

第2章 机械零件的强度

§ 2-1 载荷和应力

§ 2-2 机械零件的静强度

§ 2-3 机械零件的疲劳强度

§ 2-4 机械零件的表面接触强度

§ 2-5 机械零件的冲击强度

§ 2-1 载荷和应力

一、载荷的分类

载荷：进行强度计算所依据的作用于零件上的力、弯矩、扭矩统称为载荷。

静载荷——载荷的大小和方向不随时间变化或变化缓慢的载荷。

动载荷——载荷的大小和方向随时间作周期性或非周期性变化的载荷。

- 1) 交变载荷：随时间作周期性变化的载荷。
- 2) 冲击载荷：物体运动发生突变所引起的载荷。

§ 2-1载荷和应力

一、载荷的分类

工作载荷—机器正常工作时所受的实际载荷。

名义载荷F—理想、平稳的工作条件下作用在零件上的载荷。

计算载荷 F_{ca} —综合考虑了各种实际影响因素之后，用于零件设计计算的载荷。

$$F_{ca} = KF$$

K—载荷系数。



二、应力的分类

静应力——应力的大小和方向不随时间变化或变化缓慢的应力

变应力——应力的大小和方向随时间作周期性或非周期性变化的应力

变应力：稳定变应力和非稳定变应力

稳定变应力：非对称循环变应力、脉动循环变应力、对称循环变应力。

非稳定变应力：规律性和无规律性非稳定变应力

平均应力:

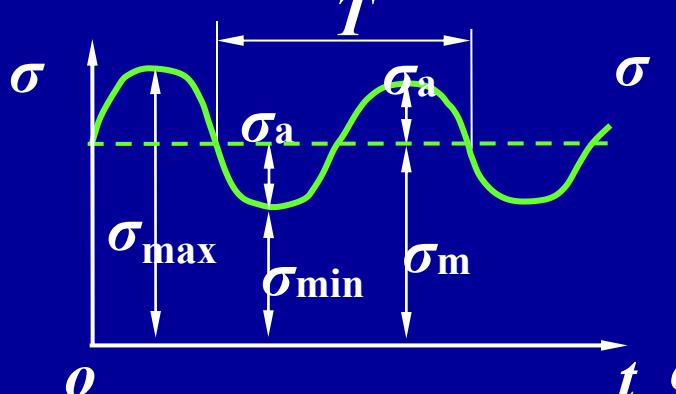
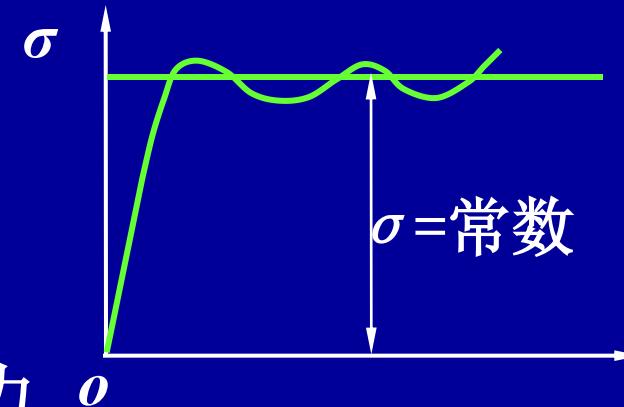
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

应力幅:

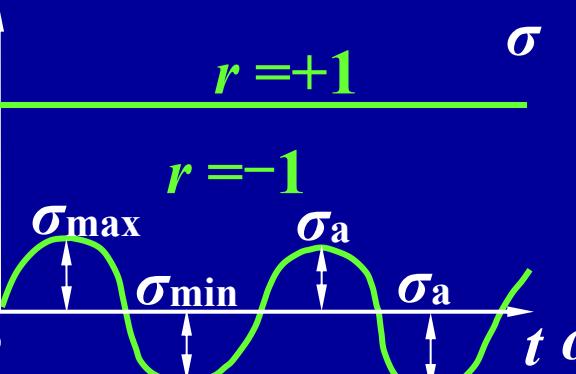
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

变应力的循环特性:

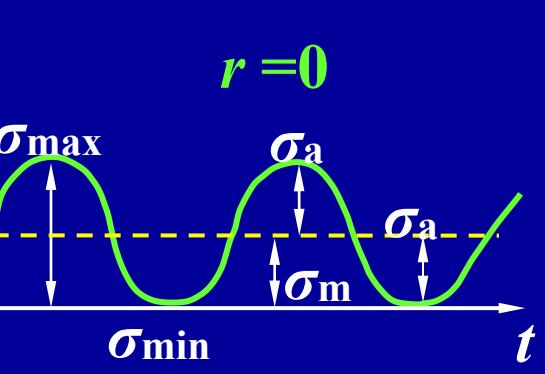
$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \begin{cases} -1 & \text{---对称循环变应力} \\ 0 & \text{---脉动循环变应力} \\ +1 & \text{---静应力 (变应力特例)} \\ -1 < r < +1 & \text{---非对称循环变应力} \end{cases}$$



非对称循环变应力



对称循环变应力



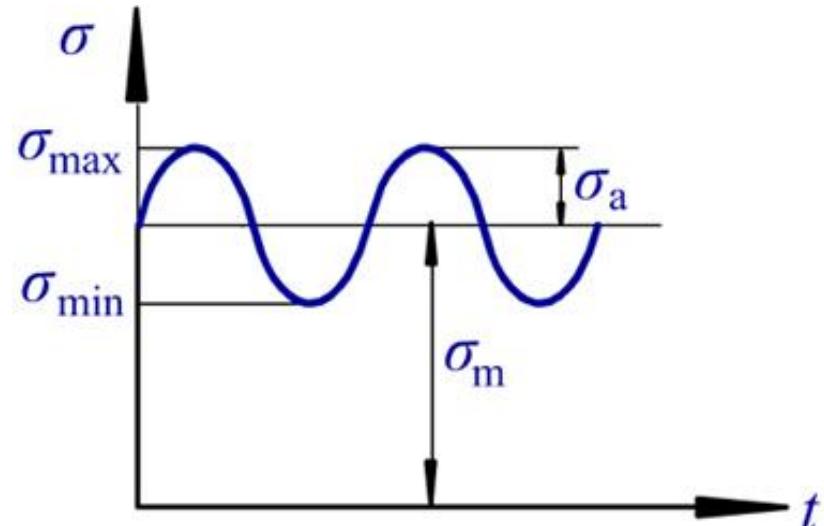
脉动循环变应力

变应力的描述：

σ_m —平均应力； σ_a —应力幅值

σ_{\max} —最大应力； σ_{\min} —最小应力

r —应力比（循环特性）



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

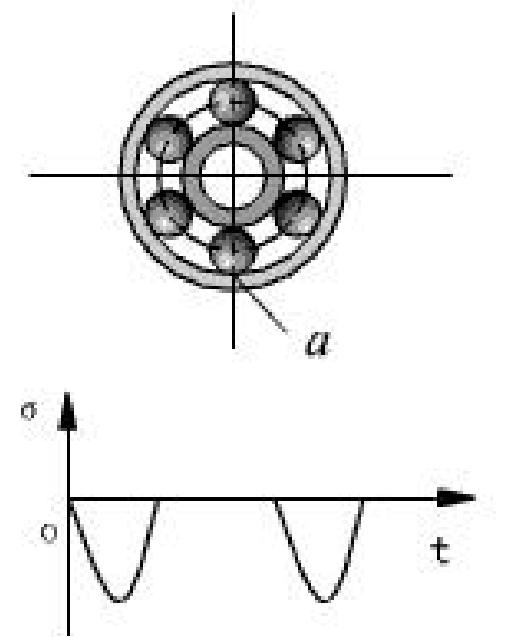
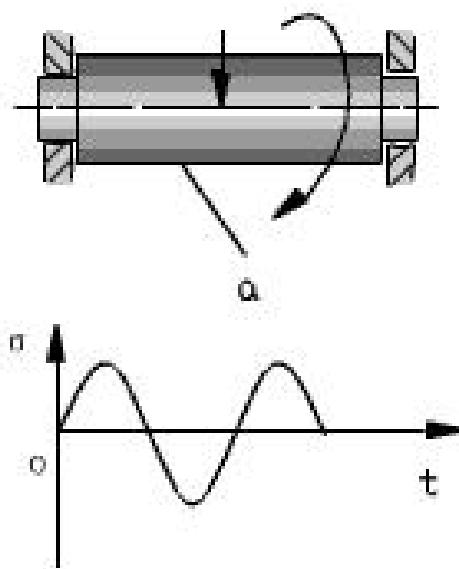
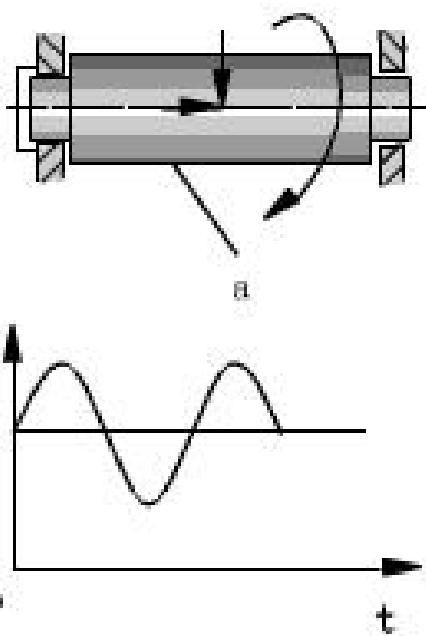
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

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

描述规律性的交变应力可有5个参数，但其中只有两个参数是独立的。

注意：静应力只能在静载荷作用下产生，失效形式：断裂或塑性变形。

变应力可由动载荷或静载荷产生，失效形式：疲劳失效。



§ 2-2 机械零件的静强度

静应力时零件的主要失效形式：塑性变形、断裂

一、单向应力下的塑性零件

设单向正应力和切应力分别为 σ 和 τ

1. 强度条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ca} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\lim}}{[s_{\sigma}]} = \frac{\sigma_s}{[s_{\sigma}]} \\ \tau_{ca} \leq [\tau] = \frac{\tau_{\lim}}{[s_{\tau}]} = \frac{\tau_s}{[s_{\tau}]} \end{array} \right.$$

σ_{ca} 、 τ_{ca} — 计算正应力和计算切应力；

σ_{\lim} 、 τ_{\lim} — 材料的极限正应力和极限切应力；

$[s_{\tau}]$ 、 $[s_{\sigma}]$ — 许用安全系数

σ_s 、 τ_s — 塑性材料的屈服极限

2. 安全系数条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{\sigma} = \frac{\sigma_s}{\sigma_{ca}} \geq [s_{\sigma}] \\ s_{\tau} = \frac{\tau_s}{\tau_{ca}} \geq [s_{\tau}] \end{array} \right.$$

s_{σ} 、 s_{τ} —计算安全系数

二、复合应力时的塑性材料零件

按第三或第四强度理论对弯扭复合应力进行强度计算
设单向正应力和切应力分别为: σ 和 τ

由第三强度理论: (最大剪应力理论)

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

由第四强度理论: (最大变形能理论)

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

σ_b 、 τ_T —弯曲正应力; 扭转切应力。

工程中可以近似的取：

$$\frac{\sigma_s}{\tau_s} = 2 \quad \text{或} \quad \frac{\sigma_s}{\tau_s} \approx \sqrt{3}$$

复合安全系数

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{ca} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_b^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\tau_s}\right)^2 \tau_T^2}} \geq [s] \\ S_{ca} = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq [s] \end{array} \right. \quad [S] : \text{许用复合安全系数}$$

S_σ 、 S_τ 分别为单向正应力和切应力时的安全系数

三、脆性材料与低塑性材料

失效形式：断裂

脆性材料极限应力： σ_B （拉压断裂强度极限） $\sigma_{\lim} = \sigma_B$

τ_B （剪切断裂强度极限） $\tau_{\lim} = \tau_B$

强度条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ca} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_B}{[s_\sigma]} \quad \text{或} \quad s_\sigma = \frac{\sigma_B}{\sigma_{ca}} \geq [s_\sigma] \\ \tau_{ca} \leq [\tau] = \frac{\tau_B}{[s_\tau]} \quad \quad \quad s_\tau = \frac{\tau_B}{\tau_{ca}} \geq [s_\tau] \end{array} \right.$$

注意：

低塑性材料（低温回火的高强度钢）——强度计算应计入**应力集中**的影响。

脆性材料（铸铁）——强度计算**不考虑应力集中**。

一般来说，工作期内**应力变化次数 $<10^3$** 可按**静应力强度**计算。

四、许用安全系数的选取

$S \uparrow \rightarrow$ 零件尺寸大，结构笨重。

$S \downarrow \rightarrow$ 可能不安全。

原则：在保证安全可靠的前提下，尽可能小。

典型的 S 可通过查P23表2. 2求得。

无表可查时，按以下原则取：

- | | | |
|----------|-----------------|-------------------|
| (1) 静应力: | (1) 塑性材料: | 表2. 2 |
| | (2) 脆性材料、低塑性材料: | |
| | $[S]=2\sim 4$ | $[S]=2\sim 3$ |
| (2) 变应力: | (1) 塑性材料: | $[S]=1.5\sim 4.5$ |
| | (2) 脆性材料: | $[S]=2\sim 6$ |

表 2.2 静应力下的许用安全系数

塑性材料					脆性材料
σ_s / σ_B	0.45~0.55	0.55~0.70	0.70~0.90	铸件	
[S]	1.2~1.5	1.4~1.8	1.7~2.2	1.6~2.5	3~4

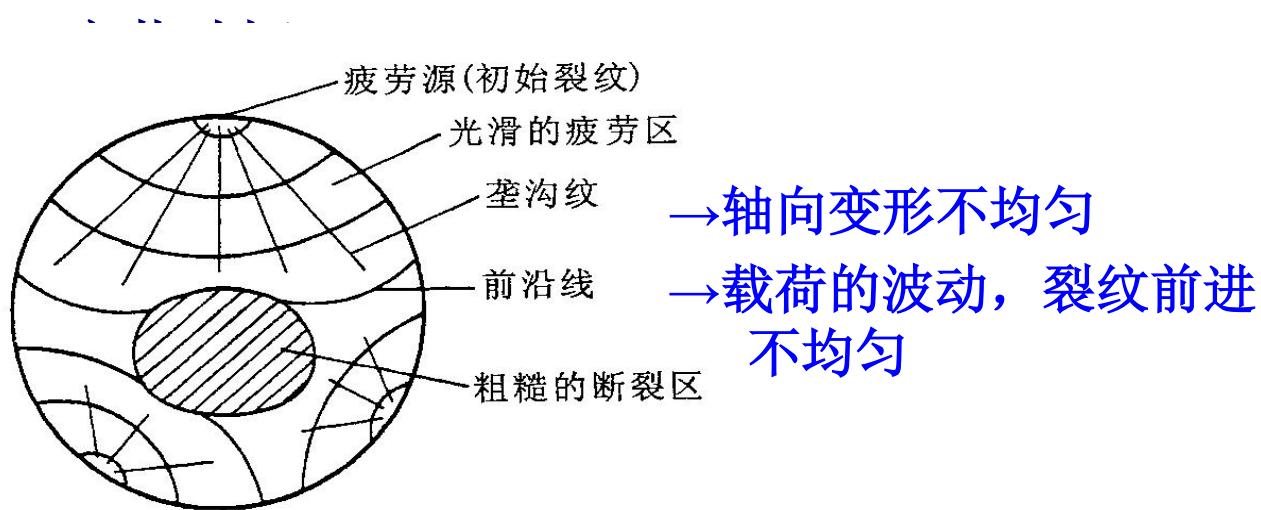
注: 当载荷和应力的计算不十分准确时, 塑性材料 [S] 加大 20%~50%, 脆性材料 [S] 加大 50%~100%。

2.3 机械零件的疲劳强度

一、疲劳破坏的过程及断面特征

机械零件在循环应力作用下。即使循环应力 $\sigma_{\max} < \sigma_B$ 的

而应力的每次循环也仍然会对零件造成轻微的损伤。随应力循环次数的增加，当损伤累积到一定程度时，在零件的表面或内部将出现（萌生）裂纹。之后，裂纹又逐渐扩展直到发生完全断裂。这种缓慢形成的破坏称为

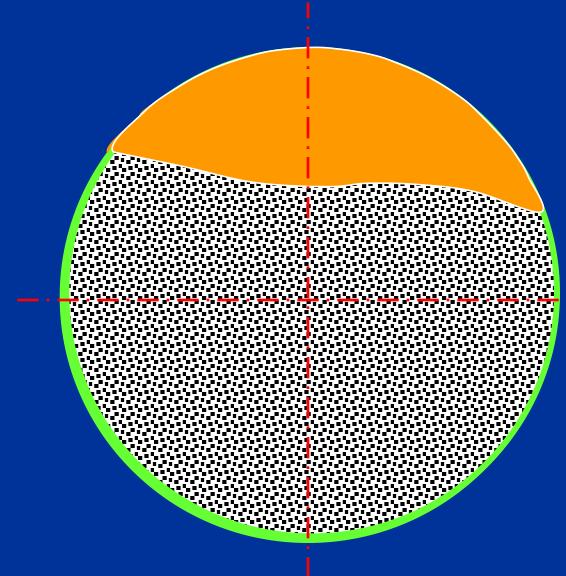


- ◆ 疲劳断裂的过程一般由三个阶段构成：
- ◆ 第一个阶段是零件表面上应力较大位置的材料发生剪切滑移，产生初始裂纹，形成疲劳源；
- ◆ 第二个阶段为裂纹尖端在切应力下发生反复塑性变形，使裂纹逐渐扩展；
- ◆ 第三个阶段是当裂纹扩展到一定程度，剩余剖面的静强度不足时就发生瞬时的断裂。

对于实际的零件疲劳过程来说，由于材料内部存在夹渣、缺陷、微孔，表面存在划伤、微裂纹、酸洗等形成天然疲劳源，因此零件的疲劳破坏过程一般都是从第二阶段开始的。

1、疲劳断裂过程：

- ▲零件表层产生微小裂纹；
- ▲随着循环次数增加，微裂纹逐渐扩展；
- ▲当剩余材料不足以承受载荷时，突然脆性断裂。



疲劳断裂是与应力循环次数(即使用寿命)有关的断裂。

“疲劳破坏”。——是循环应力作用下零件的主要失效形式。

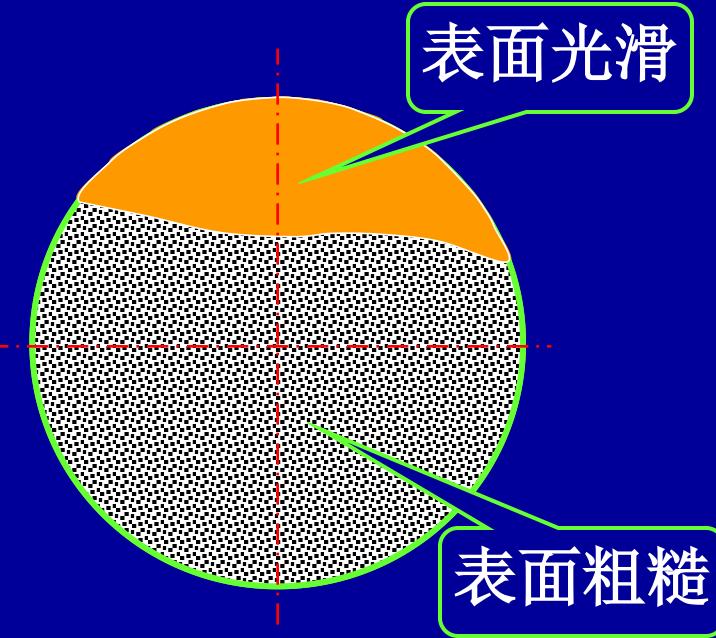
2、疲劳断裂的特征

疲劳断裂具有以下特征：

- ▲ 疲劳断裂的最大应力远比静应力下材料的强度极限低，甚至比屈服极限低；
- ▲ 疲劳断口均表现为无明显塑性变形的脆性突然断裂；
- ▲ 疲劳断裂的机理：微观损伤积累的结果。
- ▲ 断裂面累积损伤处表面光滑，而折断区表面粗糙。

3、影响因素：

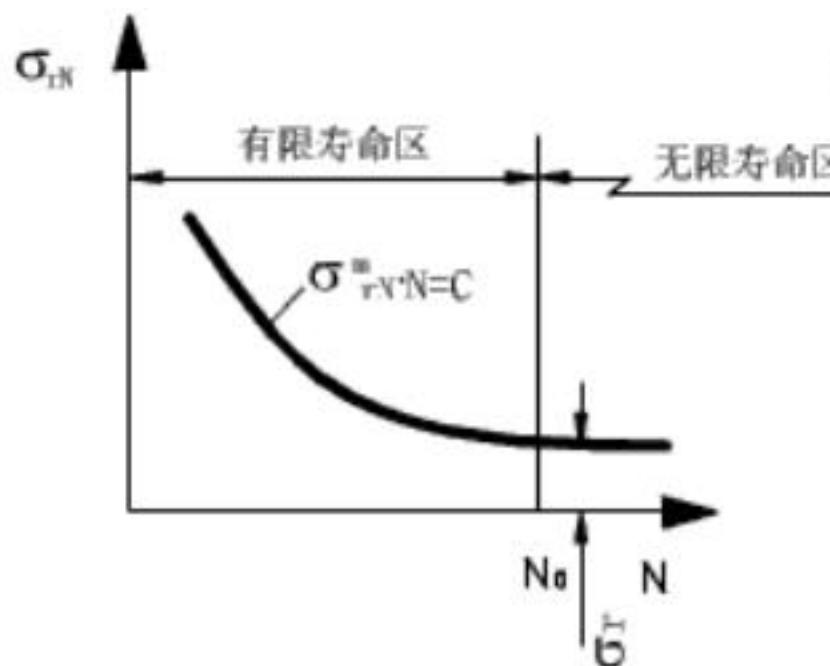
材料性能，变应力的循环特性，应力循环次数，应力幅都对疲劳极限有很大影响。



二、材料的疲劳曲线

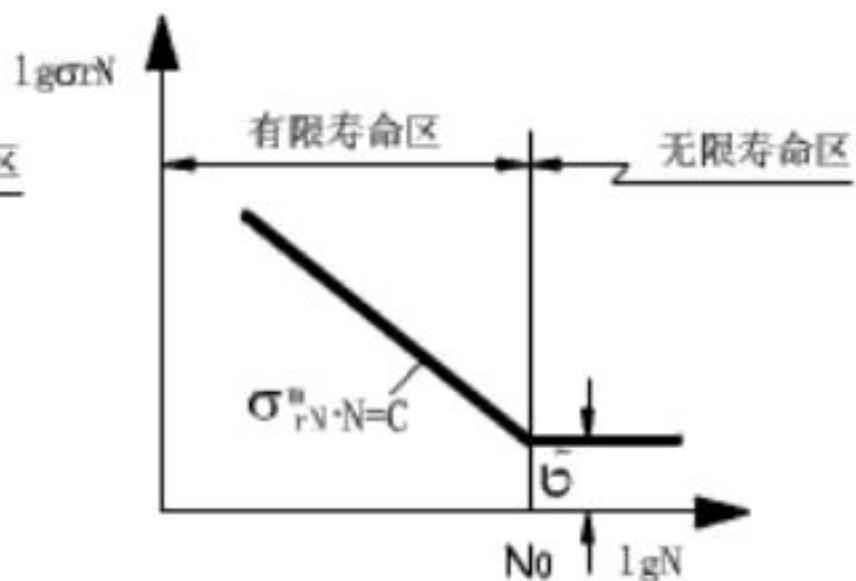
1. 疲劳极限——在循环特性 r 一定的变应力作用下, 经过 N 次循环作用材料不发生疲劳破坏的最大应力称为疲劳极限(σ_{rN} 或 τ_{rN})
2. 疲劳寿命 (N) ——材料疲劳失效前所经历的应力循环次数 N

3. 疲劳曲线—— 应力循环特性 r 一定时，材料的疲劳极限 σ_{rN} 或 τ_{rN} 与应力循环次数 N 之间关系的曲线。（ σ - N 曲线）



N_0 — 循环基数

σ_r^* — 持久极限



1) 有限寿命区

当 $N < 10^3 (10^4)$ —— 低周循环, 疲劳极限接近于屈服极限, 按静强度计算;

当 $N > 10^3 (10^4)$ —— 高周循环, 当时随循环次数 N 疲劳极限 \downarrow

2) 无限寿命区

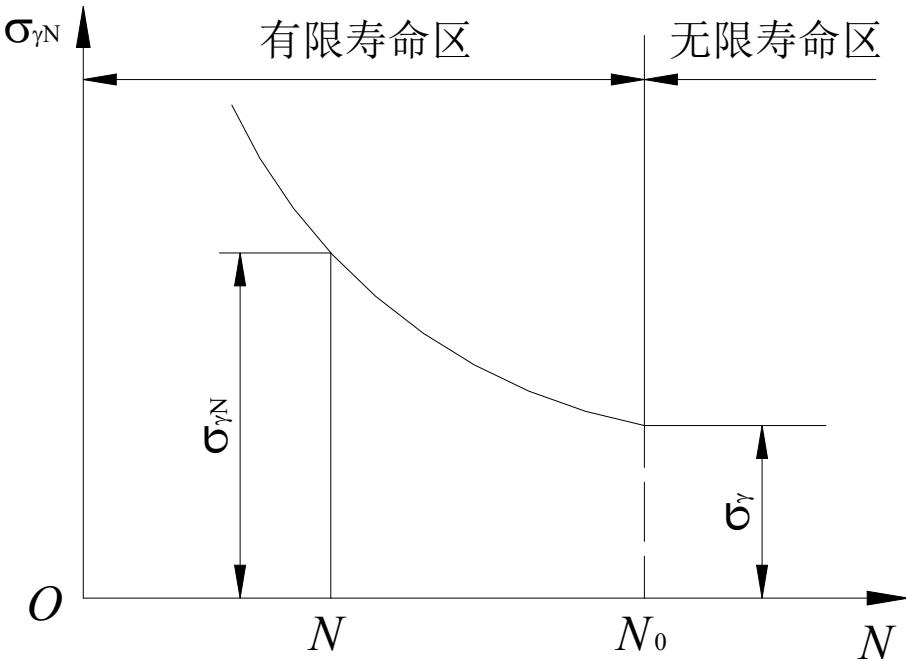
$$N \geq N_0$$

$\sigma_{rN} = \sigma_r$ —— 持久极限, 循环特性为 r 时

对称循环: $\sigma_{-1} \quad \tau_{-1}$

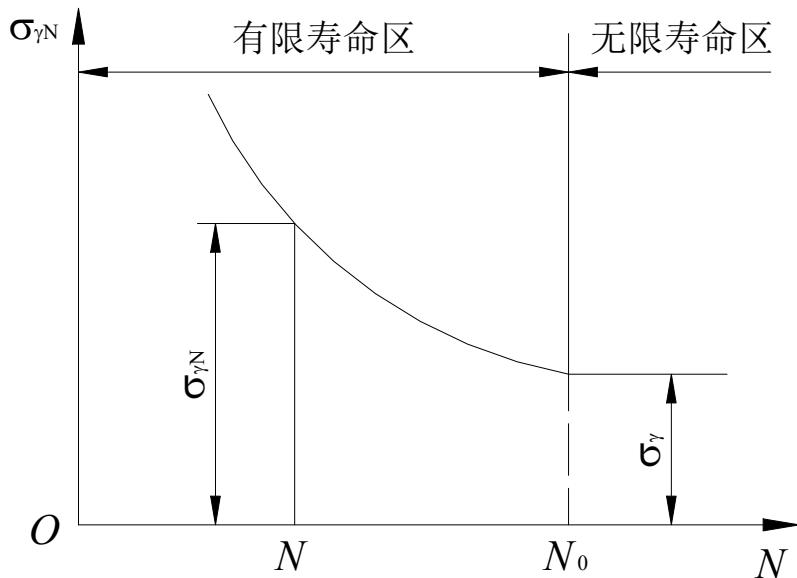
脉动循环: $\sigma_0 \quad \tau_0$

• 注意: 有色金属和高强度合金钢 无 无限寿命区。



3) 疲劳曲线方程

$$(10^3 (10^4) \leq N \leq N_0)$$



$$\sigma_{rN}^m \cdot N = \sigma_r^m \cdot N_0 = C$$

∴ 疲劳极限

$$\sigma_{rN} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \sigma_r = K_N \cdot \sigma_r$$

$$K_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}}$$
 —— 寿命系数

$$\sigma_{rN} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \sigma_r = K_N \cdot \sigma_r$$

几点说明：

(1) 循环基数 N_0

与材料性质有关，硬度愈高，循环基数愈大。

对于钢：若硬度 $\leq 350HB$ ，取 $N_0 = 10^6 \sim 10^7$

$> 350HB$ ，取 $N_0 = 10 \times 10^6 \sim 25 \times 10^7$

有色金属：取 $N_0 = 25 \times 10^7$

(2) m —特性系数（指数）

与应力与材料的种类有关。

钢 $m=9$ ——拉、弯应力、剪应力

青铜 $m=9$ ——弯曲应力

$m=6$ ——接触应力

$m=8$ ——接触应力

$$\sigma_{rN} = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \sigma_r = K_N \cdot \sigma_r$$

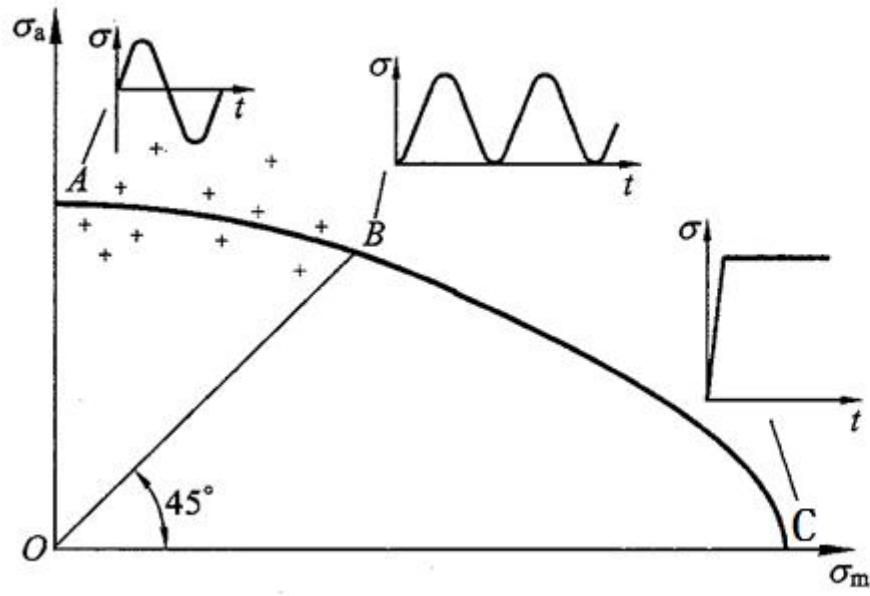
$$K_N = \sqrt[m]{\frac{N_0}{N}} \quad \text{——寿命系数}$$

- 3) 计算 K_N 时, 如 $N \geq N_0$, 则取 $N = N_0$ 。
- 4) 工程中常用的是对称循环应力 ($\gamma = -1$) 下的疲劳极限, 计算时, 只须把 σ_γ 和 $\sigma_{\gamma N}$ 换成 σ_{-1} 和 σ_{-1N} 即可。
- 5) 对于受切应力的情况, 则只需将各式中的 σ 换成 τ 即可。
- 6) 当 $N < (10^3 \sim 10^4)$ 时, 因 N 较小, 可按静强度计算。

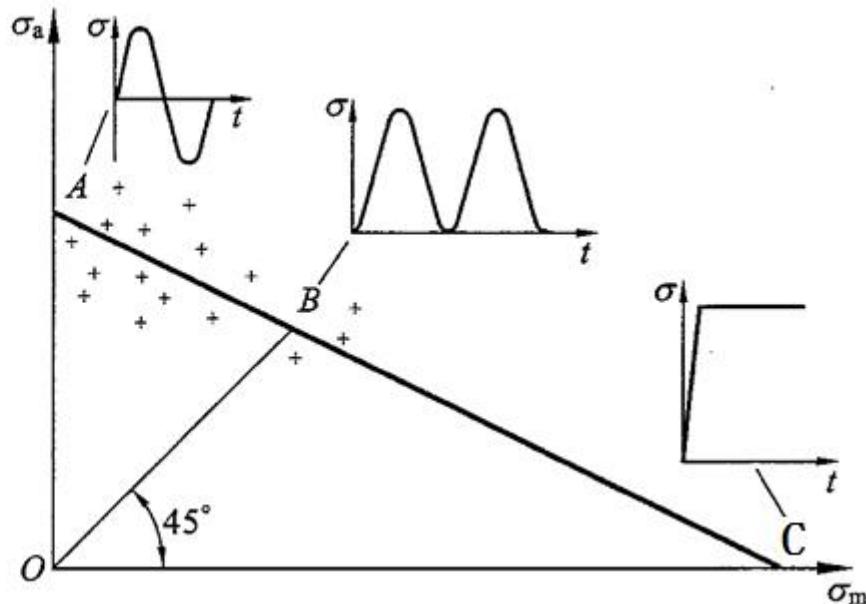
三、材料的疲劳极限应力图

材料的疲劳极限应力图——同一种材料在不同的

应力循环特性下的疲劳极限图 ($\sigma_m - \sigma_a$ 图)。



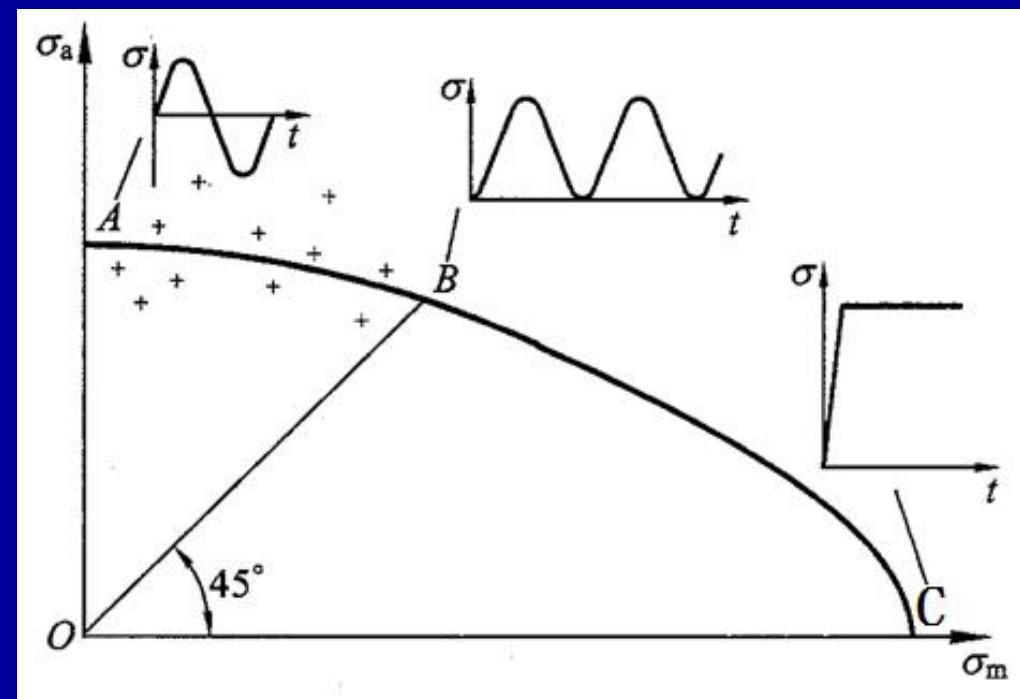
塑性材料的 $\sigma_m - \sigma_a$ 曲线



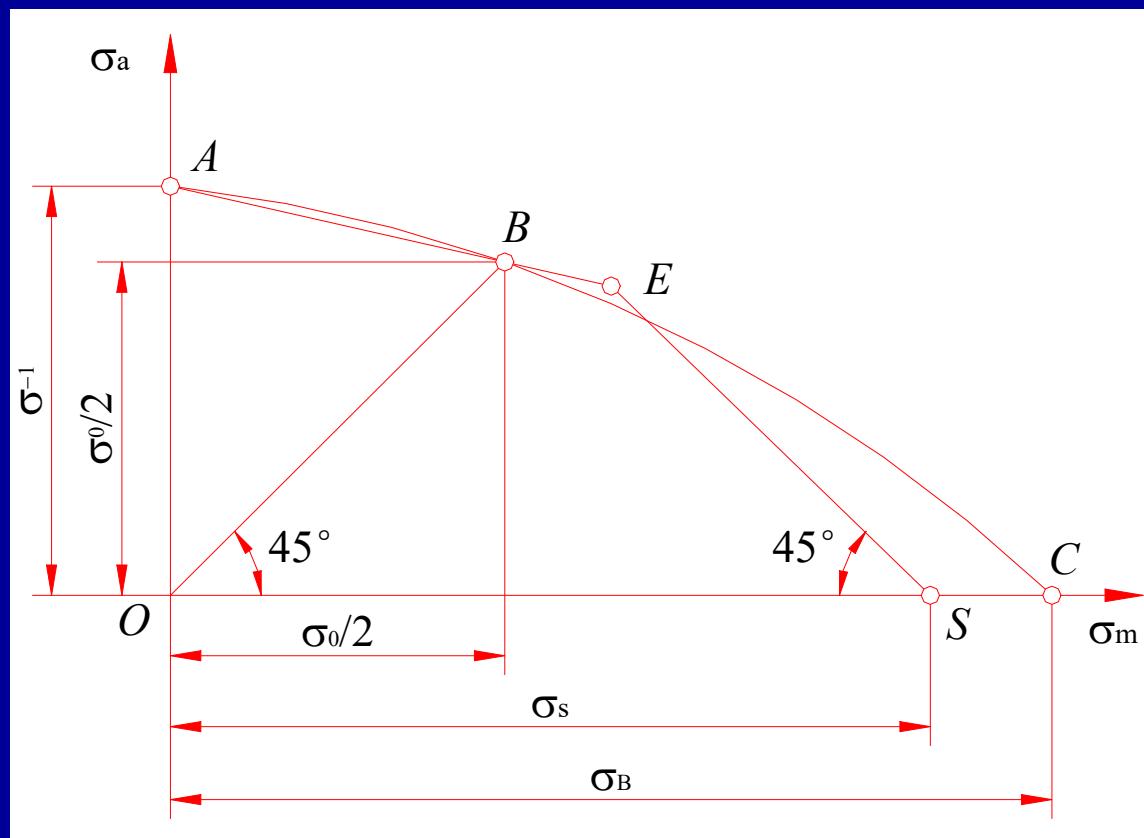
低塑性和脆性材料的 $\sigma_m - \sigma_a$ 曲线

对任何材料（标准试件）而言，对不同的应力循环特性下有不同的持久极限，即每种应力循环特性下都对应着该材料的最大应力 $\sigma_{\max} = \sigma_{\gamma}$ ，再由应力循环特性可求出 $\sigma_{\min} = \gamma\sigma_{\max}$ 和 σ_m 、 σ_a 。

以 σ_m 为横坐标、 σ_a 为纵坐标，即可得材料在不同应力循环特性下的极限 σ_{rm} 和 σ_{ra} 的关系图。



材料的简化疲劳极限应力线图，可根据材料的三个试验数据 σ_{-1}, σ_0 和 σ_s 而作出。



- A——对称疲劳极限点
- B——脉动疲劳极限点
- S——屈服极限点
- C——强度极限点

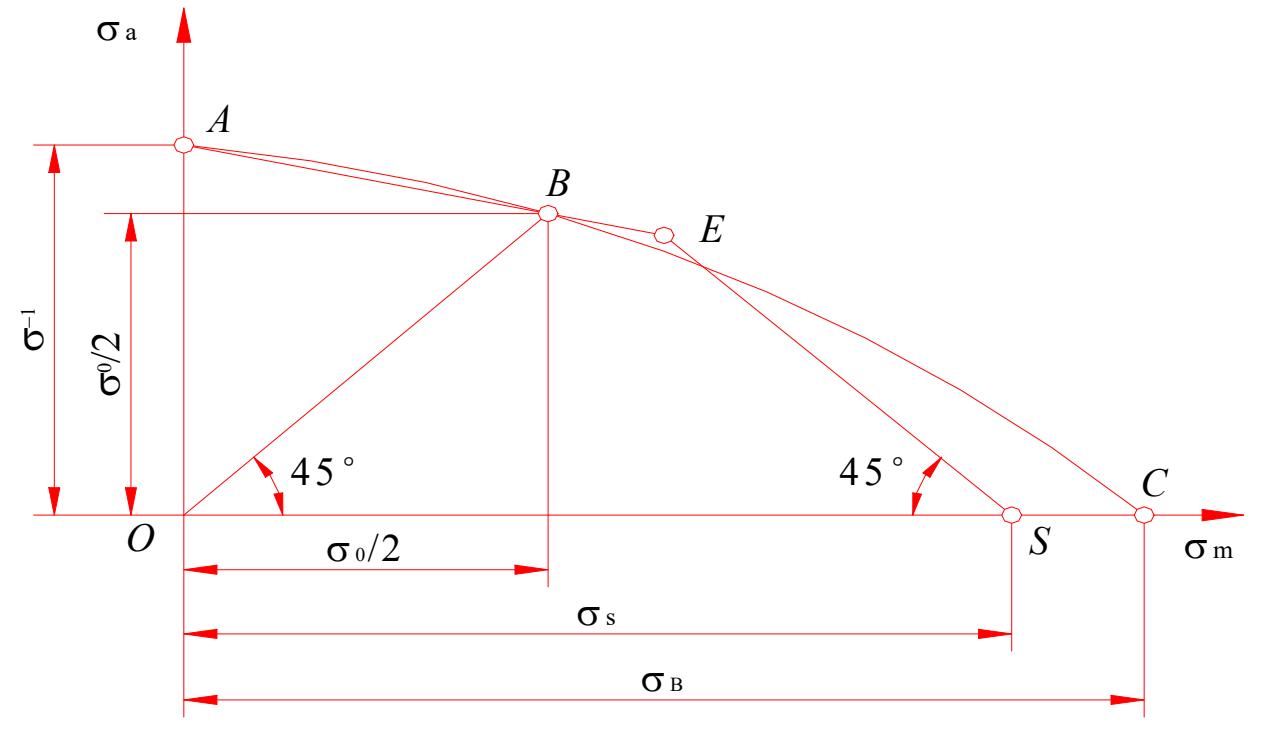
极限应力线上的每个点，都表示了某个应力比下的极限应力。 $\sigma_\gamma = \sigma_{\gamma m} + \sigma_{\gamma a}$

AE

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_{rm} + \sigma_{ra} = \sigma_r$$

ES

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_{rm} + \sigma_{ra} = \sigma_s$$



折线以内为疲劳和塑性安全区，折线以外为疲劳和塑性失效区，工作应力点离折线越远，安全程度愈高。

当循环应力参数 (σ_m , σ_a) 落在OAES以内时, 表示不会发生破坏。

当应力点落在OAES以外时，一定会发生破坏。

正好落在AES折线上时，表示应力状况达到破坏的极限值。

四、影响机械零件疲劳强度的主要因素

1. 应力集中——有效应力集中系数 $k_\sigma (k_\tau)$

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{-1})_k}, k_\tau = \frac{\tau_{-1}}{(\tau_{-1})_k}$$

σ_{-1}, τ_{-1} ——无应力集中试件的疲劳极限，

$(\sigma_{-1})_k, (\tau_{-1})_k$ ——有应力集中试件的疲劳极限，

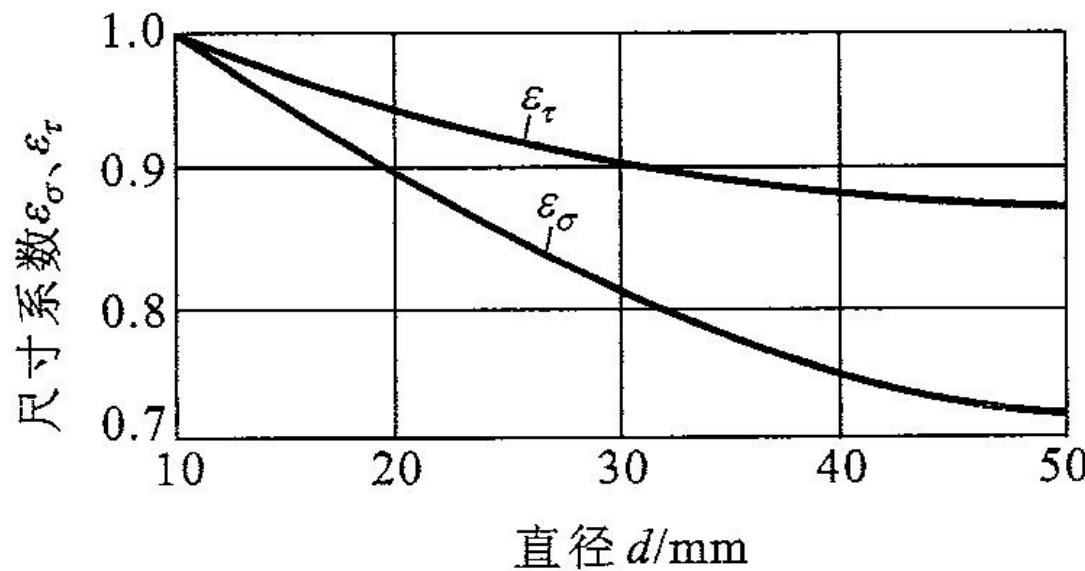
一般材料强度越高，硬度越高，对应力集中越敏感。
同一剖面上同时有几个应力集中源，强度计算取最大值。

2. 几何尺寸——尺寸系数

$$\varepsilon_\sigma(\varepsilon_\tau)$$

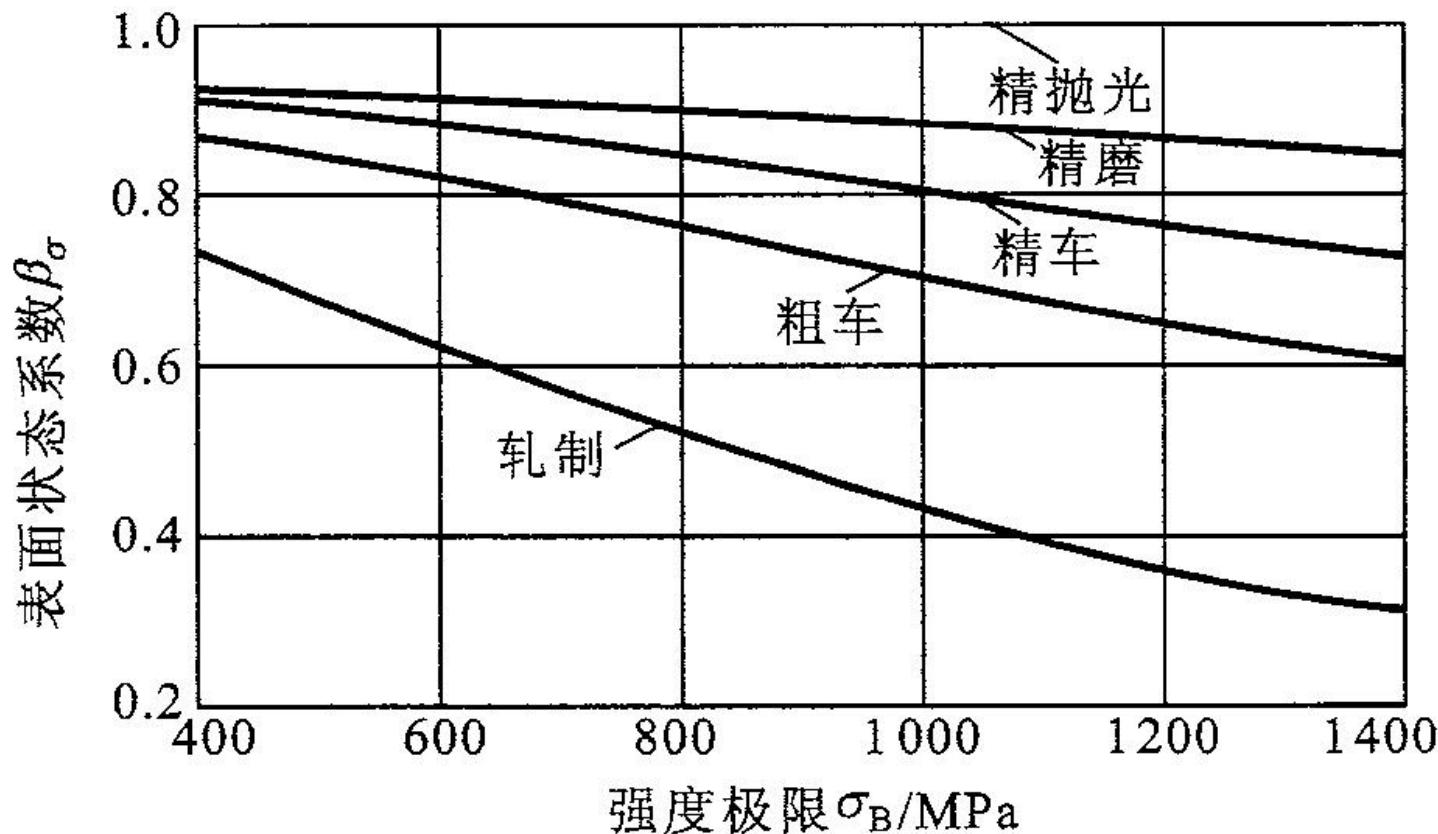
由于零件尺寸愈大时，材料的晶粒较粗，出现缺陷的概率大，而机械加工后表面冷作硬化层相对较薄，所以对零件疲劳强度的不良影响愈显著。

$$\varepsilon_\sigma = \frac{(\sigma)}{C}$$



3. 表面状态——表面状态系数 β

零件的表面粗糙度对疲劳强度的影响。



综合影响系数:

$$K_{\sigma}, K_{\tau}$$

••应力集中，零件尺寸和表面状态只对**应力幅**有影响，而对**平均应力**无影响。

综合影响系数:

$$K_{\sigma} = \frac{k_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma} \beta}, K_{\tau} = \frac{k_{\tau}}{\varepsilon_{\tau} \beta}$$

五、机械零件疲劳极限应力图

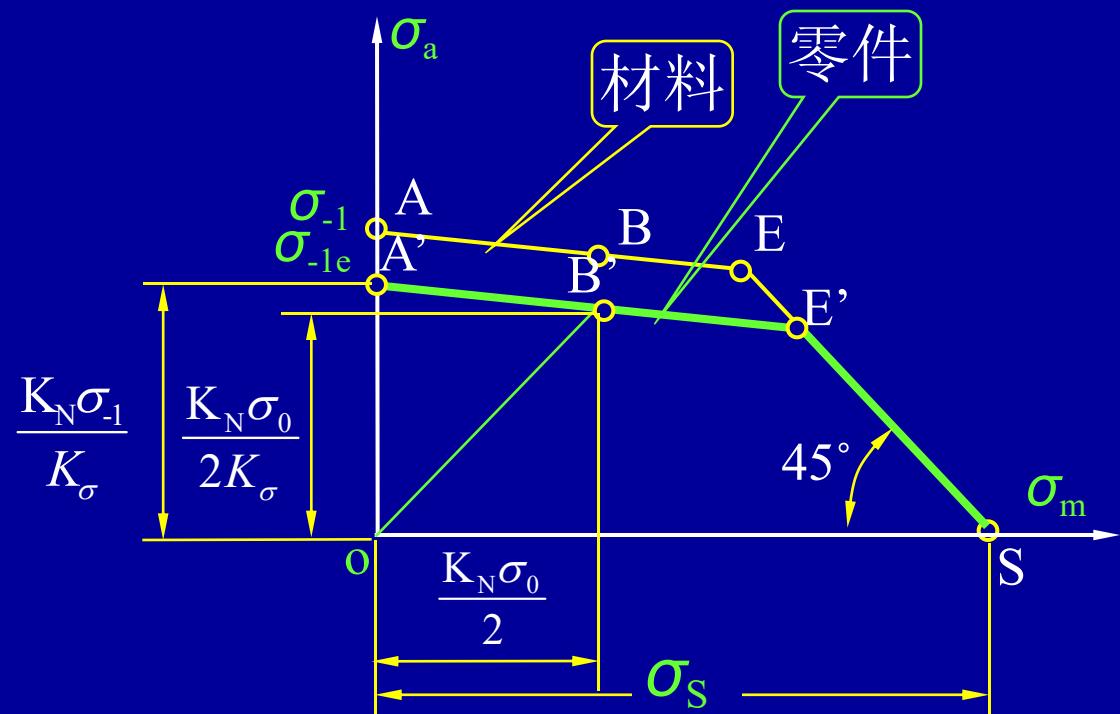
考虑综合影响系数 $k\sigma$ 和寿命系数 k_N

零件对称循环疲劳点

$$A' \left(0, \frac{K_N \sigma_{-1}}{K_\sigma} \right)$$

零件脉动循环疲劳点

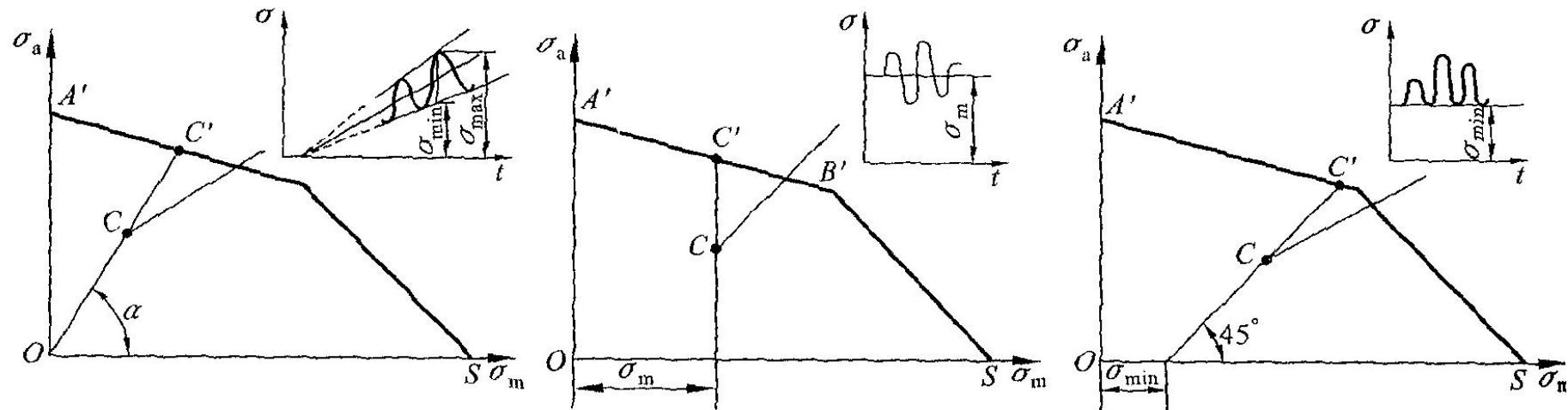
$$B' \left(\frac{K_N \sigma_0}{2}, \frac{K_N \sigma_0}{2K_\sigma} \right)$$



- 1. 所谓机械零件的疲劳极限应力图是在考虑了综合影响系数和寿命系数之后得出的疲劳极限应力图
- 2. 综合影响系数只对极限应力幅有影响, 而寿命系数对应力幅和平均应力均有影响

- 1. 所谓机械零件的疲劳极限应力图是在考虑了综合影响系数和寿命系数之后得出的疲劳极限应力图
- 2. 综合影响系数只对极限应力幅有影响, 而寿命系数对应力幅和平均应力均有影响
- 3. 工作应力点(σ_m, σ_a)必须落在安全区内, 当零件受到的应力增长导致发生破坏时, 最终发生的破坏形式与应力的增长规律有关。

工作应力增长的规律



三种常见的应力增长方式