

高等学校教材

HEP  
mse

# 金属塑性成形 数值模拟

Numerical Simulation  
of Metal Forming

洪慧平 编著

高等教育出版社

# 金属塑性成形 数值模拟

Numerical Simulation  
of Metal Forming

洪慧平 编著

JINSHU SUXING CHENGXING SHUZHIMONI

高等教育出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性成形数值模拟 / 洪慧平编著. -- 北京 :  
高等教育出版社, 2014.12

(材料科学与工程著作系列)

ISBN 978-7-04-041234-5

I. ①金… II. ①洪… III. ①金属压力加工-塑性变  
形-数值模拟-高等学校-教材 IV. ①TG302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 240296 号

策划编辑 刘剑波  
插图绘制 宗小梅

责任编辑 刘剑波  
责任校对 李大鹏

封面设计 姜磊  
责任印制 张泽业

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京天时彩色印刷有限公司  
开 本 787mm × 1092mm 1/16  
印 张 30  
字 数 550 千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landraco.com>  
<http://www.landraco.com.cn>  
版 次 2014 年 12 月第 1 版  
印 次 2014 年 12 月第 1 次印刷  
定 价 69.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 41234-00

# 前 言

计算机数值模拟技术是当今先进制造技术的重要组成部分,给包括材料加工在内的几乎所有制造业带来了巨大变革。应用计算机数值模拟技术能够极大地促进加工制造业的发展。在金属塑性成形领域中应用计算机数值模拟技术,不仅能够超前再现材料塑性成形各阶段的具体实施情况,而且还能获得材料变形过程中应力场、应变场、应变速率场、温度场以及微观组织变化和宏观力学参数等重要目标量的预报性结果,根据模拟结果可对设计方案进行必要修改,优化工艺方案,提高产品质量并且降低生产成本,缩短新产品的研究开发周期。因此,计算机数值模拟技术已成为当今科学研究和技术创新不可缺少的重要研究手段。当代理工科大学学生、研究生以及工程师等科技工作者极有必要掌握先进的计算机数值模拟技术。

由于金属塑性成形问题大多具有复杂的材料非线性、几何非线性和接触非线性并可能涉及三维热力耦合等因素,因此其求解过程通常要借助非线性数值法(例如非线性有限元法)。与早期数值模拟工作者针对特定塑性加工问题各自编写专门求解程序相比,当前数值模拟工作者一般可以借助现有的成熟商业模拟分析软件,以此为支撑平台进行二次开发,从而将创造性的工作更多地集中于问题本身(例如材料模型及参数的合理性、边界条件的正确描述等);另一方面,虽然当今通用商业分析软件大多具有较完善的前后处理器和易操作的人机界面,但研究者仍需对数值模拟的基本原理(包括求解器的控制方程、算法、收敛准则以及边界条件和单元特性等)有一个根本了解,这样才能在建立模型时合理定义各类重要控制参数,为数值模拟的可靠性提供技术基础。

与现有同类教材相比,本书的特色及创新点包括:①在内容组成上,重点介绍金属塑性成形过程总体量、局部量和微观量的分级模拟;②在模拟方法上,系统介绍有限元模拟的主要方法(包括弹塑性有限元模拟、刚塑性有限元模拟、黏塑性有限元模拟),特别针对金属塑性成形过程的特点,介绍材料参数和各类边界条件的确定方法,为合理建模提供技术基础;③在模拟结果可靠性分析上,重点介绍各类误差源以及提高模拟精度的有效方法;④在实际应用上,结合大型模拟软件 Marc 和 LARSTRAN 详细介绍轧制、锻造、冲压、挤压、拉拔等典型塑性加工过程的具体模拟方法,使读者能学以致用。

本书为高等学校理工科专业金属塑性成形数值模拟及相关课程的教材,也

## 前言

可供研究生及工程技术人员使用。

本书的出版得到了教育部本科教学工程—专业综合改革试点项目经费和北京科技大学教材建设基金的资助。本书的编写得到了美国 MSC Software 公司以及德国亚琛工业大学金属塑性成形研究所 (IBF) 和德国 LASSO 公司的技术支持。康永林教授等对书中某些内容提出有益建议。在此一并致谢!

洪慧平

2014 年 6 月于北京科技大学

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 概论 .....                | 1  |
| 1.1 金属塑性成形概述 .....            | 1  |
| 1.1.1 金属塑性成形的基本概念 .....       | 1  |
| 1.1.2 金属塑性成形的基本分类 .....       | 2  |
| 1.2 金属塑性成形数值模拟的意义 .....       | 3  |
| 1.3 金属塑性成形数值模拟的主要任务 .....     | 5  |
| 1.3.1 金属塑性成形数值模拟的特点 .....     | 5  |
| 1.3.2 金属塑性成形数值模拟的主要任务 .....   | 5  |
| 1.4 模拟的基本概念 .....             | 6  |
| 1.4.1 模拟的定义 .....             | 6  |
| 1.4.2 数值模拟与物理模拟的区别与联系 .....   | 7  |
| 1.5 金属塑性成形问题的主要求解方法 .....     | 8  |
| 1.5.1 有限元法 .....              | 8  |
| 1.5.2 边界元法 .....              | 9  |
| 1.5.3 有限差分法 .....             | 10 |
| 1.5.4 初等解析法 .....             | 11 |
| 1.5.5 滑移线法 .....              | 11 |
| 1.5.6 上、下界法 .....             | 12 |
| 1.5.7 视塑性法 .....              | 12 |
| 1.6 金属塑性成形数值模拟的分级 .....       | 13 |
| 1.6.1 金属塑性成形的目标量 .....        | 13 |
| 1.6.2 金属塑性成形数学模型的分级 .....     | 14 |
| 1.6.3 金属塑性成形数值模拟的分级 .....     | 15 |
| 1.7 金属塑性成形数值模拟的应用及发展趋势 .....  | 15 |
| 1.7.1 金属塑性成形数值模拟的应用 .....     | 15 |
| 1.7.2 金属塑性成形数值模拟的若干发展趋势 ..... | 20 |
| 思考题 .....                     | 24 |
| 第 2 章 有限元法的基本原理 .....         | 25 |
| 2.1 有限元法的基本概念 .....           | 25 |

|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 2.2   | 工程问题有限元分析的流程 .....    | 28 |
| 2.2.1 | 问题分类 .....            | 28 |
| 2.2.2 | 数学模型 .....            | 29 |
| 2.2.3 | 初步分析 .....            | 30 |
| 2.2.4 | 有限元分析 .....           | 31 |
| 2.2.5 | 检查结果 .....            | 31 |
| 2.2.6 | 期望修正 .....            | 32 |
| 2.3   | 有限元法的计算步骤 .....       | 33 |
| 2.3.1 | 有限元法计算的基本步骤 .....     | 33 |
| 2.3.2 | 所需 CPU 时间 .....       | 34 |
| 2.3.3 | 简单算例分析 .....          | 35 |
| 2.4   | 单元类型选择及高斯积分法 .....    | 37 |
| 2.5   | 非线性有限元的迭代算法 .....     | 38 |
| 2.5.1 | 完全 N-R 方法 .....       | 39 |
| 2.5.2 | 修正 N-R 方法 .....       | 40 |
| 2.6   | 非线性迭代求解的收敛判据 .....    | 41 |
|       | 思考题 .....             | 43 |
| 第3章   | 金属塑性成形非线性有限元分析 .....  | 45 |
| 3.1   | 非线性的基本概念 .....        | 45 |
| 3.1.1 | 非线性问题 .....           | 45 |
| 3.1.2 | 3 种非线性来源 .....        | 46 |
| 3.2   | 材料非线性分析 .....         | 48 |
| 3.2.1 | 弹塑性有限元法 .....         | 48 |
| 3.2.2 | 刚塑性有限元法 .....         | 60 |
| 3.2.3 | 黏塑性有限元法 .....         | 61 |
| 3.3   | 几何非线性分析 .....         | 63 |
| 3.3.1 | 几何非线性概述 .....         | 63 |
| 3.3.2 | 坐标系 .....             | 64 |
| 3.3.3 | 完全拉格朗日法与更新拉格朗日法 ..... | 65 |
| 3.3.4 | 欧拉列式 .....            | 70 |
| 3.3.5 | 任意欧拉-拉格朗日列式 .....     | 71 |
| 3.4   | 接触非线性分析 .....         | 71 |
| 3.4.1 | 接触问题的特点 .....         | 71 |
| 3.4.2 | 接触体的分类 .....          | 72 |
| 3.4.3 | 接触体的运动 .....          | 74 |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 3.4.4      | 接触的描述方法                   | 76         |
| 3.4.5      | 施加约束                      | 78         |
| 3.4.6      | 摩擦模型                      | 80         |
| 3.4.7      | 耦合接触分析                    | 88         |
| 3.4.8      | 接触分析的网格自适应                | 89         |
| 3.4.9      | 接触问题的若干数值方法               | 90         |
|            | 思考题                       | 100        |
| <b>第4章</b> | <b>金属塑性成形有限元模拟的若干关键技术</b> | <b>101</b> |
| 4.1        | 自动网格优化技术                  | 101        |
| 4.1.1      | 单元密度与单元几何形态               | 101        |
| 4.1.2      | 自适应网格划分                   | 102        |
| 4.1.3      | 网格重划分技术                   | 108        |
| 4.2        | 隐式求解法与显式求解法               | 109        |
| 4.3        | 热力耦合分析方法                  | 110        |
| 4.3.1      | 热力耦合概念                    | 110        |
| 4.3.2      | 热力耦合求解方法                  | 111        |
| 4.3.3      | 热边界条件                     | 111        |
| 4.4        | 模拟结果的主要影响因素               | 112        |
| 4.4.1      | 有限元模拟的误差源                 | 112        |
| 4.4.2      | 提高模拟精度的措施                 | 116        |
|            | 思考题                       | 116        |
| <b>第5章</b> | <b>材料参数及边界条件的确定方法</b>     | <b>119</b> |
| 5.1        | 确定材料参数及边界条件的基本流程          | 119        |
| 5.1.1      | 材料参数的分类                   | 119        |
| 5.1.2      | 确定材料参数和边界量的基本流程           | 120        |
| 5.2        | 流变应力、流变曲线的测定方法            | 121        |
| 5.2.1      | 流变应力、流变曲线                 | 121        |
| 5.2.2      | 流变曲线测定的不确定性               | 121        |
| 5.2.3      | 流变曲线的描述                   | 121        |
| 5.2.4      | 流变曲线的表达式                  | 122        |
| 5.2.5      | 流变应力的测定方法                 | 124        |
| 5.3        | 摩擦边界条件的处理方法               | 127        |
| 5.3.1      | 摩擦                        | 127        |
| 5.3.2      | 摩擦定律                      | 127        |
| 5.3.3      | 摩擦系数和摩擦因子的测定方法            | 131        |



|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 5.4 传热边界条件的建立方法 .....               | 135        |
| 5.4.1 热传递 .....                     | 135        |
| 5.4.2 热传递定律 .....                   | 135        |
| 5.4.3 变形热与摩擦热的确定方法 .....            | 138        |
| 思考题 .....                           | 139        |
| <b>第6章 金属塑性成形数值模拟应用举例 .....</b>     | <b>141</b> |
| 6.1 概述 .....                        | 141        |
| 6.1.1 Marc 有限元软件简介 .....            | 141        |
| 6.1.2 Marc 有限元分析的基本步骤 .....         | 142        |
| 6.2 轧制过程数值模拟 .....                  | 156        |
| 6.2.1 问题提出 .....                    | 156        |
| 6.2.2 模拟方法 .....                    | 156        |
| 6.3 锻造过程数值模拟 .....                  | 167        |
| 6.3.1 问题提出 .....                    | 167        |
| 6.3.2 模拟方法 .....                    | 169        |
| 6.4 冲压过程数值模拟 .....                  | 184        |
| 6.4.1 问题提出 .....                    | 184        |
| 6.4.2 模拟方法 .....                    | 187        |
| 6.5 挤压过程数值模拟 .....                  | 203        |
| 6.5.1 问题提出 .....                    | 203        |
| 6.5.2 模拟方法 .....                    | 204        |
| 6.6 拉拔过程数值模拟 .....                  | 243        |
| 6.6.1 问题提出 .....                    | 243        |
| 6.6.2 模拟方法 .....                    | 245        |
| 6.7 超塑性成形数值模拟 .....                 | 254        |
| 6.7.1 问题提出 .....                    | 254        |
| 6.7.2 模拟方法 .....                    | 255        |
| 思考题 .....                           | 275        |
| <b>第7章 金属热变形组织模拟应用举例 .....</b>      | <b>279</b> |
| 7.1 概述 .....                        | 279        |
| 7.2 金属热变形组织模拟方法 .....               | 281        |
| 7.2.1 热变形过程动态组织模拟原理 .....           | 281        |
| 7.2.2 热变形组织模拟(STRUCSIM)计算流程 .....   | 282        |
| 7.2.3 描述热变形微观组织的材料模型 .....          | 284        |
| 7.3 LARSTRAN/STRUCSIM 模拟组织的步骤 ..... | 287        |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 7.3.1 | LARSTRAN 有限元软件简介 .....          | 287 |
| 7.3.2 | LARSTRAN/STRUCSIM 模拟组织的步骤 ..... | 288 |
| 7.4   | 热压缩过程组织模拟 .....                 | 289 |
| 7.4.1 | 问题提出 .....                      | 289 |
| 7.4.2 | 模拟方法 .....                      | 290 |
| 7.5   | 板材轧制过程组织模拟 .....                | 316 |
| 7.5.1 | 问题提出 .....                      | 316 |
| 7.5.2 | 模拟方法 .....                      | 317 |
| 7.6   | 孔型轧制过程组织模拟 .....                | 375 |
| 7.6.1 | 问题提出 .....                      | 375 |
| 7.6.2 | 模拟方法 .....                      | 377 |
|       | 思考题 .....                       | 441 |
|       | 附录 .....                        | 443 |
|       | 附录 1 有限元分析中常用的单位及换算表 .....      | 443 |
|       | 附录 2 Marc 中建立材料数据库的方法 .....     | 447 |
|       | 附录 3 LARSTRAN 中建立材料数据库的方法 ..... | 456 |
|       | 参考文献 .....                      | 463 |
|       | 索引 .....                        | 465 |

# 第 1 章

## 概论

### 1.1 金属塑性成形概述

#### 1.1.1 金属塑性成形的基本概念

金属塑性成形(metal plastic forming, 通称 metal forming)是利用金属材料具有的塑性,通过施加外力有目的地改变工件的形状和尺寸。经过塑性成形,金属不仅几何尺寸得到控制,而且内部组织和性能以及表面质量等均能得到改善和提高。

与其他加工过程(例如切削、铸造、焊接等)相比,塑性成形因具有节约材料(投入的材料质量保持不变)、改善金属组织性能和生产效率高等诸多优点,其应用几乎遍布冶金、汽车、航空、航天等领域。以冶金工业为例,铸钢总产量的 90% 以上都要经过塑性加工成坯或成材;以汽车工业为例,汽车制造中 60% ~ 70% 的金属零部件(从车身上的各种覆盖件到车内各种结构件等)需经过塑性成形。作为制造业的重要分支,金属塑性成形技术对于国民经济和国防等具有重要作用,也是体现综合国力的一个重要方面。

## 1.1.2 金属塑性成型的基本分类

### (1) 按应力状态分类

按应力状态不同,金属塑性成型分为压力成型、拉伸成型、拉压成型、弯曲成型、剪切成型等。

### (2) 按加工温度分类

按加工温度不同,金属塑性成型分为冷塑性成型、温塑性成型和热塑性成型。在不产生回复和再结晶的温度以下进行的加工称为冷塑性成型;在充分再结晶的温度以上进行的加工称为热塑性成型;将金属加热到低于再结晶温度下进行的塑性成型称为温塑性成型。

### (3) 按产品类型分类

按产品类型不同,金属塑性成型可分为板料成型和块体成型(包括轧制)。

若干基本塑性成型方法(锻造、轧制、拔长、冲压、挤压和拉拔)如图1.1所示。

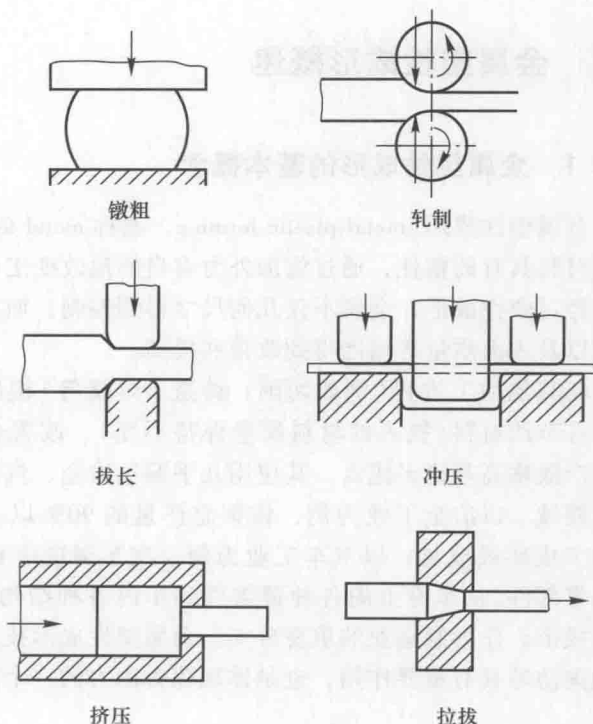


图 1.1 若干基本塑性成型方法

## 1.2 金属塑性成形数值模拟的意义

金属塑性成形作为制造技术的分支,其追求的目标是优质、低耗、高效率地生产出用户所需的产品。随着国民经济和科学技术的发展,人们对提高产品质量、降低成本、提高生产的安全性和可靠性以及环境保护等,提出了越来越高的要求,这就要求不断地改进或优化金属塑性成形的生产工艺。

在金属塑性成形技术的发展历程中,人们曾长期依据经验或者采用简单假设的经验公式或设计规则来制订和改进工艺方案及设备的设计方案。例如,为了设计制造一台大型设备,先制造一台小型的,根据观测和检测的结果,再制造一台中型的,然后再制造一台大型的。在大型设备试生产一段时间后,再进行必要的修改。从工具设计、质量控制、生产线建设直至大型生产基地的决策等,早期多采用这种试凑法(trial and error)。

然而金属塑性成形往往不是在一个塑性加工步骤中完成,而是由相互影响的多阶段组成的。现代化塑性成形工业(例如连续轧制生产线等)是一个由冶金、机械、电气、自动控制和其他设施组成的高效率、高精度的综合化学冶金、物理冶金、机械加工等的生产系统,而且工艺和设备不断革新。人们发现,单纯用试凑法已不能满足要求。例如,异型断面轧制孔型和复杂形状的冲压模具的设计及反复修改是一个很耗时费力的工作;一种产品的质量控制,从连铸、连轧到成品生产线的协调性等都将受到众多随机因素的影响,人们很难做出正确的决策;连续、高速生产过程中,各因素之间的制约关系也很难进行准确检测和判断;有时,小型设备并不能反映大型设备的问题,如用窄带钢难以模拟宽带钢的板型问题,用小锻件也难以模拟大型锻件的内部组织变化情况,等等。

尤其是面对当今世界竞争激烈的市场,产品研发者在开发新产品或新工艺方面,必须在很短的时间内,有时是在缺乏前人经验的情况下进行工作。由于产品的更新更加频繁,材料更难以加工,且越来越多的复杂零件需要精密成形,而允许进行实物试验的时间被大大缩短,因此必须采用更加先进的科学研究方法,从而有效地提高产品开发者的工作效率,以适应市场竞争的需要。

随着计算机软件和硬件技术的飞速发展,计算机数值模拟技术为有效分析和解决上述复杂问题提供了可能性。计算机数值模拟技术能在试验、制造、试生产之前,对诸如规划、试验、设计等重大决策性问题提出预报性结论并能够通过数值模拟对生产工艺及设备参数进行优化。它可以解决试凑法耗时费力的问题、因素众多难以决策的问题,并克服不能进行试验的困难。

例如,借助计算机数值模拟技术,产品开发者在制造和试验样品之前,能

准确评价不同的设计,从而能选择最佳设计方案;工艺流程可以反复在计算机中通过工艺模拟来超前再现,而不是在实验室或车间中用实物模拟来实现;各种不同的设计方案可以在进行耗资的实物制造和试验之前,在计算机上模拟工艺的全过程,从而使设计者可以分析工艺参数与产品性能之间的关系,观察局部变形情况以及是否产生内部或外部的缺陷,进而修改工艺及模具直至达到满意状态。

以轧制为例,在型钢孔型设计中或在钢管轧机调整参数制订中,可先通过计算机模拟,获得轧件进入孔型或轧机的情况、变形区中轧件变形及孔型充满的情况、力能参数和轧后轧件形状等,再由计算机诊断和优化系统根据模拟结果对孔型设计和轧机调整参数给出修改指示,然后按修改后的孔型和轧机调整参数再进行模拟、诊断和修改,如此反复进行,从而达到优化孔型参数和轧机调整参数的目的。另外,利用计算机模拟技术还可以模拟钢在轧制过程中的显微组织变化,并预报轧后钢材的性能,代替大量金相试验和工艺参数研究,保证钢材要求的组织和性能。其可根据加热、轧制和冷却工艺参数对轧件在变形中和变形后的组织变化进行计算机模拟和性能预报,再通过计算机诊断和修改,达到优化工艺参数的目的。

因此,计算机模拟技术受到各国轧钢工作者的普遍重视,例如德国曼内斯曼公司用有限元法模拟各种钢管轧制过程,并与设备设计的CAD系统相连接,在轧机设计中每当修改设计参数时,都先进行轧制过程的计算机模拟,模拟结果满意后才由CAD系统完成设计,例如他们用Marc有限元软件模拟三辊钢管斜轧延伸变形。德国亚琛工业大学金属塑性成形研究所(IBF)用计算机模拟各种轧制和其他塑性加工的变形情况,例如用LARSTRAN/SHAPE有限元软件模拟工字钢等轧制变形区内各截面上的变形情况,还开发了根据有限元计算结果考虑变形历史影响的金属显微组织变化的模拟程序(STRUCSIM),其模拟结果与实测值较为吻合。

以大型锻件生产为例,据了解,目前国外主要大型锻件生产企业已普遍使用计算机模拟技术对铸锭、铸造、锻造、热处理过程进行数值模拟分析,并辅助工艺设计和过程控制。如大钢锭的凝固分析和偏析预测,铸钢件的三维凝固分析和浇注系统设计,锻造金属流变的数值模拟,热处理的温度场、应力场、断裂力学的分析、组织与性能的预测和工艺优化分析等。这大大缩短了大型铸锻件产品的技术开发周期,优化了产品制造工艺,提高了产品质量,在市场竞争中具有明显的优势。

计算机数值模拟技术不仅在上述轧制、锻造领域得到深入应用,而且在其他块体成形和板料成形等塑性成形领域都有大量应用。

综上所述,应用计算机数值模拟技术能够极大地促进科研及制造业生产的

发展。在金属塑性成形领域中应用计算机数值模拟技术,能够超前再现材料成形各阶段的具体实施情况,获得金属塑性成形过程应力、应变、应变速率、温度分布以及微观组织变化和宏观力学参数等重要目标量的预报性结果,根据模拟仿真结果可对设计方案进行必要修改,优化工艺,提高产品质量,而且可极大地降低生产成本,缩短新产品的研究开发周期,提高生产效率。

事实上,计算机数值模拟已成为先进制造技术的重要组成部分,与科学实验、理论分析共同成为当今科学研究和技术创新的三大支柱。

## 1.3 金属塑性成形数值模拟的主要任务

### 1.3.1 金属塑性成形数值模拟的特点

金属塑性成形过程往往涉及复杂的材料非线性、几何非线性和接触非线性。材料非线性包括弹塑性、刚塑性和黏塑性等;几何非线性要求能够处理大变形问题;接触非线性包括工具与工件之间接触和脱离的探测以及建立合理的摩擦模型等。因此,金属塑性成形过程的模拟(包括三维大变形弹塑性有限元模拟)需要从空间上和时间上进行离散化,并采用非线性迭代算法,计算时间一般较长。

### 1.3.2 金属塑性成形数值模拟的主要任务

当前金属塑性成形技术工作者的任务不仅是塑性成形装备的规划、设计制造和运行,而且要研究开发环境友好的绿色制造流程和产品,同时还要考虑产品的寿命周期。欲达此目的,必须对塑性成形工艺参数、工艺变化状态和产品性能之间的相互关系有根本的认识。计算机数值模拟技术恰好为新塑性成形技术和新产品开发提供了极为有效的研究手段。

对金属塑性成形过程进行数值模拟的目的是:在物理模拟和实验研究的基础上,应用数值计算和分析技术(例如有限元法等)确定塑性成形过程中材料内部的应力、应变、应变速率、温度等局部量的分布特点以及金属的流动规律并预测加工界限;确定加工工具内部的应力、应变、温度分布以及工具的合理形状、材质和磨损;确定制品尺寸精度、残余应力、缺陷以及微观组织结构和宏观力学参数等的变化规律,实现对塑性成形过程的控制和优化,从而提高产品质量,降低生产成本并缩短设计和研制周期,代替或减少工业性试验。

简言之,当前金属塑性成形数值模拟工作者面临的主要任务是:在宏观上精确模拟分析材料几何尺寸的变化规律,在微观上准确模拟分析材料内部组织变化和质量缺陷的成因,为工艺优化和质量控制提供理论基础和实践依据。为



此,模拟工作者不仅要掌握计算机数值模拟基本理论及建模技术,而且要对研究对象(具体的塑性成形问题)涉及的工艺、设备以及材料特性和产品质量等有透彻的了解,同时还要深入细致地研究并建立材料数据库(流变曲线及重要物性参数的精确测定等)和模型库(材料本构关系的合理建立等),并掌握各类重要边界条件(摩擦、传热等)的正确制订方法。

## 1.4 模拟的基本概念

### 1.4.1 模拟的定义

所谓模拟(simulation),就是将所研究的对象(简单的物体或复杂的系统)用其他手段加以模仿的一种活动。当采用模拟方法来研究问题时,人们并不直接观察所研究的对象及其变化过程,而是先设计一个与该对象或其变化过程相似的模型,然后通过模型来间接地研究这个对象或其变化过程。模拟是对真实事物(原型)的形态、工作规律和信息传递规律等在特定条件下的一种相似再现,它具有超前性、综合性与可行性的特点。

早期的模拟研究主要是物理模拟(physical simulation),即实物模拟,存在价格昂贵、速度慢、不易重现试验结果等弱点。自20世纪50年代以来,由于电子计算机的出现和发展,产生了一种新的模拟方法——计算机数值模拟(computer simulation)或称为数值模拟(numerical simulation)。计算机数值模拟是一种对问题求数值解的方法,它利用电子计算机对一个客观复杂系统(研究对象)的结构和行为进行动态模仿,从而以安全和经济的手段来获得系统及其变化过程的特性指标,为决策者提供科学的决策依据。因此计算机模拟是系统工程研究和分析的有力工具。

随着计算机科学与系统科学的发展,计算机数值模拟的应用领域不断拓展。目前计算机数值模拟不仅在工程技术、科学实验、军事作战、生产管理中得到了应用,而且在财政金融甚至社会科学中也得到了广泛的应用。例如,在工程系统中,计算机模拟是系统规划、设计、分析、评价的有力工具;在管理系统中,对于企业管理,计算机模拟被用来做产品需求预测、确定最优库存量、安排生产计划、拟定企业的开发战略等;对于经济管理,计算机模拟被用来做国民经济预测、经济结构分析、政策评价等;在军事作战系统中,计算机模拟被用来做坦克对抗、导弹对抗、多兵种协同作战对抗中的战略战术方案的规划与评价等;在社会经济系统中,计算机模拟被用来做人口、人才和能源等方面的预测与规划等。

计算机模拟的应用之所以如此广泛,除了计算机本身所具有的优点外,还



在于它为实际系统的运行提供了一个假想的“试验场所”，从而使得一些无法以付诸实施来进行研究的问题，或者虽能实现真实试验，但代价昂贵、甚至会带有某种风险性等问题的研究得到解决。例如，要预测未来 15 年的经济计划指标，人们无法让国民经济实际去运行一段时间来取得这些指标，但却可以构造一个经济模拟模型，利用尽可能搜集到的数据，根据不同的计划设想，对其进行各种模拟试验，从而得到各种预测的经济计划指标。对于企业管理人员来说，为使企业在竞争中发展壮大，新产品的研制以及新的开拓性投资将是十分重要而又带有风险性的决策问题。因为上述做法一旦遇到挫折甚至失败，将使企业遭受巨大的经济损失甚至破产，其后果是十分严重的。因此，对于这一类问题，可事先进行各方面的调查和分析，将不确定的因素抽取出来，并组合到模型中去，然后设法变换有关数据，多次进行模拟试验，以便进一步较全面地来认识这些不确定因素的实质，从而为今后制订有效的对策打下基础。

综上所述，许多复杂的决策问题，由于建立了对应的模拟模型，便可在计算机上反复地进行模拟试验，进行大量方案的比较和评优，为决策者提供必要的数量依据，这正是计算机模拟的主要优点。当然，计算机模拟也不是万能的，由于它目前尚处于发展之中，一些问题尚待解决，例如精度估计问题、收敛速度问题等。因此，对实际问题的基本认识是合理恰当地应用计算机模拟技术所不可缺少的。

#### 1.4.2 数值模拟与物理模拟的区别与联系

物理模拟是基本现象相同的模拟，通常是指缩小或放大比例或简化条件，或代用材料，用试验模型代替原型的研究。模型与原型的所有物理量相同，过程的物理本质相同，区别只在于物理量的大小不同。物理模拟是保持同一物理本质的模拟。相比之下，数值模拟是保持信息传递规律相似的模拟。这时，模型与原型中过程的物理本质不同，但信息传递按统一微分方程进行。

对材料和热加工工艺来说，物理模拟通常指利用小试件，借助于某试验装置再现材料在制备或热加工过程中的受热，或同时受热与受力的物理过程，充分而精确地暴露与揭示材料或构件在热加工过程中的组织与性能变化规律，评定或预测材料在制备或热加工时出现的问题，为制订合理的加工工艺以及研制新材料提供理论指导和技术依据。物理模拟试验分为两种，一种是在模拟过程中进行的试验，另一种是模拟完成后进行的试验。金属塑性成形的物理模拟方法包括视塑性法和密栅云纹法等。

物理模拟试验的目的可能有下列几种：① 试图了解某一工艺中材料的流动机制；② 探索某一假说或理论；③ 验证某一原理；④ 研究某一工艺中的参数影响，例如几何参数和摩擦参数；⑤ 进行模具或工件的几何设计；⑥ 控制