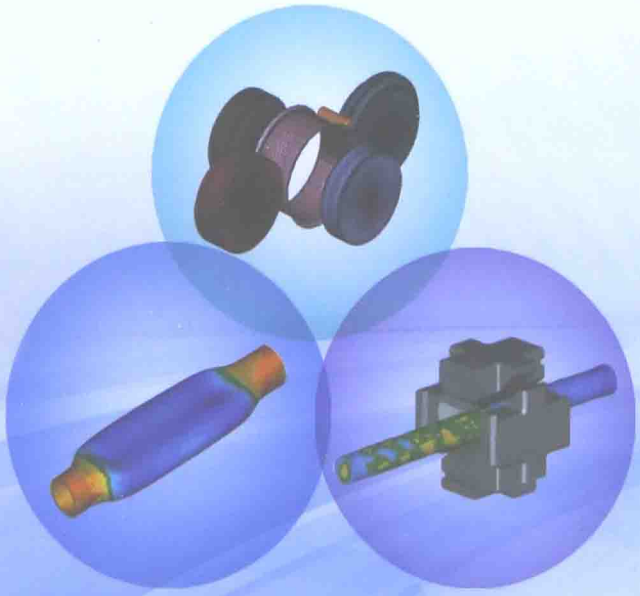
普通高等教育“十二五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

FORGE塑性成型有限元模拟教程

主　编　黄东男
副主编　陈　林



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

普通高等教育“十二五”规划教材

FORGE塑性成型有限元模拟教程

主　编　黄东男
副主编　陈　林

北　京
冶金工业出版社
2015

内 容 提 要

法国的 FORGE 是金属材料塑性成型领域的一款专用的有限元数值模拟软件。为了使国内企业和科研院所从事数值模拟研究的人员方便快捷地掌握该软件的应用方法，内蒙古工业大学联合该软件国内代理商北京扩世科技有限公司，对 FORGE 2011 进行了汉化，推出了 FORGE 2011 软件中文版。本书为该软件的应用教程。

全书共分 10 章，包括了自由锻、模锻、辊锻、辗环、挤压、冷冲压等基本塑性加工的模拟分析以及典型的热处理分析。

本书为高等院校相关专业学生学习该软件的指导教材，也可供塑性加工领域的工程技术人员、科研院所的研究人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

FORGE 塑性成型有限元模拟教程/黄东男主编．—北京：冶金工业出版社，2015. 1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6808-8

Ⅰ. ①F… Ⅱ. ①黄… Ⅲ. ①金属压力加工—塑性变形—有限元法—高等学校—教材 Ⅳ. ①TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 276878 号

出 版 人 谭学余

地　　址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网　　址 www. cnmip. com. cn 电子信箱 yjcbs@ cnmip. com. cn

责任编辑 贾怡雯 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6808-8

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版，2015 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm；12. 25 印张；239 千字；186 页

32. 00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmip. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy. tmall. com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

前　言

金属塑性成型作为金属加工的主要方法，具有生产效率高、材料利用率高、成型后组织性能好等优点，因此被广泛应用于工业制造中。近年来，随着社会经济的发展，传统的塑性加工技术正向以净成型和近净成型为目标的精密塑性成型技术发展。与此同时对塑性加工技术提出了更高的要求，采用传统的解析方法与依靠工程类比和模具设计师个人经验试错的方法，已经很难满足制品性能的要求。因此以数值模拟取代部分试验，已成为研究复杂构件精确成型过程、制定合理模具结构、优化工艺、奠定成型理论的最有效手段。

目前在塑性成型领域主要应用软件有美国的 DEFORM、ABAQUS、MARC，俄罗斯的 QFORM 以及法国的 FORGE。法国的 FORGE 是金属塑性成型过程的专用有限元模拟软件，其功能强大、自动网格划分和再生技术稳定、计算精度及效率高，更加适用于复杂零件塑性成型过程分析。该软件不但可模拟普通的冷锻、温锻、热锻成型，同时还可以模拟辊锻、辗环、径向锻造、挤压、轧制、剪切、冲孔等特殊成型工艺，并且可以按成型工序过程（下料—制坯—成型—切边—热处理）进行建模及模拟分析。

美国和俄罗斯的模拟软件由于进入国内比较早，应用范围较广，已有使用教程，而法国的 FORGE 软件近年来国内才开始接触，尚没有使用教程，为了让用户尽快了解熟悉 FORGE 软件操作及使用方法，特编写了该教程。

本书阐述了数值模拟技术在塑性成型过程中的地位及应用，并在此基础上通过典型的成型实例对 FORGE 的使用操作过程进行了讲解。

旨在让读者了解几何模型构建、边界条件施加、工艺参数选择、模拟结果分析、多工序的模拟设置、热处理分析等基本的模拟流程。

本书由内蒙古工业大学黄东男担任主编，北京扩世科技有限公司陈林担任副主编。参编人员包括内蒙古工业大学的左壮壮、李有来、徐宁。其中黄东男编写第3章、第5~8章，陈林编写第1~2章，左壮壮编写第9~10章，李有来、徐宁编写第4章。全书由黄东男统稿，陈林对所有模拟案例进行审核。

感谢国家自然科学基金，内蒙古自治区自然科学基金、内蒙古工业大学科学研究项目对本书出版提供的资助。

由于编者水平所限，书中难免存在疏漏及缺点，敬请广大读者、同行批评指正。

编 者

2014年10月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　录

1　概述 …… 1

1.1　金属塑性成型技术的特点 …… 1
1.2　金属塑性成型方法分类 …… 1
1.3　金属塑性成型数值模拟技术 …… 3
1.3.1　塑性加工模拟重要性 …… 3
1.3.2　有限元法的发展及应用 …… 3
1.3.3　有限元模拟的注意事项 …… 6
复习思考题 …… 6

2　FORGE 软件 …… 7

2.1　简介 …… 7
2.2　功能及特点 …… 7
2.3　模块结构 …… 8
2.3.1　前处理 …… 8
2.3.2　计算 …… 11
2.3.3　后处理 …… 14
2.3.4　设定 …… 17
2.3.5　右键菜单 …… 20
复习思考题 …… 20

3　自由锻过程模拟分析 …… 21

3.1　模型建立 …… 21
3.1.1　创建新工程 …… 21
3.1.2　导入几何模型 …… 23
3.1.3　网格划分 …… 24
3.1.4　位置设置 …… 26
3.1.5　接触检查 …… 29
3.1.6　对称面设定 …… 30

3.1.7 坯料基本参数设置 …… 32
3.1.8 模具初始条件设置 …… 33
3.1.9 模拟计算参数设置 …… 34
3.1.10 保存数据 …… 35
3.2 计算和后处理 …… 36
3.2.1 生成计算文件 …… 36
3.2.2 模拟结果分析 …… 38
复习思考题 …… 43

4 模锻过程模拟分析 …… 44

4.1 有限元模型建立 …… 44
4.1.1 增加一个新模拟 …… 44
4.1.2 导入几何模型 …… 46
4.1.3 网格划分 …… 47
4.1.4 模具位置 …… 48
4.1.5 计算参数设置 …… 49
4.1.6 检查及保存数据 …… 50
4.2 有限元模型分析 …… 50
4.2.1 运行计算 …… 50
4.2.2 模拟结果分析 …… 51
复习思考题 …… 54

5 模具应力分析 …… 55

5.1 有限元模型建立 …… 55
5.1.1 添加一个模具应力分析模拟 …… 55
5.1.2 模具体积网格划分 …… 55
5.1.3 模具设置定义 …… 58
5.1.4 添加载荷文件 …… 62
5.2 模拟计算 …… 65
5.2.1 保存方案 …… 65
5.2.2 后处理 …… 66
复习思考题 …… 68

6 挤压过程模拟 …… 69

6.1 模型建立 …… 69

6.1.1　创建新工程 …… 69
6.1.2　添加模具模块 …… 71
6.1.3　导入几何模型 …… 71
6.1.4　模型网格划分 …… 75
6.1.5　位置设置 …… 81
6.1.6　接触检查 …… 83
6.1.7　对称面设定 …… 83
6.1.8　坯料参数设置 …… 85
6.1.9　模具参数设置 …… 87
6.1.10　计算参数设置 …… 87
6.1.11　检查及保存数据 …… 90
6.2　计算和后处理 …… 91
6.2.1　生成计算文件 …… 91
6.2.2　模拟结果分析 …… 91
复习思考题 …… 97

7　辊锻过程模拟分析 …… 98

7.1　问题分析 …… 98
7.2　模型建立 …… 98
7.2.1　创建新工程 …… 98
7.2.2　导入几何模型 …… 100
7.2.3　坯料属性设置 …… 102
7.2.4　钳臂设置 …… 103
7.2.5　多道次文件定义 …… 105
7.2.6　锻辊属性设置 …… 106
7.2.7　模拟参数定义 …… 109
7.2.8　检查及保存数据 …… 110
7.3　计算和后处理 …… 112
7.3.1　生成计算文件 …… 112
7.3.2　模拟结果分析 …… 112
复习思考题 …… 115

8　辗环过程模拟分析 …… 116

8.1　模型建立 …… 116

8.1.1 创建新工程 …… 116
8.1.2 导入几何模型 …… 116
8.1.3 网格模型构建 …… 119
8.1.4 几何模型位置设置 …… 125
8.1.5 接触检查 …… 132
8.1.6 设置基本参数 …… 133
8.1.7 模具参数设置 …… 135
8.1.8 计算参数设置 …… 138
8.1.9 检查及保存数据 …… 139
8.2 计算和后处理 …… 139
8.2.1 生成计算文件 …… 139
8.2.2 模拟结果分析 …… 140
复习思考题 …… 147

9 冷冲过程模拟 …… 148

9.1 模型建立 …… 148
9.1.1 创建新工程 …… 148
9.1.2 导入几何模型 …… 150
9.1.3 网格划分 …… 154
9.1.4 参数设置 …… 159
9.1.5 模具参数设置 …… 163
9.1.6 计算参数设置 …… 164
9.1.7 检查及保存数据 …… 165
9.2 计算和后处理 …… 166
9.2.1 生成计算文件 …… 166
9.2.2 模拟结果分析 …… 168
复习思考题 …… 171

10 热处理过程分析 …… 172

10.1 模型建立 …… 172
10.1.1 创建新工程 …… 172
10.1.2 几何模型 …… 172
10.1.3 钢件参数设置 …… 175
10.1.4 计算参数设置 …… 178

10.1.5　检查及保存数据 …… 178
10.2　计算和后处理 …… 180
10.2.1　生成计算文件 …… 180
10.2.2　模拟结果分析 …… 182
复习思考题 …… 185

参考文献 …… 186

1 概　　述

1.1 金属塑性成型技术的特点

金属塑性成型是金属加工主要方法之一，即在外力作用下，利用金属塑性，通过模具使金属坯料加工成形状和尺寸符合需求的工件制品的加工技术，也称金属塑性加工或金属压力加工。主要具有以下特点：

（1）有效改善和控制金属的组织与性能。金属材料经过相应的塑性成型后，其组织、性能都能得到改善和提高，特别是对于铸造组织，效果更为显著。

（2）尺寸精度高。近年来，应用先进的技术和设备，用塑性成型方法获得的零件已经达到少切削甚至无切削的要求，实现了近净成型甚至净成型。如精密锻造的伞齿轮，其齿形部分精度可不经切削加工直接使用；精密锻造的叶片的复杂曲面可达到只需要采用磨削加工的精度。

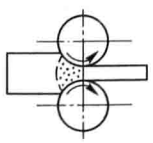
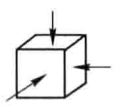
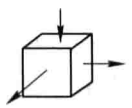
（3）原材料消耗少。金属塑性成型过程是靠金属在塑性状况下的体积转移，其过程不产生切削，只有少量的工艺废料，因而材料利用率高。

（4）生产效率高。如在 120000kN 机械压力机上锻造汽车用六拐曲轴仅需 40s；在曲柄压力机上压制一个汽车覆盖件仅需几秒；拉丝机的拉拔速度达到 20m/s 以上。

1.2 金属塑性成型方法分类

按照金属成型特点，塑性成型分为体积成型和板料成型两大类。体积成型主要包括轧制、拉拔、挤压、锻造等，板料成型主要指冲压，见表 1-1。

表 1-1　塑性成型方法分类

序号	成型方法	工序简图	变形区域（阴影区）	变形区主应力图	变形区主变形图	变形区塑性流动性质
1	轧制		轧辊间			变形区不变稳定流动

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

续表 1-1

序号	成型方法	工序简图	变形区域（阴影区）	变形区主应力图	变形区主变形图	变形区塑性流动性质
2	拉拔		模子锥形腔			变形区不变稳定流动
3	挤压		接近凹模口			变形区不变稳定流动
4	自由锻		全部体积			变形区变化非稳定流动
5	模锻		全部体积			变形区变化非稳定流动
6	拉深		压边圈下板料			变形区变化非稳定流动

轧制是金属锭料或坯料通过两个旋转轧辊的特定空间的压缩，获得一定截面形状工件的塑性成型方法。主要生产型材、板材、带材、管材等。

拉拔是在拉应力的作用下，把金属坯料从一定形状和尺寸的模孔中拉出，从而获得断面符合需求的型材、线材和管材等。

挤压是对放在容器（挤压筒）内的金属坯料施加外力，使之从特定的模孔中流出，获得截面形状和尺寸符合需求的一种塑性加工方法。

锻造是利用锻压机械对金属坯料施加压力，使其产生塑性变形，获得具有一定力学性能、形状尺寸的锻件的加工方法。通常分为自由锻和模锻两大类。自由锻一般是在锤或水压机上，利用简单的工具将金属锭料或块料锻成特定形状和尺寸的加工方法，如平砧镦粗，尺寸精度和生产率低，适用于小批量生产；模锻是在模锻锤或热模锻压力机上利用模具来成形，精度高，生产率高，适用于大批量生产。

1.3 金属塑性成型数值模拟技术

1.3.1 塑性加工模拟重要性

金属塑性成型加工是制造工业的重要组成部分，广泛应用于工业制造中。据不完全统计，世界上75%的钢材经过塑性成型加工；汽车行业中塑性成型件占60%以上；在冶金、航空、船舶、军工等工业生产中也都占有相当的比例。成型技术是现代工业生产技术的支柱，生产能力和工艺水平，对一个国家的工业、农业、国防和科学技术所能达到的高度影响很大。

金属塑性成型时，材料特性、变形速度、温度、摩擦条件、坯料形状及尺寸、模具形状等因素对成型过程都有一定影响。因此金属塑性成型过程是复杂的非线性问题，包括材料非线性（应力与应变之间的非线性）、几何非线性（应变与位移之间的非线性）和边界的非线性（边界条件随变形发生变化，如摩擦和接触边界）。因此塑性加工问题采用传统的解析方法，如主应力法、滑移线法、均匀变形能法等很难计算；而对于塑性成型过程的工艺参数确定和模具结构设计，目前大多企业所采用的试错法，也具有周期长、成本高、效率低的缺陷。

近年来，随着社会经济的发展，传统的塑性加工技术正向以净成型和近净成型为目标的精密塑性成型技术发展。与此同时对塑性加工提出了更高要求，要获得高质量和高尺寸精度的塑性加工制件，必须提高塑性加工技术的科学化和可控化水平。与传统的塑性成型工艺相比，现代塑性加工技术对毛坯和模具设计以及金属塑性流动控制等方面的要求更高，所以采用传统的解析方法与依靠工程类比和模具设计师个人经验的试错法方法，很难满足制品性能要求。引入以计算机为工具的现代设计分析手段已经成为人们的共识。从20世纪80年代以来，CAD和CAE等单元技术开始运用到塑性成型工艺分析、规划及模具设计上，如图1-1所示。作为该系统的必要支撑技术，数值模拟技术早已受到各国尤其是发达国家的高度重视。国外已推出不少塑性成型模拟软件，如美国的DEFORM、ABAQUS、MARC，俄罗斯的QFORM，法国的FORGE等。目前以数值模拟取代部分试验，已成为研究复杂构件精确成型过程、制定合理模具结构、优化工艺、奠定成型理论的最有效手段。

1.3.2 有限元法的发展及应用

塑性加工的分析方法大致可以分为三类：首先是解析法，主要包括主应力法、滑移线法和上限法，它们都属于塑性力学中的经典解法；其次实验/解析法，即实验与解析的综合方法，有相似理论法和视塑性法；最后是数值法，它是随着

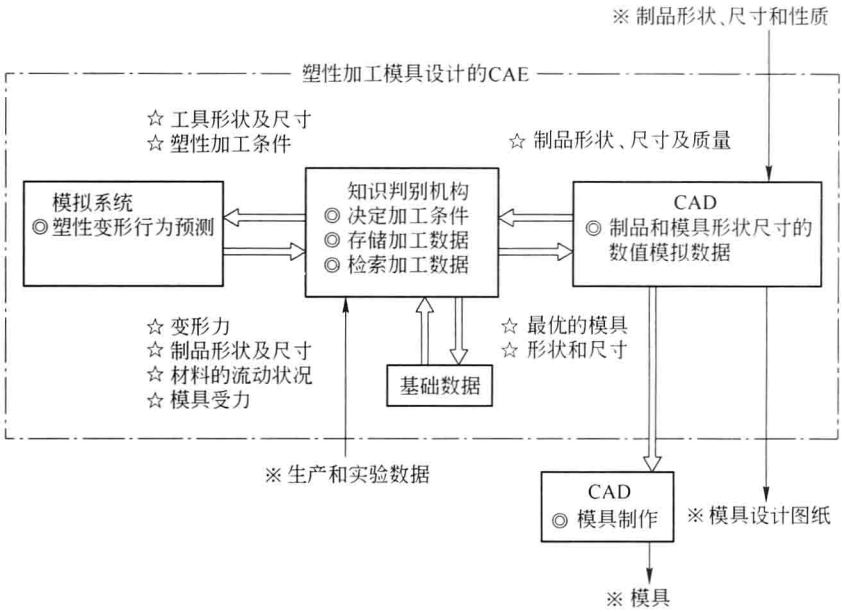


图 1-1 塑性加工模具设计 CAE

计算机的发展和应用而产生的，包括有限元法、有限差分法和边界元法。如图1-2所示，其中有限元法是一种广泛使用的方法。

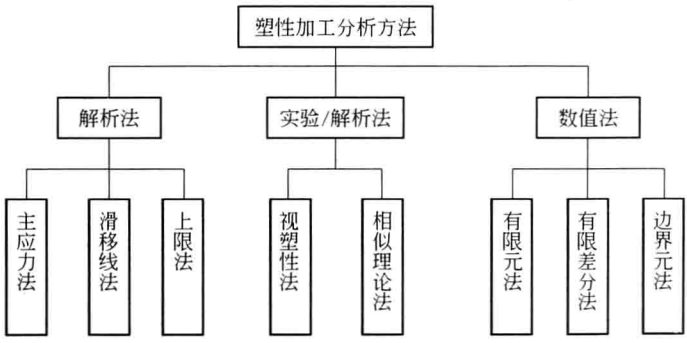


图 1-2 塑性加工分析方法

用有限元法（FEM）对金属成型过程进行数值模拟，起源于 20 世纪 60 年代，开始时主要是对二维结构问题进行数值计算，后来把它的应用扩展到能建立变分公式的广泛领域，成功地用于分析许多不同形式的边值问题。早期的研究工作中，用此法对小塑性应变问题进行模拟，R. Hill 开创了大变形的理论基础研究，S. Kobayashi 和 C. H. Lee 于 70 年代提出了基于变分原理的刚塑性有限元方

法。刚塑性有限元法较适合分析对应变速率不敏感的体积成型问题，而对变形速度有较大敏感性的材料加工过程的模拟，选用黏塑性本构关系比较合适，相应地发展了刚黏塑性有限元法。

有限元法功能强、精度高、解决问题的范围广，可以用不同形状、不同大小和不同类型的单元来描述任意形状的变形体，适应于任意速度边界条件，可以方便合理地处理模具形状、工件与模具之间的摩擦、材料硬化效应、温度等各种工艺参数对成型过程的影响，能够模拟整个成型过程中的金属流动规律，获得成型过程中任意时刻的力学信息和流动信息，如应力场、应变场、位移场、速度场、温度场以及预测缺陷的生成与扩展等。因此，用有限元法模拟塑性成型过程已成为塑性成型理论研究的中心问题。

金属成型领域的有限元法大致分为两类，首先是固体型塑性有限元（solid formulation），包括弹塑性有限元和弹黏性有限元，这类有限元同时考虑弹性变形和塑性变形，弹性区域采用 Hooke 定律，塑性区域采用 Prandtl-Reuss 方程和 Mises 屈服准则，对于小塑性变形所求未知量是单元节点位移，适用于分析构件的失稳、屈服等工程问题。对于大塑性变形，采用增量法分析。这类有限元的特点是考虑弹性区和塑性区的相互关系，既可分析加载过程，又可分析卸载过程，包括计算残余应力、应变、回弹以及模具和工件之间的相互作用，可以处理几何非线性和非稳态问题，其缺点是所取步长不能太大，计算工作量繁重，累积误差大，对于非线性硬化材料计算复杂。

其次是流动型塑性有限元（flow formulation），包括刚塑性有限元和刚黏塑性有限元。刚（黏）塑性有限元法不计弹性变形，采用 Levy-Mises 方程作为本构方程，满足体积不变条件，采用 Newton-Raphson 迭代方法求解，求解变量为单元节点的速度增量，适用于各类冷态体积成型问题的分析，刚黏塑性有限元视变形体为连续介质非牛顿流体，适用于速率敏感材料热成型过程的热力耦合分析。刚（黏）塑性有限元可取较大的增量步长，计算工作量较小，精度较高，并避开了几何非线性问题，因而能够模拟复杂的大变形过程，但不能计算弹性变形和卸载过程，无法求得残余应力、应变和回弹。

一般而言，弹塑性有限元适合于分析板料成型，如拉延、弯曲、缩口等工艺，刚塑性有限元法适合冷加工锻造过程的体积成型问题，刚黏塑性有限元适用于分析锻造、挤压、冲压、轧制等大变形的体积成型问题的热加工过程。

塑性有限元法在塑性加工方面的应用与发展，大致有两个方向。一是分析塑性加工的各种不同工序，以获得变形力、金属流动规律、微观组织演变等的有关数据；另一方面是在此过程中，不断丰富和发展有限元的理论和技术，为该方法开拓新的用途。

1.3.3 有限元模拟的注意事项

1.3.3.1 有限元计算步骤

采用如法国的 FORGE、美国的 DEFORM、俄罗斯的 QFORM 等商用软件进行模拟时，主要分为三个阶段。第一是前处理阶段，用户输入坯料、模具等几何模型参数，对几何模型进行有限单元网格划分，坯料和模具的材料信息，初始工艺条件和边界摩擦条件，设置坯料和模具相对位置、接触条件和运动条件。第二步为模拟阶段，设定成型模拟的各项计算参数和控制参数，如静力或动力求解方法，设置计算增量步长，间隔输出的计算结果，检查生成计算数据文件后，进行模拟计算。第三步对计算结果提取分析阶段，用云图或等值线图显示应力-应变场、温度场、金属流速场等。还可提取数据绘制行程与力、温度等的历史曲线等。

1.3.3.2 影响模拟精度的主要因素

（1）几何模型的构建。坯料和模具结构尺寸的二维或三维实体模型与实际情况的相符程度，简化是否合理。

（2）材料模型构建。金属材料塑性变形过程，一方面取决于变形条件，如温度、应变速率、应力应变的历史；另一方面取决于材料本身，如化学成分、夹杂、微观组织等。因此模拟时的材料模型本构函数关系与实际材料真实性能差别的大小就是影响模拟精度的首要关键因素。

（3）动态接触边界条件的处理。金属塑性成型时工件与模具的接触边界随时间变化，是动态的接触边界条件。其处理和计算涉及接触与脱离搜索方法、判断准则、法向接触力计算方法等。同时由于始终是动态接触过程，工件与模具不同部位接触的摩擦机理未必相同，所以根据实际情况合理设置各部位摩擦条件也是保证模拟精度的关键之一。

复习思考题

1-1 简述塑性成型数值模拟的基本方法。

1-2 简述常用的数值模拟软件及优缺点。

1-3 影响塑性成型模拟精度的主要因素有哪些？

2 FORGE 软件

2.1 简　　介

FORGE 2D 软件由 SNECMA 公司和法国 Ecole des Mines de Paris 大学联合研究，在 1989 年开始应用在塑性成型领域。FORGE 3D 软件由法国 PEUGEOT S. A. 公司、FORGES DE COURCELLES 公司、SAFE ASCOMETAL 公司、意大利的 TEKSID 公司、Ecole des Mines de Paris 大学等机构联合开发。FORGE 2011 由 FORGE 2D 和 3D 合并而成，是由世界数值模拟研讨大会的创始者，CEMEF（材料成型研究中心）研发。目前由法国的 TRANSVALOR 公司负责全球销售。

2.2 功能及特点

FORGE 软件主要由前处理器和网格生成器 GLPre、求解器 solver 2D/3D、后处理器 GLview Inova、材料数据库、设备数据库等构成。二维模式下，需导入 IGES 和 DXF 格式二维几何图形；三维模式下，需导入 STL，STEP/STP 等格式文件。可用 AutoCAD、SolidWorks、UG、Pro/E、CATIA 等行业常用软件绘制几何模型。软件可对几何图形进行总体有限元网格划分，局部网格细化，手动网格划分，边缘切割，节点居中或删除。

软件可对冷锻、温锻、热锻、冲压、切削、热处理等工艺进行二、三维模拟。热锻变形模拟时使用热-黏塑定律。温锻和冷锻变形模拟使用热-弹-塑模型，并可模拟残余应力。软件具有稳定的自动网格生成和再生技术，更加适用于复杂零件的三维网格划分。

FORGE 软件可在 Windows 95/98/2000/XP/NT/Vista/7 以及 Linux 系统环境下运行，支持 32 位和 64 位多种语言操作系统。三维 FORGE 软件并行/集群版本，最多支持 128 位 CPU 的并行处理计算，极大提高了计算效率。

FORGE 软件能对锻造生产剪切下料、加热、辊锻、楔横轧、辗环、热锻、冷锻、切边等各个过程进行模拟分析。同时 FORGE 可以对金属材料的奥氏体化过程、正火、回火、退火、淬火等热处理过程进行模拟，并可模拟成型过程的动态再结晶过程。其主要模拟功能见表 2-1。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com