

軋鋼工藝學講義

陶洪疇編

北京鋼鐵學院

壓力加工教研組

1965.2

绪 论

金属成型方法是多种多样的，但可概括为三种：

1. 金属在成型过程中逐步减少其质量的方法，即使金属坯料上去除不必要的部份，而成为要求的形状，各种金属切削加工即属此种方法。此法的特点是在成型过程中产生废料（切屑），金属性质保持不变。

2. 金属在成型过程中逐步增加其质量的方法，其特点是在成型过程中不产生废料，金属的性质可以得到改变，铸造，焊接等即属此法。

3. 金属在成型过程中保持其质量不变的方法，各种金属压力加工均属此法。它利用金属的塑性，使之变形，其特点是在成型过程中不产生废料，能够改变金属的组织性能。

在金属成型的整个过程中常先后顺序地使用这三种方法，如用铸造和压力加工方法获得坯料，随后用切削加工获得成品。压力加工方法在该国、机械和国防等工厂获得了广泛的应用，其产品的供应范围包括了整个国民经济各部门。

金属压力加工的主要方式有：

1. 轧制，金属在两个旋转的轧辊间变形，又可分为：

纵轧——金属的延伸方向与轧辊轴线垂直，如型钢和钢板等的轧制（图1）。

横轧——金属的延伸方向与轧辊轴线平行（图2）

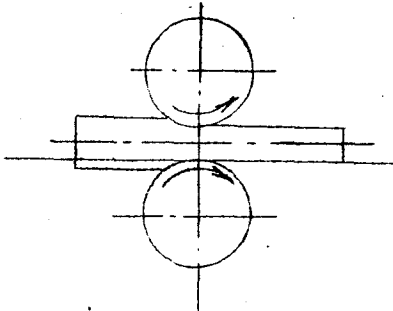


图1. 纵 轧

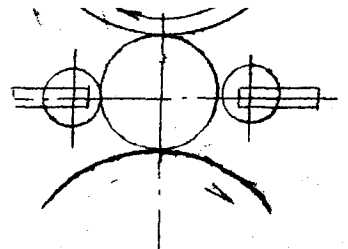


图2. 横 轧

斜轧——介于纵轧和横轧之间，即金属的延伸方向和轧辊轴线间有一夹角（图3），如钢管的穿孔和钢球的轧制等。

2. 锻造：金属在锻锤或水压机砧子间进行变形，又可分为：

自由锻——在砧子间变形（图4—1）；

模锻——在带模膛的砧子间变形（图4—2）；

冲压——在冲模中使板料成型（图4—3）。

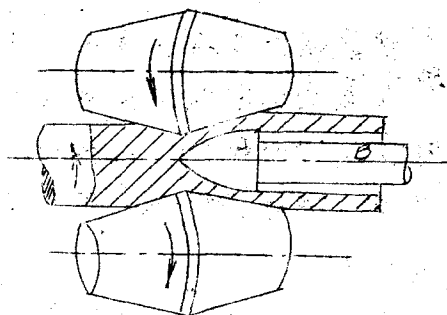


图3. 斜轧穿孔

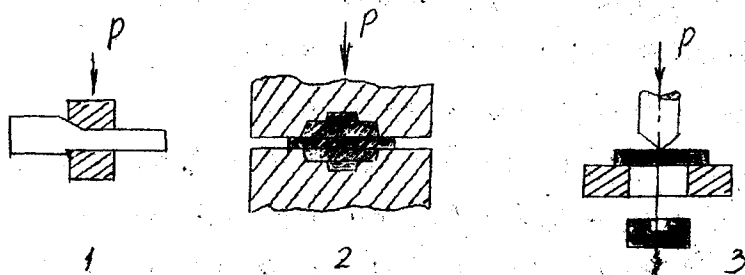


图4. 锻造

3. 挤压：在封闭的挤压筒中对金属施加压力，使其从规定的模孔中流出，从而使金属具有与模孔相仿的断面（图5）。

4. 拉拔：使金属棒或线材通过规定的模孔，从而使金属具有与模孔相仿的断面（图6）。

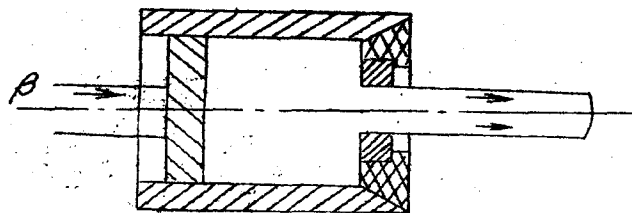


图5 挤压

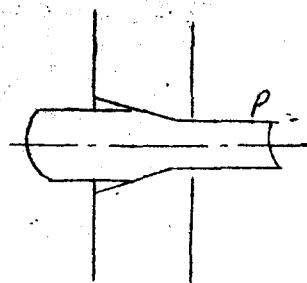


图6. 拉拔

第一篇 塑性变形原理

一、压力加工时金属形状的变化

§1. 体积不变定律

金属压力加工属于“在变形的过程中保持质量不变”的方法，现在来研究其体积变化的规律。

压力加工的原料多为铸造成金属，它们是不致密的，具有缩孔，疏松和气泡。当经过压力加工后便得到消除，致使金属度有所增加，从而体积有所减小。例如沸腾钢钢锭中含有大量气泡，其密度为 6.9 吨/米³，经过热加工后便增至 7.85 吨/米³，从而使体积有 12% 的减小。如果继续进行冷加工，其密度维持不变。

如果进行冷加工，便可发现其密度因晶粒间界产生的细微裂纹而有 0.1—0.25% 的减小，从而使体积有所增加。当其经过再结晶退火以后，密度和体积又重新恢复。

由此可见，当铸造成金属经过初步的压力加工后，再继续压力加工时，可以认为体积将不发生变化，此即体积不变定律，可表示为：

$$V_1 = V_2$$

V_1 ——变形前的体积。

V_2 ——变形后的体积。

对于大尺寸的金属，则可写成：

$$H_1 B_1 L_1 = H_2 B_2 L_2$$

H_1, H_2 ——变形前、后的厚度。

B_1, B_2 ——变形前、后的宽度。

L_1, L_2 ——变形前、后的长度。

对于圆柱体的金属，则为：

$$\frac{\pi D_1^2}{4} L_1 = \frac{\pi D_2^2}{4} L_2$$

D_1, D_2 ——变形前后的直径。

3.2. 变形的表示。

金属的变形常用受压后坐标的三个方向上的尺寸变化来衡量，以轧制为例：金属高度减小称压下，宽度的增加称宽展，长度的增加称延伸。可以用下列三种方法来表示变形：

1. 变形量：三个方向上尺寸变化的绝对量称为变形量，所以

压下量为 $\Delta H = H - h$

宽展量为 $\Delta B = B_2 - B_1$

延伸量为 $\Delta L = L_2 - L_1$

2. 变形系数：三个方向上变形前后尺寸的比值称为变形系数，

所以

压下系数为 $\eta = \frac{h}{H}$

宽展系数为 $\beta = \frac{B_2}{B_1}$

延伸系数为 $\mu = \frac{L_2}{L_1}$

3. 相对变形：它也有三种表示方法。

1) 三个方向上尺寸变化的增量与相应的原始尺寸的比值，所

以

相对压下量为 $\frac{\Delta H}{H}$

相对宽展量为 $\frac{\Delta B}{B_1}$

相对延伸量为 $\frac{\Delta L}{L_1}$

2) 三个方向上尺寸变化的增量与相应的终了尺寸的比值，所以

相对压下量为 $\frac{\Delta H}{h}$

相对宽展量为 $\frac{\Delta B}{B_2}$

相对延伸量为 $\frac{\Delta L}{L_2}$

3) 真变形：上述两种相对变形量只涉及原始或终了尺寸，只有

当变形量与原始或终了尺寸相比很小时两者才可认为是接近的，因而在压力加工理论中常用真应变，它是用在变形过程中尺寸变化无限小的增量 dh_x , dB_x , dL_x 与在该瞬间相应的尺寸 h_x , B_x , L_x 的比值，并将其积分求定头的（图 7）。

$$\delta_1 = \int_H^h \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{h}{H}$$

$$\delta_2 = \int_{B_1}^{B_2} \frac{dB_x}{B_x} = \ln \frac{B_2}{B_1}$$

$$\delta_3 = \int_{L_1}^{L_2} \frac{dL_x}{L_x} = \ln \frac{L_2}{L_1}$$

由体积不变定律可知

$$HB_1L_1 = hB_2L_2$$

$$\text{或 } \frac{hB_2L_2}{HB_1L_1} = 1$$

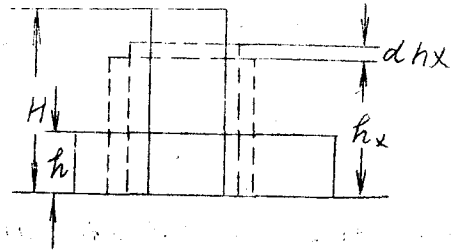


图 7

$$\text{取对数得 } \ln \frac{h}{H} + \ln \frac{B_2}{B_1} + \ln \frac{L_2}{L_1} = 0$$

$$\text{即 } \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0$$

由此式可知，体积不变定律可用真应变表示，即三个方向上真应变的代数和为零，其中一個的符号与另外两个相反，而绝对值为其它两个之和。

§3. 可能的变形方式

根据体积不变定律，变形金属在直角坐标的三个方向上的尺寸变化只有三种可能的方式，按延伸增加的顺序分别用 ρ_1 , ρ_2 和 ρ_3 来表示。

ρ_1 变形方式表示变形金属的尺寸在一个方向上减小，而在另外两个方向上增加，如锻造。

ρ_2 变形方式表示变形金属的尺寸在一个方向上减小，一个方向上不变，在另一个方向上增加，如轧制。

ρ_3 变形方式表示变形金属的尺寸在两个方向上减小，一个方向上增加，如挤压。

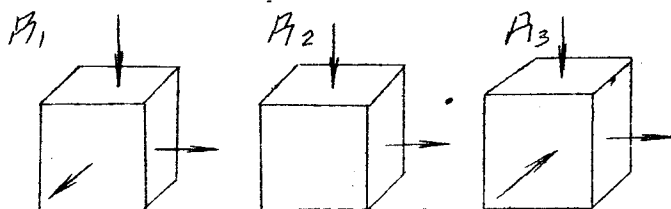


图8 三种变形方式

三种变形方式可用体积不变定律联系起来，

$$H B_1 L_1 = H B_2 L_2$$

$$\text{即 } \frac{H}{H} = \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{L_2}{L_1}$$

当 $\frac{H}{H}$ 为常数时

$$\frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{L_2}{L_1} = C$$

反映了宽展系数和延伸系数间为双曲线关系。或者用下式表示

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0$$

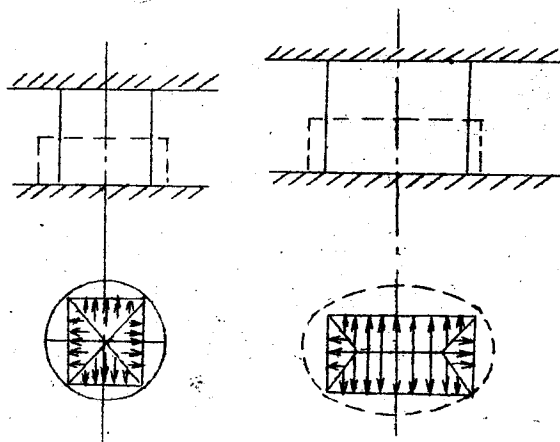
即三个方向上真变形之代数和为零。

3.4. 最小阻力定律

金属在变形过程中，当其质点有向各个方向流动的可能时，则质点将沿阻力最小的方向流动。例如在轧辊上刻有纵纹时，则被轧制的金属沿纵向所受的阻力

较小，故延伸较大，而沿横向所受的阻力较大，故宽展较小。反之，当轧辊上刻有横纹时，则延伸和宽展的情况相反。

在两个平板间压缩力断的金属时，随着压下量的增加，断面最终趋于圆形。当压缩短形断面的金属时，随着



图

压下量的增加，断面起初为椭圆形，而最终亦趋于圆形（图9）。

从压缩试验中可了解，最小阻力的方向可以认为是因某点至断面边界距离最短的方向，即边界的法线方向。因此方形和矩形断面均可用顶角的分角线将其分为四个区域，每个区域的金属有各自的流向，因为该方向是这个区域的金属距边界最近，即最小阻力的方向。

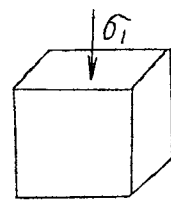
二 压力加工时金属的应力状态

§1 可能的应力状态

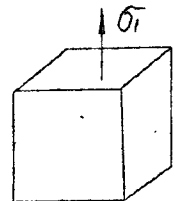
变形金属在外力作用下，且不发生刚体运动，则金属将发生变形，即原子脱离了它的平衡位置而处于应力状态。变形金属某点的应力状态可用主应力三个方向上的应力来表示，可能的应力状态有三种：

1. 线应力状态：三个主应力中有两个为零，因而便有单向压缩 λ_1 和单向拉伸 λ_2 两种方式。

2. 平面应力状态：三个主应力中有一为零，因而便有双向压缩 λ_1 ，一向压缩一向拉伸 λ_2 和双向拉伸 λ_3 三个方式。



$\lambda_1 (-, 0, 0)$

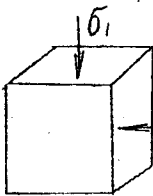


$\lambda_2 (+, 0, 0)$

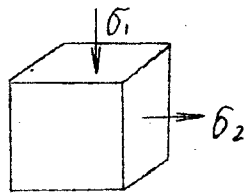
图10. 线应力状态

3. 体应力状态：三个主应力

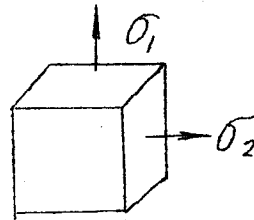
均不为零，因而便有双向压缩 λ_1 ，双向压缩一向拉伸 λ_2 ，一向压缩双向拉伸 λ_3 和双向拉伸 λ_4 四种方式。



$\lambda_1 (-, -, 0)$



$\lambda_2 (-, +, 0)$



$\lambda_3 (+, +, 0)$

图11. 平面应力状态

这样便可能有九种应力状态方式。

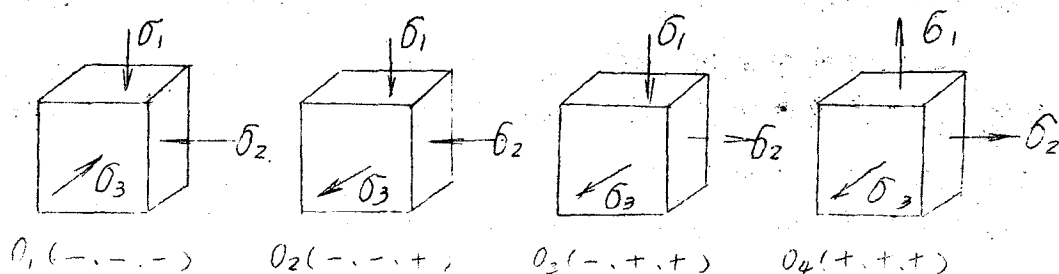


图12. 体应力状态

3.2. 实际过程的应力状态方式

1. 拉伸试验：在试样有效部分，金属处于 $\sigma_1(+, 0, 0)$ 方式。

2. 在平板间的压缩：虽然仅施加了外力 P ，然而在金属与工头的接触区会产生摩擦力，阻碍金属的运动，因而它不是处于

$\sigma_1(-, 0, 0)$ ，而是处于 $\sigma_1(-, -, -)$ 方式。

只有当接触表面十分光滑，施加润滑油时，

才可近似地认为处于 $\sigma_1(-, 0, 0)$ 方式。

3. 轧制：可看作连续的压缩(图15)

因而亦是处于 $\sigma_1(-, -, -)$ 方式。

4. 挤压：金属处于 $\sigma_1(-, -, -)$ 方式(图16)

式(图16)

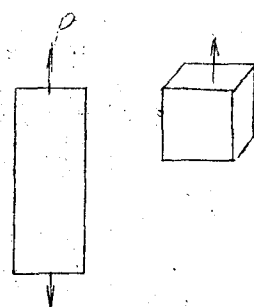


图13. 拉伸试验

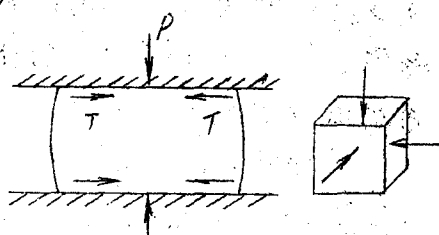


图14. 平板间的压缩

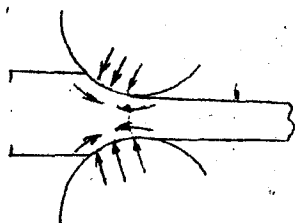


图15. 轧制

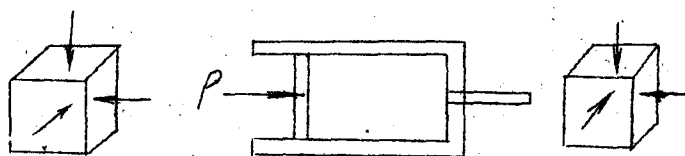


图16. 挤压

5. 拉拔：金属处于 $\sigma_2(-, -, +)$ 方式。

由此可见，压力加工过程均属体应力状态，且多为三向压应力状态方式。应该注意，在实际的压力加工过程中，变形金属所处

的应力状态方式比较复杂，金属的各部分并不总是处于相同的应力状态方式下。

§3. 变形的力导图示

单纯使用变形方式或应力

状态方式都不能完全表示某个应力加工过程的特征，为此常用变形力导图示来表示。它是变形方式和应力状态方式的某种组合，已知变形方式有三种，应力状态方式有九种，故可能的变形力导图示为二十七种，但只有物理意义者为二十三种。

1. 平砧间的压缩 (图18)。
2. 轧制与1相同 (图18)
3. 无宽展轧制 (图19)。
4. 挤压 (图20)
5. 拉拔 (图21)

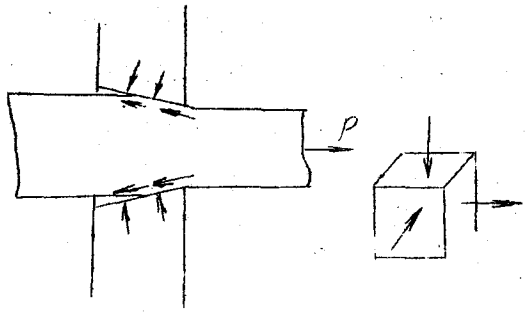


图17 拉拔

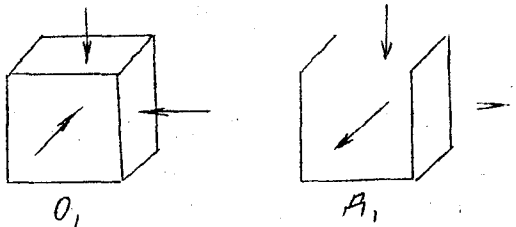


图18. 平砧间压缩和轧制的变形力导图示。

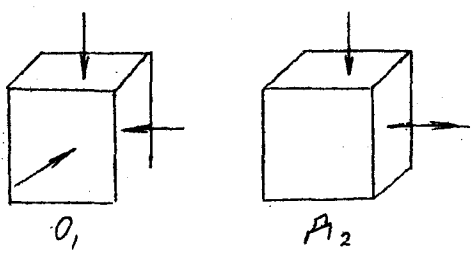


图19. 无宽展轧制的变形力导图示。

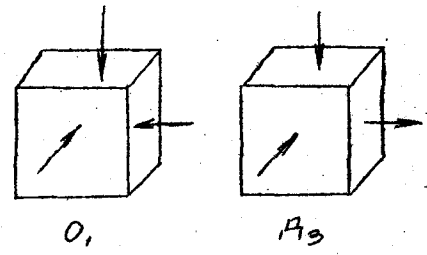


图20. 挤压的变形力导图示。

应当注意，不要把应力的方向和变形的方向混淆。

§4. 塑性变形的条件

1. 塑性变形的条件

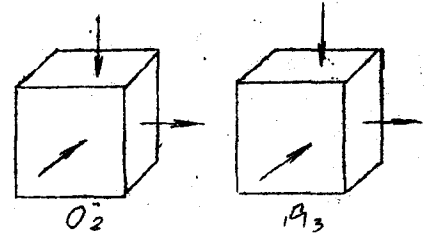


图21. 拉拔的变形力导图示

在拉伸试验中可知, 当 $\sigma_1 = \sigma_s$ 时金属便开始从弹性变形过渡到塑性变形, 意即在 σ_2 的应力状态方式下, 只要 $\sigma_1 = \sigma_s$ 便开始塑性变形。在压力加工时, 金属多处在三向应力状态下, 其塑性变形的条件如何? 研究表明, 只要三个主应力满足下列条件时就开始塑性变形。

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2$$

即三个主应力中, 任何两个主应力差值的平方和等于金属在单向拉伸时屈服限平方的二倍时, 便开始塑性变形, 此方程式称塑性方程式。

2. 塑性方程式的推导

在弹性变形时在金属内部积累着位能, 弹性变形的位能是由于体积变化的位能和形状变化的位能所组成, 当形状变化的位能达到一定数值时便开始塑性变形而与应力状态无关。

$$U = U_v + U_p$$

U ——单位体积内的弹性位能。

U_v ——体积变化的单位位能。

U_p ——形状变化的单位位能。

$$U_v = \frac{1}{2} \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \frac{\Delta V}{V} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (3)$$

$\frac{\Delta V}{V}$ ——相对体积变化

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu_p (\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu_p (\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu_p (\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \right\} (4)$$

E ——弹性系数,

μ_p ——泊松系数。

将(4)和(3)代入(2)式得

$$u_v = \frac{1-2\mu_p}{\sigma E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{和 } u &= \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \\ &= \frac{1}{2E} \{ \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu_p (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1) \} \quad (6) \end{aligned}$$

所以 $u_\phi = u - u_v$

$$= \frac{1+\mu_p}{\sigma E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (7)$$

由于“当形状变化的依能达一定值时便开始塑性变形而与应力状态无关”便可求得在线应力状态下开始塑性变形时的形状变化的依能，此时 $\sigma_1 = \sigma_s$ ， $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 所以

$$u_\phi = \frac{1+\mu_p}{3E} \sigma_s^2 \quad (8)$$

(7)应与(8)式相等，所以

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (9)$$

三个主应力中，任何两个主应力差值的平方和等於单向拉伸的屈服极限两倍的平方时，便开始塑性变形。

3. 塑性方程式的实际应用。

压力加工时，金属多处在三向压应力状态方式，现来研究几种压力加工过程的塑性方程式。

(1) 在平板间压缩方或圆断面柱体时， $\sigma_2 = \sigma_3$ ， $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ ，

此时的塑性方程式便为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

(2) 当 σ_2 增至一定数值，便可阻止金属在 2 方向上的增长，故 $\varepsilon_2 = 0$ ，轧板即属这种情况。

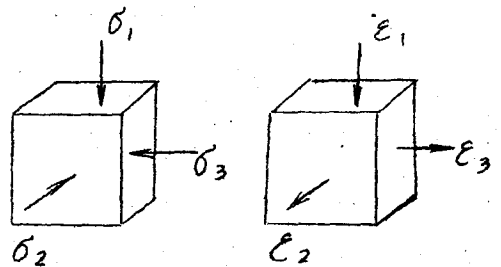


图 22

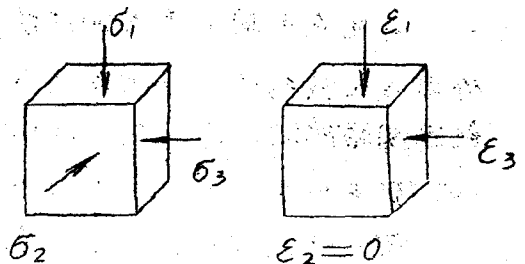


图 23

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu_p (\sigma_1 + \sigma_3)] = 0$$

由体积不变定律 $\mu_p = 0.5$

$$\text{故此时 } \sigma_2 = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3)$$

塑性方程式则改为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s = 1.15 \sigma_s$$

3) 继续增加 σ_2 值，而以 $\sigma_2 = \sigma_1$ 为极限，便可使金属在 2 方向上减缩，挤压便是这种情况。此时塑性方程式变为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

由上三例可知，在三向应力状态方式下，塑性方程式的普遍形式是：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s$$

β ——为一个数值为 1.0—

1.15 的系数。

即中间主应力 σ_2 在其变化的整个范围内，引起不超过 15% 的影响。

1) 应力及变形的不均匀分布。

31. 应力及变形不均匀分布的现象

在理论分析中，为了便于揭发压力加工过程的本质，常假设应力和变形在变形金属中的分布是均匀的，即用一点的应力状态方式和变形方式代表整个变形金属，但是在实际的压力加工过程中应力和变形是不均匀分布的。

可用在平板上压缩的过程来说明，圆柱体在压缩后不再是圆柱体而成为鼓形体，即金属在高度方向上变形是不均匀的。用在侧边刻有网格的试料在平板间进行压缩，可以看到网格的扭曲，由此可以了解各点变形不均匀的程度（图 25）。

将一中间厚两边薄的金属在圆柱轧辊中轧制时，可发现边缘的破裂，明显地显示应力分布的不均匀性（图 26）。

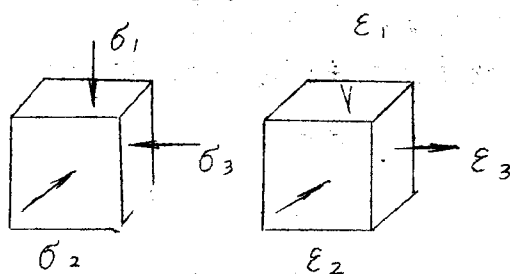


图 24

5.2. 引起应力和变形不均匀分布的原因

1. 工具和金属接触面上的摩擦。

在平板间压缩时，金属按照片变形方式流动，高度

减小而断面面积增加。由于接触表面上摩擦力的阻碍，愈近接触面金

属的变形愈小，最终形成鞍形。随着接触面间摩擦系数的增加，鞍形

愈显著；只有当接触面极端光滑，且有润滑时，才接近于均匀变形。

因冷压锻造合金的试验证明变形的不均匀性，这是基于冷加工时变形愈大则硬度（加工硬化）愈大的原理。由图27可知：

I. 区硬度最低，可知变形较小

，因受摩擦力的作用最大。

II 区硬度最高，表明变形最大。

III、IV 介于 I、II 区之间。

2. 工具的形状

将方坯件送入椭圆孔型中轧制时，沿轧制宽度上的压下量便不一致；与此同时，在沿轧件长度上将产生附加应力，轧件中部为拉应力，两边为压应力（图28）

3. 金属的形状

在平辊中轧制椭圆轧件时，亦引起沿轧件宽度上的压下量不均匀，以及沿轧件的长度方向上产生附加应力，中部受压应力，两边为拉应力（图29）。

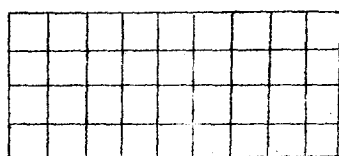


图 25

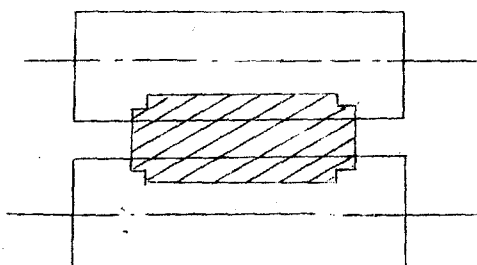


图 26

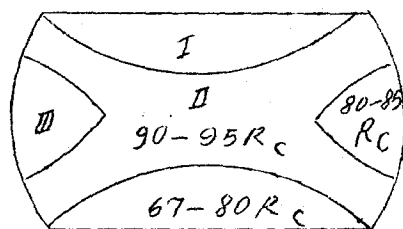


图 27

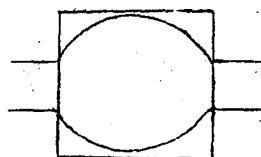


图 28

4. 金属的性质不均匀

轧制加热不均匀的轧件，如其上部温度过高，下部温度不足，则上部将有较大的延伸，下部有较小的延伸，从而轧件将产生弯曲，其附加应力上部为压应力，下部为拉应力（图30），金属的组织性能不均匀，亦会造成相似的现象。

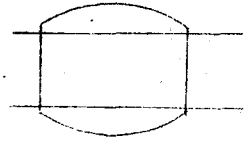


图 29

3.3. 应力和变形不均匀分布所引起的后果

1. 工艺过程复杂化：如上部4的辊缝，2，3的孔型不均匀磨损。

2. 产品畸形。

3. 在变形过程中产生附加应力，此应力有可能使产品破裂。

4. 在变形结束后，产品中可能残存残余应力，此应力可导致产品形状的扭曲和机械——物理性能的降低。

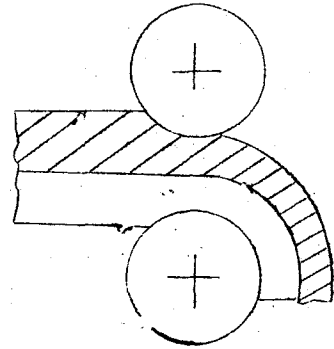


图 30

因而在压力加工过程中应力应避免应力和变形的不均匀分布。

3.4. 压力加工时的摩擦

1. 压力加工时摩擦的特点；

在金属压力加工过程中，金属和工具表面不可避免地产生摩擦，将产生各种影响：形成和加强变形及应力的不均匀分布，使加工物处于三向压应力状态；降低工具寿命和产品表面质量，但对某些加工过程——轧制，却有特殊意义。

压力加工时的摩擦和一般机械中的摩擦有所不同，表现在：

1) 摩擦面上的单位压力很高，热加工时约10—50公斤/毫米²，冷加工时在50—250公斤/毫米²范围，而在典型轴承中不过2~4公斤/毫米²。

2) 金属表面存在氧化铁皮，且表面不断更新。

3) 各种加工过程的摩擦条件十分悬殊，可以使摩擦系数随摩擦范围而变化。

此特点使对摩擦的研究复杂化。

2. 影响摩擦的因素

1) 工具的表面状态：影响很大，工具的不同表面状态可使摩擦系数在 0.7—0.05 范围内变化。

2) 变形金属的表面状态：取决于金属的化学成份，加工过程（浇铸、压力加工，退火或酸洗）和氧化铁皮等。

3) 变形金属的温度：通常摩擦系数在 500—800°C 间有一极大值，故在钢的压力加工范围内它是随温度的升高而降低（图 31）。

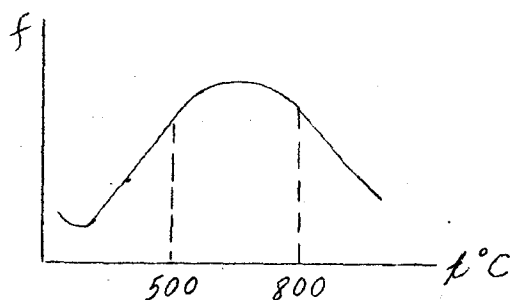


图 31

4) 工具的速度：摩擦系数随着轧辊线速度的增加而降低，而在 2—3 米/秒范围最为显著（图 32）。

5) 接触区间的润滑剂：施以不同的润滑剂将有不同的摩擦系数。

3. 摩擦系数的确定

由上述影响因素可知，确定摩擦系数相当复杂，原因在於各种因素的影响本质不甚清楚，故一般常用实际方法和经验公式确定。

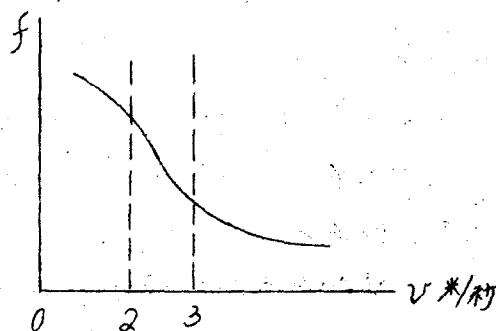


图 32

轧制时的摩擦系数可用下

式计算：

$$\mu = K_1 K_2 K_3 (1.05 - 0.0005t)$$

式中的 K_1 ——轧辊材料的影响系数，铁辊 0.8 钢辊 1.0。

K_2 ——速度的影响系数（图 33）。

K_3 ——轧件材料的影响因素（表 1）。

钢号	CT1	PΦ1	14X15	91T	21341
K_3	1.0	1.1	1.3	1.47	1.55

t ——轧制温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

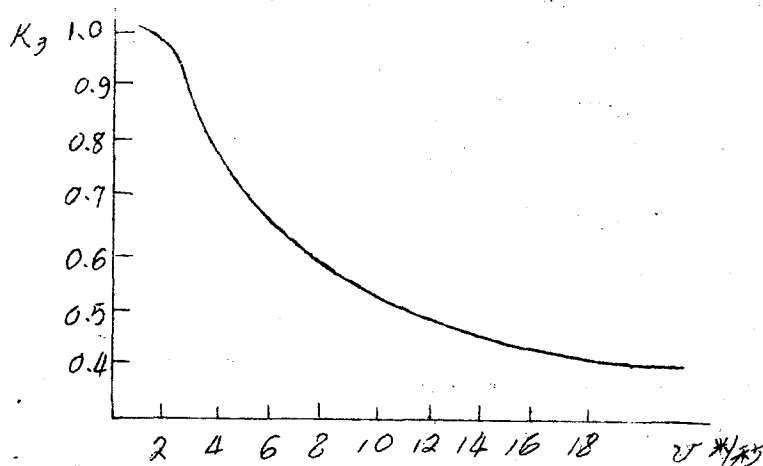


图 33

四 金属的塑性和变形抗力

§1. 基本概念

塑性可理解为：金属在外力作用下稳定地改变自己的形状，而且质点间连接又不被破坏的能力，这取决于金属本身的性质和压力加工条件。人们常之把金属的塑性和柔软性混淆起来，以为塑性良好就是性质柔软。柔软性应理解为金属对迫使它变形的的外力的抵抗程度，即变形抗力的大小。

塑性和变形抗力并不成反比，塑性良好不一定是变形抗力低，反之，变形抗力高不一定是塑性差。

可以举例说明。

铁的变形抗力很小，塑性又良好，然而自然界中的金属并不是都是这样。需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com