

锻造知识培训

2008-8

锻造知识

目 录

第一节：基础知识.....	5
一、锻压及其特点.....	5
1.定义.....	5
2.分类.....	5
3.特点.....	5
4.应用.....	5
二、金属的锻造性能.....	6
1.定义.....	6
2.影响锻造性能的因素.....	6
三、金属的塑性变形规律.....	7
1. 最小阻力定律.....	7
2. 塑性变形时的体积不变规律.....	8
第二节：锻 造.....	8
一、锻造的定义及方法.....	8
1.定义.....	8
2.分类.....	8
二、自由锻造及其特点.....	8
1.定义.....	8
2.特点.....	8
三、自由锻造的工序.....	9
1.镦粗.....	9
2.拔长.....	10
3.冲孔.....	13
4.扩孔.....	14

锻造知识

四、设备与工具	15
1.设备	15
2.工具	15
五、锻造缺陷及防止	15
第三节：锻造用原材料及其加热	15
一、锻造用材料	15
1.分类	15
2.钢锭的结构	15
3.钢锭的缺陷	16
二、原材料的加热	17
1.加热的目的	17
2.加热方法	17
3.锻造温度范围的确定	17
4.金属的加热规范	18
三、加热缺陷及防止措施	18
1.氧化	18
2.脱碳	19
3.过热	20
4.过烧	20
5.裂纹	21
四、加热温度的测量	21
第四节：锻件的锻后冷却和热处理	21
一、锻件的锻后冷却	21
1.定义	21
2.锻后冷却常见缺陷产生的原因和防止措施	21

锻造知识

3.锻件的冷却方法	22
二、锻件的锻后热处理	23
1.目的	23
2.方法	23
第五节：工艺制定	23
一、内容	23
二、锻件图的制定	23
三、坯料重量和尺寸的确定	24
1.形状材料的重量计算	24
2.坯料尺寸确定	25
三.确定变形工艺和锻造比	25
1 变形工艺	25
2.锻造比	25
3.锻造比的计算	25
4.锻造比对组织和机械性能的影响	26

第一节：基础知识

一、锻压及其特点

1.定义

锻压是利用外力使金属坯料产生塑性变形，获得所需尺寸、形状及性能的毛坯或零件的加工方法。锻压是锻造和冲压的总称。

2.分类

锻压是机械制造中毛坯和零件生产的主要方法之一，常分为自由锻、模锻、板料冲压、挤压、拉拔、轧制等

3.特点

锻压加工与其他加工方法相比，具有以下特点。

(1) 改善金属的组织、提高力学性能。金属材料经锻压加工后，其组织、性能都得到改善和提高，锻压加工能消除金属铸锭内部的气孔、缩孔和树枝状晶等缺陷，并由于金属的塑性变形和再结晶，可使粗大晶粒细化，得到致密的金属组织，从而提高金属的力学性能。在零件设计时，若正确选用零件的受力方向与纤维组织方向，可以提高零件的抗冲击性能。

(2) 材料的利用率高。金属塑性成形主要是靠金属的形体组织相对位置重新排列，而不需要切除金属。

(3) 较高的生产率。锻压加工一般是利用压力机和模具进行成形加工的。例如，利用多工位冷镦工艺加工内六角螺钉，比用棒料切削加工工效提高约400倍以上。

(4) 毛坯或零件的精度较高。应用先进的技术和设备，可实现少切削或无切削加工。例如，精密锻造的伞齿轮齿形部分可不经切削加工直接使用，复杂曲面形状的叶片精密锻造后只需磨削便可达到所需精度。

(5) 锻压所用的金属材料应具有良好的塑性，以便在外力作用下，能产生塑性变形而不破裂。常用的金属材料中，铸铁属脆性材料，塑性差，不能用于锻压。钢和非铁金属中的铜、铝及其合金等可以在冷态或热态下压力加工。

(6) 不适合成形形状较复杂的零件。锻压加工是在固态下成形的，与铸造相比，金属的流动受到限制，一般需要采取加热等工艺措施才能实现。对制造形状复杂，特别是具有复杂内腔的零件或毛坯较困难。

4.应用

由于锻压具有上述特点，因此承受冲击或交变应力的重要零件(如机床主轴、齿轮、曲轴、连杆等)，都应采用锻件毛坯加工。所以锻压加工在机械制造、军工、航空、轻工、家用电器等行业得到广泛应用。例如，飞机上的塑性成形零件的质量分数占85%；汽车，拖拉机上的锻件质量分数约占60%~80%。

二、金属的锻造性能

1.定义

金属的锻造性能(又称可锻性)是用来衡量压力加工工艺性好坏的主要工艺性能指标。金属的可锻性好,表明该金属适用于压力加工。衡量金属的可锻性,常从金属材料的塑性和变形抗力两个方面来考虑,材料的塑性越好,变形抗力越小,则材料的锻造性能越好,越适合压力加工。在实际生产中,往往优先考虑材料的塑性。

1.1 金属的塑性

指金属材料在外力作用下产生永久变形而不破坏其完整性的能力,用伸长率 δ 、断面收缩率 ψ 来表示。材料的 δ 、 ψ 值越大或锻粗时变形程度越大且不产生裂纹,塑性也越大。

1.2 变形抗力

指金属在塑性变形时反作用于工具上的力。变形抗力越小,变形消耗的能量也就越少,锻压越省力。

塑性和变形抗力是两个不同的独立概念。如奥氏体不锈钢在冷态下塑性很好,但变形抗力却很大。

2.影响锻造性能的因素

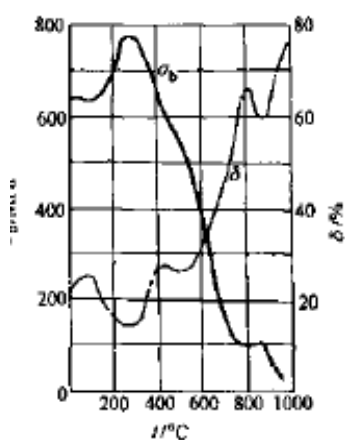
2.1 化学成分

不同化学成分的金属其锻造性能不同。纯金属的锻造性能较合金的好。

钢的含碳量对钢的可锻性影响很大,对于碳含量分数小于0.15%的低碳钢,主要以铁素体为主(含珠光体量很少),其塑性较好。随着碳含量的增加,钢中的珠光体量也逐渐增多,甚至出现硬而脆的网状渗碳体,使钢的塑性下降,塑性成形性也越来越差。

合金元素会形成合金碳化物,形成硬化相,使钢的塑性变形抗力增大,塑性下降,通常合金元素含量越高,钢的塑性成形性能也越差。

杂质元素磷会使钢出现冷脆性,硫使钢出现热脆性,降低钢的塑性成形性能。



2.2 金属组织

金属内部的组织不同,其可锻性有很大差别。纯金属及单相固溶体的合金具有良好的塑性,其锻造性能较好;钢中有碳化物和多相组织时,锻造性能变差;具有均匀细小等轴晶粒的金属,其锻造性能比晶粒粗大的铸态柱状晶组织好;钢中有网状二次渗碳体时,钢的塑性将大大下降。

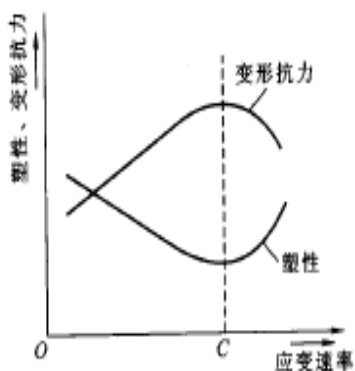
2.3 变形温度

随着温度升高,原子动能升高,削弱了原子之间的吸引力,减少了滑移所需要的力,因此塑性增大,变形抗力减小,提高了金属的锻造性能。变形温度升高到再结晶温度以上时,加工硬化不断被再结晶软化消除,金属的锻造性能进一步提高。

但加热温度过高，会使晶粒急剧长大，导致金属塑性减小，锻造性能下降，这种现象称为“过热”。如果加热温度接近熔点，会使晶界氧化甚至熔化，导致金属的塑性变形能力完全消失，这种现象称为“过烧”，坯料如果过烧将报废。因此加热要控制在一定范围内，金属锻造加热时允许的最高温度称为始锻温度，停止锻造的温度称为终锻温度。

2.4 变形速度

变形速度即单位时间内变形程度的大小。



它对可锻性的影响是矛盾的。一方面，随着变形速度的增大，金属在冷变形时的冷变形强化趋于严重，表现出金属塑性下降，变形抗力增大；另一方面，金属在变形过程中，消耗于塑性变形的能量一部分转化为热能，当变形速度很大时，热能来不及散发，会使变形金属的温度升高，这种现象称为“热效应”。变形速度越大，热效应现象越明显，有利于金属的塑性提高，变形抗力下降，锻造性能变好(图中C点以右)。但除高速锤锻造外，在一般的压力加工中变形速度不能超过C点的变形速度，因此热效应现象对可锻性并不影响。故塑性差的材料(如高速钢)或大型锻件，还是应采用较小的变形速度为宜。若变形速度过快会出现变形不均匀，造成局部变形过大而产生裂纹。

2.5 应力状态

不同的压力加工方法在材料内部所产生的应力大小和性质(压应力和拉应力)是不同的。

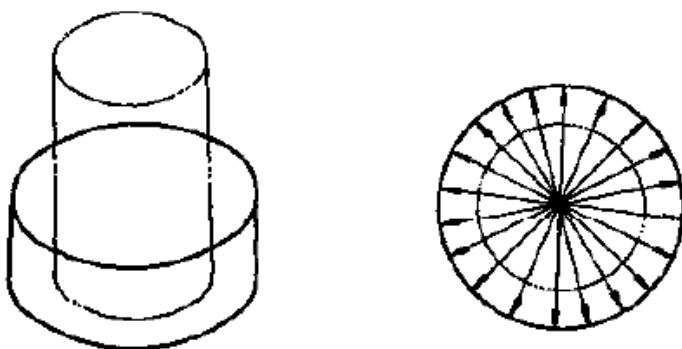
在三向应力状态下，压应力的数目越多，则其塑性越好；拉应力的数目越多，则其塑性越差。其原因是在金属材料内部或多或少总是存在着微小的气孔或裂纹等缺陷，在拉应力作用下，缺陷处会产生应力集中，使缺陷扩展甚至达到破坏，从而金属丧失塑性；而压应力使金属内部原子间距减小，又不易使缺陷扩展，因此金属的塑性会提高。

三、金属的塑性变形规律

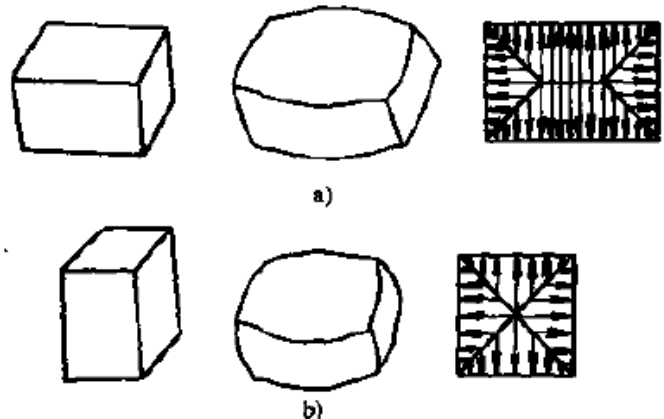
金属塑性变形时遵循的基本规律。

1. 最小阻力定律

最小阻力定律是指在塑性变形过程中，如果金属质点有向几个方向移动的可能时，则金属各质点将向阻力最小的方向移动。阻力最小的方向移动是通过该质点向金属变形的周边所作的法线方向，因为质点沿此方向移动的距离最短，所需的变形功最小。最小阻力定律符合力学的一般原则，它是塑性成形加工中最基本的规律之一。利用最小阻力定律可以推断，任何形状的物体只要有足够的塑性，都可以在平锤头下锻粗使坯料逐渐接近于圆形。这是因为在锻粗时，金属流动距离越短，摩擦阻力也越小。



图中，圆形截面的金属朝径向流动；方形、长方形截面则分成4个区域分别朝垂直与四个边的方向流动，最后逐渐变成圆形、椭圆形。由此可知，圆形截面金属在各个方向上的流动最均匀，锻粗时总是先把坯料锻成圆柱体再进一步锻造。



2. 塑性变形时的体积不变规律

体积不变规律是指金属材料在塑性变形前、后体积保持不变。金属塑性变形过程实际上是通过金属流动而使坯料体积进行再分配的过程。但实际上，由于钢锭再锻造时可消除内部的微裂纹、疏松等缺陷，使金属的密度提高，因此体积总会有一些减小，只不过这种体积变化量极其微小，可忽略不计。

第二节：锻 造

一、锻造的定义及方法

锻造是毛坯成形的重要手段，尤其在工作条件复杂、力学性能要求高的重要结构零件的制造中，具有重要的地位。

1.定义

锻造是使金属坯料，在外力的作用下，发生塑性变形，通过控制金属的流动，使其成形为所需形状、尺寸和组织的方法。

2.分类

2.1根据变形时金属流动的特点不同，可以分为自由锻和模锻两大类。

2.2根据温度可分为热锻、等温锻、温锻和冷锻

二、自由锻造及其特点

1.定义

使用简单的通用工具或直接在锻造设备（锻锤或水压机）的上、下砧间进行锻造，叫做自由锻造。

2.特点

自由锻造时，金属只有部分表面受到工具限制，其余则为自由表面。

自由锻造的优点是：适用性强、灵活性大、生产周期短，是特大型锻件的唯一生产方法。

缺点是：锻件精度低、加工余量大、生产效率低、劳动强度大，只能适用于单件小批量生产。

三、自由锻造的工序

基本工序：锻粗、拔长、冲孔、扩孔、弯曲、切割、扭转和错移等

辅助工序：压钳口、倒棱、压肩等

修整工序：修整、校直、平整端面等

1. 锻粗

1.1 定义

沿工件轴向进行锻打，使其长度减小，横截面积增大的操作过程。如下图：

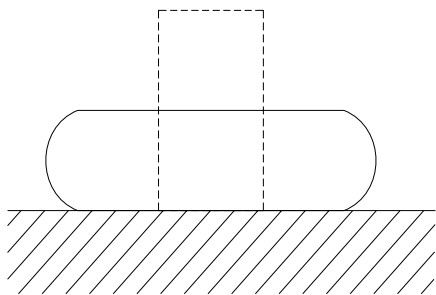


图1

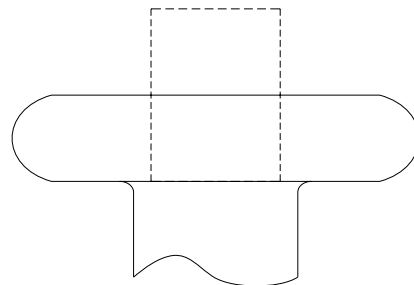


图 2

1.2 用途

- a. 锻制饼块类锻件；
- b. 空心锻件在冲孔前使坯料横截面增大和平整；
- c. 锻造轴杆类锻件可提高后续拔长工序的锻造比；
- d. 提高锻件的横向力学性能和减小力学性能的异向性。

1.3 分类与方法

锻粗分全锻粗(见图 1)和局部锻粗(见图 2)。

方法有铆锻、叠锻等。

1.4 锻粗时的工艺参数及要领

1.4.1 工艺参数

锻粗时的工艺参数主要指坯料的高径比。为防止锻粗时产生纵向弯曲，圆柱坯料高度与直径之比不应超过2.5~3，控制在2~2.5的范围更好。为避免出现双鼓形，锤上用坯料取高径比1.5~2。

1.4.2 操作要领

- a. 锻粗前坯料下料端面应平整，并与轴心线垂直。

- b. 为了锻合坯料内部缺陷和减小镦粗变形抗力，在镦粗前应将坯料加热到最允许的加热温度，并要求温度均匀。
- c. 镦粗时坯料要围绕轴心线转动，坯料发生弯曲时需立即进行校正。
- d. 镦粗的压缩量应小于材料塑性允许的范围。
- e. 如果镦粗后需要进一步拔长时，应考虑拔长的可能性，即不宜镦的太低。高径比为0.6。
- d. 镦粗前应进行倒棱制坯，其目的是焊合皮下缺陷，使镦粗时侧面不致产生裂纹，同时去掉钢锭的棱边和锥度。
- f. 镦粗时毛坯高度应与设备空间相适应

在锤上镦粗时，应满足 $H-h_0 > 0.25H$ H 为锤头的最大行程， h_0 为坯料原始高度

在水压机上镦粗时， $H-h_0 > 100\text{mm}$ H 为水压机的最大距离， h_0 为坯料原始高度

2.拔长

2.1 定义

拔长是沿垂直于工件的轴向进行锻打，以使其截面积减小，而长度增加的操作过程。

2.2 用途

- a. 轴杆类、筒类锻件成形；
- b. 芯轴拔长还是高环类锻件的预备工序；
- c. 改善锻件内部质量

2.3 分类与方法

2.3.1 分类

拔长分直接拔长和芯轴拔长。

2.3.2 方法

根据使用的工具有平砧拔长、型砧（“v”型砧和弧形砧）拔长

根据拔长的效果有普通拔长、“WHF”法拔长、“FM”法拔长和“JTS”法拔长

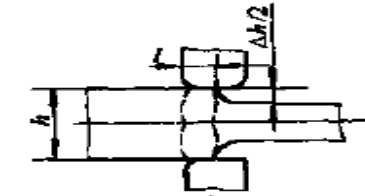
2.4 拔长工序及其操作要领

实际上拔长是一系列的横向镦粗的过程，变形相当于沿着轴向进行一系列镦粗工序的组合。

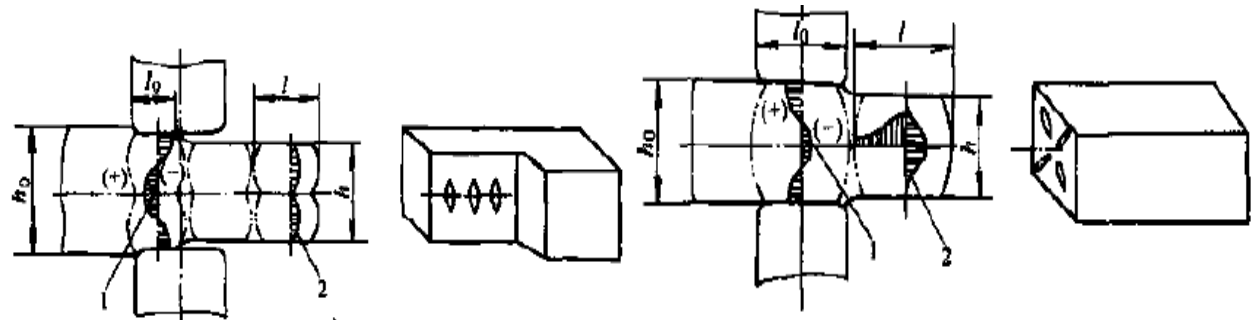
拔长时的锻透程度，内、外部裂纹及锻件内在质量，均与拔长时的变形分布和应力状态有关，主要取决于送进量、压下量、砧子形状、拔长操作等工艺因素。

2.4.1 送进量的影响

送进量的大小不仅关系到拔长效率，而且影响锻件质量。



当送进量小时 ($l_0/h_0 < 0.5$), 拔长变形区则出现双鼓形。这时变形集中在上、下表面层, 中心部分非但不能锻透, 并且出现轴向拉应力, 容易引起内部横向裂纹 (见左下图)。送进量如果小于单边压下量还会在锻件表面形成折叠。

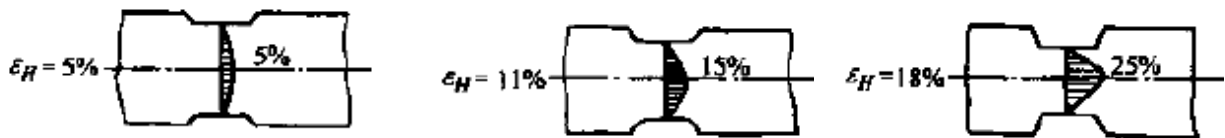


当送进量过大时 ($l_0/h_0 > 1$), 拔长变形区出现单鼓形, 心部变形很大, 得到锻透, 但在鼓形的侧面和角部受拉应力, 容易引起表面裂纹与角裂。如果坯料在同一位置反复重击, 由于金属沿对角线的剧烈流动, 还会使塑性低的锻件产生十字裂纹 (见右上图)。

综合考虑送进量对拔长效率和锻件质量的影响, 一般认为相对送进量 $l_0/h_0 = 0.5 \sim 0.8$ 较为合适, 绝对送进量常取 $l_0 = (0.4 \sim 0.8)B$ 。 B为砧宽

2.4.2 压下量的影响

拔长时增大压下量不但可提高生产率, 还可强化心部变形, 有利于锻合内部缺陷。拔长压下量对变形分布的影响如下图:



只要坯料的塑性允许, 应尽量采取大压下量拔长。但为了避免锻件产生折叠, 单边压下量应小于送进行量。

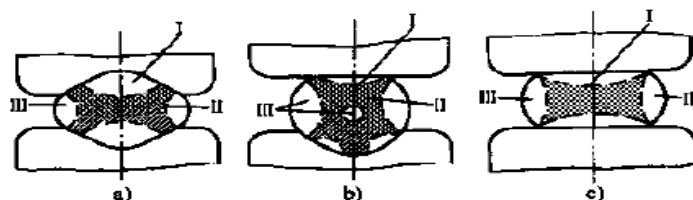


图 3-10 拔长砧子形状及其对变形区分布的影响
a) 上、下 V 形砧 b) 上平、下 V 形砧 c) 上、下平砧
I — 难变形区 II — 大变形区 III — 小变形区

2.4.3 砧子形状的影响

用不同形状的砧子拔长时, 坯料内部变形区分布也不同。见左图。

当采用上、下 V 型砧拔长时, 坯料中心的变形程度最大, 又处于强烈三向应力状态, 因此能很好锻合心部缺陷, 并且拔长效率也高, 坯

料轴心线不易偏移。

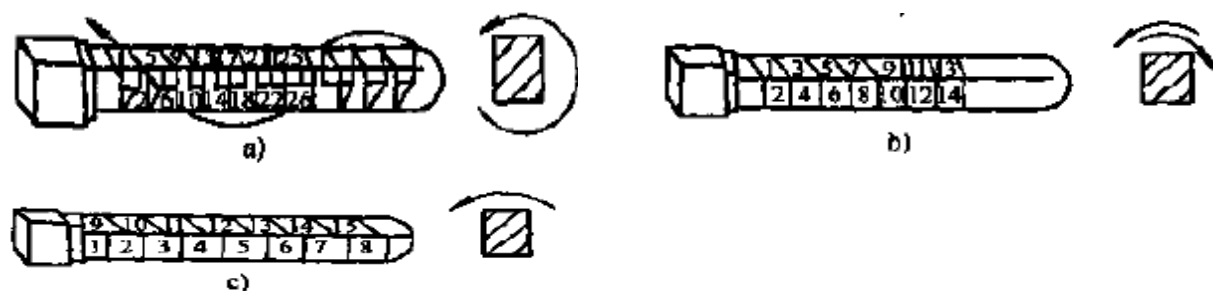
当采用上平、下V形砧拔长时，最大的变形区不在坯料中心，而在距中心 $1/2 \sim 3/4$ 半径处，故锻透不理想。

当采用上、下平砧拔长矩形截面坯时，只要相对送进量选取得合适，就能够使坯料的中心锻透。如果有大压下量，把坯料压成扁方，则锻透效果更好。

使用平砧拔长步骤：圆——方——扁方——方——八方——圆

2.4.4 拔长操作的影响

拔长时坯料送进与翻转的方法有三种：



第一种方法是沿螺旋线翻杆 90° ，适用于锻造台阶轴锻件；第二种方法是反复翻杆 90° 拔长，常用于手工损伤锻造；第三种方法是沿着整个坯料长度拔长趟后翻转 90° 拔长，多用于锻造大型锻件。这种操作易使坯料产生弯曲，因此需先翻转 180° 将料平正值，然后再翻转 90° 依次拔长。翻转前后拔长的送进位置要相互错开，这样才能使锻件沿轴线方向的变形趋于均匀。

2.5 宽砧高温强压法(WHF)法

宽砧高温大压下量拔长，改善了坯料内部的应力应变场，有利于内部孔隙缺陷的锻合、压实。当增加砧面宽度并满砧送进(送进量不小于砧宽的 $70\% \sim 90\%$)，在压下量为 $20\% \sim 25\%$ ， $W_0/H_0=0.6 \sim 0.9$ 时，坯料内应力应变分布较为合理，加上较高而均匀的温度场，孔穴和疏松结构将被有效地锻合压实。

在用WHF法拔长时，沿砧子外缘约有 $35\% \sim 50\%$ 区域，孔洞难以闭合，为此两次压缩中间应有不少于 10% 砧宽的搭接量，并在翻料时注意错砧，以达到全部均匀压实的目的。

2.6 FM 锻造法

FM法(Free from Mannesmann effect)即中心无拉应力锻造法，它与普通平砧拔长的区别在于只加宽了下砧。由于不对称的砧型配置，锻压时坯料内部产生不对称变形，中部拉应力位置下移，这样钢锭芯部缺陷较多的部位将避开拉应力的破坏作用。

2.7 中心压实法(J、T、S法)

中心压实法的实质是将坯料加热到允许的最高温度，然后表面先冷却降温(空冷、吹风或喷雾冷却)，在中心还处于高温状态，用窄平砧沿坯料纵向加压，借且表层低温壳的限制作用，达到显著压实中心的效果。

3.冲孔

3.1 定义

利用冲头在工件上冲出通孔或盲孔的操作过程。

3.2 作用

常用于锻造齿轮、套筒和圆环等空心锻件。

3.3 实心冲子冲孔

用实心冲子冲孔时，主要质量问题是“走样”、裂纹和孔冲歪等

3.3.1 冲孔“走样”

在分析冲孔变形特点时，可将坯料按两区考虑，冲头下面为圆柱区，冲头以外为圆环区。在冲孔过程中圆柱区金属的变形，相当于在圆环包围下的镦粗，被压缩的圆柱区金属必将拉着相邻的圆环区金属下移而产生拉缩现象，即上端面凹，高度减小，同时圆柱区金属被镦粗挤向四周，使圆环区相似在内压力作用下胀形，造成外径上小下大，下端面呈凸形，这些现象统称“走样”。冲孔时坯料的“走样”，与坯料直径 D_0 与孔径 d 之比的关系很大，如下图

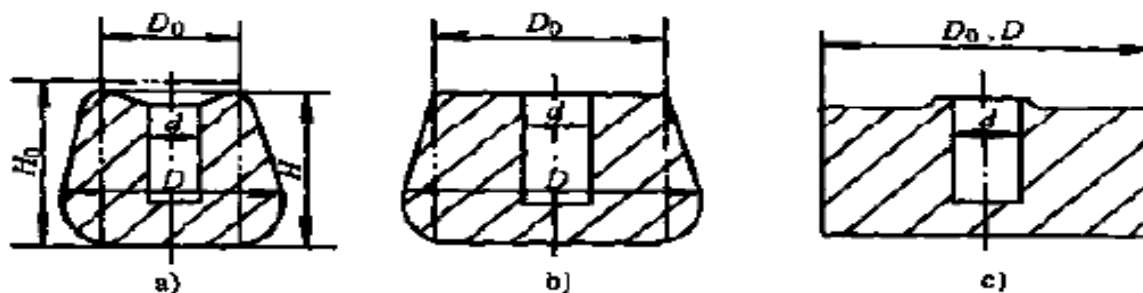


图 3-16 冲孔时坯料的“走样”
a) 端面凹下 b) 端面平整 c) 端面呈凸台

当 $D_0/d \leq 2.5$ 时，拉缩严重，外径明显增大，如上图a；

当 $D_0/d = 3 \sim 5$ 时，几乎没有拉缩现象，外径仍有所增大，如上图b；

当 $D_0/d > 5$ 时，由于环壁较厚，扩径困难，多余金属反挤向端面而凸台，如上图c。

3.3.2 冲孔裂纹

低塑性坯料冲孔时常易在外侧表面和内孔圆角产生纵向裂纹。外侧表面裂纹的产生，是由于冲头下部金属向外流动时，使外层金属切向受到拉应力和拉应变而引起的。 D_0/d 越小时，外层金属的切向伸长变形越大，越应产生裂纹，通常取 $D_0/d \geq 2.5 \sim 3$ 。

内孔圆角处裂纹，是由于此处温度降低较多，因而塑性降低，加之冲头一般有锥度，当冲子往下运动时，此处便被胀裂。因此，为避免产生裂纹，冲子的锥度不宜过大，冲Cr12Mo型钢等低塑性材料时，不仅要求冲子锥度较小，而且要经过多次重复加热，逐步将孔冲成。

3.3.3 孔冲歪

引起孔冲歪的原因较多，如冲子放偏、坯料温度及性能不均匀、冲头磨损各处的圆角、斜度不一致等。原坯料越高越易冲歪。因此，冲孔高度 H 一般宜小于直径 D ，个别采用 $H/D \leq 1.5$ 。

坯料冲孔后的高度 H 通常小于或等于坯料原高度 H_0 。因此，实心冲子冲孔时，坯料高度按下述考虑：

当 $D_0/d < 5$ 时，取 $H_0 = (1.1 \sim 1.2)H$ ；

当 $D_0/d \geq 5$ 时，取 $H_0 = H$ 。

3.3.4 操作要领

- 冲孔前坯料必须镦粗，以使高度减小、直径增大、端面平整；
- 冲头必须对中放正，打击方向垂直向下；
- 在冲出的盲孔内撒上煤末或木炭粉，以便取出冲头；
- 在冲孔过程中应把坯料绕轴心线转动，防止孔形位置偏斜。

实心冲子冲孔的优点是，操作简单，芯料损失较少，高度 $h \approx 0.25H$ 。这种方法广泛应用于孔径小于400~500mm的锻件。

3.4 空心冲子冲孔

这种方法主要用于孔径在400mm以上的大锻件。冲孔时坯料形状变化较小，芯料损失大，但对锻造大锻件而言，却是非常有利的，能将钢锭中心质量差的部分冲掉，为此在冲孔时应将钢锭冒口端向下。

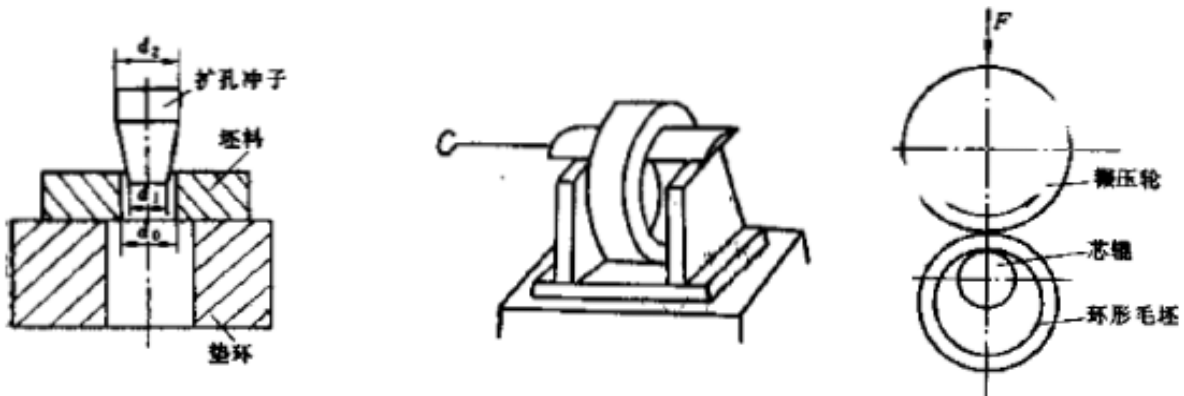
4. 扩孔

4.1 定义

减小空心坯料壁厚而增加其内、外径的锻造过程。用于锻造各种圆环锻件。

4.2 方法及种类

常用的扩孔方法有冲子扩孔、芯轴扩孔(又叫马杠扩孔)、辗压扩孔、楔扩孔、液压扩孔和爆炸扩孔等。



四、设备与工具

锻造使用的工装、辅具以及机器的总称。

1. 设备

锻造设备分主要设备和辅助设备。

1.1 主要设备

液压机、空气锤、电液锤等

1.2 辅助设备

操作机、行车、加热炉、热处理炉、出料机等

2. 工具

锤头（砧子）、漏盘、冲子、马杠、芯棒、剁刀、号刀（压棍）、垫（压）铁等

五、锻造缺陷及防止

除上述以外有：折叠、拉边等

第三节：锻造用原材料及其加热

一、锻造用材料

1. 分类

按加工形态分为钢锭、轧材、铸坯以及锻坯等。

按照钢种分为碳素钢、合金钢、不锈钢等

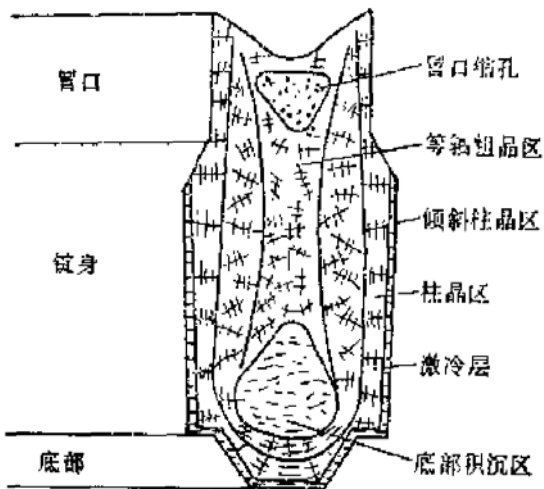
按照截面形状分为圆钢锭、方钢锭、八角钢锭；圆坯、方坯、板坯等。

2. 钢锭的结构

钢锭由冒口、锭身和底部组成。

由于钢液在凝固过程中各处的冷却与传热条件很不均匀，钢液是由模壁向锭心、由底部向冒口逐渐冷凝选择结晶，从而造成钢锭的结晶组织、化学成份及夹杂物分布不均。从钢锭纵剖面结构示意图（左图）可知，钢锭表层为细小等轴结晶区（也称激冷区），向里为柱状结晶区，再往里为倾斜树枝状结晶区，心部为粗大等轴结晶区。

由于选择结晶的原因，心部上端聚集着轻质夹杂物和气体，并形成巨大收缩孔，其周围还产生严重疏



松。心部称底部为沉积区，含有比重较大的夹杂物。因此钢锭内部缺陷主要集中在冒口、底部。

一般来说，锭身角数越多、锭身锥度越大，越有利于远见液中的夹杂物和气体上浮，有利于凝固补缩和减少偏析程度。但是如果锥度太大，反而会扩大负偏析。

3.钢锭的缺陷

钢锭的常见缺陷有：偏析、夹杂、气体、气泡、缩孔、疏松、裂纹和溅疤等。

3.1 偏析

指各处成份与杂质分布的不均匀现象，包括枝晶偏析和区域偏析等。偏析是由于选择性结晶、溶解度变化、比重差异和流速不同造成的。偏析会造成力学性能不均匀和裂纹缺陷。

3.2 夹杂

主要指冶炼时产生的氧化物、硫化物、硅酸盐等非金属夹杂。有时也包括浇注系统不清洁，耐火材料质不良带入的外来夹渣物。夹杂是一种异相质点，它的存在对热过程和锻件质量均有不良影响，它破坏金属的连续性，在应力的作用下，在夹杂处产生应力集中，会引发显微裂纹，成为锻件疲劳破坏的疲劳源。如低熔点夹杂物过多地分布于晶界上，在锻造时会引起热脆现象。可见，夹杂不利于铸锭的锻造性能和锻后力学性能。

3.3 气体

主要指钢锭中的有害气体，如氢、氧等。对于白点敏感钢种，当氢含量高，加上冷却时组织应力作用，容易产生白点缺陷。钢中氢含量高时还将引起脆性，热锻工艺性将明显下降。

3.4 气泡

它主要产生在钢锭冒口、底部及底部中心部位。在切除冒口和底部后，只要气泡不是敞开的或气泡内壁未被氧化，通过锻造可以焊合，否则在锻造时会产生裂纹。

3.5 缩孔

它是在最后凝固的冒口区形成，由于冷凝结晶时没有钢液补充而形成孔洞性缺陷组织，同时含有大量杂质，因此必须切除。

3.6 疏松

它主要集中在钢锭中心部位，产生的原因与缩孔相同，它使钢锭组织致密度降低，锻造时要求采用大变形疏松才能消除，否则对锻件的力学性能会产生不良影响。

3.7 溅疤

当采用上注法浇注时，钢液因冲击模底而飞溅到模壁上，溅珠和钢锭不能凝固成一体，形成溅疤。在锻造前必须铲除溅疤，否则会在锻件上形成严重的夹层。

综上所述，钢锭的冶金缺陷与冶炼、浇注过程、冷凝结晶条件、钢锭模具设计、耐火材料质量等有关。

二、原材料的加热

1.加热的目的

提高金属的塑性，降低变形抗力，使其易于流动成形并获得良好的锻后组织。

能否把原材料转化为高质量的锻件，对压力加工领域来说主要面临两个方面的问题：金属的塑性；变形抗力。因而锻造生产中，金属坯料锻前大部分需要加热以改善这两个条件。

2.加热方法

根据金属加热时所用的热源不同，目前生产中应用的加热方法有火焰加热（燃煤、气、油）和电加热法。

3.锻造温度范围的确定

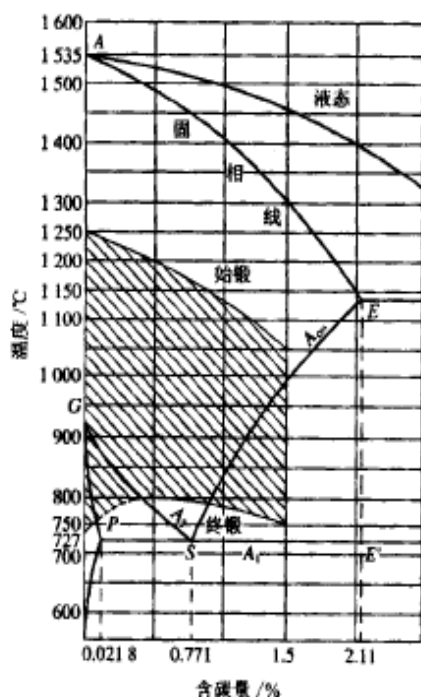
钢的锻造温度范围，是指开始锻造温度（始锻温度）和结束锻造温度（终锻温度）之间的一段温度区间。

3.1 确定锻造温度的基本原则

要求在锻造温度范围内金属具有良好的塑性和较低的变形抗力；能锻出优质锻件；锻造温度尽可能宽广些，以便减少加热火次，提高锻造生产率。

3.2 确定锻造温度范围的基本方法

以合金平衡相图为基础，再参考塑性图、抗力图和再结晶图，由塑性、质量和变形抗力三个方面加以综合分析，从而定出始锻温度和终锻温度。



一般来讲，碳钢的锻造温度范围，根据铁-碳平衡图可直接确定。对于多数合金结构钢的锻造温度范围，可以参照含碳量相同的碳钢来考虑。但对塑性较低的高合金钢，以及不发生相变的钢种（如奥氏体钢、铁素体钢），则必需通过试验，帮能订出合理的锻造温度。

3.3 始锻温度的确定

确定钢的始锻温度，首先必须保证钢无过烧现象。因此对碳钢来讲，始锻温度应比铁-碳平衡图的固相线低 150-250℃。

如以钢锭为坯料时，由于铸态组织比较稳定，产生过烧的倾向性小，因此，钢锭的始锻温度比同钢种钢坯和钢材要高 20-50℃。

3.4 终锻温度的确定

在确定终锻温度时，如果温度过高，会使锻件的晶粒粗大，甚至产生魏氏组织。相反，终锻温度过低，不仅导致锻造后期加工硬化严重，可能引起断裂而且会使锻件局部处于临界变形状态，产生粗大晶粒。因此，通常钢的终

锻温度应稍高于再结晶温度。这样，既保证坯料在终锻前仍有足够的塑性，又可使锻件在锻后能够获得较好的组织性能。

4.金属的加热规范

加热规范是指坯料从装炉开始到加热完一整个过程对炉子温度和坯料温度随时间变化的规定。

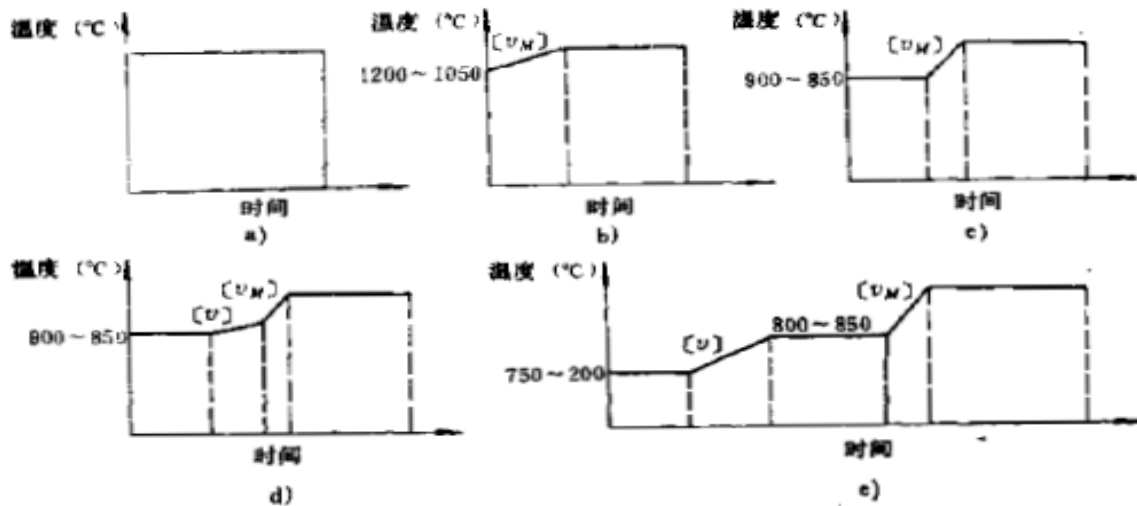


图3-11 锻造加热曲线类型

a)一段加热曲线 b)二段加热曲线 c)三段加热曲线 d)四段加热曲线 e)五段加热曲线
[v]金属允许的加热速度 [v_M]最大可能的加热速度

4.1 加热规范的类型

加热规范采用炉温-时间的变化曲线（又称加热曲线）来表示。常用的加热规范有：一段式、二段式、三段式、四段式、五段式（见上图）。

4.2 加热规范制定的原则及方法

加热规范通常包括装炉温度、加热各个阶段炉子的升温速度、各个阶段加热（保温）时间和总的加热时间，以及最终加热温度、允许的加热不均匀性和温度头（炉温与料温差）等。

一般情况下，制定正确的加热规范应保证金属在加热过程中不产生裂纹、过热和过烧，加热均匀、氧化脱碳少，加热时间短、生产效率高和节省燃料等，总之应保证高效、优质、低消耗。

总之，在制定加热规范时，主要从钢料的断面尺寸、化学成份、塑性、强度极限、导温性、线膨胀系数、组织特点及在加热时的变化和坯料的原始状态等方面进行综合考虑。

三、加热缺陷及防止措施

1.氧化

1.1 定义

钢料加热到高温时，其表层的铁离子与炉气中的氧化性气体（ O_2 、 CO_2 、 H_2O 和 SO_2 ）发生化学反应，使金属表层形成氧化皮的现象。

1.2 氧化的影响因素

氧化受金属材料本身的化学成份、炉气成分、加热温度及加热时间的影响。

1.2.1 化学成份

当含碳量大于 0.3%时，由于钢坯表层氧化反应形成的 CO 降低了氧化气体对其表层的作用，氧化皮将减少。Cr、Ni、Al、Mo 等合金元素能在钢坯的表面形成致密的氧化膜，其透气性很小，阻止了氧化性气体向钢坯内部的扩散，而且其膨胀系数与钢几乎一致，能牢固地附在钢坯的表面而不脱落，阻止了氧化的进行。当 Cr、Ni 含量为 13-20%时，几乎不产生氧化。

1.2.2 炉气成分

火焰炉内的气氛通常分为氧化性气氛、还原性气氛和中性气氛。炉气的性质是由燃烧时的空气供给量决定的，当燃烧条件一定时，燃烧所消耗的空气量是一定的。当空气供给过多时，多余空气中带的氧化性气体使炉内呈氧化性气氛；空气的供给不足时，炉内有过量的 CO、H₂ 而呈还原性气氛。

1.2.3 加热温度

加热温度升高时，氧化扩散速度加快，氧化烧损也就严重，形成的氧化皮较厚。

1.2.4 加热时间

钢料处在氧化性介质中的加热时间越长，氧化扩散量越大，于是形成的氧化皮也越厚。

1.3 预防措施

- a.在保证锻件质量的前提下，尽量采用快速加热，缩短加热时间，尤其是缩短高温下停留的时间，在操作时尽量采用少装勤装的方法。
- b.在燃料完全燃烧的条件下，尽可能减少空气过剩量，以免炉内剩余氧气过多，并注意减少燃料中的水分。
- c.炉内应保持不大的正压力，防止冷空气的吸入

2.脱碳

2.1 定义

钢料在加热时，其表层的碳和炉气中的氧化性气体（如 O₂、H₂O、CO₂ 等）及某些还原性气体（如 H₂）发生化学反应，造成了钢料表面含碳量降低的现象。

2.2 脱碳的影响因素

脱碳受金属材料本身的化学成份、炉气成分、加热温度及加热时间的影响。

2.2.1 化学成份

钢中含碳量越高，脱碳的倾向性就越大。某些合金元素使脱碳层加深，如 C、W、Al 等；而有些合金元素则能阻止脱碳，如 Cr、Mn 等。

2.2.2 炉气成分

炉气成分中脱碳能力最强的介质是 H₂O（汽），其次是 CO₂ 和 O₂，最后是 H₂。而 CO 的含量增加可减少脱碳。一般在中性介质或弱氧化性介质中加热可减少脱碳。

2.2.3 加热温度

钢在氧化性气氛中加热时，既产生氧化，同时也产生脱碳。在温度低于 1000℃时，由于钢料表面的氧化皮阻碍碳的扩散，因此脱碳过程比氧化慢。随着温度的升高，氧化速度加快，同时脱碳速度也加快，但是，此时氧化皮失去保护能力，因此达到某一温度后，脱碳就比氧化更激烈。

2.2.4 加热时间

加热时间越长，脱碳层就越厚，但二者不成比例关系。

2.3 危害

脱碳使锻件表面变软，强度和耐磨性降低。当脱碳层厚度小于加工余量时，对锻件性能没有什么危害，反之就要影响到锻件质量。

2.4 预防措施

一般用于防止氧化的措施，同样也可用于防止脱碳。

3.过热

3.1 定义

坯料加热温度超过始锻温度，或坯料在高温下停留时间过长而引起晶粒粗大的现象。

3.2 影响因素

钢的过热温度主取决于它的化学成份，对于不同的钢种，其过热温度也不同。通常钢中有些元素会增加其过热倾向，如 C、Mn、S、P 等元素，而 Ti、W、V、Nb 等元素可减小钢的过热倾向。

3.3 危害

过热的组织由于晶粒粗大，要引起力学性能（特别是冲击韧性）的降低。这是因为与细晶相比，粗晶粒钢晶界总面积减少，从而使晶界杂质密度增加，晶粒之间的结合力减弱。

3.4 预防措施

- a.严格控制加热温度，尽可能缩短高温保温时间，加热时坯料不要放在炉内局部高温区。
- b.在锻造时，要使锻件有足够的变形量，因为足够的变形量能够破碎粗大的奥氏体晶粒和分散晶界上的析出相。对于需要预制坯的模锻件，应保证终锻时锻件各部分有适当的变形量。
- c.测温用的热工仪表必须校下准确。

4.过烧

4.1 定义

当金属加热到接近其熔化温度（称为过烧温度），并在此温度下停留时间过长时，不仅晶粒粗大，而且由于发生局部熔化，氧化性气体进一步侵入晶界，使晶间物质氧化，形成易熔共晶氧化物，使晶粒间结合完全破坏。

4.2 危害

对过烧的坯料进行锻造时，轻则在表面引起网状裂纹，一般称之为“龟裂”，严重时将导致坯料破裂成碎块。所以过烧是加热的致命缺陷，最后坯料只能报废。如果坯料只是局部过烧，可将过烧的部分切掉。

4.3 影响因素

钢的过烧温度主要受其化学成份的影响，并且因不同的钢种而异。通常钢中的 Ni、Mo 等元素易使其产生过烧；而 Al、Cr、W 等元素则能减小其过烧。

4.4 措施

减少和防止过烧的办法就是严格遵守加热规范，特别是要控制出炉温度及在高温时的停留时间。

5. 裂纹

钢在加热过程的某一温度下，内应力超过它此时的强度极限时，就要产生裂纹。

通常内应力有温度应力、组织应力和残余应力。

为防止裂纹的产生，对钢料的加热，特别是断面尺寸大的大钢锭和导温差的高合金钢的加热，其低温段必须缓慢加热。

四、加热温度的测量

测量方法有：光学测温、电子测温、目测法

第四节：锻件的锻后冷却和热处理

一、锻件的锻后冷却

锻后的冷却的重要性并不亚于锻前加热和锻造变形过程，有时钢料采用正常的加热规范和适当的锻造，虽然可以保证获得高质量的锻件，但是，如果锻后冷却方法选择不当，锻件还有可能产生裂纹甚至报废，这在实际生产中时有发生，因此应予重视。

1. 定义

锻后冷却就是指结束锻造后从终锻温度冷却到室温的过程。

2. 锻后冷却常见缺陷产生的原因和防止措施

常见缺陷有：裂纹、白点、网状碳化物等。

2.1 裂纹

冷却裂纹是由于冷却过程中产生的内应力引起的。由于锻件冷却后期温度低塑性差，因此其冷却内应力较加热时的内应力的危险性更大。

按冷却时内应力产生的原因不同有：温度应力、组织应力和残余应力。

2.1.1 温度应力

温度应力是锻件冷却过程中内外温度不同造成冷缩不均而产生的。

冷却初期，锻件表面温度较心部低，表面的收缩受到心部的阻碍，在表面产生拉应力，而心部产生与其平衡的压应力。随着冷却的继续进行将发生下列两种变化。

a.如锻件材料为抗力小易变形的软钢，可以产生微量变形，松弛冷却初期表面产生拉应力，并逐渐减小至零。到了冷却后期，表面温度已接近常温，基本不再收缩，而心部温度尚高继续收缩，此时，心部的收缩受到表面的阻碍，结果导致温度应力方向的改变，即表面由拉应力变为压应力，而心部由压应力变为拉应力。

b.若锻件材料为抗力大难变形的硬钢，在冷却初期表面产生的拉应力得不到松弛，到了冷却后期，虽然心部收缩对表面产生附加压应力，但这只能使冷却初期表面产生的拉应力有一定的降低，而不会使温度应力方向发生改变，即表面仍为拉应力，心部仍为压应力。

第一种情况出现内裂的倾向性较大，而第二种情况则往往出现外裂。

2.1.2 组织应力

锻件在冷却过程如的相变发生，由于锻件在冷却过程中表面与心部相变不同时而产生的应力。

2.1.3 残余应力

加热后的钢料在锻造过程中，由于变形不均或加工硬化所引起的内应力，如未能及时得到再结晶软化将其消除，便会在冷却终了时保留下来构成残余应力。

锻件在冷却过程中总的内应力为上述三种应力的叠加。当总的内应力超过材料某处的强度极限时，便会在锻件相应的部位产生裂纹。

一般情况下，锻件尺寸越大，导热系数越小，冷速越快，温度应力和组织应力就越大。如果迭加后的内应力没有造成破坏，冷却终了便保留下来，构成锻件的残余应力。

2.2 白点

白点是由于氢的富集和组织应力共同作用的结果。

白点多发生在珠光体类和马氏体类合金钢中，碳素钢程度较轻，奥氏体和铁素体类钢极少发现白点，莱氏体合金钢也未发现白点。

白点在钢的纵向断口上呈圆形或椭圆形的银白色斑点。而在横向上呈细小的裂纹。合金钢中的白点色泽光亮，碳素钢较暗。

2.3 网状碳化物

过共析钢的轴承钢终锻温度高并在锻后缓冷时，特别是在 $A_{cm} \sim A_{r1}$ 区间缓冷，将由奥氏体中大量析出二次碳化物，这时碳原子由于具有较大的活动能力和足够的时间扩散到晶界，于是沿着奥氏体晶界形成网状碳化物。

3. 锻件的冷却方法

空冷、坑冷（沙冷、箱冷）、炉冷和水冷

二、锻件的锻后热处理

1.目的

由于在锻造生产过程中，锻件各部分的变形温度和冷却速度不一致，锻后必然导致锻件组织不均匀、残余应力和加工硬化等现象。为了消除上述不足，在锻后还需进行锻件热处理。

- a.调整锻件的硬度，以利于锻件进行切削加工；
- b.消除锻件内应力，以免在机械加工时变形；
- c.改善锻件内部组织，细化晶粒，为最终热处理作组织准备；
- d.对于不再进行最终热处理的锻件，满足其使用要求。
- e.防止白点产生。

2.方法

退火、正火、淬火、回火、调质和等温退火等

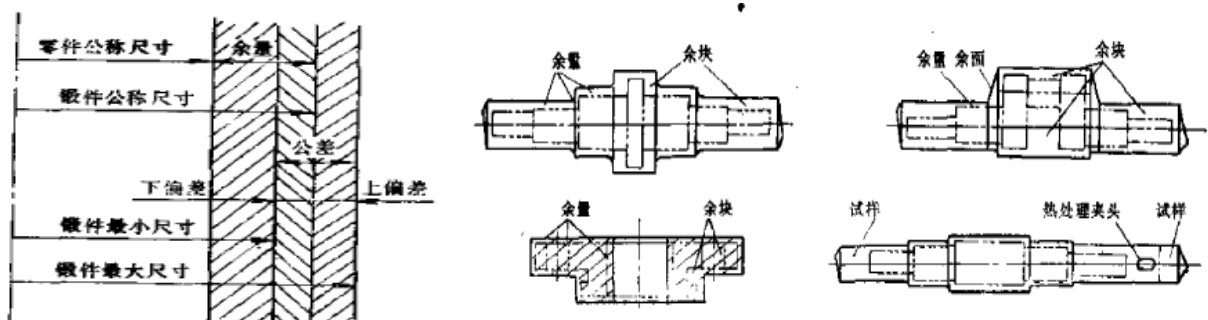
第五节：工艺制定

一、内容

- ◆ 根据零件图及其技术条件设计锻件图，并提出锻件的技术条件和检验要求；
- ◆ 确定坯料的重量和尺寸（大型锻件还需对原材料的材质及冶炼方法提出要求）；
- ◆ 确定变形工序和工具；
- ◆ 选择锻造设备；
- ◆ 确定锻造温度范围及加热和冷却规范；
- ◆ 确定锻后的热处理规范；
- ◆ 填写工艺卡片。

二、锻件图的制定

锻件图是编制锻造工艺、设计工具、指导生产和验收锻件的主要依据，也是联系其它后续加工工艺的重要技术资料，它是根据零件图考虑了加工（锻造）余量、锻件公差、锻造余块、检验试样及工艺卡头等绘制而成的。



在锻造生产中，由于各种因素的影响，锻件的实际尺寸不可能达到公称尺寸，允许有一定的误差，称为**锻造公差**（如上图左）。大于公称尺寸的部分为上公差（正偏差），小于公称尺寸的为下公差（负偏差）。通常锻造公差约为余量的 $1/4 \sim 1/3$ 。

为了简化锻件外形或根据锻造工艺需要，在零件上较小的孔、狭窄的凹档、直径差较小而长度不大的台阶等（如上图右）难于锻造的地方通常都需填满金属，这部分附加的金属叫**锻造余块**。

除锻造工艺要求加放余块外，对于有特殊要求的锻件，尚需在锻件的适当位置添加试样余块、热处理或机械加工用工艺夹头。

三、坯料重量和尺寸的确定

1. 形状材料的重量计算

1.1 长方体（正方体）

$$V = A \cdot B \cdot L \quad G = V \cdot \rho$$

V 为体积，A、B 分别为两条边长，L 为长度，G 为重量， ρ 为比重

1.2 圆柱体

$$V = 1/4 \cdot \pi D^2 \cdot L \quad G = V \cdot \rho$$

V 为体积，D 为圆柱体直径，L 为长度，G 为重量， ρ 为比重

1.3 六棱体

$$V = 3/2 \cdot B^2 \tan 30^\circ \cdot L \quad G = V \cdot \rho = 6.798 B^2 \cdot L$$

V 为体积，B 为六棱体对边距离，L 为长度，G 为重量， ρ 为比重， $\tan 30^\circ = 0.577$

1.4 八棱体

$$V = 2B^2 \tan 22.5^\circ \cdot L \quad G = V \cdot \rho = 0.6503 B^2 \cdot L$$

V 为体积，B 为八棱体对边距离，L 为长度，G 为重量， ρ 为比重， $\tan 22.5^\circ = 0.414$

1.5 多边形的面积

$$S_1 = n/4 \cdot b^2 \tan(180^\circ / n)$$

$$S_2 = n/4 \cdot a^2 \cotg(180^\circ / n)$$

$$S_3 = n/4 \cdot d^2 \sin(180^\circ / n) \cdot \cos(180^\circ / n)$$

S 为面积，n 为多边形边数，a 为边长，b 为多棱体对边距离（内切圆直径），d 为外接圆直径

1.6 坯料重量计算

$$G_{\text{坯}} = G_{\text{锻}} + G_{\text{芯}} + G_{\text{切}} + G_{\text{耗}}$$

$$\text{圆形件 } G_{\text{切}} = (1.65 \sim 1.8) D^3 \quad \text{矩形件 } G_{\text{切}} = (2.2 \sim 2.36) B^2 H$$

2.坯料尺寸确定

镦粗前的坯料高径比为 $1.25 \leq H_0/D_0 \leq 2.5$

镦粗程度 $H/D \approx 0.6$

分料(号印)长度 $1/3D$

钢锭的选择 要先确定身比例约为 80%~82%

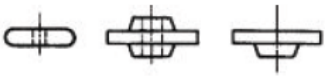
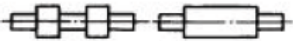



三.确定变形工艺和锻造比

1 变形工艺

变形工艺的内容包括：确保锻件成形必需的工序、决定工序顺序、设计工艺尺寸等。

锻件所需变形工序及工序顺序应根据锻件形状、尺寸和技术要求，并考虑具体生产条件等而确定。

自由锻工序的选择与整个锻造工艺过程中的火次（即坯料加热次数）和变形程度有关。所需火次与每一火次中坯料成形所经历的工序都应明确规定出来，写在工艺卡片上。

锻件类别	图 例	锻造工序
盘类零件		镦粗（或拔长—镦粗），冲孔等
轴类零件		拔长（或镦粗—拔长），切肩，锻台阶等
筒类零件		镦粗（或拔长—镦粗），冲孔，在芯轴上拔长等
环类零件		镦粗（或拔长—镦粗），冲孔，在芯轴上扩孔等
弯曲类零件		拔长，弯曲等

2.锻造比

锻造比是金属在锻造前后截面面积之比。它表示锻造变形量的大小。用 γ 表示。

3.锻造比的计算

不同的锻造工序，锻造比方法各不相同。

锻造比分为工序锻造比、火次锻造比和总锻造比。

当只用拔长或只用镦粗，而进行几次锻造时，则总锻造比等于各次锻造比的乘积，

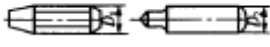
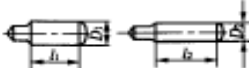
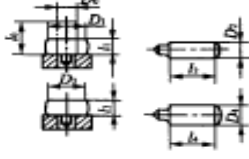

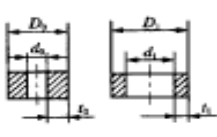
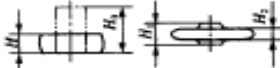
锻造知识

即 $\gamma_{\text{总}} = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdots$

如两次拔长中间镦粗或两次镦粗中间拔长时，总锻造比规定为两次锻造比相加，

即 $\gamma_{\text{总}} = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 \cdots$

式中未将中间镦粗或中间拔长的锻造比计算在总锻造比之内。

序号	锻造工序	变形简图	总锻造比
1	钢锭拔长		$K_L = D_1^2 / D_2^2$
2	坯料拔长		$K_L = D_1^2 / D_2^2$ 或 $K_L = l_2 / l_1$
3	两次镦粗拔长		$K_L = K_{L1} + K_{L2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} + \frac{D_2^2}{D_4^2}$ 或 $K_L = l_2 / l_1 + l_4 / l_3$
4	芯轴拔长		$K_L = \frac{D_0^2 - d_0^2}{D_1^2 - d_1^2}$ 或 $K_L = l_1 / l_0$
5	芯轴扩孔		$K_L = \frac{F_0}{F_1} = \frac{D_0 - d_0}{D_1 - d_1}$ 或 $K_L = \frac{l_0}{l_1}$
6	镦粗		轮毂 $K_R = H_0 / H_1$ 轮缘 $K_R = H_0 / H_2$

注：a. 钢锭倒棱的锻造比不计算在总锻造比内；b. 连续拔长或连续镦粗时，总锻造比等于分锻造比之乘积；c. 两次镦粗拔长和两次镦粗间有拔长时，总锻造比等于两次分锻造比之和，并要求各次分锻造比不小于 2。

4. 锻造比对组织和机械性能的影响

锻造过程随着锻造比增大，由于内部孔隙焊合，铸态树枝晶被打碎，锻件的纵向和横向的力学性能均得到明显提高。当锻造比超过一定数值后，由于形成纤维组织，横向力学性能（塑性、韧性）急剧下降，导致锻件出现各向异性。因此，在制定工艺时，应合理地选择锻造比。