

南京航空航天大学

范钦珊 李 晨 李栋栋 孙 伟 (特邀)

材料力学

Mechanics of Materials



2019-5-5



自主学习 + 深度研讨



单元13 疲劳强度概述

(Unit 13 An introduction to fatigue strength)



开篇之说

结构的构件与机器的零部件在交变应力（alternative stress）作用下发生的失效，称之为**疲劳失效**，简称为**疲劳**（fatigue）。



开篇之说



飞机承受纵向和环向交变载荷



开篇之说

对于矿山、冶金、动力、运输机械以及航空航天等工业部门，疲劳是零件或构件的主要失效形式。统计结果表明，在各种机械的断裂事故中，大约有 80% 以上是由于疲劳失效引起的。

因此，对于承受交变应力的设备，疲劳分析在设计中占有重要的地位。



开篇之说

这一单元的主要内容包括：
疲劳失效的主要特征与失效原因简述；
疲劳极限及其影响因素；
线性累积损伤理论；
疲劳强度的无限寿命设计；
疲劳强度的有限寿命设计。



自主学习从问题开始

什么是交变应力？

疲劳破坏与静载强度破坏有什么不同？

我们的日常生活中有没有疲劳破坏的实例？

什么是结构寿命？

什么是无限寿命？无限寿命设计有什么不好？

什么是有限寿命？有限寿命设计的难点是什么？



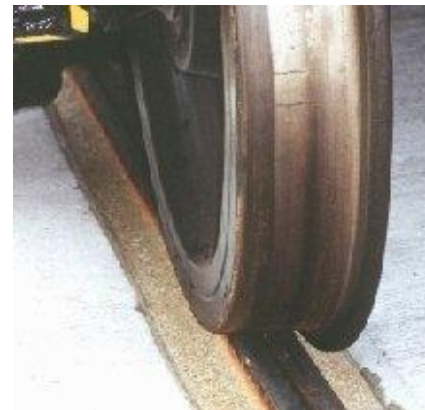
- 疲劳强度的基本概念
- 疲劳极限与应力-寿命曲线
- 影响疲劳寿命的因素
- 基于无限寿命设计方法的疲劳强度
- 基于线性累积损伤理论的有限疲劳寿命设计
- 深度研讨

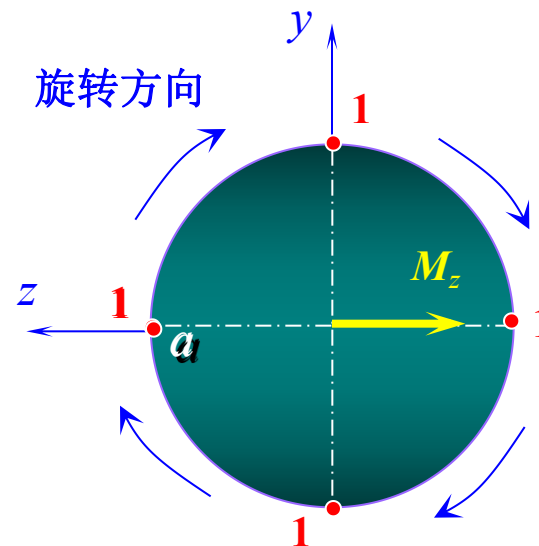
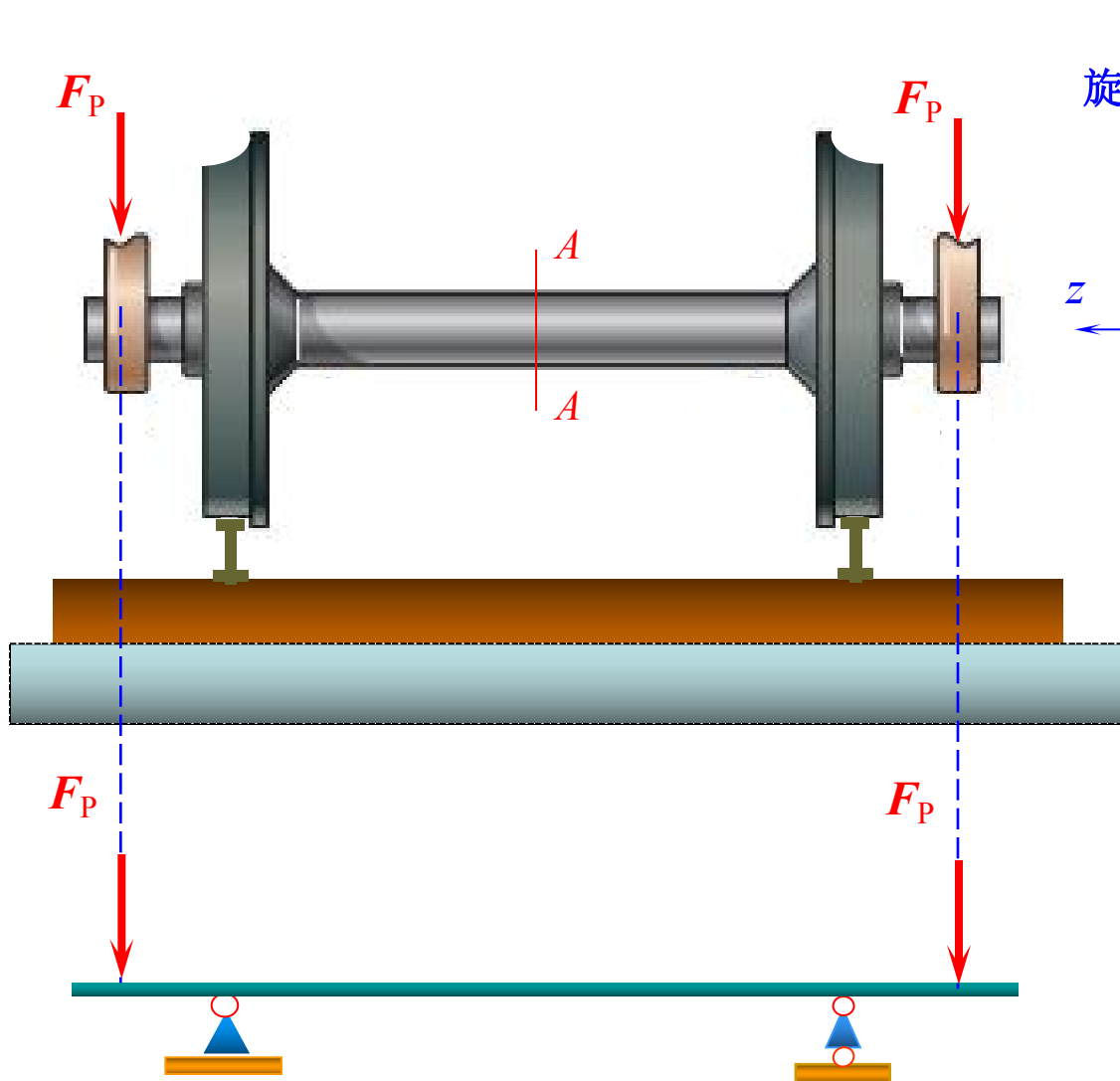
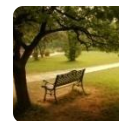


■ 疲劳强度的基本概念



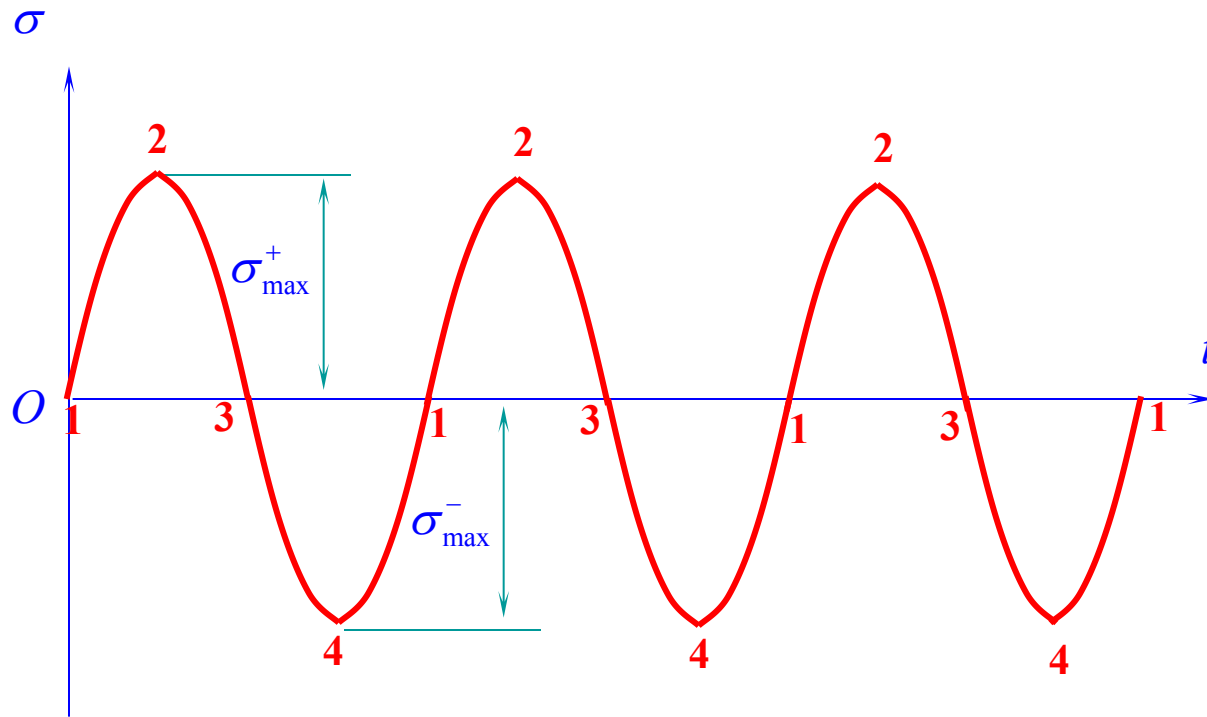
- ★ 交变应力
- ★ 疲劳失效特征与失效原因分析
- ★ 交变应力的若干名词和术语
- ★ 疲劳失效特征







a 点的应力随时间变化曲线

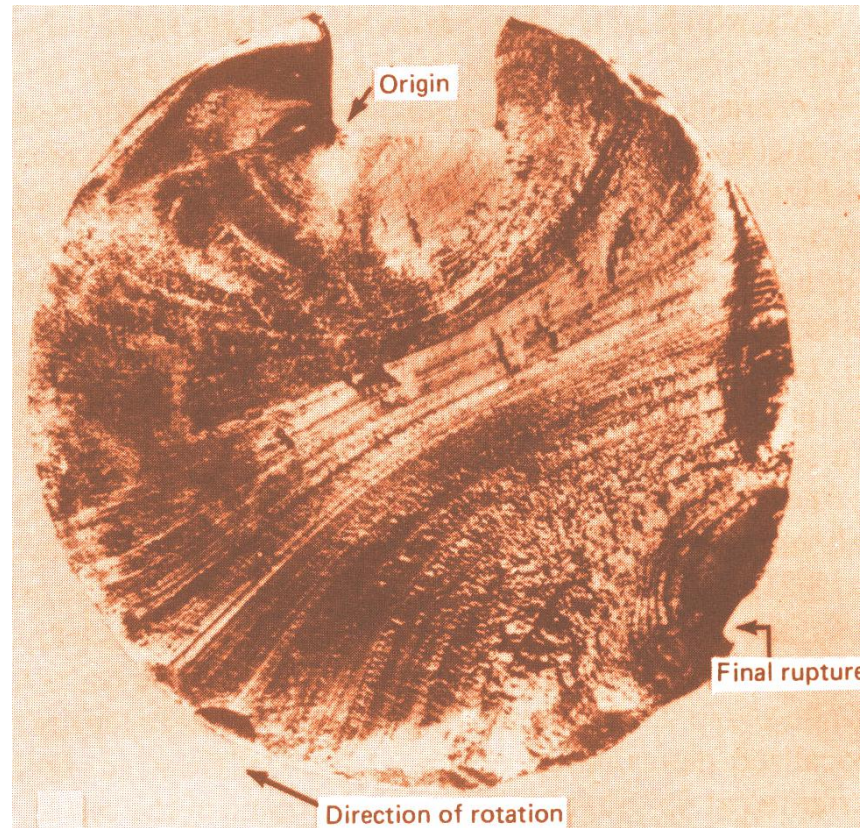




★ 疲劳失效特征与失效原因分析

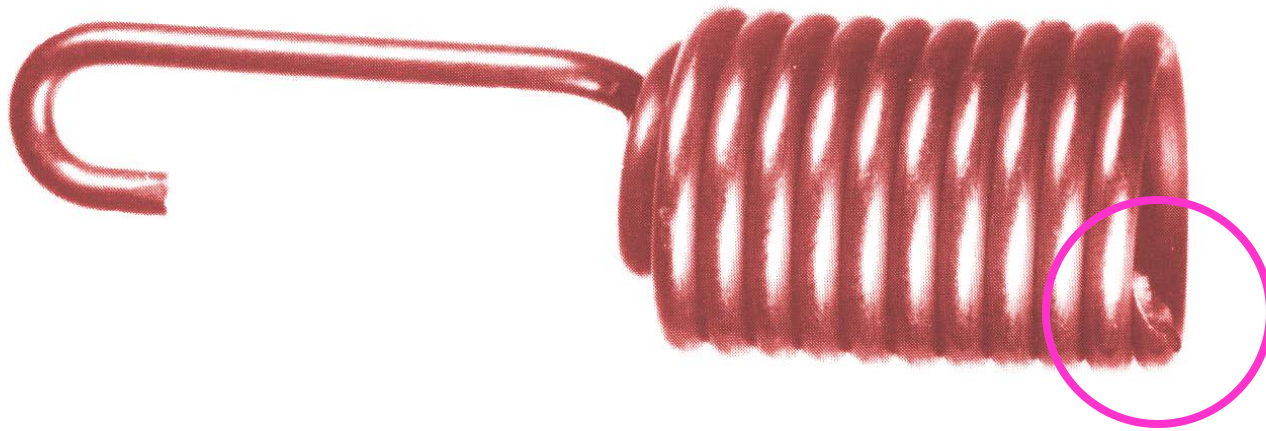


传动轴的疲劳失效



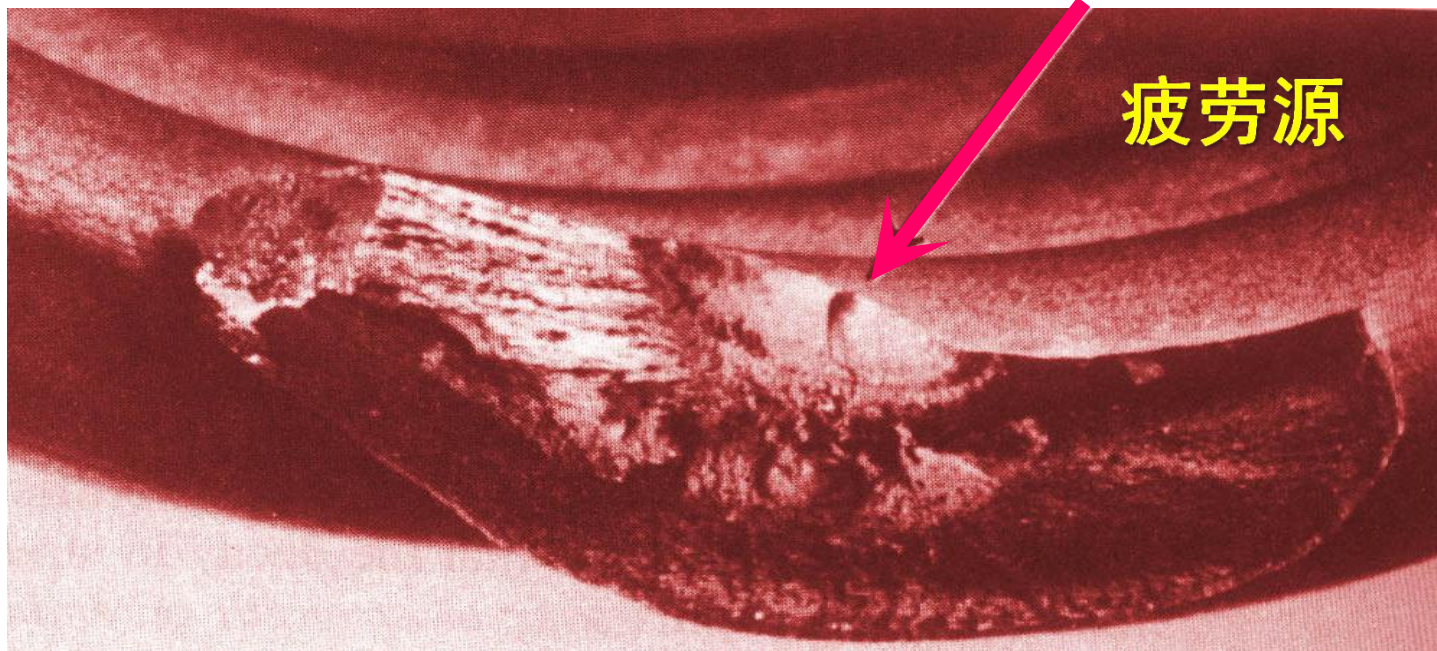


弹簧的疲劳失效



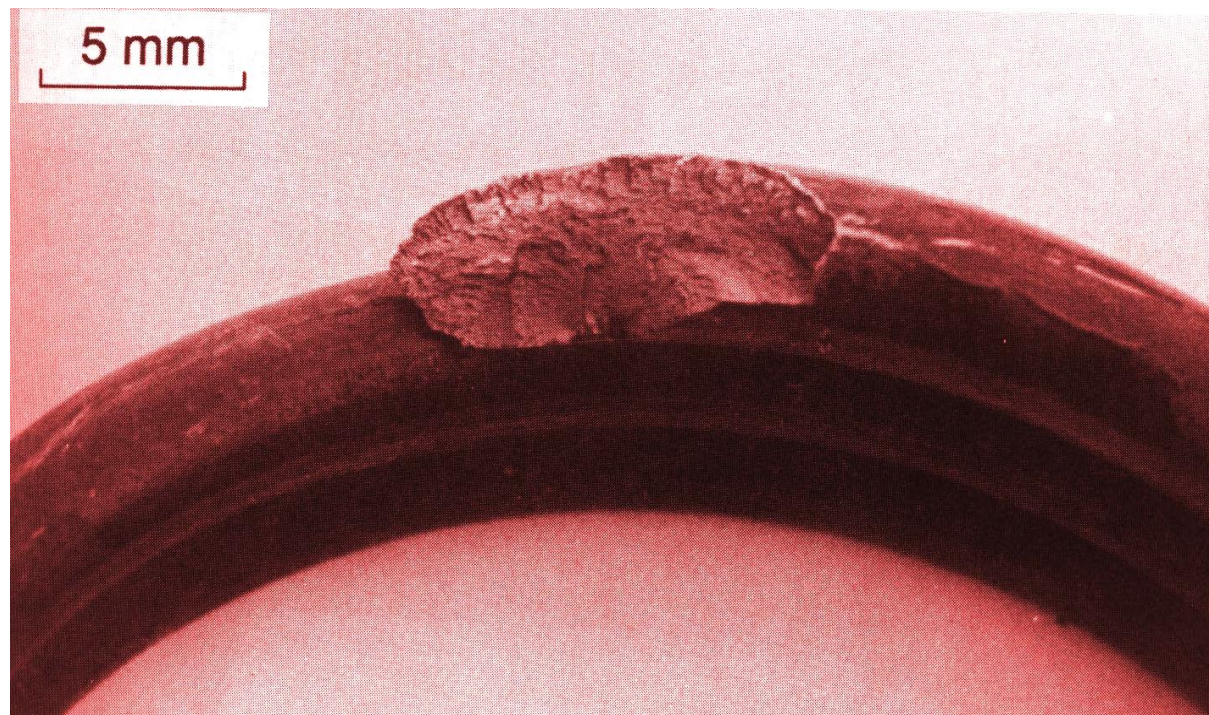


弹簧的疲劳失效



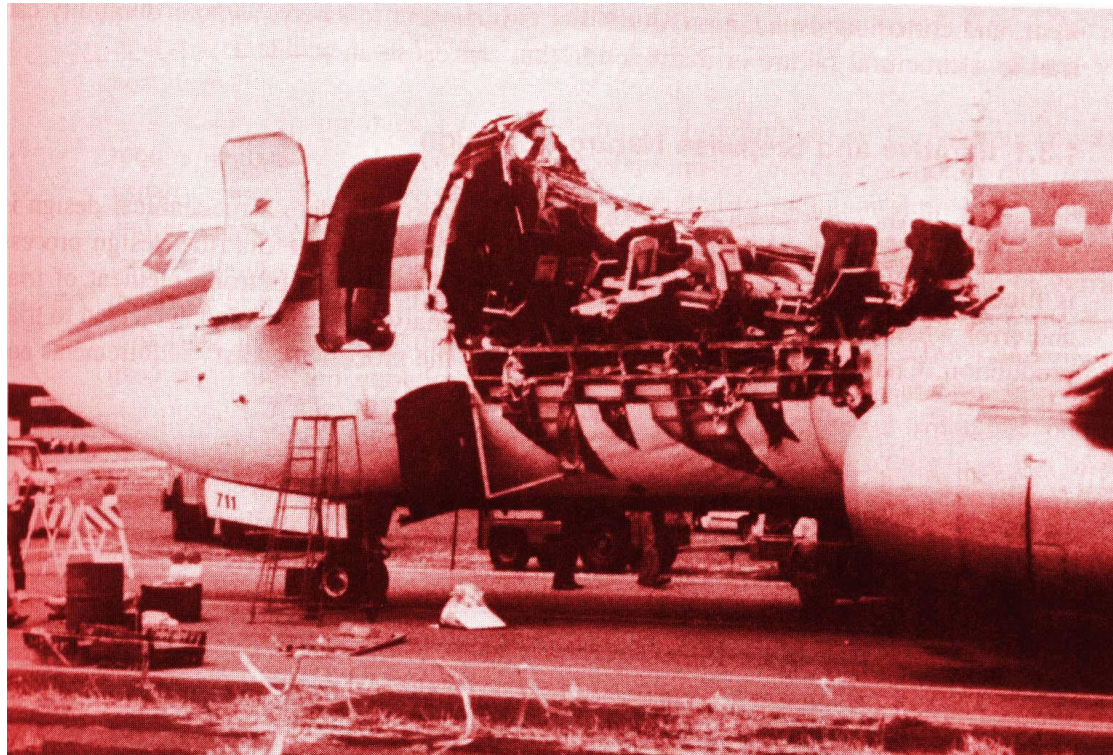


弹簧的疲劳失效



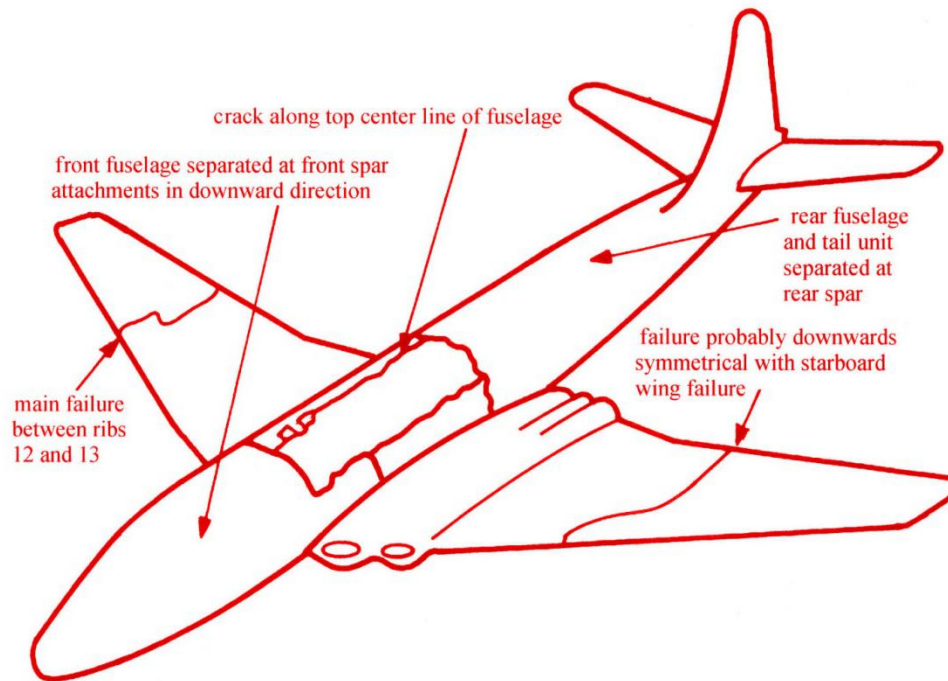


飞机的疲劳失效

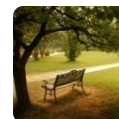




飞机的疲劳失效







1998年德国高铁ICE特大事故

1998年6月3日，周三，载有287名乘客的德国高铁ICE在经过Eschede(埃舍德)小镇时，由于车轮的疲劳破坏而脱轨，继而撞倒桥桩，导致上方的桥梁坍塌，前后车箱挤压在一起，造成重大伤亡事故：101人死亡（其中包括2名铁路维修工人）；88人受伤。

这是德国历史上最严重的铁路交通事故。



★ 交变应力的若干名词和术语

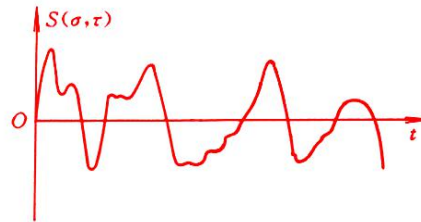
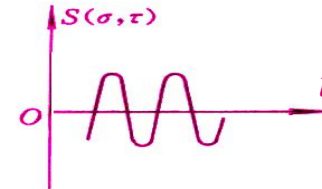
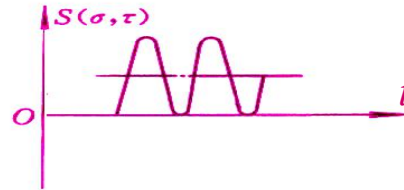
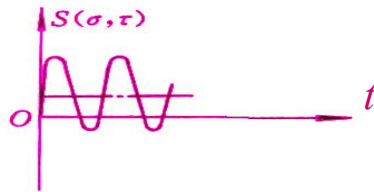


交变应力 —— 一点的应力若随时间而变化，这种应力称为交变应力(alternative stress)

疲劳失效 —— 材料与构件在交变应力作用下的失效，称为疲劳失效(fatigue failure),简称疲劳(fatigue)。

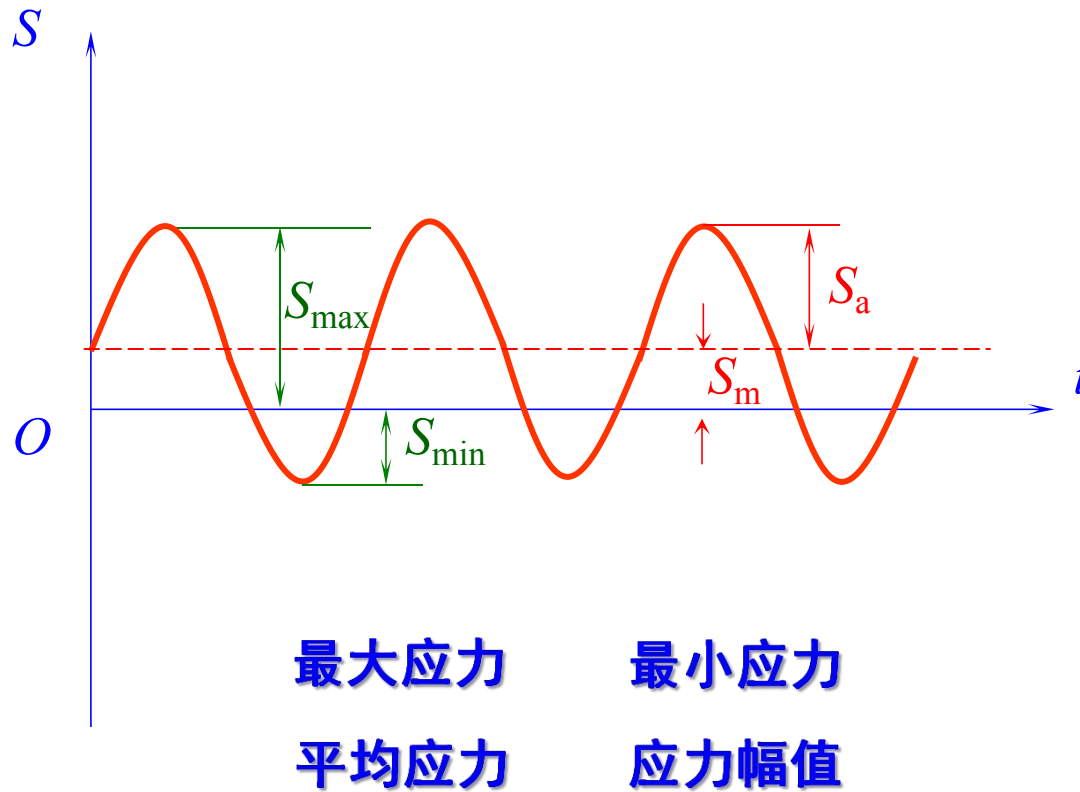


承受交变应力作用的构件或零部件，大部分都在规则或不规则变化的应力作用下工作。



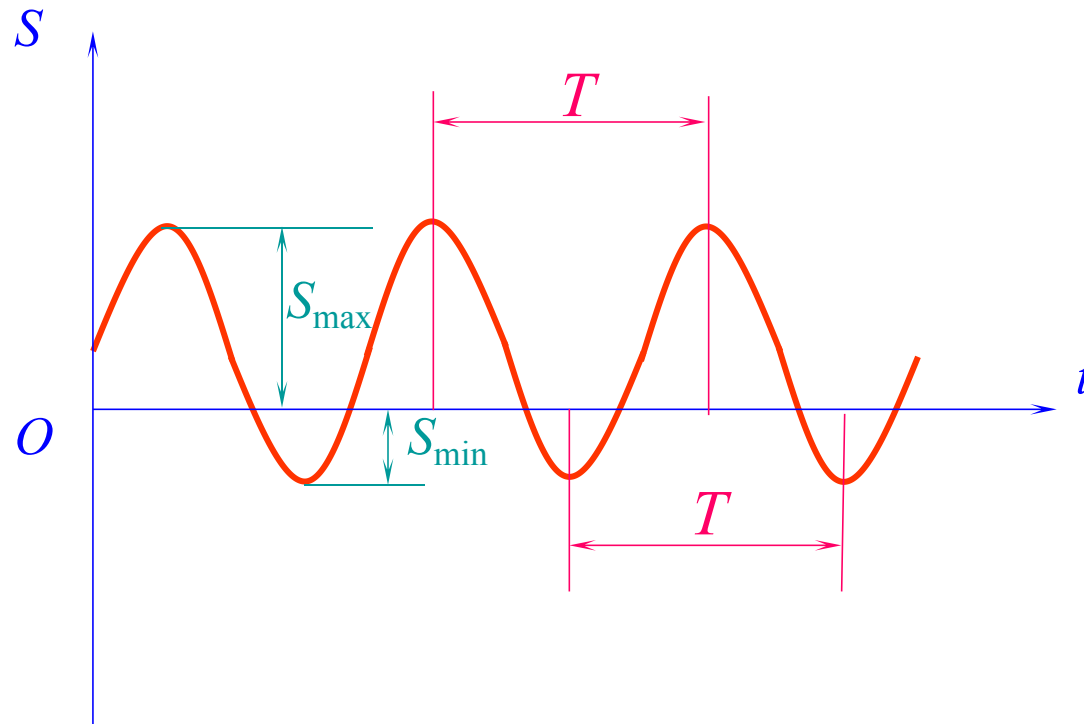


有关交变应力的若干名词和术语



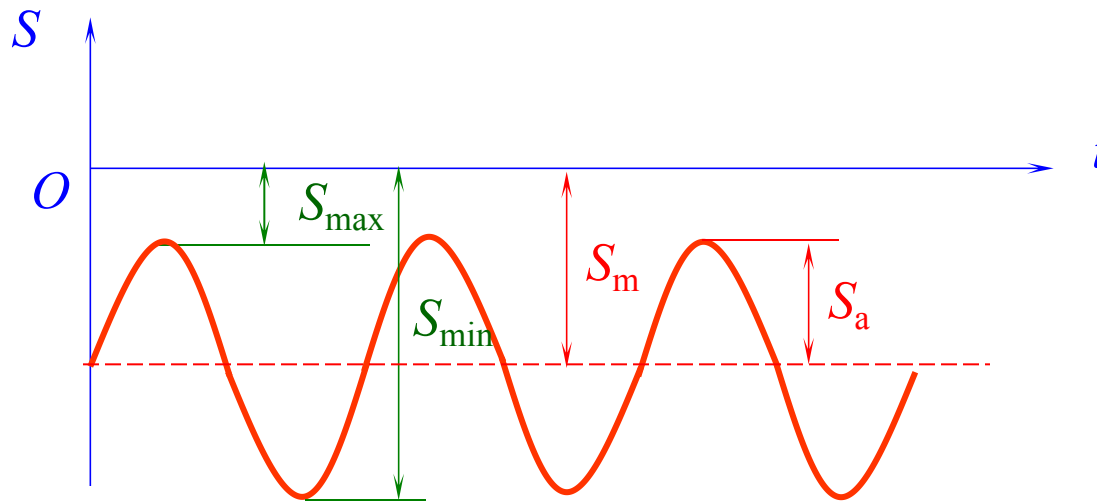


应力循环——应力变化的一个周期





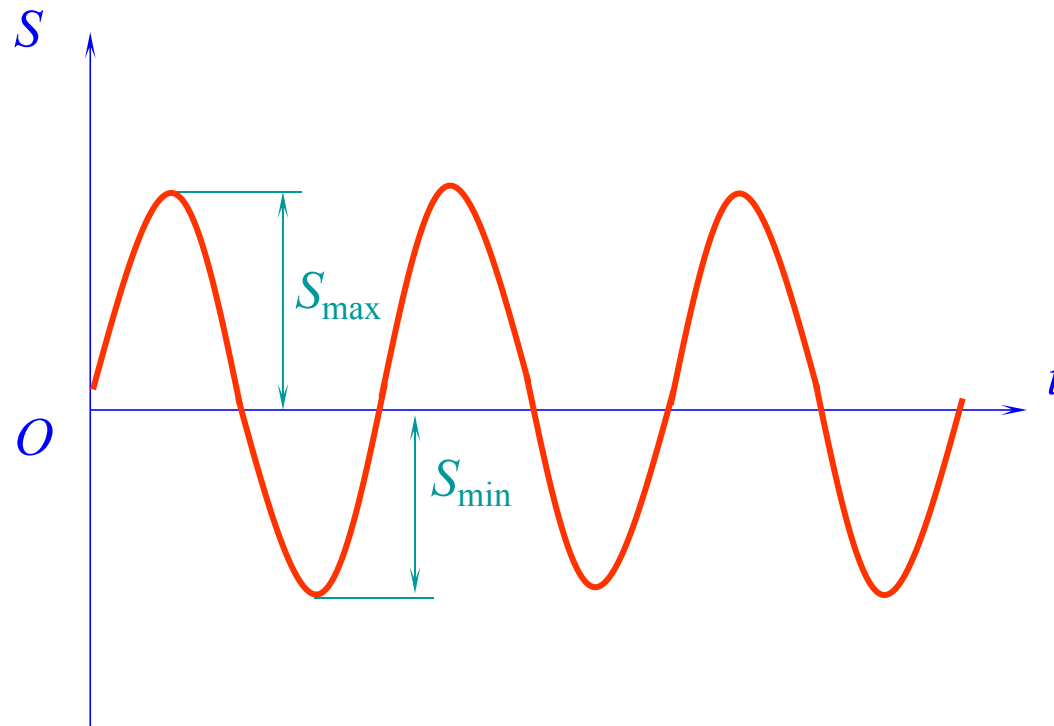
应力比——应力循环中最小应力与最大应力之比。



$$r = \frac{S_{\max}}{S_{\min}} \quad (|S_{\max}| \leq |S_{\min}|)$$

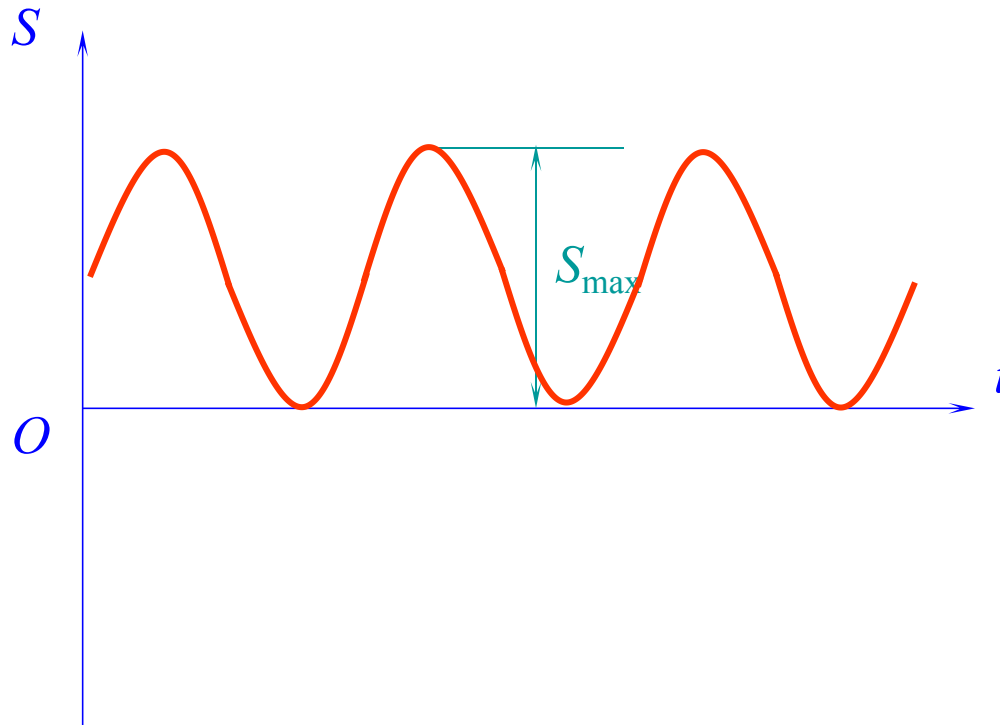


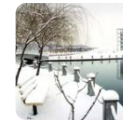
对称循环——应力比 $r = -1$ 的应力循环。



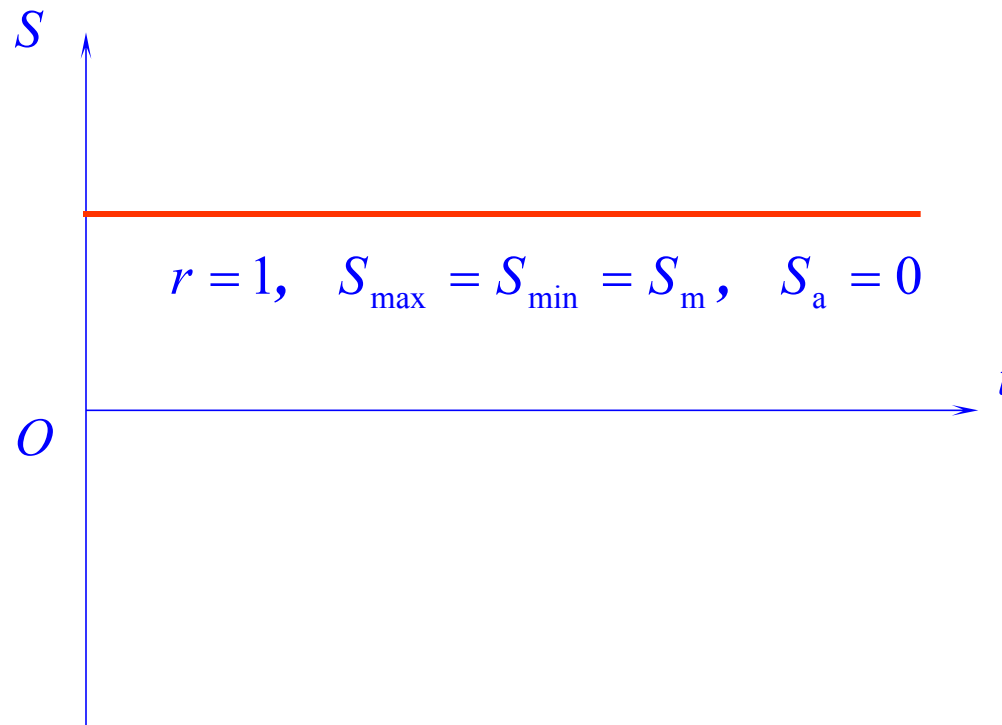


脉冲循环——应力比 $r = 0$ 的应力循环。





静应力 (statical stress) ——静应力可作为交变应力的特例。在静应力作用下，有





需要注意的是：应力循环指一点的应力随时间的变化循环，最大应力与最小应力等都是指一点的应力循环中的数值。它们既不是指横截面上由于应力分布不均匀所引起的最大和最小应力，也不是指一点应力状态中的最大和最小应力。

上述广义应力记号 S 泛指正应力和剪应力。若为拉、压交变或反复弯曲交变，则所有符号中的 S 均为正应力 σ ；若为反复扭转交变，则所有 S 均为剪应力 τ ，其余关系不变。

上述应力均未计及应力集中的影响，即由理论应力公式算得。这些应力统称为名义应力（nominal stress）。例如

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad (\text{拉伸}) \quad \sigma = -\frac{M_z y}{I_z} \quad (\text{平面弯曲}) \quad \tau = \frac{M_x \rho}{I_p} \quad (\text{圆截面杆扭转})$$



★ 疲劳失效特征



- ◆ **破坏时，名义应力值远低于材料的静载强度极限；**
- ◆ **交变应力作用下的疲劳破坏需要经过一定数量的应力循环；**
- ◆ **破坏前没有明显的塑性变形，即使韧性很好的材料，也会呈现脆性断裂；**
- ◆ **同一疲劳断口，一般都有明显的光滑区域和颗粒状区域。**



◆ 同一疲劳断口，
一般都有明显的光
滑区域和颗粒状区
域。

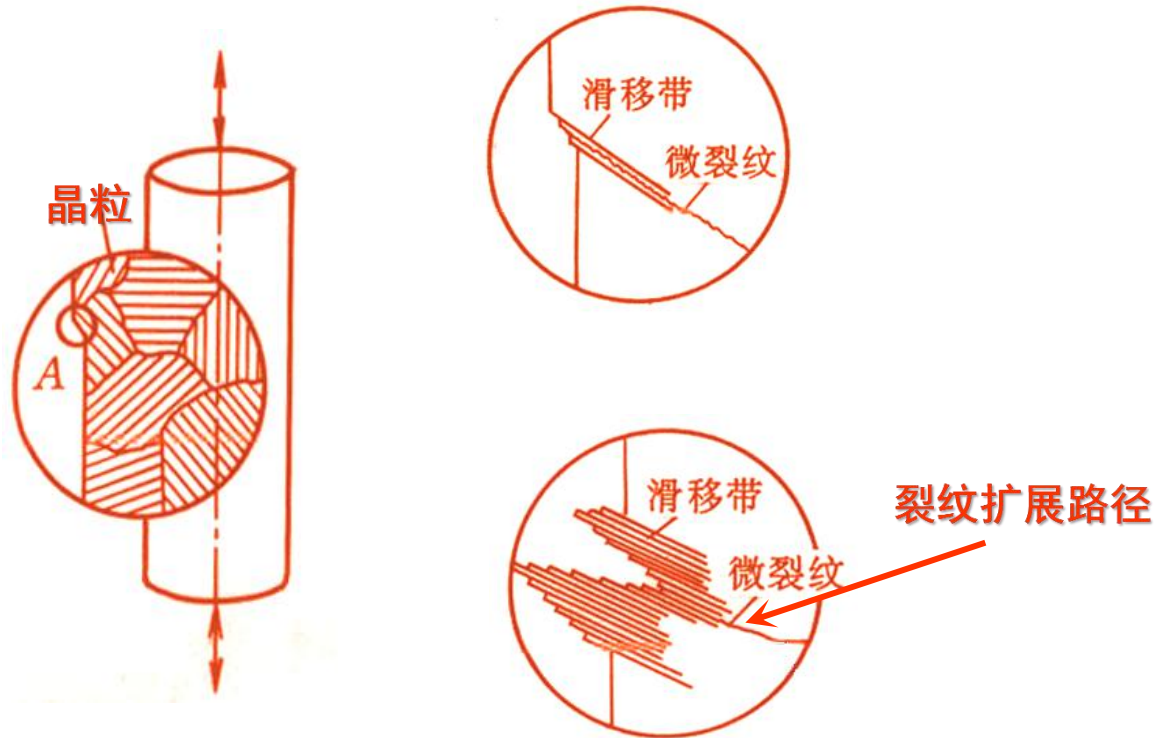


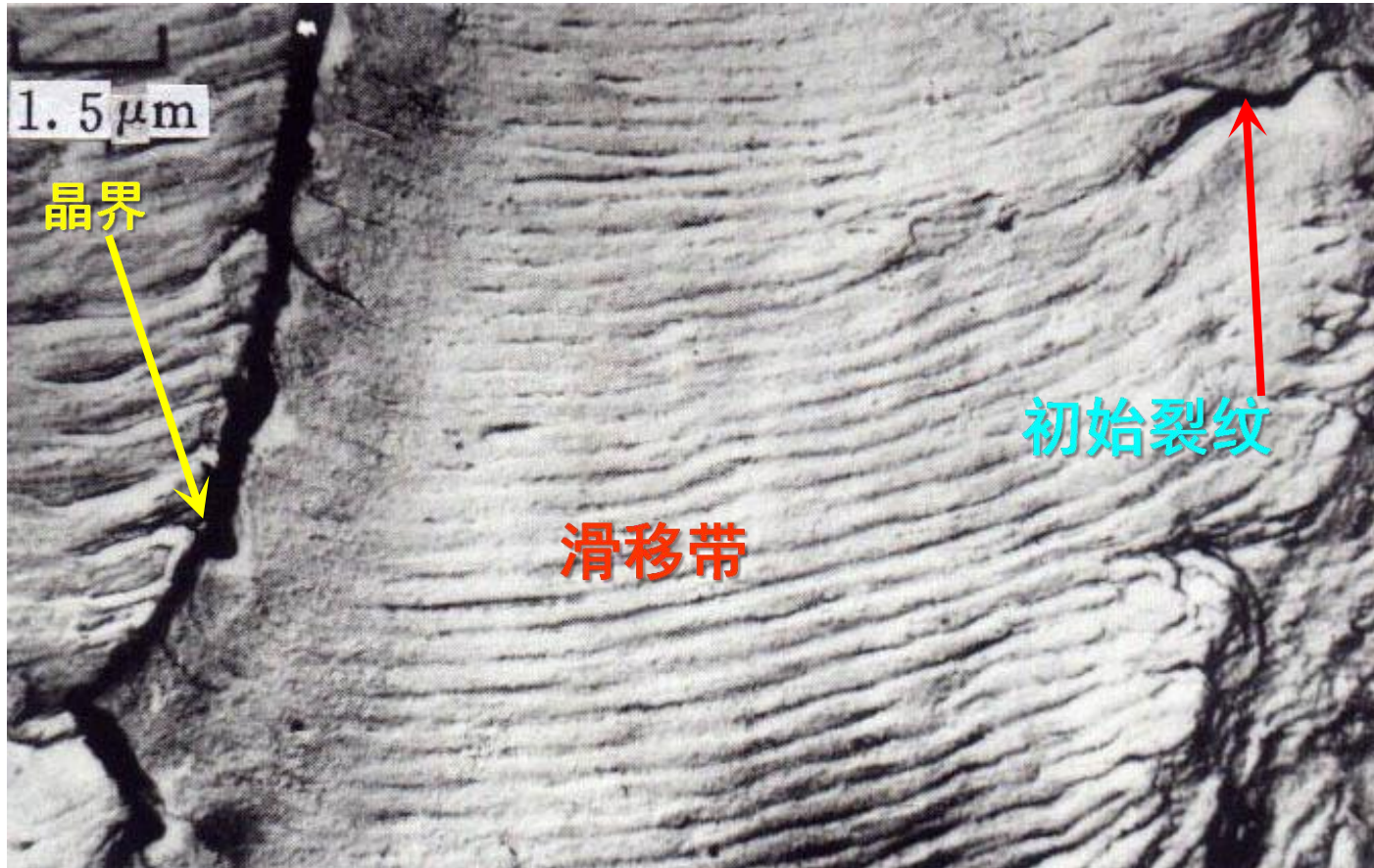
颗粒状区域

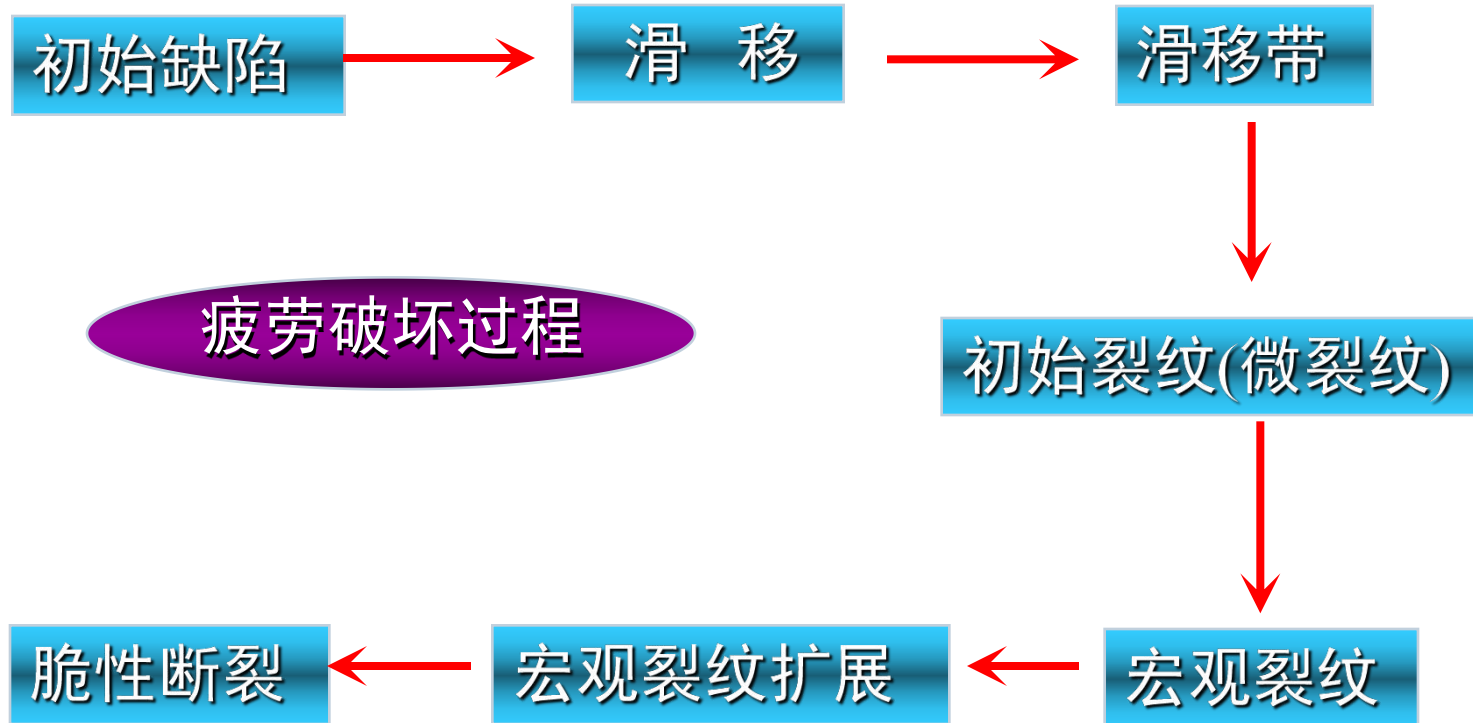
光滑区域



疲劳失效原因分析









- 疲劳强度的基本概念
- 疲劳极限与应力-寿命曲线
- 影响疲劳寿命的因素
- 基于无限寿命设计方法的疲劳强度
- 基于线性累积损伤理论的有限疲劳寿命设计
- 深度研讨



■ 疲劳极限与应力-寿命曲线



疲劳极限

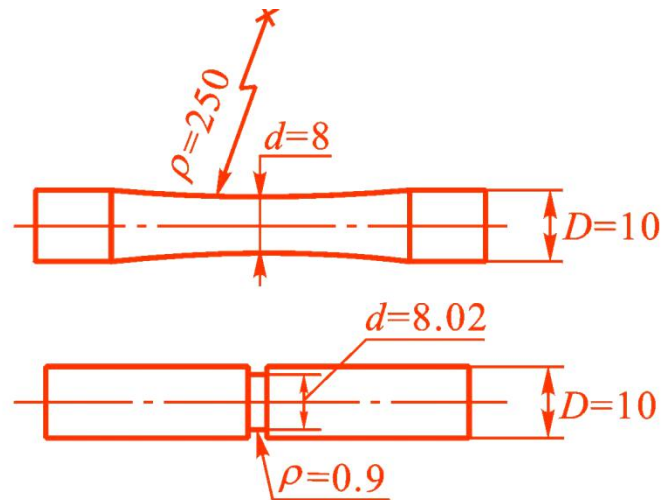
疲劳强度设计的依据——疲劳极限

疲劳极限——经过无穷多次应力循环而不发生疲劳失效时的最大应力值。又称为持久极限(endurance limit).

疲劳极限需要由疲劳实验确定。

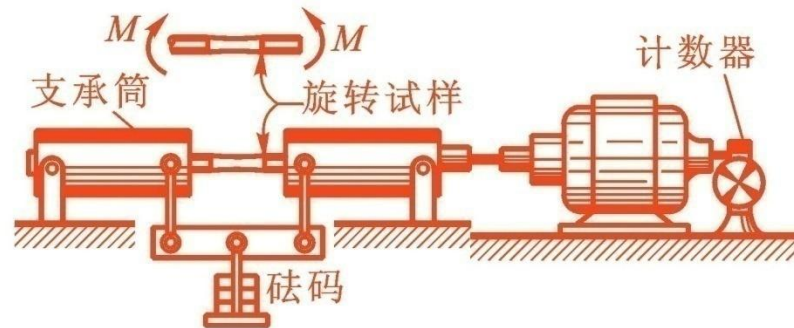


疲劳试样



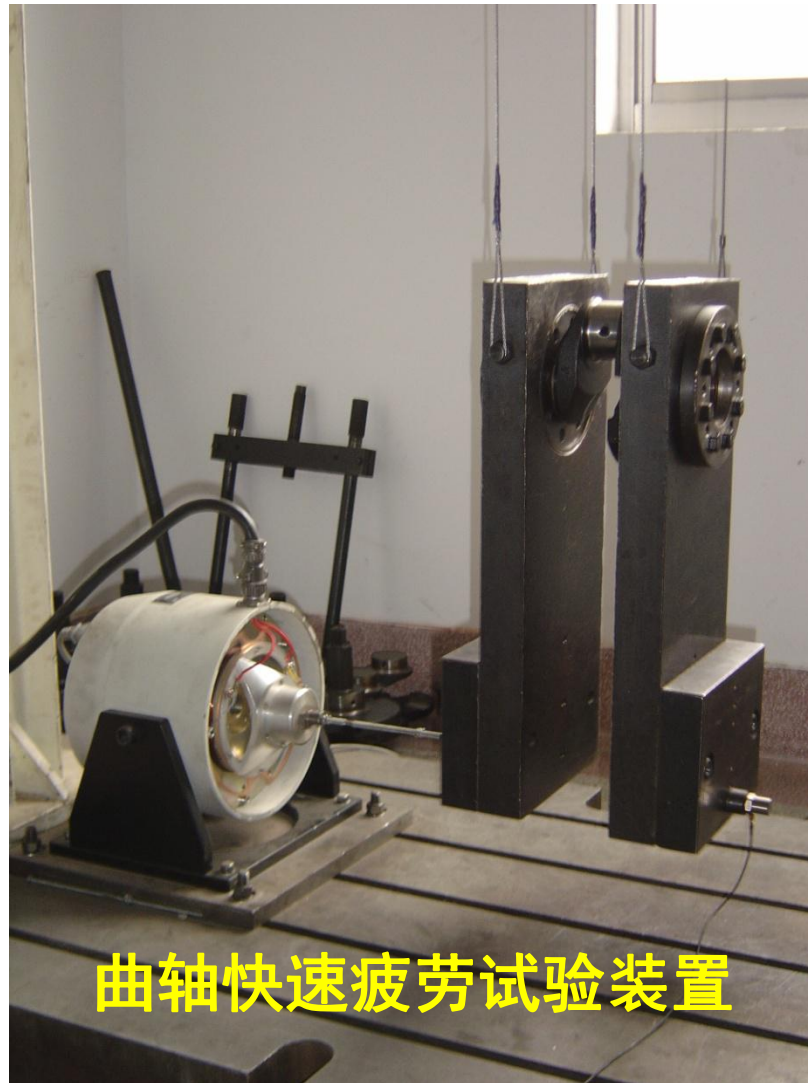


疲劳试验装置

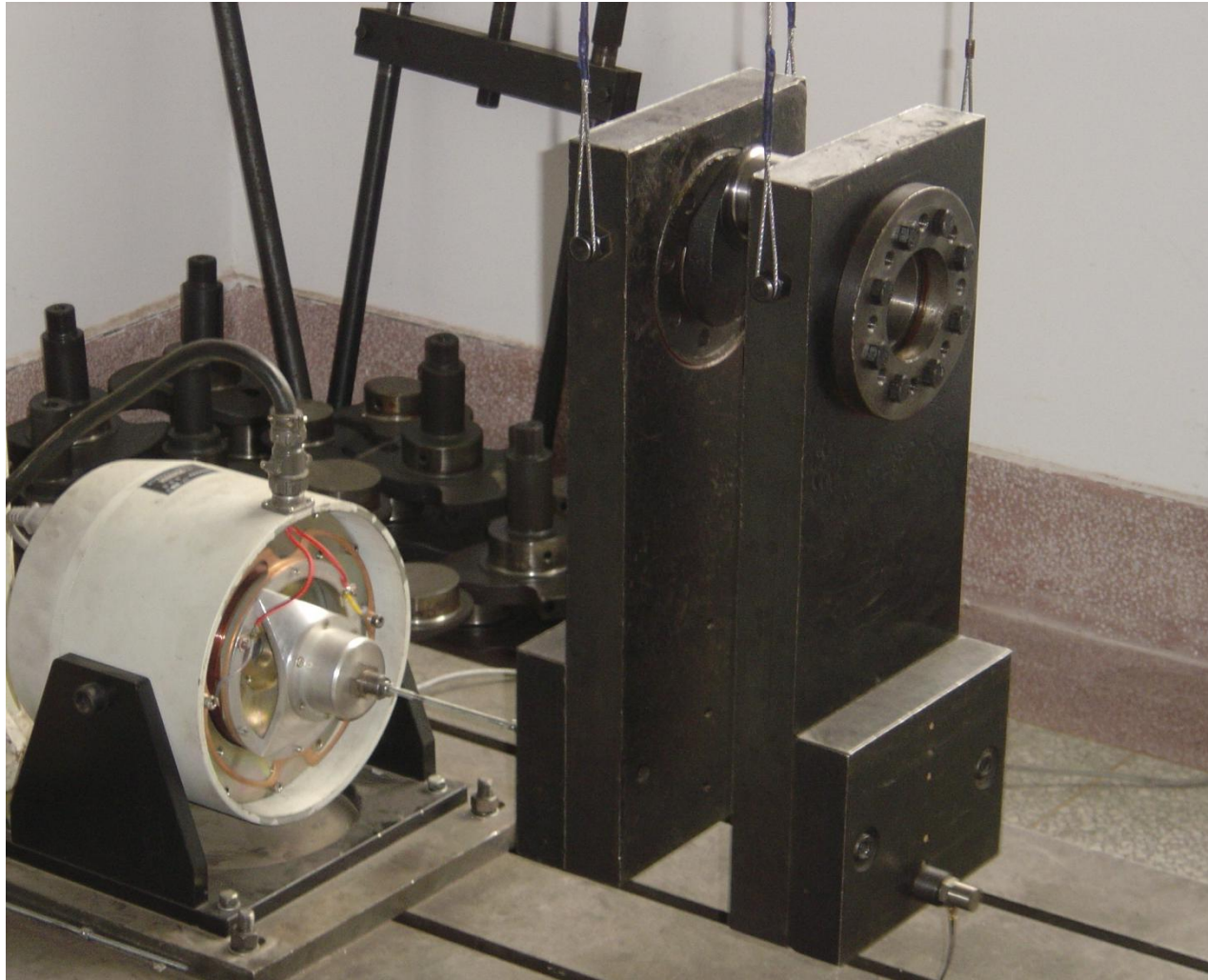


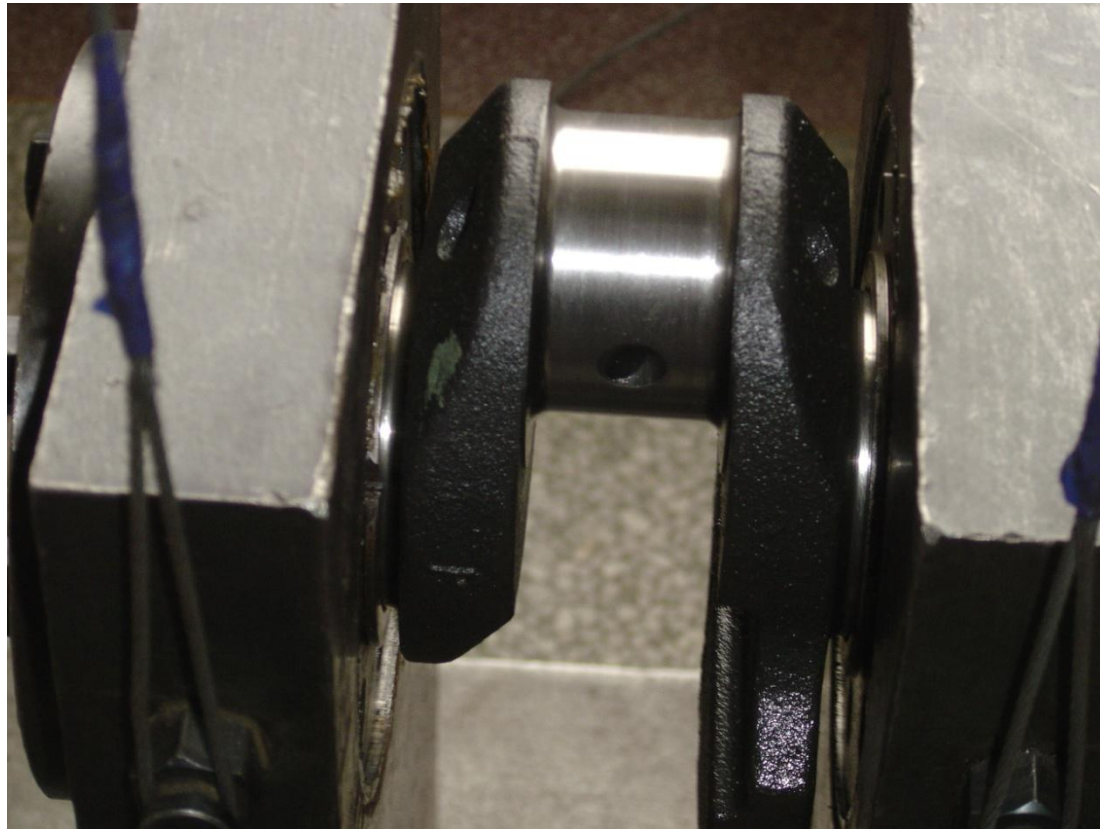


实际结构疲劳试验装置



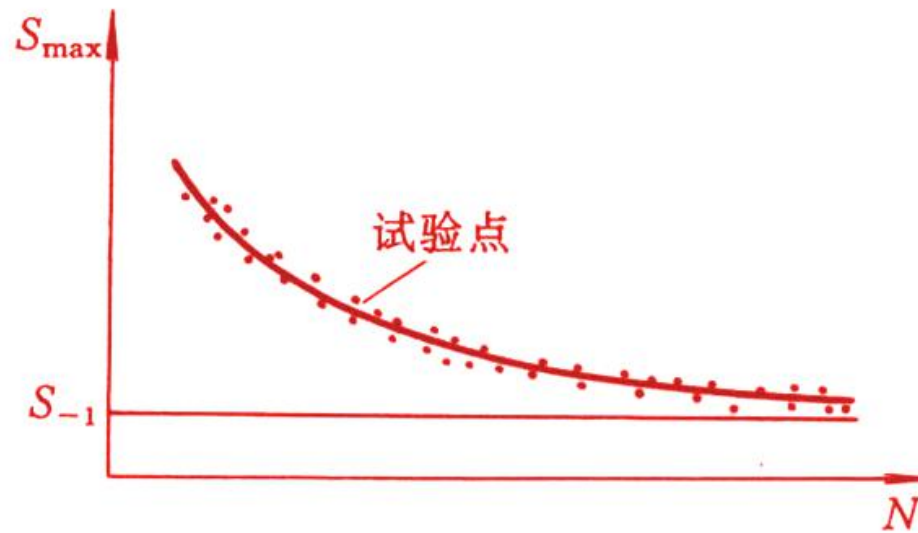
曲轴快速疲劳试验装置





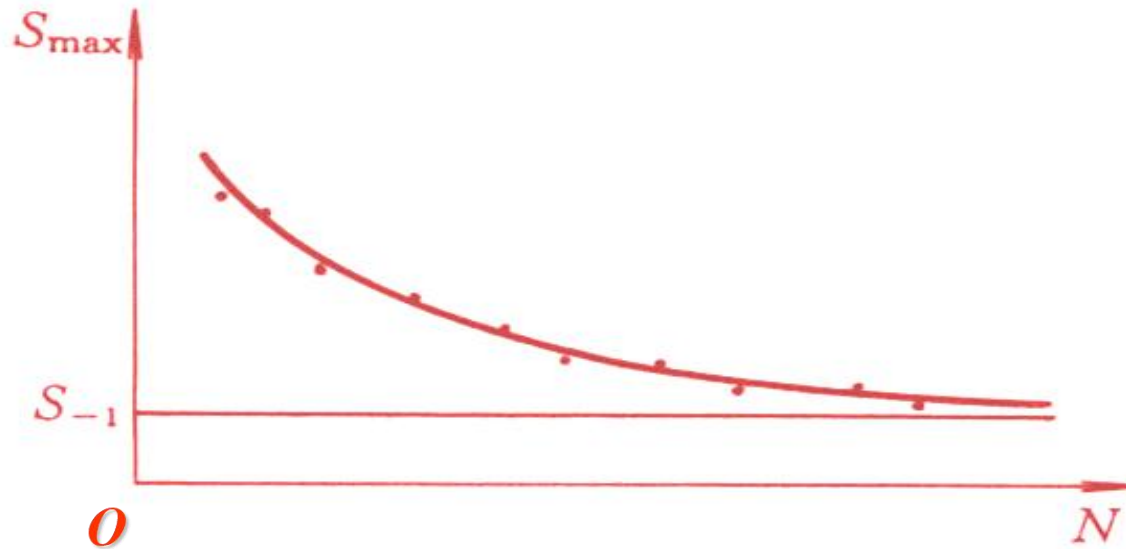


应力-寿命曲线



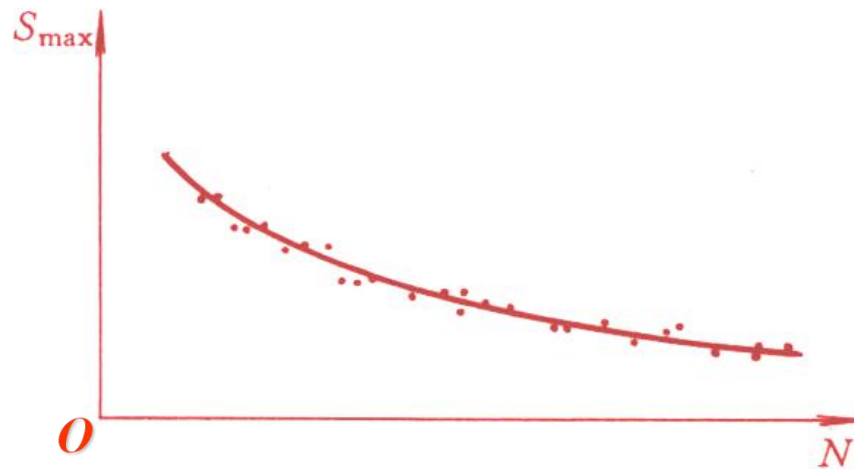


每一应力水平只有一个试样的数据



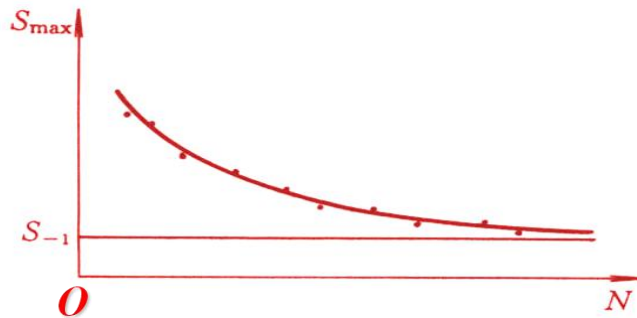


每一应力水平有一组试样的数据



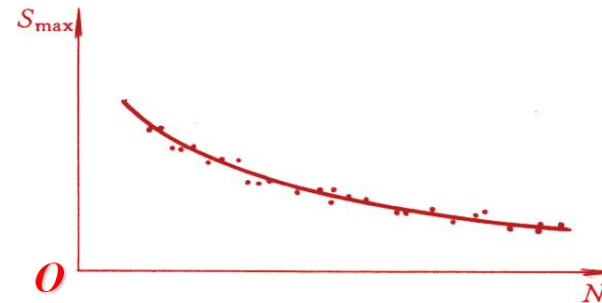


两种试验的应力-寿命曲线



每一应力水平只有
一个试样的数据

每一应力水平有
一组试样的数据





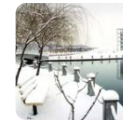
条件疲劳极限

对于有渐近线的 $S-N$ 曲线，规定经历 10^7 次应力循环而不发生疲劳破坏，即认为可以承受无穷多次应力循环。

对于没有渐近线的 $S-N$ 曲线，规定经历 2×10^7 次应力循环而不发生疲劳破坏，即认为可以承受无穷多次应力循环。



需要指出的是，裂纹的生成和扩展是一个复杂过程，它与构件的外形、尺寸、应力变化情况以及所处的介质环境等都有关系。因此，对于承受交变应力的构件，不仅在设计中要考虑疲劳问题，而且在使用期限内需要进行中修或大修，以检测构件是否发生裂纹及裂纹扩展的情况。



对于某些维系人民生命财产的重要构件，还需要作经常性的检测以及裂纹扩展程度检测。

乘坐火车时你会注意到，火车停驶后，都有铁路工人用小铁锤轻轻敲击车厢车轴的情景。这便是检测车轴是否发生裂纹，以防止发生突然事故的一种简易手段。

因为火车车厢及所载旅客的重力方向不变，而车轴不断转动，其横截面上任意一点的位置均随时间不断变化，故该点的应力亦随时间而变化，车轴因而可能发生疲劳破坏。

用小铁锤敲击车轴，可以根据声音直观判断是否存在裂纹以及裂纹扩展的程度。



- 疲劳强度的基本概念
- 疲劳极限与应力-寿命曲线
- 影响疲劳寿命的因素
- 基于无限寿命设计方法的疲劳强度
- 基于线性累积损伤理论的有限疲劳寿命设计
- 深度研讨



■ 影响疲劳寿命的因素



前面介绍了光滑小试样的疲劳极限，并不是零件的疲劳极限，零件的疲劳极限则与零件状态和工作条件有关。

零件状态包括应力集中、尺寸、表面加工质量和表面强化处理等因素；工作条件包括载荷特性、介质和温度等因素。其中载荷特性包括应力状态、应力比、加载顺序和载荷频率等。



- ★ 应力集中的影响——有效应力集中因数
- ★ 零件尺寸的影响——尺寸因数
- ★ 表面加工质量的影响——表面质量因数



★ 应力集中的影响——有效应力集中因数



理论应力集中因数

在构件或零件截面形状和尺寸突变处（如阶梯轴轴肩圆角、开孔、切槽等），局部应力远远大于按一般理论公式算得的数值，这种现象称为应力集中。显然，应力集中的存在不仅有利于形成初始的疲劳裂纹，而且有利于裂纹的扩展，从而降低零件的疲劳极限。



理论应力集中因数

在弹性范围内，应力集中处的最大应力（又称峰值应力）与名义应力的比值称为理论应力集中因数，用 K_t 表示，即

$$K_t = \frac{S_{\max}}{S_n}$$

式中， S_{\max} 为峰值应力； S_n 为名义应力。对于正应力

$$K_t \rightarrow K_{t\sigma}$$

对于剪应力

$$K_t \rightarrow K_{t\tau}$$



有效应力集中因数

有效应力集中因数不仅与零件的形状和尺寸有关，而且与材料有关。前者由理论应力集中因数反映；后者由**缺口敏感因数** (notch sensitivity factor) q 反映。三者之间有如下关系：

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

此式对于正应力和剪应力集中都适用。



★ 零件尺寸的影响——尺寸因数



前面所讲的疲劳极限为光滑小试样（直径6~10 mm）的试验结果，称为“试样的疲劳极限”或“材料的疲劳极限”。

试验结果表明，随着试样直径的增加，疲劳极限将下降，而且对于钢材，强度愈高，疲劳极限下降愈明显。因此，当零件尺寸大于标准试样尺寸时，必须考虑尺寸的影响。



尺寸引起疲劳极限降低的原因主要有以下几种：

一是毛坯质量因尺寸而异，大尺寸毛坯所包含的缩孔、裂纹、夹杂物等要比小尺寸毛坯多。

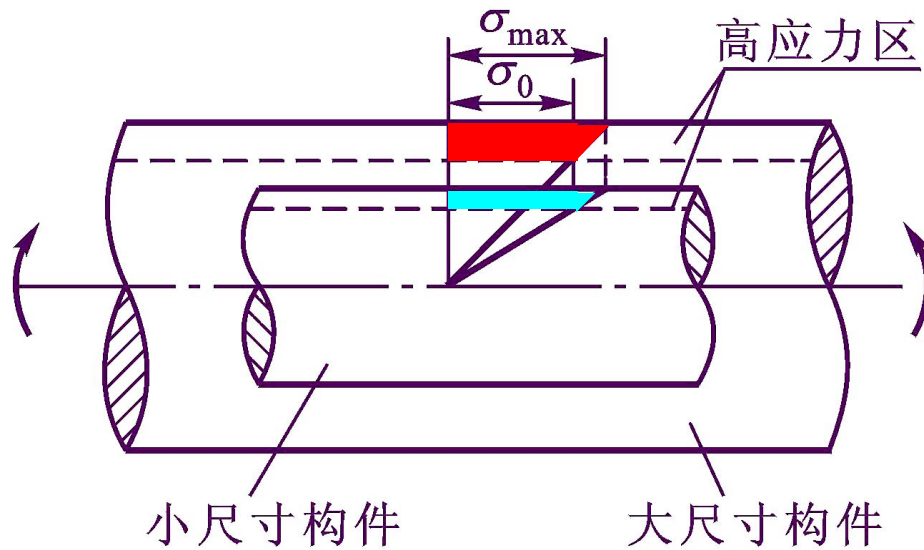
二是大尺寸零件表面积和表层体积都比较大，而裂纹源一般都在表面或表面层之下，故形成疲劳源的概率也比较大。

三是应力梯度的影响：若大、小零件的最大应力均相同，在相同的表层厚度内，大尺寸零件的材料所承受的平均应力要高于小尺寸零件。

这些都有利于初始裂纹的形成和扩展，因而使疲劳极限降低。



应力梯度的影响





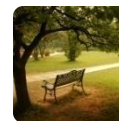
零件尺寸对疲劳极限的影响用尺寸因数度量：

$$\varepsilon = \frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{-1}}$$

式中， σ_{-1} 和 $(\sigma_{-1})_d$ 分别为试样和光滑零件在对称循环下的疲劳极限。上式也适用于剪应力循环的情形。



★ 表面加工质量的影响——表面质量因数



零件承受弯曲或扭转时，表层应力最大，对于几何形状有突变的拉压构件，表层处也会出现较大的峰值应力。因此，表面加工质量将会直接影响裂纹的形成和扩展，从而影响零件的疲劳极限。

表面加工质量对疲劳极限的影响，用表面质量因数度量：

$$\beta = \frac{(\sigma_{-1})_{\beta}}{\sigma_{-1}}$$

式中， σ_{-1} 和 $(\sigma_{-1})_{\beta}$ 分别为磨削加工和其他加工时的对称循环疲劳极限。



上述各种影响零件疲劳极限的因数都可以在有关的设计手册中查到。



- 疲劳强度的基本概念
- 疲劳极限与应力-寿命曲线
- 影响疲劳寿命的因素
- 基于无限寿命设计方法的疲劳强度
- 基于线性累积损伤理论的有限疲劳寿命设计
- 深度研讨



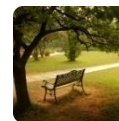
■ 基于无限寿命设计方法的疲劳强度



- ★ 构件寿命的概念
- ★ 无限寿命设计方法——安全因数法
- ★ 等幅对称应力循环下的工作安全因数
- ★ 等幅交变应力作用下的疲劳寿命估算



★ 构件寿命的概念



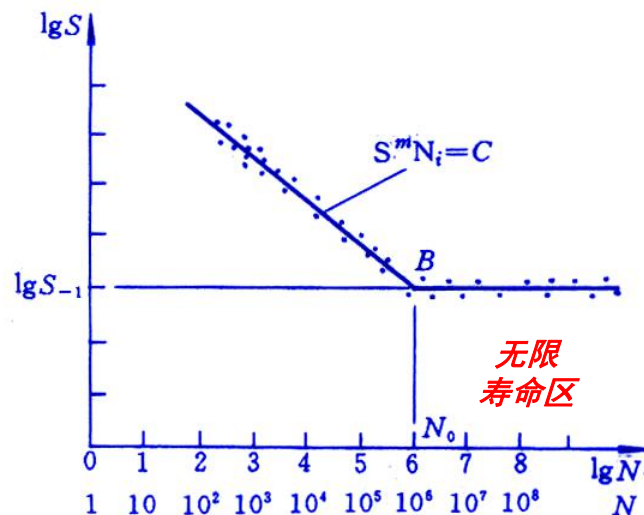
对数坐标系中的应力——寿命曲线

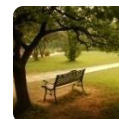
若将 $S_{\max}-N$ 试验数据标在 $\lg S - \lg N$ 坐标中，所得到的应力-寿命曲线可近似视为由两段直线所组成。

两直线的交点之横坐标值 N_0 ，称为循环基数；与循环基数对应的应力值（交点的纵坐标）即为疲劳极限。

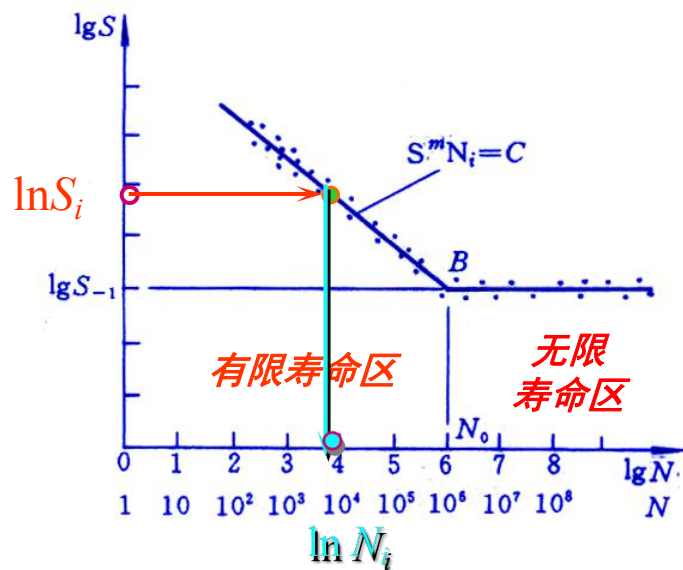
在双对数坐标中 $\lg S - \lg N$ 曲线上循环基数 N_0 以右部分（水平直线）称为**无限寿命区**。

因为循环基数都比较大(10^6 次以上)，故按疲劳极限进行的强度设计称为**无限寿命设计**。





有限寿命区与无限寿命区



在双对数坐标中 $\lg S - \lg N$ 曲线上
循环基数 N_0 以左部分（斜直线）
称为有限寿命区。

按照有限寿命进行的疲劳强度
设计称为有限寿命设计。



★ 无限寿命设计方法——安全因数法



应力循环中应力幅保持不变的交变应力，称为**等幅交变应力**。

工程设计中一般都是根据静载设计准则首先确定构件或零部件的初步尺寸，然后再根据疲劳强度设计准则对危险部位作疲劳强度校核。通常将疲劳强度设计准则写成安全因数的形式，即

$$n \geq [n]$$

n ——零件的工作安全因数；

$[n]$ ——规定的安全因数。

这种疲劳强度设计方法称为安全因数法。

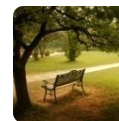


当材料较均匀，且载荷和应力计算精确时，取 $[n]=1.3$ ；当材料均匀程度较差，载荷和应力计算精确度又不高时，取 $[n]=1.5\sim 1.8$ ；当材料均匀程度和载荷、应力计算精确度都很差时，取 $[n]=1.8\sim 2.5$ 。

疲劳强度计算的主要工作是计算工作安全因数 n 。



★ 等幅对称应力循环下的工作安全因数



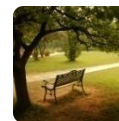
考虑到上一节中关于应力集中、尺寸和表面加工质量的影响，正应力和剪应力循环时的工作安全因数分别为

**对于对称
正应力循环**

$$n_{\sigma} = \frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{\max}} = \frac{(\sigma_{-1}) \varepsilon \beta}{(\sigma_{\max}) K_{f\sigma}} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_{f\sigma}}{\varepsilon \beta} \sigma_{\max}}$$

**对于对称
剪应力循环**

$$n_{\tau} = \frac{(\tau_{-1})_d}{\tau_{\max}} = \frac{(\tau_{-1}) \varepsilon \beta}{(\tau_{\max}) K_{f\tau}} = \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_{f\tau}}{\varepsilon \beta} \tau_{\max}}$$



$$n_{\sigma} = \frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{\max}} = \frac{(\sigma_{-1})\varepsilon\beta}{(\sigma_{\max})K_{f\sigma}} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_{f\sigma}}{\varepsilon\beta}\sigma_{\max}} \quad n_{\tau} = \frac{(\tau_{-1})_d}{\tau_{\max}} = \frac{(\tau_{-1})\varepsilon\beta}{(\tau_{\max})K_{f\tau}} = \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_{f\tau}}{\varepsilon\beta}\tau_{\max}}$$

n_{σ} n_{τ} ——工作安全因数；

σ_{-1} 、 τ_{-1} ——光滑小试样在对称应力循环下的疲劳极限；

$K_{f\sigma}$ 、 $K_{f\tau}$ ——有效应力集中因数；

ε ——尺寸因数；

β ——表面质量因数。



★ 等幅交变应力作用下的疲劳寿命估算



对于等幅应力循环，可以根据光滑小试样的 $S-N$ 曲线，也可以根据构件或零件的 $S-N$ 曲线，确定给定应力幅下的寿命。

以对称循环为例，根据光滑小试样的 $S-N$ 曲线确定疲劳寿命时，首先需要确定构件或零件上的可能危险点，并根据载荷变化状况，确定危险点应力循环中的最大应力或应力幅（ $S_{\max}=S_a$ ）；然后考虑应力集中、尺寸、表面质量等因素的影响，得到

$$\frac{K_{fS} S_a}{\varepsilon \beta}$$

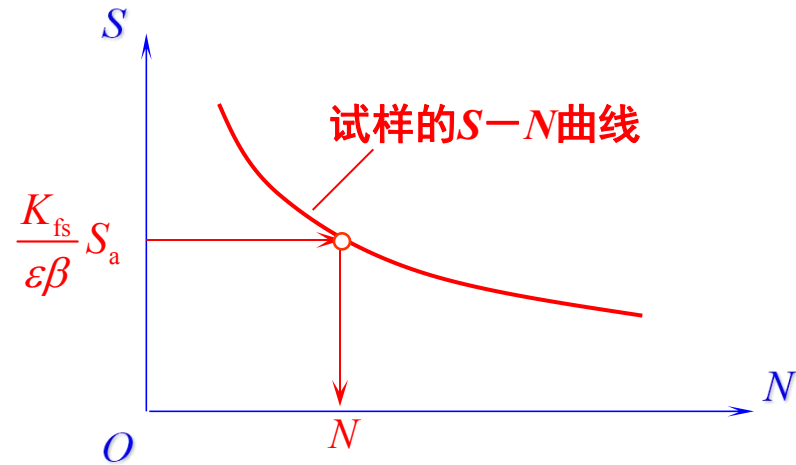
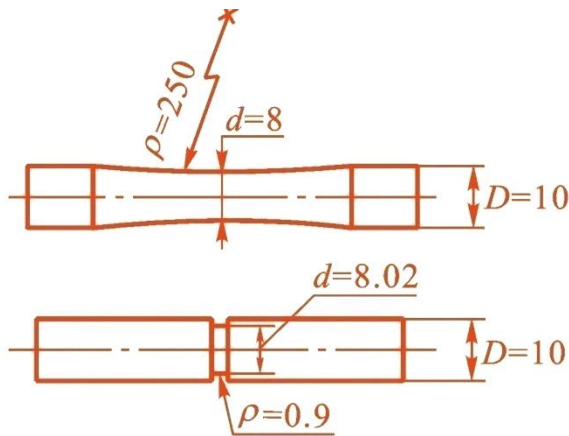
据此，由 $S-N$ 曲线，求得在应力

$$S = \frac{K_{fS} S_a}{\varepsilon \beta}$$

作用下发生疲劳断裂时所需的应力循环次数 N ，此即所要求的寿命。



根据光滑小试样的应力-寿命曲线 估算疲劳寿命

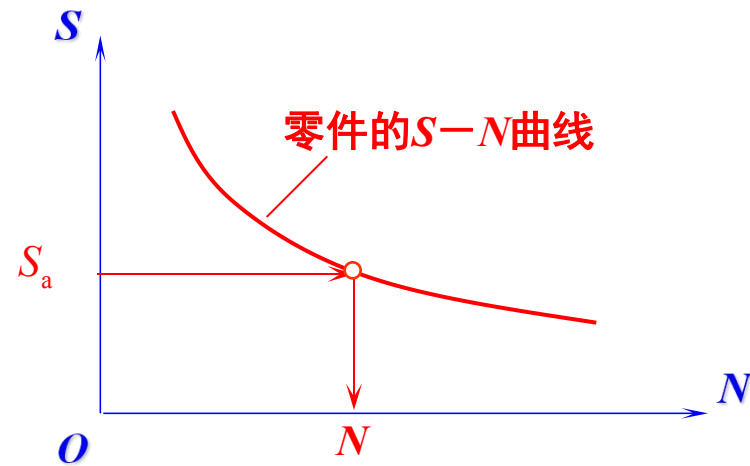
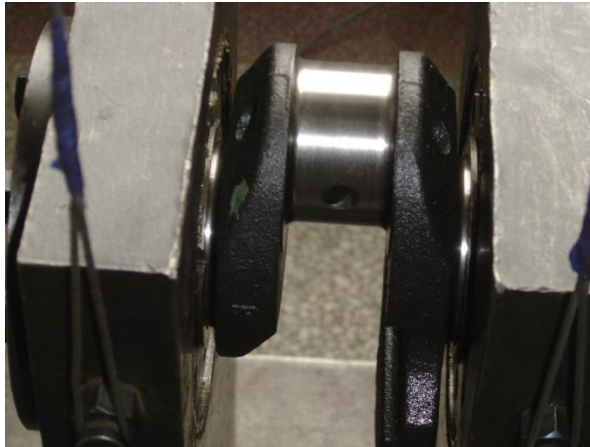




当根据零件试验所得到的应力-寿命曲线确定疲劳寿命时，由于试验结果已经包含了应力集中、尺寸和表面质量的影响，在确定了危险点的应力幅 S_a 之后，可直接根据 S_a 由 $S-N$ 曲线求得这一应力水平下发生疲劳断裂时的循环次数 N 。



根据零件试验所得到的应力-寿命曲线 估算疲劳寿命





- 疲劳强度的基本概念
- 疲劳极限与应力-寿命曲线
- 影响疲劳寿命的因素
- 基于无限寿命设计方法的疲劳强度
- 基于线性累积损伤理论的有限疲劳寿命设计
- 深度研讨



■ 基于线性累积损伤理论的有限寿命设计



- ★ 基本概念
- ★ 线性累积损伤理论—迈因纳准则
- ★ 周期性变幅交变应力时的
有限疲劳寿命估算



★ 基本概念

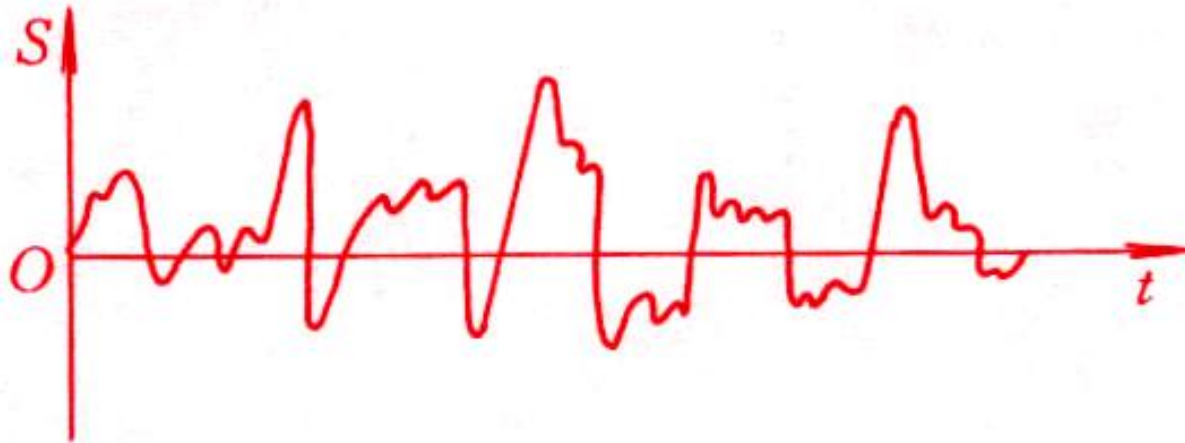


变幅交变应力

大多数机械零件和结构构件所承受的交变应力，应力幅是变化的。这种变化有的是规则的，有的则是随机的。这些交变应力统称为变幅交变应力（alternative stress with varying amplitude）。

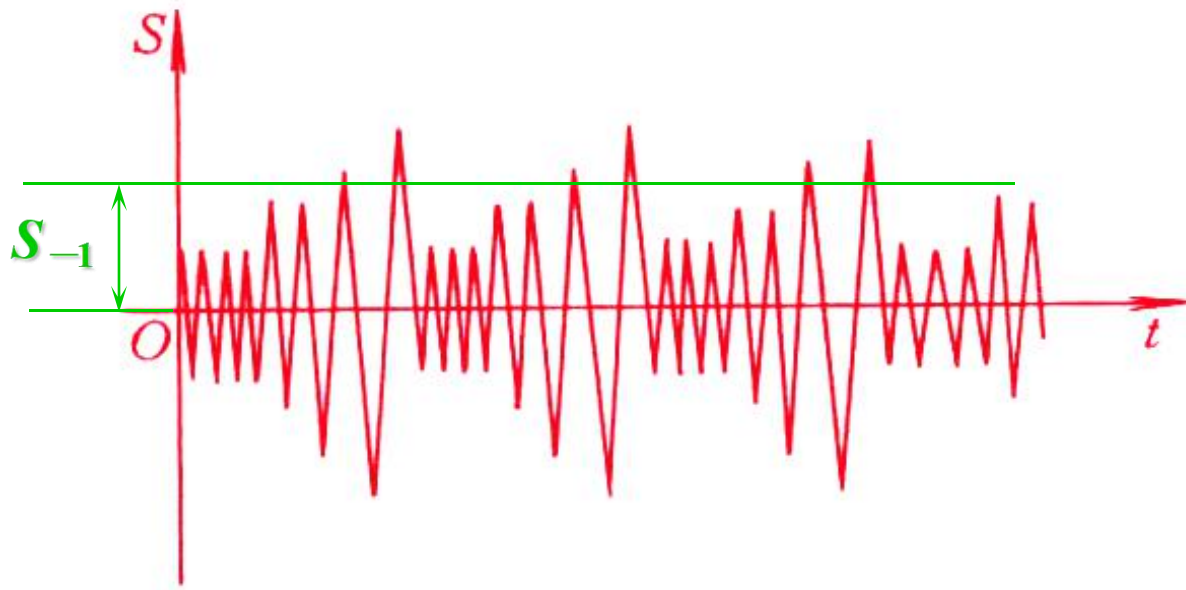


随机变幅交变应力





无限寿命设计的不合理性





无限寿命设计的不合理性

在等幅交变应力的疲劳强度设计中，采用的是控制危险点应力循环中的最大应力不得大于疲劳极限这一准则。若将这一准则用于变幅交变应力下的疲劳强度设计，则显得过于保守。

这是因为变幅交变应力作用下，最大应力有时超过疲劳极限，有时则低于疲劳极限，而且，在很多情形下，高幅应力的循环次数远远低于低幅应力的循环次数。而在确定的应力幅下，发生疲劳破坏需要一定量的应力循环次数。超过疲劳极限的高幅应力，若其循环次数较少时，则不一定会引起构件的疲劳破坏。

显然，在变幅应力循环下，若仍然沿用等幅应力循环时的设计准则，则是不合理的。

这里将讨论基于线性累积损伤理论的变幅交变应力循环时的疲劳强度设计准则。



★ 线性累积损伤理论—迈因纳准则

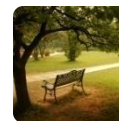


变幅应力循环下疲劳强度设计的基本思想是，允许构件上危险点应力循环中的最大应力值超过疲劳极限。当最大应力超过疲劳极限时，构件内部就会产生一定量的损伤（damage）。而且，这种损伤是可以累积的。当损伤累积到一定数值（即所谓“临界值”）时，便发生疲劳破坏。这种损伤称为累积损伤（cumulative damage）。

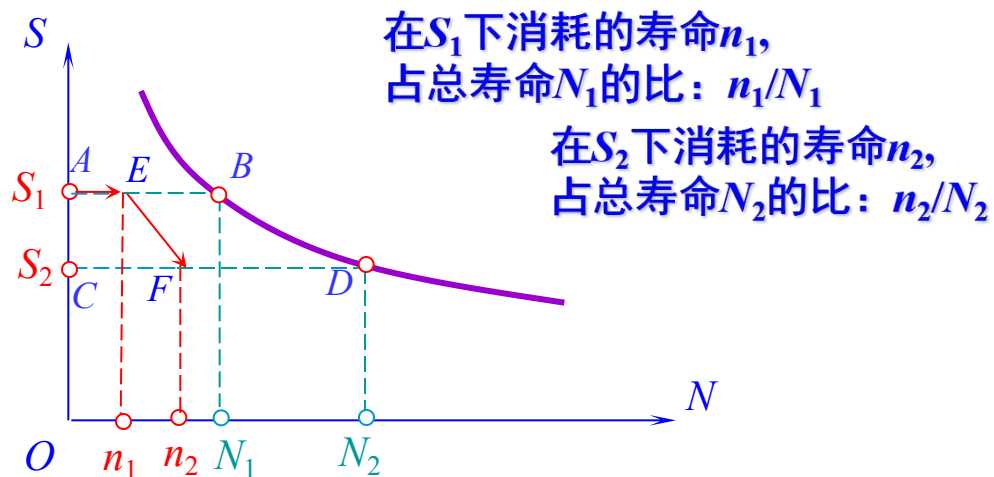


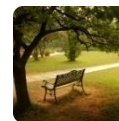
损伤的概念

- ◆ 周期变幅交变应力时的疲劳强度设计，允许构件上危险点应力循环中的最大应力值超过疲劳极限。
- ◆ 当最大应力值超过疲劳极限时，构件内部就会产生一定数量的损伤(damage)。
- ◆ 这种损伤是可以累积的，当损伤累积到一定数量时，便发生疲劳破坏。这一过程称为损伤累积 (cumulative damage)
- ◆ 构件的累积损伤过程，即为构件固有寿命的消耗过程。现以应力幅仅变化一次的情形为例，说明寿命消耗的过程。

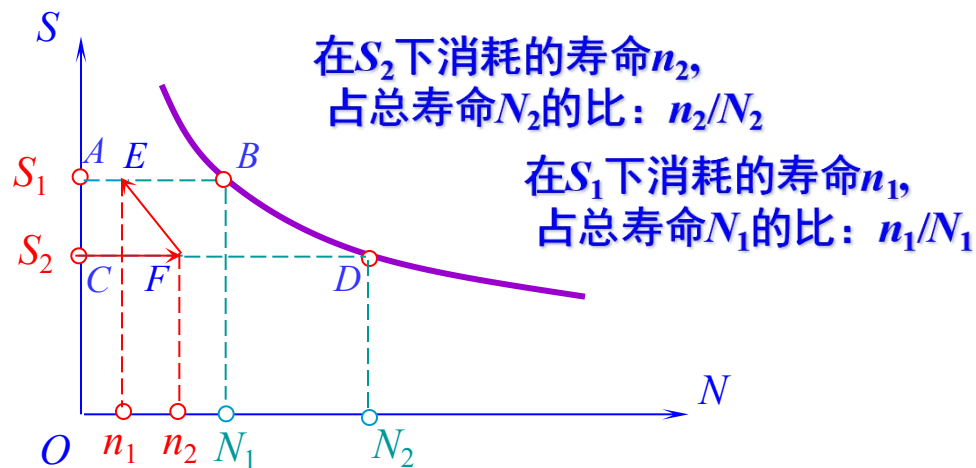


构件寿命的消耗过程——应力由高到低





构件寿命的消耗过程——应力由低到高





损伤率

确定的应力 S_i 水平下，消耗的寿命 n_i ，
与这一应力水平时的总寿命 N_i 之比： n_i/N_i



线性累积损伤理论

- ★ 在确定的应力水平下，经过一次应力循环，产生一定的损伤。
- ★ 在不同的应力水平下，经过多次应力循环，损伤累积到一定程度，寿命终结，发生疲劳破坏。



线性累积损伤理论

1945年迈因纳（Miner, M. A.）根据材料损伤时吸收净功（不考虑其它形式的能量损耗）的原理，提出了线性累积损伤的数学表达式。

设在某一应力水平（例如 S_1 ）下，发生疲劳断裂（ $N=N_1$ ）和部分损伤（ $N=n_1$ ）时材料所吸收的净功分别为 W 和 W_1 ，则有

$$\frac{W_1}{W} = \frac{n_1}{N_1}$$

在另一应力水平（例如 S_2 ）下，同样有

$$\frac{W_2}{W} = \frac{n_2}{N_2}$$

损伤和发生疲劳破坏时材料所吸收的净功之比，等于损伤率。



线性累积损伤理论

设在某一应力水平（例如 S_1 ）下，发生疲劳断裂（ $N=N_1$ ）和部分损伤（ $N=n_1$ ）时材料所吸收的净功分别为 W 和 W_1 ，则有

$$\frac{W_1}{W} = \frac{n_1}{N_1}$$

在另一应力水平（例如 S_2 ）下，同样有

$$\frac{W_2}{W} = \frac{n_2}{N_2}$$

对于任意应力水平（ S_i , $i=1, 2, \dots, n$ ），亦有

$$\frac{W_i}{W} = \frac{n_i}{N_i} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$



线性累积损伤理论

$$\frac{W_1}{W} = \frac{n_1}{N_1} \quad \frac{W_2}{W} = \frac{n_2}{N_2} \quad \dots \quad \frac{W_i}{W} = \frac{n_i}{N_i} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

上述各式中的 W ，均为发生疲劳破坏时材料吸收的净功，它与应力水平无关，因而都是相等的。

经过 k 次应力幅的改变，构件发生疲劳破坏时，有

$$W_1 + W_2 + \dots + W_i + \dots + W_k = W$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = 1$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$



线性累积损伤理论

$$\frac{W_1}{W} = \frac{n_1}{N_1} \quad \frac{W_2}{W} = \frac{n_2}{N_2} \quad \cdots \quad \frac{W_i}{W} = \frac{n_i}{N_i} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

$$W_1 + W_2 + \cdots + W_i + \cdots + W_k = W$$

$$\longrightarrow \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

此即关于线性累积损伤的基本方程，称为迈因纳准则（Miner Criterion），其中 n_i/N_i 称为应力水平 S_i （ $i=1, 2, \dots, k$ ）下的损伤率。

以上分析均为光滑小试样的情形。



★ 周期性变幅交变应力时的 有限疲劳寿命估算



周期性变幅交变应力时的疲劳寿命估算

作为变幅应力循环疲劳问题的简单情形，下面讨论周期性变幅交变应力时的疲劳寿命估算。

承受变幅交变应力（仍以对称循环为例）作用的零件，当载荷谱（或应力谱）中有若干应力循环的应力幅超过疲劳极限时，应按累积损伤理论估算零件的疲劳寿命。

由线性累积损伤的迈因纳准则，发生疲劳断裂时有

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$



周期性变幅交变应力时的疲劳寿命估算

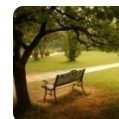
由线性累积损伤的迈因纳准则，发生疲劳断裂时有

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

其中， N_i 和 n_i 分别为应力水平 S_i 下的固有寿命和应力循环次数。

设零件的总寿命为 N ，将上式改写为

$$N \sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i} \cdot \frac{n_i}{N} = 1$$



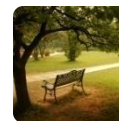
周期性变幅交变应力时的疲劳寿命估算

设零件的总寿命为 N ，将上式改写为

$$N \sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i} \cdot \frac{n_i}{N} = 1$$

于是，得到估算零件寿命 N 的公式为

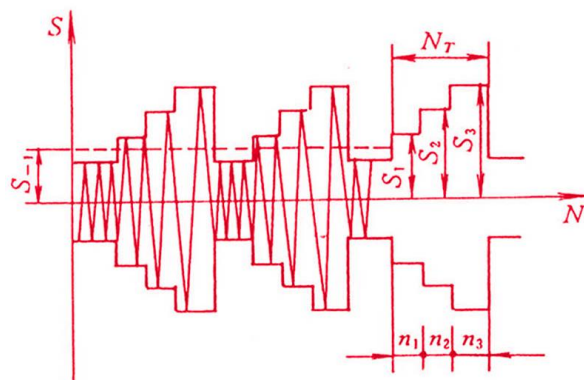
$$N = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i} \cdot \frac{n_i}{N}}$$

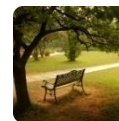


周期性变幅交变应力时的疲劳寿命估算

$$N = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{N_i} \cdot \frac{n_i}{N}}$$

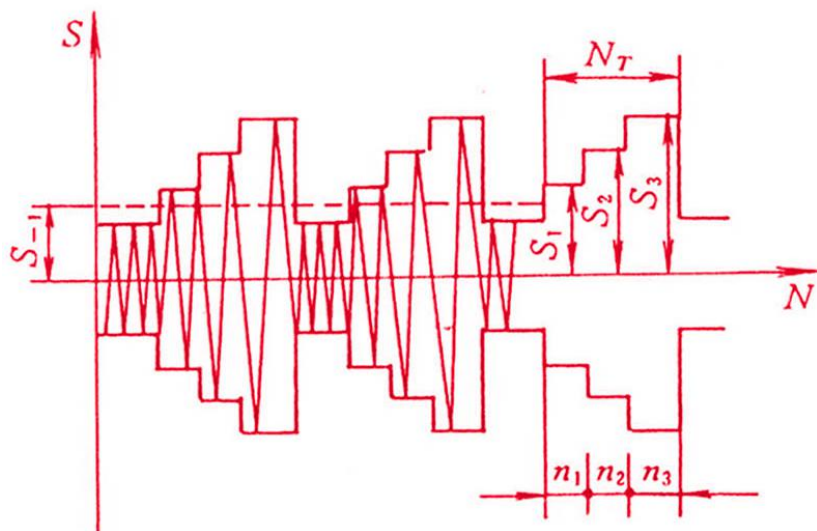
式中, N_i 由 $S-N$ 曲线和 S_i 确定; 比值 n_i/N 中的 N 虽为未知, 但对于规则变化的载荷谱 n_i/N 却是已知的, 它等于一个周期 (T) 内的比值, n_i^T / N_T 为一个周期内在应力水平 S_i 下的循环数; N_T 为一个周期内在所有应力水平下的循环总数 (不考虑应力水平低于疲劳极限的应力循环数)。





周期性变幅交变应力时的疲劳寿命估算

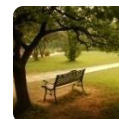
根据寿命公式可以确定零件的剩余寿命



$$\frac{n_i}{N} = \frac{n_i^T}{N_T}$$

n_i^T — 一个周期内某个应力水平 S_i 下的循环数；

N_T — 一个周期内所有应力水平下的循环总数。



能力训练 1

已知：低合金结构钢试样在不同应力水平下的疲劳寿命(试验数据)。

一材料相同的试样在承受下列应力水平和相应的应力循环次数仍未发生疲劳破坏：

σ_i / MPa	N_i (寿命循环数)	σ_i / MPa	N_i (经历的循环数)
380	275000	380	80000
410	125000	450	12000
450	50500	510	3000
480	20800	480	?
510	10050		
550	1500		



σ_i / MPa	N_i (寿命循环数)	σ_i / MPa	N_i (经历的循环数)
380	275000	380	80000
410	125000	450	12000
450	50500	510	3000
480	20800	480	?
510	10050		
550	1500		

这一试样再 $\sigma_a = 480$ MPa 承受对称应力循环，其剩余寿命还有多少？



解： 设还要经历 n_4 次应力循环，发生疲劳破坏，根据 Miner 准则，有

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} = 1$$



$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} = 1$$

$\sigma_1 = 510 \text{ MPa} :$	$N_1 = 10050,$	$n_1 = 3000;$
$\sigma_2 = 450 \text{ MPa} :$	$N_2 = 50500,$	$n_2 = 12000;$
$\sigma_3 = 380 \text{ MPa} :$	$N_3 = 275000,$	$n_3 = 80000;$
$\sigma_4 = 480 \text{ MPa} :$	$N_4 = 20800,$	$n_4 = ?$



$$n_4 = 3598$$



- 疲劳强度的基本概念
- 疲劳极限与应力-寿命曲线
- 影响疲劳寿命的因素
- 基于无限寿命设计方法的疲劳强度
- 基于线性累积损伤理论的有限疲劳寿命设计
- 深度研讨



■ 深度研讨



- ★ 德国高铁事故解析
- ★ 提高构件疲劳强度的途径
- ★ 研讨问题

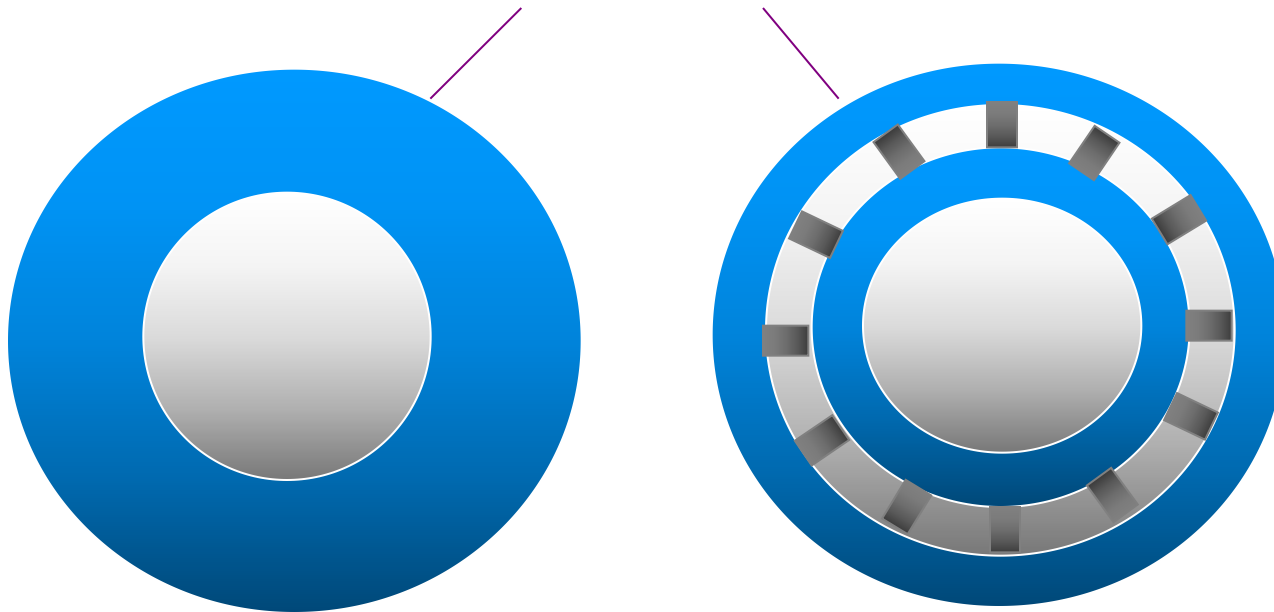


★ 德国高铁事故解析



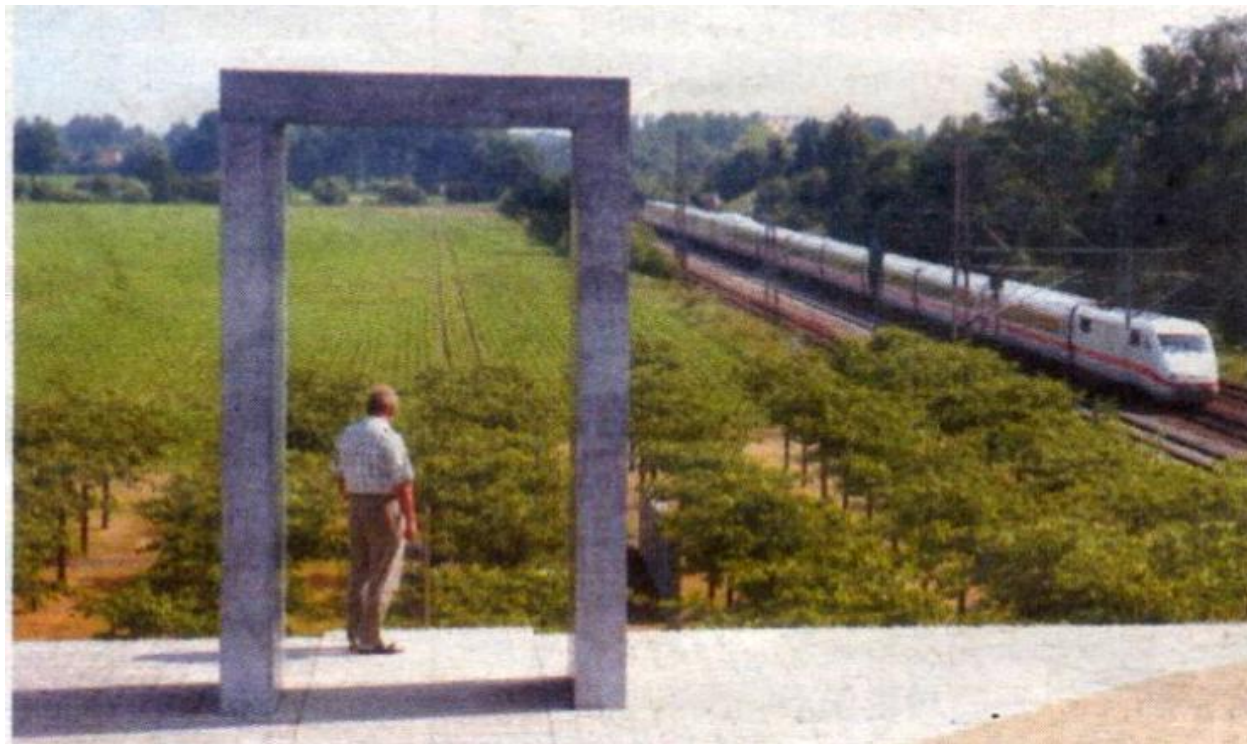


轮毂





栽樱桃树缅怀逝者 立纪念碑予以反思





101棵樱桃树代表101个生命

具有800年历史的埃舍德小镇位于德国北部名城汉诺威以北约50公里处，人口3700多。

镇边有一座高架桥，这座桥就在当年被失事火车撞塌的那座桥的原址重新建造的。

桥的一旁立着一扇水泥门。门的侧面刻着：“1998年6月3日，10时58分ICE884伦琴号在这里发生严重的出轨事故，101人在这次事故中遇难，他们的家庭被彻底破坏，更有数以百计的人严重受伤，这些伤痕将伴随他们一生。在这灾难面前我们看到了人类的渺小和短暂，还有我们的不足。那些舍己救人的救护人员、当地的市民们为我们作出榜样，他们完成了巨大的任务，也给予他人莫大的帮助和安慰。通过他们的行动，我们也在埃舍德看到了团结一心和人与人之间的真切情感。”

从水泥门往下看，是101棵樱桃树，这101棵樱桃树代表着101个逝去的生命。每年6月，鲜红的樱桃果实和繁茂的枝叶相互依托，象征着事故的受害者本次扶持、相互照顾。



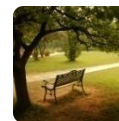
事故后，德国政府和民众都支持建立一个纪念馆以“反思事故”。这项工作最后交给汉诺威的两位建筑师。二人通过1年多的调查和设计，确定了一个主题——“在天堂的路上”。设计者纪念馆能够起到5个方面作用：

- 一是让人记住高铁事故；
- 二是提醒后人；
- 三是让人反思；
- 四是不被历史遗忘；
- 五是愈合伤口。

摘自2011年8月5日《环球时报》第9版



★ 提高构件疲劳强度的途径



所谓提高疲劳强度，通常是指在不改变构件的基本尺寸和材料的前提下，通过减小应力集中和改善表面质量，以提高构件的疲劳极限。通常有以下一些途径：

★ 缓和应力集中

截面突变处的应力集中是产生裂纹以及裂纹扩展的重要原因，通过适当加大截面突变处的过渡圆角以及其他措施，有利于缓和应力集中，从而可以明显地提高构件的疲劳强度。

★ 提高构件表面层质量

在应力非均匀分布的情形（例如弯曲和扭转）下，疲劳裂纹大都从构件表面开始形成和扩展。因此，采用机械的或化学的方法对构件表面进行强化处理，改善表面层质量，将使构件的疲劳强度有明显的提高。



★ 提高构件表面层质量

在应力非均匀分布的情形（例如弯曲和扭转）下，疲劳裂纹大都从构件表面开始形成和扩展。因此，采用机械的或化学的方法对构件表面进行强化处理，改善表面层质量，将使构件的疲劳强度有明显的提高。

采用表面热处理和化学处理（例如表面高频淬火、渗碳、渗氮和氰化等）、冷压机械加工（例如表面滚压和喷丸处理等），都有助于提高构件表面层的质量。

采用这些表面处理方法，一方面可以使构件表面的材料强度提高；另一方面可以在表面层中产生残余压应力，抑制疲劳裂纹的形成和扩展。

喷丸处理方法近年来得到广泛应用，并取得了明显的效益。这种方法是将很小的钢丸、铸铁丸、玻璃丸或其他硬度较大的小丸以很高的速度喷射到构件表面上，使表面材料产生塑性变形而强化，同时产生较大的残余压应力。



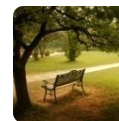
★ 研讨问题



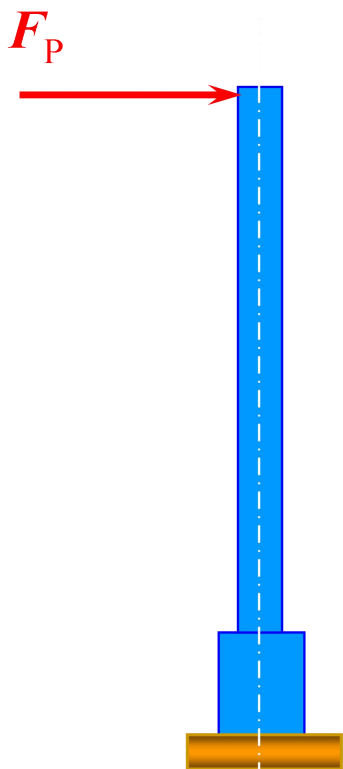
研讨问题 1



**因为不明原因汽车正面的挡风玻璃出现一条不长的裂纹，
请分析可以采用什么方法可以防止裂纹继续扩展？**



研讨问题 2



仪表的微型元件，下端固定、上端自由，在自由端承受不规则振荡力作用如图18-18所示。元件工作一段时间以后发生断裂。而且类似的问题常有发生。请分析：

1. 怎样判断元件是疲劳破坏还是非疲劳破坏？
2. 提出改进的设计方案以避免发生类似的破坏。



能力训练 I

13-I-1

13-I-2

13-I-4



再认知测试

13-2

13-4



谢谢大家