

# 锻模设计 技术及实例

王以华 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 锻模设计技术及实例

主 编 王以华  
副主编 吕景林 姜剑敏 林 健 吴振清  
汪 磊 张海英  
参 编 宦有佩 刘国龙 杨国彬 缪桃生 周 煊  
管熙荣 王永华 张 晖 孙佳佳 王 黎  
何 刚 杨智瑜 何琪海 王海光  
主 审 张质良



机械工业出版社

随着汽车、航空航天、造船、农机、高速列车等工业的飞速发展，对模锻件的需求与日俱增，对从事锻模设计人才的需求如饥似渴。为了给刚从事锻模设计、缺乏经验的人员提供锻模设计实例，尽快掌握锻模设计的技艺，同时也为已经从事锻模设计的工程技术人员、大专院校的师生及科研人员、工人提供可借鉴的理论和实例，编写了本书。

本书除了介绍锻模设计的基本理论知识外，还汇集了众多作者从事锻模设计数十年的经验，选择了上海及国内外典型、先进、实用的模具结构，给出了近百个设计实例。有的实例给出详尽的设计步骤，初学者可以模仿设计；有的实例结合金属流动模拟技术，给出节能、节材、深入研究、开拓创新的新思路。本书可供相关专业的科技人员和大专院校师生参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

锻模设计技术及实例/王以华主编. —北京:机械工业出版社, 2009.1  
ISBN 978-7-111-25194-1

I. 锻… II. 王… III. 锻模-设计 IV. TG315.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第148956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:刘彩英 责任编辑:李建秀 版式设计:霍永明  
责任校对:陈延翔 封面设计:赵颖哲 责任印制:李妍  
北京蓝海印刷有限公司印刷  
2009年1月第1版·第1次印刷  
169mm×239mm·41.75印张·2插页·837千字  
0001—4000册  
标准书号:ISBN 978-7-111-25194-1  
定价:76.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
销售服务热线电话:(010) 68326294  
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话:(010) 68351729  
封面无防伪标均为盗版

# 序

锻造是制造业的基础工艺之一，是机械产品不可缺少的重要环节。在人类生活、国防等各个领域如汽车、电站、冶金、机械装备、铁道、造船、航空航天、兵器、化工等部门中都占有重要地位。因为采用锻压工艺制造的零件不仅强度高、韧性好，而且节材、节能、降耗、成本低，适用于大批量生产。正如欧洲一些著名学者在人类进入 21 世纪前夕撰文指出：欧洲的锻造者将是把欧洲带入 21 世纪提供高科技零件的源泉。

本书正是根据我国进入 21 世纪模锻行业的发展需要，以创新设计为主线，以节能降耗和环保为宗旨，总结了作者从事锻模设计数十年的宝贵经验，并结合了上海乃至国内外工厂、科研机构、大专院校锻模设计的基本理论和实践，介绍锻模设计的基本技术并给出近百个设计实例。这些实例具有典型性、实用性、先进性和前瞻性，并能深入浅出地分析在生产实践中所出现的问题，又给出解决问题的方法。书中较详细地介绍了具有实际应用价值的节能节材的小飞边模锻、闭塞锻造、积极摩擦挤压方法、铸锻联合工艺等。为适应数字化制造之需，书中还介绍了锻模设计 CAD/CAE/CAM，在众多的净成形或接近净成形的实例中，其中不少都有通过金属流动模拟优化锻模设计的实例；在模具材料及热处理一章中，还特别介绍了模具的修复方法。它既适合初学者使用，又对从事科研、生产实践的工程技术人员有借鉴作用。

我相信，本书的出版，对提升我国的锻模设计水平、提高锻件的竞争力一定会有所裨益。

中国工程院院士

殷雪松

2008-2-19 于上海



# 前 言

随着汽车、航空航天、造船、农机、高速列车等工业的飞速发展，对模锻件的需求与日俱增，对从事锻模设计人才的需求如饥似渴。而刚从高校毕业的大专院校学生，由于专业面需要拓宽，不可能马上就能从事锻模设计。为了给这部分学生提供锻模设计实例，尽快掌握锻模设计的技艺，同时也为已经从事锻模设计的工程技术人员、大专院校的师生及科研人员、工人提供可借鉴的实例，编写了本书。

本书汇集了众多作者从事锻模设计数十年的经验，选择了上海及国内外典型、先进、实用的模具结构的近百个设计实例，大多数实例都配有工艺分析、模具设计、试验时出现的缺陷及解决办法。在第1章中，给出基本数据分析，采用何种工艺生产锻件才能取得最佳经济效益；在第2章中，除了介绍锻模设计的一般知识外，在实例中，以典型产品495A连杆为例，给出详尽的设计步骤，初学者可以模仿设计，对轿车曲轴锻压机上模具设计也给出详尽的设计步骤和经验；在第3章中，较为详尽系统地介绍了闭塞锻造的模具及应用，齿轮锻件的精密成形模具设计、优化及精密整形模具设计；在第4章中，较为详尽地介绍了轻金属锻模设计，给出铝合金锻件常见缺陷及预防措施；在第5章中，着重介绍挤压模具设计，首次较为详细系统地写出“积极摩擦”挤压模具的设计理论和方法；在第6章的实例中，着重给出切边、校正、压挤复合模实例，还给出低塑性合金锻件及易出现切边裂纹的切边模设计的成功实例；在第7章中，除了介绍辗环、墩锻模具设计之外，还首次涉及较为详尽的铸锻联合工艺，为初涉边缘和交叉学科的复合工艺提供参考；在第8章中，通过实例分析比较CAD/CAM/CAE应用前、应用中、应用后的效果；在第9章中，除给出锻模热处理的实例外，还介绍了模具的修复技术和工艺。文中尽量避免冗长的文字叙述，力求简明扼要、通俗易懂。

参加本书编写的单位有：上海保捷汽车零部件锻压有限公司、上海桦厦实业有限公司、上海交通大学、上海爱知锻造有限公司、上海晋博机电有限公司、上海交通大学中京锻压有限公司、无锡东海锻造有限公司、江苏海安百协锻锤有限公司、山西金瑞高压环件有限公司等。

本书由王以华任主编，吕景林、姜剑敏、林健、吴振清、汪磊、张海英任副主编。按各章次排序的撰写者为：第1章王以华、吴振清；第2章王以华、姜剑敏、缪桃生；第3章王以华、杨国彬；第4章王以华、林健；第5章王以华、张海英；第6章王以华、王永华；第7章王以华、张晖；第8章汪磊、何刚；第9章宦有佩、刘国龙、吕景林。何琪海提供了实例2-18，王海光提供了实例3-15及实

例 6-7；周焯、管熙荣、孙佳佳、王黎、杨智瑜为本书的图稿做了大量的工作。

本书由上海交通大学博士生导师张质良教授主审。

在编写过程中，得到许多单位和工程技术人员的积极支持，并提供和翻译了一些有价值的资料，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平，错误和谬误在所难免，敬请读者指正。

编 者

# 目 录

序	
前言	
第 1 章 概论	1
1.1 锻模的分类	1
1.2 锻模的设计程序和一般要求	1
1.3 模锻成形过程及其主要影响因素	2
1.3.1 开式模锻的成形过程及影响模膛充填的主要因素	2
1.3.2 闭式模锻成形过程及影响模锻力的主要因素	7
1.3.3 锻模设计与锻件尺寸精度的关系	9
1.3.4 锻模设计与模具寿命的关系	11
1.4 锻模设计温度规范的选择	14
1.4.1 成本费用	14
1.4.2 温度规范选择的综合评价	17
1.5 锻模设计常用的资料 and 标准	18
1.5.1 各种金属材料的锻造温度范围	18
1.5.2 常用金属材料的线胀系数和收缩率	24
1.5.3 常用金属材料的变形抗力	24
参考文献	37
第 2 章 普通锻模设计	38
2.1 锻件图的设计	38
2.1.1 分模面与分模线	38
2.1.2 锤锻和压力机上模锻件的余量和公差	39
2.1.3 模锻斜度	46
2.1.4 圆角半径	47
2.1.5 凹腔、凹槽、不通孔和连皮	49
2.1.6 技术条件	51
2.2 锤用锻模	51
2.2.1 工艺特点	51
2.2.2 锤上模锻件的分类	52
2.2.3 模锻工步的选择	55
2.2.4 锻锤吨位的确定	59
2.2.5 毛坯尺寸的确定	59
2.2.6 锤用锻模模膛的设计	61
2.2.7 锤用锻模结构设计	75
2.3 螺旋压力机用锻模设计	97
2.3.1 螺旋压力机模锻特点、设备吨位选取及技术参数	97
2.3.2 模膛与锻模设计	98
2.3.3 模架与模块设计	108
2.4 热模锻压力机用锻模设计	113
2.4.1 热模锻压力机上模锻的特点、设备吨位的选取及技术参数	114
2.4.2 模膛设计	116
2.4.3 模架设计	129
2.5 锻模设计实例	139
参考文献	195
第 3 章 精密塑性成形的锻模设计	197
3.1 概述	197
3.2 锻件图的制定及模膛设计要点	198
3.2.1 锻件图的制订	198
3.2.2 模膛尺寸的确定	198
3.2.3 模具结构及制造要点	201
3.3 精密模锻的方法	201

3.3.1 精压 .....	202	内容 .....	380
3.3.2 复合模锻工艺 .....	210	5.2.2 模具工作部分设计 .....	381
3.3.3 小飞边锻模设计 .....	211	5.2.3 组合凹模的设计 .....	388
3.3.4 无飞边锻模的设计 .....	217	5.2.4 冷挤压的模架结构 .....	390
3.3.5 等温模锻和超塑性锻模 设计 .....	229	5.3 温挤压模具设计 .....	394
3.3.6 挤压 .....	231	5.4 热挤压模具设计 .....	395
3.3.7 精密模锻实例 .....	231	5.4.1 模具结构及零部件设计 .....	395
参考文献 .....	264	5.4.2 挤压设备的选择 .....	398
<b>第4章 轻金属锻模设计</b> .....	266	5.4.3 毛坯的尺寸 .....	398
4.1 概述 .....	266	5.4.4 热挤压工步的设计 .....	399
4.2 铝合金锻造 .....	267	5.5 带积极摩擦力作用的挤压模具 设计 .....	402
4.2.1 铝合金的分类 .....	267	5.6 挤压模具设计实例 .....	407
4.2.2 铝合金模锻用的原材料 .....	268	参考文献 .....	445
4.2.3 铝合金锻造的热力规范 .....	269	<b>第6章 切边、冲孔和校正模 设计</b> .....	447
4.2.4 铝合金锻模设计 .....	274	6.1 切边和冲孔 .....	447
4.2.5 铝合金的锻造工艺 .....	278	6.1.1 切边和冲孔的方法 .....	447
4.3 钛合金锻造 .....	280	6.1.2 切边力的计算和切边压力机 的选择 .....	448
4.3.1 钛和钛合金 .....	280	6.2 切边模的设计 .....	449
4.3.2 钛合金锻造的热力规范 .....	285	6.2.1 凸模与凹模的间隙 .....	449
4.3.3 钛合金的锻件和模具 设计 .....	290	6.2.2 切边凹模的设计 .....	451
4.3.4 钛合金的锻造工艺 .....	293	6.2.3 切边凸模的设计和固定 .....	457
4.3.5 钛合金的热处理 .....	302	6.2.4 切边凸、凹模座的设计 .....	461
4.4 镁合金锻模设计 .....	303	6.2.5 卸飞边装置 .....	472
4.4.1 镁和变形镁合金 .....	303	6.2.6 其他主要紧固件 .....	475
4.4.2 模锻镁合金用原材料 .....	308	6.2.7 切边模的压力中心 .....	477
4.4.3 镁合金锻造的热力规范 .....	310	6.2.8 切边模的闭合高度 .....	478
4.4.4 镁合金的锻造工艺 .....	315	6.3 冲孔模的设计 .....	479
4.5 轻金属锻模设计实例 .....	320	6.3.1 冲孔模的结构 .....	479
参考文献 .....	352	6.3.2 冲孔凸模的设计 .....	480
<b>第5章 挤压模具设计</b> .....	354	6.3.3 冲孔凹模的设计 .....	482
5.1 概述 .....	354	6.3.4 底座的设计 .....	483
5.1.1 挤压方法 .....	354	6.3.5 卸锻件装置 .....	484
5.1.2 挤压变形程度的计算 .....	357	6.4 切边冲孔连续模设计 .....	484
5.1.3 挤压力的计算 .....	360	6.5 切边冲孔复合模设计 .....	485
5.2 冷挤压模具设计 .....	380	6.5.1 复合模的工作过程 .....	485
5.2.1 模具设计要求及主要			



6.5.2 复合模的设计要点 .....	486	8.1.6 CAE 的概念 .....	573
6.5.3 用于冲直径较小孔的 复合模 .....	488	8.2 CAD/CAE/CAM 常用软件 介绍 .....	574
6.6 锻件校正模设计 .....	492	8.2.1 常用国外软件 .....	574
6.6.1 校正模的作用及分类 .....	492	8.2.2 常用国内软件 .....	577
6.6.2 需用校正模校正的锻件 .....	493	8.3 锻模 CAD/CAE/CAM 的发展 概况 .....	578
6.6.3 校正模设计 .....	494	8.4 锻造过程的数值模拟 .....	579
6.7 切边、冲孔、校正模具设计 实例 .....	497	8.4.1 有限元分析的基本概念 .....	579
参考文献 .....	507	8.4.2 锻造过程数值模拟中的刚 (粘)塑性有限元法 .....	581
<b>第7章 特种锻模设计</b> .....	508	8.5 CAD/CAE/CAM 一体化方案的 实施 .....	587
7.1 环件轧制模具设计 .....	508	8.6 CAD/CAE/CAM 技术应用在锻模 设计后所产生的效益 .....	594
7.1.1 辗环的分类和应用 .....	509	8.7 锻模 CAD/CAE/CAM 应用 实例 .....	595
7.1.2 辗环的变形特点 .....	510	参考文献 .....	602
7.1.3 辗压力和辗环机 .....	518	<b>第9章 模具材料、热处理及模具 寿命的提高</b> .....	603
7.1.4 辗环工艺参数及模具 设计 .....	522	9.1 模具材料的使用要求及分类 .....	603
7.2 镦粗(聚集)模具设计 .....	535	9.1.1 模具材料的使用要求 .....	603
7.2.1 棒料镦粗(聚集)模具 设计 .....	535	9.1.2 模具材料的分类 .....	603
7.2.2 管料镦粗(聚集)模具 设计 .....	540	9.1.3 主要合金元素在模具材料中 的作用 .....	604
7.3 铸锻联合工艺 .....	544	9.1.4 冷作模具钢 .....	607
7.3.1 铸锻联合工艺的使用 范围 .....	544	9.1.5 热作模具钢 .....	610
7.3.2 工艺参数的确定 .....	545	9.2 模具钢材料的选择与发展 .....	612
7.3.3 力学性能的比较 .....	546	9.2.1 模具钢材料选择的基本 原则 .....	612
7.4 实例 .....	548	9.2.2 模具钢材料选择的主要 指标 .....	612
参考文献 .....	570	9.2.3 推荐模具材料选择 .....	614
<b>第8章 锻模 CAD/CAE/ CAM</b> .....	571	9.2.4 国内外模具钢的发展概况与 动向 .....	619
8.1 CAD/CAE/CAM 的介绍 .....	571	9.3 模具热处理 .....	622
8.1.1 CAD 的概念 .....	571	9.3.1 模坯预热处理 .....	622
8.1.2 CAD 技术原理 .....	571	9.3.2 模具热处理(强韧化	
8.1.3 CAD 系统的组成 .....	571		
8.1.4 CAD 过程模型、功能与 特点 .....	572		
8.1.5 CAM 的概念 .....	573		

---

处理) .....	625	9.4.2 整体开裂 .....	643
9.3.3 冷作模具钢热处理 .....	629	9.4.3 腐蚀 .....	644
9.3.4 热作模具钢热处理 .....	636	9.4.4 磨损 .....	644
9.3.5 其他模具钢热处理 .....	641	9.5 模具修复与表面强化处理 .....	645
9.3.6 模具钢热处理常见的缺陷和 预防 .....	641	9.5.1 模具的堆焊修复 .....	645
9.3.7 模具材料及热处理检验 .....	642	9.5.2 模具套箍 .....	646
9.4 模具失效分析 .....	643	9.5.3 模具表面强化处理 .....	647
9.4.1 热疲劳(热裂) .....	643	9.6 模具失效分析实例 .....	651
		参考文献 .....	657

# 第1章 概 论

锻模是金属在热态或冷态下，在外力作用下迫使金属成形所需的形状和性能的模具总称。一个完整的锻模设计过程应该包括：毛坯准备—毛坯加热—模锻—切边、冲孔—热校正或热精压—打磨毛刺—热处理—清理—冷校正或冷精压—质量检验等。因此，一个零件是否适于模锻成形，要通过工艺分析和经济分析来确定（表 1-2 ~ 表 1-7），同时还要考虑本企业设备及模具的加工能力等诸多因素。

## 1.1 锻模的分类

锻模是实现模锻工艺的关键装备之一。可以按照所使用的模锻设备进行分类；也可以按工艺用途分类；还可以按锻模结构和分模面的数量分类。具体分类如下：

- 按工艺用途分类 {
  - 锻造模具
  - 挤压模具
  - 辊锻模具
  - 墩锻模具
  - 摆碾模具
  - 校正模具
  - 压印模具
  - 切边模具
  - 冲孔模具
  - 精锻模具
  - 精整模具
- 按锻模结构分类 {
  - 整体模具
  - 组合模具
- 按分模面数量分类 {
  - 单向分模面锻模
  - 多向分模面锻模

## 1.2 锻模的设计程序和一般要求

设计出的锻模要能够完成所需的变形工艺和技术要求。因此，当你拿到零件图时，首先要根据零件的材质、尺寸、形状、技术要求、批量大小和工厂现有设备能力，确定变形工步并选择模锻设备，然后再着手设计模具。模锻的工艺过程一般由

下列基本工序组成：

- 1) 据锻件图及变形工步的要求，选定毛坯规格并以此下料。
- 2) 据毛坯材质选择加热规范。
- 3) 确定模锻工步并设计模膛，一般顺序是先设计终锻模膛，再设计预锻模膛，最后设计制坯模膛。
- 4) 据压力机的装模空间（和闭合高度）设计模具的闭合高度，选择锻造设备。
- 5) 设计切边模和冲孔模。
- 6) 根据需要设计校正模、精压模、精整模。
- 7) 确定检验项目，如主要尺寸，锻件的清理和探伤，打磨毛刺等工序并设计必要的检验工夹具。

8) 选取模具材料并确定热加工规范。

一副好的锻模要满足以下基本要求：

- 1) 保证获得满足尺寸要求和力学性能要求的锻件。
- 2) 便于安装、调整，操作安全方便。
- 3) 要有足够的强度和刚度，有高的使用寿命。
- 4) 锻模的外廓尺寸符合所选设备的技术规格。

## 1.3 模锻成形过程及其主要影响因素

### 1.3.1 开式模锻的成形过程及影响模膛充填的主要因素

#### 1. 开式模锻的成形过程

在锤上模锻时，其成形过程大体分为四个阶段（图 1-1）。

（1）第一阶段即镦粗阶段 毛坯的自由镦粗阶段图（1-1a）。外圈金属流入法兰部位，内圈金属流向凸台部位。在更复杂的情形下，金属自由地挤入模具的深腔形成不通孔。在此阶段，变形力相对较小。在毛坯上作用着如下的力：外力  $p$  和端面上作用着反作用力和摩擦力  $T$ 。

（2）第二阶段即与模壁接触阶段 毛坯与模壁刚一接触的瞬间称为第二阶段（图 1-1b）。在此阶段，增加模具侧壁力  $Q$ ，毛坯的侧表面出现摩擦力  $T_b$ ，该力沿着模膛表面。在此阶段，毛坯被压缩  $\Delta H_2$ ，也是飞边即将出现的瞬间。

（3）第三阶段 在此阶段，毛坯被压下高度  $\Delta H_3$ （图 1-1c），毛坯的多于金属开始流入飞边槽。由于变形力急剧增长，金属处于更明显更复杂的三向应力状态。由于变形和流向飞边的力（飞边阻力  $p_f$  及其反作用力）同时存在，总的变形抗力  $p$  在增大。在该阶段，只有角隙  $C$  未充满。在随后的金属流动中，在飞边槽入口处的侧壁表面出现摩擦力  $T'_b$ ，其方向与模膛角隙处的摩擦力  $T_b$  相反；在飞边槽处出

现摩擦力  $T_f$ 。第三阶段模锻的特点是，飞边完成了自身的功能作用——封闭了模具模膛。在进一步变形中，由于飞边桥部开口高度在减小，随着桥部金属的变薄及温度下降，金属流向飞边的阻力也大大增加，迫使金属流向凸台和角隙  $C$  部，以致完全充满模膛。

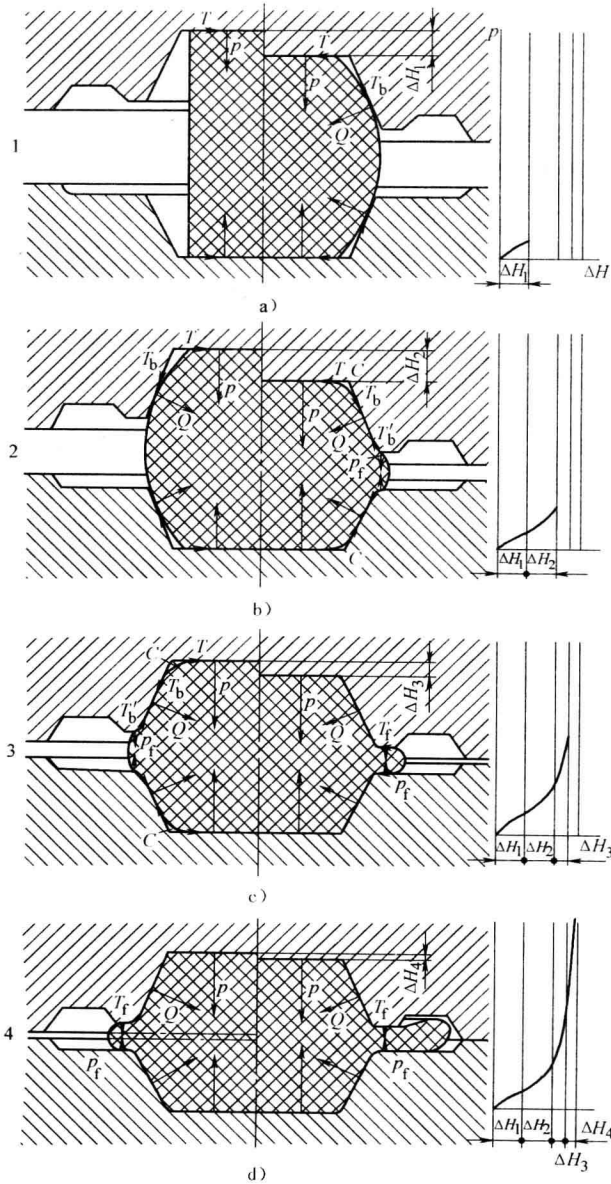


图 1-1 开式模锻成形过程及模锻力—行程曲线<sup>[1]</sup>

1、2、3、4—左面为该阶段的开始阶段，右面为该阶段的结束阶段

(4) 第四阶段即打靠阶段 金属已完全充满模膛 (图 1-1d), 但上下模面即将打靠。多余的金属被挤入飞边槽, 锻造变形力急剧上升。

## 2. 模锻时影响金属充满模膛的主要因素<sup>[2]</sup>

(1) 模锻件 (模膛) 的形状和尺寸 模锻件的形状和尺寸对模膛的充填有重要影响。

1) 高肋的锻件 (图 1-2), 尤其较薄的肋, 较难充满。因为模膛越窄越深, 在其他条件相同时, 金属向模膛内流动的阻力越大, 金属温度降低也越快, 故充满模膛也越困难。因此, 对高肋类的锻件, 要增设预锻模膛, 预锻件的形状和尺寸有助于金属充填终锻模膛时减小阻力, 详见后面有关章节。

2) 具有叉形部分的锻件, 在叉形内端角处常不能充满 (图 1-3)。如将毛坯直接终锻时, 金属的变形流动情况如图 1-4 所示。由于横向流动的金属首先沿水平方向向外流, 与模壁接触后, 部分金属转向内角处流动, 于是, 内角处是最难充满的地方。内角处不易充满的另一原因是, 此处被排出的金属, 除了沿横向流入模膛外, 很大一部分金属沿纵向流入飞边槽 (图 1-5), 造成内角端处金属不足。

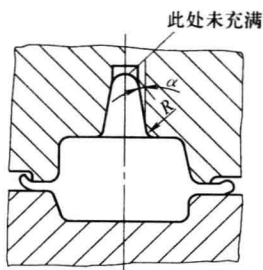


图 1-2 具有高肋的锻件

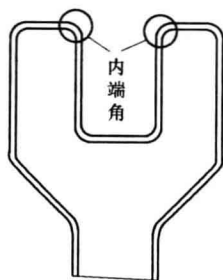


图 1-3 具有叉形部分的锻件

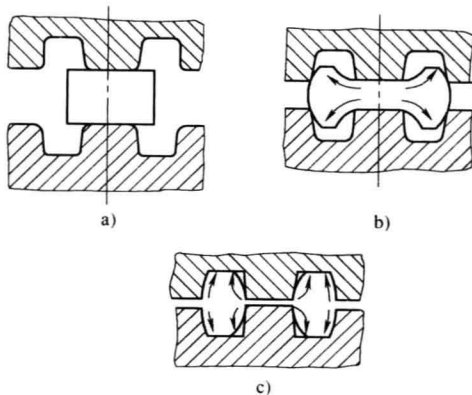


图 1-4 模锻叉形件时金属的流动情况

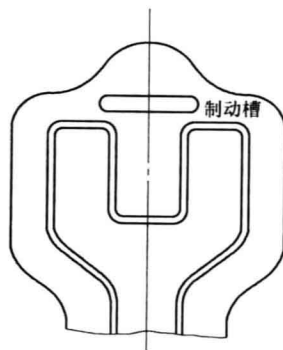


图 1-5 叉口处大量金属流入飞边槽

(2) 金属充填模腔的方式 模锻时金属充满模腔的方式有镦粗和压入两种方式(图1-6),其中镦粗方式较易充满模腔。

(3) 模壁的斜度 模膛制有一定的斜度,为的是使模锻后的锻件易于从模膛中取出。因为金属充满模膛的过程实质上是金属经受变截面的挤压过程(图1-7),金属处于三向压应力状态。为了使充满过程得以实现,必须使 $\sigma_3 \geq \sigma_s$  ( $\sigma_s$ 为所锻材料的屈服点),在上端面, $\sigma_1 = 0$ ,  $\sigma_3 = \sigma_s$ 。为了得到足够的 $\sigma_3$ 值,模锻斜度愈大,所需的挤压力 $p$ 也就愈大。

(4) 摩擦阻力 摩擦阻力对金属充填模膛有重要的影响。摩擦阻力愈大,金属充满模膛愈困难。因此,为了有利于金属充满模膛,应该尽量降低模壁表面的粗糙度,采用性能良好的润滑剂。近年来采用浮动凹模研究的报道日渐增多,改变金属与模壁之间的摩擦力的方向,变害为利,即所谓“积极摩擦”,在第5章5.5节中有专述。

(5) 孔口圆角半径 模具孔口圆角半径 $R$ (图1-2)对金属流动有很大影响。当 $R$ 很小时,在孔口处金属质点要拐一个很大的弯才能流入孔内,为此,要消耗较多的能量,故不易充满模膛的尖角处,因此,在条件允许的情况下,适当加大孔口的圆角半径。

(6) 金属变形温度和模具预热温度 毛坯的温度和模具预热温度愈低,金属的变形抗力愈大,愈不易充满模膛。

(7) 飞边槽桥部尺寸、形状和位置的影响 飞边槽桥部的主要作用是阻止金属外流,迫使金属充满模膛。设置飞边槽桥部是使金属外流时沿上下接触面摩擦阻力增加,其值为 $2bT_f$ ,见图1-8,设摩擦力达到最大值等于 $T_f$ 。由于该摩擦力在桥部

引起的压应力(或称桥部的)为 $\sigma_1 = \frac{2bT_f}{h_f}$   
 $= \frac{b}{h_f} \sigma_s$ ,即桥部阻力的大小与 $\frac{b}{h_f}$ 有关。桥部愈宽,高度愈小,亦即 $\frac{b}{h_f}$ 愈大时,阻力也愈大。阻力太大,模具打不靠,达不到

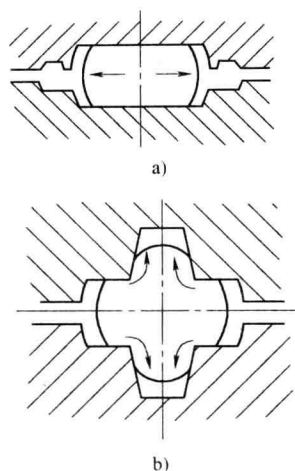


图1-6 金属充填模膛的方式  
a) 镦粗方式 b) 压入方式

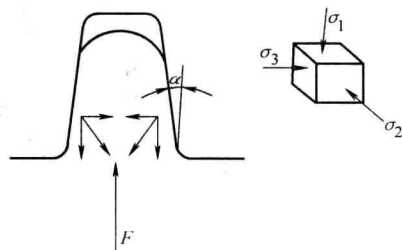


图1-7 模壁斜度引起的阻力

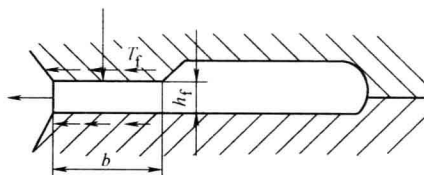


图1-8 飞边槽

锻件尺寸要求，且模具会因承受过大的应力而遭到破坏；阻力太小，金属大量流入飞边中，模膛充不满。据有关文献推荐  $\frac{b}{h_f} = 4 \sim 6$  为宜。在该范围内，飞边金属的消耗和变形抗力的大小均处在合理的范围内。熟知飞边槽的作用原理，可以通过改变飞边槽的形状和尺寸，达到金属既充满模膛，又节约金属，还提高了模具寿命。如上海爱知锻造公司，通过飞边槽的巧妙设计，使曲轴锻件的材料利用率超过 80%。

(8) 设备的工作速度和吨位 一般说来，设备的工作速度较高时，金属变形流动的速度也较快，有利于金属充填模膛，可以得到外形复杂、尺寸精度较高的锻件。这是因为在高速设备上模锻时，由于变形金属具有很高的流动速度，在模具停止运动时，变形金属仍旧可以依靠流动惯性继续充填模膛。图 1-9 示出用 45 钢、壁厚  $t = 1.5\text{mm}$  薄壁杯形件分别在不同工作速度的设备上模锻时的充填情况。从图中可以看出，在模具运动速度最慢的热模锻压力机上，壁部充填高度最低，即使把单位压力由 800MPa 提高到 1100MPa，壁高增加也不明显。图 1-10 给出分别由 45 钢和锻铝合金 2A50 具有不同形状的工件变形速度与单位压力的关系。一般地说，随着变形速度的增高，平均单位压力下降。

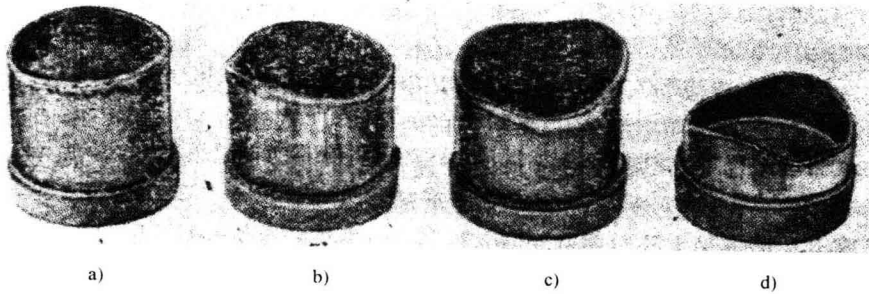


图 1-9 薄壁杯形件在不同速度设备锻造时的充填情形<sup>[3]</sup>

a) 在高速装置上 b) 在高速锤上 c) 在蒸-空气锤上 d) 在热模锻压力机上

为了读者便于选择锻造设备，在表 1-1 中，列出设备工作速度对金属充填模膛的影响。

表 1-1 设备工作速度对金属充填模膛的影响<sup>[4]</sup>

设备类型 锻件特征尺寸/mm	高速锤	模锻锤、螺旋压力机	曲柄压力机
最小壁厚	1.5	2.0	3.0~4.0
最小肋宽	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~4.0
最小腹板厚	1.0	1.5~2.0	2.0~3.0
最小圆角半径	0~1.0	2.0~3.0	3.0~5.0



在高速变形时，只有流动惯性与需要充填的方向一致时，才有利于金属充填模膛，否则会起相反的作用。例如，在锤上进行开式模锻时，如果第一、二锤打击过重，由于此时飞边尚未封闭模膛，桥部阻力较小，金属主要沿横向流动，于是大量金属流出模膛，进入飞边槽，尔后，由于金属量不足，模膛反而充不满。初始猛击，大量金属流出模膛就是径向流动的惯性（方向与需要充填的方向垂直）作用的结果。因此，在锤上模锻时第一、二锤应轻击，待金属充到模膛侧壁，形成一定的飞边，具有一定的阻力后再进行重击。

选取模锻设备的吨位也必须足够。打击力过小的设备将使金属不能充满模膛；过大的设备不仅会造成能源浪费，而且多余的能量要靠模具和设备的弹性变形吸收，甚至造成模具和设备的损坏。

### 1.3.2 闭式模锻成形过程及影响模锻力的主要因素

闭式模锻过程可分为三个阶段（图 1-11）：第一阶段为自由锻粗阶段

（图 1-11a），即从毛坯与上模膛（或冲头）表面接触开始到毛坯金属与模膛最宽处侧壁接触为止，在这一阶段中，金属充满模膛中容易充满的部位；第二阶段为充满阶段（图 1-11b），即从毛坯金属与模膛最宽处侧壁接触开始到金属完全充满模膛为止。在这一阶段中，毛坯金属受到模壁阻碍，毛坯的各个部分处于不同的三向压应力状态。随着坯料变形的增大，模壁的侧向压力也随之增大，直到模膛基本充满，此阶段的变形力比第一阶段末可增大 2~3 倍；第三阶段毛坯基本上成为不变形的刚体，只有在很大的模压力作用下使端部金属产生变形流动，形成纵向飞边，飞边的厚度愈薄，高度愈大，所需的模压力和模膛侧壁的压应力  $\sigma_R$  也愈大。例如在锤上模锻低碳钢锻件（图 1-12），当飞边从  $0.3\text{mm} \times 6.3\text{mm}$  增大到  $0.3\text{mm} \times$

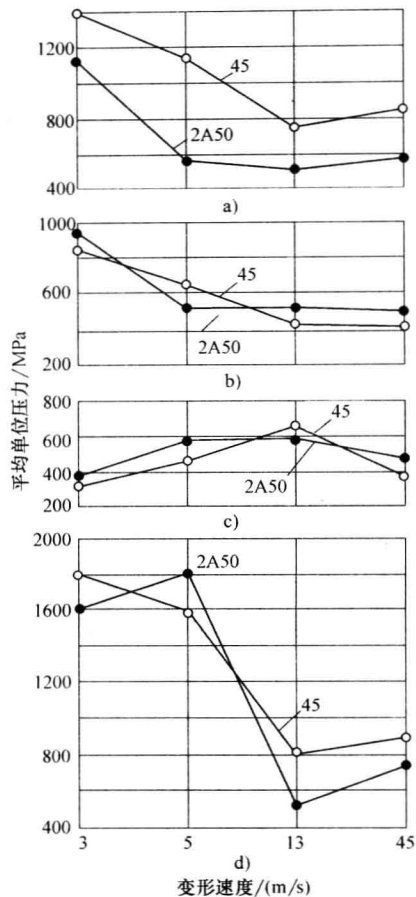


图 1-10 变形速度与单位压力的曲线图<sup>[3]</sup>

a) 薄壁杯形件  $t=1.5\text{mm}$  b) 有加强肋的杯形件  
c) 有加强肋的芯轴 d) 有台阶的锻件