

材料加工理论与技术丛书

刚塑性有限元

——理论、方法及应用

Rigid Plastic Finite Element : The Theory,
Method and Application

刘相华 著



科学出版社

013032936

TG331
06

材料加工理论与技术丛书

刚塑性有限元

——理论、方法及应用

Rigid Plastic Finite Element:
The Theory, Method and Application

刘相华 著



科学出版社

北京

TG331
06



北航

C1640732

380991310

内 容 简 介

本书介绍了作者在刚塑性有限元理论与应用方面的研究成果,证明了刚塑性可压缩材料的变分原理和特定材料总能耗率泛函极值点的唯一性,解决了两类奇异点的处理、半接触单元接触区表征等难题,为轧制问题的刚塑性有限元求解提供了理论基础。同时,本书给出了用刚塑性有限元法解析各种金属成形过程的实例,对轧制过程解析的系列有限元软件进行了详细介绍。

本书可供从事金属材料成形工作的科研人员、工程设计人员、高等院校的教师和研究生参考阅读,也可作为材料加工工程及材料学专业的硕士生、博士生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

刚塑性有限元:理论、方法及应用=Rigid Plastic Finite Element; The Theory, Method and Application/刘相华著. —北京:科学出版社,2013. 3
(材料加工理论与技术丛书)

ISBN 978-7-03-036860-7

I. ①刚… II. ①刘… III. ①轧制-有限元法-研究 IV. ①TG331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 040026 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:纪振红
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 3 月第一次印刷 印张:23 3/4

字数:456 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

“志守一井，力求及泉”。本书是著者坚持刚塑性有限元研究方向，挖掘了近三十年的成果撰写而成的，是用青春、精力、心血换来的。光阴荏苒，回想三十年前，哈尔滨工业大学的王仲仁教授聘请日本著名学者小坂田宏造先生（当时为日本神户大学副教授）来华讲学，使著者有机会接触到刚塑性有限元。时值刚刚获得硕士学位，正在为已经开始的博士研究生工作选择研究方向。

作为改革开放后恢复学位制度的第一届博士研究生，当时真是不知怎样才能写出一篇达到博士毕业标准的学位论文。当怀揣忐忑，向导师白光润教授汇报了学习刚塑性有限元的体会后，导师果断决策：研究课题就定为用刚塑性有限元解析 H 型钢的轧制过程，从此著者便与刚塑性有限元结下了不解之缘。

从零到一的起步是艰难的，至今仍不能忘记当初一遍一遍推导有限元公式，一行一行编写 FORTRAN 程序，一个一个挑出程序中的各种错误，一步一步接近成功。与巨大困难同在的是条件的简陋，当时计算机数量和能力都极其有限，作为沈阳市的最高学府，当时东北大学（时称东北工学院）尚且找不到一台能够用于有限元求解的计算机。中国科学院沈阳计算技术研究所的 ND100（后来升级到 ND500）小型机成了著者开始刚塑性有限元编程计算的起点。

从无到有的有限元程序调试过程是一项充满了艰辛和苦恼的工作，此间常态是被各种各样摸不着头脑的错误所困扰。发现错误、有所进展，带来了喜悦，而让人体会到有所成就的一刻转瞬即逝，随即又陷入新一轮的困扰。那段时光让人寝食不安，是未曾经历过的人难以想象的。不仅仅是在计算机屏幕前面，在路上、床上、餐桌上，处处想的是程序、程序、程序，甚至睡梦中还在不停地抓程序中的“臭虫”（bug）。

糟糕的状况还不止于此，当时使用计算机是按照占用 CPU 时间收费的，把程序投入运行之后，就相当于一张一张地往这个无底洞中扔钞票。经常是在程序运行一段时间之后，陷入两难之中：停止运行意味着又一次前功尽弃，继续下去也不知道还有多长时间能够见到结果，况且也不知道能不能得到所需要的结果。

这种煎熬成为著者学术生涯的第一次“炼狱”，在退下来和冲过去之间，考验了信心，砥砺了意志，检验了智慧，增强了能力。这又是一笔可享用一生的宝贵财富，自那以后，在困难面前总有一种油然而生的豁达——山再高，也高不过脚面；天下无难事，只要肯登攀。

“山重水复疑无路，柳暗花明又一村”。一个偶然的的机会，得知 IBM 公司的个

人电脑(PC机)开始进入中国市场。导师白光润教授了解情况后当即拍板,买!以超过一套房子价格的科研经费实现了著者的梦想,从此有了课题组的第一台微机。这也是沈阳市的第一台PC机,她高傲而孤独地见证了著者在刚塑性有限元征程上一点一滴的进步,伴随着著者走向成功。可随心所欲地占用CPU时间而不必付费,给了著者有力的心理支撑。这段时间著者对她的依赖程度,可比撬动刚塑性有限元这座大山的“阿基米德支点”(Archimedean point)。

这台几乎决定了著者命运的微型机,其技术指标今天说起来人们也许不会相信它能进行刚塑性有限元计算:内存512kB,硬盘10MB,主频4.77MHz。著者采用了压缩存储、化简单元、缩减规模、优化程序等一系列措施,把这台微型机的能力发挥到极致,于1985年在世界上首次完成了H型钢带张力轧制过程的有限元模拟,并在国内期刊上发表了这些成果。令人遗憾的是,由于历史原因,这些成果未能及时在国际上发表,以至于直到5年后的1990年,日本塑性加工学会会长木内学教授和韩国著名有限元专家Park、Oh两位教授还在国际著名期刊上发表文章指出:“以当时的计算机软硬件条件,用有限元模拟H型钢轧制过程‘几乎是不可能的’”(见本书13.4.2节)。

“会当凌绝顶,一览众山小”。在澳大利亚做访问学者期间,有了睁开眼睛看世界的机会,澳大利亚相对宽松的生活节奏,给了著者充足的时间可以对刚塑性有限元的理论、方法和程序进行系统的整理。著者回国后于1994年出版了第一本专著《刚塑性有限元及其在轧制中的应用》。自此以后,研究刚塑性有限元不再是著者的个人行为,它成为东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室中一个团队的集体行动。在那些为刚塑性有限元贡献出青春年华的一批莘莘学子中,不会忘记以下几位的重要贡献:

- 姜正义,于1996年获得东北大学博士学位,将刚塑性有限元的求解范围扩大到纵筋板和冷轧等,长期坚持刚塑性有限元研究方向,在发表的用有限元求解轧制问题论文中,被SCI收录的数量连续多年在国际上名列前茅。把刚塑性有限元方法带到了澳大利亚,目前是澳大利亚伍伦贡大学教授。

- 熊尚武,于1997年获得东北大学博士学位,致力于用刚塑性有限元方法求解板坯立轧和平-立交替轧制过程,率先采用超薄单元处理第一类奇异点。把刚塑性有限元方法带到了西班牙和美国,扩大了刚塑性有限元的国际影响,目前在美国西北大学继续从事有限元方面的研究。

- 宋叔尼,于2000年获得东北大学博士学位,证明了刚塑性可压缩材料总能耗率泛函极值点的存在和唯一性这个世界性难题,后来又在改进求解算法方面进行了深入研究,为加快刚塑性有限元计算速度作出重要贡献。目前是东北大学教授,担任理学院副院长。

- 李长生,于2001年获得东北大学博士学位,先期用有限元法求解了轧辊的

温度场和热疲劳等问题,在无网格法研究中取得系列成果,并出版了专著。后期开展快速有限元研究,取得突破性进展。目前是东北大学教授,担任国家重点实验室金属成形过程数值模拟研究室主任。

- 喻海良,于 2008 年获得东北大学博士学位,擅长用有限元法分析裂纹演变等不连续现象,在博士生学习期间发表有限元方面的研究论文 20 余篇,参加编撰有限元方面的著作 2 部,现在澳大利亚伍伦贡大学从事博士后研究工作。

- 支颖,于 2008 年获得东北大学博士学位,从事有限元与元胞自动机结合进行多层次数值模拟方面的研究,实现了软件组织演变过程的定量化表征、可视化描述和连续化动态展示,现在东北大学任教。

- 梅瑞斌,于 2009 年获得东北大学博士学位,开发了快速有限元计算程序,实现了 70ms 内完成一次刚塑性有限元计算的目标,对有限元在轧制生产线控制中的在线应用进行了最初的尝试,目前在东北大学秦皇岛分校任教。

为刚塑性有限元作出贡献的历届东北大学研究生还有很多,刚塑性有限元曾是他们研究课题解析工具的首选。没有他们的辛勤付出,就不会有本书介绍的刚塑性有限元新进展,在此对所有为本书作出过贡献的人表示感谢!

前面讲的是一个真实故事,也是著者对历届研究生常常谈起的培养情商案例和励志话题,在本书出版的时候,权作前言,以飨读者。

刘相华

2012 年 5 月 30 日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 刚塑性有限元解析的对象和任务	1
1.1.1 金属成形概述	1
1.1.2 适于用刚塑性有限元求解的金属成形过程	2
1.1.3 刚塑性有限元解析的基本任务	3
1.2 金属成形工艺技术的发展	4
1.2.1 轧制技术	4
1.2.2 锻造技术	7
1.2.3 挤压技术	10
1.2.4 回转变形技术	13
1.3 金属成形过程解析理论与方法的回顾	16
1.3.1 工程法	16
1.3.2 滑移线法	17
1.3.3 基于能量原理的各种解法	18
1.4 金属成形过程的数值解法	20
1.4.1 弹塑性有限元法及其早期研究工作	20
1.4.2 国内弹塑性有限元法在金属成形分析中应用进展	22
1.4.3 黏塑性有限元法	23
1.4.4 无网格法	23
1.4.5 其他数值解法	23
1.4.6 早期数值解法的计算时间	24
1.5 刚塑性有限元概述	25
1.5.1 刚塑性有限元法及其早期国外研究工作	25
1.5.2 拉格朗日乘数法	26
1.5.3 罚函数法	27
1.5.4 可压缩法	28
1.5.5 国内刚塑性有限元研究与应用进展	30

1.6 本书内容与结构	30
参考文献	32
第2章 塑性力学基本方程	39
2.1 三维空间问题的基本方程	39
2.1.1 变形、变形速度与位移、位移速度关系(几何方程)	39
2.1.2 变形、变形速度与应力关系(本构方程)	41
2.1.3 力平衡方程	42
2.1.4 屈服条件(塑性方程)	43
2.2 平面变形问题的基本方程	44
2.2.1 平面变形的几何方程	44
2.2.2 平面变形的本构方程	45
2.2.3 平面变形的力平衡方程	45
2.2.4 平面变形的屈服条件	46
2.3 轴对称问题的基本方程	46
2.3.1 轴对称问题的几何方程	47
2.3.2 轴对称问题的本构方程	47
2.3.3 轴对称问题的力平衡方程	48
2.3.4 轴对称问题的屈服条件	49
2.4 塑性成形过程求解的边界条件	49
2.4.1 塑性成形过程的四类边界面	49
2.4.2 外力边界条件	51
2.4.3 位移和速度边界条件	52
2.4.4 摩擦边界条件	54
参考文献	56
第3章 刚塑性材料模型	58
3.1 刚塑性材料的类型	58
3.1.1 理想刚塑性材料	58
3.1.2 刚塑性硬化材料	58
3.1.3 刚黏塑性材料	59
3.1.4 刚塑性可压缩材料概述	60
3.2 刚塑性可压缩材料的力学方程	60
3.2.1 屈服条件	60
3.2.2 塑性势和变形速度	62

3.2.3 应力-变形速度关系及等效变形速度	64
3.2.4 刚塑性可压缩材料的流动法则	65
3.3 刚塑性可压缩材料模型讨论	65
3.3.1 刚塑性可压缩材料模型的罚函数性质	65
3.3.2 可压缩参数对体积变化的影响	66
参考文献	67
第4章 刚塑性材料的变分原理	68
4.1 理想刚塑性材料的变分原理	68
4.1.1 刚塑性材料第一变分原理	68
4.1.2 第一变分原理的一般形式及其物理意义	69
4.1.3 第一变分原理与避免局部极小	70
4.1.4 刚塑性材料第二变分原理	71
4.2 刚塑性可压缩材料的变分原理	71
4.2.1 问题提出	71
4.2.2 刚塑性可压缩材料变分原理的证明	72
4.2.3 刚塑性可压缩材料的变分原理的适用范围	74
4.3 刚塑性可压缩材料的广义变分原理	76
4.3.1 不完全广义变分原理	77
4.3.2 完全广义变分原理	79
4.4 速度敏感材料的总能耗泛函及其变分原理	79
4.4.1 速度敏感材料的总能耗泛函	79
4.4.2 速度敏感材料的变分原理	80
4.5 刚塑性材料变分原理的一般形式	80
参考文献	81
第5章 刚塑性材料能耗率泛函及其性质	82
5.1 总能耗率泛函的构成	82
5.1.1 塑性变形功与功率泛函	82
5.1.2 摩擦功率泛函	83
5.1.3 张力功率泛函	84
5.1.4 速度不连续面上的剪切功率泛函	84
5.1.5 总能耗率泛函	85
5.2 总能耗率泛函极值点唯一性	86
5.2.1 关于极值点唯一性的两个猜想	86

5.2.2	极值点唯一性证明	87
5.2.3	泛函极值点唯一性的讨论	99
5.3	总能耗率极值点的特征及收敛条件判定	99
5.3.1	极值点附近的泛函特征	99
5.3.2	总能耗率泛函收敛条件	100
5.3.3	速度修正量收敛条件	101
	参考文献	102
第6章	刚塑性有限元的求解方法与途径	103
6.1	刚塑性有限元的求解的思路和做法	103
6.1.1	基本思路	103
6.1.2	求解过程的一般步骤	103
6.1.3	求解框图	104
6.2	确定研究对象的求解区域	105
6.2.1	存在两个坐标面对称的成形过程	105
6.2.2	存在一个坐标面对称的成形过程	106
6.2.3	轴对称和点对称的成形过程	107
6.2.4	不对称的成形过程	107
6.2.5	塑性加工过程对称性应满足的条件	108
6.3	总能耗率泛函的计算方法	108
6.3.1	计算能耗率泛函需要的条件	108
6.3.2	单元能耗率泛函的计算方法	109
6.3.3	按单元求和的总能耗率泛函	109
6.4	总能耗率泛函的最小化	110
6.4.1	总能耗率泛函驻值条件	110
6.4.2	拟牛顿法求解	111
6.4.3	总能耗率泛函最小值的一维搜索	112
6.5	温度场与速度场的耦合求解	114
6.5.1	温度场与速度场的准耦合求解	114
6.5.2	准耦合求解时的收敛判定	114
6.5.3	温度场与速度场的完全耦合求解	116
6.5.4	完全耦合求解时的收敛判定	117
6.5.5	温度场与速度场的伪耦合求解	118
	参考文献	118

第 7 章 刚塑性有限元网格分析	120
7.1 有限元的单元与节点概述	120
7.1.1 单元、节点和网格的基本概念	120
7.1.2 单元的整体坐标和局部坐标	120
7.1.3 节点和单元的编号	121
7.2 单元类型分析	122
7.2.1 平面单元	122
7.2.2 三维单元	123
7.2.3 其他单元	124
7.3 常用单元的插值函数	124
7.3.1 形函数概念与基本性质	124
7.3.2 二维三角形线性单元的形函数	125
7.3.3 二维四边形线性等参单元的形函数	126
7.3.4 三维六面体线性等参单元的形函数	128
7.3.5 一维线性等参单元的形函数	129
7.4 有限元网格生成	130
7.4.1 有限元网格划分	130
7.4.2 有限元网格的欧拉构形与拉格朗日构形	131
7.4.3 单元和节点关系调查	132
7.4.4 网格自动生成与网格更新	132
7.4.5 用于金属成形分析的有限元网格规模	133
参考文献	134
第 8 章 刚塑性有限元计算公式	135
8.1 概述	135
8.2 变形速度与位移速度关系: B 矩阵	135
8.2.1 基本概念和思路	135
8.2.2 二维问题的 B 矩阵	135
8.2.3 三维问题的 B 矩阵	137
8.3 雅可比矩阵及其行列式	139
8.3.1 复合函数的求导法则	139
8.3.2 二维问题的雅可比矩阵及其行列式	139
8.3.3 三维问题的雅可比矩阵及其行列式	140
8.3.4 一维问题的雅可比矩阵及其行列式	142

8.4 高斯求积方法	143
8.4.1 基本概念和求解思路	143
8.4.2 一维插值求积法	144
8.4.3 高斯积分点和求积系数	145
8.4.4 二维问题的高斯求积公式	148
8.4.5 三维问题的高斯求积公式	149
8.4.6 一维问题的高斯求积公式	149
8.5 二维问题总能耗率泛函极值的求解	150
8.5.1 二维问题单元能耗率的数值积分	150
8.5.2 二维问题总能耗率泛函的集成与分解	151
8.5.3 二维问题总能耗率泛函的一阶偏导数:梯度	151
8.5.4 二维问题总能耗率泛函的二阶偏导数:汉森矩阵	155
8.6 三维问题总能耗率泛函极值的求解	157
8.6.1 三维问题单元能耗率的数值积分	157
8.6.2 三维问题总能耗率泛函的集成与分解	157
8.6.3 三维问题总能耗率泛函的一阶偏导数:梯度	158
8.6.4 三维问题总能耗率泛函的二阶偏导数:汉森矩阵	163
参考文献	166
第9章 求解中几个关键问题及其处理	167
9.1 设定初速度场	167
9.1.1 初等方法设定初速度场	167
9.1.2 细化网格法设定初速度场	170
9.1.3 G 函数法设定初速度场	171
9.2 奇异点的处理	174
9.2.1 第一类奇异点的概念	174
9.2.2 第一类奇异点的处理方法	174
9.2.3 第二类奇异点的概念	177
9.2.4 第二类奇异点的处理方法	178
9.3 静力学条件检验与自由表面宽展检验	179
9.3.1 静力学条件检验的必要性及其基本思路	179
9.3.2 节点力不平衡量的计算	180
9.3.3 静力学条件检验方法	180
9.3.4 自由表面宽展检验	181

9.4 大矩阵的处理	181
9.4.1 B 矩阵的分析与处理	181
9.4.2 汉森矩阵的特性分析	182
9.4.3 节点整体编号与汉森矩阵的半带宽	183
9.4.4 汉森矩阵的处理	188
参考文献	190
第 10 章 金属成形过程温度场的有限元解法	191
10.1 传热问题的基本理论	191
10.1.1 傅里叶传热定律	191
10.1.2 三维问题的热传导方程	192
10.1.3 二维问题的热传导方程	193
10.1.4 轴对称问题的热传导方程	194
10.1.5 求解热传导方程的初始条件和边界条件	195
10.2 求解温度场的数值计算方法	196
10.2.1 传热问题的泛函	197
10.2.2 热传导问题的变分原理	197
10.2.3 求解温度场的有限元离散化	198
10.3 求解温度场的有限元公式	199
10.3.1 二维传热问题的有限元公式	199
10.3.2 三维传热问题的有限元公式	201
10.3.3 求解温度方程组的集成	202
10.3.4 温度降过程的差分求解	203
参考文献	205
第 11 章 轧制过程二维温度场分析程序开发	206
11.1 FATOF-2D 程序概况	206
11.1.1 FATOF-2D 程序功能	206
11.1.2 FATOF-2D 程序子程序集合	207
11.1.3 FATOF-2D 流程图	207
11.1.4 FATOF-2D 程序结构树	207
11.2 FATOF-2D 主程序及数据处理程序	209
11.2.1 FATOF-2D 版本信息	209
11.2.2 数据定义及公用数据区	210
11.2.3 建立数据通道及读入数据	211

11.2.4 调用子程序及程序终止	212
11.3 FATOF-2D 中的有限元网格相关程序	213
11.3.1 网格生成与节点调查程序	213
11.3.2 形函数、雅可比矩阵和 B 矩阵计算程序	215
11.3.3 数组清零子程序	217
11.4 FATOF-2D 核心程序	219
11.4.1 线性方程组系数矩阵生成程序	219
11.4.2 线性方程组系数矩阵求解程序	222
11.4.3 计算结果输出程序	222
参考文献	225
第 12 章 三维平板轧制过程刚塑性有限元程序开发	226
12.1 FAROF-3D 程序概况	226
12.1.1 FAROF-3D 程序功能	226
12.1.2 FAROF-3D 程序子程序集合	227
12.1.3 FAROF-3D 流程图	228
12.1.4 FAROF-3D 程序结构树	229
12.2 FAROF-3D 主程序及数据区	229
12.2.1 版本信息	229
12.2.2 数据定义与公用数据区	231
12.2.3 建立数据通道及读入数据	232
12.2.4 调用子程序及程序终止	233
12.3 FAROF-3D 中的有限元网格相关程序	234
12.3.1 网格生成及节点赋初值程序	234
12.3.2 单元和节点关系调查程序	239
12.3.3 未知数序列生成程序	240
12.3.4 形函数及其偏导数与高斯点计算程序	241
12.3.5 B 矩阵计算程序	242
12.4 FAROF-3D 核心程序	245
12.4.1 能耗率计算程序	245
12.4.2 总能耗率最小化计算程序	247
12.4.3 二阶偏导数计算程序	252
12.5 通用程序及辅助程序	253
12.5.1 大型线性方程组求解程序	253

12.5.2 数组清零程序	254
12.5.3 应力场计算程序	255
12.5.4 中间结果数据检查程序	256
12.5.5 输出计算结果程序	257
参考文献	260
第 13 章 刚塑性有限元求解轧制问题的应用实例	261
13.1 概述	261
13.2 二维平板轧制过程解析	261
13.2.1 铜板带轧制过程解析	261
13.2.2 轧件头部弯曲的有限元解析	264
13.3 三维板材轧制过程的有限元分析	268
13.3.1 板坯立轧过程的有限元模拟	268
13.3.2 带有狗骨形板材平轧的有限元模拟	269
13.3.3 轧制异型扁坯的有限元模拟	274
13.3.4 纵筋板的有限元模拟	276
13.3.5 带凸度板的有限元模拟	279
13.4 型材轧制过程的有限元分析	282
13.4.1 棒线材轧制的有限元解析	282
13.4.2 H 型钢轧制过程的有限元解析	288
13.4.3 异型断面钢材轧制的有限元解	292
参考文献	297
第 14 章 刚塑性有限元求解应用实例	299
14.1 锻压过程的有限元分析	299
14.1.1 平板压缩过程的有限元分析	299
14.1.2 圆环压缩过程的有限元分析	300
14.1.3 异型断面模锻的有限元分析	304
14.2 各类挤压过程的有限元分析	306
14.2.1 等通道挤压过程的有限元分析	306
14.2.2 反挤压过程的有限元分析	309
14.2.3 连续铸挤过程的有限元分析	311
14.3 回转成形过程的有限元分析	313
14.3.1 环形件轧制成形的有限元分析	313
14.3.2 楔横轧过程的有限元分析	316

14.3.3 斜轧穿孔过程的有限元分析	318
参考文献	321
第 15 章 金属成形数值模拟研究新进展	323
15.1 金属成形过程的多尺度数值模拟研究进展	323
15.1.1 轧制中组织性能演变的 FEM 模拟	323
15.1.2 FEM+CA 对轧制中组织演变的模拟	324
15.1.3 轧制组织演变的晶体塑性有限元模拟	325
15.2 裂纹及夹杂等不连续问题的数值模拟	326
15.2.1 轧制中轧件表面裂纹演变的模拟	326
15.2.2 轧制中轧件内部垂直裂纹演变的模拟	329
15.2.3 热轧中内部裂纹演变的实验与分析	330
15.3 快速有限元研究及进展	331
15.3.1 有限元求解轧制问题的计算时间	331
15.3.2 快速有限元与提高计算速度的措施	332
15.3.3 计算条件和快速有限元的计算效果	333
15.4 金属成形有限元分析发展方向的展望	334
15.4.1 常规塑性有限元分析的发展方向	334
15.4.2 塑性有限元发展的新趋势	336
参考文献	337
附录	340
附录 1 张量及其表示法与求和约定	340
附录 2 正文变量数据字典	342
附录 3 程序变量数据字典	344
附录 4 索引词表	348
附录 5 人名索引	357

第 1 章 绪 论

刚塑性有限元是一种数值计算方法,主要用来对金属材料成形过程进行分析与模拟,适用于大塑性变形。这里所说的大变形与结构分析中刚刚进入到塑性状态的大变形不同,是指使金属材料经轧制、锻造、挤压、拉拔等塑性加工过程,发生百分之几到百分之几十的永久变形。与这么大的塑性变形相比,弹性变形往往可以被忽略,因而可以用刚塑性材料模型进行求解^[1]。

与其他方法相比,刚塑性有限元法出现得较晚,它建立在已有的一些理论基础之上,借鉴了其他方法的一些长处,形成了自己具有特色的解法体系。为了深入掌握刚塑性有限元法的来龙去脉,本章首先对其解析的对象金属塑性加工过程的进展加以介绍,然后介绍与刚塑性有限元相关的几种用于分析金属成形过程的常用方法,最后概要介绍刚塑性有限元在理论和应用方面的进展。

1.1 刚塑性有限元解析的对象和任务

刚塑性有限元的解析对象是金属成形过程。金属是支撑人类社会发展的最重要材料,近年来随着科学技术的进步和社会经济的发展,金属成形工艺技术得到了快速发展。2011 年全世界钢产量超过 15 亿 t,我国钢产量接近 7 亿 t;铝、铜、镁、铅、锌等 10 种有色金属仅我国 2010 年总产量就超过 3400 万 t,这些金属材料中绝大部分要经过塑性加工获得所需要的形状尺寸和使用性能,这是推动金属成形工艺与理论发展的原动力。

1.1.1 金属成形概述

金属成形对应的英文有 metal forming^[2] 或者 metal working^[3] 两种表达方式,因前者比后者更加明确与金属切削加工的区别,故本书采用前者。有意思的是,中文对金属成形也有两种表达方法:有人把“成形”写成“成型”,其实两者的含义是有差异的。一般认为金属的“成型”常用于带有模型的铸造过程,因为过去铸模经常用沙土制成,所以字型从“土”。而描述主要依靠外力使工件发生的形状改变,与“变形”一脉相承用“成形”更为贴切。过去这两个词泾渭分明,不曾混淆。在高等院校本科生专业名称改为“材料成型与控制工程”之后,有些人分不清究竟该使用“成形”还是“成型”。