

塑性加工工程学

——板成型理论

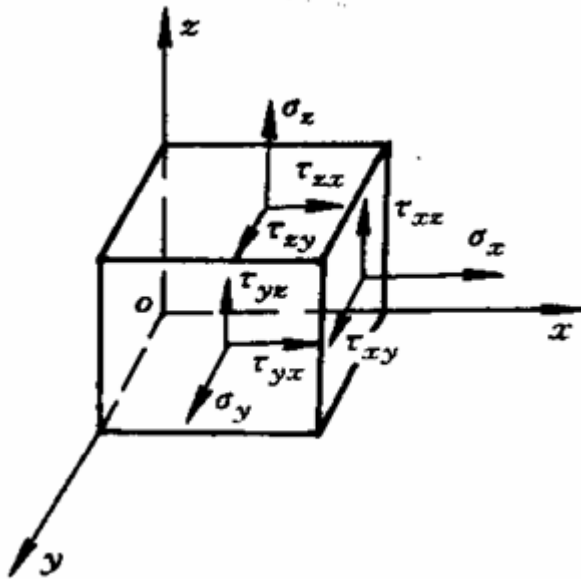
主讲

曹建刚

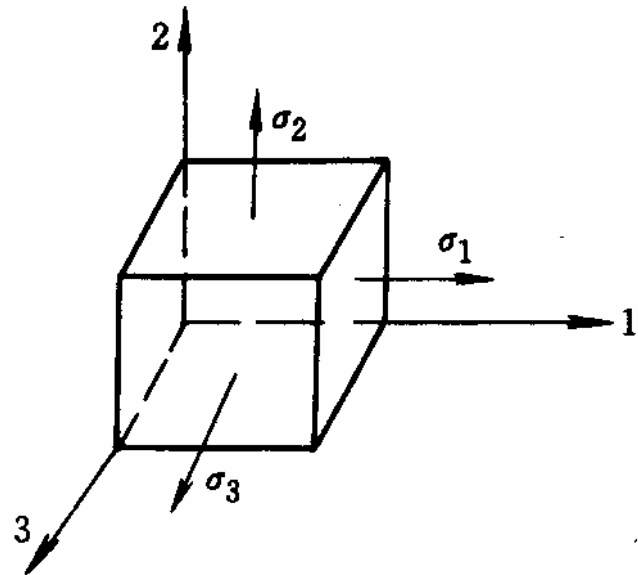
第二章 冲压变形基本规律

第一节 冲压变形的应力与变形特点

1. 应力的表示

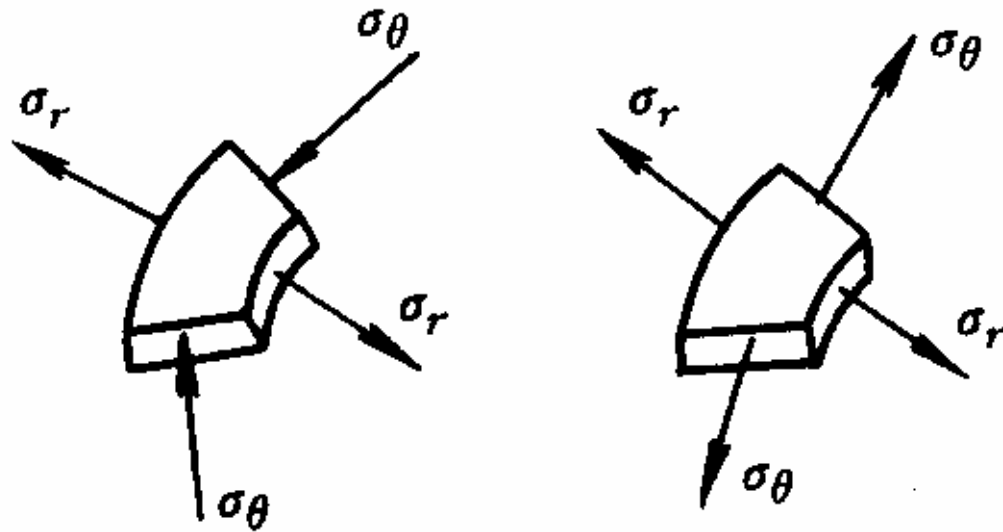


点的应力状态 (一)



点的应力状态 (二)

一般取其变形坯料的经向（径向）、板厚方向及纬向（切向、周向）作主轴方向，所以常用 σ_r 、 σ_t 及 σ_θ 来表示构成一种立体应力状态。由于大部分冲压变形中，板厚方向的 $\sigma_t \approx 0$ ，故通常规为平面应力状态。



拉深、翻边变形区内主应力方向

2、应变的表示

(1) 相对应变与对数应变

由塑性力学可知，塑性应变的表示有相对应变和对数应变两种。

3、常用的塑性理论

- 1) 塑性条件
- 2) 体积不变假设
- 3) 全量理论
- 4) 增量理论
- 5) 板料拉伸失稳理论
- 6) 板料压缩失稳理论
- 7) 板材各向异性理论
- 8) 加工硬化理论
- 9) 剪切变形理论

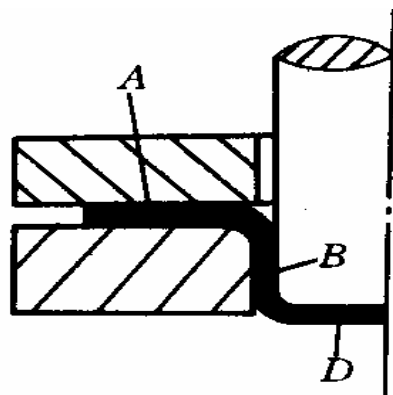
第二节 冲压成形的力学特点与分类

对板料冲压成形各种工艺进行分类，应该能够正确地反映出每个类型中成形工艺的共性，并在此基础上提供共同的观点和方法，去分析、研究和处理每类成形工艺中的各种问题。

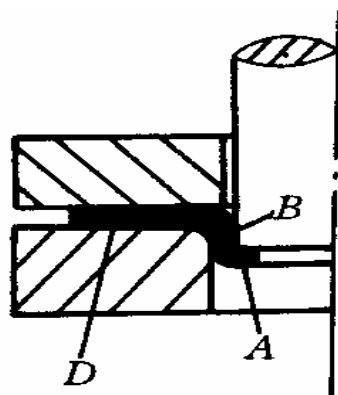
1、分类的前提和依据

对冲压成形的变形毛坯进行分区，并确认变形区的范围，是两大类冲成形分类的基础。

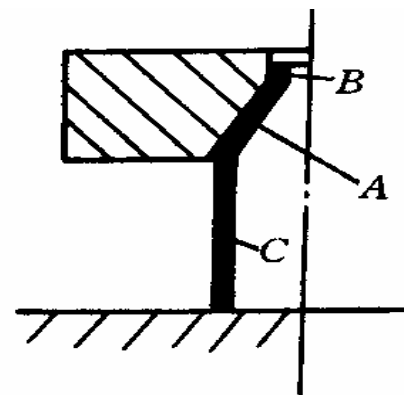
板料在进行各种冲压成形时，都可以把正在变形的毛坯划分为变形区和不变形区两大部分。



a) 拉深



b) 翻边



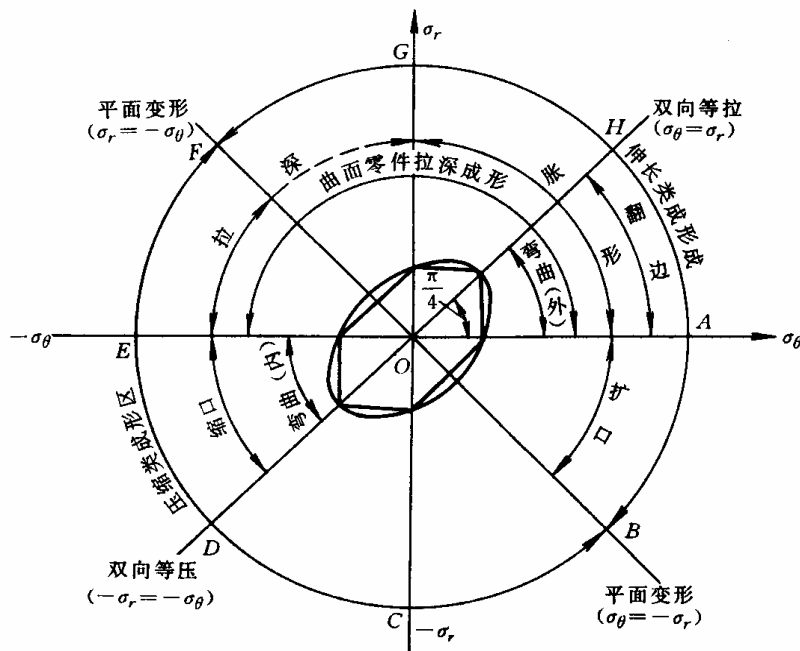
c) 缩口

表 8-1 冲压变形毛坯各区划分情况

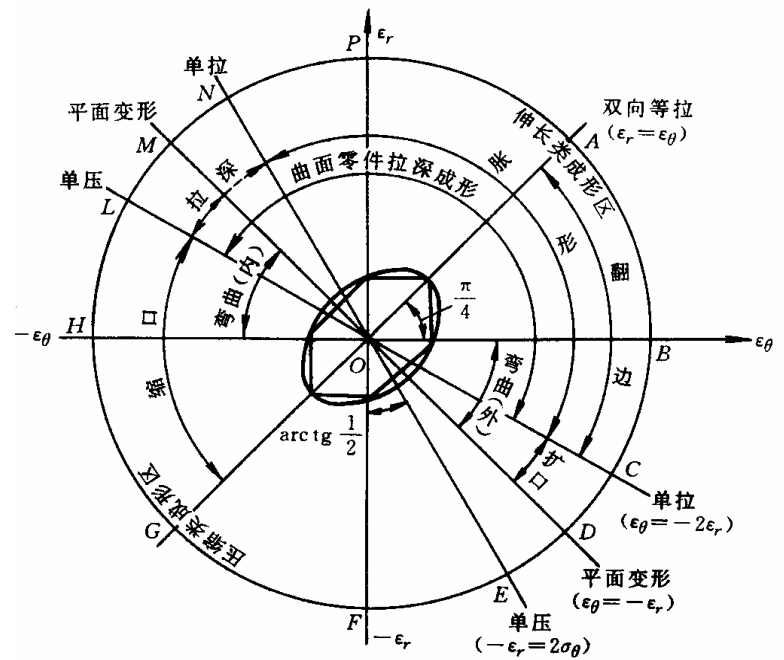
成形工序	变形区	不变形区			
		已变形区	待变形区	传力区	单纯不变区
拉深	A	B	—	B	D
翻边	A	B	—	B	D
缩口	A	B	C	C	—

2、分类的分析与结果

把所有冲压变形方式按毛坯变形区的应力状态和变形特点,为以下四种情况,分别研究它们的特点。



冲压应力图



冲压应变图

第三节 冲压加工工序的构成

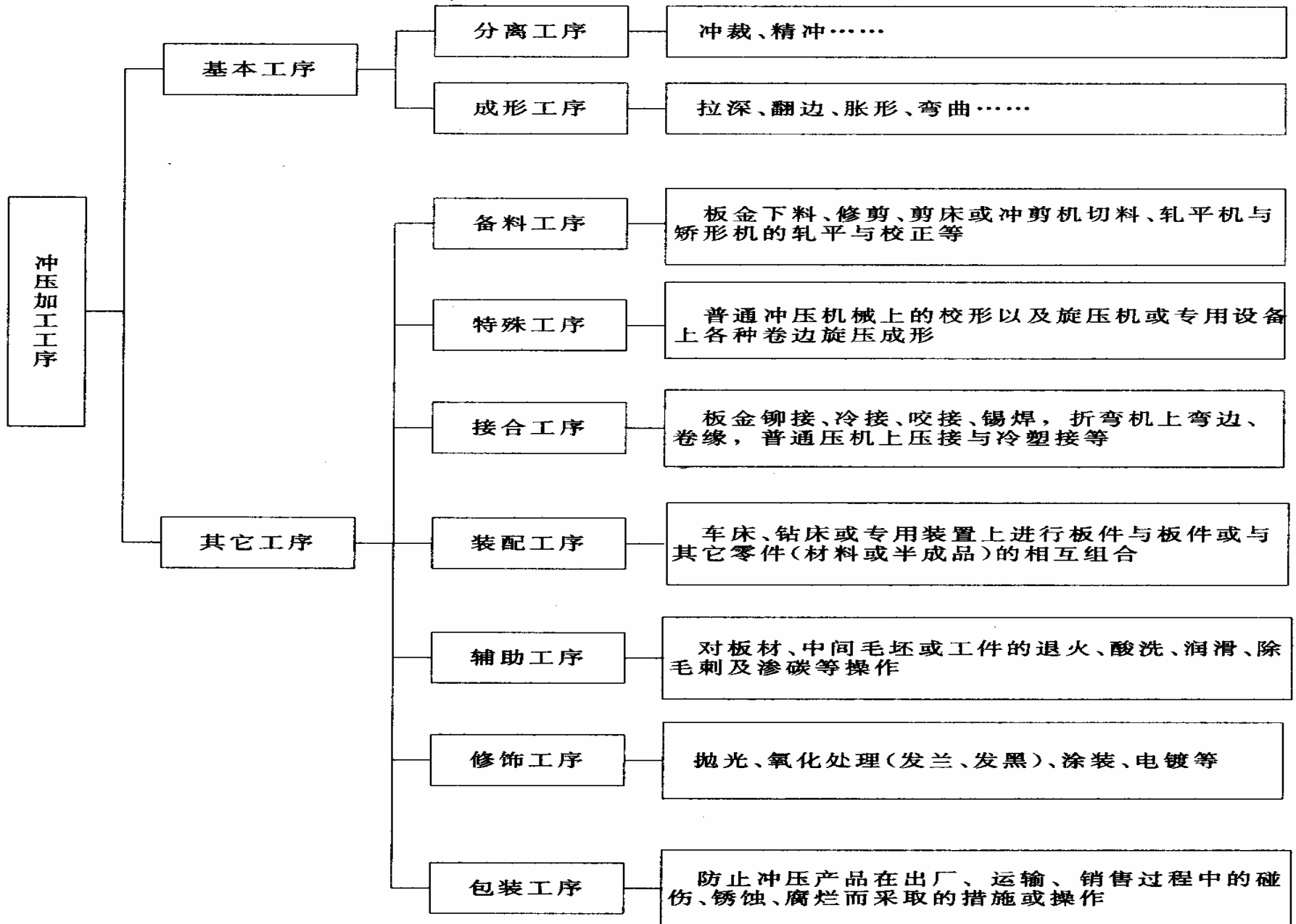
1、冲压工序的组成与分类

把全部冲压加工工序分成两大类：基本工序和其它工序。

基本工序是指借助于典型的冲压设备及冲压模具而实现板料冲压加工的工序。

其它工序是指除了基本工序外，成为冲压产品所涉及到的那些加工工序。

表 8-3 冲压加工工序的分类



2、冲压基本工序的构成

冲压加工中的基本工序包括分离工序和成形工序两大类。

在分离工序中，按照分离变形机理的不同，又可分为四类，即：

1) 冲裁

2) 精密冲裁

3) 整修

4) 半精密冲裁

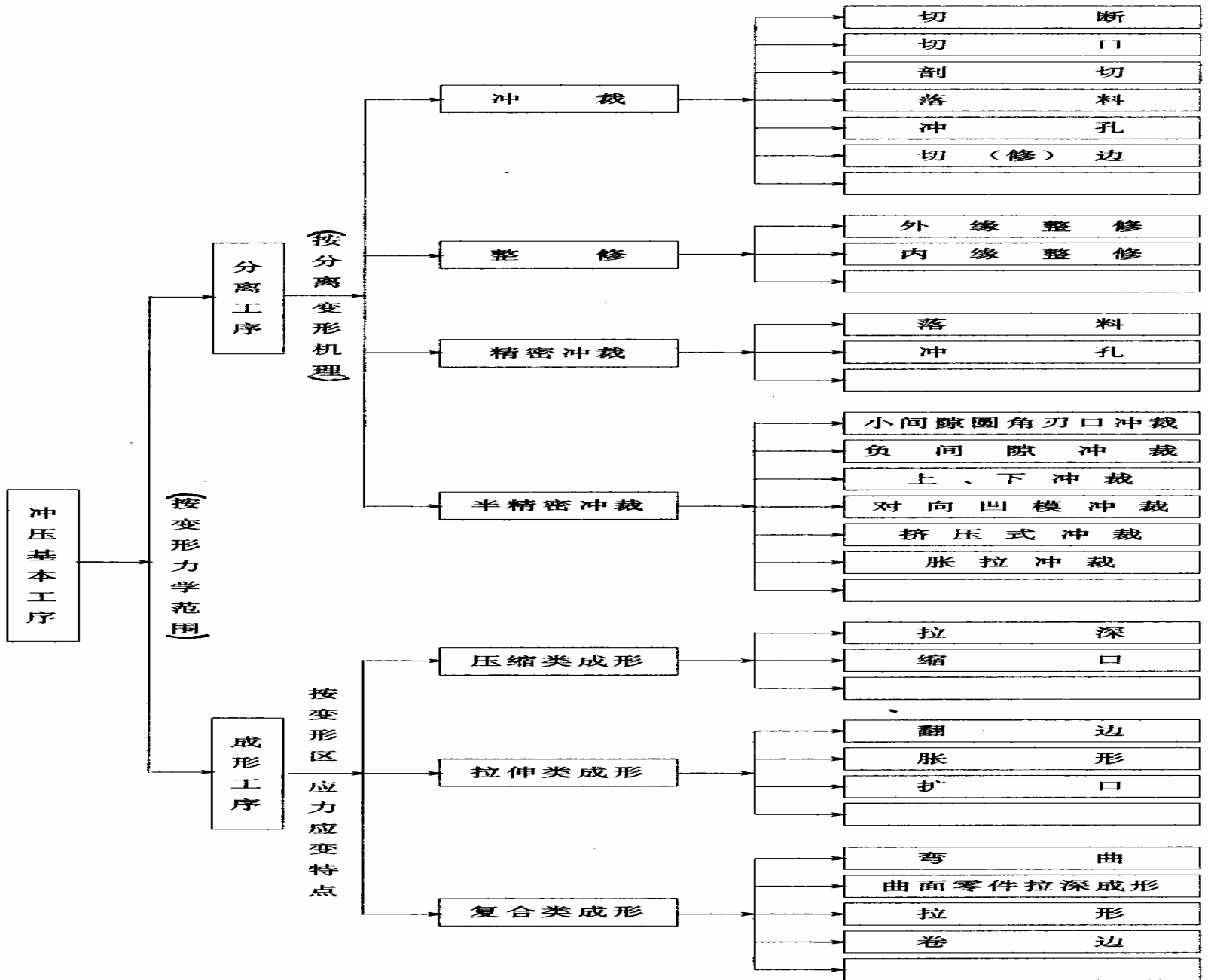
成形工序按照变形区的应力特点和变形特点可以分为三类：

1) 压缩类成形工序

2) 拉伸类成形工序

3) 复合类成形工序

表 8-4 冲压基本工序的构成



第三章 塑性加工中的失稳

◆在塑性加工中，当材料所受载荷达到某一临界值后，即使载荷下降，塑性变形还会继续，这种现象称为塑性失稳。

◆塑性失稳问题对塑性成形具有重要影响。

失稳有压缩失稳和拉伸失稳

◆压缩失稳的主要影响因素是刚度参数，它在塑性成形中主要表现为坯料的弯曲和起皱，在弹性或塑性变形范围内都可能产生。

◆拉伸失稳的主要影响因素是强度参数，它主要表现为明显的非均匀伸长变形，在坯料上产生局部变薄或变细现象，其进一步发展是坯料的拉断或破裂，它只产生于塑性变形范围内。

◆压缩失稳和拉伸失稳是具有不同本质的两种现象。

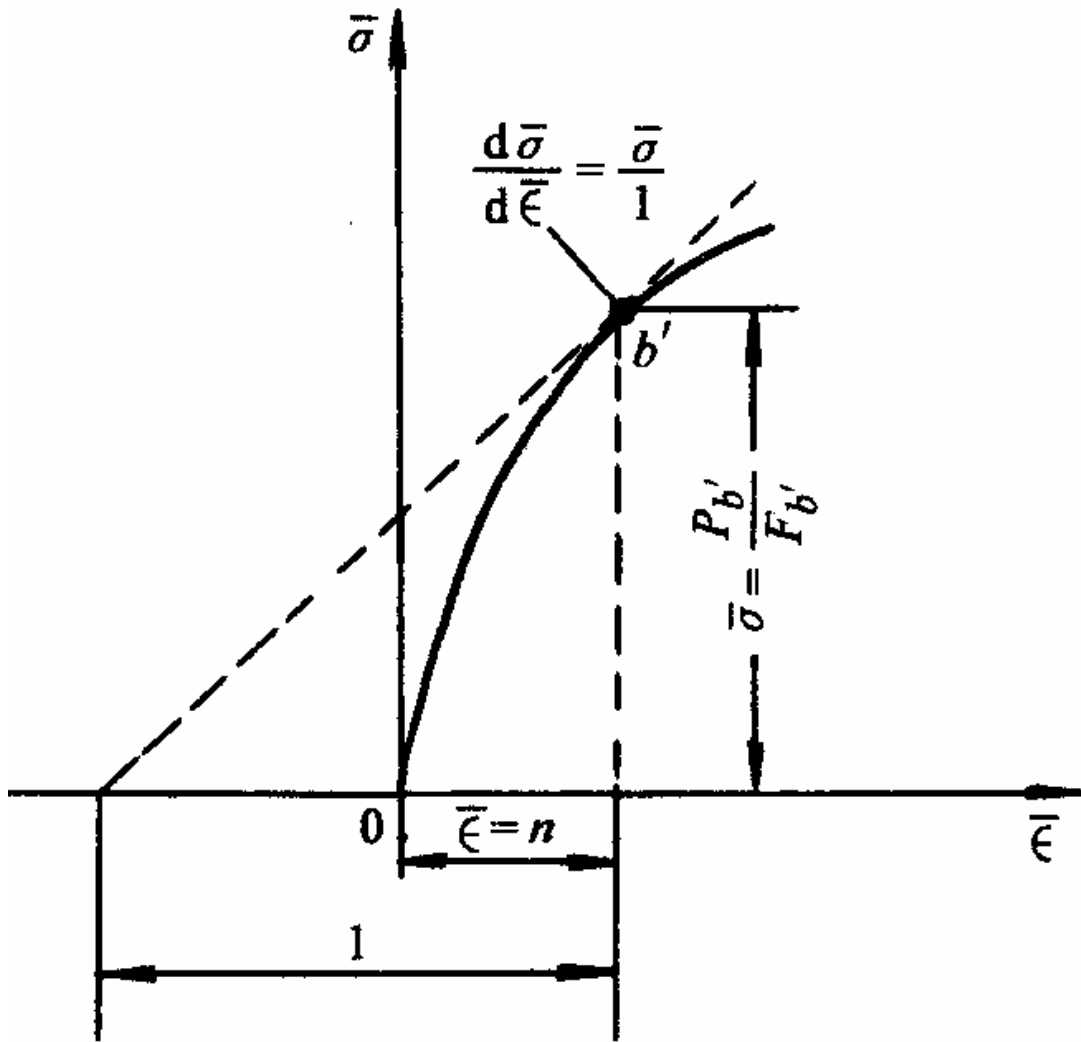
第一节 拉伸失稳

一. 单向拉伸时的塑性失稳

单向拉伸时，出现缩颈后，外载下降，塑性变形还继续进行，显然，极限强度（抗拉强度）。所对应的点就是塑性失稳点。现通过单向拉伸时的真实应力—应变曲线来研究塑性失稳时的特点。

在均匀塑性变形阶段，有

$$P = \sigma F$$



单向拉伸时的塑性失稳点

◆对上式微分，可得

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} + \frac{dF}{F}$$

式中 $\frac{dP}{P}$ ——试样承载能力变化率；

$\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}}$ ——因加工硬化引起的流动应力的增加率；

$\frac{dF}{F}$ ——断面减缩率。

当变形继续发展到某一时刻，必然会使变形抗力的增加率等于断面减缩率，即

$$\left| \frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} \right| = \left| \frac{dF}{F} \right|$$

◆此时，试样在某一部位开始出现缩颈，载荷达到极值（临界值），亦即 $P=P_{\max}$ 于是便有

$$dP=0$$

$$\frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = -\frac{dF}{F} = d\bar{\epsilon}$$

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \bar{\sigma}$$

所以，在失稳点有： $\left(\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}}\right)_{b'} = \bar{\sigma}_{b'}$

上式为拉伸塑性失稳条件，它表示在曲线上过塑性失稳点所作切线的斜率为 $\bar{\sigma}$ ，即该切线与横坐标的交点到塑性失稳点跟坐标间的距离为1。

$$\frac{d\sigma}{d\bar{\epsilon}} = nB\bar{\epsilon}^{n-1} = \bar{\sigma} = B\bar{\epsilon}^n$$

$$\bar{\epsilon}_b = n$$

- ◆加工硬化指数n就等于塑性失稳点的真应变。
- ◆它是表明材料加工硬化特性的一个重要参数。
- ◆n值越大，说明材料的应变强化能力愈强，均匀变形阶段愈长。
- ◆对于金属材料， n的范围是 $0 < n < 1$ 。

$$P_{\max} = \sigma_b F_0 = \bar{\sigma}_{b'} F_{b'} = (Bn^n) F_{b'}$$

$$\sigma_b = (Bn^n) \frac{F_{b'}}{F_0}$$

$$\epsilon = \ln \frac{F_0}{F}$$

$$\frac{F_{b'}}{F_0} = e^{-\bar{\epsilon}_{b'}} = e^{-n}$$

9), 得

$$\sigma_b = B \left(\frac{n}{e} \right)^n$$

◆若已知强度系数B和加工硬化指数n, 就可求出塑性失稳时的抗拉强度。

◆当 $\epsilon < n$ 时, 而且标距内的试样横截面积相等, 变形将是均匀的。

◆当 $\epsilon > n$ 时, 出现缩颈, 由于缩颈处的加工硬化不能补偿其横截面积的减小, 使变形集中在缩颈处, 而其他截面的变形几乎不再增长。

◆因此, $\epsilon = n$ 处就是单向拉伸时的失稳点。

2、双向等拉时的塑性失稳

薄板双向等拉： $P_1=P_2$ ，垂直于板面方向的载荷
 $P_3=0$ 。

发生塑性失稳时， $dP=0$

对于所讨论的情况，有： $P_1=\sigma_1 F_1$

式中： F_1 — P_1 的作用面积；

σ_1 — F_1 面上的正应力。

对上式两边进行微分

$$dP_1 = \sigma_1 dF_1 + F_1 d\sigma_1 = 0$$

从而可得

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} = -\frac{dF_1}{F_1} = d\epsilon_1$$

对于 $\sigma_1 = \sigma_2$ 和 $\sigma_3 = 0$ 的应力状态，等效应力

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$$

根据 $\epsilon_1 = \epsilon_2$ 和体积不变条件可得

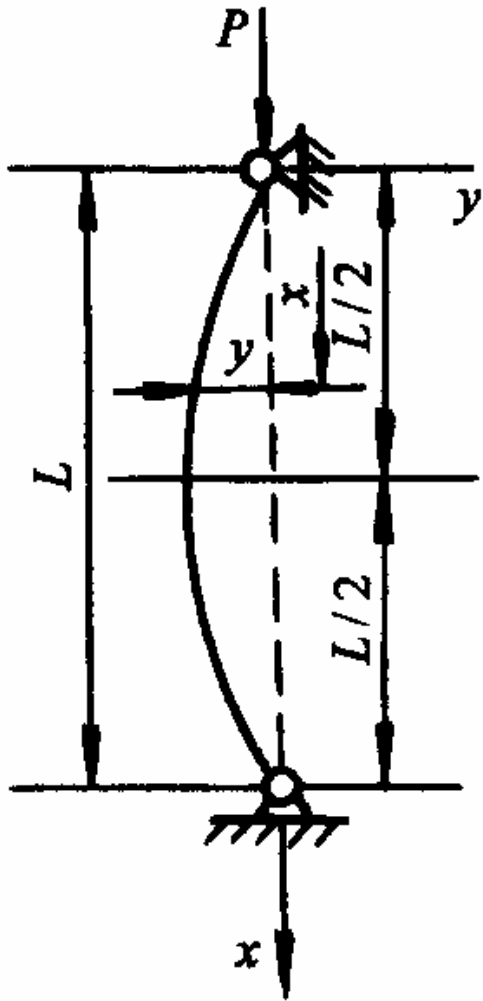
$$\bar{\epsilon} = 2\epsilon_1 = 2\epsilon_2 = -\epsilon_3$$

根据等效应变计算公式，可得 $\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \frac{\bar{\sigma}}{2}$

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = nB \bar{\epsilon}^{n-1} = \frac{\bar{\sigma}}{2} = 0.5 B \bar{\epsilon}^n$$

$$\bar{\epsilon} = 2n$$

上式表明双向等拉时，失稳时的应变为单向拉伸时的两倍。



压杆的
受力和变形

第二节 压缩失稳

一、压杆（板条）失稳

压缩失稳在弹性和塑性变形范围内都可发生。在弹性状态时，当压力 P 达到某临界力 P_k 时，压杆（板料）就产生失稳而弯曲，使压杆以曲线形状保持平衡。这时杆内产生一内力矩与外力矩平衡，即
 内力矩=外力矩。

平衡状态下的微分方程为：

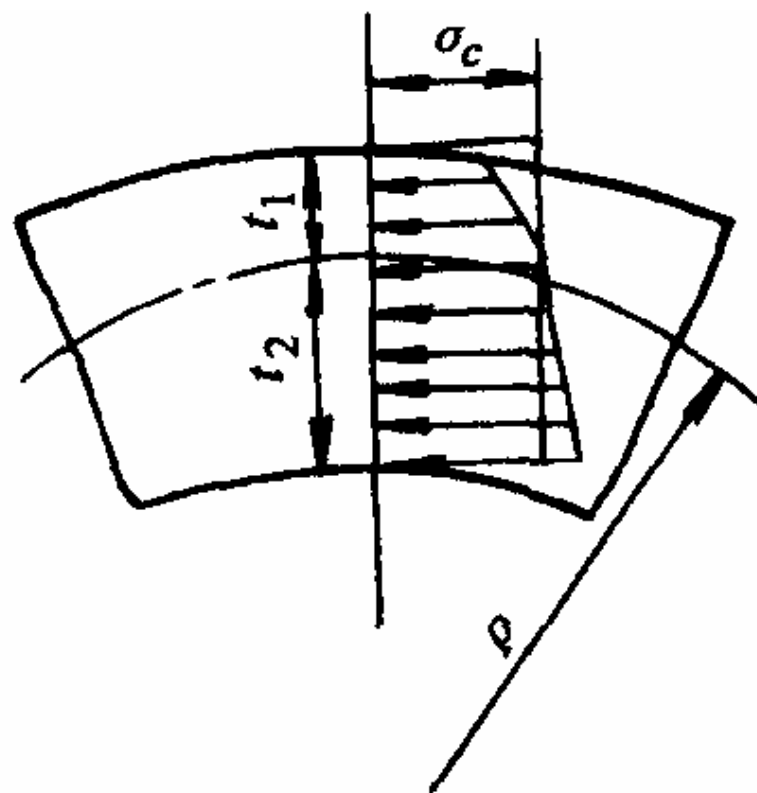
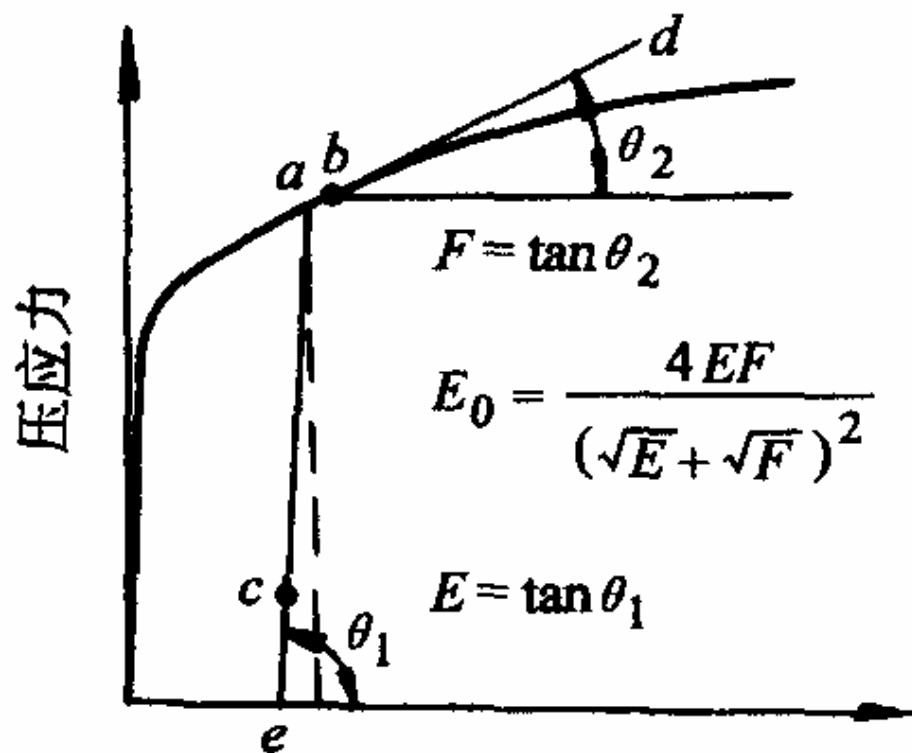
$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -py$$

式中 E ——材料的弹性模量；

I ——压杆的惯性矩，对于宽为 b 厚为 t 的平板， $I = \frac{bt^3}{12}$ 。

将上式积分并整理后得到如下的欧拉压杆失稳准则：

$$P_K = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$



压应力

a)

b)

临界压力下坯料截面内的应力分布情况

材料受拉的外侧边沿上的应力增量为 $\Delta \sigma_1$ ，受压的内侧边沿上的应力增量为 $\Delta \sigma_2$ ，可分别表示为

$$\Delta \sigma_1 = E \frac{t_1}{\rho}$$

$$\Delta \sigma_2 = F \frac{t_2}{\rho}$$

根据塑性失稳条件，轴向压力的增量 $dP=0$ （即在临界力 P_K 作用下压杆以曲线形状保持平衡），可以得到内力矩

$$M = \frac{I}{\rho} \frac{4EF}{(\sqrt{E} + \sqrt{F})^2}$$

将 $E_0 = \frac{4EF}{(\sqrt{E} + \sqrt{F})^2}$ ， $\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2}$ 代入 得

$$M = E_0 I \frac{d^2 y}{dx^2}$$

$$M = E_0 I \frac{d^2 y}{dx^2}$$

根据内力矩与外力矩相等的平衡条件，可得临界状态下的微分方程式：

$$E_0 I \frac{d^2 y}{dx^2} = - P_K y$$

积分式

并整理后得：

$$P_K = \frac{\pi^2 E_0 I}{L^2}$$

研究表明，塑性失稳时实际的临界压力比上式得到的还要低，失稳在压力达到 P_K 前就发生了。为了安全和简便，多采用下式求临界

$$P_K = \frac{\pi^2 FI}{L^2}$$

在研究压缩失稳时硬化模量 F 又称切线模量。

对于直径为 d 的圆截面杆, $I = \frac{\pi d^4}{32}$, 代入 得:

临界压力
$$P_K = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\pi^2 F}{8} \left(\frac{d}{L} \right)^2$$

临界压应力
$$\sigma_K = \frac{\pi^2 F}{8} \left(\frac{d}{L} \right)^2$$

对于宽为 b , 厚为 t 的矩形板条, $I = \frac{bt^3}{12}$, 代入 得:

临界压力
$$P_K = bt \frac{\pi^2 F}{12} \left(\frac{t}{L} \right)^2$$

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 F}{12} \left(\frac{t}{L} \right)^2$$

由得到的塑性压缩失稳的临界压力和临界压应力的公式可以看出:

- ◆材料的抗压缩失稳的能力除与材料的刚度性能参数 E_0 、 F 有关。
- ◆还与受载的压杆几何参数有关。相对厚度越小, 即杆件越细、板料越薄时越发生失稳, 杆件的压缩失稳往往表现为失稳弯曲, 而板料的压缩失稳往往表现为失稳起皱。

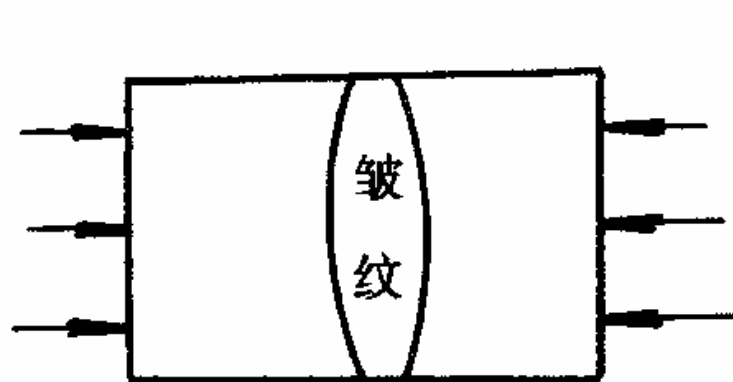
二、板料失稳起皱

对于板料成形，失稳起皱除影响成形件的质量和成形极限外，也还直接影响一些成形工序能否顺利进行。由于板厚尺寸与其他两个方向尺寸相比很小，因此厚度方向是不稳定的。当外力在板料平面内引起的压应力使板厚方向达到失稳极限时便产生失稳起皱，皱纹的走向与压应力垂直。

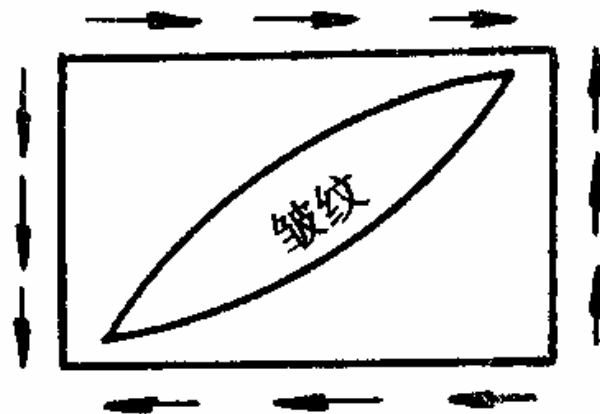
引起压应力的外力大致可分为

- ◆ 压缩力
- ◆ 剪切力
- ◆ 不均匀拉伸力
- ◆ 板平面内弯曲力四种。

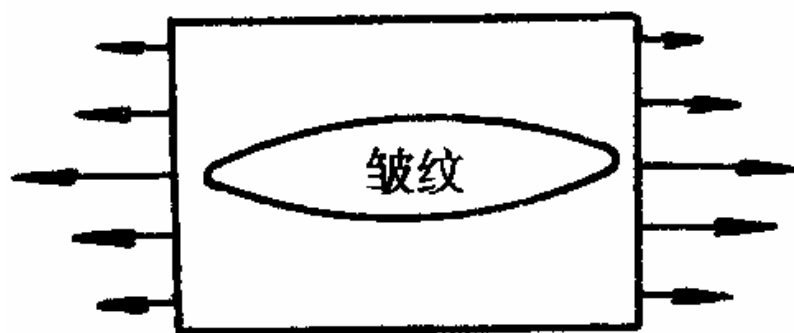
因此，失稳起皱也相应地有四种。



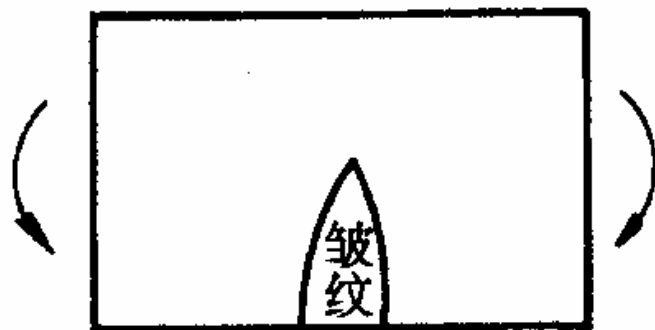
a)



b)



c)



d)

平板失稳起皱的分类

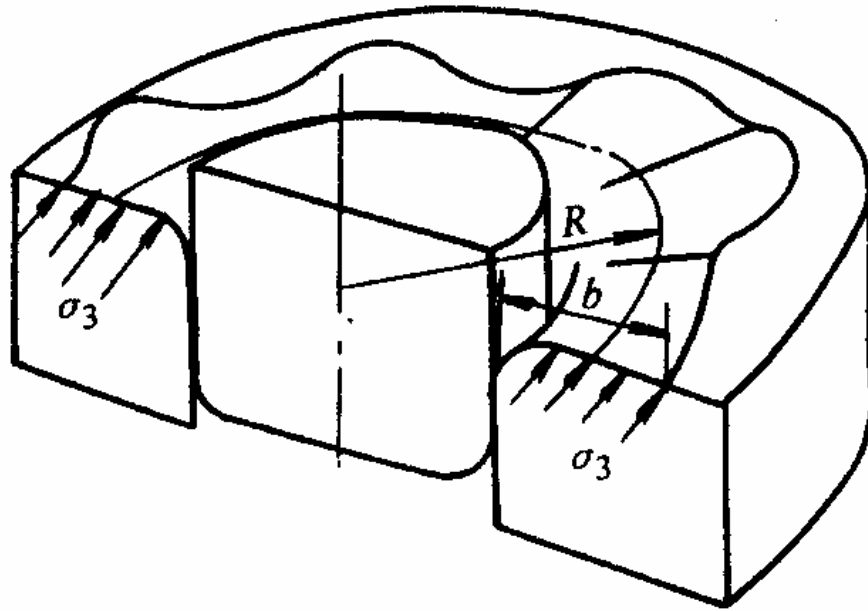
a) 压缩力 b) 剪切力 c) 拉力不均 d) 板内弯曲力

(I) 压缩力引起的失稳起皱

◆圆筒形零件拉深时法兰变形区的起皱、曲面零件成形时悬空部分的起皱，都属于这种类型。

◆当切向压应力达到失稳临界值时，坯料将产生失稳起皱。

◆塑性失稳的临界应力可以用力平衡法或能量法求得。为了简化计算，多用能量法。



法兰变形区起皱

不用压边圈的拉深，拉深过程中法兰变形区失稳起皱时能量的变化主要有三部分。

1) 皱纹弯曲所需的弯曲功

皱纹形成时，假定皱纹形状为正弦曲线，半波（一个皱纹）弯曲所需的弯曲功为：

$$u_w = \frac{\pi E_0 I \delta^2 N^3}{4R^3}$$

2) 虚拟压边力所消耗的功

法兰内边缘在凸模和凹模圆角间夹持得很紧，相当于内周边固持的环形板，起着阻止失稳起皱的作用，与有压边力的作用相似，可称为虚拟压边力。

失稳起皱时形成一个皱纹，虚拟压边力所消耗的功为：

$$u_x = \frac{\pi R b K \delta^2}{4N}$$

3) 变形区失稳起皱后，周长缩短，切向压应力 σ_3 由于周长缩短而放出的能量。形成一个皱纹，切向压应力 σ_3 放出的能量为：

$$u_f = \frac{\pi \delta^2 N}{4R} \sigma_3 b t$$

式中 N —皱纹数； R —法兰变形区平均半径；

b —法兰变形区宽度； δ —起皱后的皱纹高度；

K —常数。

法兰变形区失稳起皱的临界状态应该是切向压应力所释放的能量等于起皱所需的能量。

$$u_f = u_w + u_x$$

将前边各能量值代入整理后得

$$\sigma_3 b t = \frac{E_0 I N^2}{R^2} + b K \frac{R^2}{N^2}$$

对皱纹数 N 进行微分，并令 $\frac{\partial \sigma_3}{\partial N} = 0$ ，便得到临界状态下的皱纹数

$$N = 1.65 \frac{R}{b} \sqrt{\frac{E}{E_0}}$$

将 N 值代入

得起皱时临界压应力 σ_{3K}

$$\sigma_{3K} = 0.46 E_0 \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

因此可得到不需压边的极限条件

$$\sigma_3 \leq 0.46 E_0 \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

◆由上式可以看出，切向压应力的临界值与材料的折减弹性模量 E_0 、相对厚度 t/b 有关。

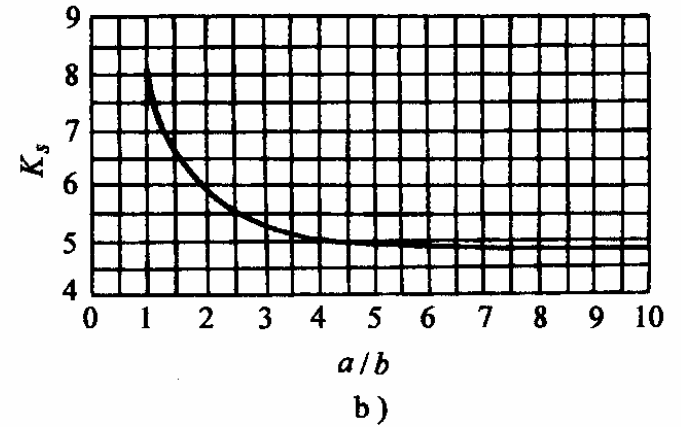
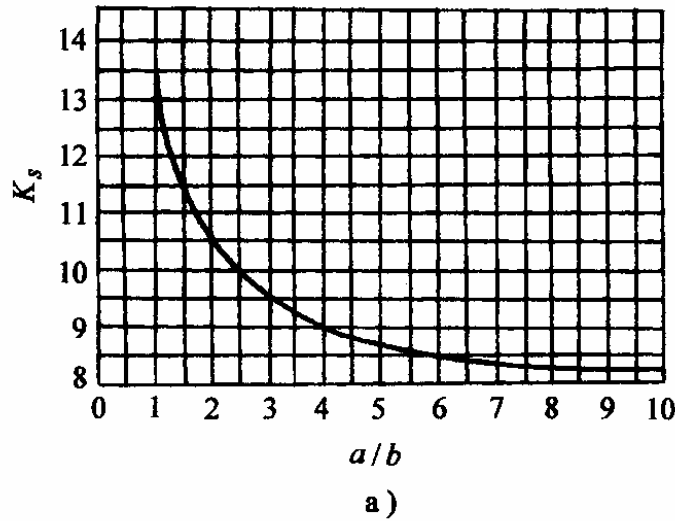
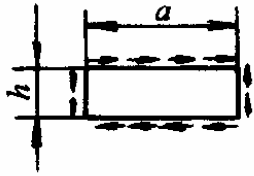
◆材料的弹性模量 E 、硬化模量 F 越大，相对厚度越大，切向压应力越小，不用压边的可能性就越大。

(2) 剪切力引起的失稳起皱

◆剪应力引起的失稳起皱，其实质仍然是压应力的作用。

◆例如板坯在纯切状态下，在与切应力成 45° 的两个剖面上分别作用着与切应力等值的拉应力和压应力。只要有压应力存在就有导致失稳的可能。失稳时切应力的临界值可写成如下形式

$$\tau_K = K_s E \left(\frac{t}{b} \right)^2$$



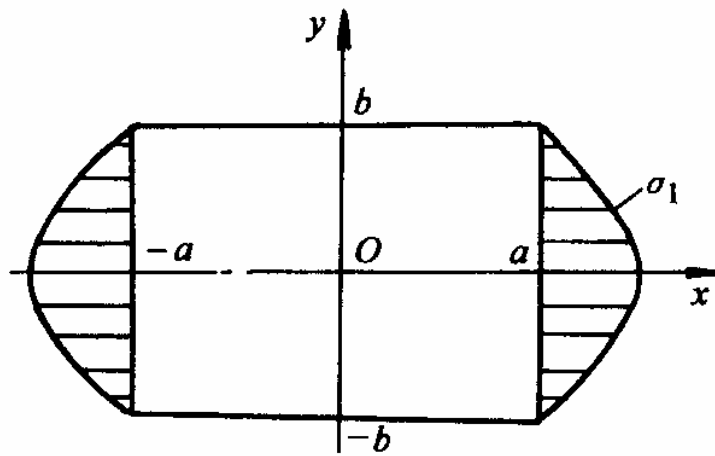
K_s 值随边界条件变化的曲线

a) 四边固持 b) 四边简支

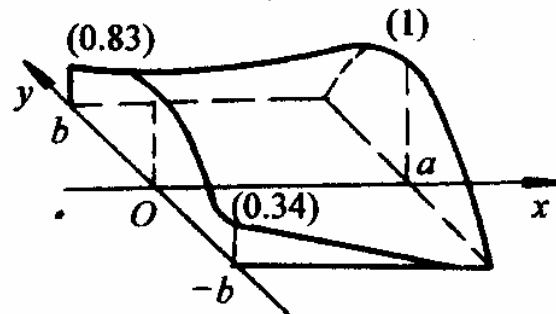
(3) 不均匀拉伸力引起的失稳起皱

◆当平板受不均匀拉应力作用时，在板坯内产生不均匀变形，并可能在与拉应力垂直的方向上产生附加压应力。该压应力是产生皱纹的力学原因。

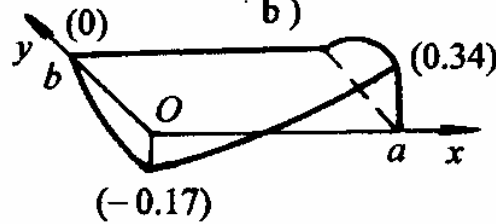
◆拉应力的不均匀程度越大，越易产生失稳起皱。皱纹产生在拉力最大的部位，其走向与拉伸方向相同。平板沿宽度方向上的不均匀拉应力。



a)



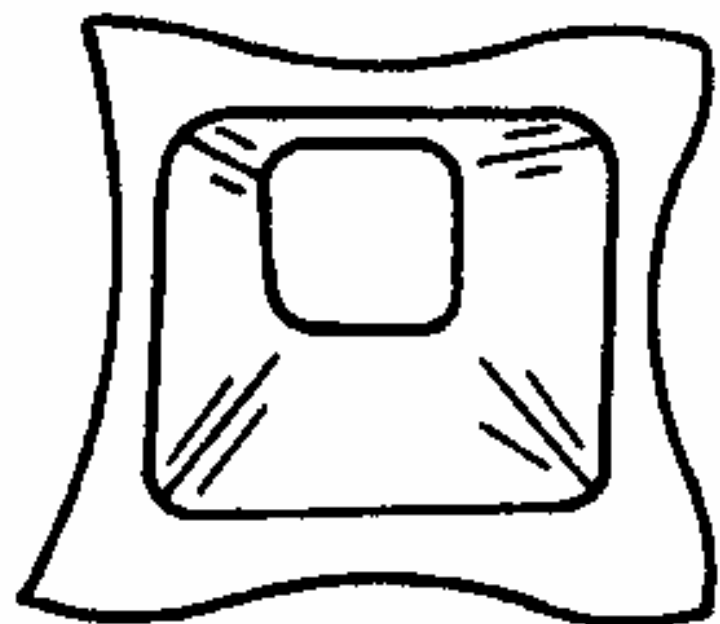
b)



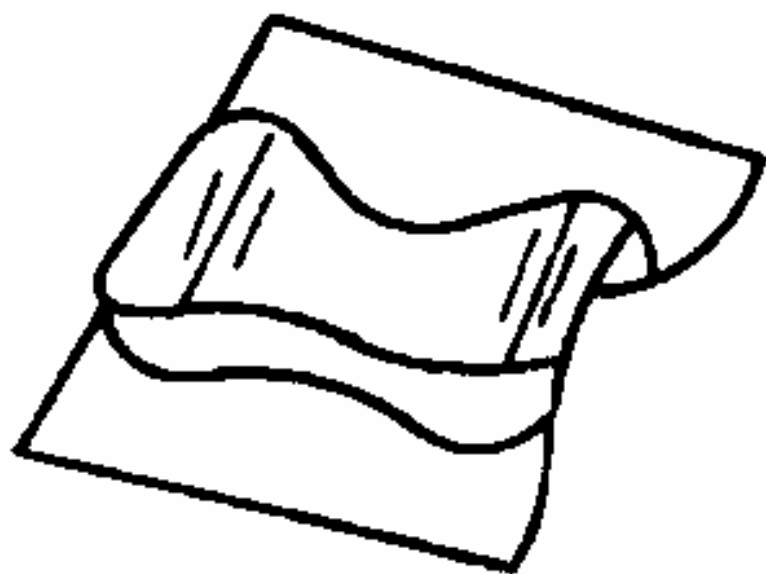
c)

平板在不均匀拉力
作用下的应力分布

a) σ_1 的分布 b) σ_x/σ_1 的分布 c) σ_y/σ_1 的分布



a)



b)

拉力不均匀形成的皱纹

a) 棱柱台 b) 鞍形件

第四章 冲压加工中的硬化

第一节 概述

◆ 板料冲压加工是属于冷塑性变形。冷变形与热变形的根本不同在于冷变形有硬化效应。

这种硬化效应表现为：

◆ 决定金属变形抗力的机械性能 σ_s 、 σ_b 、硬度等指标随着变形程度的增加而增加；

◆ 同时，塑性指标 δ 、 ψ 等则随着变形程度的增加而下降。金属的这种效应称为加工硬化，其数学表达式为 $d\sigma/d\varepsilon > 0$ 。

◆ 加工硬化对于不同的冲压工艺的影响和作用是不相同的，有的有利，有的有害。

◆ 在进行冲压工艺（过程）设计，必须研究和掌握材料的硬化与硬化规律带来的影响。

第二节 硬化曲线及数学表达式

在冷变形中材料的变形抗力随变形程度变化的关系可用硬化曲线来表示。

- ◆不同的材料有不同的硬化曲线，但变化趋势大致相同，
- ◆其硬化梯度愈来愈小，即硬化强度 $d\sigma/d\varepsilon$ （或称硬化模数）逐渐降低。

材料的硬化曲线可用不同的实验方法求得

- ◆用拉伸实验求得
- ◆用墩粗实验也能得到硬化曲线
- ◆还可以用液压胀形实验来求得硬化

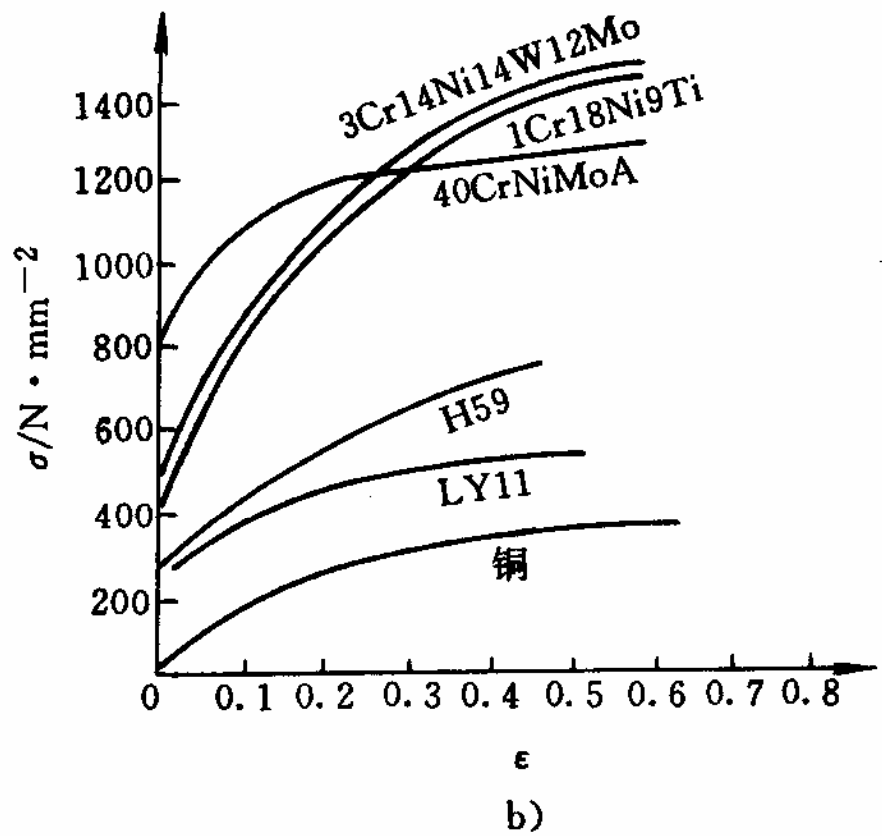
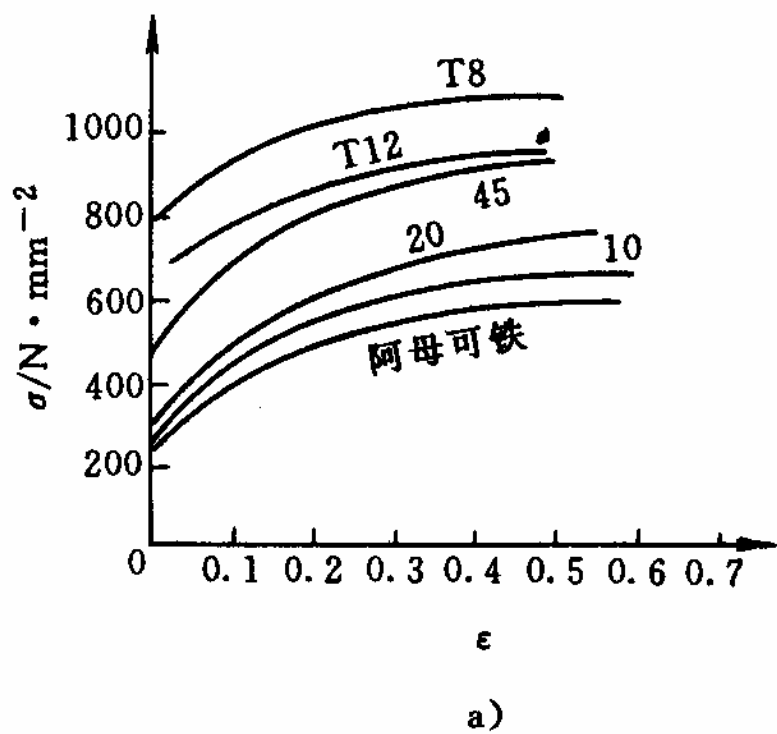


图 8-8 各种材料的硬化曲线举例

$$\epsilon = \frac{H_0 - H}{H_0}$$

为了实用上的需要，必须把硬化曲线用数学式表示出来。当然，要用一个精确的数学式表示出来，目前尚不可能。常用的几种硬化曲线的数学式都是近似地表达，由于材料的种类和性能及实验等的不同，其误差大小也不尽相同。

目前常用数学表达式有两种：

1) 斜截式——用直线来代替硬化曲线，

即
$$\sigma = \sigma_0 + F \varepsilon$$

式中 σ_0 ——截距， $\sigma_0 \approx \sigma_s$

F ——斜率，表示材料的硬化强度的大小，其值为细颈点的应力，即 $F = \sigma_j$ 。

当应变。用拉伸试件的延伸率 δ 来表示时，具有如下形式

$$\sigma = \sigma_b (1 + \delta)$$

当用拉伸试件的断面收缩率 ψ 来表示时，具有下面的形式

$$\sigma = \sigma_0 + F \psi$$

$$\sigma_0 = \sigma_b \frac{1 - 2\psi_u}{(1 - \psi_u)^2}$$

$$F = \sigma_b \frac{1}{(1 - \psi_u)^2}$$

其中 ψ 为拉伸试件开始产生局部变形时的断面收缩率。

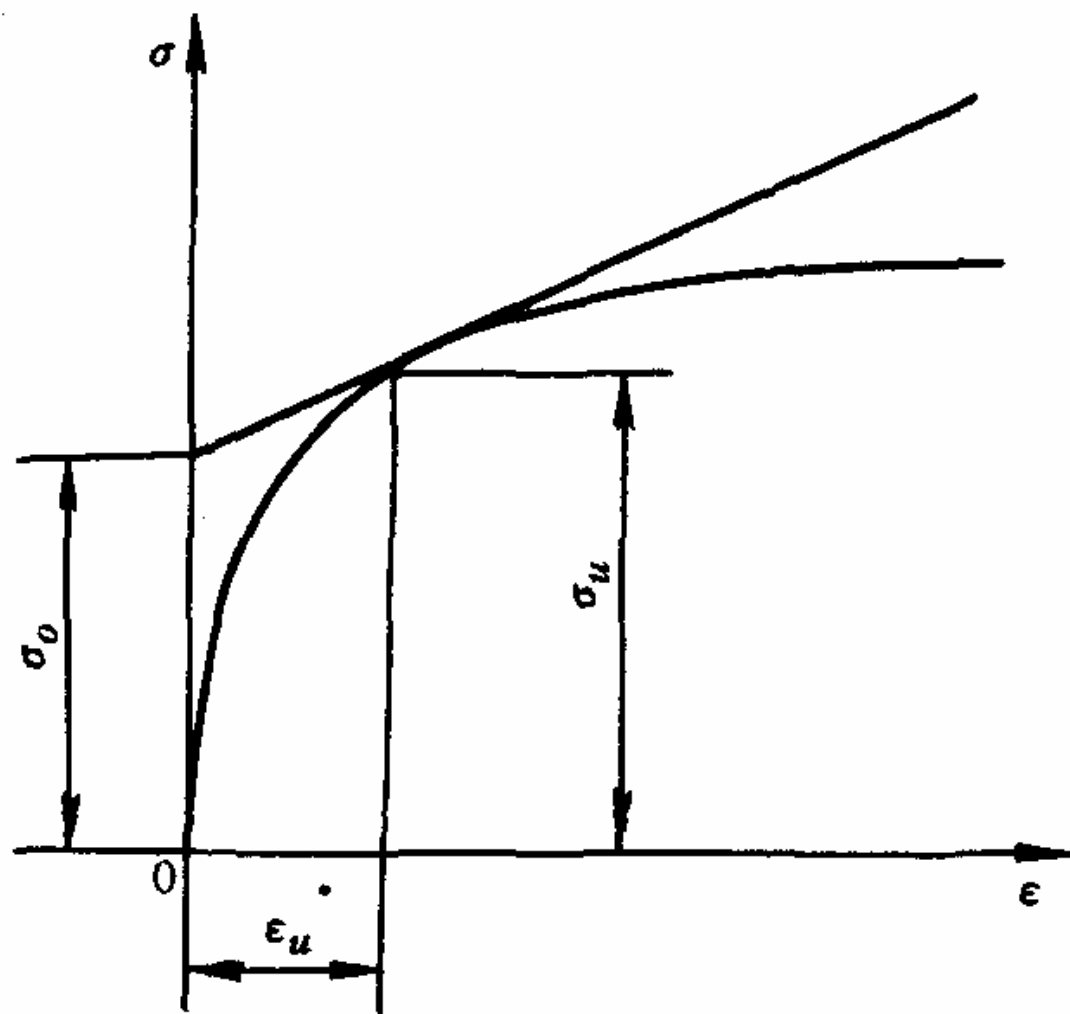
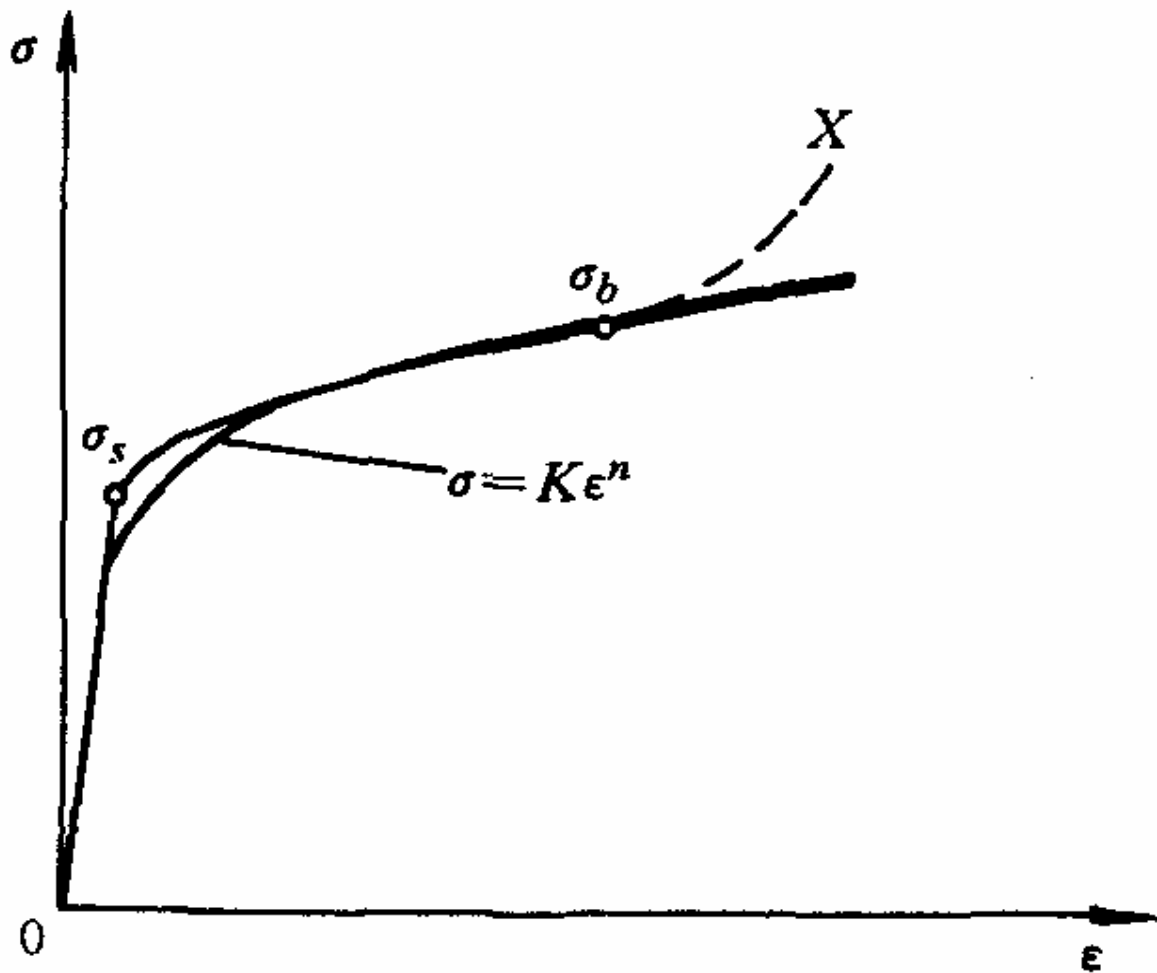


图 8-9 硬化直线

2) 幂次式——用幂函数曲线代替硬化曲线



$$\sigma = K \varepsilon^n$$

式中 K——材料常数；

n——加工硬化指数。

K值和n值均决定于材料的种类和性能。

表 8-5 各种材料的 K 与 n 值

材 料	$K/N \cdot \text{mm}^{-2}$	n	材 料	$K/N \cdot \text{mm}^{-2}$	n
软钢	710~750	0.19~0.22	银	470	0.31
黄铜 (60/40)	990	0.46	铜	420~460	0.27~0.34
黄铜 (65/35)	760~820	0.39~0.44	硬铝	320~380	0.12~0.13
磷青铜	1100	0.22	铝	160~210	0.25~0.27
磷青铜 (低温退火)	890	0.52			

由于真实应力、应变关系的幂函数曲线与材料的实际硬化曲线比较接近常用它来代替硬化曲线。

第三节 加工硬化指数

◆加工硬化指数 n 是表明材料冷变形硬化性能的重要参数，也叫 n 值。

◆ n 值对板材在各种冲压成形中的冲压性能以及冲压件的质量都有较重要的影响。

n 值较大时：

◆冷变形过程中材料的变形抗力随变形的进展而增长也较大

◆这表明材料的塑性变形稳定性较好

◆不易出现局部的集中变形和破坏

◆有利于增大拉伸类成形的成形极限

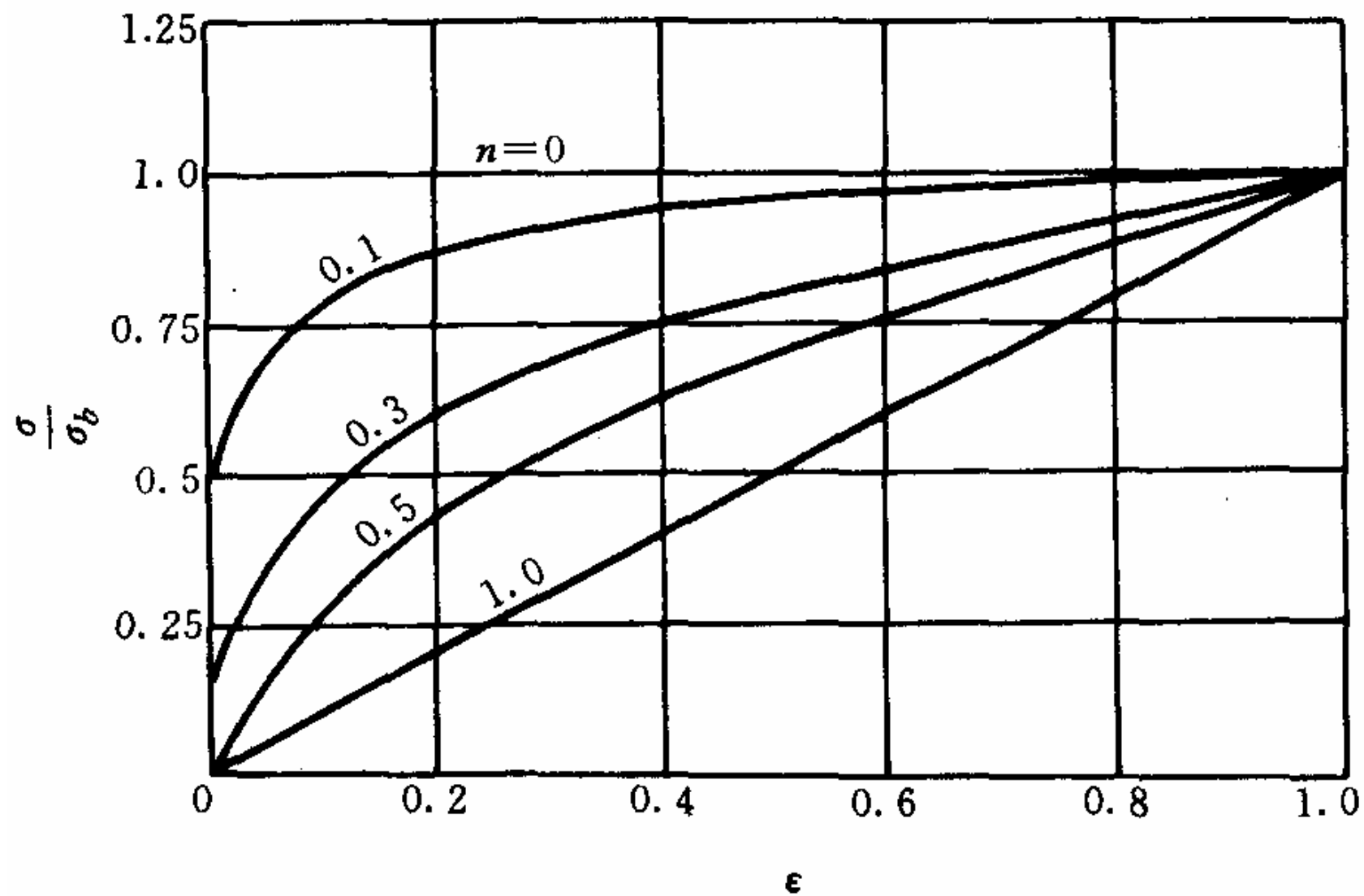


图 8-11 n 值不同的硬化曲线

(1) 求证: $n = \epsilon_j$; $K = \sigma_j / \epsilon_j^n$ (角标 j 代表拉伸中细颈开始)

证明: 因为 $\sigma = K\epsilon^n$ 设细颈点的坐标为 (σ_j, ϵ_j) , 考虑 $0 - \epsilon_j$ 阶段

$$\text{所以 } \sigma_j = K\epsilon_j^n \quad \text{及} \quad \frac{d\sigma_j}{d\epsilon_j} = Kn\epsilon_j^{n-1} = \sigma_j \frac{n}{\epsilon_j}$$

因为 实际拉力 P 等于实际应力 σ 乘上试件的实际剖面面积 F 即 $P = \sigma F$

$$\text{所以 } dP = \sigma dF + F d\sigma$$

$$\text{根据体积不变条件 } F_0 L_0 = FL, \text{ 有 } F = \frac{F_0 L_0}{L} \quad dF = -\frac{F_0 L_0}{L^2} dL$$

又因为 细颈开始时 P 达 P_{\max} , 有 $dP = 0$, 且此时的 σ 为 σ_j , $d\sigma$ 为 $d\sigma_j$, L 为 L_j , dL 为 dL_j

$$\text{所以 } dP = \sigma dF + F d\sigma = -\sigma_j \frac{F_0 L_0}{L_j^2} dL_j + \frac{F_0 L_0}{L_j} d\sigma_j = 0$$

$$\text{即 } \frac{\sigma_j F_0 L_0}{L_j^2} dL_j = \frac{F_0 L_0}{L_j} d\sigma_j$$

$$\frac{\sigma_j dL_j}{L_j} = d\sigma_j$$

又因为 $\frac{dL_j}{L_j} = d\epsilon_j$ 所以有 $\sigma_j \cdot d\epsilon_j = d\sigma_j$ 即 $\sigma_j = \frac{d\sigma_j}{d\epsilon_j}$ 于是, 有 $\sigma_j = \frac{d\sigma_j}{d\epsilon_j} = \sigma_j \frac{n}{\epsilon_j}$

因而有,

$$n = \epsilon_j$$

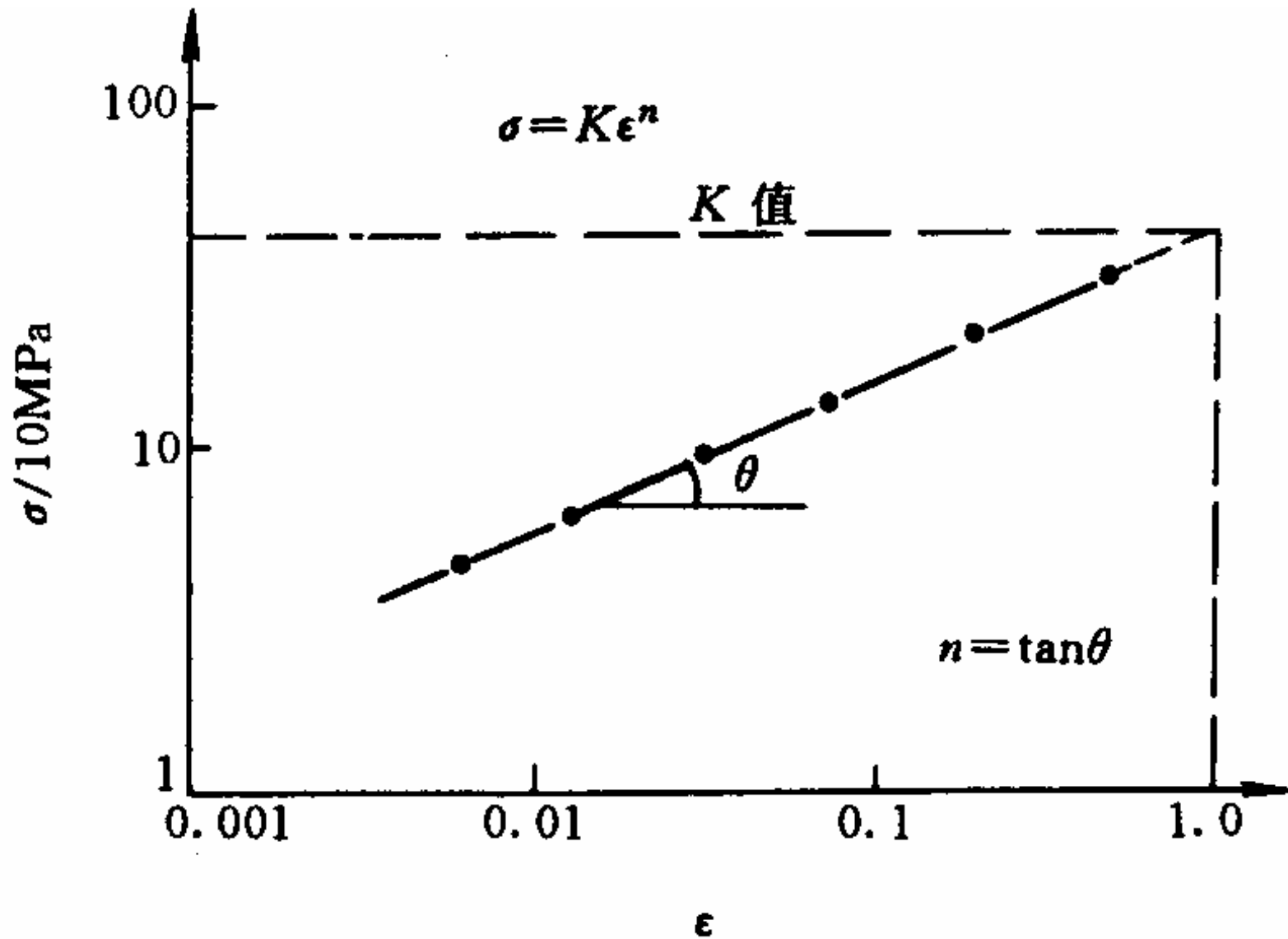
且因 $\sigma_j = K\epsilon_j^n$ 故有 $K = \frac{\sigma_j}{\epsilon_j^n}$

◆从力学意义来说，加工硬化指数代表拉伸中细颈点的对数应变， n 值等于拉伸试件中出现细颈时的对数应变值 ε_j 。

◆ n 值和 K 值是由材料所决定的，表示加工硬化程度的一个定量数值。为了求得 n 值，用对数来表示的话，有

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon$$

这个式子在两对数图上成为一直线，直线的斜率即为 n 值。

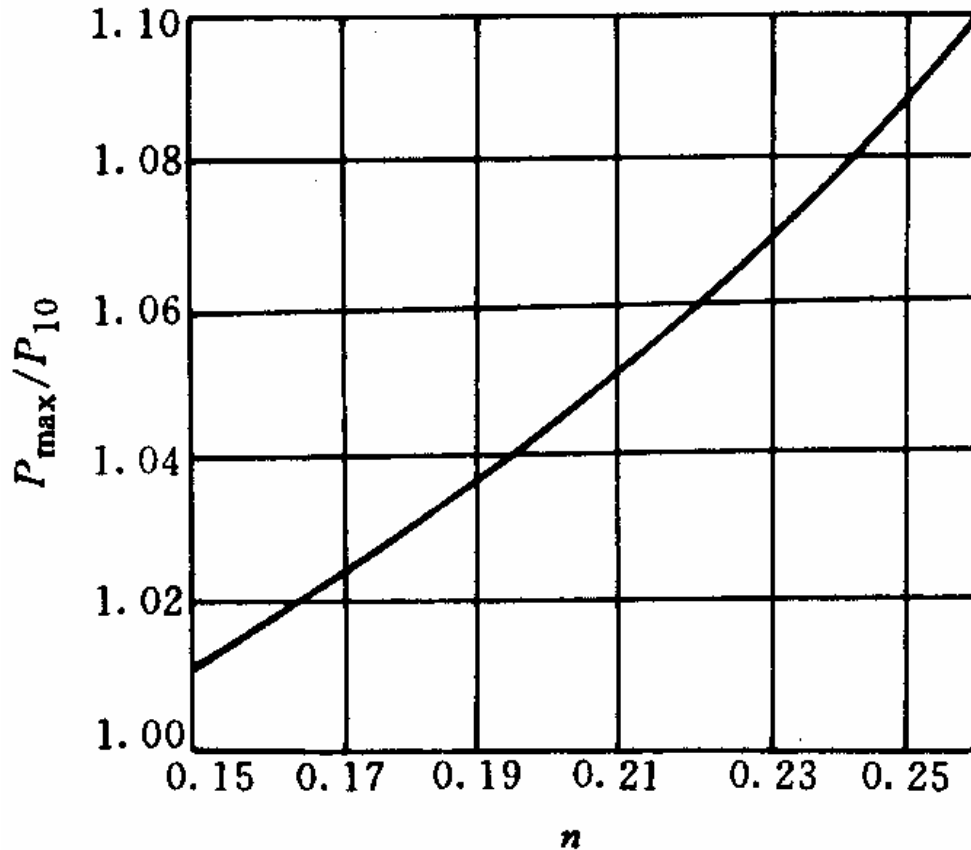


n值、K值的求法

(2) 硬化指数的实验测定

1) 载荷法

用拉伸实验测得材料的最大载荷 P_{\max} 及相对应应变 $\delta = 10\%$ 点的载荷 P_{10} ，再由其比值 P_{\max}/P_{10} 查图中的曲线，即可确定 n 值。所以，这种方法又叫查曲线法。

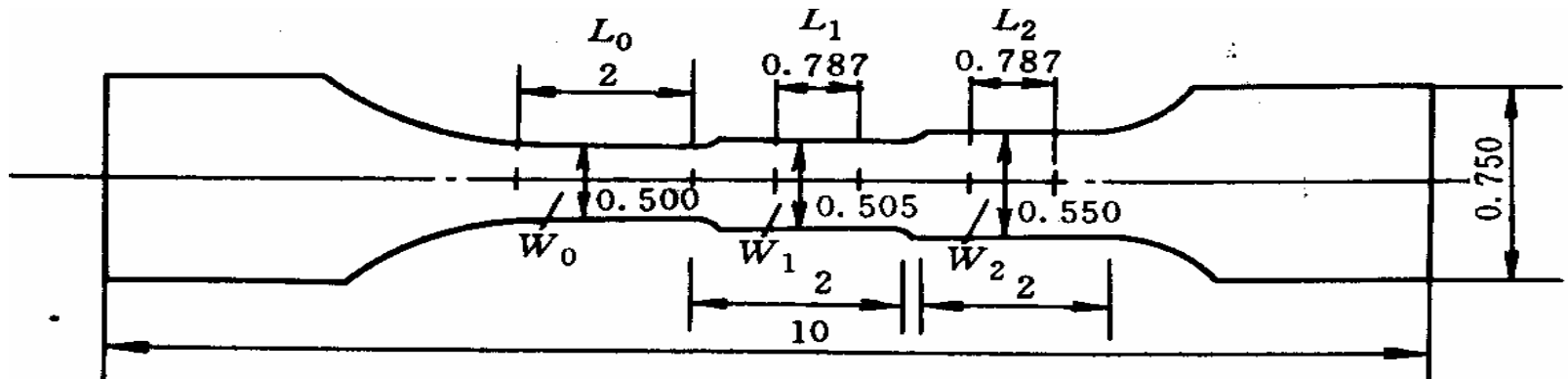


P_{\max}/P_{10} 与 n 值之间的关系

2) 阶梯形试件法

进行拉伸，待试件在 W_0 处破断时，测出 W_1 、 W_2 处的应变 ϵ_1 、 ϵ_2 再按下式进行计算得到 n 值

$$n = \frac{\ln(W_1/W_2) + (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\ln(\epsilon_2/\epsilon_1)}$$



阶梯形拉伸试件

3) 两点法

用普通拉伸试件进行拉伸实验，分别测取有关载荷和试件长度，然后按下面公式计算出n值：

$$n = \log \frac{P_2 L_2}{P_1 L_1} \bigg/ \log \frac{\ln(L_2/L_0)}{\ln(L_1/L_0)}$$

式中 P_2 、 L_2 —最大载荷及拉断后试件的长度；

P_1 、 L_1 —变形量为10%时的载荷值及试件的长度；

L_0 —原始长度（试件标距）。