

普通高等教育“十二五”规划教材



塑性成形 数值模拟

刘建生 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

塑性成形数值模拟

主 编 刘建生

副主编 李 萍 张 建 安红萍

参 编 运新兵 田继红 褚 亮

主 审 董湘怀



机械工业出版社

有限元方法是解决工程问题的强有力的数值分析方法之一,本书在介绍刚塑性有限元相关理论及方法的基础上,重点就有限元模拟的关键技术、变形与传热耦合分析、微观组织结构演变模拟预测、材料模型建立及简化方法进行了阐述。在此基础上,使用商用软件 DEFORM 作为平台介绍了刚塑性有限元软件的应用,并给出了一些工程问题的计算实例和相应的分析结果。全书共分 10 章,第 1 章介绍了有限元模拟方法的发展、分类等基本知识;第 2~5 章介绍了刚塑性有限元基本理论;第 6 章介绍了变形与传热耦合分析技术;第 7 章介绍了有限元模拟的关键技术;第 8~10 章介绍了有限元建模方法、有限元软件应用,每章后配有相应的思考题。

本书可作为材料成形及控制工程专业本科生、材料加工工程专业研究生的教学用书,也可供塑性成形领域从事研究和生产的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

塑性成形数值模拟/刘建生主编. —北京:机械工业出版社,2014.8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-47536-1

I. ①塑… II. ①刘… III. ①金属压力加工—塑性变形—数值模拟—高等学校—教材 IV. ①TG302

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 169989 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:冯春生 责任编辑:冯春生 程足芬 陈崇昱 余 晖
版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔
封面设计:张 静 责任印制:李 洋
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·13 印张·293 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-47536-1
定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育“十二五”规划教材 编审委员会

主任委员 李荣德 沈阳工业大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

方洪渊 哈尔滨工业大学

朱世根 东华大学

邢建东 西安交通大学

李永堂 太原科技大学

聂绍珉 燕山大学

王智平 兰州理工大学

许并社 太原理工大学

李大勇 哈尔滨理工大学

周 荣 昆明理工大学

葛继平 大连交通大学

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁雨田 兰州理工大学

王卫卫 哈尔滨工业大学(威海)

邓子玉 沈阳理工大学

刘金合 西北工业大学

毕大森 天津理工大学

闫久春 哈尔滨工业大学

张建勋 西安交通大学

李 桓 天津大学

李亚江 山东大学

周文龙 大连理工大学

侯英玮 大连交通大学

赵 军 燕山大学

黄 放 贵州大学

薛克敏 合肥工业大学

文九巴 河南科技大学

计伟志 上海工程技术大学

刘永长 天津大学

华 林 武汉理工大学

许映秋 东南大学

何国球 同济大学

李 尧 江汉大学

李 强 福州大学

邹家生 江苏科技大学

武晓雷 中国科学院

姜启川 吉林大学

梁 伟 太原理工大学

蒋百灵 西安理工大学

戴 虹 西南交通大学

秘 书 长 袁晓光 沈阳工业大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

塑性成形及模具教材编委会

顾问

王仲仁 哈尔滨工业大学
聂绍珉 燕山大学

俞新陆 清华大学

主任委员 李永堂 太原科技大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

邓子玉 沈阳理工大学
华 林 武汉理工大学
陈拂晓 河南科技大学
赵 军 燕山大学

刘建生 太原科技大学
许映秋 东南大学
周文龙 大连理工大学
薛克敏 合肥工业大学

委员 (按姓氏笔画排序)

于宝义 沈阳工业大学
王雷刚 江苏大学
石连升 哈尔滨理工大学
刘守荣 中国农业大学
毕大森 天津理工大学
闫 洪 南昌大学
侯英玮 大连交通大学
郝滨海 山东大学
曹建国 四川大学
董湘怀 上海交通大学

王 群 湖南大学
冯再新 中北大学
刘全坤 合肥工业大学
吕 琳 重庆理工大学
池成忠 太原理工大学
李国禄 河北工业大学
姚兴军 华东理工大学
袁子洲 兰州理工大学
梅 益 贵州大学
霍晓阳 河南理工大学

秘书长 宋建丽 太原科技大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

前言

如今, 刚塑性有限元模拟技术已经在生产实际中获得越来越广泛的应用, 逐渐成为金属塑性成形领域工程技术人员从事研究和设计工作的必要手段。采用有限元模拟技术取代人们长久以来采用的基于经验的试错方法进行工艺及模具设计, 将缩短新产品和新工艺的开发试制周期, 降低材料消耗, 减少费用, 并且更能保证加工制品的质量。近年来, 为了满足塑性加工制件不断向着大型化、精密化方向发展及其内在质量和尺寸精度日益提高的要求, 有限元模拟技术在金属塑性加工理论研究和生产实际应用中显示出了不可替代的作用, 成为对塑性成形工艺进行科学预测、工艺优化和定量控制的有效方法。同时, 各种有限元模拟软件也不断被开发且广泛应用, 并在工程设计、数据分析方面得到普遍的认可。目前, 与发达国家相比, 虽然我国的模拟技术水平还存在一定差距, 但是在大型锻造、精密成形等方面还是取得了一定的进展。

金属塑性成形是一个极其复杂的过程, 它不仅变形量大, 而且成形过程及产品质量受材料性能、摩擦状况、工艺条件、模具结构及加工设备等多种因素的共同影响。所以, 对塑性有限元数值模拟技术的要求很高。除了塑性大变形的非线性特征之外, 还涉及模具型腔几何描述、动态接触边界条件处理、有限元网格重分、变形与传热耦合等关键技术问题的解决。本书作者自 20 世纪 80 年代初期开始, 一直从事有限元模拟技术研究、生产应用及相关教学工作, 在刚塑性有限元理论、模拟关键技术及软件开发等方面作了一些有益的探索, 积累了一些理论研究和应用成果。为了促进我国模拟技术及软件水平的提高, 满足塑性成形行业日益发展的要求, 现将长期以来的有关研究结果整理、编撰成书, 供同行参考。

本书第 1 章由太原科技大学刘建生教授执笔, 第 2 章、第 8 章由合肥工业大学李萍教授执笔, 第 3 章由天津理工大学张建教授执笔, 第 4 章、第 5 章由天津理工大学褚亮副教授执笔, 第 6 章、第 7 章由太原科技大学安红萍副教授执笔, 第 9 章由太原科技大学田继红副教授执笔, 第 10 章由大连交通大学运新兵教授执笔。全书由刘建生统稿, 上海交通大学董湘怀教授主审。

鉴于编者水平有限, 书中难免有不当之处, 敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言	2.3.4 增量迭代法	26
第1章 绪论	思考题	26
1.1 概述	第3章 刚塑性有限元法原理	27
1.2 塑性成形工艺模拟及方法	3.1 概述	27
1.2.1 塑性成形工艺的特点	3.2 刚塑性材料变形的变分原理	28
1.2.2 塑性成形研究的目标和任务	3.2.1 刚塑性变形的边值问题	28
1.2.3 塑性成形模拟分析方法	3.2.2 刚塑性变形的马尔可夫 (Markov) 变分原理	28
1.3 塑性成形中的有限元法概述	3.2.3 刚塑性变形的广义变分原理	31
1.3.1 塑性有限元法的分类	3.3 塑性边界条件及泛函	33
1.3.2 有限元法发展历程与趋势	3.3.1 边界条件	34
思考题	3.3.2 摩擦力计算模型	34
第2章 数学理论基础	3.3.3 摩擦功率公式	35
2.1 变分法	3.4 刚性区的处理	36
2.1.1 泛函和泛函极值	思考题	37
2.1.2 弹性力学的变分原理	第4章 平面应变问题	38
2.1.3 弹性理论的广义变分原理	4.1 概述	38
2.1.4 里茨 (Ritz) 法	4.2 四节点四边形单元	38
2.2 加权余量法	4.2.1 四节点四边形单元的形状函数	38
2.2.1 加权余量法的基本思想	4.2.2 单元应变率矩阵	40
2.2.2 加权余量法的基本方法	4.3 刚塑性有限元列式	42
2.3 非线性方程组求解方法	4.3.1 单元刚度方程	43
2.3.1 直接迭代法	4.3.2 体积积分公式	48
2.3.2 牛顿-拉弗森 (Newton-Raphson) 迭代法	4.3.3 整体刚度方程	48
2.3.3 载荷增量法	4.4 接触边界条件的处理	52
	4.4.1 接触边界的离散化	52

4.4.2 摩擦功率的有限元公式	53	7.1.1 近似泛函法	81
4.4.3 速度约束条件的引入	53	7.1.2 直接迭代法	82
4.5 刚塑性有限元分析求解步骤	56	7.2 模具型腔的几何描述	83
4.5.1 刚塑性有限元分析方法	56	7.2.1 代数法	84
4.5.2 刚塑性有限元分析步骤	57	7.2.2 NURBS 法	87
思考题	58	7.3 动态接触边界的自动处理	89
第5章 轴对称问题与空间问题	59	技术	89
5.1 概述	59	7.3.1 基于代数法的自由节点	90
5.2 形函数与单元刚度方程	59	接触模具的判断	90
5.2.1 轴对称单元	59	7.3.2 基于 NURBS 的自由节点	92
5.2.2 四面体单元	61	接触模具判断	92
5.2.3 八节点六面体单元	62	7.3.3 增量时间步长 Δt_m 的	94
5.2.4 轴对称单元的有限	64	确定	94
元公式	64	7.3.4 接触节点的位置调整	94
5.2.5 六面体单元的有限	67	7.3.5 边界接触节点的脱模	95
元公式	67	判断	95
5.3 接触边界条件的处理	69	7.4 有限元网格畸变与网格重分	95
5.3.1 接触边界的离散化	69	7.4.1 网格重新划分的判别	96
5.3.2 摩擦功率的有限元公式	70	准则	96
思考题	70	7.4.2 网格重新划分的技术	97
第6章 变形与传热的耦合分析	71	方法	97
6.1 概述	71	7.4.3 新旧网格间的数据转换	101
6.2 塑性成形中传热问题的基本	71	思考题	105
理论	71	第8章 刚塑性有限元建模基础	106
6.2.1 含内热源的瞬态热传导	71	8.1 概述	106
问题	71	8.2 材料屈服应力模型	106
6.2.2 初始条件和边界条件	72	8.2.1 理想刚塑性材料	107
6.3 有限元公式与求解	73	8.2.2 刚塑性硬化材料	107
6.3.1 传热问题的变分原理	73	8.2.3 刚塑性可压缩材料	110
6.3.2 有限元公式	74	8.3 工件与模具接触界面参数	111
6.3.3 瞬态传热问题的解法	77	8.3.1 模具与工件之间的摩擦	111
6.4 耦合分析技术	78	8.3.2 工件与模具之间的	113
6.4.1 耦合迭代法	79	热量传递	113
6.4.2 分开迭代法	80	8.4 再结晶模型	115
思考题	80	8.4.1 热变形中金属的再结晶	116
第7章 刚塑性有限元法实施中的	81	8.4.2 动态再结晶动力学模型	116
关键技术	81	8.4.3 静态再结晶动力学模型	117
7.1 初始速度场确定	81	8.4.4 亚动态再结晶动力学	118
		模型	118



思考题	119
第9章 刚(黏)塑性有限元模拟	
应用	120
9.1 概述	120
9.2 锻造成形工艺	121
9.2.1 大型锻件自由锻工艺	
模拟	121
9.2.2 模锻	131
9.3 挤压成形工艺	135
9.3.1 挤压工艺简介	135
9.3.2 半轴套管热挤压成形数值模拟与实验	136
9.3.3 汽车半轴花键冷挤压工艺数值模拟	140
9.4 轧制成形工艺	141
9.4.1 轧制成形工艺概述	141
9.4.2 中空钢轧制过程数值模拟	142
9.5 其他	145
9.5.1 护环热成形微观组织模拟	145
9.5.2 大型核电SG水室封头热拉深成形	148

思考题	149
第10章 刚塑性有限元模拟软件	
DEFORM	150
10.1 DEFORM-3D 软件简介	150
10.1.1 DEFORM 的发展史	150
10.1.2 DEFORM-3D 软件的特点	151
10.2 DEFORM-3D 软件的模块结构	151
10.2.1 前处理器	151
10.2.2 模拟处理器	152
10.2.3 后处理器	152
10.3 DEFORM-3D 软件功能介绍	152
10.3.1 操作图标的功能	152
10.3.2 前处理功能操作	154
10.3.3 后处理功能操作	170
10.4 DEFORM-3D 软件应用实例	179
10.4.1 顶凸垫锻压成形模拟前处理	179
10.4.2 进行求解计算	189
10.4.3 后处理	189
思考题	196
参考文献	197

第 1 章 绪 论

1.1 概述

金属塑性成形是金属加工的一种重要工艺方法，它不仅生产效率高、原材料消耗少，而且可以有效地改善金属材料的微观组织和力学性能。因而，塑性成形作为制造业的一个重要分支，广泛地用于工业制造中。据统计，全世界有 75% 的钢材经过塑性成形，在汽车行业生产锻件和冲压件的数量约占零件总数的 60% 以上，在冶金、航空、船舶和军工等工业生产部门也都占有相当大的比例。

作为一种传统的制造行业，近几十年来，随着社会经济和其他相关支柱产业的发展，塑性成形行业得到前所未有的新发展，新工艺、新技术、新设备和新产品层出不穷。当前，塑性成形制件具有尺度大型化、形状复杂化、成形精密化、结构轻量化和制造工艺短流程化等主要发展趋势，并且成形与成性一体化的精确控制要求也在日益提高。因此，要实现塑性成形制件的内在质量和尺寸精度的稳定和提高，必须提高塑性成形技术的科学化和可控化水平。与传统的成形工艺相比，现代塑性成形技术对毛坯与模具设计、材料塑性流动及组织控制等方面要求更高，所以采用基于经验的试错设计方法也就更不能满足实际需要，引入以计算机为工具的现代设计分析手段已成为人们的共识。自 20 世纪 80 年代以来，CAD、CAE 等单元技术开始运用到塑性成形工艺分析、规划与模具设计上。随着这些单元技术的不断发展，近年来通过它们的集成形成了基于知识的成形专家系统，并且有朝着集成化的塑性成形虚拟制造系统发展的趋势。作为系统必要支撑技术的计算机数值模拟技术，早已受到世界各国尤其是发达国家的高度重视，在国外已有不少塑性有限元商品软件推出，并在许多国家的研究部门和生产企业中得到应用，如美国的 DEFORM、ABAQUS、MARC 和法国的 FORGE 等。我国的许多高校和科研院所在该方面的研究和软件开发已有相当积累，在相关企业中的应用也越来越广泛。

然而，对于塑性成形行业整体来讲，目前仍处于以经验、知识为依据，以试错为基本方法的工艺技术阶段。如图 1-1 所示，塑性成形生产流程一般是根据市场需求，对制品进行加工工艺性分析，确定成形工艺方案，同时进行模具设计与制造，然后利用模具依照已确定的工艺规程进行生产，其中最关键的环节是模具的设计和制造。模具设计与制造合理与否，直接决定着能否生产出满足要求的制品。传统的模具设计与制造过程是一个基于经验知识的串行工作过程，企业的各部门之间相互独立、专业化程度高，模具设计和制造作为两个独立的环节，二者之间缺乏有机的联系和信息反馈。模具的设计与制造过程需要经过设计、试制、再修改设计的多次反复，导致模具的制造周期长、成本高，也就失去了市场竞争的优势。这种“反复试验直到工艺及模具设计合理”是传统塑性成形技术的重要特征，它使得产品的

质量保证主要靠检验来把关,而不是融入设计、制造的全过程。CAD/CAE 技术在我国塑性成形中的应用尚处于初级阶段,主要是基于一般的经验和知识,应用 CAD 系统代替简单而重复的手工设计工作,把设计人员从繁冗的设计绘图中解放出来;CAE 系统的应用还不是很普遍,因此缺乏对设计对象的分析、检测乃至修改功能,对塑性成形流程没有起到质的改变。这种现状不能满足整个制造业的发展要求。

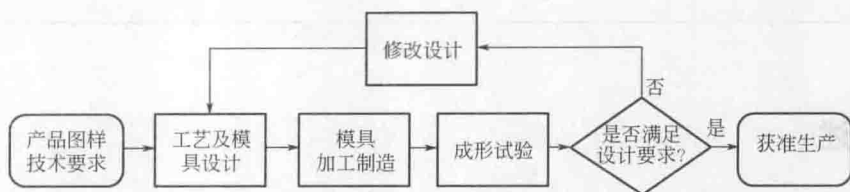


图 1-1 传统塑性成形工艺、模具及产品开发流程简图

解决上述问题的重要途径是将虚拟制造技术应用于塑性成形全过程,其中的成形过程模拟分析(虚拟仿真)显得尤为重要。借助于成形过程的虚拟仿真,可以在模具加工制造和工艺实施之前,检验模具关键工作部分形状和尺寸设计的合理性,分析材料的流动规律,预测是否产生缺陷,还可以对其他工艺参数进行优化分析。这样,可以确保成形工艺和模具的设计及制造一次成功,主要问题在设计阶段就完全解决。从而使得塑性成形进入以模型化、最优化和柔性化为特征的工程科学阶段,提高塑性成形行业的科学化水平。

1.2 塑性成形工艺模拟及方法

1.2.1 塑性成形工艺的特点

金属塑性成形是利用金属的塑性即金属产生塑性变形的能力,使金属材料在外力作用下成形的一种工艺方法。塑性成形工艺具有如下特点:

1. 成形工艺的多样性

在工业生产中,由于生产规模、用途及目的的不同产生了多种多样的塑性成形工艺方法。按工艺特征可以分为:轧制、挤压、拉拔、锻造、冲压等。通常轧制、拉拔和挤压是生产型材、板材、管材和线材等金属材料的加工方法,属于冶金工业行业;而锻造、冲压则是用来制造机器零件或毛坯的加工方法,属于机械制造行业。随着生产要求和技术的发展,一些传统塑性成形工艺方法相互渗透、交织和演变,产生了一些新的工艺,如在锻造中引入了挤、轧等变形方式来生产锻件,用辊锻方法生产连杆、叶片,用三辊横轧方法生产长轴锻件,用挤压方法生产汽阀、万向节等。与此同时,对于一些特殊零件发展出新的加工方法,如采用旋压法生产压力容器的封头。这些技术的发展,既扩大了塑性成形工艺的应用领域,又使生产率得到进一步提高。

塑性成形中依据变形特征的不同又可分为体积成形工艺和板料成形工艺。体积成形工艺是通过金属材料体积的大量转移来获得机器零件(毛坯)或各种型材,如锻造、轧制、挤压等工艺方法都属于体积成形工艺。体积成形工艺的重要特征是金属产生较大的塑性变形,因此要有较好的塑性,故多在热态下进行。板料成形工艺是指利用专用模具对板料进行塑性

成形工艺,如冲压、旋压工艺。板料成形时金属材料的塑性变形并不一定很大,但与模具的相对运动较大,通常板料成形在室温下进行。

随着技术的发展、加工设备刚度的提高以及新模具材料的应用,塑性成形产品的精度也在不断提高,出现了许多精密塑性成形技术,如精密锻造、精密冲裁等,这些变化在体积成形类工艺方面尤其明显。金属材料体积成形工艺大多是在热态下进行的,因而其制品的表面质量和尺寸精度都较低,采用不加热或少加热的方法可大大提高精度。例如,精密锻造的锥齿轮,其齿形部分的精度可达8级,表面粗糙度 Ra 达 $3.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$,可以不经切削加工直接使用;在轧制方面,冷轧板带厚度精度最高可达 $\pm 0.003\text{mm}$ 。

多种塑性成形方法并存和发展,丰富了塑性成形技术,也满足了制造业日益发展的需要。同时也增加了塑性成形研究和工程实施的难度,这是由于不同加工方法的工艺特征(指加工设备、模具、工艺参数、工艺难点等)和变形特征(变形模式、材料行为)存在着较大的差异。

2. 变形行为的复杂性

尽管塑性成形工艺方法种类繁多,但它们的变形过程都具有相同之处,即将一个几何形状简单的金属毛坯,通过模具或工具的作用,产生塑性变形而加工成形状较为复杂的产品。这个变形过程比较复杂,影响因素较多,概括起来有以下特征。

(1) 变形机理的复杂性 塑性成形时,金属材料发生很大的塑性变形,例如有些模锻、挤压工艺中,等效应变能达到甚至超过2。这时材料的本构关系和几何关系同时存在着非线性,即物理非线性(应力与应变或应变率的关系)和几何非线性(应变或应变率与位移或位移速度间的关系),由此而导致了分析模型和理论的复杂化。此外,这种大变形对不同类别工艺又有相异的表征,如体积成形工艺中,塑性变形区域和大小远比弹性变形大得多,因而变形后的弹性回复可忽略不计,而板料成形工艺中塑性变形的大小与弹性变形是可比的,因而变形后的弹性回复或回弹必须考虑。

(2) 变形金属材料性能的可变性 塑性成形时金属材料的屈服应力(或流动应力、变形抗力)是反映金属发生塑性变形的重要力学性能参数,影响屈服应力的因素主要有:

1) 与变形过程无关的参数。它们包括材料的化学成分,组织结构,相、晶粒度和变形工艺前的应变历史等。

2) 与变形过程相关的参数。变形温度、变形程度和变形速率,这三个参数习惯上称为变形条件。此外,金属材料塑性变形过程中,其微观结构也在不断变化,由此而影响到材料的屈服应力。

在塑性变形过程中,金属材料屈服应力变化就是由变形条件的变化所引起的。一方面,在变形过程的任一瞬时,由于这些参数场在变形区内分布的不均匀性,而导致屈服应力在金属材料内部分布不均匀;另一方面,随着变形过程的进行,这些参数场本身也在变化,从而造成各处屈服应力的进一步变化。应当指出,这种变化着的不均匀分布的材料性能对塑性变形过程也同时产生很大的影响。

(3) 接触界面与摩擦作用 绝大部分塑性成形工艺中,金属毛坯是由模具在接触界面上施加压力而逐步产生塑性变形的。这个接触界面的作用对金属材料的塑性变形影响很大,其形状、表面状态对金属毛坯的变形分布以及最终产品的形状起着决定作用。然而在塑性成形过程的任一瞬时,变形毛坯与模具在接触表面有相对运动,因而必然存在着摩擦。由于摩

擦的作用,使模具产生磨损、工件表面出现划伤,这样既缩短模具寿命,又影响产品质量,同时摩擦还会引起毛坯变形不均匀,使塑性成形时的变形力和变形功增加等。但是,摩擦也起有益作用,例如模锻时,飞边桥部的摩擦力有利于充满模膛;轧制时,轧辊与坯料间的摩擦力会使坯料易于咬入等。

塑性成形中毛坯与模具之间的摩擦与机械传动中的摩擦有很大差别,具有以下特点:

1) 接触表面正压力极高。金属塑性变形时,接触表面所受的单位压力一般在 500N/mm^2 左右;钢制零件冷挤压时,单位压力可达 2500N/mm^2 ;而承受重载荷的轴承,工作时的单位压力仅为 $20 \sim 40\text{N/mm}^2$ 。

2) 加热成形时,金属毛坯是在高温下进行塑性成形的,如钢的锻造温度一般为 $800 \sim 1200^\circ\text{C}$,在这样高的温度下金属的组织 and 性能发生变化,且表面产生强烈的氧化、粘结等。

3) 塑性成形中,摩擦常常是伴随着坯料的塑性变形而产生的。由于塑性变形,接触面上金属各质点的运动情况不同,有的滑动,有的粘着。而且随着变形过程的进行,坯料与模具间又会出现新的接触表面。

总之,由于上述特点,塑性成形中的摩擦作用机理比较复杂,难以给出准确的理论描述,这些都会给塑性变形工艺分析带来困难。

1.2.2 塑性成形研究的目标和任务

金属塑性成形工艺中所涉及的具体物理现象,都难以用简单的数量关系来描述。塑性变形时,金属的流动模式、毛坯与模具的接触摩擦、金属材料内部热的产生及热传导、微观组织结构或性能与工艺条件之间的关系等,所有这些也都难以预测和分析。通常,对于一个给定产品的塑性成形工艺,可能需要数个变形工步才能将形状简单的毛坯变成形状较为复杂的产品。因此,塑性成形分析的重要目标之一就是合理地设计出变形工步及操作顺序,而其中任一变形工步的分析基本上都涉及以下几个方面:

1) 建立金属材料内部变形区与未变形区间的动态变化(如外形、速度、应变、应变率),即金属塑性流动的预测。

2) 确定材料与工艺的成形极限,即确定工件成形后是否会出现表面或内部缺陷。

3) 预测变形工艺所需的变形力、应力,以便于模具及设备的设计或选用。

为了达到上述目标,实现对塑性成形工艺的定量分析和优化设计,有必要将塑性成形工艺作为一个复杂的系统进行分析。

1. 塑性成形工艺分析系统

塑性成形工艺分析系统应当包括关于毛坯(几何和材料方面)、模具(几何及材料方面)及毛坯与模具接触摩擦条件等输入信息、变形机理、使用设备类型、加工制品的特性要求以及完成该工艺的生产环境。

采用塑性成形工艺分析系统可以研究工艺参数对产品质量和生产效益的影响。合理的工艺方案能够获得合乎要求的几何形状尺寸及性能的制品,其关键在于如何了解变形过程中金属材料的塑性流动并进行有效的控制。金属材料的流动方向、变形量大小以及产生变形时的温度条件都极大地影响着塑性成形产品的性能,同时塑性流动还决定着产品表面或内部缺陷的形成。总之,塑性成形工艺是一个复杂的系统,其影响因素如下:

(1) 材料参数 若金属材料的化学成分、变形及热处理历史(即微观组织)给定,那

么它的屈服应力和塑性是塑性成形工艺分析中最重要的材料参数。

材料的微观组织结构给定的条件下,其屈服应力是应变、应变率和温度的函数。对于具体的金属材料,这种函数关系必须通过材料性能试验才能得出,如扭转试验、轴对称试验或平面应变压缩试验。塑性是金属材料产生塑性变形而不被破坏的能力,它取决于:①变形条件(如温度、应变率、应变、应力以及应变历史);②材料本身(如化学成分、夹杂、初始微观组织等)。应当指出,热变形时金属材料内部的温度梯度对屈服应力和塑性影响也很大。

(2) 模具及设备 模具参数包括:①模具结构几何尺寸;②工作表面的加工精度;③模具刚度;④模具材料在使用条件下的力学性能和热物理性能。

设备的加工速度、精度以及载荷能量特性对塑性成形工艺有影响,设备的合理选用要考虑产品批量、工厂条件、环境影响、设备维修以及一些特殊产品和工艺的需要。

(3) 摩擦条件 金属塑性成形中的摩擦机理十分复杂,引入摩擦系数 μ 或摩擦因子 m 可以定量表示摩擦力的大小和方向,即采用库仑摩擦条件或常应力摩擦条件。确定 μ 或 m 的试验方法有很多,对体积成形工艺常用圆环镦粗或夹钳轧制法,而板料成形工艺则常用平面应变或单向拉伸法。

(4) 变形机理 塑性成形中,毛坯发生塑性变形而改变形状,故其变形机理即金属材料的塑性流动模式。塑性流动受以下几方面因素的影响:①模具几何形状及尺寸;②摩擦作用;③变形金属的材料性能;④变形区的传热条件。同时,金属塑性流动情况又影响到最终产品的质量和性能,以及变形工艺所需的参数。

(5) 产品性能 塑性成形产品的性能包括宏观和微观两个方面。宏观性能主要指产品的几何形状、尺寸和产品的力学性能等;微观性能包括产品的表面质量、内部微观组织结构(如晶粒度、夹杂大小)。变形工艺条件(应变、应变率、温度)决定着产品加工过程中微观组织的变化,并且常常对其最终性能有很大的影响。因而,一个真正的工艺分析系统必须要考虑:①变形金属材料的性能与其微观组织的关系;②变形工艺条件对金属塑性流动及微观组织的影响的定量关系。

塑性成形系统中影响产品的性能及经济性的工艺变量多种多样,并且它们之间在成形过程中相互作用,相互影响。塑性加工主要工艺变量之间的关系如图1-2所示。

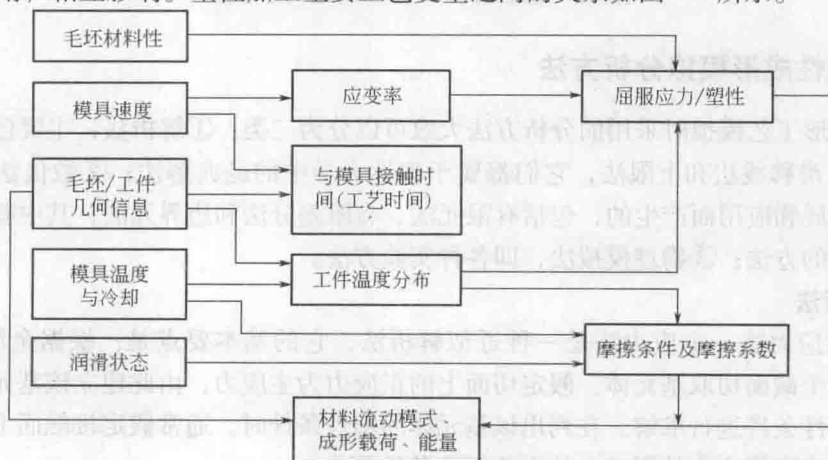


图 1-2 塑性加工主要工艺变量之间的关系

塑性成形工艺是一个复杂的系统，工艺分析的目的就是实现成形工艺和工艺参数的优化。当然，这种优化取决于对塑性成形工艺本身的了解程度及各工艺参数对给定目标的影响情况，而工艺模拟分析则是实现这一目标的关键手段。

2. 塑性成形工艺分析模型

图 1-3 所示为塑性成形工艺模拟分析的原理框图。它由三个部分组成：第一，工艺模型的建立，它包括变形毛坯及产品、模具、材料、工艺参数等方面信息；第二，工艺模拟分析，它是分析模型的核心部分，它完成所分析工艺的各种力能参数、变量的结果数据，为最终的结果分析提供依据；第三，模拟结果的解释与评价，如工艺参数优化、产品几何尺寸控制、微观组织预报等，这部分工作可能涉及产品的技术要求、工艺规程以及利用大量试验所确定的某一评价模型，如产品表面裂纹的生成模型。

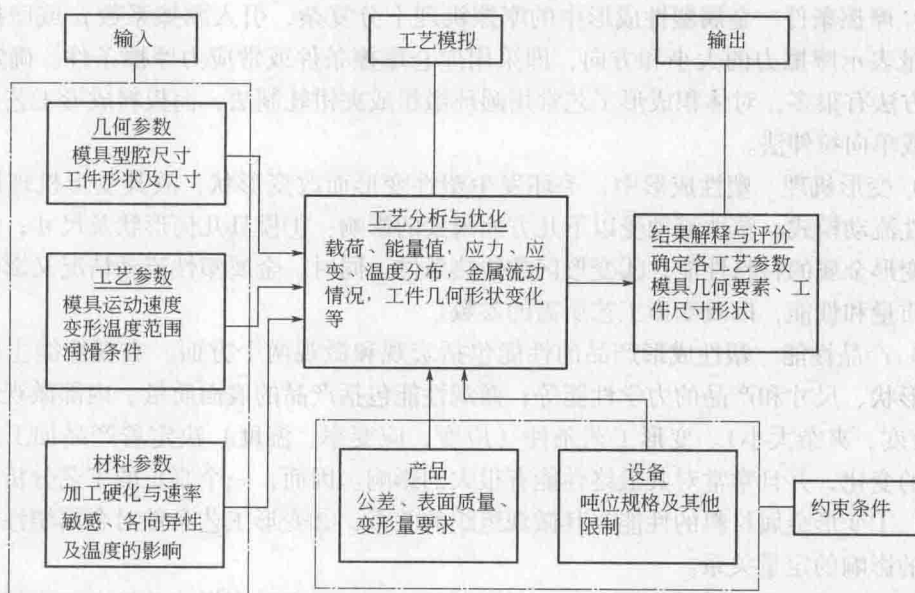


图 1-3 塑性成形工艺模拟分析的原理框图

1.2.3 塑性成形模拟分析方法

塑性成形工艺模拟时采用的分析方法大致可以分为三类：①解析法，主要包括主应力法（切块法）、滑移线法和上限法，它们都属于塑性力学中的经典解法；②数值法，它是随着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，其中有限元法是一种广泛使用的方法；③物理模拟法，即各种实验方法。

1. 解析法

(1) 主应力法 主应力法是一种近似解析法，它的基本要点是：根据金属流动方向，沿变形体整个截面切取单元体，假定切面上的正应力为主应力，由此建立该单元体的平衡方程，联立塑性条件进行求解。在列出该单元体的塑性条件时，通常假定接触面上的正应力为主应力，忽略摩擦应力的影响，从而使塑性条件简化。

主应力法实质是通过一些假设，将偏微分形式的应力平衡方程简化成常微分方程，将非

线性关系的屈服条件简化为线性关系,因而简化了数学运算。但这些假设从变形方面看,实际上是均匀变形假设,所以它只能确定接触面上的应力大小和分布,而内部应力场、应变场均无法给出,其计算结果的准确性和所作假设与实际情况的接近程度有关。

(2) 滑移线法 塑性变形体内各点的最大切应力的轨迹称为滑移线。由于最大切应力成对正交,因而在变形体内滑移线形成两组相互正交的网络,即滑移线场。滑移线法就是利用滑移线场某些特性求解塑性成形问题,如确定变形体内的应力分布、计算变形力、分析变形和决定毛坯的合理外形、尺寸等。

滑移线法对于理想刚塑性体的平面应变问题的求解是精确的,它也能近似处理轴对称问题,但无法解决诸如温度、材料性能等参量的不均匀问题。对于加工硬化、速率敏感性问题,虽已开始考虑,但用滑移线法来解决是相当困难的。

(3) 上限法 20世纪50年代,英国学者 Johnson 和日本学者工藤英明等人,根据理想刚塑性材料的极值原理提出了一个较滑移线法简单的求极限载荷的方法,称为上限法。上限法的优点是不仅适用于平面应变问题,也适用于轴对称和三维问题,同时不用解复杂的平衡方程,数学运算比较简单,因而其研究应用也较多。但是,上限法的应用是建立在对变形体提出合适的运动许可速度模式的基础上的。因此,在很多情况下还要借助实验建立运动许可速度场,方能进行正确计算。另外,上限法不能算出变形体内部的应力分布规律。

2. 数值法

数值法是以电子计算机为工具,用现代数值方法求解塑性成形问题的方法,主要包括有限元法、边界元法和有限差分法。

(1) 有限元法 有限元法的基本思想是:将连续的求解域离散为一组有限个单元的组合物体,这样的组合物体能近似地模拟或逼近求解区域。由于单元能按各种不同的连接方式组合在一起,且单元本身又可以具有不同的几何形状,因此可以模拟形状复杂的求解域,有限元法作为一种数值分析法的另一重要步骤是利用在每一单元内假设的近似函数来表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数在单元各个节点上的数值以及插值函数表达。这样一来,一个问题的有限元分析中,未知场函数的节点值就成为新的未知量,从而使一个连续的无限自由度问题变为离散的有限自由度问题。这些未知量一经求解出,就可以利用插值函数确定单元组合物体上的场函数。显然,随着单元数目的增加,即单元尺寸的缩小,解的近似程度将不断改进,如果单元是满足收敛性要求的,其近似解最后将收敛于精确解。

有限元法的数学基础是经过很长时间才发展起来的,最早可以追溯到19世纪末(1895年)高斯的加权余值法,但它在工程上的应用,是从结构分析方面开始的。直到1960年以后,随着电子计算机的广泛应用和发展,有限元法的发展速度才显著加快。1960年,Clough在进行平面弹性问题分析时,第一次提出了“有限元法”的名称,使人们开始认识到有限元法的功效。几十年来,有限元法的应用已由弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题,由静力平衡问题扩展到稳定问题、动力学问题和波动问题。分析的对象从弹塑性材料扩展到塑性、黏弹性、黏塑性和复合材料,从固体力学扩展到流体力学、热力学、电磁学、生物工程等方面。有限元法在塑性成形方面的应用始于20世纪70年代,随着塑性有限元法的不断发展和应用,人们才清楚地认识到这种方法的独到之处。正如著名学者 Kobayashi 指出,有限元法以它的适应性、能获得详尽解的能力和它与精确解的固有接近,证明它优于经典的

分析方法。

(2) 边界元法 边界元法是继有限元法之后发展起来的一种新的数值方法。与有限元法不同,边界元法仅在定义域的边界划分单元,用满足控制方程的函数去逼近边界条件。所以边界元与有限元相比具有单元和未知数少、数据准备简单等优点,但边界元法解非线性问题时,遇到同非线性项相对应的区域积分,这种积分奇异点处的强烈的奇异性,使求解遇到困难。有限差分法和边界元法在塑性成形问题中应用还比较少。

3. 物理模拟法

通常,物理模拟是指缩小或放大比例,或简化条件,或代用材料,用试验模拟来代替原型的研究。对于尺寸较小的成形件,往往可以采用原型尺度进行试验。但工件尺寸较大,或者由于试验条件等其他原因,不可能进行 1:1 的实物试验,只能采用缩小比例试验即缩比试验。

塑性成形工艺研究中所采用的物理模拟试验可以分为两种。一种是材料热变形基础试验,以工件所用材料为对象,采用热压缩或扭转等试验方法,并借助于专用设备或仪器完成,用于实测材料的应力-应变关系、塑性等热成形性能参数、接触摩擦因子以及一些热物性参数,并经过金相分析定量研究热变形过程中组织变化与变形温度、变形速度、变形量等热力参数的关系。这些试验数据一方面为塑性成形工艺方案的制订提供表征参数,如塑性、动态再结晶临界变形量等;另一方面也为数值模拟提供必要而准确的材料模型或参数。

另一种物理模拟是工艺模拟试验,其参照原型为所研究的塑性成形工艺,并依据相似原理进行缩比试验。为了获得较多的试验数据,进行缩比试验时可采用网格法、密栅云纹技术等。然而,对于热变形工艺,其几何条件、材料性能等因素的相似性容易满足,但是接触界面参数和热参数等则不易满足。因此,工艺模拟试验有时会与实际生产相差很大,而且通常只能给出工艺过程某个阶段的结果,无法全面了解整个工艺过程,具有一定的局限性。如果设计合理,并且试验条件和检测能够保证,该种试验数据一般对于工件成形具有足够的精度,但其对组织性能往往仅有一定参考价值。

4. 模拟分析方法的集成应用

解析法和数值法均为塑性成形的理论分析方法,由于解析法的求解困难及局限性,以有限元为代表的数值法逐渐成为塑性成形工艺研究与开发的主要理论方法。有限元数值模拟是通过建立相应的数学模型,在工艺设计阶段,用计算机对工艺的全过程进行分析,它不仅可以通过图形、数据等形式直观地反映诸如材料塑性流动、温度场、应变场、载荷等各种信息,而且能预测可能存在的成形缺陷;还可以通过改变工艺参数对不同方案进行模拟分析,从各方案的对比中总结出规律,进而实现工艺的优化,确定工艺方案和主要工艺参数。由此可见,数值模拟技术在保证工件成形质量、减少材料消耗、提高生产效率、缩短试制周期等方面显示出无可比拟的优越性。

图 1-4 所示为建立在工艺模拟、优化基础上的塑性成形工艺设计技术。它采用计算机设计、优化、仿真的科学技术和现代测试方法,在设计阶段同时考虑制造过程,可以将隐患消灭在计算机拟实加工的反反复复比较中,力争工件一次制造成功。

然而,若要实现这一目标,使模拟技术在新工艺、新产品开发中得以有效利用,就必须将物理模拟与数值模拟技术有机集成。图 1-5 所示为塑性成形工艺研究与开发时物理模拟与数值模拟技术集成的内在机制,其要点如下: