XJTU-MSE @ Jiping WANG

悲剧发生在泰坦尼克号的处女航

TITANIC

1912年4月10日 英国→美国纽约

4月14日晚11点40分，泰坦尼克号在北大西洋撞上冰山

2208名船员和旅客中，705人生还 1503人葬生海底

XJTU-MSE@Jiping WANG

重庆綦江彩虹桥 豆腐渣工程害死人

拱架钢管焊接质量不合格

钢管内混凝土抗压强度不足

连接桥梁、桥面的拉索、锚具和镏片严重锈蚀

KJTU-MSE @ Jiping WANG

1999年1月4日晚6时50分左右，彩虹桥整体垮塌，包括18名年轻武警战士在内的40人遇难

坍塌的彩虹桥

痛惜的婚礼

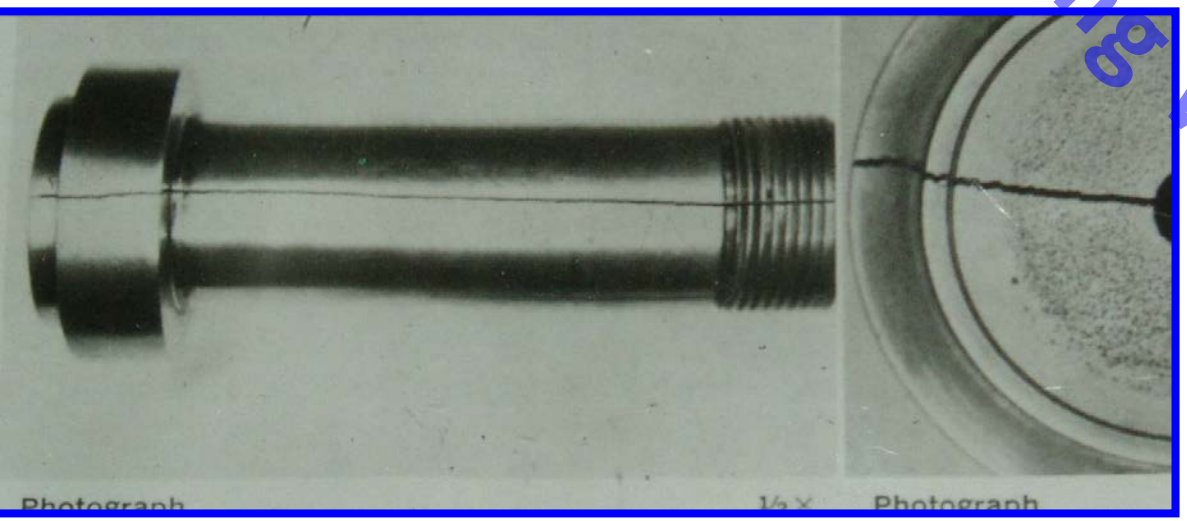
上海　高速路

XJTU-MSE@Jiping WANG

塔吊事故频发

XJTU-MSE @ Jiping WANG

大量零部件的断裂失效



XJTU-MSE@Jiping WANG

第二节　零件在静载和冲击载荷下的断裂

一、基本概念

静　载　荷　载荷从零**逐渐**缓慢地**增加**到最终值而**保持不变**，或**变化很小**的**载荷**

拉伸→ 压缩　　剪切

扭转　　弯曲

动　载　荷　载荷随**时间**变化（有加速度）

冲击载荷　　交变载荷

XTU MSE @ Jipin WANG

冲击载荷

两个作相对运动的零构件发生碰撞而产生的载荷

XTU-MSE @ Jiping WANG

断　　裂

材料在**外力**作用下**分为两个**或者**两个以上**部分的现象

传说中的肉坚强，刀表示跪了

XJTU-MSE @ Jiping WANG

断裂的分类

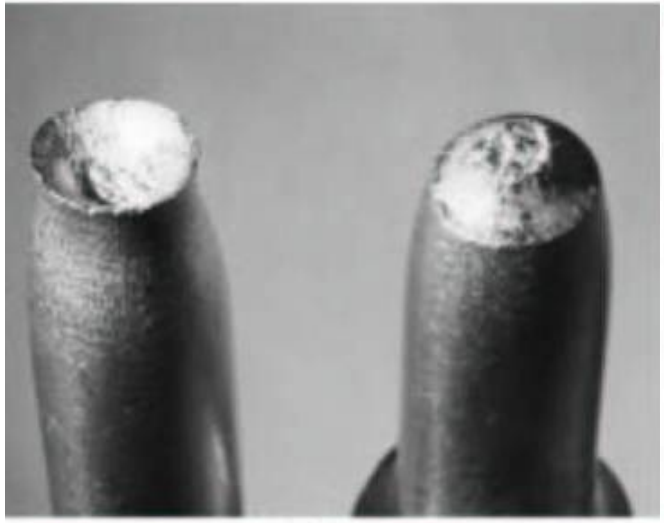
韧性断裂　断裂前发生明显塑性变形的断裂

断口特征：杯锥状，暗灰色

脆性断裂　断裂前未发生明显塑性变形的断裂

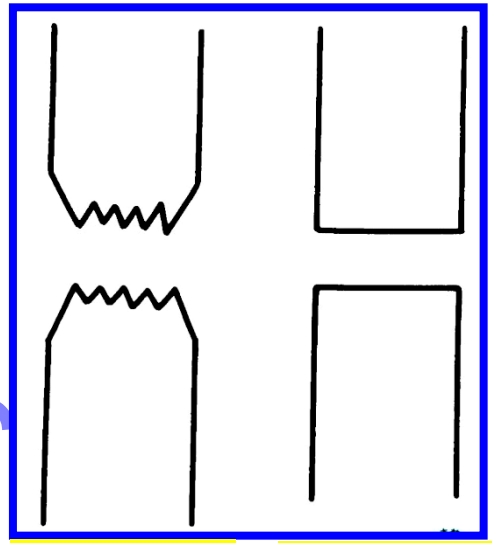
断口特征：平齐，无数发亮的小平面

SJTU-MSE @ Jiping WANG



韧断

脆断



韧断　脆断

断裂过程

包含两个阶段

裂纹的形成 (萌生)

材料在**外力**作用下，形成**微裂纹**或以**内部缺陷**作为裂纹源

+

裂纹的扩展

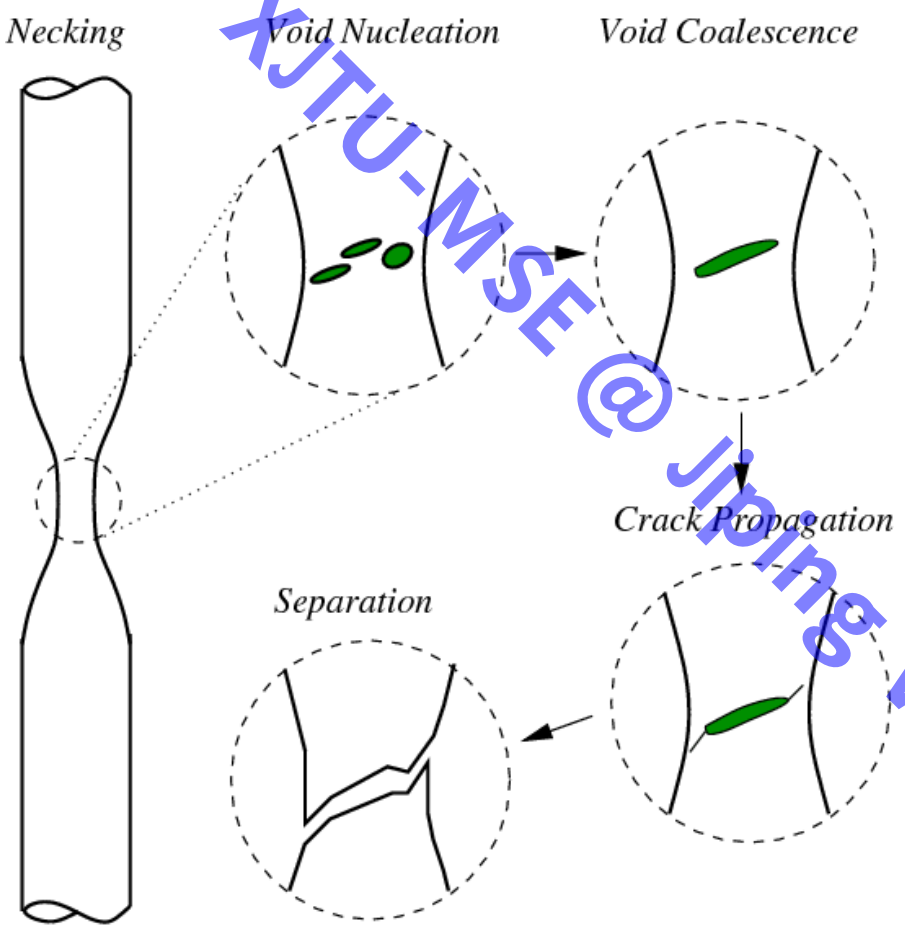
微裂纹或裂纹源逐渐扩展至**临界尺寸**时，立即发生断裂

微裂纹 → 扩展至临界裂纹长度 → 快速扩展至断裂

裂纹**亚稳**扩展阶段

裂纹**失稳**扩展阶段

KJTU MSE @ Jing WANG



XJTU-MSE @ JPing WANG

Schematic representation of the steps in ductile fracture (in pure tension)

裂纹亚稳扩展阶段　　裂纹失稳扩展阶段

韧性断裂

- 裂纹的亚稳扩展阶段较长
- 裂纹的扩展与塑性变形同时进行
- 断裂慢
- 吸收能量很多

脆性断裂

- 几乎没有亚稳扩展阶段
- 无明显塑性变形
- 断裂快
- 吸收的能量较少

XJTU MDE @ Jiping WANG

韧性断裂 or **脆性断裂** ??

有没有定量评判的标准？

韧性

材料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力

是材料强度和塑性的综合表现

- 韧性越好，脆断倾向越小
- 力学性能指标

冲击韧性　**断裂韧性**

XJTU-MSE@Jiming WANG

二、冲击韧性

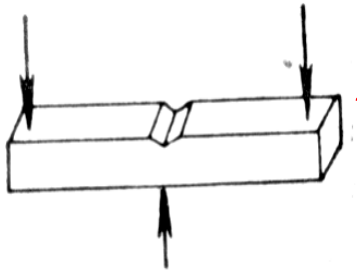
材料在冲击载荷下吸收塑性变形功和断裂功的能力

是材料强度和塑性的综合表现

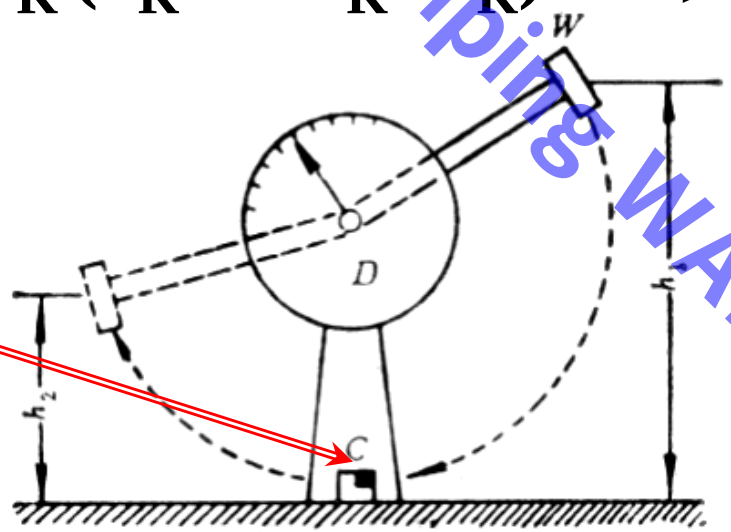
衡量指标：

冲击吸收功 $A_K = mg(h_1 - h_2)$　　单位：J

冲击韧度 $a_K\ (a_K = A_K / F_K)$　　单位：J/cm^2



冲击实验的试样



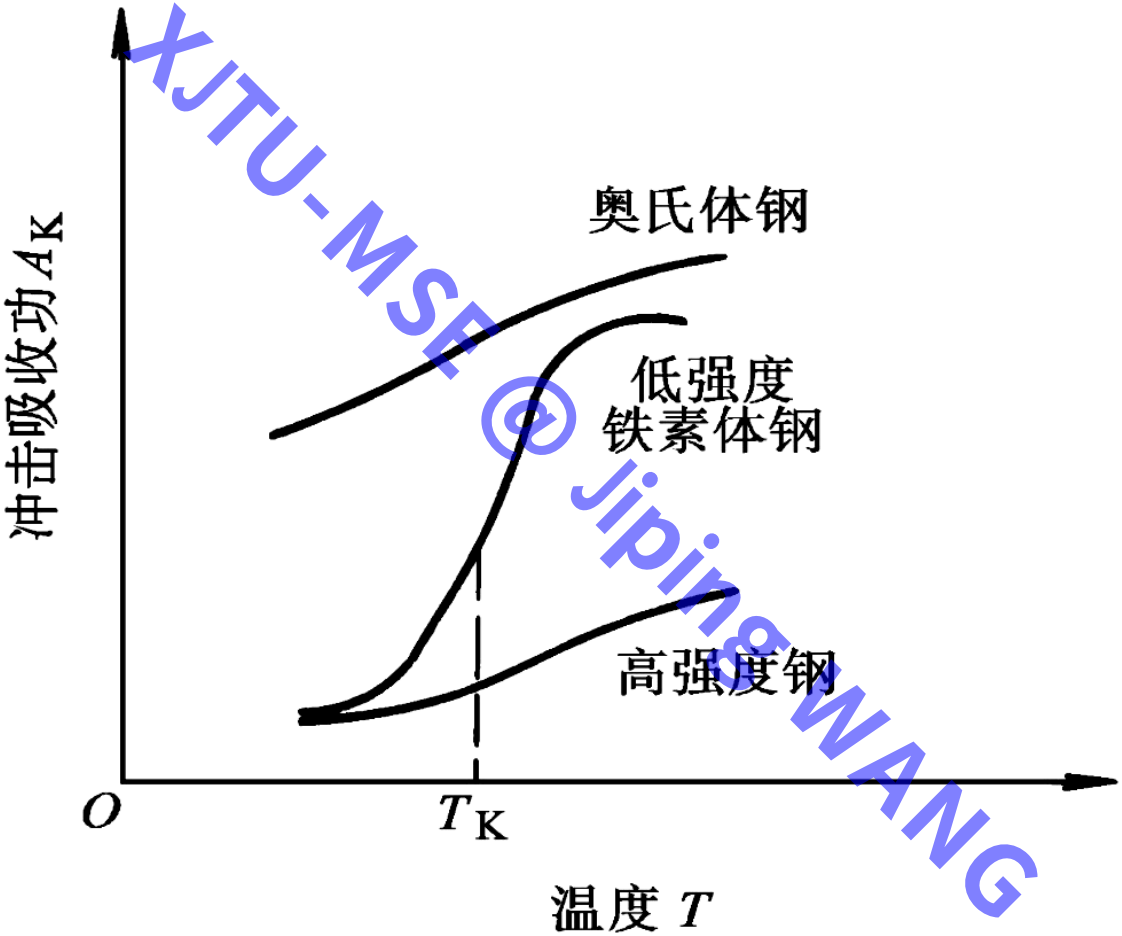
冲击实验示意图

F_K = 断口截面积

m = 摆锤的质量

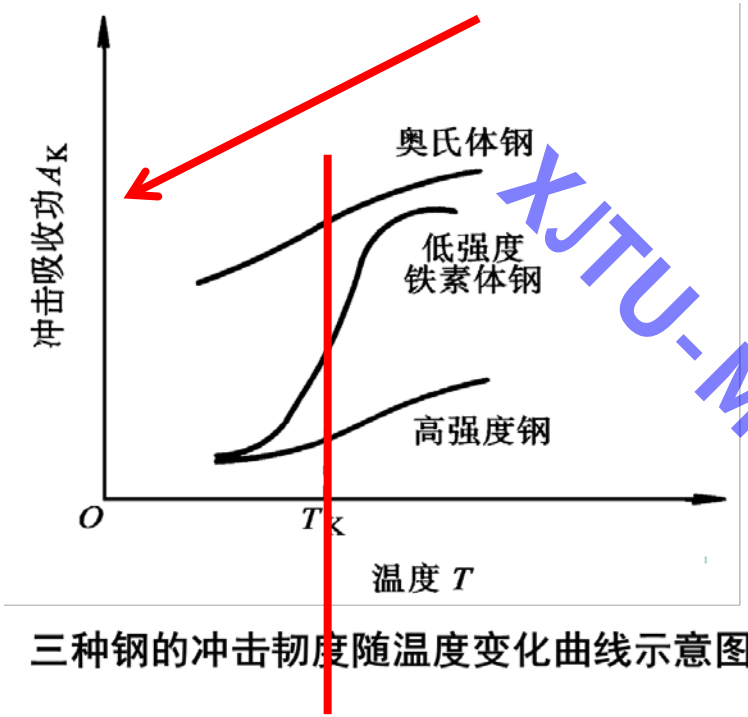
JUTH-MSE@Jiping WANG

冲击韧度与温度的关系



XJTU-MSE @ JipingWANG

三种钢的冲击韧度随温度变化曲线示意图



三种钢的冲击韧度随温度变化曲线示意图

- 冲击韧度随温度降低而减小

- 存在**韧脆转变温度** T_K

材料由韧性状态转变为脆性状态的温度称为**韧脆转变温度**

- 对材料的成分和组织敏感

夹杂物、偏析、气泡、内部裂纹、钢的回火脆性、晶粒粗化

XJTU-MSE @Jiling WANG

泰坦尼克号快速沉没的原因

A Comparison of Tensile Testing of *Titanic* Steel and SAE 1020		
	Titanic	SAE 1020
Yield Strength	193.1 MPa	206.9 MPa
Tensile Strength	417.1 MPa	379.2 MPa
Elongation	29%	26%
Reduction in Area	57.1%	50%

XJTU-MSE @ Jiping WANG

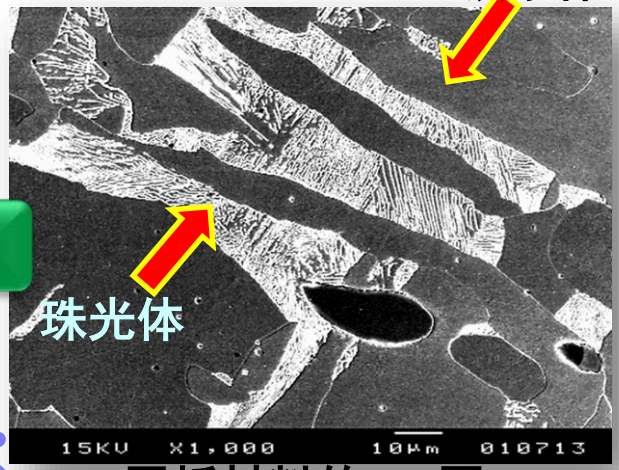
劣质铆钉“谋杀”泰坦尼克?

船体撞击冰山，导致船底的铆钉承受不了撞击因而毁坏

矿渣含量是现代锻铁的三倍

泰坦尼克号快速沉没的原因

结构



甲板材料的SEM图

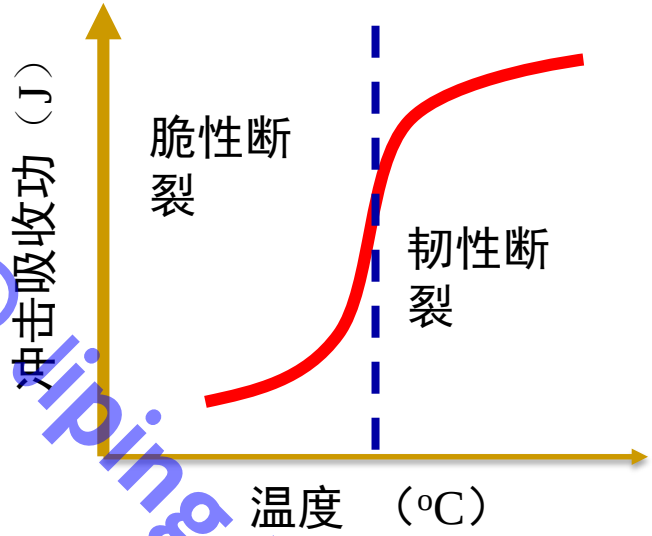
成分

黑色为MnS杂质（夹杂物）

与ASTM A36比较，Mn↓，S↑

XJTU-MSE@ Jiping WANG

泰坦尼克号快速沉没的原因

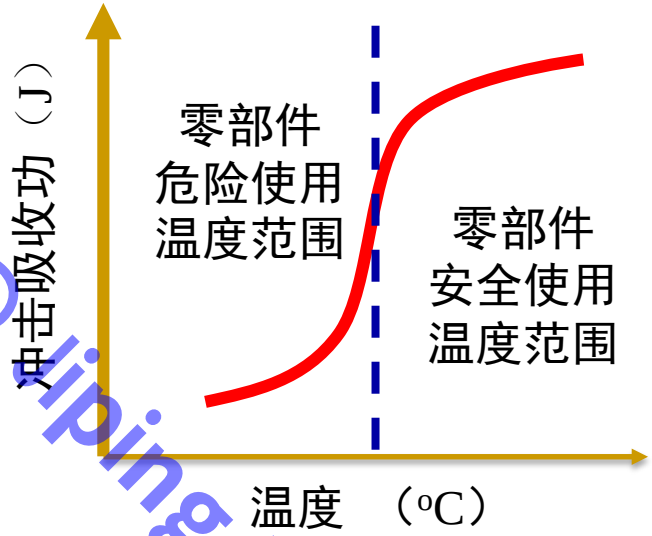


性能

该船用材料纵向的韧脆转变温度为32 °C，
材料横向的韧脆转变温度为56 °C，
事发时海水温度-2 °C。

XJTU-MSE@liping WANG

泰坦尼克号快速沉没的原因



性能

该船用材料纵向的韧脆转变温度为32 °C，
材料横向的韧脆转变温度为56 °C，
事发时海水温度-2 °C。

XJTU-MSE@liping WANG

The RMS Olympic made more than 500 round trips between Southampton and New York before it was retired in 1935 and was finally broken up in 1937. 服役超20年

KJTU-MSE@Jiping WANG

冲击韧性在材料设计中的应用

A_k 值低的材料称为脆性材料

A_k 值高的材料称为韧性材料

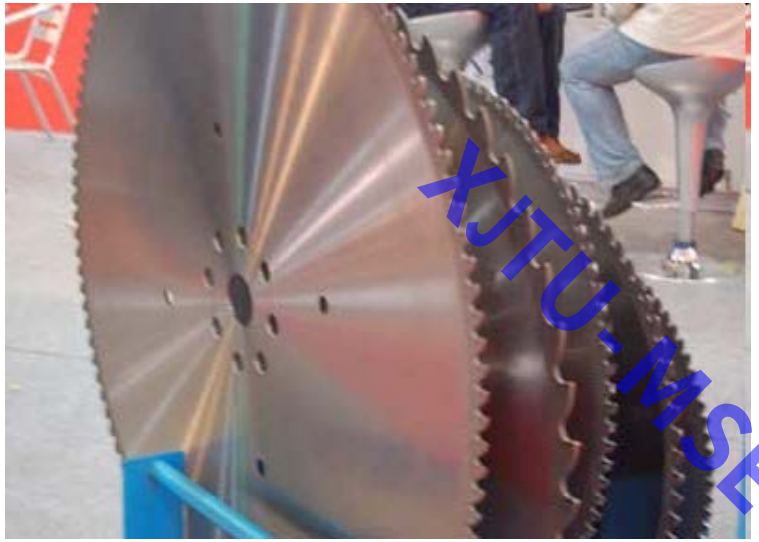
工程中常将材料的屈服强度与冲击韧性结合在一起用于零件及结构的设计

例1: 飞机主起落架

着陆瞬间：承受(几十吨力至几百吨力)的撞击力

材料性能要求：冲击韧性好的超高强度结构钢

STP-MSE@JIPING WANG



例2：锯片

基体良好的抗**冲击韧性**

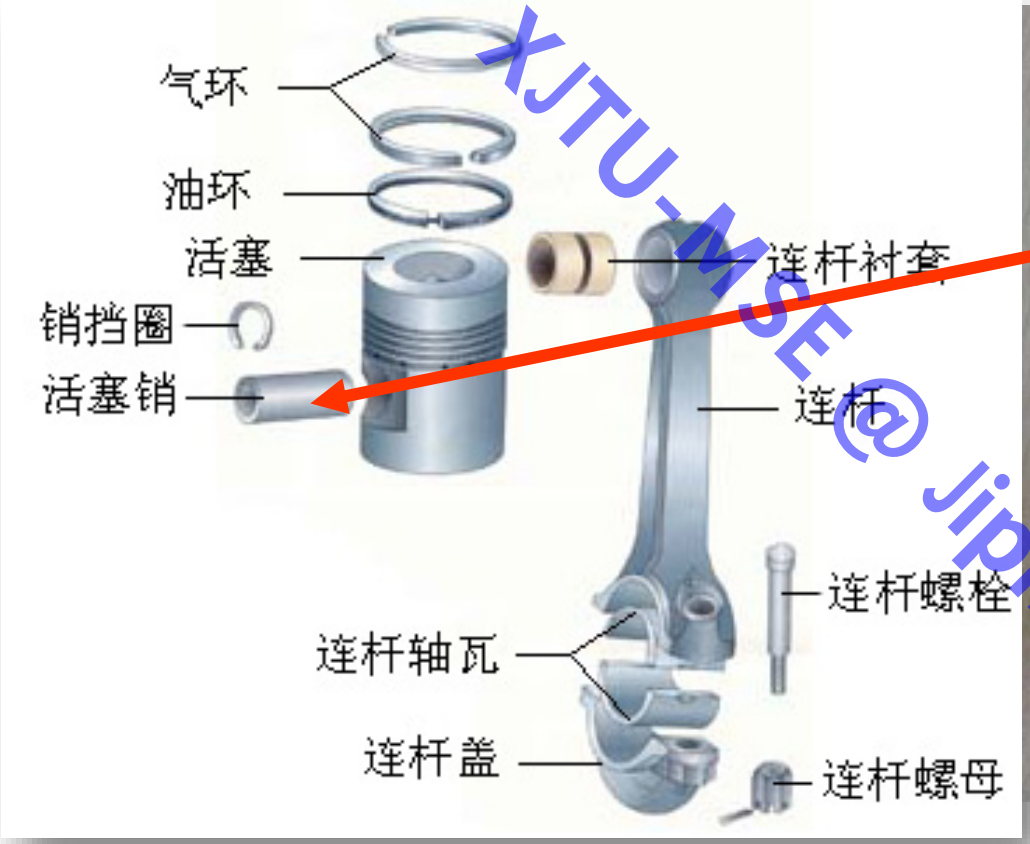
例3：焊接件，

除了强度的要求外，规定**焊接接头冲击吸收功** $A_K > 27J$

XJTU-MSE @ Jinhe WANG

材料力学性能判据　σ_s/k,　δ, ψ,　A_K, a_K

冲击韧性其他应用例子：活塞销、冲模、锻模



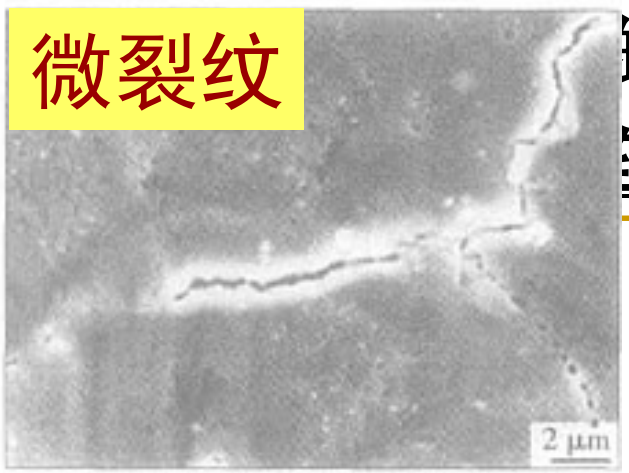
XJTU-MSE @ Jiping WANG

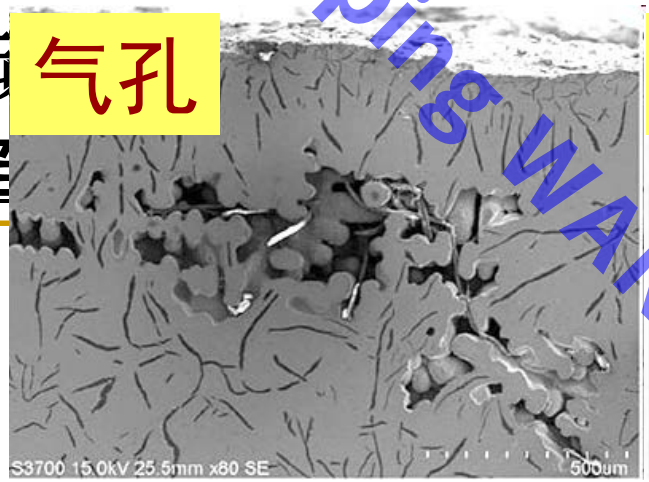
传统的零件及结构设计是基于

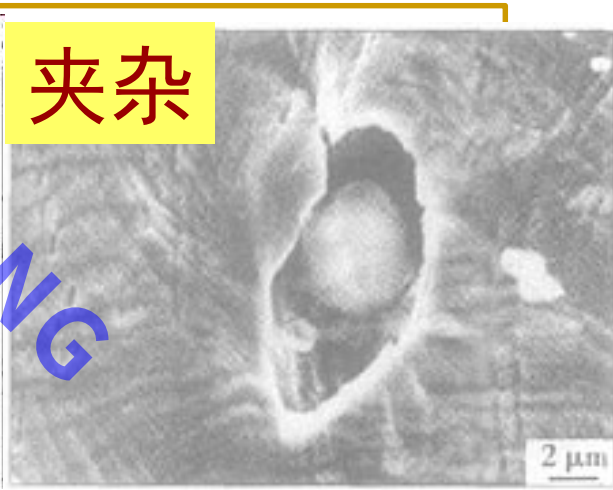
假设“材料是一个连续均质的整体”

σ_s/k (强度/刚度) 越高越安全？

经典案例：1965年 英国 氨合成塔，设计压力为36MPa 选材 σ_s =460MPa，加压35.2MPa突然爆炸。事后检查，发现在焊缝区有一约为10mm的内部裂纹







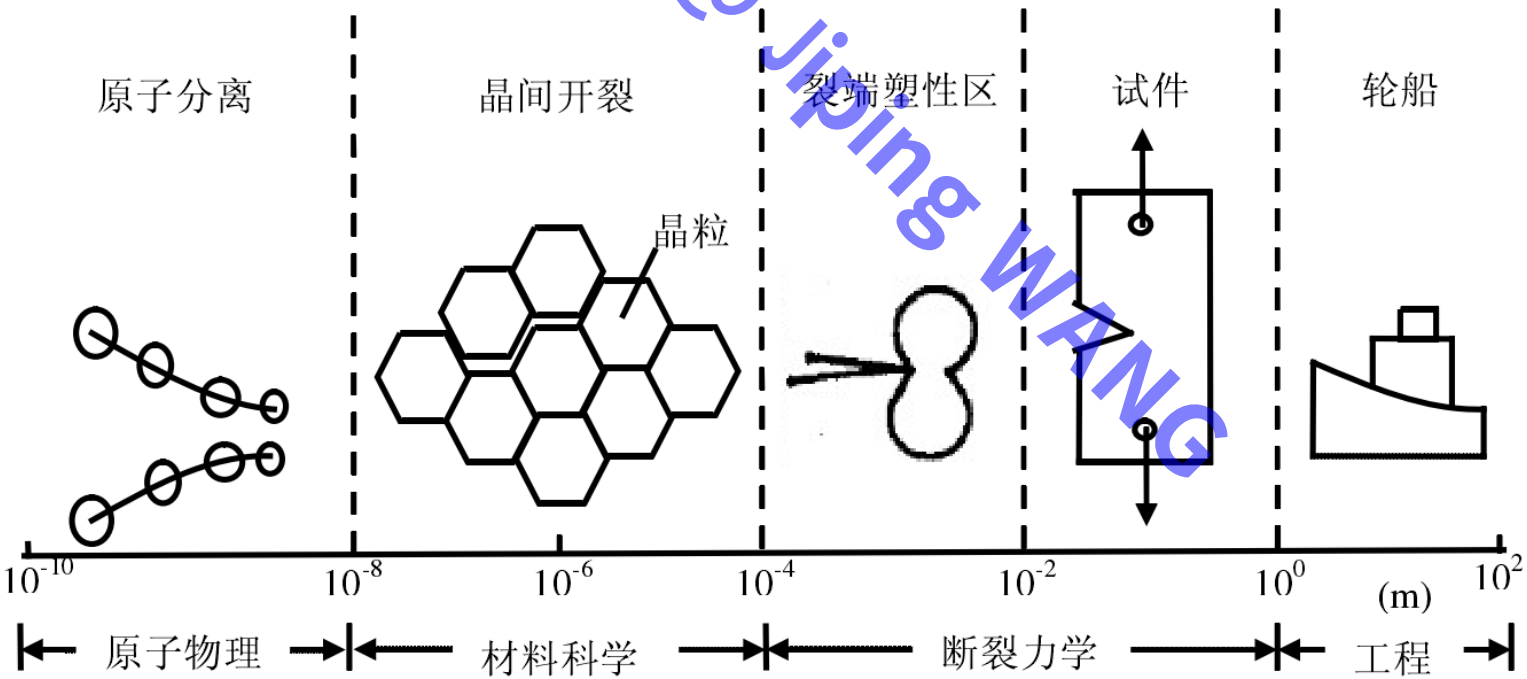
HJTU-MSE@Jiping WANG

三、断裂韧性

断裂力学

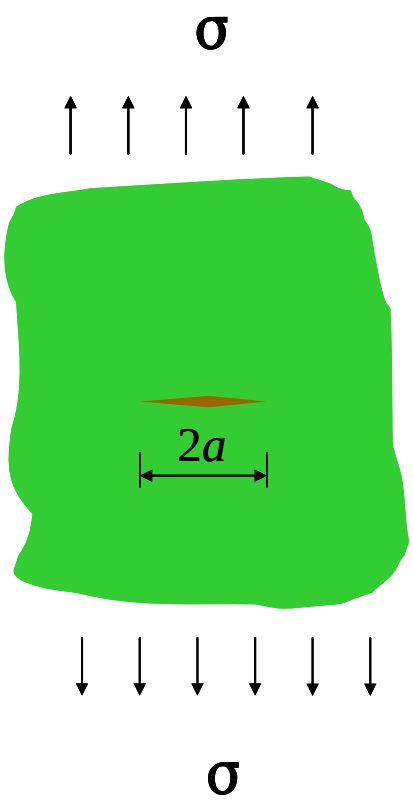
把材料看成是**裂纹体**，利用**弹塑性理论**，
研究裂纹尖端的**应力**、**应变**，以及**应变能分布**；
确定**裂纹**的**扩展规律**；
建立裂纹扩展的**新**的**力学参数**

xuchuang@jiping WANG



裂纹尖端应力场强度因子 K_I

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$



Y **: 几何形状因子，*Y*=1～2**

***σ*: 工作应力**

***a* : 裂纹半长度**

XJTU-MSE @ Jiping WANG

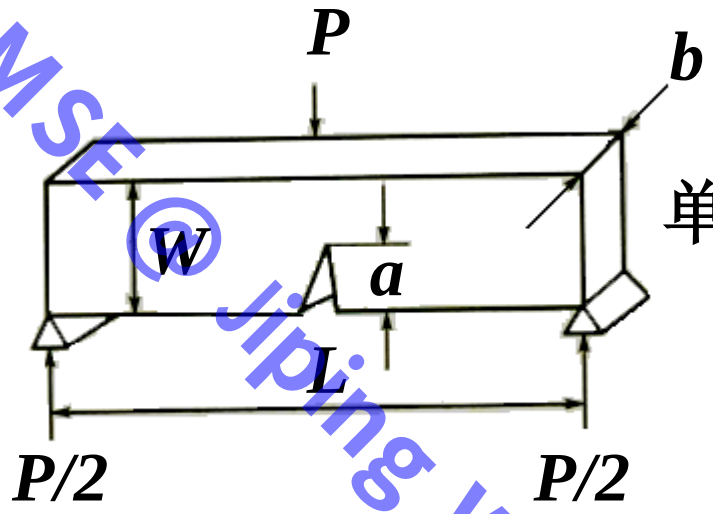
断裂韧度K_{IC}

评定材料抵抗脆性断裂的力学性能指标

是材料**抵抗裂纹失稳扩展的能力**

单边切口梁法

$$K_{IC} = Y\frac{3PL}{2bW^2}\sqrt{a}$$



单位：MPa·m $^{1/2}$

MN · m$^{-3/2}$

断裂判据

$K_I < K_{IC}$　构件**安全**

$K_I > K_{IC}$　构件发生**脆性断裂**

$K_I = K_{IC}$　构件发生低应力脆性断裂的**临界条件**

XJTU-MSE@ Jiping WANG

断裂判据-应用

* 已知应力，材料
  确定最大裂纹长度

$$a_c = \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma}\right)^2$$

* 已知裂纹长度，材料
  确定最大应力

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{a}}$$

*已知 应力，裂纹长度
  确定 材料

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} < K_{IC}$$

XJTU-MSE @ Jiping WANG

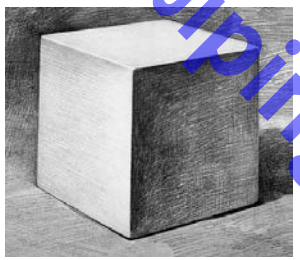
四、影响脆性断裂的因素

韧性断裂　　**脆性断裂**

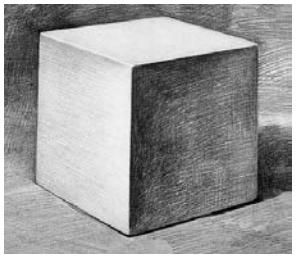
(a) 加载方式和材料本质

加载方式

拉伸 →脆性



压缩→韧性



例：灰铸铁

材料本质　　表 1-2 常见工程材料的断裂韧度

纯金属>合金、复合材料>陶瓷、玻璃

xjtu-MSE@Jiping WANG

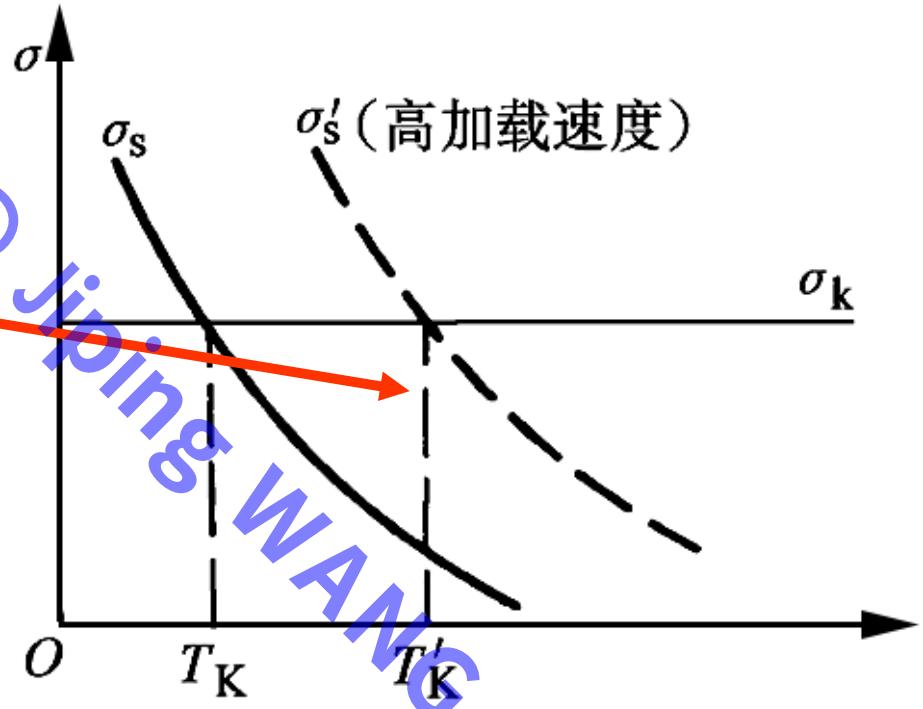
(b) 温度和加载速度

T_k：材料的韧脆转变温度

T_k 越低，机件越不容易发生脆性断裂

提高加载速度，导致韧脆转变温度升高

加载速度越高，材料的脆断倾向就越大



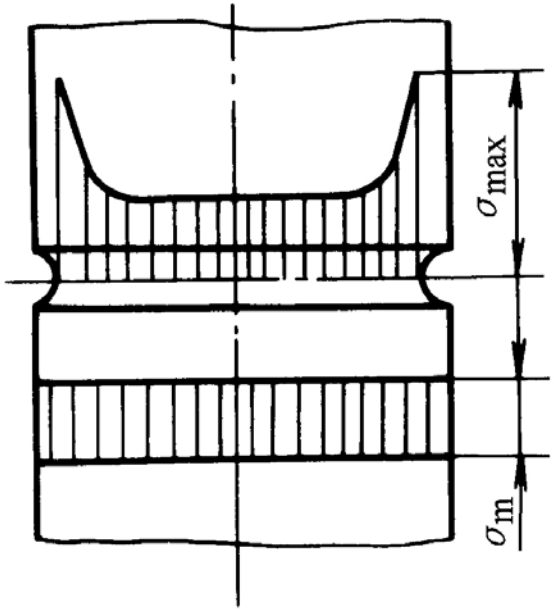
屈服强度随温度变化示意图

JTU-MSE @ Jiping WANG

(c) 应力集中

应力集中改变了应力状态，
应力集中越严重 $\alpha\downarrow$

应力状态就越硬，材料就越容易发生脆性断裂



缺口处应力集中示意图

(d) 零件尺寸

零件尺寸越大，塑性变形越困难，脆断倾向越大

XJTU-MSE@ Jiping WANG

影响脆性断裂的因素

- 加载方式和材料本质
- 温度和加载速度
- 应力集中
- 零件尺寸

XJTU MSE @ Jiping WANG

第三节 零件在交变载荷下的疲劳断裂

一、基本概念

交变载荷: 载荷**大小**和**方向随时间**发生周期**变化**

疲劳断裂: 零件在**交变载荷**下经过**长时间**工作而发生**断裂的现象**成为疲劳断裂

疲劳断裂: 零件在交变载荷下经过长时间工作，**零件所承受的应力低于材料的屈服强度**，发生断裂的现象成为疲劳断裂

XJTU-MSE@Ping WANG

Fatigue is important inasmuch as it is the single largest cause of failure in metals, estimated to comprise approximately 90% of all metallic failures

Polymers and ceramics (except for glasses) are also susceptible to this type of failure.

Furthermore, it is catastrophic and insidious, occurring very suddenly and without warning.

XJTU-MSE@Jiping WANG

Fundamentals of materials science and engineering Callister 5th P255

几种常见的交变应力

(变化的应力中)

最大应力 $\boldsymbol{\sigma}_{\max}$

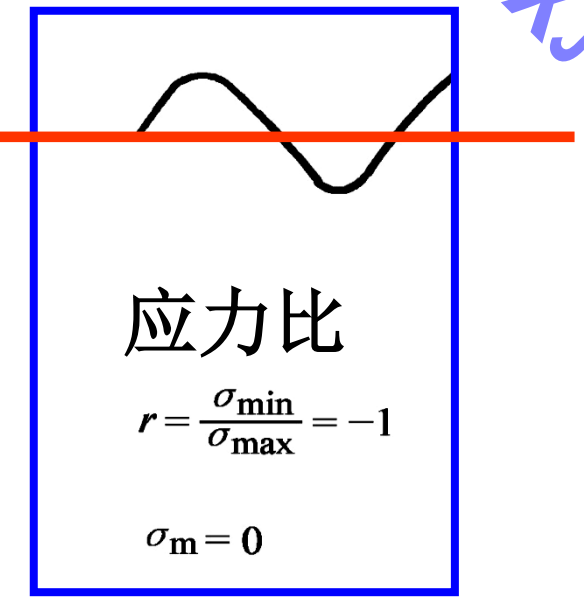
最小应力 $\boldsymbol{\sigma}_{\min}$

应力幅 $\sigma_a = \dfrac{\boldsymbol{\sigma}_{\max} - \boldsymbol{\sigma}_{\min}}{2}$

平均应力 $\sigma_m = \dfrac{\boldsymbol{\sigma}_{\max} + \boldsymbol{\sigma}_{\min}}{2}$

应力比 $r = \dfrac{\boldsymbol{\sigma}_{\min}}{\boldsymbol{\sigma}_{\max}}$

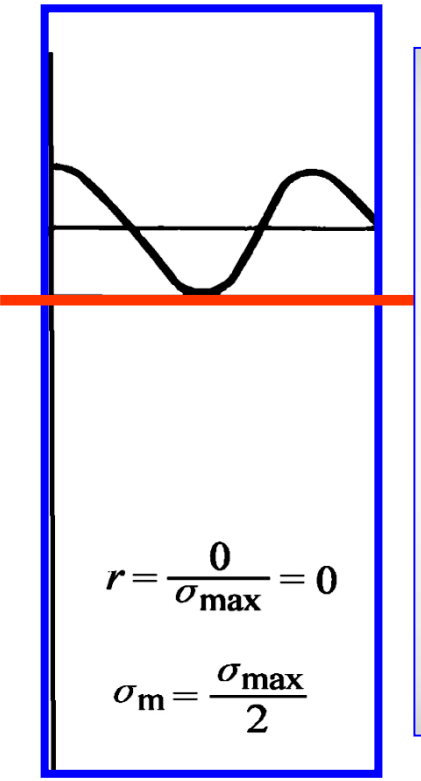
XJTU-MSE @Jiping WANG



平均应力

火车轴(弯曲交变载荷)

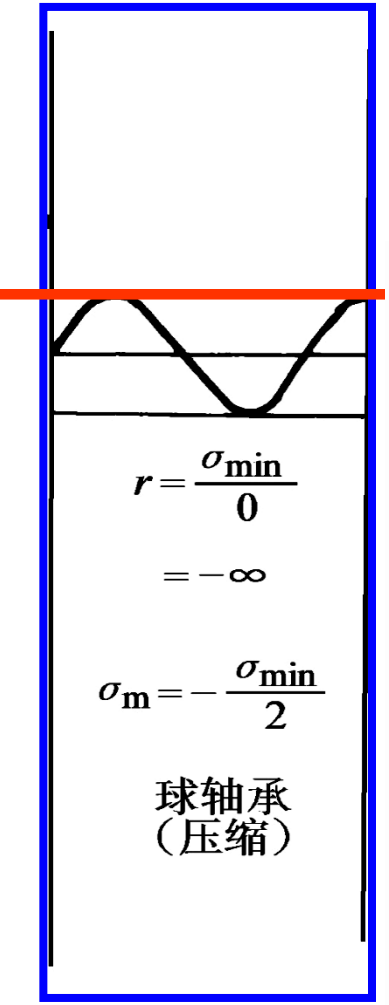
XJTU-MSE@JipingWANG

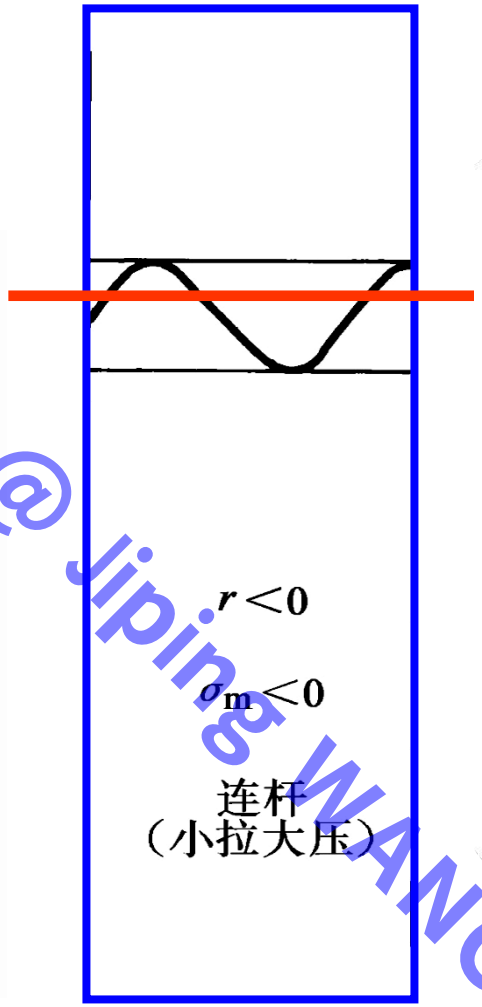


XJTU-MSE @ Jiping WANG

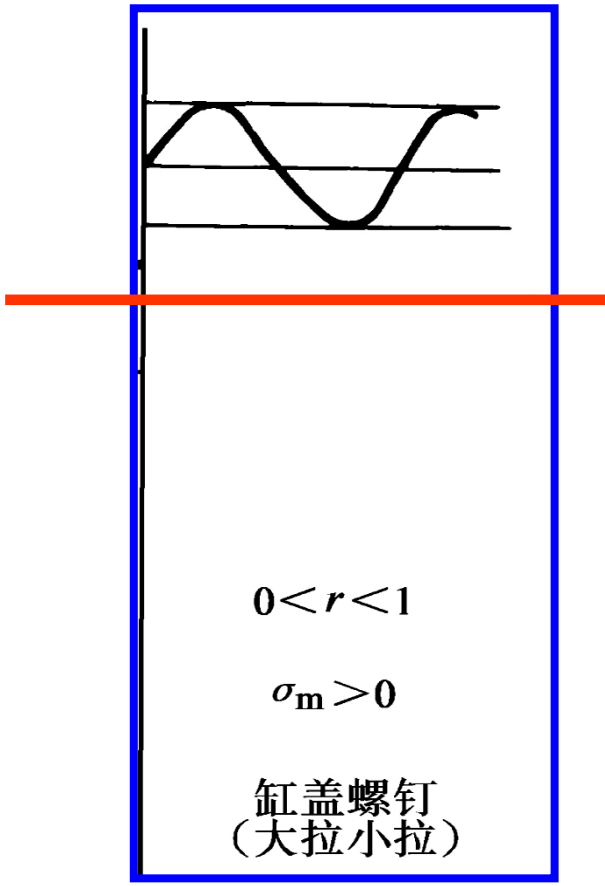
齿轮齿根(弯曲交变载荷)

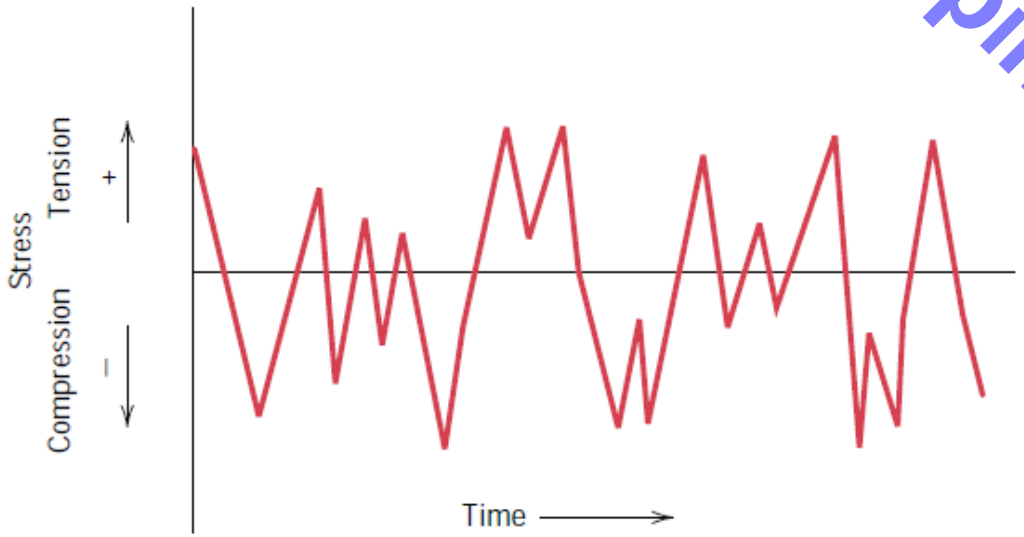
啮合的时候最大拉应力，离开时渐变为0





XJTU-MSE @ Jiping WANG





Random stress cycle

XJTU-MSE @ Jiping WANG

疲劳断裂的特点

断裂的应力很低　($< \sigma_s$)

断裂时无明显宏观塑性变形→脆断特征

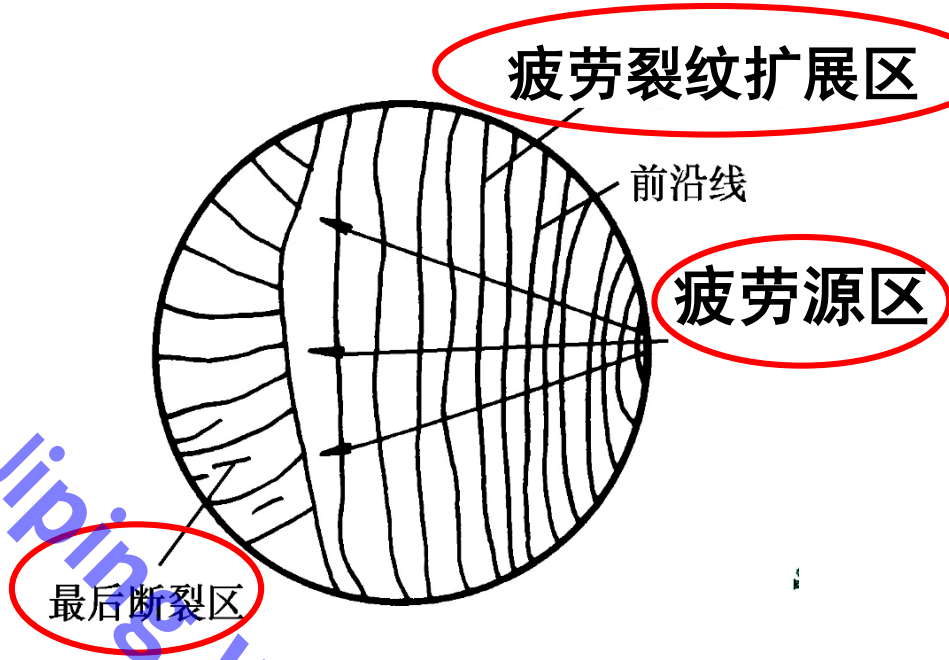
断口显示出裂纹形成、扩展和最后断裂三阶段

发动机曲轴

KJTU-ME @ Jiping WANG

二、疲劳断口的特征

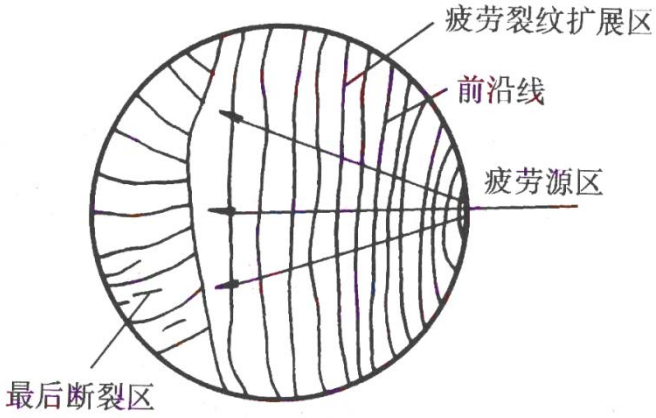
疲劳断口的形貌



分三个区域
- 疲劳源区
- 疲劳裂纹扩展区
- 最后断裂区

XJTU-MSE @ Jiping WANG

疲劳源区



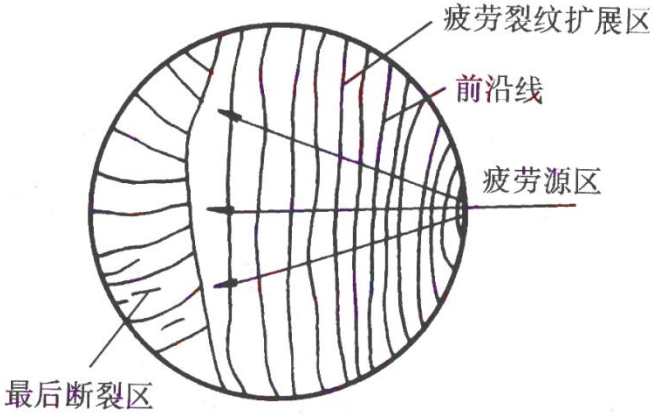
形成于应力集中处

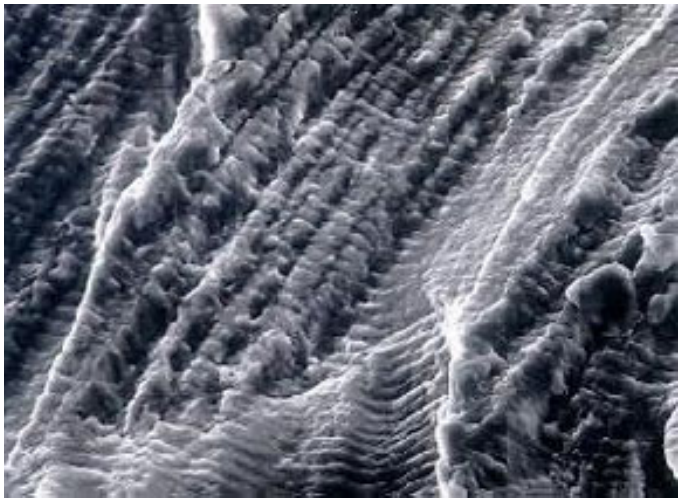
- 内部缺陷 (夹杂物，孔洞)
- 加工缺陷 (刀痕,微裂纹)
- 不当设计 (截面突然变化)

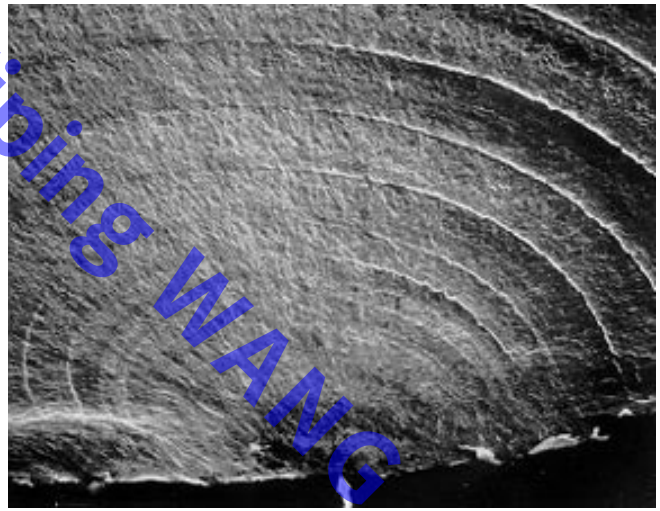
XIU-YSE@Jpins WANG

疲劳裂纹扩展区

疲劳裂纹形成后，在**交变应力的作用下**，**裂纹**口不断**张开**和**闭合**，裂纹表面相互摩擦，裂纹向前扩展的同时留下一条条**光亮的弧线**，称**疲劳线**





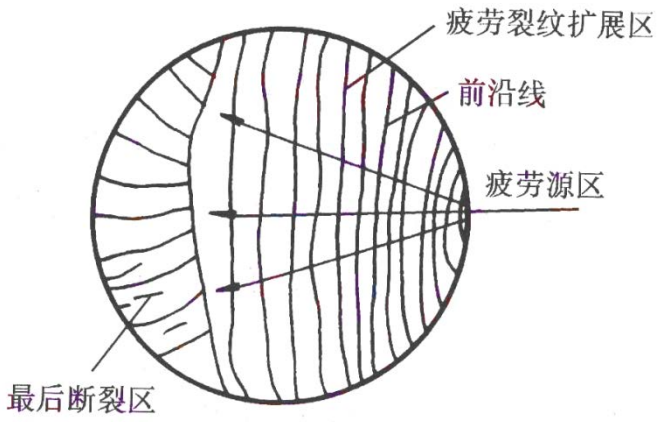


疲劳线呈“**贝壳状**”或“**海滩状**” 疲劳断裂的重要特征

静载脆断断口 没有这个区

XJTU MSE @ Jiping WANG

最后断裂区



随着裂纹的扩展，**有效承载面积减小**，**应力增加**，当应力超过材料的断裂强度时，即**发生快速断裂**

此区断口与**静载脆断**相似，呈**放射状**

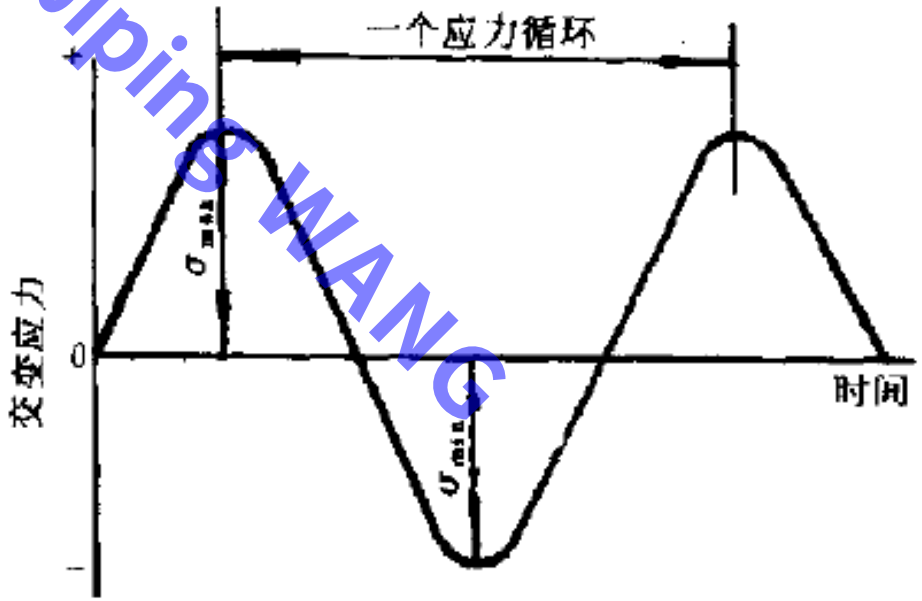
XJTU-MSE @Jiping WANG

三、无裂纹零(构)件的疲劳抗力指标

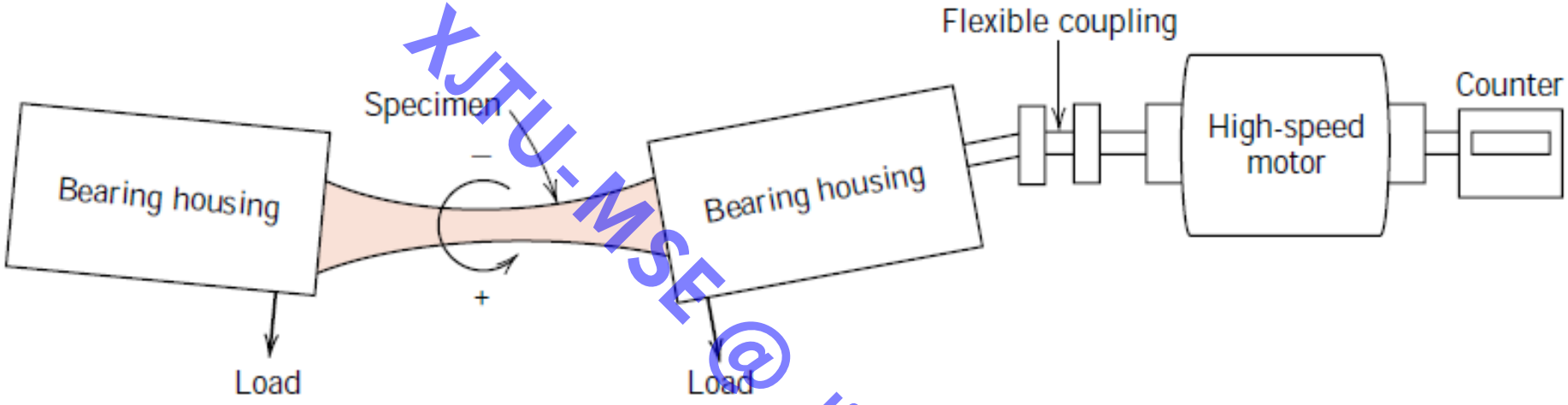
1 疲劳极限和过载持久值

1) 疲劳曲线

旋转弯曲疲劳实验机



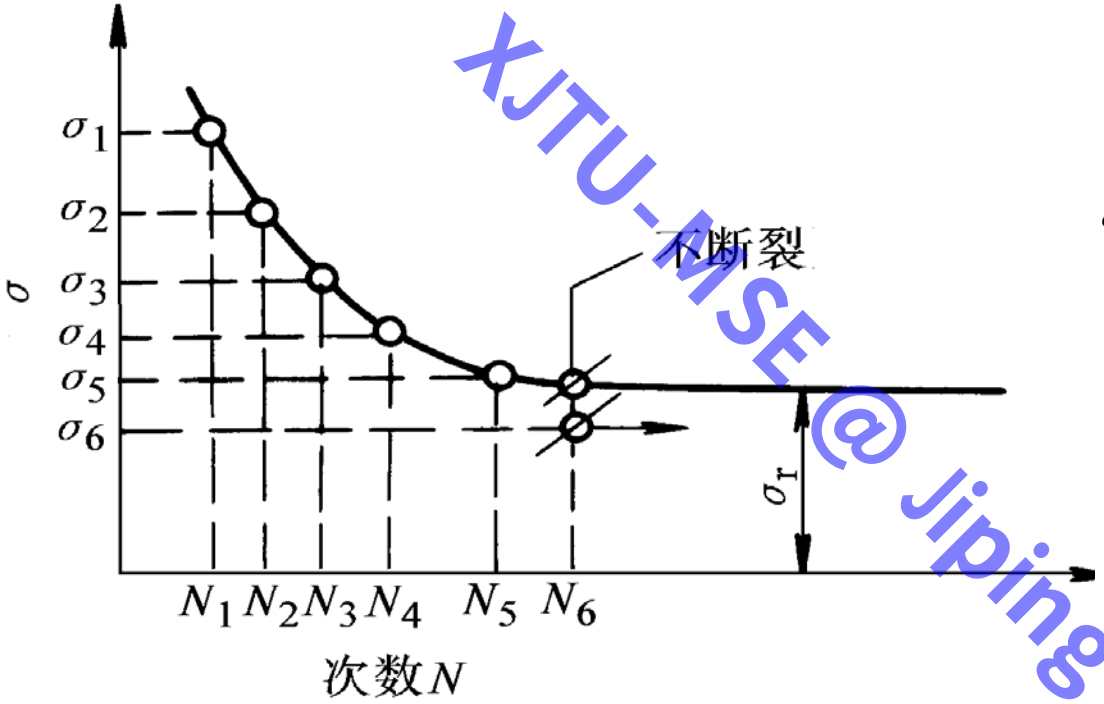
XJTU-MSE @ Jiping WANG



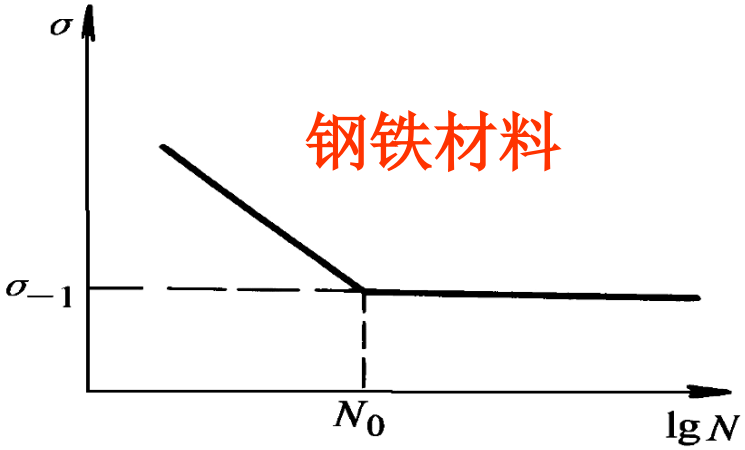
Schematic diagram of fatigue testing apparatus for making rotating-bending tests

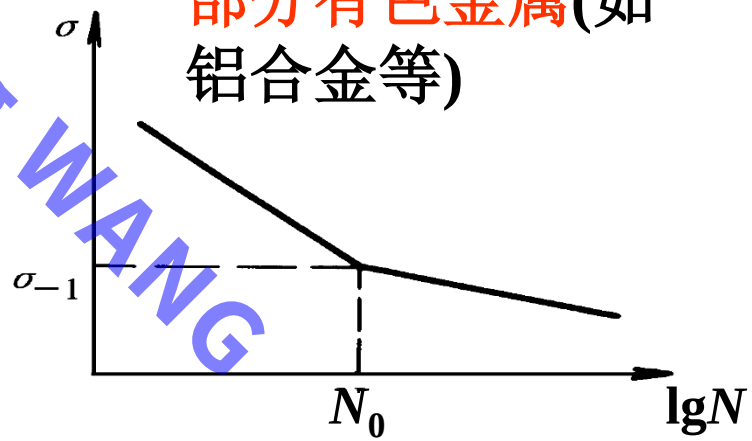
XJTU-MSE @ Jiping WANG

1) 疲劳曲线 S–N CURVE



疲劳曲线示意图



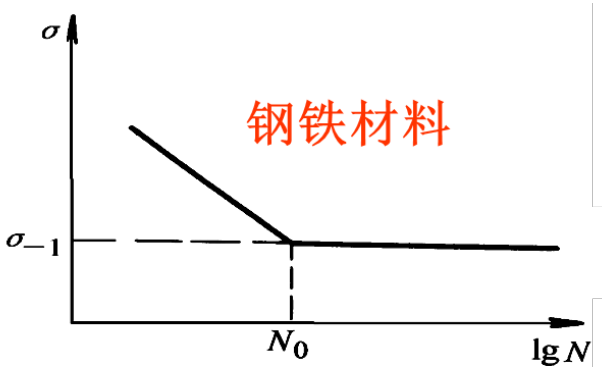


两种类型疲劳曲线

XJTU-MSE@ Jiping WANG

2) 疲劳极限 (Fatigue Limit):

(σ_r) 经受 无限多次应力 循环也不断裂的最大应力



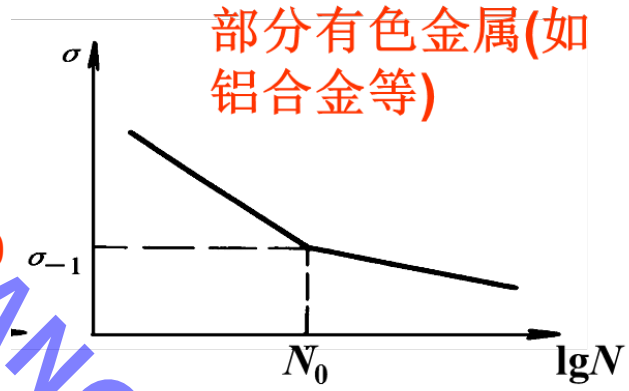
举例 σ_{-1}:r = -1，旋转弯曲疲劳极限

For many steels, fatigue limits range between 35 and 60% of the tensile strength.

3) 条件疲劳极限 fatigue strength:

不存在疲劳极限时，规定循环基数 N_0 时的断裂应力

$N_0 = 10^7$ cycles

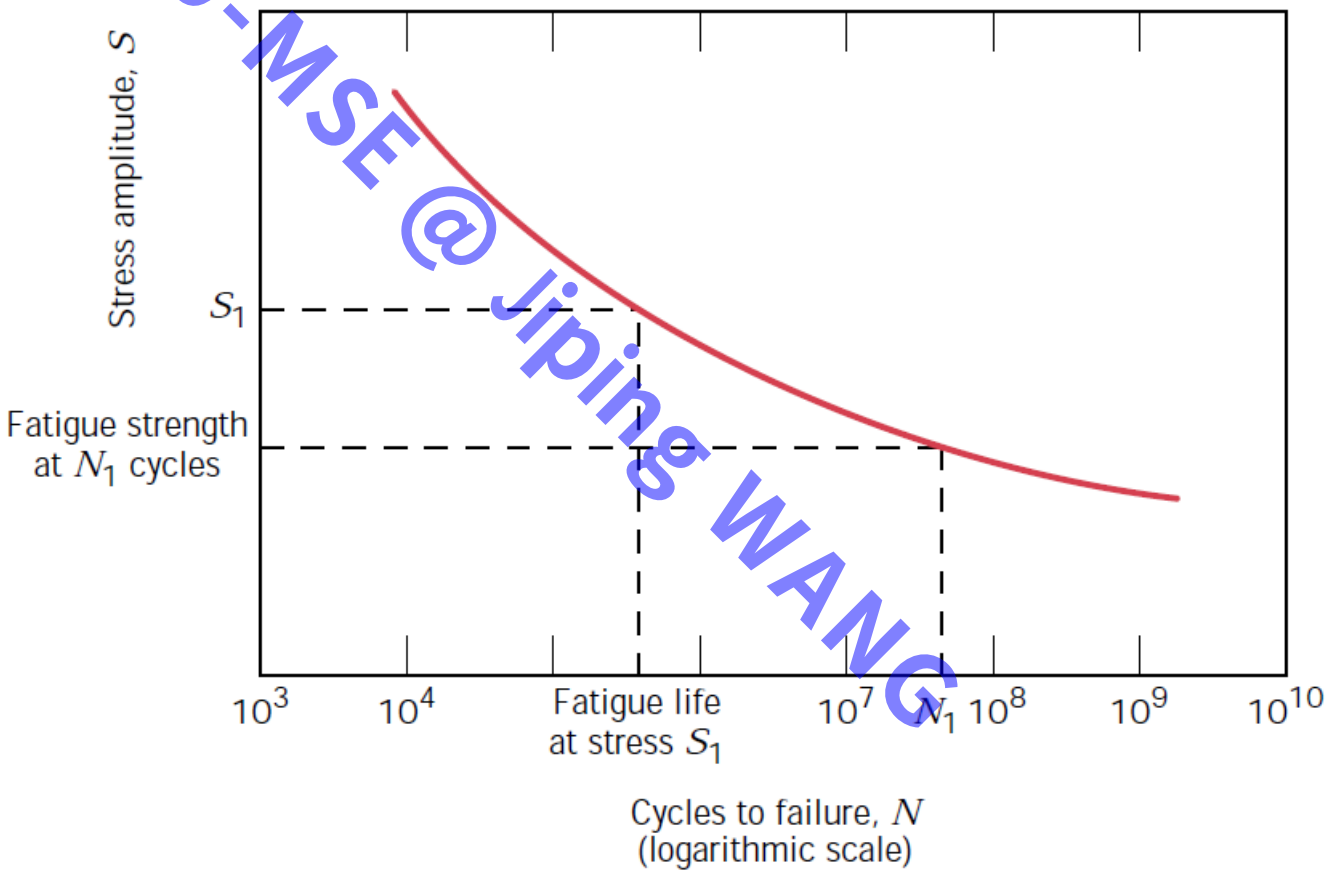


Most nonferrous alloys (e.g., aluminum, copper, magnesium) do not have a fatigue limit

KJTU-MSE@ JipingWANG

4) 过载持久值 fatigue life N_f

在高于疲劳极限的应力作用下，发生疲劳断裂的应力循环周次

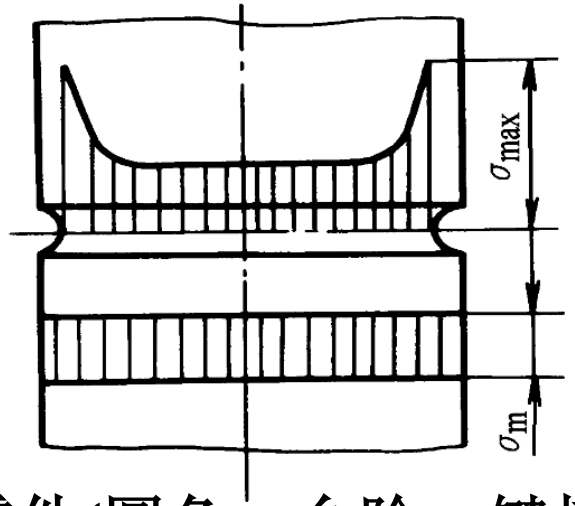


SJTU-MSE @ Jiping WANG

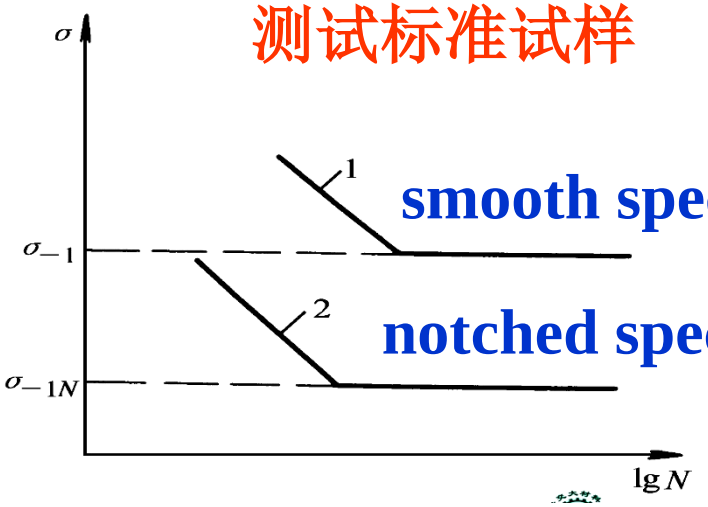
2 疲劳缺口敏感度 — q

定性对比不同材料缺口对疲劳极限的敏感程度

测试标准试样



实际零件(圆角、台阶、键槽)静载下缺口处的应力集中



smooth specimen ←高 σ_{-1} 光滑试样疲劳极限

notched specimen ←低 σ_{-1N} 缺口试样的疲劳极限

光滑试样 1 与缺口试样 2 的疲劳极限

XJTU-MSE @ Jiping WANG

疲劳缺口敏感度 $q = \dfrac{K_f - 1}{K_t - 1}$　　$(0<q<1)$

$K_f = \dfrac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1N}}$　　**K_f 有效应力集中系数**

与缺口几何形状和材料都有关

$K_t = \dfrac{\sigma_{max}}{\sigma_m}$　　**K_t 理论应力集中系数**

仅与缺口几何形状有关

用 q 可定性对比不同材料缺口对疲劳极限的敏感程度

疲劳缺口敏感度的变化范围：$0 < q < 1$

当 $q=0$，　缺口不降低材料疲劳极限　**最不敏感**

当 $q=1$，　缺口严重降低材料疲劳极限　**最敏感**

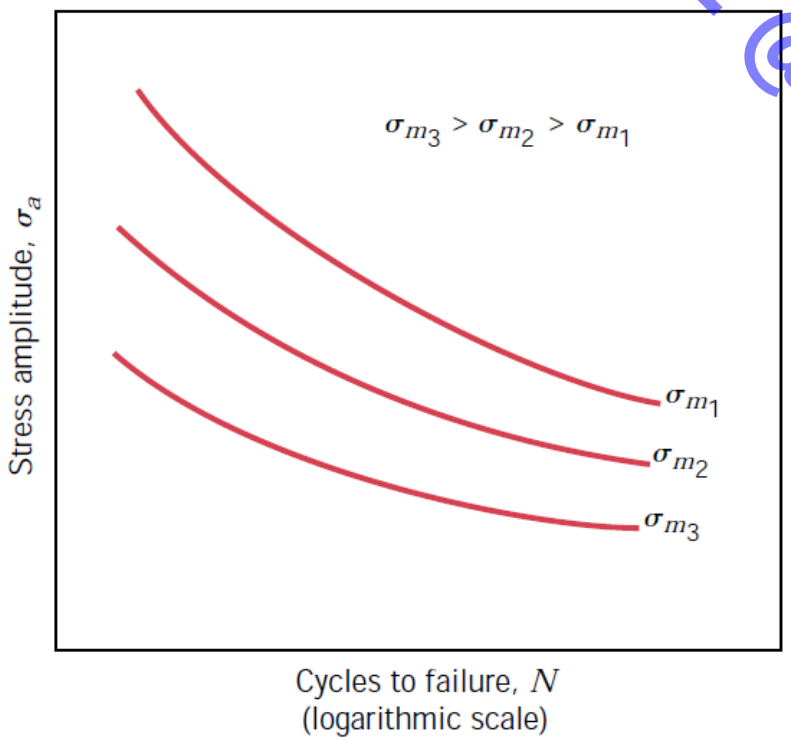
XJTU MSE @ Jiping WANG

四、影响疲劳抗力的因素

1 载荷类型

拉-压疲劳 $\begin{cases} \sigma_{-1P} = 0.85\sigma_{-1}\text{钢} \\ \sigma_{-1P} = 0.65\sigma_{-1}(\text{铸铁}) \end{cases}$

扭转疲劳 $\begin{cases} \tau_{-1} = 0.55\sigma_{-1}(\text{钢及轻合金}) \\ \tau_{-1} = 0.8\sigma_{-1}(\text{铸铁}) \end{cases}$



应力幅对材料疲劳寿命的影响

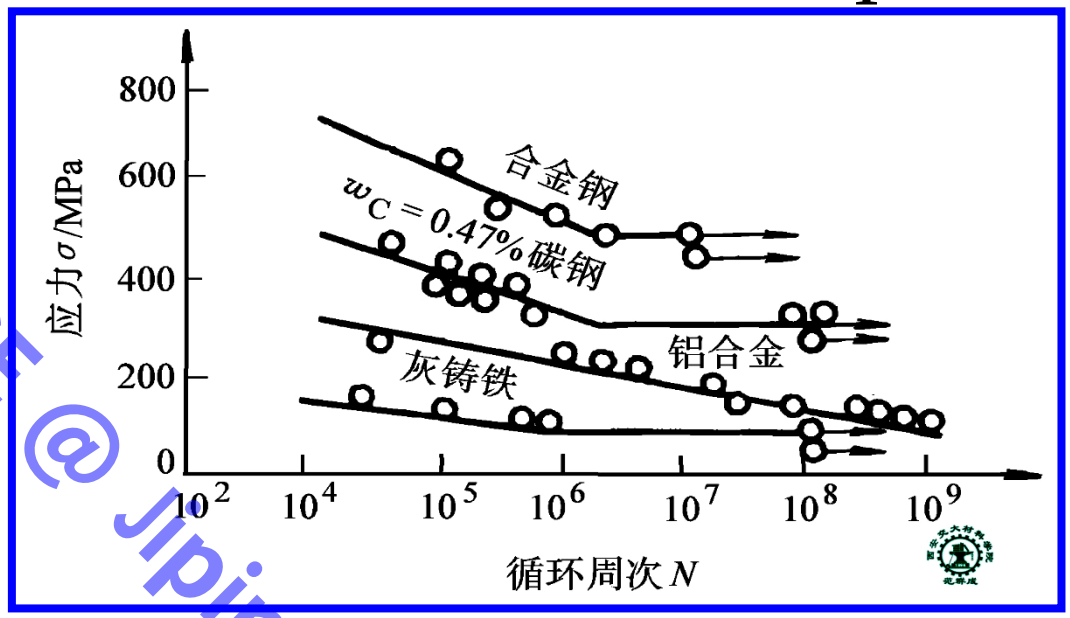
应力幅 $\sigma_a = \dfrac{\boldsymbol{\sigma}_{\max} - \boldsymbol{\sigma}_{\min}}{2}$

XJTU-ME @ Jiping WANG

2 材料本质

不同材料有不同的疲劳极限 σ_{-1}

几种材料的疲劳曲线



3 零件表面状态

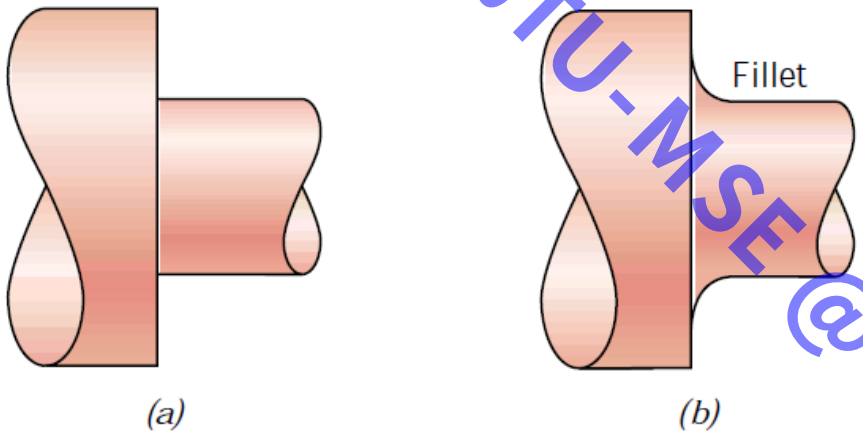
1) 表面光洁度

试样表面轻微刀痕对抗拉强度和疲劳极限的影响

材　料	表面状态	抗拉强度 σ_b /MPa	疲劳极限 σ_{-1} /MPa
45 钢（正火）	光滑试样	656	280
	有刀痕试样	654	145
40Cr 钢（淬火+200℃回火）	光滑试样	1947	780
	有刀痕试样	1922	300

XJTU-MSE @ Jiping WANG

2) 表面应力状态　表面残余压应力有利



Demonstration of how design can reduce stress amplification. (a) Poor design: sharp corner. (b) Good design: fatigue lifetime improved by incorporating rounded fillet into a rotating shaft at the point where there is a change in diameter.

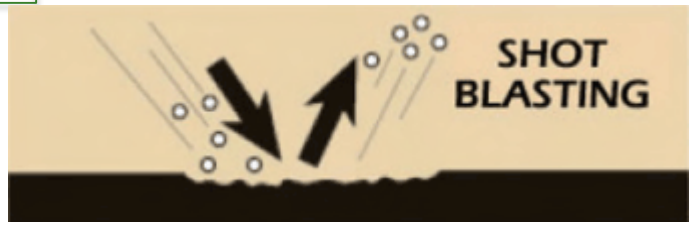
XJTU-MSE @ Jiping WANG

4 温度

$$\begin{cases} T\uparrow & \text{疲劳极限降低} \\ T\downarrow & \text{疲劳极限升高，但缺口敏感度}q\text{增加} \end{cases}$$

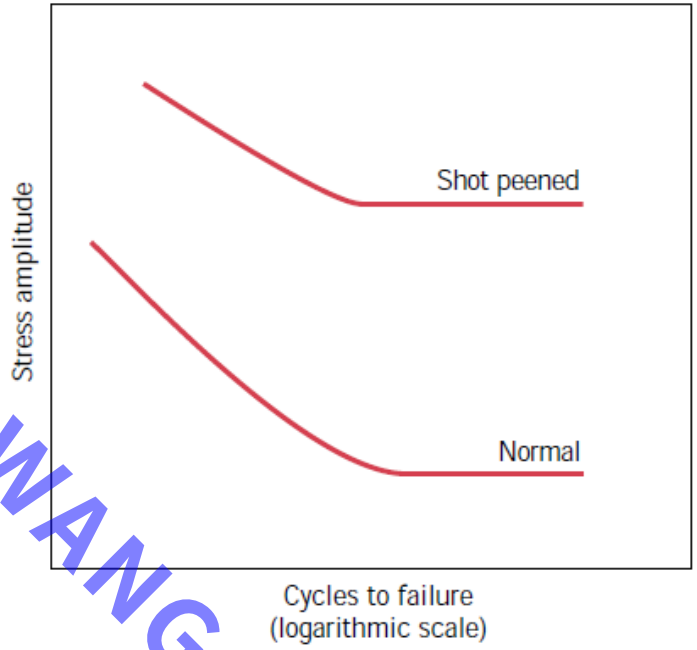
5 腐蚀性介质　酸、碱、盐、水溶液等　降低疲劳极限

五、提高材料疲劳抗力的途径



常用的表面强化处理方法

- 表面冷作变形：喷丸、滚压
- 表面热处理：渗碳、渗氮
- 表面镀层：镀铬、镀镍



提高疲劳极限的机制：

- 提高零件表层强度
- 在零件表层产生残余压应力

} 防止疲劳裂 纹产生

XJTU-MSE@Jiping WANG

喷丸：

用钢铁丸或玻璃丸喷射金属零件表面的表面防护方法。喷丸处理可提高材料的疲劳强度、抗应力腐蚀能力和表面硬度。通过离心力或压缩空气喷射丸粒，使其以很高的速度冲击零件，可在表面产生塑性变形层，缓和机加工和热处理残留的张应力，形成残余压应力。

XJTU MSE @ Jiping WANG