

挤压理论

吴诗惇 著

国防工业出版社

378047

挤压理论

吴诗惇 著

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目 (CIP) 数据

挤压理论/吴诗惇著. —北京:国防工业出版社, 1994

ISBN 7-118-01224-6

- I. 挤…
- II. 吴…
- III. 挤压-理论
- IV. TG371

挤 压 理 论

吴诗惇 著

责任编辑 蒋 怡

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 $\frac{1}{8}$ 365 千字

1994 年 9 月第 1 版 1994 年 10 月北京第 1 次印刷 印数: 1—2 500 册

ISBN 7-118-01224-6/TG·81

定价: 16.30 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘书长	刘琯德			
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤	
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟	
	何新贵	宋家树	张汝果	
	范学虹	胡万忱	柯有安	
	侯 迁	侯正明	莫梧生	
	崔尔杰			

前 言

本书初稿原为我校金属塑性加工专业设置的硕士研究生学位课程而编写。这次出版，作者又对全书重新作了修改与补充，使它成为一本关于挤压理论的学术专著。

本书在综合国内外有关文献资料的同时，以大量的篇幅介绍了本书作者以及作者指导的研究生们近几年来在这方面的研究成果。这些成果中，绝大多数属于作者得到的国家自然科学基金和航空科学基金资助的课题。它们已经在国内外学术刊物和国际学术会议上发表，受到国内外同行的瞩目。同时，国家自然科学基金资助的课题成果曾经国家自然科学基金会组织专家鉴定，航空科学基金资助的课题成果也曾经陕西省教委组织专家鉴定。因此本书在内容上具有自己的特色，特别是在杯-杆型复合挤压时的八种金属流动方式及其转换、复合挤压过程中的各种缺陷预测、应用近似主应力法预测成形缺陷以及根据损伤力学概念导出的韧性断裂准则等方面更为突出。

本书从主应力法、滑移线法、上限法和有限元法四个方面对挤压过程进行了全面的理论分析。内容涉及各种挤压过程的变形机理、金属流动、力能参数、缺陷分析和工艺参数确定的理论依据。其中，特别是对包括杯-杆型、杯-杯型和杆-杆型在内的各种复合挤压过程及其缺陷的分析，在其它书籍中是几乎见不到的。

为了便于读者进一步研究，书中对全部资料都注明了来源，并在每章末列出了该章的参考文献目录。

作者在此要感谢西北工业大学教授、学部委员、国务院学位委员会学科评议组成员周尧和同志和西安交通大学教授陈金德同志，他们阅读了本书原稿，促使本书得以出版。作者也要感谢国防工业出版社的同志们，没有他们的帮助和认真编辑，本书出版

也是不可能的。作者还要感谢国防科技图书出版基金评审委员会给予出版基金的资助。作者在此还要提到作者的许多已经走上工作岗位的研究生朱志文、李森泉、程秀全、黎文玉、梁华和党蓁。其中李森泉毕业留校后仍在作者的课题组工作。本书引用的大量科研成果，是在他们的努力下与作者共同取得的。作者的许多同事，也提供了许多帮助与支持。在此作者一并表示谢意。

本书适合高等院校机械、冶金、材料和力学等类有关专业的研究生、高年级本科生和教师阅读或参考，可以选作有关专业的研究生教材，也可供有关专业的广大科技人员阅读和参考。

作者真诚地欢迎广大读者提出宝贵意见和批评建议，以便有机会时再作修改和补充。

吴诗悖

1993 年 2 月

于西北工业大学

内 容 简 介

本书从主应力法、滑移线法、~~上限法~~和有限元法四个方面对挤压过程进行全面的理论分析。内容涉及各种挤压过程的变形机理、金属流动、力能参数、缺陷分析和确定一些工艺参数的理论依据，是一本关于挤压理论的专著。

本书在综合国内外有关文献资料的同时，大量介绍了本书作者的科研成果。这些成果中，绝大多数属于作者得到的国家自然科学基金和航空科学基金资助的课题。因此，本书在内容上具有自己的特色，特别在各种复合挤压的流动方式、各种挤压缺陷的预测、应用近似主应力法预测成形缺陷以及根据损伤力学概念导出的韧性断裂准则等方面更为突出。

本书适合高等院校机械、冶金、力学和材料等类有关专业的研究生、高年级本科生和教师阅读或参考，可以作为有关专业的研究生教材，也可供有关专业的广大科技人员阅读和参考。

目 录

主要符号说明.....	1
第一章 基础理论简述	4
1.1 应力状态	4
1.1.1 应力分量	4
1.1.2 主应力和应力主轴	5
1.1.3 静水应力与应力偏量	6
1.2 屈服准则	7
1.2.1 米塞斯屈服准则	8
1.2.2 屈雷斯加屈服准则	10
1.3 应变和应变速率	11
1.4 米塞斯应力-应变速率定律	11
1.5 上限原理	13
1.5.1 应变能	14
1.5.2 运动学许可速度场与速度不连续	17
1.5.3 摩擦和摩擦损耗	18
1.5.4 上限原理的基本公式	21
1.6 滑移线	26
1.6.1 滑移线的基本概念与假设	26
1.6.2 平面塑性变形的平衡方程式	27
1.6.3 滑移线族的方向	33
1.6.4 亨盖应力方程	34
1.6.5 盖林格速度方程和速端图	37
1.6.6 滑移线的几何学性质	39
1.6.7 简单应力状态的滑移线场	43

1.6.8 应力不连续	45
1.6.9 速度不连续	49
1.6.10 应力边界条件	50
1.6.11 完全解的必要条件	56
1.6.12 滑移线场的绘制	56
本章参考文献	64
第二章 应用主应力法计算挤压力	65
2.1 正挤实心件时单位挤压力的计算	65
2.2 反挤杯形件时单位挤压力的计算	69
本章参考文献	70
第三章 应用滑移线分析挤压过程	71
3.1 挤压过程的各个阶段	71
3.2 光滑模壁直角模正挤压	73
3.2.1 变形程度为 50% 时的正挤压	73
3.2.2 变形程度大于 50% 时的正挤压	80
3.2.3 变形程度小于 50% 时的正挤压	88
3.3 粗糙模壁直角模正挤压	90
3.3.1 完全粗糙模壁时的正挤压	90
3.3.2 部分粗糙模壁时的正挤压	92
3.4 普拉格应力平面法	93
3.4.1 利用普拉格应力平面绘制滑移线场	93
3.4.2 应用普拉格应力平面法解决具有库仑摩擦条件的 平面应变挤压问题	97
3.5 管形件正挤压	99
3.6 锥形模正挤压	100
3.6.1 断面缩减率为 $2\sin\alpha / (1 + 2\sin\alpha)$ 时的正挤压	100
3.6.2 断面缩减率小于 $2\sin\alpha / (1 + 2\sin\alpha)$ 时的正挤压	103
3.6.3 断面缩减率大于 $2\sin\alpha / (1 + 2\sin\alpha)$ 时的正挤压	105
3.7 毛坯长度的影响	106

3.8	挤压时金属的流线	108
3.9	利用流线矢端曲线确定挤压时的等效剪应变	112
3.9.1	基本原理	112
3.9.2	计算实例	114
3.10	挤压时的温升	120
3.11	单孔不对称正挤压	123
3.12	反挤压	124
3.13	正、反挤压的非稳定变形阶段	129
3.14	复合挤压	132
3.14.1	变形阶段	133
3.14.2	滑移线场	133
3.14.3	流动规律	136
3.14.4	挤压力	138
	本章参考文献	139
第四章	应用上限原理分析平面变形的挤压过程	140
4.1	对称锥形模正挤压	140
4.2	非对称锥形模正挤压	144
4.3	直角模正挤压	145
4.4	反挤压	148
4.5	正、反挤压的非稳定变形阶段	151
4.6	杯-杆型复合挤压	154
4.7	杯-杯型复合挤压	161
4.7.1	速度场	161
4.7.2	几点说明	162
4.7.3	凸模单位压力	164
4.7.4	流动方式	166
4.8	金属流线与温度分布	166
	本章参考文献	168
第五章	应用上限原理分析轴对称挤压过程	169
5.1	应变速率方程	170

5.1.1	球坐标的应变速率方程	170
5.1.2	圆柱坐标的应变速率方程	171
5.2	锥形模正挤压	171
5.2.1	球面速度场	171
5.2.2	变形功率与单位挤压力	174
5.2.3	最佳半锥角	177
5.2.4	死区形成	180
5.2.5	网格畸变	183
5.2.6	应变速率与应变	189
5.2.7	球面速度场在直角模正挤压时的应用	195
5.3	直角模正挤压	198
5.3.1	挤压的早期阶段	198
5.3.2	挤压的晚期阶段	206
5.3.3	正挤压过程中变形模式的转换	208
5.4	型线模正挤压	210
5.4.1	速度场	210
5.4.2	上限解	211
5.5	反挤压	212
5.5.1	早期阶段	212
5.5.2	晚期阶段	214
5.6	杯-杆型复合挤压	222
5.6.1	早期阶段	222
5.6.2	晚期阶段	228
5.6.3	变形模式的转换	230
5.6.4	金属流动方式	230
5.6.5	硬化的处理办法	237
5.7	杯-管型复合挤压	240
5.8	杯外径相等的杯-杯型复合挤压	245
5.8.1	早期阶段	245
5.8.2	晚期阶段	254
5.8.3	冷作硬化考虑	256
5.9	杯外径不等的杯-杯型复合挤压	258

5.9.1 早期阶段	258
5.9.2 晚期阶段	261
5.9.3 变形模式转换	264
5.9.4 杯-杯型复合挤压时最大变形力计算的通式	265
5.10 杆-杆型复合挤压	266
5.10.1 早期阶段	266
5.10.2 晚期阶段	272
5.11 墩挤复合成形	280
5.12 双金属反挤压	283
5.12.1 计算方法	283
5.12.2 计算结果	291
本章参考文献	294
第六章 应用有限元法分析挤压过程	296
6.1 应用弹塑性有限元法分析挤压过程	296
6.1.1 凹模数学方程和材料常数	296
6.1.2 弹塑性有限元法的基本原理	298
6.1.3 计算结果	301
6.2 分析挤压过程的刚塑性有限元程序及其特点	302
6.2.1 刚塑性有限元法的基本原理	302
6.2.2 分析挤压过程的刚塑性有限元程序	305
6.2.3 刚塑性有限元计算中几个问题的处理	308
6.3 应用刚塑性有限元法分析轴对称正挤压	310
6.3.1 计算条件和材料性能数据	310
6.3.2 计算结果与实验验证	311
6.4 应用刚塑性有限元法分析轴对称反挤压	314
6.4.1 计算条件和材料性能数据	314
6.4.2 计算结果与实验验证	315
6.5 应用刚塑性有限元法分析轴对称杯-杆型复合 挤压	319
本章参考文献	324

第七章 损伤和韧性断裂	325
7.1 韧性断裂的基本概念	325
7.1.1 韧性断裂与脆性断裂	325
7.1.2 穿晶断裂与沿晶断裂	327
7.1.3 解理断裂、纯剪切断裂与微孔聚集型断裂	328
7.2 空洞（微孔）生长规律与韧性断裂	328
7.2.1 莱斯-特拉西模型	328
7.2.2 塑性变形时在真实金属材料中的空洞生长规律	329
7.3 柯勒莫格洛夫的断裂条件	332
7.3.1 断裂条件的基本式	332
7.3.2 实验确定塑性图	338
7.4 勒墨特雷的塑性损伤理论	344
7.5 吴-梁塑性损伤演变方程	351
7.6 常用的其它韧性断裂准则	357
7.7 富焦维克等建议的变形极限曲线	358
本章参考文献	361
第八章 挤压缺陷的预测	363
8.1 应用滑移线法预测板条挤压时表层是否开裂	363
8.2 应用上限原理分析成形缺陷问题的基础	366
8.3 应用上限原理预测反挤压缺陷	368
8.4 应用上限原理预测正挤压时的中心开裂	370
8.5 应用上限原理预测杯-杆型复合挤压时的缩孔	372
8.6 应用上限原理预测正挤压时的中心缩孔	379
8.7 应用上限原理预测杯-杆型复合挤压时的杆部 表面裂纹	383
8.7.1 出现杆部表面裂纹时的速度场和单位压力计算	383
8.7.2 缺陷形成必要条件及结果分析	385
8.7.3 实验验证	387
8.8 应用上限原理预测正挤压时的表面裂纹	388

8.9 应用上限原理预测杯外径相等的杯-杯型复合挤压时的裂纹	392
8.9.1 剩余毛坯外圆周上的表面开裂	392
8.9.2 凸模角部的毛坯内表面开裂	395
8.9.3 毛坯外表面和下凸模角部处的毛坯内表面同时开裂	400
8.10 应用上限原理预测杆-杆型复合挤压时剩余毛坯的中部开裂	404
8.11 应用上限理论论证杯外径不等的杯-杯型复合挤压时不可能产生角部收缩	406
8.12 应用刚塑性有限元法预测挤压成形缺陷	410
8.12.1 正挤压缺陷分析	410
8.12.2 反挤压缺陷分析	412
8.13 应用近似主应力法预测挤压成形缺陷	415
8.13.1 应用近似主应力法分析成形缺陷的基本概念	416
8.13.2 反挤压时角部收缩缺陷分析	416
8.13.3 正挤压时中心缩孔缺陷分析	420
本章参考文献	424

第九章 静液挤压 426

9.1 静液挤压的原理与特点	426
9.2 压力介质和润滑剂	428
9.3 挤压压力	429
9.4 挤压速度	430
本章参考文献	434

主要符号说明

本书各章节对使用符号均已说明，现仅将常用主要符号排列如下：

D_0	毛坯初始直径 ($D_0 = 2R_0$)
H_0	毛坯初始高度
J^*	功率消耗的上限解
k	米塞斯 (Mises) 屈服准则的常数；剪切屈服应力
m	摩擦因子 ($0 \leq m \leq 1$)
P	力
p	静水压力
p	单位压力
p_f	正挤压单位挤压力 (正挤单位压力)
p_b	反挤压单位挤压力 (反挤单位压力)
p_{ave}	平均单位压力；平均单位挤压力
S_{ij}	应力偏量张量分量
S	静水应力 ($S = \sigma_m$)
S	表面积
S_r	速度不连续面
S_t	预加牵引力的面
T	预加牵引力
T	毛坯瞬时高度
T	等效剪应力
T_{cri}	毛坯临界余厚
t	时间
U	位移
$\dot{U}$	速度