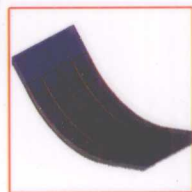
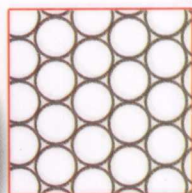
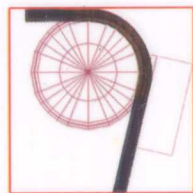
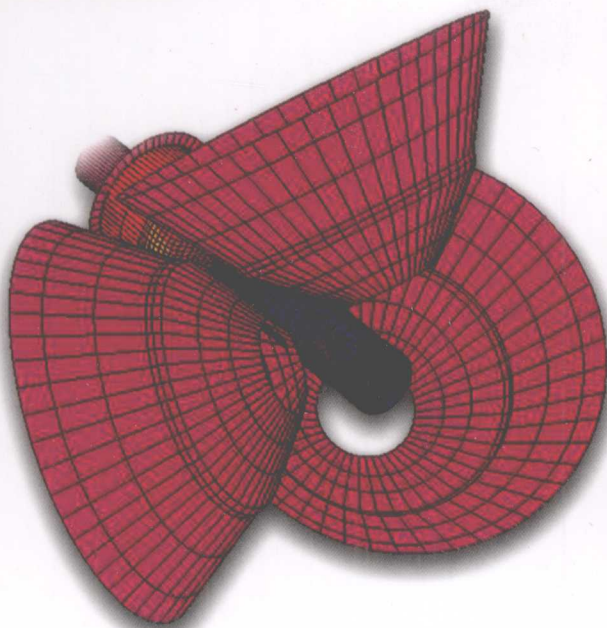


万水CAE技术丛书



MSC.MARC

刘劲松 张士宏 肖 寒 李毅波 编著

MSC.MARC

在材料加工工程中的应用

材料加工工程领域的典型实例专业精讲



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 CAE 技术丛书

MSC.MARC 在材料加工工程中的应用

刘劲松 张士宏 肖 寒 李毅波 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍 MSC.MARC 在材料加工工程中的应用及其相关的技术问题,特别是对塑性加工成形过程中的典型应用进行重点讲解。全书以应用为主,理论为辅,既注重 MSC.MARC 基本原理与使用方法,又强调提高实际工程应用分析能力。

本书所有案例皆来自实际工程项目,不仅包括具体的建模过程,还包括具体的模拟结果分析与技术处理。全书共分 13 章,介绍有限元技术在材料加工工程中的应用状况;有限元法的一些基本原理与 MSC.MARC 在材料加工中的一些常用技术;分别从板材成形、型材成形、轧制成形、液压成形、锻造成形、热处理、焊接等方面介绍 MSC.MARC 在材料加工工程中的典型应用案例,并给出了全部命令流流程和相应的子程序代码。通过本书的学习,可以掌握有限元法解决实际工程问题的关键技术,学会应用本专业知识和分析问题、解决问题,将理论分析与工程实践紧密衔接在一起。本书附带所有案例的模型文件,读者可以从中国水利水电出版社网站及万水书苑 (<http://www.waterpub.com.cn/sofdown/> 及 <http://www.wsbookshow.com>) 下载。

本书既适合作为材料加工工程专业的本科生与研究生教材,也可作为相关企事业单位工程技术人员应用参考书,还可作为 MSC.MARC 有限元分析软件的高级培训教材。

图书在版编目 (C I P) 数据

MSC.MARC在材料加工工程中的应用 / 刘劲松等编著
— 北京:中国水利水电出版社,2010.3
(万水CAE技术丛书)
ISBN 978-7-5084-7348-2

I. ①M… II. ①刘… III. ①工程材料—加工—有限元分析—应用软件, MSC.MARC IV. ①TB3-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第041841号

策划编辑:杨元泓

责任编辑:宋俊娥

封面设计:李 佳

书 名	万水 CAE 技术丛书 MSC.MARC 在材料加工工程中的应用
作 者	刘劲松 张士宏 肖 寒 李毅波 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 31.25 印张 775 千字
版 次	2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	68.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

塑性加工成形中的各种现象及其规律是十分复杂的,这使得塑性加工成形工艺和模具设计缺乏系统精确的理论分析手段,主要依据工程师长期积累的经验,设计质量难以得到保证。借助于有限元模拟方法,可以获得对于塑性加工成形过程规律的认识,用较小的代价、在较短的时间内找到最优的或可行的设计方案。有限元模拟对材料加工是强有力的设计、分析和优化的工具,可以分析预测成形期间零件形状的变化、坯料的变形规律、最终应变分布、温度场分布、全场应力与应变分布、组织性能变化规律、工艺参数对产品质量和尺寸精度的影响规律以及缺陷形成区域等,并可在零件生产前最大限度地优化工艺参数,加快生产周期、降低生产成本,所有这些对于成功地成形复杂形状的零件并减少成形时间是至关重要的。采用有限元技术,可以实现对塑性成形全过程的参数监控与预测,进行材料的流动变形规律与各种工艺缺陷的变化规律研究,作为工艺参数优化与选择的依据,对实验起到指导和预测的作用,为提高塑性加工生产工艺设计、模具设计、设备设计提供理论依据,使工艺设计和生产控制摆脱人工试错法,走向科学化和智能化。

塑性加工成形模拟技术经历了几十年的发展,国际上已经出现了一批塑性成形模拟软件。其中,大型有限元分析软件 MSC.MARC 是可以快速模拟各种冷热成形、挤压、轧制等塑性成形过程的工艺成形专用软件,它可以实现对具有高度组合的非线性体成形过程的全自动数值模拟, MSC.MARC 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,为塑性加工成形二次开发设计提供了开发平台。

本书通过各种典型材料加工案例,详细介绍 MSC.MARC 在材料加工工程中的应用及其相关的技术问题。全书以应用为主,理论为辅,一方面强调培养 MSC.MARC 有限元软件基本应用能力,另一方面又强调提高应用 MSC.MARC 有限元软件计算结果分析问题、解决问题的能力。

本书所有案例皆来自实际工程项目,不仅包括具体的建模过程,还包括具体的模拟结果分析与技术处理。全书共分 13 章,第 1 章由张士宏(中国科学院金属研究所)编写,介绍有限元技术在材料加工工程中的应用状况。第 2 章由岳峰丽(沈阳理工大学)编写,介绍有限元法的一些基本原理与关键技术。第 3 章由李毅波(中南大学博士生, MSC 上海办事处工程师)编写,介绍 MSC.MARC 在材料加工过程中的常用技术。第 4 章由刘劲松(沈阳理工大学)、岳峰丽编写,介绍异型结构件增量弯曲成形有限元模拟和一些 MSC.MARC 软件的基本操作技能。第 5 章由肖寒(大连理工大学与中国科学院金属研究所联合培养博士研究生)、刘劲松编写,介绍整体壁板滚弯成形有限元模拟。第 6 章由王祺(沈阳理工大学与中国科学院金属研究所联合培养硕士研究生)、刘劲松、肖寒编写,介绍镁合金型材弯曲成形有限元模拟。第 7 章由李毅波编写,介绍金属轧制成形的有限元模拟。第 8 章由梁海城(沈阳理工大学,东北大学博士研究生)编写,介绍镁合金板材异步轧制数值模拟。第 9 章由李冰(大连交通大学)编写,介绍三辊行星轧制成形有限元模拟。第 10 章由陈仕清(大连理工大学与中国科学院金属研究所联合培养硕士研究生)、袁安营编写,介绍管材液压成形有限元分析实例。第 11 章由

张海燕（中国科学院金属研究所博士研究生）编写，介绍高温合金开坯锻造过程中组织演变的有限元模拟。第12章由肖寒、潘进兵、刘劲松编写，介绍铜盘管退火过程温度场有限元模拟。第13章由林涛（中国科学院金属研究所博士研究生）编写，介绍管道对接焊有限元模拟。全书由刘劲松负责统稿，肖寒负责校对。读者通过本书的学习，可以掌握有限元法解决实际工程问题的关键技术，学会应用本专业知识分析问题、解决问题，将理论分析与工程实践紧密衔接在一起。本书附带所有案例的模型文件，读者可以在中国水利水电出版社网站及万水书苑（<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>及<http://www.wsbookshow.com>）下载。

本书既适合作为材料加工工程专业的本科生与研究生教材，也可作为相关企事业工程技术人员应用参考书，还可作为 MSC.MARC 有限元分析软件的高级培训教材。

本书的编写得到了 MSC 公司的支持与鼓励，特别是北京 MSC 办事处的陈火红先生对本书的编写与出版给予了大力帮助，在此致以由衷的感谢！同时，还应感谢国家自然科学基金项目（50474059）的支持以及在本书编写过程中给予作者支持与关心的老师和同事们！

成书之际，正值中国科学院金属研究所塑性加工先进技术研究组建组十周年，这个小组在张士宏研究员的带领下日益壮大，在材料加工领域作了大量的研究工作，取得了很多科研成果，培养了多名博士、硕士。参加本书编写的人员基本上都是来自这个组，书中的大部分案例也都是这个组近些年来的研究项目与成果。在此谨将此书作为中国科学院金属研究所塑性加工先进技术研究组组庆十周年的一份献礼，祝张士宏老师和他的团队蒸蒸日上，不断进步。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

刘劲松

2010年1月于沈阳

目 录

前言

第 1 章 绪论	1	3.4.1 预状态分析的基本功能	31
1.1 有限元法的特点与发展过程	1	3.4.2 预状态分析应用实例	31
1.2 有限元法在塑性加工领域的应用	1	3.5 重启动分析	36
1.3 有限元法的基本问题	2	3.5.1 重启动分析的基本步骤	37
1.4 有限元法的发展趋势	4	3.5.2 重启动分析实例	37
1.5 MSC.Marc 有限元软件的特点	6	3.6 热-结构耦合分析	39
第 2 章 有限元法的基本理论	7	3.6.1 热-结构耦合分析的基本概念	39
2.1 有限元法概述	7	3.6.2 热-结构耦合分析的基本过程	41
2.1.1 有限元法的基本思想	7	3.7 小结	42
2.1.2 有限元法分析计算的思路和做法	7	第 4 章 异型结构件增量弯曲成形有限元模拟	43
2.1.3 有限元分析的基本方法	8	4.1 引言	43
2.1.4 学习有限元法所需的理论基础	11	4.2 增量弯曲成形原理	43
2.2 塑性有限元法分类	11	4.3 异型结构件有限元模型的建立	44
2.2.1 弹塑性有限元法	11	4.3.1 几何模型	44
2.2.2 刚塑性有限元法	13	4.3.2 单元网格划分	45
2.3 非线性方程组的数值解法	15	4.3.3 定义材料特性	55
第 3 章 MSC.MARC 在材料加工过程中的		4.3.4 定义接触条件	57
一些常用技术	18	4.3.5 定义边界条件	62
3.1 变形的描述	18	4.3.6 定义载荷工况	63
3.1.1 定义	18	4.3.7 定义作业参数并提交运行	66
3.1.2 Eulerian 坐标和 Lagrangian 坐标	18	4.4 单筋条结构件变形模拟结果分析	70
3.1.3 Eulerian 网格和 Lagrangian 网格	19	4.4.1 单筋条结构件回弹分析	70
3.1.4 Lagrangian 网格畸变的处理方式	22	4.4.2 应变分布	75
3.2 局部自适应网格细划分	22	4.5 单筋结构件失稳模拟结果分析	77
3.2.1 自适应网格细划分准则	22	4.5.1 I 形单筋结构件失稳分析	77
3.2.2 局部自适应网格细划分的数量	24	4.5.2 T 形单筋结构件失稳分析	80
3.2.3 局部网格自适应实例分析	25	4.5.3 J 形单筋结构件失稳分析	80
3.3 网格重划分	27	4.6 单筋结构件翘曲模拟结果分析	82
3.3.1 网格重划分器	27	4.6.1 I 形单筋结构件翘曲分析	82
3.3.2 网格重划分准则	28	4.6.2 T 形单筋结构件翘曲分析	84
3.3.3 网格重划分数量	28	4.6.3 J 形单筋结构件翘曲分析	86
3.3.4 网格重划分实例分析	28	4.7 有限元模拟对工程的指导作用	86
3.4 预状态分析	31	4.7.1 特征直线方程的建立	87

4.7.2 自适应增量成形工艺知识库 总体结构	89	6.5 镁合金型材绕弯成形模拟结果分析	167
4.7.3 自适应增量成形工艺知识库 参数获取方法	90	6.5.1 回弹分析	167
4.7.4 应用与验证	91	6.5.2 温度对成形的影响	176
4.8 小结	91	6.5.3 成形质量分析	179
第5章 整体壁板滚弯成形有限元模拟	93	6.5.4 创建动画	184
5.1 引言	93	6.6 小结	186
5.2 滚弯成形原理	93	第7章 金属轧制成形的有限元模拟	188
5.3 滚弯成形有限元模型的建立	94	7.1 材料的变形抗力	188
5.3.1 几何模型	94	7.1.1 冷轧变形抗力模型	188
5.3.2 单元网格划分	94	7.1.2 热轧变形抗力模型	189
5.3.3 定义材料特性	105	7.1.3 MARC 中对变形抗力模型的 处理方式	190
5.3.4 定义接触条件	107	7.2 轧制力能参数的计算	191
5.3.5 定义边界条件	111	7.2.1 轧制力的计算及影响因素	191
5.3.6 定义载荷工况	114	7.2.2 MARC 计算轧制力的方式	193
5.3.7 定义作业参数并提交运行	115	7.3 板厚、板形、宽展的计算	194
5.4 整体壁板滚弯成形模拟结果分析	116	7.3.1 板厚	194
5.4.1 壁板应力分析	116	7.3.2 板形	194
5.4.2 壁板应变分析	126	7.3.3 宽展	196
5.4.3 三辊作用力分析	133	7.3.4 MARC 计算板厚、板形的方法	198
5.4.4 回弹分析	134	7.4 轧制过程温度的计算	199
5.5 小结	136	7.4.1 热轧过程的基本传热方程与 边界条件	199
第6章 镁合金型材绕弯成形有限元模拟	137	7.4.2 热轧过程热-结构耦合分析的 边界条件	199
6.1 引言	137	7.4.3 热轧过程热-结构耦合在 MARC 中的实现	200
6.2 绕弯成形原理	137	7.5 轧制成形分析应用实例	200
6.3 材料性能曲线测定	139	7.5.1 案例说明	200
6.3.1 材料性能测定	139	7.5.2 模型的简化	202
6.3.2 材料的物理属性	140	7.5.3 第一道次轧制仿真	202
6.4 绕弯成形有限元模型的建立	142	7.5.4 第二道次轧制仿真	216
6.4.1 几何模型	142	7.5.5 轧制过程的三维热-结构耦合分析	224
6.4.2 单元网格划分	146	7.6 小结	234
6.4.3 初始条件	150	第8章 镁合金板材异步轧制数值模拟	235
6.4.4 边界条件	151	8.1 引言	235
6.4.5 模具加载条件	153	8.2 板材异步轧制基本原理	235
6.4.6 材料的物理属性	157	8.3 板材异步轧制有限元模型的建立	236
6.4.7 定义工况	163	8.3.1 几何模型建立	236
6.4.8 定义作业参数	165		
6.4.9 求解	167		

8.3.2 单元网格划分	236	9.4.5 坯料纵向运动的变形段	317
8.3.3 材料特性定义	248	9.5 旋轧成形温度场模拟结果分析	318
8.3.4 接触条件定义	251	9.5.1 旋轧成形过程的温度场分布	318
8.3.5 初始条件定义	256	9.5.2 坯料上一点的温度变化	319
8.3.6 载荷工况定义	256	9.5.3 坯料横切面温度场分布	320
8.3.7 定义作业参数并提交运行	258	9.5.4 坯料切面圆周温度变化	322
8.4 镁合金板材异步轧制模拟结果分析	260	9.5.5 旋轧成形应变速率特点分析	323
8.4.1 板材异步轧制过程金属流动分析	261	9.6 小结	324
8.4.2 板材异步轧制等效应变场分布	262	第 10 章 管材液压成形有限元分析实例	325
8.4.3 板材异步轧制等效应力场分布	263	10.1 引言	325
8.4.4 板材异步轧制温度场分布	264	10.2 管材液压成形原理	325
8.5 不同工艺参数对板材异步轧制过程的影响	264	10.3 管材液压成形有限元模型的建立	326
8.5.1 不同轧辊转速比对异步轧制的影响	264	10.3.1 几何模型	326
8.5.2 摩擦因素对板材异步轧制的影响	268	10.3.2 单元网格的划分	332
8.5.3 坯料温度对板材异步轧制的影响	273	10.3.3 材料特性的定义	336
8.5.4 轧辊温度对板材异步轧制的影响	276	10.3.4 几何特性的定义	339
8.5.5 压下率对板材异步轧制的影响	278	10.3.5 接触条件的定义	341
8.6 小结	283	10.3.6 边界条件的定义	345
第 9 章 三辊行星轧制成形有限元模拟	284	10.3.7 载荷工况的定义	346
9.1 引言	284	10.3.8 定义作业参数并提交运行	347
9.2 三辊行星轧制成形基本原理	284	10.4 管材液压成形模拟结果分析	351
9.3 旋轧成形有限元模型的建立	285	10.4.1 壁厚分布	352
9.3.1 建立轧辊芯棒小车坯料有限元模型	285	10.4.2 应变分布	354
9.3.2 几何参数的定义	293	10.5 小结	357
9.3.3 材料特性的定义	294	第 11 章 涡轮盘闭模锻造中组织演变的有限元模拟	358
9.3.4 连接控制的定义	295	11.1 概述	358
9.3.5 接触体和接触表的定义	296	11.2 组织演变的有限元计算	358
9.3.6 初始条件的确定	305	11.2.1 组织演变模型	358
9.3.7 边界条件的定义	305	11.2.2 用户子程序二次开发	359
9.3.8 工况的定义	307	11.3 有限元模型的建立	364
9.3.9 定义作业参数并提交运行	309	11.3.1 几何模型	365
9.4 旋轧成形变形规律模拟结果分析	311	11.3.2 材料模型	377
9.4.1 坯料三角形效应分析	311	11.3.3 接触条件	382
9.4.2 坯料受力特征分析	313	11.3.4 初始条件	386
9.4.3 运动轨迹分析	314	11.3.5 网格重划分	386
9.4.4 接触特征规律	316	11.3.6 定义工况	387
		11.3.7 定义作业参数	389
		11.3.8 提交作业	392

11.4 结果分析	392	12.4.3 铜盘管径向和轴向温度分布	450
11.4.1 温度场	393	12.4.4 分析与讨论	453
11.4.2 等效应变场	394	12.5 小结	454
11.4.3 流线场	395	第 13 章 管道对接焊有限元模拟	455
11.4.4 组织场	396	13.1 引言	455
11.5 小结	398	13.2 热—力耦合有限元法	455
第 12 章 铜盘管退火过程温度场有限元模拟	399	13.2.1 热传导问题的控制方程	455
12.1 引言	399	13.2.2 热传导问题的有限元描述	456
12.2 铜盘管退火工艺过程	399	13.2.3 热应力问题的有限元描述	457
12.2.1 铜盘管退火工艺概述	399	13.3 管道焊接模拟前处理	458
12.2.2 铜盘管退火过程的传热分析	400	13.3.1 网格划分	459
12.2.3 铜盘管退火过程传热学理论	401	13.3.2 定义几何属性	467
12.2.4 铜盘管退火过程关键参数分析	403	13.3.3 定义材料属性	467
12.3 铜盘管退火温度场有限元模型的建立	404	13.3.4 设置焊接路径和填充焊料	469
12.3.1 几何模型	404	13.3.5 添加边界条件和初始条件	472
12.3.2 单元网格划分	405	13.3.6 定义工况	478
12.3.3 材料特性定义	422	13.3.7 定义作业参数	480
12.3.4 初始条件的定义	428	13.4 后处理结果分析	482
12.3.5 边界条件的定义	429	13.4.1 焊接温度场分析	482
12.3.6 载荷工况的定义	444	13.4.2 管道焊接残余应力	486
12.3.7 定义作业参数并提交运行	445	13.4.3 管道焊后变形分析	489
12.4 铜盘管退火温度场模拟结果分析	446	13.5 小结	490
12.4.1 铜盘管退火温度场云图	446	参考文献	491
12.4.2 铜盘管热点与冷点温度演变历史	449		

第 1 章 绪论

1.1 有限元法的特点与发展过程

有限元法是一种数学方法，是 20 世纪 50 年代求解航空工程结构问题的一种离散数学方法。这种方法的主要特点是，对于任何复杂边界条件、复杂结构对象和初始条件，都可以应用该方法进行求解，特别适合求解多物理场作用下的超静定工程问题，包括力场、电磁场等各种连续介质问题。其中塑性加工问题是一种最为典型的力场及多物理场非静定工程问题，是有限元应用的最典型领域之一。

有限元法的实质是将连续体离散为有限个小的单元体，这些单元依靠各节点相互连接和传递力等物理作用，将外力和边界条件分解到各个单元上，对每个节点设力或其他物理量的平衡方程，将这些平衡方程联立成多元方程组，再求解计算。对于每个单元内的物理量，则采用形函数进行插值计算。应用这种方法，可以解决非常复杂的工程计算问题。建立方程组的方法有多种，例如对于弹性结构问题可以建立力的平衡方程和力矩的平衡方程，对于非线性问题可以根据虚功原理建立能量泛函平衡方程。这样，很多物理问题都可以建立求解方法。

有限元法在塑性加工领域的应用开始于 20 世纪 70 年代，发展于 80 年代，成熟于 90 年代，推广于 21 世纪初。1970 年代末，美国福特汽车公司著名学者 S C Tang（唐先芝）先生最早将有限元法应用于汽车车门的冲压成形过程计算分析，为弹塑性有限元法在冲压领域的应用开创了先河。

为解决锻造等体积成形大变形问题，20 世纪 70 年代，美国加州大学 Kobayashi 等学者进行了卓越的工作，提出了刚塑性有限元法，并成功应用于锻造和轧制领域。英国 Swansea 大学 Zienkwich 等学者则发展了粘塑性有限元理论，使有限元法在超塑成形和热锻等领域获得了应用。

弹塑性有限元法主要应用于板成形问题。由于该方法通常属于小变形大挠度问题，早期主要采用小变形理论，公式推导简单，软件编写方便，初期对一些简单的板成形问题精度足够，因此发展较快。随着求解问题的复杂性加大，小变形理论不能满足精度要求，有限变形理论逐渐被广泛采纳，目前，大多数弹塑性有限元软件都采用了有限变形理论。

在板材成形领域，早期应用的是弹塑性隐式计算方法，但这种方法计算速度慢，不容易收敛，限制了有限元法的应用。20 世纪 90 年代初，人们发现可以将显式算法应用于冲压等准静态过程的弹塑性有限元计算，虽然精度不够，但计算速度大为提高，与隐式方法配合则可得满意的计算结果和较高的计算效率。

关于有限元法的方法和理论，已经有很多著作和文献在国内外出版发表，各有限元软件也都有理论文本的手册，在这里就不详细介绍。

1.2 有限元法在塑性加工领域的应用

有限元法自建立以来，通过几代科学家的不断努力，已经成为工程领域最有效的数值计

算方法，尤其在塑性加工领域得到了广泛的应用。

有限元法的应用首先在于分析塑性加工过程的材料变形过程和机理，将很多不可视过程或高速变形过程转为可视化过程，从而可以分析材料的变形规律、材料的流动规律，判断材料的屈服过程和进入屈服的顺序。例如板材的冲压和弯曲变形过程中，板材各部位变形进入屈服状态是不同步的，了解屈服顺序和变形过程对于设计工艺和模具非常重要。另外，通过变形过程分析还可以预测和了解材料的弹复规律，以便对模具设计进行调整。对于锻造工艺，由于变形发生在模具之内，无法进行直接观测，有限元可以模拟材料的流动和变形过程，这对于工艺优化和模具设计很有意义，对于掌握缺陷的形成也很有帮助。

有限元法还可以给出应变和应力分布，不但能够给出接触面的应力分布，还可以给出变形体内部任何位置的应力应变分布及变形历史，这对于判断材料的屈服状态、破裂位置等很有意义。

有限元法可以预测材料的工艺缺陷形成位置、形成条件、缺陷种类，例如预测冲压过程的起皱、破裂和过度减薄等问题，预测锻造过程中的裂纹形成、折叠形成等问题，通过图形显示可以帮助判断缺陷产生的机理。这些已经在工业实例中得到了应用。

有限元法可以计算模具和材料的温度场变化，从而对材料的温度影响和材料性能变化进行实时计算。

有限元法还可以计算动态再结晶、相变和组织形态的转化，以用于控制材料变形后的组织和性能。

有限元结果可以用于工艺优化和模具设计，是塑性加工工艺和模具设计及优化的有力工具。有限元法可以给出总的变形力，给出变形体和模具的应力分布，这也是设备选择和模具强度设计的基础。

综合上述原因，有限元法在塑性加工各领域都相继得到了广泛应用。在汽车覆盖件模具设计企业，有限元模拟已经成为模具设计的一个关键工序，如同 CAD 成为模具和工艺设计的必备工具一样。这方面已经有大量的论文发表，这里就不细述。有限元法在超塑成形、等温锻造、高温合金管材热挤压领域、管材液压成形、板材充液拉深成形等领域也有大量应用实例。在轧钢领域，有限元法不但应用于热轧带钢的组织演变模拟，还可以应用于在线计算和工艺控制。有限元法还可以应用于焊接、热处理等热加工过程，应用于设备结构和疲劳分析，这些应用可以通过大量文献得到说明。

有限元法是在不断发展过程中的一个工程数值计算方法，科研人员在建模、分析和使用中经常遇到各种困难和问题，同时也为学术界和有限元软件专家提出了很多新的建议和挑战，工程师们在使用中会遇到更多常见问题。因此，一本塑性加工应用实例方面的书将会为学者和工程师提供更有意义的帮助。

1.3 有限元法的基本问题

求解有限元法需要解决的基本问题主要包括以下几方面：

(1) 有限元基本方法及材料模型问题。根据材料的不同出现了弹塑性有限元法、刚塑性有限元法和粘塑性有限元法等，需要建立材料的本构关系（硬化曲线）。

(2) 边界条件和初始条件。求解有限元问题不可越过的的问题包括接触问题、摩擦准则和

网格划分等。

一般来说,工程问题尤其是塑性加工问题是大变形过程,工具一般有运动和位移,而工具的运动通常都有一定规律,即工具与坯料的接触,工具与工具之间的接触,坯料与坯料的接触,坯料的一部分与另一部分表面的接触,这些接触关系需要进行计算与判断,以确定工具和坯料表面的位移。另外,工具与坯料的运动都是有规律或限定条件的,例如对称面、固定边界等,这些限定条件给出了已知的边界条件,简化了计算,一般有利于问题的解决。

由于塑性变形往往涉及大变形,部分区域由于过量的变形往往会产生形状畸变,原来的网格系统不能满足计算的要求,因此常常要求软件具有网格自动重构的功能。目前,大部分商用有限元软件大都具有网格自动划分的功能。而且,对于体积成形问题,例如锻造、轧制和挤压,网格自动重构是必备的功能。早期的软件一般具备网格自动划分功能,而成熟的软件则大多具备变形过程中网格的重构功能,可以根据计算步数设定,也可根据区域变形单元畸变程度来自行设定,这些软件还往往具备根据精度要求进行局部加密的功能。随着数学方法的丰富,学者们提出了越来越多新的网格自动划分方法,达到自适应能力,具有一定的智能性。

(3) 塑性加工问题的热力耦合计算方法。对于热加工问题和一些精度要求较高的加工成形问题,往往需要考虑温度场对材料和变形的影响。例如热模锻过程就是一个非稳态的热变形过程,伴随温度场的变化,不但影响了材料的性能,还影响了模具的形状。铝管材的连续挤压过程由于摩擦和变形热使材料由室温升高到几百度,可以达到材料的再结晶温度,这个过程的计算就不能不考虑温度场的变化。

一般来说,大多数软件都有热力耦合计算功能,但其计算方法大多是半耦合或称弱耦合,即一般通过主程序计算时不考虑温度场,另外有一个专门计算温度场的子程序,当主程序完成变形计算某一加载步后,再由子程序负责相应温度场的计算,然后将计算获得的新温度场赋值到原变形场,再计算新温度场条件下的变形过程。计算方法中不是统一设定平衡方程,因为计算量太大,一般很难完成。而弱耦合则使计算量显著降低,因为单独计算温度场是很快速的,这样总的计算时间增加不多。如果进行全耦合计算,即在列平衡方程时将力平衡方程和热平衡方程联立求解,将使未知数大幅度增加,平衡方程总数也大幅度增加,求解很困难,计算速度大幅度降低,在以往的计算机硬件条件下一般不可能在较理想时间内完成,因此很少有强耦合计算方法的使用。

(4) 塑性加工工艺缺陷的预测。在塑性加工过程中,往往伴随一些工艺缺陷的产生,例如冲压过程中的失稳起皱、破裂,锻造过程中的裂纹、折叠、孔洞,轧制过程中的边裂、起浪等。

目前,对于冲压过程,人们已经可以比较容易地预测破裂和起皱,但是对于破裂过程的发展、起皱数量的准确预测还不够,但对于大多数冲压工艺分析已基本足够。人们已经将一些成形准则应用到冲压领域,例如成形极限图 FLD (Forming Limit Diagram) 的应用,在汽车覆盖件冲压过程中得到了普遍应用,可以预测破坏的位置,对工艺及时进行调整改进和优化。

在锻造等体积成形工艺中,对于裂纹和折叠的预测已基本成熟,可以给出裂纹的位置、发生条件,给出折叠产生的条件和发生方式。

在轧制过程中经常产生的边裂和波浪化,目前的软件也基本有了比较准确的预测能力。

总之,有限元法目前已经可以预测大部分工艺缺陷,给出发生条件和位置,不足之处是定量不够准确,对于缺陷的发展过程不能准确描述。

1.4 有限元法的发展趋势

从以上论述可以看出,塑性加工有限元分析常见的传统问题大多得到了解决,有限元法已经可以用于解决绝大多数塑性加工工程问题。

然而,工程问题进一步提出了更高的要求。例如对于精度的要求,要求定量预测尺寸和形状精度,还要定量预测和描述工艺缺陷,定量预测组织演变。精度预测不仅涉及模具、工艺、设备参数,还涉及材料性能、环境温度、有限元计算方法、计算机软硬件环境、边界条件的处理等。以下问题是需要进一步解决的。

(1) 材料数据库、本构关系。对任何材料的塑性加工过程模拟分析都是建立在材料性能基础上的,要获得准确的计算机模拟结果,必须对材料性能进行准确的测试,建立合理准确的材料本构关系模型。因为材料加工过程中屈服曲面的尺寸、位置和具体形状是取决于材料具体性能的,即应力应变曲线、硬化规律,这往往涉及到材料的变形条件、组织演变规律、相变规律等。以往的计算机模拟工作对于材料本构关系没有给予足够的重视,对模拟结果的精度有很大的影响。发达国家在这一领域的工作比较好,例如美国大多数钢铁公司对自己的产品都有全面的测试数据,大多数有限元软件都提供了很多主要材料的性能数据。我国过去不够重视,企业没有提供足够的材料性能数据,买软件时一般也不愿意购买国外的材料数据库,而且国内材料与国外材料有较大差异,很多科研人员简单参照国外的材料数据也造成了模拟结果的不准确性。

可喜的是,近年来国内在这一领域进行了大量工作,科研机构和企业购买了很多热模拟试验机和拉伸试验机,发表了很多关于材料本构模型的文献,国家和企业也越来越重视,科研项目中包含了很多这方面的试验工作。然而,这些工作还不够系统和深入,测试工作非常分散,很少形成专门的材料性能数据库,人们做了大量的重复工作,材料本构关系模型的建立大多是沿用国外已有的模型,缺少针对性和创造性。建立全面系统而准确的材料数据库和本构关系模型,是进一步准确进行有限元模拟的必然要求,国家和企业有必要加大投入和引导、整合,形成高效、节俭的材料数据库。

(2) 工艺缺陷预测与多场耦合模拟分析。未来的有限元软件必须具备对塑性加工工艺缺陷的定量预测分析功能。例如对于大锻件的裂纹和孔洞预测,要能够预测其发生的条件、位置、尺寸、扩展方式和愈合条件。对于冲压失稳起皱,要能预测其起皱的准确位置、条件、起皱的准确方式、尺寸和发展方式。对于缺陷的预测,目前人们主要建立了断裂力学和损伤力学。断裂力学可望对裂纹等缺陷进行定量、准确的预测,但目前距实际工程需求还有些距离,需要解决不少问题。损伤力学发展 20 余年以来吸引了塑性加工界的广泛关注,由于该方法可以给出裂纹等缺陷的定量但统计性预测,虽然不能给出缺陷的尺寸和发展过程,然而对于工艺优化还是很有作用的。

对于一些重要部件和加工过程,材料的组织演变非常重要,有限元法要能够预测其组织的定量变化,包括动态再结晶、相变、组织形态的变化,并以此预测材料的性能。这些工作在轧钢、航空航天领域的关键锻件的锻造过程中都很有必要。

要求有限元法同时可以预测变形过程、温度场变化、工艺缺陷和组织演变,这就必须实现有限元的多物理场耦合模拟,在目前条件下大多采用弱耦合方式,其作用和发展趋势是不可

低估的。

(3) 网格自适应重构、无网格模拟等。对于有限元软件, 网格的自适应重构功能是必需的, 因为这影响到有限元结果的精度、计算的速度、计算的收敛性。软件不但要能够针对特定问题进行初始网格划分, 还要能够根据变形量的大小、畸变程度、计算精度、计算速度要求进行有限次数的网格自动重构和数据的重新分配, 对于网格的密度分布、重构次数和网格类型都要有一定的人工智能能力。

近年来出现了一种无网格计算机模拟方法, 该方法在解决某些工程问题时具有很有效的作用, 得到发展和应用。但该方法不可能是有限元的替代方法, 只能是有限元法的补充。

(4) 成形极限图 FLD 和材料加工图的应用。典型的有限元软件已经将 FLD 集成于软件中, 进行冲压工艺模拟时可以很容易地依据 FLD 对材料的破坏方式进行对比和预测。随着材料数据库的进一步健全, 软件中 FLD 数据和模型也将进一步健全和准确, 利用 FLD 预测板材冲压缺陷并进行工艺调整和优化将成为常用的方法。

近年来, 材料加工图的应用日渐广泛。对于难加工材料, 应用材料加工图可以比较准确地给出材料的加工工艺条件, 例如变形温度、变形速度和变形量等条件, 这一方法已有一些学者进行了探讨应用, 可以通过二次开发, 将材料加工图集成于有限元软件, 在材料数据库的基础上实现加工图用于优化设计塑性成形工艺。

对于一些板成形工艺, 例如高强钢、钛合金、高温合金板材的热冲压, 可以将 FLD 和材料加工图相结合实现缺陷预测与工艺优化。

(5) 有限元法与优化技术的集成应用。目前, 有限元法大多用于材料塑性加工过程的分析, 还不具备独立进行工艺过程的优化能力。诚然, 有限元法可以用于塑性加工过程的分析, 这对工程技术人员分析、预测工艺过程中所发生的现象、理解塑性加工工艺过程是很有益处的, 是一个不可缺少的工具。然而, 人们应用有限元法的目的一般不只是分析工艺过程, 更希望可以进行工艺的优化。一般来说, 人们都是事先设定多种工艺方案, 通过模拟分析多种方案的基础上, 确定一种比较合理的工艺方案, 有一定优化作用, 但还不能保证工艺方案的最佳化, 这是目前有限元在优化技术方面的缺失。科研人员已尝试了多种有限元法与优化技术的结合, 例如在有限元模拟基础上结合人工神经网络、遗传算法等进行优化。目前, 这些方法的应用还不够方便, 但其发展趋势是正确的, 有限元技术和优化技术的结合, 是有限元发展的必然趋势, 工程界将期待更合理先进的优化数学技术与有限元法的结合。

(6) 二次开发技术。为了进一步提高有限元法的准确性, 用户对已有软件的各种模型进行改进和二次开发是完全必要的。例如材料本构关系模型, 对于软件所不具备的材料模型或数据不准确的模型, 都有必要建立特定材料的本构关系模型。进行材料加工过程的组织演变模拟预测, 就有必要进行组织演变模型的二次开发。对于各种缺陷和损伤的预测, 也需要建立破坏或损伤模型, 以实现这些功能。

(7) 有限元在线快速计算 FFEM。工程界不但希望有限元法可以用于塑性加工过程的分析 and 优化, 这些一般是离线计算和分析, 而且工程界还希望有限元法可以应用于在线计算与控制。这对有限元法是很大的挑战。作者和一些合作者在宝钢—国家自然科学基金的资助与要求下, 已经完成了板带钢热轧过程的快速刚塑性有限元法数学计算方法和软件的开发, 可以实现在线快速计算和控制, 在 0.3s 内可以实现主要参数的有限元计算。希望这些工作可以为学术界与工程界开拓出一条新的思路。

1.5 MSC.Marc 有限元软件的特点

MSC.Marc 软件是国际上应用广泛的有限元软件之一,与 DEFORM、ABAQUS、ANSYS、LS-DYNA 等软件一样,在国际国内塑性加工领域得到了广泛应用和认可。这些软件各有其特点和适用范围,人们已经积累了大量应用经验。

首先, MSC.Marc 软件具有强大的前处理和后处理功能,可以实现非常复杂的塑性加工运动和变形过程的描述,例如管材三辊行星轧制过程的建模与分析,这在一些其他软件中很难实现。其次, MSC.Marc 软件适合于塑性加工过程等大变形计算分析,其非线性计算具有很强的能力,因此在塑性加工领域和相关材料加工领域获得了广泛应用。另外, MSC.Marc 软件是一个开放性软件,该软件留出了很多二次开发接口,可以根据实际过程分析需要进行新的模型二次开发,这对于科研机构、学术研究和高技术加工企业非常必要。

本课题组自 2000 年开始使用该软件,解决了大量工程问题,积累了丰富的经验,培养了上百名科技人员和研究生,发表了大量学术论文和学术报告,在国内外建立了一定影响。本书是集成了本课题组的科研人员和博士、硕士研究生及一些同行朋友多年使用 MSC.Marc 软件的一些经验总结,是与多家企业合作解决塑性加工工程问题的一些代表性实例,当然,也仅仅是很多工程问题中的少部分实例。我们发现,很多同行都有对 MSC.Marc 软件的使用经验交流要求,也有大家在解决工程实例中遇到的一些困惑,希望我们提供的这些有限实例能够为企业和学术界的同行提供解决问题的一些思路和经验,同时建立交流讨论的管道和平台。

第2章 有限元法的基本理论

2.1 有限元法概述

有限元法是计算力学的重要分支，是一种将连续体离散化以求解各种力学问题的数值方法。有限元法是根据变分原理近似求解一般连续域问题的数值方法。有限元法起源于1943年Courant发表的论文，这篇论文是Courant 1941年在美国数学界讲演时所用的文稿，但直到1956年，才由Turner、Clough等人用此种方法解决实际问题。1960年Clough用该方法求解弹性力学的平面应力问题时首次使用了“有限元法”这一术语。近50年来，有限元法的理论和应用得到了迅速发展，其应用领域也大为扩展。

有限元模拟对于材料加工是强有力的设计、分析和优化的工具，可以分析预测成形期间零件形状的变化、坯料的变形规律、最终应变分布、温度场分布、全场应力、应变分布、组织性能变化规律、工艺参数对产品质量和尺寸精度的影响规律以及缺陷形成区域等，并可在零件生产前最大限度地优化工艺参数，加快生产周期、降低生产成本，所有这些对于成功地成形复杂形状的零件并减少成形时间是至关重要的。

2.1.1 有限元法的基本思想

有限元法的基本思想如下：

(1) 把连续体看成是有限数目单元体的集合，单元之间只在指定节点处相互铰接，并在节点处引入等效相互作用以代替单元之间实际的相互作用。

(2) 分片近似，即对每个单元选择一个函数来近似描述其物理量（如位移），并依据一定的原理来建立各物理量之间的关系式。

(3) 把各个单元上建立起来的关系式加以集成，得到一个与有限个离散点相关的总体方程，由此可求得有限个离散点上的未知量，从而得到整个问题的近似解。

因此，有限元法的实质就是用场量的分片插值来近似，即将具有无限个自由度的连续体近似看成只有有限个自由度的单元集合体，使问题简化且便于数值分析计算。

2.1.2 有限元法分析计算的思路 and 做法

有限元法分析计算的思路 and 做法可归纳如下：

(1) 物体离散化。将某个工程结构离散为由各种单元组成的计算模型，这一步称作单元剖分。离散后单元与单元之间利用单元的节点相互连接起来；单元节点的设置、性质、数目等应视问题的性质、描述变形形态的需要和计算进度而定（一般情况下单元划分越细则描述变形情况越精确，即越接近实际变形，但计算量越大）。所以有限元中分析的结构已不是原有的物体或结构物，而是同种材料的由众多单元以一定方式连接成的离散物体。很明显，离散化引进了新的近似，产生误差的来源主要包括建模误差、离散化误差和数值误差。建模误差可以通过改进模型来减少，离散化误差可以通过运用更多的单元来减少，数值误差是由于计算过程中计

算机表示的数据和处理过程结果精度有限所致。

(2) 单元特性分析。在有限单元法中, 选择节点位移作为基本未知量称为位移法; 选择节点力作为基本未知量时称为力法; 取一部分节点力和一部分节点位移作为基本未知量时称为混合法。位移法易于实现计算自动化, 所以, 在有限单元法中位移法应用范围最广。当采用位移法时, 物体或结构离散化之后, 就可把单元总的一些物理量如位移、应变和应力等由节点位移来表示。这时可以对单元中位移的分布采用一些能逼近原函数的近似函数予以描述。

2.1.3 有限元分析的基本方法

2.1.3.1 分析问题的性质, 选择适当的工具

(1) 问题识别。分析问题所包含的物理现象, 是否包含非线性问题, 需要多高的计算精度, 是单场问题还是多场耦合问题等。

(2) 明确分析的目标。理解问题的性质, 选择适当的数学模型。明确分析的目标, 是应力、应变、温度、厚度还是组织演变, 是弹塑性问题还是刚塑性问题, 应当使用什么样的单元类型, 是梁单元、平面单元、壳单元还是三维实体单元; 如果是平面单元, 应当使用三角形单元还是四边形单元, 带不带边节点; 如果是三维实体单元, 应当使用四面体单元还是六面体单元, 单元的类型是什么, 要用到多少个单元, 怎样划分网格; 材料的典型物理属性(如屈服强度、强度极限、弹性模量、延伸率、收缩率、硬化指数、泊松比、热传导系数等)是多少; 成分组成、温度和处理条件的差别对材料属性的影响。诸如此类问题都需要在确定模拟方案以前考虑清楚。

(3) 确定模拟方案。模拟方案的合理性直接决定了模拟结果的正确性与实用性, 在制定模拟方案时, 应考虑各种因素的影响, 通常可以采用正交试验设计、均匀试验设计、变更工艺参数法等进行模拟方案设计。

(4) 根据问题的性质和软件的特点选择模拟工具。

(5) 根据分析的目标选择是否需要二次开发。

确定模拟工具以后, 应检查该工具是否能满足分析目标的需要。一般来说, 材料在不同温度下的流动应力应变曲线、组织演变模拟等经常需要进行二次开发, 使用 FORTRAN 等语言编写相应子程序。

2.1.3.2 有限元前处理 (Preprocessing)

(1) 建立实际工程问题的计算模型。

1) 通过软件自身建模。很多有限元软件前处理中都包含建模工具, 这些建模工具自身功能并不强大, 适于简单建模, 模型在进一步分析处理时不容易出错。

2) 借助其他 CAD 软件建模。当模型结构复杂时, 可以采用 CATIA、UG、ProE 等软件建立几何模型, 然后将建立好的几何模型保存为 IGS、IGES、STL 等格式, 导入到有限元软件之中。由于软件的兼容性不同, 通常这些几何模型还需要进行几何修复。

3) 模型简化。抓住问题的本质特征, 排除不必要的细节, 利用几何、载荷的对称性简化模型, 建立等效模型。如对于模具, 通常可以设为刚体, 仅取其工作面几何轮廓面或线建立模型就可以。

(2) 网格划分。

1) 单元质量。理想的单元网格应该是等边三角形、正方形、等边四面体和立方体。但是对于任意的、复杂的几何形状的结构, 试图完全用理想的单元去离散和描述是徒劳的。幸运的