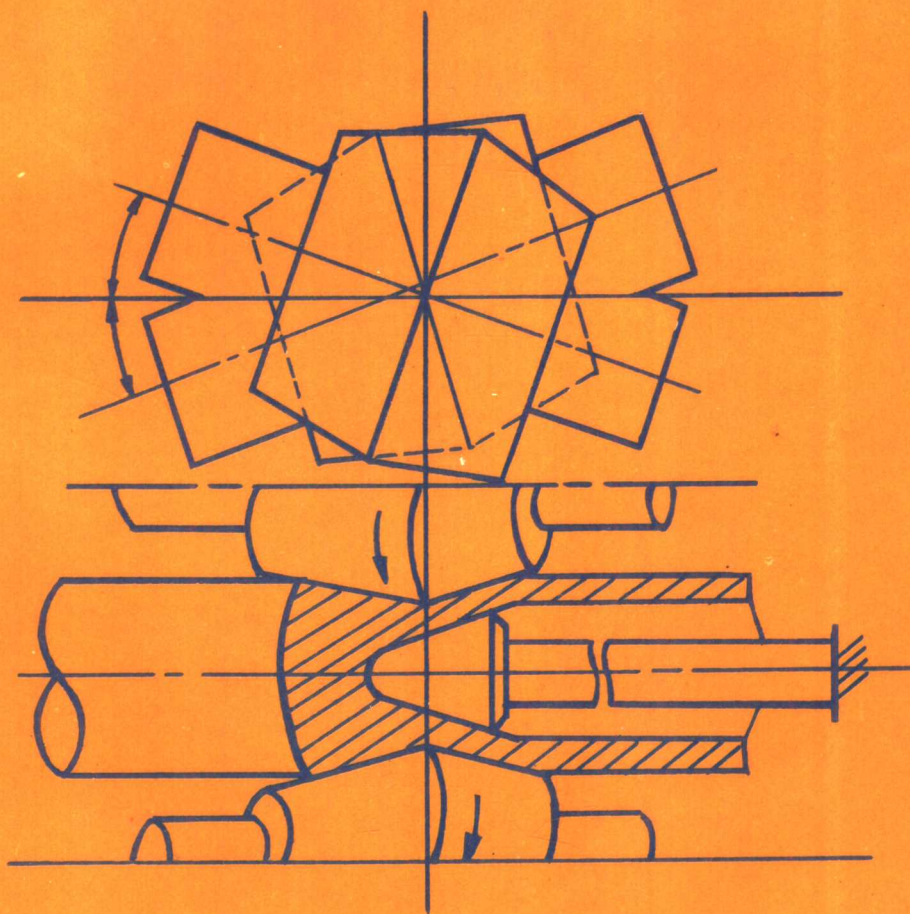


# 金属塑性加工

解春蓉 朱殿强 编  
李生智 成友义



东北工学院出版社

# 金属塑性加工

解春蓉 朱殿强 编  
李生智 成友义

东北工学院出版社

(辽)新登字第8号

## 内 容 提 要

《金属塑性加工》一书是高等工科院校非金属压力加工专业学习金属压力加工课的教材。

全书共有十五章，其中第一至四章阐述金属塑性加工理论、轧制理论、轧制工艺基础；第五至七章介绍钢坯、型钢和线材生产技术；第八至十一章介绍热轧和冷轧板带钢生产技术；第十二至十四章介绍无缝钢管生产技术；第十五章介绍金属塑性加工车间产量计算及技术经济指标。

本书适用于冶金企业管理、热能工程、钢铁冶金、金属材料、冶金机械等专业，同时也可供有关工程技术人员和管理干部学习参考。

### 金 属 塑 性 加 工

解春蓉 朱殿强 编  
李生智 成友义

---

东北工学院出版社出版      辽宁省新华书店发行  
(沈阳·南湖)                  大连海运学院印刷厂印刷

---

开本：787×1092 1/16      印张：18.75      字数：468千字  
1992年9月第1版                  1992年9月第1次印刷  
印数：1~2600册

---

责任编辑：长 仁                  责任校对：张德喜  
封面设计：唐敏智                  责任出版：高志武

---

ISBN 7-81006-457-6/TG·20      定价：5.25元

## 前 言

《金属塑性加工》一书是高等学校教学用书，属高等工科院校实用技术教材。书中着重阐述金属塑性加工理论、轧制理论、轧钢生产工艺等内容。轧钢生产工艺又按型钢生产、板带钢生产、钢管生产等分类进行了介绍。本书为高等学校非金属压力加工专业学习金属压力加工课的指定用书，适用于冶金企业管理、热能工程、钢铁冶金、金属材料、冶金机械等专业师生阅读，也可供有关工程技术人员和管理干部学习参考。

本书由解春蓉同志主编，李生智同志主审。

全书共有十五章，其中第一，二，三章由解春蓉编写；第四，五，六，七章由朱殿强编写；第八，九，十，十一章由李生智编写；第十二，十三，十四，十五章由成友义编写。

由于编者水平有限和时间仓促，书中难免存在偏颇悖谬之处，敬请批评指正。

编 者

1991年4月

## 绪 论

金属的用途十分广阔，在国民经济建设中极为重要。尤其是钢铁，它的生产水平是衡量一个国家工业、农业、国防和科学技术四个现代化水平的重要标志。在钢的生产总量中除少量用铸造方法制成零件外，其余均采用塑性加工方法制成产品。其中主要以轧制方法生产成品钢材供给国民经济各部门使用。某些钢材虽非由轧制方法直接出成品，但仍需由轧制所得半成品坯料经过深加工而获得。因此在现代的钢铁联合企业里，作为使钢成材的最后一个环节的轧钢生产，在国民经济中占据极其重要的地位。

金属塑性加工是对固态（包含半固态）金属施加压力，使其产生塑性变形而获得要求的几何尺寸、断面形状和性能的产品。可以说，金属塑性加工的目的，一个是满足成型要求，一个是满足性能要求。

金属塑性加工若忽略切头、切尾、切边和氧化烧损等损失，可认为变形前、后金属质量相等；若忽略变形中金属的密度变化，可认为变形前后金属体积不变。因此视金属塑性加工为无屑加工。

金属塑性加工和金属切削加工、铸造、焊接等过程相比，主要有以下优点：

- ① 无废屑，可以节约大量金属；
- ② 可改善金属的组织 and 性能；
- ③ 生产率高，适于大量生产。

金属塑性加工方式有轧制、锻造、挤压、拉拔、冲压和弯曲成型等，以及锻一轧、轧一挤、拔一轧、轧一弯等组合加工方式。

轧制坯料通过转动轧辊受到压缩，使其横断面减小，形状改变、长度增加。可分为纵轧、横轧和斜轧。纵轧时，工作轧辊旋转方向相反，轧件的纵轴线与轧辊轴线垂直，用此法可生产钢轨、工字钢、槽钢、角钢、圆钢、扁钢、方钢、钢板、带钢、钢管以及其它异型断面的钢材。横轧时，工作轧辊的旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线平行，此法可生产齿轮、各种轴类件回转体。斜轧时，工作轧辊的旋转方向相同，轧件的纵轴线与轧辊轴线成一定的倾斜角（送进角），此法可生产无缝钢管、钢球等。

挤压把坯料放入挤压罐中靠水压机的推头，使其从一定形状和尺寸的模孔中挤出。分正挤压和反挤压。正挤压时推头的运动方向和从模孔中挤出的金属前进方向一致，反挤压时，推头的运动方向和从模孔中挤出的金属前进方向相反，此法可生产各种断面的型材和管材。

拉拔用拉拔机上小车的钳口把金属料从模孔中拔出，可获得各种断面的型材、管材和线材。

冲压靠压力机冲头把板带顶入凹模中进行拉延，可生产各种杯件和壳体（如汽车外壳等）。

拉伸成型用拉伸法成型，如板料两端在拉力作用下沿一定形状的模具包制成型，又如带材拉力矫直等。

为扩大品种和提高加工成型效率,常采用组合方式,如锻造和轧制组合方式的锻轧过程,可生产各种变断面零件;轧制和挤压组合的轧挤过程,如纵轧压力穿孔(推轧穿孔),可对斜轧法不易穿孔的连铸坯(易出内裂、折叠)进行穿孔,使用连铸方坯代替圆坯;拉拔和轧制组合的拔轧过程,其轧辊可不用电机驱动而靠拉拔工件带动,能生产各种断面形状的钢材;轧制和弯曲组合的辊弯过程,使带钢通过一系列轧辊构成的孔型进行弯曲成型,可生产各种断面形状的冷型材,可生产圆断面焊管;轧制和剪切组合的搓轧过程,如因上下工作轧辊线速度不等(也叫异步轧制)而造成上下轧辊辊面对轧件摩擦力方向相反的搓轧条件,可显著降低轧制力。

此外,还有铸造与轧制组合的液态铸轧,以及粉末冶金和轧制组合的粉末轧制等新的变形过程。目前已采用液态铸轧法生产铸铁板和铝带。钢的液态铸轧法研究已取得可喜的阶段成果,用粉末轧制法已能生产出有一定强度和韧性的板带。

实践说明,各种新的加工方式的出现,可以获得扩大品种、提高塑性加工成型效率的新的加工变形过程。塑性加工和热处理适当配合可显著改善钢材组织性能,以获得高效钢材。

金属塑性加工领域中,随着金属冶炼技术的发展和机电工业的进步,电子计算机技术的广泛应用和整个科学技术水平的提高,轧钢事业发展比较快,具有代表性的轧钢生产技术的发展的主要趋势是:

① 生产过程连续化、自动化和高速化。如冷热带钢连轧机全部实现电子计算机控制;冷轧带钢实现无头全连续轧制;H型钢及其它异型钢材已能连轧,无缝钢管连轧管机已普及,连续线材轧机的轧制速度达100m/s,冷轧带钢轧制速度达41m/s,钢管张力减径达20m/s。

② 不断扩大钢材品种规格,增加板带和钢管比重。钢材品种规格已达数万种。现已能生产1200×530H型钢、78kg重轨、直径1.6m以上的管线用管、宽5m以上的钢板、薄至0.1mm以下的镀锡板等。近年来,经济钢材(包括经济断面钢材和异型少(无)切屑钢材)和冷弯型材的生产,发展很快。H型钢在几个主要工业国家已占大型钢材产量的30%~45%,可使金属节约30%~40%。各种特殊断面及变断面钢材、各种镀层、复层及涂层钢材都有很大的发展。在钢材总产量中,板带钢和钢管产量所占比重不断增大,工业发达的国家,板带钢占钢材产量的50%~65%,钢管占钢材产量的14%~16%。

③ 大力开发新工艺、新技术,节约能源和金属消耗,降低生产成本。近年来很多新工艺,如“液芯加热”、初轧坯“直接轧制”、薄板的“不对称轧制”等正在积极试验和推广应用,有的工厂已开始进行连铸连轧、液态铸轧试验。这些都可大大节约能源消耗、提高成材率。尤其是近年发展起来的连铸钢坯取代初轧坯,具有提高成材率、简化生产过程、降低生产成本等许多优点。一些工业发达国家连铸坯占钢坯总量的60%~70%。各国对于直接采用连铸坯轧管及连铸坯穿孔的新工艺极为重视,工业发达国家已应用连铸坯在曼乃斯曼穿孔机、推轧穿孔机上穿孔,我国已在小型穿孔机上应用连铸圆管坯进行穿孔试验,并在积极推广这项新技术。

此外,电子计算机在轧钢生产过程中的应用,带来了产品尺寸精度的提高和表面质量的改善,并正向深广发展。

# 目 录

## 前 言

绪 论 .....	( I )
-----------	-------

## 第一章 金属塑性加工的变形力学基础

第一节 外力、内力和应力 .....	( 1 )
第二节 应力状态和主应力图示 .....	( 3 )
第三节 弹性变形和塑性变形特征 .....	( 5 )
第四节 主变形和主变形图示 .....	( 6 )
第五节 塑性条件 .....	( 8 )

## 第二章 金属塑性加工的金属学基础

第一节 金属的塑性变形机构 .....	( 10 )
第二节 加工过程中的硬化和软化 .....	( 13 )
第三节 金属的冷变形和热变形 .....	( 16 )
第四节 加工硬化曲线和再结晶 .....	( 17 )
第五节 塑性变形对金属组织性能的影响 .....	( 19 )
第六节 金属的塑性和变形抗力 .....	( 22 )
第七节 不均匀变形与附加应力 .....	( 29 )
第八节 塑性加工中摩擦特点与润滑 .....	( 35 )

## 第三章 轧制理论基础

第一节 纵轧时变形区和变形的表示方法 .....	( 39 )
第二节 纵轧时轧辊咬入轧件的条件 .....	( 42 )
第三节 纵轧时的宽展和前滑 .....	( 48 )
第四节 纵轧时的轧制压力和传动力矩 .....	( 53 )
第五节 斜轧穿孔时孔腔的形成 .....	( 59 )
第六节 斜轧穿孔过程轧件的运动学特点 .....	( 60 )

## 第四章 轧制工艺基础

第一节 轧制钢材的品种 .....	( 63 )
第二节 轧钢机 .....	( 65 )
第三节 轧钢生产系统及工艺过程 .....	( 76 )
第四节 坯料及其清理 .....	( 77 )
第五节 坯料的加热 .....	( 78 )

第六节	轧制制度的确定 .....	(82)
第七节	连轧的基本概念 .....	(84)
<b>第五章 钢坯的轧制</b>		
第一节	初轧机类型及其产品范围 .....	(86)
第二节	二辊可逆式初轧机的生产工艺 .....	(87)
第三节	三辊开坯机的生产工艺 .....	(94)
第四节	钢坯连轧机 .....	(94)
<b>第六章 型钢生产</b>		
第一节	型钢轧机及其布置型式 .....	(98)
第二节	热轧型钢生产工艺过程 .....	(101)
第三节	孔型设计的基本知识 .....	(106)
第四节	H型钢生产 .....	(120)
<b>第七章 线材的轧制</b>		
第一节	线材生产的特点 .....	(125)
第二节	线材轧机的工艺布置 .....	(127)
第三节	高速无扭线材轧机 .....	(131)
第四节	线材的控制冷却 .....	(134)
<b>第八章 钢板及带钢生产概述</b>		
第一节	板带钢生产在国民经济中的地位 .....	(141)
第二节	板带钢产品的分类 .....	(142)
第三节	板带钢产品的主要技术要求 .....	(143)
<b>第九章 热轧板带钢生产</b>		
第一节	热轧厚板生产 .....	(153)
第二节	热连轧带钢生产 .....	(161)
第三节	热轧薄板带钢生产 .....	(170)
第四节	热轧窄带钢生产 .....	(172)
<b>第十章 冷轧板带钢生产</b>		
第一节	冷轧板带钢生产的基本技术问题 .....	(176)
第二节	冷轧板带钢生产工艺过程 .....	(183)
第三节	冷轧极薄带材生产 .....	(193)
<b>第十一章 板带钢轧制制度的确定及精度的控制</b>		
第一节	板带钢轧制制度的确定原则和要求 .....	(200)
第二节	压下规程的设定 .....	(202)
第三节	板带钢轧制中的厚度控制 .....	(203)



第四节	板形及辊型的控制·····	(208)
<b>第十二章</b>	<b>钢管生产概述</b>	
第一节	钢管的用途和分类·····	(214)
第二节	钢管的生产方法·····	(217)
<b>第十三章</b>	<b>热轧钢管生产</b>	
第一节	自动轧管机组的工艺与设备·····	(220)
第二节	热轧无缝钢管的其他生产方法·····	(233)
第三节	顶管机组和挤管机组·····	(239)
第四节	热轧无缝钢管生产的几种新方法·····	(248)
<b>第十四章</b>	<b>冷轧冷拔钢管生产</b>	
第一节	概    述·····	(250)
第二节	冷轧冷拔钢管生产的一般问题·····	(254)
第三节	冷拔钢管·····	(262)
第四节	冷轧钢管·····	(267)
第五节	冷加工钢管的生产范围·····	(271)
<b>第十五章</b>	<b>金属塑性加工车间产量计算及各项技术经济指标</b>	
第一节	轧机产量计算·····	(272)
第二节	各项技术经济指标·····	(278)

# 第一章 金属塑性加工的变形力学基础

## 第一节 外力、内力和应力

为了使金属变形，必须施加一定的外力。如果在该力作用下物体产生变形而使运动受到阻碍，则在物体内将产生内力。

### 一、外力

塑性加工过程中，在被加工的物体的外表面通常有如下三种外力：

① 作用力。一般由机械运动所产生，例如锻造时的锤头的下落作用于金属的力，如图1-1所示之 $P$ 。

② 反作用力。由于工具阻碍金属向某一方向运动而产生的，如图1-1所示砧子作用于金属之力 $N$ 。反作用力方向总是垂直于工具表面且指向物体，而不一定和作用力在同一条直线上。

③ 摩擦力。在塑性加工过程中，产生于变形金属和工具接触之间的阻力称之为摩擦力，如图1-1所示的力 $T$ 。摩擦力的方向指向阻碍工件质点沿工具表面运动的方向。摩擦力对金属的塑性变形既能起阻碍作用（如上述墩粗情况），又能起有益作用（如轧制时金属靠摩擦力被咬入辊缝）。

### 二、内力

由于某种原因，当物体内部的原子被迫离开平衡位置时，则在物体内部要产生与外力相平衡的力，称之为内力。当迫使原子离开平衡位置的因素（外力）消除后，原子回到平衡位置，则内力消失。使物体产生内力的原因有二：其一是由于平衡外力而产生的，在外力作用下使物体产生变形时，则物体内部便产生了与外力平衡的内力；其二是由于物理过程及物理—化学过程的作用（如不均匀变形，不均匀加热及冷却，不均匀相变等），在物体内部产生相互平衡的内力。如金属板材不均匀加热时（图1-2）的膨胀结果，板材右半部受到左半部的压缩作用，而左半部则受到拉伸作用，拉应力与压应力在物体内部相互平衡。

### 三、应力

单位面积上产生的内力称为应力。一般情况下，当断面上的内力分布不均匀时，真实的应力将为一个在数值上无限小的截面积上作用的内力 $\Delta P$ 与该微小截面积 $\Delta F$ 比值的极限，

$$\text{即} \quad \sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (1-1)$$

当应力分布均匀时，或者虽然应力不均匀分布，但为了计算方便取平均值时

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (1-2)$$

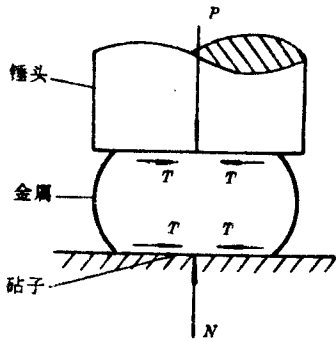


图 1-1 锻粗时金属受的外力

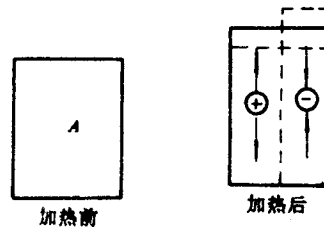


图 1-2 加热不均引起的内力

式中  $F$ ——物体的截面积； $P$ ——作用于该截面积的内力。

一般情况下(图 1-3)作用于任意一截面上的应力，往往与该截面成任意角度，此时可以分解为垂直于截面  $F$  的法线应力  $\sigma_n$  和作用于截面  $F$  的切线应力  $\tau_x, \tau_y$ 。

在塑性加工原理中，为了使用方便，常常取适当的坐标轴(图 1-4)，使之按此轴方向所取的截面上只有法线应力作用，而无切线应力作用( $\tau_x = \tau_y = \tau_z = 0$ )。通常把如此所取的坐标轴 ( $x, y, z$ ) 叫主轴，所截取的截面 ( $F, Q, V$ ) 叫主平面，作用在主平面上的法线应力 ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) 叫主应力。

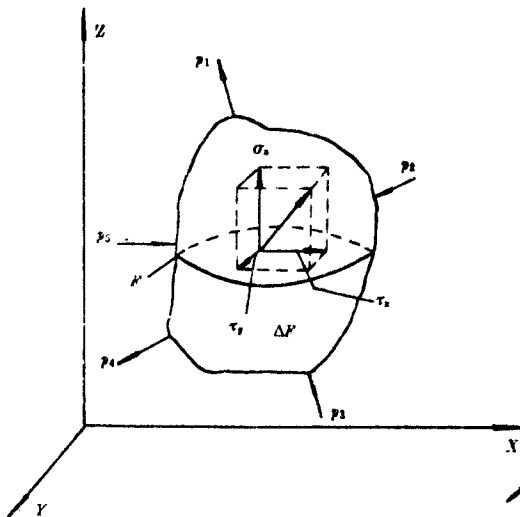


图 1-3 总应力矢量的分量图

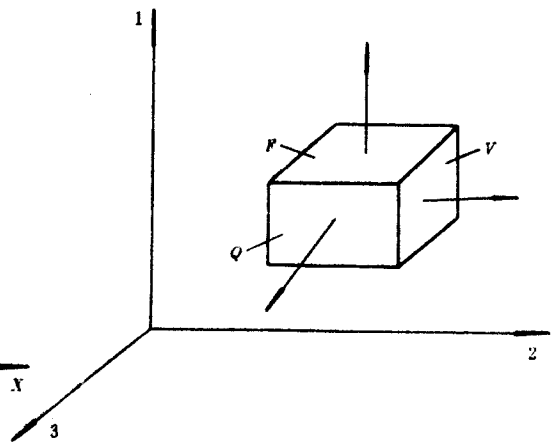


图 1-4 主应力状态

## 第二节 应力状态和主应力图示

### 一、应力状态

当金属受外力或由于物理过程、物理—化学过程的作用而在物体内产生内力时，称金属处于应力状态。由弹性力学可知，变形物体任一点的主应力状态，可用三个主应力来表示，也就是说，由通过该点的三个主平面上的应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  能够决定此点的主应力状态(图 1-4)。一般规定拉应力为正，压应力为负，按代数顺序  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

### 二、主应力图示

在塑性加工原理中，为了定性说明变形金属内某点的应力状态，常采用只注明作用于该点的三个主应力是否存在及其正、负号，而不注明应力数值的简明立方体图解，把该图解称为主应力状态图示或简称主应力图示。

可能的主应力状态图示共九种，如图 1-5 所示。金属塑性加工中，金属内各点的主应力图示往往是不一样的。如果绝大多数金属质点都是同样的主应力图示，则该种主应力图示就表示这种塑性加工过程的主应力图示。主应力图示很重要，首先它能定性地反映出该塑性加工过程所需单位变形力(常用作用于可动工具接触面上的平均单位压力来表示)的大小。其次，也能定性地说明工件在破坏前可能产生的塑性变形程度，即塑性大小。例如挤压时为显著的三向压应力状态，而拉拔时为一向拉应力二向压应力状态，所以前者塑性比

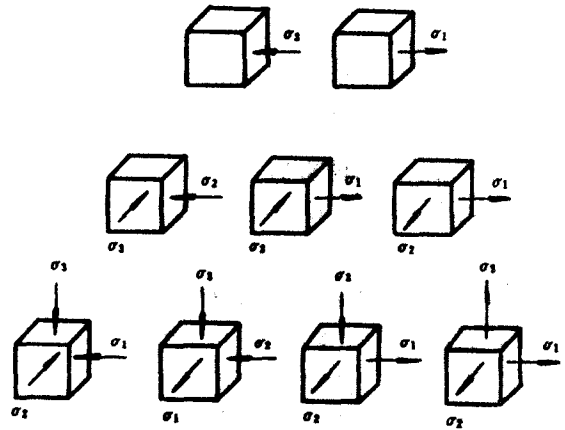


图 1-5 应力状态图示

后者高，但单位变形力却比后者大得多。在此遇到一个矛盾现象，即三向压应力对金属塑性提高是有利条件，但单位形力增大又是使金属产生变形的不利条件。这就需要根据金属本身特点来选择适当的加工方法，既能使金属塑性满足要求，又能使加工时比较省力。

### 三、影响主应力状态、主应力图示的因素

#### 1. 外摩擦影响

众所周知，理想的光滑无摩擦的情况是不存在的。特别是金属塑性加工过程中，在外力作用下，工件和工具接触表面间产生摩擦力是不可忽略的。由于该摩擦力的作用往往会改变金属内部的应力状态，例如镦粗时，工件与工具接触表面在光滑无摩擦的条件下，其应力为单向压应力状态(图 1-6 (a))，金属将均匀变形(实际上这种情况是不存在的)。事实上因摩擦力存在，金属内部应力状态为三向压应力状态。摩擦力的作用可由圆柱体镦粗后变为“单

鼓形”而得到证明（图 1-6 (b)）。

### 2. 变形物体形状的影响

拉伸试验时，开始阶段是一向拉伸主应力图示（图 1-7 (a)），当出现细颈以后在细颈部分变成三向拉应力主应力图示（图 1-7 (b)）。

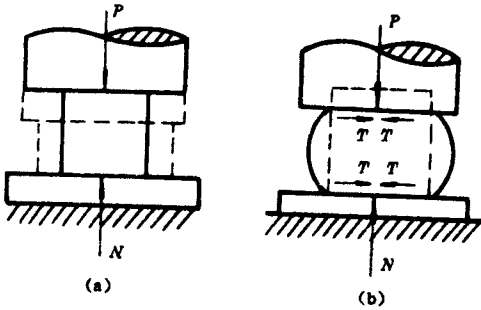


图 1-6 摩擦力对应力图示影响  
(a) 无摩擦；(b) 有摩擦

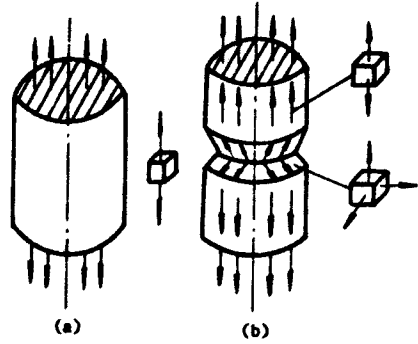


图 1-7 拉伸实验出细颈前后的应力状态图示  
(a) 出细颈前；(b) 出细颈后

### 3. 工具形状的影响

如当用凸形工具压缩金属时（图 1-8），由于改变了作用力方向，所以主应力状态图示相应地也随之改变。由图 1-8 可知，当摩擦力的水平分力  $T_x$  大于作用力的水平分力  $P_x$  时，则为三向压应力状态；当  $T_x$  小于  $P_x$  时，为二向压一向拉应力状态，当  $T_x$  等于  $P_x$  时为二向压应力状态。

### 4. 不均匀变形的影响

由于某种原因产生了不均匀变形时，也能引起主应力状态图示的变化。如图 1-9 所示，用凸形轧辊轧制板材时，由于中部变形大，两边边缘变形小，金属为保持完整性，内部便产生了相互平衡的内力，此时中部为三向压应力一向拉应力状态。

金属塑性加工中，最常见的是三向压力主应力图示（如轧制、锻

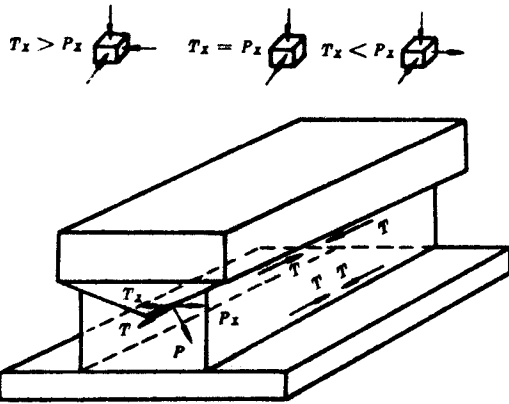


图 1-8 凸形工具对主应力状态图示影响

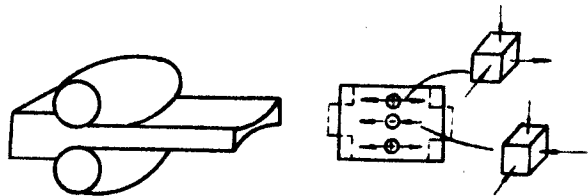


图 1-9 不均匀变形对应力状态图示的影响

造和挤压)和一向拉伸二向压缩主应力图示(如拉拔)。

### 第三节 弹性变形和塑性变形特征

如前所述,当外力作用于物体,并使物体运动受到阻碍时,则在物体内部都会产生内力,同时物体内的原子将产生位移,即所谓变形。物体的变形又分为弹性变形和塑性变形。

#### 一、弹性变形

当使物体发生变形的因素去掉之后变形即行消失,这种变形叫做弹性变形。其特征如下:

① 应力和应变是直线关系,即遵守虎克定律。图1-10为软钢(20号钢)位伸图示。由图可知,施加外力在材料弹性极限 $\sigma_e$ 以前,应变与应力的变化关系是直线 $ob$ ,实验证明在 $a$ 点以前外力与试样伸长量成正比例变化关系,外力去掉后变形完全消失;当外力达到 $b$ 点时,外力去掉后试样将有 $0.0001\% \sim 0.03\%$ 的残余变形。因为 $a$ 点和 $b$ 相距很近,所以一般认为 $b$ 点前为弹性伸长阶段。

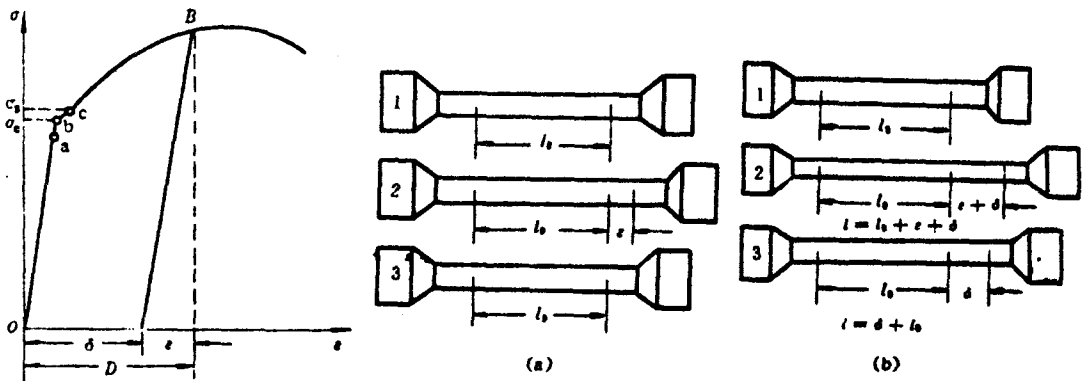


图1-10 金属试样拉伸时应力-应变曲线

(a) 试样弹性伸长图示; (b) 试样塑性伸长图示

1—原始试样; 2—拉伸中试样; 3—卸载后试样

② 外力只改变原子间的距离,而不破坏原子间的关系,因而外力消失后原子又回到其原来的平衡位置,而物体则恢复到原来的形状(图1-11(b))和原始的长度(图1-10(a))。

③ 弹性变形过程材料的基本性质不变。

#### 二、塑性变形

当使物体发生变形的因素去掉后,物体不能恢复原来的形状,这种变形叫做塑性变形。塑性变形特征如下:

① 塑性变形是在弹性变形的基础上发生的。当所加的外力达到一定程度(如达到屈服极

限  $\sigma_s$ ), 变形体便由弹性变形转变到塑性变形。如图 1-10 所示, 由外力所引起的应力  $\sigma$  大于  $\sigma_s$  时, 则去掉外力后试样不能恢复其原来形状, 同时由图 1-10 (b) 看出卸载后拉伸试样长度比卸载前拉伸试样长度缩短了。这一现象说明在塑性变形过程中仍然存在一部分弹性变形  $e$ , 因此, 塑性变形时的总变形  $D$  等于弹性变形  $e$  和塑性变形  $\delta$  之和, 即  $D=e+\delta$ 。由此得出在塑性加工过程中为保证产品尺寸精度, 就必须考虑弹性变形。

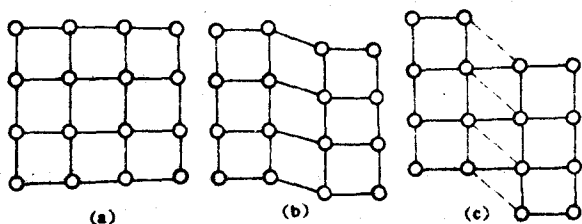


图 1-11 结晶格子的弹性变形和塑性变形  
(a) 变形前; (b) 弹性变形; (c) 塑性变形

② 应力和变形不是直线关系, 即不遵守虎克定律。由图 1-10 可看出当应力超过弹性极限后, 变形与应力呈曲线关系。

③ 塑性变形过程中, 外力不但改变了原子的间距, 而且破坏了原来的原子间联系, 建立了新的联系 (图 1-11 (c))。

④ 塑性变形能改变材料的机械物理性质。

#### 第四节 主变形和主变形图示

##### 一、主变形

在塑性加工原理中, 为研究问题方便而引入主变形概念。所谓主变形是指在主轴方向 (或主应力方向) 所产生的变形。表示主变形的有三种, 即绝对主变形、相对主变形和真实相对主变形。现以图 1-12 所示矩形坯料变形前、后尺寸变化为例说明之。

##### 1. 绝对主变形

系指在主轴方向上 (或主应力方向上) 物体变形前 (高  $h$ , 宽  $b$ , 长  $l$ ) 和变形后 (高  $h'$ , 宽  $b'$ , 长  $l'$ ) 的尺寸差 ( $\Delta h$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta l$ )。

##### 2. 相对主变形

因为绝对主变形没有相对比较的意义, 所以在大多数情况下采用相对主变形, 用绝对主变形与变形前尺寸之比来表示 ( $\Delta h/H$ ,  $\Delta b/B$ ,  $\Delta l/L$ )。

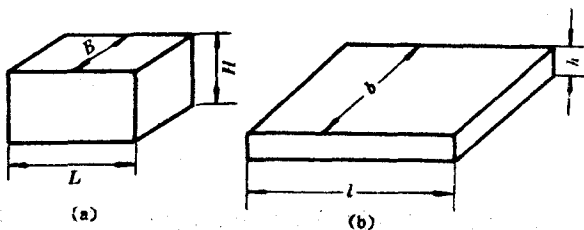


图 1-12 矩形坯变形前、后的尺寸变化  
(a) 变形前; (b) 变形后

##### 3. 真实相对主变形 (简称真变形)

由于相对主变形并不能准确地表示出变形金属在某变形瞬间的真实变化程度, 因此引入了真实相对主变形的概念。这种主变形是用某一瞬间变形尺寸的无限小的增量  $dh$ ,  $db$ ,  $dl$  与该瞬间尺寸  $h$ ,  $b$ ,  $l$  的比值之积分来表示的 (图 1-13)。即

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \int_H^h \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{h}{H} \\ \epsilon_2 &= \int_B^b \frac{db_x}{b_x} = \ln \frac{b}{B} \\ \epsilon_3 &= \int_L^l \frac{dl_x}{l_x} = \ln \frac{l}{L} \end{aligned} \right\} (1-3)$$

上述三种表示变形程度的方法中，以相对主变形最为常用。

为了表示塑性变形的激烈程度，还常常引用变形速度的概念。所谓变形速度就是变形程度对时间的变化率 $(\frac{de}{dt})$ 。为了研究变形速度对金属性能的影响而常用平均变形速度 $(\bar{a})$ ，它在数值上等于变形程度除以所经过的时间，单位是 $s^{-1}$ 。

根据塑性变形时，变形前、后体积不变的条件，可以求出三个主变形间的关系。如图1-12所示，假设物体的体积在变形前为 $V_1$ ，变形后为 $V_2$ ，则 $V_1=V_2$ ， $H \cdot B \cdot L = h \cdot b \cdot l$ 或 $h \cdot b \cdot l / H \cdot B \cdot L = 1$ ，两边分别取对数，则有：

$$\ln \frac{h}{H} + \ln \frac{b}{B} + \ln \frac{l}{L} = 0 \quad (1-4)$$

或写成

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (1-5)$$

和应力状态一样，变形金属中任一点的变形状态也可以用三个主变形来表示，在三个主变形中数值最大的称为最大主变形。显而易见，最大主变形较比其它两个主变形更能反映变形过程的情况。因此，任何变形过程的变形程度，一般都用最大主变形表示，例如轧制时以压下量表示，拉拔时用延伸率表示，挤压时用断面收缩率表示等。

## 二、主变形图示

在塑性加工原理中，为研究问题的方便，同样也采用了主变形图示。所谓主变形图示，乃是用来表示三个主变形存在与否，符号的正负，而不注明它的具体数值的简明立方体示意图形。根据体积不变条件可以断定，塑性变形时可能的主变形图示只有三种 $(D_1, D_2, D_3)$ ，如图1-14所示。主变形图示是很重要的，它直接反映出金属塑性的好坏。如图1-15(c)所示，轧制扁钢时，主变形图示为 $D_1$ ，当主变形程度增加时，由于缺陷面积被扩大了，导致金属塑性降低；与此相反，图1-15(b)所示挤压时，主变形图示为 $D_2$ ，主变形程度增加时，缺陷暴露面积缩小了，所以提高了金属的塑性。

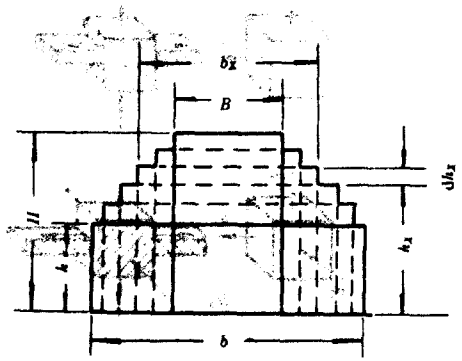


图 1-13 轧制时体积变化图示



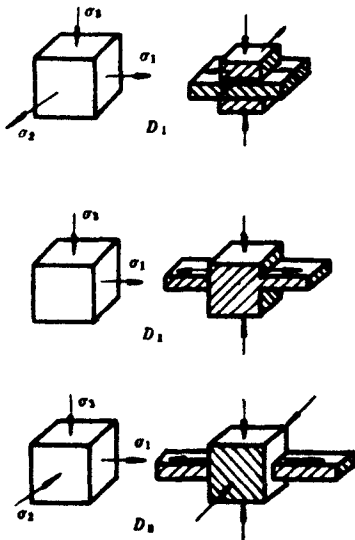


图 1-14 主变形图示

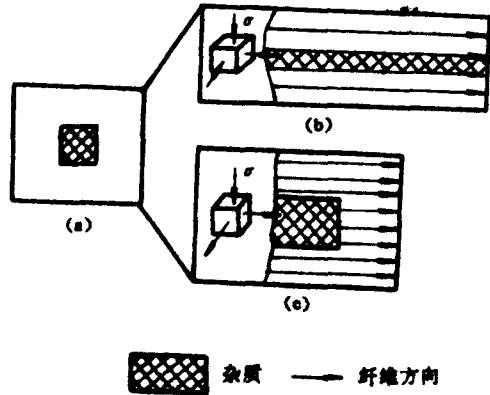


图 1-15 主变形对夹杂物形状影响

## 第五节 塑性条件

前已述及，当弹性变形发展到一定程度时，金属开始发生塑性变形，即金属进入塑性状态。本节将研究金属在什么应力条件下，才能使金属由弹性变形开始过渡到塑性变形。

材料力学拉伸试验已指出，当拉伸应力达到屈服极限时，材料即由弹性变形转向塑性变形，即  $\sigma \geq \sigma_s$  ( $\sigma_s$  是材料屈服极限)。

金属塑性加工中，大多数为三向应力状态，比单向拉伸时复杂得多。为了说明任一种应力状态下金属由弹性变形过渡到塑性变形的应力条件，目前常用的有屈雷斯加塑性条件（最大剪应力理论），密席斯塑性条件（形变能量定值理论）。

屈雷斯加塑性条件（亦称屈服准则、塑性方程）表述如下：当材料（质点）中的最大剪应力达到某一定值时，材料就屈服，或者说材料处于塑性状态时，其最大剪应力始终是一个不变的定值，该定值只取决于材料在变形条件下的性质，而与应力状态无关。

即 
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (1-6)$$

屈雷斯加塑性条件式 (1-6)，计算比较简单，有时也比较符合实际，但未反映中间主应力  $\sigma_2$  的影响，故而常有误差。该塑性条件必须在预先知道主应力次序的情况下才能使用，但是在三向应力条件下，主应力是待求的数值，大小次序不能事先知道，此时使用该式就不很方便了。

汉基于 1924 年阐明了密席斯屈服准则的物理意义：当材料的质点内单位体积的弹性形变能（即形状变化的能量）达到某临界值时，材料就屈服。

取坐标轴为主轴，力的作用面为主平面时，密席斯屈服准则（塑性方程）为