

精密塑性成形工艺

HotMold.com 收集整理 欢迎转载

目 录

前言

第一章 精密下料	1
第一节 精密塑性成形工艺对毛坯下料的质量要求	1
第二节 精密下料方法及设备	1
第二章 钢料少无氧化加热	5
第一节 敞焰少氧化加热	5
第二节 感应加热	7
第三节 保护—润滑涂层	9
第三章 精密模锻工艺及模具设计	11
第一节 锻件的分类及表示锻件复杂程度的参数	11
第二节 精密模锻成形过程的分析	15
第三节 精密模锻变形力的计算	19
第四节 影响精密模锻件尺寸精度的主要因素	24
第五节 闭式精密模锻工艺的制订	28
第六节 精密模锻的辅助工序	33
第七节 精密模锻时的润滑	35
第八节 模具设计	36
第九节 精密模锻模具材料的选用	45
第十节 精密模锻实例	47
第四章 挤压工艺及模具设计	56
第一节 概述	56
第二节 冷挤压工艺	58
第三节 温挤压工艺	90
第四节 热挤压工艺	95
第五节 挤压模具设计	98
第五章 粉末锻造工艺及模具设计	118
第一节 粉末锻造的特点及应用	118
第二节 粉末锻造时金属粉末的选择	119
第三节 粉锻件和预成形坯的设计	120
第四节 预成形坯的压制与锻造工艺	126
第五节 预成形坯烧结锻造变形特点与致密	131
第六节 粉锻模具设计及对设备的要求	136
第七节 粉末热等静压和粉末喷射锻造	138
第六章 精冲工艺及模具设计	141

第一节	概述	141
第二节	精冲件结构的工艺性分析及精冲复合工艺	147
第三节	精冲工艺的设计与计算	157
第四节	精冲工艺的润滑	164
第五节	精冲模具设计	165
第六节	精冲模具材料	179
第七章	复杂管件精密塑性成形	181
第一节	变径管缩径挤压成形工艺及模具设计	181
第二节	多通管塑挤胀形工艺及模具装置	188
第三节	翻管工艺及模具	202
参考文献	212

第一章 精密下料

第一节 精密塑性成形工艺对毛坯下料的质量要求

随着精密模锻等精密塑性成形工艺不断发展，对下料的质量要求也有所提高，如何提高毛坯的几何精度、断面质量、重量公差及生产率等，已构成发展精密塑性成形工艺的一个重要配套环节。

以精锻用的毛坯为例，一般均以棒材为原材料，经过下料后要求重量公差小、断面塌角小、断面平整并与轴线垂直。目前，生产中评定毛坯的剪切质量和精度，通常以 $\eta_0 = \frac{\Delta V}{V}$, $f_0 = \frac{f}{d}$, $k_0 = \frac{k}{b}$, $b_0 = \frac{b}{d}$, $s_0 = \frac{d-d_1}{d}$ 和 φ 等技术参数或以 ΔV 、 f 、 k 、 b 、 $d-d_1$ 等数值来表示。式中， η_0 、 f_0 、 k_0 、 b_0 、 s_0 和 φ 分别为毛坯的体积偏差（或重量偏差）、塌陷、压塌、断面不平度，断面椭圆度和断面倾角。 ΔV 为剪切后的毛坯实际体积与精锻工艺所要求的毛坯体积的差值， V 为精锻工艺所要求的毛坯体积。 f 、 k 、 b 、 φ 、 d 和 d_1 等符号的意义如图 1-1 所示。

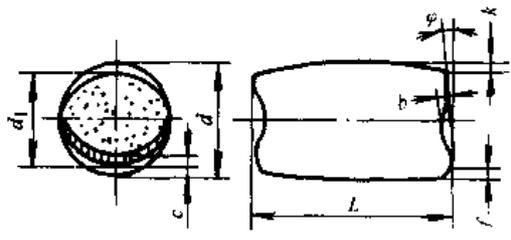


图 1-1 评价毛坯剪切质量的一些技术参数
 f 、 k —分别为静、动剪刀形成的压塌深度 b —断面不平度 φ —断面倾角 d 、 d_1 —分别为棒料直径和毛坯最小直径 c —断面光亮带宽度
 L —毛坯长度

精锻工艺对毛坯质量和精度的要求，如表 1-1 所列。

表 1-1 锻造工艺对剪切毛坯的质量要求

名 称	冷 锻		热 锻	
	锻造、挤压	闭式模锻	闭式模锻	开式模锻
体积偏差 η_0	0.02	0.02	0.02	0.05
塌陷 f_0	0.02	0.03	0.04	0.06
压塌 k_0	0	0.01	0.04	0.06
断面不平度 b_0	0	0.01	0.05	0.12
断面椭圆度 s_0	0.02	0.03	0.08	0.15
断面倾角 φ_0	1°	3°	5°	7°

第二节 精密下料方法及设备

近十多年来，国外在研究棒料精密下料工艺方法和设备中，对提高剪切断面质量、减少断面不变形、严格控制重量公差以及提高生产率等方面，做了大量工作。国内也有一些单位进行了研究，并取得了一定的效果。这里，仅选择几种比较成熟适用的方法和设备进行介绍。

一、径向夹紧剪切及剪切设备

径向夹紧剪切时，棒料处于夹紧和受压状态，这样剪切下的毛坯能与棒料平行下移，使剪切面变形小，从而得到毛坯断面光滑平整以及断面倾角较小的剪切效果。

图 1-2 所示为径向夹紧剪切。这种精密下料方法与板料的精密冲裁十分相似。可以看出，为了增大径向夹紧力，常采用增加夹紧长度或加大单位夹紧力的方法来改变剪切区的应力状态，限制棒料的轴向位移，达到塑性剪切的目的。

目前在生产中，采用棒料径向夹紧剪切的设备或模具结构形式很多，通常可以归纳为两类，即为专用剪断机的径向夹紧剪切和在普通压力机上安装专用模具的径向夹紧剪切。

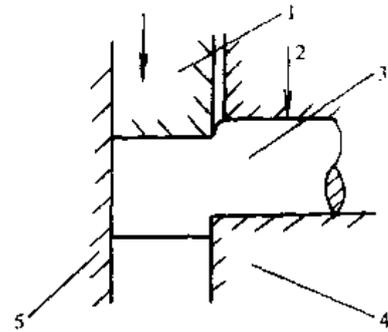


图 1-2 径向夹紧剪切

1—动剪刀 2—夹紧块 3—棒料
4—静剪刀 5—挡板

图 1-3 所示为采用液压—机械传动式棒料剪断机工作原理。它是根据径向夹紧剪切原理，由夹紧机构活塞 2 和 5，分别将毛坯和棒料 8 夹紧。而夹紧力和剪切力应保持一定的比例关系，即

$$P_{夹} = P_{剪} K$$

式中 $P_{夹}$ ——剪切时的夹紧力 (kN)；

$P_{剪}$ ——剪切力 (kN)；

K ——比例系数，取 0.8~1.5。

由图 1-3 可知，夹紧机构活塞 2、5 和剪切滑块活塞 1，均由曲柄连杆带动的液压泵 10 供油，而活塞 2、5 和 1 的三个活塞缸是由同一管道连接的，因此，缸内的液压是相同的。在剪切过程中，活塞 1、2 和 5 均向前移动。活塞 2 上的夹紧块 7 将棒料紧压在静剪刀 4 上，活塞 1 上的动剪刀 9 和活塞 5 上的夹紧块 6 将棒料另一端夹紧。由于活塞 1 的面积大于活塞 5，故活塞 1 能带动动剪刀 9 继续前进，将棒料 8 切断。剪切后，活塞 2、5 和 1 的三个活塞缸先后排油，在杠杆 3、弹簧和气垫作用下，分别将夹紧机构和夹紧块恢复到原始位置，用以准备下一次的棒料送入和剪切。

这种液压—机械传动剪切机传动平稳，能够保证夹紧块 6 和 7 的夹紧力大小相等，并与剪切力成一定比例，故毛坯的剪切面光滑整齐，断面倾角 φ 也较小。

这种剪切机的现有规格为 2250~12500kN。

二、在冲床和剪床上安装专用模具装置下料

1. 冲床剪切下料

安装在冲床上使用的精密下料模具装置有全封闭式和半封闭式两种。用于大批量生产的全封闭式剪切模具装置的典型结构如图 1-4 所示。工作时，由上压头 5 推动滑块 4 带动活动剪刀 3 向下运动，将棒料 14 剪断。固定剪刀 1 与活动剪刀 3 之间的间隙为 0.2~0.3mm。若间隙过大将使剪切断面不平整；过小则会影响滑块 4 的复位。固定剪刀 1 与棒料 14 之间的间隙为 0.2mm。剪口与棒料之间间隙应在保证送料畅通的前提下，尽量取小值，这是由于间隙过大时，将会使剪坯产生较大的塌头。滑块向下运动时，依靠斜块 11、滑轮 10 将推料弹簧 7 压缩，待滑块运动至下死点，则通过打料销 6 将已剪切好的毛坯弹出，滑块依复位弹簧 12 恢复到原始位置，开始下一次送料。这种模具装置下料的优点是生产率高，材料利用率高；其缺点是毛坯形状欠规则。

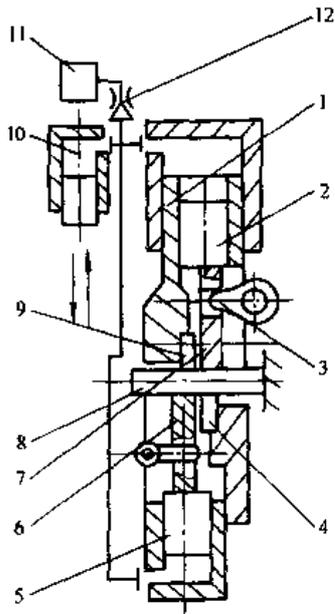


图 1-3 液压—机械传动式棒料剪切机工作原理
 1—剪切滑块活塞 2、5—夹紧机构活塞 3—杠杆 4—静剪刀 6、7—夹紧块 8—棒料 9—动剪刀 10—液压泵 11—油箱 12—单向阀

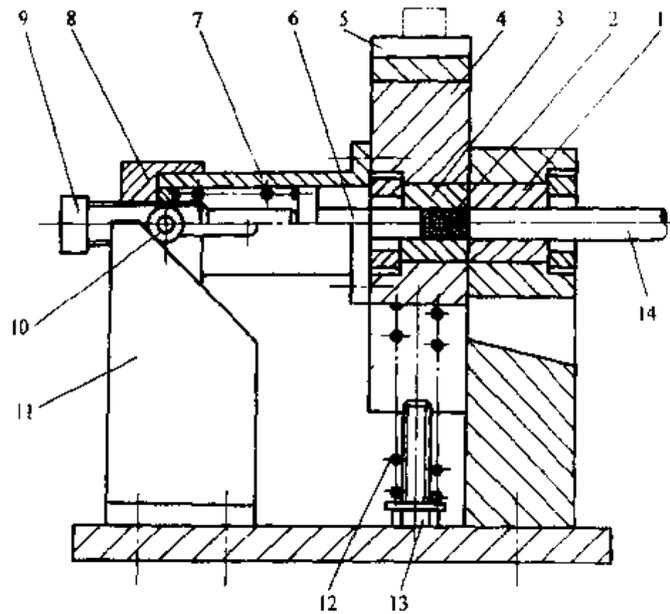


图 1-4 全封闭剪切模具装置
 1—固定剪刀 2—毛坯 3—活动剪刀 4—滑块 5—上压头 6—打料销 7—推料弹簧 8—推簧阀 9—定位螺钉 10—滑轮 11—斜块 12—复位弹簧 13—限位螺钉 14—棒料

2. 在冲床上安装专用模具装置的径向夹紧剪切

棒料的径向夹紧剪切，除采用上述的专用剪断机构外，为减少下料费用和利用现有冲压设备，还大量采用专用模具在普通压力机上对棒料进行精密剪切，也能得到高质量的剪切毛坯。

图 1-5 所示为在普通压力机上实现精密下料的差动式剪切模具工作原理。图 1-5a 所示为棒料开始送入模具的情况。当压力机滑块向下移动时，模具的斜楔 1 和斜块 2 下行，使可分的剪刀 4 向模具中心合拢将棒料 5 夹紧（见图 1-5b）。当斜楔 1 继续下行时，通过斜块 2 推动一对剪刀 4 左右移动，将棒料 5 切断（见图 1-5c）。棒料切断后，压力机滑块上升，模具在弹簧 3 作用下，又恢复到原来位置，待送料后进行下一次剪切。

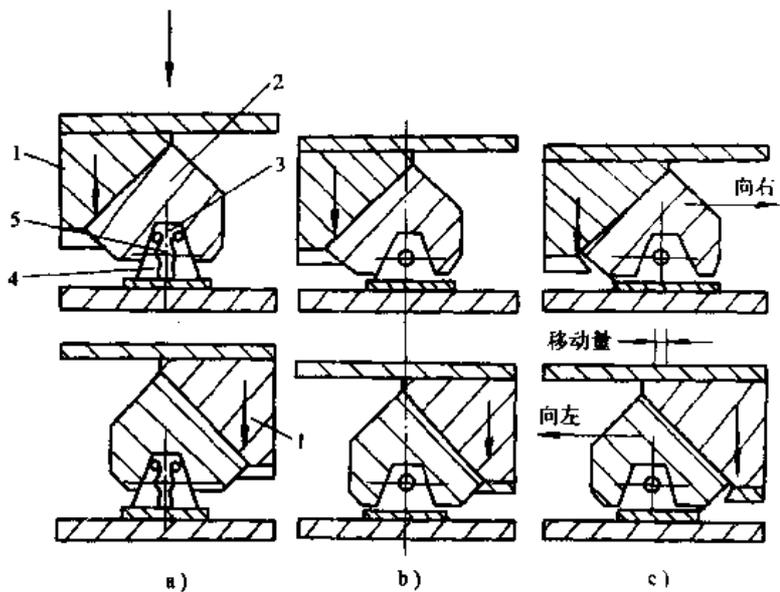


图 1-5 差动式剪切模的工作原理
 1—斜楔 2—斜块 3—弹簧 4—剪刀 5—棒料

3. 在棒料剪切机上附加径向夹紧装置下料

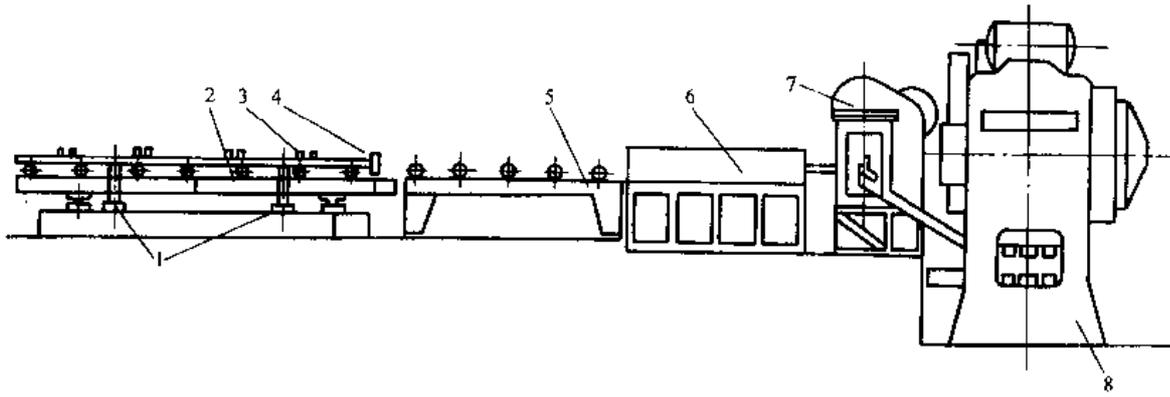


图 1-6 剪切加热和精密模锻生产线

1—称重传感器 2 升降台 3—料架 4—挡块 5—加热炉送料台 6—加热炉
7—剪切机 8—热模锻压力机

在棒料剪切机棒料入口的一边附加液压式或机械式径向夹紧装置，径向夹紧装置的下部固定在剪切机工作台的外面，装置的上部则固定在剪切机滑块的外面，剪切时随着滑块向下，夹紧装置首先将棒料沿径向夹紧，随后上下剪刀将棒料剪断。

图 1-6 所示为一台棒料剪和一台两工位热模锻压力机生产线。棒料经感应加热炉加热至蓝脆区温度，加热炉的出口端安置一台带径向夹紧装置的棒料剪，其上还装有机械式或由计算机控制的挡料装置。剪下的毛坯经过感应加热炉加热至始锻温度从出口端经过斜槽，送入压力机的第一工位上。

三、自动卧式带锯床锯切下料

自动卧式带锯床为近十多年来发展起来的一种精密下料设备，在日本等工业发达国家的锻造行业应用很广，我国近年来也在逐步推广。图 1-7 为湖南机床厂制造的 GZ4032 型自动卧式带锯床。该机主要特点为：凸轮控制液压进给恒定；液压张紧锯条；锯切速度可无级调整，其范围为 18~120m/min；锯条断裂可自动停车；自动送料系统可用单程（0~380mm）或多程（380mm 以上）。当锯切圆料时，最大直径为 320mm；锯切方料时，最大截面为 320mm×320mm。当锯切直径较小的棒料时，可将数根棒料捆在一起下料，即一次可锯切数根棒料。使用表明：采用该机下直径为 50mm 的棒料时，其锯口缝宽在 1mm 以内，长度公差可控制在 0.5mm 左右。因此，这种自动卧式带锯床已成为国内外较为主要的精密下料设备。

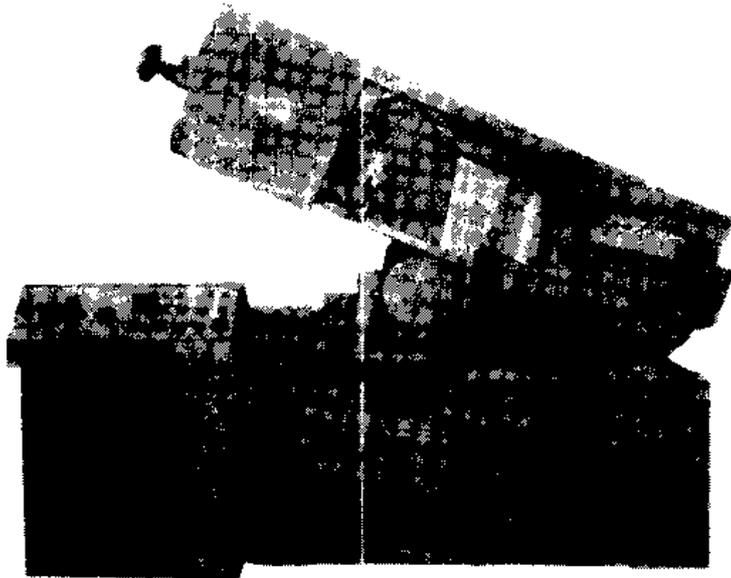


图 1-7 GZ4032 型自动卧式带锯床

第二章 钢料少无氧化加热

精密塑性成形的工件，往往只进行少量的机械加工，有时甚至不加工就直接进行装配，这样，对工件的表面质量和尺寸精度就提出了更高的要求。例如，表面氧化皮厚度应限制在 $0.05 \sim 0.06\text{mm}$ 以下；表面脱碳层最好控制在磨削余量范围以内。因此，在热精密塑性成形以前，毛坯必须采用少无氧化加热。少无氧化加热减少了钢材的氧化和脱碳，有利于提高模具寿命，例如，采用无氧化加热，可使锻模寿命延长约 16% 。

第一节 敞焰少氧化加热

它是目前应用较为广泛的一种方法，特别适用于成批生产和中小型车间。因为这种炉子具有一定的通用性，被加热的毛坯形状和尺寸不受限制；既可实现整体加热，也可实现毛坯的局部加热。它的特点是燃料的燃烧产物不仅用来加热金属，而且起到保护气体的作用。

一、缝隙式少氧化加热炉加热

图 2-1 所示的缝隙式少氧化加热炉，用于长毛坯端部的局部加热。用天然气工作。在侧墙上设置有两排烧嘴，上排用喷射式烧嘴，下排用双管烧嘴。双管烧嘴结构如图 2-2 所示，这种

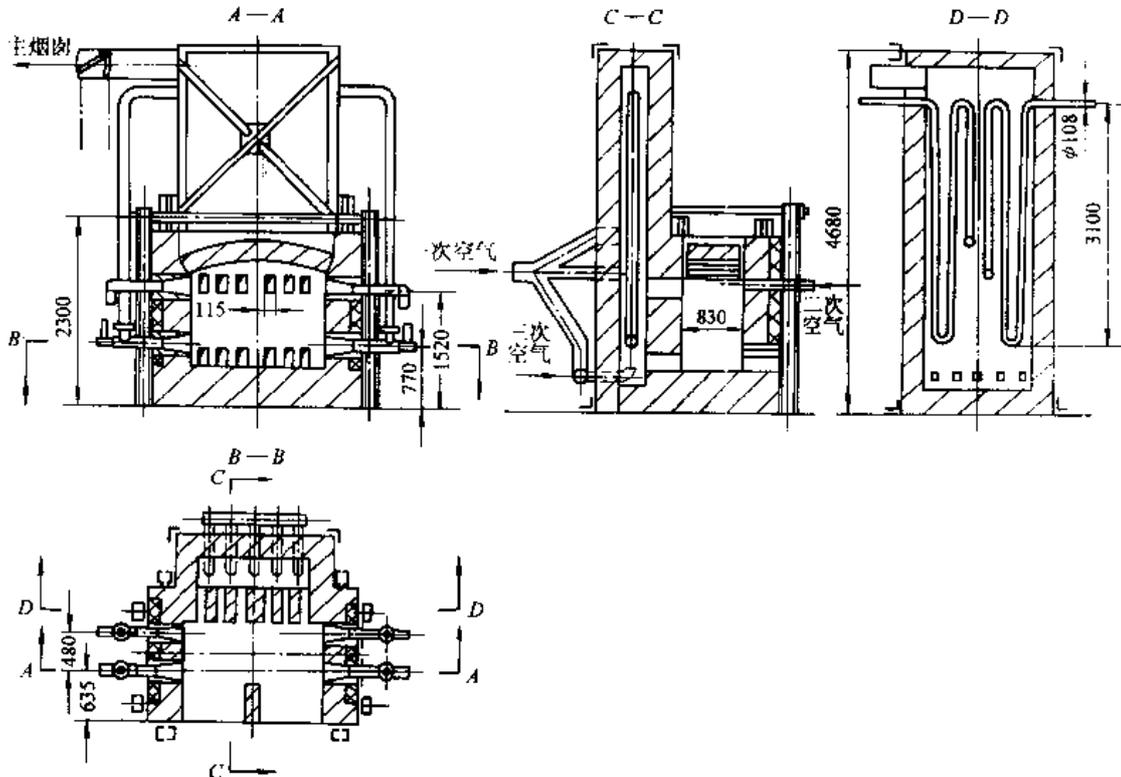


图 2-1 缝隙式少氧化加热炉

结构保证能良好地调节空气和煤气的混合比，使下炉膛形成保护气氛。在炉子端墙上，设置有二次空气喷头。一次空气用管式换热器预热到 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，换热器材料为 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 。

炉子的工作过程是：开始，两排烧嘴都按 $\alpha=1\sim 1.1$ 的规范工作，以提高炉温和减少炉子升温时间。然后，关闭上排烧嘴，打开二次空气的阀门，下排烧嘴调节到按 $\alpha=0.4\sim 0.5$ 规范，在下炉膛内形成保护气氛，并依靠二次空气在拱顶附近完全燃烧。

为了防止上炉膛内的氧化性炉气下窜而破坏保护气氛，在炉底和拱顶附近，设有两排烟孔，以导出燃烧产物。这样布置烟孔，将有一部分保护气体进入烟道，为了使这部分烟气燃烧完全，应把三次空气鼓入烟道。试验证明，下炉膛炉温达 $1320\sim 1380^{\circ}\text{C}$ ，料温达 $1180\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。加热约 0.5h ，毛坯烧损为 $0.03\sim 0.035\text{g}/\text{cm}^2$ ，氧化皮厚度为 $0.15\sim 0.17\text{mm}$ 。

二、环形转底式少氧化快速加热炉

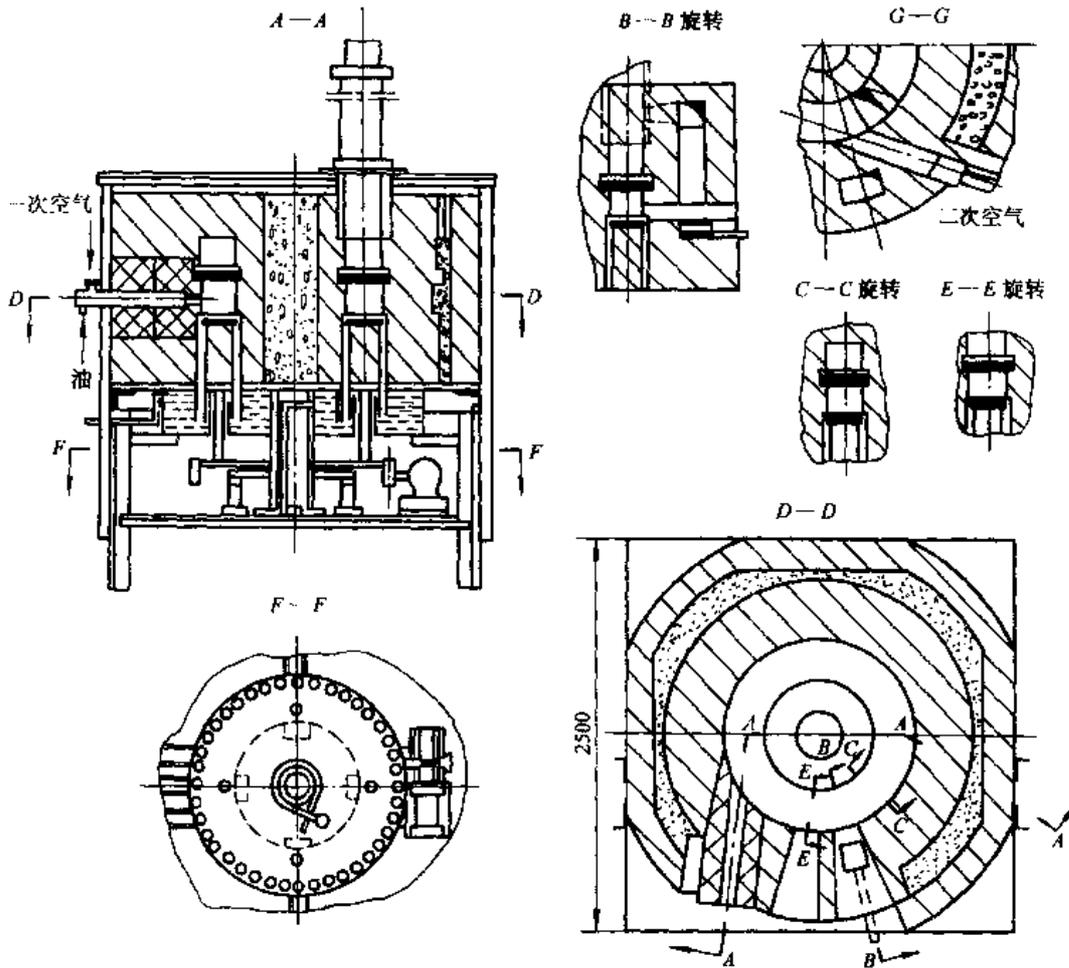


图 2-3 环形转底式少氧化快速加热油炉

为了实现加热过程的机械化，加热不便滚动的毛坯（如伞齿轮、叶片等），以及适应中小车间以轻柴油为燃料的要求，研制出一种环形转底式少氧化快速加热油炉，如图 2-3 所示。

这种炉子的炉膛分为上、下两层，并用碳化硅板隔开。毛坯从加料门放在旋转炉底上加热，经一定时间转到出料门被取出送去精锻。一次空气利用烟气余热经辐射换热器预热到 300°C 以上，二次空气没有预热。沿下炉膛内表面的切线方向，设有一个喷嘴（RK 或 RC 型）。在炉气进入上炉膛附近设置有一个二次空气喷头。炉子按少氧化规范工作时，喷嘴供给 $\alpha=0.4\sim 0.45$ 的一次空气。燃料在下炉膛中的不完全燃烧产物，以对流传热加热毛坯后，利用二次空气的喷射作用，经隔板上的烟孔被吸入上炉膛内，与二次空气混合进行完全燃烧，并将热量传给碳化硅隔板，以提高下炉膛温度。为了防止炉门口冒火，在进出料炉门口设置了扩张口。碳化硅板厚度为 $40\sim 50\text{mm}$ 。在砌炉时，隔板应该自由支承在上、下炉膛之间。

与室式少氧化加热炉比较，这种炉子比较成功地解决了下列问题：

1) 采用碳化硅隔板后，克服了室式炉少氧化效果不稳定和炉内气氛调节不方便的缺点。

2) 下炉膛空间尺寸大大减小，使保护气氛能充满整个炉膛，炉内气流速度高，加之毛坯运动到火焰喷嘴附近实现了冲击加热，因而毛坯加热速度较高；由于隔板把上、下炉膛隔开，可以增大二次风量，使燃料在上炉膛内完全燃烧，而不影响下炉膛的保护气氛；燃料完全燃烧所发出的热量，由隔板传到下炉膛，提高了下炉膛温度。因此解决了室式炉存在的炉温低和热效率低两个主要问题。

3) 采用环形转底结构后，既解决了现有室式油炉因炉内可见度差，以致进出料困难的矛盾；又解决了室式炉温度不均和同一批毛坯因加热时间不同所引起的各个毛坯温度和氧化不一致的问题。若配置进出料机械手，劳动条件大大改善，而这是室式炉无法办到的。

4) 这种炉型结构，同样也适用于气体燃料。

这种炉子用来加热直径 $d\leq 50\text{mm}$ 的钢料，配合 300t 摩擦压力机生产。试验证明，取得如下的效果：

1) 炉温：当 $\alpha=0.44$ 和一次空气预热到 300°C 左右时，上炉膛为 $1260\sim 1280^{\circ}\text{C}$ ，下炉膛为 $1200\sim 1220^{\circ}\text{C}$ 。

2) 料温： 1150°C 以上。

3) 单位油耗： 0.21kg/kg 。

4) 炉子生产率： 85kg/h 。

5) 加热质量：当 $\alpha=0.44$ 和料温 1150°C 左右时，45 号钢加热 0.5h，烧损为 0.08%；2Cr13 加热 1h，表面无脱铬，脱碳层为 $40\mu\text{m}$ 。

第二节 感应加热

随着锻压生产机械化自动化程度的提高，特别是对无公害加热技术的要求，在大批量生产中，采用感应加热已成为一种发展趋势。与敞焰加热比较，感应加热还有下列优点：

1) 加热速度很高，达 $0.4\sim 0.6\text{min/cm}$ ；感应加热时，毛坯周围的气氛不强烈流动，故氧化脱碳少。

2) 总效率高达 50%~60%。

由于感应加热也有缺点，故使用上仍受到某些限制：

一是消耗电能大，每吨钢材的耗电指标为 400~500kW·h。在供电较紧张的情况下，普遍采用感应加热还存在一定困难。但近年来随着电力事业的发展，感应加热正在较为迅速地推广。

二是感应加热装置的初期投资大，故对锻件的批量有一定要求，否则加热成本提高。

三是感应器的规格必须与毛坯尺寸相匹配。当毛坯尺寸经常变化时，必须及时更换相应的感应器，否则效率不但明显下降，而且加热时间也会增加。目前，感应加热还不能用来加热形状复杂的毛坯（如异形和变截面）。

一、感应加热的基本原理

如图 2-4 所示，若将毛坯 2 放在感应圈 1 内，并在其两端施加交变电压 u ，当感应圈内通过电流 I_1 后，便有相应的交变磁场产生。根据电磁感应定律，在毛坯内产生感应电流 I_2 ，依靠毛坯的阻抗，使毛坯产生热量。

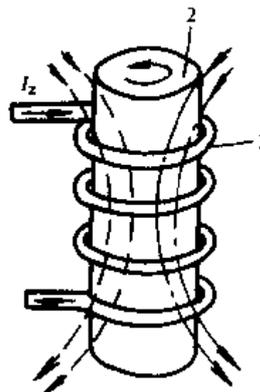


图 2-4 感应加热的基本原理
1—感应圈 2—毛坯

交变电流通过导体时，电流密度沿其截面的分布是不均匀的。最大电流密度出现在导体表面，这种现象叫做集肤感应。通过交变电流的表面层厚度称为电流穿透深度 δ ，其计算公式如下：

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (\text{cm}) \quad (2-1)$$

式中 f ——电流频率 (Hz)；

μ ——金属的相对磁导率。对于钢材，当温度在磁性转变点 (760°C左右) 以下时， μ 值为变数；当温度在 760°C 以上，可取 $\mu=1$ ；

ρ ——金属的电阻系数 ($\Omega \cdot \text{cm}$)。在不同温度下，各种金属材料的电阻系数可按图 2-5 查得。

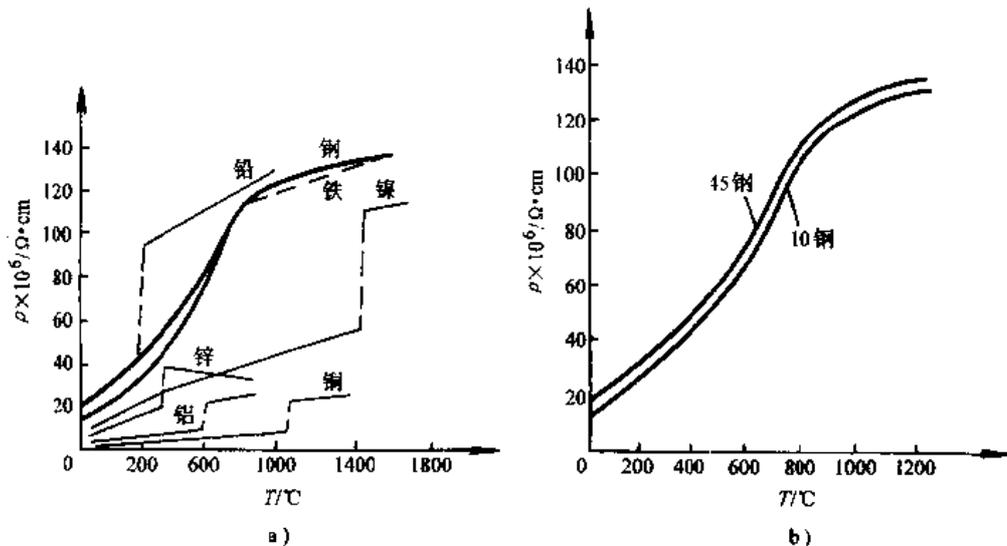


图 2-5 金属毛坯的电阻系数 ρ 与温度 T 的关系
a) 一般常用金属 b) 普通碳钢

分析式(2-1)可知:当毛坯处于热态时($\mu=1$),电流穿透深度与电流频率的平方根成反比,所以,电流频率越高,则电流穿透深度越小。因毛坯表面的热量必须依靠热传导方式逐渐传到毛坯中心,故当加热时间给定时,为了保证毛坯表面和中心所需的温差,必须减小毛坯尺寸;当毛坯温差和尺寸给定时,就要延长加热时间。加热时间增长,会降低加热质量,这是我们所不希望的。

二、感应器的计算

感应加热设备通常由中频电源、感应器、电容器组、接触器和自动控制装置等组成。作为选用感应加热设备最重要的环节是感应器的有关技术参数的设计和计算。计算的原始数据是:毛坯的加热温度 T 、材料、尺寸(直径 D_0 和长度 L_0)和截面上允许的温差 ΔT 以及锻压设备的生产率 N (件/h)。同一个感应器可以加热不同尺寸的毛坯,这时,应按照毛坯的最大尺寸进行计算,再按最小尺寸来验算。

计算的目的是内容:确定电流频率;确定毛坯的最短加热时间;确定加热方式;确定感应器的尺寸、匝数、功率和钢管尺寸等;合理选用中频电流的类型并确定其输出功率;确定电容器组的标称容量并选择规格和数量。

三、保护气体的选择

感应加热中,钢材的氧化和脱碳较少,一般烧损在0.5%以下,脱碳约为0.1~0.4mm。但试验证明,感应加热时,氧化和脱碳在很大程度上取决于加热时的温度-时间因素。当温度从1050°C增加到1200°C,烧损几乎增加0.5倍,氧化皮厚度已超出精锻允许的范围;随着加热温度和高温下停留时间增加,脱碳层也明显增厚。例如,对于 $\phi 80\text{mm}$ 的40Cr,用5min加热到1100°C,脱碳层为0.25mm;而用8min加热到1200°C,脱碳层为0.5mm。因此,为了实现无氧化加热,常采用保护气体的感应加热。

保护气体的种类很多。选择它的成分,不仅要注意工艺效果,也要考虑其制备过程的难易程度和成本,综合比较,因地制宜。常用的保护气体有以下几种。

(1) 工业惰性气体 如氩和氮气及氮-氢混合气等。它们与任何金属都不发生化学反应,经净化处理(去 O_2)后使用。工业惰性气体较贵,故适用于一些特殊和贵重金属,如钛及其合金、耐热钢和不锈钢等。

(2) 还原性气体 又称为可控气氛,它是 CO 、 H_2 的混合气。

第三节 保护—润滑涂层

根据用途不同,涂层可分润滑、保护和保护—润滑三大类。锻造生产常用润滑,或保护—润滑涂层。关于润滑涂层,将在精锻工艺中介绍,这里只介绍适用于少氧化加热的保护—润滑涂层。

和其他少氧化加热比较,采用保护—润滑涂层具有如下优点:

- 1) 可以采用车间现有的加热设备。
- 2) 在锻件整个生产过程中都能起保护作用。
- 3) 它是模具的良好润滑剂。
- 4) 兼有表面化学处理(如渗硼、渗碳等)的作用。

当前,采用硅酸盐玻璃或搪瓷作为涂层还存在如下的缺点:

1) 因模具温度不高,在使用过程中玻璃涂层可能凝固,必须定期清除模具内残存的玻璃残渣,以免压入锻件表面。

2) 在高温下涂层成分与基体金属发生化学反应, 影响锻件表层的成分和性能。

一、涂料成分的选择

对保护—润滑涂料提出下列要求:

1) 有较低的软化温度, 并对变形金属有良好的润滑作用。

2) 在加热温度下有适当的粘度和流动性能。采用玻璃或搪瓷作为涂料, 挤压时粘度为 200~1200Pa; 模锻时为 1000~3000Pa。粘度超过 3000Pa, 玻璃熔体有凝固倾向, 不宜作为保护润滑涂料。

3) 对变形金属不应有腐蚀作用。

4) 涂层薄膜对模具有良好的润滑, 同时有一定的强度和韧性, 并能均匀连续地随金属一起变形。

5) 有低的热膨胀系数, 锻件成形后, 易于从锻件上清除, 或能自动剥落。

二、涂料的使用方法

涂料使用不当, 也会影响到涂层的保护性能, 因此, 应重视涂料的正确使用方法。

1. 毛坯表面处理

常用的毛坯表面处理方法有:

(1) 预热喷涂法 将毛坯置于电炉中预热到 100~150°C, 清除其表面的油污, 再用喷枪把悬浊液喷在毛坯表面上。这种方法可以提高玻璃涂料的粘附能力, 效果较好; 但增加了预热工序, 且操作不便。

(2) 喷砂法 毛坯在浸涂悬浊液前, 先经喷砂处理, 以清除表面的氧化皮和油污, 并增加了毛坯表面的粗糙程度。这种方法的优点是涂附性能好, 浸涂方便。但应注意, 对于钛合金和耐热合金, 不能用金属砂, 要用刚玉 (Al_2O_3) 砂。

(3) 酸洗法 毛坯酸洗后浸涂悬浊液。这种方法操作方便, 节省工时。目前, 成批生产时, 工厂都用此法, 效果良好。

2. 悬浊液配制

将固体玻璃、粘土和水放入球磨机内, 球磨后即得到玻璃悬浊液。

粘土作为粘结剂应具有很高的耐火度、塑性和悬浮能力, 其质量分数一般为 3%~8%。在室温和高温下, 粘土的粘结能力较差, 如不小心, 很易碰落涂层, 影响保护性能和操作。为了提高涂层的机械强度, 还应加入其他粘结剂。常用质量分数为 10% 的亚硫酸盐碱液和聚合乙炔醇水溶液, 有时也用水玻璃。水玻璃用量不能太多, 因加热时其水分剧烈汽化, 易引起涂层剥落; 温度在 1000°C 以上时, 水玻璃熔化后腐蚀钢材表面。

配制好的悬浊液, 应贮放在镀锌或搪瓷钢桶内, 防止氧化铁污染悬浊液。

3. 烘干

涂制后的毛坯放在空气中干燥 20~30min, 再用烘干炉烘干。从室温升到 160°C 的时间为 1.5~3h, 保温 1h 后出炉。烘干速度太快, 温度过高, 涂层易干裂而剥落。若无烘干设备, 应置于空气中干燥 24h 以上。

4. 涂层清除

模锻后锻件上残存的玻璃膜, 用喷砂或腐蚀法清除。腐蚀液成分为: $NaOH$ 650~700g/L, $NaNO_2$ 200~250g/L, $NaNO_3$ 50~70g/L。温度为 140°C。腐蚀时间约为 70min。锻件腐蚀后, 用热水和冷水冲洗, 再用空气吹干。

第三章 精密模锻工艺及模具设计

与普通模锻比较,精密模锻能获得表面质量好,机械加工余量少和尺寸精度较高的锻件。目前,精密模锻主要应用在两个方面:一是精化毛坯,即利用精锻工艺取代粗切削加工工序,将精锻件直接进行精加工而得到成品零件;二是精锻零件,即通过精密模锻直接获得成品零件。

第一节 锻件的分类及表示锻件复杂程度的参数

一、锻件的分类

锻件种类繁多,其几何形状的复杂程度和相对尺寸的差别很大。为了制订精密模锻工艺、确定合理的毛坯形状和尺寸,首先应将锻件分类。无疑,形状相似的锻件,其精密模锻工艺及模具的结构基本相同。因此,目前比较一致的分类方法是按照锻件形状并参考精密模锻时毛坯的轴线方向来分类的。精密模锻件的分类情况见表 3-1。

第一类(饼盘类)锻件。其外形为圆形而高度较小。精密模锻时毛坯轴线方向与模锻设备的作用力方向相同,金属沿高度和径向同时流动。对于结构简单的饼盘类锻件,一般只需一个终锻工步即可;对于结构复杂的,如编号为 135、144 和 145 所示齿轮坯锻件,若在热模锻压力机上闭式模锻,在终锻工步前通常还需锻粗坯和预锻工步。编号为 154、155 所示圆锥齿轮锻件,无论采用开式或闭式精密模锻,均能直接终锻出齿形。

第二类(法兰突缘类)锻件。其外形为回转体,带有圆形或长宽尺寸相差不大的法兰或突缘。闭式模锻时,一般只需一个终锻工步。

第三类(轴杆类)锻件。其杆部为圆形,带有圆形或非圆形头部,或中间局部粗大的直长杆类。这类锻件中,对于编号为 313 所示的杯杆形阶梯轴可采用闭式锻粗与反挤复合成形工艺;其余的轴杆类锻件一般都采用闭式局部锻粗成形。

第四类(杯筒类)锻件。这类锻件多采用闭式反挤、正反复合挤压或锻粗冲孔复合成形。

第五类(枝芽类)锻件。包括单枝芽、多枝芽的实心 and 空心类锻件。这类锻件多采用可分凹模模锻或多向模锻。

第六类(叉形类)锻件。包括带有空心或实心杆部、带有圆形或非圆形法兰等多种结构形式。这类锻件常常需要两个工步以上的可分凹模模锻,即预成形和终锻。

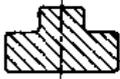
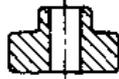
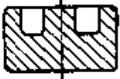
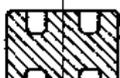
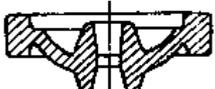
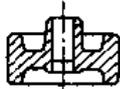
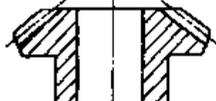
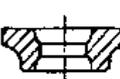
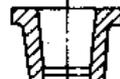
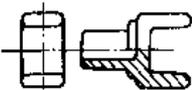
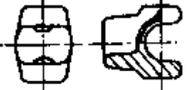
从表 3-1 所示六种类型锻件的外形特点可以看出,前四类,即饼盘类、法兰突缘类、轴杆类和杯筒类属于旋转体;后两类,即枝芽类和叉形类属于非旋转体。

二、表示锻件复杂程度的参数

锻件形状对模锻时金属流动和变形力有很大影响,因此,必须找出表示锻件形状复杂程度的参数。

1. 锻件形状复杂系数的一般表达式

表 3-1 精密模锻件的分类

分类及编号	1	2	3	4	5
第一类 (饼盘类)	 111	 112	 113	 114	 115
		 122	 123	 124	 125
		 132	 133	 134	 135
			 144		 145
			 154		 155
第二类 (法兰、穿线类)	 211	 212	 213	 214	 215
第三类 (轴杆类)	 311	 312	 313	 314	 315
第四类 (杯筒类)	 411	 412	 413	 414	 415
第五类 (枝芽类)	 511	 512	 513	 514	 515
第六类 (叉形类)	 611		 612		 613

锻件形状复杂系数 C_G 是锻件体积 $V_{\text{锻}}$ 与相应的锻件外轮廓包容体的体积 $V_{\text{外}}$ 的比值, 即

$$C_G = \frac{V_{\text{锻}}}{V_{\text{外}}} \quad (3-1)$$

圆形锻件的外轮廓包容体的体积 (图 3-1)

$$V_{\text{外}} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (3-2)$$

非圆锻件的外轮廓最小包容体体积 (图 3-2)

$$V_{\text{外}} = l b h \quad (3-3)$$

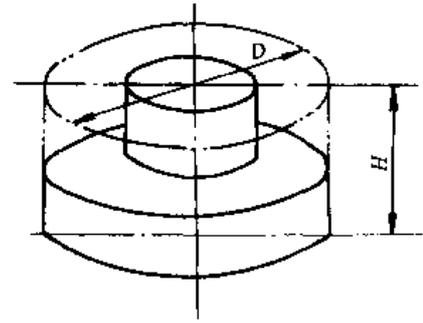


图 3-1 圆柱体锻件及其外接圆柱体

由图可知, C_G 越大, 形状越简单。通常将其分为四级: 简单的, $C_G = 0.63 \sim 1$; 一般的, $C_G = 0.32 \sim 0.63$; 较复杂的, $C_G = 0.16 \sim 0.32$; 复杂的, $C_G \leq 0.16$ 。

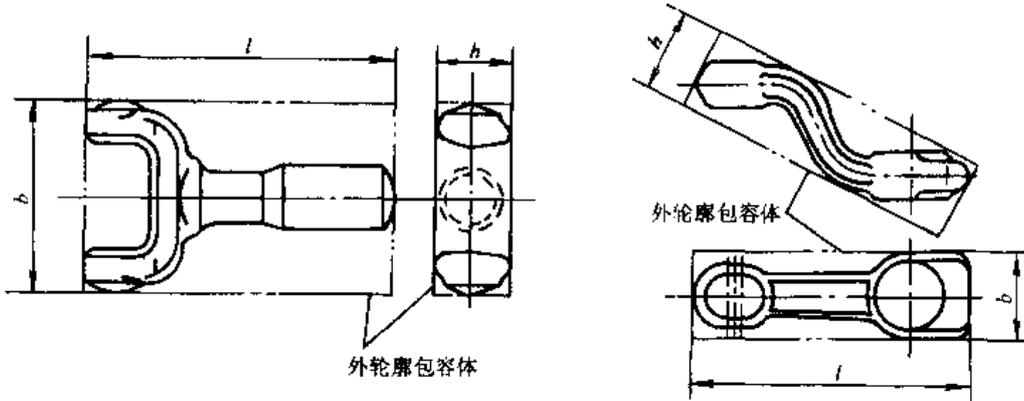


图 3-2 非圆形锻件及其外轮廓最小包容体

2. 回转体锻件的形状复杂系数

1. 11. 捷捷林等在研究飞边槽尺寸设计时, 提出了回转体锻件的形状复杂系数 C_r , 其表达式为:

$$C_r = \alpha \beta \quad (3-4)$$

式中 α 、 β ——锻件纵、横截面形状复杂系数。

其中, 纵截面形状复杂系数

$$\alpha = \frac{C_{\text{锻}}}{C_{\text{外}}} = \frac{L^2/F}{L_c^2/F_c} \quad (3-5)$$

式中 $C_{\text{锻}}$ ——回转体锻件轴向断面周长 L 的平方与其轴向断面积 F 之比

$C_{\text{外}}$ ——锻件外接圆柱体轴向断面周长的平方与外接圆柱体的轴向断面积 F_c 之比。

横截面形状系数

$$\beta = \frac{2R_g}{R_c} \quad (3-6)$$

式中 R_g ——对称轴至半个纵截面的质心间的径向距离;

R_c ——锻件外接圆柱体的半径。

由式(3-5)可以看出,在锻件外接圆柱体的高度和直径不变的条件下,空腔愈多、愈窄和愈深,则锻件的周长愈长、纵截面面积愈小,相应的 L_c^2/F_c 值愈大。这个比值没有完全考虑空腔在锻模上的位置:对于具有相同宽度和深度的空腔,它们位于轴线附近或者位于外围,其 L_c^2/F_c 值是相同的。然而,根据实验结果,中心空腔比外围空腔能更好、更易充满。式(3-6)的 β 值考虑了空腔在锻模中的分布。对于圆柱形锻件(图3-3a), $2R_g/R_c=1$;对于带有法兰的锻件(图3-3c),其 β 值比无法兰的类似锻件(图3-3b)要小。这是因为法兰突缘在某种程度上起到了飞边的作用,有利于锻件充满,因而其复杂程度要小一些。

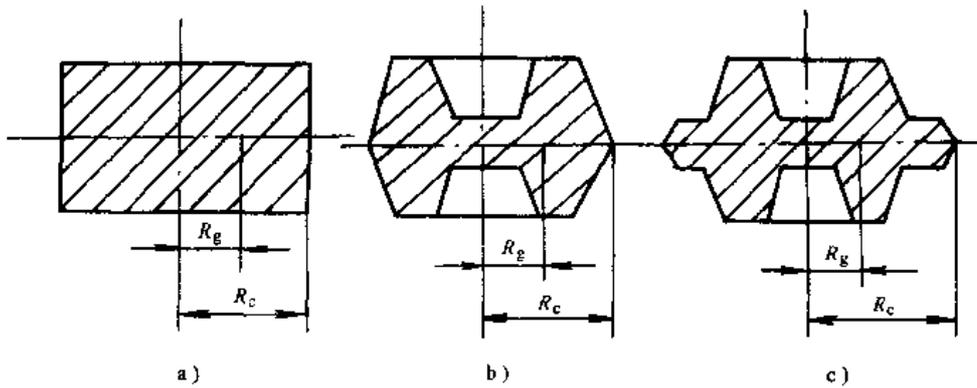


图 3-3 空腔在模内的位置

a) $2R_g/R_c=1$ b) $2R_g/R_c=1.29$ c) $2R_g/R_c=0.88$

由此可见,形状复杂系数反映了回转体锻件纵截面相对于锻件外接圆柱体纵截面的复杂程度。

不难想像,在其他条件相同的情况下,锻件形状复杂系数的大小,可反映其锻件在模锻成形时金属充满模膛的难易程度和所需变形力的大小等主要工艺性能。

3. 枝叉类锻件的成形难度系数

对于枝叉类锻件,不可能提出类似于回转体锻件那样的形状复杂系数来表示几何形状的复杂程度对其工艺性能上的难易程度的影响。枝芽和叉形件若采用开式精模密锻,很难获得理想的效果。径向挤压和正向分流挤压是近十多年来针对枝叉类零件的形状特征所研究开发出的精密成形新工艺,应用效果显著。根据能反映变形金属在模膛内流动充满时的难易程度和所需变形力或功的大小等主要工艺性能,可以提出用锻件的成形系数来表示:

$$\lambda = F_c / \Sigma F_b \quad (3.7)$$

式中 F_c ——工作筒(原毛坯)横截面面积(图3-4);

ΣF_b ——枝芽模膛横截面面积之和(图3-4)。

图3-4所示为十字轴径向挤压模锻时,变形金属作用于冲头上的单位压力 K_u 同侧向枝芽的个数 z 及尺寸比 $\frac{d}{D}$ 间的关系曲线。枝芽的个数 z 和尺寸比 $\frac{d}{D}$ 两者综合在一起,实质上代表了比值 $F_c/\Sigma F_b$ 。由图可以看出,从左到右,随比值 $F_c/\Sigma F_b$ 不断减小,由冲头所施加的单位变形力逐渐降低。这是因为模膛侧枝通道越多,金属材料被挤出形成侧向枝芽的阻力越小。

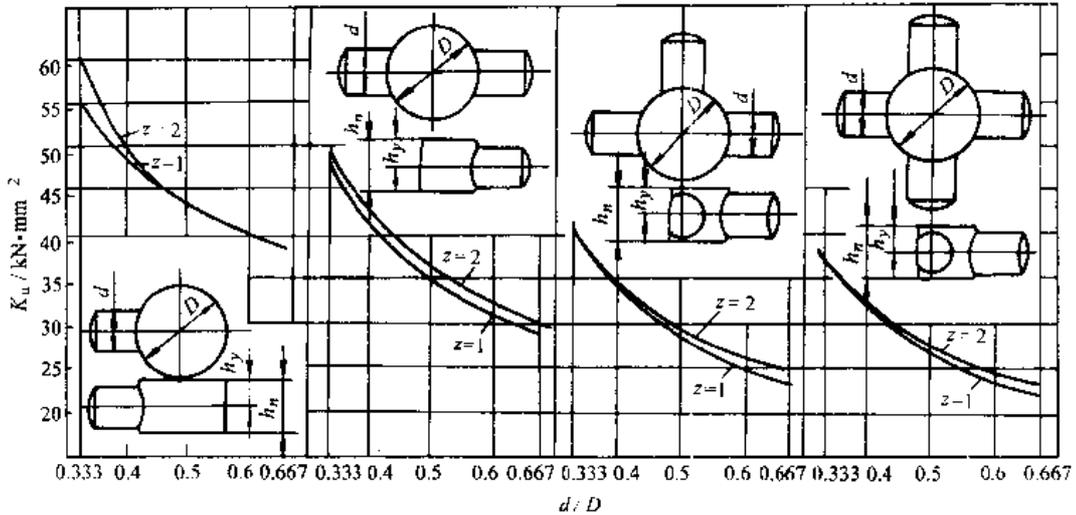


图 3-4 单位压力 K_u 与 $\frac{d}{D}$ 的关系曲线

第二节 精密模锻成形过程的分析

一、开式精密模锻成形过程的分析

开式精密模锻成形过程及锻造力行程曲线,如图 3-5 所示。其成形过程大体可分为三个阶段:

- (1) 锻粗阶段 坯料外圈金属流向法兰部分,内圈金属流向凸台部分。
- (2) 模膛充满阶段 下模膛已经充满,而凸台部分尚未充满,金属开始流入飞边槽。随着桥部金属的变薄,金属流入飞边的阻力增大,迫使金属流向凸台和角部,以完全充满模膛。
- (3) 打靠阶段 金属已完全充满模膛,但上、下模面尚未打靠。此时,多余金属挤入飞边槽,锻造变形力急剧上升。

图 3-6 分别为回转体锻件和长轴类锻件在开式精密模锻时的金属流动模型。以长轴类锻件为例,将锻件沿与分模面垂直的方向作若干个横截面,称为金属流动平面,如图 3-6a 所示。也就是说,在模锻过程中,对于这些地方的金属,可近似地认为只沿这些平面流动,即只产生平面变形。而在这些平面的中心线上的金属流动,则是与模具运动方向平行。把各个流动平面的中心线连接起来,便得到锻件的中性面。中性面内的金属流动系与模具运动方向平行,中性面以外的金属流动则与模具运动方向垂直。长轴类锻件的流动模型为其终锻成形前的锻坯设计提供了依据。

为了保证金属流动充满模膛而不产生锻件缺陷,可将设计好的锻坯,利用软金属(如铅)或粘性蜡泥、塑性泥等进行试锻。根据试锻结果,对锻坯设计进行修改,再用碳钢进行热锻试验。经反复试锻和修改,便可得到满意的结果,从而可设计出合理的制坯工艺和模具。

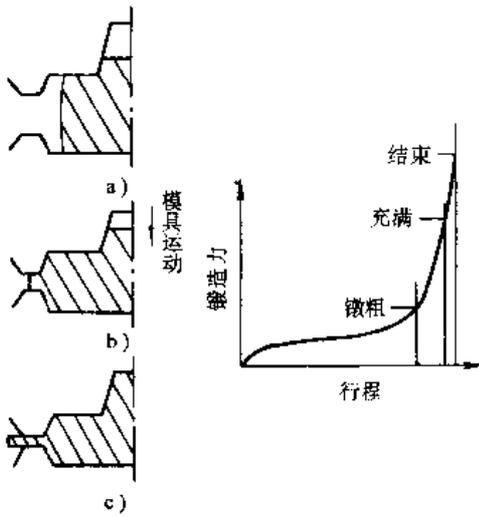


图 3-5 成形过程及锻造力·行程曲线
a) 镦粗 b) 充满 c) 打靠

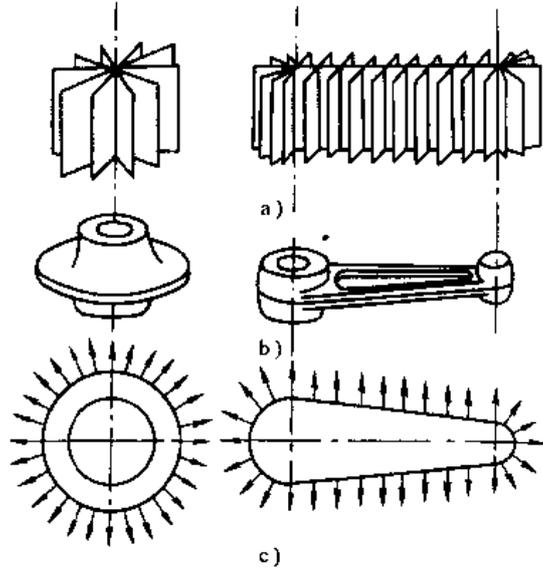


图 3-6 开式模锻时的金属流动模型
a) 流动平面 b) 精锻件形状 c) 流动方向

二、闭式精密模锻成形过程分析

闭式精密模锻成形主要有镦粗、正挤、反挤、侧向挤压和镦粗兼压入等几种变形方式，前三种方式在不少教材及专著中已有详细介绍，这里着重论述后两种方式的成形过程。

1. 镦粗压入式模锻变形过程

以环形件为例，其镦粗压入式闭式模锻过程可以分为三个阶段，如图 3-7 所示。

第一阶段：如图 3-7a 所示，坯料冲孔和镦粗，与开式模锻无甚差别，仅结束时间略长，因为无飞边，坯料体积比开式模锻的小得多，其鼓形与模壁接触较迟。

第二阶段：如图 3-7b 所示，金属流动特性与开式的不同，模壁限制了径向流动，只能向模膛上下底部充填。当金属与底部接触时，第二阶段结束。

第三阶段：如图 3-7c 所示，模膛内各圆角半径处被充满，直到出现纵向飞边为止。

为了了解闭式模锻第二、三阶段金属流动的特点及塑性变形区的形状，林治平教授利用铅试件坐标网格法对如图 3-8 所示七类锻件作了研究。图中 *o-o*、*a-a*、*b-b* 表示金属的分流轴或分流面，阴影区表示刚性区，箭头表示金属流动方向。由图及以上分析可见：

1) 在圆柱体闭式镦粗的第二阶段，变形区分布状况与锻件高径比有关。高径比大于 1 (图 3-8a) 时，上半部和中心区的变形早已结束，相当于刚性区，下半部在上半部作用下继续镦粗，把金属挤入上下角隙，变形区呈盆状。高径比接近于或小于 0.5 (图 3-8b、c) 时，中心部分相当于刚性区，变形区呈空心凹盆状。显然，锻件高径比对变形区的这种影响，是由

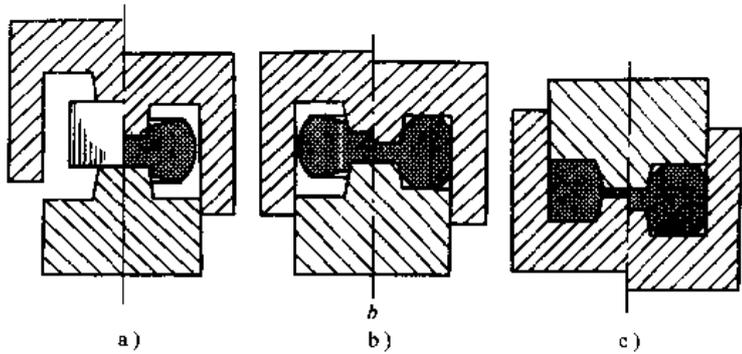


图 3-7 镦粗压入式闭式模锻过程

于毛坯同凹模模壁间的接触摩擦所引起的。当 $H/D > 1$ 时，摩擦的作用有利于上角隙的充满，随着变形的继续进行变形区将逐渐缩小，最后集中到下角隙。当 $H/D \leq 0.5$ 时，摩擦影响很小，上下角隙几乎同时充满，上下变形区均保留到变形结束。当模膛充满后尚有多余金属，或锻件形状复杂需形成纵向飞边方能充满全部角隙时，最后变形区将集中在飞边附近。

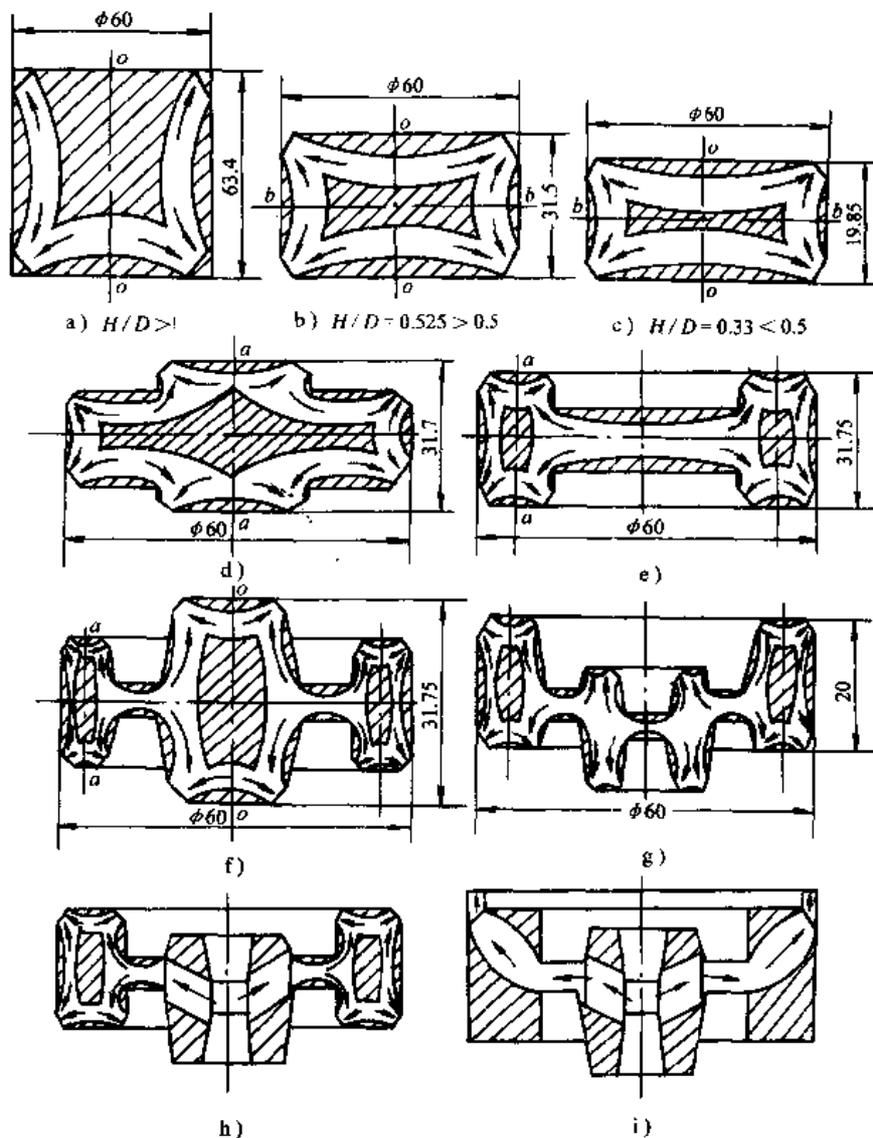


图 3-8 闭式模锻第二、三阶段的变形区模型

2) 所有复杂锻件的截面，均可分解为若干简单矩形单元，其变形区模型相当于各简单矩形截面变形区模型的组合，如图 3-8d~g 所示。所以，只要利用简单矩形截面的变形区模型计算出圆柱体闭式模锻粗和反挤的变形力，就能计算出任意复杂锻件闭式模锻的变形力。

3) 闭式模锻时，在图 3-8e~g 类锻件外轮缘上出现分流面，分流面以外金属挤入外角隙，分流面以内金属挤入内角隙。这样，对于复杂回转体锻件，除了角部变形区外，还存在由薄辐板延伸到外轮缘分流面附近的塑性变形区。如果锻件较复杂，圆角尺寸较小，需要形成纵向飞边才能充满角隙，其变形区模型如图 3-8h 所示。因此，对于复杂闭式模锻件，其变形区

模型可有三类：辐板墩粗和充满角隙（图 3-8g）；充满轮缘角隙，其余同开式模锻（图 3-8h）；多余金属挤入飞边（图 3-8i）。

2. 侧向挤压模锻

侧向挤压模锻也称侧向挤压，当锻件的枝芽部分同本体轴线垂直时则称径向挤压。按照挤压模锻时金属流动的特点，侧向挤压又可分为分流式、汇集式和弯曲式三类。

分流式侧向挤压即毛坯金属在一个冲头作用下同时或先后向几个不同的方向流动。

汇集式侧向挤压即毛坯金属在两个冲头作用下同时或先后向一个或一个以上的方向流动。

弯曲式侧向挤压即毛坯金属通过冲头挤压的方式使其产生弯曲变形。

(1) 侧向挤压时的金属流动 侧向挤压模锻时，无论是哪种方式，其变形过程大体可分为：自由墩粗、侧向挤压、充满模膛角隙和挤出多余金属等四个阶段。自由墩粗、充满模膛角隙和挤出多余金属等三个阶段的变形过程及特征与前述闭式墩粗和正、反挤压模锻中相对应阶段的情况完全相同。这里，着重讨论侧向挤压阶段的金属流动。

图 3-9 为十字轴和 T 形件闭式模锻时坯料金属在模膛的侧向通道中流动的状况。可以看出，当坯料在挤压力 P_I 的作用下流入侧向通道时，其流出的金属首先同侧向通道底部接触，然后旋转偏向顶部，即使是自由流动阶段，也是底部的金属流动比上部的金属流动强烈，在上部从 A 点到 B 点形成凹坑而金属不贴紧上模壁，凹坑的大小取决于 D/d_0 值和侧孔轴线相对于冲头轴线间的夹角。在下部自 E 点向左的金属不贴紧模底，而是形成凸起，其凸起的径向尺寸小于侧孔直径 d_0 。变形金属在侧向通道中的整个自由流动阶段，其轴线不垂直于冲头的运动方向。

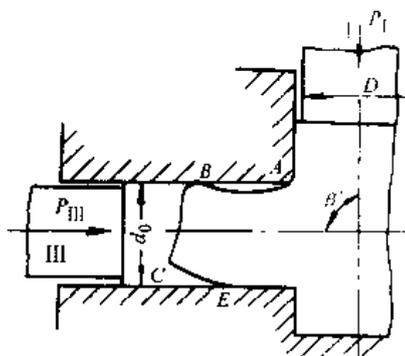


图 3-9 模锻十字轴时侧孔中的金属流动

如果把图 3-9 所示侧向挤压称为单冲头侧向挤压，那末，对于 T 形件常常采用如图 3-11 所示的双冲头对向挤压，此时，即使进入侧向通道中的金属处于自由流动状态，其枝芽的轴向也是垂直于冲头 I、II 的轴线，而不会出现单冲头侧向挤压时金属流动所出现的现象。

(2) 侧向挤压时的滑移线场分析 侧向挤压时的变形过程和特点，通过滑移线场法可对其机理作出进一步的分析。

对于图 3-9 所示的侧向挤压，处于冲头 I 下面的均匀应力状态区沿冲头运动方向移动，当其移到模膛侧向通道的入口处，以与 x 轴成一定角度并指向侧向通道（即 III 通道）型腔底部移动。图 3-10 所示为主、侧通道直径之比 $D/d=1; 1.2; 1.6$ 三种情况下试件子午面上的滑移线场和金属在侧向通道中流动时的速度矢端图。这样运动的结果，导致已流入侧向通道中的金属与靠近冲头 I 的模壁分离，在拐角处形成凹坑（图 3-9）。

当冲头 I、II 同时同速对毛坯施加压力时，两个冲头前面的均匀应力状态区向侧向通道中移动，其方向与 x 轴成相同的夹角，并与 x 轴对称，所构成的合成速度方向与 x 轴平行。图 3-11 所示为主、侧通道直径比 $D/d_0=1; 1.2; 1.6$ 三种情况下试件子午面上的滑移线场和速度矢端图。通过对比可知，两冲头对挤时，坯料金属变形均匀，不会出现凹坑现象。

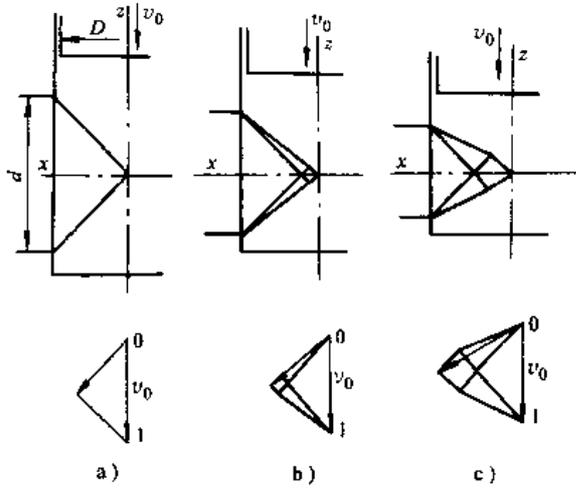


图 3-10 单冲头侧向挤压时子午面上
滑移线场和速度矢端图

a) $\frac{D}{d_0}=1$ b) $\frac{D}{d_0}=1.2$ c) $\frac{D}{d_0}=1.6$

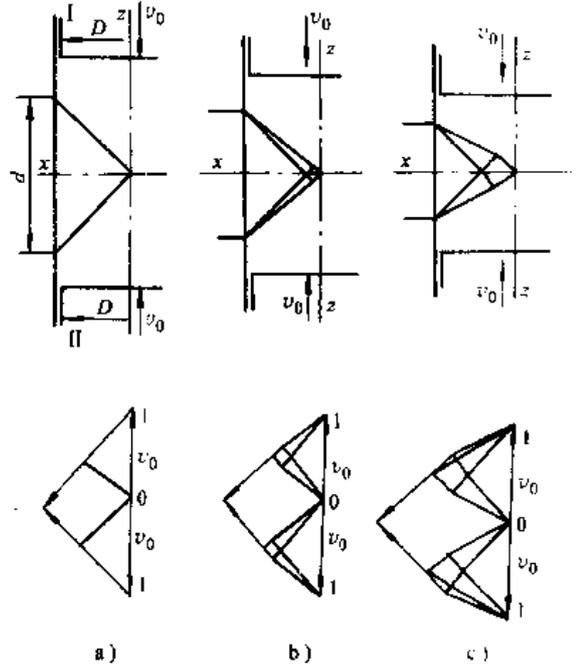


图 3-11 双冲头侧向挤压时子午面上的滑移
线场和速度矢端图 (侧向通道中摩擦为 0)

a) $\frac{D}{d_0}=1$ b) $\frac{D}{d_0}=1.2$ c) $\frac{D}{d_0}=1.6$

第三节 精密模锻变形力的计算

确定精密模锻所需的变形力，是为了合理选择或设计所需的模锻设备，正确设计模具和制订工艺方案。

一、回转体锻件精密模锻变形力的计算

对于回转体锻件精密成形，国内外普遍采用闭式模锻工艺，因此，下面仅介绍闭式模锻变形力的计算。

1. 圆柱体闭式锻粗力的计算

(1) 端部不出现飞边时的单位压力 设模膛下角隙最后充满，则变形区可简化为图 3-12 所示的半径为 ρ 、厚度为 h 的球面与倾斜自由表面围成的球面体。当从变形区内切取一个单元体 (图中阴影部分) 时，则作用于其上的均布应力为 σ_r 、 σ_θ 、 $\sigma_r + d\sigma_\theta$ 及 τ 。将作用于单元体上的力在 θ 方向列平衡微分方程，利用塑性条件和边界条件，积分并整理得闭式锻粗至端部尚未出现飞边时的单位压力的简化表达式：

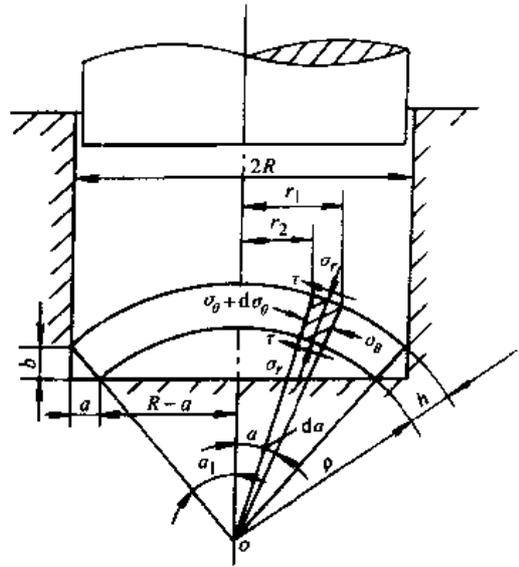


图 3-12 闭式锻粗变形单元体的受力情况

$$p = \sigma_s \left[1 + \frac{\alpha_1 D}{9a} \left(\frac{D}{D-a} - \frac{2\alpha}{D} \right) \right] \quad (3-8)$$

式中 σ_s ——闭式墩粗变形条件下的流动应力；
 α_1 ——变形区自由表面与凹模壁的夹角；
 D ——凹模工作筒直径；
 a ——角部径向未充满值。

(2) 端部出现纵向飞边时的单位压力 对于端部出现纵向飞边的闭式模锻，其变形过程与反挤相同，计算变形力时需要考虑飞边的影响。若在飞边内取一单元体，如图 3-13 所示，则由平衡方程、塑性条件和边界条件求出 z 向和 x 向的正应力：

$$\sigma_z = \frac{4\mu_2\sigma_s}{D-d}(z-\lambda) \quad (3-9)$$

$$\sigma_r = \frac{4\mu_2\sigma_s}{D-d}(z-\lambda) - \sigma_z \quad (3-10)$$

然后可导出端部出现纵向飞边时的单位变形力的简化表达式：

$$p = \sigma_s \left[1.7 + \frac{2.7\mu_2\lambda}{D-d} + \frac{\alpha_1 D}{4.5(D-d)} \right] \quad (3-11)$$

式中 μ_2 ——变形金属与凸模接触面上的摩擦系数；
 λ ——纵向飞边高度；
 D ——凹模直径；
 d ——凸模直径。

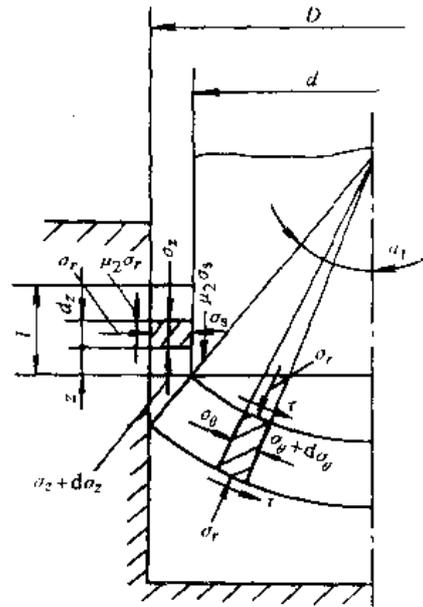


图 3-13 带纵向飞边的闭式模锻受力状况

2. 闭式精密模锻变形力的一般计算公式

1) 端部不出现纵向飞边，上角隙先充满，下角隙后充满，或上下角隙同时充满时，其单位变形力为：

$$p = C_p \sigma_s \left[1 + \frac{\alpha_1 D}{9\alpha_1} \left(\frac{D}{D-a_1} - \frac{2a_1}{D-a_2} \right) + \frac{2(\mu_2 - 0.25)}{R} (H - b_1 - b_2) \right] \quad (3-12)$$

2) 端部出现纵向飞边时，其单位变形力为：

$$p = C_p \sigma_s \left[1.7 + \frac{2.7\mu_2\lambda}{D-d} + \frac{\alpha_1 D}{4.5(D-d)} \right] \quad (3-13)$$

式中 C_p ——锻件形状影响系数。相同变形条件下：对于简单锻件 $C_p=1$ ，对于形状中等复杂程度的锻件 $C_p=1.2$ ，对于形状复杂的锻件 $C_p=1.3\sim 1.4$ ；

σ_s ——变形条件下金属的流动应力；

α_1 ——后充满的下角部（或同时充满的角部）的变形自由表面与凹模壁的倾角， $\alpha_1 = \mu_1(1.234 - 0.206a)$ ，其中 a 为未充满值；

R 、 D ——凹模筒的半径和直径；

a_1 、 a_2 ——锻件下、上角部的径向未充满值，约等于锻件相应处的圆角半径（当上、下角同时充满时，取 $a_2=a_1$ ）；

b_1 、 b_2 ——锻件下、上角部的轴向未充满值，可由 α 和 a 计算；

- H ——锻件高度；
 μ_1 ——变形金属上、下接触面间的摩擦系数；
 μ_2 ——变形金属与凹模侧壁的摩擦系数；
 λ ——端部纵向飞边高度。

3. 闭式锻挤力的计算

图 3-14 为闭式锻挤时的工作状态，所需锻挤力可按下式计算：

$$p = 4.985 \times (1 - 0.001D) D^2 \sigma_b \quad (3-14)$$

式中 D ——锻挤凸模直径；

σ_b ——锻挤终了时金属材料的屈服强度。

二、长轴类锻件精密模锻变形力的计算

对于长轴类锻件的精密成形，目前主要是采用开式模锻工艺，只不过是通过对飞边槽的优化设计，来减少飞边金属的损耗，切除飞边之后，再采取开式或闭式精整工序，进一步减少加工余量和提高锻件的尺寸精度。对于模锻变形力 p 可采用如下公式进行计算。

1. 托特 (Tot) 公式

$$p = W \ln(Y_{fi} C_{fi} + Y_{fr} C_{fr}) \quad (3-15)$$

$$C_{fi} = \left(1 + \frac{b}{W}\right) \left(1 + \frac{b}{h_{fk}}\right)$$

$$C_{fr} = \left(2 + \frac{2b}{W}\right) \left[0.28 + \ln\left(0.25 + 0.25 \frac{W}{h_{fk}}\right)\right]$$

式中 W ——锻件重量(不包括飞边)；

Y_{fi} ——飞边部分的屈服强度；

Y_{fr} ——锻件本体部分的屈服强度；

b ——飞边桥部宽度；

h_{fk} ——飞边桥部高度。

2. 列别利斯基(ребельский)公式

$$p = 8(1 - 0.0287 \sqrt{A})(1.1 + 0.696 \sqrt{A})^2 \left[1 + 0.1 \sqrt{\frac{L}{A}}\right] YA \quad (3-16)$$

式中 A ——包括飞边桥部的锻件水平投影面积；

L ——锻件长度；

Y ——屈服强度。

三、异形件精密模锻变形力的计算

采用可分凹模模锻可以成功地实现异形件的精密成形，而可分凹模模锻时金属是在闭式或半闭式状态下变形的。下面着重介绍以侧向挤压为主要变形方式的闭式模锻变形力的计算。

1. 枝芽类锻件的闭式模锻力

(1) 分流式侧向挤压模锻 对于 T 形接头和十字轴等带枝芽类锻件，采用如图 3-15 所示的闭式模锻是近年来发展起来的一种新工

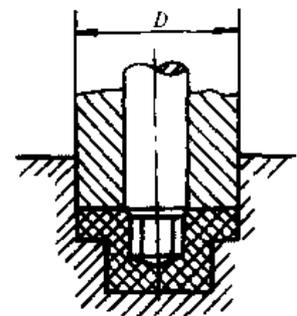


图 3-14 闭式锻挤工作状态图

艺，其变形方式属于分流式侧向挤压。带枝芽类锻件的侧向挤压工艺，其挤压力的理论计算比较困难，因为它既非轴对称问题，又非平面问题。然而，从近似求解的角度出发，可把冲头下面圆柱体部分的金属变形视为具有侧向挤压力的墩粗，并假定其侧面与四个（十字轴）或二个（T形接头）水平轴颈相连；且认为冲头和金属接触面上的摩擦力达到了最大剪切应力，即 $\tau = \frac{\sigma_s}{2}$ ；又将每个侧枝的变形看成沿水平方向的正挤压。这个假设由十字轴金属流动的网格实验可得到验证。基于这种假设，可绘出十字轴挤压最后瞬间的示意图（图 3-15）。

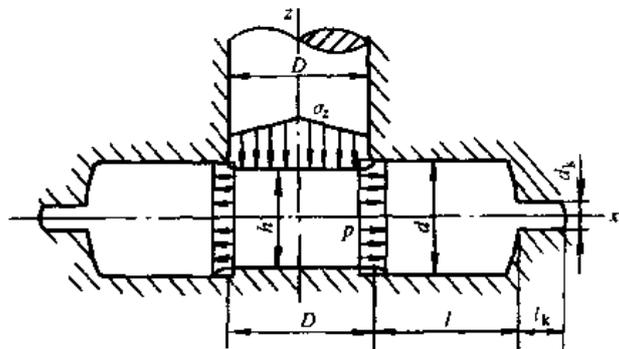


图 3-15 十字轴挤压终了时示意

据此分析，有关文献提出了如下计算公式：

$$p = \sigma_s \left[1 + 2 \left(\ln \frac{d}{d_k} + 2\mu \frac{\lambda_k}{d_k} + \frac{\lambda}{d} \right) + \frac{1}{6} \frac{D}{h} \right] \quad (3-17)$$

也可采用下面的公式计算：

$$p = \sigma_s \left(\frac{D^2}{2\sqrt{3}d^2} + \frac{4d^2}{\sqrt{3}D^2} + 2 \ln \frac{d}{d_k} + 4\mu \frac{\lambda_k}{d_k} + \frac{2\lambda}{d} \right) \quad (3-18)$$

其张模力的计算公式为

$$Q = (F_f - F_c) p_0 + 4d\lambda_k \sigma_s \quad (3-19)$$

式中 F_f ——锻件的水平投影面积；

F_c ——挤压筒的横截面积；

p_0 ——单位张模力，可取 $p_0 = (0.8 \sim 1) p$ 。

由于侧向通道端部有小的排料孔，故计算 p_0 时，其系数可取小值，即取 0.8。

(2) 汇集式侧向挤压模锻 对于汇集式侧向挤压（图 3-16）可采用与分流式侧向挤压类似的分析和假设，其差别仅在于分流式侧向挤压只有一个挤压筒，而汇集式侧向挤压有两个挤压筒，即 I 和 II。

1) 当侧枝通道没有余料孔时单位挤压力的计算。当挤入侧枝通道的金属与通道底面相碰后，其变形情况相当于圆柱体闭式墩粗，所需单位变形力 p' 可按式 (3-18) 计算。而处于冲头 I 或 II 下面圆柱体部分的金属变形可视为具有侧压力 p' 作用的墩粗。作用在冲头 I 或 II 上的挤压力计算公式推导如下：

由圆柱体墩粗平衡微分方程，根据边界条件和塑性条件可得：

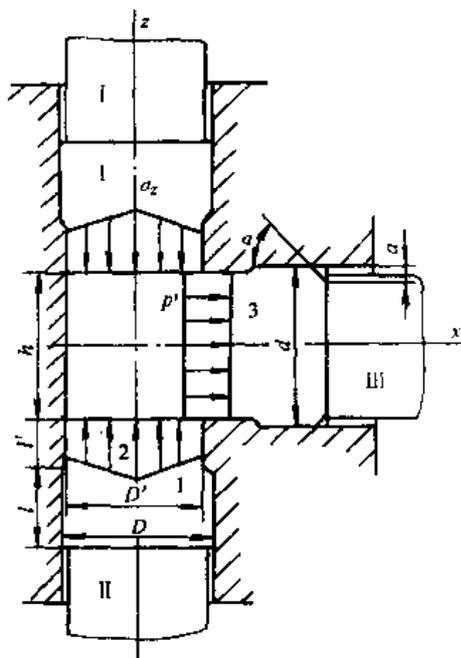


图 3-16 T形接头挤压终了示意

$$\sigma_x = \sigma_s \left\{ \left[2.5 + \frac{\alpha_1 d}{9a} \left(\frac{d}{d-a} - \frac{2a}{d} \right) \right] - \frac{x}{h} \right\}$$

挤压力为:

$$\begin{aligned} P &= \int_0^{\frac{d}{2}} \sigma_x 2\pi r dr \\ &= \int_0^{\frac{D}{2}} \sigma_s \left\{ 2.5 + \frac{\alpha_1 d}{9a} \left(\frac{d}{d-a} - \frac{2a}{d} \right) - \frac{x}{h} \right\} 2\pi r dr \\ &= \frac{\pi D^2}{4} \sigma_s \left[2.5 + \frac{\alpha_1 d}{9a} \left(\frac{d}{d-a} - \frac{2a}{d} \right) - \frac{D}{3h} \right] \end{aligned}$$

单位挤压力为:

$$p = \frac{P}{\frac{\pi}{4} D^2} = \sigma_s \left[2.5 + \frac{\alpha_1 d}{9a} \left(\frac{d}{d-a} - \frac{2a}{d} \right) - \frac{D}{3h} \right] \quad (3-20)$$

若 $d=D$, 且 $h=d=D$, 则其单位挤压力为:

$$\begin{aligned} p &= \sigma_s \left[2.5 + \frac{\alpha_1 D}{9a} \left(\frac{D}{D-a} - \frac{2a}{D} \right) - \frac{1}{3} \right] \\ &= \sigma_s \left[\frac{17}{6} + \frac{\alpha_1 D}{9a} \left(\frac{D}{D-a} - \frac{2a}{D} \right) \right] \end{aligned} \quad (3-21)$$

式中 α_1 ——侧枝角部自由表面与模壁的夹角;

a ——角隙径向未充满值。

2) 当侧枝通道端部开有余料孔 (孔径为 d_k 、长度为 λ_k)，其单位挤压力为:

$$p = \sigma_s \left[1 + 2 \left(\ln \frac{d}{d_k} + 2\mu \frac{\lambda_k}{d_k} + \frac{\lambda}{d} \right) + \frac{1}{6} \frac{D}{d} \right] \quad (3-22)$$

若 $d=D$ ，其单位挤压力为:

$$p = \sigma_s \left[\frac{7}{6} + 2 \left(\ln \frac{d}{d_k} + 2\mu \frac{\lambda_k}{d_k} + \frac{\lambda}{d} \right) \right] \quad (3-23)$$

2. 弯曲类锻件侧向挤压模锻

1) 圆角弯曲锻件侧向挤压变形力的计算有关文献指出，在制造 12 种典型尺寸的分叉斜角 α (图 3-17) 为 20° 、 40° 、 60° 和相对变形程度 ϵ 为 59%、77% 和 90% 3M437BV 等难变形钢和合金的喷嘴锻件时，研究了弯曲锻件侧向闭式挤模锻力。

分析表明，弯曲件侧向挤压模锻在一般情况下可分成四个阶段：I 为毛坯在挤压筒中镦粗，充满锥形部分，开始将金属挤入凹模口部；II 为金属被稳定地挤入凹模模腔的倾斜段；III 为金属被稳定地挤入凹模模腔的垂直段；IV 为结束阶段。

为了分析确定侧向挤压模锻变形力 P ，曾研究了金属在 I ~ IV 段的流动条件 (图 3-17)，利用计算方法联解无限小单元体的微分平衡方程式与相应的塑性条件，即可求得侧向挤压弯曲

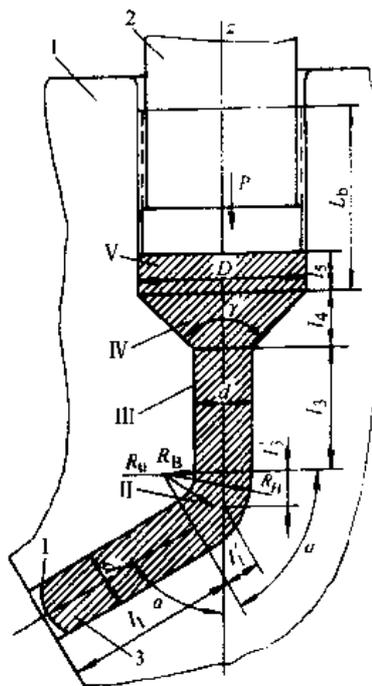


图 3-17 弯曲件侧向挤压示意

件所需变形力的计算公式

$$P = 2.82\sigma_s D \left\{ 0.44 + \ln \frac{D}{d} - 0.333 + \frac{1.235}{d} \mu (\lambda_1 \cos \alpha - \lambda_3) + \frac{0.154}{d} \left[\frac{R_H}{R_1} (\sin^2 \alpha + 4 \sin^4 \alpha) - 2 \sin^2 \alpha + 0.14 R_1 \sin \alpha \right] \right\} \cdot e^{\frac{2\mu\lambda_1}{D}} \quad (3-24)$$

式中 μ ——接触面上的摩擦系数；

σ_s ——变形金属在挤压模锻终了时的流动应力。

2) 直角弯曲锻件侧向挤压变形力的计算。图 3-18 为直角弯曲锻件侧向挤压时的滑移线场和速度矢端图。利用滑移场求得侧向挤压成形力的计算公式为：

$$P = K \left\{ 1.78 + 3\varphi - \frac{\epsilon}{2} - 0.7 \frac{d}{D} \left[\left(\varphi - \frac{\pi - \epsilon}{2} \right) \cos \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right) + \sin \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right) \right] + \frac{2\mu F}{D} \right\} \quad (3-25)$$

式中 K ——变形金属的塑性常数；

φ, ϵ ——滑移线网中心点 a 和 b 的夹角；

F ——同垂直模腔壁接触的无变形金属移动时的接触面积；

μ ——摩擦系数。

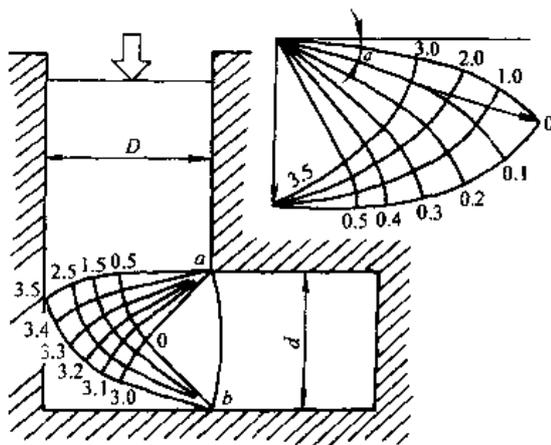


图 3-18 直角弯曲锻件侧向挤压时的滑移线场和速度矢端图

第四节 影响精密模锻件尺寸精度的主要因素

一、毛坯体积的波动

在开式精密模锻中，因为模腔周围设有飞边槽，正常情况下，多余金属全部挤入飞边槽，毛坯体积波动并不影响锻件的尺寸。

在闭式精密模锻中，毛坯体积的波动直接引起锻件尺寸的变化。当不产生飞边或飞边体积不大时，毛坯体积偏差增大将使锻件尺寸偏差增大。

对于图 3-19 所示的轴对称锻件，假设模膛水平尺寸不变，那末，毛坯体积的波动仅引起锻件高度尺寸 H_1 变化。由体积不变条件有：

$$\Delta H_1 = \frac{\Delta V}{V} H_1 \quad (3-26)$$

式中 V 、 ΔV ——分别为毛坯体积及其允许的偏差。若不形成飞边，即等于锻件体积及其允许的偏差。

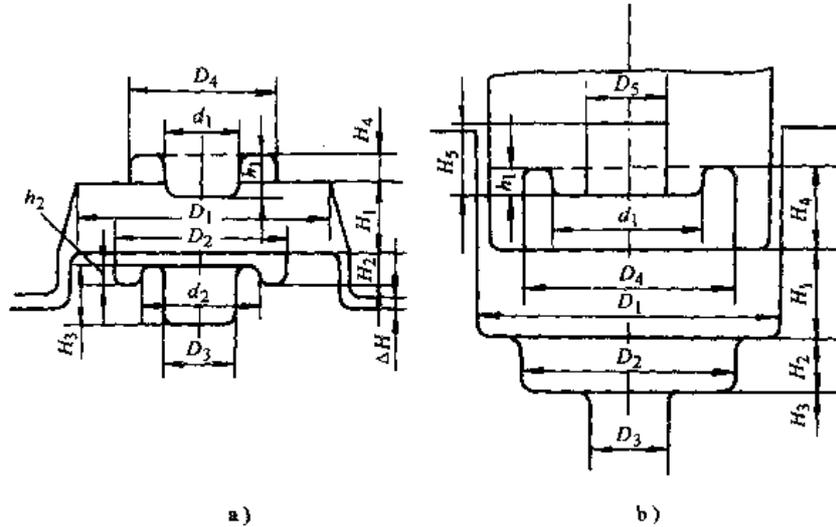


图 3-19 闭式模锻轴对称锻件的模膛

a) 锤上模锻 b) 机械压力机上模锻

当模膛水平尺寸也有变化，即锻件水平尺寸有偏差时，毛坯体积与锻件尺寸偏差有如下关系：

对于矩形截面的锻件

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H_1}{H_1} + \frac{\Delta A_1}{A_1} + \frac{\Delta B_1}{B_1} \quad (3-27)$$

对于圆柱形锻件

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H_1}{H_1} + 2 \frac{\Delta D_1}{D_1} \quad (3-28)$$

二、模膛的尺寸精度和磨损

模膛的尺寸精度和在模锻过程中的磨损对锻件尺寸精度有直接影响，在同一模膛的不同位置，由于变形金属的流动情况和所受到的压力不同，其磨损程度也不相同。

对于开式精密模锻，在大量生产中可采用如下模具磨损公差：模具的外长度、外宽度和外径尺寸的磨损公差是用外长度、外宽度和外径尺寸乘以表 3-2 中相应的材料系数而得。这个公差加在锻件外长度、外宽度和外径尺寸的正偏差上。

模具的内长度、内宽度和内径尺寸的磨损公差按同样方法计算，但这个公差加在内长度、内宽度和孔径尺寸的负偏差上。

模具内、外尺寸上单面公差均为计算总值的一半。模具磨损公差不能应用于中心线到中心线间的距离尺寸。

表 3-2 计算模具磨损公差的材料系数

锻件材料	系数	锻件材料	系数
碳钢	0.004	难熔合金	0.012
低合金钢	0.005	锻铝合金	0.004
高铬马氏体和低碳高铬铁素体不锈钢耐热钢 (如 1Cr13、2Cr13)	0.006	超硬铝合金	0.007
镍铬奥氏体不锈钢 (如 1Cr18Ni9Ti)	0.007	镁合金	0.005
耐热合金	0.008	黄铜	0.002
钛合金	0.009	铜	0.002

如果采用少无氧化加热，毛坯通常是没有或只有少量氧化皮。在这种条件下，模具的磨损量比模锻有氧化皮的毛坯时可减少约 16%。当然采用性能更好的模具材料以及对模具进行渗氮等表面处理，可以较显著地提高模具的耐磨性能。同时，模锻时对模具进行良好的润滑和冷却，也可减少模具的磨损。由此，应根据上述多种情况的综合来确定模具的磨损公差。这些计算和考虑均可应用于闭式模锻时模具磨损公差的设计。

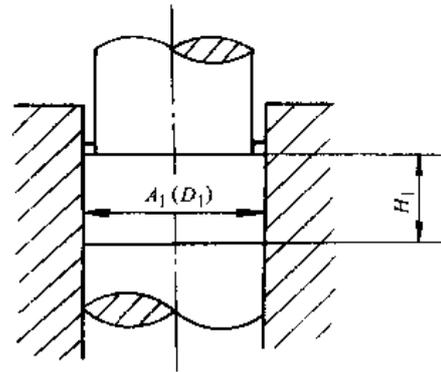


图 3-20 闭式模锻件的尺寸

在机械压力机上进行闭式精密模锻时，模膛磨损对锻件尺寸的影响可用图 3-20 说明。模壁的磨损将引起锻件水平尺寸 A_1 的增大。若毛坯体积不变，且不产生飞边，或所产生的飞边体积不变，此时为了获得充满良好的锻件，应该减小锻件高度尺寸 H_1 ，即调整滑块以改变模具的封闭高度来实现。在这种情况下，锻件高度尺寸的公差 ΔH_1 就不能由模具垂直方向的磨损来决定，而应该是锻件水平尺寸磨损公差的函数。在新模具中，锻件水平方向尺寸取最小值，而高度方向尺寸取最大值；当模具磨损达最大值时，锻件水平尺寸达最大值，而高度方向尺寸达最小值。按照体积不变条件，锻件高度尺寸公差由水平尺寸的公差决定，其关系为：

矩形截面锻件

$$-\Delta H_1 = \Delta A_1 \frac{H_1}{A_1} + \Delta B_1 \frac{H_1}{B_1} \quad (3-29)$$

圆柱形锻件

$$-\Delta H_1 = 2\Delta D_1 \frac{H_1}{D_1} \quad (3-30)$$

- 式中 $A_1、B_1$ ——锻件长边和短边尺寸；
- $\Delta A_1、\Delta B_1$ ——锻件长边和短边尺寸的偏差；
- $H_1、\Delta H_1$ ——锻件高度尺寸及其偏差；
- $D_1、\Delta D_1$ ——锻件直径及其偏差。

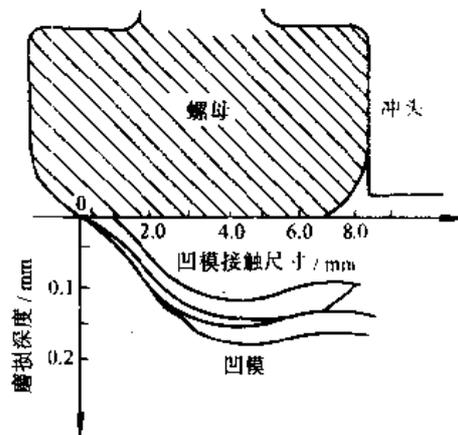


图 3-21 所示为在冷镦机上闭式模锻 3 万个六角螺母后模膛的磨损深度。由磨损特征可以看出，模膛入口至中部模壁的磨损程度最大，而从中部至模底的磨损程度由

图 3-21 在冷镦机上闭式模锻 3 万个六角螺母后的磨损深度

最小减小至 0。磨损深度分布曲线的形状与模膛侧向压力分布曲线的形状极为相似，由此可得出模壁磨损深度同其所承受的压力间的关系。

三、模具温度和锻件温度的波动

热模锻时即使采取良好的冷却措施，模具温度一般也在 300°C 以上。室温下的冷态体积成形，由于金属变形发热导致模具升温，尤其在挤压成形时模具温度也常常升至 100°C 以上甚至到 200°C。总之在模锻过程中模具的温度是波动的。而模具温度的波动会引起模膛容积的变化，其变化值可按下式计算：

$$\frac{\Delta V_1}{V_0} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (3-31)$$

$$\Delta V_1 = V_t - V_0;$$

式中 ΔV_1 ——模膛容积的变化值；

V_0 ——预定温度下的模膛容积；

V_t ——锻造时实测温度下的模膛容积；

$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$ ——三个互相垂直方向上模膛尺寸相对变化量。

如果模具温度分布均匀，当模具实测温度与预定温度相差 Δt 时，则

$$\frac{\Delta V_1}{V_0} = 3\epsilon = 3\alpha\Delta t \quad (3-32)$$

式中 α ——模具材料的线膨胀系数。

对于淬硬钢，可取 $\alpha \approx 0.000012$ ，则有

$$\frac{\Delta V_1}{V_0} = 0.000036\Delta t \quad (3-33)$$

由模具温度和锻件温度波动引起的锻件尺寸变化，可按下式计算：

$$\Delta A = A_1\alpha_1\Delta t_1 + A_2\alpha_2\Delta t_2 \quad (3-34)$$

式中 ΔA ——A 方向锻件尺寸对公称尺寸的波动值；

A_1 ——在预定温度下 A 方向的锻件尺寸；

Δt_1 ——模锻结束时锻件温度对预定温度的波动值；

A_2 ——在预定温度下 A 方向的模膛尺寸；

Δt_2 ——模锻结束时模具温度对预定温度的波动值；

α_1 、 α_2 ——锻件材料和模具材料的线膨胀系数。

计算 ΔA 时，应该注意，提高终锻时的锻件温度将使锻件尺寸减小，而提高模具温度则使锻件尺寸增大。

此外，模具的弹性变形对锻件尺寸精度也有直接影响，润滑剂不均匀和润滑剂残渣会使锻件个别尺寸减小，锻件冷却时也可能变形，必须根据具体情况进行计算。

曾经有过一种看法，即对于直径尺寸为 4 级精度的棒料，只有完全按毛坯长度的公称尺寸下料，确保毛坯体积波动值不大于 1%，才能作为闭式精密模锻的毛坯。实验表明，在大批量生产中用剪切机械或通用机械压力机上用模具下料，长度的最小波动量为 $\pm 0.5\text{mm}$ ，这是不能满足体积波动值不大于 1% 的要求的，即使在锯床上也达不到这么高的精度。然而，在热

模锻中, 如果各种波动因素都处于极限状态, 而初始毛坯有精确的体积, 这时, 模膛和变形金属间的体积波动达 5.4%。这表明, 在闭式模锻中, 单纯追求精确的毛坯体积并不能达到理想的效果, 必须从下料、加热、模具的耐磨性等多方面采取措施, 才能获得良好的效果。尤其在模膛中适当的部位设置余料分流腔, 即采用半闭式模锻, 可大大降低对上述各种因素的严格限制。

四、零件结构的工艺性

对于闭式精密模锻件而言, 由于毛坯在封闭模膛中经塑性变形而获得, 故零件的结构即几何形状也是影响锻件尺寸精度的因素之一。这就要求设计者在可能的范围内应考虑其模锻变形特点, 设计出适合于闭式精密模锻工艺的锻件形状。而在制订闭式精密模锻工艺方案时, 应根据变形过程中金属的流动特点, 考虑零件结构对锻件尺寸精度的影响, 采取相应的技术措施。

以汽车传动轴万向节的闭式挤压模锻为例, 该锻件的耳部即叉形端部若完全按零件图来锻造, 即使内侧面平行地预留 0.5~1mm 的余量, 待锻件冷却后, 叉形口部的尺寸也会小于根部尺寸, 而将根部至耳朵顶端内侧相连接成自然的斜度后, 所得锻件就不会出现叉形口部尺寸比根部尺寸小的现象, 而将口部尺寸由零件的 60mm 减小至锻件的 57mm, 并自上而下地形成斜度, 所得锻件的工艺性能更稳定。

五、锻件高度尺寸的变化同各种影响因素的关系

如果已知毛坯尺寸的偏差, 那末毛坯体积的最大变化率为:

$$\lambda = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\min}} = \frac{2}{d_{\min}} \left\{ \frac{\Delta L}{m} + \Delta_1 + \Delta_2 \right\} \quad (3-35)$$

式中 d_{\min} ——毛坯最小直径;

ΔL ——毛坯长度偏差。

按轧材下料的圆柱形毛坯考虑, 应有:

$$\Delta H = \frac{2d_b^2}{D^2} [\Delta L + m(\Delta_1 + \Delta_2)] \quad (3-36)$$

锻件高度尺寸的变化值 ΔH 与模膛磨损、温度波动等各影响因素间的关系为:

$$\Delta H = \frac{4\Delta V}{\pi D^2} \quad (3-37)$$

式中 ΔV ——毛坯体积的绝对变化值;

D ——锻件或模膛最大直径;

m ——毛坯的高度与直径之比;

Δ_1 、 Δ_2 ——毛坯直径的正、负偏差绝对值。

第五节 闭式精密模锻工艺的制订

一、锻件的工艺性分析

锻件的工艺性分析, 主要考虑锻件的用料、几何形状、尺寸精度和表面质量、生产批量及设备条件等, 下面分别简要说明。

(1) 锻件材料 凡是采用开式精密模锻方法能锻造的任何合金材料, 都可以进行闭式精

密模锻，一些塑性较差的材料采用闭式精密模锻更为有利。

一般模锻用铝合金、镁合金等轻金属和有色合金，因为模锻温度低，不易产生氧化，模具磨损小且锻件表面粗糙度低等，故适宜于采用闭式精密模锻。

钢质锻件的闭式模锻比轻合金和有色金属困难。因为在低温下钢的变形抗力大，对模具的强度和耐磨性要求较高。因此，通常采用热态闭式精密模锻，但要求模具有较高的红硬性和抗热疲劳性能等。

(2) 锻件形状 如齿轮坯、轴承、突缘等旋转体锻件最适合于整体凹模闭式精密模锻。形状复杂的锻件，只要模锻时能从闭式凹模模膛中取出，就可采用整体凹模闭式精密模锻，若不能采用整体凹模闭式精密模锻，可采用可分凹模闭式精密模锻。所有旋转体锻件和部分形状复杂的锻件还可进行闭式精密模锻。从几何形状的角度考虑，能进行闭式精密模锻的锻件已列于表 2-1 中。

(3) 锻件尺寸精度和表面质量 在闭式精密模锻的工艺分析和模具设计中，应考虑上述影响锻件精度的诸因素，进行具体分析计算，以确定锻件的尺寸精度。但是，由于影响因素比较复杂，使得理论上不易准确地计算。实际上，如能在生产中严格控制各因素，则锻件的尺寸精度约比模膛精度低 2 级。就精密模锻而言，目前，温锻件的尺寸精度可达 4 级，热锻件可达 5 级左右。表面粗糙度则取决于毛坯加热时的氧化程度、模膛的表面粗糙度、模锻时的冷却和润滑以及锻件的冷却条件等。通常，表面粗糙度为 $R_a 12.5 \sim 6.3 \mu\text{m}$ 。

二、闭式精密模锻工艺过程的制订

制订闭式精密模锻工艺过程的主要内容如下：

- 1) 根据产品零件图绘制锻件图；
- 2) 确定模锻工序和辅助工序，决定中间毛坯的形状和尺寸；
- 3) 确定加热方法和加热规范；
- 4) 确定清除毛坯表面氧化皮或脱碳层的方法；
- 5) 确定毛坯尺寸、重量及其允许的公差，选择下料方法；
- 6) 选择设备；
- 7) 确定毛坯和模具润滑、冷却方法；
- 8) 确定锻件冷却方法和冷却规范；
- 9) 确定锻件热处理方法。

下面将分别叙述锻件图的制订、模锻工序、中间毛坯的形状及尺寸的确定等问题。

三、锻件图的制订

1. 确定分模面

确定闭式精密模锻件分模面的原则，与开式精密模锻相同，应考虑模膛易于充满、锻件能从模膛中取出和便于模具加工等。在闭式精密模锻中，毛坯金属在凸凹模构成的封闭模膛中变形。锻件形状越复杂，金属流动越困难，因此，应尽可能造成以锻造或挤压或两者复合的方式成形。对于整体凹模闭式精密模锻，分模面应选择在锻件与冲头（凸模）接触的端面上；对于复杂锻件的可分凹模模锻，其可分凹模分模面的选择与开式模锻完全相同。根据锻件的形状特点，分模面有三种基本形式，即水平分模、垂直分模和混合式分模（图 3-22）。对于一些中空或多孔零件，可采用多向闭式模锻，其凹模的分块和冲头的个数常在两块和一个以上，即有多个分模面。

分模面的位置与模锻方法直接有关，而且它决定着锻件内部金属纤维的流线方向。金属纤维流线方向对锻件性能有较大影响。合理的锻件设计应使最大载荷方向与流线方向一致。若锻件的主要工作应力是多向的，则应设法造成与其相适应的多向流线。为此，必须将锻件材料的各向异性（即纵向、横向和宽度方向的性能）与零件外形联系起来，选择恰当的分模面，以保证锻件内部的金属纤维方向与主要工作应力方向一致。

2. 机械加工余量和公差

即使采用可分凹模模锻，锻件上总会有些不便模锻成形的部分（如小孔和某些凹槽等）。凡不便模锻成形的部分，可以加上敷料，以简化锻件的形状。锻件上凡是尺寸精度和表面质量达不到产品零件图要求的地方，锻后需进行机械加工，这些地方应根据加工方法的要求预留加工余量。其余量和公差的大小根据锻件重量、加工精度要求和形状复杂系数 [参考 JB3834—85 (精密级)] 确定。

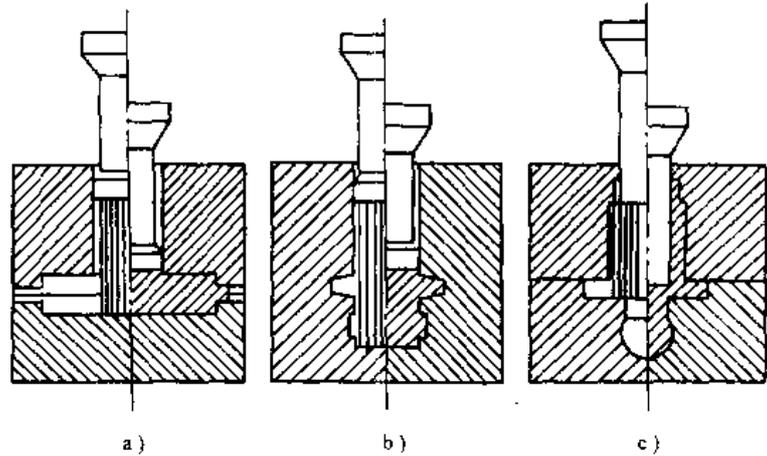


图 3-22 可分凹模的基本型式

a) 分平分模 b) 垂直分模 c) 混合分模

3. 模锻斜度

当模具中没有顶出装置时，锻件应给出模锻斜度，以保证顺利脱模。此时精度模锻与普通模锻一样，若锻件材料为铝、镁合金时，外模锻斜度分别为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 和 $1^\circ \sim 3^\circ$ ，内模锻斜度分别为 $5^\circ \sim 7^\circ$ 和 $3^\circ \sim 5^\circ$ ；若锻件材料为钢、钛、耐热合金时，外模锻斜度分别为 $5^\circ \sim 7^\circ$ 和 $3^\circ \sim 5^\circ$ ，内模锻斜度分别为 7° 、 10° 、 12° 和 5° 、 7° 、 9° 。模锻斜度公差值为 $\pm 30'$ 或 $\pm 1^\circ$ 。

模具中设有顶出装置时，可以不设模锻斜度或只设很小的模锻斜度，如 $30'$ 或 1° 。

4. 圆角半径

锻件的圆角半径直接影响着模锻时的金属流动、模膛充满、模锻力、模具磨损、切削加工余量和锻件转角处的流线切断等。

闭式精密模锻件内外圆角半径的确定与开式精密模锻件的相同。其外圆角半径和内圆角半径分别为

$$r = \text{余量} + a$$

$$R = (2 \sim 3)r$$

式中 a ——零件上相应处的圆角半径或倒角。

表 3-3 和表 3-4 为有关文献建议的允许最小圆角半径。

四、模锻工序及锻坯的设计

1. 对于一般闭式精密模锻由变形程度确定模锻工序

以温挤或热挤压变形的闭式精密模锻为例，最大变形程度取决于毛坯的塑性和模具所能承受的压力。同时，为了获得具有良好力学性能的挤压件，保证零件有合适的晶粒组织，变形程度应大于临界变形程度，通常就是大于最小变形程度。

表 3-3 闭式模锻件的最小圆角半径

(mm)

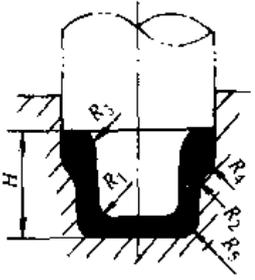
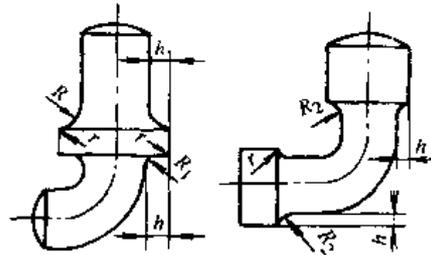
	锻件高度 H	正常级模锻件		较高级模锻件	
		R_1 和 R_2	R_3 、 R_4 和 R_5	R_1 和 R_2	R_3 、 R_4 和 R_5
	5 以下	0.5~0.8	0.4~0.8	0.4~0.8	0.3~0.5
	5~10	1.0~1.5	0.8~1.0	0.8~1.0	0.5~0.8
	10~15	1.5~2.5	1.0~2.0	1.0~2.0	0.8~1.0
	15~25	2.5~3.0	2.0~2.5	2.0~2.5	1.5~2.0
	25~40	3.0~4.0	2.5~3.0	2.5~3.0	2.0~2.5
	40~80	4.0~5.0	3.0~4.0	3.0~4.0	2.5~3.0

表 3-4 锻件难充满部位的最小圆角半径

(mm)



h	R	R_1	R_2	r
3 以下	5	2.5	1.5	1.0
3~5	8	4	2.5	1.0
5~10	10	5	4	1.5
10~15	12	8	5	1.5

一般用断面缩减率表示挤压变形程度，即

$$\epsilon_F = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \quad (3-38)$$

式中 F_0 —— 毛坯截面积；

F_1 —— 挤出件截面积。

枝芽类零件闭式精密模锻（以挤压方式成形）时其变形程度可用成形系数的倒数表示，即

$$\epsilon_F = \frac{1}{\lambda} = \frac{\Sigma F_b}{F_0} \quad (3-39)$$

式中 ΣF_b —— 锻件各枝芽或叉形部分横截面面积之和；

F_0 —— 原毛坯横截面积。

对于碳钢和合金结构钢，热挤压的最大变形程度可达 90% 以上。临界变形程度约为 20% 左右，所以最小挤压变形程度一般应大于 20%。

温度范围低于 700~800°C 的中温挤压，考虑到模具寿命，各种钢的变形程度，建议采用：

1Cr18Ni9Ti、W9Cr4V2、Cr23Ni18 等钢， $\epsilon_F \leq 60\%$ ；

1Cr13、GCr15、T8、T12、30CrMnSi 等钢， $\epsilon_F \leq 65\% \sim 70\%$ ；

35、45、40Cr、40CrNi、45Cr、50 等钢， $\epsilon_F \leq 70\% \sim 75\%$ ；

10、15、20、20Cr、20Mn 等钢， $\epsilon_F \leq 80\% \sim 85\%$ 。

挤压模锻时，挤压次数和工序间尺寸是根据允许变形的挤压变形程度来确定。

2. 一般开式精密模锻锻坯设计的经验数据

(1) 对于具有腹板和肋条形状的铝合金、钛合金锻坯的经验数据 表 3-5 列出这种锻坯的经验数据, 可供设计锻坯时参考。

表 3-5 具有腹板和肋条形状的铝合金、钛合金锻坯的经验数据

精锻件尺寸/mm	锻 坯 尺 寸 /mm	
	铝 合 金	钛 合 金
腹板厚度 t_P	$t_P \approx (1 \sim 1.5)t_F$	$t_P \approx (1.5 \sim 2.2)t_F$
内圆角半径 R_{PF}	$R_{PF} \approx (1.2 \sim 2)R_{FF}$	$R_{PF} \approx (2 \sim 3)R_{FF}$
外圆角半径 R_{PC}	$R_{PC} \approx (1.2 \sim 2)R_{FC}$	$R_{PC} \approx 2R_{FC}$
拔模斜度 α_P	$\alpha_P \approx \alpha_F \quad \alpha_P = 2^\circ \sim 5^\circ$	$\alpha_P \approx \alpha_F \quad \alpha_P = 2^\circ \sim 5^\circ$
凸缘宽度 W_P	$W_P \approx W_F \sim 0.8$	$W_P \approx W_F - (1.6 \sim 1.4)$

注: 下标中 F 表示精锻件; P 表示锻坯。

锻坯的拔模斜度, 一般等于锻件的拔模斜度。但如果终锻模膛很深时, 锻坯拔模斜度可大于锻件拔模斜度。当腹板面积较小而其相邻的肋条高度很大时, 则腹板的厚度应适当增大。

(2) 设计碳钢和低合金钢锻坯的经验数据 图 3-23a 所示为锻坯。图 3-23b 所示为锻件。

$$R_P \approx R_F + C \tag{3-40}$$

C 值可按表 3-6 选取。

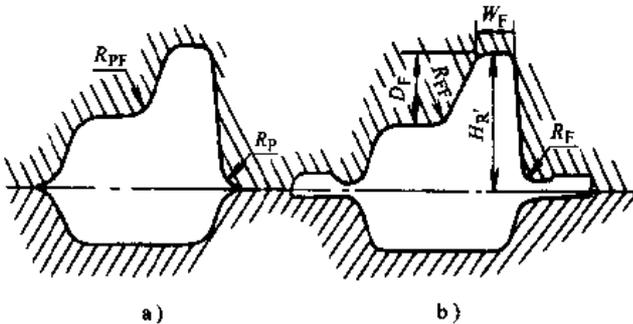


图 3-23 碳钢或低合金钢锤锻件的锻坯和终锻件横截面形状

表 3-6 C 值的选取 (mm)

模膛深度	C 值
<10	0.08
10~25	0.12
25~50	0.16
>50	0.2

R_P 也可按下式计算:

$$\frac{H_R}{6} < R_P < \frac{H_R}{4}$$

R_{PF} 一般应大于 R_{FF} 。当 $D_F > W_F$ 时, 可取

$$R_{PF} = 1.2R_{FF} + 3.175 \text{ (mm)} \tag{3-41}$$

对于工字形截面的锻件, 如图 3-24 所示, 锻坯有两种设计参数。

1) 当 $D_F < 2W_F$ 时, 可取

$$B_P = B_F - (2.03 \sim 10.16) \text{ (mm)} \tag{3-42}$$

原始毛坯高度 H_P 是根据流动平面内锻坯横截面积应等于锻件横截面积与飞边面积之和来决定 (飞边重量约占锻件总重量的 5%~15%)。

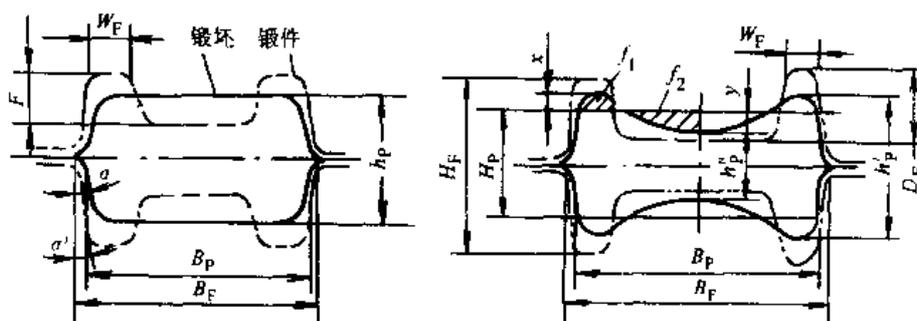


图 3-24 工字形横截面的锻坯形状

2) 当 $D_F > 2W_F$ 时, 可取

$$B_P = B_F - (1.02 - 2.03)(\text{mm}) \quad (3-43)$$

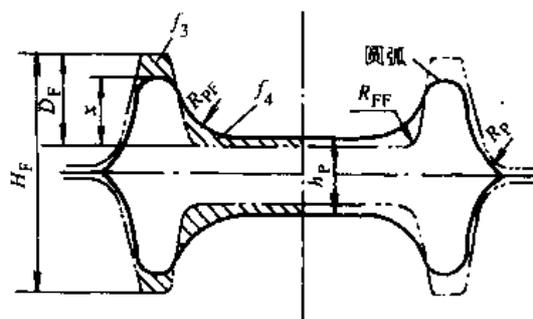
$$x = 0.25(H_F - H_P)$$

式中 H_P ——原始毛坯高度。

Y 可按面积 $f_1 = f_2$ 算出, 用大半径圆弧将腹板和肋条连接。

当两肋条之间的距离很大时, 如图 3-25 所示, 可取

$$x = (0.6 \sim 0.8)D_F \quad (3-44)$$

图 3-25 横向距较大的工字形
截面锻坯尺寸的确定

R_P 、 R_{FF} 则分别由式(3-40)、式(3-41)给出。

h_P 是根据面积 f_3 加飞边面积应等于面积 f_4 求出。

上述工字形锻坯的设计方法, 也可应用于其他类似形状的锻件毛坯。

第六节 精密模锻的辅助工序

一、毛坯和锻件的清理

为了减少变形金属在模膛中流动的阻力, 要求毛坯表面光滑。当采用少无氧化加热毛坯时, 加热前的毛坯不应带有氧化皮。因此, 清理毛坯和锻件表面的氧化皮是很重要的。

1. 毛坯的清理

清除毛坯表面氧化皮的方法, 常用的有酸洗、干法滚筒清理、车削或无心磨削等。

干法滚筒清理, 是在转动的滚筒中 (一般滚筒直径为 500~600mm, 转速为 30~50r/min),

利用毛坯的互相碰撞和锯木屑等与毛坯的摩擦作用,使氧化皮脱落。通常,毛坯与锯木屑装入量的体积比为4:1~6:1,总装载量约占滚筒容积的3/4。滚筒清理成本低:能全部清除表面的氧化皮,毛坯的棱角被磨钝,有利于锻模。

如需同时清除毛坯表面的氧化皮和脱碳层,则需采用车削或无心磨削剥去毛坯表皮。但车削和磨削成本较高,只有当少无氧化加热能保证锻件的脱碳深度要求和锻件主要部分不必再经切削加工时,才采用这两种清理方法。

对于一般闭式模锻件,也可采用普通加热方法加热毛坯,然后把高温毛坯浸入冷水中,使氧化皮爆裂而脱落;也可选用预锻工序,将加热好的毛坯,通过预锻使氧化皮脱落,再进入模锻工序;也可用滚动的钢丝刷子或刮板清理毛坯表面的氧化皮。

2. 锻件的清理

闭式模锻件的清理包括两项内容:一是切掉飞边;二是清理氧化皮。闭式模锻件,往往在分模面上带有一定宽度的薄飞边,这对后续切削加工十分不利,必须采用类似于板料冲裁模的切边模切掉。清除锻件氧化皮的方法,一般采用酸洗、干法滚筒清理、湿法滚筒清理、喷砂或喷丸等。

干法滚筒清理会引起锻件变形,特别是细长和薄壁件容易变形和碰伤。干法清理后的锻件,一般需进行校正。

湿法滚筒清理是在滚筒内用液体和磨料组成的研磨剂与锻件一起滚动而清理锻件表面的氧化皮。湿法清理的锻件表面非常光洁,相当于研磨,而且成本不高。与干法滚筒清理相似,清理时锻件会发生变形和尖角被磨钝。

采用喷砂和喷丸清理,可避免锻件变形,还能提高锻件表面的硬度,一般在0.3mm的深度内硬度可提高30%~40%。

对于较重要的锻件,要用酸洗清理。酸洗的优点是不会使锻件变形,并能显露锻件表面裂纹。但酸洗废液是有害物质,会造成环境污染,所以,必须对酸洗废液进行净化处理,以保护环境。

各种常用清理方法的比较和应用范围见表3-7。

表 3-7 毛坯和锻件氧化皮的清理方法

方法名称	优点	缺点	应用范围
酸洗	大量的;保持毛坯或锻件原有尺寸和形状;可发现表面缺陷	劳动条件不好;废液会污染环境	毛料和锻件;不受锻件形状和重量的限制
干法滚筒清理	大量的;成本低	毛坯或锻件的棱角磨钝;锻件可能变形	主要用于毛坯的清理,亦可用于锻件的清理。毛坯重量一般小于6kg
湿法滚筒清理	大量的;表面粗糙度相当于研磨;成本不高	锻件棱角磨钝(相当于 $r \leq 1.5\text{mm}$),锻件可能发生变形	用于锻件的清理。若零件尺寸精度不高于7级,可作锻件最后加工用;锻件重量一般小于6kg
喷砂、喷丸	大量的;保持毛坯或锻件原有尺寸	成本较高	主要用于锻件的清理,锻件重量不限

(续)

方法名称	优点	缺点	应用范围
车削	能同时除去氧化皮和表面脱碳层	生产率低;材料利用率低;成本较高	用于直径较大的毛坯,要求除去脱碳层的表面清理
无心磨削	能同时除去氧化皮和表面脱碳层	成本高	用于较小直径的毛坯,要求除去脱碳层的表面清理
冷水浸、喷粗	成本低	清除氧化皮不十分完全	用于加热后毛坯氧化皮的清理

二、锻件的冷却和防氧化

目前的精密模锻,尤其是闭式精密模锻件,无论是中小型的还是大型的,多为一次模锻成形,模锻结束后锻件温度往往还在 1000°C 左右,甚至更高。所以,锻件的冷却与普通模锻件的不同之处,主要是防止锻件在冷却过程中发生氧化。因此,应在保护介质中冷却。通常采用如下三种冷却方法:

- 1) 一般是把锻件放入干燥的细砂中冷却,在批量生产中是把锻件有次序地分放在有格子的砂箱中;
- 2) 当需要缓慢冷却时,可把锻件放在热砂箱或石棉粉中冷却;
- 3) 对于小型精密锻件,为了更有效地保护锻件,可在保护气氛的装置中冷却。

第七节 精密模锻时的润滑

精密模锻无论是开式还是闭式,模锻时接触面上的单位压力一般在 $800\sim 1200\text{MPa}$,有的甚至高达 2500MPa ,温度一般在 $1150\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。在如此高的压力和温度下,润滑膜的建立是非常困难的。模锻时变形金属与模膛表面间的摩擦,将使模膛表面磨损,增大金属的流动阻力并造成脱模困难。所以,必须采用和研制专门的润滑剂及润滑方法以改善模锻条件。

在生产中一些常用的热锻润滑剂列于表3-8。

表 3-8 热锻润滑剂配方 (质量分数,%)

润 滑 剂 成 分	使用方法	锻件材料
石墨水悬浮液	A、B	钢、铁
石墨+机油 50%	A、B	钢
MoS ₂ 粉剂 15%+铝粉 5%~10%+胶体石墨 20%~30% 炮油余量	A	碳钢、不锈钢、耐热钢
石墨 3%+食盐 10%+水 87%	A	钢
银色石墨 34%+亚硫酸盐纸浆溶液 34%+水	A	钢
碳酸锂 28%+甲酸锂 14%+胶体石墨 25%+水 28%+次生羟基硫酸盐 5%	A	耐热钢
ZnSO ₄ 49.5%与 KCl50.5% 共溶物+K ₂ CrO ₄ 2.3%	A	钛及钛合金
氧化硼	A	钛及钛合金
C-9 玻璃 ^① 50%+苏州粘土 3%~5%+水 40%外加水玻璃 5%	C (另用润滑剂喷涂模膛)	碳钢、不锈钢、耐热钢
豆油磷脂+滑石粉+38号汽缸油+石墨粉微量	B	铜和黄铜
机油 95%+石墨粉 5%	B	铜和黄铜
机油+松香+石墨 30%~40%	A、B	铝、镁及其合金

注: A—喷涂于模具上; B—喷涂于热坯料上; C—加热前喷涂于毛坯上。

①C-9 玻璃成分 (质量分数): SiO₂43.2%, Al₂O₃0.9%, BaO45.8%, CaO3.9%, ZnO5.1%, MoO₃1.1%

实际应用表明,石墨水悬浮液(即水剂石墨)的润滑效果比较理想,故目前在各种热态成形中应用比较广泛。这种润滑剂是1979年开始研制,1981年投入使用,是一种比较新型的润滑剂,现介绍如下:

(1)具有多性能的水剂石墨润滑剂的成分设计 其配方主要是由固体物质及介质水组成。前者主要起润滑、绝热、脱模和高温湿润等作用。后者采用水作介质,主要是考虑价格便宜、不燃烧和无污染。用水作介质,在高温汽化时能带走模具的热量,起冷却作用。另外,水蒸发汽化后,在模具表面上能形成一层均匀的固体润滑膜。

这种润滑剂的固体物质主要是石墨和无机盐类。虽然石墨在高温($>540^{\circ}\text{C}$)下由于氧化速度的加快而使润滑性能显著下降,但可以通过与一些无机盐类的组合来提高石墨的高温润滑性能。无机盐在这种润滑剂中主要是起脱模、高温粘结和湿润作用。

水剂石墨润滑剂的主要成分(质量分数)如下:

1)石墨(20%~22%)。石墨纯度——一般矿区提供的石墨纯度平均在82%左右。因此,进厂后要采用化学酸进行提纯,去掉Si、Fe、Na、K、Mg、Al和Ca等主要杂质,使石墨纯度达到98%以上;

石墨粒度——一般矿区提供的石墨粒度在 $140\mu\text{m}$ 左右。因此,进厂后要采用机械气流粉碎,把石墨粒度粉碎到 $4\mu\text{m}$ 以下,最好在 $2.5\mu\text{m}$ 左右。

2)添加剂(16%~18%)。在石墨加入某种在升温过程中能不断脱掉结晶水的无机盐,使石墨在升温过程中不断得到微量水分,是提高石墨高温润滑性能的有效途径。一般常采用的添加剂为碳酸盐和磷酸盐。其作用在于能很好地进行热分解,提高润滑性能,使挤压件易于脱掉。

3)分散剂(0.1%~0.5%)。在水剂石墨中加入少量的亲液胶体或缔合胶体,能显著提高溶胶对电解质的稳定性,保护石墨颗粒不致凝聚结团,以得到较佳的分散性。

4)表面活性剂(1%~3%)。为了减少石墨的表面张力,加入少量表面活性剂,使水与液体或固体的表面张力显著下降,以增强石墨能均匀地分散在水中,防止石墨的沉降,这对生产应用是很有意义的。

第八节 模具设计

精密模锻模具设计时,应根据锻件图、工艺参数、金属流动分析、变形力和功的计算、设备参数和模锻过程中模具的受力情况等,逐一考虑模具整体结构;模具工作零件的结构、材料、硬度和强度核算;从模膛中迅速取出锻件的方法;闭式精密模锻时多余金属分流腔的位置、形状和尺寸的确定;零件设计包括加工精度、表面粗糙度、热处理要求和技术条件等。下面仅就精密模锻模具设计中的一些特性问题进行论述。

一、模具的类型

精密模锻模具的分类通常有两种:一种是按模锻设备分类;一种是按凹模结构分类。

(1)按模锻设备分类 如锤用锻模、螺旋压力机用锻模、机械压力机用锻模、液压机用锻模和高速锤用锻模等。

(2)按凹模结构分类 可以分为整体凹模(图3-26 I)和可分凹模(图3-26 II)两种结构。

图 3-26 所示热模压力机（机械压力机）上模锻用典型的闭式精密锻模结构原理图。图中①为可动凸模（冲头），②为凹模，③为固定凸模。采用这些模具实现环形件、法兰类锻件、齿轮、轴及传动轴上的滑动叉、万向节叉和十字轴等锻件的闭式模锻。

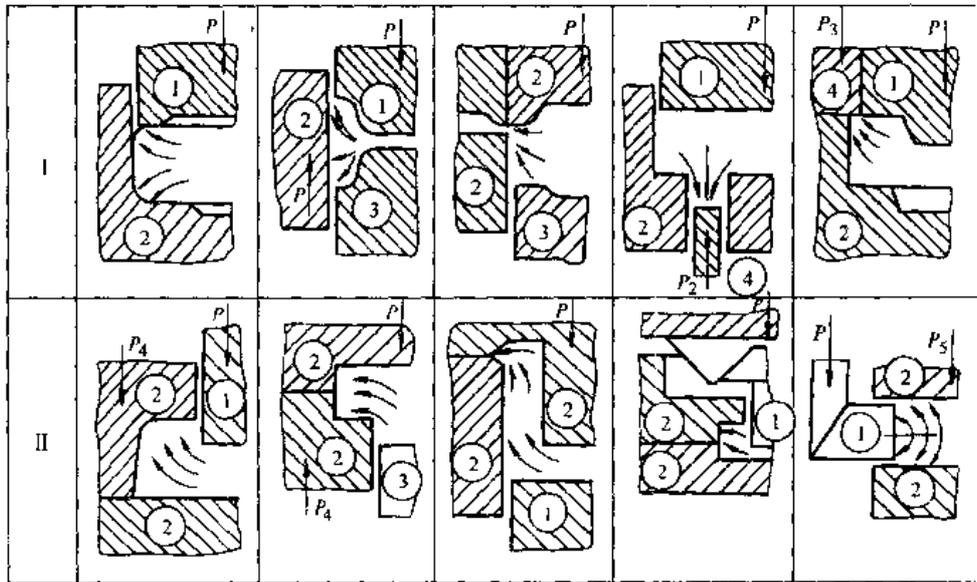


图 3-26 热模锻压力机上使用的典型的闭式精锻模结构

□ 整体凹模 ▨ 可分凹模

当然也可按工作条件分为冷锻模、温锻模和热锻模。

二、闭式精锻模分流降压腔的设计

如前所述，由于各种因素的影响，很难使毛坯体积与闭式模膛的容积刚好相等。为解决这一问题，可采取两条有效措施：一是提高下料精度，保证毛坯体积的波动小；二是在模具上设置工艺补偿空间，即多余金属分流降压腔，像开式模锻一样，当模膛充满后多余金属被挤入分流腔。带有分流腔的闭式模锻实际上就是半闭式模锻。这虽然使模锻时仍有一定的飞边金属损耗，但比开式模锻时飞边金属损耗要小得多，重要的是设置了分流腔之后，既可降低对下料精度的苛刻要求，又可降低模膛内部压力，提高模具寿命，使闭式精密模锻的适用范围大为扩展，因此，可以说这是闭式精密模锻工艺的一大进步。

1. 分流腔的设置原则

分流腔的设置原则，即分流腔应设置在什么位置最合理。应遵循的原则就是多余金属分流腔应满足的要求，即

1) 当模膛中所有难于充满的部位在未充满之前，变形金属不应当被挤入到分流腔，这就是说分流腔的位置应选择模膛最后充满的部位；

2) 多余金属挤入分流腔时不应当伴随变形阻力的提高，即多余金属分流时在模膛内所产生的压力比模膛刚充满时所产生的压力没有增加或增加很小，以免增加总的模锻力和加快模膛的磨损。

此外，从便于切掉所产生的小飞边的角度考虑，侧向分流腔应设置于锻件最大横向投影面积对应的模膛（沿分模面）周围。

具体设计时，一般依靠合适的尺寸关系来满足第一个要求；以合理的金属流动方向来满足第二个要求。

2. 分流腔的结构型式及设计计算

分流腔有不同的结构型式，如侧向缝隙式、纵向缝隙式、中心孔式和窗框式等。到底采用哪种型式，取决于锻件的结构性能和所采用的工艺方案等。如果是轴对称锻件，当为盘类锻件时，一般采用环形侧向缝隙式分流腔，且设置在锻件高度的中部；当为直齿圆柱齿轮精密模锻时，则应采用中心孔或分流轴的方式分流。

(1) 孔式分流腔 如图 3-27 所示，孔式分流腔适用于带有中心孔的圆盘类锻件的闭式模锻。这种分流结构简单，其位置设在终锻模冲孔凸台的中心部位(图 3-27b)。当锻件的孔径 $d \geq 50\text{mm}$ 时，分流孔分设在上模和下模，图 3-27c 即为这种情况；当锻件的孔径 $d = 40 \sim 50\text{mm}$ 时，分流孔完全设在下模。

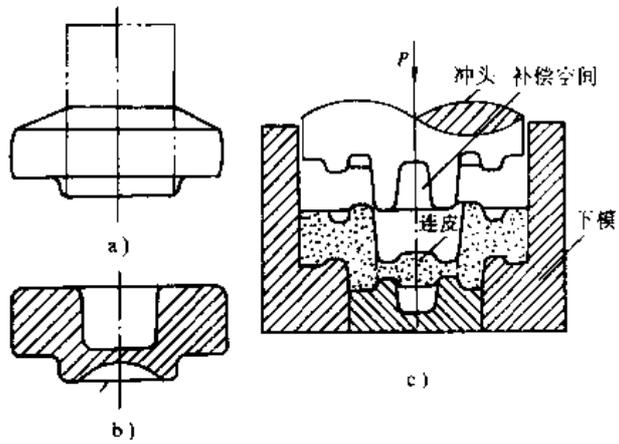


图 3-27 带连皮的闭式精密模锻
a) 锻粗 b) 冲孔 c) 终锻

可以看出，孔式分流腔的结构与开式模锻中带仓连皮的内飞边槽相似。因此，设计时，分流腔桥部的宽度、高度和过渡处圆角半径均可按带仓连皮桥部对应的尺寸选择，而对应于仓部的分流空间则按如下原则确定：

$$V_d \geq V_b - V_f$$

式中 V_d ——分流腔空间容积，为仓部与桥部空间容积之和；

V_b ——毛坯体积，按毛坯长度和截面尺寸的上偏差计算；

V_f ——锻件体积，按各公称尺寸的下偏差计算。

当锻件中心带有凸起或不长的杆部时，则在凹模上对应的孔形型腔可适当加深，以此作为自然的多余金属分流腔，还可降低模膛内的压力值。当锻件直径与中心孔径之比较大时，将变形金属挤入中心孔所需的力会增大，这会引起模具产生较大的弹性变形，进而导致锻件出现端部飞边。如果所采用的中心孔分流腔使得模膛直径与中心孔径之比具有最小值，那末变形阻力将减小，当变形金属清晰地充满模膛时，锻件端部可能不会产生飞边，这样一来，由多余金属在中心分流孔形成的枝芽长度不长，脱模时容易从孔中退出。设计时还应预留容纳附加金属体积的空间，保证多余金属全部流入中心孔分流腔时也不至引起模膛内压力的增高。

实践表明，对于阶梯齿轮或具有小台阶的法兰的闭式模锻，当 $\frac{D}{D_p}$ (D 为锻件直径； D_p 为中心孔直径) = 1.2~4.5 时，可得到很好的效果。在这种情况下，可在凹模的中心孔中装设弹性推出机构，当多余金属流入孔中时将弹簧压缩，其阻力增大，模锻结束后，靠弹簧的伸张力将锻件推出。

中心孔式分流的直径等于锻件中心凸台或杆部直径，而深度必须大于凸台或杆的长度，具体按下式确定：

$$\Delta L = \frac{4\Delta V}{\pi d_p^2} + (10 \sim 15)$$

式中 ΔL ——由于锻件体积同毛坯体积不一致而导致凸台或杆长的变化值 (mm)；

ΔV ——多余金属体积 (mm³)。

式中，10~15mm 为顶出装置顶部至最大长度的凸台或杆长端面间的附加距离。

例. 已知一齿轮锻件直径 $D=140\text{mm}$ ，圆角半径为 3mm，轮缘高 25mm，凸台直径 65mm。在新的模具中模锻时多余金属体积为 216mm³，试确定中心孔式分流腔的尺寸。

首先确定中心分流孔直径，因锻件带有中心凸台，故分流孔直径应与凸台直径相等。取 65mm 的孔径。然后确定分流孔的深度。由上式得：

$$\Delta L = \frac{4 \times 21600}{\pi 65^2} + (10 \sim 15) = 17.9 \sim 22.9$$

取孔深为 20mm。

(2) 轴向分流减压分流孔

1) 减小模膛工作压力的设想和依据。通常，模锻时的工作压力包括材料的理想变形抗力、摩擦阻力和多余功阻力三部分。理想变形抗力可用下式表示：

$$P_i = \gamma_m \ln \left(\frac{R}{1-R} \right)$$

式中 γ_m —— 锻件材料的名义流动应力；

R —— 变形强度，即相对面积缩减率。

由图 3-28 所示曲线可以看出，工作压力 P_m 随面积缩减率 R 的增加而增加，当 $R=1$ 时， P_m 增至无限大。 R 由图 3-29 确定，挤压时 R 值为常数。开式模锻时，由于工件自由表面的减小而 R 值增大，因此，如果能控制 R 值的增加就可减小工作压力。

在闭式模锻中，因为在行程末了，其 $R=1$ ，当工作压力无限增加时，变形金属也不可能完全充满模膛。如果在与锻件非重要部位对应的模膛设置一溢流口，当模膛完全充满时，就可避免工作压力的急剧增高。

摩擦阻力可用下式表示：

$$P_f = C\mu \frac{W}{t}$$

式中 C —— 比例常数；

μ —— 接触面上的摩擦系数；

W/t —— 工具宽与变形金属厚度之比。

由该式可以看出，除减小摩擦系数外，减小工具宽度与变形金属厚度之比是很重要的，因为接触宽度中间部分通常成为变形金属的分界点，而工作压力朝分界点方向增加，减小宽度尺寸对减小摩擦力是很有效的。

无用功阻力在变形金属中存在死区或

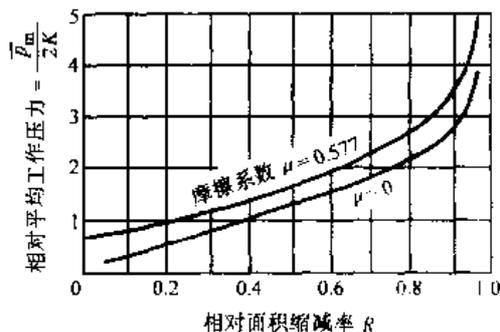


图 3-28 相对面积缩减率 R 对挤压力 P_m 的影响

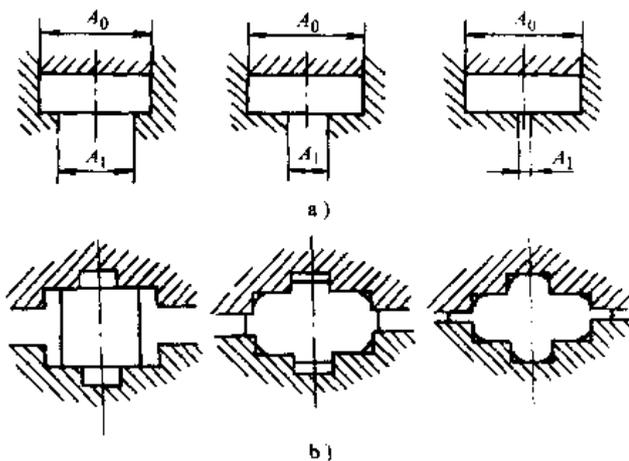


图 3-29 相对面积缩减率 R 的概念

a) 挤压 (相对面积缩减率: $R = (A_0 - A_1) / A_0$, A_0 为试样截面积; A_1 为产品截面积) b) 模锻 (相对面积缩减率: $R = (A - F) / A$, F 为自由表面积; $(A - F)$ 为与模具接触的面积; A 为总的表面积)

金属流向变化很大时增加，即发生不均匀变形。一般，减小摩擦或使模具运动和金属自然流动方向一致以形成均匀变形，就能减小阻力。

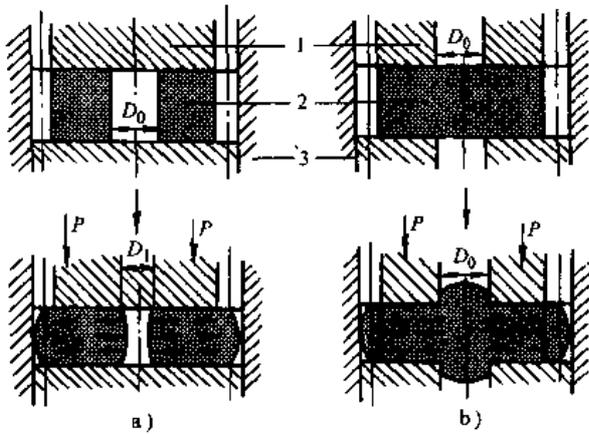


图 3-30 利用分流原理的锻造过程
a) 减压孔流动原理 b) 减压轴流动原理
1—冲头 2—毛坯 3—挤压筒

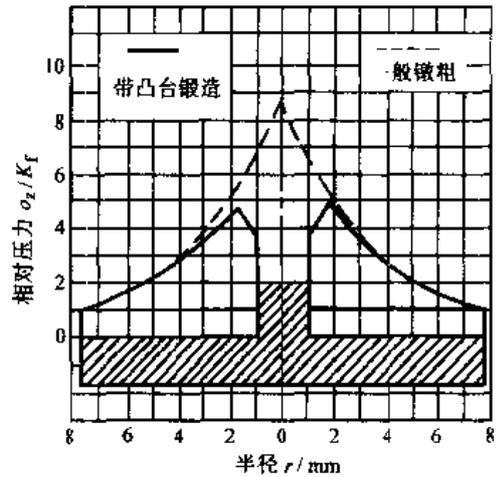


图 3-31 带凸台锻造和一般锻造时的应力分布比较

2) 在毛坯上预留分流孔或形成减压轴向减压孔。图 3-30 为直齿圆柱齿轮利用分流原理闭式精密模锻成形的过程。图 3-30a 为分流孔原理，即在毛坯中心钻出一直径为 D_0 的孔，当毛坯在凸模施加压力 P 的作用下，分流面以外的金属向外流动充满凹模齿廓，分流面以内的金属向内流动，通过减压孔的收缩而实现分流。图 3-30b 则是在凸、凹模的中心孔中形成小圆柱而实现分流。

由图可以看出，首先由于抑制了完全的封闭状态，减小了金属流动填充凹模齿廓型腔的工作压力。其次，运用分流抑制了断面缩减率和图 3-31 中摩擦力的上升。实验表明，分流原理的运用对改善外轮廓的充填性具有良好的效果。

(3) 环形缝隙式分流腔 其结构型式相当于开式模锻时的飞边槽，只不过是仅为宽度尺寸较大的桥部而无仓部，即扁平飞边槽。分流腔缝隙的高度 h 可参考开式模锻飞边槽桥部高度 h_x 的方法来确定，其宽度为 h 值的 1.5~2 倍，其位置如前所述应选择在最后充满的地方。很显然，这种分流腔适合于饼盘类锻件的半闭式精密模锻。

(4) 热挤压带法兰实心锻件端部环形分流腔 这种分流腔的结构如图 3-32 所示，可以看出它与上述侧向环形分流腔的结构相似，其区别在于前者适用于闭式锻造工艺，而本分流腔适合于齿轮、联轴节和法兰类实心零件热态闭式挤压成形工艺，其原理也是在变形结束时毛坯上多余金属被挤入环形分流腔。实际经验表明，分流腔的尺寸应保证既要使模膛易于充满又要使模具具有经济合理的寿命，而经济合理的寿命又决定于多余金属挤入分流腔时所产生的流动阻力。经试验确定，当多

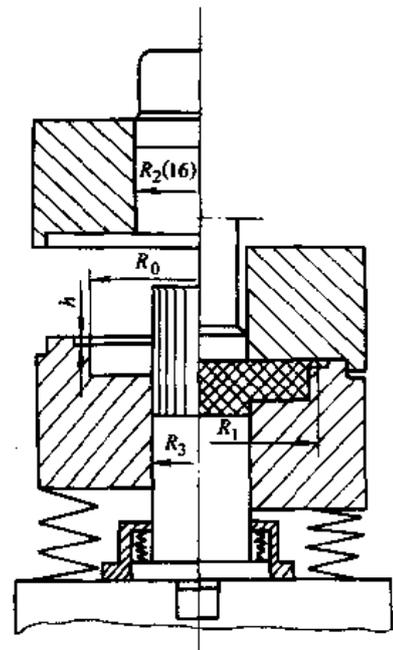


图 3-32 在具有横向分模和分流腔的凹模中挤压

余金属在具有高度 h 的分流腔中流动时,其流动阻力不超过充满模膛所需压力的 7%。由此可见,高度 h 值是高度固定缝隙式分流腔的关键结构参数。

图 3-33 所示挤压变形力 p 同分流腔和锻件法兰半径相对值 R_0/R_1 与 h/R_1 间的关系曲线。

由实验得到过横坐标上 $\frac{h}{R_1} = 0.110; 0.121; 0.140; 0.168$ 的点作垂线与曲线相交,这些点对应的纵坐标点 $\frac{R_0}{R_1} = 1.25; 1.5; 1.75; 2.0$ 。按这些点确定的参数,模具寿命可达到最高。

根据单位压力的波动不超过 7% 的范围,可得到缝高 h 与工作筒半径 R_0 的近似关系:

$$h = 0.082R_0 \quad (3-45)$$

设转移到分流腔中的多余金属体积为 V_k ,由实验确定 V_k 的计算公式如下:

$$V_k = 2\pi R_0^2 h \ln \frac{R_1}{R_0} \quad (3-46)$$

因分流腔外半径 R_1 很少影响到多余金属在分流

腔中的流动阻力,它的大小可取 $(1.1 \sim 1.15) R_0$,代入式 (3-46) 后得 $\ln \frac{R_1}{R_0} \approx 0.12$,得

$$V_k = 0.75R_0^2 h \quad (3-47)$$

将式 (3-45) 代入式 (3-47),得

$$V_k = 0.06R_0^3 \quad (3-48)$$

按式 (3-48) 得到的体积大约小于原毛坯上多余金属体积的 2 倍。

按上述各式确定的分流腔尺寸为最佳尺寸。

(5) 端部轴向分流孔 对于带枝芽类的锻件,可在枝芽模膛的端部开一轴向分流孔,图 3-49d 所示为十字轴和 T 形接头闭式侧向分流挤压成形工艺,当模膛充满之后,毛坯上多余金属从 4 个 (T 形接头只需 2 个) 端部的分流孔中挤出形成小的圆柱形枝芽,模锻结束后,将小枝芽去掉。因十字轴和 T 形接头端部模膛是最后充满的部位,故分流孔设置在枝芽模膛的端部是符合第一条原则的。

经实验研究表明,当十字轴或 T 形接头锻件本体上无难于充满的凸台时,合适的分流孔尺寸 (即满足第二条原则) 取决于枝芽模膛的结构特征,通常取

$$\frac{d_k}{d} = 0.35 \sim 0.4 \quad (3-49)$$

式中 d_k ——分流孔直径;

d ——锻件枝芽部分或枝芽模膛直径。

当枝芽锻件本体上有圆形或方形凸台时,尤其是凸台截面尺寸越小, d_k 相对于 d 的尺寸应越小,对于不同的锻件结构可通过实验确定。

(6) 端部角隙 对于某些锻件的闭式模锻,可在锻件需要加放切削加工余量的端部模膛上预留工艺补偿间隙即分流空间。如图 3-34 所示,三通管接头多向闭式模锻时,将工艺补偿空间留在旁通的端部,这种形式的分流空间称作端部角隙。在设计模具时,使冲头 \blacksquare 与旁通

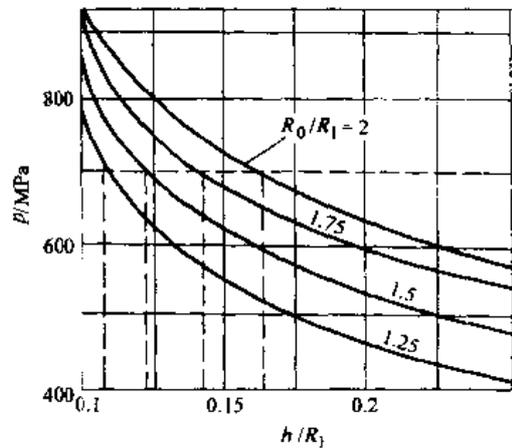


图 3-33 $p - \frac{h}{R_1}$ 曲线

型腔构成的封闭腔长度比锻件旁通的长度尺寸略长。模锻时，毛坯体积的波动反映在锻件旁通端部周边圆角半径大小的变化上。其设计依据是保证锻件旁通端部形成的最大圆角半径在预留的切削加工余量所允许的范围內。

三、可分凹模模具设计要点

与整体凹模相比，除有利于变形金属的流动、便于取出锻件等共同点外，可分凹模的设计还应注意如下要点。

1) 在凹模上必须设置分流腔或工艺补偿空间。在机械压力机上进行闭式模锻时，因压力机滑块工作行程固定，仅靠机身和模具的弹性变形即弹性退让，不可能满足毛坯体积波动的要求，必须在模具上主要是在凹模上设置分流或工艺补偿空间。即使在行程不固定的螺旋压力机或液压机上进行闭式模锻，为了保证锻件高度尺寸的精确，必须对滑块工作行程加以严格限位，因此，也应在凹模上设置分流空间，以便起到调节作用。

2) 可分凹模的夹紧力必须大于或等于模锻时变形金属在分模面上产生的张模力，防止变形金属流入分模面而形成飞边。

3) 模锻时，模具的动作顺序应是先使可分凹模闭合并夹紧，然后冲头挤压毛坯而模锻成形；模锻结束后，冲头首先退出复位，然后，可分凹模张开。

4) 对于需要两个或两个以上冲头的多向闭式模锻当要求毛坯由冲头自动对中定位时，首先使接触毛坯的两个冲头（如图 3-34 中冲头 I 和 II）同步动作；当不能使坯料自动对中定位时，应在凹模中设有定位基准，避免在模锻时因毛坯没有对中定位而发生一端充不满另一端有多余金属而产生飞边。

5) 在满足工艺要求的前提下，模具结构力求简单可靠，便于操作，易于清除模膛中的氧化皮和润滑剂残渣。

6) 模架上的运动副及凸、凹模工作部分尽量采用镶块结构，以便磨损或损坏后更换。

四、模膛设计中的一般问题

1. 模膛尺寸

在普通开式模锻中，终锻模膛尺寸系按照热锻件图确定。由于仅考虑了锻件的冷却收缩，而不考虑其他因素，所以锻件的公差较大。

对于精度要求较高的精密模锻件，应综合考虑各种因素的影响，合理地确定模膛尺寸。

在简化设计中，闭式精密模锻的模膛尺寸可按式 (3-50) 确定，然后通过试锻加以修正。

如图 3-35 所示的锻模，模膛外径为

$$A = A_n + A_n \alpha_k t - A_n \alpha_d t_d - \Delta A_s \quad (3-50)$$

式中 A —— 模膛外径 (mm)；

A_n —— 锻件相应外径的公称尺寸 (mm)；

α_k —— 毛坯的线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)；

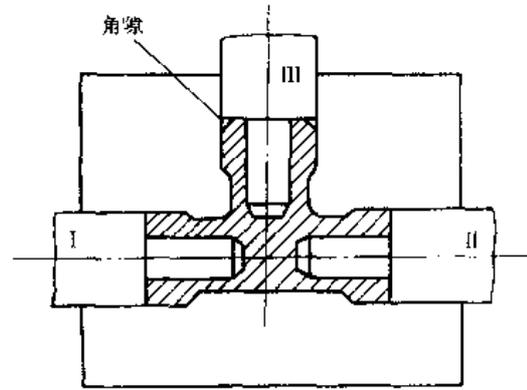


图 3-34 三通管接头多向闭式精密模锻

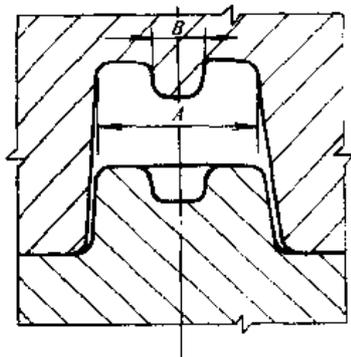


图 3-35 模膛尺寸简图

t ——终锻时锻件的温度 ($^{\circ}\text{C}$);

α_0 ——模具材料的线膨胀系数 ($1/^{\circ}\text{C}$);

t_0 ——模具工作温度 ($^{\circ}\text{C}$);

ΔA_0 ——模锻时模膛外径 A 的弹性变形绝对值 (mm)。

冲头直径 B 按下式计算:

$$B = B_0 + B_0 \alpha t - B_0 \alpha_0 t_0 + \Delta B_0 \quad (\text{mm}) \quad (3-51)$$

式中 B ——冲头或模膛冲孔凸台直径 (mm);

B_0 ——锻件孔的公称尺寸 (mm);

ΔB_0 ——模锻时冲头直径 B 的弹性变形值。当直径 B 变大时, ΔB_0 为负值; 当直径 B 减小时, ΔB_0 为正值 (mm)。

其余符号与式 (3-50) 相同。

关于模膛的磨损等因素, 可在锻件公差中考虑, 而通过模膛制造公差来体现。

2. 模膛的尺寸公差和表面粗糙度

模膛的尺寸精度和表面粗糙度, 是根据锻件图对锻模所要求的精度和表面粗糙度等级来确定的。

一般来说, 对于中小型锻模和形状不太复杂的模膛, 系按三级和四级精度制造; 对于大型锻模和形状复杂的模膛, 系按四级和五级精度制造。如果锻件精度高, 则相应地提高模膛制造精度, 因而增加了模具制造的困难。

模具表面的粗糙度, 应考虑加工的可能性。对有利于金属流动和减小摩擦来说, 希望粗糙度低些。通常, 模膛中重要部位的粗糙度 R_a 应为 $1.6\mu\text{m}$ 以上, 一般部位的粗糙度 R_a 为 $3.2 \sim 1.6\mu\text{m}$ 。

3. 有深凹穴且形状复杂的模膛的布置

对于水平可分凹模, 有深的凹穴和形状复杂的模膛, 最好布置在上模, 这样不仅有利于金属更好地充满模膛, 而且也便于清除氧化皮和润滑剂残渣。由于上模与热锻件接触时间较短, 温度较低, 模具寿命较长。下模膛有深的凹穴和直棱角时, 氧化皮和润滑剂残渣填塞在角部处, 无法吹掉, 妨碍锻件棱角或肋条的充满, 导致形成废品。

对于垂直可分凹模, 因两半凹模均为下模, 凹模张开时, 就可便利地吹掉氧化皮和润滑剂残渣, 故不存在上述问题。

此外, 闭式模锻与开式模锻一样, 在模膛中深穴处应有通气孔, 以便排出空气, 保证模膛充满。通气孔直径一般为 $1 \sim 1.5\text{mm}$ 。

五、模具的导向装置

精密模锻模具上常用的导柱导套的结构及与模座的紧固形式如图 3-36 所示。为了保持良好的润滑状态, 在导

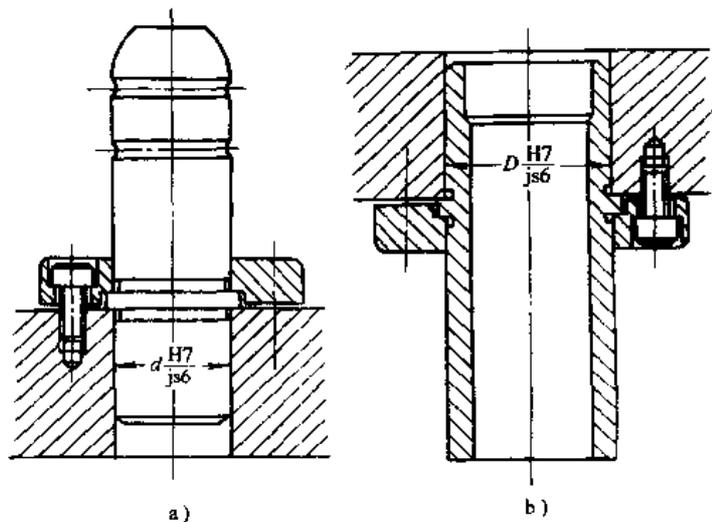


图 3-36 导柱导套的结构及与模座的紧固方式

a) 导柱 b) 导套

柱(图 3-36a)或在导套(图 3-36b)上开有油槽,导柱直径 d 在总长上做成统一的名义尺寸,其公差按压入段和导向段配合性质而定;直径 d 的大小可根据模具的结构及导柱本身的强度、刚度等条件来确定。导柱总长一般按模具的结构尺寸而定,但必须保证凸模伸入凹模之前,导柱应伸入导套 10mm 以上。通常,导柱与导套按二级精度 $\frac{H7}{f7}$ 配合;要求较低的模具,可采用三级精度的滑动配合。

通常采用基孔制过渡配合,用环形压板螺钉将导柱导套紧固在上、下模座上。

六、模具的顶出装置

精密模锻,尤其是闭式精密模锻,为了能迅速地从模膛中顶出锻件和使模具可靠地工作,在模具设计和制造中,对顶出装置应给予足够的重视。

在机械压力机、螺旋压力机和液压机等设备上闭式模锻时,可利用设备上的顶出装置迅速将锻件从模膛中顶出。

图 3-37 所示为机械压力机上闭式模锻用的有顶出装置的锻模。由压力机中的液压顶出器或机械顶出器推杆 8,通过调整垫板 6 推动锻模顶杆 4 而顶出锻件。

配置有机械手的多模膛模锻的热模锻压力机,其下顶料机构多采用液压顶出装置。在此机构中,滑块与顶出装置之间的协调靠电气连锁来保证。摩擦压力机上广泛配置液压顶出装置以满足大的顶出行程或大的顶出力量。

图 3-38 所示为在 25000kN 液压机上用的带顶出装置的闭式模锻锻模。

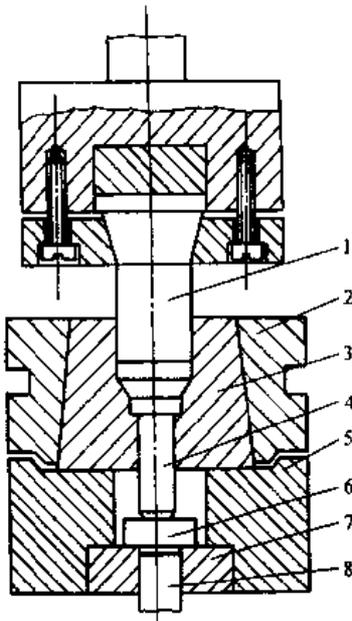


图 3-37 机械压力机用带顶出装置的精锻模
1—冲头 2—预应力圈 3—凹模
4—顶杆 5—下模板 6—调整垫板 7—垫板 8—推杆

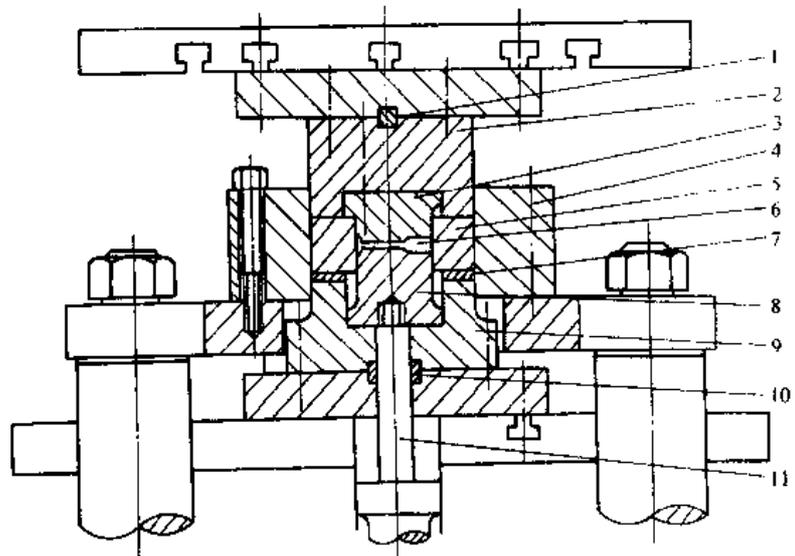


图 3-38 在 2500kN 液压机上精锻铝合金零件的模具
1—定位销 2—上模固定板 3—上冲头 4—预应力圈 5—凹模 6—锻件
7—垫板 8—下冲头 9—下模固定板 10—定位环 11—顶杆

如果无法利用设备上的顶出装置,或在设备上无顶出装置,则必须在模具结构上设置附加顶出机构,这在一些可分凹模模锻的模具上常常碰到。

第九节 精密模锻模具材料的选用

一、锻模常用钢及热处理规范

表 3-9 所列为锻模常用钢及热处理规范。

表 3-9 锻模常用钢的热处理规范

钢 号	退火温度/°C	退火后硬度 HBS	淬火温度/°C	淬火介质	冷处理温度/°C	回火温度/°C	硬度 HRC
Cr12MoV	850~870	207~255 ~	1020~1040	油		150~425	55~63
			1115~1130	硝盐		510~520	60~62
5CrNiMo	850~870	197~241	820~850	油		490~640	30~47
5CrNiMo	850~870	197~241	830~860	油		490~660	30~47
3Cr2W8V	860~880	207~255	1050~1150	油		600~620	50~54
4Cr5MoSiV	840~900	190~229	1000~1025	油		540~650	40~54
35Cr3MoW2V	860~890	180~225	1030~1060	油		580~630	45~54
3Cr3Mo3V	845~900	~	1010~1040	空气		550~600	40~54
4Cr3W4Mo2V	850~870	180~240	1160~1220	油或 硝盐		580~630	48~56
TiNb							
5Cr4W5Mo2V	850~870	200~230	1130~1140	油		600~630	50~56
W18Cr4V	870~900	217~255	1260~1300			540~600	60~65
W6Mo5Cr4V2	820~870	212~241	1190~1230			540~600	60~65

5CrMnMo 钢具有良好的强度、耐磨性和韧性。有良好的淬透性。适用于制造中小型热锻模（最小边长 300~400mm）。

5CrNiMo 钢具有良好的综合力学性能。加热至 500°C 时仍能保持高的强度极限和屈服强度。有很高的淬透性。适合于制造大型热锻模（最小边长 ≥ 400 mm）。

3Cr2W8V 钢的主要特点是有高的热稳定性和耐磨性，较好的抗氧化性和抗热疲劳性。有较高的淬透性。用于制造大型热锻模和尺寸较小但在动载荷下工作的热锻模时，淬火温度应选择在 1050~1100°C；用于制造承受动载较小的热锻模时，淬火温度提高到 1140~1150°C 是合适的。

4Cr5MoSiV 和 4Cr5W2SiV 均具有高的强度和韧性，较好的抗氧化性和抗热疲劳性。有较高的淬透性。适于制造中小型热挤压、热锻和精密模锻模具。

此外，华中理工大学研制的新型热作模具钢 HD（4Cr3Mo2NiVNb），同 3Cr2W8V 钢相比，其热稳定性和高温下抗软化能力更好。国内已有不少厂家用于制造以热挤压、热锻变形为特征的精锻模具。美国的热作模具钢 H13 具有较好的热稳定性、抗氧化性和抗热疲劳性。国内也有不少厂家用于制造单位挤压力不太高的钢件热锻模，用于制造有色金属热精锻模具，效果更好。尤其是该系列的新型模具钢 H26（50W18Cr4V）和 H42（60W6Mo5CrV2），显著提高了强度和硬度，有好的热稳定性、抗龟裂性和韧性。

二、锻模常用硬质合金及淬火规范

制造模具工作部分的镶块常用硬质合金，钢结硬质合金的化学成分及物理力学性能见表 3-10 与表 3-11。常用钢结硬质合金的淬火规范见表 3-12。

表 3-10 常用硬质合金的化学成分及物理力学性能

牌 号	化学成分 (质量分数,%)		物理力学性能		
	碳化钨	钴	抗弯强度 /N·mm ⁻²	密度/g·cm ⁻³	硬度(HRA)
YG8	92	8	≥1500	14.5~14.9	≥89
YG15	85	15	≥2100	13.0~14.2	≥87
YG20	80	20	≥2200	13.4~13.5	≥85

表 3-11 常用钢结硬质合金的化学成分及物理力学性能

牌 号	化学成分(质量分数,%)		物理力学性能					
	硬 质 相		基 体	密 度 /g·cm ⁻³	硬 度 HRC		抗 弯 强 度 /N·mm ⁻²	冲 击 韧 度 /J·m ⁻²
	TiC	W,C			退 火 态	淬 回 火 态		
TLMW50	-	50	1.25Cr-1.2 5Mo- (0.8~1.0)C-Fe	10.21~10.37	35~40	66~68	≥2000	≥8
GW50	-	50	1.1Cr-0.3M o- 0.3Ni-0.8C-Fe	10.30~10.60	35~42	68~72	2300~2800	12
TMM50	-	50	2Mo-1C-Fe	≥10.20	-	63	1770~2150	7~10
GT35	35	-	3Cr-3Mo-0 9C-Fe	6.4~6.6	39~46	67~69	1300~2300	5~8

表 3-12 常用钢结硬质合金的淬火规范

牌号或代号	淬火设备	淬 火 工 艺 条 件					淬 火 硬 度 HRC
		预热温度 /°C	预热 时间 /min	加热温度 /°C	保温时间 (按速率计) /min·mm ⁻¹	冷却介质	
TLMW50	盐浴炉	820~850	30	1050	0.5~0.7	油	68
GW50	箱式炉	800~850	30	1050~1100	2~3	油	68~72
GT35	盐浴炉	800~850	30	960~980	0.5	油	68~72

硬质合金具有很高的抗磨性,但抗弯强度、抗拉强度很低,缺口敏感性大,所以用它做凹模的镶块,以避免由于结构因素引起的缺口效应。如果用作凸模,必须采用韧性好的材料[含钴量(质量分数)30%以上]。

由于它的硬脆性,使用时容易折断,所以要特别保证所采用设备和模架的精度及刚性。硬质合金成本较高,所以只在大批量生产且产品公差严格时才采用。用硬质合金制作冷挤、冷镦凹模,可提高使用寿命数十倍;制作凸模可提高寿命3~4倍。

钢结硬质合金的基体为钢,因此可以切削加工、焊接、热处理,甚至还可以承受一定的塑性变形。同时又含有大量的碳化钨,因而保留了硬质合金的高硬度和良好的耐磨性。与硬质合金相比,它具有比较好的抗弯强度和韧性。它既可用于冷挤、冷镦模具材料,又是以热挤、热镦为变形特征的热精锻模的较为理想的模具材料。

第十节 精密模锻实例

例 1 圆柱齿轮坯无飞边模锻

据文献介绍,模锻图 3-39 所示圆柱齿轮坯,当其直径在 170~300mm 之间,可在 10000kN 螺旋压力机上进行无飞边模锻。

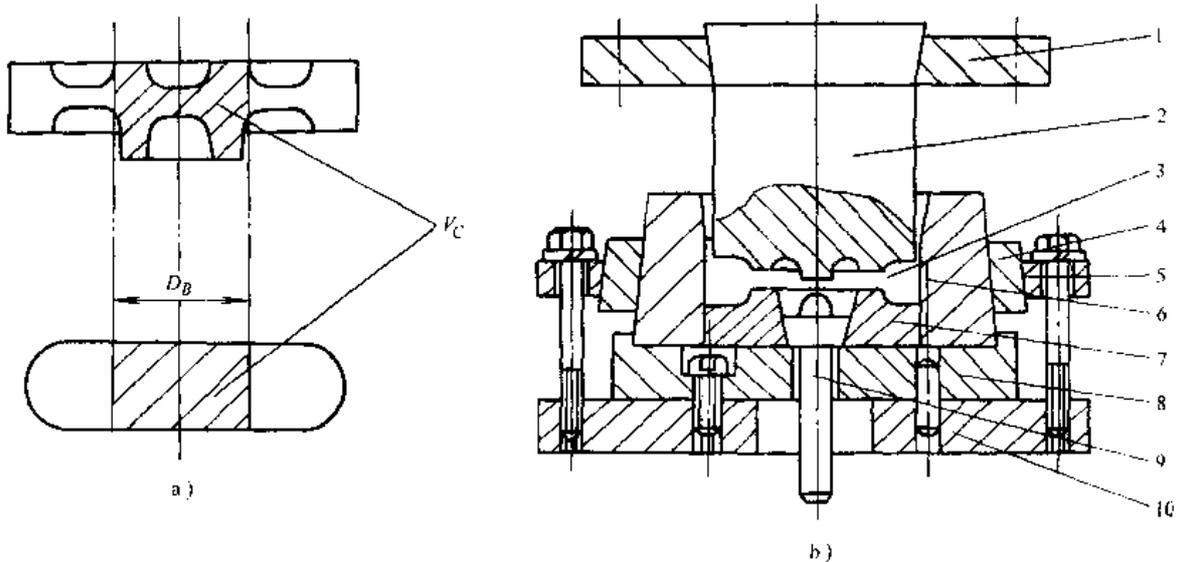


图 3-39 齿轮坯无飞边模锻

a) 齿轮坯 b) 模具结构

1—上模压板 2—上模 3—锻件 4—压套 5—压紧圈 6—模套
7—下模 8—下模座 9—顶杆 10—垫板

(1) 圆柱齿轮坯精密锻件图的制订

- 1) 一般圆柱齿轮坯表面加工粗糙度为 $R_a 12.5 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 时,加工余量为 1.5~2.5mm;加工粗糙度为 $R_a 1.6 \mu\text{m}$ 以上时,增加余量 0.25~0.5mm;
- 2) 锻件高度尺寸偏差为 $\pm 0.2 \text{mm}$,内孔孔径偏差为 $\pm 1 \text{mm}$;
- 3) 锻件与上、下模对应的模锻斜度分别为 3° 、 5° ;与模套间的斜度为 0.5° ;
- 4) 锻件的冷缩率取 1.5%。

(2) 模锻工艺 对于直径小于 200mm 的齿轮坯不需锻粗制坯,可以直接对毛坯进行终锻;对于直径较大且轮毂高而过渡处圆角半径小的齿轮坯,为了确保轮毂处的充满成形,应锻粗制坯,经锻粗后毛坯的高度 H_r 可用下面经验公式计算

$$H_r = \frac{V_c}{\pi \left(\frac{D_g}{2} \right)^2}$$

式中 V_c ——齿轮轮毂体积 (mm^3);

D_g ——轮毂直径 (mm)。

此外,因无飞边模锻是金属在封闭的模膛内挤压成形,变形金属在上模膛内的变形属于反向挤压,在下模膛内属于正挤压。因此,应将轮毂较高的一端置于下模。

(3) 模具结构 在 10000kN 摩擦压力机上进行无飞边模锻，采用压圈紧固形式的组合结构。其特点是当模锻直径不同的齿轮坯时，只需更换上模、下模及模套即可。此外紧固比较牢靠，适合于有顶出装置的模具。模具结构如图 3-39b 所示。

例 2 直齿圆锥齿轮的精密模锻

很多文献指出，精锻齿轮因金属流线沿齿廓分布并组织致密，使得齿轮的强度、齿面的耐磨能力、热处理和啮合噪声都比切削加工的齿轮优越。与切削加工比较，精锻齿轮的强度可提高 20%，抗弯疲劳寿命提高 20%，热处理变形减少 30%，生产成本降低 20% 以上，并且认为，生产批量在 300~500 件以上，经济上就是合理的。

(1) 工艺过程 以东—20 行星齿轮（图 3-40）为例，其精锻齿轮的工艺流程为：下料——车削或磨削外圆、除去表面缺陷层——加热——精密模锻——冷切边——酸洗（或喷砂）——加热——精压——冷切边（或喷砂）——镗孔、车背锥球面——球处理——喷丸——磨内孔和背锥球面。

(2) 锻件图制订 图 3-40 和 3-41 分别为行星齿轮零件图和精锻件图。制订锻件图时主要考虑如下几方面：

1) 分模面位置。将分模面选择在锻件最大直径处，能锻出全部齿形和顺利脱模。

2) 加工余量。齿形和小端面不需机械加工，不留余量。背锥面是安装基准面，精锻时不能达到精度要求，预留 1mm 加工余量。

3) 冲孔连皮。当锻件上的孔径大于 25mm 时，应锻出有斜度和连皮的锻件。对于圆锥齿轮精密模锻的研究指出，当锻出中间孔时，连皮的位置对齿形充满情况有影响，连皮至端面距离约为 $0.6H$ 时，齿形充满情况最好，其中 H 为不包括轮毂部分的锻件高度，如图 3-42 所示。连皮厚度 $h = (0.2 \sim 0.3)d$ ，但不宜小于 6~8mm。东—20 行星齿轮孔径 $d = 20\text{mm}$ ，不锻出。

(3) 精锻模具 图 3-43 为行星齿轮精锻模具，它是开式精密模锻的典型结构。一般来说，齿形模膛设置在上模有利于成形和提高模具寿命。但对东—20 行星齿轮的

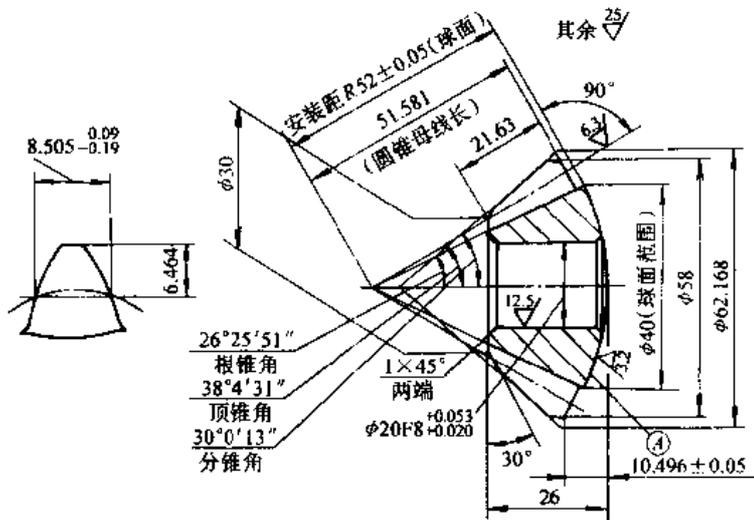


图 3-40 东—20 行星齿轮零件图

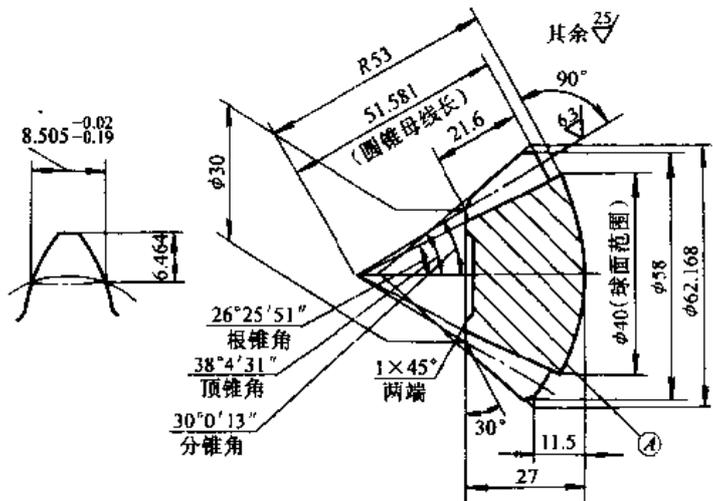


图 3-41 行星齿轮精密锻件图

精锻模来说，为了安放毛坯方便和便于顶出锻件，凹模 9 安放在下模板 13 上，这对于清除齿形模膛中的氧化皮或润滑剂残渣、提高模具寿命是不利的。采用双层组合凹模，凹模 9 用预应力圈 6 加强。凹模压圈 7 仅起固紧凹模的作用。模锻后，由顶杆 10 把锻件从凹模中顶出。

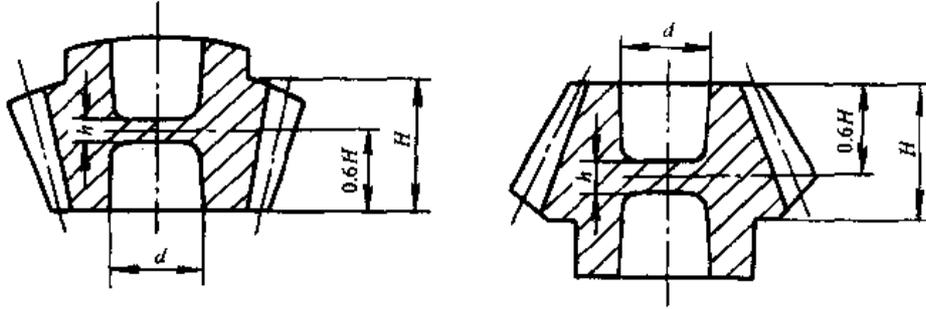


图 3-42 冲孔连皮位置

图 3-44 为半闭式精密模锻圆锥齿轮的典型结构。该模具上的关键零件是环形齿圈，模锻时由它直接压出轮齿齿形。

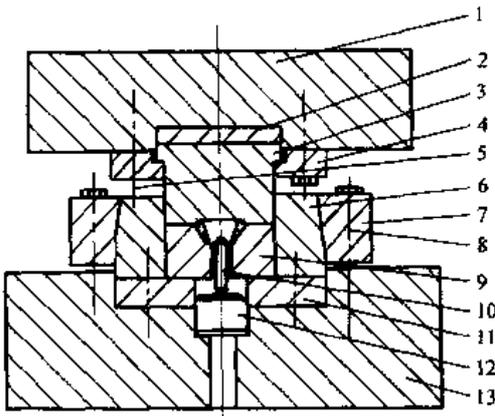


图 3-43 行星齿轮精锻模

- 1—上模板 2—上模垫板 3—上模 4—压板
- 5、8—螺栓 6—预应力圈 7—凹模压圈
- 9—凹模 10—顶杆 11—凹模垫板
- 12—垫板 13—下模板

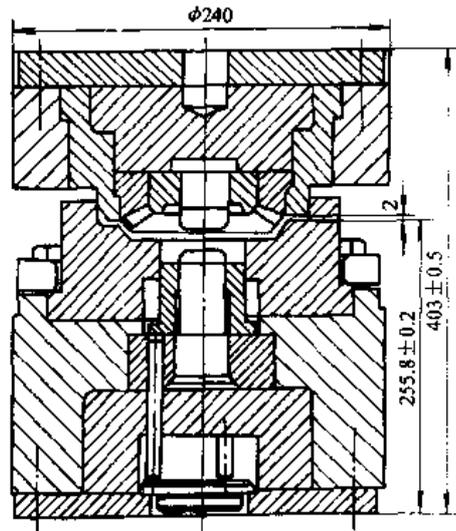


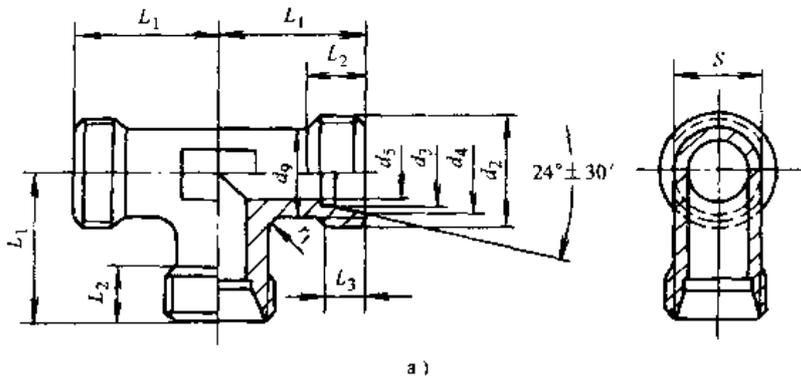
图 3-44 圆锥齿轮半闭式精密模锻的模具结构

利用这种结构的半闭式精密模锻，在 16000kN、25000kN 和 40000kN 热模锻压力机上可以模锻公称直径为 79~229mm，具有直线型和曲线型的圆锥齿轮。其工艺流程为：剪床下料→电感应加热→模锻（锻粗和终锻）。为提高终锻模锻块寿命，模锻在两个镶块中轮流进行。终锻模锻块寿命为 2500~3000 件，生产率为 2500 件/班。

例 3 三通管接头可分凹模模锻

三通管接头零件如图 3-45a 所示，其可分凹模锻件如图 3-45b 所示。由图可以看出，三通

管接头属于典型的枝芽类零件，采用普通模锻生产该锻件毛坯时，其工艺流程为：毛坯感应加热→立式锻成T形工件→切飞边→清理→感应加热→终锻→冷切边。当采用可分凹模多向模锻时，可将加热好的棒料毛坯一次模锻成如图3-45b所示的精密锻件。同普通模锻工艺相比，采用多向精密模锻工艺时，减少工序4~5道，相应减少设备4~5台（次）、减少操作工6~8人（班）；节约钢材30%以上，降低能耗45%；产品质量显著提高。



(1) 三通管接头多向模锻时金属变形过程的分析 三通管接头多向模锻是将加热至始锻温度的棒料毛坯置于水平可分凹模的封闭型腔中，三个水平冲头同时对坯料进行挤压成形，如图3-46d所示。

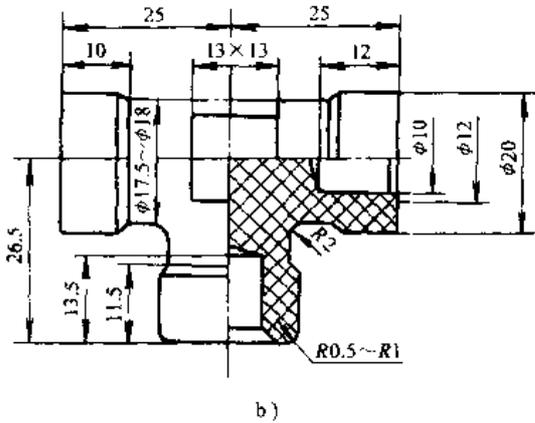


图 3-45 三通管接头

由图3-46可以看出，三通管接头的多向模锻过程，可以分为三个变形阶段，即锻粗反挤阶段；侧向挤压阶段；复合成形阶段。

锻粗反挤阶段（图3-46a）：当三个水平冲头同时以同样的速度工作时，冲头I、II首先同毛坯接触，毛坯两端在挤孔的同时被锻粗，毛坯中段仅被微量锻粗消除毛坯同凹模轴颈间的间隙。此阶段至毛坯两端变形接近锻件相应部分的形状为止。

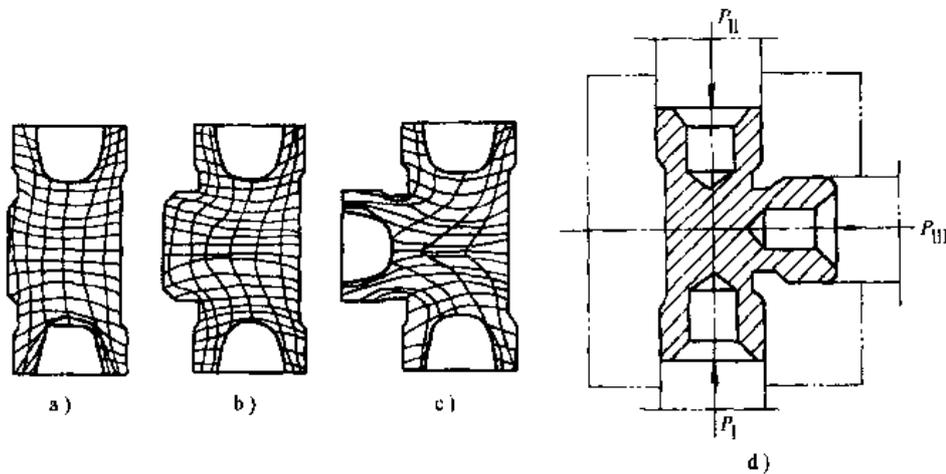


图 3-46 三通管接头轴向剖面坐标网格的变化情况

侧向挤压阶段（图 3-46b）：毛坯两端变形结束后，冲头 I、II 继续前进迫使毛坯中部金属流入凹模的侧通型腔，直至流入侧通的金属与正在向前运动的冲头 III 相碰为止。在这个阶段，金属的变形特点是毛坯中部为纯侧向挤压，两端向中部作刚性平移。

复合成形阶段（图 3-46c）：当挤入侧通的金属同冲头 III 相碰后，随着三个冲头继续前进，毛坯中部的金属被挤入旁通型腔，而冲头 III 对流入旁通型腔的金属进行反挤和墩粗，直至三个冲头达到行程终点为止。在这个阶段是旁通的反挤压和最后使金属充满型腔。

上述分析，还可由所测试的挤压力—行程曲线的变化来得到验证。由图 3-47 所记录的曲线可以看出，多向模锻时，冲头 I、II 首先对毛坯进行反挤和墩粗，见曲线 *ab* 段，相应的墩挤力为 O_2P_1 代表的数值；至 *b* 点墩挤结束，开始侧向挤压，至 *c* 点侧向挤压结束， O_2P_1 所代表的数值为相应的侧向挤压力；在 *c* 点，即当冲头 I、II 同毛坯相接触一段时间后，挤入旁通的金属同冲头 III 相遇，冲头 III 开始反挤和墩粗，见曲线 *ef*， O_3P_1 代表其挤压力的大小；由于冲头 III 对挤入旁通型腔的金属进行反挤和墩粗，使冲头 I、II 所承受的变形抗力由 *c* 点上升至 *d* 点， O_2P_1 代表冲头 II（I）对毛坯施加的最大挤压力。曲线表明，冲头 I 与 II 的工作过程完全相同。

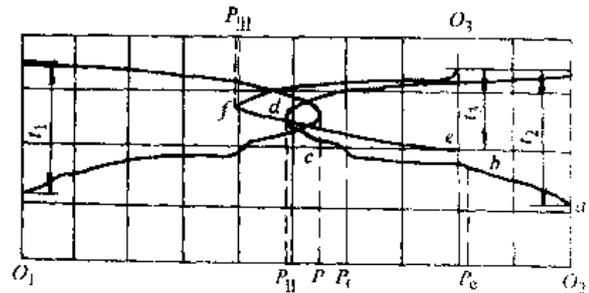


图 3-47 Z14 型三通管接头外向模锻挤压力—行程曲线

(2) 楔块式水平可分凹模模具的结构及工作原理 图 3-48 所示为这种模具结构及工作原理图。下半凹模 14 通过固定垫铁 13 固定在下模板 1 上。冲头 15 通过燕尾槽或 T 型槽固定在外侧滑块 12 上，而侧滑块 12 可在下模板的导向槽中作水平滑动。上半凹模 10 通过固定垫板 9 固定在塔形块 8 的底面上。塔形块 8 通过拉杆 7 与上模板 5 相连且能相对于拉杆 7 滑动。楔形块 3 安装在圆筒形动圈 4 上，动圈 4 通过拉杆 11 和小圆柱 2 与上模板 5 相连。动圈 4 与上模板 5 间的相对运动通过套在拉杆上的弹簧的伸缩来实现，且由小圆柱 2 导向。中间楔形块 6 通过燕尾与上模板 5 相连。

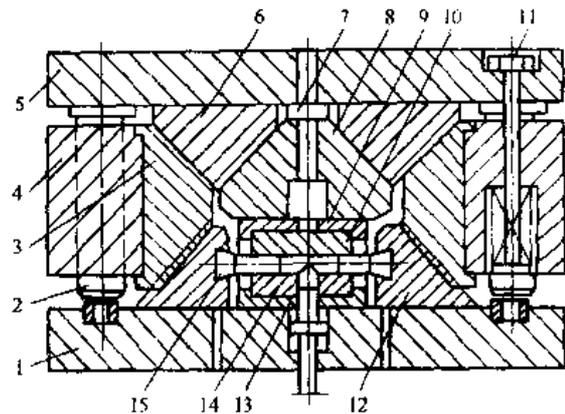


图 3-48 楔块式水平可分凹模模具

- 1—下模板 2—小圆柱 3—楔形块 4—圆筒形动圈
5—上模板 6—中间楔形块 7—拉杆 8—塔形块 9—固定垫板
10—上半凹模 11—拉杆 12—侧滑块
13—固定垫铁 14—下半凹模 15—冲头

模锻时，上模板 5 与压力机滑块一起下行。首先，上半凹模 10 与下半凹模 14 闭合，且与模板 5 推动中间楔形块 6 沿模板 5 的导向槽在向外滑动的同时还与模板 5 一起向下移动，两个中间楔形块 6 推动对应的楔形块 3 与动圈 4 一起下行，随着压力机滑块继续下行，动圈 4 下部的斜面与侧滑块 12 的相应斜面接触，由其水平分力推动侧滑块 12 作向心运动，两个冲头 15 同时挤压毛坯，成形锻件。压力机滑块回程时，上模板 5 与中间楔形块 6 同时上升，通过拉杆 7 和 11 使上半凹模 10 和动圈 4 随之上升，冲头随侧滑块 12 复位，顶杆从下半凹模中顶出锻件。

这种模具安装在机械压力机(热模锻压力机或普通曲柄压力机)上使用,适合于模锻 T 形接头。

例 4 十字轴径向挤压

十字轴是汽车传动轴万向节上的重要零件,在传统的模锻生产方法中以热模锻压力机模锻最先进,其模锻工艺为压扁制坯、预锻、终锻和切边。当采用径向挤压工艺时,可由棒料毛坯直接挤压成十字轴精密锻件。以 EQ140 十字轴为例,单件用料由 1.7kg 降低到 1.15~1.2kg,其关键力学性能指标扭转疲劳寿命由平均 8 万次提高到 23 万次以上。下面仅就挤压过程的分析和力—行程曲线两项径向挤压最关键的问题论述如下。

(1) 十字轴径向挤压变形过程的分析 图 3-49 为在水平可分凹模中十字轴径向挤压变形过程示意图。变形金属的流动过程可分为四个阶段,即锻粗变形、稳定径向挤压、充满侧向型腔和挤压完成,现将每一个阶段的变形情况及特点分述如下:

锻粗变形阶段(图 3-49a)。挤压开始时,毛坯在冲头的作用下产生锻粗变形,很快消除毛坯同挤压筒的径向间隙而充满挤压筒;由于毛坯下端处在四个水平侧腔方向的金属系自由表面,故毛坯在局部锻粗的同时,便开始流入侧腔。由于进入侧腔的变形金属受到挤压筒出口尖角及上部金属向下流动的影响,故流入侧腔的金属呈斜向下方趋势,但当图中 α 处圆角半径增大时,则因水平流动分量的增加,金属向侧腔流动的均匀性明显改善(见图 3-49a 中虚线)。可见,圆角半径大小对金属流动的均匀性是有影响的,但选择圆角半径大小要适当,圆角半径过小时,不仅影响金属流动的均匀性,且易降低模具的使用寿命;圆角半径过大时,虽有利于金属流动,但却会在此处产生过大的毛刺,影响零件的后续加工。试验证明,圆角半径取 2mm 左右为宜。毛坯直径对挤压成形过程也有较大影响,当直径过小时,会因毛坯在挤压筒中摆放位置的偏差而造成四个侧腔中金属分配不均。一般,毛坯直径与挤压工作筒间的径向间隙(双边)为 1mm 左右时,水平侧腔的金属分配无明显差异。

稳定径向挤压阶段(图 3-49b)。锻粗变形结束后,随着冲头继续下压,挤压工作筒内的毛坯金属开始大量流向侧腔,形成四个侧枝,直到金属的前端碰到模壁为止。在这一阶段中金属流动比较稳定。

由图 3-49b 可见,因流入侧腔的金属呈斜向下方向,故中心线以下模膛充满较好,而中心线以上的金属未与模壁接触;又因其下部所受模壁的摩擦阻力大于上部,故金属前端出现向下卷曲的趋势,严重时将产生折叠缺陷,这种现象应设法避免。

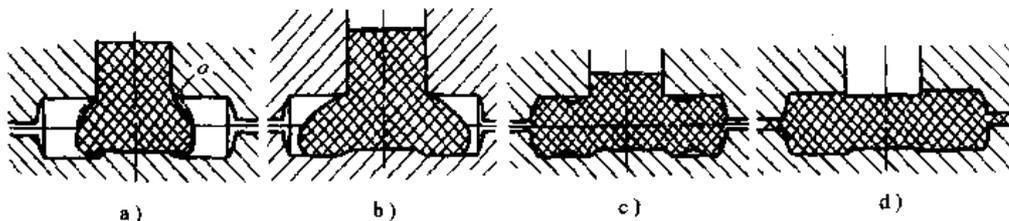


图 3-49 十字轴径向挤压变形过程

a) 锻粗变形阶段 b) 稳定径向挤压阶段 c) 充满侧向型腔阶段 d) 挤压完成阶段

填充侧腔阶段(图 3-49c)。当侧枝前端碰到模壁后,挤压筒内的金属仍继续被挤入侧腔,这时,侧腔内金属的变形,类似于沿水平方向的锻粗。由图 3-49c 可见,十字轴侧枝前端和根

部的截面尺寸首先增大, 然后逐渐向根部扩展。因此, 侧枝中段的上部和侧枝上部圆角部分最后充满。当此阶段结束时, 即冲头接近行程終了位置时, 除前端圆角部分外, 其余部分均已充满。

挤压完成阶段 (图 3-49d)。此阶段最终充满型腔并排出多余金属。为了防止设备超载和模具损坏, 多余金属必须从侧腔前端的余料分流孔中排出。在这种条件下, 每个侧枝的变形相当于变形程度很大的正挤压。这种强烈的三向压应力状态, 为型腔内难于充满的部位创造了有利的充满条件。

(2) 挤压力、张模力—行程曲线分析 图 3-50 所示的挤压力、张模力—行程曲线中, $0a$ 阶段为开式镦粗部分; $0b$ 段对应于径向挤压部分; bc 段对应于型腔充满部分; fk 段对应于多余金属分流部分。

如图 3-50 所示, 因由开式镦粗转为闭式镦粗, 毛坯同挤压筒接触面积逐渐增大至最大而使摩擦阻力也逐步增至最大, 然后, 随着金属流入四个侧腔, 毛坯同挤压筒的接触面积逐渐减少而使摩擦阻力也逐渐减小, 至 c 点后因变形金属充满侧腔而使变形力急剧上升, 所以整个变形力由 0 点上升至 b 点然后逐渐下降至 c 点又上升。相应于开式镦粗阶段的张模力因上半凹模根本没有受到变形金属的作用, 所以不存在张模力; 自 a 点至 f 点, 因挤压筒壁上摩擦力促使上半凹模压紧下半凹模, 故对应的张模力 $a'b'c'd'$ 呈负值; 当模膛充满至多余金属分流段张模力同挤压力一样急剧上升 ($f'k'$ 段)。

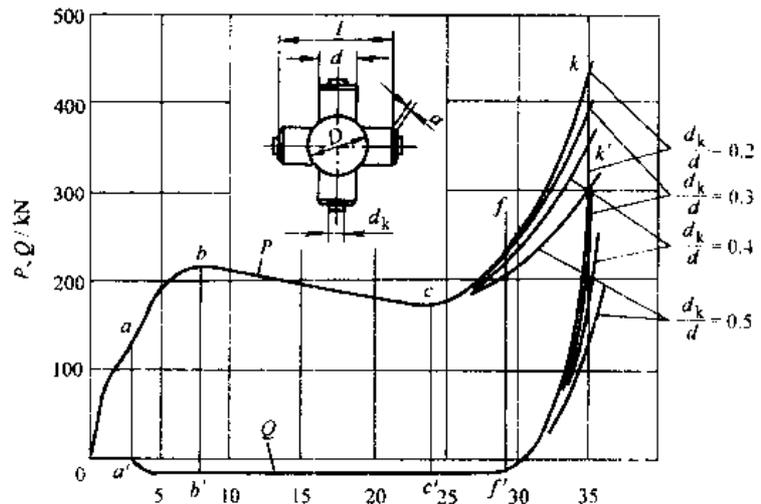


图 3-50 挤压力 P 、张模力 Q —行程曲线 (钢试件)
毛坯: $\phi 28.7 \times (55 \sim 56)$ mm; 锻件尺寸 (mm): $l=64$; $d=20$;
 $D=30$; $d_k=10$

从该曲线还可看出, 多余金属分流孔直径与侧腔直径之比 $\frac{d_k}{d}$ 的合理范围是 $0.35 \sim 0.4$ 。

(3) 实现十字轴径向挤压的模具装置及设备 这主要有两条途径: 一条是采用可分凹模模具装置在通模锻设备如曲柄压力机、液压机上实现; 另一条采用双动压力机实现。

对于不同的压力机, 可以设计不同结构型式的可分凹模模具装置。如果压力机工作台面安装有液压缸或气缸, 则可以利用液 (气) 缸作为可分凹模闭合压紧力的来源。如果压力机上没有且无法安装液 (气) 压缸时, 则可以利用多组柱形弹簧或碟形弹簧作为合模力的来源。

图 3-51 为模锻 EQ140 汽车十字轴的专用模具装置。上半凹模 7 固定在上夹持器 5 内, 当上模板与压力机滑块一起处于上限位置时, 上夹持器 5 悬挂固定于上模板 1 上的限位销 23 上, 冲头 8 固定在上模板 1 上, 当上半凹模 7 与冲头 8 发生相对运动时, 依靠副导柱 6 导向。下半凹模 10 固定在下夹持器 11 中, 下夹持器通过弹簧 15 支承在下模板 14 上, 冲头 20 固定在下模板 14 上, 下半凹模 10 同冲头 20 发生相对运动, 也是依靠副导柱导向, 而下半凹模的上

限位置由固定于下模板 14 上的限位器决定。括弧楔 9 通过杠杆 4 与连接板 3 相连，调节板 2 通过螺钉固定在上模板上，通过螺栓调节板 2 的上下位置，可以调节括弧楔在水平方向上的前后位置。当上模随滑块处于上限位置时，括弧楔的上端支承在上夹持器 5 的法兰边缘上。此时，上、下凹模间有足够大的空间位置。

工作时，将加热好的毛坯垂直插入下半凹模的工作筒而落在冲头 20 的顶端上。当压力机滑块向下运动时，上半凹模 7 与下半凹模 10 相碰而暂时停止下移，括弧楔 9 上端挂在上夹持器 5 的法兰边缘上而暂时停止下移。但滑块仍在向下运动，在滑块下移的过程中，括弧楔沿水平方向向前移动而夹紧两半凹模。此后，已闭合的两半凹模与上模板一起下行而压缩弹簧 15。与此同时，上、下冲头挤压毛坯，使毛坯金属向四个侧腔流动。由于变形金属产生的张模力而使两半凹模被括弧楔夹持得更紧。当滑块下行到下限位置时，变形金属充满模腔，多余金属从四端余料孔中排出。模锻结束后，滑块回程，在回程过程中，首先两半凹模一起上行，然后，括弧楔与下半凹模脱开，继而上半凹模离开下半凹模并通过限位销 23 悬挂在上模板上而一起上升，回到初始位置。

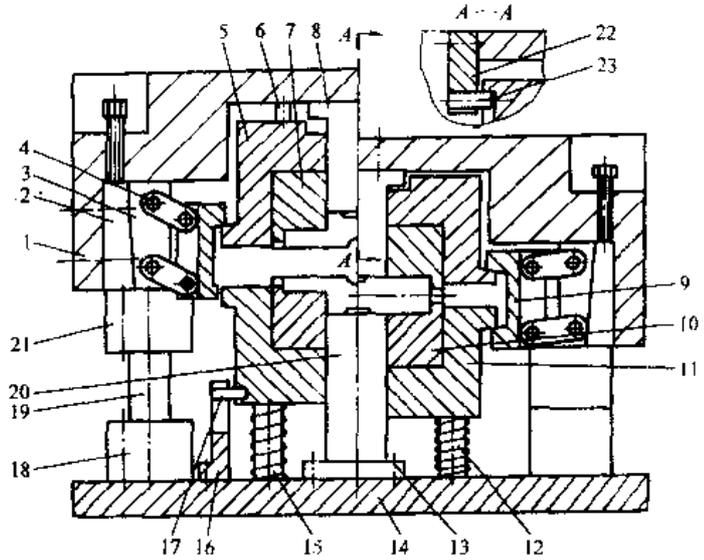


图 3-51 带刚性夹紧装置的可分凹模结构

- 1、14—上、下模板 2—调节板 3—连接板 4—杠杆 5、11—上、下夹持器 6—副导柱 7、10—上、下半凹模 8、20—上、下冲头
- 9—括弧楔 12—弹簧导柱 13—螺钉 15—弹簧 16—支座
- 17—限位销 18—导柱座 19—导柱 21—导套
- 22—销座 23—销

设计要点：这种模具装置结构复杂，设计时必须使夹紧机构的水平运动与上、下凹模的垂直合拢与张开运动协调一致。为此，需作两个方向的运动分析，以求出其相互关系。

夹紧机构同凹模的相互运动关系如图 3-52 所示。 ox 为水平方向，当括弧楔完全夹紧两半凹模时连杆 oa 与水平方向即 ox 的夹角为 α ；连杆长度为 L ； H 为上半凹模处于初始位置至与下半凹模夹紧时所移动的垂直距离； s 为与 H 对应的水平距离，即从两半凹模开始接触至完全被夹紧时括弧楔在水平方向移动的距离，则两个方向的运动关系为：

$$H+h=L\sin\beta=L\sqrt{1-\left(\frac{L-s}{L}\right)^2}$$

经变化后，得

$$H=L\left[\sqrt{1-\left(1-\frac{s}{L}\right)^2}-\tan\alpha\right]$$

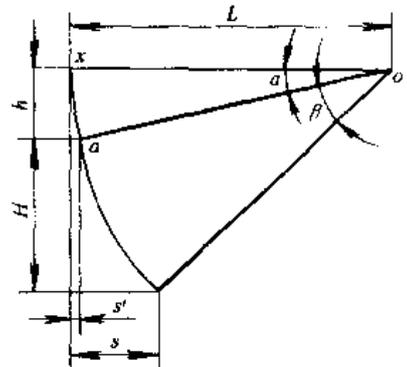


图 3-52 运动分析示意图

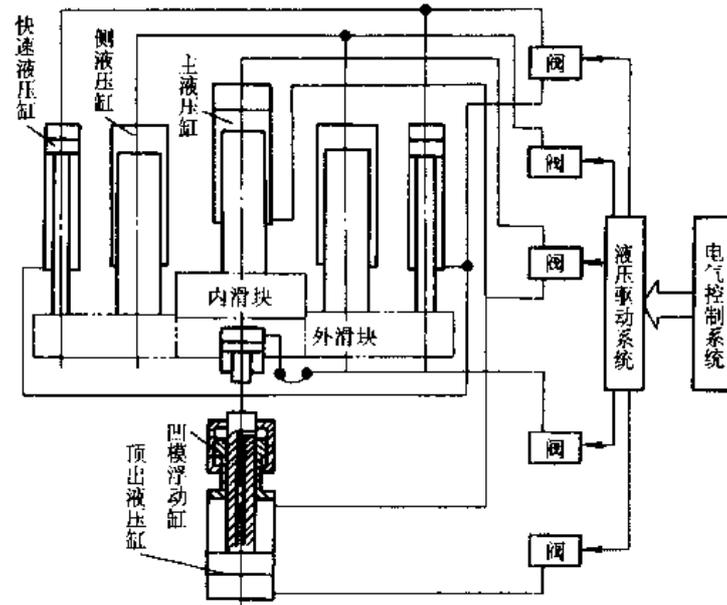


图 3-53 HYD-Y61-400/600 双动挤压液压机原理图

图 3-53 为华中理工大学与湖北省汉阳锻压机床总厂共同研制的 HYD-Y61 400-600 型双动挤压液压机的原理图。该机由框架式机身、内、外滑块、主液压缸、侧液压缸、快速液压缸、下凹模浮动液压缸和上、下顶出器液压缸等部分组成。内、外滑块的吨位分别为 400t、600t，空程速度均为 400mm/s，内滑块在压力下的引程速度为 70mm/s。

在该压力机上进行十字轴径向挤压模锻时，上半凹模固定在外滑块上，挤压冲头固定在内滑块上，下半凹模支承在下凹模浮动液压缸的活塞杆上。模锻时，首先外滑块下行使上半凹模同下半凹模闭合形成十字轴封闭型腔，然后内滑块下行带动冲头迫使置于挤压筒内的棒料毛坯实现径向挤压变形为十字轴精密锻件。变形结束后，内滑块首先带动冲头上行复位，然后外滑块回程带动上半凹模与下半凹模脱开，随之顶出器将锻件从上（下）凹模中顶出。图 3-54 为径向挤压的 EQ140 十字轴精密锻件。



图 3-54 EQ140 十字轴锻件

图 3-54 为径向挤压的 EQ140 十字轴精密锻件。

第四章 挤压工艺及模具设计

第一节 概 述

挤压是将金属毛坯放入挤压模具模腔内，在强大的压力和一定的速度条件下，迫使金属从模腔中挤出，从而获得所需形状、尺寸以及具有一定力学性能的挤压件。显然，挤压加工是靠模具来控制金属流动，靠金属体积的大量转移来成形零件。

一、挤压种类及基本方法

1. 按毛坯的温度不同分类

1) 冷挤压。在室温下对毛坯进行挤压。

2) 温挤压。将毛坯加热到金属再结晶温度下某个适合的温度范围内进行挤压。其变形实质与冷挤压基本相同，基本保持冷挤压变形的显著特点。

3) 热挤压。将毛坯加热到一般热锻温度范围内进行挤压。

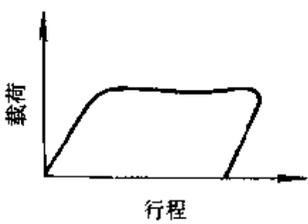
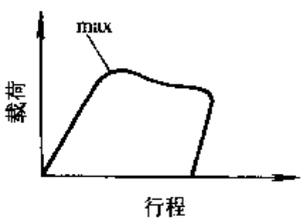
2. 按毛坯材料种类不同分类

1) 有色金属及其合金挤压。

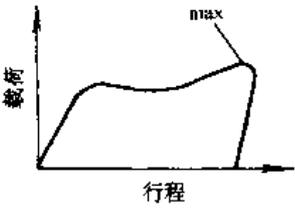
2) 黑色金属及其合金挤压。

挤压的成形速度范围很广，它既可在专用挤压设备上进行，也可在曲柄式机械压力机、液压机、螺旋压力机及高速锤上进行。但冷挤压的速度不能过高，热挤压的速度不能过低。挤压时设备速度特性同模具寿命的关系如表 4-1 所示。

表 4-1 设备速度特性同模具寿命的关系

		冷 锻		温 热 锻	
载荷行程曲线		影响模具寿命原因	压力机要求特性	影响模具寿命原因	压力机要求特性
正挤压		磨损	平均加压速度低	变形或磨损	加压速度快
反挤压 浅挤压		磨损或破损	接触速度低	变形或磨损	

(续)

		冷 锻		温 热 锻	
反 挤 压	深 挤 压		平均加压速度低, 下止点附近的加 压速度低	变形或磨耗	加压速度快
			磨耗或破损		

3. 挤压的基本方法

根据挤压时金属流动方向与凸模运动方向之间的关系,将常见的挤压方法分为如下几种:

(1) 正挤压 挤压时,金属的流动方向与凸模的运动方向一致。正挤压又分为实心件正挤压(图4-1a)和空心件正挤压(图4-1b)。挤压件的断面形状可以是圆形、椭圆形、扇形、矩形或棱柱形,也可以是非对称的等断面挤压件和型材。

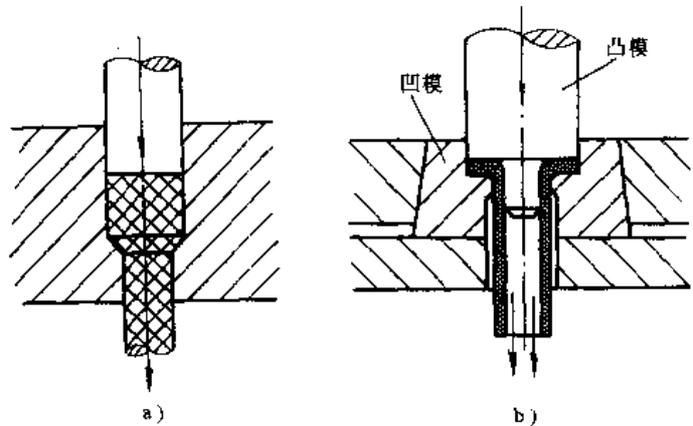


图 4-1 正挤压

a) 实心件正挤压 b) 空心件正挤压

(2) 反挤压 挤压时,金属的流动方向与凸模的运动方向相反,如图4-2所示。反挤压法适用于制造断面为圆形、方形、长方形、“山”形、多层圆和多格盒形的空心件。

(3) 复合挤压 挤压时,毛坯一部分金属的流动方向与凸模的运动方向相同,另一部分金属的流动方向与凸模运动方向相反,如图4-3所示。复合挤压适合于制造杯杆类零件。

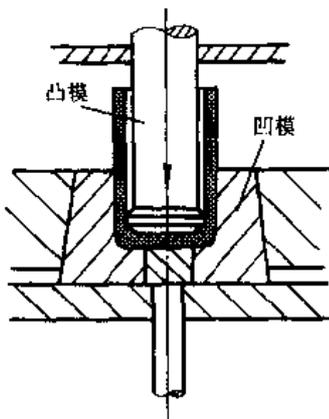


图 4-2 反挤压

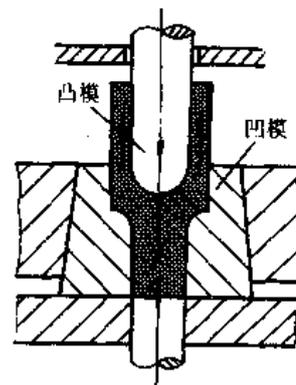


图 4-3 复合挤压

(4) 径向挤压 挤压时,金属的流动方向与凸模的运动方向垂直,如图4-4所示。径向挤压又分为分流式和汇集式径向挤压两种。径向挤压适用于制造十字轴、T形接头、小模数的直齿和斜齿轮等。

(5) 墩挤复合法 它是将局部墩粗和挤压结合在一起的加工方法,如图 4-5 所示。该法主要用于制造带法兰的空心杆类零件。

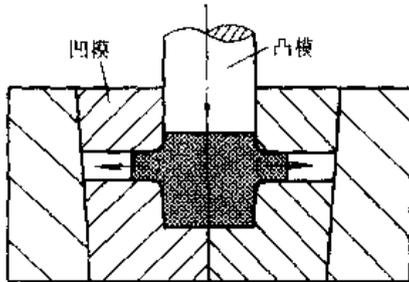


图 4-4 径向挤压

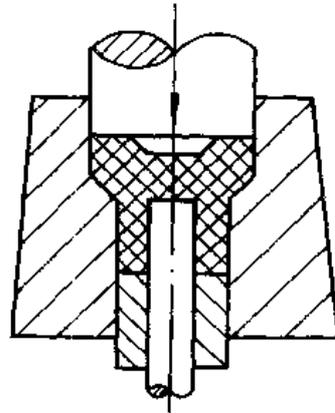


图 4-5 墩挤复合成形

二、挤压特点及应用范围

1. 冷挤压特点及应用范围

采用冷挤压加工可以降低原材料消耗,材料利用率高达 70%~80%。在冷挤压中,毛坯金属处于三向压应力状态,有利于提高金属材料的塑性且经挤压后金属材料的晶粒组织更加细小而密实;金属流线不被切断加上所产生的加工硬化特性,可使冷挤压件的强度大为提高;可以获得较高的尺寸精度和较低的表面粗糙度。

目前,冷挤压已在机械、汽车、仪表、电器、轻工、宇航、船舶、军工等工业部门得到较为广泛的应用。

2. 温挤压特点及应用范围

温挤压与冷挤压相比,挤压力大为减少;与热挤压相比,加热时的氧化、脱碳都较少,产品的尺寸精度高,且力学性能基本上接近冷挤压件。可见,温挤压综合体现了冷、热挤压的优点,避免了它们的缺点,因此,正在得到迅速发展。

3. 热挤压特点及应用范围

热挤压时,由于毛坯加热至一般的始锻温度,材料的变形抗力大为降低。因此,它不仅适用于有色金属及其合金铜、低碳钢、中碳钢,而且也可以成形高碳钢、高合金结构钢、不锈钢、工模具钢、耐热钢等。但由于加热时产生氧化、脱碳和热胀冷缩大等缺陷,必会降低产品的尺寸精度和表面质量。所以,它一般用于锻造毛坯精化和预成形。

当然,冷、热挤压也均有一些缺点。冷挤压单位压力大,热挤压单位压力较小,但因毛坯表面的氧化皮增大了接触面上的摩擦阻力,导致模具使用寿命不高。但随着模具材料、设计方法及润滑等配套技术的进步,挤压工艺的优越性必将得到充分发挥。

第二节 冷挤压工艺

一、各种挤压方法的金属流动规律

为了搞清楚各种挤压方法的金属流动情况,可以采用坐标网格法、视塑性法、光塑性法、密栅云纹法等实验研究方法和上限元法、有限元法等数值计算方法。下面采用简便的坐标网

格法来分析各种挤压方法的金属流动情况。

1. 正挤压实心件的金属流动情况

为了了解正挤压实心件的金属流动情况,可将圆柱体毛坯切成两块,见图4-6。在其中的-块剖面上刻上 $5\text{mm}\times 5\text{mm}\sim 20\text{mm}\times 20\text{mm}$ 的正方形网格,将拼合面涂上润滑油,再与另一块拼合在一起放入挤压凹模模腔内进行正挤压。当挤压至某一时刻时停止挤压,取出试件,将试件沿剖分面分开,此时可以观察到坐标网格的变化情况,见图4-7。由图中坐标网格的变化情况,可以对金属流动情况作如下分析:

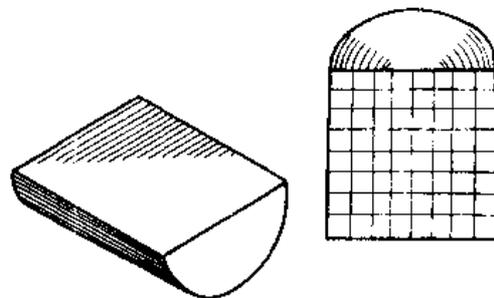


图4-6 毛坯上的坐标网格

1) 横向坐标线在出口处发生了较大的弯曲,且中间部分弯曲更剧烈,这是由于凹模与被挤压毛坯表面之间存在着接触摩擦,使金属在流动时外层滞后于中层的缘故。被挤毛坯的端部横向坐标线弯曲不大,这是由于该部分金属原来就处在凹模出口附近,挤压时迅速向外挤出,受摩擦影响较小。横向坐标线的间距从挤出部分端部开始逐渐增加,即 $l_3>l_2>l_1$,这说明挤出金属的纵向拉伸变形愈来愈大;而当达到某定值 l_5 时,间距 l_5 不再变化,说明此时的变形已处于稳定状态。

2) 纵向坐标线挤压后也发生了较大的弯曲。如果把开始向内倾斜的点连成I-I线,把开始向外倾斜的点连成II-II线。I-I线与II-II线之间所构成的区域为剧烈变形区。I-I线以左或II-II线以右坐标线基本上不变化,说明在这些区域内金属不发生塑性变形,只作刚性平移。

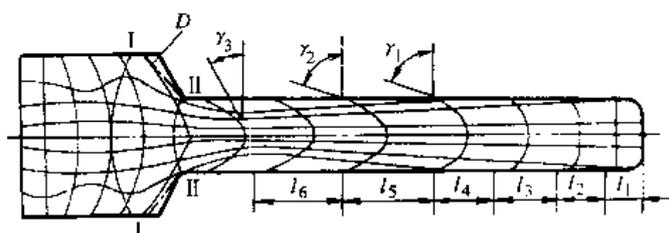


图4-7 正挤压实心件的网格变化情况

3) 正方形网格经过出口以后,变成了平行四边形,这说明金属除发生拉伸变形以外,还有剪切变形。愈接近外层,剪切角愈大,即 $\gamma_2>\gamma_3$,这是

由于外层金属受到摩擦阻力的影响较大,使得内外层的金属流动存在着较大差异的缘故。刚开始挤出端部剪切角较小,以后逐渐增大,即 $\gamma_2>\gamma_3$,这是由于刚开始挤压时,受摩擦影响较小的缘故,当进入稳定变形状态以后,相应处的剪切角保持不变。

4) 凹模出口转角 D 处,在挤压过程中形成不流动的“死区”。“死区”的大小受摩擦阻力、凹模形状与尺寸等因素的影响,当摩擦阻力越大、凹模锥角越大时,则“死区”也越大。

从上述分析可以看出,正挤压实心件的变形特点是:金属进入I-I至II-II线之间的区域时才发生变形,此区称为剧烈变形区。进入此区以前或离开此区以后,金属几乎不变形,仅作刚性平移。在变形区内,金属的流动是不均匀的,中心层流动快,外层流动慢;而当进入稳定变形阶段以后,不均匀变形的程度是相同的。在凹模出口转角处会产生程度不同的金属“死区”。

2. 正挤压空心件的金属流动情况

正挤压空心件的坐标网格变化情况见图4-8。毛坯除了受凹模工作表面的接触摩擦影响外,还受到心棒表面接触摩擦的影响,因而毛坯上的横向坐标线向后弯曲,不再有产生超前

流动的中心区域，这说明正挤压空心件的金属流动比正挤压实心件均匀一些。在进入稳定流动时，剧烈变形区也是集中在凹模锥孔附近高度很小的范围内，金属在进入变形区以前或离开变形区以后，几乎不发生塑性变形，仅作刚性平移。

3. 反挤压杯形件的金属流动情况

用实心毛坯反挤压杯形件时，挤压变形过程的坐标网格变化情况见图 4-9。图 4-9b 表示毛坯高径比大于 1 进入稳定挤压状态时的网格变化情况。此时可将毛坯内部的变形情况分为三个区域：Ⅰ区为金属“死区”，它紧贴着凸模端表面，呈倒锥形，该锥形大小随凸模端表面与毛坯间的摩擦阻力大小而变化；Ⅱ区为剧烈变形区，毛坯金属在此区域内产生剧烈流动，该区的轴向范围大约为 $(0.01 \sim 0.2) d_1$ (d_1 为反挤压凸模直径)。当凸模下行到毛坯底部尺寸仍大于此界限尺寸时，仍为稳定变形状态，金属流动局限于Ⅰ区内，Ⅰ区以下即紧贴凹模腔底部的一部分金属保持原状，不产生塑性变形；当凸模再继续下行到毛坯残余厚度小于此界限尺寸时，在此残余厚度内的全部金属材料皆产生流动，成为如图 4-9c 所示的非稳定变形状态，图中 D 表示金属“死区”；Ⅲ区为刚性平移区，剧烈变形区的金属流动至形成杯壁后，就不再变形，而是以刚性平移的形式往上运动，该运动一直延续到凸模停止工作时为止。

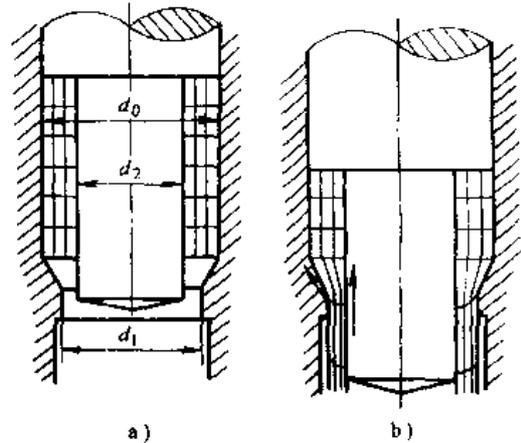


图 4-8 正挤压空心件的金属流动情况

a) 挤压前的初始状态 b) 挤压时的网格变化情况

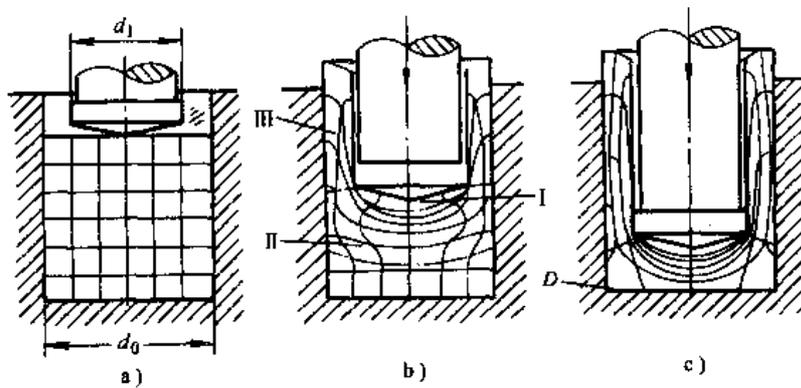


图 4-9 反挤压杯形件的金属流动情况

a) 反挤压开始状态 b) 进入稳定变形状态 c) 反挤压终了状态

4. 复合挤压时的金属流动情况

图 4-10 为杯杆零件复合挤压，上部金属材料的流动情况与杯形件反挤压相似，下部与实心件正挤压相似，图中 D 表示金属“死区”。

二、应力与应变状态的分析

挤压变形时，变形区内任一点的应力与应变状态，可用主应力简图和主应变简图来表示。众所周知，挤压变形区内的基本应力状态是三向受压，即径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 以及轴向应力 σ_z 都是压应力，但是在不同区域中主应力和主应变的顺序是不同的。

1. 正挤压实心件的应力应变状态

实心件正挤压时,如果摩擦阻力很小且毛坯的长径比也较小时,可把变形区分为两个不同区域,见图 4-11a。由图可以看出,区域 1 与环形毛坯在封闭模中的墩粗变形相似,其主应力与主应变的顺序是:径向应力 σ_r 为最大主应力 σ_1 (代数值最大,绝对值最小),径向应变 ϵ_r 为最大主应变 ϵ_1 (拉应变);轴向应力 σ_z 为最小主应力 σ_3 (代数值最小,绝对值最大),轴向应变 ϵ_z 为最小主应变 ϵ_3 (压应变);切向应力 σ_θ 为中间主应力 σ_2 ,切向应变 ϵ_θ 为中间主应变 ϵ_2 。而区域 2 的变形却与棒子摔圆的一个圆棒相似,其主应力、主应变的顺序是:轴向应力 σ_z 为 σ_1 ,轴向应变 ϵ_z 为 ϵ_1 ;切向应力 σ_θ 为 σ_3 ,切向应变 ϵ_θ 为 ϵ_3 ;径向应力 σ_r 、应变 ϵ_r 与切向应力 σ_θ 、应变 ϵ_θ 近似相等,为中间主应力 σ_2 、中间主应变 ϵ_2 。

2. 反挤压杯形件的应力应变状态

杯形件反挤压时也可把变形区分为两个不同区域,见图 4-11b。由图可知,区域 1 与圆柱体毛坯墩粗相似,切向应力 σ_θ 为 σ_1 ,切向应变 ϵ_θ 为 ϵ_1 ;径向应力 σ_r 为 σ_2 ,径向应变 ϵ_r 为 ϵ_2 ;轴向应力 σ_z 为 σ_3 ,轴向应变 ϵ_z 为 ϵ_3 。而区域 3 与受内压的圆环相似,轴向应力 σ_z 为 σ_1 ,轴向应变 ϵ_z 为 ϵ_1 ;切向应力 σ_θ 为 σ_2 ,切向应变 ϵ_θ 为 ϵ_2 ;径向应力 σ_r 为 σ_3 ,径向应变 ϵ_r 为 ϵ_3 。

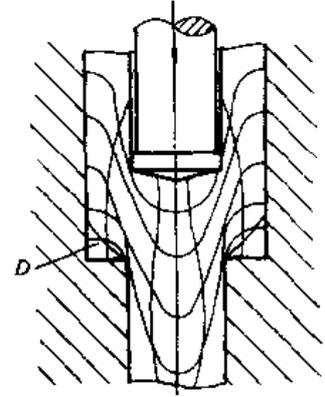


图 4-10 杯杆件复合挤压时金属的流动情况

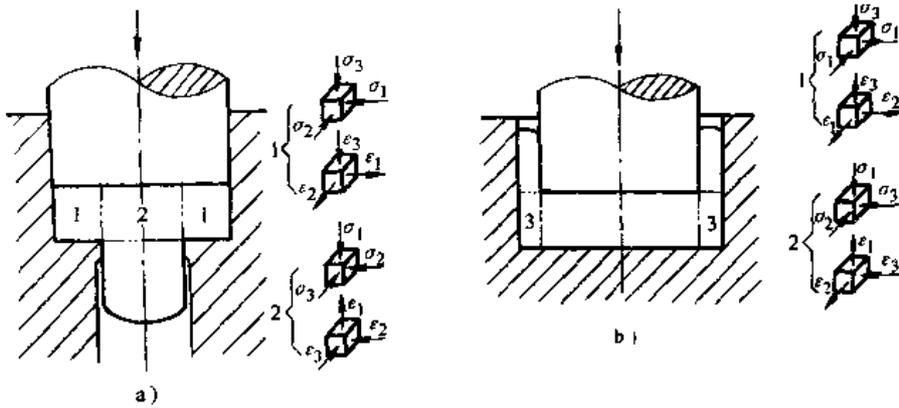


图 4-11 挤压变形区内的应力应变状态
a) 正挤压 b) 反挤压

三、冷挤压变形力的计算

1. 挤压变形程度的表示方法

在挤压工艺中,表示变形程度的方法有如下三种。

(1) 断面缩减率 ϵ_A

$$\epsilon_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (4-1)$$

式中 A_0 ——挤压变形前毛坯的横断面积;

A_1 ——挤压变形后工件的横断面积。

(2) 挤压比 G

$$G = \frac{A_0}{A_1} \quad (4-2)$$

(3) 对数变形程度 ϵ_e

$$\epsilon_c = \ln \frac{A_0}{A_1} \tag{4-3}$$

三者之间存在着如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_A &= \left(1 - \frac{1}{G} \right) \times 100\% \\ \epsilon_c &= \ln G \\ \epsilon_c &= \ln \frac{1}{1 - \epsilon_A} \end{aligned} \right\} \tag{4-4}$$

2. 影响冷挤压力的主要因素

(1) 金属的化学成分及力学性能 钢中含碳、含铬量的多少对挤压力的影响较大，而C的影响远较Cr大。当仅考虑C的含量对单位挤压力的影响时，可用影响系数 K_c 来表示，见图4-12。若综合考虑C、Cr含量的影响，可用下式来计算综合影响系数 K_c ：

$$\begin{aligned} \text{正挤压 } K_c &= 0.8 + C + 0.12Cr \\ \text{反挤压 } K_c &= 0.875 + 1.25(C + 0.12Cr) \end{aligned}$$

式中 C、Cr——碳、铬的质量分数。

有色金属的挤压力较低，常用有色金属的单位挤压力按下列顺序增大：Pb→Sn→Al→Cu。

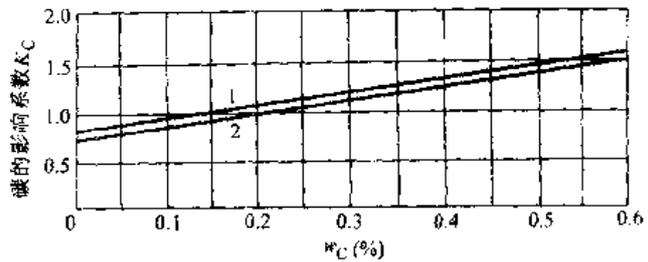


图 4-12 含碳量对单位挤压力的影响系数
1 正挤压 2 反挤压

冷挤压金属的力学性能对挤压力的影响很大，是决定单位挤压力的基本因素。抗拉强度 σ_b 和屈服点 σ_s 或屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 高的材料，其单位挤压力较大。金属材料经软化热处理后，其抗拉强度、屈服强度、硬度均显著下降，从而可以使变形力降低。此外，金属材料加工硬化敏感性越大，冷挤压时所需变形力也越大。

(2) 冷挤压变形方式 对于同一种金属材料来说，冷挤压变形方式不同，所需的单位挤压力也不同。

图4-13所示的三条曲线，分别表示对15钢进行实心件正挤压、空心件正挤压和反挤压时的单位挤压力的变化情况。由图可知，当断面缩减率相同时，反挤压的单位挤压力最高，正挤压实心件与正挤压空心件比较接近，皆比反挤压低。至于复合挤压时单位挤压力的关系，与正、反两个方向的挤压比有关。

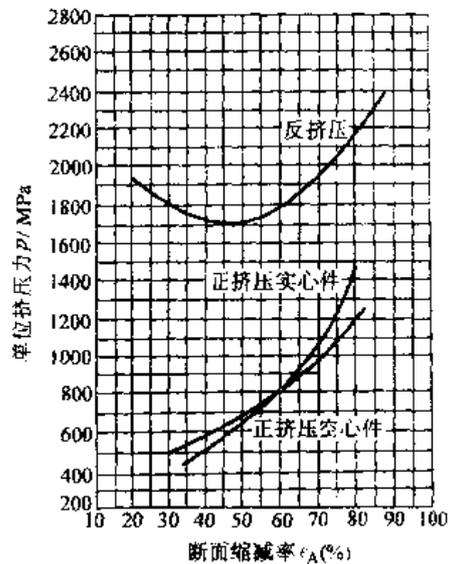


图 4-13 不同冷挤压方式对单位挤压力的影响

(3) 变形程度对挤压力的影响 图4-14为正挤压时单位挤压力与断面缩减率的关系。由图可见，所有材料的单位挤压力 p 均随断面缩减率 ϵ_A 值的增大而加大。当 $\epsilon_A < 60\%$ 时， p 与 ϵ_A 几乎均成直线关系，但直线斜率比较平缓；而当 $\epsilon_A > 60\%$ 时， p 值上升率迅速增大，其中当 ϵ_A 由60%上升到80%时，单位挤压力的增长率要提高将近一倍。

因此, 在进行工艺设计时, 对于碳钢等较高强度的材料, 为了保证较长的模具寿命, 若 $\epsilon_A > 75\%$ 时, 最好采用多工序成形。

图 4-15 为反挤压时单位挤压力与断面缩减率的关系。由图可见, 随着断面缩减率 ϵ_A 的增加, 单位挤压力 p 有一最低值。材料种类不同, 其与最小单位挤压力相对应的 ϵ_A 稍有变化, 一般在 $40\% \sim 60\%$ 之间, 而小于 40% 或大于 60% 时, 单位挤压力均迅速增加。因此, 为了保证较低的单位挤压力和较长的模具寿命, 从工艺设计角度出发, 选 $\epsilon_A = 40\% \sim 60\%$ 较为合理。

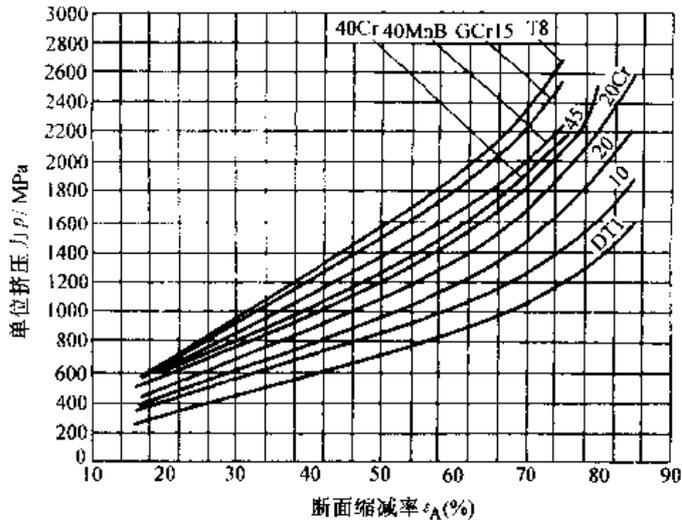


图 4-14 正挤压时单位挤压力与断面缩减率的关系

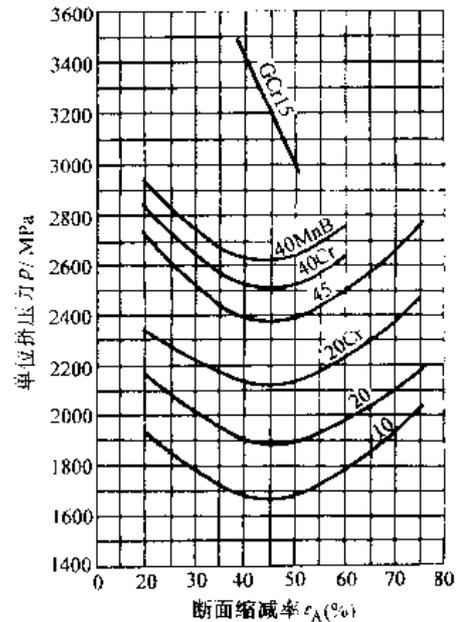


图 4-15 反挤压时单位挤压力与断面缩减率的关系

(4) 模具几何形状对挤压力的影响 模具几何形状是指模具工作部分的几何形状。现就正、反挤压两种情况分别介绍于下。

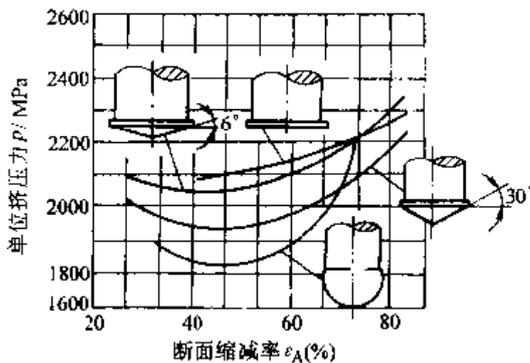


图 4-16 反挤压凸模形状对单位挤压力的影响

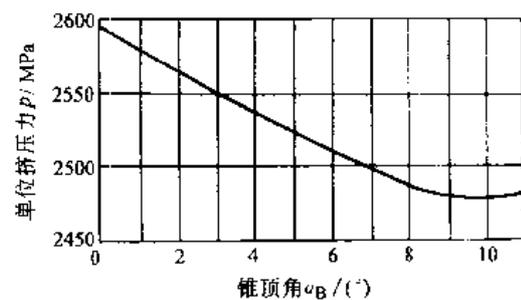


图 4-17 单位挤压力与凸模锥顶角的关系

反挤压时, 凸模的形状是多样的, 不同形状对单位挤压力的影响见图 4-16。平底凸模的单位挤压力最大, 球形凸模的单位挤压力最小, 而当 $\epsilon_A > 60\%$ 时, 球形凸模的单位挤压力便急剧上升。因此, 球形凸模仅适用于浅孔反挤压。锥形凸模的单位挤压力较平底小, 且加工制造较球容易, 当 ϵ_A 超过 70% 以上时, 锥形比球形的单位挤压力小, 但锥形凸模易造成壁

厚不均。因此，在生产实际中常用带平底的锥形凸模。锥形凸模工作部分的几何尺寸，尤其是锥顶角 α_B 对单位挤压力的影响最大。所谓锥顶角 α_B 是指凸模锥角补角的一半。锥形凸模的锥顶角 α_B 对单位挤压力的影响见图 4-17。当 $\alpha_B=7^\circ\sim 9^\circ$ 时，单位挤压力为最小。

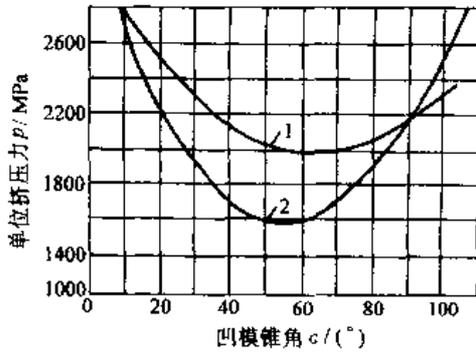


图 4-18 凹模锥角对单位挤压力的影响
(低碳钢 $\epsilon_A=75\%$)

1—正挤实心件 2—正挤空心件

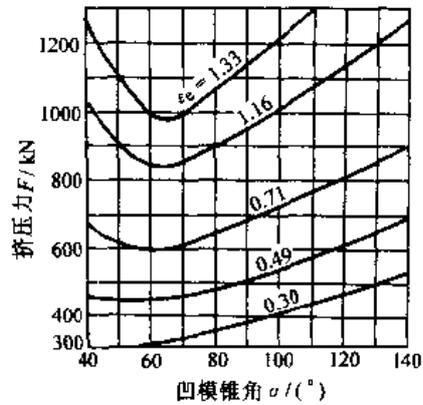


图 4-19 变形程度对凹模锥角的影响

正挤压时，在成形零件允许的情况下，正挤压凹模一般都做成锥形。锥形凹模对单位挤压力影响最大的是凹模锥角 α 的大小（见图 4-18）。当 $\alpha=60^\circ$ 左右时，单位挤压力最小；当 $\alpha < 60^\circ$ 或 $\alpha > 60^\circ$ 时，单位挤压力皆较大，使单位挤压力最小的合理锥角 α_r ，是随变形程度的增加而增大的，如图 4-19 所示。当对数变形程度 ϵ_c 从 0.30 增至 1.33 时， α_r 从 40° 增大到 66° 左右。当锥角 α 较小时，出现挤压力上升的现象，这是由于被挤压毛坯在凹模锥角处所经过的距离较长，真实接触面积率 β 增大而导致摩擦阻力增加的缘故。变形程度越大，单位挤压力也越大，这是因为变形程度大，被挤压金属在凹模锥角处所经过的路程增大，从而使摩擦阻力随之增大的缘故。当凹模锥角大于 66° 时，挤压力随 α 增大而增加。这是因为 α 增大，被挤压金属在锥面处不易流动，故形成了较大的流动阻力，导致挤压力增大。当 $\alpha=180^\circ$ 时，会形成较大的金属死区，此时挤压力最大。但另一方面，考虑到 α 较小时，挤压余料增加，这会增加后续机械加工工序的工时及增大材料消耗。因此，综合诸多因素，取凹模锥角 $\alpha=90^\circ\sim 150^\circ$ 为宜，其中 $\alpha=120^\circ$ 最常用。

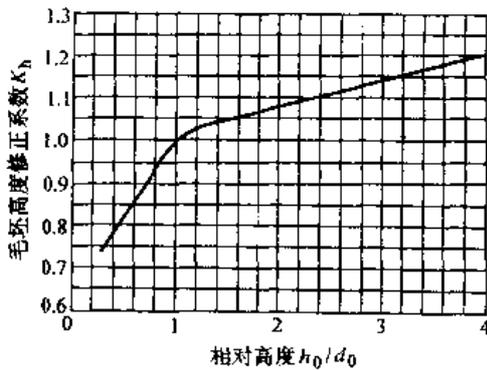


图 4-20 正挤压的毛坯高度修正系数 K_h 与 h_0/d_0 的关系

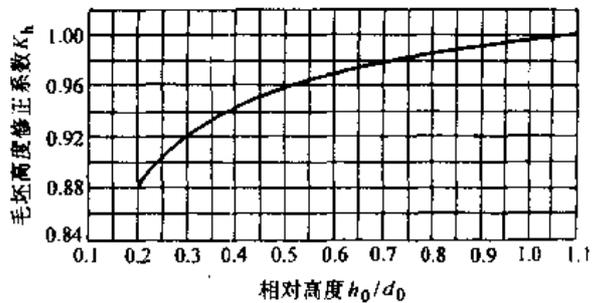


图 4-21 反挤压的毛坯高度修正系数 K_h 与 h_0/d_0 的关系

(5) 毛坯高度对挤压力的影响 毛坯高度的变化，影响到毛坯与凹模真实接触面积率的改变，进而影响到摩擦阻力的变化，毛坯高度对单位挤压力的影响用一系数来表示。正挤压

时,不同的 h_0/d_0 (h_0 为毛坯高度, d_0 为毛坯直径)与毛坯高度修正系数 K_h 的关系见图4-20;当 $h_0/d_0 < 1$ 时, K_h 值的变化率大;当 $h_0/d_0 > 1$ 时,则变化减慢。反挤压时,不同的 h_0/d_0 与毛坯高度修正系数 K_h 的关系见图4-21; $h_0/d_0 < 1$ 时 K_h 值随着 h_0/d_0 的减小而有所下降;当 $h_0/d_0 > 1$ 时,随着 h_0/d_0 的增大, K_h 值增加不明显。

(6) 润滑条件对挤压力的影响 良好的润滑状态可使真实接触面积率 β 大大减小,从而减小摩擦阻力,因此,单位挤压力较低。表4-2和表4-3为钢件正挤压和反挤压时,不同润滑状态对单位挤压力的影响。

表 4-2 钢质正挤压实心件不同润滑状态对单位挤压力的影响

润滑状态	无润滑	机油	镀锌	镀铜	磷化	磷化加石灰水	磷化加皂化
单位挤压力	1	0.95	0.75	0.63	0.56	0.55	0.50

注:本表以无润滑状态作为基准,单位挤压力为1。

表 4-3 钢质反挤压杯形件不同润滑状态对单位挤压力的影响

润滑状态	无润滑	机油加石墨	磷化加皂化	镀铝加机油	MoS ₂ 油剂	MoS ₂ 粉
单位挤压力	1	0.95	0.87	0.86	0.80	0.80

注:本表以无润滑状态作为基准,单位挤压力为1。

(7) 变形速度对挤压力的影响 变形速度对单位挤压力的影响不太大。正挤压时的情况如图4-22所示。当 $\epsilon_A < 40\%$ 时,热效应的影响较小,加工硬化占优势,随着挤压速度增加,挤压力略有增加;而当 $\epsilon_A > 40\%$ 时,热效应的影响较大,毛坯温度升高,硬度下降,随着挤压速度的增加,单位挤压力反而减少。

3. 冷挤压力的计算

挤压力是拟定挤压变形工序、设计模具、选择挤压设备的重要依据。挤压力或所选设备吨位 P 可按下式计算

$$P = CpA \quad (4-5)$$

式中 P ——单位挤压力 (MPa);

A ——凸模工作部分的投影面积 (mm^2);

C ——安全系数,一般取1.3。

由上式可见,计算挤压力 F 的主要内容是如何确定单位挤压力,其常用的方法有如下三种。

(1) 单位挤压力的理论计算法 其经典理论计算方法有主应力法、滑移线场法、上限法和变形功法等,采用这些方法求得单位挤压力的精确值是比较困难的,只能求得近似解。而上限单元法和有限元法等现代计算方法是根据变形体内实际应力应变状态和边界条件,采用计算机运算求解,其精度大为提高,因而正日益受到人们的重视。鉴于这些经典和现代的计算方法已有不少专著论述,下面仅列出两种应用较为简便的经典理论的计算公式。

1) 用主应力法计算单位挤压力

正挤压实心件

$$p_1 = 2p_k \left(\ln \frac{d_0}{d_1} + 2\mu_1 \frac{h_1}{d_1} \right) e^{\frac{2\mu_1 h_0}{d_0}} \quad (4-6)$$

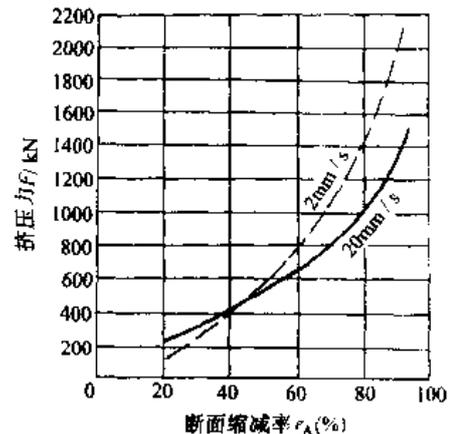


图 4-22 正挤压时挤压速度对压力的影响

式中 p_k ——金属材料的流动应力；
 h_0 ——坯料的高度；
 μ_t ——接触面上的摩擦系数。

其余符号见图 4-23。

反挤压杯形件

$$p_b = p_k \left[\frac{d_0^2}{d_1^2} \ln \frac{d_0^2}{d_0^2 - d_1^2} + (1 + \mu_t) \left(1 + \ln \frac{d_0^2}{d_1^2 - d_1^2} \right) \right] \quad (4-7)$$

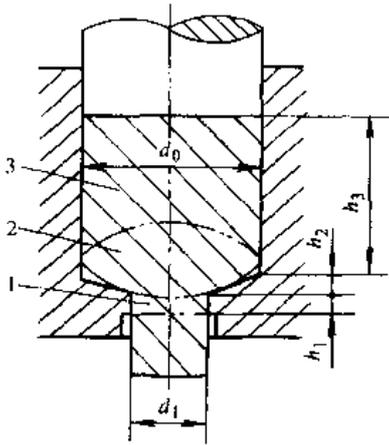


图 4-23 正挤压实心件的变形模型
 1—凹模出口部分 2—锥形部分
 3—直筒部分

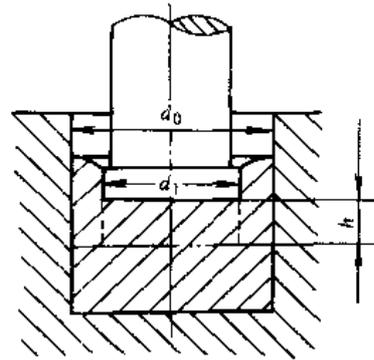


图 4-24 反挤压初始状态

式中符号见图 4-24。

2) 用变形功法计算单位挤压力
 平底凹模内正挤压实心件

$$p_t = 2\tau_k \left(1.2 + \ln \frac{A_0}{A_1} \right) \quad (4-8)$$

式中 τ_k ——金属材料的抗剪屈服应力(MPa)；
 A_0 ——正挤压前毛坯的横断面积(mm²)；
 A_1 ——正挤压后工件的横断面积(mm²)；

反挤压杯形件

$$p_b = 2\tau_k \left[1.5 + \frac{1}{1 - \frac{d^2}{D^2}} \ln \frac{D}{d} + \frac{2}{\sqrt{3 \frac{d}{D} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)}} \right] \quad (4-9)$$

式中 D ——反挤压杯形件外径(mm)；
 d ——反挤压杯形件内径(mm)。

(2) 单位挤压力的经验计算 目前有许多计算冷挤压单位挤压力的经验公式，比较简便且常用的计算公式如下

$$p = xn\sigma_b \quad (4-10)$$

$$n = a \ln \frac{A_0}{A_1} + b$$

式中 p ——单位挤压力 (MPa);

n ——各种因素对冷挤压单位挤压力影响系数的平均值;

a 、 b ——与材料有关的系数, 对于低碳钢: $a=2.8$, $b=0.75$, 对于有色金属 (除铝在平底凹模内正挤压外): $a=3.14$, $b=0.8$;

A_0 、 A_1 ——毛坯挤压前后的断面积;

x ——模具形状影响系数, 可查图 4-25 得;

σ_b ——冷挤压件材料的抗拉强度 (MPa)。

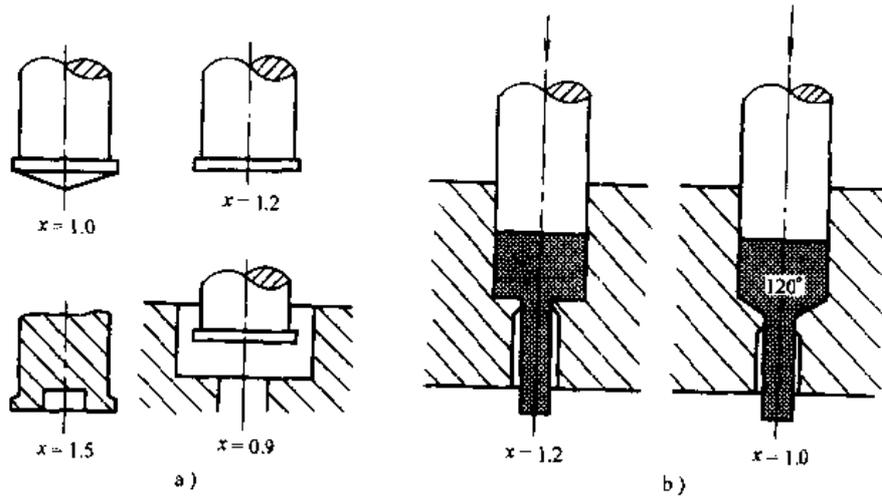


图 4-25 模具形状影响系数

a) 反挤压 b) 正挤压

锻造时的单位挤压力可由下式计算:

$$p = y p_k A \tag{4-11}$$

(4-11)

式中 y ——模具的约束系数, 由图 4-26 查得;

p_k ——材料的变形抗力 (MPa);

A ——成形终了时挤压头部断面积 (mm^2)。

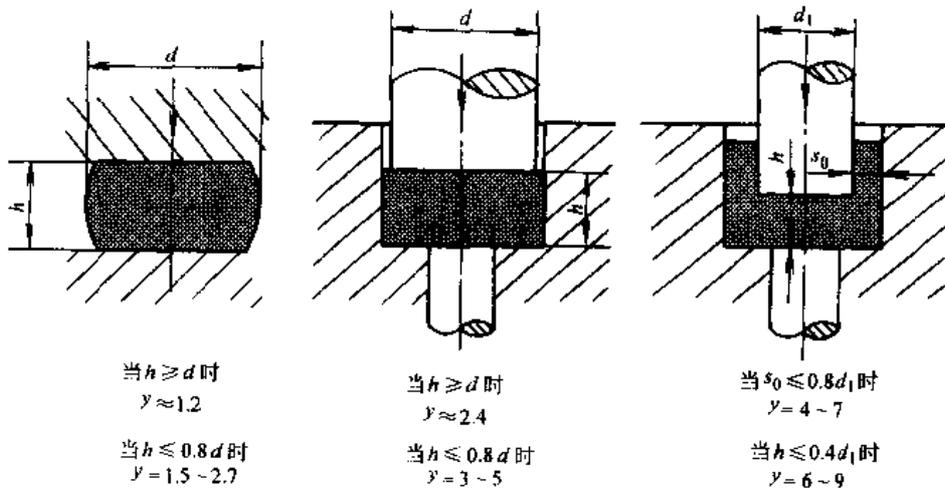


图 4-26

在生产实际中,估算单位挤压力也可采用下列经验数据:

钢材反挤压	1500~2500MPa
钢材正挤压	1000~2000MPa
纯铝挤压	600~1000MPa
硬铝挤压	1000~1500MPa
纯铜挤压	800~1500MPa
黄铜挤压	1000~2000MPa

变形程度较大时取上限,变形程度较小时取下限。

钢材冷挤压时,在最佳变形程度范围内,不同挤压方法的单位挤压力见表4-4,可供选用。

表4-4 钢质挤压件不同挤压方法时的单位挤压力

冷挤压方法	$\omega_c < 0.1\%$ 的低碳钢		$\omega_c > 0.1\%$ 的低碳钢及渗碳用钢		$\omega_c < 0.5\%$ 的中碳钢及合金钢	
	ϵ_A (%)	p /MPa	ϵ_A (%)	p /MPa	ϵ_A (%)	p /MPa
正挤压	50~80	1400~2000	50~70	1600~2500	40~60	2000~2500
减径挤压	25~30	900~1100	24~28	1000~1300	23~28	1150~1500
反挤压	40~70	1600~2200	40~70	1800~2500	30~60	2000~2500
自由微挤	50~60	500~700	50~60	800~1000	50~60	1000~1500
模内微挤	30~50	1000~1600	30~50	160~2000	30~50	1800~2500

(3) 挤压力的图表算法

1) 黑色金属挤压力的图表算法。这里仅介绍国际冷锻协会(ICFG)所推荐的图表算法。

图4-27、图4-28是以挤压比 G 和材料的硬度 HBS 这两个影响挤压力的主要因素为计算基础,此外,还考虑了凹模锥角 α (对正挤压)和毛坯高径比 h_0/d_0 的影响。其他因素影响很小,予以忽略。坯料采用磷化和润滑处理。

2) 有色金属挤压力的图表算法。图4-29、图4-30分别为有色金属的正、反挤压的单位挤压力的图算表。

其查找方法是按照图表中箭头所示的顺序查得。

四、冷挤压工艺

1. 冷挤压毛坯的制备

(1) 毛坯形状和尺寸的确定及下料 正挤压用的毛坯形状主要有三种形式,见图4-31。图a、图b由原材料直接制成;图c、图d由原材料经反挤压制成。反挤压用的毛坯形状主要有两种形式,见图4-32,都由原材料直接制成。

毛坯的外形一般为圆形。对于用有色金属板料作为原材料进行冷挤压时,为了提高材料的利用率,可以采用六方或其他不与凹模内腔形状相一致的多边形毛坯。

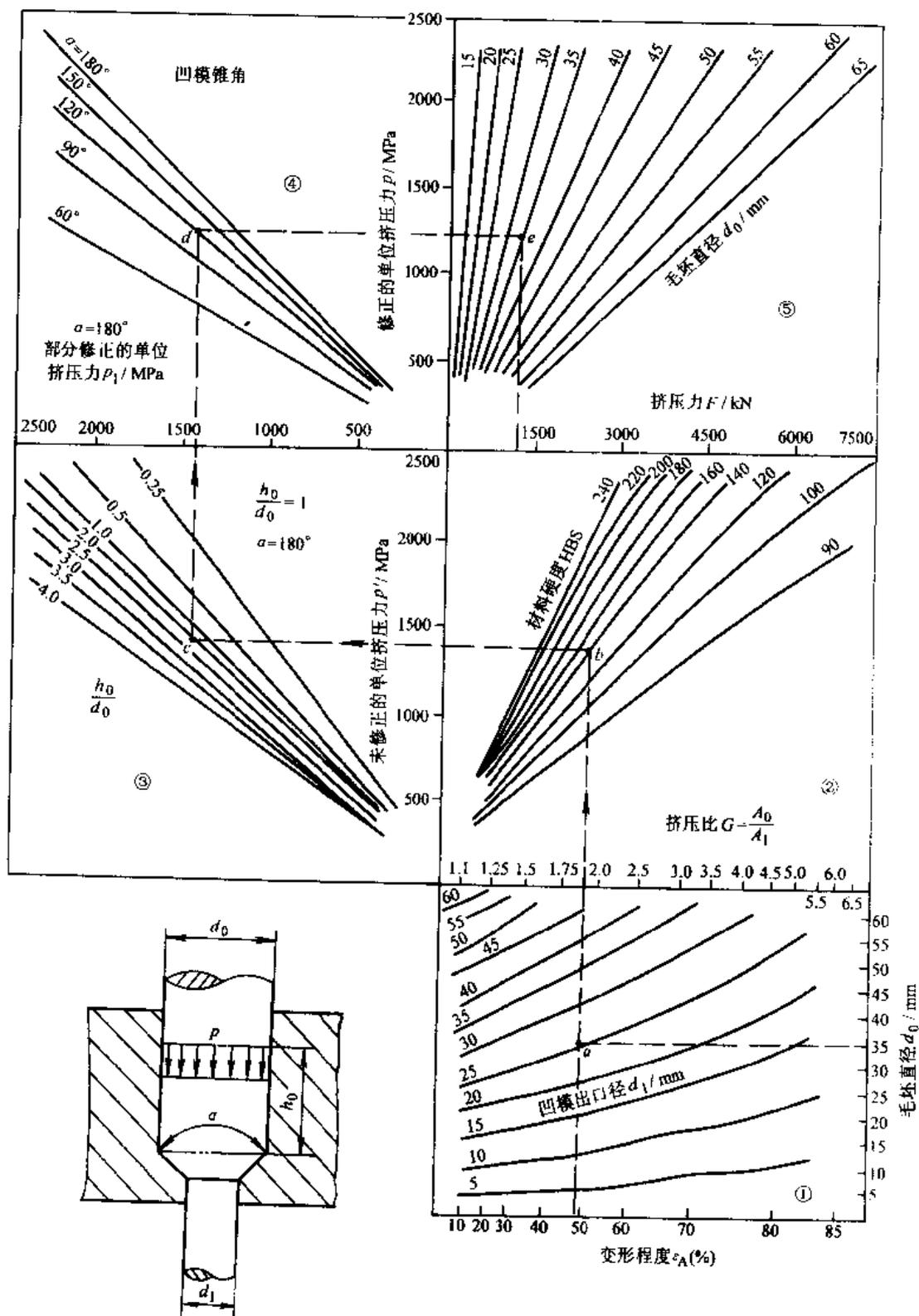


图 4-27 正挤压实心件挤压力图算表

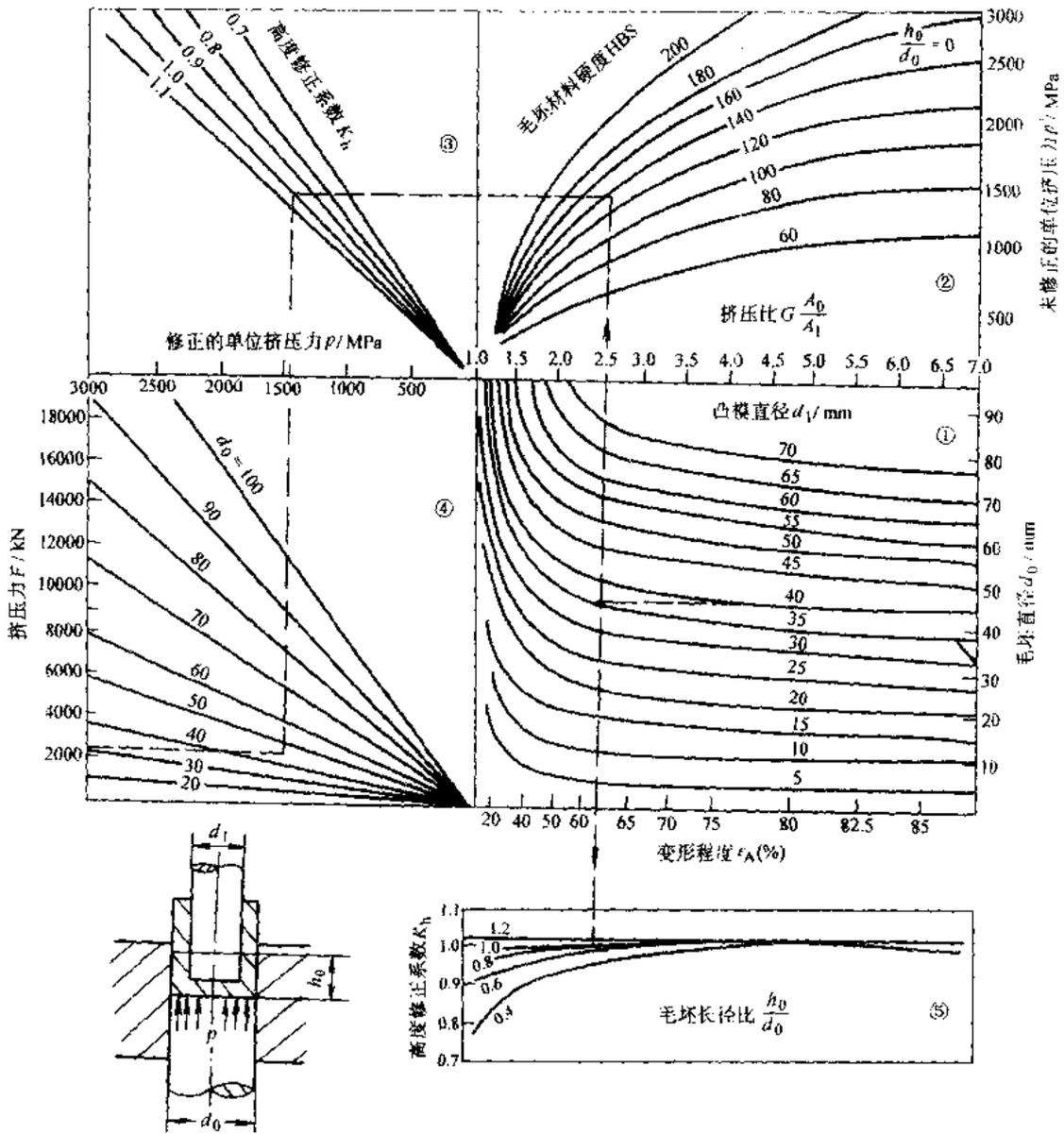


图 4-28 反挤压求挤压力图算表

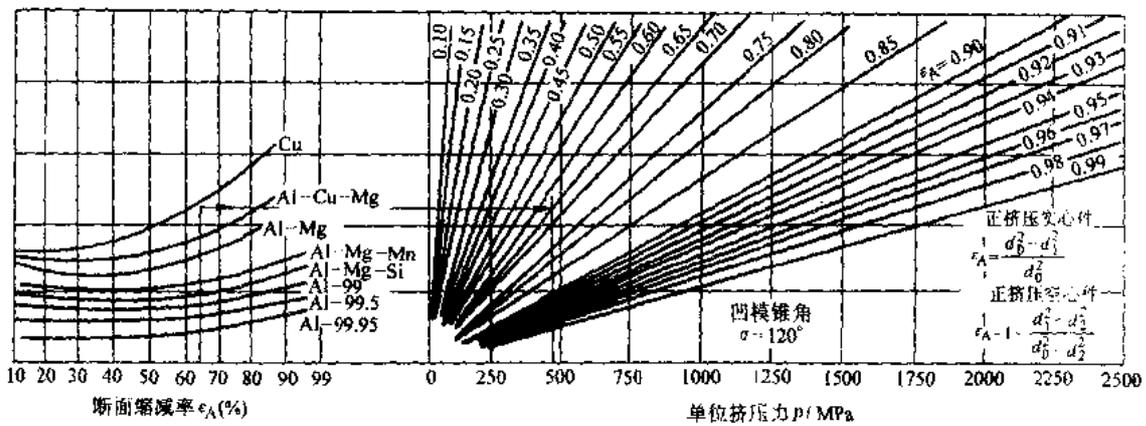


图 4-29 有色金属正挤压时单位挤压力图算表

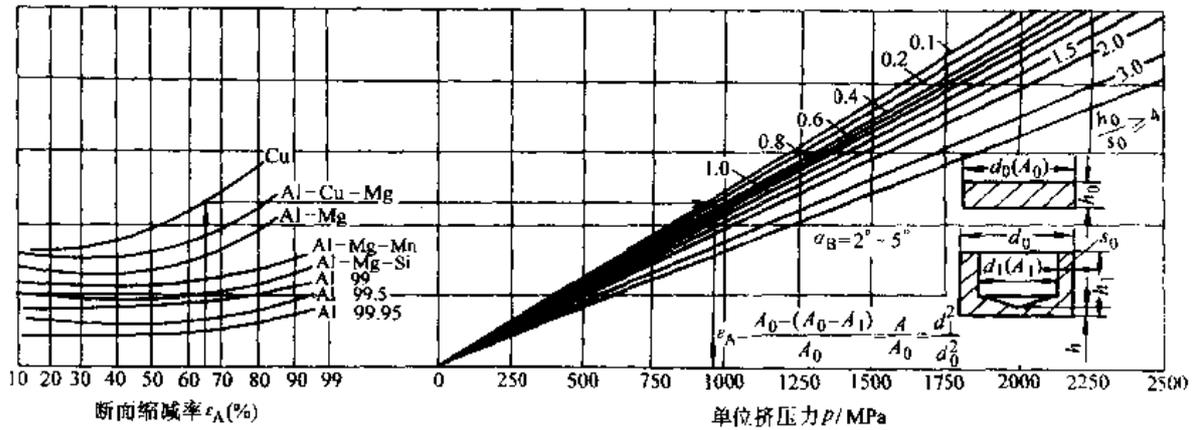


图 4-30 有色金属反挤压时单位挤压力图算表

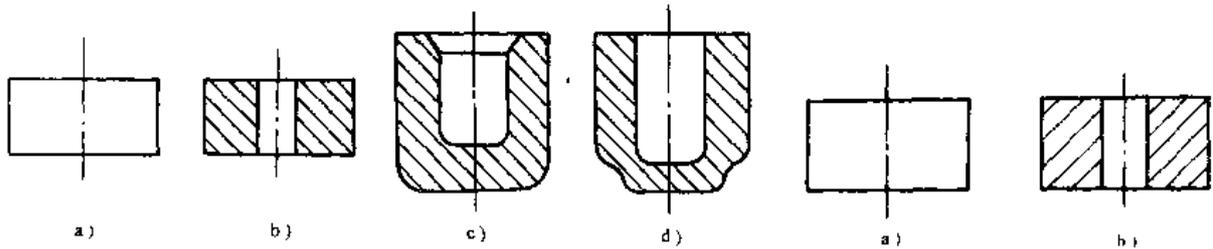


图 4-31 正挤压用的毛坯形状

图 4-32 反挤压用的毛坯形状

毛坯的体积按体积不变条件计算。如果冷挤压后还要进行切削加工，则计算毛坯体积时还应加上修边量，即

$$V_0 = V_p + V_s \tag{4-12}$$

式中 V_0 ——毛坯体积 (mm^3)；
 V_p ——挤压件体积 (mm^3)；
 V_s ——修边量体积 (mm^3)。

不同挤压件的修边量 Δh 可参照表 4-5、表 4-6 选取。挤压件体积的计算方法是先将挤压件分成若干个简单的几何形状，分别算出这些简单几何形状的体积，然后相加，其和即为挤压件的体积。

表 4-5 旋转体冷挤压件高度修边量 Δh 值 (mm)

挤压高度	10	10~20	20~30	30~40	40~60	60~80	80~100
修边量 Δh	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

注：1. 当挤压件高度大于 100mm 时，修边量为高度的 5%。
 2. 复合挤压件的修边量应适当加大。
 3. 矩形挤压件的修边量，按表列数据加倍。

表 4-6 大量生产铝质外壳所用的修边量 Δh 值 (mm)

挤压件高度	15~20	20~50	50~100
修边量 Δh	8~10	10~13	15~20

注：表列数值适用于大量生产壁厚为 0.3~0.4mm 的薄壁反挤压杯形件。

毛坯的外径可根据凹模腔相应尺寸决定。为了便于将毛坯放入凹模腔内，毛坯外径应比凹模腔直径小 0.1~0.2mm。空心毛坯内径应根据凸模心棒直径而定。为了便于将凸模心棒伸入毛坯内孔，一般应使毛坯内孔径比凸模心棒直径大 0.05~0.1mm。若挤压件的内孔尺寸精度要求不高，则该值可取 0.1~0.2mm；若挤压件的内孔尺寸精度要求较高，则该值只能取 0.01~0.05mm。毛坯径向尺寸确定后，就可算出横断面积。于是毛坯高度就可由体积和断面积求得。

毛坯的形状和尺寸确定后就着手下料，其下料方法可根据对毛坯下料质量要求和设备条件按第一章中所介绍的方法选择。

(2) 毛坯的软化处理。为了降低毛坯的变形抗力，提高塑性，改善组织，细化晶粒，使金属材料易于冷挤压，通常在冷挤压前或多道冷挤压工序之间必须进行软化处理。冷挤压常用的金属材料软化处理规范见表 4-7。

表 4-7 常用冷挤压材料的软化热处理规范

序号	冷挤压材料	热处理	规 范	处理前硬度 HBS	处理后硬度 HBS	附 注
1	纯铝 L1、L2、L3、L4、L5	退火	420°C 保温 2~4h 随炉冷却	-	15~19	
2	铝镁合金 LF2	退火	390~400°C 保温 5h 随炉冷却到 150°C	-	38~39	
3	硬铝 LY12	退火	400~420°C 保温 4h 随炉冷却到 150°C	105	55~60	
4	硬铝 LY11	退火	410~420°C 保温 4h 随炉冷却到 150°C		53~55	
5	锻铝 LD5	退火	410±10°C 保温 4h 随炉冷却到 150°C		50~51	
6	纯铜 Cu-1~Cu-2 无氧铜	退火	710~720°C 保温 4h 随炉冷却	110	38~42	也可采用淬火软化
7	锡磷青铜 QSn6.5~0.1	退火	650~750°C 保温 4h 随炉冷却到 300°C		75~90	
8	黄铜 H62	退火	670~680°C 保温 4h 随炉冷却	150	50~55	也可采用 700~750°C 水淬
9	黄铜 H68	退火	670~680°C 保温 4h 随炉冷却		45~55	也可采用 700±10°C 水淬
10	20Cr	退火	750°C 保温 4h，以 20°C/h 速度冷却 4h 至 680°C 保温 3h，再以 20°C/h 速度冷却 2h，然后随炉冷却到 350°C		125~140	
	20CrMnTi				150~165	
	30				135~150	
	45				150~165	
	40Cr				150~165	
11	10	退火	850°C 保温 6h，随炉冷却到 350°C		100~115	
	15				105~120	
	20				110~125	
	20Cr				120~135	
	30				130~145	
45	140~155					

(续)

序号	冷挤压材料	热处理	规范	处理前硬度 HBS	处理后硬度 HBS	附注
12	Q215	长时间退火	920~960°C 保温 8h, 随炉冷到 680°C 再升温到 960°C 保温 4h, 随炉冷到 250°C 出炉		100~110	所需时间较长, 但热处理后硬度较低
13	纯铁 DT	退火	900±10°C 保温 3h 随炉冷却		60~30	
14	奥氏体不锈钢 ZG1Cr18Ni9Ti	淬火	1150°C 保温 5min 用 100°C 沸水淬软		130	沸水淬的效果优于盐水平

(3) 毛坯的表面处理和润滑 冷挤压时单位挤压力很大, 特别是钢的冷挤压单位挤压力高达 2000MPa 以上, 使用一般的涂刷润滑剂易被挤掉, 不能起到润滑作用, 毛坯表面也易被拉毛。因此, 为了确保润滑剂起到良好的润滑效果, 在润滑处理前, 必须对毛坯进行表面处理。

1) 黑色金属毛坯的表面处理和润滑

a. 碳钢和合金结构钢毛坯的表面处理和润滑。目前, 碳钢和合金结构钢毛坯冷挤压前的表面处理和润滑采用的方法仍以磷化后皂化的效果为最佳。其工艺流程是:

清除表面缺陷——用软轴砂轮或抛光轮清除个别毛坯表面微小裂纹、折叠等缺陷。

化学去油——采用氢氧化钠、碳酸钠、磷酸三钠、水玻璃等碱性水溶液, 并加入少量去垢剂、表面活性剂等, 以加强去垢能力。

流动冷水清洗。

热水清洗——以上两个工序都是为了防止碱性除油液带入下道酸洗中, 影响去锈能力。

酸洗——一般采用盐酸或硫酸液去除表面氧化皮。

流动冷水、热水清洗——该流程是防止将吸附在毛坯表面的酸洗液带入到下一流程磷化液中, 影响磷化效果。

磷化处理——将毛坯浸在磷酸盐溶液中, 使其表面生成一层不溶性磷酸盐薄膜的处理方法, 称为磷化处理。经磷化处理的毛坯可以减少毛坯与模具间的接触摩擦; 提高冷挤压件表面质量和模具使用寿命。磷化处理之所以具有以上作用, 是因为磷酸盐薄膜具有如下一些特性:

一是磷化膜由细小片状结晶组成构成, 呈多孔状态, 对润滑剂有吸附作用, 是贮存润滑剂的“仓库”。在冷挤压过程中, 贮藏在细孔内的润滑剂被挤出, 起润滑作用, 从而减少了毛坯与模具间的摩擦阻力。

二是磷化膜与钢毛坯表面结合牢固。这是由于经磷化处理后, 毛坯表面因金属的置换作用形成了一层磷酸铁, 它与金属基体有很强的结合力, 且有一定的塑性, 在冷挤压过程中能与毛坯基体一起变形。

三是经磷化处理的毛坯, 其力学性能(如硬度、韧性等)不变, 而耐磨性却大大提高。

四是毛坯表面磷化层的耐热能力也很强, 足以对付挤压时的温升, 但影响力学性能, 减

弱了与金属基体的结合力。

流动冷水清洗。

中和处理——采用氢氧化钠溶液，将磷化镀膜时附着的酸性物质中和，以延长润滑液的使用寿命，得到良好的润滑层。

润滑处理——磷化后的润滑处理方法较多，皂化就是一种最常用的方法。皂化处理是在60~70°C的硬脂酸钠(C₁₇H₃₅COONa)溶液中浸泡15min，使毛坯表面牢固地附上皂化层作润滑剂。此外，采用机油添加适量的二硫化钼作润滑剂，其润滑效果也很好。

b. 不锈钢的表面处理与润滑。奥氏体不锈钢(ZG1Cr18Ni9Ti)和碳钢不一样，它与磷酸盐溶液基本上不发生作用，因此不锈钢不能采用磷化处理，而应采用草酸盐进行表面处理，处理后的毛坯表面呈绿黑色。不锈钢毛坯经草酸盐表面处理，还应进行润滑处理，才可以进行冷挤压。润滑处理常用氯化石蜡油、肥皂油加二硫化钼混合液，润滑效果良好。

2) 有色金属毛坯的表面处理和润滑。大部分有色金属(硬铝除外)毛坯的表面处理不用磷化，其余的表面处理工艺过程基本上与黑色金属相同，表面处理后再进行润滑处理。有色金属毛坯常用的润滑方法见表4-8。

表4-8 有色金属毛坯的润滑方法及使用效果

序号	材料名称	润滑剂成分配比 (质量分数)	配制与使用方法	应用效果及说明
1	纯铝	猪油 100%		(1) 天冷时易凝结，涂擦不便 (2) 不易涂擦均匀，易产生“流散”现象 (3) 与其他润滑剂相比，挤压力较大
2	纯铝	猪油 5%、甘油 5%、气缸油 15%、四氯化碳 75%	猪油、甘油加热至 200°C，然后冷却到 40°C 以下，倒入四氯化碳搅拌均匀，最后倒入气缸油	(1) 冷挤时金属的流动性较好 (2) 冷挤压件表面粗糙度在 $R_a0.4\mu\text{m}$ 以下
3	纯铝	猪油 25%、液体石蜡 30%、十二醇 10%、四氯化碳 35%	猪油加热至 200°C，冷却后再加入四氯化碳，搅拌均匀后加入十二醇，冷却后加入液体石蜡	(1) 冷挤时，金属的流动性及润滑性皆较好 (2) 冷挤压件表面粗糙度在 $R_a0.8\mu\text{m}$ 以下
4	纯铝	硬脂酸锌	将经表面处理好的毛坯与粉状硬脂酸锌一起放在滚筒内滚动 15min，使毛坯牢固而均匀地涂上一层硬脂酸锌	(1) 冷挤件壁厚均匀 (2) 金属流动性好 (3) 卸料力小 (4) 冷挤件表面粗糙度 $R_a0.8\mu\text{m}$ 以下
5	纯铝	十四醇 80%、酒精 20%	按规定比例混合后就可使用，但当气温较低时，十四醇应加热，以增加其流动性，使与酒精混合良好	润滑效果较好

(续)

序号	材料名称	润滑剂成分配比 (质量分数)	配制与使用方法	应用效果及说明
6	铝合金 LF21 LF2	猪油 18%、气缸油 22%、石蜡油 22%、十 四醇 3%、四氯化碳 35%	猪油加热至 200°C 后加入少许四氯化 碳,然后加入气缸油及石蜡油,升温至 250°C。稍冷后则加入工业甘油和十四醇。 当冷却到 150°C 时,再把四氯化碳全部加 入	(1) 润滑性能较好 (2) 挤压件表面粗糙度 在 $R_a0.8\mu\text{m}$ 以下
7	Cu-1、Cu-2、T1、T2、 T3、黄铜 H62~H68	猪油 13%、十四醇 8%、机油 34%	将猪油加热至 200°C,几分钟后加入机 油,两者搅拌均匀(约 3min)最后加入十 四醇	挤压件表面粗糙度 $R_a0.8\mu\text{m}$ 以下
8	Cu-1、Cu-2、T1、T2、 T3、黄铜 H62~H68	工业豆油		润滑效果良好
9	Cu-1、Cu-2、T1、T2、 T3、黄铜 H62~H68	蓖麻油或透平油		润滑效果良好
10	黄铜 H62~H68	硬脂酸锌(粉末状)	撒上即可	润滑效果较好,特别是正 挤空心件,可能获得较好的 表面质量,基本上避免了内 孔壁出现环状裂纹,但挤压 力略有增高
11	黄铜 H62~H68	表面钝化处理:在黄 铜表面形成一层钝化 膜作为润滑用。具体过 程为先退火→酸洗→ 钝化→浸入润滑剂	钝化工艺流程:汽油除油→热水洗(60 ~120°C)→冷水冲洗→钝化(5~10s)→ 冷水冲洗→热水洗→干燥。钝化配方:酪 酐 200~250g/L,硝酸 30~50g/L,溶液 温度 20°C,时间 5~10s	
12	锌镉合金	羊毛脂与工业汽油 按 1:1 或 1:1.5 混 合	先将羊毛脂在 50~60°C 的电炉中溶 化,然后按规定比例与工业汽油混合而成	(1) 冷挤压件的表面质 量较好 (2) 对模具材料及毛坯 材料均有腐蚀作用
13	镍 Ni-1、Ni-2	表面镀铜挤压,因此 润滑剂可采用紫铜的 润滑剂	按一般镀铜工艺对毛坯表面进行镀铜, 镀层厚 0.01~0.015mm	效果良好
14	硬铝	工业菜油		效果良好;冷挤压件内孔 表面粗糙度为 $R_a0.8\mu\text{m}$,外 表面粗糙度为 $R_a0.8\mu\text{m}$
15	硬铝	皂化		效果尚好,冷挤压件内外 表面粗糙度在 $R_a0.8\mu\text{m}$ 以 下

硬铝毛坯硬而脆,塑性较差,在冷挤压过程中,往往因金属与模壁之间所产生的剧烈摩擦而引起较大的附加拉应力,使挤压件产生环状裂纹,因此,硬铝毛坯的表面处理和润滑处理要求较高,一般工艺流程是:

- a. 汽油清洗,以去除油污。
- b. 热水(60~100°C)清洗。
- c. 流动冷水清洗。
- d. 工业硝酸清洗,以去除氧化皮。
- e. 流动冷水清洗两遍。

f. 表面处理。硬铝毛坯的表面处理方法有三种:氧化处理、磷化处理和氟硅化处理。三种表面处理与碳钢的磷化处理的作用相同,均可形成一层薄膜,起到减少摩擦阻力、贮藏润滑剂的作用。试验表明,三者以氟硅化表面处理后的效果最佳。硬铝毛坯的氟硅化处理配方和工艺是:

$$\left. \begin{array}{l} \text{氟硅酸钠粉末的质量分数} = 93\% \\ \text{氟化锌的质量分数} = 7\% \end{array} \right\} \text{共 } 0.03\text{kg}$$

水(另加) 10^6mm^3

按上述比例配制成溶液,加热至沸后将硬铝毛坯浸泡 10min 即可。

- g. 流动冷水清洗。
- h. 流动热水(70~80°C)清洗。
- i. 润滑处理,其工艺规范与效果见表 4-8。

2. 冷挤压件的工艺性分析及工序设计

由原始毛坯获得冷挤压件是通过不同的冷挤压工序来完成的,因此,对冷挤压件进行工艺性分析进而设计合理的冷挤压加工工序是制订冷挤压工艺过程的主要工作。

(1) 适合冷挤压成形的零件形状 冷挤压成形是使金属在模腔内产生塑性流动,从而获得所需的形状和尺寸的挤压件。因此,研究哪些零件适合于冷挤压成形,哪些零件的工艺性较差是很必要的。

1) 冷挤压成形对零件形状的要求

a. 断面形状对称。冷挤压件的形状对称所需的挤压力较小,模具使用寿命较长。非对称形零件挤压时,对模具作用有不平衡的侧向力,易使下模的中心移动而降低产品精度,或易使凸模折断。例如,图 4-33 所示零件外壁上只有一个凸肋,断面形状不对称,进行挤压件设计时,在与凸肋相对的另一侧,增设一个形状和尺寸完全相同的凸肋(A),以保证形状对称。挤压之后,再将不需要的那个凸肋(A)切除,恢复原来的非对称形状。

b. 断面面积差较小。相邻横断面积之差过大时,在断面变化的过渡部位,不均匀变形的程度加剧,就可能引起模具局部过载、局部磨损和早期破坏。断面面积相差愈大,变形程度也就愈大;就可能超出模具的许用单位压力,同样会招致模具早期失效。因此,对于

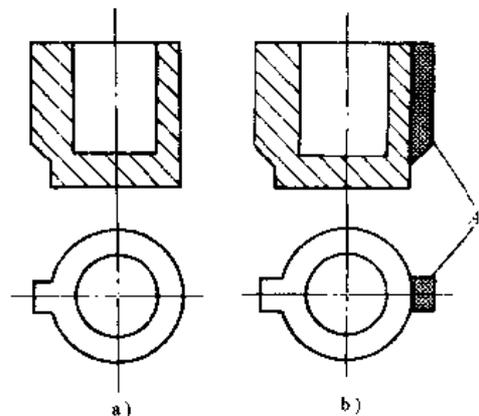


图 4-33 非对称形状的改进设计

a) 非对称形状 b) 对称形状

断面积差较大的零件,必须进行改进设计,改变成形方法或增加工序。例如,图 4-34 所示为具有较大凸缘的空心件,由于断面积 A_2 与 A_1 相差较大,采用断面积为 A_2 的管形毛坯一次挤压成形是困难的。现改为两次成形,正挤压制成一个中间形状,然后再冷镦凸缘。所选的毛坯断面积 A_0 介于 A_1 与 A_2 之间。这样一来,各道工序间的断面积之差大大减小,所需的挤压力也大为减小。

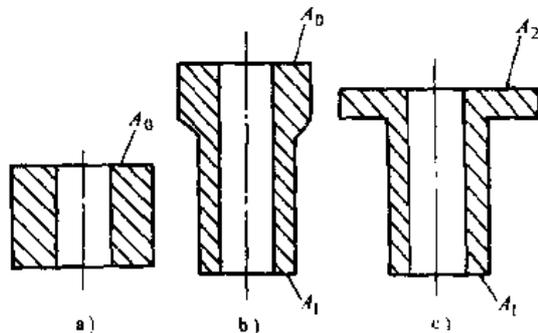


图 4-34 减小断面积差的工艺设计

a) 毛坯 b) 预成形件 c) 空心挤压件

c. 断面过渡平缓。零件的断面变化应平缓进行,因为断面急剧过渡,就会造成变形不均,应力分布也不均,因此,该处就易产生裂纹。相对应的模腔部位,就是热处理和挤压时应力集中的区域,这样就会招致模具早期破坏。例如,图 4-35

所示的是采用平底凹模制成的实心件和采用直角过渡的阶梯形冲头挤压成形的杯形件,均属于不合理的断面过渡形式,必须作改进设计,将断面变化部位设计成锥形过渡,过渡部分的衔接处采用充分平滑的圆弧连接,见图 4-35。

2) 适合于冷挤压成形的最佳形状。根据上述分析可以看出,适合于冷挤压成形的零件很多,其最佳形状可以归纳为:

a. 底部带孔的杯形件,如图 4-36a 所示。可通过正反分步或复合挤压成形获得高精度的内孔及外表面。

b. 带有深孔的双杯形件,如图 4-36b 所示。可以通过两次反向挤压或对向反挤压成形的方式获得。活塞销也可划分为这类零件,只不过是挤压后需冲去中间连皮。

c. 带有较大法兰的轴类件,如图 4-36c 所示。可以采用闭式墩挤成形的方式获得,它比切削加工省材,且生产率也较高。

d. 多台阶的阶梯轴类零件,如图 4-36d 所示。采用正挤或减径挤压,尽管工序较多,但极易成形,挤压件精度高,质量好,尤其适宜于大批量生产。

e. 小型花键轴和齿轮轴,如图 4-36e 所示。采用复合挤压成形可以获得优质挤压件,与切削加工相比,省材料,性能好,生产率高。

f. 截面为正方形、六边形、八边形等多边形薄壁件,如图 4-36f 所示。采用冷挤压成形可以一次加工多件,然后再切断成单个零件。

g. 深孔杯形件,如弹壳等。先采用反挤压制坯,再采用正挤压拉伸成形,成形工序少,挤压件的性能好。

(2) 冷挤压工序与金属流动的关系 搞清楚冷挤压工序与金属流动的关系,必将有助于选择最合理的冷挤压工序,获得优质的冷挤压件。

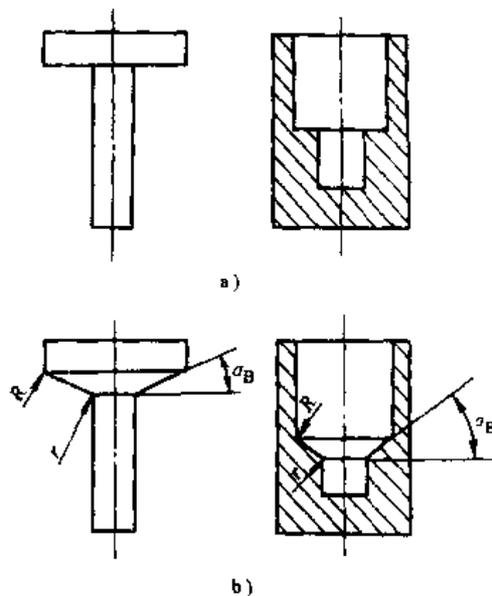


图 4-35 断面过渡部位的设计

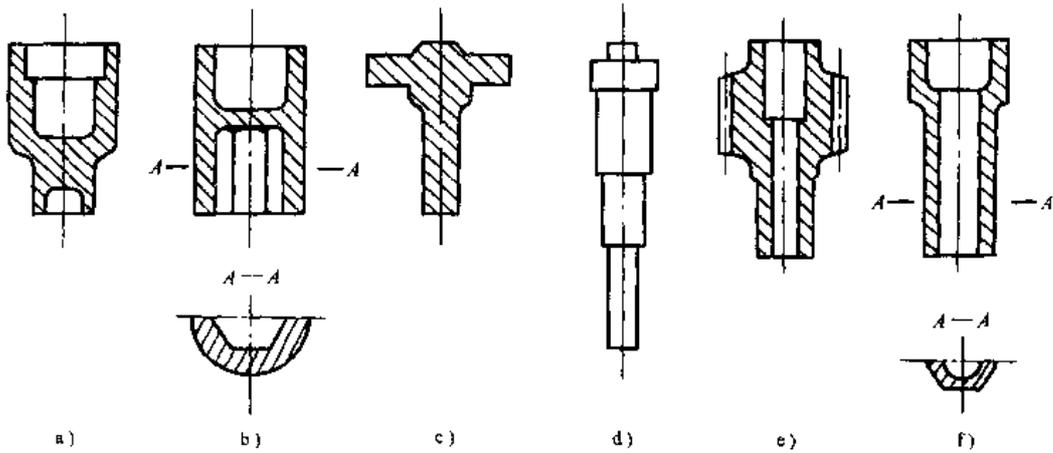


图 4-36 适宜于冷挤压成形的最佳形状

1) 金属流动的趋势。在设计冷挤压工序时,必须根据最小阻力定律,对每道工序的金属流动进行有效的控制,迫使金属朝着应该流动的方向流动。制止其朝着其余方向流动。例如,冷挤压上、下有孔并带凸缘的挤压件

(图 4-37),该挤压件可以选择两个工艺方案 I 和 II。方案 I 是利用杯形半成品,一次成形出凸缘形状和位于其上的孔。冷挤压时,金属有向上(B)和沿径向流动(A)两种流动趋向。挤压开始时,金属主要沿 B 向流动,而在挤压后一阶段,金属主要沿 A 向流动。沿 A 向流动将使形成的向外扩张而变成喇叭状。即使在成形凸缘的最后阶段进行封闭,也难以得到理想的内孔尺寸精度。方案 II 增加了一道带有凸缘的中间挤压工序,它是为防止孔径胀大而设计的。先在杯形半成品上墩出凸缘,然后在凸缘外径 D 与模腔完全接触限制径向流动的情况下成形凸缘。可见,选用不同的工艺方案,可使流动条件得到改善,从而实现对金属流动的趋向性的有效控制,迫使金属向所希望的方向流动。

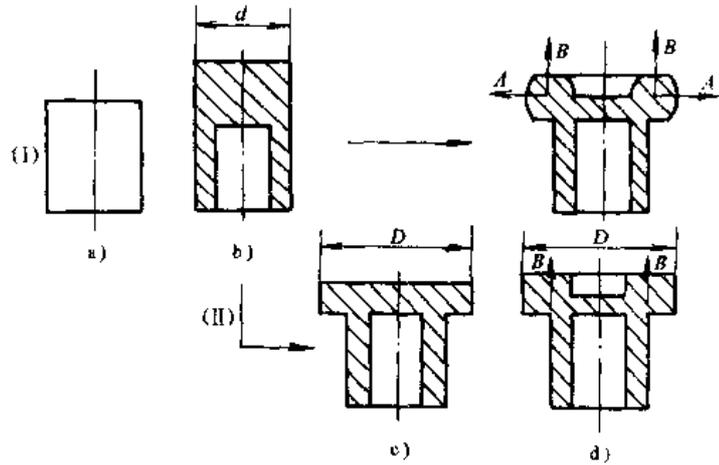


图 4-37 成形带凸缘件的冷挤压工艺方案

a) 毛坯 b) 杯形半成品 c) 带凸缘的中间工序 d) 冷挤压件

2) 杯形件的壁厚设计。杯形件的壁厚与金属流动有着密切的关系,设计合理可以防止出现狭窄变形区,确保金属流动顺畅,变形稳定,获得优质挤压件。

2) 杯形件的壁厚设计。杯形件的壁厚与金属流动有着密切的关系,设计合理可以防止出现狭窄变形区,确保金属流动顺畅,变形稳定,获得优质挤压件。

a. 流动通道的变化与金属流动的关系。外壁带锥形台阶的杯形件反挤时,金属流道的变化情况如图 4-38。由图可以看出,当孔的挤压深度较浅时,内孔拐点 A 远离外形拐点 B,从点 A 到锥体母线延长线间的垂直距离 s_1 大于筒壁厚度 s_0 ;随着挤压进行,A 点到锥面的垂直距离 s_2 等于筒壁厚度 s_0 ,此时,金属流动顺畅,变形稳定;再继续挤压时,A 点到锥面的垂直距离 s_3 小于 s_0 ,这时,金属流道变窄,阻碍金属向上流动。如果再继续挤压时,向上流动形成壁厚的金属体积便得不到应有的补充,只能靠变形区附近的材料延伸来维持其变形的连续性,变形金属不再返回到转折点 B 而产生收缩,厚度变薄,从而脱离凸模和模腔,形成很不规则的缩孔。

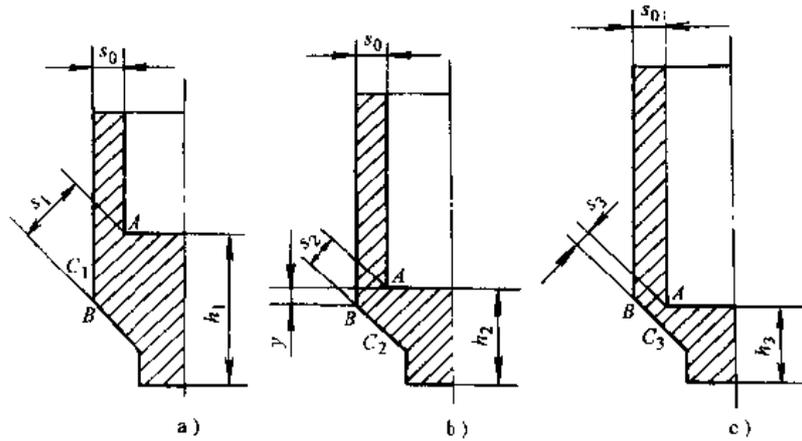


图 4-38 外壁带锥形台阶的杯形件反挤压

b. 等壁厚设计原理。从上述分析可知, 可以 $s_1 = s_0$ (即等壁厚) 为条件来设计外壁带锥形台阶的杯形件, 以确保冷挤压过程中金属稳定流动, 获得符合要求的挤压件形状和尺寸。为了实现等壁厚, 必须对内孔拐点 A 与外锥形转折点 B 之间的距离 y 进行有效控制, 即 $s_1 = s_0, \beta = \alpha$ 为条件, 用几何作图法求出 y 值, 见图 4-39。求解方法如下:

在直角三角形 $\triangle ADB$ 和 $\triangle ACB$ 中

$$\because \angle ABC = \angle ABD, \angle ABC + \angle ABD + \alpha = 180^\circ$$

$$\therefore \angle ABD = 90^\circ - \frac{\alpha}{2}$$

$$\angle DAB = 90^\circ - \angle ABD = \frac{\alpha}{2}$$

于是, 求得实现等壁厚的初始位置尺寸 y 为

$$y = AD \tan \angle DAB = s_0 \tan \frac{\alpha}{2}$$

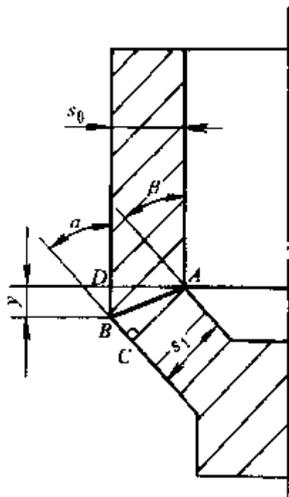
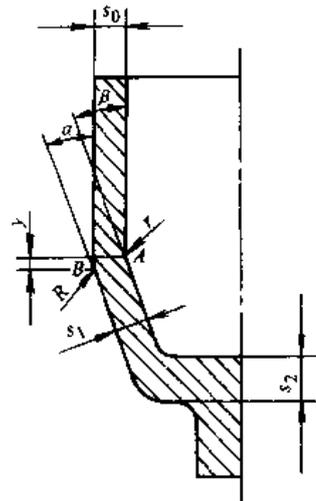
图 4-39 求 y 值的图解

图 4-40 等壁厚设计实例

图 4-40 所示的就是运用上述原理, 设计等壁厚挤压件的一个典型实例。该设计以锥壁厚度 s_1 等于筒壁厚度 s_0 、底厚 $s_2 \geq s_1$ 以及转折部位附近的金属厚度不小于 s_0 为条件, 来决定 y 值。

c. 变壁厚设计方法。将等壁厚设计原理应用到变壁厚设计，一般是采用增添一中间半成品工序，见图 4-41。变壁厚挤压件的杯壁厚度 $s_0 <$ 锥形部位最薄处厚度 s_1 (2mm)，A 点超越 B 点。如果采用毛坯直接挤压，必然造成截流和引起形状畸变。因此，应增添一中间工序，将毛坯先挤成如图 4-41a 所示的半成品，杯壁各部位的厚度相等 ($s_1 = s_0$)，且由内外拐点 A' 和 B' 将半成品所分成的两部分体积 V_1' 和 V_2' ，分别等于挤压件以 AC 为分界面划分成的两部分体积 V_1 和 V_2 ，即 $V_1' = V_1$ ， $V_2' = V_2$ 。这样一来，不仅在中间半成品上建立了等壁厚的工艺条件，还将挤压时的材料体积事先分配好，以确保 AC 分成的上下两部分，都在各自范围内进行体积转移，不产生任何的紊乱流动。

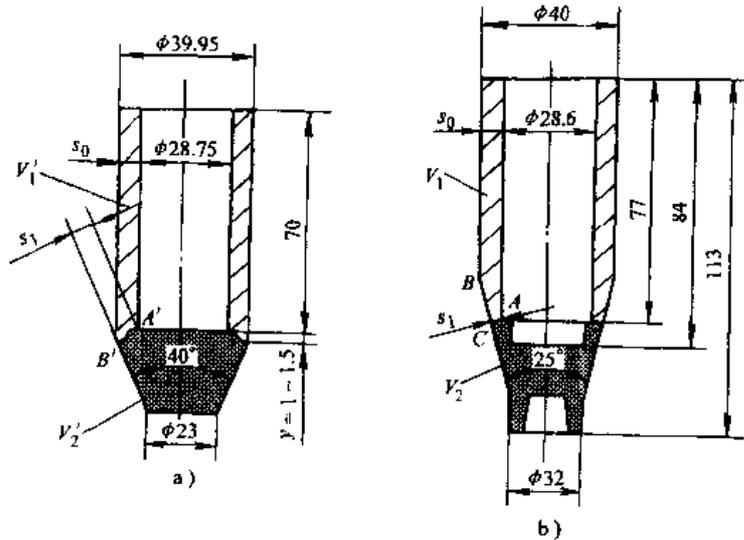


图 4-41 变壁厚设计方法
a) 中间半成品 b) 变壁厚冷挤压件

3) 金属体积的分配方法。冷挤压成形是使毛坯体积重新分配并进行适当的转移。合理的挤压工序可以使毛坯体积从一个有利的位置转移到另一指定的位置，不存在多余和不足。在挤压成形过程中，毛坯金属具有不同的流动趋向，因而体积的转移和分配过程是极为复杂的，归纳起来主要有两种转移方式。

a. 分区转移。将挤压件需要变形和不要变形的部分区分开来，迫使毛坯某个部分只产生要求的变形，而其余部分不应产生任何形式的变形。带实心锥体的阶梯轴类冷挤压件 (见图 4-42b)，如果采用实心圆柱毛坯在锥形挤压模内一次成形，则会产生加大变形区范围，增加摩擦面积，使润滑条件变差等弊病。现采用增加一道中间半成品工序的设计方法以防止上述弊病。挤压这一半成品时，应使圆柱部分体积 V_0 (图 4-42a) 等于锥形部分体积 V_1 ，在成品挤压时，只需将圆柱变成锥形，其余部分基本上保持不变。

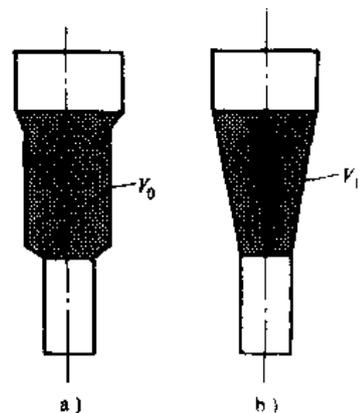


图 4-42 实心锥体挤压时的体积分配
a) 中间半成品 b) 挤压件

b. 多向性转移。多向性体积转移是较为复杂的冷挤压变形方法。它必须满足金属流动趋向性要求，保证同时达到所要求的形状和尺寸，同时充满模腔的各个角落。例如，挤压如图 4-43 所示的中间带凸缘的空心挤压件，必须设计一个合理的中

间半成品，确保成品挤压时，金属材料的体积转移向 A、B、C 三个方向同时进行，同时充满模腔。

4) 工艺轴的利用。为了改善金属的流动条件，减少挤压力，保证获得合格的挤压件，有时需增加余块，这种只因工艺需要而增加的余块称为工艺轴。例如图 4-44a 为具有通孔的带凸缘的挤压件，通常采用反挤压后再墩挤凸缘，这种成形方法不仅所需的挤压力较大，而且挤孔时流出的大量金属再流到凸缘上去，造成流动紊乱且路程也较长，极易产生废品。针对上述问题，现对挤压件进行改进设计，特在半成品下端增设工艺轴，使中间工序挤压成形时，变反挤压为复合挤压。这样不仅可以减小单位挤压力，且可使挤孔时流出的金属一部分分流到工艺轴上去，墩挤凸缘后，再用冲孔法或切削加工法将工艺轴去除，从而得到所需的带凸缘的空心件。图 4-44b 为带通孔的薄壁深孔杯形件，采用工艺轴后，即可改善金属流动条件，缩短流动路程，又可减少工序次数。

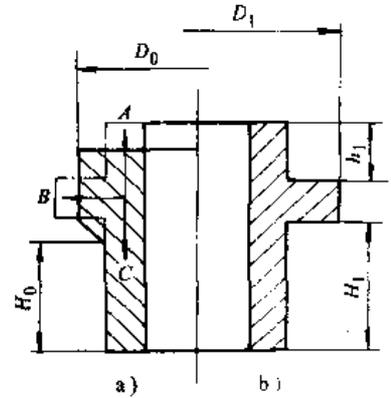


图 4-43 中间带凸缘的空心件冷挤压
a) 半成品 b) 挤压件

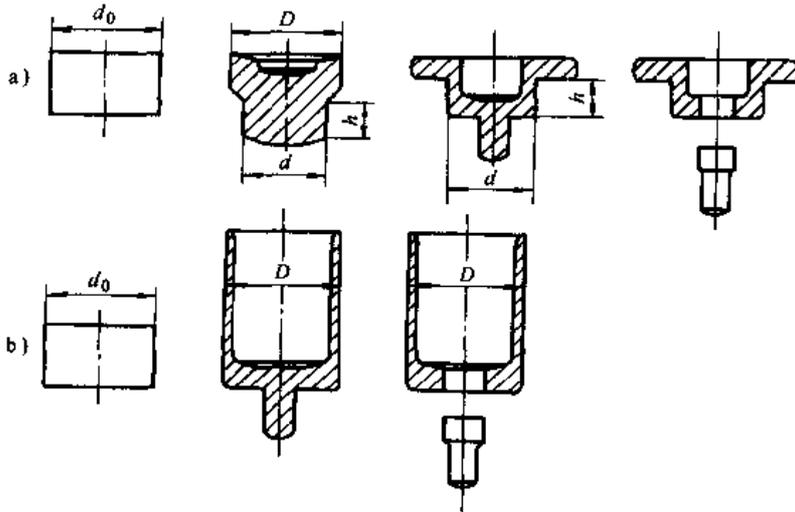


图 4-44 增添工艺轴的冷挤压工序
a) 带凸缘的空心件 b) 薄壁深孔杯形件

3. 冷挤压的许用变形程度

每道冷挤压变形工序所允许的变形程度称为许用变形程度。许用变形程度越大，工序就愈少，则生产率就愈高。但随着许用度变形程度的增大，单位挤压力也会随之增大，这就有可能超出模具的许用单位压力，导致模具的损坏。因此，许用变形程度的大小应严格控制。

(1) 影响许用变形程度的因素

1) 模具许用单位压力。冷挤压模具的强度越高，模具许用单位压力就越大，则许用变形程度值也就越大。在当前技术条件下，从模具材料、结构和使用寿命等方面考虑，钢的冷挤压模具许用单位压力以 2000~2500MPa 为高限来确定许用变形程度是可行的。

2) 材料种类。被挤金属材料强度越大，挤压时变形抗力也越大，则许用变形程度值就愈小。挤压件的材料种类不同，许用变形程度值就不一样，有色金属比黑色金属的许用变形程

度值大，黑色金属的许用变形程度又随含碳量的增加而减小。

3) 挤压方式。同一挤压件采用不同的冷挤压方式，需要的单位挤压力不一样，因而其许用变形程度也就不一样。正挤压和反挤压的许用变形程度是不同的。

4) 模具工作部分的形状。模具工作部分的形状不同，成形相同挤压件所需的单位压力是不一样的，因此，许用变形程度也就不一样。

5) 润滑条件。毛坯表面润滑条件好坏直接影响到单位挤压力的大小，因此，润滑条件的优劣理应对许用变形程度值有较大的影响。

(2) 不同材料的许用变形程度。由于有色金属冷挤压时所需的单位挤压力较小，因此以不超出模具的许用单位压力为依据，所允许的变形程度是很高的，见表 4-9。

表 4-9 有色金属一次冷挤压成形的许用变形程度

有色金属种类	冷挤压方式	许用断面缩减率 ϵ_A (%)
铅、锡、铋、铝等软金属	正挤压	95~99
	反挤压	90~95
无氧铜、纯铜、黄铜、硬铝、镁	正挤压	90~95
	反挤压	75~90

注：1. 润滑条件良好。

2. 低强度金属取上限，高强度金属取下限。

(3) 黑色金属的许用变形程度

1) 正挤压的许用变形程度。正挤压时，毛坯材料硬度与许用变形程度的关系见图 4-45。该关系曲线由实验测得，其试验条件是：毛坯的相对高度 $h_0/d_0=1.0$ 、凹模锥角 $\alpha=120^\circ$ 、毛坯经退火软化、表面磷化加皂化处理，模具的许用单位压力分别为 2000MPa 和 2500MPa。

2) 反挤压的许用变形程度。反挤压时，毛坯材料硬度与许用变形程度的关系见图 4-46。该关系曲线由实验测得，其试验条件是：毛坯的相对高度 $h_0/d_0=1.0$ 、经退火软化、表面磷化加皂化处理，模具的许用单位压力分别为 2000MPa 和 2500MPa。

4. 不同挤压方法的一次成形范围

不同挤压方法的一次成形范围是指在当前技术条件下，一次成形所允许的加工界限。它是根据不超出冷挤压加工的许用变形程度、一定的模具使用寿命以及良好的冷挤压件质量等原则来确定的。

(1) 反挤压杯形件的一次成形范围 反挤压形件的两种典型形状见图 4-47。

1) 孔的深度 h 。为了保证反挤压凸模在挤压过程中不失去稳定性，孔的深度 h 应受凸模长径比的限制。以此为依据，对于不同材料杯形件允许的相对孔深 h/d_1 分别为：

有色金属及其合金杯形件	3~6
黑色金属杯形件	2~3

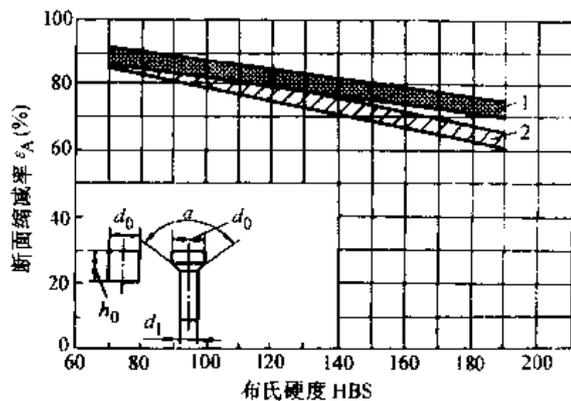


图 4-45 黑色金属正挤压的许用变形程度

1—模具的许用单位压力为 2500MPa

2—模具的许用单位压力为 2000MPa

2) 底厚 s_1 。底厚 s_1 过小, 除了引起挤压力急剧上升以外, 还可能在底部转角处引起如图 4-47b 所示的缩孔缺陷。因此, 一般情况下应使 $s_1 \geq s_0$ (s_0 为壁厚), 特殊情况才允许 $s_1 < s_0$, 最低限度必须保证 $s_1 \geq 0.8s_0$ 。

3) 壁厚 s_0 。杯壁减薄意味着凸模和凹模之间的环形间隙缩小, 变形程度加大, 从而使变形抗力增加。不同材料杯形件壁厚 s_0 的极限尺寸见表 4-10。

4) 内孔径 d_1 。为了保证反挤压时不超出模具的许用单位压力, 根据反挤压单位压力与变形程度的关系, 内孔径 d_1 的一次成形范围应受最小和最大许用变形程度的限制。例如, 黑色金属反挤压时, 合适的变形程度应在下述范围内

$$25\% \leq \epsilon_A \leq 75\%$$

经换算后, 内孔径 d_1 一次成形范围应为

$$0.5D \leq d_1 \leq 0.86D$$

5) 阶梯孔杯形件的小孔长径比 h_2/d_2 带阶梯内孔杯形件反挤压时(图 4-47), 凸模工作带会加长, 成形压力随之加大, 凸模寿命就会大大缩短。因此, 一般情况下, 应使 $h_2/d_2 \leq 1$ 。只有在特殊情况下, 才允许 $h_2/d_2 > 1$, 但必须限制 $h_2/d_2 \leq 1.2$ 。

(2) 正挤压件的一次成形范围 正挤压实心件和空心件的两种典型形状见图 4-48。

1) 毛坯高径比 h_0/d_0 正挤压时, 毛坯高径比 h_0/d_0 (h_0 为毛坯高度; d_0 为毛坯直径, $d_0 \approx D$; D 为挤压件头部直径) 过大, 必然会加大摩擦阻力, 增大挤压力, 见图 4-49。由图可以看出, 挤压力增大倍数 n 随高径比 h_0/d_0 增大而加大, 为了不使单位挤压力超出许用值, 一般应限制 $h_0/d_0 \leq 8$ 。

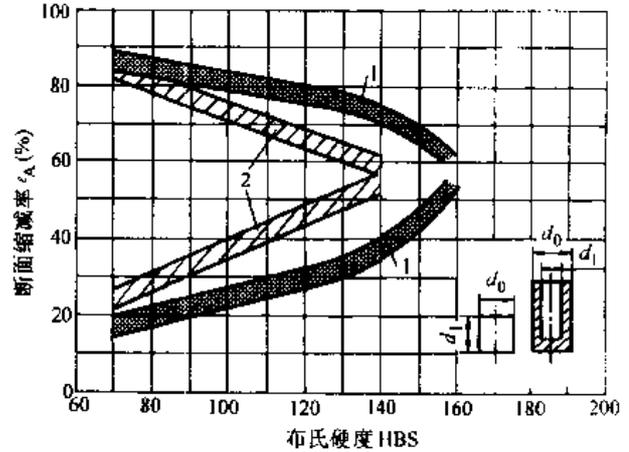


图 4-46 黑色金属反挤压的许用变形程度

1—模具的许用单位压力为 2500MPa

2—模具的许用单位压力为 2000MPa

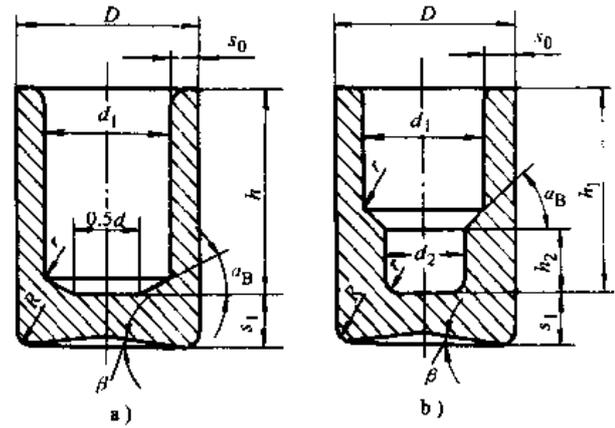


图 4-47 反挤压杯形件的典型形状

a) 直孔杯形件 b) 阶梯孔杯形件

表 4-10 壁厚极限尺寸

挤压件材料种类	许用变形程度取值 (%)	壁厚尺寸界限	
		许用比值 s_0/D	极限值/mm
纯铝、纯铜等	98	$\geq 1/200$	≥ 0.1
硬铝、黄铜等	85	$\geq 1/25$	≥ 0.8
钢	75	$\geq 1/15$	≥ 1.0

注: D —反挤杯形件外径。

2) 正挤压实心件杆部直径 d_1 。杆径 d_1 过小, 变形程度会超出许用变形程度; d_1 过大, 中心层易产生内部裂纹。对于黑色金属实心件正挤压, 为限制变形程度不超出许用变形程度, 且

又不致产生内部裂纹，一次成形的杆径 d_1 应在下述范围内

$$0.85D \geq d_1 \geq 0.5D$$

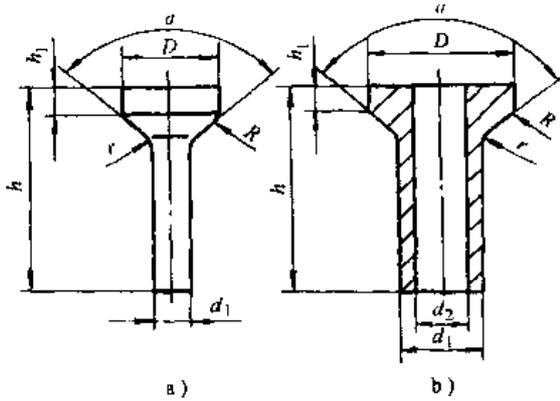


图 4-48 正挤压件的典型形状
a) 正挤压实心件 b) 正挤压空心件

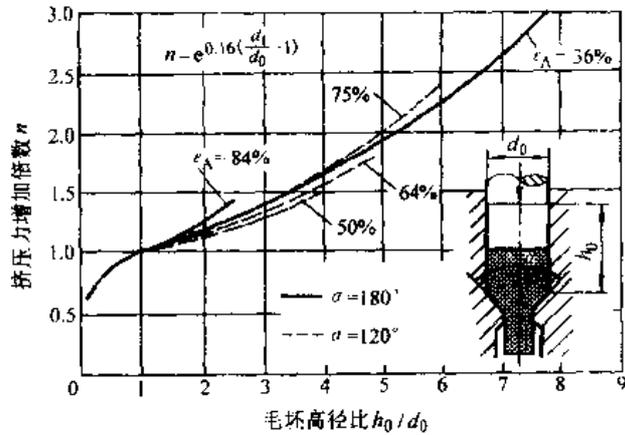


图 4-49 毛坯高径比对挤压力的影响

3) 余料高度 h_1 。挤压终了时，毛坯的剩余高度称为余料高度。正挤压时，余料高度 h_1 过小，单位挤压力就会急剧增加，对于实心件正挤压还会从头部端表面开始引起缩孔缺陷。对于黑色金属实心件， $h_1 = d_1/2$ ；空心件 $h_1 = (d_1 - d_2)/2$ 。

4) 凹模锥角 α 。如果零件结构要求 $\alpha = 180^\circ$ ，此时，为了降低单位挤压力，延长模具寿命并确保优质的挤压件，可以分两道工序成形，先挤成带有锥角 $\alpha < 180^\circ$ 的挤压件，然后再镦粗至要求的尺寸；如果允许自选锥角 α ，可根据挤压件的原材料种类、单位挤压力以及机械加工余量的大小来选择合理的凹模锥角 α ，对于黑色金属，一般取 $\alpha = 90^\circ \sim 150^\circ$ ，以 $\alpha = 120^\circ$ 为最佳；对于有色金属，一般取 $\alpha = 140^\circ \sim 170^\circ$ 。

(3) 复合挤压件的一次成形范围
复合挤压件的两种典型形状见图 4-50。它们的一次成形范围可参照单纯正挤压和单纯反挤压的一次成形范围来确定。

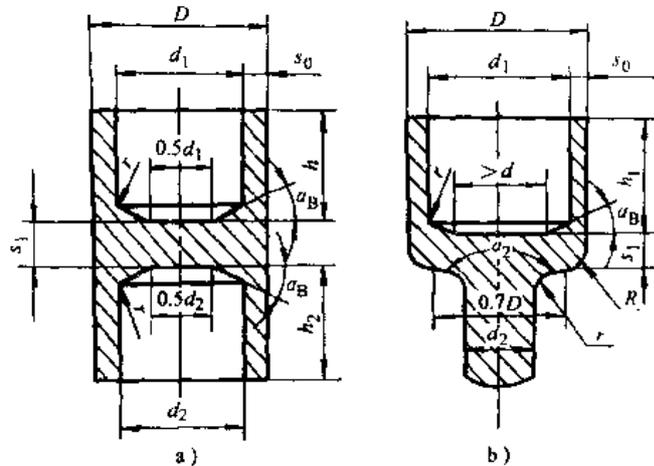


图 4-50 复合挤压的典型形状
a) 双杯类挤压件 b) 杯杆类挤压件

1) 双杯类挤压件的复合挤压。由分析可以看出，复合挤压力总不会超过单纯正挤压或单纯反挤压的挤压力，因此，复合挤压件的一次成形范围理应比单纯正挤压或单纯反挤压大一些。但在生产实际中，从安全角度考虑，拟分别将双杯类挤压件按单个反挤压件的一次成形范围来确定其一次成形范围。

2) 杯杆形零件的复合挤压。对于杯形部分的尺寸仍按与反挤压件相同的成形范围来确定；而对于正挤压成形的杆径 d_2 的一次成形范围可以扩大一些，一般可取 $d_2 \geq 0.4D$ ，其他尺寸仍按与单个正挤件相同的成形范围来确定。

(4) 减径挤压件的一次成形范围 减径挤压是一种在开式模具内变形且变形程度较小的

正挤压，见图 4-51。毛坯在进入变形区以前不能有任何的塑性变形。因此，减径挤压件的一次成形范围应综合考虑毛坯材料的变形抗力、挤压件的变形程度、模具的许用单位压力以及不产生内部裂纹等因素，由此来确定主要尺寸参数。对于碳钢零件减径挤压的一次成形范围是：当锥角 $\alpha = 25^\circ \sim 30^\circ$ 时，毛坯经退火处理， $d_1 \geq 0.85d_0$ ；采用经冷拉拔加工过的毛坯， $d_1 \geq 0.82d_0$ 。

(5) 黑色金属粗腰类挤压件一次成形范围 该类挤压件采用局部镦挤成形。为保证毛坯不产生纵向弯曲，挤压件粗腰凸起表面不产生纵向表面裂纹，其一次成形范围见图 4-52。图中实线包围的区域为可以一次成形范围；影线部分为引起纵向弯曲或表面裂纹的区域。

五、冷挤压工艺方案的制订

对于任何一种冷挤压件，从不同的角度和设计观点出发，会有多个工艺方案。在制定工艺方案时，既要考虑到技术上的可能性和先进性，又要注重经济效益。应该拟定两个或更多个工艺方案，然后将这些方案进行经济技术分析，以便得出合理的工艺方案。

1. 冷挤压件图的制订

冷挤压件图是根据零件图制订的。它是编制工艺、设计模具、夹具、量具和刃具的原始依据是与机械加工工艺取得协调的重要技术文件。

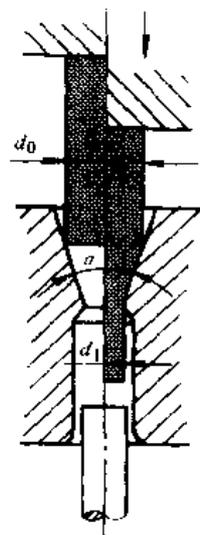


图 4-51 减径挤压的特性尺寸参数

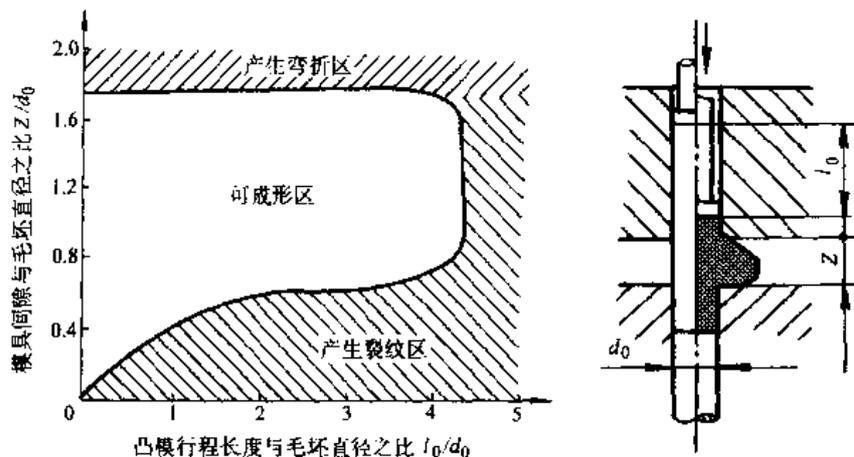


图 4-52 粗腰类挤压件的局部镦挤一次成形范围

制订冷挤压件图的内容：

1) 确定冷挤压和进一步加工的工艺基准。如果要改变原来的工艺基准，必须在冷挤压件图上明确标出。

2) 对于不经机械加工的部位，不加余量，应按零件图的技术要求直接给出公差，而对于需进行机械加工的部位，应按表 4-11、表 4-12、表 4-13 给出公差。

3) 确定挤压完成后多余材料的排除方式。

4) 按照零件的技术要求及冷挤压可能达到的精度，确定表面粗糙度等级和形位公差值。

2. 冷挤压工序的设计

从毛坯到冷挤压加工全过程应包含下料工序、预成形工序、辅助工序、冷挤压工序以及后续加工工序等。其中冷挤压工序的设计是制定冷挤压工艺方案的核心工作。

表 4-11 正挤压实心件的尺寸精度

(mm)

挤压件杆径 d_1	杆径 d_1 偏差		挤压件杆长 h_2	杆径 d_1 轴线对直径 D 轴心线的同轴度 δ
	一般正挤压	附加修整工序		
10~18	± 0.11	—	< 100	$\pm 0.02 \sim \pm 0.15$
18~30	± 0.13	± 0.052	100~200	$\pm 0.05 \sim \pm 0.25$
30~50	± 0.16	± 0.062	200~500	$\pm 0.10 \sim \pm 0.50$
50~80	± 0.19	± 0.074	500~700	$\pm 0.20 \sim \pm 1.50$
80~100	± 0.22	± 0.087	700~1200	$\pm 0.50 \sim \pm 2.00$

正挤压实心件的基本形状及尺寸符号

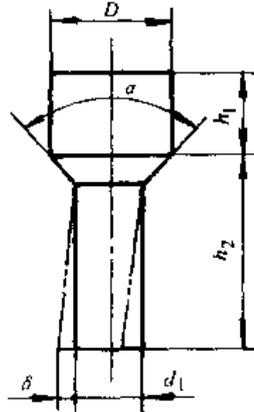


表 4-12 反挤压杯形件的尺寸精度

($h_2/D \leq 1.2$, $s_0 = 2 \sim 15\text{mm}$)

(mm)

外径 D	外径偏差		内径偏差		壁厚 s_0	壁厚偏差	
	一般反挤压	附加修整工序	一般反挤压	附加修整工序		一般反挤压	附加修整工序
< 10	± 0.08	± 0.05	± 0.10	± 0.05	< 2	± 0.10	± 0.05
10~30	± 0.10	± 0.06	$\pm 0.10 \sim \pm 0.20$	$\pm 0.05 \sim \pm 0.10$	2~10	± 0.15	± 0.10
30~40	± 0.12	± 0.07	$\pm 0.15 \sim \pm 0.25$	$\pm 0.10 \sim \pm 0.15$	10~15	± 0.20	± 0.15
40~50	± 0.15	± 0.10	$\pm 0.20 \sim \pm 0.25$	$\pm 0.10 \sim \pm 0.25$	底厚 s_1	底厚偏差	
50~60	± 0.20	± 0.12	$\pm 0.20 \sim \pm 0.30$	$\pm 0.12 \sim \pm 0.25$		一般反挤压	附加修整工序
60~70	± 0.22	± 0.15	$\pm 0.20 \sim \pm 0.30$	$\pm 0.15 \sim \pm 0.25$			
70~80	± 0.25	± 0.17	$\pm 0.20 \sim \pm 0.35$	$\pm 0.15 \sim \pm 0.25$	< 2	$\pm 0.15 \sim \pm 0.20$	± 0.19
80~90	± 0.30	± 0.20	$\pm 0.25 \sim \pm 0.40$	$\pm 0.20 \sim \pm 0.30$	2~10	$\pm 0.20 \sim \pm 0.30$	± 0.15
90~100	± 0.35	± 0.22	$\pm 0.30 \sim \pm 0.45$	$\pm 0.25 \sim \pm 0.35$	10~15	$\pm 0.25 \sim \pm 0.30$	± 0.20
100~120	± 0.40	± 0.25	$\pm 0.35 \sim \pm 0.50$	$\pm 0.30 \sim \pm 0.40$	15~25	$\pm 0.30 \sim \pm 0.40$	± 0.25
					25~40	$\pm 0.40 \sim \pm 0.50$	± 0.35

反挤压杯形件的基本形状及尺寸符号

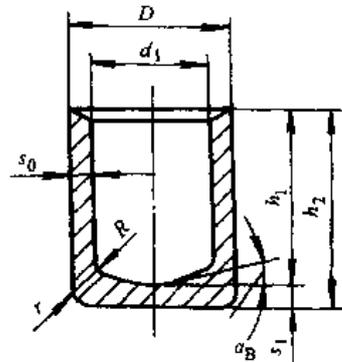


表 4-13 反挤压杯形件的尺寸精度

 $(h_2/D \leq 1.2, s_0 = 0.6 \sim 6.0\text{mm})$

(mm)

外径 D	外径偏差		内径偏差		壁厚 s_0	壁厚偏差	
	一般反挤压	附加修整工序	一般反挤压	附加修整工序		一般反挤压	附加修整工序
<10	+0.1	± 0.020	+0.05	± 0.020	<0.6	+0.05~ ± 0.10	± 0.020
10~30	± 0.1	± 0.020	$\pm 0.05 \sim \pm 0.07$	$\pm 0.020 \sim \pm 0.04$	0.6~1.2	$\pm 0.07 \sim \pm 0.10$	± 0.020
30~40	± 0.1	± 0.020	$\pm 0.08 \sim \pm 0.10$	$\pm 0.020 \sim \pm 0.04$	1.2~2.0	$\pm 0.10 \sim \pm 0.15$	± 0.025
40~50	± 0.1	± 0.025	$\pm 0.10 \sim \pm 0.12$	$\pm 0.025 \sim \pm 0.04$	2.0~3.5	$\pm 0.12 \sim \pm 0.15$	± 0.030
50~60	± 0.1	± 0.030	$\pm 0.12 \sim \pm 0.14$	$\pm 0.030 \sim \pm 0.05$	3.5~6.0	$\pm 0.15 \sim \pm 0.20$	± 0.040
60~70	± 0.1	± 0.035	$\pm 0.15 \sim \pm 0.18$	$\pm 0.035 \sim \pm 0.05$	底厚 s_1	底厚偏差	
70~80	$\pm 0.2 \sim \pm 0.3$	± 0.040	$\pm 0.18 \sim \pm 0.20$	$\pm 0.040 \sim \pm 0.05$		一般反挤压	附加修整工序
80~90	$\pm 0.2 \sim \pm 0.3$	± 0.050	$\pm 0.20 \sim \pm 0.24$	$\pm 0.050 \sim \pm 0.08$		± 0.15	± 0.10
90~100	$\pm 0.2 \sim \pm 0.3$	± 0.060	$\pm 0.25 \sim \pm 0.30$	$\pm 0.060 \sim \pm 0.09$		<2	± 0.15
100~120	± 0.3	± 0.030	$\pm 0.30 \sim \pm 0.40$	$\pm 0.080 \sim \pm 0.10$	2~10	$\pm 0.20 \sim \pm 0.30$	± 0.12
120~140	± 0.4	± 0.120	$\pm 0.40 \sim \pm 0.50$	$\pm 0.100 \sim \pm 0.12$	10~15	$\pm 0.25 \sim \pm 0.35$	± 0.15
					15~25	$\pm 0.30 \sim \pm 0.40$	± 0.20
					25~40	$\pm 0.35 \sim \pm 0.50$	± 0.25
					40~50	$\pm 0.40 \sim \pm 0.50$	± 0.30
					50~70	$\pm 0.45 \sim \pm 0.60$	± 0.35

(1) 挤压工序数目的确定。冷挤压工序数目主要取决于如下因素：

1) 冷挤压件的复杂程度。形状越复杂，加工工序越多；形状简单的零件，一般只需要一道挤压工序便可成形；至于那些形状极复杂的零件，为了成形某一特殊的部位，或者为了进一步提高冷挤压件精度，冷挤压工序需要增加到两道以上。

2) 冷挤压件材料的成形性能。材料的塑性极好（例如工业纯铝 L1），采用一道工序就可以成形几何形状复杂、变形程度很大的零件；而对于一些塑性不太高的材料，例如硬铝、黄铜及低碳钢，成形不太复杂的冷挤压件，也需要采用多道工序成形。

3) 变形程度的大小。在允许的变形程度范围内可以一次成形，超过许用变形程度就应采用多道工序成形，每道工序皆不允许超出许用变形程度。

4) 金属的流动状况。对于一些流动状况不佳的挤压件，往往采用分工序成形，以降低单位挤压力和延长模具使用寿命。

5) 挤压件的尺寸参数。尺寸大小是决定所需工序数目的主要依据。在不超出加工界限的前提下，应尽量选用较少的加工工序数。

6) 挤压件的精度。挤压件精度越高，加工工序越多。为了提高冷挤压件精度，增加一道修整工，既可以延长模具使用寿命，又可以简化后续加工工序，总的经济效益还是较高的。

7) 挤压件的批量。生产批量较大时，在确保模具寿命的前提下，应该尽量采用可以一次完成多个工序的复杂模具；如果批量很小，则要考虑用简单模具分成单工序逐步成形。

(2) 中间工序的设计。中间工序是成品挤压之前半成品的冷挤压工序。在中间工序里，主

要进行材料体积和变形量的分配，为成品冷挤压作形状和尺寸等方面的准备工作。中间半成品工序设计应注意如下问题：

1) 最大限度的满足挤压件的质量要求。例如，冷挤压带有凸缘的深孔杯形件时，如果半成品是平底的，那么在成品正挤压时，在孔底转角附近就会出现收缩缺陷，见图 4-53a。如果将底部形状设计成阶梯形，使其小端尺寸与成品杯体一致，则成品的形状就很理想，见图 4-53b。

2) 应保证充满难以挤压到位的冷挤压件的局部形状。例如，带芯轴杯形件中心的圆柱体很高，见图 4-54。如果采用一道反挤压成形，则达不到所要求的高度尺寸 H 。现增设一道中间半成品工序，先挤出在成品挤压中不能挤足的高度 h 。

3) 当成品挤压毛坯呈悬空状态时，应增设中间半成品工序。例如，图 4-55 所示的杯-杆件的两种成形方法，毛坯都出现悬空状态。由于拉应力的作用，易使冷挤压件外表面或底部被拉裂。如果改用增设中间半成品工序的冷挤压加工方法(图 4-56)，就可以避免产生裂纹的可能性。图中第一方案的半成品是一个具有凸缘的实心件；第二方案的中间工序是挤出部分孔深，外形采用锥形过渡的半成品。这两种不同的中间形状的共同特点是：半成品形状与成品挤压模腔严密配合，并且基本一致，从而保证挤压过程的顺利进行。设计时，应尽量做到圆角半径一致，且 $H_1 < H_2$ 、 $h_1 < h_2$ 。

4) 中间工序半成品锥形形状的锥度应大于冷挤压件相应处的锥角，见图 4-57。这样一来，既便于将半成品放入凹模，又可以确保在冷挤压过程不致出现多余的表面积。

(3) 各道工序间的尺寸配合 在多道工序挤压成形过程中，合理地确定各道工序间的尺寸配合关系也是很重要的，它可以使各道工序配合良好，确保成品尺寸精度及质量要求。

1) 径向尺寸配合关系。确定径向尺寸配合关系的原理是：要使毛坯或半成品能够自由放入下一道工序的模腔内。在确定各道工序尺寸时，应从成品开始反过来推算。例如，图 4-58 所示的挤压件，成品外径尺寸为 D ，半成品上的相

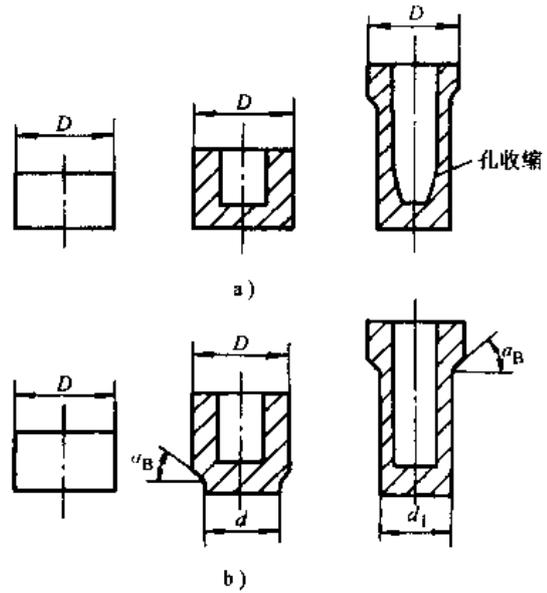


图 4-53 半成品形状对冷挤压件的影响

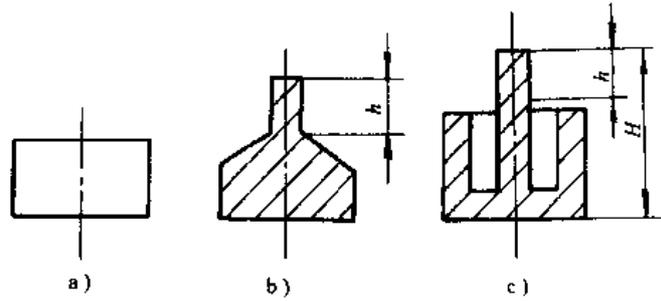


图 4-54 考虑成品局部形状的半成品设计

a) 毛坯 b) 半成品 c) 冷挤压件

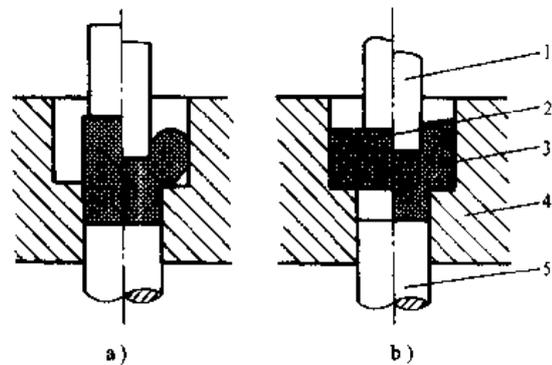


图 4-55 毛坯出现悬空状态时的成形方法

a) 毛坯侧壁悬空 b) 毛坯底面悬空
1—凸模 2—毛坯 3—冷挤压件
4—凹模 5—顶杆

应尺寸应减小一间隙值 Z_2 ；毛坯外径又要比半成品的直径小一间隙值 Z_1 。即半成品外径尺寸为 $(D-Z_2)$ ；毛坯外径尺寸为 $(D-Z_2)-Z_1$ ，该间隙值视挤压件的精度要求而定，通常在 $0.05 \sim 0.1\text{mm}$ 之间。内孔径也可用同样方法确定，不同的是，孔径尺寸越往前越大。如果成品内孔径为 d_2 ，半成品相应的孔径为 d_2+Z_3 。由于各道工序的变形性质与质量要求不同，配合间隙取值是不一样的。一般规律是，从毛坯到成品，间隙值应逐渐减小。

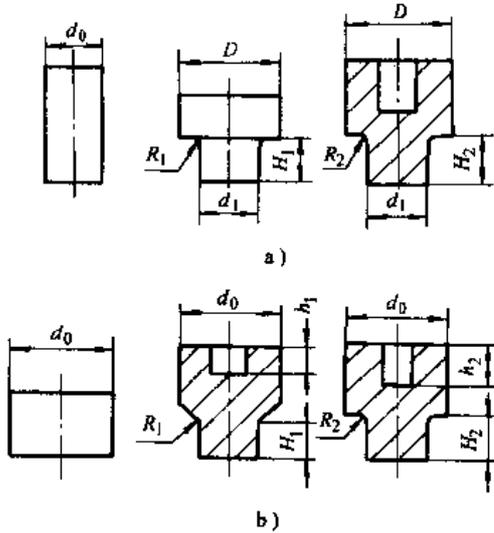


图 4-56 两种不同的中间半成品形状

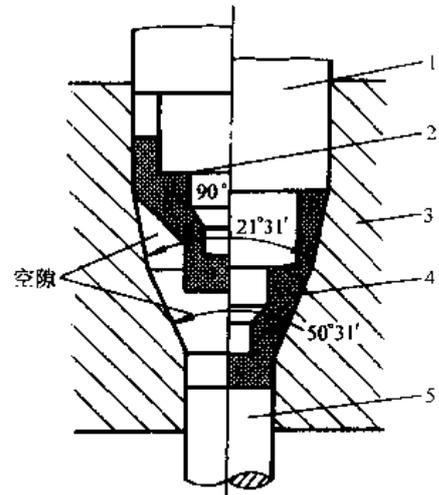


图 4-57 锥形件的半成品形状

1—凸模 2—半成品 3—凹模
4—筒形 5—顶出杆

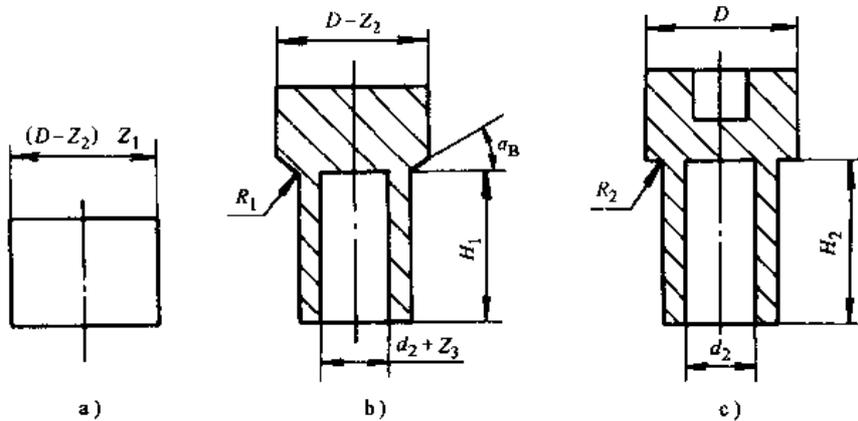


图 4-58 冷挤压工序间的尺寸配合关系

a) 毛坯 b) 半成品 c) 冷挤压件

2) 轴向尺寸的配合关系。考虑到成品挤压时，将有部分金属挤入凹模型腔内，使轴向尺寸增加一高度 ΔH 。因此，半成品轴向尺寸 H_1 应略小于成品相应处尺寸 H_2 ，即 $H_1 - H_2 = \Delta H$ 。该增长量 ΔH 的大小要视其具体零件的形状尺寸、变形特点、材料性能及变形程度的大小来决定。

3) 其他尺寸的配合关系。为了防止金属滞流，半成品的过渡部位应设计成锥形，其锥角 α 已在前面详细介绍。为了避免金属的堆积和折叠，半成品的圆角半径应与成品相应处的圆角半径相协调，即 $R_1 \geq R_2$ 。

第三节 温挤压工艺

温挤与冷挤相比增加了加热设备, 劳动条件要差一些, 且零件的尺寸精度及表面质量也差一些, 此外, 温挤的润滑剂还需不断改进。但温挤却兼有冷挤和热挤的优点, 只要充分发挥它的优越性, 则能获得良好的综合效果, 所以它是值得大力推广的先进技术。

一、温挤温度范围的选择

1. 温度范围选择的基本原则

前已谈到, 温挤压一般是将金属毛坯加热到再结晶温度以下的某个适当温度进行挤压。一般说来, 金属的变形抗力越小, 单位挤压力越小, 所需设备吨位越小, 因此温挤压应选择在金属变形抗力小的温度范围内进行。

由图 4-59 可见, 金属的变形抗力一般随温度增加而降低, 但这些碳钢的变形抗力却在 300°C 左右维持不变, 甚至略有上升。这就是“蓝脆区”。在此区域内, 变形抗力增加, 塑性变差。在“蓝脆”温度范围内挤压, 不但单位挤压力较大, 而且挤压件的质量下降, 严重的甚至会出现裂纹。

由图 4-59 还可以看出, 各种不同的材料在 600~800°C 之间变形抗力都下降较大。在 800°C 后, 变形抗力随温度增加而下降的趋势明显减慢, 这就是温挤钢零件的温度范围常选在 600~800°C 范围内的一个重要原因。

另一个需要注意的问题是各种金属的蓝脆温度范围与变形速度有关。图 4-59 所示的钢 15, 其变形速度 ϵ 为 $0.1s^{-1}$, 相当于生产中的液压机速度, 其蓝脆温度大约在 300°C 左右。而当变形速度为 $40s^{-1}$, 相当于生产中的曲柄压力机挤压速度, 其蓝脆温度约为 450°C。这表明, 对于普通钢而言, 当变形速度增加时, 蓝脆温度区域向高温方向移动。而由图 4-59 还可看出, 随着含碳量的增加, 出现蓝脆的温度范围也向高温方向移动。

此外, 钢加热到一定的温度, 出现明显的氧化现象。温度越高, 氧化越严重。它将严重地影响到零件的尺寸精度, 表面质量及模具寿命等。实验表明, 15 号钢加热到 800°C 时的氧化烧损量仅为 1150°C 时的 1/10。由此, 温挤温度应选在金属强烈氧化以前的温度范围内。

2. 各种金属材料温挤压的温度范围

根据上述各项原则以及国内外生产实践, 对各种金属材料温挤压的温度推荐如下, 作为选择温挤压温度时参考。

1) 对 10、15、20、35、40、45、50 号钢和 40Cr、45Cr、30CrMnSi、12CrNi3 等碳钢和低合金结构钢在曲柄压力机上温挤压时, 挤压温度可选择在 650~800°C 之间; 在液压机上温挤压时, 可选择在 500 (或 550) ~800°C 之间。

2) 对调质合金结构钢 38CrA 等可选择在 600~800°C 之间进行温挤压。

3) 对中合金结构钢 18Cr2Ni4WA 等可选择在 $670 \pm 20^\circ\text{C}$ 之间进行温挤压。

4) 对 T8、T12、GCr15、Cr12MoV、W9Cr4V2、W6Mo5Cr4V2Al 等工具钢和轴承钢可

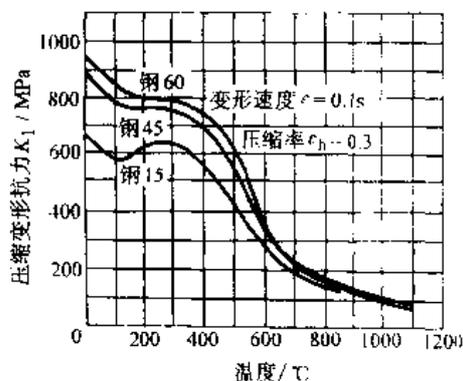


图 4-59 碳钢的加工温度与压缩变形抗力的关系

选择在 700~800°C 之间进行温挤压。

5) 对马氏体不锈钢 2Cr13、4Cr13 以及马氏体-铁素体不锈钢 1Cr13、Cr17Ni2 等可选择在 700~800°C 之间进行温挤压。

6) 对奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 等可选择在 260~350°C 或在 800~900°C 之间进行温挤压。

7) 对耐热钢及耐热合金如 GH140 可选择在 850~900°C 或在 230~340°C 之间进行温挤压。

8) 对铝及铝合金可选在 250°C 以下进行温挤压。

9) 对一般铜及铜合金可选在 350°C 以下进行温挤压。

10) 对铅黄铜 HPb59-1 可选在 300~400°C 之间进行温挤压或在 680°C 左右进行温挤压。

11) 对室温塑性较差的镁及其合金, 其挤压温度的选择原则如下: MA1-M 合金为 300~350°C; MA2-1M 合金为 250~300°C; MA8-M 合金为 280~360°C; MA8-H 和 MA2-1H 合金为 220~260°C。

12) 对室温塑性较差的钛及钛合金, 其挤压温度的选择原则如下: BT1-1 和 BT1-2 为 350~400°C; DT4-1 和 DT4 为 500~650°C; BT4、BT5、BT14 为 550~700°C; DT4-2、BT5-1、BT6 为 550~750°C。

13) 某些钢种使用过的温挤压温度见表 4-14。

表 4-14 某些钢种使用过的温挤压温度

钢 号	毛坯直径/mm	加热温度/°C	钢 号	毛坯直径/mm	加热温度/°C
20 钢	16~38	290	40	19	700~800
30 钢	16	370			370
40Mn	25~32	440	50Cr	25	425
42CrMo	19	425	50CrV	19	440
20CrNiMo	16	385	Cr17	8	230
40CrMnMo	19	425	3Cr13	13	345
1Cr13	12.5	345	0Cr18Ni9	7~9	455~460
3CrA		650	1Cr18Ni9Ti		260~350
18CrNiWA					700~800
10、15、20、35、 45、50 钢		700~800	GCr15		550~800
2Cr13		650~700	40Cr、45Cr、30CrMn、 Si、T8		700~800

二、温挤毛坯的加热及模具预热

1. 毛坯的加热方法和时间

对温挤压毛坯的加热, 采用连续式煤气加热、电阻加热、中频感应加热比较合适。为了防止毛坯在加热时的氧化与脱碳, 可以在炉内通入惰性气体或采用真空加热炉。若无此条件则可采用快速加热或在毛坯上涂上固体润滑剂起到防护作用。较为简便且实用的方法是, 当

在毛坯加热前涂以水剂石墨时，应将毛坯预热至 $160\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，然后，在水剂石墨润滑剂中浸泡一下立即拿起，使其表面上形成薄而均匀的石墨层。然后入炉再加热到温挤所需温度。经过这样的处理，在挤压过程中表面上的石墨保护层还能起到润滑作用。当然，在模具上仍应另涂润滑剂。

当在毛坯上涂以水溶性润滑剂时，要求在加热过程中水分的蒸发时间要尽量短。据试验，最合适的毛坯预热温度是 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，这时水分蒸发很快，只需 $1\sim 2\text{s}$ ，涂层也很均匀。如果在模具上不另涂润滑剂，则从开始加热到挤压结束的时间要尽量短。据试验，如果加热温度是 800°C ，则在 3.5min 后就可将石墨保护层烧去 80% ， 17min 后则完全烧尽。如果挤压温度为 700°C ，那么最好在 10min 内完成加热和挤压的全程。这样石墨保护层还可保留 50% ，因而即可防止毛坯表面氧化，又可在挤压过程中起到润滑作用。

对于大批量生产，可采用中频感应加热或利用温挤材料本身的电阻加热，因为这两种方法不仅有利于操作自动化，而且能够有效地延续毛坯温度的降低。

对于大型零件温挤压，如果采用感应加热，则由于毛坯直径较大，毛坯断面上的温度难以均匀。因此，在中频感应加热后，再在箱式电炉中加热，使毛坯温度沿断面均匀一致。

毛坯的加热时间可根据加热设备，毛坯尺寸及加热的毛坯数量而定，以均匀达到挤压温度作为确定加热时间的标准。

2. 模具的预热和冷却

在温挤压前，一般要将挤压凸凹模预热到 $150\sim 300^{\circ}\text{C}$ 才能进行生产，模具预热的目的有两个：一是使挤压毛坯放入模具中温度降低不致过快；二是减小模具与毛坯接触时的温差。

在模具上安装专门的煤气（或液化石油气）预热器或电阻预热器，如果不具备这些条件，也可将烧红的铁块进行预热。预热温度视温挤毛坯温度的高低而定。

在连续生产过程中，模具温度将不断升高，加上挤压力的作用，模具会发生变形，从而严重影响挤压件的尺寸精度，故在模具结构设计中应考虑设置冷却装置或不断用人工方法冷却，使模具温度保持在 $150\sim 300^{\circ}\text{C}$ 之间。

三、温挤压力的计算

影响温挤单位挤压力的因素主要有：变形温度、材料种类、变形程度、模具工作部分形状、挤压方式、润滑情况、变形速度、毛坯形状和尺寸等。

温挤压力可采用图表法，公式计算法和近似估算法确定。

1. 图表法

图 4-60 是钢的温挤压单位挤压力的计算图表。图中虚线上的箭头表明了查找的方法。例如，当在 550°C 挤压钢 35 时，可沿图中 550°C 向上作虚线交到钢 35 的曲线上，然后，箭头向左标到正挤压断面缩减率 80% 曲线上的一点，这一点在水平轴上的投影数据为 1900MPa ，这就是钢 35 最大的凹模单位挤压力，将这个单位压力乘以凹模内腔的环形面积，即为总的正挤压力。

如果是反挤，则箭头向右标去，同样可以查到某一断面缩减率时作用于凸模上的最大单位压力，然后乘以杯形件内径对应的面积，即为总的反挤压力。图中仅列出部分钢种，其他钢种可用其屈服应力的类比，近似地确定其单位挤压力。

图中轴承钢 Cr15 的曲线比较特殊，它在 $300\sim 800^{\circ}\text{C}$ 温挤时，单位挤压力几乎保持不变，只有当加工温度大于 850°C 以后，单位压力才有所下降。因为在 800°C 时，GCr15 的渗碳体球

状组织变为片状组织。

获得本图表的实验条件为：模具的结构参数如图所示；挤压前模具预热到 60~100°C；以油剂石墨作为润滑剂；反挤压温度在 600°C 以下者，毛坯作磷化处理，600°C 以上者，毛坯不处理。

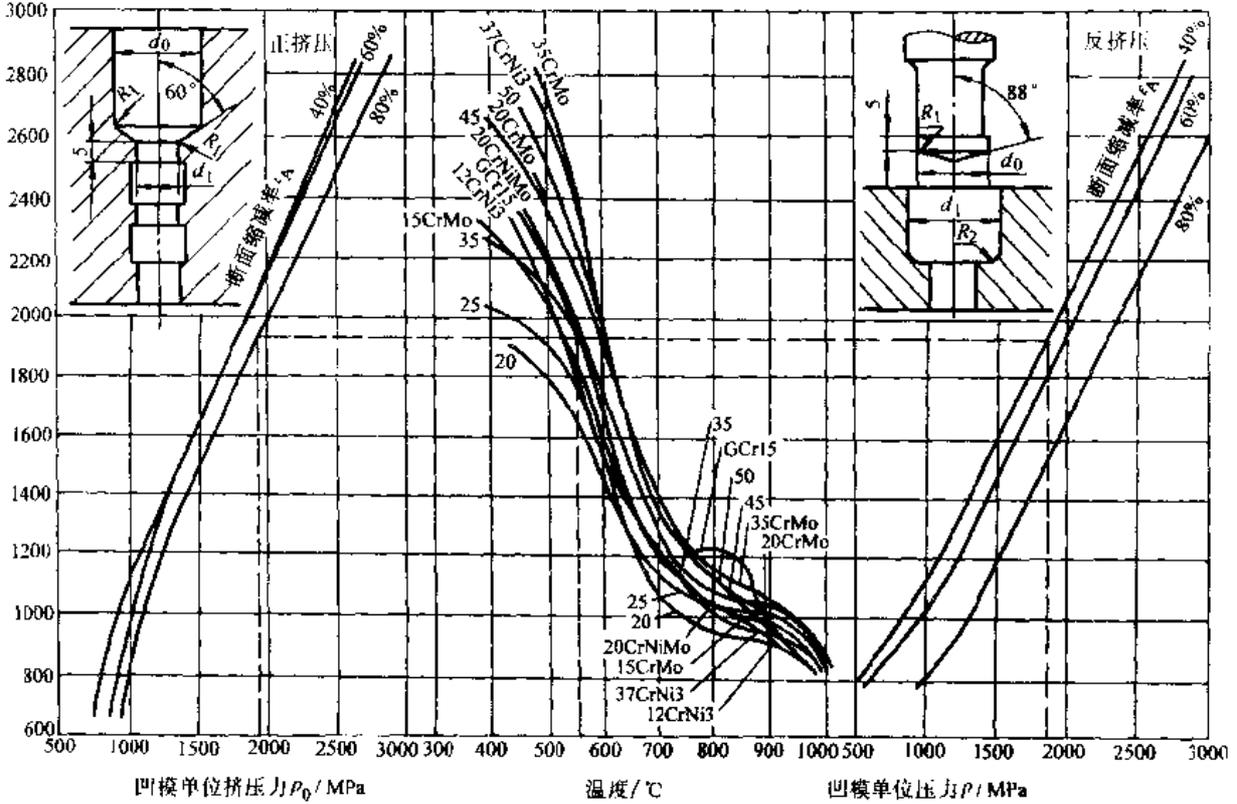


图 4-60 钢的温挤单位压力图算表

2. 经验公式计算法

1) 用元素含量的估算公式，对于在 200~600°C 反挤时的凸模单位压力可按下列公式计算：

$$p = 1.575(76\omega_C + 1.3\omega_{Ni} - 0.08\omega_{Cr} - 0.1t + 0.36\epsilon_A) + 143 \tag{4-13}$$

- 式中
- p ——凸模上最大单位压力(MPa)；
 - $\omega_C, \omega_{Ni}, \omega_{Cr}$ ——碳、镍、铬的质量分数(%)；
 - t ——毛坯的挤压温度(°C)；
 - ϵ_A ——以断面收缩率表示的变形程度(%)。

采用该式进行计算，其误差在 10% 以内。该式表明，钢的含碳量对挤压力的影响最大。本公式仅适用于一般碳钢、低合金结构钢、常用的奥氏体及铁素体和马氏体不锈钢的反挤压，对其他钢种使用时应慎重。

2) 拘束系数估算公式：

正挤时
$$p_t = cn\sigma_b \tag{4-14}$$

- 式中
- p_t ——凸模上最大单位挤压力 (MPa)；
 - c ——拘束系数；
 - n ——考虑温挤变形时材料冷作硬化系数；

σ_b ——在温挤温度时的材料强度极限 (MPa);

反挤时
$$p_b = Cn\sigma_b \frac{F_m}{F_p} \tag{4-15}$$

式中 p_b ——凸模上的单位压力 (MPa);

F_m ——毛坯断面积 (mm^2);

F_p ——凸模工作带断面积 (mm^2).

关于 c 、 n 值可查表 4-15。当温挤温度较高时, n 取较小值, 反之, n 取较大值。

表 4-15 拘束系数 C 和硬化系数 n

变形程度 (%)	拘束系数 C		硬化系数	
	正挤	反挤	正挤	反挤
40	1.03	1.6	1.5~2	1.5~2
60	2.6	2.6	1.7~2.2	1.7~2.2
80	3.6	4.0	1.8~2.2	1.8~2.2

图 4-61 可用于查找钢在不同温度下的强度极限, 但需已知其室温时的强度极限。图中曲线上所标数据为钢材在室温时的强度极限, 根据挤压温度及室温强度极限, 很容易在图中找到相应于挤压温度时的强度极限。

四、温挤压的润滑

1. 对温挤润滑剂的要求

在室温下冷挤时, 其润滑方法是先将毛坯表面进行磷酸盐处理 (不锈钢为草酸盐处理), 然后进行硬酸钠皂化处理或涂 MoS_2 。这种润滑方法对钢的冷挤压具有满意的效果, 但当温度在 $250\sim 300^\circ\text{C}$ 以上时, 由于磷化层与皂化层被烧坏, 使润滑条件恶化, 所以在 $250\sim 300^\circ\text{C}$ 以上温挤时, 这种润滑方法便不适用, 必须采用其他润滑方法。

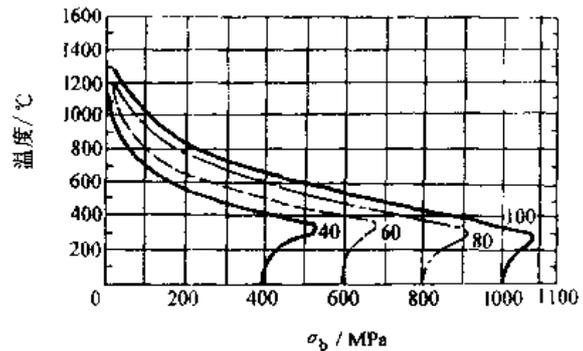


图 4-61 钢随温度而变化的抗拉强度 σ_b 的曲线

温挤压对润滑剂的要求大体上与冷挤相同, 不同之处为:

- 1) 能耐 2000MPa 以上的高压;
- 2) 应具有足够的热稳定性, 在温挤时仍能保持很好的润滑效果;
- 3) 具有一定的绝热作用, 能减缓毛坯的温度降低和模具的温度升高;
- 4) 在温挤压温度下能均匀地粘附在毛坯或模具表面上, 而不形成堆积成厚的薄膜;
- 5) 化学稳定性好, 保证温挤时不分解, 不氧化变质, 无毒, 无公害, 对产品和模具没有腐蚀作用。

2. 温挤时的润滑剂

(1) 石墨水剂或油剂 石墨水剂除起润滑作用外, 还可以对模具起冷却作用。可以只涂于模具上, 也可以除了在模具上涂覆以外, 还在毛坯上涂覆后再将毛坯加热。石墨油剂是将胶质石墨与着火点较高的油 (如炮油、气缸油等) 混合。石墨与油的混合比例为 1:2 (体积比), 在整个温挤压温度范围 (800°C 以下) 用它润滑碳钢、非不锈钢等, 效果均好。

为了在挤压后从挤压件上除去石墨，可将挤压件在质量分数为 15%~20% 的铬酸和质量分数为 5% 的 NaNO_3 混合水溶液中浸泡 1~3min，或用喷砂法来去除挤压件上的石墨。

(2) 石墨加二硫化钼加油酸 一般常用的比例是，石墨：二硫化钼：油酸=26：17：57（重量比）。这种润滑剂可适用于碳钢和非不锈钢。涂用方法及从挤件上消除的方法与石墨油（或水）剂相同。

(3) 氧化铅 (PbO) 用气缸油或其他油将 PbO 调和，比例是 $\text{Pb}:\text{油}=1:2$ （体积比）适用于 400°C 以上不锈钢的挤压，不适用于碳钢、低合金钢。另外应注意该润滑剂有毒。

涂用方法同前。除去氧化铅系润滑剂的方法是在质量分数为 10%~30% 硝酸水溶液中浸泡 20~30min。

(4) 氧化铅 (PbO) 加 5%（体积分数） CrO_3 在 PbO 中加入（体积分数为 5% 的） CrO_3 ，然后用油（气缸油、亚麻油等）调和，适用于碳钢和低合金钢的温挤压。

涂用方法同前。但应注意 PbO 和 CrO_3 均有毒。

(5) 氧化硼 (B_2O_3) 加入 25%（质量分数）石墨氧化硼加 33%（质量分数） MoS_2 这种润滑剂用于钢时，最好将毛坯在 600°C 左右预热，然后涂上混合的粉末。试验表明，在 300~700°C，其摩擦系数均在 0.1~0.2 左右，可用于温挤压碳钢、低合金钢和不锈钢。

(6) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-Bi}_2\text{O}_3$ 系润滑剂 即在硼砂 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 中混入 10%（质量分数） Bi_2O_3 粉末，适用于不锈钢在内的各种钢，特别是在较高温度时更合适。在 300~400°C 时，摩擦系数为 0.3；在 500~700°C 时，摩擦系数为 0.1~0.3。

使用时需将涂有这种粉末的毛坯加热到 900°C，此时粉末熔化形成薄膜。在挤压件上除去润滑剂可采用酸洗、喷砂、喷丸等方法。

(7) 玻璃润滑剂 它适用于 700~800°C 的碳钢、合金钢，不锈钢。润滑剂的配方为：硅砂 (SiO_2) 23%（质量分数）+ 硼酸 (H_3BO_3) 41%（质量分数）+ 红丹 (Pb_2O_4) 30%（质量分数）+ 氧化铝 (Al_2O_3) 1.8%（质量分数）+ 硝酸钠 (NaNO_3) 4.2%（质量分数）。

以上原料均为粉状，搅拌均匀后，经过焙烧变成熔融玻璃，然后激入水中变成玻璃球，烘干后保存，使用前应磨成极细的粉末。

涂料的方法有喷涂、刷涂和浸涂三种。一般以涂层厚度不超过 0.25mm 为宜。涂刷前，毛坯必须去油，并预热到 120~150°C，使湿粉涂上去能立即干燥固定，很好地粘附在毛坯表面上。

采用玻璃润滑剂时，挤压件表面有一层玻璃，可以用酸洗的方法去掉。酸洗液是氢氧酸或盐酸与硫酸的混合液，盐酸：硫酸=1：4（体积比）。

当挤压小毛坯时，在凸模和凹模表面上涂 MoS_2 油剂润滑，与毛坯润滑配合使用，其润滑效果会更好， MoS_2 油剂的配方： MoS_2 40% + MoS_2 锂基脂 30% + 气缸油 25% + 粘度添加剂 5%（均为质量分数）。

第四节 热挤压工艺

热挤压工艺作为金属在高温下成形，毛坯下料、加热和润滑等，与精密模锻的相应要求基本相同。作为挤压工艺，在金属变形方式及模具结构等与冷挤、温挤尤其是与温挤压基本

相同。因此，这里仅对热挤等截面长形件、棒、管、型材等的一些的特性问题进行简要的论述和介绍。

一、热挤压工艺的特点及主要形式

所谓热挤压就是将毛坯金属加热到再结晶温度以上的某个温度范围内进行的挤压。热挤压时，毛坯是在很高的压力下产生塑性变形。所以包括高温下塑性很低材料，均可承受很大的变形而不发生破坏。此外，还可进行粉末材料的压实，异种金属的接合等。

热挤压工艺过程包括：毛坯的制备→毛坯的预热和加热→涂玻璃润滑剂→挤压→卸下凸凹模、芯棒、清除制件上的玻璃润滑剂→精加工。

与冷挤压相比，热挤压具有如下优点：提高了塑性，降低了变形抗力，因此可以挤压强度较高材料，挤压断面形状复杂、尺寸较大的零件。同时，还可以增大每一工步的变形量，减少变形工步数；生产方法比较灵活，可以连续生产。但也存在一些缺点：由于在高温下变形，因此对模具材料有一定的耐热性要求；在模具结构设计中要考虑冷却系统；由于加热与冷却使制件表面粗糙度增大而尺寸精度降低。

热挤压的几种形式如图 4-62 所示，其中 a、c、d 所示形式应用最广。图 a 用于挤压筒形件；图 c 用于挤压管形件；图 d 用于挤压棒形件。

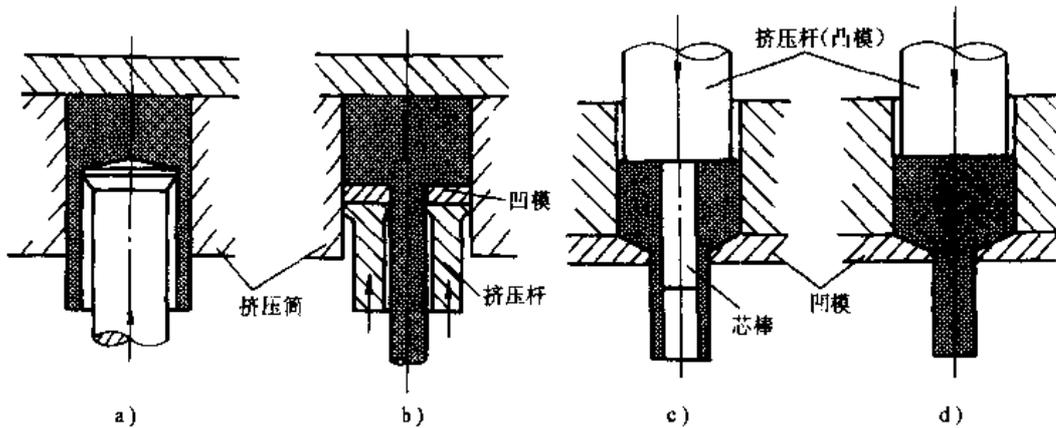


图 4-62 热挤压的各种形式

a) 深孔反挤压 b) 实心反挤压 c) 空心正挤压 d) 实心下正挤压

二、挤压金属流出速度的选择

挤压金属流出速度对变形抗力及塑性的影响决定于切应变（或硬化）与软化过程（恢复与再结晶）之间的相互关系，这种相互关系首先决定于变形机理，也随变形温度而变。软化过程的进展需要一定时间。在高温下软化速度比硬化速度快。所以研究速度对变形抗力及塑性的影响时，不能不考虑它们与温度之间的关系。

当加工温度未达到上限时，速度对变形抗力及塑性的影响很大，因为当变形速度很大（大于 6m/s ）时，恢复和结晶过程将受到阻碍，这一点已为 Ni437 镍基类耐热合金在静态变形（ 0.03m/s ）及动态变形速度（大于 6m/s ）下的塑性变形情况所证实。

一般要求热挤压金属流出速度尽可能快，这样既可使制件尺寸均匀一致，又可防止毛坯冷却和模具过热。但随着流出速度的提高，平均变形抗力增加，而且流出速度太大会出现过热现象，引起晶粒粗大或材料开裂（角裂）。反之，流出速度太慢，会使毛坯挤压温度下降，不易成形并降低模具寿命。挤压金属流出速度可参见表 4-16。

表 4-16 挤压金属流出速度

材 料		挤压金属流出速度 m/min
铝合金		6~60
铝合金	纯铝	25~75
	耐腐蚀合金	1.5~30
	强力合金	1.5~6
铜合金	纯铜	6~300
	黄铜、青铜	6~200
锌合金	纯锌	2~23
	锌合金	2~12
钢		120~230

三、润滑剂及其清除

润滑剂选用的合适与否直接影响热挤压工艺的成败。对于钢，使用各种各样的玻璃粉或者玻璃纤维作润滑剂。它们不仅起润滑作用（摩擦系数 $\mu=0.027\sim0.033$ ），还在毛坯和模具之间起隔热作用。玻璃润滑剂除了用于镍基合金、钛和银的挤压以外，还可用于各种耐热材料的挤压，并取得了显著的效果。

此外，也可用其他金属把毛坯表面包覆住，起润滑作用，防止氧化及开裂。例如：对铝合金包以纯铝，对铸铁、锡、铀、钛包以钢板等。近来有报导采用通电润滑法。即在挤压过程中用低压电流通过被挤材料与模具的接触面，供其形成保护薄膜，从而可大大减少模具的磨损。

(1) 热挤压用的玻璃润滑剂 表 4-17 为 И. В. 普罗佐诺夫推荐的钢和某些低塑性合金挤压时用的玻璃润滑剂的化学成分及应用范围。

表 4-17 热挤压钢、低塑性合金用润滑剂成分及应用范围

化学成分 (质量分 数%) 玻 璃 代 号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	说明及应用范围
	A(1)	56	15	18	2	7	/	
A(2)	65	3	10	15	/	/	/	其他元素 7%，润滑芯棒
A(5)	60	3	15	15	3	2	2	允许含 K ₂ O ₂ , K ₂ O + Na ₂ O 总量应为 13%，润滑毛坯表面
A(13)	60	3	15	13	5	2	3	允许含 K ₂ O ₂ , K ₂ O + Na ₂ O 总量应为 13%，用于碳钢、不锈钢、耐热钢的毛坯（直径 60~150mm）表面和小直径（25mm）管子的芯棒。当挤压毛坯表面有明显氧化物时，最好加 1%~16%CaF ₂ （相应减少 Na ₂ O 含量）
B(21)	65	3	12	5	5	3	7	润滑直径在 150mm 以上的毛坯和不锈钢、耐热钢、高镍钢的芯棒
B(23)	50	3	5	25	12	2	/	润滑直径为 6mm 的毛坯

研究还指出，热挤压时，玻璃层的厚度为 0.02~0.05mm。玻璃为粉状（经 100# 以上筛子筛过），用钠的碱性或硅酸盐水玻璃的水溶液粘到芯棒上，或用纤维细度为 0.01~0.05mm

的玻璃棉置于凹模中效果最好。

法国推荐表 4-18 所列化学成分的玻璃用于热挤压时的润滑。

表 4-18 用于热挤压的玻璃润滑剂成分

润滑剂代号	化学成分(质量分数,%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	其他
1	60	5	14	14	
2	72	4	8	13	
3	65	4	14	8	

对不锈钢在 1150~1250°C 下热挤压时,亦可选用窗玻璃或成分相似的玻璃作润滑剂。窗玻璃的成分(质量分数)为 Na₂O14.5%、SiO₂74%、CaO10%、Al₂O₃1%。其软化点为 700°C,流动点为 940°C。

对钢和钛合金挤压时,润滑凹模用的润滑剂亦可用玻璃粉(或将玻璃圆盘置于凹模与毛坯之间)与鳞片状石墨 1%~90%(体积分数)或 MoS₂5%~40%(体积分数)或硼的氯化物 10%~40%(体积分数),加粘结剂(液体玻璃或酚醛脂清漆)构成的混合物。

在挤压变形抗力小的合金和变形量小于 35%~40%时,采用以下润滑剂亦可得到很好的效果。

- 1) 胶体石墨——含石墨 35%、云母 5%、钙 60%(质量分数)。
- 2) 二硫化钼型——含 MoS₂25%、云母 5%、钙 70%(质量分数)。
- 3) 鳞片石墨 25%、MoS₂15%、云母 5%、铝粉 55%(质量分数)。

资料还介绍一种主要由氧化铁组成的润滑剂,其摩擦系数为 0.052,热导率仅为钢 1/12,比玻璃的热导率小。可用于 1100~1250°C 下钢的挤压,还可用于 Fe-Ni-Co 合金钢和 Cr 钢的热挤压。

(2) 玻璃润滑剂的清除 玻璃润滑剂的缺点是很难从挤压件和模具上清除。目前最常用的清除方法有两种:一种是喷砂等机械法;另一种是酸洗等化学法,即用氢氧化钠或氟氢酸和硫酸的混合液浸除。

每次挤压后要清除残留在模具中的玻璃润滑剂,在生产中很不方便。为此,美国提出一种加润滑剂法,即在毛坯送入涂有玻璃润滑剂的挤压筒前,在筒壁和凸模上先涂一层含耐火材料的液体或矿物油和石墨的混合物,以防玻璃粘到模具上。现在国内采用的基本方法是:毛坯自动送入玻璃熔池(或玻璃粉池)内浸粘,然后速入感应炉中加热到挤压温度,与此同时,模具采用自动喷射胶体石墨剂,加热后的毛坯再自动送入模具中进行挤压。

第五节 挤压模具设计

冷挤压模具所承受的单位压力特别高,通常在 1500MPa 以上,甚至高达 2500MPa。其次,金属的强烈流动及摩擦产生热效应而使模具工作部分的温度可能达到 200~350°C。温挤压时由于需要将毛坯加热,因此,连续生产时模具的温度比冷挤压时升高得多,可达 300~500°C。这就要求温挤模具不但象冷挤那样能经得住高压的作用,而且具有抗室温及中温破坏的足够硬度、强度和韧性,还要在反复变形应力和热应力的作用下,具有高的抗磨性、耐疲劳性能。热挤压模具是在极其沉重的温度条件和动力条件下工作的,因此模具设计中必须考虑冷却问题。

为此，挤压模具设计应注意下列因素：

- 1) 模具应具有足够的动态强度和刚度；
- 2) 合理地设计工作部分的几何形状及其参数，选择合适材料；
- 3) 模具的易损件折换方便；
- 4) 有利于机械化，自动化及安全生产；
- 5) 制造容易，成本低；

设计时，必须根据具体零件的实际生产条件，在满足零件质量要求的前提下，综合考虑其经济效益。

挤压模具一般由工作部分、传力部分、顶卸件部分，导向部分和紧固部分所组成。这里着重论述和介绍工作部分尤其是组合凹模的设计，其余零部件结合工艺及模具实例加以介绍。

一、反挤凸模的设计

1. 反挤凸模

反挤凸模主要有三种形式，如图 4-63 所示。平底凸模主要用于要求平底或单位挤压力较低的情况；尖锥顶凸模可以降低单位压力，但易造成壁厚不均，因此，实际生产中应用较少；带平底的锥形凸模兼有这两者的优点，它既可减少单位压力，又可以保证壁厚均匀，因此在生产中应用较多。

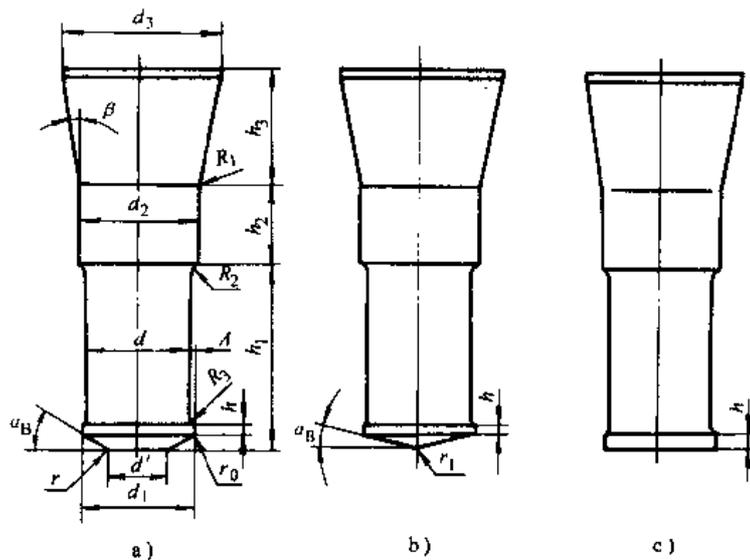


图 4-63 反挤压凸模的形式

a) 带平底的锥形凸模 b) 尖锥顶形凸模 c) 平底凸模

由图 4-63 可以看出，三种形式的凸模，其工作部分均作成减压结构，即工作带以上的凸模直径 d 应小于挤压件内径 d_1 ，它的作用是减小凸模与流动金属的接触面积，从而大大降低摩擦阻力，防止挤压件粘模。成形时，由于凸模会弹性变形而使其横向变粗，设计成这样的减压结构可以防止挤压件产生二次变形。

在进行反挤凸模结构设计时应注意以下问题：

- 1) 为了保证凸模装卸方便，紧固可靠，凸模的夹紧部分应做成锥形或阶梯形；
- 2) 当凸模带有导向部分时，导向部分的长度应在开始挤压时伸入凹模的长度不小于 5mm；

3) 为了防止应力集中而造成凸模早期失效, 所有过渡部分皆应设有足够大的圆角半径或倒角;

4) 为了防止凸模工作时产生纵向弯曲, 成形部分高度 h_1 应尽量短一些, h_1 与工作带直径 d 之比值应限制在下述范围内:

有色金属反挤压 $h_1/d \leq 6$

黑色金属反挤压 $h_1/d \leq 3$

带平底锥形凸模 (图 4-63a) 各部分尺寸如下:

工作带直径 $d_1 =$ 挤压件孔径最大尺寸;

工作带高度 $h = 2 \sim 3\text{mm}$ (低碳钢), $0.5 \sim 1.5\text{mm}$ (有色金属);

底部平坦部分直径 $d' = (0.5 \sim 0.7)d_1$

$d = d_1 - (0.1 \sim 0.2)$;

$d_2 = (1 \sim 1.3)d_1$;

$d_3 = (1.3 \sim 1.5)d_1$;

$h_2 = 0.5d_2$;

$h_3 = (0.5 \sim 1)d_3$;

$h_1 \leq 3d_1$ (黑色金属, $\leq 6d_1$ 有色金属);

$\alpha_B = 5^\circ \sim 7^\circ$ (黑色金属), $= 1^\circ \sim 2^\circ$ (有色金属), 最大不超过 27° 。

为了提高凸模的强度, 当凸模承受的单位压力较大或反挤多台阶内孔时, 应尽量做成组合式结构。

2. 正挤凸模

正挤凸模工作部分尺寸较短, 一般弯曲应力较小, 所以其应力状态优于反挤凸模, 故形状简单, 如图 4-64 所示。凸模与凹模之间的间隙要适当, 太大会出现毛刺, 太小会损伤凸凹模配合面。一般取 H7/h6 和 H6/h5, 但还要考虑凸模受力后产生弹性胀大的影响。图 4-64 中左边的凸模用于实心件正挤压, 右边的适用于空心件正挤压。这种用于空心件挤压, 在挤压时, 由于流动金属与芯棒之间的摩擦力作用, 芯棒受到轴向拉力。当挤压力大、芯棒较细且摩擦力较大时, 芯棒易被拉断, 因而须采用带活动芯棒的组合式凸模。

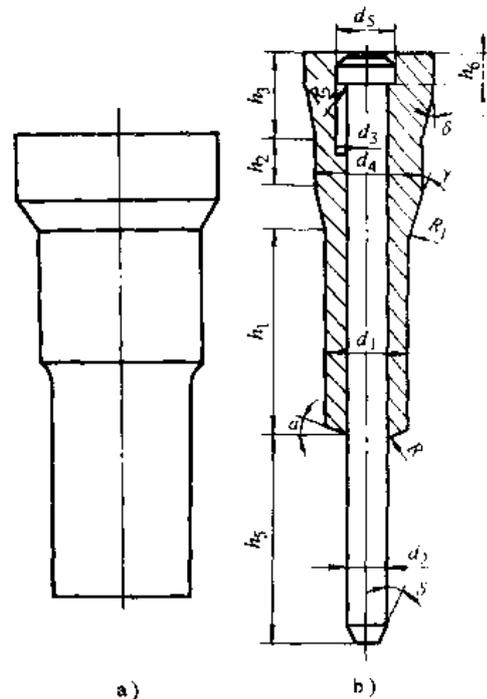


图 4-64 正挤凸模

二、挤压凹模的设计

1. 反挤压凹模

图 4-65 为几种常用的反挤压凹模的结构形式。

a、b、c、d 四种主要用于挤压后零件不卡在凹模内, 不需要顶出装置的情况。有色金属薄壁件反挤压常用这些结构。

图 4-65a 是整体式凹模, 这种凹模的优点是结构简单、制造方便; 缺点是型腔底部转角半径 R 处容易开裂下沉, 模具寿命较短, 适用于生产批量不很大的条件下。图 4-65b 也属于整

体式凹模，但凹模底部型腔有 25° 斜度，有利于金属流动，这种凹模形式用于反挤压壁厚仅 0.07mm 的铝质圆筒形件是成功的。图 4-65c 是贯通式分体凹模，这种凹模比整体式凹模（图 4-65a）要好得多，寿命较长；其缺点是在零件底部连接处有一圈毛刺，阻力也大些，但只要制造精度高一些，这些缺点是可以克服的。图 4-65d 是上下分体式挤压凹模，这种凹模比前面几种凹模的工作寿命都长，零件底部连接处的痕迹也不很明显，但这种凹模的制造精度要求非常高，否则同心度就难于保证。为了避免挤压金属流入上下层间的拼合夹缝处拼结合面的表面粗糙度为 $R_a=0.1\mu\text{m}$ ，这样可以保证即使像纯铝这样流动性能好的金属也不会流入拼合夹缝之中，上下层分体凹模的下层凹模模腔本身可用冷挤压型腔的方法压出凹坑，这种凹模特别适合于大批量生产。图 4-65e 和 f 适用于要求顶件时的反挤压。

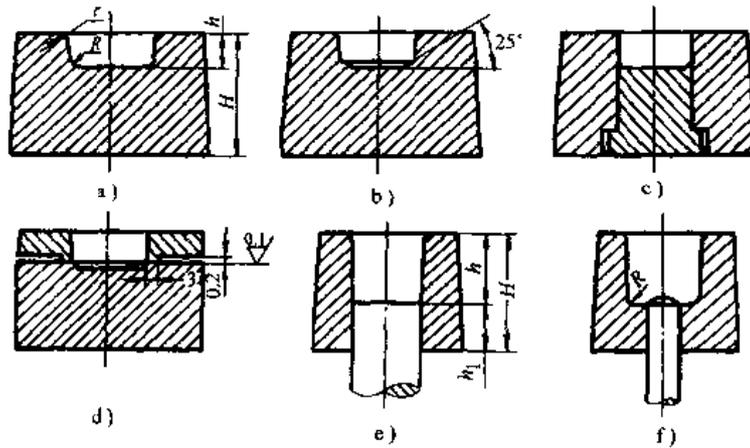


图 4-65 反挤压凹模的结构形式

为了减少挤压金属的流动阻力，可以将凹模型腔内壁作出 $10^\circ\sim 20^\circ$ 的斜度。斜度不宜取得过大，否则挤出的零件会产生下薄上厚的壁厚差，对于挤压内外径公差要求不高的零件，以及后续空心件正挤的深孔零件和后续变薄拉伸的零件，在反挤凹模型腔内壁作成斜度是完全合适的。

凹模型腔内的表面粗糙度应越低越好，最好抛光到 $R_a=0.1\mu\text{m}$ 以下。

反挤压凹模的型腔直径相当于挤压件外径，型腔深度要比毛坯厚度大 $3\sim 5\text{mm}$ 。因此，型腔深度 h_2 （见图 4-66）可用下式表示：

$$h_2 = H_0 + h + r$$

式中 H_0 ——毛坯高度；

h ——凸模工作带以下的高度加上毛坯入凹模后必须的导向高度，约 4mm ；

r ——凹模入口处的圆角半径，取 3mm 。

$$h_1 = (1/2 \sim 2/3)D$$

凹模底部有时留有 2mm 的直线部分，凹模预应力圈压入后，该直线段露在外面，以利于凹模安装定位。

2. 正挤压凹模

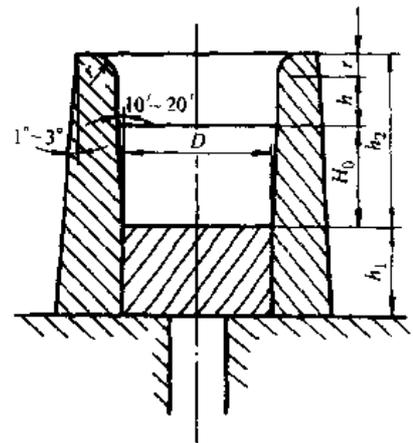


图 4-66 反挤压凹模的尺寸

正挤压凹模如图 4-67 所示, 外壁应作成斜度为 $1^{\circ}30'$ 的锥形, 以便与预应力圈压配。深度 h_3 根据毛坯高度和挤压前凸模进入凹模中导向长度来决定, 凹模锥角一般以 $60^{\circ}\sim 126^{\circ}$ 为佳。锥角过大, 金属变形时易形成“死区”, 不利于金属流动, 并给润滑造成一定的困难; 锥角小于 60° 时, 则有毛坯金属楔附凹模的趋势, 不仅使顶出力增大, 而且使凹模的径向应力也增大。

实践证明, 凹模模腔过渡圆角半径对模具寿命的影响很大, 通常取 $r = (D - D_1) / 2$ 为宜。工作带长度 h_1 可按如下选择:

纯铝正挤压: $h_1 = 1.0 \sim 2.0 \text{mm}$;

小的纯铝件正挤压: $h_1 = 0.6 \text{mm}$;

低碳钢正挤压: $h_1 = 2.0 \sim 6.0 \text{mm}$;

硬铝、纯铜、黄铜正挤压: $h_1 = 1.0 \sim 3.0 \text{mm}$ 。

工作带以下的孔径 $D_2 = D_1 + (0.5 \sim 1) \text{mm}$, 这样可使挤出件不再与凹模接触, 以免增加摩擦。由 D_1 到 D_2 也应光滑过渡。底厚 h_2 应以强度要求进行选择, 一般可能 $h_2 = (1.1 \sim 1.2)D$ 。

对于较长零件, 在凹模出口处采用导向套, 或加长 h_2 的长度达到导向作用, 防止挤压件产生纵向弯曲。

整体式挤压凹模, 容易产生径向开裂, 由于应力集中, 开裂常常发生在凹模挤压筒与锥形部分的交界处, 为了避免这种开裂, 可以采用分体式凹模, 如图 4-68 所示。对于 a 和 c 两种横向分体式凹模, 其接合面宽度为 $1 \sim 3 \text{mm}$, 对该面应仔细研磨, 保证接合严密, 防止金属挤入接合面。在接合面以外, 对其中一块作成 1° 斜度。图 4-68b 为纵向分割式, 银块模芯与挤压筒之间的过盈量可取 $0.02 \sim 0.05 \text{mm}$ 。图 4-68d 银块模芯为硬质合金。

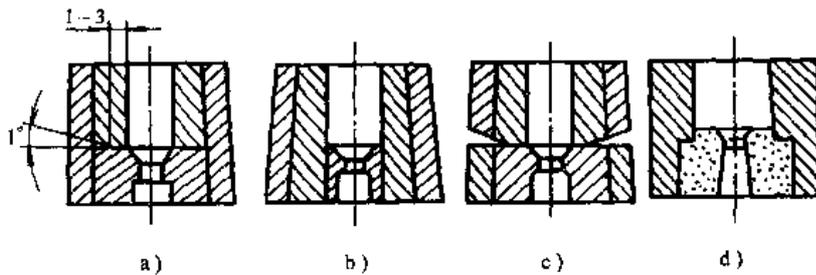


图 4-68 正挤压分体凹模

三、组合凹模的优化设计

挤压凹模, 尤其是冷、温挤压凹模内壁承受的单位压力高达 2000MPa 以上, 仅增大凹模壁厚是不能解决强度问题的。采用预应力组合凹模则是克服凹模径向破裂行之有效的办法。

根据挤压力的大小, 冷温挤压凹模一般可采用三种类型 (见图 4-69), 即单层凹模 (图 a)、双层 (图 b) 和三层 (图 c) 组合凹模。根据生产经验, 对于由 W18Cr4V 和 3CrW8V 等模具钢制造的凹模可按如下情况确定: 当模腔工作压力小于 1000MPa 时, 可采用整体凹模; 当模腔工作压力为 $1000 \sim 1500 \text{MPa}$ 时, 可采用双层组合凹模; 当模腔工作压力大于 1500MPa

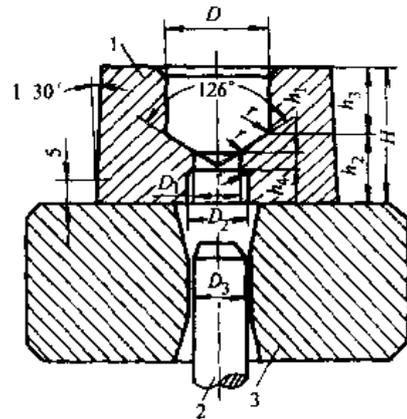


图 4-67 正挤压凹模

1—凹模 2—顶杆 3—导向套

时,可采用三层组合凹模。为了节省模具钢,模膛工作压力虽然没有达到 1000MPa 以上,仍可采用双层或三层组合凹模。

组合凹模优化设计,就是在一定挤压力条件下,确定各圈的直径和过盈量,充分发挥模具材料的强度潜力,尽可能提高凹模的承载能力,以保证凹模最佳工作性能。

1. 组合凹模的受力分析

(1) 预应力分布 组合凹模受到预应力圈的接触压力 p_{2k} , 将产生切向预应力 σ'_t 和径向预应力 σ'_r , 两种应力的计算式为

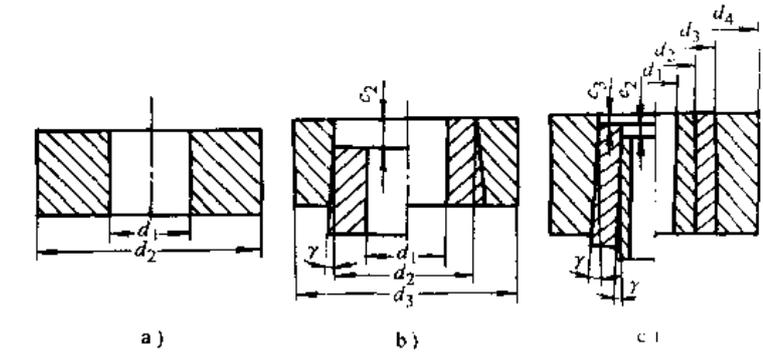


图 4-69 挤压凹模的三种类型

$$\begin{aligned}\sigma'_t &= -\frac{r_2^2 p_{2k}}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right) \\ \sigma'_r &= -\frac{r_2^2 p_{2k}}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right)\end{aligned}\quad (4-16)$$

式中 $r_1 \leq r \leq r_2$ 。由上式可知, σ'_t 和 σ'_r 是压应力, 分布情况如图 4-70a 所示。由图可知, 切向压应力 σ'_t 绝对值的最大值产生在内壁; 径向应力 σ'_r 的最大值绝对值产生在外壁。凹模的外半径 r_2 在 p_{2k} 作用下缩小, 如图 4-70a 中的虚线所示, 其压缩量的算式为:

$$\Delta r'_2 = -\frac{r_2 p_{2k}}{E} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \mu \right)\quad (4-17)$$

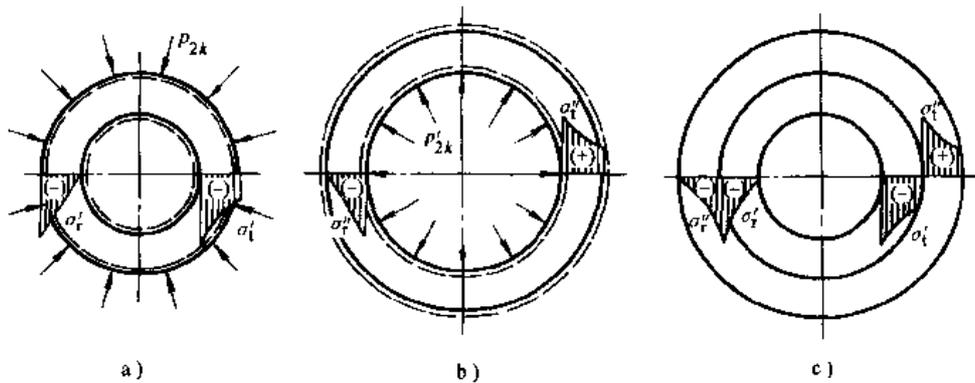


图 4-70 组合凹模内预应力分布及径向位移

a) 凹模内预应力分布及径向位移 b) 预应力圈内预应力分布及径向位移 c) 组合体内预应力分布

预应力圈同凹模压配后,对于预应力圈而言,其接触压力 p'_{2k} 为内压力,所产生的切向应力 σ''_t 和径向应力 σ''_r 的计算式为:

$$\begin{aligned}\sigma''_t &= \frac{r_2^2 p'_{2k}}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{r^2} \right) \\ \sigma''_r &= \frac{r_2^2 p'_{2k}}{r_3^2 - r_2^2} \left(1 - \frac{r_3^2}{r^2} \right)\end{aligned}\quad (4-18)$$

式中, $r_2 \leq r \leq r_3$ 。由式(4-18)可知, σ''_t 为拉应力, σ''_r 为压应力,其分布情况如图 4-70b 所示,由图 b 可知最大切向应力 σ''_t 产生在内壁,最大径向应力绝对值也产生在内壁。预应力圈的内半径 r_2

在 p_2 作用下扩大,如图 4-70b 中虚线所示,其扩张量 $\Delta r_2''$ 的计算式为:

$$\Delta r_2'' = \frac{r_2 p_2'}{E} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + \mu \right) \quad (4-19)$$

凹模与预应力图压配后的组合体的切向预应力和径向预应力,分别等于凹模内和预应力圈内相应的预应力相叠加,其分布情况如图 4-70c 所示。

(2) 工作应力分布 首先把组合凹模当作整体凹模,仅考虑由挤压力 p_1 所产生的切向应力 σ_t'' 和径向应力 σ_r'' ,两种应力的计算公式为:

$$\begin{aligned} \sigma_t'' &= \frac{r_1^2 p_1}{r_3^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_3^2}{r^2} \right) \\ \sigma_r'' &= \frac{r_1^2 p_1}{r_3^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_3^2}{r^2} \right) \end{aligned} \quad (4-20)$$

式中, $r_1 \leq r \leq r_3$ 。由上式可知,切向应力 σ_t'' 为拉应力,径向应力 σ_r'' 为压应力,其分布情况如图 4-71a 所示。

然后,将工作应力与相应的预应力进行叠加,即可得到组合凹模内总的切向应力和径向应力。对于凹模:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \sigma_t' + \sigma_t'' \\ \sigma_r &= \sigma_r' + \sigma_r'' \end{aligned} \quad (4-21)$$

对于预应力圈:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \sigma_t' - \sigma_t'' \\ \sigma_r &= \sigma_r' + \sigma_r'' \end{aligned} \quad (4-22)$$

其应力分布情况如图 4-71b 所示。

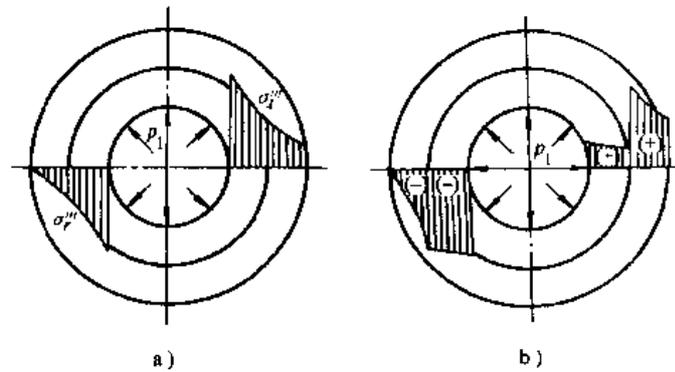


图 4-71 工作应力分布

a) 组合凹模内的工作应力分布 b) 总的应力分布

2. 组合凹模的优化设计

(1) 凹模内壁不允许出现拉应力的优化设计 凹模常用高强度模具钢或硬质合金制造,为了防止破裂,则要求在内壁不出现拉应力。在这一前提下,优化设计的目标函数是,当承受最大的单位压力时,凹模内壁不出现拉应力,而预应力圈处于许用力状态下。需优选的设计变量为凹模外径 d_2 、过盈量 Δd_2 以及预应力圈径 d_3 ,并满足 $d_3/d_1 = 4 \sim 6$ 。

1) 凹模外径和预应力圈外径的确定。组合凹模工作时,凹模是由压力 p_1 、外压力 p_2 的作用,如图 4-72 所示。 p_2 是组合凹模工作时的实际外压力,不等于接触压力 p_{2k} 。

按厚壁圆筒理论,可采用拉美 (Lame) 公式求得组合凹模内壁上即 r_1 处的切向应力 $\sigma_{t(r_1)}$ 和径向应力 $\sigma_{r(r_1)}$ 为

$$\begin{aligned} \sigma_{t(r_1)} &= \frac{r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \\ \sigma_{r(r_1)} &= \frac{r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \end{aligned}$$

令 $r_1/r_2 = d_1/d_2 = m_1$ 代入上式,得

$$\begin{aligned} \sigma_{t(r_1)} &= \frac{1 + m_1^2}{1 - m_1^2} p_1 - \frac{2 p_2}{1 - m_1^2} \\ \sigma_{r(r_1)} &= \frac{m_1^2 - 1}{1 - m_1^2} p_1 = -p_1 \end{aligned} \quad (4-23)$$

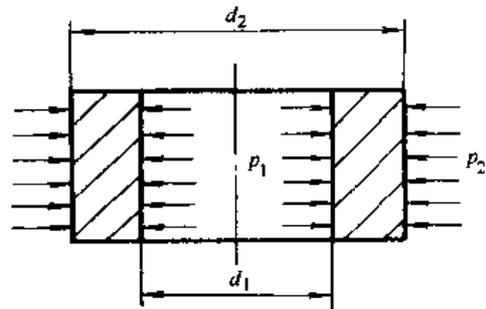


图 4-72 内层凹模的受力情况

为了在内壁上不出现拉应力，应使 $\sigma_{t(r_1)} = 0$ ，由式 (4-23) 中的第一式得

$$p_1 = \frac{2p_2}{1+m_1^2} \quad (4-24)$$

根据第三强度理论可知

$$\sigma_{t(r_1)} - \sigma_{r(r_1)} \leq [\sigma_1]$$

式中 $[\sigma_1]$ ——凹模的许用应力。

将式(4-23)代入上式得：

$$\frac{1+m_1^2}{1-m_1^2}p_1 - \frac{2p_2}{1-m_1^2} - \frac{m_1^2-1}{1-m_1^2}p_1 \leq [\sigma_1]$$

即

$$\frac{2}{1-m_1^2}(p_1 - p_2) \leq [\sigma_1]$$

$$p_1 - p_2 \leq \frac{[\sigma_1]}{2}(1-m_1^2) \quad (4-25)$$

预应力圈只受内压力 p_2 的作用，如图 4-73 所示。设预应力圈的许用应力 $[\sigma_2]$ ，则根据上式得

$$p_2 - 0 = \frac{[\sigma_2]}{2}(1-m_2^2) \quad (4-26)$$

式中 $m_2 = \frac{r_2}{r_3} = \frac{d_2}{d_3}$ ，

将 p_2 代入式(4-24)得

$$p_1 = \frac{2}{1+m_1^2} \left\{ \frac{[\sigma_2]}{2}(1-m_2^2) \right\}$$

或

$$p_1 = \frac{[\sigma_2]}{1+m_1^2}(1-m_2^2) \quad (4-27)$$

因为 $m_1 m_2 = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{r_2}{r_3} = m$ ，代入上式得

$$p_1 = \frac{[\sigma_2]}{1+m_1^2} \left(1 - \frac{m^2}{m_1^2} \right) \quad (4-28)$$

根据极值原理，求 p_1 对 m_1 的导数，并使 $\frac{\partial p_1}{\partial m_1} = 0$ ，便可求出 m_1 的最优解：

$$\frac{\partial p_1}{\partial m_1} = \frac{[\sigma_2] \left\{ (1+m_1^2) \frac{2m^2}{m_1^3} - 2 \left(1 - \frac{m^2}{m_1^2} \right) m_1 \right\}}{(1+m_1^2)^2} = 0$$

即

$$(1+m_1^2) \frac{2m^2}{m_1^3} - 2 \left(1 - \frac{m^2}{m_1^2} \right) m_1 = 0$$

将式(4-28)代入上式得：

$$(1+m_1^2) \frac{2m^2}{m_1^3} - 2 \frac{p_{1\max}(1+m_1^2)}{[\sigma_2]} m_1 = 0$$

化简后，得

$$m_2^2 = \frac{p_{1\max}}{[\sigma_2]} m_1^2 \quad (4-29)$$

将式(4-29)代入式(4-27)得

$$p_{1\max} = \frac{1}{1+m_1^2} \{ [\sigma_2] - p_{1\max} m_1^2 \}$$

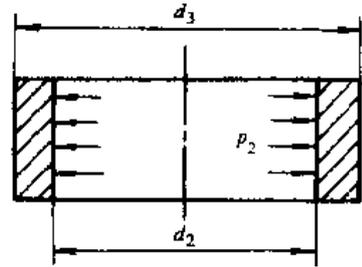


图 4-73 预应力圈的受力情况

化简后,得

$$p_{1\max} = \frac{[\sigma_2]}{1 + 2m_1^2} \quad (4-30)$$

因此,当 p_1 为最大工作的压力时,由上式可得 m_1 的最优解:

$$m_1' = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sigma_2]}{p_1} - 1 \right\}} \quad (4-31)$$

将式(4-31)代入式(4-29)得 m_2 的最优值:

$$m_2' = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{p_1}{[\sigma_2]} \right\}} \quad (4-32)$$

求出 m_1, m_2 的最优值后,便可求得 d_2, d_3 。

2) 接触预压力 p_{2k} 的计算。作用在凹模壁上的切向应力 $\sigma_{t(r_1)}$ 可由下式计算:

$$\sigma_{t(r_1)} = \sigma_{t(r_1)}^+ + \sigma_{t(r_1)}^-$$

式中 $\sigma_{t(r_1)}^+$ ——凹模组合体在内压力 p_1 的作用所产生的切向拉应力;

$\sigma_{t(r_1)}^-$ ——凹模组合体在接触压力 p_{2k} 作用下内壁上所产生的切向压应力。

现分别按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{t(r_1)}^- &= \frac{r_1^2 p_1}{r_2^2 - r_1^2} \left\{ 1 + \frac{r_2^2}{r_1^2} \right\} = \frac{1 + m^2}{1 - m^2} p_1 \\ \sigma_{t(r_1)} &= -\frac{r_2^2 p_{2k}}{r_2^2 - r_1^2} \left\{ 1 + \frac{r_2^2}{r_1^2} \right\} = -\frac{2}{1 - m^2} p_{2k} \\ \sigma_{t(r_1)} &= \frac{1 + m^2}{1 - m^2} p_1 - \frac{2}{1 - m^2} p_{2k} \end{aligned} \right\} \quad (4-33)$$

令切向应力 $\sigma_{t(r_1)} = 0$, 得

$$p_{2k} = \frac{(1 + m^2)(1 - m^2)}{2(1 - m^2)} p_1 \quad (4-34)$$

3) 过盈量 Δd_2 的计算。其计算公式如下:

$$\Delta d_2 = \frac{d_2}{E} - \frac{1 + m^2}{1 - m_1^2} p_2 \quad (4-35)$$

式中 E ——模具材料的弹性模量。

4) 组合凹模内壁的强度核算 凹模同预应力圈压配后,内壁上的切向压应力不能超过许用应力 $[\sigma_1]$, 即

$$\sigma_{t(r_1)} \leq [\sigma_1]$$

即

$$\frac{2}{1 - m_1^2} p_{2k} \leq [\sigma_1]$$

或

$$p_{2k} \leq \frac{1 - m_1^2}{2} [\sigma_1]$$

将式(4-34)代入上式并化简得到凹模强度的核算公式:

$$p_1 \leq \frac{1 - m_1^2}{1 + m^2} [\sigma_1] \quad (4-36)$$

(2) 凹模内壁允许出现拉应力的优化设计 这种情况下的目标函数是:当组合凹模承受最大的压力 p_1 时,凹模和预应力圈正好达到许用应力 $[\sigma_1]$ 和 $[\sigma_2]$ 。而不考虑凹模内壁是否出现

应力。约束条件是：组合凹模外、内径之比为4~6；设计变量仍为凹模外径 d_2 、径向过盈量 Δd_2 和预应力圈外径 d_3 。

1) 凹模外径 d_2 和预应力圈外径 d_3 的确定。将式(4-25)与式(4-26)相加并化简，得

$$p_1 = \frac{1}{2} \left\{ [\sigma_1](1-m_1^2) + [\sigma_2] \left(1 - \frac{m^2}{m_1^2} \right) \right\} \quad (4-37)$$

根据极值原理求 m_1 的最优解，即

$$\frac{dp_1}{dm_1} = \frac{1}{2} \left\{ -2[\sigma_1]m_1 + 2[\sigma_2] \frac{m^2 m_1}{m_1^3} \right\} = 0$$

化简得

$$[\sigma_1]m_1^2 = [\sigma_2]m_2^2$$

将 $m = m_1 m_2$ 代入上式得

$$m = m_1^2 \sqrt{\frac{[\sigma_1]}{[\sigma_2]}} \quad (4-38)$$

将式(4-38)代入式(4-37)，得

$$p_1 = \frac{[\sigma_1]}{2} \left\{ 1 + \frac{[\sigma_2]}{[\sigma_1]} - 2m_1^2 \right\} \quad (4-39)$$

由上式可得最优的 m_1 值

$$m_1 = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sigma_2]}{[\sigma_1]} - \frac{2p_1}{[\sigma_1]} \right\}} \quad (4-40)$$

将上式代入式(4-38)，并利用 $m_2 = \frac{m}{m_1}$ 就可以求出最优的 m_2 值。那么，最优的 d_2 、 d_3 也就可以求出，但应满足约束条件 $d_3/d_2 = 4 \sim 6$ 。

由式(4-40)可知，为使该式有意义，应使

$$1 + \frac{[\sigma_2]}{[\sigma_1]} - \frac{2p_1}{[\sigma_1]} \geq 0$$

即

$$p_1 \leq \frac{[\sigma_1] + [\sigma_2]}{2} \quad (4-41)$$

上式是为凹模内压 p_1 已知时，合理选择凹模和加强圈材料的必要条件；或当已选定凹模和预应力圈材料时，核算凹模允许的承载能力。

2) 接触压力 p_{2k} 的计算。组合凹模工作时，作用在内壁处的切向应力 $\sigma_{t(r_1)}$ 可由式(4-33)求得

$$\sigma_{t(r_1)} = \frac{1+m^2}{1-m^2} p_1 - \frac{2p_{2k}}{1-m_1^2} \quad (4-42)$$

作用在内壁处的径向应力 $\sigma_{r(r_1)}$ ，可参照式(4-20)得

$$\sigma_{r(r_1)} = -p_1 \quad (4-43)$$

根据第三强度理论，将式(4-42)、式(4-43)代入由第三强度理论建立的关系式，经化简得：

$$p_{2k} = \frac{1-m_1^2}{2(1-m^2)} \{ 2p_1 - [\sigma_1](1-m^2) \} \quad (4-44)$$

3) 过盈量 Δd_2 的计算

$$\Delta d_2 = \frac{d_2 2p_1 - [\sigma_1](1-m^2)}{E(1-m_2^2)} \quad (4-45)$$

4) 组合凹模内壁强度计算 组合凹模压合时其最大过量不能使切向压应力大于许用应

力,即

$$\sigma_{i(r_j)} \leq [\sigma_1]$$

即

$$\frac{2p_m}{1-m_1^2} \leq [\sigma_1]$$

将式(4-44)代入上式得:

$$\frac{1}{1-m^2} p_1 \leq [\sigma_1] \tag{4-46}$$

3. 组合凹模的有限元法计算

采用拉美公式计算是假设凹模为无限长受均匀内压的厚壁圆筒,而实际生产中,凹模内壁是局部受压,载荷常为非均匀分布,凹模长度有限且常常是高度与其直径之比小于1,这与假设相差甚远,因而计算结果误差很大。有限元法计算是直接以组合凹模的实际结构及受力情况来建立计算模型,因而,不仅计算结果比较精确,而且还为组合凹模的优化设计提供了理论依据。

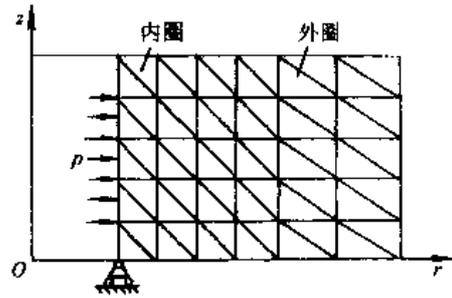


图 4-74 有限元法网格图

(1) 工作应力的计算 组合凹模工作应力的有限元计算模型如图 4-74 所示。

组合凹模属于典型的轴对称构件,其有限元平衡方程为

$$[k]\{\delta\} = \{Q\} \tag{4-47}$$

式中 $[k]$ ——组合凹模的总体刚度矩阵;

$\{\delta\}$ ——节点位移列阵;

$\{Q\}$ ——由挤压力 p 计算出来的等效节点力列阵。

工作应力的有限元计算程序如图 4-75 所示。

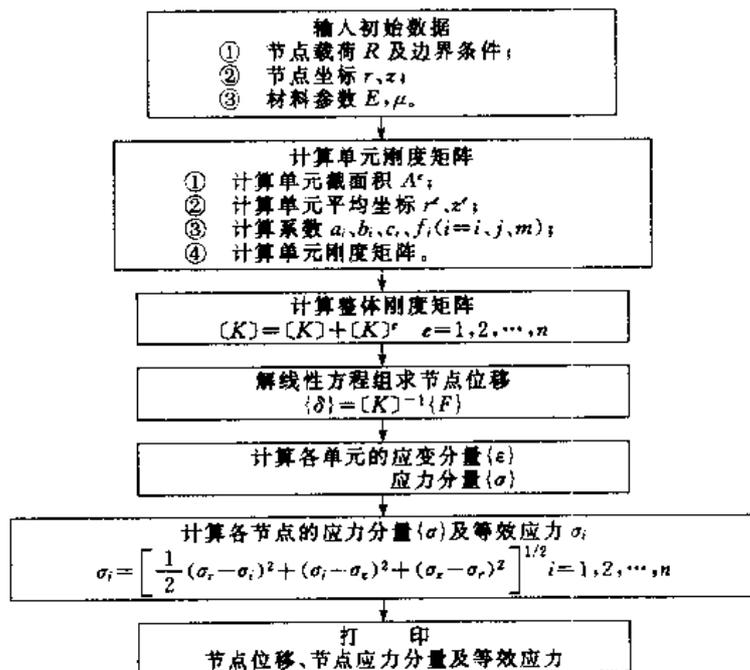


图 4-75 有限元计算程序

计算工作应力时,将组合凹模当整体凹模处理,即不考虑各圈材料性能的差别,假设模具为完全弹性体,其弹性模量为 E ;泊松比为 μ 。

下面按框图顺序写出每一步的计算公式。

单元截面积:

$$A = \frac{1}{2} [r_i(z_j - z_m) + r_j(z_m - r_i) + r_m(z_i - z_j)]$$

单元的平均坐标(图 4-76)

$$r' = \frac{1}{3} (r_i + r_j + r_m)$$

$$z' = \frac{1}{3} (z_i + z_j + z_m)$$

位移函数中的各项系数,即坐标差:

$$a_i = y_j z_m - r_m z_j$$

$$b_i = z_j - z_m$$

$$c_i = -(r_j - r_m)$$

$$f_i = \frac{a_i}{r'} + b_i + \frac{c_i z'}{r'}$$

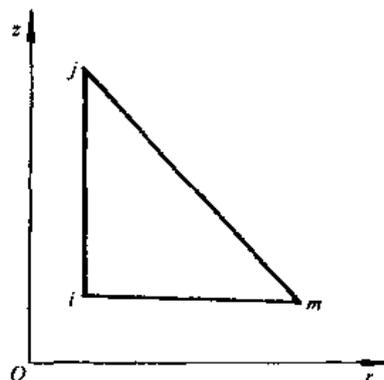


图 4-76 单元坐标图

单元刚度矩阵为:

$$\begin{Bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} \\ k_{ji} & k_{jj} & k_{jm} \\ k_{mi} & k_{mj} & k_{mm} \end{Bmatrix}$$

其中每一个子矩阵的表达式为

$$[k_{st}] = \frac{2\pi r A_3}{A} \begin{bmatrix} b_s(b_t + A_1 f_s) + f_s(f_t + A_1 b_t) + A_2 C_s C_t & A_1 C_s (b_t + f_t) + A_2 C_s C_t \\ A_1 C_s (b_t + f_t) + A_2 b_s b_t & C_s C_t + A_2 b_s b_t \end{bmatrix}$$

$$\text{式中 } A_1 = \frac{\mu}{1-\mu}, A_2 = \frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}, A_3 = \frac{(1-\mu)E}{4(1+\mu)(1-2\mu)}$$

$$(s=i, j, m; \quad t=i, j, m)$$

整体刚度矩阵为

$$[k] = \sum_{e=1}^n [k]^e$$

等效节点力为

$$[F]^e = 2\pi r z p_i$$

式中 z ——内壁上节点 $i-1$ 与 i 的中点和 i 与 $i+1$ 的中点间的距离。

解线性方程组求节点位移:

$$\{\delta\} = [k]^{-1} \{F\}$$

各单元的应变、应力分量为

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_i \\ \epsilon_x \\ \epsilon_{rz} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ f_i & 0 & f_j & 0 & f_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ W_i \\ U_j \\ W_j \\ U_m \\ W_m \end{Bmatrix}$$

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_i \\ \sigma_x \\ \sigma_{rz} \end{Bmatrix} = (s_i, s_j, s_m) \begin{Bmatrix} U_i \\ W_i \\ U_j \\ W_j \\ U_m \\ W_m \end{Bmatrix}$$

$$[S_i] = \frac{2A_3}{A} \begin{bmatrix} b_i + A_1 f_i & A_1 c_i \\ A_1 b_i + f_i & A_1 c_i \\ A_1 (b_i + f_i) & c_i \\ A_2 c_i & A_2 b_i \end{bmatrix} \quad (i=i, j, m)$$

计算应力分量 σ_r 、 σ_{rz} 时，对于中心区域各节点用平均法计算，即将某节点周围单元的应力值相加，然后除以单元个数。对边界上的节点则采用抛物插值法计算。

(2) 预应力的计算 预应力的有限元计算模型如图 4-77 所示。设内、外圈的刚度矩度分别为 $[k^{(1)}]$ 、 $[k^{(2)}]$ ；节点位移列阵分别为 $\{\delta^{(1)}\}$ 、 $\{\delta^{(2)}\}$ ；等效节点力列阵分别为 $\{Q^{(1)}\}$ 、 $\{Q^{(2)}\}$ ；则两者的有限元平衡方程分别为：

$$\begin{cases} [k^{(1)}]\{\delta^{(1)}\} = \{Q^{(1)}\} \\ [k^{(2)}]\{\delta^{(2)}\} = \{Q^{(2)}\} \end{cases} \quad (4-48)$$

由第一个方程并假设在装配时只有内圈被均匀压缩，可求出内圈中各节点位移 $\{\delta_i^{(1)}\}$ ，单元应变 $\{\epsilon_{ij}^{(10)}\}$ 和压合接触面上平均径向应力为 $\sigma_r^{(1)}$ ，同理可求出 $\{\delta_r^{(2)}\}$ 、 $\{\epsilon_{ij}^{(20)}\}$ 和 $\sigma_r^{(2)}$ 。

根据线性单元的特性，内、外圈的压缩量 $\Delta^{(1)}$ 、 $\Delta^{(2)}$ 与压合面上平均径向应力的关系如图 4-78 所示，由图示关系得

$$\Delta^{(1)} = \frac{\sigma_r^{(2)}}{\sigma_r^{(1)} + \sigma_r^{(2)}}; \Delta^{(2)} = \frac{\sigma_r^{(1)}}{\sigma_r^{(1)} + \sigma_r^{(2)}};$$

仍然根据线性单元的特性，同时忽略接触面上的摩擦力的影响，即认为内、外圈在接触线上同一节点的轴向位移相等，则可得内、外圈上各节点的位移和单元的应变与应力的计算公式：

$$\{\delta^{(1)}\} = \frac{\Delta^{(1)}}{\Delta^{(0)}} \{\delta_r^{(1)}\}$$

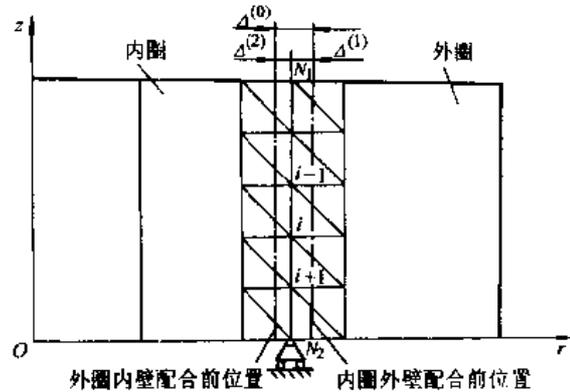


图 4-77 预应力有限元计算模型

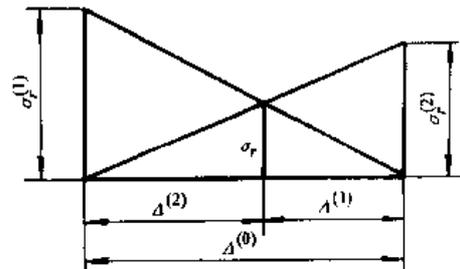


图 4-78 内、外圈压缩量与压合面上平均应力的关系

$$\begin{aligned} \{\epsilon_{ij}^{(1)}\} &= \frac{\Delta^{(1)}}{\Delta^{(0)}} \{\epsilon_{ij}^{(10)}\} \\ \{\sigma_{ij}^{(1)}\} &= \frac{\Delta^{(1)}}{\Delta^{(0)}} \{\sigma_{ij}^{(10)}\} \\ \{\delta_r^{(2)}\} &= \frac{\Delta^{(1)}}{\Delta^{(0)}} \{\delta_r^{(2)}\} \\ \{\epsilon_{ij}^{(2)}\} &= \frac{\Delta^{(1)}}{\Delta^{(0)}} \{\epsilon_{ij}^{(20)}\} \\ \{\sigma_{ij}^{(2)}\} &= \frac{\Delta^{(1)}}{\Delta^{(0)}} \{\sigma_{ij}^{(20)}\} \end{aligned}$$

对于三层组合凹模，预应力的计算需要分两次进行：第一次计算外圈同中圈过盈配合所产生的预应力；第二次计算中外圈组合体同凹模过盈配合所产生的预应力，然后进行叠加即得总的预应力。

分别将凹模内壁各节点上对应的预应力分量及工作应力分量相加，即可得最终的应力分布。进而计算出各节点的等效应力，然后根据强度理论进行校核。

根据有限元计算，若采用如图 4-79 所示阶梯式组合凹模，凹模压装于预应力圈的中部，凹模高度 H_2 约等于高度 H_1 的 2 倍，而 H_1 约等于模膛或挤压件高度 H 的 3 倍。这种结构的组合凹模在挤压时产生的切向拉应力可降低 30%~50%；挤压时组合体所产生的变形如图中虚线所示，可以看出，组合体中部径向涨大，而两端向内缩小，这样可有效地防止凹模的径向与横向破裂，因而可显著提高模具的寿命。这已为生产实践所证明。

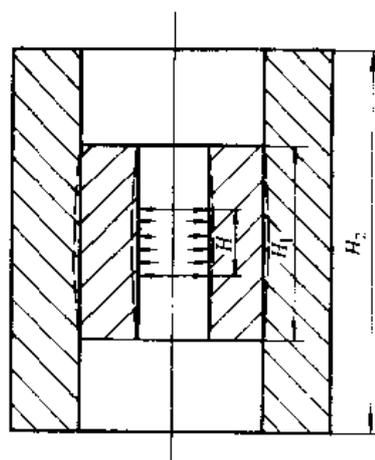


图 4-79 阶梯式组合凹模及挤压时的变形情况

四、挤压工艺及模具实例

1. 汽车轮胎螺母冷挤压

(1) 冷挤压工艺方案比较 图 4-80 为冷挤压汽车轮胎螺母的五种工艺方案，现将其分析如下：

方案 I：采用三道成形工步。由于毛坯直径小，长径比大，下料精度较高。在第二工步反挤内孔时，冲头长度大于 43mm，其长径比大于 2.3，在后一工步中，由于锻坯四方头对圆筒形部分的不同轴度和圆筒形部分的壁厚差，加上凹模与冲头的不同轴度的存在，镦锻凸缘时，芯棒承受偏心载荷，容易折断，因此对模具的刚度和制造精度要求很高，要求第二、三工步有严格的同轴度，否则将导致最后工步挤压模的芯棒容易折断，而无法正常生产。

方案 II：采用四道成形工步；由于成形工步多，若不进行中间退火，则加工硬化严重，很难获得高的产品质量和模具寿命。

方案 III：工步多，有类似于方案 II 的缺点。要求第二、三和四道成形工步有严格的同轴度，否则冲头极易受弯折断。

方案 IV：有类似于方案 III 的缺点。

方案 V：此方案的工步少，第二道成形工步不再镦锻凸缘，仅进行正、反合挤压，大大地改善了冲头的受力情况。经生产实践表明，该方案在技术上和经济上都优于前四种方案。

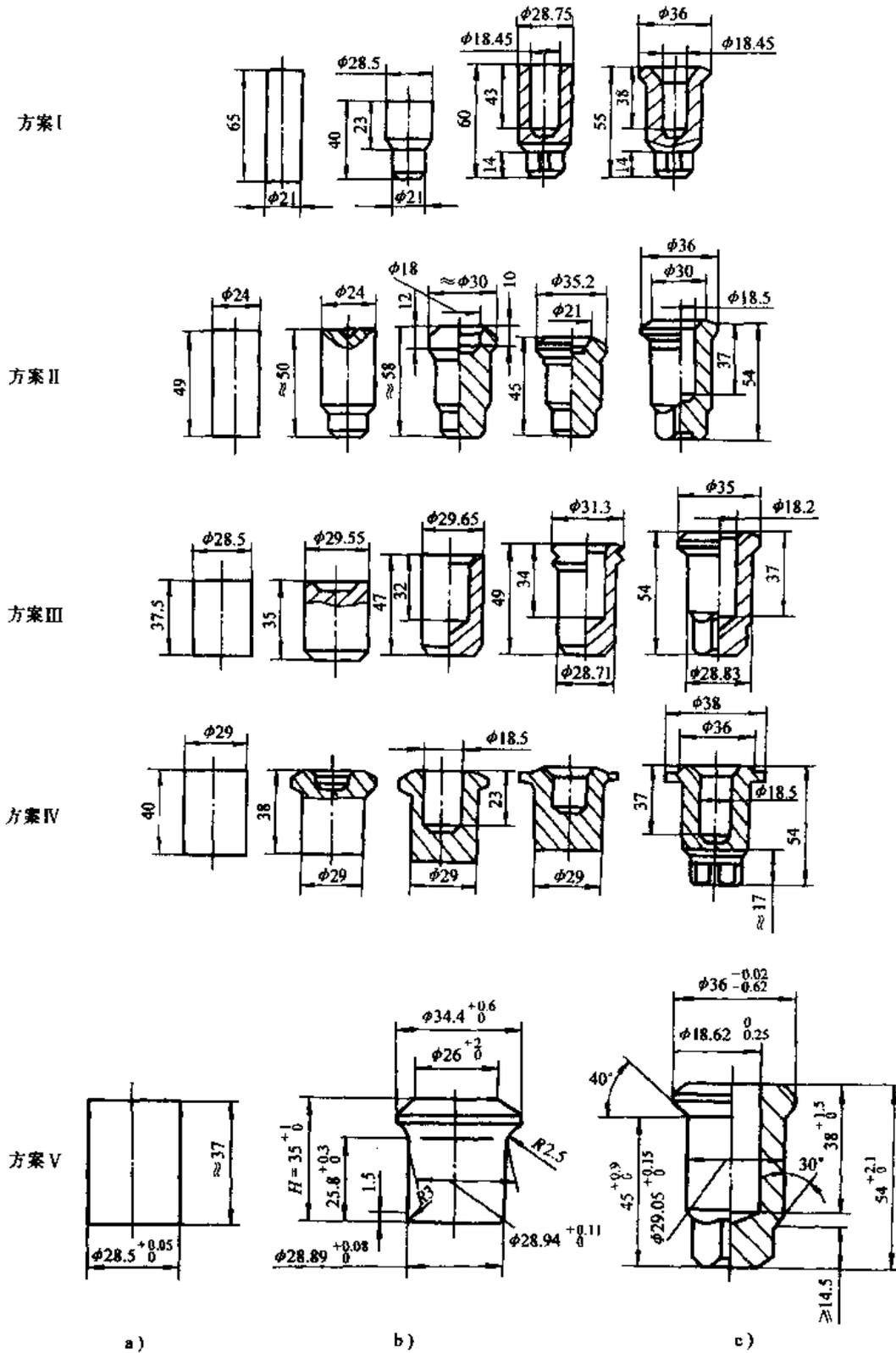


图 4-80 汽车轮胎螺母冷挤压工艺方案比较

(2) 冷挤压时的金属流动 图 4-81 为方案 V 第二道成形工步的挤压工件图，其冷挤变形过程可分为正挤压、正反复合挤压、正挤压结束、反挤压结束四个阶段。表 4-19 列出挤压过程中 15 个瞬时的挤压件尺寸，尺寸符号见图 4-81。

从表 4-19 可以看出金属流动情况, 在挤压开始后, 圆柱部分的高度 h_2 从原高度 25.8mm 减小到 20.4mm (此时孔深为 13.6mm), 随后才又逐渐增加。由此可见, 如果凹模圆柱形孔的深度大于 20.4mm, 则挤压件凸缘将受到拉伸, 可能产生裂纹。所以, 合理的凹模孔深应使挤压件凸缘不与凹模台阶接触。若凹模孔深太小, 则冲头挤压时会引起挤压件外径胀大。

(3) 冷挤压模具设计 图 4-82 为轮胎螺母冷挤压模具图, 为了保证产品的精度, 采用了刚性好的模架和导向装置, 凹模为三层预应力组合凹模, 采用可更换的定位环作为冲头 8 和凹模 7 的定位装置, 在定位面间隙磨损过大时, 可更换定位环。导套 5 中有注油孔与注油器 9 相通, 使导柱 4 和导套 5 始终在良好的润滑条件下工作。在大批量生产中, 冲头难免断裂, 为了安全生产, 防护罩已将冲头罩住, 即使冲头断裂时也不致飞出伤人。

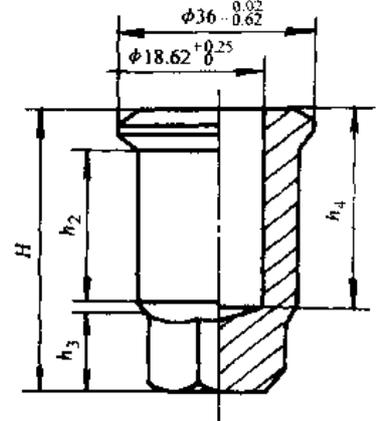


图 4-81 汽车轮胎螺母挤压件尺寸

内层凹模材料为 Cr12MoV, 热处理硬度为 60~64HRC。凹模与预应力圈配合的锥面 ($1^{\circ}30'$) 需以内孔定位与预应力圈配磨, 其压合接触面不能少于 70%, 且小端必须接触。冲头材料为 W18Cr4V, 热处理硬度为 61~63HRC。

表 4-19 挤压过程中挤压件成形情况

序号	挤压件高度 H/mm	孔深 h_4/mm	四方体心体高度 h_3/mm	圆柱高度 h_2/mm	说 明
1	43.3	13.1	10.7	21	正挤
2	43.6	13.7	10.9	20.8	正挤
3	43.8	13.6	11	20.4	从此瞬时开始, 挤压件圆柱高增加, 反挤开始
4	46.1	16.9	13.8	20.5	正、反挤压
5	47	17.7	14.1	20.8	正、反挤压
6	47	19	14.3	21.1	正、反挤压
7	48.5	23.1	15.1	22	此时正挤结束, 仅进行反挤
8	49.9	26.6	15.1	23	反挤
9	50.8	27.5	15.1	23.4	反挤
10	51.8	30.2	15.1	24	反挤
11	52	30.4	15.1	24.3	反挤
12	52.4	30.8	15.1	24.7	反挤
13	53.3	33.4	15.1	24.7	反挤
14	53.4	33.8	15.1	25.3	反挤
15	55.5	38.8	15.1	26.3	冲头到最下极限位置, 挤压结束

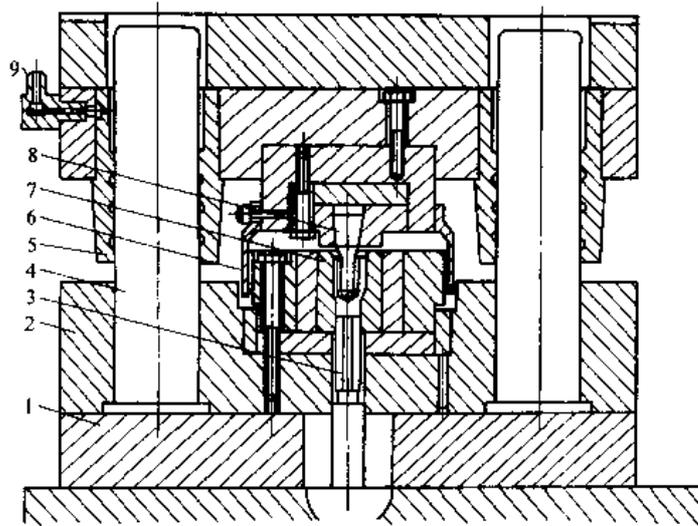


图 4-82 轮胎螺母冷挤压模具

1—下底板 2—下模板 3—顶杆 4—导柱 5—导套
6—防护罩 7—凹模 8—冲头 9—注油器

2. 轴承套圈温挤压

(1) 挤压方案 轴承套圈的温挤压成形共有五种方案，如图 4-83 所示，温挤压前，将经退火的棒料冷剪下料，然后在冷态或温态下墩饼压缩，饼状毛坯加热到 $700 \pm 20^\circ\text{C}$ 左右进行温挤。

方案 I：单圈反挤成形，该法模具结构简单，反挤后冲底。但单位挤压力 p 高达 $1400 \sim 1600\text{MPa}$ ，是五种成形方案中挤压力最高的一种。

方案 II：杯杯复合挤压成形，又称：“塔形”锻造，该法同时可以生产一套内、外圈环料，上杯为轴承外圈，下杯为轴承内圈，生产效率高。单位挤压力 $p = 1100 \sim 1200\text{MPa}$ ，较方案 I 低。目前国内外应用较多。

方案 III：杯杆复合挤压成形，该法单位挤压力 $p = 600 \sim 800\text{MPa}$ ，是五种方案中单位挤压力最低的一种。挤压后分离的实心圆柱体，可以不经再次退火而直接进行冷挤或温挤内圈。

方案 IV：双圈复合挤压成形，

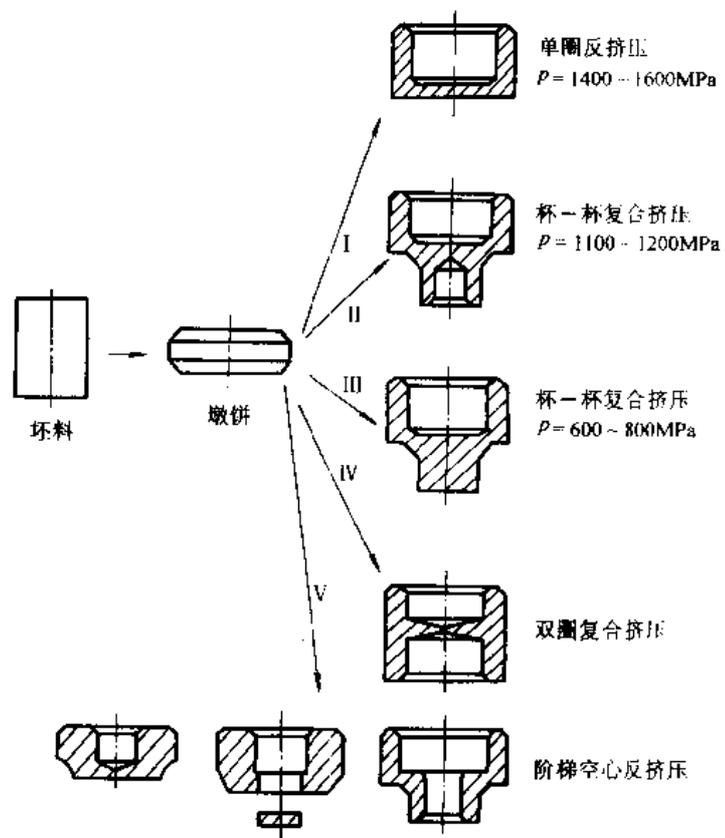


图 4-83 轴承套圈温挤压成形方案

该法可以一次成形两个尺寸相同的套圈，仅有一个冲孔连皮为挤压余料，材料利用率较高。

方案V：先反挤压预成形，再复合挤压成形，该法可以降低单位挤压力，对减少能量消耗提高模具寿命有利。

(2) 温挤压模具设计 图4-84为实现方案I单圈反向温挤压模具结构，可以看出，温挤压模具结构类似于冷挤压模具结构，但模具零件要适应工作温度要求。当要求较严格控制挤压温度时，模具中应设置加热和冷却装置。

3. 气门热挤压模具

图4-85为轿车气门热模锻工艺，它是采用棒料正向热挤压制坯，然后闭式锻锻法兰成形，不难看出，气门挤压制坯属于典型的细长杆件正挤压。

图4-86为气门单工序热挤压制坯模，可以安装在带有压缩空气缸的曲柄压力机上使用。热挤压时凹模升温很快，为了防止凹模因温度升高而软化，在压紧环6和凹模12之间加上带有环形槽的锥形套，工作时通过循环水将凹模体中的热量带走。

为了提高气门热挤压模寿命，国内外提出过好几种凹模型腔的设计方法，经试验和实际使用表明，有关文献提出的反推法设计的凹模为优。所谓反推法设计，即首先从终锻件（气门锻件）到原毛坯进行反向分析得出气门锻件、挤压工艺与原毛坯之间的尺寸关系，然后依据尺寸关系设计凹模型腔。

由图4-85，挤压所得中间毛坯同气门锻件及原毛坯的尺寸关系如下：

$$\begin{aligned} d_e &= d_f \\ D_e &= D_f - k_1 \\ V_2 &= V_3 \\ D_0 &= D_e - k_2 = d_e + k_3 \\ L_0 &= \frac{V}{\frac{\pi}{4} D_0^2} = \frac{V_1 + V_2}{\frac{\pi}{4} D_0^2} \end{aligned}$$

式中， k_1 、 k_2 、 k_3 为由实验和经验确定的修正值。

由上面的关系式可以确定气门挤压凹模型腔的基本尺寸，由此所作的挤压凹模如图4-87所示。图中 D_e 为挤压工件头部直径， d_e 为杆部直径，由图中几何关系可得：

$$D_e = D + 2H$$

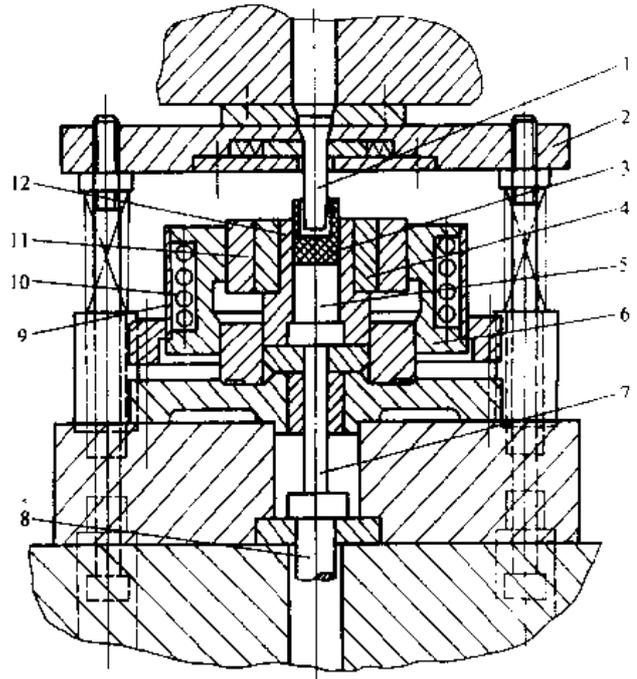


图 4-84 温挤压模具

- 1—凸模 2—卸料器 3—工件 4—预应力圈 5—凹模顶块
6—夹持圈 7—顶杆 8—顶出器 9—护套
10—加热器 11—预应力圈 12—凹模

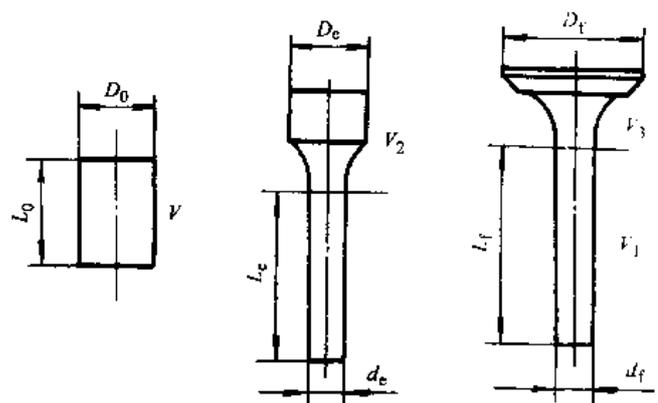


图 4-85 气门热挤压锻锻成形工艺

$$\begin{aligned}
 D_b &= d_c + 2BD \\
 &= d_c + 2 \sqrt{\left(2R \sin \frac{45^\circ}{2}\right)^2 - \frac{R^2}{2}} \\
 &= d + 0.5858R
 \end{aligned}$$

式中 R ——气门锻件盘部间的圆弧半径，由经验确定，一般为 3~5mm。

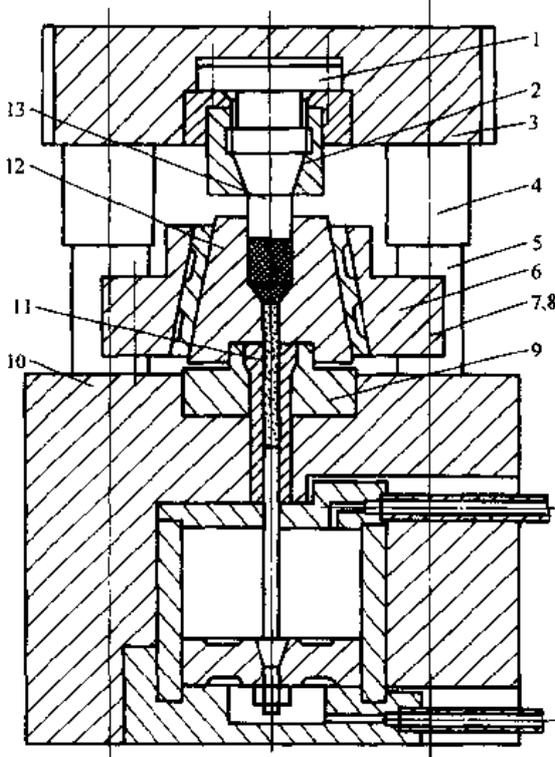


图 4-86 气门热挤压制坯模

- 1—冲头支承器 2—固定螺母 3—上模座 4—导套
5—导柱 6—压紧环 7—螺栓 8—螺母 9—垫板
10—下模座 11—顶杆导套 12—凹模 13—凸模

五、挤压模具材料的选择

1. 冷挤压模具材料的选择

目前，常用的冷挤压模具材料有碳素工具钢，合金工具钢、高碳高铬模具钢，高速钢、硬质合金及钢结硬质合金等。有时，也用一些合金成分较低的合金钢。国内各厂家所采用的冷挤压模具材料见表 4-20。

表 4-20 冷挤压模具材料

模具类别	模具材料	
铝件冷挤压模	凸模	Cr12MoV Cr12 CrWMn 9CrSi W18Cr4V
	凹模	Cr12MoV CrWMn T10A W18Cr4V YG15 YG20
锌合金件冷挤压模	凸模	Cr12MoV Cr12 W18Cr4V
	凹模	YG15 YG20 YG25
铜件冷挤压模	凸模	Cr12MoV W18Cr4V
	凹模	Cr12MoV CrWMn
钢件冷挤压模	凸模	W6Mo5 Cr4V2 W18Cr4V Cr12MOV GCr15
	凹模	Cr12MoV CrWMn YG20 65Nb LD1

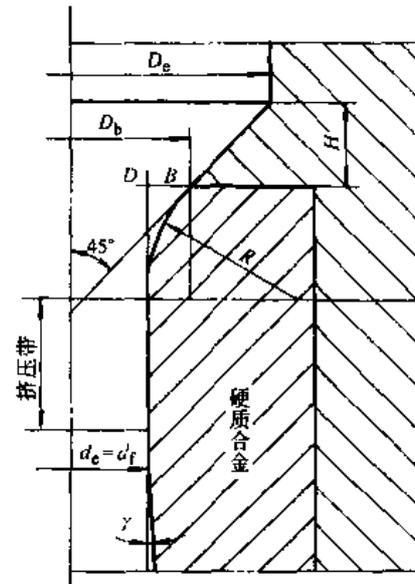


图 4-87 反推法设计的凹模形状

2. 温挤压模具材料的选择

目前, 没有完全适合于温挤压的模具材料, 但可以根据工作条件在冷、热压模具钢中选取, 见表 4-21。

表 4-21 温挤压模具材料

模具材料	淬火温度/°C	回火温度/°C	使用硬度 HRC
Cr12MoV	1000~1050(空冷)	450~550	55~58
W18Cr4V	1200~1240(油冷)	550~700	50~63
W6Mo5Cr4V2	1160~1270(油冷)	550~680	50~63
3Cr2W8V	1150~1250(油冷)	550~600	46~50
5CrNiMo	830~870(油冷)	450~570	45~50

在 200~400°C 范围内温挤时, 可以采用与冷挤压相同的模具材料, 如 Cr12MoV、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、6W6Mo5Cr4V 等。而在 700~850°C 温挤压时, 也可采用 5CrNiMo、3Cr2W8V, 但只有在单位压力较低以 (1100MPa 以下) 时才可能收到较好的效果。

硬质合金和基体钢也可用作温挤压模具材料。

3. 热挤压模具材料的选择

目前, 常用的热挤压模具钢为 4Cr5MoSiV、4Cr5W2SiV、3Cr2W8V 等。它们虽然都具有较好的热稳定性和抗热疲劳性, 但在高温条件下的耐磨性较差。钢结硬质合金是较为理想的热挤压凹模材料, 因其脆硬性, 用作挤压凹模时容易产生破裂, 因此, 应当采用预应力组合凹模结构。例如, 某厂用来制作气门热挤压凹模镶块, 其使用寿命可以稳定在 3000 件以上, 高的可达 5000 件。美国生产的新型模具钢 H26 (50W18Cr4V) 和 H42 (60W6Mo5Cr4V2) 也是很好的热挤压模具钢。

第五章 粉末锻造工艺及模具设计

第一节 粉末锻造的特点及应用

一、概述

粉末锻造是将粉末冶金和精密模锻相结合的工艺，综合了二者的优点。能以较低的成本和较高的生产率实现大批量生产。能够生产高质量、高精度、形状复杂的结构零件。粉末锻造工艺已经受到各工业化国家的重视。

粉末锻造（简称粉锻）的研究，实际上起源于60年代初期。1964年美国GM公司研究了粉末锻造汽车连杆，同年英国GKN公司对粉末锻造材料、工艺及预成形坯的力学物理性能进行了研究。1970年在纽约召开的第三届国际粉末冶金会议，对粉末锻造的发展起了很大的推动作用。

美国粉末锻造一直处于领先地位。GM公司首先使用粉末锻造生产汽车后桥差速器齿轮。1972年Federal Mogul公司大规模生产粉末锻件，用于自动变速机构，其中轴承座圈月产量达10万件。该公司1976年建立了两条粉锻生产线，主要生产汽车传动装置用零件，月产量达60万件。1984年用4600系低合金钢粉生产的粉末锻件已达1亿件。目前该公司生产的粉末锻件近100种。现在，IPM公司在粉末锻造上已采用计算机技术，研制大型卡车制动系统用刹车导轨锻件，并建立了两条生产线。俄亥俄州克利夫兰市变形控制技术公司开发了粉末锻造预成形坯设计的“专家系统”，用以处理复杂工艺条件和材料种类粉末锻造预成形坯的设计问题。

我国从1972年开始粉末锻造工艺的研究，先后有数十个单位从事开发研究，先后建成三条生产线生产齿轮、密封环等多种零件，能力达100万件以上。目前，正在不断扩大粉锻工艺的研究与应用。

二、粉锻工艺过程

粉末锻造工艺，通常可分为粉末锻造、烧结锻造，锻造烧结和粉末冷锻。具体工艺过程如图5-1所示。

与普通锻造不同，粉锻毛坯采用的是粉末预成形坯。由于冷锻提高毛坯的密度十分困难，因而常采用热锻。对于粉末烧结锻造工艺，其前期工序为传统的粉末冶金生产方法，后期工序为锻造成形。

三、粉锻工艺的特点

1) 粉末锻造属于无飞边闭式精密成形，材料利用率高，显著减少后续加工工作量。

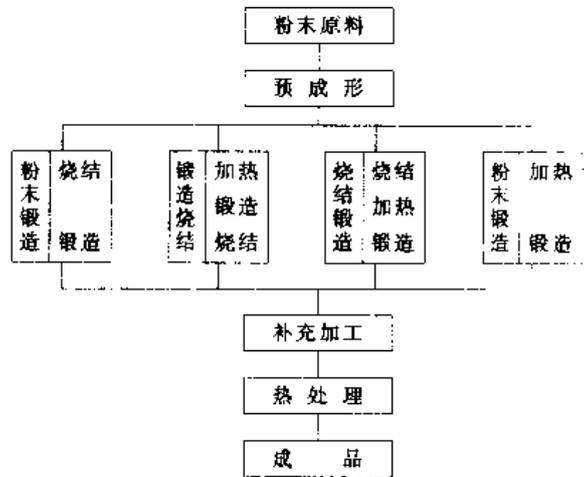


图 5-1 粉末锻造成基本工艺过程

2) 粉末制品零件几何形状准确, 表面光洁, 尺寸精度高, 且在大批量生产中零件的一致性较好。

3) 制件可以由不同粉料混合制成, 也可使制件的不同层面具有不同的金属成分, 甚至可以制造钻石级硬度的零件。

4) 工模具磨损减小, 使用寿命长。

5) 噪声低, 热辐射减少, 改善劳动条件。

粉末冶金锻造工艺虽有许多优点, 但也有些不足之处, 如零件的大小和形状还受到一些限制; 粉末价格还比较高; 零件的韧性较差等。但这些问题随着粉末冶金和锻造技术的发展, 正在逐步解决。随着粉末冶金和锻造技术的进展, 其应用范围正在不断扩大, 技术经济效益将越来越显著。

四、粉末锻造的应用

粉末锻造在许多领域中得到应用, 主要用来制造高性能的粉末制品, 尤其是在汽车制造业中应用更突出。例如汽车发动机中的连杆、齿轮、气门座、气门挺杆、交流电机转子、启动齿轮和环形齿轮; 手动变速器中的毂套、倒车空套齿轮、离合器、轴承坐圈和同步器中各种齿轮; 底盘中的后轴承盖、扇形齿轮、万向轴节、侧齿轮、轮毂、伞齿及环形轮等近百种复杂零件适合于采用粉末锻造工艺生产。其中齿轮和连杆是最能发挥粉末锻造优点的两大类零件。这两类零件均要求有良好的动平衡性能, 要求具有均匀的材质分布, 这正是粉末锻件特有的优点。

第二节 粉末锻造时金属粉末的选择

粉末的选用关系到压制工艺、锻造工艺、锻件的性能和生产成本。其内容包括粉末类型、杂质含量、粒度分布及预合金化程度等。

1. 粉末的类型及纯度

粉锻对粉末纯度的要求比普通粉末冶金件要高。普通粉末冶金制品孔洞较多, 对性能影响大, 因而杂质的影响不太明显。而粉末冶金锻件制品, 杂质的影响十分显著。因此必须提高粉末原料的纯度。考虑到电解粉末成本高, 目前一般采用还原粉或雾化粉, 不论何种粉, 其氧含量都要求尽可能低。表 5-1 示出三种合金氧含量不同对力学性能的影响。由此可见, 断面收缩率、冲击值与氧含量之间存在明显关系。因此, 一般在压制前应进行还原处理。烧结、锻前加热也应采用还原气氛进行保护。

表 5-1 粉锻钢氧含量对力学性能的影响

合金 编号	烧结温度 /°C	w_{O} (%)	氧含量 (质量分数, $10^{-4}\%$)	强度极限 σ_b /MPa	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ψ (%)	室温时夏式 V 缺口冲击韧度 a_{KV} (J·cm ²)
1	1100	0.38	800	1000	950	19	31	21
	1200	0.40	400	1040	1000	20	40	36
2	1100	0.41	900	980	930	17	26	21
	1200	0.40	400	1020	970	17	37	46

(续)

合金编号	烧结温度 /°C	wc (%)	氧含量 (质量分数, 10 ⁻⁴ %)	强度极限 σ_b /MPa	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ (%)	断面减缩率 ψ (%)	室温时夏式 V 缺口冲击韧度 a_K / (J·cm ⁻²)
3	1100	0.38	1800	1100	1080	10	10	8
	1200	0.34	700	1060	1010	13	30	21

注: 1、2、3号合金在 1100°C 和 1200°C 烧结 60min 后热成形至完全致密, 淬火并回火, 硬度 310~350HV。

2. 粉末的合金化

粉锻原料可以是纯金属粉末, 如还原粉、雾化粉; 也可以是混合粉, 如还原铁粉中加入纯合金元素粉末或中间合金粉末; 也可以是粉末本身已经合金化的预合金粉末, 如雾化合金钢粉。采用混合粉作原料时, 合金元素的分布是不均匀的, 而且成形后需在高温下长时间烧结才能使合金元素扩散均匀, 因此对性能要求高的粉末热锻钢, 不宜采用混合粉末。

粉锻碳素合金钢按碳元素是否增加分为两种预合金粉末。一种是合金元素的预合金粉末, 不必增加碳量; 另一种是含碳低的预合金粉末, 需增加的碳以石墨粉的形式掺入, 在高温烧结时碳易于扩散均匀。采用后者的成形性好, 可减少模具磨损。

目前, 国外采用的粉锻材质系列一般为雾化法生产的预合金钢粉。对无镍锻钢体系的研究, 也受到国内外的普遍重视。例如近年来国内外都重视 Mn-Mo 系的试验研究。Mn 能提高淬透性, 含锰钢热处理后强度显著提高, 而资源丰富、价廉, 一般说来, 预合金钢粉末锻件比混合粉末锻件具有更好的综合性能 (见表 5-2)。

表 5-2 预合金粉末锻钢和混合粉锻钢热处理后的力学性能

粉末类型	材 质	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ (%)	HRC
混合粉	1.85Ni-0.5Mo-0.5C	1470	1970	4.4	46
雾化预合金钢粉	1.85Ni-0.5Mo-0.5C	1515	1970	4.9	49

3. 粒度

采用预合金化粉末, 可以采用粗颗粒粉末。在高温高压同时作用下, 粉末颗粒均可以熔为一体。例如 -30 目和 -80 目 (“-”表示可以通过筛网) 的 Cu-Mo 预合金钢粉, 锻造成形后的物理力学性能几乎相当。因粗颗粒粉末比表面积小, 可以减少氧化物夹杂。粗粉原料的利用率高, 因而可以降低粉末生产的成本。

对于非预合金化的混合粉末, 由于合金化的困难, 不能采用粗粒度粉末。

第三节 粉锻件和预成形坯的设计

一、粉锻件的分类与锻件图设计

与普通钢锻件不同, 粉锻件除按外形和轴线方向分为长轴类锻件和短轴类锻件外, 还应按锻件锻击方向的高度分为等高件和非等高件两大类。等高与非等高是指与锻击方向垂直的各断面面积是否相等。

粉锻件图的制订与钢锻件的基本相同, 其特殊性为:

1) 预成形坯的几何形状及重量准确, 利于闭式锻造成形;

- 2) 粉锻为精锻成形, 某些表面可直接达到成品零件的最终要求, 而且锻件易锻出内孔;
- 3) 粉末预制坯的抗拉强度和塑性低, 锻造时易出现裂纹。

粉锻件图的设计内容如下:

1. 确定表面精度

粉锻件同样不是所有表面靠锻造来保证精度的, 主要解决难于机加工或机加工量大的面, 并以此作为其他表面的检验和加工基准。如粉锻齿轮是以齿面作为主要精锻表面, 然后以齿面定位来加工其他表面。

2. 确定分模面的位置和形状

对于圆柱体和正齿轮类零件, 由于锻体是等高件, 可采用套筒模锻, 在上表面分模。一般采用强制性脱模; 对高度方向断面变化大的非等高锻件, 考虑出模的问题, 因而分模面一般选在最大断面处, 如伞齿轮锻件。

3. 余量、公差和余块的确定

粉锻件余量、公差的确定和余块的添加与一般钢质精锻件类似。一般精锻表面的公差按零件公差给定, 而其他表面的余量和公差除与零件的尺寸、精度和粗糙度有关外, 还与设备及模具的结构和精度有关。

4. 确定模锻斜度

粉锻往往可以作出内孔, 但内孔芯棒不能采用强制方法脱模时则需采用较大的斜度, 否则锻件冷缩时将把芯棒越夹越紧, 芯棒上的斜度一般取 $\alpha \geq 7^\circ$, 方能使芯棒从锻件的孔内拔出。其他不能采用强制方法脱模的部分也应适当给出斜度。

斜度对粉锻成形也有很大的影响, 取得不当则可能造成锻件开裂。粉锻为压入成形时, 模壁带有斜度对粉末金属可造成轴向分力和水平分力的作用, 有利于金属的致密。同时斜度的设置使孔口直径加大, 起到了开流作用, 有利于金属充满型腔。

综合考虑成形、脱模及防止裂纹等因素, 压入成形时的斜度宜取大些。图 5-2a 为未加斜度, 入口圆角又较小时, 伞齿轮轮毂部位压入成形产生裂纹的情况, 改为 10° 斜度且入口圆角半径增至 12mm 时, 则不产生裂纹。

5. 确定圆角半径

粉末锻造时, 如果预制坯作成与锻件相似的形状, 锻造时金属以墩粗的方式成形, 当锻件密度低时金属就可以充填细小角部, 得到清晰的粉锻件。但如用压入法成形, 如图 5 2b 所示, 圆角半径 R 又很小时, 金属不易流入型腔, 预成形件在拐角处受阻力较大易于开裂。因此内圆角半径 R 应比相应的钢质锻件时取大些。而外圆角半径 r 仅影响到充满和模具拐角处的强度, 可参照一般锻造方法选取。

二、预成形坯的设计

预成形坯的设计是从锻件的重量、密度、形状和尺寸出发, 考虑预成形坯的密度、形状和尺寸。最基本

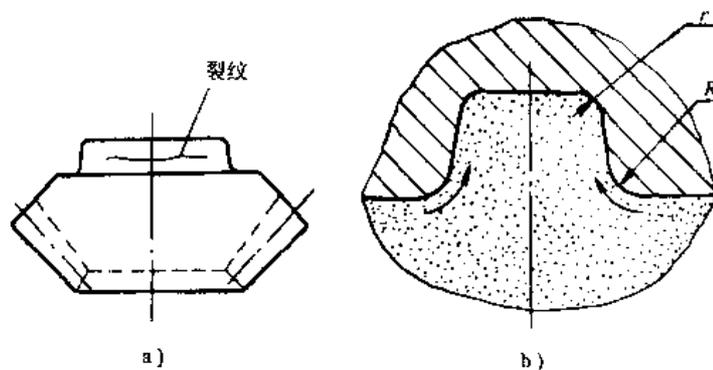


图 5-2 斜度、圆角半径影响开裂示意

a) 开裂 b) 锻件圆角半径的影响

的原则是在锻造时有利于致密和充满模腔；在充满模腔时应尽可能使预成形坯有较大的横向塑性流动。因为塑性变形有利于致密和改善性能。但过大的塑性变形可能在锻件表面或心部产生裂纹，因此其塑性变形量不能大于预成形坯塑性变形所允许的极限值。另外还需考虑预成形坯在充满型腔时，各部分尽可能处于三向压应力状态下成形，避免或减少拉应力状态。

1. 预成形坯的密度选择

密度是预成形坯的基本参数。根据预成形坯密度及锻件质量，求得预成形坯的体积，然后根据预成形坯的高径比，分别确定预成形坯的高度及径向尺寸。所以作为压制模具尺寸设计的依据。

粉末锻件的最终密度主要是由锻造变形所决定的，一般与预成形坯的密度关系不大。预成形坯密度的选择主要考虑预成形坯要有足够的强度，保证在生产工序传输过程中不被损坏，形状完整为基准。为此，一般冷压制后的预成形坯密度为理论密度的80%左右。对于铁基制品的密度选择在 $6.2\sim 6.6\text{g/cm}^3$ 范围内。为了获得无飞边的粉末锻件，预成形坯重量公差必须控制在 $\pm 0.5\%$ 左右。

2. 预成形坯的设计

预成形坯的设计主要包括形状设计和尺寸的确定。

(1) 预成形坯形状设计 预成形坯的几何形状大体上可分为两类：

1) 近似形状。即预成形坯与终锻件形状近似。这有利于锻造时以镦粗的方式成形，且因塑性变形量小，可以避免产生裂纹。适于制造连杆和直齿轮类零件。

2) 简单形状。预成形坯形状较简单，与锻件形状差别较大。这一般是锻件形状的一种简化，经简化的预成形坯锻造时，不仅是高度方向的镦粗变形或压实，而且通过较大的塑性流动充满模具型腔。相应的预成形坯模具易于制造且寿命长，在热锻过程中塑性变形量较大，有利于提高粉锻件的力学性能。

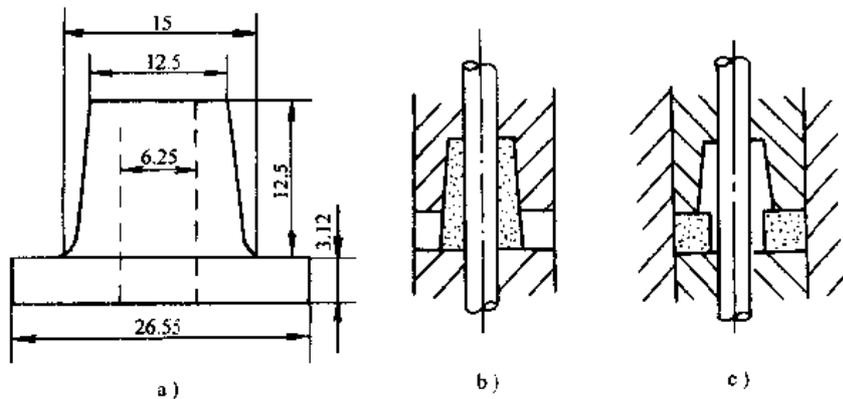


图 5-3 长径法兰零件及预成形坯形状设计

a) 零件形状及尺寸 b) 近似形状预成形坯 c) 简单形状预成形坯

对于形状较复杂的锻件的预成形坯，可以对其不同部位及性能要求，分别进行设计。例如对于如图 5-3a 所示带径法兰零件，如果采取近似形状制坯，锻造时只是简单的轴向压实，由于没有水平方向的塑性流动，不能满足力学性能要求。图 5-3b、c 给出了这种法兰两种可能的预成形坯的形状。图 5-3b 所示预成形坯的形状是充满法兰的胫部，通过镦粗充满法兰的盘部；图 5-3c 所示预成形坯是充满法兰的盘部，通过挤压成形胫部。图 5-3b 的径向应变为 $\epsilon_r = \ln(26.55/15) = 0.575$ ，显然大于这种材料预成形坯的塑性极限值，因此不能采用。图 5-3c 方

案是反挤压成形法兰颈部，如果预成形坯内孔与芯棒之间变形时接触过早，就会因摩擦作用而产生拉应变，导致颈的顶部开裂。为此要求预成形坯内孔与芯棒之间留有一定间隙，避免内表面过早接触芯棒，需选择合适的孔径。

(2) 几种典型粉锻件的预成形坯设计

1) 直齿轮

a. 当 $H/d > 0.4 \sim 0.5$, $d_1/d > 0.5$ 时 (如图 5-4 所示), 一般设计成相似形状预制坯, 锻造时径向外形以墩粗方式成形。此时齿侧间隙在 $0.5 \sim 1\text{mm}$ 间选取。其余的径向尺寸考虑热胀并考虑顺利放入模具而给以适当间隙, 在内孔部分不宜给变形间隙, 以保证定位准确。同时可以防止内孔处间隙较大, 内孔产生内凹或充不满, 如图 5-5 所示。

b. 当 $H/d < 0.4 \sim 0.5$, $d_1/d \leq 0.5$ 时, 可采取径向压入成形方式设计预制坯。

对模数较小的齿轮, 预制坯可作为圆柱形或筒形, 外径为产品齿根圆直径, 并给定一放入间隙。对中等模数以上的齿轮 (如 $m > 3$), 齿高较大, 变形不均匀。若齿形全部靠压入成形, 所需变形功很大, 而且金属的流动大对模具的磨损严重, 产品还易产生裂纹。压入成形

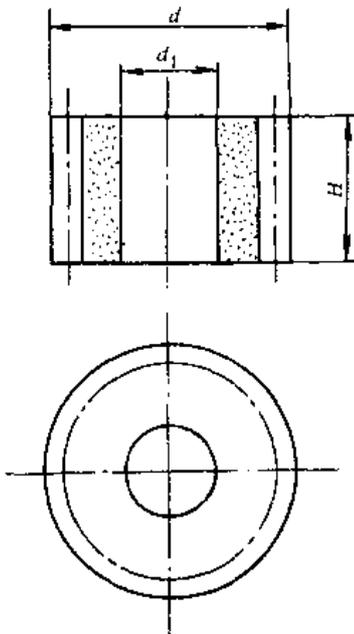


图 5-4 直齿轮粉锻件

时, 当压入深度超过一定值时, 致密效果与压入深度无关, 但决定于变形程度。因此最好采用半齿压入, 即预制坯作出半个齿形, 外径等于产品的分度圆直径, 齿侧、齿根仅给定放入间隙, 如图 5-6 所示。此种预制坯成形时齿厚削减, 预制坯处于强大的三向压应力状态, 致密效果好, 不易开裂。

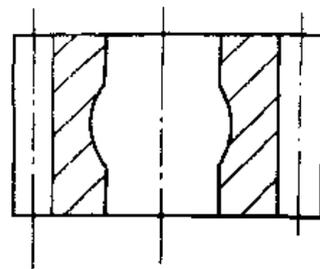
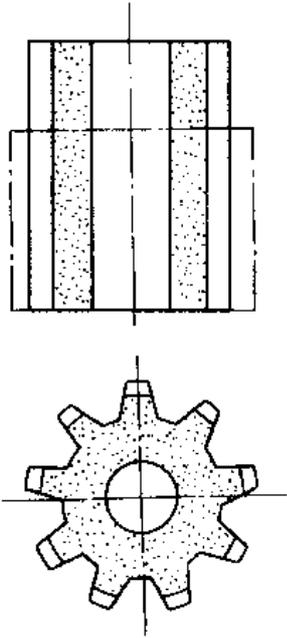


图 5-5 预制坯内孔间隙大, 锻件内凹

同样, 对于其余部位不宜给出变形间隙, 以免不均匀变形造成开裂。

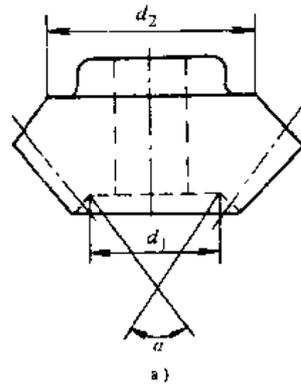
2) 伞齿轮。伞齿轮主要的成形方向在轴向, 适合于压入成形, 所以一般设计为简单形状预制坯。按锻件的几何形状, 设计为带锥圆柱体, 锻造时造压入成形齿形。为入模后定位可靠, 锥角 α 一般与产品齿轮齿根锥顶角相等。底部直径 d_{01} 可等于产品的 d_1 , 也可将 d_{01} 稍大于 d_1 ($3 \sim 5\text{mm}$), 这样可减少底部的冷却。 d_{02} 约等于最大齿根圆的直径。如图 5-7 所示。这种预制坯可称之为全锥形预制坯。

另一种方法是采用半锥形预制坯, 其形状如表 5-3 所示。实验表明, 正圆柱形预制坯在成品齿轮根部面积内出现很大的流动梯度, 因而形成折叠、剪切裂纹, 并且模具磨损很大。而全锥形的预制坯在齿轮底部只发生小的流动, 底部密度不均匀, 同时难以达到高密度。因而采用半锥形预制坯。

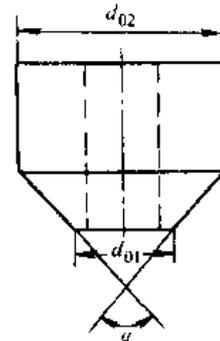


—— 预制坯轮廓线
 - - - 锻件轮廓线

图 5-6 半齿压入预制坯形状



a)

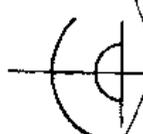
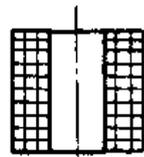
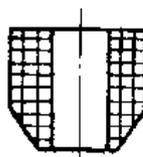
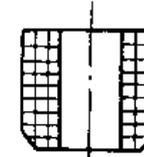
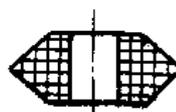
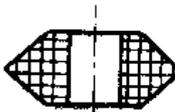
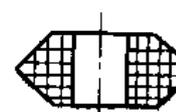
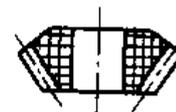


b)

图 5-7 伞齿轮全锥形预制坯设计

a) 锻件 b) 预制坯

表 5-3 预制坯的几种不同几何形状

	正圆柱形	全锥形	半锥形
预制坯剖面 			
轮齿剖面 			
根部剖面 			

从工艺实践来看，半锥形预制坯可能产生两个问题。第一，小端齿形的成形性不好，易造成小端齿形充不满；第二，易在锻造时产生裂纹。因此采用全锥形预制坯，并适当调整底部直径，易协调两种设计方案的有效办法。

3) 法兰件。这类零件的结构尺寸如图 5-8 所示, 其工艺参数为:

①沿高度方向的等截面变化率 (设 $\alpha=0$):

$$\epsilon = \frac{A_0 - A}{A_0} \% = \frac{D_1^2 - D^2}{D_1^2 - d^2} \%$$

②凸台高度比: h/b

③法兰高宽比: h_1/b_1

如 ϵ 大于 60%, 可采取压入成形, 预制坯为一圆环, 如图 5-8b 所示, 尺寸 d_0 和 D_0 的选取视产品的 h/b 大小而定。

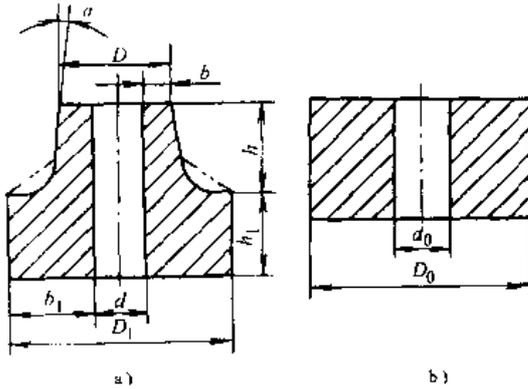


图 5-8 法兰粉锻件及预制坯设计

a) 锻件 b) 预制坯

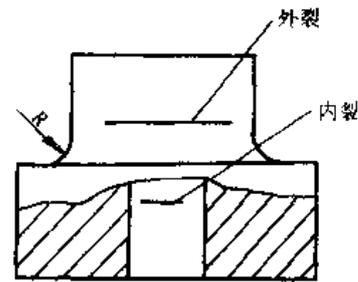


图 5-9 压入成形粉锻件开裂示意图

当 $h/b < 1$, d_0 和 D_0 分别接近 d 和 D_1 时, 不给变形间隙。当 $h/b > 1$ 时, D_0 应小于产品的 D_1 , 使法兰部分成形时, 有一个墩粗变形量, 保证预制坯在锻造时先充满孔隙, 后充满法兰的角部, 或至少应大致同时充满, 以防因形成死区而造成剪切裂纹。否则应改变产品形状 (见图 5-8a 中虚线所示) 加余块, 以保证挤压时不形成死区。当然, 对塑性不同的预制坯应区别对待。

ϵ 大于 60% 时, 采用压入成形一般不产生挤压裂纹。但对塑性较低的烧结体, 在 ϵ 超过 60% 不多的情况下, 也可产生裂纹, 特别是对大型件。裂纹可能产生于外表面, 也可产生在内表面, 如图 5-9 所示。这些裂纹是因压入成形时内外表面因摩擦的影响, 流动速度低于中心部位, 因而产生轴向拉应力而造成的。此时可通过调节锻件的斜度或圆角来控制裂纹的产生。

如果锻件工艺参数不允许改变, 而又易于产生裂纹, 则有必要设计成相似形状预制坯, 锻造时以墩粗方式成形, 如图 5-10 所示。

如果 $\epsilon < 60\%$, 一般可墩粗成形为好。否则靠压入成形致密效果差, 而且又易于产生挤压开裂。墩粗成形预制坯如图 5-10 所示, 结构尺寸的计算按对应锻件部分重量相等来考虑。预制坯尺寸 h_0 和 h_{01} 均比锻件尺寸 h 和 h_1 大, 而转角处的圆角半径 R_0 应比锻件的圆角半径 R 大, 否则易产生折叠。预制坯由内孔定位, 变形间隙由外径给出, 间隙大小视相应的 h_0/b_0 与 h_{01}/b_{01} 的大小给出。

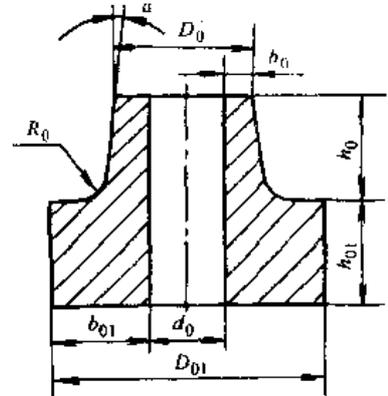


图 5-10 法兰件墩粗成形预制坯

4) 长轴类锻件。长轴类粉锻件国内研制得较少, 国外研制的典型锻件有汽车连杆、加速器 (M85 型 50 发机关枪用) 等,

西欧、美国、日本均已将连杆粉锻件应用于实际生产。

粉锻长轴类锻件有许多优点，如锻件沿轴线的体积分配由预制坯制造来实现，不必采用较多的制坯工步；易于准确装粉，保证重量公差；可以作出内孔，实现无飞边或少飞边模锻，不用或简化切边工序等。因而锻件精度高、质量好、材料利用率高、成本低。

对于这一类锻件，粉末预制坯的设计方法一般不同于致密锻造。可以按下述方法来考虑。

长轴类锻件粉锻时，金属在横断面内的流动阻力要比沿轴向流动的阻力小得多，可假定长轴类锻件模锻时属于平面应变状态，因而预制坯的长度与粉末锻件的长度相等。设计时沿轴线将锻件划分为若干个简单的几何形体，分别考虑各个几何形体的成形、致密与开裂等问题，仅在各几何形体交接处考虑金属的轴向流动及其影响。这样长轴类粉锻件的问题就可得到简化。至于预制坯的密度，一般按等密度原则确定。

图 5-11 为粉锻连杆预制坯设计的两种方案：一种为相似形状预制坯，或称精压式预制坯（图 5-11b）；另一种为简单形状预制坯，或称锻造式预制坯（图 5-11a）。前者在锻造时材料仅发生少量的侧向流动即接触模壁，即锻粗加复压方式成形并致密化。而后者在锻造时有锻粗成形和压入成形两种方式，最终复压致密两种预制坯的密度均为理论密度的 83%。

连杆粉锻时若采用简单形状预制坯，由于变形流动大，模具的磨损比较明显，但预制坯制作简单。相似形状预制坯的锻粗成形时金属变形流动小，对模具的磨损小，模具寿命可达 25000 次，较常规钢模提高 3~4 倍，但预制坯制作比较困难。

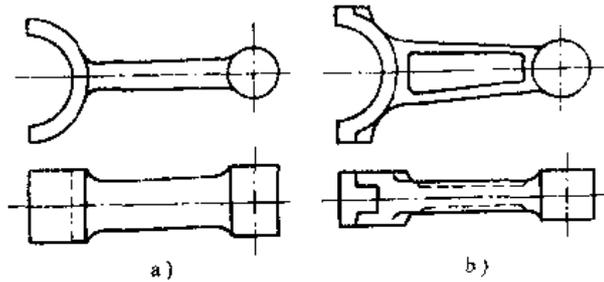


图 5-11 连杆预制坯的两种设计方案
a) 锻造式（简单形状） b) 精压式（相似形状）

第四节 预成形坯的压制与锻造工艺

一、预成形坯的压制成形

预成形坯压制成形是粉末冶金工艺的主要工序，是金属粉末压实成具有一定形状、尺寸、孔隙度和强度的压制工艺过程。

1. 成形前的物料准备

(1) 退火 粉末的预先退火可消除表面的氧化物和吸附的气体，消除粉末的加工硬化现象。退火时一般采用还原性气氛。温度为 $(0.5 \sim 0.6) T_{\text{熔}}$ ，并保持一定的退火时间。

(2) 筛粉 目的在于把颗粒大小不同的原始粉末进行分级，以便按要求的粒度分布进行配料。

(3) 混合 其目的是使成分不同的组元形成均匀的混合物，以利压制和烧结时获得均匀一致的状态。除基体原料粉末外，对粉末锻造材质还需配入其他添加组元，如合金组元以及

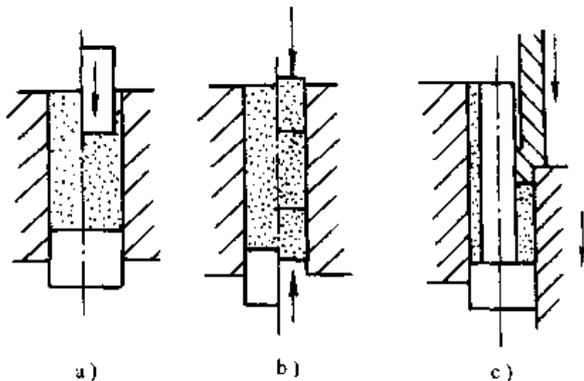


图 5-12 粉末压制的三种基本方式
a) 单向压制 b) 双向压制 c) 浮动压制

压制时起润滑剂和粘结作用的工艺性组元。

2. 压制成形

预成形坯的压制是通过模具对粉末施加压力,使粉末颗粒在室温下聚集成形为一定形状、尺寸、密度、强度的粉末坯体。

(1) 称粉与装粉 自动化大批量生产时,一般用容量法称粉,利用粉末的流动性进行自动化生产。单件、小批量生产时多用称重法称粉,手工装粉。

(2) 压制 压制是将装在型腔中的粉料聚集到一定密度、形状和尺寸要求的压坯工艺过程。

粉末压制有三种基本方式,即单向压制、双向压制和浮动压制,如图 5-12 所示。

粉末注入型腔中,由于表面不规则,彼此之间有摩擦,相互搭架而形成大小不一的拱桥孔洞。加压时,粉末颗粒发生位移和变形,拱洞破坏孔隙减小,粉末挤紧,小颗粒填入大颗粒间隙之中。继之粉末颗粒表面的凸凹部分被压紧且啮合成牢固的接触状态。粉粒从弹性变形过渡到塑性变形,颗粒间从点接触到面接触。颗粒间的机械啮合力增加而接触面增加,形成具有一定强度的压坯。在压制过程中,由于粉末颗粒加工硬化到极限状态而产生颗粒碎化和晶粒细化。

(3) 保压与脱模 当压力达到规定值后,需保压以提高压坯密度。为了从模腔中取出预成形压坯,也需要施加一定的脱模力。

3. 压制力及脱模力的计算

(1) 单位压制力的确定 压制时,除粉末性质外,压制工件的密度主要取决于压制压力和模壁的摩擦。

忽略摩擦的影响,压制时的压力仅取决于压坯的密度,二者的关系如图 5-13 所示。根据这一关系图,就可以确定压制具有一定密度的压坯所需的单位压制力。

(2) 侧压力及模壁的摩擦 压坯的受力情况如图 5-14 所示。压制时压模中的粉末处于非平衡的体积压缩状态。在弹性范围内,设单位压力为 p ,泊松比为 ν ,单位侧压力为 $p_{侧}$,由于垂直于压制方向的应变为零,根据广义虎克定律得:

$$p_{侧} = \frac{\nu}{1-\nu} p = \xi p$$

$$\xi = \frac{\nu}{1-\nu}$$

式中 ξ ——侧压系数。

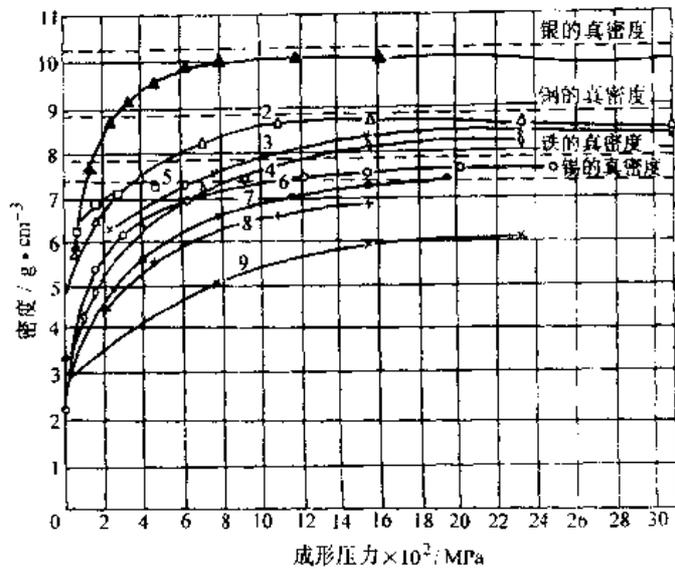


图 5-13 各种粉末成形压力与压坯密度的关系

- 1—结晶银粉 2—精电解钢粉 3—析出细铜粉
4—电解细钢粉 5—喷雾锡粉 6—纯电解铁粉
7—氢还原电粉 8—纯铁粉 9—退火粉碎铜粉

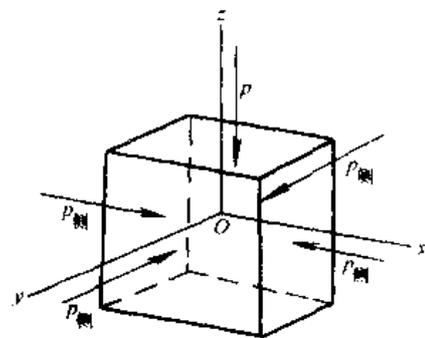


图 5-14 压坯受力示意

由于没有考虑粉末的塑变和摩擦, 所以 $p_{\text{侧}}$ 值是一近似值, 而且是一个平均值。

实验资料表明, 侧压力在压制过程中的变化是很复杂的, 要直接准确地确定 $p_{\text{侧}}$ 很困难。因此, 国内外在计算侧压力时, 一般取侧压系数 $\xi = 0.25$ 左右。

粉末体与模壁的摩擦力的大小 $p_{\text{侧}}$ 与摩擦系数 f 的关系如下:

$$p_{\text{侧}} = f p_{\text{总}} \quad \text{因而} \quad p_{\text{侧}} = f \xi p_{\text{总}}$$

在一般情况下, 外摩擦引起的压力损失取决于粉末材料与压模间的摩擦系数、模壁表面粗糙度、硬度及润滑情况, 还有压坯高度 H 、直径 D 等。

外摩擦的压力损失可用下式表示:

$$\Delta F = f F_{\text{侧}}$$

式中 $F_{\text{侧}}$ ——总侧压力。

上式又可改写为外摩擦的压力损失 ΔF 与总压力 F 之比:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{f F_{\text{侧}}}{F} = \frac{f \xi \pi D H p}{\frac{\pi D^2}{4} p} = f \xi \frac{4H}{D}$$

对上式微分得:

$$\frac{dF}{f} = f \xi \frac{4}{D} dH$$

积分整理后得:

$$F' = F e^{-\frac{4H}{D} f \xi}$$

式中 F' ——模底受的总压力;

F ——上模施加的总压力。

若干实验指出, 如果考虑到消耗在弹性形变上的力, 则有:

$$F' = F e^{-\frac{8H}{D} f \xi}$$

上述关于压力损失的公式已为实验证实, 说明沿高度的压力降与高径比成指数关系。

(3) 脱模压力 脱模压力与压制力、粉末性质、压坯密度、尺寸以及压模和润滑情况有关。

压坯在压制力消除后发生弹性膨胀, 侧压力降低。对塑性金属粉末, 因弹性膨胀不大, 脱模压力与摩擦力损失接近。

铁粉的脱模压力与压制力 F 有如下关系:

$$F_{\text{脱}} = 0.13F$$

在使用硬脂酸锌作润滑剂来压制铁粉时, 可将脱模压力降低为:

$$F_{\text{脱}} = (0.13 \sim 0.15)F$$

二、预成形坯的烧结

金属粉末压坯在低于基本金属熔点的温度下加热、保温, 粉末颗粒间产生扩散、固溶、化合和熔接, 致使压坯收缩并强化, 这一过程称为烧结。烧结的目的是为了合金化或使成分更均匀, 增加预成形坯的密度和塑性。另一方面还可进一步降低锻件内的氧含量, 以利提高锻件密度和性能。

粉末锻造主要分为预成形坯烧结和不烧结两种热锻。对合金粉末预成形坯, 直接加热到锻造温度进行锻造, 可以得到与烧结锻造同样性能的锻件。对于采用混合元素粉末原料和不含碳的部分预合金粉末制成的混碳预成形坯, 一般采取烧结锻造。

对于混合元素粉末预成形坯的烧结, 由于合金元素的固相扩散速度比较低, 在高温长时间的烧结条件下, 才能使其合金化较均匀, 对于雾化预合金粉末, 为改善压制性能, 常用不

含碳的预合金粉末，具有一定混合碳的合金粉末预成形坯的烧结过程中，部分碳使粉末中的金属氧化物还原，要保持烧结中不脱碳，也不增碳，应选择可控碳势烧结炉内进行，结果较好。烧结工艺参数对粉末锻件性能的影响见表 5-4。

表 5-4 烧结工艺参数对锻件性能的影响

粉末类型	烧结温度 /°C	烧结时间 /h	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)	备注
还原铁粉加入 0.5% Ni, 0.5% Mo, 0.25% C (均为质量分数)	1150	0.5	400	533	26	47	混合元素粉末 锻后油淬 600°C 回火
	1150	1	420	554	25	47	
	1300	1	440	570	22	35	
4600 加入 0.25% C (质量分数)	1300	2	480	645	19	30	预合金雾化粉 锻后油淬 600°C 回火
	1150	0.5	578	844	15	45	
	1300	1	640	900	15	49	
	1300	2	640	860	19	58	

三、预成形坯的锻造

如前所述，粉末冶金锻造有三种工艺方法：粉末锻造，即直接将粉末预成形坯加热后锻造；烧结锻造，即将预成形坯烧结后进行加热锻造；锻造烧结，即将预成形坯加热锻造后再烧结。第一种方法简单，第三种方法的锻件性能较好，但因锻前未烧结，易于锻裂，所以一般采用烧结锻造。

1. 预成形坯锻造成形方法

粉末锻造按其成形方式有三种方法：

第一种为热复压法。它类似于粉末体的压制成形。预成形坯具有精确的外形尺寸和重量，其形状与终锻件非常接近，仅考虑加入模具型腔的间隙的高度方向的压缩变形量，故又称小变形量锻造。显然这种方法在成形过程中没有宏观的金属流动，如图 5-15a 所示。

第二种为无飞边闭式锻造。预成形坯一般设计得较为简单，但重量公差同样要求严格。它与前一方法的主要区别在于需经较大的塑性变形来充满型腔，如图 5-15b 所示。

第三种为开式小飞边模锻。预成形坯不像前两种方法那样严格，重量的波动可通过飞边调节，锻造成形时塑性变形量较大，如图 5-15c 所示。

第一种方法用于密度要求不高的零件生产，锻造的残余孔隙度在 0~2%。要使密度提高，需要很大的压力。第二、第三种方法用于要求高密度的场合。但是粉末锻件并不总是要求高密度，而与产品性能有关。除密度指标外，还要根据锻件成形的复杂程度、锻造设备及工艺条件等合理选择锻造成形方法。

2. 预成形坯锻造工艺参数的选择

要获得致密、高性能的粉锻件，必须正确选择锻造温度、速度、变形力等参数。

粉末锻造变形初期，由于多孔的预成形坯易变形、变形力较小，密度增加较快。锻造成形后期，由于大部分孔隙闭合，变形抗力增大，要消除残留孔隙所需变形力迅速增高。变形

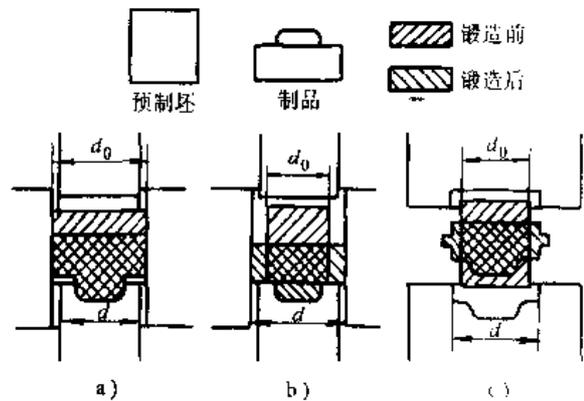


图 5-15 粉末锻造成形方案

a) 热复压法 ($d/d_0=1$) b) 闭式锻造 ($d/d_0 > 1$)
c) 开式锻造 ($d/d_0 > 1$)

抗力还与变形温度密切相关，较高的变形温度有利于致密，并降低变形抗力。较高的变形速度同样也有利于致密。为此，必须综合考虑诸因素对锻件质量影响、选择工艺参数。

图 5-16 给出 800°C 和 1100°C 锻造还原铁粉和低中碳钢时变形力与锻造密度的关系。图 5-17~图 5-18 给出几种低合金雾化钢粉末锻造时的变形力、变形温度与锻件密度的关系。变形力、变形温度与锻件密度的关系曲线是确定变形力和锻造温度的依据。

3. 预成形坯锻前加热

预成形坯锻前加热，需要在保护气氛下进行。为了防止氧化和脱碳，一般在惰性气体或氢气保护下的电炉内进行。加热时间可根据材料合金化程度、氧含量及预成形坯的尺寸大小确定。加热应该以使坯料内外温度均匀，当达到锻造温度和加热时间后，应立即进行锻造。

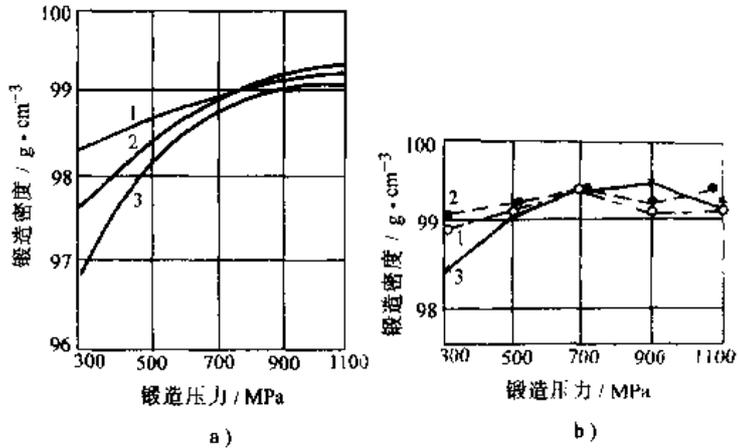


图 5-16 混合粉预成形坯锻造变形力与锻件密度的关系
 a) 800°C 锻造 b) 1100°C 锻造
 1—还原铁粉 2 还原铁粉+0.3%C (质量分数)
 3 还原铁粉+0.6%C (质量分数)

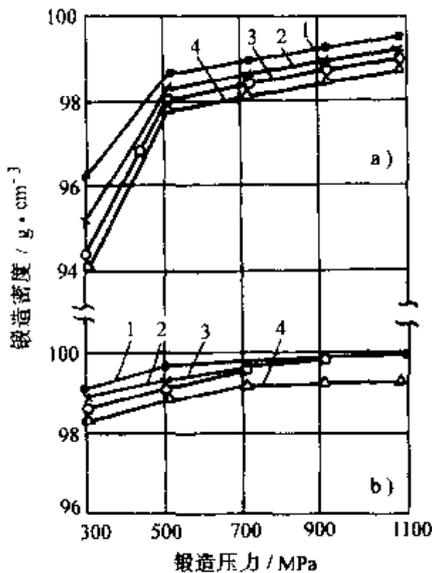


图 5-17 雾化锻造变形力与锻件密度的关系(预成形坯密度 6.5g/cm³)
 a) 800°C 锻造 b) 1100°C 锻造
 1—0.4%C(质量分数)+雾化粉(0.005%C, 0.025%Si, 0.28%Mn(均为质量分数) 2—0.4%C(质量分数)+4600 系 3—0.4%(质量分数)C+雾化粉(0.19%C, 0.029%Si, 1.48%Mn, 0.51%Ni, 0.54Cr, 0.49%Mo, 0.09%O)(质量分数) 4—0.4%C(质量分数)+雾化粉(0.096%C, 0.036%Si, 1.33%Mn, 0.56%Cr, 0.43%Mo, 0.24%O)(均为质量分数)

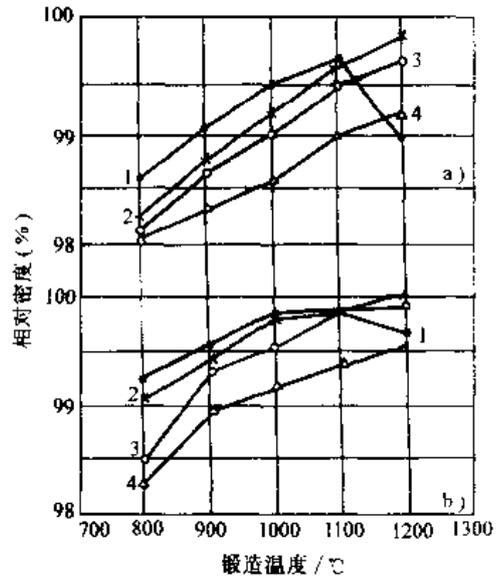


图 5-18 雾化粉锻造温度与锻件密度的关系
 a) 锻造力 500MPa b) 锻造力 900MPa
 1—0.4%C(质量分数)+雾化粉(0.005%C, 0.025%Si, 0.28%Mn(均为质量分数) 2—0.4%(质量分数)C+4600 系雾化粉 3—0.4%(质量分数)C+雾化粉(0.19%C, 0.029%Si, 1.48%Mn, 0.51%Ni, 0.54Cr, 0.49%Mo, 0.09%O)(均为质量分数) 4—0.4%(质量分数)C+雾化粉(0.096%C, 0.036%Si, 1.33%Mn, 0.56%Cr, 0.43%Mo, 0.24%O)(均为质量分数)

合适的锻前加热温度可保证粉末锻件有低的流动应力，足够的塑性，并可保证精度，降低粗糙度。铁基粉末锻件的锻造加热温度为 $800\sim 980^{\circ}\text{C}$ ，此时变形抗力低，锻件质量好。

为适应生产的需要，粉末烧结锻造可以考虑三种加热方案：

- 1) 粉冶烧结炉内烧结，冷至室温，在中频感应加热炉加热烧结体，最后锻造。
- 2) 粉冶烧结炉内烧结，降温至 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ ，从炉内取出直接锻造。
- 3) 在低温炉内脱去润滑剂，感应烧结，降低到某一固定温度范围，然后锻造。

第五节 预成形坯烧结锻造变形特点与致密

一、预成形坯烧结锻造变形的特点

粉末冶金烧结体的锻造与致密金属坯的锻造相比，具有下列特点：

1. 质量不变条件

致密金属坯在塑性变形过程中遵循体积不变条件，而多孔体在锻造时则遵循质量不变条件。

由于质量不变，体积 V 和密度 ρ 成反比：

$$\rho_0 V_0 = \rho V$$

$$\frac{\rho V}{\rho_0 V_0} = 1$$

则
$$\ln\left(\frac{\rho V}{\rho_0 V_0}\right) = \ln\frac{\rho}{\rho_0} + \ln\frac{V}{V_0} = 0$$

式中 ρ_0 、 ρ ——分别为变形前后的密度；

V_0 、 V ——分别为变形前后的体积。

如果设 $\ln\frac{\rho}{\rho_0} = \epsilon_p$ 为真实密度应变；

$\ln\frac{V}{V_0} = \epsilon_v$ 为真实体积应变。

则有

$$\epsilon_p + \epsilon_v = 0$$

因

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$$

所以质量不变条件可表达为：

$$\epsilon_p + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

对于致密金属坯，塑变时没有密度的改变，即 $\epsilon_p = 0$ ，上式变为 $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$ ，因此可以认为致密金属的体积不变条件仅是质量不变条件的一个特例。而质量不变条件用以描述多孔烧结体锻造时的塑性变形和致密化则是一种更普遍的规律。

2. 小的横向流动和泊松比的变化

在无摩擦单轴压缩时，将会发生金属的横向流动。对于致密金属，其高度的减小等于宽度的增加。此时泊松比 $\nu = 0.5$ ，并且在整个过程中， ν 值保持不变。烧结体在锻造时产生变形和致密化，遵循质量不变条件，但其体积不断减小。初期的锻造能量用于减小孔隙，横向流动较小，其塑性泊松比 $\nu < 0.5$ 。随着密度的提高， ν 值随着变化，当密度趋向于理论密度时， ν 值也逐渐趋向于 0.5。

经实验分析可知，锻造初期，多孔预制坯的横向流动小，致密化速度快。当相对密度大于85%时，才显示出大的横向流动。这一特点表明，预制坯锻造初期，高度方向的变形量大，而横向流动充满型腔的能力较差，仅当密度提高时，充填能力才逐渐与致密材料相当。

3. 屈服极限和拉伸性能低

图 5-19 和图 5-20 为铁粉预成形坯无润滑平面应变热锻时，锻造压力与高度真实应变及相对密度的关系。根据实验曲线测得屈服极限与单位压力及孔隙度的关系式如下：

$$p = 1.15(\sigma_s - K\eta^{2/3})$$

式中 η ——预成形坯的孔隙度；

K ——常数。

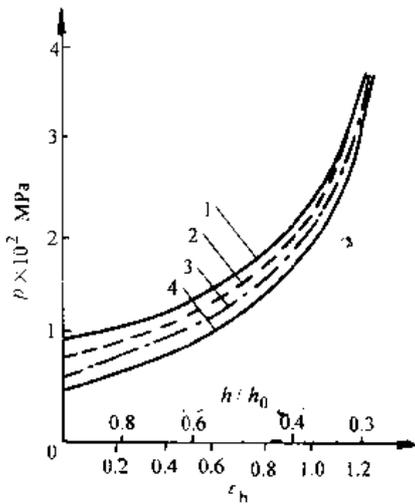


图 5-19 平均单位锻造压力 p 与高度真实应变 ϵ_h 的关系

1—19.8% 2—25.7% 3—32.7%
4—37.4% (1~4 为预制坯孔隙度；锻造温度 1160°C)

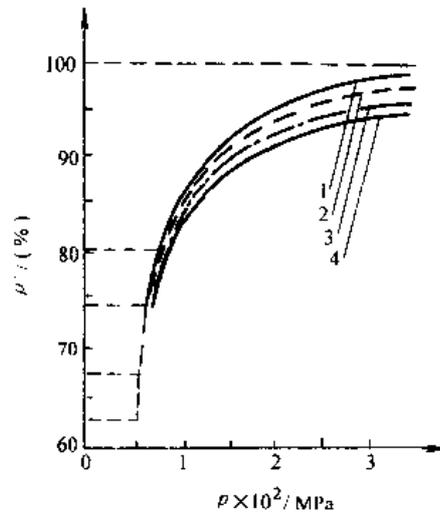


图 5-20 平均相对密度 ρ' 与平均锻造压力 p 的关系

1—19.3% 2—25.7% 3—32.7%
4—37.4% (1~4 为预制坯孔隙度；锻造温度 1160°C)

表 5-5 为屈服极限与孔隙度的关系数据。这些数据表明，预成形坯的屈服极限均随孔隙度的增大而减小。因此密度较低的预成形坯在较低的锻造变形力作用下就会产生塑性变形。随预成形坯的相对密度提高，变形抗力也随之增加。当相对密度达到 95%~98% 以后，基体材料发生显著塑性变形，并且进一步致密的抗力很大，必须用很高的锻造力才能接近致密，但如果在锻造初期锻件能够基本成形，锻造后期则基本是一种复压形式，因此对模具的磨损小，而且与致密钢锻造相比，能够得到更精确的形状。

由于孔隙削弱了基体之间的联系，多孔预成形坯的拉伸性能低，在非均匀拉应力的情况下，较致密金属易于产生开裂。这是区别于致密金属锻造的又一显著特点，需要在设计时慎重对待。

二、烧结体的致密

对粉末烧结体进行塑性加工时，既有

表 5-5 预成形坯的屈服极限与孔隙度的关系

预成形坯的孔隙度 η (%)	屈服极限 /MPa		
	取自图 5-18	取自图 5-19	取自经验公式
37.4	58	55	56
32.7	63	65	65
25.7	84	78	79
19.8	88	94	91

形状的变化，又有体积的变化，前者称为变形，后者称为致密。从粉末锻造方法来看，要达到成形和致密的双重目的，可以采用纯复压致密的方式，也可采用塑性变形致密的方式，两种方式相比较，后者的效果好。致密效果应包括四个方面：

- 1) 所得锻件密度高低及分布；
- 2) 孔洞焊合情况；
- 3) 锻造变形力的大小；
- 4) 裂纹的产生与发展情况。

1. 复压致密

如烧结体完全不经或只经少量的宏观塑性变形即接触模壁，高度方向的变化导致体积改变。孔洞主要是在体积应力下产生缩小，闭合或压平。致密仅仅靠内部孔隙的缩小或减少来实现，这就是复压致密，如图 5-21 所示。变形体主要通过静水压应力来消除孔洞，要达到完全致密是困难的，需要无穷大的压应力。被一层致密材料所包围的球形孔隙，在致密过程中，在一定温度和压力下存在一个“终点”密度，热复压的压力可高达 1500MPa。而且孔洞表面的氧化物及夹杂不易破坏，因而致密效果不好。即使给予极高的压力，锻件还残存着 2~3% 左右的孔隙。

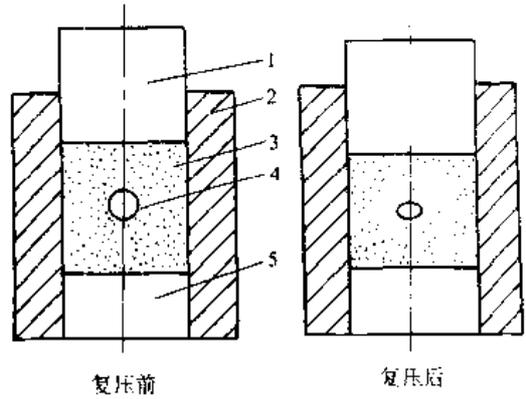


图 5-21 复压变形时孔洞变形示意

1—冲头 2—凹模 3—预成形坯
4—孔洞 5—模垫

但另一方面，由于复压时变形体受三向压应力作用，不可能产生裂纹，而且可能闭合已经出现的表面裂纹。

2. 塑性变形致密

(1) 成形过程 塑性成形可分为锻粗成形方式和压入成形方式，其成形过程分别如图 5-22 和图 5-23 所示。由图可见，其共同特点是变形初期均有较大的塑变致密过程，最后阶段又或多或少的存在一个复压过程。

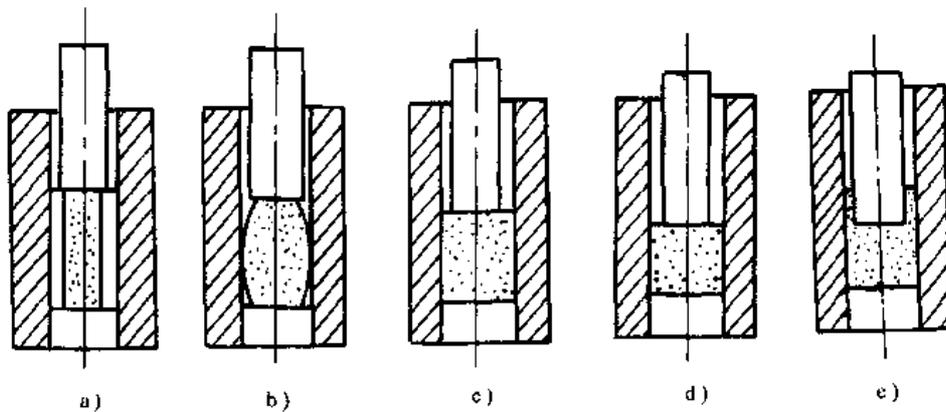


图 5-22 粉锻锻粗成形过程

a) 开始接触 b) 自由锻粗 c) 充满型腔 d) 压实 e) 形成毛刺

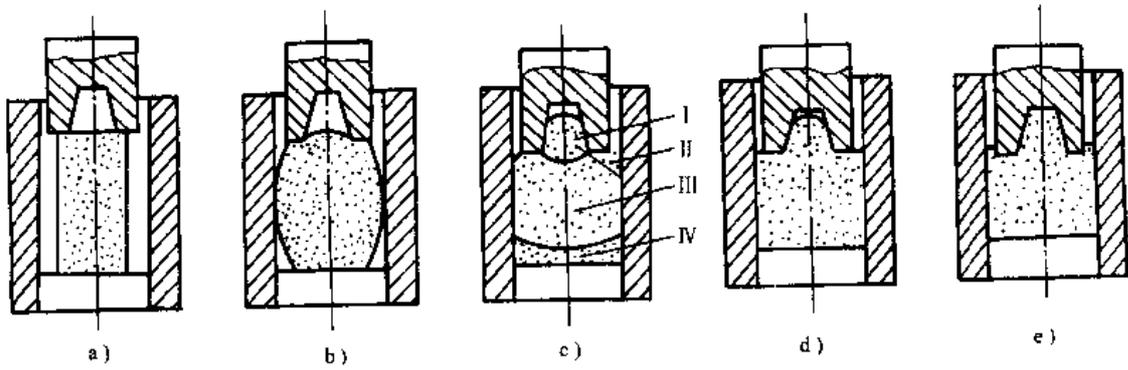


图 5-23 粉锻压入成形过程

a) 开始接触 b) 孔板锻粗 c) 充满角部 d) 充满型腔 e) 压实与形成毛刺

粉锻中的塑性变形与致密是互相渗透的,然而致密与变形所占比例各个阶段有所不同。当金属具有宏观塑性变形时,孔隙被拉长、压合以致闭合,所需变形力较小,而且易于破坏孔洞表面的氧化物及夹杂,见图 5-24。由于大量孔洞在塑性变形过程中闭合,当充满型腔后,仅需在最终复压阶段锻合少量残余孔洞,因此可以得到最佳致密效果。

但是必须指出,由于烧结体残存约 20%~30% 的孔隙度,塑性较低,因此宏观塑性变形量受到限制。例如闭式锻粗初期烧结体自由锻粗时,鼓形表面存在切向拉应力,易出现裂纹。当塑性较好时,开裂呈正裂形式,见图 5-25a;塑性较差时,开裂呈剪裂形式,见图 5-25b。此外,由于端面滑移可能产生端面开裂,环形件锻粗时由于不均匀锻粗成形可能产生纵向开裂,见图 5-25c。

而在压入成形时,由于金属的不均匀流动,可能产生挤入端开裂(图 5-26a)、剪切裂纹(图 5-26b),以及挤压裂纹(图 5-26c)等多种形式。

避免这些缺陷的途径有:

- 1) 合理确定烧结体的密度以及控制密度的均匀分布,以保证烧结体有足够的塑性。
- 2) 正确设计预制坯的几何尺寸,即控制烧结体锻造时的塑性变形程度。
- 3) 正确设计模具工艺参数,减少不均匀变形。
- 4) 增加润滑。

(2) 致密效果 从闭式锻粗成形的全过程来看,致密贯穿始终,但效果不同。自由锻粗与充满角部效果好,压实及形成纵向毛刺的效果差,而其中又以充满角部效果最好。

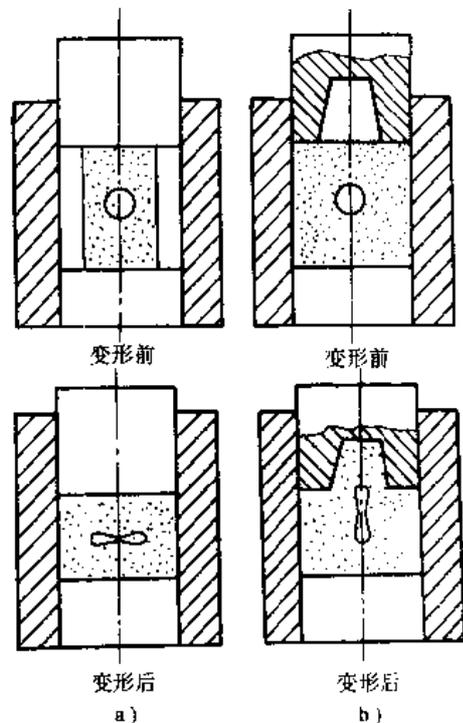


图 5-24 塑变方式对孔洞锻合的影响
a) 锻粗 b) 压入

压入成形时(图 5-23), 第一阶段和第二阶段的致密速度最高。在充满型腔阶段, 近似于挤压变形。若型腔无斜度时, 压入部分即 I 区作平移动, 大变形区(II 区)向下移动, 死区 III 与不变形区 IV 基本上不变化(图 5-23c)。反映到变形抗力上变化不大, 仅增加变形流动的距离。在压实及形成毛刺阶段, 可继续增加致密作用, 但与镦粗成形相同, 所需变形力或功极大。

从密度与性能分布来看, 压入部分的顶端最差, 其次是 I 和 IV 区, II 区即大变形区的密度及性能最好。图 5-27 为实测密度分布纵断面图。

复压时致密方式是压实致密。密度最难提高, 孔洞难于焊合, 得到同一密度, 所需变形力最大。而镦粗方式和压入方式在变形初期均有较大的塑变致密过程, 最后阶段或多或少存在一个复压过程。因此若变形力一样, 变形程度达一定值, 最终的致密效果总高于复压形式。

3. 应力状态对致密的影响

由塑性理论可知, 一点的应力状态可分为静水压分量和应力偏量。在镦粗变形时, 应力偏量最大, 静水压分力最小; 在复压状态, 应力偏量最小, 静水压分力最大; 平面应变时, 介于两者之间。在应力偏量作用下, 将产生宏观金属流动, 易于消除孔洞, 使烧结体致密化。静水压条件虽然也可产生压实致密, 但需要极高的压力。

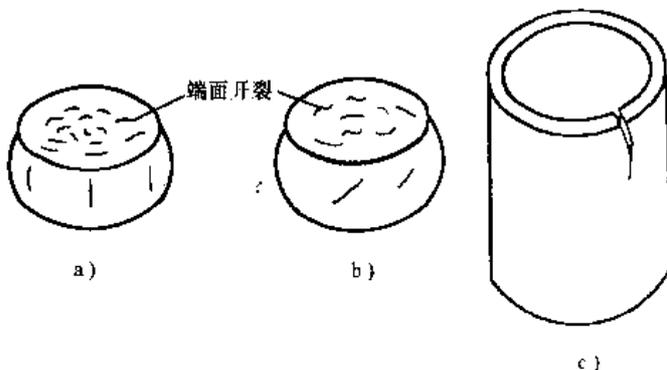


图 5-25 镦粗成形时裂纹的种类

a) 侧面正裂 b) 侧面剪裂 c) 纵向端裂

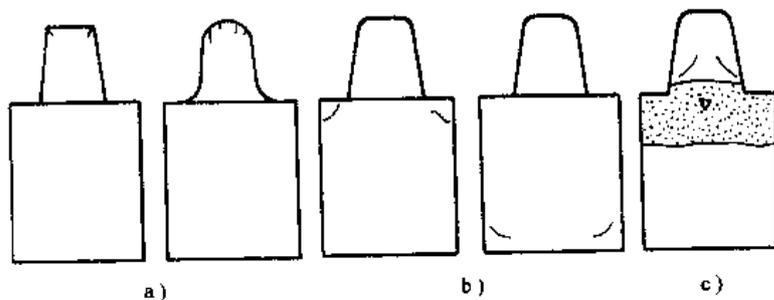


图 5-26 压入成形时裂纹的类型
a) 挤入端开裂 b) 剪切裂纹 c) 挤压裂纹

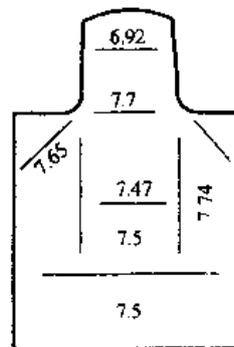


图 5-27 压入成形时的密度分布
(试件 $\rho_0 = 6.0g/cm^3$)

通过把所施加的应力分解为静水压分量和应力偏量, 研究了对应三种简单变形方式的静水压应力分量和应力偏量与密度的关系, 如图 5-28 示。自由镦粗时致密化最为容易, 复压时致密化最为困难, 平面应变时介于其间。

至于致密化所需应力, 以镦粗形式时为最小、平面应变时其次, 而复压时为最大。这点从图 5-29 的实验曲线中可以清楚看出。

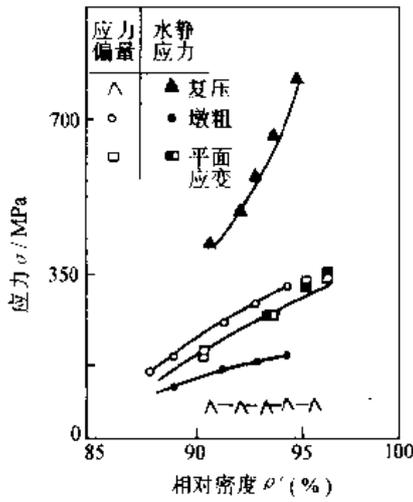


图 5-28 对应于三种变形方式的静水压分量 and 应力偏量与密度的关系

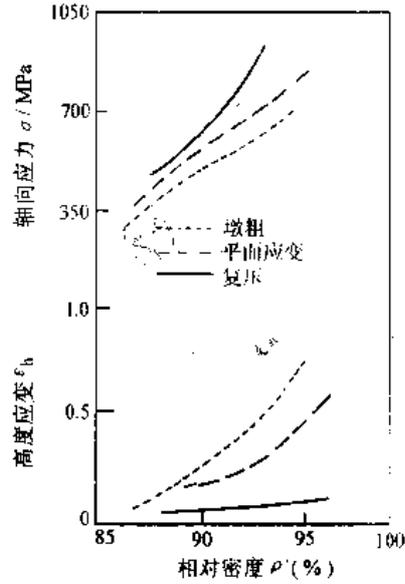


图 5-29 对应于三种变形方式的高度应变和轴向应力与密度的关系

第六节 粉锻模具设计及对设备的要求

1. 粉锻模具设计与使用

粉锻模的结构设计与精密模锻的锻模设计极为相似，但也有一些特殊之处。

对于等高型粉锻件，均应采用闭式锻模结构。由于粉锻工艺采用粉末压制模制坯，易于满足闭式模锻的工艺条件，如能准确控制重量，可以靠毛坯外形或内孔准确定位。粉锻设备大多有顶出装置，易于使锻件脱模。在采用闭式模锻时，要使冲芯或模垫与凹模之间的间隙控制适当，防止纵向飞刺的产生，同时便于冲芯进入凹模。

对于非等高型粉锻件，如果小断面的部分靠轴向压入成形，如法兰类零件的柄部，也可采用闭式模锻成形，如果断面不同的两部分均靠墩粗，必要时可采用浮动凹模结构。

当粉锻圆锥齿轮这类两头小中间大的产品时，可以用开式锻模，以大端为分模面，将型腔为上下两部分。但为了防止产生过大的飞边，保证型腔的充满，上模分为两件，以实现锻前的封模，基本上做到不产生飞边或仅生成小飞边。此外设计时可考虑将形状复杂的凹模部分置于上模，以减少模具受热和毛坯的热损失，并利用设备的打击惯性，获得饱满的外形，延长模具的寿命。

图 5-30 所示的粉锻模的典型结构。设计时应保证模具上易于磨损的模块便于更换。一般情况下粉锻模寿命至少应达到 5000~10000 件。

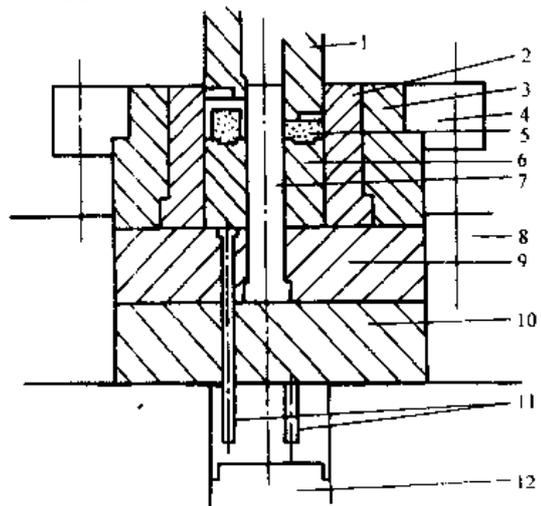


图 5-30 粉末锻造模具结构

- 1—上凸模 2—凹模 3—预应力圈 4—紧固圈
- 5—锻件 6—下凸模 7—芯棒 8—模座 9—垫块
- 10—支承垫块 11—顶出杆 12—压机顶出机构

锻造时，模具的润滑和预热是两个重要的因素，为了保证锻件质量，提高模具寿命，降低变形阻力，有利于预成形坯充满模具型腔。同时也是为了减小锻件表面或局部表面低密度层厚度的重要措施。预成形坯与模具表面接触，因受到激冷，可能得不到完全致密，因而提高变形速度，减少预成形坯与锻模之间的接触时间；模具预热，减少模具与高温毛坯的温差；充分良好的润滑，均有利于克服锻件表面低密度层的形成。

模具温度开始时应预热到 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，但过高的模具温度会降低模具寿命，连续自动生产线生产时，模具温度应能自动控制。

一般选择水基石墨悬浮液或胶体石墨悬浮液作为粉锻润滑剂，也有采用水溶性玻璃润滑剂，均以喷涂的方法，喷涂在模具或预成形坯表面。

2. 应用实例

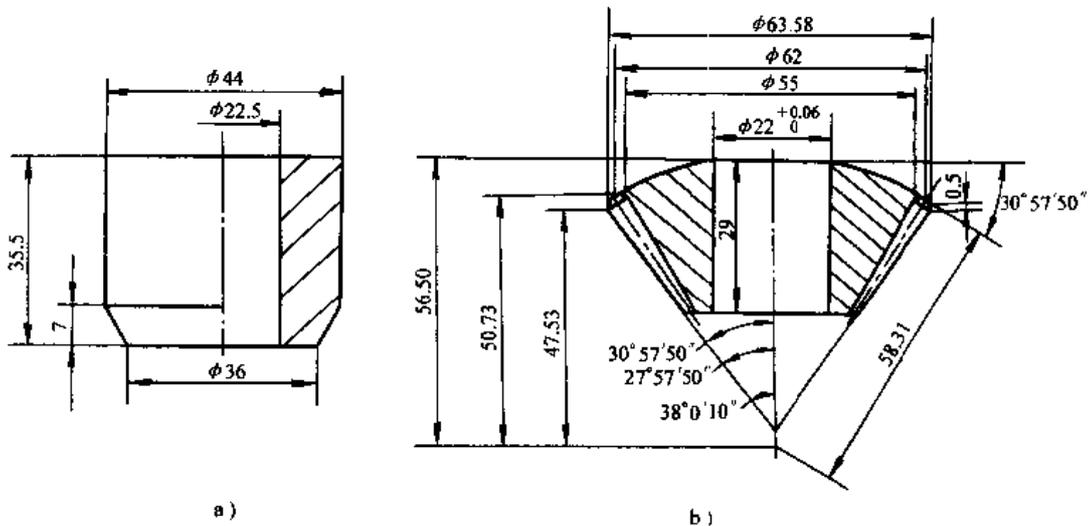


图 5-31 NJ-130 汽车行星齿轮预成形坯与锻件图

a) 预成形坯 b) 锻件

粉末烧结锻造 NJ-130 汽车后桥行星齿轮，其预成形坯和锻件如图 5-31 所示。锻造用模具结构如图 5-32 所示。

NJ-130 汽车后桥行星齿轮，原采用 18CrMnTi 钢制造。采用粉末烧结锻造生产该齿轮，选用 Fe-Mo 共还原粉，其预成形坯的化学成分为： $w_{\text{C}}0.4\%\sim 0.45\%$ ， $w_{\text{Mo}}0.38\%\sim 0.44\%$ ， $w_{\text{Cu}}2\%$ ，余量为 Fe。外加 $W_{\text{硬脂酸锌}}0.4\%$ 和 $w_{20\text{号机油}}0.1\%$ ，经混粉后进行压制。压制是在 1250kN 粉末自动压机上进行。预成形坯重量控制在 $262\pm 2\text{g}$ ，密度为 $6.5\sim 6.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。其主要工艺如下：

(1) 烧结 烧结是在分解氨保护气氛的钼丝烧结炉内进行，烧结温度为 $1120\sim 1180^{\circ}\text{C}$ ，保温时间 1.5~2.0h。烧结后检查预成形坯离表层 3~3.5mm 处含碳量， w_{C} 为 $0.28\pm 0.07\%$ 的合格。

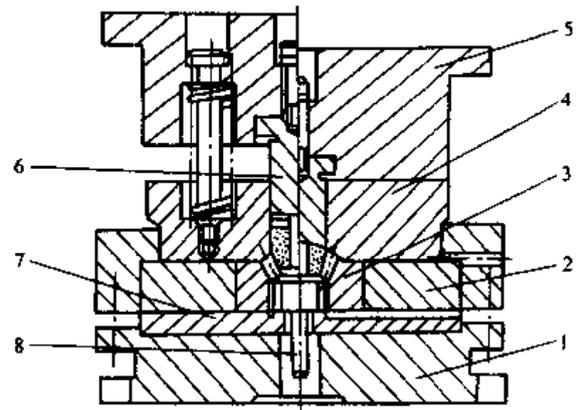


图 5-32 NJ-130 汽车行星齿轮
粉末锻造模具结构图

1—下模座 2—预应力圈 3—凹模 4—导向模块
5—上模座 6—凸模 7—垫块 8—顶杆

(2) 锻前加热及锻造 锻前加热是在氮气保护下的 100kW、2500Hz 可控硅中频感应加热

装置内进行。加热温度控制在 $900^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ 范围内，加热时间为 $10 \sim 15\text{s}$ 。取出后立即在 3000kN 摩擦压力机上进行锻造，空气中暴露时间不应大于 4s 。然后利用锻后余热（约在 800°C 左右）在 1000kN 压力机上精整。润滑剂采用水基胶体石墨，模具温度应控制在 300°C 左右。锻件密度在 $7.75\text{g}/\text{cm}^3$ ，应大于理论密度的 98% 以上，在 800kN 冲床切去小飞边。

(3) 锻后热处理 锻件在井式炉中进行气体渗碳，渗碳温度为 930°C ，保温 2.5h ， 880°C 出炉直接油淬。然后在盐浴炉中加热至 860°C 进行二次油淬，再加热到 180°C 回火 1.5h 。渗碳层应控制在 $0.75 \sim 1.00\text{mm}$ 之间，表面层 w_c 应为 $0.75\% \sim 0.9\%$ ，表面硬度 $> 50\text{HRC}$ ，心部硬度 $> 30\text{HRC}$ 。

3. 粉末锻造对设备的要求

粉末锻造对设备的基本要求为：

- 1) 满足粉末锻造的力、能量及精度的要求；
- 2) 工作速度要合适，即每分钟行程次数，加压保持时间和加压速度等要合适；
- 3) 粉锻常采用单型腔模锻，应有顶出装置或模具能翻转脱模，以便能迅速方便地脱模。

常用的模锻设备中，摩擦压力机、高速锤、热模锻压力机等均能较好地进行粉锻。自由锻锤在某些特定条件下也能满足粉锻工艺要求。

我国目前主要使用机械压力机和高精度摩擦压力机进行粉末锻造。在自由锻锤上用锻模对一些批量不大而重量较大的零件进行粉锻也是可行的，胎模设计应力求结构简单，操作方便，定位可靠。

第七节 粉末热等静压和粉末喷射锻造

1. 粉末热等静压 (HIP)

热等静压 (HIP) 是将粉末体在高温高压下致密成形技术，高温下传力介质一般为惰性气体。为了提高生产率，近年来出现了快速 HIP 设备，如瑞士 ASEA 通用电气公司，已经将热等静压标准化、系列化、商业化并畅销世界各地。我国也能自制热等静压机。

典型的 HIP 如图 5-33 所示。HIP 是将粉末在静水压力下，高温高压下的固结过程，没有宏观塑性流动（只有微观粉末颗粒的塑性变形充填空隙），仅有体积变化，与一般粉末锻相比纯属压实致密。

一种是有包套的热等静压，主要用于生产高性能材料，不需要活化烧结的添加剂，几乎达到完全致密。HIP 一般采用雾化的预合粉末，直接装入包套内，抽真空并封焊，先进行冷等静压，然后进行热等静压。包套材料一般选择金属、玻璃和陶瓷。

另一种是无包套的热等静压，主要用于成

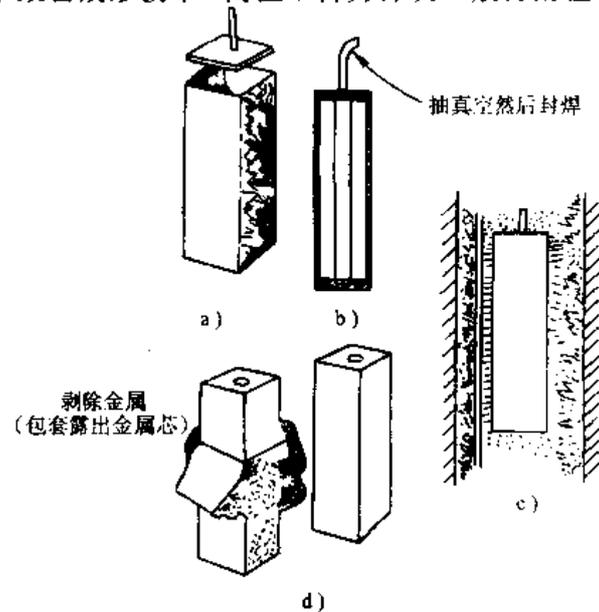


图 5-33 热等静压过程示意

- a) 成形件组装的金属包套 b) 装粉和密封后的包套
c) 高温气体压制 d) 剥除金属包套和致密锭

形复杂形状高性能金属零件和结构陶瓷制品。该方法是将烧结至一定密度的预成形坯，经热等静压成形，这样消除了包套材料选择和加工的困难，降低了成本，提高了生产效率。

HIP 技术应用越来越广泛，主要用于生产高速钢、高温耐热合金、钛合金、不锈钢、硬质合金、磁性材料、结构陶瓷及其重要结构件。还可进行 HIP 扩散连接成形，在高温下将两种相同或不同材料结合在一起，并获得满意的强度。

2. 粉末准等静压法

由于 HIP 法设备昂贵，生产周期长，效率低，虽然制品性能优良，但成本高。准 HIP 目前主要有两类方法。

(1) STAMP 法 该方法主要特点是将真空或大气中熔融金属或合金用氮气朝水平方向喷雾、获得球状雾化粉末，粉末含氧量（质量分数）在 $100 \times 10^{-4}\%$ 以下，如图 5-34 所示。将粉末装入容器内脱气，封焊等工序与 HIP 方法相同。连同容器加热至成形温度后，装入封闭模，用液压机压制 5min 使之致密化。与 HIP 方法相比，成形条件为低温高压。然后再进行锻造成形。其制品组织和性能与 HIP 法无区别。如用该法生产的 AISI₄₁₅₀ (Cr-Mo 钢)，AISI₄₂₂ ($w_{Cr}12\%$ 耐热不锈钢)、AISI₅₂₉ (铁素体不锈钢) 的力学性能几乎无区别。

(2) CERACON 法 HIP 方法用氮气作压力介质，而这种方法采用固体陶瓷粒作为压力传递介质。CERACON (Ceramic Granular Consolidation) 法的预成形坯与烧结锻造相同，采用传统的粉末冶金方法。如图 5-35 所示，将预成形坯放入保护气氛中加热到成形温度，将压力介质陶瓷粒加热至同样温度，填充到压力容器内，然后用机械手把加热好的预成坯放入压力容器里，施以单向压力使之致密化。加压时间与粉末锻相同，仅用几秒钟即可完成致密过程。

该方法生产效率高，可生产形状复杂的金属制品，如生产扳手、小型连杆、齿轮等。也可利用于生产低合金钢、不锈钢、铜合金、钛合金等。这种方法的关键是选择合适的陶瓷粒，陶瓷粒不仅在高温下要有足够强度，而且本身不会烧结，也不与预成形坯材料发生反应。其次要求形状和粒度必须满足压力传递均匀要求。目前使用的是 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ 球形氧化铝粒子，并混入适当量的石墨粉。该方法如果只施加单向压力不能达到 HIP 效果。因此要求施加 1.5~2 倍轴向压力，才能达到 HIP 效果。例如相对密度为 80% 的 AISI₆₅₀ 粉末预成形坯，经烧结后，在 1065°C 和 441MPa 压力下可到高密度。其性能与一般铸锻材料相当。

3. 粉末喷射锻造法 (Osprey)

粉末喷射(喷雾)锻造工艺过程如图 5-36 所示。该方法是采用高速氮气喷射金属液流，雾化的粉末落下，沉积到预成形的模具中。沉积的预成形坯的密度很高，相对密度可达 99%。将预成形坯从雾化室中取出，放在保温加热炉内，当预成形坯加热到锻造温度后，立即进行锻造，得到近乎完全致密的锻件。然后送到切边压力机切边获得成品锻件。

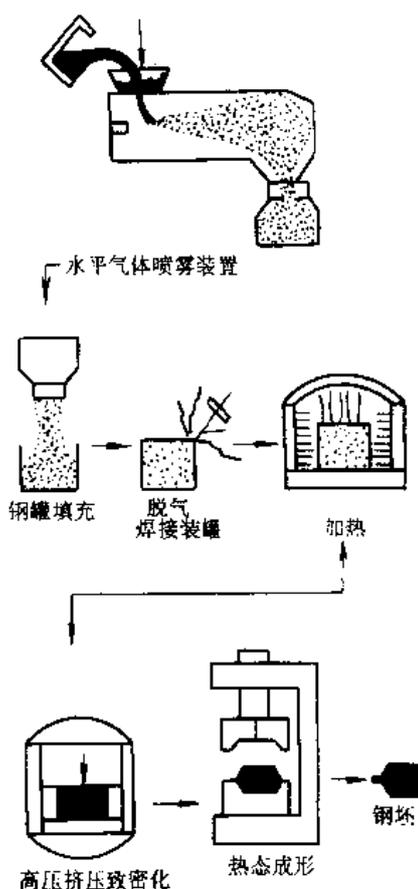


图 5-34 STAMP 法过程示意

该方法比较适合大型锻件的成形。还可以进行喷射轧制；喷射挤压。采用离心喷射沉积等方法制造板材、型材和大型薄壁筒形件。

喷射成形和塑性加工结合，是将雾化方法生产金属粉末与锻压成形有机结合在一起，从熔融金属到锻件材料利用率达90%以上。与传统铸锻和粉末锻造工艺相比，大大节约能源。采用喷射锻造制件的性能优于普通铸锻件的性能，并且不存在各向异性现象。因此是一项很有应用前景的工艺方法。

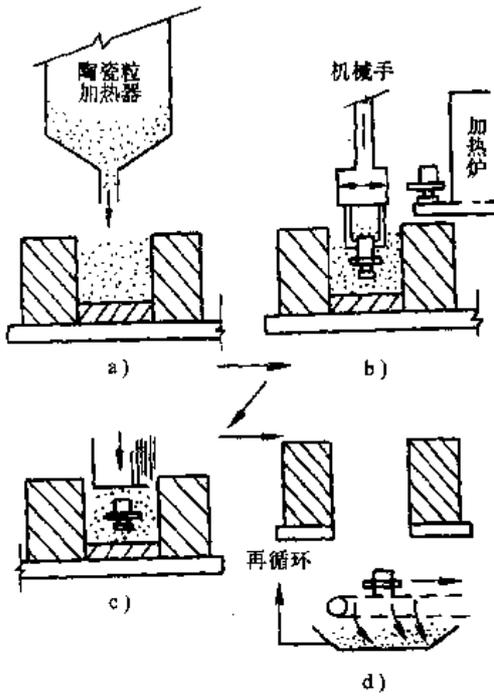


图 5-35 CERACON 方法示意

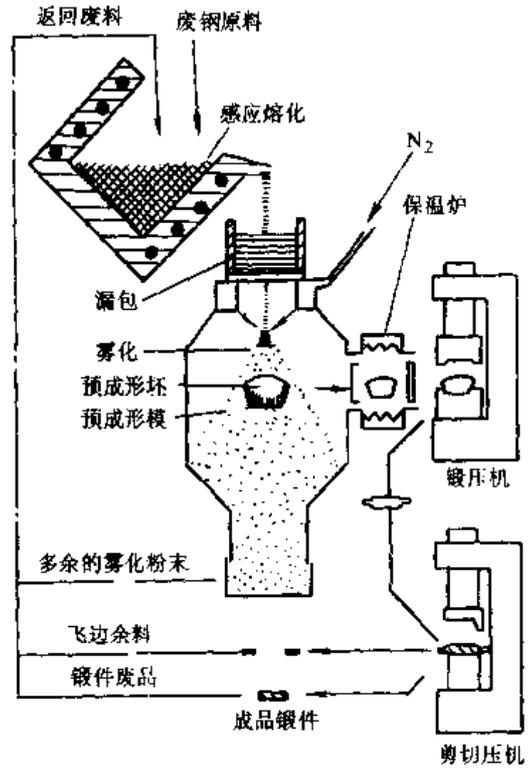


图 5-36 喷射锻造过程示意

第六章 精冲工艺及模具设计

第一节 概 述

精冲是在普通冲裁工艺的基础上发展起来的,根据所采用的模具结构及动作方式、工艺过程和材料变形特征,精冲工艺主要有强力无板式精冲、对向凹模精冲、负间隙精冲、往复精冲、精冲孔、冲深孔等。近年来精冲技术发展迅速,其特点是:

1) 精冲复合工艺有了很大发展,如精冲压印、精冲弯曲、精冲挤压、精冲浅拉深等。目前采用精冲复合工艺生产的零件约占全部精冲件的 20% 左右。

2) 精冲由薄板向厚板方向发展,最厚的精冲件达 25mm。

3) 多工位精冲工艺有了很大发展,有利于实现精冲复合工艺或解决精冲模具强度等问题。

4) 精冲的材料范围不断扩大,除了许多常用材料供料时均已球化处理专供精冲外,还出现了适于精冲的高强度微量合金细晶粒钢,使高强度厚板零件实现精冲成为可能,从而扩大了精冲的使用范围。

5) 实现铸、锻、焊件的精冲化。它是上述各项技术的综合发展的集中体现,许多铸锻毛坯切削加工零件,切削加工后用铆、焊组装的零件都可用厚板精冲复合工艺来加工。

6) 精冲设备性能改善并实现了单机自动化等。

一、精冲变形过程及应力分析

1. 精冲变形过程

图 6-1 所示为精冲工艺的全过程。a 为初始位置; b 为模具闭合, V 形环压边圈和反压板压紧材料; c 为板料在完全压紧时开始冲裁; d 为冲裁结束,工件和废料分别进入凹模和凸模; e 为模具开启,压力释放; f 为卸料、顶料; g 为顶出工件,开始送料; h 为吹出工件及废料; i 为送料结束,完成一个工作循环,准备下一个循环。

要了解精密冲裁过程及其机理与普通冲裁过程及其机理的不同,首先需简要地分析普通冲裁过程及其机理。按日本中川威雄教授的解释,普通冲裁过程可归结为四个阶段,即:①压流变形阶段:此阶段包含由弹性变形到塑性变形两个阶段,此时,反映在零件上是出现塌角;②剪切变形阶段:当凸模继续下行,进入板料一定深度时,板料金属停止向孔周流动,大量挤入凹模洞口,反映在零件上是出现光亮的剪切带;③裂纹扩展阶段:当凸模施加的压力达到板料金属的抗剪强度时,首先在发生应力集中的刃口处产生显微裂纹,进而裂纹在板料内部扩展,反映在零件上是出现了剪裂带;④分离阶段:当凸模下行至凹模刃口上表面一很小距离(约 0.1~0.2mm)时,零件与板料完全分离,然后,零件被推出,反映在零件上是出现毛刺。如图 6-2 所示。

这四个阶段,一方面可以说明普通冲裁的过程与变形机理,同时,也可解释冲裁件表面依次出现塌角、光亮带、剪切带和毛刺等特点。

仍按中川威雄的解释来分析,在普通冲裁时,凸模和凹模尖角的连线处为剪切应力区,而

在凸模刃口下方和凹模刃口上方为压应力区，上、下两个圆角附近区域为拉应力区，如图6-3所示。如果从切应力区（剖面线表示的区域）取出一微元体，看其应力状态，则纯剪可以用大小相等、方向相反的一拉一压的正应力代替。这正好与拉应力区（+表示的区域）、压应力区（-表示的区域）相对应，由此可以看出上述关于压应力区与拉应力区分布的分析是具有一定的理论与实验基础的。

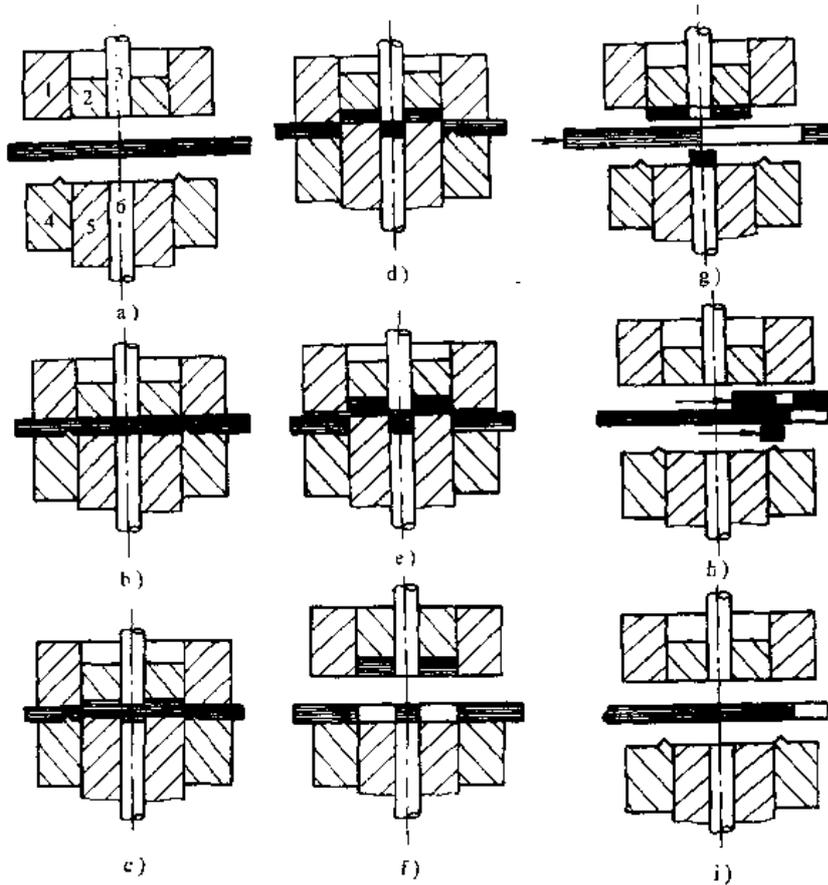


图 6-1 精冲工艺全过程

1--凹模 2--反压板 3--冲孔凸模 4--V形环压边圈 5--凸凹模 6--顶杆

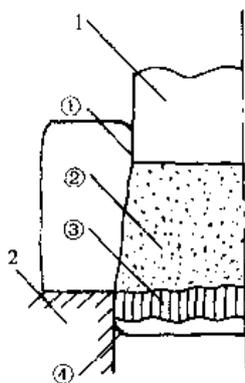


图 6-2 普通冲裁过程示意
1—凸模 2—凹模
①毛刺 ②剪裂带 ③光亮带 ④塌角

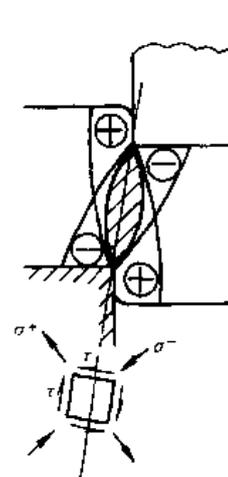


图 6-3 普通冲裁时应力状态的分析

正因为普通冲裁时不可避免地存在有拉应力区,故零件冲裁面上也不可避免地存在剪裂带。

针对普通冲裁时存在拉应力区、零件上存在被剪裂而出现剪裂带表面质量不好的原因,精冲则采用V形环压边圈、小间隙(仅为普通冲裁的10%左右)、反压力、凹(凸)模刃口处加小圆角等多项工艺措施(如图6-4所示),在精冲变形开始前,首先对板料毛坯变形区内、外、上下施加单位压力接近于板料金属屈服点 σ_s 的压力,且在整个精冲过程中保持不变。这些措施消除了普通冲裁时存在的拉应力,增大静水压力,将应力状态改变为三向压应力状态,防止剪裂纹的产生,使精冲过程变成类似于挤压变形的塑性流动。根据实验,当板料厚度被精冲到80%左右时,变形区内仍看不到剪裂纹,而且金属流线连续、零件表面光滑。

要说精冲过程中仍然存在一点剪裂的话,那也是在精冲过程即将完成的最后阶段,此时V形环压边圈对板料的压应力减弱,导致变形区中材料产生显微裂纹,但由于这部分显微裂纹一方面比较细小,且深度不深,另一方面在零件被挤出凹模时,实际上被挤光了,因此,精冲面上仍然看不到多少剪裂带而呈现为光亮表面。

2. 精冲变形区的受力分析

精冲时作用于材料的外力和变形区的应力,如图6-5所示。图中:

P_y ——凸模作用于材料的冲压力;

$$P_y = P'_y + P''_y$$

P''_y ——顶件反力;

P'_y ——冲裁力;

P_v ——V形齿内边作用于材料的力;

N ——作用于材料的侧向压力;

F_x, F_y ——模具表面作用于材料的摩擦力。

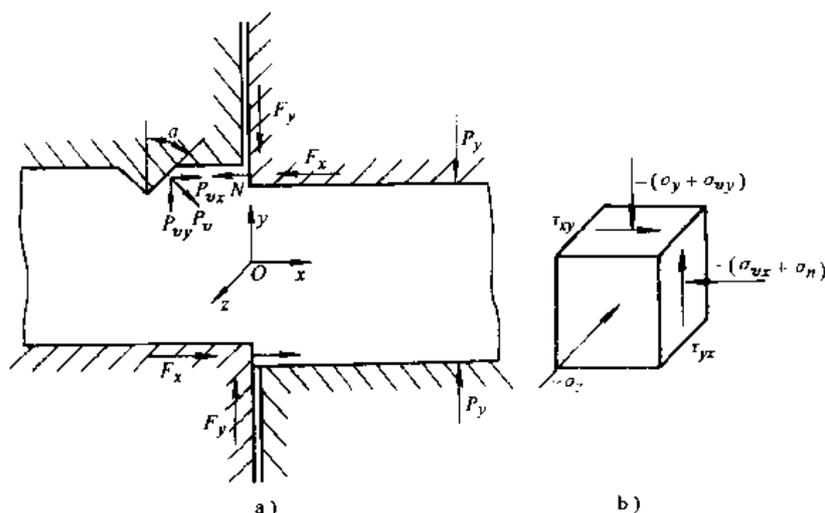


图 6-5 精冲时作用于材料的外力及变形区承受的应力

(1) 变形区内任一点的应力张量 在变形区内任一点 O 取坐标系 xyz , 在该处取一基元六面体, 其上作用的应力示于图 6-5b。 σ_y 系由 P_y 引起的正应力, σ_{vx} 、 σ_{vy} 分别由 P_x 在 x 方向的分量 P_{vx} 和 y 方向的分量 P_{vy} 引起的正应力, σ_n 为侧向力 N 引起的正应力, σ_z 为模具等对材料的约束作用引起的正应力, 切应力由外擦力而引起。

O 点的应力张量以 T_o 表示

$$T_o = T'_o + T''_o$$

式中 T'_o —— 球形应力张量;

T''_o —— 应力偏量。

$$T_o = \begin{Bmatrix} -\sigma_{vx} + \sigma_n & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & -(\sigma_y + \sigma_{vy}) & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_m \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\frac{2}{3}(\sigma_{vx} + \sigma_n) + \frac{1}{3}(\sigma_y + \sigma_{vy} + \sigma_z) & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \frac{1}{3}(\sigma_{vx} + \sigma_n + \sigma_z) - \frac{2}{3}(\sigma_y + \sigma_{vy}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{3}\sigma_z + \frac{1}{3}\sigma_{vx} + \sigma_n + \sigma_y + \sigma_{vy} \end{Bmatrix}$$

$$T''_o = \begin{Bmatrix} -\sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_m \end{Bmatrix} \quad -\sigma_m = -\frac{1}{3}(\sigma_{vx} + \sigma_n + \sigma_y + \sigma_{vy} + \sigma_z)$$

球形应力张量系 O 点所受的静水压, 它影响该点材料的塑性。

$$T''_o = \begin{Bmatrix} -\frac{2}{3}(\sigma_{vx} + \sigma_n) + \frac{1}{3}(\sigma_y + \sigma_{vy} + \sigma_z) & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \frac{1}{3}(\sigma_{vx} + \sigma_n + \sigma_z) - \frac{2}{3}(\sigma_y + \sigma_{vy}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{3}\sigma_z + \frac{1}{3}(\sigma_{vx} + \sigma_n + \sigma_y + \sigma_{vy}) \end{Bmatrix}$$

应力偏量 T''_o 包括一对切应力 τ_{xy} 、 τ_{yx} 和由

$$\pm \frac{2}{3} \left[(\sigma_{vx} + \sigma_n) - \frac{1}{3}(\sigma_y + \sigma_{vy} + \sigma_z) \right],$$

$$\pm \left[\frac{2}{3}(\sigma_y + \sigma_{vy}) - \frac{1}{3}(\sigma_{vx} + \sigma_n + \sigma_z) \right]$$

构成的两对切应力, 应力偏量使材料在精冲过程中产生塑性变形。

(2) 关于提高变形区静水压力的分析 精冲时变形区的球形应力张量为:

$$T'_o = \begin{Bmatrix} -\sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_m \end{Bmatrix}$$

是该区所受的静压力, 而

$$-\sigma_m = -\frac{1}{3}(\sigma_{vx} + \sigma_n + \sigma_y + \sigma_{vy} + \sigma_z)$$

从上式可以知道影响变形区静水压力的因素,从而找到最高静水压的途径:

1) 增大 σ_y 。 $\sigma_y = \sigma'_y + \sigma''_y$, σ'_y 系冲裁力所引起的正应力, σ'_y 在材料一定时为一定值, σ''_y 系顶件反力 P''_y 所引起的正应力, 因此增加 σ_y 只能通过增加 σ''_y 来实现, 就是说增大顶件反力是提高精冲变形区静水压的途径之一。

2) 增大 σ_n 。 σ_n 为侧向力引起的正应力, 它与凸凹模间隙及刃口的圆角密切相关, 间隙偏大 σ_n 将降低, 因此小间隙是实现精冲的关键因素之一。当然采用小间隙的目的不仅是为了提高 σ_n 。在生产当中或在精冲试模时, 如果发现工件某局部出现撕裂而采取措施仍不能克服时, 可将相应部位的凹模刃口倒圆, 借增加 σ_n 来提高静水压, 作为消除局部撕裂的一种办法。

3) 增大 $(\sigma_{vx} + \sigma_{vy})$ 。因为 $\sigma_v = \sqrt{\sigma_{vx}^2 + \sigma_{vy}^2}$, 显然增大 $(\sigma_{vx} + \sigma_{vy})$ 可通过增大 P_v 来实现, 就是说增大压边力是提高精冲变形区静水压的途径之一。

4) 采用最佳压边圈齿形内角 α 。当压边力一定时, 还存在着压力圈齿形内角 α 取何值时 $(\sigma_{vx} + \sigma_{vy})$ 有最大值的问题。

由于 σ_{vx} 为 P_{vx} 引起的应力, σ_{vy} 为 P_{vy} 引起的应力, 所以 $(\sigma_{vx} + \sigma_{vy})$ 的极值问题, 可以归结为求 $(P_{vx} + P_{vy})$ 的极值问题。

由图 6-5 知:

$$\begin{aligned} P_{vx} &= P_v \cos \alpha \\ P_{vy} &= P_v \sin \alpha \\ P_{vx} + P_{vy} &= P_v (\cos \alpha + \sin \alpha) \end{aligned}$$

取极值:

$$\frac{d(P_{vx} + P_{vy})}{d\alpha} = 0$$

得
$$P_v (\cos \alpha - \sin \alpha) + dP_v (\cos \alpha + \sin \alpha) = 0$$

因压边力为一定, P_v 为定值, $dP_v = 0$

故:

$$\begin{aligned} \cos \alpha - \sin \alpha &= 0 \\ \alpha &= \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$

以上结果表明, 齿形内角 $\alpha = 45^\circ$ 时, $(P_{vx} + P_{vy})$ 或 $(\sigma_{vx} + \sigma_{vy})$ 有极大值, 此时精冲变形区内材料所受的静水压力最大。

5) 关于 σ_x 的分析。从静水压的关系中知 σ_x 增加也可提高静水压力, 但 σ_x 为模具等对材料约束而引起的应力, 它取决于工件的形廓, 在工件轮廓内凹部分 σ_x 值比较大, 这些部分压边圈的齿形不必沿工件轮廓线分布, 就能使变形区有足够大的静水压力, 从而使精冲过程获得完美的结果。

二、精冲工艺的技术指标及精冲件的质量分析

1. 精冲的尺寸公差

精冲件可达到的尺寸公差取决于: 模具的制造精度; 刃口锋利程度; 压力机性能; 润滑剂和工件材料的种类、金相组织、厚度以及精冲件几何形状的复杂程度。

根据 JB/Z 280—87 精密冲裁件质量标准的规定, 精冲件可达到的尺寸公差列于表 6-1。

精冲件的尺寸一致性好, 公差在 0.01mm 之内。

表 6-1 精冲件可达到的尺寸公差等级

材料厚度/mm	抗拉强度至 600MPa			材料厚度/mm	抗拉强度至 600MPa		
	内形 IT	外形 IT	孔距 IT		内形 IT	外形 IT	孔距 IT
0.5~1	6~7	7	7	5~6.3	8	9	8
1~2	7	7	7	6.3~8	8~9	9	8
2~3	7	7	7	8~10	9~10	10	8
3~4	7	8	7	10~12.5	9~10	10	9
4~5	7~8	8	8	12.5~16	10~11	10	9

2. 剪切面质量

精冲件剪切面质量包括表面粗糙度、表面完好率和允许的撕裂等级三项内容。

精冲时可达到的剪切面粗糙度取决于：冲切元件的表面粗糙度；刃口状态；润滑剂；压力机；工件材料的种类、金相组织和厚度。

精冲件的剪切面粗糙度根据 GB 131-83 用轮廓算术平均偏差 R_a 值评定。可达到的剪切面粗糙度为 $R_a 3.6 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ，一般为 $R_a 2.5 \sim 0.63 \mu\text{m}$ 。测量位置为沿剪切面厚度的中心部位。测量方向为垂直于剪切方向。

JB/Z 280-87 规定表面完好率分五个等级，列于表 6-2。允许的撕裂分四个等级，列于表 6-3。

表 6-2 精冲件的表面完好率等级 (%)

级别	I	II	III	IV	V
h_1	100	100	90	75	50
h_2	100	90	75	--	-

注： t 为材料厚度。

表 6-3 精冲件允许的撕裂等级

级 别	1	2	3	4
δ/mm	0.3	0.6	1	2

精冲性能最好或料厚较薄的零件，一般表面完好率可达 I 级；精冲性能良好料厚较厚的零件，一般表面完好率可达 II~III 级。

关于精冲件剪切面粗糙度的代号，按 GB 131-83 中的符号 $\sqrt{R_a}$ 表示，在符号的右上方横线上用罗马字 I、II、III、IV、V 表示表面完好率的等级，用阿拉伯数字 1、2、3、4 表示允许撕裂的等级。例如： $\sqrt{1.25}$ 表示剪切面粗糙度为 $R_a 1.25$ ，表面完好率为 2 级； $\sqrt{2.5}$ 表示表面粗糙度为 $R_a 2.5$ ，允许 2 级撕裂。

3. 剪切面垂直度

剪切面的倒锥现象是精冲的特征之一。如前所述，它是精冲过程中材料随模具刃口流动又始终保持为一个整体而产生的，它与材料的厚度和力学性能、模具结构和刃口状态以及力能参数等有关。

图 6-6 给出了可达到的剪切面垂直度公差，一般内形的垂直度比外形的高。

当料厚超过 4mm 时，在凹模平面上加 V 形环，可防止剪切面垂直度降低。厚度 4mm 以下的零件，当剪切面的垂直度要求较高时，也可以在凹模平面上加 V 形环，以满足工件的技术要求。

4. 平面度

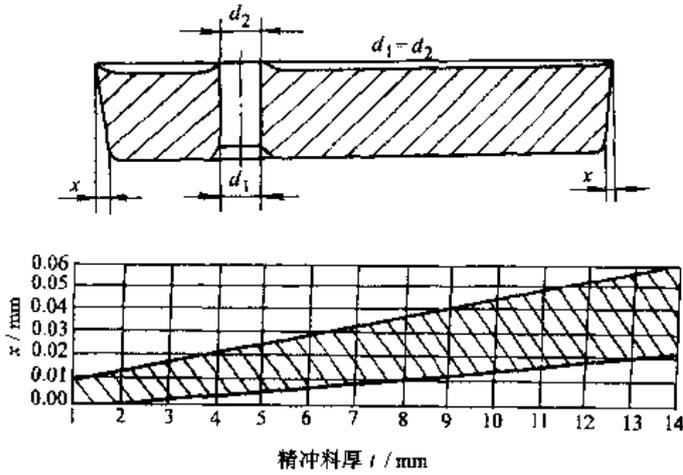


图 6-6 精冲件剪切面垂直公差

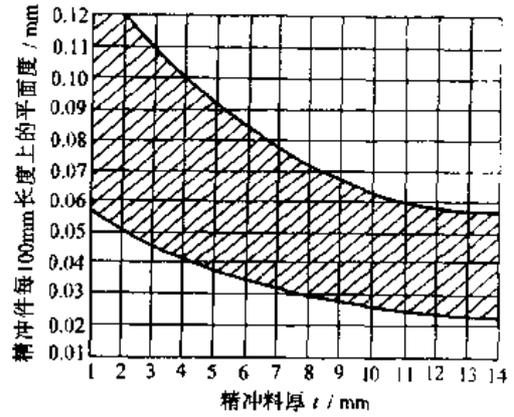
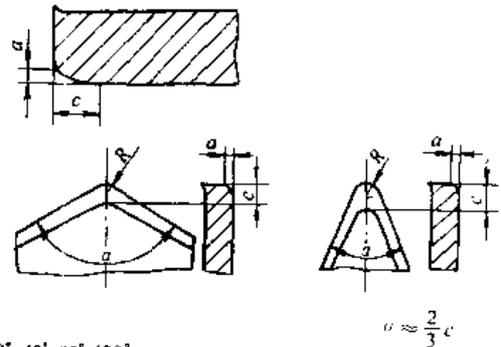


图 6-7 精冲件的平面度公差

精冲过程中，材料在压边圈和凹模、反压板和凸模的强力夹持下进行，本身就具有校平的作用，因此精冲件具有较高的平面度。图 6-7 所示为在一般条件下精冲件每 100mm 距离上的平面度公差。

一般精冲件凸模侧呈微小的中凹现象，凹模侧呈微小的中凸现象。

精冲件的平面度与材料的厚度、原始的平直度、内部的残余应力，力学性能以及精冲的力能参数等有关。



5. 塌角和毛刺

(1) 塌角 塌角的大小取决于工件的几何形状、材料的强度和厚度。在给定材料种类及厚度的条件下，圆角半径 R 和夹角 α 越小，塌角的宽度 c 和深度 d 越大。如果给定零件的圆角半径和尖角，则减小材料厚度和提高强度，会使塌角的深度和宽度减小。图 6-8 给出了最小允许圆角处最大塌角的标准值。

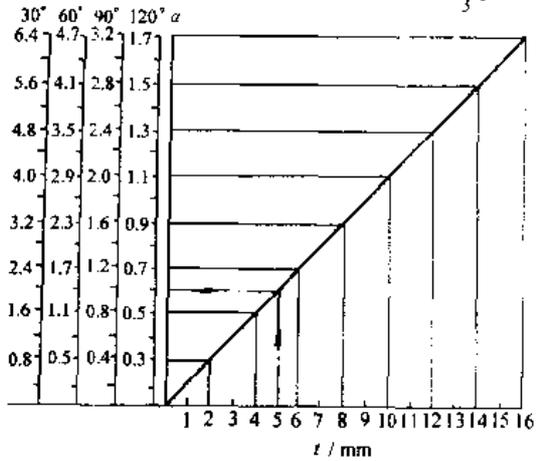


图 6-8

(2) 毛刺 精冲工艺目前还不能消除毛刺，它产生在凸模侧。其大小取决于零件的材质，模具的刃口状态，磨损程度以及零件的轮廓形状等因素。模具刃口锋利时，一般毛刺高度在 0.01~0.08mm 范围之内。

精冲件的毛刺高度，随冲裁次数增加和刃口磨损增大而增大，最后达到十分之几毫米。

第二节 精冲件结构的工艺性分析及精冲复合工艺

一、精冲件结构的工艺性分析

精冲件的工艺性是指被加工零件在精冲时的难易程度，在一般情况下，影响精冲件工艺

性能的因素有：零件的几何形状；零件的尺寸公差和形位公差；剪切面质量；材质及厚度。

其中，零件几何形状是主要影响因素。几何形状对工艺性的影响称为精冲件的结构工艺性。精冲件的几何形状在满足技术条件的前提下，应力求简单，尽可能为规则的几何形状，避免尖角。正确设计精密冲裁件有利于提高产品质量，提高模具寿命，降低生产成本。

精冲件的尺寸极限，如最小孔径、最小槽宽等都比普通冲裁的小，这是由于精冲压力机具有良好的刚性和导向精度，精冲过程速度低，冲击小；精冲模架的刚性好导向精度高；冲切零件在压边圈，反压板无松动滑配长距离的导向和支撑下，避免了纵向失稳，提高了承受载荷的能力，这一点十分重要。因此，虽然精冲时冲切零件承受的载荷要比普通冲裁大 30%~50%，甚至更大，但由于上述各种有利因素，精冲件内外形轮廓的极限尺寸要比普通冲裁的小，从而有利于扩大精冲工艺的使用范围。

实现精冲零件尺寸的极限范围，主要取决于模具强度，也与剪切面质量、模具寿命等有关。

下面分别给出圆角半径、槽宽、悬臂、环宽、孔径、孔边距、齿轮模数的极限范围图表，它将各种几何形状的零件实现精冲的难易程度分为三级： S_1 、 S_2 、 S_3 分别表示容易、中等和困难。

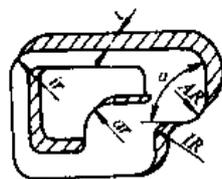
模具寿命随精冲难度的增加而降低。在 S_2 的范围内，模具冲切零件用高速工具钢 ($\sigma_{c2} = 3000\text{N/mm}^2$) 制造，要求被精冲的材料 $\sigma_b \leq 600\text{N/mm}^2$ 。在 S_3 范围以下，一般不适于精冲。

1. 圆角半径

精冲难易程度与圆角半径、料厚的关系如图 6-9 所示。

精冲件内外轮廓的拐角处必须采用圆角过渡，以保证模具的寿命及零件的质量。圆角半径在允许的范围尽可能取得大些。它和零件角度、材料、厚度及其强度有关。

例：已知零件角度 30° ，材料厚度为 3mm，半径为 1.45mm，由图 6-9 查得其加工难易程度在 S_2 和 S_3 之间。



$$\begin{aligned} IR &= 0.6AR \\ ir &= 0.6AR \\ ar &= AR \\ ir &= IR \end{aligned}$$

2. 槽宽和悬臂

精冲件槽的宽度和长度，悬臂的宽度和长度取决于零件的材料和强度，应尽可能增大它们的宽度，减小它们的长度，以提高模具寿命。

精冲难易程度与槽宽、悬臂和料厚的关系见图 6-10。

例：已知零件槽宽 a 悬臂 b 为 4mm，材料厚度 5mm，由图 6-10 查得精冲的难易程度为 S_3 。

3. 环宽

精冲难易程度与环宽和料厚的关系见图 6-11。

例：已知零件环宽 6mm，料厚 6mm，由图 6-11 查得其精冲难易程度在 S_2 和 S_3 之间。

4. 孔径和孔边距

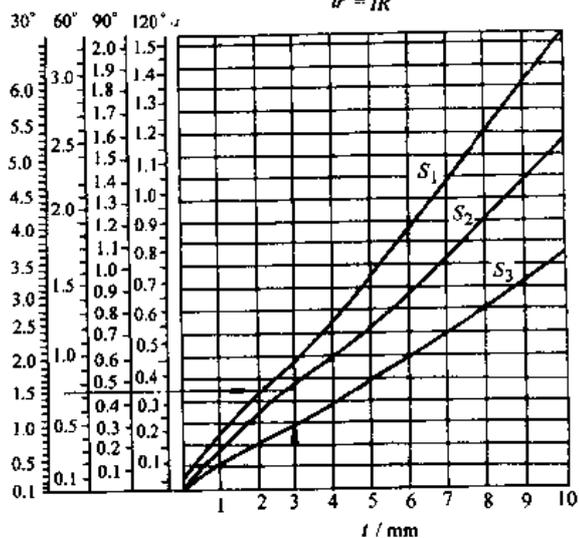


图 6-9 精冲难易程度与圆角半径、料厚的关系

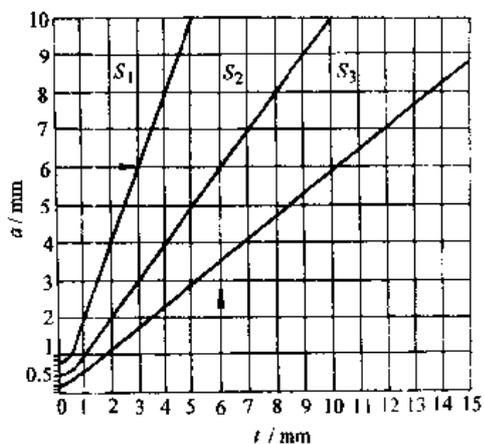
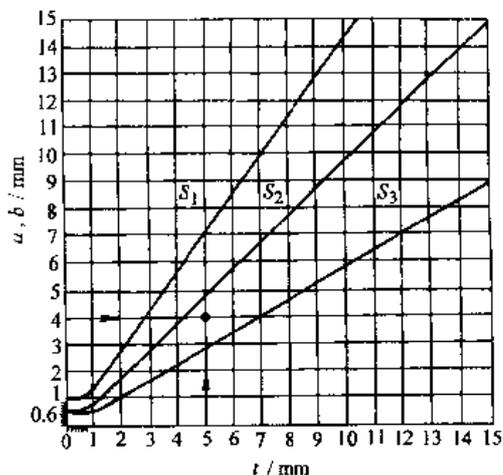
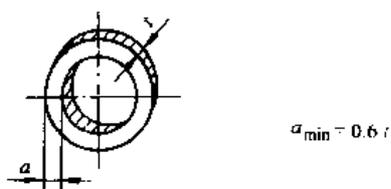
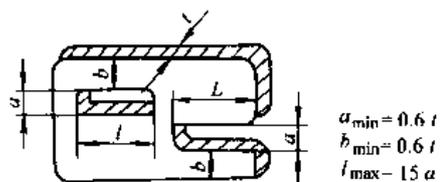


图 6-10 精冲难易程度与槽宽、悬臂和料厚的关系

图 6-11 精冲难易程度与环宽和料厚的关系

精冲难易程度与孔径、孔边距和料厚的关系见图 6-12。

例：已知零件孔径 7.5mm，料厚 5mm，由图 6-12 查得其难易程度为 S_1 。

5. 齿轮模数

精冲难易程度与齿轮模数和料厚的关系见图 6-13。

例：已知齿轮模数 1.4mm，料厚 4.5mm，由图 6-13 查得其难易程度为 S_3 。

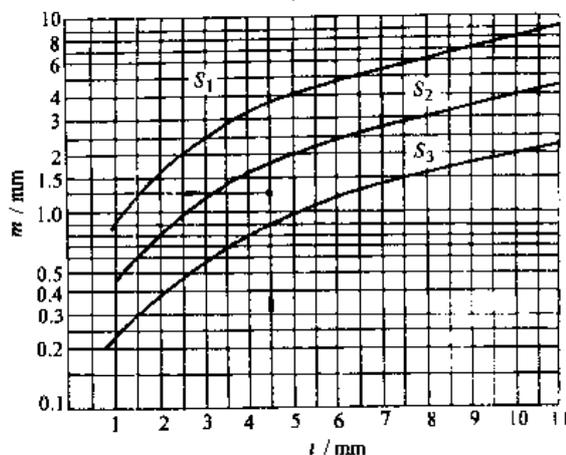
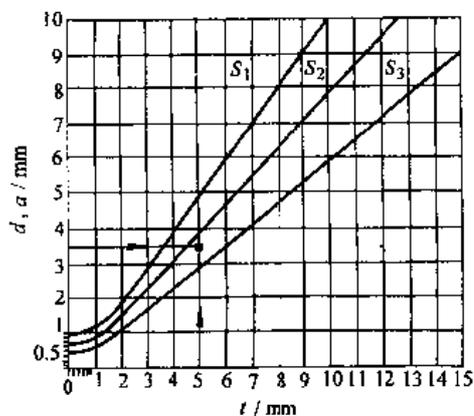
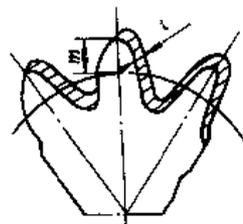
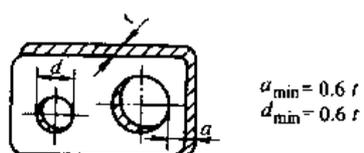


图 6-12 精冲难易程度与孔径、孔边距和料厚的关系

图 6-13 精冲难易程度与齿轮模数和料厚的关系

二、精冲复合工艺

精冲和其他工艺的复合简称精冲复合工艺，包括两种形式：一种是精冲作为精锻、冷挤、拉深等工艺的后续工序；另一种是充分利用三动精冲压力机具有三种独立可调压力的特点，在精冲过程中通过连续模或复合模及其他工艺（包括挤压、半冲孔、压扁、压印、压沉头和弯曲等工艺）的复合。精冲复合工艺具有十分显著的技术经济效果，是取代切削加工的一种先进的工艺方法。下面介绍几种主要的复合工艺。

1. 半冲孔

半冲孔是在工件上冲出凸台的一种工艺，属于精冲复合工艺中最简单的一种。

(1) 半冲孔工艺过程分析 对于普通冲裁，凸模进入料厚三分之一左右时，工件就已经和条料分离。半冲孔工艺的特点是在冲裁过程中工件和条料始终保持为一整体。其变形过程同带齿圈压边的精冲过程基本相同，如图 6-14 所示，虽然半冲孔的周边没有齿圈压边，但由于一般半冲孔均在精冲件的内部进行，半冲孔的变形部位距工件边缘较远，外部材料的刚度作用及精冲件外围齿圈压边圈的作用，可以防止半孔剪切区以外的材料在变形过程中随凸模流动。凸凹模和反压板，半冲孔凸模和顶杆的夹持作用使材料在半冲孔过程中始终保持和冲裁方向垂直而不翘起，由于半冲孔变形区的材料处于三向受压的应力状态，提高了材料的塑性，避免了精冲件的凸台部分和本体分离或产生撕裂。

(2) 半冲孔相对深度 在半冲孔过程中，半冲孔凸模进入材料的深度 h 和材料厚度 t 之比是衡量半冲孔变形程度的指标，称为半冲孔相对深度 c

$$c = \frac{h}{t}$$

半冲孔相对深度 c 和凸台同本体连接处的抗剪强度 τ 之间的关系示于图 6-15。对于塑性较好的材料，在 c 值很大 $t-h$ 很薄的情况下，凸台和本体仍为一个整体，并保持一定的强度。但是考虑到连接部分的材料由于加工硬化而变脆，在冲击载荷下凸台和本体有分离的危险，因此推荐软钢的极限半冲孔相对深度 c_{\max} 取 0.65~0.75，如图 6-15 所示。

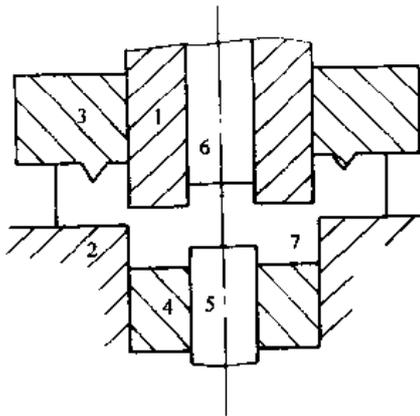


图 6-14 精冲 半冲孔复合工艺过程示意

1—凸凹模 2—凹模 3—压边圈 4—反压板
5—半冲孔凸模 6—顶杆 7—工件

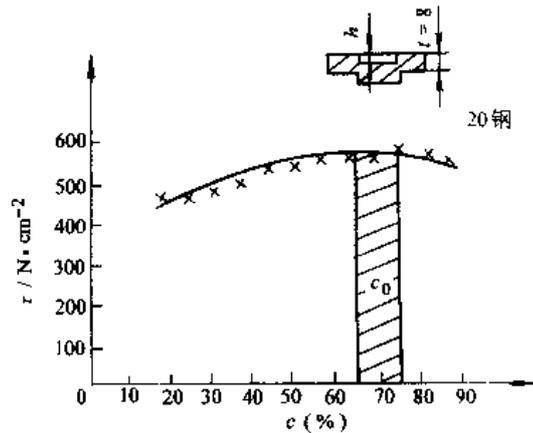


图 6-15 半冲孔相对深度 c 和连接处剪切强度 τ 的关系

试验材料：20 钢， $\sigma_b = 400 \text{ N/mm}^2$ 。
料厚 $t = 8 \text{ mm}$ ，半冲孔间隙 0.03 mm

(3) 半冲孔工艺实例 图 6-16~19 所示为单个半冲孔精冲件。图 6-20 和图 6-21 所示是由两个精冲件组成的半冲孔组合零件。这类结构一般适合于较大的零件,它是铸锻件精冲化的典型实例。图 6-20a 为链轮原来的结构,它是用锻造或锻造毛坯,通过若干道机械加工工序完成的。图 6-20b 为两个精冲件组成的零件,两个零件各自只需一道冲压工序即可完成,而且两件共用一套模具,其中一套只需将冲孔凸模相应的减短即可。图 6-21a 为原来的双联齿轮结构,它同样是用铸造或锻造毛坯,通过多道机械加工工序完成的。图 6-21b 为两个精冲件组合而成的零件。

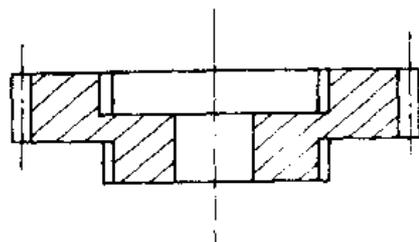
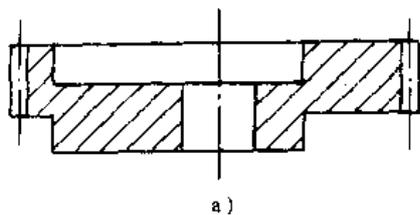
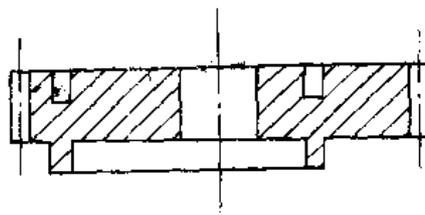


图 6-16 双联齿轮



a)



b)

图 6-17 齿轮凸轮

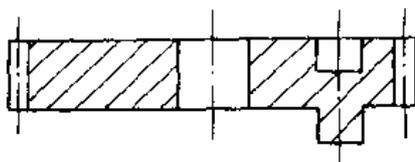


图 6-18 齿轮偏心轴

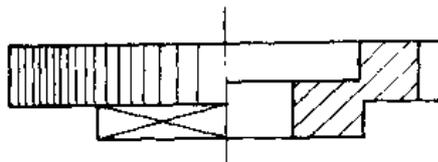
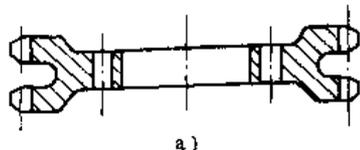


图 6-19 棘轮方形凸台

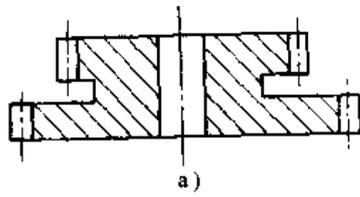


a)



b)

图 6-20 半冲孔组合件



a)



b)

图 6-21 半冲孔组合件

从图 6-20 和图 6-21 可以看出,精冲半冲孔组合件可以具有原有零件的功能,但和原工艺相比,精冲工艺可以大大缩短生产周期,提高生产率并降低成本。另外,还可看出,各种扁平类零件都有可能采用相应的精冲件组合。

精冲件组合时,连接方式除采用螺栓、铆钉及点焊方法外,还可采用精冲件本身的凸台代替铆钉进行铆接,如图 6-22 所示。

2. 精冲挤压

图 6-23 为精冲挤压复合工艺示意图,它是通过挤压凸模 6 和凸凹模 2 的型腔来实现正挤压过程。外形的精冲和一般精冲完全相同。在模具结构上,挤压凸模 6 必须低于凸模 4,以保

证外形完成精冲后挤压凸台和工件之间有足够的连接厚度，即保证先实现外表的精冲后实现内形的挤压。

精冲挤压，其内形挤压的变形程度同一般挤压一样用断面缩减率 ϵ_F 表示。通常正挤压碳钢的许用变形程度为 70%~90%。精冲时的挤压许用变形程度应该相应取得低一些，这是由于精冲模具的许用应力比冷挤压模具低，且精冲时的挤压和一般正挤压的变形条件存在很大的区别。一般正挤压时，挤压凸模的周围是凹模，毛坯被挤压凹模和凸模所封闭，加压时它只能从下部的凹模孔中挤出。精冲时的挤压，挤压凸模周围是被凸凹模和反压板夹持的毛坯，如图 6-23 所示。显然，即使在毛坯上施加较大的顶件反压力，它的刚性也远不如挤压凹模的好，因此挤压凸模下面的材料，只能被认为处于半封闭状态，当挤压的变形程度超过某一数值即单位挤压力超过某一数值时，挤压凸模下面的材料，除了挤入凸凹模的凹模孔内，还向四周流动，这是在制订精冲挤压复合工艺时必须考虑的。

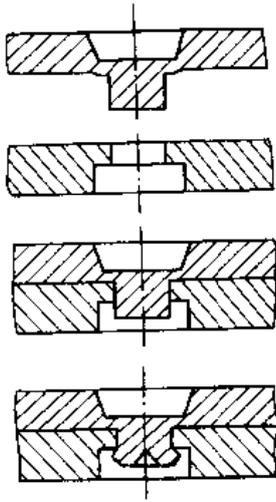


图 6-22 用于铆接的凸台

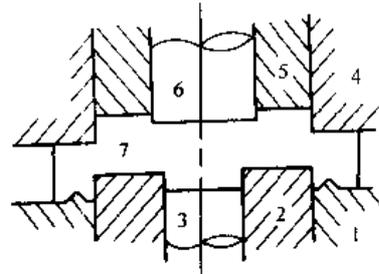


图 6-23 精冲挤压复合工艺示意

1—齿形压边圈 2—凸凹模 3—顶杆 4—凸模
5—反压板 6—挤压凸模 7—工件

3. 精冲体积成形

图 6-24 所示为精冲体积复合成形工艺。外形精冲和一般精冲完全一样，内形体积成形由凸凹模孔和顶杆端面构成为成形模腔，通过成形凸模加压来实现。精冲体积成形也应遵循先外形精冲后内形体积成形的次序，在模具结构设计上必须考虑这一特点。

体积成形时，材料沿厚度方向转移，其过程类似于一般的闭式模锻，需遵循体积不变条件来考虑模具有关部分的尺寸，即被成形凸模挤压转移的材料应等于充满成形模腔的材料。但精冲时的体积成形也和一般闭式模锻不一样，成形的材料也是处于半封闭状态，在一定条件下，同样也有可能向四周转移。

4. 压印

压印系指在工件表面上压出较浅的凹凸花纹、标记、文字、符号或刻度等，凹下的深度和凸起的高度都比较小，一般为 0.1~0.3mm。硬币、证章和各种标牌是压印的典型零件。

压印也可以和精冲复合进行，外形精冲内表面压印，在精冲压印复合模上一次完成。压印面放在工件的塌角一侧时，由反压板压印，如图 6-25a 所示；压印面放在工件毛刺一侧时，由凸模压印（如图 6-25b 所示），应尽可能采用反压板压印，以利于模具的刃磨和维修。

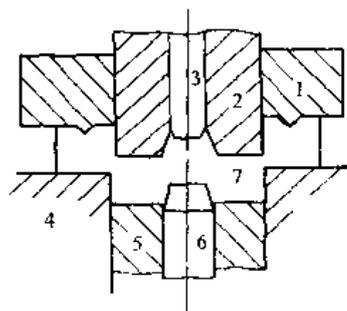


图 6-24 精冲体积成形复合工艺示意

1—齿形压边圈 2—凸凹模 3—顶杆 4—凹模
5—反压板 6—成形凸模 7—工件

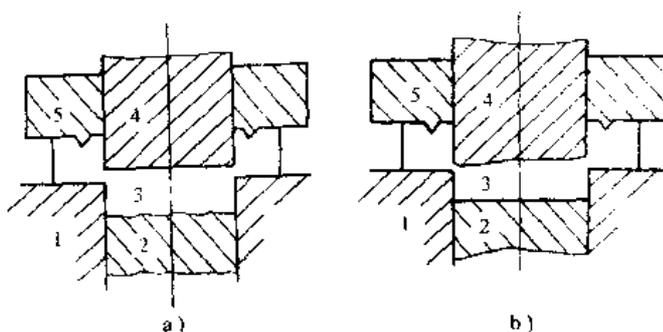


图 6-25 精冲压印复合工艺示意

a) 反压板压印 b) 凸模压印
1—凹模 2—反压板 3—工件 4—凸模 5—压边圈

压印所需压力 P 按下式计算

$$P = Aq$$

式中 A ——压印部位的投影面积 (mm^2);

q ——压印所需的单位压力 (MPa)。

q 值与压印的方式和材料等因素有关。压印凹下的线条时, q 值按压印材料的屈服点取值, 即 $q = \sigma_s$ 。压印凸起的线条或起伏的花纹时, q 值参考表 6-4 选取。

应当指出, 压印一方面要求压力机的刚性好, 封闭高度的重复精度高(多数采用精压机), 另一方面要求材料的厚度公差严, 否则会影响压印面的质量和模具寿命。精冲压印时, 材料在凸模和反压板之间完成后, 在凸模和反压板夹持下继续进行外形精冲, 此时对材料厚度公差要求不严。

5. 压扁

压扁精冲是获得不等厚精冲的另一种方法, 一般在连续模上进行。如图 6-26 所示, 压扁精冲时, 首先要冲出定位孔, 通过定位销保证每一工步的送料精度, 并在材料局部压扁的周围预先切口, 以便压扁时材料易于流动。由于局部压扁要比条料局部变厚易实现, 因此在多数情况下, 条料的厚度均按工件的最大厚度来选择。工件的其他厚度通过压扁来获得。

由于压扁精冲在连续模上进行, 条料压扁硬化后不可能进行退火, 因此压扁精冲只适于硬化指数较低的低碳钢等材料。另外, 还可以看出, 压扁精冲的技术关键主要是压扁后材料的硬化对后续精冲表面质量的影响。图 6-27 给出了 20 号钢的相对压扁量与加工硬化的实验结果。材料的厚度和强度是制订精冲工艺方案及设计精冲模具的主要原始数据。

6. 弯曲

精冲弯曲复合工艺的关键是如何根据零件弯曲形状的特征、技术要求和生产批量来选择复合的形式, 进而确定模具结构。

精冲和弯曲的复合有三种情况。

(1) 精冲和弯曲同时进行 精冲和弯曲同时进行时必须采用复合模。

1) 切口弯曲。切口弯曲可成锐角、直角和其他形状, 比较容易和精冲复合, 并同时进行。采用切口弯曲既可以实现内形弯曲, 也可实现外形弯曲, 如图 6-28 所示。

表 6-4 q 值的参考表

材 料	q / MPa
黄铜板 $t < 1.8\text{mm}$	800 ~ 900
低碳钢	1500 ~ 2000
铝或铜	1500 ~ 1800
不锈钢	2500 ~ 3000

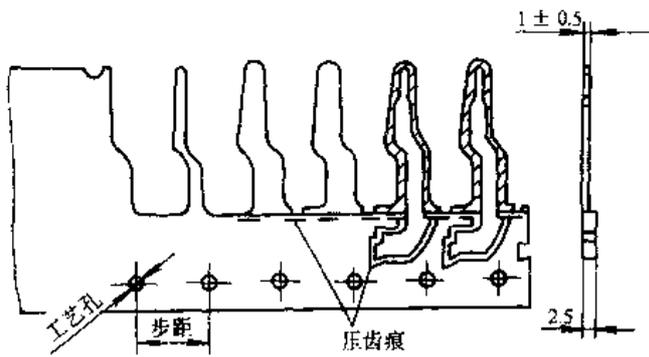


图 6-26 压扁精冲典型实例

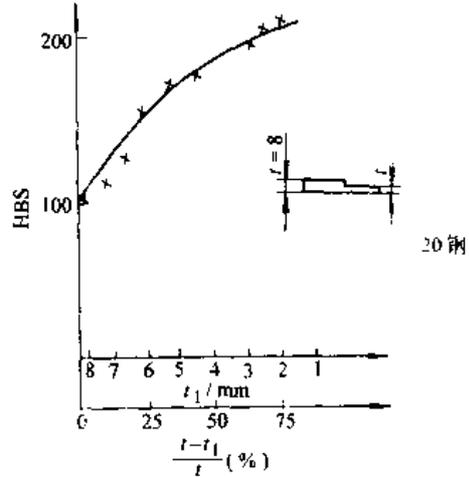


图 6-27 20号钢相对压扁量与加工硬化的实验结果

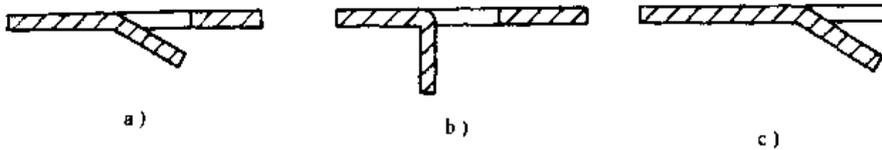


图 6-28 精冲切口弯曲

a) 内形切口弯锐角 b) 内形切口弯直角 c) 外形切口弯锐角

2) 浅 Z 形弯曲。对于弯曲高度 $h < t$ ，弯曲角度 $\alpha < 75^\circ$ 的 Z 形弯曲件也可以采取精冲和弯曲同时进行，如图 6-29 所示。精冲弯曲复合模的凸模和反压板按工件弯曲轮廓制造，压边圈和凹模保持平齐。

从图 6-29 可以看出，采用平直的材料，通过精冲弯曲复合模一次冲压出精冲弯曲零件的必要条件是反压力 P_3 必须大于弯曲力 P 。而同时精冲的条件是先压边，后精冲，即压边圈必须高出凸模一定的距离。合模时条料在反压板作用下压入压边圈，出现了精冲（见图 6-29b），继续弯曲和冲裁同时进行，最后凸模和反压板压靠完成精冲的全过程，如图 6-29d 所示。从图 6-29b 可以看出，模具闭合时材料已被四周的压边圈和凹模夹紧，而此时工件的弯曲尚未完成，弯曲继续进行材料向内转移受到四周压边的限制，将在剪切区产生拉应力甚至撕裂，降低剪切面的质量，这是此方案的主要缺点。但是，这种结构采取平直的压边圈和凹模，不仅制造和维修方便，而且精冲后的废料仍保持平直，有利于自动送料。

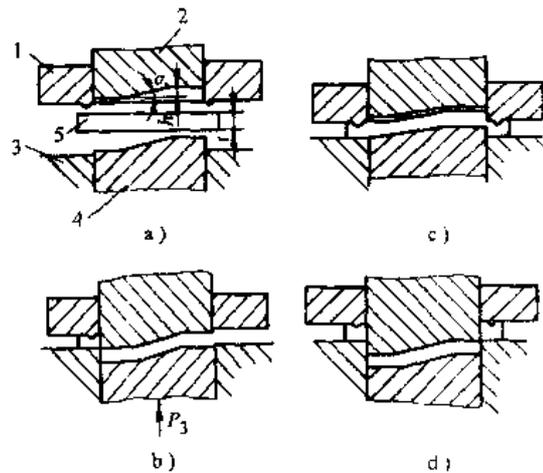


图 6-29 精冲和弯曲同时进行的过程示意

1—压边圈 2—凸模 3—凹模 4—反压板 5—条料
t—料厚 h—弯曲高度 α —弯曲角度

(2) 先弯曲后精冲 先弯曲后精冲，一次冲压可生产出如图 6-30 所示的 Z 形精冲弯曲件。但要求零件的弯曲角 $\alpha < 75^\circ$ 。

先弯曲后精冲的复合模如图 6-31 所示, a 为模具开启, b 为模具闭合。

复合模的压边圈和凹模、反压板和凸模分别按零件的内外弯曲形轮廓制造, 即闭合时, 压边圈和凹模、反压板和凸模之间的距离都相距一个料厚。压边圈只在平面上有齿形, 斜面上不带齿形, 如图 6-31a 所示。

应该注意的是不能使凸模和凹模闭合时其刃口之间也相距一个料厚, 如果这样, 精冲时凸模必须进入凹模一段距离 $\Delta y = \left[\frac{1}{\cos\alpha} - 1 \right] t$ 才能使零件的斜边分离。正确的设计应该是模具闭合时使凸模和凹模的平刃口都相切合缝, 这样条料完成弯曲后精冲时可防止凸模进入凹模, 如图 6-31b 所示。

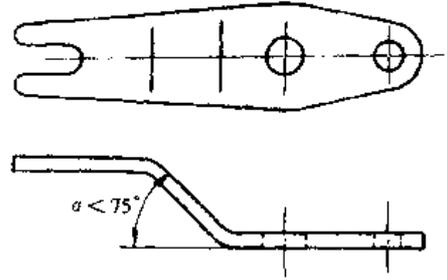


图 6-30 先弯曲后精冲的 Z 形件

(3) 先精冲后弯曲 先精冲后弯曲主要采用精冲弯曲连续模完成, 也可采用精冲、弯曲两副单工序模具完成。先精冲后弯曲可以完全不受弯曲角度的限制, 可以弯曲轮廓更复杂的零件。但应注意将毛刺面放在弯曲边的内侧, 以免在弯曲处产生裂纹。图 6-32a 为先精冲后弯曲的典型零件连接板, 它的弯曲角度为 90° , 弯曲边上有小孔, 这种零件只能采用先精冲后弯曲工艺。

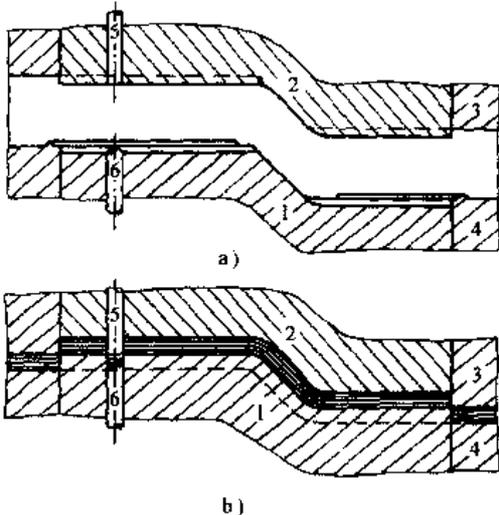


图 6-31 弯曲精冲复合模示意

1—凸模 2—反压板 3—凹模 4—压边圈
5—冲孔凸模 6—顶杆

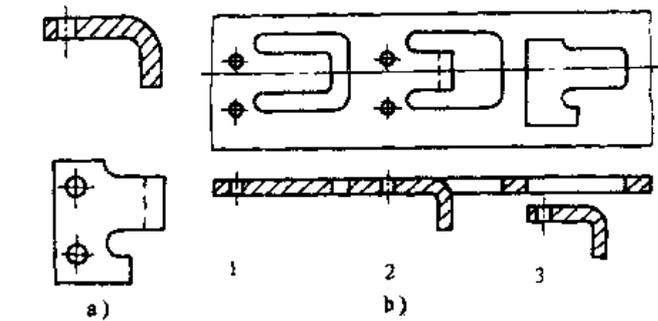


图 6-32 连接板精冲弯曲工艺

a) 零件图 b) 精冲弯曲工步图
1—切口冲孔 2—定位弯曲 3—落料

图 6-32b 为在连续模上精冲弯曲连接板的工步图。显然, 连接板零件也可以采取先精冲、后弯曲两道工序完成, 具体采用哪一方案好, 应根据生产批量进行经济分析后确定。

7. 压沉孔

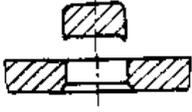
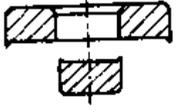
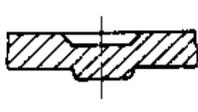
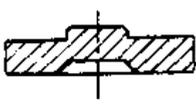
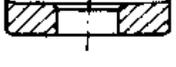
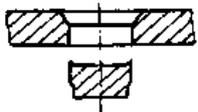
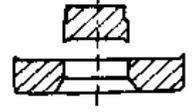
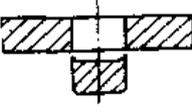
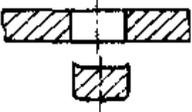
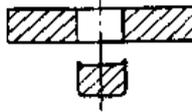
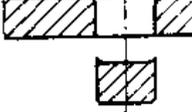
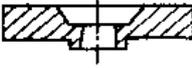
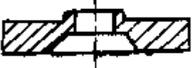
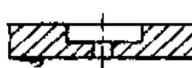
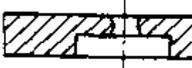
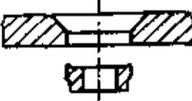
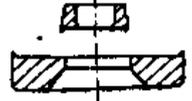
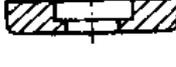
精冲和压沉孔复合可在精冲件的压塌角面上或毛刺面上压出圆锥形或圆柱形沉孔。沉孔的不同形式、深度和位置, 需要采用不同的冲压方法和模具, 见表 6-5。

8. 三维精冲件精冲复合工艺

图 6-33 所示为捷达车变速箱拨叉上的两个典型零件。北京机电研究所成功地开发出精冲、挤压、弯曲、翻边、压肋、压扁、压印和半冲孔等复合工艺。零件的技术要求为: 材料抗拉强度 $\sigma_b 640 \sim 880 \text{MPa}$; 剪切面粗糙度 $R_a 0.8 \sim 0.4 \mu\text{m}$; 尺寸公差 IT8~IT7 级; 两孔同轴

度 0.05mm；弯曲角偏差 $\pm 10'$ 。在开发中，成功地解决了双向压扁时材料的爬行，连续精冲模几何参数和步距精度控制及偏心载荷平衡结构，冲切元件的强韧化和被冲材料（优质中碳钢）的处理等关键技术，使精冲技术提高到一个新的水平。

表 6-5 压沉孔工艺

沉孔形式	圆 锥 形				
沉孔深度 (%)	15		40		
沉孔部位	塌角面	毛刺面	毛刺面	塌角面	
工 序	名称	1. 落料、冲孔、压沉孔	1. 冲孔、压沉孔	1. 压沉孔	1. 压沉孔
	简图				
	名称		2. 落料	2. 冲孔	2. 落料、冲孔
	简图				
工 序	名称			3. 落料	
	简图				
模具	复合模		连续模		
沉孔形式	圆 锥 形		圆 柱 形		
沉孔深度 (%)	60		60		
沉孔部位	毛刺面	塌角面	毛刺面	塌角面	
工 序	名称	1. 冲孔	1. 冲孔	1. 冲孔	1. 冲孔
	简图				
	名称	2. 压沉孔	2. 压沉孔	2. 压沉孔	2. 压沉孔
	简图				
工 序	名称	3. 冲孔	3. 落料、冲孔	3. 冲孔	3. 落料、冲孔
	简图				
工 序	名称	4. 落料		4. 落料	
	简图				
模具	连续模		连续模		

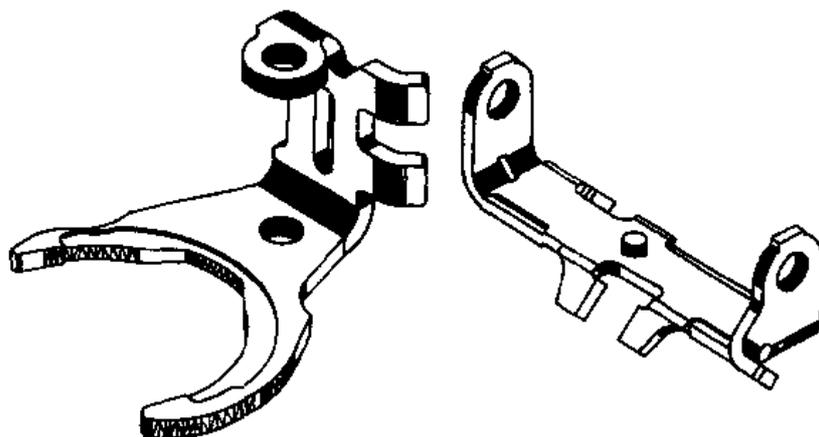


图 6-33 变速箱拨叉精冲件

第三节 精冲工艺的设计与计算

一、精冲工艺的力能计算

1. 精冲工艺力的计算

精冲时的受力状态如图 6-34 所示, a 为冲切过程中压边力、反压力和冲裁力三者同时作用的情况; b 为冲裁结束卸料力将废料从凸模上卸下, 顶件力将工件从凹模中顶出的情况。

(1) 冲裁力 P_1 的大小可按经验公式计算:

$$P = f_1 L_n t \sigma_b$$

式中 f_1 —— 系数, 取决于材料的屈服比, 可从图 6-35 求得;

L_n —— 内外周边长度 (mm);

t —— 材料厚度 (mm);

σ_b —— 材料的抗拉强度 (N/mm^2)。

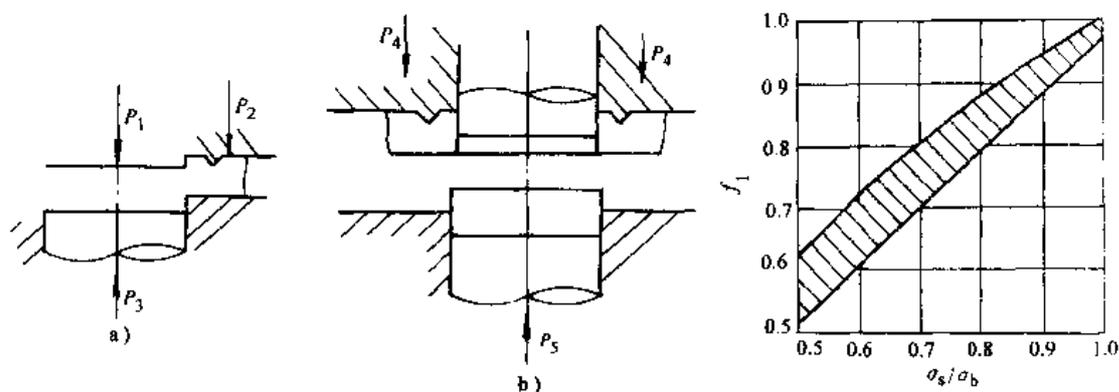


图 6-34 精冲时的受力状态

1—冲裁力 2—压边力 3—反压力

4—卸料力 5—顶件力

图 6-35

考虑到精冲时由于模具的间隙小，开口有圆角，材料处于三向压应力状态，和一般冲裁相比提高了变形抗力，因此取系数 $f_1=0.9$ ，故精冲力的计算公式为

$$P_1=0.9L_c t \sigma_b$$

(2) 压边力 V形环压边力有三个作用，即防止精冲区以外的材料在变形过程中随凸模流动；在精冲过程中使材料始终和冲裁方向垂直而不翘起；使变形区处于三向压应力状态。因此，正确计算和选定压边力，对于保证工件剪切面的质量，降低动力消耗和提高模具寿命都有密切关系。压边力 P_2 按以下经验公式计算：

$$P_2=f_2 L_c 2h \sigma_b$$

式中 f_2 ——系数，取决于 σ_b ，可由表 6-6 查得；

L_c ——工件周边长度 (mm)；

h ——V形齿高 (mm)，查表 6-16；

σ_b ——材料的抗拉强度 (N/mm²)。

表 6-6

σ_b (N/mm ²)	200	300	400	600	800
f_2	1.2	1.4	1.6	1.9	2.2

(3) 反压力 反压板的反压力 P_3 也是影响精冲件质量的重要因素，它主要影响工件的尺寸精度、平面度、塌角和孔的剪切面质量，增加反压力可以改善这些质量指标，同时也可增强精冲时的静水压力，但反压力过大会增加凸模的负载，降低凸模的使用寿命。因此和压边力一样需在实际工艺过程中，在保证工件质量的前提下尽量调到下限值。反压力可按如下经验公式计算：

$$P_3=pA$$

式中 A ——工件的平面面积 (mm²)；

p ——单位反压力，一般取 20~70N/mm²。

反压力按上式计算波动范围较大，可按以下经验公式计算：

$$P_3=0.2P_1$$

(4) 总压力 P_t 工件完成精冲所需总压力 P_t 是选择精冲压力机的主要依据。

$$P_t=P_1+P'_2+P_3$$

式中 P'_2 ——保压压边力， $P'_2=(0.3\sim0.5)P_2$ 。

为了提高精冲压力机的有效负载能力，目前大多数精冲压力机的压边系统都有无级调节的自动卸压装置。精冲开始时，首先在压边力 P_2 作用下 V形压环边圈压入材料，完成压边后，压力机自动卸压到预先调定的保压压边力 P'_2 ，然后再进行精冲。因此实现精冲所需的总压力 P_t 不是 P_1 、 P_2 和 P_3 之和，而是 P_1 、 P'_2 和 P_3 之和。明确和强调这一点有以下两点意义：

- 1) 编制精冲工艺选用精冲压力机时，用上式计算总压力可以充分发挥压力机的潜力；
- 2) 使用压力机时，通过调试，利用压边部分自动卸压，可以降低精冲时的能耗，在大压力机上精冲大零件时， P_2 和 P'_2 差值大，节能的效果更显著。

(5) 卸料力 P_4 和顶件力 P_5 卸料力 P_4 和顶件力 P_5 分别按以下两个经验公式计算：

$$P_4=(0.05\sim0.1)P_1$$

$$P_5=(0.05\sim0.1)P_1$$

2. 精冲时功的计算

完成精冲工艺过程所耗的功包括精冲本身的变形功和施加压边和反压所耗的功, 即

$$A_t = A_1 + A_2$$

式中 A_t ——完成精冲工艺所耗的总功;

A_1 ——精冲的变形功;

A_2 ——压边和反压所耗的功。

A_1 可用图 6-36 中 P_1 - S 曲线所包围的面积求得。 A_1 是 P_1 - S 曲线所包围的面积。

$$A_1 = KP_1t$$

式中 K ——系数, $K=0.6\sim 0.7$ 。

由于 P_2' , P_3 在精冲过程中是定值, A_2 是 $P_2'+P_3$ 和 t 构成的矩形面积, 即

$$A_2 = (P_2' + P_3)t$$

因此 $A_t = A_1 + A_2 = (KP_1 + P_2' + P_3)t$

额定载荷下的 A_t 是精冲压力机主传动系统动力设计计算的依据。

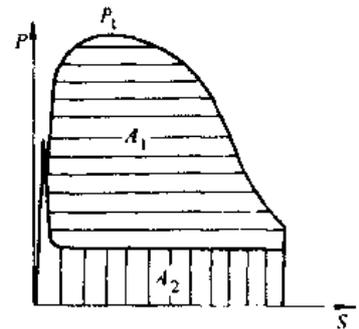


图 6-36

二、精冲零件及工艺过程设计

1. 精冲零件设计

长期以来, 有尺寸公差和表面粗糙度要求的零件, 由于绝大多数都采用切削加工工艺生产, 因此目前产品的结构设计和材料的选择主要是满足切削加工生产的要求。如果采用精冲或精冲复合工艺, 这些零件的结构和材料选用, 多数需要按精冲工艺的要求作相应的改变。

图 6-37 给出了工艺对零件外形结构影响的实例。双联齿轮采用切削加工生产时要求在二个齿轮之间有退刀槽, 如图 6-37a 所示; 采用精冲——半冲孔复合工艺生产的双联齿轮如图 6-37b 所示。产品设计者如果不改变双联齿轮的传统结构, 即取消退刀槽, 就无法实现精冲——半冲孔工艺生产图 6-37b 所示的双联齿轮。

仪器仪表中的片齿轮、夹板等许多零件, 常用 HPb59-1 材料, 这种材料切削性能好, 但材质脆而精冲性能差。产品设计者如果将上述零件设计为精冲零件时, 建议将材料改为 H62。这两种材料力学性能接近, 都能满足产品的技术要求, 但 H62 的塑性好, 适合于精冲。

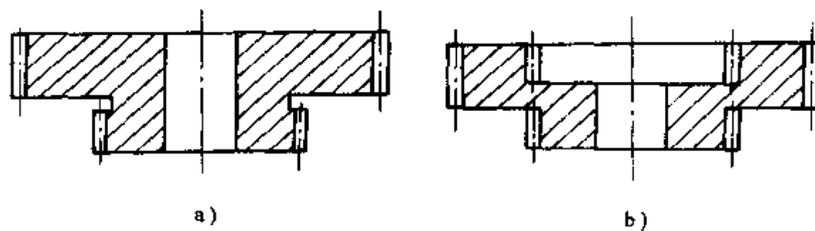


图 6-37 工艺对零件外形结构影响的实例

a) 切削加工双联齿轮 b) 精冲——半冲孔双联齿轮

图 6-38 为 1t 手动葫芦的左墙板。材料为 16Mn, 厚度 4.5mm, 传统的切削加工孔的表面质量差 ($R_a 20\sim 10\mu\text{m}$), 孔距尺寸分散, 精度低, 生产效率低。采用精冲工艺, 孔的表面质量高 ($R_a 1.25\sim 0.63\mu\text{m}$), 孔距精度高, 生产效率高。由于尺寸的一致性, 减少了装配工作量。

但美中不足的是采用精冲工艺后仍然沿用原来的图纸, 图中 3 个 $\phi 7\text{mm}$ 孔距边缘太窄, 一次精冲难度大, 如产品设计得将此处结构作微小的修改, 即适当增大外圆或孔边距, 则可减少精冲工艺的工序、降低成本, 进一步发挥精冲工艺的优越性。

东风汽车公司的产品设计者和精冲工艺人员相配合, 将汽车门锁的凸轮和卡板零件由切割加工改为精冲生产, 技术经济效果十分显著。

精冲零件的设计步骤如下:

(1) 原始资料的分析 主要包括:

- 1) 设计零件的功能和技术要求;
- 2) 选择适合于精冲的材料;
- 3) 精冲零件结构工艺性分析;
- 4) 精冲复合工艺;

5) 精冲件质量等。其中第 3、5 项已制订了标准 JB/Z272—

86 和 JB/Z 280—86。

(2) 确定材料和厚度 材料的强度越高、厚度越厚实现精冲越困难。各种材料都存在可以实现精冲的极限厚度, 因此, 正确地选择材料和厚度至关重要。

(3) 零件轮廓设计 根据零件的工作要求拟定它的几何形状是精冲零件设计的关键。内外轮廓应尽量是规则的几何形状, 避免尖角, 力求圆滑过渡。应根据 JB/Z272—86 精冲件结构工艺性中规定的实现精冲的难易程度来衡量初步设计零件的难易程度级别: 属容易的 S_1 级最好; 属中等的 S_2 级次之; 属困难的 S_3 级应慎重。设计者应该在零件技术要求允许的范围内修改初步设计, 尽可能使零件的几何形状处于 S_1 和 S_2 级, 难易程度越低, 越有利于提高精冲件质量和模具寿命。

如果根据零件的工作要求, 其几何形状不可避免地处于 S_3 级, 此时设计者应尽可能选用强度低的材料。

如果零件精冲难易程度为 S_3 级, 材料强度又要求较高 ($\sigma_s \geq 600\text{N/mm}^2$) 时, 当难易程度涉及的是孔径、孔边距, 设计者可以考虑局部放弃精冲, 而保留其他部分的精冲。

(4) 确定技术要求 包括尺寸公差、精冲面质量、热处理或表面处理等。其中精冲面质量所含内容及标注方法不同于常规, 系根据精冲工艺的特点制订, 详见 JB/Z 280—87。

(5) 质量和成本综合分析 最基本的原则是在满足零件技术要求的条件下使生产成本最低。影响精冲件成本的因素很多, 其中最敏感的因素是精冲面质量, 当精冲 4mm 以上的零件时, 适当降低精冲面质量要求, 有利于提高模具寿命和降低原材料成本。

(6) 绘制零件图 图 6-39 为精冲零件图实例, 图中精冲质量的标准系根据 JB/Z280—87 的规定。

2. 精冲工艺过程设计

精冲工艺过程设计是从下料到后续各工序整个工艺过程的设计, 具体体现为编制工艺卡。典型的精冲工艺过程一

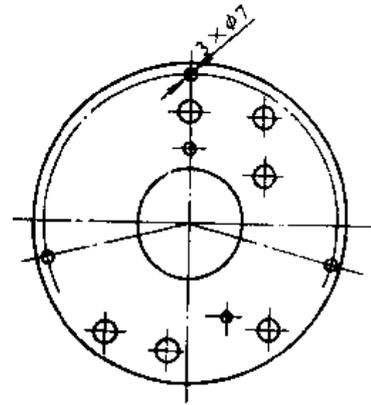


图 6-38 左墙板零件

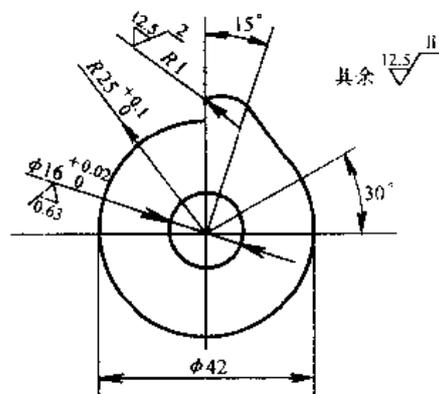


图 6-39 精冲零件图
(材料 20 号钢, 厚度 6mm)

般包括：下料→球化处理→酸洗→涂油→精冲→去毛刺→热处理或表面处理等。其中有些材料塑性好不需要球化处理；有些零件不要求热处理或表面处理。

精冲是整个工艺过程的核心，前后各个工序都是围绕它进行的。精冲工艺方案的制订应考虑的问题是：零件的结构工艺性；材料的精冲性能；零件的剪切面质量、尺寸公差等技术要求。

仍以图 6-38 所示左墙板为例，其尺寸公差和表面质量要求精冲均可达到。材料 16Mn，塑性好，虽然厚度 4.5mm，不经球化退火处理也能获得满意的剪切质量。从左墙板零件图可以看出，3 个均布的 $\phi 7\text{mm}$ 孔距边缘 1.5mm，根据 JB/Z 272--86 精冲件结构工艺性中规定难易程度来判断，为 S₃ 级，实现精冲困难。为此可采用以下三种方案：

方案 I：采用两次精冲，即落料冲中心孔；精冲其他各孔。

方案 II：周边放余量一次精冲，即落料冲孔；车外圆。

方案 III：采用两次精冲，即冲孔；落料。

实践表明：方案 I 落料后冲孔，3 个 $\phi 7\text{mm}$ 小孔距边缘太近，冲孔时金属往外流，影响外圆的尺寸和小孔剪切面的质量，不可取。方案 II 是可行的。方案 III 尚未实践，其出发点是想改善冲孔模的结构。最终在方案 II 和 III 两者选择最佳方案。

三、适于精冲的材料及球化退火

1. 适于精冲的材料

(1) 钢 大约 95% 的精冲零件是钢件，其中大部分是低碳钢，适于精冲的主要钢种列于表 6-7。未列于表 6-7 的钢种，可参考表中含碳量接近的钢种。但对于含硫、磷较高的非镇定钢，即使是低碳钢，精冲时也会出现问题，选材时需慎重。表中第 2 项，可精冲的最大厚度是一个范围，它与材料的状态，工件的技术要求以及模具的寿命有关。

表 6-7 适于精冲的主要钢种

钢种	可精冲的最大厚度/mm	精冲适应性 ^①	钢种	可精冲的最大厚度/mm	精冲适应性 ^①
08	15	1	T8A	3	3
10	15	1	T10A	3	3
15	12	1	15Mn	8	2
20	10	1	16Mn	8	2
25	10	1	15CrMn	5	2
30	10	1	20CrMoB	8	2
35	8	2	20CrMo	4	2
40	7	2	GCr15	6	3
45	7	2	1Cr18Ni9	8	2
50	6	2	0Cr13	6	2
55	6	2	1Cr13	5	2
60	4	2	4Cr13	4	2
70	3	3			

①1—理想的精冲材料；2—适合的精冲材料；3—精冲困难的材料。

(2) 铜和铜合金 铜和铜合金的精冲性能取决于化学成分和冷轧的程度。含锌量(质量分数)在38%以下时,其合金为单一的 α 相,塑性好,因此所有含锌量(质量分数)低于37%(含铜量(质量分数)高于63%)的青铜均能精冲,含铜量越高效果越好。含锌量(质量分数)超过38%时,其组织为 $\alpha+\beta$ 双相不均体,精冲性能差,H59黄铜就属于这种组织。

铝青铜中含铝量较低时塑性好,可以精冲。含铝量(质量分数)超过10%时,塑性差,含铝量(质量分数)超过10%的铝青铜不适于精冲。

铝黄铜塑性差不适于精冲。

铜及铜合金的精冲适应性列于表6-8。

表 6-8 适于精冲的铜及铜合金

铜及铜合金牌号	精冲适应性①	铜及铜合金牌号	精冲适应性
T2、T3、T4、TU1、TU2	1	HNI65-5	2
H96、H90、H80、H70、H68	1	QSn4-3	2
H62	2	QBe2、QBe1.7	3
HSn70-1、HSn62-1	2	QA17	2

①1—良好 2—中等 3—困难。

(3) 铝和铝合金 铝和铝合金同样可以精冲,其精冲性能取决于化学成分和冷轧程度。各种纯度的铝都很软,具有良好的塑性,容易实现精冲,但受冷轧产生加工硬化的限制,铝及铝合金的精冲适应性列于表6-9。

表 6-9 铝及铝合金的精冲适应性

铝及铝合金牌号	精冲适应性①	铝及铝合金牌号	精冲适应性
L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7	1	LF2、LF3	2
LF21	1	LY11、LY12	3

①1—良好 2—中等 3—困难。

2. 常用精冲材料的球化退火工艺

常用钢材球化退火工艺有以下几种:

(1) 普通球化退火 这种球化退火适用于原始组织基本上为片状珠光体的钢材,球化退火温度见图6-40。

普通球化退火温度为临界 $A_{c1}+20\sim 30^{\circ}\text{C}$,保温时间随钢材尺寸、设备类型和加热情况而有所不同,根据金相检查确定,一般保温时间常在2~4h之间,冷却速度以 $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 为宜,炉冷到 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 出炉。

(2) 等温球化退火 将钢材加热 $A_{c1}+20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 透热后,随炉冷却到 A_{r1} 点以下约 20°C 等温4~6h后,炉冷到 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 出炉。等温球化退火工艺周期短,是常用的球化退火工艺。

(3) 循环球化退火 它是等温球化退火型式的几次重复,生产周期长,操作繁琐,仅用于原始组织为粗片状珠光体或渗碳弥散度过小的钢材。

3. 亚共析钢和亚共析钢的球化退火工艺

亚共析钢的精冲用以上工艺退火，亚共析钢很难球化退火并且球化退火时间也较长。因此，精冲用亚共析钢建议采用加预热的球化退火工艺。

(1) 加预热的球化退火工艺 几种亚共析钢的化学成分、规格和供料状态列于表 6-10。15 及 45 号钢的显微组织为铁素体+片状珠光体；50A 为铁素体+珠光体+少量细颗粒碳化物；T8A 为片状珠光体，沿晶界偶有少许断续分布的游离碳化物。

亚共析钢和共析钢的球化退火工艺列于表 6-11，亚共析钢球化退火温度范围狭窄，缺少球化成核的残余碳化物颗粒，为了使钢易于得到全球化状态，采用奥氏体化加热之前，增加一段预热处理阶段，在预热温度下进行“截断”片状珠光体，并形成细小碳化物颗粒，而在奥氏体化时，碳化物颗粒仍残存于奥氏体内，这对球化将起核心作用，预热温度采用尽量接近 A₁ 点的 720℃，保持时间分别为 1h、2h、3h；冷轧钢带在 720℃ 预热 2h，碳化物总数量达到了 762.5×10^6 个/mm³ 的临界值，对以后球化将得到较好的效果；奥氏体化温度以 760℃ 较为理想，过高或过低的奥氏体化温度，都将容易导致一些片状珠光体出现，要得到较理想的残余碳化物颗粒、弥散分布和球化状态，以选择较低的奥氏体化温度为宜，对于热轧 T8 共析钢宜采用更低一些的奥氏体化温度。试验结果表明，奥氏体化的时间，对冷轧钢带来说 10min 即可满足要求，但热轧钢带则需要延长至 1h。这说明冷轧钢要容易球化一些，其原因在于冷轧变形不仅是破碎片状碳化物，而且形成高的位错密度，其数量级为 10^{11} 根/cm²，退火则只有 10^7 根/cm²，相差近 4 个数量级，存在高位错密度的碳化物片，在加热时易于起到破碎片状碳化物的作用。奥氏体化、球化后冷却速度分别进行炉冷和空冷，试验证明所得到的球化组织差别不大，只是空冷硬度更高。

(2) 调质球化工艺 带钢还可以调质球化处理，工艺参数见表 6-12。对于带钢，调质球化有更好的球化状态，碳化物颗粒也更弥散和均匀分布，但硬度则比退火球化的高出布氏硬度 HBS20~30，因此，对于小批量的钢件调质球化处理也是可行的。

表 6-10 试验带钢化学成分及硬度

钢号供货状态	规格 /mm×mm	化学成份 (质量分数,%)					硬度 HBS	
		C	Si	Mn	P	S		
45	冷轧	3×120	0.45	0.24	0.65	0.016	0.007	181
50A	冷轧	3×100	0.47	0.27	0.67	0.015	0.007	-
15	冷轧	3×110	0.18	0.23	0.56	0.015	0.009	144
T8	热轧	2×110	0.79	0.24	0.22	0.011	0.007	263
45	热轧	8×60			...	—	—	

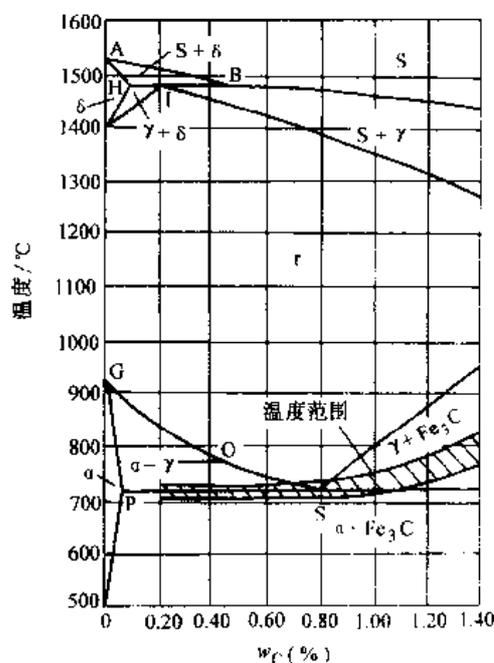


图 6-40 球化退火温度在铁碳平衡图中的位置

表 6-11 亚共析钢和共析钢加预热的球化处理工艺

钢 号	加预热的球化处理工艺			硬度 HBS
	预 热	奥 氏 体	球 化	
冷轧 45	720°C×2h	760°C×10min	720°C×2h 空冷	141
带钢	720°C×2h	760°C×10min	720°C×6h 炉冷	116
	720°C×2h	760°C×10min	700°C×4h 炉冷	
热轧 45 扁钢	720°C×4h	760°C×1h	700°C×4h 炉冷	
50A 钢带	720°C×2h	760°C×10min	700°C×3h 炉冷	143
15 钢带	720°C×2h	760°C×10min	720°C×6h 炉冷	144
热轧 T8 带钢	720°C×3h	740°C×1h	720°C×4h 炉冷	141
退火状态 45	720°C×4h	760°C×1h	700°C×4h 炉冷	
50A 钢	720°C×4h	760°C×1h	700°C×4h 炉冷	

表 6-12 冷轧 45 带及热轧 T8 钢带调质球化工艺

钢 号	调质球化处理工艺		硬度 HBS
	淬火工艺	回火工艺	
45	800°C×10min 淬火	700°C×6h 回火	166
T8	800°C×10min 淬火	700°C×6h 回火	169

加预热的球化处理工艺不但可以得完全球化，而且可以缩短奥氏体和球化两阶段的保持时间，从预热开始至等温球化结束的“有效周期”，对于冷轧钢带为 7h，热轧钢带为 8h。由于球化处理后的硬度较低，因此，处理后可以出炉空冷。

4. 过共析钢的球化工艺

表 6-13 给出了 T10A 钢及 Gr15 钢的球化退火工艺。其他过共析钢的球化均系常规工艺，可查阅有关资料。

表 6-13 T10A 钢及 GCr15 钢球化退火工艺

钢 号	加热规范		冷却规范			硬度 HBS
	温度/°C	保温时间/h	缓 冷	等 温		
				温度/°C	保温时间/h	
T10A	750~760	4~2	以<30°C/h 炉冷到	680~700	6~4h 等温保持后，炉冷到	≤197
GCr15	780~800	4~2	500~600°C 出炉	700~720	500~600°C 出炉	179~207

第四节 精冲工艺的润滑

润滑是实现精冲工艺的四个条件之一，它与模具寿命，工件质量密切相关，直接影响精冲的技术经济效果。

精冲过程中的润滑，实质上是在边界条件下，如何防止模具工作表面和工件精冲面直接接触，减少接触面之间的摩擦阻力，降低模具的磨损。

精冲润滑剂主要由基础油和各种添加剂组成。基础油是溶剂并起液体润滑作用。添加剂

一般由极压油、油性剂和抗磨剂等组成，在精冲过程中起边界润滑的效果。

精冲时接触部分出现瞬时高温，压力也非常高，含有硫、磷、氯等元素的极压剂在高温下与金属表面化合，首先在凸起部位生成膜，然后在运动中扩展至凹下的部位，最后整个凹下部位被膜复盖，形成一层平滑表面，它就是在高温高压下起润滑作用的极压膜，极压膜的最大厚度为 $0.03\mu\text{m}$ 左右，它具有低熔性质，精冲时将模具工作表面与工件精冲面隔开，避免大面积擦伤。

精冲润滑剂不应出现沉淀，长期存放时不被氧化，不变质，对金属表面无腐蚀，对环境无污染，精冲后容易清除。

80年代初，北京机电研究所研制的 F-1 精冲润滑剂能较好地满足上述要求。该润滑剂的配方如下：

氯化石蜡 10%~15%，有机酸酯类 0.1%~1%，S、P 添加剂 5%~10%，50[#] 机油 75%~85%。

7507 极压油：磺酸钡 10%，环烷酸锌 10~12%，酸化茶油酸 2%，油酸 5%，磺化油 15%，三乙醇胺 3~4%，5[#] 或 7[#] 机油余量。

精冲材料为 15 号钢、厚度 4mm 的杠杆零件时，采用 F-1 精冲润滑剂，冲孔凸模和凸凹模一次刃磨的寿命达 41000 次。

第五节 精冲模具设计

一、精冲模具结构

1. 活动凸模式精冲模

这种模具结构的特点是，凸模靠模座和压边圈的内孔导向，凹模和压边圈分别固定在上、下模座上，凸模通过压边圈和凹模保持相对的位置，因此要求凸模和压边圈之间的间隙比凸模和凹模之间的间隙更小。只有使凸模有较长的导向和正确定位才能保证对中，如果凸模轮廓的最大尺寸超过了凸模的高度，准确对中就难以保证，因此活动凸模式模具主要适于中、小尺寸的零件。

图 6-41 为活动凸模式精冲模的典型结构。b 采用座圈结构有利于凹模和压边圈的加工和装配，适用更小的零件。另外还采用凸模固定板将凸凹模固定在凸模座上，因为凸凹模小无法用螺钉和凸模连接。其他零件和图 a 相同。

2. 固定凸模式精冲模

这种模具结构的特点是：凸模固定在模座上，压边圈通过传力杆和模座，与凸凹模保持相对运动，如图 6-42 所示，其中 a 为典型结构，b 为采用专用结合环结构。

固定凸模式精冲模适合于：大型或窄长的零件；不对称的复杂零件；内孔较多的零件；冲压力较大的厚零件；需要连续模精冲的零件等。

固定凸模式模具精冲时的情况如图 6-42a 所示，在传力杆 18 及顶杆 13 的作用下，压力垫 21 向下移动，在模座的下面出现很大的空洞，而全部冲裁力都作用在空洞的上方，使凸凹模产生弯曲，这是十分不利的，在大冲裁力的不断作用下，凸凹模的下部有由于弯曲而产生拉裂的危险。为了避免产生这种情况，在冲裁力较大时，需要采用专用承力环（如图 6-42b 所示），以改善下模座的支撑条件，避免出现大空洞而使凸凹模产生弯曲。

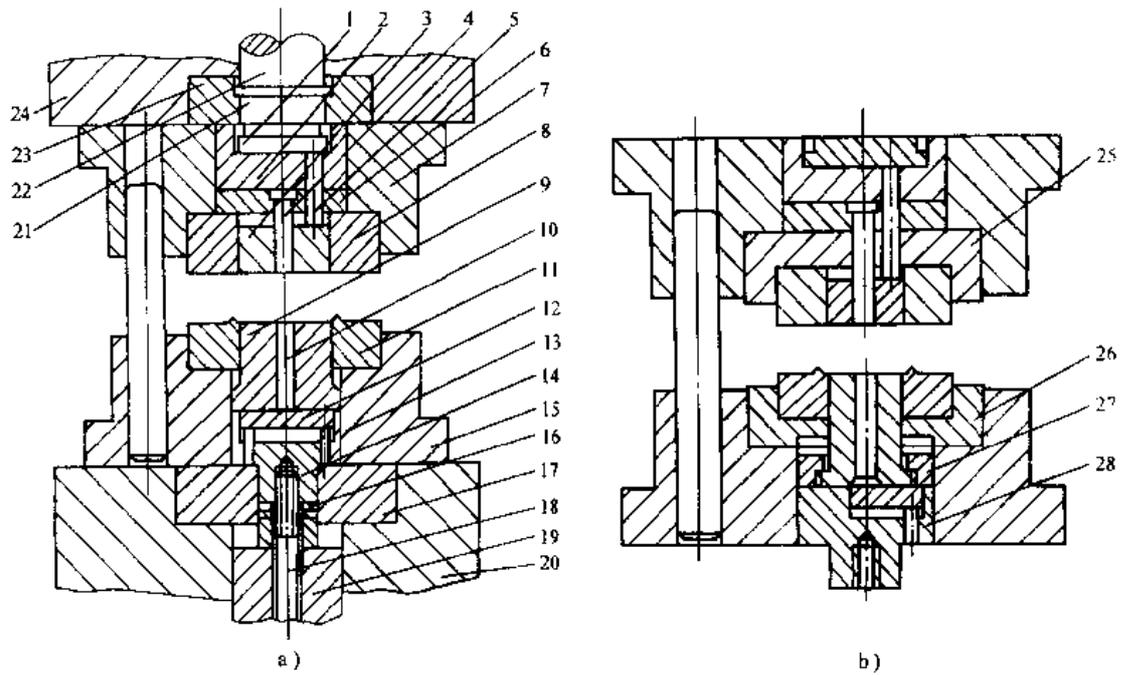


图 6-41 活动凸模式精冲模具典型结构

- 1—压力垫 2—上垫板 3—推件板 4—冲孔凸模 5—顶杆 6—冲孔凸模固定板 7—上模座 8—凹模 9—凸凹模 10—顶杆 11—齿圈压板 12—桥板 13—顶杆 14—凸模座 15—下模座 16—垫圈 17—承力环 18—拉杆 19—滑块 20—液压活动工作台 21—压力垫 22—反压力液压柱塞 23—接合环 24—压力机上工作台面 25—凹模座圈 26—齿圈压板座圈 27—凸模固定板 28—凸模座

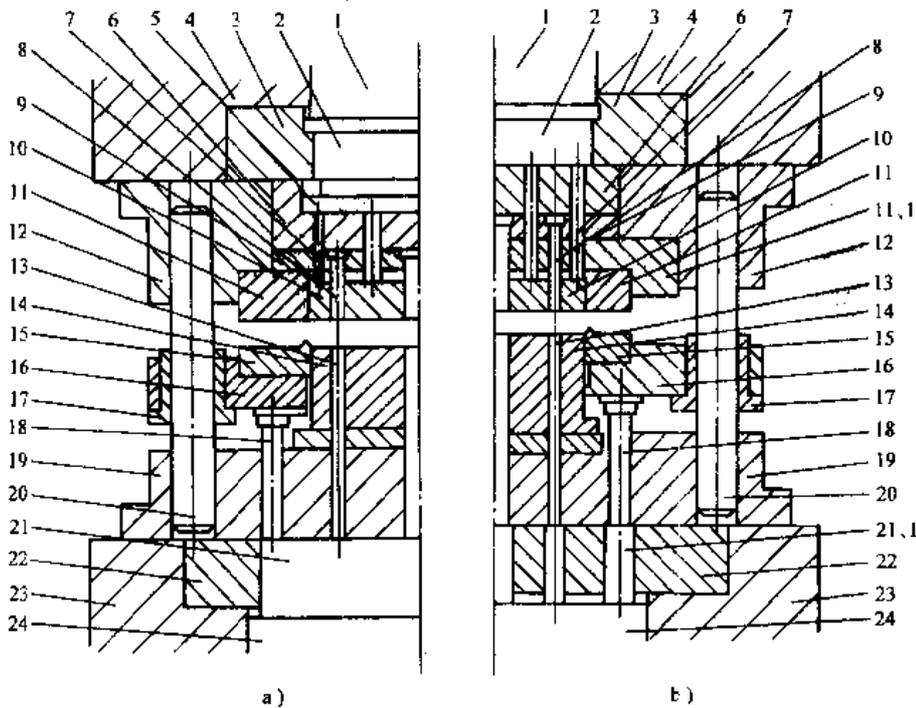


图 6-42 固定凸模式精冲模

- 1—反压力柱 2—压力垫 3—承力环 4—上工作台面 5—垫块 6—上垫板 7—顶杆 8—冲孔凸模 9—冲孔凸模固定板 10—推件板 11—凹模 11、1—凹模固定板 12—上托 13—顶杆 14—凸凹模 15—齿圈压板 16—活动模板 17—导套 18—传力杆 19—底座 20—导柱 21—压力垫 21、1—大顶杆 22—专用承力环 23—下工作台面 24—下压力柱

下面对上述两种结构作进一步的分析和比较,不同的模具结构形式,要求压力机具有相应的工作台结构相匹配。活动凸模式模具要求压力机工作台中心部位固定四周由环形油缸、柱塞构成的浮动液压工作台。固定凸模式模具要求压力机的工作台中部有柱塞油缸。

活动凸模式模具的凸凹模直接固定在上述工作台中心部位,支撑条件好。压边圈和模座固定在四周的浮动工作台上,压边圈的运动比固定凸模式模具的压力圈平稳,后者需要通过许多根传力杆推动,传力杆的高度有误差,就会使凸凹模受侧弯。此外活动凸模式模具的压边圈和凸凹模之间的间隙极小而导向部分又长,在凸凹模支撑良好,压边圈运动平稳的条件下,压边圈将防止凸凹模失稳,不受侧向力而起到保护凸凹模的作用。这一点,对于精冲小零件的细而长的凸凹模尤其显得重要。另外,活动凸模式模具刃磨凸凹模后,只需根据修磨量更换垫圈(图6-41中件1系压机的附件,它有各种厚度可供选择)即可继续进行精冲,十分方便,而固定凸模式模具凸凹模修磨后,需相应的修磨各个传力杆,而且还要重新调整压机的封闭高度,总之工作量要比活动凸模式模具大。以上都是活动凸模式结构的优点。但是,活动凸模式需要通过桥板(图6-41件12)将四周浮动工作台的液压力传递给中心部位凸凹模内的顶杆,由于受桥板结构强度和刚性的限制,活动凸模式不能冲多孔或内轮廓较大的零件。另外,活动凸模式模具精冲的零件尺寸受凸模座尺寸的限制,例如窄长的零件,冲裁力虽然在压机的范围之内,但零件的轮廓尺寸超过了凸模座,超过的部分凸凹模没有支撑,在模具结构上是不允许的。此外,连续模中几个工步的凸模分布距离很长,安排在活动凸模式模具的凸模座上更是不可能的,这些是活动凸模式模具的缺点。

由于精冲技术向大型和复合工艺发展,所以固定凸模式模具的比重日益增加。

二、凸凹模间隙及尺寸

1. 凸凹模间隙

精冲凸模和凹模之间的间隙系指凸模刃口和凹模刃口在直径方向的尺寸差。除V形环以外,小间隙也是精冲模的主要特征。如前所述,间隙的大小及其沿刃口周围的均匀性,是影响精冲件剪切面质量的主要因素,因此,选取合理的间隙,保证四周间隙均匀,并在结构上使冲切元件有足够的刚度和导向精度,使其在整个工作过程中,保持间隙均匀是实现精冲的关键技术。

精冲间隙和工件的形状、材质和厚度有关。凸凹模的间隙值列于表6-14。

表6-14提供的数据,是具有最佳精冲组织的碳钢,在精冲面表面完好率为I级,模具寿命高的基础上制订的。

外轮廓:凸、凹之间的间隙是冲裁料厚的1%;对于齿轮,在齿顶和齿根部分间隙应加倍,这一条也适用于有缺口的零件;带沟槽或其他类似缺口的零件,外轮廓的相应部分不带V形环的,均按内轮廓处理。

内轮廓:孔的直径、长度、宽度的料厚一样也是决定间隙的重要因素。

应当强调指出,在实际工作中,必须结合精冲件的材质和精冲面的质量要求,合理

表 6-14 凸模和凹模的间隙 (%*t*)

料厚 <i>t</i> /mm	外 形	内形 (孔、直径 <i>d</i>)		
		$d < t$	$d = 1 \sim 5t$	$d > 5t$
0.5		2.5	2.0	1.0
1		2.5	2.0	1.0
2		2.5	1.0	0.5
3	1.0	2.0	1.0	0.5
4		1.7	0.75	0.5
6		1.7	0.5	0.5
10		1.5	0.5	0.5
15		1.0	0.5	0.5

选取表 6-14 中的数据。对于不易精冲的材料其间隙应取得更小一些。对于允许精冲面有一定缺陷的零件，其间隙可取得稍大一些，间隙大意味着模具寿命长，便于加工。

对于外轮廓剪切面质量局部要求高而其他部分要求低的零件，同样可按上述原则，在不同部位选取不同的间隙。但在模具结构上应确保凸模和压边圈四周仍然保持百分之百的良好导向。

2. 凸、凹模尺寸

在正常情况下，精冲件的外形比凹模刃口减小 0.01mm，内孔比凸模刃口也略小一些。凹模和冲孔凸模在理想情况下，应比工作尺寸大 0.005~0.01mm。因此，在精冲件的尺寸精度要求较高的情况下，确定凹模和冲孔凸模尺寸时应考虑这些因素。

设计模具刃口尺寸时，还应考虑模具磨损对零件尺寸的影响。磨损对尺寸的影响分为三类，如图 6-43 所示。

1) 随模具刃口的磨损零件尺寸逐渐变大，如图中尺寸 A；

2) 随模具刃口的磨损零件尺寸逐渐变小，如图中尺寸 B；

3) 模具刃口磨损对零件尺寸基本无影响，如图中尺寸 C。

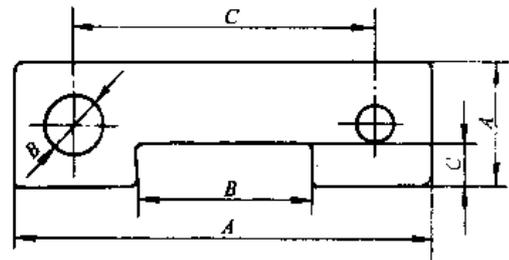


图 6-43 模具磨损对零件尺寸的影响

A—零件尺寸变大 B—零件尺寸变小

C—零件尺寸基本不变

为了提高模具寿命，确定模具刃口尺寸时，应考虑在保证精冲件尺寸公差的前提下，使模具刃口具有较多的磨损储备量。为此，对于上述第一类情况，应使新模具的刃口尺寸接近零件的下限尺寸，即取刃口的名义尺寸为

$$A = L_{\min} + \frac{\Delta}{4}$$

式中 L_{\min} —零件的下限尺寸 (mm)；

Δ —零件的公差 (mm)。

对于第二种情况，应使新模具的刃口尺寸等于零件的平均尺寸，即取刃口的名义尺寸为

$$C = (L_{\min} + L_{\max}) / 2$$

(1) 落料 精冲件的外形尺寸取决于凹模，此时间隙应取在凸模上。落料应按上述第一种情况确定凹模刃口的尺寸 A：

$$A = \left(L_{\min} + \frac{\Delta}{4} \right)^{1-\delta}$$

式中 δ —模具的制造公差 (mm)；

Δ 、 L_{\min} —分别为零件的公差和最小尺寸 (mm)。

如果零件外形上有内凹部分，则该处零件尺寸将随凹模的磨损逐渐减小，属第二种情况，则此处凹模刃口的尺寸 B：

$$B = \left(L_{\max} - \frac{\Delta}{4} \right)^{1-\delta}$$

式中 L_{\max} —零件的最大尺寸；

Δ 、 δ —零件公差和模具制造公差。

(2) 冲孔 精冲件的内孔尺寸取决于凸模，此时间隙应取在凹模上。随着凸模的磨损零

件尺寸变小,属于上述第二种情况,因此,凸模的尺寸 B 按下式确定:

$$B = \left(L_{\max} - \frac{\Delta}{4} \right)_{-x}$$

如果零件内形上有凸出部分,则该处零件尺寸将随凸模的磨损而增大,属于第一种情况,此处精冲凸模刃口尺寸 A 为

$$A = \left(L_{\min} + \frac{\Delta}{4} \right)_{-0}$$

(3) 实例 确定图 6-44 所示精冲件凸模和凹模刃口尺寸的计算方法。

图中尺寸 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 属上述第一类情况,尺寸按 A 计算; B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 属于第二种情况,尺寸按 B 计算; C_1 、 C_2 、 C_3 属于第三种情况,尺寸按 C 计算。

三、模芯结构

精冲模具包括模架及模芯两大部分,模架及其零件均已系列化,可根据精冲零件的尺寸和模芯结构直接选用,设计者只需考虑模芯的结构设计。

模芯是精冲模的工作部分,主要包括凹模、凸凹模、冲孔凸模、压边圈、及压板和顶杆等。与普通冲裁模比较,除了精度高以外,就是模芯的刚性要求高。

1. 凹模

凹模结构分整体式和镶拼式两种。凹模的厚度和外形尺寸都比普通冲裁模大,以增加刚性。图 6-45 所示为适合于 1.5~3mm 料厚的冲孔凹模形孔至边缘的最小距离。镶拼式凹模不小于 25mm,整体式凹模不小于 35mm。材料厚度增加时则相应增大,料厚减小时则相应的减小。

镶拼式凹模的分段,设计时应尽可能使分界面相互垂直或平行,各分段的配合面不应在工作的轮廓面上相交。镶拼式凹模用座圈固定,如图 6-46 所示。凹模压入座圈的锥角为 $30'$,预压量和凹模直径有关,列于表 6-15。

对于形状复杂而又薄弱的部分,可采用如图 6-47 所示的凹模镶块。这种型式的镶块装在冲孔凸模固定板上,更换方便。

凹模在模座上固定有两种形式:一种用锥面定位、螺钉固紧、销钉防转;另一种用销钉定位螺钉固紧,如图 6-48 所示。前者定位可靠,重复精度高,但加工较复杂,中小型模具多采用这种结构。后者结构简单,易于装配,但重复精度差,抗侧向力差,因此,有时在凹模和压边圈之间再加小导柱、导套。

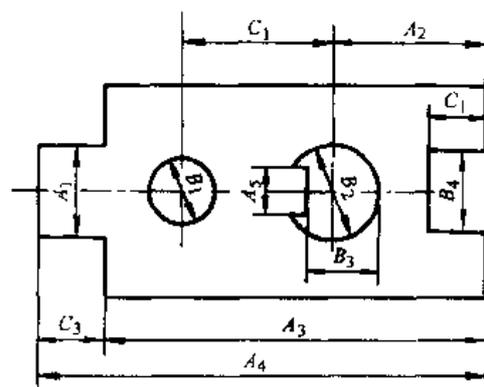


图 6-44 按零件内外形确定凸、凹模尺寸示例

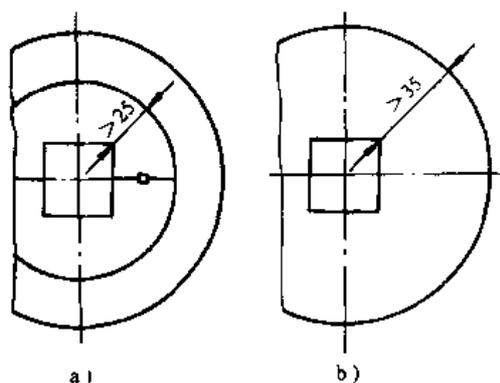


图 6-45 凹模型孔至边缘的最小距离
a) 镶拼式凹模 b) 整体式凹模

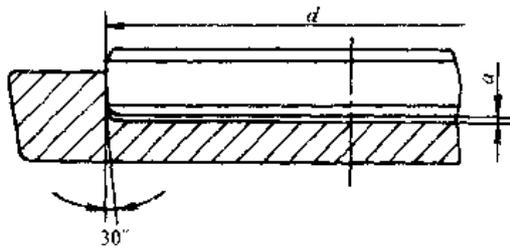


图 6-46 镶拼式凹模与整体式凹模

凹模用锥面定位时，其锥角取 3° ，轴向预压量即对应于图 6-46 中的 a 取 0.4mm 。

2. 压边圈

V 形环压边圈是精冲模的主要特征，其功能为在变形区建立三向压应力状态，防止材料在精冲过程中被剪裂；还可夹持材料使其和冲裁方向垂直；对材料起校平作用；对凸模起导向定位作用和卸料等。它对实现精冲起着关键作用。

V 形环压边圈的尺寸取决于料厚，料厚 4mm 以下的 V 形环压边圈的尺寸列于表 6-16。料厚 4mm 以上采用双面 V 形环压边圈，其尺寸列于表 6-17。此时一个 V 形环在压边圈上，另一个在凹模上。对于齿轮等要求精冲面垂直度较高的零件，即使料厚在 4mm 以下，也应采用双环形环。

表 6-15 镶拼式凹模的预压量

直径 d/mm	预 压 量	
	深度 a	公差
40~100	1.75	
150	2.5	± 0.25
>200	2.75	

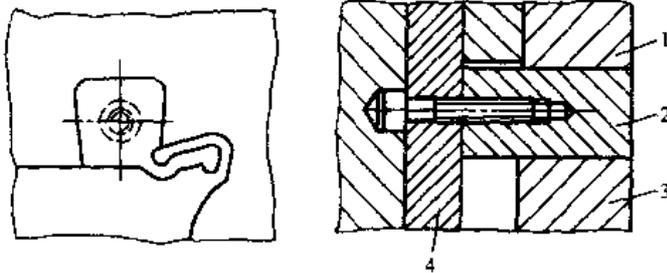


图 6-47 薄弱部分的凹模镶块

1- 凹模 2-凹模镶拼 3- 反压板 4- 冲孔凸模固定板

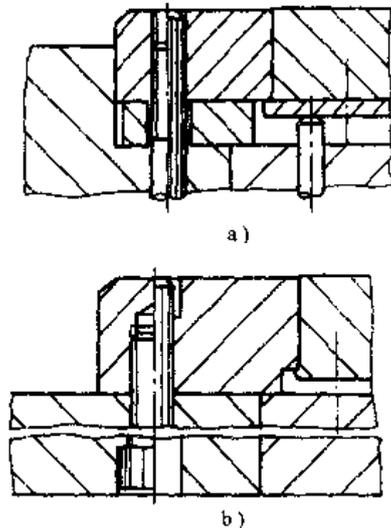


图 6-48 凹模的固定方式

冲小孔时，一般不需要 V 形环，冲直径 30mm 以上的孔时，应在顶杆上加 V 形环。

如前所述，V 形环一般沿冲裁件轮廓分布，但是当工件有较小的内凹轮廓时，V 形环可以不紧沿轮廓分布。

V 形环压边圈的外形结构及固定方法与凹模基本相同，也是采用整体式和镶拼式。

为了防止模具闭合时压坏 V 形环，在结构上需采用防护措施，如图 6-49 所示。

防护垫的高度 H 需大于 V 形环高度 h ，小于料厚 t ，采用双面 V 形环时，防护垫的高度 $2H$ 也需大于 V 形环高度 $2h$ ，小于料厚 t 。防护垫置于送料方向的两侧，中间开挡需大于条料宽度。

为了防止挤走润滑剂，压边圈在送料方向应适当减小厚度。

3. 凸模

凸模的结构分为两类，如图 6-50 所示。a、d 为等截面结构；c、b 为带凸缘结构。前者采用线切割和成形磨削加工，后者采用仿形刨和滚铣加工，两种结构也可采用电火花和外圆磨加工。

表 6-16 单面 V 形环尺寸 (mm)

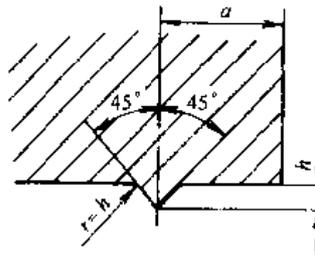
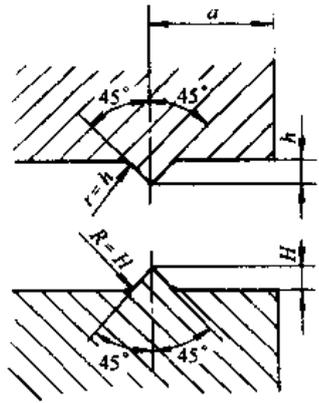
料厚 t		
	a	h
0.5~1	1.0	0.3
1~1.5	1.3	0.4
1.5~2	1.6	0.5
2~2.5	2.0	0.6
2.5~3	2.4	0.7
3~3.5	2.8	0.8
3.5~4	3.2	0.9

表 6-17 双面 V 形环尺寸 (mm)

料厚 t			
	a	h	H
4~5	2.5	0.6	0.9
5~6	3.0	0.8	1.1
6~8	3.5	1.1	1.4
8~10	4.5	1.2	1.6
10~12	5.5	1.6	2.0
12~15	7.0	2.2	2.6

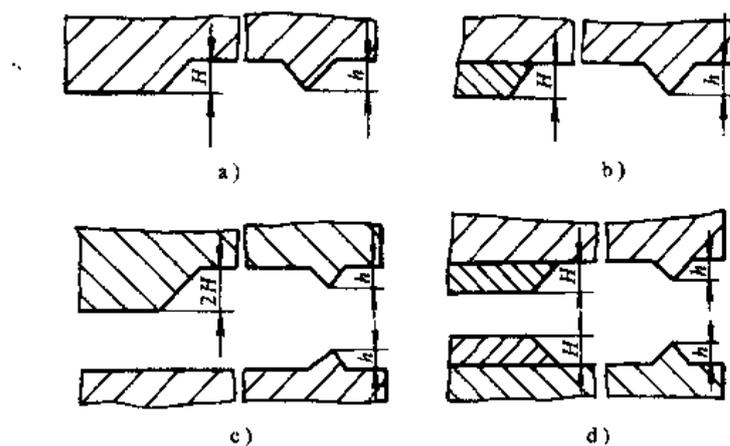


图 6-49 V 形环防护结构

a)、c) 整体结构 b)、d) 加防护垫

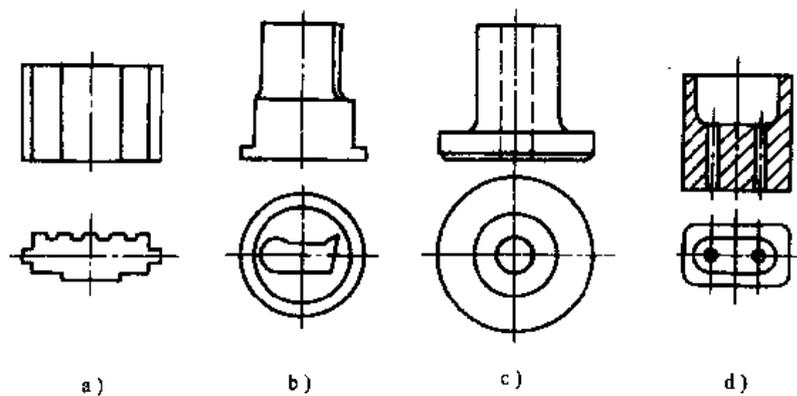


图 6-50 凸模结构形式

a)、c) 等截面凸模 b)、d) 带凸缘凸模

当凸模上有形状复杂的内孔或孔壁较薄时，其孔的深度一般取 8~15mm，以保证凸模强度。

凸模的固定方法如图 6-51 所示，根据其结构和尺寸大小，采用不同的固定方法。当加工厚板精冲件而凸模底面积又较小时，可采用加淬硬垫板的方法(图 6-51f)，防止在模座上压出痕来。

4. 凸模座及桥板

这种结构用于活动凸模。将凸模和凸模座分开便于加工、淬火处理和装配。

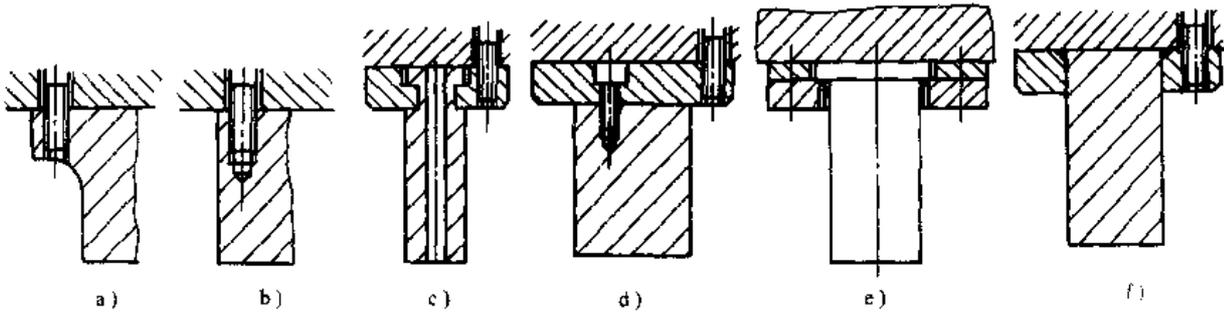


图 6-51 凸模的固定方法

a) 螺钉紧固凸缘 b) 螺钉固定 c) 压板固定 d) 带凸缘凸模 e) 焊接固定 f) 衬接固定

凸模座大部分采用圆形，如图 6-52 所示。对于窄而长的零件也可采用矩形凸模座，但矩形凸模座对中比较困难。凸模和凸模座可用骑缝钉防转，骑缝钉直径的 2/3 在模座内，1/3 在凸模座内，如图 6-52a 所示。也可采用防转键，如图 6-52b 所示。

桥板的形状根据凸模上冲孔凹模的形状和位置设计，既要保证传递力的要求，又要使凸模的支持面积尽可能大。桥板的形状有矩形，也有十字形和三角形。

5. 冲孔凸模

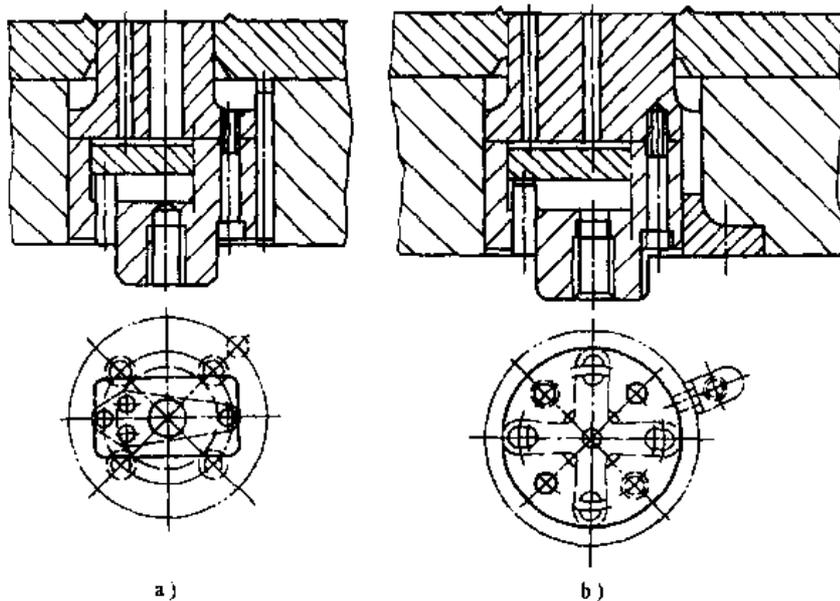


图 6-52 凸模座及桥板结构

a) 矩形桥板，用骑缝钉防转 b) 十字形桥板，用键防转

冲孔凸模和上述凸模一样也分等截面和带凸缘两种。圆形冲孔凸模的固定方法示于图 6-53。冲孔直径小于料厚的凸模，为了保证强度，仅在端部磨至所需尺寸，如图 6-54 所示，采用 a 、 b 的导向方法是有利的。

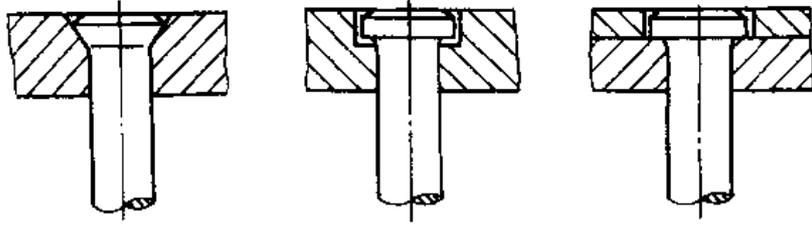


图 6-53 圆形冲孔凸模固定方法

异形冲孔凸模的固定方法示于图 6-55，当凸模尺寸大到可钻螺孔时，可直接用螺钉固定，如图 6-55b 所示。轮廓薄弱的冲孔凸模仅借反压板不能防止转动时，可在凸模头部用键防转，如图 6-55c、d 所示。

6. 反压板

反压板的作用为配合冲裁力和压边力在变形区建立三向压应力；使被冲材料与冲裁方向垂直；对工件起校平作用；对冲孔凸模起导向和定位作用；将工件从凹模内顶出；在复合工艺中在工件上压印、成形和弯曲等。

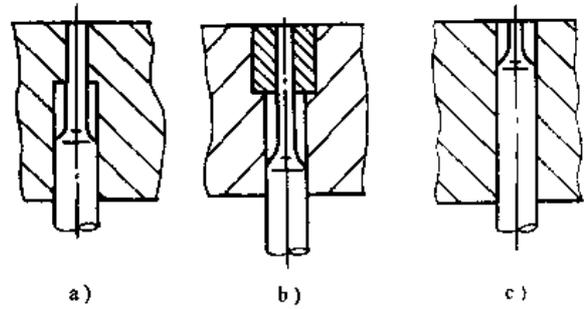


图 6-54 孔径小于料厚的台阶式冲孔凸模

反压板的形状和尺寸与凸模的工作部分相同，因此有时将凸模和反压板用一个整料加工，然后再分开。

反压板放置在上模座内，外形和凹模，内孔和冲孔凸模之间为无松动滑配。

如果凹模和反压板在下模座一侧，则反压板用等截面，直接支撑在顶杆上。如果凹模和反压板在上模座一侧，为了防止反压板从凹模内掉出，则需在反压板上加一限位板或将反压板的头部镗粗，如图 6-56 所示。

7. 顶杆

顶杆的作用是将废料从凸模的冲孔凹模内顶出。顶杆的结构如图 6-57 所示。为了防止废料粘在顶杆上，将顶杆头部稍微导圆(图 6-57a)；在头部加弹簧顶料销(图 6-57b)；在板上刻交叉小槽使废料易被吹掉(图 6-57c)；采用 T 形槽连接盖板与销(图 6-57d)；如果内孔的尺寸是料厚的 10 倍以上时，可在顶杆上加 V 形环，借以提高内孔的剪切面质量(图 6-57e)。

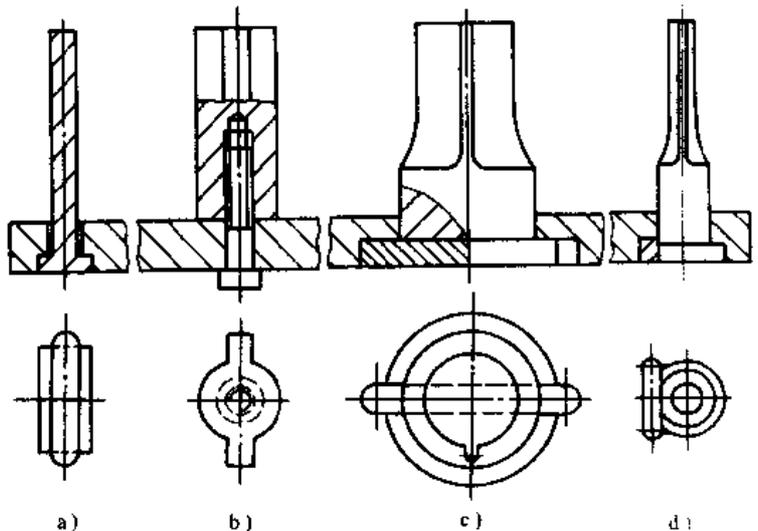


图 6-55 异形冲孔凸模固定方法

8. 传力杆

传力杆用于传递压边力、反压

力、顶件力和卸料力。其结构如图 6-58 所示。设计传力杆时，其许用应力为 $500\text{N}/\text{mm}^2$ 。

9. 排气、冷却、润滑

精冲模应设排气槽，如图 6-59 所示。因反压板在精冲过程中多次往复运动，在上垫板与压力垫间可能出现升压与降压，如果没有排气槽，会因封闭在运动空间的气体压力而影响反压板的运动进而引起安全装置起作用导致压力机停车。

精冲过程中因被冲材料塑性变形和外摩擦而引起局部高温，除了通过良好的润滑减少摩擦散发热量外，如果凸模的内、外工作部分壁部较薄，而又处于自动连续工作条件之下，模具工作面的薄弱部分，会由于温升而降低寿命，采用压缩空气冷却凸模不仅可提高凸模寿命，还有利于排除废料，压缩空气冷却装置如图 6-60 所示。

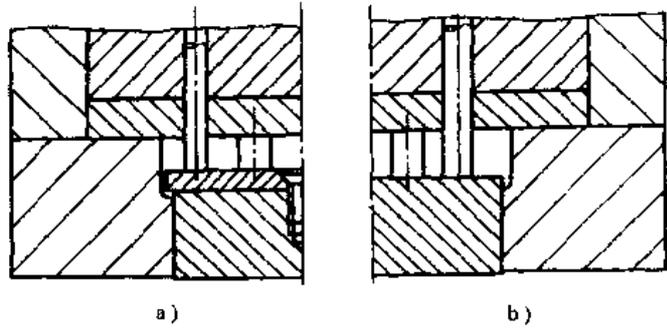


图 6-56 反压板的支持方法

a) 限位板与反压板用螺钉固定 b) 反压板头部微粗

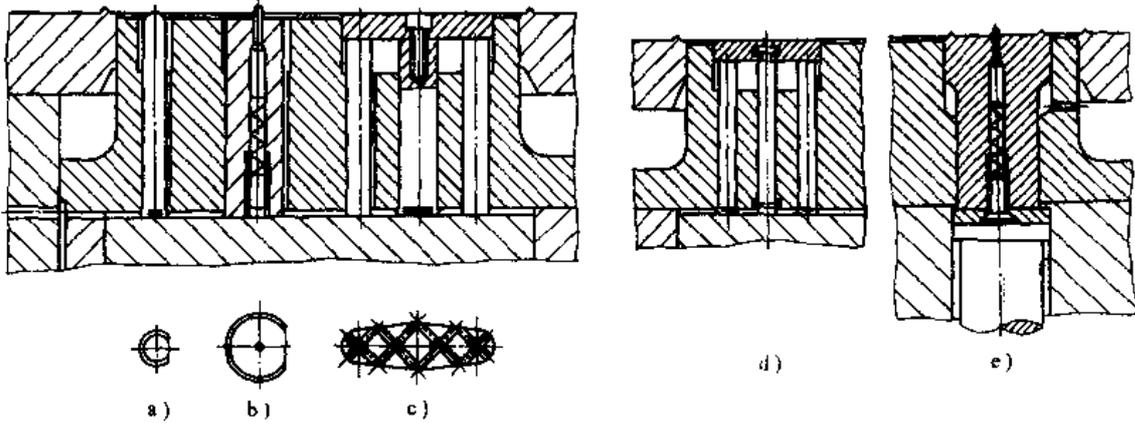


图 6-57 顶杆结构

a) 凸部导圆 b) 用弹簧顶料销 c) 端面开交叉小槽 d) 用销固住盖板 e) V 形环顶杆

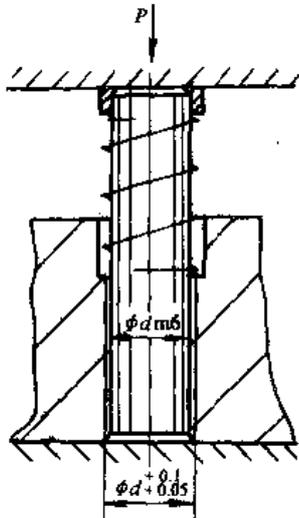


图 6-58 传力杆结构

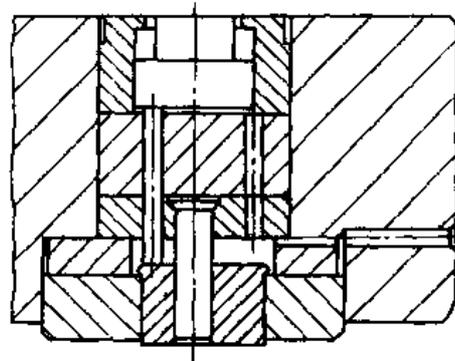


图 6-59 排气槽

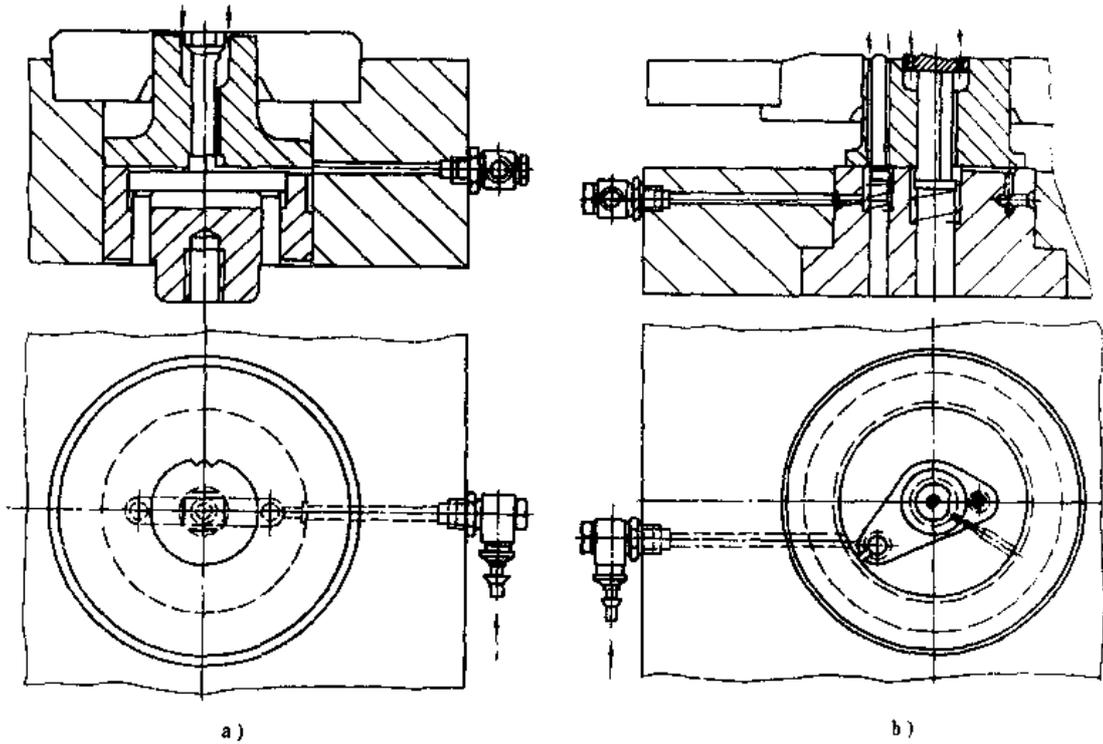


图 6-60 压缩空气冷却凸模装置
a) 适合于活动凸模 b) 适合于固定凸模

图 6-61 为获得充分润滑的模具结构。为了使润滑充分，在反压板、顶板和压边圈与模具工作表面接触的端面上倒角 $(0.2 \sim 0.4) \times 45^\circ$ ，模具闭合时，涂在材料两面的润滑剂被挤入凹模，成为储油空间，它紧靠着模具工作表面，在冲裁过程中，储存的润滑剂被模具工作表面带入剪切变形区，从而大大地提高了润滑效率。

为了使模具闭合时不挤走下一次冲裁所需的润滑剂，凹模和压边圈在送料方向做成下沉的台阶（见图 6-61），沉台至模具刃口的距离 D 和料厚、送进距离、工作形状等有关，一般取 D 为料厚的 2 倍。

10. 零件配合的尺寸要求

图 6-62 为活动凸模式模具的上、下模各零件间的配合和相关的尺寸要求。当压边和反压系统的刚性较差时，按图中所示压边圈高出凸模 $0.1 \sim 0.2$ ，而反压板高出凹模 $0.1 \sim 0.2$ 是不够的，应适当增加，确保在精冲开始前完成强力压边。在实际调试精冲过程中，发现零件精冲面出现缺陷时，应注意检查是否因未满足上述条件，导致压边和冲裁同时进行而引起的。

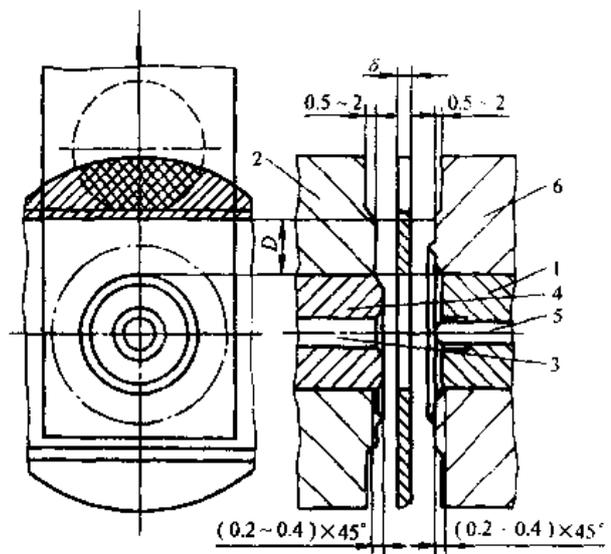


图 6-61 改善润滑条件的模具结构
1—凸模 2—凹模 3—冲孔凸模 4—反压板
5—顶杆 6—压边圈

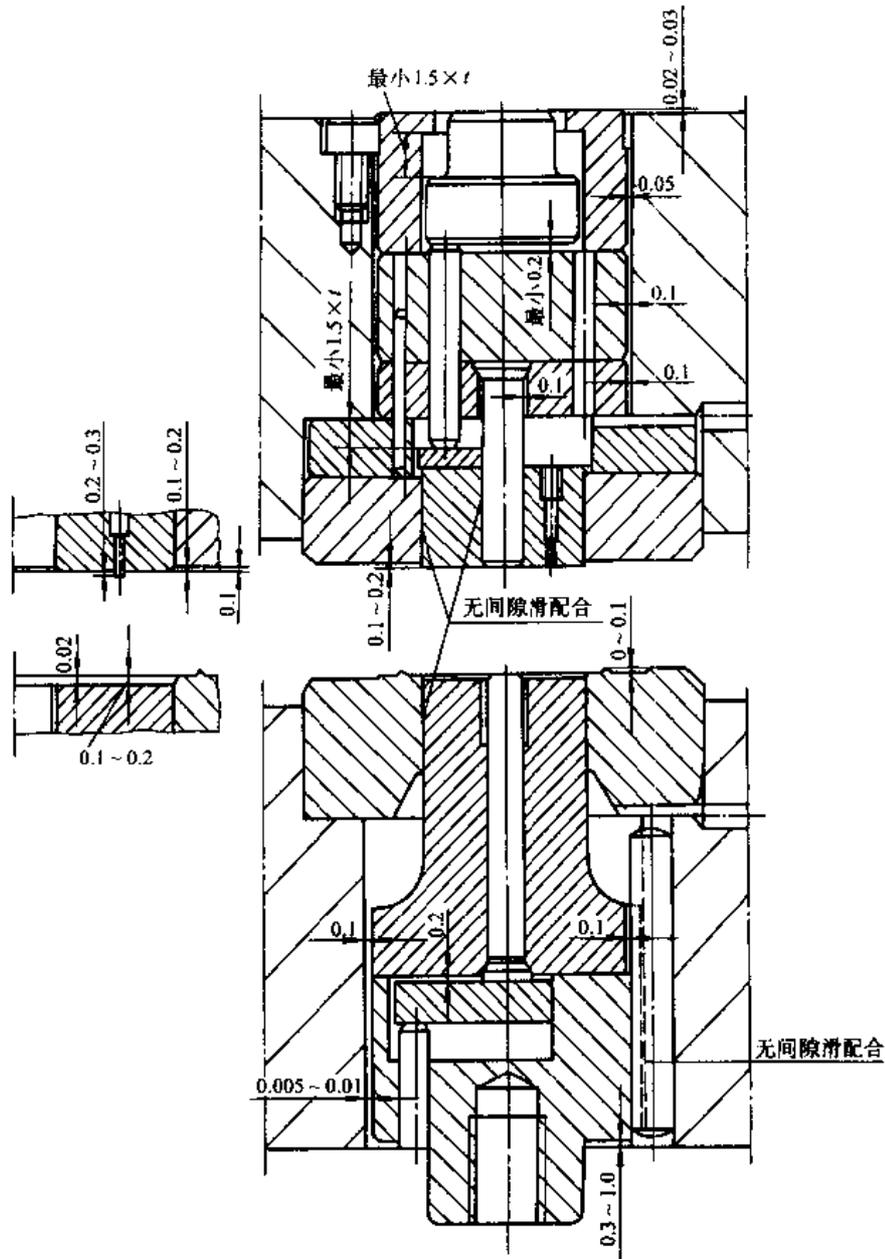


图 6-62 活动凸模式模具零件间的配合和尺寸要求

与活动凸模式模具一样，固定凸模式模具的压边圈高出凸模，反压板高出凹模的数值视系统的刚性而定，必须保证冲裁前完成强力压边。

另外，当凸模的强度和刚性足够时且不靠压边圈定位时，可以适当放松凸模和压边圈之间的配合间隙。同样当冲孔凸模的强度和刚性足够且不靠反压板导向定位时，也可适当放宽反压板和冲孔凸模以及凹模间的间隙。

四、精冲模的典型结构

1. 活动凸模式模具典型结构

图 6-41，图 6-63 和图 6-64 分别为活动凸模式精冲模具三种典型结构。图 6-41 结构应用

最普遍。图 6-63 结构的特点是上、下模座不带定位锥形凹槽，凹模和压边圈直接装在上、下模座平面上，压边圈和凹模靠导销对中，定位和导向重合，有利于加工和对中。图 6-64 结构的特点是用传力板代替桥板将四周的液压力传递到中间。

2. 固定凸模式模具典型结构

根据压边圈的导向结构和凹、凸模的固定方法的不同，有多种不同的典型结构，图 6-65 为 GKP 精冲压力机用固定凸模式复合精冲模，属于固定凸模式模具的典型结构之一。

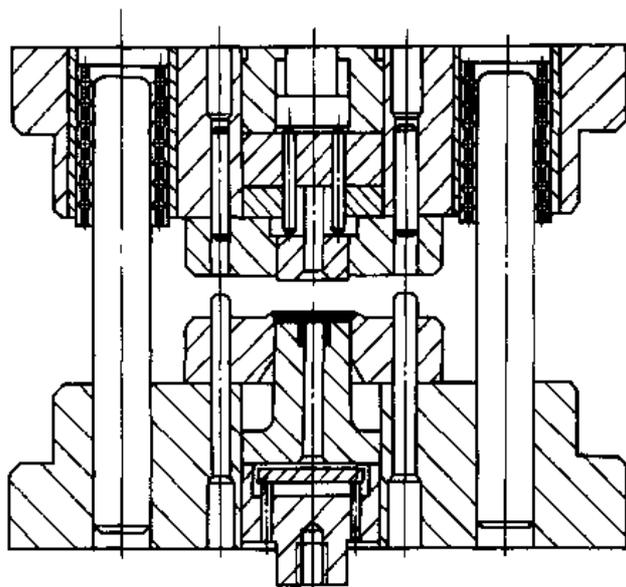


图 6-63 活动凸模式精冲模典型结构二

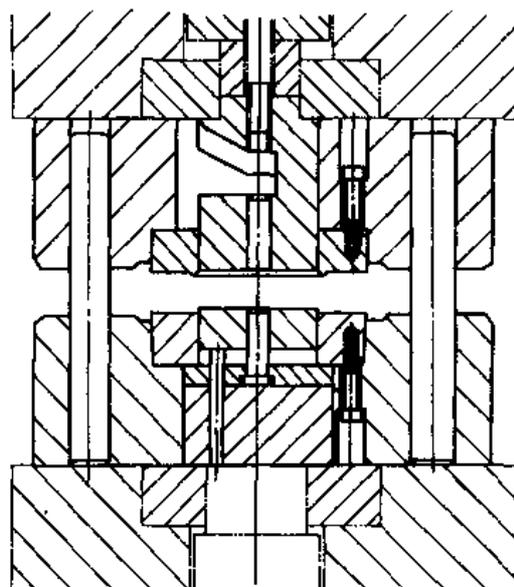


图 6-64 活动凸模式精冲模典型结构三

3. 连续模典型结构

有些复合工艺，如压扁精冲、压沉孔精冲、弯曲精冲等需在连续模上进行。图 6-66 为 GKP 精冲压力机用级进精冲模，属于连续模的典型结构之一。图 6-67 为相应的精冲工艺图。可以看出，该连续模分为三个工步：第一工步冲内孔；第二工步压内孔下倒角；第三工步为压上倒角和外圆落料。

4. 通用液压精冲模

精冲一般需要专用的精冲压力机，为了推广精冲工艺，扩大精冲工艺的应用范围，可采用通用液压精冲模或液压模架在通用压力机上进行。精冲所需的压边力和反压力由液压精冲模和液压模架提供。

压边和反压系统可单独成为一个系统，如图 6-68 所示的液压模架。也可安装在精冲模座或压力机内构成液压精冲模，如图 6-69 所示。

液压模架和液压精冲模均采用相同的液压系统，可用油泵或气动增压缸驱动，后者比较节能。

长期生产应用表明，在通用压力机上装上图 6-68 所示的液压模架，则压力机具有精冲压力机的功能，不但可以提供精冲所需的压边力和反压力，而且具有很高的导向精度和刚度，完全具备完成精冲工艺的技术条件。具有投资少、见效快的特点。

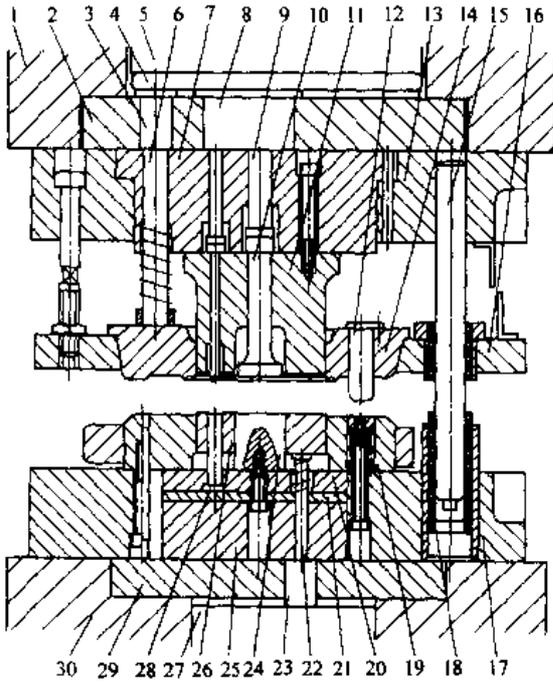


图 6-65 GKP 精冲压力机用固定凸模式复合精冲模

- 1—上工作台面 2—承力垫 3—大顶杆 4—压力垫
- 5—压力柱 6—顶杆 7—凸凹模固定板 8—压力柱
- 9—顶杆 10—推料杆 11—凸凹模 12—导销
- 13—上托 14—齿圈压板 15—导柱 15—活动
- 模板 17—底座 18—衬套 19—凹模 20—冲
- 孔凸模固定板 21—垫板 22—顶杆 23—大顶
- 杆 24—冲内形凸模 25—垫块 26—推件板
- 27—压力柱 28—冲孔凸模 29—承力垫
- 30—下工作台面

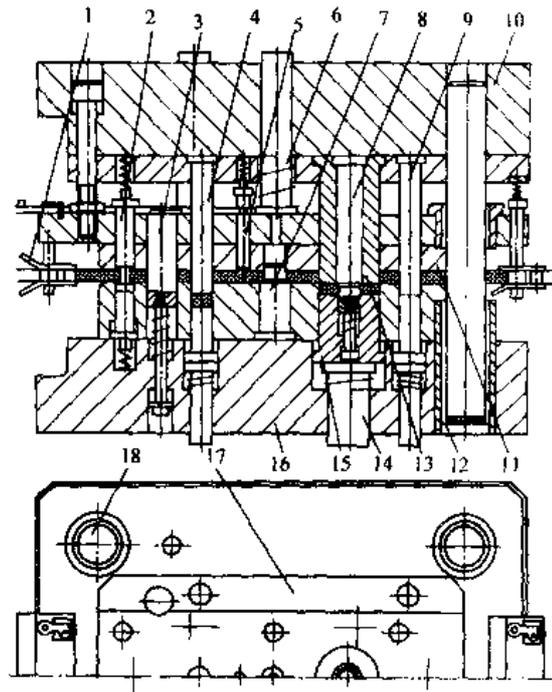


图 6-66 GKP 精冲压力机用

级进式精冲模

- 1—导料装置 2—导向销 3—定位杆 4—冲孔凸模
- 5—挡料销 6—顶杆 7—压倒角凸模 8—压毛刺面倒
- 角凸模 9—平稳压力杆 10—上托 11—齿圈压力板
- 12—衬套 13—落料凸模 14—顶杆 15—推件板
- 16—底座 17—限位侧板 18—导柱

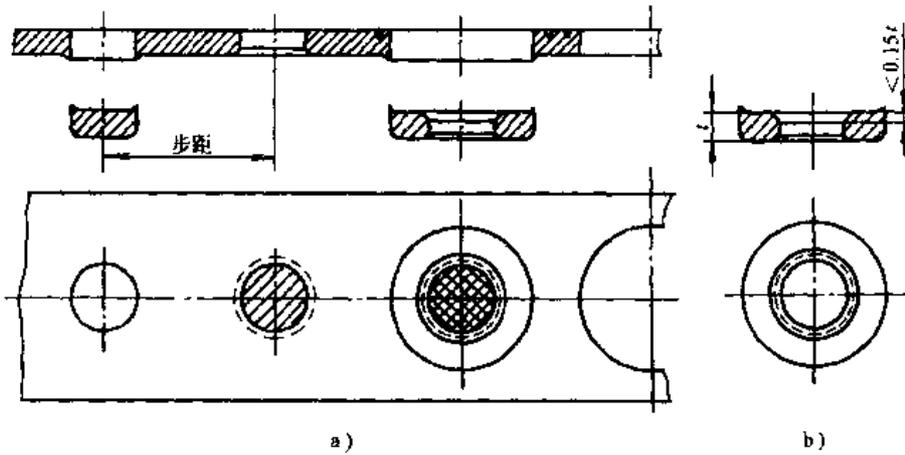


图 6-67 级进精冲工艺图

- a) 排样图 b) 精冲零件

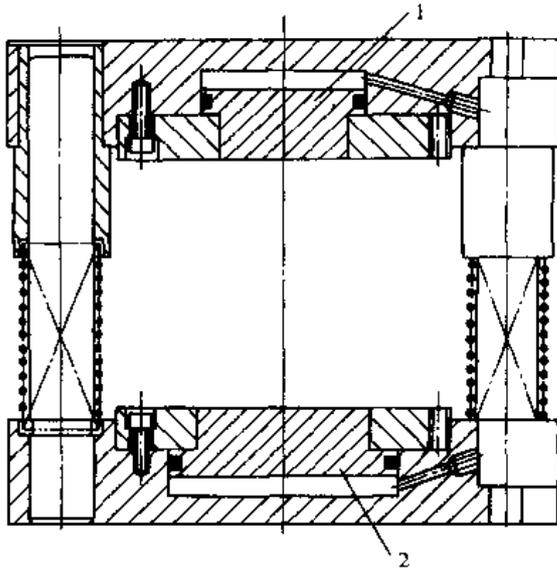


图 6-68 液压模架
1—反压系统 2—压边系统

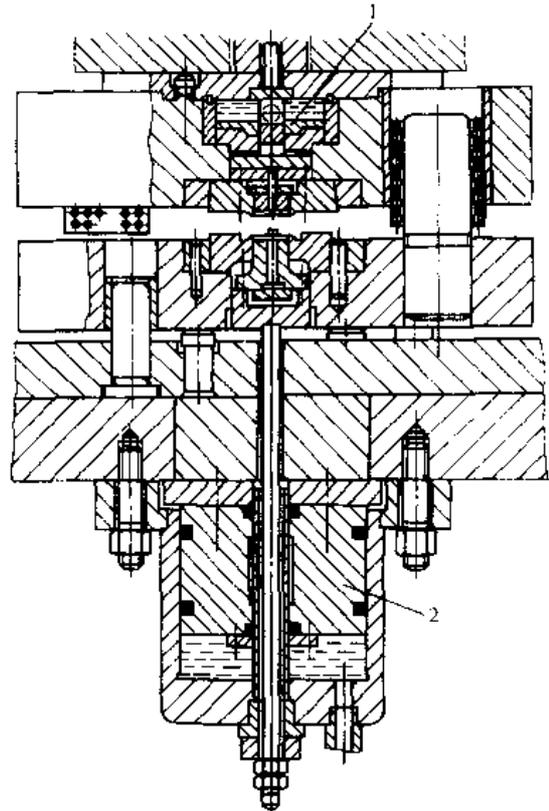


图 6-69 液压精冲模
1—反压系统 2—压边系统

第六节 精冲模具材料

精冲模具由通用模架和模芯所组成，通用模架已经标准化系列化，可根据需要直接向制造厂家订购。模芯也逐渐标准化，设计模芯时则主要是根据精冲零件的几何形状和尺寸，设计凸模、凹模、冲孔凸模、压边圈、反压板、顶杆和传力杆等主要零件。因此，精冲模具材料，也主要选择这些关键零件所需材料和热处理要求。

上述主要精冲模具零件，特别是凸模和凹模，其工作条件极为苛刻，在冲击载荷作用下，承受高压和瞬时高温，刃口不断和工件的新生表面间产生相对滑动摩擦，因此选用的模具材料必须满足如下要求。

(1) 硬度 精冲模具的冲切零件间隙小，受力大，磨损严重，要求有较高的硬度，以减少模具零件的磨损，保证其尺寸精度，但过高的硬度会带来脆性，因此按不同零件的受力情况，选择不同的硬度。

(2) 耐磨性 工件新生表面相对模具工作表面滑动摩擦引起的刃口磨损，是精冲模具的主要失效形式之一。一般情况下，材料的硬度越高，承压能力就越高，耐磨性也愈好，材料的耐磨性除与材料的硬度有关外，还和材料的组织有关。另外，模具材料含碳量及合金元素较多，淬火后有较多的残余奥氏体，而残余奥氏体的硬度不高，耐磨性差，一般精冲模具材料中残余奥氏体要求在 5% 左右为宜（体积分数）。为了提高耐磨性，用锻造方法改变碳化物

的大小和分布；用热处理方法控制残余奥氏体的量，以提高模具寿命。

(3) 强度 精冲时总的冲裁力较普通冲裁力大，因此要求模具有很高的承压、抗弯和抗拉强度。

(4) 韧性 模具零件断裂和崩刃是精冲模具常见的失效形式，产生这种失效的原因很多，其中韧性是主要原因。影响韧性的因素主要有钢中碳和合金元素的含量，晶粒度大小，碳化物颗粒大小及分布状态等。需通过合理的选用模具材料和锻造及热处理方法来提高韧性。

显然，硬度和韧性的需求是存在矛盾的，必须注意材料硬度和韧性的统一，从实际被精冲零件的强度和几何形状出发，或者是在不降低韧性的前提下，提高模具材料的硬度，或者是通过适当降低硬度来提高模具材料的韧性。精冲模具零件材料及热处理硬度要求列于表 6-18。

表 6-18 精冲模具主要零件材料及硬度要求

模 具 零 件	选 用 材 料	硬 度 HRC
凸 模	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V ₂ 、Cr12MoV	60~62
凹 模	Cr12MoV、W6Mo5Cr4V ₂ 、W18Cr4V	62~64
冲孔凸模	W6Mo5Cr4V ₂ 、W18Cr4V、Cr12MoV	60~62
压边圈	Cr12MoV、CrWMn	58~60
反压板	Cr12MoV、CrWMn	58~60
顶杆、定位销	T10A、T8A、9Mn2V	58~60
传力杆	CrWMn、9Mn2V、T10A	58~60
垫 板	Cr12、9Mn2V、9SiCr	56~58
导柱、导套	GCr15	58~62

第七章 复杂管件精密塑性成形

众所周知, 液压、气压传动系统及装置上的各种管接头, 自行车面管四通和中轴五通、波纹管、电缆接头、轻工产品和家用电器中的空心件, 一般均以空心管子为毛坯制作。近年来, 出现了这样的发展趋势: 一是随着汽车和航空工业的发展, 以提高载重量与自身重量之比为目标, 在设计和制造上不断要求减轻汽车和飞机等的自身重量。为此, 除了通过结构上的优化设计的途径外, 更多地是通过以空心件代替实心件的途径来实现。如美国通用汽车公司在这方面的研究和应用处于领先地位, 近年来先后有十多种车架零件采用空心件取代实心件。二是随着空调器、冷柜和冰箱等家电产品的发展, 需要大量的纯铜和黄铜管接头, 这些管接头形状极为复杂, 原来一般是采用管坯先胀形成简单形状再焊接为最终零件的方法生产, 采用这样的工艺方法生产, 因零件形状过于复杂焊接质量难于保证, 常出现漏气现象而影响产品质量, 且生产效率低。为此, 要求完全采用塑挤胀形的工艺方法生产。美国、日本等国家已基本实现了这一目标。国内, 也有少数单位着手这一新工艺的研究开发和应用。

本章着重论述和介绍变径缩径挤压成形、多通管塑挤胀形和管子翻卷成形。

第一节 变径管缩径挤压成形工艺及模具设计

一、缩径(缩口)挤压过程分析及工艺参数的确定

1. 缩径(缩口)挤压过程分析

缩径(缩口)如图 7-1a 所示, 是将管件或预先拉深好的圆筒件, 通过缩径模具将其口部直径缩小的一种成形工序。对于圆筒件, 有时用它来代替拉延工序, 可以减少冲压工序, 提高生产率。

缩径挤压如图 7-1b 所示, 首先由锥形凹模从端部对管坯进行缩径, 然后由芯棒从内部对已缩径部分的内壁进行挤压。

经观察分析, 缩径挤压过程大致可分为四个阶段。

(1) 刚性滑入阶段 管坯在凹模作用下, 其端部首先与凹模锥孔接触, 只有当管坯能够向锥孔内滑入时, 缩径过程才能进行, 管坯与锥孔表面接触的瞬间能够作刚性滑入的动力学条件为:

$$\tan(90^\circ - \alpha) \leq \tan\varphi$$

式中 α ——凹模锥孔半角;

φ ——摩擦角。

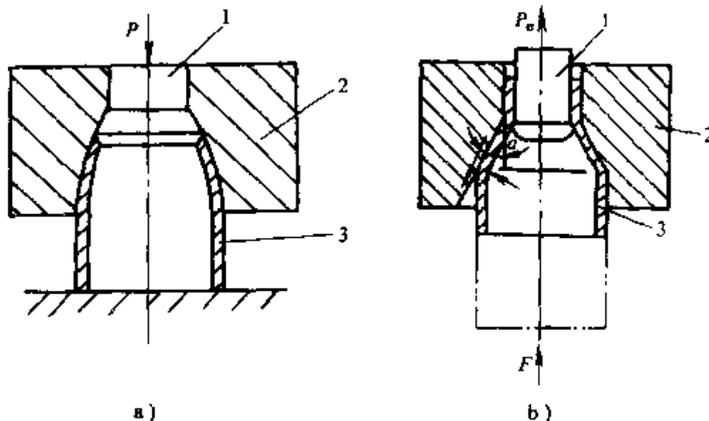


图 7-1 缩径(缩口)与缩径挤压过程示意

1—芯棒 2—凹模 3—工件

由上式可知,必然存在一临界锥角 $\alpha_{\text{临}}$ 。由于轴向压力的作用,管坯开始进入锥孔,要产生少量弯曲和周向压缩变形,增加了刚性滑入的难度,故由实验所得的 $\alpha_{\text{临}}$ 要比上式的理论计算值小。如果锥孔半角 $\alpha > \alpha_{\text{临}}$,管坯将无法向凹模锥孔内滑动而发生轴向失稳。因此,凹模锥孔半角 α 一定要小于 $\alpha_{\text{临}}$ 。从理论上可以证明必定存在一个最佳凹模锥孔半角 $\alpha_{\text{佳}}$,且不同的管材有不同的 $\alpha_{\text{佳}}$ 与 $\alpha_{\text{临}}$,但二者间的定量描述有待进一步实验研究。

(2) 缩径变形阶段 当管坯沿锥孔小端即凹模出口方向运动时,管坯直径不断减小,故圆周必为压缩变形,而厚度方向与轴向均为拉伸变形。随着缩径量的增加,应变硬化现象越来越严重,导致成形力急剧上升。当未变形区的变形抗力达到其屈服极限时,就会发生轴向塑性失稳而使零件报废。降低凹模孔表面粗糙度并采用合适的润滑剂,可以明显地减小未变形区的变形抗力。若将管坯在凹模出口处与入口处的直径之比称为缩径比 n ,则 n 值越小,发生轴向塑性失稳的可能性越大。将未变形区的变形抗力达到其屈服极限时的缩径比称为极限缩径比 $n_{\text{限}}$,当总缩径变形比大于其极限缩径比,即 $n_{\text{总}} > n_{\text{限}}$ 时,表明一次缩径不能达到所需尺寸,必须分多道缩径工序进行,且要求每个道次的缩径比 n 小于其极限缩径比 $n_{\text{限}}$ 。

若仅为缩口,整个变形过程到此结束。若为缩径,则还需经历反弯曲阶段。

(3) 反弯曲阶段 当管坯端部自凹模锥孔小端挤出后,并不是紧贴凹模定径区的模壁向前移动,而是仍沿锥孔斜壁方向向前移动一小段距离后再向外翻转而贴向定径区模壁。这种反弯曲现象不仅是由弹性回弹造成的,更主要是管子外壁金属因受凹模锥孔表面摩擦作用,使其流动方向与轴向送进方向相反,而内壁金属处于自由状态,导致管坯变形区内外金属流动不均匀的结果。实验表明,管壁越薄,反弯曲现象越严重。

(4) 挤压变形阶段 为了消除管端的反弯曲现象,在缩径变形结束后,通过心棒沿轴线自内向外的挤压变形,将处于定径区的管壁挤直并使内直径的尺寸精度和表面粗糙度达到零件的要求。

2. 缩径(缩口)工艺参数的确定

缩径(缩口)的变形特点由图 7-1a 可知,材料主要受切向压应力,使直径减小,壁厚和长度增加。因而,在变形过程中,材料由于切向应力的作用易于失稳起皱。同时,在非变形区的管壁,由于承受全部缩径压力 P ,也易于失稳而产生变形。所以,防止失稳起皱是缩径工艺的主要问题。缩径的极限变形程度,主要是受失稳条件的限制。缩径变形程度可用缩径系数 m 表示:

$$m = \frac{d}{D}$$

式中 d ——缩径后的直径;

D ——缩径前的直径。

缩径系数主要取决于材料的种类、厚度、模具形式及表面粗糙度。表 7-1 为平均缩径系数 $m_{\text{均}}$ 。表 7-2 为材料在不同支承方式下的缩径系数。由表 7-1 和表 7-2 可以看出,材料塑性越好、厚度越大,或者模具结构中对管壁有支持作用的,缩径系数 m 值便较小。

缩径模的支承方式如图 7-2 所示。

表 7-1 平均缩径系数 $m_{\text{均}}$

材料	材料厚度/mm			材料	材料厚度/mm		
	~0.5	0.5~1	>1		~0.5	0.5~1	>1
纯铜	0.75	0.7~0.65	0.65~0.60	钢	0.85	0.75	0.7~0.65
黄铜	0.85	0.8~0.7	0.7~0.65				

表 7-2 缩径系数 m

材料	支承方式		
	无支承	外支承	内外支承
软钢	0.70~0.75	0.55~0.60	0.30~0.35
黄铜 H62、H68	0.65~0.70	0.50~0.55	0.27~0.32
铝	0.68~0.72	0.53~0.57	0.27~0.32
硬铝 (退火)	0.73~0.80	0.60~0.63	0.35~0.40
硬铝 (淬火)	0.75~0.80	0.68~0.72	0.40~0.43

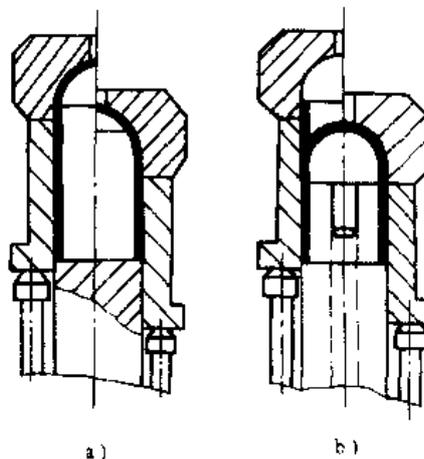


图 7-2 缩径模的支承方式

a) 外支承 b) 内外支承

当制件的缩径系数 $m_{\text{均}}$ 小于表 7-1 中所列的数值时, 就需要多次缩径, 其中缩径系数可参考下式确定:

$$\text{首次参考系数} \quad m_1 = 0.9m_{\text{均}}$$

$$\text{再次缩口系数} \quad m_2 = (1.05 \sim 1.1)m_{\text{均}}$$

缩径次数 n 可按下式确定:

$$n = \frac{\lg d - \lg D}{\lg m_{\text{均}}}$$

缩径后端部壁厚由原来厚度 t_0 增加到 t' , 其值为

$$t' = t_0 \sqrt{\frac{D}{d}}$$

对于多次缩径

$$t_n = t_{n-1} \sqrt{\frac{D}{d}}$$

缩径后工件高度的计算 (参见图 7-3) 如下:

对于图 7-3a:

$$H = 1.05h_1 + \frac{D^2 - d^2}{8D\sin\alpha} \left(1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right)$$

对于图 7-3b:

$$H = 1.05 \left\{ h_1 + h \sqrt{\frac{d}{D}} + \frac{D^2 - d^2}{8D\sin\alpha} \left(1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right) \right\}$$

对于图 7-3c:

$$H = h_1 + \frac{1}{4} \left[1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right] (\sqrt{D^2 - d^2})$$

缩径凹模的锥角 $\alpha < 45^\circ$ ，最好在 30° 以下。

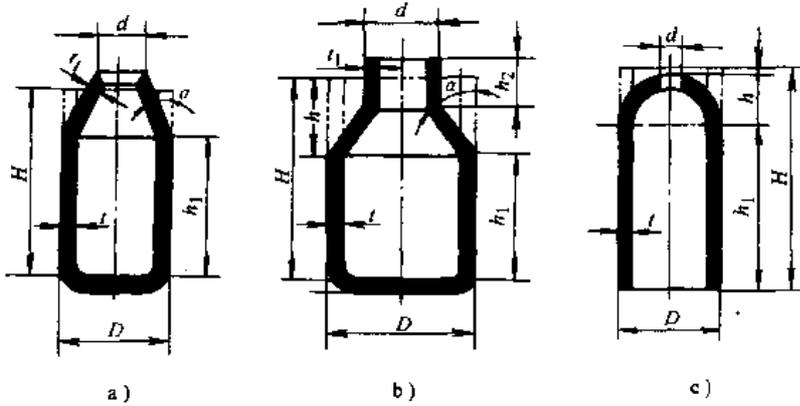


图 7-3 缩径后工件高度的计算

在合理的锥角 α 时，允许的极限缩径系数 m 可比 $m_{\text{容}}$ 小 $10\% \sim 15\%$ 。缩径后，由于回弹的原因，工件要比模具尺寸增大 $0.5\% \sim 0.8\%$ 。

二、缩径成形力和壁厚变化的计算

1. 缩径成形力的计算

薄壁管缩径挤压成形中挤压变形量甚微，变形力较缩径成形力要小，从选择设备吨位和凹模强度设计考虑，只需分析计算缩径成形力即可。

在薄壁管缩径成形过程中，因任意截面的壁厚与直径之比很小，故沿壁厚的应力变化可以忽略不计，忽略管坯的弹性变形对计算误差也不会造成多大影响。因此，可以认为当管端到达凹模出口处时其缩径变形已由非稳态过程转变为稳态过程，如图 7-4a 所示。在变形区内微元体上的应力状态如图 7-4b 所示，其中平行于锥孔表面的 q 为轴向应力， σ_θ 为周向应力， p 为模具与工件接触表面上的法向应力，对应的摩擦应力为 $\tau = \mu p$ ， μ 为摩擦系数。应用主应力法分析可得

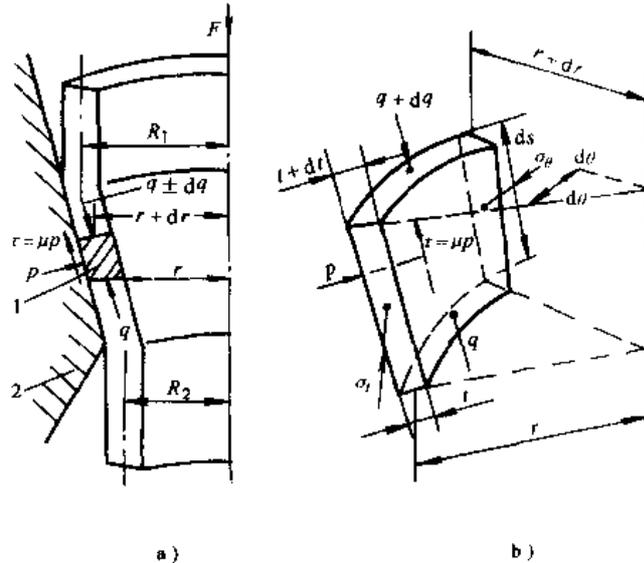


图 7-4 缩径变形过程及应力状态

1—管坯 2—凹模

$$\left. \begin{aligned} p &= \sigma_\theta t \cos \alpha / r \\ d(rqt) / dr - \sigma_\theta t (1 + \mu \cot \alpha) &= 0 \end{aligned} \right\} r \quad (7-1)$$

对于薄壁管壁厚的变化可以忽略不计，即 $dt/dr \rightarrow 0$ ，并令 $B = \mu \cot \alpha$ ，则由方程 (7-1) 可得

$$r \frac{dq}{dr} + q - \sigma_\theta (1 + B) = 0 \quad (7-2)$$

严格地讲， p 不是主应力，轴向应力也与端面上非均匀分布的剪应力相关； $t \cos \alpha / r$ 很小， p 比 σ_θ 、 q 要小得多，且对于一般的摩擦系数而言，剪应力的影响可以忽略不计，因此，应力主轴方向不变。由于周向应力 σ_θ 在数值上大于轴向应力 q ，因此， $\sigma_\theta > q \geq p$ (均为压应力)，令

$\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_2 = q$, $\sigma_3 = p$ 。由于 $\sigma_3 = p$ 可以忽略不计, 因此, Von-Mises 屈服准则可写成 $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 = Y^2$, Y 为理想刚塑性材料的屈服应力。对于同一应力状态, Tresca 屈服准则表达式为 $\sigma_1 - \sigma_3 = Y$ 。对于大多数工程材料来说, Von-Mises 屈服准则较 Tresca 屈服准则更精确一些。然而, 当主应力的大小顺序已知时, 应用 Tresca 屈服准则会使数学运算更简单。在薄壁管缩径变形过程中三个应力的大小顺序已知, 为了兼顾两个屈服准则的优点, 作者采用一种所谓的修正 Tresca 屈服准则。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = mY \quad (7.2)$$

式中, m 为可调整的常数, 由最小二乘法计算得出, 对于平面变形状态 $m = 1.1$ 。

在实际应用过程中, 应变硬化对壁厚的影响很小, 因此对于应变硬化材料, 用平均屈服应力代替式 (7.3) 的 Y 能保证足够的精度。修正的 Tresca 屈服准则为

$$\sigma_\theta - p = mY \quad (7.4)$$

进而可得 $\sigma_\theta = mY$

将方程 (7.4) 代入式 (7-2), 整理后得到

$$\frac{dq}{q - mY(1+B)} = -\frac{dr}{r} \quad (7.5)$$

对式 (7-5) 积分并利用在凹模出口处的边界条件 $r = R_2 = D_2/2$, $q = q_2 = 0$, 由此可得

$$q/Y = m(1+B) \left(1 - R_2/r\right) \quad (7.6)$$

凹模入口处的圆弧过渡部分的摩擦和弯曲作用对缩径成形过程有重要影响, 考虑其影响得凹模入口处的轴向应力为

$$q_{\max} = [mY(1+B)(1 - R_2/R_1) + Y_1/4R_a](1 + \mu\alpha) \quad (7.7)$$

式中, R_a 为凹模圆弧过渡区最小径向曲率半径。于是, 实际所需的缩径成形力为

$$F = \pi D_1 t_1 q_{\max} \quad (7.8)$$

由式 (7.8) 可知, 在其他条件相同时, 缩径成形力 F 随摩擦系数和壁厚的增加而增加。当凹模锥孔半角 $\alpha = \alpha_{\text{佳}}$ 时, F 值最小, 且 $\alpha_{\text{佳}}$ 随摩擦系数的增加而增加。

缩径 (缩口) 力 F 也可按下式计算:

$$F = K \left[1.1\pi D t \sigma_s \left(1 - \frac{d}{D} \right) (1 + \mu \tan \alpha) / \cos \alpha \right] \quad (\text{N})$$

式中 t ——材料厚度 (按厚度不变计算) (mm);

D ——毛坯直径 (中径) (mm);

d ——缩径部分直径 (中径) (mm);

μ ——凹模与毛坯接触面的摩擦系数;

σ_s ——材料屈服强度, 取 $\sigma_s = \sigma_b$;

α ——凹模圆锥半角;

K ——速度系数, 在曲柄压力机上工作时, $K = 1.15$ 。

2. 壁厚变化的计算

前面已给出了缩径后管端壁厚的计算公式, 这里再作进一步的分析和计算。

缩径过程中对应于凹模锥孔部分的管坯壁厚变化最大, 因此, 在此仅讨论该区域管坯壁厚的变化规律。假设管材为理想刚塑性材料, Von-Mises 应力应变增量关系为:

$$\begin{aligned}d\epsilon_1 &= \frac{dr}{r} = d\lambda(\sigma_1 - \sigma_m) = \frac{2}{3}d\lambda\left[\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}\right] \\d\epsilon_2 &= \frac{dh}{h} = d\lambda(\sigma_2 - \sigma_m) = \frac{2}{3}d\lambda\left[\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right] \\d\epsilon_3 &= \frac{dt}{t} = d\lambda(\sigma_3 - \sigma_m) = \frac{2}{3}d\lambda\left[\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right]\end{aligned}\quad (7-9)$$

式中 σ_m —— 平均应力, $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 。

如果管材满足体积不可压缩条件, 则有

$$d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3 = 0 \quad (7-10)$$

由方程(7-9)可得

$$\frac{d\epsilon_3}{d\epsilon_1} = \frac{dt/dr}{dr/r} = \left[\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right] / \left[\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}\right] \quad (7-11)$$

对于平面应力状态($p = \sigma_3 \approx 0$), 整理式(7-11)可得

$$\frac{dt}{t} = \left[\frac{q + \sigma_\theta}{q - 2\sigma_\theta}\right] (dt/r) \quad (7-12)$$

由 $\sigma_1 = \sigma_\theta = mY$ 及 $\sigma_2 = q = mY(1+B)(1-R_2/r)$, 可得

$$\frac{dt}{t} = \left[1 + \frac{3r}{(1-B)r + (1+B)R_2}\right] \frac{dr}{r} \quad (7-13)$$

对上式积分得

$$t = \frac{ct}{[(1-B)r + (1+B)R_2]^{3/(1+B)}} \quad (7-14)$$

式中 c —— 积分常数。

在凹模入口处 $r=R_1, t=t_1$, 由此可得壁厚 t 与半径 r 的关系

$$t = \frac{rt_1}{R_1} \left\{ \frac{(1-B)R_1 + (1+B)R_2}{[(1-B)r + (1+B)R_2]} \right\}^{3/(1+B)} \quad (7-15)$$

将凹模出口处 $r=R_2$ 及 $t_1=t_2$ 代入式(7-15)可得出口处的壁厚

$$t_2 = \frac{R_2 t_1}{R_1} \left[\frac{(1-B)R_1 + (1+B)R_2}{2R_2} \right]^{3/(1+B)} \quad (7-16)$$

令出口处与入口处管径之比为 $n=R_2/R_1$, 则管壁厚度之比为

$$n_t = \frac{t_2}{t_1} = n \left[\frac{(1-B) + (1+B)n}{2n} \right]^{3/(1+B)} \quad (7-17)$$

由于缩径变形阶段轴向应力 q 为压应力, 图 7-4b 所示微元体处于三向受压状态。在实际缩径范围($0.7 < n < 1.0$)内, 壁厚不断增加。当直径比 n 一定时, 锥孔半角 α 越小, 壁厚比 n_t 越大。

三、缩径挤压模具设计及应用实例

1. 缩径挤压模具设计

图 7-2 所示实际为缩径(缩口)模的工作部分。图 7-5 为一简单缩径模具的整体结构。不难看出, 它与一般冲压模具的结构相似。但在设计时, 需特别注意的是, 当工件长径比较大在缩径过程中可能产生失稳时, 应当设计芯棒, 芯棒还起定位作用。

2. 应用实例

图 7-6 所示变径管为用于自卸车和一些改装车的传动轴套管, 因为内径 d_1 有较为严格的

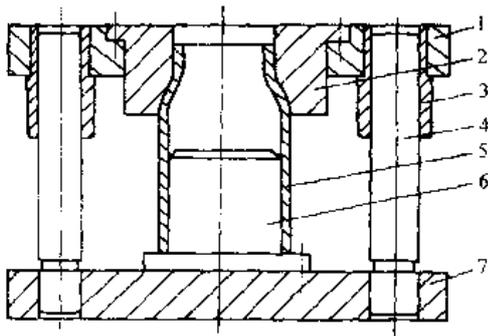


图 7-5 缩径模具结构
1—上模板 2—凹模 3—导套 4—导柱
5—工件 6—芯棒 7—下模板

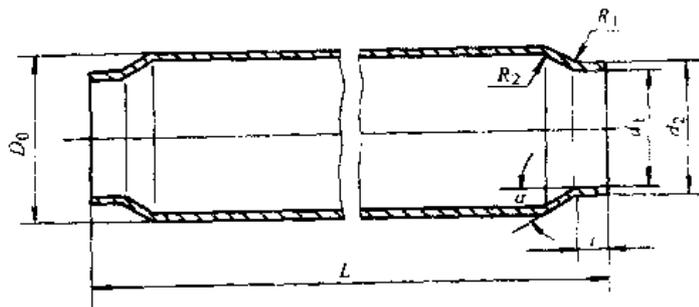


图 7-6 变径管零件

精度要求，故需采用外缩径内挤压的成形工艺才能达到图样要求。

图 7-7 为实现变径管缩径挤压工艺的模具装置。1 为管坯夹紧凹模，3 为缩径凹模，4 为芯棒，5 为凹模座，9 为油缸柱塞。凹模 3 通过螺栓 6 与凹模座 5 相连，芯棒 4 通过螺钉 7 与凹模座紧固为一体，凹模座 5 通过螺钉 8 与油缸柱塞 9 固定。油缸与夹紧凹模 1 的下凹模固定在油压机的工作台面上，夹紧凹模 1 的上凹模固定在油压机滑块上。工作时，首先油压机滑块下行，凹模 1 的上下两半凹模将管坯 2 夹紧，接着左右两油缸柱塞 9 向前移动，芯棒 4 伸入管坯内，左右两凹模 3 同时对管坯两端进行缩径，当缩径长度达到预定长度后，左右两油缸柱塞同时后退，凹模 3 静止不动，芯棒 4 随柱塞 9 后退而对工件两端已缩径的部分进行挤压，当柱塞继续后退时，通过螺栓 6 将凹模 3 从工件上退出，油压机滑块回程，完成一个工作循环，即生产出一根变径管。

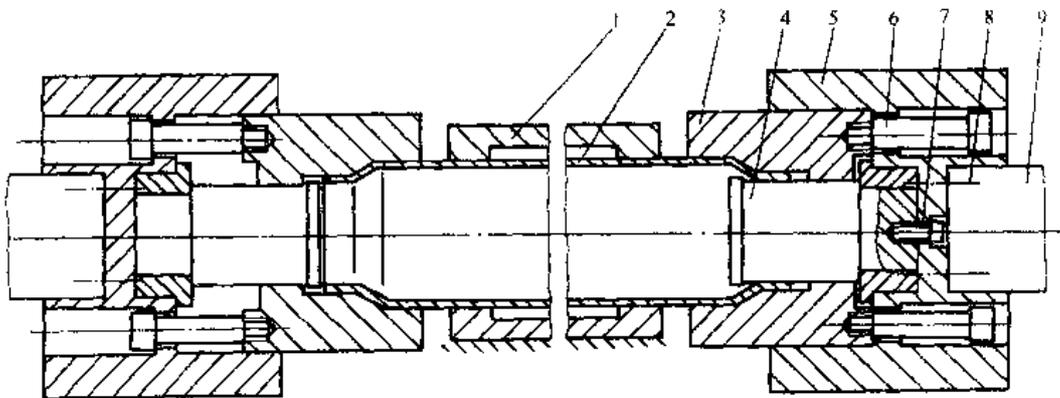


图 7-7 缩径挤压工艺的模具装置

1—夹紧凹模 2—管坯 3—缩径凹模 4—芯棒 5—凹模座 6—螺栓 7、8—螺钉 9—油缸柱塞

以 EQ3141G 套管为例，传统的生产工艺是将两段直径为 d_2 的短管通过两段截锥管同直径为 D_0 的长管焊接后经车削两端内孔 d_1 至规定精度而成，而两段截圆锥则是采用厚壁筒经车削加工而成。或采用厚壁管坯将小端与截锥管作为一整体加工（两件），然后同直径为 D_0 的长管焊接为一体，再将两端孔径 d_1 加工到规定尺寸精度。采用整体管坯缩径挤压成形，只需油压机一次工作循环，便能生产一根优质变径套管。

缩径挤压成形同传统工艺比较：

1) 显著降低生产成本，例如生产一根 EQ3141G 套管，其加工费用由约 62 元减少到 29 元，即减少了 50% 以上；

2) 采用整体管坯, 材质均匀, 且经冷态缩径挤压变形, 使套管两端材料得到了强化, 提高了力学性能指标, 增强了扭转疲劳寿命。且因整体成形明显提高了动平衡性能, 采用老工艺生产时, 多数套管需附加 2~3 块配重块, 采用新工艺生产时, 多数套管只需附加 1 个配重块;

- 3) 显著提高生产率, 且改善劳动条件;
- 4) 易于实现生产自动化。

第二节 多通管塑挤胀形工艺及模具装置

一、工艺基础

1. 自然胀形和轴向压缩(塑挤)胀形

根据毛坯的变形不同, 胀形可以分为自然胀形和轴向压缩胀形两类。自然胀形, 即在胀形过程中, 零件的成形主要靠毛坯壁厚的变薄和轴向自然收缩(缩短)而成形。轴向压缩胀形, 即在胀形的同时, 沿管坯轴向施加挤压力而进行压缩成形, 故也称为塑挤胀形

(1) 自然胀形 如图 7-8 所示, 自然胀形时, 毛坯的壁部主要承受双向拉应力的平面应力状态和两向伸长, 一向变薄的变形状态。

自然胀形的变形情况较为复杂, 随着胀形零件的形状和胀形部位的不同, 能够胀形的程度差别很大, 这是因为在胀形过程中与轴向有无自然收缩和收缩量的大小有关。当成形部分完全靠毛坯壁部的变薄而成形时, 如图 7-8 和图 7-9 所示, 其成形极限与材料的伸长率有关, 也与毛坯的壁厚有关。

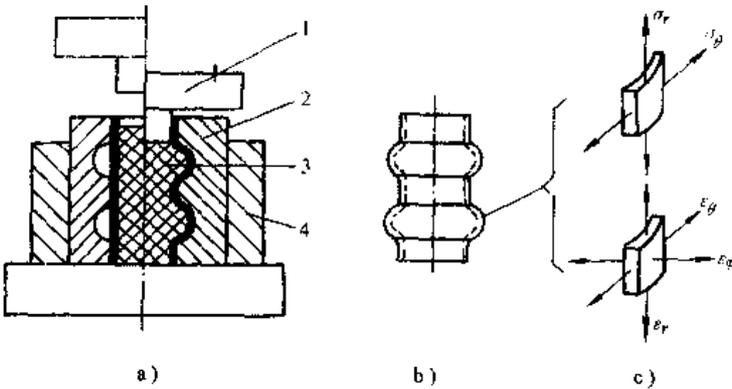


图 7-8 自然胀形极其应力应变状态

a) 胀形过程 b) 零件 c) 应力应变状态

1—压力头 2 组合凹模 3—聚氨酯橡胶棒 4—凹模座

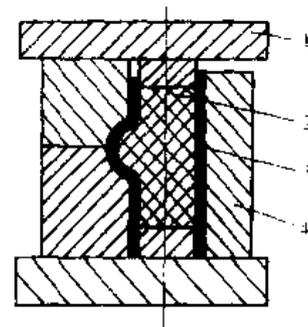


图 7-9 不对称胀形

1—压力头 2—聚氨酯橡胶棒 3—零件 4—组合凹模

零件胀形部分的最大延伸率 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \leq 0.75\delta$$

式中 L_0 ——胀形前胀形部分的毛坯周长;

L_1 ——胀形后胀形部分的最大周长;

δ ——材料的伸长率。

上述这种完全靠变薄而成形的例子, 实际上是一种局部成形的例子。

另一种自然胀形的例子是在胀形部分局部变薄的同时，还伴随着轴向的缩短。由于轴向缩短部分的材料补充到成形部分；因此，其成形极限要比上述完全靠变薄的局部胀形情况好得多，如图 7-10 所示。

带轴向收缩的自然胀形，其成形极限通常用胀形系数 K 表示：

$$K = \frac{d_{\max}}{d_1}$$

式中 d_{\max} ——胀形后零件的最大直径；

d_1 ——胀形前毛坯直径。

表 7-3 所列为几种材料的胀形系数实验值。

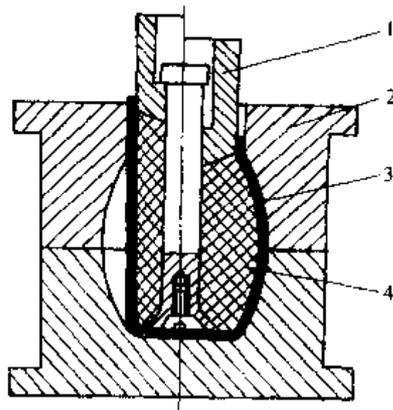


图 7-10 双动冲床上筒形件的胀形

1—内滑块压力头 2—组合凹模

3—零件 4—聚氨酯橡胶棒

表 7-3 胀形系数实验值

材 料	厚度 /mm	伸长率 (%)	极限胀形 系数 K
高塑性铝合金	0.5	25	1.25
	1.0	28	1.28
纯铝	1.2	32	1.32
	2.0	32	1.32
低碳钢 (10、20 号钢)	0.5	20	1.20
	1.0	24	1.24
不锈钢 (1Cr13Ni4Ti 型)	0.5	26~32	1.26~1.32
	1.0	28~34	1.28~1.34

胀形系数 K 与材料伸长率的关系为

$$\delta = \frac{d_{\max} - d_1}{d_1} = K - 1$$

或

$$K = 1 + \delta$$

前面已经介绍，带轴向自然收缩的胀形，其胀形极限系数 K 与胀形件的端部收缩量的多少，有很大变化，因此，对同一材料的各种不同的胀形件不可能有相同的极限胀形系数。为此，表 7-3 及以上计算公式所得的 K 值只能是参考值。

利用聚氨酯橡胶或橡皮胀形时，由于在胀形过程中，聚氨酯橡胶或橡皮与毛坯间的摩擦作用带动毛坯向成形部分流动，因而这种摩擦作用是有利的，有利于减少毛坯的变薄和不均匀程度，有利于提高极限胀形系数。

胀形部分的壁厚变化，大致可按式计算：

$$t = \frac{d_1}{d_{\max}} t_1$$

式中 t ——最大胀形处的壁厚；

t_1 ——毛坯的壁厚；

d_{\max} ——胀形处的最大直径；

d_1 ——毛坯直径。

(2) 轴向压缩胀形（塑挤胀形） 在生产实践中，为了提高胀形系数，通常采用在胀形

的同时，将毛坯沿轴向进行压缩，即所谓轴向压缩胀形。采用轴向压缩的结果，使胀形区的应力、应变状态得到了改善，有利于塑性变形（如图 7-11 所示）。譬如，在轴向压力足够大时，变形区的轴向拉应力变为压应力，即变为—拉—压的应力状态，而应变状态也可能由图 7-8 所示的厚向变薄、径向及轴向伸长变为轴向压缩、径向伸长，而厚向可能不变薄或变薄很少，这就可以显著的提高胀形系数的极限值。但是，要实现毛坯的轴向压缩，只有在毛坯的厚度较大时才易于实现。

生产实际中，对毛坯所施加的轴向压缩力和对聚氨酯橡胶凸模所施加的胀形力可同时进行，也可分别单独进行。由于聚氨酯橡胶的体积不可压缩（而采用橡皮时，其体积随压力的变化而稍有变化，其变化量一般可取 2% 左右），对毛坯和聚氨酯橡胶的压缩胀形可同时进行，这对模具的设计和制造带来很大的方便。但有时为了提高胀形系数，使作用在毛坯上的压力达到材料的流动极限 σ_s 值，而聚氨酯橡胶的胀形力只起毛坯材料成形的导向作用和防皱作用，此时，极限胀形系数可以很大。

随毛坯的轴向压缩力与对聚氨酯橡胶的胀形力的大小及其比值的不同，在胀形区域上材料所受的应力、应变状态可能很不一样（见图 7-11 的虚线箭头指示），应力状态中的轴向应力 σ_z 一般应为压应力状态，但当对毛坯的压力不足，或对毛坯的压力与对聚氨酯橡胶的胀形力的比值过小，也可能为拉应力状态，这在本质上与不带轴向压缩的自然胀形一样。其应变状态一般应为一拉一压的平面应变状态，或一拉两压的体积应变状态，但也可能出现两向拉伸、一向压缩的不利的应变状态，这在结合具体零件，编制工艺规程和设计模具时应予注意。

据日本资料介绍，自然胀形时，其胀形系数 K ，对低碳钢为 1.15~1.2；对不锈钢为 1.26~1.32。但对毛坯施加以轴向压缩时，则其胀形系数 K ，对低碳钢可提高到 1.4~1.5；对不锈钢可提高到 1.6~1.7。胀形系数的上限受材料的稳定性和硬化的影响。

2. 胀形介质的选择

目前，在胀形中采用如下几种材料作为介质：

(1) 液体 采用液体作为介质的胀形称为液压胀形。液体介质能够根据需要很方便地选择合理的胀形力和胀形速度，能够获得最大的胀形系数。但液体需要密封，填充管坯及从工件中清除等均给生产带来不便，此外，还存在生产效率低和管理不便等缺点。

从便于密封的角度考虑，在各种液体中，目前，主要是选择具有一定粘度的油液为介质。

(2) 橡皮或聚氨酯橡胶 利用橡胶棒体积受压建立起基本稳定的压力场，与液压的情况相似，只是管坯和橡胶棒间存在摩擦，但摩擦力场分布要合理，其方向与变形的方向是可能一致的。当外力撤除时，橡胶棒又能恢复原状，可方便地抽出，因而不需增添专门的设备，模具结构简单。但普通橡胶可压缩性大，使用寿命较低。近年来发展起来的聚氨酯橡胶，具有优良的物理力学性能，得到了越来越广泛的应用，已成功地用于自行车接头的生产中。

聚氨酯橡胶介质的工作是通过聚氨酯橡胶的变形，把压力机的压力传递到管坯上，使管坯按预定的要求发生变形来实现的。在胀形过程中，聚氨酯橡胶受压后，其形状首先发生变化，完全充满由坯料和冲头组成的型腔，此过程压力不大。当冲头进一步动作时，聚氨酯橡胶的体积受到压缩，压力急剧增大，直至坯料发生塑性变形。此后，聚氨酯橡胶随着坯料

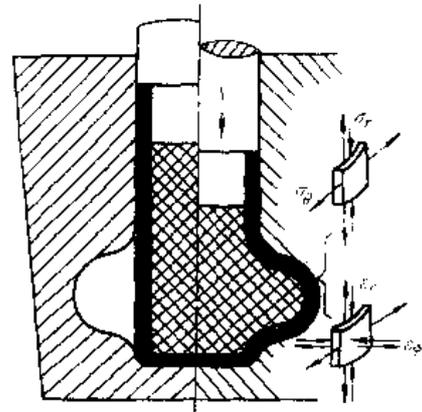


图 7-11 轴向压缩胀形时的应力、应变状态

起变形，体积不再变化，建立起基本均匀稳定的压力场。

聚氨酯橡胶种类繁多，适合于管成形的主要是聚氨基甲酸酯和氨基甲酸乙酯，均具有下列一些优良性能：硬度范围大，能根据工艺要求有广泛的选择范围；耐磨程度高；强度高，能承受100MPa，甚至能在1000MPa的高压下工作；弹性高而剩余变形量小；耐油性能好；有理想的机械加工性能、良好的耐撕性等等。当然，使用聚氨酯橡胶也有一些必须考虑的问题，如综合成形能力没有油压的高；单工步变形量必须控制在一定范围内，否则影响聚氨酯橡胶的使用寿命；聚氨酯橡胶耐水解性较差，长期存放于水中或潮湿的空气中易变质；聚氨酯橡胶对缺陷很敏感，对工作表面的要求较高；聚氨酯橡胶变形时发热较多，且这种材料耐高温性能差（温度不宜高于80℃），只能适合于冷加工，且还需严格控制压力机的速度和每次的压缩变形量（一般不大于35%）。

聚氨酯橡胶的成形能力直接与物理力学性能指标有关，主要是硬度、相对伸长率、压缩性能、断裂强度、乘余变形量和冲击回弹量等。选用聚氨酯橡胶的主要依据是硬度，同时还必须准确把握其压缩性能，因为压力场的建立主要是靠体积的受压减小来实现的。实验表明聚氨酯橡胶在封闭型腔受压时，其体积—压力关系是线性的，即 $Q=K\Delta V$ 。对于圆柱型封闭型腔，则有：

$$q = k\Delta l$$

式中 k ——比例系数。需由聚氨酯橡胶的缩性能实验测定。

聚氨酯橡胶棒的直径以经多次变形而产生少量永久变形后仍然易于放进和取出为原则，一般可比管坯或中间毛坯的内径小0.5~1mm。取得过小，会增加聚氨酯橡胶的压缩变形量，从而降低其使用寿命。若采用橡皮为芯棒时，由于其永久变形量较大，可按下式确定直径 d ：

$$d = 0.985d_0 - 0.3t$$

式中 d_0 ——毛坯内径；

t ——毛坯壁厚。

在不考虑体积变化时，聚氨酯橡胶或橡皮芯棒在变形前的高度为

$$L_0 = \frac{(H_0 + h)d_0^2}{d^2}$$

式中符号见图7-12，其中 h 为零件底部不变形部分的长度。

胀形的聚氨酯橡胶的硬度最好选用HS50~70A较合理。较软的适用于成形大圆弧曲面的胀形件，由于其允许的变形量较大，可提高聚氨酯的使用寿命，而且也可减小压力机的吨位。但当成形零件具有小的圆弧或尖角，并要求成形后外轮廓清晰时，则应采用较硬的聚氨酯橡胶。若成形的同时还要求有冲孔等冲裁工序时，则最好采用硬度为HS70~80A的聚氨酯橡胶。

若成形铝、钢等软金属且变形程度不太大的零件，压力要求不大，或即使所需压力较大但生产批量很小时，则可采用橡皮或具有一定弹性的聚氯乙烯塑料。

若成形铝、钢等软金属且变形程度不太大的零件，压力要求不大，或即使所需压力较大但生产批量很小时，则可采用橡皮或具有一定弹性的聚氯乙烯塑料。

在离压力作用端较远部位的成形，由于摩擦阻力的作用而造成压力损失和不均匀时，往往不易成形，为此，常常采用一种均力环的锥形块，如图7-13所示。在均力环锥形面的作用下，使弹性体部分垂直压力反射到需要成形的部位，使上下压力更加均匀而达到成形的目的。

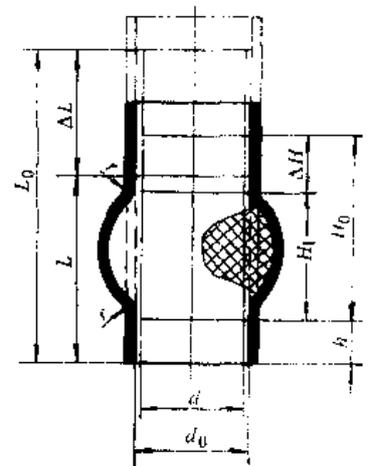


图7-12 胀形零件尺寸

均力环锥面角度一般为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。

关于环状弹性体（如聚氨酯橡胶）芯的壁厚和高度可以这样考虑：为了减少设备吨位，在使压缩变形量不超过弹性体总高度三分之一的条件下，环状弹性体芯要在不失稳的原则下选择壁厚。而其自由状态下的总高度应保证在压缩后能够充满成形部位的型腔即可。

(3) 低熔点合金 以低熔点合金作为介质，是介质材料的新发展。将熔化的低熔点合金直接浇入管坯内部或将低熔点合金芯棒置入管坯内，其胀形过程可以认为是一整体毛坯的径向挤压过程。其优点是不需密封，缺点是装人和清理不方便，且影响生产效率的提高。它适合于强度较高的材料或虽然强度较低但变形量大而需要成形力大的零件的成形。

3. 胀形力的计算及压力机吨位的确定

由于胀形的方式不同，其内部受力情况十分复杂，对胀形力及所需设备吨位的计算带来很大困难。

在自然胀形时，若假设管子内部各处的压力都是均匀的，即相当液压胀形的情况，则管子胀形时所需的内部压力 p_1 可按拉普拉斯公式进行计算（见图 7-14）：

$$p_1 = t \left(\frac{\sigma_r}{R_r} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) \quad (7-18)$$

式中 σ_r 、 σ_θ ——成形区的轴向及切向应力；

R_r 、 R_θ ——成形区的轴向及切向圆弧半径。

应力 σ_r 和 σ_θ ，可通过变形区单元体的受力平衡条件和材料的塑性变形条件联立求解而得。在实际生产中，为了使计算简单实用，取 $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_b$ ，代入上式后，得

$$p_1 = t \sigma_b \frac{R_r R_\theta}{R_r + R_\theta} \quad (7-19)$$

当成形平稳过渡的锥形件时，则 $R_r \rightarrow \infty$ ，或当 $R_r \gg R_\theta$ 时，则式 (7-19) 又可化为

$$p_1 = \frac{2t}{d_0} \sigma_b \quad (7-20)$$

式中 d_0 ——毛坯内径。

由于用 σ_b 代替了 σ_r 和 σ_θ ，按式 (7-19) 计算的结果比精确的理论计算压力要大 10%~30%。另外，式 (7-19) 是在“整个毛坯均匀受压”的假设条件下得出的，实际上，这里所用的胀形芯棒是聚氨酯等弹性体，由于它与毛坯侧壁摩擦的影响，内部各处的压力并不均匀，另外，压缩芯棒弹性体材料变形，也需要一定的力量。实践证明，当选用硬度为 HS50A 左右较软的聚氨酯橡胶棒并在表面涂上少量的润滑剂时，由式 (7-19) 和式 (7-20) 所计算的结果比

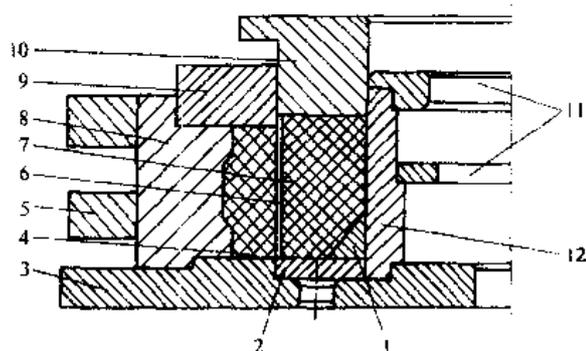


图 7-13 环状波纹管胀形模

- 1—均力环 2—顶出环 3—下模板 4—环树脂型面
- 5—外承力环 6—毛坯 7—聚氨酯橡胶（或 PVC 塑料）
- 8—凹模圈 9—玉环 10—上模座 11—内承力环
- 12—中心模体

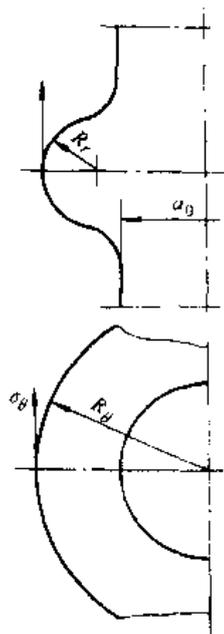


图 7-14 胀形件受力计算图

较接近实际，其增大部分和由于摩擦和压缩聚氨酯橡胶所造成的损失基本抵消。

二、多通管聚氨酯橡胶塑挤胀形

三通、四通和五通等形状复杂多变的多通管接头，传统的生产方法多采用铸造、锻造、焊接、机加工和冲焊工艺。采用这些工艺方法生产，不但生产效率低，质量不高，而且成本较高。采用管子成形工艺，不仅保证了较高的生产率、较轻的重量、较低的成本，而且可有效地提高产品的内在与表面质量。

1. 多通管聚氨酯塑挤胀形工艺

塑挤胀形即利用带轴向压缩的聚氨酯胀形或液压胀形，在一次成形工序中，能够得到成形支管的长径比约等于1，而其变薄量不超过15%。

图7-15所示为利用聚氨酯胶带轴向压缩成形三通管的受力情况。

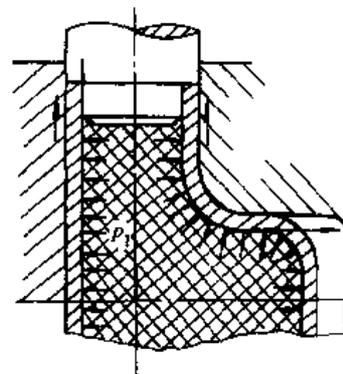


图7-15 支管塑挤胀形示意

其成形过程为：将管坯置于可分式刚性凹模中，并将直径略小于管坯内径（一般约小0.5~1.0mm）的聚氨酯橡胶置于管坯内，在刚性凸模的作用下，先使聚氨酯橡胶棒压缩变形而使管坯处于塑性状态，进而压缩管坯端部直至成形结束。假若支管自由面在聚氨酯橡胶压力的作用下不开裂，则成形过程中一直进行下去。但与此同时，内压又必须足以克服管坯壁起皱。

为了使支管的成形能够达到更高的程度，应该采用下列措施：

- 1) 必须对管坯表面进行很好的润滑，使在内部压力 p_i (见图7-15) 的作用下，仍保持良好的润滑性能；
- 2) 相反，对管坯内壁则应提高摩擦作用，以减少支管端部的变薄；
- 3) 为了减少摩擦的不利影响，应尽量使聚氨酯橡胶的作用集中在成形部分，如图7-16所示；

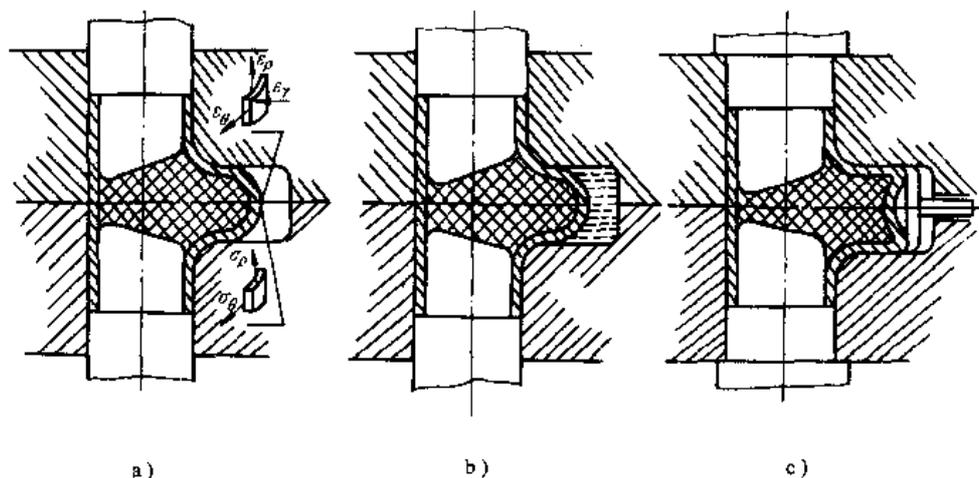


图7-16 聚氨酯橡胶在支管成形中的作用

a) 对支管成形区的集中作用 b) 带液体反压的支管成形 c) 带刚性反压板的支管成形

- 4) 尽量增大支管与主管连接处的圆角半径，以减少弯曲抗力；

5) 为了改善支管端部的应力和应变状态，以提高变形程度和减少变薄量，可以在支管端部处侧施加反作用力，见图7-16b；

6) 为了减少危险断面处支管顶端的破裂, 根据经验, 还可采用刚性反压装置, 这与反拉延一样, 提高了顶端的强化效果, 见图 7-16c:

7) 尽可能采用塑性好、抗力小和硬化少的材料。

2. 应用实例及模具结构

自行车六通是带支管零件的典型结构, 是自行车的主要受力构件。制造该零件的老工艺方法是, 钢板经多道冲压成形后, 再用弯曲、焊接等工艺等完成。老工艺工序多、成本高、生产率低, 而且零件的质量也得不到保证。

近年来, 国内、外普遍采用液压、橡皮或聚氨酯橡胶为介质, 将卷焊而成的钢管直接胀挤成形。塑挤胀形的具体工艺路线和基本尺寸如图 7-17 所示。其主要工序为: 管坯的准备→磷化、皂化→塑挤胀形→冲或钻四个支管孔→退火→用钢球或圆柱销翻孔→两端镗孔、车端面→两头挤压滚纹。

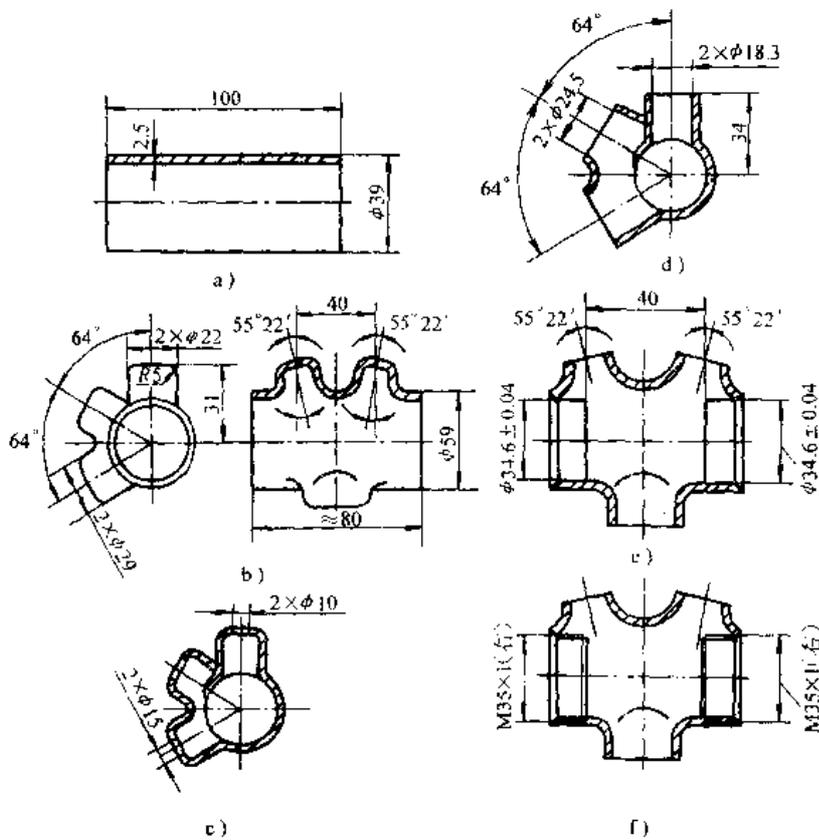


图 7-17 自行车六通塑挤胀形工艺路线

a) 切断 b) 胀形 c) 冲孔 d) 孔翻边 e) 镗孔、车端面 f) 两端挤压滚纹

液压胀形生产效率低, 工模具结构复杂而污染严重, 生产周期长。橡皮价格便宜, 但承载能力低, 使用寿命短。聚氨酯橡胶为介质的塑挤胀形工艺比较理想。

自行车六通管由于成形部位不对称, 变形量又大, 必须采用带轴向压缩的胀形即塑挤胀形, 而且为了解决单向挤压时受摩擦的影响而沿轴向压力分布不均匀的问题, 应采用上、下对向挤压胀形工艺, 相应的模具结构如图 7-18 所示。

该模具结构实际可以作为多通管对向塑挤胀形模的通用结构, 安装在冲床上使用。凹模 3 由三瓣组成, 每瓣的下端同凹模座 7 通过燕尾或 T 形槽相连。工作前将三瓣凹模合拢形成

模型腔，将带有聚氨酯芯棒的管坯置于凹模型腔，当压力机滑块向下行程时，首先锥形套将三瓣凹模压合为一整体。随着滑块继续下行，上、下冲头同时从上下两端对管坯进行挤压，实现塑挤胀形。聚氨酯橡胶棒尺寸为 $\phi 32 \times 100\text{mm}$ ，硬度为 HS75A。

为了减少塑挤胀形时管坯金属流动的阻力和提高模具的寿命，管坯在挤压前必须经过磷化和皂化处理。

三、多通管液压介质塑挤胀形工艺及装置

如前所述，作为弹性介质，聚氨酯橡胶是最为理想的材料，但因受变形量的限制，当支管长径比超过 1 以后，已不能适应，当支管长径比接近 2 时，塑挤胀形结束后，芯棒无法从工件中退出。因此，对于支管长径比大于 1 的多通管塑挤胀形，宜于采用液体作介质。

1. 三通管液压介质塑挤胀形工艺分析

图 7-19 为三通管液压介质塑挤胀形原理及变形区应力状态分布图。长度 $2L_0$ 、直径 $2R$ 和壁厚 S_0 的原始管坯，置于可分凹模型腔中。塑挤胀形时，管坯受内压 q 、轴向挤压力 Q_1 和侧向支承力 Q_2 的作用。两个冲头以相同的速度彼此相对移动，管坯中部金属向支管型腔内作径向流动，开始时形成鼓包。由于材料硬化和连续挤压使塑性变形区扩展到整个毛坯，导致毛坯沿全长管壁增厚。随着两个挤压冲头继续向前移动，支管的长度 b 不断增加，直到所需长度为止。支管端部的反向支承力 Q_2 ，其作用在于减少甚至抵消支管部分的拉应力，尽可能造成三向压应力状态，以防止支管发生破裂。

利用圆柱坐标 ρ 、 θ 、 z 分析变形区的应力与应变状态，如图 7-19 所示。忽略毛坯与凹模壁间摩擦引起的切应力 $\tau_{\rho\theta}$ 、 $\tau_{z\rho}$ ；毛坯被看成薄壁管。利用连续原理可建立与变形速度相关的动力学方程。

在圆柱坐标系内建立单元体受力的平衡方程。将动力学方程、平衡方程和塑性条件联立求解可得应变和应力表达式。其中应力表达式分别为：

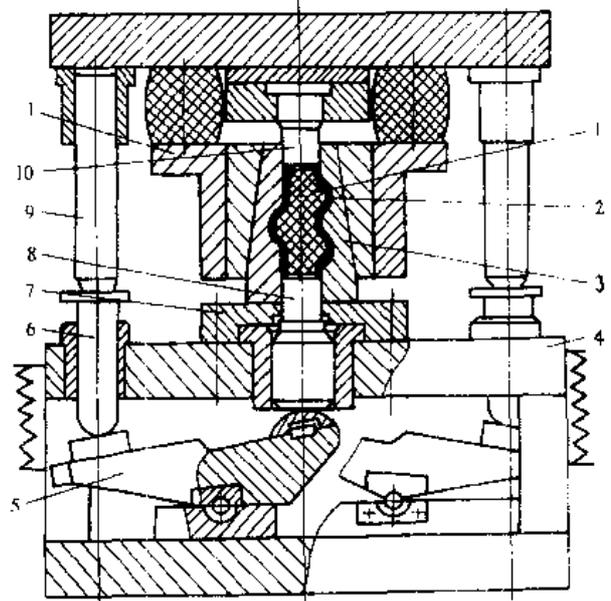


图 7-18 自行车六通管塑挤胀形模具示意图
1—聚氨酯橡胶芯棒 2—工件 3—组合凹模 4—下模块
5—摆杆 6—导杆 7—凹模座 8—下冲头 9—连杆
10—上冲头 11—锥形套

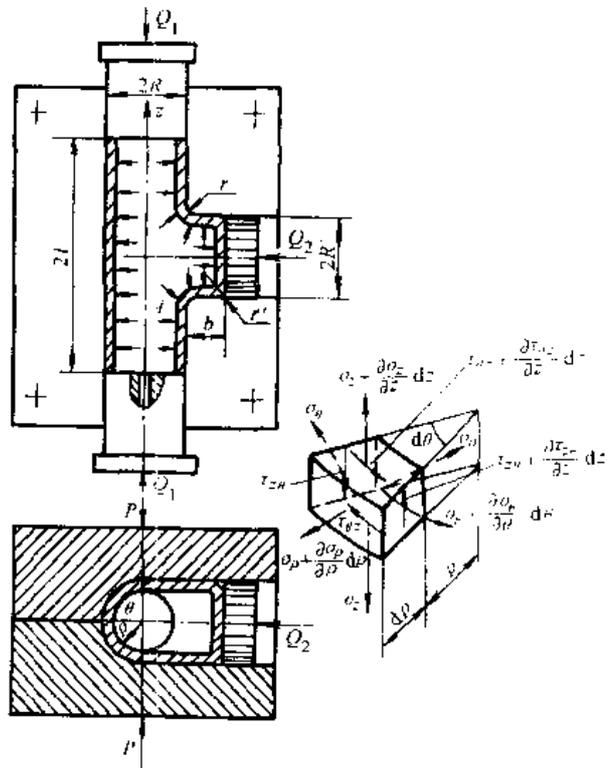


图 7-19 三通管液压胀形原理及变形区的应力状态

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= -q - \frac{\sigma_s(m-1)\ln\frac{\rho}{R-S_1}}{\sqrt{3(m+1)}} \\ \sigma_\theta &= -q + \frac{\sigma_s(m-1)}{\sqrt{3(m+1)}} \left(\ln\frac{\rho}{R-S_1} + 1 \right) \\ \sigma_z &= -q - \frac{\sigma_s(2+m) + (1-m)\ln\frac{\rho}{R-S_1}}{\sqrt{3(m+1)}} \end{aligned} \tag{7-21}$$

$$\begin{aligned} \tau_{\theta z} &= - \frac{\sigma_s \eta \sin\theta \operatorname{sh} \frac{z}{R}}{\sqrt{3(m+1)} \left(\cos\theta \operatorname{ch} \frac{z}{R} \right)} \\ m &= \frac{\eta \left(1 + \cos\theta \operatorname{sh} \frac{z}{R} + \eta \right)}{\left(\cos\theta + \operatorname{ch} \frac{z}{R} \right)^2} \end{aligned}$$

式中

η 为系数, 考虑因内在 q 和支管端单位支承压力 q_2 的差别而导致在支管侧壁上的应力的影响。

$$\eta = \frac{2a^2 \sqrt{4-a^2}}{2 + \sqrt{4-a^2}} \left\{ q \pm \frac{(q-q_2)R'}{2S_1} \frac{\sqrt{3}}{\sigma_s} + \frac{2\sqrt{4-a^2}-1}{\sqrt{4-a^2}} - \frac{r}{R'}(2-a) \right\}$$

式中 R ——毛坯外半径;

R' ——支管外半径;

r ——支管与主管相交处半径;

a ——系数, $a = \frac{R'+r}{R+r}$;

q_2 ——支管端部支承力, $q_2 = \frac{Q_2}{\pi(R')^2}$;

σ_s ——材料屈服应力。

由方程组 (7-21) 可以看出, 应力分量不是随圆柱坐标系不变的, 而是随着塑挤胀型过程的变化而变化的。图 7-20 表示了当支管长度 $b=2R'$ 时三通管侧表面沿工件轴线的应力分布曲线, 图示曲线表明: 由支管引起的应力波动, 在离开 $z=0$ 的横向对称面 ($2.5\sim 3$) R' 处消失了。

经分析不难得出: 在主管的端部 σ_z 、 σ_ρ 和 σ_θ 均为压应力, σ_z 是由挤压力 Q_1 引起的, 其方向与毛坯的轴线平行。毛坯外表面承受径向应力 σ_ρ 的作用, 而内表面承受均匀的内压 q 的作用, 因受凹模刚性模壁的限制, 主管端部的切向变形 e_θ 为零, 属于平面应变状态, 故有

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_\rho + \sigma_z)$$

2. 工艺参数的计算

(1) 壁厚的计算 在塑挤胀形过程中, 主管壁厚将变厚, 即壁厚 S_1 将大于原始壁厚 S_0 ; S_1 可按下式计算:

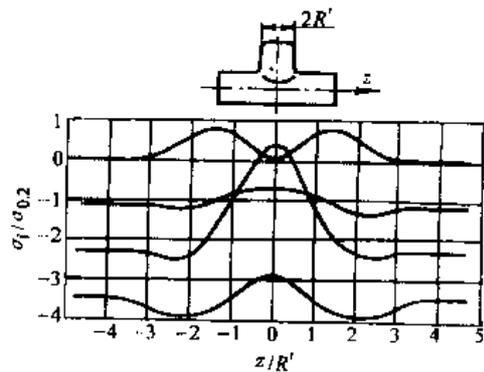


图 7-20 支管成形产生的应力变化

$$S_1 = S_0 \left(\frac{l_0 + \eta R}{l + \eta R} \right) \quad (7-22a)$$

式中 l_0 、 l ——原始管坯和三通管长的一半，或采用下式计算：

$$S_1 = S_0 \left(1 + k \frac{b}{R'} \right) \quad (7-22b)$$

式中 b ——支管长度；

R' ——支管外半径；

k ——系数，对于低碳钢取 0.14~0.16。

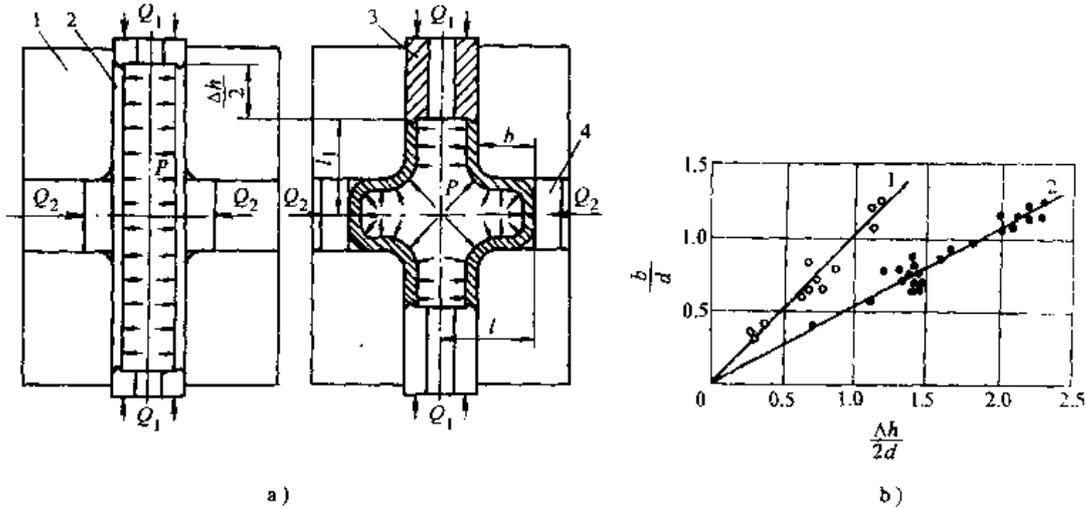


图 7-21

a) 液压塑挤胀形系统 b) 比例关系曲线

(2) 支管长度的计算 在塑挤胀形过程中，支管长度 b 与主管的轴向压缩量 Δh 之间存在近似关系 (图 7-21a)：

$$b = K \frac{\Delta h}{n} \quad (7-23)$$

式中 K ——比例系数，三通、四通的比例关系分别为图 7-21b 中曲线 1 和 2 所示；

n ——支管数量。

支管长度 b 同主管两端的压缩量 Δh 之间的关系，还可利用图 7-22 中的曲线求得，图中曲线 1 为单个支管的关系，曲线 2 为异侧双支管的关系。

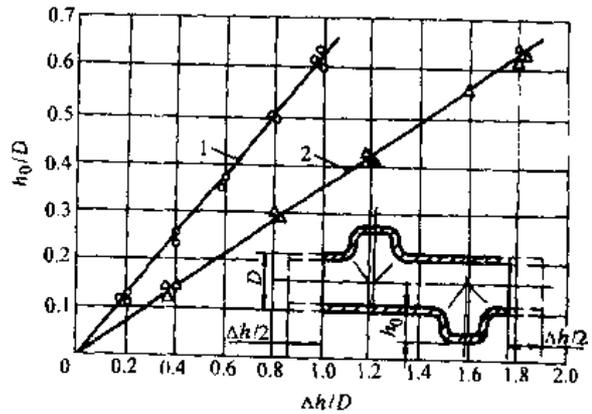


图 7-22 支管长度 b 同主管压缩量 Δh 之间的关系曲线

1—单个支管的关系曲线 2—双支管的关系曲线

利用公式 (7-23) 或图 7-22 曲线关系，可以确定当需要成形长度为 b 的支管时所需的主管的压缩量，因此，也就确定了原始管坯的长度 l_0 。

(3) 最小内压的确定 最小的液体压力 q_{min} 可利用它同材料的屈服应力 σ_s 、管坯壁厚 S_0 和支管长度 b 间的经验关系确定：

$$q_{min} = \frac{2A \left(1.15k \frac{b}{R'} \right)^n \left(1 + k \frac{b}{R'} \right) S_0}{2R' - S_0} \quad (7-24)$$

式中 A 、 n ——材料的近似硬化曲线参数；

k ——系数，对于低碳钢取 0.14~0.16。

(4) 轴向挤压力 Q_1 的计算 轴向挤压力 Q_1 包含克服管坯变形，由胀形液体所产生的内压 q 、管坯和凹模间的摩擦阻力等。如前所述，在接近冲头的端部，可假设为平面变形，因此，挤压力 Q_1 可采用下式计算：

$$Q_1 = \pi \left\{ q \frac{d^2}{4} + 1.15\sigma_s \frac{3}{4} (d - S_1) S_1 + \frac{d^2}{8} \ln \frac{d}{d - 2S_1} + \mu d \left(l - \frac{d'}{2} \right) \left(q + \frac{1.15\sigma_s S_1}{d - 2S_1} \right) \right\} \quad (7-25)$$

为预防支管破裂而加的支承力 Q_2 可按式计算：

$$Q_2 = \pi q \left(\frac{2R' - S_0}{2} - \frac{\sigma_b S_0}{q} \right)^2 \quad (7-26)$$

为防止可分凹模张开而所需的压紧力 P 可按式计算：

$$P = q + \frac{1.15\sigma_s S_1}{d - 2S_1} (2l - d') d + q d' (d + b) \quad (7-27)$$

式中 d 、 d' ——管坯和支管外径；

l ——三通管部长度的一半；

σ_s ——材料的流动应力；

S_1 ——三通管件壁厚；

μ ——摩擦系数，取 0.05~0.1。

3. 同侧双支管液压塑挤胀形

如图 7-23 所示，在凹模上设计了可动镶块 2 和 3。工作开始时，管坯 1 置于凹模型腔中，

可动镶块 2、3 分别被顶向两端，如图 7-23a 所示；管坯在两个冲头挤压力 Q_1 和内部液体压力 q 的作用下，在两个支管型腔处形成椭圆形鼓包，椭圆形长轴与主管轴线一致，如图 7-23b 所示。在两个冲头继续挤压时，迫使镶块 2、3 一起向前移动，镶块 2 和 3 沿椭圆形长轴方向压缩鼓包，支管横向尺寸减小，依靠金属体积的转移而使支管长度增加，如图 7-23c 所示。利用这种模具结构，可使支管长度的极限值增大 2~3 倍。

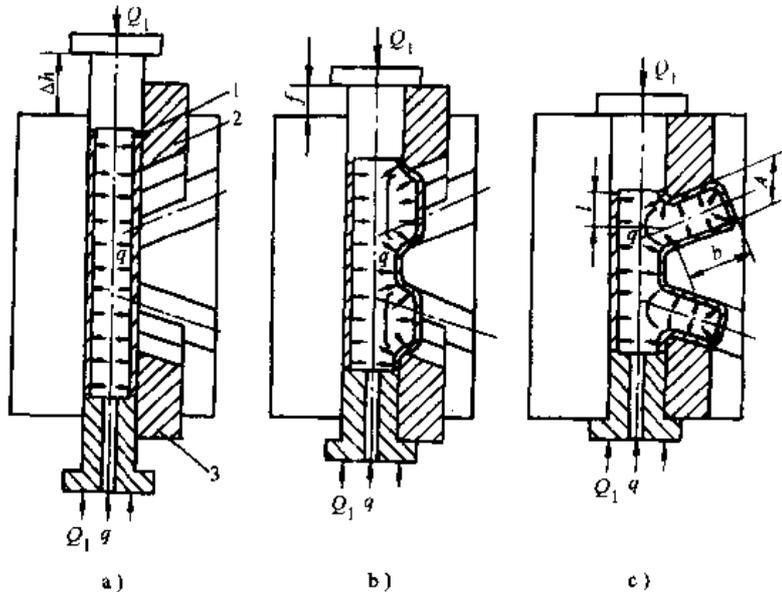


图 7-23 同侧双支管液压塑挤胀形系统

a) 初始状态 b) 开始压缩阶段 c) 塑挤胀形终了阶段

1—管坯 2、3—镶块

在这样的塑挤胀形系统中，支管长度极限值可达到支管管径

的 1~1.2 倍，即可达到塑挤胀形三通时支管的长度。支管长度的进一步增加，将受到管坯起

皱等失稳的限制。

镶块移动距离 f 影响到支管的最终高度, f 越大, 支管越长。然而 f 值增大将导致材料失稳。经验表明, 镶块移动距离 f 一般为轴向压缩量 Δh 的 0.6~0.7 倍。由经验公式可确定管坯一端的压缩量为:

$$\Delta h = 1.55b + (l - 0.75A) \frac{(d - S_1)S_1}{(d - S_0)S_0} \quad (7-28)$$

式中 S_0 、 S_1 ——分别为管坯和制件端部壁厚, 其余符号如图 7-23 所示。

4. 液压塑挤胀形模具及设备

液压塑挤胀形模具及设备有两种途径, 一种是设计专用的模具装置与通用压力机配套使用; 另一种是设计专用压力机。前者适合于多品种中小批量生产, 后者适合于少品种大批量生产。

(1) 专用模具装置与通用压力机配套使用 图 7-24 为异形四通液压塑挤胀形工作原理及基本模具结构。图 7-24a 为初始状态, 图 7-24b 为结束状态。

图 7-25 为包括模具、液压、空气增压器及控制系统在内的整套专用模具装置。该模具装置与液压机配套使用。

其工作原理及过程如下: 管坯置于凹模型腔 12 中, 并由油箱 11 向管坯内注满油液。当着压力机滑块向下行程时, 上凹模 13 同下凹模 12 闭合并压缩下面的碟形弹簧 16, 保证上下凹模必要的合模力, 冲头 10 和 14 密封管坯中的油液。此时, 开关 17 动作, 压缩空气经过过滤器 1、压力调节阀 2、喷雾器 3 和空气分配器 4 进入增压缸 9 的右腔, 推动活塞向左移动, 保证管坯内开始的液体压力, 压力大小通过阀 2 调节。

当压力机滑块继续下行时, 管坯被轴向压缩, 使管坯体积减小而导致管坯内排出部分油液, 排出的压力油进入增压器左腔而使活塞右移, 使增压缸右腔中的压缩空气被压缩 (反向阀 5 此时关闭)。工作空腔中液体压力按照下面的关系式变化:

$$q_i = q_0 \frac{V_0}{V_i}$$

式中 V_0 、 q_0 ——管坯空腔初始体积压力;

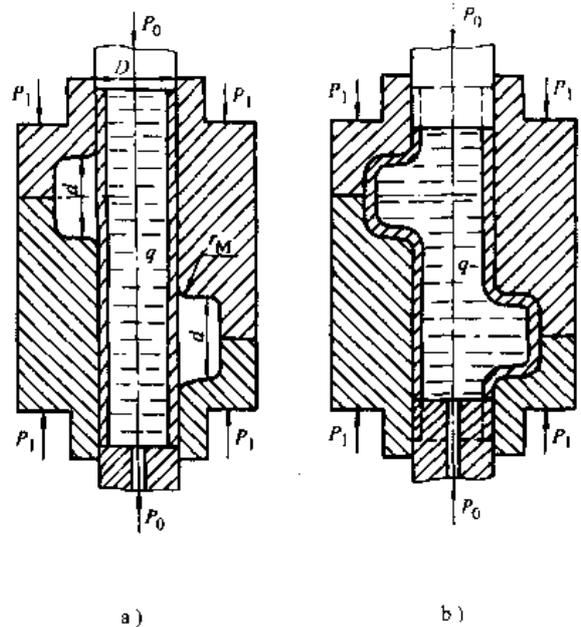


图 7-24 异形四通液压塑挤胀形
a) 初始状态 b) 结束状态

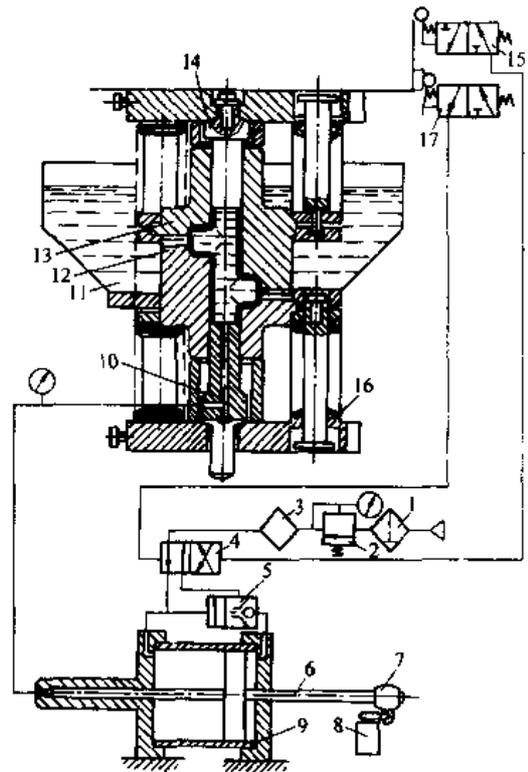


图 7-25 模具、液压及空气增压系统
1—过滤器 2—压力调节阀 3—喷雾器 4—分配器
5—反向阀 6—活塞杆 7—凸轮 8—阀 9—增压缸
10、14—冲头 11—油箱 12—凹模型腔 13—上凹模
15—中断器 16—碟形弹簧 17—开关

V_1 、 q_1 ——工件空腔内瞬时体积和压力。

q_0 采用圆形管承载特性表达式确定：

$$q_0 = \beta \sigma_s \ln \left(1 + \frac{S}{R} \right)$$

式中 β ——考虑平均主应力影响系数；

σ_s ——材料屈服极限；

R 、 S ——分别为管坯外半径和壁厚。

增压器提供的初始压力 q_0 和体积 V_0 的变化，可使工件空腔内液体压力有较大的调节范围，因而保证了合适的塑挤胀形规范。

变形结束时，中断器 15 动作，来自管道的压缩空气进入增压缸 9 的左腔，使活塞向右移动，保证工件内腔的液体压力卸压。

空气增压器的技术参数

气缸中的初始压力	MPa	0.6
活塞直径	mm	360
活塞杆直径	mm	23
活塞最大行程	mm	440
外形尺寸长×宽×高	mm×mm×mm	1500×1030×870

当压力机滑块向上移动时，上凹半模 13 回到初始位置，开关 17 动作使活塞右移回到原位。

增压缸 9 右腔开始的空腔体积 V_0 可由阀 8 调定，阀 8 可自动确定带杆活塞在任何中间位置，具体位置取决于在活塞杆 6 上的凸轮 7 的定位。

(2) 专用压力机 图 7-26 为支管端部带有支承力 Q_2 的液压塑挤胀形原理及模具基本结构。图 7-27 为相应的专用压力机结构。

该机机身由焊接框架式结构，采用液压传动。组合模具安装在工作台上。组合模具由下半凹模 10、两个中心线相同的冲头 27 和 28、一个或一个以上的支承活塞 5 组成。上半凹模 9 安装在压力机滑块上。冲头 27、28 分别与同轴水平油缸 2 和 3 的活塞杆相连。油缸 2 的活塞上配置有增压器 6，该增压器专为管坯 29 内提供高压油。垂直油缸 4 包括油缸柱塞 7 和增压柱塞 8，柱塞 8 与缸体固定，油缸柱塞 7 与压力机滑块相连并可带动滑块上下移动，其作用是在向下行程终了时将凹模压紧直至整个塑挤胀形完成。

水平油缸 2、3 和垂直油缸 4 均通过油泵 11 并经分配阀 12、承压阀 13 和 14、充液阀 15、节流阀 16 和流量分配阀 17 组成的系统来驱动。

增压器 6 和支承活塞 5 经同一节流阀 16 供液，其动作由分配阀 19 和 20、安全阀 21 和

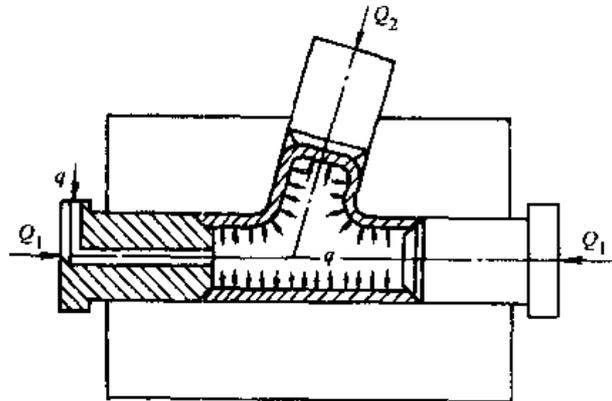


图 7-26 带支承力 Q_2 的液压塑挤胀形原理示意

22、减压阀 23 来控制。

为了由增压器预先给管坯内充满油液介质，也为了排除管内的空气，配备有包括油泵 24、分配阀 25 和逆向阀 26 等的独立液压站。

管坯置于下半凹模型腔中，按下启动按钮，接通分配阀 12，来自油泵 11 的压力油经过柱塞 8 的通道进入油缸 4 的中间腔，推动柱塞 7 同凹模 9 一起向下移动。此时，油缸 4 的支承活塞腔内建压，其压力的大小由承压阀 14 确定，该压力应该足以开启充液阀 15，使来自油箱 31 中的油充满油缸 4 的上腔。

在柱塞 7 行程终了时，当上半凹模 9 接近下限位置，增压柱塞 8 的下端打开柱塞 7 上的通道，来自油泵 11 的油经增压器的空腔进入油缸 4 的上腔。此时，柱塞 7 的行程速度降低，充液阀 15 关闭，上半凹模 9 以全压力压紧在下半凹模 10 上。两半凹模闭合后，油缸 4 上腔的压力油经过承压阀 13、流量分配阀 17 进入水平油缸 2 和 3，迫使冲头 27 和 28 以相同的速度对向挤压管坯 29。

在上半凹模 9 位移的终了时刻，按照行程开关的指令伴随分配阀 19 和 25 的动作，油泵 24 将油液充满管坯 29，并经凹模和模座 30 上的通道排出空气。支承活塞 5 在油泵 18 供给的压力油作用下向前移动，所要求的压力由减压阀 23 和承压阀 22 确定。

当冲头 27 和 28 向前行程至接近管坯端部时，接通分配阀 20，来自分配阀 19 的压力油供入增压器 6 中，使增压器 6 压缩管坯内部的液体压力到安全阀 21 所规定的值。塑挤胀形时，管坯长度缩短，支管长度增加，当冲头 27 和 28 被凹模的护衬挡住时，所有的油缸转为回程。为了避免空气进入增压器 6，在它上面经过逆向阀 26 供给来自泵的的油液。至此，完成了一个工作循环，即完成了一个制件。

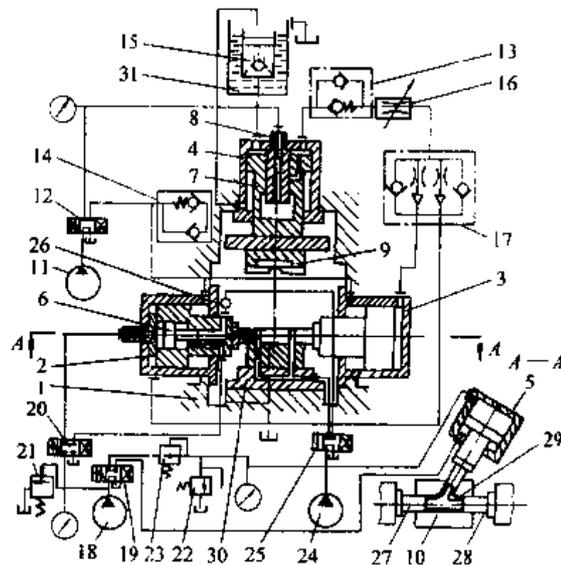


图 7-27 塑挤胀形专用压力机

- 1 机身 2、3—水平油缸 4—垂直油缸 5—支管支承活塞
6—增压器 7—油缸柱塞 8—增压柱塞 9—上半凹模
10—下半凹模 11、18、24—油泵 12—分配阀 13、14—承压阀
15—充液阀 16—节流阀 17—流量分配阀
19、20、25—分配阀 21、22—安全阀 23—减压阀
26—逆向阀 27、28—冲头 29—管坯
30—模座 31—油箱

压力机的主要参数

管坯最大直径与长度	mm×mm	40×25
压力	MN	
压紧凹模		2
水平柱塞缸		0.9
增压器最大液压	MPa	200
工作循环周期	s	20

利用焊按管坯，直径 $\phi 34\text{mm}$ 、长 197mm 、壁厚 2mm ，在该机上生产自行车架多通管接件，其生产率为 180件/h 。

第三节 翻管工艺及模具

翻管工艺是从冲压翻边工艺发展起来的一种新的特种成形工艺。翻管就是将管材翻卷成双层管、多层管或其他形状的管制件。翻管的方式如图 7-28 所示,可归结如下:

1) 外翻。管坯在轴向压力下从内向外翻卷,使管材的内壁翻卷成外壁。翻卷后的管径变大,翻管时外压载荷虽使管壁有所减粗,但由于外翻产生的周向拉应力作用更强,因而一般会使管壁变薄。

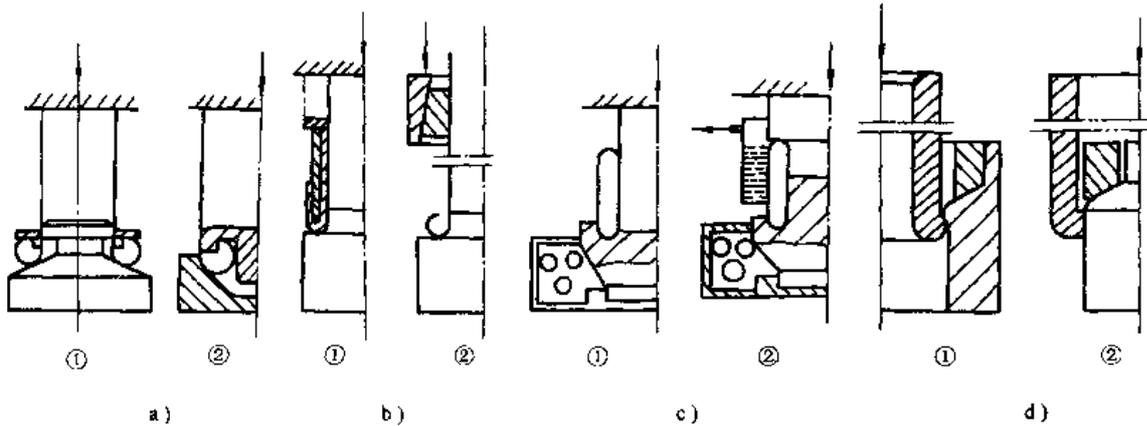


图 7-28 翻管方式和翻管模具

a) 锥模 ①—外翻 ②—内翻 b) 圆角模 ①—导向翻 ②—夹持器翻 c) 槽模 ①—热外翻 ②—差温内翻 d) 拉伸翻管模 ①—外翻 ②—内翻

2) 内翻。从外向内使管材的外壁翻卷成内壁,翻卷后的管径变小,管壁变厚。

3) 单向翻。在管材的一端进行翻卷。

4) 双向翻。在管材的两端同时进行翻卷。

在少数情况下,翻管可以不用模具。如用作吸能元件时,在大多数情况下,为了加工成管制件,则必须使用模具。适于在模具上翻管的管材很广泛,如铝合金、低碳钢、奥氏体不锈钢等,从 $\phi 10 \times 1$ 到 $\phi 250 \times 5$ 规格的管坯,都可成功地翻成双层管。翻管模的型式很多,有锥形模、圆角模、槽形模和拉伸翻管模(图 7-28)。在后三种型式的模具上翻管,管材在变形过程中其几何形状有部分或全部受到模具的约束,在锥形模上翻管,管材在变形过程中处于自由状态,其几何形状只由模具锥角引起的应力状态决定。

一、翻管过程分析及翻管的失效型式

1. 翻管时变形过程的分析

翻管是一个复杂的变形过程,它涉及到三种变形的转化,即从扩口变形转化到卷曲变形,从卷曲变形转化到翻卷变形。要保证变形模式的顺利转化,必须满足翻管变形时的力学、几何和塑性条件,其中最主要的工艺参数是翻管力 p , 模具半锥角 α , 管材的相对壁厚 S (管坯壁厚 t 与管径 D_0 之比) 和管材塑性条件 δ 。

现以锥形模外翻为例来分析翻管的变形过程(见图 7-29 和图 7-30):管材在轴向载荷 p 的作用下,与模具接触的端部发生弹性挠曲变形,当 p 增大时,弯曲挠度也随之增大,致使管材端部进入塑性状态,这时管材下的某一圆周位置如 A 截面,所承受的弯曲力矩达到塑性弯曲力矩而形成塑性铰(图 7-29b),这一阶段为管材的初始屈曲阶段,对应于图 7-30 上的 a 点。

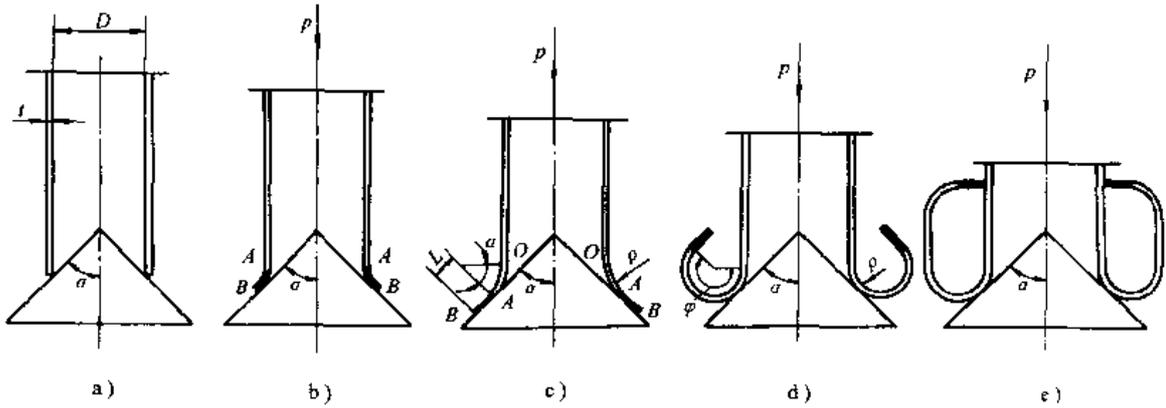


图 7-29 翻管变形过程

一旦塑性铰形成后, 管材的承载抗力急剧下降, 塑性铰的形成过程, 相当于失稳。出现一段以曲率半径为 ρ 的塑性弯曲弧段 AO , 而管材端部的弹性挠曲段受周向拉应力 σ_θ 的作用恢复为平直段 AB (图 7-29c), 这一状态对应于图 7-30 上的 b 点。 AB 段为扩口变形, 并且在以后的整个翻管过程中一直保持为平直段而不再发生形状变化, 因此, 我们定义 AB 段为扩口刚性端, 以 L 表示, 将卷曲半径 ρ 定义为自由卷曲半径。

当管材继续受压时, 在扩口刚性端 AB 区, 如果 σ_θ 的作用产生的弯曲力矩小于 A 处的反弯力矩, 则 AO 段不能发生反弯变形, 亦即不能沿模具表面恢复为扩口平直段, 而是仍然以曲率半径 ρ 继续变形产生卷曲, 见图 7-29d, 这一状态对应于图 7-30 上的 c 点; 如果扩口刚性端 AB 因 σ_θ 的作用产生的弯曲力矩大于 A 处的反弯力矩, 则 AO 段将发生反弯变形, 即沿模具表面扩张, 如同冲压工艺中的扩口变形情况。因此扩口变形模式转化为卷曲变形模式, 必须使模具半锥角 α 大于临界锥角 α_{cr} 。

管材以曲率半径 ρ 卷曲, 当卷曲角 φ 达到某一值 φ_c 时, 即卷曲部分因 σ_θ 引起的反弯力矩等于材料的塑性弯曲力矩时, 端部停止卷曲而不再变形, 后继卷曲部分则发生反弯变直, 变形过程转化为翻卷变形 (图 7-29e), 对应于图 7-30 上的 d 点。我们把 φ_c 定义为终止卷曲角。管材进入翻卷变形后, 载荷达到最大值 p_m 并保持不变, 在 p_m 的作用下一直翻卷下去, 直至所需要的高度, 我们称 p_m 为翻管工艺力。如果卷曲部分的反弯力矩达不到材料的塑性弯曲力矩, 则卷曲过程将一直继续下去, 直至卷曲端与管坯的外壁接触, 产生干涉而导致失效。在锥形模上翻管, 发生几何干涉导致失稳的情况极少, 一般不予考虑, 而采用圆角模或槽形模翻管时, 由于模具对卷曲半径的约束, 容易产生几何干涉, 因此设计模具时, 必须使其圆角半径 r 大于干涉曲率半径 ρ_e 。

2. 翻管的失效型式

模具上的薄壁管轴向受压时, 翻卷远远不是唯一的变形型式, 可能会出现各种各样的非翻卷变形, 我们将这些变形统称为翻管失稳。失稳与材料和模具形状、材料的变形抗力和塑性条件、材质结构和缺陷等有关。

(1) 欧拉失稳 管坯在轴向压力下其中部发生整体弯曲, 如同压杆失稳的型式, 这种失稳通常在管坯长径比很大时发生, 主要是由管坯端面倾斜, 压力中心与管坯轴线偏离以及材

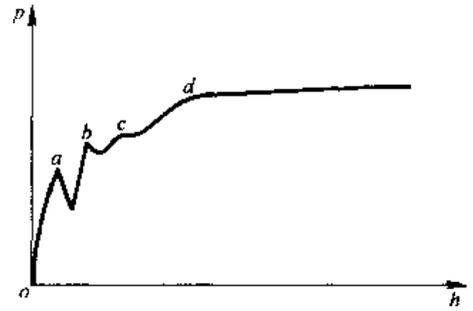


图 7-30 翻管变形力—位移曲线

质结构不均所引起。

(2) 轴对称失稳 管材受压时不产生翻卷而出现均匀的凸肚和内缩，一圈接一圈折叠起来，形成波纹状，这是翻管时最常见的失稳型式，有人认为在管坯的相对壁厚 $S \geq 1/50$ 的情况下发生，但我们的实验结果并未完全遵循这一规律，如 LF21Y2 ϕ 42 \times 1 的管坯，在强化状态下为轴对称失稳，在退火状态下为金刚石失稳。我们认为，轴对称失稳的变形特点是失稳具有轴对称性质，管坯在抵抗变形时，其力学性能和几何形状都是轴对称的，管径越大，力学性能沿周向分布的差异将越大；强度越高或管壁越厚，这种差异将会相对缩小。因此，除了相对壁厚的影响外，还与材料强度，几何缺陷有关。

(3) 金刚石失稳 其型式是管坯在局部位置发生非对称折叠，形成多层的花瓣状折叠管。变形特点是失稳具有非对称性质，管坯在抵抗变形时，其力学性能和几何形状的非对称性超过轴对称失稳程度，由轴对称失稳转化为金刚石失稳。

(4) 轴对称与金刚石混合失稳 由于管材强度或几何缺陷沿周向分布的差异反映在轴向长度的各个区域不可能完全相同，有的长度区域周向差异小，有的区域周向差异大。因此在管坯失稳变形时，可能出现相应的型式，即轴对称和金刚石失稳，这些型式的互相转化则形成混合型失稳，实验发现，由金刚石失稳转化为轴对称失稳的现象较少，两次以上的转化则更少，一般是轴对称失稳转化为金刚石失稳。

(5) 错移失稳 翻管时，若管坯两端载荷不同轴，如压力机上下工作台面不平行，上下模不同心，管坯端面与其轴线不垂直等，都将会造成歪斜，外层管弯曲甚至内外管不同轴等错移失稳型式。

(6) 管端撕裂 这种现象在翻边工艺中很容易见到，处于翻管变形的扩口阶段，若扩口变形程度超过管坯材的塑性范围，则发生撕裂失效。

(7) 桶状失稳 其型式类似于圆柱体墩粗，是由于管坯长径比太小所致。

二、翻管变形方式的转化条件

翻管变形过程的分析仅为定性分析，为了确定翻管工艺参数，必须分析推导出一些定量计算的公式，对于翻管变形方式的转化条件的分析与研究，正是为了达到这一目的。

1. 扩口平直端长度的确定

图 7-29a~d 表示翻管过程所经历的初始屈曲、扩口、卷曲、翻卷的瞬时状态，要保证翻管顺利进行，必须满足扩口 \rightarrow 卷曲 \rightarrow 翻卷三种变形模式的转化条件。

管材在半锥角为 α 的锥模上轴向受压时，经初始屈曲形成塑性铰后，管端沿模具表面扩张，形成一定长度的平直段，在以后的整个变形过程中仍然保持平直，我们称其为扩口平直端，以 L 表示（见图 7-29c），它对以后的翻管变形有很大的影响，计算 L 的长度，可沿管坯轴向取一单位宽度的单元体，如图 7-31 所示。

设周向应力 σ_θ 和轴向应力 σ_x 沿截均匀分布，忽略材料的弹性变形、强化效应、摩擦力和弯曲挠度，将受力状态视作平面应力状态，这样，单元体上扩口平直端与屈曲段的过渡处 A-A 截面，所承受的弯矩 M_A 等于塑性弯矩，根据宽板弯曲理论可得到：

$$M_A = [1/(2\sqrt{3})]\sigma_{0.2}t^2 \quad (7-29)$$

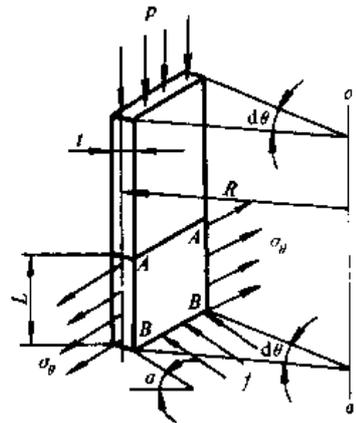


图 7-31 扩口平直端模型

又因为 M_A 是由 σ_θ 和模具支撑反力 f 共同作用而致, 所以 $M_A = fL \cos \alpha - \sigma_\theta t \int d\theta / 2$, 列轴向平衡方程

$$\sigma_n = f \sin \alpha / t$$

塑性屈服条件

$$\sigma_n + \sigma_\theta = (2 / \sqrt{3}) \sigma_{0.2} t^2$$

将以上方程代入式(7-29)可得到:

$$fL \cos \alpha - [(2 / \sqrt{3}) \sigma_{0.2} - (f \sin \alpha) / t] t L^2 / (2R) = [1 / (2 \sqrt{3})] \sigma_{0.2} t^2$$

对上式求导, 并令 $df/dL=0$, 解得

$$L = (t \tan \alpha + \sqrt{t^2 \tan^2 \alpha + 8Rt}) / 4$$

由于忽略了弹性弯曲挠弯和认为 AB 段全部进入了塑性状态, 致使按上式计算的结果必然大于实际值, 因此应予以修正, 根据实验, 取修正系数为 0.68, 则上式变为:

$$L = 0.68(t \tan \alpha + \sqrt{t^2 \tan^2 \alpha + 8Rt}) / 4 \tag{7-30}$$

从式(7-30)可见, 扩口平直段长度 L 只与管坯壁厚 t 、半径 R 和模具锥角 α 有关, 而与材料特性无关, 其计算结果与实验结果符合很好。

2. 扩口向卷曲变形转化的条件

管坯经扩口继续变形时, 根据不同的条件会产生不同的变形方式, 图 7-29c 示出了从扩口可能转化成的两种变形方式。 AB 为扩口平直段 AO 是自由卷曲半径为 ρ 的弯曲圆弧部分, 随着变形过程的继续, 未变形部分进入弯曲圆弧区变为圆弧段 OD (图 7-32), 原来的圆弧段 AO 由于 σ_θ 的作用发生反弯变形进入扩口区, 变为平直段, 如果 AO 不发生反弯变形, 而以卷曲半径 ρ 的圆弧继续运动, 即 A 截面的塑性弯矩大于其反弯力矩, 则产生卷曲 (图 7-31 中虚线), 显然, 扩口变形转化为卷曲变形的条件就是:

$$M'_A = (1/2 \sqrt{3}) \sigma_{0.2} t^2 \tag{7-31}$$

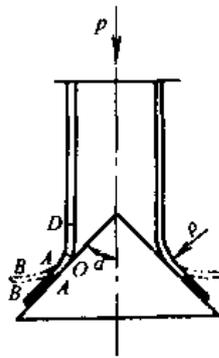


图 7-32 扩管中的卷曲变形

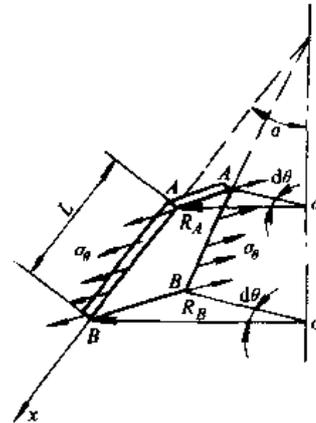


图 7-33 扩口变形模型

为了分析 $A-A$ 截面承受的反弯力矩, 在管端取如图 7-33 所示的一单元体, 并假设变形过程中厚度 t 保持不变 ($E_t=0$), $R_A \approx R = 1/d\theta$, 周向应力 σ_θ 沿厚度均匀分布, 则可写出 $A-A$ 截面承受的反弯力矩为:

$$M'_A = \int_0^t \sigma_\theta t d\theta x \cos \alpha dx$$

$$\sigma_{\theta} = \bar{\sigma}$$

采用幂强化模型 $\bar{\sigma} = A\bar{E}^n$ 。

式中 A ——强化系数；

n ——硬化指数；

\bar{E} ——等效应变。

根据 $E_t = 0$ 和体积不变条件, 有 $\bar{E} = (2/\sqrt{3})E_{\theta}$, E_{θ} 为周向应变, $E_{\theta} \approx \epsilon_{\theta} = x \sin \alpha / R$, 解得:

$$M_A = (2/\sqrt{3})^n A t L^{n+2} \sin^n \alpha \cos \alpha / [(n+2)R^{n+1}] \quad (7-32)$$

由式(7-31)和式(7-32)得到:

$$\sin^n \alpha \cos \alpha \leq (n+2) \sqrt{3}^{n-1} \sigma_{0.2} R^{n-1} t / (2^{n+1} A L^{n+2})$$

实验表明 $\alpha \rightarrow 45^\circ$, 且 $n \rightarrow 0$, 为简化计算, 可令 $\sin^n \alpha \cos \alpha \approx \cos^{n+1} \alpha$, 求得

$$\alpha \geq \alpha_0 = \arccos \left\{ \frac{\sqrt{3} R [(n+2) \sigma_{0.2} t]^{1/(n+1)}}{2AL} \right\} \quad (7-33)$$

式(7-33)表明: 管坯在锥模或类似于锥模上扩口变形, 当模具锥角 $\alpha < \alpha_0$ 时, 只扩口不卷曲, 一直到管端断裂失效; 当 $\alpha \geq \alpha_0$ 时, 扩口长度达到 L 后, 扩口变形模式会转化为卷曲变形模式。因此, 我们定义 α_0 为翻管模具临界半锥角。由式(7-33)计算出 $\alpha_0 = 55^\circ \sim 60^\circ$, 比有关文献未考虑扩口平直端、材料强化和硬化影响所求出的 $\alpha_0 = 44^\circ \sim 46^\circ$, 更接近于实际情况。

3. 自由卷曲半径 ρ 的确定

在锥角为 α 的锥模上, 管坯从扩口到卷曲的过程中, 变形没有受到模具的限制, 呈现自由状态, 称其弯曲半径为自由卷曲半径, 以 ρ 表示, 如图 7-29c 所示。 ρ 的大小直接影响着翻管时的几何干涉和翻管件的几何尺寸。

理论推导采用图 7-29b 的变形模型, 仍然采用前面的假设条件, 并忽略管坯厚度方向的应力, 则周向应力和径向应力分别为周向和径向主应力, 根据能量法则, 有:

$$dW_{\text{外}} = dW_e + dW_b + dW_f \quad (7-34)$$

式中 $dW_{\text{外}}$ ——外载荷功增量;

dW_e ——周向扩张能增量;

dW_b ——弯曲能增量;

dW_f ——摩擦力增量。

圆弧部分周向扩径能增量

$$dW_{e1} = \int_0^{\alpha} \bar{\sigma} d\bar{E} dV = (2/\sqrt{3})^{n+1} A \int_0^{\alpha} E_{\theta}^n dE_{\theta} dV,$$

式中, $E_{\theta} = \ln[1 + \rho(1 - \cos \alpha)/R]$; $dE_{\theta} = \rho \sin \alpha d\alpha / [R + \rho(1 - \cos \alpha)]$

式中 V ——圆弧部分体积。

所以 $dW_{e1} = 2\pi R t A dL [2\rho(1 - \cos \alpha) / \sqrt{3} R]^{n+1} / (n+1)$

同理, 可得到扩口平直端扩张增量

$$dW_{e2} = 2\pi R t A dL [2\rho(1 - \cos \alpha) / \sqrt{3} R]^{n+1} \{ [1 + L \sin \alpha / \rho(1 - \cos \alpha)]^{n+1} - 1 / (n+1) \}$$

因 $dW_e = dW_{e1} + dW_{e2}$, 则

$$dW_e = 2\pi R t A dL [2\rho(1 - \cos \alpha) / \sqrt{3} R]^{n+1} [1 + L \sin \alpha / \rho(1 - \cos \alpha)]^{n+1} / (n+1) \quad (7-35)$$

弯曲部分变形能

$$dW_b = \int \sigma dE dV = 2\pi R t A dL (2E_0 / \sqrt{3})^{n+1} / (n+1)$$

$$E_0 = (1/2) \ln(1 + t/(2\rho)) \approx t/(4\rho)$$

代入上式得到

$$dW_b = 2\pi R t A dL [t/(2\sqrt{3}\rho)]^{n+1} / (n+1)$$

摩擦功增量

$$dW_f = \mu p dL / \cos\alpha$$

外力功增量

$$dW_{\#} = P dL \quad (7-36)$$

由式(7-35)~式(7-36)得到

$$P = 2\pi R t A \{ [2\rho(1 - \cos\alpha) / \sqrt{3} R]^{n+1} [1 + L \sin\alpha / (\rho(1 - \cos\alpha))]^{n+1} + [t/2\sqrt{3}\rho]^{n+1} / [(1 - \mu/\cos\alpha)(n+1)] \} \quad (7-37)$$

P 为扩口转化到卷曲变形模式的瞬时变形力, 不能作为翻管工艺力, 对式(7-37)求导, 并令 $dP/d\rho=0$, 得到在锥形模或圆角模上翻管时的自由卷曲半径

$$\rho = \sqrt{Rt/(4(1 - \cos\alpha))} [1 + L \sin\alpha / (\rho(1 - \cos\alpha))]^{-n/(2n+2)} \quad (7-38)$$

4. 卷曲向翻转变形转化的条件

在翻管的整个过程中, 从卷曲开始, 由于变形力一直呈稳定上升, 直至翻卷而达到一不变的翻管工艺力, 因此分析卷曲→翻卷变形模式的转化条件时, 从卷曲和翻卷的变形力着手, 求得这两种变形模式变形力的交点, 作为它们的转化点。

(1) 卷曲变形力 $P_{\#}$ 图 7-29d 为卷曲过程中瞬时示意图, 假设管材壁厚 t 在卷曲过程中保持不变, 周向、径向和轴向分别为主应力方向, 这三个方向上的应力分别为主应力。由于卷曲角在 $\varphi < 180^\circ$ 时, E_0 为正; $\varphi > 180^\circ$ 时, E_0 为负。这在考虑变形硬化时将会给理论分析增加许多困难, 所以下面采用无强化刚塑性材料模型 $\bar{\sigma} = \sigma_s$, 并忽略扩口平直的影响。

根据能量法则, 式(7-34)中周向扩张能增量

$$dW_e = \sigma_s d\bar{E} dV = \pi \sigma_s \rho t dL (3 + \cos\varphi) / \sqrt{3} \quad (\varphi > \pi)$$

弯曲变形能增量

$$dW_b = \sigma_s dE dV = \pi \sigma_s R t^2 dL / (\sqrt{3}\rho)$$

摩擦功增量

$$dW_f = \mu p dL$$

外载功增量 $dW_{\#} = P dL$, 将 dW_e, dW_b, dW_f 和 $dW_{\#}$ 代入式(7-36), 可解得

$$P_{\#} = 4\pi \sigma_s t [\rho(3 + \cos\varphi) + Rt/(4\rho)] / (\sqrt{3}(1 - \mu)) \quad (7-39)$$

(2) 翻卷变形力 $P_{\#}$ 图 7-29e 为翻卷变形示意, 采用 $\bar{\sigma} = A\bar{E}^n$ 幂强化模型, 其余条件仍按上述假设。

根据能量法则, 式(7-34)变为

$$dW_{\#} = dW_e + 2dW_b + dW_f$$

$$dW_e = 2\pi R t A dL (4\rho / (\sqrt{3}R))^{n+1} / (n+1)$$

$$dW_b = 2\pi RtAdL [t/(2 + \sqrt{3}\rho)]^{n+1}/(n+1)$$

$$dW_i = \rho\mu dL$$

$$dW_{\text{外}} = PdL$$

将 dW_c, dW_b, dW_i 和 $dW_{\text{外}}$ 代入上式, 解得

$$P_{\text{翻}} = 2\pi RtA [(4\rho/(\sqrt{3}R))^{n+1} + 2(t/2\sqrt{3}\rho)^{n+1}] / [(1-\mu)(1+n)] \quad (7-40)$$

(3) 卷曲→翻卷变形方式的转化条件 由于管坯从圆曲终止到翻卷开始是一个连续的变形过程, 因此, 必然存在着一个转化点, 在这一点上, 两种变形模式的变形力应该相等, 即从卷曲转化到翻卷必须满足 $P_{\text{翻}} = P_{\text{卷}}$, 将式 (7-39) 和式 (7-40) 代入此式, 并设 $A = \sigma_s, n = 0$, 可以得到卷曲终止角 φ_0 和相应的卷曲半径 ρ_0 :

$$\varphi_0 = \arccos\left(\frac{Rt}{4\rho_0^2} - 1\right)$$

$$\rho_0 = \sqrt{Rt/[4(1 + \cos\varphi_0)]}$$

由卷曲干涉的几何关系(图 7-34)

$$\rho_c(1 - \cos\varphi'_c) + L\cos(\pi/2 - \varphi'_c) = 2\rho_c - t/2$$

可以得到卷曲干涉角 φ_c 和相应的卷曲干涉半径 ρ_c :

$$\varphi_c = \pi + \arccos[(t/2 - \rho_c)/\sqrt{L^2 + \rho_c^2}] - \arccos(\rho_c/\sqrt{L^2 + \rho_c^2})$$

$$\rho_c = (t/2 - L\sin\varphi_c)/(1 - \cos\varphi_c)$$

显然, 要使翻管时不发生几何干涉, 必须满足条件 $\rho_0 \geq \rho_c$ 或 $\varphi_0 \leq \varphi_c$ 。

由以上分析可以得到结论: 设计圆角模时, 必须使其圆角半径 $r \geq \rho_c + t/2$, 以保证 $\varphi_0 \leq \varphi_c$ 而不致发生卷曲干涉, 同时还应使 $r \leq \varphi + t/2$, 以保证模具圆角的意义。

5. 翻管力的计算

翻管工艺力, 亦称翻管力, 它是控制翻管失效最重要的工艺参数, 也是翻管制件用作吸能元件时唯一决定作用的参数。翻管力可以用式 (7-40) 计算, 它与管坯材料、几何尺寸和卷曲半径有关。利用式 (7-40) 计算时, 确定参数 ρ 比较麻烦。在锥模上翻管时, ρ 为自由卷曲半径, 可按式 (7-38) 计算。在圆角模或槽形模上翻管时, 可直接用模具圆角半径 r_0 。当翻管件作为吸能元件时, 翻管或反翻卷(双层管翻为单层管) 无需模具, 这就很难预先确定 ρ 值。因此, 我们通过求极值的方法, 求出最小翻管力, 以供计算真实翻管力时参考。

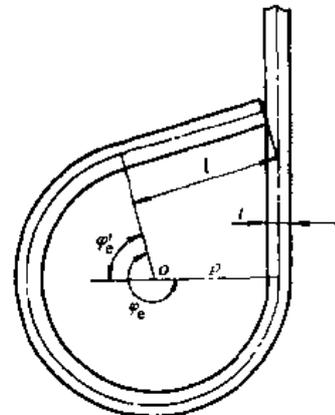


图 7-34 卷曲干涉模型

对式 (7-40) 求导, 并令 $dP/d\rho = 0$, 得到 $\rho = \sqrt{Rt/4} \times 2^{-n/(2n+2)}$, 代入 (7-40) 式解得

$$P_{\min} = 4\pi RtA \sqrt{t/3R} - 2^{(n-2)/(2n+2)} / [(1-\mu)(1+n)]$$

P_{\min} 就是 $\rho = \sqrt{Rt/4} \times 2^{-n/(2n+2)}$ 时的翻管工艺力。

三、翻管模具设计

翻管模的结构虽然比较简单, 但它对于保证翻管工艺的顺利进行和获得满意的管制件却起着决定性的作用。翻管时, 经常会出现管材变形不均匀而导致翻卷管歪斜、偏心、起皱、拉伤等缺陷以及前述的一些失稳破坏, 因此, 应该根据产品几何形状的要求和变形过程中的应

力-应变特征,合理地设计翻这模具。

1. 锥形模 (图 7-28a)

这是最简单和最具有代表性的一种翻管模具。设计锥形模时,主要是确定模具半锥角 α ,使其满足条件 $\alpha > \alpha_{cr}$, 否则将不能实现翻管。Горбунтов 根据应力应变和塑性条件导出:

$$\alpha_{cr} = \frac{\pi}{2} - \frac{\sin \alpha_{cr}}{\sqrt{\cos \alpha_{cr}}} \sqrt{1 - \frac{t}{D_0} \frac{1}{\sin \alpha_{cr}}}$$

计算得 $\alpha_{cr} = 44^\circ \sim 46^\circ$, 比实验结果小 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。考虑材料强化和扩口刚性端的影响,根据塑性条件导出:

$$\alpha_{cr} = \arccos \left\{ \frac{\sqrt{3} D_0 \left[\frac{(n+2)\sigma_{t,2} t}{3AL} \right]^{n-1}}{L} \right\}$$

$$L = (t \tan \alpha + \sqrt{t^2 \tan^2 \alpha + 4 D_0 t}) / 4$$

式中 A ——强化系数;

n ——硬化指数。

计算得 $\alpha_{cr} = 55^\circ \sim 60^\circ$, 与实验结果吻合得很好。

在 α 大于 60° 时,翻管都能顺利地进行,但是随着 α 的增大,翻出双层管之间的间隙有所减小,即翻出的外层管直径减小,用翻管系数 K 表示双层管内外径之比 ($K = D_{外}/D_{内}$), 采用 $\phi 30 \times 1$ 和 $\phi 42 \times 1$ 的 LF21Y2 铝合金管坯,在不同锥角的锥形模具进行翻管试验,测得的结果绘于图 7-35。从图中可以看出, K 值随模具锥角 α 的增大、管坯相对壁厚 S 的减小而增大。因此为了得到预定的翻管系数,在比较小的范围内,可以通过选择合适锥角的翻管模实现。

锥形模虽然具有通用性广(一个锥模可用于任意尺寸的管坯翻管)、摩擦力小、结构简单、易于制造等优点,但管坯在锥形模上变形时,容易滑动,难于准确地对中定位,翻卷处于自由变形状态,只由最小阻力和应力平衡的原则决定其形状,受材料结构非均匀性的影响很大,而难于制造出高质量的管制件。为了防止管端在锥模上滑动,在锥头上做成如图(7-28a)所示的定位凸台可获得明显的效果。

2. 圆角模 (图 7-28b)

这是锥形模演变出来的一种翻管模具,在有定位凸台的锥形模上,将凸台与锥面相贯处作为圆角过渡,用以使管坯卷曲变形。这种模具有较好的对中性,管材卷曲时受到圆角部分的约束,但在圆角之外角仍处于自由变形状态,因此翻管质量虽较锥形模有所改善,但歪斜波动等弊端依然存在。

圆角模的设计主要是确定圆角半径 r , r 的大小既决定着圆角部分对管坯变形时的约束作用,又决定着翻卷与管坯未变形部分的几何干涉,因此,它是唯一重要的工艺参数,必须大于或等于干涉曲率半径 ρ_c 和小于或等于自由卷曲径 ρ , $\rho \geq r \geq \rho_c$, 利用能量法则,由锥形翻卷模式导出:

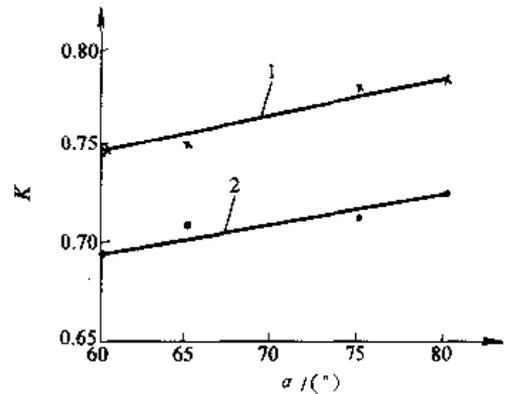


图 7-35 模具锥角与翻管系数的关系

$$\rho = \sqrt{\frac{D_0 t}{2(1 - \cos\alpha)}} \left[1 + \frac{L \sin\alpha}{\rho(1 - \cos\alpha)} \right]^{-n/(2n+2)}$$

利用卷曲干涉条件,导出:

$$\rho_c = \sqrt{\frac{D_0 t}{2(1 - \cos\varphi_c)}} \quad \varphi_c = \arccos \left[\frac{D_0 t}{2\rho_c^2} - 1 \right]$$

设计圆角模时,在一般情况下,可不进行上述的繁琐计算,而根据锥形模翻管时所测出的自由卷曲半径,然后通过试验修正。

3. 槽形模(图 7-28c)

槽形模的特点是管坯能方便地定位对中和强制管材变形,因此能获得高质量的翻卷管,但变形时的摩擦阻力大,容易导致翻管工艺力大于临界失稳力而产生失稳。圆槽半径的确定类似于圆角模。

4. 拉伸翻管模(图 7-28d)。在上述三种形式的模具上翻管,常常会发生失稳,起皱或翻卷部分弯曲等缺陷,工艺受到较大的局限,其原因是管坯在变形时,都是处于压应力状态下,拉伸翻管模则是使在外载荷下的管坯的变形部分处于拉应力状态,从而完全消除了翻管时的失稳起皱现象,并且由于变形区由模具形状决定,因而翻管件的尺寸精度可以完全由模具控制。因此,对于自由翻管难于实现的管材和尺寸精度要求较严的管制件,应该采用拉伸翻管模。这种模具结构复杂,加工费用较高,而且在翻管前,管坯需预先加工出一法兰,供翻管时夹紧固定。

对于不同的管材,除了合理地应用上述类型的模具外,还应采用必要的工艺措施(见图 7-28),如塑性差的材料可采用局部加热的方法;强度太低的材料可采用差温翻管;为了防止干涉,利用活动导向环限制干涉;长管的头部翻管,在距离头部一定长度处通过夹持器加载等措施,从保证翻管的顺利进行和达到产品的质量要求。

四、翻转管的应用

当今,各种车辆、船舶、飞行器的数量越来越多,运行速度越来越快,发生碰撞事故也随之日益增加,给社会和家庭带来了巨大的痛苦和损失。从技术上解决这个问题的主要途径,是除研究和提高各种车辆、船舶、飞行器结构的耐撞性能以外,同时还需设计一些特殊的结构元件来吸收碰撞能,进而保护人身安全。

图 7-36 所示翻转管吸能器就是属于特殊结构元件的典型实例。其吸能原理为,当它承受冲击载荷时,翻转管发生塑性变形,双层壁还原为单层壁,碰撞能就在这一变形过程中被吸收。如果再施加反向载荷,则单层壁又将还原成双层管。

翻转管的变形吸能过程是非破坏性的可逆过程,所以翻转管吸能器可以多次重复使用。这种吸能器主要用来保护人身和结构的安全。生物力学的研究表明,人的颅脑系统的忍受度可以用下式表述:

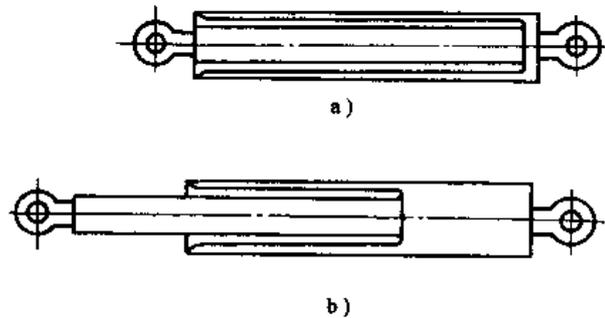


图 7-36 翻转管吸能器吸能示意

a) 冲击前 b) 冲击后

$$G.S.I = \int_0^T a^{2.5} dt < 1000$$

式中 G.S.I——Godd 指标；

a ——物体运动加速度 (m/s^2)；

t ——时间 (ms)；

T ——经历加速度的总时间；

1000——正常成人颅脑损伤的门槛值。

可以证明,在给定初速度和碰撞距离的条件下,使 G.S.I 取极小的减速过程是 a 为常数的匀减速过程。所以,良好的能量吸收装置应该具有定常的承载能力。翻转管吸能器正好具有这种特点。

参 考 文 献

- 1 夏巨谌, 丁永祥, 胡国安编著. 闭式模锻. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 2 肖景容主编. 精密模锻. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 3 林治平编著. 锻压变形力的工程计算. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 4 (苏) А. И. 阿特罗申柯, В. И. 费多罗夫著. 难变形材料热模锻. 薛永春, 王惠泉译. 北京: 国防工业出版社, 1986
- 5 В. А. Гимощенко, В. В. Ермилов, формование поволоков с изогнутой поволоком сизогнутойосьно в закрытых штампах, «К. Ш. П», 1979 (9)
- 6 Kazuyoshi Kondo. 精密冷模锻新工艺的开发. 见: 世界塑性加工最新技术译文集. 北京: 机械工业出版社, 1987, 701~709
- 7 刘景茂. 齿轮无飞边模锻的经验点滴. 锻压机械. 1986 (2); 29~30
- 8 洪深泽. 挤压工艺及模具设计. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 9 吴诗惇. 冷温挤压技术. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 10 林法禹. 特种锻压工艺. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 11 夏巨谌, 李尚健, 李赞, 肖景容. 冷挤压组合凹模的有限元计算. 锻压技术. 1983, (5); 7~10
- 12 夏巨谌, 李赞. 冷挤压组合凹模预应力的有限元计算. 华中理工大学学报, 1986, 14 (5): 715~720
- 13 王英, 段道华, 夏巨谌, 丁永祥. 正向热挤压凹模优化设计方法的研究. 中国机械工程. 1997, 8 (4): 49~52
- 14 中国机械工程学会锻压学会. 锻压手册; 第1卷锻造. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 15 精冲编写组. 精冲. 北京: 国防工业出版社, 1982
- 16 涂光祺. 精冲技术. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 17 丁永祥, 夏巨谌, 胡国安, 肖景容. 薄壁管无芯推压缩径过程的应力应变分析. 金属成形工艺, 1994, 12 (5): 225~228
- 18 夏巨谌, 王英, 胡国安, 丁永祥. 薄壁管缩径挤压工艺的模拟分析与应用. 石油机械, 1997, 25 (3): 18~21
- 19 蒋侠民, 田苗, 张仲元. 聚氨酯橡胶在冲压技术中的应用. 北京: 国防工业出版社, 1989
- 20 杨雨春, 夏巨谌, 胡国安, 戴望保. 大长径比三通薄壁管塑挤胀形工艺关键技术的研究. 见: 第五届全国塑性理论学术论文集. 1994
- 21 К. Н. Боговявленский, Е. Н. Серяков, А. П. Швецов. Выбор основных параметров при гидравлической штамповке тройников из труб, «К. Ш. П», 1980 (6): 18~22
- 22 К. Н. Боговявленский, Е. Н. Серяков, гидравлическая формовка тройников и крестовин, «К. Ш. П», 1972 (4): 22~24
- 23 В. Н. Лукьянов, В. В. Клочков, В. П. Шатеев, Л. В. Обрушников, Гидромеханическая штамповка тройников с регулируемым давлением жидкости, «К. Ш. П», 1980 (3): 7~9
- 24 К. Н. Боговявленский, Е. Н. Серяков, А. Н. Кобышев, А. И. Евстигисев, А. А. Савельев, штамповка деталей велосипедных рам, «К. Ш. П», 1979 (5): 21~24
- 25 К. Н. Боговявленский, Е. Н. Серяков, А. А. Савельев, А. П. Швецов, Опыт внедрения Гидравлической Штамповки деталей велосипедных рам, «К. Ш. П», 1982 (2): 19~21
- 26 黄早文, 胡国安, 郭芷荣, 涂方正. 翻管工艺的研究. 华中理工大学学报, 1991, 19 (增刊Ⅲ): 89~94
- 27 黄早文, 胡国安, 郭芷荣. 翻管变形模式的转化条件. 华中理工大学学报. 1993, 21 (4): 118~123