



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

成形工艺与模具设计

鄂大辛 编著

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对当前先进制造技术现状,并根据未来工业制造技术的发展趋势,系统地介绍了金属冷冲压成形工艺、热锻工艺、冷锻工艺及塑料的成形基本原理、成形方法及其模具设计。其中,包括金属材料 and 塑料的基本性能、成形过程、工艺方案的制定、模具设计及其设备的选用等。特别是选入了金属塑性成形技术亟待发展的部分内容,如管材弯曲成形、非回转对称拉深成形等的研究结果,对于发展塑性成形技术,具有相应的启发意义。

本书可作为高等学校材料工程类、机械工程类、化工工程类本科及高职高专教材,也可作为从事各种金属、非金属成形加工及模具设计、制造的工程技术人员和科研人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

成形工艺与模具设计/鄂大辛编著. —北京:北京理工大学出版社,
2007. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5640-1255-7

I. 成… II. 鄂… III. ①成型-工艺-高等学校-教材 ②模具-
设计-高等学校-教材 IV. TG39 TG76

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第063704号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中华美凯印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/29.5

字 数/700千字

版 次/2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

印 数/1~4000册

责任校对/张宏

定 价/38.00元

责任印制/吴皓云

C 目 录

Contents



第一篇 材料变形基础

第一章 金属冷塑性变形	1
第一节 金属塑性变形的物理基础	1
第二节 金属塑性变形的力学基础	9
思考题	13
第二章 金属热塑性变形	14
第一节 金属热变形过程	14
第二节 热变形对金属组织和性能的影响	17
第三节 金属可锻性	18
思考题	20
第三章 工程塑料成型的基本知识	21
第一节 塑料的组成与分类	21
第二节 塑料的特性及其应用简介	22
第三节 塑料制品的成型工艺	24
思考题	27

第二篇 冲压工艺与模具设计

第四章 冲压工艺基础	28
第一节 冲压工艺概述	28
第二节 冲压工艺分类及特点	30
第三节 冲压材料	33
第四节 冲压设备	44
思考题	49
第五章 冲裁工艺与冲模设计	50
第一节 冲裁工艺分析	50
第二节 冲裁间隙	55
第三节 冲裁模刃口尺寸的计算	59

第四节	冲裁件的排样与搭边	64
第五节	冲裁力分析及计算	67
第六节	冲裁工艺设计	73
第七节	冲裁模结构设计	78
第八节	精密冲裁与其他冲裁工艺及模具简介	99
思考题		114
第六章	弯曲成形工艺与模具设计	115
第一节	板材弯曲成形及其变形分析	115
第二节	弯曲力矩及弯曲力	123
第三节	板材弯曲加工极限	127
第四节	弯曲回弹	130
第五节	弯曲板坯尺寸的展开	136
第六节	弯曲工艺设计	138
第七节	弯曲模工作部分设计计算	142
第八节	弯曲模的典型结构	144
第九节	管材弯曲成形	148
思考题		162
第七章	拉深工艺及模具设计	163
第一节	拉深过程的力学分析	163
第二节	拉深成形极限及拉深系数	168
第三节	拉深力、拉深功及压料力计算	176
第四节	旋转体拉深	180
第五节	盒形件拉深	195
第六节	拉深件工艺设计	209
第七节	其他拉深方法简介	211
思考题		215
第八章	其他板料成形工艺及模具设计	216
第一节	胀形工艺及模具	216
第二节	翻边工艺及模具	223
第三节	缩、扩口成形工艺及模具	230
第四节	旋压及模具	234
第五节	先进成形工艺简介	239
思考题		245
第三篇 锻造工艺与锻模设计		
第九章	锻造工艺概述	246
第一节	锻造工艺分类及特点	246
第二节	锻造工艺流程	249
第三节	锻造设备	251

思考题	256
第十章 热锻工艺及模具设计	257
第一节 锻造加热	257
第二节 自由锻造工艺	262
第三节 胎模锻造工艺及胎模具	275
第四节 模锻工艺及模具	278
第五节 模锻后续工序	318
思考题	324
第十一章 冷锻工艺及模具设计	325
第一节 冷锻工艺概述	325
第二节 冷锻工艺	326
第三节 精压工艺及模具	331
第四节 冷态模锻工艺	334
第五节 冷挤压工艺及模具	336
思考题	355
第十二章 其他金属体积成形方法简介	356
第一节 材料及零件体积成形工艺技术	356
第二节 特种成形工艺	367
第三节 快速原型制造技术简介	379
思考题	382

第四篇 塑料成型及模具设计

第十三章 塑件设计简介	383
思考题	388
第十四章 塑料注射成型工艺及模具设计	389
第一节 注射成型模的组成及分类	389
第二节 注射参数计算	391
第三节 浇注系统设计	394
第四节 成型零部件设计	404
第五节 其他辅助机构设计	415
思考题	428
第十五章 热固性塑料成型工艺及模具设计	429
第一节 热固性塑料及成型工艺简介	429
第二节 热固性塑料注射成型及模具设计	431
第三节 热固性塑料压缩成型及模具设计	437
第四节 压注成型工艺及模具设计	452
思考题	459
参考文献	460

P 序

reface



材料成形是先进加工技术的重要组成部分，属于少、无切屑加工，制造方法简单、生产效率高，特别是经过成形加工后的金属零件具有优越的力学性能，可满足工程需要。因此，成形加工在未来制造业技术发展中，将占有举足轻重的地位。而目前的成形加工，都需要采用相应的模具才能实现，模具工业的发展和提高是材料成形加工的必要保证。

在现代化基础建设中，模具工业已经逐渐形成为制造业的基础核心产业。越来越多的工业产品制造与模具有关，根据国际生产协会的专家预测，在 21 世纪末，50%~75%的机械加工（主要是切削加工）产品都将利用模具进行加工制造。模具是工业的基础工艺装备，用模具生产制件所表现出来的高精度、高复杂程度、高一一致性、高生产力和低消耗，是其他加工制造方法所不能比拟的，工业发达国家的模具工业产值早已超过机床工业产值。因此，模具工业已经成为现代制造业的重要支柱性产业。特别是近些年来，模具设计制造的需求量以及高速度化、高效率化已经成为汽车制造业亟待提高的一项重要技术。模具生产技术水平的高低不仅是衡量一个国家产品制造水平高低的重要标志，而且在很大程度上决定着这个国家产品质量、效益及新产品的开发能力。

模具技术，既是先进制造技术的重要组成部分，又是先进制造技术的重要应用领域，其技术水平与先进制造技术的发展与应用密切相关。模具对于一般产品来说属于工具范畴，精度高、结构复杂，并有较高的材质要求，是典型的高附加值、高风险产品。其制造过程复杂，涉及产品设计、模具设计、毛坯制造、电加工、机械加工、测量技术、表面工程、热处理和快速原型制造技术等方面，需要多种技术装备，而且使用率极不平衡。

随着社会经济的发展，对于工业产品的品种、数量、质量及款式等都提出了越来越高的要求，因此，也促进了模具工业的快速发展。许多新产品的开发和生产，在很大程度上依赖于模具制造技术，特别是在汽车、轻工、电子和航天的行业中尤显重要。模具制造能力的强弱和模具制造水平的高低，已经成为衡量一个国家机械制造技术水平的重要标志之一，直接影响国民经济中许多部门的发展。

模具工业是国民经济发展的重要基础工业之一。模具的质量精度、寿命对其他工业的发展起着十分重要的作用，其在现代化工业生产中的重要地位不容忽视，并且随着模具技术的不断发展，其在国民经济建设中将发挥越来越重要的作用。因此，模具的内涵需要发展和丰

富，需要在实践的基础上不断进行研究、挖掘和补充，为这门实用技术注入新的理论和技术内容，使其在现代化制造领域中发挥更重要的作用。

作者曾在一汽集团长期从事模具研发工作，之后在国外留学工作期间一直围绕着材料成形机理及模具进行了广泛深入的研究和实践。作者从材料成形工艺与模具设计岗位走上高等学府讲台，是国内该领域中为数不多的既具有深厚的理论基础、又具有丰富实践经验的专家，对于材料成形及模具设计持有较深刻的理解和认识。教材的编写是对材料成形和模具技术发展进行系统研究和浓缩的结晶，内容基本涵盖了工程应用中最基本的成形方法和模具特征，既适用于高等学校教学需求，又可作为相关专业工程技术人员的参考用书，具有一定的理论探索意义和实际应用价值。

该书经教育部专家委员会评审遴选为高等学校国家级“十一五”规划教材，并向全国高等学校相关专业做出推荐，实为模具行业造就高素质创新人才提供了良师益友，希望该书能够受到广大读者的喜爱，并对热衷于学习和研究材料成形及模具设计的读者有所助益。

中国模具协会理事长 褚克辛
一汽模具有限公司总经理



前言

Introduction



材料成形及模具技术在现代工业中占有越来越重要的地位，并且将成为未来制造业的支柱性行业。这一点，已为诸多工业发达国家率先认识。因此，在新时代理工科大学、高职高专等学校的专业教学内容中，应尽快将这一门专业技术介绍给学生，使他们能够初步认识现代制造工业的发展趋势，在自己所学专业基础知识的基础之上，拓宽认识视野和明确发展方向。目前，材料成形工艺与模具设计课程已为许多大学及高职高专机械制造、材料成形、化工等专业的学生在校学习的主要学习内容之一。

成形工艺与模具设计是一个实践性很强的专业，需要从理论教学和实验教学两方面入手培养学生。教材中既要有成形的基础理论，还要有模具的基本结构，使学生在学习这门课程时，即了解材料的变形机理，又产生控制材料变形的理念，进而才能开发并创造新的成形工艺方法和新型成形模具。本书根据作者在国内、外多年生产实践和科研，以及大学及高职高专学校的教学经验积累的基础上，综合了国内、外的先进技术并吸取了现有类似教材或科技书籍的精华和长处，系统编著而成。书中深入浅出地融入了作者近 30 年在板材、管材成形及其模具设计制造工作中的真实试验研究成果，增添了既有基础性技术又有研究性启示的内容，既适合于理工科大学本科生，也适合于高职高专学生的技术基础教学使用，也可作为相关专业选修课教学使用，同时，还可供有关工程技术人员参考使用。

由于本书部分章节是有关试验研究现状的提示性内容，因此，不属于教学大纲范围内所规定的内容，可供相关技术人员及感兴趣的学生参考，教师在授课时可根据学科专业需求进行适当取舍选择。全书分为四篇，主要介绍材料成形基础知识、冲压工艺及模具、锻造工艺及模具、塑料成型工艺及模具。其中，还插入了一些新的成形原理、工艺及部分模具知识。

作者最近在机械工业出版社出版了一套音像教学光盘《模具设计系列 VCD 教程》，其中包括《冲裁工艺与模具设计》、《拉深工艺与模具设计》、《弯曲工艺与模具设计》、《挤出吹塑气压成型工艺与模具设计》、《热塑性塑料成型工艺与模具设计》和《热固性塑料成型工艺与模具设计》。本书相关内容可与之配套使用。

本书在编写过程中，经吉林大学宋玉泉教授（科学院院士）悉心指教，并提出许多建设性意见，在此深表感谢。另外，借此机会对为本书编写完稿做了大量工作的刘小亦、李悦、王立石、贾震、丁洁、古涛、魏乐愚等人士以及所参考文献的作者表示深厚的谢意，同时，

前 言

对曾经工作 20 年始终保持合作研究并对本书成稿给予大力支持的一汽集团公司深表谢意。

本书于 2006 年 8 月经教育部专家委员会评审，遴选为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。本书的出版得到了北京理工大学和北京理工大学出版社“十一五”国家级规划教材的项目资助，作者在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促，加之作者水平所限，书中不妥之处敬请读者不吝指正。

编著者

1) 圆角半径

为了便于金属流动聚料，预锻型腔各处圆角半径应比终锻型腔相应的圆角半径略大 1~2 mm。如图 10-45 所示，对于型腔入口处圆角半径 R_1 可按式计算

$$R_1 = R + C \quad (10-14)$$

式中 R ——对应的终锻型腔圆角半径 (mm)；

C ——与型腔深度有关的圆角半径增大值，可参考表 10-13。

对于具有较高凸起或凸筋的锻件，为使中间坯料在预锻后易于充满终锻型腔，在适当减小该处预锻型腔的宽度及长度尺寸的前提下，加大该处圆角半径。当 $h \leq b$ 时，取 $R_2 = R$ ；当 $h > b$ 时，取 $R_2 = 1.2R + 3$ 。但应注意，预锻型腔中过大的圆角半径，可能增大型腔的不必要宽度使金属余肉量过多，而在终锻成形时容易产生折纹。

对于锻件形状急转弯处、截面突然改变处，为减小金属在终锻型腔内的流动阻力，其圆角半径还应适当加大。

2) 模锻斜度

从锻造时金属深腔充型能力来看，模锻斜度略小些有利。但预锻型腔的模锻斜度常与终锻型腔基本相同，由于预锻型腔的圆角半径均大于或等于终锻型腔的圆角半径，因而选用同样的模锻斜度仍有利于预锻聚料。对于要求模锻斜度较小的锻件，在预锻时将模锻斜度略微增大可有利于终锻成形。

表 10-13 与型腔深度相关的圆角半径增大值 mm

型腔深度	<10	10~25	25~50	>50
C	2	3	4	5

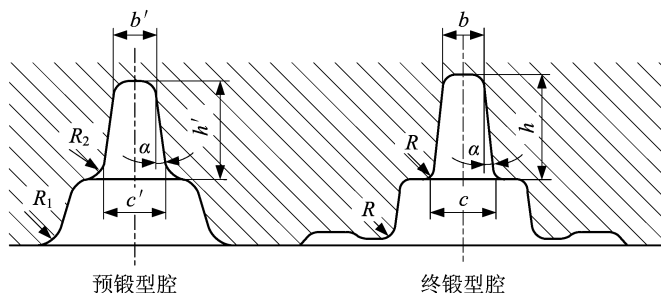


图 10-45 预锻型腔与终锻型腔及其尺寸关系

3) 型腔形状、尺寸

由于预锻成形时上、下模通常打不靠，预锻型腔的高、宽尺寸与终锻型腔的区别，应视锻件具体形状、尺寸而定。

① 具有较高凸起的锻件 如图 10-45 中所示具有较高凸起的锻件，为使预锻后的中间坯料在终锻成形时易于充满深腔凸起部位，可略微减小预锻

型腔中凸起部位的高度和宽度。比如使 $b' = b$, $h' = h - (3 \sim 5) \text{ mm}$ ，即相当于减小了预锻成形高度增大了模锻斜度，又由于圆角半径相对较大，因而增强了预锻成形性。对于这类深腔凸起锻件，为了使终锻成形能获得完整的锻件形状尺寸，有时预锻的充填成形性相对重要。

② 带叉形锻件 对于带叉形锻件，如汽车连杆、分力叉及拨叉等，预锻成形时须将坯料劈开分配，以使终锻时金属易于充满叉角部。因此，预锻型腔中应设置劈料台，其形式如图 10-46 所示。常用劈料台如图 10-46 (a) 所示，劈料台面宽度 $A \approx 0.25B$ ，当锻件叉形宽度 B 较大时，应保证 $8 < A < 30$ 。劈料台过窄，锻模强度不足，容易损坏模具；劈料台过宽，金属不易分流，劈料效果不好。上、下劈料台高度 $h = (0.4 \sim 0.7) B$ ，分料面倾角 $\alpha = 10^\circ \sim 45^\circ$ ，可视劈料台高度 h 而定。

成形工艺与模具设计

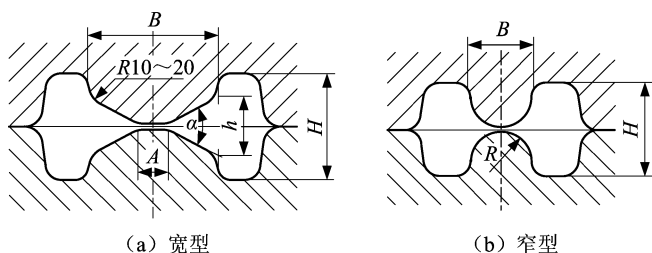


图 10-46 预锻劈料台

当锻件叉形宽度 B 较小且叉角较深时,可采用图 10-46 (b) 所示窄型柱面劈料台结构。窄型柱面劈料台的分料效果较好,但柱面半径 R 不宜过大,否则终锻成形时棱角内侧容易产生折纹。

③ 带工字形断面的锻件 对于带有工字形断面的锻件,特别是当锻件中间腹板较薄、较宽且转角半径较小时,需要采用特殊的预锻型腔。终锻之前使金属合理分流,以避免终锻成形时两翼角部冲不满或在腹板转角处产生折纹。考虑到预锻成形时避免中间腹板转角处产生折纹,则需要尽可能加大该处圆角半径,使之与锻型腔各处均能圆滑过渡。

带工字形断面的预锻型腔与终锻型腔的几何形状尺寸关系如图 10-47 所示。设计工字形断面处的预锻型腔时,考虑到预锻成形不可能打靠,因而计算该处断面面积时应计入欠压部分面积。通常当 $h < 2b$ 时,使预锻型腔宽度 $B_2 = B_1(2 \sim 3)$ mm。当 $h > 2b$ 时,取预锻型腔宽度 $B_2 = B_1 - (1 \sim 2)$ mm。

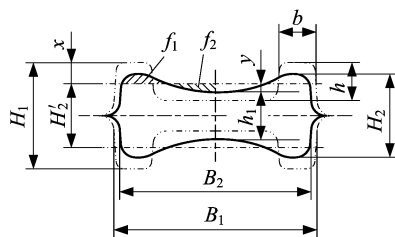


图 10-47 带工字形断面的预锻型腔

为了确定预锻型腔的高度,须先求出锻件在工字形断面处的等效断面面积 A'

$$A' = A + 2A_1 - A_2 \quad (10-15)$$

式中 A ——工字形断面处终锻型腔的断面积 (mm^2);

A_1 ——终锻时单侧飞边断面积 (mm^2);

A_2 ——预锻时未打靠部分的金属断面积 (mm^2),按照锻足近似有 $A_2 = B_2 h$ 。据资料介绍,3 t 锤模锻成形时,未打靠金属量 h 约取 1.5~3.5 mm。

将工字形断面处的预锻型腔简化成矩形,可求得预锻型腔的等效高度

$$H_2' = \frac{A + 2A_1}{B_2} - h \quad (10-16)$$

令 $x = (H_1 - H_2')/4$,在假设矩形断面处作圆弧线,使矩形侧边上、下端面积相等 $f_1 = f_2$,即可求得简化成圆滑轮廓的工字形预锻型腔断面。

终锻具有难以充满的高筋,预锻型腔可适当减小筋高,增大顶部圆角,切勿使终锻时金属倒流,以避免形成折伤。锻件带有枝芽形状时,预锻型腔应尽量使枝芽形状简化,必要时可增设阻力沟。

预锻型腔的高、宽尺寸,应视锻件在终锻成形时的变形性质确定。预锻后的毛坯在终锻过程中以镦粗成形为主时,预锻型腔高度可比终锻相应部位大 2~5 mm,宽度比终锻型腔小 1~2 mm,即使横断面比终锻型腔大,容积也略大于终锻型腔。当终锻成形时,金属是以挤入方式充填终锻型腔时,则需要使预锻型腔与终锻型腔略有差异。设计原则是使预锻后

的锻坯侧面在终锻型腔内一开始变形时就贴靠型腔侧壁上，即阻止金属横向流动，迫使其向型腔深处挤入填充。

锤上模锻中，预锻型腔的形状尺寸与终锻型腔相似，因此，仅将不同处标注于图纸上，其余按热锻件图制造。

(5) 确定模锻工步

模锻工步是指锻件在锻模中所经历的每一种变形方式。需要根据锻件的形状、尺寸具体选择模锻工步。合理确定模锻工步可使金属变形符合塑性变形规律，提高模锻件质量和精度，降低材料消耗，提高模具使用寿命和生产效率。

锤上模锻时，绝大多数制坯工序与终锻是利用同一锻模一火完成的，因此，模锻工步不易太多。按模锻件形状可以分为两大类，即短轴类和长轴类零件。

1) 短轴类零件的模锻工步

短轴类零件通常采用直径较小的坯料经镦粗或成形镦粗等制坯工序后终锻成形。所谓成形镦粗是将坯料在成形镦粗型腔内镦制出具由于终锻型腔接近形状的制坯成形方法。形状复杂的短轴类锻件，有时还须设置预锻工序。形状简单的小型盘类零件，如汽车行星齿轮等，也可以直接由终锻完成。确定模锻工步时，应根据锻件的纵断面形状，如轮毂、轮辐及轮缘等的比例，以分流面为基准面合理分配金属。对于套环类锻件，应以金属轮缘部分成形为主，制坯成形时尽可能增大镦粗直径。但应注意坯料中间部分金属较少时，容易产生折纹，必要时可采用成形镦粗工序。当轮毂较高且凸缘较大，又需锻出内孔时，为保证轮毂及凸缘都能充满，通常需要采用镦粗成形工序。确定模锻工步时，可根据锻件的纵断面特征并参考表 10-14 具体选用。

表 10-14 短轴类锻件锤上模锻工步

锻件简图	纵断面特征	变形工步
	$h_1/h_2 < 2$	镦粗→终锻
	$h_1/h_2 > 2$	自由镦粗（或成形镦粗）→终锻
	$h_3/h_2 < 1.3$	镦粗→终锻
	$h_3/h_2 = 1.3 \sim 4$	自由镦粗→终锻
	$h_3/h_2 > 4$ $d_3 < 350 \text{ mm}$	自由镦粗（或成形镦粗）→终锻

成形工艺与模具设计

续表

锻件简图	纵断面特征	变形工步
	$h_3/h_2 > 4$ $d_3 > 350 \text{ mm}$	预锻→终锻

短轴类锻件模锻过程中，必须保证制坯后的中间坯料在终锻型腔中的定位，特别是高径比较大的锻后坯料。如果在终锻型腔内定位不准确，常形成局部飞边偏大且充不满现象，造成锻件质量、密度分配不均甚至因后续机加工余量不足而报废。

2) 长轴类零件的模锻工步

长轴类零件的长宽比较大，锻造过程中打击力垂直于坯料轴线。终锻成形时，金属沿横断面的流动阻力比沿轴向要小得多，因而金属主要沿高度和宽度方向流动变形，长度方向的流动不显著。单纯从金属流动趋势来看，终锻成形近似于平面变形。因此，对于这类锻件的制坯工序，应达到使各部分横断面面积近似等于相应的终锻型腔与飞边槽断面面积之和。为了满足这一变形需求，模锻制坯通常采用拔长、滚挤、弯曲等工序。当坯料的横截面积大于锻件最大横截面积时，可只选用拔长工步。但当坯料横截面积小于锻件最大横截面积时，则有必要在拔长之后，设置滚挤工步，以保证充满锻件最大横截面积。因此，为了获得与终锻型腔近似的中间坯料断面面积，需要合理确定制坯工序并计算中间坯料的形状尺寸。通常根据平面变形假设计算所得中间坯料称为计算坯料，它是长轴类锻件选择制坯工序、确定坯料尺寸及设计制坯模结构的基本依据。

① 计算坯料截面图 根据平面变形假设计算坯料的原则是锻件某断面计算面积等于锻件该截面与飞边断面面积之和，即 $A_{\text{计}} = A_{\text{锻}} + A_{\text{飞边}}$ 。设直径为 d 的圆形截面坯料或边长为 a 的方形截面坯料，其计算坯料截面面积 $A_{\text{计}} = \pi d_{\text{计}}^2 / 4$ 或 $A_{\text{计}} = a_{\text{计}}^2$ ，因此，所求原毛坯的截面尺寸可表示为

$$d_{\text{计}} = 1.13\sqrt{A_{\text{计}}}, \text{ 或 } a_{\text{计}} = \sqrt{A_{\text{计}}} \quad (10-17)$$

相应的飞边横截面面积

$$A_{\text{飞边}} = 2\zeta A_{\text{边槽}} \quad (10-18)$$

式中 ζ ——飞边充满系数，取值可参考表 10-15；

$A_{\text{飞边槽}}$ ——选定截面处飞边槽截面面积 (mm^2)。

对于同一锻件的不同截面处，其飞边的大、小不可能一致，因而对于较难成形

表 10-15 飞边槽充满系数 ζ

锻件类型	质量/kg	ζ			
		锻粗变形	冲孔或劈开	挤入成形	冲孔或劈开内毛边
短轴类	<1	0.3	0.4	0.5	
	1~5	0.4	0.5	0.6	1
	>5	0.5	0.6	0.7	
长轴类	<1	0.4	0.5	0.6	
	1~5	0.5	0.6	0.7	1
	>5	0.6	0.7	0.8	

注：在锻件两端面，由于未考虑端部飞边，一般可取 $\zeta=1$

的截面可适当增大飞边充满系数,或增大飞边槽尺寸。

根据上述关系计算得出锻件各部分的截面面积 $A_{\text{计}}$ 后,为了绘制计算坯料图,设定一个适当的作图比例系数 M ,用以求出对应截面的高度

$$h_{\text{线}} = A_{\text{计}} / M \quad (10-19)$$

以线段的轴线尺寸 L 为横坐标、以缩小比例的横截面面积 $A_{\text{计}}$ 及计算直径 $d_{\text{计}}$ 或计算边长为 $a_{\text{计}}$ 为纵坐标,将各截面数据标出,并将线段的终点用光滑曲线连接起来,便可得到计算坯料的截面图,如图 10-48 所示。将图中各点的面积乘以比例作图系数 M ,即可获得坯料该点所在截面的面积。

② 计算坯料直径图 利用所得截面面积 $A_{\text{计}}$, 根据式 (10-16) 可计算出坯料各特征点或截面处的直径 $d_{\text{计}}$, 同样, 将其连接成光滑曲线即为计算坯料直径图。

③ 计算坯料平均截面积及平均直径 在坯料截面图上取一轴线方向的微段 dL , 则该微段处坯料的微小计算体积 $dV = A_{\text{计}} dL$, 根据式 (10-19) 具有 $dV = A_{\text{计}} dL = h_{\text{计}} M dL$ 的关系, 因而可得该坯料的计算总体积

$$V = \int_0^L M h_{\text{计}} dL$$

根据计算坯料图可计算出计算坯料的平均截面积

$$A_{\text{平均}} = \frac{M \int_0^L h_{\text{计}} dL}{L} = \frac{M A_{\text{计}}}{L} \quad (10-20)$$

这样, 利用

$$d_{\text{平均}} = 1.13 \sqrt{A_{\text{平均}}}, \text{ 或 } a_{\text{平均}} = \sqrt{A_{\text{平均}}} \quad (10-21)$$

的关系即可绘出计算坯料平均截面图和平均直径图, 如图 10-48 所示。

④ 计算坯料的修正及简化 由上述计算坯料简图可以看到, 当锻件带有压凹或型孔时, 按上述计算方法得到的截面图和计算坯料简图的图形会产生突变现象。为了便于聚料制坯、简化制坯型腔结构, 必须对计算坯料图进行简化和修正处理。因此, 通常按照截面图上面积相等的原则进行简化修正, 以获得具有光顺外形的截面图和计算坯料图。

对于锻件杆部带有折线或曲线组成的凸起形状时, 杆部与凸起部转接处的坯料直径

$$d_k = \sqrt{3.82 \frac{V_{\text{杆}}}{L_{\text{杆}}} - 0.75 d_{\text{min}}^2 - 0.5 d_{\text{min}}} \quad (10-22)$$

式中 $V_{\text{杆}}$ ——计算坯料的杆部体积 (mm^3);

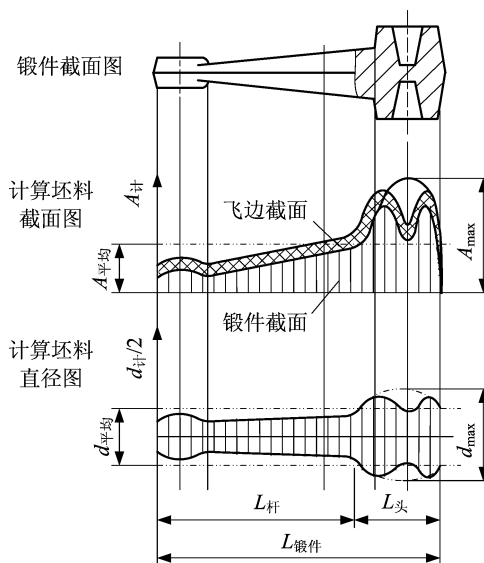


图 10-48 计算坯料图

$L_{\text{杆}}$ ——计算坯料的杆部长度 (mm);

d_{min} ——计算坯料的杆部最小直径 (mm)。

杆部与凸起转接处的过渡直径 d_k 也可由坯料截面图的关系求出, 即

$$d_k = 1.13\sqrt{A_k} = 1.13\sqrt{h_k M}。$$

对于形状较复杂的锻件, 处理计算坯料与平均计算坯料图形时可能会产生多头多杆的复杂形状。通常需要根据截面图上面积相等的原则将其简化为一头一杆、一头两杆或两头一杆等简单计算坯料形式, 以便于选择制坯工步。

3) 选择模锻工步

合理的模锻工步应使毛坯在锻造过程中符合金属流动变形规律, 获得高质量、低成本锻件, 同时还应考虑到锻打操作方便和安全。对于拔长制坯来说, 头部的相对尺寸越大, 金属聚料量越多, 应选择聚料小高较高的制坯工步; 如果锻件相对长度较长, 锻造时金属流动距离越大, 需要选择拔长效率较大的制坯工步。锻件杆部锥度越大, 作用在制坯形抢中变形金属的水平分力越大, 另外, 锻件越大, 原坯料也越重。因而可综合考虑

原坯料的头部相对尺寸 $\alpha = \frac{d_{\text{max}}}{d_{\text{平均}}} = \frac{A_{\text{max}}}{A_{\text{平均}}}$ 、锻件相对长度 $\beta = \frac{L_{\text{件}}}{d_{\text{平均}}} = \frac{L_{\text{件}}}{1.13A_{\text{平均}}}$ 、杆部锥度

$K = \frac{d_k - d_{\text{min}}}{L_{\text{杆}}}$ 及原坯料质量 $G_{\text{坯}}$ 这四个因素的综合关系来选择拔长类制坯工步。通常, 可

计算得出上述四个影响因素的相应数值, 利用图 10-49 所示工步选择图解来具体选择工步。例如, 计算得出 $\alpha = 1.37$ 、 $\beta = 3.2$ 、 $G_{\text{锻}} = 0.8$ kg 时, 由工步选择图解可查得应采用闭式滚挤制坯。

一般, 各种制坯工步转移金属的能力按开滚、闭滚、拔长、拔长+开滚、拔长+闭滚顺序递增。

此外, 根据选定的坯料尺寸也可以确定相应的制坯工步。一般, 坯料不经拔长而直接进行滚挤成形时, 原坯料的断面积总是大于平均计算坯料的断面积, 而小于头部平均断面积, 大体上可以取 $F_{\text{坯}}/F_{\text{max}} \geq 0.7 \sim 0.85$ 。当锻件大头靠近钳口一端的情况下, 由以上方法选择的坯料长度与滚挤模膛长度之差小于 $1.13\sqrt{F_{\text{平均}}}$ (即 $d_{\text{平均}}$), 在为数不多的滚挤过程中, 充满大头的

同时, 也能充满型腔的长度。如果坯料长度与滚挤模膛长度之差小于 $1.13\sqrt{F_{\text{平均}}}$, 则应选取拔长制坯工序。当锻件大头在钳口相反一端时, 由于差值正处于头部位置, 滚挤时要求由杆部流入头部的金属更多一些, 因而允许的差值还应减小。

(6) 制坯型腔的设计

对于长轴类或形状复杂锻件, 通常设置制坯工步, 使制坯锻造时改变坯料截面面积和形状, 有利于锻造过程中的材料合理分配、减少飞边、适应锻件横截面积和形状的要求。制坯

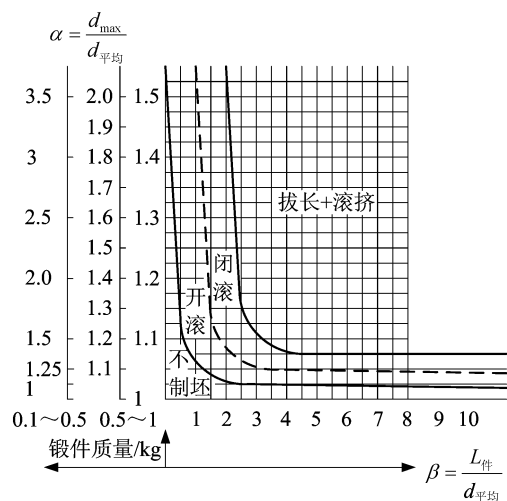


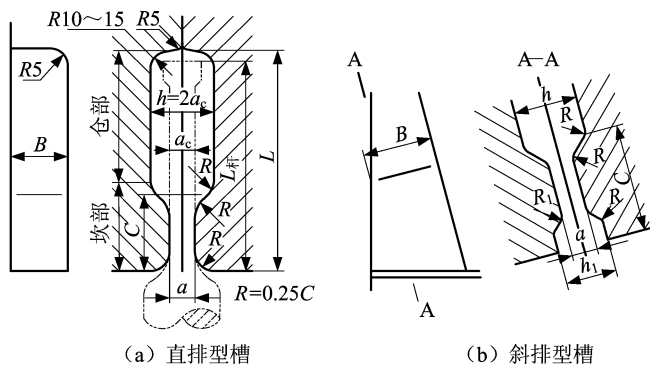
图 10-49 拔长工步的选择

型腔主要包括拔长、滚挤、压肩、弯曲、镦粗或压扁及切断等。

1) 拔长型槽

当锻件的截面面积变化比较大时,常采用拔长工步制坯,其主要目的是减小坯料截面积并增加坯料长度。实际上,用于拔长制坯的型腔是指设于分模面上的一个凸台,通常称为拔长台或拔长坎。按照工作特点,拔长坎可分为两种类型。

经拔长后锻件杆部的最小高度靠模具闭合时的上、下坎面的距离决定,主要有坎部和仓部两部分组成。其中,坎部为金属拔长变形的工作部分,常设计成开式结构。仓部是用于置放拔长后坯料并根据其长度可控制拔长杆部长度的辅助部分。按照拔长坎在锻模上的设置形式,常可分为直排型腔和斜排型腔两种形式,其形状尺寸关系如图 10-50 所示。



(a) 直排型槽 (b) 斜排型槽

图 10-50 拔长型槽

当杆部的尺寸变化不是很大,可直接拔长至接近于计算坯料的尺寸,因而拔长后就不再需要进行滚挤成形。此时,拔长坎上、下端面高度

$$a = (0.7 \sim 0.8) d_{\min} \quad (10-23)$$

式中 d_{\min} ——计算坯料的最小直径 (mm)。

如果杆部尺寸变化较大,拔长后还需进一步滚挤成形时,上、下坎端面高度

$$a = (0.8 \sim 0.9) a_c = (0.8 \sim 0.9) \sqrt{\frac{V_{\text{杆}}}{L_{\text{杆}}}} \quad a = (0.8 \sim 0.9) a_c \quad (10-24)$$

式中 a_c ——拔长后方形杆的边长 (mm);

$V_{\text{杆}}$ ——计算坯料的杆部体积 (mm^3);

$L_{\text{杆}}$ ——计算坯料的杆部长度 (mm)。 $L_{\text{杆}} \geq 500 \text{ mm}$ 时,取较小系数; $L_{\text{杆}} < 200 \text{ mm}$ 时,取较大系数坎部长度

$$C = (1 \sim 2) D_{\text{坯}} \quad (10-25)$$

式中 $D_{\text{坯}}$ ——坯料直径 (mm)。

拔长型槽的宽度

$$B = (1.2 \sim 1.5) D_{\text{坯}} + 20(\text{mm}) \quad (10-26)$$

$D_{\text{坯}} < 40 \text{ mm}$ 时,取较大系数; $D_{\text{坯}} > 80 \text{ mm}$ 时,取较小系数。

拔长型槽长度

$$L = L_{\text{杆}} + (5 \sim 10) (\text{mm}) \quad (10-27)$$

拔长型槽高度

$$h = 2a_c \quad (10-28)$$

坎部转角半径 $R = 0.25C$ 、 $R_1 = 10R$,将拔长坎的纵断面形状做成凸圆弧形,有助于金属轴

向流动。即增大 R_1 可避免拔长后的坯料表面形成急突波浪形状，进而提高拔长质量。

为了提高拔长效率和拔长后杆部表面质量，也可将拔长型槽做成闭式结构，但由于操作困难、制造复杂，一般不常采用。

此外，当拔长部分较短时，也可采用简易拔长台。即在锻模左侧分模面上设置一凸起平台，将棱角倒圆即可用于拔长制坯。

2) 滚挤型腔

滚挤工步通常也称作碾光，是用来减少坯料某一部分截面积，同时增大另一部分的截面积。滚压型腔的设置可以使坯料在预锻和终锻之前进行合理的材料分配，将坯料表面滚光，避免预锻或终锻时产生折叠，并可去除由于加热所形成的氧化皮。

如图 10-51 所示，滚挤型腔也有开式、闭式及混合式之分。采用开式滚挤锻造时，金属横向展宽较大，轴向流动较小，操作方便，制模简单，坯料经滚挤后的横断面近似于矩形；闭式滚挤相反，椭圆形模壁阻碍金属横向流动，因而金属横向展宽小，模壁迫使金属沿轴

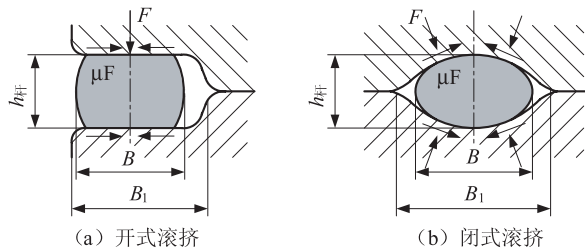


图 10-51 滚挤制坯中金属受力情况

向产生较大流动，聚料作用较强，经滚挤后的坯料横断面呈椭圆形，闭式滚挤型腔制造相对复杂。混合式滚进型槽用于要求制坯后杆部为圆形断面，两端为矩形断面的情况。

有时，为了节省一个成形型腔，还可采用不对称滚挤型腔将滚挤和成形在同一个型腔内锻造成形。利用这种不对称滚挤型腔锻造成形效果比利用普通成形型腔还好，只是操作不方便。不对称滚挤型腔通常做成开式。一般，对于具有工字形断面、有冲孔连皮或具有劈开形状的锻件，为了便于后续成形，常需使滚挤后的坯料断面呈矩形，应选用开式滚挤型槽，其形状结构如图 10-52 所示。否则，应尽可能采用闭式滚挤。

滚挤型腔由钳口、滚挤型槽本体及毛刺槽三部分组成，滚挤型槽部分以计算坯料图为依据设计，其主要内容是确定本体部分每一断面高度 h 及型槽宽度 B 。

① 滚挤型槽高度 闭式滚挤型槽的杆部高度，可根据计算坯料与滚挤后坯料相应部分断面积相等的原则确定

$$h_{\text{杆}} = \sqrt{\frac{4}{\pi(1.6\sim 2)} A_{\text{计}}^2} = (0.9 \sim 0.8) A_{\text{计}} \quad (10-29)$$

式中 $A_{\text{计}}$ —— 计算毛坯相应部分的截面面积 (mm^2)。

开式滚挤型槽的杆部高度

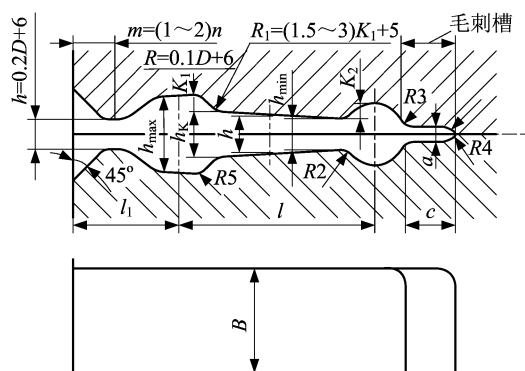


图 10-52 开式滚挤型腔结构尺寸