



第四章 材料的磨损失效形式与机理

主 讲 人： 杨振国

单 位： 材料科学系

办 公 室： 先进材料楼 407室

联系方式： zgyang@fudan.edu.cn
65642523 (O)

第四章 材料的磨损失效形式与机理



4.1 磨损概述

4.2 磨粒磨损

4.3 粘着磨损

4.4 冲蚀磨损

4.5 微动磨损

4.6 疲劳磨损

4.7 腐蚀磨损

4.8 气蚀

4.1 磨损概述

1. 磨损的定义

摩擦过程中零部件表面发生尺寸变化和物质损耗的现象叫磨损（wear）。

磨损是材料四大失效形式之一。它所造成的经济损失巨大。据统计，在失效的零部件中，约有80%是由于各种形式的磨损和腐蚀所引起的。

对一个工业化国家而言，每年因摩擦磨损造成的经济损失约占GDP的1~2%。

2. 磨损的多学科性质

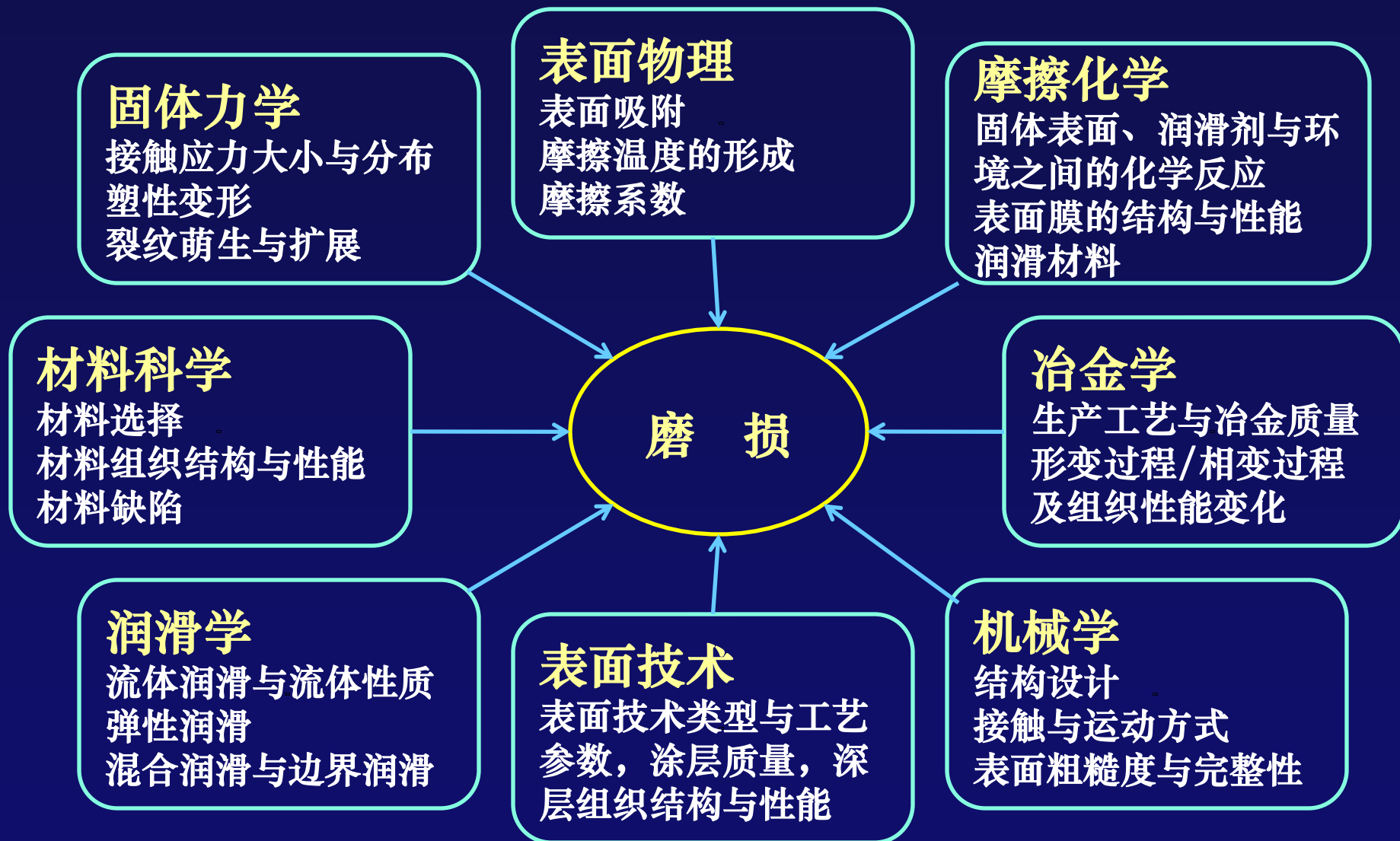


图4-1 磨损的学科交叉性

3. 磨损行为

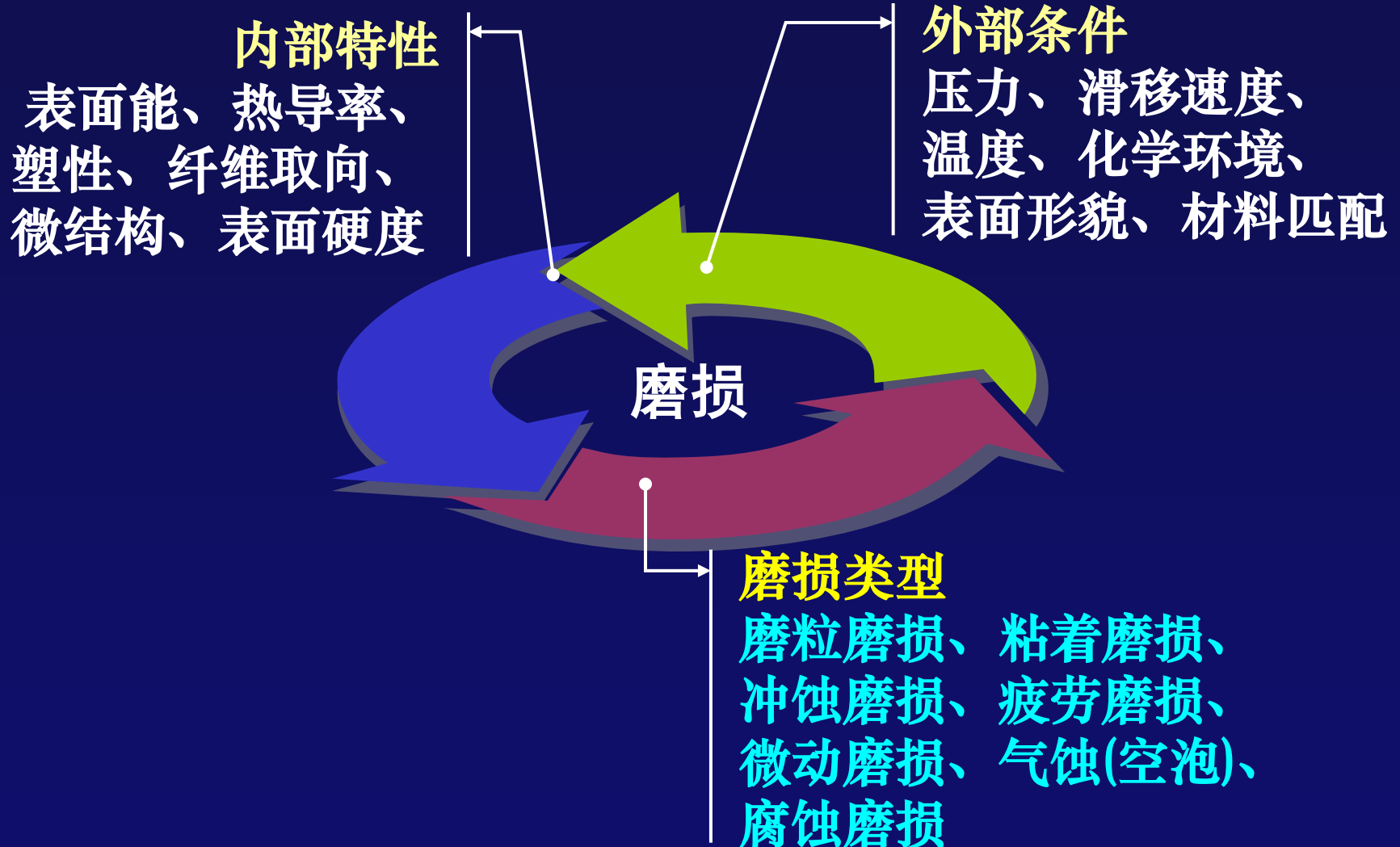


图4-2 磨损的因果关系

第四章 材料的磨损失效形式与机理



4.2 磨粒磨损 (abrasive wear)

● 定义

硬颗粒或硬突起使摩擦表面破损而分离出磨屑或形成划伤的磨损，称为磨粒磨损，又称磨料磨损。

磨粒磨损很少是由一种单一的磨损机制引起的，经常是多种磨损机制的综合作用，并且随着磨损条件的变化，从一种磨损机制转化成另一种磨损机制。

● 预防措施

- (1) 提高表面硬度（从选材方面）；
- (2) 减少磨粒数量（从工况方面）。

● 磨粒磨损的主要机制

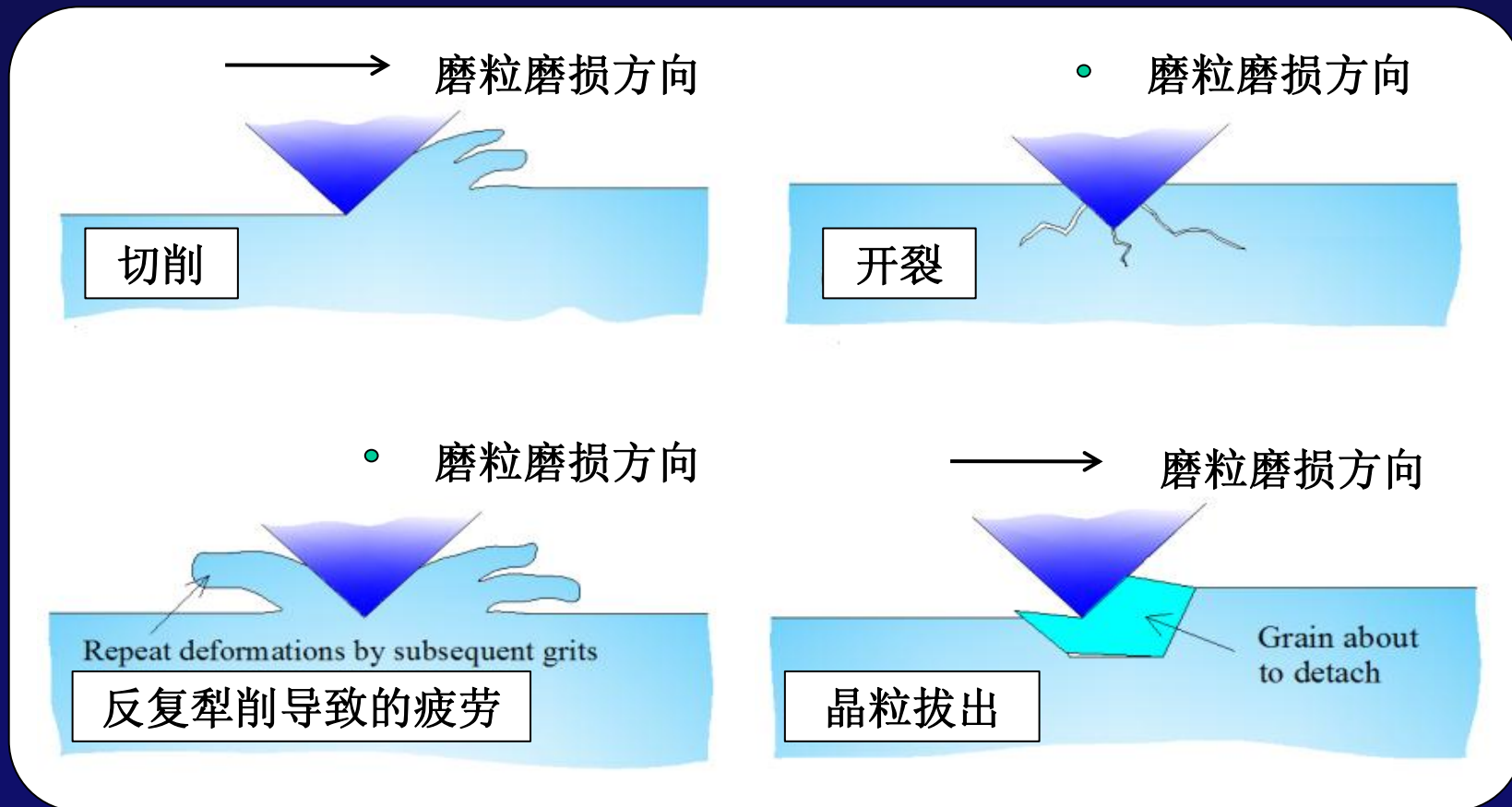
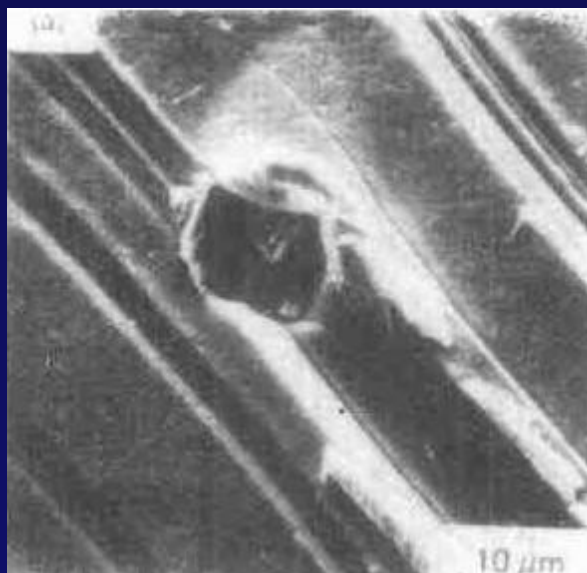


图4-3 磨粒磨损的四种机制

第四章 材料的磨损失效形式与机理



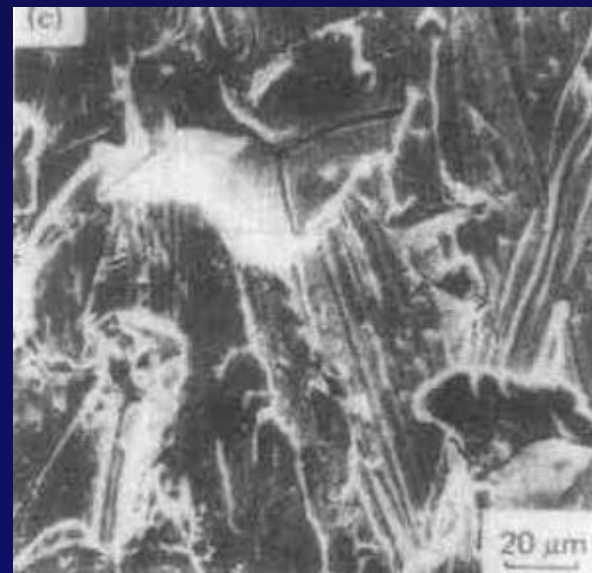
● 磨粒磨损的主要形貌



(a) 微观犁沟



(b) 微观切削



(c) 微观断裂(剥落)

图4-4 三种不同的磨粒磨损形貌

第四章 材料的磨损失效形式与机理



● 磨粒磨损的宏观形貌



(a) 磨痕条



(b) 切削犁沟

图4-5 典型磨粒磨损的失效形貌

第四章 材料的磨损失效形式与机理



4.3 粘着磨损 (adhesive wear)

● 定义：两个相对运动的接触表面，由于分子间的吸引力作用，产生固相的局部“冷焊”或粘附连接，使材料从一表面转移至另一表面而引起的磨损，又称粘附磨损。

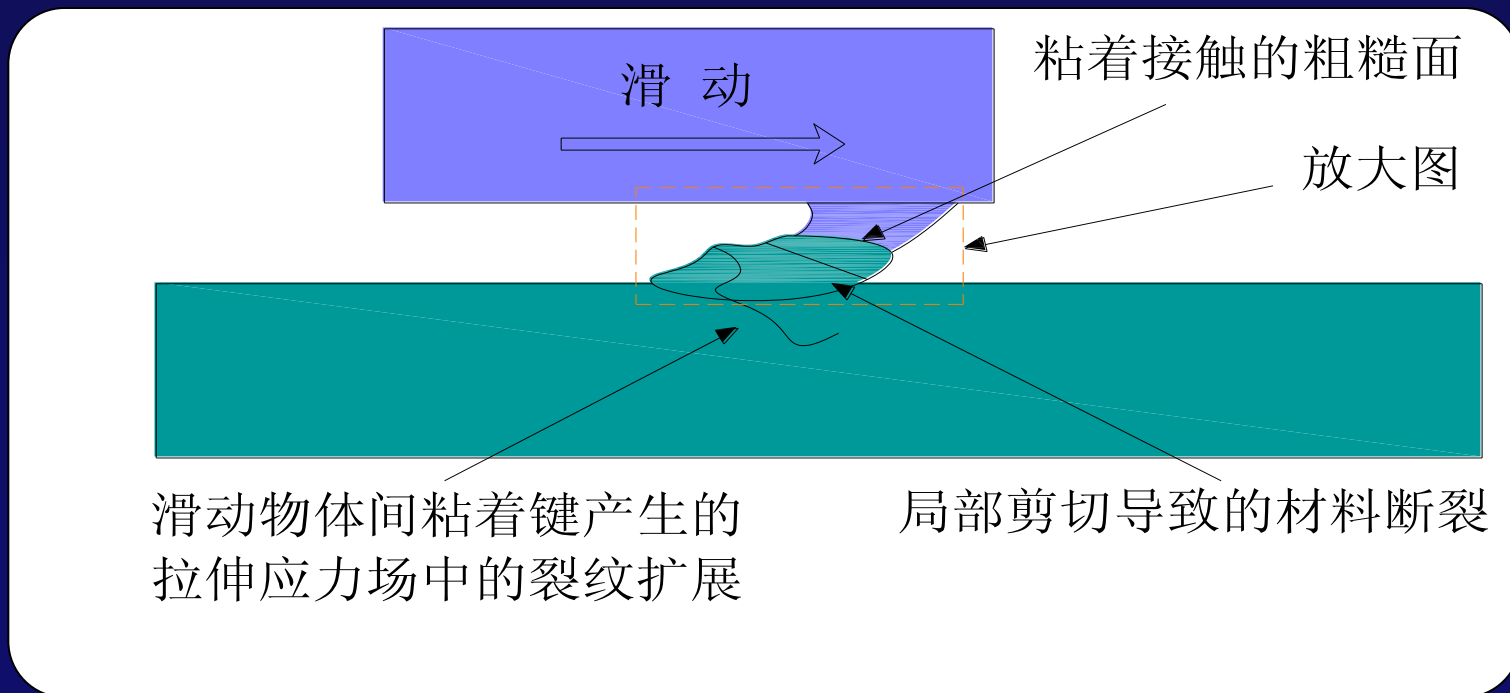


图4-6 粘着磨损的机理

● 粘着磨损的特点

- 磨损速度大
- 破坏严重

● 防止措施

- 合理选材，摩擦付配对材料选用硬度差较大的异类材料
- 提高表面硬度
- 减小接触压应力
- 减小表面粗糙度

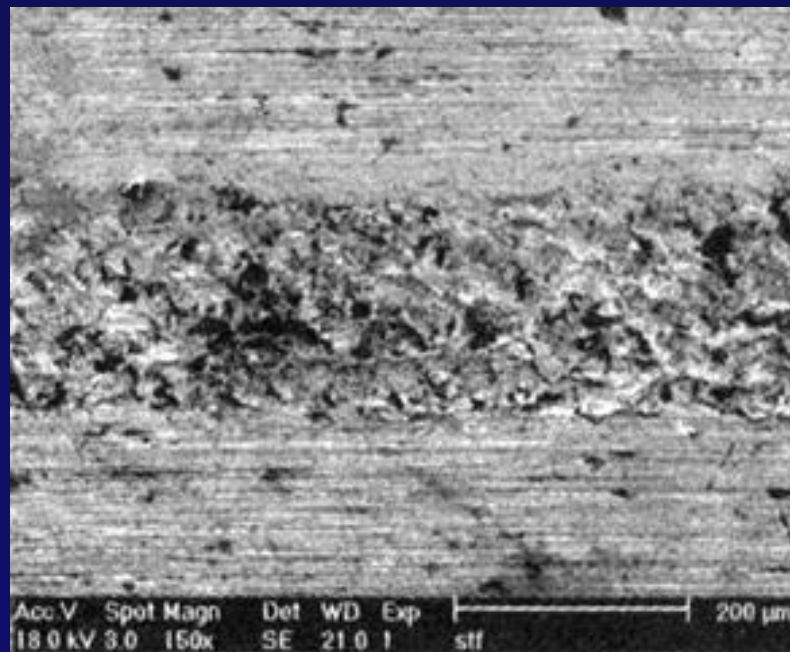


图4-7 粘着磨损失效形貌

第四章 材料的磨损失效形式与机理

4.4 冲蚀磨损 (erosive wear)

● 定义: 含颗粒的流体(液体或气体)冲刷固体表面时, 表面局部材料不断损失而发生的破坏。

- 韧性材料的微切削
- 脆性材料的微脆断
- 弹性材料的疲劳和刺穿

● 冲蚀磨损带来的失效占工业生产中经常出现的磨损破坏总数的8%。

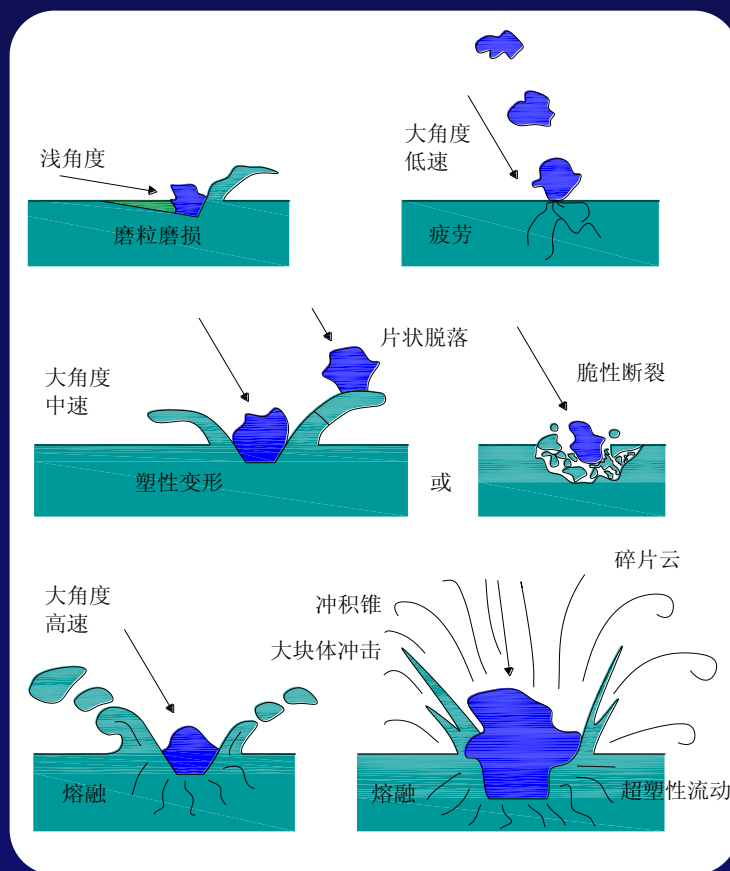


图4-8 冲蚀磨损机理

1.3 冲蚀与磨损交互作用下的材料损耗率

● 冲蚀磨损 (Erosive corrosion and wear)

在含颗粒的腐蚀性液体冲刷下，其质量损耗率为：

$$W_e = kV^n + W_w + W_c + W_w \times W_c$$

其中， W_e ：冲蚀工况下管道单位表面的总损耗率 (mg/g)；

V ：颗粒流速 (m/s)； n ：材料常数，金属在2.0— 2.4之间；

k ：是与颗粒大小,形状,冲刷角以及介质,温度,压力等有关的系数。

★ kV^n 损耗率远高于纯磨损或纯腐蚀工况。

因此，在冲蚀磨损复杂工况下，普通单质材料是难以抵御的，开发多元复合材料显得很有必要，高耐磨耐蚀三元复合材料管道基于这样的认知而开发的一类新型复合材料。

第四章 材料的磨损失效形式与机理



(a) 蒸汽管冲蚀形态



(b) 月牙形冲蚀形态

图 4-9 典型韧性材料的冲蚀磨损失效形貌

第四章 材料的磨损失效形式与机理



4.5 微动磨损 (fretting wear)

● 定义：两个接触体表面之间没有宏观相对运动，但在载荷作用下产生小振幅的相对振动（小于100 μm ）在这种情况下接触表面产生的磨损称为微动磨损。

- OA: 由于金属转移和初始磨损造成曲线迅速上升；
- AB: 从剪切到磨粒参与磨损，使曲线第二次向上弯曲；
- BC: 磨粒作用下降，从而减缓材料损失；
- CD: 最后达到稳定磨损率。

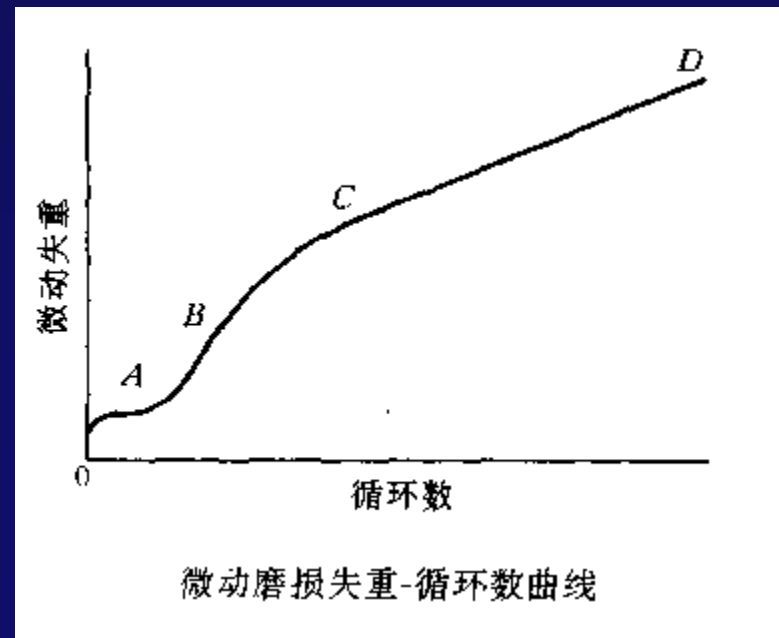
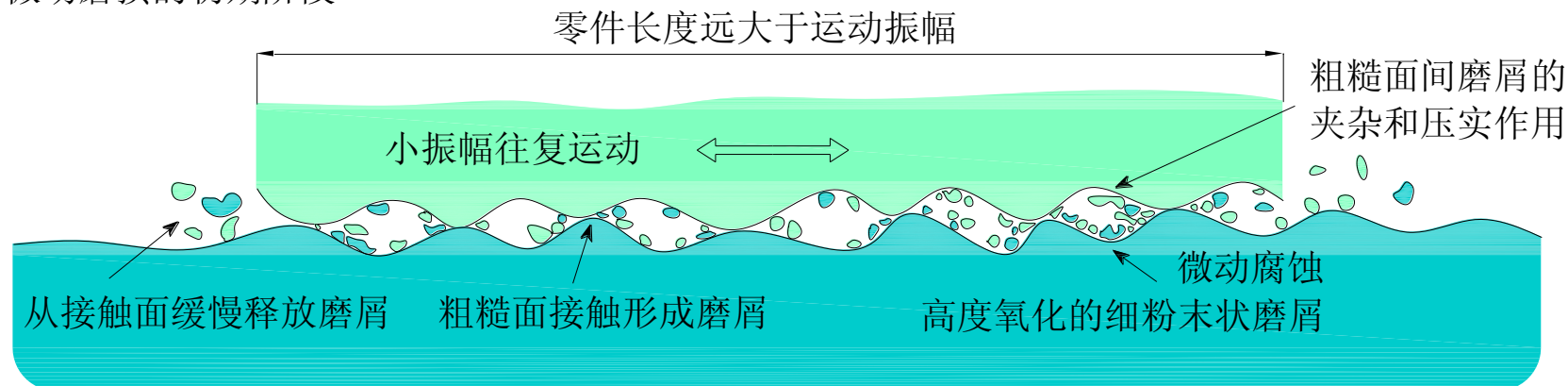


图4-10 微动磨损损伤过程

第四章 材料的磨损失效形式与机理



微动磨损的初期阶段



微动磨损的后期

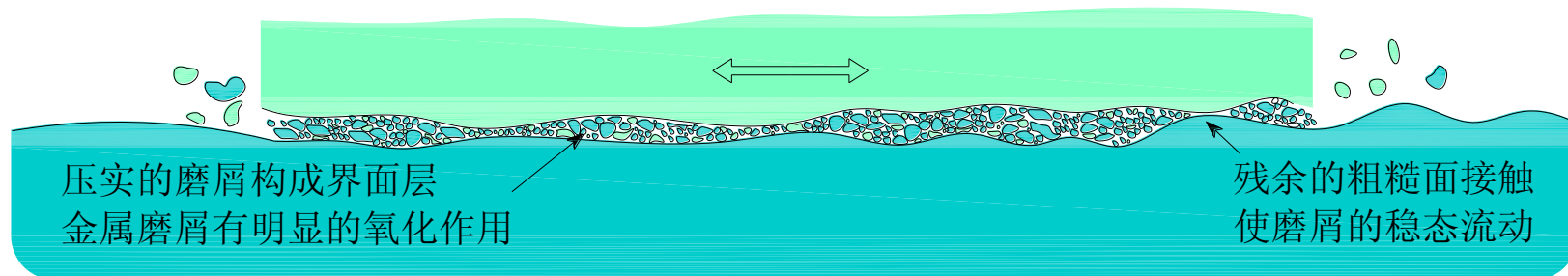


图 4-11 微动磨损不同阶段的损伤过程

第四章 材料的磨损失效形式与机理



(a) 螺栓的微动磨损

(b) 固定链条的微动磨损

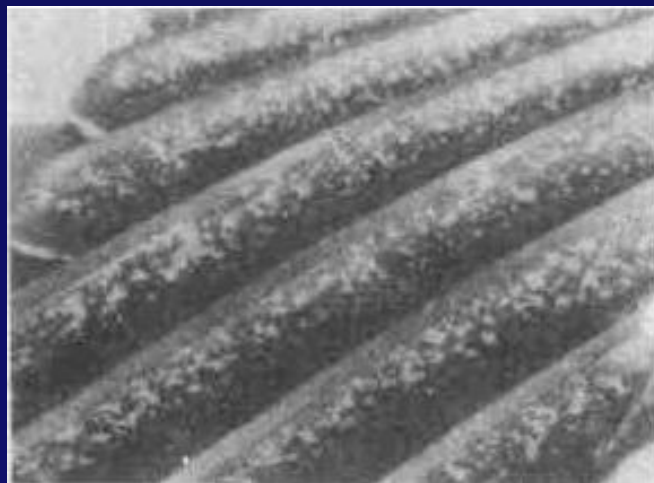
图 4-12 微动磨损的失效形貌

第四章 材料的磨损失效形式与机理

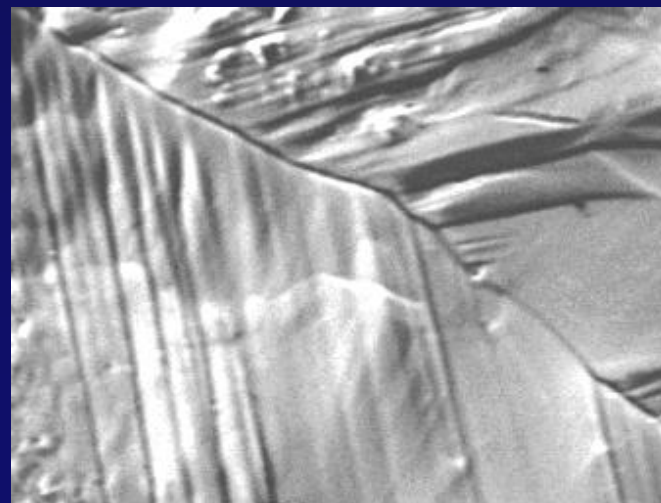


4.6 疲劳磨损 (fatigue wear)

- 定义：当两个接触体相对滚动或滑动时，在接触区形成的循环应力超过材料的疲劳强度时，表面层将引发裂纹，裂纹再逐步扩展，最后使裂纹以上的材料断裂剥落，这种磨损过程叫疲劳磨损。



(a) 齿轮节圆上的点蚀



(b) 微动疲劳

图 4-13 疲劳磨损的失效形貌

第四章 材料的磨损失效形式与机理

●过程：类似于疲劳断裂，是裂纹萌生和扩展过程。

● 防止措施

- 提高材料硬度
- 提高材料纯度
- 提高零件心部和表面强度
- 减小表面粗糙度

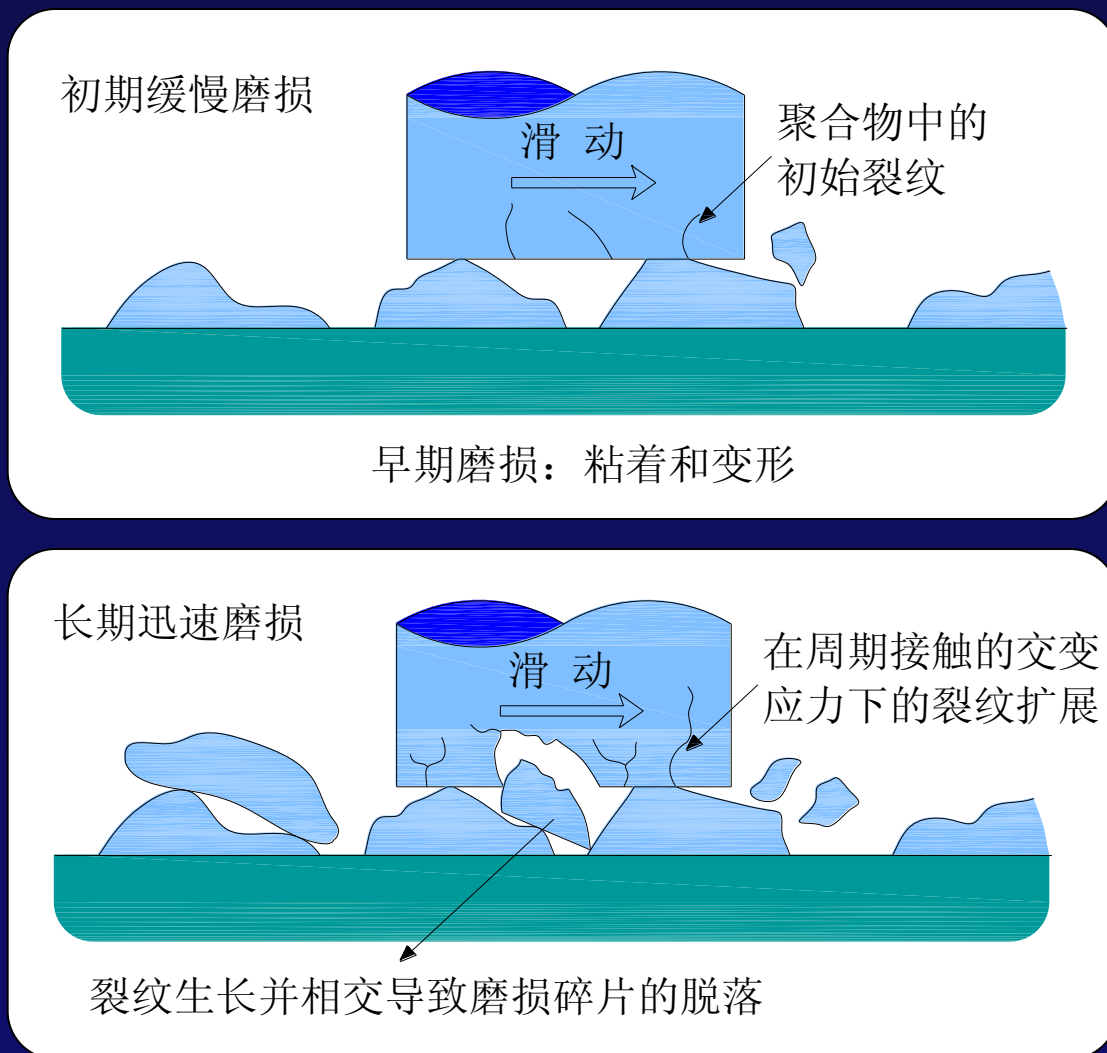


图 4-14 疲劳磨损的损伤过程

第四章 材料的磨损失效形式与机理

4.7 腐蚀磨损 (corrosive wear)

- 当含颗粒的腐蚀性流体沿固体表面流动时，其表面不仅受到以电化学腐蚀为主的腐蚀作用，同时还受到颗粒的磨擦作用，称为腐蚀磨损。

例如，沿海地区以海水为介质的各类管道经受了这种类型的腐蚀磨损。

- 防止措施

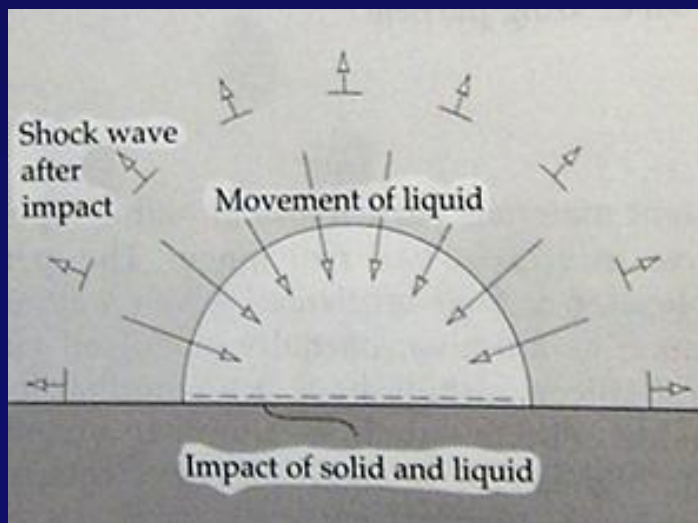
- 提高材料的耐磨耐蚀性 (三元复合管)
- 流体介质的中和处理
- 适当减低流体的流速

第四章 材料的磨损失效形式与机理

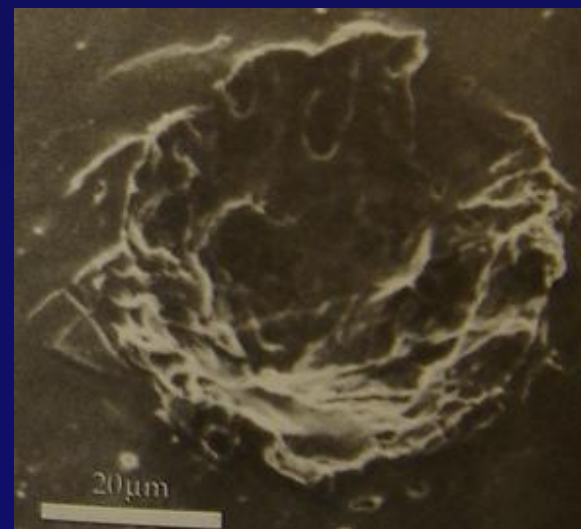


4.8 气蚀 (cavitation)

- 当液流局部区域的压力减小时，将发生“气泡”，这种现象大都出现在高速流动且有局部搅动的水力机械的过流部件中。“气泡”的萌生、长大、溃灭将使限流部件的表面受到破坏。



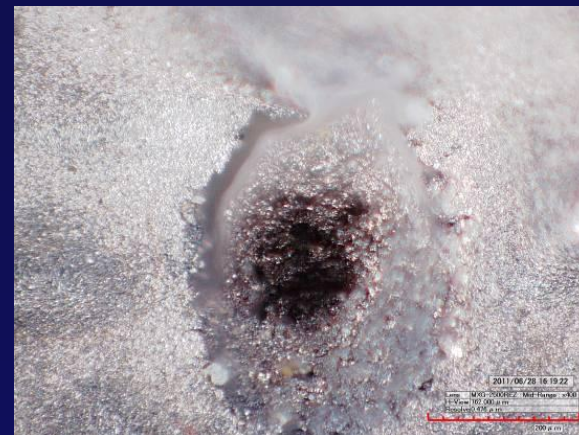
(a) 气蚀的产生



(b) 实际形貌

图 4-15 气蚀的损伤过程和形貌

第四章 材料的磨损失效形式与机理



(a) 冲蚀宏观形貌

(b) 冲刷分界处

(c) 空泡腐蚀

图 4-16 凝汽器钛管的气蚀失效形貌

● 防止措施

- 提高材料的抗冲蚀性
- 改善材料表面的光洁度
- 降低流体中的空泡(液体)或液滴(气体)
- 适当减低流体流速

第四章 思考题



1. 什么叫磨损？它和腐蚀和断裂有什么不同？
2. 磨损具有多学科交叉的特点，请概要说明它们之间的相互关系。
3. 磨损的外部条件和内部条件一般有哪些？
4. 水是好的润滑剂吗？好的润滑剂应具有什么特性？
5. 什么叫磨粒磨损？它的基本特征是什么？其失效机制有哪些？
6. 粘着磨损是什么？它与磨粒磨损有什么区别？
7. 什么样的固体材料具有最低的摩擦系数，因而它常被用作作为润滑脂、润滑油中的添加剂？
8. 什么叫冲蚀磨损？为什么冲蚀磨损一般的磨损要严重得多？
9. 微动磨损有哪些特点？试举出二个实例说明由微动磨损引起的构件失效。
10. 什么叫气蚀？它与局部腐蚀在本质上有何不同？
11. 为什么缝纫机的针头会发热？应该使用什么材料来制造？怎样才能将温度降低到最低？