



# 机械设计



主讲：王君玲

工程学院机械设计教研室

## 第二章 机械零件的计算准则及强度计算

### 教学目标

- 机械零件的主要失效形式及计算准则
- 静应力下机械零件的强度计算
- 对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算
- 非对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算
- 规律性非稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算
- 双向稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算
- 机械零件的接触强度
- 机械零件的材料及选用原则
- 机械零件的工艺性及设计的标准化

## 本章重点

- 机械零件的主要失效形式及计算准则
- 静应力下机械零件的强度计算
- 对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算
- 非对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算
- 机械零件的接触强度

## 2.1 机械零件的主要失效形式及计算准则

### 一、机械零件的主要失效形式

#### 失效的概念：

机械零件在规定的使用期限内，在规定的条件下，不能完成规定的功能而丧失工作能力时称为失效。

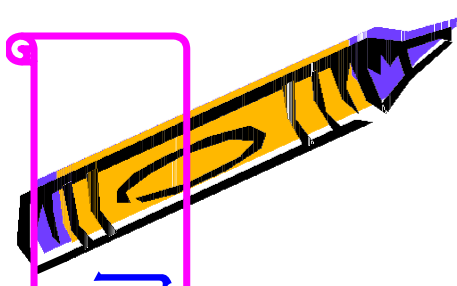
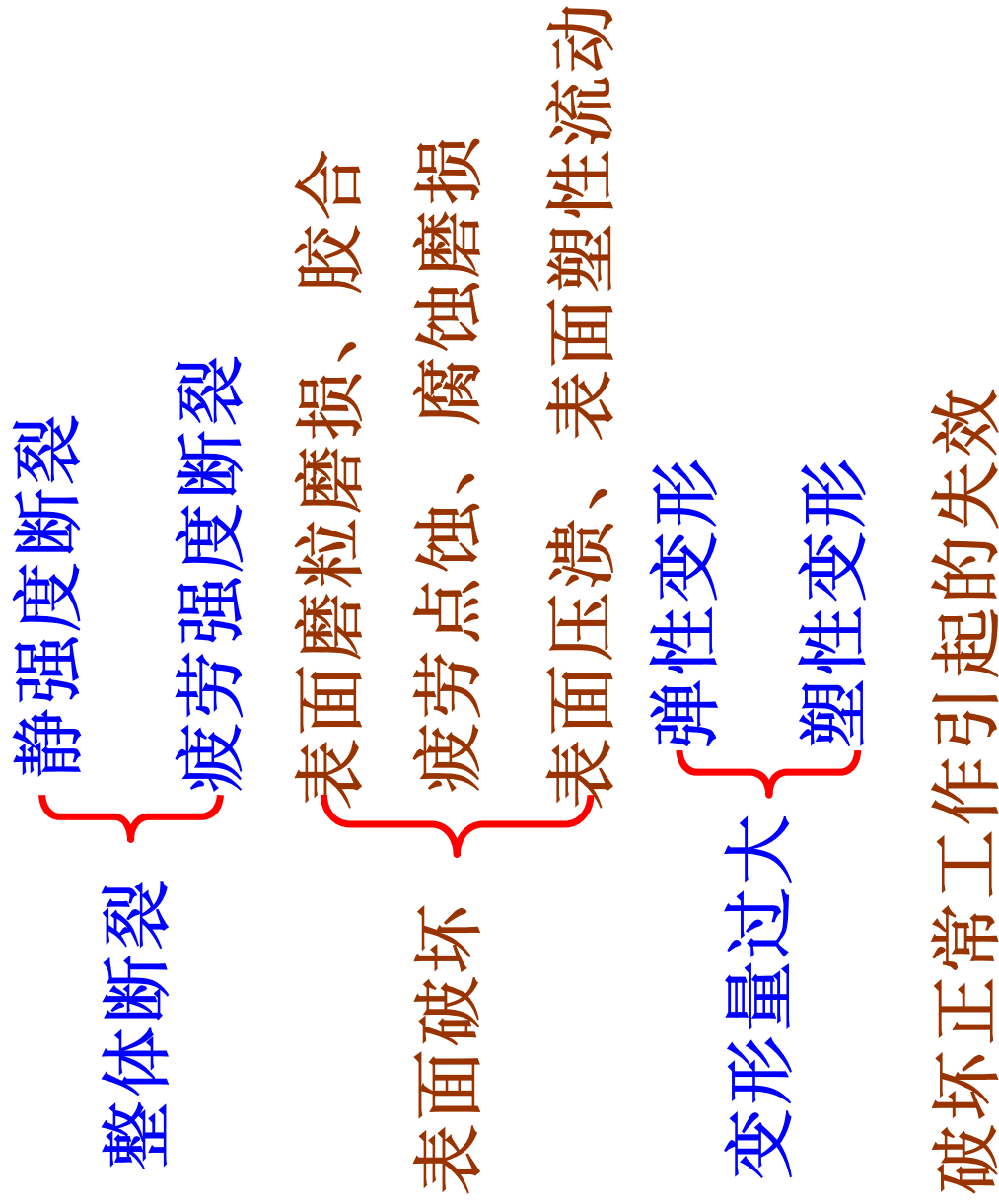
\* 机械零件失效并不意味着就破坏。

#### 工作能力：

零件不发生失效时的安全工作限度。

## 2.1 机械零件的主要失效形式及计算准则

### 一、机械零件的主要失效形式



同一种零件发生失效的形式可能有数种。

■ **主要的失效形式**将由零件的**材料**、**具体的结构**及**工作条件**等决定。

■ 例如：齿轮的失效形式有轮齿折断、齿面点蚀、齿面胶合、齿面磨损、齿面或齿体塑性变形及齿轮其他部分的破坏等。

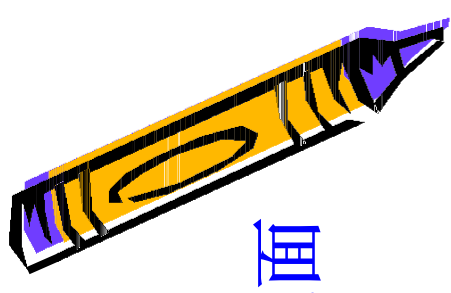
■ 在多尘粉下工作的**开式齿轮传动**，齿面磨粒磨损可能是主要失效形式；**润滑良好的闭式齿轮传动**，疲劳点蚀可能是主要失效形式。

## 二、机械零件的计算准则

**计算准则** — 用于计算并确定零件基本尺寸的主要依据。

对于具体的零件，应根据它们的主要失效形式，采用相应的计算准则。

- 1) 强度准则;
- 2) 刚度准则;
- 3) 寿命准则;
- 4) 耐磨性准则;
- 5) 振动稳定性准则;
- 6) 可靠性准则;



## 1) 强度准则(strength criterion):

强度是零件在载荷作用下抵抗整体断裂、表面接触疲劳及过大的塑性变形的能力。

强度准则是最基本的设计准则。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma \leq [\sigma] \\ \tau \leq [\tau] \end{array} \right\} \longrightarrow \text{针对断裂和塑性变形}$$

$$\sigma_H \leq [\sigma_H] \longrightarrow \text{针对表面接触疲劳破坏}$$

## 2) 刚度准则(rigidity criterion):

确保零件不发生过大的弹性变形。



$$\text{弹性变形量} \quad y \leq [y]$$



### 3) 寿命准则(life criterion) :

影响零件寿命的主要失效形式: 腐蚀、磨损、疲劳

腐蚀寿命、磨损寿命 没有提出实用有效的或通行的  
定量计算的方法.

疲劳寿命计算 通常是求出使用寿命时的疲劳极限来  
作为计算的依据.

### 3) 耐磨性准则——针对过度磨损、胶合破坏

耐磨性是指磨损过程中材料抵抗脱落的能力。

——采用条件性计算

- 滑动速度低，载荷大时 可只限制工作表面的压强  $p$   
 $p \leq [p]$  —— 防止过度磨损
- 滑动速度  $v$  较高时 还要限制摩擦功耗  
 $pv \leq [pv]$  —— 防止胶合破坏
- 高速时 还要限制滑动速度  $v$   
 $v \leq [v]$  —— 防止加速磨损

## 5) 振动稳定性准则(vibration stability criterion) :

零件的自振频率  $f$  与激振源的激振频率  $f_p$  相等或相接近时, 零件就要发生共振, 这种现象称为失稳, 即丧失振动稳定性。

高速运转机械的设计应注重此项准则。

使机器中受激振作用用的各零件的自振频率  $f$  与激振源的激振频率  $f_p$  错开.

$$f_p < 0.85f$$

$$f_p > 1.15f$$

## 6) 可靠性准则(reliability criterion) :

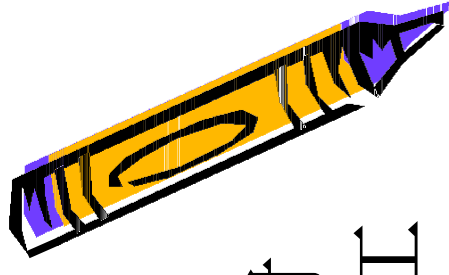
设一批相同零件的件数为 $N_0$ ，如在 $t$ 时  
间后仍有 $N$ 件在正常地工作，则此零件在工  
作时间 $t$ 的可靠度 $R$ 为

$$R = \frac{N}{N_0}$$

- 零件的可靠度是时间的函数

$$\lambda(t) = -\frac{dN / dt}{N}$$

$$R = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$



## • 浴盆曲线

零件或部件的失效率 $\lambda(t)$ 与时间 $t$ 的关系，一般是用试验的方法求得的

### • 该曲线分为三段：

#### 第Ⅰ段：早期失效阶段

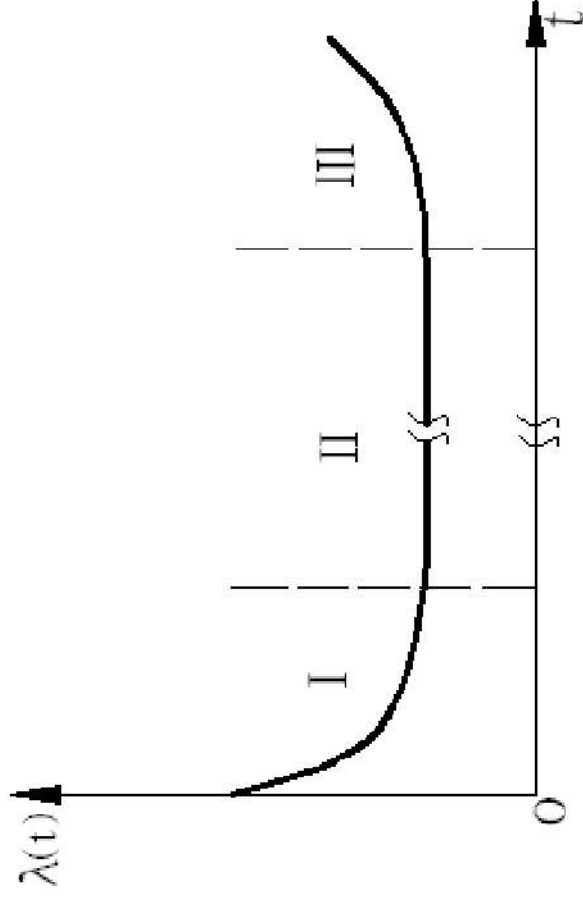
原因是零、部件中所存在的**初始缺陷**

#### 第Ⅱ段：正常使用阶段

失效的发生是随机性的，失效率则表现为一常数。

#### 第Ⅲ段：损坏阶段

由于长时间的使用而使零件发生磨损、疲劳等原因，使失效率急剧增加。



失效率曲线

## 2.2 静应力下机械零件的强度计算

### 一、载荷及应力的分类

载荷

- 静载荷 → 不随时间变化或变化缓慢的载荷
- 变载荷 → 随时间作周期性或非周期性变化的载荷

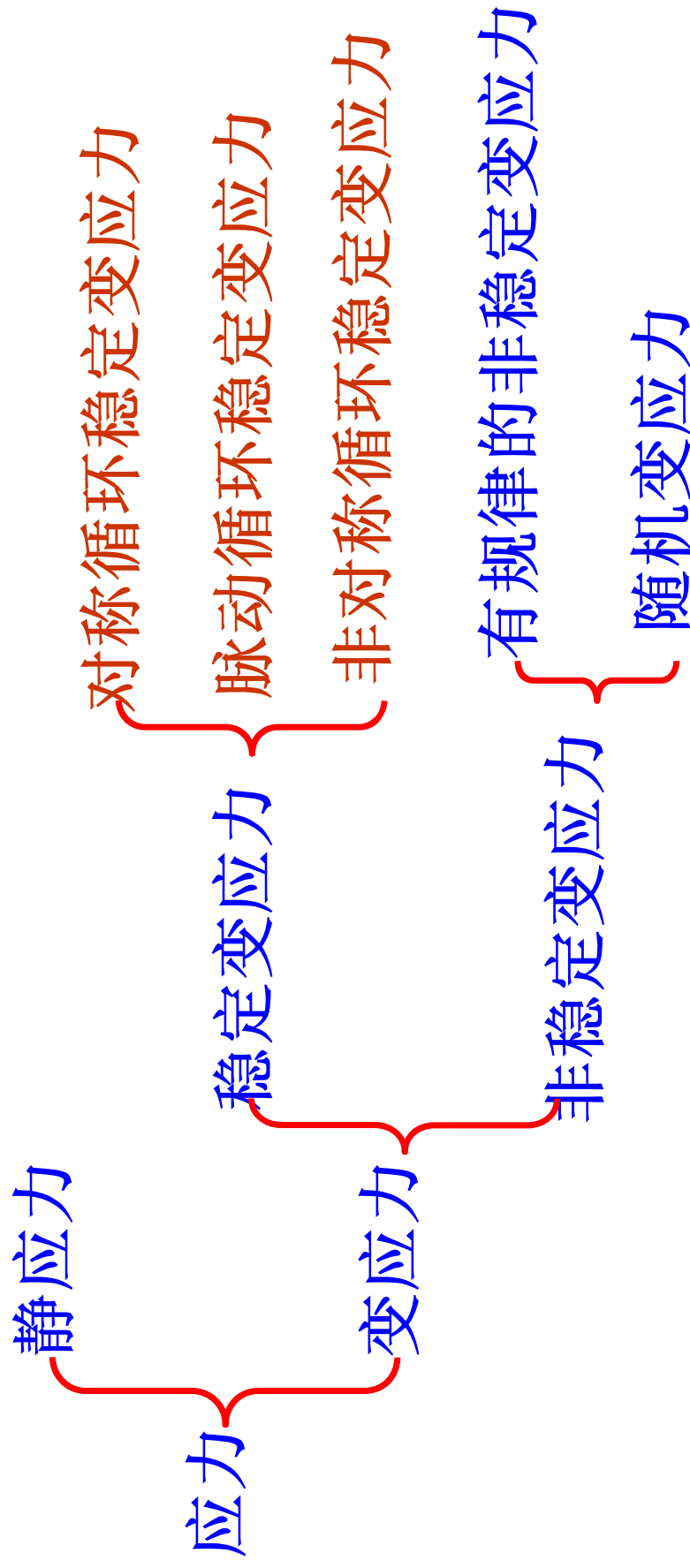
载荷

- 名义载荷  $F$  → 原动机功率或用力学公式计算出的载荷
- 计算载荷  $F_C = KF$ ,  $p_C = Kp$ ,  $T_C = KT$

$K$ : 载荷系数

## 2.2 静应力下机械零件的强度计算

### 一、载荷及应力的分类



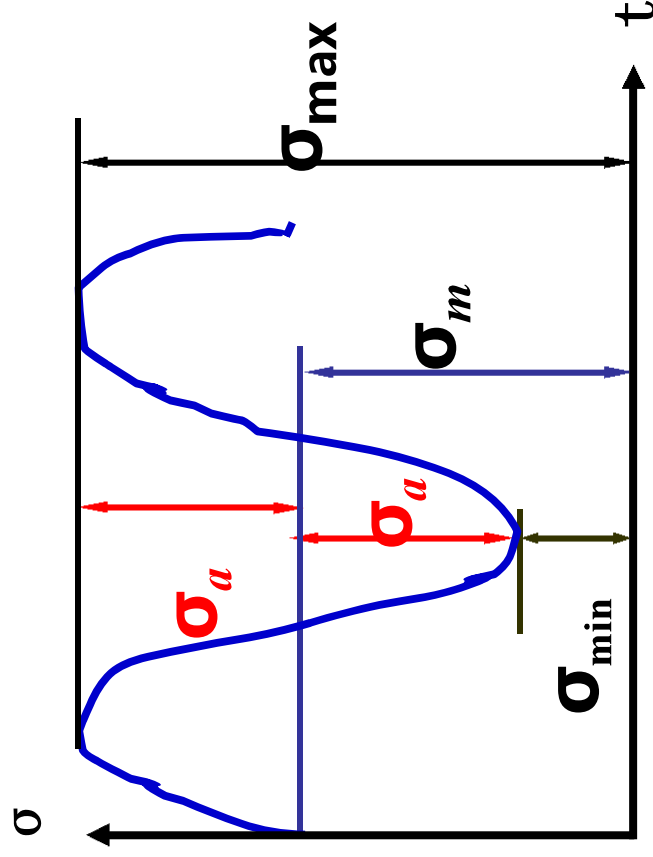
## 1) 变应力参数:

最大应力:  $\sigma_{\max}$

最小应力:  $\sigma_{\min}$

平均应力:  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$

应力幅:  $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$

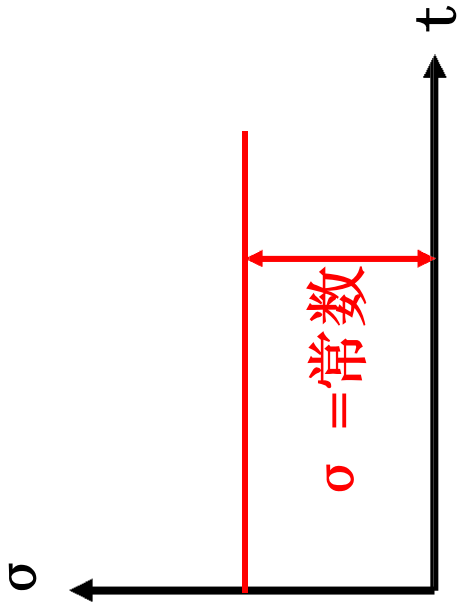


应力循环特性: 用来表示应力的变化情况

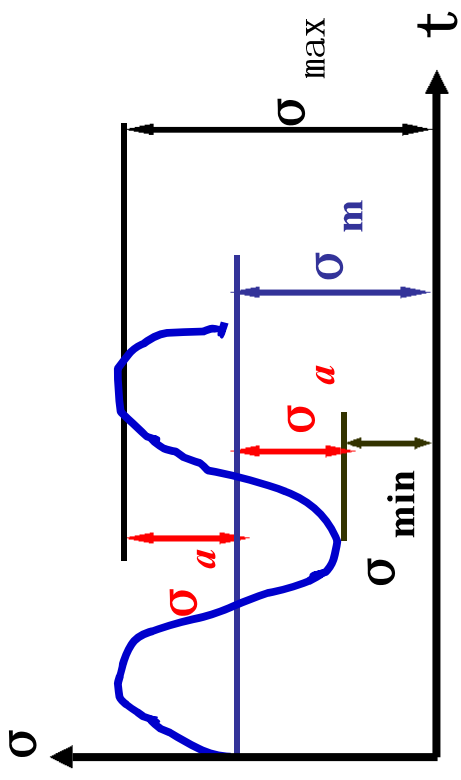
$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$



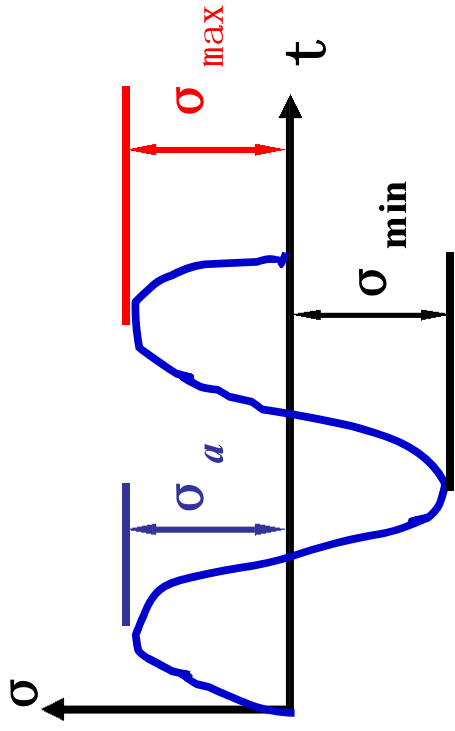
## 2) 典型变应力及应力循环特征 $r$



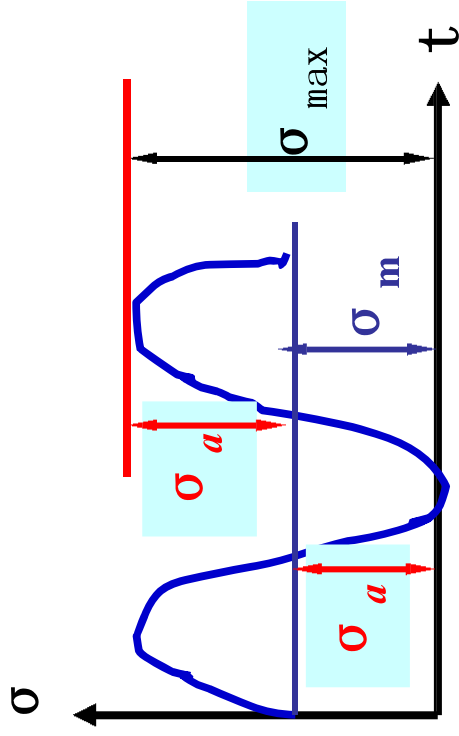
a) 静应力:  $r = +1$  变应力特例



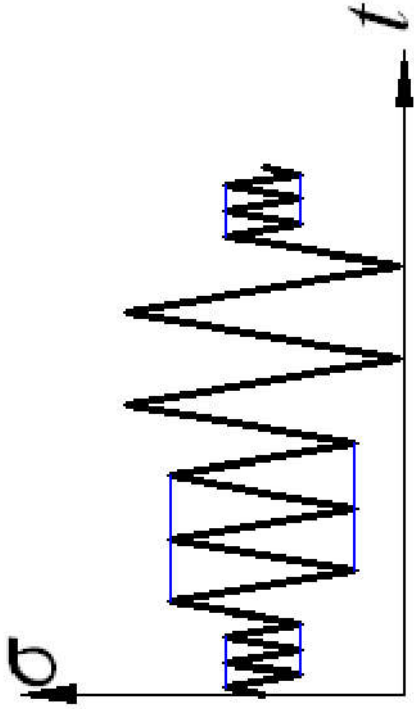
b) 非对称循环变应力  
 $r$ 在  $(+1 \sim -1)$  间变化



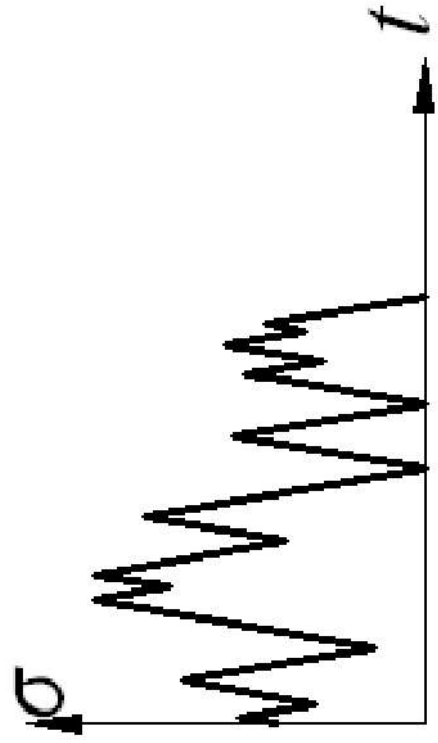
c) 对称循环变应力  $r = -1$



d) 脉动循环变应力  $r = 0$



规律性非稳定变应力



随机变应力

## 二、机械零件的强度判断

### (1) 按危险截面的最大应力判断

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{[S_{\sigma}]}$$

$$\tau \leq [\tau] = \frac{\tau_{\text{lim}}}{[S_{\tau}]}$$

……式 (2-12)

### (2) 按危险截面的实际安全系数判断

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\sigma} \geq [S_{\sigma}]$$

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{\text{lim}}}{\tau} \geq [S_{\tau}]$$

……式 (2-13)

### 三、静应力下机械零件的强度

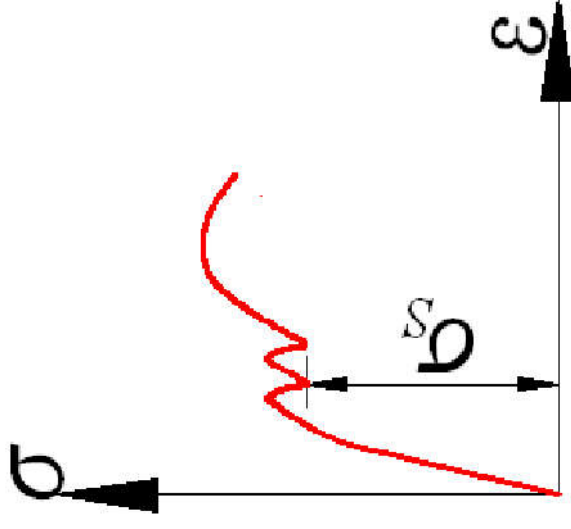
#### (1) 单向应力下的塑性材料零件

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_s \quad \tau_{\text{lim}} = \tau_s$$

$\sigma_s$  和  $\tau_s$  : 材料的屈服极限

$$\left. \frac{\tau}{\tau_s} \leq [\tau] \right\} \left[ \frac{\tau}{\tau_s} \right] \leq [\tau]$$

$$\left. \frac{\sigma}{\sigma_s} \leq [\sigma] \right\} \left[ \frac{\sigma}{\sigma_s} \right] \leq [\sigma]$$



$$\left[ \frac{\tau}{\tau_s} \right] \leq [\tau]$$

$$\left[ \frac{\sigma}{\sigma_s} \right] \leq [\sigma]$$

## (2) 复合应力下的塑性材料零件

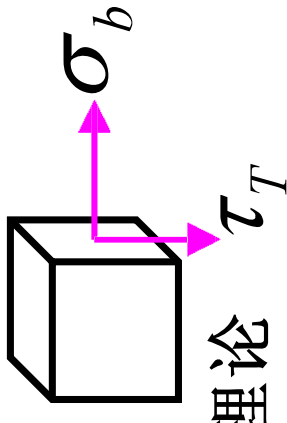
第三强度理论

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau_T^2} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{[S_\sigma]}$$

式 (2-14)

$$\sigma = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau_T^2} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{[S_\sigma]}$$

第四强度理论



复合安全系数

$$S = \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_b^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\tau_s}\right)^2 \tau_T^2}} \geq [S]$$

或

$$S = \frac{s_\sigma s_\tau}{\sqrt{s_\sigma^2 + (s_\tau)^2}} \geq [S]$$

……式 (2-15)

### (3) 脆性材料和低塑性材料零件

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_B \quad \tau_{\text{lim}} = \tau_B$$

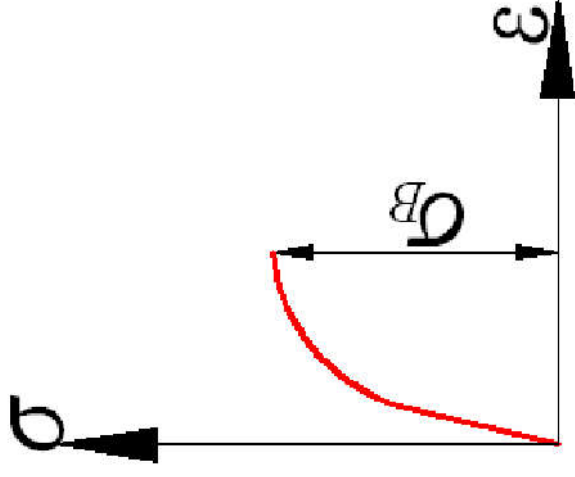
$\sigma_s$  和  $\tau_s$  : 材料的强度极限

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_B}{[S_\sigma]}$$

$$\tau \leq [\tau] = \frac{\tau_B}{[S_\tau]}$$

$$S_\sigma = \frac{\sigma_B}{\sigma} \geq [S_\sigma]$$

$$S_\tau = \frac{\tau_B}{\tau} \geq [S_\tau]$$



组织均匀的低塑性材料 需考虑应力集中。  
复合应力状态按照 第一或第二强度理论计算。

## 四、许用安全系数与许用应力

**许用安全系数选用原则：** 在保证机器安全可靠的前提下，尽可能选用较小的安全系数。

**选择许用安全系数时应考虑的因素：**

- 1) 载荷和应力的性质及计算的准确性。
- 2) 材料的性质及材质的均匀性。
- 3) 零件的重要程度。
- 4) 工艺质量和探伤水平。
- 5) 运行条件和环境状况。

## 四、许用安全系数与许用应力

各个行业有自己的许用安全系数和许用应力的专用规范。静强度设计且无规范时可参考P14表2-2。

### 塑性材料

$\sigma_s / \sigma_B$	0.45~0.55	0.55~0.7	0.7~0.9	铸件
[S]	1.2~1.5	1.4~1.8	1.7~2.2	1.5~2.5

如载荷和应力计算不十分准确，[S]应加大20%~50%

### 脆性材料

[S]=3~4,如载荷和应力计算不十分准确，[S]应加大50%~100%



## 2.3 对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

### 一、疲劳断裂特征

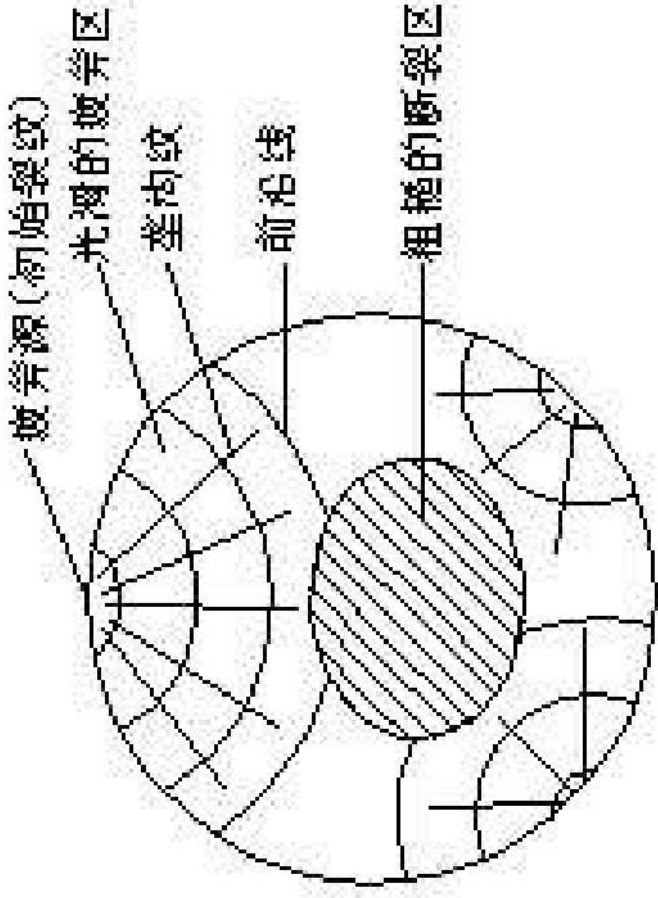
(1) 疲劳断裂的三个阶段

形成疲劳源

裂纹扩展 (2) 疲劳断裂的两个区

断裂

光滑区和粗糙区



循环变应力多次反复作用下产生

(3) 疲劳破坏的特点

无宏观明显的塑性变形现象

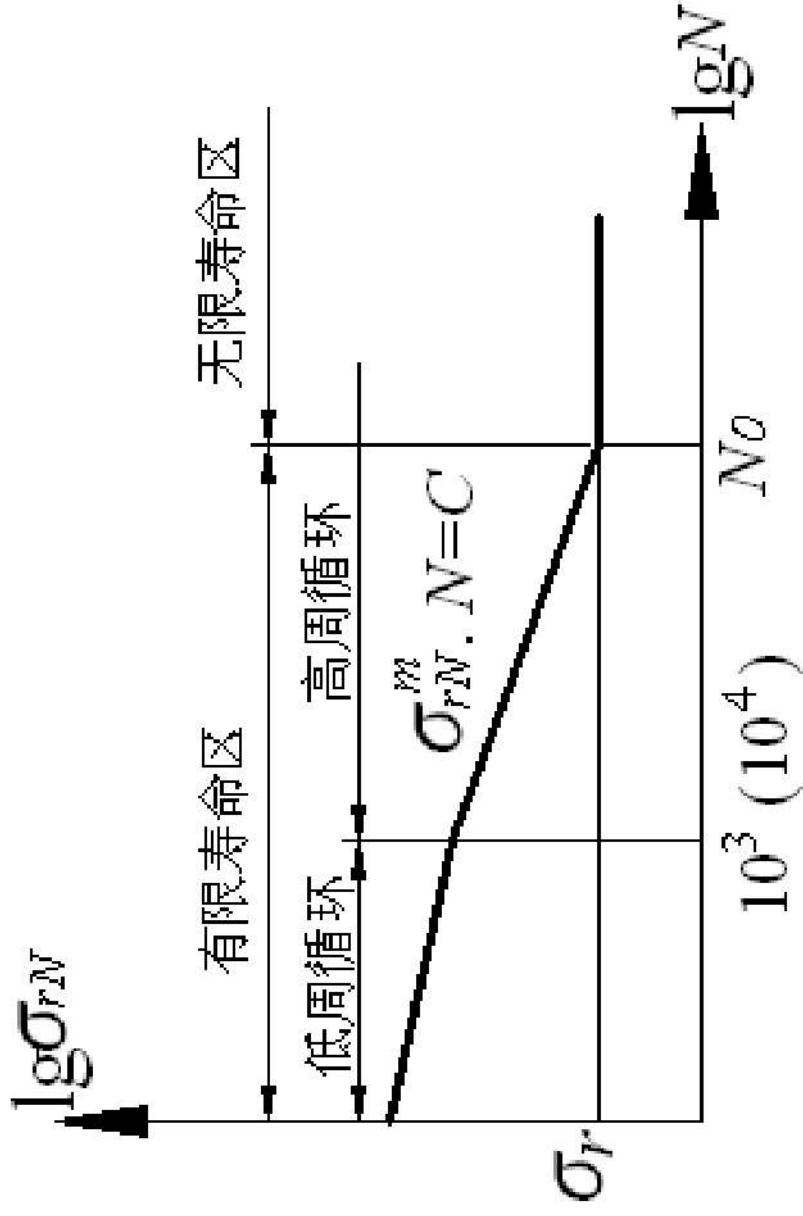
对各种缺陷非常敏感

## 二、疲劳曲线与疲劳极限

■ 疲劳极限  $\sigma_{r_N}$  或  $\tau_{r_N}$ :

在循环特性 $r$ 下的变应力, 经过 $N$ 次循环后, 材料不发生疲劳破坏的最大应力值。

$\sigma_{-1N}(\tau_{-1N})$ : 在循环特性 $r=-1$ 下, 循环次数为 $N$ 时, 材料的疲劳极限。



(1) 有限寿命区:  $N < N_0$

按此区疲劳极限所作的疲劳强度设计称为有限寿命设计

(2) 无限寿命区:  $N \geq N_0$

按此区疲劳极限所作的疲劳强度设计称为无限寿命设计

(3) 有限寿命区内应力循环次数为 $N$ 时的疲劳极限

$$\sigma_{rN}^m N = \sigma_{rN}^m N_0 = C \quad \sigma_{rN} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \sigma_r = K_N \sigma_r \quad \dots\dots\dots \text{式 (2-17)}$$

$$K_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \quad \text{式 (2-18)}$$

$K_N$ : 寿命系数, 当 $N > N_0$ 时, 取 $N = N_0$ , 即 $K_N = 1$ ;

$m$ : 材料常数, 与应力状态、材料性质和热处理方法有关,

$$\tau_{rN}^m N = \tau_{rN}^m N_0 = C \quad \tau_{rN} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \sigma_r = K_N \sigma_r$$

#### (4) 有关疲劳曲线方程的基点说明

##### 循环基数 $N_0$ ：

钢的硬度（强度）愈高， $N_0$ 值愈大。

$\leq 350\text{HBS}$ 的钢， $N_0 \approx 10^7$ ；

$> 350\text{HBS}$ 的钢， $N_0 \approx 10 \times 10^7 \sim 25 \times 10^7$ ；

有色金属， $N_0 \approx 25 \times 10^7$ 。

$$N > N_0 \text{ 时取 } N = N_0, \quad k_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = 1$$

## (4) 有关疲劳曲线方程的基点说明

### 材料常数 $m$ :

$m$ 与应力状态、材料性质和热处理方法有关  
 $m$ 值最好根据具体零件材料的疲劳曲线来确定

$m$ 的平均值为

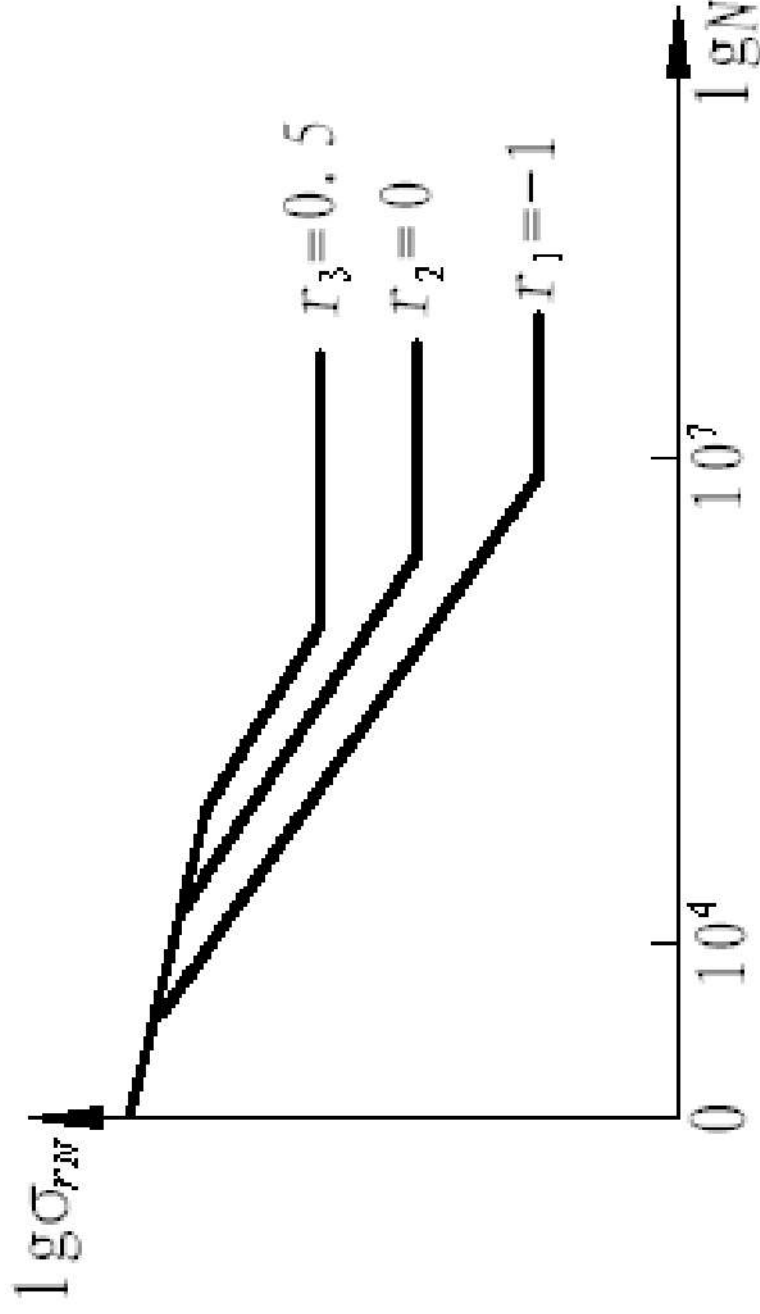
$$m = \frac{\lg N_0 - \lg N}{\lg \sigma_{rN} - \lg \sigma_r}$$

一般计算中：

对于钢，受拉应力、弯曲应力和切应力时 $m = 9$ ，  
接触应力时 $m = 6$ ；

对于青铜，弯曲应力时 $m = 9$ ，接触应力时 $m = 8$ 。

**(4) 有关疲劳曲线方程的基点说明**  
**不同循环特性 $r$ 时的疲劳曲线:**



**$R$ 值不同，曲线形状相似， $r$ 越大，疲劳极限值越高。**

### 三、影响机械零件疲劳强度的主要因素

- (1) 应力集中的影响

以有效应力集中系数  $k_\sigma$  ( $k_\tau$ ) 表示

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}} \quad k_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1k}}$$

$\sigma_{-1}(\tau_{-1})$ : 试件的疲劳极限

$\sigma_{-1k}(\tau_{-1k})$ : 材料的疲劳极限

$$k_\sigma \geq 1, k_\tau \geq 1$$



## (2)绝对尺寸的影响

以绝对尺寸系数  $\varepsilon_\sigma$  ( $\varepsilon_\tau$ ) 表示

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}} \quad \varepsilon_\tau = \frac{\tau_{-1d}}{\tau_{-1}}$$

$\sigma_{-1}(\tau_{-1})$ : 试件的疲劳极限  $\varepsilon_\sigma \leq 1, \varepsilon_\tau \leq 1$

$\sigma_{-1d}(\tau_{-1d})$ : 材料的疲劳极限

### (3) 表面状态的影响

---

以表面状态系数  $\beta_\sigma$  ( $\beta_\tau$ ) 表示

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1\beta}}{\sigma_{-1}} \quad \beta_\tau = \frac{\tau_{-1\beta}}{\tau_{-1}}$$

$\sigma_{-1}(\tau_{-1})$ : 试件的疲劳极限  $\beta_\sigma \leq 1, \beta_\tau \leq 1$

$\sigma_{-1\beta}(\tau_{-1\beta})$ : 材料的疲劳极限

## (4) 综合影响系数 $K_\sigma$ 、 $K_\tau$

- 应力集中、绝对尺寸、表面状态只对变应力的变化部分即应力幅有影响。

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1e}} = \frac{k_\sigma}{\beta_\sigma \varepsilon_\sigma}$$

$$K_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1e}} = \frac{k_\tau}{\beta_\tau \varepsilon_\tau}$$

## 2.3.4 对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

- $N_0$ 次循环时机械零件的疲劳极限:

$$\sigma_{-1e} = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma} = \frac{\beta_\sigma \varepsilon_\sigma}{k_\sigma} \sigma_{-1}$$

- $N$ 次循环时机械零件的疲劳极限:

$$\sigma_{-1Ne} = k_N \sigma_{-1e} = \frac{k_N \sigma_{-1}}{K_\sigma} = \frac{\beta_\sigma \varepsilon_\sigma}{k_\sigma} k_N \sigma_{-1}$$

对称循环稳定变应力下，机械零件的疲劳强度安全系数：

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{\lim}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_{-1Ne}}{\sigma_a} = \frac{k_N \sigma_{-1}}{K_{\sigma}} \geq [S_{\sigma}]$$

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{\lim}}{\tau_{\max}} = \frac{\tau_{-1Ne}}{\tau_a} = \frac{k_N \tau_{-1}}{K_{\tau}} \geq [S_{\tau}]$$

## 例题1:

- 一 $\leq 350\text{HBS}$ 硬度的钢制轴，其材料的机械性能为：  
 $\sigma_{\text{B}} = 770 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\text{S}} = 400 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{-1} = 250 \text{ MPa}$ ,  
循环基数 $N_0 = 10^7$ , 材料常数 $m = 9$ 。已知零件危险截面的直径 $d = 100\text{mm}$ , 承受弯矩 $M = 10^7\text{Nmm}$   
(载荷的大小和方向不变)。该危险截面的有效应力集中系数 $k_{\sigma} = 1.45$ , 绝对尺寸系数 $\varepsilon_{\sigma} = 0.85$ ,  
表面状态系数 $\beta_{\sigma} = 0.95$ ; 轴的转速 $n = 40\text{r/min}$ ,  
要求工作时间 $t = 800\text{h}$ 。若取许用安全系数 $[S_{\sigma}] = 1.5$ , 试校核该轴的疲劳强度。

解: (1) 计算危险截面的最大工作应力

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{M}{\pi d^3} = \frac{10^7}{\pi \times 100^3} = 101.86 \text{MPa}$$

轴转动时, 若载荷的大小和方向不变, 其危险截面上的弯曲应力为对称循环变应力, 即循环特性  $r = -1$ 。

(2) 计算应力循环次数及寿命系数

$$N = 60nt = 60 \times 40 \times 800 = 1.92 \times 10^6 < N_0 = 10^7$$

$$\text{寿命系数 } k_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = \sqrt[9]{\frac{10^7}{1.92 \times 10^6}} = 1.2$$

### (3) 计算综合影响系数

$$K_{\sigma} = \frac{k_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma} \beta_{\sigma}} = \frac{1.45}{0.85 \times 0.95} = 1.795$$

### (4) 计算疲劳安全系数

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{\lim}}{\sigma_{\max}} = \frac{k_N \sigma_{-1}}{K_{\sigma} \sigma_a} = \frac{1.2 \times 250}{101.86} = 1.65$$

$S_{\sigma} > [S_{\sigma}] = 1.5$  该轴的疲劳强度足够。



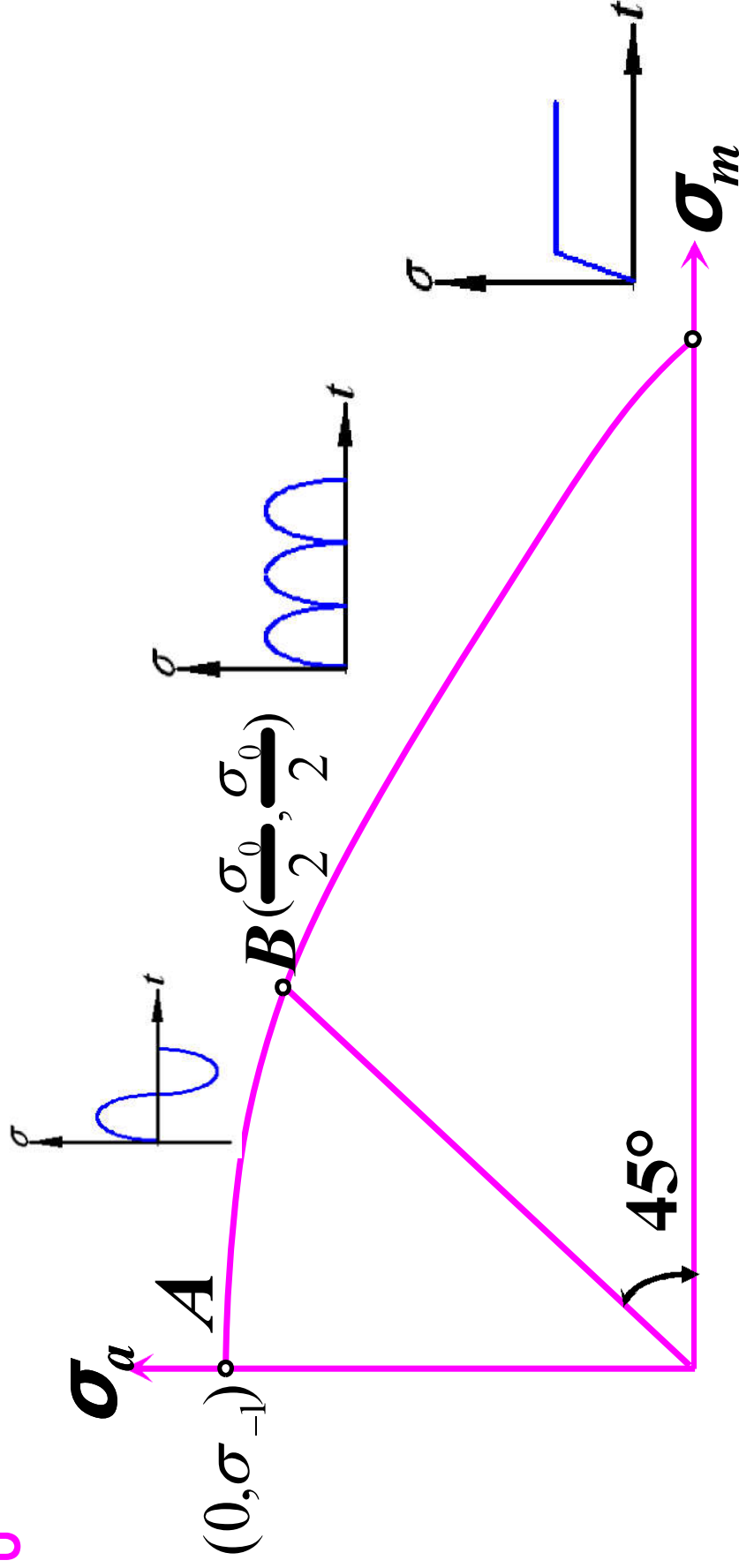
## 2.4 非对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

### • 2.4.1 疲劳极限应力图

疲劳极限应力图概念：

将根据不同的循环特性试验得到的疲劳极限数值描绘在 $\sigma_m - \sigma_a$ 坐标系中得到的线图。

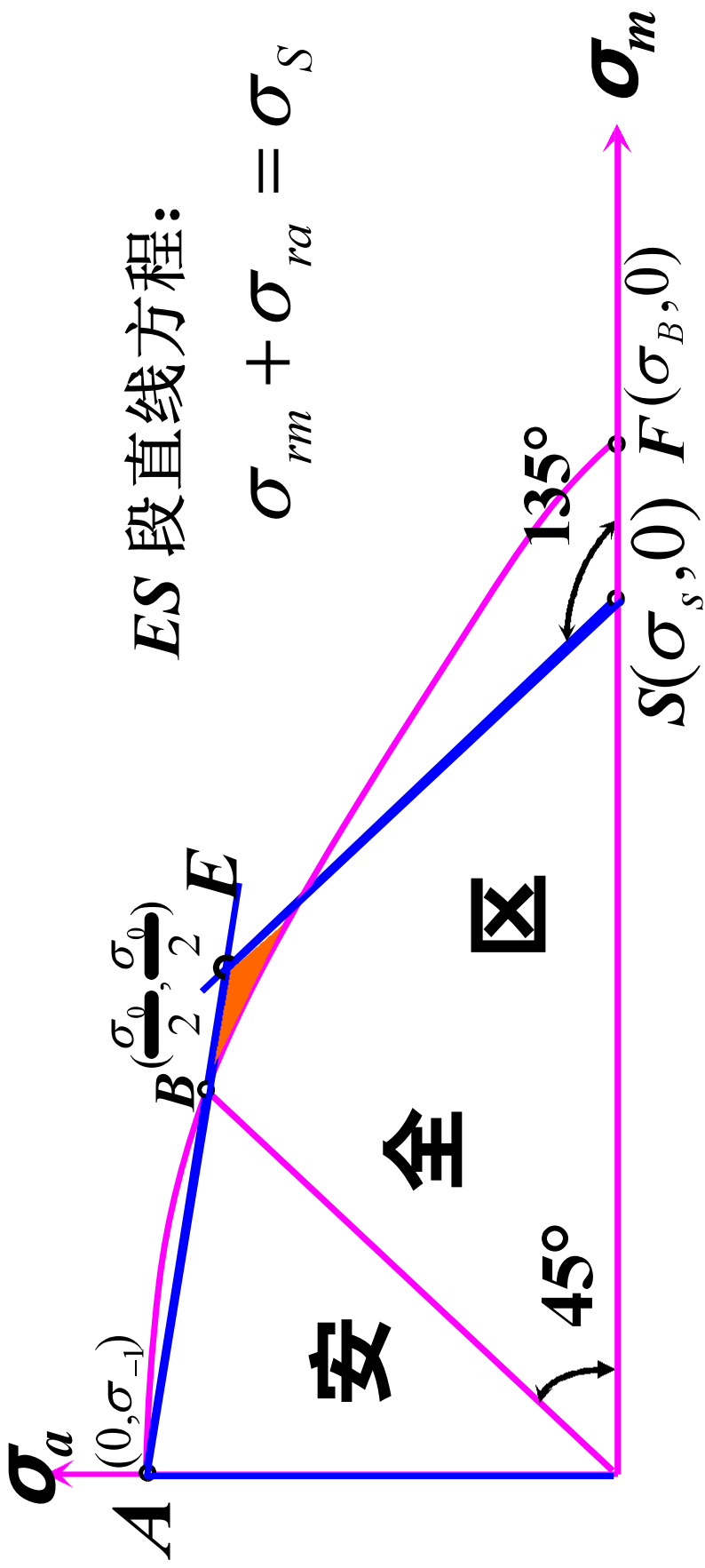
## 2.4 非对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算



材料疲劳极限应力图（等寿命疲劳曲线图） $F(\sigma_B, 0)$

在相同的循环次数 $N$ 下将根据不同的循环特性 $r$ 试验得到的疲劳极限数值描绘在 $\sigma_m - \sigma_a$ 坐标系中得到的线图。

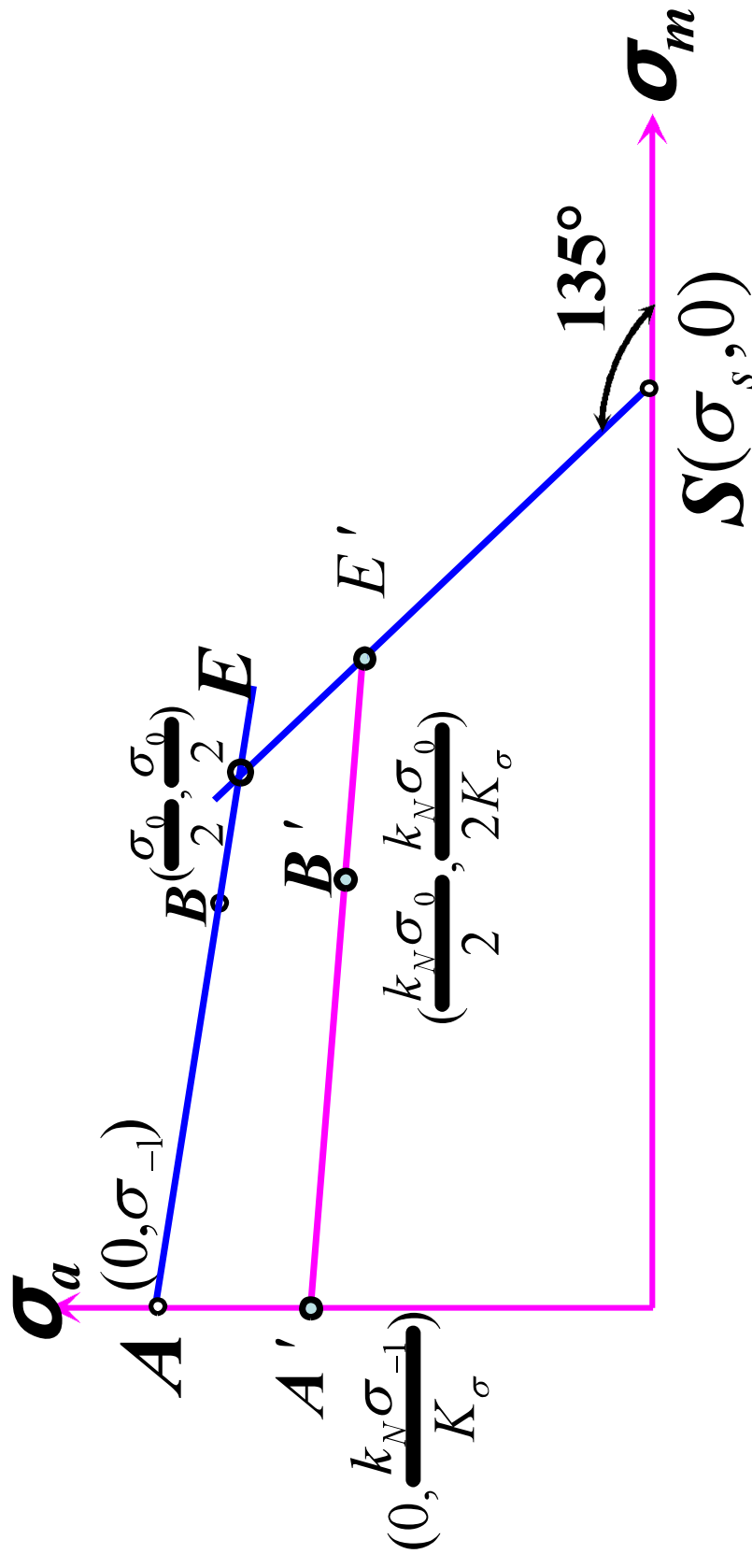
# 材料简化疲劳极限应力图



AE 段直线方程:  $\sigma_{-1} = \sigma_{ra} + \psi_\sigma \sigma_{rm}$  式 (2-31)

$$\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}$$

# 零件简化疲劳极限应力图



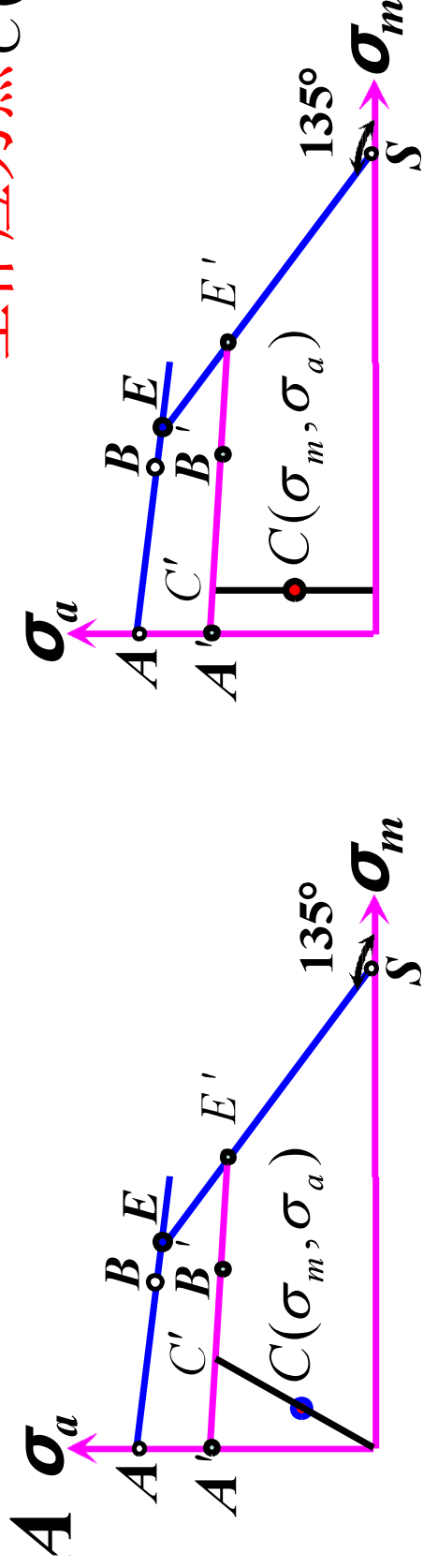
A'E' 段直线方程:  $k_N \sigma_{-1} = K_\sigma \sigma'_{ra} + \psi_\sigma \sigma'_{rm}$

E'S 段直线方程:  $\sigma_{rm} + \sigma_{ra} = \sigma_S$

# 非对称循环稳定变应力变化规律:

(1) 循环特性  $r = \text{常数}$   $\longrightarrow$  简单加载

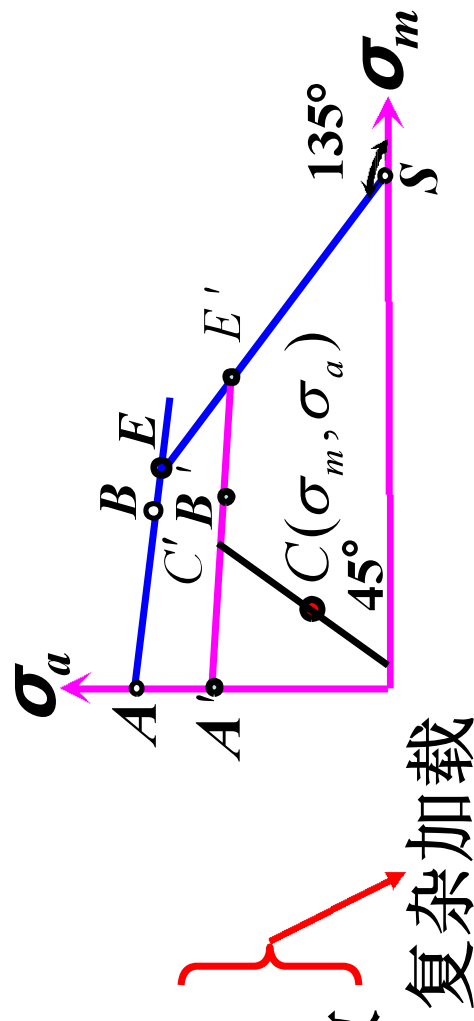
工作应力点  $C(\sigma_m, \sigma_a)$



极限应力点  $C'(\sigma'_{rm}, \sigma'_{ra})$

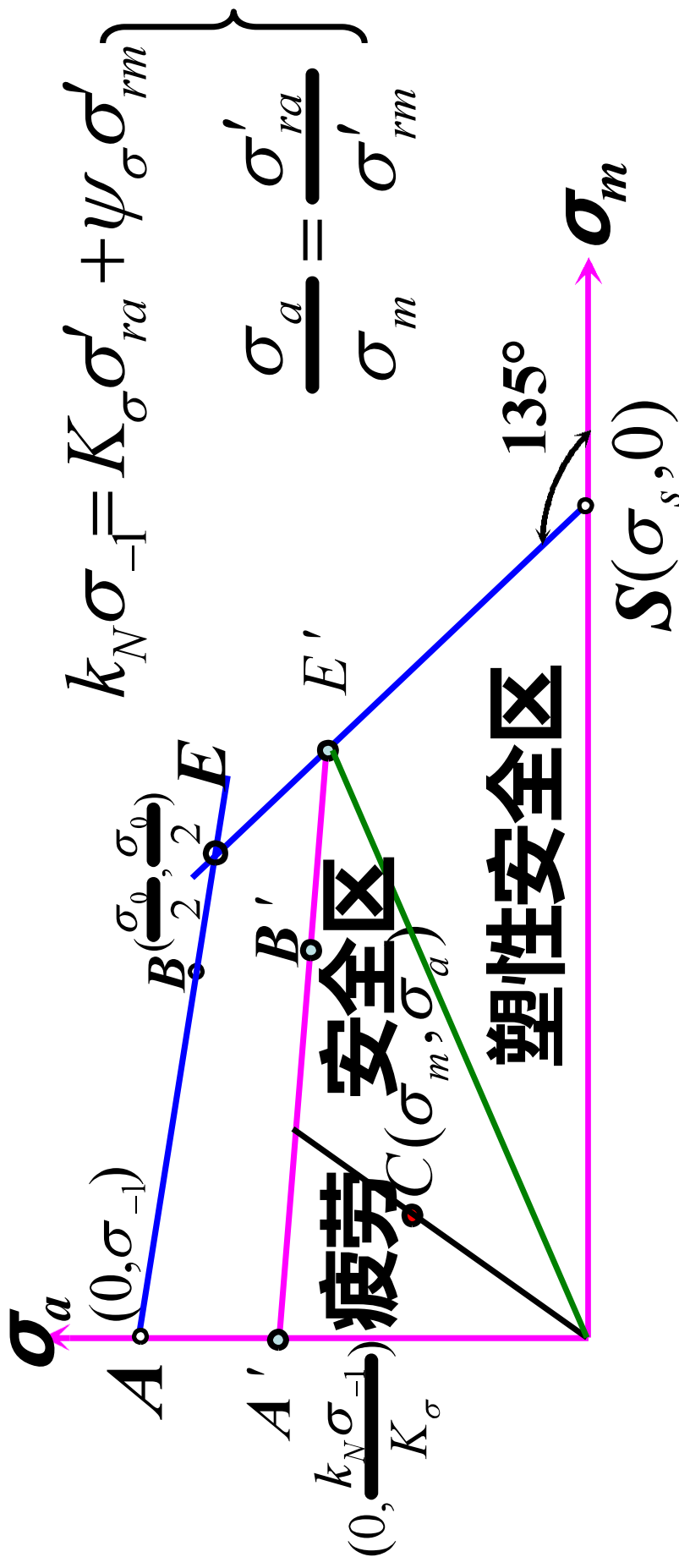
(2) 平均应力  $\sigma_m = \text{常数}$

(3) 最小应力  $\sigma_{\min} = \text{常数}$



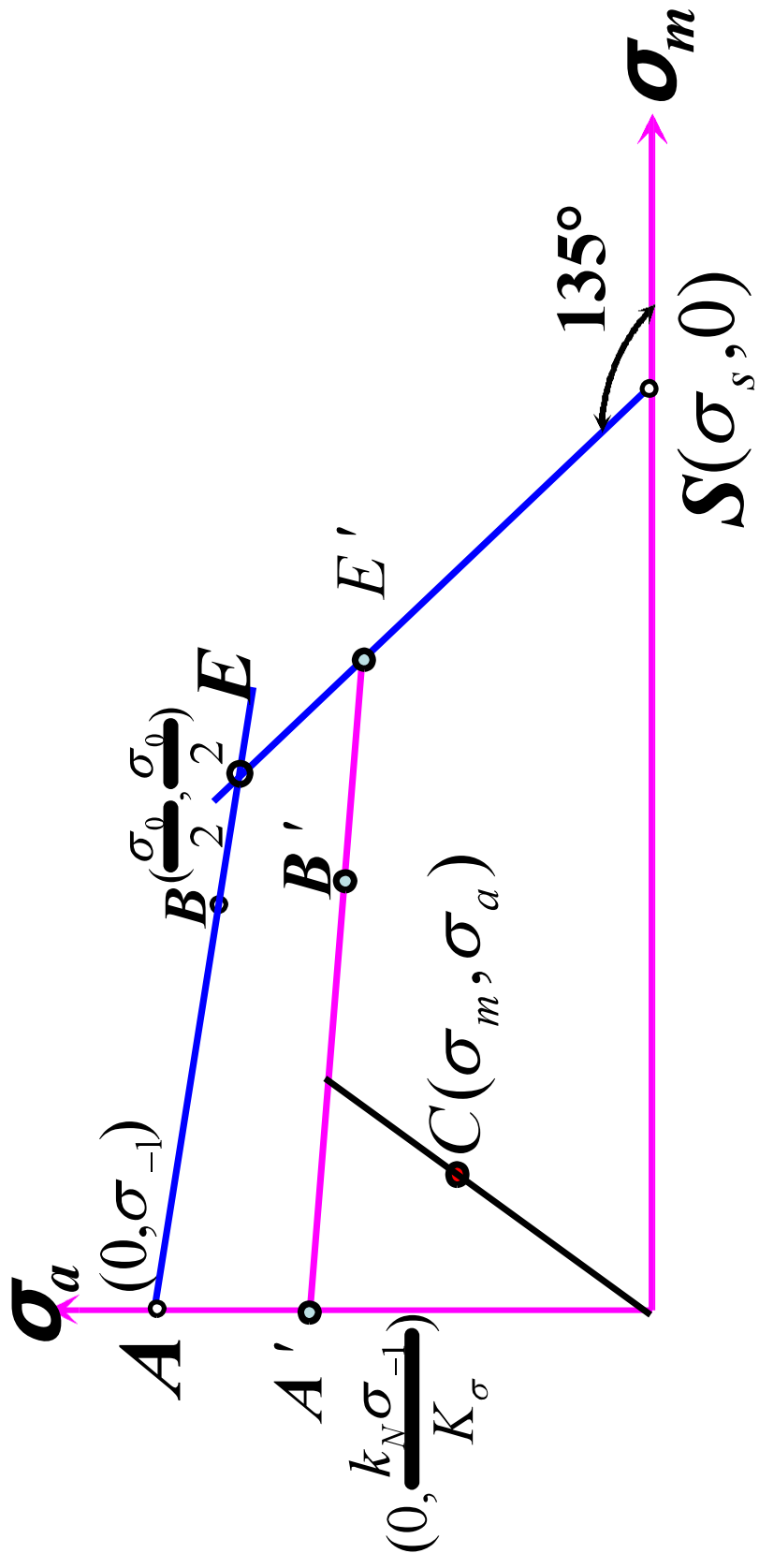
## 2.4.2 非对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

(1) 简单加载 ( $r = \text{常数}$ )



$$\sigma'_{rm} = \frac{k_N \sigma_{-1} \sigma_m}{K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$

$$\sigma'_{ra} = \frac{k_N \sigma_{-1} \sigma_a}{K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$



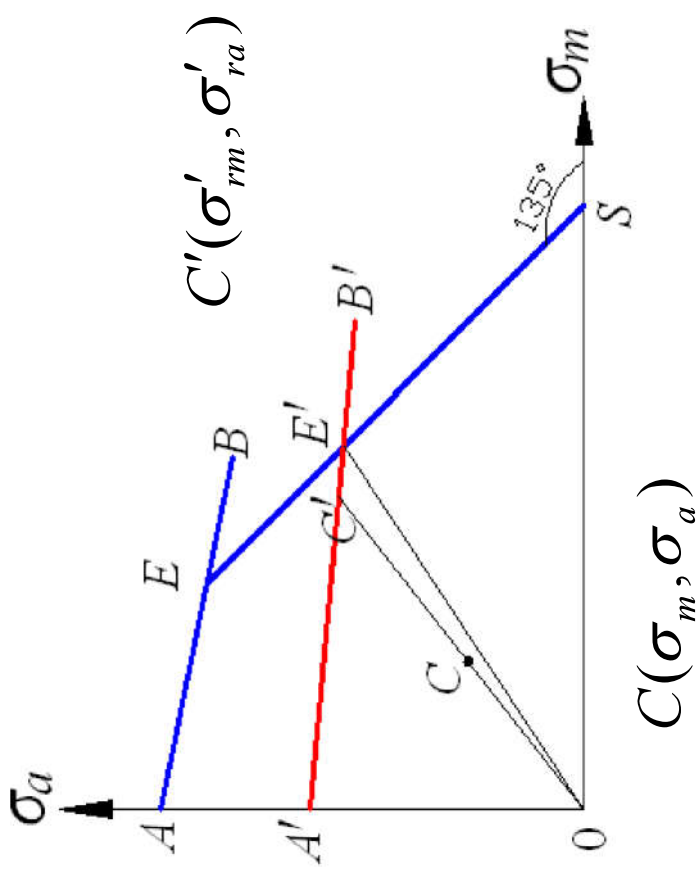
## 2.4.2 非对称循环稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

(1) 简单加载 ( $r = \text{常数}$ )

$$\sigma'_{rm} = \frac{k_N \sigma_{-1} \sigma_m}{K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$

$$\sigma'_{ra} = \frac{k_N \sigma_{-1} \sigma_a}{K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$

$$\sigma'_{\max} = \sigma'_{rm} + \sigma'_{ra} = \frac{k_N \sigma_{-1} (\sigma_m + \sigma_a)}{K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m} = \frac{k_N \sigma_{-1} \sigma_{\max}}{K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$$





非对称循环稳定变应力机械零件的疲劳强度安全系数:

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\sigma} = \frac{\sigma'_{\text{max}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{k_N \sigma_{-1}}{K_{\sigma} \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m} \geq [S_{\sigma}]$$

式 (2-39)

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{\text{lim}}}{\tau} = \frac{\tau'_{\text{max}}}{\tau_{\text{max}}} = \frac{k_N \tau_{-1}}{K_{\tau} \tau_a + \psi_{\tau} \tau_m} \geq [S_{\tau}]$$

式 (2-40)

非对称循环稳定变应力机械零件的静强度安全系数:

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\sigma} = \frac{\sigma'_{\text{max}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{\sigma_s}{\sigma_a + \sigma_m} \geq [S_{\sigma}]$$

式 (2-41)

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{\text{lim}}}{\tau} = \frac{\tau'_{\text{max}}}{\tau_{\text{max}}} = \frac{\tau_s}{\tau_a + \tau_m} \geq [S_{\tau}]$$

式 (2-42)

## 等效对称循环工作应力 $\sigma_{av}$ :

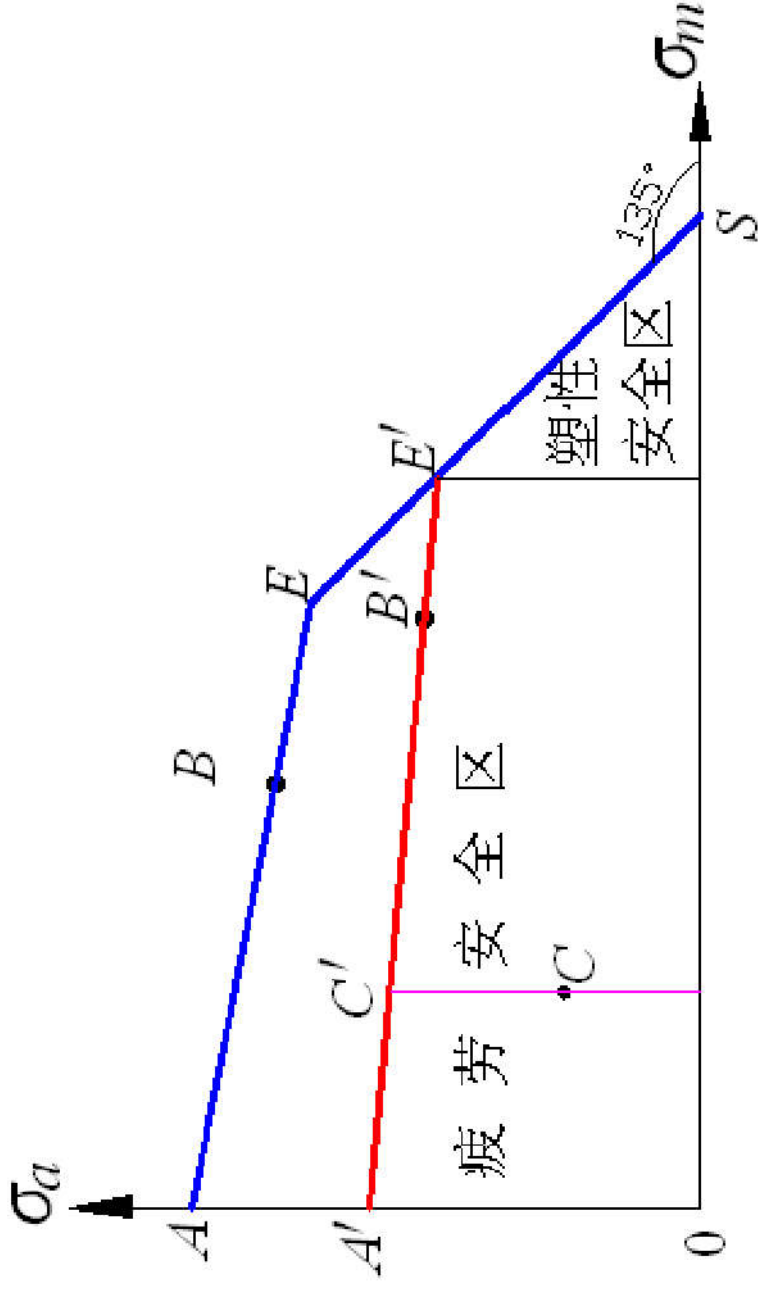
$$S_\sigma = \frac{\sigma_{\lim}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_{-1Ne}}{\sigma_a} = \frac{k_N \sigma_{-1}}{\sigma_a} \geq [S_\sigma] \quad \text{式 (2-29)}$$

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{\lim}}{\sigma} = \frac{\sigma'_{\max}}{\sigma_{\max}} = \frac{k_N \sigma_{-1}}{K_\sigma \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m} \geq [S_\sigma] \quad \text{式 (2-39)}$$

引入:  $\sigma_{av} = \sigma_a + \frac{\psi_\sigma}{K_\sigma} \sigma_m$  式 (2-49)

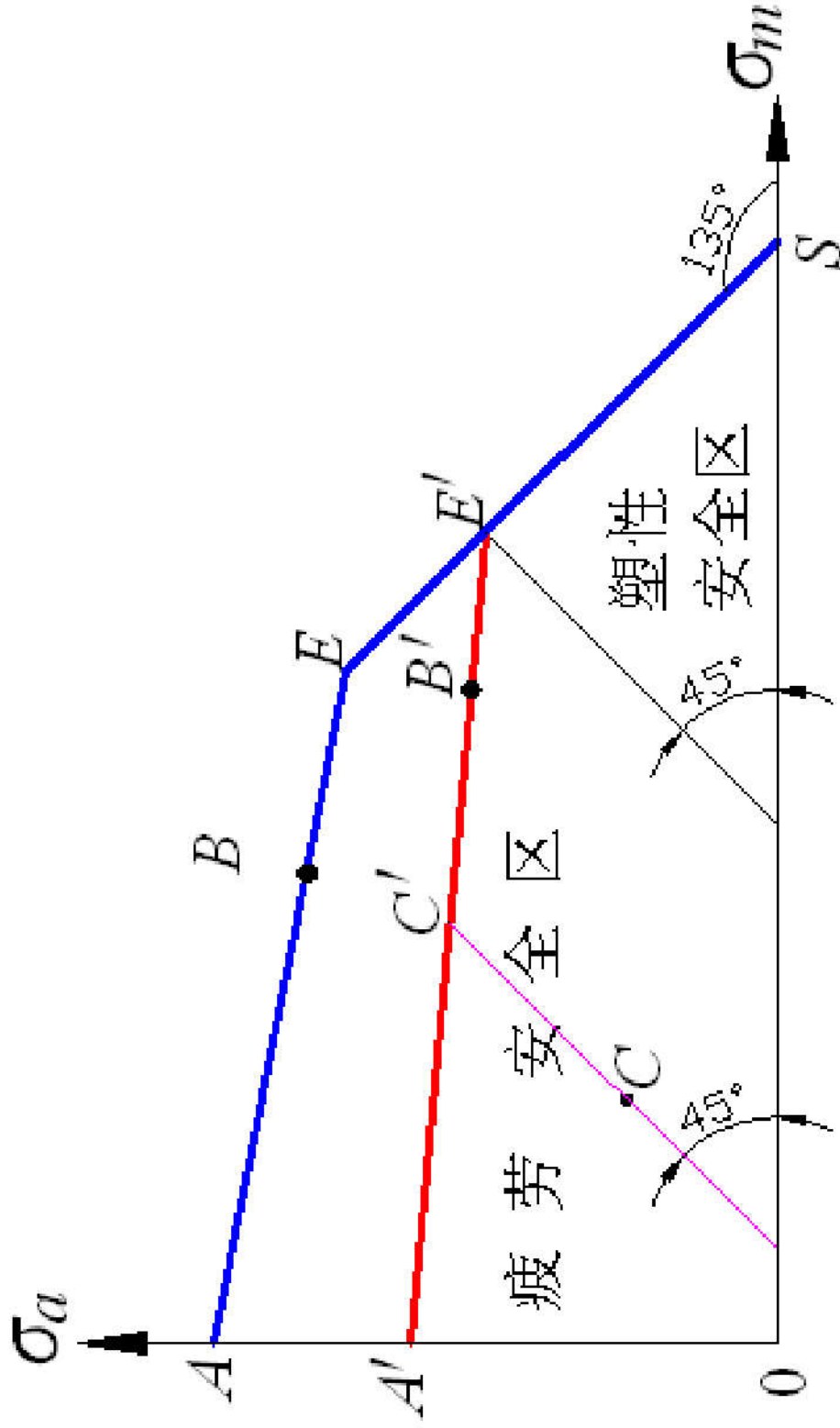
则:  $S_a = \frac{k_N \sigma_{-1}}{\sigma_{av}} \geq [S_\sigma]$  式 (2-50)

(2) 平均应力为常数  $\sigma_m$  (或  $\tau_m$ ) = 常数



强度计算公式见书24页式 (2-43)、  
式 (2-44) 和式 (2-45)

(3) 最小应力为常数  $\sigma_{\min}$  (或  $\tau_{\min}$ ) = 常数



强度计算公式见书24页式 (2-46)、  
式 (2-47) 和式 (2-48)

## 例题2:

- 一 $\leq 350\text{HBS}$ 硬度的钢制轴，其材料的机械性能为：  
 $\sigma_B = 560\text{ MPa}$ ,  $\sigma_S = 280\text{ MPa}$ ,  $\sigma_{-1} = 200\text{ MPa}$ , 循环基数 $N_0 = 10^7$ , 材料常数 $m = 9$ 。已知零件危险截面的 $\sigma_{\max} = 155\text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\min} = 30\text{ MPa}$ ,  $\psi_\sigma = 0.2$ 。该危险截面的有效应力集中系数 $k_\sigma = 1.65$ , 绝对尺寸系数 $\varepsilon_\sigma = 0.81$ , 表面状态系数 $\beta_\sigma = 0.95$ ; 要求应力循环次数不低于 $5 \times 10^5$ 。若取许用安全系数 $[S_\sigma] = 1.5$ , 试校核该零件的强度。

解：(1) 计算危险截面的平均应力和应力幅

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 92.5 \text{MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 62.5 \text{MPa}$$

(2) 计算寿命系数

$$\text{寿命系数 } k_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} = \sqrt[7]{\frac{10^7}{5 \times 10^6}} = 1.39$$

(3) 计算综合影响系数

$$K_\sigma = \frac{k_\sigma}{\varepsilon_\sigma \beta_\sigma} = \frac{1.45}{0.85 \times 0.95} = 1.795$$

#### (4) 计算疲劳安全系数

$$S_{\sigma} = \frac{k_N \sigma_{-1}}{K_{\sigma} \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m} = \frac{1.39 \times 200}{2.14 \times 62.5 + 0.2 \times 92.5} = 1.825$$

$S_{\sigma} > [S_{\sigma}] = 1.5$  该零件的疲劳强度足够。

#### (5) 计算静强度安全系数

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_s}{\sigma_a + \sigma_m} = \frac{280}{62.5 + 92.5} = 1.81$$

$S_{\sigma} > [S_{\sigma}] = 1.5$  该零件的静强度足够。

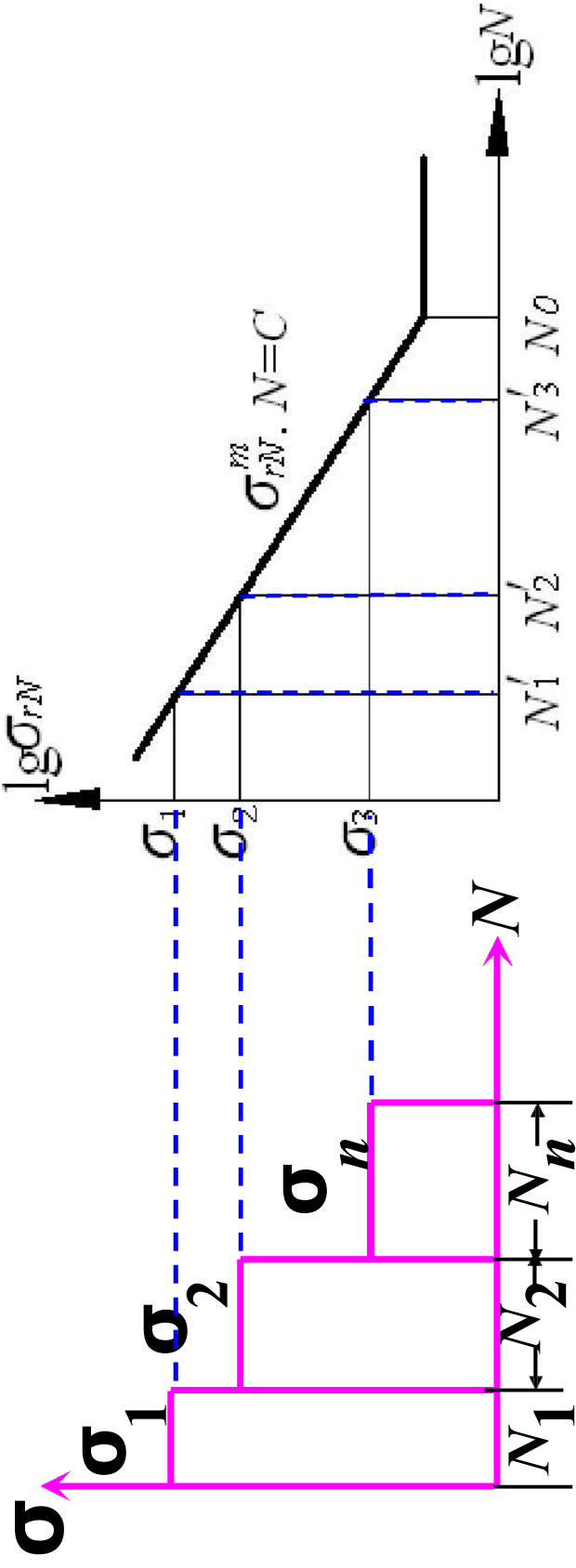
## 2.5 规律性非稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

### 2.5.1 线性疲劳损伤积累理论

**疲劳损伤积累理论：**当材料受高于疲劳极限的应力时，每一次循环都使材料产生一定量的损伤，而该损伤是可以积累的；当积累到临界值时机发生疲劳断裂。

**线性疲劳损伤积累理论：**材料在各个应力下的疲劳损伤是独立进行的，并且总损伤是可以线性累加起来的。





损伤率: 
$$F = \frac{N_1}{N_1'} + \frac{N_2}{N_2'} + \dots + \frac{N_n}{N_n'} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_i'}$$

$\sigma_i$ : 对称循环变应力的最大应力;

$N_i$ : 各个应力对应的工作循环次数;

$N_i'$ : 各个应力对应的材料发生疲劳破坏时的循环次数

## 线性疲劳损伤积累理论表达式：

$$0.7 < F < 2.2$$

$$F = \frac{N_1}{N'_1} + \frac{N_2}{N'_2} + \dots + \frac{N_n}{N'_n} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N'_i} = 1$$

计算时通常  
取  $F=1$ 。

当损伤率达到100%即  $F=1$  时，材料发生疲劳破坏。

## 试验结果表明：

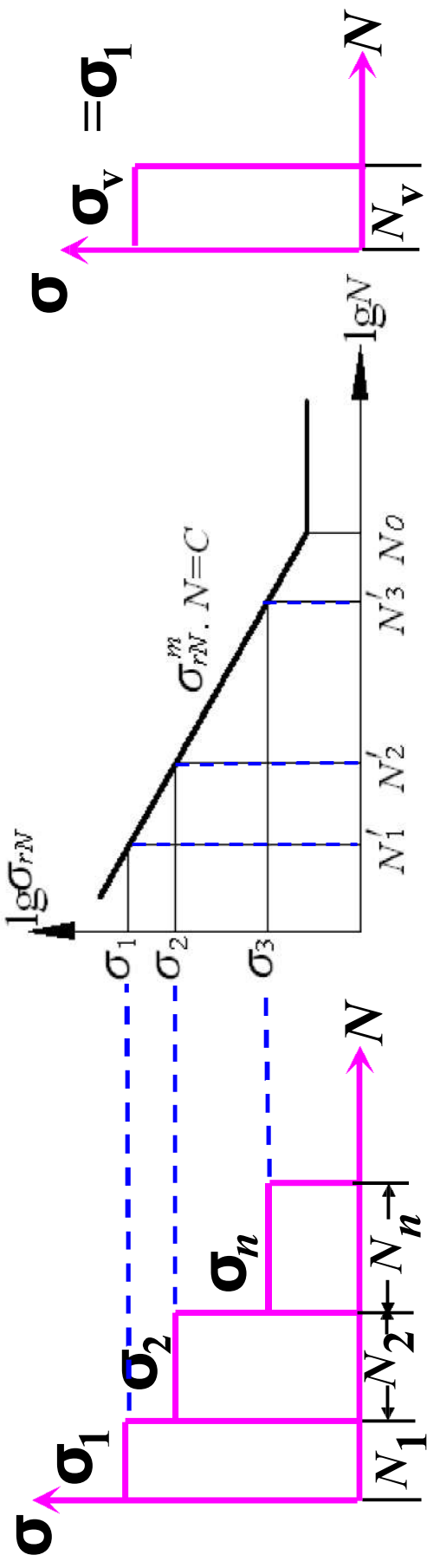
- 1) 当作用的各级应力幅无巨大差别以及无短时超载时，这个规律是正确的。
- 2) 当各级应力是先作用最大的，然后应力依次降低时， $F < 1$ 。
- 3) 当各级应力是先作用最小的，然后应力依次增大时， $F > 1$ 。

## 2.5.2 规律性非稳定应力下零件的疲劳强度计算

**计算方法:** 先将非稳定应力折算成单一的与其总寿命损伤率相等的等效稳定变应力 $\sigma_v$ （简称等效应力），然后再按稳定变应力进行疲劳强度计算。

**等效应力 $\sigma_v$ :** 通常取非稳定应力中作用时间最长和（或）起主要作用的应力。

## 2.5.2 规律性非稳定变应力下零件的疲劳强度计算



$$N_v = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_v} \right)^m N_i \quad \dots \text{式 (2-54)}$$

$$\sigma_{-1N_v} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_v}} \sigma_{-1} = k_N \sigma_{-1} \quad \dots \text{式 (2-55)}$$

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1N_v e}}{\sigma_v} = \frac{k_N \sigma_{-1} / K_\sigma}{\sigma_v} \geq [S_\sigma] \quad \dots \text{式 (2-56)}$$

### 例题3:

- 45钢调质后的机械性能为:  $\sigma_{-1} = 307\text{MPa}$ , 循环基数  $N_0 = 5 \times 10^6$ , 材料常数  $m = 9$ 。现用此材料作一零件, 以对称循环变应力  $\sigma_1 = 500\text{MPa}$  作用  $10^4$  次,  $\sigma_2 = 400\text{MPa}$  作用  $10^5$  次。

- 1) 计算该零件在此条件下的疲劳安全系数。
- 2) 若再施加  $\sigma_3 = 350\text{MPa}$ , 还能再循环多少次才会使零件破坏?

解： (1) 取等效应力计算等效循环次数

$$\sigma_V = \sigma_1 = 500\text{MPa}$$

$$N_V = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_V}\right)^m N_i = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1}\right)^m \times 10^4 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^m \times 10^5 = 2.342 \times 10^4$$

(2) 计算寿命系数

$$k_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_V}} = \sqrt[9]{\frac{5 \times 10^6}{2.342 \times 10^4}} = 1.814$$

(3) 计算安全系数

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{k_N \sigma_{-1} / K_\sigma}{\sigma_a} = \frac{1.814 \times 307 / 1}{500} = 1.114$$

#### (4) 计算每个疲劳极限应力下的循环次数

$$N_1' = N_0 \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right)^m = 5 \times 10^6 \times \left( \frac{307}{500} \right)^9 = 0.0625 \times 10^6$$

$$N_2' = N_0 \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^m = 5 \times 10^6 \times \left( \frac{307}{400} \right)^9 = 0.47 \times 10^6$$

$$N_3' = N_0 \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_0} \right)^m = 5 \times 10^6 \times \left( \frac{307}{350} \right)^9 = 1.55 \times 10^6$$

#### (5) 计算循环次数 $N_3$

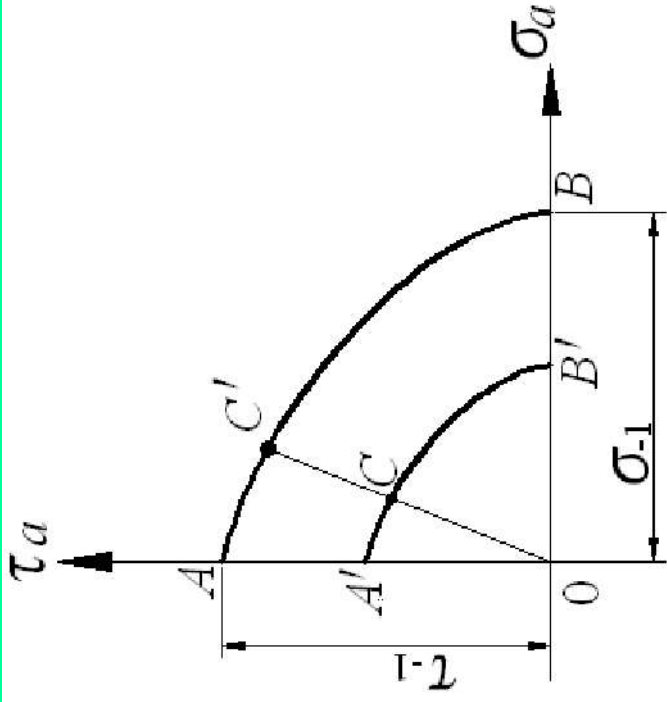
$$\frac{N_1}{N_1'} + \frac{N_2}{N_2'} + \frac{N_3}{N_3'} = 1 \quad \frac{10^4}{0.0625 \times 10^6} + \frac{10^5}{0.47 \times 10^6} + \frac{N_3}{1.55 \times 10^6} = 1$$

$$N_3 = 0.97 \times 10^6$$

## 2.6 双向稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

- 在零件截面上同时作用有同相位的法向和切向稳定变应力时，为双向稳定变应力

### 2.6.1 双向稳定变应力为对称循环稳定变应力



$$S_{\sigma} = \frac{k_N \sigma_{-1} / k_{\sigma}}{\sigma_a}$$

$$S_{\tau} = \frac{k_N \sigma_{-1} / k_{\tau}}{\tau_a}$$

零件的复合疲劳强度安全系数

$$S = \frac{S_{\sigma} S_{\tau}}{\sqrt{S_{\sigma}^2 + S_{\tau}^2}} \geq [S]$$



## 2.6 双向稳定变应力下机械零件的疲劳强度计算

$$S_{\sigma} = \frac{k_N \sigma_{-1}}{K_{\sigma} \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m}$$

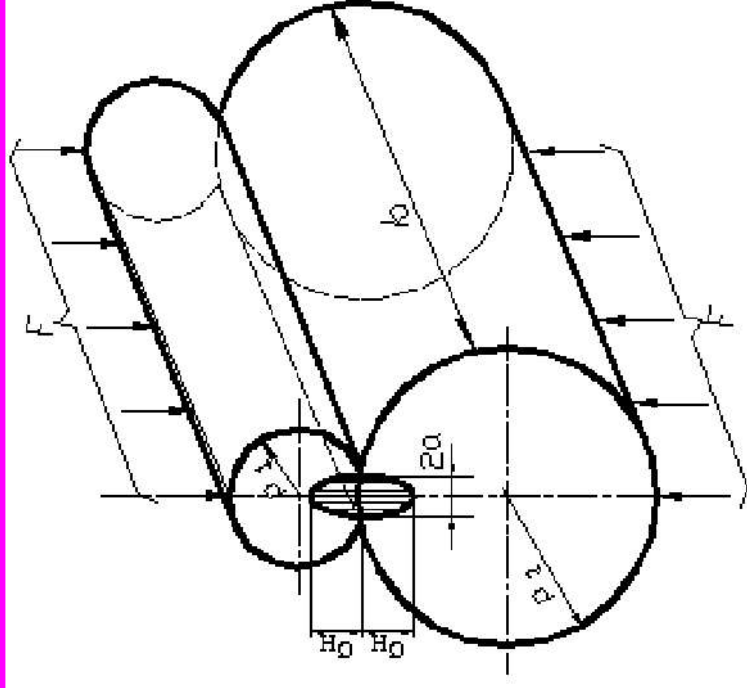
$$S_{\tau} = \frac{k_N \tau_{-1}}{K_{\tau} \tau_a + \psi_{\tau} \tau_m}$$

零件的复合疲劳强度安全系数:

$$S = \frac{S_{\sigma} S_{\tau}}{\sqrt{S_{\sigma}^2 + S_{\tau}^2}} \geq [S]$$

## 2.7 机械零件的接触强度

- **接触应力概念:** 当两个零件以点或线接触时, 在外力作用下, 两零件在接触处所形成的应力。



$$\sigma_H = \frac{F}{\pi b} \sqrt{\frac{1}{\rho_\Sigma} \left[ \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right]}$$

$$\frac{1}{\rho_\Sigma} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}$$

$\rho_\Sigma$  综合曲率半径

## ● 接触疲劳强度

当零件在循环接触条件下工作时，零件上任一点的接触应力在 $0 \sim \sigma_H$ 之间变化，因此接触应力是脉动循环变应力，在其作用下的破坏为疲劳破坏，对应的零件强度称为**接触疲劳强度**。

● 零件表面接触疲劳强度条件:  $\sigma_H \leq [\sigma_H]$

## 2.8 机械零件材料的选用原则

### 一、常用材料

铁：灰铸铁、球墨铸铁...  
(如：TH300 QT500-5)

黑色金属 {

钢：低碳钢、中碳钢、高碳钢、合金钢...  
(如：08F 45 60 1Cr18)

有色金属 {

有色金属：铝合金(LY12)、铜合金(ZCuSn10P1).....

### 金属材料

高分子材料：塑料、橡胶、合成纤维

优点是原料丰富、密度小、耐腐蚀性好  
缺点是容易老化、耐阻燃性差。

### 非金属材料

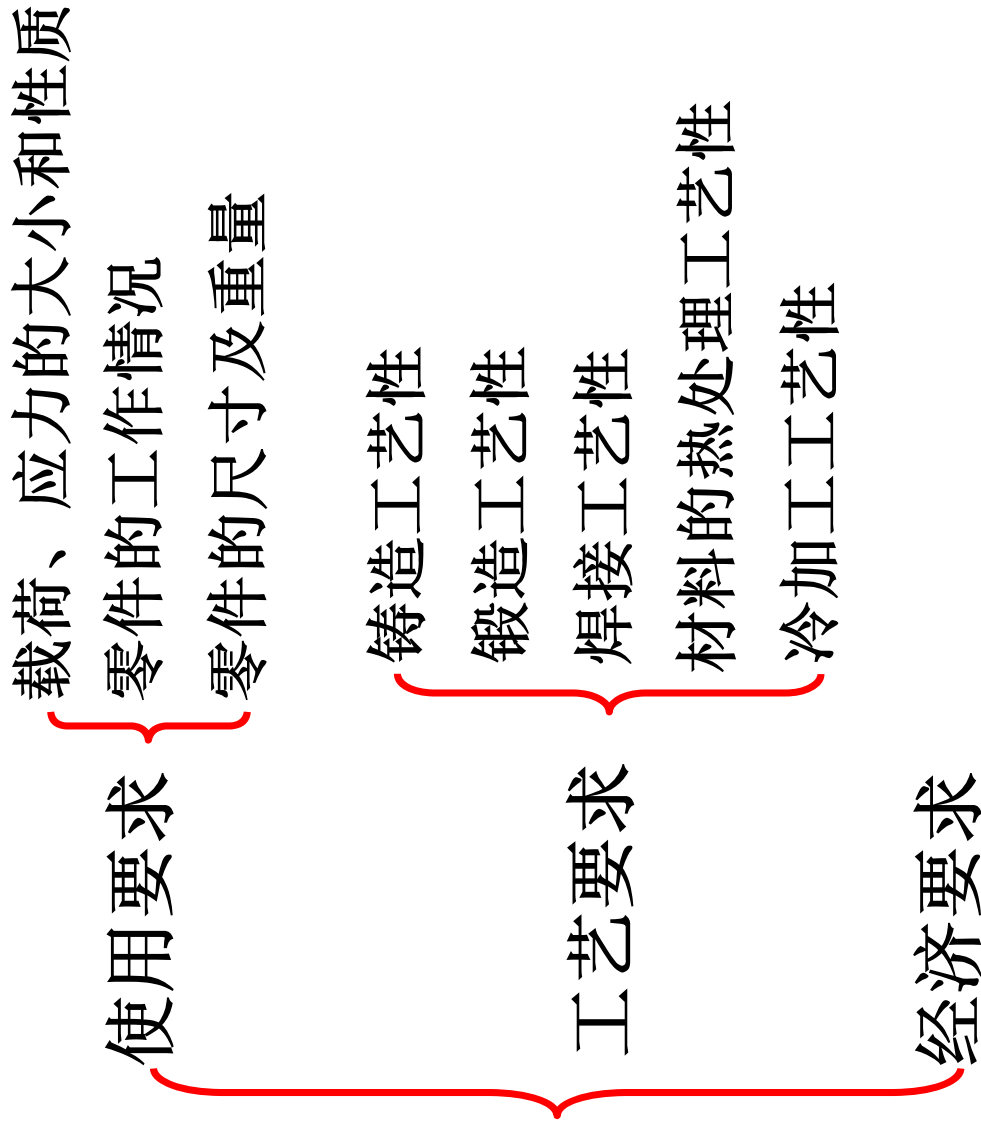
陶瓷： $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiC}$ 高温结构陶瓷、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 刀具结构陶瓷

优点是强如钢、轻如铝、硬如金刚石  
缺点是比较脆、加工工艺性差、价格昂贵。

复合材料：优点是强度高、弹性模量大、质量轻  
缺点是耐热性差、导热导电性能较差、价格贵

## 2.8 机械零件材料的选用原则

### 二、机械零件材料的选用原则：



- 使用要求一般是指零件的受载情况、工作情况、零件的重要性以及对零件尺寸和重量的限制等。

- 当零件尺寸主要取决于强度时，应选用强度较高的材料；

- 若零件的尺寸取决于刚度，应选用弹性模量较大的材料；

- 在滑动摩擦下工作的零件，应选用减摩耐磨性能好的材料；

- 在可能发生磨损之处，应选用适于进行表面硬化处理的材料，以提高其耐磨性；

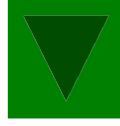
- 高温下工作的零件应选用耐热材料；

- 在潮湿或腐蚀介质中工作的零件，应选用防锈和耐腐蚀性能好的材料。



所谓工艺要求是指所选材料的冷、热加工工艺性要求。

- 形状复杂，尺寸较大的零件宜选用铸件或焊接件；
- 大批生产时宜选用铸件，小批或单件生产时宜选用焊接件，所选材料应具有良好的铸造性能或焊接性能；
- 结构简单的零件可选用锻件，视批量大小而决定是采用模锻还是自由锻。
- 毛坯的制造方法不同，所选择的材料也不一样。



- **经济性**首先体现在**材料本身的价格**上。在选择满足**价格低廉**和**工艺要求**的基础上，应尽量选择**价格低廉**的材料，这对于**大批量制造**的零件尤为重要。

- 其次是**材料的加工费用**，当零件的**加工费用**在零件的**成本**中占有**很大比例**时，选择**材料**要考虑零件的**加工性能**。

例如**箱体类零件**通常采用**灰铸铁**铸造，但在**小批量**或**单件生产**时，可采用**钢板焊接箱体**，以**简化工艺**，降低**成本**。

- **材料的利用率**



## 2.9 机械零件的工艺性及设计的标准化

在一定的生产规模和生产条件下，花费劳动量最小，加工、装配及维修费用最少的零部件，称为具有良好的工艺性。

合理选择毛坯种类

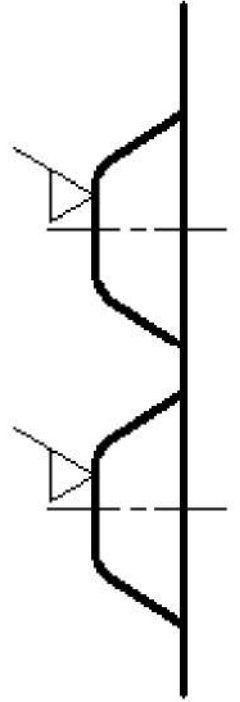
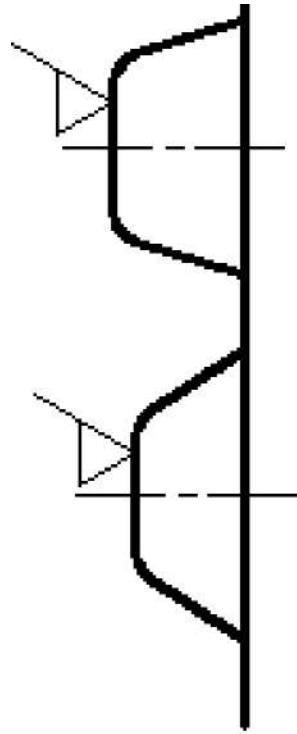
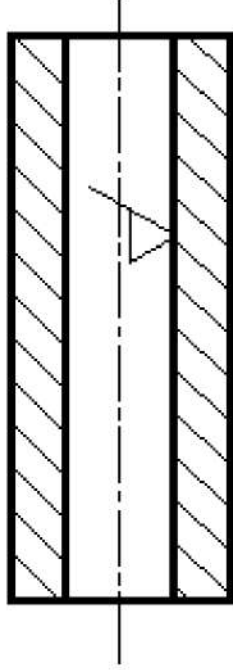
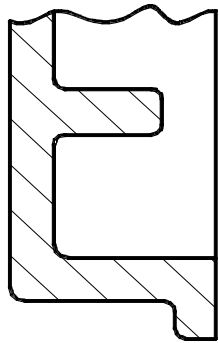
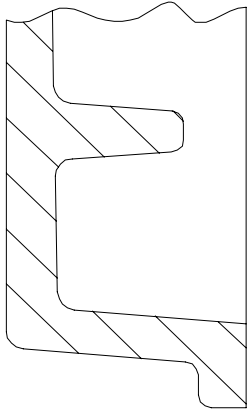
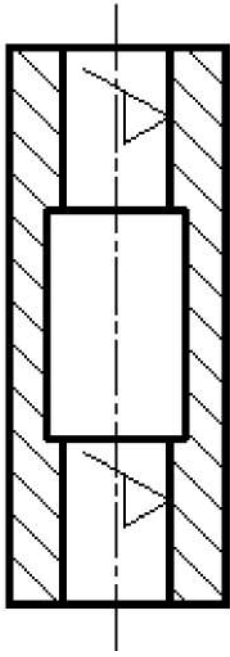
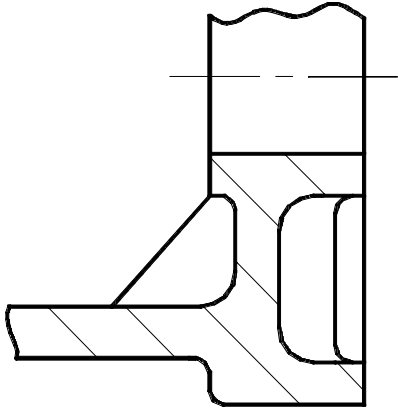
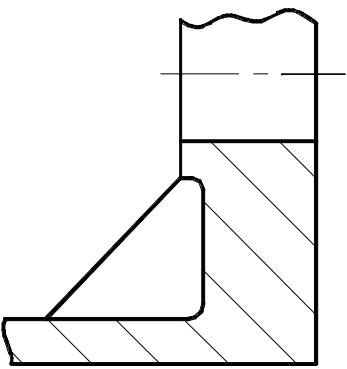
造型简单合理

铸件结构的工艺性

切削加工工艺性

零部件的拆装工艺性

机械零件的  
工艺性



## 二、机械零件设计中的标准化

■ 标准化就是要通过对零件的尺寸、结构要素、材料性能、设计方法、制图要求等，制定出大家共同遵守的标准。

### ■ 标准化的益处：

- 1)能以最先进的方法在专门化工厂中对那些用途广泛的零件进行大量的、集中的制造，以保证产品质量、降低生产成本。减轻设计工作量，便于零部件的互换和组织专业化的大生产。
- 2)统一了材料的和零件的性能指标，使其能共进行比较，提高零件的可靠性，便于零部件的互换和组织专业化的大生产。
- 3)采用标准结构及零部件，可以简化设计工作，缩短设计周期，同时也简化了机器的维修工作。
- 4)机械制图的标准化保证了工程语言的统一。

## 二、机械零件设计中的标准化

### ■ 与设计有关的标准:

国际标准    国家标准    行业标准    企业标准等  
如:    **ISO**    **GB**    **JB、HB**    **QB**

### ■ 国标分为: 强制标准和推荐标准

**强制性国家标准:** 代号为**GB** ××××-××××  
(为批准年代)(为标准序号)

**强制性国标**必须严格遵照执行, 否则就是违法。

**推荐性国家标准:** 代号为**GB / T** ××××-××××, 这类标准占整个国标中的绝大多数。如无特殊理由和特殊需要, 必须遵守这些国标, 以期取得事半功倍的效果。

## 系列化:

- 对于同一产品，为了符合不同的使用条件，在同一基本结构或基本尺寸条件下，规定出若干个辅助尺寸，称为不同的系列。

## 通用化:

- 是指系列之内或跨系列的产品之间尽量采用统一结构和尺寸的零部件，以较少的规格品种满足生产和使用的广泛需要。