

第 3 篇

锻 压



2017
1



主编单位 机械工业部北京机电研究所

编写单位 机械工业部北京机电研究所

清华大学

机械工业部第五设计院

东北重型机械学院

西安交通大学

北京科技大学

哈尔滨工业大学

主 编 李社钊

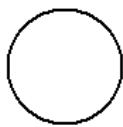
副 主 编 皇甫骅 胡正寰

编 写 人 李社钊 王祖唐 吴德荣 刘助柏

张子公 皇甫骅 胡正寰 何绍元

俞新陆 陆煜众 吴觉伪

主 审 霍文灿



第 1 章 概 论^{[1][2]}

1 锻压在机械制造业中的地位和作用

锻压加工是利用金属的塑性变形以得到一定形状的制件，同时提高或改善制件力学或物理性能的基础工艺之一。负载大、工作条件恶劣的关键零件，如汽轮发电机组的转子、主轴、叶轮和护环，大量生产的汽车、拖拉机中的曲轴、连杆、齿轮和转向节，大型水压机的立柱、高压缸和冷、热轧辊等，都是锻压加工而成的。各种刀具、模具、农具、手工工具、紧固件和轴承环等也大都采用锻压加工。

锻件的年产量，模锻件在锻件总产量中的比例，精锻件在模锻件中的比例，锻压生产的机械化、自动化程度以及锻压设备在加工机床总量中所占的比例和重型水压机的拥有量等，在一定程度上反映了一个国家的机械制造业的能力和水平，如先进工业国家模锻件占锻件总产量的比例已达 70%~80%。

汽车、电站设备、化工设备、造船业、重型机械以及新兴的宇航、原子能工业的发展，对锻压加工提出了更高的要求，大批量生产要求提供少无切屑的精密锻件，特殊要求的则需提供形状复杂、性能要求严格的大型锻件或者特殊材料锻件，可以说锻压生产无论对现代工业生产还是未来的工业生产都是必不可少的重要手段。

2 锻压工艺方法分类

锻压工艺的发展已有悠久的历史，工艺方法多种多样（表 3·1-1），其分类可按是否加热、是否采用模具或采用不同锻压设备等来划分。就其工艺本质而言，都是金属的塑性变形。

金属塑性决定了金属能承受塑性变形的能力。决定金属塑性的内在因素是其化学成分和组织结构，而影响塑性的主要外因是变形温度、变形程度、应力状态和变形速率。由于外部条件的变化可形成不同的工艺方法，例如冷锻是在室温条件下进行塑性变形，虽然变形抗力高，但可以得到力学性能好、尺寸精度高、表面光洁的少无切屑制品；挤压是在强烈三向压应力状态进行的塑性变形，可以加工低塑性的金属，又能得到较大的变形程度；精锻轴、回转锻造等是采用局部累积变形，生产效率高，可用较小吨位的设备获得大变形量；高速锻是在超过通常变形速率较多的状态下进行加工，可成形薄壁、复杂截面形状的锻件；等温锻造是在恒定的变形温度下进行加工，变形抗力很小，可以较小吨位的设备，成形大型、复杂形状的零件；中心压实锻造是利用大锻件内外温差来控制变形程度的分布，达到中心部位产生大变形，焊合内部缺陷的目的。

表 3·1-1 锻压方法及其适用范围

加工方法	使用设备	特点及适用范围	生产率	设备费用	锻件精度及表面状态	模具质量要求	模具寿命	机械化及自动化	劳动条件	对环境的影响
自由锻	手工锻	单件、小批，小型锻件		很低	低				差	
	3t 以下自由锻锤	单件、小批，小型锻件	中	低	低			较难	差	振动噪声
	3t 以上自由锻锤	单件、小批，中型锻件	中	中	低			较难	差	振动噪声
	1250t 以下自由锻水压机	单件、小批，中型锻件	中	高	低			较易	较好	
	1250~12000t 自由锻水压机	单件、小批，大型及特大型锻件		很高	低			较易	较好	



(续)

加工方法	使用设备	特点及适用范围	生产率	设备费用	锻件精度及表面状态	模具质量要求	模具寿命	机械化及自动化	劳动条件	对环境的影响
胎模锻	利用自由锻锤及水压机	中小批, 中小型锻件。用胎模成形, 提高锻件质量和设备的生产效率	较高	低、中	中	低	低	较难	差	
模 锻	有砧座模锻锤	成大批量, 中小型模锻件; 可在一台设备上拔长、聚料、预锻、终锻	高	中	中	高	中	较难	差	振动 噪声
	无砧座模锻锤	大、中批, 中小型模锻件; 单模膛模锻	高	较低	中	高	中	较难	较差	噪声
	热模锻压力机	大、中批, 中小型模锻件; 大批量需配备制坯设备; 亦可用于精密模锻	很高	高	较高	较高	较高	易	好	
	平锻机	大批大量, 适用于法兰轴、带孔模锻件; 多模膛模锻	高	高	较高	高	较高	易 (水平分模)	较好	噪声
	螺旋压力机	大、中批, 中小型模锻件; 一般是单模膛模锻; 可进行精密模锻; 大型精密模锻件用液压电动高能螺旋压力机	较高	较高	高	高	中	较易	好	噪声
	高速锤	中、小批。单模膛模锻; 用于锻制低塑性合金锻件和薄壁高筋复杂模锻件	中	中	高	高	较低	较难		噪声
	多向模锻水压机	大批, 可锻制不同方向具有多孔腔的复杂模锻件	中	高	高	高	高	易	较好	
	模锻水压机	小批, 锻制大型非铁合金模锻件	中	很高	高	高	高	较易		
径向锻造	精密锻轴机	大批, 锻制空心 and 实心阶梯轴	中	高	高	高	中	较易		噪声
挤压	冷挤 冷挤压力机	大批大量, 钢及非铁合金小型零件	高	高	高	高	高	较易	好	
	温热挤 机械压力机 螺旋压力机 液压机	大批大量, 挤压不锈钢、轴承钢零件以及非铁合金的坯料	高	高	较高	高	中	较易	好	
	热挤 多工位冷锻机	大批大量生产标准件	很高	高	高	高	高	易	好	噪声



(续)

加工方法	使用设备	特点及适用范围	生产率	设备费用	锻件精度及表面状态	模具质量要求	模具寿命	机械化及自动化	劳动条件	对环境的影响	
锻 锻	多工位热锻机	大批大量生产轴承环、齿轮、汽车锻件	很高	高	较高	高	高	易	好	噪声	
	电热锻机	大批大量生产大头螺杆锻件	高	中	中	中	高	易	好		
回 转 成 形	纵 轧	二辊或三辊轧机	高		中			易			
	辗 锻	辗锻机	高	中	中	高	高	易	好		
	楔形模 横 轧	平板式、辊式、行星式楔形横轧机	高	高	高	高	高	易	好		
	螺旋孔 型斜轧	二辊或三辊斜轧机	高	高	高	高	高	易	好		
	仿型 斜 轧	三辊仿形斜轧机	高	高	高	中	高	易	好		
	扩 孔	扩孔机	大批大量生产大、小环形锻件	高	中	高	中	高	易	好	
	齿 轮 轧 制	齿轮轧机	大批大量生产、热轧后冷轧，可大大提高精度	高	高		高		易	好	
摆 动 辗 压	摆动辗压机	中、小批生产盘类、轴对称类锻件。要求配备制坯设备。可热辗、温辗和冷辗	中	高	高	高	中	较易	好		

3 锻压工艺的发展趋势

锻压生产与国民经济的发展关系极为密切，国外曾预测，到本世纪末，产品中锻压件的比例将有所增长，例如飞机的锻压件占85%，汽车的占60%~70%，农机的占70%，电器仪表的占90%，随着锻压工艺的发展，已突破锻压工艺只能提供零件毛坯的概念，社会化大生产的发展，靠拼设备、拼体力是无法满足的，也无法保证产品零件生产的质量，只能依靠科技进步，提

高专业化生产水平，而锻压工艺除自身的发展外，还必须与相应的锻压设备和配套技术同步发展，在锻压工艺方面的发展有：

(1) 加强对锻压成形理论的研究，并使之与新工艺的开发相结合。把计算机技术应用于锻压工艺设计，形成工艺设计的专家系统，达到工艺方案的优化设计。

(2) 发展精密模锻技术，研究开发成品锻件或准成品锻件的生产技术，使锻件尽可能地接近实际零件形状。



(3) 发展边缘工艺或复合工艺,如回转锻造、粉末锻造、液体模锻、等温锻造等。

(4) 研究大钢锭冶炼和新锻造技术,以改善大锻件内部质量。通过大型水压机的自动控制和测量技术的发展,提高大锻件尺寸精度。

在锻压设备方面向下列方向发展:

(1) 发展高效、高精度、多工位成形设备,把计算机数控技术,机器人技术,光电技术等综合应用到锻压设备中,以提高其可靠性和各种参数的监控。

(2) 发展柔性锻压加工系统,以满足多品种、中小批量生产,缩短产品换型的周期。

(3) 开发改造旧锻压设备的新技术,以提高旧设备

的生产能力和锻件质量,改善生产条件。

在配套技术方面着重向如下方向发展:

(1) 发展模具 CAD/CAM 技术和新模具材料及新的加工方法,以降低模具的表面粗糙度和提高模具使用寿命。

(2) 发展适应不同材质、不同规格材料的高效精密下料方法,满足精密锻造的需要。

(3) 发展适合不同温度区间、无污染的润滑材料和涂覆方法。

(4) 发展快速、少氧化的加热方法和相应加热设备。

(5) 发展锻压生产的检测技术。

第2章 塑性成形理论^{[3][4]}

1 概述



塑性成形理论为制订工艺规程、设计模具、选择或设计锻压设备提供科学依据。其内容包括微观变形机制和宏观变形的应力应变。

从微观上看,各种材料的塑性变形带来内部组织结构的变化。现代电子显微镜的发展和应用,可对各种材料塑性变形过程微观组织结构的变化进行详细观察,将变形量、温度、应变速率等因素对材料强度、韧性和断裂机制的影响和微观组织结构的变化结合起来,成为材料科学的基本内容之一。

塑性成形理论是从宏观上计算出各种塑性成形工艺、工步在不同变形量、温度和应变速率下坯料内的应力和应变分布,并和微观变形机理结合起来分析它们对变形抗力、成形极限以及制品性能的影响,以便按照锻压件形状和性能要求,选择合理的工艺、工步和工艺参数,优化工艺规程。

锻压件的生产是锻压设备通过工模具对坯料施加外力,使坯料发生塑性变形改变原始形状和性能,得到满足要求的制品。一种工模具使坯料在一定方式下发生一定量的塑性变形,成为一种工艺的一个工步,不同的工具或模具产生不同方式的变形。经过不同的塑性成形工步,可将形状简单的坯料加工成各种不同形状的锻压件。塑性成形工步是锻压生产的一个基元。

1. 自由锻 在锻锤或压力机上,采用通用的工具,将热锭或热坯在高度方向压缩,水平方向可自由伸

长或展宽,以制造出各种锻件,主要工步有锻粗、拔长和冲孔等,如图 3·2-1 所示。

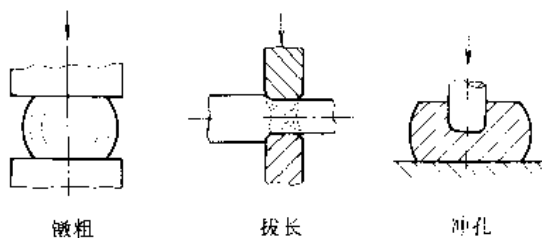


图 3·2-1 自由锻

2. 模锻 模锻时采用为某种锻件专门制造的锻模,将加热的坯料放在锻模内,在锻锤或压力机的动力作用下,坯料在模膛形状控制下塑性变形。主要工步有开式模锻和闭式模锻,如图 3·2-2 所示。

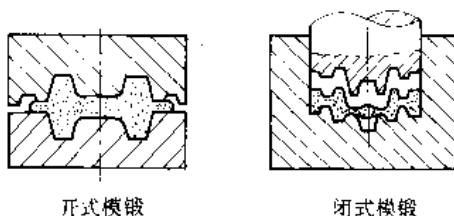


图 3·2-2 模锻

3. 挤压 坯料放入挤压模内,在压力机滑块上冲头的压力作用下,金属被挤压从凹模口向外流动变形。主要有正挤、反挤和复合挤等,如图 3·2-3 所示。

4. 回转成形 以两个表面按需要做出型槽的轧



辊作工具,在轧机的动力作用下相对转动。坯料由轧辊表面摩擦带入轧辊间,在型槽内压缩变形,制成各种制品。主要有辊锻、楔横轧和轧环等,如图3-2-4所示。

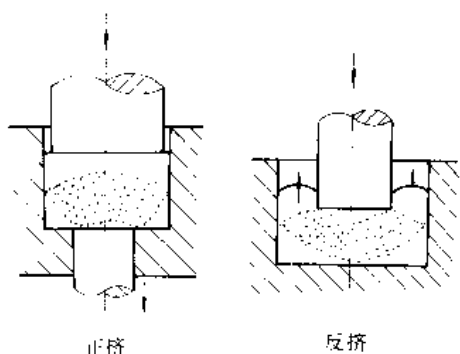


图3-2-3 挤压

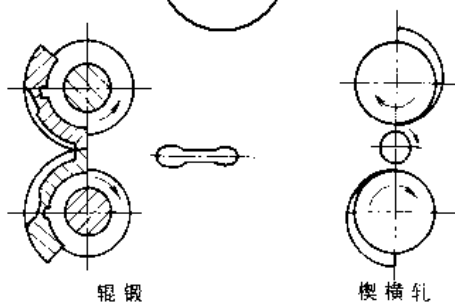


图3-2-4 回转成形

5. 板料成形 用金属板料制成坯料放在冲模内,在压力机滑块上冲头的压力作用下,坯料塑性变形制成各种机器零件或构件。主要工步有拉深、翻边、胀形和缩口等,如图3-2-5所示。

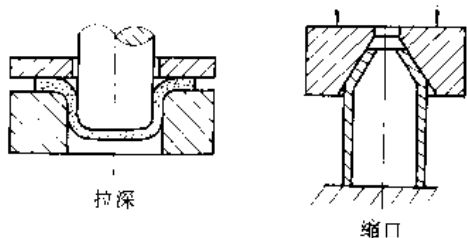


图3-2-5 板料成形

6. 切断 坯料放在两个上下能相对运动的刀刃之间,上刀刃在压力机动力作用下,压入放在下刀刃上的坯料,使刀刃间金属塑性变形、开裂而切断分离。主要有下料、冲孔和切边等,如图3-2-6所示。

7. 弯曲和扭转 弯曲是坯料放在弯曲模内,冲头在压力机动力作用下对坯料产生弯矩,使坯料塑性变形沿轴线弯曲成一定角度。扭转是加工设备通过工具

对坯料施加扭矩,使坯料塑性变形绕轴线扭转一定角度,如图3-2-7所示。

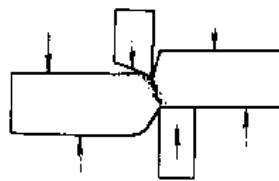


图3-2-6 切断

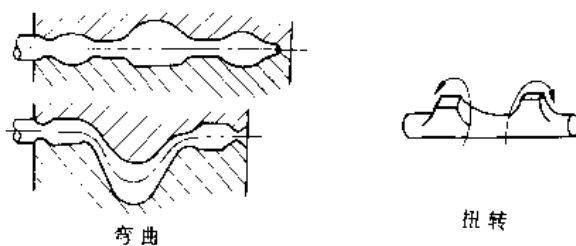


图3-2-7 弯曲和扭转

2 金属塑性变形机理及其影响因素

金属在外力作用下,内部发生应力和应变。当应力小于屈服强度值时,内部只发生弹性应变。如应力达到屈服强度,内部发生不可逆的塑性应变。拉伸试验所测定的应力应变曲线的金属力学性能的基本数据。金属塑性变形的机理和变形量、应变速率及温度密切相关,所以金属的屈服强度是变形量、应变速率及温度的函数。图3-2-8是常温下碳钢的拉伸试验应力应变曲线。

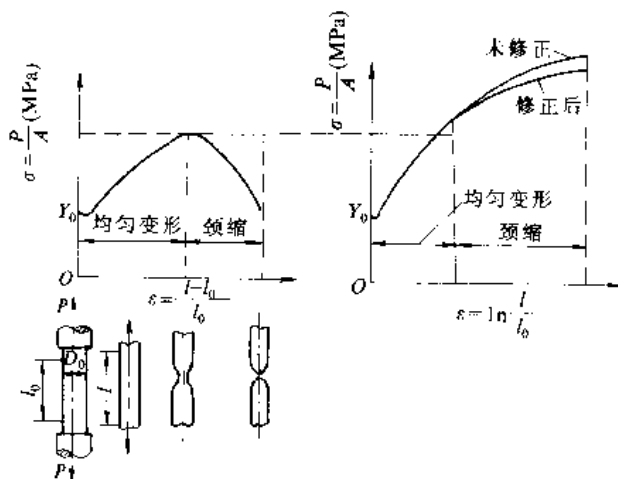


图3-2-8 碳钢常温下应力应变曲线

Y_0 —材料拉伸试验中屈服点的应力值(屈服极限)

2.1 金属在常温下塑性变形机理

工业用金属都是多晶体。金属在外力作用下,晶粒



内部产生滑移或孪晶,晶粒间界也会产生滑动,形成宏观的塑性变形。

晶粒内的滑移和孪晶是由于位错的运动产生的。位错是晶体原子结构的线缺陷。在应力作用下,位错发生运动,且不断增殖。不同位错的交叉切割和相互作用,形成塞积和缠结,晶格发生畸变,使位错继续运动困难。如要继续运动,需要增加外力。材料的屈服强度随应变的增加而增加,这种现象叫加工硬化。这时金属的硬度也随着增加,塑性下降,内部出现残余应力。这种塑性变形叫冷变形。

冷变形后的金属内部组织结构变化不均匀。变形剧烈的区域会出现微裂。如继续变形,微裂扩大,终至断开。

2.2 金属在高温下塑性变形机理

冷变形后的金属经加热时,内部组织结构发生回复、再结晶和晶粒长大,为静态回复或再结晶。

回复时,晶体的强烈滑移区的残余应力得到消除,位错移动到能量较低的位置。晶粒内的亚晶界增加,晶体结构形成多边化。

再结晶时,晶体内残余应力进一步消除,在畸变能较高的区域产生新的晶核,新晶核逐步长大成新的等轴晶粒。屈服强度和硬度下降,塑性增加,产生软化作用。

再结晶在一定的温度和变形量下发生,纯金属一般是在 $0.4 T_m$ 熔化绝对温度时开始,即

$$T_R \approx 0.4 T_m$$

式中 T_R —— 再结晶温度(K);

T_m —— 熔化温度(K)。

再结晶温度和变形程度有关。变形程度小时,再结晶温度较高。此外还和原始晶粒度及保温时间有关。

再结晶后金属如长时间保持在高温下,晶粒会合并长大。

金属加热到再结晶温度以上塑性变形时,变形过程既有硬化现象,又有软化现象。如温度足够高,变形量足够大,软化作用占优势,产生动态再结晶。这样变形后的金属完全为再结晶后等轴晶粒组织,这种变形叫热变形。

金属在不同温度下塑性变形,内部组织结构的变化归纳如下:

当变形温度 $T < 0.3 T_m$ (金属熔化温度),内部组织发生硬化;当变形温度在 $0.3 \sim 0.5 T_m$ 时,内部组织发生局部硬化;当变形温度在 $0.5 \sim 0.7 T_m$ 时,内部组

织呈软化状态。

金属的屈服强度一般随温度的升高而下降。在温度高于 $0.5 T_m$ 时,即使应力远小于屈服极限,只要保持较长的时间,金属也会发生塑性变形,这种和时间相关的塑性变形叫蠕变。蠕变是由位错运动和原子扩散的联合作用产生的。

图 3-2-9 为低碳钢在不同温度静载压缩试验下的应力应变曲线。

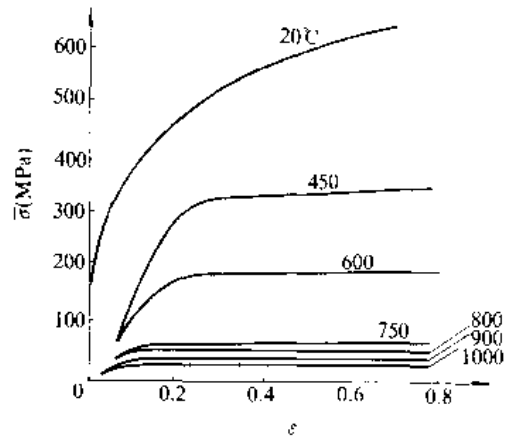


图 3-2-9 低碳钢不同温度静载压缩应力应变曲线

2.3 应变速率对塑性变形机理的影响

拉伸试验测定金属材料力学性能时,规定应变速率在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间。如应变速率不同,材料的应力应变曲线值也不同。一般地说,应变速率越高,在相同的应变时,材料的屈服强度越高,这是速度效应。图 3-2-10 是多晶体在不同温度下不同应变速率的屈服强度变化。

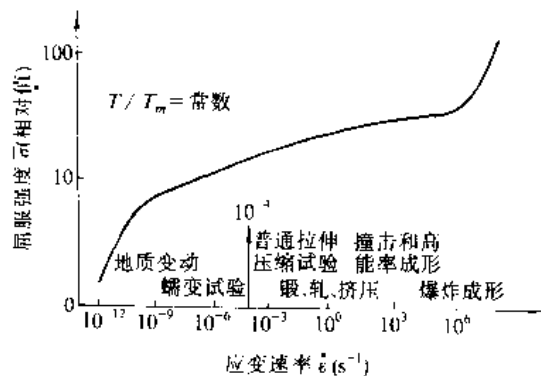


图 3-2-10 多晶体材料不同应变速率下的屈服强度变化

应变速率另一个影响作用是热效应。金属在塑性变形过程,塑变功转变为热能。在较高的应变速率下,热能来不及传导,导致材料的温度升高。这种应变速率



(ϵ) 和温度 T 的相关作用 通常用 Zener-Hollomon 指数表示, 即

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

应变速率第一个影响作用是变形分布状态。在应变速率很高的动载变形下, 变形聚集在局部区域, 发生应变集中。有的金属发生孪晶。

2.4 超塑性变形机理

有些合金在细晶结构, 温度 $T \approx 0.5T_m$ (T_m 指变形金属的熔化温度) 下慢速变形时, 拉伸试验中伸长率可超过 100%, 最多可达 2000%, 这种现象叫超塑性。

超塑性变形机理涉及面很广, 现提出的理论有: 溶解-沉淀理论, 亚稳态理论, 扩散蠕变理论, 位错攀移理论、动态再结晶理论、晶界滑动 (滑移、迁移、转动) 理论, 原子定向扩散晶界滑移机理等、至今对超塑性变形的机理尚不能作出全面的解释。

超塑性材料属速度敏感材料, 屈服强度和应变速率的关系密切, 其本构方程可用下式表示:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m$$

式中 σ —— 屈服强度;

K —— 材料常数。典型的超塑性材料有 Zn-Al22%, Al-6Cu-0.5Zr, Ti-6Al-4V 等;

m —— 速度敏感性指数, $m \geq 0.3$ 。

3 塑性成形过程的计算和模拟

为要计算分析各种塑性成形工步的应力、应变和温度分布状态以及变形抗力和成形极限等工艺参数, 须要对塑性成形过程建立计算方程, 并根据各种成形工步的边界条件设法求解。为核验计算结果或探索开发新的成形工步, 则需采用各种模拟技术进行数据的测定。

3.1 成形过程计算的基本方程

1. 微分平衡方程

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_i} + f_i = 0$$

式中 σ_{ij} —— 应力张量分量 (MPa);

X_i —— 所考察点的笛卡尔坐标 (mm);

f_i —— 体力分量 (N/mm³)。

2. 变形几何协调方程

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)$$

式中 ϵ_{ij} —— 应变张量分量;

U_i, U_j —— 位移分量 (mm)。

3. 材料屈服准则

a. 连续体

$$\text{Mises 准则 } F = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} = K^2$$

$$\text{Tresca 准则 } F = \text{Max} \left\{ \frac{1}{2} |\sigma_1 - \sigma_2|, \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} |\sigma_2 - \sigma_3|, \frac{1}{2} |\sigma_3 - \sigma_1| \right\} = K$$

式中 σ'_{ij} —— 偏应力张量分量 (MPa);

K —— 抗剪强度 (MPa);

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ —— 主应力 (MPa)。

b. 多孔体

$$AJ_2^2 + BJ_1^2 = Y_k^2 = \delta Y_k^2$$

$$\begin{aligned} A &= 2 - R^2 \\ B &= 1 - \frac{A}{3} \\ \delta &= 2R^2 - 1 \end{aligned}$$

$$R = \rho / \rho_0$$

式中 J_2 —— 偏应力张量二次不变量 (MPa²);

J_1 —— 应力张量一次不变量 (MPa);

Y_k, Y_b —— 多孔体材料屈服强度 (MPa)、压实后材料屈服强度 (MPa);

R —— 相对密度;

ρ, ρ_0 —— 多孔体材料压实前、后的密度 (kg/cm³)。

4. 本构方程

a. 弹性体

$$\sigma_{ii} = 3K \epsilon_{ii}$$

$$\sigma'_{ij} = 2G \epsilon'_{ij}$$

式中 K, G —— 材料弹性常数 (MPa);

ϵ'_{ij} —— 应变偏量张量分量 (MPa)。

b. 塑性连续体

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$$

Mises 准则材料有

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \sigma'_{ij}$$

式中 $\lambda = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_e}{\sigma_e}$

$\dot{\epsilon}_e$ —— 等效应变速率 (1/s);

σ_e —— 等效应力 (MPa)。

对应变硬化材料: $\sigma_e = Y_0 \left(1 + \frac{\epsilon_e}{\epsilon_0} \right)^n$



对应变率敏感材料: $\sigma_r = Y_0 \left[1 - \left(\frac{\dot{\epsilon}_e}{\dot{\epsilon}_0} \right)^m \right]$

- 式中 ϵ_e 等效应变;
 ϵ_0 材料常数;
 $\dot{\epsilon}_0$ 材料常数(1/s);
 Y_0 材料常数(MPa);
 n 应变硬化指数;
 m 应变率敏感指数。

c. 塑性多孔体

$$\dot{\epsilon}_e = \lambda \left[A\sigma_r + \frac{2}{3}(3-A)J_1\delta_{rr} \right]$$

$$\lambda = \frac{\dot{\epsilon}_e}{2\sigma_r}$$

$$\sigma_r = (AJ_2 - BJ_1^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\dot{\epsilon}_e = \left[\frac{3}{A}\dot{\epsilon}_e^2 + \frac{1}{3(3-A)}\dot{\epsilon}_{kk}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

5. 体积变化率

a. 塑性连续体

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_r = 0$$

式中 $\dot{\epsilon}_v$ 体积变化率。

b. 塑性多孔体

$$\dot{\epsilon}_v = \frac{\dot{\epsilon}_e}{\sigma_r} (3-A)J_1$$

6. 边界条件

应力边界 $S_T \quad \sigma_{ij}n_j = T_i$

速度边界 $S_U \quad U_i = \dot{U}_i$

摩擦边界 $S_C \quad T_i - (T_j \cdot n_j)n_i = f_i$

$$S = S_T + S_U + S_C$$

- 式中 n_i 表面外法线单位矢量分量;
 T_i 作用在表面的外力分量 (MPa);
 U_i 给定外表面速度分量 (m/s);
 f_i 摩擦力分量 (MPa)。

以上计算方程, 难以求出通解。在实际应用中, 需根据具体要求, 对工步的变形状态加以简化或进行数值计算。

3.2 塑性成形过程的实用计算方法

计算分析成形工步的应力、应变和温度分布以及变形抗力和成形极限等工艺参数, 实际应用时常根据具体要求和工步变形特点, 对问题进行合理的简化, 以便较快地得出需要的数据。按照简化方法不同, 常用的计算方法有 (1) 初等解析法或切块法, (2) 滑移线场理论, (3) 上限法, (4) 板料成形理论和 (5) 塑性有限元法等。

3.2.1 初等解析法或切块法

对变形体取较大的单元体或切块, 假设边界上的正应力为主应力, 对单元体建立平衡方程和屈服条件联立求解。得出边界上的正应力分布和变形力能参数, 变形体内的变形状态假设是均匀的。下面以求解圆柱体镦粗时的变形力为例来说明。

图 3-2-11 表示一个圆柱体, 原始直径 D_0 和高 H_0 , 在上下平砧间在压力 P 的作用下镦粗到直径为 D

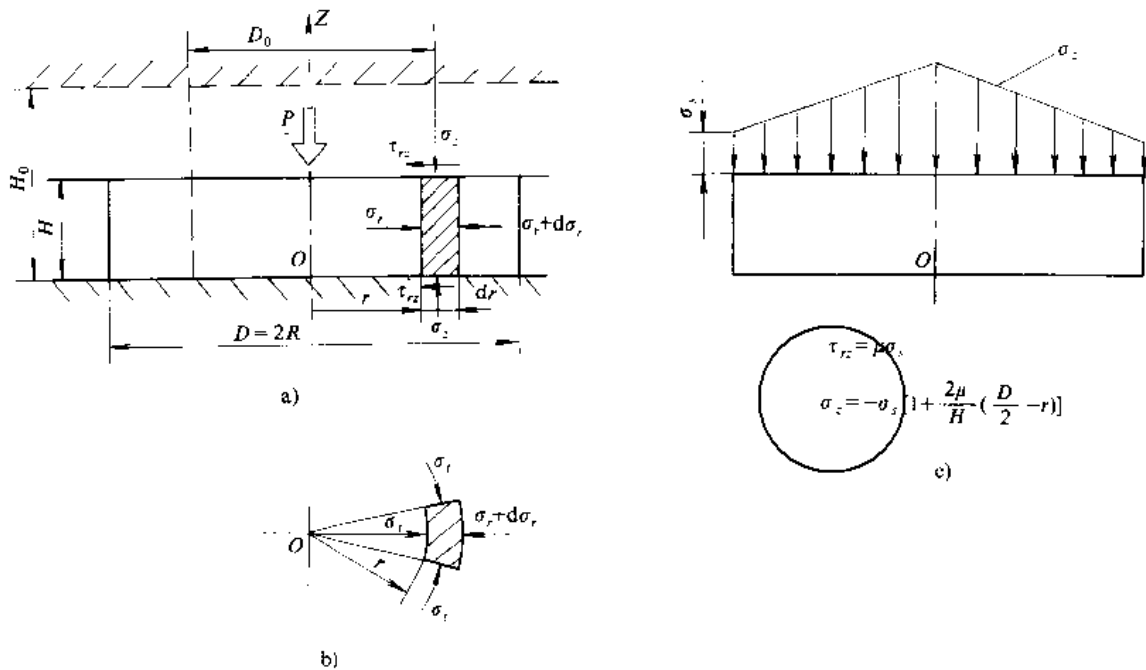


图 3-2-11 圆柱体镦粗应力状态分析图



高 H 的圆柱时的情况,变形为轴对称状态。

在变形体内半径 r 处,取厚度为 dr ,圆心角 $d\theta$,高 H 的圆环切块。设上下两端的压应力为 σ_z ,摩擦切应力 τ_{rz} ,沿 r 径向的压应力分别为 σ_r 和 $\sigma_r + d\sigma_r$,切向应力 σ_θ 。由切块上径向力的平衡,得

$$F_r = \sigma_r H r d\theta - (\sigma_r + d\sigma_r) H r d\theta + 2\sigma_\theta \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) H dr - 2\tau_{rz} r d\theta dr = 0$$

当 $d\theta$ 很小时,有 $\sin d\theta \approx d\theta$,并忽略二次微量,上式简化为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\tau_{rz}}{H} = 0$$

设表面摩擦切应力为平均值的常数,即

$$\tau_{rz} = \mu\sigma_z$$

式中 σ_z ——材料屈服点。

取 Tresca 屈服准则,

$$\sigma_r - \sigma_z = \sigma_s$$

因此

$$d\sigma_r = d\sigma_z$$

代入平衡方程后得

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2\mu\sigma_z}{H} = 0$$

上式积分后,并取边界条件当 $r = \frac{D}{2}$, $\sigma_r = 0$, $\sigma_z = \sigma_s$,定出积分常数,得

$$\sigma_z = \sigma_s \left[1 + \frac{2\mu}{H} \left(\frac{D}{2} - r \right) \right]$$

从上式可以看出,圆柱体镦粗时,端面上的压应力在中心处 $r = 0$ 最大,边缘处 $r = \frac{D}{2}$,压应力最小。这已由试验证实。

镦粗压力可计算如下:

$$P = \int_0^{\frac{D}{2}} \sigma_z 2\pi r dr = \frac{\pi D^2}{4} \sigma_s \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{D}{H} \right) \text{ (N)}$$

单位面积的平均压力可以算出如下:

$$q = \frac{P}{\frac{\pi}{4} D^2} = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{D}{H} \right) \text{ (MPa)}$$

上式说明镦粗的变形力不但和材料的屈服极限 σ_s 成正比,而且随表面摩擦系数 μ 以及坯料的径高比 D/H 的增加而增加。冷锻表面润滑良好时, $\mu \approx 0.1$; 热锻无润滑时, $\mu \approx 0.35$ 。

3.2.2 滑移线场理论

假设材料为刚塑性体,在平面变形状态下,可以证

明塑变区内任一点存在两族正交的滑移线族。根据滑移线族的特性和成形工步的边界条件,可以解出塑变区的应力状态、速度场和瞬时的变形状态,计算出力能参数。下面以上下平冲头压入坯料为例来说明。

图 3-2-12a 表示上下平冲头压入方坯时内部塑变区的分布。设冲头宽度 $2b$,长 $L \gg 2b$,坯料高 $2h$,变形可简化为平面变形状态。又设冲头下的压力 q 均匀分布,根据应力边界,可解出塑变区的滑移线场和速度场。由于塑变区上下左右对称,取左上的 $\frac{1}{4}$ 如图 3-2-12b 所示。根据滑移线场理论,可求出塑变区内任一点 (l, m) 的应力和相对速度。图 3-2-12b 的右侧为沿中心线上的 σ_x 分布。取 X 轴方向的力平衡,得

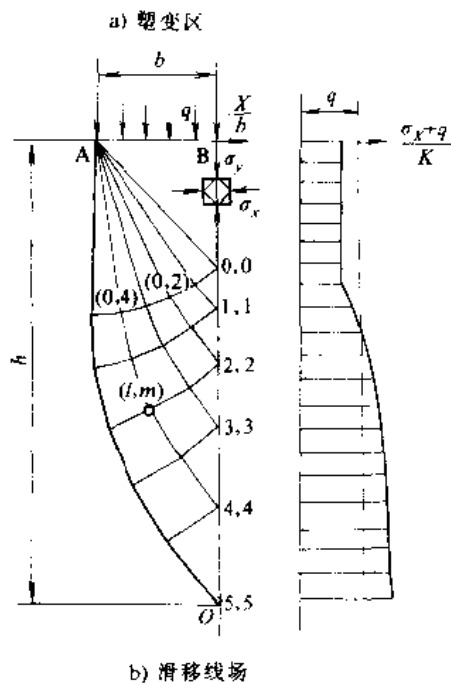
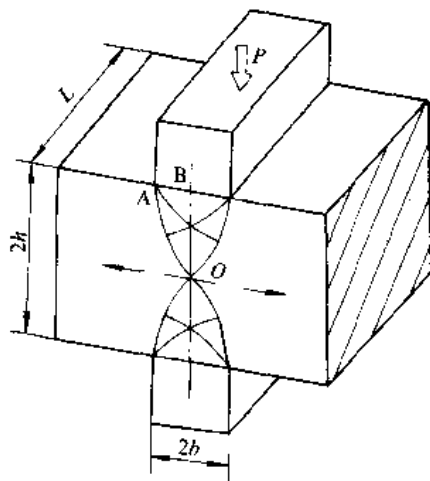


图 3-2-12 上下平冲头压缩坯料



$$q = 2K \left(1.2 \ln \lambda + \frac{1.2}{\lambda} - 0.2 \right) \text{ (MPa)}$$

$$\lambda = \frac{h}{b}$$

式中 K —— 材料抗剪强度。

上式的应用范围为 $1 \leq \lambda \leq 8.6$ 。如 $\lambda > 8.6$ ，则塑变区发生在坯料表层局部，这时有

$$q = 2K \left(1 + \frac{\pi}{2} \right) \text{ (MPa)}$$

根据滑移线理论，可求出塑变区中心点 O 的应力 或 如下：

$$\sigma_x = 2.4K \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_y = 2K \left(0.2 - \frac{1.2}{\lambda} \right) \text{ (MPa)}$$

如 $\lambda > 6$ ，则 σ_x, σ_y 都是拉应力。

以上计算说明塑变区的中心点当 λ 大于一定值时出现拉应力。如坯料内部存在缺陷，引起应力集中，拉应力达到材料的强度极限，内部就会裂开。这在平砧锻轴和楔横轧时容易出现。

3·2·3 上限法

从变形体的连续条件和体积不变条件下的动可容速度场出发，对塑变区取较大的单元，根据极值原理，求出塑变功为极小值时的速度分布，从而计算出力能参数，不考虑塑变区内的应力状态。下面以复合挤为例来说明。

图 3·2-13 表示将圆柱体坯料一端反挤成杯形，另一端正挤成杆部复合挤的变形状态。

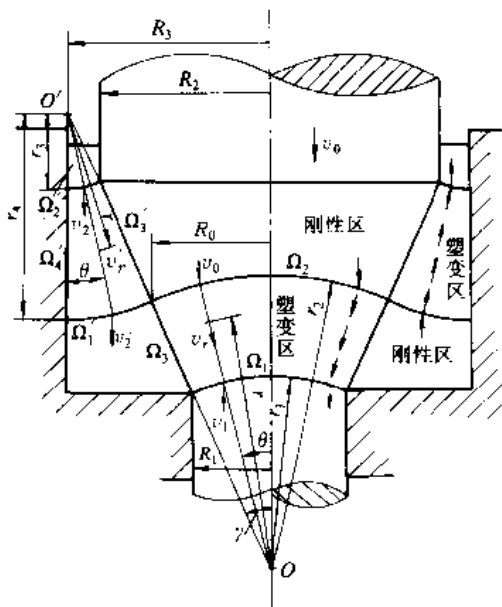


图 3·2-13 复合挤的变形

在复合挤过程，塑变区内存在金属流动方向相反的分流点。分流点的一边为正挤，另一边为反挤。分流点在塑变区内形成一个圆环，在分流点位置上的静水压最高。分流圆环的半径 R_0 ，要通过计算来确定。作为初步估算，先设正反挤两部分的挤压比相等，参见图 3·2-13 中符号，有如下关系式：

$$\frac{R_3^2 - R_0^2}{R_3^2 - R_2^2} = \frac{R_0^2}{R_1^2}$$

$$R_0 = \frac{R_1 R_3}{\sqrt{R_3^2 + R_1^2 - R_2^2}} \text{ (mm)}$$

以 R_0 作初值，分别计算出正反挤两部分的塑变功率如下。

1. 正挤部分 设塑变区分别以半径 r_2 和 r_1 的球面速度间断面为界，组成圆锥截体，动可容速度场设金属都流向球心 O ，并设杆部出口流速为 v_1 ，按照体积不变条件，可得塑变区内任意点离球心为 r 处的径向流速

$$v_r = v_1 \cos \theta \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 \text{ (mm/s)}$$

由球的对称条件，其他方向的速度分量为零，所以 $v_\theta = v_\phi = 0$ 。

已知 v_r ，可计算出各应变速率分量和塑变功率。

各应变速率分量为

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial r} = 2v_1 r_1^2 \frac{\cos \theta}{r^3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \dot{\epsilon}_\phi = v_1 r_1^2 \frac{\cos \theta}{r^3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{\gamma}_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} = v_1 r_1^2 \frac{\sin \theta}{r^3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$\dot{\gamma}_{\theta\phi} = \dot{\gamma}_{r\phi} = 0$$

塑变功率

$$\begin{aligned} \dot{W}_1 &= \sqrt{2} K \int_V \sqrt{\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_\phi^2 + \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{r\theta}^2} dV \\ &= 2\pi Y v_1 R_1^2 \ln \frac{R_0}{R_1} \cdot f(\alpha) \text{ (J/s)} \end{aligned}$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha}$$

$$\times \left\{ 1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{132}} \right.$$

$$\left. \times \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}}} \right\}$$

式中 α —— 圆锥角($^\circ$)；

R_1 —— 挤出杆部半径(mm)；

Y —— 材料平均屈服强度(MPa)。



沿速度间断面 Ω_1 和 Ω_2 的剪变功率分别为

$$\begin{aligned} \dot{W}_2 &= \int_{\Omega_1} K v_1 \sin\theta d\Omega_1 + \int_{\Omega_2} K v_2 \sin\theta d\Omega_2 \\ &= \frac{2}{3} Y \pi v_1 R_1^2 \left\{ \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right\} \quad (\text{J/s}) \end{aligned}$$

沿圆锥体外表面的剪变功率

$$\begin{aligned} \dot{W}_3 &= \int_{\Omega_3} K v_1 \cos \alpha \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 d\Omega_3 \\ &= \frac{2}{\sqrt{3}} Y \pi v_1 R_1^2 \cot \alpha \ln \frac{R_0}{R_1} \quad (\text{J/s}) \end{aligned}$$

正挤部分总耗费功率

$$\begin{aligned} \dot{W}_0 &= \dot{W}_1 + \dot{W}_2 + \dot{W}_3 \\ &= \pi R_1^2 v_0 Y \left\{ 2 \int (\alpha) \ln \frac{R_0}{R_1} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + \cot \alpha \cdot \ln \frac{R_0}{R_1} \right] \right\} \quad (\text{J/s}) \end{aligned}$$

2. 反挤部分 反挤部分的塑变区是以两个圆弧旋转曲面 Ω_1 和 Ω_2 为速度间断面, 分别以速度 v_2 和 v_2 向下移动的变形状态。由体积不变条件, 可知

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{R_2^2 - R_0^2}{R_3^2 - R_2^2} v_0 \quad (\text{mm/s}) \\ v_2 &= v_2 + v_3 = \frac{R_3^2 - R_0^2}{R_3^2 - R_2^2} v_0 \quad (\text{mm/s}) \end{aligned}$$

塑变区内任意一点离顶点 O 的距离 r 处的径向流速可根据体积不变条件计算出为

$$v_r = \frac{(R_3 - r_3 \sin\theta) r_3 \cos\theta}{(R_3 - r \sin\theta) r} v_2 \quad (\text{mm/s})$$

式中 R_3 - 坯料外半径(mm);

r_3 - 圆弧旋转曲面 Ω_2 离顶点 O 的距离(mm);

θ - 任意一点的半和凹模内壁夹角($^\circ$)。

已知 v_r , 可算出应变速率分量, 塑变功率和各速度间断面的剪变功率和摩擦耗费功率如下。

塑变区内任意一点的应变速率分量为

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial v_r}{\partial r} \\ &= - \frac{(R_3 - r_3) r_3 \cos\theta (R_3 - 2r \sin\theta)}{(R_3 - r \sin\theta)^2 r^2} v_2 \quad (\text{s}^{-1}); \end{aligned}$$

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{v_r}{r} = \frac{(R_3 - r_3 \sin\theta) r_3 \cos\theta}{(R_3 - r \sin\theta) r^2} v_2 \quad (\text{s}^{-1});$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_\phi &= -(\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta) \\ &= - \frac{(R_3 - r_3 \sin\theta) r_3 \cos\theta \sin\theta}{(R_3 - r \sin\theta)^2 r^2} v_2 \quad (\text{s}^{-1}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \\ &= \frac{R_3 r_3 r - R_3 r_3^2 \cos 2\theta - R_3^2 r_3 \sin\theta - r r_3^2 \sin^3 \theta}{(R_3 - r \sin\theta)^2 r^2} v_2 \quad (\text{s}^{-1}) \end{aligned}$$

反挤部分的塑变功率

$$\begin{aligned} \dot{W}_1 &= \sqrt{2} K \int_{r_3}^{r_1} \int_0^\pi \sqrt{\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_\phi^2} - \frac{1}{2} \dot{\gamma}_\theta \\ &\quad \times 2\pi (R_3 - r \sin\theta) r d\theta dr \quad (\text{J/s}) \end{aligned}$$

沿圆弧旋转速度间断面 Ω_1 的速度间断值为 $v_2 \sin\theta$, 剪变功率为

$$\dot{W}_2 = K \int_0^\pi v_2 \sin\theta \times 2\pi (R_3 - r_3 \sin\theta) r_3 d\theta \quad (\text{J/s})$$

同理 沿圆弧旋转曲面 Ω_2 的剪变功率为

$$\dot{W}_3 = K \int_0^\pi v_2 \sin\theta \times 2\pi (R_3 - r_3 \sin\theta) r_3 d\theta \quad (\text{J/s})$$

沿圆锥表面 Ω_3 的速度间断值为

$$\frac{(R_3 - r_3 \sin\alpha) r_3 \cos\alpha}{(R_3 - r \sin\alpha) r} v_2$$

剪变功率为

$$\dot{W}_4 = K \int_{r_3}^{r_1} v_2 \times 2\pi (R_3 - r_3 \sin\alpha) r_3 \cos\alpha \frac{dr}{r} \quad (\text{J/s})$$

沿凹模内壁坯料有相对滑动 $r_3 v_2 / r$, 表面 Ω_4 上的摩擦耗费功率

$$\dot{W}_5 = m K \int_{r_3}^{r_1} r_3 v_2 \times 2\pi R_3 \frac{dr}{r} \quad (\text{J/s})$$

式中 m - 凹模内壁摩擦因子, $0 < m \leq 1$ 。

反挤部分总耗费功率为

$$\dot{W}'_0 = \dot{W}_1 + \dot{W}_2 + \dot{W}_3 + \dot{W}_4 + \dot{W}_5 \quad (\text{J/s})$$

正反联合挤总耗费功率为正挤和反挤两部分耗费功率之和, 即

$$\dot{W} = \dot{W}_0 + \dot{W}'_0 \quad (\text{J/s})$$

冲头上单位面积的平均压力

$$q = \frac{\dot{W}}{\pi R_2^2 v_0} \quad (\text{N/mm}^2)$$

计算过程先求出 \dot{W} 为极小值时的 R_0 , 即取

$$\frac{\partial \dot{W}}{\partial R_0} = 0$$

算出 R_0 值, 然后分别算出 \dot{W}_0 和 \dot{W}'_0 , 即可计算出 q , 计算一般是在计算机上进行数值积分。

计算举例如下。

设 $R_1 = 10\text{mm}$, $R_2 = 24\text{mm}$, $R_3 = 30\text{mm}$, $H = 30\text{mm}$, $m = 0$, 计算出不同 R_0 时的 q/Y 值如下。

R_0	11.4	12.8	14.2	15.6	17.0	18.4	19.8	21.2
q/Y	3.83	3.63	3.48	3.38	3.35	3.39	3.50	3.69

以上计算结果表明当 $R_0 = 17\text{mm}$ 时, \dot{W} 有极小值, 它是瞬时的分流圈半径。已知 R_0 , 可分别计算出正挤和反挤部分的变形力和瞬时流动状态。

3.2.4 板料成形理论

很多零件和器具用金属薄板作坯料经过塑性变形制造而成。板料的厚度尺寸通常比宽度和长度小得多。



变形主要依靠沿板面方向的应力的作用。计算分析板料成形问题,常简化成平面应力状态问题求解。下面以圆坯拉深成杯形为例来说明。

图 3-2-14 表示薄板圆坯拉深成杯形的过程。直径 $D_0 = 2R_0$ 的板坯放在凹模上,在直径为 $d = 2r$ 的冲头压力下,把坯料中心部分推入凹模内,坯料沿凹模内径弯曲后变成杯形的侧壁。坯料的法兰部分在杯形侧壁的拉应力 σ_r 作用下外径由 D_0 缩小到 D 。

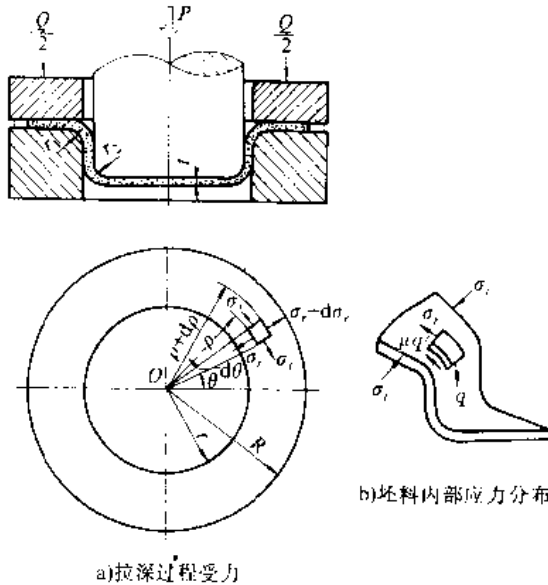


图 3-2-14 圆坯拉深成杯形

在拉深过程,作用在法兰部分的应力除径向拉应力 σ_r 外,还有切向压应力 σ_t 。设法兰内任意一点离坯料中心的距离为 ρ ,在点的附近取极坐标微体如图 3-2-14a 所示。这样的变形过程可简化为平面应力的轴对称问题。设板料厚度的变化很小可以忽略,根据微体径向力的平衡得

$$\frac{d\sigma_r}{d\rho} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{\rho} = 0$$

按照最大切应力屈服准则,有

$$\sigma_r - \sigma_t = \sigma_s$$

式中 σ_s ——材料的平均屈服强度。

将上式代入平衡方程,积分后得

$$\sigma_r = -\sigma_s \ln \rho + C \quad (\text{MPa})$$

当 $\rho = R, \sigma_r = 0$, 得 $C = \sigma_s \ln R$, 代入上式得

$$\sigma_r = \sigma_s \ln \frac{R}{\rho} \quad (\text{MPa})$$

在法兰内侧沿凹模内径处, $\rho = r$, 因此可得沿法兰内边的拉应力

$$\sigma_r = \sigma_s \ln \frac{R}{r} \quad (\text{MPa})$$

切向压应力

$$\sigma_t = -\sigma_s \left[1 - \ln \frac{R}{r} \right] \quad (\text{MPa})$$

在极限状态下, $\sigma_r \leq \sigma_s$, 或

$$\ln \frac{R_0}{r} \leq 1$$

因此杯形拉深的极限拉深比

$$\frac{D_0}{d} \leq \epsilon = 2.72$$

在实际生产中,拉深过程由于坯料拉入凹模内有弯曲圆角半径,表面摩擦力和法兰上的压边力等因素影响,圆坯拉深成杯形的最大拉深比一般是 1.7 ~ 2.0。

法兰部分内缘沿凹模圆角半径弯曲成杯形的筒壁,径向拉应力的增值可用下式计算

$$\Delta\sigma_r = \frac{\sigma_s t}{2r_1}$$

式中 r_1 ——凹模圆角半径。

再加上凹模口表面摩擦阻力和压边力 Q 的影响,冲头上单位面积的总拉延力可计算如下,

$$q = \left(\sigma_s \ln \frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R t} + \frac{\sigma_s t}{2r_1} \right) (1 + 1.6\mu) \quad (\text{MPa})$$

式中 μ ——坯料和凹模间的摩擦系数;

t ——板料厚度。

冲头上的拉深力

$$P = \pi d t q \quad (\text{N})$$

冲头底部材料沿冲头圆角半径弯曲成杯形圆筒直臂,圆角半径外表有拉应力增值,这里是拉深过程拉应力最大处。

3-2-5 塑性有限元法

塑性有限元法是将求解未知场变量的连续变形体划分为任意的有限个单元,单元用节点连接,每个单元内用插值函数作为场变量,插值函数由节点值确定,单元之间的作用由节点传递,建立物理方程,并将全部单元的插值函数集成整体场变量的方程组,然后进行数值计算,求出变形体的速度、应变、应力、温度分布以及各种动态的力能参数。由于计算是在现代化电子计算机上进行,效率高,功能全,能分析各种影响因素,所以塑性有限元法可计算出各种复杂成形工步的工艺参数及模拟各种动态变化。

图 3-2-15 是用刚塑性有限元法模拟自行车飞轮温锻制坯工步变形过程的某一瞬间。由图可以看出金属上下分流的变形状态。在后续计算中,可以判断变形过程能否充满模腔或发生折叠。

图 3-2-16 表示钛合金 Ti6242 圆柱体坯料,加热到 954℃,锤砧预热到 351℃,用玻璃润滑,平均应变



速率 $\dot{\epsilon} = 3s^{-1}$ ，墩粗压下量 60% 时的塑性有限元模拟温度场的计算结果。由图可以看出坯料在变形结果中心部位温度升高很多，它将引起相应的组织结构变化。

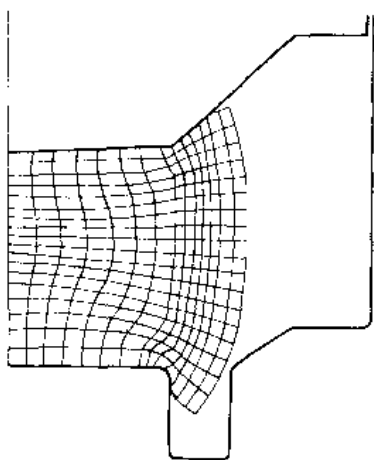


图 3-2-15 温锻变形过程模拟

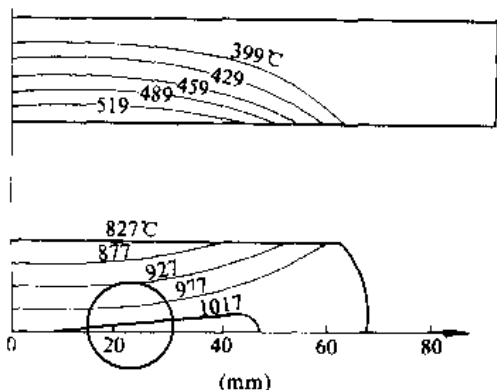


图 3-2-16 钛合金温锻温度场

以上所说塑性成形的各种计算方法都有各自的特点和适用范围。在实际应用中，要结合问题的具体要求，选择适用的计算方法，就可很快取得所需数据。

3.3 塑性成形过程的模拟

塑性成形过程的模拟和试验的目的如下：

- (1) 观察规定条件下塑性变形的规律，为开发新工艺提供感性认识。
- (2) 测试变形过程材料的屈服强度、成形极限和摩擦系数等工艺参数，核验理论计算结果。
- (3) 观察应力、应变、温度等宏观参数对微观组织结构的影响关系。

用塑性有限元法可以计算出成形工步的速度场、应变场，应力场和温度场。

物理模拟是按照相似原理，用相似的材料制成试

样，在相似条件下进行塑性变形试验，测量需要的数据。

用纯铝料制成试样，在 450℃ 下，经 4h 退火处理，经塑性变形后将试样剖分再抛光。用 $HNO_3 30\%$ ， $HCl 20\%$ ， $H_2O 50\%$ ，加 $HF 5\%$ 的溶液腐蚀后，可清楚地显示出内部塑变区的形貌分布。

用不同颜色的塑泥制成组合试样，经过塑性变形后加以剖分，观测内部塑变区的形貌是最简易的模拟方法。图 3-2-17 是两种颜色塑泥相间叠合制成挤压试样变形后剖分的情形。由图可以看出型材挤压时平模上配置导流模后对金属流动的影响。

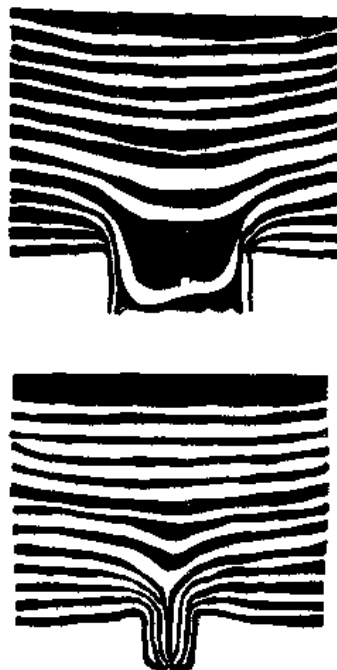


图 3-2-17 塑泥模拟挤压

用铅或钢制成试样，沿中心平面剖开。在剖分面上刻出 $2mm \times 2mm$ 或 $3mm \times 3mm$ 的坐标网格，将试样粘合，经过变形后设法再分开，在剖分面上即可观察到经塑性变形引起的网格畸变，这是最常用的模拟技术。图 3-2-18 是铅试样墩粗后的网格变化。用显微镜测量坐标网格的变化值后，可计算出应变分布。

对于板料成形的模拟，可用电化学腐蚀法在板坯试样表面绘出 $\phi 2mm$ 的圆形网格。试样变形后，塑变区内的圆形变成椭圆，长轴为拉伸最大主应变，短轴为最小主应变。测量网格的变化，可计算出各处的应变。

密栅云纹法是较精密的模拟技术。在试样一半的剖分面上，粘贴一定密度的栅板，和试样另一半合并

① 皆指质量分数。



一起变形后,将经过变形的栅版和基准栅重叠,即出现干涉条纹。拍摄出两个相互垂直方向的云纹图,显示出塑变区内的变形状态。图3-2-19是型线凹模挤压棒料过程的云纹图。根据云纹图,可计算出位移速度分布、应变速率和应力分布。

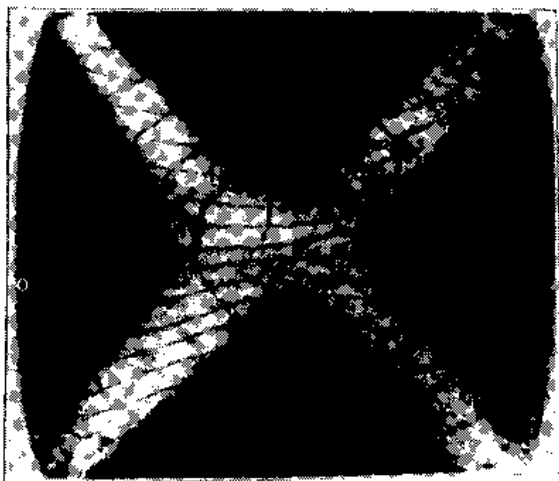


图3-2-18 坐标网模拟锻压变形

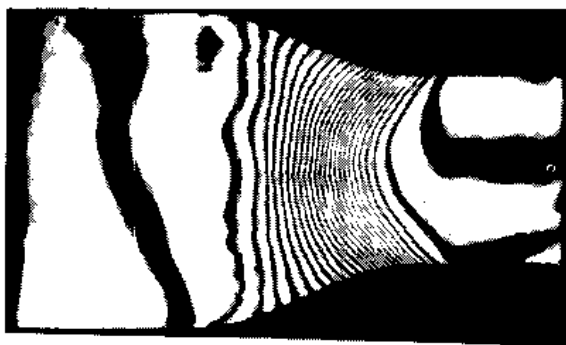
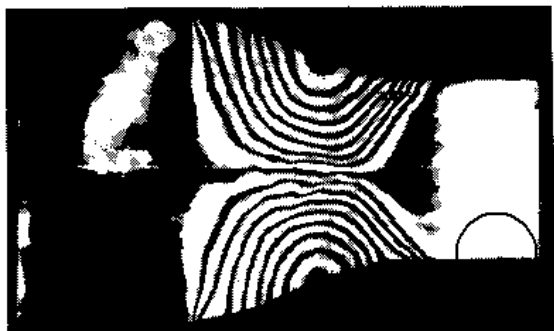


图3-2-19 型线凹模挤压云纹图

光塑性模拟是用聚碳酸脂制成试样,试样变形后经过处理,在偏振光场中拍摄出等差线图和等倾线图,根据条纹分布计算出应力分布和变形状态。

4 塑性成形理论的应用

4.1 计算和模拟应力场、应变场和温度场

(1) 计算出塑变区内各点的金属流动速度、应变速率和应变值,可获得以下信息:

1) 预测变形过程是否能充满模腔,发生折迭或破裂,为合理设计模腔形状提供依据。

2) 知道塑变区内各点应变大小和分布状态后,可分析制品内的加工硬化和纤维组织分布以及缺陷产生的原因。

3) 可分析塑性变形过程的热效应和坯料内温度升高情况以及它对组织结构和晶粒度变化的影响。

(2) 计算出塑变区的应力场后,可得到以下信息:

1) 可计算出工步的变形力和能耗,为选用合适的加工设备或设计新设备提供依据。

2) 可得知变形体内各处的应力大小和静水压值,分析制品产生缺陷的原因。

3) 可得知模腔内各处的应力分布,为设计计算模具结构和强度提供依据。

这些信息都是锻压生产中制订工艺规程时选择和分析成形工步、解决产品质量、提高效益、优化工艺规程或开发新工艺的科学基础。

塑性成形理论和工艺学相结合,成为塑性成形学科的系统工程,两者相互关系可用图3-2-20表示。

4.2 塑性成形理论的应用举例

(1) 优化轴类大锻件锻造过程,提高内部质量
大钢锭凝固过程,体积收缩约3%。根据钢锭大小和结构的不同,收缩的一部分在凝固过程成为缩孔和密集疏松残留在钢锭中心轴线附近区域内,这些空洞性缺陷在锻压过程中,由空洞周围金属最大压应变作用而被压扁,在一定应变下闭合,在温度1050℃以上能迅速焊合。所以大型锻件锻压工艺的首要任务是制订合理的工艺规程保证锻合钢锭内的空洞性缺陷。

计算和模拟拔长成形过程的结果表明,每次锤砧压缩时,由于锤砧和坯料间存在接触摩擦,坯料内的应变集中在锤砧间对角线附近。图3-2-21是上下平砧拔长方坯连续三砧坯料内的应变分布。由图可以看出,每次压缩后,中心轴线上只有一小段应变较大,其余大部分应变很小。因此每道拔长操作后,坯料中心轴线上存在周期性的小应变区。如工艺规程不当,在这区域内的空洞性缺陷就不能锻合。对锤砧宽比、压下量和操



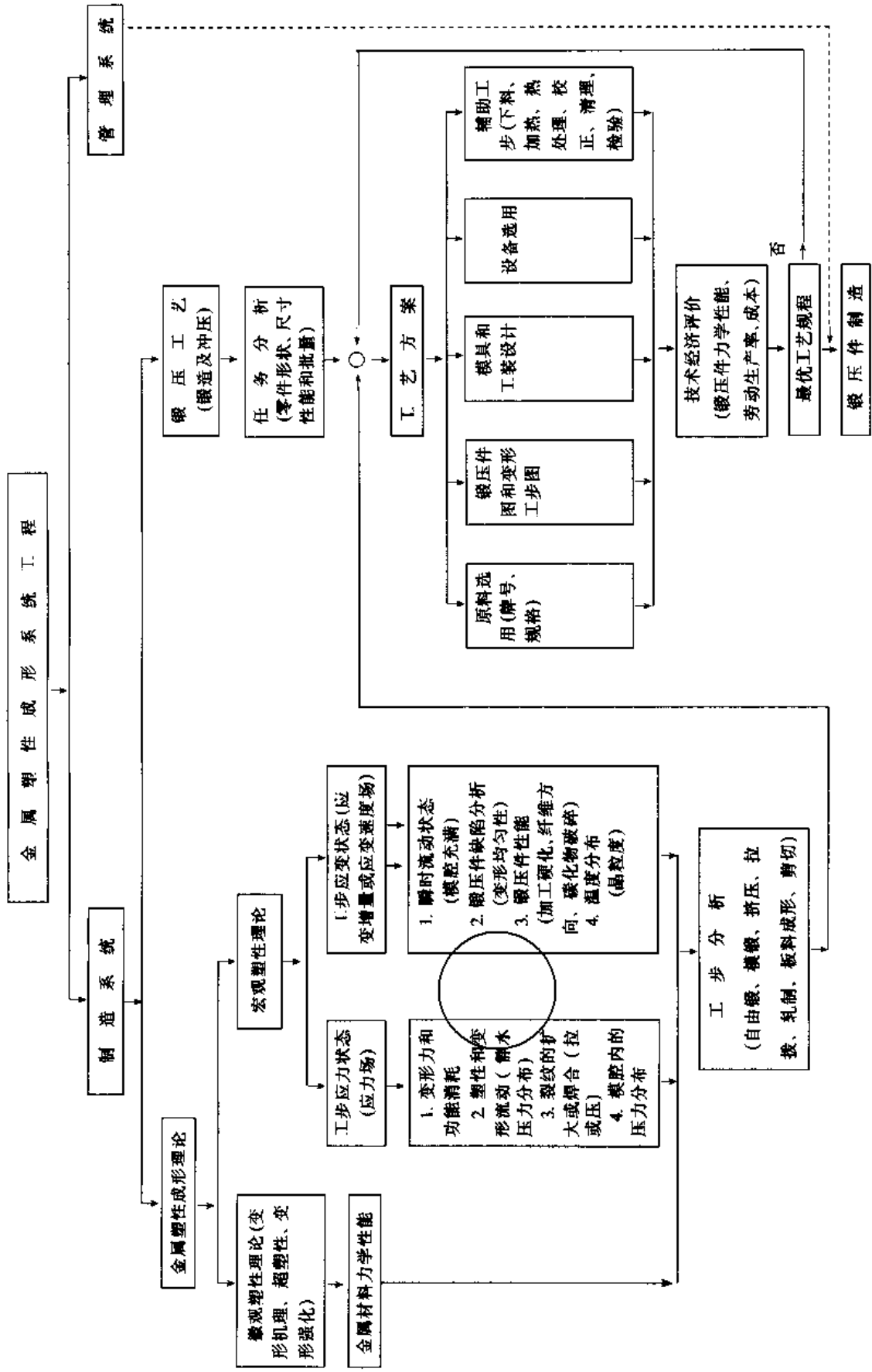


图 3-2-20 金属塑性成形系统工程主要内容框图



$$\frac{W}{H} = 0.5 \text{ 平砧拔长, } \epsilon_0 = 20\%$$

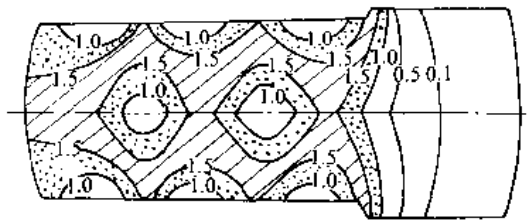


图 3-2-21 连续拔长三砧坯料内的应变分布 ϵ_1/ϵ_0
作程序进行合理安排, 保证钢锭中心轴线附近有足够

和均匀的应变量, 就能完全锻合大钢锭中心轴线附近的空洞性缺陷。这种优化的新工艺已在生产中应用。

(2) 中小型轴承环温锻新工艺 轴承钢的强度高。采用常规冷锻或温锻工艺制造轴承环时, 由于变形抗力大, 模具寿命低, 效益不好。采用热锻制造轴承环, 工步多, 材料损耗高, 劳动条件差。为改进轴承环锻压工艺, 经过计算和试验模拟, 用镦粗和冲孔复合工步制造环形坯, 冲去中心连皮后, 再复合挤出出塔形件, 切离成内外套圈的温锻新工艺如图 3-2-22 所示。它的特点是变形抗力小, 工步少, 效率高。可采用吨位较小的压力机并提高模具寿命。

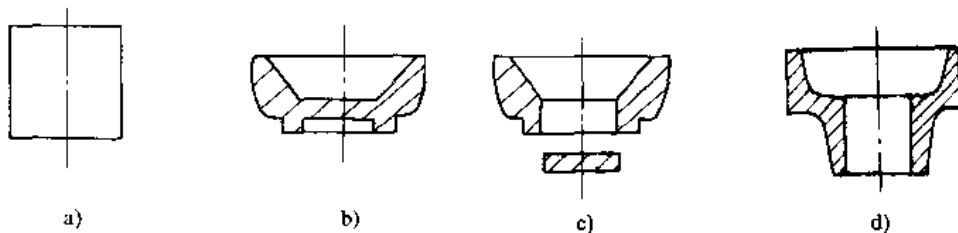


图 3-2-22 轴承环温锻最佳工艺流程
a) 下料 b) 镦粗和冲孔联合 c) 冲连皮 d) 复合挤压

第 3 章 锻造加热技术^{[5]~[7]}

1 金属的加热方法

金属加热是热锻生产中不可缺少的重要工序之一, 其目的是提高金属的塑性、降低变形抗力, 以利于金属的变形和得到良好的锻后组织和性能。

1.1 锻造加热方法分类及特点

根据热源可把锻造加热方法分为燃料加热与电加

热两大类(表 3-3-1)。

燃料加热亦称火焰加热, 它是利用燃料(固体、液体、气体)燃烧所产生的热能直接或间接加热金属。其优点是: (1) 能源费用较低; (2) 可利用燃烧产物的动量和火焰特性, 实现均匀加热、快速加热、少无氧化加热; (3) 燃烧器等附属设备较电加热元件等费用低, 相同能力的燃料炉费用较电炉低得多; (4) 燃料炉在经济条件下的供热能力可以更大, 因而大型加热炉多为燃

表 3-3-1 锻造加热方法、加热设备及应用范围

分 类		应 用 范 围			特 点	
		坯 料	批 量	工 艺		
燃 料 加 热	间 歇 式 炉	室式炉	中小件	单件或成批	自由锻	结构简单, 适用面广
		双室式炉	中小件	单件或成批	自由锻	适应面较广, 可用于预热, 多次加热及合金钢加热, 双室可预热、加热交替
		开敞式炉	中小件及杆件 端部加热	成批	小型模锻、胎模锻、摩擦压力机上模锻、平锻	无炉门, 多采用上排烟, 应用较广



(续)

分 类		应 用 范 围			特 点	
		坯 料	批 量	工 艺		
燃 料 加 热	间 歇 式 炉	双开隙式炉	中小件及杆件 端部加热	成批	小型模锻、胎模锻、摩 擦压力机上模锻	无炉门, 可交替生产, 应用较 广
		台车式炉	大、中型坯料 和钢锭	单件, 小批	重型液压机自由锻	便于大、中型件装出料
		敞焰无氧化 室式炉	中小件	成批	精密锻压	利用燃料不完全燃烧, 形成保 护气氛
	连 续 式 炉	推杆式连续 炉及半连续炉	中小型坯料, 圆形或方形断面	成批, 大量	模锻	用推料机推料, 有预热和加热 段, 排烟温度较低, 热效率较高
		转体炉	中小型棒料, 端部加热	成批	平锻、摩擦压力机上模 锻	炉体带孔并旋转, 结构稍复杂
		转底炉	中小型坯料	成批, 大量	模锻	结构复杂, 可机械化进出料
		环形炉	大中型坯料	成批, 大量	模锻	炉底呈环形并旋转, 有预热、加 热和均热段, 用机械手进出料, 结 构较复杂
		步进式炉	大中型板坯、 棒料等	成批大量	模锻、回转锻造、精锻	没有滑道印痕, 能四面加热, 炉 长不受限制, 自动化程度高, 结 构复杂, 设备费用较高
		敞焰无氧化 连续炉	中小件	成批	精密锻压	利用不完全燃烧形成保护气氛 有推杆式和环形等结构
		陶瓷管型炉	小型棒料 ($\phi 20 \sim 80$)	成批, 大量	精密锻压	坯料在陶瓷管中间接加热, 实 现少氧化, 热效率很高
电 加 热	电阻炉	中小型非铁金 属及合金钢坯料	单件, 成批	自由锻, 模锻	常用箱式炉, 结构简单, 单位 电能消耗为 $0.5 \sim 1.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$	
	盐浴炉及玻璃浴炉	小件整体或局 部无氧化加热	单件, 成批	精密模锻	结构简单, 单位电能消耗为 $0.3 \sim 0.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$, 有盐蒸气 污染	
	接触加热	直径 $< 80 \text{ mm}$ 的长杆料	成批, 大量	模锻、电锻、卷簧、电 热弯曲及回转成形	结构简单, 加热速度快, 单位 电能消耗为 $0.3 \sim 0.45 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$, 适于局部加热; 短坯料整体 加热困难, 温度不均匀	
	工频感应加热	直径 > 150 mm 的坯料	成批, 大量	模锻、热挤、回转成形	不用变频设备, 单位电能消耗 为 $0.35 \sim 0.55 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$; 用于 调整功率因数的电容器用最大	
	中频感应加热	$\phi 20 \sim 150$ mm 的坯料	成批, 大量	模锻、热挤、回转成形	需要变频装置, 单位电能消耗 为 $0.4 \sim 0.55 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$, 加热速 度快, 自动化程度高, 应用普遍	

冶金工业出版社重作版权

九

二



(续)

分 类		应 用 范 围			特 点
		坯 料	批 量	工 艺	
电加热	高频感应加热	直径<20 mm 的坯料	成批, 大量	模锻、热挤、回转成形	需复杂的变频装置, 单位电能消耗为 0.5~0.7kW·h/kg, 加热速度快, 自动化程度高

料加热。

燃料炉缺点是: 控温精度较电炉差; 有烟尘、噪声、有害气体污染; 炉子热效率较低。

电加热是利用电能转换为热能以加热金属的方法。与燃料加热相比, 电加热具有升温快(如感应加热和接触加热), 炉温易准确控制(如电阻加热), 氧化和脱碳少, 劳动条件好, 便于实现机械化和自动化。缺点是对坯料尺寸形状变化的适应性较小, 设备结构复杂, 投资费用较高。

1.2 锻造加热方法选择

选择锻造加热方法主要考虑以下因素:

- (1) 加热重量及其控制精度要求;
- (2) 长期稳定的能源供应;
- (3) 机械化、自动化程度;
- (4) 综合经济效益;
- (5) 对环境污染控制及劳动条件的要求等。

在整个锻造加热产量中, 燃料加热在我国占 90% 以上, 国外也以燃料加热为主, 但国内外电加热的比例均逐年上升, 在精密锻造、锻压机模锻、合金钢锻造等工艺中电加热的比重大, 上升趋势明显。

2 锻造加热工艺基础

2.1 金属锻造温度范围

碳素钢锻造温度范围依据图 3-3-1 确定, 合金结

表 3-3-2 几类钢的锻造温度范围 (°C)

钢 类	始 锻	终 锻
合金结构钢	1150~1200	800~850
碳素工具钢	1050~1150	750~800
合金工具钢	1030~1150	800~850
高速工具钢	1100~1150	900
耐热钢	1100~1150	850
弹簧钢	1100~1150	800~850
轴承钢	1080	800

构钢、碳素工具钢、高速钢、耐热钢、弹簧钢、轴承钢锻造温度范围见表 3-3-2。不锈钢、耐热合金及高温合金、非铁金属及其合金的锻造温度范围参见本篇第 9 章。在锻造温度范围内金属应具有良好的塑性和合适的金相组织。始锻温度主要受过烧温度限制, 通常低于固相线 150~250°C。终锻温度应保证终锻时坯料仍有较好的塑性并得到良好的锻后组织。

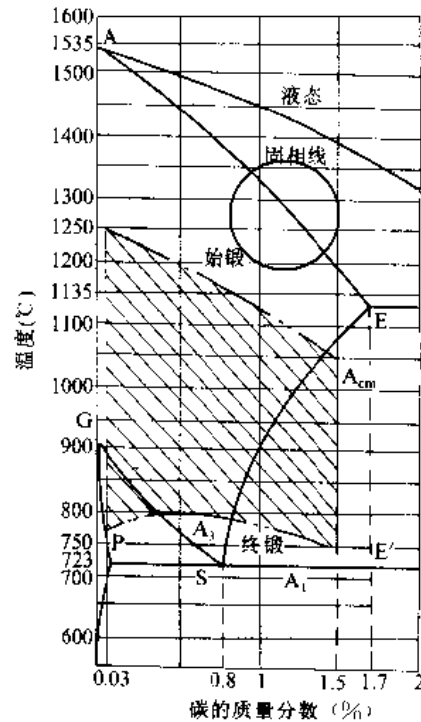


图 3-3-1 碳素钢锻造温度范围

2.2 金属加热速度和加热制度

2.2.1 金属加热速度

金属加热速度通常指金属表面的升温速度 (C/min 或 C/h), 生产中也常用单位厚度坯料所需加热时间 (min/cm) 或单位时间加热厚度 (cm/min) 表示。允许的加热速度由坯料的导温性能、几何形状与尺寸、低温塑性及残余应力等因素确定。实际加热速度受炉温、



钢种、坯料形状和尺寸、炉内坯料放置情况、炉型结构和供热能力等因素影响。加热初期(500~600℃以前)应考虑温度应力,终期应考虑截面温差的允许界限。

2.2.2 加热制度

加热制度是指加热过程的炉温制度。对周期炉全炉温度均一,炉温制度是指炉温随时间的变化;对连续炉,沿炉长炉温不同但不随时间变化,炉温制度是指炉温沿炉长的分布。直径小于150mm或200mm的低、中碳钢和合金结构钢材,以及Bi数小于0.25的高合金钢材可以采用一段加热制度,其所需加热时间可参照图3-3-2。

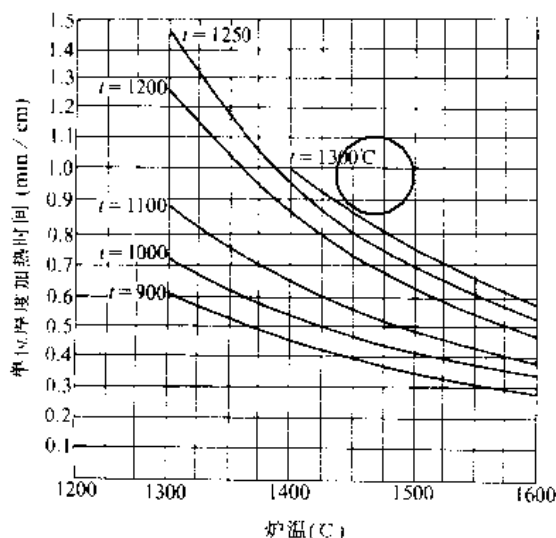


图 3-3-2 中小型结构钢材的加热时间
t—金属加热温度

对于大于上述尺寸的碳素钢和合金结构钢,为减小截面温差,可采用加热、均热二段加热制度。对于尺寸更大的碳素钢和合金结构钢材,以及高碳钢、高合金钢和高合金钢材,则应采用预热、加热和均热三段或更复杂的加热制度。

实践证明,为了保证最终的金属断面允许温差(通常规定为 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{cm}$)而降低整个加热过程的加热速度是不合算的。合理的加热工艺是:在500~600℃以上的加热阶段,加热速度可大大超过按出炉断面温差确定的加热速度,而在出炉前经过均热阶段使表面温度不再升高并使断面温差达到界限以内。对大型坯料用这种合理的快速加热工艺收效显著。

2.3 金属加热缺陷及防止方法

2.3.1 氧化

炉气中氧化性介质(O_2 、 CO_2 、 H_2O 、 SO_2)与金

属表面在高温下发生反应,迅速生成氧化铁皮,造成金属氧化烧损,其重量烧损率见表3-3-3。氧化皮层导热性很低, $\lambda=5.2\sim 7.5\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$,仅为一般钢的 $\frac{1}{20}$,显著影响加热速度。氧化皮加剧模具磨损,降低模锻件精度,增加表面粗糙度,并对炉子操作、炉底寿命有严重影响。减少氧化的措施是:采用快速加热,缩短加热时间,特别是金属加热到高温后的停留时间;保持炉膛高温区微正压操作,防止吸入冷空气;采用少、无氧化加热和电加热等。

表 3-3-3 不同加热方法钢的烧损率

加热方法	质量烧损率 (%)	加热方法	质量烧损率 (%)
室式煤炉	2.5~4	电阻炉	1~1.5
油炉	2~3	接触加热和感应加热	<0.5
煤气炉	1.5~2.5		

2.3.2 脱碳

加热过程中金属表层含碳量因氧化反应而减少称为脱碳。脱碳层深度如大于加工余量,则将降低零件表面的硬度和强度。脱碳和氧化是同时进行的,1000℃以上由于钢的强烈氧化,表层烧损,脱碳不太明显。700~900℃烧损较少,应特别注意脱碳。高碳钢及含Al、Co、W元素的合金钢易脱碳,含Cr、Mn等元素则有利于防止脱碳。减少氧化的措施同时防止脱碳。

2.3.3 过热与过烧

钢加热到1100~1250℃以上,晶粒急剧长大,若停留时间太长,晶粒就会过大而产生过热。过热使钢的力学性能变坏、塑性降低,锻造时易产生裂纹,在棱角和端头处更明显。过热的金属可用热处理方法使晶粒重新细化,但奥氏体钢和铁素体钢则不能重新细化,对这类钢应特别注意防止过热。金属加热到接近固相线温度时,晶粒边界间的低熔点物质开始熔化,产生过烧。金属过烧后一经锻打即破碎而成为废品,无法挽救。钢能在高温下渗入晶间而削弱晶粒间的联系,造成

$$\textcircled{\ominus} Bi = \frac{\alpha_s d}{\lambda}$$

式中 Bi ——毕欧准数; d ——坯料的计算厚度(m);
 α_s ——对坯料的总传热系数[$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]; λ ——金属的导热系数[$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$].



与过烧类似的后果。因此,铜材和铝材不要用同一台炉子加热;必须用一个炉子时,加热钢材前必须将炉底清理干净,加热铜材时,垫以薄钢板,以免铜屑渗入炉底。

2.3.4 内部裂纹

坯料加热过快时,表面与中心温差过大,形成温度应力,可以造成内部裂纹。为此,应消除加热前的残余应力(如退火),并按合理加热规范加热。

3 锻造加热设备及装置

3.1 燃料炉

3.1.1 炉型选择

按燃料种类锻造炉可分为煤炉(包括煤粉炉)、油炉和煤气炉。从技术进步与燃料本身的特点考虑,燃料的优选顺序是:气体燃料,液体燃料,固体燃料。通常连续炉及加热质量要求较高的都采用液体或气体燃料。燃料炉选择炉型时主要考虑以下因素:

(1) 生产性质。对单件小批生产,为适应坯料变化常采用室式炉(中小件)、台车炉(中大件);成批大量生产模锻件应选用各种机械化程度高的半连续炉和连续炉。

(2) 燃料种类。

(3) 加热工艺要求。主要是对炉温均匀性、稳定性、加热制度和氧化程度等的要求,以保证加热质量。精锻时应采用无氧化加热炉。

(4) 加热工件尺寸和重量。大型钢锭用台车式炉;长杆件、板坯等可用步进式炉;端部加热可用开隙式炉、转体炉等;模锻坯料可用推杆炉、转底炉和环形炉。

(5) 余热利用。主要用于预热助燃空气和低热值的气体燃料。

(6) 劳动条件。应提高机械化、自动化程度,减少环境污染。

3.1.2 主要技术经济指标

1. 炉底强度 指单位炉底有效面积的生产能力 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$,是炉子设计和正常操作的重要技术指标,见表3-3-4。根据工艺要求的生产率或锻压设备的生产率 $G(\text{kg}/\text{h})$ 和炉底强度 P ,可确定所需的炉底有效面积 $A = G/P(\text{m}^2)$ 。炉底强度取低了,炉子偏大,能耗增高。反之,炉子偏小,不能满足生产率要求,或需要采用很高的供热制度工作,导致炉子寿命缩短。实际生产中,常常是周期炉炉底强度偏小,一般达不到 $300\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;而连续炉(主要是推杆炉)则实际使用的炉底强度偏大。结果,前者能耗高,后者炉底寿命短。

2. 炉底热强度 指单位炉底有效面积的小时供热量 $[\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$ 。炉底热强度主要由炉温与加热强化的程度确定,提高炉底热强度可提高炉温,从而提高加热速度和炉底强度。炉底面积越大,炉底热强度越小,如表3-3-5所示。

3. 单位金属的热耗、能耗和加热炉热效率(表3-3-6)。

表 3-3-4 锻造加热炉炉底强度 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$

炉 型	重油或天然气	煤 $Q = 25122$ (kJ/kg)	煤气(空、煤气经预热)		
			$Q = 7537$ (kJ/m ³)	$Q = 6280$ (kJ/m ³)	$Q = 5024$ (kJ/m ³)
室式炉	400~550	300~400	400~500	300~400	200~250
台车式炉	150~300	100~200	150~250	100~200	80~150
开隙式炉	400~500	300~400	350~500	250~400	200~250
推杆式半连续炉	350~450	250~350	300~400	250~350	200~250
推杆式连续炉	250~400	200~300	200~350	200~300	150~200
环形加热炉	250~300		150~300	100~250	100~200
步进式炉	250~400		200~400	200~250	150~200
快速加热炉	1000~3000		1000~3000		
陶瓷管型加热炉	500~800		500~800		

注:陶瓷管型加热炉以加热区面积计算。



表 3-3-5 炉底热强度 [10⁶kJ/(m²·h)]

炉 型	炉底有效面积 (m ²)						
	<1	1~3	3~5	5~10	10~20	20~40	>40
室式炉 (燃煤)	1.8~2.3	1.5~1.8	1.0~1.5				
室式炉 (重油或煤气)	1.7~2.0	1.5~1.7	1.2~1.5	1.0~1.2			
开隙式炉	1.8~2.3	1.6~1.8	1.2~1.6				
推杆式炉		1.5~1.8	1.4~1.5	1.4~1.5	1.4~1.5		
台车式炉			1.05~1.0	0.9~1.0	0.85~0.9	0.85~0.9	0.85~0.9
环形炉			0.8~0.85	0.75~0.8	0.7~0.75	0.65~0.7	0.6~0.65

表 3-3-6 单位金属热耗、燃耗及加热炉热效率

炉 型	燃料和热值 (kJ/kg) 或 [kJ/m ³ (标准)]	空气及煤气 预热温度 (°C)	加热温度 (°C)	热效率 (%)	单位金属热耗 (kJ/kg)	单位燃耗 (kg/kg) 或 [m ³ (标准)/kg]
手锻炉	煤或焦炭 27215		1250	3~10	8793~29308	0.3~1.1
室式加热炉	煤		1250	5~10	5862~17585	0.2~0.65
	油 41032 (kJ/kg)		1250	15~22	3978~5862	0.1~0.14
	发生炉煤气 5234~6699 [kJ/m ³ (标准)]	200	1250	20~25	3517~4396	0.6~0.75①
			1250	10~20	4396~8792	0.75~0.93
	天然气 33496 [kJ/m ³ (标准)]		1250	20~30	2931~4396	0.09~0.13
开隙式加热炉	煤		1250	5~15	5852~17585	0.2~0.65
	油		1250	10~20	4396~8793	0.1~0.21
	发生炉煤气	200	1250	17~22	3597~5172	0.68~0.86①
			1250	13~18	4885~6763	0.84~1.12①
	天然气		1250	18~24	3664~4885	0.09~0.12
台车式加热炉	煤		1220	12~14	6280~7327	0.22~0.27
	油		1220	17~21	4103~5024	0.1~0.12
	发生炉煤气	200°C以上	1220	19~30	2889~4522	0.49~0.77①
			1220	15~18	4689~5694	0.81~0.97①
	天然气		1220	18~22	3894~4689	0.12~0.14
推杆式炉	煤气或油		1250	14~33	2664~6280	0.07~0.15②
转底炉	煤气或油		1250	10~30	2931~8793	0.07~0.21②
环形炉	煤气或油		1250	18~40	2198~4885	0.055~0.12②
步进式炉	煤气或油		1250	10~35	2512~8793	0.06~0.21②
快速加热装置	煤气或油		1250	18~30	2931~4885	0.07~0.12②
陶瓷管炉	煤气 (天然气)		1200	45~50	1688~1876	0.05~0.056③

- ① 发生炉煤气以 5862kJ/m³ (标准) 计算燃耗。
- ② 以油 41032kJ/kg 计算燃耗。
- ③ 以天然气 33496kJ/m³ (标准) 计算燃耗。



3.1.3 锻造加热用炉

1. 室式加热炉(图3-3-3) 炉膛呈室状,由炉口进出料,室式炉结构简单,造价低,适应多品种单件或小批生产,使用范围很广。我国数量众多的燃煤锻造炉大都为室式炉。室式炉常为人工装出料,加热不均匀,

热效率较低,劳动条件较差。室式煤炉通常在 3m^2 以下,使用 1m^2 以下的更多,与 750kg 以下的自由锻锤配用。使用液体和气体燃料的室式炉,大的可达 10m^2 。产量较大时,可采用双炉门的炉子或双室式炉。小型室式炉为提高热效率,常设有预热室。

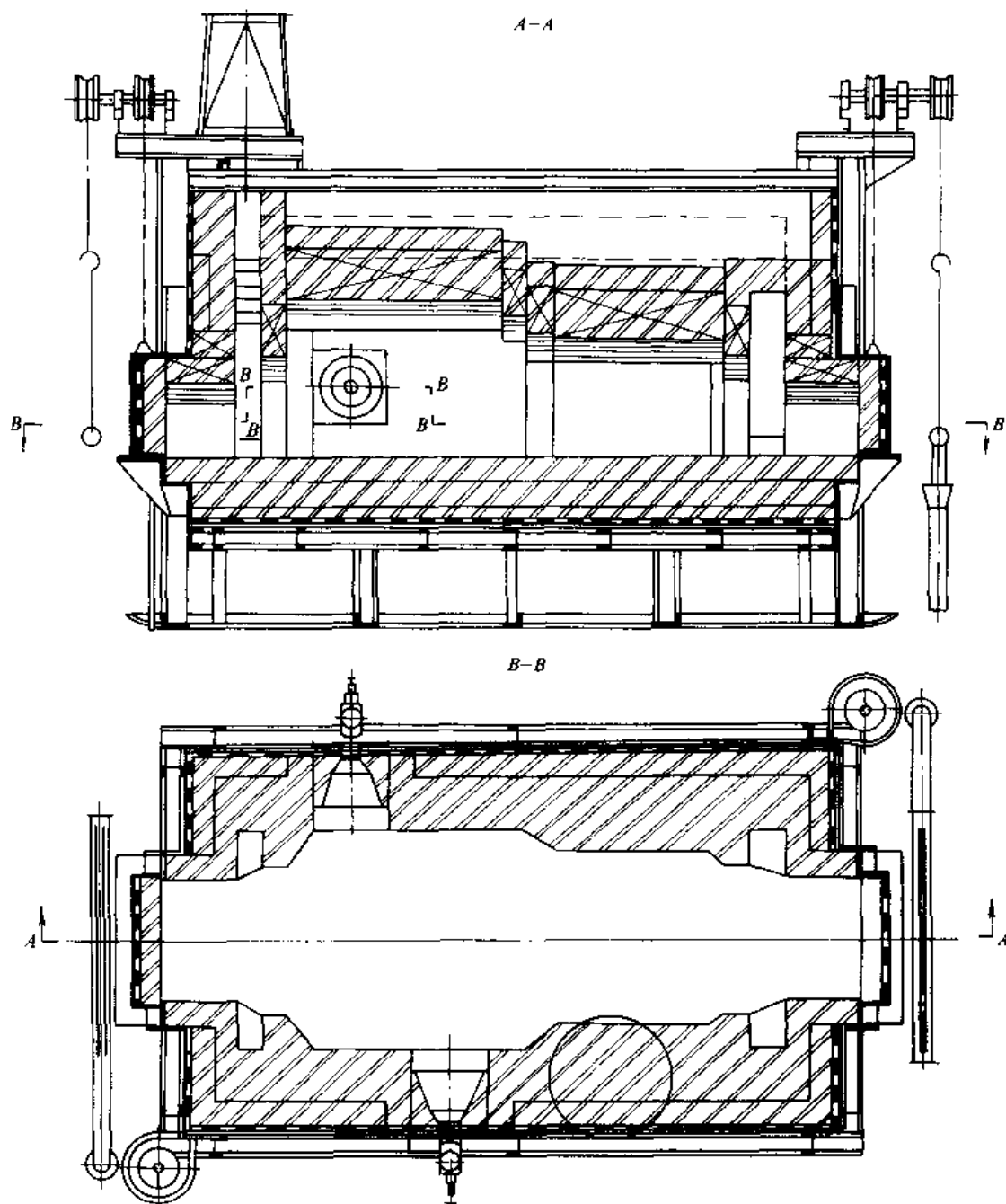


图3-3-3 带预热室的室式炉



2. 开隙式加热炉(图 3·3-4) 燃料通常用煤气和油,它是一种有扁而宽的缝隙式开口的室式炉,多数不带炉门,用于钢坯和圆钢的端头加热,也可用于批量生产的小件加热。

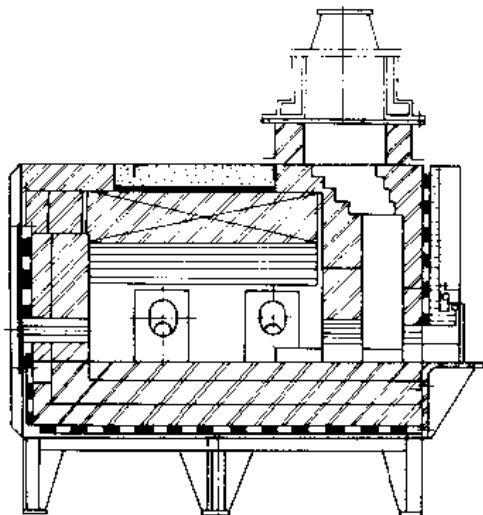


图 3·3-4 开隙式加热炉

3. 台车式加热炉(图 3·3-5) 常用于加热大中型坯料和钢锭,炉膛温度均匀,炉温按规定的升温曲线控

制,大型现代台车炉由计算机实现综合控制与管理,包括炉温、炉压、空燃比的自动控制与全过程(从开启炉门、装料到出料)的自动控制。新型台车炉还采用台车、炉门的软密封与气缸压紧,空、煤气高温预热及新型燃烧器等。

4. 推杆式加热炉 用机械、气动或液压推杆推动坯料沿炉底由低温区向高温区移动。平炉底或炉底上设纵向沟槽,将钢坯纵向排满炉底或置沟槽中,然后推钢前进,称为“纵推式”(图 3·3-6)。图 3·3-7在炉底上设有滑轨,大型钢坯横向排列向前推进,称为“横推式”。“纵推式”推杆炉为锻造车间批量生产常见炉型,适于加热直径 25~150mm,长度为直径的 2 倍至 450mm 的坯料,产量从 200~300kg/h 至 2~3t/h。“横推式”适于加热边长 75mm 以上,长度 600mm 以上的方坯,产量 1~2t/h 以上。高温坯料之间受力太大时容易粘钢,造成两根料同时出炉;排料太长也容易起拱,甚至造成操作事故。因此,推杆炉炉长有一定限制。当要求产量增加时,为不使炉子过长,要增加推料排数。

连续式推杆炉的长宽比大于 6,半连续式炉的小于 4,连续炉可使排烟温度降至 600~800℃ 以下,具有更高的热效率。

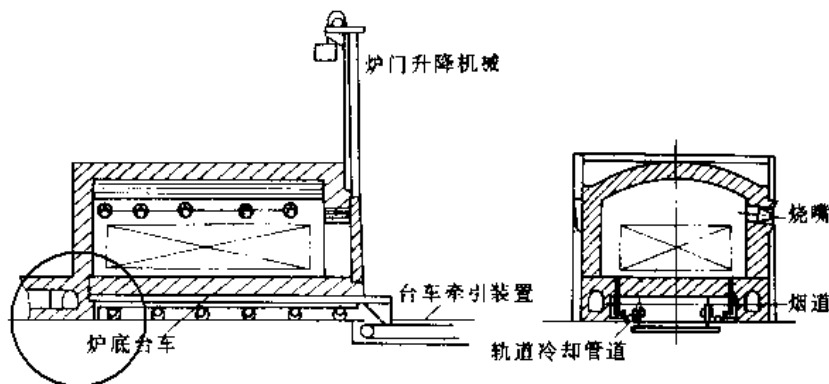


图 3·3-5 台车式加热炉

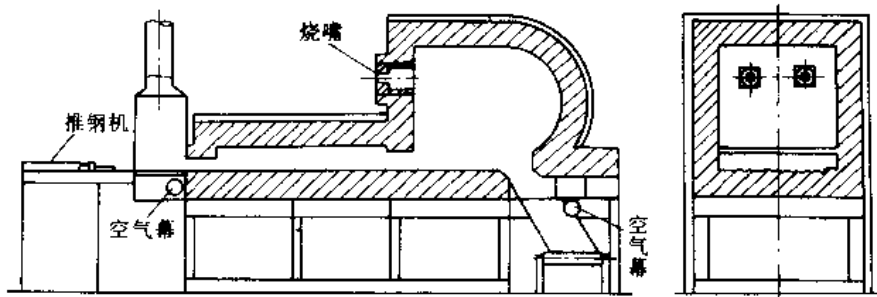


图 3·3-6 纵推式推杆加热炉



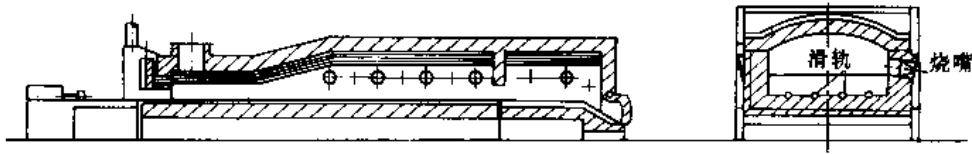


图 3-3-7 横推式推杆加热炉

5. 转底式加热炉(图 3-3-8) 这是连续炉中受原料形状、尺寸限制最少的炉型,因而用途广泛。其缺点是炉底故障较多;排烟温度高,热效率低。图 3-3-8所示为端部加热用的转底炉,炉体与回转炉底间没有垂

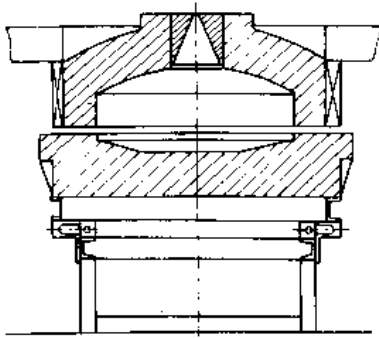


图 3-3-8 转底式端部加热炉

示为端部加热用的转底炉,炉体与回转炉底间没有垂

直窄缝,炉底故障少。转底炉适于中小件整体及端部加热,炉子产量 200~300kg/h 至 4~5t/h。

6. 环形加热炉 当批料单件重量达数十千克,产量较大时,炉底做成环形,常与 5t 以上模锻锤和机械锻压机配用。炉内分预热、加热、均热三段;较小的环形炉可不设均热段,加热较小的坯料。燃烧器主要布置在加热段和均热段。坯料运动与烟气流动方向相反,燃烧器迎着运动着的坯料呈一角度安装,有利燃烧产物与坯料间的热交换。由于坯料与炉底间没有相对运动,且放置有规则间距,因而炉底寿命长、加热条件好,加热快而均匀,坯料表面的氧化皮不易脱落,氧化量少,特别便于配用机械手装出料,和坯料输送机组成生产线。环形炉应保持环形转底与内外墙间密封结构的完好。图 3-3-9 为大型环形炉断面图。环形转底中径可从几米至数十米,产量可从每小时几吨至几十吨乃至上百吨。

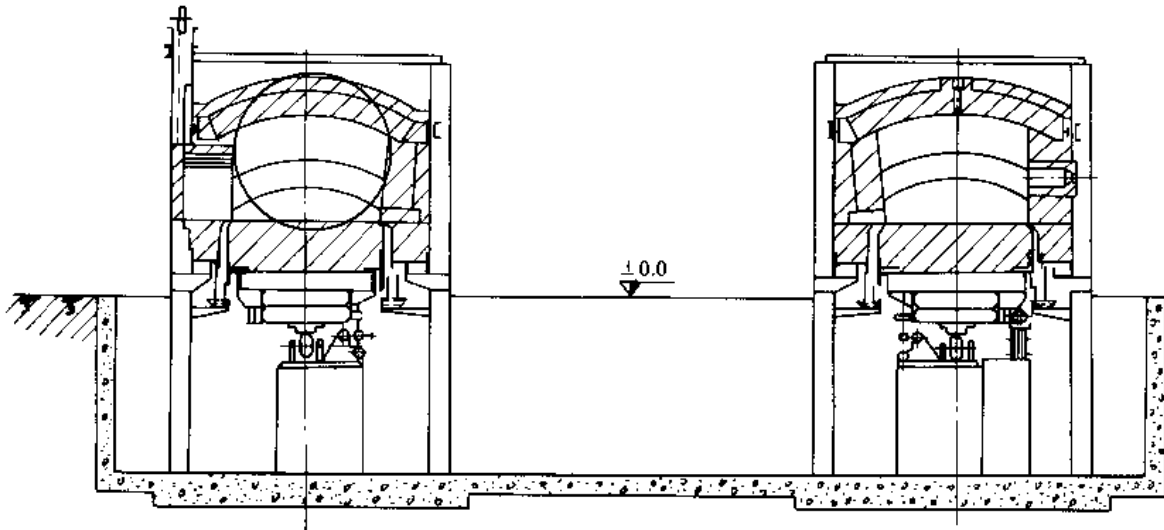


图 3-3-9 环形加热炉

7. 步进式加热炉 锻造加热一般只用步进底式加热炉(图 3-3-10)而不用步进梁式的大型步进炉。横放在步进炉中的固定底上的坯料,利用步进机构(包括升降与往复运动)使整炉坯料同步进底一起作上升—前进—下降运动,此时整炉坯料落到固定底上并向前移动一个距离(步距),随后步进底后退到最初位置,完

成一个矩形运动循环。坯料便一步一步前进。步距和步进周期根据生产要求,可以调整。步进炉是一种先进的机械化加热炉,同台车炉相比可采用下加热、炉温可按要求分段,属连续加热炉,因而炉底强度高,热效率高。同推杆炉相比,适应的坯料相同于“横推式”炉,但步进炉对圆坯、方坯同样适用,而“横推式”炉推圆料受



到限制；步进炉坯料同炉底没有摩擦运动，也无水冷滑道印痕，炉底寿命长，氧化铁皮较少，且炉长不受推料起拱等因素的限制，并可同时加热尺寸大小不同的坯料，灵活性较大。步进炉还可将炉中坯料出空而勿需用废料顶出。步进炉缺点是结构复杂，投资费高，炉下需要很大的地坑，地下基础深。

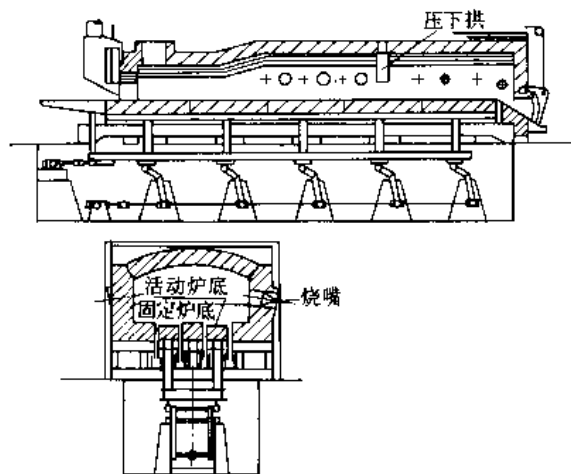


图 3-3-10 步进底式加热炉

除前述炉型外，还有用于中小棒料端部加热的转壁炉和转体炉（图 3-3-11）；局部加热小件用的网眼炉，以及端头加热用的输送带式炉（图 3-3-12）等。输送带式炉可用于长料的端部加热，料长可在 1~2m 以上，直径也不受限制，一般要求加热部分的长度在 150~250mm 以上。

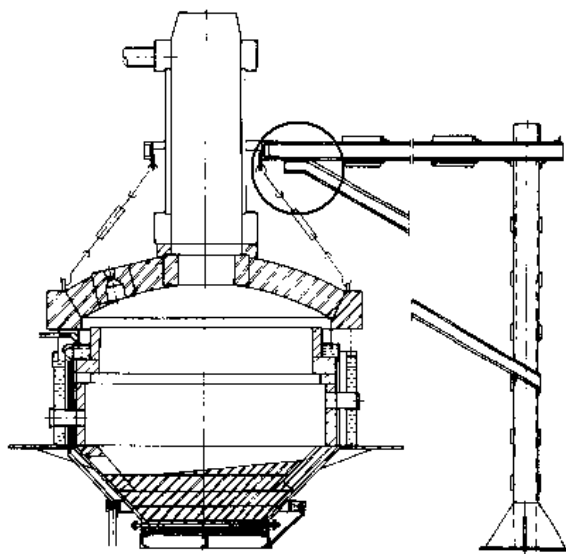


图 3-3-11 转体加热炉

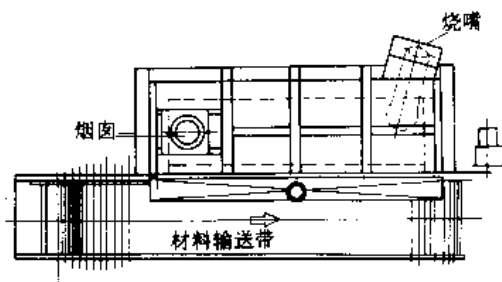


图 3-3-12 端部加热用输送带式炉

3.2 电加热装置

有感应加热、接触加热、电阻加热和盐浴加热四类，应用最多的是感应加热。

3.2.1 感应加热

1. 感应加热的特点 与燃料炉相比，优点是：

- (1) 易实现自动化，能够流水线作业，操作简便、稳定，可组成锻造生产线。
- (2) 加热速度快，炉子启动快，锻造设备的作业率能显著提高。
- (3) 加热质量好，温度控制准确，烧损少（一般不超过 0.5%）。
- (4) 由于采用清洁能源，低噪声加热，劳动条件好，对环境无污染。

缺点是：

- (1) 设备费用高。
- (2) 一种规格的加热器只适用于尺寸变化范围较小的坯料，不适于规格品种多的小批量生产，且对形状复杂的坯料或返修锻件的加热难以实现。
- (3) 电能消耗较大，大于接触加热，小于电阻加热。相反，对坯料变化的适应性则低于电阻炉而高于接触加热。

2. 电源频率 在坯料中感应产生的电流，因趋肤效应而集中于表面层，并从表面向中心按指数函数关系衰减，将占总发热量 90% 的发热层厚度视为电流的透入深度，以 δ 表示。当坯料尺寸小时，发热层可达到中心，形成均匀加热，但此时钢坯内部与表面的感应电互相产生干扰、削弱，使电效率下降；当电流透入深度与坯料断面尺寸相比较小时，发热部分相对集中于表面层，形成心部温度低的不均匀加热。为使钢坯均匀加热并能具有较高的电效率，根据坯料材质、尺寸大小、加热温度及希达到的电流透入深度范围，应选择合适的频率使 δ 值合理。



圆棒料 $2r = (3.5 \sim 8)\delta$

板坯 $2b = (2.5 \sim 6)\delta$

式中 $2r$ —— 圆棒料直径(mm);

$2b$ —— 板坯厚度(mm);

δ —— 电流透入深度(mm)。

钢加热到 900~1250℃ 范围选择频率见表 3·3-7。钢的电流透入深度与频率、温度的关系见图 3·3-13。图中在居里点(碳素钢为 780℃)以下温度区透入深度很小,即使用较低频率的电源也能达到高效加热。因此,对直径 80~180mm 的钢坯用大容量感应加热炉时,可采用低温区为 50 或 60Hz 的工频,高温区用 100 或 1000Hz 中频的双频感应加热。

表 3·3-7 圆钢加热的频率选用表

坯料直径 (mm)	150 以上	70~ 160	50~ 120	30~ 80	15~ 40	<15
电流频率 (Hz)	50	500	1000	2500	8000	130000~ 300000

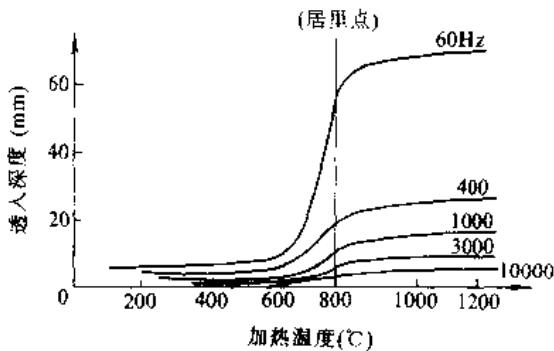


图 3·3-13 钢的电流透入深度和频率

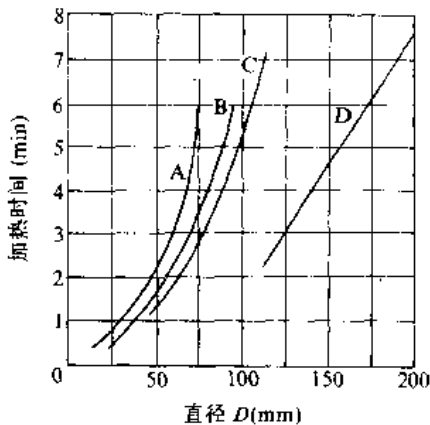


图 3·3-14 钢坯所需快速加热时间

A—10000Hz B—3000Hz

C—1000Hz D—50Hz

3. 加热时间 必要的加热时间包括加热及表面与中心的均热所需时间,见图 3·3-14,加热结果可使坯料表面与中心温差不大于 100~200℃。

4. 加热功率 金属加热的有效功率见图 3·3-15。设计合理、运行正常的感应加热装置,热效率为 50%~65%,各部分能量消耗见图 3·3-16。金属的有效功率除以热效率,即为加热功率。实际加热的耗电量见图 3·3-17。

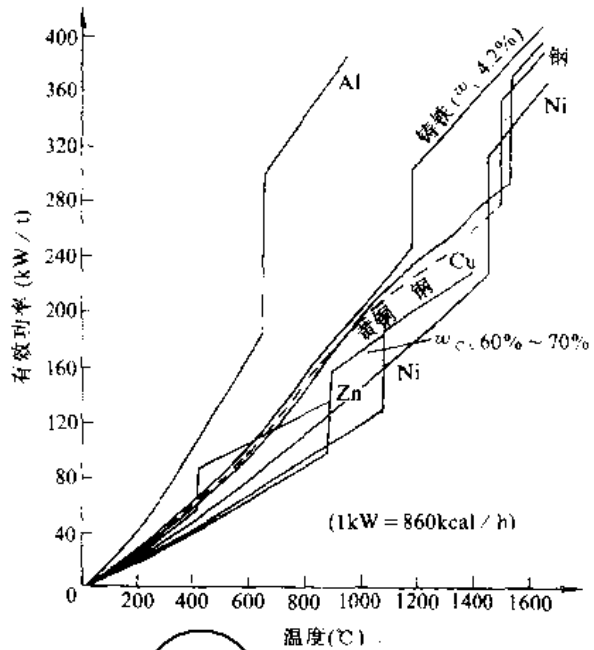


图 3·3-15 加热金属需要的有效功率
 w_c 、 w_{c_0} 分别为 C、Cu 的质量分数

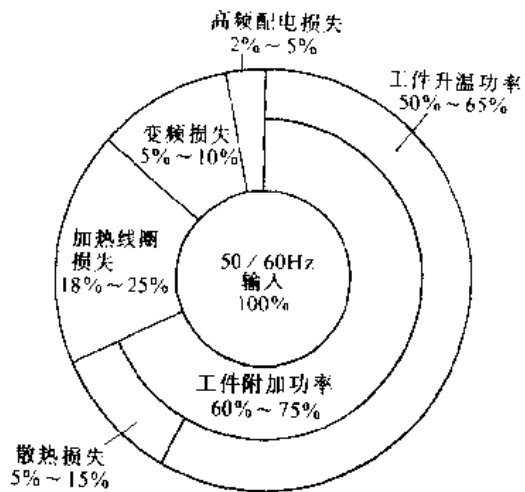


图 3·3-16 感应加热炉中能量消耗比例

5. 感应加热装置 由电源设备、控制系统、自动给料装置、坯料推送机构、感应加热器本体及出料机构等组成。电源设备由变频机组(中频发电机或可控硅变



频装置、高频发生器等)、变压器和补偿电容器等组成。控制部分包括各种检测、调节、控制仪表和接触器开关等。感应器型式由坯料形状、尺寸及加热要求而定,见图3-3-18。整体加热时,多将工件放在圆筒形感应线圈的中心方向,纵向移动进行加热。局部加热时,工件部分放置于线圈中,可以静止加热也可移动加热。

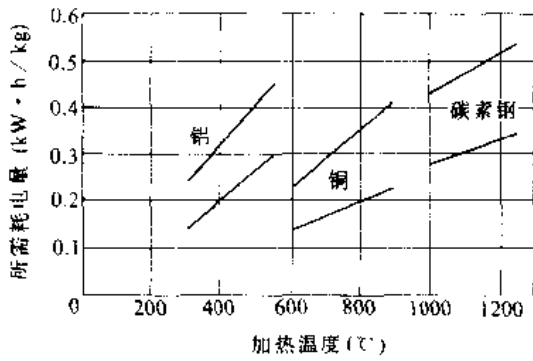


图 3-3-17 感应加热耗电量

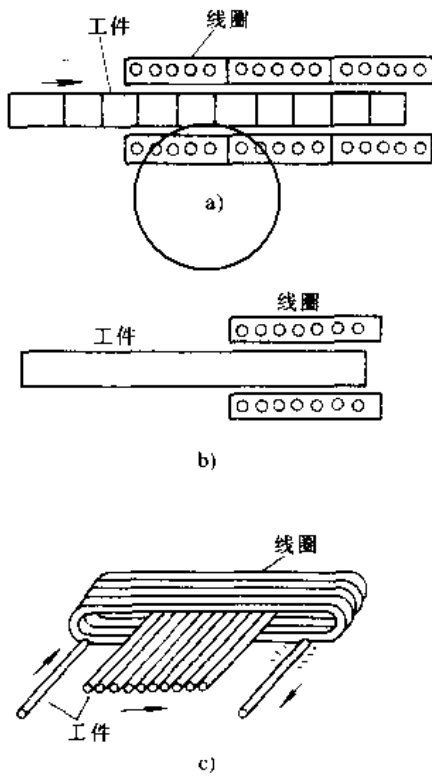


图 3-3-18 整体加热和局部加热用感应器
a) 整体加热 (移动加热) b) 局部加热 (静止加热) c) 局部加热 (移动加热)

3-2-2 接触加热 (电直接加热)

利用低电压直接加在坯料两端或一部分,使大电流通过坯料因本身电阻而迅速加热。

优点是:(1)生产率高,加热速度快且断面温差小;(2)热效率高,金属的氧化和脱碳少;(3)加热温度不受限制。

缺点是:(1)对坯料的表面光洁程度和形状尺寸要求严格,下料必须规整,特别是端部不允许发生畸变;(2)大电流导电夹不易制作;(3)夹紧不当时,接触处容易过热或加热不足;(4)测量及温度控制较困难。

接触加热适用于等截面的长杆料和管料的整体或局部加热。加热时间见图3-3-19。单位电能消耗、热效率值见图3-3-20。

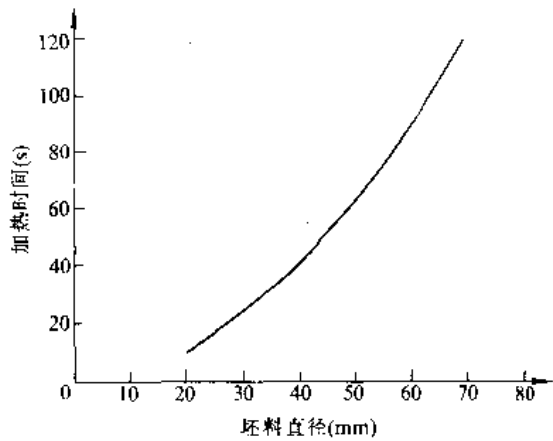


图 3-3-19 不同直径坯料的加热时间 (加热温度 1200°C)

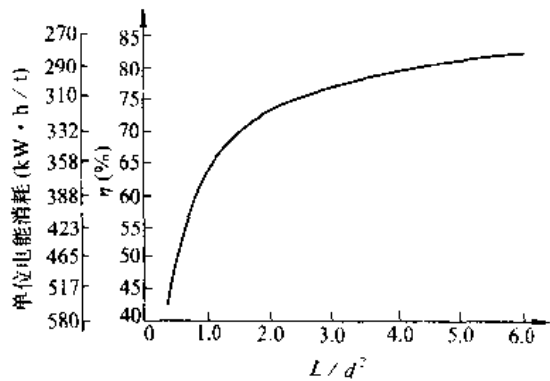


图 3-3-20 单位电能消耗,热效率和坯料 L/d^2 的关系
 L —坯料长度(cm) d —坯料直径(cm)
 η 效率 (%) 加热温度 1200°C

3-2-3 电阻炉

利用电阻加热元件间接加热坯料。加热温度受加热元件特性的限制(表3-3-8)。热效率比其他电热法低,一般约30%。主要用于高合金钢、耐热合金和非铁合金等加热,常用小型室式炉。易于采用保护气氛或真空无氧化加热;也便于实现机械化自动化操作。



表 3-3-8 电阻加热元件特性

名称	牌号	供应状态	最高使用温度 (°C)	特 性
铁铬铝合金	Cr25Al5	线状或带状	1200	高电阻, 耐热性好, 但高温强度较低, 冷却后有脆性
	Cr17Al5		1300	
	Cr13Al4		850	
镍铬合金	Cr20Ni80	线状或带状	1100	高电阻, 耐热性好, 高温强度较高, 冷却后无脆性
	Cr15Ni60		1000	
碳化硅元件		棒	1400~1650	非金属加热元件, 高电阻, 耐热性好, 但电阻温度系数较大, 冷态时硬而脆, 高温下有氧化倾向
二硅化钼元件		棒	1650~1850	
钼		线状	1600~2000	高度耐热, 但在空气中容易氧化, 只能用于真空或有保护气氛的炉中
钨		线状	3000	
石墨		棒	3000	

电阻炉的主要实用节能技术有: (1) 采用合理的轻质炉衬; (2) 选用适当的技术参数, 主要是加热能力、升温速度及升温时间、最大允许装炉量及空炉损耗等; (3) 完善炉体结构, 炉壳及炉体密封性能及绝热性能良好。

3.2.4 盐浴加热炉

是利用熔融盐电阻进行加热的电阻炉。有外热式和内热式两类。外热式用于 950°C 以下; 内热式即电极式盐浴炉。按电极安装型式分插入式和埋入式两种。在

正常使用情况下, 埋入式盐浴炉生产率高, 电极寿命长, 加热更均匀。盐浴炉多用于挤压、回转成形以及精密模锻的无氧化加热。常用浴盐为 BaCl_2 75% 和 NaCl 25% 组成, 最高使用温度 1050°C; 含 $\text{BaCl}_2 > 98\%$ 的浴盐最高温度可达 1350°C。高温盐浴炉应加强通风, 以排除盐蒸气。电极式盐浴炉采用低电压 (6~18V), 大电流 (1700~5000A), 电极的电流密度应不大于 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 。一对电极的功率一般不大于 60kW。盐浴炉的缺点是热效率低, 耗电量大 (表 3-3-9), 辅助工时较多, 劳动条件较差。

表 3-3-9 高温盐浴炉技术特性

项 目	空炉损耗功率 N_1 (kW)	蓄热量 N_2 (kW·h)	技术生产率 P (kg/h)	生产率		计算能耗		1.2×平均值	
				(kg/h)		(kW·h/t)		(kW·h/t)	
				P_1	P_2	P_1 时	P_2 时	P_1 时	P_2 时
RYD-20-13	11	47	90	23	27	759	657	827	709
RYD-35-13	16.5	82	100	25	30	769	653	827	709
RYD-45-13	22	106	200	50	60	537	460	827	709
RYD-75-13	37	176	250	63	75	591	533	827	709

盐浴炉的主要节能措施有: (1) 提高负荷率。实际生产率通常只有额定的技术生产率的 25%~30%, 大部分时间高温保温, 以致耗电高; (2) 采用快速起动, 降低炉子的空载功率及冷炉升温时间; (3) 加保温炉盖, 减少辐射损失; (4) 熔盐用石墨粉覆盖, 形成 3~5mm 的覆盖层, 对降低空载功率缩短升温时间效果明显。

3.2.5 浮动粒子炉 (流动粒子炉)

用固态粒子 (石墨、石英砂、刚玉球等) 做工作介质, 在布风板及一定风压下, 使粒子形成悬浮状态的流化床, 工件在床层中似盐浴那样进行加热 (图 3-3-21)。

⊙ 皆指质量分数。



同箱式电阻炉与盐浴炉相比,冷炉升温快3~8倍,升温总电耗约为电阻炉的1/5~1/10,工件的加热速度接近同温度的盐浴炉,可在150~1300℃间调节温度,保温功率也比盐浴炉小。缺点:有粒子损耗,需及时补充;要采取防尘及回收飘散粒子措施;工作故障率高于盐浴炉。

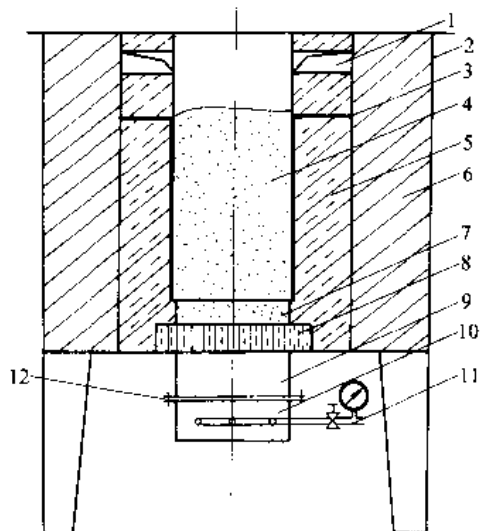


图 3-3-21 浮动粒子炉结构示意图

- 1—排烟口 2—炉壳 3—电极板
- 4—石墨粒子 5—耐火砖 6—保温砖
- 7—耐热砂 8—透气砖 9—上风室
- 10—下风室 11—进风管 12—布风板

4 锻造加热节能技术及装置

4.1 节能燃烧技术及装置

4.1.1 预热空气和燃料的节能燃烧技术

锻造炉排烟温度可高达1000~1300℃,带走燃料供热量的50%~70%,回收烟气热量预热空气和燃料是重要的节能措施。实践中主要采用预热空气,预热燃料仅限于气体燃料,且预热温度也受限制。

预热助燃空气可提高理论燃烧温度,从而强化传热,对热值较低的燃料尤为重要。同时还可显著节能,其燃料节约率 S_p 按下式计算:

$$S_p = \frac{P}{H + P} (\times 100\%)$$

- 式中 S_p 预热空气的燃料节约率;
 P 预热空气带入的热量(kJ/kg 燃料);
 H 在炉内可利用的燃料有效热量(kJ/kg 燃料),为燃料发热量与炉子出口处单

位燃料的排烟量带走的热量之差。

图3-3-22为根据上式计算的燃料节约率。由图可见:空气预热温度越高,燃料节约率越大;对相同的预热温度,排烟温度越高, H 越小,燃料节约率越大。因此,锻造炉预热空气效果好。预热空气的效益有以下经验值:通常空气每预热100℃,可节约燃料5%以上;并可提高理论燃烧温度45~70℃(高热值取上限);提高产量2%。例如空气预热300℃,燃料节约率 $\geq 15\%$ 。在每一具体条件下,助燃空气预热温度有一最佳值:烟气温度越高、燃料价格越高、换热器综合传热系数 K 值越高、换热器价格(元/m²)越便宜,空气预热的最佳温度越高。在目前的工业炉技术及换热器条件下,空气最佳预热温度略大于排烟温度的一半。实际空气预热通常低于此值,因此应进一步提高空气预热温度。

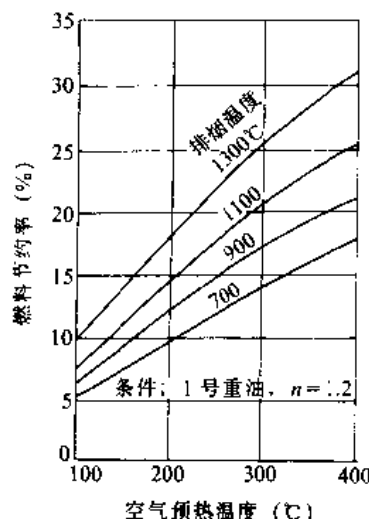


图 3-3-22 空气预热的燃料节约率

4.1.2 低空气系数节能燃烧技术

空气系数 n 为实际燃烧用空气量(L_n)与按化学反应计算的理论空气量(L_0)之比, $n = L_n/L_0$ 。为保证完全燃烧, n 总是大于1,这就造成燃烧后仍有过剩空气存在,其危害甚大:降低燃烧温度;增大排烟量,消耗热能;增加金属氧化烧损。低空气系数节能燃烧技术就是既保证完全燃烧而又尽可能减少过剩空气量的燃烧技术。由新型燃烧装置与控制系统实现的低空气系数燃烧可达到:气体燃料 $n = 1.02 \sim 1.05$;液体燃料 $n = 1.05 \sim 1.1$ 。降低空气系数带来的燃料节约率 S_A 按下式计算:

$$S_A = \frac{L_0(n_1 - n_2)T_{c_{p2}}}{Q_{DW} - Q_{py} - L_0(n_2 - 1)T_{c_{p2}}} \times 100(\%)$$

式中 n_1 校正前的空气系数;



- n_2 —— 校正后的空气系数;
- T —— 炉温($^{\circ}\text{C}$);
- c_{pa} —— 空气的比定压热容 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$];
- Q_{DW} —— 燃料低位发热量 (kJ/kg);
- Q_{pv} —— 理论空气量燃烧情况下排带走的热量 (kJ/kg).

由 S_A 计算式以重油为例的计算结果见表 3-3-10。排烟温度、空气系数与排烟热损失的定量关系见图 3-3-23。空气系数与燃料单耗的关系见图 3-3-24。图中以 $n = 1.1$ 的单耗为 100%。由以上图表可得出：
 (1) 炉温越高，同样的 n 值，排烟损失大，低空气系数燃烧节能效果越大；
 (2) 燃料热值越高，排烟损失大，实行低 n 值燃烧节能效果越明显；
 (3) 低 n 值燃烧由于 L_m 的减少可提高理论燃烧温度，有利强化传热。

表 3-3-10 校正空气系数的燃料节约率

排烟温度 ($^{\circ}\text{C}$)	校正前空气系数 n_1	校正后空气系数 n_2			
		1.30	1.20	1.10	1.00
700	1.40	3.76	7.27	10.50	13.50
	1.30	—	3.65	7.01	10.10
	1.20	—	—	3.48	6.74
	1.10	—	—	—	3.38
900	1.40	5.94	11.27	16.60	20.20
	1.30	—	5.66	10.70	15.20
	1.20	—	—	5.29	10.10
	1.10	—	—	—	5.06
1100	1.40	9.43	17.30	23.80	29.40
	1.30	—	8.67	15.90	22.10
	1.20	—	—	7.91	14.70
	1.10	—	—	—	7.36
1300	1.40	15.70	27.20	35.90	42.70
	1.30	—	13.70	23.90	32.10
	1.20	—	—	11.90	21.30
	1.10	—	—	—	10.70

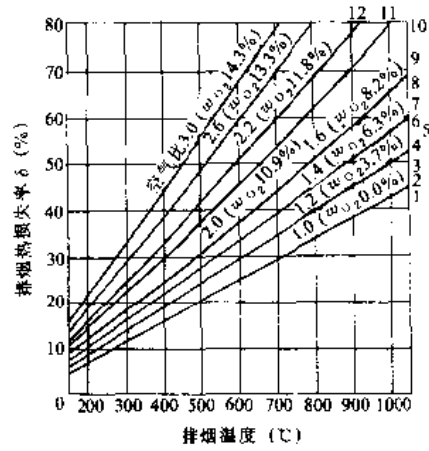


图 3-3-23 排烟温度、空气系数与排烟热损失的关系 (燃料: 轻油)

w_{O_2} —— 氧的质量分数

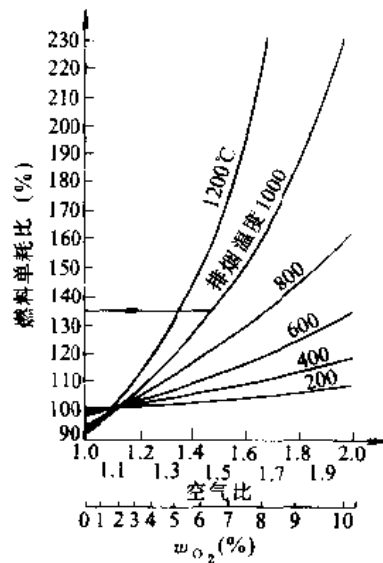


图 3-3-24 空气系数与单位能耗的关系

w_{O_2} —— 氧的质量分数

4-1-3 同时使用预热空气与低空气系数燃烧技术

一般常在预热空气同时实行低空气系数燃烧。若单独预热空气的燃料节约率为 S_p ，单独实行低 n 值燃烧的节约率为 S_A ，此时总的燃料节约率 S_T 按下式计算：

$$\begin{aligned}
 S_T &= S_A + (1 - S_A)S_p \\
 &= S_p + S_A - \frac{S_p S_A}{100} \quad (\%)
 \end{aligned}$$



S_T 值也可由图 3-3-25 直接查得。

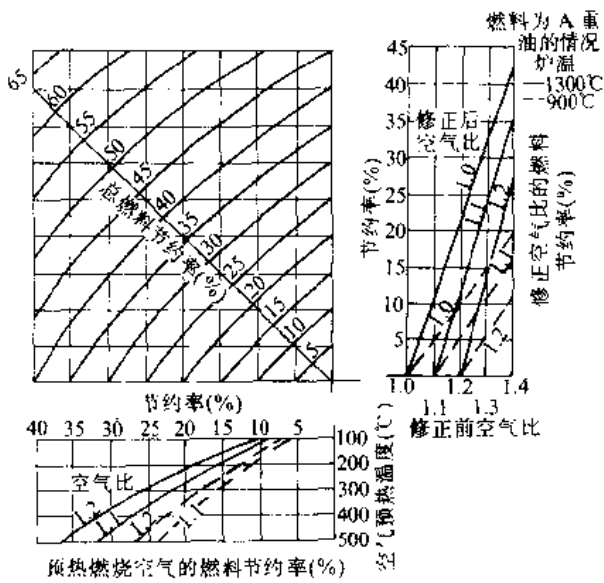


图 3-3-25 校正空气系数及预热空气的总燃料节约率

4.1.4 几种较好的节能燃烧装置

1. R 型 (PLB 型) 燃油喷嘴 (图 3-3-26) 特点为燃料与空气比例调节, 空气与燃料三次雾化, 效果好。缺点: 结构复杂, 燃重油易堵塞。在此基础上发展的热风比调烧嘴 Hot-PLB 型, 可用于 500°C 的热风烧重油, 该烧嘴带有热风温度波动时的自动补偿装置, 以确保空燃比为规定值。在炉温 1300°C, $n=1.1$, 空气预热 500°C, 用 Hot-PLB 烧嘴烧重油, 节能 30%。

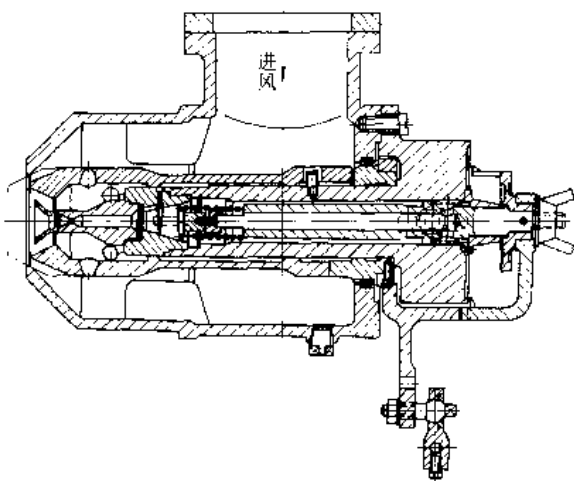


图 3-3-26 R 型低压比例调节燃油喷嘴

2. F 型燃油喷嘴 F 型燃油喷嘴为我国研制的油压自动比例调节型烧嘴 (图 3-3-27)。该烧嘴通过控制

油压利用波纹管的压缩或伸长与油压成比例的关系, 波纹管带动在弹簧作用下的柱塞及空气喷头, 实现控制油槽及空气喷头的截面, 并保持其相对比例关系, 从而实现空燃比自动调节。要改变这一比例时, 只需调整比例调整手柄 8 即可。在 F 型烧嘴的基础上, 改进变型的烧嘴有 F-RF 型油压自动比例调节热风烧嘴和 QRF 型高温全热风油压自动比例调节烧嘴。F-RF 型可用于热风 200~350°C; QRF 型可用于热风 350~500°C。这种烧嘴节能效果好, 使用普遍。

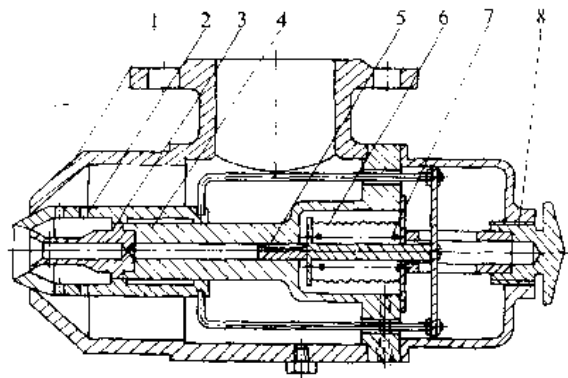


图 3-3-27 F 型油压自动比例调节烧嘴

1—壳体 2—空气喷头 3—油喷头 4—油缸 5—柱塞
6—波纹管 7—弹簧 8—比例调整手柄

3. 自身预热烧嘴 自身预热烧嘴亦称换热烧嘴 (图 3-3-28)。其特点是将烧嘴与换热器组成一体, 从而克服了一般的换热器—烧嘴系统的烟气降温 and 已预热的空气降温。利用烧嘴的引射器可排除全部烟气, 并可控制炉压, 勿需另设排烟系统。根据需要烧嘴与换热器也可做成分离型。适用燃料为油和各种煤气, 空气预

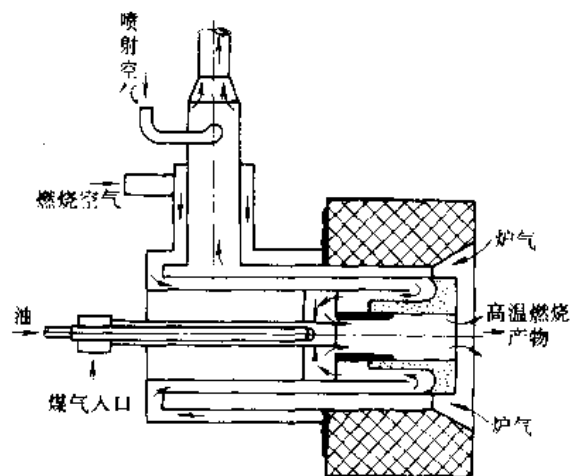


图 3-3-28 自身预热烧嘴结构原理示意



热 300~500℃。

4. 平焰烧嘴 利用空气或煤气(或二者同时)的旋转气流产生的离心力,使火焰沿喇叭形烧嘴砖壁扩展形成紧贴于炉墙或炉顶的盘状平火焰。燃料主要是各种煤气,也可使用重油、煤粉。图 3-3-29 为带煤气旋流器的平焰烧嘴。使用平焰烧嘴与炉型相适应时,可较普通烧嘴节能 12%~30%,并具有较好的加热质量。

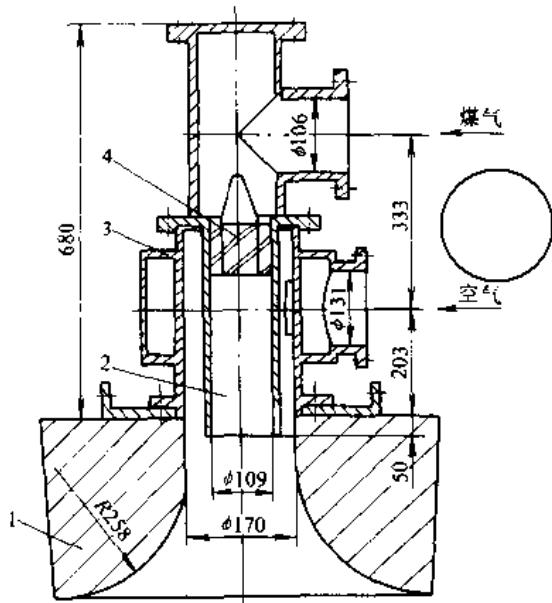


图 3-3-29 平焰烧嘴结构示意图

1—烧嘴砖 2—煤气喷嘴 3—空气旋流器
4—煤气旋流器

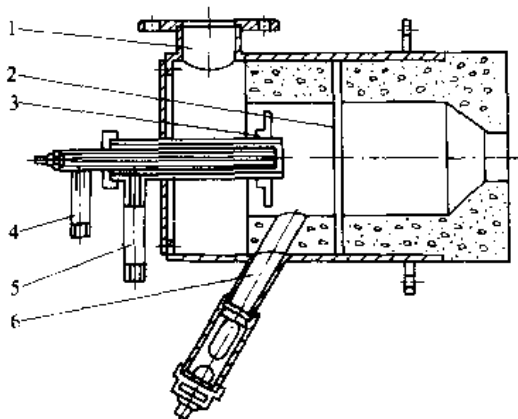


图 3-3-30 挡盘式高速烧嘴

1—空气接管 2—挡环 3—空气挡盘 4—点火煤气接管
5—燃烧煤气接管 6—紫外线火焰监察装置

5. 高速烧嘴 高速烧嘴是燃烧产物的喷出速度

达 100m/s 以上,最高达 300m/s,常用 (90~120) m/s。利用此特点可强化对流传热与提高炉温均匀性。高速烧嘴带有一个小燃烧室,在燃烧室内基本实现完全燃烧(85%以上),燃烧产物靠膨胀压力从收缩口以高速喷出(图 3-3-30)。高速烧嘴有等温与调温两类,锻造加热常用等温高速烧嘴,即不带二次调风机构,空气过剩量变化不大。可用于普通大中型加热炉;在快速加热炉上使用效果显著。

4.2 快速加热节能技术

在快速加热炉中,加热速度常达到 1~2min/cm。在各种快速加热方法与装置中,国外新发展的快速对流加热炉综合性能优越。

4.2.1 快速对流加热技术的特点

(1) 加热速度快,比普通加热炉快 4~5 倍,设备生产率显著提高,装置小,结构紧凑,适于在生产流水线和自动线中使用。

(2) 热效率高,用于锻造加热可达 20%~30%。

(3) 金属加热质量高,能实现少氧化和少脱碳,用于普通钢及硅锰钢、镍铬钢、高速钢等的冲击加热,氧化烧损率均为 0.5%左右,脱碳层深度不超过 0.1mm。用于精密锻压、温锻和温挤等工艺,能延长模具寿命。

(4) 快速对流加热炉热惰性小,操作灵活,可以突然停车和迅速起动,炉子降温快可避免因故障而停歇时造成坯料在炉中过热。

(5) 传统加热炉以辐射传热为主(90%以上),炉墙辐射占 60%、炉墙温度高,寿命短。快速对流炉以对流传热为主,炉衬温度较低,甚至可低于金属最终加热温度。这有利于炉衬轻质化和延长炉衬寿命。

(6) 加热铜、铝材供热强度高。如一般加热铜件的供热强度为 12~17kJ/(cm²·h),快速对流加热为 84~209kJ/(cm²·h);一般加热铝件为 4~8.4kJ/(cm²·h),快速对流加热为 126~167kJ/(cm²·h)。

(7) 加热装置投资费用低,约为电加热投资费用的 1/3。

快速对流加热炉适用于一定批量的生产,更适合用于生产线与自动线上。目前主要用于较小厚度和直径(例如 φ100mm 以下)的坯料。

4.2.2 快速对流加热炉

有各种炉型:



(1) 对流平床快速加热装置 (图 3-3-31), 适于较长坯料的整体加热, 已有 273kg/h 至 4.5t/h 的各种规格。

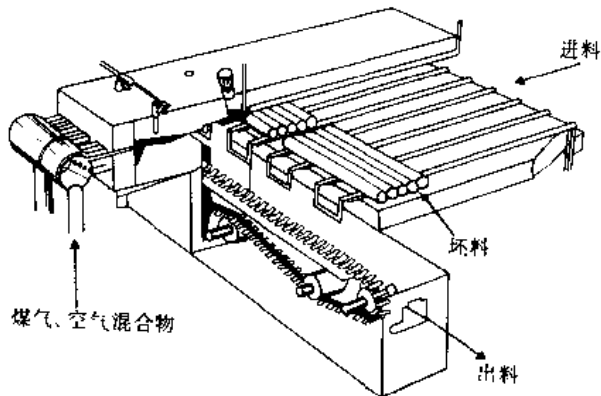


图 3-3-31 820kg/h 棒料整体加热装置示意

(2) 连续逆流式快速加热炉 (图 3-3-32), 燃烧产物从切线安装的烧嘴喷出 (100m/s 以上), 形成强烈的围绕工件的旋转气流, 使工件在与旋转气流的逆向运动中被迅速加热。

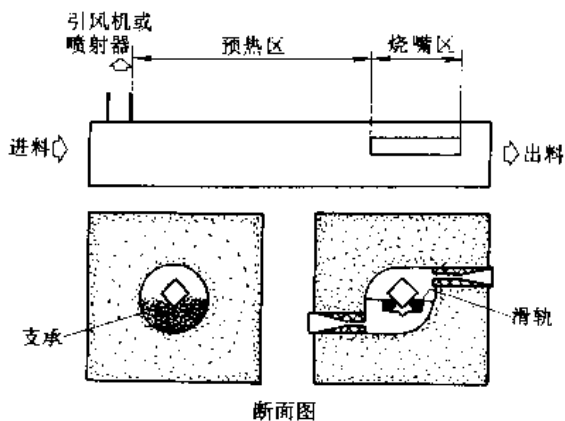


图 3-3-32 连续逆流快速加热炉原理图

(3) 快速对流加热炉 (图 3-3-33), 生产能力为 500~1500kg/h, 加热 60~100mm 的棒料和方坯, 坯料长度 ~120mm。炉底有效区长 2025mm, 内宽 290mm, 炉底强度高达 3100~4100kg/(m²·h), 炉子热效率 20%~25%, 空气预热 300~400℃ 后可达 30%~35%, 其对流传热量占 80%~85%。

(4) 棒料端部加热炉, 用于局部加热。

(5) 快速对流加热剪切炉, 加热温度 350℃, 热效率可高达 50%, 现已有 25t/h 及更大的快速对流温

剪炉用于生产。

快速对流加热炉的发展和改进在于: 精确控制炉压; 减少炉底水冷件; 充分利用烟气热量预热空气; 改进炉底结构, 发展陶瓷整体炉底, 开发适应各种快速对流加热用的新型专用高速烧嘴; 进行快速冲击加热传热机理的研究, 扩大加热坯料的直径与厚度范围。

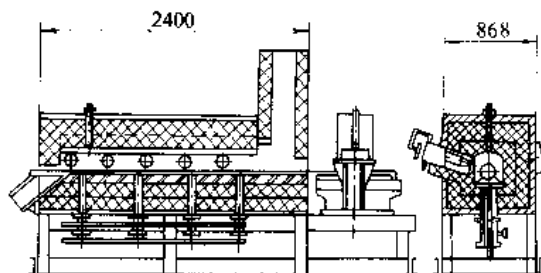


图 3-3-33 快速对流加热钢坯自动化炉

4.3 少无氧化加热技术及装置

它是适应少无切屑加工需要, 满足精锻要求的一种加热新工艺和方法。通常无氧化加热可使金属完全免受氧化或烧损率在 0.1% 以下。少氧化加热是指氧化率在 0.5% 以下, 即达到一般感应加热水平。由于少氧化加热已可以满足一般精锻工艺要求, 而又不使加热工艺过于复杂, 因而近年来有了较大发展。

实现无氧化加热的方法有: 保护性涂层; 玻璃浴中加热; 电热盐浴加热; 马弗炉中使用保护气氛加热; 敞焰无氧化加热等。生产中使用较多的为敞焰无氧化加热。它是利用控制燃料不完全燃烧程度, 形成对工件的无氧化气氛, 而不完全燃烧产物在上部进行完全燃烧, 通过高温预热空气及高温区对工件的辐射加热, 而实现既不氧化工件又使其加热。小批量生产常用室式炉, 成批生产或在生产线上, 可用推杆炉、环形炉和步进炉, 典型示例见图 3-3-34、图 3-3-35。前者金属表面氧化率为 0.006g/cm², 热效率 10%~15%; 后者质量氧化率 0.1%~0.25%, 短期热效率达到 29%, 用于汽轮机叶片精锻加热。

少氧化加热多采用感应加热, 在感应加热时通保护气氛或在真空中加热、涂保护涂层的电加热等可达到无氧化加热要求。最近发展的陶瓷管型少氧化加热炉 (图 3-3-36) 具有明显的综合技术经济效益, 因而发展迅速。

陶瓷管型少氧化炉以煤气或油为燃料, 是一种密



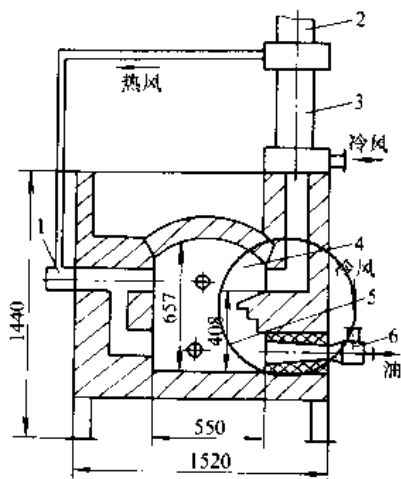


图 3-3-34 室式敞焰无氧化加热炉

- 1-二次风喷嘴 2-烟囱 3-空气预热器
4-高温区(氧化气氛) 5-加热区(还原气氛) 6-油喷嘴

闭式推杆加热炉。坯料在陶瓷管中间接加热，每排陶瓷管用一个小气缸推料，陶瓷管通常有3至8排，可加热 $\phi 20 \sim 80\text{mm}$ 的圆形坯料。生产能力 $300 \sim 1000\text{kg/h}$ 。这种炉子炉温自控，进出料机械化。工件氧化率稳定在 $0.2\% \sim 0.3\%$ ，炉子热效率稳定在 $45\% \sim 50\%$ ，是少氧化、节能指标最好的炉型。冷炉升温至 1300C 在 20min 以内。陶瓷管寿命约一年，材质为氮化硅结合的碳化硅材料。

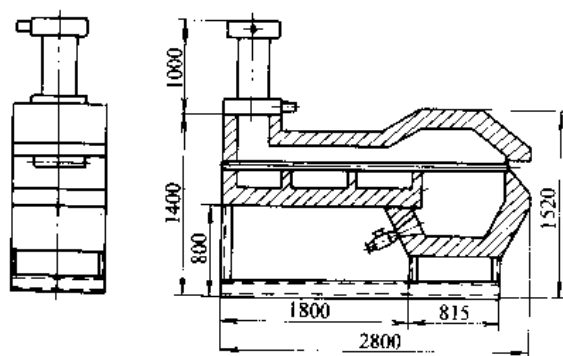


图 3-3-36 陶瓷管型少氧化炉示意

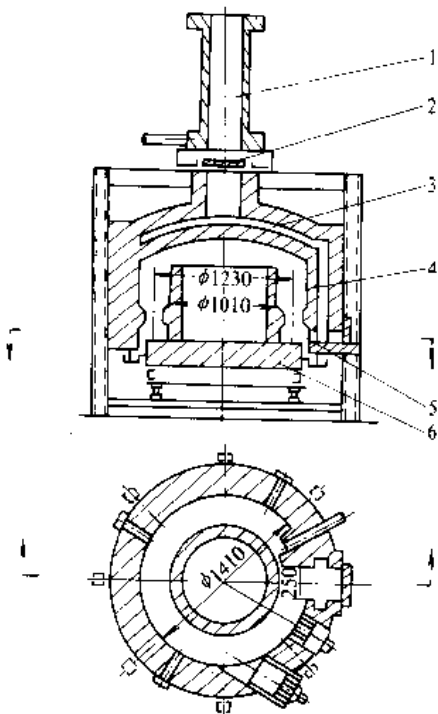


图 3-3-35 少氧化环形加热炉

- 1-预热器 2-烟道隔板 3-双层拱顶 4-氧化区
5-工作区 6-转动炉底

4.4 锻造炉节能炉衬

节能炉衬通常是一种多层复合炉衬，在热工作面采用耐火度高的材料，在炉壁外侧采用隔热性能好的材料，层间分界面的温度应略低于较低温度侧材料的长期允许使用温度。同时，除节能外还要综合考虑炉衬造价、使用寿命、燃料价格等因素，以便得到一种节能的合理炉衬。锻造加热炉多为间歇性周期作业，炉体的蓄热损失占很大比例，而表面散热由于大部分时间炉体蓄热未达到热稳定状态，因而散热量较少。锻造炉节能炉衬主要是采用各种轻质化炉衬，其中多层陶瓷纤维复合炉衬效果最好，其次是轻质砖复合炉衬。这类炉衬热惰性小，升温迅速，可节能 $15\% \sim 30\%$ 。对于连续作业的锻造炉，一次蓄热达到稳定后，主要是炉壁外表面的散热损失，因而应加强绝热，降低炉体表面温度。采用耐火纤维与砖体的复合炉衬，也是一种节能型炉衬。通常在热面粘贴 50mm 厚的多晶高铝纤维进行内隔热，在砖外侧用适当厚度的保温材料。表 3-3-11 为各种复合炉衬散热量与蓄热量的比较，以第 1 种炉衬为比较基准，这与前述相符。



表 3-3-11 各种复合炉衬散热量与蓄热量的比较

No	炉衬结构及温度梯度	散热量 [kJ/ (m ² ·h)]	蓄热量 (kJ/m ²)	No	炉衬结构及温度梯度	散热量 [kJ/ (m ² ·h)]	蓄热量 (kJ/m ²)
I		6121 (100)	306627 (100)	IV		3148 (51)	527562 (104)
II		3605 (59)	569432 (112)	V		3395 (55)	192602 (38)
III		4895 (80)	443822 (87)	VI		3517 (57)	19260 (4)

注：Z—耐火砖；GZ—保温隔热砖（粘土质、高铝质）；X—耐火纤维；Y—岩棉板；GB—硅酸钙保温板。

4.5 锻造加热余热回收技术及装置

锻造炉排烟热损失高达 50%~70%，回收排烟余热是最重要的节能措施之一。工业炉余热回收标准见表 3-3-12。

表 3-3-12 工业炉窑烟气余热回收标准
(GB 3486 83)

烟气 出炉 温度 (°C)	使用低热值燃料时			使用高热值燃料时		
	余热回 收率标 准 (%)	排气 温度 (°C)	预热空 气温度 (°C)	余热回 收率标 准 (%)	排气 温度 (°C)	预热空 气温度 (°C)
500	20	350	170	22	340	150
600	23	400	220	27	380	200
700	24	450	260	27	420	230
800	24	530	300	26	510	250
900	26	580	350	28	560	300
1000	23	670	350	25	560	300
>1000	26~	710~	450~	30~	670~	400~
	48	170	750	55	400	700

锻造炉余热回收技术有多种：设置空气预热器；安装小型蓄热器；连续炉炉尾设喷流预热段；将排烟用做低温炉热源等。

1. 小型陶瓷换热器（图 3-3-37）有直交型与逆流型两种，整体陶瓷芯尺寸（mm）：267×267×267，它体积小，换热面积大。用于炉温 870~1370°C 的加热炉，空气预热温度 370~675°C，燃料节约率 26%~50%，投资回收期约一年。常用材质有 β-堇青石、高铝碳化硅等。

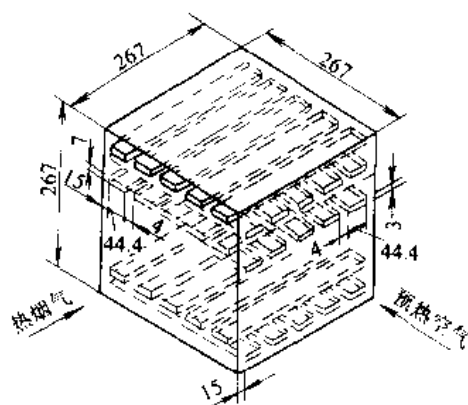


图 3-3-37 小型陶瓷换热器



2. 管式陶瓷换热器(图 3-3-38) 图示装置陶瓷管为碳化硅材料,空气经管内而烟气从管外呈交叉流过。标准换热器在深度方向有 5 排管子,靠热面的一排为光管,其余四排带翼片(内径 38mm,长 1220mm,换热面积 0.93m²)。当烟气温度 1370℃时,空气预热达 815℃,换热器效率超过 50%,高温下漏气率小于 2%。燃料节约率见表 3-3-13。

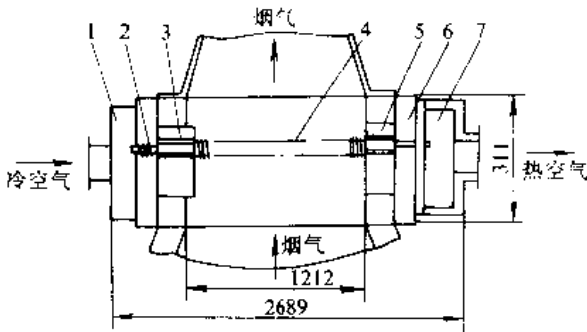


图 3-3-38 管式陶瓷换热器示意

- 1—冷风集气室 2—预压弹簧 3—冷端陶瓷管接头
- 4—陶瓷管 5—热端陶瓷管接头 6—密封紧固件
- 7—热风集气室

表 3-3-13 陶瓷管换热器的燃料节约率
(换热器效率 60%)

烟气入换热器温度(℃)	燃料节约率(%)
1370	50
1260	44
1150	37

3. 新型蓄热室 为了将空气预热到更高温度同时使最终排烟温度降至最低,充分回收余热,国内外近斯研制成新型蓄热室,并成功地用于锻造炉(图 3-3-39)。图中采用粘上质与铸铁质的波纹片状蓄热体,单位体积的传热表面积达 260m²/m³。蓄热室换向时间为 5min。以油为燃料时,该炉当炉温 1350℃时,空气平均预热温度 1050℃,而排烟温度平均 70℃。采用全纤维炉衬,空炉升温至 1350℃约需 15min。炉子的炉底强度可达 800kg/(m²·h),相应的炉子热效率达到 47.9%。由于其极佳的技术性能与经济效果,具有良好的发展前景。

随着蓄热材料、换向装置及控制系统的进步,新型蓄热室已进一步发展完善为新型蓄热式烧嘴装置。它体积小,使用安装方便,换向时间可减少到一分钟以

内,具有更好的综合技术性能与经济效益,并已有系列产品供应。

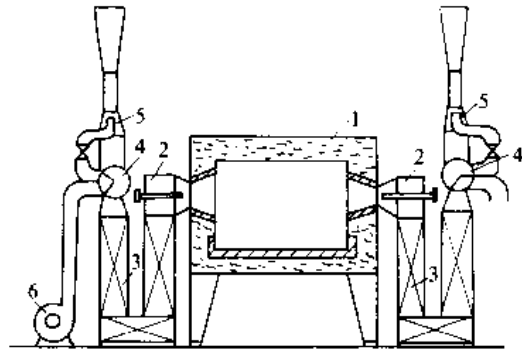


图 3-3-39 蓄热式锻造炉系统示意

- 1—炉体 2—旋流燃烧器 3—蓄热室
- 4—旋转换向阀 5—喷射器 6—鼓风机

4.6 锻造加热的测量控制技术

包括炉温与炉压的检测控制,燃烧系统的控制(自动点火、空燃比的控制等),换热器的保护控制等。国内外已将计算机用于加热炉的全过程控制取得了良好效果。它能实现生产过程的最佳状态控制,实现优质、高产、低成本;能对事故进行预报和及时处理;对生产过程实行全面管理和控制。炉温控制原理见图 3-3-40,炉压控制原理见图 3-3-41,燃烧控制例见图 3-3-42,使用计算机的综合控制示例见图 3-3-43。

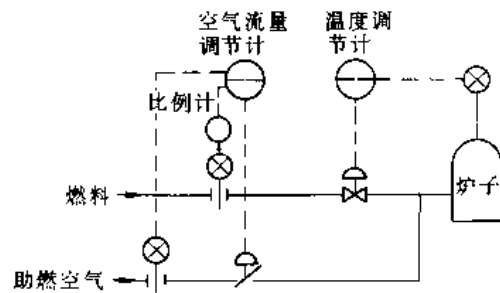


图 3-3-40 炉温控制方式原理图

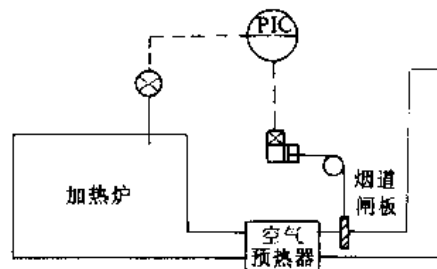


图 3-3-41 加热炉的炉压控制示意



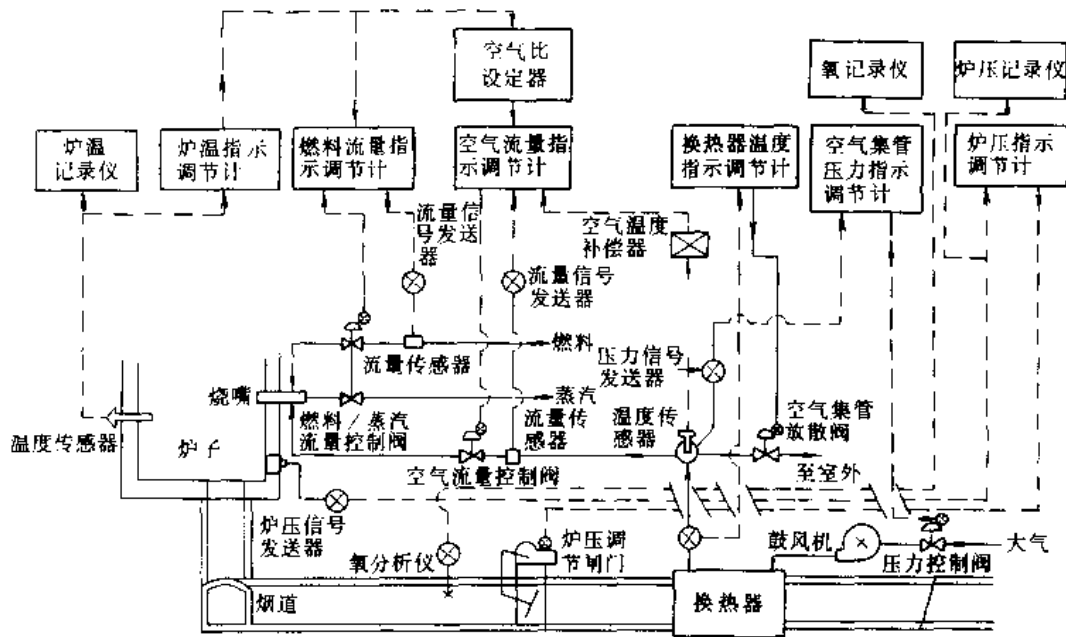


图 3-3-42 空气预热情况下的空燃比控制系统

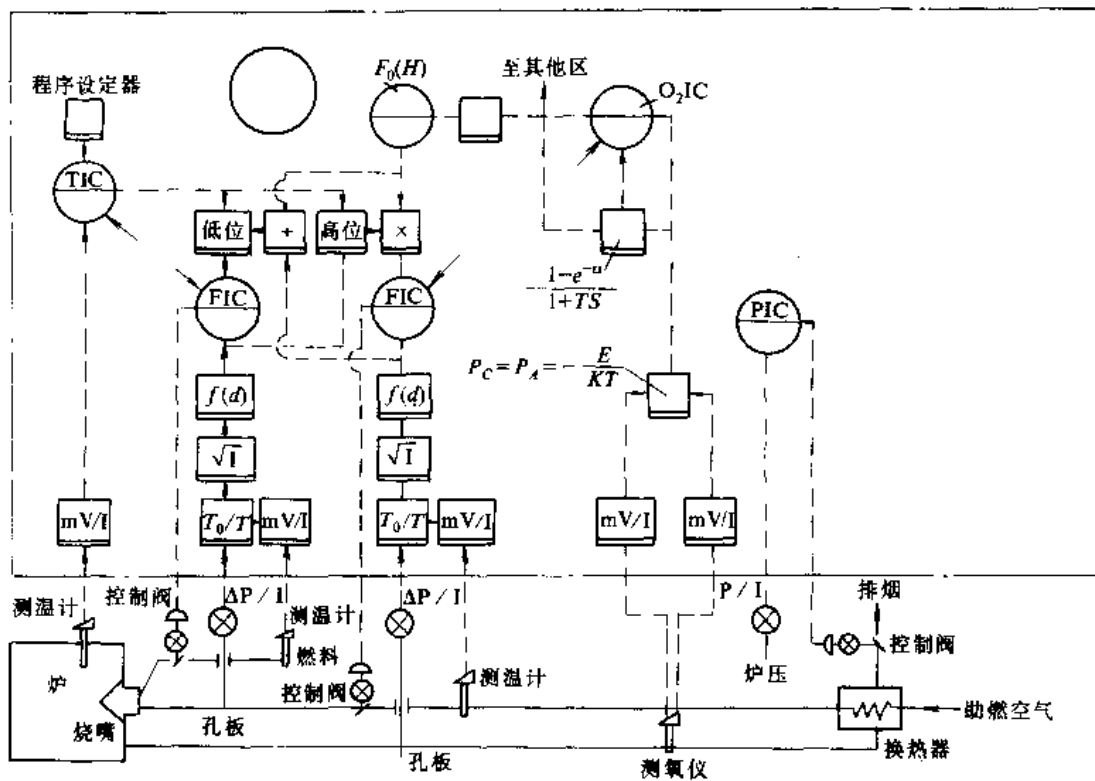


图 3-3-43 使用计算机的综合控制示例

TIC—温度调节计 FIC—流量调节计 低位—低位选择器
 高位—高位选择器 mV/I—毫伏-电流讯号变换器
 PIC—压力调节计 ΔP/I—差压讯号发送器



第4章 自由锻^[10]

自由锻有锤上自由锻和液压机上自由锻之分,两者有共性内容,也有各自的特点。

1 概述

1.1 定义、基本任务

自由锻采用通用工具或直接在锻造设备(锻锤或液压机)的上、下砧间进行锻造。金属只有部分表面受到工具限制,其余则为自由表面。原材料用锭料和轧材。主要用于单件或小批生产,是特大型锻件的唯一生产方法。

自由锻的基本任务是经济地获得所需锻件的形状、尺寸和内部质量。一般小型锻件以成形为主,大型锻件(尤其是重要锻件)和特殊钢的锻造则以改善内部质量为主。钢锭经过锻造,粗大的铸造组织被打碎,非金属夹杂物及异相质点被分散;内部缺陷锻合,致密性可以提高,金属的纤维流向在锻件截面上正确分布,因而大大提高了金属力学性能,尤其是塑性指标和冲击韧度。

制定工艺包括:绘制锻件图,确定坯料重量和尺寸,确定锻造工具,选择锻造主、辅设备,确定加热、冷却和热处理规范,确定工时定额,填写工艺卡片等。

1.2 基本工序和锻比

1.2.1 基本工序

1. 锻粗 减小坯料高度增大横截面的工序称为锻粗(图3-4-1)。制定锻粗工序的要点是:

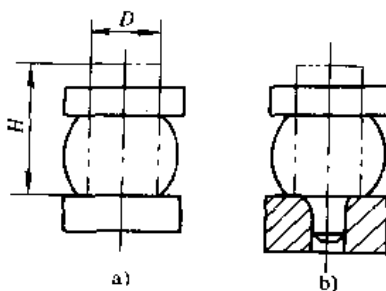


图 3-4-1 锻粗

a) 平砧或平板间锻粗 b) 带钳把锻粗

(1) 合金钢锭和大于 $8\sim 15t$ 的碳素钢锭锻粗前最好倒棱;

(2) 锻粗前坯料加热到高温后应保温,使温度均匀;

(3) 坯料的相对高度(高径比 H/D) 应小于 3, 最好 $2.0\sim 2.5$;

(4) 钢锭锻粗锻比 $\geq 2\sim 2.25$; 以成形为主的锻件,坯料锻粗锻比 ≥ 1.5 ;

(5) 液压机上锻粗时,坯料立起放入漏盘中,搁上锻粗板,其总高度应小于走料台到活动横梁的最大距离。锤上锻粗时,坯料高度应小于锤头全行程的 0.75。

2. 拔长 减小坯料截面增加长度的工序称为拔长(图3-4-2)。l 为送进量, l/H (或 l/D) 称为相对送进量。对于平砧拔长矩形截面毛坯,当满砧送进时,送进量 l 与砧子宽度 W 相等,则砧宽比 W/H 等于相对送进量 l/H 。毛坯宽度为 B , B/H 称为料宽比。平砧拔长只有砧宽比 W/H 这个工艺参数来控制大锻件的内部质量是不完善的,而应增加工艺参数料宽比 B/H , 才能正确描述拔长体内部的应力状态与有效控制其内部的质量。制定拔长工艺的要点是:

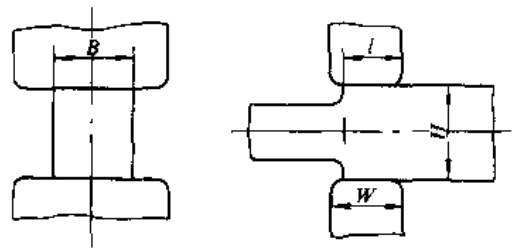


图 3-4-2 拔长

(1) 锻造塑性较差的钢锭时,倒棱应在尽可能高的温度下进行,采取预压钳把、倒棱,然后精压钳把的操作,以防止出现裂纹。

(2) 为使锻件表面光滑, l 一般小于砧宽的 0.75;

(3) 为防止端部凹心,端部压料长度应大于或等于坯料直径或边长的 0.4;

(4) 在液压机上拔长时,为有效锻合内部缺陷和防止内部缺陷重新萌生,应在高温下采用 20% 的压下量(双面)进行拔长;



(5) 对于重要锻件,为了锻透与拔长体中心形成轴向压应力, l/H (或 W/H) $\geq 0.8 \sim 0.9$ (宽砧锻造),对于一般锻件,为提高效率,允许降低到0.4;

(6) 台阶分段压痕或切肩(切槽)时产生拉缩(拉引),必须留出一定的保险量,以便修正。

3. 冲孔 在坯料中冲出透孔或不透孔的工序称为冲孔(图3-4-3)。制定冲孔工序的要点是:

(1) 冲孔后不再拔长时,冲孔前锻粗高度 H_1 (图3-4-4)应满足以下条件:

当 $D/d \geq 5$ 时, $H = H_1$,

当 $D/d < 5$ 时, $H_1 = (1.1 \sim 1.2)H$;

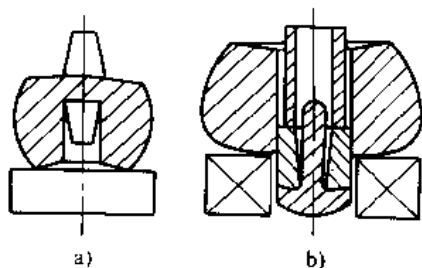


图 3-4-3 冲孔

a) 实心冲子冲孔 b) 空心冲子冲孔

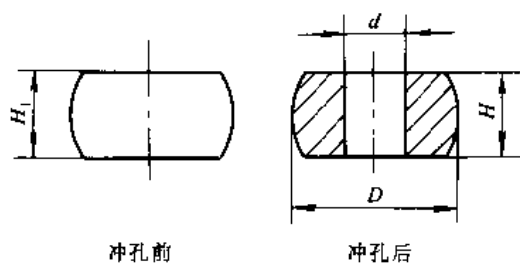


图 3-4-4 冲孔前后尺寸

(2) 坯料直径小于2.5~3倍冲子直径时,冲孔较困难,冲孔前应预先锻粗使之增大到2.5~3倍冲子直径;

(3) 钢锭制坯冲孔时,质量较差端朝下。

4. 扩孔 减小空心坯料壁厚,增大内、外径的工序称为扩孔。有冲子扩孔和马杠扩孔两种,前者扩孔量小。制定马杠扩孔工序的要点是:

(1) 扩孔前坯料尺寸(图3-4-5)应满足

$$\frac{D_0 - d_1}{H_0} \leq 5$$

$$d_0 = d_1 + (20 \sim 50)\text{mm}$$

$$H_0 = H + \mu(d - d_0)$$

式中 μ 系数。用新平砧 $\mu = 0.06$,用旧平砧 $\mu =$

0.1,用扩孔窄砧 $\mu = 0.02 \sim 0.03$;

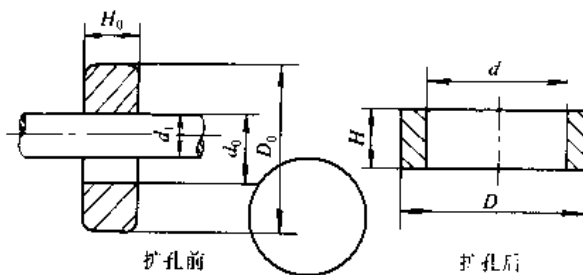


图 3-4-5 扩孔前、后尺寸

(2) 预扩孔根据回转变锻粗台的直径选择;

(3) 大环扩孔时要考虑冷缩,一般钢环直径冷缩率取1.0%~1.7%;0Cr18Ni9Ti,0Cr18Ni10Ti大环取2.0%。

5. 芯轴拔长 减小空心坯料壁厚增加长度的工序称为芯轴拔长。在上平、下V型砧或上、下V型砧中进行,用于锻造长筒形锻件(图3-4-6)。

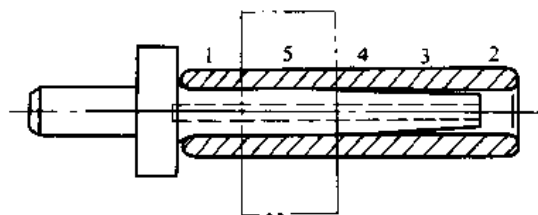


图 3-4-6 芯轴拔长的锻造过程

1~5 拔长时锻压的顺序

6. 错移 将坯料一部分轴线对另一部分轴线平行移动的工序称为错移(图3-4-7),主要用于曲轴锻件锻造。

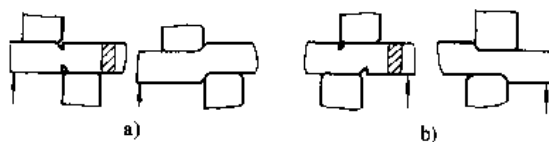


图 3-4-7 错移

a) 在一个平面内错移 b) 在两个平面内错移

7. 扭转 将坯料的一部分相对于另一部分绕公共轴线旋转一定角度的工序称为扭转。用夹叉扭转(图3-4-8)可得到曲柄位于不同平面内的曲轴锻件,这时整个坯料首先在一个平面内锻造成形,然后扭转。

212



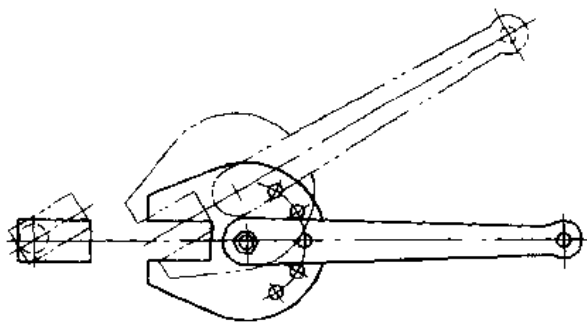


图 3-4-3 叉头扭转

8. 切割 将坯料分离(剁料)或部分分离(劈料)的工序称为切割,用于下料和切除料头等。切割长轴类锻件时要考虑冷缩现象。

9. 弯曲 改变坯料轴线形状的工序称为弯曲,用于锻造单钩吊钩等锻件。弯曲计算中,截面拉缩保险量一般加大 10%~15%。

1.2.2 锻比(锻造比)

锻比是变形程度的表示方法之一,是反映锻件质量的一个重要指标。计算方法见表 3-4-1。

表 3-4-1 锻比的计算

序号	工 序	简 图	总 锻 比
1	钢锭拔长		$B_1 = \frac{D_1^2}{D_2^2}$
2	坯料拔长		$B_2 = \frac{D_2^2}{D_3^2}$ 或 $B_2 = \frac{l_3}{l_2}$
3	两次拔长	与序号 1,2 同	$B = B_1 \cdot B_2 = \frac{D_1^2}{D_2^2} \cdot \frac{D_2^2}{D_3^2} = \frac{D_1^2}{D_3^2}$
4	两次墩粗拔长		$B = B_1 + B_2 = \frac{D_1^2}{D_2^2} + \frac{D_2^2}{D_3^2}$ 或 $B = \frac{l_2}{l_1} + \frac{l_3}{l_2}$
5	芯轴拔长		$B = \frac{D_0^2 - d_0^2}{D_1^2 - d_1^2}$ 或 $B = \frac{l_1}{l_0}$
6	扩 孔		$B = \frac{F_0}{F_1} \approx \frac{D_0 - d_0}{D_1 - d_1}$ 或 $B = \frac{l_0}{l_1}$



(续)

序号	工 序	简 图	总 锻 比
7	墩 粗		$\text{轮毂 } B = \frac{H_0}{H_1} \quad \text{轮缘 } B = \frac{t_0}{t_1}$

注：1. 钢锭倒棱不计算在总锻比数值内。

2. 两次墩粗拔长和两次墩粗中间有拔长工序时，总锻比等于各次分锻比之和。

3. 连续墩粗或连续拔长时，总锻比等于分锻比的乘积。

1.3 自由锻工艺特点

锤和液压机的锻造能力范围见表3·4-2和表3·4-3。

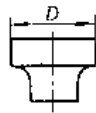
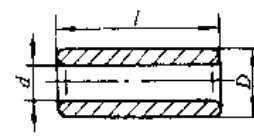
1.3.1 锻件

表 3·4-2 锻锤锻造能力范围

锻锤吨位 10kN		5	3	1	0.75	0.40	0.15
锻件特征		最大能力 尺寸 (mm)					
	<i>D</i>	350	280	180	150	80	40
	<i>m</i>	1500	800	250	80	30	6
	<i>D</i>	750	550	380	300	200	150
	<i>m</i>	700	400	100	50	20	5
	<i>D</i>	1000	650	400	300	200	150
	<i>H</i>	280	200	150	80	60	40
	<i>B</i>	500	450	250	180	130	70
	$H \geq$	70	50	30	20	10	7
	<i>m</i>	750	400	150	40	18	4
	<i>A</i>	400	300	200	160	110	80
	<i>m</i>	500	210	65	32	10	4

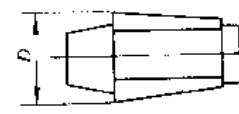
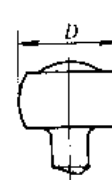
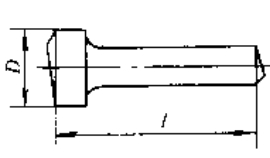
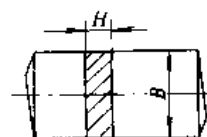


(续)

锻锤吨位 10kN		5	3	1	0.75	0.40	0.15
锻件特征		最大能力 尺寸 (mm)					
	D	550	50	350	220	140	60
	m ①	350	250	80	40	15	4
	D	450	330	220	150	120	
	d	140~250	100~150	80~120	60~100	50~80	
	l	700	500	350	250	200	
参考数据	最大行程 (mm)	1500	1450	1000	835	700	410
	砧面尺寸 (mm)	710×400	600×330	410×230	345×130	265×100	200×58
	生产能力 (kg/h)	500	400	140	100	60	15

① m —锻件质量 (kg)。

表 3-4-3 液压机锻造能力范围

水压机吨位 (10kN)		800	1250	2500	3150	6000	12000	备注
锻件特征		最大能力 尺寸 (mm)						
	D	740	900	1360	1450	2000	3000	
	m_1 ①	7	12	45	50	130	300	主要取决于起重设备
	D	800	1100	1600	1800	2600	3200	
	m_1 ①	2.5	6	24	30	60~90	150~230	矮胖锭质量可适当增加
	$D \times l$	$\phi 500 \times 4500$	$\phi 750 \times 14000$	$\phi 1000 \times 16000$	$\phi 1350 \times 18000$	$\phi 1900 \times 20000$	$\phi 2500 \times 26000$	长度取决于辅助设备
	m_2 ②	4	7	25	30	80	150	
	$H \geq$	100	125	140	150	200	400	
	B	800	1000	1400	1500	2200	3700	



(续)

水压机吨位 (10kN)		800	1250	2500	3150	6000	12000	备注
锻件特征		最大能力 尺寸 (mm)						
	l	2500	4000	6500	10000	16000	18000	
	m ②	1.5	3.5	14	20	40	130	
	D	1000	1200	1800	2000	2500	3500 ~ 5000	
	$H \geq$	80 ~ 160	160 ~ 120	100 ~ 150	130 ~ 150	180 ~ 200	250 ~ 300	
	D	1200	1600	2200	2600	3800	5000 ~ 6000	
参 考 数 据	活动横梁最大行程 (mm)	1000	1250	1800	2000	2580	3000	
	活动横梁底面与工作台面最大距离 (mm)	2000	2680	3400	3800	6110	7000	
	立柱护套间净距 (mm)	1400 × 540	1800 × 600	2710 × 910	2900 × 1400	4100 × 1200	5000 × 2150	
	工作台面尺寸 (mm)	1200 × 2000	1500 × 3000	2000 × 5000	2600 × 6000	3400 × 9000	4000 × 10000	
	砧面尺寸 (mm)	850 × 240	1050 × 300	1400 × 450	1500 × 500	2300 × 600	3500 × 850	选用宽砧锻造砧宽增加

① m_1 - 钢锭质量 (t);

② m - 锻件质量 (t)。

1.3.2 原材料

液压机上自由锻所用原材料,基本上都是锭料,大型液压机用原材料全是钢锭。钢锭或锭料内部是铸造组织,且具有疏松孔隙和不同程度的夹杂。通过锻造,如何均匀地打碎铸造组织及有效地锻合孔隙;在什么条件下使夹杂处不出现夹杂性裂纹,这是液压机锻造要解决的主要问题。

锤上自由锻所用的原材料大都是锻坯或轧坯(轧材),已经大塑性变形,内部组织已得到改善。因此,锤上自由锻的主要任务是以成形为上。

1.3.3 变形速率

液压机上自由锻,砧子作用给变形体是一种静载荷,变形速率低;锤上自由锻,砧子作用给变形体的是一种冲击动载荷,变形速率高。变形速率的很大差别,引起变形体内部的应变、应力状态不同。结果,对锻件质量的影响也不同。

在相同高径比、相同材料、相同物理模拟试样、相同锻造温度、相同端部摩擦系数的条件下,在普通平板间进行锻粗,变形 30%,空冷,在液压机上锻粗的中心部位裂纹(图 3-4-9a),比在锤上锻粗的(图 3-4-9b)



要大得多。

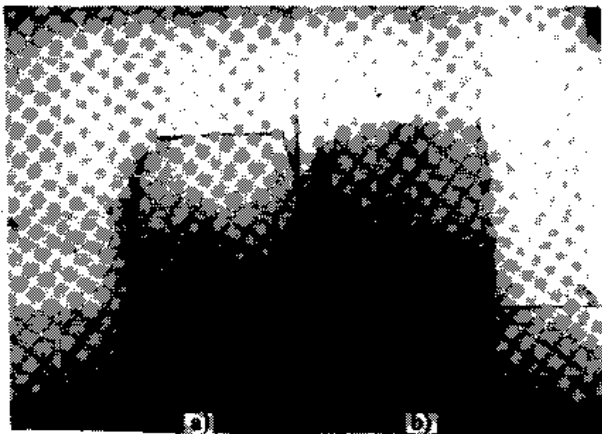


图 3-4-9 变形速率对锻粗体内部质量的影响
a) 液压机上锻粗 b) 锤上锻粗

2 大型锻件用钢锭的冶炼与浇注

2.1 大型锻件用钢锭的冶炼¹⁾

钢锭中的主要有害元素是硫(S)、磷(P)、氢(H),还有有害稀有元素砷(As)、锑(Sb)、锡(Sn)等。所以冶炼工艺的主要任务是保证钢液的化学成份符合钢种的要求,提高钢液纯净度或最大限度地减少硫、磷、非金属夹杂物及气体的含量。

大型锻件用的钢锭,在我国主要靠碱性平炉和电炉冶炼、钢包炉精炼、电渣重熔。

2.1.1 碱性平炉冶炼

碱性平炉是用碱性炉渣炼钢。碱性炉渣可排除大量的S、P有害元素。氢在碱性炉渣中的溶解度和扩散能力较大,因此碱性平炉钢液中氢的质量分数高达 $(6\sim 8)\times 10^{-4}\%$ 。钢中非金属夹杂物主要是氧化物和硫化物。

按照大型锻件的质量要求,碱性平炉炼钢,可将钢中的P、S的质量分数控制到0.01%以下,碱性平炉生产低P、S优质钢水,采用真空碳脱氧工艺浇注钢锭,对充分利用现有设备生产更多优质合金钢大型锻件是一种好方法,引入精炼炉冶炼,在钢的质量和吨位上又上一个等级。

碱性平炉冶炼提供粗炼钢水。平炉冶炼的重点是去磷和防止回磷,可通过选择炉料来控制As、Sn、Sb、Cu的带入量,其炉料由废钢和生铁组成。

平炉的去磷和防止回磷可采取如下措施:

(1)利用平炉熔渣与钢水接触面积大的有利条件,

造高碱度、高氧化铁炉渣;并利用熔化后期钢水温度较低这一脱磷的热力学有利条件,提前造渣,多放初期渣与开炉期氧化渣,从而使钢中磷脱除后进入渣中,通过反复放渣将其排除炉外。钢中磷的质量分数在出钢前可控制在 $\leq 0.005\%$ 。

(2)为了减少回磷,炉内和出钢过程不进行预脱氧和终脱氧,采用倒包法进行钢渣分离,避免平炉熔渣进入钢包炉。其原理是由于元素脱氧能力越强,对破坏高(FeO)炉渣的能力越大,造成从炉渣中将 P_2O_5 还原成P而进入钢中的数量也越多。钢水不脱氧,在强氧化性炉渣条件下出钢,在出钢过程加入适量的石灰提高碱度,可保持高FeO、高碱度条件。出钢过程,钢水与炉渣激烈作用,能有效地防止磷的回升。

2.1.2 碱性电炉冶炼

碱性电炉冶炼与碱性平炉冶炼相似,区别在于前者靠高温电弧熔炼。碱性电炉冶炼的周期短,且不受炉气污染的影响,再经还原气氛处理,钢液中的非金属夹杂得到进一步的排除,S、P的质量分数可降低到 $\leq 0.01\%$ 。但碱性电炉钢液中氢的质量分数仍较高,一般为 $(5\sim 7)\times 10^{-4}\%$ 。

碱性电炉冶炼电站锻件用钢,提供粗炼钢水,粗炼钢水的主要任务是去磷,控制有害微量元素As、Sn、Sb和残余Cu的含量,提高钢水温度。

电炉冶炼粗炼钢水采用全废钢。为了创造良好的脱磷条件,在炉料中加入质量分数为5%的石灰和3%的氧化铁皮。脱磷过程在熔化后期和氧化期进行,脱磷的重点放在熔化后期,这时钢水温度低,炉渣中氧化铁含量高、碱度高,加上吹氧,不但保持了高FeO,而且增加了钢水与炉渣之间的作用面积。熔化期完毕后除去氧化渣,并重新造渣。上述工艺可有效地去除钢中的磷,使 $w_{\text{P}} \leq 0.005\%$ 。然后通过氧化期吹氧脱碳,补加造渣剂,继续脱磷并提高钢液温度。再次扒除氧化渣,将炉渣中的 P_2O_5 清除掉。之后造适合于钢包精炼的炉渣,并将此炉渣兑入钢包炉。

2.1.3 钢包炉精炼

钢包炉冶炼的主要任务是脱氧、脱硫、去除非金属夹杂物、脱氢、钢液成分调整和升温。

钢包炉采用吹氩搅拌或者电磁搅拌,均匀钢液的

^① w_{P} 为P的质量分数。



温度和成分，排出金属夹杂物。

钢包炉的精炼渣来源于电炉粗炼钢水的热熔渣和固体精炼渣料，其渣系为 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ ，并含有一定量的 Al_2O_3 和 Mg 组元。这种精炼渣熔点低，对 SiO_2 、 MnO 、 Al_2O_3 、 MgO 及钙铝酸盐等夹杂物吸收率高，且渣的硫容量大，对脱硫有利。

脱硫和脱氧是在还原条件和氩气不断搅拌或者电磁搅拌下进行的。通过向钢包炉加入脱氧剂，提高熔渣的还原性，从而不断将钢液中的硫变成 CaS 而进入渣中，脱氧和脱硫的过程存在于下列反应之中：

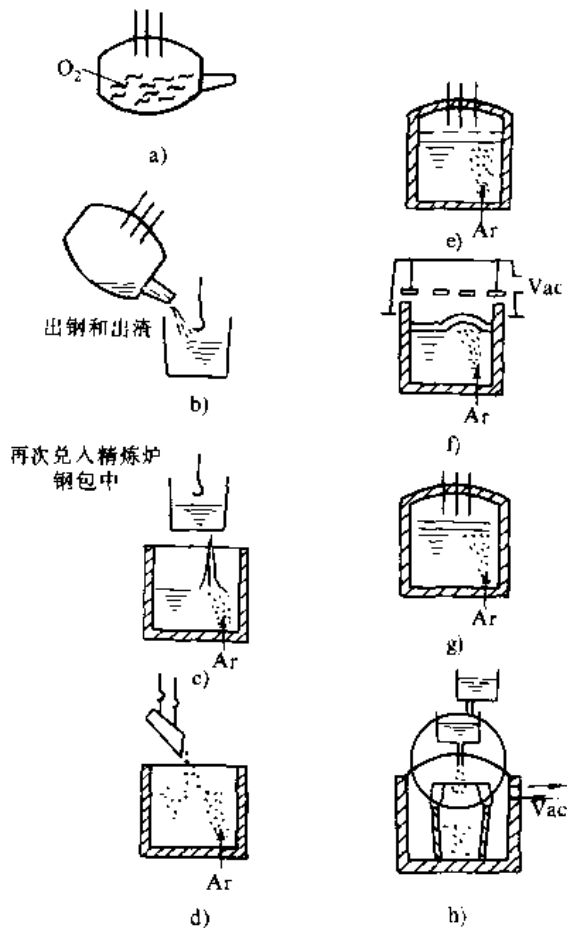
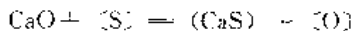
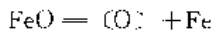


图 3-4-10 典型的纯净钢炼钢工艺

- a) 碱性电弧炉熔炼，氧化精炼，脱碳，脱磷，去锰
- b) 出钢水和氧化渣 c) 完全去除氧化渣以防回磷回锰 d) 加入生石灰和铁合金 e) 加热和调整还原渣 f) 抽真空，脱硫 g) 调整化学成分和温度 h) 浇注

真空处理通过减压和提高氩气搅拌强度，提高熔渣的搅拌能，增强液-渣、液-气、渣-气不同物相之间

的传质作用；同时在减压条件下，促使氧化物分解，气体从钢液排出，促使碳、氧反应并生成一氧化碳排出，达到在真空条件下用碳去除氧的目的。碳、氧反应的过程产生大量的一氧化碳气体，在高氩气的搅拌作用下，加速了进一步脱氧、脱硫和脱除氢、氮的作用。其作用的效果以脱氧脱硫最为明显，脱氢次之，脱氮再其次。真空脱气的真空度控制 $\leq 4000\text{Pa}$ ，处理的时间约 10~20min，充分净化钢液，提高钢水纯净度。

图 3-4-10 为典型的纯净钢炼钢工艺。

2.1.4 电渣重熔

电渣重熔使用的装置如图 3-4-11 所示。熔炼时，按钢种要求先用小钢锭或钢坯制成金属电极，然后将电极伸入水冷结晶器内通电熔化。熔化钢液穿过电渣层流入金属熔池里，随着金属电极的不断熔化，纯净钢液在结晶器内自下而上地凝固成钢锭。

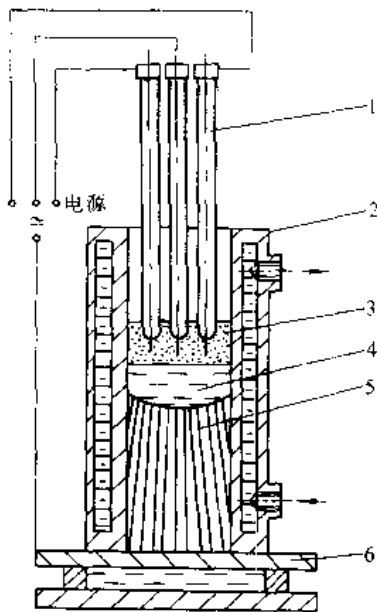


图 3-4-11 电渣重熔示意图

- 1—金属电极 2—水冷结晶器 3—渣层
- 4—金属熔池 5—钢锭 6—水冷底板

电渣重熔把熔炼和铸锭两道工序合二为一。不仅从内部创造了精炼净化金属的良好条件，而且从外部杜绝了外来夹杂物的来源。尤其是具有在强制冷却条件下进行可控定向凝固的特点，因此，电渣重熔能有效地解决钢锭的冶金质量问题。在合适的工艺制度下，可以获得表面光滑、内部纯净、致密，成分和组织均匀性都很高的优质钢锭。

目前，我国已成功地生产出 200t 以上电渣锭。其成分均匀性很高，钢中氢的质量分数在 $2 \times 10^{-4}\%$ 以



下, 铝的质量分数 0.008%, 氧的质量分数 $< 30 \times 10^{-4}\%$, 硫的质量分数 $\leq 20 \times 10^{-4}\%$ 。

2.2 大型锻件用钢锭的浇注

锻造用钢锭基本上是镇静钢锭, 很少采用沸腾钢锭, 因为后者内部气泡、空穴多, 靠锻造难以焊合或消除内部全部缺陷。

钢锭由冒口、锭身和锭尾组成。目前锻造用大型钢锭有三种规格: 第一种是普通锻件用的 4% 锥度、高径比^①为 1.8~2.3、冒口比例为 17% 的钢锭; 第二种是优质锻件用的 11%~12% 锥度、高径比为 1.5 左右、冒口比例为 20%~24% 的钢锭; 第三种是高优质锻件用的锥度 8% 左右、高径比为 1.2 左右、冒口比例为 17%~24%、多棱的钢锭。精炼钢液浇注的钢锭, 冒口 $\leq 20\%$ 。

锭身呈多角形的钢锭, 凝固均匀。钢锭愈大, 锭身棱数愈多。大型钢锭有八棱形、十二棱形和二十四棱形等。锭身锥度增大, 有利于钢液中的夹杂和气体上浮, 有利于凝固补缩和减少偏析程度。

钢锭高径比对轴向凝固速度和偏析的不均匀程度都有影响。目前, 钢锭高径比趋向于减小到 1.1 左右。

钢锭冒口可以补充锭身的收缩, 容纳上浮的夹杂和气体, 纯净锭身质量。因此, 冒口应占钢锭的一定比例。使用发热剂发热冒口, 可使锭身在凝固过程中得到充分补缩; 夹杂容易上浮, 减少偏析、疏松, 缩孔上移, 减小了冒口所占钢锭的比例。

大型锻件用钢锭的浇注工艺可分成大气浇注、真空浇注和多炉合浇。

2.2.1 大气浇注

浇注是铸锭的重要环节。从钢液流入盛钢桶内静置开始, 经过浇注使钢液在锭模内凝固成钢锭, 直到最后脱模这一过程, 称为铸锭。

大气浇注铸锭过程有下列变化:

- (1) 钢液与空气接触, 产生二次氧化, 同时增氢;
- (2) 钢液与耐火材料接触, 是产生外来夹杂的来源;
- (3) 钢液在锭模中结晶, 并产生固态组织转变;
- (4) 钢锭冷却收缩。

这些现象对钢锭质量都有不同程度的不良影响。

经真空循环除气 (RH) 的钢液, 进行大气浇注, 钢液的含氢量降低, 但大气浇注的弊病仍是不可避免。

2.2.2 真空浇注

真空浇注是将钢锭模置于真空室内, 在进行浇注

的过程中抽气。

真空铸锭是优质大型钢锭, 特别是电站转子及重要轧辊锻件所用钢锭的重要手段之一。脱气效果显著, 能净化金属, 提高内部质量, 改善力学性能, 防止白点。

真空浇注最大效果之一, 是减少了氢含量。这就减少了大型锻件由于氢所引起的缺陷, 如裂纹等的危险性。并为大型锻件锻后热处理大幅度减少时间, 缩短生产周期, 节约能源。

其次, 真空浇注可以防止钢液二次氧化。同时还可实现真空碳脱氧浇注。

真空碳脱氧工艺, 即钢液 ($w_{Si} \leq 0.05\%$)^②不用硅、铝脱氧, 而是在真空条件下, 依靠钢液中的碳脱去氧的一种工艺。该工艺优点是因钢液没用强脱氧剂脱氧, 因而避免了固态脱氧产物残留钢中。在真空碳脱氧过程中生成的脱氧产物仅仅是一氧化碳气体, 可随真空管道抽走。

2.2.3 多炉合浇

为了减少大型钢锭在凝固过程中所形成的 A 形偏析和区域偏析, 并改善钢中夹杂物的上浮条件, 按照多炉出钢顺序及钢水量的不同, 采用多炉合浇工艺 (即 AP 工艺), 适当控制不同炉次的碳及其他元素成分和出钢温度, 可获得理想效果。

2.3 大型钢锭内部缺陷对锻件质量的影响^{[10][11]}

2.3.1 大型钢锭的内部结构

钢锭内部组织结构, 取决于浇注时钢液在锭模内的结晶条件, 即结晶热力学与动力学条件。钢液在钢锭模内由模壁向锭心和底部向冒口逐渐冷凝选择结晶, 从而造成钢锭的结晶组织、化学成分及致密程度不均。且随钢锭尺寸增大, 这种不均匀程度越为严重。图 3-4-12 示意了典型镇静大型钢锭的纵向剖面宏观组织形貌。

1. 细晶粒层 (激冷层) 由于钢液接触模壁冷凝速度快, 产生大量晶核, 因而表面首先凝固成细小的等轴晶粒层 (或称激冷层)。

这一层晶粒中没有偏析, 看其浇注条件, 会有夹杂物的混入和气孔的产生。实际上这部分是烧损和削去

① 为钢锭锭身高径比。

② w_{Si} 为 Si 的质量分数。



层,形成危害的可能性少。

2. 柱状晶区 表面细晶粒层形成后,锭模温度上升,形成气隙,散热速度减慢,晶粒开始沿着与模壁垂直稍微向上的方向发展,形成柱状晶区。由于分选结晶的缘故,易熔成分挤向中心,所以柱状晶区的夹杂及其他缺陷较少。

3. 倾斜树枝晶区 随着柱状晶区的不断发展,锭模温度继续上升,气隙扩大,散热速度愈加减慢,加以杂质和气体上浮的运动作用,于是形成晶轴偏离柱状晶体方向的倾斜树枝晶区,且 Δ 形偏析也在这一区间形成。

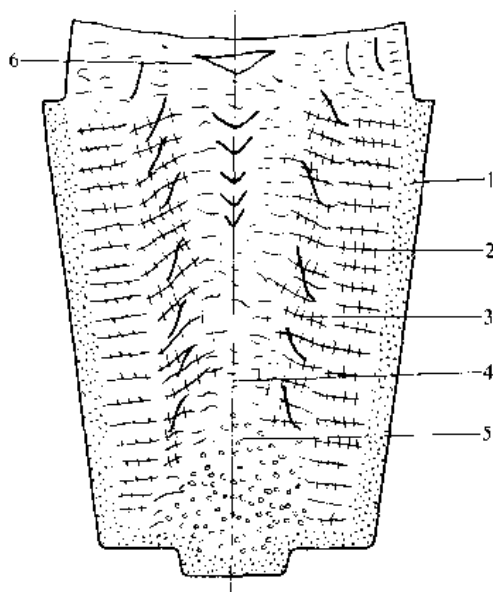


图 3-4-12 镇静钢锭纵向剖面宏观组织

1—细晶粒层(激冷层) 2—柱状晶区 3—倾斜树枝晶区
4—粗大等轴晶区 5—沉积锥 6—冒口区

4. 粗大等轴晶区 倾斜树枝晶区长大到一定阶段后,气隙的完成,散热速度更加减慢,中心区域的钢液达到同一过冷度而同时凝固,最终形成粗大等轴晶区。在这一区域的上部出现V形偏析,下部出现负偏析,夹杂与疏松等缺陷较多。因此,钢锭中心处组织较差。

5. 沉积锥 底部钢液凝固快,形成较厚的细晶粒层,此外,由于上部钢液中最初形成的晶体因比重大而下沉,并将碰断树枝状晶分枝一起向下堆积。该区沉积有大量堆积状硅酸盐夹杂物。等轴晶形成后,下沉时一些高熔点夹杂物同时被带入钢锭底部,堆积而成锥状。在化学成分上构成负偏析区。

6. 冒口区 最后凝固的冒口区杂质最多,特别是低熔点物聚集。在最后凝固过程中钢液得不到补缩,最

终形成大缩孔,其周围并存在大量疏松。

钢锭底部和冒口分别占碳素钢锭质量的5%~7%和18%~25%。对于合金钢,切除的冒口应占25%~30%,底部占8%~20%或更多。

2-3-2 大型钢锭的内部缺陷及防止对策

大型钢锭的内部缺陷有偏析、夹杂物、气体、缩孔和疏松等。这些缺陷的形成与冶炼、浇注和结晶过程密切相关,有些是不可避免,但程度可控制。这些缺陷,往往是造成大型锻件报废的主要原因。为此,应当了解钢锭内部缺陷的性质、特征和分布规律,以便在锻造时选择合适的钢锭,制订合理的锻造工艺,并在锻造过程中消除内部缺陷和改善锻件的内部品质。

1. 偏析 钢锭内部化学成分和杂质分布的不均匀性称为偏析。高于钢锭平均化学成分的叫作正偏析,低于钢锭平均化学成分则叫作负偏析。大型锻件的偏析与钢锭的偏析密切相关。

钢锭的偏析程度与锭型、钢种、冶炼质量及浇注条件有关。合金元素、杂质元素及气体的含量均加重偏析,浇注温度越高,浇注速度越快,冷却速度越慢,偏析程度越严重。显然,钢锭越大,偏析程度也越严重。

偏析可分为显微偏析和宏观偏析两大类。钢锭偏析在大型锻件缺陷中引起常见的宏观偏析,按形貌可分为:锭型偏析、点状偏析、波纹状偏析、斑块状偏析四种。

a. 锭型偏析 锭型偏析是一种区域性偏析,在横向低倍酸浸试片上因偏析区呈现和锭型轮廓相对应的方框形或框形特征而得名。钢锭中V形偏析, Δ 形偏析以及负偏析区都是形成锭型偏析原因。

防止锭型偏析的一般对策是:

(1) 采用真空碳脱氧技术和底吹氩工艺;

(2) 选择适当的钢锭模设计参数,适当减小钢锭锭身高度比 H/D ,增大锥度,增强冒口保温能力;

(3) 严格控制浇注温度和浇注速度。

b. 点状偏析 钢液在凝固过程中由于选择结晶,结晶前沿钢液为C、S、P等元素所富集,而随着温度降低,气体在钢中的溶解度下降,在结晶前沿析出形成气泡,随气泡上浮逸出,使富集杂质的钢液沿气泡上浮的轨迹形成条状或须状偏析,在横向低倍酸浸试片上呈分散的深色斑点,称之为点状偏析。

根据斑点分布的位置可将点状偏析分为:一般点状偏析和边缘点状偏析两种。

一般点状偏析的宏观形貌,偏析斑点分散分布在



整个截面上;边缘点状偏析,则偏析斑点集中分布在截面的边缘次表面区。

偏析斑点中C和S的含量都远超出钢液的平均含量,硫化物夹杂级别也高于正常区。

点状偏析降低钢的切向力学性能,偏析越严重钢的切向韧性越低。

防止点状偏析的一般对策是:

(1) 采用真空碳脱氧技术(VCD),以最大限度地去除钢中气体;

(2) 严格控制冶炼工艺,最大限度地脱硫;

(3) 选择适当的浇注温度和浇注速度。

c. 电渣重熔钢锭中的波纹状偏析 电渣重熔钢锭在熔炼过程中,如电流和电压不稳,则会形成波纹状偏析。当电流、电压突然增高时,钢液过热,结晶速度减慢,钢液中的溶质元素的结晶前沿偏聚,形成富集带;当电流、电压减小时,溶质元素的偏聚程度减小。电流、电压的这种周期性变化,导致偏析的周期性变化。在横向低倍试片上,即出现明暗相间的波纹状偏析条带。

防止波纹状偏析的对策是:稳定电渣重熔时的电流、电压,适当提高重熔温度,控制适宜的熔渣厚度。

d. 电渣重熔钢锭中的斑块状偏析 斑块状偏析是电渣重熔钢锭上部特有的区域性偏析。形成的原因与熔炼工艺控制不当,熔炼后期钢液局部增碳有关。

斑块状偏析的宏观形貌,呈暗黑色不规则斑块状特征。由于斑块状偏析区富集大量的碳,所以显微组织与基体有明显差别。

防止斑块状偏析的一般对策是:正确控制重熔工艺,防止局部增碳。发现这类偏析后应予切除。

2. 夹杂物 钢中的夹杂物可分为异金属夹杂物和非金属夹杂物两类。非金属夹杂物按其来源又可分为内生夹杂物和外来夹杂物两种。

内生夹杂物是钢液在冷凝过程中因平衡度的变化而析出的第二相,最常见的有硫化物、氧化物、氮化物、硅酸盐等。它在钢中的数量与组成与钢的成分、冶炼质量、浇注过程以及脱氧方法有关。

内生夹杂物如果熔点较高,先于基体金属凝固,可以不受阻碍地成长,常呈现出有规则状的带棱角的几何外形;在金属凝固以后生成的夹杂物由于受已凝固金属的限制,形态多为球或条状、枝晶状,沿晶界分布。钢锭经锻造变形后,脆性夹杂物易破碎成更小的颗粒,一般呈链状沿变形方向分布;塑性良好的夹杂物则沿变形方向延伸,呈条带状。

内生夹杂物尺寸小且分散分布,为微观缺陷;但如密集成堆、长度在毫米以上,即构成宏观缺陷,暴露在锻件加工面上为发纹,暴露在断口上即构成断口缺陷。

外来夹杂物是指混入钢中的炉渣、保护渣、氧化膜、耐火材料以及钢液或渣液与耐火材料的反应物。通常,外来夹杂物较粗大,多出现在钢锭底部。

异金属夹杂物是进入钢中的与基体金属截然不同的金属块,形状不规则,但边缘比较清晰。

降低钢中夹杂物的一般对策是:

(1) 采用真空碳脱氧,钢包精炼等工艺;

(2) 注意浇注系统清洁工作,防止外来夹杂物和异金属进入钢液;

(3) 炉后合金化,注意铁合金的预热;

(4) 使用发热剂发热冒口。

3. 气体 在冶炼过程中氢、氧、氮等气体通过炉料和炉气溶入钢液。钢液凝固时,这些气体虽然析出一部分,但在固态钢锭内仍有残留。氮和氧在钢锭中以氧化物和氮化物出现,氢则以原子状态存在,也可能形成一部分分子状态氢和氢化物。氢是钢锭中危害最大的气体,如果氢的质量分数超过一定极限值〔一般为 $(2\sim 5)\times 10^{-4}\%$ 〕,则锻后冷却过程在锻件内部会产生白点缺陷。常见于马氏体、珠光体钢中,合金的质量分数大于3.5%的镍铬钢或镍铬钨钢最易出现,而奥氏体、铁素体和莱氏体钢不形成白点。

氢在钢中的分布是不均匀的,其特点是,在一般钢锭中,上部氢含量比底部高,心部氢含量比表层高;在夹杂集中的区域,缩孔和疏松甚至晶界上,氢含量都比较高。

防止白点的一般对策是:

(1) 注意炉料烘烤,冶炼时充分沸腾,采用真空除气技术,降低钢中的氢含量;

(2) 锻后及时装炉退火;

(3) 根据钢种和钢中氢含量以及锻件的大小等情况,确定合理的去氢退火规范。

此外,有些气体未能排出钢锭外,又不能溶解,以气泡的形式存在于钢锭内,或填充于缩孔和疏松中。

防止气泡产生的一般对策是:

(1) 加强炉料的烘烤,保证钢包与整个浇注系统干燥,使用前应充分烘烤;

(2) 冶炼时应充分脱气,并采用保护浇注等工艺。

4. 缩孔和疏松 钢液在凝固过程中由于体积收缩而在钢锭最后凝固区形成的管状或分散的孔洞,称为缩孔。钢锭开坯时未将缩孔切尽而留在锻件中的残



留部分叫做缩孔残余。

缩孔是在冒口区形成的。缩孔的大小、位置和锭模结构及浇注工艺有关。如果锭模不适当,冒口保温不佳,有可能深入到锭身形成二次缩孔(即缩管)。一般情况下,锻造时将缩孔随冒口一并切除,否则因缩孔残余,而导致锻件报废。

缩孔残余在锻件横向酸浸试片上为孔洞状缺陷,孔洞外缘呈枝叉状;纵向酸浸试片上则表现为不连续管状缺陷。缩孔残余破坏金属的连续性,属于不允许缺陷。它在锻件中存在与否取决于钢锭开坯的切头率,

防止缩孔残余的一般对策是:

- (1) 严格控制浇注温度和浇注速度;
- (2) 采用良好的发热覆盖剂或保温冒口,将缩孔控制在冒口区;
- (3) 控制锻造时钢锭冒口端的切头率;
- (4) 应用发热剂发热冒口。

疏松是由于晶间钢液最后凝固收缩造成的晶间空隙和钢锭凝固过程析出气体构成的显微孔隙。这些孔隙在区域偏析处较大者为疏松。

大型钢锭锻造时,如果锻比不足;变形方案不佳;或相对送进量过小;加热温度不足,无法形成高塑性和三向压应力两个基本条件时,钢锭中的疏松因未能锻合而保留在锻件内部,形成疏松缺陷。

减轻疏松的一般对策是:

- (1) 采用硬壳锻造,高温宽砧锻造等中心压实的方法;
- (2) 对拔长变形的轴类锻件,可采用上、下V型砧;
- (3) 加大锻比,使锻比大于3。

3 液压机上自由锻

锻造的目的不仅是成形和得到所需的尺寸,而且还要求打碎铸态粗大晶粒,使内部孔隙锻合,以得到致密的内部组织。加热使钢的变形抗力降低,热塑性提高,为锻造创造必要的条件。但加热温度过高,会引起过烧,锻时发生龟裂;而无锻比加热时,温度应严格限制,以免晶粒粗大,给锻后热处理带来困难;冷锭加热要注意装炉温度和升温速度的控制。对合金钢和高碳钢尤其要注意,过高的装炉温度和过快的升温速度,都会引起过大的热应力,而使钢锭产生横裂。锻造是塑性变形过程,要根据变形要求,选择合理的变形方式。对心部性能有要求的轴类锻件,更要注意中心疏松的锻合。钢锭的粗大柱状晶热塑性很低,始锻时要轻压倒

棱,将粗大的树枝晶充分打碎,这对于开裂倾向大的钢锭是很必要的。拉应力是引起锻造开裂和形成内部裂纹的根源,对锻造过程中形成的拉应力要特别注意,低温强压和小进给大压下工艺是锻造中的禁忌。

3.1 大型锻件生产特点及其影响因素

3.1.1 大型锻件的生产特点

大型锻件生产的主要特点是:体形大,质量要求高,产品种类多,单件、小批生产,产品生产周期长。

1. 产品品种范围广 通常,用10MN及以上的自由锻液压机生产的锻件称为大型锻件。

大型锻件的主要品种是:

- (1) 轧钢机锻件,如冷、热轧辊等;
- (2) 锻压设备锻件,如液压机的立柱、缸体等;
- (3) 火电锻件,如发电机转子、护环,汽轮机转子、叶轮等;
- (4) 水电锻件,如水轮发电机的主轴、镜板等;
- (5) 核电站锻件,如压力壳,蒸发器筒体、管板等;
- (6) 石化压力容器锻件,如高压容器的筒体、法兰和封头等;
- (7) 船用锻件,如艉轴、中间轴和船舶发动机的曲轴等;
- (8) 水泥设备锻件,如齿圈等;
- (9) 矿井提升设备的锻件,如主轴等;
- (10) 特大型轴承用的内、外圈;
- (11) 模锻锤和压力机用的模块;
- (12) 军工锻件,如火炮炮管、核潜艇核容器的压力壳、喷式发动机的涡轮盘等;
- (13) 铁路车辆的各种车轴;
- (14) 大型交流和直流电机的主轴。

上述范围锻件,种类繁多,规格不一,各有特色。这就给生产技术准备和生产计划管理带来了较大的困难。

2. 单件、小批生产 重型机械,特别是大型轧钢与锻压设备,均系单机生产,大型锻件毛坯也是一次性单件生产。一个件一套工艺,有许多专用工装,再用的机会较少。

有些属于“工具”性的大型锻件,如冶金厂用冷、热轧辊,也是小批量生产。

大锻件生产时,需一次成功。这就要求生产前,充分做好技术准备工作,包括各种工艺验证与试验研究在内,费时费事,生产成本高。

7

三二



3. 技术准备工作繁杂, 产品生产周期长 单件或小批生产的大型锻件, 生产准备繁杂, 生产周期长。

(1) 冶金附具准备工作繁杂。如一根 600MW 发电机转子, 从冶炼和浇注的钢锭模, 起运吊具, 运输辅具, 锻造、热处理及粗加工用的大型辅具等, 其辅具总重, 生产工时, 生产周期和生产耗资大大超过基本件生产。

(2) 大锻件生产前需要进行的各种课题研究和工艺方案的制定与实施, 周期也较长。

(3) 由于大锻件体形大, 本身生产周期长。包括: 炉料准备、冶炼、铸锭、锻造、第一热处理、第二热处理、粗加工及其各种检测。

4. 产品要求质量高, 生产难度大 大型锻件, 普遍要求质量高, 技术条件苛刻。特别是电站锻件, 更是如此。它对钢的化学成分(包括气体含量)、力学性能(拉伸和冲击性能)、无损检验(超声波检查和磁粉检验)、金相检验(晶粒度、夹杂物)以及尺寸和光洁度, 都有极其严格的标准和要求。

大型锻件的生产从冶炼、注锭、锻造、锻后热处理到性能热处理, 要经过很多道工序, 每一道工序都影响锻件的质量, 稍有偏差就可能引起缺陷, 因此生产的难度大。

3.1.2 大型锻件质量的影响因素

大型锻件的生产是一项系统工程。钢锭的质量是保证锻件质量的先决条件, 钢锭的质量主要表现在纯净性、致密性和均匀性三个方面: 纯净性是指杂质元素及夹杂物的含量; 致密性是指缩孔、疏松、气泡、裂纹等各种孔隙性缺陷的严重程度; 均匀性是指成分及杂质的偏析程度。钢锭质量不仅决定锻件的质量, 更为重要的是决定钢的锻造性能, 质量不好的钢锭容易发生锻裂, 锻件无法成型。为了获得良好组织和性能的锻件, 还要有合理的锻造工艺和热处理工艺^[1]。锻造过程既要满足锻件尺寸、形状的要求, 还要将钢锭冒口端的缩孔、水口端的沉积锥切除, 并造成内部有利的应力状态, 心部疏松锻合, 不出现新的裂纹及夹杂性裂纹, 保证内部质量。热处理过程既要考虑组织和性能的要求, 还要注意应力水平, 避免开裂。

3.2 钢锭及钢坯加热要点

钢锭(或大型钢坯)加热, 要考虑其截面尺寸、合金成分、冷热状态及原材料的初始状态, 最后一火要考虑变形量的大小。具体内容:

(1) 截面尺寸和合金成分。钢锭或大型钢坯的截面尺寸大, 加热时间长; 合金成分高, 加热时间也长。

冷钢锭在室式炉中加热到 1240℃ 所需的最短加热时间(不考虑高温扩散均热时间)可按下列式计算:

$$\tau = kD^{1.5} \quad (\text{h})$$

式中 τ —— 总的加热时间(h);

D —— 钢锭直径(m)(方形或矩形截面钢坯为厚度);

k —— 考虑合金成分系数: 碳钢与低合金钢 $k = 10$, 高碳钢高合金钢 $k = 20$, 因钢锭的合金成分越高, 则在低温区间的导热系数越小所致。

(2) 冷热状态。冷锭加热时, 应低温装炉, 在装炉温度下应有一保温阶段, 以后以较小速度升温; 在表层发生相变的温度区间(750~850℃)再要有一保温阶段, 以后可以炉子最大功率升温到锻造温度。

热锭(表面温度不低于 600℃)加热, 大型碳素钢和合金结构钢锭, 都可以安全地采用快速加热: 装炉温度不限、装炉后按炉子最大功率加热到锻造温度(见表 3.4-4)。

表 3.4-4 热锭装炉时保温时间

钢锭质量 (t)	钢锭直径 (mm)		锻造温度下最短保温时间 (h)		
			装 炉 方 式		
	上部	下部	1	2	3
11	857	800	3.5	4.5	5.5
13	904	815	4	5.5	6.5
14	998	929	4	5.5	6.5
16	966	904	4	5.5	6.5
18~20	1025	960	4.5	6	7
22~24	1097	1029	5	6.5	8.5
26~33	1218	1140	6	7.5	9.5
34~42	1352	1265	7	8.5	10.5
43~52	1455	1357	8	10	12
53~64	1547	1450	10	12	14
67~77	1619	1539	12	14.5	17
79~88	1750	1630	13	16	18
93~105	1839	1717	14	17	19.5
110~120	1940	1811	16	19	
125~145	2050	1921	17	20.5	
150~170	2177	2033	18		
200~230	2509	2241	24		

注: 1—· 单根 2—· · 并排 3—· · 叠加

冶金工业出版社

冶金工业出版社



无论是冷锭或热锭装炉，在锻造温度下都应有足够的保温时间，使内外温度均匀。碳素钢和合金结构钢，允许截面温差 50~100℃，高碳钢和高合金钢不得超过 40℃。

(3) 原材料初始状态。钢锭表面的原始晶粒熔点较高，产生过烧的倾向较小，因此钢锭的始锻温度可比同钢种钢坯高 20~50℃。

锻制重要锻件的钢锭，有些工厂在锻粗前进行高温扩散处理（表 3·4-5），使偏析扩散，匀化化学成分，提高钢锭塑性，并使其原始缺陷易于锻合。

表 3·4-5 锻粗前高温扩散处理保温时间

钢号	25Cr2Ni4MoV、34CrNi3Mo 30Cr1Mo1V、34CrMo1A		
	钢锭质量 (t)	32~57	70~125
保温时间 (h)	25~30	35~40	45~60

(4) 最后（一火或两火）要考虑变形量。如锻比 < 1.5，则应降低加热温度（例如到 1050℃ 或 1100℃）对不能用热处理方法细化晶粒的某些特殊钢尤为重要。

3·3 大型锻件的锻造工艺流程及工艺装置

3·3·1 大型锻件的锻造工艺流程

大型锻件的锻造目的有两个方面：

(1) 改善组织。从高温扩散、再结晶和形成纤维组织来观察在锻造过程中对锻件组织的改善。

1) 高温扩散。钢锭中含有粗大的树枝晶组织，枝间高浓度成分偏析，组织不均匀，韧性较低。高温锻造能够改善这种不良的铸态结构。

高温锻造必须在锻造温度的上限（低于凝固温度 100~170℃）进行。微观偏析成分可望经高温扩散消除。图 3·4-13 表示了低合金钢的冲击特性与高温扩散影响的关系。

2) 再结晶。钢的高温锻造是在再结晶温度以上进行。在此期间，伴随着结晶、滑移变形和加工硬化的发生，由于应变能的增加，在钢中产生了新的晶粒核并长大成细晶粒的过程为再结晶。

在这个晶粒细化的现象中，会使结晶应变和加工硬化同时消除。即应变速度和再结晶速度达到了平衡。这可以避免在锻造过程中发生龟裂。

然而，如终锻温度较高，也会使晶粒长大粗化。所以，终锻温度应靠近 A_r3 相变点为宜。对于大直径的轴

类锻件，其内部温度常偏高，其内部晶粒度只有在锻后热处理过程中予以细化和改善。高合金大件有严重的晶粒遗传倾向，成分偏析又易造成不同区域间遗传倾向的差别，所以，大锻件易于出现混晶现象。因此，研究大锻件不同钢种的再结晶（含动态再结晶和静态再结晶）行为，对消除混晶现象有重要意义。

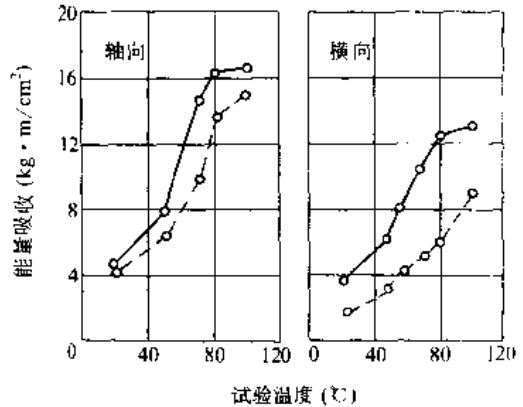


图 3·4-13 Ni-Cr-Mo-V 钢的高温扩散效果
——有高温扩散 ——无高温扩散

3) 纤维组织。钢锭中的铸态组织，经过适当的高温锻造和热处理，由于偏析扩散、晶粒细化和空洞压合而得以性能优化。

但是，晶包在锻造过程中被压扁，夹杂物弥散拉长，而沿着变形方向形成了纤维组织。由于纤维组织具有取向性，使钢的横向力学性能，尤其是横向冲击韧度大为恶化。

因此，除对横向力学性能没有高要求的长锻件，可以采用钢锭直接拔长工艺外，应限制拔长的锻压比，或增加中间锻粗工序。通过采用不同的拔长和锻粗锻比可以调整纵向和横向力学性能的比例。

(2) 压合内部空洞。对于钢锭内部空洞的压实消除，即金属的焊合状态，达到致密化，是锻造效果的最大作用。

Δ 型偏析内的空洞，由于靠近钢锭表面处，锻造时容易压合。但对于位处心部的空洞，就必须依赖静水压应力和应变的锻造效果。

1) 锻粗效果。锻粗锻造中影响空洞压合效果的主要因素有，坯料锻粗前的形状 H_0/D_0 、锻粗工具的形状、锻粗比、空洞的位置与形状、压入力与压入速度等。

锻粗对于压合心部空洞，在一定的变形阶段是有效的，尽管在靠近工具附近的死区内无效。但锻粗为使下步拔长工序的效果增大，对于提高轴类锻件切向、径向韧性的作用上，仍不失为一种较好的锻造方法。



平板间锻粗圆柱体的刚塑性拉应力力学模型 ($H/D > 1$) 和静水压应力剪切力学模型 ($H/D < 1$) 共同证明了, 锻粗体在变形过程中, 只有当压缩到毛坯高径比 $H/D \approx 1$ 时, 锻合内部空洞最有效, 且不形成新的裂纹型缺陷^[13]。

靠锻粗锻造过程压合中心线附近的空洞, 必须要达到一定的变形率。建议压缩后毛坯的高径比 $H/D \leq 0.8$ 为佳, 如从下道工序拔长操作考虑, 希望锻粗前毛坯高径比 $H_0/D_0 = 1.5 \sim 2.0$ 合适。

另一方面, 在 H_0/D_0 太小时, 需要预拔长, 以确保锻粗时的锻比。

对于重要的、纵向和横向性能要求高的锻件, 如应用高径比大于 1.5 的钢锭, 采用一次锻粗; 对 100t 以上的钢锭, 也有采用两次或三次锻粗的。锻粗后毛坯高径比 $H/D \leq 0.8$, 经钢包精炼及真空脱气, 加真空碳脱氧浇注的多棱、大锥度 (高径比小于 1.2) 的大型纯净钢锭, 直接拔长锻比如能达到 3, 不需锻粗。

压入力由于受到压机能力的限制, 锻粗直径越大, 变形速度必然减慢。为使变形抗力小, 尽量防止坯料降温。

2) 拔长效果。工艺参数砧宽比 (W/H) 和料宽比 (B/H) 可正确描述拔长体内部的应力状态与有效控制其内部的质量。因此, 拔长时压合内部空洞的影响因素, 综合起来有: 砧子形状、砧宽比与料宽比、压下量和空洞的位置等。

在拔长的情况下, 从宏观来看, 由于空洞主要存在与压下方向相垂直的中心轴线附近, 所以, 需要探讨使其周围的变形量和静水压应力增大的条件。

关于砧子形状对变形量的影响, 对于中心轴线附近的变形量, V 型砧比平砧要大, 且拔长效率高。但是, 在同样的砧宽条件下, V 型砧所需要的压机力, 是平砧的两倍以上 (图 3-4-14)。所以, 在压机能力有限的情况下, 其砧宽比 (W/D) 的选择受到限制。另外, 使用 V 型砧拔长, 静水压应力要大得多; 而使用平砧, 等效应变则明显大。使用平砧拔长较为有利。

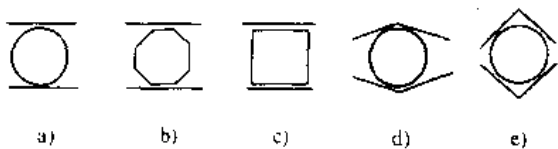


图 3-4-14 各种拔长方式的压机力比

a) 0.35 b) 0.60 c) 1 d) 2.16 e) 3.17

平砧拔长, 毛坯中心无轴向拉应力作用, 应控制砧

宽比 (W/H) $\geq 0.8 \sim 0.9$; 毛坯中心无横向拉应力作用, 料宽比 (B/H) 应控制在 0.85 ~ 1.18 的范围内。

在平砧拔长变形的过程中, H 是变化的, 因此, 砧宽比 (W/H) 和料宽比 (B/H) 也是变化的。此外, 平砧拔长变形时, 变形体在轴向有伸长, 在横向有展宽。这样, 就要综合协调压缩率 $\left(\epsilon_H = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H_0 - H}{H_0} \right)$ 、砧宽比 (W/H)、料宽比 (B/H) 这三者之间的关系。

保证砧宽比和料宽比在理想的范围中变化, 最合适的压下率 (双面) 应为 20%。

拔长时, 各砧的结合部位, 变形量明显很小。为使整个中心轴线上的变形量均匀分布, 在拔长过程中, 应使砧子中心位置逐次移动 (前道次砧子的结合部位与下道次的中心部位重合), 即前后道次的砧花相互错开, 反复拔长。

锻造目的靠有效的锻造过程 (正确的锻造工艺流程) 来实现。

1. 特殊锻造方法 该法是针对大截面的轴类锻件, 以较小的锻比锻合内部空洞的特殊锻造方法。这一类的锻造方法有中心压实法 (硬壳锻造法或称 JIS 法)、非对称平砧 (下砧宽) 锻造法 (FM 锻造法) 和宽平砧锻造法。

这些锻造方法, 都是对矩形截面坯料, 采用不同尺寸的平砧压下, 使坯料心部产生较大的静水压应力, 使内部空洞压实的方法。

(1) 中心压实法, 如图 3-4-15a 所示, 是先将加热好的坯料空冷或喷雾造成温差, 然后用比坯料宽度 (B) 窄的上砧 ($70\% B$) 压入。压下变形率为 $7\% \sim 8\%$ 。在这种条件下, 由于内部温度高, 使得内部容易变形, 而外壳温度较低, 如压力容器的作用, 增大了内部静水压。

(2) FM 法 (图 3-4-15b), 上为普通平砧、下为大平台。当砧宽比 $W/H \geq 0.4$, 料宽比 $B/H = 0.83 \sim 1.20$, 上砧压下时, 坯料心部产生较大静水压。

FM 锻造当 $W/H = 0.4$ 时, 对孔洞的锻合能力, 如用孔洞面积收缩率和孔洞投影尺寸综合来衡量, 约与宽砧锻造法 $W/H = 0.9$ 时大致相当。而所需锻压力, 前者只为后者的 $2/3$ 。

(3) 宽平砧锻造法 (图 3-4-15c), 上、下砧宽相等, 是应用砧宽比 $W/H > 0.8$ 的宽平砧锻造矩形坯料的方法, 料宽比 $B/H = 0.85 \sim 1.18$, 压下率 (双面) = 20%。

(4) 对于矩形扁平形状的锻件, 轴向压下法 (图



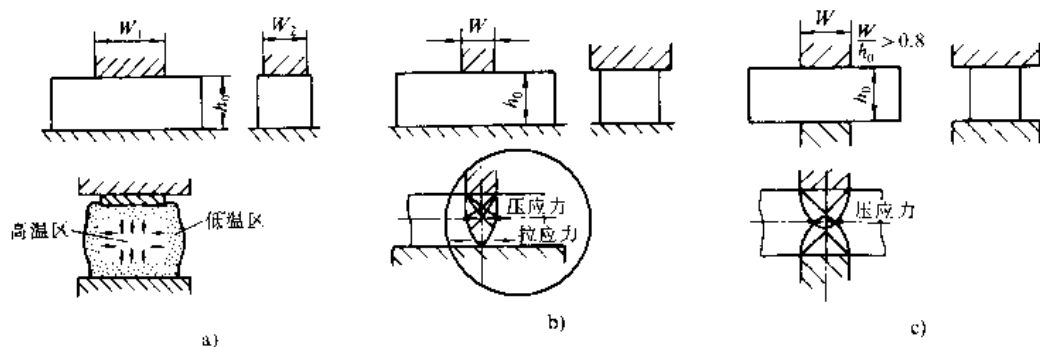


图 3-4-15 特殊锻造法

a) 硬壳锻造法 b) FM法 c) 宽平砧锻造法

3-4-16) 比较有效。

20%。

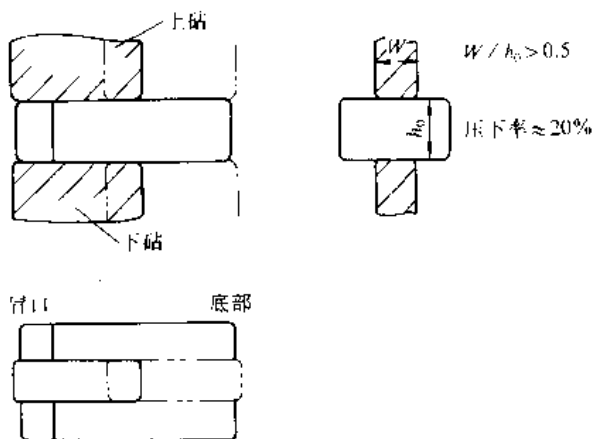


图 3-4-16 轴向压下法

(摘自大型铸锻件文集(机电部大型铸锻件情报网网刊)。北京重型机器厂技术情报室编辑。1991(4)、98

页图 15)

轴向压下法,是使砧子长度方向的中心线,与钢锭的轴线重合或平行进行锻造。 $W/H > 0.5$, 压下率 \approx

2. 变形工艺的确定 需要确定的内容包括:基本工序、工序的顺序、变形过程尺寸、基本工具等。应根据锻件生产批量、形状、尺寸和技术要求,考虑工人的经验、技术水平、车间设备条件、坯料情况、工具情况,并参考有关典型工艺确定。变形过程尺寸设计和工序选择同时进行,应注意:

- (1) 变形过程尺寸必须符合工艺要点。
- (2) 必须保持各部分有足够的体积,例如台阶尺寸相差较大的轧辊形锻件的辊身,可以按其公称长度下料,或按其计算重量(直径应加正公差)下料。
- (3) 多火锻打大件时必须注意中间各火次加热的可能性。
- (4) 有些长轴类锻件的轴向尺寸要求很准确,且沿轴向又不可能镦粗(例如曲轴),必须预计到轴向尺寸在修整时会略有但长(例如曲轴中间轴颈)。

拔长时截面变换的经验计算公式见表 3-4-6。

典型锻件变形方案的选择,见表 3-4-7 至表 3-4-9。

表 3-4-6 拔长截面变换经验计算公式

截面变换	变形简图	计算公式
由圆变方		当送进量 l - 砧宽 b 时 $D = (1.35 \sim 1.45) B_1$
由方变圆		$B_1 = (0.98 \sim 1.0) D$



(续)

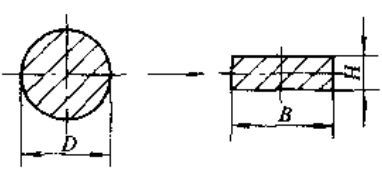
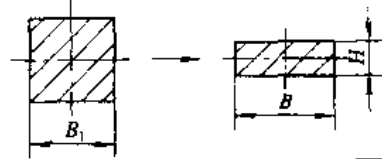
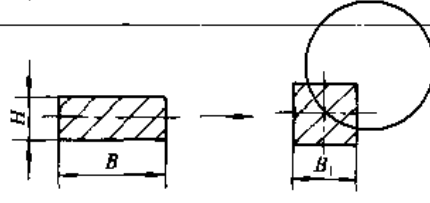
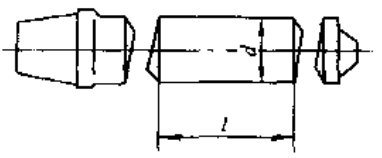
截面变换	变形简图	计算公式
由圆变扁方		$\text{当 } H < 0.5B \text{ 时, } D = \frac{2B + H}{3 \sim 2.5}$ $\text{当 } H \geq 0.5B \text{ 时, } D = \sqrt{H^2 + B^2}$
由方变扁方		$B_1 \geq 1.5H \left(\sqrt{1 + 1.8 \frac{B}{H}} - 1 \right)$
由扁方变方		<p>当 $\frac{\text{砧宽 } b}{\text{毛坯截面尺寸 } H} = 1 \sim 1.4$ 时,</p> $B = (1.4 \sim 1.65)B_1$ $H = (0.75 \sim 0.8)B_1$

表 3·4-7 重要轴类液压机锻件锻造方案

方案	变形方案	适用范围	备注
I	压钳把—倒棱—微粗—拔长出成品	$\leq 50\text{MW}$ 转子锻件 小直径冷轧辊锻件 热轧辊锻件 其他轴类锻件	
II	压钳把—倒棱—微粗—拔长—微粗—拔长出成品	50MW 以上的 34CrNi3Mo 发电机转子锻件 30Cr2Ni4MoV 汽轮机转子锻件 工作辊直径 $\geq 800\text{mm}$ 、支承辊直径 $\geq 1000\text{mm}$ 的冷轧辊锻件	转子锻件微粗一次拔长锻比 $\geq 3.5 \sim 4$ 和支承辊锻件微粗—拔长锻比 ≥ 3 者, 不再进行第二次微粗
III	压钳把—倒棱—锻方坯—中心压实—拔长出成品	$\geq 100\text{MW}$ 转子锻件	钢锭高径比 $\frac{H}{D} \leq 1.2$
IV	压钳把—倒棱—微粗—锻方坯—中心压实—拔长出成品		钢锭高径比 $\frac{H}{D} > 1.5 \sim 2$

表 3·4-8 叶轮锻件锻造方案

轮毂厚度 (mm)	锻 造		工 序		轮毂最小锻比
	火次	工 序 名 称	一 序	二 序 简 图	
< 300	1	倒棱下料 $l \leq 2.5d$, 且 $l \geq 4H$			4



(续)

轮毂厚度 (mm)	锻 造		工 序	轮毂最小锻比
	火次	工 序 名 称	工 序 简 图	
<300	2	锻粗 $h = 1.6H$ 垫环成形 $h_1 = H + 50\text{mm}$ 辗边 冲孔 $d_1 < \frac{1}{3}d_2$ 精整		4
≥300	1	倒棱 切水口		5
	2	锻粗 拔长 下料 $l \leq 2.5d$		
	3	锻粗 $h = 1.6H$ 垫环成形 $h_1 = H + 50\text{mm}$ 辗边 冲孔 $d_1 < \frac{1}{3}d_2$ 精整	同轮毂厚度<300的火次2工序简图	

注：表中只阐述了采用专用漏盘进行锻造的方案，批量较大时可改用胎模锻。

表 3·4-9 液压机中空锻件锻造方案

尺寸关系	$\frac{D}{d} \geq 2.5$ $\frac{H}{D-d} < 1$	$\frac{D}{d} \leq 2.5$ $\frac{H}{D-d} = 0.4 \sim 1.7$	$\frac{D}{d} \leq 1.5$ $\frac{H}{D-d} > 1$	$\frac{D}{d} \geq 1.5$ $\frac{H}{D-d} > 1.7$
简 图				
变形方案	锻粗—冲孔—滚外圆	1. 锻粗—冲孔—扩孔 2. 锻粗—冲孔—芯轴拔长扩孔	锻粗—冲孔—扩孔	锻粗—冲孔—芯轴拔长



3. 典型锻件总锻比的选择 (表 3·4-10)

表 3·4-10 典型锻件总锻比的选择

锻件名称	计算部位	总锻比
碳钢轴类锻件	最大截面	2~2.5
合金钢轴类锻件	最大截面	2.5~3
热轧辊	辊身	2.5~3①
冷轧辊	辊身	3.5~5②
船用尾轴、中间轴、推力轴	法兰	>1.5
	轴身	≥3
水轮机主轴	法兰	最好>1.5
	轴身	≥2.5
曲轴	曲拐	≥2
	轴颈	≥3
齿轮轴	最大截面	2.5~3
模块	最大截面	≥3
锤头	最大截面	≥2.5
水压机立柱	最大截面	≥3
高压封头	最大截面	3~5
汽轮机转子	轴身	3.5~6
发电机转子	轴身	3.5~6
汽轮机叶轮	轮毂	4~6

① 一般取 3, 小型轧辊可取 2。

② 支承辊锻比可减小到 3。

3·3·2 大型锻件锻造用工艺装置

1. 三点砧 三点砧 (图 3·4-17) 是锻造大型筒形

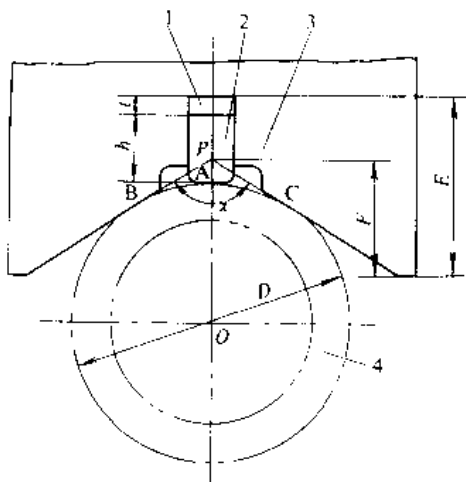


图 3·4-17 三点砧原理图

1—砧垫 2—平砧 3—砧座 4—锻件

锻件的工具。筒形锻件扩孔时, 孔径与外径由小到大, 根据成品外径尺寸可以计算出砧垫厚度 t

$$t = \frac{D}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) + (E - F) - h$$

如选 $\alpha = 110^\circ, E = 1460\text{mm}, F = 1129.86\text{mm}, h = 606\text{mm}$

则 $t = 0.11D - 275.86\text{mm}$

2. 胀形强化护环装置 胀形强化护环的方法有减压法液压胀形、全压法液压胀形、外补液压胀形、楔块扩孔。

a. 减压法液压胀形 减压法液压胀形护环装置 (图 3·4-18) 由上冲头、减力导向柱、下冲头组成。胀形时, 在上冲头上放置球面垫, 便于压机加载对准中心。

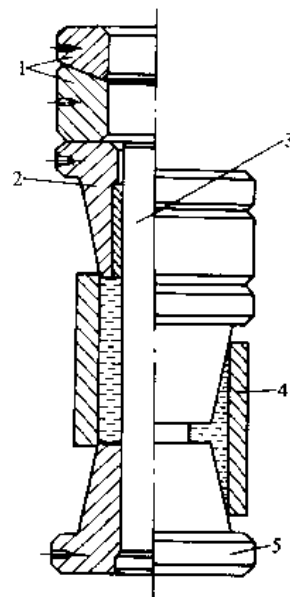


图 3·4-18 减压法液压胀形护环

1—球面垫 2—上冲头 3—减力导向柱
4—护环 5—下冲头

(摘自刘助柏, 石振华, 王谦和等。30 万 kW 发电机转子护环液压胀形工艺试验。东北重型机械学院学报, 1986 (4)。3 页。)

减压法液压胀形护环的特点: 省力, 结构简单、可靠, 导向性好, 操作方便; 在 30, 60, 120MN 自由锻液压机上分别可以胀形 12~600MW 的汽轮发电机护环。

b. 全压法液压胀形 用全压法液压胀形生产汽轮发电机护环, 最早应用于法国, 模具结构如图 3·4



-19所示。用该装置强化大型护环，需要大功率专用压机。限制了在自由锻液压机上的应用^①。

c. 外补液压胀形 外补液压胀形法不是靠压机作动力，而是由高压泵将高压液体注入环腔进行胀形。模内可设置大直径减力柱以大幅度降低变形力(图3·4-20)，从而实现只用一个承载能力小得多的框架生产大型护环^②。

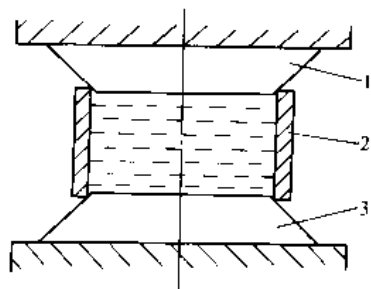


图 3·4-19 全压法液压胀形护环
1—上冲头 2—护环 3—下冲头

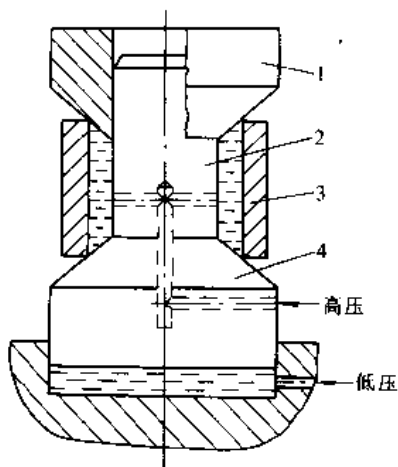


图 3·4-20 外补液压胀形护环
1 上模 2—减力柱 3 护环 4—下模

d. 楔块扩孔 楔块扩孔是满足护环力学性能要求的冷作强化工艺之一。护环楔块扩孔装置如图3·4-21所示。该装置中的主要部件楔块、冲头、垫片的材质选用，要根据冷扩后护环的强度级别而定。楔块制造难度大。

冷扩孔前先将护环毛坯放入150~170℃油槽中预热8h以上。冲头和楔块中心预先均匀地涂好润滑剂。在扩孔过程中，冲头每提起一次，护环要按规定转动一定角度。与此同时，冲头上要均匀地涂一次润滑

剂。扩成一个300MW护环，要反复压下并转动30次以上。

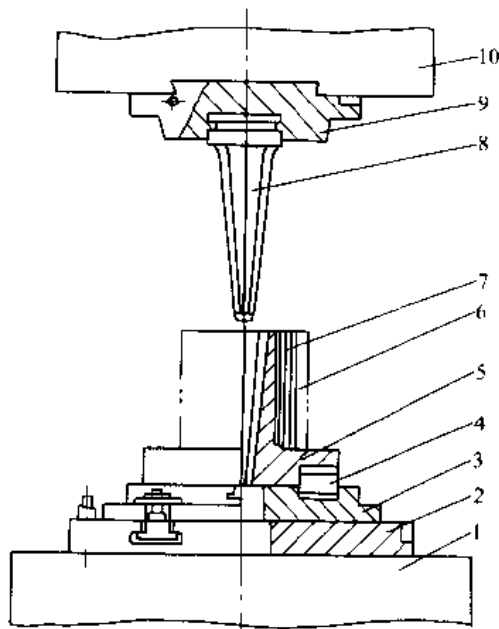


图 3·4-21 护环楔块扩孔装置

1—定料台 2—下模板 3—下模座 4—导向体
5—楔块 6—护环 7—垫片 8—冲头
9—冲头支持器 10—活动横梁

楔块扩孔法虽然具有诸多优越性，但也有不少弊病，如模具制造难度大、生产率低等^③。

3·4 大型锻件锻后冷却及热处理

大型锻件的锻后热处理（也称毛坯热处理或第一热处理）和锻后冷却，通常是结合在一起进行的。

3·4·1 大型锻件热处理的目的

由于大型锻件的断面尺寸大和生产过程复杂，大型锻件热处理应考虑以下特点：锻件的组织与性能很不均匀；锻件晶粒度粗大不均；锻件内部存在较大残余

① 摘自刘助柏，杨耀田，汇耀宗等，轴对称变形强化护环残余应力与新工艺的研究，机械工程学报，1979(3,4)，38、39页。

② 摘自杨煜生，陶永发，李春科等，护环外补液压胀形法工艺参数的有限元分析，机械工程学报，1991(6)，61页。

③ 摘自叶伟蓉，王太甲，用楔块扩孔法生产大型汽轮发电机护环，大型铸锻件，1987(2)，54~56页。



应力；一些锻件易产生白点缺陷。

因此，大型锻件热处理（含锻后冷却）的目的是：

(1) 改善锻件内部组织，提高其化学成分均匀性，细化晶粒，为超声波探伤和最终热处理创造内部的组织条件。

(2) 减少应力，降低硬度，以免在机械加工时变形，有利于切削加工。

(3) 预防锻件出现白点。

(4) 对于不再进行最终热处理的锻件，应保证达到规定的力学性能要求。

3.4.2 大型锻件热处理工艺

大型锻件热处理工艺的基本原理：

(1) 采用一次或两次高温正火和两次或三次较低温度的过冷，在过冷温度下保持足够的时间，使心部组织得到充分的转变，达到细化晶粒的目的，并使氢由里向外扩散。

(2) 在 620~650℃ 作长期保温，扩散氢，降低组织应力。如钢内氢的质量分数低，小于 1×10^{-6} ，应取消去氢时间，缩短保温时间。

大型锻件锻后冷却及热处理工艺类型：

(1) 水冷。对于没有相变的钢，如护环钢，由于锻件冷却过程无相变，可采用快速冷却。同时，为了锻后获得纯奥氏体组织，防止碳化物在晶界析出，也要求快速冷却。所以，这类钢的锻后冷却，通常采用水冷。

(2) 等温冷却（图 3.4-22a）。适用于白点敏感性较低的碳钢及低合金钢锻件，以减少应力、降低硬度、预防白点。

(3) 起伏等温冷却（图 3.4-22b）。适用于白点敏感性较高的小截面合金钢锻件，以减少应力、降低硬度、预防白点。

(4) 重结晶起伏等温冷却（图 3.4-22c）。适用于白点敏感性高的大截面合金钢锻件，可细化晶粒、减少应力、预防白点、降低硬度。

(5) 双重结晶起伏等温冷却（图 3.4-22d）。适用于白点敏感性高大型转子锻件，以减少应力、降低硬度、预防白点、均匀化学成分、细化晶粒。

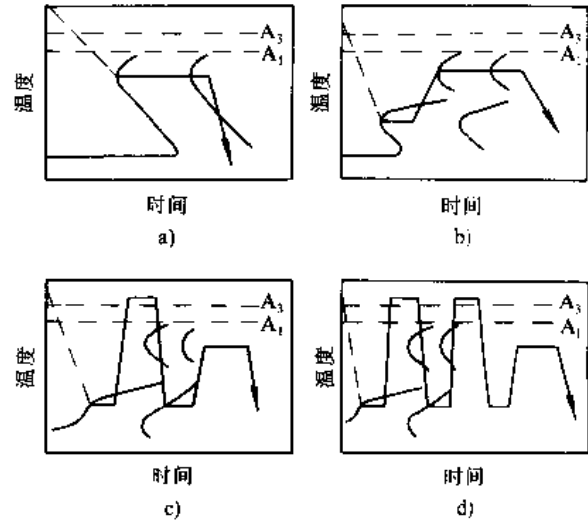


图 3.4-22 锻后冷却热处理曲线与奥氏体等温转变曲线的关系

a) 等温冷却 b) 起伏等温冷却 c) 重结晶起伏等温冷却 d) 双重结晶起伏等温冷却

例如，300MW 发电机转子锻件，材料为 26Cr2Ni4MoV，属于白点敏感性高的钢。锻件截面尺寸大，最大直径 $\phi 1210\text{mm}$ 。因此，锻件冷却与热处理采用双重结晶起伏等温冷却（图 3.4-23）。由于采用钢包精炼（真空碳脱氧）和真空浇注，氢的质量分数 $< 1 \times 10^{-6}$ ，缩短了 640℃ 的保温时间。

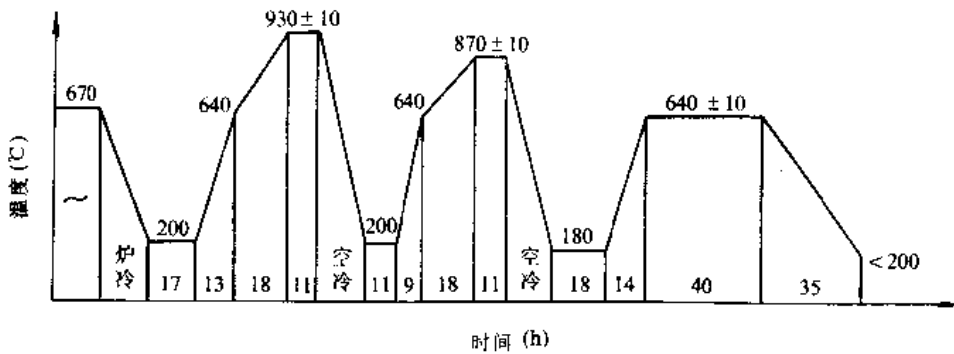


图 3.4-23 300MW 汽轮发电机转子锻后冷却热处理工艺



3.5 大型锻件常规缺陷及其防止措施 (表 3.4-11)

表 3.4-11 大型锻件常规缺陷及其防止措施

缺陷名称	缺陷特征	防止措施	备注	
横向裂纹	锻造时分成两截	严格操作制度	锻造时第一火即出现	
	锻造时毛坯表面出现较深的横向裂纹	<ol style="list-style-type: none"> 1. 正确设计钢锭模, 选择合理参数 2. 选用光滑无疵的钢锭模, 保证钢液凝固时自由收缩; 新锭模很好退火 3. 正确安置保温冒口, 防止出现飞边 4. 控制浇注工艺, 选择适当的浇注温度和浇注速度, 注速要稳, 注流要正 5. 钢锭浇注完毕要及时热送, 按制度缓冷 	锻造过程中一经发现应立即吹氧去除, 以免锻造中扩大	
	锻造时毛坯表面出现较浅的横向裂纹	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加强炉料烘烤, 保证钢包与整个浇注系统干燥, 使用前应充分烘烤 2. 冶炼应充分脱气, 并采用保护浇注等工艺 3. 正确编制与执行锻造工艺 		
内部横向裂纹	裂纹取向于垂直轴线方向	<ol style="list-style-type: none"> 1. 正确编制与执行加热工艺 2. 正确编制与执行锻造工艺; 砧宽比 (W/H)、料宽比 (B/H)、压下率诸参数要正确设计 		
纵向裂纹	表面纵向裂纹	<ol style="list-style-type: none"> 1. 正确设计钢锭模, 选择合理参数 2. 降低钢中的氧含量, 防止氧对钢的脆化作用 3. 限制钢的加铝量, 最大限度地去除氮气或采用加铈的办法来抑制过量的 AlN 4. 控制浇注温度和浇注速度, 避免高温快注 5. 采用石墨渣保护浇注, 保证外壳均匀冷却 6. 浇注完毕要及时热送, 按制度缓冷 	锻造过程中一经发现, 应即吹氧去除	
	内部纵向裂纹	因缩管残余或二次缩孔在锻造时引起裂纹	<ol style="list-style-type: none"> 1. 严格控制浇注温度与浇注速度 2. 采用良好的发热覆盖剂或保温冒口 3. 控制锻造时钢锭冒口端的切头率 	
		中空纵裂	应禁止在平砧下用小压下量拔长圆形毛坯	
		裂纹出现于锻件中心区域	<ol style="list-style-type: none"> 1. 正确制定与执行加热规范 2. 正确编制与执行锻造工艺; 砧宽比、料宽比、压下率诸参数要正确设计 	
	十字裂纹	正确编制锻造工步、合理选择与执行锻造工艺参数	多见于高合金钢中	



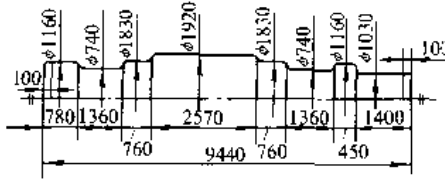
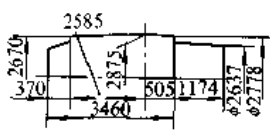
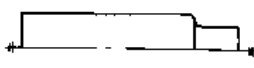
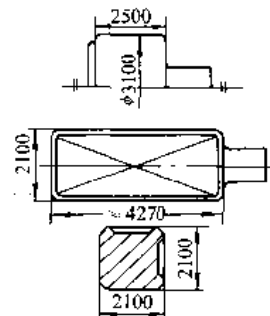
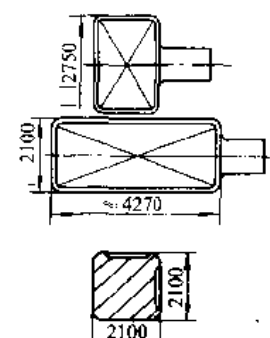
(续)

缺陷名称	缺陷特征	防止措施	备注
炸裂	锻造前加热锻后冷却或热处理后, 表面或内部裂纹	正确编制与执行加热规范	如对高速钢、耐热钢等
		正确编制与执行锻后冷却及热处理工艺	
置裂	锻造或热处理后发生, 或经过长时间后发生	严格锻造与热处理工艺	
龟裂	在锻件表面出现较浅的龟甲状裂纹	1. 减少钢中 Cu、Sn、As、S 等有害杂质元素的含量 2. 严格控制始锻温度	缺陷清理后, 可继续锻造
过烧	晶粒间氧化, 锻造时引起裂纹, 锻裂断面上失去金属光泽	正确控制加热规范, 确保合适的始锻温度; 保证加热炉温度均匀, 防止局部过烧	
白点	锻件内部银白色、灰白色圆形的裂纹	1. 注意炉料烘烤, 冶炼时充分沸腾, 采用真空除气技术, 降低钢中含氢量 2. 锻后及时装炉退火 3. 根据钢种和钢中含氢量以及锻件的大小等情况, 确定合理的去氢退火规范	酸洗低倍断口和超声波探伤发现
疏松	钢锭中心疏松组织未锻合, 多与非金属夹杂等并存	1. 采用硬壳锻造, 高温宽砧锻造或 FM 锻造法 2. 对拔长变形的轴类锻件, 可采用上、下 V 型砧 3. 加大锻比, 使锻比大于 3	
非金属夹杂物	非金属夹杂的总量、尺寸与分布超过允许范围	1. 采用钢包精炼, 真空浇注等工艺 2. 防止外来夹杂物和异金属进入钢液	
折叠	锻后表面折叠	正确控制变形程度与变形方式, 适当增加送进量, 使每次送进量与单边压下量之比大于 1~1.5; 适当加大砧子圆角	
局部晶粒粗大		1. 正确编制与执行锻造工艺 2. 采用特殊锻造工艺, 如高合金钢饼类锻件采用叠锻	奥氏体钢
		1. 正确执行冶炼工艺 2. 根据锻比确定始锻温度	结构钢
成分不合	化学成分不符合要求	正确执行冶炼工艺	
力学性能达不到要求	强度不合	1. 正确执行冶炼工艺 2. 严格热处理制度	
	横向机械性能(塑性、韧性)不合格	1. 正确执行冶炼工艺 2. 严格热处理制度	
偏料、偏心	端部偏料(钢锭中心线偏移锻件中心线)、中心线偏移	严格锻造工艺与加热制度	
弯曲、变形	锻造、热处理后弯曲与变形	严格矫直与热处理操作	



3.6 大型锻件的典型实例 (表 3.4-12~表 3.4-16)

表 3.4-12 300MW 汽轮机低压转子锻造工艺

名称	300MW 汽轮机低压转子				
类别	I				
钢号	30Cr2Ni4MoV				
锻造比	7.0				
钢锭质量	205t				
锻件质量	124t				
锻件占比例	50%				
每锭锻件数	1				
火次	温度	操作说明	变形过程图	设备	工 具
		钢锭			
1	1250℃	1. 压瓣口 2. 倒棱		大型压机	上平砧 下V型砧 套筒
2	1270±30℃ 空冷 780℃ 开锻	3. 微粗 (微粗后 H/D = 0.8) 4. WHF 法 (砧宽 1650mm 压下量 20%) 5. 倒角 6. JTS 法 (压下量 8%)		大型压机	球面微粗板 下微粗盘 上下平砧 上小砧 下平台
3	1270℃ 空冷 780℃ 开锻	7. 微粗 8. WHF 法 (砧宽 1650mm 压下量 20%) 9. JTS 法 (压下量 8%)		大型压机	球面微粗板 下微粗盘 上下平砧 上小砧 下平台

冶金工业出版社 请尊重作者版权



(续)

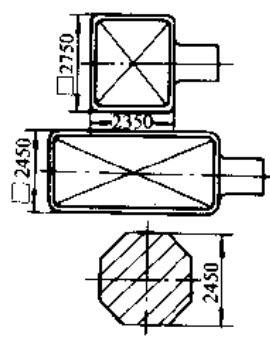
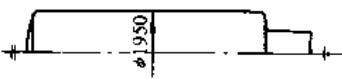
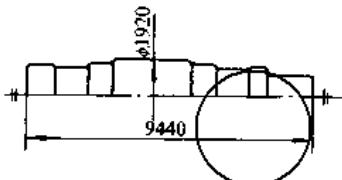
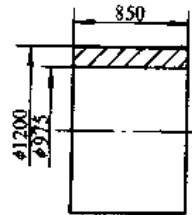
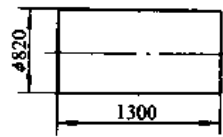
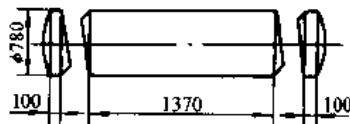
火次	温度	操作说明	变形过程图	设备	工具
4	1270±50℃	10. 墩粗 11. WHF 法 12. 倒八角		大型压机	球面墩粗板 下墩粗盘 上下平砧
5	1250℃	13. KD 法 (上、下 V 型砧宽 1200mm)		大型压机	上、下 V 型砧
6, 7	1220℃	14. 滚圆 15. 下料 16. 出成品		大型压机	上平、下 V 型砧 剃刀

表 3·4-13 300MW 护环锻造工艺

名称	300MW 护环				
类别	特				
钢号	Mn18Cr18N				
锻造比	墩粗比 2.1; 扩孔拔长比 3				
锻件质量	3355kg				
锻件质量	2549kg				
锻件占比例	47.6%				
每锭锻件数	1				
火次	温度	操作说明	变形过程图	设备	工具
		电渣锭			
1	1210~850℃	1. 预拔长 2. 下料		60MN 液压机	上平砧下 V 型砧 剃刀



(续)

火次	温度	操作说明	变形过程图	设备	工具
2	1210~850℃	3. 锻粗 4. 冲孔 5. 扩孔		60MN 液压机	平面锻粗板 平台 护环专用马杠 马架
3	1180~900℃	6. 芯棒拔长 (锻后水冷)		60MN 液压机	上、下 V 型砧 芯棒 (预热至 200~250℃)
	常温	7. 液压扩孔 强化(第一道:内孔扩到 φ860;第二道:内孔扩到 φ940;第三道:内孔扩到尺寸)		125MN 液压机	液压扩孔 专用模具

表 3-4-14 筒体锻造工艺

名称	筒 体	
类别	I	
钢 号	2¼Cr-1Mo	
锻造比	13 (锻粗锻比×扩孔锻比)	
钢锭质量	124 000kg	
锻件质量	71000kg	
锻件占比例	57.2%	
每锭锻件数	1	



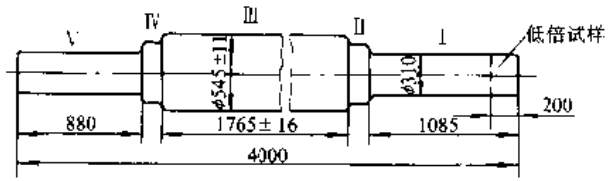
(续)

火次	温度	操作说明	变形过程图	设备	工具
		钢锭			
1	1220~ 750℃	1. 压钳口 2. 倒棱 3. 切除水口 4. 下料		125MN 液压机	上平砧 下V砧 套筒 剃刀
2	1220~ 750℃	5. 墩粗 6. 冲孔		125MN 液压机	平面墩粗板 平台 φ1200 空心冲子
3	1220~ 750℃	7. 芯棒拔长		125MN 液压机	φ1200 芯棒
4	1220~ 700℃	8. 用三点砧扩孔 9. 出成品	<p>1—三点砧 2—垫 3—马杠 4—筒体</p>	125MN 液压机	三点砧 马杠 马架



表 3-4-15 $\phi 500$ 冷轧辊的锻造工艺

名称	$\phi 500$ 冷轧辊
类别	I
钢号	9Cr2Mo
锻造比	4
钢锭质量	8t
锻件质量	4.75t
锻件占比例	59%
每锭锻件数	1

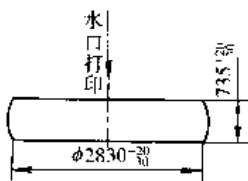


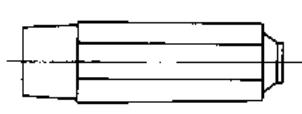
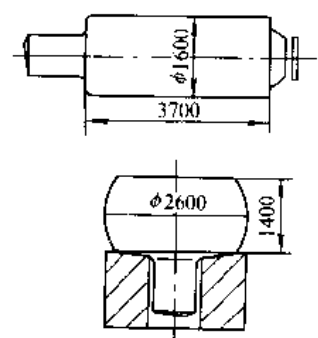
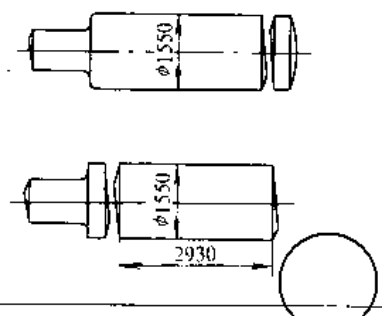
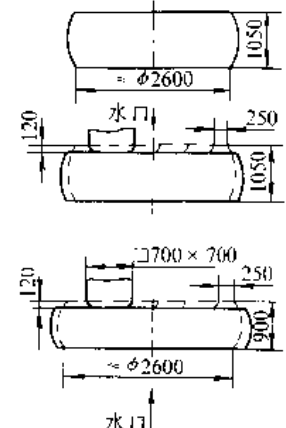
火次	温度	操作说明	变形过程图	设备	工具
		钢锭			
1	1150~800℃	1. 压钳把 2. 倒棱 3. 切底		12.5MN 液压机	上平砧 下V型砧 剃刀
2	1180~800℃	4. 滚粗 5. 拔长至 $\phi 730$		30MN 液压机	球面滚机板 下滚粗盘 上下V型砧套筒
3	1150~800℃	6. 拔长至 $\phi 590$ 7. 分段压槽 8. 拔长 I + II, IV + V 至 $\phi 430$ 9. 分段压槽 10. 拔长 III 至成品尺寸 11. 拔长 I、V 至成品尺寸 12. 切去料头、余料		12.5MN 液压机	上平砧 下V型砧 压棍 剃刀

冶金工业出版社 请尊重作者版权



表 3·4-16 管板锻造工艺

名称	管板	
类别	Ⅱ	
钢号	R20MnMo	
锻造比	拔比: 2.8; 徽比: 5	
钢锭质量	76t	
锻件质量	41.2t	
锻件占比例	54%	
每锭锻件数	1	

火次	温度	操作说明	变形过程图	设备	工具
		钢锭			
1	1220~750℃	1. 压钳口 2. 倒棱 3. 错尾		大型液压机	上下V型砧套筒
2	1250~750℃	4. 徽粗(徽粗前高温扩散 $\geq 30h$) 5. 拔长 6. 切水口 7. 下料		大型液压机	球面徽粗板 下徽粗盘 上下V型砧 剃刀
3	1250~750℃	8. 徽粗 9. 中心压实(先压一面,平整,翻转后再压另一面,平整) 10. 出成品		大型液压机	平面徽粗板 下平台 上凸型砧



第5章 模 锻^{[1][13]}

(续)

1 概述

通过压力迫使赤热金属流动、充满锻模模膛(型腔)而生产锻件的方法叫作模锻。模锻的分类及工艺流程见表 3·5-1和表 3·5-2。

表 3·5-1 常用模锻方法

方法	设备	工艺特点及应用
锤 上 模 锻	胎模锻 自由锻锤	利用自由锻设备生产有飞边或无飞边的各类锻件, 模具简单灵活; 生产率较低, 多火次, 劳动强度大; 可用于小批量生产
	各种模锻锤	金属在各模膛中多次打击成形, 每次打击能量可控; 无顶出器多采用整体模、多模膛、有飞边模锻; 生产率高, 劳动强度大, 难于机械化自动化; 适合于大批量生产。无砧座模锻锤多用于单模膛大型锻件。在我国的模锻生产中, 双作用锤模锻还占主导地位
锻压机模锻	锻压机	压机滑块行程固定, 每模膛锻压一次, 变形较均匀但高度方向充填能力稍弱, 导致预锻工步可能增多; 难于击去氧化皮故对加热要求较高; 不宜用拔长和滚压制坯而常配用辊锻机制坯。多用组合模多模膛有飞边锻造, 模具有顶出器, 锻件精度较高; 生产率高, 劳动条件较好, 易于机械化自动化; 适于大批量生产
平 模 锻	平锻机	用活动凹模夹住棒料, 冲头在水平方向移动, 用局部锻压、冲孔、穿孔、分离等工序成形锻件; 采用多膛组合模; 多用无飞边, 材料利用率较高; 最适于生产旋转体带头杆件、中空件及环形件; 生产率高, 劳动条件好, 易于机械化; 适合于大批量生产

方法	设备	工艺特点及应用
螺旋压力机模锻	摩擦、液压螺旋锤	打击特性接近于模锻锤, 但行程慢, 不适于制坯, 多用组合模或整体模有飞边单模膛模锻, 有顶出器; 除一般模锻外还适合于墩头、精密模锻及其它锻造作业; 生产效率较高, 劳动条件好; 不易机械化自动化, 适于中小批生产

表 3·5-2 模锻的工艺流程

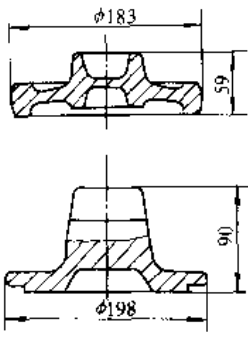
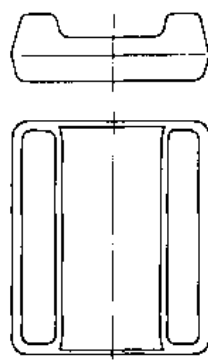
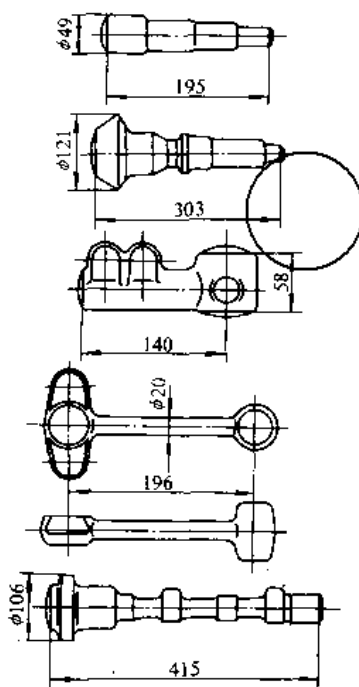
工艺	设备	简要说明
下 料	棒料剪切机、高速锯及其他压力机	模锻原材料多数用圆棒料, 少数用方棒料, 除直接采用棒料锻造的平锻外, 都要把棒料剪切成一定长度的毛坯, 直径 > 70mm 的碳钢及直径 > 50mm 的合金钢剪切前需预热 350~550℃, 其余为冷下料
加 热	室式炉、半连续炉、感应加热炉与锻压设备配套安装	平锻为棒料局部加热, 主要用开敞式炉。小型锻件或小批生产时也可用开敞式或眼式炉多数以半连续炉和转体(底)炉为主; 机械压力机类模锻和单模膛锻造不易去除氧化皮, 最好用少无氧化加热, 其中感应加热最佳, 否则毛坯出炉后应清除氧化皮。一般材料的加热规范无特殊要求。除复杂件胎模锻外, 一般一火完成
锻 造	见表 3·5-1	(详见后)
切 边 冲 连 皮	切边压力机, 其他压力机或螺旋锤。与锻造设备配套	胎模锻的切边冲孔也用胎模完成; 平锻的切边冲孔在平模内完成; 锻压机模锻用机械手操作时也可在组合模内设切边冲孔工位; 其他情况下都在配套的切边机上用切边模、冲孔模或复合模完成, 一般多利用模锻余热进行热切, 低碳钢小锻件可用冷切



(续)

工艺	设备	简要说明
热处理	热处理炉	按热处理规范进行
清理氧化皮	滚筒、抛丸机、酸洗装置	要求不高的简单小锻件可用滚筒；复杂件、表面要求高以及大型锻件多用酸洗；一般中小件多用抛丸清理
校正	落锤、模锻锤、螺旋锤、切边压机	校正由切边冲孔、热处理等原因引起的锻件翘曲变形。大型、复杂锻件可用切边后的余热进行热校正，一般多用冷校正，也可在切边机上设置校正模或复合模在切边的同时进行校正，多数用专用设备及模具，小批生产时也可利用锻模的终锻模膛进行校正；校正时锻件只在高度方向与模具接触承力，故校正模膛在平面方向要比锻件每边大1~3mm
精压	精压机、螺旋锤	部分要求较高的锻件需经精压以提高尺寸精度、降低表面粗糙度。多数用平面冷精压，精整锻件的一个或几个平面；少数用体积精压，相当于用更精确的终锻模膛再锻一次，再切去少量飞边
检验	通用及专用量具、磁粉探伤机	复杂、高要求锻件要逐件检验尺寸精度，某些承载严峻的锻件需逐件检查表面裂纹，磁粉探伤机是常用的方法

表 3·5-3 锤上模锻件举例及分类

类别	特点
<p>饼类（短轴类）</p> 	<p>基本轴对称，轴线与打击方向相同。锻件中可有：透孔、盲孔、轮缘轮辐、突缘、柄等形状。模锻成形（终锻或预锻）前毛坯需墩粗</p>
<p>直轴扁平类</p> 	<p>平面图上锻件轴线为直线，形状扁平，长度方向材料分布较均匀。模锻成形前毛坯需压扁</p>
<p>直轴对称类</p> 	<p>轴线为直线，且两边大致对称，可有各种形状的、带孔或不带孔的头部，横断面形状不限，如圆、工字形等；沿轴线方向材料分布一般不均匀，故需用制坯工步使材料沿轴线方向重新分布（简称轴向配料）</p>

2 锤上模锻

2.1 锤模锻件分类

锤上模锻件举例及分类见表 3·5-3。



(续)

类别	特点
<p>直轴非对称类</p>	<p>轴线为直线，但两边形状不对称。除轴向配料外，还应使部分材料侧向偏移（简称侧向配料）</p>
<p>弯轴类</p>	<p>平面图上锻件轴线弯曲，除轴向配料外还需把毛坯打弯。对于垂直方向、也即打击方向有弯曲的锻件，因打弯与模锻成形同时完成，故不属弯轴类，但毛坯长度计算则与弯轴类相近</p>
<p>叉类</p>	<p>锻件平面图呈叉形且不能用弯曲工步成形者。一般在轴向配料后，在预锻时用“劈开”的方法成形</p>

(续)

类别	特点
<p>复合类</p>	<p>具有直轴、弯轴、枝芽、叉形等特征中两种以上特征的锻件，其制坯也需相应的工步</p>
<p>复杂类</p>	<p>形状复杂，但特征不明确的锻件，其制坯还要由具体分析及经验决定</p>

2.2 锤模锻的模具、模膛和工步

图 3-5-1 为弯轴类锻件模锻变形及模具（下模）例子。

锤模锻时，金属的变形是在模具的各个模膛中依次完成的，在每个模膛中的锻打变形称一个工步，模膛名称与工步名称相同。

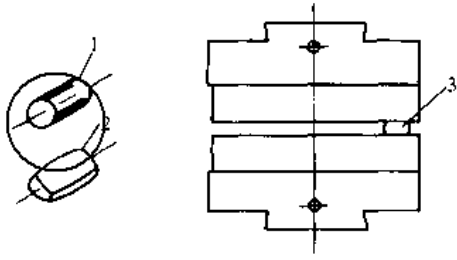
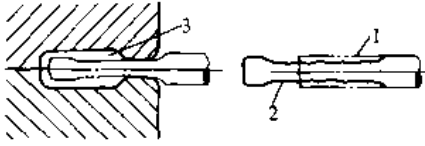
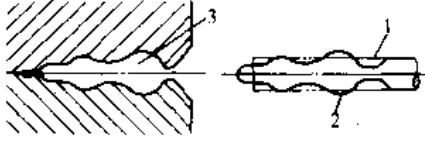
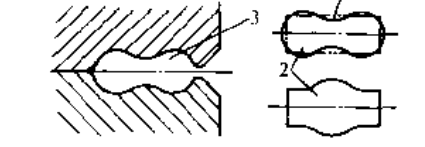
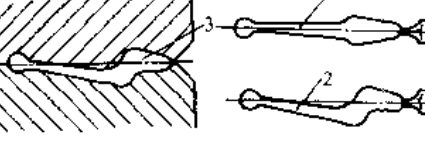
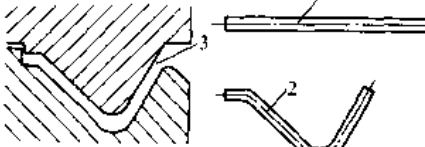
表 3-5-4 为锤上模锻的模膛名称及作用。

表 3-5-4 锤上模锻的模膛名称及作用

类别	名称	简图	用途
制坯模膛	锻粗	<p>1—坯料 2—锻粗后的坯料 3—锻粗模膛</p>	减小坯料高度，增大直径



(续)

类别	名称	简图	用途
制坯模膛	压扁	 <p>1—坯料 2—压扁后坯料 3—压扁模膛</p>	增大坯料宽度
	拔长	 <p>1—坯料 2—拔长后坯料 3—拔长模膛</p>	减小坯料部分长度上的截面，增大其长度
	滚压	 <p>1—坯料 2—滚压后坯料 3—滚压模膛</p>	减小坯料部分长度上的截面，增大另一部分截面，总长略有增加
	卡压	 <p>1—坯料 2—卡压后坯料 3—卡压模膛</p>	增大坯料部分长度上的宽度，截面略有变化
	成形	 <p>1—坯料 2—成形后坯料 3—成形模膛</p>	局部转移金属，以符合锻件水平投影形状
	弯曲	 <p>1—坯料 2—弯曲后坯料 3—弯曲模膛</p>	改变坯料轴线形状，以符合锻件水平投影形状

冶金工业出版社 请尊重作者版权



(续)

类别	名称	简图	用途
模锻模膛	预锻	<p>1 预锻模膛 2—终锻模膛</p>	获得与终锻相近的形状, 以利于锻件在终锻模膛中清晰成形, 防止产生折纹和提高终锻模膛寿命
	终锻		最后获得锻件
切断模膛	切断	<p>1—坯料 2 锻件 3—切断模膛</p>	将锻件与坯料分离

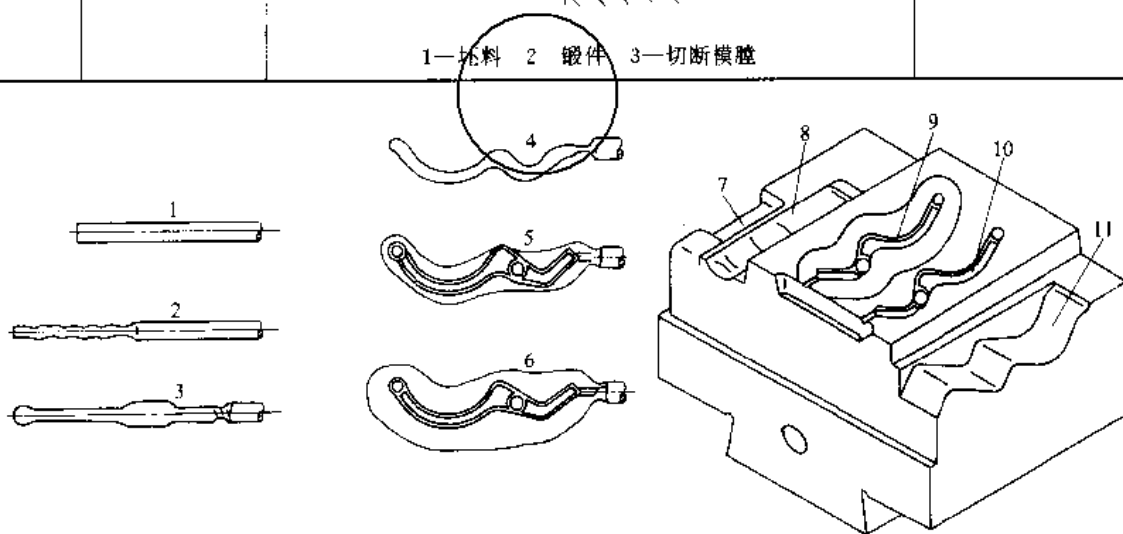


图 3-5-1 模锻模和模锻工步示例

1—坯料 2—拔长 3—滚压 4—弯曲 5—顶锻 6 终锻 7 拔长模膛
8—滚压模膛 9—终锻模膛 10—预锻模膛 11—弯曲模膛

2.3 锤模锻工艺的设计流程及要点

锤模锻的工艺设计流程没有统一的模式。有的设计过程一切从锻件及成品零件的形状、尺寸及要求出发, 比较细致, 但对于工厂实用以及有经验的设计者则显繁琐。工厂中常用的方法是, 除锻件外往往还从模锻

锤的吨位出发确定许多参数, 比较容易, 对于常见锻件也是足够精确的, 但也存在前后牵制的问题。下面以后者为主介绍设计流程及要点。

2.3.1 估算模锻锤吨位

双作用蒸汽空气模锻锤: $G = 0.001KA \quad (t)$



无砧座模锻锤: $E = (20 \sim 25)G$ (kJ)

式中 A —— 包括1/2飞边仓部在内的锻件水平投影面积(cm^2);

K —— 材料系数: 低碳钢、低合金钢、中碳钢为4, 中碳低合金钢为6, 高合金钢为8。

2.3.2 设计冷锻件图 (图 3.5-2)

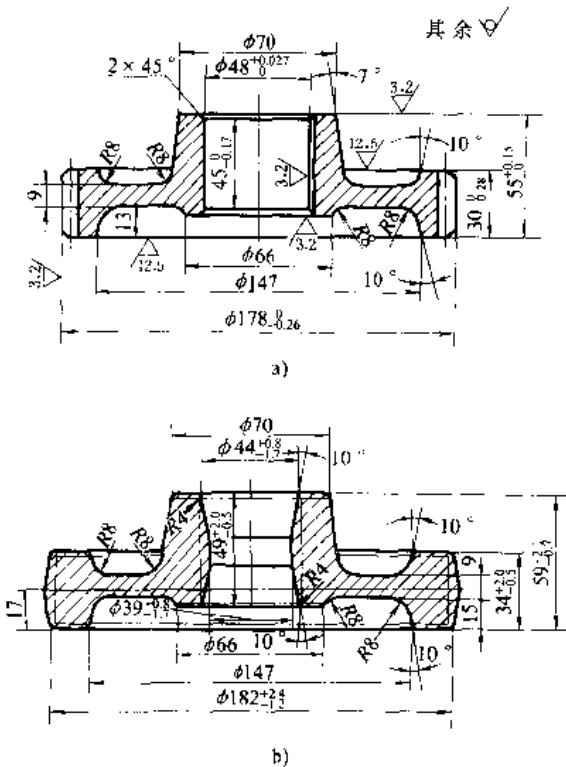


图 3.5-2 模锻件设计

a) 成品零件 b) 锻模件

1. 确定分模面 其原则

为: 尽量使模膛浅以便金属充填和锻件取出; 尽量用平面以简化模具结构; 不应放在端面上以利检查错模和切边。

2. 加余块 成品零件中的

各种细槽、齿轮齿间、横向孔以及其他妨碍出模的凹部均应加余块; 小于 25mm 的垂直孔可加整体余块或压凹。

3. 加工余量 凡机加工

面均应加余量, 所有尺寸应有模锻公差。余量公差与工件形状尺寸、精度要求等等因素有关, 大致范围见表 3.5-5, 详细

可参阅机械工业部标准 JB/Z75-64。

表 3.5-5 按吨位确定的锻件余量和公差

锻锤吨位 (t)	1	2	3	5	10	16
单边余量 (mm)	1~2	1.5~2.0	2~3	2.5~3.5	3.0~4.5	4~6
高度偏差 (mm)	+1.0 -0.5	+1.5 -0.5	+1.5 -1.0	+2.0 -1.0	+2.5 -1.0	+3.5 -1.5

4. 拔模斜度 为了顺利取出锻件、提高模具寿命,

锻件上必须有斜度, 其值为:

外壁斜度 α 常为 7° , 特殊情况可用 5° 或 10° 。

内壁斜度 β 常为 10° , 特殊情况可用 7° 、 12° 或 15° 。

5. 圆角半径 为了保证金属充填、提高模具寿命,

锻件上不应有倾角, 必须用圆角过渡。圆角半径为:

凸圆角半径 r 等于单面加工余量加成品零件圆角半径或倒角值;

凹圆角半径为: $R = (2 \sim 3)r$ 计算所得的圆角半径需圆整成下列标准值: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30mm, 以利使用标准刀具。

6. 制定技术条件 包含: 热处理方法、硬度及其

检测点、表面清理方法、形位公差、表面缺陷允许深度以及其他特殊要求。

冷锻件各设计应注意的问题参见机械零部件设计卷第 2 篇第 5 章。

2.3.3 制定热锻件图

热锻件图基本上就是锻模的终锻模膛型腔图。其

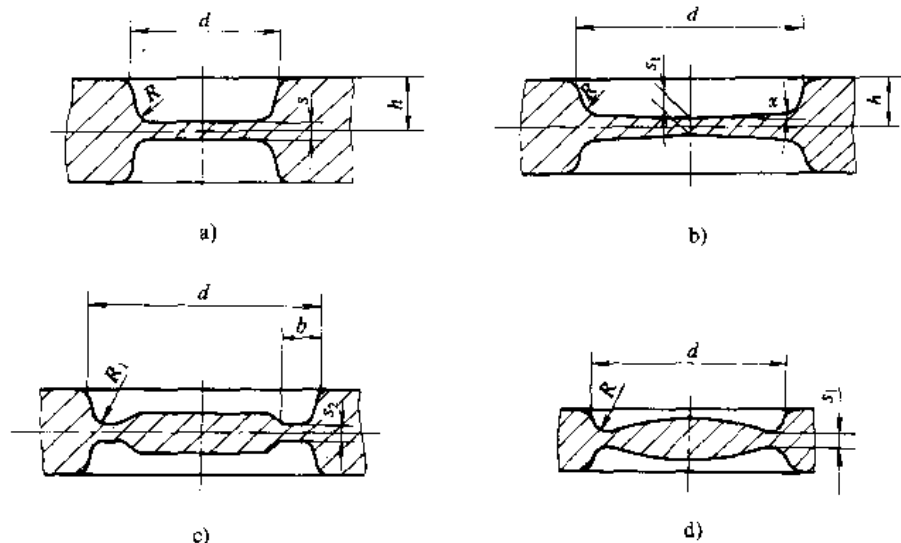


图 3.5-3 冲孔连皮形式



制定方法是在冷锻件图基础上,加冲孔连皮,加热膨胀量,一般不标注公差,形状复杂部分应放在上模。

冲孔连皮的形式如图 3·5-3 所示。图中 a 为平底连皮,厚度 $s = 4 \sim 12\text{mm}$, $R = 5 \sim 20\text{mm}$,视锤的吨位大小而定;图 b 为斜底连皮,用于 $d > 60\text{mm}$ 或 $d > 2.5h$ 的大孔, $s_1 = 0.7s$; $\alpha = 1^\circ \sim 2^\circ$; 图 c 为带仓连皮,也用于大孔,其形状尺寸相当于飞边的桥部和仓部(表 3·5-6),这时预锻件上应采用图 b 所示的斜底连皮;大孔也可采用图 d 所示的拱形连皮。

热膨胀量取决于锻件材料的终锻温度和线膨胀率。钢锻件的热膨胀系数为 1.5%,细长件在长度方向上应取 1.2%,冷锻件所有尺寸乘以热膨胀系数即为热锻件尺寸,但圆角半径值不变。

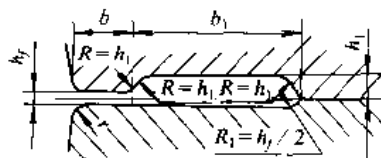
2·3·4 飞边设计

有飞边模锻时,终锻后锻件在分模面上带有一圈飞边,其作用是容纳多余金属,同时在模膛的飞边桥部形成保证金属充填所需的阻力。飞边设计就是设计终锻模膛的飞边槽。飞边槽靠近型腔、深度较浅的部分叫桥部,其余部分叫仓部。飞边槽的型式、选用及尺寸见表 3·5-6 和表 3·5-7。

表 3·5-6 飞边槽型式

飞边槽型式	用途
<p>型式 I</p>	桥部位于上模,温度低,不易磨损。用于一般锻件
<p>型式 II</p>	桥部位于下模。用于切边时需将锻件翻转或整个锻件均在下模成形的锻件
<p>型式 III</p>	仓部较大,可容纳较多的多余金属。用于大型、复杂锻件
<p>型式 IV</p>	加宽了下模桥部,提高了寿命
<p>型式 V</p>	桥部增加阻力沟,以便更大地增加金属外流阻力,迫使金属充满深凹复杂的模膛。多应用于局部

表 3·5-7 飞边槽尺寸



锻锤吨位 (t)	h_f (mm)	h_1 (mm)	b (mm)	b_1 (mm)	r (mm)	A_r (mm)	备注
1	1~1.6	4	8	22~25	1.5	1.00~1.26	齿轮锁扣 $b_1 = 30$
	25~30			1.34~1.68		$b_1 = 40$	
2	1.8~2.2	4	10	30~40	2.5	2.07~2.85	齿轮锁扣 $b_1 = 45$
	40~50			3.20~4.40		$b_1 = 55$	
3	2.5~3.0	5	12	50~60	3	5.28~7.28	
	60~80			8.33~12.79			
5	3~4	6	12~14	60~80	4		
	4~6						
10	4~6	8	14~16		3		
	6~9						
16	6~9	10	16~18		4		

2·3·5 作“计算毛坯”图

除饼类锻件外,材料沿轴向的分布是工艺和模膛设计的重要依据。材料轴向分布可用“计算毛坯”直径图的形式表达(图 3·5-4),它是一个假想的直轴旋转体,长度等于锻件长度,轴向任意处的横截圆面积 A_f 等于相应位置冷锻件、飞边及连皮截面积之和:

$$A_f = A_s + A_l + A_r$$

$$d_f = 1.13 \sqrt{A_f}$$

$$A_f = 2\eta A_s$$

式中 A_s —— 锻件截面积;
 A_l —— 连皮截面积;
 A_r —— 飞边截面积,可按飞边槽截面积 A_r (见表 3·5-7) 计算;
 η —— 飞边槽充满系数,简单锻件取 0.3~0.5,复杂件取 0.5~0.8,两端点取 1。

弯轴类及其他弯曲变形的锻件在作计算毛坯前应先按轴线按弯曲中性轴展开(拉直)。

如模锻成形时金属无轴向流动,则上述计算毛坯刚好可充满模膛;但实际上锻件两端、冲孔、端面刷变等部位,轴向流动明显,为了使计算毛坯能反映模锻成

冶金工业出版社



形前对毛坯轴向材料分布的需要,以便更好地设计轴向配料模膛(拔长、滚压、卡压等),应将严格按截面计算所得计算毛坯直径图外形作相应的调整和光滑处理。

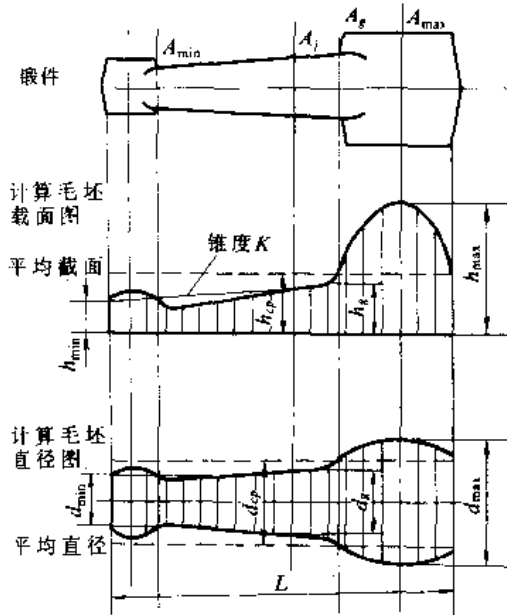


图 3-5-4 计算毛坯图

A—取截面的位置,和 h、d 的标示对应

2.3.6 选择模锻工步

工步选择是模锻工艺的关键。终锻工步是必不可少的,带高筋、深槽、开叉、长枝芽、大孔、截面剧变等特征的锻件均需预锻,其余视情况而定;采用预锻可减少终锻的金属流动,提高模具寿命,但增大了错移力和模具尺寸。制坯工步根据锻件形状及金属分布选择,但最好不少于一个,以便击去氧化皮。小锻件 ($m_d < 0.5\text{kg}$) 可用一坯多件锻造,这时需用切断工步。下面为工步选择的一般规律:

1. 饼类锻件

(1) 齿轮、十字轴等常用墩粗、终锻。

(2) 高毂深孔件、尤其是下模冲头高出分模面者常用墩粗、成形墩粗、终锻。(图 3-5-5)。

(3) 高筋、薄壁、薄辐、大孔件常用墩粗、预锻、终锻。

(4) 小饼类件可采用一根毛坯上连续锻几件。这时饼类件应转化为直轴对称类件,要用切断、或者一模多件的方法锻造。一模多件时应把几个锻件连成一个直轴对称类锻件。

2. 直轴扁平类锻件 常用压扁、预锻、终锻、切

断。

3. 直轴对称类锻件 常用轴向配料制坯、预锻、终锻、切断。

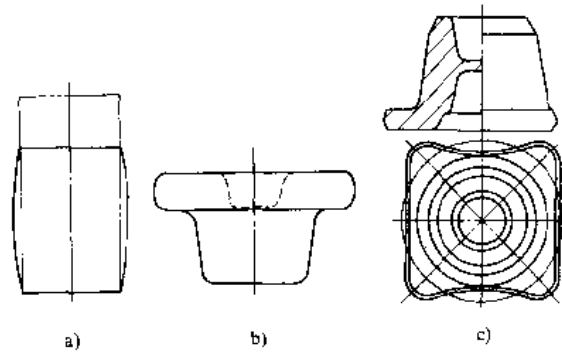


图 3-5-5 高毂深孔锻件工步示意

a) 墩粗 b) 成形墩粗 c) 锻件

轴向配料含卡压、开式和闭式滚压、拔长等工步,其选用的根据是材料轴向流动的强度,即各横断面积的差别,以及轴向流动的距离;具体可用计算毛坯直径图中的最大直径与平均直径之比 d_{max}/d_g 以及长度与平均直径之比 L/d_g 来表达。这两个比值的乘积大时,应选用拔长加滚压工艺,中等时可选用单滚压,较小时可只用卡压。实际选用时可按经验图表、也可直接凭经验选定。应注意:(1) 一模多件模锻时,应将几个锻件联成一体作计算毛坯直径图;(2) 拔长一般不单独应用,都要后跟滚压或卡压。

4. 直轴不对称锻件 常用轴向配料制坯、成形、预锻、终锻、切断。如不对称程度不大,则可用不对称滚压代替成形(图 3-5-6)。

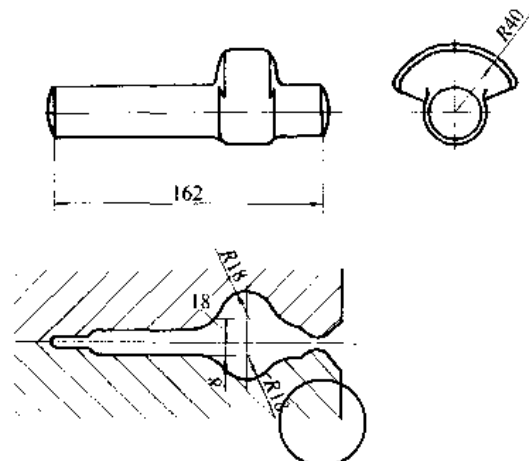


图 3-5-6 短枝芽锻件及不对称滚压

5. 叉形锻件 常用轴向配料制坯、成形、预锻、终锻、切断。成形用于不对称性很大的锻件。

6. 弯轴类锻件 常用轴向配料制坯、弯曲、预锻、终锻、切断。



7. 复合类和复杂锻件 应根据锻件形状尺寸特征以及各种工步的功能等等因素具体分析。例如图3·5-7b所示曲轴，由于拐间相距相对很小，不能用弯曲而应用“劈叉”，总体可视为直轴不对称、带“横向开叉”的锻件。故可选方案是：轴向配料、成形、预锻、终锻。考虑到不对称性相对较小，为了减少模具尺寸简化操作，实际采用了：滚压、预锻、终锻。如曲轴不带平衡块，则轴向材料分布较均匀，甚至可采用成形（或夹紧弯曲）、终锻。

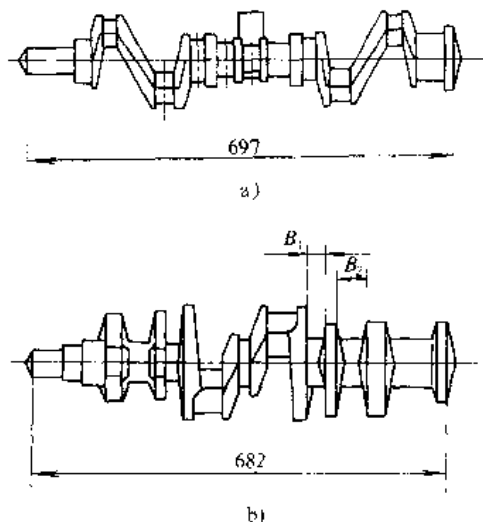


图 3·5-7 曲轴锻件示例

a) 不带平衡块 b) 带平衡块

由此可见，工步选择是技术性和经验性很强的作业，必须细致，慎重对待。

2·3·7 确定毛坯尺寸

1. 毛坯体积 V_0

$$V_0 = [N(V_d + V_f + V_b) + V_g](1 + \delta\%)$$

$$V_1 = V_d + V_f + V_b$$

$$V_f = \eta V_{fc}$$

式中 V_d —— 锻件体积，一模多件时应合算为一件；
 V_f —— 飞边体积；
 V_b —— 冲孔连皮体积；
 V_1 —— 计算毛坯体积；
 η —— 参见 2·3·5 节；
 V_{fc} —— 飞边槽体积；
 N —— 一根毛坯上锻打的件数，质量 $m < 2.5\text{kg}$ 的锻件可以一坯两件（调头锻）， $m \leq 0.5\text{kg}$ 的锻件可以一坯多件；
 V_g —— 钳头料体积，钳头主要是滚压工步所需，所以下列场合可以不需钳头、饼类

件、调头锻，一坯多件最后两次可用调头锻，滚压时不需整个毛坯进入模膛；

δ —— 烧损率，根据不同炉型选择，室式煤炉、油炉：2.5~4，室式煤气炉：2.5~3，半连续煤炉、油炉：2.5~3，半连续煤气炉：2~2.5，电加热：0.5~1。

2. 毛坯直径 从工艺角度，方坯优于圆坯，但圆棒料价廉易购，故应尽量用圆坯。用下述方法计算所得的圆坯直径应圆整成标准值。

饼类锻件坯料直径：

$$d = 1.08 \sqrt{\frac{V_0}{1.8 \sim 2.2}}$$

轴类锻件坯料直径与第一工位的种类有关。

第一工位为拔长时

$$d = (0.98 \sim 1.07) \sqrt{A_{np}} \\ = (0.87 \sim 0.95) d_{np}$$

其余场合

$$d = K d_{np}$$

式中 A_{np} —— 计算毛坯最大头部的平均截面积；

d_{np} —— 计算毛坯最大头部的平均直径；

d_{cp} —— 计算毛坯平均直径；

K —— 系数：无制坯时为 1.01~1.025；第一工步为卡压或成形时为 1.015~1.14；第一工步为滚压时为 1.025~1.095。

3. 毛坯长度

$$L = \frac{4V_0}{d}$$

2·3·8 模膛设计

1. 终锻模膛设计 终锻模膛的型腔即为热锻件图，外周开飞边槽，另加钳口或浇盐口。型腔某些部分必要时应作一些调整：(1) 锻件的较难部分置于上模。(2) 模锻锤吨位偏小时，可适当减小终锻模膛高度尺寸，反之增大。(3) 模膛易于磨损部位的尺寸可较热锻件图略小，以延长锻模寿命。(4) 模膛深凹处常积存氧化皮，不易吹除干净，妨碍金属冲满，应在此部位适当加深模膛尺寸。(5) 当切边冲孔时锻件可能影响余量时，应在该部位适当加大模膛尺寸。

2. 预锻模膛设计 在终锻模膛基础上作如下修改：

(1) 模锻斜度一般同终锻。模膛局部深凹处应适当加大斜度，但模面上模膛宽度不得大于终锻。



(2) 垂直截面上模膛圆角半径 $R_1 = R$ (终锻模膛相应圆角半径) + c 。 c 值见表 3·5-8。

表 3·5-8 c 值 (mm)

所在部位模膛深度	<10	10~25	25~50	>50
c	2	3	4	5

水平投影上锻件尺寸差别较大或急剧转弯处 (图 3·5-8), 预锻模膛圆角半径应适当加大, 圆滑过渡。枝芽锻件 (图 3·5-9) 为了使金属易于向枝芽方向流动, 可增大该处圆角半径, 简化形状, 为了增大金属流向飞边的阻力, 可在飞边桥部增设阻力沟。

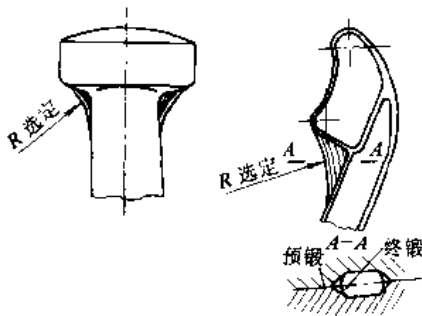


图 3·5-8 预锻模膛

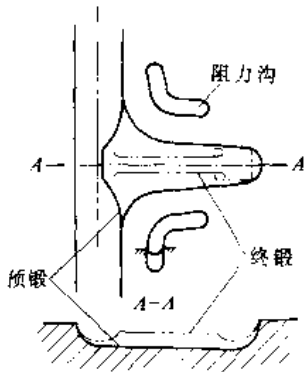


图 3·5-9 枝芽锻件的预锻模膛

(3) 锻件高度方向较小的突起, 在预锻中可以简化, 不必锻出。

(4) 叉形锻件在预锻模膛中应采用劈料台 (图 3·5-10) 进行分料。

(5) 工字形截面预锻模膛宽度可比终锻减小 1~2mm, 并较圆滑 (图 3·5-11)。为了避免产生折纹, (图 3·5-12), 预锻模膛截面 (不计未模合) 应小于或等于终锻模膛截面。

(6) 对带有落差和平衡锁扣的锻件, 在预锻模膛倾斜分模面应加大间隙, 以容纳多余的金属 (图 3·5-13B-B)。

(7) 厚度小于 10mm 的扁薄锻件, 由于在终锻模膛中不易定位, 可将预锻模膛扁薄部分外周制成斜坡 (图 3·5-13 中 C-C)。

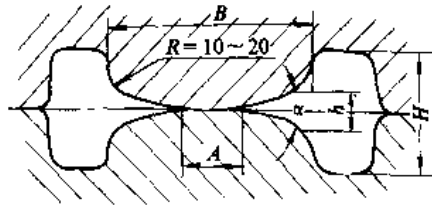


图 3·5-10 劈料台

$$A \approx 0.25B \quad 5 < A < 30 \quad h = (0.4 \sim 0.7)H$$

$$\alpha = 10^\circ \sim 45^\circ, \text{依 } h \text{ 而定}$$

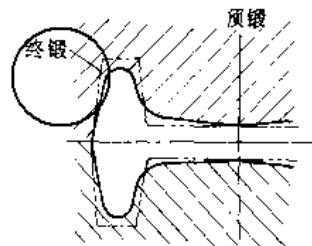


图 3·5-11 工字形截面预锻模膛

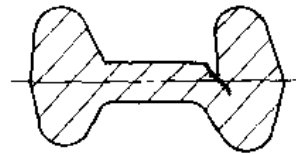


图 3·5-12 折叠

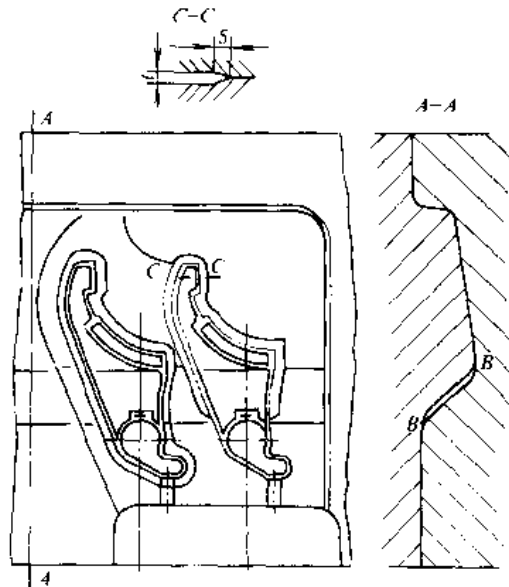


图 3·5-13 平衡锁扣的间隙

3. 拔长模膛设计 (表 3·5-9)。

4. 滚压及卡压模膛设计 (表 3·5-10)。



表 3-5-9 拔长模膛型式与设计

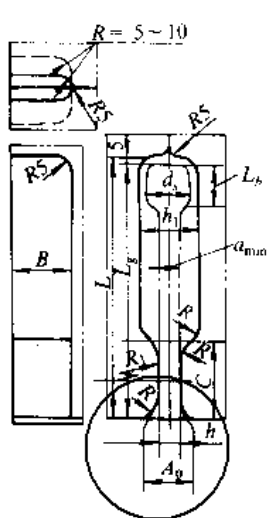
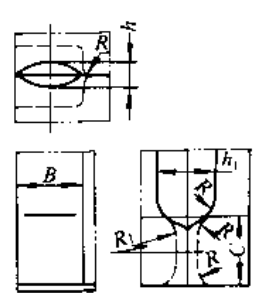
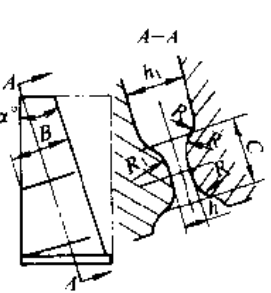
型式	简图与特点	尺寸计算 (mm)																													
按模膛型式分 开式	 <p>制造容易, 操作方便, 应用较广</p>	<p>1. 拔长口高度</p> $h = K_1 \sqrt{\frac{V_g}{L_g}} \text{ (需滚压)}$ $h = K_2 \sqrt{F_{\min}} \text{ (不滚压)}$ <p>式中 V_g, L_g —— 锻件杆部体积(包括飞边)与长度 F_{\min} —— 锻件杆部最小截面(包括飞边)</p> $K_1 = 0.8 \sim 0.9$ $K_2 = 0.75 \sim 0.85$																													
按模膛型式分 闭式	 <p>仅用于细长锻件</p>	<p>2. 拔长口长度</p> $C = K_3 d_0$ <table border="1" data-bbox="782 1008 1404 1209"> <tr> <td>L_0</td> <td>< 1.2</td> <td>$(1.2 \sim 1.5)$</td> <td>$(1.5 \sim 3)$</td> <td>$(3 \sim 4)$</td> <td>> 4</td> </tr> <tr> <td>d_0</td> <td></td> <td>d_0</td> <td>d_0</td> <td>d_0</td> <td>d_0</td> </tr> <tr> <td>K_3</td> <td>1</td> <td>1.2</td> <td>1.4</td> <td>1.5</td> <td>2</td> </tr> </table> <p>表中 d_0 —— 坯料直径 L_0 —— 坯料拔长部分原始长度</p> <p>3. 模膛宽度</p> $E = K_4 d_0$ <table border="1" data-bbox="782 1366 1404 1657"> <tr> <td>d_0 (mm)</td> <td>< 40</td> <td>$40 \sim 80$</td> <td>> 80</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">K_4</td> <td>直式</td> <td>2</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>斜式</td> <td>1.7</td> <td>1.3</td> </tr> </table>	L_0	< 1.2	$(1.2 \sim 1.5)$	$(1.5 \sim 3)$	$(3 \sim 4)$	> 4	d_0		d_0	d_0	d_0	d_0	K_3	1	1.2	1.4	1.5	2	d_0 (mm)	< 40	$40 \sim 80$	> 80	K_4	直式	2	1.5	斜式	1.7	1.3
L_0	< 1.2	$(1.2 \sim 1.5)$	$(1.5 \sim 3)$	$(3 \sim 4)$	> 4																										
d_0		d_0	d_0	d_0	d_0																										
K_3	1	1.2	1.4	1.5	2																										
d_0 (mm)	< 40	$40 \sim 80$	> 80																												
K_4	直式	2	1.5																												
	斜式	1.7	1.3																												
按模膛排列分 直式	<p>图同上。模膛中心线与锻模燕尾中心线平行, 应用较广</p>																														
斜式	 <p>模膛较多, 布排有困难时采用, $\alpha \leq 20^\circ$, 以坯料不碰锤柱为原则</p>	<p>4. 其他尺寸</p> $R = 0.25C$ $K_1 = 10R$ $h_1 = 2h \text{ 或 } 1.2d_2 \text{ (小头直径)}$																													



表 3-5-10 滚压模膛型式与设计

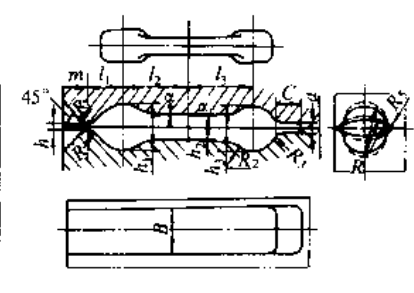
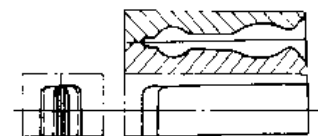
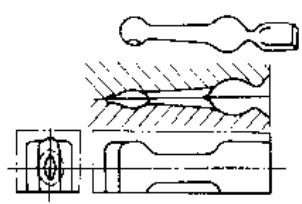
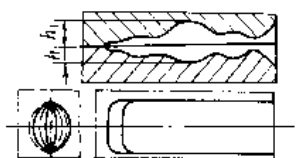
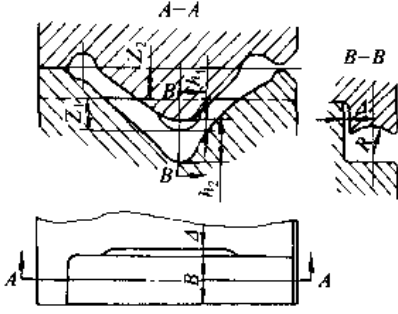
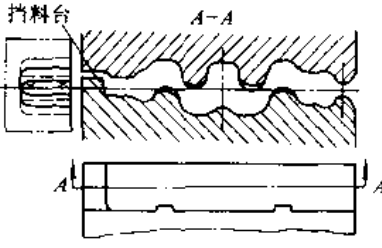
型 式	图 例 与 特 点	尺 寸 计 算																		
闭 式	 <p>金属横向展宽小，轴向流动大。聚料效果好，应用较广</p>	<p>1. 模膛各部分高度</p> $h = K \sqrt{A}$ <p>式中 A —— 锻件相应部分截面(包括飞边)</p> <p>K 值</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">坯料直径 d_0 (mm)</th> <th colspan="2">$A < A_0$</th> <th rowspan="2">$A > A_0$</th> </tr> <tr> <th>闭 式</th> <th>开 式</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 30</td> <td>0.9</td> <td>0.85</td> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td>30 ~ 60</td> <td>0.85</td> <td>0.8</td> <td>1.15</td> </tr> <tr> <td>> 60</td> <td>0.8</td> <td>0.75</td> <td>1.13</td> </tr> </tbody> </table> <p>杆部较长时，模膛可制出 $\alpha = 2^\circ \sim 3^\circ$ 斜度，以利于金属流向头部</p>	坯料直径 d_0 (mm)	$A < A_0$		$A > A_0$	闭 式	开 式	< 30	0.9	0.85	1.2	30 ~ 60	0.85	0.8	1.15	> 60	0.8	0.75	1.13
坯料直径 d_0 (mm)	$A < A_0$			$A > A_0$																
	闭 式	开 式																		
< 30	0.9	0.85	1.2																	
30 ~ 60	0.85	0.8	1.15																	
> 60	0.8	0.75	1.13																	
开 式	 <p>相对于闭式，金属横向展宽小，轴向流动小。聚料效果不及闭式，适用于叉形锻件制坯，操作方便</p>	<p>2. 模膛宽度 B</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>坯料型式</th> <th>闭 式</th> <th>开 式</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>原坯料</td> <td> $B = 1.15 \frac{A_0}{h_{min}}$ 且 $1.7d_0 > B > 1.1d_{max}$ </td> <td> $B = \frac{A_0}{h_{min}} + 10\text{mm}$ 且 $1.5d_0 > B > d_{max} + 10\text{mm}$ </td> </tr> <tr> <td>拔长后坯料</td> <td> $B = (1.4 \sim 1.6)d_c$ 且 $B > 1.1d_{max}$ </td> <td> $B = (1.4 \sim 1.6)d_0$ 且 $B > d_{max} + 10\text{mm}$ </td> </tr> </tbody> </table>	坯料型式	闭 式	开 式	原坯料	$B = 1.15 \frac{A_0}{h_{min}}$ 且 $1.7d_0 > B > 1.1d_{max}$	$B = \frac{A_0}{h_{min}} + 10\text{mm}$ 且 $1.5d_0 > B > d_{max} + 10\text{mm}$	拔长后坯料	$B = (1.4 \sim 1.6)d_c$ 且 $B > 1.1d_{max}$	$B = (1.4 \sim 1.6)d_0$ 且 $B > d_{max} + 10\text{mm}$									
坯料型式	闭 式	开 式																		
原坯料	$B = 1.15 \frac{A_0}{h_{min}}$ 且 $1.7d_0 > B > 1.1d_{max}$	$B = \frac{A_0}{h_{min}} + 10\text{mm}$ 且 $1.5d_0 > B > d_{max} + 10\text{mm}$																		
拔长后坯料	$B = (1.4 \sim 1.6)d_c$ 且 $B > 1.1d_{max}$	$B = (1.4 \sim 1.6)d_0$ 且 $B > d_{max} + 10\text{mm}$																		
混 合 式	 <p>头部开式，杆部闭式。适用于头部有冲孔或需劈料的锻件</p>	<p>闭式不对称滚压模膛： 头部模膛宽度 $B_r = 2.2h_1$</p> <p>闭式不等宽滚压模膛： 杆部模膛宽度 $B_g = 1.25 \frac{A_g}{h_{min}}$ 头部模膛宽度 $B_r = 1.1d_{max}$</p> <p>长度 > 600mm 的轴类锻件： $B = 2d_0$</p> <p>小型锻件计算宽度 $B < 45\text{mm}$ 时则取 45mm，以便于操作</p>																		
不对称闭式	 <p>上下模膛不对称，适用于 $\frac{h_1}{h} < 1.8$ 的不对称锻件制坯</p>	<p>F_c, d_0 —— 坯料截面，直径 A_g —— 锻件杆部平均截面(包括飞边) d_{max} —— 锻件最大截面直径(包括飞边) h_{min} —— 模膛最小高度</p> <p>3. 模膛长度 L</p> <p>直长轴线锻件模膛长度等于热锻件长度；无拉伸弯曲锻件可按距弯曲内侧径向 1/3 处中心线展开得出；有明显拉伸弯曲锻件按锻件水平投影确定</p>																		



表 3-5-11 弯曲模膛型式与设计

型式	图例与特点	尺寸计算																				
自由弯曲式	 <p>坯料在略有拉伸条件下弯曲成形。适用于圆浑弯曲锻件</p>	<p>1. 模膛形状根据热锻件水平投影外形用作图法得出</p> <p>2. 模膛深度</p> $h \leq (0.8 \sim 0.9)b$ <p>式中 b——锻件相应截面宽度。容易堆积氧化皮部位,可适当加大深度</p> <p>3. 模膛宽度 B</p> <table border="1"> <tr> <td>原坯料</td> <td>拔长,深压后坯料</td> </tr> <tr> <td>$B = \frac{A_0}{h_{min}} + (10 \sim 20)\text{mm}$</td> <td>$B = \frac{A_1}{h_{min}} + (10 \sim 20)\text{mm}$</td> </tr> <tr> <td></td> <td>且 $B \geq \frac{A_{max}}{h_2} + (10 \sim 20)\text{mm}$</td> </tr> </table> <p>式中 A_0——坯料截面</p> <p>A_1, h_{min}——模膛最小深度处坯料截面和相应模膛深度</p> <p>A_{max}, h_2——坯料最大截面及其相应模膛深度</p> <p>4. 上下模间隙 Δ</p> <table border="1"> <tr> <td>锻锤吨位(t)</td> <td>< 1</td> <td>1~1.5</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>10~16</td> </tr> <tr> <td>Δ (mm)</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> </table> <p>5. 其他</p> <p>模膛急弯弯曲部位应制成较大圆角,以防止终锻时产生折纹;上下模膛突出分模面高度应大致相等(即 $Z_1 \approx Z_2$);模膛突出部分截面应制成弧形凹坑, $h_1 = (0.1 \sim 0.2)h$, h 为相应模膛深度;下模应设两个支点将坯料水平支承;模膛末端制出挡料台以便定位,如坯料经过滚压,可采用钳口定位</p>	原坯料	拔长,深压后坯料	$B = \frac{A_0}{h_{min}} + (10 \sim 20)\text{mm}$	$B = \frac{A_1}{h_{min}} + (10 \sim 20)\text{mm}$		且 $B \geq \frac{A_{max}}{h_2} + (10 \sim 20)\text{mm}$	锻锤吨位(t)	< 1	1~1.5	2	3	5	10~16	Δ (mm)	3	4	5	6	7	8
原坯料	拔长,深压后坯料																					
$B = \frac{A_0}{h_{min}} + (10 \sim 20)\text{mm}$	$B = \frac{A_1}{h_{min}} + (10 \sim 20)\text{mm}$																					
	且 $B \geq \frac{A_{max}}{h_2} + (10 \sim 20)\text{mm}$																					
锻锤吨位(t)	< 1	1~1.5	2	3	5	10~16																
Δ (mm)	3	4	5	6	7	8																
夹紧弯曲式	 <p>坯料在明显拉伸条件下弯曲成形。适用于多处弯曲、急弯弯曲锻件</p>	<p>5. 其他</p> <p>模膛急弯弯曲部位应制成较大圆角,以防止终锻时产生折纹;上下模膛突出分模面高度应大致相等(即 $Z_1 \approx Z_2$);模膛突出部分截面应制成弧形凹坑, $h_1 = (0.1 \sim 0.2)h$, h 为相应模膛深度;下模应设两个支点将坯料水平支承;模膛末端制出挡料台以便定位,如坯料经过滚压,可采用钳口定位</p>																				

5. 弯曲及成形模膛设计 弯曲模膛设计见表 3-5-11。成形模膛的设计方法与自由弯曲模膛基本相同。

6. 其他模膛设计

- a. 墩粗台 (图 3-5-14, 表 3-5-12)
- b. 压扁台 (图 3-5-15)

表 3-5-12 墩粗台尺寸计算

坯料墩粗后直径 D_d	坯料墩粗后高度 h	坯料墩粗后至各边缘距离 c, c', c''	键槽中心线位置	燕尾中心线位置
$D_1 > D_d > D_2$	$h = \frac{V_0}{\frac{\pi}{4} D_d^2}$	$c = 10 \sim 15\text{mm}$ $c' = 5 \sim 10\text{mm}$ $c'' = 15 \sim 20\text{mm}$	$\frac{B-b_1}{b_1} < 1.4$	$\frac{L-l_1}{L-l_1} < 1.4$

V_0 ——坯料体积(包括飞边)

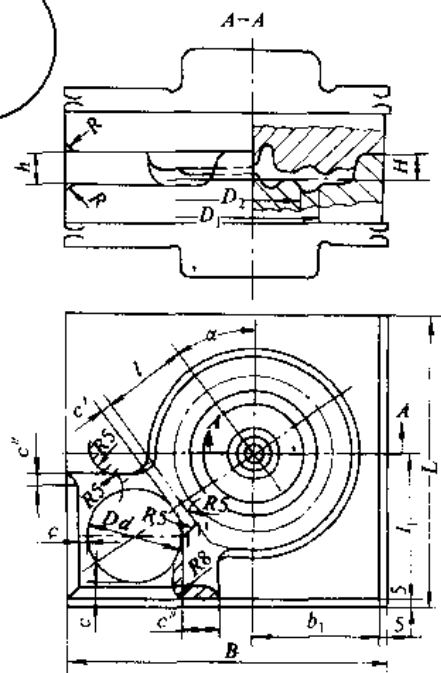


图 3-5-14 墩粗台



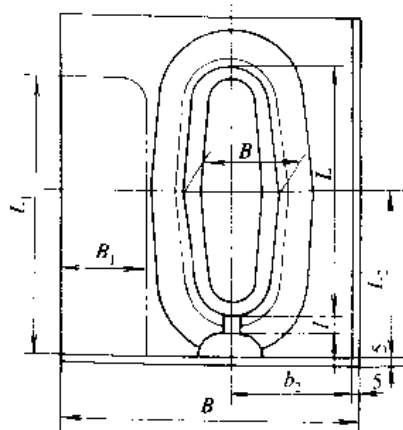


图 3-5-15 压扁台

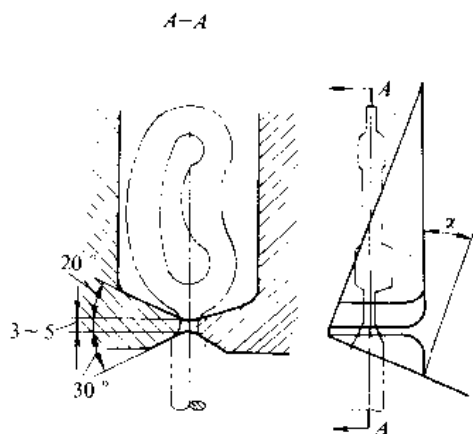


图 3-5-16 前切刀

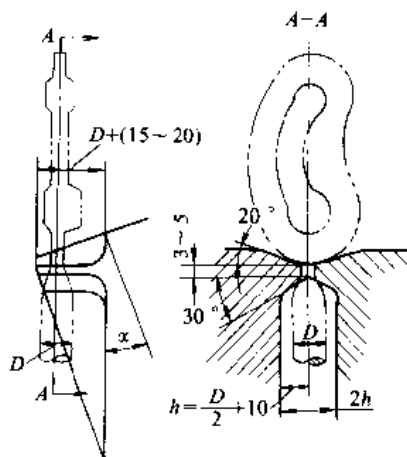


图 3-5-17 后切刀

c. 切断模膛 (1) 前切刀(图 3-5-16)多位于锻模右前角或左前角,操作方便,生产效率高;(2)后切刀(图 3-5-17)多位于锻模左后角;(3)联合切刀(图 3-5-18)滚压时进行切断,生产效率高。

各类切刀的斜角根据模膛布排与操作方便,常用 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

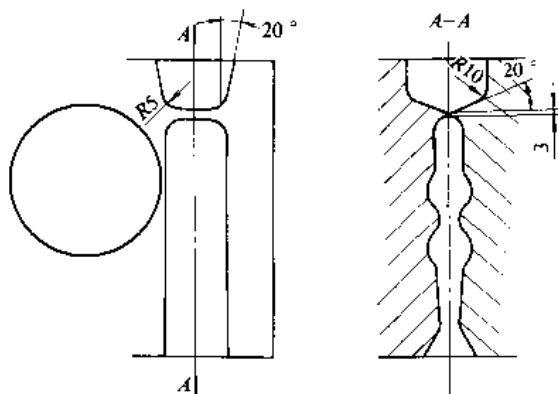


图 3-5-18 联合切刀

2.3.9 锻模结构设计

锻模结构设计的内容包括:模膛安排,锁扣设计,模块尺寸设计和校核,选用标准模块、燕尾及检验面等等。具体方法参见第6篇第5章。

2.4 胎模锻

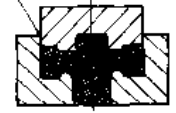
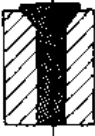
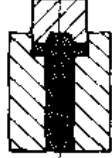



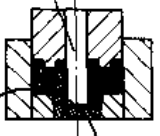
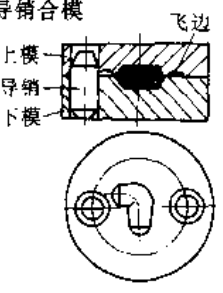

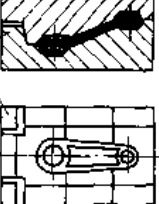


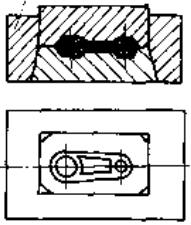
胎模锻是从自由锻的甩子、型砧、垫模、漏盘等等锻造工具基础上发展起来的锻造方法,曾广为应用。它采用活动的胎模,由人工(也可由操作机)抬到自由锻设备上锻出锻件,其模具简单,工艺灵活,可用多种方式方法进行制坯和成形或局部成形,可进行无飞边模锻,原则上可以锻出所有种类的锻件。但是,胎模锻的抬模劳动强度大,辅助操作多,金属与模具接触时间长,导致生产率和模具寿命低下;而且常需多火加热,以致锻件表面质量差,所以胎模锻的缺点是很大的。在特殊情况下虽不失为一种可选的生产方法,但应慎重采用。

胎模锻的制坯可直接采用自由锻进行,但更多是用甩子、垫模、型砧等工具,可以参照锤上模锻制坯模膛进行设计。切边冲孔胎模基本上与漏盘相同。

成形胎模大致可分成套筒模(开式、闭式)和合模两大类,见表 3-5-13。



表 3-5-13 成形胎模分类及应用

分类及特点	结构简图	用途	分类及特点	结构简图	用途
套模 (闭式套筒模) 由模套、冲头、下垫组成; 炯形终了, 在模套与上冲间常形成纵向毛刺; 取件时胎模翻转180°或不翻转; 主要用于圆盘、圆环类锻件成形	无垫套模 纵向毛刺 	高凸台法兰、高毅齿轮、带杆杯筒成形	套模	顶墩垫模 	法兰轴、销轴顶墩
	顶墩套模 	法兰轴顶墩		跳模 (不通孔垫模) 	法兰墩挤; 当锤击力量足够、模膛光洁、润滑适当时, 锻件能由模内自动跳出
	带垫套模 模套 冲头 下垫 	法兰、齿轮、杯筒、环套炯形; 是套模基本形式		拼分垫模 	双面法兰、侧壁有凹挡的锻件成形
	活动冲头套模 活动冲头 	法兰、齿轮、杯筒、环套炯形; 是套模基本形式。模内深孔冲挤、冲连皮孔		导销合模 飞边 上模 导销 下模 	平面分模杆叉类锻件成形; 是合模基本形式
	拼分套模 拼分模 	双面法兰成形		导锁合模 导锁 	平面分模, 落差较小的弯曲分模锻件成形
	垫模 (开式套筒模) 仅有下模, 上模即上平砧。炯形终了在上端面常形成横向小飞边。取件时胎模需翻转180°。主要用于圆盘类锻件制坯及炯形	无垫垫模 小飞边 		圆盘类制坯; 法兰顶墩、墩挤; 是垫模基本形式	合模
带垫垫模 	圆盘类制坯; 法兰顶墩、墩挤; 是垫模基本形式。加垫可增大模高, 便于模, 成形下端有凸凹的锻件	导框合模 导框 	平面分模、尺寸相近的小型锻件采用公用导框成形		

模具公司制作 请尊重作者版权



3 锻压机模锻

锻压机模锻与锤模锻性质相近，锤模锻工艺设计的所有原理、原则、方法和应用，基本上都适用于锻压机模锻，但也存在某些差别，有其特点。

锻压机模锻与锤模锻的差别主要是由所用设备不同引起的。锻压机模锻使用热模锻机械压力机，它的行

程、节拍、速度都是固定的；它以较慢速度施加压力，故冲击较小；以封闭的整体机架代替了与锤头分离的大砧座。由此，锻压机模锻有以下特点：

(1) 由于上下模均有顶出器，故设置分模面的自由度稍大，拔模斜度可减至 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ，整体机架刚性好，模具上有导柱，在电加热条件下，锻件精度有所提高，余量公差比锤模锻件略小。

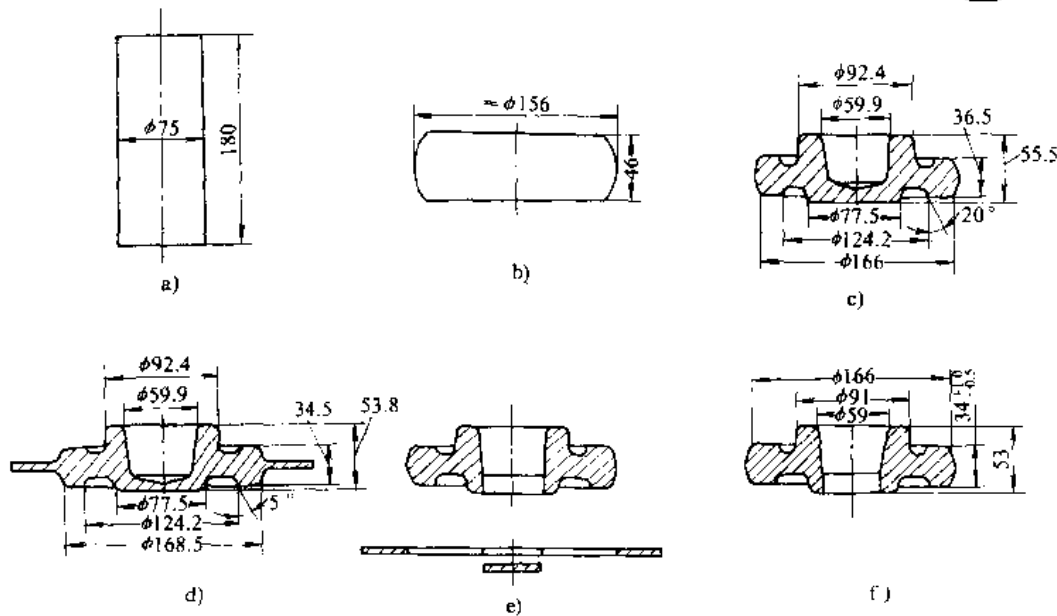


图 3-5-19 从动轮模锻变形过程

a) 坯料 b) 自由锻粗 c) 预锻 d) 终锻 e) 切边、冲连皮 f) 锻件

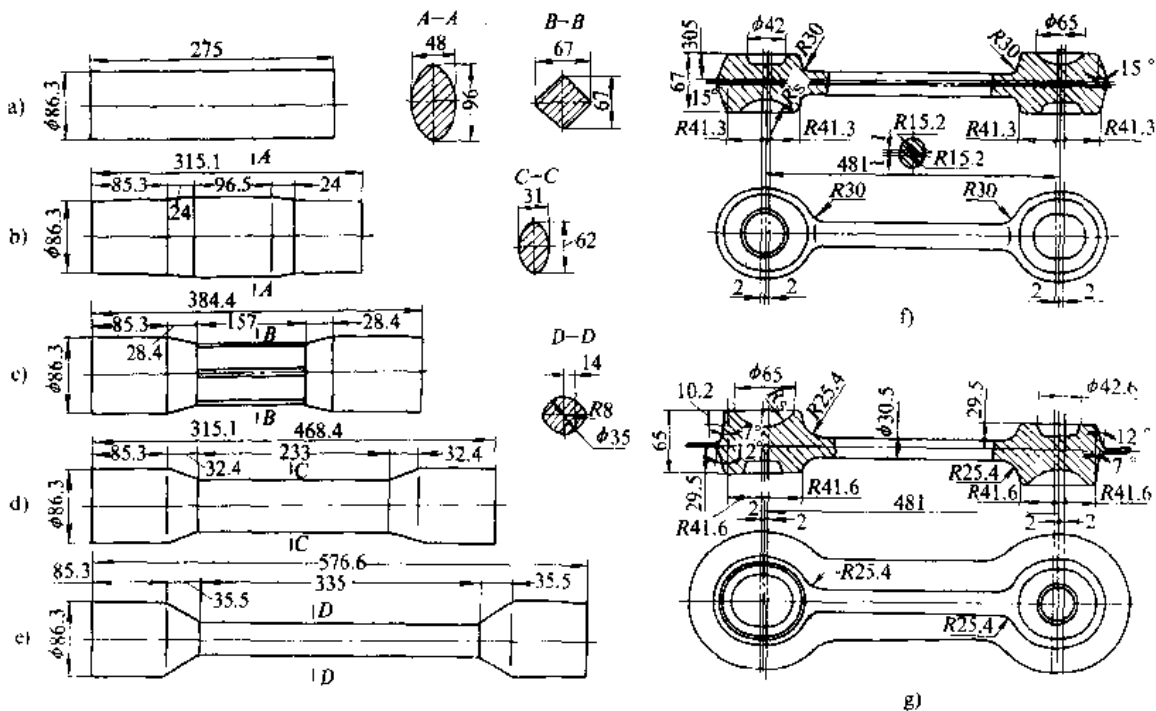


图 3-5-20 从动杆模锻变形过程

a) 坯料 b)、c)、d)、e) 模锻制坯 f) 预锻 g) 终锻

冶金工业出版社重作版权



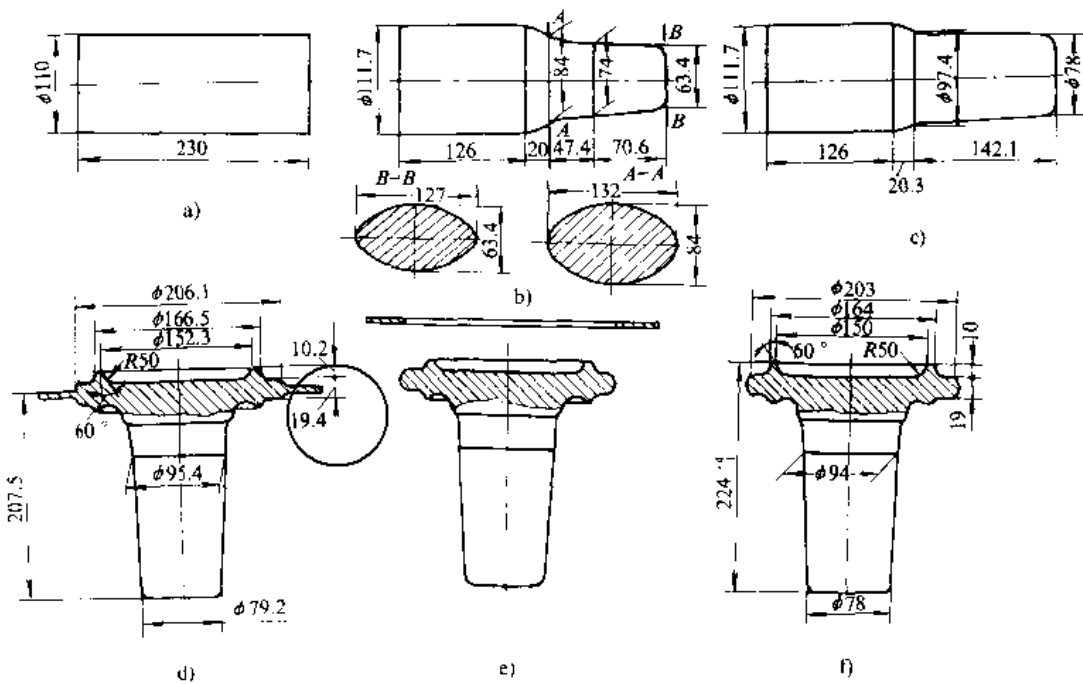


图 3-5-21 轮毂轴管模锻工步

a) 毛坯 b)、c) 制坯 d) 终锻 e) 切边 f) 锻件

(2) 在每个工步中金属的变形都是一次行程完成、而不是多次打击,变形较均匀;但是金属在水平方向流动趋势大而高度方向的充填能力稍弱,对于薄壁高筋锻件,采用预锻、预成形工步的情况增多,而且预锻、预成形工步的作用更为重要,设计难度也有所提高。图 3-5-19 为一种饼类锻件的工艺过程示例。

(3) 由于上模行程固定,在锻压机上不适合于进行拔长和滚压操作,这两个常用的工步需在其他设备上完成。目前较理想的配套制坯设备是辊锻机。图 3-5-20 为辊锻机制坯、锻压机预锻终锻的实例。

(4) 由于有顶出器,锻件高度可比锤模锻高得多,可立起来锻“头杆形锻件”,例如轮毂轴管、汽车转向节、汽阀等等;同时还可以采用挤压工步。这些都是锤模锻不能做到的。图 3-5-21 为用两次卡压制坯、以锻锻方式终锻的实例。

当锻件的头与杆的截面积相差很大时,也可配用平锻、电锻等聚料功能强的设备作制坯(图 3-5-22);其中电锻制坯较好,平锻因制坯工步较多,现已少用。

(5) 由于锻压机行程和变形的特点,上下模不需打靠,飞边槽尺寸应略大(表 3-5-14);终锻模膛深度最后充填处应开直径小于 2mm 的排气孔以保证充满。预锻模膛中的锻粗成形部位的深度应比相应的终锻模膛深度增大 4%~5%,宽度则每边减少 0.5~2mm;压入法成形部位的形状应保证预锻件放入终锻模膛时,

立即与模壁接触,以限制金属水平方向流动,迫使金属向深度方向充填。其他制坯工步及其模膛,例如卡压、压扁、成形、弯曲、锻粗等等的设计方法基本上与锤模锻相同。但锻压及模锻时更常用预成形锻粗、局部锻粗等工步,以适应那些高度大、充填较难的饼类锻件成形的需要。锻压机上不用切断工步。

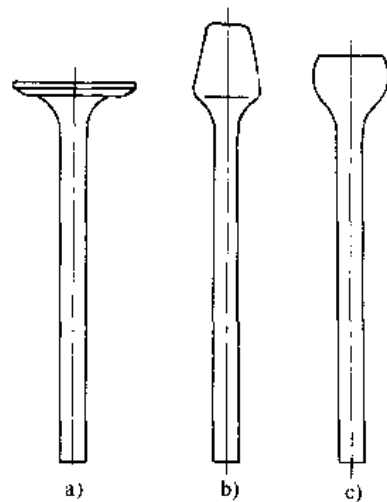


图 3-5-22 汽阀模锻工艺

a) 锻件 b) 平锻制坯 c) 电锻制坯

(6) 锻压机多采用组合模。各模膛分别制在镶块上,然后集中固紧在通用模架上。图 3-5-23 为矩形镶块用的通用模架示例。一台锻压机配备多套模架。在一



付模架上, 工位(镶块数及安装位置)及顶杆(数量、位置)都是固定的, 工艺设计时应适应这一特点。一般有顶杆的工位不超过三个, 总工位不超过五个。

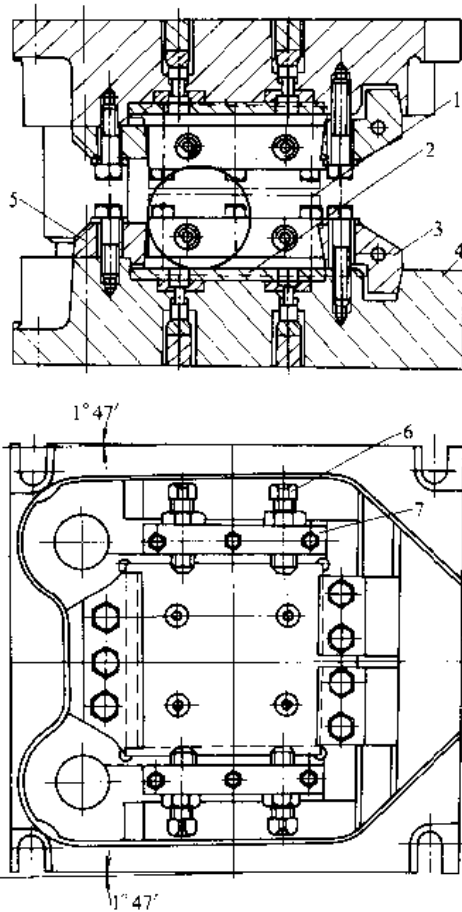


图 3-5-23 矩形斜面压板式模架

- 1—镶块 2—下垫板 3—前压块 4—下撑座
5—后定位压块 6—侧压紧螺栓 7—侧压固定块

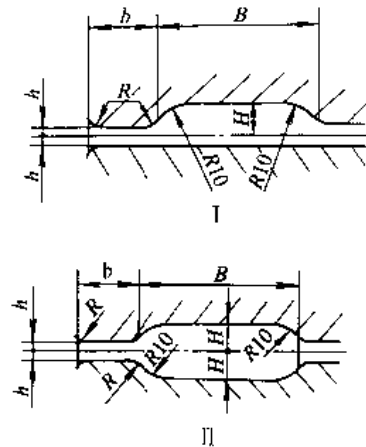
(7) 锻压机的规格以压力表示, 可用下式计算:

$$P = KA \quad (\text{kN})$$

式中 A ——锻件及飞边桥部的水平投影面积 (mm^2);

K ——系数, 结构钢按钢种及形状复杂程度取 0.64 ~ 0.73。

表 3-5-14 飞边槽尺寸



压力机吨位 (kN)	b (mm)	h (mm)	II (mm)	B (mm)	R (mm)
10000~16000	10~12	1.2~1.5	5	25~30	1.5~2
20000~25000	10~14	1.5~2	5~6	30~35	2~3.5
31500~40000	12~14	2~2.5	6~7	35~40	2~3
63000~80000	12~16	2.5~3.5	7~8	40~45	3~4
120000	14~16	2.5~4.0	8~10	45~50	3~5

4 螺旋压力机模锻

螺旋压力机也称螺旋锤, 其滑块行程不固定, 可多次打击, 打击能量可控, 这一特点与锤相似, 但打击速度要慢得多, 冲击力较小; 另一方面, 它由飞轮释放能量、整体机架、有顶出器, 这些特点则近似于锻压机。但是, 它只有一根下顶杆, 动作慢, 顶出时间长, 金属温降大; 传动螺杆对偏载敏感。所以, 螺旋压力机模锻特点是: 不利于多模膛模锻, 可以用无飞边模、剖分活动凹模等等。螺旋压力机是一种多功能设备, 除本节所述的一般模锻外, 它很适合于精密模锻, 还可以用于弯曲、校正、精压、挤压、切边冲孔、下料等作业。

螺旋压力机普通模锻件的分类及特点见表 3-5-15。

表 3-5-15 螺旋压力机模锻件分类

分 类	锻 件 简 图	说 明
第 I 类 顶墩类锻件		1. 头部局部墩粗成形, 杆部不变形 2. 多用开式模具进行小飞边模锻



(续)

分 类	锻 件 简 图	说 明
第 I 类 杯盘类锻件		1. 整体墩粗、挤压成形 2. 多采用闭式模具, 进行无飞边模锻
第 II 类 长轴枝叉类锻件		1. 相当于锤上模锻的长轴类锻件, 又可分为直线主轴、弯轴、叉杆及带枝芽、十字轴类锻件 2. 采用开式模具, 进行有飞边模锻
第 III 类 长轴弯曲类锻件		
第 IV 类 用组合凹模锻出的在两个方向有凹坑的锻件		采用组合凹模, 可得到在两个方向上有凹坑、凹挡的锻件, 如法兰、三通阀体等

普通饼、轴类锻件的模锻工艺与锤、锻压机模锻相近, 但应尽量用单模膛终锻, 同时用配套设备制坯; 当必须用预锻时, 模具的模膛中心不应超过螺杆直径的范围, 以免偏载过大。此类锻件的模具大多用类似于锤锻模的整体模。

顶墩类锻件的小飞边模锻在螺旋压力机上运用很广。图 3-5-24 为螺钉、铆钉墩头模的结构示例。

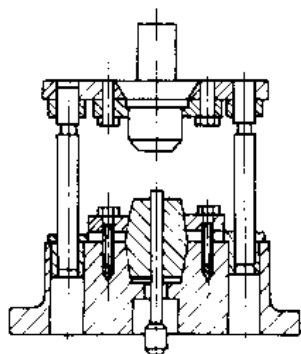


图 3-5-24 螺旋压力机用顶墩模结构示例

图 3-5-25 为杯盘类锻件的无飞边模, 有一定的典型性。

图 3-5-26 为活动剖分凹模示意。
螺旋压力机吨位确定

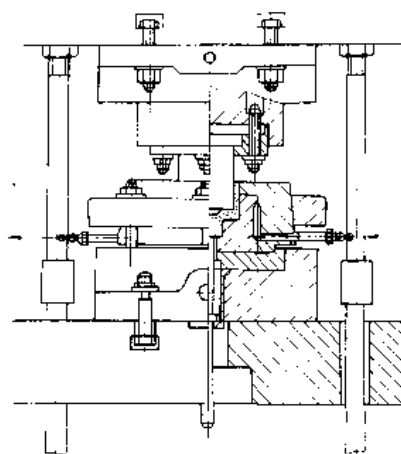


图 3-5-25 螺旋压力机杯盘类锻件无飞边模结构示意



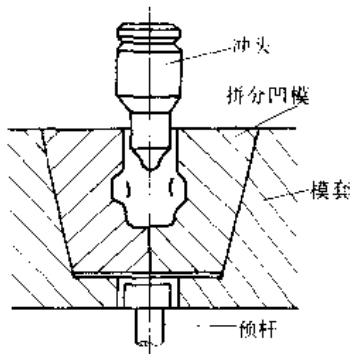


图 3-5-26 剖分凹模

螺旋压力机的吨位严格说应按能量计,但习惯上仍多用压力,按终锻工步打击2~3次计,其压力可用下式计算:

$$P = (1.75 \sim 2.8)KA \quad (\text{kN})$$

式中 K —— 材料系数,见表 3-5-16;

A —— 包括连皮、飞边在内的锻件水平投影面积 (mm^2),

如终锻需在一次打击内完成,则吨位应增大一倍。

表 3-5-16 材料系数 K

钢 号	K
$w_c \leq 0.25\%$ 碳素钢。如 10, 20, Q215	0.9
$w_c > 0.25\%$ 的碳素钢, $w_c \leq 0.25\%$ 的低合金结构钢。如 45, 20Cr	1
$w_c > 0.25\%$ 的低合金结构钢。如 45Cr, 45CrNi	1.1
高合金钢, 硅铬钢。如 GCr15, 45CrNiMo	1.25
合金工具钢。如 3Cr2W8, 7Cr3	1.55

注: w_c 为 C 的质量分数。

5 平锻机模锻

5.1 平锻工艺特点

平锻和前述各种模锻方法差别很大,专用性较强。图 3-5-27 为汽车半轴平锻工艺及模具的简图。由剖分活动凹模夹住棒料(或毛坯),凸模水平方向前进使棒料头部成形。因此它适合于锻造细杆大头的“头杆件”、空心件(参见图 3-5-35)和管子局部成形。多数情况下可采用长棒料直接模锻,并且用无飞边成形。

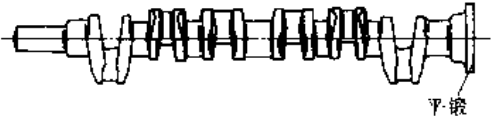
5.2 平锻件分类及特点(表 3-5-17)

表 3-5-17 平锻件分类及特点

锻件类别	简 图	工 艺 特 点
杆 类		<ol style="list-style-type: none"> 1. 坯料直接按锻件杆部直径选定 2. 大多数单件模锻(一坯一件),后挡板定位 3. 模膛采用: 积聚、预成形、终锻
穿孔类		<ol style="list-style-type: none"> 1. 坯料直径尽量按孔径选定 2. 多件模锻(一坯数件),前挡板定位 3. 模膛采用: 积聚、预成形、终锻、穿孔
管 类		<ol style="list-style-type: none"> 1. 坯料直径按锻件杆部直径选定 2. 多采用后挡板定位; 3. 加热长度不超过变形长度不能太多 4. 应先增加壁厚再锻粗成形 5. 模膛采用: 积聚、预成形、终锻



(续)

锻件类别	简 图	工 艺 特 点
联合模锻		采用一种以上模锻设备成形复杂锻件。如曲轴锻件曲拐部分锤上模锻，法兰部分平锻

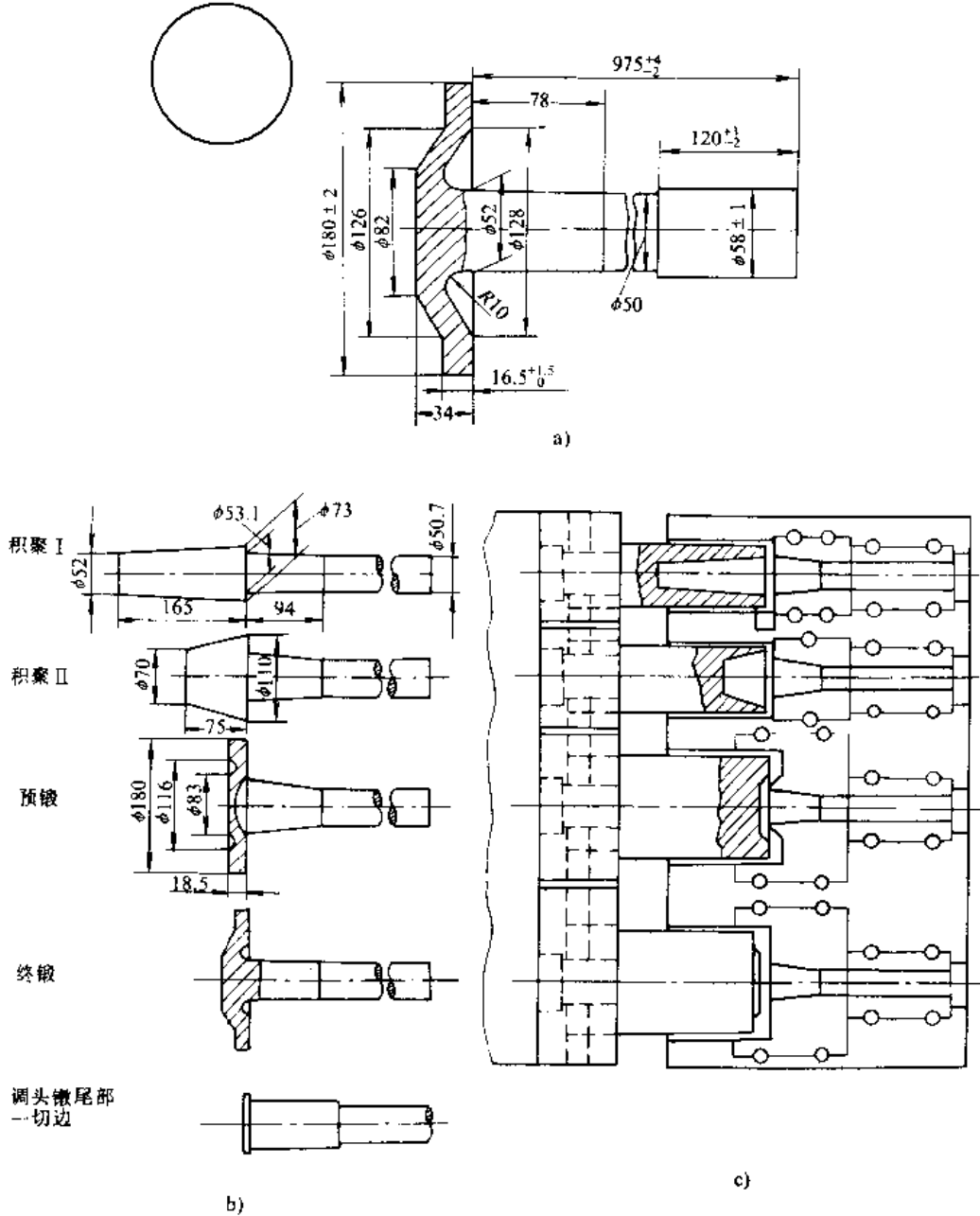


图 3·5-27 半轴平锻工步及模具
a) 锻件 b) 平锻工步 c) 平锻模

5·3 平锻件图及毛坯的特点

旋转体锻件用前挡板定位时，多用无飞边闭式模

锻，分模面设在最大直径处(图 3·5-28a)用后挡板定位以及非旋转体头杆件，需有飞边，分模面设在端面上(图 3·5-28b)；终锻模膛的主要部分在凸模内时，需用

模具公司制作 请尊重作者版权



飞边，分模原则与前述各种模锻相似（图 3·5-28c）。

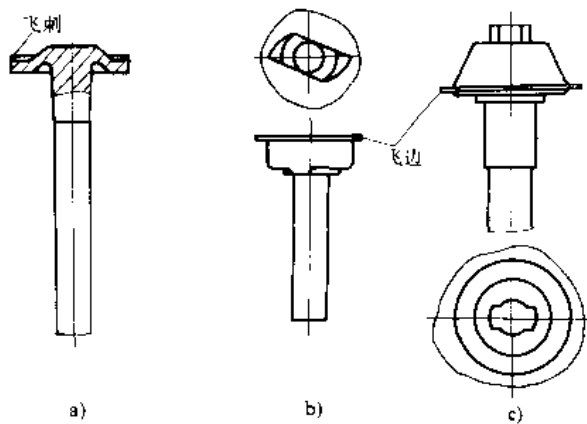


图 3·5-28 平锻件的分模面

由于剖分凹模等因素的影响，平锻件精度略低，加工余量约每边 1.5~4mm，公差为 (+1、-0.5) ~ (+2、-1)。

由于平锻模有两个分模面，锻件出模方便锻件不同部位所需拔模斜度（图 3·5-29）为：

$$\begin{aligned} \alpha &= 3^\circ \sim 5^\circ \\ \beta &= 7^\circ \sim 12^\circ \\ \theta &= 0.5^\circ \sim 1.5^\circ \end{aligned}$$

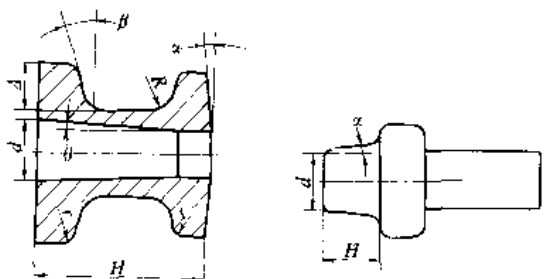


图 3·5-29 平锻件斜度

毛坯体积及长度的计算方法同前。“头杆件的毛坯直径”取杆部直径，冲孔件的直径等于计算毛坯的最小直径，也即毛坯的截面积等于最小截面积。

5.4 平锻件的飞边及穿孔芯料

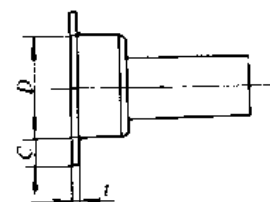
平锻件的飞边形式及尺寸见表 3·5-18。

穿孔芯料的作用与前述的连皮相似，但它和棒料连在一起，其形状见图 3·5-30。其中浅孔用平冲头终锻，芯料形式见图 3·5-30b，其尺寸为： $l_0 = 2 \sim 10\text{mm}$ ， $R_1 = (0.8 \sim 1.2)d$ ， $R_2 = (0.1 \sim 0.15)d$ 。深孔用尖冲头终锻（图 3·5-30a）， $R_1 = 0.2d$ ， $R_2 = 0.4d$ ， $\alpha = 60^\circ \sim 120^\circ$ ； l_0 与平锻机大小相关，取 20~45mm。

穿孔后芯料必须平滑地连在棒料上，因此，如棒料直径大于穿孔直径，棒料需在先行工步中夹细（图

3·5-30a），棒料小于孔径则需膨大（图 3·5-30b）。

表 3·5-18 横向飞边尺寸 (mm)



D	<20	20~80	80~160	160~260	260~360
c	5~8	8~12	12~16	16~20	20~25
t	1.0~1.5	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	5.0~6.0

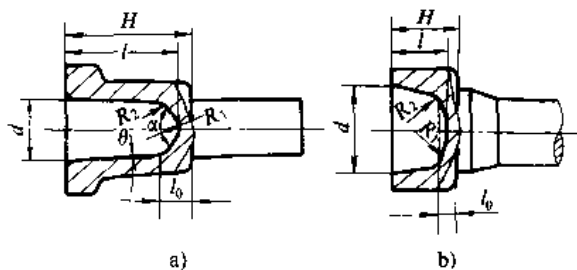


图 3·5-30 穿孔芯料

5.5 平锻工步

平锻过程由下列作业组成：

- 制坯——积聚、预冲孔等；
- 成形——终锻（成形）、预锻（成形）等；
- 辅助——切边、穿孔、切断（棒料或过细的芯料）、夹细、膨大、弯曲、夹扁等等。

它们多数均单独成为工步，但也有几种作业复合成一个工步的，例如预冲孔和预成形；夹细、膨大则总是复合在其他作业之中。

1. 积聚工步 当坯料变形部分的长细比 $l_0/d_0 < 2 \sim 2.5$ 时，可以一次顶锻成形，否则就要用积聚工步使坯料逐步加粗，直至符合一次顶锻成形的要求。

积聚可以在凹模或凸模的型腔内实现。由于平锻凹模是剖分的，积聚时易产生毛刺，故多数用锥形型腔的凸模（图 3·5-31）积聚。锥形腔的尺寸及积聚次数计算方法如下：

已知 $\psi = l_0/d_0$ ，设定 $\eta = 1 \sim 1.2$ ；从图 3·5-31 中 ψ 曲线和折线 abc 交点的纵横坐标，查得 β 和 ϵ 值；图 3·5-31 中锥腔的尺寸即全部确定（实际设计时尺寸应略增大，使体积增大 3%~10% 以免产生飞边）。



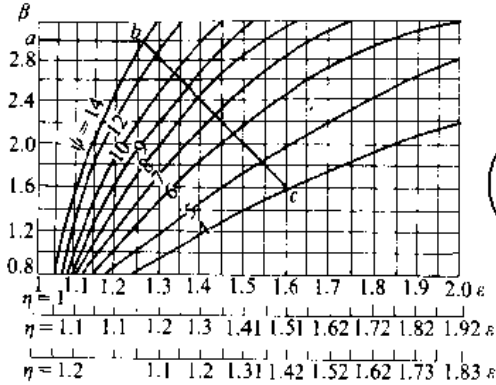
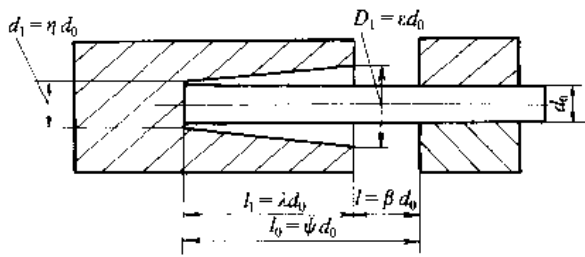


图 3-5-31 锥腔尺寸图线

将锥腔的平均直径作为 d_0 , l_1 作为 l_0 , 校核是否可以直接成形。如长细比仍过大, 则用同样的方法计算第二次积聚的锥腔尺寸, 直至长细比符合成形要求。

图 3-5-32 为二次积聚后直接成形的实例。

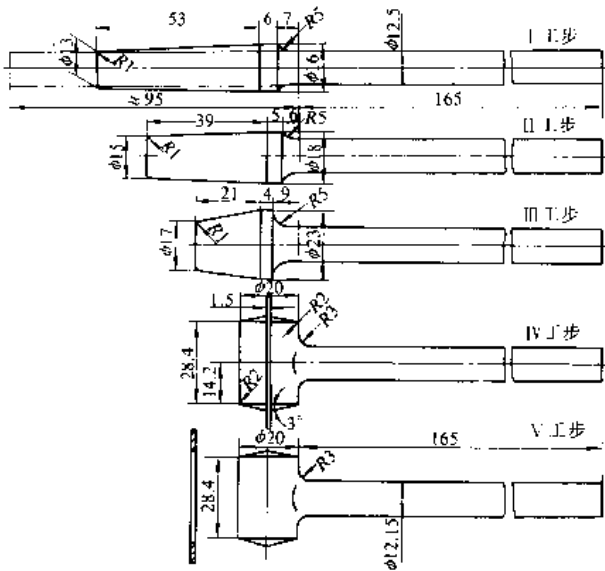


图 3-5-32 水箱柱杆平锻工步

2. 冲孔工步 浅孔可一次冲成, 深孔则需分几次冲(表 3-5-19)。表中 l/d 见图 3-5-30。如冲孔前毛坯端部已形成大的突缘使毛坯能在凹模中准确定心、并且“拉住”毛坯使它在冲孔时不能后退, 则冲孔次数可以减少。

冲孔前毛坯应锻成“计算毛坯”的形状, 冲深孔前,

毛坯端部应锻至其直径等于凹模直径(锻件相应处外径)以便定心, 并冲出定心孔。

表 3-5-19 冲孔次数

l/d	<1.5	1.5~3	3~5
冲孔次数	1	2	3

图 3-5-33~图 3-5-35 为冲孔工步图设计方法。

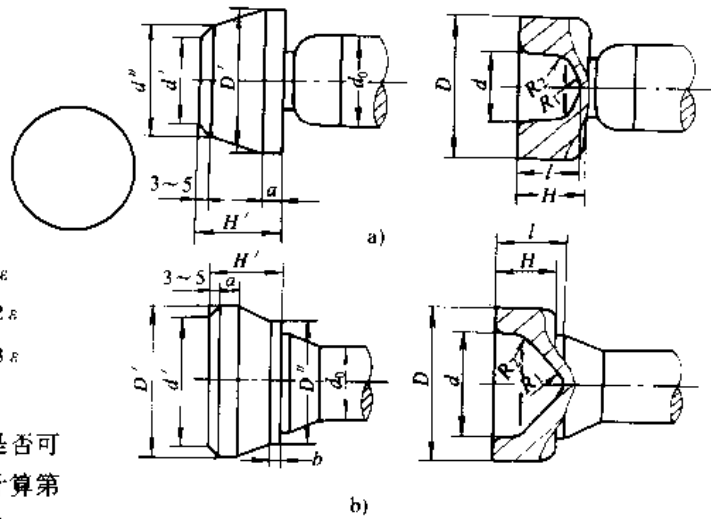


图 3-5-33 浅孔件冲孔成形

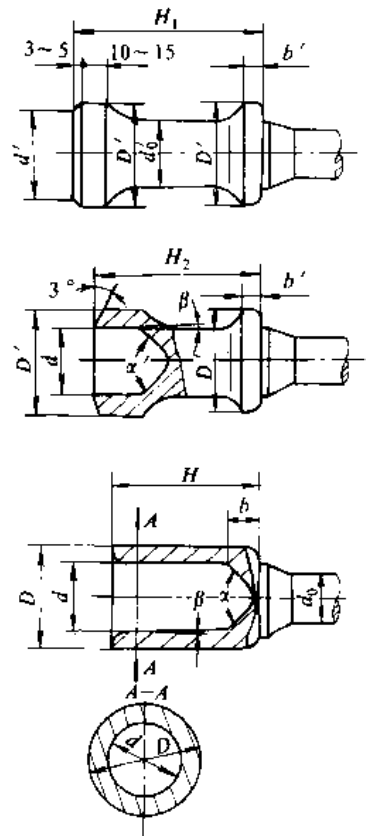


图 3-5-34 深孔薄壁锻件冲孔工步设计



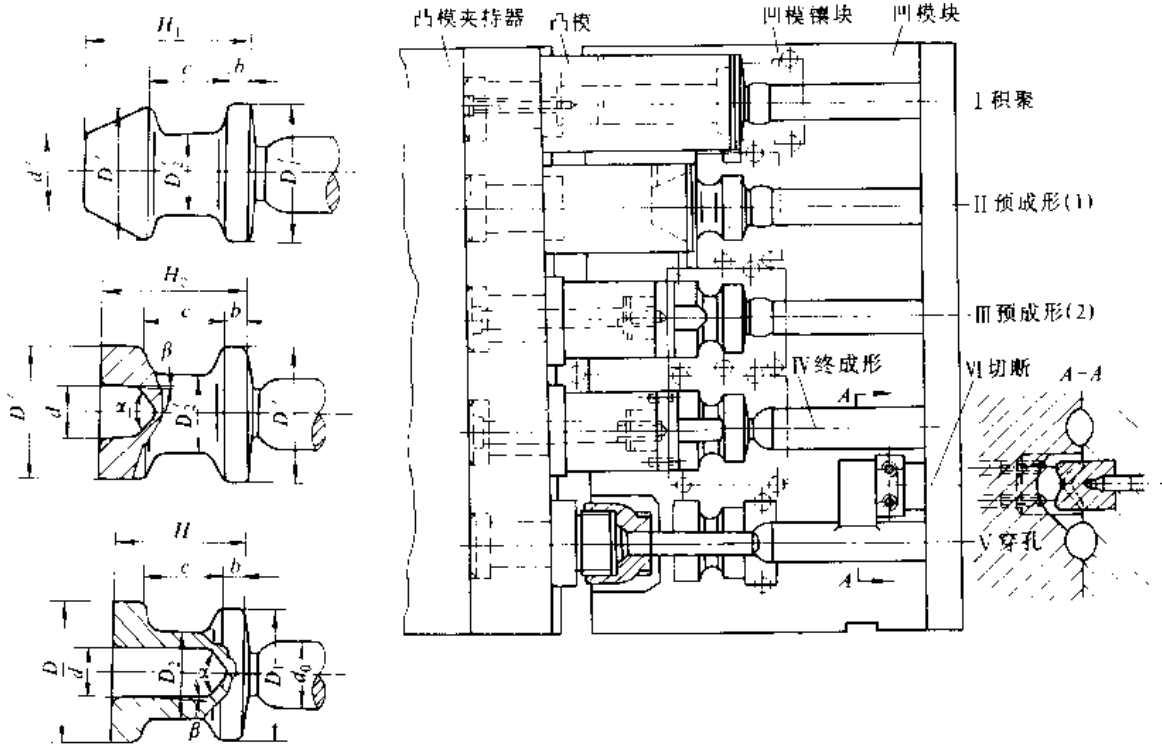


图 3-5-35 深孔厚壁锻件（兼带前后法兰）工步设计及模具

6 锻模 CAD/CAM 的应用和发展

锻模设计和制造是模锻生产的关键，传统的设计制造体制和方法存在一系列不可克服的矛盾，已难于适应现代化生产技术的发展。锻模计算机辅助设计/制造 (CAD/CAM) 的应用，能使模锻工程技术人员摆脱繁重的事务性重复劳动，能充分利用理论研究成果和前人经验，甚至有可能代替试模，大幅度提高设计制造速度和质量。从而在整体上提高模锻技术水平。

模锻 CAD/CAM 是一种新生的技术，而且还在快速发展之中，还没有成熟和固定的模式。目前可以在各种不同的层次上应用：

(1) 计算机辅助制图。用传统设计方法获得必要的数 据，利用两维制图软件，通过交互式（即人机“对话”方式）在计算机的屏幕画出图形，最后通过绘图机绘出锻模图纸，提高制图速度。

(2) 计算机数控 (NC) 编程及控制。用 NC 机床加工锻模能大幅度提高效率和质 量；关键技术之一是编制 NC 程序（指令）；利用 CAM 系统，按图纸输入模具的形状、尺寸、要求等等信息，计算机可迅速编出 NC 程序，间接（通过纸带或磁盘）或直接控制 NC 机床工作。

(3) 利用锻模 CAD 系统，在人工干预（交互

式）下完成各项设计任务，其中绝大部分计算、查表、图形生成等繁冗的工作都可由软件在很短时间内完成，方案性和经验性较强的工作以交互式操作为主，设计效率主要取决于交互式操作的多少、人机界面及绘图机速度。

(4) CAD/CAM 一体化。锻模 CAD 的结果不通过图纸，而是通过公共数据库直接传送给 CAM 系统，由计算机编制加工工艺过程 (CAPP) 及 NC 程序，并控制 NC 机床工作。

(5) 在 CAD、CAM 系统中引入人工智能的专家系统。由人工收集大量高级专家的经验（高级的系统还有学习的功能），软件将它们转化为“知识”存入知识库，系统引用这些知识、针对锻模设计中提出的问题，通过推理得出最佳结论，用以解决锻模设计中大量存在的、难于数学模型化的问题。

(6) 锻模工作过程的模拟（仿真）。在计算机上模拟所设计锻模的实际工作过程，显示出金属的流动充填、应力场、温度场变化以及锻模的应力应变温度场变化等等，从而检验设计是否正确。如不满意，可立即修改设计、再次模拟，直到获得满意结果。此技术的效益很大，在许多行业（包括模具行业中的注塑模等）中使用。由于金属成形理论发展水平的限制，在锻造行业中，还只在个别简单问题和局部问题上试验，可相信在



不久的将来将逐步实用。此技术的进一步发展将实现锻模的真正优化设计。

(7) 结合其他行业的发展可知, CAD/CAM 的进一步发展必将导致锻模制造的柔性加工系统(FMS)以及计算机集成制造系统(CIMS), 实现锻模设计制造的基本自动化。

以上由低到高的各项技术本身以及它们之间都没有确定的界限, 可以单项应用、交叉应用, 也可以应用某项的一部分。例如计算机制图中也可有部分的设计计算, CAD 时也可以包括交互作图乃至人工计算后再用计算机制图。

锻模 CAD/CAM 系统主要由计算机硬件(包括计算机主机和绘图机等外部设备)、各类软件、NC 机床等组成, 软件是其中的核心。软件包括: 基础软件, 如操作系统、语言工具等; 支持软件, 即通用性的工具软

件, 如二维制图软件、实体及曲面造型系统、通用 NC 编程软件、有限元分析软件、优化分析软件、数据库、网络等等; 应用软件, 即针对某具体问题的软件, 例如各种锻模的 CAD 软件、CAPP 软件、CAM 软件、专家系统、模拟软件、工程数据库等等。

用于 CAD、CAM 的计算机目前可分成: 大中小型机、工作站、微机(PC) 等三类, 各约占 1/3; 预测工作站和微机在不久的将来将占主导地位。锻模 CAD/CAM 的用机情况也是这样。对于比较简单的锻模 CAD/CAM 工作, 例如二维制图、回转体饼类件及简单轴类件锻模、平锻模、挤压模、切边冲孔模等的 CAD、CAM、CAPP 等等, 微机都能满足要求。其他较复杂的锻模, 由于需要大型造型系统的支持, 目前还只能在工作站级以上的计算机中实现。

第6章 特种锻造^[14]

特种锻造包括精密模锻、多工位热锻及电热锻、粉末锻造、等温锻造及超塑性锻造、液态模锻等, 亦可称为少无切削锻造工艺。

1 精密模锻(精锻)

精密模锻是获取高精度和高质量锻件的模锻过程, 包括有螺旋压力机(压力机)上的精锻、高速锤上的精锻及多向精密模锻等。

精密模锻件和普通模锻件相比, 其精度及各种工艺参数指标见表 3-6-1。

精密模锻的优点: 精锻件的金属流线分布更为合理; 力学性能和抗应力腐蚀性能高; 切削加工量大大减少, 节材节能效果明显; 能加工难成形材料和形状复杂的锻件。但精密模锻要求毛坯的精度高, 需采用少无氧

化加热, 工艺设计复杂、高精度的模具, 操作过程严格, 具有良好的润滑条件, 有的毛坯(材料)需经前、后处理等。所以一般精密模锻件的生产成本较高, 在生产批量较大或很大时, 经济上才是有利的。锻造方法、成本和生产批量的定性关系见图 3-6-1。

基于上述精密模锻的特点, 在国内外的汽车、拖拉机、航空航天、动力、医疗器械、仪器仪表、电子、工具及标准件等行业中均有大量的应用。例如在航空发动机、汽车的动力部件中, 国外工业发达国家采用精密模锻件的比例已达 40%。用于生产精密模锻件的材料有各种合金结构钢、铝合金、镁合金、钛合金及高温合金等。由成形温度区分有热锻、温锻、等温锻及冷锻等。典型零件有叶片类、齿轮类、轴类及带肋-腹板的支架类锻件等。

表 3-6-1 模锻件精度分类表

	需加工表面的比例 (%)	余量	斜度 α (°)	圆角 R	粗糙度 R_a (μm)		肋板高宽比 h/b	
					钢	铝	钢	铝
普通模锻	60~80	一般	5~7	大	20	10	5	8
半精密模锻	20~60	较好	3~5	较小	10	5	—	—
精密模锻	<20	少无余量	<3	小	1	1.6	8	23
多向精锻	<20	少无余量	<1	小	1	1.6	10	23

注: 摘自参考文献 [1] 115 页。



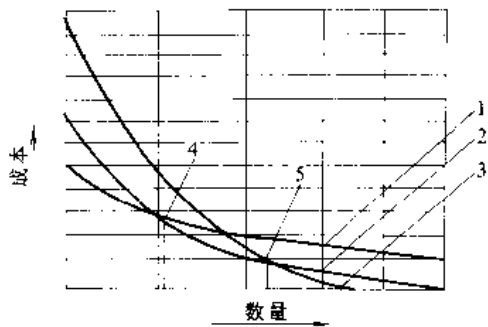


图 3-5-1 锻造方法、成本和生产批量的定性关系曲线
1—自由锻件 2—普通模锻件 3—精密模锻件
4—采用模锻最少的锻件数 5—采用精锻最少的锻件数
(摘自参考文献 [1] 1116 页)

1.1 压力机上精密模锻

通常中小型精密模锻件是在螺旋压力机（机械压力机）上生产的。其典型工艺流程是：精密下料→少无氧化加热或保护气氛中加热→压力机上精密模锻→切边→后处理→清理→精整→清理→质检→精锻件。

1.1.1 精锻件的设计

1. 锻件图设计

(1) 选择分模面的原则。重点要考虑金属流线的合理性；要便于毛坯充满模膛，使锻件的形状与尺寸和成品零件一致，以达到精化的目的；分模面选取应便于脱模，使模具有合理的强度和耐磨寿命；采用组合模，结构应简单、便于装配更换等。

(2) 模锻斜度和圆角半径。外缘斜度取 $0^{\circ}\sim 1^{\circ}$ ；内缘斜度取 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。精锻件的圆角半径按锤上模锻件圆角的 $1/2\sim 1/4$ 选取。

(3) 余量和公差的选择。精锻件的余量和公差应取决于零件的加工要求和锻件所能达到的合理精度。如果锻件的某些部位不再需要切削加工，则相应尺寸的余量应取为零，而其公差则应达到零件相应尺寸的公差。在需加工的部位，其尺寸的余量和公差可大致取为锤锻件余量公差的 $20\%\sim 50\%$ ，或按 JB3834-85 “钢质模锻件公差及机械加工余量” 中的精密级选取，或根据锻件的后道切削加工工序直接定出加工余量和公差。一般，如后道机加工需抛光、磨削、少量精车削加工，则其对应的加工余量分别取为 $0.1\sim 0.3\text{mm}$ ； $0.3\sim 0.5\text{mm}$ ； $0.5\sim 1.5\text{mm}$ 。公差值则根据尺寸值大小及形状复杂程度，可取为 $0.05\sim 0.2\text{mm}$ （尺寸值大、

形状复杂的应选大值）。

2. 其他技术要求 在锻件图上应注明热处理要求、锻件的内外质量要求及其他特定的检测要求。在冷锻件图的基础上加热胀量得到热锻件图，以此作为精锻模具的设计依据。

此外，精锻件的设计应保证获得合理的金属流线分布；试验证明，金属流线的分布是否合理对锻件的力学性能有较大的影响；垂直于金属流线方向比顺流线方向的抗拉强度 σ_b 值小 10% ；对应的伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 要小 33% ；其疲劳强度大 $15\%\sim 20\%$ ；冲击韧性 a_k 小 33% 。

1.1.2 精锻件工艺要求

1. 精锻对毛坯的要求 毛坯表面应无氧化皮、夹杂、裂纹、折叠及局部凹陷等缺陷，表面粗糙度要小；内部质量要求控制脱碳层厚度、硬度及低倍晶粒度，以精锻后锻件内外质量能达到锻件图所规定的技术条件为依据。钢质模锻件通用技术条件可按 JB3835-85 确定。其次，毛坯的尺寸形状要考虑到各模锻工序的工件定位精度要求及变形流线的合理分布。第三，按精锻的工艺：是一火锻还是二火锻，是闭式模锻还是小飞边模锻及锻件要求的重量公差的大小，确定毛坯的合理尺寸形状及尺寸公差或重量公差值。

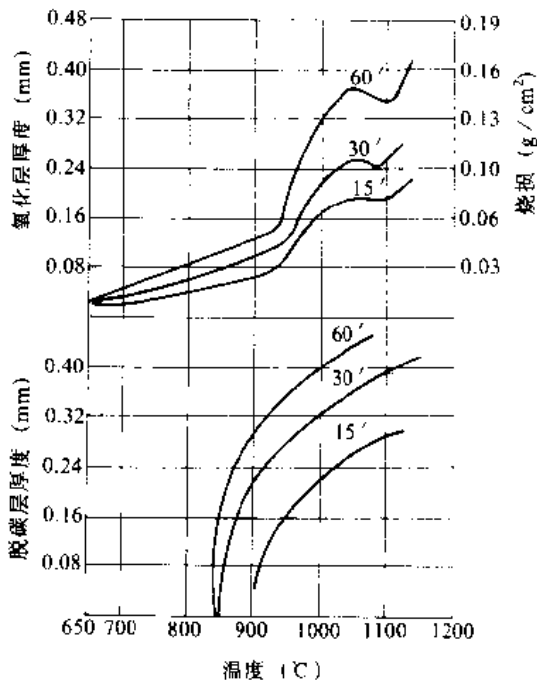


图 3-6-2 碳钢加热温度与氧化、脱碳的关系
(摘自参考文献 [14] 139 页)



2. 毛坯加热要求 精锻要求采用少无氧化和脱碳的加热方法和相应的设备,应控制加热温度和时间,避免临界变形以得到较好的晶粒度。一般精锻的加热温度比普通模锻的温度略低,可参考图 3·6-2 选取。在

加热过程中要保持毛坯的清洁。

3. 精锻及精压用润滑剂 为保证精锻件的成形精度和合理的模具寿命,精锻过程中的润滑起重要作用。精锻时采用的润滑剂见表 3·6-2。

表 3·6-2 精密模锻常用的润滑剂

状态	锻件材料	选用之润滑剂及质量配比
高温	铝镁合金	1. 动物油 (如猪油); 2. 水基或油基石墨; 3. 液化处理的石腊
	碳钢 低合金结构钢	1. 水基石墨 (石墨 7%; 粘度 20~25 μ m); 2. MoS ₂ ; 3. 油基石墨 (石墨 20%~25%+矿物油+稀释油)
	高温合金	FR ₂₁ , FR ₂₂ , FR ₃₀ , FR ₃₅
	不锈钢	FR ₄₁ , FR ₄₂
	钛合金	FR ₅ , FR ₆ , FR ₂ , FR ₃ , FR ₄ 水基石墨 (石墨水溶液 18%+少量硅酸钠)
中温	钢	1. 低温玻璃润滑剂 (石英砂 23%, 硼酸 41%, 红丹 30%, 三氧化二铝 1.8%, 硝酸钠 4.2%) + MoS ₂ 2. 油酸 57%, MoS ₂ 17%, 石墨 26%
	不锈钢	1. 低温玻璃润滑剂 (石英砂 23%, 硼酸 41%, 红丹 30%, 三氧化二铝 1.8%, 硝酸钠 4.2%) + MoS ₂ 2. 油酸 57%, MoS ₂ 17%, 石墨 26%
室温 (冷锻)	钢	磷化处理+皂化液或 MoS ₂
	不锈钢	1. 草酸盐处理; 2. 氧化石腊 85%+ MoS ₂ 15%
	铝和铝合金	1. 磷化处理+粉状硬脂酸锌; 2. 硬铝用氧化处理+ MoS ₂
	铜和铜合金	钝化处理+粉状硬脂酸锌

注: 摘自参考文献 [1] 1132 页。

1.1.3 齿轮的精密模锻

内轮精锻可生产直齿圆柱齿轮, 直齿或螺旋伞齿轮、平面齿轮及变速箱同步器齿环等类齿形零件, 精锻齿轮齿形精度可直接达到 8~9 级, 国内已有成功的经验, 部分已形成批量生产。

载重汽车的差速器行星齿轮的精密模锻。其零件图、锻件图及精锻模具结构图分别见图 3·6-3~图 3·6-6。

1. 差速器行星齿轮精锻工艺流程 该锻件可在 3000kN 摩擦压力机上或相应吨位的热模锻压力机上及高速锤上进行精锻。一般工艺流程是: 精密棒料剪下料 (毛坯尺寸是 $\phi 35$ mm, 重量 285⁺⁵g) → 少无氧化加热到 1000~1150℃ → 预锻 → 终锻 → 空冷 → 切边 → 清理

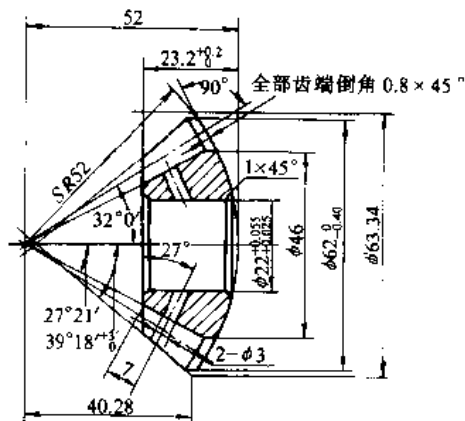


图 3·6-3 差速器行星齿轮零件图
模数 5.4 齿数 10 压力角 22°30' 精度等级 8~9 级
粗糙度 R_a 6.3 μ m 材料 18CrMnTi



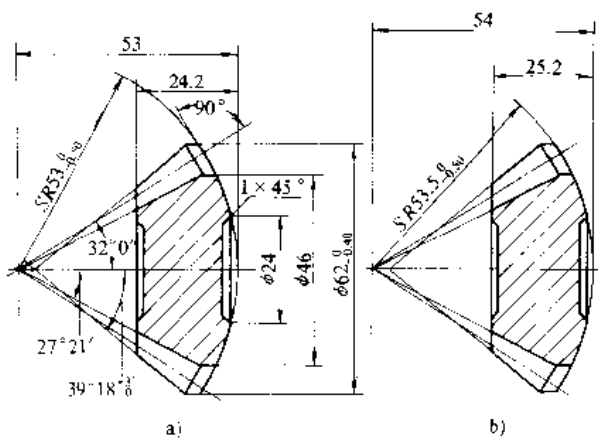


图 3-6-4 差速器行星齿轮精锻件及预锻坯图
a) 精锻件图 b) 预锻件 (未注尺寸与精锻件同)

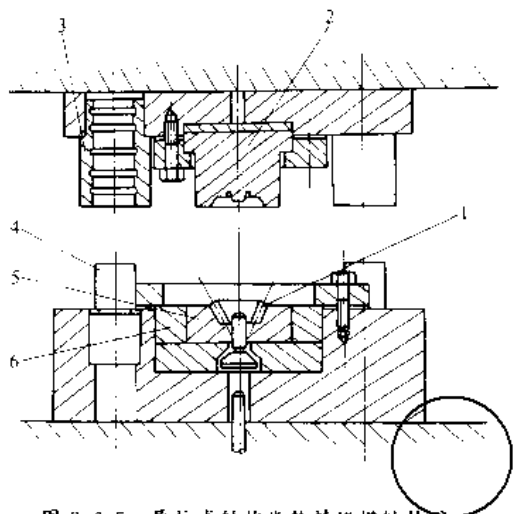


图 3-6-5 导柱式结构齿轮精锻模结构图
1—工件 2—上模 3—导套 4—导柱
5—下模 6—预应力圈

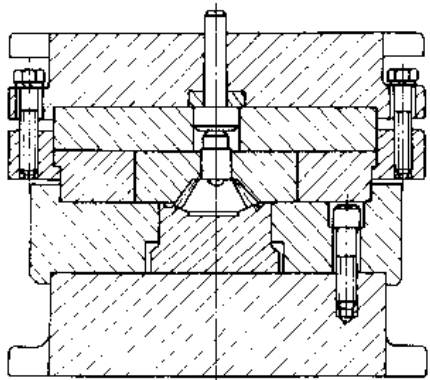


图 3-6-6 差速器行星齿轮精锻模具图

氧化皮→检验→加热到 700~850℃→3150kN 精压机上温精压→保护介质中冷却→1600kN 切边压力机上切边→检验→齿形定位加工中心轴孔。齿形定位加工中心轴孔的定位夹具可见图 3-6-7。

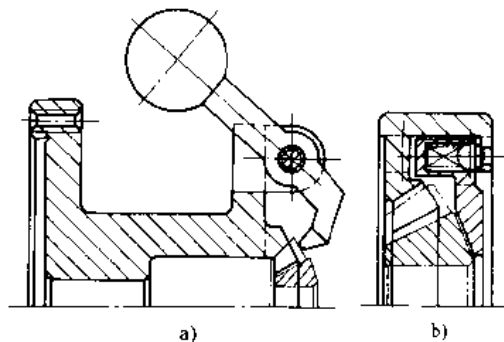


图 3-6-7 行星齿轮轴孔加工夹具
a) 车孔夹具 b) 磨孔夹具

2. 齿轮精锻模具设计

(1) 齿轮精锻模加工用电极的齿形修正, 应考虑放电间隙、电极损耗、模具和热锻件的非均匀收缩量(应严格执行工作节拍和操作规程)和模具不同部位的不均匀磨损等因素。其中基本确定或可控制的因素, 如放电间隙、电极损耗及热收缩量等则可通过计算(计算机编程计算)确定电极的修正量, 其中不可确定的因素则通过试验或经验积累的数据确定修正量, 差速器行星齿轮的电极齿形参数修正见表 3-6-3。电极齿形的加工精度一般应比需锻齿轮的齿形精度提高 2 级, 表面粗糙度降低 1~2 等级。

(2) 在齿轮精锻模具设计中广泛采用预应力圈结构, 可以有效地提高凹模的寿命。预应力圈的装配有热压和冷压两种, 经验过盈量为: 热压装配时过盈量取凹模直径的 3%, 冷压装配时取过盈量为 1.5%。

(3) 为了保证变形金属在模膛中充满型腔, 在凹模齿形小端处应加工 φ2mm 的排气小孔, 但此小孔加工很困难, 在热处理时易产生裂纹, 故一般如在改进齿轮形状或预锻毛坯形状能解决成形时的排气问题, 则尽可能不加工排气孔。

精锻时为了便于金属流动及提高模具寿命, 应保证良好的模膛表面状态及润滑条件, 每锻一次应清理模膛中的氧化皮并喷涂润滑剂, 润滑一般采用水基石墨, 润滑剂应便于清除以避免在模膛中积存。

精锻模在锻前应预热到 200~300℃。



表 3-6-3 电极齿形参数修正表

参 数	行 星 齿 轮		半 轴 齿 轮		改 变 参 数 原 因		
	产 品	电 极	产 品	电 极			
端 面 模 数	5.4	5.4	5.4	5.4			
齿 数	10	10	16	16			
分度圆上压力角	22°30'	21°30'	22°30'	21°45'	放电间隙、电极损耗、热锻件冷缩的补偿		
安 装 距	35±0.04	35-0.02	35±0.04	35-0.02	提高电极精度并延长模具使用寿命		
粗糙度 R_a (μm)	3.2	1.6	3.2	1.6			
精	Δa	≤ 0.13	≤ 0.04	≤ 0.14		≤ 0.04	
	Δb	≤ 0.078	≤ 0.02	≤ 0.078		≤ 0.02	
等 级	8~9	6~7	8~9	6~7			
度	接 触 斑 点	高 度	50%中间	80%中间	50%中间	80%中间	弥补电极消耗和锻造中凹模膛的磨损
		长 度	50%中间	80%略偏小端	50%中间	80%略偏小端	
齿 面 形 状			鼓形		鼓形	降低齿轮副对安装误差的敏感性,改善接触精度	

注: 1. Δa —与标准齿轮配对啮合时转1周的轴向移动变动量 (mm)。
 2. Δb —与标准齿轮配对啮合时转1牙的轴向移动量 (mm)。
 3. 本表基本上适用于端面模数4.25~6.35,分度圆上压力角20°~22°30',外径53~84的齿轮及外径74~143的半轴齿轮。

1-1-4 扭叶片精密模锻

精密模锻叶片的叶身厚度公差与叶型形状及尺寸有关,较好的可达 $\pm 0.10 \sim \pm 0.3\text{mm}$ 。扭角公差达 $\pm 11' \sim \pm 15'$ 。精锻叶片的长度现已达1700mm、弦宽400mm、扭角80°,并可锻出带拉筋凸台的叶片。

1. 叶片精密模锻工艺 叶片精密模锻的工艺流程有三种:

(1) 数控径向锻造机制坯→无砧座锤预锻→螺旋压力机上均余量精密模锻→电解加工型面→抛光(机械抛光法、电解抛光法或化洗)。

(2) 平锻机制坯→机械压力机(液压螺旋压力机)上预锻和精锻→校正→抛光。

(3) 螺旋压力机(或锤)上模锻制坯→精密辊锻成形型面→校正→抛光。

由于叶片产品的重要性,其精锻工艺过程控制很严,一般工序有:原材料检验、下料、加热、备坯锻造、检测、清理、防氧化涂层、加热、精密模锻(或辊锻)、检测、热处理、切边、清理、冷精压、校正、检验、入库等约40道工序,每道工序都必须保证内外质量的要求。

2. 长500mm以下扭曲叶片精密模锻举例

a. 扭叶片锻件图设计 按叶片零件图尺寸在叶身每面加放0.3~0.5mm的抛光量,但在出气边为了成形和避免该处由于温降过快锻造时产生局部冷击,往往需加厚2~3mm,叶根部每边留3mm的切削余量,则得到冷锻件图,再据此设计完成热锻件图,为制造模具提供依据。

b. 制坯 叶片材料一般采用1Cr13, 2Cr13, 15CrMoV等不锈钢,特种用途的采用镍基或钛合金钢。原材料经严格检查后下料。采用少无氧化加热到1150~1200℃,亦可用镀镍或采用玻璃润滑剂作防氧化措施加热。

制坯后的锻坯形状尺寸应尽量接近终锻件图,如采用压力机进行精锻,则叶身背弧的形状尺寸应尽量满足精锻时依此(背弧)而定位的要求,叶身的内弧一般可留有1~1.5mm的精锻余量;如以精密辊锻成形最终锻件(图3-6-8),则备坯的形状应能满足均匀压下量的要求,以保证得到合格的精密辊锻件。扭曲叶片精锻时必须具备和辊锻成形相配合的强制扭形装置(机械手)。制坯工序要求把叶根部分基本成形。

c. 精密成形 在各类设备上完成精密成形扭曲

冶金工业出版社

320

凡



叶片时，模具设计上应注意扭曲叶片变形中的侧向推力。一般应采取带锁扣结构的模具来平衡这侧向推力。分模面的合理选择亦是重要的解决途径之一。

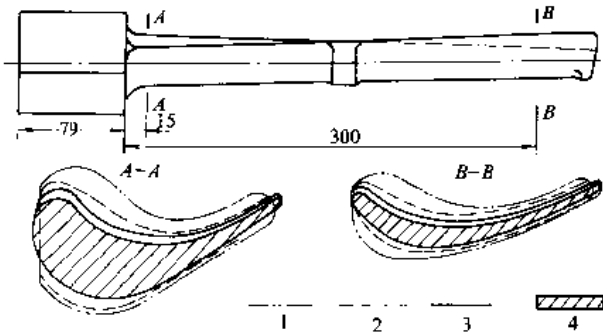


图 3-6-8 扭叶片精密模锻工序图

1—挤压型线 2—第一道模锻型线

3—第二道模锻型线 4—精锻后截面

d. 后续工序 根据叶片对力学性能的要求，一般有两种后续处理工艺：(1)热精密模锻→热切边随即空冷淬火→喷砂清理→回火处理并在回火温度下校正；(2)热精密模锻后冷却→加热淬火→喷砂清理→回火处理并在回火温度下切边校正。

e. 校正工序 在校正量大时用模具在压力机上校正；如校正量较小或只需局部校正时则可采用手工逐步校正。校正后形状符合要求的叶片尚需进行型线抛光。最后以叶身的内弧面定位，加工叶根。

1.2 高速锤上精密模锻^[1]

1.2.1 工艺特点

(1) 高速锤具有较高的打击速度。各类锻造设备的打击速度对比表见表 3-6-4。高的打击速度有助于变形金属的充填，变形能在瞬间促使变形金属的温升也有助于金属的流动，因此高速锤能锻出轮廓清晰的复杂形状锻件，并对难成形金属的加工有明显的效果。现在应用的主要领域是军工领域的生产，如齿形件、叶片、气门、涡轮盘及航空工业中带有薄壁高筋的锻件生产。

表 3-6-4 常用锻压设备的打击速度

设备	水压机	机械压力机	螺旋压力机	模锻锤	对击锤	高速锤
速度 (m/s)	0.06 ~0.3	0.06 ~1.5	0.6 ~1.2	3.0 ~9.0	4.5 ~9.0	12 ~30

(2) 高速锤生产的锻件常具有细晶组织，其冲击韧度和疲劳强度等动态力学性能提高较多。但应注意，应使锻件的各部分得到较均匀的变形量，否则将出现各部分的组织和性能的不均匀性。如叶片在采用高速锤锻造时，叶身产生剧烈的挤压变形，而叶根部分的变形量却很小，则叶根部分的组织和力学性能与叶身相比有较大的差别，叶根部分的组织往往仍处于原材料状态的粗晶组织，而叶身则达到 8 级细晶组织并呈纵向纤维组织状态。

(3) 高速打击使变形金属产生温升，可提高大多数金属和合金的允许变形程度，可使锻造温度范围狭窄的特种合金（如钛合金、钨、钼等高温合金）易于成形。但由于同样的原因亦要求对锻造的始锻温度加以严格的控制，尤其是对那些对过热、过烧敏感的合金（如铝、镁、镍基耐热合金等），则往往需经试验确定合理的始锻温度，以免由锻造过程的温升而过热。高速锤是采用对击方式锻打的，故设备相对较小亦无振动，但其工作台面较小，承受偏载的能力差，较适用于单模膛锻造轴对称形状的锻件。

(4) 高速锤吸收剩余能量的能力低，各种锻件都应经过试锻，从低能量开始逐渐增加，尽可能避免过载冷击，打击的剩余能量以较锻件成形所需能量高 5%~10% 为宜。以下是高速锤模锻所需能量的计算方法，在能量预选时可供参考。

如锻件需锻挤复合成形时，其锻粗部分所需能量 E_1 ，挤压部分所需能量为 E_2 ，则 E_1 、 E_2 的计算公式是：

$$E_1 = 0.06aa_1a_2V_1 \quad (J)$$

$$E_2 = (bb_1V/\xi)[1 + (m/M)2] \quad (J)$$

式中 V_1 、 V_2 —— 对应变形区的体积 (cm^3)；

a, b —— 各项系数取决于锻件的尺寸和形状的复杂程度，具体查图表确定；

ξ, α —— 为系数，取决于锻件的材质和变形程度，具体查表图；

m —— 变形部分材料的质量 (kg)；

M —— 高速锤锤头的质量 (kg)。

(5) 高速锤严禁空击，并不宜用于小变形，如压印、精压等锻压工序。

(6) 高速锤具备顶出机构，锻件的斜度可取 $0^\circ \sim 3^\circ$ 。外圆角 R 取 $1 \sim 3mm$ ，内部圆角 r 取 $0.5 \sim 1mm$ 。高速锤一般是一次打击成形，故备坯的形状和尺寸是至关重要的，重要零件的备坯往往是冷加工完成的。锻模预热温度为 $200 \sim 400^\circ C$ 。



(7) 高速锤锻造常用润滑剂有有机油、炮油、硅油、硅脂等为基体，加上 MoS_2 、 WS_2 、石墨等为添加剂组成。当挤压变形为主时，除模具涂润滑剂外，在坯料表面还应涂玻璃涂层，以防止加热和变形过程中的氧化，同时起润滑作用，为增加润滑膜的强度，有的坯料表面需镀以很薄的减磨的金属层，例如热挤压镍基耐热合金锻件，需先镀镍后再涂以玻璃涂层；冷挤压锻铝件时，先镀锌再涂以膨润土基高温润滑剂（脂）。

1.2.2 高速锤用锻模

1. 基本类型 高速锤通常是一次打击成形，飞边槽基本上无法保证变形金属充满模膛，故高速锤大都采用闭式模膛结构。闭式模具结构见图 3·6-9a。对某些不适宜用闭式模锻的精锻件则只能采用开式模，其结构见图 3·6-9b，用于挤压扭叶片等锻件的可分式模具可参见图 3·6-9c，这种模具使用时劳动强度大，锻件在模具中停留时间长，不适合大尺寸锻件和大批量的生产。

2. 结构特点

(1) 高速锤锻模在高温、高冲击力的严峻条件下工作，为避免应力集中和起补强作用，多采用组合模，镶块与外套采用圆柱面或圆锥面（单边锥角取 $1^\circ \sim 2^\circ$ ）配合。过盈量取该处直径的 $0.3\% \sim 0.5\%$ ，贴合面积应大于 90% ，简单锻件可采用整体模。可分的挤压模常用圆锥面（单边锥角取 6° ）配合。模膛表面应力求光洁，去除棱角、刀痕等可能引起应力集中的因素；

(2) 上下模的导向。闭式模常用模口导向，凹模入口处作成单边锥角 $20^\circ \sim 25^\circ$ 的锥面或大圆角。也可在外套上作出导向面。上模在接触坯料前或在坯料锻粗变形接触凹模侧壁前应进入导向面。导向面的间隙（单边）为 $0.15 \sim 0.2\text{mm}$ ；

(3) 高速锤大都设有顶出装置，下模可采用无斜度或 $1^\circ \sim 3^\circ$ 的小斜度。如上模无卸料机构，为防止粘模，冲头可制有 $3^\circ \sim 12^\circ$ 的斜度。对于容易被上模带起的工件，则可在凹模内壁开环形卸料沟，尺寸可考虑为宽 $5 \sim 10\text{mm}$ 、深 0.2mm ，见图 3·6-9a 的 1 放大视图。它能有效的将工件滞留在凹模内。

(4) 为使高度方向锻件尺寸准确，上下模应打靠，模具的承击面积可按 0.4MPa 计算确定。

(5) 精锻成形的成败及所耗能量和模具是否开有排气孔有关，有时在最后充填部位开设专用排气孔，一般可利用顶出装置的顶杆和凹模间的间隙排气。

3. 模具材料 常用 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 、 $4\text{Cr}5\text{W}2\text{VSi}$ 、

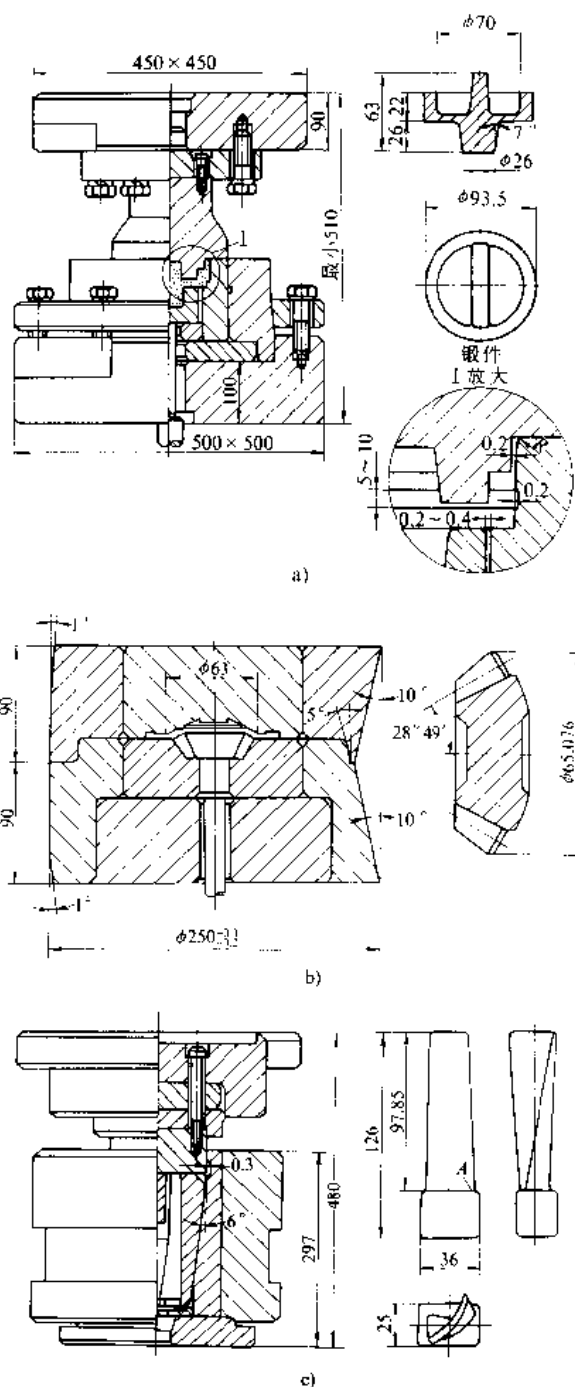


图 3·6-9 高速锤模具示例

$4\text{Cr}4\text{Mo}2\text{WVSi}$ 、 $4\text{SiMnW}3\text{Mo}2\text{VN}$ 、 $5\text{Cr}4\text{W}5\text{Mo}2\text{V}$ 。开式模也可用 5CrMnMo 。高速锤锻模材料应具有有良好的红硬性、红韧性、抗回火稳定性、高温强度及抗热疲劳性等综合性能。应经过充分的三向锻拔，打碎内部的碳化物组织，细化晶粒，消除力学性能的方向性。组合模镶块对红韧性要求可略低。陶瓷型精铸锻模镶块，其合金成分可与上述模具钢种相同或略高，它的制造工艺简单、周期较短而成本低、废模一般可重熔再铸，具



有一定的优点,但采用精铸锻模镶块时应采用双层或三层热压模套加以补强,一般内套用高强度钢,外套用高强度耐冲击钢,取较大的热装过盈量。

1.3 多向模锻^{[1][15]}

多向模锻是在模具内,用几个冲头自不同方向同时或依次对坯料加压以获得形状复杂的精密锻件。

1.3.1 阀体类、叉形类锻件的多向模锻

这是在闭合模具的型腔中进行模锻和挤压成形。在模具闭合的过程中,坯料可以产生变形,也可以不产生变形;在模具闭合后,主冲头以挤压变形为主完成终锻,得到所需的复杂形状的锻件。有三种成形方法:

(1) 垂直分模法见图 3·6-10a,其左右模闭合时进行顶锻或预锻,然后主冲头垂直加压于坯料,完成冲孔或挤压成形。

(2) 水平分模法见图 3·6-10b,是上下模闭合时进行预锻,然后左右冲头完成冲孔及挤压成形。

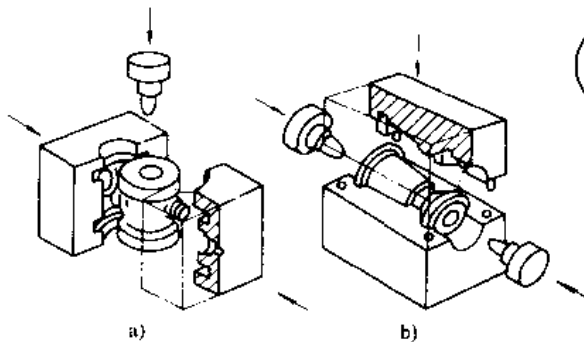


图 3·6-10 多向模锻示意图

(3) 水平分模兼垂直穿孔法,是上下模闭合进行预锻,然后两个水平冲头冲孔挤压,最后上模具的内置式冲头再进行穿孔完成终锻。

叉类锻件锻造模具结构图见图 3·6-11。

多向模锻能锻出具有凹面及凸肩等复杂外形,并有多向孔穴可以同时锻出。锻件一般无需模锻斜度。多向加压改变了金属的变形条件,提高了塑性,适宜于模锻塑性较差的高合金钢和合金。

多向模锻一般在多向锻造水压机上进行。美、日等国已生产系列多向锻造(三动或四动)压力机,一般合模压力为穿孔压力的 2~3 倍。

航空零件下套筒的多向模锻效益显著,模具结构图见图 3·6-12,其经济效益对比见表 3·6-5。

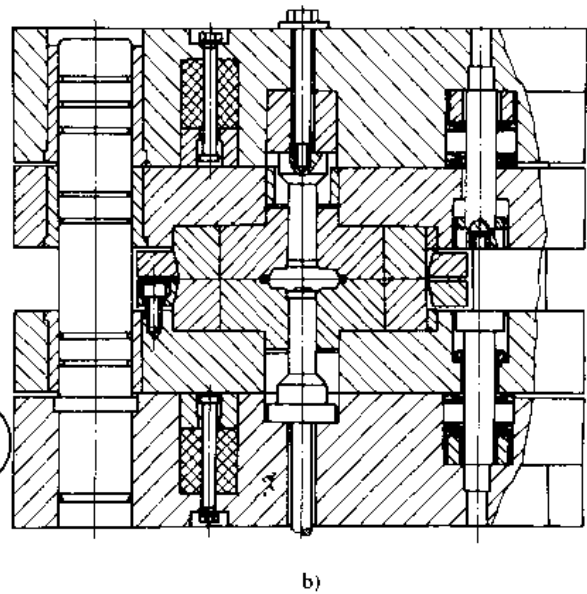
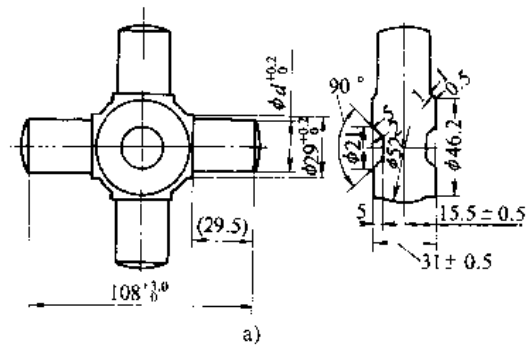


图 3·6-11 叉类锻件锻造模具结构图
(摘自参考文献 [15] 91 页)

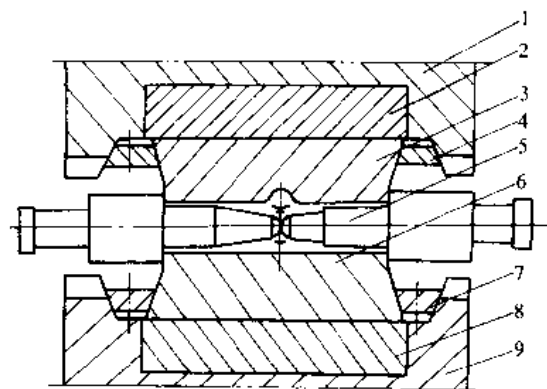


图 3·6-12 下套筒的模具结构
1—上模座 2—上垫板 3—上凹模
4—上压板 5—冲头 6—下凹模
7—下压板 8—下垫板 9—下模座
(摘自参考文献 [1] 1360 页)



表 3·6-5 下套筒多向模锻和普通模锻的效益对比

工艺	锻造 工序 数	零件 质量 (kg)	锻件 质量 (kg)	毛坯 质量 (kg)	材料 利用 率	机加 工工 时 (h)
普通模锻	19	0.76	8.80	10.0	7.6%	3.08
多向模锻	8	0.76	5.05	5.12	14.9%	2.38

注：摘自参考文献 [1] 1365 页。

1·3·2 曲轴类锻件多向模锻

曲轴类锻件多向模锻也称曲轴的弯曲模锻。其变形过程见图 3·6-13，先是由 1 和 2 夹紧模块和上冲头纵横两个方向对毛坯施压，在拉伸曲拐的过程中同时

用已成形的拐颈定位，以保证曲拐间的相对角度。曲轴端部的法兰也可用此模锻出。弯曲模锻曲轴锻件形状接近零件，节约原材料和切削加工工时；金属流线合理。但只适宜于锻造具有椭圆形拐颈的曲轴，不宜于锻造具有整体平衡块的曲轴。由于锻造过程中主轴颈和拐颈不参与变形，锻后要用热处理方法来细化晶粒。这种工艺一般是用于无法整体模锻的大型柴油机曲轴。此工艺可以在专用的液压机上进行，也可以在通用液压机上用特殊结构的模具实现。现在实用的模具结构有两种，见图 3·6-14，一种是利用时杆原理实现水平模锻，称为 TR 法，见图 3·6-14b；另一种是利用斜面进行水平模锻的称为 RR 法，见图 3·6-14a。TR 法的水平模锻力是随滑块的压下行程而增大的，更符合锻件变形的要求，比 RR 法更为合理，目前国内外应用的较多。

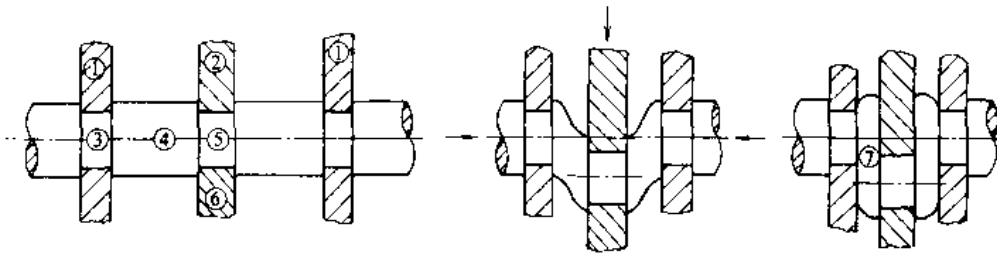


图 3·6-13 曲轴弯曲模锻过程

1—夹紧模块 2—上冲头 3—主轴颈 4—成形拐颈的坯料 5—拐颈 6—下冲头 7—拐颈

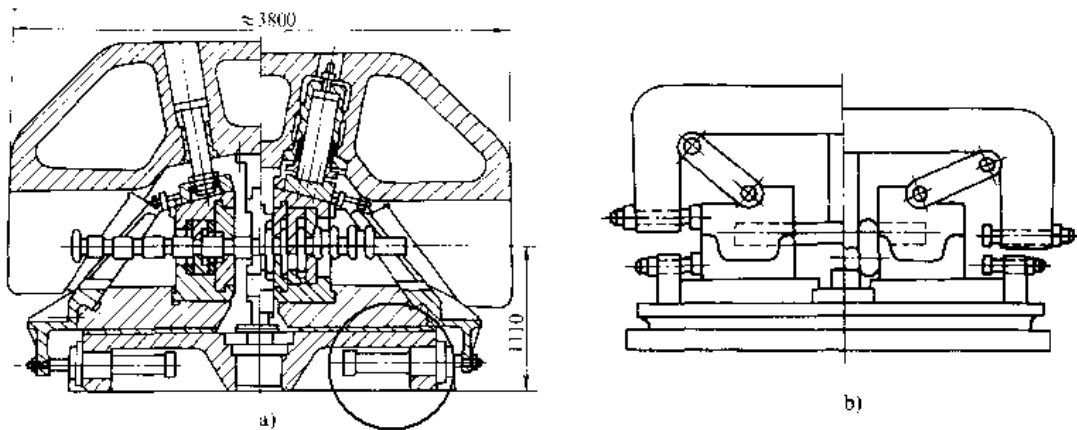


图 3·6-14 大型柴油机曲轴弯曲模锻模具

a) RR 法模锻 b) TR 法模锻

2 多工位热模锻和电热模

2·1 多工位热模锻

多工位热模锻机一般有一个切断棒料的工位和 3

~4 个锻造成形工位（其中亦可包括冲孔和分离工位）。工位一般呈适式横排布置，而工位间由机械手进行毛坯的传递。最大型号的模锻机的模锻力为 12000kN，可锻造 $\phi 120\text{mm}$ 的圆件或相当截面积的异形件，其生产效率很高，小吨位的模锻机每分钟可生产



150件锻件，最大吨位的墩锻机生产率为每分钟50~70件。多工位热墩锻造用于大批量生产的轴承环，中小形汽车用锻件，如齿轮坯、十字接头、环形件等锻坯及大型螺母等。

轴承内环和外环的合锻是多工位墩锻的典型工艺，在一次行程中可以同时锻造出内环和外环锻件，只有一个料芯，生产率提高数十倍、材料利用率提高10%以上。图3·6-15为7909轴承内外环内合锻的锻件图。 H/D 和 h/H 标志合锻的难易程度， H/D 值大和 h/H 值小显示在合锻成形时金属的流动量大，变形剧烈，对成形和模具寿命不利。通常 $H/D \leq 0.5$ ， $h/H \geq 0.3$ 。7909轴承内外环合锻时 $H/D = 0.74$ ， $h/H = 0.14$ 。图3·6-16表示在8MN五工位热墩锻机上锻造7909轴承内外圆环时各工位的毛坯形状和模具结构。棒料经感应电加热到1150~1200℃。第二工位墩粗坯的形状对第三工位成形的影响很大，不合适的形状将在第三工位成形时形成扩叠和端边不平整，并影响模具寿命。墩粗坯设计原则是：

(1) 形状便于墩粗。

(2) 保证成形工步有合理的变形流动。在成形锻造中，墩粗毛坯在成形冲头下的金属首先完成内环的拉深成形，其多余的金属被反挤成形外环，见图3·6-17。这部分位积 V 与内环的实际体积 V_1 之比 $K (= V/V_1)$ 在一定程度上反映了成形锻造中金属流动的激烈程度。实验证明，合锻7909轴承内外环， $K = 1.1 \sim$

1.4的范围内。对于较浅的合锻件， $K = 1.1 \sim 1.2$ 为宜。

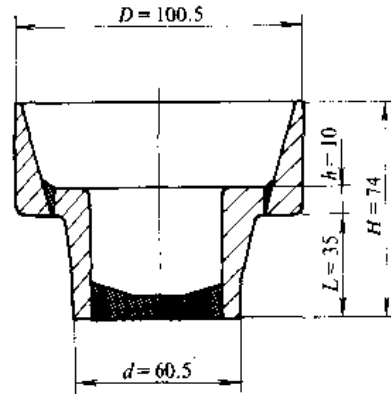


图3·6-15 7909轴承内、外环毛坯合锻件图

(3) 墩粗坯的上端压成凹窝，有利于成形外环时金属的反挤流动，并减小了内环拉深流动的的金属量，这对于深度大的合锻件成形是有利的。但上端形成的凸边亦不宜过高，因为在墩粗时由于毛坯端面的不平整和定位精度较差，易形成凸边的不平厚和厚度不均，这均影响最终的成形。墩粗时在底部可成形一个小凸台，以此来调整上述 K 值，以利于成形，并可以此小台阶作为成形工位的定位。

墩粗后的毛坯可由两个方案成形，一是一次成形→冲孔→分离内外套，二是二次成形锻造→冲孔分离在一个工位中采用复合模完成。通过试生产证明，一次

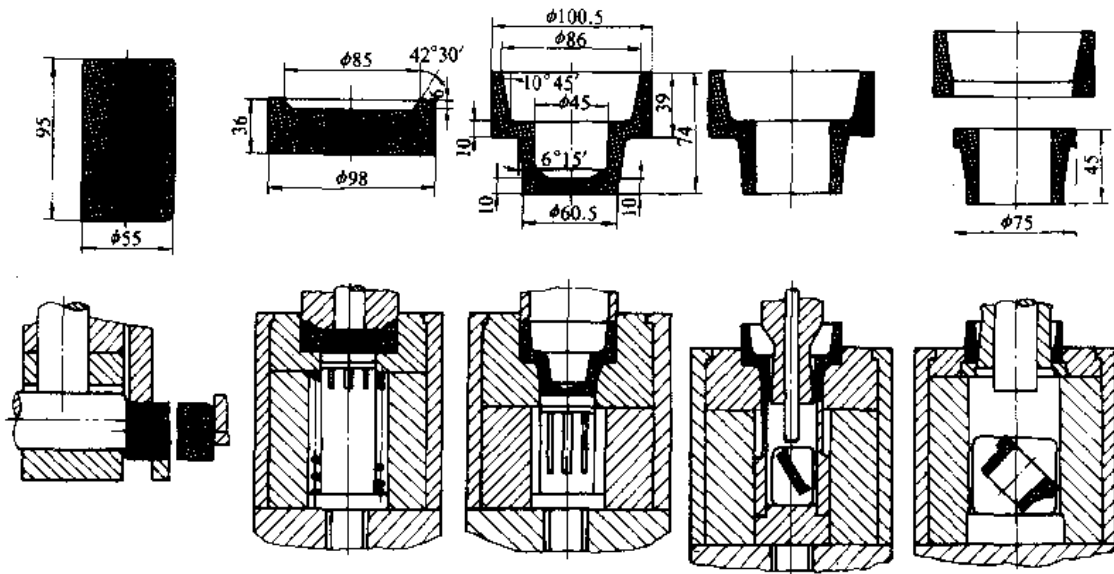


图3·6-16 7909轴承内、外环毛坯合锻工艺一次成形方案



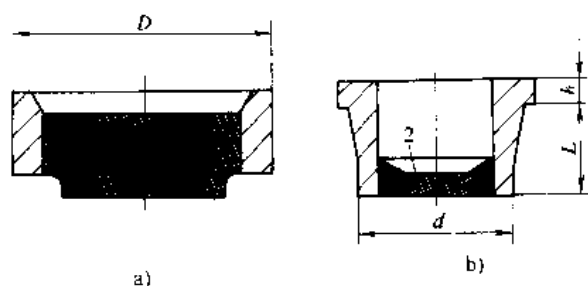


图 3-6-17 变形程度计算示意图

a) 锻粗后的坯料, 其中 1 是冲头下面的金属

b) 分套后的内环锻件, 其中 2 是冲去的连皮

成形方案, 具有安排工位方便, 模具结构简单的特点。但是它的成形工位的锻造力大, 模具磨损较快。由于冲孔分离复合模的结构复杂, 生产的稳定性较差, 所以采用二次成形方案的较少。

2.2 电热锻^[1]

2.2.1 电热锻工艺特点及其主要形式

电热锻是对坯料在接触电加热的同时进行局部锻粗的一种工艺。可使杆形或管形零件局部积聚锻粗。用于加工内燃机进、排汽门, 汽车半轴及螺栓头部等。其加工特点是:

(1) 电热锻可以是一个连续的多工序变形过程, 可以获得很大的锻粗比和体积聚积量, 最大锻粗比 L/d 可达 39^\ominus , 而平锻机一个工位的最大锻粗比为 $L/d = 3$;

(2) 在合理的工艺参数下, 可得到变形均匀, 尺寸准确, 组织均匀, 流线合理的产品;

(3) 电热锻锻件表面质量好, 少无氧化;

(4) 操作方便, 调整简单, 产品质量容易一致;

(5) 生产效率高, 热效率高, 耗电量为平锻机的 50%, 每公斤锻件耗电量约为 0.35~0.45kWh。

电热锻成形方式有四种: 端部锻粗见图 3-6-18a; 中间锻粗见图 3-6-18b; 模膛成形锻粗见图 3-6-19a;

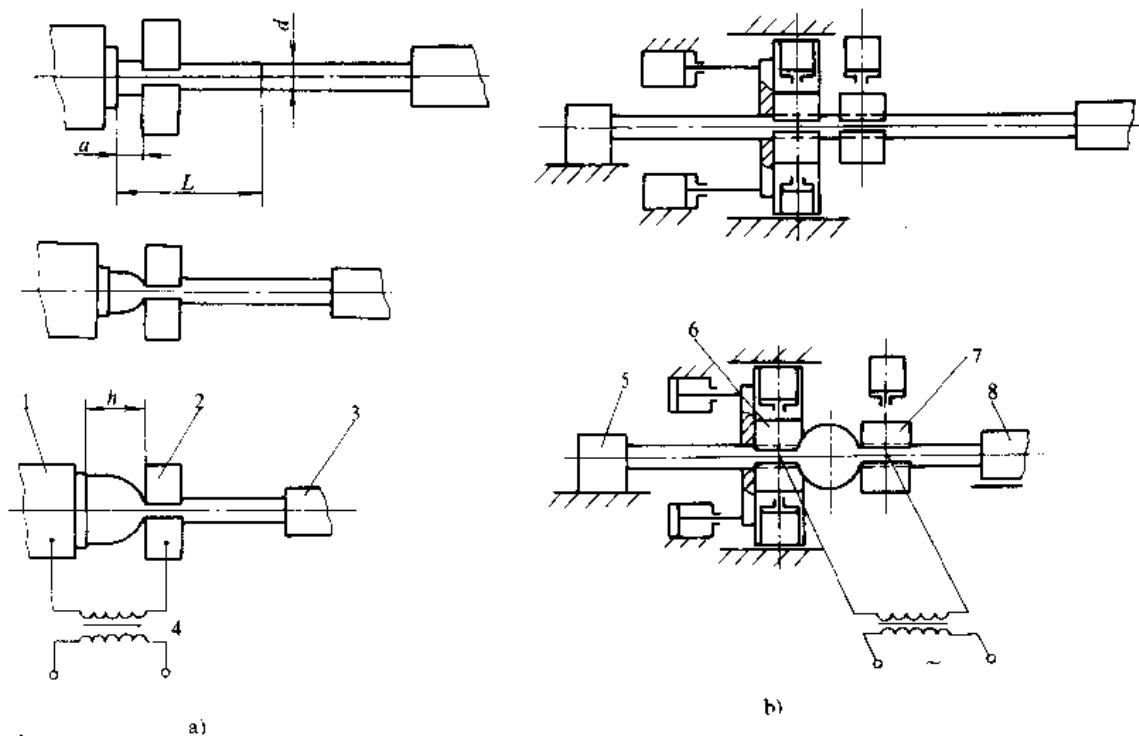


图 3-6-18 电热锻成形方式 I

a) 端部锻粗 b) 中间锻粗

1 砧块 2 夹紧钳口 3 锻粗杆 4 变压器 5 定位块 6 活动夹紧电极 7 固定夹紧电极 8 锻杆

⊖ 摘自参考文献 [1] 1366 页。



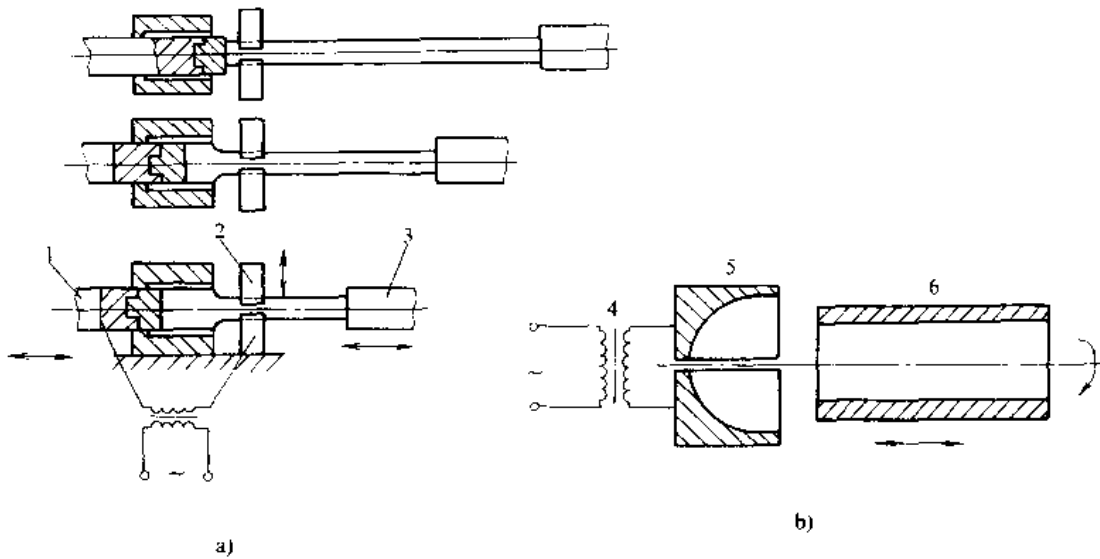


图 3-6-19 电热锻成形方式 II

a) 模槽锻粗 b) 管子端部锻粗

1—砧子电极 2—夹紧电极 3—锻杆 4—加热变压器 5—锻粗模 6—管材

管坯端部锻粗见图 3-6-19b。

按材料直径由图 3-6-20 可查得最小加热时间。工件的电阻

2.2.2 电热锻工艺参数

1. 电热锻所需电功率及电流的计算 接触电加热的发热量根据焦耳—楞次定律:

$$Q = I^2(R_1 + R_2)T \quad (J)$$

式中 I —— 通过导体的电流强度(A);

R_1 —— 工件(垫铁和夹头间)的电阻,取室温和热温度下的平均值(Ω);

R_2 —— 工件与垫铁间的接触电阻(Ω);

T —— 通电时间(s)。

$$R_1 = \rho L/S \quad (\Omega)$$

式中 ρ —— 电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$);

L —— 电极间计算长度(cm);

S —— 导体横截面积(cm^2)。

电加热时随温度上升,钢材电阻率增高,其关系式为:

$$\rho_t = \rho_{20C} \times [1 + \alpha(t - 20)]$$

式中 α —— 温度系数;

t —— 加热温度($^{\circ}\text{C}$)。

一些电热锻用钢材的电阻率见表 3-6-6。

表 3-6-6 钢材的电阻率

钢号	不同温度下的电阻率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)					
	20 $^{\circ}\text{C}$	200 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	800 $^{\circ}\text{C}$	1000 $^{\circ}\text{C}$	1200 $^{\circ}\text{C}$
中碳钢	17	29.6	76.6	111.1	117.9	123
中碳铬钢	20	33	77.8	110.6	117.7	123
中碳铬镍钢	26.8	38.7	81.7	111.5	117.8	122.5
高铬钢	50.6	61.9	102.1	116	117	121.6

接触电阻 R_2 是由于工件与垫铁间接触面不平及沾有氧化膜和油垢而引起的,随着顶锻力增加,接触面积增大,和温度的升高,接触电阻 R_2 迅速降低。当温度高于 600 $^{\circ}\text{C}$ 时, R_2 可忽略不计。

钢材达到锻造温度时所需热量:

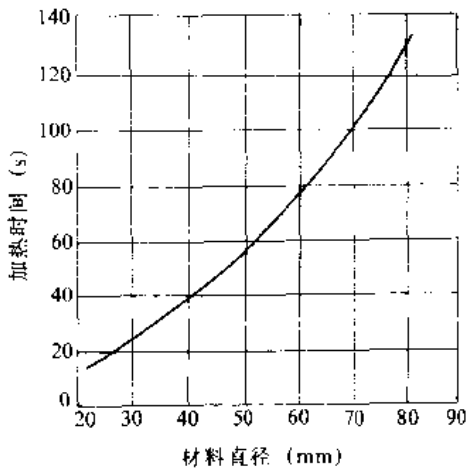


图 3-6-20 电接触加热材料直径和最小加热时间关系



$$Q_c = mtc/\eta \quad (\text{kJ})$$

式中 m —— 加热毛坯质量(kg);
 t —— 加热温度(°C);
 c —— 比热容[kJ/(kg·K)], 一般室温到1200°C, 其平均值为0.167;
 η —— 效率, 一般取0.8~0.9。

由 $Q = Q_c$ 取可计算出电流强度:

$$I = \sqrt{\frac{mtc}{0.24\eta(R_1 + R_2)T}} \quad (\text{A})$$

适当选取次级电压 V , 即可求出所需功率 $P = IV$ (VA), 由 P 值可选取相应的变压器。

电热锻加热电压一般取1.5~10V, 视工件大小和接线长短而定, 工件大则电压高。

加热各种尺寸棒料所需的最小电功率和最大生产率见图3-6-21。

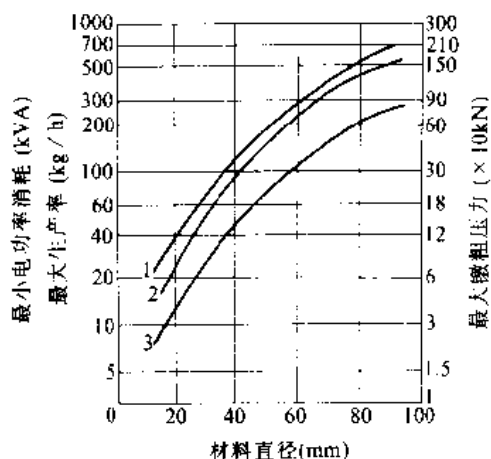


图3-6-21 电热锻棒料直径与生产率, 加热功率和锻粗压力的关系

1—生产率 2—加热功率 3—锻粗压力

2. 锻粗温度和锻粗力 锻粗温度的范围与通常锻造温度相同。锻粗力

$$P = \beta F \sigma_s \quad (\text{N})$$

$$\beta = 2 \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{d}{h} \right)$$

式中 β —— 与锻粗相关的系数, 一般为2~8;
 F —— 锻粗前坯料横截面积(mm²);
 σ_s —— 锻粗温度下钢材的强度极限(MPa);
 μ —— 高温摩擦系数, 取0.4;
 d, h —— 锻粗部分的直径和长度(mm)。

3. 夹持力 夹持力取锻粗力的15%~20%。

4. 原始坯料长度

$$L_d = \frac{4V_d}{\pi d^2 n} = \frac{1.4V_d}{d^2} \quad (\text{mm})$$

式中 V_d —— 锻粗坯体积(mm³), 考虑棒料直径公差, 一般取得比锻件体积大12%~20%。

d —— 原坯料直径(mm);

n —— 烧损系数, 取0.9。

5. 锻粗速度 一般 ≤ 10mm/s。

6. 锻粗时间

$$t_d = (L + 0.5d_0)/(V_d - V_r) \quad (\text{s})$$

式中 L, d_0 —— 分别为锻粗长度和毛坯直径(mm);

V_d, V_r —— 分别为锻粗速度和退砧速度(mm/s)。

7. 毛坯要求 最好电阻率适中、表面质量良好、直径公差小及端面平整。

8. 夹钳 材料可取紫铜或铜合金, 硬度以120~170HB为宜, 可采取镶块结构。

9. 砧块 材料应具有强度高、耐热, 电阻系数大的性能, 可取铜钨合金或3Cr2W8等。

2-2-3 电热锻常见缺陷及原因

1. 聚集体呈层状堆积 这是由于工艺参数不稳定, 温度不稳定造成的。

2. 端面环状折叠、材料的塑性差 采取端部倒角可改善。

3. 不规则变形 应控制锻粗和退砧的速度; 砧块不平或毛坯表面不平亦易产生。

4. 材料过热过烧 产生原因是接触不良或速度不当。

3 粉末锻造^[16]

3-1 粉末锻造工艺特点及应用

粉末锻造是粉末冶金和精密锻造相结合的新技术。通过粉末锻造可将粉末冶金提供的预制坯的孔隙度由75%~85%提高到98%以上, 从而大大的提高了粉末件的机械强度, 可以用作受力结构件, 同时具有粉末件的一些特性。

粉锻工艺特点:

(1) 变形过程是压实和塑性变形两个过程的有机结合。

(2) 变形力在开始阶段, 压实的成分为主, 故变形力较小, 随着工件的密度的增大变形力亦增大, 但总体上变形力一般小于普通模锻所需的变形力。

(3) 锻坯形状可制成最佳的毛坯形状, 以获得形状复杂的精密锻件。



(4) 通过调整预制坯的密度和形状, 可得到具有合理流线和各向性能一致的锻件。

(5) 锻件精度可高于一般的模锻件, 得到尺寸精确、表面光洁的锻件。材料利用率很高。

(6) 锻件的力学性能大体上相当普通模锻件, 但塑性和韧性较差。

粉锻件的应用, 随着粉锻工艺技术和日益成熟及可用于粉锻的材料种类增多, 各行业应用粉锻件的品种和数量稳步增长。用不同粉锻材料生产的粉锻件在各行业中的应用示例见表 3·6-7。

表 3·6-7 粉锻件应用示例

部 类	普通碳钢粉末	合 金 粉 末
发 动 机	连杆, 飞轮环形齿轮	起动齿轮, 阀
人力变速器	离合器轮毂, 同步环	换向齿轮, 换向空转轮
自动变速器	轴承外圈, 凸轮	棘轮, 行星齿圈
车 身 底 盘	轮毂, 后轴端法兰	差速小齿轮, 齿圈

注: 摘自参考文献 [16] 273 页。

粉末锻造低合金钢锻件的主要力学性能见表 3·6-8。

-8。

表 3·6-8 粉末锻造低合金钢的主要性能

钢 种			室 温 性 能				
名 称	名义成分的质量分数 (%)	状 态	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	α_K (kJ/m ²)
铜钼钢	0.25C - 2Cu - 0.4Mo	880℃油淬	882	686	14	23	363
		200℃回火 渗碳淬火	1637	1333	0.5	1.0	294①
钼 钢	0.32C - 0.4Mo	860℃油淬, 180℃回火	882	—	—	—	216
铬镍钢	12Cr2Ni4A	890℃, 1h, 空冷 780℃, 油淬 160℃回火	1058	1186	6.8	22.8	20.6
铬镍钨钢	18CrNi4WA	950℃1h, 空冷	1372	1156	9.5	31.3	24.5
		860℃, 空冷 160℃回火					

① 无缺口试样。

3·2 粉末锻造对原料粉末的要求

1. 原料粉末制备 原料粉末的制备方法最常用的有金属固体碳还原法、雾化法和机械粉碎法。近来又随新材料生产的要求发展了新的方法, 如电解法、气相沉积法和液相沉积法。我国采用各种方法已成功的制备出近百种金属粉末, 其中主要是铁粉 (约占 50% 的产量), 其他还有难熔金属及其化合物、非铁金属、稀有金属和包覆粉末等。

制粉方法对粉末的粒度、形状、表面状态及化学物理性能都有较大的影响。

2. 金属粉末的性能

(1) 金属粉末的化学性能, 粉末金属与原来金属的化学成分相同, 如要改变合金成分需混粉配制。粉末金属亦含有杂质, 如铁粉中存在碳、锰、磷、硫等, 铜粉中存在铅等。金属粉末的化学稳定性较差, 在贮存和运输过程中要采取防氧化措施, 一般要求较高的粉锻件, 制坯前需预先经还原处理。

(2) 金属粉末的物理性能, 它取决于粉粒的形状、

粒度组成和比表面积等。粉粒的形状主要取决于制粉方法, 如雾化法成形的粉末呈球状, 而还原法及机械粉碎法制成粉粒呈鳞片状, 电解法则呈树枝状。粉粒形状影响“松装密度”和压实的效果, 以球状和树枝状粉粒压实效果较好。粉末的粒度大小及均匀性影响压实效果和烧结工艺, 粒度越细则“比表面积”(每克粉粒具有的总表面积)越大则压实力需越大; 而压制件的烧结强度越高, 粉末粒度越均匀则对压实和烧结强度的效果亦越好。

(3) 金属粉末的工艺性能, 是指粉末的充填性、流动性及可压缩性, 它将直接影响工件的使用性能。工艺性能取决于粉粒形状、粒度大小及均匀性, 以细粒的球状和树枝状粉末为佳。

3. 粉末锻造对粉末原料的要求

(1) 合金成分要求分布均匀;

(2) 粉末的密度、流动性、压实性和烧结扩散弥合性要好;

(3) 尽量减少制件中的气体含量, 尤其要控制氧含量和氢含量, 以保证制件内部的致密性和结合力;



(4) 严格控制非金属夹杂物。

3.3 粉末锻造工艺设计要点

3.3.1 粉锻工艺流程

金属粉末→混粉→冷压制坯→烧结→加热→锻造(模锻)→热处理→机加工→成品。

目前先进的方法可实现一次加热,即将烧结和加热两工序合并为一次加热。但是有的由于烧结温度和锻造加热温度相差甚远,或由于烧结加热保温等工艺规范所决定,则通常仍采用烧结坯再次加热进行锻造是合理的。烧结和加热过程中应注意防氧化措施。

3.3.2 粉末锻件的设计

粉末冶金可以获得各种复杂形状的预成形件,然后锻造成形为零件,这是比其它精密压力加工工艺优越的方面。因此,粉末锻件的设计关键是预成形毛坯的设计,设计中应注意的原则如下:

(1) 预制坯形状保证在锻造成形时毛坯处于三向压应力状态,采用墩挤结合形式成形,避免毛坯呈受拉应力,形状尽可能接近终锻形状,外形应尽可能圆滑过渡,避免不利于流动的死角。

(2) 预制坯毛坯压制时最好采取双向压实方式,以保证各部密度均匀;装粉量及压实量希望控制一致,可采用重量和体积自动监控装置;压实过程应具备良好的润滑条件,以便完整脱模。

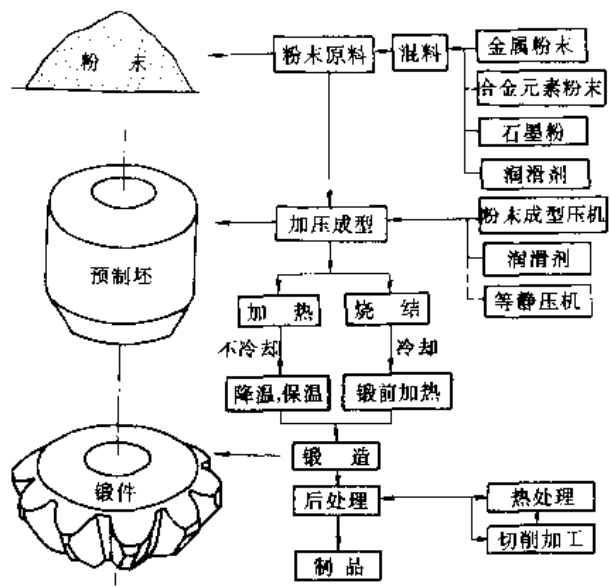


图 3-6-22 齿形锻件的预成形毛坯及工艺流程

(3) 烧结过程是增加预制毛坯的结合强度和可锻

性的重要环节,烧结能使合金成分均匀化扩散和降低工件中的含气量,具体工艺参见工程材料卷第7篇第1章。

(4) 粉末锻造密度应力求均匀,预制坯应尽量避免出现尖角,因尖角部密度偏低,而在锻造中亦不可能改善,设计锻件时应将直角设计成倒角或圆角过渡,成形后达到密度和性能均匀。齿形锻件和预制坯设计示例见图 3-6-22。

3.3.3 锻造过程

(1) 锻造设备一般采用摩擦压力机、机械压力机或高速锤进行粉锻。

(2) 一般要求在保护气氛中加热,可采用电阻炉或中频感应加热炉;有的采用玻璃润滑剂防氧化加热。加热温度和普通模锻一致。

(3) 模具需预热到较高的温度进行模锻,以避免模壁激冷锻坯,影响锻造塑性及内部组织的均匀性。锻后锻件要求在保护气氛中冷却,对复杂形状和精度要求高的锻件可采用整形和精压工序。

3.3.4 后处理

粉末锻造锻件可按普通模锻件一样进行退火、调质或时效处理及进行各种表面处理。个别高要求的锻件在退火后,还要求进行再次烧结或热等静压处理,使其合金成分充分扩散和结合,提高锻件的力学性能,尤其是韧性。

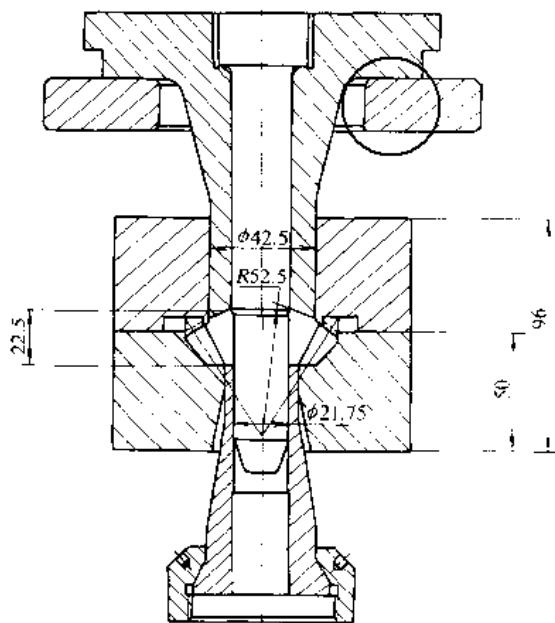


图 3-6-23 汽车差速器行星齿轮粉末锻造模芯结构



3.4 粉末锻造模具设计要点

(1) 粉末锻造锻件的尺寸精度和内部质量要取决于预制坯的形状和尺寸的优化设计。预制坯的形状尺寸有可能合理接近终锻件的形状。

(2) 粉末锻造可以生产精密锻件，除少数加工面需留较小的加工余量和公差外(提高1~2级精度)，大部分非加工表面要注意模具和锻件的热胀量和模具表面的粗糙度，以符合产品要求。

(3) 粉末锻造成形一般是在单模膛采用闭式模成形，大部分锻造过程不产生飞边。

(4) 粉末锻造可以生产复杂形状锻件，用组合模

具实现多向变形锻造成形。

(5) 与普通模锻一样在粉末模锻过程中应保证良好的润滑和表面防护措施。

差速器行星齿轮粉末锻造模模芯结构见图3-6-23。

差速器行星齿轮粉末锻造锻件，齿轮精度可达7~8级，齿面粗糙度 R_a 3.2 μ m，表面硬度58~63HRC，心部30~40HRC，耐疲劳强度超过常规锻造后切削加工的齿轮，加工工时节约50%，材料利用率达95%。

3.5 粉末锻造典型示例

典型粉末锻造汽车零件见图3-6-24^[16]。

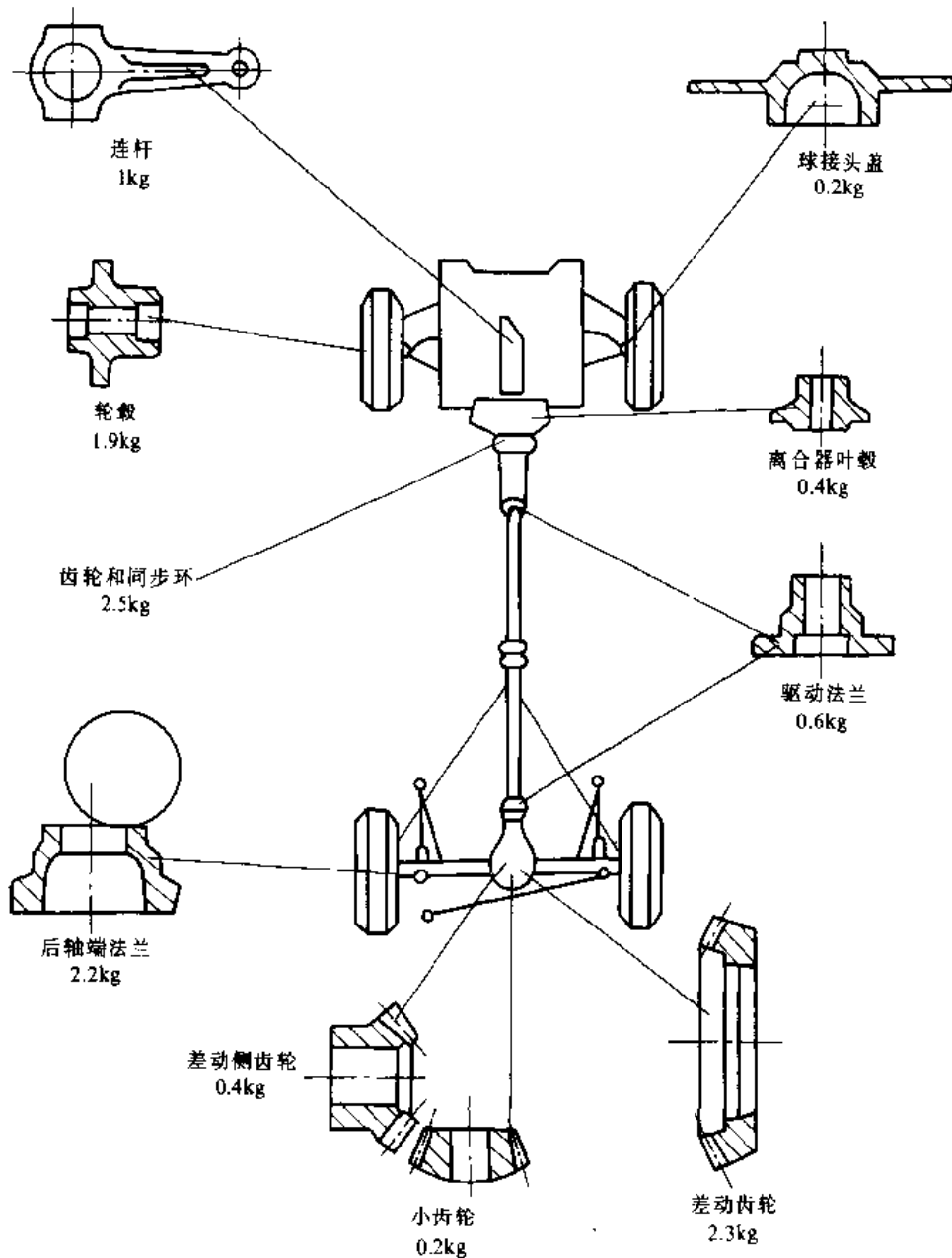


图3-6-24 适合粉末锻造的典型汽车零件



粉末锻造连杆及普通模锻件的精度比较见表 3·6-9。

表 3·6-9 粉末锻造及热锻的连杆精度

	热 锻	粉末锻造
尺寸精度	±1.5mm	±0.2mm
拔模斜度角	7°	0°
重量误差	±3.5%	±0.5%
材料利用率 ($\frac{\text{锻造产品}}{\text{钢棒或粉末}}$)	70%	>99.5%
材料利用率 ($\frac{\text{机加工产品}}{\text{钢棒或粉末}}$)	45%	80%

粉末锻造连杆及普通模锻的成本及能耗比较见图 3·6-25。

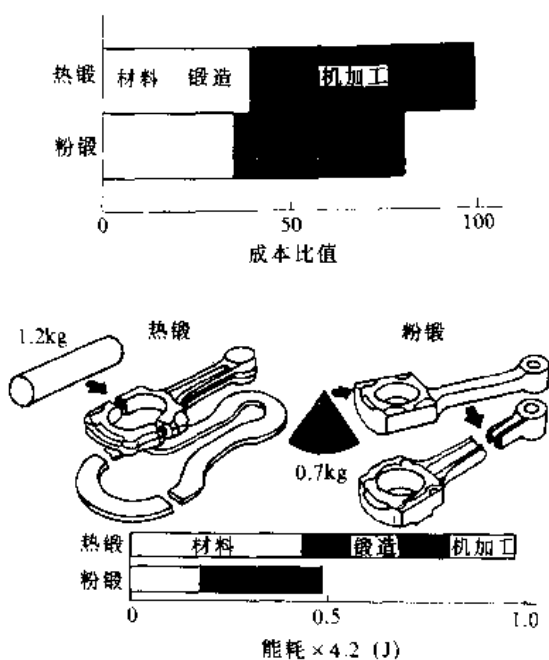


图 3·6-25 粉末锻造和热锻连杆的成本和能耗比较
(摘自参考文献 [16] 273 页)

4 等温锻造和超塑性锻造

4·1 等温锻造 [17][18]

4·1·1 等温锻造的特点及应用

等温锻造是 70 年代发展和实用化的新工艺,它是把锻模的温度控制在和锻造毛坯加热温度大致相同的

条件下,使毛坯处于等温条件下锻压成形。

等温锻造过程中变形材料的温度基本不变,致使变形材料的变形抗力很小,流动性能良好,创造了有利成形的条件。

这对于一些宇航、军工用的难变形,耐高温等特种材料的锻造成形提供了良好的条件,并可获得形状复杂、尺寸精密的锻件。钛合金的锻造效果尤为明显,如 Ti-6Al-6V-(2Sn) 在 760~980℃ 温度下等温锻造,其变形抗力可降低 70%。以此材料生产飞机的某锻件,采用等温锻造获得精密锻件,锻件重量由普通模锻件的 18.1kg 降到 9.2kg,机加工费用降低 27%。又如以耐热合金 IN100 镍基合金等温锻造生产高压压气机第 6、8、10 级叶片,亦取得良好的节能、节材效果。此外 Al、Mg 合金、高温合金及粉末冶金毛坯亦都采用等温锻造技术生产锻件,都取得了良好的技术经济效益。

钛合金 Ti-6Al-6V-2Sn 在等温锻造时,变形温度和变形速度与流动应力(变形抗力)的关系见图 3·6-26。

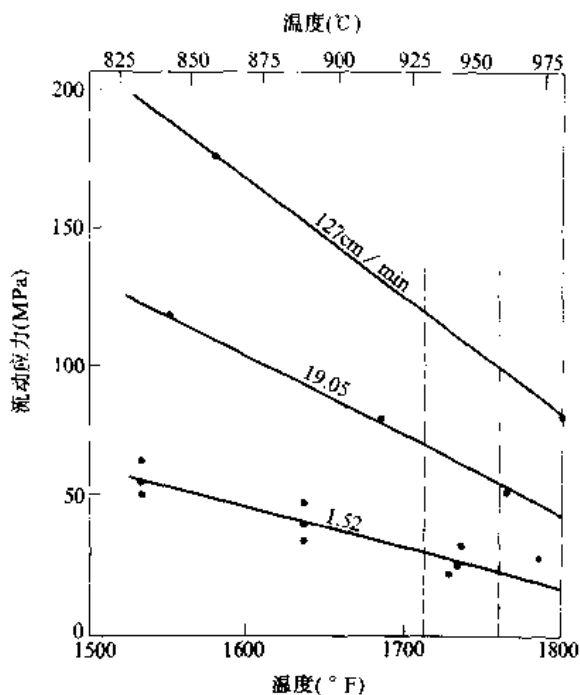


图 3·6-26 钛合金 Ti-6Al-6V-2Sn 等温锻造时
变形温度、变形速度与流动应力的关系

等温锻造要求较缓慢的变形速度,一般采用液压机进行,根据锻造力的需要选用,大体上等温锻造所需力仅为普通模锻的 1/4~1/5。设备的装模空间应考虑



模具加热装置的位置及模具的装卸空间。

4.1.2 模具

1. 模具材料(模膛部分) Al、Mg 合金等温锻造的模具一般在 425℃ 下工作, 可选用 5CrNiMo、3Cr3Mo3VNb 等材料。Ti 合金等温锻造时, 模具温度一般高达 925~1260℃, 要求选用高强度耐热合金, 如镍基铸造和锻制合金制造, 欧美所选用的合金牌号有 Inconel 713C, IN-100, Mar-M-200, Udimet 700, Waspaloy, TRW-NASA VIA。原苏联牌号有 ЖС-6K, ЖС-6-Y, Л114 等。镍基高温合金的高温力学性能见图 3-6-27。高温合金、粉末冶金在等温锻造时, 模具选用高熔点合金(钨合金)或金属陶瓷。

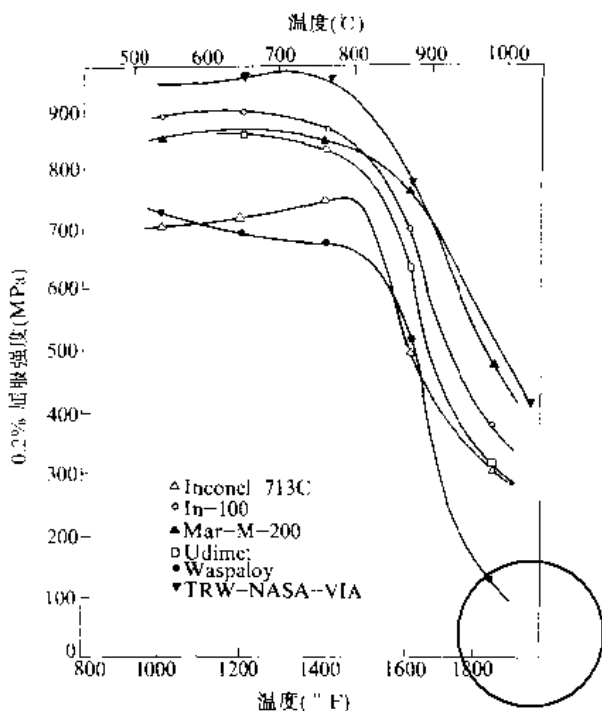


图 3-6-27 镍基高温合金的高温力学性能

2. 模具设计特点

- (1) 考虑模具精密铸造过程中金属的收缩率。
- (2) 考虑锻模加热时的热膨胀量和毛坯材料的线膨胀系数的差别。
- (3) 由于飞边限流作用降低, 应减小飞边桥部的间隙, 以保证锻件的充满, 成形良好。
- (4) 以陶瓷材料作模具时应避免或减少拉应力, 尽可能处于三向压应力状态。

3. 模具结构 (见图 3-6-28)

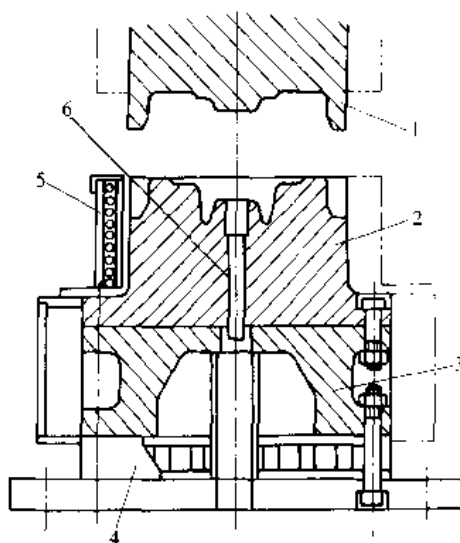


图 3-6-28 等温模锻工艺装备示意图

- 1—上模 2—下模 3—隔热板
4—水冷板 5—感应圈 6—顶料杆

4.1.3 工艺设计特点

1. 等温锻造的锻件图设计要点 等温锻造金属的流动性好, 可成形高精度的锻件。在设计锻件图时和普通模锻件相比可考虑采用小余量、小公差, 过渡圆角和拔模斜度均可取小值, 见表 3-6-10。

表 3-6-10 锻件图设计参数表(附相应普通模锻件)

	等温锻造锻件	普通模锻件
模锻斜度 α	$0^{\circ} \sim 1^{\circ}$	$3^{\circ} \sim 7^{\circ}$
外部圆角 (mm)	10	22
内部圆角 (mm)	3.3	10
欠压量 (mm)	0~1	0.76~3.3
错移量 (mm)	0.51	1.27
歪曲量 (mm)	0.38	1.52
长度和宽度公差 (mm)	± 0.38	± 1.0
肋的厚度 (mm)	2.5~3.2	12.7

2. 等温锻造对润滑防护剂的特殊要求 润滑防护剂对等温锻造工艺的成败起着关键作用。它应满足以下几点要求:

- (1) 在模膛和毛坯之间形成均匀致密的薄膜, 起分离作用;
- (2) 减少变形过程中的摩擦力, 降低变形抗力, 减少模具的磨损;
- (3) 对变形毛坯和模具无腐蚀作用;



- (4) 锻件脱模方便, 便于锻后清理;
- (5) 加热时, 保护毛坯表面, 防止氧化。

一般被采用的润滑防护剂有: 玻璃、熔融态盐、皂土、和云母为基的润滑剂。亦可采用氯化硼为润滑和脱模剂, 效果甚佳。玻璃类润滑剂对陶瓷模有腐蚀作用, 不用为宜。

4.1.4 TC6 钛合金作动筒筒体的等温锻造

TC6 合金作动筒是航空零件, 其形状和等温挤压模见示意图 3-6-29。

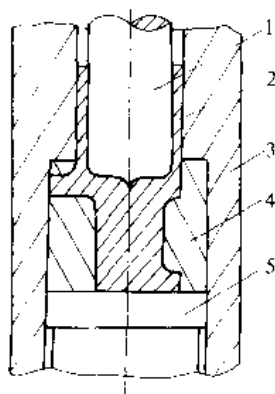


图 3-6-29 TC6 钛合金作动筒等温挤压示意图

- 1 挤压冲头 2—工件 3—挤压凹模外腔
- 4—可分式挤压凹模 5—凹模下顶杆

零件尺寸: 外径 60mm, 壁厚 3.5mm, 筒深 150mm, 总高度为 240mm。零件质量 0.6kg, 采用普通模锻(实心件)重量为 3.4kg, 其材料利用率仅 18%。等温锻造(反挤压成形)锻件质量为 1.7kg, 材料利用率为 34%, 成本下降 1/4。

工艺流程: 涂高温玻璃润滑剂于毛坯表面→电阻炉中加热至 940℃→在 940℃的模具中等温挤压→碱液洗除润滑剂→喷砂作表面清理→酸洗表面氧化皮→清洗→机加工。

4.2 超塑性锻造

4.2.1 超塑性锻造的特点和应用

超塑性是指金属(大部分)在一定的组织状态下

(微细晶粒或相变过程), 在一定的温度范围和相应的低应变速率下进行变形时, 金属呈现出允许应变特大和变形抗力很小的一种特性。

人们利用材料的这种特性进行锻压加工, 可获得形状复杂、尺寸精确的成形零件。这对部分难成形金属的军工零件的加工具有特殊的重要意义。

超塑性锻造的特点:

(1) 超塑性状态下的金属材料具有超常规塑性, 例如钛合金 Ti-6Al-4V 伸长率可超过 1600%, 一般钢材在相变过程组织状态时, 伸长可超过 500%。超塑锻造时材料具有良好的流动性(成形性)。

(2) 变形抗力很小, 例如 Zn-22%Al 合金在 250℃时超塑锻造, 变形抗力为 0.2MPa; 轴承钢 GCr15 在 700℃下超塑锻造时, 变形抗力为 3MPa; 耐热合金 IN100 在 1038℃超塑锻造, 变形抗力为 2.8MPa。

(3) 超塑锻造时, 应变速率对变形抗力的影响明显。一般在 $10^{-4} \sim 10^{-2} (s^{-1})$ 之间。

(4) 超塑性模锻后, 锻件一般应通过固溶稳定化和沉淀等热处理方法, 达到所要求的力学性能。其组织和力学性能是稳定的。

此工艺已逐步推广应用于军工、仪表、模具等批量少, 难加工精度要求高的零件。例如飞机的高强度合金的起落架、整体舱门、整体涡轮盘、整体加强框架等; 仪表中的汽路管板; 注塑型腔模; 特种齿轮、衬套等。其应用范围已逐步向各行业渗透, 但由于其生产率较低, 对大批量生产产品是有局限性的。

4.2.2 超塑材料及其预处理

迄今发现具有超塑性的金属材料已近 200 种, 其中包括锌合金、铝合金、铜合金、钛合金、不锈钢、低合金钢和高温合金等。

材料为获得超塑性需作组织细化预处理, 预处理可分为微细晶粒超塑性和相变超塑性处理二种, 常用材料的超塑性预处理工艺见表 3-6-11, 一些两相合金在相变和再结晶的同时呈现超塑性, 这种超塑性组织称为双重显微组织。其处理工艺见图 3-6-30。

表 3-6-11 常用材料的超塑性处理工艺

材料①	状态	超塑性处理规范	超塑性锻造温度(℃)
Zn-22%Al	轧后退火	350℃保温 60min, 在盐水中冷却 60min, 250℃回火 30min	240~260



(续)

材 料	状 态	超塑性处理规范	超塑性锻造温度 (C)
Zn-22%Al	铸锭经 370 C 退火	350 C 保温 60min, 在清水中冷却 60min, 250 C 回火 30min, 250 C 轧制	240~260
Al-6%Cu-0.5%Zr	铸锭经激冷	370 C 保温 12h, 炉冷, 300 C 多道轧制	430
HPb-39-1	轧后退火	250~300 C 保温 60min, 退火空冷, 再次加热至 470 C, 在冰盐水中淬火	620
H62	轧后退火	250~300 C 保温 60min, 退火	750
Ti-6Al-4V	轧后退火	920 C 轧制, 变形程度大于 60%, 空冷, 800 C 保温 1h, 空冷	920
Ti-8Al-1Mo-1V	轧后退火	704~982 C 变形, 压缩比 4:1	871~982
Waspaloy	轧后退火	843~968 C 变形, 压缩比 4:1	899~996
Astroloy	轧后退火	899~1066 C 变形, 压缩比 4:1	927~1066
IN-100	粉末毛坯	1038~1149 C 变形, 压缩比 5:1	1038
GH33A	锻后退火	960 C 保温 8h, 空冷, 950 C 保温 50min, 变形程度 > 60%, 锻后 950 C 保温 1h 再结晶处理	~970 C

① 百分数皆为各成分的质量分数。

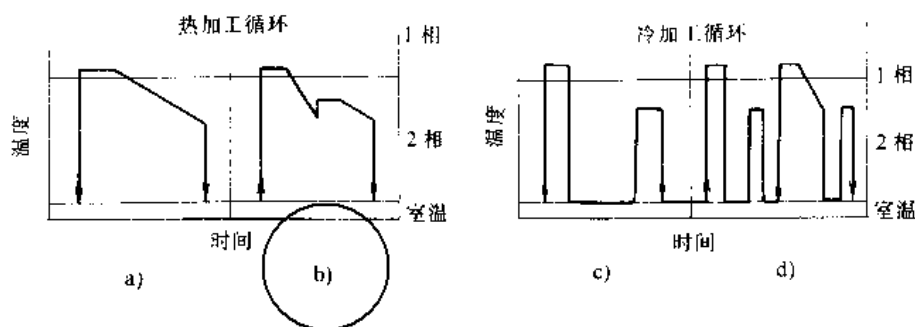


图 3-6-30 两相合金形面双重组织的工艺示意图

a)、c) 用于沉淀相析出较快的合金 b)、d) 用于沉淀相析出较慢的合金

4.2.3 工艺和模具设计

超塑性锻造工艺过程是将已具备超塑性的毛坯材料加热到超塑成形所需的温度, 以超塑变形允许的变形应变速率作等温锻造成形。超塑锻造温度一般为

$(0.5 \sim 0.7) T_m$, T_m 为材料的绝对熔化温度。

工艺和模具设计的原则可参考等温锻造的要求, 如精化的锻件图设计, 润滑防护要求等。模具结构示意图见图 3-6-31。

高温合金锻件超塑性模锻后的恢复性能热处理规



范见表 3·6-12。

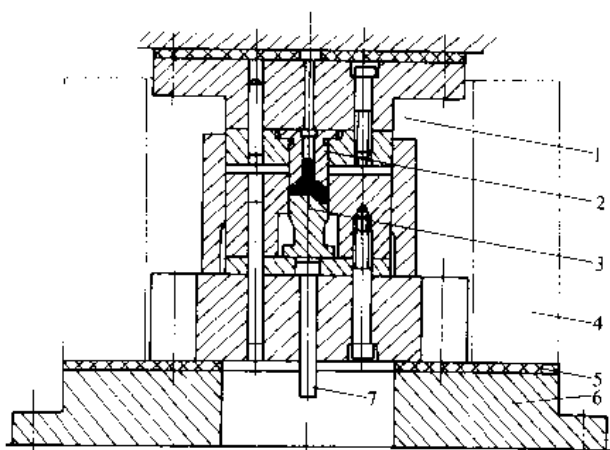


图 3-6-31 黄铜衬套超塑性模锻的模具示意图

1- 限位块 2- 上模 3- 下模 4- 电炉
5- 石棉垫板 6- 垫板 7- 顶杆

表 3·6-12 镍基合金固溶处理温度

变形合金	再结晶温度 (°C)	固溶温度 (°C)
Inconel X-750	954	982
Inconel 625	954	982
Inconel 718	969	954
Waspaloy	1010	985
Udimet 500	1052	1080
Rene'41	1052	1066
Astroloy	1121	1121
IN-100	1149	1190
MAR, M200	1218	1204

5 液态模锻

5.1 液态模锻工艺特点及应用

液态模锻是用熔融金属做原料，直接浇入金属模腔内，然后以一定的压力作用于液态或半固态金属上，使之结晶并产生一定程度的塑性变形，生产所需的锻件。

液态模锻实质上是铸造与锻造工艺的组合工艺，它具有铸造（压力铸造）工艺简单、成形复杂形状及成本较低的优点，又具有锻造产品内部质好及成形精度高的特点。

液态模锻所需的成形压力比普通模锻的压力小得多，由于液态金属的良好充填性能，往往只需一般模锻

1/5 的压力，同时成形所需的工序少。

液态模锻发展已有 30 年的历史，但由于其变形、成形机理和产品的内部质量及性能的关系甚为复杂，所以在 70 年代才在工业产品生产中推广应用。如生产铝合金活塞、镍黄铜的高压阀体，仪表外壳及铜合金涡轮、球墨铸铁齿轮及钢法兰盘等等，以非铁合金件为主，这是由模具承受能力所限，用于钢制件尚有一定的局限性。

5.2 液态模锻工艺设计要点

1. 工艺流程 液态模锻工艺流程如下：原材料配制→熔炼→浇注→合模与加压→卸模顶出锻件→灰坑冷却→热处理→检验→入库。其工艺特征是：

(1) 结晶过程，液态模锻的凝固过程是在封闭模腔中加压完成的。先在周边凝固和结晶，同时在加压下材料中心部分凝固。这有助于组织细化、均匀、致密和铸造缺陷少。对于非铁金属，当加压的压力大于 50MPa 时，一般内部不出现缩孔和疏松。

(2) 相变过程，随着压力增加将导致结晶温度和熔点温度略有上升。

(3) 力学性能，液态模锻件往往在强度指标上高于一般的轧材，这是由于加压下完成凝固和相变过程，增加了强化相的比例。但其塑性指标相对较差，这是由于枝晶偏析、杂质与铸造残余组织的影响。表 3·6-13 是液态模锻钢件的力学性能对比情况。

表 3·6-13 钢液态模锻件的力学性能特点

钢 材	性 能 指 标					
	σ (MPa)	σ_s (MPa)	δ (%)	ψ (%)	a_K (kJ/m ²)	
25	液态模锻件	480 ~542	293 ~362	5.2 ~20.3	6.5 ~16.3	206 ~412
	轧 材	452	274	23	50	882
	铸 件	481	235	20	30	442
35	液态模锻件	622	341	11.8	9.8	402
	轧 材	529	314	20.0	45.0	682
	铸 件	491	274	16.0	45.0	343
20Mn	液态模锻件	506 ~519	268 ~354	10 ~11	10 ~14	230 ~270
	轧 材	460	280	24	50	—
25Mn	铸 件	500 ~550	300 ~350	30 ~35	45 ~55	155 ~170



2. 工艺设计要点

(1) 比压、施压的大小是保证液态模锻件质量的关键参数,一般对非铁金属,比压应大于50MPa,而钢锻件的所加比压应大于250MPa。

(2) 加压开始时间,应在金属处于熔融、半熔融状态时加压为宜。

(3) 加压速度,一般小锻件取0.2~0.4m/s,大锻件取0.1m/s。

(4) 保压时间,取决于凝固时间,希望在整个凝固时间中保压,以厚度考虑,钢可按0.55s/mm,Al件直径小于50mm的可取0.3s/mm,而厚度大于100mm时取1~1.5s/mm。

(5) 模具温度,模具需预热到200~400℃(铝件取200℃,钢件取400℃),模具使用中温度不应大于700℃,否则应加冷却装置冷却模具。

(6) 浇注温度,浇注温度将影响制件的内部质量、模具寿命及内部气体的排除,以偏低有利。常用材料的浇注温度见表3-6-14。

表3-6-14 常用材料液态模锻时的浇注温度

材 料	炉 温 (°C)	浇注温度 (°C)
铸铝	680~750	640~670
Cu5	680~750	580~650
Cu62	1040~1080	980~1030
HSi59-1	1000~1020	950~1000
HMn58-1	950~1020	900~970
青铜	1100~1150	1050~1100
锡磷青铜	1100~1150	1050~1100
铝铁锰青铜	1170~1220	1120~1170

(7) 润滑,模具锻造过程中需润滑,为了便于脱模和减少模具磨损,润滑剂要求耐高温、高压、良好的粘附性、无毒、无腐蚀并便于清理等性能。

铝合金液态模锻可用:石墨加机油、猪油及石墨加猪油等多种润滑剂。对于铜合金可用:石墨加机油、植物油加肥皂水、石墨加机油加松香加松节油等为润滑剂。

5.3 液态模锻模具设计原则

(1) 分模面,可设一个或多个分模面,便于成形和

出模;

(2) 加工余量,在机加工部位放3~6mm,在薄壁部位亦应加工工艺余量;

(3) 模锻斜度,内外侧壁部分一般取1°~3°的出模斜度;

(4) 圆角半径,取在3~10mm范围(外角取小值);

(5) 收缩量,应根据材料和加工温度决定,对于复杂的形状应考虑不均匀收缩;

(6) 最小孔径,对非铁金属取 $\phi 25 \sim 35\text{mm}$,对黑色金属取 $\phi 35 \sim 50\text{mm}$;

(7) 模具材料,铝合金零件可用3Cr2W8、4W2CrSiV、3W4Cr2V等模具钢,对于铜合金或钢件应选用耐热钢、锻模钢、钨基合金等;

(8) 模具结构,铝合金活塞件为例,工件图见图3-6-32,模具结构图见图3-6-33。

5.4 液态模锻设备

(1) 专用多动液态模锻液压机,原苏联设计研制的是VJM型系列液态模锻压力机。它具有熔化、浇注、成形(加压)及清渣工作。日本亦开发了150~1000kN液态模锻压机,生产铝合金活塞,直径达400mm。

(2) 通用液压机,生产简单形状零件,从模具上实现多动作,完成液态模锻。

(3) 对设备的要求:所需压力比压铸时的压力更大;设备应具有较大的回程力,以完成卸料;组合模有合模动作时应有足够的合模力,可按冲孔挤压的一倍考虑,专用液压机除主工作缸、水平液缸外一般还有活动横梁的操作油缸;最后设备应有顶出装置。

5.5 液态模锻示例

铝合金(LD8)柴油机活塞的液态模锻,其工件图见图3-6-22。工艺参数如下:

(1) 熔炼,先把铝屑重熔注成铝锭,然后再熔成液态模锻的铝液。

(2) 在4000kN油压机上进行液态模锻,比压为16MPa。

(3) 保压时间为120s。

(4) 模具温度控制在250~300℃。

(5) 热处理,加热温度为 $520 \pm 5^\circ\text{C}$,保温5h,淬入60℃以上的温水中,人工时效温度为 $170 \pm 5^\circ\text{C}$,保温12h,出炉后空冷。

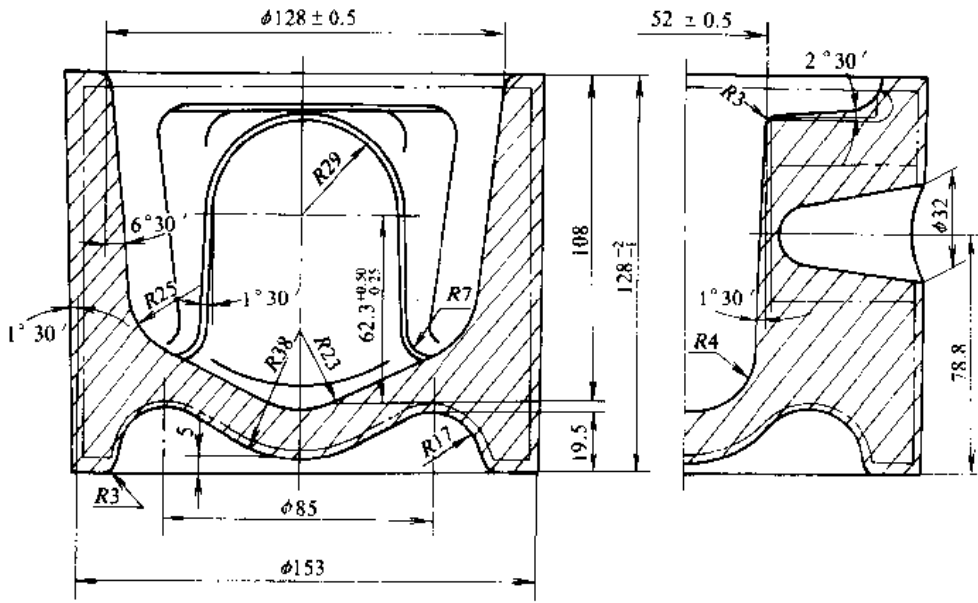


图 3-6-32 活塞工件图

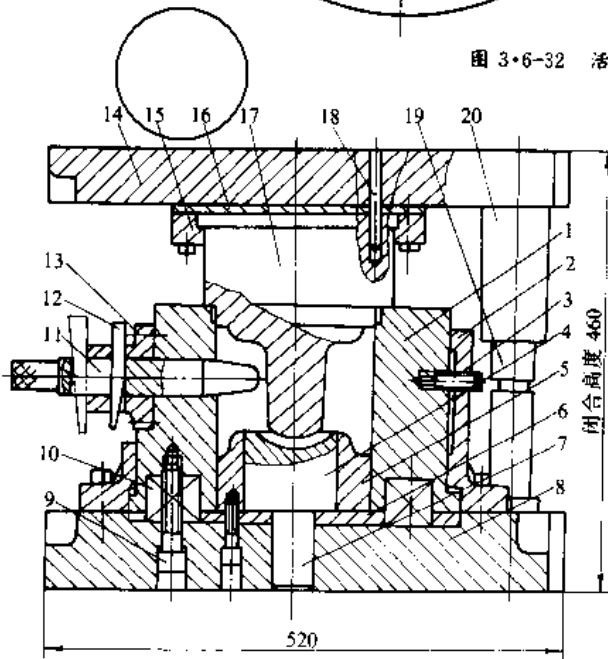


图 3-6-33 模具图

- 1—凹模 2—凹模外套 3—导向销 4—顶块 5—凹模镶块 6—凹模垫板 7—内顶杆 8—下模板 9—内六角螺钉 10—反压弹簧 11—轴销(左右对称) 12—斜楔 13—轴销座 14—上模板 15—冲头固定板 16—冲头垫板 17—冲头 18—定位销 19—导套 20—导柱



第7章 冷锻和温锻^{[1][19][20]}

1 冷锻特点及应用^[19]

冷锻是在室温下使金属在模具内成形的工艺方法的总称,其中包括墩锻、挤压、模锻、压印等(图3·7-1)。

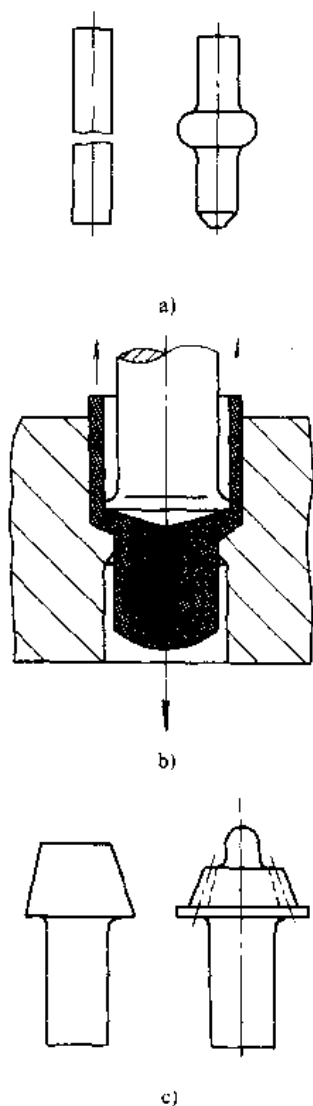


图3·7-1 冷锻的分类

a) 墩锻 b) 挤压 c) 模锻

冷锻工艺有如下特点:

- (1) 可以生产成品零件或与成品件非常接近的毛坯。
- (2) 冷锻件的尺寸精度高,表面状态好,表面粗糙

度达 $2\mu\text{m}$,制件力学性能好,材料利用率一般达70%以上。

(3) 生产率高达每分钟数十件至数百件,适合于大批量生产,也易于实现生产的机械化、自动化。

由于冷锻工艺在室温下变形,必然带来成形力相对其他成形工艺要大的问题,因而要求冷锻用原材料冷成形性要好,坯料要求软化处理和润滑处理;所用模具材料要求高的强度和耐磨性;成形设备需要吨位大、刚性和精度高等。

冷锻工艺广泛应用于标准件,液压件及汽车、电子、兵器和日常用品的生产。应用的材料有非铁金属及其合金、钢及合金钢。制件质量由几克至数十公斤。

2 冷锻用原材料及制坯要求

2.1 冷锻用材料及准备

冷锻用材料有: B2、B2F、B3、B3F及10~45钢,高强度螺栓用低合金钢,可用盘材或棒材。冷拔盘材常用规格为 $\phi 2\sim 25\text{mm}$,100~2000kg, $\phi 16\text{mm}$ 以上需用开卷装置。

冷锻用冷拔线材要求直径公差小,表面状态好,不允许有麻斑、伤痕、微裂等缺陷,要求平直无突弯,表面硬度为75~85HRB。

典型的拉拔工艺如表3·7-1。表3·7-2为拉丝模直径与线材直径对照表。

表3·7-1 钢材拉拔工艺

工序	工艺流程	设备
1	剥壳去除氧化皮	卷绕式拉丝机
2	酸洗盐酸(其质量分数为15%)	酸洗池
3	水浸清洗	清水池、喷水泵
4	石灰浆中和	石灰浆池
5	烘干	干燥炉
6	初拉拔(拉拔量为原材料直径的26%~33%)	单头或多头拉丝机
7	回火处理(680~700℃随炉冷却)	退火炉
8	酸洗去除氧化皮	酸洗池
9	水浸清洗	清水池、喷水泵
10	石灰浆中和	石灰浆池
11	烘干	干燥炉
12	拉拔(拉拔量为线材直径的20%)	单头或多头拉丝机



表 3-7-2 拉丝模直径与线材直径对照表 (mm)

规格	螺 母 (GB52-66)		螺 钉 (全长螺纹)				螺 栓 (非全长螺纹)	
	模孔直径 及公差	线材直径 及公差	二级螺纹		三级螺纹		模孔直径 及公差	线材直径 及公差
			模孔直径 及公差	线材直径 及公差	模孔直径 及公差	线材直径 及公差		
M6×1.0	6.99 ^{+0.02}	7.0 ^{-0.03}	5.25 ^{-0.02}	5.26 ^{-0.02}	5.21 ^{+0.02}	5.22 ^{-0.02}	5.85 ^{+0.03}	5.86 ^{-0.03}
M8×1.25	8.32 ^{+0.03}	8.33 ^{-0.03}	7.08 ^{-0.02}	7.09 ^{-0.02}	7.01 ^{+0.02}	7.02 ^{-0.02}	7.72 ^{+0.03}	7.73 ^{-0.03}
M10×1.5	10.62 ^{+0.02}	10.63 ^{-0.04}	8.85 ^{-0.02}	8.86 ^{-0.03}	8.79 ^{+0.02}	8.80 ^{-0.03}	9.77 ^{+0.03}	9.78 ^{-0.04}
M12×1.75	12.48 ^{+0.04}	12.50 ^{-0.04}	10.65 ^{+0.02}	10.66 ^{-0.03}	10.61 ^{+0.02}	10.62 ^{-0.03}	11.73 ^{-0.03}	11.74 ^{-0.04}

2.2 冷挤用材料及准备

2.2.1 材料

冷挤压用材料应有良好的冷塑性，较低的变形抗力和冷作硬化敏感性。冷挤压用的材料有：铝及铝合金 L1~L5、LF2~LF5、LY11~LY12 等。

铜及铜合金 T1~T3、TU1~TU2、H62~H80、QSn6.5~0.1 等。

碳钢 Q195、Q215A、Q215B、08~55。

合金结构钢 16Mn、15Cr、20Cr、20MnB、20MnV、12CrNi3A、30CrMnSiA、18CrMnTi 等。

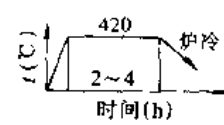
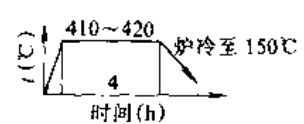
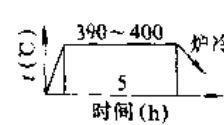
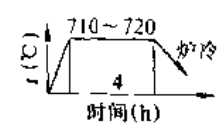
不锈钢 1Cr13、2Cr13、1Cr18Ni9Ti 等。

其他金属及合金 Ni1~Ni2、Zn 及其合金、纯铁等。

控制一定的变形量，高碳钢、轴承钢甚至高速钢都可进行冷挤压变形。

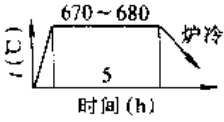
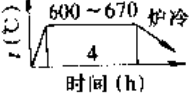
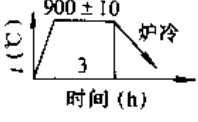
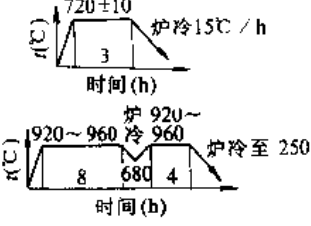
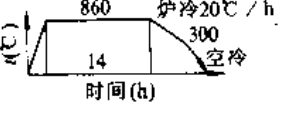
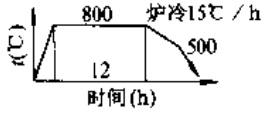
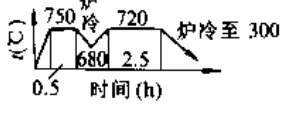
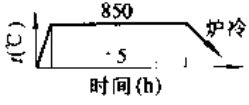
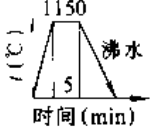
为提高材料的塑性，冷挤压前大部分金属需经软化处理（表 3-7-3）。

表 3-7-3 冷挤压材料软化处理规范

材 料	软化处理规范	处理前硬度 HB	处理后硬度 HB	备 注
铝 合 金 L1~L5			15~19	
铝 合 金 LY11 LY12		105	53.5~55 55~60	
LF2~LF5			38~39	
铜 及 铜 合 金 T1~T4		110	38~42	也可采用水淬软化处理



(续)

材 料	软化处理规范	处理前硬度 HB	处理后硬度 HB	备 注	
铜及铜合金	H62 	150	50~55	可用 700~750 C 水淬	
	H68 		45~55		
纯铁	DT1 		60~80		
碳素钢	A2, B2 10 15 20 30 45 	107~179	100~110 107~118 109~121 121~131 138~145 154~163	Q215A、Q215B 处理规范需 注意密封, 其他材料防止脱碳	
	合金结构钢	15Cr 	170~217	113~120	○
		20Cr 		120~130	
		40Cr		150~163	
	碳素工具钢	T8A 	HV195	HV160~165	
轴承钢	GCr15 		174~192		
不锈钢	1Cr18Ni9Ti 	220	130~140		

此星公司制作 请尊重原作者版权



2.2.2 下料

为保证挤压件能充满成形又有足够的模具寿命，挤压用坯料应控制在0.5%~1%的重量公差，端面与轴线的垂直度应小于3°。常用的下料方法有：

(1) 冲裁。用于板料下料，效率高、质量好，但材料利用率低，一般用于反挤压毛坯。

(2) 锯切。用于棒材下料，断面质量好，为提高效率一般采用一次夹紧同时锯切几根棒料，采用带锯锯切已成为备料的一种趋向。

(3) 剪切。用于棒材下料，材料利用率和效率均较高，生产中普遍采用。由于剪切面质量不能满足工艺要求，一般需加平整工序。

2.2.3 润滑

理想的润滑剂应能随着金属变形，在金属与模具间产生一层良好的润滑膜，降低金属流动与模具间的摩擦系数，在300~400℃不降低润滑性能，而且使用方便，无毒，易于配制，废水排放应经过处理，防止对环境产生污染。表3-7-4为不同材料的表面处理和润滑。

表 3-7-4 不同材料表面处理和润滑

材料	纯铝	硬 铝	铜及合金	碳钢及轴承钢	不锈钢
表面 处理 方法		氧化： NaOH 40~60g/L 温度 50~70℃ 时间 1~3min	钝化： 铬酐 200~300g/L 硫酸 8~16g/L 硝酸 30~50g/L 温度 20℃ 时间 5~10s	磷化 ZnO 20~30g/L H ₃ PO ₄ 20~30g/L HNO ₃ 30~40g/L Na ₂ CO ₃ 4~6g/L NaNO ₂ 0.1~0.2g/L 温度 40~45℃ 时间 10~15min	草酸 50g/L 氯化钠 25g/L 亚硝酸钠 3g/L 氯化氢钠 10g/L 温度 80~90℃ 时间 10min
		磷化： ZnHPO ₄ 28g/L H ₃ PO ₄ (75%) 25g/L CrO ₃ 10g/L 温度 55~60℃ 时间 2~5min		磷化 ZnO 9g H ₃ PO ₄ 23mL 水 1L 温度 90℃ 时间 15~20min	
		氟硅化 氟硅酸钠 7.9g/L 氟化锌 2.1g/L 温度 沸点 时间 10min		磷化 ZnO 23~26g/L H ₃ PO ₄ 40g/L HNO ₃ 22~24g/L 温度 75℃ 时间 30~40min	
润 滑 方 法	粉状硬脂酸锌	粉状硬脂酸锌	粉状硬脂酸锌、钙	硬脂酸钠 5~8g/L 温度 60~70℃ 时间 10min	氟化石蜡 85%① MoS ₂ 15%①
	猪油	豆油	豆、菜油	羊毛脂 95%~97%① MoS ₂ 3%~5%①	
	蓖麻油	菜油	猪油	肥皂 80~100g/L 温度 50~70℃ 时间 10min	

① 指质量分数。



3 冷锻工艺设计

3.1 冷锻件的工艺设计

冷锻件工艺设计的合理与否直接影响冷锻件的质量、尺寸精度、模具寿命和生产效率,因此在设计冷锻件时应注意如下几点:

(1)冷锻件选用材料必须具有良好的冷塑性,并把由于冷塑性变形使材料的力学性能和表面状态提高的因素加以考虑,如果使用性能满足要求,可选用低档次的材料。

(2)冷锻件的形状力求对称,并避免尖角(图3·7-2),截面变化应缓慢过渡,不宜形成外锥度很小、而长度与直径比大于1.5的锻件,更不宜设计在横截面上有内凹的锻件(图3·7-3)。

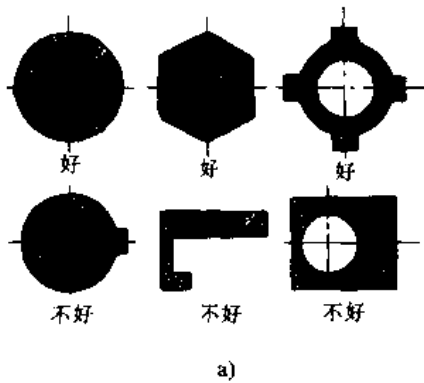


图3·7-2 挤压件截面形状

a) 横截面 b) 纵截面

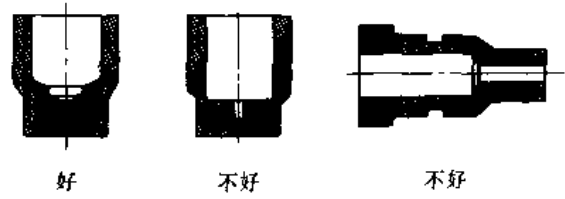
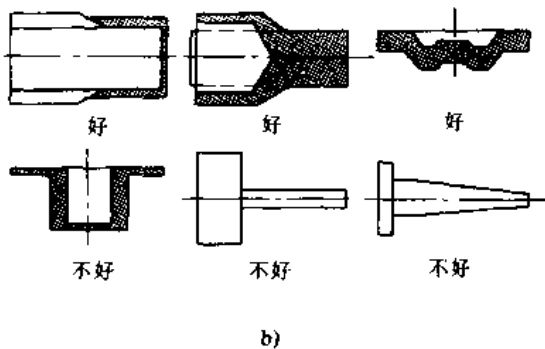


图3·7-3 挤压件内腔形状

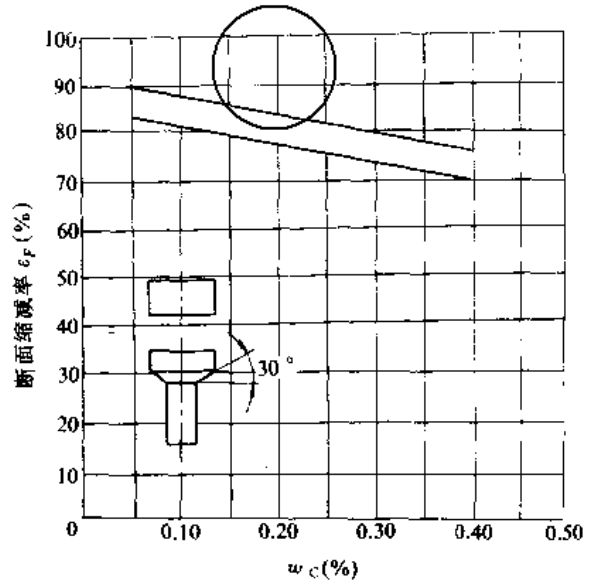


图3·7-4 碳钢碳含量对正挤压实心件许用变形程度的影响

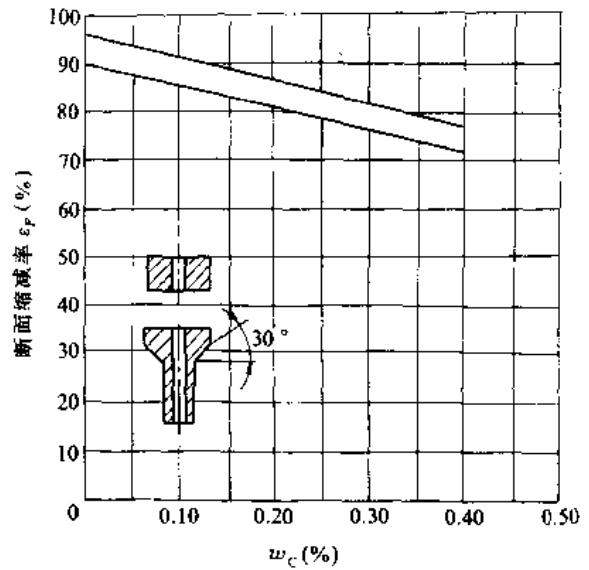


图3·7-5 碳钢碳含量对正挤压空心件许用变形程度的影响

(3)为保证模具有足够的寿命,碳钢件一次变形量应小于许用变形程度(图3·7-4~图3·7-6)。锻锻时锻粗部分的长径比 d/l 应小于2.5。非铁金属的许用变形程度见表3·7-5。



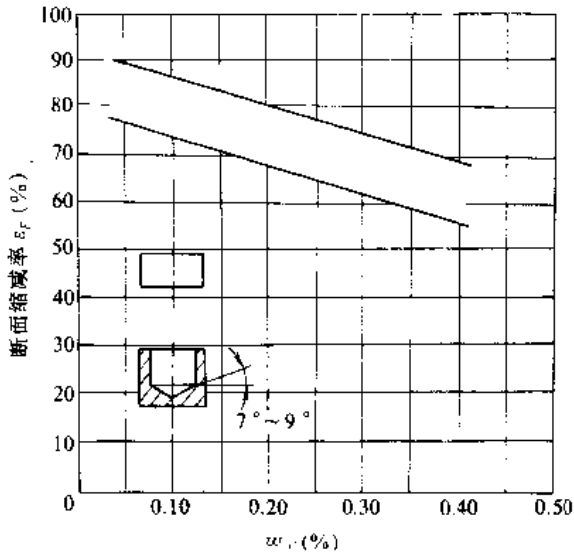


图 3-7-6 碳钢碳含量对反挤压许用变形程度的影响

表 3-7-5 非铁金属的许用变形程度

材 料	许用变形程度 (%)	
锌、纯铝、无氧铜	正挤	95~99
	反挤	90~95
紫铜、黄铜、硬铝	正挤	90~95
	反挤	75~90

3.2 冷锻件的经济精度

冷锻件精度主要受模具和机床精度和刚性的影响,根据不同的生产批量和冷锻件要求,冷锻件的精度也随之不同。目前最高的尺寸精度可达到 0.002mm,但是在保证模具寿命的前提下,冷锻件要按经济精度

进行生产,影响精度的主要因素有:

- (1) 零件的绝对尺寸越大,冷锻件的误差值也越大。
- (2) 成形工序越多,冷锻件尺寸的积累误差就越大。
- (3) 模具制造精度决定最初一批锻件的精度。
- (4) 模具工作部分的磨损决定最后一批锻件的精度。
- (5) 模具的装配精度和导向精度。
- (6) 成形设备的精度和刚性。

图 3-7-7 为典型冷锻件精度影响因素的分析。表 3-7-6、表 3-7-7 为正、反挤压钢件的经济精度值。

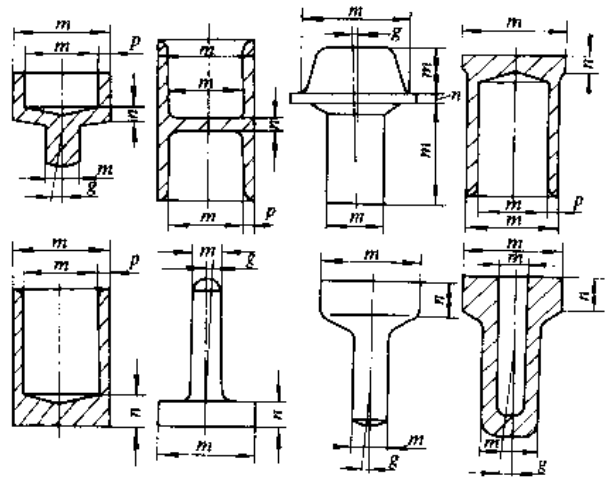


图 3-7-7 典型冷锻件

m —决定于模具工作部分精度 n —决定于挤压机下死点位置精度 p —决定于模具装配精度和导向精度 g —挠曲度决定于模具的几何精度及材料性能的统一性

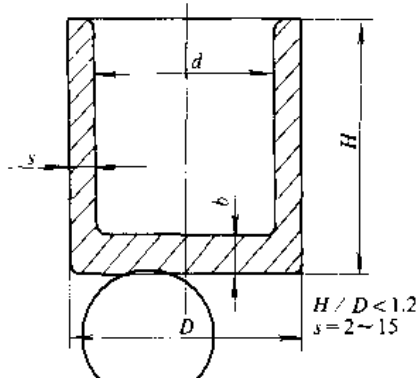
表 3-7-6 大批量生产正挤压钢件经济精度 (mm)

	直 径 $d_1 \pm$		长 度 L		
	公称尺寸	偏 差		公称尺寸	挠曲度 f
		正常的	精整的		
10~18	0.05	0.008	<100	0.02~0.15	
18~30	0.07	0.03	100~200	0.05~0.25	
30~50	0.08	0.04	200~500	0.10~0.50	
50~80	0.10	0.08	500~700	0.20~1.50	
80~100	0.12	0.08	700~1200	0.50~2.00	



表 3-7-7 大批量生产反挤压钢件经济精度

(mm)



直径 D或d	外径偏差 D±		内径偏差 d±		底厚 b	底厚偏差±	
	正常的	精整的	正常的	精整的		挤压的	精整的
~10	0.08	0.05	0.10	<0.05	~2	0.15~0.20	0.10
10~30	0.10	0.06	0.10~0.20	0.05~0.10	2~10	0.20~0.30	0.15
30~40	0.12	0.07	0.15~0.25	0.10~0.15	10~15	0.25~0.30	0.20
40~50	0.15	0.10	0.20~0.25	0.10~0.25	15~25	0.30~0.40	0.25
50~60	0.20	0.12	0.20~0.30	0.12~0.25	25~40	0.40~0.50	0.35
60~70	0.22	0.15	0.20~0.30	0.15~0.25	壁厚 s	壁厚偏差±	
70~80	0.25	0.17	0.20~0.35	0.15~0.25		挤压的	精整的
80~90	0.30	0.20	0.25~0.40	0.20~0.30	~2	0.10	0.05
90~100	0.35	0.22	0.30~0.45	0.25~0.35	2~10	0.15	0.10
100~120	0.40	0.25	0.35~0.50	0.30~0.40	10~15	0.20	0.15

3.3 冷锻的变形量和冷锻力计算

A_0 ——变形前截面积 (mm^2)。

或用挤压比 R 表示

3.3.1 冷锻的变形量

即
$$R = \frac{A_0}{A_1}$$

冷锻的变形量用断面缩减率 ϵ_F 表示。

$$\epsilon_F = \frac{A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中 A_1 ——变形后截面积 (mm^2)；

3.3.2 冷锻力计算

冷锻力的计算是校核模具承载能力和选择成形设备的依据，冷锻力的计算与成形材料性能、变形程度、

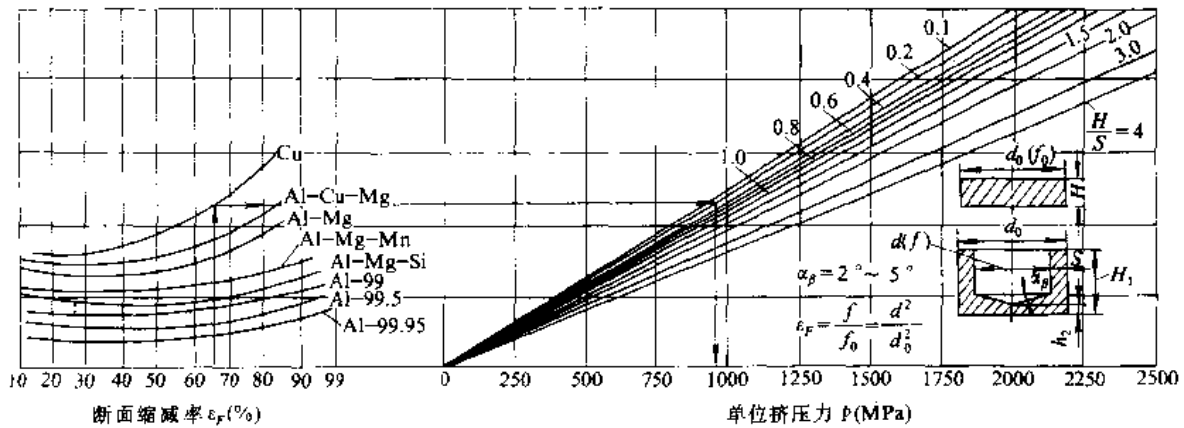


图 3-7-8 非铁金属反挤压时确定单位挤压力图表



模具形状和润滑等因素有关，通常可按下式计算：

$$F = A/p \quad (\text{kN})$$

式中 F ——成形力 (kN)；

A ——凸模与材料接触面积 (mm^2)；

p ——单位成形力 (MPa)。

p 值可通过图 3·7-8~图 3·7-11 查得。

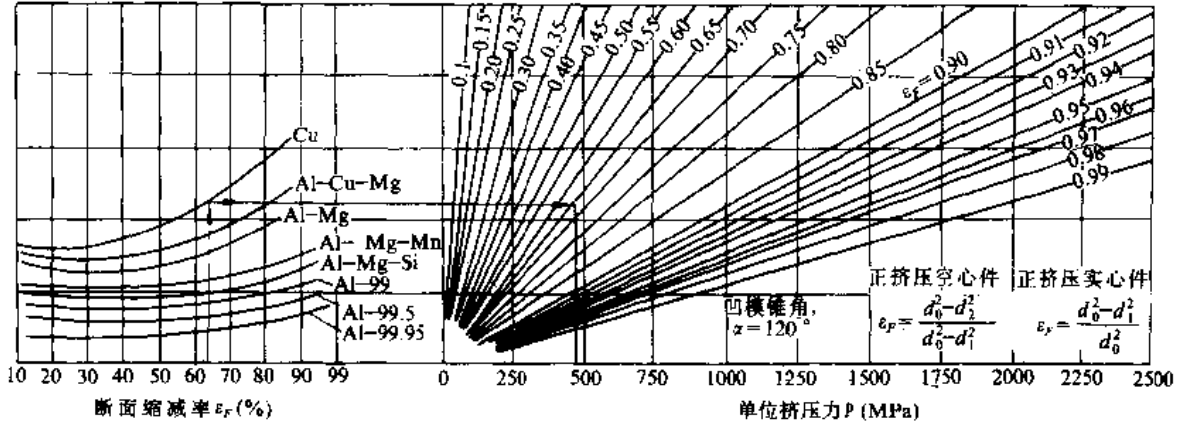


图 3·7-9 非铁金属正挤压时确定单位挤压力图表

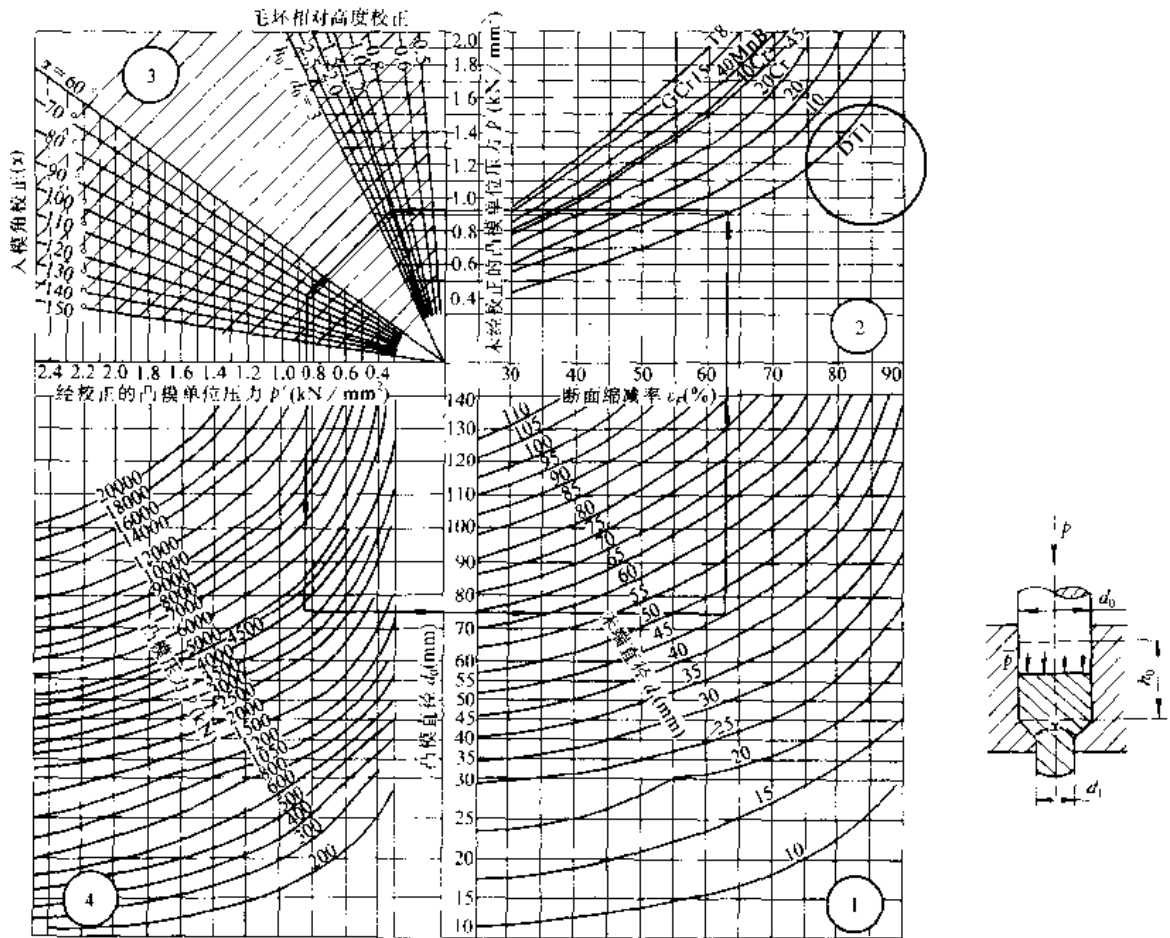


图 3·7-10 钢铁正挤压实心件计算挤压力用图表



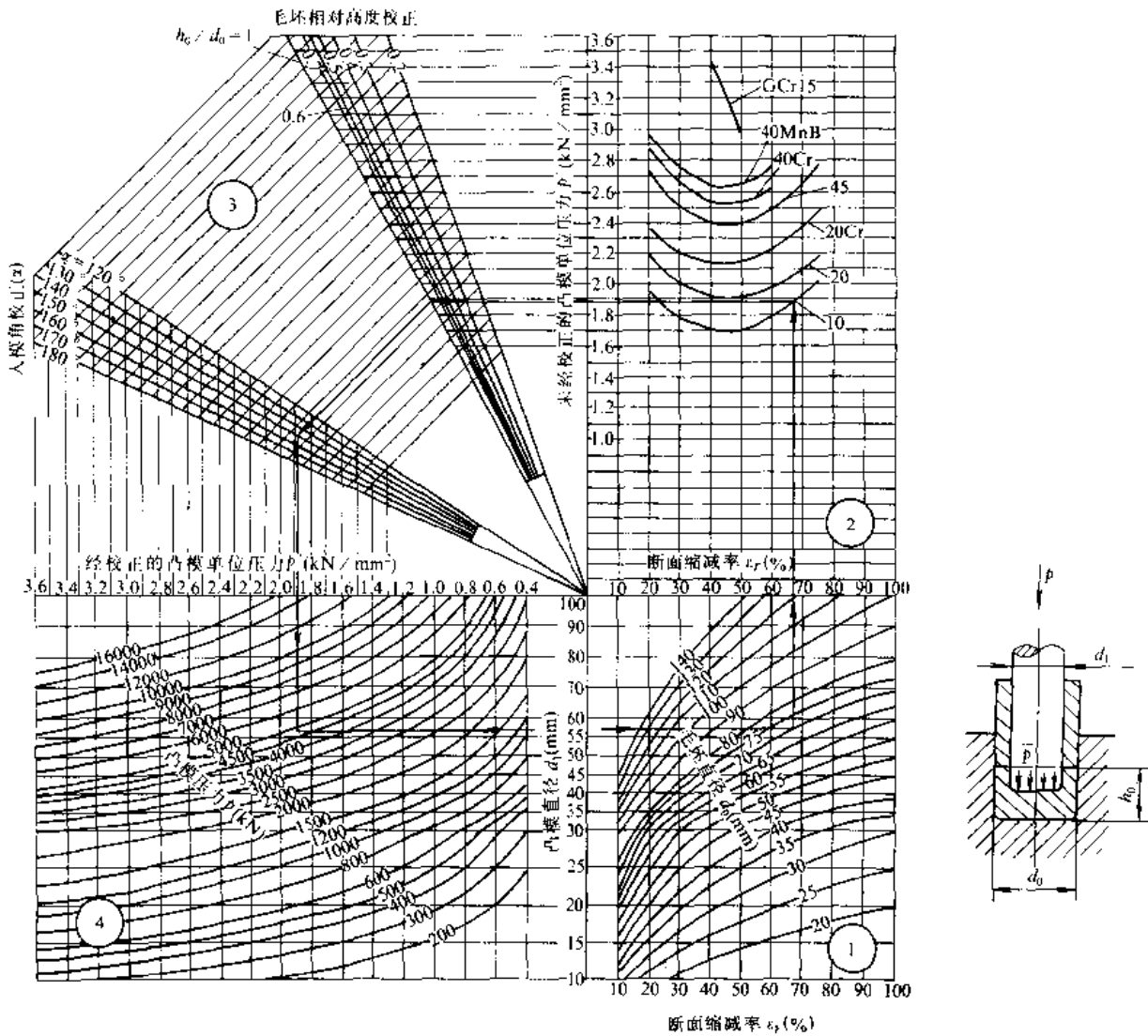


图 3-7-11 钢铁反挤压计算挤压力用图表

3.4 冷锻模具设计

3.4.2 冷锻模工作部分设计

3.4.1 冷锻模具结构

为保证冷锻件的精度和模具寿命，冷锻模具的结构除适应成形设备的特点外，应考虑下列要求：

- (1) 模具承压部分应有较高的强度和刚性。
 - (2) 模具工作部分应能简便可靠地固紧和拆卸更换。
 - (3) 坯料和成形件进出模腔方便，便于实现机械化、自动化。
 - (4) 模架实行标准化，便于模芯的加工制造。
 - (5) 保证操作人员的安全。
- 典型的冷锻模具结构见图 3-7-12~图 3-7-14。

模具工作部分的合理设计，可以改善金属流动，提高制件质量，减小成形力和提高模具使用寿命。有关锻模工作部分设计见多工位冷锻成形一节，此节只叙述挤压模的工作部分设计。

1. 反挤压凸模 常用的凸模型式见图 3-7-15。

图 3-7-15a、c 两种型式采用较多，紧固部分采用锥形面为好，便于定位。 l_1 长度选择时应进行纵弯稳定校核。 l_1/d 值推荐如下数值：

- 纯铝： $l_1/d \leq 6 \sim 8$ ；
- 铜： $l_1/d \leq 5 \sim 6$ ；
- 硬铝、黄铜： $l_1/d \leq 4 \sim 5$ ；
- 钢： $l_1/d \leq 2.5 \sim 3$ 。



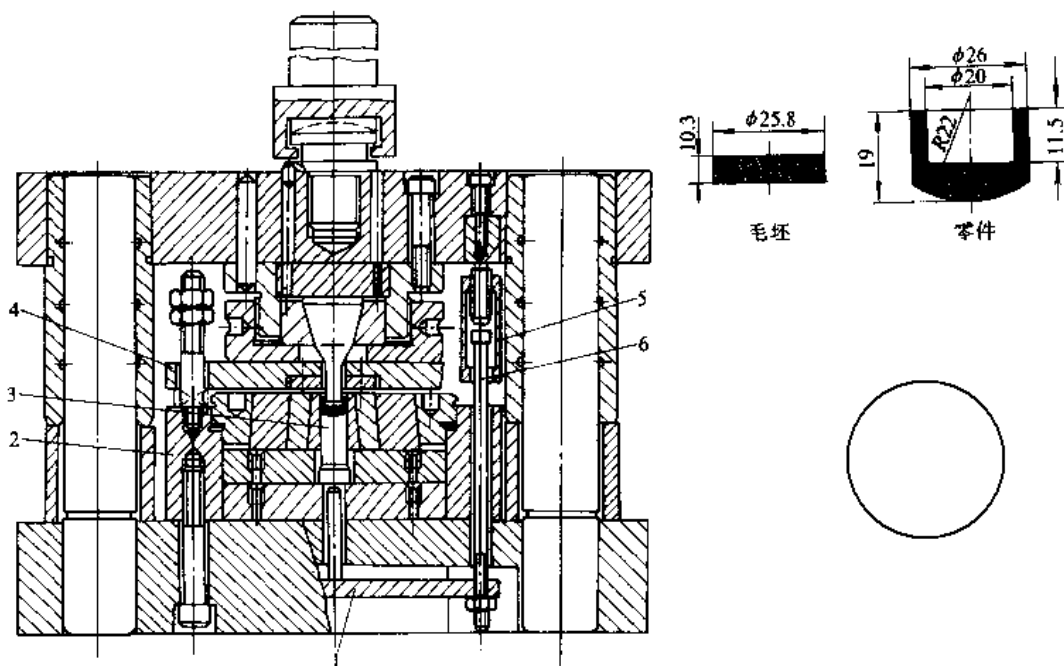


图 3-7-12 通用模架—热工仪表旋扭帽冷挤模

材料：黄铜 H68

1—下顶料板 2—下模座 3—下顶杆 4—卸料板 5—顶料挂钩 6—顶料拉杆

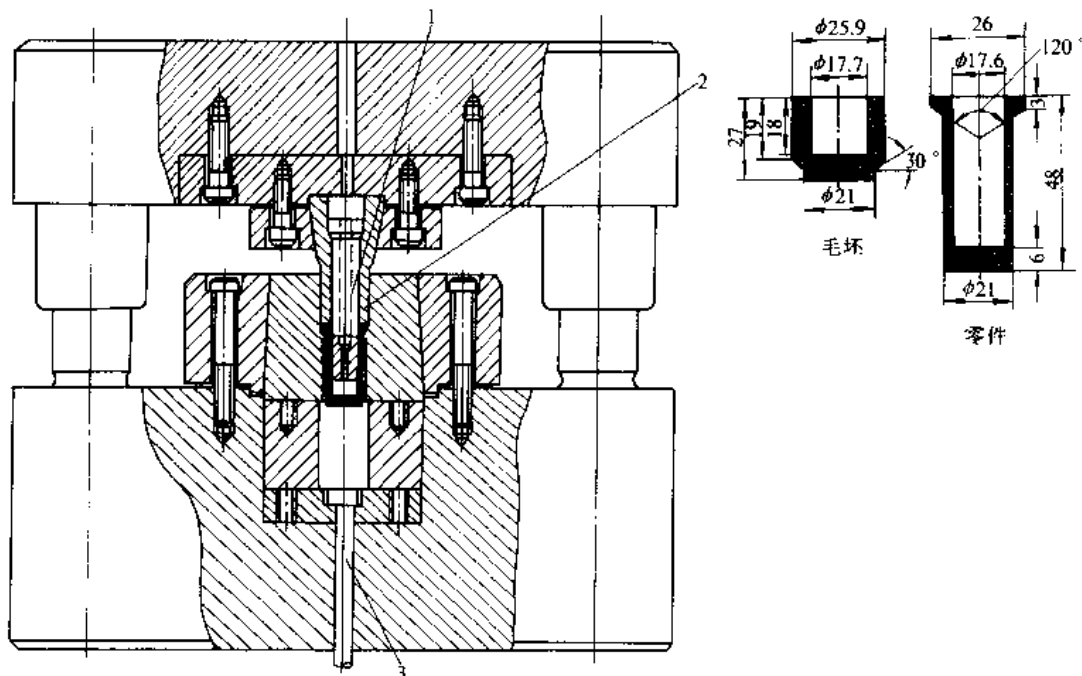


图 3-7-13 正挤压通用模架—不锈钢外壳冷挤模

材料：不锈钢 1Cr18Ni9Ti

1—挤压芯杆 2—挤压冲头 3—顶料杆



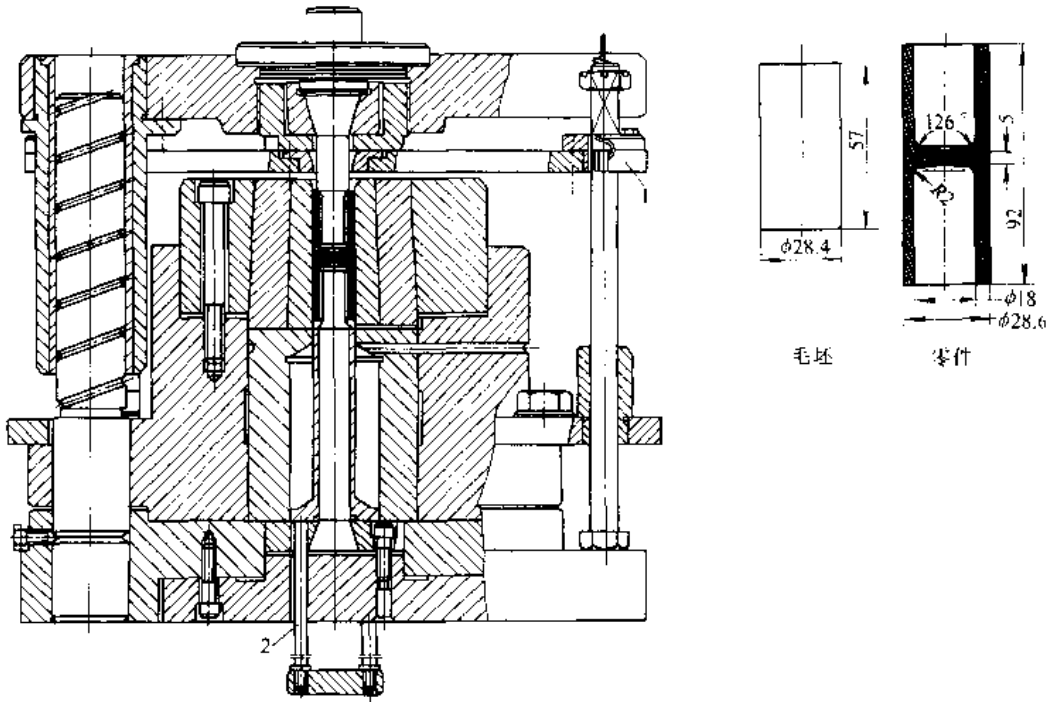


图 3-7-14 复合挤压通用模架—活塞销冷挤模

材料：钢 20Cr

1—卸料板 2—顶料杆

2. 正挤压凸模 正挤压凸模工作部分形状较简单, 承压部分可参照反挤压凸模的选用。主要型式见图 3-7-16。图 a 用于实心件挤压。

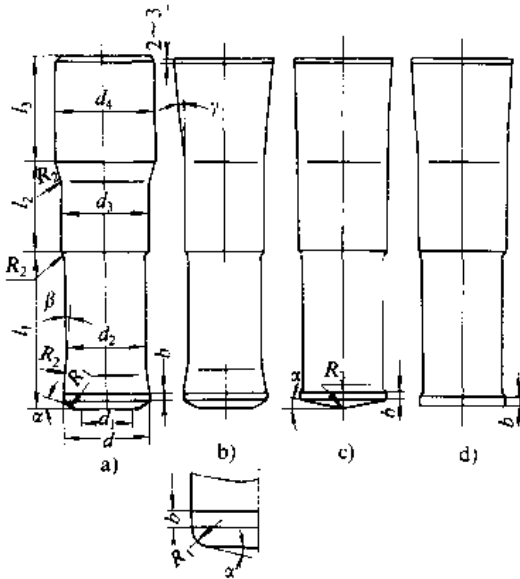


图 3-7-15 反挤压凸模型式

a)、b) 锥形平底式 c) 尖角锥形形式 d) 平底式

d —挤压件内孔直径 $d_1 = d - 2R_1 + 0.2d$ $d_2 = d - (0.1 \sim 0.2) \text{ mm}$ $d_3 \geq d$ $d_4 \geq 1.3d$ $R_1 = 0.05d$ $R_2 = 0.2d \sim 0.4d$
 $b = 1.5 \sim 3 \text{ mm}$ $\beta = 1.5^\circ \sim 2^\circ$ $R_3 = 3 \sim 4 \text{ mm}$ $\alpha = 8^\circ \sim 9^\circ$
 $\gamma = 15^\circ \sim 30^\circ$ l_1 —挤压件内孔高度 + (3~5) mm
 l_2 —卸料板高度 + (10~15) mm $l_3 = d_4$

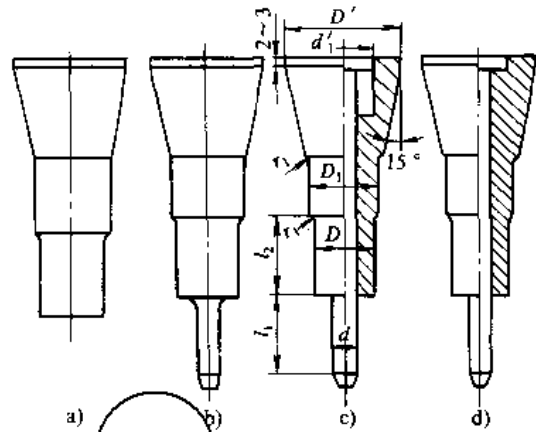


图 3-7-16 正挤压凸模型式

a)、b) 整体凸模 c)、d) 组合凸模

d —挤压件内孔直径 D —挤压件头部直径
 $D' = 1.8D \sim 2D$ $D_1 = 1.2D \sim 1.3D$ $d_1 = d + (3 \sim 5) \text{ mm}$
 $r_1 = 0.1D \sim 0.2D$ l_1 —毛坯高度 + 凹模刃带高度 mm
 l_2 —毛坯变形高度 + 凹模引导部分高度 + (10~20) mm



3. 反挤压凹模 常用反挤压凹模见图 3·7-17。

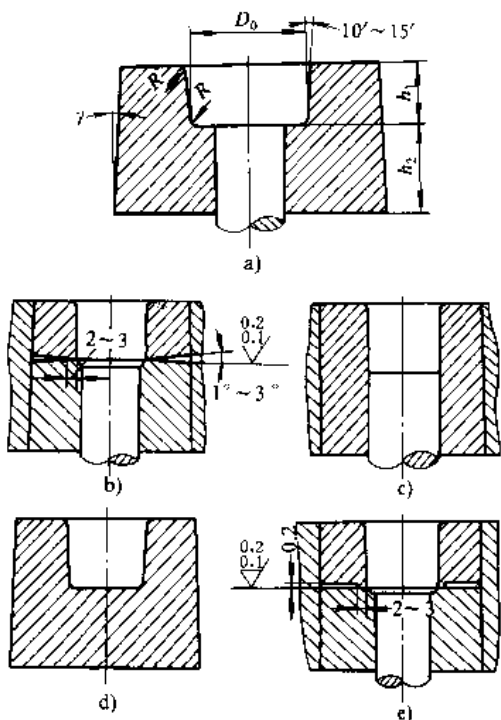


图 3·7-17 反挤压凹模型式

a)、d) 整体凹模 b)、c)、e) 剖分式凹模

D_0 —挤压件外径 h_1 —毛坯高度+ R + (5~10) mm

$h_2=0.5D_0\sim 1D_0$ $R=0.1D_0\sim 0.2D_0$ $\gamma=1.5^\circ\sim 3^\circ$

4. 正挤压凹模 图 3·7-18 为正挤压凹模型式。除变形量极小或挤压纯铝或纯铜采用整体凹模外，大多采用剖分式凹模 (图 3·7-18b、c、d、e)。

5. 组合凹模应用和计算 整体凹模在使用中容易产生纵横向裂纹，有效的解决途径是采用组合凹模，解决横向裂纹则采用横向剖分。解决纵向裂纹的措施，通常采用加预应力的组合凹模，以改善凹模工作时的应力分布，外套可用合金结构钢以节省模具用钢。

a. 总直径比 a 和应力圈层数的确定 增大凹模外径和凹模内径的总直径比 a 可使危险断面应力值减小，如把 a 值由 2 提高到 4，危险断面的合成应力降低 20%，而把 a 值提高到 10，即合成应力只相对 4 时降低 4%，所以生产中 a 值一般选用 4~6。组合凹模的层数根据单位压力 p 值确定。

$p \leq 1000\text{MPa}$ 时，采用整体凹模；

$1000\text{MPa} < p \leq 1400\text{MPa}$ 时，采用二层组合凹模；

$1400\text{MPa} < p \leq 2500\text{MPa}$ 时，采用三层组合凹模。

b. 应力圈尺寸 径向过盈量 u (双向) 和轴向压合量 c 的确定。

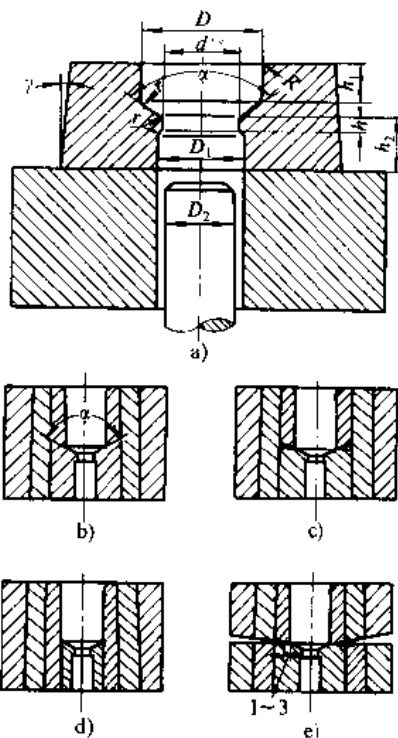


图 3·7-18 正挤压凹模型式

a) 整体式 b)、c)、d)、e) 剖分式

D —挤压件头部直径 d —挤压件杆部直径 $h=2\sim 4\text{mm}$

h_1 —毛坯高度+ (10~15) mm $\alpha=60^\circ\sim 126^\circ$ $\gamma=1.5^\circ\sim 2^\circ$

$h_2=h+(0.5\sim 1)D$ $r=\frac{1}{2}(D-d)$ $R=3\sim 5\text{mm}$

$D_1=d+(0.5\sim 1)\text{mm}$ $D_2=d-(0.1\sim 0.5)\text{mm}$

(1) 二层组合凹模 (图 3·7-19a)

中层直径比 $a_{21}=1+0.2a_{31}$

或 $d_2=\sqrt{d_1d_3}$

式中 $a_{21}=\frac{d_2}{d_1}$

$a_{31}=\frac{d_3}{d_1}$

由图 3·7-20 查得径向过盈系数 β_2 和轴向压合系数 δ_2 ，确定 a_2 和 c_2 ：

$$u_2=\beta_2d_2$$

$$c_2=\delta_2d_2$$

(2) 三层组合凹模 (图 3·7-19b)

$$a_{21}=\frac{d_2}{d_1}=0.07a_{41}+1.15$$

$$a_{32}=\frac{d_3}{d_2}=0.1a_{41}+1.2$$

或按下式计算：

$$d_2=1.5d_1$$

$$d_3=1.6^2d_1$$

$$d_4=1.6^3d_1$$



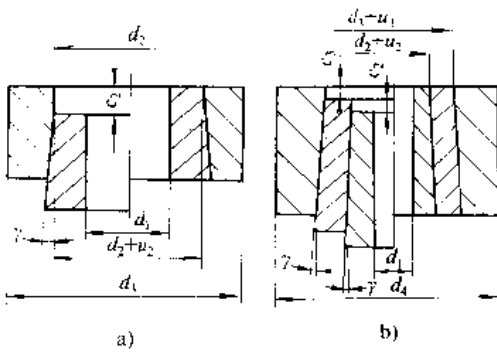


图 3-7-19 两层和三层组合凹模
a) 两层 b) 三层

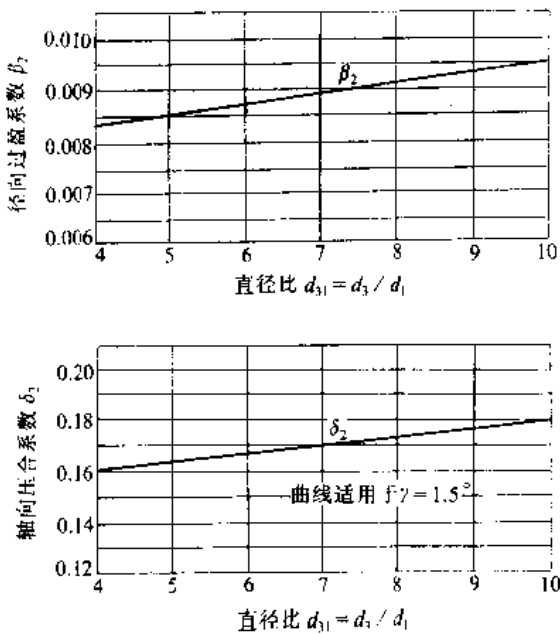


图 3-7-20 两层组合凹模径向过盈系数、轴向压合系数与直径比的关系

其径向过盈系数 β_2 、 β_3 和轴向压合系数 δ_2 、 δ_3 按图 3-7-21 查得，并计算 c_2 、 c_3 和 u_2 、 u_3 ：

$$\begin{aligned} c_2 &= \delta_2 d_2 \\ u_2 &= \beta_2 d_2 \\ c_3 &= \delta_3 d_3 \\ u_3 &= \beta_3 d_3 \end{aligned}$$

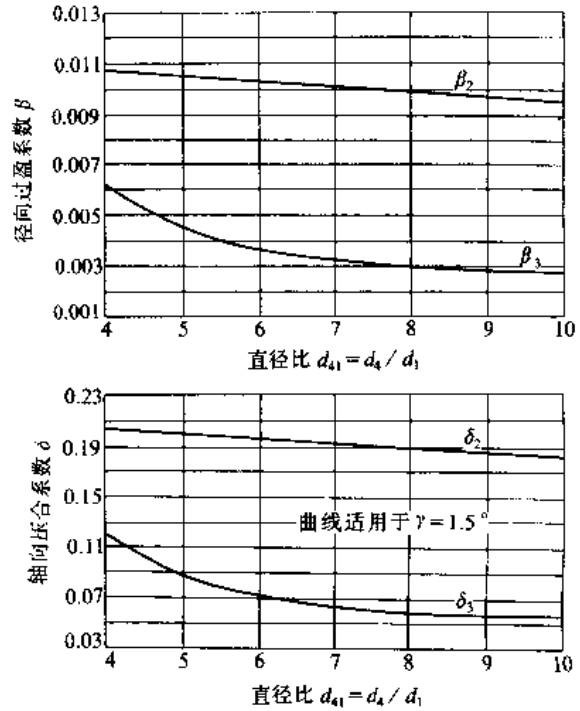


图 3-7-21 三层组合凹模的过盈系数、轴向压合系数与直径比的关系

4 冷锻件缺陷分析和预防

冷锻件生产中由于工艺设计不当、材料缺陷、润滑等原因，出现各种缺陷，在锻造中常出现头部侧面的纵向裂纹，表 3-7-8 为常见缺陷及防止方法。

表 3-7-8 冷锻件常见缺陷及防止方法

序号	常见缺陷	防止方法
1		
2		



(续)

序号	常见缺陷	防止方法
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

5 多工位冷锻成形

多工位冷锻成形是指以线材或棒材为坯料，在多工位自动冷成形机上通常用4~7道工序锻成各种螺栓（钉）、螺母、活塞销、火花塞、阶梯轴和齿轮轴等零件的成形方法，其生产率高，尺寸精度高，零件表面质量好。

冷锻螺栓（钉），采用Z47系列多工位冷锻机，机床尾部附有搓丝装置。冷锻螺母采用Z41系列多工位冷锻机，上述二系列机床均有4个以上工位，各工位间有自动夹钳传送工件，生产规格从M3~M30，产量达50~300件/min。多工位冷成形机在我国应用还为数不多，国外已发展系列，卧式多工位冷成形机，最大成形吨位达1000t以上，可加工5kg以上冷锻件。



5.1 多工位冷锻工艺

多工位冷锻工艺应遵守如下原则设计：

(1) 多工位锻锻力力求均匀，防止过大的偏载，以提高机床和模具的寿命。

(2) 锻锻次数按下式确定：

$$\frac{l}{d} \leq 2.5 \text{ 时, 1次锻锻}$$

$$2.5 \leq \frac{l}{d} \leq 4.5 \text{ 时, 2次锻锻}$$

$$4.5 \leq \frac{l}{d} \leq 6 \text{ 时, 3次锻锻}$$

式中 d ——坯料直径 (mm)；

l ——锻锻部分坯料长度 (mm)。

(3) 工位间的零件应有自动夹钳夹紧的部位。

5.2 螺母冷锻工艺设计

5.2.1 螺母冷锻工序及模具结构 (图 3.7-22、图 3.7-23)

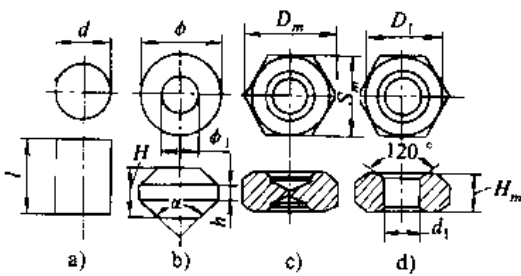


图 3.7-22 螺母冷锻工序

a) 切料 b) 压球 c) 压角 d) 冲孔

1. 螺母坯料单件质量

$$m = 1.1m_m \text{ (kg)}$$

式中 m_m ——螺母净质 (kg)。

2. 螺母坯料长径比

$l/d = 1.1 \sim 1.4$ ，以利于剪断面平整，减少锻锻时开裂。

3. 螺母压球尺寸

$$d = 0.98S_m \text{ (mm)}$$

$$\phi_1 = d_1 \text{ (mm)}$$

式中 S_m ——螺母扳手处公称尺寸 (mm)；

d_1 ——螺纹底径 (mm)。

为使金属在压角工序中自动形成 30° 外倒角，生产中压球工序的圆锥台角 α ，通常取 $\alpha = 100^\circ$ 。

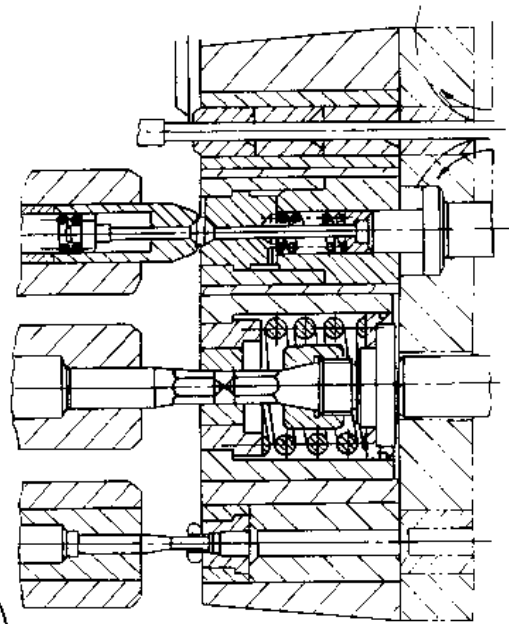


图 3.7-23 螺母多工位冷锻模具图

5.2.2 主要模具尺寸计算

1. 压球上下模尺寸 (图 3.7-24)

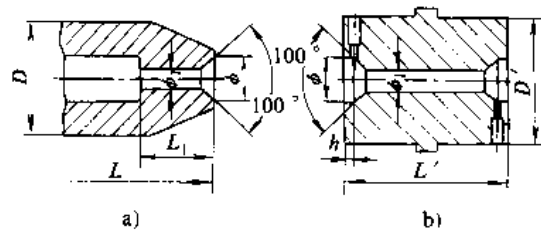


图 3.7-24 压球上下模

a) 上模 b) 下模

$$\phi = 0.98S_m$$

$$\phi_1 = d_1$$

$$L_1 = (4 \sim 6) \phi$$

$$h = \frac{V - 0.262 \cot 50^\circ (\phi^3 - \phi_1^3)}{0.785 \phi^2} \times 0.98$$

$$V = 0.785 d^2 l$$

式中 V ——未径冲孔的螺母坯体积。

D 、 D' 和 L 、 L' 的尺寸由螺母规格及机床型号决定。

2. 压角上下冲头尺寸 (图 3.7-25a)

$$S = 0.98S_m$$

$$h = (1 \sim 1.5) t$$

$$D_2 = 1.155S_m - (0.5 \sim 1.2) \text{ mm}$$

$$D = 1.2D_2$$



式中 t ——螺距；

h_1 ——按表 3·7-9 选取；

L 、 l ——由夹持器和机床行程决定。

3. 六角模尺寸 (图 3·7-25b)

$$S = S_m - (0.15 \sim 0.25) \text{ mm}$$

$$H = 4H_m$$

$$R = (0.5 \sim 1) \text{ mm}$$

式中 H_m ——螺母高度。

六角模内腔斜度 β 按表 3·7-9 选取。

$$d = d_1 \text{ (螺纹底径)}$$

$$d_v = d \cdot (1.5 \sim 2) \text{ mm}$$

$$h_1 = 0.15 \sim 0.25 \text{ mm}$$

$$l = 2.5H_m$$

$$\alpha = 5^\circ \sim 10^\circ \text{ (随工件尺寸增大取高值)}$$

$$H = (1 \sim 1.5) t$$

$$H_v = 1.5H_m$$

5.3 凹穴螺栓 (钉) 冷锻工艺设计

5.3.1 螺栓 (钉) 冷锻工序及模具结构 (图 3·7-27、图 3·7-28)

六角螺栓 (钉) 需 2~3 次锻成形, 使头部与杆部过渡部分的纤维不被切断, 避免螺栓脱头。

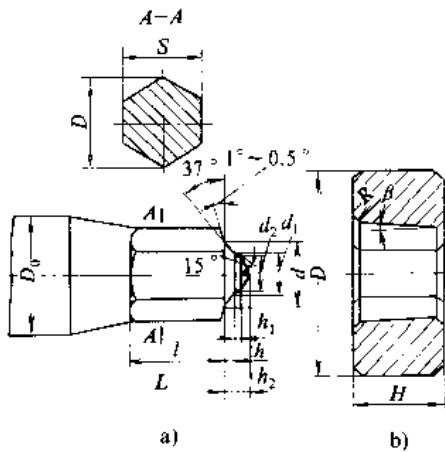


图 3·7-25 压角上下冲头及六角模

a) 上下冲头 b) 六角模

表 3·7-9 压角上下冲头 h_1 值和六角模 β 值

螺母规格	M2	M2.5	M3	M4	M5	M6	M8	M10
h_1 (mm)	0.2		0.3			0.4		0.5
β	0.2°		0.3°		0.4°		0.5°	

螺母规格	M12	M14	M16	M18	M20~24	M27	M30
h_1 (mm)	0.6~1.0		1.4~1.6			1.8~2.0	
β	0.6°		0.8°		1.5°		2°

4. 冲头上下模尺寸 (图 3·7-26)

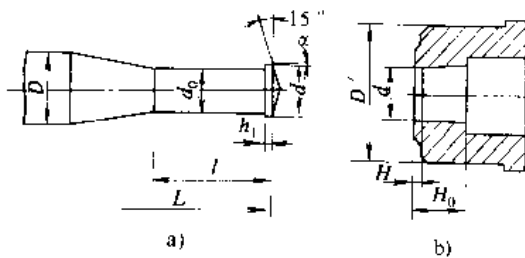


图 3·7-26 冲孔上下模

a) 上模 b) 下模

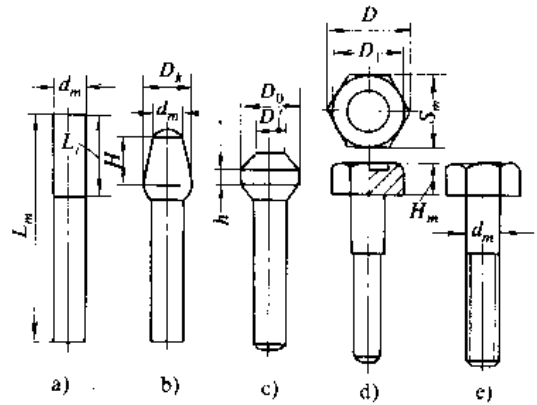


图 3·7-27 螺栓冷锻工序

a) 切料 b) 镦头 c) 镦球头 d) 镦六角 e) 搓丝

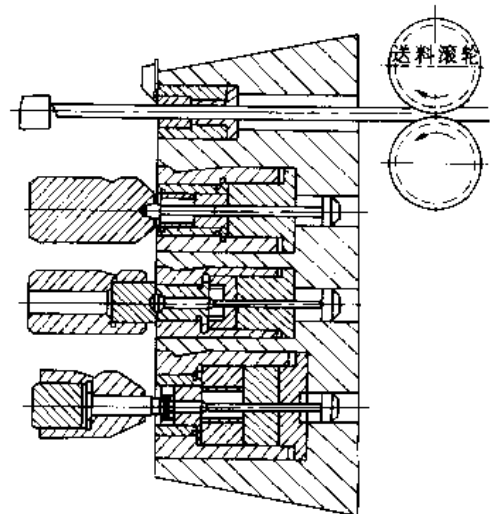


图 3·7-28 螺栓多工位冷锻模具图



5.3.2 材料直径选择和坯料长度计算

线材直径可选择等于螺纹的中径或外径，采用螺纹外径的线材可减小头部的变形量，减小微粗时开裂。螺栓杆部可用缩梗工艺得到所需尺寸。

螺栓（钉）坯料质量等于螺栓（钉）的实际质量。六角头部锻锻所需料长

$$L_r = 1.1 \frac{S_m^2}{d_m^2} H_m \quad (\text{mm})$$

式中 S_m ——螺栓扳手处尺寸 (mm)；
 d_m ——坯料外径 (mm)；
 H_m ——六角头高度 (mm)。

5.3.3 主要模具尺寸计算

1. 镦头模尺寸 (图 3-7-29)

$$\alpha = 7^\circ \sim 8^\circ 30' \quad D_K = d_m + 2H \tan \frac{\alpha}{2} \quad (\text{mm}) \quad H = 0.6L_r \quad (\text{mm})$$

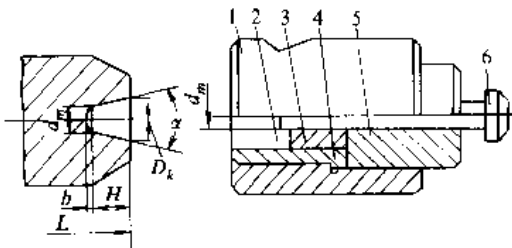


图 3-7-29 镦头模—上冲头及组合下模
 1—模套 2—硬质合金模芯 3—模芯垫
 4—模套紧固圈 5—模垫 6—顶件销

2. 镦球模尺寸 (图 3-7-30)

$$D_3 = 0.98S_m \quad (\text{mm}) \quad D_2 = \frac{1}{2} S_m \quad (\text{mm}) \quad \alpha = 100^\circ$$

$$h = 1 \sim 2 \text{mm}$$

上冲头中 $d' = h'$ 是 $\phi 1 \sim \phi 2 \text{mm}$ 的存气孔，以保证球头的几何形状并利于脱模。下模完成镦球下部和杆部倒角，采用组合结构。

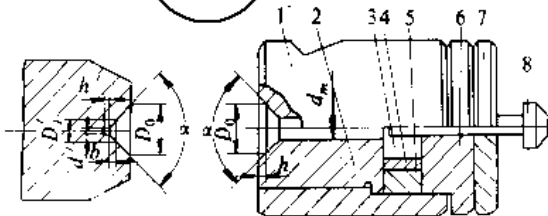


图 3-7-30 镦球模—上冲头及组合下模

1—模套 2—镦球下模 3—倒角模 4—倒角模紧固圈
 5—紧固套 6—模垫 7—垫圈 8—顶件销

3. 六角模尺寸 (图 3-7-31)

$$D_2 = 0.8S_m \quad (\text{mm}) \quad D_3 = 0.98S_m \quad (\text{mm}) \quad b = 0.25H_m \quad (\text{mm})$$

$$a_1 = 1.5D_3 \quad (\text{mm}) \quad S = 0.98S_m \quad (\text{mm}) \quad S_m = 1.16S - 0.31r \quad (\text{mm}) \quad D' \geq 2S_m \quad (\text{mm})$$

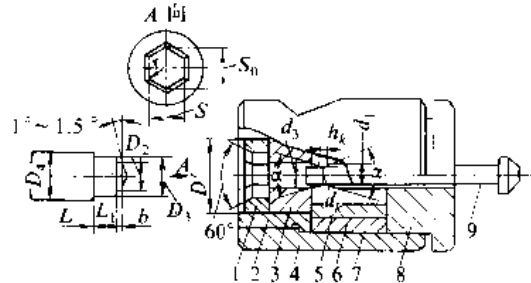


图 3-7-31 镦六角模及缩梗模

1—六角模 2—紧固套 3—镦模模芯
 4—外模套 5—缩梗模 6—紧固圈
 7—紧固套 8—模垫 9—顶件销

六角模腔棱面相交处必须由圆弧过渡，以免应力集中，圆弧半径 r 按表 3-7-10 选取。

表 3-7-10 六角模棱面相交处 r 值

规格	M2.5	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12
r (mm)	0.2~0.3		0.4		0.5		0.8	
规格	M14	M16	M18~M22	M24~M30				
r (mm)	1		1.2~1.5		1.5~2			

对附有搓丝装置的冷成形机，在完成镦六角头部时可完成搓丝部分的缩梗。六角模、镦模和缩梗模均采用组合结构。

缩梗模尺寸：

$$d_3 = d_m$$

$$d_1 = d_k + (0.03 \sim 0.05) \quad (\text{mm})$$

$$h_k = (0.8 \sim 1.2) \quad (\text{mm})$$

$$\alpha = 18^\circ \sim 20^\circ$$

式中 d_k ——模孔直径，按表 3-7-11 选取。

表 3-7-11 缩梗模直径选取 (mm)

螺纹直径	螺距	模孔直径	公差	缩梗后 螺坯直径	公差
M5	0.8	4.36	+0.015	4.41	-0.05
M6	1.0	5.23	+0.015	5.29	-0.05
M8	1.25	7.04	+0.015	7.11	-0.06
M10	1.50	8.87	-0.020	8.95	-0.07
M12	1.75	10.70	+0.020	10.80	-0.08



6 温锻 [20, 21]

温锻是将金属加热到再结晶温度以下的某合适温度进行体积成形的新工艺，温锻成形不仅具有冷锻和热锻的优点，而且避免各自的不足。表 3·7-12 为钢的温锻与冷、热锻的技术经济比较。

表 3·7-12 钢温锻与冷、热锻技术经济比较

项 目	变形方法		
	热锻	温锻	冷锻
变形温度范围 (°C)	850~1200	200~850	室温
产品精度 (mm)	±0.5	±0.05~ 0.25	±0.02~ 0.25
产品组织	晶粒粗大	晶粒细化	晶粒细化
产品表面质量	氧化、脱碳	轻微氧化、 脱碳	无氧化、 脱碳
工序数量	少	比冷锻少	多
能量消耗	大	少	少
劳动条件	差	较好,易于组 织连续生产	好,可以组 织连续生产

温锻主要用于下列情况：

- (1) 冷锻时会产生强烈冷作硬化和变形抗力很高的不锈钢、轴承钢、工具钢和高合金钢等。
- (2) 冷状态时塑性差、易产生开裂的材料，如铜合金 HPb59-1、铝合金 LC4、钛合金 TC4 等。
- (3) 采用冷锻时成形设备能力较小、无法满足冷锻力的要求。

6·1 温锻温度及温锻力

温锻温度选择的的原则是：

- (1) 所选择温度区域可显著减小温锻力。
- (2) 在该温度范围内，润滑剂的润滑效果及其涂敷性好。
- (3) 温锻零件的力学性能和表面状态好。
- (4) 碳钢应避免兰脆温度区。

常用材料的温锻温度和单位挤压力见表 3·7-13。

表 3·7-13 温锻温度及单位挤压力

材 料 (温锻温度)	断面缩减率 ϵ_F (%)	正挤压单 位挤压力 (MPa)	反挤压单 位挤压力 (MPa)
20 (600~700°C)	40	1100~1350	950~1400
	80	1150~1500	1400~1850

(续)

材 料 (温锻温度)	断面缩减率 ϵ_F (%)	正挤压单 位挤压力 (MPa)	反挤压单 位挤压力 (MPa)
45 (600~700°C)	40	1250~1850	1300~1850
	80	1350~2000	1700~2300
20CrMo (600~700°C)	40	1250~1850	1300~1850
	80	1350~2000	1700~2300
12CrNi3 (600~700°C)	40	1150~1400	1100~1500
	80	1250~1600	1500~1950
GCr15 (700~800°C)	40	1150	1100
	80	1300	1600

6·2 温锻模具设计

温锻模具的结构与冷锻模具基本相同，由于温锻时毛坯加热到一定温度，因此应考虑以下几点：

- (1) 采用组合凹模时，应考虑由于模具预热和温锻温度对预应力的影响。
- 在采用硬质合金凹模时，由于凹模圈与预应力的热膨胀系数的明显差别，可能使预应力圈失去作用。
- (2) 使用中为使模具温度稳定，操作前应进行预热，操作中必要时还须进行冷却，因此温锻模设计时应考虑预热和冷却装置。
- (3) 模具和温锻件的热胀冷缩对产品尺寸的影响，即反挤时：

$$\begin{aligned} \text{产品外径} &= \text{凹模冷态内径} + \text{预热后凹模的热胀量} \\ &\quad - \text{温锻受力后产生的弹性变形量} \\ &\quad - \text{锻件冷却时外径的收缩量} \\ \text{产品内径} &= \text{凸模直径} + \text{凸模热膨胀量} \\ &\quad + \text{凸模受力后产生的径向弹性变形量} \\ &\quad - \text{产品内径收缩量} \end{aligned}$$

正挤压时：

$$\begin{aligned} \text{产品外径} &= \text{凹模内径} + \text{预热后凹模内径的热膨胀量} \\ &\quad + \text{凹模受力后的弹性变形量} \\ &\quad - \text{产品冷却后的收缩量} \end{aligned}$$

为了简化计算可用当量收缩率，如 45 钢在 700~800°C 反挤时，凹模的内径的当量收缩率为 0.8%~1.0%，凸模外径当量收缩率为 0.6%，反挤时则分别为 0.6%~0.9% 和 0.4%。

6·3 温锻润滑剂

冷锻时最常用的润滑方法是将毛坯表面进行磷酸盐处理，然后再进行皂化处理，可以取得最好的润滑效



果,当变形前毛坯温度已达到 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 以上时,磷化膜和皂化膜被烧毁,无法起到润滑作用,必须采用其它润滑剂。

温锻用润滑剂目前还不很成熟,为适应温锻成形特点,对温锻润滑剂应具有如下特性:

- (1) 能承受 2000MPa 以上的能力,并保持较好的润滑性能。
- (2) 在温锻温度范围内,具有稳定的化学、物理性能,对环境、锻件性能不产生有害的作用。
- (3) 便于使用,涂敷性好,锻后易于清理去除,对模具不产生粘附作用,残留物很容易清除。

常用的温锻润滑剂有:

- (1) 水剂石墨。适用于 800°C 以下碳钢、合金钢和工具钢的温锻,使用时将毛坯预热后涂敷,模具也同时喷涂使用。
- (2) 石墨加 MoS_2 加油酸。可用于批量较小的锻件,对环境有影响。
- (3) 草酸盐处理加氯化石蜡。应用于不锈钢的低温成形($200\sim 380^{\circ}\text{C}$)。
- (4) 玻璃润滑剂。根据温锻温度的不同,可选择不同成分的玻璃润滑剂。但玻璃润滑剂在模具内的残留物不易去除。

第8章 回转成形^[22]

回转成形^①,是指工件成形时,或工具回转、或工件回转、或工具与工件均回转。如辊锻为工具回转工件不回转;板式楔横轧为工具不回转工件回转;辘环为工具与工件均回转。回转成形的一个共同特点为:成形过程是连续和局部的。

旋压也属回转成形,由于它又具有板料成形特点,故将其放在冲压篇内。

旋转锻造属断续回转和局部锻打成形,与回转成形相近,故将其放在本章。

1 辊锻^[23,24]

1.1 辊锻特点、分类及应用

1.1.1 辊锻的原理及特点

辊锻属纵向轧制。其运动原理如图3-8-1所示,两个轧辊轴线平行,其旋转方向相反,毛坯在安装于轧辊上的扇形模具带动下,作垂直于轧辊轴线的直线运动。毛坯在模具的作用下高度减小长度延伸(宽度略有增加)的锻件成形。

辊锻与一般模锻相比较其特点如下:

- (1) 所需设备的吨位小。辊锻变形压力只有一般模锻的10%左右,故所需设备吨位小得多。
- (2) 生产率高。与锤上模锻长杆件比较,生产率高5倍以上。
- (3) 材料消耗少。辊锻件的尺寸稳定,精度高,与锤上多型槽模锻比,材料消耗减少8%左右。

(4) 劳动条件改善。无冲击、低噪声,容易实现机械化操作,工人劳动条件改善等。

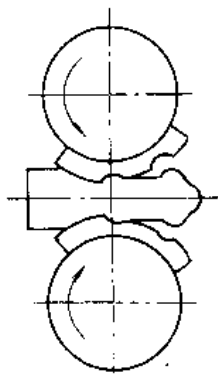


图3-8-1 辊锻原理图

1.1.2 辊锻的分类及应用

1. 按用途分类 按用途分为制坯辊锻与成形辊锻。制坯辊锻主要用于为模锻制坯,即在辊锻机上按锻件形状尺寸进行金属预分配(制坯),然后在曲柄压力机或摩擦压力机等设备上模锻成形。组成生产线既提高生产率又提高材料利用率,如汽车曲轴、前梁等锻件的生产。成形辊锻视锻件成形程度分为终成形辊锻、部分成形辊锻和初成形辊锻。截面形状简单的锻件,如垦锄、钢叉、汽车变截面弹簧等多采用终成形辊锻或部分成形辊锻生产。截面形状比较复杂、厚度差比较大的锻

① 本章的标题在第一版中称轧锻,现改用国际上比较通用的称呼——回转成形。



件,如连杆、汽车前梁等多采用初成形辊锻,辊锻后再在小吨位的模锻设备上整形。

2. 按送料方式分类 按送料方式分为顺向送料与逆向送料。顺向送料如图 3·8-1 所示,坯料沿辊锻方向送进,从坯料端部实现咬入。逆向送料如图 3·8-2 所示,坯料逆辊锻方向送进,扇形板从坯料中部实现咬入。实际辊锻生产中较多采用逆向送料。

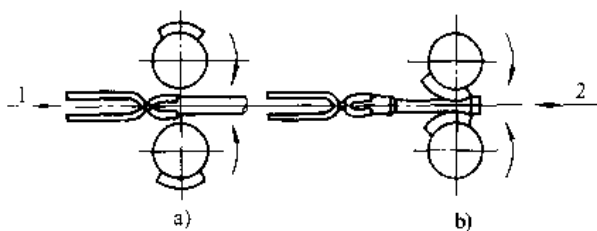


图 3·8-2 逆向送料

1—送料方向 2—辊锻方向

1.2 辊锻工艺参数

1.2.1 变形区及其几何参数

直接承接辊锻模具压缩作用,产生变形的这部分金属所占有的空间,称为变形区。用平辊模具辊锻矩形坯料属最简单的辊锻变形,其变形区用阴影线表示在图 3·8-3 中。

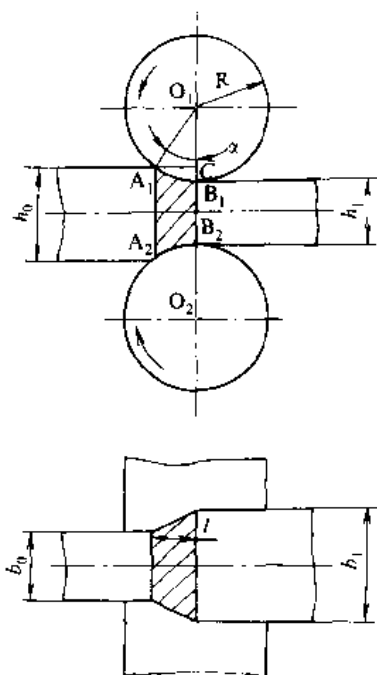


图 3·8-3 辊锻变形区

(摘自参考文献 [2] 556 页)

变形区中主要原始几何参数为:坯料变形前、后高度 h_0 与 h_1 , 变形前、后宽度 b_0 与 b_1 , 变形前、后长度 l_0 与 l_1 。

分析变形区几何参数间的关系及其控制对实现辊锻变形,合理制定工艺以及孔型设计具有重要意义。

1. 绝对变形 以绝对变形量 Δh 、 Δb 、 Δl 分别表示绝对变形的压下量、宽展量与延伸量,其式如下:

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (\text{mm})$$

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (\text{mm})$$

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (\text{mm})$$

2. 相对变形 绝对变形量与相对应坯料原始尺寸的比值称为相对变形量,通常用百分数表示相对压下量 ϵ_h 、相对宽展量 ϵ_b 与相对延伸量 ϵ_l ,其式如下

$$\epsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} 100\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} 100\%$$

$$\epsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0} 100\% = \frac{b_1 - b_0}{b_0} 100\%$$

$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100\%$$

3. 变形系数 坯料变形后的尺寸与变形前的尺寸之比称为变形系数,它们是压下系数 η 、宽展系数 β 与延伸系数 λ ,其式如下:

$$\eta = \frac{h_1}{h_0}$$

$$\beta = \frac{b_1}{b_0}$$

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0}$$

4. 咬入角 变形区对应的锻辊圆心角 α 称为咬入角(图 3·8-3)。咬入角 α 用下式表示

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right)$$

式中 D ——锻辊直径 (mm)。

5. 变形区长度 变形区咬入弧的水平投影长度 l 称为变形区长度。变形区长度 l 用下式近似表示

$$l = \sqrt{R\Delta h} \quad (\text{mm})$$

式中 R ——锻辊半径 (mm)。

1.2.2 咬入条件

能否将坯料曳入辊锻的模具孔型,实现变形的全过程,是辊锻工艺的先决条件。

1. 端部咬入条件 当坯料端部接触旋转的锻辊时,在摩擦力带动下被自动曳入时,称端部自然咬入。

如图 3·8-4a 所示,其端部接触锻辊时,坯料受锻



辊径向压力 p 与摩擦力 T 的作用, 其咬入条件为

$$\mu > \tan \alpha$$

式中 μ ——锻辊与坯料间的摩擦系数。

2. 稳定咬入条件 当坯料咬入后, 坯料端部向锻辊中心线方向移动, 径向压力 p 与摩擦力 T 作用点发生变化, 其咬入变得有利, 当坯料端部超过锻辊出口时, 其稳定辊锻时的咬入条件为 (图 3·8-4b)。

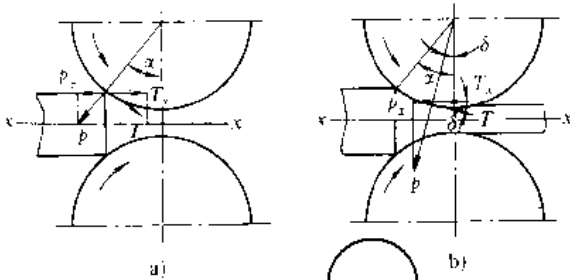


图 3·8-4 坯料咬入受力图

a) 开始咬入 b) 已经咬入

$$\mu > \tan \delta$$

$$\delta \approx \frac{1}{2} \alpha$$

由此可见, 端部自然咬入时的条件较一经咬入后的咬入条件困难。所以, 中间咬入与强迫推入时的咬入条件优于端部自然咬入条件, 或者说前者的允许咬入角 α 大于后者。

1·2·3 延伸变形

辊锻变形主要是延伸变形, 坯料在高度上经辊锻压缩后, 其横截面积减小长度增加。

1. 延伸系数计算 辊锻延伸变形程度通常用延伸系数 λ 表示, 即

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{A_0}{A_1}$$

式中 A_0, A_1 ——坯料变形前、后的横截面积 (mm^2)。

当坯料需要多道次辊锻时, 其总延伸系数 λ_n 表示为

$$\lambda_n = \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_{(n-1)} \lambda_n = \frac{A_0}{A_n}$$

式中 λ_n ——第 n 道次的延伸系数;

A_n ——坯料经 n 道次辊锻后的横截面积 (mm^2)。

2. 影响延伸系数的因素

a. 相对位移面积 从坯料横截面积中压缩下来的面积 A_c 称为位移面积。位移面积 A_c 与坯料辊锻前面积 A_0 之比 A_c/A_0 称为相对位移面积。相对位移面

积越大, 延伸系数也越大。

b. 辊锻模具工作半径 在辊锻中辊锻模具工作半径 R 往往是变化的, 其值越大, 延伸系数越小。这是由于半径 R 越大变形区长度 l 越大 ($l = \sqrt{R\Delta h}$), 金属纵向流动阻力增加, 而延伸变形减小的缘故。

c. 接触摩擦系数 辊锻模具与坯料之间接触摩擦系数 μ 增加, 延伸系数减小。当模具表面粗糙度不同时, 其延伸系数有明显的差别。因此, 降低模具表面粗糙度, 采用适当的润滑, 将降低摩擦系数而有利于延伸变形。

d. 模具型槽形状 辊锻时, 延伸系数与模具型槽形状有关, 但一般在 1.4~1.6 范围内选取。

1·2·4 前滑与后滑

1. 前滑与后滑现象 坯料辊锻时, 高度上压缩, 纵向延伸与宽度上宽展 (图 3·8-5)。在变形区内, 存在一个流动分界面, 在此分界面前, 金属的纵向流动速度大于锻辊圆周速度的水平分速度, 金属出现前滑; 在分界面后, 金属的纵向流动速度小于锻辊圆周速度的水平分速度, 金属出现后滑。此分界面金属的纵向流动速度等于锻辊圆周速度的水平分速度, 称为中性面或

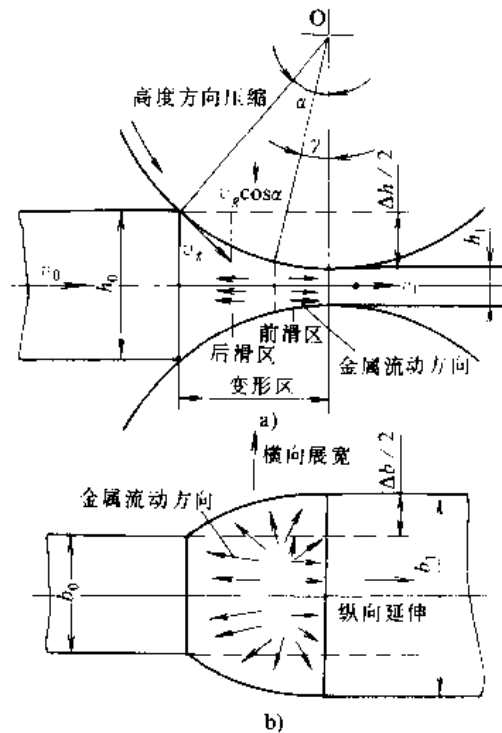


图 3·8-5 辊锻变形区的金属流动图

a) 金属纵向流动 b) 金属横向流动

(摘自参考文献 [2] 562 页)



临界面，它所对应的中心角 γ 称为中性角（图3·8-5a）。

中性角 γ 的近似计算公式为

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right)$$

式中 β ——咬入时的摩擦角，又称为极限咬入角(°)。

前滑量的近似计算公式为

$$s = \left(\frac{R}{h_1} - \frac{1}{2} \right) \gamma^2$$

2. 影响前滑的因素

a. 变形程度 变形程度越大、即辊锻时坯料高度方向压下金属越多，纵向金属流动量增加，故延伸增加。延伸量越大，其前后滑量也越大。

b. 模具与坯料的形状 一般情况，凡是有利于限制宽展变形的模具与坯料形状，均有利于延伸与前滑。如椭圆型槽内辊锻方形坯料较之辊锻圆形坯料的宽展变形小，故其延伸及前滑均较大。

c. 坯料温度 坯料温度在700℃以下时，前滑随温度的增加而增加；在700℃以上时，前滑随温度升高而减少。所以，为了减少辊锻件的尺寸波动，应该减少辊锻件温度的波动。

d. 摩擦系数 实验表明，辊锻模具与坯料之间摩擦系数的减少，金属的前滑降低。

e. 辊径直径 随着辊径直径的增大，金属的前滑增加。

1·2·5 宽展变形

辊锻的变形，除延伸外还有宽展。正确计算宽展，对保证锻件宽度方向轮廓形状及几何精度具有重要意义。当计算宽度过大时，则孔型充填不满，出现锻件尺寸不够问题；当计算宽度过小时，则孔型充填过满，形成飞边。这两种情况都可能造成废品。

1. 宽展的形式 按模具对变形金属横向流动约束的不同，分为三种宽展形式，如表3·8-1所示，即自由宽展、限制宽展及强迫宽展，生产中限制宽展与强迫宽展用得较多，而且往往同时存在。

2. 宽展的计算

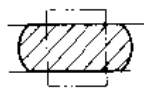
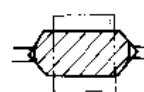

a. 影响宽展的因素

(1) 压下量。随压下量的增加，宽展增加。因此，总压下量一定时，减少辊锻的道次，宽展量增大。

(2) 辊径直径。辊锻模具直径越大，变形区长度越长，宽展随之增大。

(3) 坯料宽度。坯料宽度较小时，绝对宽展量随

表3·8-1 宽展变形的形式

宽展形式	简图	变形特点
自由宽展		在平辊模或宽度较大的扁平孔型内辊锻时，金属流动没有受到模具孔型侧壁的限制的都为自由宽展
限制宽展		坯料在型槽内的横向流动受侧壁的阻碍，使延伸的变形量增加，称为限制宽展
强迫宽展		模具孔型具有凸形部分时，金属受凸部作用，被迫作强烈地横向流动，称强迫宽展

宽度增加而增加，坯料宽度超过一定值时，则随坯料宽度的增加而减少。

(4) 摩擦系数。宽展随摩擦系数的增加而增加。凡属摩擦系数增加的影响因素都使宽展增加，如模具表面状态、坯料温度、辊锻速度以及工艺润滑条件等。

b. 宽展计算公式 计算宽展公式较多，下面推荐两个有代表性的公式：

(1) A. И. Целиков 公式

$$\Delta b = C \Delta h (2 \sqrt{R_x / \Delta h} - 1 / \lambda) \varphi(\epsilon)$$

$$C = 1.34 \left(\frac{b_0}{\sqrt{R_x / \Delta h}} - 0.15 \right) e^{0.15} - \frac{b_0}{\sqrt{R_x / \Delta h}} + 0.5$$

$$\varphi(\epsilon) = 0.138\epsilon^2 - 0.238\epsilon$$

式中 R_x ——模具的工作半径(mm)；

ϵ ——相对压下量。

(2) S. Ekelund 公式

$$b_1 = \sqrt{4m^2 (b_0 - h_1)^2 \left(\frac{l_d}{b_0} \right)^2 + b_0^2 + 4ml_2 (3h_0 - h_1) - 2m (h_0 + h_1) \frac{l_d}{b_0}}$$

$$m = (1.6\lambda_d - 1.2\Delta h) / (h_0 + h_1)$$

$$l_d = \sqrt{R_x / \Delta h}$$

1·3 辊锻模具设计

1·3·1 制坯辊锻模具设计

1. 辊锻毛坯图设计 制坯辊锻是为模锻提供合理的毛坯。所以制坯辊锻工艺设计的第一项任务是设计辊锻毛坯图。基本方法是：根据锻件图（图3·8-6a）



计算绘制截面图(图3·8-6b),最后计算并确定辊锻毛坯图(图3·8-6c)。所谓计算毛坯图,是以圆形或方形横截面的坯料,其截面积应等于相应长度上锻件截面积与飞边截面积之和。计算出的毛坯形状反映了沿锻件长度上金属的分布情况。

计算毛坯的截面积 A 按下式确定:

$$A = A_d + 2kA_f$$

- 式中 A_d ——锻件的横截面积 (mm^2);
 A_f ——飞边的横截面积 (mm^2);
 k ——飞边的充满系数,一般 $k=0.6\sim 0.7$ 。

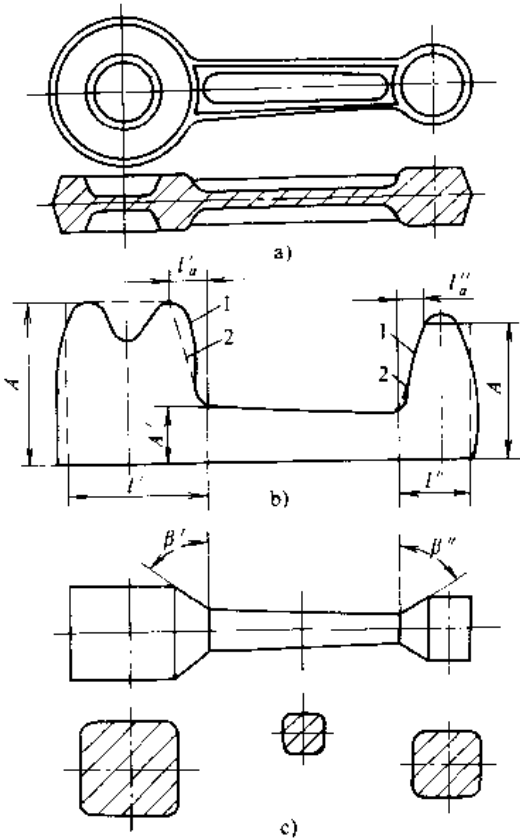


图3·8-6 辊锻毛坯设计图

a) 锻件图 b) 截面图 c) 辊锻毛坯图

2. 辊锻型槽的选择 制坯辊锻常用的型槽系有:椭圆一方、椭圆一圆、菱一方、箱形一矩形、六角一方等(图3·8-7)。

可供制坯辊锻选用的型槽系方案,如图3·8-8所示。

各种型槽系的变形特点及优缺点列于表3·8-2中。

3. 辊锻道次的确定 按辊锻毛坯最大截面尺寸选择原始毛坯尺寸后,按下式求总延伸系数 λ

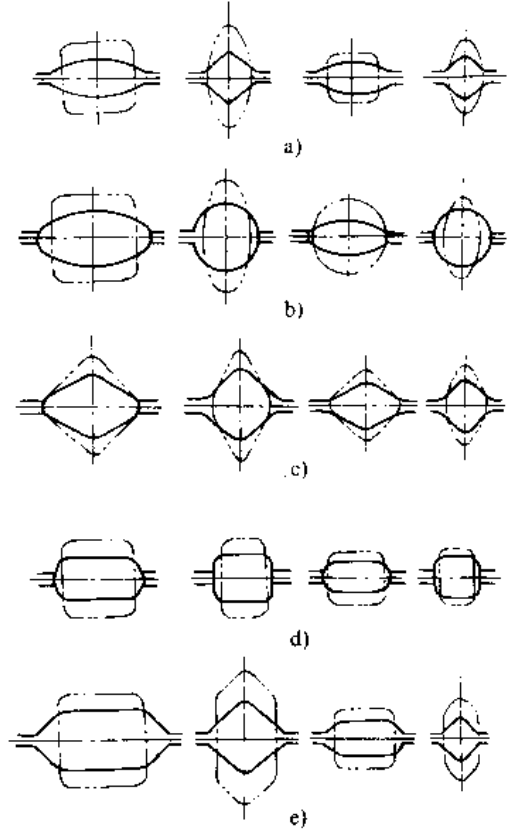


图3·8-7 常用型槽系图

a) 椭圆·方 b) 椭圆·圆 c) 菱·方
d) 箱形·矩形 e) 六角·方

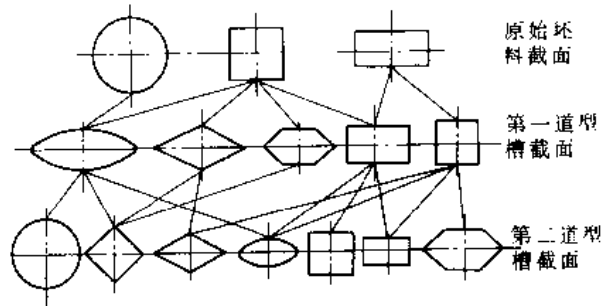


图3·8-8 辊锻型槽系方案图

$$\lambda_z = \frac{A_0}{A_n}$$

式中 A_0 ——原始坯料的截面积 (mm^2);
 A_n ——辊锻最后道次毛坯截面积 (mm^2)。

辊锻道次 n 按下式计算:

$$n = \frac{\tan \lambda_z}{\tan \lambda_p}$$

式中 λ_p ——平均延伸系数。

1·3·2 成形辊锻件的类型及工艺方案

1. 成形辊锻件的基本类型 成形辊锻件分为四

冶金工业出版社重作版权



表 3·8-2 制坯辊锻常用型槽系的变形特点

型槽系	优点	缺点
椭圆—方型槽系	1. 坯料在椭圆—方型槽系中变形时, 金属的四面均受到压缩, 坯料角部经常变换位置, 变形金属的组织性能均匀 2. 延伸系数大。在椭圆型槽内的延伸系数可以达到 2, 在方形型槽内延伸系数可达 1.8 3. 椭圆截面坯料在方形型槽中与方形截面在椭圆型槽中辊锻的稳定性较好	该型槽系的主要缺点是沿型槽宽度变形分布不均匀, 引起了型槽磨损的不均匀。如椭圆型槽中对应坯料棱角的部分变形最大, 磨损也最快
椭圆—圆型槽系	1. 型槽周边皆由弧线构成, 因此能使坯料周边和截面形状平稳地转变, 所以能有效的防止在局部区域呈现局部应力 2. 型槽没有尖角, 坯料截面能均匀地冷却, 在辊锻时不易产生裂纹, 能得到良好的表面 3. 适于辊制塑性较低金属坯料	1. 允许的延伸系数小, 一般为 1.4~1.5 2. 沿型槽宽度上变形分布很不均匀 3. 椭圆坯料在圆形型槽中的稳定性不好, 往往需要导板
菱—方型槽系	1. 能使坯料得到准确的方形截面 2. 沿型槽宽度变形分布较为均匀 3. 允许的延伸系数较大, 一般可在 1.4~1.8 范围内选取 4. 在辊锻时稳定性较好	此型槽系的缺点为: 金属只能在彼此垂直的两个方向受压缩, 因此截面的角隅, 在整个辊锻过程中, 都由同一部分金属形成, 易于在此处产生缺陷
矩形(箱形)型槽系	1. 坯料在整个截面宽度上变形均匀 2. 与在平辊模辊锻时比较, 较高的矩形坯料在箱形型槽内辊锻时, 不易发生歪扭 3. 模具的切槽较浅	1. 不能从矩形(箱形)系型槽内得出方形和矩形的精确几何图形 2. 金属只能在两个方向受到压缩
六角—方型槽系	1. 坯料多向受压, 有利于提高金属的组织与性能 2. 在坯料宽度上变形均匀, 此是优于椭圆—方型槽系变形之处 3. 辊锻过程中稳定性较好	

类, 如表 3·8-3 所示。

时金属成形和流动特点, 将成形辊锻工艺方案分为三


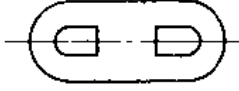
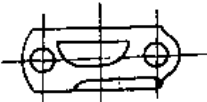
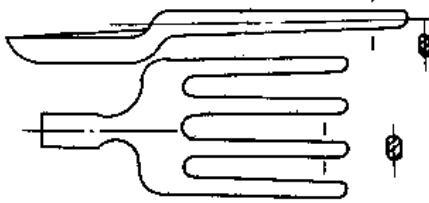
2. 成形辊锻的工艺方案 根据锻件形状及辊锻 种, 如表 3·8-4 所示。

表 3·8-3 辊锻件工艺性基本分类

类别	组 别	辊锻件图例	工艺方法
板片类	I. 扭曲变截面		成形辊锻
	II. 平直变截面		成形辊锻
长轴类变截面锻件	I. 形状简单		成形辊锻

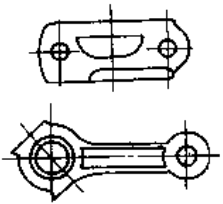

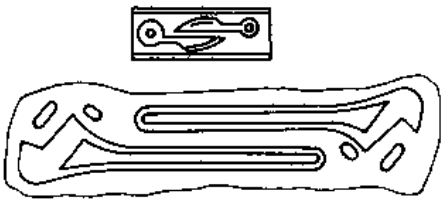


(续)

类别	组别	辊锻件图例	工艺方法
长轴突变截面锻件	Ⅰ. 形状复杂		初成形辊锻
扁宽类	Ⅰ. 形状简单		成形辊锻
	Ⅱ. 形状复杂		初成形辊锻
单纯拔长类			杆部、叉齿部分成形辊锻

注：摘自参考文献 [23] 598 页。

表 3-8-4 成形辊锻工艺方案分类

类别	单件辊锻	多件辊锻	组合辊锻
图例	 零件沿轴线方向对称或基本对称，锻件尺寸与设备能力相当	 零件对称或基本对称，锻件尺寸小，设备能力富裕	 零件不对称，设备对单件有很大富裕。它有利于减少辊锻时宽度上的不均变形，使难成形处良好成形

2 横轧和斜轧 [24]~[25]



2.1 横轧和斜轧特点、分类及应用

2.1.1 横轧和斜轧的运动特点

1. 横轧的运动特点 如图3·8-9所示，其特点是：
(1) 两个轧辊轴心线平行，其旋转方向相同；(2) 轧件作平行于轧辊轴心线并与轧辊旋转方向相反的旋转运

动。旋转的圆形轧件，在轧辊孔型的作用下，局部连续成形零件。

2. 斜轧的运动特点 如图3·8-10所示，其特点是：
(1) 两个轧辊轴心线交叉一个不大的角度，其旋转方向相同；(2) 轧件在两个轧辊的交叉中心线上作与轧辊旋转方向相反的旋转运动外，同时作前进直线运动。所以又称它为螺旋轧制或横向螺旋轧制。旋转的圆形轧件，在轧辊孔型的作用下，局部连续成形零件。

冶金工业出版社重作版权

4
1
C
4



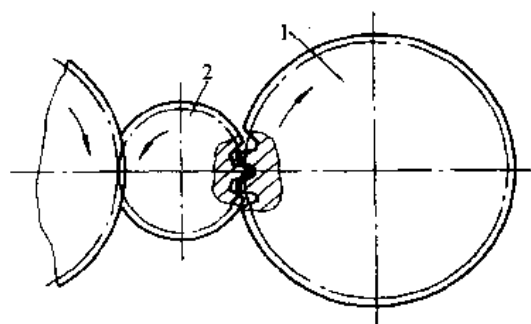


图 3-8-9 横轧齿轮原理图

1—轧辊 2—轧件

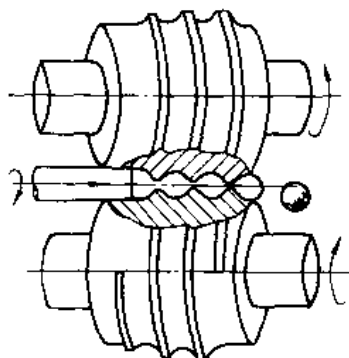


图 3-8-10 斜轧钢球原理图

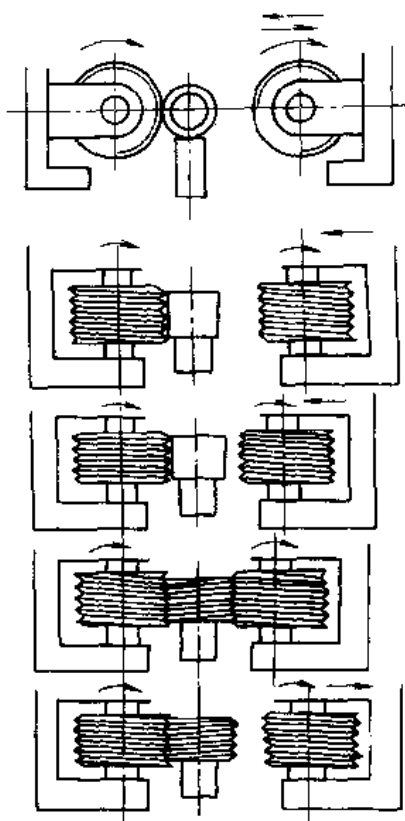


图 3-8-11 横轧螺纹原理图

2-1-2 横轧和斜轧的分类及应用

1. 横轧的分类及应用

a. 齿轮横轧 如图 3-8-9 所示, 带齿形的轧辊 1 与圆形轧件 2 对滚中, 实现局部连续成形, 轧制成齿轮。这种横轧的变形主要在径向进行, 轴向变形很小并受到限制。

横轧齿轮的应用范围包括: 直齿、斜齿及人字圆柱齿轮, 直齿、斜齿及螺旋圆锥齿轮, 还可以轧制链轮等。

横轧齿轮有热轧与冷轧, 热轧多用于精度不高的大模数齿轮, 冷轧多用于精度高的小模数齿轮, 也有采用热粗轧后冷精轧的。

b. 螺纹横轧 螺纹横轧又称螺纹滚压, 如图 3-8-11 所示, 两个带螺纹的轧辊, 以相同的方向旋转, 带动圆形轧件旋转, 其中一个轧辊径向进给, 将轧件轧成螺纹。这种横轧的变形主要在径向进行。

横轧螺纹广泛应用于冷轧直径 3~20mm 紧固件的螺纹, 其精度可达 7 级, 螺纹表面的粗糙度 R_a 可达 $0.4\mu\text{m}$ 。

c. 楔横轧 如图 3-8-12 所示, 两个带楔形模具的轧辊, 以相同的方向旋转, 带动圆形轧件旋转, 轧件

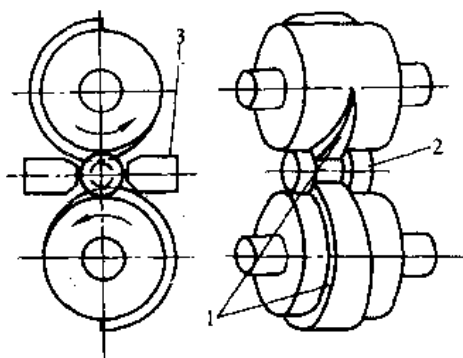


图 3-8-12 楔横轧原理图

1—带楔形模具的轧辊 2—轧件 3—导板

在楔形孔型的作用下, 轧制成各种形状的台阶轴。楔横轧的变形主要是径向压缩轴向延伸。

楔横轧与传统锻造方法比较, 生产某些轴类零件毛坯, 具有: (1) 生产率高 3~7 倍; (2) 节材率 20% 左右; (3) 模具寿命高, 一般为 20~30 万件/付; (4) 容易实现机械化操作, 工人劳动条件好等优点, 在汽车、拖拉机、摩托车、内燃机凸轮等轴类零件毛坯上得到广泛应用。还可以用它为模锻件提供精确的预制毛坯。楔横轧部分产品如图 3-8-13 所示。



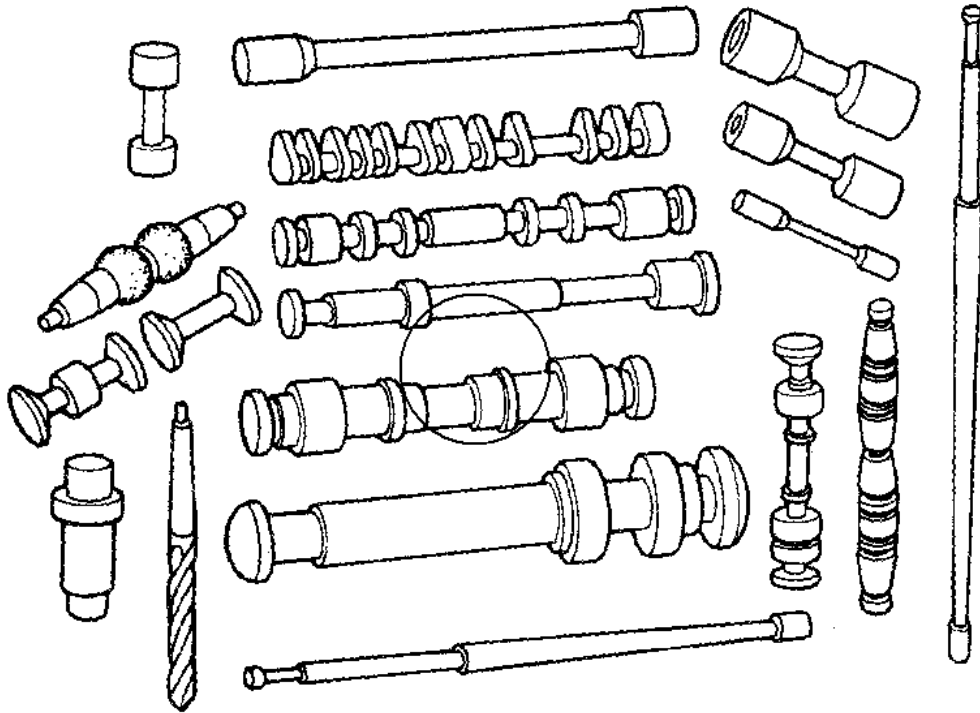


图 3-8-13 楔横轧的部分产品

2. 斜轧的分类及应用

a. 穿孔斜轧 如图 3-8-14 所示，两个带正反锥的轧辊，其轴线相互交叉，轧辊以相反方向旋转带动圆形轧件既旋转又前进，在正锥压缩作用下，轧件心部出现疏松并扩大为孔隙，轧件进入反锥部分，孔隙在顶头的作用下，轧制成空心管坯。它是冶金工厂无缝钢管生产中成管的主要方法之一。

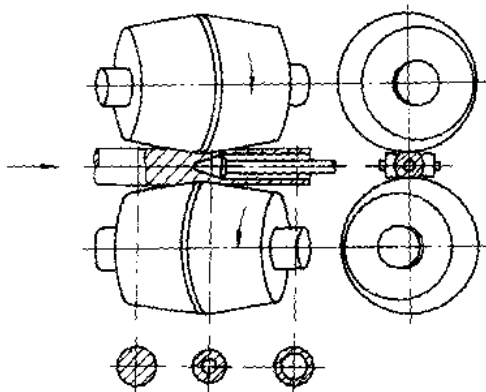


图 3-8-14 穿孔斜轧原理图

b. 螺旋孔型斜轧 如图 3-8-10 所示，两个带螺旋孔型的轧辊，其轴线相互交叉，轧辊以相同方向旋

转，带动圆形轧件既旋转又前进，轧件在螺旋孔型的作用下，成形回转体零件毛坯。螺旋孔型斜轧的变形主要是径向压缩轴向延伸。

螺旋孔型斜轧与传统锻造方法比较，生产某些回转体零件或零件毛坯，具有：(1) 生产率高 4~10 倍；(2) 节材率 25% 左右；(3) 模具寿命高；(4) 容易实现机械化操作，工人劳动条件好等优点，在球磨机钢球、轴承钢球及滚子等零件毛坯上得到广泛应用。还可以用穿孔斜轧轧出空心毛管后，在带芯棒的螺旋孔型斜轧机上轧出空心的回转体零件毛坯，如自行车闸皮、轴承的内座圈等。图 3-8-15 为螺旋孔型斜轧出的部分产品。

c. 仿形斜轧 如图 3-8-16 所示，三个带锥形的轧辊 1 带动圆形轧件 2 旋转，由于轧辊轴线与轧件轴线交叉，故轧件旋转外还向前运动。三个轧辊借助于仿形板 3 改变轧辊距轧件径向位置，实现变截面轴的轧制。仿形斜轧的变形主要是径向压缩轴向延伸。

仿形斜轧与楔横轧比较，优点是模具小而形状简单，缺点是生产率低，产品台阶只能平缓过渡，表面有明显的螺旋纹等，故不如楔横轧应用广泛。主要用于长径比大的产品，如火车轴、纺织锭杆、医疗器械的生产。



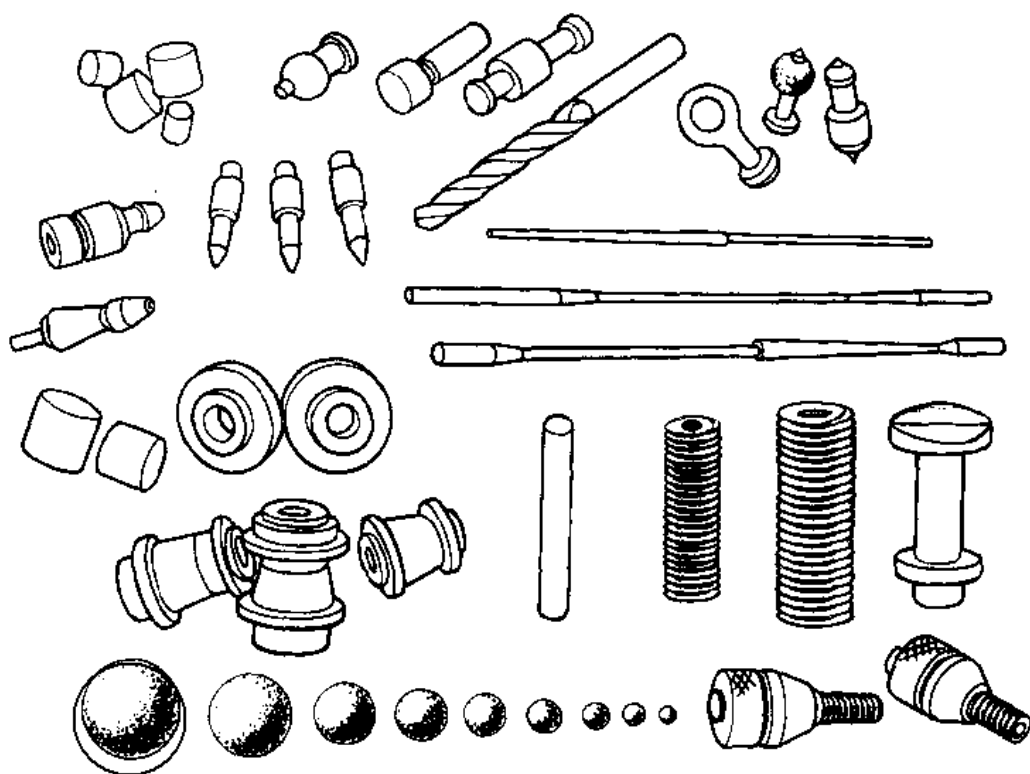


图 3-8-15 斜轧部分产品

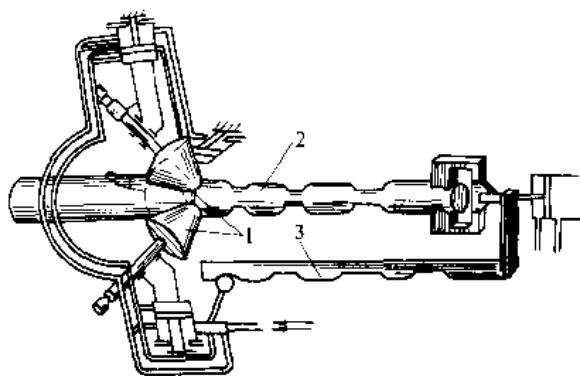


图 3-8-16 仿形斜轧原理图

1—轧辊 2—轧件 3—仿形板

d. 麻花钻头斜轧 如图 3-8-17 所示, 四个带扇形板的轧辊 1、2, 其轴心线与轧件 3 的轴心线交叉, 四个轧辊同时旋转带动轧件作旋转前进运动。轧辊 1 为钻沟扇形板, 轧辊 2 为钻刃背扇形板, 通过四个扇形板将圆形轧件轧制成麻花钻头。其变形主要为径向压缩轴向延伸。

这种方法主要用于热轧 3~13mm 的钻头。

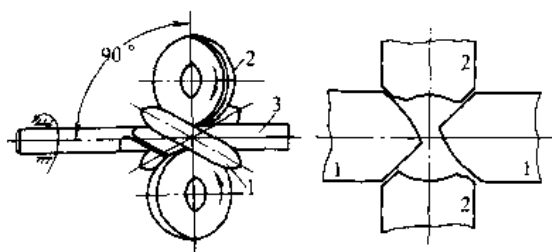


图 3-8-17 斜轧麻花钻头原理图 (左) 及孔型示意图 (右)

1—钻沟扇形板 2—钻刃背扇形板 3—轧件

2.2 楔横轧

2.2.1 楔横轧的主要工艺参数

1. 断面减缩率 ψ 断面减缩率 ψ 为轧件轧前面积 A_0 与轧后面积 A_1 之差比上轧前面积, 即 (图 3-8-18)

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = 1 - \left(\frac{d_1}{d_0} \right)^2$$

式中 d_1 ——轧件轧后直径 (mm);

d_0 ——轧件轧前直径 (mm)。

楔横轧的一次的断面减缩率 ψ 一般应 $< 75\%$, 否



则容易在轧件上产生螺旋缩颈与拉断现象,以及轧件不旋转等问题。若轴类件的断面减缩率 $>75\%$ 时,可采用两次楔入的方法解决。

需要指出的是,当 $\psi < 35\%$ 时,当工艺参数选择不当时,不但轧件直径尺寸精度不易保证,而且容易出现轧件中心疏松缺陷。

所以,楔横轧比较好的断面减缩率 $\psi = 40\% \sim 65\%$ 。

2. 成形角 α 成形角 α 是楔横轧模具设计中两个最主要参数之一。

楔横轧正常展宽部分的 α (图3-8-18),一般在下列范围内选取: $18^\circ \sim 32^\circ$ 。

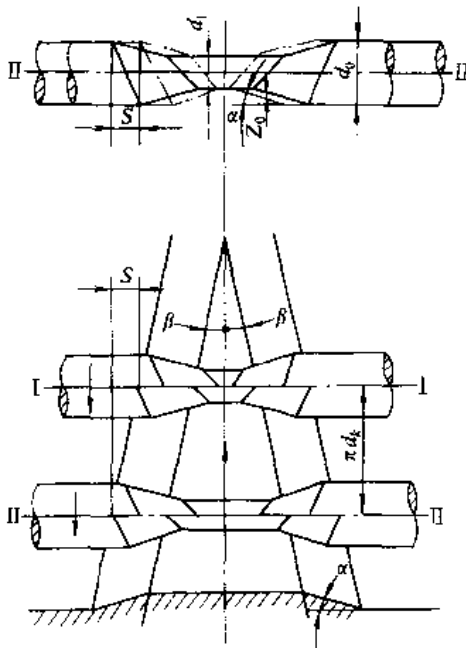


图3-8-18 典型楔横轧展宽图

I、I'—为对应位置的轧件瞬时状态图

成形角 α 对轧件的旋转条件、疏松条件、缩颈条件及轧制力的影响较大。通常情况下, α 角越大,旋转条件越差,容易产生缩颈,而中心疏松不易发生。

成形角 α 与断面减缩率 ψ 的关系较大,一般情况下, ψ 越大,越容易发生缩颈与轧件不转的问题,而中心疏松却不易发生,故 α 选较小值。

ψ 与 α 的关系,建议按表3-8-5中选取。

在模具其他部分,例如轧齐、切头等部分的 α 角可以大于 32° ,甚至可以取接近 90° 角。

3. 展宽角 β 展宽角 β 与成形角 α 是楔横轧模具设计两个主要参数。

在楔横轧正常展宽部分的展宽角 β ,一般在下列

表3-8-5 断面减缩率与成形角的关系

断面减缩率 ψ (%)	成形角 α ($^\circ$)
<50	>26
50~60	25~32
60~70	22~28
70~80	18~24

范围内选取: $4^\circ \sim 12^\circ$ 。

展宽角 β 对轧件的旋转条件、疏松条件、缩颈条件及轧制力的影响较大。通常情况下, β 角越大,旋转条件越差,容易产生螺旋缩颈,而中心疏松不易发生。

为了减少模具的展开长度,设计上应尽量选大的 β 值。

断面减缩率 ψ 对展宽角 β 的影响比较复杂,一般情况下是:当 $\psi > 70\%$ 时,容易产生缩颈,应选择较小的 β 值;当 $\psi < 40\%$ 时,容易产生疏松,也应该选择较小的 β 值。

ψ 与 β 的关系,建议按表3-8-6中选取。

表3-8-6 断面减缩率与展宽角的关系

断面减缩率 ψ (%)	展宽角 β ($^\circ$)
<40	<7
40~50	5~8
50~60	7~12
60~70	5~9
70~80	4~7

在模具其他部分,例如堆料、轧齐、切头等部分的 β 角不受 $4^\circ \sim 12^\circ$ 的限制。

2.2.2 楔横轧的模具设计

1. 楔横轧模具设计的一般原则

a. 对称原则 楔横轧模具上左右两条斜楔,在设计上希望对称,这样在轧制中模具两边作用于轧件两边的空间力是对称的,不会由于轴向力不等而串动及切向力不等而扭转等不良现象。如果轴类件本身在长度上对称,那么自然满足对称原理。对于不对称的轴类件,为使两边的力符合对称原则,有三种方法:第一,成对轧制,将不对称件成对轧制;第二,长棒料轧制,用预轧楔方法将非对称轴变为对称轧制;第三,对称力轧制,将两边斜楔的工艺参数 α 与 β 取不等数值,而作用于轧件的力,尤其是轴向力相等。

b. 旋转条件 轧件在模具带动下能否稳定旋转,



是楔横轧必备条件。极限条件下的旋转判别式为

$$\tan \alpha \tan \beta \leq \frac{d_1 \mu^2}{\pi d_s \left(1 + \frac{d_1}{D_1} \right)}$$

式中 d_1 —— 轧件轧后直径 (mm);

D_1 —— 轧辊上模具楔顶直径 (mm);

d_s —— 轧件的滚动直径 (mm);

μ —— 模具与轧件间的摩擦系数。

由于 μ 对旋转条件影响很大, 为此在斜楔面上刻平行于轴线的刻痕, 其目的是加大摩擦系数 μ 值。

c. 缩颈条件 设计模具时, 应满足轧件不因轴向力过大出现轧件拉细 (严重时拉断) 及螺旋缩颈等现象。当断面减缩率 ψ 较大、成形角 α 较大、展宽角 β 较大时, 容易发生螺旋缩颈 (局部连续拉细) 现象。

d. 疏松条件 横轧时, 圆形轧件在转动中径向连续小变形压缩时, 轧件除轴向延伸外, 径向也产生扩展, 因而在轧件心部产生拉应力, 当应力达到一定数值时, 中心将发生疏松甚至空腔, 在模具设计中应避免出现。容易出现疏松的条件是: 当断面减缩率 ψ 小时, 变形多为表面进行, 轴向变形小而横向变形大; 成形角 α 小时, 斜楔给轧件轴向拉力小, 轴向变形小而横向变形大; 展宽角 β 小时, 相当于径向压下量减小, 使横向变形增加。

2. 楔横轧典型件的模具设计 对称轴的典型模具设计, 如图 3-8-19 所示, 分为五个区段, 每一区段的作用与计算如下:

a. 楔入段 (A-B) 楔入段的作用是实现轧件的咬入与旋转, 并将轧件由 d_0 压到 d_1 的 V 型槽。楔顶高 $h = \frac{d_0 - d_1}{z} + \delta$, δ 为轧件外径 d_0 至轧辊基圆的距离, 其数值一般取 0.5~2mm。

楔入段的长度 L_1 为

$$L_1 = h \tan \alpha \cot \beta \quad (\text{mm})$$

b. 楔入平整段 (B-C) 楔入平整段的作用是将轧件整周轧成深度为 $(d_0 - d_1) / 2$ 的 V 形槽, 目的为改善展宽段开始时的变形量值。

楔入平整段的长度 L_2 为

$$L_2 = 0.6 \pi d_s \quad (\text{mm})$$

c. 展宽段 (C-D) 展宽段是楔横轧模具完成变形的区段。此段的楔顶高度不变, 斜楔由窄变宽, 实现轧件直径压缩长度延伸变形。

展宽段的长度 L_3 为

$$L_3 = \frac{1}{2} L_1 \cot \beta \quad (\text{mm})$$

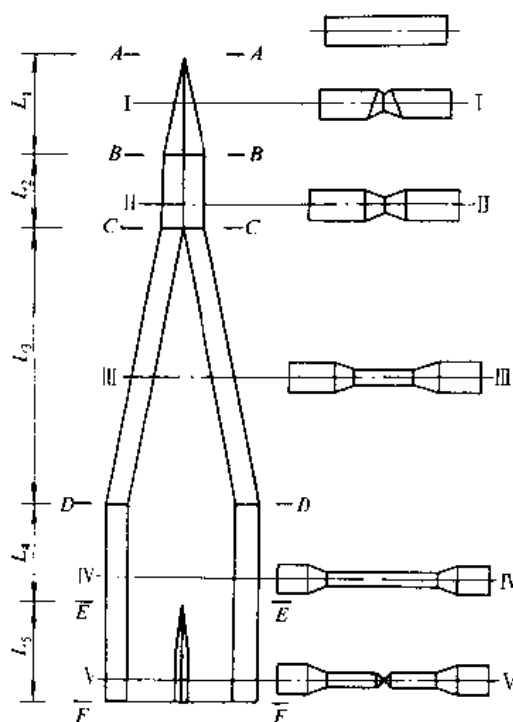


图 3-8-19 楔横轧典型模具区段图

式中 L_1 —— 坯料轧后以 d_1 为直径的长度 (mm)。

d. 精整段 (D-E) 精整段的作用是将轧件的整周轧到所需的尺寸, 并对轧件的全部尺寸精度与表面粗糙度精整到产品最终要求。

精整段的长度 L_4 为

$$L_4 = 0.6 \pi d_s \quad (\text{mm})$$

e. 剪切段 (E-F) 剪切段的作用是将轧件切成两件或更多件, 或者切去轧件两边的切头。由于切刀的寿命较低, 故切刀一般用更好的材料做成后再镶在模具上。

2.3 螺旋孔型斜轧

2.3.1 螺旋孔型斜轧的主要工艺参数

1. 极限压缩量 Z_{max} 螺旋孔型斜轧必要条件之一是: 轧制中要建立稳定的旋转条件。由于螺旋孔型斜轧的旋转条件比较复杂, 一般用简单横轧的旋转条件进行近似的分析。其满足旋转条件下的最大允许压缩量称为极限压缩量 Z_{max} 为

$$\frac{Z_{max}}{d} = \frac{\mu^2}{1 + \frac{d}{D}}$$

式中 D 、 d —— 轧辊与轧件的直径 (mm);

μ —— 轧辊与轧件间的摩擦系数。



Z_{max}/d 为极限相对压缩量。从式中可以看出摩擦系数 μ 对极限压缩量的影响显著, 轧辊直径与轧件直径之比 D/d , 当 <5 时影响显著, 当 >5 时影响减弱。

2. 轧辊倾斜角 α 螺旋孔型斜轧使轧件前进的运动有两个: 一是轧辊圆周速度在轧件轴向的分速度; 二是螺旋孔型的推进速度在轧件轴向的分速度。实现理想平稳的轧制, 以上两个速度应相等。按此理论得到轧辊倾角 α 的关系式为

$$\alpha = \text{arccot} \frac{S}{\pi D} = \beta$$

式中 S —— 螺旋孔型的导程;

β —— 螺旋孔型的螺旋升角。

由于轧辊孔型的导程与凸棱高度都是变化的, 所以轧辊孔型的螺旋升角 β 也是变化的, 轧辊倾斜角 α 一般按孔型精整部分的 β 角确定后, 根据轧制具体情况做某些微量调整。

孔型精整部分的螺旋升角 β , 一般取 $3^\circ \sim 6^\circ$, $<3^\circ$ 时, 轧辊辊径 D 过大; $>6^\circ$ 时, 辊径虽可以减小, 但轧辊原始辊面需做成高次曲面辊形, 否则轧辊不能实现对轧件的包络。

2.3.2 螺旋孔型斜轧的模具设计原则

螺旋孔型斜轧模具设计除满足旋转条件与疏松条件 (参见本章 2.2.2 节) 外, 还应遵守两个基本原则。

a. 体积相等原则 在螺旋封闭孔型区段内, 任何位置孔型内所包含的金属体积应保持为一个常数, 此常数为需轧出产品的体积加上精整部分连接颈体积。

为了说明这一原则, 以斜轧钢球孔型为例, 如图 3·8-20 所示, 表示两个轧辊在任意位置所形成的孔型。封闭孔型内包含五种分体积, 应等于轧出钢球加上最终连接颈的体积 V_0 , 其表达式为

$$V_{a\alpha} + V_{c\alpha} - V_{s\alpha} - V_{c\alpha+360} + V_{a\alpha-360} = V_0$$

式中 $V_{a\alpha}$ 、 $V_{a\alpha-360}$ —— 前后连接颈体积 (mm^3);

$V_{c\alpha}$ 、 $V_{c\alpha+360}$ —— 前后球台体积 (mm^3);

$V_{s\alpha}$ —— 平直部分体积 (mm^3)。

如果等式左边大于右边, 在孔型中出现多余体积金属, 这将可能出现疏松及不旋转等问题; 如果等式左边小于右边, 在孔型中出现体积金属不够, 这将可能出现连接颈提前拉断, 以及产品体积不够成形有缺陷等问题。

b. 连接颈相适应原则 在任何位置, 孔型凸棱宽度与连接颈长度应当适应。

为了说明这一原则, 仍以斜轧钢球孔型为例, 如图 3·8-21 所示, 该图表示相差 90° 轧辊凸棱的关系, 即由 $\alpha-90^\circ$ 位置连接颈体积到 α 位置时, 其连接颈宽度 b_c 与 α 角位置凸棱宽度 a_c 应当适应, 其表达式为

$$2V_{a\alpha-90} = 2V_{a\alpha} + 2(V_{c\alpha} - V_{c\alpha+90}) \quad (\text{mm}^3)$$

如果凸棱宽度 a_c 大于连接颈长度 b_c , 连接颈受拉, 可能出现提前拉断现象; 如果凸棱宽度 a_c 小于连接颈长度 b_c , 在连接颈处出现多余体积金属, 当发生在未封闭孔型处时, 多余金属延伸将后一个球推离凸棱, 造成钢球前半部缺金属缺陷, 当发生在封闭孔型处时, 多余金属使连接颈变扁, 既可能造成不旋转, 又可能出现强迫旋转将连接颈扭断, 还可能出现疏松乃至中空并向球心扩展等问题。

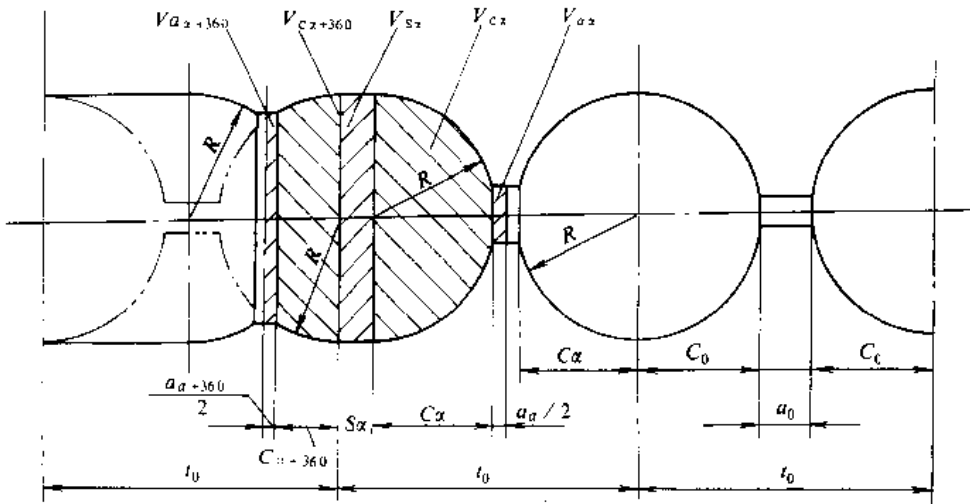


图 3·8-20 任意位置斜轧钢球孔型法向剖面图



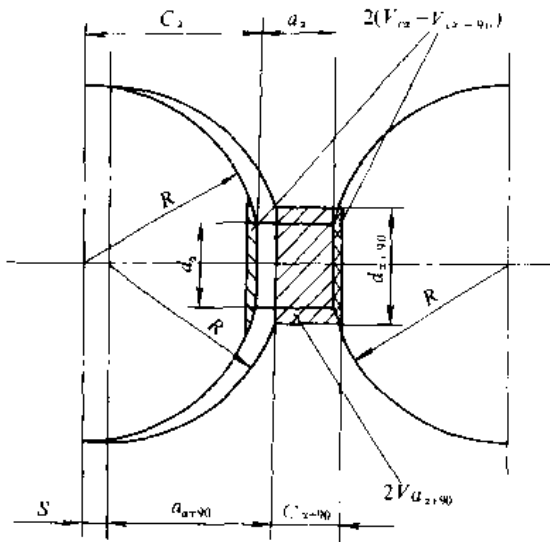


图 3·8-21 连接颈体积相适应图

3 辗环

3.1 辗环特点、分类及应用^[26]

3.1.1 辗环的原理及特点

辗环是环形件辗扩的简称，是环形件成形方法之一。其工作原理如图 3·8-22 所示，辗压轮 1 主动旋转，带动环形坯 3 旋转，环形坯再带动芯辊 2 旋转。同时辗压轮与芯辊间的中心距离逐渐缩小，即环形坯的厚度逐渐减小，直径逐渐扩大，并形成所需要的截面形状。导向辊 4 起诱导工件成圆及增加辗扩稳定的作用。当工件与信号辊 5 接触时，表示已达到预定尺寸，信号辊

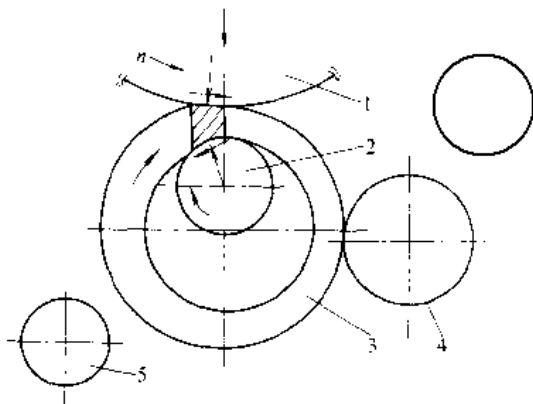


图 3·8-22 辗环原理图

1—辗压轮 2—芯辊 3—环形坯
4—导向辊 5—信号辊

发出精辗及停辗的信号，辗压轮完成辗压任务退回到原始位置。

辗环的主要特点如下：

(1) 所需设备的吨位小。辗环属于连续局部成形，变形压力只有一般模锻的 10% 左右，故所需设备的吨位小得多。

(2) 材料利用率高。与模锻比没有飞边与拔模斜度，尺寸与形状更接近成品，其材料利用率一般在 80% 以上。

(3) 质量好。辗环为径向（厚度）压缩切向延伸变形（环件内外径都增加），金属纤维沿圆周连续分布，产品综合力学性能好。

(4) 劳动条件改善。无冲击、低噪声、容易实现机械化操作，工人劳动条件改善等。

3.1.2 辗环的分类及应用

1. 辗环的分类 根据辗环的温度分为冷辗、温辗和热辗三类，其中冷辗和温辗多用于精密辗压；热辗多用于为进一步精加工的制坯环零件。

根据辗环时变形区在环坯上位置的分布，分为径向辗环与径向—轴向辗环两类（图 3·8-23）。外径尺寸小于 350mm 的环形件，一般只用径向辗压成形；外径尺寸大于 350mm 的大型环形件，两种类型都用。轴向辗压是为了消除径向辗压在端面形成鱼尾状，平整端面用的。

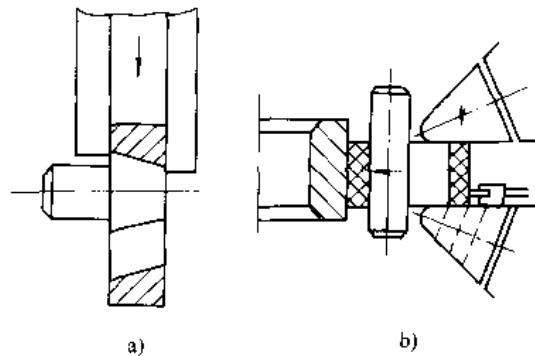


图 3·8-23 辗环的类型

a) 径向辗环 b) 径向—轴向辗环

2. 辗环的应用 辗环用于生产等截面环形件，应用比较广泛，包括火车车轮箍、轴承内外套圈、齿轮圈、法兰、起重机旋转轮圈等。

辗环工艺生产环形件的尺寸范围为：直径 40~1000mm，高度 10~4000mm。质量 0.2~6000kg，其

三
一
八



至更重的环形件。

按截面形状,如图3·8-24所示,辗环包括矩形、内径异形、外径异形和内外径异形。

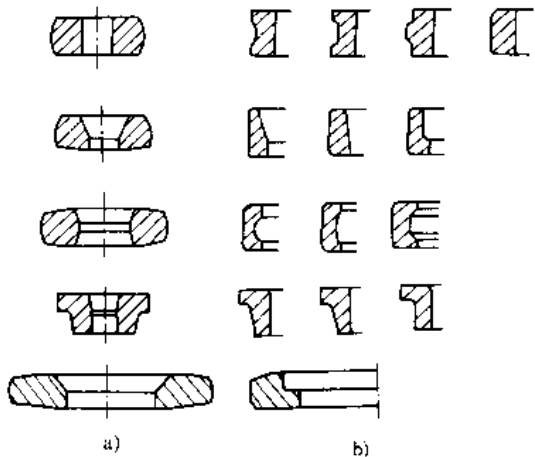


图3·8-24 辗环件的毛坯及截面形状
a) 毛坯 b) 辗环件截面

3.2 辗环主要工艺参数

3.2.1 辗扩比 K

辗扩比 K 是辗压前毛坯壁厚与辗压后锻件壁厚之比,即

$$K = \frac{D_m - d_m}{D_n - d_n}$$

式中 D_m 、 d_m —— 毛坯的外径与内径 (mm);

D_n 、 d_n —— 辗压件的外径与内径 (mm)。

为便于工艺设计,一般取 $K \approx d_n/d_m$ 计算。

当 $D_n > 100\text{mm}$ 时,一般取 $K = 1.5 \sim 1.7$; 当 $D_n < 100\text{mm}$ 时,一般取 $K = 1.3 \sim 1.5$, 当辗压件截面形状复杂,特别是沿轴向直径大小变化较大时, K 应选较大值; 对辗压件内部组织及周向纤维质量要求高时, K 应选较大值。

当 K 值确定后,已知辗压件内径,就可以计算确定毛坯的内径,按体积相等的原则,就可以确定毛坯的外径。

3.2.2 辗环毛坯尺寸与形状确定

1. 毛坯孔径的确定 当辗环件内孔为平点时其毛坯孔内径取 $d_{m1} = d_n/K$ 。当辗环件内孔为阶梯时,为避免内孔出现毛刺与折叠,一般毛坯内孔的大孔直径取 $d_{m1} = d_{n1}/K_1$, 毛坯小孔的 K_2 取

$$K_2 = K_1 \cdot \alpha (K_1 - 1)$$

式中 α —— 系数,取 $0.15 \sim 0.35$ 。

毛坯小孔直径为 $d_{m2} = d_{n2}/K_2$ 。

2. 毛坯外径的确定 毛坯外径主要根据体积不变原则与保证稳定辗压原则确定。当辗压件外径沿轴向变化时,则毛坯也应做成类似的形状。如果辗压件外径是阶梯形,在确定毛坯小外径时,应保证辗压轮的外凸缘首先接触毛坯的小外径,即毛坯外径差值应小于辗压件外径差值,否则将出现折叠。

3. 毛坯轴向宽度的确定 径向辗压的毛坯轴向宽度 B_m 一般为:

$$B_m = (0.95 \sim 0.98) B_n \quad (\text{mm})$$

式中 B_n —— 辗压件的轴向宽度 (mm)。

径向-轴向辗压的毛坯轴向宽度 B_m , 根据体积不变原则计算得到。

4. 毛坯形状的确定 毛坯的形状决定于辗压件形状和辗扩比 K , 当辗扩比 K 接近 1 时,毛坯外形与辗压件外形应接近; 辗扩比 K 值越大,毛坯的外形越简单。图3·8-24 给出部分成形件及其对应的毛坯外形。

3.3 辗环模具结构设计

3.3.1 辗压轮的结构设计

辗压轮和芯辊是辗压成形的两个主要模具。两者在回转中中心距离不断地减小,两者的外轮廓的对应部分组成与环形件一致的孔型,辗压轮的结构有整体式(图3·8-25a)和组合式(图3·8-25b)两种。小型辗压机的辗压轮常用的结构尺寸见表3·8-7,大型辗压机的辗压轮结构尺寸,需根据具体设备确定。

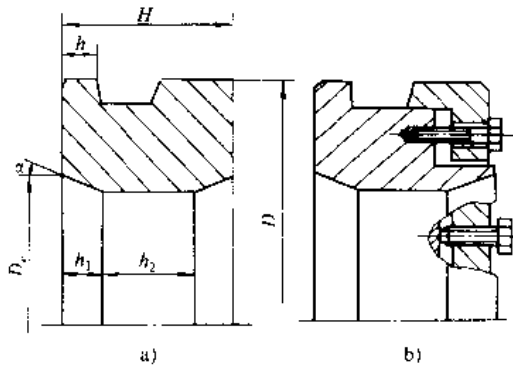


图3·8-25 辗压轮的结构形式
a) 整体式 b) 组合式



表 3·8-7 常用辗压轮的结构通用尺寸

辗压机型号	D	D_2	H	h	α	h_1	h_2
$\phi 160$	360	280	85	≥ 12	15°	—	—
$\phi 250$	450/420	329	100	≥ 16	15°	26	48
$\phi 350$	690	500	180	25	$10^\circ/20^\circ$	55	70

注：表中符号 D 、 D_2 、 H 、 h 、 α 、 h_1 、 h_2 均见图 3·8-25。

3·3·2 芯辊的结构设计

由于芯辊在环孔内，直径远小于辗压轮，与工件接触的时间长，所以工作环境恶劣，磨损快，在结构设计上应予考虑。小型辗压机上常用芯辊的结构如图 3·8-26，其主要结构尺寸见表 3·8-8。

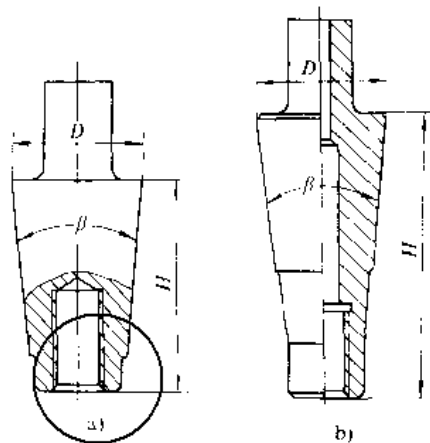


图 3·8-26 小型辗环机的芯辊结构

- a) 用于 $\phi 160$ 、 $\phi 250$ 辗环机
- b) 用于 $\phi 250$ 、 $\phi 350$ 辗环机

表 3·8-8 小型辗环机芯辊结构尺寸

辗环机型号	D	β	H
$\phi 160$	70/55	$8^\circ/10^\circ$	125/80
$\phi 250$	73/60	8°	145/90
$\phi 350$	130	8°	335

注：表中符号 D 、 β 、 H 均见图 3·8-26。

芯辊辗压成形部分的结构分为细颈式和直圆柱式(图 3·8-27)。直圆柱式在辗压时，辗压件容易出现轴向毛刺，但调整方便、强度好；细颈式多用于较大型件的辗压，直圆柱式多用于中小型件的辗压。

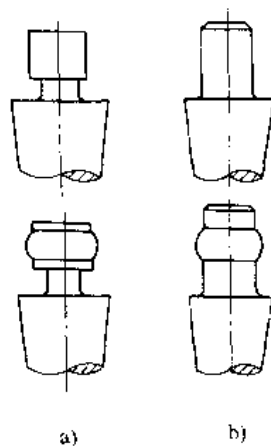


图 3·8-27 芯辊辗压成形部分结构

- a) 细颈式 b) 直圆柱式

4 摆辗

4·1 摆辗特点、分类及应用

4·1·1 摆辗的原理及特点

摆辗是摆动辗压的简称，是盘形件成形新方法之一。其工作原理如图 3·8-28 所示，锥模 1 的轴线 $O-P$ 与摆辗机主轴 $O-M$ 成一个夹角 γ ，称之为摆角。当主轴旋转时，带动锥模沿工件 2 作摆动运动，液压缸 4 推动滑块 3 把毛坯送进并加压，锥模母线相对于工件轴线作螺旋运动。毛坯在锥形模具作用下高度减小直径增大，成形为盘形件。

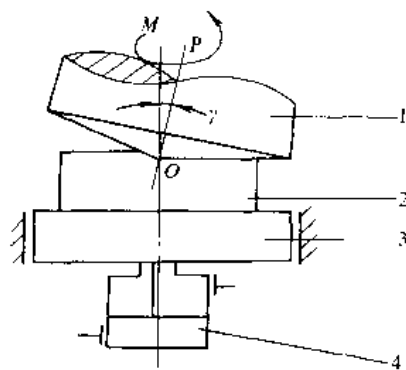


图 3·8-28 摆辗原理图

- 1—上模 2—毛坯 3—滑块 4—液压缸

摆辗与一般锻造比较其特点如下：

- (1) 所需设备的吨位小。摆辗属于连续局部成形，一般摆辗力只有模锻的 (10~20)%，故所需设备吨位小得多。



(2) 产品质量好。摆辗产品表面粗糙度一般在 $R_a 0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围, 垂直方向尺寸精度可达 $0.1 \sim 0.2 \text{mm}$ 。

(3) 适合薄盘形件成形。由于模具与工件接触面积小, 容易实现薄盘形件的成形。

(4) 劳动条件好。无冲击、低噪声, 容易实现机械化操作, 工人劳动条件改善等。

摆辗工艺的缺点为: 对于毛坯高度 H_0 与直径 D_0 之比大的摆辗件, 不仅生产效率低而且容易产生“蘑菇头”缺陷; 由于机器受偏心载荷作用, 机构比较复杂, 对其刚性要求也高; 多数摆辗件都需要预制坯等。

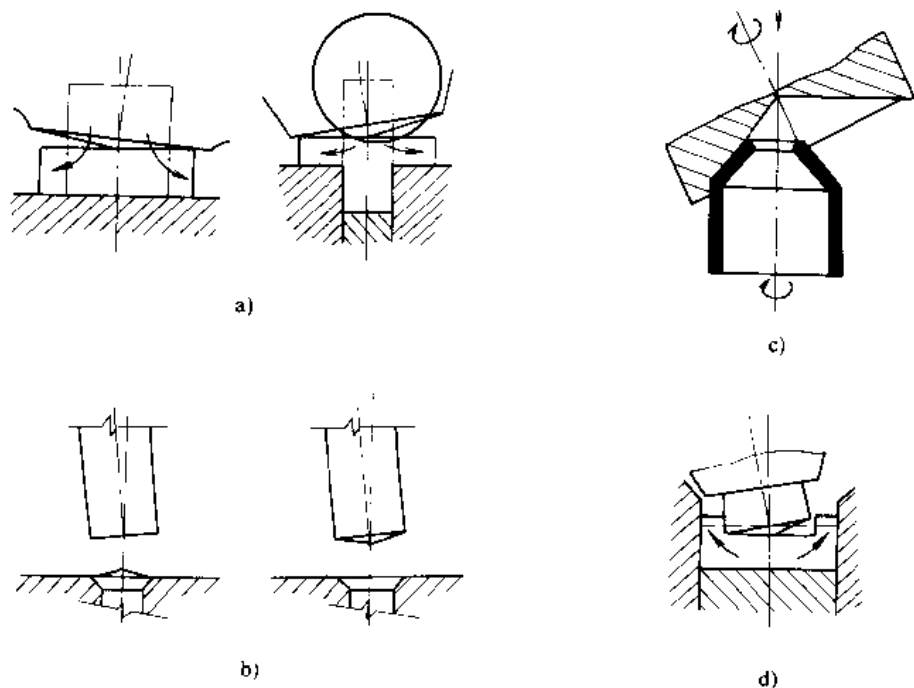


图 3-8-29 摆辗分类

a) 碾粗盘类件 b) 铆接件 c) 缩口件 d) 挤压件

此外, 根据成形温度分为冷辗与热辗成形, 冷摆辗产品精度高、模具寿命长, 热摆辗件变形力小, 容易成形。近些年温摆辗得到发展, 因为它具有上述两者的优点。

4.2 摆辗主要工艺参数

4.2.1 摆角 γ

摆角 γ (图 3-8-28) 对模具与工件的接触面积、摆辗机的轴向力、力矩与功率、及摆辗件的质量都有直接影响。冷辗时, 由于变形抗力大, γ 角选择较小值, 一

4.1.2 摆辗的分类与应用

1. 摆辗盘类件 (图 3-8-29a) 主要用于成形饼盘类件, 如汽车后桥被动大齿轮、铣刀片、盘形弹簧片等。带法兰的长轴类件, 如汽车半轴等。

2. 摆辗铆接 (图 3-8-29b) 主要用于汽车、造船、家俱、门窗中的铆接, 包括半端铆接、半圆铆接、翻孔铆接等。与风铆接相比, 无振动、少噪声。

3. 摆辗缩口 (图 3-8-29c) 可使金属成球面、锥面、抛物面等形状。

4. 摆辗挤压 (图 3-8-29d) 用于正挤压、正挤压墩粗和反挤压等。

般 $\gamma = 1^\circ \sim 2^\circ$; 热辗时, 则选择较大值, 一般 $\gamma = 3^\circ \sim 5^\circ$; 对于金属主要进行垂直流动的摆辗, 应选择较小的 γ 值 (如图 3-8-29d 中的正挤压); 对于金属主要进行径向流动的摆辗, 则应选择较大的 γ 值 (如图 3-8-29a 中的碾粗)。铆接时, 主要目的是实现金属的径向流动 (如图 3-8-29b), γ 角常取 $4^\circ \sim 5^\circ$ 。

4.2.2 每转进给量 s

摆辗机主轴每转进给量 s 越大, 生产率越高, 承受的压力越大, 电机的功率也越大。当摆辗圆柱件时, 毛坯高度 H_0 与直径 D_0 之比较大时, s 值不能取得过小,



否则会由于局部变形出现上大下小的“蘑菇效应”，为保证其均匀变粗，最小 s 值按下式计算。

$$s_{\min} = \frac{H_0}{2D_0} \tan \gamma$$

目前国内外常用的 $s=0.2\sim 2\text{mm}$

4.2.3 摆头转速 n

当每转进给量一定时，摆头转速 n 越高，设备生产率越高，电机的功率越大，设备承受的压力变化不大。

一般摆头转速 $n=30\sim 300\text{r/min}$

当进给速度不变时，摆头转速 n 越高，摆辗力越小，所要求的设备吨位小，摆辗铆接属于这种。当摆辗大工件时，为避免摆辗功率过大，采用较低的摆头转速 n 。热辗时，为避免模具与工件接触时间过长，影响模具寿命，采用较高的摆头转速 n 。

4.3 摆辗模具设计

冷、温、热三种摆辗在模具设计上是基本相同的，只是在温、热摆辗上需要考虑热胀率。

4.3.1 摆辗件图的制定

1. 机械加工余量和摆辗公差 当摆辗件的精度较高时，其余量与公差可按曲柄压力机的模锻件选取；冷摆辗件可以做到无余量，其公差可以达到 $\pm 0.02\text{mm}$ 。

2. 开式模与闭式模 根据摆辗件的外廓形状，摆辗模具分为开式和闭式两种。开式模（图3-8-30a）的摆辗件有飞边，需增加切除工序。闭式模（图3-8-30b）的摆辗件往往有纵向毛刺，不需专门的切除工序，只是在机械加工中顺便去除。闭式模还具有模膛容易充满，模具加工简单等优点，所以摆辗多用闭式模。但对于摆辗件外轮廓为非圆形的，如摆辗六角螺钉头，则采用开式模。

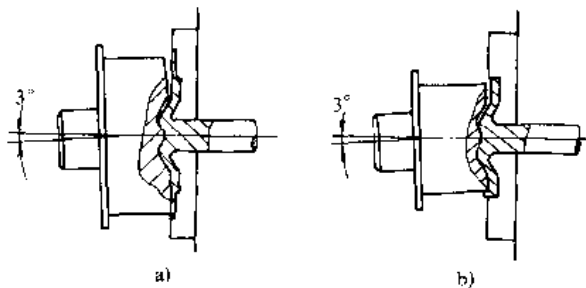


图3-8-30 开式与闭式摆辗模

a) 开式模 b) 闭式模

3. 摆辗件的斜度与圆角 由于摆辗机大都设有顶料装置，所以摆辗件的斜度较小，一般在 $3^\circ\sim 5^\circ$ 范围。摆辗件的圆角半径一般参考机械压力机上模锻件选取。

4.3.2 摆辗模具的结构设计

1. 凹模与凸模 摆辗模具由固定凹模与摆动凸模组成，摆辗件的复杂部分，特别是非回转体部分，一般在固定凹模中成形；形状简单的部分，一般放在摆动凸模内成形。

2. 立式模与卧式模 在立式摆辗机上用立式模具（图3-8-29），主要应用于盘类件及短轴类件；在卧式摆辗机上用卧式模具（图3-8-31），主要应用于长轴类件。

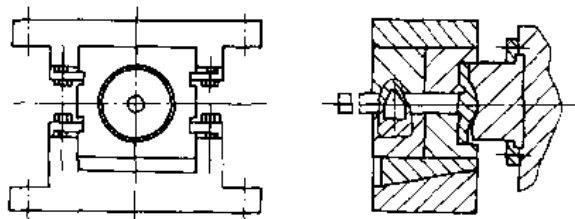


图3-8-31 卧式摆辗机模具

3. 整体式模与镶块式模 摆辗模具既有整体式的，也有镶块式的。后者是将整体式模具中最容易磨损或者损坏的部位，用独立的好材料块镶上去，这样做比较经济。

4.4 摆辗实例

4.4.1 摆辗汽车后半轴

汽车后半轴摆辗件如图3-8-32b所示，其坯料如图3-8-32a所示。在200t卧式摆辗机上成形法兰部分，摆角 $\gamma=3^\circ$ ，摆头转速 $n=200\text{r/min}$ ，每转进给量 $s=2\text{mm}$ ，始辗温度为 $1100\sim 1150^\circ\text{C}$ ，终辗温度为 $950\sim 1000^\circ\text{C}$ ，模具为闭式模，由三块组成（图3-8-32），材料为3Cr2W8V或5CrNiMo。

4.4.2 摆辗导磁体

导磁体是扬声器中主要零件之一，其形状如图3-8-33所示。由于该零件尺寸精度要求高，采用冷摆辗成形。坯料采用 $\phi 24.9\text{mm}$ 的冷拔材，在带锯上切成长89mm的圆柱料。在160t立式摆辗机上成形，摆角 $\gamma=1^\circ 30'$ ，每转进给量 $s=3\text{mm}$ ，模具材料为Cr12MoV，平



均寿命约 20000 件。

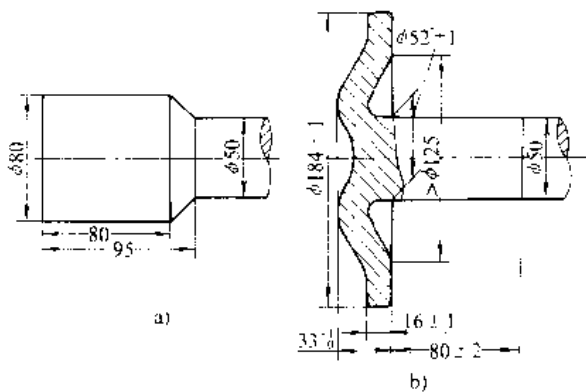


图 3-8-32 汽车半轴法兰
a) 坯料 b) 锻件

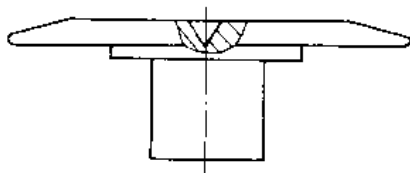


图 3-8-33 扬声器的导磁体

5 旋转锻造

5.1 旋转锻造特点、分类及应用

5.1.1 旋转锻造的原理及特点

旋转锻造又称径向锻造，是直长件成形新方法之一。其工作原理如图 3-8-34 所示，在工件径向对称布置两个以上的锤头，它以高频率的径向往复运动打击工件，工件作旋转与轴向移动，在锤头的打击下工件实现截面积减小、长度延伸变形。

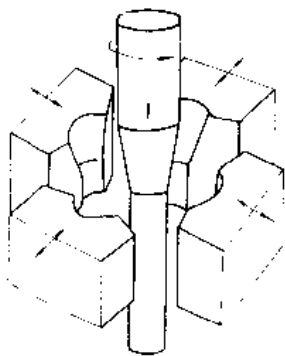


图 3-8-34 旋转锻造原理图

旋转锻造工艺的主要特点如下：

(1) 锻件质量好。热旋转锻造的尺寸精度为 6~7 级，表面粗糙度为 $R_a 12.5 \sim 3.2 \mu\text{m}$ ；冷旋转锻造的尺寸精度为 2~4 级，表面粗糙度为 $R_a 1.6 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。冷锻件的表面硬度可提高 4~8HRC，强度极限提高 5%~10%。

(2) 可以锻造低塑性材料。由于旋转锻造属于三向压应力状态下局部高速锻造，所以可以锻造低塑性的高合金钢，如含钨、钼、铌等的合金钢。

(3) 锻件的范围广。旋转锻造件的截面包括圆形、方形及多角形等；实心件直径从 0.15~400mm，空心件直径大到 600mm。由于旋转锻造的工具简单造价低，所以既可以用于大批量也可以用于小批量锻件的生产。此外，在冶金厂还用于合金钢锭的开坯。

旋转锻造的缺点为冲击与噪声大，工作环境差，对于某些长锻件的生产率较低等。

5.1.2 旋转锻造的分类与应用

1. 旋转锻造的类型

(1) 按锤头数目及运动方式分为：二锤头自身回转式(图 3-8-35a)、二锤头坯料回转式(图 3-8-35b)、三锤头坯料回转式(图 3-8-35c)及四锤头非回转式(图 3-8-35d)。

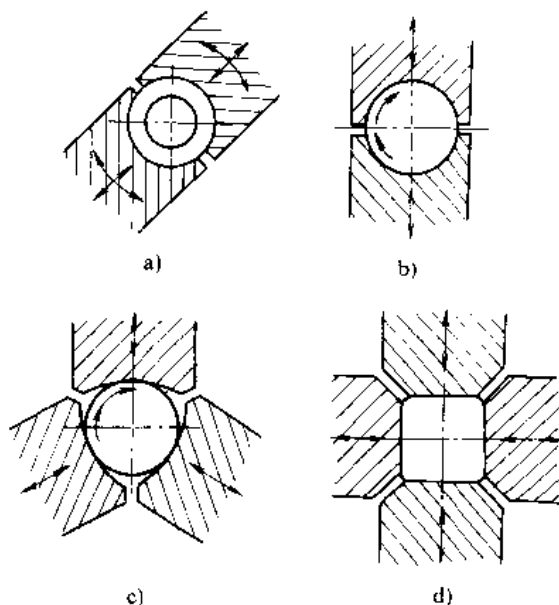


图 3-8-35 旋转锻造按锤头数及运动方式分类图

a) 二锤头回转式 b) 二锤头坯料回转式
c) 三锤头坯料回转式 d) 四锤头非回转式



(2) 按工件运动方式分为：既旋转又移动（图 3·8-36a）、只作移动（图 3·8-36b）、只作转动（图 3·8-36c）。既转动又移动的多用于锻圆形长轴与阶梯轴，只移动的多用于锻非圆形件，只转动的多用于空心件缩口。

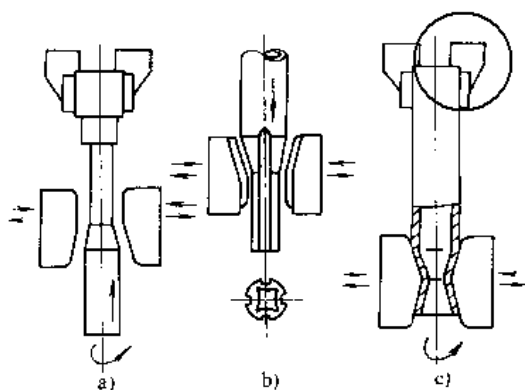


图 3·8-36 旋转锻造按工件运动方式分类图
a) 工件既旋转又移动 b) 工件只移动 c) 工件只转动

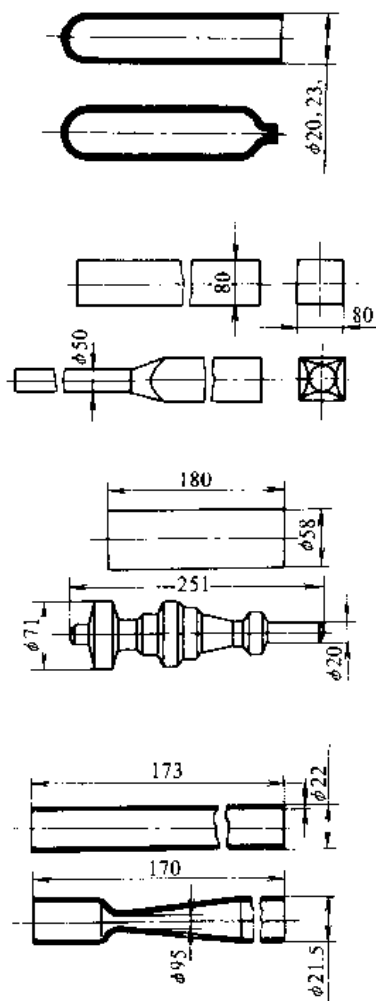


图 3·8-37 旋转锻造的典型锻件

(3) 按锻造温度分为：旋转锻造按温度分为冷锻、温锻 500~700℃ 与热锻 900~1000℃。温锻与热锻的温度一般比模锻低 100~200℃。

2. 旋转锻造的应用 旋转锻造广泛应用于汽车、拖拉机、机床、机车等各种机器的台阶轴的生产，包括直台阶与带锥度的轴类件；截面为方形、矩形及多边形的棒材；带台阶的空心轴及内壁异形材；各种气瓶、炮弹壳的收口等。其代表性产品如图 3·8-37 所示。

5.2 旋转锻造工艺设计

5.2.1 旋转锻件图及成形过程

1. 锻件图的确定 旋转锻造用的毛坯直径一般等于或稍大于锻件最大直径，毛坯的长度按锻件体积加轴向余量计算确定。

旋转锻件的直径余量 a 与公差 b (图 3·8-38) 的数值列于表 3·8-9 中。

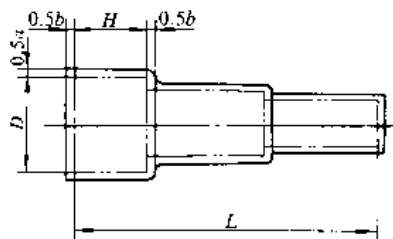


图 3·8-38 旋转锻件的余量及公差

2. 成形过程的确定 工件的成形过程，由旋转锻机夹头与锤头动作，由程序自动控制确定，此动作程序称为工作循环。如图 3·8-39a 所示，工作循环顺序用箭头表示，并注上工步序号，垂直于轴线表示径向送进，平行于轴线的表示轴向送进，图 3·8-39b，表示循环过程中工件的形状。

5.2.2 旋转锻造主要工艺参数

1. 工件转速 工件由夹头带动旋转，夹头的转速是可调的，一般为 25~46r/min。转速高，轴向送进速度快，生产率也高。当锤头每分钟打击次数与夹头转速已知时，工件每转锤头打击次数可以计算出来，该数值不应是锤头数的整数倍，否则将产生打击部位重合的缺点。

2. 轴向送进速度 轴向送进速度大，生产率高。但过大的轴向送进速度，工件表面被锤头打击的次数少，将影响锻件的表面质量。一般热锻为 1.5~2.5m/



min, 温锻为 0.3~0.5m/min, 冷锻为 0.06~0.2m/min。

3. 进锤速度 进锤速度对锻件表面质量影响不大, 对生产率以及空心管壁厚增加有影响。

4. 径向压入量 在设备允许条件下, 选用较大的

径向压入量, 可减少工步, 提高生产率, 并可减小锻件轴端的凹坑。但径向压入量过大时, 横向变形也相应加大, 当轴向送进速度也较大时, 锻件表面将出现螺旋脊纹, 尤其是小直径的工件更为明显。所以, 当选用较大的径向压入量时, 则应配之以较小的轴向送进速度。

表 3-8-9 旋转锻件的公差及机加工余量 (mm)

零件长度 <i>L</i>		零件最大直径 <i>D</i>							
		大于	30	80	100	120	120	200	
		至	80	100	120	120	200		
		余量 <i>a</i> 、 <i>b</i> 与公差							
大于	至	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
0	400	3.5 ^{+0.8} _{-0.4}	4.5 ^{+1.5} _{-0.8}	4.0 ^{+0.9} _{-0.5}	5.0 ^{+1.5} _{-0.8}	4.5 ^{+1.0} _{-0.5}	5.5 ^{+1.8} _{-0.9}		
400	800	4.0 ^{+0.9} _{-0.5}	5.0 ^{+1.6} _{-0.8}	4.5 ^{+1.0} _{-0.5}	5.5 ^{+1.8} _{-0.9}	5.0 ^{+1.2} _{0.6}	6.0 ^{+2.0} _{1.0}	5.5 ^{+1.3} _{-0.6}	6.5 ^{+2.2} _{-1.1}
800	1200	4.5 ^{+1.0} _{-0.5}	5.5 ^{+1.8} _{-0.9}	5.0 ^{+1.2} _{-0.6}	6.0 ^{+2.0} _{-1.0}	5.5 ^{+1.3} _{-0.6}	6.5 ^{+2.2} _{-1.1}	6.0 ^{+1.4} _{-0.7}	7.0 ^{+2.3} _{1.2}
1200	2000			5.5 ^{+1.3} _{-0.6}	6.5 ^{+2.2} _{-1.1}	6.0 ^{+1.4} _{-0.7}	7.0 ^{+2.3} _{-1.2}	6.5 ^{+1.5} _{-0.7}	7.5 ^{+2.4} _{-1.2}

注: 表中符号 *D*、*L*、*a* 及 *b* 均见图 3-8-38。

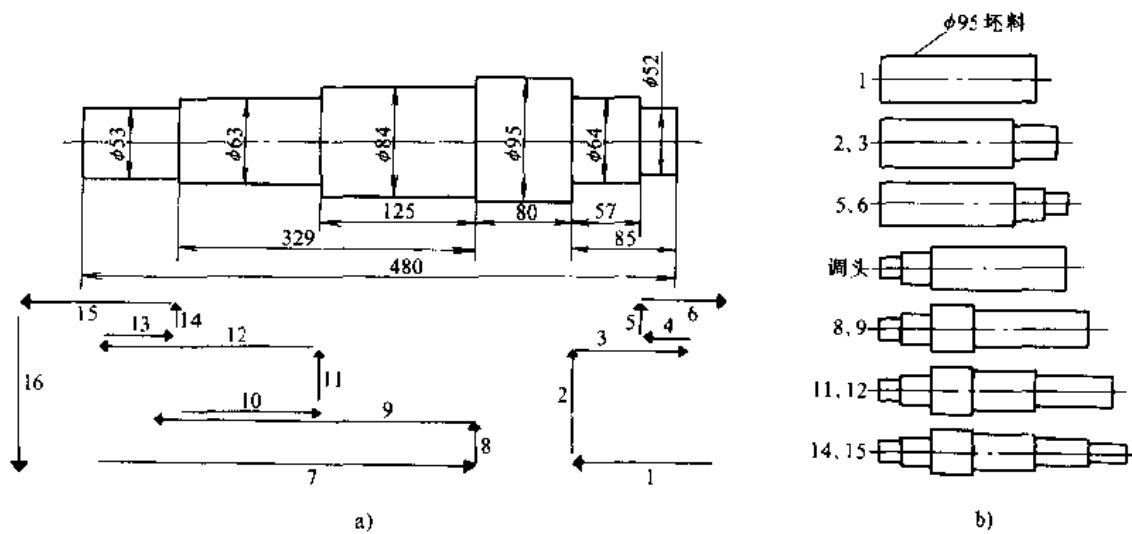


图 3-8-39 旋转锻造机床主轴成形过程

a) 工作循环 b) 成形过程的工件形状

5-2-3 旋转锻造工艺实例

旋转锻造直流电焊机主轴 (图 3-8-40) 的工艺实例。材质为 45 钢, 坯料直径按锻件最大直径 φ110mm 选取。

工作循环及工步如图 3-8-40 所示, 先夹持 φ110mm 坯料, 通过 2、3、4、5、6、7、8 工步将 φ105、

φ99、φ85 及 φ75mm 的直径锻出, 然后调头, 夹持 φ85mm 处, 通过 11、12、13、14、15 工步将 φ105、φ95、φ75mm 的直径锻出。

选用的工艺参数为: 进锤速度 4~5mm/s、轴向送进速度 2~3m/min (其中 8、15 两步由于压下量较大, 选用较低的速度 1.5m/min)、锻件转速 25r/min、始锻温度 1150~1180℃。



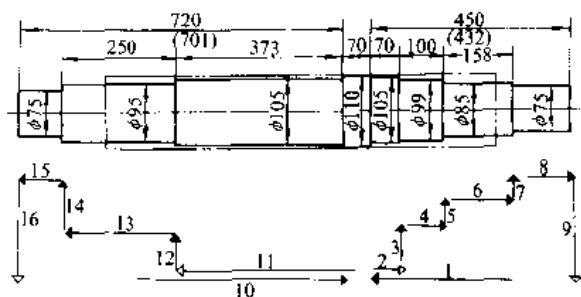


图 3-8-40 直流电焊机主轴及其旋转锻造工作循环图

5.3 旋转锻造典型锤头结构

旋转锻造的典型锤头结构如图 3-8-41 所示。锤头表面为凹圆形。锤头纵向截面工作表面(图 3-8-41 侧视图)由预成形段与整形段两部分组成,预成形段为圆锥面,毛坯在这里进行平稳均匀的变形,由于锤头与工件接触面积加大,外部摩擦阻力增加,打击变形容易深入内部,减少纯表面变形,不仅可以提高锻件内部质量,还减小端部的凹陷。锥面的锥角一般为 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$,冷锻一般小于 8° ,整形段长度与夹头转速及轴向送进速度有关,工件旋转一周的轴向送进量,应保证相邻锤头

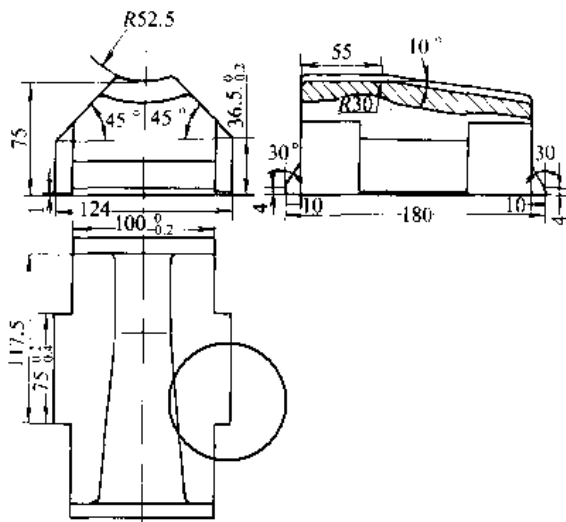


图 3-8-41 旋转锻造典型锤头结构

的整形段锤痕仍能衔接上。

锤头整形段部分横截面为凹圆弧形,其弧面半径一般比毛坯半径大 $1\sim 2\text{mm}$,过小锤头容易啃料与折叠,过大锻件将出现多边形。

第9章 高合金钢和非铁合金锻造

高合金钢由于组织的多相性、再结晶温度高、再结晶速度低、导热性差、变形抗力高等特点的存在,其锻造性能区别于普通合金结构钢。非铁合金由于裂纹敏感性高、塑性低、流动性差,也有其锻造特性。

1 高合金工具钢锻造^{[29][30]}

低塑性莱氏体高合金工具钢的相主要是由 α 铁的固溶体和复合碳化物组成。在结晶过程中,由于组织的变化,通常产生三种不同的碳化物:共晶初生碳化物,二次碳化物及共析三次碳化物。共晶碳化物呈粗大鱼骨状,具有很大脆性,因而塑性极低。二次碳化物大都是围绕晶界析出而形成网络状,它也使材料力学性能降低。三次共析碳化物颗粒细小,分散分布,具有较高的力学性能。高合金工具钢锻造的主要目的是要把粗大的共晶碳化物打碎,使其在基体中均匀分布。

1. 备料 锭料经退火后要用砂轮清理或“剥皮”。用砂轮清理表面缺陷时,应防止局部过热,以免引起裂

纹。

2. 加热 在火焰炉或电阻炉中进行加热,冷锭装炉应预热,升温不能过快。

3. 锻造工艺特点 钢锭开坯必须保证足够的锻比(7~8)。一般锻造方法不能使碳化物细化到所需程度,也不能使碳化物足够均匀地分布到全部基体中。采用“走扁方”的锻造方法,并加大变形量,有较好的效果。“走扁方”最好在两次以上。

改锻是为了使碳化物细化、改善不均匀度。常用的锻造方法有单向锻粗、单向拔长、轴向反复锻拔、径向十字(单十字、双十字)锻造等。

对塑性很低或中心疏松较为严重的材料,可采用型砧或棒子进行拔长;圆柱形锻件的最后修整,最好在棒子内完成;砧子要有适当的圆角;工具均应预热。

严格控制最后一火的终锻温度,并保证有足够的变形量。

锻后可置于干砂或铁桶(预热 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$)中冷



却；出砂后及时进行退火处理。

2 不锈钢锻造

1Cr18Ni9Ti、4Cr14Ni14W2Mo 等奥氏体不锈钢没有同素异晶转变，通过热处理的方法是不能细化晶粒的，只能通过热锻变形的方法才能实现细化组织。奥氏体不锈钢铸锭的柱状晶粒越长，塑性越低，这是铸锭开坯时产生横向断裂的基本原因之一。某些奥氏体钢，高温下出现 δ 相，低于 900℃ 时缓冷或缓慢加热时出现 σ 相，含 Mo 或 Si 较高时易出现 α 相。这些相虽然数量很少，却使高温塑性明显下降。

1. 备料 钢锭或钢坯的表面缺陷必须在加热前用机械方法去除。

2. 加热 不锈钢的加热应在弱氧化气氛的火焰炉或电阻炉中进行。加热时要严格避免渗碳。加热后的不锈钢也不允许与含碳物质（如油脂等）接触。

3. 锻造工艺特点 锻造钢锭时，开始轻击；当钢锭变形量达 30% 后，才能重击。锻造时应单向送进，避免在一处重复锤击，以防止出现中心十字裂纹。

钢锭锻比采用 4~6，钢坯取 2~4，具体视原材料的晶粒度而定。不锈钢晶粒度大小，对抗腐蚀性有很大影响。为了获得细晶粒组织，应保证最后一火有足够大的锻比，并使在终锻温度下的变形量大于再结晶临界变形程度。

变形过程中要求变形均匀，以能得到较均匀的晶粒组织。

锻造时所用工具均应预热，砧面要光滑，必要时用润滑，加软钢垫板等。

锻后的锻件要空冷。

4. 固溶处理 为了使锻造和空冷过程中析出的碳化物重新溶入奥氏体，得到均匀单一的常温奥氏体组织，不锈钢锻后应进行固溶处理，温度为 1020~1050℃，水冷。固溶处理的温度不宜过高，保温时间不宜过长，以防晶粒长大。

3 耐热合金和高温合金锻造

这类合金通常没有同素异晶转变，且临界变形程度在较广的范围内变化（0.5%~20%），锻造温度范围窄，不允许在高温下停留时间长，要求有均匀的变形。对于加热和冷却的要求也很严格。

3.1 钛合金锻造

钛合金有足够的塑性，可进行自由锻、模锻、挤压。

钛合金的变形抗力高，填充模膛性能差，粘模现象严重。锻造钛合金比起锻造不锈钢更为困难。

3.1.1 备料

坯料上的所有缺陷必须用车削或磨削清除。自由锻毛坯要去掉 3~5mm 的表层，挤压棒料要去掉 2~3mm。下料要在车床、砂轮切割机、阳极切割机上冷切，也可以在剪床或锤上进行热切，温度控制在 750~900℃。不准用气割下料。

3.1.2 加热

钛合金在高温下与氧、氮、氢的亲合力很强，为了减少和防止钛合金表面形成 α 相脆化层和吸氢变脆现象，它的加热宜在电炉中或在氧化气氛的火焰炉内进行。炉底垫不锈钢板。加热前的钛合金表面最好涂敷一层保护物质（如钡化钠玻璃或硅化硼玻璃），以防出炉后被空气污染。钛合金导热率低，在 800~850℃ 以前加热应特别小心。为了减少氧化、 α 相脆性层、吸氢和晶粒长大，在高温下停留时间应为热透整个断面所需的最短时间。

3.1.3 模具设计与润滑

钛合金主要采用单模膛模锻。由于充填性能差，尽量采用较大的圆角半径。与钢件比，同样深度和同样复杂程度的模膛壁厚要加大 50%。模膛表面粗糙度 R_a 应为 0.1~0.2 μm 。为了增加充模能力，有时要增大飞边槽桥部尺寸。锻件收缩率取 0.5%~0.7%。

常用润滑剂有：胶状石墨与水的混合物；重油或机油与石墨的混合物。

3.1.4 锻造温度范围（表 3-9-1）

表 3-9-1 钛合金锻造温度范围

类型	合金牌号	$\alpha+\beta/\beta$ 转变温度 (°C)	锻造温度范围 (°C)		
			铸锭开坯	坯料自由锻	模锻
α	TA6	1020~1050	1150~950	1080~850	1100~850
	TA7	1020~1050	1100~900	1080~950	1080~850
	TA8	950~990	1150~900	960~850	
β	TB1	750~800	1150~950	1050~850	1000~900



(续)

类型	合金牌号	$\alpha+\beta$ 转变温度 (°C)	锻造温度范围 (°C)		
			铸锭开坯	坯料自由锻	模锻
$\alpha+\beta$	TC4	960~1000	1050~850	950~500	980~800
	TC5	930~980	1050~900	950~800	1000~850
	TC6	930~980	1050~900	1000~850	1030~850
	TC8	970~1000	1100~900	1020~850	1040~850
	TC9	970~1000	1150~900	970~850	
	TC10	930~960	1150~900	970~850	

3.1.5 许用变形程度和临界变形程度 (表 3-9-2)

表 3-9-2 钛合金的允许变形程度和临界变形程度

合金牌号	锻粗最佳变形程度 (%)		模锻允许变形程度 (%)		模锻临界变形程度 (%)		
	压力机、平锻机	模锻锤	模锻锤、压力机	高速锤	压力机上挤压	模锻锤、压力机	高速锤
TA2, TA3, TA4, TA5	40~50	40~50	80~85	90	90~95	2~12 >85	1~15 >90
TA6, TA7, TC1, TC2, TC3, TC4, TC5	40~70	40~70	80~85	90	90~95	2~12 >85	1~15 >90
TC6, TC7, TC8, TC9, TC10	40~60	40~60	80~85	90	90~95	2~12 >85	1~15 >90
TB1, TB2	40~70	30~50					

3.1.6 钛合金的 β 锻造法

β 锻造法就是将 $\alpha+\beta$ 相钛合金的毛坯加热到高于 $\alpha+\beta/\beta$ 转变温度 55~160°C, 用大变形量进行锻造。这种方法可扩大锻造温度范围、提高塑性、增强充模能力、降低变形抗力, 而又不损害使用性能。温度上限要防止晶粒长大和相的偏析。为了得到较小的晶粒和把 β 相中的等轴 α 相控制在 20%~30% 以内, 每次变形量尽量取大些, 最后一次变形量不应 $<50\%$ 。

对于含有大量使 β 相稳定元素 (如 Mo 等) 的钛合

金, 如锻后强度要求较高, 不宜采用 β 锻造法。对于含有中等程度使 β 相稳定元素 (如 V 等) 的钛合金, 如加热后施加大变形量, 可采用 β 锻造法。对于含有少量使 β 相稳定元素的钛合金, 完全可以进行 β 锻造。

3.1.7 切边、冷却与清理

大型小批锻件在室温下用机械加工或锯床切边; 小型大批锻件用切边模在 600~800°C 范围内热切。

在干砂箱中、石棉板上覆盖干砂或石棉板中缓慢而均匀地冷却。

锻件上污物可在碱溶液中进行充分洗涤, 然后用水洗净。氧化层可用喷砂法, 也可用化学腐蚀法 (在 HNO_3 的质量分数 15%~40% 和 HF 的质量分数 1%~2% 的溶液中浸泡, 温度为 20~40°C, 时间为 1~2min) 清除。

3.2 镍合金锻造

镍合金无同素异晶转变, 因此零件晶粒度大小及均匀度与变形程度关系甚大。为使组织均匀, 既要使变形均匀, 又要使每火变形量不低于临界变形程度, 而这类合金的临界变形程度是在 0.5%~20% 较广的范围内。

3.2.1 备料

中型坯料 ($>\phi 25mm$) 一般采用片砂轮切割; 小型坯料采用剪切下料。铸锭在加热和锻造前应予以剥皮。

3.2.2 加热

大件加热一般采用火焰加热炉, 小件加热用电阻炉。炉温的精确度应在 $\pm 10^\circ C$ 范围内。分预热、加热、均热三个阶段进行。由于这类合金 (又可称为耐热合金) 的锻造温度范围窄, 要求取料迅速, 尽量缩短辅助时间, 加大每火的变形量, 减少锻造火次。常用耐热合金的锻造温度范围如表 3-9-3。

表 3-9-3 耐热合金锻造温度范围

合金牌号	加热温度 (°C)	终锻温度 (°C)	整修温度 (°C)
GH36	1150~1180	900	850
GH132	1090~1110	900	850
GHI35	1110~1120	900	850
GH33	1170~1190	900	850
GH37	1140~1160	1000	900



3.2.3 锻造工艺

自由锻可在锤上或水压机上进行。严格控制最后一火的加热温度、保温时间和变形量。

拔长时,如在锤上,则用平砧;如在水压机上,则用型砧。砧子应有较大的圆角。铸锭拔长时,开始要轻击,待铸态组织适当破碎后可增大变形量。在同一部位不要连击。

锻粗时,锻粗台表面应光滑,采用润滑。对 D/H 较大的坯料,可采用叠锻或在坯料两端加碳钢软垫;对特别低塑性的高温合金,亦可采用包套锻粗。

耐热合金亦适合于在压力机上模锻。要求坯料表面光滑、形状规整。制坯、预锻和终锻,分别安排在不同的设备上,每一工步都要重新加热。锻模设计要考虑锻件变形量应大于临界变形程度。锻模表面应很光滑,保证变形均匀。要保证每一个锻件的锻造条件都是相同的(例如预锻两锤、终锻一锤)。锻模用钢可采取 $4\text{Cr}5\text{W}2\text{VSi}$, $45\text{Cr}2\text{W}2\text{MoV}$ 等,保证寿命较长。

不论自由锻或模锻,所用工具和模具均需预热,预热温度不低于 250°C , 均需使用润滑。

3.3 其他高合金钢锻造

凡是含铬、镍、钼、钨、钽、钒、锰成分较高的合金钢,都在不同的温度下出现塑性不同的相。弥散的碳化物或金属间化合物会使塑性有所下降;奥氏体钢中的 α 相,铁素体中的 γ 相,沿晶界上呈骨架状、块状和粗针状的脆性相、低熔点相等,显著引起钢的塑性下降和变形抗力增大。它们在高温下晶粒急剧长大。随着合金元素种类和含量的增加,导热性能也显著下降,在高温下易出现低熔点物质或称之为 δ 相。因此,给锻造工艺带来一系列难点,随之也规定了一系列的严格要求。

这类合金的坯料,在锻前加热时必须预先“剥皮”,并在具有保护气氛的电阻炉或真空炉中加热,严格控制加热速度和加热温度,坯料在高温下停留时间不可长。始锻温度较一般结构钢低,终锻温度较一般结构钢高,一般结构钢的始—终锻温度差可达 $350\sim 400^\circ\text{C}$, 而高合金钢的始—终锻温度差仅为 $100\sim 200^\circ\text{C}$ 。严格要求采用相应速度的锻压设备,严格控制总变形量、每一火的变形量和工步间的时间。要求每一锻件均有相同的锻造条件。使用的工、模具必须预热,锻后冷却应缓慢。总之,对这类合金的锻造,要求操作人员具有较

高的综合素质。

对于新的难变形的合金的锻造,一般先在实验室中取得相应参数的数据,作为指导生产的依据,而后在实践中再加以完善。

4 非铁金属锻造^{[31][32]}

4.1 铝合金锻造

凡是用低碳钢能够锻出的各种形状的锻件,亦可用铝合金锻出,可以对铝合金进行自由锻、模锻、墩锻、辗锻、挤压、扩孔。铝合金的塑性受合金成分和锻造温度的影响较大,有些合金受变形速度的影响,当静变形时的塑性高,在动冲击变形时的塑性低。高强度铝合金,随着温度的下降,变形抗力剧烈增大,为了减少变形抗力,应在较高温度下结束锻造,并给以较大的变形程度。

4.1.1 备料

铸锭用于自由锻制造锻件或锻坯,在锻前须经均匀化处理。

锻坯用于制造大型模锻件。

挤压坯(棒材和型材)用于模锻。挤压坯中有粗晶环和挤压效应(强烈的各向异性)存在。为消除挤压效应,需在挤压前对铸锭进行高温均匀化处理,挤压后进行反复墩拔。对要求性能高的锻件,必须对挤压坯进行“剥皮”。

铝合金下料常用锯床、车床、铣床,有时也用剪床。不能用砂轮切割。

4.1.2 加热与锻造温度范围

多用电阻炉加热。炉内最好有强迫空气循环装置。坯料入炉前应除去油垢及其他污物。炉温准确度应在 $\pm 10^\circ\text{C}$ 范围内。锻造上限温度不能偏高,以免有害气体(氢气等)损坏毛坯表面质量或出现过热过烧。铝合金可以高温装炉。加热时间一般比碳钢长,以保证强化相充分溶解而获得均匀的组织。加热速度以 $1.5\sim 2.0\text{min}/\text{mm}$ 计算(合金化程度高的取大值、大件取大值)。设备发生故障时,铝合金可以在 $430\sim 470^\circ\text{C}$ 下保温 $6\sim 7\text{h}$;但含镁量高的铝合金不得超过 4h 。

常用铝合金的锻造温度范围见表 3-9-4。要特别注意,高强度铝合金(如 LC4)的始锻温度稍有偏高就引起过烧;其终锻温度不得低于再结晶温度,以免导



表 3-9-4 常用铝合金锻造温度范围

合金牌号	锻造温度范围 (°C)	合金牌号	锻造温度范围 (°C)
LF2	500~380	LD2	500~380
LF21	500~380	LD5 (铸态)	450~350
LY2	450~350	LD5 (变形)	475~380
LY11	475~380	LC4 (铸态)	430~380
LY12	460~380	LC4 (变形)	430~350

致变形抗力增高和加工硬化。

4.1.3 许用变形程度 (表 3-9-5)

表 3-9-5 常用铝合金的许用变形程度 (%)

合金牌号	LF2	LF21	LY2	LY12	LD2	LD5	LC4	
锤上	铸态	80	80	40	40	80	40~ 50	30~ 40
	经预 变形	80	80	50~ 70	50~ 70	80	50~ 65	50~ 60
压力机上	铸态	80	80	40~ 50	40~ 50	80	>50	40~ 50
	经预 变形	80	80	80	80	80	80	80

4.1.4 锻件设计和锻模设计

基本与钢锻件相同。但由于高温摩擦系数高、流动性差、裂纹敏感性强，应注意下列问题：

选取分模面时，不仅要考虑金属充满模膛、起件、模锻变形力等因素，特别要考虑变形均匀和流线分布。对于形状复杂的锻件要采用多套模具、多次模锻，以便由简单形状毛坯逐步过渡到复杂形状的锻件。不宜采用剧烈变形的滚挤制坯工步。成形困难的部分，在锤上模锻时放在上模；在压力机上模锻时放在下模。

锻件的圆角半径一般比钢件大些，小型模锻件为 1~2mm；大型件为 2~5mm。

模锻斜度通常取 5°~7°；有顶出机构装置的可取 1°~3°。

锻件收缩率为 1%；薄件为 0.7%。

飞边桥口高度比钢件大 30%。

模膛表面粗糙度 $R_a=0.2\sim 0.1\mu\text{m}$ ，精度一般应在 3~5 级范围内。

4.1.5 模具预热与润滑

铝合金在锻锤和高速压力机上锻造时所用工具和锻模，均需预热至 250°C 以上；在低速压力机上则需预热至 400~450°C。预热用煤气喷头、喷灯或电阻加热器，尽量不采用烧红的钢块。

采用水与胶状石墨混合物为润滑剂。对形状复杂的锻件，加入少许肥皂；也可以用机油加石墨，质量配比一般为 (90~80):(10~20)，对于大件和形状简单的模锻件质量配比为 (80~70):(20~30)。

4.1.6 精压

铝合金精压可在三种状态下进行：淬火、时效前；淬火后、时效前；淬火、时效后。

精压一般在精压机上或机械压力机上进行，也可以在带有限程装置的螺旋压力机上进行。

精压分平面精压和体积精压两种。

平面精压中的突出问题是解决平面突起。解决方法为：冷精压前预先热精压一次；多次精压，每次精压前均应退火；选用淬硬性高的材料制作精压平板；利用润滑剂控制金属流动，最好是用石蜡。

体积精压要求模膛尺寸比普通锻模更精确（公差在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下），表面粗糙度更低 ($R_a < 0.1\sim 0.2\mu\text{m}$)。坯料表面及端面必须车削，表面锈蚀点应进行刮研或化学清理。精压次数一般在两次以上。上步压下量（每次精压余量）取 0.15~0.5mm，最后一次必须取小值。是否需加热，视具体材料而定。采用石蜡或蜂蜡润滑，模膛上只留一层薄膜。

精压模材料一般用 Cr12Mo, Cr12V，其硬度为 54~58HRC。

4.1.7 设备选用和操作

形状复杂和小型锻件采用模锻锤；形状简单和中型锻件采用热模锻压力机；大型锻件采用模锻水压机。所需设备能量要比同样尺寸的碳钢件大 30% 左右。

操作时开始轻击几下，然后逐步加重打击。

除超硬铝合金锻件外，铝合金锻件的切边都在冷状态下进行。大型模锻件采用锯床切边。铝合金模锻件易于产生折叠、裂纹、起皮等缺陷，必须及时清除，以免再次模锻时继续发展而报废。锻件上润滑剂的残渣、氧化薄膜和暴露在表面上的缺陷应予以清理，常用的方法是化学清理，如表 3-9-6 所示。



表 3-9-6 铝合金锻件化学清理工艺

顺序	清理液成分	工作温度 (C)	清理时间 (min)	目的
1	Na ₃ PO ₄ 50g, Na ₂ CO ₃ 50g, Na ₂ SiO ₃ 30g, 水 1L	60~70	2	除油
2	水	60~80		漂洗
3	NaOH 或 KOH 50~70g, 水 1L	50~70	3~20	蚀洗
4	水	20	3~5	漂洗
5	HNO ₃ 1.4~1.0L, 水 1L	20	3~10	光洗
6	水	60~80	洗净为准	漂洗

4.1.8 锻件缺陷及消除方法 (表 3-9-7)

表 3-9-7 铝合金锻件缺陷及消除方法

常见缺陷名称	消除方法
折叠 (折纹)	准确制坯, 适当加大坯料 正确放置坯料, 及时检查模具 适当加大圆角半径 认真检查和消除原材料表面缺陷, 不使之过热
裂纹	热透, 由轻到重逐步打击 避免在一处连续重击 锻打时不得低于终锻温度 严格检查原材料, 采用合格坯料 合理制坯, 使与终锻模膛尽量相近
沿分模面的裂纹	不采用内部有裂纹或分层的原材料 严格遵守加热规范 加厚飞边 加大出口处的圆角半径 控制打击能量
穿筋 (射穿)	在锻件允许的情况下, 减少筋肋宽度差, 增大筋肋的过渡半径 保持一定粗糙度, 稍加大圆角半径 热透 润滑剂适量, 涂敷方法正确
粗大晶粒	预先车去粗晶环, 或当粗晶层厚度不大时, 锻后磨掉 在较高的终锻温度下以较大的变形程度结束锻造

4.2 镁合金锻造

由于镁合金的塑性对温度、变形速度、变形程度及

应力状态等变形条件十分敏感, 所以它属于低塑性合金。镁合金的锻压虽与铝合金有相似之处, 但也有它的某些特点。

4.2.1 锻造温度范围和许用变形程度

镁合金的锻压温度范围比铝合金还要窄。由于镁合金对变形速度敏感, 在锤上及压力机上的锻造温度范围和许用变形程度, 都有明显差别。表 3-9-8 给出镁合金的锻造温度范围和许用变形程度。

表 3-9-8 镁合金的锻造温度范围和许用变形程度

合金牌号	锻造温度(C)		许用变形程度(%)		合金的塑性
	锤上	压力机上	锤上	压力机上	
MB1	320~500	320~500	80~85	85~90	高
MB8	350~480	350~480	70	70~80	高
MB2	350~425	350~450	30	80	中
MB5	325~375	350~480	20~30	60	中下
MB7	不宜锤上锻	320~380	—	25~30	低
MB11	300~350	300~375	25~30	50~60	低
MB14	390~450	390~480	50~70	80	中
MB15	320~410	280~400	30~40	90	中

4.2.2 备料

镁合金下料常用的设备是圆盘锯、车床或专用的快速端面铣床。不采用剪床下料。一般是在冷状态下进行。

由于镁合金屑易燃, 下料速度应缓慢。为不使表面损坏, 下料时用橡皮或牛皮等软垫将毛坯夹住。为避免对镁合金腐蚀, 切削时禁用冷却液。

4.2.3 加热

除了与铝合金的加热相同外, 在加热装料时, 镁合金毛坯与加热元件不得接触, 最好在电阻丝旁装有保护板。坯料在炉内不得堆放, 各件之间保持一定距离。坯料装炉必须在炉子预热后再进行。

4.2.4 锻造要点及润滑

镁合金的流动性差, 只适用于单型槽模锻。对一些形状复杂、尺寸较大的模锻件, 可以采用自由锻制坯, 最后进行单型槽模锻。不宜采用自由锻粗和平砧上拔长。

形状简单、变形程度不超过 35% 的锻件, 可一次模锻成形; 形状复杂、变形程度超过 40% 的锻件, 应



分成两次或多次成形。

通常用矿物油(机油或汽缸油)加细石墨粉,质量配比为80:20;或用油酸加石蜡,质量配比为90:10,不论用那一种润滑剂,重要的是涂敷均匀,不得有空白或堆积处。

4.2.5 切边

由于镁合金塑性低,拉应力特别敏感,切边时产生裂纹常常成为锻造的关键问题。

对于批量不大、形状简单或尺寸大的锻件,采用带锯切割毛边,这样可以省去制造切边模。对于其他锻件,为了避免在低温下切边而产生切边拉裂和在高温下切边产生切边拉伤,应在200~300℃间进行热切。切边模的间隙要小。

塑性特别低的镁合金,采用两次切边。第一次不切净,留6~10mm的飞边,以保证切边裂纹不致深入锻件内部。第二次切边是在特制的、上下模都有刃口的、互咬式切边模上进行,靠上下刃口对齐切净(见图3.9-1)。

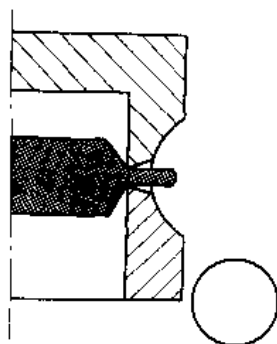


图3.9-1 互咬式切边模示意图

4.2.6 精压

镁合金锻件的精压通常在锻造温度范围内进行。为了提高力学性能和精度,在230~250℃下进行半热冷作硬化精压,变形程度应在10%~15%范围内。

4.2.7 防锈蚀处理

镁合金防腐蚀能力很低,必须做氧化处理。为此,首先要除油除垢,然后酸洗清理。表3.9-9给出镁合金化学清理工艺。

为防止锻件表面锈蚀,对镁合金一般采用化学处理(氧化处理)。常用的镁合金锻件化学氧化工艺见表3.9-10。

锻件氧化后如果不能及时加工,需涂油封存。

表3.9-9 镁合金化学清理工艺

顺序	清理液成分	工作温度(℃)	清理时间(min)	目的
1	Na ₃ PO ₄ 40~60g, NaOH 10~15g, Na ₂ SiO ₃ 20~30g, 水 1L	70~90	10~15	除油
2	水	60~80		漂洗
3	HNO ₃ 0.1~0.3L, 水 1L	20	10~60s	蚀洗
4	水	20		漂洗
5	Cr ₂ O ₃ 100~150g, NaNO ₃ 20~30g/L	15~40	5~15	光洗
6	水	60~80		漂洗

表3.9-10 镁合金锻件化学氧化工艺

编号	溶液成分	含量(g/L)	温度(℃)	时间(min)	膜层颜色
1	K ₂ Cr ₂ O ₇ HNO ₃ NH ₄ Cl	40~55 90~120 0.75~1.25	70~80	0.5~2.0	草黄色到棕色
2	K ₂ Cr ₂ O ₇ K ₂ Al ₂ (SO ₄) ₄ ·24H ₂ O 醋酸(60%)	30~50 8~12 5~8	15~30	3~15	金黄色到棕褐色

4.3 铜合金锻造

锻造黄铜的锌的质量分数一般为32%以下,锌的质量分数超过32%,则塑性很快下降。铝青铜铝的质量分数在8%~10%时,塑性最好;若铝含量增高,塑性显著下降。

铜合金在中温区有低塑性区存在(表3.9-11),在此温度下锻造易形成裂纹,还易形成折叠和内部组织不均。

表3.9-11 铜合金低塑性温度区间

牌 号	温度区间(℃)
H96	650~750
H90, H80	500~600
He8	300~650
H62	550~600
HPb59-1	550~650
HPb64-2	350~650
QA19-4	200~700
QPe2	200~600
BZn45-20	330~670



4.3.1 加热

用普通加热钢料的火焰炉加热铜合金时,炉底预先垫上钢板,坯料放好后,三面用薄钢板覆盖,以免火焰直接喷射到坯料表面上而引起局部过烧。

4.3.2 锻造温度范围

铜合金锻造温度范围列于表3-9-12中。因终锻温度难以用颜色分辨,通常是用严格控制锻造时间来定。

表 3-9-12 铜合金锻造温度范围

类别	牌 号	锻造温度范围 (°C)	类别	牌 号	锻造温度范围 (°C)
普通黄铜	H90	900~700	特殊黄铜	HSi80-3	820~700
	H80	870~700		HA159-3-2	800~650
	H68	830~700		HA177-2	780~650
	H62	820~700	青铜	QA117	840~700
特殊黄铜	HPb60-1	800~650		QA19-2	900~700
	HPb59-1	800~650		QA110-3-1.5	850~700
	HSn62-1	820~650		QSi3-1	800~650
	HSn60-1	820~650		QBe2.5	750~650
	HMn58-2	800~650		QSn7-0.2	800~700
	HFe59-1-1	800~650	白铜	BZn15-20	940~810
HNi65-5	850~650	BMn40-1.5		1030~800	

4.3.3 工艺特点

铜合金的收缩率取1.3%~1.5%。模锻斜度最大取3°。铜合金一般采用单模膛模锻,形状复杂的件,可先用自由锻制坯,然后再模锻成形。

铜合金模锻件切边一般在室温下进行。但在室温

下发脆的铜合金和飞边过于肥厚的模锻件的切边,要进行热切,热切温度为420°C。

多数铜合金对变形速度并不敏感,可在压力机上或锤上锻造。对含铅量较高的铝黄铜、锡磷青铜和锰青铜来说,以在压力机上锻造为宜。

第10章 锻造设备^{[33][34][35]}

锻造设备主要用来完成自由锻、模锻、挤压等各种锻造工艺。按其工作原理可分为锤、液压机、机械压力机、螺旋压力机、回转成形设备等。

1 锤

1.1 工作原理

锤在工作时以其落下部分的动能来使锻件产生塑性变形。落下部分包括锤头、锤杆和活塞。落下部分在一定压力的蒸汽、压缩空气或液体驱动下回升到初始位置,依靠自重及压缩气体的双重作用下落并打击锻件。打击能量按下式计算:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{J})$$

式中 m ——落下部分质量 (kg);
 v ——锤头接触锻件时的速度 (m/s)。

1.2 蒸汽-空气自由锻锤 (图3-10-1)

用于生产中小批量自由锻件和胎模锻件。有三种结构型式。单柱式三面敞开,操作方便,但刚度较差,吨位0.5~1t。双柱拱式只能前后操作,刚度好,应用普遍,吨位1~5t。双柱桥式结构及占地均大,但砧座四面敞开,操作方便,目前使用不多,吨位3~5t。

常用蒸汽或压缩空气的压力为0.6~0.9MPa。锤



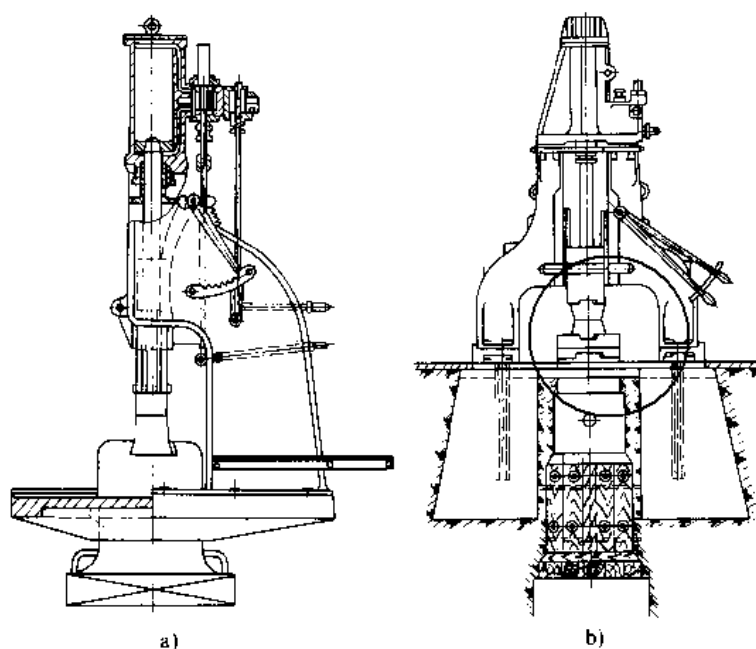


图 3-10-1 蒸汽-空气自由锻锤

a) 单柱式 b) 双柱式

头打击速度为 7~9m/s。可用改变锤头的提升高度及进汽压力来调节打击能量。用手柄直接操纵或借助液

锤的结构简单,但效率低,操作强度大,振动强烈,劳动条件差,对厂房结构和周围环境有不利影响。由于上述缺点,蒸汽-空气锤已有逐渐被淘汰的趋势。技术

重击等动作。砧座质量为落下部分质量的 15 倍左右。

参数见表 3-10-1。

表 3-10-1 蒸汽-空气自由锻锤技术参数

锻锤吨位 (t)	1	2	3	5	5
结构型式	双柱	双柱	双柱	双柱	桥式
最大打击能量 (kJ)	35.3	70.0	120.0	152.2	180.0
最高打击次数 (min ⁻¹)	100	90	90	90	90
锤头最大行程 (mm)	1000	1260	1450	1500	1728
锤杆直径 (mm)	110	140	180	205	205
立柱间距离 (mm)	1800	2300	2700	3130	4850
上砧面尺寸 (mm)	230×410	290×520	330×590	400×710	380×686
下砧面尺寸 (mm)	230×410	290×520	330×590	400×710	380×686
导轨间距 (mm)	430	550	630	850	737
砧座质量 (t)	12.7	28.4	45.8	68.7	75.0
总质量 (t)	27.6	57.9	77.4	120.0	138.5
外形尺寸 (长×宽) (mm)	3750×1500	4600×1700	5100×2630	6030×3940	6260×2600
地面上高度 (mm)	4880	3640	5380	7400	7510

1.3 蒸汽-空气模锻锤

用于中大批量锻件生产,可进行多模膛模锻。两个立柱直接安放在砧座上,用加簧螺栓联结,并与汽缸及其底板构成锤的封闭框架。配气阀控制压力气体驱动

落下部分,使其沿立柱导轨上下运动。锤头打击速度为 6~8m/s。砧座质量为落下部分质量的 20~25 倍。可完成摆动循环、压锤、轻击、重击等动作,用脚踏板或借助于液压(或气动)助力器操作。生产率较高,但工作中振动及噪声大。技术参数见表 3-10-2。



表 3-10-2 蒸汽-空气模锻锤技术参数

锻锤吨位 (t)	1	2	3	5	10	16
落下部分公称质量 (kg)	1000	2000	3000	5000	10000	16000
打击能量 (kJ)	25	50	75	125	250	400
锤头最大行程 (mm)	1200	1200	1250	1300	1400	1500
锻模最小闭合高度 (mm)	220	260	350	400	450	500
导轨间距 (mm)	500	600	700	750	1000	1200
锤头前后长度 (mm)	450	700	800	1000	1200	2000
锤座前后长度 (mm)	700	900	1000	1200	1400	2110
蒸汽压力 (MPa)	0.6~0.8	0.6~0.8	0.7~0.9	0.7~0.9	0.7~0.9	0.7~0.9
砧座质量 (kg)	20250	40000	51400	112547	233533	325852
地面上高度 (mm)	5051	5418	6035	6560	7460	7894
外形尺寸 (长×宽) (mm)	2380×1330	2960×1670	3260×1800	3700×2090	4400×2700	4500×2500
总质量 (kg)	31850	57900	77740	156340	311270	422087

1.4 对击模锻锤 (无砧座锤)

上锤头带动下锤头同时反向运动,两者对击使工件变形。打击时的振动不传到基础上,对地基和厂房结构无影响。比普通模锻锤的质量轻,可以做成打击能量很大的锤。机架刚度和导向精度较差,操作较不方便。承受偏心载荷能力较差,一般用于单模膛模锻。

1.4.1 钢带联动对击锤 (图 3-10-2)

蒸汽或压缩空气进入汽缸上腔,推动上锤头向下运动,通过联结上下锤头的钢带,带动下锤头作等速向上运动。返向时,蒸汽或压缩空气进入汽缸下腔,推动上锤头上升,钢带松动,下锤头靠自重下落到缓冲垫上。打击能量靠控制进气量和锤头行程来调节。钢带使

使用寿命一般为3~6个月,只用于中小型对击锤。

1.4.2 液压联动对击锤 (图 3-10-3)

锤的下部有三个彼此连通的液压缸。下锤头装在中间液压缸的大柱塞上。两侧液压缸的小柱塞与上锤头联结。当气体压力驱动上锤头向下运动时,两侧柱塞随之向下运动,将两侧液压缸中的液体压入中间缸,推动大柱塞和下锤头向上运动,实现两锤头反向对击。若两侧柱塞工作面积之和等于中间柱塞的工作面积,则上、下锤头的行程和打击速度相等。当气体压力驱动上锤头回程时,两侧柱塞随之上升,两侧缸压力下降,下锤头靠自重落下。液压联动工作可靠,避免了钢带易断的缺点,但结构较复杂。一般用于大中型对击锤。对击模锻锤技术参数见表 3-10-3。

表 3-10-3 对击模锻锤技术参数

打击能量 (kJ)	160	250	400	630	1000	1600
最高打击次数 (次/min)	45	45	40	35	30	25
导轨间距 (mm)	900	1000	1200	1500	1700	2000
锤头前后长度 (mm)	1200	1800	2000	2500	3700	5000
锤头行程 (mm)	2×650	2×650	2×700	2×800	2×900	2×1100
锻模公称闭合高度 (mm)	2×355	2×400	2×450	2×500	2×600	2×750
锻模最小闭合高度 (mm)	2×200	2×250	2×280	2×315	2×355	2×450
工作气体压力 (MPa)	0.7~0.9	0.7~0.9	0.7~0.9	0.7~0.9	0.7~0.9	0.7~0.9
每次蒸汽消耗量 (kg)	1.8	2.74	4.0	4.65		
顶出行程 (mm)					100	150
外形尺寸 (长×宽×高) (mm)	3000×3300 ×8400	2900×4000 ×9100	3320×5060 ×11600	6100×2500 ×16140		
总质量 (t)	101	149	300	435	940	



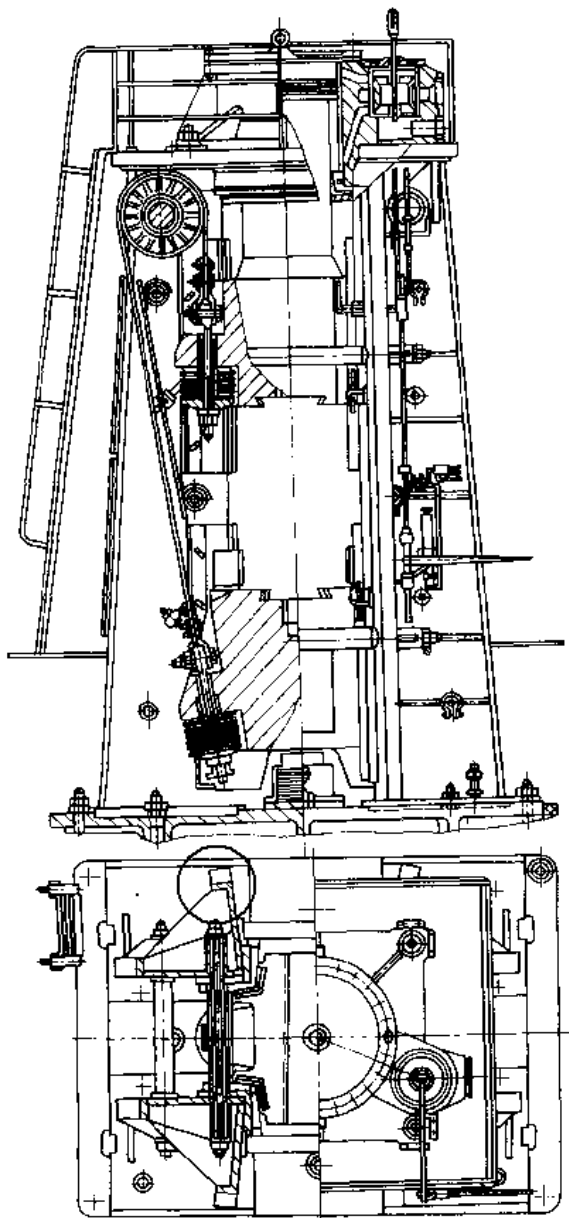


图 3-10-2 钢带联动对击锤

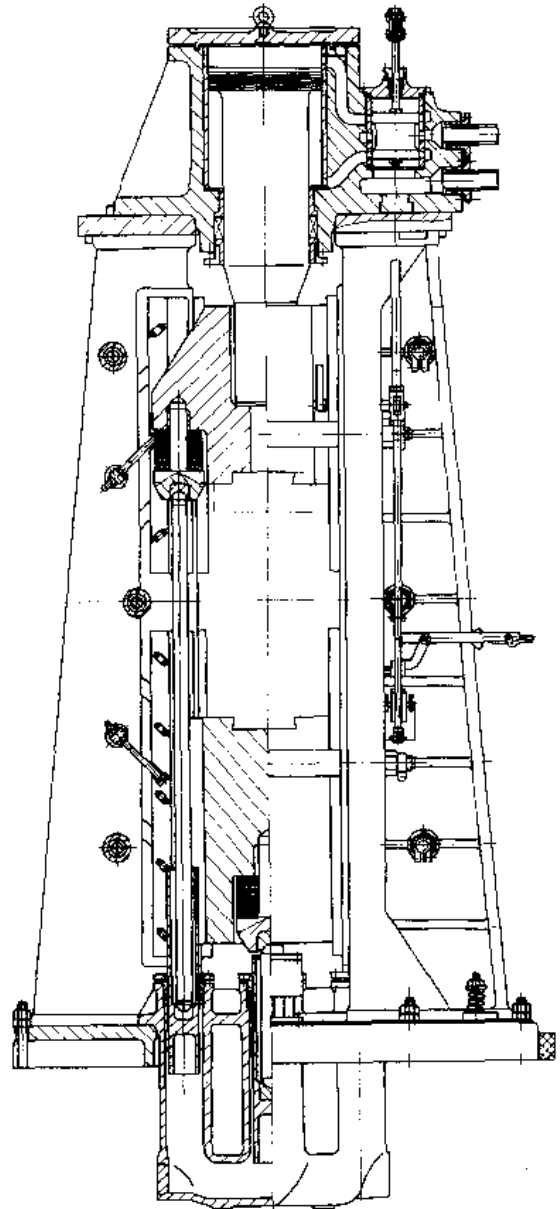


图 3-10-3 液压联动对击锤

1.5 空气锤

1.5.1 空气自由锻锤 (图 3-10-4)

用于中小批量的自由锻和胎模锻锻件生产。工作缸和压缩缸的上下腔通过旋阀配气机构分别连通。电动机通过传动系统及曲柄连杆机构带动压缩活塞上下运动,被压缩的空气经旋阀分别通入工作缸上下腔,带动工作活塞上下运动,打击锻件。可以完成悬锤、压锤、空行程、轻打、重打、单次打击或连续打击。空气自由锻锤技术参数见表 3-10-4。

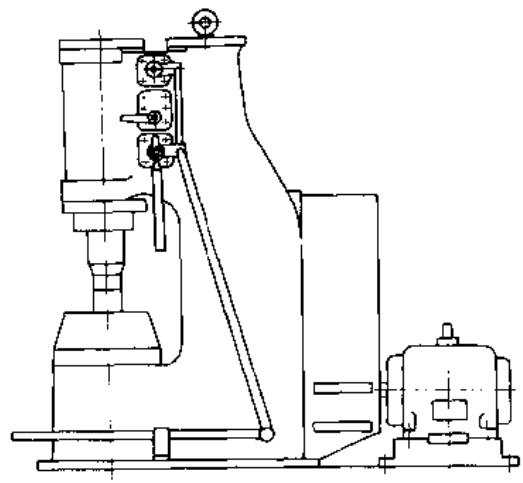


图 3-10-4 空气自由锻锤



表 3·10-4 空气自由锻锤技术参数

型 号	C41-75	C41-150	C41-250	C41-400	C41-560	C41-750
落下部分质量 (kg)	75	150	250	400	560	750
最大打击能量 (kJ)	1.0	2.5	5.3	9.5	13.7	19.0
最高打击次数 (min ⁻¹)	210	180	140	120	115	105
锤头最大行程 (mm)	350	380		700	600	835
工作缸直径 (mm)	240	330	385	470	510	600
上下砧面尺寸 (mm)	145×65	220×85	225×90	265×100	280×160 430×160	330×160
锤杆中心至锤身距离 (mm)	280	350	420	520	550	750
砧座质量 (t)		1.9	3.0	5.0	6.7	9.0
总质量 (t)	2.3	5.1	8.0	14.0	18.0	26.0
外形尺寸 (长×宽×地面上高) (mm)	1510×1480 ×1890	2390×1085 ×2150	2665×1155 ×2540	3300×1100 ×2740	3360×1490 ×2860	4010×1290 ×3175
电机功率 (kW)	7.5	15	22	30	40	55

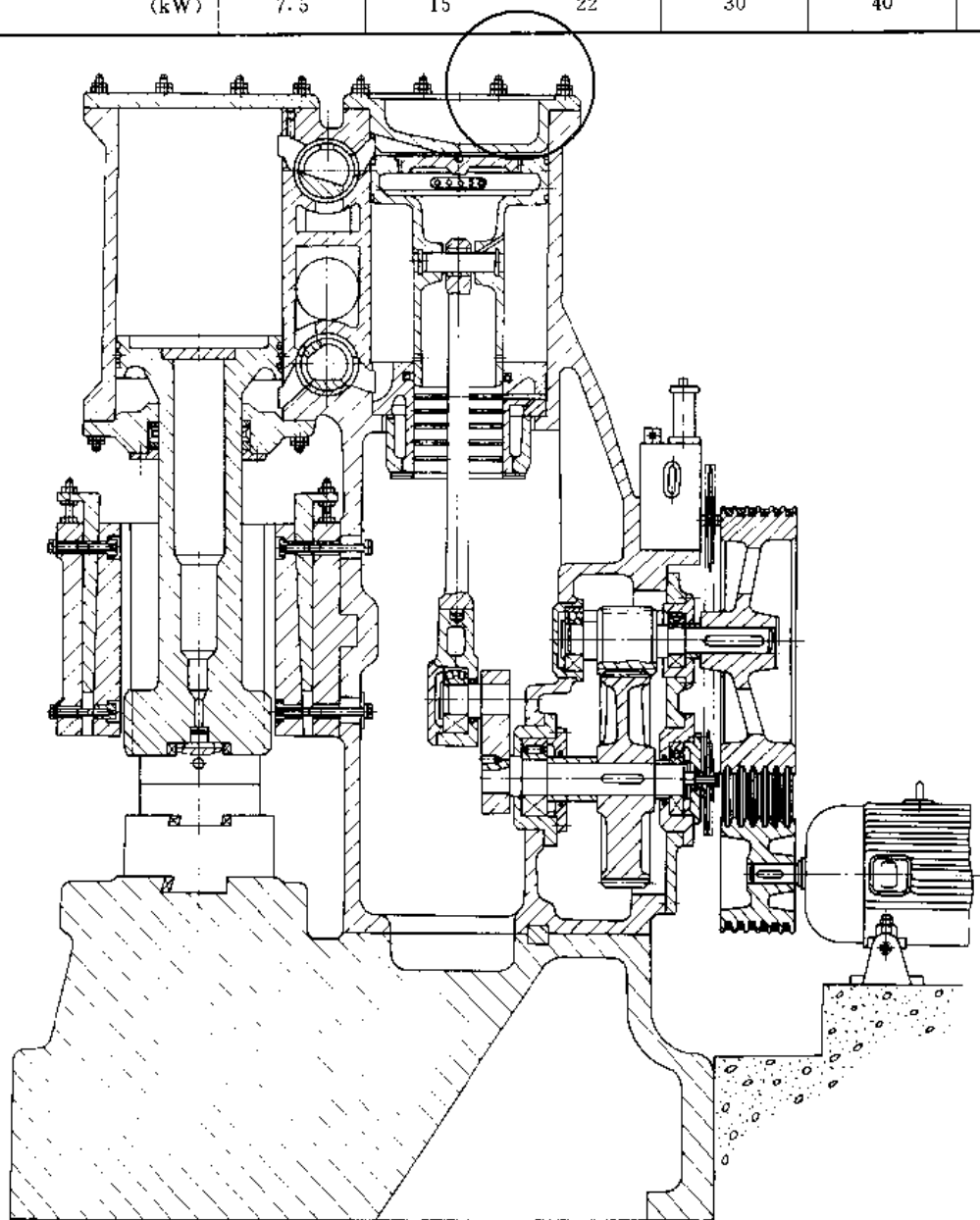


图 3·10-5 空气模锻锤



1.5.2 空气模锻锤 (图 3·10-5)

用于生产小型模锻件。机身与砧座用带弹簧的拉紧螺栓联结成一体,锤头在机身的导轨中运动,比空气自由锻锤提高了刚度和导向精度。砧座质量为落下部分质量的 20 倍。动作原理与空气自由锻锤相同。可完成空行程、摆动循环、压锤、单打、轻打、重打等动作。落下部分质量不超过 1000kg。

1.6 液压锤

液压锤是利用液压来提升锤头的一种新型锻压设备。液压锤的突出优点是效率高,可达 60%~70%,而空气-蒸汽锤的效率一般低于 20%。液压锤的动力源装置结构紧凑,占地面积小。但液压锤对液压元件的质量要求高,成本较高,维修比较复杂。日前有用液压锤来取代中小型蒸汽-空气模锻锤及改造自由锻锤的趋势。

液压模锻锤分为有砧座式及无砧座式两大类。有砧座液压模锻锤(图 3·10-6)的机架 2 与一般有砧座模锻锤相似。活塞杆下方与锤头联接,当压力油进入活塞下腔时,推动活塞杆与锤头向上运动,压缩气缸上腔的气体,进行蓄能。当活塞下方油腔快速放油时,锤头在自重及上腔气体压力作用下向下打击。其技术参数如表 3·10-5 所示。

微动式对击液压模锻锤的工作原理如图 3·10-7, 0.6MPa 的压缩空气被封闭于气缸的 C 腔内,压力油进入 A 腔,使锤头提升,并压缩 C 腔气体。当阀 1 打开时, A 腔内的压力油经阀 1 流入 B 缸,锤头在压缩空气及自重作用下,向下打击,锤身则在 B 缸油压及气缸 C 腔内气体向上压力作用下,微动上跳,产生对

击。微动式对击液压模锻锤的技术参数见表 3·10-6。

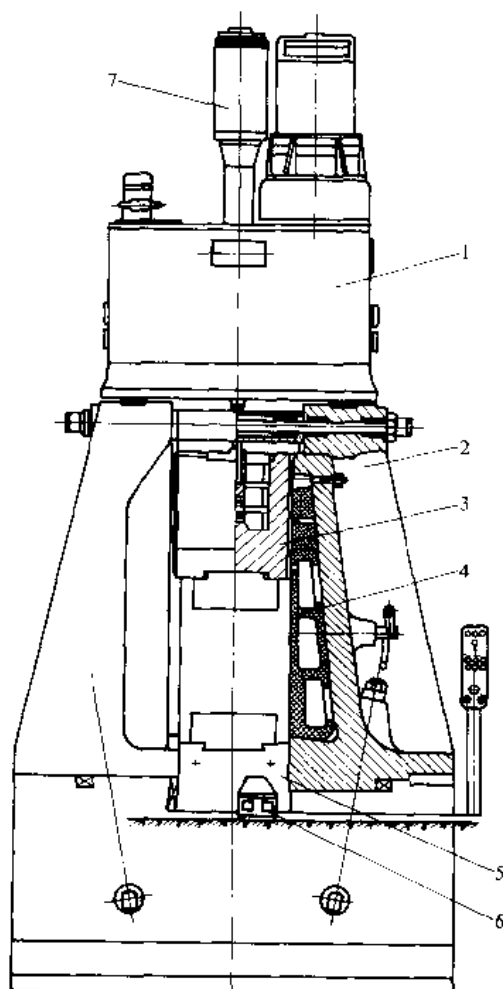


图 3·10-6 有砧座液压模锻锤
1—液动力头 2—机架 3—锤头 4—导轨
5—下模座 6—操纵装置 7—气缸

表 3·10-5 有砧座液压模锻锤技术参数

型 号	063	125	160	315	630	1250
打击能量 (kJ)	6.3	12.5	16	31.5	63	125
最大行程 (mm)	630	700	700	800	900	1100
锤头质量 (kg)	630	1100	1350	2500	5000	9000
导轨间距 (mm)	420	500	525	700	825	1000
锤头前后尺寸 (mm)	430	500	500	600	870	1000
打击次数 (次/min)	83	78	75	67	58	49
顶出器顶出力 (kN)	100	100	100	200	200	300
顶出器行程 (mm)	125	125	125	150	150	150
砧座质量 (kg)	9000	15500	19000	34000	70000	125000
总质量 (kg)	21500	31500	35500	64000	115000	190000
总高 (mm)	5130	5460	5560	6650	8000	9800
电机功率 (kW)	16	24	28	50	90	2×90



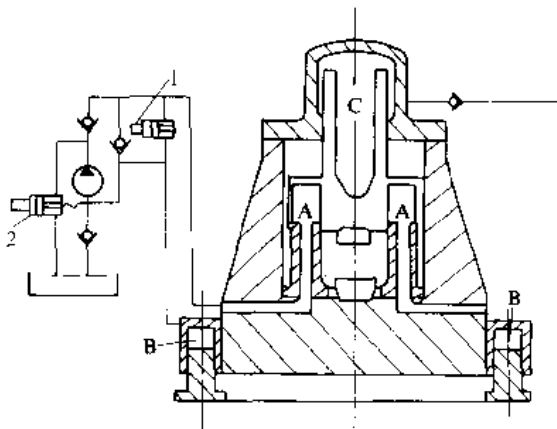


图 3·10-7 微动式对击液压模锻锤
A—回程油缸 B—联通缸 C—工作气缸
1、2—液压阀

利用液压力头来对蒸汽—空气自由锻锤进行技术改造，有很好的节能效果。图 3·10-8 是改造后的 3t 自由锻锤。

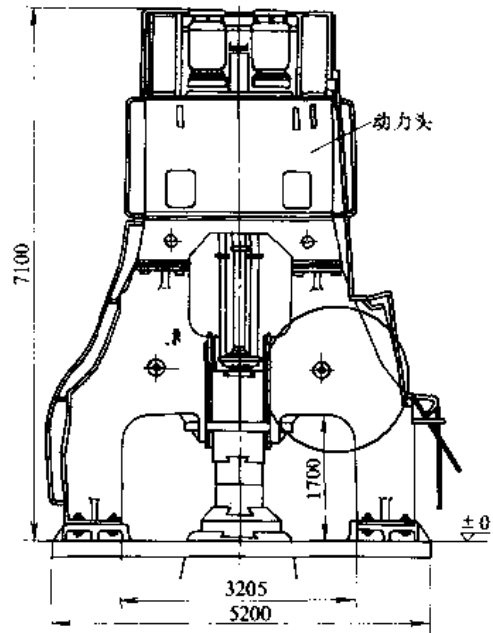


图 3·10-8 具有液压力头的 3t 自由锻锤

表 3·10-6 微动式对击液压模锻锤技术参数

型 号		KJH2	KJH4	KJH8	KJH16
打击能量	(kJ)	20	40	80	160
锤头质量	(kg)	650	1700	2500	
最大行程	(mm)	400	500	600	850
机身最大上跳量	(mm)	25	32	45	
打击次数	(次/min)	40~60	40~100	40~80	40
最小闭合高度	(mm)	160	350	450	
锻模工作面积	(mm)	200×450	266×600	314×710	456×1000
液体工作压力	(MPa)	16	16	16	
总质量	(t)	12	29	44	120
主电机功率	(kW)	45	90	135	

1·7 高速锤

打击速度达 18~20m/s。适用于强度高、塑性低、锻造温度范围窄、形状复杂的金属零件的精锻，一般为单模膛模锻。高速锤体积小、质量小、振动小，但锻模寿命低。

1·7·1 悬挂式高速锤 (图 3·10-9)

高压氮气或空气通入工作缸，但 A 室气压比 B 室低，使活塞连同锤杆、锤头悬挂在图示位置。打击时，启动阀 1 切换，A、B 两室连通，A 室气压急增，使活塞连同锤杆、锤头高速下落。同时，机架 7 在 A 室气

压的反作用下向上运动，上下模对击。回程时，回程缸把活塞推入上盖的空腔内，起动阀切换，A、B 两室不再连通，回程缸复位，活塞及锤头因自重略降，A 室气压降低，活塞重新处于悬挂状态。

1·7·2 快放油式高速锤 (图 3·10-10)

活塞在压力油作用下处于图示上悬位置。打击时，C 孔通高压油路，B 孔通低压油路，A 孔高压油路切断，快放油阀 6 下降，排油口 5 开启，F 腔油压迅速降低，E 腔内高压气体膨胀，推动活塞连同锤杆、锤头高速下落，同时机架 7 在气压反作用下向上运动，上、下模对击。打击后，B 孔改通高压，C 孔改通低压，快放



油阀 6 上升, 封住排油口 5。A 孔接通高压油路, 推动活塞等上升。在活塞上升的任一高度上, 均可开始打击, 以获得不同的打击能量, 也可以快速连续打击。

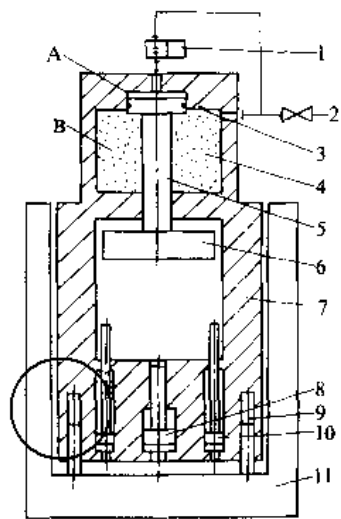


图 3-10-9 悬挂式高速锤

- 1—启动阀 2—高压气源 3—活塞密封圈
- 4—工作缸 5—锤杆 6—锤头 7—机架
- 8—顶出活塞 9—隔振缸 10—回程缸
- 11—机座

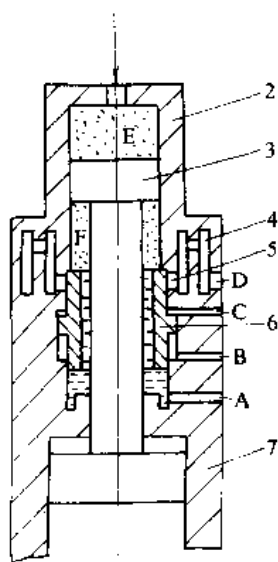


图 3-10-10 快放油式高速锤

- 1—高压气源 2—工作缸 3—活塞 4—中间油箱
- 5—排油口 6—快放油阀 7—机架

2 液压机

液压机按巴斯加原理工作, 传动介质用乳化液

或油, 压力一般为 20MPa 或 32MPa, 也有用到 50~100MPa 的超高压。液压机的特点是工作空间及行程大, 在全行程中都能产生最大压力, 可以较长时间保压, 行程速度调节方便, 传动平稳, 结构比较简单。

2.1 传动型式及结构分类

2.1.1 传动型式

1. 泵直接传动(图 3-10-11) 由液压泵将高压液体直接供给各个液压缸。空程时低压液体由充液罐经充液阀进入工作缸, 回程缸的液体经分配器排回液箱。工作行程时, 泵将高压液体经分配器送入工作缸, 回程缸继续排液。回程时, 工作缸卸压, 泵将高压液体经分配器送入回程缸, 工作缸内液体排回充液罐。充液罐内压力为 0.4~0.8MPa。泵直接传动的特点是: 泵供给的液体压力随工件变形抗力而变化, 传动效率较高。活动横梁的行程速度取决于泵的供液量, 而与工件变形抗力无关。泵和电机的参数应能保证液压机所需的最大速度与最大压力。一般应用于中小型液压机。

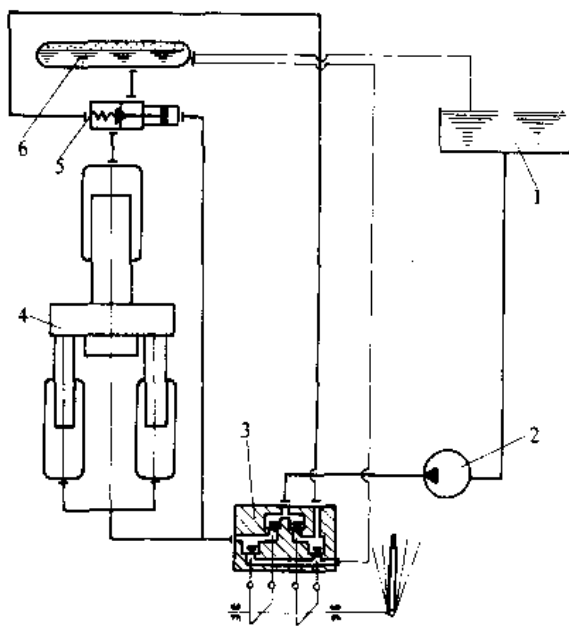


图 3-10-11 泵直接传动示意图

- 1—液箱 2—泵 3—分配器 4—液压缸
- 5—充液阀 6—充液罐

2. 泵-蓄势器传动(图 3-10-12) 在泵直接传动系统中, 加入一组蓄势器。蓄势器由高压气罐及高压液罐组成, 用以贮存高压液体, 用充满气罐的高压气体来



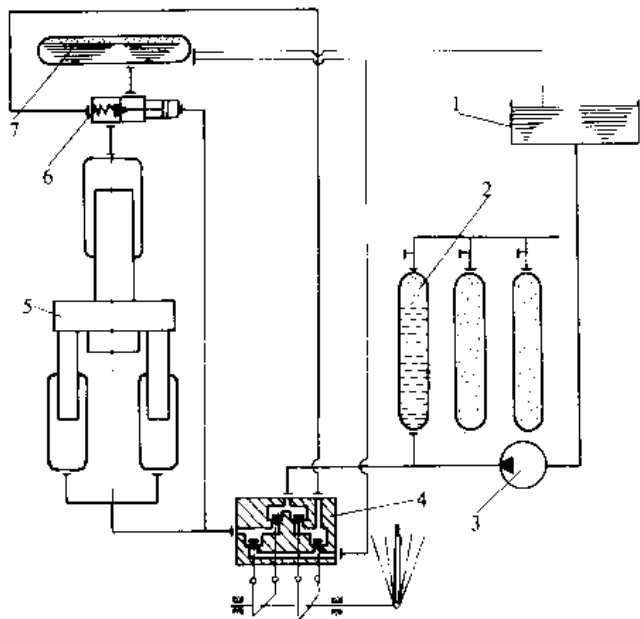


图 3·10-12 泵—蓄势器传动示意图

- 1—液箱 2—蓄势器 3—泵 4—分配器
- 5—液压机 6—充液阀 7—充液罐

保压。当液压机工作时，由泵及蓄势器同时供给高压液体，因此在短时间内可以供给大量高压液体。当液压机不工作时，泵打出的高压液体贮入蓄势器，用以平衡泵的负荷。泵和蓄势器供给的液体压力保持在罐内高压气体压力波动值范围内，可认为变化不大，与工件变形抗力无关。活动横梁的工作行程速度随工件变形抗力的增加而减小。多用于短时间内要求供应大量高压液体的大中型液压机中。当需要供给液压机以大于32MPa的超高压工作液体时，采用增压器增压。

2·1·2 结构分类

小型液压机常采用C型单臂式机架，三面敞开，操作方便，但刚度较差。最常见的是三梁四柱式立式结构，它由四个立柱与上、下横梁组成一个刚性封闭框架，承受全部工作载荷。在大型模锻液压机中，由于工作台面大，有采用六柱式或八柱式框架结构的。快锻液压机中，由于行程速度及工作频率较高，常采用下拉式结构，以降低液压机的重心。一般液压机采用立式结构，挤压液压机则常采用三柱或四柱卧式结构。

2·2 锻造液压机

主要用于各种金属的自由锻造。8000kN以下的小型锻造液压机采用C型单臂式机架（图3·10-13）。图中工作缸的柱塞固定于上小梁中，工作缸在导轨内

上下运动。上小梁2用四根立柱1固定于机架上。机架为铸钢或钢板焊接的整体箱形结构，回程缸也固定于机架上方。大中型锻造液压机采用三梁四柱式结构（图3·10-14）。工作缸安装于上横梁中，分单缸、三缸及多缸，以不同数目的工作缸进行工作时，可得到不同级别的压力。回程缸安装在上横梁或下横梁上。吨位大的锻造液压机，由于活动横梁质量大，为了使它在空程向下时平稳下降，可设置平衡缸。活动横梁的上部与工作缸柱塞塞相联结，两侧与回程缸及平衡缸的柱塞或拉杆相联结，下表面上固定上砧块。锻造液压机一般在下横梁上设置移动工作台，以便于翻转工件、多砧锻造或换

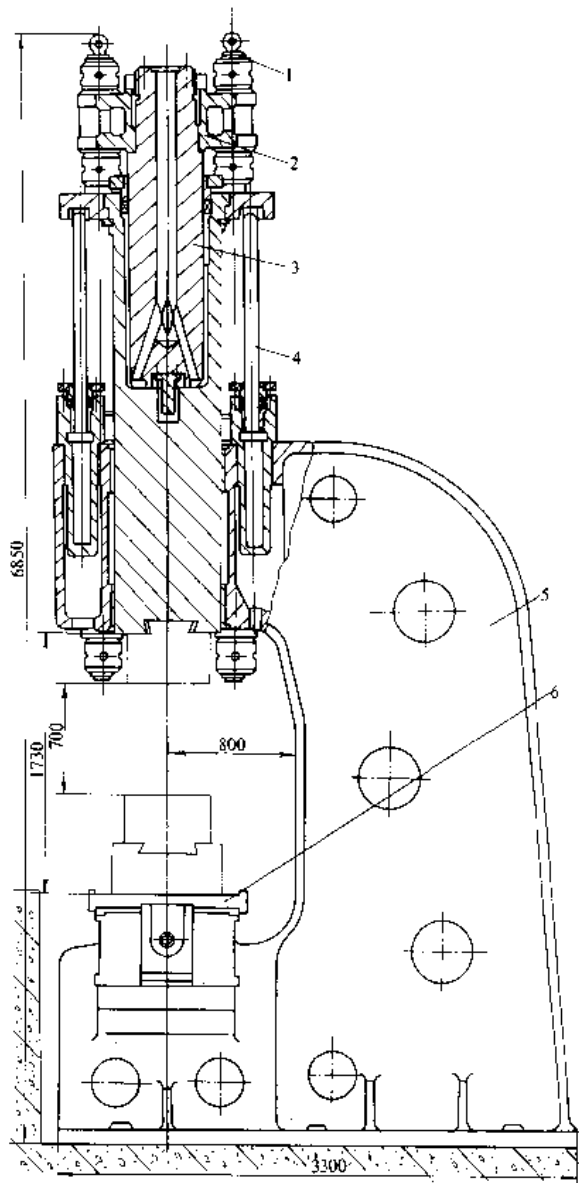


图 3·10-13 单臂式锻造液压机

- 1—立柱 2—上小梁 3—工作缸 4—回程缸
- 5—机架 6—移动工作台



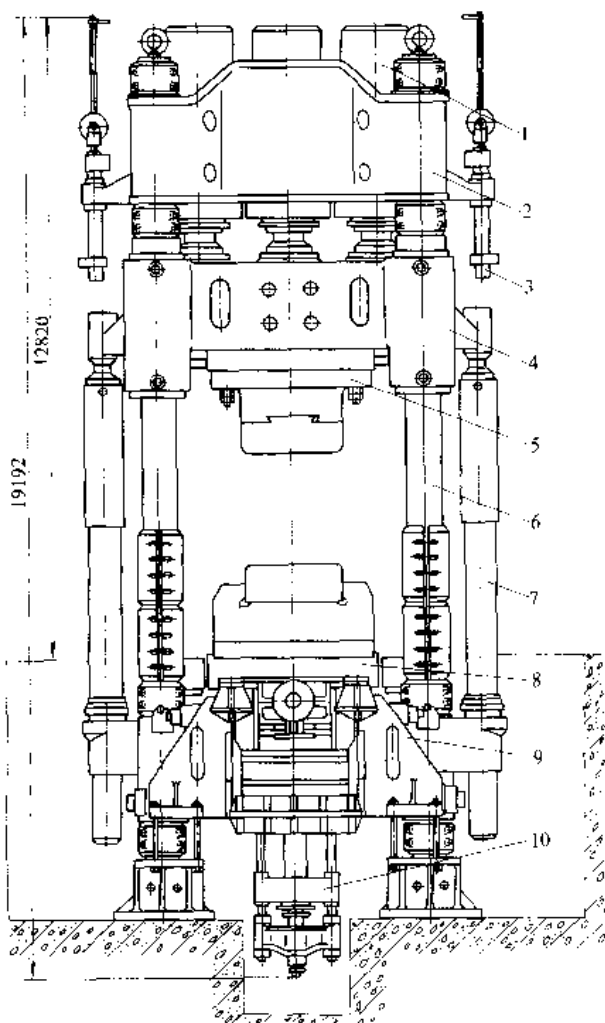


图 3·10-14 三梁四柱式锻造液压机

- 1—工作缸 2—上横梁 3—工具提升机构
- 4—活动横梁 5—上砧座 6—立柱
- 7—回程缸 8—移动工作台
- 9—下横梁 10—顶出器

砧。有的还设置有横向移砧装置及砧库，便于快速换砧。下横梁中有时装有顶出器。中小型液压机的三个横梁通常是整体铸钢件，大型液压机的横梁则采用组合式铸钢件或钢板焊接结构。锻造液压机技术参数见表 3·10-7。

2·3 快锻液压机

为了适应日益增多的高强度、低塑性、锻造温度范围窄的高合金钢及特殊耐热钢的锻造工艺需要，近年来发展了快速锻造液压机，其锻造次数可达 80 次/min 以上。快锻液压机一般与锻造操作机联动，可以在操作台上集中控制，通过计算机实现自动或半自动操作。快

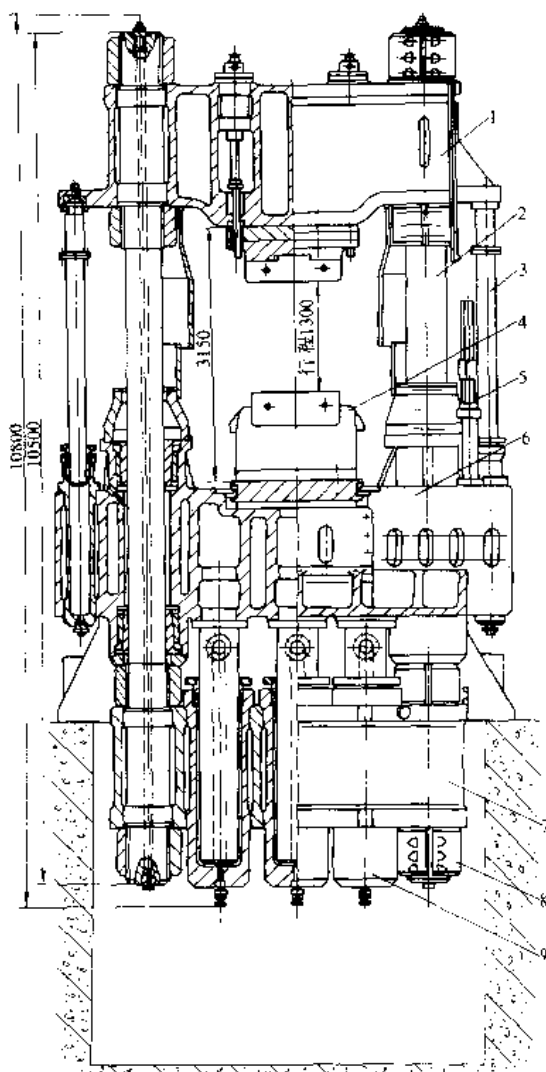


图 3·10-15 下拉式快锻液压机

- 1—上横梁 2—立柱 3—回程缸 4—砧座
- 5—行程标尺 6—固定梁 7—下横梁
- 8—立柱螺母 9—工作缸

锻液压机均配有锻件厚度尺寸自动测量、控制与显示装置，可根据给定尺寸及实测尺寸，自动控制压机行程、操作机送进量及钳杆转角大小，能显著提高锻件精度及劳动生产率，减少锻造火次，节约原材料，极大地改善了劳动条件。锻件尺寸精度可控制在 $\pm 1 \sim 2\text{mm}$ 。快锻液压机一般采用下拉式结构（图 3·10-15）。它与上传动三梁四柱式相比，将原来固定的上、下横梁和立柱变成了一个活动的封闭框架，而将原来的活动横梁固定在基础上成为固定梁。工作缸安装在下横梁上，成为活动框架的一部分，而工作柱塞则固定在固定梁下面。工作时，活动框架在固定梁的导向中往复运动。下拉式液压机与上传动液压机相比，地面以上高度降低

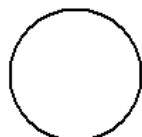


表 3-10-7 三梁四柱式锻造液压机技术参数

公称压力 (kN)	16000	25000	31500	63000	125000
第一级压力 (kN)	8000	8000	16000	20000	40000
第二级压力 (kN)	16000	16000	31500	40000	80000
第三级压力 (kN)		25000		63000	
立柱中心距 (mm)	2400×1200	3400×1600	3500×1800	5200×2300	5300×3450
净空距 (mm)	2950	3900	4050	6100	7000
动梁最大行程 (mm)	1400	1800	2000	2600	3000
常锻行程次数 (min ⁻¹)	60	45	40	25	20
快锻行程次数 (次/min)	16	12	10	7	5
工作台面尺寸 (mm)	4000×1500	5000×2000	6000×2000	9000×3400	10000×4000
工作台行程 (mm)	2×1500	2×2000	2×2000	2×3000	2×3500
回程力 (kN)	2×650	2×1550	2×1700	2×3250	4×2150
允许最大偏心距 (mm)	120	200	200	200	250
拔长最大钢锭质量 (t)	15	45	50	150	300
墩粗最大钢锭质量 (t)	10	20	35	80	150
压机长度① (mm)	15200	26350	21760	31600	52200
压机宽度① (mm)	12600	14750	17000	20500	7600
压机总高度① (mm)	12350	15310	16200	22500	24400
压机地面上高① (mm)	8350	9810	11200	15500	
本体质量① (t)	220	385		1584	2200
设备总质量① (t)	459	511	560	1850	3600

① 为参考数据。

近一半,重心降低到大致和地平面相等,液压机工作的稳定性好,可降低厂房高度。由于上横梁不安装工作缸,宽度比较窄,锻造时天车及工具可更接近液压机中心。但要求较深的地坑。小型快锻液压机采用双柱式。

两个立柱联线斜置,与压机横向轴线成 30°角,操作工人有较好的视野。立柱为矩形截面的铸钢或钢板焊接整体机架,抗弯性能好,且可用平面导向装置,导向间隙容易调整。快锻液压机的技术参数见表 3-10-8。

表 3-10-8 下拉式快锻液压机技术参数

公称压力 (kN)	5000	8000	12500	20000	31500
最大行程 (mm)	800	1000	1250	1600	2000
净空距 (mm)	1800	2200	2500	3150	4000
立柱间净距 (mm)	1300	1500	1900	2300	2800
工作台面尺寸① (mm)	1500×800	2000×1000	2500×1250	3200×1600	4000×1800
工作台行程① (mm)	2×700	2×800	2×900	2×1100	2×1200
每分钟锻造次数 (次/min)	35~90	35~80	30~80	25~70	15~60

① 为参考数据。

2.4 模锻液压机

2.4.1 普通模锻液压机

用于模锻各种金属锻件,主要用于模锻航空工业中铝、镁合金的大型复杂锻件。这些模锻件的特点是:平面尺寸大、锻件精度高、变形抗力大,因此要求模锻液压机的工作台面大,刚度好,吨位大。目前最大的模锻液压机为 750MN。图 3-10-16 为 300MN 的模锻液压机,八缸六柱式,上、下横梁及活动横梁分别由铸钢件分块组合而成,为了增加刚度,常用多块厚钢板直立组合,用多排拉紧螺栓及键预紧联结。对于大吨位的模锻液压机,若用整体锻造的圆截面立柱,在制造及运输

上均有很多困难,改用多块锻制厚钢板组合而成的矩形截面的立柱,两端是“T”形,以与上、下横梁连结,不用螺帽。为了减少接触面上的单位压力,在上模与活动横梁之间以及在下模与工作台之间,要加装多层承压垫板,以 38°角逐步扩散变形力。为了减少活动横梁在偏心载荷时的倾斜,以确保模锻件精度,在大型模锻液压机上均装有同步系统。大型模锻液压机也有下拉式结构。

2.4.2 多向模锻液压机 (图 3-10-17)

用于生产形状复杂的中空的模锻件。结构特点是增加了一对水平工作缸,并在活动横梁上装有穿孔缸。可以水平分模,也可以垂直分模。水平分模时,由水平

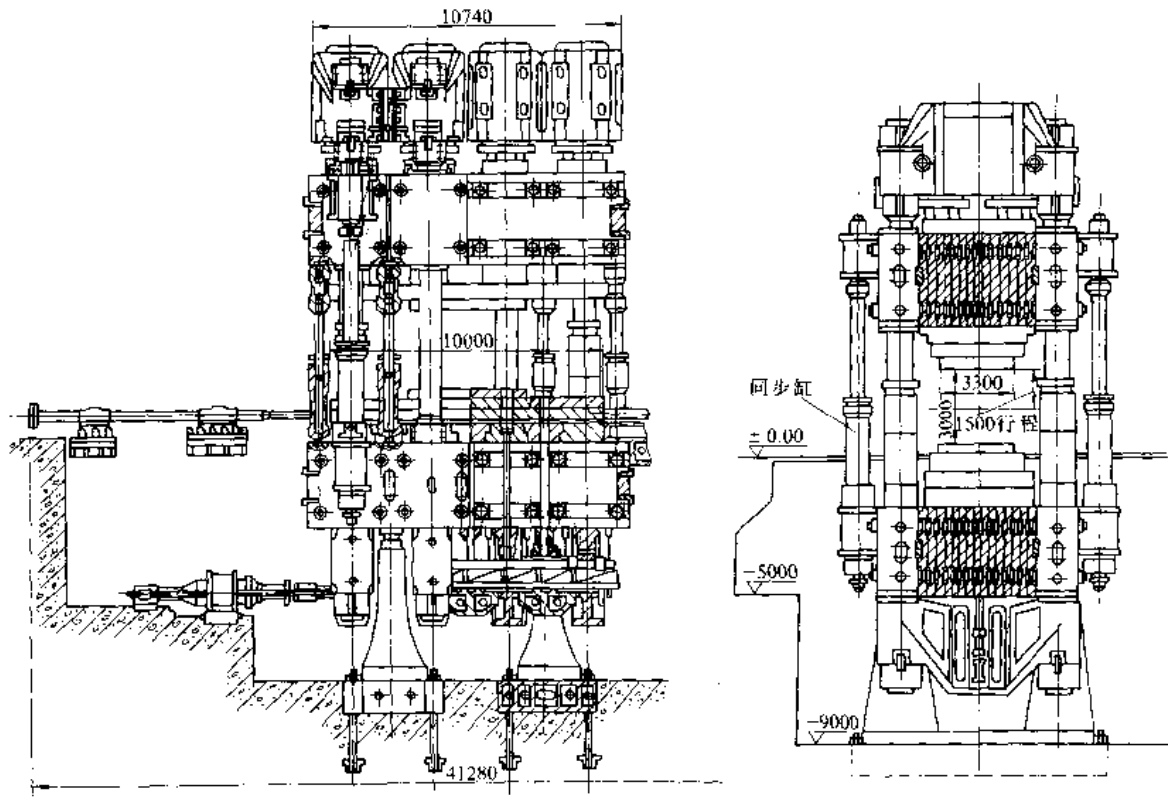


图 3·10-16 300MN 模锻液压机

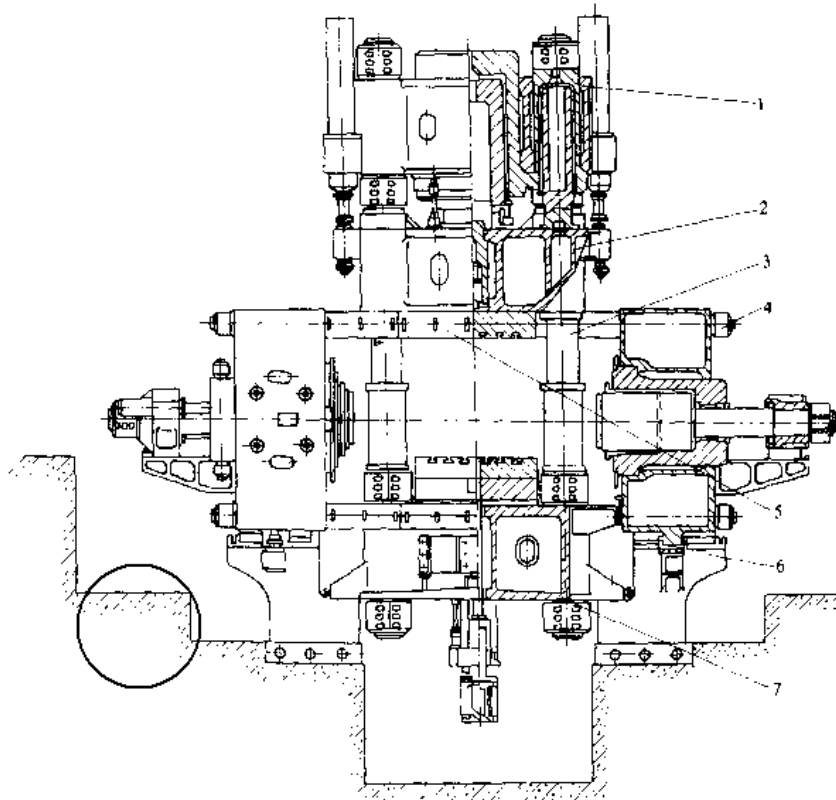


图 3·10-17 100MN 多向模锻液压机

1—上横梁 2—活动横梁 3—立柱 4—水平工作缸 5—水平机架 6—底座 7—下横梁



工作缸完成冲孔工序,垂直分模时,由冲孔缸的垂直冲头来完成冲孔工序。水平工作缸装在水平机架内,水平机架由左、右两个横梁与立柱组成。

2.4.3 专用模锻液压机

模锻一些高强合金锻件时,所需模锻总压力很大,但工作台面尺寸及工作行程均不大,可采用专用模锻液压机。它的特点是采用63MPa或100MPa的超高压液体,结构尺寸小,质量小,造价较低。有多种结构型

式,图3·10-18为筒式结构,图3·10-19为钢带缠绕结构,它的机架由上、下半圆梁及立柱组成,外面在一定

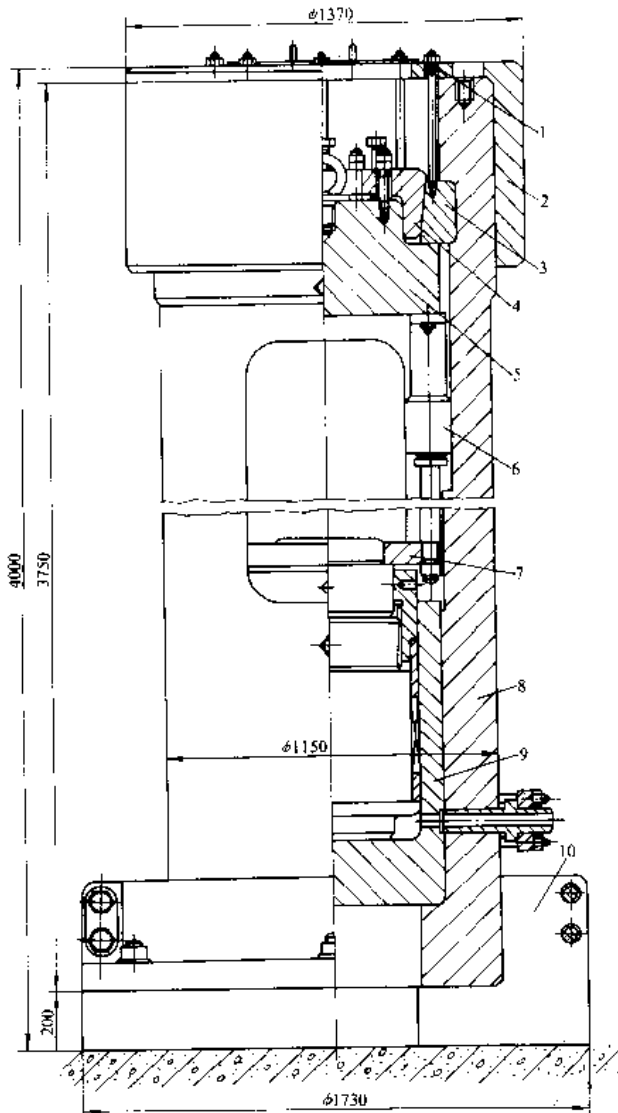


图3·10-18 单缸筒式模锻液压机

- 1—定位螺钉 2—框套 3—卡环 4—压紧环
- 5—上垫板 6—回程缸 7—垫板 8—机架
- 9—工作缸 10—底座

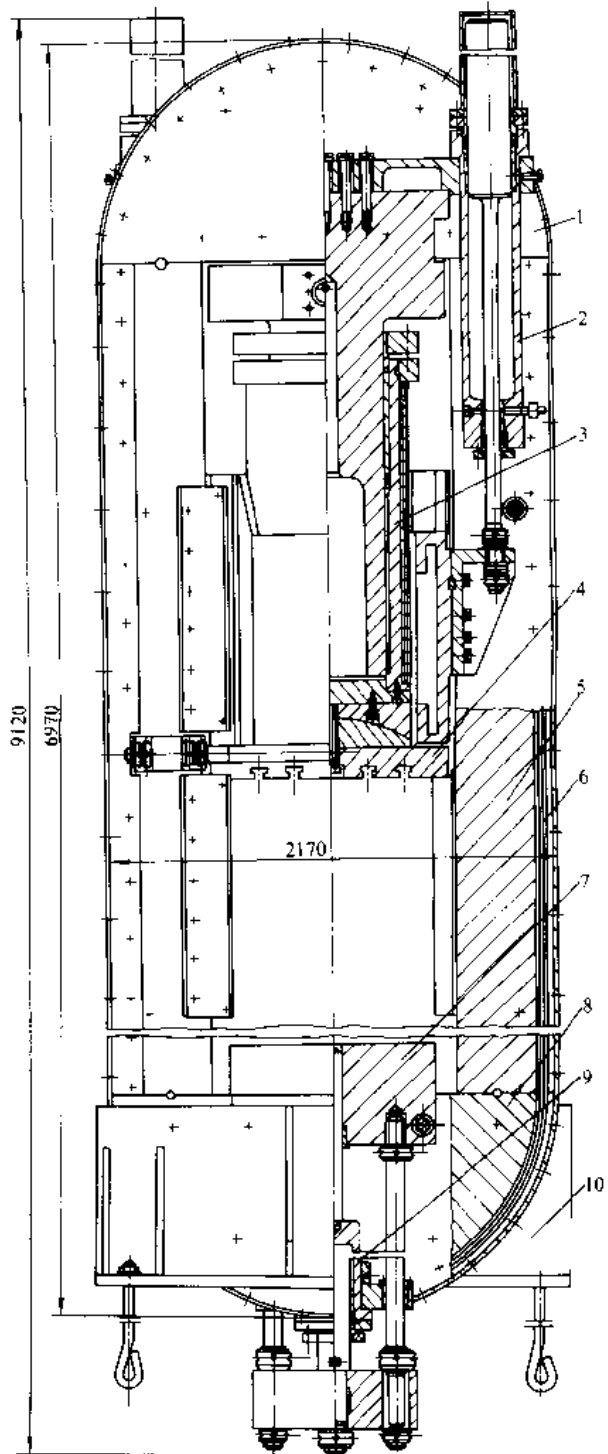


图3·10-19 钢带缠绕式模锻液压机

- 1 上半圆梁 2 回程缸 3 工作缸 4 活动横梁
- 5 立柱 6 高强钢带 7 工作台
- 8 下半圆梁 9 顶出器 10 支座



拉力下缠绕多层高强度钢带,形成预应力结构,并保证在满负荷时立柱仍处于压应力状态。这种机架结构紧凑、质量小、刚度大,并具有很好的耐疲劳强度,除用于模锻液压机外,也常用于其他用途的液压机。

3 机械压力机

3.1 工作原理 (图 3·10-20)

电动机 1 通过皮带传动及齿轮副 3 传动并减速后,把运动传给曲轴 8,经曲柄连杆机构,把曲轴的旋

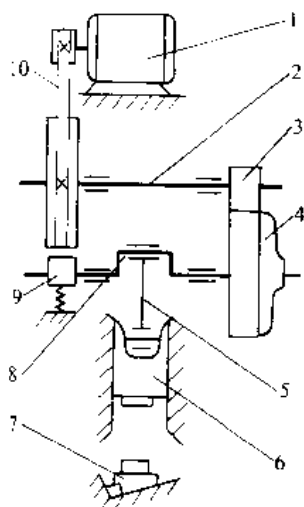


图 3·10-20 机械压力机工作原理图

- 1—电动机 2—传动轴 3—齿轮 4—离合器
- 5—连杆 6—滑块 7—工作台 8—曲轴
- 9—制动器 10—三角带

转运动变为滑块 6 的直线往复运动。上、下模分别装在滑块与工作台上,坯料在上、下模之间成形。离合器 4 和制动器 9 可以使滑块运动或停止。大皮带轮起飞轮作用,使电动机负荷均匀。

3.2 热模锻压力机 (图 3·10-21)

用于各种金属的热模锻。其结构特点是:

- (1) 刚度高,以保证模锻件精度
- (2) 滑块抗倾斜能力强,以保证在较大偏心载荷下的锻件精度。如采用象鼻式滑块(图 3·10-21)或长滑块以增加导向长度,或用楔块传动。

(3) 滑块每分钟行程次数比相同公称压力的通用曲柄压力机高 6~8 倍,以保持较高的模锻温度,利于锻件成形及延长锻模寿命。

(4) 有力量较大的上、下顶料装置,可将锻件出模角降低到 2°以下,减少加工余量,节约金属。

(5) 具有脱出“闷车”的装置。

热模锻压力机的曲柄连杆与滑块的结构类型很多,各有特色。最常用的是普通的曲柄滑块机构,连杆较粗。也有采用环形连杆,框架式滑块的。双滑块式结构中,用传动滑块代替连杆,剖分式传动滑块的上、下两个半圆将曲柄颈夹紧,装在工作滑块的水平槽内。曲轴旋转时,传动滑块推动工作滑块沿导轨作上下往复运动,并相对于工作滑块作前后往复运动。楔块传动结构中,连杆通过传动楔块来驱动滑块。采用这些结构的目的,都是提高刚度及抗倾斜能力。

表 3·10-9 为具有普通曲柄滑块机构的 Mp 系列热模锻压力机的主要技术参数。

表 3·10-9 Mp 系列热模锻压力机技术参数

型 号	Mp1000	Mp1600	Mp2500	Mp3150	Mp4000	Mp6300
公称压力 (kN)	10000	16000	25000	31500	40000	63000
滑块行程 (mm)	250	280	320	340	360	450
滑块行程次数 (次/min)	100	90	80	60	55	50
最大闭合高度 (mm)	700	875	1000	1050	1110	1615
闭合高度调整量 (mm)	14	18	22.5	25	28	35
工作台尺寸: 左右 (mm)	890	1120	1370	1440	1580	1840
前后 (mm)	1120	1400	1700	1860	2050	2300
滑块下平面: 左右 (mm)	820	1030	1260	1360	1460	1800
前后 (mm)	930	1140	1380	1540	1710	1925
上顶料推力 (kN)	50	80	125	160	200	300
上顶料行程 (mm)	30	37	44	48	52	60
下顶料推力 (kN)	150	240	375	475	600	700
下顶料行程 (mm)	30	37	44	48	52	0~150 (可调)
电机功率 (kW)	45	75	110	132	185	300



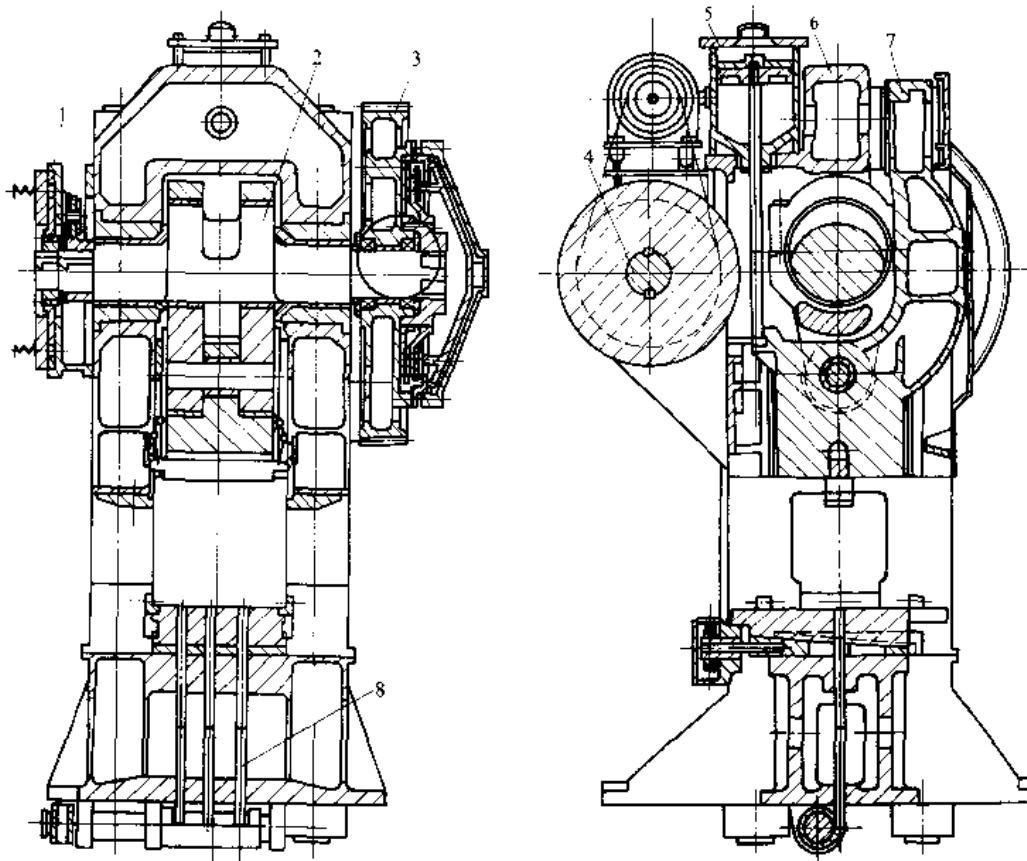


图 3·10-21 热模锻压力机

1—制动器 2—曲轴 3—大齿轮及离合器 4—传动轴 5—平衡缸 6—机身 7—滑块 8—下顶杆

3·3 切边压力机 (图 3·10-22)

主要用于在热态或冷态下切除模锻件飞边,也可完成冲孔、校正和弯曲等工序。其结构类似于通用压力机,但行程较小,滑块行程次数高。机架侧边一般装有侧滑块,用以切断模锻件的钳口部分。当需要同时完成

切边、冲孔、校正、弯曲等多个工序时,可采用顺序模或复合模。在闭式双点和闭式四点宽台面切边压力机上,也可安装几个单独的模具来工作。近年来带侧滑块的结构已较少采用。

表 3·10-10 为切边压力机与模锻锤的配用关系。

表 3·10-10 切边压力机与模锻锤配用表

模锻锤公称吨位 (t)	1	2~3	5	10	15
切边压力机公称压力 (kN)	1600	2500~3150	4000~6300	8000~12500	12500~16000

3·4 精压机

主要用于工作行程小而变形力大的工艺,如精压、校平、压印等。模锻件或冲压件经过平面精压后,高度方向尺寸公差可达 0.05mm,表面粗糙度 $R_a 3.2\mu\text{m}$ 。经过体积精压后,可以得到精确的重量及低的表面粗糙

度。

精压机的传动原理如图 3·10-23。电动机经传动机构带动曲轴旋转,通过曲柄—肘杆机构使滑块上、下运动。上、下肘杆结构粗短,承受全部工作载荷,但变形很小。连杆在工作时只承受很小的拉力。滑块可两次经过下死点,保压时间长,有利于工件精压。



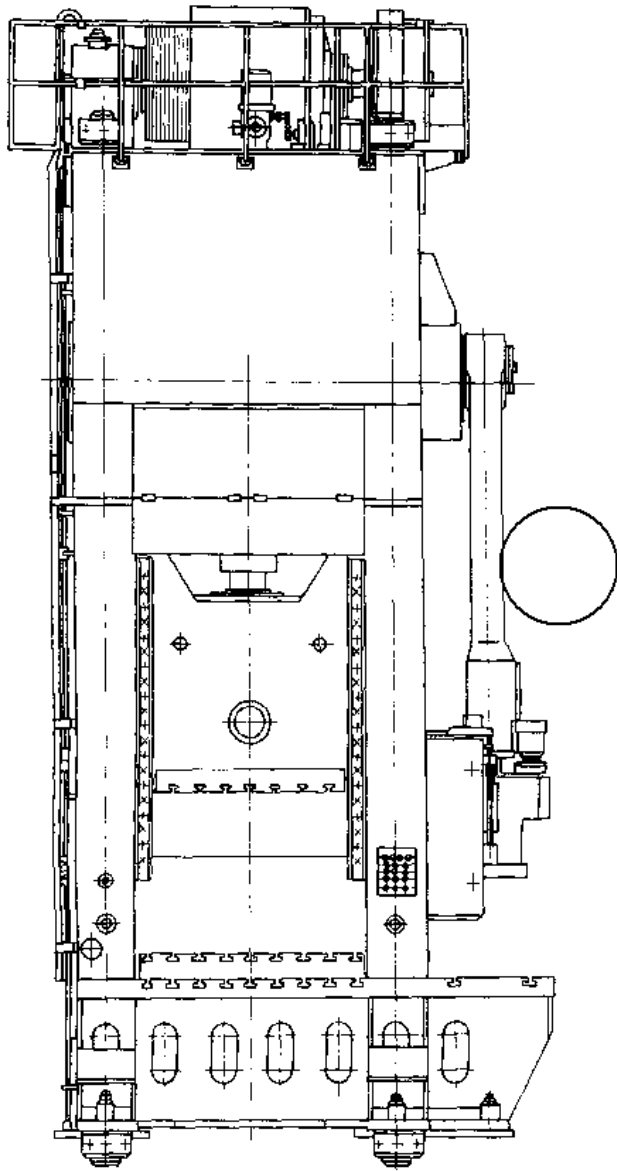


图 3·10-22 切边压力机

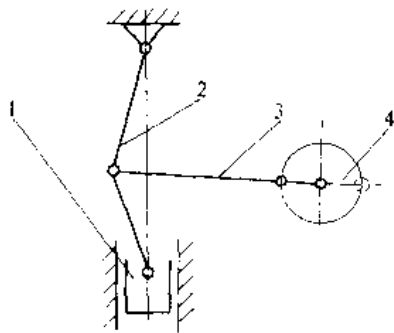


图 3·10-23 精压机传动原理图

1—滑块 2—肘杆机构 3—连杆 4—曲柄

大中型精压机采用上传动方式，图 3·10-24 为其结构图。小型精压机采用下传动。

上传动精压机技术参数如表 3·10-11。下传动精压机技术参数如表 3·10-12。

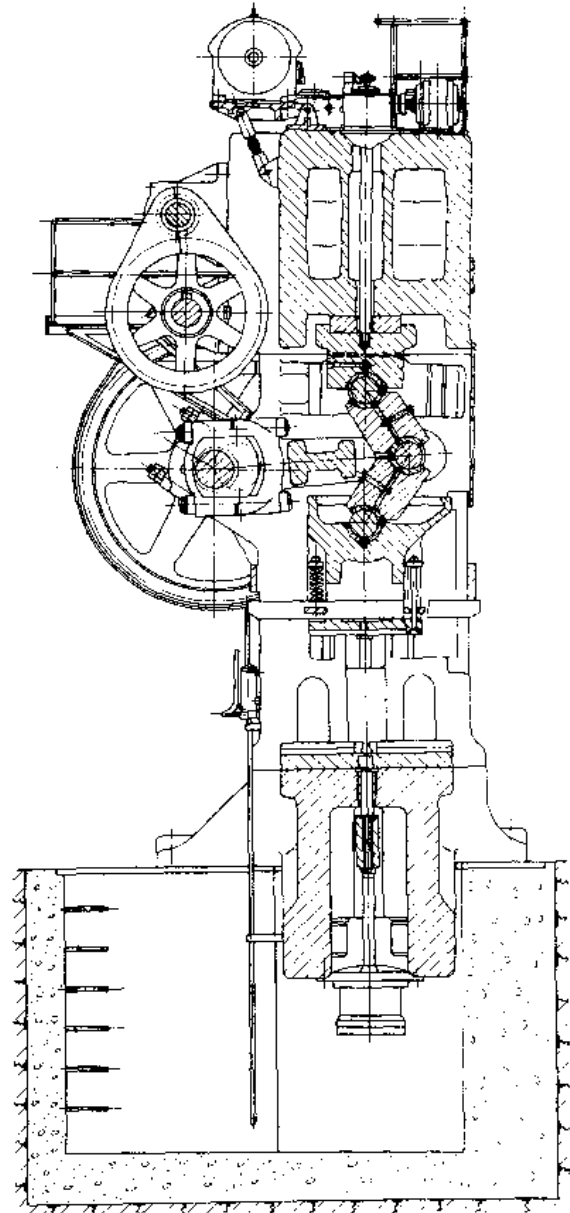


图 3·10-24 上传动精压机结构图

3·5 多工位高速锻压机

多工位高速锻压机是在热态下经多个工位的锻粗或成形，把坯料锻造成各种零件的高速自动机。它包含送料、感应加热、切断及锻造成形等工序，形成全部自



表 3·10-11 上传动精压机技术参数

公称压力 (kN)	4000	8000	12500	20000	35000
公称压力行程 (mm)		1.5	2	3	5
滑块行程 (mm)	130	125	150	200	150
滑块行程次数 (次/min)	50	26	30	18	16
闭口高度 (mm)	520	460	580	830	1600
闭口高度调节量 (mm)	15	15	15	15	15
工作台前后尺寸 (mm)	660	800	980	1300	
工作台左右尺寸 (mm)	660	720	1010	1280	
立柱间净距 (mm)	660	750	1010	1300	1320
主电机功率 (kW)	17	22	30	55	155
压机长度 (mm)	2145	2150	2930	3600	5490
压机宽度 (mm)	1677	2165	3200	3700	4176
地面上高度 (mm)	3730	4397	5185	6639	7623
总质量 (t)	14	33.5	60.8	128.2	213.5

表 3·10-12 下传动精压机技术参数

公称压力 (kN)	400	630	1250	2500
滑块行程 (mm)	25	65	25	65
行程次数 (次/min)	24	24	24	8
闭口高度 (mm)	260	260	340	400
闭口高度调节量 (mm)	5	5	5	5
立柱间距离 (mm)	410	410	440	440
滑块有效工作面积 (mm)	230×310	230×310	255×350	290×310
电机功率 (kW)	2.7	2.7	4.2	6.0
压机长度 (mm)	1900	1900	1950	2200
压机宽度 (mm)	1600	1600	1650	1550
地面上高度 (mm)	2000	2000	2240	2210
总质量 (t)	5.15	5.15	6.5	9.0

动化的制造系统。锻造成形工序中一般有三个工位，分别是预成形、终锻与冲孔。在多工位锻压机上可以生产各种螺母、薄壁套筒、爪形件、十字轴节等零件，如图3·10-25所示。生产率可高达90~180个/min。

自动送料机构从台架上夹取棒料，连续送入感应加热器，加热后，由送料辊送到锻压机上，送料辊也起清除氧化皮的作用。由凸轮操纵的切刀滑块把加热好

的棒料剪断，并送入第一个工位上的模具中。切断的长度可以调整。几个工位上的冲头及凹模均安装在整体的模座中，从而保证了冲头与凹模的同轴线，提高了模具寿命。主滑块为象鼻式、两端导向，在偏心载荷时也能保证精确的直线运动。

瑞士生产的两种多工位高速锻压机技术参数如表3·10-13，有三个工位，冷却水压力0.4MPa，压缩空气压力0.55~1.0MPa。

表 3·10-13 多工位高速锻压机技术参数

型 号	AMP20	AMP30	型 号	AMP20	AMP30
工件初始质量 (g)	20~150	50~700	第1、3工位模具直径 (mm)	80	125
圆形锻件最大外径 (mm)	35	64	第2工位模具直径 (mm)	100	150
锻件横截面最大宽度 (mm)	33.3	56	主滑块行程 (mm)	110	160
毛坯直径 (mm)	14~25	18~40	顶出器行程 (mm)	55	70
切料长度 (mm)	15~40	20~72	冷却水最大消耗量 (m ³ /h)	8	30
生产率 (min ⁻¹)	120~180	85~140	机器长度×宽度 (mm)	3200×2600	5000×3700
锻造压力 (kN)	600	2300	机器总高度 (mm)	1550	2000
电机功率 (kW)	22	55	地面上高度 (mm)	800	1100
模具中心距 (mm)	110	160	机器总质量 (t)	11	35.8



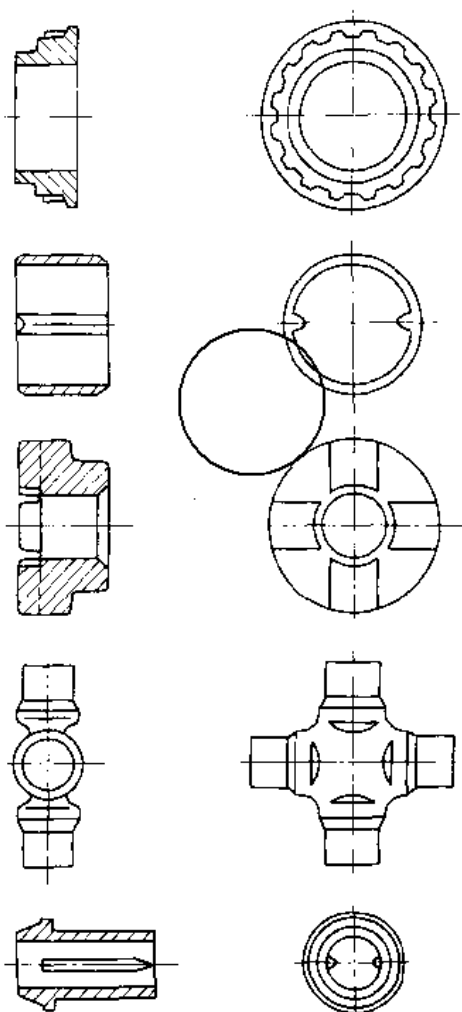


图 3-10-25 多工位锻压机产品

3.6 平锻机

主要用于对金属棒料和管料进行热态局部积聚、墩头、冲孔、翻边、切边、弯曲、切断等。平锻工艺的模具由墩锻冲头和夹紧凹模组成，夹紧凹模首先把棒料夹紧，然后由墩锻冲头进行墩锻。锻后，冲头退回，凹模分开，取出锻件。

按夹紧凹模的分模面位置，可以把平锻机分为垂直分模和水平分模两种结构。垂直分模平锻机的工作原理如图 3-10-26，电动机经带轮、飞轮离合器、中间传动轴和齿轮，带动曲轴转动，使主滑块连同冲头作直线往复运动，同时曲轴左端的凸轮迫使侧滑块前后运动，通过杠杆机构使夹紧滑块左右移动。凹模的右半块固定在机身上，左半块固定在夹紧滑块上。冲头则固定主滑块上。一般在模具上有 4~6 个模膛，垂直分布。锻造时，坯料沿垂直方向从一个模膛移向下一个模膛。垂直分模平锻机的结构如图 3-10-27，工人操作的劳

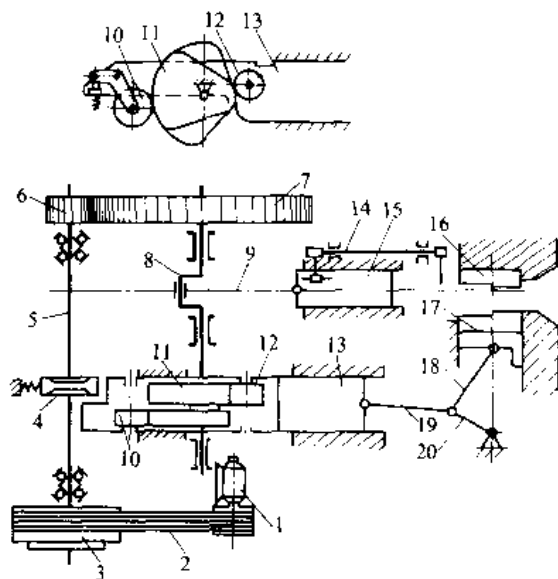


图 3-10-26 垂直分模平锻机工作原理图

- 1—电动机 2—三角带 3—飞轮离合器 4—带式制动器
- 5—传动轴 6—小齿轮 7—大齿轮 8—曲轴
- 9—连杆 10、12—滚子 11—凸轮 13—侧滑块
- 14—挡料机构 15—主滑块 16—凹模
- 17—夹紧滑块 18、19、20—杠杆

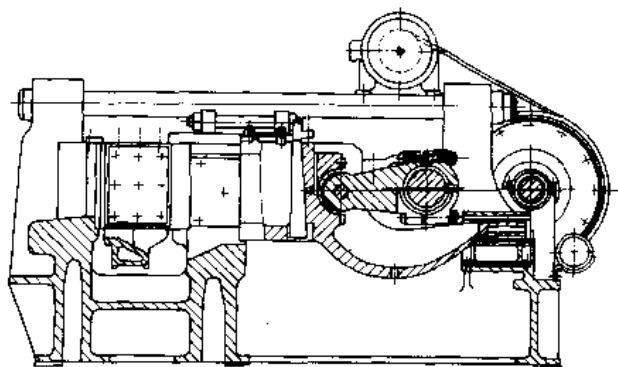


图 3-10-27 垂直分模平锻机结构图

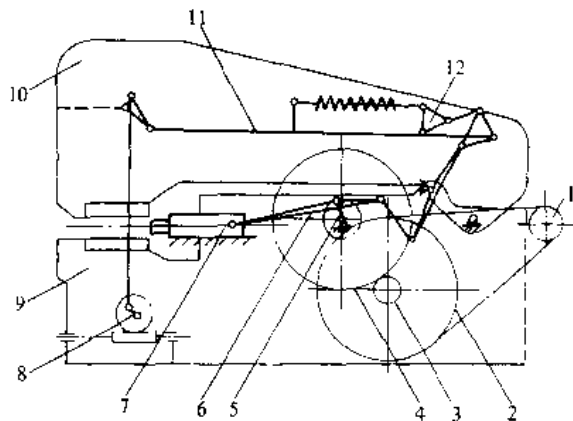


图 3-10-28 水平分模平锻机工作原理图

- 1—电动机 2—大皮带轮 3—小齿轮 4—大齿轮
- 5—曲轴 6—连杆 7—主滑块 8—偏心调节机构
- 9—下机身 10—上机身(夹紧横梁)
- 11—夹紧机构 12—过载保护装置



动条件较差,实现机械化自动化比较困难,但锻件的氧化皮易清除,机构刚度较高,有效行程较长,工作范围较大。

水平分模平锻机的工作原理如图 3·10-28,电动机通过皮带轮及齿轮传动,经过曲柄连杆机构,带动主滑块及冲头进行锻压工作。凹模的两半分别固定在上、下机身上。连杆的后端通过一套杠杆系统,带动上机身(夹紧横梁)上下摆动,完成夹紧动作。夹紧机构中的

过载保护装置可防止夹紧时过载。下机身上的偏心调节机构可调节夹紧凹模的夹紧程度。水平分模平锻机的模膛按水平排列,工人操作方便,易于实现机械化与自动化,机身受力比较合理,质量较小,近年来发展较快。图3·10-29为水平分模平锻机的结构图。表 3·10-14为垂直分模平锻机的技术参数。表 3·10-15 为水平分模平锻机的技术参数。

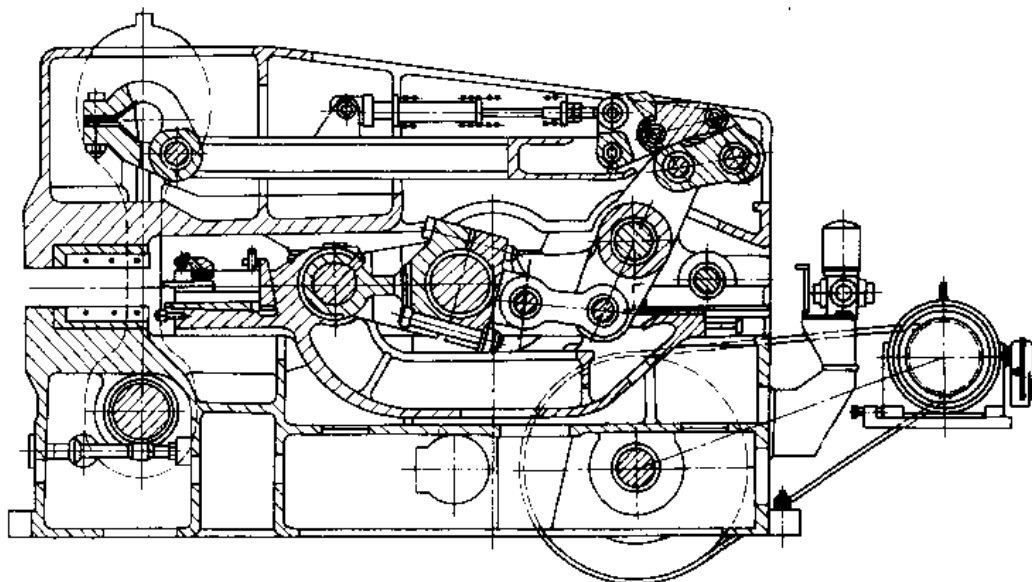


图 3·10-29 水平分模平锻机结构图

表 3·10-14 垂直分模平锻机技术参数

公称压力 (kN)	5000	8000	12500	20000	31500
主滑块全行程 (mm)	280	380	460	570	700
主滑块有效行程 (mm)	190	250	310	390	480
夹紧滑块行程 (mm)	125	160	220	312	
行程次数 (次/min)	45	35	27	25	21
棒料最大直径 (mm)		125	150	190	225
电机功率 (kW)	29	50	115	200	317
机器长度① (mm)	4600	5215	6345	8620	
机器宽度① (mm)	3055	3931	3930	5185	
地面上高度① (mm)	1945	2296	3000	3140	
总高度① (mm)	2310	3041	3680	4140	
总质量① (t)	40	85	129.3	256.4	

① 为参考数据。

表 3·10-15 水平分模平锻机技术参数

公称压力 (kN)	3150	4500	6300	9000	12500	16000
主滑块行程 (mm)	290	330	360	420	460	540
主滑块有效行程 (mm)	150	170	190	215	245	280
夹紧模开启度 (mm)	120	135	155	180	205	230
夹紧力 (kN)	3150	4500	6300	9000	12500	16000
行程次数 (次/min)	55	45	35	32	28	25
棒料最大直径 (mm)	65	85	95	115	140	165



(续)

公称压力 (kN)	3150	4500	6300	9000	12500	16000
电机功率 (kW)	15	22.5	30	37	51.5	67
电机转数 (r/min)	1500	1500	1500	1500	1500	1500
机器长度① (mm)	3442	3905	4320	6535	7645	8731
机器宽度① (mm)	2160	2450	2700	3370	3825	4352
地面上高度① (mm)	2070	2120	2364	2680	2599	3719
总高度① (mm)	2415	2440	3098	3626	4149	5091
总质量① (t)	21.4	34.6	49.0	87.2	132.0	197.4

① 为参考数据。

3.7 冷挤压机

主要用于将金属棒料冷挤压成各种零件。冷挤压工艺对挤压机的要求是：刚度大、挤压能量大、精度高、挤压速度合适、顶料力大、过载保护装置可靠等。冷挤压机按工作机构可分为：曲柄式、肘杆式和拉力肘杆式（图 3-10-30）。挤压同样长度的坯料时，拉力肘杆式加压时间最长，行程末端挤压力大；肘杆式次之，但两者行程均较短，适合挤压较短的工件。曲柄式适合挤压较长的工件。

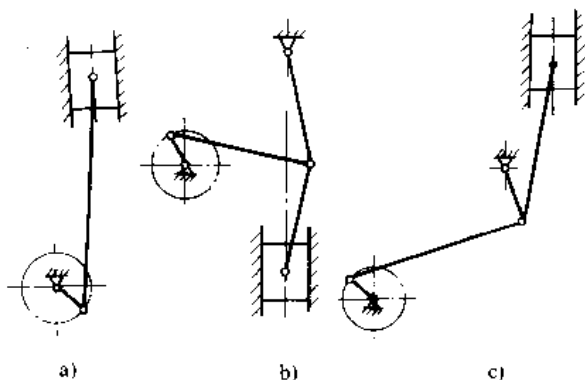


图 3-10-30 挤压机的动作原理图

a) 曲柄式 b) 肘杆式 c) 拉力肘杆式

图 3-10-31 为拉力肘杆式挤压机结构简图。图 3-10-32 为开式拉力肘杆式挤压机主传动示意图，主电动机经两级减速后，使左右曲柄轴 8 旋转，通过左右连

杆 9 带动摆杆 10，再经过左右肘杆 11 带动滑块 12 上下运动，滑块在工作中所承受的载荷完全加在左右肘杆上，机身只承受较小的侧向力，滑块导向精度高。

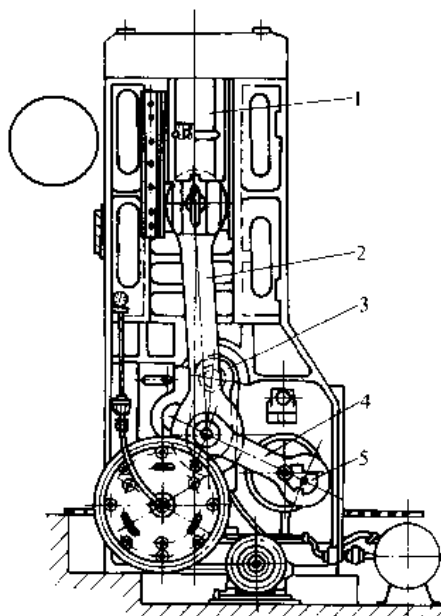


图 3-10-31 拉力肘杆式挤压机

1—滑块 2—拉杆 3—摆杆 4—连杆 5—曲柄

挤压机也有液压式的，还有一些专用自动挤压机如活塞销挤压自动机等。

表 3-10-16 及表 3-10-17 为部分挤压机的主要参数。

表 3-10-16 部分曲柄式挤压机技术参数

公称压力 (kN)	1600	2500	3000	4000	6300
型号	J87-160	J87-250A	J87-300	J87-400	J87-630
滑块行程 (mm)	230	200	300	250	300
工作行程 (mm)	25	32	40	40	40
行程次数 (次/min)	34	32	33	25	18
最大封闭高度 (mm)	385	560	550	670	750
主电机功率 (kW)	30	55	55	100	130

冶金工业出版社重作版权



表 3·10-17 部分拉力肘杆式挤压机技术参数

公称压力 (kN)	1000	2000	1600	4000	10000
型号	J88-100	J88-200	J88-160	J88-400	J88-1000
型式	开式	开式	闭式	闭式	闭式
滑块行程 (mm)	60	160	70	160	350
工作行程 (mm)	4	4	4	10	23
行程次数 (次/min)	60	30	80	40	13
最大封闭高度 (mm)	265	420	265	530	950
主电机功率 (kW)	5.5	22	5.5	40	

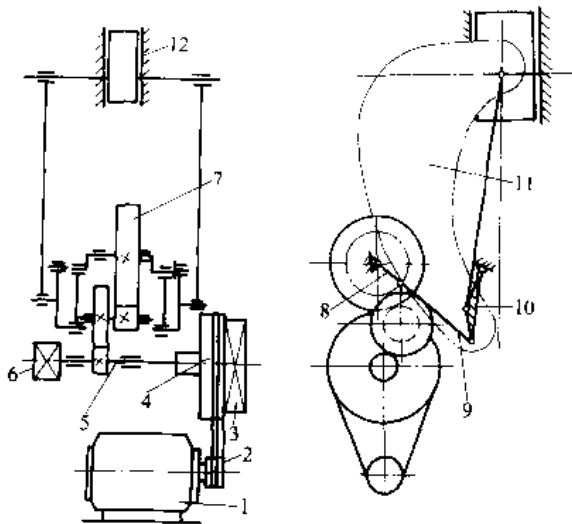


图 3·10-32 拉力肘杆式挤压机传动图

- 1—主电机 2—小皮带轮 3—离合器 4—飞轮
- 5—传动轴 6—制动器 7—斜齿圆柱齿轮
- 8—曲柄轴 9—连杆 10—摆杆
- 11—肘杆 12—滑块

4 螺旋压力机

4.1 工作原理

螺旋压力机是利用螺旋机构来传递运动与能量的锻压设备。滑块下行时,与之相联的飞轮加速并获得动能,当滑块及模具接触锻件时,主要依靠飞轮等旋转部分的动能使锻件塑性变形。

螺旋压力机的打击能量 E 用下式表示:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 + \frac{1}{2} m v^2 \quad (J)$$

式中 I —飞轮等旋转部分的转动惯量 ($kg \cdot m^2$);

ω —飞轮打击时最大角速度 (rad/s);

m —滑块等运动部分的质量 (kg);

v —滑块最大打击速度 (m/s)。

上式中第一项占总能量的 90% 以上。

螺旋压力机用途广泛,除主要用于模锻外,还可用于精压、校正、挤压、弯曲、切边及板料冲压等工艺,而且特别适合于精密锻造。在陶瓷、建材和耐火材料等行业中也大量使用。

4.2 摩擦螺旋压力机 (图 3·10-33)

飞轮与主螺杆及滑块相联结。当飞轮旋转时,由于主螺杆与主螺母之间的螺旋作用,带动滑块作上下直线运动。电动机经带轮带动摩擦盘转动,向下行程开始时,右边气缸进气,推动摩擦盘压紧飞轮,推动飞轮旋

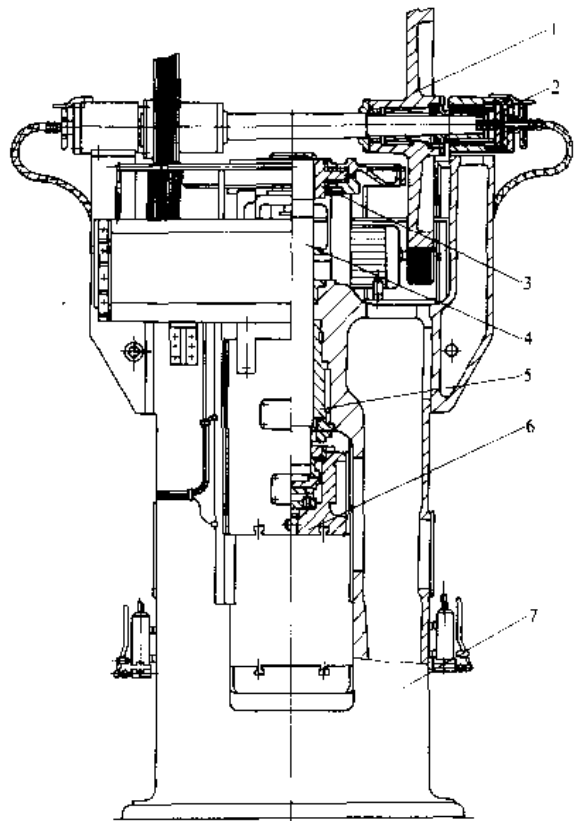


图 3·10-33 摩擦螺旋压力机

- 1—摩擦盘 2—操纵气缸 3—飞轮 4—主螺杆
- 5—主螺母 6—滑块 7—机身



转, 滑块下行, 此时飞轮加速并获得动能。在锻击工件前的瞬间, 摩擦盘与飞轮脱离接触, 滑块以运动部分的动能锻压工件, 直至停止。回程时, 左边气缸进气, 推动左边的摩擦盘压紧飞轮, 搓动飞轮反向旋转, 滑块迅速提升, 至某一位置后, 摩擦盘与飞轮脱离接触, 滑块继续自由向上运动, 直至被制动停止, 完成一个工作循环。

摩擦螺旋压力机的滑块没有固定的下死点, 机身、

螺杆等的弹性变形可由滑块下移来补偿, 加上导向精度较好, 因此适宜于精密锻造。滑块在打击前的速度为 $0.6 \sim 0.7 \text{ m/s}$, 适宜于对变形速度敏感的合金锻件成形。机器结构简单, 成本低, 维修方便, 锻造时的振动及噪声低于模锻锤, 劳动条件较好。行程次数及生产率较低, 只适用于单模膛模锻。

双盘摩擦压力机的技术参数见表 3·10-18。

表 3·10-18 双盘摩擦压力机技术参数

公称压力 (kN)	630	1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000	25000	40000
打击能量 (kJ)	2.2	4.5	9	18	36	72	140	280	500	1000
滑块行程 (mm)	200	250	300	350	400	500	600	700	800	900
行程次数 (次/min)	35	30	27	24	20	16	13	11	9	7
最小闭口高度 (mm)	315	355	400	450	530	630	710	800	1000	1250
垫板厚度 (mm)	80	90	100	120	150	180	200	220	250	280
工作台左右尺寸 (mm)	250	315	400	500	600	720	800	1050	1250	1400
工作台前后尺寸 (mm)	315	400	500	600	720	800	1050	1250	1500	1800

4.3 液压螺旋压力机

以液压驱动代替摩擦驱动, 传动效率高, 结构紧凑, 特别适合于大型螺旋压力机, 用来精锻叶片和航空锻件。易于机械化及自动化, 设备成本较高。

4.3.1 液压马达—齿轮式螺旋压力机 (图 3·10-34)

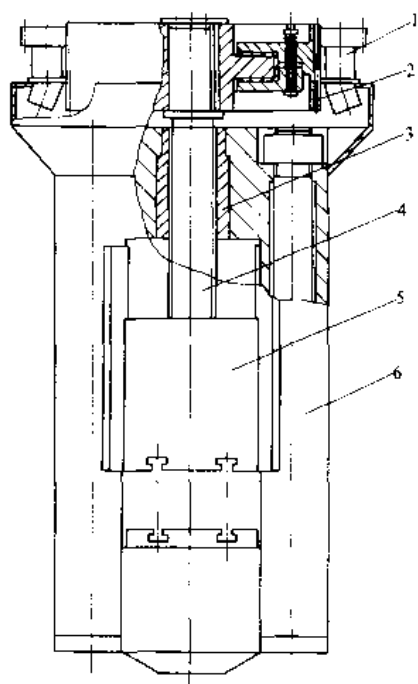


图 3·10-34 液压马达—齿轮式螺旋压力机

1—液压马达与小齿轮 2—大齿轮 3 主螺母
4—主螺杆 5—滑块 6—机身

由若干个带小齿轮的液压马达驱动大齿轮(飞轮)正转或反转, 通过螺杆带动滑块上下运动, 完成工作循环。大齿轮的高度为小齿轮厚度加上滑块行程。表 3·10-19 为德国的大型液压螺旋压力机的技术参数。

4.3.2 副螺杆式液压螺旋压力机 (图 3·10-35)

当高压油进入油缸上腔, 推动活塞及副螺杆下行, 副螺杆在副螺母中作螺旋运动, 并以尼龙十字形联轴节与飞轮连接, 带动飞轮旋转并获得能量。副螺杆与主

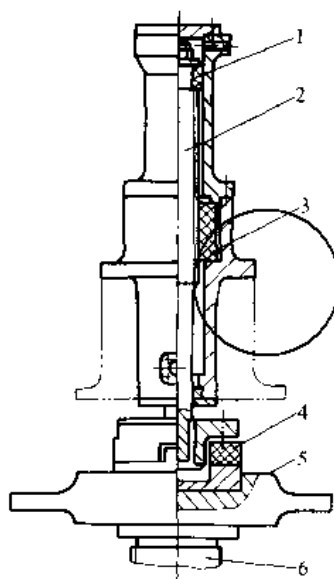


图 3·10-35 副螺杆式传动原理图

1—活塞 2—副螺杆 3—副螺母 4—尼龙联轴节 5—飞轮 6—主螺杆



表 3-10-19 大型液压螺旋压力机技术参数

型 号	560	630	750	900	1000	1180
螺杆直径 (mm)	560	630	750	900	1000	1180
公称压力 (kN)	31500	40000	56000	80000	100000	140000
冷击力 (kN)	63000	80000	112000	160000	200000	280000
飞轮能量 (kJ)	800	1120	1900	3150	4500	7500
滑块行程 (mm)	560	630	750	900	1000	1120
最小闭口高度 (mm)	1120	1250	1500	1800	1900	2000
工作台左右尺寸 (mm)	1270	1350	1450	1800	2000	2240
工作台前后尺寸 (mm)	1700	1900	2120	2650	3000	3000
滑块最大速度 (m/s)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
行程次数 (次/min)	6.5	6.5	5.0	4.5	4.5	4.5
电机功率 (kW)	260	360	440	840	1050	2100

螺杆导程相同,两者同步运动下行。回程时,油缸上腔排油,下腔进油,推动主、副螺杆反向作螺旋运动,滑块提升回程。副螺母用特制的布质酚醛树脂层压材料制成,摩擦系数很小,因此这种压力机传动效率较高。

4.3.3 推缸式液压螺旋压力机

结构简图如图 3-10-36,油缸固定于机架上,活塞杆与滑块相联。螺杆固定在飞轮上并与滑块相联,螺母固定在机架上。压力油进入油缸上腔,推动活塞杆下行,带动滑块、螺杆及飞轮向下运动,固定螺母迫使螺杆和飞轮旋转而储存动能。回程时,下缸进压力油,滑块、螺杆及飞轮反向运动,这种螺旋压力机结构简单可靠,但效率较低。

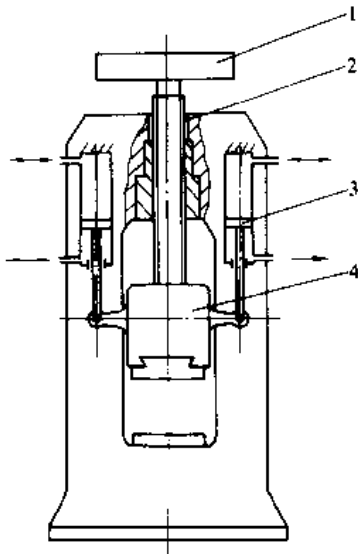


图 3-10-36 推缸式液压螺旋压力机
1—飞轮 2—主螺杆 3—活塞 4—滑块

4.4 电动螺旋压力机

电动螺旋压力机用电动机直接驱动,或经一级齿轮减速,传动环节少,效率高,没有经常需要更换的磨损件,深受用户欢迎。电动螺旋压力机有以下几种类型。

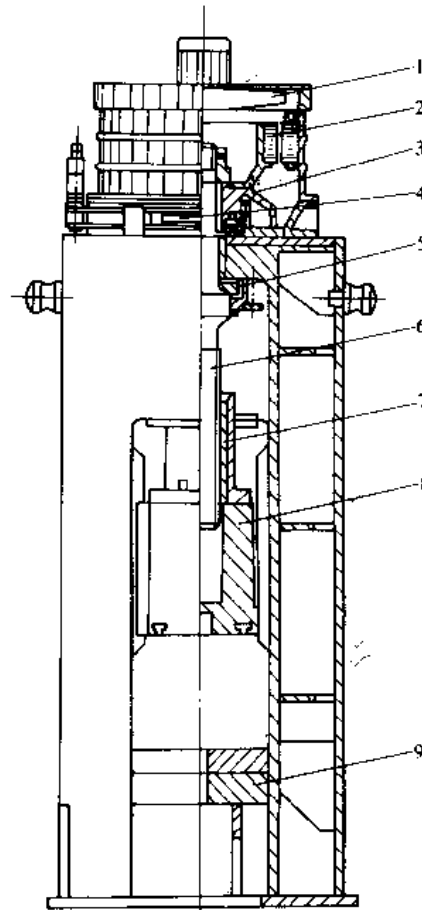


图 3-10-37 环形定子双鼠笼转子电动螺旋压力机
1—风扇 2—电动机 3—飞轮 4—制动器 5—撞块
6—主螺杆 7—主螺母 8—滑块 9—机身



1. 环形定子、双鼠笼转子电动螺旋压力机 电机定子安装在机身上,电机转子固定在飞轮上,并用圆柱键与主螺杆连接。转子和定子之间的磁场产生的力矩,驱动转子—飞轮和主螺杆加速旋转并储蓄能量。主螺母固定在滑块上,当主螺杆旋转时,滑块向下运动并打击锻件。若电机反转,则滑块回程,最后由制动器使滑块停止于预先调定的上死点位置。其结构简图如图3·10-37。这种专用的环形定子、双鼠笼式异步电机的起动电流小,起动速度快,温升低,体积小。

2. 弧形定子、铁磁体转子的电动螺旋压力机 两个弧形定子对称地安装在机身上部,主螺杆只作旋转运动,主螺母安装在滑块上与滑块一起上、下运动。

3. 环形定子、实心铁磁体转子的电动螺旋压力机 转子为圆筒形,其高度为滑块行程加定子高度。在机

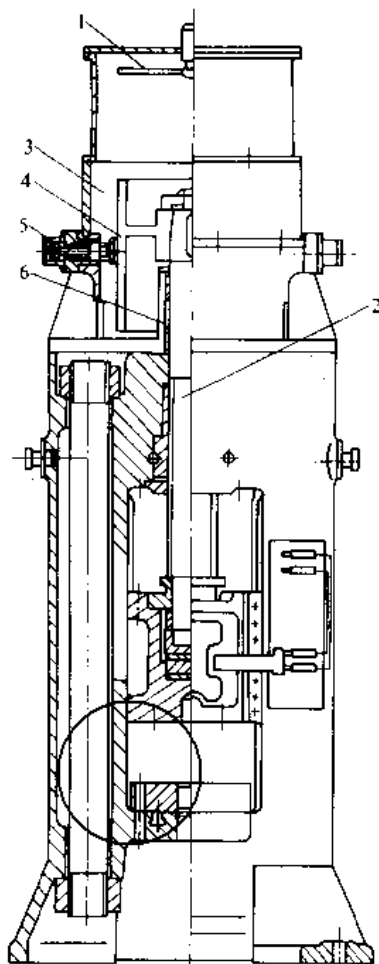


图3·10-38 实心铁磁体转子的电动螺旋压力机

- 1—导套 2—制动器 3—转子
4—定子 5—风扇 6—主螺杆

身上有特殊的导套,以保持均匀的气隙。这种电机起动转矩大,性能比鼠笼转子优越,适合于螺旋压力机的工作要求。主螺母固定在机身上,主螺杆连同滑块作上、下运动。结构简单,加工容易,成本较低,可靠性好。图3·10-38为其结构图。

5 回转成形设备

5.1 工作原理

回转成形设备是机器的工作部分和所成形的工件,二者同时或其中之一作旋转运动,使金属通过塑性变形而获得所需的形状与尺寸,并具有一定的尺寸精度和表面粗糙度。由于工件是局部连续变形,故所需的变形力小。设备结构比较简单,振动和冲击小。用回转成形设备往往可成形一些其他设备难以成形的工件,且尺寸精度较高,后续加工余量小。易于实现机械化及自动化,劳动生产率较高。特别适合于生产轴对称零件,但也可加工出其他形状的零件。

5.2 辊锻机

辊锻机是利用固定着扇形模的两个锻辊的反向旋转,使金属坯料在扇形模中连续地产生局部塑性变形,以制成所需形状及尺寸的工件。一般用来生产模锻件的毛坯,也用来生产一些零件。辊锻件的纤维流线好,力学性能高。由于是连续局部变形,所需设备作用力小。锻模寿命较高。设备结构简单,噪声小,振动小,不需高大的厂房和地基,投资少。

辊锻机广泛地用于汽车、拖拉机、农业机械、动力机械、航空以及日用品制造业中。可以辊锻周期性断面及各种几何断面形状的锻件,如圆形、椭圆形、方形、菱形以及工字形等。作为制坯工序,与模锻设备配套,常完成长轴件的拔长工序,如连杆、曲轴、前梁、汽轮机叶片等。对于形状简单的板形件和长轴件,也可全部或部分辊锻成形,如垦锄、犁铧、钢叉、斧头、十字镐、餐具、医疗器具等。

5.2.1 悬臂式辊锻机

悬臂式辊锻机锻辊的工作部分悬臂伸出机身外部,便于锻模的装卸与更换,特别适宜于环形模,可以同时安装2~3个模膛的锻模,用转动锻辊轴瓦上的两个偏心套来调整中心距。有压力和扭矩过载保护装置。结构紧凑,但机器刚度较差。传动系统如图3·10-39,结构如图3·10-40。主要技术参数如表3·10-20。



表 3·10-20 悬臂式辊锻机技术参数

型 号	D41 250	D41 315	D41 400	D41 500
锻模公称直径 (mm)	250	315	400	500
公称压力 (kN)	250	400	630	1000
锻辊直径 (mm)	140	180	220	280
锻辊可用长度 (mm)	250	315	400	500
锻辊转数 (转/min)	100	80	63	50
锻辊中心距调整量 (mm)	12	14	16	16
锻辊轴向调整量 (mm)	±3	±3	±3	±3
锻模角度调整量 (°)	±3	±6	±5	±5
可锻毛坯最大断面尺寸 (mm)	45×45	75×75	90×90	125×125
电机功率 (kW)	17	22	28	55
机器长度 (mm)	1870	2310	2840	3610
机器宽度 (mm)	1315	1540	2100	2759
机器高度 (mm)	1380	1960	2320	2682
机器质量 (t)	3.5	6.5	12.8	21.0

5·2·2 双支承辊锻机

锻辊的工作部分安装在两个机架轴承之间，锻辊刚度较大，可同时安装4~6个模膛的锻模。模具通常为扇形，最大工作包角一般不超过180°。多用于冷、热成形辊锻。传动系统如图3·10-41。结构简图如图3·10-42。技术参数见表3·10-21。

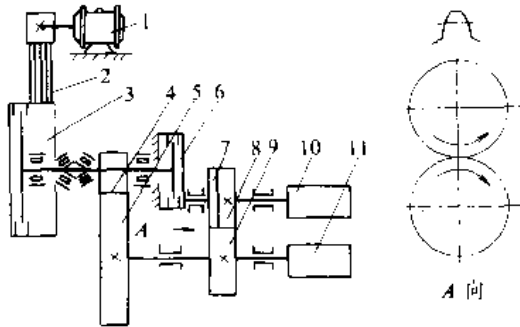


图 3·10-39 悬臂式辊锻机传动系统

- 1—电动机 2 三角皮带 3—离合器 4—小齿轮
- 5—大齿轮 6—制动器 7—浮动长齿齿轮
- 8—长齿齿轮 9—长齿齿轮 10—上辊
- 11—下辊

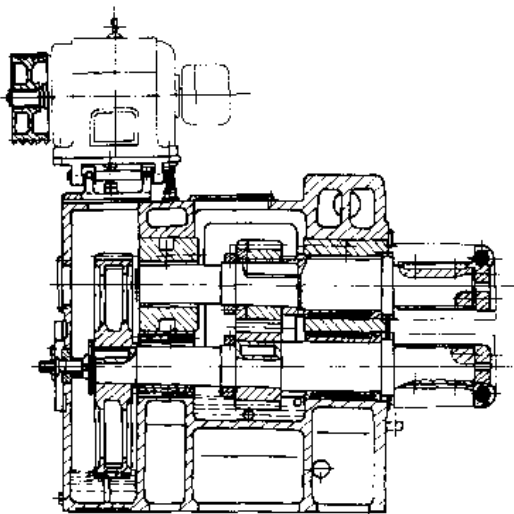


图 3·10-40 悬臂式辊锻机结构

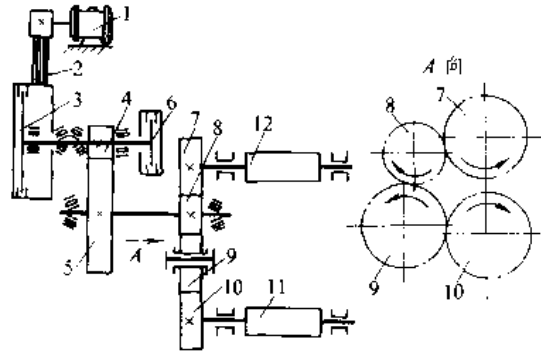


图 3·10-41 双支承辊锻机传动系统

- 1—电动机 2—三角皮带 3—离合器
- 4、5、7、8、9、10—齿轮 6—制动器
- 11—下辊 12—上辊

5·2·3 复合式辊锻机

兼有上述二者的性能，在双支承机架之间的锻辊工作部分为内辊，悬伸部分为外辊。可同时进行制坯和成形工艺。



表 3·10-21 双支承辊锻机技术参数 (JB2403—79)

锻模公称直径 (mm)	160	250	400	500	630	800	1000
公称压力 (kN)	125	320	800	1250	2000	3200	4000
锻辊直径 (mm)	105	170	260	330	430	540	680
锻辊可用长度 (mm)	160	250	400	500	630	800	1000
I 档锻辊转速 (次/min)	100	80	60	50	40	30	25
II 档锻辊转速 (次/min)	—	—	40	32	25	20	—
锻辊中心距调节量 (mm)	8	10	12	14	16	18	20
可锻方坯边长 (mm)	20	35	60	80	100	125	150

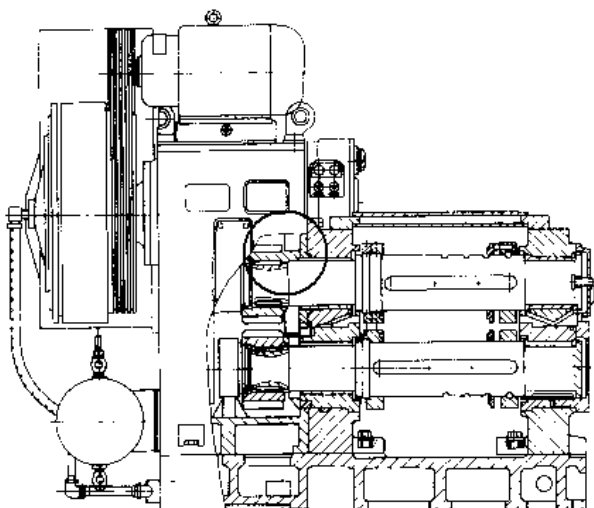


图 3·10-42 双支承辊锻机结构

5·3 楔横轧机

有三种基本类型：双辊式、板式及单辊弧形式。双辊式楔横轧机的工作原理如图 3·10-43a，两个轴心线平行的带楔形模具的轧辊，以相同的方向旋转，带动圆形坯料旋转，坯料在楔形模作用下，直径缩小长度增大，轧制成各种形状的台阶轴。左右有导板以防止工件歪斜。这种轧机应用广泛，生产率高，但模具加工困难，适合于生产批量大的轴类零件。除双辊式外，还有三辊

式，产品精度高，工件中心不易出现疏松，但调整困难。板式楔横轧机的工作原理如图 3·10-43b，上、下两块带有楔形模的板对向搓动，工件在模具之间滚动变形。其优点是模具制造容易，但生产率较低。单辊弧形式楔横轧机的工作原理如图 3·10-43c，工件在有楔形模的弧形板及辊子之间旋转变形，只需驱动一个轧辊，结构简单，造价低。但内弧形楔形模加工困难，轧机调整也十分困难，故用得不多。

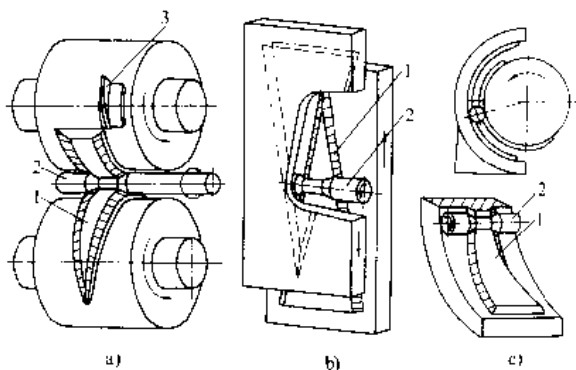


图 3·10-43 楔横轧机工作原理

a) 双辊式 b) 板式 c) 单辊弧形式
1-楔形模具 2-工件 3-切断模

双辊式楔横轧机的技术参数见表 3·10-22。

表 3·10-22 双辊式楔横轧机主要参数

型 号	D46	D46	D46	D46	D46	D46
	15×300	25×350	35×400	50×500	70×700	100×800
轧辊中心距 (mm)	315	400	500	630	800	1000
轧辊工作部分直径 (mm)	250	320	400	500	630	800
轧辊工作部分长度 (mm)	400	450	500	650	800	900
工件最大直径 (mm)	15	25	35	50	70	100
工件最大长度 (mm)	300	350	400	500	730	800
轧辊中心距调整量 (mm)	±8	±10	±12	±15	±20	±25
轧辊转速 (次/min)	15	15	14	12	12	10
下轧辊角度调整量 (°)	±7.5	±7.5	±7.5	±7.5	±7.5	±7.5
电机功率 (kW)	7.5	15	22	30	55	75
机器质量 (约) (t)	2	3.5	6.3	11.5	21	38



5.4 斜轧机

两个轴心线交叉成一定角度的带有螺旋形孔型的轧辊，同向旋转，带动两轧辊间的圆形坯料旋转并前进，坯料在螺旋孔型的作用下，经过成形、精整与切断，轧制成各种形状的回转体零件或毛坯。图 3·10-44 为钢球斜轧的示意图。

斜轧生产率及材料利用率高，无冲击少噪声，模具寿命高，但模具设计及加工困难，工艺调整复杂。斜轧适于生产批量大的回转体零件，如钢球、滚子、轴承环及具有螺旋面的零件。也用于生产模锻的毛坯。

1. 穿孔式斜轧机(图 3·10-45) 电动机、减速机构及轧机分别安装在基础上，轧机强度高，刚性好，使用可靠。多用于轧制尺寸大，精度要求不高的产品。穿孔式钢球斜轧机的技术参数如表 3·10-23。

2. 机床式斜轧机(图 3·10-46) 电动机、减速机构与轧制部分安装在一个机架内，结构紧凑，占地小，

精度高，易于配置前后进出料装置。承载能力较小，维修较困难。一般用于轧制尺寸小，精度要求高的产品，如自行车钢球、滚针等。

轴承环斜轧机及齿轮滚刀斜轧机的技术参数见表 3·10-24。

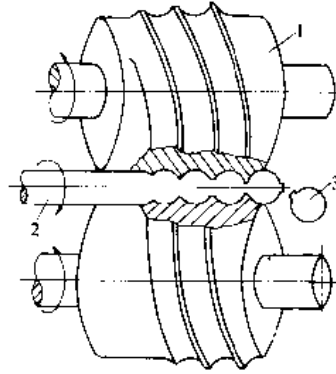


图 3·10-44 钢球斜轧示意图
1—轧辊 2—坯料 3—钢球

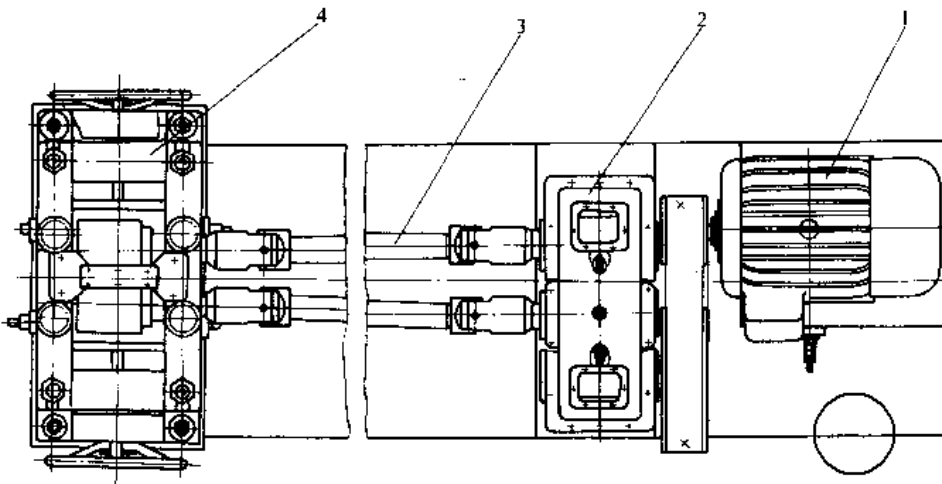


图 3·10-45 穿孔式斜轧机

1—电机 2—减速机 3—方向节轴 4—轧机座

表 3·10-23 穿孔式钢球斜轧机技术参数

规格	φ30 钢球	φ60 钢球	φ75 钢球	φ100 钢球
轧制钢球直径范围 (mm)	6~35	41.5~62	41.5~78	62~104
坯料直径 (mm)	6~35	40~60	40~80	60~100
最大轧制压力 (kN)	100	250	600	1200
最大轧制扭矩 (kN·m)	2×3	2×12	2×30	2×70
最大轧辊直径 (mm)	220	300	375	350~500
轧辊倾角 (°)	0~8	0~7	0~7	0~7
轧辊转数 (次/min)	120、150、180	75	70	60
电机功率 (kW)	40	125	320	700
轧机质量 (约) (t)	4.5	12	40	75



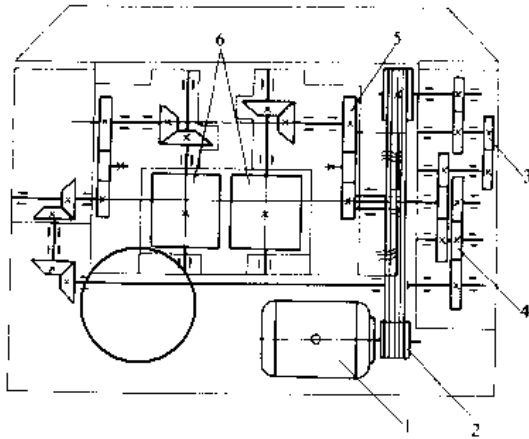


图 3·10-46 机床式斜轧机传动简图

- 1—电动机 2—皮带轮 3—齿轮减速装置
4—分速齿轮 5—行星齿轮箱 6—轧辊

表 3·10-24 其他螺旋孔型斜轧机技术参数

类 型	轴承环斜轧机	齿轮滚刀斜轧机
轧件外径 (mm)	50~100	45~130
轧制压力 (kN)	400	
轧辊数	2	3
轧辊倾角 (°)	0~10	0~6
轧辊直径 (mm)	300、420	265
轧辊转数 (次/min)	74	57
电机功率 (kW)	380 (穿孔机) 280 (成形轧机)	130
轧机质量 (t)	~20	

三辊仿形斜轧机的技术参数见表 3·10-25。

表 3·10-25 三辊仿形斜轧机技术参数

类 型	锭杆热轧机	80 型三辊轧机
轧件直径 (mm)	3.8~17.8	30~80
轧件最大长度 (mm)	650	2600
轴向拉速 (m/min)	3~3.5	0~6
轧辊转数 (次/min)	615	75~160
电机功率 (kW)	7	100
生产率 (kg/h)		600 (按 $\phi 60$ 坯料算)
仿形特点	90~250 (件/h) 机械仿形	液压仿形

表 3·10-26 旋转锻造机技术参数

型 号	D21-4.2	D21-7.3	D21-17.5	D24-30
坯料最大直径 (mm)	4.2	7.3	17.5	30
锻后最小直径 (mm)	1.1	4.1	7	6
主轴转数 (次/min)	1200	900	600	270
送料速度 (m/min)	3.5	2		1.44
电机功率 (kW)	1.0	1.7	1.7	10
机器长度 (mm)	1040	780	780	1560
机器宽度 (mm)	730	760	760	1360
机器高度 (mm)	1300	1300	1400	1230
机器质量 (kg)	300	465	635	1478
工艺用途	锻棒料	锻棒料	锻棒料	锻管材

5·5 旋转锻造机

心轴式旋转锻造机的工作原理如图 3·10-47。鼓轮 1 固定不动，内有保持器 4 及装在保持器内成偶数的圆柱滚子 3。锻模 6、调节垫板 5 及滑块 2 均装于心轴 7 的径向滑槽内。当心轴旋转时，由于离心力的作用，滑块与锻模沿着滑槽向外运动，处于张开状态（图 3·10-47a）。当心轴带着滑块旋转到与滚子相接触的位置时，迫使滑块带着锻模向中心运动（图 b），打击工件使产生压缩变形。工作的特点是对锻件连续不断地周期性打击，每次打击的变形量很小。轮圈式旋转锻造机与心轴式正好相反，心轴固定不动，鼓轮带着保持器及圆柱滚子作旋转运动，以推动滑块及锻模对锻件进行打击，滑块依靠弹簧回程。深筒式旋转锻造机兼有上述两者的特点，心轴带着滑块及锻模向一个方向旋转，而鼓轮带着保持器及圆柱滚子向相反方向旋转，因而磨损比较均匀。

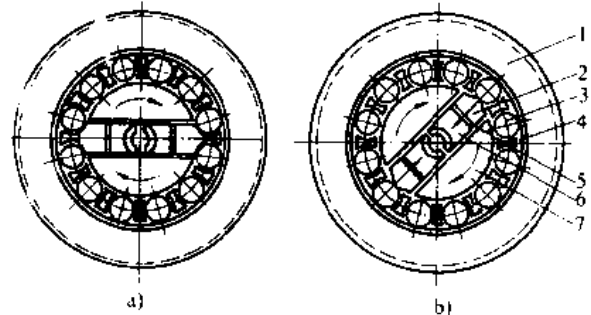


图 3·10-47 心轴式旋转锻造机工作原理

- 1—鼓轮 2—滑块 3—圆柱滚子 4—保持器
5—调节垫板 6—锻模 7—心轴

旋转锻造机由上述工作部分、传动部分、送料机构及机身组成，一般用于锻造对称断面的棒材或管材，旋转锻造机的技术参数如表 3·10-26。



5.6 辗扩机

辗扩机的工作原理如图 3·10-48。热坯套在芯辊上，旋转的辗压辊快速向下，接触坯后逐渐下压，与芯辊组成辗压型腔。在辗压辊压力下，坯被辗轧并被带动旋转，芯轴也被带动反向旋转，坯壁厚变薄而直径扩大，同时形成所需要的截面形状。导向辊起诱导工件成圆的作用，并增加辗扩过程的稳定性，导向辊随坯件的扩大而后退。当坯件被扩到预定外径时，坯件和信号辊接触，先发出精辗信号，最后发出停辗信号，此时辗

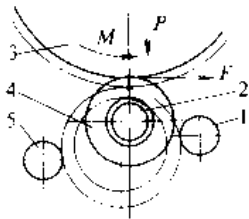


图 3·10-48 辗扩机工作原理

1—导向辊 2—芯辊 3—辗压辊 4—坯 5—信号辊

压辊退回。辗扩机用于生产各种等截面的环形毛坯，如轴承环、齿圈、轮箍、衬套及高压容器等。

1. 立式辗扩机 能辗扩的最大环件的公称外径一般在 400mm 以下。机身立置但稍向后倾，以便于进出料及增加辗扩过程的稳定性。其传动系统如图 3·10-49，电动机经减速箱、万向节带动辗压辊旋转，

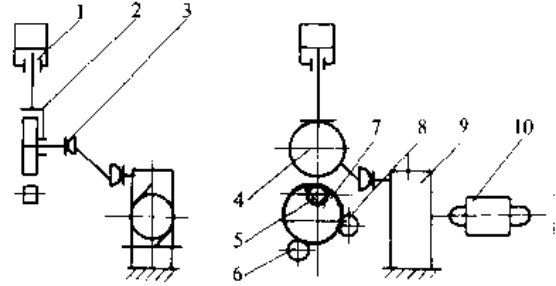


图 3·10-49 立式辗扩机传动简图

1—气缸 2—滑块 3—万向节 4—辗压辊
5—芯辊 6—信号辊 7—坯 8—导向辊
9—减速箱 10—电动机

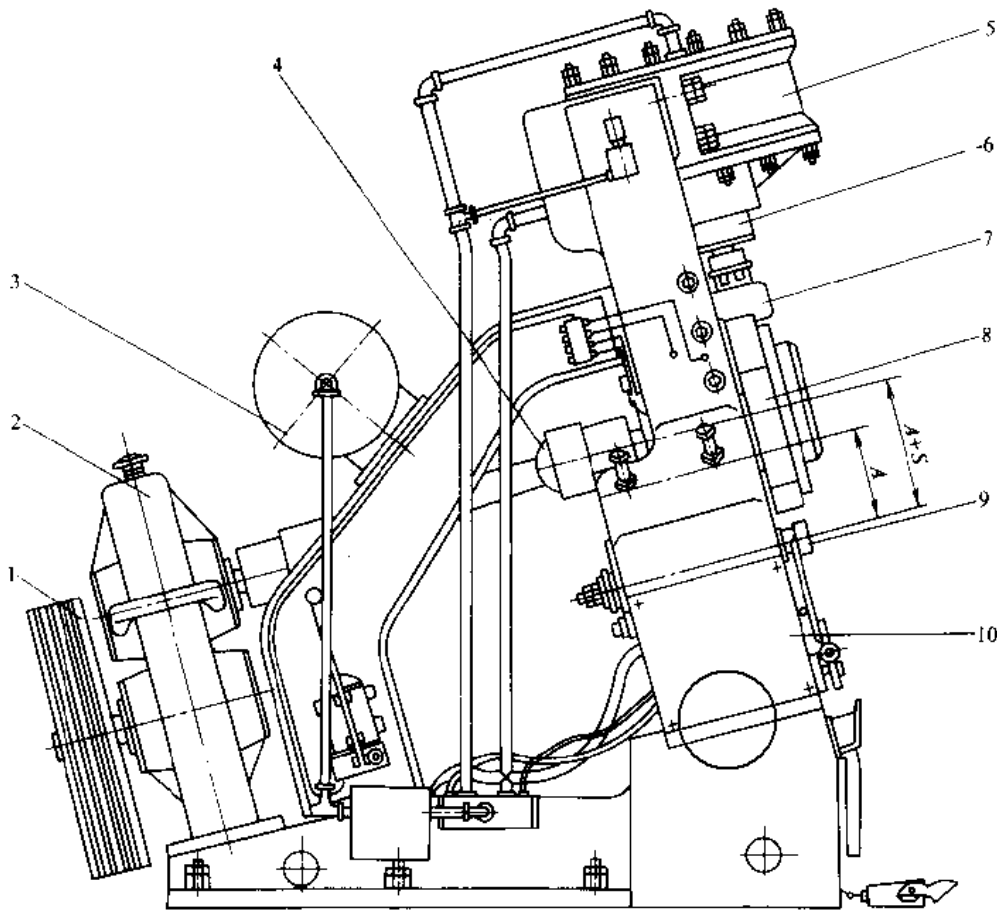


图 3·10-50 立式辗扩机结构图

1—带轮 2—减速箱 3—气罐 4—万向节 5—气缸 6—活塞杆 7—滑块 8—辗压辊 9—芯辊 10—机身



气缸则通过滑块使辗压辊下压或回程。结构如图 3·10-50。

2. 卧式辗扩机 能辗扩的最大环件的公称外径一般在 400mm 以上。机身水平放置，导向辊 2~4 个，并可设上、下端面的锥形辗压辊。工作原理如图 3·10-

51，电动机经减速箱带动辗压辊旋转。芯辊和支架均安装在滑块上，由主油缸驱动，右行则施加压力进行辗扩，左行回程，支架可围绕销轴连同芯辊向上抬起，以便于装卸料。其结构如图 3·10-52。

辗扩机的技术参数见表 3·10-27。

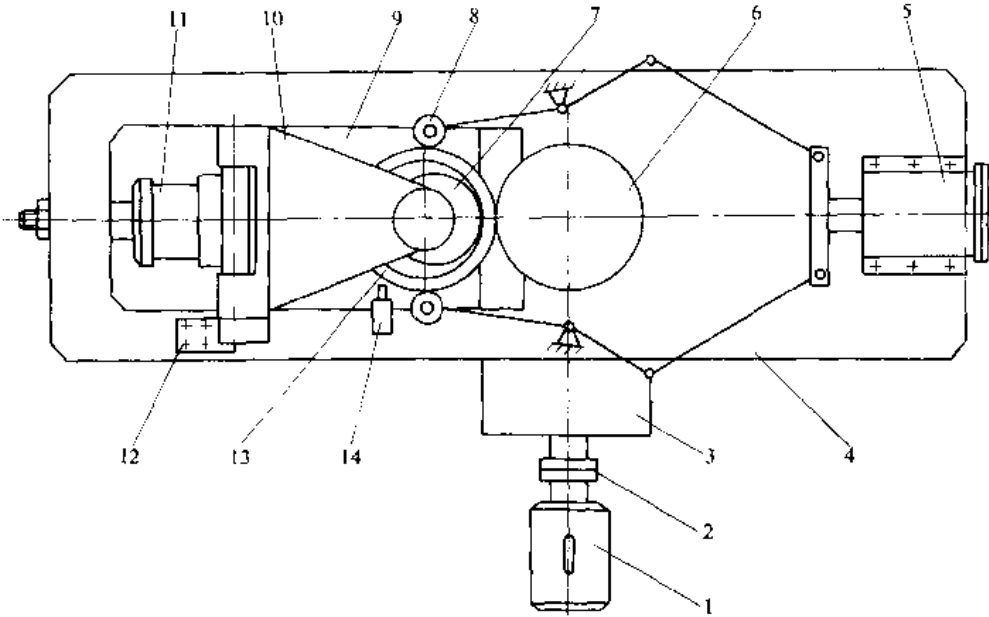


图 3·10-51 卧式辗扩机传动原理

- 1—电动机 2—联轴节 3—减速箱 4—机身 5—导向辊缸 6—辗压辊 7—芯辊 8—导向辊
9—滑块 10—支架 11—主缸 12—挡块 13—环坯 14—检测机构

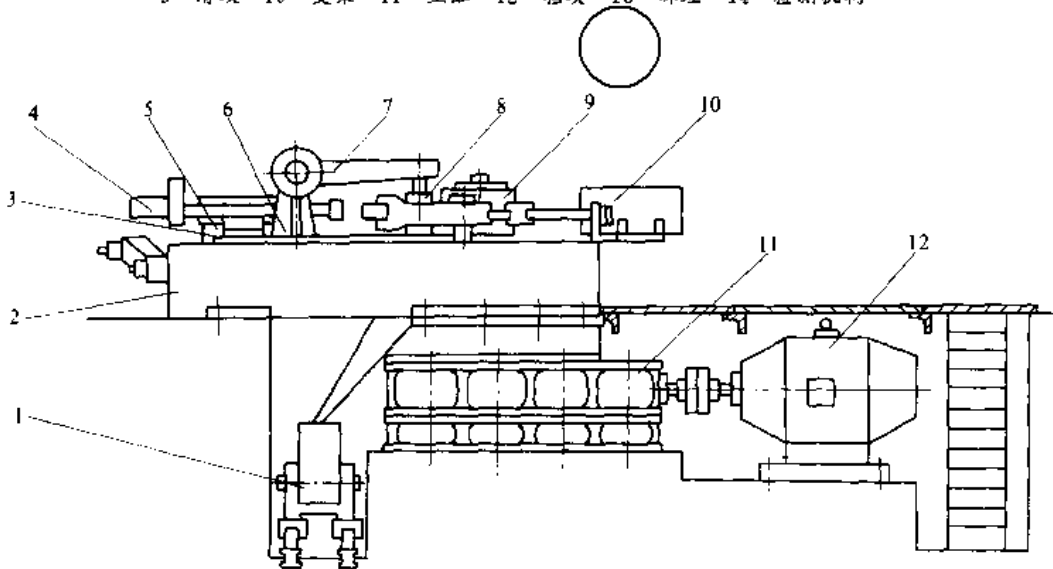


图 3·10-52 卧式辗扩机结构

- 1—落料箱 2—机身 3—支架摆动机构 4—检测机构 5—主缸 6—滑块 7—支架 8—芯辊
9—辗压辊 10—导向辊机构 11—减速箱 12—电动机



表 3·10-27 辗扩机技术参数

型 号		D51W-160	D51W-250	D51W-350	D51-1300
坯件最大外径	(mm)	160	250	350	1420
坯件最大高度	(mm)	35	50	85	200
公称辗压力	(kN)	75	98	155	830
辗压线速度	(m/s)	2	2.1	2.2	1.15
滑块行程	(mm)	70	110	130	840
辗压辊至芯辊最小中心距	(mm)	180	265	365	
电机功率	(kW)	18.5	37	75	135
生产率	(件/h)	500	400	200	
主轴转速	(次/min)	120	80	62	
外形尺寸(长×宽×高)	(mm)	2200×1550×1850	2890×1900×2400	4050×1800×3000	
机器质量	(t)	2.8	6.5	10	27

5·7 摆辗机

摆辗机结构简图如图 3·10-53。圆锥体形状的上模固定在摆头上，摆头轴线与机器主轴线相交成 γ 角(摆角)，一般 $0^\circ \leq \gamma \leq 6^\circ$ ，当主轴旋转时，摆头及上模绕主轴线回转，作摆动运动。毛坯置于固定在下模中的下模中，滑块在油缸推动下，将下模及毛坯推向上行，当毛坯接触到摆动的上模时，上模在工件上不断滚动，局部且顺次地对工件加压，下模带着工件不断向上进给，从而使工件逐步产生塑性变形，呈螺旋面逐渐扩展，最终按下模模腔成形。

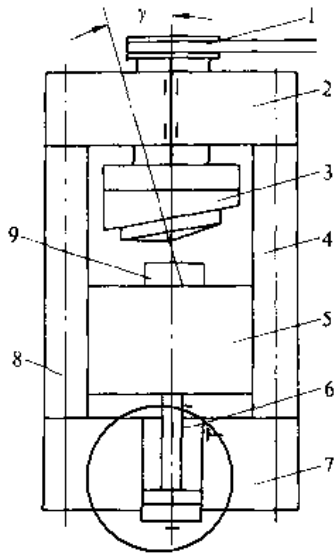


图 3-10-53 摆辗机结构简图

- 1—皮带传动 2—上横梁 3—摆头 4—立柱
- 5—滑块 6—油缸 7—下横梁
- 8—拉紧螺栓 9—工件

摆头是摆辗机的关键部件，主要有两种结构：

1. 轴承式摆头(图 3·10-54) 传动齿轮 5 带动主轴旋转，主轴下端固定有偏心斜盘 3，摆头与摆头座以

轴承安装于偏心斜盘的偏心孔内，偏心孔轴线与主轴线成 γ 角(摆角)，因而摆头也与主轴线成 γ 角。当主轴旋转时，摆头随之产生摆动运动。结构简单，加工容易，维修方便，消耗功率较少。

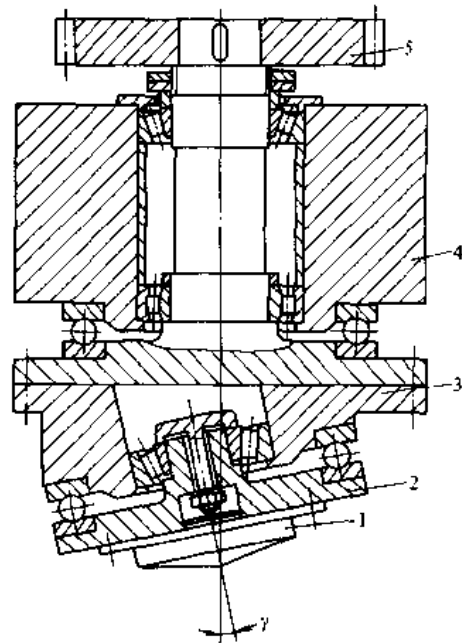


图 3·10-54 轴承式摆头

- 1—摆头 2—摆头座 3—偏心斜盘
- 4—机架 5—传动齿轮

2. 球面式摆头(图 3·10-55) 传动齿轮 4 带动主轴旋转，主轴下端固定偏心套 3，偏心套内的偏心内孔带有斜端面，偏心孔轴线与主轴线成 γ 角。摆头连同球头以轴承安装于偏心孔内，当主轴旋转时，偏心套随之旋转，球头带动摆头作摆动运动，并以球面在球形衬套内相对滑动。这种结构传递载荷较大，寿命较长。也有在球头和球面衬套之间建立一层静压油膜，以提高其润滑与承压性能。



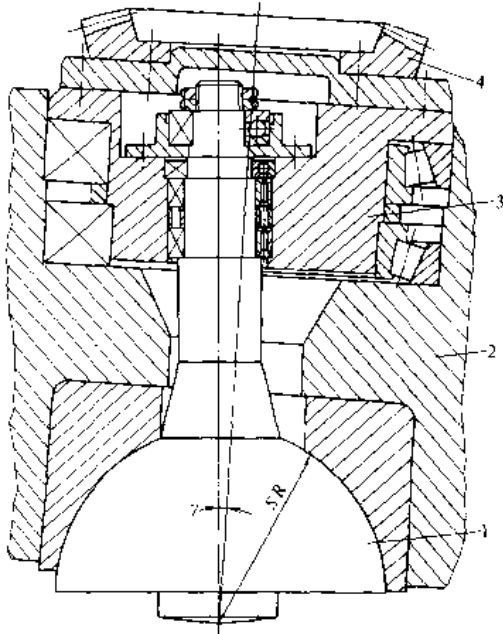


图 3-10-55 球面式摆头

1-球头 2-机架 3-偏心套 4-传动齿轮

表 3-10-28 为部分国产立式摆辗机的技术参数。

卧式摆辗机适合于加工长轴类锻件，如汽车半轴等。它的凹模由上、下两个半模组成，多一套能使上半凹模作上、下往复运动的运动副。表 3-10-29 为国产卧式摆辗机的技术参数。

表 3-10-28 立式摆辗机技术参数

公称压力 (kN)	1000	1600	2000	4000
辗压最大直径 (mm)	200	210	200	400
摆头转数 (次/min)	200	69/92/138	240	96
每转送进量 (mm)	3~6	0.22~8.7	6	1.5
最大行程 (mm)		230	150	200
顶出力 (kN)		40		300
工作台尺寸 (mm ²)		650×610	700×650	1250×940
电机功率 (kW)		20/25/28	37	130
液体工作压力 (MPa)	20	25	25	21

表 3-10-29 卧式摆辗机技术参数

公称压力 (kN)	1000	1600	2000
夹紧力 (kN)	1000	1600	2000
工作缸行程 (mm)	250	300	300
夹紧缸行程 (mm)	200	250	300
摆头转数 (次/min)	200	200	240
每转送进量 (mm)	0.5~1.5	1.8~6	0~6
摆头电机功率 (kW)	40	55	80
泵电机功率 (kW)	20	22	55
摆角 (°)	3	3	3

5.8 径向辗机 (精锻机)

径向锻造时坯料轴向旋转进给，由均匀分布在圆周上的多个锤头沿径向同步锻打，频率很高，每次变形量很小，金属变形处于三向压应力状态，有利于提高金属塑性，心部不易产生裂纹，不仅适用于一般钢材锻造，且适用于高强度低塑性的高合金钢锻造，尤其适用于难熔金属如钨、钼、铌等及其合金的开坯和锻造。在径向辗机上，除可锻造各种台阶轴、空心轴类锻件外，还可进行各种气瓶及炮弹壳的缩口与缩颈，冷锻枪管来复线及膛膛，及钢锭开坯与棒材生产。

立式径向辗机的工作原理如图 3-10-56。电动机 1 经三角带轮 2、空心轴 3 及中心齿轮 27 带动齿轮 26。

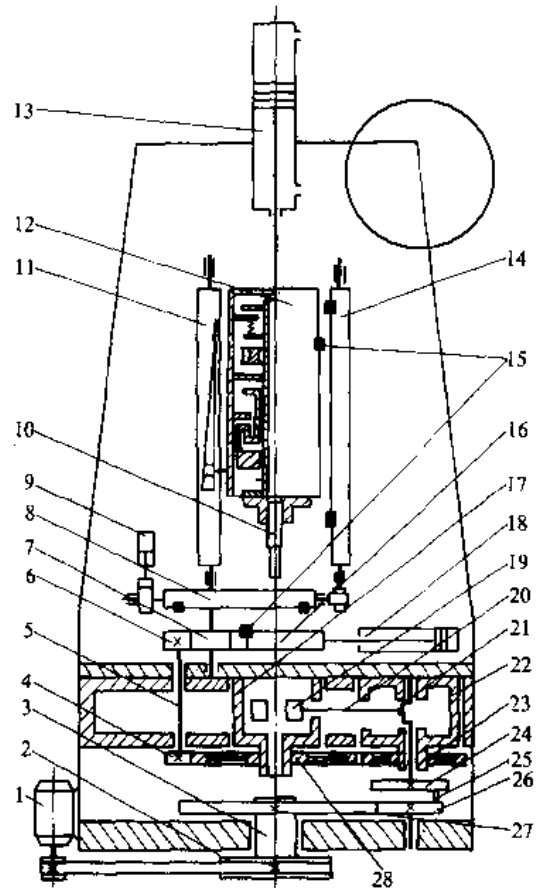


图 3-10-56 立式径向辗机工作原理图

1-电动机 2-带轮 3-空心轴 4、6、7、26-齿轮
5-轴 8-卧式控制鼓 9-分度液压缸 10-工件
11-靠模柱 12-夹头 13-轴向进给齿轮 14-立式控制鼓
15-撞块 16-齿条 17-摆动套
18-径向进给液压缸 19-锤头 20-连杆
21-曲轴 22-偏心套 23-进给齿轮
24-飞轮 25-撞块 27、28-中心齿轮



齿轮 26 通过拨块 25 驱动飞轮 24 旋转, 拨块 25 可在飞轮的槽中作径向滑动。飞轮 24 通过曲轴 21 及连杆 20 使锤头 19 作往复运动, 对毛坯进行锻击。在圆周上均匀分布有三套曲轴、连杆和锤头, 同步锻击(图中仅画出一套)。径向进给液压缸 18 控制锤头的径向进给, 当高压油进入液压缸, 和活塞杆相连的齿条 16 带动齿轮 7、6、小轴 5、小齿轮 4 和中心齿轮 28 转动, 从而带动三个进给齿轮 23 转动一定角度, 并使固定在齿轮

23 上的三个相应的偏心套 22 也转动一定角度, 迫使相应的三个曲轴 21 靠近或离开毛坯, 实现锤头的径向进给或后退。进给液压缸 13 控制毛坯的轴向进给, 而夹头 12 内的电机及相应传动机构则使毛坯同时作回转运动, 因此, 锻件相对于锤头作螺旋运动。

卧式径向锻机可以锻造长度很长的锻件, 其结构如图 3·10-57。

径向锻机的技术参数见表 3·10-30。

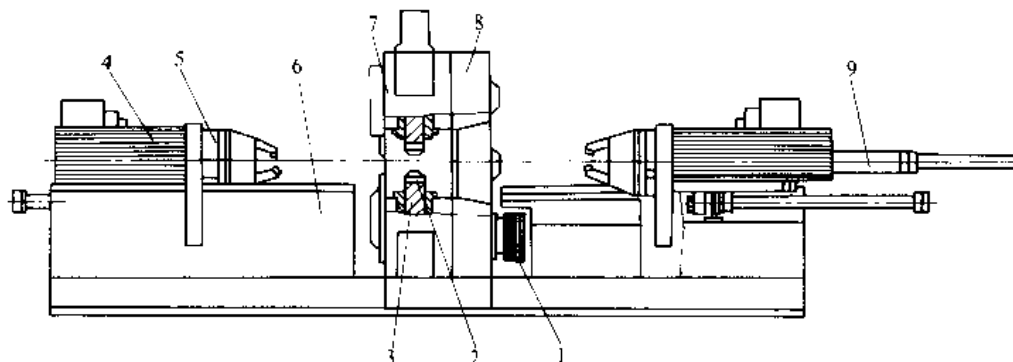


图 3·10-57 卧式径向锻机结构图

1—主传动带轮 2—锤头 3—连杆 4—控制板 5—夹头 6—机身 7—减速箱 8—传动箱 9—芯棒机构

表 3·10-30 径向锻机技术参数

型 号	中 国		奥 地 利				
	立式	卧式	SX06	SX13	SX20	SX32	SX55
锤头数	3	4	4	4	4	4	4
每个锤头最大打击力 (kN)	1000	1200	800	1600	2600	5000	10000
锤头锻击次数 (次/min)	600	650~800	1200	750	520	330	200
锻件长度 (m)	1	0.7 或 1	1	1~6	3~10	3~10	3~10
直径调节范围 (mm)	—	50	35	80	135	210	300
夹头数	1	2	1	1 或 2	2	2	2
可夹持最大毛坯直径 (mm)	85	85	60	130	200	320	550
主电机功率 (kW)	28	55	45	160	250	500	1000
总功率 (kW)	34.8	90	83	200 或 300	450	750	1740
机器长度 (mm)	2256	9000	—	—	—	—	—
机器宽度 (mm)	1654	8000	—	—	—	—	—
机器高度 (mm)	4648	2000	—	—	—	—	—
机器质量 (t)	~14	~30	~17	55~83	140~163	256~300	580~700

6 其他锻压设备

6.1 棒料剪切机

用于将棒料按需要长度切断, 为模锻、挤压、辗锻及辗压等工艺准备坯料。剪切棒料直径范围为 20~

200mm。生产率和材料利用率高。棒料剪切机的传动原理和曲柄压力机相似, 如图 3·10-58。其结构简图如图 3·10-59。

棒料剪切机剪切机构的工作原理如图 3·10-60。被剪切的棒料 8, 通过机动辊道 7, 送入装在滑块 5 下面的上刀片 4 和装在机身 10 上的下刀片 9 之间, 碰到



按定尺调节好的后挡料器 3 即停止,随之离合器接通,传动系统通过曲柄连杆机构带动滑块 5 下行,同时压料器 6 也下行,将棒料提前压紧。托料器由气缸推动上行,托住棒料,当上刀片随滑块下行碰到棒料时,和托

料器 2 共同夹紧棒料,并压托料器下行,直至棒料被剪断。滑块到下死点后回程,托料器气缸放气,并返回原来位置。

棒料剪切机技术参数见表 3·10-31。

表 3·10-31 棒料剪切机技术参数

公称剪切力 (kN)	1600	2500	4000	6300	10000	16000
剪切棒料最大直径 ($\sigma_b=600\text{MPa}$) (mm)	63	80	100	125	160	200
滑块连续行程次数 (次/min)	50	40	32	25	20	16
滑块单次行程次数 (次/min)	32	25 </td <td>20</td> <td>16</td> <td>12</td> <td>10</td>	20	16	12	10
挡料长度最小值 (mm)	50	65	80	100	125	160
挡料长度最大值 (mm)	320	320	500	500	800	800

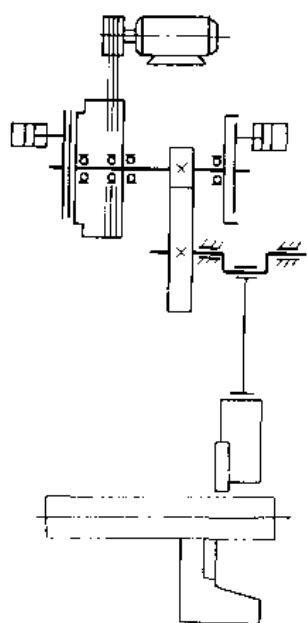


图 3·10-58 棒料剪切机传动原理图

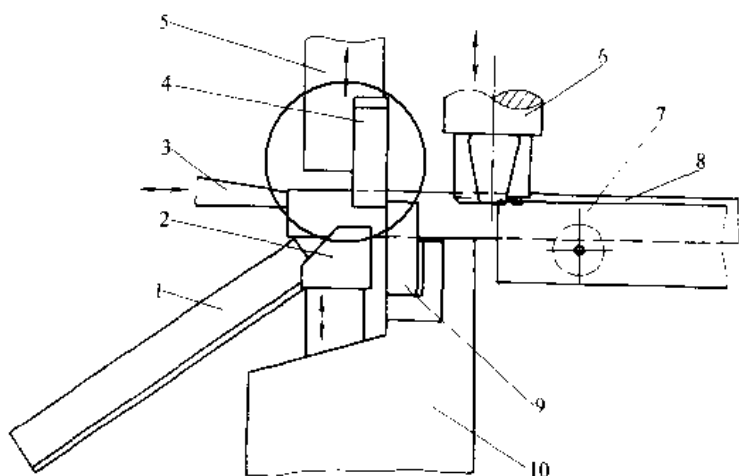


图 3·10-60 剪切机构工作原理

- 1—出料槽 2—托料器 3—后挡料器 4—上刀片
5—滑块 6—压料器 7—辊道 8—棒料
9—下刀片 10—机身

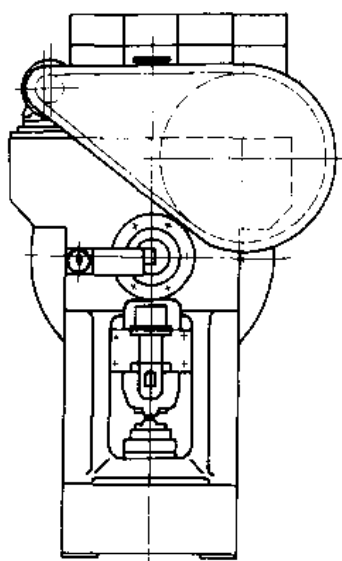


图 3·10-59 棒料剪切机结构简图

6·2 电热锻机

工作原理如图 3·10-61。夹头 5 与砧子 3 串联在特制单相变压器 8 的副绕组上。夹头夹紧工件后,顶锻液

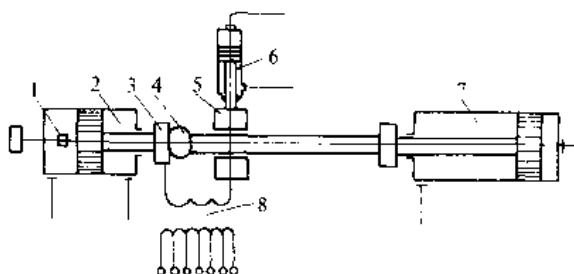


图 3·10-61 电热锻机工作原理

- 1—定位块 2—砧子液压缸 3—砧子 4—工件
5—夹头 6—夹紧液压缸 7—顶锻液压缸
8—单相变压器



压缸将工件推向左移,当工件与砧子接触时,电流通过两电极间的金属,工件被迅速加热至锻造温度。工件在夹头中定位,在保持良好接触状态下,工件与砧子在顶锻液压缸作用下继续向左移动,端部被逐步微粗,此时工件与夹头有相对滑动。当工件成形后,碰到定位块

1,顶锻液压缸活塞右移,夹头松开,加热停止,取出工件。

电热锻机上工件加热的方式有中频感应加热和电接触加热两种。电热锻机分立式和卧式,单头和多头等几种。电热锻机的技术参数见表3·10-32。

表3·10-32 电热锻机技术参数

毛坯最大直径 (mm)	8~13	8~16	10~40	30~50
毛坯最大长度 (mm)	210~290		100~600	1500
顶锻液压缸最大行程 (mm)	220	350		420
夹紧液压缸最大行程 (mm)	25	25		80
砧子液压缸最大行程 (mm)	60	80		200
最大顶锻力 (kN)	34	68	25~150	750
最大夹紧力 (kN)	9.5	16	7.8~50	150
变压器容量 (kVA)	50	50	150	500
变压器暂载率 (%)	50	50		
变压器次级电压 (V)	2.04~4.08	2.04~4.08		
生产率 (件/h)	500~1200	200		
机器长度 (mm)		1850	2250	
机器宽度 (mm)		3000	990	
机器高度 (mm)		3800	1334	
机器质量 (t)		~3.5	~3.0	

6·3 粉末锻造设备

大多采用通用锻造设备,如摩擦螺旋压力机、机械压力机、高速锤及液压机等。

对粉末锻造设备的主要要求为:

(1) 精度及刚度高,工作过程设备变形要小,以免

降低工件精度或损坏模具。

(2) 可以预选锻造能量。为了得到致密锻件,单位压力应达到600~1100MPa。

(3) 锻后应能迅速脱模,以减小模具热疲劳应力,提高模具寿命,并减少工件氧化。

(4) 主要用闭式模锻,设备应对过载不敏感。

第11章 锻造生产机械化与自动化^{[36]~[38]}

锻造生产机械化与自动化主要包括备料、加热(参见本篇第3章2节)和锻造操作三个方面。

备料通常采用锯床或剪床,效率以剪断为最高。剪床上使用的机械化自动化装置主要包括棒料传送、料头分选、下料长度检测等整套自动装置。

锻造设备主要有压力机和锻锤两类。压力机振动小,便于安装自动输送装置,滑块运动易于控制;设置脱模机构也比较方便,因此实现锻造过程的机械化和自动化以压力机为主。

连续自动送料适用于多工位热模锻压力机,其生产效率高,一台设备可以代替几台甚至十几台一般压

力机,是单机自动化的发展方向。

关于锻造机械手的应用方面,首先着重于提高其快速性,使锻件不致过度降温。其次是提高重复定位精度,要求在水平和垂直方向分别为±0.5mm和1mm以下。此外,对其防振与抗高温性能也应以改善。

在大量生产中,锻造自动线已日益普遍,其发展趋势大体上可分为三个方面:第一是向综合方向发展,即除备料、加热、制坯、模锻和切边外,还将热处理和检验等工序均列入自动线;第二是实现自动线能快调、可变,以适应多品种小批量生产的需要;第三是进一步发展自动锻压车间或锻压工厂,采用电子计算机进行生

产控制和企业管埋。

1 锻造操作机

锻造操作机是锻造车间实现锻造机械化与自动化的重要设备。它主要用于夹持锻件配合主机完成锻造工艺，也可用于坯料的装出炉、运输和堆放或夹持模具、工具进行操作。

1.1 锻造操作机分类

1.1.1 有轨操作机

有轨操作机如图 3-11-1，其结构紧凑，占地面积小，易实现遥控和与主机联动，但活动范围受限制。

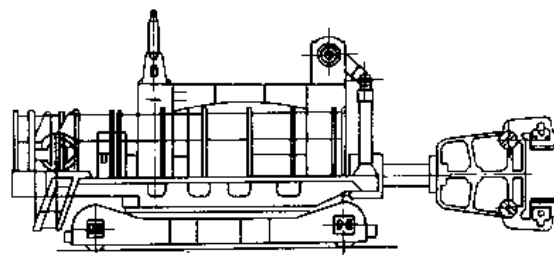


图 3-11-1 有轨操作机

1.1.2 无轨操作机

无轨操作机如图 3-11-2，活动范围大，用途广（锻造、装取料、搬运及堆放锻件等）；但占地面积大，不易实现遥控和与主机联动。

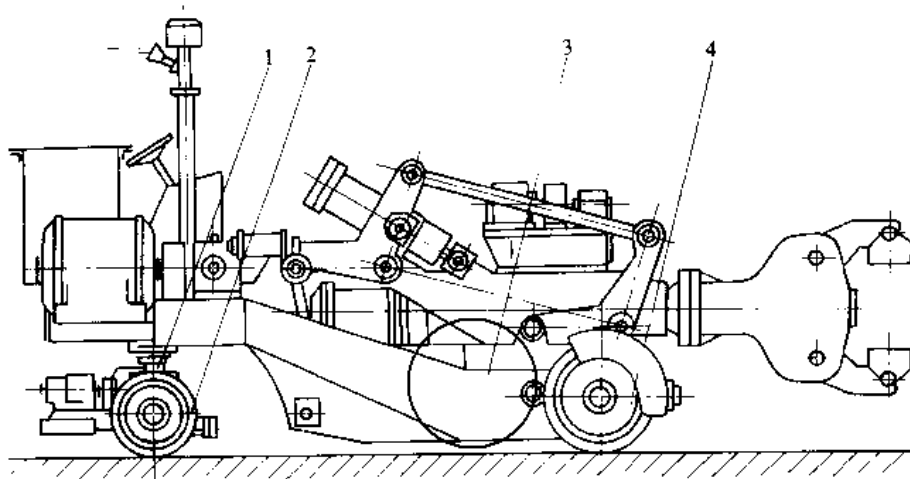


图 3-11-2 无轨锻造操作机

1—回转立柱 2—后轮 3—大车架 4—前轮

1.2 锻造操作机结构 (图 3-11-3)

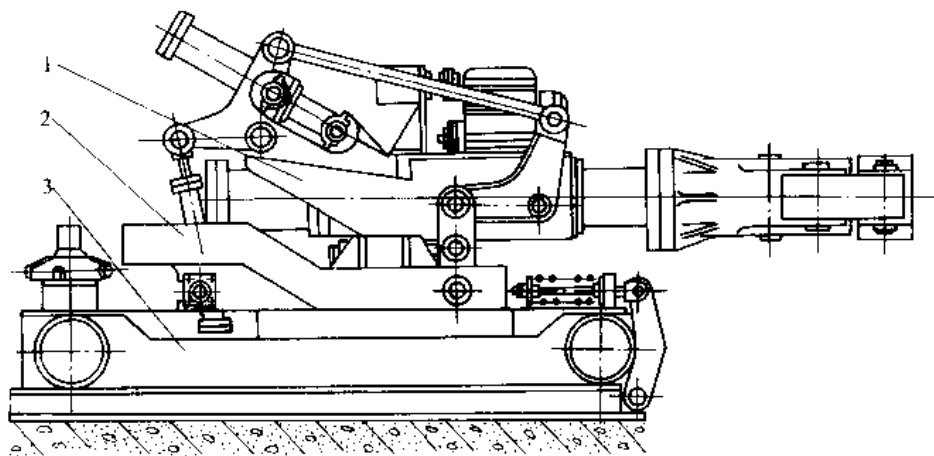


图 3-11-3 锻造操作机

1—夹钳 2—台架 3—大车



为了满足锻造工艺要求，锻造操作机一般有钳口夹紧机构、钳杆旋转机构、夹钳平行升降及倾斜机构、台架回转或夹钳摆移机构和大车行走机构。

1.2.1 钳口夹紧机构

钳口夹紧机构应能张开到一定尺寸，并要足够的夹紧力。钳口夹紧机构由钳头和拉紧装置两部分组成。钳头结构见图 3-11-4~图 3-11-6。拉紧装置有机械式，气动式和液压式三种。见图 3-11-7~图 3-11-9。

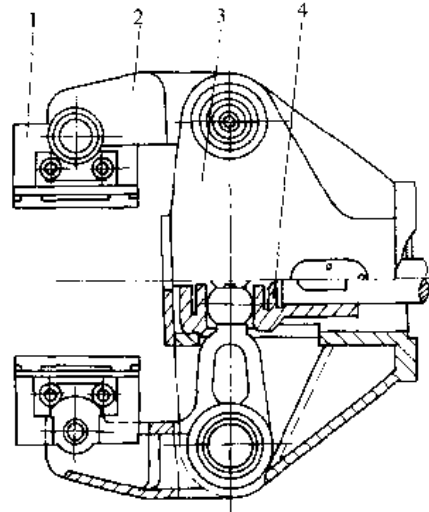


图 3-11-5 短臂杠杆式钳头

1—钳口 2—钳臂 3—钳壳 4—拉杆滑块

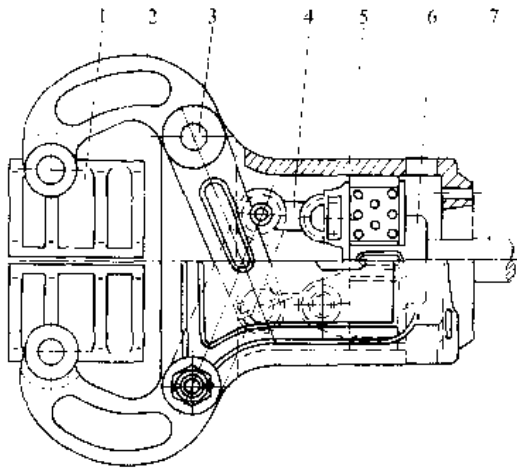


图 3-11-4 长臂杠杆式钳头

1—钳口 2—钳臂 3—钳臂固定销轴 4—连杆
5—钳壳 6—拉杆滑块 7—拉杆

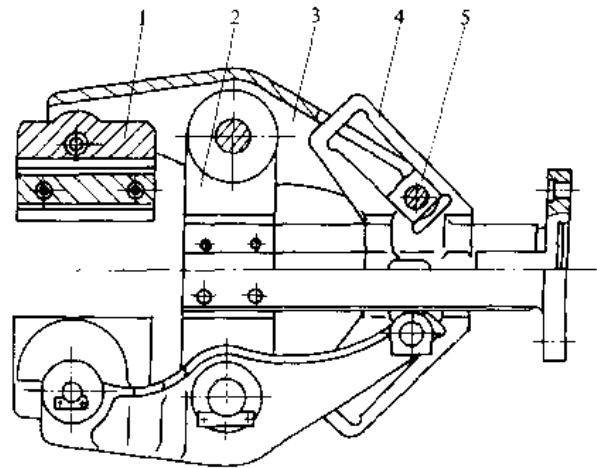


图 3-11-6 滑块斜槽式钳头

1—钳口 2—T形钳壳 3—钳臂 4—滑块 5—小滑块

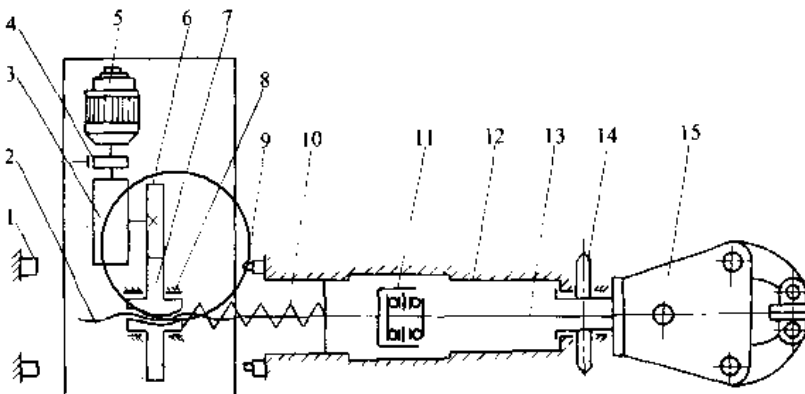


图 3-11-7 机械式拉紧装置

1—后挡块 2—螺杆 3—蜗轮蜗杆减速器 4—联轴节 5—电动机 6、7—齿轮 8—轴承 9—限位开关
10—弹簧 11—隔转装置 12—夹钳体 13—拉杆 14—链轮 15—钳头



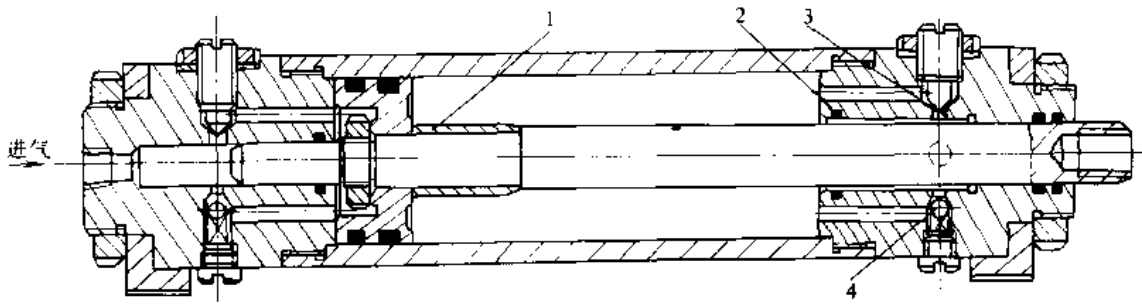


图 3-11-8 气动式拉紧装置

1—缓冲柱塞 2—密封圈 3—节流口 4—单向阀

1—钳杆 2—液压马达

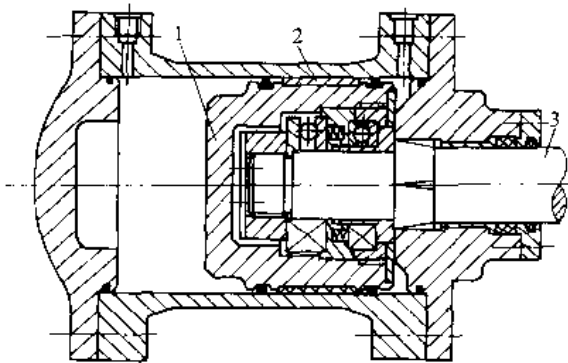


图 3-11-9 拉紧装置液压缸

1—活塞 2—尼龙导套 3—活塞杆

1.2.2 钳杆旋转机构

锻造时要求工件左右翻转，因而钳杆应能绕轴线作正反向旋转并能在任意转角上停止，钳杆旋转机构见图 3-11-10。

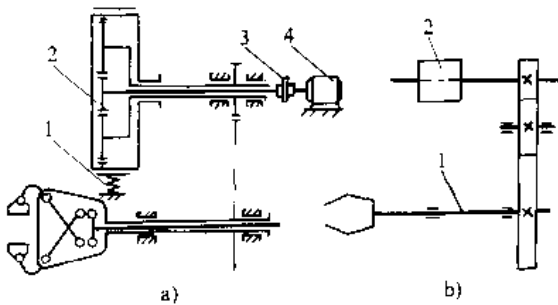


图 3-11-10 钳杆旋转机构

a) 电动机—减速器驱动

1—制动器 2—行星减速器 3—联轴器 4—电动机

b) 液压马达—减速器驱动

1.2.3 夹钳升降及倾斜机构

使工件能按锻造工艺要求以一定速度上升、下降或倾斜摆动，见图 3-11-11~图 3-11-13。

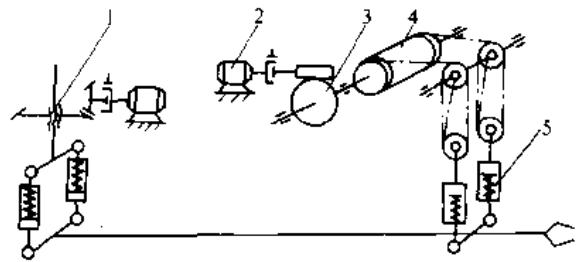


图 3-11-11 机械式钳杆升降和倾斜机构

1、4—升降机构 2—电动机 3—蜗轮副 5—缓冲器

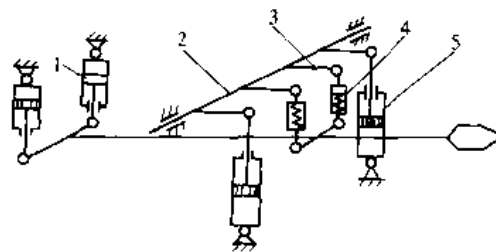


图 3-11-12 摆动杠杆式钳杆升降机构

1—调平缸 2—摆动轴 3—摆杆

4—缓冲器 5—升降缸



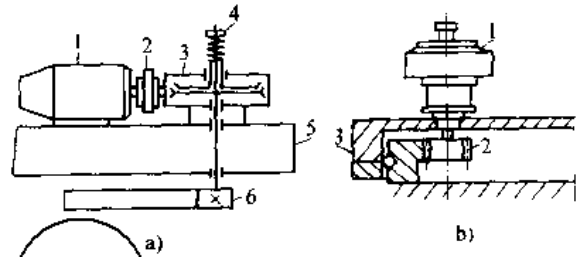
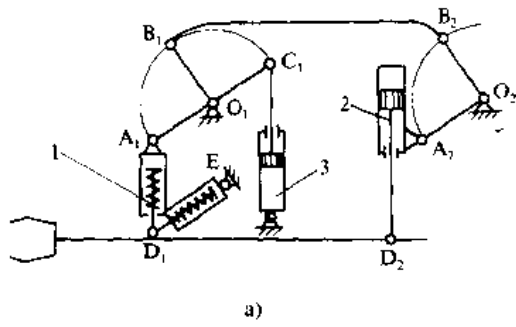


图 3-11-15 台架回转机构的驱动方式

a) 电动机—减速器驱动

1—电动机 2—制动器 3—蜗轮蜗杆减速器

4—极限力矩联轴节 5—台架 6—行星齿轮

b) 液压马达驱动

1—液压马达 2—行星齿轮 3—回转支承装置

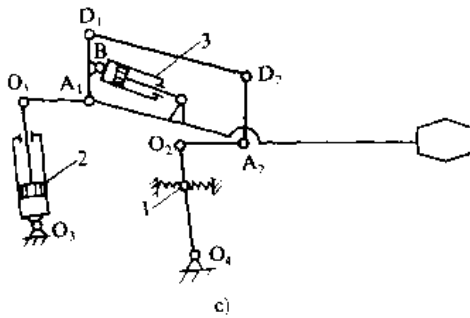
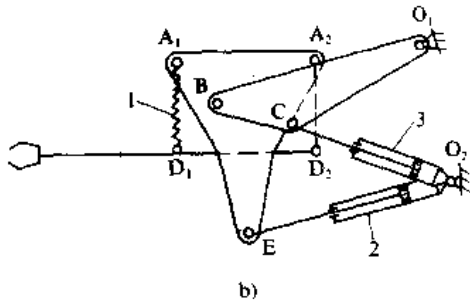


图 3-11-13 平行四连杆式钳杆升降机构

a) 上四连杆式 b) 倒四连杆式 c) 下四连杆式

1—弹簧缓冲器 2—倾斜缸 3—平行升降缸

1.2.4 台架回转机构

用以使操作机上部机架(包括钳杆、升降系统等)能绕垂直轴线回转,以完成夹取毛坯及放置锻件等动作。台架回转机构的支承型式见图 3-11-14,驱动方式见图 3-11-15。

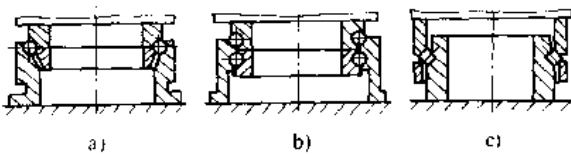


图 3-11-14 台架回转机构的支承型式

a) 单排滚珠式 b) 双排滚珠式 c) 交叉滚柱式

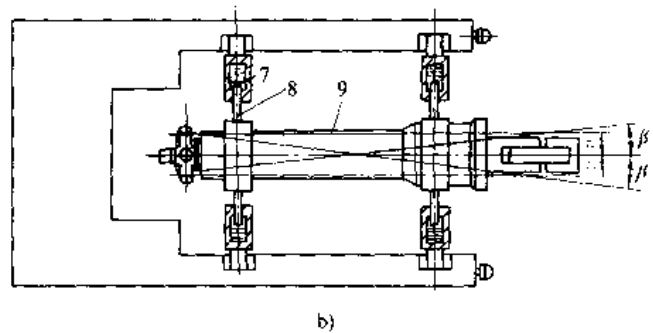
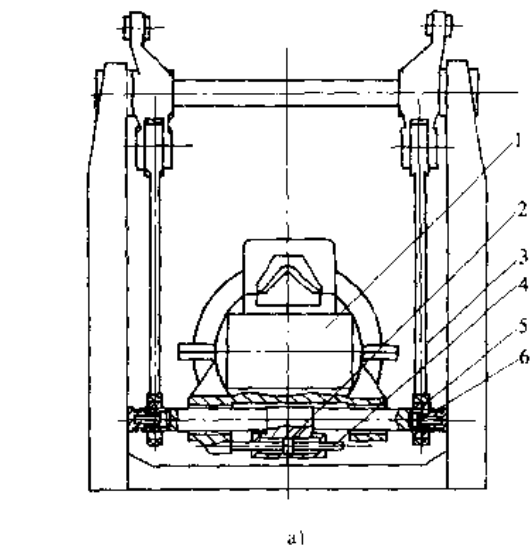


图 3-11-16 夹钳侧移和摆移机构

1、9—夹钳 2—双出杆液压缸 3—连杆 4—活塞杆

5—球面轴承 6—缓冲弹簧 7—油缸 8—柱塞



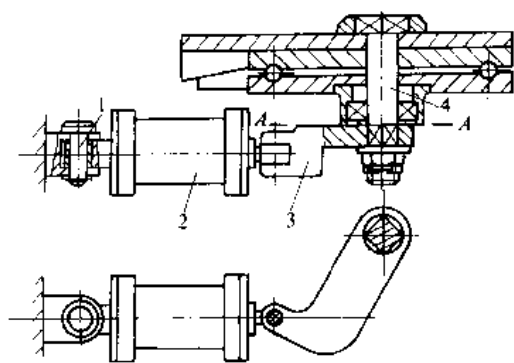
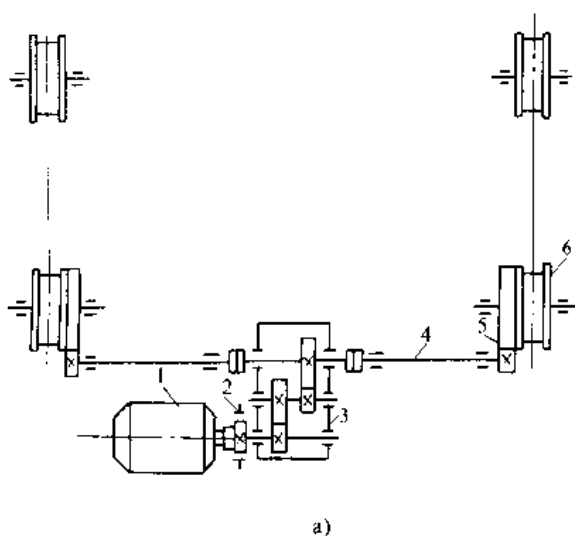
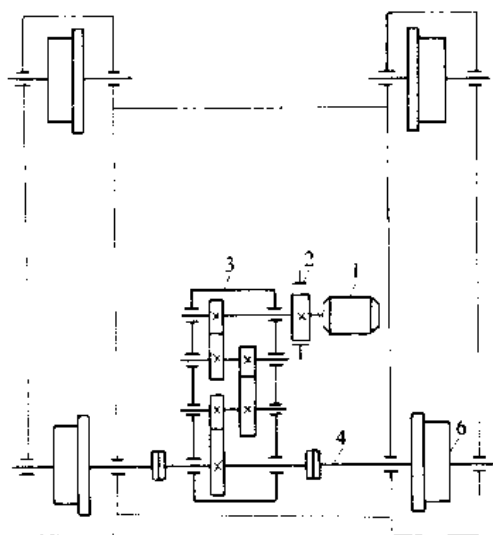


图 3-11-17 夹钳摆移机构

1—销轴 2—摆动液压缸 3—摆杆 4—转轴



a)



b)

图 3-11-18 集中驱动

a) 开式 b) 闭式

1—电动机 2—制动器 3—减速器 4—传动轴
5—开式传动齿轮 6—主动车轮

夹钳摆移机构一般用于小型操作机，见图 3-11-17。

1-2-6 大车行走机构

有轨操作机大车行走驱动方式可分为集中驱动(图 3-11-18)和分别驱动(图 3-11-19);前轮驱动和后轮驱动。

集中驱动用于小型操作机。大型操作机，宜用分别驱动，但必须保证同步运行。

一般操作机如后轮轮压能满足驱动要求，仍以后轮驱动较为合适。

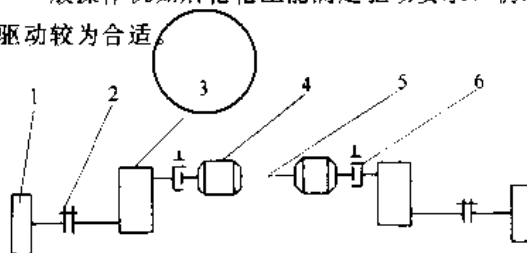


图 3-11-19 分别驱动

1—车轮 2—联轴器 3—减速器 4—电动机
5—同步装置 6—制动器

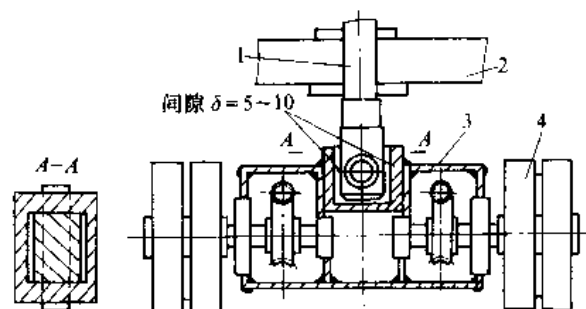


图 3-11-20 无轨锻造操作机后桥结构示意图

1—回转主轴 2—车架 3—驱动后桥 4—车轮

无轨锻造操作机，一般由柴油机带动油泵驱动后桥上的油马达使操作机前后行走。后轮为驱动轮并兼作转向用，见图 3-11-20。

1-2-7 缓冲装置

操作机钳杆与车架之间一般均装有垂直和水平缓冲器，用以吸收钳杆在锻造或大车运行时所引起的冲击震动。弹簧缓冲器和液压缓冲器(图 3-11-21)用得较多。

缓冲器的缓冲行程根据钳杆所要求的缓冲范围来确定。

缓冲器只在超载时起作用，因此，缓冲器的最小回弹力应大于额定载荷，一般为额定载荷的 1.1~1.25 倍。

312
凡



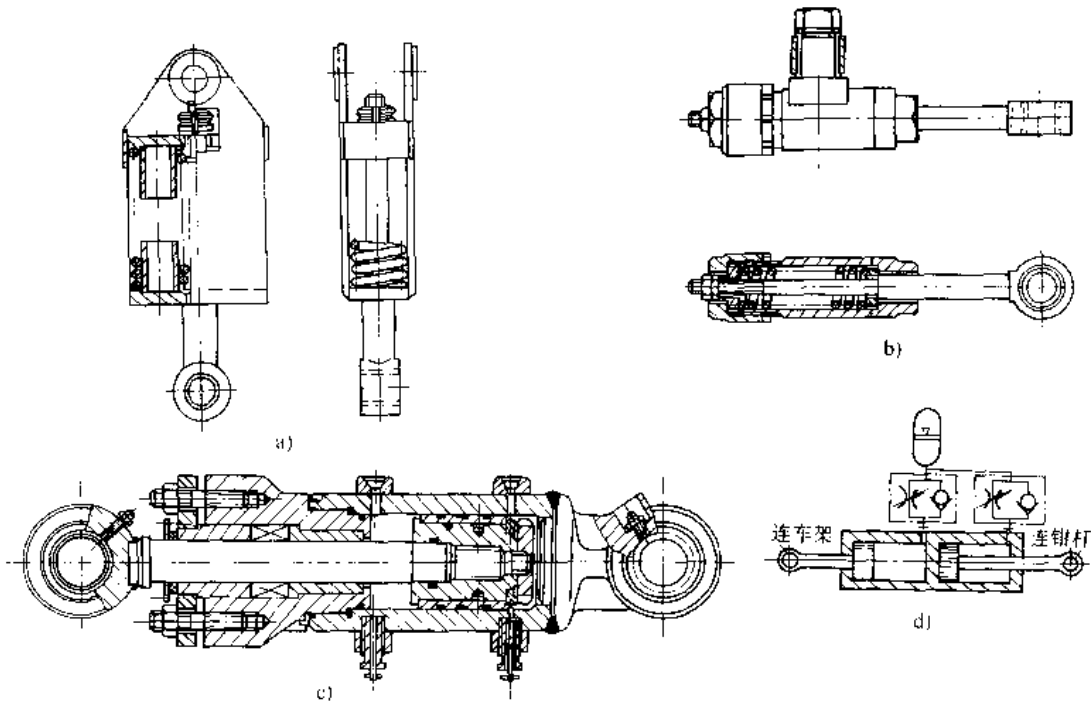


图 3-11-21 缓冲器

a) 垂直弹簧缓冲器 b) 水平弹簧缓冲器 c) 垂直液压缓冲器 d) 水平液压缓冲器

1.3 锻造操作机负载质量选择 (表 3-11-1)

表 3-11-1 推荐的锻造操作机负载质量选用数据

锻压设备	操作机负载 (kN)	锻件或钢锭质量
5600N 空气锤	2	成形锻件质量 30~50kg 要夹持胎模
7500N 空气锤	2~6	成形锻件质量 60~300kg 要夹持胎模
10kN 自由锻锤	5~10	成形锻件质量 70~600kg 要夹持胎模
20kN 自由锻锤	10~20	成形锻件质量 130~800kg 要夹持胎模
30kN 自由锻锤或 5000kN 液压机	20~30	钢锭质量 1000~2000kg
50kN 自由锻锤或 8000kN 液压机	30~40	钢锭质量 1000~4000kg
12500~16000kN 液压机	50~100	钢锭质量 2000~10000kg
25000~31500kN 液压机	200~400	钢锭质量 6000~40000kg
60000kN 液压机	400~600	钢锭质量 20000~100000kg

1.4 锻造操作机主要参数 (图 3-11-22 和表 3-11-2~表 3-11-4)

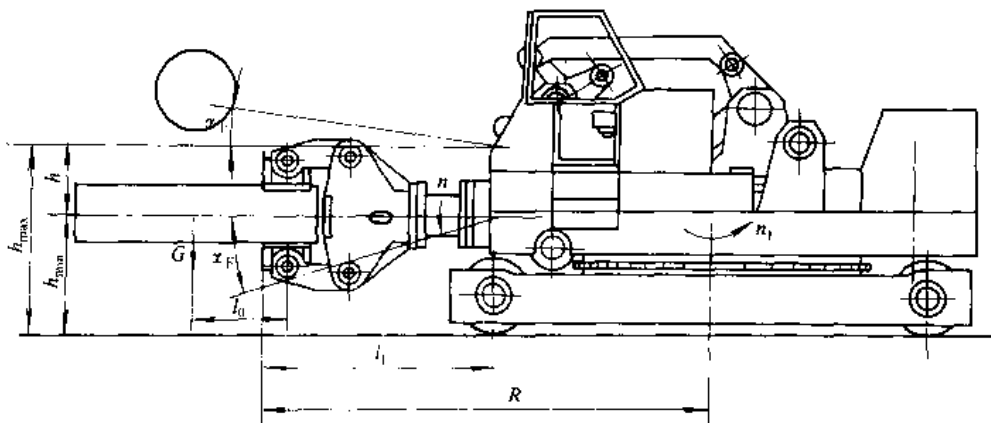


图 3-11-22 锻造操作机基本参数



表 3-11-2 有轨锻造操作机的主要参数

序号	公称负载 G (kN)	2	6	16	20	30	50	100	200	400	600	1200	
1	夹持力矩 M (kJ)	3	9	20	40	60	125	250	500	1000	1500	3400	
2	夹持锻件尺寸范围 (mm)	d_{max}	250	380	420	540	650	740	940	1200	1380	1600	2000
		d_{min}	60	90	140	175	230	275	400	500	600	700	850
3	夹钳中心线至轨顶高度 (mm)	h_{max}	950	1040	1080	1150	1200	1340	1600	1850	2250	2600	3250
		h_{min}	600	650	650	650	650	740	900	1050	1350	1600	2050
4	夹钳伸出量 l_1 (mm)	1000	1200	1400	1400	1400	1600	2000	2300	2450	2450	3000	
5	轨距 s (mm)	1000	1200	1500	2200	2500	2800	3000	3600	4600	4600	5200	
6	大车运行速度 v (m/min)	45	45	45	45	45	45	45	45	35	30	30	
7	钳杆旋转速度 n (r/min)	30	30	30	20	20	16	14	10	8	8	6	
8	钳头旋转直径 D (mm)	620	750	900	1050	1200	1400	1650	2000	2450	3400	3800	

表 3-11-3 回转式和摆移式锻造操作机的主要参数

序号	负载 G (kN)	2	6	10	20	30	50	100	200	400	600	
1	夹钳在水平面上左右摆动角度 $\pm\beta$ ($^\circ$)	± 7	± 7	± 7	± 7	± 7	± 7	± 6	± 5	± 4	± 3.5	
2	夹钳在水平面上左右移动距离 $\pm C$ (mm)	± 150	± 200	± 200	± 200	± 200	± 200	± 200	± 200	± 300	± 300	
3	夹钳中心线至轨顶高度 (mm)	h_{max}	1050	1200	1280	1400	1500	1650	1850	—	—	—
		h_{min}	700	800	850	900	950	1050	1150	—	—	—
4	轨距 s (mm)	1000	1200	1500	2200	2500	3000	3800	—	—	—	

表 3-11-4 无轨锻造操作机的主要参数

序号	负载 G (kN)	2	6	10	20	30	50	
1	夹持力矩 M (kJ)	3	9	15	30	45	75	
2	夹持锻件尺寸范围 (mm)	d_{max}	250	380	420	540	650	740
		d_{min}	60	90	140	175	230	275
3	夹钳中心线至轨顶高度 (mm)	h_{max}	950	1040	1080	1150	1200	1340
		h_{min}	600	650	650	650	650	700
4	夹钳伸出量 l_1 (mm)	1000	1200	1400	1400	1400	1400	
5	大车运行速度 v (m/min)	60	60	60	60	60	50	
6	钳杆旋转速度 n (r/min)	30	30	30	20	20	16	
7	钳头旋转直径 D (mm)	620	750	860	980	1100	1250	

2 锻造机械手

锻造机械手是工业机械手在锻造上的应用，在设计中除考虑工业机械手的原则之外，还要考虑锻造生产的特殊要求。

2.1 锻造机械手组成与分类

2.1.1 机械手的组成

机械手的结构，由执行机构、驱动系统和控制系统等三部分组成，如图 3-11-23。

(1) 执行机构。包括手爪、手腕、手臂，立柱和行走机构等部分。

(2) 驱动系统。由动力源、调节控制装置和辅助装

置等组成。

(3) 控制系统。控制系统是支配机械手按预定程序、行程和速度进行运动的装置。

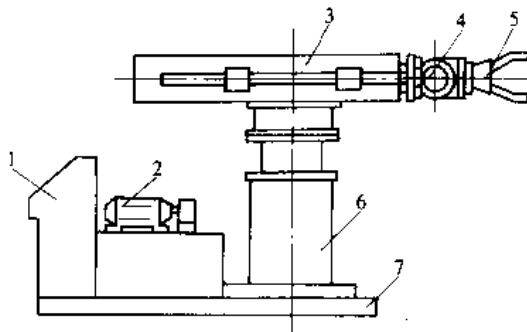


图 3-11-23 锻造机械手结构示意图

1—控制系统 2—驱动系统 3—手臂 4—手腕
5—手爪 6—立柱 7—机座



2.1.2 锻造机械手的分类^[38]

锻造机械手的种类很多，目前国内尚无统一的分类标准，为了便于了解，现按使用范围、驱动方式和控制方式进行分类，见表 3·11-5。

表 3·11-5 锻造机械手分类

分类	类型	特点
按使用范围分	专用机械手	指附属于某设备、动作程序固定，为特定的操作服务
	通用机械手	具有独立的控制系统，动作程序可变的自动化操作装置，能用于多种工作场合
按驱动方式分	液压机械手	体积小，操作力大，传动平稳，可实现连续轨迹的运动，动力消耗较大
	气动机械手	气源方便，易于获得高速度，但体积大，操作力有限，动作不平稳，控制有滞后现象
	电动机机械手	动力源方便，使用普通的电动机则需要设置减速机构，结构较复杂，也可以应用特殊构造的电机直接驱动
	机械驱动机械手	一般由主机通过凸轮、连杆、齿轮、齿条等来实现规定的动作，变换程序较困难
按控制方式分	点位控制	机械手的运动轨迹是空间两点的连线，只控制手爪移动的起止位置或有限的设定点
	连续控制	机械手的运动轨迹是空间的任意连续曲线，其设定点是无限的，能在三维空间作任意复杂的动作

2.2 手爪

锻造机械手的手爪(亦称夹钳)是用来抓取并握紧工件，是机械手的关键部件之一。图 3·11-24~图 3·11-29 所示为手爪的结构。其中，图 3·11-24 的机械手可抓取短的和粗的轴类锻件；而图 3·11-25 则适合抓取长轴类锻件。

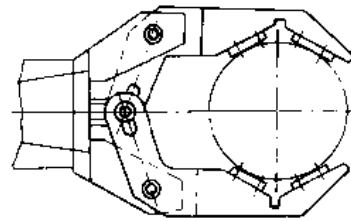


图 3·11-24 杠杆滑槽式手爪

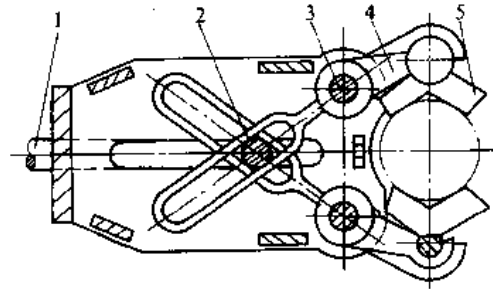


图 3·11-25 上下料机械手的手爪结构

1-活塞杆 2、3-销轴 4-手指 5-镶块

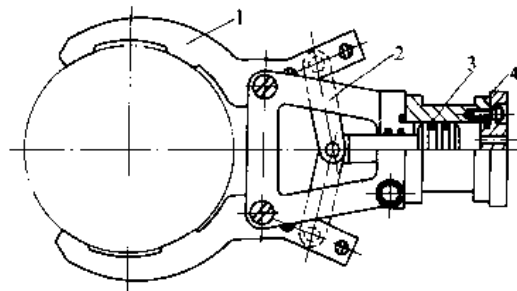


图 3·11-26 连杆式手爪结构

1-手指 2-连杆 3-活塞 4-缸体

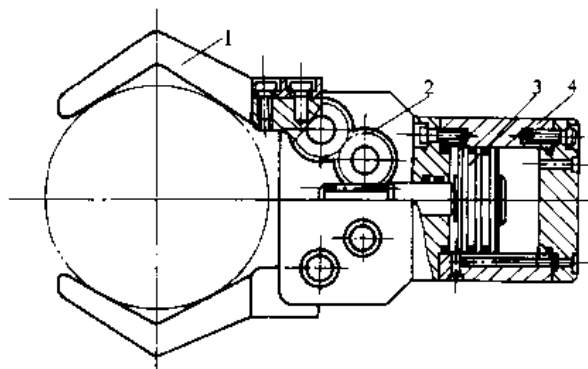


图 3·11-27 齿轮齿条式手爪结构

1-手指 2-齿轮 3-活塞 4-缸体



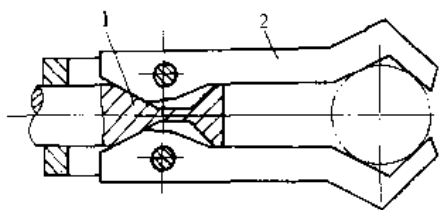


图 3-11-28 斜楔杠杆式手爪结构

1—斜楔 2—手指

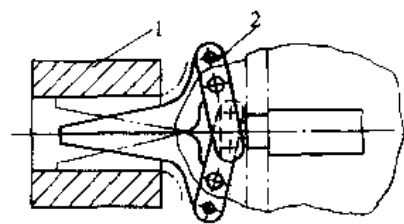


图 3-11-29 内撑式手爪结构

1—工件 2—手爪

2.3 手腕

手腕是连接手爪和手臂的部件，它具有独立的运动自由度，能够使被抓取的工件在空间处于任意方位。通常手腕绕 X 轴转动称为回转，绕 Y 轴转动称为俯仰，绕 Z 轴转动称为左右摆动，如图 3-11-30 所示。手腕的典型结构见图 3-11-31，图 3-11-32。

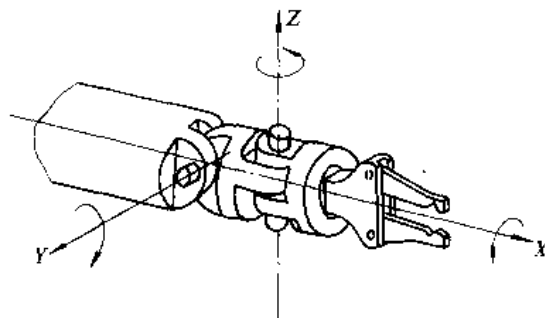


图 3-11-30 手腕运动示意

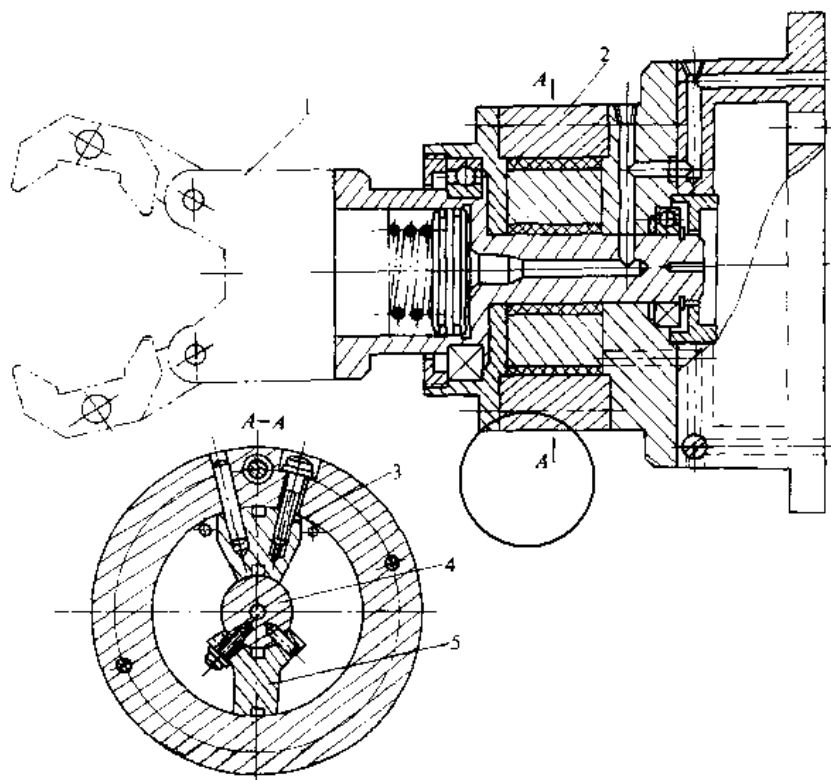


图 3-11-31 回转液压缸驱动腕部回转的结构

1—手爪 2—回转液压缸 3—定片 4—回转轴 5—动片



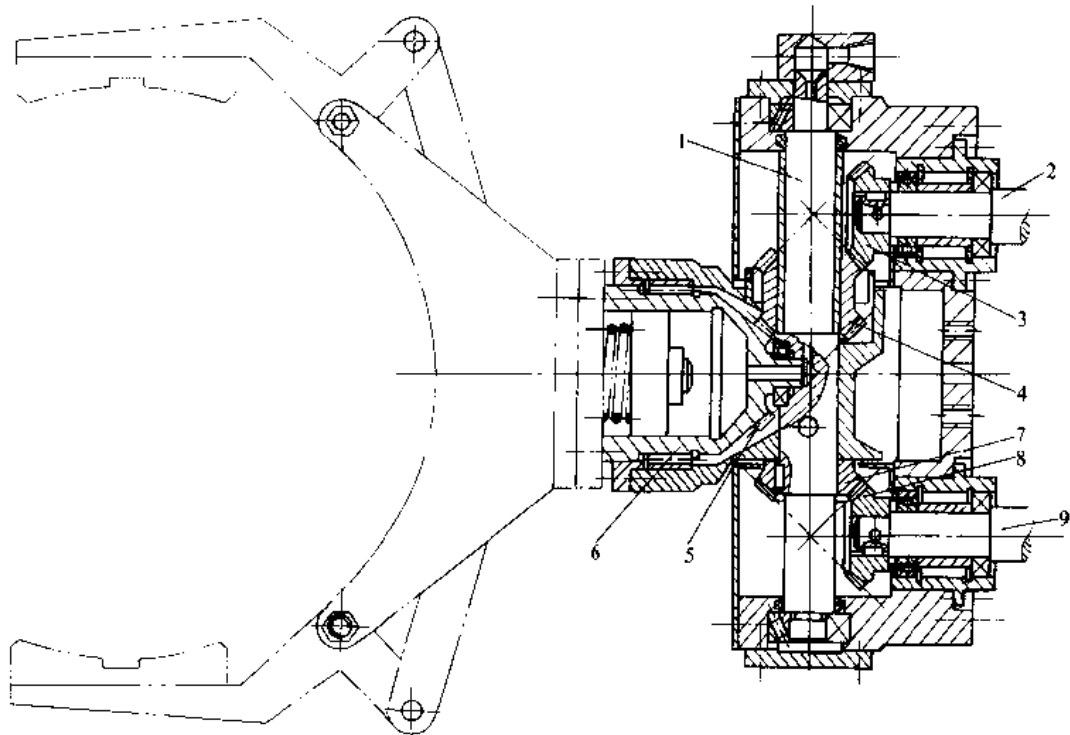


图 3-11-32 回转和俯仰的腕部结构

1、2、6、9—轴 3、5、7、8—锥齿轮 4—双头锥齿轮

(续)

2.4 手臂

手臂是机械手的主要执行部件，其作用是支承手部（包括锻件）和腕部，并带动它在空间运动，把锻件送到给定的位置或方位上。

2.4.1 手臂部件的运动形式

手臂一般有三个自由度，手臂的伸缩，左右回转，升降（或俯仰运动）。

臂部受力情况较复杂，不仅承受锻件手部腕部的动、静载荷作用，而且承受驱动装置及臂部本身运动时的载荷作用。

2.4.2 手臂结构和导向形式（表 3-11-6）

表 3-11-6 手臂结构和导向形式

结构形式	简图	特点及应用场合
单导向杆		结构简单，承载能力差，刚度小 适用于较小型机械手

结构形式	简图	特点及应用场合
双向导向杆		刚度大，可承受重载，导向杆内可装伸缩内管 适用于中型机械手
燕尾导向		结构复杂，刚度大，配合间隙小，制造困难 适于负荷重、速度低的机械手
滚轮导向		结构较复杂，间隙可自动调整，摩擦阻力小 适于速度高、负重大的机械手
四导向柱		刚度大，抗偏心载荷能力强，结构尺寸较大 适用于负荷较重的机械手的升降运动



2.5 缓冲与定位

要保证机械手平稳的运动和可靠的定位，必须采用适当的缓冲装置和定位方法。

2.5.1 液压机械手的缓冲装置

1. 液压缸端部缓冲装置 图 3·11-33 为液压缸端部一级节流缓冲装置。图 3·11-34 为液压缸端部两级节流缓冲装置。

2. 缓冲回路 行程可变和多点定位的机械手，常采用由节流阀、溢流阀及减压阀等液压元件所组成的各种液压回路来完成机械手的缓冲。见图 3·11-35~图 3·11-38。

2.5.2 机械手的定位装置

有可调的固定机械挡块。插销定位装置见图 3·11-39。伸缩液压缸定位装置见图 3·11-40 等。

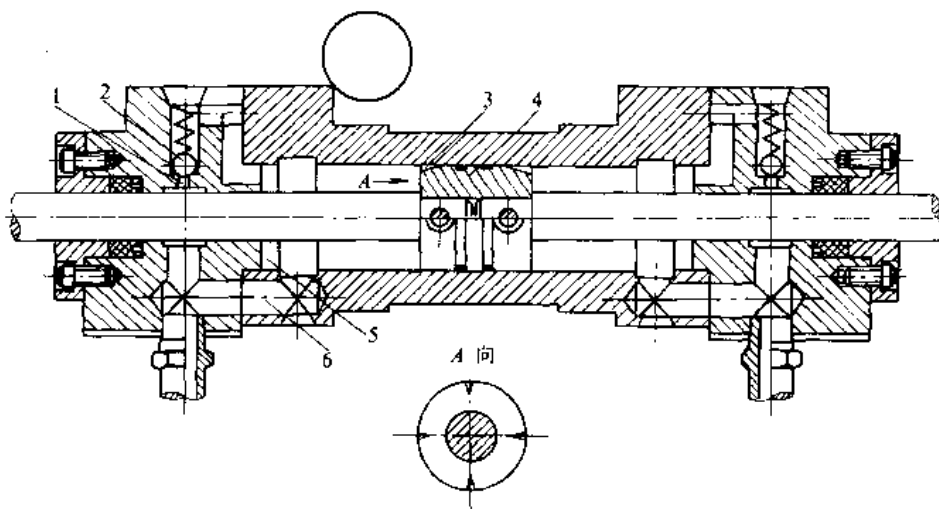


图 3·11-33 液压缸端部一级节流缓冲装置

1—节流孔 2—单向阀 3—三角节流槽 4—活塞 5—缓冲室 6—主液压力口

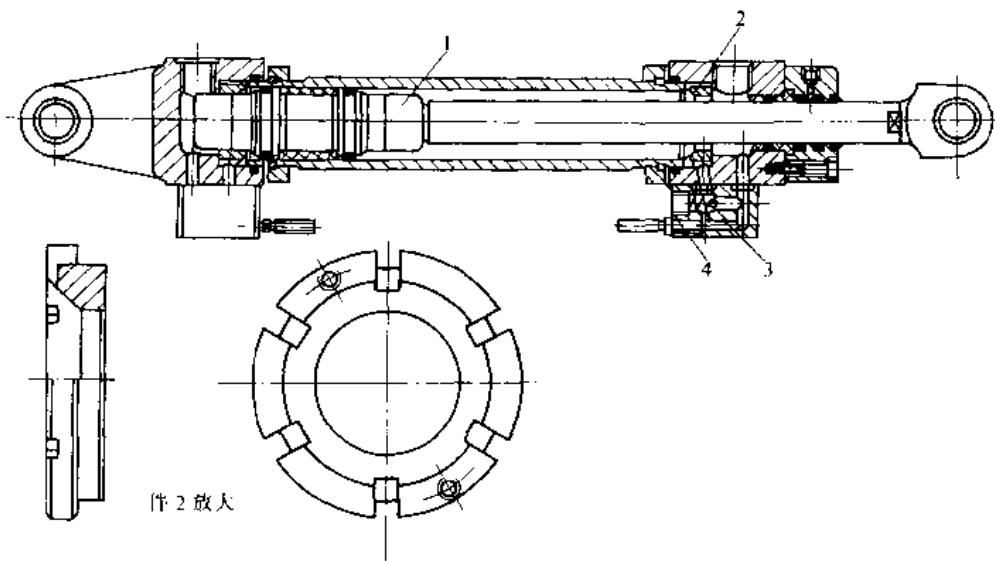


图 3·11-34 液压缸端部两级节流缓冲装置

1—缓冲柱塞 2—节流环 3—单向阀 4—可调节流阀



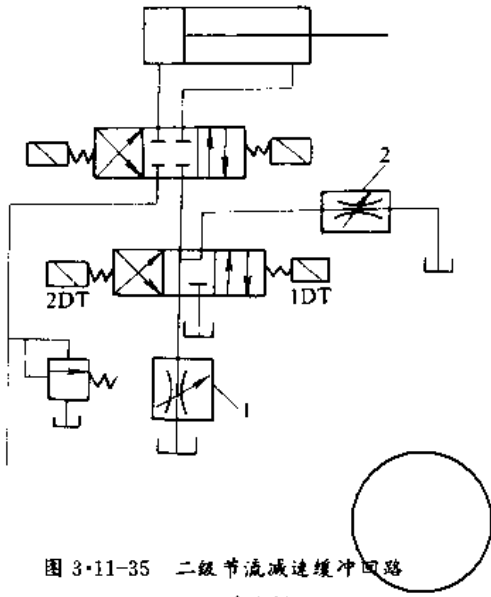


图 3-11-35 二级节流调速缓冲回路
1、2—节流阀

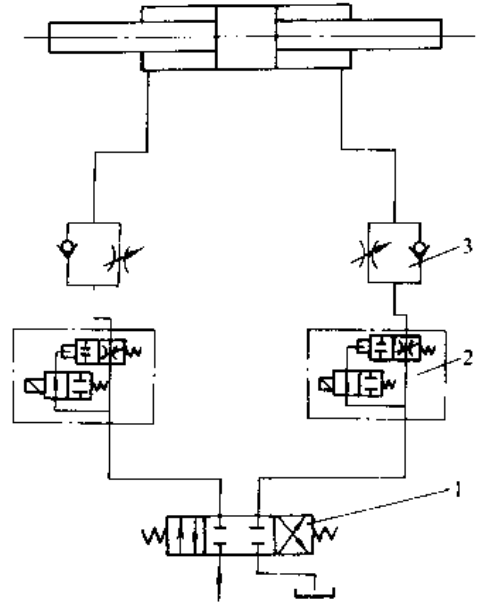


图 3-11-36 渐变节流缓冲回路
1—三位四通换向阀 2—渐变节流阀 3—调速阀

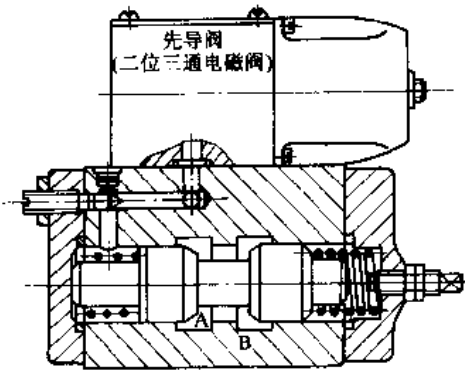


图 3-11-37 渐变节流阀

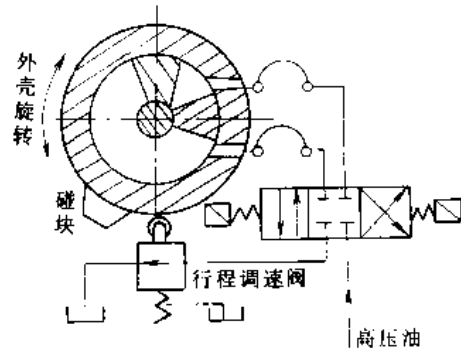


图 3-11-38 行程节流缓冲回路

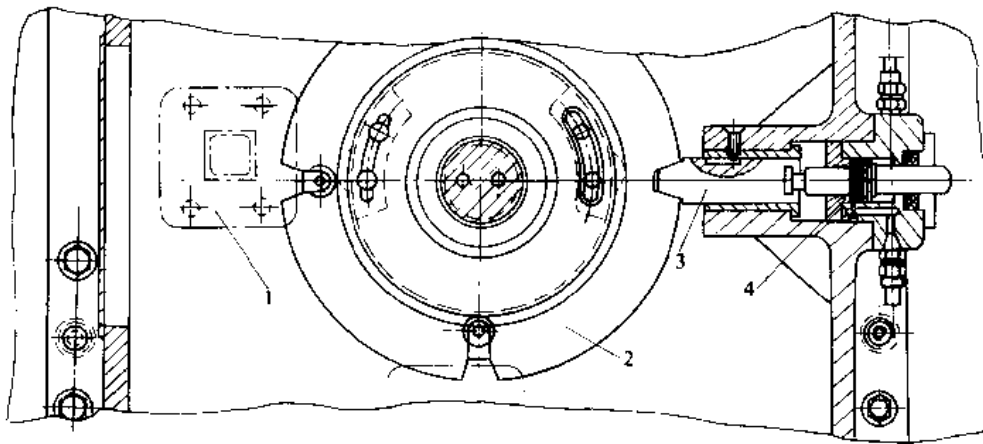


图 3-11-39 插销定位机构

1—行程节流阀 2—定位圆盘 3—插销 4—定位液压缸



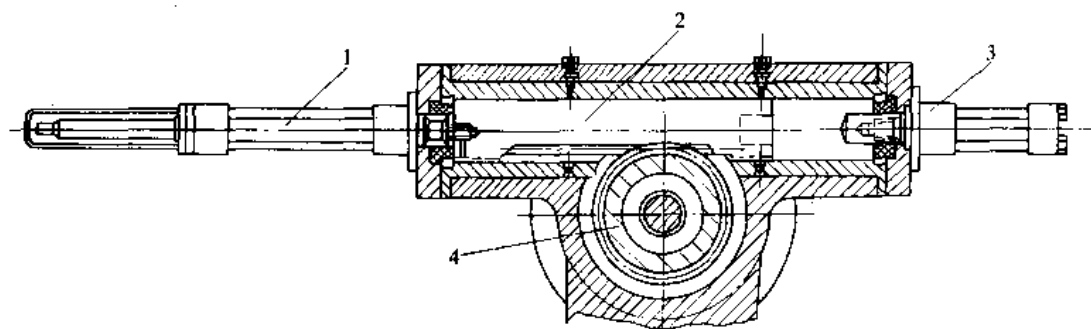


图 3·11-40 伸缩液压缸的定位机构

1—手臂回转驱动液压缸 2—齿条 3—定位液压缸 4—手臂

2·6 机械手的驱动系统和电控系统

驱动等。各种驱动方式的特点列于表 3·11-7 中供选择时参考。

2·6·1 机械手的驱动系统^{[37][38]}

2·6·2 机械手的电气控制系统

机械手的驱动系统有机械驱动、电机驱动和液压

1. 固定程序电气控制系统 (图 3·11-41)

表 3·11-7 机械手各种驱动方式特点比较

比较内容	机械驱动	电 力 驱 动		气 压 驱 动	液 压 驱 动
		异步电动机 直流电动机	步进及伺服电动机		
输出力	输出力较大	输出力较大	输出力较小	取决于气压大小, 要增加输出力可增大气压或加大气缸面积	液压高时, 可获得较大的输出力
控制性能	速度可高, 速度与加速度曲线均由机构控制, 定位精度高, 可与主机严格同步	控制性能较差, 惯性大, 不易精确定位	可控性好, 能精确定位, 但控制系统复杂	速度高, 冲击较重, 精确定位困难, 气体压缩性大, 阻尼效果差, 低速不易控制	油液不可压缩, 压力流量均易控制, 可无级调速。反应灵敏, 可实现连续轨迹控制
体积	多自由度机构复杂, 体积较大	要有减速装置, 体积较大	体积小	体积较大	体积较小, 且耐震动和冲击
维修及使用	维修使用方便	维修使用方便	维修使用较复杂	维修简单, 能在高温、粉尘等恶劣环境中使用, 泄漏影响小	维修方便, 液体对温度变化敏感, 油液泄漏易起火、爆炸
应用范围	适用自由度少, 用作速度高的专用机械手	适用于抓重大、速度低的专用机械手	可用于程序复杂、运动轨迹严格要求的小型通用机械手	专用和通用的中小型机械手都有应用	专用和通用机械手都有应用, 特别是重型机械手, 多为液压驱动
成本	结构简单、成本低, 一般工厂可以自己制造	成本低	成本较高	结构简单, 能源方便, 成本低	液压元件制造困难, 成本较高, 管路较复杂



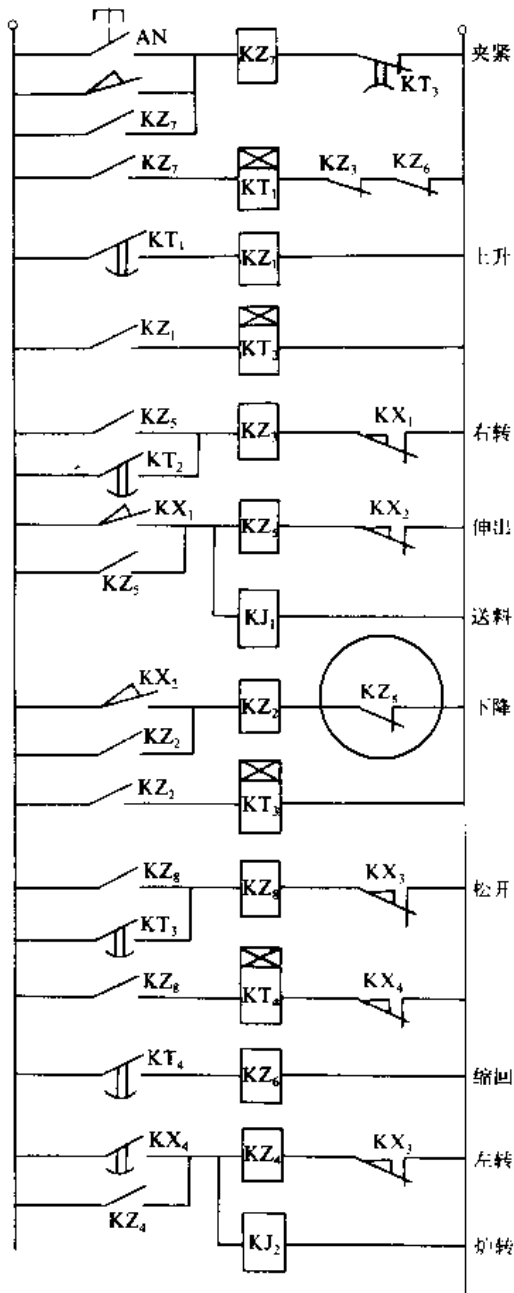


图 3-11-41 固定程序机械手控制线路

KX₁—右转限位开关 KX₂—伸出限位开关
KX₃—左转限位开关 KX₄—缩回限位开关

2. 可编程序电气控制系统 可编程序电控系统的原理图如图 3-11-42 所示,它由步进器、编程序用的矩阵插销板及输出电路等组成。

3. 数字控制电气系统 常采用示教方式,也可以采用穿孔带或磁带。示教再现控制系统的工作原理见图 3-11-43 所示,这种控制系统除能控制复杂的动作程序之外,还能控制运动的速度和轨迹。

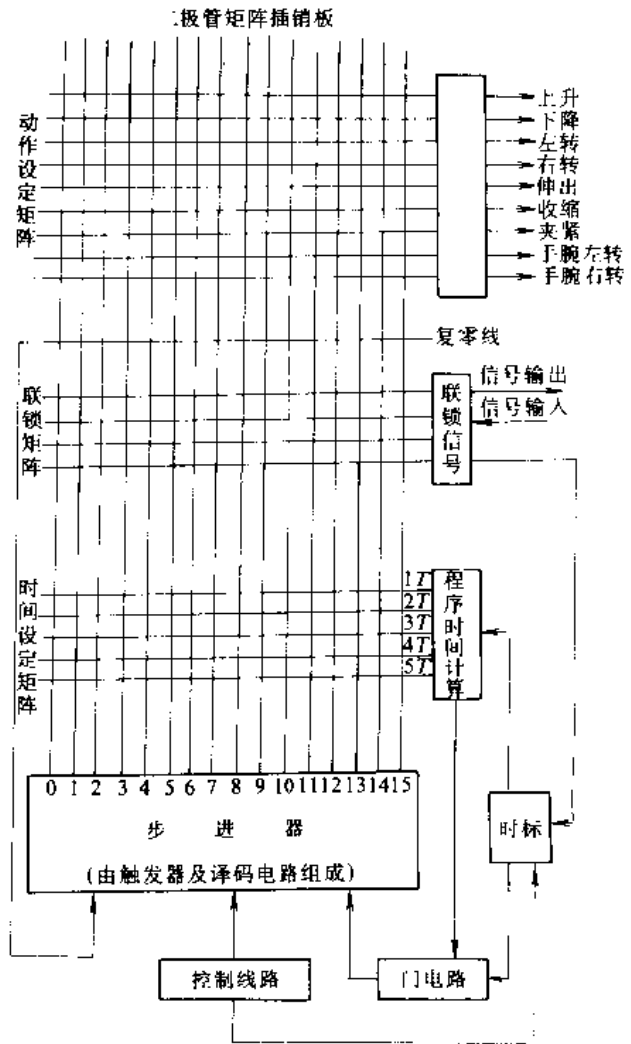


图 3-11-42 可编程序电控系统的原理图

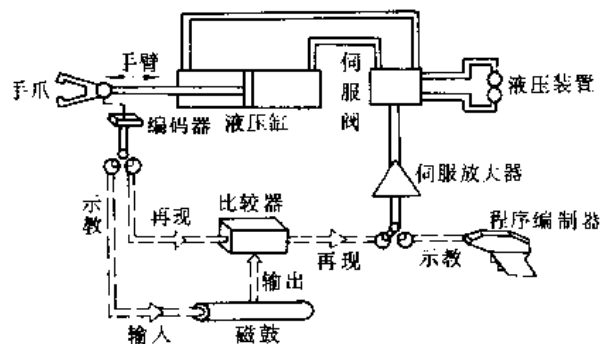


图 3-11-43 示教再现机械手控制示意图

2.7 多工位热模锻压力机机械手^[35]

多工位热模锻压力机上通常可安装 3~5 付模具,



完成锻粗、预锻、终锻、切边、冲孔等工序。工位间工件的自动传送是由安装在压力机上的两根作步进运动的传送梁完成，这种自动传送装置亦称为步进式机械手。在传送梁上装有夹持锻件的夹钳，各工位的夹钳根据工件的形状设计。传送梁通常具有夹紧松开、送进与

返向，提升与下降等三个方向的动作。图 3·11-44 是 GKA 型步进式机械手的传动原理图。图 3·11-45 是夹钳的运动轨迹图。图 3·11-46 是机械手传动结构布置图。

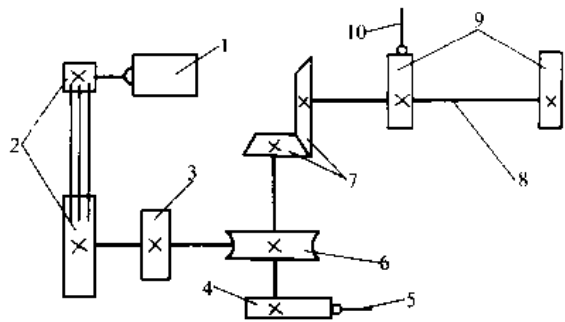


图 3·11-44 步进梁式机械手传动原理图

- 1—电机 2—三角带轮 3—气动离合器和制动器
- 4—进给—返回凸轮 5—杆系 6—蜗轮副
- 7—螺旋锥齿轮 8—传动轴 9—夹料—提升凸轮 10—杆系

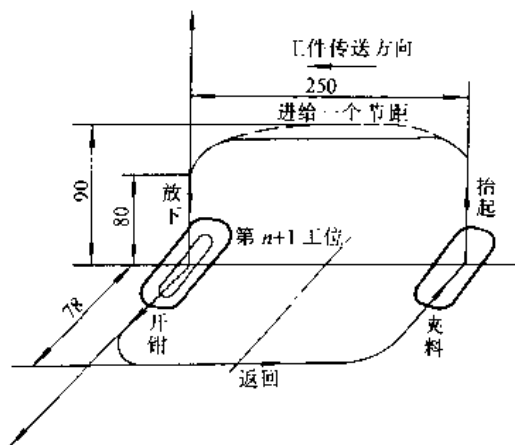


图 3·11-45 夹钳的运动轨迹图

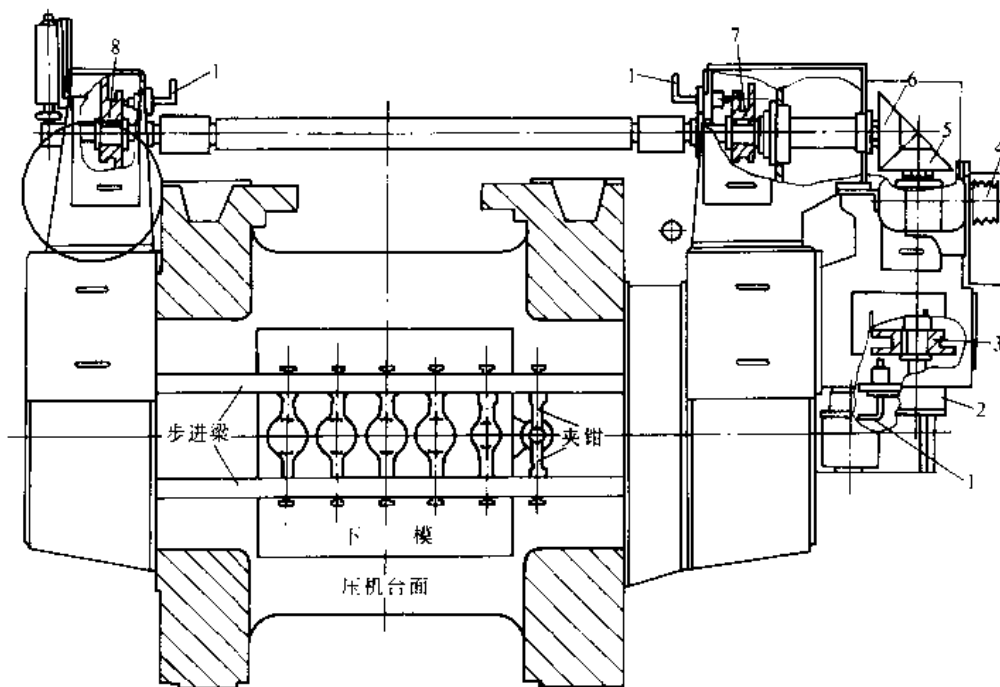


图 3·11-46 机械手传动结构布置图

- 1—凸轮定位销 2—主动轴安全离合器 3—进给—返回转动凸轮 4—传动主电机及带轮
- 5、6—螺旋锥齿轮 7、8—夹料抬起-放下开钳传动凸轮



2.8 平锻机机械手

2.8.1 垂直分模平锻机机械手

配有两组夹钳的机械手(图3-11-47)装在平锻机活动模一侧的机身上。平锻机主滑块每工作一次,机械手完成前进(取料)、退回、下降、前进(送料)、退回和上升六个动作。滑板5位于上死点时,上下夹钳和卸料钩11分别处于取料、预锻和终锻位置,滑板降至下死点时,上下夹钳分别处于预锻和终锻位置。

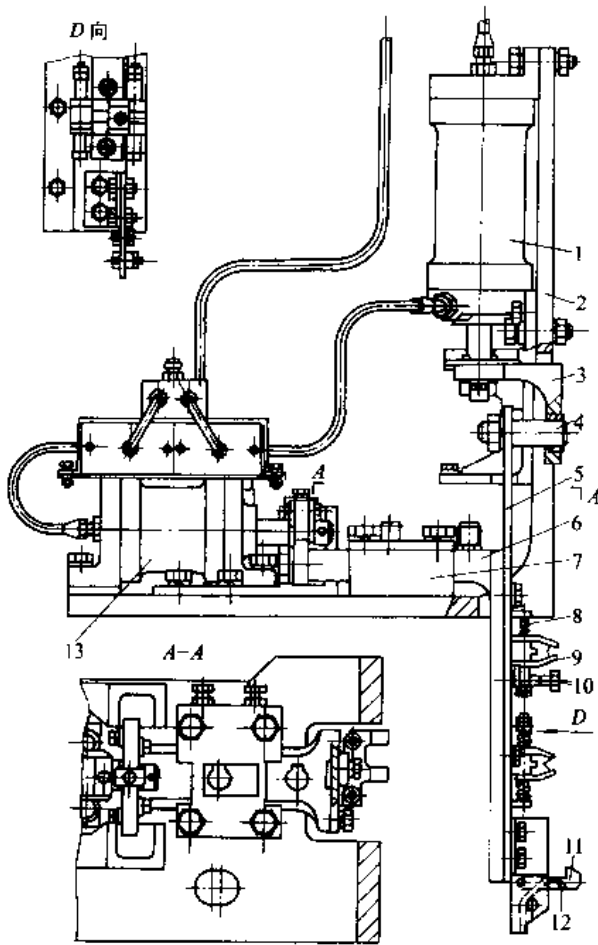


图 3-11-47 垂直分模平锻机机械手

- 1、13—气缸 2—固定板 3—联接板 4—轴 5—滑板
- 6—移动导轨 7—固定导轨 8、12—弹簧 9—夹钳
- 10—撞击螺栓 11—卸料钩

气缸13使移动导轨6在固定导轨7中滑动,以实现夹钳9的横向移动。气缸1通过联接板3使夹钳沿移动导轨升降。夹钳推向喂料斗(见图3-11-48),撞击毛坯,钳爪被迫张开,然后靠弹簧夹紧毛坯。锻锻完毕、卸料钩随滑板向右运动,撞击并越过锻件,而后靠

弹簧12的作用钩住锻件并在滑板退回时将锻件钩出。

喂料斗(图3-11-48)安装在机械手对面平锻机固定模一侧的机身上。夹钳撞击并夹住从喂料斗滚至挡板8前面的毛坯时,上钳爪下面的撞击螺栓迫使推板7随同顶杆1后移,喂料斗中第二个毛坯落至槽底板3上。夹钳退回时,弹簧11使推板和顶杆复位,第二个毛坯被推出并沿斜面滚至挡板前,供夹钳下一次取料。

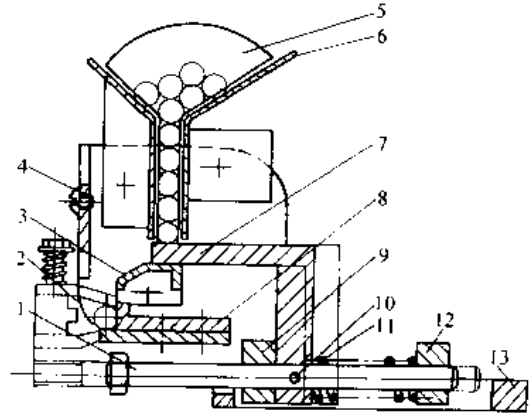


图 3-11-48 喂料斗

- 1—顶杆 2—弹簧片 3—槽底板 4—固板 5—挡料板
- 6—槽板 7—推板 8—撞板 9、12—支座
- 10—销 11—弹簧 13—固定板

2.8.2 水平分模平锻机机械手

如图3-11-49平锻机曲轴经传动系统21驱动摇杆2,使活动工作台4沿轨迹abcd运动,当达到a、c点即与平锻机机架左右两侧接触时,摇杆压缩弹簧,活动工作台分别沿左右滑动面垂直升降。下压机构7在活动工作台上上升时压住并旋转棒料。当活动工作台左移而中间气缸6使滑动压板5右移时,搓动在滚轮25上的棒料旋转。用螺栓13调节中间气缸的行程量,可使棒料旋转90°。当工作台由c点下滑至d点时,侧推气缸8使下压机构复位。锁紧螺母12用以调整下压机构的高度。下压机构的气缸11的气压应不低于0.45MPa,使下压机构处于最下位置。齿轮9和齿条10用以消除因棒料过粗或放置不当而出现的卡住现象。平时,旋转齿轮用的扳手14借卡板15固定,信号阀16的触点处于使下压气缸保持常压的位置。当棒料卡住时,先将卡板外移,压住信号阀,使下压气缸放气;旋转扳手,齿轮齿条使下压机构上移,棒料即可取出。辅助机架18用以托持长棒料,与活动工作台同步运动,并能按棒料长短调节前后位置。活动工作台和辅助机架借开合螺母19可前后移动,并用限位开关定位。



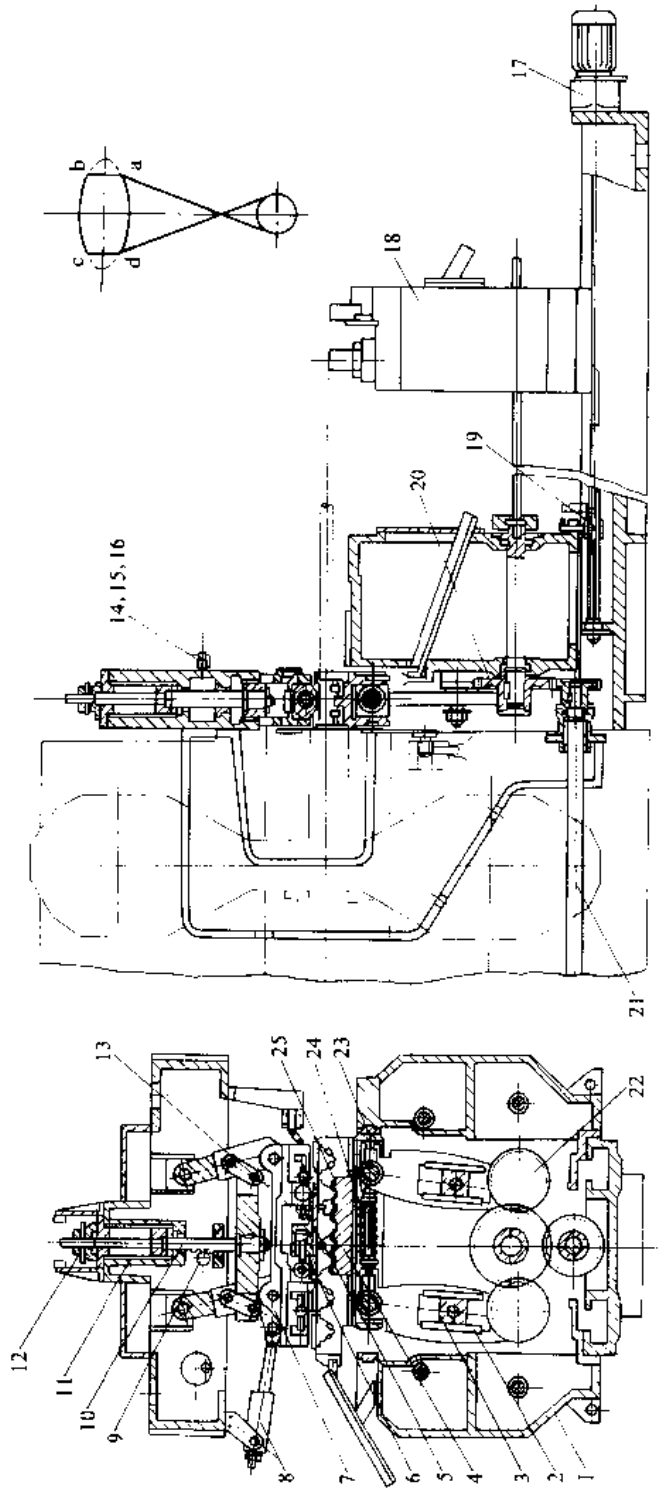


图 3-11-49 水平分摆机械手

- 1—机架 2—摇杆 3—滑块 4—活动工作台 5—滑动压板 6—抓手 14—扳手 15—卡板 16—信号阀 17—拖出机构 18—辅助机架
- 11—下压气缸 12—锁紧螺母 13—调节螺栓 14—扳手 15—卡板 16—信号阀 17—拖出机构 18—辅助机架
- 19—开合螺母 20—中间齿轮 21—传动系统 22—曲柄齿轮 23—挡块 24—弹簧 25—滚轮
- 7—下压机构 8—侧推气缸 9—齿轮 10—齿条



2.9 辊锻机机械手

辊锻机一般用作预成形,也可用于终成形加工。自动辊锻机一般都要配备辊锻机机械手。

2.9.1 水平辊锻机机械手^[35]

在感应加热设备(或其他加热设备)中把已加热到辊锻温度的毛坯顺着滑道滑入喂料器夹钳,由装在附近的红外线光电管发出信号,使喂料器夹钳气缸将毛坯夹紧,摆进油缸将喂料器夹钳转至水平位置同时将毛坯送向辊锻机机械手臂的夹钳,到一定位置后压合行程开关,手臂夹钳夹紧毛坯。当夹紧油缸的液压足以使压力继电器接通时,喂料器夹钳松开并摆回到原始位置,准备接送新的毛坯。同时在此处压合行程开关,辊锻机开动,手夹钳夹持毛坯按图 3.11-50 所示动

作程序,逆辊锻转动方向为送料,顺辊锻转动方向为辊锻。

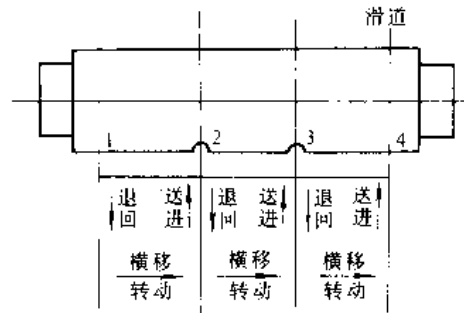


图 3.11-50 辊锻机机械手动作程序

图 3.11-51 为水平辊锻机机械手和辊锻机、喂料器布置图。

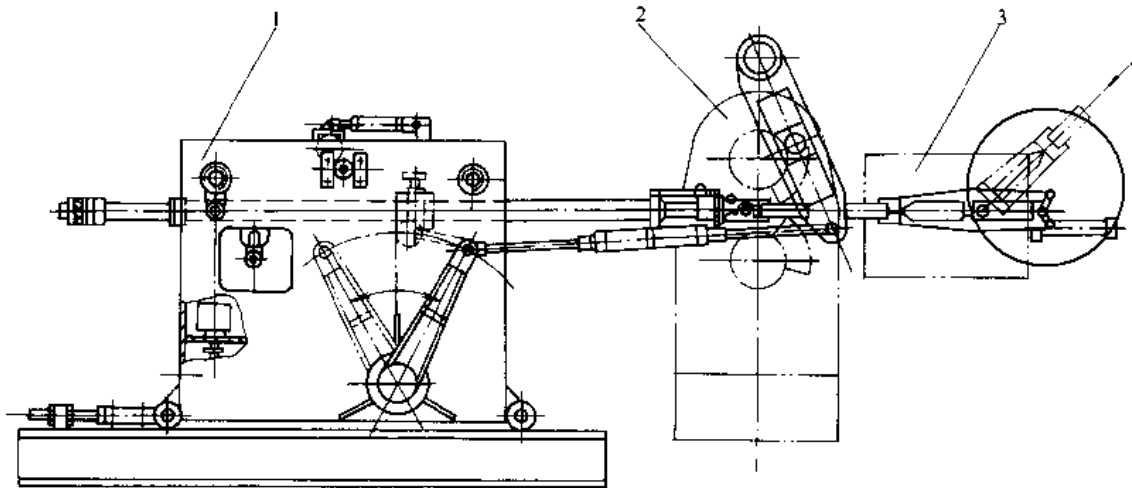


图 3.11-51 水平辊锻机机械手和辊锻机、喂料器布置图

1—机械手 2—辊锻机 3—喂料器

2.9.2 立式辊锻机机械手

当辊锻重量较大、而且较长的毛坯时,灼热(1200℃左右)的毛坯在自重的作用下可能产生弯曲。同时夹钳也由于毛坯的重量要承受很大的弯矩,促使夹钳容易磨损和损坏,因而在设计夹钳时不得不将送料机构设计得非常笨重。近年来,国外出现了带机械手的立式辊锻机,如图 3.11-52 所示。

在这种带机械手的辊锻机上两个辊子的轴线在同一个水平面上,毛坯在垂直方向送进,这样就可以避免由于毛坯自重所产生的弯矩而带来的危害,因而夹钳可设计得较轻,辊锻速度能提高到 1.4m/s 左右。

立式辊锻机机械手与立式辊锻机为电气联动,毛坯经辊道送入喂料筒,并撞击行程开关触头,液压缸 1 推喂料筒竖起毛坯,夹钳下降,夹住毛坯后上升,接着夹钳滑座横移到辊锻型槽 I 工位,当毛坯在 I 工位顺辊锻方向向上辊锻后,夹钳持锻件绕自身轴线回转 90°,依次移至各型槽进行辊锻。辊锻结束后,夹钳横移到初始位置,夹钳松开,锻件落入卸料筒,油缸 3 将卸料筒转至水平位置,油缸 6 将卸料筒门打开,锻坯落在传送辊道上送向热模锻压力机。夹钳夹紧和回转采用气动,横移和升降采用液压驱动,并用挡块定位。辊锻时,毛坯上提,控制提升液压缸 8 中的油压,使其恰好能支持毛坯和夹钳的质量,此时毛坯和夹钳处于浮



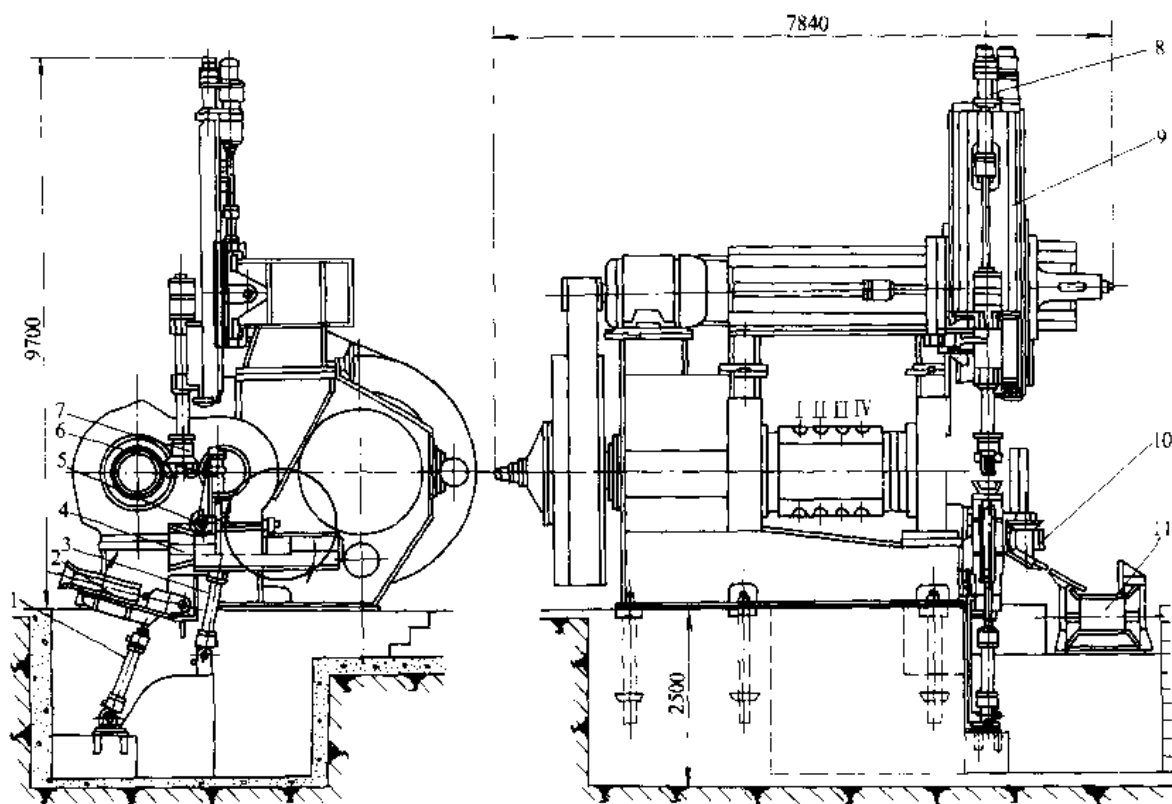


图 3·11-52 立式辊磨机机械手

1、3、6—液压缸 2—喂料筒 4—卸料筒 5—轴 7—夹钳 8—提升液压缸 9—滑座 10—挡门 11—辊道

动状态，以此来补偿夹钳提升和辊锻的线速度差及毛坯的延伸量。

3 工序间传递装置

常用的形式有板式输送、链式输送、带式输送、悬挂输送以及滑道、辊道等。

3.1 板式输送装置

如图 3-11-53，用于 25kg 以下工件的短距离传送。爬坡角度大于 20°时应装防滑肋条。传送速度为 19~38m/min。主要技术规格见表 3·11-8。

表 3·11-8 板式输送装置主要技术规格

项 目	单 位	数 值							
		2.3	3.3	3.7	4.3	5.0	5.5	6.0	8.7
公称长度 L	m	2.3	3.3	3.7	4.3	5.0	5.5	6.0	8.7
地 面 下 高 度 h	mm	—	—	—	—	1590	1360	1750	—
驱动轴中心高度 h_1	mm	1200	930	930	930	1200	1350	1350	1400
电动机架高度 h_2	mm	1550	1388	1388	1388	1388	1800	1300	1800
链板数	个	42	57	63	73	83	91	99	140
托辊数	个	3	5	6	7	8	10	10	15
链条长 (节距 25mm)	mm	2075	2075	2075	2075	1875	2225	2225	1975



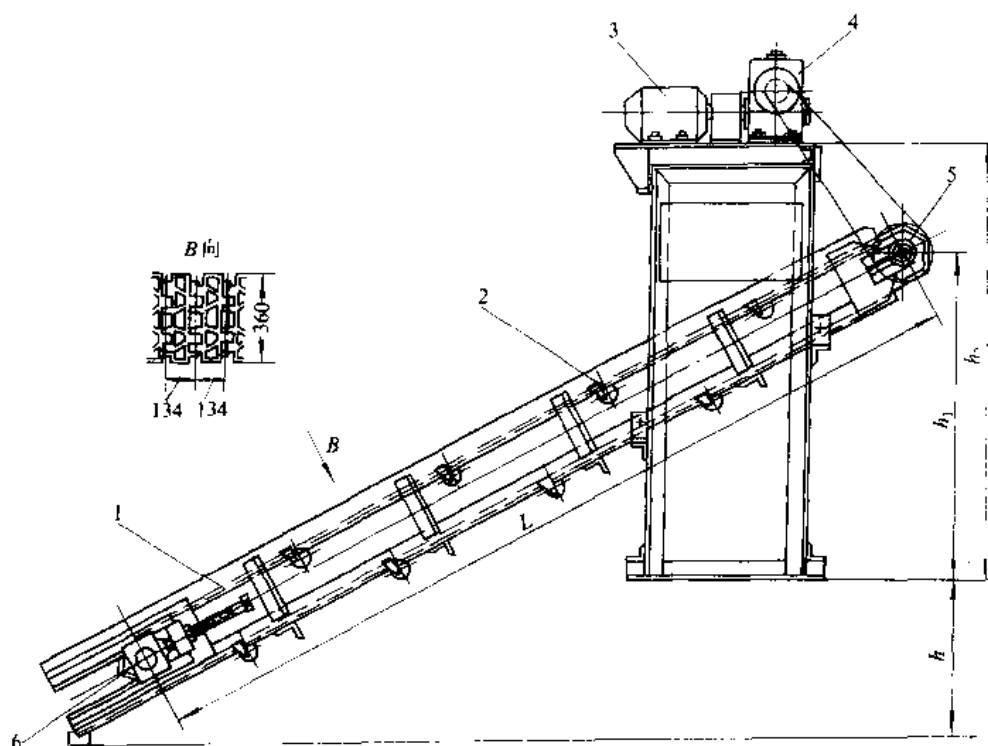


图 3-11-53 板式输送装置

1—链板 2—托辊 3—电动机 4—减速器 5—主动轮 6—从动轮

3.2 链式输送装置

爪链式输送装置 (图 3-11-54) 用于 25kg 以下工件的传送或提升。带爪的曳引链推送导轨槽 4 中的工件前进。对于长轴类工件,可采用双链。承载能力大,但通用性较差。

刮板链式输送装置 (图 3-11-55) 用于 25kg 以下

工件的短距离传送。爬坡角度不大于 45°。承载能力大,便于维修;但通用性不如板式输送装置,不适于传送小件和长料。主要技术规格见表 3-11-9。

排链输送装置适合于中小件传送。输送装置的排链可采用套筒滚子链、板链或锻造排链 (图 3-11-56)。爬坡角度较大时可在排链上加装推板。结构轻巧,噪声小,但承载能力较小。

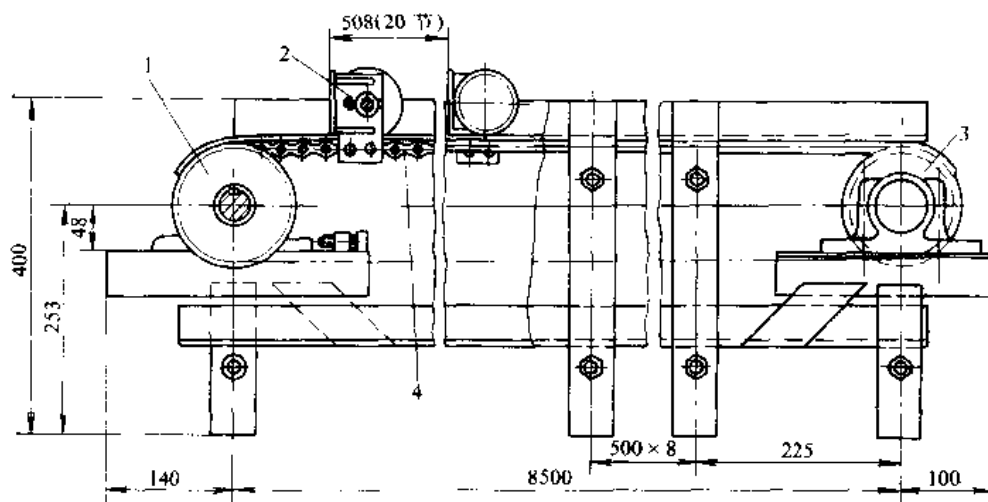


图 3-11-54 爪链式输送装置

1—从动轮 2—料斗 3—主动轮 4—单排套筒滚子链



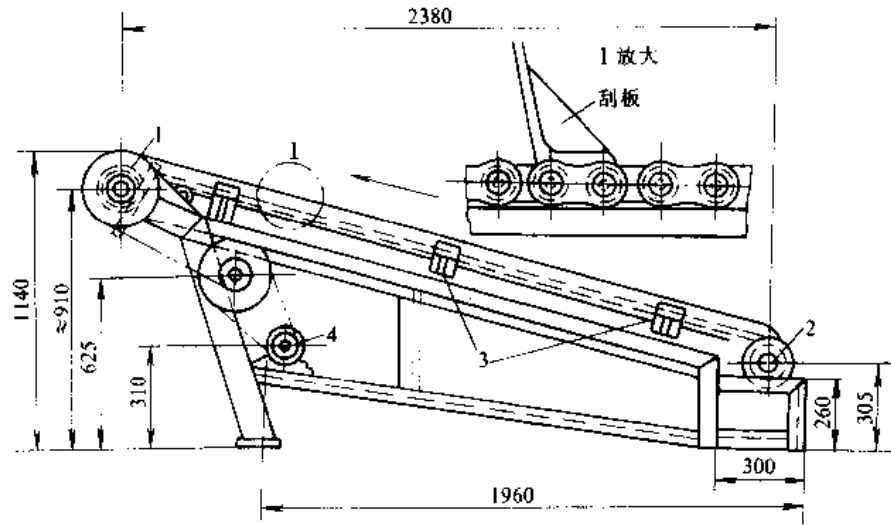


图 3-11-55 刮板链式输送装置

1—主动轮 2—从动轮 3—刮板 4—电动机

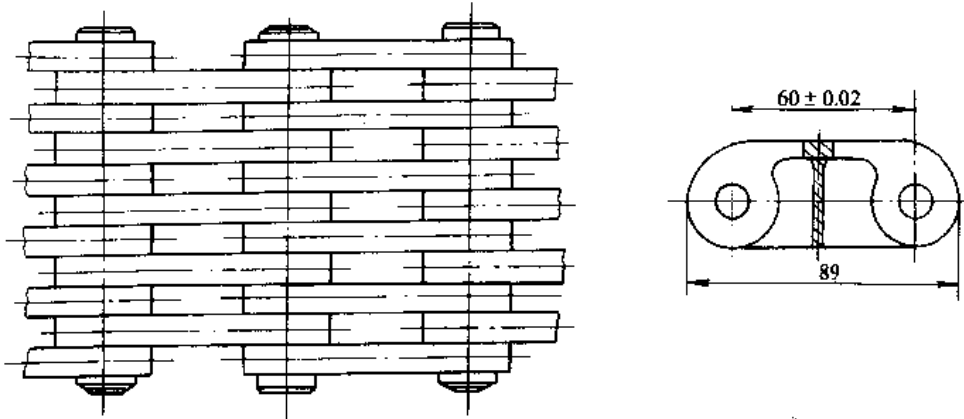


图 3-11-56 锻造排链

表 3-11-9 刮板链式输送装置主要技术规格

项 目	单 位	数 值							
		3	3.5	4	4.5	5.5	6	7	8
公称长度	m								
总长 L_1	mm	3120	3710	4300	4890	5480	6070	7250	8430
中心距 L_2	mm	2810	3400	3990	4580	5170	5760	6940	8120
刮板间距 l	mm	800	762	800	762	800	762	770	772
刮板数	个	8	10	11	13	14	16	19	22
中段导料槽板距离 $590 \times m$	mm	—	590	1180	1770	2360	2950	4130	5310
中段立柱距离 $590 \times n$	mm	590	1180	1770	2360	2950	3540	4720	5900
主链 (节距 38.1mm) 长度	m	6.4	7.6	8.8	9.9	11.2	12.2	14.6	17
驱动链 (节距 25.4mm) 长度	m	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2



4 锻造自动生产线

锻造自动生产线的发展趋向：一是向全自动线的方向发展，就是自动线不仅包括各成形工序，并将淬火、回火、清理、校正、磁力探伤、尺寸检查、涂漆防锈等辅助工序也包括在内。这种全自动生产除具有一般自动线的优点外，还可以充分利用锻造余热进行热处理，省去再次加热时间及费用。避免零件在车间内多次周转，并有利于锻件质量控制。二是发展适宜于多品种、小批量生产的可调自动线，力求缩短更换零件时的调整时间，在各方面主要借助机械人来实现。

4.1 轴承环锻造自动生产线

如图 3·11-57，棒料借自动上料装置 2 送入加热炉 3，再由进给器 4 送至压力机 5 的侧滑块按定长剪断，然后用机械手送入三工位模具，分别完成锻粗、成形和冲孔工序。当成形后的锻坯未送走而又继续向成形工位进料时，光电监视装置使滑块立即制动。在压力机的第二和第三工位间还设有形状复杂的锻坯翻转装置。冲孔后的锻坯借传送装置依次送至扩孔机 6 和整径压力机 7。最后锻件滑入料箱进行喷雾冷却。

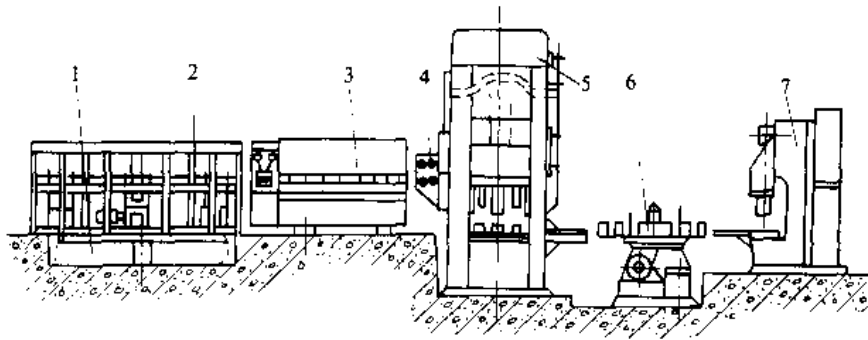


图 3·11-57 轴承环锻造自动线

1—棒料架 2—自动上料装置 3—感应加热炉 4—棒料进给器 5—多工位曲柄压力机
6—四轴偏心扩孔机 7—整径压力机

三工位模具成形工序部分有液压补偿装置。如图 3·11-58，单向阀 5 处于常开位置。当锻粗后的锻坯刚传送到成形工位时，监视光电管发出讯号，单向阀关闭。压力机滑块下行时，首先成形凹模 20、24 接触；然后外活塞 13 上移，并对油腔加压，推动内活塞 14 连同成形冲头 15 下行，冲挤锻坯至金属充满模腔为止。当锻坯过大或温度过低，阻碍成形冲头继续下行时，油压升高，安全阀 8 打开。此时锻坯的连皮较厚；反之，连皮较薄。利用连皮的厚度变化，可以补偿下料误差和加热温差。

4.2 120000kN 曲轴、前梁锻造自动生产线

主要用以生产曲轴和汽车前轴。如图 3·11-59，经感应加热机床 1 加热的毛坯，借可升降的传送带 2 喂给辊锻机械手 4 进行制坯。随后机械手夹持锻坯行到中间位置，转过 180°，再将锻坯送入模锻压力机 6 的

锻模弯曲型槽，机械手 7 又将锻坯送入预锻和终锻型槽。模锻后，锻坯被送至压力机 11 进行切边，飞边则被模具上的拨料器送入废料箱。曲轴锻坯切边后被送至曲拐扭转机 14，扭好后送至压力机 15 经两道校正。前轴锻坯切边后直接送校正压力机校正。最后锻件用机械手 17 挂到悬挂式输送机 18 上进行空冷，并被送往热处理炉。

模锻压力机上还附有模具清理和喷雾装置 9 以及模具快换装置，红外线光电监控装置等。监控装置可对坯料是否正确放入模槽，锻件是否被顶出和机械手是否正确抓住锻件等分别进行监测。

自动线是按照完成前一工序，发出信号，接通下一工序的程序工作的。当锻压设备上前一个坯料尚未送走而下一个坯料又来到，这时各相应的机械手未能接到允许送料的信号，便转过 90°，将坯料放在相应的分料架上。



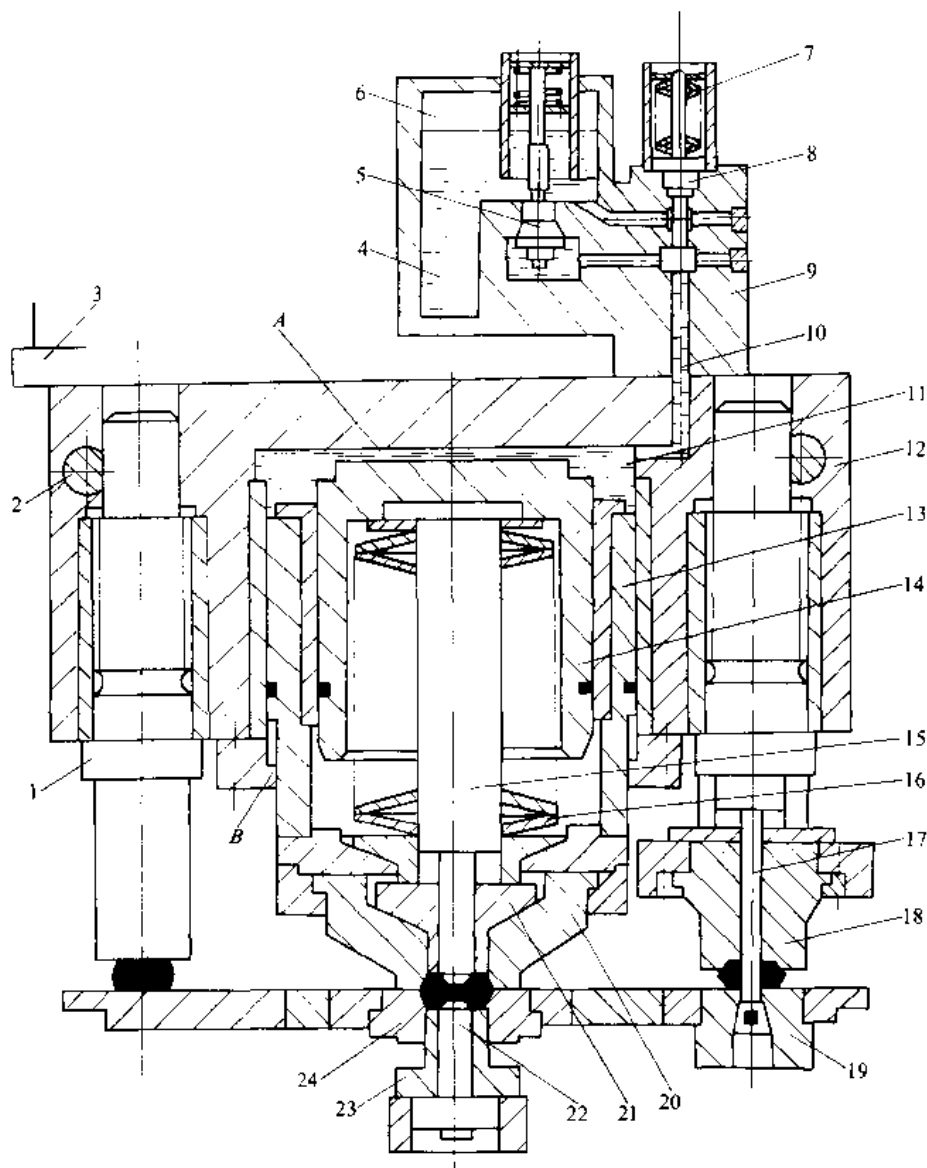


图 3-11-58 三工位模具及液压补偿装置

- 1—锻粗冲头 2—卡环 3—压力机滑块 4—油箱 5—单向阀 6—气室 7—弹簧 8—安全阀 9—阀体
 10—油路 11—压力油室 12—上模座 13—外活塞 14—内活塞 15、22—成形冲头 16—碟形弹簧
 17—冲孔冲头 18、21、23—卸料器 19—冲孔凹模 20、24—成形凹模

4.3 柔性生产系统^[38]

随着工业技术与经济的惊人发展，产品的更新换代也更加频繁，因此要求生产多品种小批量的快调、可变锻造自动生产线愈来愈引人注目。柔性生产系统就是标志着生产技术最新水平的一种生产系统，它是以多品种，中小批量锻件为对象的自动化生产系统。近年来，国外锻造刚性自动生产线已不断地被柔性化而成

为锻造柔性自动生产线，例如在汽车工业上有效地采用计算机将控制系统柔性化，而使同步的自动线非同步化或采用工业机器人，无人搬运车（搬运机器人）使自动线上的锻件输送系统柔性化均属于此类。据 1990 年年初不完全统计，世界上有 300 余条柔性生产系统在运转，其中美国约有 50 条，日本约有 70 条，德国（原西德）约有 40 条，原苏联约有 15 条，其中以锻造为对象的约占 1/10。



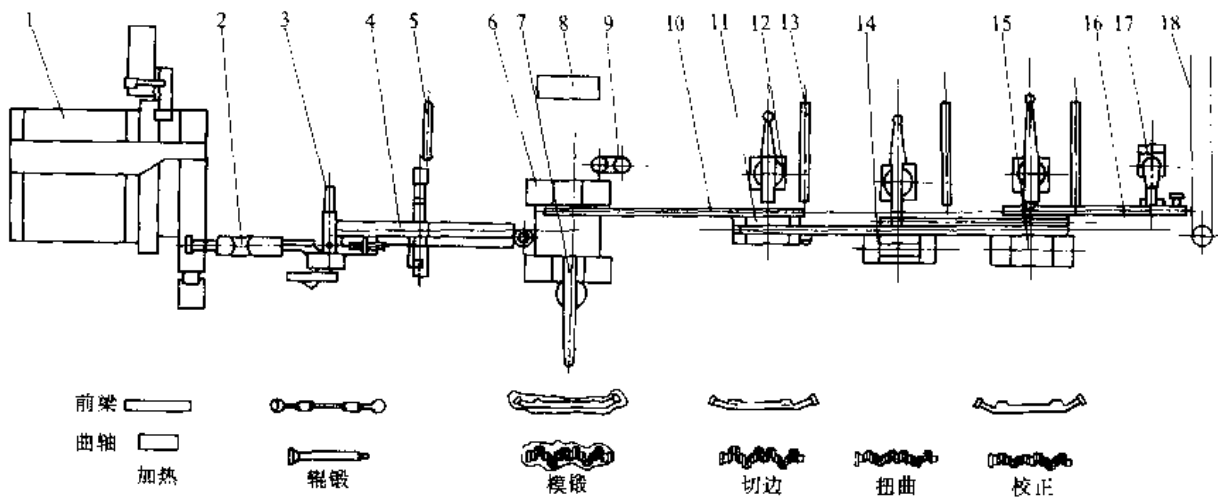


图 3-11-59 120000kN 热模锻压力机自动线

1—感应加热机床 2—传送带 3—辊锻机 4、7、12、17—机械手 5、13—分料架 6—120000kN 斜楔式热模锻压力机
8—中央控制台 9—模具清理与喷雾装置 10—带随行小车的传送带 11—切边压力机 14—曲折扭转机
15—校正压力机 16—链式传送带 18—悬挂式输送机

第 12 章 锻造生产安全技术及环境保护

1 锻造安全生产的一般准则

1.1 作业环境

锻造作业环境涉及厂房结构、温度、通风、采光、噪声、粉尘浓度、设备及管道布置；坯件、锻件、工模具存放；机械化运输等多种因素。其中最主要的是厂房耐火等级一般为 2 级；操作地温度低于 35℃；照度不小于 45lx；噪声不大于 90dB；粉尘浓度不大于 10mg/m³；人行道宽度不小于 1.5m，车行道宽度不小于 3m；560kg 以上自由锻锤应配备锻造操作机、装料出料机等等。

1.2 设备和模具

双排布置锻锤时应交错排列；加热设备的炉门不应正对操作者；外露于设备床身的飞轮、带轮、杠杆、传动齿轮等运动部件必须设置防护罩；大型设备必须配备规范要求的检修爬梯及栏杆；锻锤及冷锻设备必须设置相宜的防护挡板以防锻件飞出、模具崩裂；维修设备及在设备上安装模具时，必须首先切断动力电源

并使锻头或滑块处于有效的支承状态或静止状态；加热设备的送风装置、引风装置及燃烧器必须畅通无阻并处于良好的技术状态；设备润滑系统必须可靠；液压泵站、蓄势器应与锻造机组分离布置在独立厂房之内并保持应有的洁净度；燃油罐的位置和安装应严格遵守建筑设计防火规范；酸洗间应与锻造厂房分离并布置在车间的下风向；清理滚筒与抛丸间应封闭并具备良好的通风措施；起重运输设备一般应采用中级工作制；起动设备的脚踏板必须加防护罩，机械压力机必须配备双手起动装置等安全保护措施；必须正确设计、安装或使用工模具等等。

2 锻造安全技术

2.1 设备及操作

在满足工艺要求的前提下尽可能选用液压锻造设备如锻造水压机、液压模锻锤、液压螺旋锤、电液对击锤等，或各型机械锻造压力机如热模锻压力机、平锻机、辊锻机、楔形横轧机、径向锻造机等代替蒸汽—空气模锻锤或自由锻锤。



锻压设备应配备与之相宜的各型过载保险装置,如锤类设备的弹簧缓冲器、蒸气缓冲器、自复式摩擦过载保险装置;压力机的机械(液压)过载保险装置,偏心过载保险装置,紧急停车保安装置等。

以气体为作功介质的锤类设备的最低工作环境温度应为 $8\sim 12^{\circ}\text{C}$,非工作状态的最低环境温度不低于 5°C 。

对锤的紧固楔铁及垫片的要求是:对 3t 及 3t 以下的锻锤其伸出长度不得超过锤头或锻模前缘 50mm ; 3t 以上锻锤不得超过 80mm ,后缘不得超过 150mm 。垫片的数量不超过3片或总厚度不超过 10mm 。

应经常检查无砧座锤的钢带(绳),发现裂纹立即更换。

切边、校正压力机可设光电保护装置。

生产前应先开动设备检查空载状况,做好润滑。要特别注意锤类设备的螺钉等紧固件是否松动,有无异常。模具及锤头应预热至 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$,锤杆预热至 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。应在锻造温度范围锻造,不要勉强锻打过烧或低于终锻温度的锻件。不要作超出设备允许规定的偏心锻造,此点对水压机、高速锤等尤为重要。高速锤不许空打、冷打。锻造中应保持锻件位置平稳和水平夹持,在用起重机配合锻造时此点尤为重要,绝不允许锤头或水压机上砧的冲击力传至吊架及起重设备上。需倾斜锻造时,应选好锻打着力点以防锻件飞出。使用钳子等工具时,钳柄不可直对人体,手指不得放在钳柄中间,使用手锤时不戴手套并应站在与掌钳工人成 90° 的位置。剁料时,料头飞出方向不得有人,快剁断时应予轻击。加热炉出料口及锻压设备附近不得集存污水、杂物;工具冷却用水必须有专用容器存储并置于安全位置。向模具注油或冷却剂时,不得将手伸入模具而应使用长柄油壶注入、喷枪喷入或长柄刷子涂抹。采用压缩空气吹除氧化皮等污物时对面不得有人。

2.2 工艺装备

模具碎裂和工件、工具、料头等飞出造成人身击伤、烧伤危害最大。必须经常检查模具、工具是否完好,及时排除事故苗头。

锤类设备周围,除操作面外应设置固定或半固定的防护挡板,防止锻件、飞边或模具破裂崩出。开式模锻中要严格防止多余金属流向打击镜面或在飞边桥口处切断飞出。高速锤一般采用闭式模锻并应设置与打击动作连锁的自升挡板。

紧固模具楔铁应选用适当材料并经退火处理,头部不允许有卷曲、撕裂。

型砧、平砧、剃刀、冲子等通用工具的承受打击面不允许淬火和沾有油污,其边缘一旦出现卷曲或撕裂,应立即打磨。冲孔时漏盘高度要符合要求,不得将几个漏盘叠合使用。

夹钳类工具要求:

(1)钳口部分形状尺寸与锻件适应,并具有足够的夹持力;

(2)锻造大中型锻件时,钳口夹紧锻件后应用套环紧箍钳杆;

(3)钳口、铰链、杆部不得有裂纹、变形或缺损;

(4)采用中碳钢锻制夹钳,不允许淬火;

(5)模锻用夹钳形状尺寸应与锻模钳口槽适应,钳口及钳杆应有适当长度;

(6)运送大型锻件或坯料时必须使用自紧夹钳。

2.3 加热设备

2.3.1 油炉

点火前应首先打开炉门、烟道闸门及其它孔洞,接着送入空气排除炉内残留气体,后保持少量空气进入。将火源从点火孔送入炉内,徐徐开启油门,以防喷射速度过大造成火焰回击。若能点燃,则可逐渐加大风量、油量,使之正常燃烧。如果点不着火或火源熄灭,应立即关闭油门,加大风量。当火源重新点燃时,则重复上述操作。若几分钟内仍点不着,就应立即排除炉内烟雾及不正常因素,重新点火。点火时严禁在炉门等孔洞附近站人。没有点燃时不能任意向炉内投掷火源。

2.3.2 煤气炉

点火前应先将空气、煤气的总阀门打开;检查煤气压力是否正常。煤气压力过低时不能点火,如点火,则可能因燃烧速度大于喷出速度而回火。送入火源前应先开启炉门及烟道闸门,通入空气,排除炉内废气。然后关闭空气阀门,从点火孔投入火源,徐徐开启煤气阀门,再相应开启空气阀门。如果点火不着,应立即关闭煤气阀门,通入空气将炉内残留气体排除后,重新点火。点火时,无关人员必须离开炉门及孔洞附近。使用煤气的车间应有良好的通风,并按规范配备防爆孔、放散管、安全阀、防爆照明等设施。当煤气设备和管道出现泄漏和故障时,应立即关闭总阀门,泄漏可用肥皂水查寻,严禁使用明火。煤气烧嘴经长期使用后可能损



坏,造成烧嘴直径与煤气管径的比值过大,使煤气喷出速度太低而引起回火,必须经常检查。

自动点火的加热炉必须配置安全切断、燃烧监控、声光报警装置。

炉门冷却装置应定期检查、循环水管应畅通无阻。出现堵塞现象,必须立即排除。

3 锻造环境保护技术

3.1 防振^{[39][40]}

锻锤防振措施分基础防振及自身消振两类。在基础防振中,若按弹性元件安放方式分,有悬挂式和支承式;按有无附加质量分,有惯性块式和无惯性块式;此外还有液压空气浮动式等。防振使用的弹性元件有:金属弹簧(卷簧、板簧、碟簧等),非金属弹簧(橡胶、气垫等)以及用它们组合而成的复合弹性元件。

3.1.1 支承式基础

支承式基础是用弹性元件将锻锤的砧座、基础支承起来的一种结构形式。常见的是,有惯性块防振基础,其应用范围广、防振效果较好,但占地面积大,施工复杂,投资大,一般适合安装新设备使用。无惯性块式的支承基础多用于中小型锻锤,也有较好的防振效果。

图 3·12-1 所示为无惯性块式橡胶减振元件砧下直接支承的一种结构形式。其减振装置由回程减振系统 1,摩擦减振系统 2 和砧下减振系统 3 构成。砧下减振系统是整个减振系统中的主体。采用这类基础后,锻锤即可获得较好的减振效果且不降低打击效率。

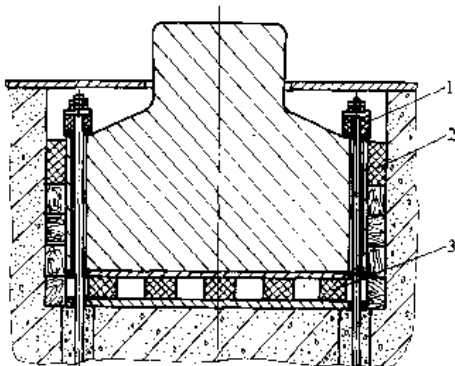


图 3·12-1 支承式无惯性块减振基础

1—回程减振系统 2—摩擦减振系统 3—砧下减振系统

图 3·12-2 为有惯性块式减振基础示意,它由砧下减振系统 1,惯性块 2 和主减振系统 3 构成。箱形基础 4 支承着整套减振系统及锤体。

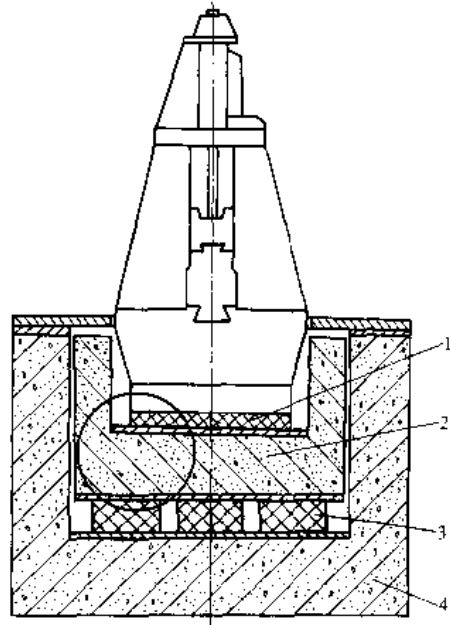


图 3·12-2 支承式有惯性块减振基础

1—砧下减振系统 2—惯性块
3—主减振系统 4—箱形基础

3.1.2 悬挂式基础

悬挂式基础是使用较早的一种防振基础,优点是弹性元件易于更换维修,但需要钢梁悬挂故造价较高。其结构也可分为带惯性块式和不带惯性块式,弹性元件一般是单独或组合使用叠合的板簧或螺旋弹簧,有时也使用气垫。

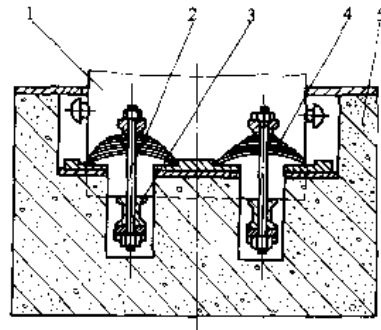


图 3·12-3 无惯性块悬挂式减振基础

1—砧座 2—悬挂螺栓 3—支承横梁
4—弹性减振系统 5—基础



图3-12-3是无惯性块悬挂式减振基础示意。由图可见,砧座1通过支承横梁3,悬挂螺栓2,弹性减振系统4即可悬挂在基础5上。这种防振基础可以利用普通基础稍加改造即成。锻造时,锤击后的振动在一个循环中即可消失,减振效果十分良好,而基础成本却大大低于有惯性块式的同等级基础。

图3-12-4是有惯性块悬挂式减振基础示意,其结构由惯性块1,支承钢梁3,悬挂螺栓4,减振系统2和基础5组成。

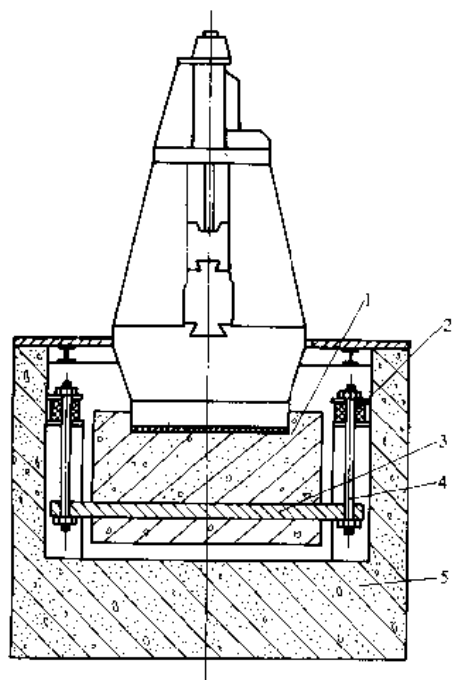


图3-12-4 有惯性块悬挂式减振基础
1—惯性块 2—减振系统 3—支承钢梁
4—悬挂螺栓 5—基础

3.1.3 浮动式减振基础

浮动式减振基础的工作原理如图3-12-5所示,它是将锤体的砧座1、惯性块2一起安放在空气室3的上框之中。空气室3由钢板焊合而成并由隔板将其分为上下两框。充水前,锤体及惯性块通过空气室3的隔板支承在基础7上;充水后,则依靠空气室3下腔内外的水压差将锤体及惯性块浮起,此时整个浮动部分的质量便支承于封闭在空气室3下腔内的压缩空气所形成的气垫弹簧4上。锻造时,此气垫弹簧便可起到吸振作用,因此,浮动式减振基础实质上也是一种独特的空气弹簧支承式基础。空气室3上下浮动时的稳定性,是通过安装在基础7上的导向机构6来保证的。

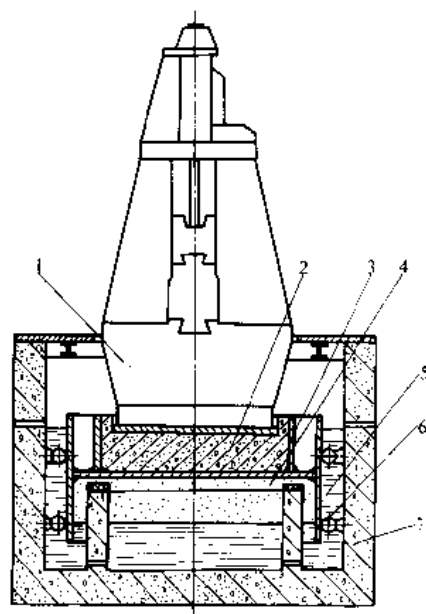


图3-12-5 浮动式减振基础

1—砧座 2—惯性块 3—空气室 4—气垫弹簧
5—水 6—导向机构 7—基础

3.1.4 混合式减振基础

混合式减振基础即是支承式基础和悬挂式基础的一种组合基础,如图3-12-6所示,锤体的砧座3置于下横梁7上,下横梁7一方面直接经由支承减振系统8置于基础5上;另一方面又借助悬挂螺栓6,悬挂减振系统2,上横梁1悬挂在基础5上。砧座移动的垂直度是通过一组导向机构4来保证的。这样,锻造时产生的振动即可分由两套减振系统所吸收。

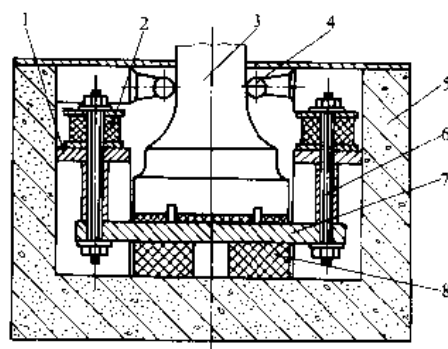


图3-12-6 混合式减振基础

1—上横梁 2—悬挂减振系统 3—砧座
4—导向机构 5—基础 6—悬挂螺栓
7—下横梁 8—支承减振系统



3.1.5 减振基础设计的一般要求

减振基础的具体结构形式虽各不相同,但设计中对它的一般要求是:在每一个打击循环前实现消振;砧座和支承体在振动时不允许脱开;保证砧座在打击时的水平度、上下移动的垂直度在规定的范围之内;确保砧座或锤体的平面位置不超出允许范围;弹性元件有足够的使用寿命及抗温度影响性能;减振装置易于维修和更换;保证必要的防潮、防水、防氧化皮装置并设置排污系统;尽可能选用既具优良减振性能又具良好吸声性能防止音频传播的弹性元件或材料(如具有弹塑性能的粘性物质及由此开发而成的粘性阻尼减振器)等。

3.1.6 锻锤的自身消振

减振基础属被动防振措施,锻锤的自身消振则是一种积极的防振措施。图3-12-7所示即为用于模锻锤的一种自消振机构原理图。铰接点2对称地布置在锤体的左右立柱上,在此铰接点上的杠杆1其左(右)端与一惯性块作刚性连接;其右(左)端与连杆3相铰接,连杆3的下端则与锤头4相铰接。只要合理调整惯性块的质量分布,就可以在打击位置附近实现以铰接点为中心的左右两端基本达到静力平衡。由于锤头4与惯性块联动,故能确保打击时基本实现垂直方向的动量平衡,从而达到打击力在机身内部大体平衡的目的。

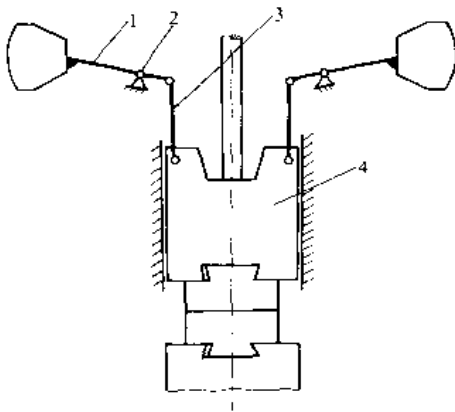


图 3-12-7 模锻锤自消振机构原理

1—带惯性块杠杆 2—锤身上的固定铰点
3—连杆 4—锤头

3.2 噪声控制

噪声控制的主要途径有三:控制噪声声源(一次声

防);控制噪声的传播和扩散(二次声防)及噪声的综合治理。

3.2.1 控制噪声声源(一次声防)

降低噪声声源是治理工业噪声的主动方法,它不但能有效地控制噪声对本车间的污染而且也能减缓对毗邻环境的影响,因此它是主动、有效,应予首选的防振措施。通常,用于锻工车间一次声防的主要方法是:

- (1) 尽可能避免偏心锻造。
- (2) 尽可能避免空击,不允许低于终锻温度锻造。
- (3) 选择合适的工艺设备。锤的噪声最大,摩擦压力机次之,热模锻压力机最小。在锤类设备中,模锻锤产生的噪声高于自由锻锤,无砧座锤高于有砧座锤。因此,在满足工艺要求的前提下应尽可能选用锻造压力机、辊锻机代替模锻锤;用快锻液压机、径向锻造压力机代替大型自由锻锤。

(4) 采用新型结构的低噪声锤类设备。锻锤的立柱振动是工作中的最大噪声源,如果加大立柱的刚度(如对U型断面的立柱加上横向拉杆)可降低噪声3dB。当把立柱的横断面由U型改为封闭结构并缩短其长度,在立柱高度的一半处的孔腔内设置弹簧——重量阻尼系统即可较传统的锤身结构降低噪声10dB左右。

(5) 改造旧有设备,在立柱和砧座之间垫上2mm的减振材料(如橡胶石棉纤维等)可减少噪声4dB左右。

(6) 选用低噪声辅助设备或工具,如尽量选用低压大直径压缩空气吹嘴;对以煤气和重油为燃料的加热炉,应选用燃烧速度较低的喷嘴。

(7) 中小型锻件的工序间运输宜采用带式输送机或链条输送装置,尽可能少用或不用链板式输送机。

(8) 在年产量达到经济批量的时候,应尽可能组织锻造生产线生产以减少工序间堆放及存取的冲击噪声。零件箱应采用耐高温、抗冲击的低噪声材料作护面。

(9) 各锻造设备尤其是锤类设备以及风机应采用相宜的弹性基础。

(10) 动力管道,尤其是高温、高压、高流速动力管道一般应敷设在地沟之中。应对压缩空气管道作阻尼处理,用沥青软橡胶及其他高分子材料涂于管壁上并用油毡裹覆以形成阻尼降低噪声。

(11) 水压机与高压泵站间采用声光信号联系,对于供应多台水压机工作的大中型水泉站,应置于距主



厂房9~15m的独立厂房之内。

(12) 小型移动式空气压缩机,清理滚筒,喷、抛丸机等不能直接放在车间使用而应置于独立的隔间之内。

(13) 在工厂总平面布置中,无论从防止噪声干扰还是从防振间距出发都应将锻工车间布置在常年主导风向的下风位置,由锻工车间所产生的噪声对临近环境的影响都不得超过规范所允许的噪声值。

3.2.2 控制噪声的传播和扩散(二次声防)^[41]

二次声防即减缓已发生的噪声影响,主要方法有:隔声,消声,吸声,隔振及阻尼降噪等。

1. 隔声 隔声的目的是切断噪声源与被污染目标之间的通路以达到降低噪声的目的。当前使用最广泛的隔声设施是隔声罩、隔声屏等。但就目前的技术状态而言锻锤的噪声仍然难以有效而普遍地得到控制,因为不是投资过高便是有碍操作。当用局部隔声屏将锻锤的立柱、砧座封闭之后可降低噪声10dB,当将锻锤作全封闭隔声处理则可降低噪声20dB左右,当必须严格控制厂界噪声影响时,则可作整个厂房的隔声处理,即对屋顶、厂房的维护墙体及室内的建筑构件分别采用玻璃纤维层、轻质泡沫混凝土、穿孔石棉板等作吸声、隔声处理;厂房的外墙作成100mm厚的混凝土墙;内外墙体之间保留不低于100mm的空气层;以人工通风的方法对密闭厂房作全室换气及空气调节,这样即可完全保证厂界噪声降至允许值之下。这种方法耗资巨大,只适用于极个别特殊情况,且其内部的噪声污染仍难根治。

2. 消声 消声一般适用于降低空气动力机械辐射的空气动力噪声,如锻锤排出的蒸气、空气;空气压缩机的吸气;加热炉鼓风机的吸气和鼓风;以及各类设备、装置上的气动元件等都是严重的气动噪声声源。为此要根据设备不同的空气动力特性配备与之适应的各式消声器,如阻性或阻抗复合消声器、小孔喷注消声器、节流降压消声器或小孔喷注一节流降压消声器等等。采取上述措施之后,就可达到降低噪声20~40dB的目的。

3. 吸声 当车间噪声源较多,而采用其他方法又不易达到噪声控制标准时可进一步采取吸声降噪措施,其基本方法是:在厂房屋顶悬挂空间吸声体;设置吸声天棚;在墙体上敷设吸声板等等。对车间面积较大的厂房混合使用吸声墙、吸声天棚则效果更佳。采取上述措施后对不同的锻造厂房所产生的吸声效果是:

一般锻造厂房降低3~5dB;

混响很严重的锻造厂房降低6~10dB;

几何形状特殊,有聚焦作用混响极为严重的锻造厂房降低11~12dB。

3.2.3 噪声的综合治理

噪声的综合治理是在一次声防,二次声防的同时进一步从锻压设备设计、工艺装备设计、生产组织管理、工业卫生防护等诸多方面采取措施最后达到操作环境低于许用噪声标准的目的。其途径有:从传动方式到设备机身进行改造;采用无冲击模架;加强设备和工装的润滑;在车间设计中按“静闹分区”的原则,将设备按噪声高低分区布置以及操作人员佩戴防声器具等。

3.3 工业卫生及其他环境保护

1. 人身防振 穿着具有微孔橡胶鞋垫的防振鞋,减轻操作者站立时受到振动而引起人体的全身颤动。手持振动性工具的操作人员佩戴防震手套,减轻工具反冲力及高频振动对人体的影响。对受高频振动影响的作业人员作定期体检,发现病变者应及时调离振动作业岗位。

2. 防噪声 当车间噪声大于90dB时,在噪声区作业的人员应佩戴防声耳罩或防声耳塞。防声耳罩、防声耳塞的隔声值分别可达5~27dB及15~36dB。

3. 通风 具体做法如下:

(1) 生产车间的小时换气量应为其容积的5~6倍即换气频次为5~6次/h。

(2) 用作自然通风的窗户面积不应小于车间面积的1/20;锻工车间的厂房一般都应设置天窗。

(3) 当车间温度超过35℃时,应具备有效的全室通风措施,并在高温作业区设置专用的局部通风装置。局部通风装置的平均送风速度不得大于5~7m/s。

(4) 当车间环境温度低于10℃时,工人不得处于大于1m/s的通风气流之中。

(5) 除车间设备占有的容积和地坪以上4m的空间外,每一工人还应占有不小于10m³的空间容积。

(6) 加热设备应尽可能安排在主导风向的下方,炉门不应正对操作工人。

(7) 在车间平面布置上必须注意合理安排大型设备、成品、半成品和模具堆放场地,上述各项不得有碍通风。

4. 采光 锻造车间必须具备良好的自然采光及



照明条件, 锻造厂房一般都应设置侧窗、高侧窗和天窗。但无论自然采光或人工照明都不许光线直射操作者的面部(特别是天车司机、司锤及主要操作者), 同时也不允许阴影(含移动阴影)进入操作者的视野。锻造车间一般应采用混光灯等新型光源照明, 照度不低于 45lx。对某些精细、危险的工作还应辅以局部照明。

5. 废液处理 具体做法:

(1) 锻件清理尽可能不用酸洗工艺以降低能耗减少污染。一旦采用酸洗工艺, 必须配备完善的通风、酸液回收、残液处理设施, 排放废液必须达到国家或当地排放标准。

(2) 所有含油废液, 如清洗装置、乳化液装置、液压传动装置、各类润滑、冷却装置等所产生的含油废液必须视其含油量及其他化学成分采取相宜的处理措施, 如: 集油槽、油水分离器、吸附过滤装置, 乳化液处理机等机械、物理、化学方法处理, 以达到国家或地区排放标准方可排放。

(3) 各种含酸、含碱废液必须视其浓度和化学成分采取相应的处理措施, 如石灰中和法、过滤中和法、废酸废碱相互中和法等予以处理, 达国家或地区排放标准后方可排放。

(4) 清洗煤气所产生的含酚污水, 必须采用有效的设施, 如曝气池处理; 对于热煤气所用的切断水封等处的含酚活水应尽量延长使用期, 不允许随意自溢外流。需要更换时应集中采用化学氧化法或吸附法处理达到国家或地区排放标准方可排放。

(5) 车间排放的废液温度不得大于 50℃。

6. 废气处理 具体做法:

(1) 各加热设备所产生的燃烧废气均不得在车间内直接排放, 必须经过烟道、烟囱或排烟罩等固定设施经处理后排放。

(2) 车间排出的燃烧废气在排烟系统出口处的烟尘黑度不得大于林格曼黑度 1 级(个别人烟稀少区允许 2 级); 排出废气的粉尘浓度必须小于 200mg/m³。

(3) 所有工作场地及设备所产生的废气, 尘埃, 如润滑、冷却液废气, 金属火焰切割废气, 砂轮磨削微尘, 清理滚筒、喷抛丸清理尘埃及酸雾等均应设置局部通风除尘装置。各通风除尘装置排放口的粉尘浓度不得大于 200mg/m³。

7. 废渣处理 具体做法:

(1) 生产中所产生的各种废渣, 如炉渣, 废弃耐火材料, 氧化铁皮等均应视情况或妥善处理或予以回收, 不允许随意弃置。

(2) 加热炉等用的石棉纤维, 矿渣棉, 玻璃纤维等绝热材料, 不得裸露在操作人员可能触及的表面。

8. 防热辐射 具体做法:

(1) 各加热设备必须配备防热辐射措施, 特别是加热炉的炉门应配置水冷却系统, 如循环冷却水管, 喷雾水幕等。

(2) 司锤工与加热炉之间, 操作人员与热锻件之间应设置隔热屏。水压机机组在不影响操作的前提下应设置固定或活动式隔热屏。

(3) 热辐射照度大于 350W/m² 以上的作业区, 必须在热源和操作者之间设置隔热屏及机械通风装置。

参 考 文 献

- [1] 李成功主编. 锻压技术手册. 北京: 国防工业出版社, 1989
- [2] 周大隼. 我国锻压技术的现状及发展方向. 机械工程. 1991-12-6-28
- [3] 王祖唐, 关廷栋, 肖景容等. 金属塑性成形理论. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [4] 王祖唐编著. 金属塑性加工工步的力学分析. 北京: 清华大学出版社, 1987
- [5] 日本工业炉协会编. 工业炉手册. 戎宗义等译. 北京: 冶金工业出版社, 1989
- [6] 锻工手册编写组编. 锻工手册. 北京: 机械工业出版社, 1974
- [7] 第一机械工业部第一设计院主编. 工业炉设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [8] 日本工业炉协会编. 工业炉省エネルギー便覧. 东京: 小宫山印刷工業株式会社, 昭和 56 年
- [9] 吴德荣等编著. 工业炉及其节能. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [10] 张志文主编. 锻造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1993
- [11] 大型铸锻件行业协会大型铸锻件缺陷分析图谱编委会编著. 大型铸锻件缺陷分析图谱. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [12] Liu Zhubai, Nie Shomin, Wang Liandong. A New Theory for Upsetting a Cylinder between Flat Platens. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 1992-12-5 (4): 297~303
- [13] 李尚健主编. 锻造工艺及模具设计资料. 北



- 京：机械工业出版社，1991
- [14] 上海机械工艺研究所，华东纺织工学院主编，金属少无切削加工，上海科技出版社，1983
- [15] 日本塑性加工学会锻造分会编，第三回中日冷间锻造学术座谈会论文集，日本塑性加工学会锻造分会，东京，ニッセイユプロ株式会社出版，1990
- [16] 中国锻压学会编译，世界塑性加工最新技术译文集，北京：机械工业出版社，1987
- [17] Thamas G. Forging Hand Book. ASME (U. S. A), 1985
- [18] International Nickel Co Inc. Catalog. Hi-Temperature Hi-Strength Nickel Base Alloys. New York; International Nickel Co Inc, 1977
- [19] 工藤英明主编，冷锻手册，一机部北京机电研究所译，北京：北京机电研究所出版，1977
- [20] 宫川松男等编，压力加工手册，江国屏，吴觉伪，皇甫骅等译，北京：机械工业出版社，1984
- [21] 吴诗悖，温锻，北京：国防工业出版社，1979
- [22] 锻压手册编辑委员会编，锻压手册，第6篇：回转成形，北京：机械工业出版社，1993
- [23] 锻模设计手册编写组，锻模设计手册，北京：机械工业出版社，1991
- [24] 傅沛福，辊锻理论与工艺，吉林：吉林人民出版社，1982
- [25] 胡正寰等编，斜轧与楔横轧，北京：冶金工业出版社，1985
- [26] 黄超群编译，国外外套圈扩孔机概况，北京：机械工业出版社，1983
- [27] Никольский Л. А. Торячая Штапповка и Прессование Титанових Сплаивовка. Машгиз, 1975
- [28] Корнеев Н. И. Ковка и Штапповка Цветных Металлов. Машгиз, 1972
- [29] 航空材料手册编写组，航空材料手册，北京：国防工业出版社，1972
- [30] 柯洛姆，戈赫曼，不锈钢与热强钢，赵忠译，北京：中国工业出版社，1964
- [31] 轻金属材料加工手册编写组编，轻金属材料加工手册，北京：冶金工业出版社，1980
- [32] 西北工业大学有色金属锻造编写组，有色金属锻造，北京：国防工业出版社，1979
- [33] 俞新陆等编，液压机，北京：机械工业出版社，1990
- [34] 何德誉主编，曲柄压力机，北京：机械工业出版社，1987
- [35] 俞新陆主编，锻压手册：锻压车间设备分册，北京：机械工业出版社，1993
- [36] 张建民编著，工业机器人，北京：北京理工大学出版社，1988
- [37] 上海市电动工具研究所编译，国外工业机械手及其应用，上海：上海科学技术情报研究所出版，1977
- [38] 杜祥瑛编著，工业机器人及其应用，北京：机械工业出版社，1986
- [39] 杨淳朴，何成宏，锻锤的振动和防振问题，锻压机械，1979(3)-1
- [40] 高乃光等，用橡胶隔振器对1t空气锤进行粘下直接减振的研究，锻压机械，1986(2)-45
- [41] 朱乃燾，锻压生产中的噪声及其控制，锻压机械，1881(1)-40

