



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材

有限元 在金属塑性成形中的应用

张彦敏 张学宾 龚红英 主 编
陈拂晓 主 审



化学工业出版社



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材



有限元 在金属塑性成形中的应用

张彦敏 张学宾 龚红英 主编
陈拂晓 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要论述了有限元在金属塑性成形中的应用及相关知识。具体内容包括：金属塑性成形塑性力学基础，弹塑性有限元理论基础及应用，板料冲压成形数值模拟，刚塑性有限元理论基础与应用，体积成形有限元数值模拟。

本书可供高校材料成型及控制工程专业与材料加工工程专业的本科生、研究生使用，也可供机械、造船等企业的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

有限元在金属塑性成形中的应用 / 张彦敏, 张学宾, 龚红英
主编. —北京: 化学工业出版社, 2010.7
(普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材)
ISBN 978-7-122-08807-9

I. 有… II. ①张… ②张… ③龚… III. 有限元法-应用-金属压力加工-塑性变形-高等学校-教材 IV. TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 107827 号

责任编辑: 彭喜英

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 郑捷

装帧设计: 周遥

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 294 千字 2010 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

序

材料成型及控制工程专业是 1998 年国家教育部进行专业调整时,在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业,其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”,以拓宽专业面,加强学科基础,培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同,也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如,一些研究型大学担负着精英教育的责任,以培养科学研究型和科学与工程复合型人才为主,学生毕业以后大部分攻读研究生,继续深造,因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任,以培养工程技术型、应用复合型人才为主,学生毕业以后大部分走向工作岗位,因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来;从人才市场来看,许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业学得少,而毕业后又不能接受继续教育,就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况,教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于 2008 年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》,共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划,按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成形及控制工程领域的基础理论和专业基础知识,具备解决材料成形及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力,具有创新精神,能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作,综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向,强化专业基础,具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”,针对第三类培养方案,按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与时俱进,在传统知识的基础上,注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容、学时、教学大纲的要求,突出重点、难点,力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨,提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业知识扎实、工程实践能力和创新能力强、综合素质高的材料成形及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任

李春峰

2010 年 4 月

前 言

金属塑性成形过程的仿真技术已成为模具 CAD/CAM/CAE 的核心技术之一,塑性有限元方法的计算机数值仿真技术在工业生产中越来越受到重视,基于此,将有限元数值模拟技术在金属塑性成形中的应用技术介绍给读者十分必要。

本书从塑性力学基础出发,介绍了板料成形有限元仿真技术、体积成形有限元仿真技术;在介绍两种分析方法的基本理论、公式推导和实施步骤的基础上,为了推动工程应用,列举了实例。

河南科技大学宋克兴负责第 1 章撰写,郭俊卿负责第 2 章的撰写,张彦敏负责第 3 章撰写,张学宾负责第 5、6 章的撰写,上海工程技术大学龚红英负责第 4 章的撰写。全书由张彦敏、张学宾负责统稿,陈拂晓主审。

作者水平有限,不当之处难免,欢迎读者不吝指正。

编 者
2010 年 5 月

普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材

编审委员会

主 任 李春峰

委 员 (按姓氏笔画排序)

王文先	王东坡	王成文	王志华	王惜宝	韦红余
龙文元	卢百平	田文彤	毕大森	刘 峰	刘雪梅
刘翠荣	齐芳娟	池成忠	许春香	杨立军	李 日
李云涛	李志勇	李金富	李春峰	李海鹏	吴志生
沈洪雷	张金山	张学宾	张柯柯	张彦敏	陈拂晓
陈茂爱	陈翠欣	林小娉	孟庆森	胡绳荪	秦国梁
高 军	郭俊卿	黄卫东	龚红英	焦永树	

目 录

第 1 章 绪论	1	3.1.1 简例-桁架结构分析	41
1.1 有限元方法的发展历史	1	3.1.2 有限元法解题步骤	44
1.1.1 板料成形有限元技术发展	2	3.2 线性问题有限元法	46
1.1.2 体积成形有限元技术发展	2	3.2.1 平面问题	46
1.2 有限元商业软件简介	3	3.2.2 轴对称问题	53
1.2.1 LS-DYNA	3	3.3 非线性问题有限元方法	56
1.2.2 Marc 软件	4	3.3.1 非线性问题概述	56
1.2.3 DEFORM 软件	5	3.3.2 材料本构关系	57
1.2.4 ABAQUS 软件	6	3.4 单元技术	65
1.2.5 PAM-STAMP 软件	7	3.4.1 单元种类	65
第 2 章 金属塑性成形塑性力学基础	9	3.4.2 单元划分技术	66
2.1 金属塑性变形问题	9	3.4.3 网格自适应优化方法	67
2.1.1 塑性变形的的基本形式	9	3.5 板料成形有限元方程求解算法	68
2.1.2 塑性及塑性指标	10	3.5.1 动态显式算法和静态隐式算法	68
2.1.3 影响塑性变形的主要因素	11	3.5.2 动态显式算法与静态隐式算法的 比较	71
2.2 求和约定与张量	14	3.6 材料模型	72
2.2.1 角标记号法	14	3.6.1 影响材料成形性能的因素	72
2.2.2 求和约定	14	3.6.2 材料的成形极限图	73
2.2.3 克氏符号 δ_{ij}	15	3.6.3 冲压成形 CAE 分析常用材料模型	75
2.2.4 张量	15	第 4 章 板料冲压成形数值模拟	77
2.3 应力分析与应变	16	4.1 板料冲压成形 CAE 分析的一般步骤	77
2.3.1 点的应力状态分析	16	4.2 DYNAFORM 软件的基本模块 主要功能	78
2.3.2 应力平衡方程	19	4.2.1 前置处理	78
2.3.3 应变与位移的关系	20	4.2.2 有限元求解计算	79
2.3.4 点的应变状态分析	23	4.2.3 后置处理	79
2.4 平面应力与平面应变问题	27	4.3 板料冲压成形缺陷	84
2.4.1 平面应力问题	28	4.4 成形极限图	85
2.4.2 平面应变问题	29	4.5 DYNAFORM 软件的 FLD 功能模块	87
2.5 屈服准则与应力应变关系	29	4.6 汽车零件的拉深成形数值模拟	88
2.5.1 弹性变形时应力应变关系	29	4.6.1 前置处理	88
2.5.2 Mises 屈服准则	30	4.6.2 快速设置	96
2.5.3 增量理论与全量理论	33	4.6.3 利用 ETA/Post 进行后处理分析	102
2.5.4 材料的真实应力应变曲线	36	4.7 管件的液压胀形成形数值模拟	105
第 3 章 弹塑性有限元理论基础及应用	41		
3.1 有限元基本方法	41		

4.7.1 进行 T 形管件液压成形模拟试验	105
4.7.2 自动设置	106
4.7.3 提交 LS-DYNA 求解器求解计算	109
4.7.4 后置处理	109
第 5 章 刚塑性有限元理论	
基础及应用	111
5.1 刚塑性变形问题	111
5.1.1 刚塑性变形的边值问题	111
5.1.2 Markov 变分原理	113
5.1.3 拉格朗日乘法	115
5.1.4 罚函数法	116
5.1.5 可压塑性法	117
5.2 刚塑性有限元	119
5.2.1 离散化	119
5.2.2 拉格朗日乘法求解式	121
5.2.3 罚函数法	122
5.3 平面问题和轴对称问题	123
5.3.1 二维单元	123
5.3.2 刚度方程	129
5.3.3 整体刚度方程	132
5.4 数值模拟关键技术	136
5.4.1 接触应力边界条件处理	136
5.4.2 速度约束条件的引入	138
5.4.3 初始状态速度场及刚性区	140

5.4.4 动态接触边界的自动处理技术	141
5.5 刚塑性有限元模拟分析步骤	145
5.5.1 增量变形分析方法	146
5.5.2 模拟分析步骤	147
第 6 章 体积成形有限元数值模拟	148
6.1 单元自适应技术	148
6.1.1 单元自适应加密技术	149
6.1.2 单元重划分	153
6.2 DEFORM 软件	160
6.2.1 简介	160
6.2.2 前处理	160
6.2.3 分析求解	163
6.2.4 后处理	164
6.3 锻造过程模拟实例	164
6.3.1 螺旋伞齿轮的锻造工艺	164
6.3.2 锻造过程前处理	165
6.3.3 进行模拟运算及后处理	172
6.4 滚压过程模拟实例	175
6.4.1 温滚压工艺	175
6.4.2 温滚压模拟方案设计	176
6.4.3 温滚压模拟过程	176
6.4.4 模拟结果与分析	178
参考文献	182

第 1 章 绪 论

1.1 有限元方法的发展历史

有限单元法（有限元法）最早可上溯到 20 世纪 40 年代。Courant 第一次应用定义在三角区域上的分片连续函数和最小位能原理来求解圣维南（St.Venant）扭转问题。现代有限元法的第一个成功的尝试是在 1956 年，Turner、Clough 等在分析飞机结构时，将钢架位移法推广应用于弹性力学平面问题，给出了用三角形单元求得平面应力问题的正确答案，故当时称为直接刚度法。1960 年，Clough 进一步处理了平面弹性问题，并第一次提出了“有限单元法”（finite element method, FEM），使人们认识到它的功效。1963 年，Melosh 认识到，有限元法的数学基础是变分原理，是一种基于变分原理的分片的 Ritz 法，这就奠定了有限元的数学理论基础。后来人们发现，早在 1943 年，Courant 就曾采用变分原理和分片插值的方法求解了圣维南扭转问题，只是由于当时计算机尚未出现，Courant 的论文未能得到重视。我国学者曾在这一方面做出过杰出贡献，胡海昌于 1954 年提出了后来称为 Hu-Washizu 变分原理的三类变量弹性力学广义变分原理，该变分原理是多变量有限元的理论基础。冯康于 1965 年提出了基于变分原理的差分格式，实质上就是有限元方法。遗憾的是，限于当时的学术交流环境，这两篇论文均只在国内发表，当时未能引起国际同行注意。我国著名力学家、教育家徐芝纶院士（河海大学教授）首次将有限元法引入我国，对它的应用起了很大的推动作用。

早期的有限元法建立在虚功原理和最小势能原理基础上，随着认识的加深，各国学者们建立了基于不同变分原理的有限元法。从 20 世纪 70 年代到 80 年代中期，有限元法向着深度和广度发展，有限元基本理论和方法已发展成熟，有限元分析方法从最早的结构化矩阵分析，逐步推广到板、壳、实体等连续体固体力学分析。随后的研究致力于高精度单元、板壳单元、非线性问题的迭代求解方法、适用于新型材料的有限元法、多尺度有限元法和多场耦合等问题的研究。近年来有限元法已经发展到流体力学、温度场、电传导、磁场、渗流和声场等问题的求解计算，以及求解一些交叉学科的问题。

从 20 世纪 80 年代后半期到现在，一方面，在理论上，随着科学技术的发展，线性理论已经远远不能满足设计的要求，例如建筑行业的高层建筑和大跨度旋索桥的出现，就要求考虑结构的大位移和大应变等几何非线性问题；航天和动力工程的高温部件存在热变形和热应力，也要考虑材料的非线性问题；塑料、橡胶和复合材料等各种新型材料的出现，仅线性计算理论已经不足以解决遇到的问题，只有采用非线性有限元法才能解决。在有限元的传统领域固体力学中，非线性有限元逐渐成熟，同时在其他领域，比如压电分析、电磁场分析方面也取得了长足的进展。另一方面，随着计算机技术的发展和软件工程的兴起，大型商用有限元软件在更好的人机界面、更强的分析功能、更直观结果的显示方面取得了长足的进步，并日益和计算机辅助设计（CAD）软件集成在一起，给工程设计带来巨大的变革。为了提高有限元解决实际工程问题的效率，前置建模及网格划分和后置数据处理已经越来越受到重视。工程师在分析计算一个工程问题时，有 80% 以上的精力会花在数据准备和结果分析上。在强调

可视化的今天，有无前后处理，已经成为有限元程序评价的重要标准。

1.1.1 板料成形有限元技术发展

板料成形的计算机辅助过程分析仿真是 20 世纪后期对于金属成形最具重大意义的技术进步之一。以有限元法为基础的板料成形过程计算机仿真技术或数值模拟技术，为模具设计、工艺过程设计及工艺参数优化提供了科学的新途径，已成为解决复杂成形过程设计和模具设计的最有效手段，是传统的成形工艺过程从“经验型”转变为“科学型”的重要标志。

有限元法在板料成形领域的应用始于 20 世纪 70 年代，1977 年美国通用汽车公司召开了金属板材成形力学分析的专门研讨会，S.Kobayashi 和 N.M.Wang 发表了两篇关于板材成形有限元数值模拟的文章，分别采用刚塑性有限元方法和弹黏塑性全拉格朗日有限元法分析了半球拉延、半球胀形以及液压胀形等简单成形问题。这两篇文章被认为是开创了板材成形有限元数值模拟的先河。自此，这一领域的研究主要沿着这两篇文章开创的道路发展起来。早期研究主要集中于比较简单的成形模拟，还没有人能够完满地模拟一般的三维板材成形，即使二维成形模拟结果也缺乏一致性。

1988 年，板料成形数值模拟在实用性方面取得了较大的进步。日本的 E.Nakamachi 和本田公司的工程师们，用弹塑性薄膜单元和模具的 CAD 表面数据分析了一个单工序的冲压成形过程，而在这之前，在有限元模拟系统和 CAD 系统之间还没有一个交互界面。与此同时，美国的 S.C.Tang 用弹塑性壳元方法分析了车门板的成形过程。1989 年在 NUMIFORM' 89 会议上，A.Honecker 和 K.Mattiasion 给出了油箱成形过程的数值模拟结果，它详细给出了成形过程中可能出现的起皱情况，引起了工程界较强的兴趣。在这次会议上，也出现了动态显示的有限元程序 DYNA-3D。DYNA-3D 程序的分析结果促进了有限元模拟领域中研究人员和工程师独立开发或在商业软件的平台开发实际成形过程数值模拟软件。1990~1991 年，S.C.Tang、E.Nakamachi 等都采用了独立开发的有限元软件分析了车门板的成形过程。从 1991 年开始，ABAQUS-EXPLICIT、RADIOS，以及以 DYNA3D 核心代码为平台的一批商用有限元软件如 PAM-STAMP、OPTRIS、LS-DYNA3D、DYNAFORM 等动力显式程序开始用于分析汽车门板类零件的成形过程。

随着板料成形有限元数值模拟研究的发展，大量的研究工作不断在有关国际会议和有关刊物上发表。为了促进板料成形模拟技术的研究和应用，国际上发起了定期召开的国际板料成形数值模拟会议（International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3-D Sheet Forming Processes），简称 NUMISHEET，迄今已举行过七届。会议的内容除一般论文的发表外，还有统一研究课题的模拟计算与实验对比，旨在对现有的板料成形有限元模拟软件的模拟能力进行验证，并为其进一步开发提供一个标准。所有实验材料和模拟计算的依据都由会议组织者统一提供，保证数据之间具有可比性，同时所有的参加者均相互独立且事先不知结果，保证数据的真实性。由于该会议具有很强的前瞻性和权威性，因此吸引了大批板料成形研究机构和软件开发商参加，成为汇集当前板料成形数值模拟最新研究成果的权威性会议。1991 年以来的研究进展可以由 NUMISHEET 会议论文发表情况、不同期间统一研究课题的复杂程度以及不同参研者递交会议的计算结果的比较清楚地看出。

1.1.2 体积成形有限元技术发展

金属体积成形是塑性加工中一类十分重要的成形方法，其成形过程的数值模拟一直是塑

性有限元的研究重点。金属体积成形过程属于几何非线性和物理非线性的大变形问题，传统的解析法，如主应力法（切块法）、上限元法（UBET）、均匀变形能法、滑移线法、流函数法及 Hill 的一般解法等由于数学上的困难或作了过多的假设使其所能求解问题的范围和难度等都极为有限，难以准确分析实际生产中复杂的体积成形过程。

R.Hiu 开创了大变形的理论基础研究，S.Kobayashi 和 C.H.Lee 于 20 世纪 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形问题，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。

O.C.Zienkiewicz 等最先把刚黏塑性有限元应用于求解塑性成形过程，20 世纪 80 年代中期，二维问题的一些关键处理技术，如：对任意曲线边界的动态接触法处理、剪切摩擦模型的建立等逐渐完善，从而使刚（黏）塑性有限元可应用于金属件的反向模拟和粉末多孔材料的成形分析。到 90 年代初，二维四边形网格全自动化生成算法逐步成熟，出现了 FORGE2，DEFORM，MARC/Autoforge，ABAQUS，MSC/Superforge，ALIPID 等处理二维问题的商品化软件，已成功地应用于实际生产中。

随着计算机运算速度的大幅度提高和存储量的大大增加，三维体积成形问题的有限元模拟技术逐渐在复杂体积成形过程与仿真中显示出了其优势，尤其是三维接触问题的解决和三维网格再划分技术的日渐成熟使三维刚黏塑性有限元仿真技术已在三维锻造、挤压、轧制、旋压等方面得到了成功的应用。目前具有代表性的大型体积成形仿真系统有美国的 DEFORM 和 AUTO-FORGE，法国的 FORGE。研究内容由单一分散的模拟转向耦合集成的模拟，如流场与温度场的耦合、温度场与应力应变场的耦合、温度场与组织场的耦合、应力 / 应变场与组织场的耦合分析等；由共性通用型的模拟转向特性专用型的模拟，如特种加工工艺、缺陷机理及消除等。近期的研究主要集中在以下几个方面：边界条件和材料流动应力的准确描述；成形过程的优化；反向模拟技术；动态网格划分与重划及自适应网格的划分；预测微观组织结构的演化；误差估计；并行环境下与生产系统其他技术的集成；无网格技术等。

1.2 有限元商业软件简介

1.2.1 LS-DYNA

LS-DYNA 是美国 Livemore Software Technology Corporation (LSTC) 公司的产品。作为世界上最著名的通用显式动力分析程序，能够模拟出真实世界的各种复杂问题，特别适合求解各种非线性的高速碰撞、爆炸和金属成形等非线性动力冲击问题。目前，LS-DYNA 已经被应用到诸如汽车碰撞、驾驶安全、水下爆炸及钣金成形等许多领域。ETA/DYNAFORM 是由美国工程技术联合公司开发的一个基于 LS-DYNA 的板料成形模拟软件包，采用 Livermore 软件技术公司 (LSTC) 开发提供的 LS-DYNA 求解器。作为一款专业的 CAE 软件，DYNAFORM 综合了 LS-DYNA 960、970 的强大分析功能以及自身强大的流线型前后处理功能。它主要应用于板料成形工业中模具的设计和开发，可以帮助模具设计人员显著减少模具开发设计时间和试模周期，不但具有良好的使用性，而且包括了大量的智能化工具，可方便地求解各类板料成形问题。同时，DYNAFORM 也最大限度地发挥了传统 CAE 技术的作

用,减少了产品开发的成本和周期。

在板料成形过程中,一般来说模具开发周期的瓶颈往往是对模具设计的周期很难把握。然而,ETA/DYNAFORM 恰恰解决了这个问题,它能够对整个模具开发过程进行模拟,因此也就大大减少了模具的调试时间和降低了生产高质量覆盖件和其他冲压件的成本,并且能够有效地模拟模具成形过程中4个主要工艺过程,包括压边、拉延、回弹和多工步成形。这些模拟让工程师能够在设计周期的早期阶段对产品设计的可行性进行分析。

ETA/DYNAFORM 具有良好的工具表面数据特征,因此可以较好地预测覆盖件冲压成形过程中板料的破裂、起皱、减薄、划痕、回弹,评估板料的成形性能,从而为板成形工艺及模具设计提供帮助。

ETA/DYNAFORM 几乎可以运行于所有的 UNIX 工作站平台上,包括:DEC(Alpha), HP, IBM, SUN 和 SGI,同时在微机上对 Windows NT 及以上版本也支持得很好。

在 ETA/DYNAFORM 5.1 的基础上,模面工程(DFE)模块大大地增强了设计工艺补充的功能,使用户只需要在 DFE 模块中,无需要借助任何其他工具就可以实现从零件几何形状开始到最后设计出整个模具的过程。大大地满足用户对模具设计的要求。

1.2.2 Marc 软件

MSC.Marc 是功能齐全的高级非线性有限元软件,具有极强的结构分析能力。可以处理各种线性和非线性结构分析,包括:线性/非线性静力分析、模态分析、响应分析、频谱分析、随机振动分析、动力响应分析、自动的静/动力接触、屈曲/失稳、失效和破坏分析等。为满足工业界和学术界的各种需求,提供了层次丰富、适应性强、能够在多种硬件平台上运行的系列产品。

MSC.Marc 包括如下模块。

(1) MSC.Marc/MENTAT MENTAT 是 Marc 的前后处理图形对话界面。两者严密整合的 MSC.Marc/MENTAT 成为解决复杂工程问题,完成学术研究的高级通用有限元软件。

MENTAT 是新一代非线性有限元分析的前后处理图形交互界面,与 Marc 求解器无缝连接。它具有以 ACIS 为内核的一流实体造型功能;全自动二维三角形和四边形、三维四面体和六面体网格自动划分建模能力;直观灵活的多种材料模型定义和边界条件的定义功能;分析过程控制定义和递交分析、自动检查分析模型完整性的功能;实时监控分析功能;方便的可视化处理计算结果能力;并可直接访问常用的 CAD/CAE 系统,如 ACIS、AutoCAD、IGES、MSC.Nastran、MSC.Patran、Unigraphics、Catia、Solidwork、SolidEdge、IDEAS、VDAFS、Pro/Engineer、ABAQUS、ANSYS、PSTEP 等。

(2) MSC.Marc MSC.Marc 是功能齐全的高级非线性有限元软件的求解器,它具有极强的结构分析能力。它提供了丰富的结构单元、连续单元和特殊单元的单元库,几乎每种单元都具有处理大变形几何非线性、材料非线性和包括接触在内的边界条件非线性以及组合的高度非线性的超强能力。Marc 的结构分析材料库提供了模拟金属、非金属、聚合物、岩土、复合材料等多种线性和非线性复杂材料行为的材料模型。分析采用具有高数值稳定性、高精度和快速收敛的高度非线性问题求解技术。为了进一步提高计算精度和分析效率, Marc 软件提供了多种功能强大的加载步长自适应控制技术,自动确定分析屈曲、蠕变、热弹塑性和动力响应的加载步长。此外, Marc 支持全自动二维网格和三维网格重划,用以纠正过度变形后产

生的网格畸变，确保大变形分析的继续进行。

(3) MSC.Marc/HEXMESH MSC 公司新近推出的六面体网格自动划分模块 MSC.Marc/HEXMESH 代表了网格划分技术的最新突破。可将任意三维块状实体几何快速准确地自动划分出几何形态良好的六面体单元。通过实施内部稀疏网格向表面密集网格的过渡，能够有效地减少单元总数，同时又保证了表面可能的应力集中区域所需的网格密度。而疏密网格过渡的位移协调，则通过自动施加多点约束实现。MSC.Marc/HEXMESH 与 MENTAT 前后处理器完全集成，能够在 MENTAT 环境下对由 MENTAT 生成的实体或通过 CAD 接口传入的由其他 CAD 造型的实体几何进行自动的六面体网格划分，并定义和实施各种非线性有限元分析。MSC.Marc/HEXMESH 的问世，为快速有效地建立复杂实体的高质量有限元分析模型开辟了一条捷径。

(4) MSC.Marc/AutoForge MSC.Marc/AutoForge 是采用 20 世纪 90 年代最先进有限元网格和求解技术，快速模拟各种冷热锻造、挤压、轧制以及多步锻造等体积成形过程的工艺分析专用软件。它综合了 MSC.Marc/MENTAT 通用分析软件求解器和前后处理器的精髓，以及全自动二维四边形网格和三维六面体网格自适应和重划分技术，实现对具有高度组合的非线性体积成形过程的全自动数值模拟。其图形界面采用工艺工程师的常用术语，容易理解，便于运用。MSC.Marc/AutoForge 提供了大量实用材料数据以供选用，用户也能够自行创建材料数据库备用。利用 MSC.Marc/AutoForge 提供的结构分析功能，可对加工后的包含残余应力的工件进行进一步的结构分析，模拟加工产品在后续的运行过程中的性能，有助于改进产品加工工艺或其未来的运行环境。此外，作为体积成形分析的专用软件，MSC.Marc/AutoForge 为满足特殊用户的二次开发需求，提供了友好的用户开发环境。

(5) MSC.Marc/Link MSC.Marc/Link 是 Marc 高级有限元分析软件与 SDRC I-DEAS、Pro/ENGINEER、CATIA 等一系列著名 CAD/CAE 软件的集成界面。通过这种强强集成，使大量 SDRC I-DEAS、Pro/ENGINEER、CATIA 软件的忠实用户，借助 Marc 软件支持的高级非线性分析功能，轻松跨越原有 CAE 软件处理线性或简单非线性问题分析的局限，将分析延伸和扩展到各种组合的复杂非线性问题。

1.2.3 DEFORM 软件

DEFORM 是一套基于有限元的工艺仿真系统，用于分析金属成形及其相关工业的各种成形工艺和热处理工艺。通过在计算机上模拟整个加工过程，帮助工程师和设计人员设计工具和产品工艺流程，减少昂贵的现场试验成本；提高工模具设计效率，降低生产和材料成本；缩短新产品的研究开发周期。

DEFORM 功能主要有以下几个方面。

(1) 成形分析 冷、温、热锻的成形和热传导耦合分析 (DEFORM 所有产品)。丰富的材料数据库，包括各种钢、铝合金、钛合金和超合金 (DEFORM 所有产品)。用户自定义材料数据库允许用户自行输入材料数据库中没有的材料 (DEFORM 所有产品)。

提供材料流动、模具充填、成形载荷、模具应力、纤维流向、缺陷形成和韧性破裂等信息 (DEFORM 所有产品)。刚性、弹性和热黏塑性材料模型，特别适用于大变形成形分析 (DEFORM 所有产品)。弹塑性材料模型适用于分析残余应力和回弹问题 (DEFORM-Pro, 2D, 3D)。烧结体材料模型适用于分析粉末冶金成形 (DEFORM-Pro, 2D, 3D)。完整的成形设备模型可以分析液压成形、锤上成形、螺旋压力成形和机械压力成形 (DEFORM 所有产品)。

用户自定义子函数允许用户定义自己的材料模型、压力模型、破裂准则和其他函数(DEFORM-2D, 3D)。网格划线(DEFORM-2D, PC, Pro)和质点跟踪(DEFORM 所有产品)可以分析材料内部的流动信息及各种场量分布。温度、应变、应力、损伤及其他场变量等直线的绘制使后处理简单明了(DEFORM 所有产品)。自我接触条件及完美的网格再划分使得在成形过程中即便形成了缺陷,模拟也可以进行到底(DEFORM-2D, Pro)。多变形体模型允许分析多个成形工件或耦合分析模具应力(DEFORM-2D, Pro, 3D)。基于损伤因子的裂纹萌生及扩展模型可以分析剪切、冲裁和机加工过程(DEFORM-2D)。

(2) 热处理分析 模拟正火、退火、淬火、回火、渗碳等工艺过程,预测硬度、晶粒组织成分、扭曲和含碳量。可以输入顶端淬火数据来预测最终产品的硬度分布,并分析各种材料晶相。

(3) 综合分析 DEFORM 用来分析变形、传热、热处理、相变和扩散之间复杂的相互作用。拥有相应的模块以后,这些耦合效应将包括:由于塑性变形功引起的升温、加热软化、相变控制温度、相变内能、相变塑性、相变应变、应力对相变的影响以及含碳量对各种材料属性产生的影响等。

1.2.4 ABAQUS 软件

ABAQUS 是美国 ABAQUS 公司研发的一套功能强大的工程模拟有限元软件,其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。ABAQUS 包括一个丰富的、可模拟任意几何形状的单元库。并拥有各种类型的材料模型库,可以模拟典型工程材料的性能,其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩超弹性泡沫材料以及土壤和岩石等地质材料。作为通用的模拟工具,ABAQUS 除了能解决大量结构(应力/位移)问题,还可以模拟其他工程领域的许多问题,例如热传导、质量扩散、热电耦合分析、声学分析、岩土力学分析(流体渗透/应力耦合分析)及压电介质分析。

ABAQUS 为用户提供了广泛的功能,且使用起来又非常简单。大量的复杂问题可以通过选项块的不同组合很容易地模拟出来。例如,对于复杂多构件问题的模拟是通过把定义每一构件的几何尺寸的选项块与相应的材料性质选项块结合起来。在大部分模拟中,甚至高度非线性问题,用户只需提供一些工程数据,像结构的几何形状、材料性质、边界条件及载荷工况。在一个非线性分析中,ABAQUS 能自动选择相应载荷增量和收敛限度。不仅能够选择合适参数,而且能连续调节参数以保证在分析过程中有效地得到精确解。用户通过准确的定义参数就能很好地控制数值计算结果。

ABAQUS 有两个主求解器模块——ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit。ABAQUS 还包含一个全面支持求解器的图形用户界面,即人机交互前后处理模块——ABAQUS/CAE。ABAQUS 对某些特殊问题还提供了专用模块来加以解决。

ABAQUS 被广泛地认为是功能最强的有限元软件,可以分析复杂的固体力学、结构力学系统,特别是能够驾驭非常庞大复杂的问题和模拟高度非线性问题。ABAQUS 不但可以做单一零件的力学和多物理场的分析,同时还可以做系统级的分析和研究。ABAQUS 的系统级分析的特点相对于其他的分析软件来说是独一无二的。由于 ABAQUS 优秀的分析能力和模拟复杂系统的可靠性使得 ABAQUS 被各国的工业和研究所广泛地采用。ABAQUS 产品在大量的高科技产品研究中都发挥着巨大的作用。

综合起来,ABAQUS 软件具有以下特点。

- ① 更多的单元种类，单元种类达 433 种，提供了更多的选择余地，并更能深入反映细微的结构现象和现象间的差别。除常规结构外，可以方便地模拟管道、接头以及纤维加强结构等实际结构的力学行为。
- ② 更多的材料模型，包括材料的本构关系和失效准则等，仅橡胶材料模型就达 16 种。除常规的金属材料外，还可以有效地模拟复合材料、土壤、塑性材料和高温蠕变材料等特殊材料。
- ③ 更多的接触和连接类型，可以是硬接触或软接触，也可以是 Hertz 接触（小滑动接触）或有限滑动接触，还可以双面接触或自接触。接触面还可以考虑摩擦和阻尼的情况，提供了方便地模拟密封、挤压、铰连接等工程实际结构的手段。
- ④ ABAQUS 的疲劳和断裂分析功能，概括了多种断裂失效准则，对分析断裂力学和裂纹扩展问题非常有效。

1.2.5 PAM-STAMP 软件

PAM-STAMP 是法国 ESI 公司开发的软件产品。迄今为止，PAM-STAMP 2G 是世界上唯一整合了所有钣金成形过程的有限元计算机模拟求解方案，能够完成从模具设计的可行性、快速模面生成与修改、钣金冲压过程快速成形模拟、成形精确模拟、回弹预测、回弹自动补偿功能以及回弹后模具型面的输出等功能为一身。PAM-STAMP 2G 的软件主要模块组成及功能见表 1-1 所列。

表 1-1 PAM-STAMP 2G 的软件主要模块组成及功能

组 成	功 能
PAM-DIEMAKER 模具设计模块	用于快速设计模具几何型面
PAM-AUTOSTAMP 精确模拟，成形质量控制模块	用于钣金成形过程精确模拟问题
DIE COMPENSATION 和 ICAPP 成形回弹自动补偿模块	用于解决自动回弹补偿问题，输出进行回弹补偿后的模具的几何模型
PAM-INVERSE 反算毛坯模块	用于反算实际成形生产过程中毛料估计问题
PAM-QUICKSTAMP 快速成形评估模块	用于模具的快速成形性分析和快速可行性分析问题
PAM-TFA for CATIA 成形性分析模块	用于 CATIA 集成环境下的零件的快速成形性分析和可行性分析以及 CATIA 的 Native 文件和 PAM-STAMP 2G 接口程序
PAM-DIEMAKER for CATIA CATIA 集成环境下模具设计模块	用于 CATIA 集成环境下的模具几何型面快速设计工具

- (1) PAM-DIEMAKER——快速模具设计 从 CAD 模型输入零件几何参数后，高度参数化驱动的 PAM-DIEMAKER 能够在几分钟内完成模面和工艺补充面的设计与优化。它能快速地通过参数迭代的方法获得实际的仿真模型，并快速地分析判断零件有无过切（负角）和计算出最佳的冲压方向，然后非常简单地对模面和工艺补充面的几何形状进行修改，能够参数化地完成所有前期模具设计的控制，例如多步成形模具和多零件组合型模具设计。
- (2) PAM-AUTOSTAMP——成形质量控制 PAM-AUTOSTAMP 是一种基于材料物理学，对金属成形过程进行精确预测的软件。PAM-AUTOSTAMP 能提供金属成形过程的工业

验证和可信的仿真，从而满足工程上的需求。

PAM-AUTOSTAMP 使用独特的技术，使用户可以简便快捷地建立对复杂的多工序成形过程的单一仿真模拟模型，配合先进的可扩展求解器技术，可以最大程度地利用最新的计算机硬件资源，提供详细的仿真结果，以解决裂口、褶皱等有关成形性能的验证问题。更突出的是，能够对一些精细的问题给出解答，例如滑移线、表面缺陷等。充分考虑了成形过程中的速度、温度、表面摩擦、压料力、冲床刚度等各种因素的影响，对预测成形过程中的材料流动、起皱、破裂和回弹等具有非常高的精度。采用的自动切边、隐式解法计算回弹、快速预压、抽象压延筋模型、成形零件刚度分析等辅助功能大大增强了软件的适用性，实现了软件模拟与实际成形的无缝贯通。

(3) **DIE COMPENSATION** 和 **ICAPP**——成形回弹自动补偿 模具回弹补偿过程是基于零件设计要求形状的虚拟修模迭代过程。它是先按照零件的设计要求形状设计出初始模具形状，经过有限元离散后输入专业板料成形数值模拟软件 **PAM-STAMP 2G** 中，经过成形模拟和回弹计算分析，获得了板料成形回弹后形状。将板料成形回弹前后形状和初始模具形状输入 **PAM-STAMP 2G** 中 **DIE COMPENSATION** 模块，软件将进行模具回弹自动补偿，得到模具修正后模具形状；然后将回弹补偿后的模具进行成形模拟和回弹计算分析，将得到零件回弹计算后的形状与设计要求形状进行比较，判断两者的几何形状误差是否满足设计误差要求。若满足设计误差要求，输出模具回弹补偿结果；若不满足设计误差要求，软件重新进行回弹自动补偿循环，直到得到符合设计误差要求的最好的模具回弹补偿结果。**DIE COMPENSATION** 和 **ICAPP** 进行自动回弹补偿功能非常强大，无须人为干预，回弹补偿过程自动完成，**DIE COMPENSATION** 和 **ICAPP** 使用方法简单，是以目标为导向的软件工具。

(4) **PAM-INVERSE**——下料估计 下料估计主要采用 **PAM-INVERSE** 来完成，它采用一步成形逆算法，计算速度很快，可以准确预测板料的初始形状，同时也间接说明零件的可成形性和可行性。

(5) **PAM-QUIKSTAMP**——快速可行性评估 **PAM-QUIKSTAMP** 是快速成形模拟工具，一般在数分钟内即可完成一个模具快速成形分析，可用于设计早期可行性评估。

PAM-QUIKSTAMP 是在数分钟内完成模具设计可行性评估最合适的工具，对于复杂部件也是如此。一旦模具设计生成后，或者通过 **PAM-DIEMAKER** 或任何其他 CAD 系统，工程师需要通过评估不同模具几何参数检查成形性，例如压料面和工艺补充面。而且，诸如板料形状、压延筋尺寸、定位和材料属性等过程参数需要进行评估。**PAM-QUIKSTAMP** 通过消除明显的差的设计选择，使得在设计过程的早期进行设计决策成为可能。

(6) **PAM-TFA for CATIA**——**CATIA** 集成环境下的快速成形性分析 **PAM-TFA for CATIA** 可以完成在 **CATIA** 集成环境下的零件的快速成形性分析和可行性分析，分析零件是否可以成形出来，有没有大的破裂和起皱，初步检验设计是否有问题。

(7) **PAM-DIEMAKER for CATIA**——**CATIA** 集成环境下的模具型面快速设计 主要完成 **CATIA** 集成环境下快速模具设计。高度参数化驱动的 **PAM-DIEMAKER for CATIA** 能够让您在几分钟内完成模面和工艺补充面的设计与优化。它能快速地通过参数迭代的方法获得实际的仿真模型，并快速地分析判断零件有无过切（负角）和计算出最佳的冲压方向，然后非常简单地对模面和工艺补充面的几何形状进行修改，能够参数化地完成所有前期模具设计的控制。

第2章 金属塑性成形塑性力学基础

金属在外力作用下由弹性状态进入塑性状态,研究金属在塑性状态下的力学行为称为塑性理论或塑性力学,它是连续介质力学的一个分支。为简化研究过程、建立理论公式,在研究塑性力学行为时,通常采用以下基本假设。

(1) 连续性假设 变形体内均由连续介质组成,即整个变形体内不存在任何空隙,应力、应变、位移等物理量都是连续变化的,可化为坐标的连续函数。

(2) 匀质性假设 变形体内各质点的组织、化学成分都是均匀而且是相同的,即各质点的物理性能均相同,且不随坐标的改变而变化。

(3) 各向同性假设 变形体内各质点在各方向上的物理性能、力学性能均相同,也不随坐标的改变而变化。

(4) 初应力为零 物体在受外力之前是处于自然平衡状态,即物体变形时内部所产生的应力仅是由外力引起的。

(5) 体积力为零 体积力如重力、磁力、惯性力等与面力相比是十分微小,可忽略不计。

(6) 体积不变假设 物体在塑性变形前后的体积不变。

在塑性理论中,分析问题需要从静力学、几何学和物理学等角度来考虑。静力学角度是从变形体中质点的应力分析出发,根据静力平衡条件导出应力平衡微分方程;几何角度是根据变形体的连续性和匀质性假设,用几何的方法导出小应变几何方程;物理学角度是根据实验和基本假设导出变形体内应力与应变之间的关系式,即本构方程。此外,还要建立变形体由弹性进入塑性状态并使继续进行塑性变形时所具备的力学条件,即屈服准则。这些塑性变形的力学基础是本章的主要内容,也是研究塑性成形力学问题的基础理论。

2.1 金属塑性变形问题

2.1.1 塑性变形的基本形式

塑性成形所用的金属材料绝大部分是多晶体,其变形过程与多晶体的结构特点有关。多晶体金属的塑性变形包括晶粒内部变形(亦称晶内变形)和晶界变形(亦称晶间变形)两种,下面分别简要介绍其变形机理。

2.1.1.1 晶内变形

晶内变形的的主要方式是滑移和孪生,其中滑移变形是主要的,而孪生变形是次要的,一般仅起调节作用。但在体心立方金属,特别是密排六方金属中,孪生变形也起着重要作用。

(1) 滑移 所谓滑移是指晶体(此处可理解为单晶体或构成多晶体中的一个晶粒)在力的作用下,晶体的一部分沿一定的晶面和晶向相对于晶体的另一部分发生相对移动或切变。这些晶面和晶向分别称为滑移面和滑移方向。滑移的结果使大量原子逐步地从一个稳定位置移到另一个稳定位置,从而产生宏观的塑性变形。

(2) 孪生 孪生是晶体在切应力作用下,晶体的一部分沿着一定的晶面(称为孪生面)