

金属塑性成形技术

金属压力加工是利用外力使金属坯料产生塑性变形,从而获得具有一定形状、尺寸和力学性能的原材料、毛坯或零件的加工方法。

金属材料良好的塑性是进行压力加工的基本条件。

压力加工的主要方式有以下几种。

(1) 轧制。轧制是指借助于摩擦力和压力使金属坯料通过两个相对旋转的轧辊间的空隙而变形的压力加工方法。轧制生产所用的坯料主要是金属锭。坯料在轧制过程中,靠摩擦力通过轧辊孔隙而受压变形,使坯料的截面减小,长度增加。如图 3-1 所示为钢板、型钢及无缝钢管的轧制。

轧制主要用于生产各种规格的钢板、型钢和钢管等钢材,如图 3-2 所示。

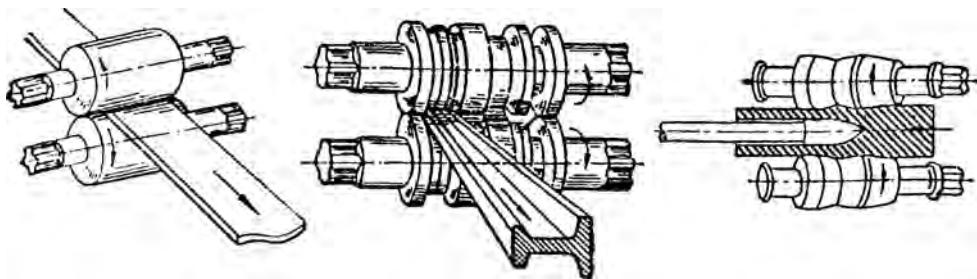


图 3-1 钢板、型钢和无缝钢管的轧制

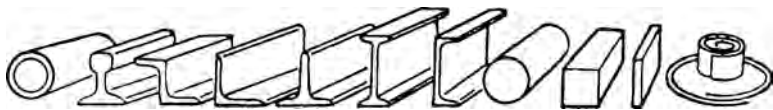


图 3-2 轧制的钢材

(2) 挤压。挤压是指金属坯料在挤压模内受压被挤出模孔而变形的压力加工方法,如图 3-3 所示。挤压按金属流动方向与凸模运动方向的不同,可分为三种:①正挤压,金属流动方向与凸模运动方向相同,如图 3-3(a)所示;②反挤压,金属流动方向与凸模运动方向相反,如图 3-3(b)所示;③复合挤压,一部分金属的流动方向与凸模运动方向相同,另一部分金属的流动方向与凸模运动方向相反,如图 3-3(c)所示。

挤压可以获得各种复杂截面形状的型材、管材、毛坯或零件,如图 3-4 所示。

(3) 拉拔。拉拔是指利用拉力,将金属坯料拉过拉拔模的模孔而成形的压力加工方

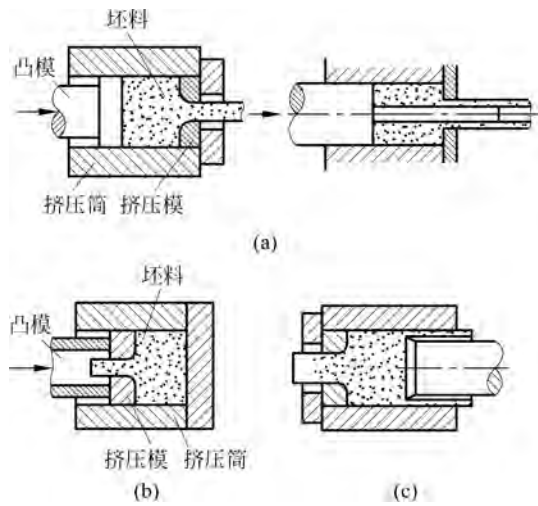


图 3-3 挤压示意图

(a) 正挤压; (b) 反挤压; (c) 复合挤压

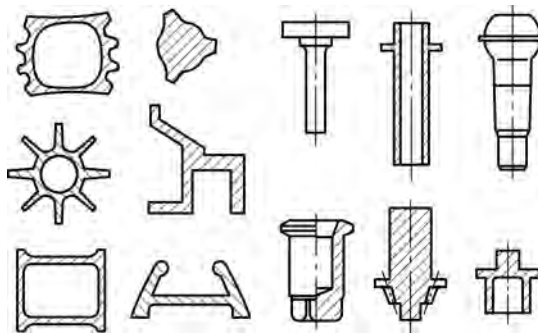


图 3-4 挤压产品

法,如图 3-5 所示。拉拔一般是在室温下进行的,故又称冷拔。拉拔时坯料截面减小,长度增加。拉拔主要用于生产各种细线材、薄壁管和特殊几何形状截面的型材,如图 3-6 所示。

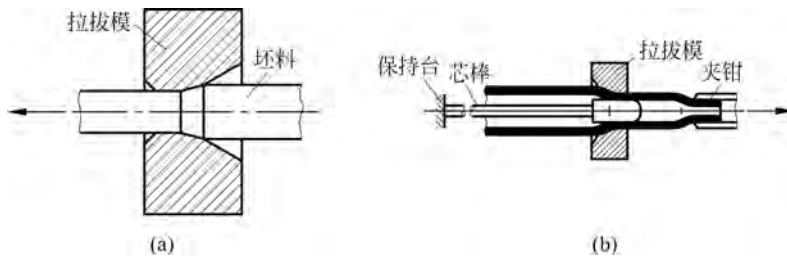


图 3-5 拉拔示意图

(a) 拉拔型材或线材; (b) 拉拔管子

(4) 自由锻。自由锻是指利用冲击力或压力,使放在上下砧之间的金属坯料变形,从而得到所需锻件的加工方法。

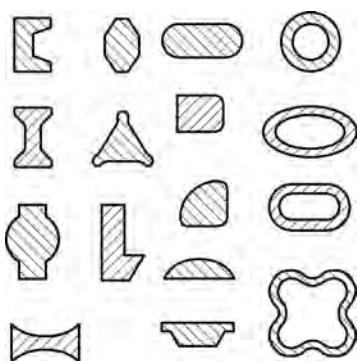


图 3-6 拉拔产品截面形状

(5) 模锻。模锻是指利用冲击力或压力,使放在锻模模膛内的金属坯料变形,最后充满模膛而成形的压力加工方法。

(6) 板料冲压。板料冲压是指利用压力,使放在冲模间的金属板料产生分离或变形的压力加工方法。

一般常用的金属型材、板材、管材和线材等原材料,大都是在冶金企业通过轧制、挤压和拉拔等方法制成的。机器制造工业常用自由锻、模锻和板料冲压等锻压方法制造毛坯和零件。由于金属压力加工不但能获得组织致密、力学性能好的工件,而且具有生产效率高、材料消耗少等优点,所以在国民经济中得到广泛的应用。

3.1 金属塑性成形基础

3.1.1 金属塑性变形的实质

金属在外力作用下首先产生弹性变形,当外力增加到金属的屈服强度时,产生塑性变形。金属在塑性变形过程中一定有弹性变形存在。当外力去除后,弹性变形将恢复。

1. 单晶体的塑性变形

单晶体塑性变形的主要方式是滑移,如图 3-7 所示。滑移是指在切应力作用下,晶体的一部分原子相对于另一部分原子,沿着一定的晶面(滑移面)和一定的方向(滑移方向)产生的位移。

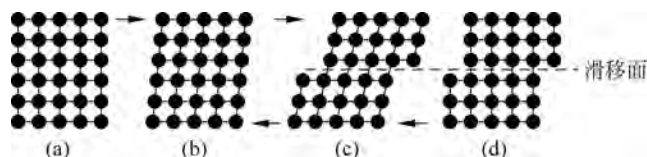


图 3-7 单晶体滑移变形示意图

(a) 未变形; (b) 弹性变形; (c) 弹塑性变形; (d) 塑性变形

滑移面是晶体中原子排列最密的晶面,滑移方向也是滑移面上原子排列最密的方向。晶体中滑移面和滑移方向数目越多,产生滑移的可能性越大,塑性越好。

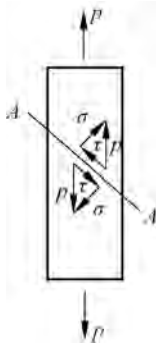


图 3-8 金属拉伸时的应力分析

作用在金属上的外力,可沿任意截面分解为正应力和切应力,如图 3-8 所示。

正应力可使金属截面 A-A 两侧的原子沿垂直于该截面的方向拉开,当正应力增大时,原子间距离拉开到一定程度,原子间的结合力遭到破坏,晶体就会断裂。切应力能使金属截面 A-A 两侧原子沿平行于该截面方向移动。这种移动主要是由金属晶体的滑移形成的。

实际晶体不像理想晶体那样完美,晶体内部存在着一系列原子错排的缺陷,称为位错。晶体中的位错可以在较小的切应力作用下,从一个相对平衡位置移动到另一个位置,形成位错运动。因此,实际晶体的滑移不像理想晶体那样,而是通过位错运动实现的,如图 3-9 所示。

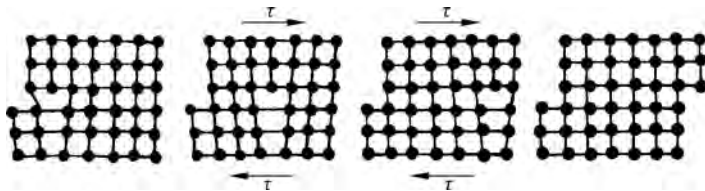


图 3-9 位错运动产生晶体滑移过程示意图

2. 多晶体的塑性变形

多晶体的塑性变形是由每个晶粒的塑性变形组成的,如图 3-10 所示。塑性变形首先在滑移面与外力成 45° 角的晶粒内开始,因为与外力成 45° 角的滑移面最易变形,产生的切应力最大。如图 3-10 中的 A 晶粒。A 晶粒的晶内滑移,必然受到邻近排列位向不同晶粒(如 B、C 晶粒)的阻碍,也受到晶界的影响。随着晶内滑移的进行,滑移阻力不断增大。与此同时,晶体排列位向不适于产生滑移的晶粒(如 B、C 晶粒)将发生滑动和转动,使自己的排列位向适于产生滑移,而逐渐开始滑移。这样,逐批进行的晶内滑移与晶粒的转动构成了多晶体的塑性变形。

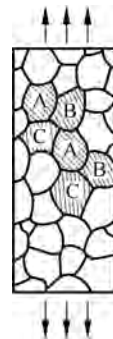


图 3-10 多晶体变形示意图

多晶体塑性变形时的特点: ①各个晶粒的变形是不均匀的; ②变形抗力大; ③晶粒间产生转动。

金属晶粒越细小,变形抗力就越大,塑性也越好。晶粒越细,在一定体积内的晶粒数目越多,则在同样变形量下,变形分散在更多的晶粒内进行,变形较均匀,从而减少了局部应力集中的程度,推迟了裂纹的形成和发展,使金属在断裂之前可得到较大的塑性变形量,提高金属的塑性。因此压力加工希望金属坯料具有细晶粒组织。

3.1.2 金属塑性变形的规律

1. 金属塑性变形的规律

1) 体积不变定律

金属塑性变形后的体积等于其塑性变形前的体积,这一规律称为体积不变定律。钢锭

经锻造后其致密度增加,体积略有减少,但因相对数量很小,可以忽略不计。计算坯料尺寸时,都依据体积不变定律。

2) 最小阻力定律

塑性变形时,变形体内质点间或局部区域间的相对位移,以及变形工具与坯料间的相对位移均称为金属流动。变形体内任一质点或微小区域的流动总是沿着阻力最小的方向进行,这一规律称为最小阻力定律。

不同截面试样的镦粗变形可以说明这一定律。圆形截面的金属朝径向流动,正方形、长方形截面则分成四个区域分别向四个边流动,最后逐渐变成圆形、椭圆形,如图 3-11 所示。

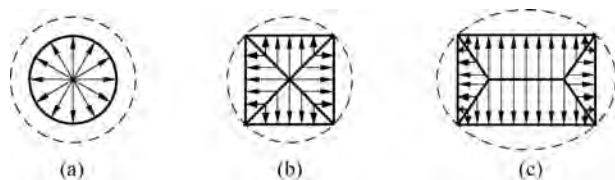


图 3-11 不同截面试样镦粗时金属的流动方向示意图

(a) 圆形; (b) 正方形; (c) 长方形

由此可知,圆形截面金属在各个方向上的流动最均匀,故镦粗时总是先把坯料锻成圆柱体。

3) 塑性变形的不均匀性

金属塑性变形时,锻件与工具接触面之间存在着摩擦力,变形中由于摩擦力的存在,使金属产生内应力和不均匀变形。不均匀变形在锻压加工中难以完全避免,会造成锻件内部组织和性能的不均匀,影响锻件内部及表面质量,甚至造成锻件内部或外部的裂纹,使锻件报废。

在平砧上对圆柱体坯料进行镦粗,镦粗后圆柱体高度减小,侧表面形成鼓形,变形区按变形程度大小大致可分为三个区,如图 3-12 所示。区域 I 为难变形区,区域 II 为剧烈变形区,变形最大,区域 III 变形介于 I、II 之间。产生变形不均匀的原因,除工具与毛坯接触面的摩擦力影响,与工具接触的上、下端面处金属(I 区)由于温度下降快、变形抗力大,比中间处(II 区)的金属变形困难也有关。

2. 控制金属流动的方法

影响金属流动的因素主要有变形金属与工具接触面上的摩擦力,工具与坯料间的相互作用,坯料的化学成分、组织和温度等。

改变工具与坯料接触面的形状和尺寸,可以减少在某一方向上的流动,增大在另一方向上的流动。在 V 形砧间拔长时,V 形砧侧表面限制了展宽变形,强化了伸长变形,如图 3-13 所示。

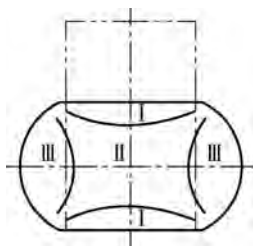
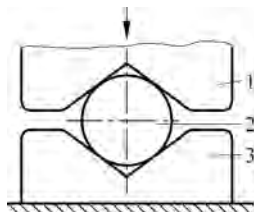


图 3-12 镦粗时变形程度分区示意图



1、3—V 形砧; 2—锻坯。

图 3-13 在 V 形砧中拔长

锤上锻造时,锻锤吨位必须足够,否则变形局限于表层,中心部分不能锻透。

改变坯料与工具接触面的状态,也可以降低变形抗力,例如使工具表面光滑、减少锻件表面氧化皮以及使用润滑剂等。

3.1.3 塑性变形后金属的组织 and 性能

1. 加工硬化

金属进行塑性变形时,随着变形程度的增加,其强度和硬度不断提高,塑性和冲击韧性不断降低,这种现象称为加工硬化。

加工硬化是由塑性变形时金属内部的组织变化引起的,如图 3-14 所示。①各晶粒沿变形最大的方向伸长,且其排列位向逐渐趋于一致;②晶粒内部位错密度增加,晶格严重扭曲,产生内应力;③滑移面和晶粒间产生碎晶。这样,就增加了进一步滑移的阻力,使金属的继续塑性变形越来越困难,即产生了加工硬化。压力加工中,为了使变形顺利进行,需要消除加工硬化。

2. 回复和再结晶

加工硬化使金属的内能升高且处于不稳定状态,使得金属具有自发地恢复到稳定状态的倾向,但在室温下不易实现。如将塑性变形后的金属加热到一定温度,使原子热运动加剧,就会产生回复和再结晶,进而消除加工硬化。图 3-15 为塑性变形后的金属加热时组织和性能的变化。

1) 回复

当加热温度不高时(图 3-15 中 $t_0 \sim t_1$),晶格扭曲被消除,内应力明显降低,但力学性能变化不大,只是部分地消除了加工硬化,这一过程称为回复。这时的温度称为回复温度。一般纯金属的回复温度为

$$T_{\text{回复}} = (0.25 \sim 0.3) T_{\text{熔点}}$$

式中: $T_{\text{回复}}$ 为金属的回复温度, K; $T_{\text{熔点}}$ 为金属的熔化温度, K。

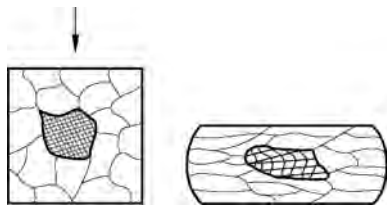


图 3-14 金属塑性变形的组织变化

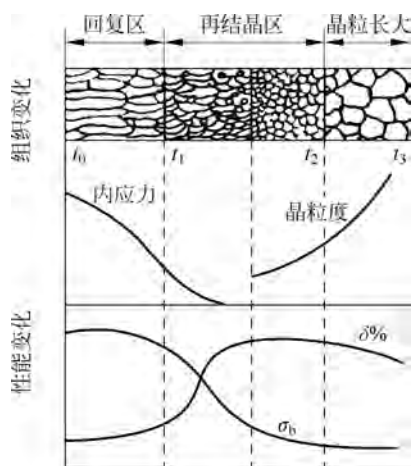


图 3-15 塑性变形后的金属加热时组织和性能的变化

2) 再结晶

进一步升高温度(图 3-15 中 $t_1 \sim t_2$),这时原子具有较大的活动能力,能以某些碎晶或杂质为晶核,成长为新的等轴细晶粒,这一过程称为再结晶。

再结晶使金属的强度和硬度明显下降,塑性和韧性显著提高,从而消除了全部加工硬化。开始产生再结晶的温度称为再结晶温度。一般纯金属的再结晶温度为

$$T_{\text{再结晶}} \approx 0.4T_{\text{熔点}}$$

式中, $T_{\text{再结晶}}$ 为纯金属的再结晶温度, K。

合金中的杂质和合金元素会阻碍原子的扩散,使再结晶温度提高。例如,纯铁的再结晶温度为 450°C ,而低碳钢则为 540°C 左右。

生产中,消除金属加工硬化的热处理方法称为再结晶退火,再结晶退火时应正确掌握加热温度和保温时间。再结晶完成后,若再继续升高温度(图 3-15 中 t_2 以上)或过多地延长加热时间,则晶粒还会不断长大,使金属力学性能下降。

应注意,再结晶是金属固态下的结晶过程,可以细化晶粒。但再结晶不同于金属的同素异构转变,因其不发生晶体结构的变化。只有产生加工硬化的金属,才能进行再结晶。

3. 冷变形、温变形和热变形

1) 冷变形

金属在回复温度以下的变形称为冷变形。冷变形过程中只产生加工硬化,而无回复和再结晶。冷变形后的金属具有加工硬化组织。

冷变形可以使工件获得较高的尺寸精度和表面质量。但变形抗力大,塑性低,需使用较大吨位的变形设备,同时变形程度不宜过大,以免工件破裂。在冷变形中,要根据加工硬化程度,进行再结晶退火(又叫作中间退火),以利于进一步的变形加工。

冷变形也是强化金属的一种重要手段。一些用热处理难以强化的金属材料,如纯铜、纯铝、低碳钢和部分不锈钢等,常用冷变形来提高它们的强度和硬度。

2) 温变形

金属在高于回复温度,并低于或稍高于再结晶温度时的变形,称为温变形。温变形过程中,既有加工硬化,又有回复,有时也产生部分再结晶,温变形后的金属具有部分加工硬化组织。

温变形与冷变形相比,金属塑性较好,变形抗力较小,能产生较大的变形量,与热变形相比,坯料表面氧化较少,有利于提高工件的尺寸精度和表面质量,而且也能起强化金属的作用。所以,近年来温变形工艺在工业生产中得到了一定的应用,如温挤压或温锻等,但温变形的温度范围比较小,工艺操作难度较大。

3) 热变形

金属在再结晶温度以上的变形称为热变形。金属在热变形过程中,也产生加工硬化,但是加工硬化随时被再结晶所消除。热变形后的金属只有再结晶组织,而无加工硬化痕迹。

热变形时,变形抗力小,塑性好,可以用较小的作用力达到较大的变形量。所以,金属压力加工大多采用热变形方式来进行,如热锻、热轧和热挤压等。在实际热变形过程中,变形速度往往较大,为使再结晶能及时消除加工硬化,必须用提高温度的办法来加速再结晶过程。例如,低碳钢的再结晶温度为 540°C ,而热变形温度则为 $800 \sim 1250^{\circ}\text{C}$ 。

4. 金属锻件的特点

金属压力加工的原始坯料是铸锭,其内部组织不均匀,晶粒较粗大,并且有气孔、缩松、

非金属夹杂物等缺陷。这种铸锭经过压力加工后,内部组织和性能将发生显著变化,如图 3-16 所示。

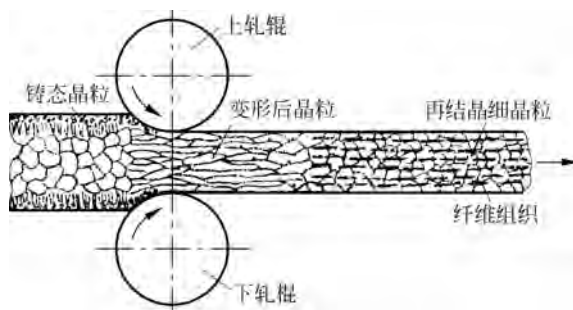


图 3-16 钢锭在热轧时组织变化示意图

1) 金属更加致密

某些铸造缺陷如气孔、缩松等被压合,金属更加致密。铸造组织(枝晶、柱晶和粗大晶粒)被破碎,并且(在热变形过程中)获得细化的再结晶组织。因此,金属的力学性能得到很大提高。

2) 形成纤维组织

金属晶界上的夹杂物随晶粒沿变形最大方向被拉长,这种组织称为纤维组织,或称流线。

纤维组织的明显程度与金属的变形程度有关。变形程度越大,纤维组织越明显。金属的变形程度常用锻造比 y 表示。坯料拔长时的锻造比为

$$y = \frac{F_0}{F}$$

式中: F_0 为坯料拔长前的横截面积, mm^2 ; F 为坯料拔长后的横截面积, mm^2 。

一般当 $y > 2$ 时,金属中开始形成纤维组织; $y > 5$ 时,纤维组织已非常明显。

纤维组织使金属在性能上具有方向性。纵向(平行于纤维方向)上的塑性、韧性提高,而横向(垂直于纤维方向)上的则降低。表 3-1 为 45 钢力学性能与纤维方向的关系。

表 3-1 45 钢力学性能与纤维方向的关系

纤维方向	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$	$\alpha_K/(\text{J}/\text{cm}^2)$
纵向	470	715	17.5	62.8	62
横向	440	672	10.0	31.0	30

纤维组织的稳定性很高,不能用热处理方法加以消除,只有经过塑性变形,才能改变其方向和分布。

在压力加工生产中应合理利用纤维组织。在设计和制造零件时,应使零件在工作中所受最大正应力方向与纤维方向重合,最大切应力方向与纤维方向垂直,并使纤维分布与零件的轮廓相符合,尽量不被切断。

如图 3-17 所示为用不同原料生产齿轮时纤维组织的比较。其中,图 3-17(a)采用轧制棒料经切削加工而成,受力时齿根处产生的正应力垂直于纤维,性能最差;如图 3-17(b)所示平行于纤维方向的齿根处正应力与纤维方向重合,性能优异;但垂直于纤维方向的齿根

处质量差；如图 3-17(c)、(d)所示纤维组织分布合理，齿轮的力学性能好，其中如图 3-17(d)所示纤维组织分布与齿轮整体轮廓最为一致，齿轮的使用寿命最高，材料消耗量最少。

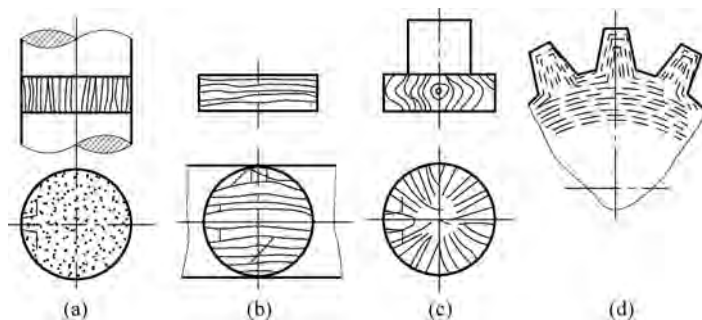


图 3-17 不同原料生产齿轮时的纤维组织示意图

(a) 用圆钢制造齿轮；(b) 用钢板制造齿轮；(c) 用圆钢镟粗制造齿轮；(d) 热轧齿轮

3.1.4 常用金属的锻造性能及其影响因素

1. 可锻性概念

金属的锻造性能即可锻性，是指金属材料在压力加工时获得优质产品难易程度的工艺性能。它常用金属的塑性和变形抗力来综合评定。塑性越高，变形抗力越小，金属的可锻性越好，反之则越差。

金属的塑性一般用延长率 δ 和截面收缩率 ψ 来表示。变形抗力一般用金属的屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 来表示。变形抗力越小，变形越容易，所消耗的能量也就越少。所以，从压力加工工艺角度出发，希望金属具有高的塑性和低的变形抗力。

2. 影响可锻性的因素

金属的可锻性不是固定不变的，与金属的本质和加工条件密切相关。

1) 金属的本质

(1) 化学成分。不同化学成分的金属具有不同的可锻性。一般来讲，纯金属的可锻性比合金好。而钢的可锻性随碳和合金元素的质量分数的增加而降低。

(2) 组织结构。金属内部的组织结构不同，其可锻性有很大差别。固溶体(如奥氏体)的可锻性好，而金属化合物(如渗碳体)的差。金属在单相状态下的可锻性比在多相状态下的好。细晶粒金属的塑性较粗晶粒的好，虽然变形抗力也较大，但可锻性中，塑性是主要的，所以可锻性好。

2) 压力加工条件

(1) 变形温度。提高变形温度可以改善金属的可锻性。从表 3-2 可看出，随着温度的升高，45 钢的强度下降，塑性上升，即钢的可锻性变好。因此，压力加工都力争在高温下进行，即采用热变形。

表 3-2 45 钢在不同温度下的力学性能

温度/°C	20	800	1200
σ_b /MPa	600	50	20
δ /%	20	60	80

金属加热温度过高,会产生过热或过烧等缺陷。

加热温度过高而使奥氏体晶粒粗大的现象称为过热。过热会降低金属性能的力学性能。但是,过热可通过退火或正火来挽救。

加热温度过高,使金属的晶界严重氧化或局部熔化的现象称为过烧。过烧会造成金属性能极脆,致使零件报废。过烧是无法挽救的缺陷。

为了避免金属加热过程中产生过热或过烧等缺陷,热变形应在一定的温度范围内进行。

锻造温度范围是指始锻温度和终锻温度间的温度范围。始锻温度是指金属在锻造前加热允许的最高温度。始锻温度的确定,一般在不产生过热或过烧等缺陷的前提下,尽量提高,以提高金属的可锻性。终锻温度是指金属停止锻造的温度。终锻温度的确定,一般在锻造不产生裂纹的前提下,尽量降低,以扩大锻造温度范围,提高生产效率。

锻造温度范围是根据铁碳合金状态图确定的,如图 3-18 所示。碳素钢的始锻温度为 1050~1250℃,终锻温度为 800℃左右。

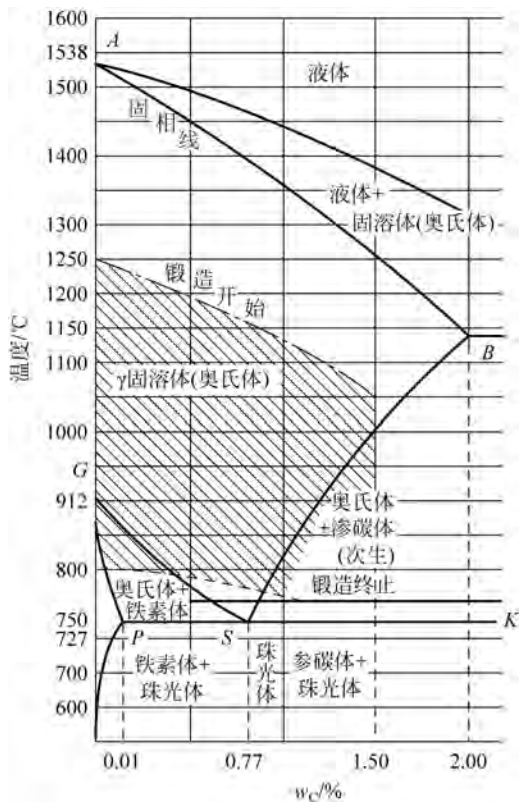


图 3-18 碳素钢的锻造温度范围

(2) 变形速度。变形速度即单位时间内的变形程度。变形速度对金属可锻性的影响如图 3-19 所示。金属随变形速度的增大,加工硬化现象显著,从而使金属塑性下降,变形抗力增大,如图 3-19 中 ω_k 点以前,导致金属可锻性降低。另一方面,消耗于塑性变形的能量有一部分转化为热能,使金属温度升高(称为热效应),如图 3-19 中 ω_k 点以后,可锻性提高。当变形速度超过临界变形速度 ω_k 后,热效应现象显著,使金属的温度超过再结晶温度,一方面,再结晶导致塑性提高,变形抗力减小,可锻性提高。另一方面,温度升高,可锻性提高。