

模具设计丛书

挤压模和镦锻模75例 设计应用评析

田福祥 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书以实用为目的,精选 75 例新颖、先进、实用的挤压模和锻模结构,论述了锻件的成形工步,模具的设计思路、结构特点和工作过程。并有 11 个设计计算示例,针对典型制件,展示工艺计算和模具设计的详细过程。全书 11 章,包括正向冷挤压模、反向冷挤压模、复合冷挤压模、反向热挤压模、正向热挤压模和复合热挤压模、垂直分模闭式挤压模、水平分模闭式热挤压模、立式锻模和卧式锻模等。本书的实例都有各自的新颖独特之处,模具结构详细具体,读者设计模具时,可借鉴本书相应或相近的实例,触类旁通,借他山之石,攻我山之玉,取得事半功倍之效。

本书既可供企业的锻模设计人员使用,也可供高等院校师生的课堂教学、课程设计和毕业设计参考。

图书在版编目(CIP)数据

挤压模和锻模 75 例设计应用评析/田福祥著. —北京:机械工业出版社, 2011. 10

(模具设计丛书)

ISBN 978 - 7 - 111 - 36712 - 3

I. ①挤… II. ①田… III. ①冷加工—挤压模—设计②锻模—设计 IV. ①TG376.3 ②TG315.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 252470 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:黄丽梅 责任编辑:黄丽梅

版式设计:张世琴 责任校对:刘志文

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

210mm × 297mm · 11 印张 · 350 千字

0001—2000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 36712 - 3

定价:56.00 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

策划编辑:(010)88379770

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

挤压和镦锻属于特种模锻，在现代工业中应用广泛。与普通模锻相比，挤压和镦锻的成形工艺和模具结构有其特殊性。现有相关的设计手册和书籍中，设计规范、图表和数表占主体，实用模具结构，特别是针对具体模具的评述分析较少。

本书以实用为目的，广泛吸收生产实践中的先进经验，精选新颖、先进、实用的挤压模和镦锻模 75 例，包括正挤压模、反挤压模、复合挤压模、垂直分模闭式挤压模、水平分模闭式挤压模、立式镦锻模和卧式镦锻模。每个实例都有各自的特点和新颖之处，许多模具构思巧妙。

本书以模具结构设计为主线，突出实用性，力求成形工艺与模具结构相结合，设计规范与设计技巧相结合，理论知识与实践经验相结合，避开繁冗抽象的理论叙述，力求简明、直观、实用。针对一些模具及其构件的特殊性，还论述了模具加工工艺、装配和调整技巧，使模具设计与模具制造紧密结合。

本书按模具结构特点分为 11 章。每个实例为一节，对具体锻件给出具体的锻模结构，论述锻件的成形工艺性、成形工步、模具的设计思路、模具结构特点、模具工作过程、关键技术，以及可能出现的问题和处理方法。

每章有一个设计计算示例，针对典型制件，给出工艺计算和模具设计的详细过程：制件工艺性分析、挤压件设计、坯料的计算和制备、成形工步设计、变形程度计算、变形力计算、润滑剂和设备选择、模具结构设计。

实践中许多锻件的形状或尺寸相近，材料或成形工艺性相同或相近。因此本书的目的在于：设计人员设计模具时，可根据制品的形状、尺寸、批量、材质和设备等条件，借鉴本书中相应或相近的实例，触类旁通，合理地设计锻件，确定分型面的位置和形状、成形工艺条件（温度、润滑和成形力等），成形工步，模具结构和型腔组合形式、脱模机构和机械化程度等。从而借他山之石，攻我山之玉，取得事半功倍之效。

作者以精品的标准撰写本书，但因时间和作者水平所限，书中难免有疏漏或不足之处，作者愿与读者探讨，纠正谬误，为模锻技术发展尽绵薄之力。

本书既可供模具设计人员使用，也可供高等院校师生的课堂教学、课程设计和毕业设计参考。

作 者

目 录

前言

第 1 章 挤压模和镦锻模设计基础.....	1
1.1 热锻、温锻和冷锻.....	1
1.2 挤压.....	2
1.3 镦锻.....	4
1.4 设备的锻压变形力.....	4
1.5 塑性变形指标.....	5
1.6 当量线膨胀率的计算.....	7
1.7 弹性夹套设计.....	7
1.8 预应力组合凹模最佳设计.....	8
1.9 挤压模和镦锻模材料.....	20
参考文献.....	20
第 2 章 正向冷挤压模.....	21
2.1 抽动式衬套正挤-切边模.....	21
2.2 铆管冷挤模的改进.....	22
2.3 夹头冷挤压模.....	23
2.4 一模两件天线拉杆正挤-冷镦模.....	25
2.5 端子冷挤压模.....	27
2.6 微型电机转子正挤压模.....	29
2.7 超长杆精密缩径模.....	30
2.8 深孔变壁厚锥形件冷挤压工艺与模具.....	31
2.9 设计计算示例：自锁螺母冷挤压模.....	33
2.10 设计计算示例：螺塞毛坯冷锻模.....	36
参考文献.....	40
第 3 章 回转体零件反向冷挤压模.....	41
3.1 锥台形空心件拉深-反挤压复合模.....	41
3.2 线圈外套冷挤压模.....	42
3.3 铝盖落料-冷挤复合模.....	44
3.4 压缩机罩体支架冷挤压模.....	45
3.5 气门挺柱冷挤压模.....	46
3.6 套筒式导向保护管反挤压模.....	47
3.7 梭心套冷挤压模.....	49
3.8 电器动触头冷挤压模.....	51
3.9 直纹滚花螺母冷挤压模.....	52
3.10 设计计算示例：铰链管冷挤压模.....	54
参考文献.....	55
第 4 章 非回转体零件反向冷挤压模.....	56
4.1 花键套冷挤冷压模.....	56
4.2 套筒扳手冷挤压模.....	57

4.3 贮液器体冷挤压模.....	59
4.4 设计计算示例：阶梯方铝罩冷挤压模.....	61
参考文献.....	63
第5章 复合冷挤压模.....	64
5.1 轮胎螺母复合挤压模.....	64
5.2 薄壁深孔锥形件成形模.....	65
5.3 杯-杆形件复合挤压模.....	67
5.4 倒装式活塞销复合挤压模.....	69
5.5 扩音器话筒接头冷挤压模.....	71
5.6 多层薄壁件复合冷挤压模.....	72
5.7 轴承套圈复合温挤压模.....	74
5.8 旋扭复合冷挤压模.....	75
5.9 双向沉孔锥体冷锻工艺与模具.....	76
5.10 光纤接头底座复合冷挤压模.....	78
5.11 设计计算示例：转子复合冷挤压模.....	79
参考文献.....	82
第6章 反向热挤压模.....	83
6.1 有补偿空间的十字轴套筒闭式热挤压模.....	83
6.2 导向凸模浮动轴承套圈热挤压模.....	84
6.3 推力弹簧座热挤压模.....	85
6.4 下出件滑动油缸热挤压模.....	86
6.5 组合式凸模压气缸热挤压模.....	88
6.6 氧气喷头热挤压模.....	89
6.7 设计计算示例：套筒热挤压模.....	92
参考文献.....	95
第7章 正向热挤压模和复合热挤压模.....	96
7.1 开关触头座多工序热挤压工艺和模具.....	96
7.2 气缸螺栓保护螺母温挤压模.....	98
7.3 不锈钢管接头温挤压模.....	99
7.4 高压开关触头座热挤压模.....	101
7.5 设计计算示例：轴套管多工位热挤压模.....	103
7.6 设计计算示例：排气门热挤压模.....	105
参考文献.....	109
第8章 垂直分模闭式挤压模.....	110
8.1 带侧面顶出装置的闭式挤压模.....	110
8.2 锥面锁紧两半凹模联轴器叉闭式挤压模.....	112
8.3 锥面锁模双侧枝件闭式挤压模.....	115
8.4 两端带法兰杯形件闭式挤压模.....	117
8.5 设计计算示例：撑板锁紧两半凹模闭式挤压模.....	118
参考文献.....	121
第9章 水平分模闭式热挤压模.....	122
9.1 摆钩锁模喷油器体闭式挤压模.....	122
9.2 楔块锁模空心枝形件闭式温挤压模.....	124
9.3 摆钩锁模阀瓣闭式温挤压模.....	126

9.4 括弧楔锁模十字轴径向挤压模.....	128
9.5 斜楔锁模阀体闭式挤压模.....	130
9.6 设计计算示例：碟簧锁模阀瓣径向闭式挤压模.....	131
参考文献.....	135
第 10 章 立式镦锻模.....	136
10.1 销轴温顶镦模.....	136
10.2 电钻轴温镦挤模.....	137
10.3 钻头钥匙冷镦锻模.....	138
10.4 弹簧座冷镦挤模.....	140
10.5 高强度螺栓冷挤镦模.....	141
10.6 圆头销冷缩颈-镦头模.....	143
10.7 长杆零件热顶镦模.....	145
10.8 自锁铆螺母温镦挤模.....	146
10.9 阶梯轴冷镦挤模.....	147
10.10 闹钟挂柱自动送料切断-冷镦级进模.....	149
10.11 带中间凸缘轴冷镦模.....	151
10.12 设计计算示例：轿车变速器输入轴多工位冷锻模.....	153
参考文献.....	155
第 11 章 卧式镦锻模.....	156
11.1 斜块型卧式浮动镦挤模.....	156
11.2 四杆型卧式浮动镦锻模.....	160
11.3 设计计算示例：变速箱操纵杆热镦锻模.....	162
参考文献.....	166
附录.....	167
附录 A 常用钢材在高温下的抗拉强度 σ_b （变形速度为 $6 \times 10^{-4}/s$ ， 变形量为 20%）和锻造温度范围.....	167
附录 B 常用钢铁材料的力学性能.....	168
附录 C 常用非铁材料的力学性能.....	169

第 1 章 挤压模和镦锻模设计基础

挤压和镦锻属于特种模锻，本章介绍与此相关的基础知识。

1.1 热锻、温锻和冷锻

以挤压或镦锻时坯料的加热温度范围为标准，锻造可分为热锻、温锻和冷锻。冷、温、热变形的区分通常是以金属成形过程中的加工硬化、回复和再结晶状况来判定的。不同的锻造温度对锻件的组织和性能的影响不同，因此应根据锻件材料的特性和对锻件性能的要求选择适当的锻造温度。

1.1.1 冷锻

冷锻是指在室温或低于工件回复温度下进行的锻造，包括镦锻、各种模锻、压印及挤压等。金属冷锻变形后，材料处于加工硬化状态。冷锻产品有销、钉、螺栓、螺母、铆钉等小件，以及汽车驱动轴、压力容器等大件。冷锻对锻造设备和坯料下料精度要求高，具有产品精度高、劳动条件好等优点。

毛坯在冷锻变形前必须进行以下三种处理：

(1) 毛坯软化退火处理 目的是改善材料冷挤压性能，提高毛坯材料塑性，降低硬度和变形力，消除内应力和降低冷挤压时的单位挤压力，提高模具使用寿命。

(2) 毛坯表面处理 毛坯表面要求良好的表面处理。通常表面处理为氧化处理，过程为：碱洗→热水洗→冷水洗→氧化→干燥。

(3) 毛坯润滑处理 目的是减小挤压力和模具磨损，避免粘模、划痕等缺陷。通常毛坯润滑处理为磷化、皂化或采用涂覆植物油润滑方式。

冷锻工艺最适用于硬度为 75~87HBW 的低碳钢，也能用于铜、铝、不锈钢和某些镍合金。其它有色金属和合金，如钛、铍、镁及高熔点金属和合金在室温下很难成形，会产生裂纹，需采用温、热成形方法。

冷锻模具的工作特点和要求：

- 1) 作用在模具上的单位压力较大，有时可达到 2500~3000MPa，模具必须具有足够的强度。
- 2) 模具连续工作时，模具工作表面温度上升，有时瞬时温度上升到 300℃ 以上。
- 3) 冷锻时模具的工作表面承受很大的摩擦载荷，故要求模具的工作表面有良好的耐磨性和耐粘附性。
- 4) 模具工作部分应避免出现尖角或退刀槽，尽量采用光滑的圆角过渡。对承受内压力较大的凹模，应采用预应力圈结构，以防凹模过量地变形与开裂。为了防止因模具工作部分形状突变而引起的应力集中，常将凸、凹模做成组合结构。

5) 冷锻模具材料要求具有足够的强度和硬度，较好的韧性，较大的疲劳强度，较好的热处理淬透性和抗回火稳定性，热处理变形小，以及良好的机械加工性能。

1.1.2 热锻

热锻是指终锻温度高于再结晶温度的锻造，塑性变形后材料具有再结晶组织。坯料因加热至较高温度，变形抗力较小，因此热锻允许较大的变形量和较小的设备吨位。低塑性的金属和合金，变形时需要采用三向不等压的热挤压。热锻所得产品表面品质和尺寸精度较差，往往需要切削加工等后续工序。

一般情况下，不允许模具温度超过凸、凹模淬火后的回火温度。冷作合金模具钢，如 Cr2MoV 的工作温度不超过 260℃。热作合金模具钢，如 4Cr5WMoVSi，硬度极限比较低，多少影响其耐磨性能。高速钢，如 W6Mo5Cr4V2，具有模具长寿所需要的高硬化指数和退火阻尼。

1.1.3 温锻

变形温度介于室温和再结晶温度之间，材料处于回复状态，称为温锻。温锻是在冷锻基础上发展起来

的一种工艺, 其变形温度在室温以上和再结晶温度以下的范围内。

对于在室温下难加工的材料, 例如析出硬化相的不锈钢和中、高碳素钢、含铬量高的合金钢、耐热钢及其合金, 以及镁及镁合金、钛及钛合金等, 温锻时可能变成可以加工或容易加工。

温锻不仅适用于变形抗力高、加工困难的材料, 对于适宜冷锻的低碳钢也可作为温锻对象。因为温锻一般无需坯料预先软化退火和工序间的退火, 也可不进行表面磷化处理, 因此组织连续生产比冷锻容易。

温锻在较低的温度范围内加热。由于加热降低了变形抗力, 对锻压设备和模具强度有利, 降低了对坯料的要求, 特别是对塑性较差、难以冷锻成形的材料, 温锻可使其产生一定程度的变形; 由于变形温度较低, 使锻件精度、表面粗糙度和力学性能均可达到与冷锻件相近的程度, 氧化和脱碳也很少。

1.2 挤压

1.2.1 挤压变形方式

挤压工艺是金属在三向压力状态下, 以恒定的变形程度, 从一定几何形状尺寸的孔口挤出成形。根据挤压时金属流动方向与凸模运动方向的关系, 挤压可分为以下几种。

1. 正挤压

金属的流动方向与凸模的运动方向相同的变形方式称为正挤压, 或称作顺挤。正挤压又分为实心件正挤压和空心件正挤压。实心件正挤压如图 1-1 所示, 凸模挤压金属毛坯, 迫使其从凹模小孔中流出, 获得所需形状的挤压件。空心件正挤压如图 1-2 所示, 金属毛坯在凸模作用下从凹模和凸模之间的环形孔流出, 形成挤压件。正挤压既可制造各类头部形状的实心杆件, 也可以制造管形件, 挤压件的断面可以是对称或不对称的任意形状。

2. 反挤压

反挤压时金属流动方向与凸模运动方向相反, 如图 1-3 所示。反挤压适用于制造横断面是圆形、方形、长方形、“山”字形、多层圆形、多格盒形的空心件。

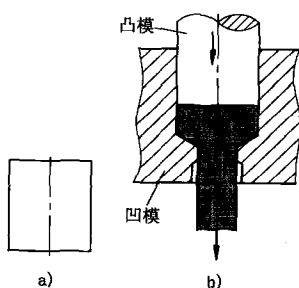


图 1-1 实心件正挤压
a) 坯料 b) 模具和工件

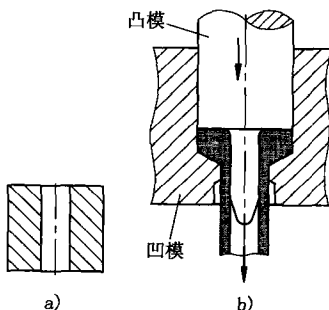


图 1-2 空心件正挤压
a) 坯料 b) 模具和工件

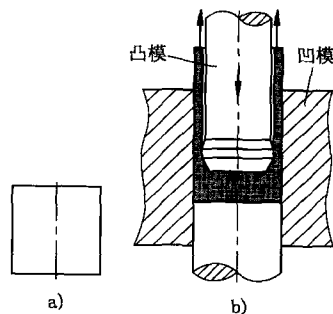


图 1-3 反挤压
a) 坯料 b) 模具和工件

3. 复合挤压

复合挤压时毛坯一部分金属的流动方向与凸模运动方向相同, 而另一部分金属的流动方向与凸模运动方向相反, 如图 1-4 所示。

4. 减径挤压

减径挤压是变形程度较小的一种正挤压方法, 毛坯断面仅作轻度缩减。该法主要适用于制造直径差不大的阶梯轴类零件, 以及作深孔杯形件的修整工序。

以上几种挤压方法的共同特点是金属流动方向与凸模轴线平行, 因此又统称为轴向挤压法。

5. 径向挤压

径向挤压时金属流动方向与凸模运动方向垂直, 如图 1-5 所示。该法可以成形十字轴类零件, 也可以制造成形圆柱齿轮齿形部分。

6. 闭模挤压

闭模挤压 (也称为闭塞式模锻或可分凹模模锻) 是具有可分凹模的闭式挤压。图 1-6 是闭模挤压成形

过程示意图。先将可分凹模闭合，并对闭合的凹模施以足够的合模力，然后用一个冲头或多个冲头，从一个方向或多个方向将模膛内的坯料挤压成形。对不同形状的零件，闭模挤压时金属的变形流动情况不同。冲头前端被挤的金属或仅径向流动，或同时沿径向和轴向流动。

闭模挤压是从径向挤压发展过来的，最初用于生产十字轴等带有枝叉的锻件，近年来已开始用于生产锥形齿轮、轮毂螺母等零件。由于闭模挤压时在一次变形工序中可以获得较大的变形量和复杂的型面，因此特别适合复杂形状零件的成形^[1]。

1.2.2 挤压力的计算

挤压力的计算方法很多，有图表算法、经验公式法和理论公式法等。其中经验公式法适用范围广、计算简便。正挤压和反挤压的挤压力 P 的计算式为

$$P = KAp \quad (1-1)$$

$$p = Zn\sigma_0 \quad (1-2)$$

式中 p ——单位挤压力 (MPa);

A ——凹模 (正挤压) 或凸模 (反挤压) 与坯料接触表面在凸模施力方向的投影面积 (mm^2);

Z ——模具的形状系数，如图1-7所示;

n ——挤压方式及变形程度修正系数，如表1-1所示;

K ——安全系数，取1.1~1.3;

σ_0 ——挤压前材料抗拉强度 (MPa)。

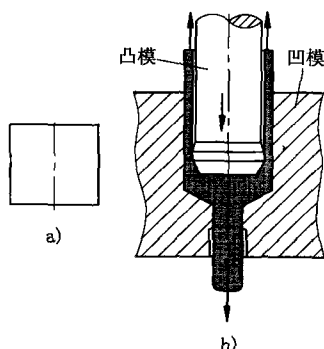


图 1-4 复合挤压
a) 坯料 b) 模具和工作

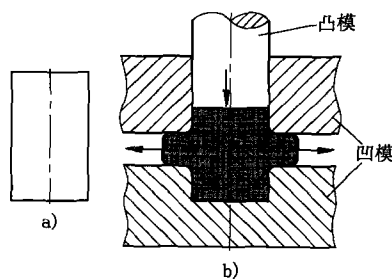


图 1-5 径向挤压
a) 坯料 b) 模具和工作

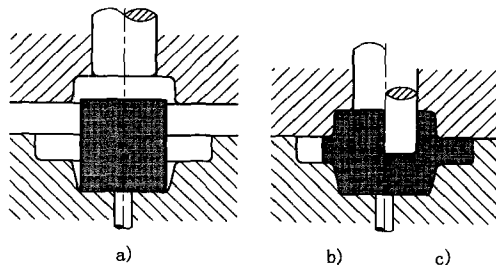


图 1-6 闭模挤压成形过程
a) 坯料置放 b) 凹模闭合 c) 冲头挤压

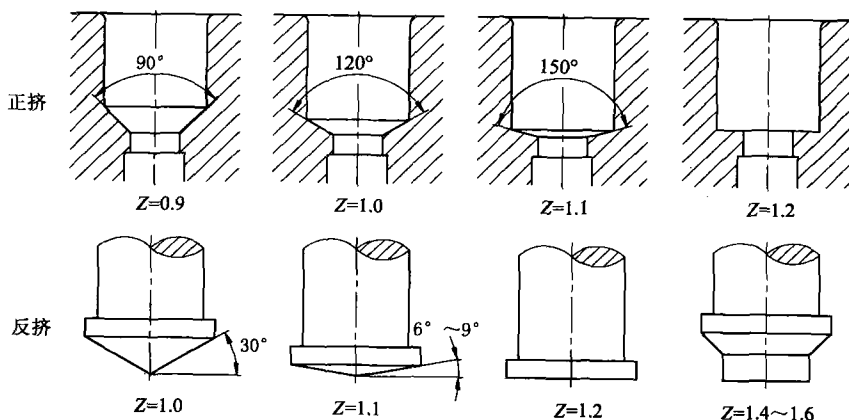


图 1-7 模具的形状系数

根据试验结果可知，复合挤压的单位挤压力 $p_{\text{复}}$ 低于单向正挤压的压力 $p_{\text{正}}$ 和单向反挤压的压力 $p_{\text{反}}$ 。

当复合挤压不限定某一方向尺寸时

$$p_{\text{复}} = \begin{cases} p_{\text{正}} & (p_{\text{正}} < p_{\text{反}}) \\ p_{\text{反}} & (p_{\text{反}} < p_{\text{正}}) \end{cases} \quad (1-3)$$

当复合挤压限定某一方向尺寸时

表 1-1 变形程度系数 n

变形程度 ε (%)	40	60	80
正挤压实心件与空心件	3	4	5
反挤压	4	5	6

$$p_{\text{复}} = \begin{cases} p_{\text{正}} & (\text{反挤压限定尺寸}) \\ p_{\text{反}} & (\text{正挤压限定尺寸}) \end{cases} \quad (1-4)$$

1.3 镦锻

1.3.1 冷镦、热镦和温镦

冷镦、热镦和温镦的温度条件分别与 1.1 节所述的冷锻、热锻和温锻相对应。

1. 冷镦

冷镦是指室温下用金属线材镦挤成形。在自动冷镦机上进行冷镦工艺多用于铆钉、螺钉、螺栓、螺母、小抽和空心套等零件的头部成形或整体成形。

2. 温镦

根据成形金属的不同材料特性，温镦温度在 175~540℃ 之间。温镦与冷镦不同，随着变形硬化材料温度的升高，加工硬化产生的强度提高得到降低。用温镦可选用较小的设备，同时使滚丝、切边、开槽等后续工序易于进行。

3. 热镦

由于我国自动化热镦设备开发较晚和材料尺寸不一、品种杂、精度低等原因，热镦主要是用适合于多品种、小批量生产的螺旋压力机和曲柄压力机设备生产一些大尺寸、高强度、大变形的紧固件，以及用于如轴承钢等难于冷成形钢种的镦锻成形。

1.3.2 镦锻力的计算

镦锻力

$$P = KA p \quad (1-5)$$

$$p = Z n \sigma_b \left(1 + d \mu \frac{D}{4H_N} \right) \quad (1-6)$$

式中 K ——安全系数，取 1.3；

A ——工件镦粗部分的横截面积 (mm^2)。

p ——单位压力 (MPa)；

H_N ——工件镦粗部分的最后高度 (mm)；

D ——工件镦粗部分的直径 (mm)；

σ_b ——变形温度下的金属强度极限 (MPa)；

其它系数由表 1-2 给出。

表 1-2 计算冷镦压力的参数值

符号	意义	条件	数值	符号	意义	条件	数值
n	变形系数	顶镦工序，形状简单	1.0~1.2	d	镦粗部分的形状系数	圆柱形截面	1.3
		精镦工序，形状简单	1.2~1.5			正多边形截面	2.0
		精镦工序，形状复杂	1.5~1.8			矩形截面	2.3
Z	模具形状系数	无凹陷，无棱角	1.0	μ	摩擦因数	表面研磨，石墨润滑	0.05~0.10
		无凹陷，有棱角	1.5~1.75			表面研磨，无润滑	0.11~0.15
		有凹陷，无棱角	1.75~2.0			表面精加工	0.16~0.20
		有凹陷，有棱角	2.5			表面粗加工	0.21~0.30

1.4 设备的锻压变形力^[2]

式 (1-1) 和式 (1-5) 分别为锻件在挤压和镦锻成形时所需要的压力。以下所述为锻压设备工作时实际作用于锻件的压力。在变形任一瞬间，锻压设备通过模具加在变形体上使其产生塑性变形的力，称为变

形力。锻压变形力与压力机的类型有关，对于不同的压力机，确定锻压设备实际变形力的方法不同。

1.4.1 液压机和曲柄压力机的锻压变形力

在液压机和曲柄压力机上模锻时，压力机产生的最大锻压变形力 P_y （以下简称锻压变形力）与锻件终锻力（锻件模锻成形需要的最大力）相等，即 $P_y = P$ 。

1.4.2 螺旋压力机的锻压变形力

螺旋压力机是定能量设备，没有固定下死点，模具承受的是冲击力。螺旋压力机的公称压力取决于设备的能量。设备的能量与滑块行程相关，而滑块行程又与装模高度（锻模闭合高度）相关。因此螺旋压力机的锻压变形力不仅与压力机公称压力有关，还与装模高度和锻件变形量有关。

装模高度越大，滑块行程越小，螺旋压力机具有的成形能越小，锻压变形力越小。能量一定的条件下，锻件的变形量越大，则设备产生的锻压变形力越小；反之，锻件变形量越小，则压力越大。

综合锻模装模高度和锻件变形量的影响，螺旋压力机的锻压变形力 P_y 可按下式计算：

$$P_y = x \left(1 - \frac{H_m - H_j}{0.9S} \right) P_g \quad (1-7)$$

式中 x ——锻件变形量影响系数，其值见表 1-3；

H_m ——锻模闭合高度（mm）；

H_j ——压力机最小装模高度（mm）；

S ——螺旋压力机滑块最大行程（mm）；

P_g ——螺旋压力机公称压力（kN）。

表 1-3 锻件变形量影响系数 x

变形量	冷击	小	较小	适中	较大	大
x	1.6~2	1.2~1.6	1~1.2	1	0.8~1	0.6~0.8

1.5 塑性变形指标

挤压和锻模所用材料主要是棒材和管材，其中棒材用的最多。金属在锻压变形过程中，主要是塑性变形，同时也有弹性变形。外力消除后弹性变形消失，塑性变形保留下来。在高温下，金属的弹性变形很小，工程上可忽略不计。在生产中，表示宏观变形量大小的指标有压下量、锻比（挤压比）、断面收缩率等。

1.5.1 压下量

在压缩、锻粗和锻轧等工步中，在锻压力方向上坯料尺寸的相对变化量称为压下量（锻粗率）。压下量分为相对变形量（工程应变）和对数变形量（真实应变），分别用 ε 和 e 表示。设坯料的初始高度为 H_0 ，压缩变形后的高度为 H_1 ，坯料压缩过程中瞬时高度为 h ，瞬时高度变化为 dh ，则相对变形量和对数变形量分别为

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

$$e = \int_{H_1}^{H_0} \frac{dh}{h} \times 100\% = \ln \frac{H_0}{H_1} \times 100\% \quad (1-9)$$

相对变形量是高度变化量与初始高度之比；对数变形量为变形后高度与初始高度之比的自然对数，它是无数个微小相对变形量连续积累（相加）的结果。

对数变形量真实地反映了实际变形的大小，具有可加性，即分次压缩的对数变形量之和等于总的对数变形量。而相对变形量则不然，它只在小变形量时，与对数变形量接近。例如高度 100mm 的坯料压缩到高 80mm，再压缩至 60mm 时，两次压缩的对数变形量 e_1 、 e_2 和总变形量 e 分别为

$$e_1 = \ln \frac{100}{80} \times 100\% = 22.31\%, \quad e_2 = \ln \frac{80}{60} \times 100\% = 28.77\%, \quad e = \ln \frac{100}{60} \times 100\% = 51.08\%$$

而两次压缩的相对变形量 ε_1 、 ε_2 和总变形量 ε 分别为

$$\varepsilon_1 = \frac{100 - 80}{100} \times 100\% = 20\%, \quad \varepsilon_2 = \frac{80 - 60}{80} \times 100\% = 25\%, \quad \varepsilon = \frac{100 - 60}{100} \times 100\% = 40\%$$

显然， $e = e_1 + e_2$ ，而 $\varepsilon = 40\% \neq \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 45\%$ 。相对变形量的缺陷是忽略了变化的基高对应变的影响，从而造成总应变不等于各阶段应变之和。由于相对变形量计算简单，工程上常采用相对变形量进行计算。

一些金属材料的许用压下量（锻粗率）列于表 1-4。

表 1-4 一些金属材料的许用压下量（锻粗率）

材料	钢						非铁材料			
	10	15	35	45	15Cr	35CrMo	纯铝	5A02	2A12	黄铜
锻粗率 $\varepsilon(\%)$	75~81	70~73	63	40~45	53~60	50~60	92~96	88~92	50	73~80

1.5.2 锻比

在钢锭开坯锻造和坯料拔长时，变形量常用锻比表示。锻比 K 为锻前钢锭平均截面积 A_0 与锻压后锻坯平均截面积 A_1 之比，即

$$K = \frac{A_0}{A_1} \quad (1-10)$$

1.5.3 断面收缩率

在挤压中，毛坯的尺寸、形状变化的大小为变形程度，也称为变形率，通常用断面收缩率度量。断面收缩率是挤压前、后的横断面积差与挤压前（毛坯）横断面积的比，定义为

$$\varepsilon_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 ε_A ——断面收缩率；

A_0 ——置放毛坯的模膛横断面积 (mm^2)；

A_1 ——制件挤出部分横断面积 (mm^2)。

对于圆截面挤压件（见图 1-8~图 1-10），断面收缩率可简化为（推导从略）以下各式：

正挤压实心件（见图 1-8）

$$\varepsilon_A = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} \times 100\% \quad (1-12)$$

正挤压空心件（见图 1-9）

$$\varepsilon_A = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2 - d_2^2} \times 100\% \quad (1-13)$$

反挤压筒形件（见图 1-10）

$$\varepsilon_A = \frac{d_1^2}{d_0^2} \times 100\% \quad (1-14)$$

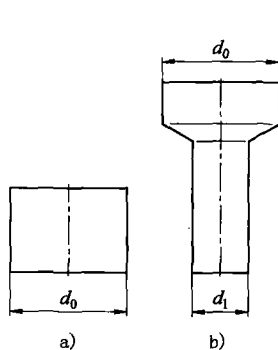


图 1-8 圆截面正挤压

a) 坯料 b) 实心制件

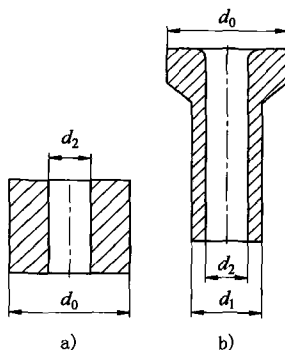


图 1-9 圆截面正挤压

a) 坯料 b) 空心制件

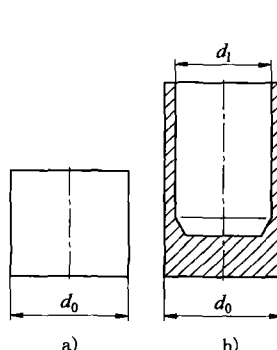


图 1-10 圆截面反挤压

a) 坯料 b) 空心制件

一些金属的许用断面收缩率列于表 1-5。在进行具体工艺设计时，确定许用变形程度还应参照工艺参数限制范围。此外，挤压变形程度也用挤压比或对数挤压比表示，工程上应用较少，故略而不述。

表 1-5 一些金属的许用断面收缩率 ε_A

材 料		钢								有色金属			
		10	15	20	30	35	45	15Cr	35CrMo	纯铝	5A02	2A12	黄铜
断面收缩率 (%)	正挤压	82~87	80~82	72~80	63~66	55~62	45~48	53~63	50~60	95~99	92~98	75~82	75~87
	反挤压	75~80	70~73	67	60~63	50	40	42~50	40~45	95~99	92~98	92~95	73~75

1.6 当量线膨胀率的计算^[4]

确定模膛尺寸的原则是保证锻件成形后在室温下符合锻件的尺寸要求。模膛与冷锻件之间的关系是模膛设计的基本依据。决定此关系的因素是热因素和弹性因素。热因素包括热锻件出模后的冷收缩和模具在其工作温度下的热膨胀；弹性因素包括锻件出模后的弹性恢复和模具在锻造力作用下的弹性变形。正常情况下，弹性因素对尺寸的影响比热因素影响小得多。下面先仅考虑热因素影响导出相应的公式，然后计入弹性影响，对公式进行修正。

假定终锻温度下的热锻件（或工作温度下的模膛）的温度场是均匀的，则热因素引起的锻件（或模膛）膨胀是均匀膨胀或线性膨胀，简称线膨胀。

设 α_j 和 α_m 分别为锻件和模具材料的线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)，则锻件由室温 t_s 升至终锻温度 t_j 时的线膨胀率为 $\alpha_j(t_j - t_s)$ ，模膛由室温 t_s 升至其工作温度 t_m 时的线膨胀率为 $\alpha_m(t_m - t_s)$ 。

设 L_j 和 L_m 分别为室温锻件和模膛在某一方向的尺寸，则终锻温度的锻件尺寸必定等于工作温度的模膛尺寸，即 $[1 + \alpha_j(t_j - t_s)]L_j = [1 + \alpha_m(t_m - t_s)]L_m$ 。设

$$L_m = (1 + \alpha_d)L_j \quad (1-15)$$

则

$$\alpha_d = \frac{\alpha_j(t_j - t_s) - \alpha_m(t_m - t_s)}{1 + \alpha_m(t_m - t_s)} \quad (1-16)$$

称为当量线膨胀率，为无量纲系数。

通常情况下， $10^\circ\text{C} < t_s < 30^\circ\text{C}$ 。对热锻，锻件终锻温度 t_j 高于 900°C ，模膛工作温度 $t_m = 200 \sim 300^\circ\text{C}$ ，锻件和模具材料的线膨胀系数 α_j 和 α_m 在 $(12 \sim 18) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 范围内。 t_s 与 t_j 相比很小， $\alpha_m(t_m - t_s)$ 远小于 1，此两项可忽略不计，因此当量线膨胀率计算公式可简化为

$$\alpha_d = \alpha_j t_j - \alpha_m t_m \quad (1-17)$$

对热锻，用式 (1-17) 代替式 (1-16) 计算当量线膨胀率，误差不超过 1%。若计入弹性因素影响，上两式修正为

$$\alpha_d = \frac{\alpha_j(t_j - t_s) - \alpha_m(t_m - t_s)}{1 + \alpha_m(t_m - t_s)} \pm |\varepsilon| \quad (1-18)$$

$$\alpha_d = \alpha_j t_j - \alpha_m t_m \pm |\varepsilon| \quad (1-19)$$

式中， ε 为锻件出模后的弹性恢复应变与模具在锻造时的弹性应变之和，简称当量弹性应变。锻孔时 $|\varepsilon|$ 前取“+”号，锻轴时 $|\varepsilon|$ 前取“-”号。

表 1-6 给出了不同温度范围钢的线膨胀系数 α 。

表 1-6 不同温度范围钢的线膨胀系数 α

温度范围 ($^\circ\text{C}$)	20~300	20~400	20~600	20~700	20~900	20~1000
$\alpha \times 10^6 / ^\circ\text{C}$	12.4	13	13.6	14.4	16.6	18

1.7 弹性夹套设计

弹性夹套内孔为圆柱面，外形是半锥角为 7° 的圆锥面，利用弹性夹套的锥面和夹套的弹性将凸模夹

紧定位, 凸模对中性很好。凸模上部的紧固段为圆柱形, 无锥度, 便于制造和更换凸模。

图 1-11 为 4 豁口弹性夹套。豁口均匀分布, 其中一个豁口径向和轴向均开通。其余豁口仅轴向开通, 豁口底部为圆弧, 以避免弯曲变形引起应力集中。夹套槽的底部厚度 a 在 $1\sim 2\text{mm}$ 范围内根据夹套内径大小选取。

图 1-12 是常用的 8 豁口弹性夹套。豁口仅径向开通, 豁口底部为圆弧。豁口均匀分布, 豁口的方向间隔颠倒排列。夹套槽的底部厚度 $b_1=1\sim 2\text{mm}$, 按 b_2 与 b_1 两处的抗弯模量相等的原则确定 b_2 值。

按未开豁口前的弹性夹套与凸模过盈配合 (P7/h6) 确定弹性夹套内径。内、外径留有精磨余量, 热处理后精磨至设计尺寸, 最后用线切割开豁口, 并割去端部装夹余料^[5]。

因弹性夹套内径略小于其夹持的凸模紧固段直径, 为便于凸模装入, 夹套内孔大端有小圆角。弹性夹套材料和硬度与弹簧相同, 即材料为 60Si2Mn, 热处理硬度为 58~62HRC。

以图 1-13 所示的模具结构为例说明弹性夹套与凸模的装配。先将凸模 3 装入弹性夹套 2, 再一起装入固定板 1, 将螺纹压板 4 旋紧后, 固定板 1 的斜面使弹性夹套产生的收缩量与装入凸模时弹性夹套产生的膨胀量基本抵消, 从而保证弹性夹套内孔与外锥面同轴度不变。

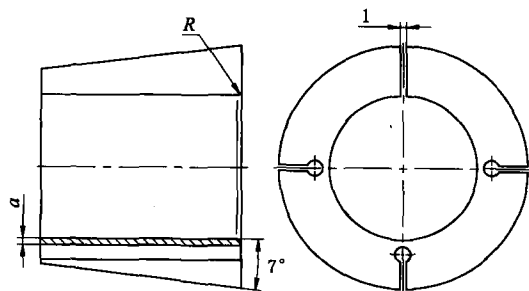


图 1-11 4 豁口弹性夹套

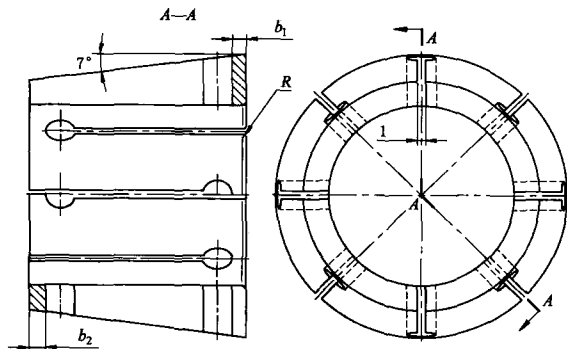


图 1-12 8 豁口弹性夹套^[5]

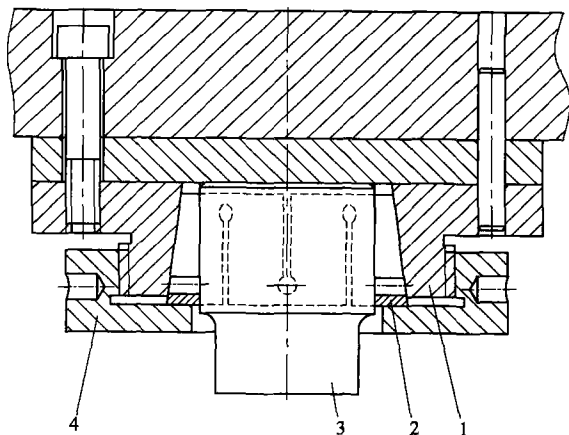


图 1-13 用弹性夹套固定凸模的模具^[5]

1—固定板 2—弹性夹套 3—凸模 4—螺纹压板

1.8 预应力组合凹模最佳设计

预应力组合凹模是许多闭式模锻设计中十分重要的设计内容, 需要应用许多公式计算。简捷实用起见, 本书避开繁琐的理论推导和论证, 直接给出设计方法, 步骤、数表、数表所依据的计算公式, 以及计算实例。读者应用时不必用公式计算, 仅需查表获得所需要的数据即可计算。

在构成模具的全部零件中, 凹模是和坯料接触, 直接参与变形过程, 执行成形加工的最重要的工作零件。冷挤压时, 凹模在静态高压、强烈冲击和巨大摩擦作用下, 凹模应力是一个复杂的抗张、抗压和抗剪切的联合应力, 作用在冷挤压凹模内壁的单位挤压力非常大。由于凹模内壁切向拉应力的作用, 整体凹模易产生纵向开裂, 且当凹模外径与内径之比 $n>4$ 以后加大凹模壁厚, 凹模强度提高很小。于是采用预应力组合凹模。图 1-14 所示为实际生产中常用的两层式和三层式预应力组合凹模。

1.8.1 凹模侧壁单位内压力

由于影响凹模内壁侧向压力的因素较多, 如挤压方式、变形区域、变形程度、凹模形状以及摩擦状况等, 目前对于塑性变形中摩擦规律的研究仍无较大突破, 挤压时变形毛坯作用在凹模内壁上的压力与毛坯作用在凸模端面上的压力的关系及分布规律至今还不很清楚, 尚未有完全符合实际情况的计算方法。实用上, 一般按下面两种原则确定凹模侧壁单位内压力, 且认为其如静水压力一样作用于内腔表面。

1) 根据变形程度。由凸模的单位压力 $p_{\text{凸}}$ 大致推断凹模侧壁单位内压力 p_1 , 有

$$p_1 = \varepsilon_A p_{\text{凸}} \quad (1-20)$$

杯形件反挤压与复合挤压时, 凹模侧壁单位内压力 p_1 也可用下式计算:

$$p_1 = 1.3 (\varepsilon_A p_{\text{凸}} - \sigma_s) \quad (1-21)$$

式中 σ_s —— 挤压毛坯的屈服极限;

$p_{\text{凸}}$ —— 凸模的单位压力;

ε_A —— 挤压件的断面收缩率, 见式 (1-11), 对于圆截面, 按简化式 (1-12) ~ 式 (1-14) 计算。

2) 根据实验测量结果。一般情况下, $p_1 \leq p_{\text{凸}}$ (凸模上的单位挤压力)。在坯料的塑变区内, $p_1 \approx p_{\text{凸}}$; 在弹性区内, 若润滑良好, $p_1 \approx (0.5 \sim 0.8) p_{\text{凸}}$ 。综合塑变区和弹性区的受力, 近似认为凹模所能承受的内压力为

$$p_1 \approx (0.6 \sim 0.9) p_{\text{凸}} \quad (1-22)$$

变形程度较大时取较大值, 反之取较小值。

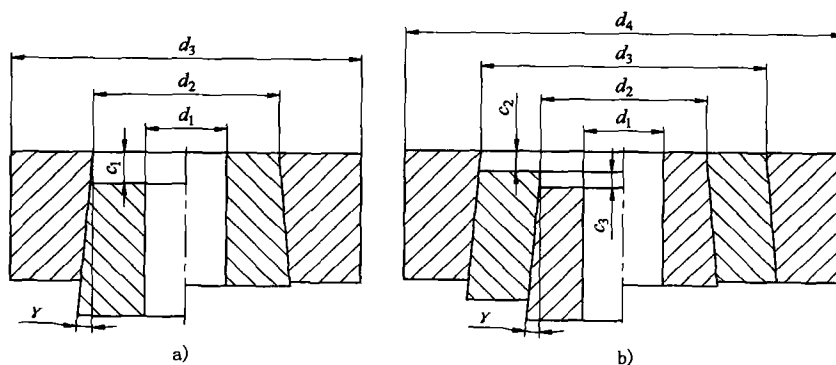


图 1-14 预应力组合式凹模

a) 两层式 b) 三层式

1.8.2 最佳组合凹模设计内容

在已知 (或已求出) 模膛侧壁内压 p_1 的前提下, 组合凹模设计内容包括:

- 1) 根据工艺要求确定组合凹模结构形式, 即决定采用两层式还是三层式的组合凹模, 以及凹模内腔断面是整体的还是棱边形纵向剖分形式。
- 2) 确定组合凹模各层环套的材料及其热处理硬度。
- 3) 确定各层环套的最佳直径比, 即各层环套直径 (通常组合凹模外环直径因受空间限制事先确定)。
- 4) 确定组合凹模各层环套配合直径之间的过盈量, 使凹模内壁产生满足模具强度要求的切向预应力。
- 5) 组合凹模各层环套的压合工艺。

1.8.3 最佳组合凹模设计过程

设计组合凹模时 (以两层组合凹模为例), 在已知凹模工作内压 p 、内层凹模屈服极限 σ_{s1} 和预紧套屈服极限 σ_{s2} , 以及总直径比 n 的条件下, 根据式 $p = (\sigma_{s1} + \sigma_{s2})/2 - \bar{\sigma}_s$ 求出组合凹模的综合极限, 表达式为 $\bar{\sigma}_s = (\sigma_{s1}\sigma_{s2}/n^2)^{1/2}$ ($\bar{\sigma}_s$ 是计算中用到的没有物理意义的量)。由 $\bar{\sigma}_s$ 表达式, 以及 $n = n_1 n_2$ 求出最佳直径比

$$n_1 = \left(\frac{\sigma_{s1}}{n^2} \right)^{1/2}, \quad n_2 = \left(\frac{\sigma_{s2}}{n^2} \right)^{1/2}$$

式中 n —— 总直径比;

n_1 —— 内层凹模的外径 d_2 与凹模内径 d_1 的比值;

n_2 —— 预应力套外径 d_3 与内径 d_2 的比值。

进而确定组合凹模的各层直径, 即内层凹模外径 (预应力套内径) d_2 和预应力套外径 d_3

$$d_2 = n_1 d_1, \quad d_3 = n_2 d_2$$

组合凹模的预应力效果需通过过盈配合来实现, 所以预应力套和内层凹模之间需要有一定的过盈量 Δd_2 , 同时须算出过盈配合的组合凹模内径的收缩量 Δd_1 。先由下式求过盈系数 β_2 和收缩系数 β_1 :

$$\beta_2 = \frac{1}{E}(\sigma_{s2} - \bar{\sigma}_s), \quad \beta_1 = \frac{n^2 - n_1^2}{n^2 - 1} \beta_2$$

进而确定两层间的径向过盈量 Δd_2 和内层凹模内径收缩量 Δd_1

$$\Delta d_2 = \beta_2 d_2, \quad \Delta d_1 = \beta_1 d_1$$

方便起见, 各组常用的数据已计算且制成表格, 设计时可直接查表。为此将不同类型的组合凹模及屈服应力赋予代号, 如表 1-7 所示, 以便于设计时查表。

表 1-7 不同类型的组合凹模及屈服应力代号

	组合凹模类型代号			屈服应力代号		
	凹模内表面允许承受拉应力	凹模内表面不允许承受拉应力		内层凹模	外环	中环
		钢制凹模	硬质合金凹模			
两层式组合凹模	2A	2B	2C	σ_{s1}	σ_{s2}	无中环
三层式组合凹模	3A	3B	3C	σ_{s1}	σ_{s3}	σ_{s2}

1.8.4 组合凹模层数和最佳设计原则^[6]

组合凹模最佳设计, 就是设计的组合凹模在承受最大工作压力的前提下用的材料最少。或用的材料一定的前提下, 组合凹模承受的工作压力最大。设计采用 Tresca 屈服准则。

根据内层凹模选用的模具材料不同和模腔剖分形式不同, 决定是否采用组合凹模, 确定组合凹模结构形式 (采用两层还是三层), 以及要实现组合凹模最佳设计时, 分为两种情况考虑:

1. 组合凹模工作时允许凹模内表面存在切向拉应力

采用一般模具钢制作凹模, 凹模内层本身有足够的抗拉强度, 组合凹模工作时允许凹模内壁承受一定的切向拉应力。内层凹模通常采用一般工具钢。由于内层凹模和各层预应力套都是钢制, 弹性模量相同。

当凹模工作内压 $p_1 \leq 1000 \text{ MPa}$ 时, 应采用整体式凹模。

当 $1000 \leq p_1 \leq 1600 \text{ MPa}$ 时, 采用具有一个预应力套的组合凹模 (即两层式组合凹模)。当 $p_1 = 1000 \sim 1100 \text{ MPa}$ 时, 应根据各层所用的材料和总直径比来决定采用单层 (整体式) 凹模或两层式组合凹模。

当 $1400 \leq p_1 \leq 2000 \text{ MPa}$ 时, 采用具有两个预应力套的组合凹模 (即三层式组合凹模)。当 $p_1 = 1400 \sim 1600 \text{ MPa}$ 时, 应根据各层所用的材料和总直径比来决定采用两层式或三层式组合凹模。

这种组合凹模的最佳设计原则: 凹模的最大内压使内层凹模和各层预应力套同时达到屈服条件。

2. 组合凹模工作时不允许凹模内表面存在切向拉应力

采用硬质合金作为内层凹模材料或凹模内腔断面为棱边形纵向剖分形式, 组合凹模工作时不允许凹模内表面存在切向拉应力。在不允许承受切向拉应力的情况下, 不可采用单层凹模。

当 $p_1 \leq 1100 \text{ MPa}$ 时, 采用两层式组合凹模。

当 $1100 \leq p_1 \leq 1900 \text{ MPa}$ 时, 采用三层式组合凹模。

这种组合凹模的最佳设计原则: 使内层凹模切向拉应力等于零 (由内压引起的切向拉应力与由预应力套过盈配合产生的切向压应力相抵消) 同时各层预应力套达到屈服。

允许在有切向拉应力和不允许有切向拉应力两种情况, 同样尺寸组合凹模的承载能力相差较大。

1.8.5 组合凹模材料的选用^[6]

对于冷挤压组合凹模, 常用材料如下:

内层凹模——一般采用模具钢、高速钢及硬质合金等材料, 如 12CrMoV、T10A、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、YG20 等。热处理硬度要求 60~62HRC, 相应的屈服极限为 2500MPa。

中层预应力套——可用 5CrNiMo、40Cr 等材料, 硬度要求 43~47HRC, 相应的屈服极限为 1500MPa。

外层预应力套——可用 5CrNiMo、40Cr 等材料, 硬度要求 38~42HRC, 相应的屈服极限为 1300MPa 或 1500MPa。外层预应力套硬度应进行严格检查, 若超过 44HRC 会引起预应力凹模外圈开裂。

在 200~400℃温度范围 (指挤压件的温度范围而非模具的温度, 模具的温度应低于此值) 内挤压时, 组合凹模设计可采用冷挤压组合凹模各层所用材料。在 400℃以上挤压时, 由于 Cr12MoV 的力学性能急剧

下降,故不能采用。热模具钢的强度不高,在单位挤压力较大时容易引起磨损与局部变形。故仅适用于挤压力不大的场合。对于400℃以上的挤压,一般应采用高速钢W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、CW6Mo5Cr4V2等作为内层凹模,此时屈服极限的允许值为2000~2200MPa。而预应力套材料的选择可参照冷挤压预应力套材料的选用。各层组合圈之间的配合面接触应大于75%以上,以保证模具良好的工作状态。

1.8.6 组合凹模数表使用说明

为了便于1.8.7节~1.8.10节中给出相应的计算实例,先对以下各节的公式和数表应用加以说明。

(1) 数表依据 以下1.8.7节~1.8.10节中各数表是根据相应的公式计算得出的。简便起见,一般常用范围的设计可直接用数表中的数据确定组合凹模的所有径向尺寸。如有特殊要求,可按公式计算。

(2) 总直径比范围 研究表明,在凹模外径与内径之比 $n < 4$ 的范围内,增加总直径比 n 对提高承载能力的作用较大,当 $n > 6$ 以后增加总直径比 n 对提高承载能力的作用很小。故两层式组合凹模数表给出总直径比范围为 $n=3 \sim 5$,三层式组合凹模给出范围为 $n=3.6 \sim 6$,推荐优先选用的直径比范围为 $n=3.6 \sim 5$ (两层式), $n=4.6 \sim 6$ (三层式)。

(3) 数据的安全裕度 表中得出的最大承载能力 p 已包括了足够的安全裕度。因为采用拉梅公式计算的条件是假定凹模内壁沿轴向全域受压,而实际内压仅作用在凹模内壁轴向一部分高度上,如图1-15所示。在 $h=d_1$ 、 $a=b=d_1/2$ 条件下产生的切向拉应力较之拉梅公式的计算值小20%左右。另外,强度计算时,采用Tresca屈服准则比采用Misess屈服准则偏于安全。

1.8.7 冷挤压组合凹模最佳设计

冷挤压组合凹模制表计算中依据的力学性能数据:内层凹模的屈服极限 $\sigma_{s1}=2500\text{MPa}$;中层预应力套的屈服极限(对于三层式组合凹模) $\sigma_{s2}=1500\text{MPa}$;外层预应力套的屈服极限 $\sigma_{s3}=1300\text{MPa}$ 。

对于碳钢和合金钢,弹性模量 $E=2.1 \times 10^5\text{MPa}$,泊松数 $\nu=0.3$;对于硬质合金, $E=5.4 \times 10^5\text{MPa}$, $\nu=0.2$ 。

1. 冷挤压两层式组合凹模最佳设计

冷挤压两层式预应力组合凹模最佳设计计算公式和由公式算得的数据如表1-8、表1-9所示。

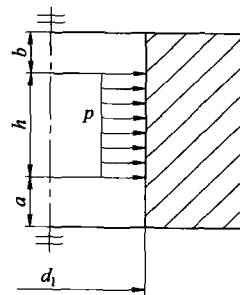


图 1-15 部分受压的凹模

表 1-8 冷挤压两层式组合凹模最佳设计计算公式

计算参数	2A 型组合凹模	2B 型组合凹模	2C 型组合凹模	
p_1	$\frac{1}{2}(\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) - \bar{\sigma}_s$	$\sigma_{s2} - \bar{\sigma}_s$		p_1 ——凹模工作内压力 n_1 ——内层凹模外径与孔径之比 n_2 ——预应力套与内层凹模直径(半径)之比 β_1 ——内层凹模内孔收缩系数 β_2 ——径向过盈系数 σ_{s1} ——内层凹模的屈服极限 σ_{s2} ——预应力套的屈服极限 $\bar{\sigma}_s$ ——综合屈服极限 n ——总直径(半径)之比, $n = n_1 n_2$
n_1	$\left(\frac{\sigma_{s1}}{\bar{\sigma}_s}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{p}{\bar{\sigma}_s}\right)^{1/2}$		
n_2	$\left(\frac{\sigma_{s2}}{\bar{\sigma}_s}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{\sigma_{s2}}{\bar{\sigma}_s}\right)^{1/2}$		
β_1	$\frac{n^2 - n_1^2}{n^2 - 1} \beta_2$	$0.19\beta_2$		
β_2	$\frac{1}{E}(\sigma_{s2} - \bar{\sigma}_s)$	$\frac{\sigma_{s2}}{E_2} - \frac{\bar{\sigma}_s}{E_1} + \frac{1}{2}\left(\frac{1 - \nu_1}{E_1} - \frac{1 - \nu_2}{E_2}\right)(p + \bar{\sigma}_s)$		
$\bar{\sigma}_s$	$\left(\frac{\sigma_{s1}\sigma_{s2}}{n^2}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{p\sigma_{s2}}{n^2}\right)^{1/2}$		

例 1-1 设计冷挤压两层式预应力组合凹模,内表面不允许承受切向拉应力。若已知凹模内孔直径 $d_1=40\text{mm}$,最大直径 $d_3=200\text{mm}$; $\sigma_{s1}=2500\text{MPa}$, $\sigma_{s2}=1300\text{MPa}$; $E_1=E_2=2.1 \times 10^5\text{MPa}$; $\nu=0.3$ 。试求组合凹模的最大承载内压,并确定最佳直径及径向过盈量。

设计过程: 组合凹模的总直径比 $n=d_3/d_1=200/40=5$ 。由于凹模内表面不允许承受切向拉应力,根据 $n=5$,