第1章　机械零件的失效分析

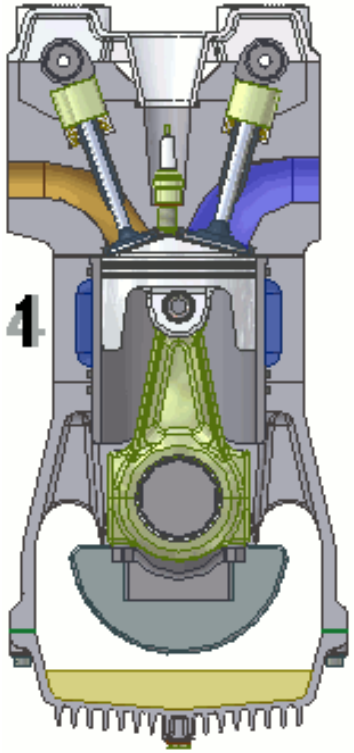
零件的功能：

在一定的载荷(压力)、温度、介质下

(1) **传递力**和**能量**等

(2) 实现**规定**的机械**运动**

(3) **保持**规定的**形状**和**尺寸**



失效的定义和表现

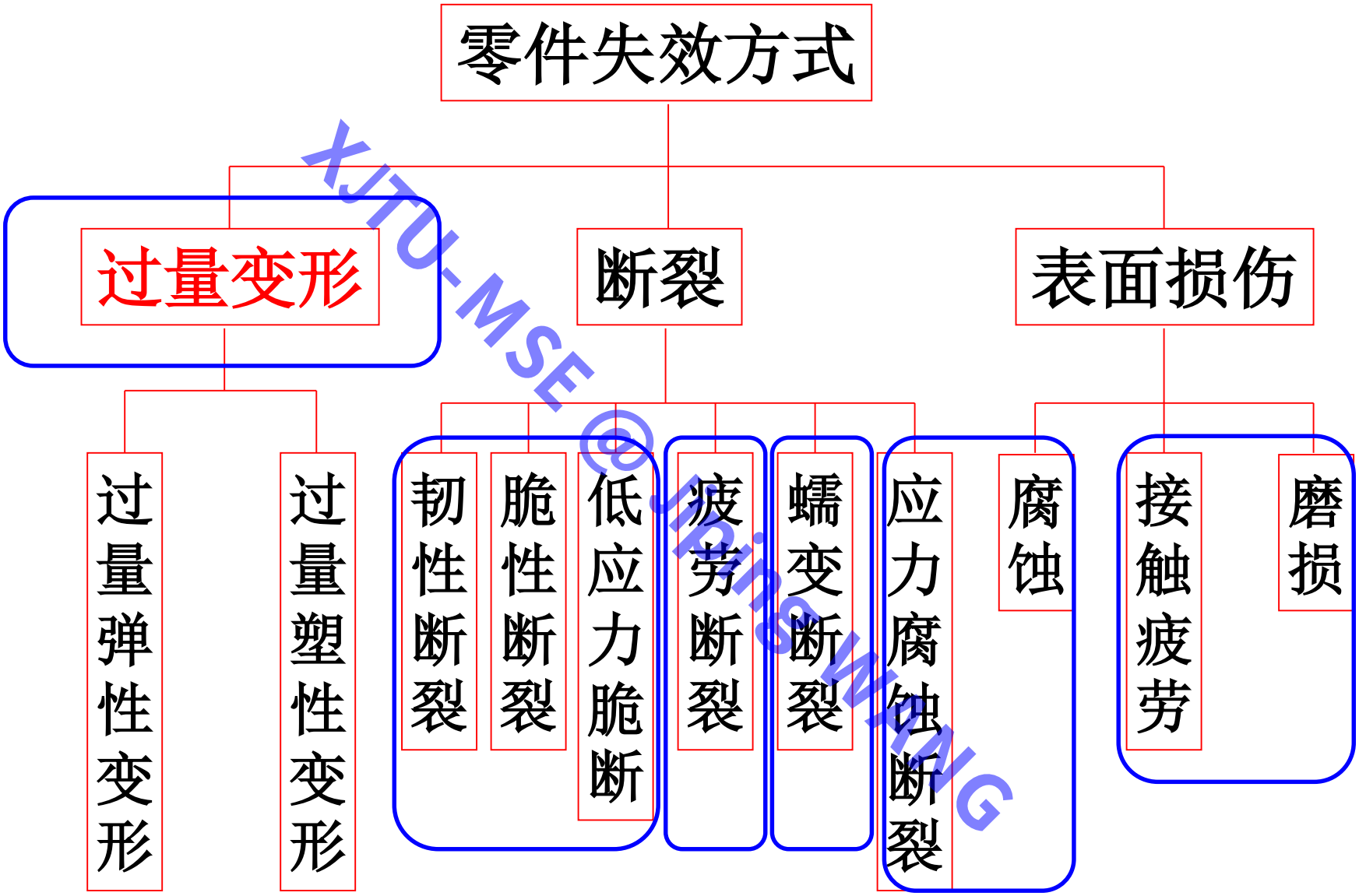
定义：**零件失去了设计所要求的效能**

(1) 完全丧失功能

(2) 功能衰退

(3) 失去可靠性与安全性

XJTUME-Jibing WANG



XJTU-MSE@JBinWENG

常见失效方式

- 过量变形
- 断裂
- 疲劳断裂
- 磨损
- 腐蚀
- 高温蠕变

学习失效方式的目的

- 可促进老材料的改进和新材料的开发
- 可促进产品结构的改进
- 可促进生产工艺的改进
- 有利于事故的责任仲裁

XJTU-MSE@JipingWANG

第一节 零件在常温静载下的过量变形

变形　材料在外力作用下产生的

形状 或 尺寸 的变化

变形形式
- 弹性变形　外力去除后可恢复
- 塑性变形　外力去除后不可恢复

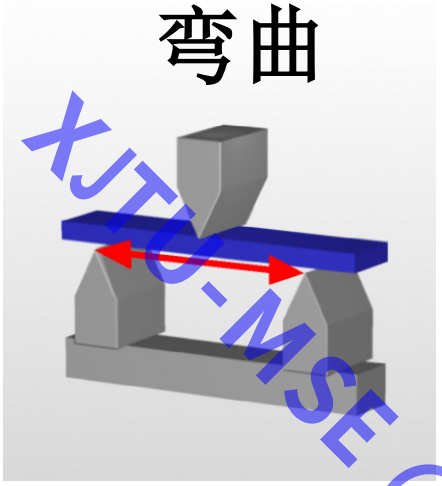
静载

常温静载试验方法

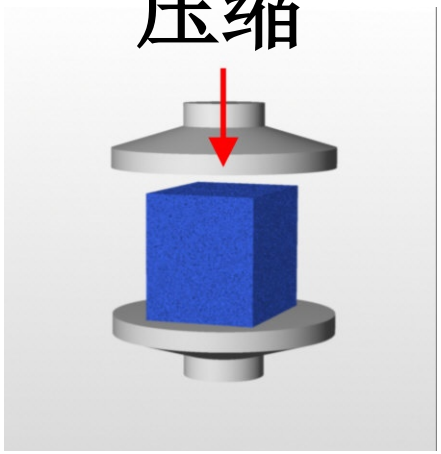
静拉伸　压缩　弯曲　扭转　硬度

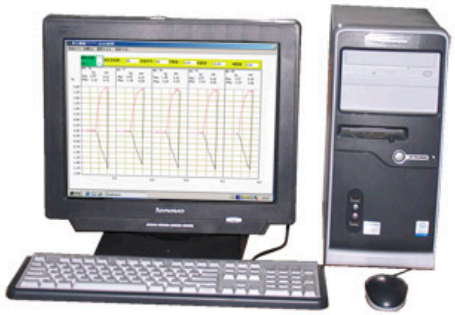
XJTU-MSE@Jiping WANG

弯曲



压缩



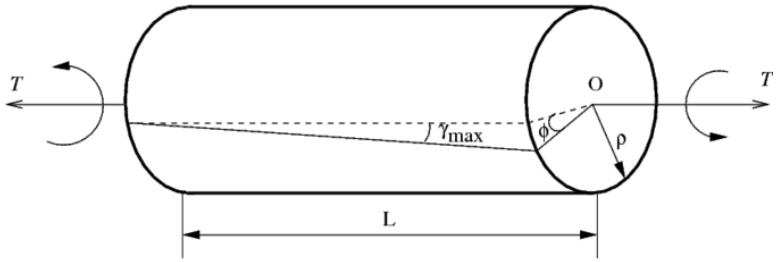


万能试验机

拉伸

XJTU-MSE @ Jiping WANG

硬度测试



扭转

XJTU-MSE @ Jiping WANG

一、工程材料在静拉伸时的应力－应变行为

应力 (工程应力或名义应力)

定义：“单位面积上所承受的附加内力”　σ表示应力

P为载荷；A为试样的原始截面积

$$R = \sigma = \frac{P}{A}$$

R (σ) 单位 MPa

$$\boxed{1\text{MPa}=10^6\text{Pa}=10^6\text{N/m}^2=1\text{N/mm}^2}$$

延伸率 = 应变 (工程应变或名义应变)

$$e = \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

绝对伸长量与初始长度的比值

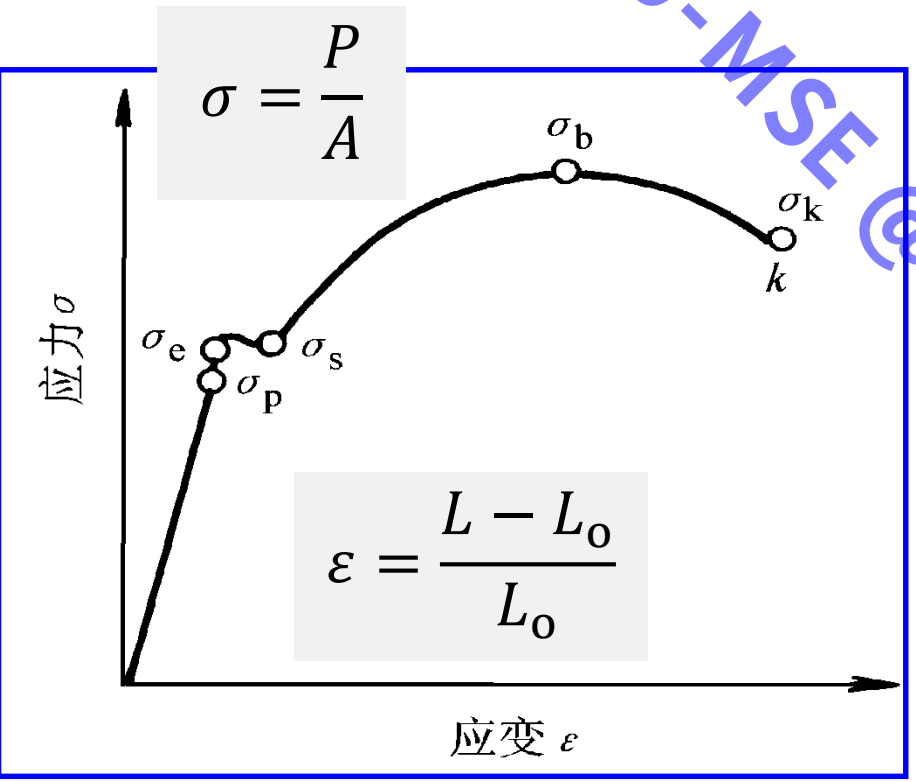
无量纲

L_0 试样原始标距长度；L 试样变形后的长度

xjtu.me@JimmyWANG

一、工程材料在静拉伸时的应力－应变行为

1 低碳钢的应力－应变行为



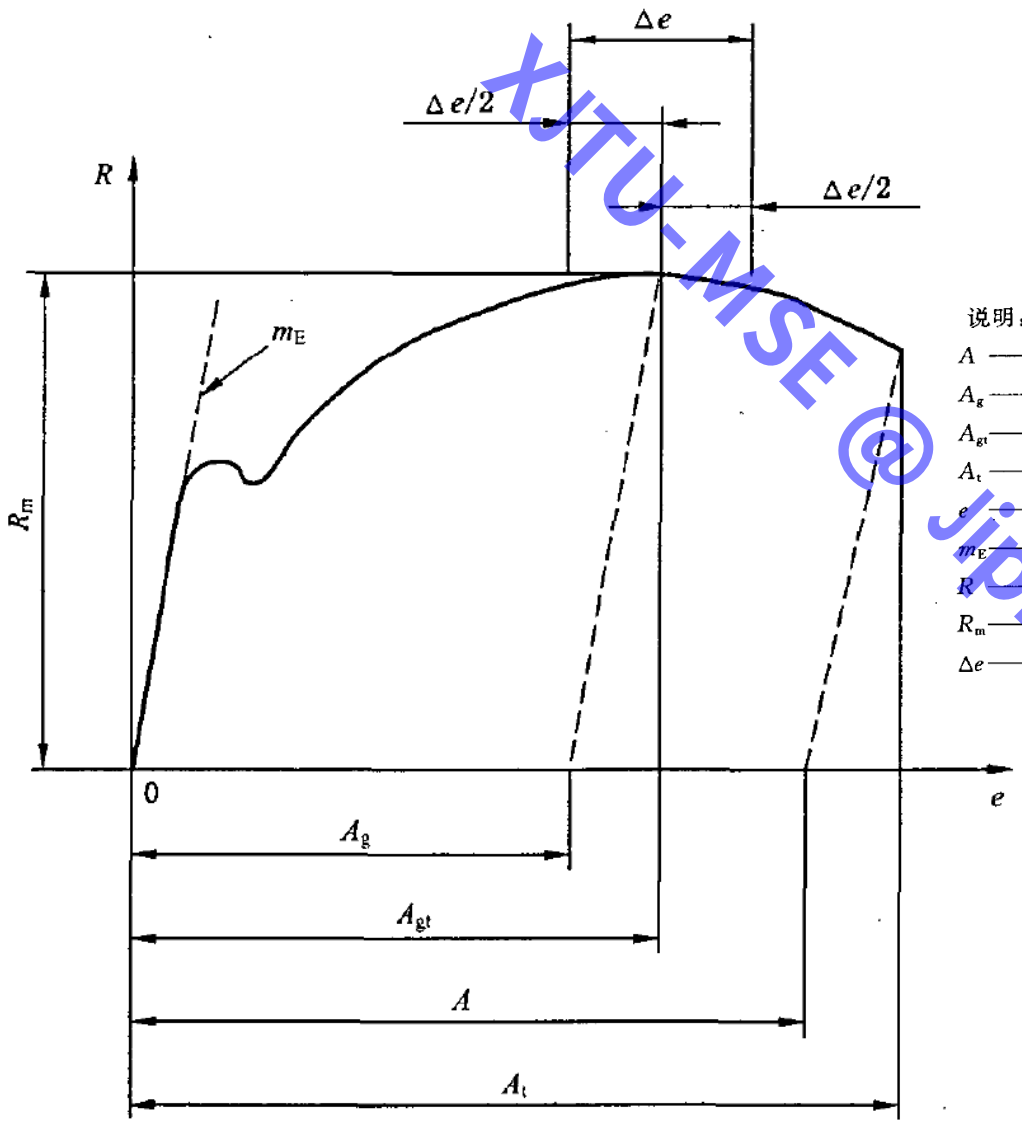
退火态低碳钢的应力－应变曲线

具有左图应力-应变行为的材料

- 正火、退火、调质态的中碳钢
- 低、中碳合金钢
- 特殊铝合金、
- 特殊高分子材料

XJTU-MSE @ LipingWang

退火态低碳钢的应力—应变曲线的动态演示



说明：

A ——断后伸长率(从引伸计的信号测得的或者直接从试样上测得这一性能，见 20.1)；

A_g——最大力塑性延伸率；

A_{gt}——最大力总延伸率；

A_t ——断裂总延伸率；

e ——延伸率；

m_E——应力-延伸率曲线上弹性部分的斜率；

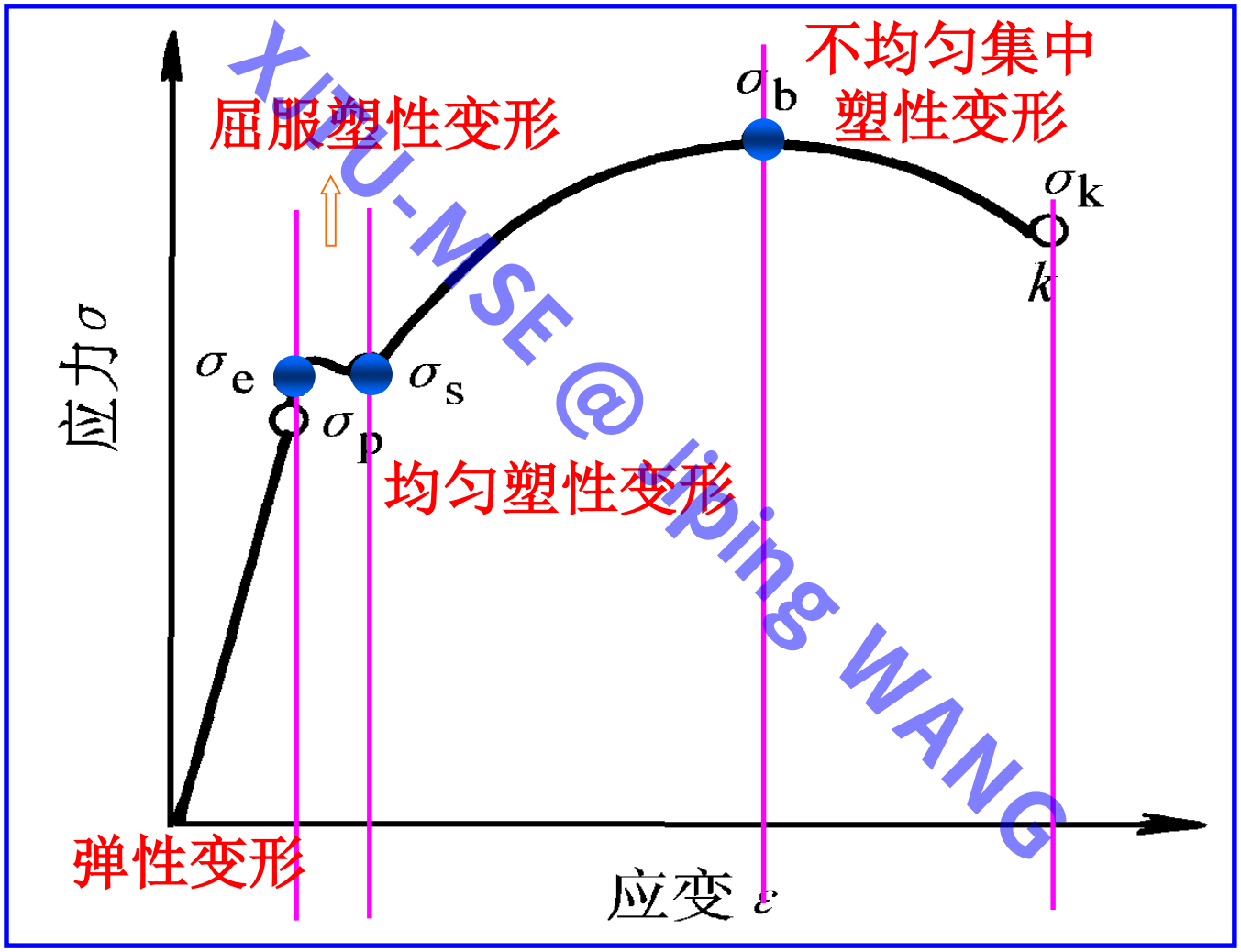
R ——应力；

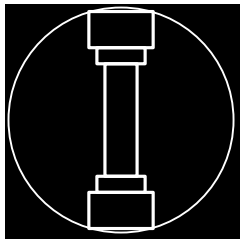
R_m——抗拉强度；

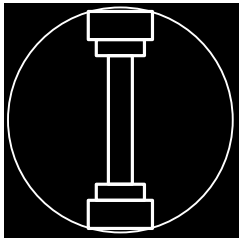
Δe——平台范围(测定 A_g 见第 17 章；测定 A_{gt} 见第 18 章)。

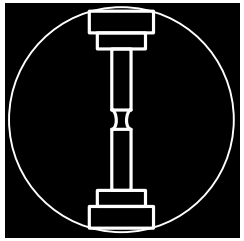
XJTU-MSE @ Jiping WANG

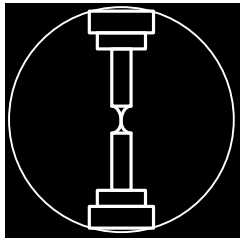
退火态低碳钢应力—应变曲线 特征分析











退火态低碳钢的应力—应变曲线

XJTU-MSE @ Liping WANG

2. 其它类型材料的应力-应变曲线

大多数纯金属 (Al, Cu, Au, Ag)

变形分为三个阶段
无屈服塑性变形阶段

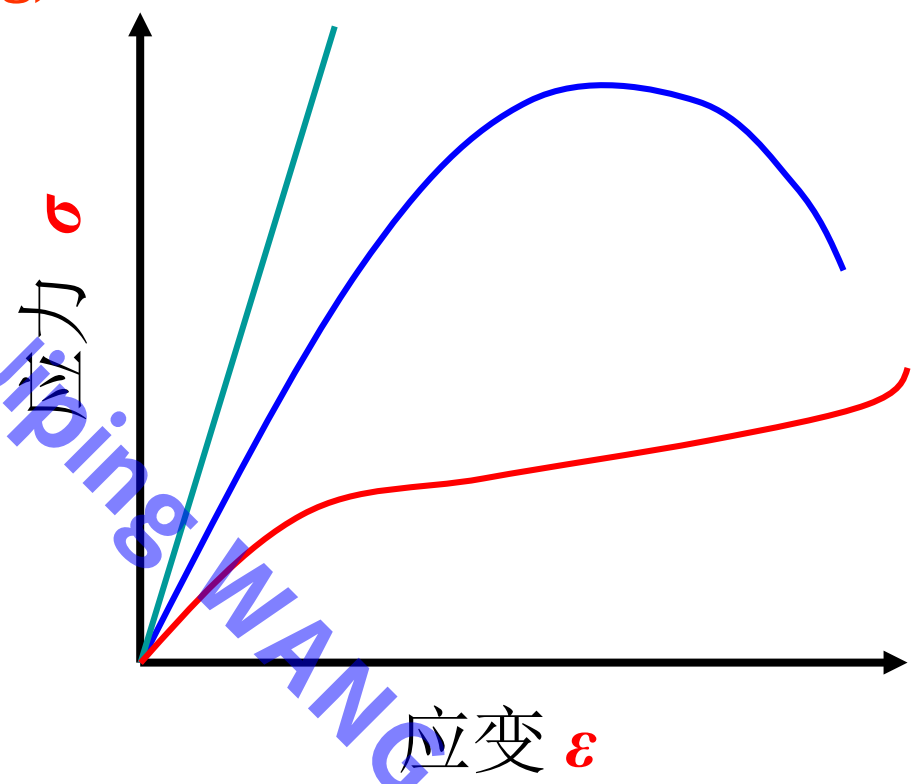
脆性材料
(陶瓷、白口铸铁、淬火高碳钢及高碳合金钢)

只有弹性变形阶段

高弹材料 (橡胶)

只有非线性弹性变形一个阶段

弹性变形能力强，弹性变形率可达 100~1000％



XJTU-MSE @ Jiping WANG

二、静载性能指标

1 刚度　零(构)件受力时抵抗**弹性变形**的能力

- 单向拉伸（或压缩）

$$k = \frac{F}{\varepsilon} = \frac{\sigma \times A}{\varepsilon} = E \times A$$

E — 弹性模量

A — 零(构件)截面积

- 纯剪切

$$k = \frac{F_\tau}{\gamma} = \frac{\tau \times A}{\gamma} = G \times A$$

G — 切变模量

XJTU-MSE @Jiping WANG

2 强度　材料抵抗变形或断裂的能力

R_m (σ_b)— 抗拉强度

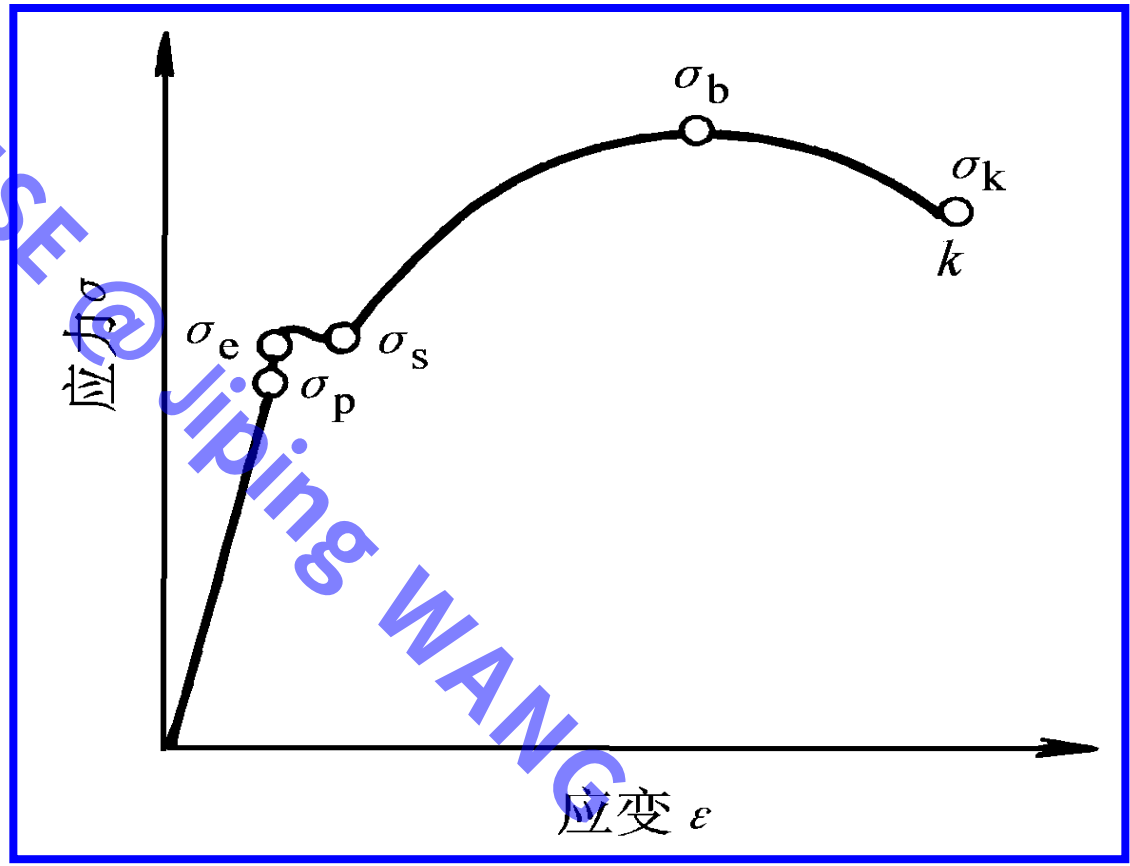
材料产生最大均匀塑性变形的应力

受拉断裂前的最大应力值

R_t (σ_k)— 断裂强度

规定总延伸强度

材料发生断裂的应力



退火态低碳钢的应力—应变曲线

XJTU-MSE @ Jiping WANG

σ_p — 比例极限 proportional limit

材料应力和应变成正比的最大应力

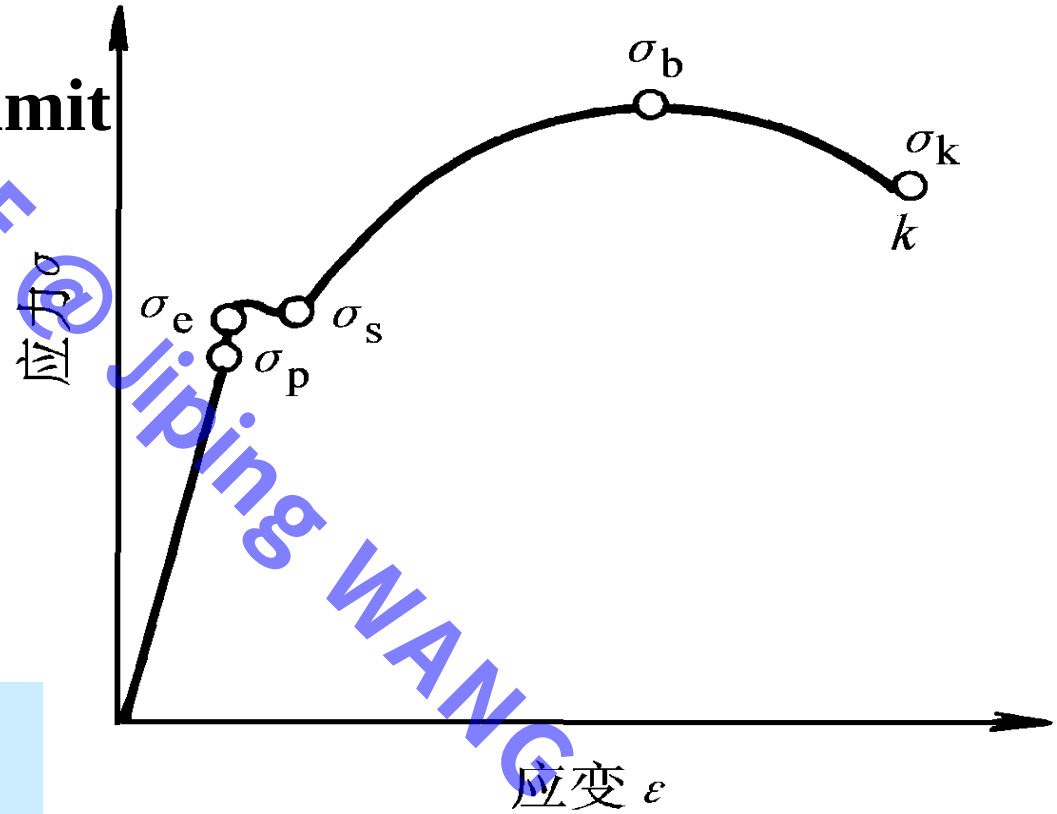
σ_e — 弹性极限 elastic limit

材料不产生塑性变形的最大应力

σ_s— 屈服强度

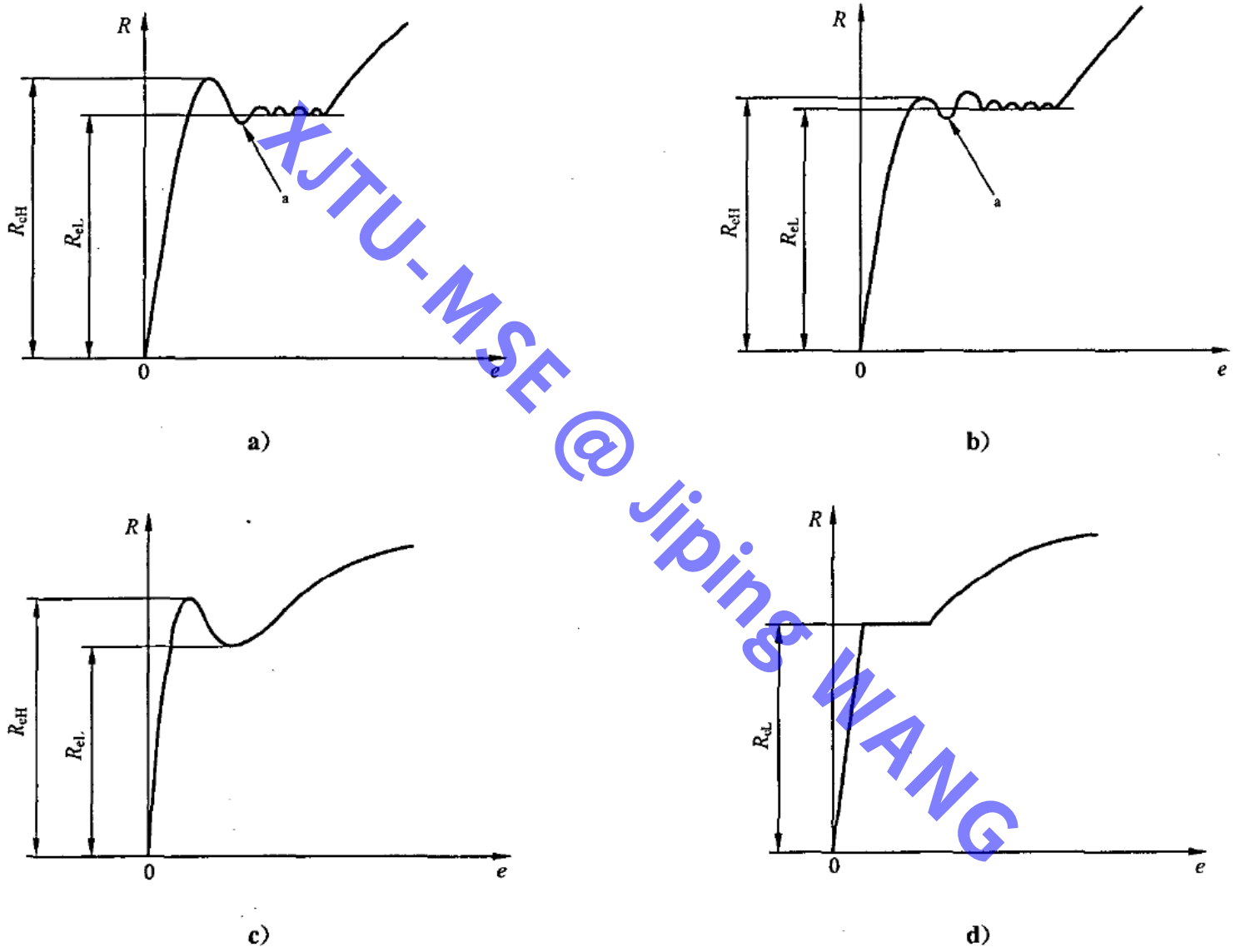
R_{eL}，$R_{p0.2}$

材料开始产生(宏观、均匀)塑性变形的应力

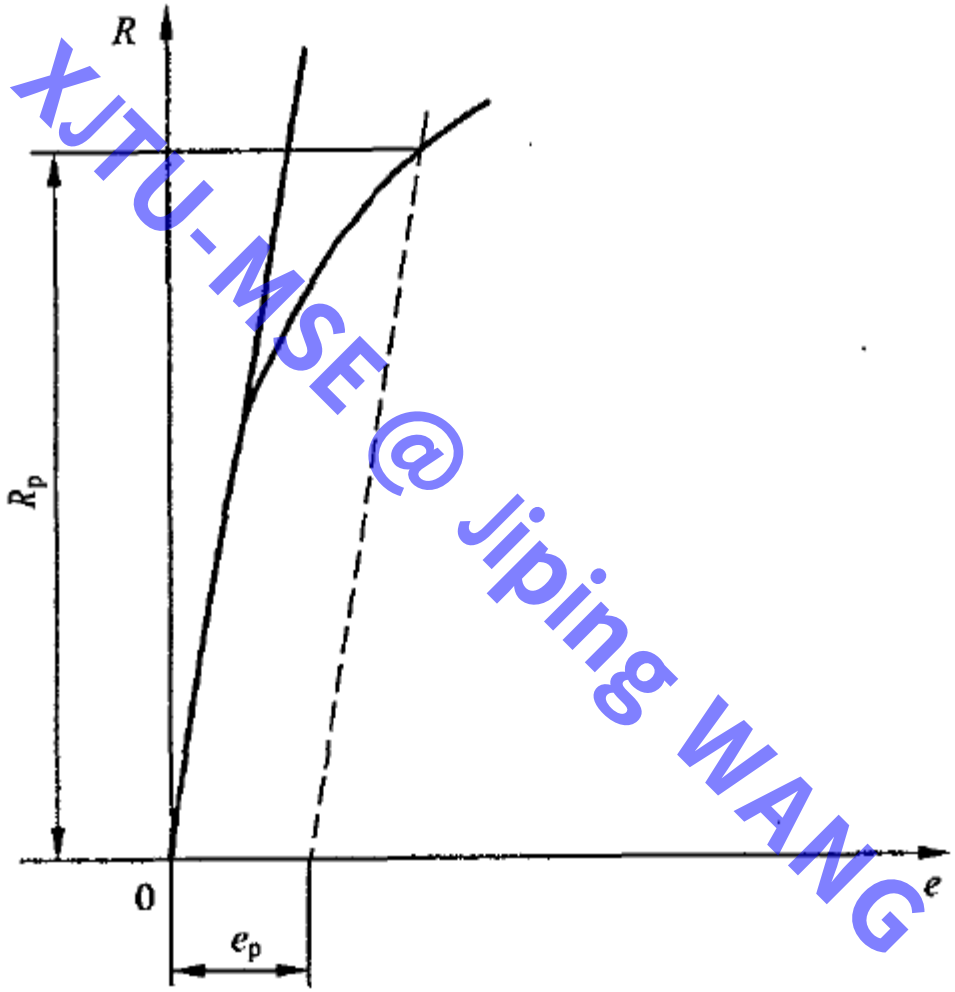


退火态低碳钢的应力－应变曲线

JTU-MSE @ Jiping WANG



XJTU-MSE @ Jiping WANG



XJTU-MSE@ Jiping WANG

规定塑性延伸强度R_p

3 弹性　材料弹性变形的大小　用弹性能表示

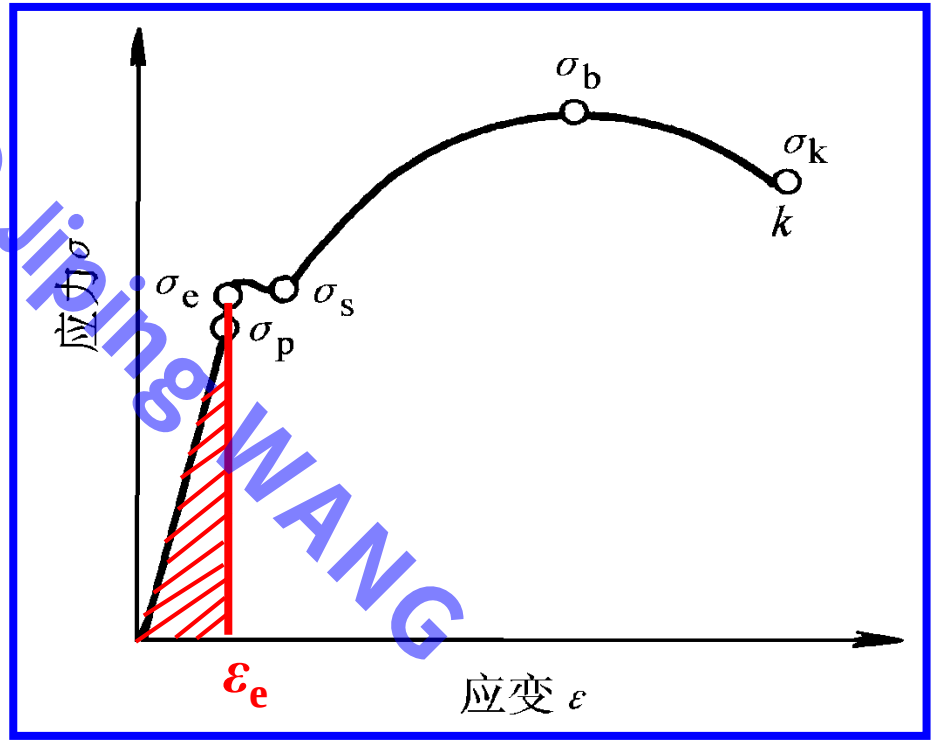
E 正弹模量　$E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon}$

G 切弹模量　$G = \dfrac{\tau}{\varepsilon}$

- u–弹性能 (弹性比功)

$$u = \frac{1}{2}\sigma_e\varepsilon_e = \frac{1}{2}\frac{\sigma_e^2}{E}$$

- ε_e — 最大弹性应变



弹性能

XJTU-MSE@JipingWANG

4 塑性

材料断裂前发生塑性变形的能力

发生塑性变形好吗？

叶子板成型 视频

弹簧生产视频

XJTU-MSE @ Jiping WANG

断后伸长率 A

percentage elongation after fracture

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

断后标距的残余伸长$(L_u - L_0)$与原始标距L_0之比的百分率

断面收缩率 Z

percentage reduction of area

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

断裂后试样横截面积的最大缩减量$(S_0 - S_u)$与原始横截面积S_0之比的百分率

L_0、S_0：拉伸试样原始标距长度、原始截面积

L_u、S：断裂后的标距长度、颈缩处最小截面积

HJTU MSE @ JinjinWANG

静载荷不止拉伸一种

拉伸→ 压缩

剪切

扭转

弯曲

我们挑了一个简单的讲

XJTU MSE @ Jiping WANG

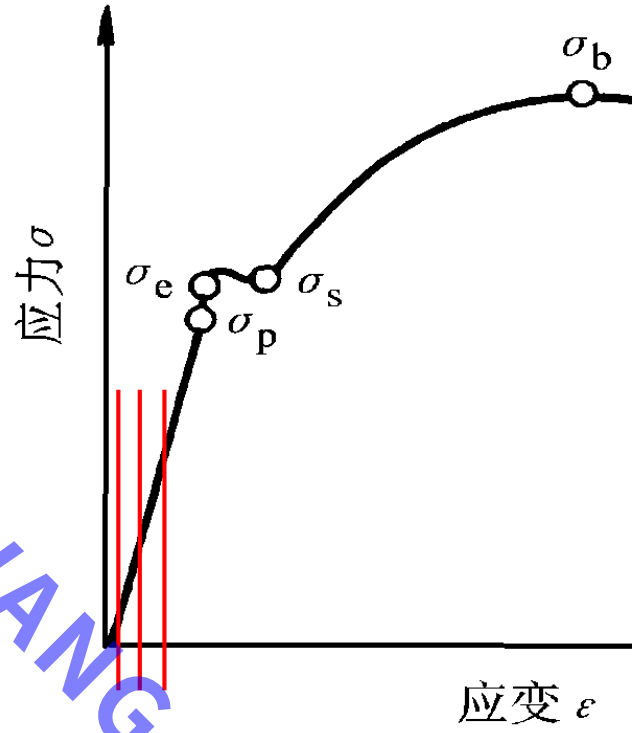
三、过量弹性变形失效

1 现象

一定载荷下，零件的**弹性变形量**超过了规定值

最大弹性变形量：Δl

最大扭转角：θ



举例：镗床的镗杆

过量弹性变形

降低被加工零件的精度

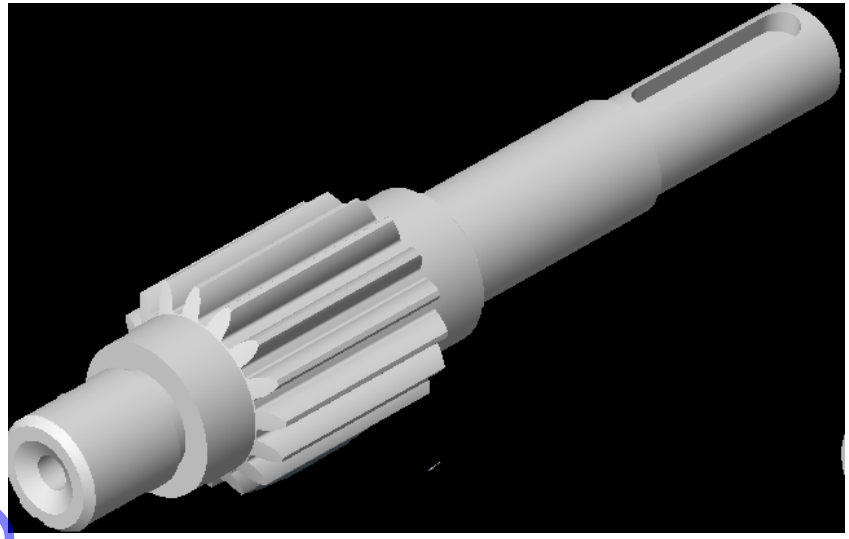
造成废品

xtumse@jiping WANG

齿轮轴

过量弹性变形

- 影响齿轮的正常啮合
- 加速磨损
- 增加噪声



弹簧

过量弹性变形

影响其减振和储能驱动作用

XJTU MSE @ JipingWANG

2 原因

零件刚度不足

以拉压服役条件为例：

$$\Delta l = \frac{FL}{EA}$$

$$k = \frac{F}{\varepsilon} = \frac{\sigma \times A}{\varepsilon} = E \times A$$

3 防止措施

- 选用弹性模量 E 高的材料
- 增大零件的截面积 A

XJTU-MSE@Jiping WANG

惯性制导的陀螺平台选用铍合金制造，其弹性模量大，不易引起弹性变形，铍的弹性模量是铝的 4倍钢的1.5倍

XJTU-MSE @ JiPing WANG

铍合金　太空反射镜

low weight and long-term dimensional stability are critical

Density (near r.t.)　1.85 g/cm^3

Young's modulus 287 GPa

Space telescope's berylli um mirrors

碳化硅　太空反射镜

https://phys.org/news/2011-01-space-telescope-beryllium-mirrors.html

各类材料的室温弹性模量 *E*

材　料	E/(10^4MPa)	材　料	E/(10^4MPa)
金钢石	102	铜(Cu)	12.6
WC	46～67	铜合金	12.2～15.3
硬质合金	41～55	钛合金	8.1～13.3
Ti,Zr,Hf 的硼化物	51	黄铜及青铜	10.5～12.6
SiC	46	石英玻璃	9.5
钨(W)	41	铝（Al）	7.0
Al_2O_3	40	铝合金	7.0～8.1
TiC	39	钠玻璃	7.0
钼及其合金	32.5～37	混凝土	4.6～5.1
Si_3N_4	30	玻璃纤维复合材料	0.7～4.6
MgO	25.5	木材(纵向)	0.9～1.7
镍合金	13～24	聚酯塑料	0.1～0.5
碳纤维复合材料	7～20	尼龙	0.2～0.4
铁及低碳钢	20	有机玻璃	0.34
铸铁	17．3—19．4	聚乙烯	0.02～0.07
低合金钢	20.4～21	橡胶	0.001～0.01
奥氏体不锈钢	19.4～20.4	聚氯乙烯	0.0003～0.001

XJTU-MSE @ Jiping WANG

不同类材料弹性模量排序

陶瓷材料　钢铁材料　有色金属　高分子材料

复合材料　钨 W (410GPa)

XJTU MSE @ Jiping WANG

材料的**原子本性**和**原子间结合力**决定 *E/G*

材料**熔点**反映了**原子间结合力**的**强弱**

也反映了*E/G*的大小

- **温度**↑ → 原子间结合力↓ → *E/G* ↓
- **金属**材料的 *E/G* 对**成分**、**组织不敏感**
- **陶瓷**、**高分子**、**复合材料**的 *E/G* 对**成分**、**组织敏感**

材料的弹性模量，**随着温度的升高，弹性模量是降低的**，比如说温度每升高100°C碳钢的弹性模量 E，下降3%~5%

热胀冷缩

对于一些精密机械中对零件的尺寸要求高的时候，环境因素必须考虑

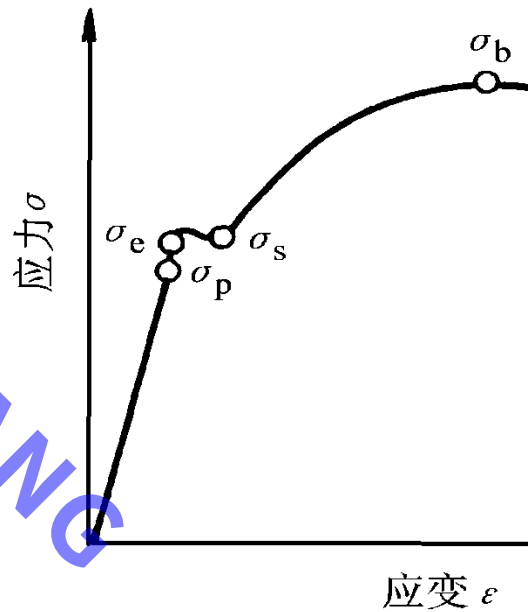
XJTU-MSE © Jiping WANG

四、过量塑性变形失效

1 现象　一定载荷下不允许发生塑性变形的零件发生了塑性变形或塑性变形量超过了规定值

2 原因　强度不足

σ_p　σ_s　σ_e



3 防止措施

用强度高的材料　(选材方面)

提高材料的强度　(强化手段)

XJTU MSE @ Jiping WANG

刚度？过量塑性变形？

XJTU-MSE@Jiping WANG

对炮筒，以比例极限为设计依据，其　$\sigma<\sigma_p/n$

对紧固螺栓，以屈服强度为设计依据，其　$\sigma<\sigma_s/n$

对弹簧，以弹性极限为设计依据，其　$\sigma<\sigma_e/n$

n: 安全系数

抗力指标：比例极限、弹性极限和屈服强度

XJTU-MSE@ Jiping WANG

抗拉强度大比拼

45钢 (碳素结构钢)

	正火	淬火+高温回火
硬度	250HBW	250HBW
σ_s	320MPa	450MPa
σ_b	750MPa	800MPa
δ	18%	23%
a_K	70J/cm^2	100J/cm^2

KJTU MSE @ JipingWANG

木材(松木)　**顺纹 (水分) ~40MPa**

PVC聚氯乙烯　**~ 42 MPa**

普通玻璃(块体)　**33MPa**

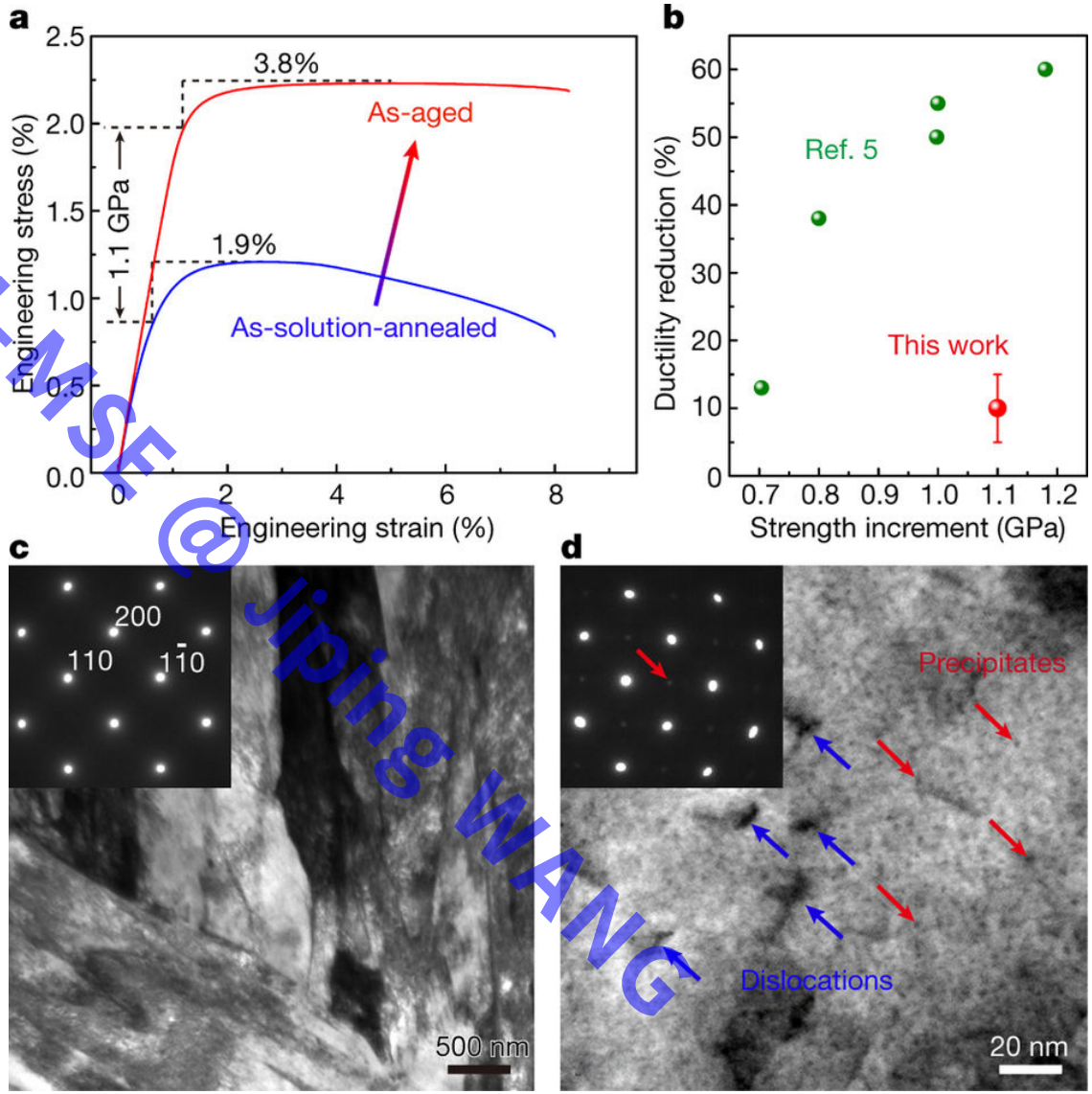
竹子(长度方向)　**350~500MPa**

Spider silk (Darwin's bark spider达尔文树皮蜘蛛)　**1652 MPa**

Ultrastrong steel via minimal lattice misfit and high-density nanoprecipitation

北科大吕昭平 **Nature**：最低晶格错配与高密度纳米析出相联手打造超强钢！

抗拉强度不低于 **2.2GPa**，拉伸塑性不低于**8%**

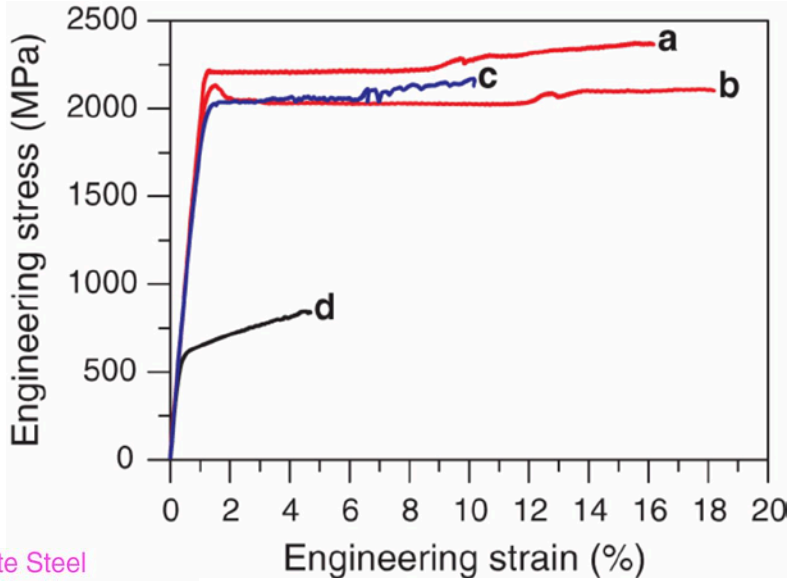


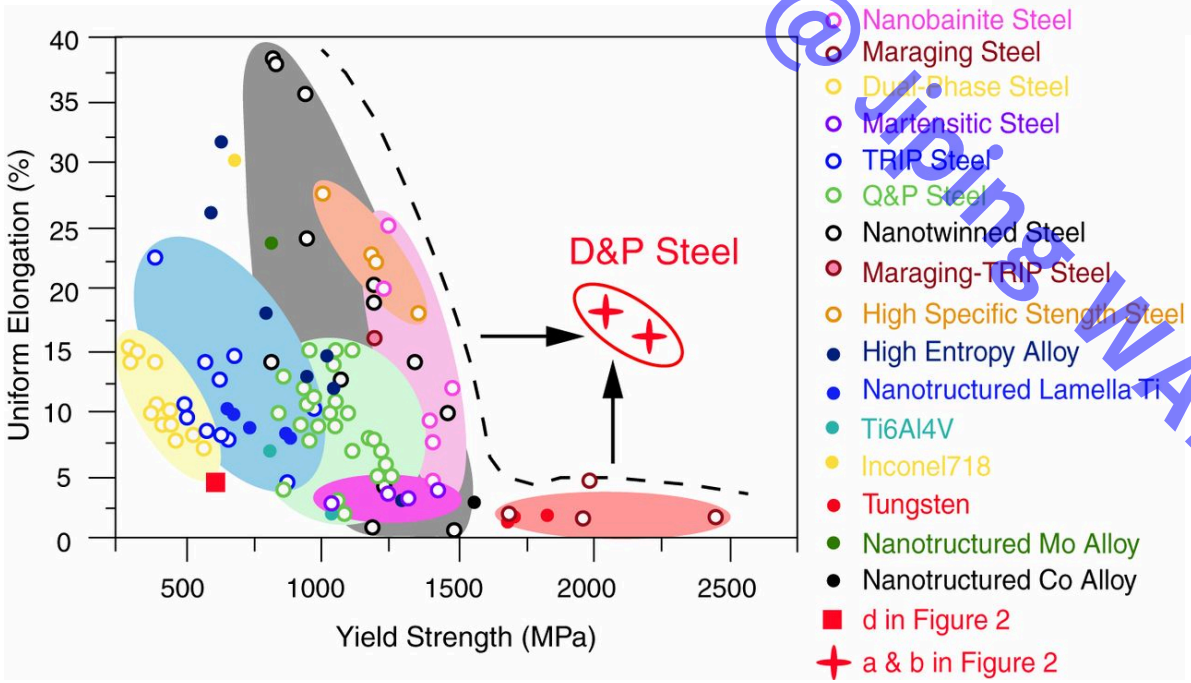
XJTU-MSE @ Jiping WANG

http://www.nature.com/nature/journal/v544/n7651/full/nature22032.html

北科大再发Science-D&P钢中高位错密度引起高延性

High dislocation density–induced large ductility in deformed and partitioned steels





NJTU-MSE @ Jiping WANG

多数工程材料为弹塑性材料，弹性变形和塑性变形间无明显的分界点

- 条件比例极限　σ_p：ε= 0.001~0.01%
- 条件弹性极限　σ_e：ε= 0.005~0.05%
- 条件屈服极限　σ_s：ε= 0.01~0.5%

XJTU-MSE @ Jiping WANG

本节中

力学性能指标及应用

刚度：为防止构件在受力时发生过量弹性变形，在设计中需要使用刚度。主要力学性能是材料的弹性模量

如: 镗床的镗杆、齿轮轴等

弹性指标：弹性极限是设计弹性零件需考虑的性能指标

如: 汽车板簧和各类弹簧等

强度和塑性指标：屈服强度和塑性指标

主要用于结构零件的抗断裂设计

硬度指标：在耐磨零件中必须考虑的性能指标

如：滚珠轴承、活塞环等

KHUMSE@JINGWING