屈服函数	
f_i	体分布力	N/m^3
F	(参考文献) 屈服函数	$(\text{Pa})^2$

续表

符号	名称或表达意义	单 位
$F_{cn,ij}$	法线方向上的接触力	N
$F_{dn,ij}$	法线方向上的阻尼力	N
$F_{s,ij}, F_{ct,ij}$	切线方向上的接触力	N
$F_{v,ij}$	范德华力	N
G	致密金属剪切模量	Pa
h	两颗粒表面之间的距离	m
I_i	颗粒 i 的转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J_1	应力张量第一不变量	Pa
J_2'	应力偏张量第二不变量	$(\text{Pa})^2$
k_n	法线方向的刚度系数	Pa
k_s	切线方向的刚度系数	Pa
m	质量	kg
m_i	颗粒 i 的质量	kg
M	$\sqrt{J_2'} - \sigma_m$ 空间上的屈服面斜率	
n	张量坐标维度	
n_j	边界外法线的方向余弦	
$\hat{n}_{ij}$	颗粒 j 的圆心指向颗粒 i 的圆心的单位矢量	
p_y	宏观屈服压力	Pa
q_1, q_2	Gurson 屈服函数的 Tvergaard 调整因素	
R	粉末相对密度	

续表

符号	名称或表达意义	单 位
R_0	粉末初始相对密度	
R_c	屈服应力为零时的临界粉末相对密度	
R_i	从颗粒 i 的中心指向接触点的向量	
R_j	从颗粒 j 的中心指向接触点的向量	
r_i	颗粒 i 的半径	m
r_j	颗粒 j 的半径	m
S_0	内部粘合力	Pa
s_{ij}	偏应力张量	Pa
S_{ij}	Kirchhoff 应力张量	Pa
S_n^k	n 增量步开始时模型参数矩阵	Pa
t	时间	s
u_{ij}, v_{ij}, w_{ij}	位移张量	m
$u_{ij,j}$ $v_{ij,j}$ $w_{ij,j}$	位移张量对第 j 个坐标的导数	
v	轧制速度	m/s
v_i	颗粒 i 的速度	m/s
x_i	颗粒 i 的空间坐标矢量	
x_j	颗粒 j 的空间坐标矢量	
X, Y, Z	物体在 0 时刻的空间位置中的任一质点位置	m
x, y, z	物体在 t 时刻的空间位置中的任一质点位置	m

二、单一希腊字母符号

符号	名称或表达意义	单 位
γ_n	阻尼系数	
δ	(参考文献) 椭球形屈服函数的第三参数	
δ'	(本书) 椭球形屈服函数的第三参数	$1/(\text{Pa})^2$
δ_{ij}	克罗内克符号	
ε_n	法向应变	
ε_{ij}	工程应变张量	
$d\varepsilon_{kl}^e$	弹性应变增量张量	
$d\varepsilon_{kl}^p$	塑性应变增量张量	
$\Delta\varepsilon_n$	应变增量矩阵	
e_{ij}	Almansi 应变张量	
$\dot{e}_{ij}$	Jaumann 应变速率张量	$1/\text{s}$
θ	剪胀角	
λ	致密金属拉梅常数	Pa
$d\lambda$	塑形流动法则中的非负因子	Pa
μ	摩擦因子	
μ^*	材料内摩擦系数	
ν	粉末泊松比	
ν_s	致密金属泊松比	
ξ_n	两个颗粒法线方向的距离	m

续表

符号	名称或表达意义	单 位
ξ_s	从 t_0 时刻开始接触到 t 时刻,切向方向的位移	m
ρ	粉末绝对密度	kg/m^3
ρ_m	致密金属绝对密度	kg/m^3
ρ_0	粉末初始绝对密度	kg/m^3
σ	正应力	Pa
σ_1 σ_2 σ_3	主应力	Pa
σ_c	平均应力轴上的临界应力	Pa
σ_e	宏观等效 von Mises 应力	Pa
σ_m	静水压力	Pa
σ_n	法向应力	Pa
σ_n	n 增量步开始时的应力矩阵	Pa
σ_s	致密金属屈服强度	Pa
σ_{SPowder}	粉末单轴表观屈服应力	Pa
σ_M	粉末材料屈服应力	Pa
σ_k^k	主应力之和	Pa
σ_{ij}	柯西应力张量	Pa
$d\sigma_{ij}$	应力增量张量	Pa

续表

符号	名称或表达意义	单 位
σ'_{ij}	应力偏张量	Pa
$\Delta\sigma'_{ij}$	应力偏张量的增量	Pa
$\Delta\sigma_n$	应力增量矩阵	Pa
τ	剪应力	Pa
$\hat{\tau}_{ij}$	Jaumann 应力速率张量	Pa/s
φ	内摩擦角	
ω_i	颗粒 i 的角速度	1/s
$\dot{\omega}_{ij}$	旋转速率张量	1/s

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 计算机模拟技术在粉末冶金中的作用	(1)
1.2 粉末成形过程力学研究和计算机模拟的发展概况	(6)
1.3 粉末成形过程数值模拟技术发展展望	(27)
1.4 本章小结	(29)
第二章 金属粉末模压成形过程的力学模型及算法	(32)
2.1 概述	(32)
2.2 弹塑性力学问题的基本方程	(34)
2.3 椭球形屈服曲面的弹塑性本构关系的推导	(37)
2.4 本构关系的积分	(40)
2.5 模型相关问题与参数	(42)
2.6 有限元算法的建立	(52)
2.7 有限元分析与实验对比验证	(71)
2.8 本章小结	(94)

第三章 典型零件压制过程的数值模拟	(96)
3.1 概述	(96)
3.2 平衡块	(97)
3.3 齿轮	(110)
3.4 同步器齿毂	(113)
3.5 同步带轮	(119)
3.6 本章小结	(128)
第四章 金属粉末轧制的数值模拟及实验研究	(130)
4.1 引言	(130)
4.2 金属粉末轧制试验装置及测试系统的研制	(131)
4.3 金属粉末轧制的数值模拟	(138)
4.4 金属粉末异步轧制的数值模拟	(162)
4.5 金属烧结带材二次轧制及数值模拟	(166)
4.6 误差分析	(172)
4.7 本章小结	(175)
第五章 基于离散元法的粉末成形过程的数学建模 与算法	(177)
5.1 球形颗粒模型假设的合理性问题	(178)
5.2 离散元法	(181)
5.3 动态松弛法求解过程	(186)
5.4 接触检测方法	(187)
5.5 离散元模拟参数选取	(190)
5.6 ParticleSim 系统	(206)

5.7 本章小结	(217)
第六章 填充过程实验与离散元模拟	(220)
6.1 不同粒径的二元粉末填充过程模拟	(221)
6.2 不同密度的二元粉末填充过程模拟	(250)
6.3 填充过程中的能量转换研究	(265)
6.4 本章小结	(269)
参考文献	(272)

第一章 绪 论

1.1 计算机模拟技术在粉末冶金中的作用

在实际工程技术领域，存在许多场问题，例如固体力学中的应力应变场、传热学中的温度场、电磁学中的电磁场、流体力学中的流场以及涉及多学科的耦合场等。这些问题的解决都可以看做是在一定的边界条件和初始条件下求解其基本微分方程或微分方程组的问题。但由于微分方程的复杂性以及边界条件和初始条件难以确定，我们一般不能得到系统的精确解。对于这类问题，一般需要采用各种数值计算方法获得满足工程需要的近似数值解，即数值模拟技术，由于通常需要借助计算机来进行，也可称为计算机模拟技术。

在粉末冶金中，粉末成形是个复杂的过程，难以用解析方法来描述。计算机技术和数值模拟技术的发展使粉末成形问题的求解成为可能。

目前，国外粉末冶金行业对计算机模拟技术的运用呈加速上升的趋势，但是能达到实用阶段的工作只集中在金属粉末烧结体成形和粉末静压成形等方面。对粉末压制成形过程的计算机模拟几乎都是对简单形状压坯的研究，而对三维复