

第一章 机械零件的失效分析

FAILURE ANALYSIS OF MACHINE ELEMENTS

常见失效方式

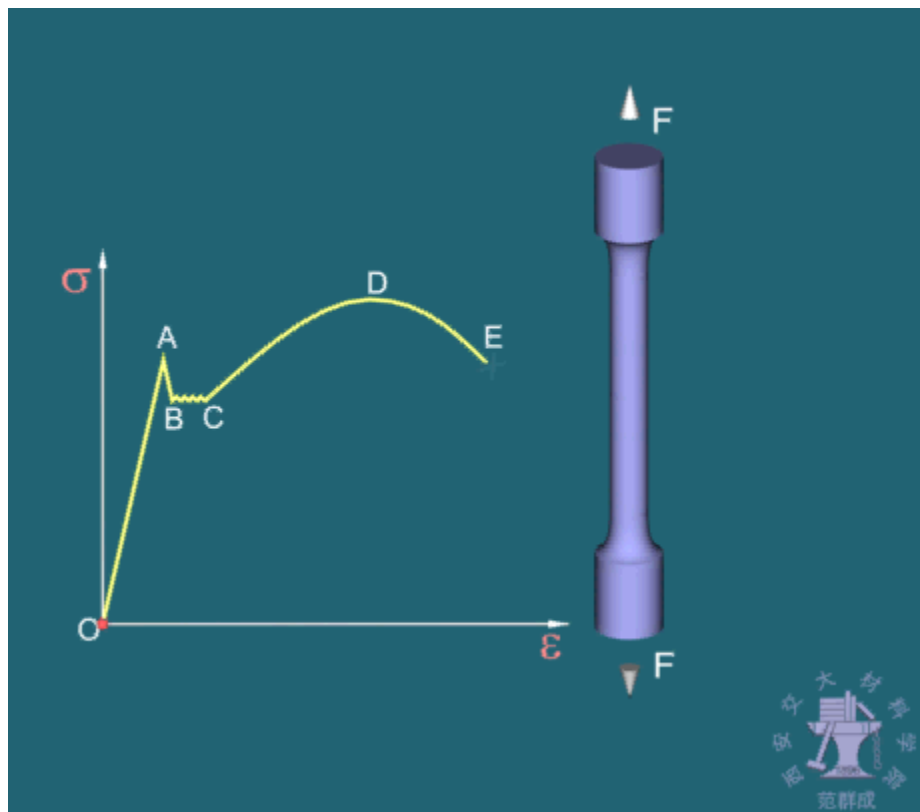
- 过量变形 Excessive deformation
- 断裂 Fracture
- 疲劳 Fatigue
- 磨损 Wear
- 高温蠕变 High temperature creep
- 腐蚀 Corrosion

THE END

第一节 零件在常温静载下的过量变形

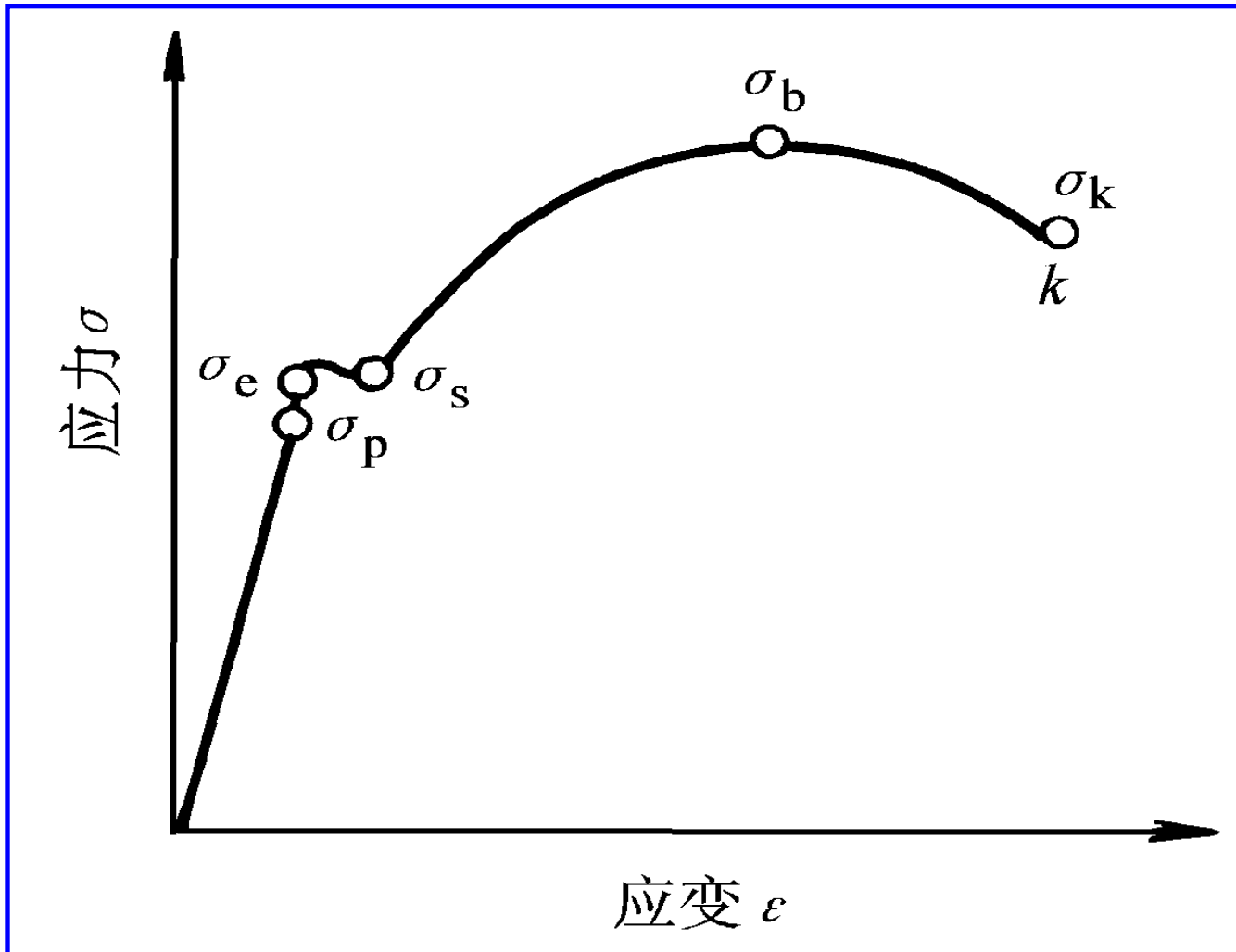
一、工程材料在静拉伸时的应力—应变行为

1. 低碳钢的应力—应变行为



OA: 弹性变形
ABC: 屈服
CDE: 塑性变形
E: 断裂

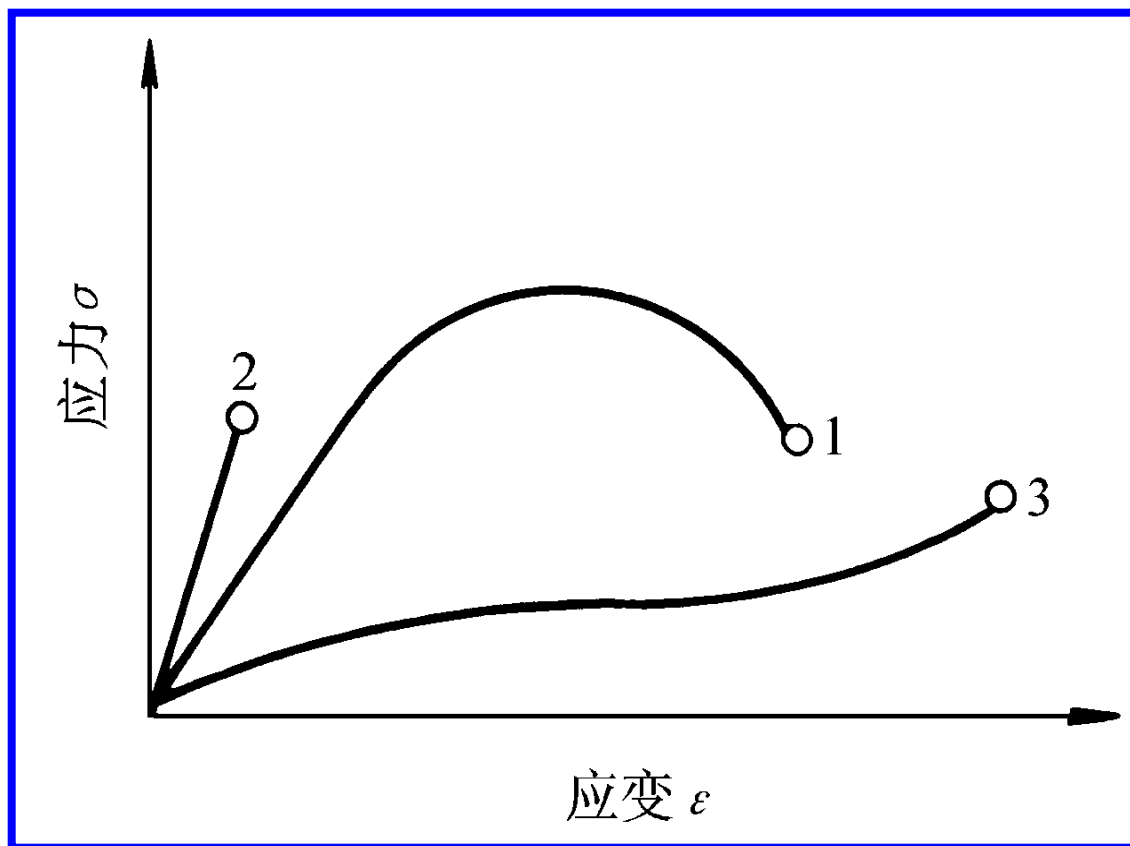
THE END



退火态低碳钢的应力—应变曲线

THE END

2. 其他类型材料的应力应变行为



其他材料的应力—应变曲线

1— 纯金属, 2— 脆性材料, 3— 高弹性材料

THE END

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）：

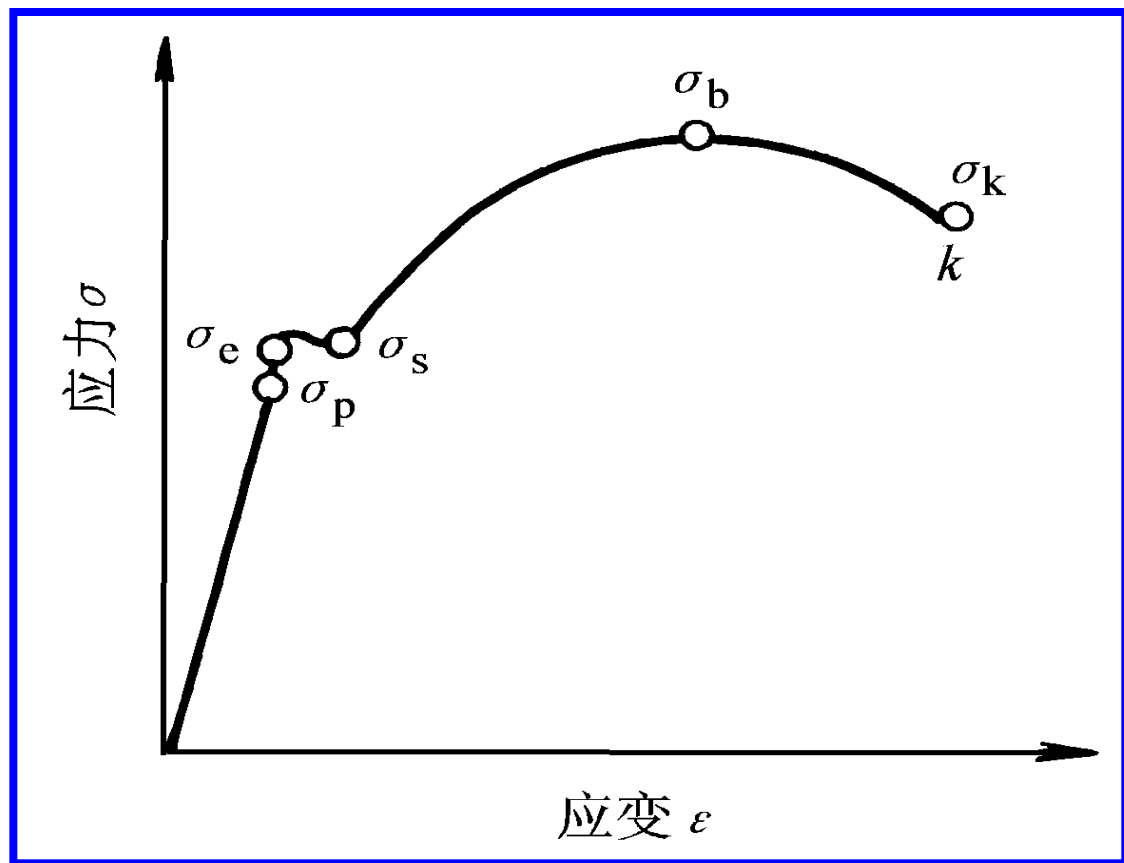
$$\frac{P}{\varepsilon} = \frac{\sigma \cdot A}{\varepsilon} = EA \quad \mathbf{E} \text{ — 弹性模量}$$

- 纯剪切：

$$\frac{P_{\tau}}{\gamma} = \frac{\tau \cdot A}{\gamma} = GA \quad \mathbf{G} \text{ — 切变模量}$$

2. 强度

- σ_p — 比例极限
- σ_e — 弹性极限
- σ_s — 屈服强度
- σ_b — 抗拉强度
- σ_k — 断裂强度



退火态低碳钢的应力—应变曲线

THE END

3. 弹性

■ **E** — 正弹模量 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

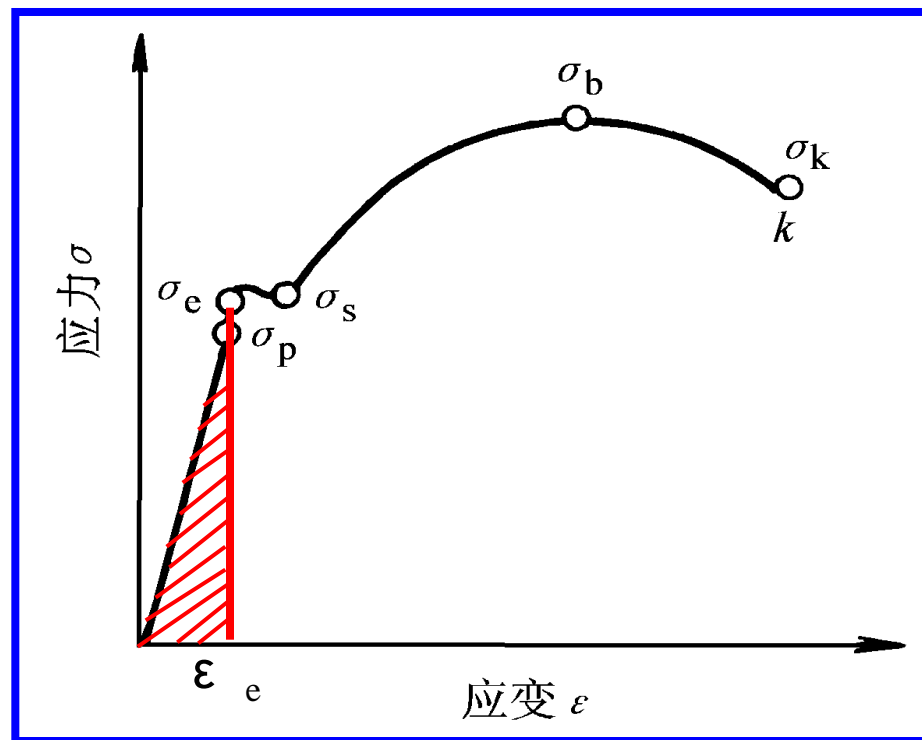
■ **G** — 切弹模量

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

■ ε_e — 最大弹性应变

■ **u** — 弹性能

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



弹性能

4. 塑性

- 断后伸长率

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

- 断面收缩率

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$$

5. 硬度 — 材料抵抗压入或刻划的能力

- 布氏硬度 HBS



■ 洛氏硬度 HRC



■ 维氏硬度 HV



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

2. 原因 — 零件刚度不足

$$\frac{P}{\varepsilon} = EA$$

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

表 1-1 各类材料的室温弹性模量 E

材 料	E/(10 ⁴ MPa)	材 料	E/(10 ⁴ MPa)
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 ₂ O 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 ₃ N 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

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

$$\sigma_P, \sigma_e, \sigma_s$$

3. 防止措施

用强度高的材料
提高材料的强度



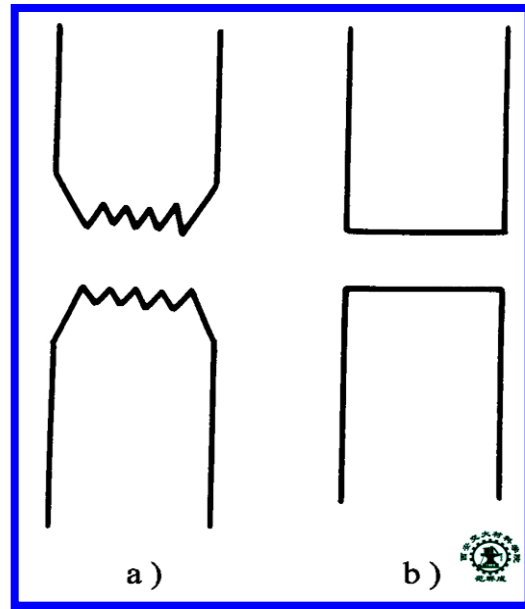
THE END

第二节 零件在静载和冲击载荷下的断裂

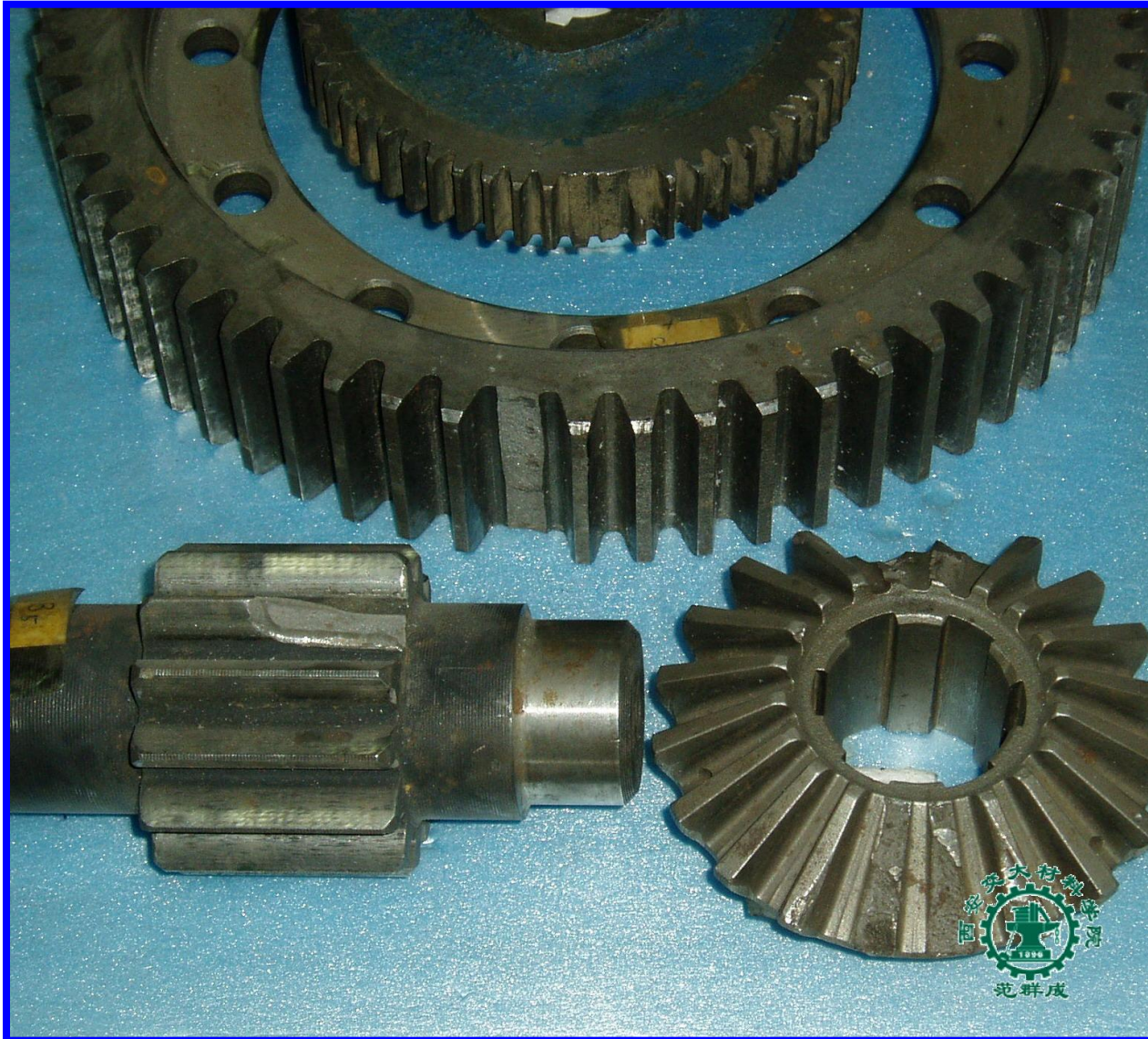
一、韧断和脆断的基本概念

1. 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

2. 脆性断裂 — 断裂前未发生明显塑性变形的断裂
断口特征：杯锥状，暗灰色

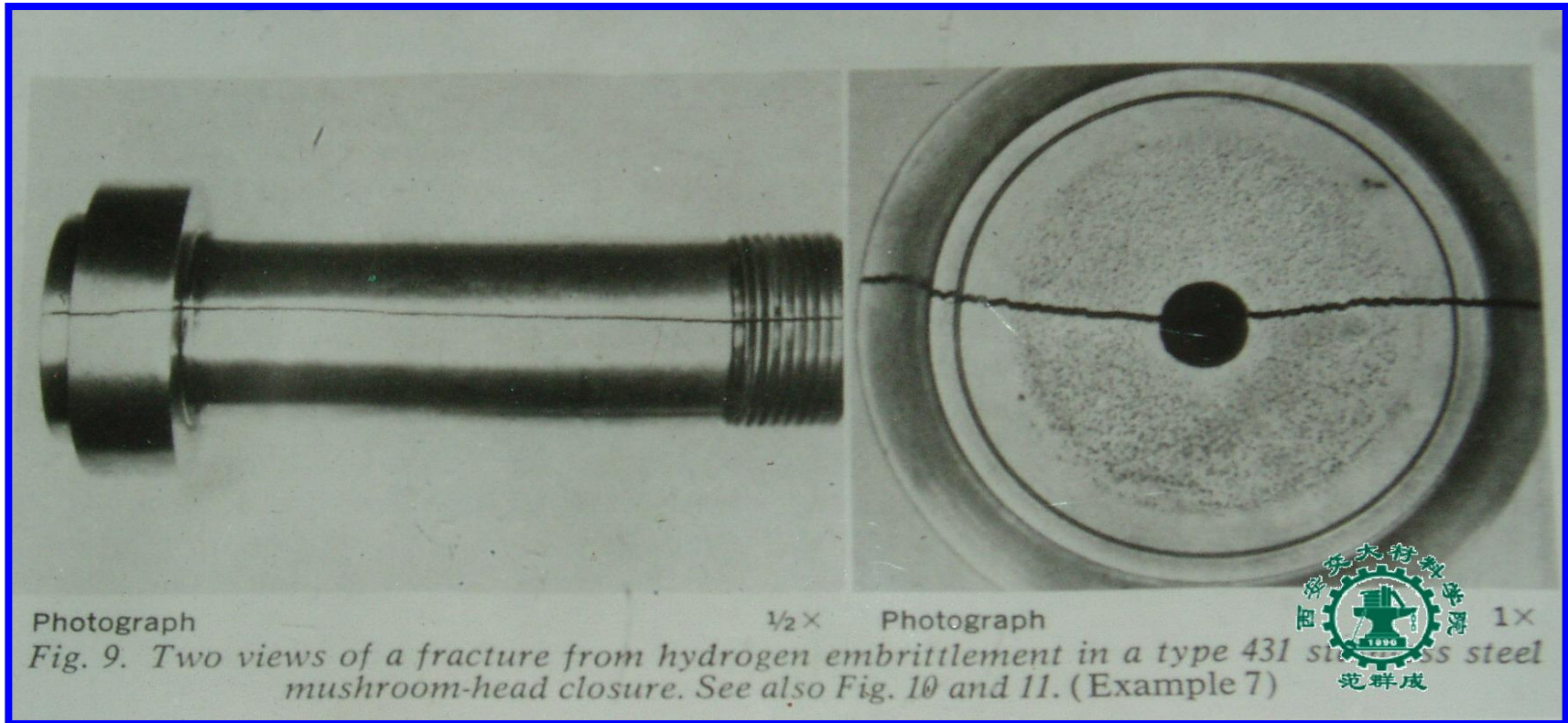


THE END

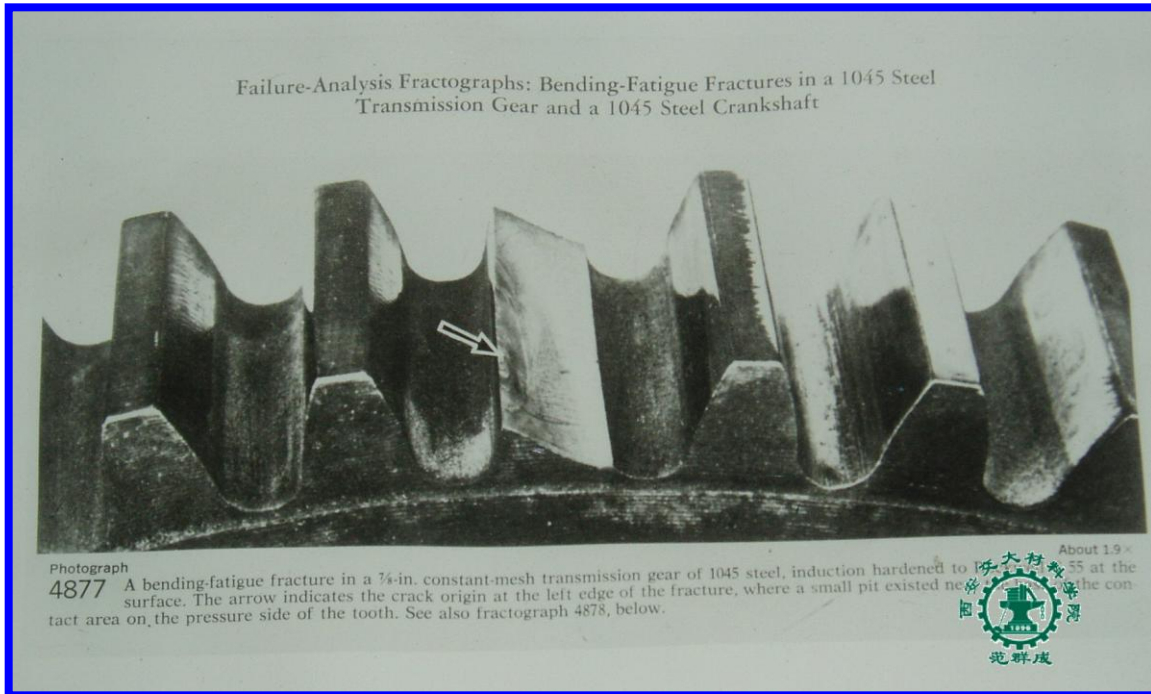


THE END





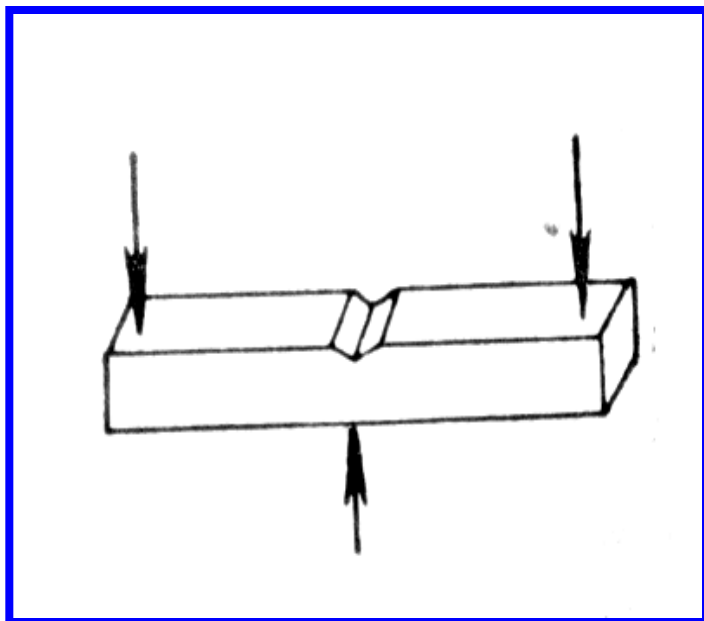
THE END



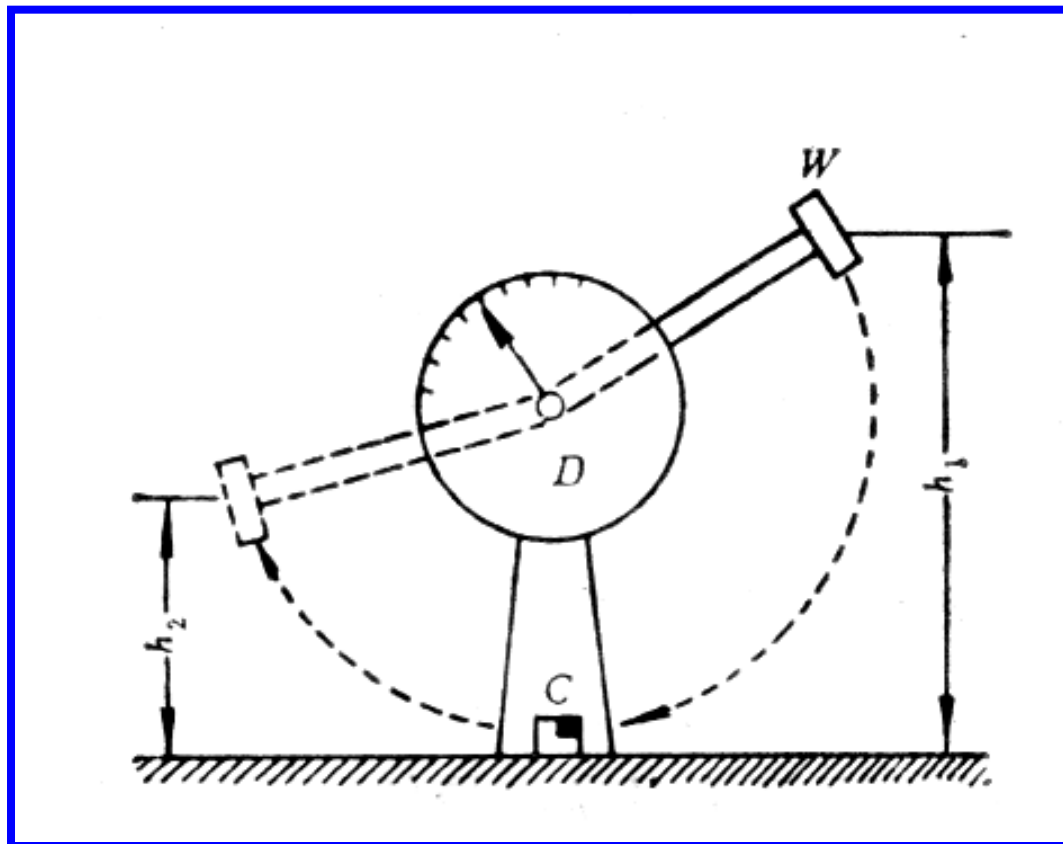
THE END

二、冲击韧性及其度量指标

1. 冲击实验



冲击实验的试样



冲击实验示意图

THE END

2. 冲击韧性 — 材料在冲击载荷下吸收冲击功（塑性变形功和断裂功）的能力

3. 冲击韧度 a_K — 冲击功与试样断面面积的比值

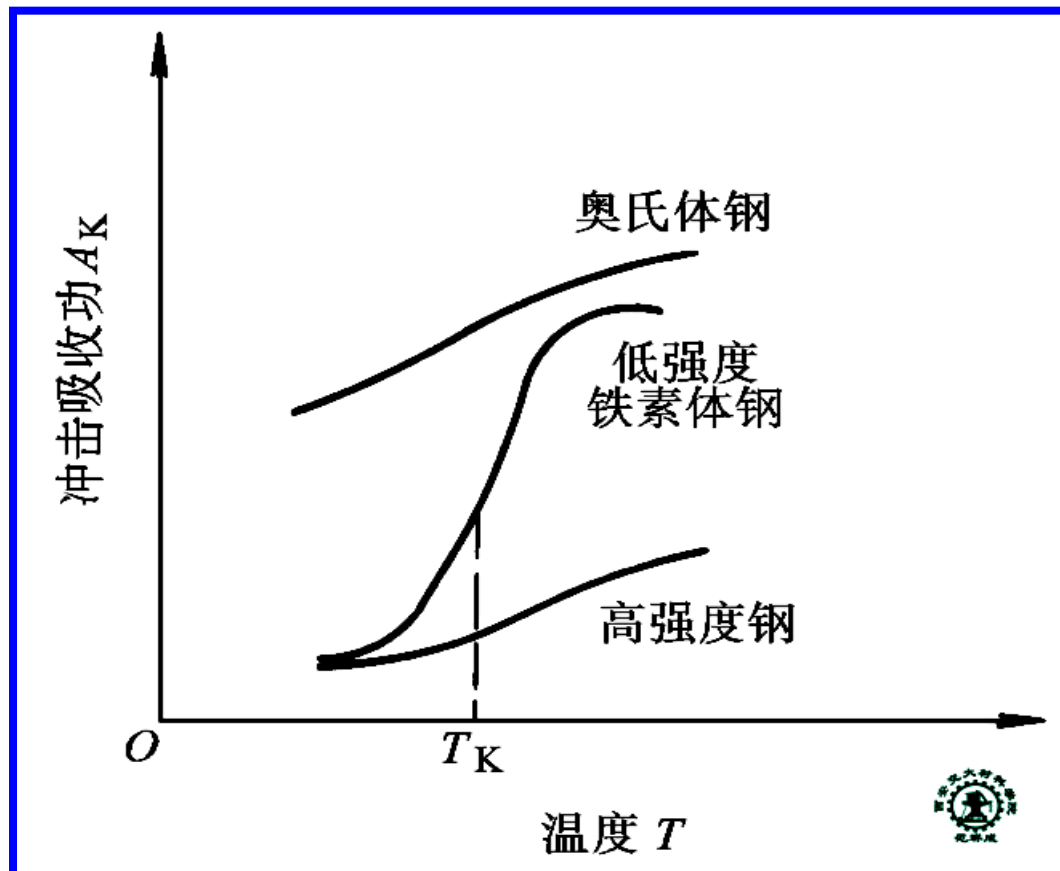
$$a_K = \frac{A_K}{F_K} \quad (J \cdot cm^{-2})$$

A_K — 冲击功 (J)

F_K — 试样断面面积 (cm^2)

4. 冲击韧度与温度的关系

- 冲击韧度随温度降低而减小
- 存在韧脆转变温度 T_K

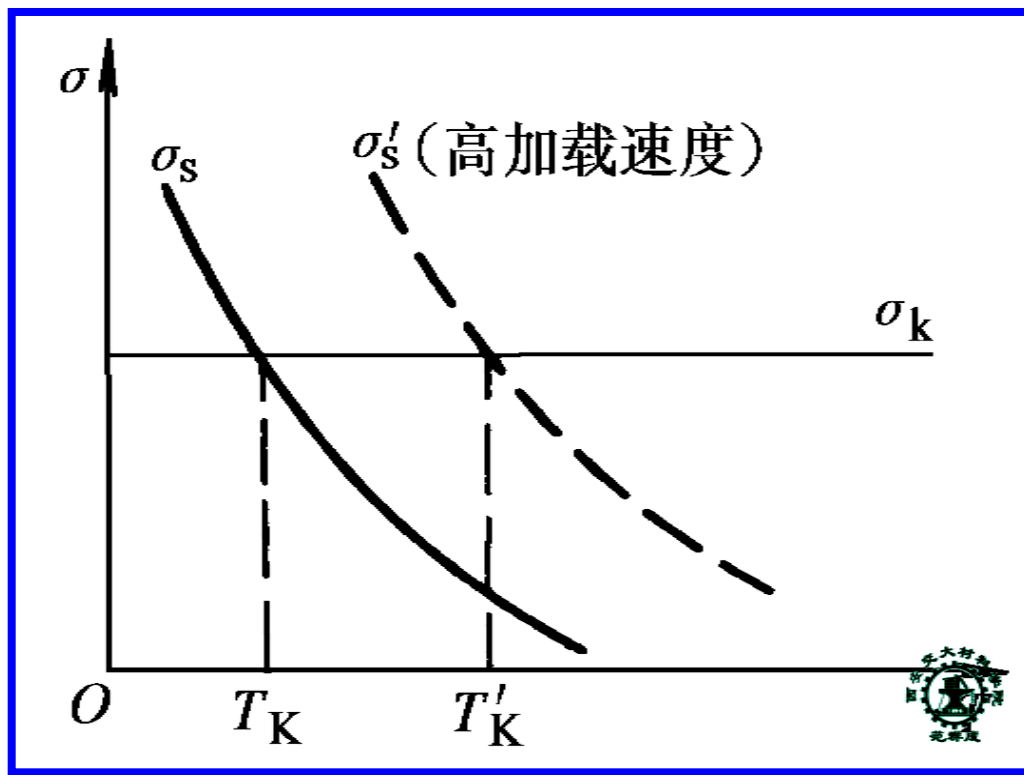


三种钢的冲击韧度随温度变化曲线示意图

三、影响脆断的因素

1. 材料本性和加载方式

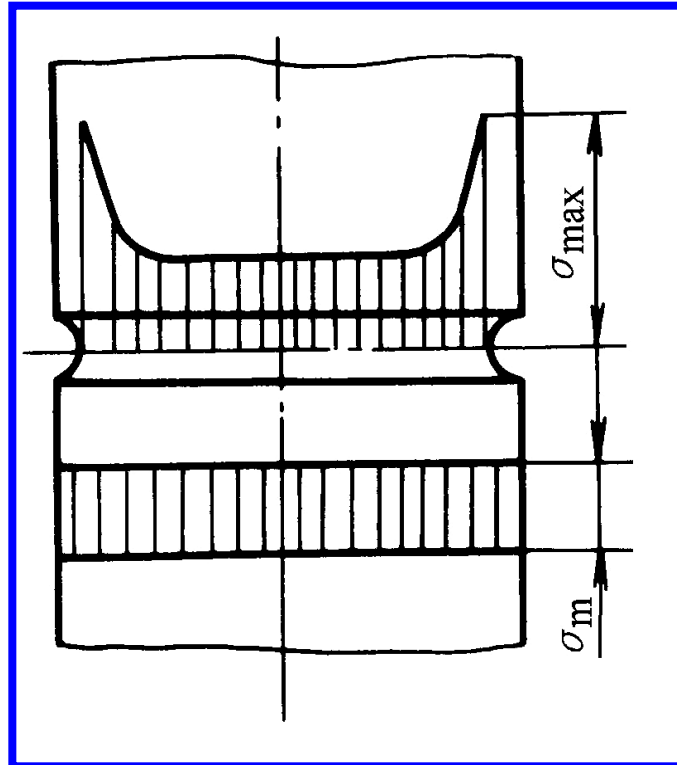
2. 温度和加载速度



屈服强度随温度变化示意图

THE END

3. 应力集中



缺口处应力集中示意图

4. 零件尺寸

截面越大, 越易脆断

THE END

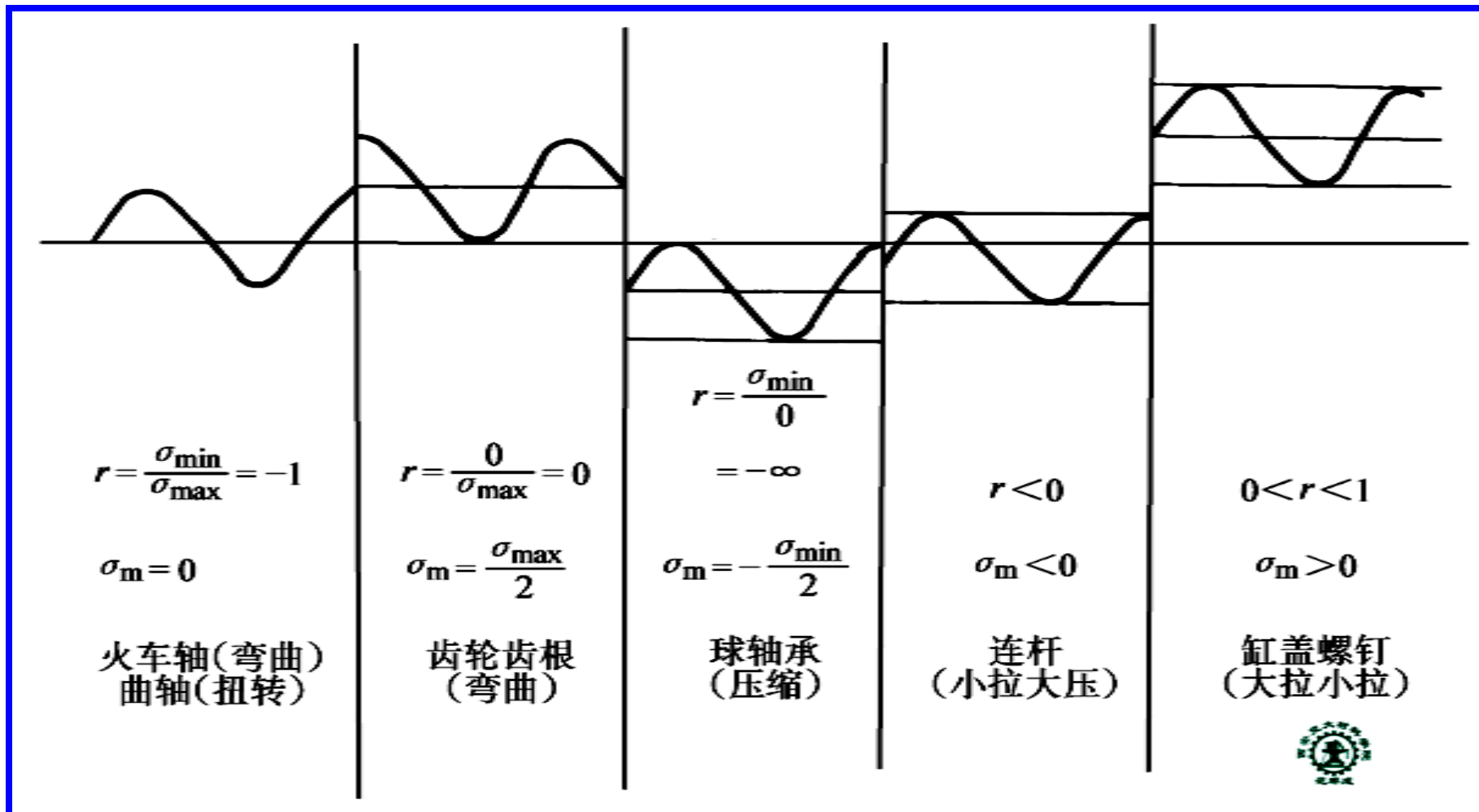
第三节 零件在交变载荷 下的疲劳断裂

一、疲劳的基本概念

1. 交变载荷

——方向及大小随时间周期性变化的载荷

几种常见的交变应力











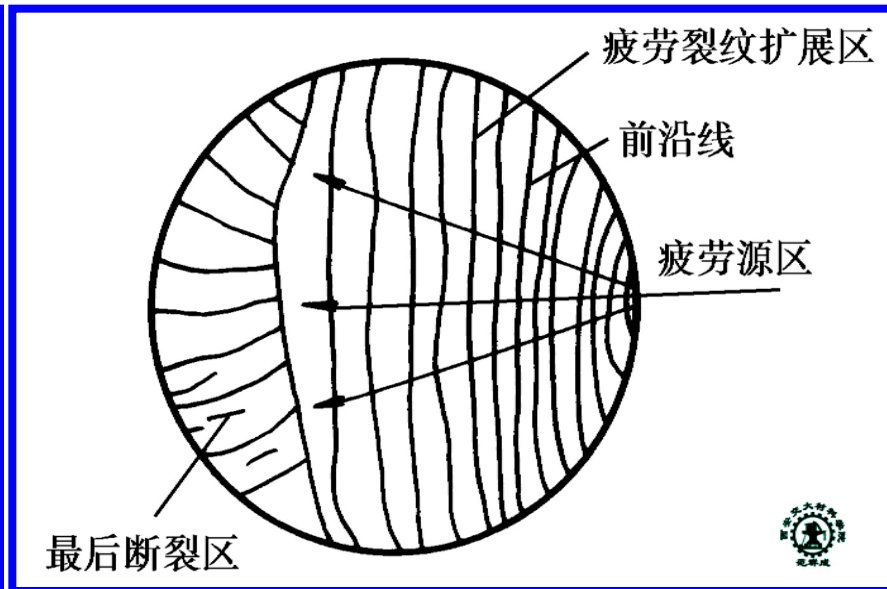


2. 疲劳断裂的特点

- 低应力 $\sigma < \sigma_s$
- 突然性
- 疲劳断裂过程

疲劳裂纹萌生 → 裂纹扩展 → 最终破断

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

THE END

1. 疲劳裂纹源区

形成于应力集中处

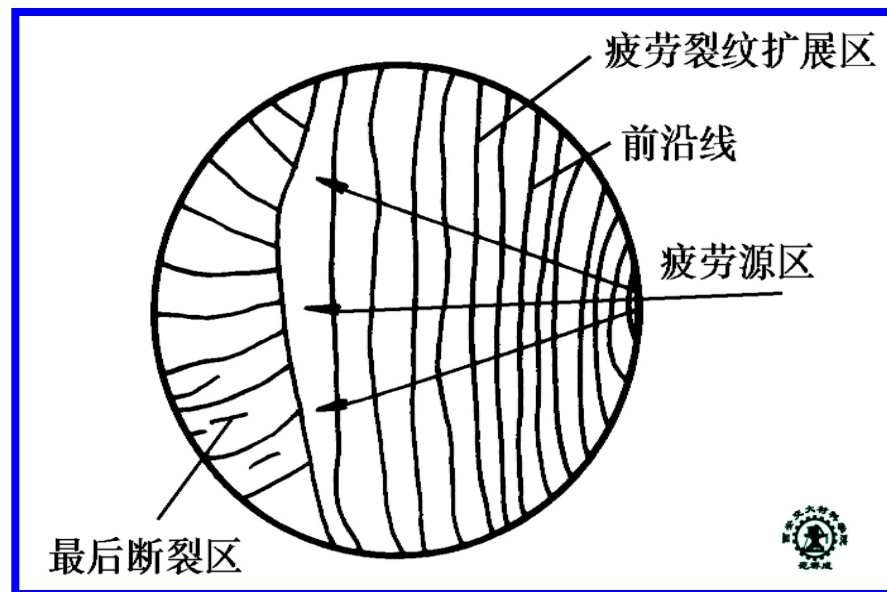
- 内部缺陷 (夹杂物, 孔洞)
- 加工缺陷 (刀痕, 微裂纹)
- 不当设计 (截面突然变化)

2. 疲劳裂纹扩展区

有疲劳条纹, 呈“贝纹状”或“海滩状”

3. 最后断裂区

有放射状线

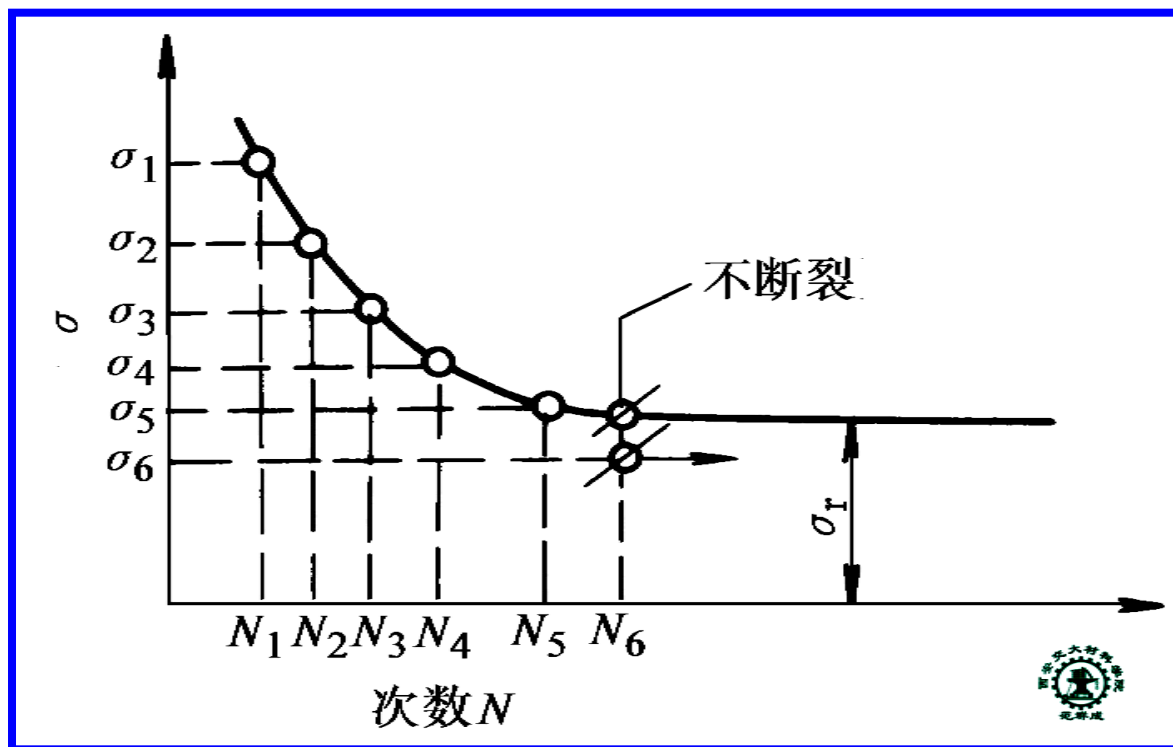


疲劳断口示意图

三、无裂纹零（构）件的疲劳抗力指标

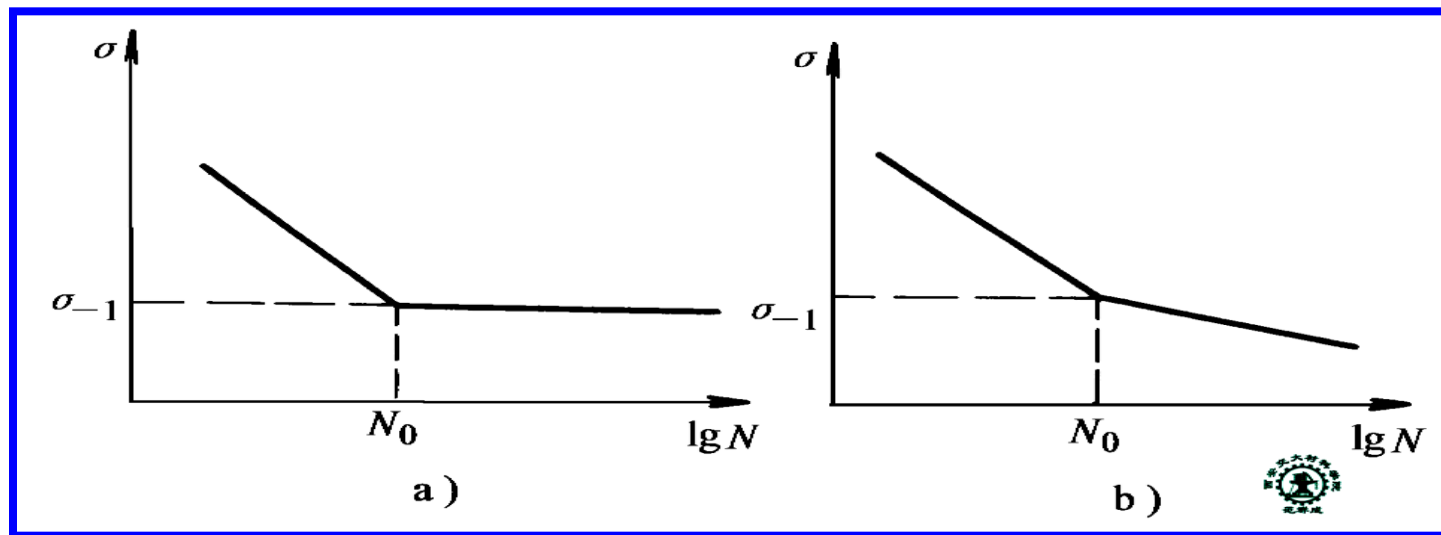
1. 疲劳极限和过负荷持久值

1) 疲劳曲线 旋转弯曲疲劳实验



疲劳曲线示意图

THE END



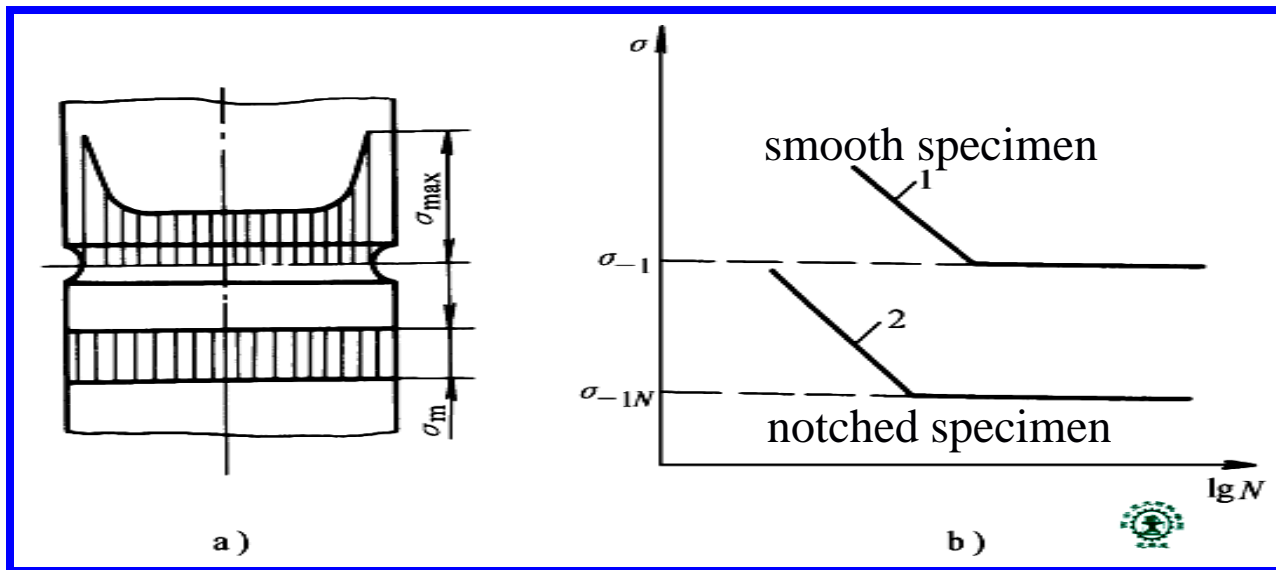
两种类型疲劳曲线：a) 钢铁材料；b) 部分有色金属（如铝合金等）

2) 疲劳极限 σ_{-1} — 经受无限多次应力循环也不断裂的最大应力

3) 条件疲劳极限 — 不存在疲劳极限时，规定循环基数 N_0 时的断裂应力

4) 过负荷持久值 — 高于疲劳极限的应力下，在规定周次断裂所对应的应力

2. 疲劳缺口敏感度 — q



缺口处的应力集中及其对疲劳极限的影响: (a) 静载下缺口处的应力集中, (b) 光滑试样 1 与缺口试样 2 的疲劳极限

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (0 < q < 1) \quad K_f = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1N}} \quad K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m}$$

σ_{-1} — 光滑试样的疲劳极限

σ_{-1N} — 缺口试样的疲劳极限

σ_{\max} — 应力集中处的最大应力

σ_m — 应力集中处的平均应力

THE END

四、影响疲劳抗力的因素

1. 载荷类型

拉-压疲劳

$$\sigma_{-1P} = 0.85\sigma_{-1} \text{ (钢)}$$

$$\sigma_{-1P} = 0.65\sigma_{-1} \text{ (铸铁)}$$

扭转疲劳

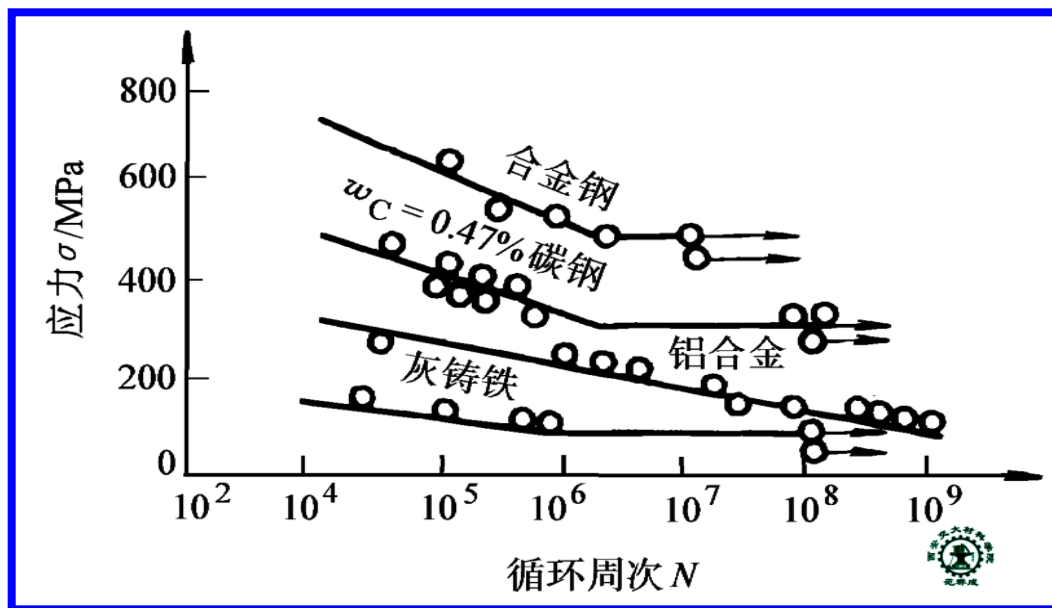
$$\tau_{-1} = 0.55\sigma_{-1} \text{ (钢及轻合金)}$$

$$\tau_{-1} = 0.8\sigma_{-1} \text{ (铸铁)}$$

2. 材料本质

1) 不同材料有不同的疲劳极限 σ_{-1}

几种材料的
疲劳曲线

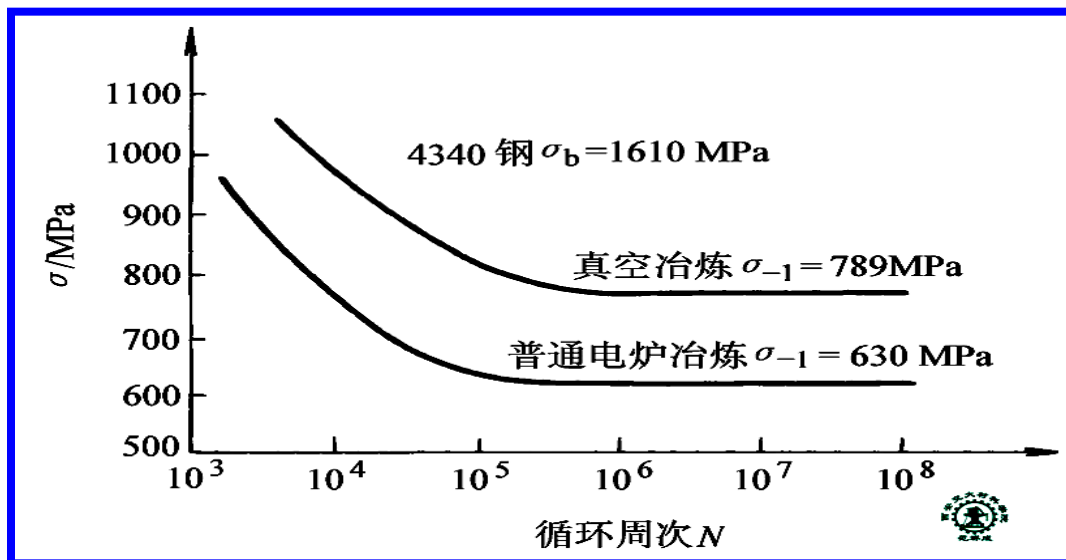


2) 材料组织类型对疲劳极限的影响

表 1-3 40Cr 钢组织类型对疲劳极限的影响

组织状态	σ_b / MPa	σ_{-1} / MPa
退火 (铁素体+珠光体)	650	341
淬火 (马氏体)	2080	775

3) 材料纯度对疲劳极限有明显影响



4043 钢纯度对
疲劳曲线的影响

THE END

3. 零件表面状态的影响

1) 表面光洁度

表 1-4 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

2) 表面应力状态 表面残余压应力有利

4. 温度的影响

$$\begin{cases} T \uparrow, & \text{则 } \sigma_{-1} \downarrow, q \downarrow \\ T \downarrow, & \text{则 } \sigma_{-1} \uparrow, q \uparrow \end{cases}$$

5. 腐蚀性介质的影响

THE END

第四节 零件的磨损失效

WEAR FAILURE OF COMPONENT

黏着磨损

磨粒磨损

腐蚀磨损

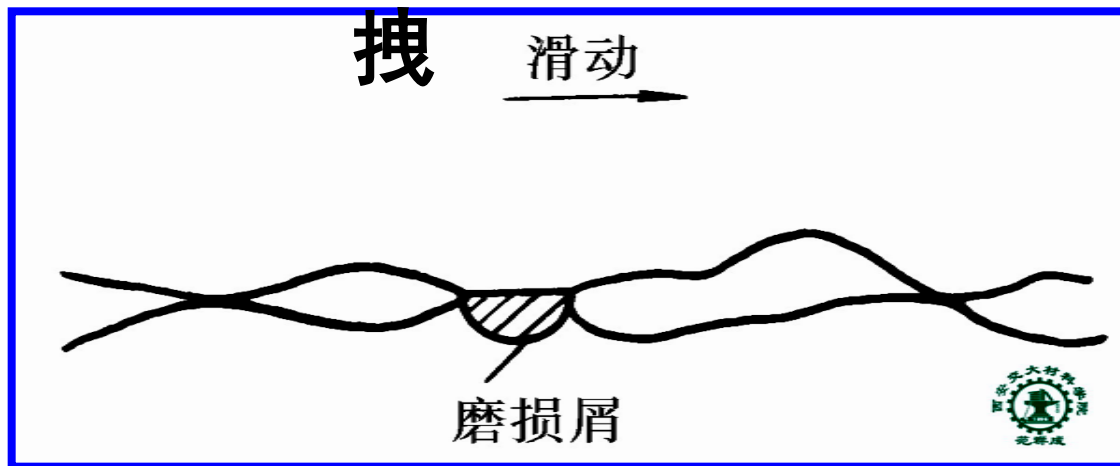
接触疲劳

THE END

一、黏着磨损

1. 现象 如：螺栓与螺母，蜗轮与蜗杆...

2. 磨损机理 “冷焊” → 拉



粘着磨损示意图

3. 防止措施

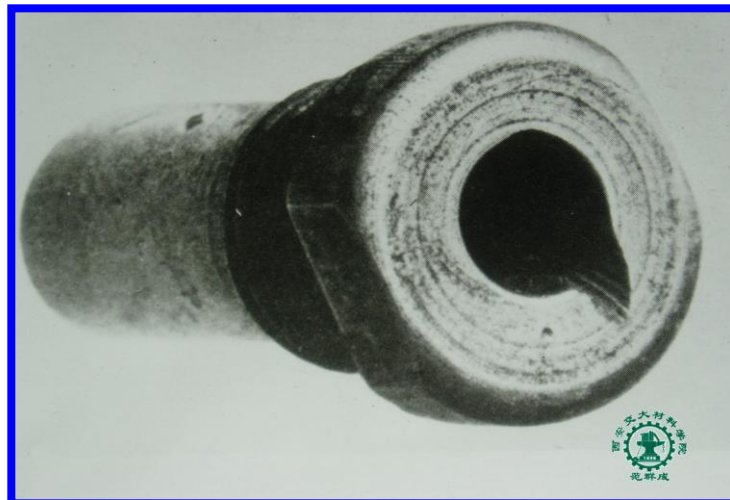
摩擦副正确配对
减小摩擦系数或提高表面硬度
减小接触压应力

THE END

二、磨粒磨损

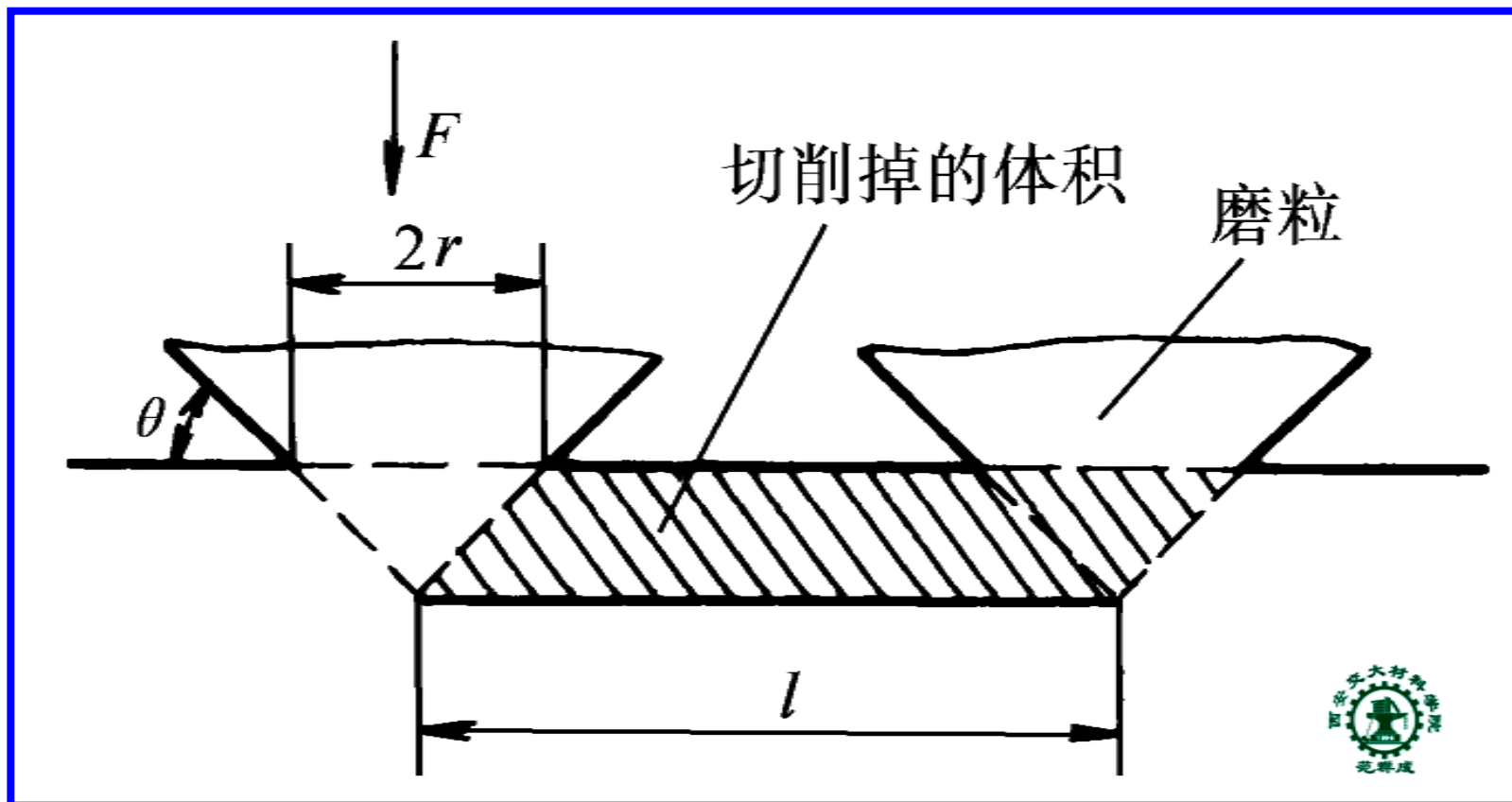
1. 现象

如： 内燃机汽缸套
内燃机偏心轮



2. 磨损机理

硬质磨粒嵌入→切削

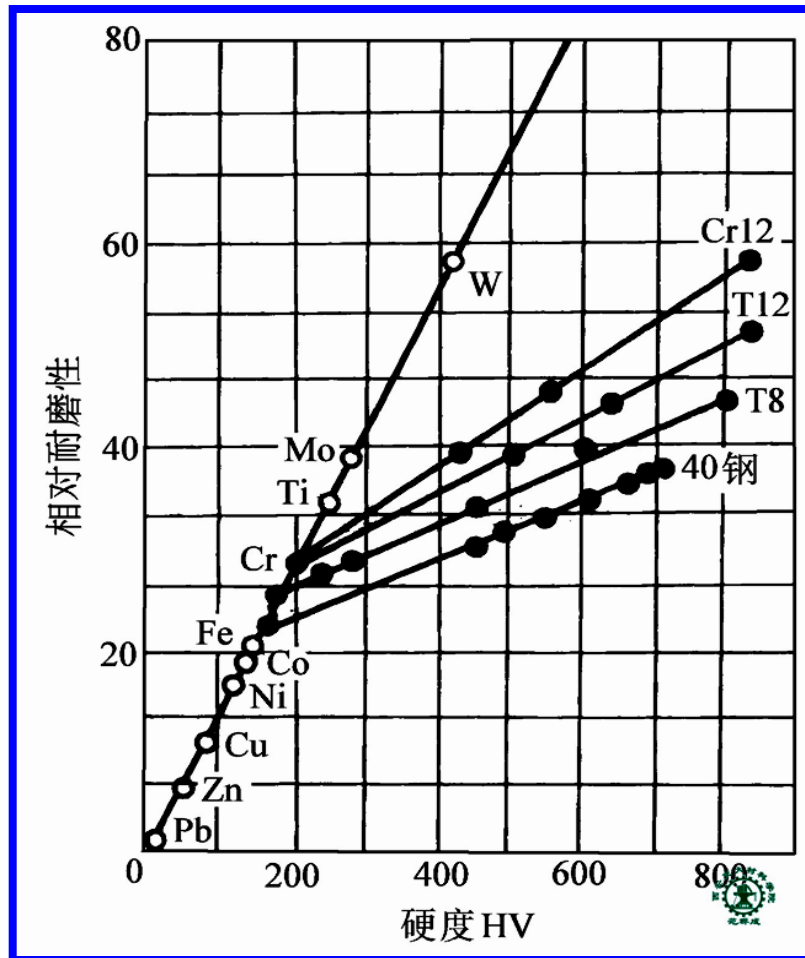


磨粒磨损示意图

THE END

3. 防止措施

提高零件表面硬度



磨粒磨损时相对耐磨性与材料硬度的关系

THE END

三、腐蚀磨损

1. 氧化磨损

1) 现象

零件表面氧化膜反复形成→脱落

2) 原因

氧化膜疏松、与基体结合力差

3) 防止措施

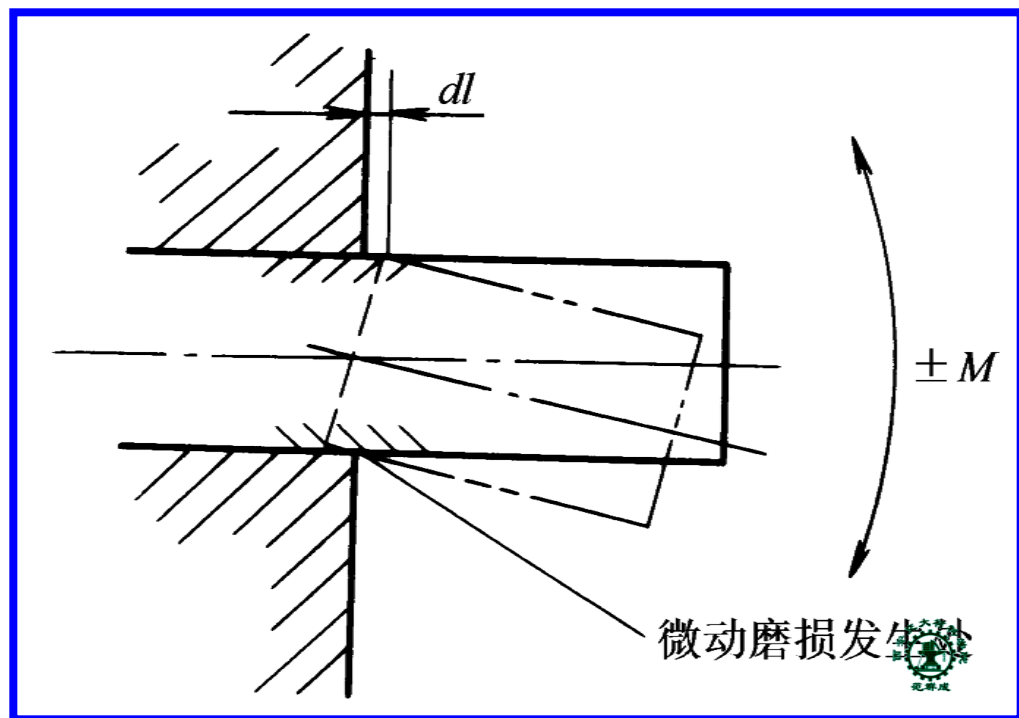
提高零件表面硬度

使零件表面形成致密氧化膜

2. 微动磨损

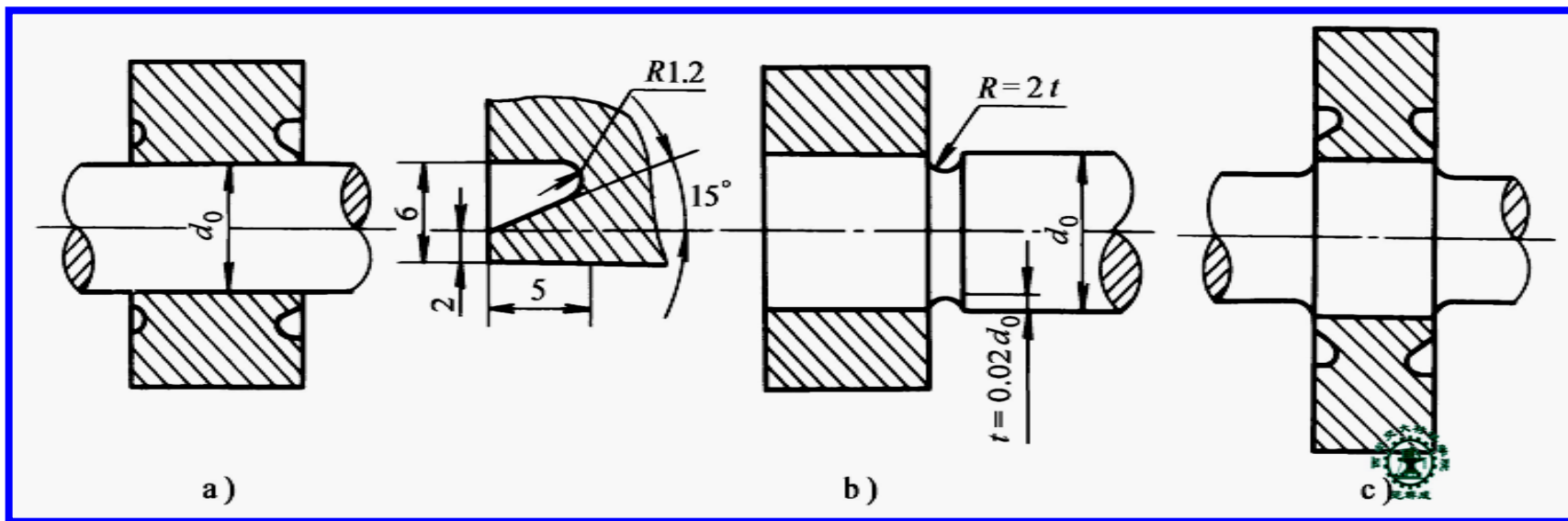
- 1) 现象 如： 嵌合连接的键、肖等的磨损
- 2) 原因： 交变载荷振动作用下的微小相对滑动磨损

紧配合轴微动
磨损的发生



THE END

- 3) 防止措施
- 提高嵌合处表面硬度
- 采用垫衬
- 改进设计减小应力集中



压配合轴设计示例

THE END

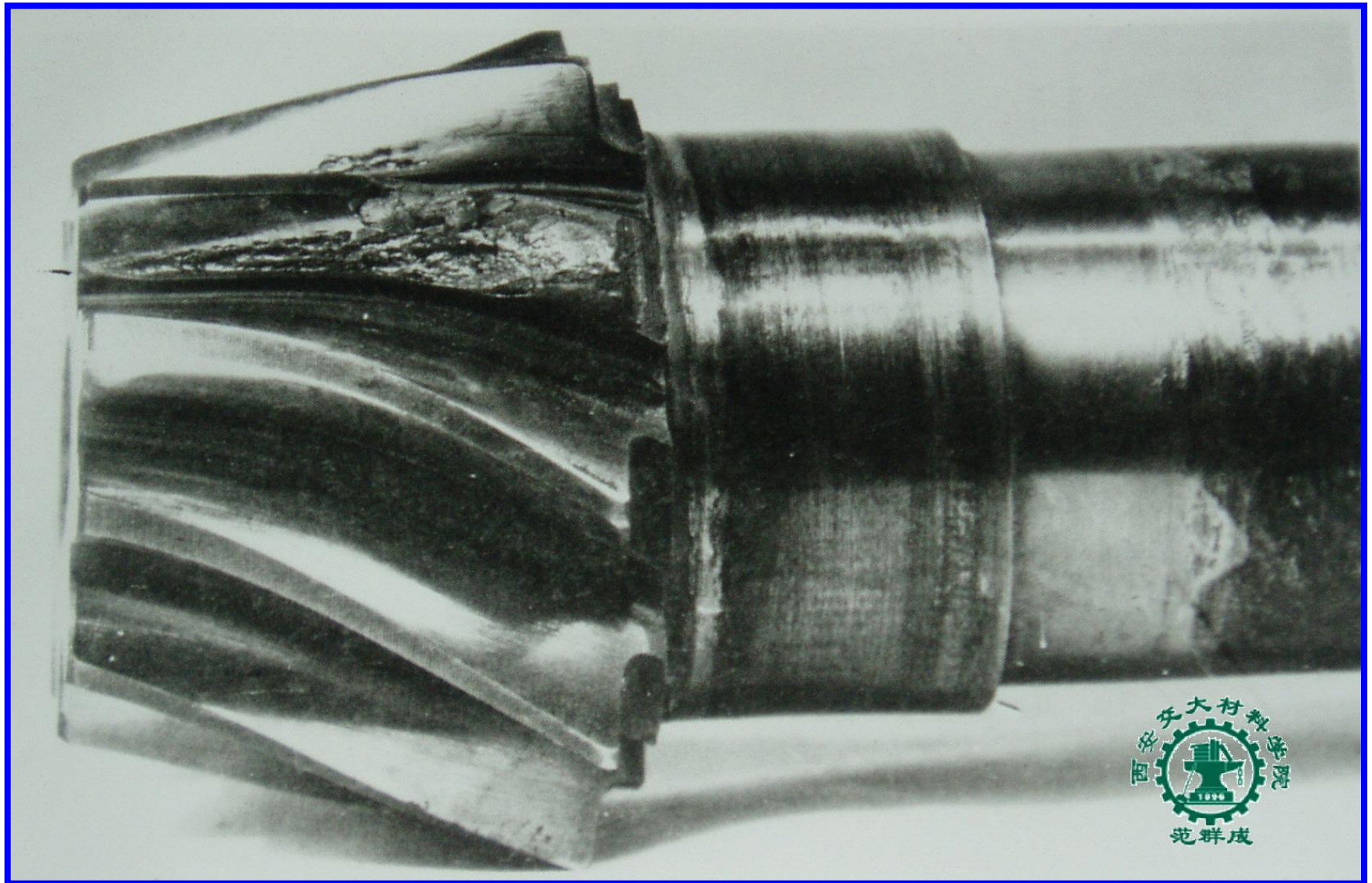
四、接触疲劳

1. 现象

在接触应力和
交变应力的联
合作下，零件
表面局部剥落
或产生麻点。
如齿轮、滚动
轴承等



THE END



2. 形成机理

裂纹形成→扩展→剥落

3. 防止措施

提高零件表面硬度

提高材料纯净度

提高零件表面光洁度

增大润滑油黏度

提高零件心部硬度和强度

THE END





第五节 零件在高温下的蠕变 变形和断裂

CREEP DEFORMATION AND FRACTURE OF COMPONENT AT HIGH TEMPERATURE

高温蠕变现象

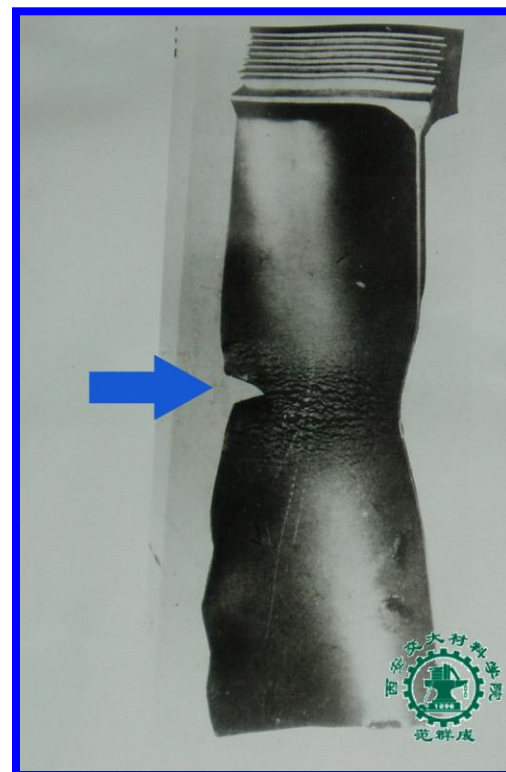
蠕变抗力指标

高温蠕变的防止

THE END

一、高温蠕变现象

1. 现象 —即使应力小于屈服强度，但在长时间、恒应力作用下，零件也会慢慢产生塑性变形和断裂。如内燃机汽缸盖螺栓等

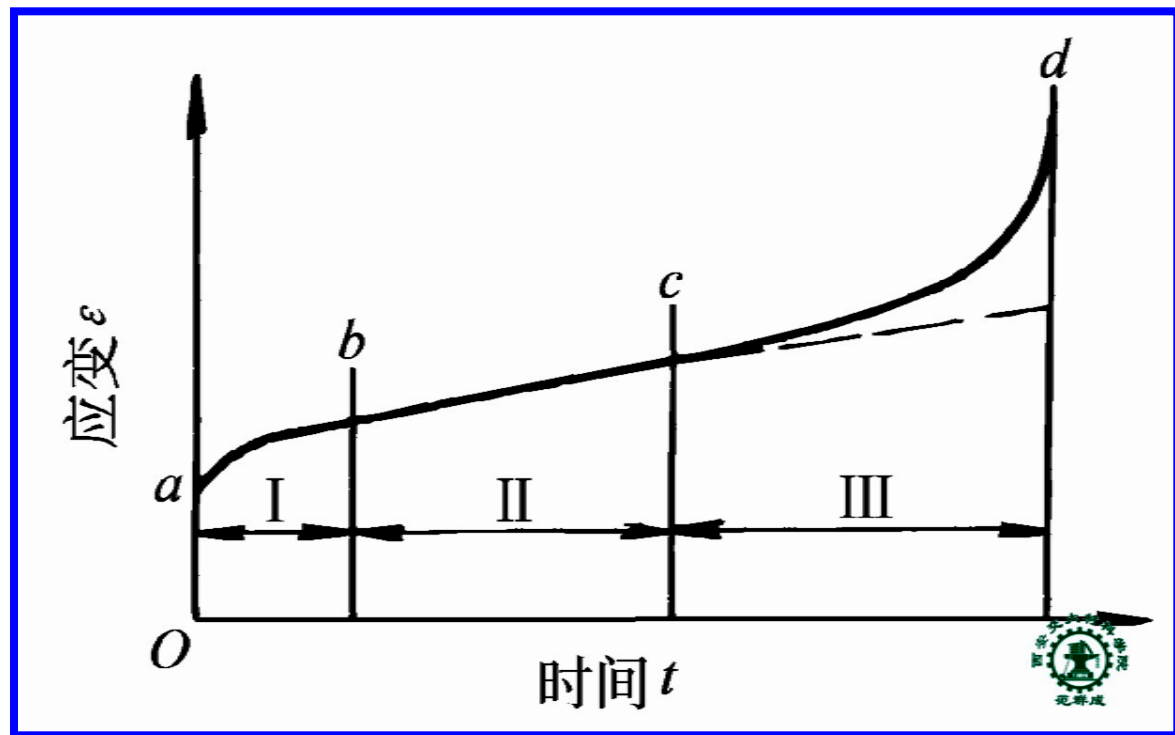


THE END

2. 蠕变曲线

1) 典型的蠕变曲线

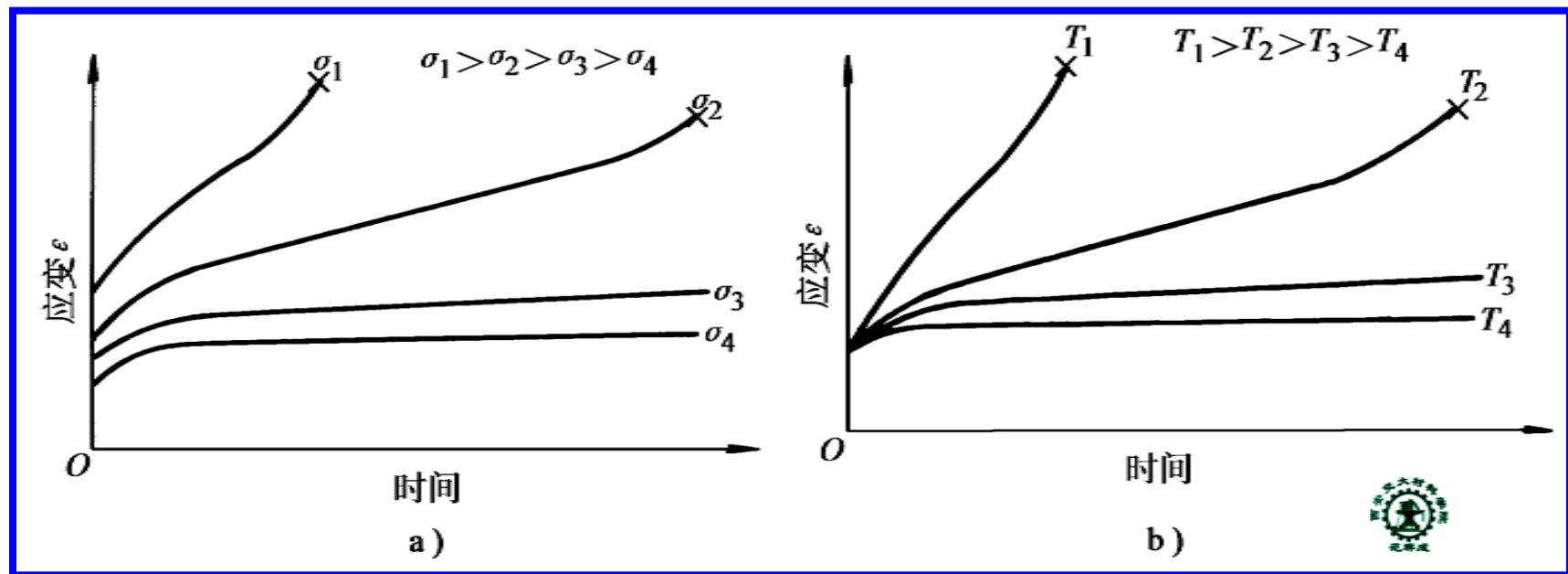
分三个阶段：
减速蠕变
恒速蠕变
加速蠕变



典型的蠕变曲线

THE END

2) 应力和温度对蠕变曲线的影响



应力和温度对蠕变曲线的影响

(a) 恒定温度下改变应力

(b) 恒定应力下改变温度

二、蠕变抗力指标

1. 蠕变极限 — 高温长期载荷作用下，材料对蠕变变形的抵抗能力

$\sigma_{\dot{\varepsilon}}^T$ — 给定温度下，使试样产生规定蠕变速率的应力值

$\sigma_{\delta/t}^T$ — 给定温度下，规定时间内使试样产生规定蠕变变形量的应力值

2. 持久强度 — 高温长期载荷作用下，材料对蠕变断裂的抵抗能力

σ_t^T — 给定温度下，规定时间内使试样产生蠕变断裂的应力值

THE END

三、高温蠕变的防止

**正确选材：陶瓷的高温蠕变抗力最大
高温合金次之
耐热钢再次之**

本章作业：

1

2

4

THE END