XJTU-MSE @ Jiping WANG

第四节 零件的磨损失效

XJTU-MSE @ Jiping WANG

磨损: 在摩擦过程中零件表面发生的尺寸变化和物质耗损现象称为 磨损

摩擦副：相接触的两个物体产生摩擦而组成的一个摩擦体系

按运动形式分类

滑动摩擦 两接触表面间存在相对滑动时的摩擦

滚动摩擦 两物体沿接触表面滚动时的摩擦

磨损失效 跟（金属） 材料的哪个性能关系最大？

硬度 材料抵抗压入或刻划的能力

硬度高 耐磨性？

XJTU-MSE @ Jiping WANG

- **布氏硬度 HBW**

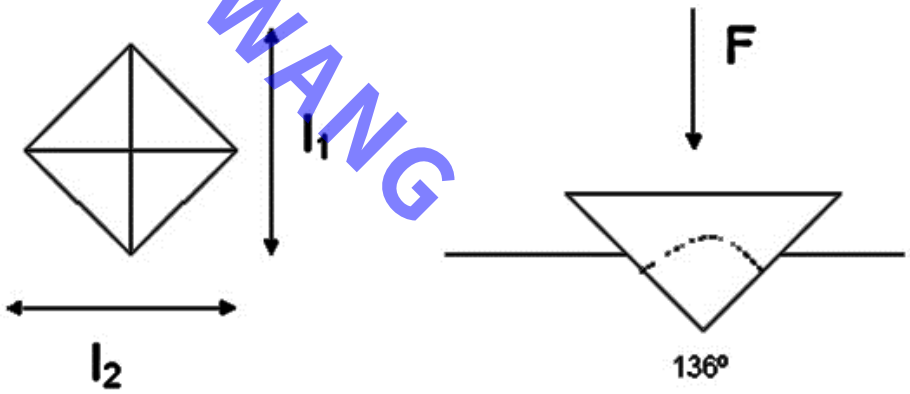
布氏硬度 (HB)： 用**硬质合金球 (W)** 压入材料表面，以单位**压痕面积**所承受的载荷来度量材料的硬度

- **洛氏硬度 HRC**

洛氏硬度 (HRC)： 以**金刚石圆锥**（锥角120度）在材料表面上的**压入深度**来度量材料的硬度

- **维氏硬度 HV**

维氏硬度 (HV)：
金刚石四棱锥（锥角136度）



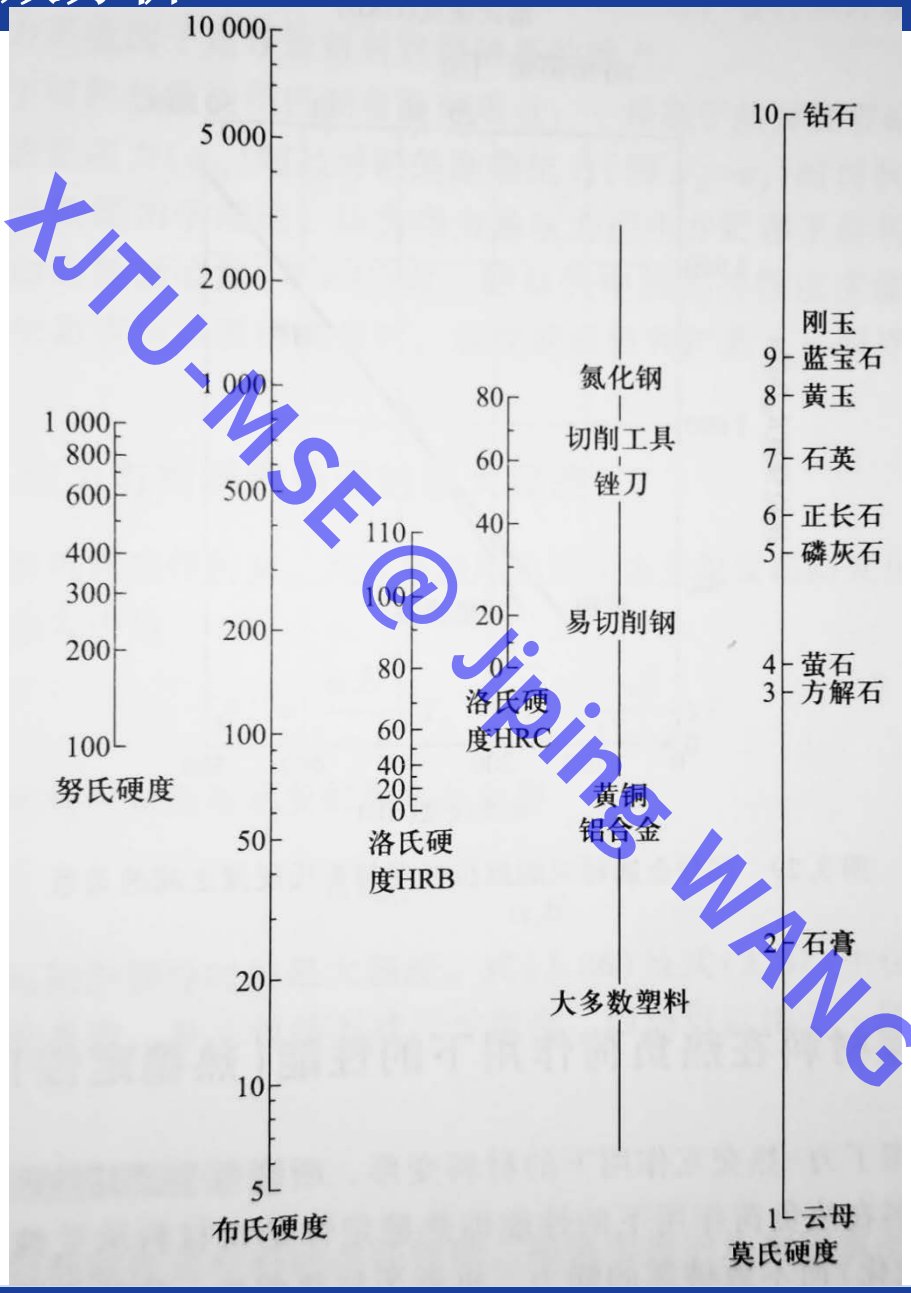
KJTU-MSE @ Jibing WANG

莫氏硬度 Mohs hardness

顺 序	材 料	顺 序	材 料
1	滑石	1	滑石
2	石膏	2	石膏
3	方解石	3	方解石
4	萤石	4	萤石
5	磷灰石	5	磷灰石
6	正长石	6	正长石
7	石英	7	SiO_2玻璃
8	黄玉	8	石英
9	刚玉	9	黄玉
10	金刚石	10	石榴石
		11	熔融氧化锆
		12	刚玉
		13	碳化硅
		14	碳化硼
		15	金刚石

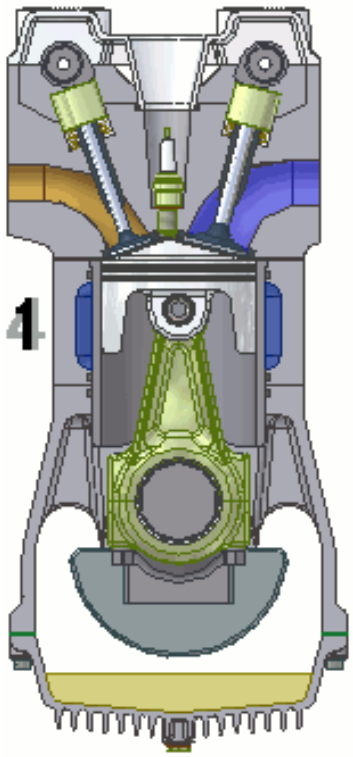
铅	**1.5**
指甲	2-3
铝	2-2.5
铜	2.5-3
阿富汗白玉、大理石	3
小刀	5-5.5
玻璃	5.5
钢锯条	6
和田玉	6-6.5
钢锉	6.5
翡翠	6.5-7
雨花石、玛瑙、石英石	7
钻石	10

KJTU-MSE@JipingWANG



XJTU-MSE@Jipin WANG

一、磨损的基本类型



- 粘着磨损
- 磨粒磨损
- 腐蚀磨损
- 麻点磨损 (接触疲劳)

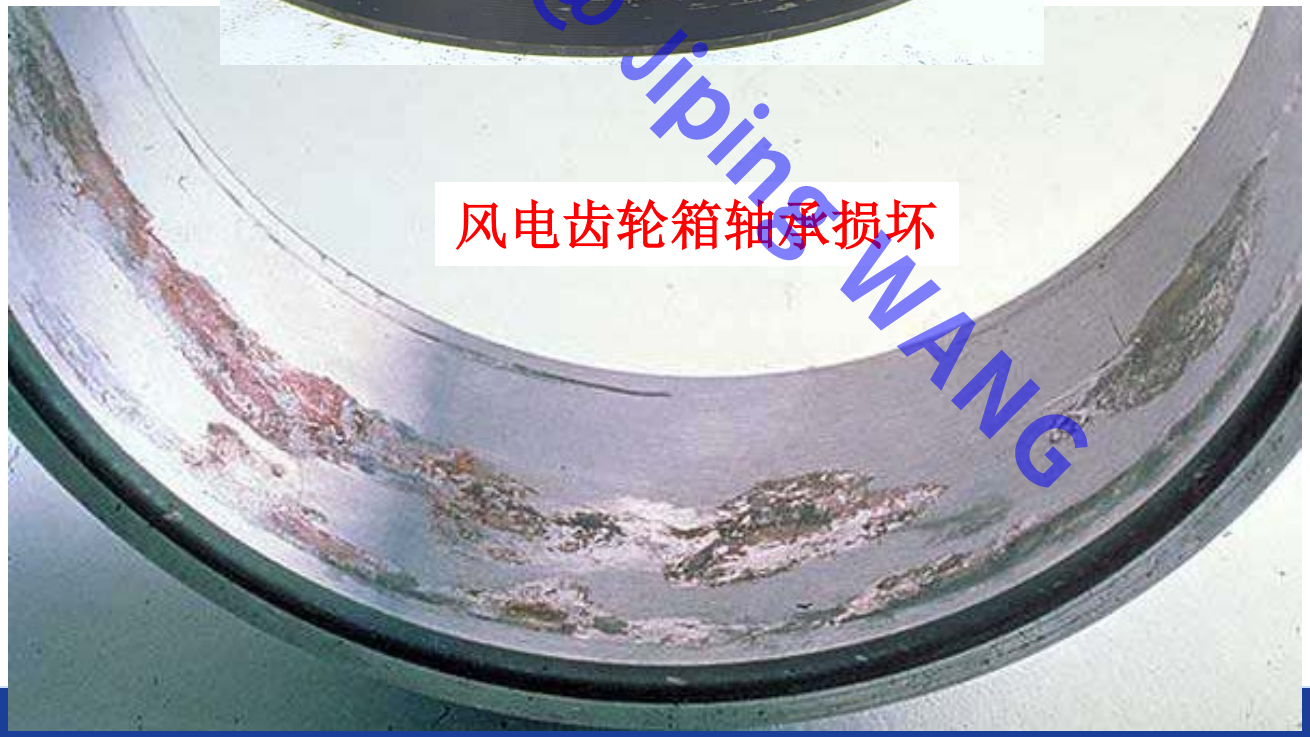
XJTU-MSE@Jiping WANG

1 粘着磨损 (咬合磨损)

组合式可倾瓦轴承（压缩机）

XJTU-MSE @ Jiping WANG

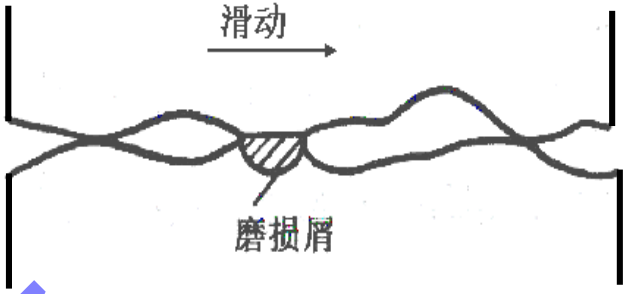
滑动摩擦，摩擦副的接触面发生金属粘着，粘着处被破坏，有金属屑粒被拉拽下来或者是金属表面被擦伤的一种磨损形式



风电齿轮箱轴承损坏

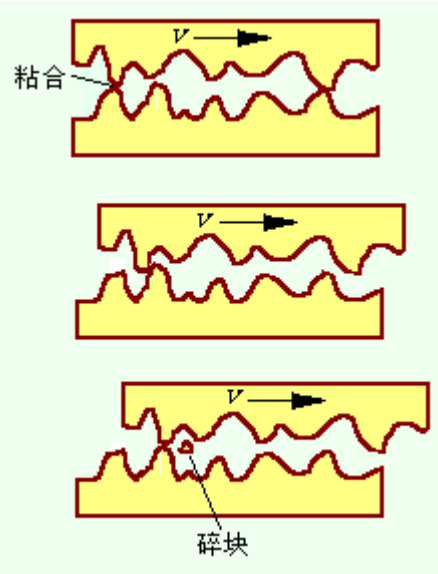
XJTU-MSE@JipingWANG

粘着磨损示意图



局部接触 → 接触面积小 应力大 → 润滑油膜、氧化膜被挤破

→ 局部粘着（冷焊） → 粘着处被撕掉 → 金属表面被划伤或金属屑粒脱落



特点

- 在滑动摩擦条件上产生
- 摩擦副的两种金属力学性能相差不大
- 磨损速度大，10~15μm/h，破坏严重

XJTU-MSE @ Jibing WANG

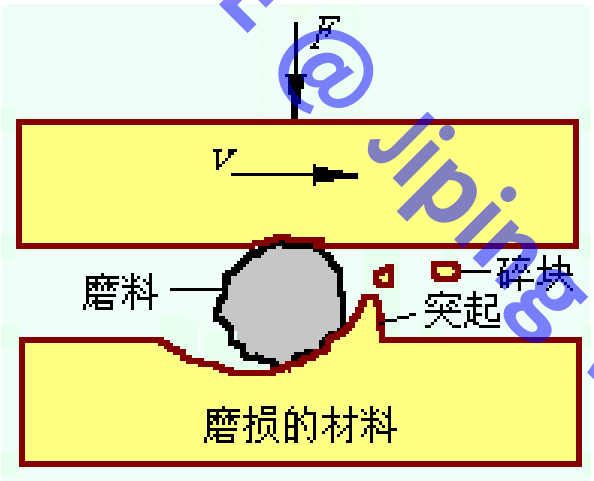
防止措施

- 合理选材，摩擦副配对材料选用**硬度差**较大的异类材料
- 提高表面硬度
- 合理设计，减小接触压应力
- 减小表面粗糙度

XJTU-MSE @ Jiling WANG

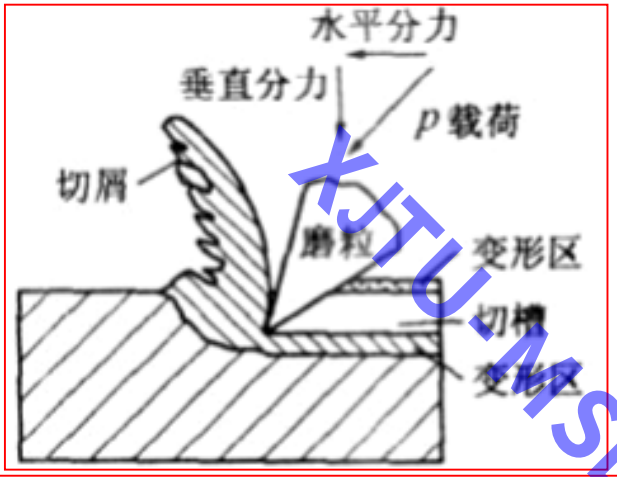
2 磨粒磨损 (磨料磨损)

在滑动摩擦时零件表面存在硬质磨粒，使磨面发生局部塑性变形，磨粒嵌入、切割金属表面，从而导致零件表面逐渐损耗的一种磨损

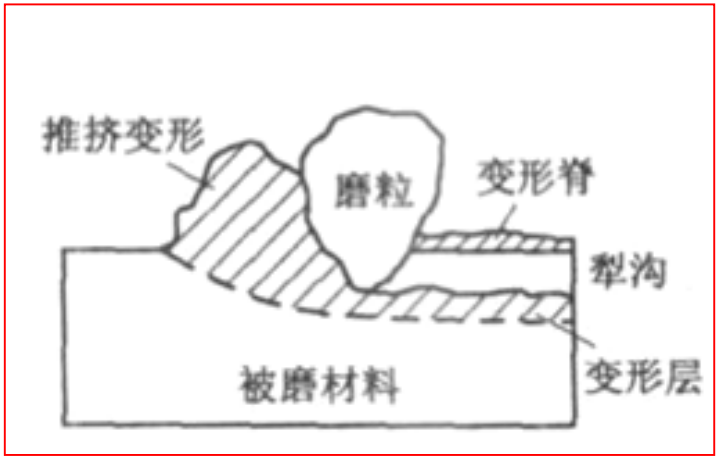


金属表面发生局部塑性变形 → 磨粒嵌入金属表面，切割金属表面 → 表面被划伤

XUTLMOE @ Jiping WANG



锐利棱角磨粒的犁削



棱角不锐利磨粒的切削

特点

- **普遍存在于机件中**
- **磨损速度较大，0.5～5 μm/h**

防止措施

- 提高表面硬度 (选材)
- 减少磨粒数量 (工作状况)

XJTU-MSE @ JianSWANG

3 腐蚀磨损

在**摩擦力**和**介质**联合作用下，金属表层的**腐蚀产物剥落**与金属磨面间的**机械磨损** **结合**的一种磨损

摩擦力 + 介质 → 机械磨损 + 腐蚀产物剥落

腐蚀磨损
- 氧化磨损
- 微动磨损
- 冲蚀磨损

XHU-MSE @ Jiping WANG

1) 氧化磨损

现象

摩擦进行中，零件表面氧化膜反复脱落→形成→脱落…的过程，造成金属表面物质不断损耗

原因

多数金属会与氧气发生氧化反应---形成氧化膜

$Fe \rightarrow Fe_2O_3$，Fe_3O_4　　$Al \rightarrow Al_2O_3$　　Cu→碱式碳酸铜

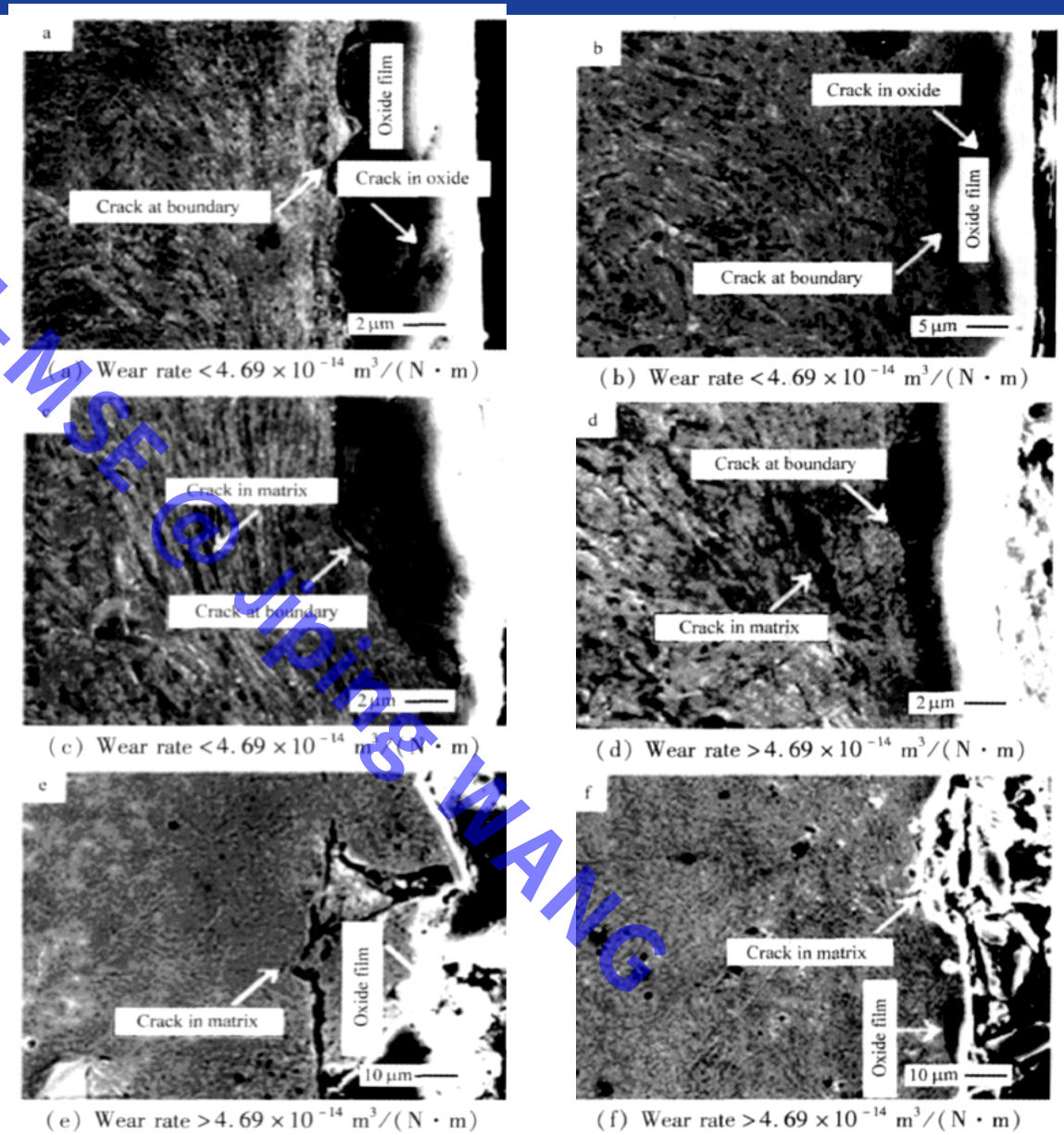
摩擦力→塑性变形→氧化膜破坏→暴露面再氧化

防止措施
- 提高零件表面硬度
- 使零件表面形成致密氧化膜

XJTU MSE @ Jing WANG

Cr-Mo-V铸钢

试验温度400℃
载荷为100 N
滑动速度为320 r/min



(a) Wear rate $<4.69\times10^{-14}$ $m^3/(N\cdot m)$

(b) Wear rate $<4.69\times10^{-14}$ $m^3/(N\cdot m)$

(c) Wear rate $<4.69\times10^{-14}$ $m^3/(N\cdot m)$

(d) Wear rate $>4.69\times10^{-14}$ $m^3/(N\cdot m)$

(e) Wear rate $>4.69\times10^{-14}$ $m^3/(N\cdot m)$

(f) Wear rate $>4.69\times10^{-14}$ $m^3/(N\cdot m)$

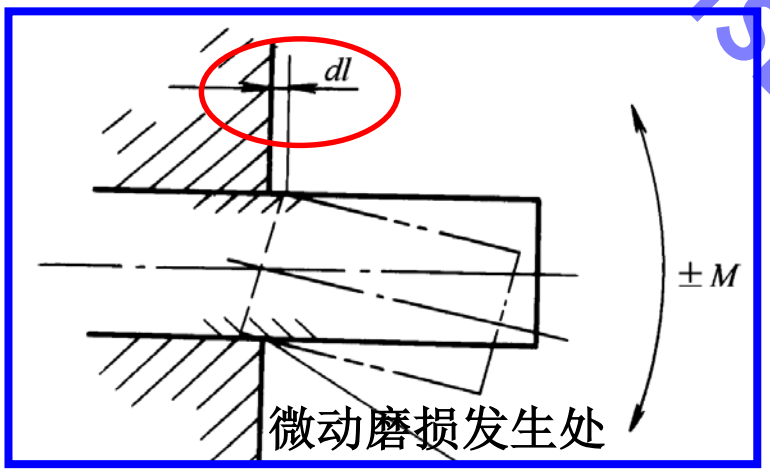
磨损表面氧化物膜的形貌和剥落方式

XJTU-MSE @ JiPing WANG

2) 微动磨损

现象：如嵌合连接的键、销等的磨损

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

微动磨损：在相互压紧的金属表面间由于小振幅振动而产生的一种复合型磨损

氧化磨损 + 磨粒磨损+ 粘着磨损

xjtuMSE @ Jiping WANG

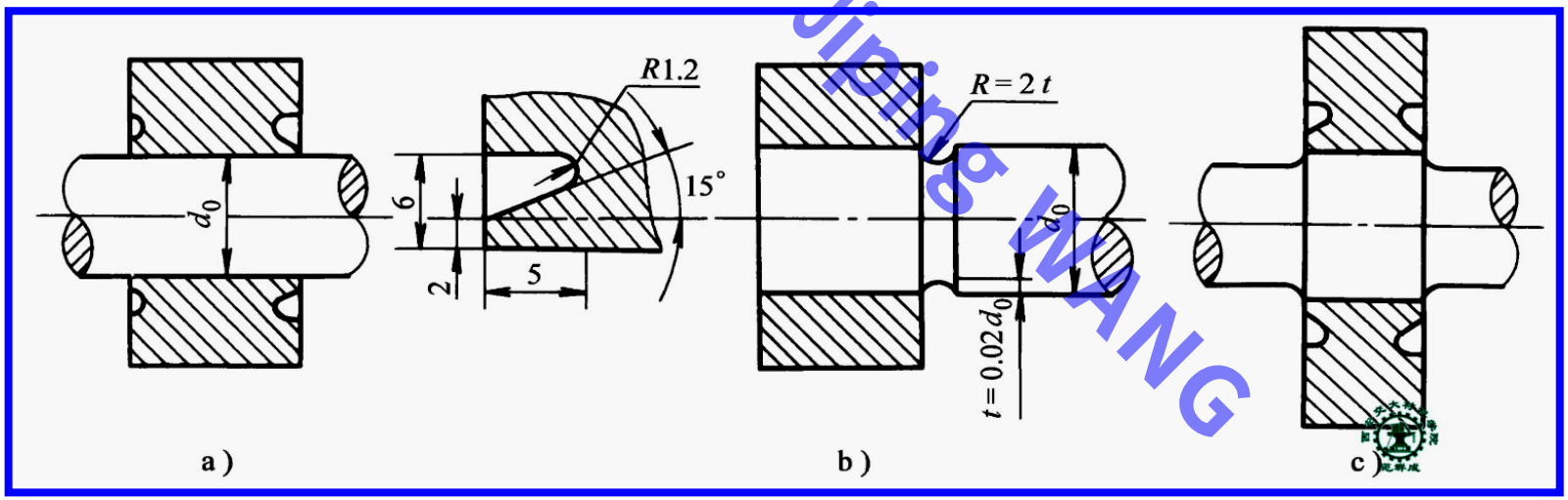
防止措施

a 提高嵌合处表面硬度

b 采用垫衬：软铜皮、橡胶、塑料，减少微小振动和滑动

c 改进设计减小应力集中

卸载槽 增大轴径

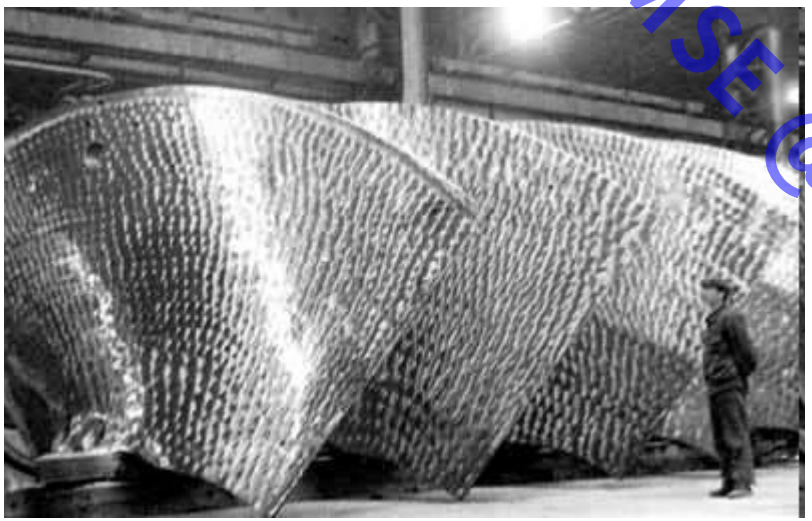


压配合轴设计示例

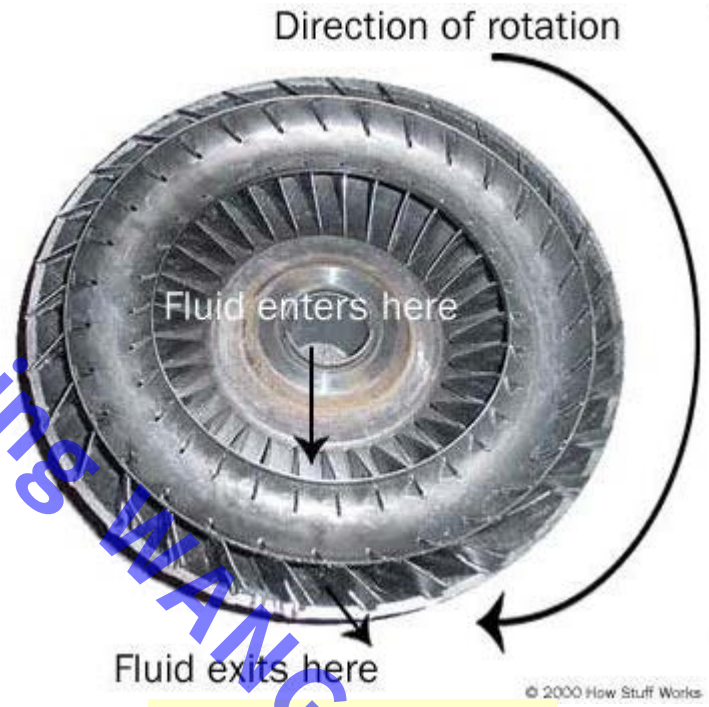
XSTU-MSE@Jiping WANG

3) 冲蚀磨损

指材料受到小而松散的流动粒子冲击时表面出现破坏的一类磨损现象



葛洲坝125兆瓦水轮机转轮叶片



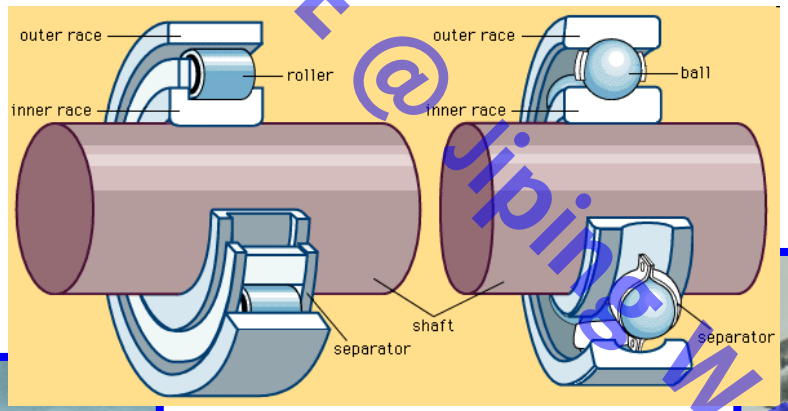
发动机叶片

坦克发动机叶片的磨损

xjtu MSE @ jiping WANG

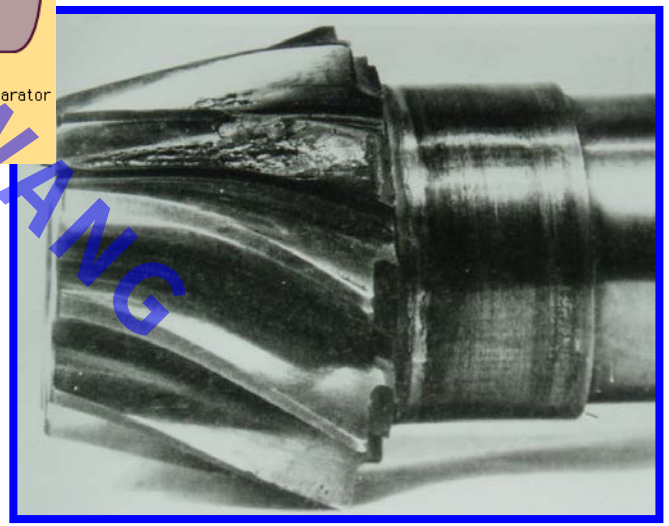
4 接触疲劳(麻点磨损)

1 现象 零件工作面作滚动或滚动加滑动摩擦时，在交变接触压应力的长期作用下引起的表面疲劳剥落破坏，使物质损耗的现象



滚动轴承

齿轮

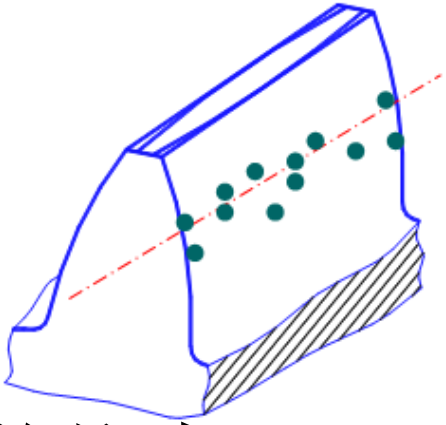


XTUME@JIPING WANG

2 特点

产生接触疲劳的零件表面上出现许多针状或痘状的凹坑，称麻点，故得名麻点磨损，疲劳磨损。

接触疲劳 = 裂纹形成和扩展的过程



3 防止措施

提高材料硬度；(以增加塑性变形的抗力，延缓裂纹形成和扩展)

提高材料纯度； (减少裂纹源)

减小表面粗糙度，以减小摩擦力

xiu-MSE@ Jiping WANG

XJTU-MSE @ Jiping WANG

XJTU-MSE @ Jiping WANG

第五节 零件的腐蚀失效 Corrosion

腐蚀失效

材料表面和周围介质发生化学反应或者电化学反应所引起的表面损伤现象

化学腐蚀: 腐蚀过程中不产生腐蚀电流，
如金属在高温氧化性气氛中发生氧化

电化学腐蚀：腐蚀过程中会产生腐蚀电流，
如金属在潮湿空气、或电解质溶液中的腐蚀

全世界每年因腐蚀消耗的金属>1亿吨，损失巨大

XJTU MSE @ Jiping WANG

一 高温氧化腐蚀

金属零件的氧化

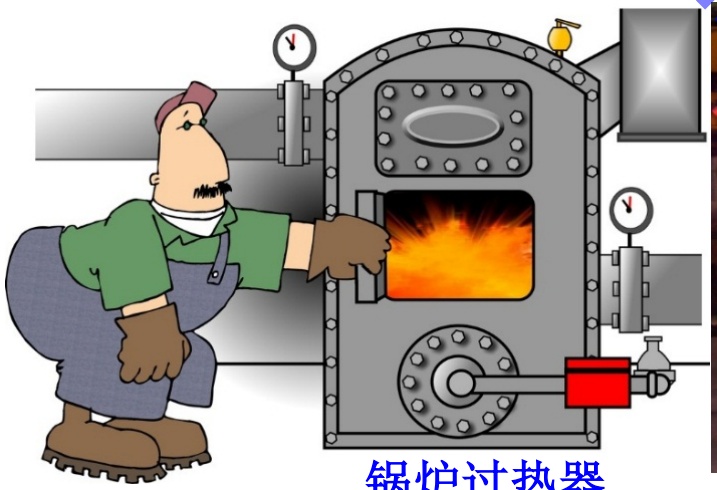
除Au、Pt 外，大多数金属在空气中都会发生氧化，形成氧化膜　普遍性？

高温会加速氧化过程（高温氧化快、低温氧化慢）

氧化层很脆(formation of nonmetallic scale or film)

有效(金属)截面积减小，承载能力降低 → 失效

高温含氧气氛下的零部件



锅炉过热器

工业加热炉部件

xiu-yse@ping WANG

在高温含氧气氛中工作的零件的抗高温氧化能力是一项重要指标

XJTUMSE@lipinWANG

氧化过程的三个步骤

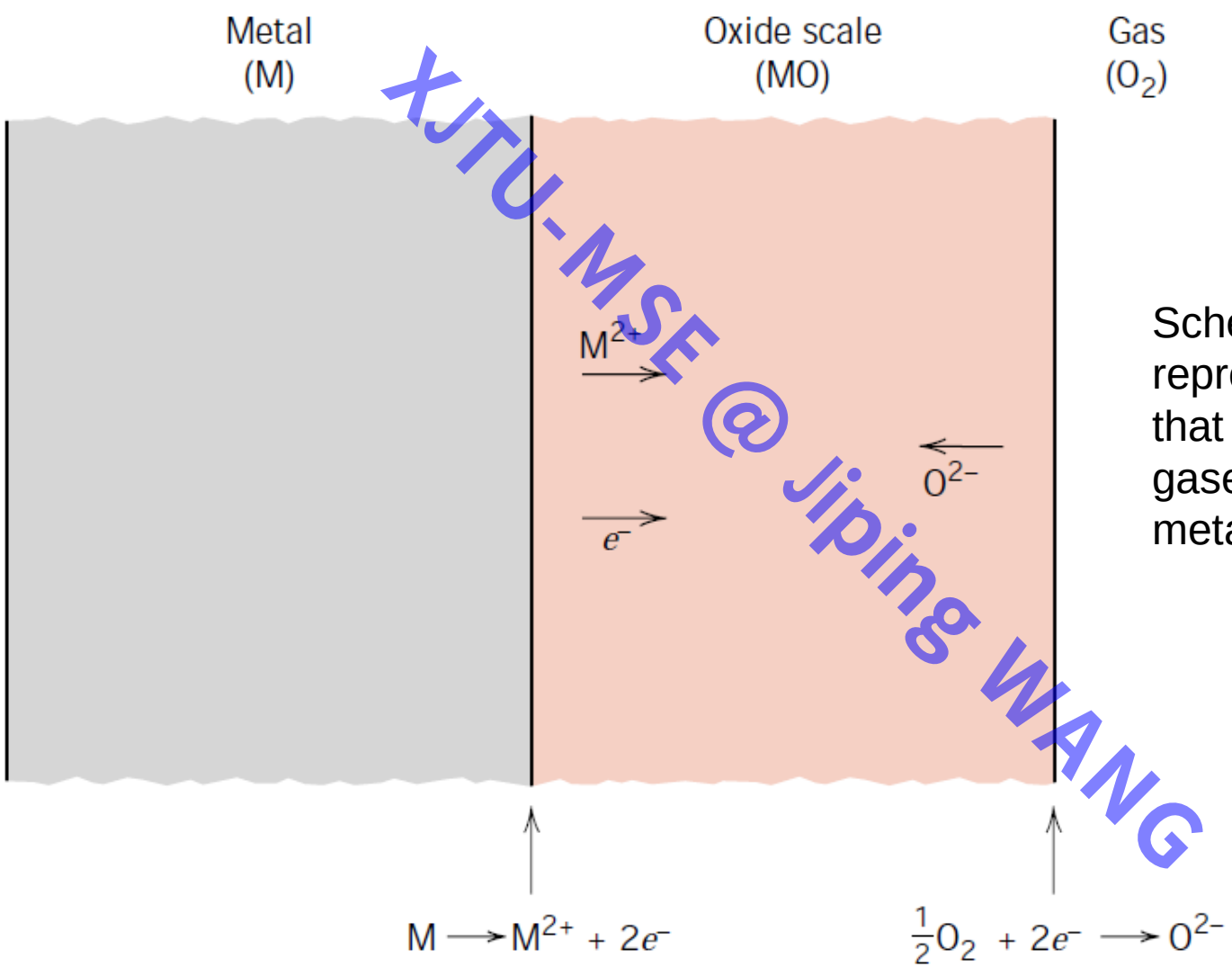
1 金属失去电子成为金属离子 $M \rightarrow M^{2+} + 2e$

2 氧原子吸收电子成为氧离子 $O + 2e \rightarrow O^{2-}$

3 金属离子+氧离子→金属氧化物 $M^{2+} + O^{2-} \rightarrow MO$

氧化膜形成后，将金属基体与氧隔开

氧化膜层阻止原子、离子及电子穿过氧化膜的能力，决定了材料的抗氧化性能



Schematic representation of processe that are involved in the gaseous oxidation at a metal surface.

XJTU-MSE @ Jiping WANG

Rate of oxidation (i.e., the rate of film thickness increase) and the tendency of the film to protect the metal from further oxidation are related to the relative volumes of the oxide and metal.

FeO 、Cu_2O等氧化膜的熔点低，疏松，阻力小

碳钢 温度>570℃ 表面形成疏松多孔的FeO 易氧化

Al_2O_3、Cr_2O_3、SiO_2等氧化膜的**熔点高，致密，阻力大**

材料抵抗高温氧化的能力称为抗氧化性

钢中加入Al、Cr、Si元素，与氧的亲和力比Fe大，优先形成致密氧化物

→阻止 (缓解) Fe的氧化

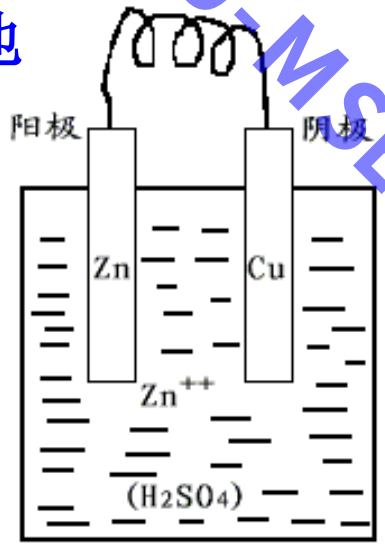
提高钢的抗氧化性

XJTU-MSE © Jiping WANG

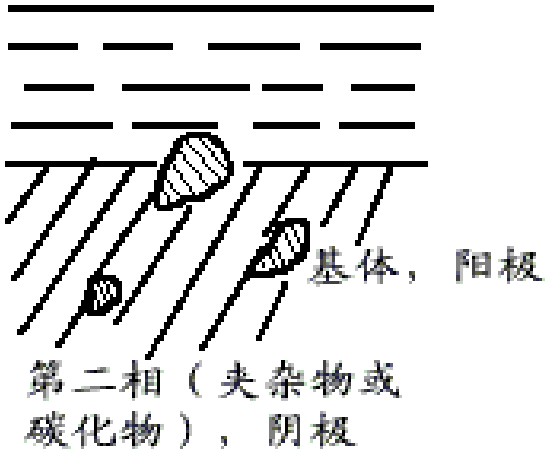
二 电化学腐蚀 (Galvanic Corrosion)

金属产生电化学腐蚀条件

(a) Zn-Cu原电池



(b) 实际金属



- 不同金属或同一金属的不同部分存在电极电位差
- 相互接触
- 有电介质溶液

XTU-MSE @ Jiping WANG

电化学腐蚀的过程

- 阳极：失去电子发生氧化反应 (被腐蚀)

  以3价金属为例 $M \rightarrow M^{3+} + 3e$

- 阴极：得到电子发生还原反应

  析氢反应 (电解质中H^+高时)

  $$2H^+ + 2e \rightarrow H_2\uparrow$$

  吸氧反应 (电解质中O_2高时)

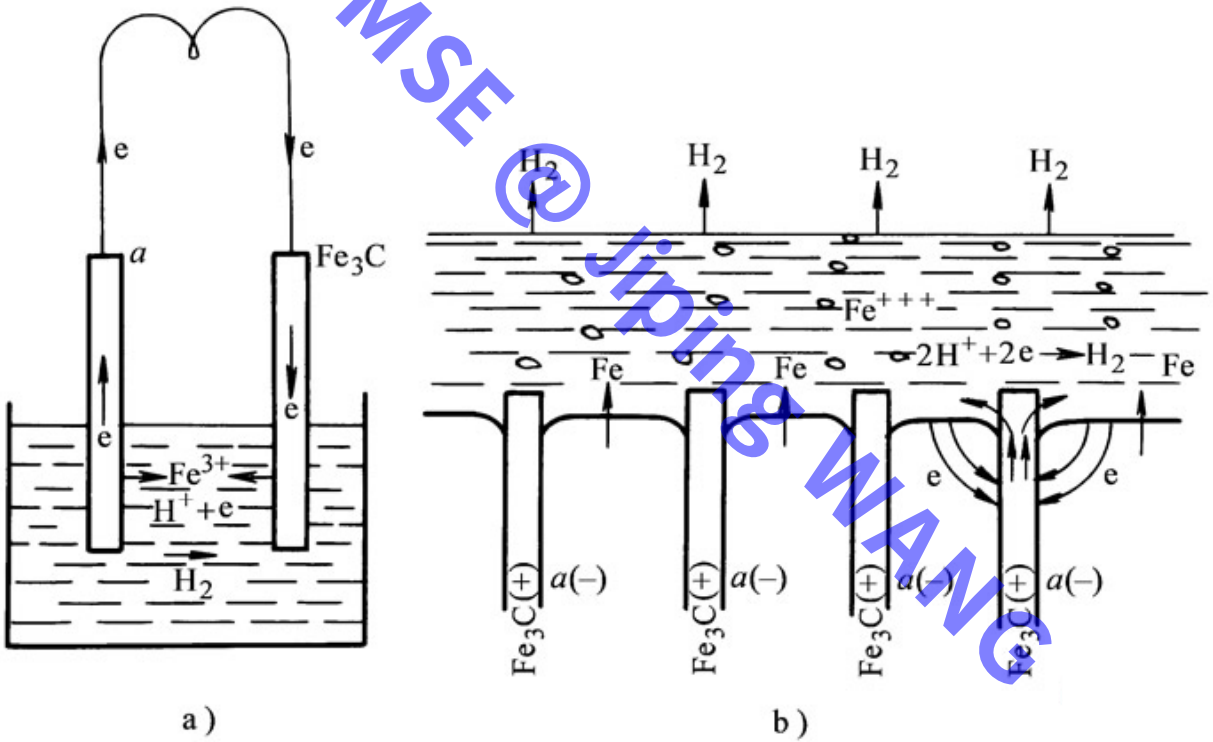
  $$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$$

XJTU MSE @ Jiping WANG

同一金属的不同部分存在电极电位差

珠光体= 铁素体 (Fe, α) + 渗碳体 (Fe_3C)

铁素体 -- 电极电位低 --阳极



珠光体的电化学腐蚀

USTB-MSE @ Jiping WANG

标准电极电势表Electromotive force

	Electrode Reaction	Standard Electrode Potential, V^0 (V)
	$Au^{3+} + 3e^- \longrightarrow Au$	+1.420
↑	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$	+1.229
	$Pt^{2+} + 2e^- \longrightarrow Pt$	~+1.2
	$Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag$	+0.800
Increasingly inert (cathodic)	$Fe^{3+} + e^- \longrightarrow Fe^{2+}$	+0.771
	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4(OH^-)$	+0.401
	$Cu^{2+} + 2e^- \longrightarrow Cu$	+0.340
	$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$	0.000
	$Pb^{2+} + 2e^- \longrightarrow Pb$	−0.126
	$Sn^{2+} + 2e^- \longrightarrow Sn$	−0.136
	$Ni^{2+} + 2e^- \longrightarrow Ni$	−0.250
	$Co^{2+} + 2e^- \longrightarrow Co$	−0.277
	$Cd^{2+} + 2e^- \longrightarrow Cd$	−0.403
	$Fe^{2+} + 2e^- \longrightarrow Fe$	−0.440
Increasingly active (anodic)	$Cr^{3+} + 3e^- \longrightarrow Cr$	−0.744
	$Zn^{2+} + 2e^- \longrightarrow Zn$	−0.763
	$Al^{3+} + 3e^- \longrightarrow Al$	−1.662
	$Mg^{2+} + 2e^- \longrightarrow Mg$	−2.363
	$Na^+ + e^- \longrightarrow Na$	−2.714
↓	$K^+ + e^- \longrightarrow K$	−2.924

XJTU-MSE@JipingWANG

材料抵抗各种介质腐蚀破坏的能力成为耐腐蚀性 corrosion resistance

腐蚀速率

Corrosion penetration rate (CPR)

$$\mathrm{CPR} = \frac{KW}{\rho A t}$$

W is the weight loss after exposure time *t*;

ρ and *A* represent the density and exposed specimen area, respectively, *K* is a constant

均匀腐蚀情况下

质量指标

物理量：g/m²·h (单位时间内在单位金属面积上由腐蚀引起的质量变化)

深度指标

物理量：毫米/年 mm/a (单位时间内的腐蚀尺寸)

XJTU-MSE@Jiping WANG

腐蚀形态

均匀腐蚀

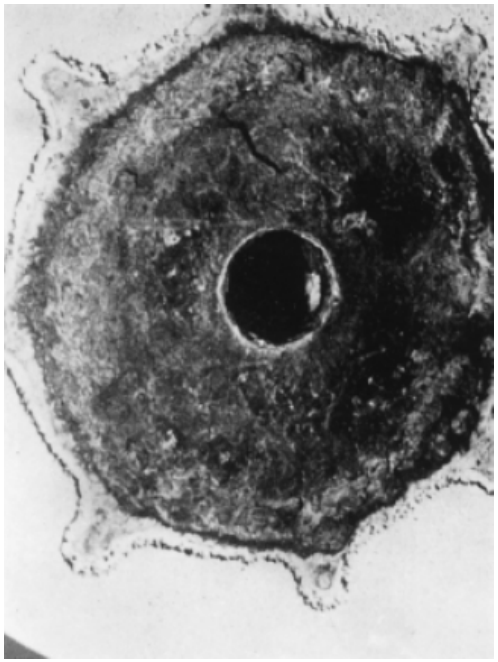
局部腐蚀

电偶腐蚀

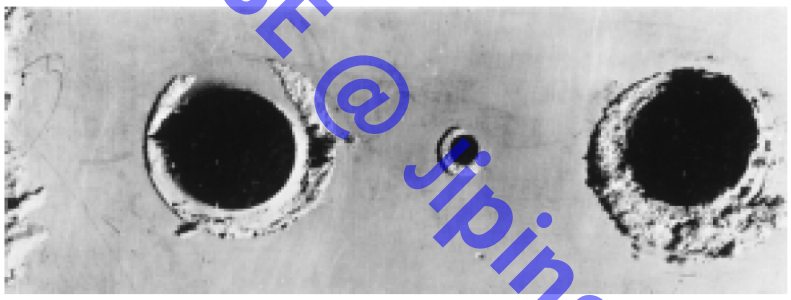
小孔腐蚀

缝隙腐蚀

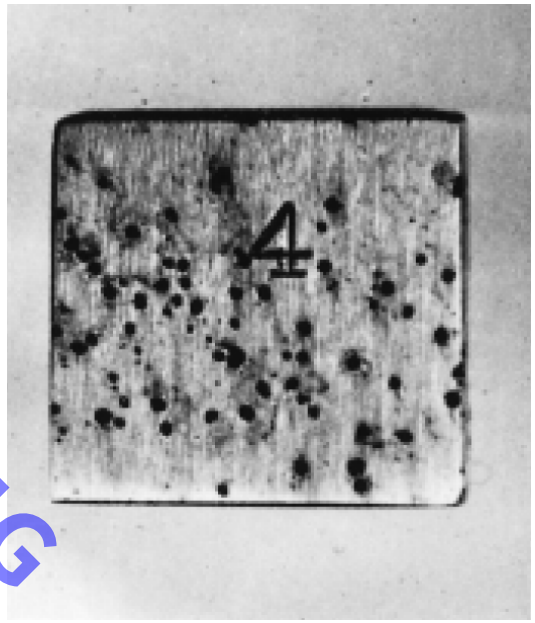
晶界腐蚀



Galvanic corrosion of a magnesium shell that was cast around a steel core



On this plate, which was immersed in seawater, crevice corrosion has occurred at the regions that were covered by washers



The pitting of a 304 stainless steel plate by an acid-chloride solution

XJTU-MSE@JipingWANG

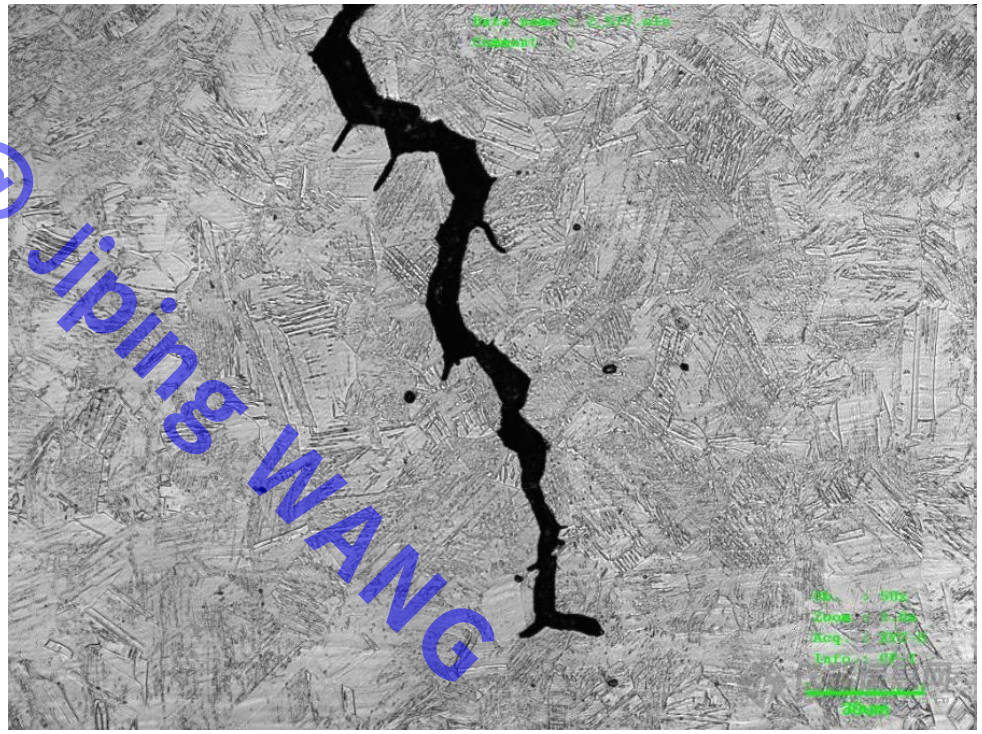
三 应力腐蚀

材料在拉应力和特定介质联合作用下产生的低应力脆性断裂

XJTU MSE @ Jiping WANG

特点

- 应力低
- 介质的腐蚀性小
- 特定介质



304不锈钢应力腐蚀

18-8奥氏体不锈钢-晶间SCC

XJTU-MSE @ Jiping WANG

大桥钢梁 在含H_2S的大气中应力腐蚀, 坍塌

飞机 高强度螺栓和起落架应力腐蚀断裂而 失事

输油管道 在H_2S的介质中应力腐蚀爆裂

锅炉 在含有少量NaOH的水中 应力腐蚀 碱脆 爆炸

四、改善零件耐蚀性的措施

- 对于化学腐蚀

  选择抗氧化材料如耐热钢、高温合金、陶瓷材料等

  零件表面涂层

- 对于电化学腐蚀

  选择耐腐蚀材料　　不锈钢、钛合金、耐蚀合金、陶瓷

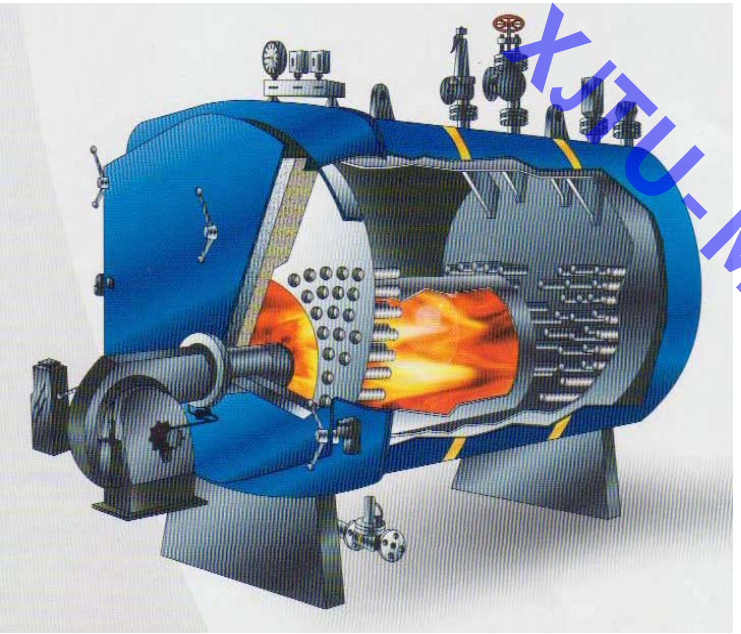
  表面涂层　　电镀、涂料、喷涂

  电化学保护　　牺牲阳极

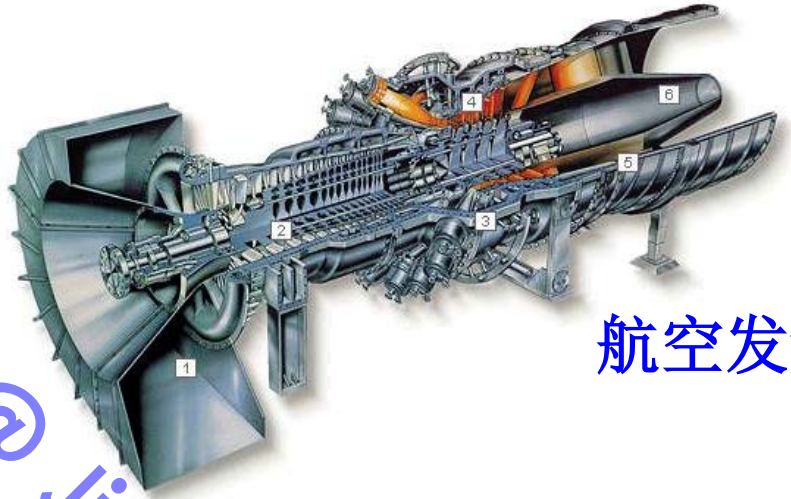
  加缓蚀剂

XUTUMSE @ JipingWANG

第六节 零件在高温下的蠕变变形和断裂失效



蒸汽锅炉



航空发动机

汽轮机

XJTU-MSE @ Jiping WANG

一 材料在高温下的力学行为

20钢

工作温度	应力	加载时间
室温	410MPa	抗拉强度
450°C	330MPa	短时
450°C	230MPa	300h 断裂
450°C	120MPa	1000h 断裂

温度　　时间　　应力　　应变

- 材料的强度随温度的升高而降低
- 高温下材料的强度随时间的延长而降低
- 高温下材料的变形量随时间的延长而增加

XJTU-MSE@Jing WANG

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

蠕变：材料在长时间、恒应力作用下缓慢产生塑性变形的现象

蠕变断裂：由蠕变变形引起的断裂

XJTU-MSE @ Jiping WANG

目前有关蠕变的毕业论文

[1] 马冰. CFETR第一壁结构材料辐照蠕变寿命分析[D]. 中国科学技术大学, 2017.

[2] 张鑫. CLAM钢TIG焊焊接接头的高温蠕变性能研究[D]. 江苏大学, 2016.

[3] 韩宁宁. 石油管道和核电金属材料的蠕变行为研究[D]. 上海交通大学, 2015.

[4] 张声远. C276片状试样蠕变试验分析[D]. 华北电力大学, 2013.

[5] 万远富. 辐照肿胀与蠕变对弥散型核燃料力学行为影响的研究[D]. 复旦大学, 2012.

[6] 李婷. 超临界水堆候选包壳材料C276合金的高温力学性能和辐照性能研究[D]. 华北电力大学, 2012.

[7] 王良芬. 二氧化铀高温蠕变性能的研究[D]. 重庆大学, 2008.

KJTU-MSE@JingWANG

二 蠕变曲线

1) 蠕变起始温度

材料	产生蠕变起始温度
高分子、铅、锡	室温
碳钢	300~350℃
合金钢	350~400℃
陶瓷材料Si_3N_4	1100℃以上

金属材料　0.3~0.4T_m

陶瓷材料　0.4~0.5T_m

YJTU-MSE @ Jiping WANG

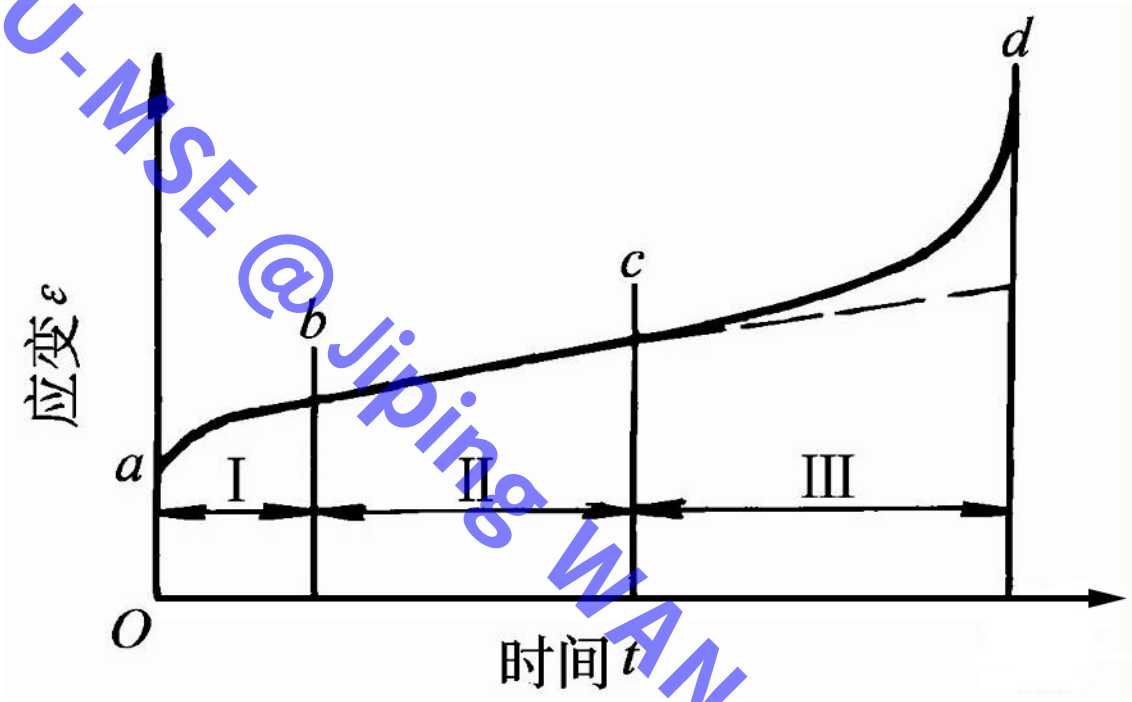
2) 典型的蠕变曲线

分三阶段：

减速蠕变

恒速蠕变

加速蠕变



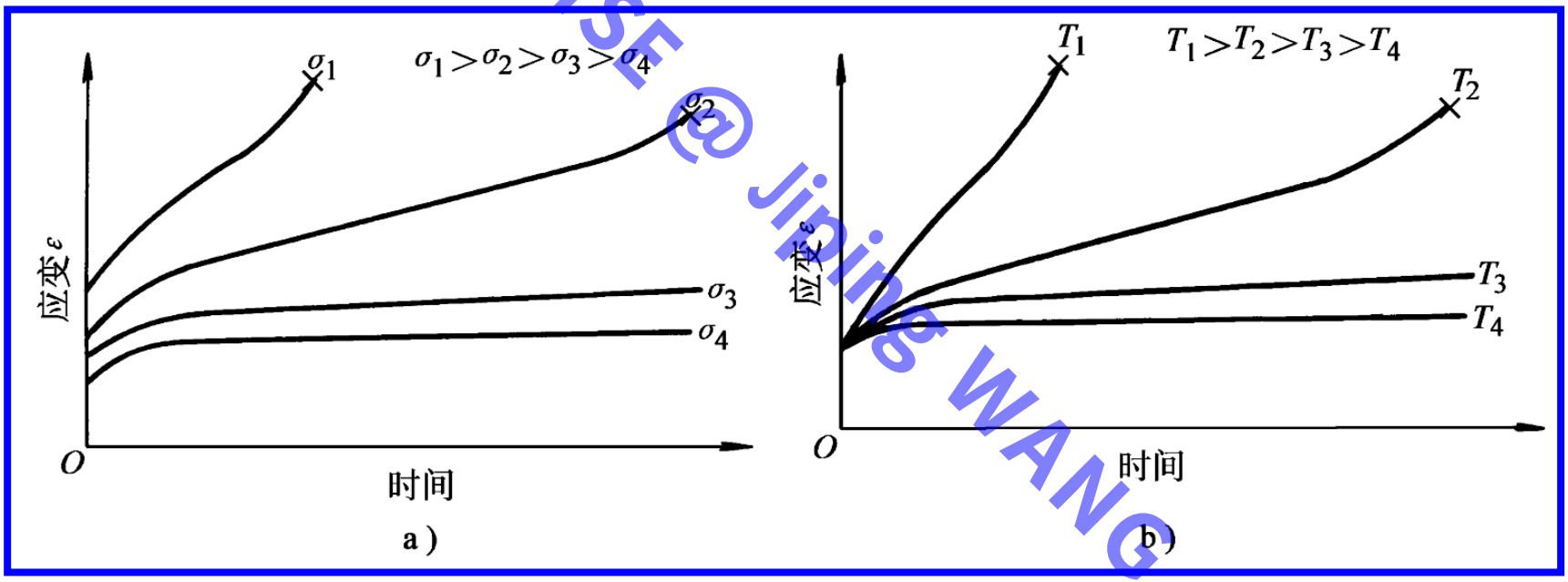
典型的蠕变曲线

XJTU-MSE @ Jiping WANG

3) 应力和温度对蠕变曲线的影响

应力越大　应变越大，断裂越快

温度越高　应变越大　断裂越快



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

XJTU MSE @ Jining WANG

三　蠕变抗力指标

1 蠕变极限

高温长期载荷作用下，材料对塑性变形的抵抗能力（抗力指标）

$\sigma_{\dot{\varepsilon}}^{T}$　给定温度 T (°C)，使试样产生规定稳态蠕变速率 $\dot{\varepsilon}$ (%/h) 的应力值 (MPa)

$\sigma_{1\times10^{-5}}^{600} = 60\text{MPa}$　600°C，稳态蠕变速率 $1\text{x}10^{-5}$ %/h 蠕变极限：60MPa

$\sigma_{\delta/t}^{T}$　给定温度 T (°C) 下，规定时间内 t (h)使试样产生规定蠕变总变形量 δ (%) 的应力值 (MPa)

$\sigma_{1/10^{5}}^{500} = 100\text{MPa}$　500°C，10^5h 后，总变形量为 1% 蠕变极限：100MPa

XJTU-MSE@JPing WANG

2 持久强度

高温长期载荷作用下，材料对抵抗断裂的能力

σ_t^T 给定温度下 T (°C)，规定时间内 t (h)使试样产生蠕变断裂的应力值 (MPa)

$$\sigma_{1\times10^3}^{700} = 300\text{MPa}$$

700°C，1000h
持久强度 300MPa

XJTU-MSE@ Jiping WANG

四　高温蠕变的防止措施

1) 正确选材:

高温蠕变抗力　陶瓷 > 高温合金 > 耐热钢

C/C复合材料
火箭发动机部件

SiC材料
航天飞机隔热瓦

高温合金
飞机发动机叶片

2) 表面处理:

表面镀硬铬

热喷涂氧化铝或陶瓷

抗氧化、耐腐蚀、耐磨

XJTU-MSE @ Jiping WANG