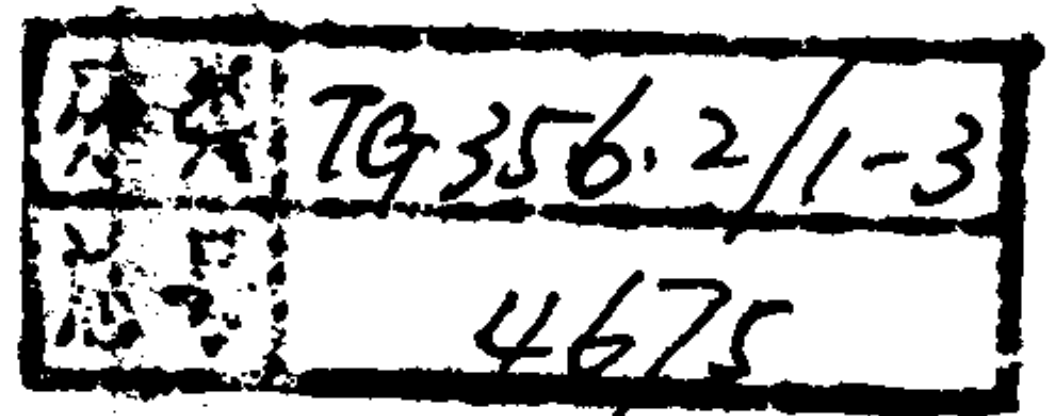


矫直理论与 参数计算

第2版

崔甫 著

机械工业出版社



矫直理论与参数计算

(第 2 版)

崔甫著



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

本书对矫直理论的系统化作了初步的尝试, 全面论述了弹塑性弯曲与矫直的基本原理, 对各种矫直方法进行了理论分析; 并在此基础上给出了各种矫直参数的计算方法, 联系实际阐明了许多工艺操作的理论根据。

本书共分五章, 包括矫直有关的弹塑性弯曲理论、各种矫直理论、参数计算方法、典型设备简述、新矫直方法的介绍等内容。并在许多章节中提出了一些新的见解。

本书可供压力加工和冶金机械方面广大科研、设计、工程技术人员及现场操作人员以及大专工科院校有关专业教师、研究生、学生备用和参考。

矫直理论与参数计算

(第 2 版)

崔 甫 著

*

责任编辑: 李骏带 版式设计: 胡金瑛

封面设计: 肖 晴 责任校对: 肖新民

责任印制: 路 琳

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 9 · 插页 1 · 字数 199 千字

1987年12月北京第1版

1994年4月北京第2版·1994年4月北京第2次印刷

印数 1301—2000 · 定价: 13.80元

*

ISBN 7-111-03896-7/TG·858

再 版 前 言

本书第一版很受读者欢迎，出版后很快脱销。应读者的要求，作者对原书进行了认真的修订。

修订后的内容在第一章和第四章有较大的变动，在弯曲应力应变的分析方法上作了改进；在拉弯矫直的变形分析上用作者近年研究得出的新结论纠正过去沿用的错误概念，并推导出一套新的计算方法。在第三章的力能参数计算公式中有几处严重的笔误也得到了修改。修订版还增加一些近年作者的主要科研成果，如负扭矩的成因、残余应力的耗能、塑性弯曲变形的耗能和双向旋转矫直法等新内容。删去一些小例题和一些不太必要的解说。既丰富了内容又保证了字数的精简。但照顾到字数的精简就难免对一些新增内容作不到展开性的论述，好在对这些新内容都注明了作者近几年发表论文的目录，很便于查阅。

本书第一版问世之后五年多时间里有许多读者来信探问某些公式的使用方法，某些系数的取值方法，以及某些计算结果与实际技术参数存在较大差距等问题，除一一作了答复之外在这次修订中都予以充分的重视。特别应该提到的是东北工学院朴永洙副教授在近年讲授选修课和培养研究生当中遇到一些理论和实际问题在这次修订中也都作了必要的改进。

学术的发展没有止境，当今世界各国对矫直技术的研究正在向精深方向发展；我国的工业建设已把质量、品种和效

益作为主要问题予以重视。矫直技术正是保证和提高产品质量的主要技术之一，急需用系统的和正确的理论来武装广大技术人员；急需用高精度和高效率的矫直设备来武装生产现场。这本书的再版如果能在这些方面起到一点推动作用将是作者的最大心愿。限于作者本人的水平尚难免有谬误之处，诚希识者继续赐教。

作者 崔甫

1992年8月

前 言

本书主要运用材料力学和弹塑性力学的基础理论，说明金属材料弹塑性弯曲的基本原理；说明各种矫直方法的基本原理。系统论述了弯曲矫直过程中的应力与应变、弯矩与曲率、能量与曲率、以及各种曲率之间的关系。给出了各种力能参数、结构参数和工艺参数的计算方法。本书在曲率关系方程式、功率计算、恒功率工作原理、辊数的定量分析、压下量的解析方法、强化弯矩的算法则、斜辊矫直的机理分析、二辊矫直特点及辊型分析、拉弯矫直的力学模型、滚动模转轂矫直的工作原理、连铸坯矫直的变形本质等方面都提出了许多新见解。这些构成了本书的独特体系。

本书共分五章，第一章属于弹塑性弯曲的基本原理，第二章到第四章是常见矫直过程的理论分析与参数计算，第五章是一些特殊矫直方法及其原理的介绍。每章中都介绍几种典型设备。最后一章提到了我国今后发展矫直技术的展望性意见。

本书统观了全部矫直领域，概括了大量的资料和作者的研究心得。针对金属材料的矫直，由浅入深，从原理到工艺，从参数到设备，都作了必要的论述。它的服务对象很广，对有关的设计、研究、工程技术和现场操作人员以及有关的研究生、大学生都是必备的参考文献。它的适用范围很宽，在轧钢业、金属加工业、机械制造业、建筑业、仪器仪表业以及轻工业中都有使用价值。

本书是在研究生教材和为《重型机械》编写的讲座基础上改写而成的。本书在写作过程中得到徐灏教授的热情支持和帮助；得到张继铎工程师在编写方法上的具体指导。本书特请刘培锷教授进行了审阅。采纳了他们的许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

鉴于作者经验不足，水平有限，编写这样一本新著，实有错误难免之疚，诚希识者赐教。

目 录

前言

第一章 金属材料的弹塑性弯曲 1

§ 1-1 弹塑性弯曲的基本概念 1

1 弹塑性弯曲的定义 1

2 弹塑性弯曲的分类 5

3 弹塑性弯曲的应力与应变 6

4 简化的弹塑性弯曲 15

§ 1-2 弹塑性弯曲的弯矩 17

1 理想金属材料的弯矩 17

2 强化金属材料的弯矩 37

§ 1-3 弹塑性弯曲的曲率 47

1 弯曲、弹复与残留曲率 47

2 变形及挠度与弯曲曲率的关系 53

§ 1-4 弹塑性弯曲的变形能 60

1 一次弯曲的变形能 60

2 多次弯曲的变形能 66

3 旋转变形的变形能 67

4 强化的弯曲变形能 69

第二章 金属材料的反弯矫直 78

§ 2-1 概述 78

§ 2-2 简单反弯矫直 79

1 矫直原理 79

2 矫直力与矫直功 85

3 矫直设备简述 88

§ 2-3 递减反弯矫直	92
1 矫直原理	92
2 压下方案与辊数	97
3 力能参数的计算	114
4 结构参数的计算	121
5 矫直设备简述	125
第三章 金属材料的旋转矫直	130
§ 3-1 多斜辊矫直	130
1 矫直原理	130
2 辊系配置与辊数	140
3 圆材直径与辊子倾斜角	143
4 力能参数计算	148
5 辊型与结构参数计算	177
6 矫直设备简述	189
§ 3-2 二斜辊矫直	192
1 矫直原理	192
2 力能参数计算	199
3 结构参数与辊型计算	203
4 矫直设备简述	212
§ 3-3 转轂矫直	214
1 孔模式转轂矫直原理与参数计算	214
2 斜辊式转轂矫直原理与参数计算	218
3 二辊式转轂矫直原理与参数计算	221
4 滚动模式转轂矫直原理与参数计算	222
5 复合转轂式矫直机	224
6 矫直设备简述	225
第四章 金属材料的拉伸矫直与拉弯矫直	226
§ 4-1 拉伸矫直	226
1 钳式拉伸矫直原理与参数计算	226

2	辊式拉伸矫直原理与参数计算	229
3	矫直设备简述	232
§ 4-2	拉弯矫直	234
1	拉弯矫直原理与参数计算	234
2	液压拉弯矫直原理与参数计算	248
3	矫直设备简述	253
第五章	矫直技术的扩充与发展	257
§ 5-1	控制尺寸及形状的矫直	257
1	拉扭矫直法	257
2	振动矫直法	259
3	保持尺寸精度的矫直法	260
4	整形矫直法	265
§ 5-2	高温矫直	265
1	大尺寸轧材的高温矫直	265
2	连铸坯的矫直	267
§ 5-3	其它矫直技术	272
1	变断面材料的矫直	272
2	行星矫直法	273
3	轧拉矫直法	275
§ 5-4	矫直技术的发展趋势	275
参考文献		277

第一章 金属材料的弹塑性弯曲

§ 1-1 弹塑性弯曲的基本概念

1 弹塑性弯曲的定义

金属材料在本书中专指板、带、型、管、线等金属轧材、挤压材和冷拔材。它们的弹塑性弯曲是既有弹性变形又有塑性变形的弯曲。当弯曲变形达到屈服极限之前，各条纵向纤维的变形可以看作简单的拉(压)变形，并遵守虎克定律，应力与应变之间有线性关系： $\sigma = E\varepsilon$ 。式中系数 E 即弹性模量，是与金属种类有关的弹性常数。现将常见的 E 值列于表1-1。

表1-1 常见金属的弹性模量 E

名 称	GPa	kN/mm ²	名 称	GPa	kN/mm ²
钢	206	206	硬 铝	70	70
冷拔纯铜	127	127	冷 拔 铝	69	69
轧制青铜	113	113	轧 制 铝	68	68
轧制纯铜	108	108	轧 制 锌	82	82
冷拔黄铜	89~97	89~97	合 金 钛	111	111

当弯曲变形达到屈服极限(ε_s)之后，该条纵向纤维的应力与应变关系不再遵守全量的虎克定律而表现为某种曲线或近似直线但其弹性性质明显减弱的特征；在卸载之后应力与应变关系呈现为增量的线性关系： $\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon$ ，也称为增量虎

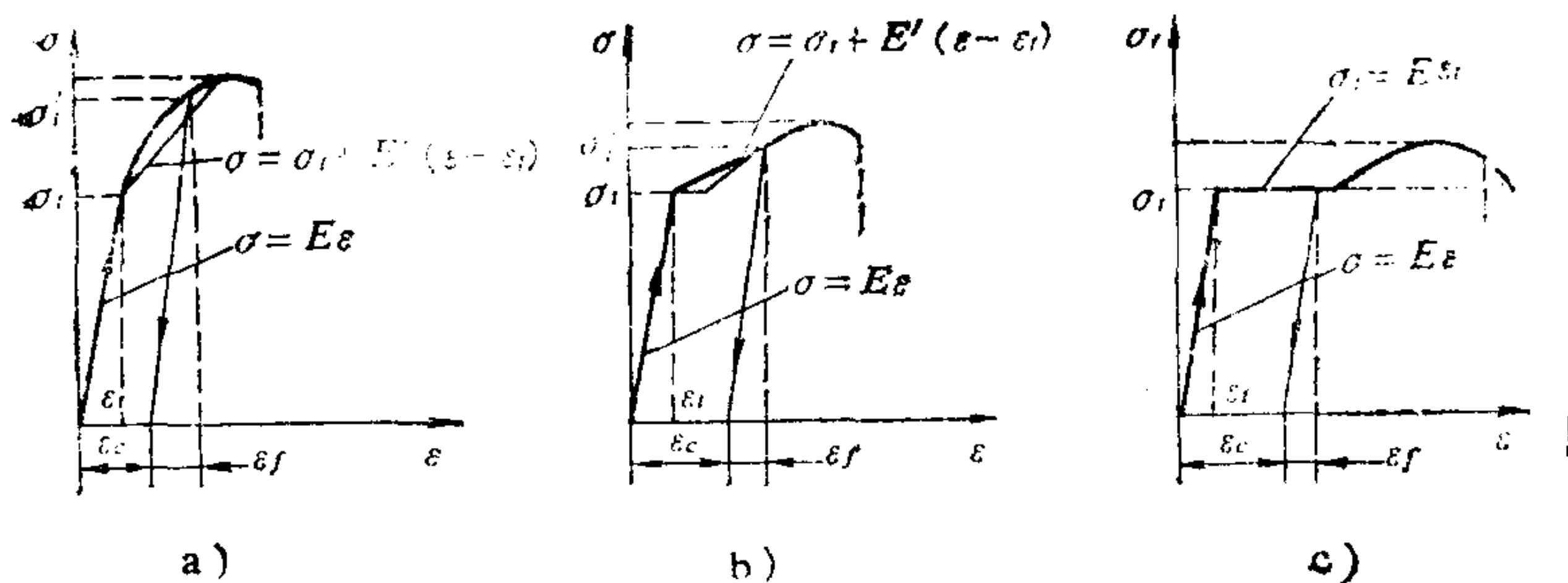


图1-1 简单拉（压）应力应变模型

a) 无屈服平台的强化材料 b) 小屈服平台的强化材料

c) 长屈服平台的韧性材料

克定律,而且必然有一部分变形得不到恢复而成为永久变形。如图 1-1 所示,金属进入塑性变形阶段,即应力超过屈服极限 σ_s 之后,应力应变关系不再是常数关系,有的金属具有指数关系,如 $\sigma = A\epsilon^n$, 示于图 1-1 a); 有的金属具有近似的线性关系,但有较小的屈服平台,如图 1-1 b) 所示; 有的金属具有较长的屈服平台; 在它们的应力应变之间没有统一的规律。为了分析和计算上的方便,并考虑到工程计算的可靠,本书将无屈服平台和小屈服平台的金属归纳为线性强化材料,用割线模量或切线模量 E' 表示强化模量。于是图 1-1 a) 及 b) 在塑性区的应力皆可写成 $\sigma = \sigma_s + E'(\epsilon - \epsilon_s)$; 图 1-1 c) 代表较长屈服平台的材料,在一般的冷弯与矫直(反弯)状态下,其变形量很难超过平台区,故作为理想弹塑性材料来处理,使其 $E' = 0$ 是可以的。强化材料的初始屈服限 σ_s 与相继屈服限 σ_i 不同,因此强化材料的塑性性质与应力历史有关,也与其材质及强化特性(E')有关。材料经过加载和卸载循环之后其全部变形中的一部分将按相继屈服限 σ_i 及

增量虎克定律恢复其变形 ε_i ，也称为弹复变形；另一部分为纯塑性变形被保留下来，也称为永久变形或残余变形。一般的弹塑性弯曲不仅其纵向纤维既有弹性或弹复变形又有塑性变形，而且也包含外层纤维的弹塑性变形与内层纤维的纯弹性变形的双重含义。

本书所讨论的金属材料的弯曲与反弯，基本符合材料力学的弯曲条件，必将遵守平截面变形原理。因此变形与断面高度的关系必将是线性关系。于是轧材经过弯曲之后必将有残余应力现象，从图1-2及图1-3上可以看清这种现象。如图1-2，当厚度为 H 的轧材受弯曲时，其单位长度轧材的两端横截面将不再互相平行而产生一个转角，使外缘纤维拉伸出 $\overline{AA_1}$ 长度，使内缘纤维受压缩短 $\overline{AA_1}$ 长度。因此 $\overline{AA_1}$ 将代表该截面 AA 边缘处的延伸率或压缩率，即代表单位长度轧材的弯曲变形，用 ε_w 表示。卸载后，各条纤维将根据自己变形后所保存的弹复能力进行弹复。凡未超过弹性极限的纤维将恢复其原状；凡超过弹性极限的纤维都将按其最大弹复能力 σ_i ，恢复 ε_i 的变形量，使变形线 $\overline{A_1A_1}$ 本能地回到 A_2aaA_2 状态。但是这种本能受到平截面原理的约束，只能回弹到 $\overline{A_3A_3}$ 位置。于是在折线 $\overline{A_2aaA_2}$ 与直线 $\overline{A_3A_3}$ 之间形成的影线面积代表着残余变形量。由于这些残余变形属于弹性变形，它与应力是线性关系，所以这些影线面积又代表残余应力的大小。图1-3表示线性强化金属弯曲时的应力与应变关系，它与前图的不同点在于超过弹性极限以后的各条纵向纤维离开中性层越远者弹复能力越大。假设边缘纤维的弹复能力为 σ'_i ，弹复量为 ε'_i ，则 $\sigma'_i > \sigma_i$ ， $\varepsilon'_i > \varepsilon_i$ 。因此本能性的弹复折线 A_2aaA_2 也将在离开中性层越远处，它与变形线 $\overline{A_1A_1}$ 的距离越大，即两者在弹性区 H_i 以外的部分不再平行；而且其不平行程度与

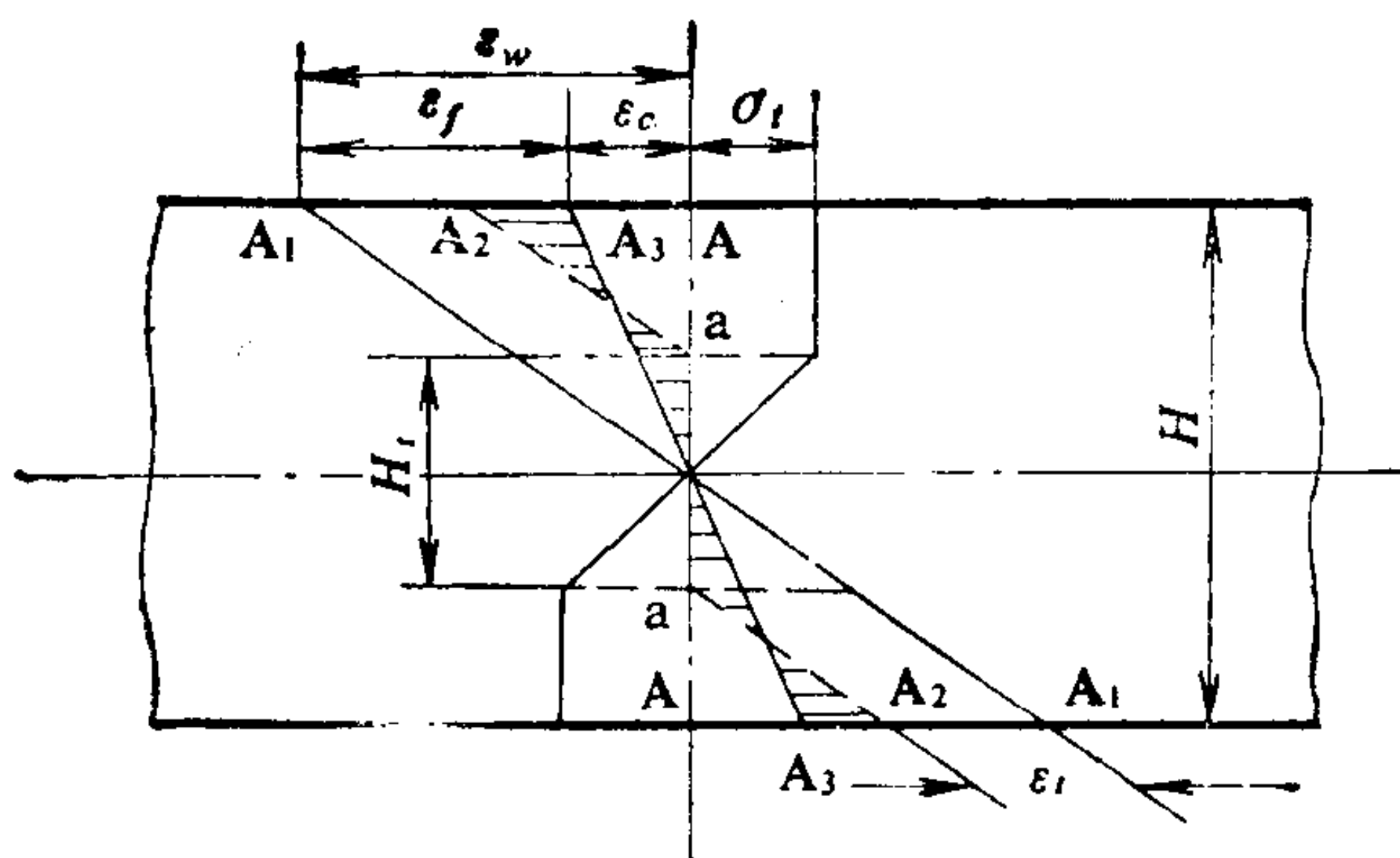


图1-2 理想材料的弹塑性弯曲

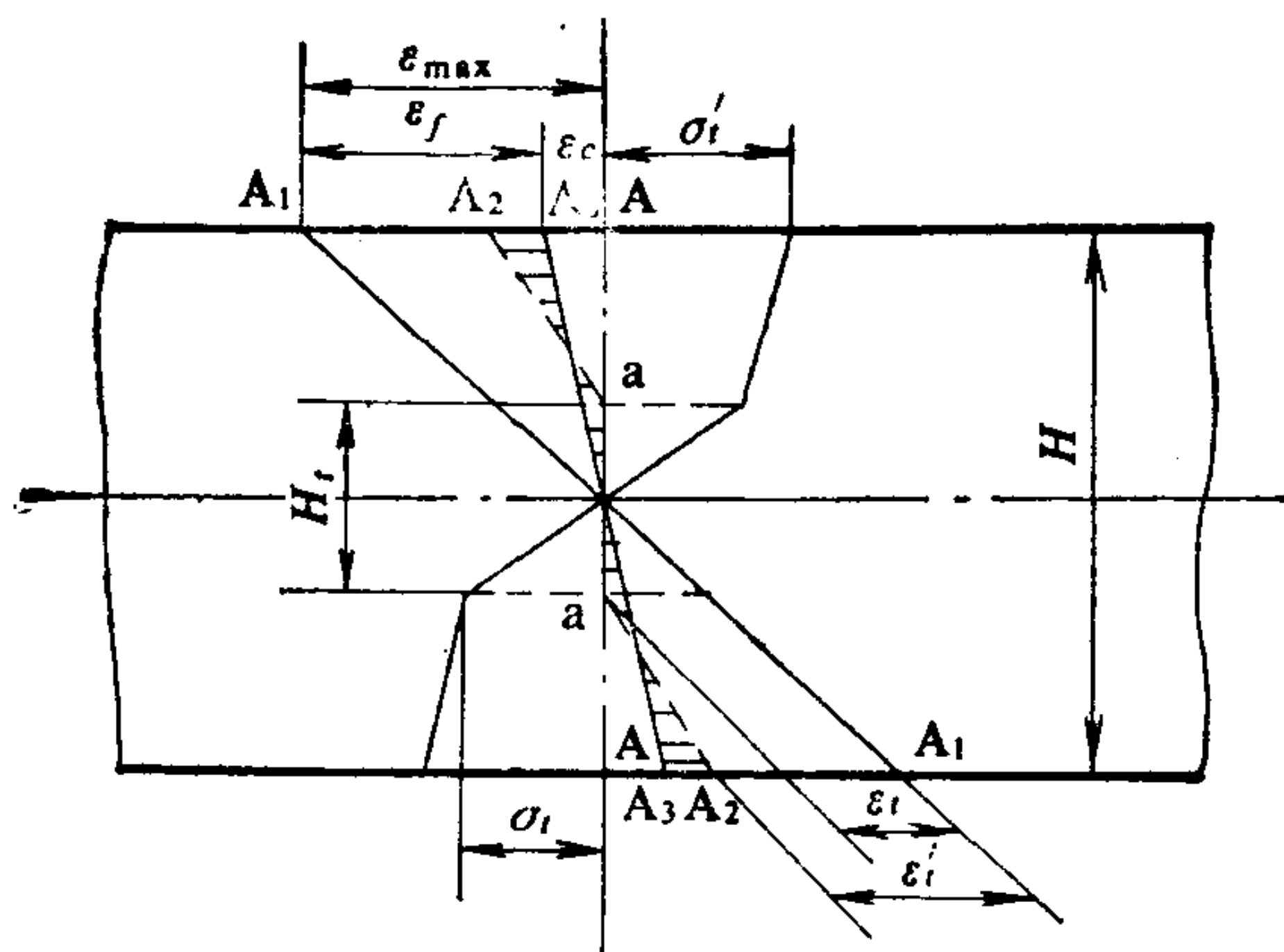


图1-3 强化材料的弹塑性弯曲

材料的强化性能成正比， E' 越大，不平行度越大。最后按平截面原理弹复到 $\overline{A_3A_3}$ 位置，这里的 $\overline{A_3A_3}$ 位置的斜度也必将小于同样弯曲程度的理想材料的 $\overline{A_3A_3}$ 斜度。因此强化材料的有效弯曲小于理想材料。同理可知，要得到同样的弯曲效果，对强化材料弯曲程度要加大。图中的 ε_f 表示外层纤维的弹复

量； ε_e 表示外层纤维的残余变形量，故总的弯曲变形
 $\varepsilon_w = \varepsilon_f + \varepsilon_e$ 。

2 弹塑性弯曲的分类

弹塑性弯曲在方式上，有受弯矩作用的纯弯曲；受横向载荷作用的梁弯曲；绕过圆柱体受拉力作用产生的拉弯；圆形材料和零件在旋转中受弯矩或横向载荷作用而产生的旋转弯曲；板材在轧制过程中由于变形不匀而产生的双向波浪弯曲；这种板材有时还出现侧向弯曲即波浪弯加镰刀弯的综合弯曲。前三种弯曲都属于单方向的弯曲，我们称为一维弯曲；

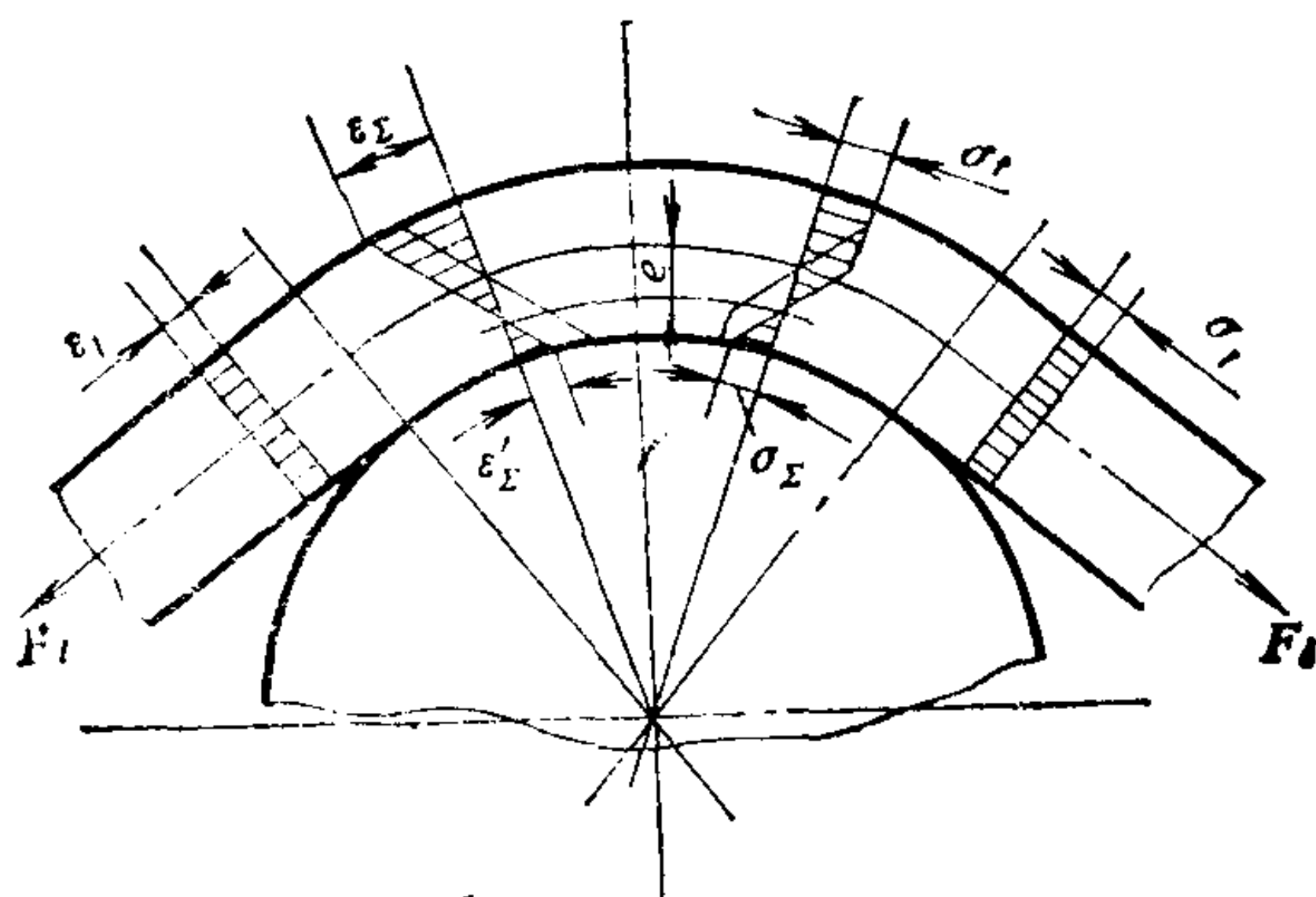


图1-4 拉弯

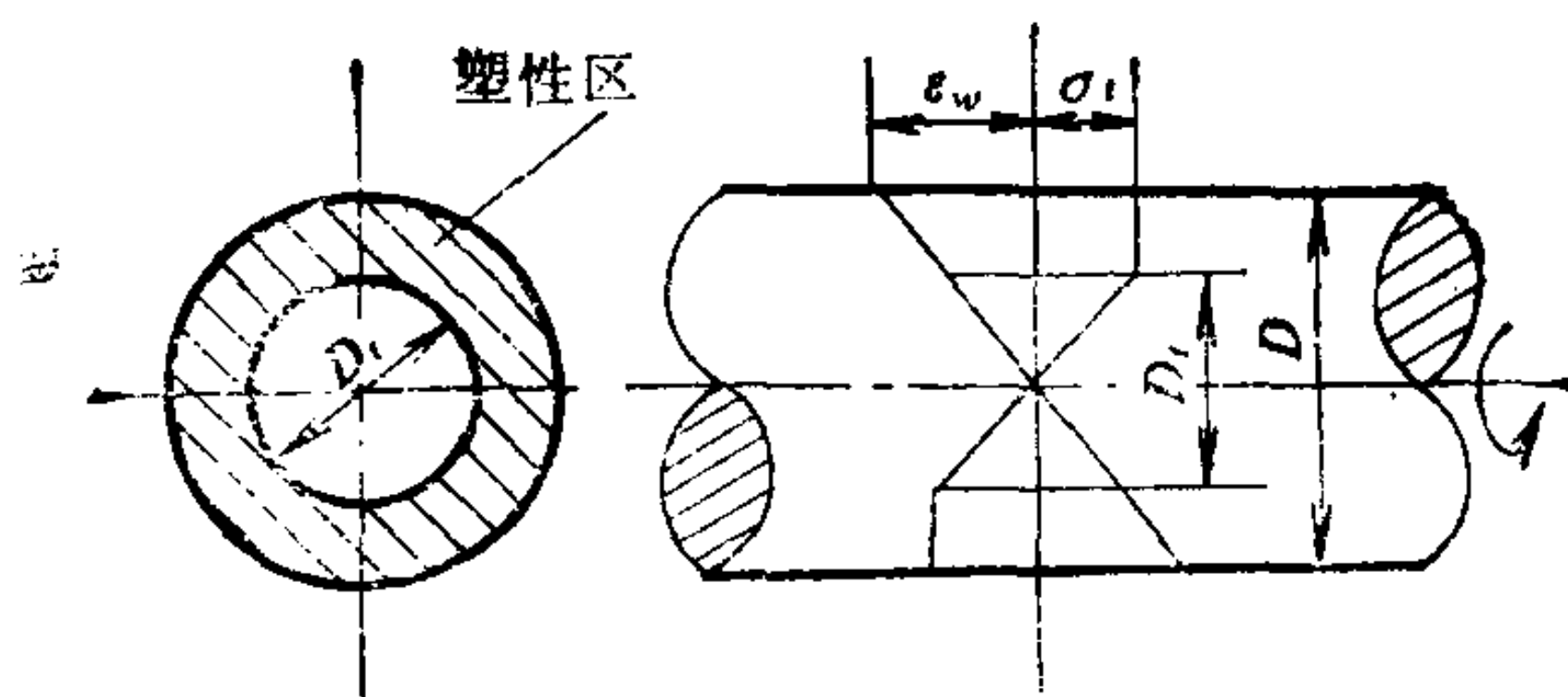


图1-5 旋转弯曲

旋转弯曲与波浪弯曲为二维弯曲；综合弯曲为三维弯曲。拉弯的模型见图1-4；旋转弯曲的模型见图1-5；双向波浪弯曲或称瓢曲，其模型见图1-6；三维弯曲的模型见图1-7。

图1-4 中的 ϵ_l 为拉伸变形， σ_l 为拉伸应力； ϵ_z 及 ϵ'_z 为弯曲与拉伸或压缩变形的叠加， σ_z 为弯曲与拉伸应力的叠加。它们的表达式为 $\sigma_z = \sigma_l - \sigma_l$ ， $\epsilon_z = \epsilon_w + \epsilon_l$ ， $\epsilon'_z = \epsilon_w - \epsilon_l$ 。

3 弹塑性弯曲的应力与应变

上面把弯曲变形的应力应变关系简化为简单拉伸或压缩的应力应变关系，而实际上在材料内部存在着三向应力，在材料的表层和中性层存在着两向应力。如图1-8所示，在拉伸侧或压缩侧如果最大主应变的弹性应变为 ϵ'_x 时，则其余主方向的应变，如 y 向弹性应变为

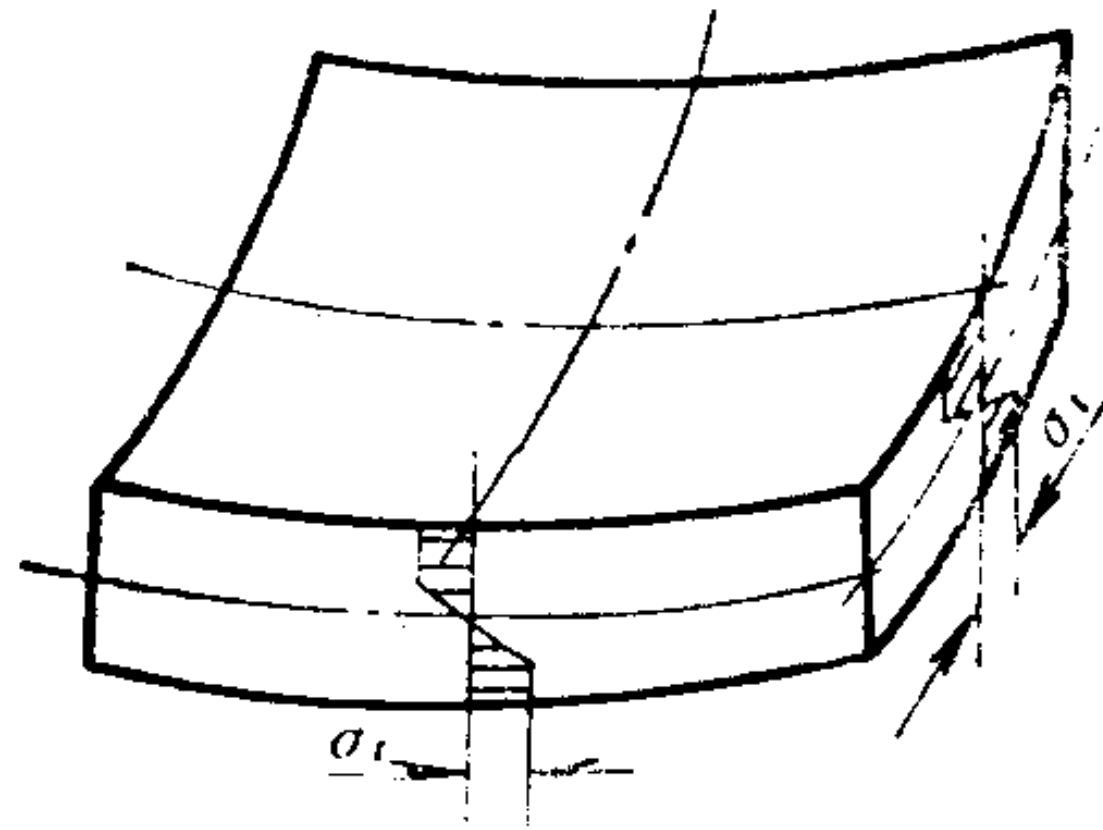


图1-6 瓢曲

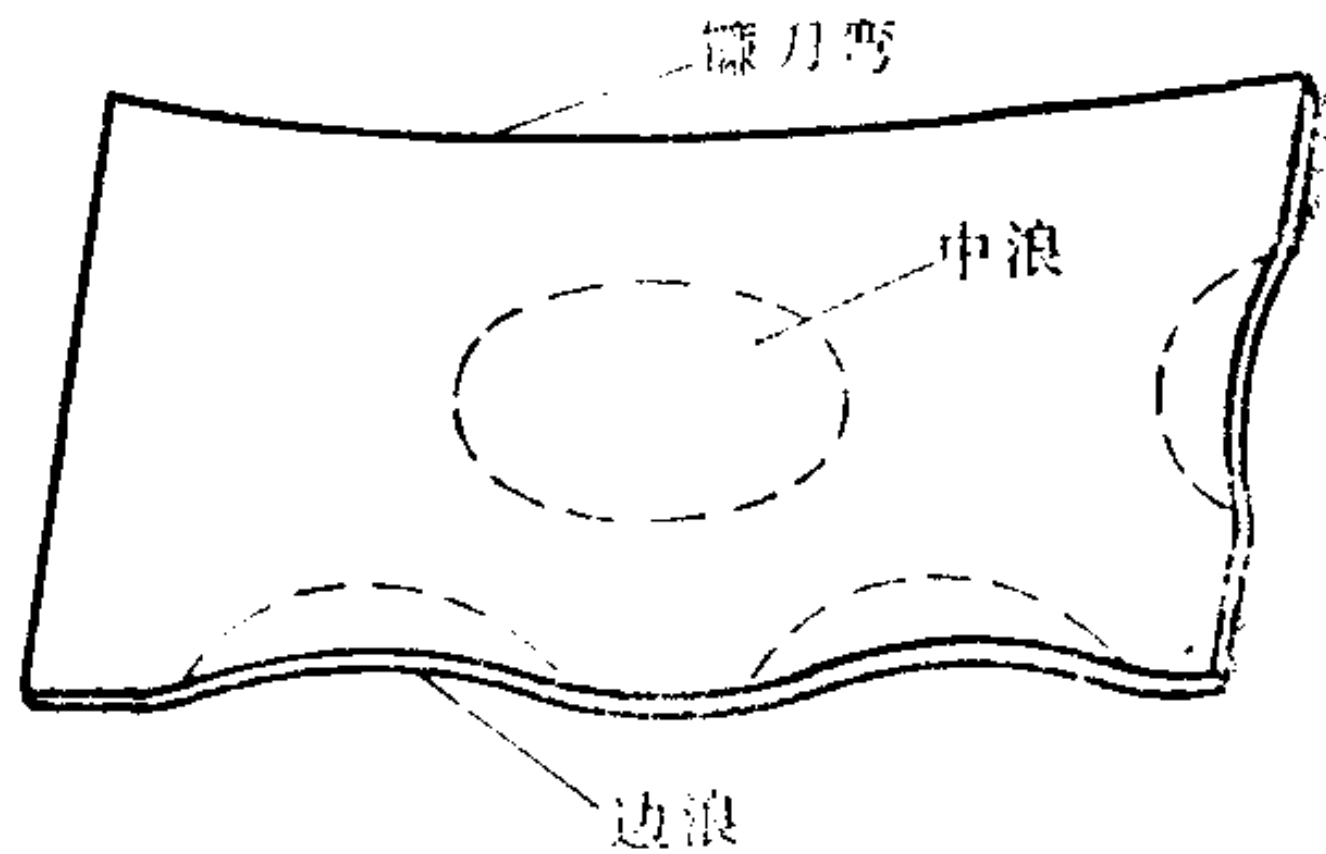


图1-7 三维弯曲

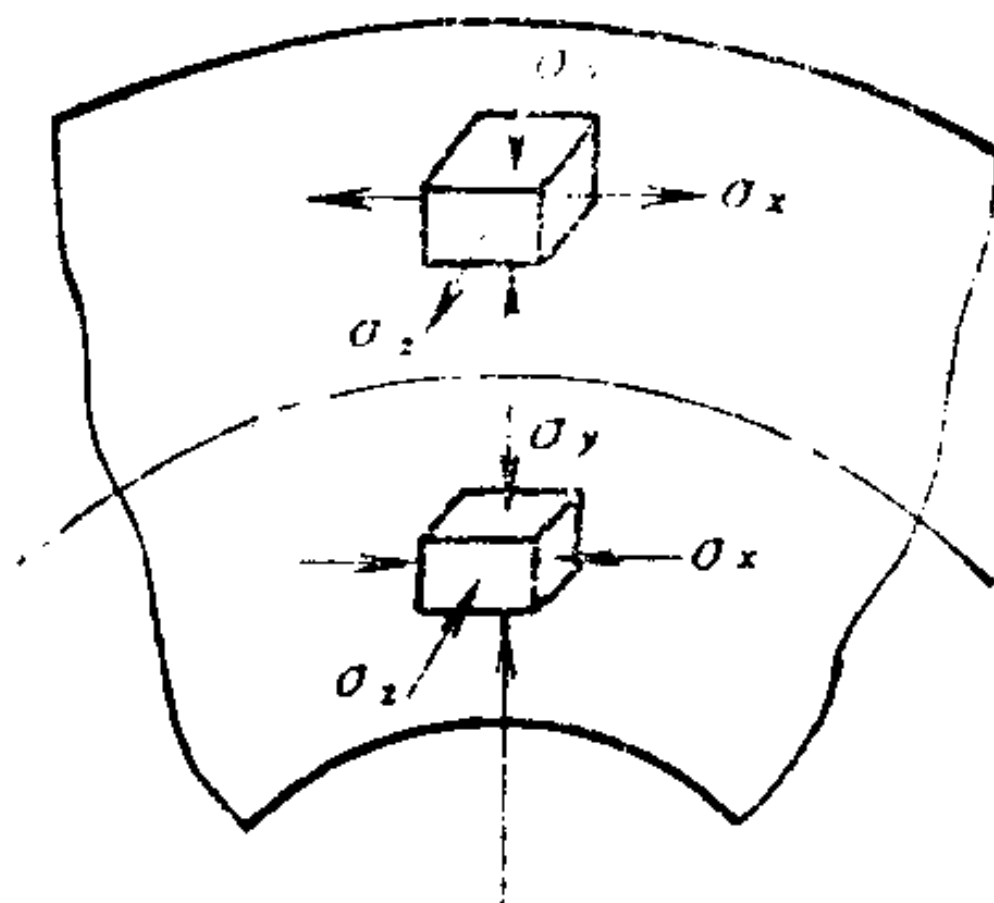


图1-8 弯曲应力状态

$\varepsilon'_y = \nu \varepsilon'_x$ ，式中 ν 为材料的泊松比。另外塑性变形的相应分量为 ε''_x 、 ε''_y 及 ε''_z ，在 $\varepsilon''_z = \varepsilon''_y$ （简单拉伸）条件下，根据体积不变原则，得：

$$1 - (1 + \varepsilon''_x)(1 - \varepsilon''_y)^2 = 0$$

将此式展开，略去高阶微量，可得 $\varepsilon''_x = 2\varepsilon''_y$ ，现在可以写出总变形的两个分量分别为 $\varepsilon_x = \varepsilon'_x + \varepsilon''_x$ 及 $\varepsilon_y = \varepsilon'_y + \varepsilon''_y$ ；它们的比值为

$$\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon'_y + \varepsilon''_y}{\varepsilon'_x + \varepsilon''_x} = \frac{\nu \varepsilon'_x + \varepsilon''_x/2}{\varepsilon'_x + \varepsilon''_x} = \frac{2\nu + \varepsilon''_x/\varepsilon'_x}{2(1 + \varepsilon''_x/\varepsilon'_x)}$$

当塑性变形很大时， $\varepsilon''_x \gg \varepsilon'_x$ ，上式中常数项可略去不计，则 $\varepsilon_y = \varepsilon_x/2$ ；鉴于在弹性极限状态下存在 $\varepsilon_y = \nu \varepsilon_x$ 的关系，则 $\varepsilon_x = \varepsilon_t$ ， $\varepsilon_y = (\nu - 0.5)\varepsilon_t$ 是判定塑性变形的依据。不过弯曲变形的应力状态变得复杂， $\varepsilon''_z = \varepsilon''_y$ 的变形条件也不复存在，此时判别塑性变形的依据应该是米塞斯屈服准则：

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 = 2\sigma_t^2$$

式中 σ_x 、 σ_y 及 σ_z 代表三个主应力，为了计算上的方便，把中间应力 σ_z 的影响考虑在系数 β 中，将上式写成两个主应力关系式

$$\sigma_x - \sigma_y = \beta \sigma_t$$

由于 β 值与应力状态和变形状态有关，常把宽度明显大于厚度的材料按平面变形来处理，即 $\sigma_z = (\sigma_x + \sigma_y)/2$ ，则 $\beta = 1.15$ 。现在就以板带材的弯曲为例，其屈服准则为

$$\sigma_x - \sigma_y = 1.15\sigma_t \quad (1-1)$$

当两个主应力的设定方向相反时，上式须改成

$$\sigma_x + \sigma_y = 1.15\sigma_t \quad (1-2)$$

参照图 1-9，先在弯曲的拉伸区取微分单元体，并写出其力学平衡关系