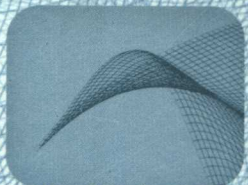
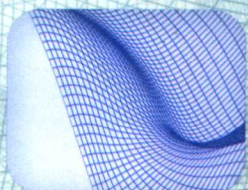
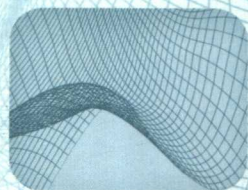
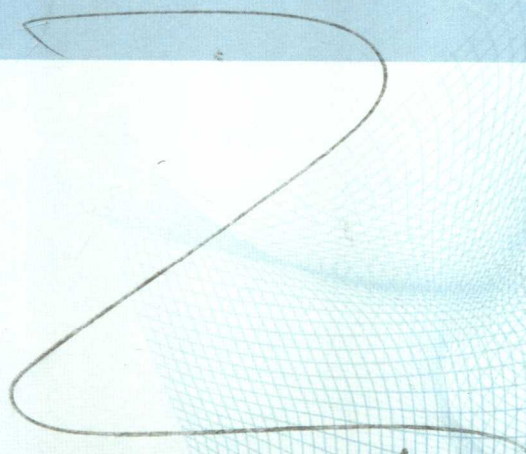


金属塑性成形的 有限元模拟技术及应用

谢水生 李 雷 著



科学出版社
www.sciencep.com

作者简介



谢水生 1944年生,江西赣州人。现任北京有色金属研究总院教授、博士生导师,有色金属材料制备加工国家重点实验室总工程师。1986年于清华大学获得工学博士学位。现兼任中国有色金属学会理事、合金加工学术委员会主任,北京市机械工程学会理事、压力加工分会主任,中国机械工程学会塑性工程分会理事、半固态加工学术委员会副主任,中国核学会核材料专业学会常务理事,国际半固态科学委员会委员,《稀有金属》、《塑性工程学报》、《锻压技术》、《有色金属再生与应用》

期刊编委,南昌大学、燕山大学、江西理工大学、河南理工大学兼职教授。

长期从事有色金属材料制备加工技术研究,主持国家“863”高技术研究课题7项、国家自然科学基金项目8项、国家科技攻关课题8项和国际合作项目多项,获部级一等奖1项、二等奖3项,三、四等奖多项,国家专利14项;在国内外刊物上发表论文160余篇,出版《金属塑性成形理论》、《金属塑性成形工步的有限元数值模拟》、《半固态金属加工技术及其应用》、《金属塑性成形的试验方法》、《铝合金材料的应用与技术开发》、《铝加工问答500问》、《金属半固态加工技术》、《镁合金制备及加工技术》等,组织《铝加工技术实用手册》的编写工作,参加《有色金属手册》、《中国材料百科全书》和《材料科学与工程手册》的编写工作。

有关作者的详细情况可参见网址(博士研究生导师介绍): <http://cmpskl.labs.gov.cn>



李雷 1975年4月生,山西原平人。2003年于中国科学技术大学获工学博士学位,现于海亮集团从事企业博士后研究。副教授、硕士生导师,河南理工大学青年骨干教师,国际计算力学学会会员。发表论文30余篇,其中SCI、EI收录15篇。作为主要参与者,完成国家自然科学基金研究项目4项,国家“863”高技术课题2项;目前主持国家科技支撑计划项目子课题1项。主要研究方向为金属塑性加工技术、铜合金加工技术以及金属成形数值模拟技术。

ISBN 978-7-03-021360-0



9 787030 213600 >

定价: 40.00 元

TG301/15

2008

金属塑性成形的有限元 模拟技术及应用

谢水生 李 雷 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是讲述金属塑性成形的有限元模拟技术及应用的一本专著。

全书分 15 章,分别介绍了:有限单元法的发展、在塑性成形中的应用及常用商业软件;有限元法的数学理论基础;有限元的一般实施步骤;常用平面和空间单元的构造方法;等参单元的构造方法;常用板单元的构造方法;高性能的非协调单元;小变形弹塑性有限元法;刚塑性有限元法;粘塑性有限元法;弹塑性有限变形的有限元法;塑性加工过程的传热问题;数值模拟塑性成形的应用实例;微塑性成形中尺度效应的数值模拟;无网格法在塑性成形模拟中的应用。

本书可作为金属塑性成形专业的本科和研究生专业课教材,也可供从事材料加工工程及相关专业的科研工作者、技术人员以及相关工程技术人员及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性成形的有限元模拟技术及应用/谢水生,李雷著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021360-0

I. 金… II. ①谢… ②李… III. 金属压力加工-塑性变形-有限元法 IV. TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 033268 号

责任编辑:童安齐 任加林 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 3 月第一次印刷 印张:19

印数:1—2 500 字数:365 400

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BZ08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

金属塑性成形是机械制造业的重要材料加工方法之一,金属塑性成形(常称为打铁)迄今已有几千年历史。早期的生产主要依靠工人的技术和经验,从 20 世纪 50 年代开始逐步发展到进行理论分析和试验研究金属的变形规律。最初的理论分析方法有:初等分析法、滑移线场理论和上限分析法等。同时也开展了试验研究,主要有:网格法、视塑性法、密栅云纹法等。因塑性成形过程影响因素复杂和非线性,上述方法都各有其优点和局限性。随着计算机的兴起以及 20 世纪 70 年代塑性有限元法的发展,塑性成形学科取得了突破性进展,很多塑性成形技术中的难题都迎刃而解。目前,塑性成形的有限元数值模拟(仿真),既能直观地描述塑性成形工步的金属变形(流动)状态,又能定量地计算出塑性变形区的应力、应变和温度分布状态,为制订和优化工艺、开发新工艺、设计模具型腔和结构、分析产品质量问题提供了科学的依据。同时,也缩短了生产周期,提高了经济效益。

本书第一作者从 1981 年开始从事有限元方法在金属塑性成形加工中的应用研究,1983 年协助导师王祖唐教授承担了中科院自然科学基金项目“有限元法在塑性加工中的应用研究”;1989 年承担《金属塑性成形理论》一书中“塑性成形理论的有限元”部分的撰写工作;并于 1997 年与王祖唐教授合著《金属塑性成形工步的有限元数值模拟》一书。该书受到广大读者的喜爱,被不少高等院校作为本科生、研究生的教材。该书在 2007 年北京大学图书馆“中文图书评价研究”初评中,列入已统计的 1036 部有关“金属压力加工”图书的前 5%行列。

近 20 年来,随着计算机技术发展迅猛,有限元技术也如鱼得水,走向发展的快车道,而许多商业软件不断的问世,进一步促进了数值模拟技术的发展。由于数值模拟技术的发展,数值模拟技术在金属塑性成形中的应用也越来越广泛。本书将近十年的新发展和新应用进一步向读者介绍,为有兴趣的读者提供一些有限元的基础理论知识,为读者进行进一步应用和进行软件开发提供一些有益的帮助。

本书共 15 章,第 1 章介绍了有限单元法的发展历史及有限元在塑性成形中应用历史,并介绍了常用的商业有限元软件;第 2 章介绍了有限元法的数学理论基础——变分原理;第 3 章介绍了有限元的基本思想和一般实施步骤,使读者对有限元方法有一个初步认识;第 4 章介绍了常用的平面和空间单元的构造方法;第 5 章介绍了工程中最常用的一类单元——等参单元的原理及构造方法;第 6 章介绍了常用板单元的构造方法;第 7 章介绍了高性能的非协调单元;前 7 章介绍的是线弹

性有限元方法,是非线性有限元分析的基础。第 8 章介绍了小变形弹塑性有限元法;第 9 章介绍了塑性成形模拟中常用的刚塑性有限元法;第 10 章介绍了粘塑性有限元法;第 11 章为弹塑性有限变形的有限元法基本方程;第 12 章为塑性加工过程的传热问题;第 13 章介绍了有限元数值模拟塑性成形工步的应用实例;第 14 章介绍了近期研究的热点——微塑性成形过程中尺度效应的数值模拟;第 15 章介绍了新兴的无网格法在塑性成形模拟中的应用。

本书第 1 章和第 8~12 章由谢水生撰写,第 2~7 章和第 14、15 章由李雷撰写,第 13 章由谢水生和李雷共同撰写,最后由谢水生定稿。

在本书撰写过程中得到黄国杰、吴朋越、杨浩强、程磊等博士大力的帮助,在此致谢。本书在编写过程中,由于时间仓促,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2007 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 有限单元法发展历史简介	1
1.2 有限单元法在塑性成形中的应用	3
1.3 商业有限元软件简介	5
1.4 本书中采用的一些约定	8
第 2 章 弹性力学变分原理	9
2.1 弹性力学基本方程	9
2.1.1 几何方程	10
2.1.2 平衡方程	11
2.1.3 本构方程	11
2.1.4 边界条件	13
2.2 变分法知识基础、Galerkin 法和 Ritz 法简介	13
2.2.1 预备知识	13
2.2.2 古典变分问题举例	14
2.2.3 泛函变分与微分方程的关系	16
2.2.4 Galerkin 法以及微分方程转化为泛函变分原理的问题	20
2.2.5 Ritz 法求泛函变分问题的近似解	22
2.3 弹性力学变分原理	25
2.3.1 有关弹性力学变分原理的一些基本概念	26
2.3.2 虚位移原理	27
2.3.3 最小势能原理	29
2.3.4 虚应力原理	30
2.3.5 最小余能原理	31
2.3.6 广义变分原理	32
第 3 章 弹性力学问题有限元方法的基本原理	37
3.1 位移元模型	38
3.2 单元位移模式和试探函数	39

3.3	应变矩阵与应力矩阵	42
3.4	单元势能表达与单元刚度矩阵	43
3.5	单元等效节点载荷	44
3.6	整体刚度矩阵集成	45
3.7	位移边界条件的引入	48
3.8	整体结构方程的求解	49
3.9	有限元解收敛性的讨论	50
第4章	平面和空间单元的构造方法	52
4.1	构造形状函数的基本原则	52
4.2	平面三角形单元	52
4.2.1	面积坐标	52
4.2.2	三角形单元形函数构造	55
4.2.3	三角形单元的刚度矩阵	56
4.2.4	等效节点载荷	57
4.3	矩形单元	58
4.3.1	形函数构造	58
4.3.2	单元刚度矩阵	60
4.4	轴对称问题	61
4.4.1	单元位移函数	62
4.4.2	单元应力场和应变场	63
4.4.3	单元刚度阵	64
4.4.4	等效节点载荷	65
4.5	空间4节点四面体单元	66
4.5.1	单元位移函数	66
4.5.2	单元应变场与应力场的表达	67
4.5.3	单元刚度矩阵	68
4.6	空间8节点长方体单元	68
第5章	等参单元	70
5.1	坐标系的映射	70
5.2	应变矩阵 B 的建立	72
5.3	单元刚度矩阵 K^e 和等效节点载荷	73
5.4	平面8节点等参元	75

5.5	三维空间等参元	76
5.6	数值积分方法	79
5.7	数值积分阶次的选择	81
第6章	板单元设计	84
6.1	薄板基本理论	84
6.1.1	基本假设	84
6.1.2	应变和应力	85
6.1.3	薄板横截面上的内力和应力	86
6.1.4	边界条件和单元刚度阵	86
6.2	四节点矩形薄板单元	87
6.3	三角形薄板单元	89
6.4	中厚板单元	91
6.4.1	中厚板基本理论	91
6.4.2	单元刚度阵	92
6.4.3	单元与性能分析	93
第7章	非协调单元	95
7.1	Wilson 非协调元	96
7.2	分片检验条件	97
7.3	非协调分析的稳定性条件	99
7.4	能量相容性分析和构造非协调元的一般公式	100
7.5	单元形函数的构造	103
7.6	数值算例	104
7.6.1	分片检验	104
7.6.2	悬臂梁的弯曲	104
7.6.3	单元不可压缩性能考察	105
第8章	弹塑性有限元法	107
8.1	材料屈服准则	107
8.1.1	Tresca 屈服准则(最大切应力条件)	107
8.1.2	Mises 屈服准则(能量条件)	108
8.2	弹塑性有限元法的本构关系	109
8.2.1	弹性阶段	109
8.2.2	弹塑性阶段	109

8.3 变刚度法	113
8.3.1 定加载法	114
8.3.2 变加载法	114
8.3.3 位移法	117
8.4 初载荷法	117
8.4.1 初应力法	118
8.4.2 初应变法	120
8.5 残余应力和残余应变的计算	121
8.6 极限载荷的确定	122
第9章 刚塑性有限元法	123
9.1 引言	123
9.2 刚塑性增量理论的广义变分原理	123
9.2.1 基本方程	123
9.2.2 不完全的广义变分原理	124
9.3 Lagrange 乘子法	126
9.3.1 离散化	127
9.3.2 线性化	128
9.4 材料可压缩性法	131
9.4.1 理论基础	131
9.4.2 系数 g 的取值	134
9.4.3 求解方程的建立	134
9.5 罚函数法	138
9.5.1 求解方程的建立	138
9.5.2 应力的求取	140
9.6 刚塑性有限元法计算中的几个问题	141
9.6.1 初始速度场	141
9.6.2 收敛判据	143
9.6.3 缩减系数 β 值的选取	144
9.6.4 奇异点的处理	144
9.6.5 摩擦条件	147
9.6.6 刚塑性交界面问题	153
9.6.7 卸载问题	154

9.6.8 比较 Lagrange 乘子法和罚函数法的收敛性	154
第 10 章 粘塑性有限元法	155
10.1 一维本构关系	155
10.2 弹粘塑性的本构关系	159
10.3 刚粘塑性的本构关系	162
10.4 弹粘塑性有限元法	163
第 11 章 弹塑性有限变形的有限元法基本方程	167
11.1 概述	167
11.2 弹塑性有限变形的 Lagrange 描述法	169
11.2.1 虚功方程和基本方程	169
11.2.2 Lagrange 描述的刚度方程	171
11.2.3 增量形式的刚度方程	173
11.2.4 弹塑性材料的本构关系	176
11.2.5 外载荷的形式	180
11.3 弹塑性有限变形的 Euler 描述法	184
11.3.1 虚功方程和基本公式	184
11.3.2 弹塑性有限变形 Euler 描述法的有限元方程	185
11.3.3 本构关系	189
11.3.4 单元刚度矩阵及其展开式	191
第 12 章 塑性加工过程中的传热问题	200
12.1 概述	200
12.2 热传导问题的基本方程	200
12.3 热传导中的变分应用	202
12.4 轴对称问题的变分	204
12.5 三维热传导问题的单元分析及求解方程	206
12.6 轴对称问题的求解方程及其展开式	208
第 13 章 有限元数值模拟应用实例	211
13.1 轧制变形过程的数值模拟实例	211
13.1.1 平轧变形过程的模拟	211
13.1.2 三辊行星轧制管坯变形模拟仿真	211
13.2 挤压成形过程的数值模拟实例	214
13.2.1 静液挤压变形过程的模拟	214

13.2.2	正挤压过程的数值模拟	217
13.2.3	不同型线凹模挤压过程的数值模拟	218
13.2.4	型材挤压的变形模拟	218
13.3	拉拔变形过程的数值模拟实例	221
13.4	自由锻变形过程的数值模拟实例	222
13.4.1	镦粗变形过程的数值模拟	222
13.4.2	局部镦粗变形过程的数值模拟	223
13.4.3	拔长工步的变形模拟	224
13.5	模锻变形的数值模拟实例	226
13.5.1	开式模锻的变形模拟	226
13.5.2	闭式模锻的变形模拟	228
13.5.3	火车车轮成形过程的数值模拟	230
13.5.4	叶片精锻成形的三维有限元分析	230
13.6	板料成形过程的数值模拟实例	233
13.6.1	板料弯曲变形过程的数值模拟	233
13.6.2	板料拉伸变形过程的数值模拟	234
13.6.3	管材弯曲的数值模拟	236
13.6.4	管材胀形的数值模拟	236
13.7	连续挤压过程的数值模拟实例	240
13.8	镁合金轮毂半固态触变成形过程的数值模拟	243
13.9	变形过程热场的数值模拟实例	245
13.9.1	挤压过程热效应的模拟计算	245
13.9.2	镁合金连续铸轧过程温度场的数值模拟	245
13.9.3	铜扁线连续挤压过程温度场的数值模拟	247
第 14 章	有限元在金属微塑性成形中的应用	250
14.1	金属微加工过程中的尺度效应	250
14.2	反映尺度效应的连续介质物理模型	252
14.3	应变梯度偶应力理论简介	253
14.4	应变梯度偶应力理论的有限元实施	254
14.5	应变梯度非协调元构造	256
14.6	数值算例	258
14.6.1	具有尺度效应的线弹性薄梁弯曲问题	258

14.6.2 小孔应力集中问题中的尺度效应	259
14.7 超薄板料微弯曲成形过程中尺度效应的数值研究	261
14.8 讨论	266
第 15 章 无网格法及其在塑性成形模拟中的应用	267
15.1 无网格法简介	267
15.2 无网格法基本原理与分类	269
15.2.1 微分方程的离散方案	269
15.2.2 近似函数的构造	271
15.3 无网格法实施过程	275
15.4 无网格法在塑性成形模拟中的应用实例	276
15.5 讨论与展望	281
参考文献	283

第 1 章 概 论

1.1 有限单元法发展历史简介

有限单元法最初于 1956 年由 Turner 和 Clough 等人^[1]在分析飞机结构力学性能时提出,由于这种方法是由矩阵位移法推广应用于弹性力学平面问题,故当时称为直接刚度法。随后,Clough^[2]将这种方法正式命名为有限单元法(finite element method, FEM)。1963 年, Melosh^[3]认识到,有限单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^[4]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^[5]于 1954 年提出了后来称为 Hu-Washiru 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^[6]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。

早期的有限单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。如基于最小余能原理或 Hellinger-Reissner 变分原理的杂交元方法,基于 Hellinger-Reissner 变分原理的混合元方法,基于修正的最小势能原理的非协调元法等。由于多变量有限元法的参数匹配以及稳定性和收敛性理论的复杂性,在工程应用中,目前仍以位移为基本变量的位移型方法为主。到 20 世纪 70 年代初,有限元基本理论和方法已发展成熟,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。有些问题的难点其实不在于有限元方法,例如新型复合材料和多场耦合问题等,其难点在于材料物理模型的建立。

在塑性成形模拟过程中,主要应用非线性有限元方法, Argris^[7]和 Marcal 等^[8]最早对弹塑性有限元分析做出了贡献。随后,对非线性有限元的研究激增,主要的进展有: Yamada 等^[9]于 1968 年推导了小变形的弹塑性应力应变矩阵; Hibbit 等^[10]于 1970 年提出了以 Lagrange 描述法为基础的大变形弹塑性有限元列式;

Mcmeeking 等^[11]在 Euler 描述法基础上建立了大变形有限元列式。至此,大变形弹塑性有限元方法不断发展完善。

在实际问题中,很多问题可忽略弹性变形和应变硬化效应,采用刚塑性本构关系。1973 年, Lee 和 Kobayashi^[12]提出了以 Lagrange 法引入不可压缩条件的刚塑性有限元方法。Zienkiewicz 等^[13]于 1975 年提出了采用罚函数法处理不可压缩条件的刚塑性有限元方法。Mori 等^[14]于 1977 年提出了可压缩刚塑性有限元方法。相对于弹塑性有限元,刚塑性有限元避开了几何非线性问题,在增量较大的情况下以小变形方法来处理大变形问题,建模简单,求解效率高,受到了工程界的欢迎。在 20 世纪 90 年代前,非线性有限元的解法主要是静态隐式方法,加州大学 Berkeley 分校的学者 Hughes 等人对这种方法的进步做出了杰出的贡献^[15],基本解决了这种方法在求解复杂非线性问题时遇到的收敛性和速度方面的困难。

在计算方法上, Costantino^[16]于 1964 年发展了最早的显式有限元程序。显式有限元的重大进展是由 John Hallquist 在 Lawrence Livermore 实验室做出的,他在 1976 年发布了 DYNA 程序,该程序在世界各大学和实验室广泛应用,成为目前所有显式求解程序的基础。显式积分方法不需要在每步计算中作矩阵分解运算,大大提高了计算效率。

有限元法本质上是一种求解微分方程组近似解答的手段,其核心思想是离散,即将连续结构体假想地离散为有限数目的单元组合体,通过对每个单元的物理性能进行分析,然后将这些离散的单元组集起来,重构得到原连续体的近似结构,得到满足工程要求的近似结果。有限元法的思想简单,步骤统一,对于各类力学问题均以统一的步骤处理,特别适合于计算机编程实现。随着计算机运算能力飞跃式的增加,在强大的工业需求的推动下,经过力学家、数学家和工程界学者们的通力合作,在有限元方法出现后不到 10 年的时间内,就构造了适用于各类问题的大量单元,商业应用软件也应运而生。尽管有限单元法最初起源于对固体力学问题的分析,但其应用不限于这个领域,目前有限元方法广泛应用于流体力学、电磁学、传热学等学科。从应用的行业来看,土木、航空、机电、材料、石化、能源、生物等各行各业几乎都用到了有限元法。有限元法可虚拟汽车碰撞试验,手机跌落试验,水下爆炸试验,跨海大桥在风载等作用下的响应,机翼与气流的相互作用,海上采油平台与海浪的作用,血液流动与血管的相互作用,机械结构的疲劳断裂过程,材料加工成形过程等。有限元法在这些行业的应用,使这些行业的发展出现了质的飞跃。在产品的设计或实物试验前,首先采用有限元对这些过程进行虚拟试验,在设计阶段预先发现潜在的问题,获得优化的设计方案。这就减少了实物试验,降低了成本,缩短了产品设计周期,提高了产品和工程的可靠性。

1.2 有限单元法在塑性成形中的应用

金属塑性成形是一个非常复杂的过程,包括晶粒生长演化和位错运动等。从连续介质力学的观点来看,则是一个强烈的非线性过程,包括材料非线性,即应力和应变关系的非线性;几何非线性,即由于变形较大,应变和位移之间的非线性;边界非线性,即边界条件随物体的运动发生变化,如摩擦和接触边界。鉴于这些现象的复杂性,早期塑性成形的应力应变分析,仅能够对一些简单的问题采用解析法、主应力法、滑移线法或极限分析法等作出估计。对于复杂零部件的加工,这些方法显得无能为力。因此,在有限元法出现以前,塑性成形过程中工艺参数的确定以及模具设计,大都基于试错法。试错方法开发周期长,浪费人力和物力资源。数值求解方法的应用,尤其是有限单元法的应用使得塑性加工方法出现了质的飞跃,该方法可为工艺参数优化提供详尽的数据,使得虚拟制造成为可能。金属塑性成形的理论基础是弹塑性力学,经典的弹塑性力学早已发展成熟。可以说,近10年来塑性成形技术最大的发展就是数值模拟技术的应用,尤其是有限元技术在塑性成形中的成功应用。

尽管有限元方法在20世纪60年代就出现了,但有限元在塑性成形中的应用研究是从20世纪70年代中期才开始的,而真正投入工业生产和指导生产设计则是近10余年的事。20世纪70年代初, Lee 和 Kobayashi^[17] 采用小变形增量有限元方法对平砧模压做了分析, Iwata 等^[18] 采用类似的有限元方法分析了静液挤压过程。由于金属塑性加工变形过程是大变形,采用小变形有限元方法误差较大,计算效率低,刚塑性有限元方法发展成熟后,迅速成为塑性变形模拟的主要方法。1977年,在通用汽车公司组织的关于板料成形力学分析的会议上, Kobayashi 等^[19] 采用刚塑性有限元对板的半球拉伸, 液压涨形等作了分析, Wang 等^[20] 采用弹黏塑性 Lagrange 有限元方法对板的拉伸成形做了研究。这两篇文章开创了板料成形的有限元模拟领域^[21]。早期研究一般采用平面单元或薄膜单元对塑性成形过程进行模拟, Park 和 Kobayashi^[22] 于1981年采用三维刚塑性有限元模拟了平砧压缩过程。进入20世纪80年代后,有限元理论已经成熟,但限于当时商业软件正处于发展阶段,前后处理系统尚不完善,计算机处理能力较低,计算费用偏高,有限元在塑性成形中的应用仍然有限。Honecker 等^[23] 在1989年的 NUMIFORM'89 会议上,给出了油盘成形过程的数值模拟结果,并预测了成形过程中可能的起皱情况,该论文引起了工程界的较强的兴趣。1990年后,计算机处理能力大为增强,计算费用降低,计算机图形学的发展促进了有限元前后处理系统的成熟,以 DYNA 为代表的显式积分算法显著地提高了计算速

度,各类有限元软件蓬勃发展,DYNA3D、MARC、ABAQUS 等非线性分析软件,DEFORM,DYNAFORM,FORGE 等专业塑性成形软件开始在压力加工行业中得到广泛应用,有限元分析成为各大汽车和飞机制造公司产品开发设计必备的工具。

国内塑性成形数值模拟技术的研究方面,王祖唐、谢水生等人^[24]于 1983 年采用弹塑性有限元对静液挤压过程作了分析。谢水生和王祖唐^[25,26]于 1984 年分别采用采用刚塑性和弹塑性有限元分析了不同凹模型线对挤压变形的影响;谢水生和王祖唐^[27]于 1985 年采用有限元法研究了塑性变形过程中的热效应对冷挤压过程的影响。随后,谢水生^[28]在其博士论文中详尽地介绍了有限元法模拟挤压过程中的应力应变场分布,以及由于变形热效应引起的试件和模具温度场的变化的过程。1997 年,谢水生和王祖唐^[29]出版了著作《金属塑性成形过程工步的数值模拟》。1990 年,熊火轮^[30]在其博士论文中采用弹塑性有限元和改进的 Kirchhoff 板元,对汽车暖风罩的成形过程作了模拟。1991 年,董湘怀^[31]研究了轴对称和三维金属板料成形过程的有限元技术。1994 年,郭刚^[32]采用大变形弹塑性有限元对冲压零件的成形过程及撕裂现象进行了分析。1995 年,柳玉启^[33]采用更新的 Lagrange 法研究了金属板料成形过程中的塑性流动规律;吴勇国^[34]开发出用于板料成形分析的动力显式有限元程序,对动力松弛和接触摩擦等问题作了深入研究;徐康聪^[35]对车身覆盖件的冲压成形过程作了有限元分析,对几何形体描述、材料非线性和接触算法等进行了系统研究。1995 年后,国内对金属成形过程数值模拟技术的研究激增,每年有 5 篇以上的博士论文进行这一方面的研究,并形成了几支稳定的研究梯队,开发了一些塑性成形软件,如北京航空航天大学开发的金属板料冲压成形模拟软件 Sheetform,吉林大学开发的汽车覆盖件成形模拟与模具设计软件 KMAS,北京有色金属研究总院开发的挤压筒体受力分析及优化软件,上海交通大学开发的金属塑性成形三维有限元仿真系统等。

鉴于塑性成形过程的复杂性,有限元模拟塑性成形仍有许多尚待解决的问题。首先,对于大型复杂构件模拟的计算费用仍然很大,因此需要发展新的高性能单元和非线性方程求解算法来提高计算速度。此外,边界条件影响微分方程的解,塑性成形过程中有复杂的摩擦接触边界,摩擦接触机理以及摩擦边界的处理尚需要进一步研究。另外,在计算过程中,变形很大时就需要重新划分网格,网格自动重划分技术尚需要提高。对于撕裂、起皱、回弹等缺陷的预测技术需要进一步发展,目前的软件对于撕裂和起皱基本上可以准确预测,但对于板料回弹问题,目前还没有好的处理方法,是一个亟待解决的难题。

近年来,还出现了一些新的数值方法,例如一些学者^[36~40]采用无网格法(meshfree/meshless method)模拟塑性成形过程。无网格法采用点的影响域来离