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 冲刷磨损
4.5 微动磨损
4.6 疲劳磨损
4.7 腐蚀磨损
4.8 气蚀

第四章 材料的磨损失效形式与机理

4.1 磨损概述

1. 磨损的定义

零部件在摩擦过程中发生表面形状变化和物质损耗的现象叫磨损（wear）。

磨损是材料五类失效模式 之一，造成的损失也是巨大的。据统计，在失效的零部件中，80%以上是由各种形式的磨损或腐蚀引起的。

就一个国家而言，每年因摩擦磨损造成的经济损失一般占GDP的1%以上。

2. 磨损的多学科性质

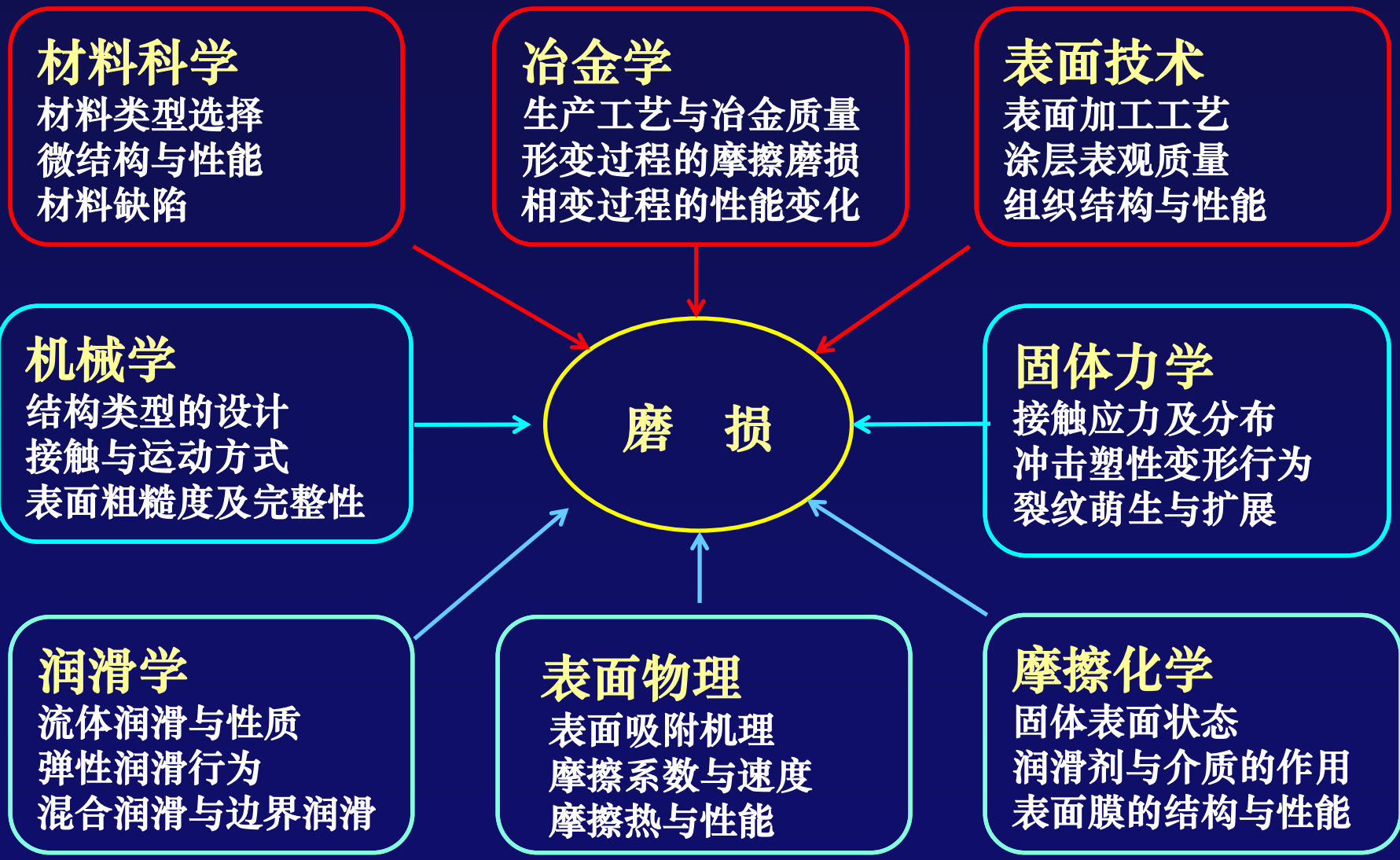


图4-1 磨损行为的学科交叉性

3. 磨损行为

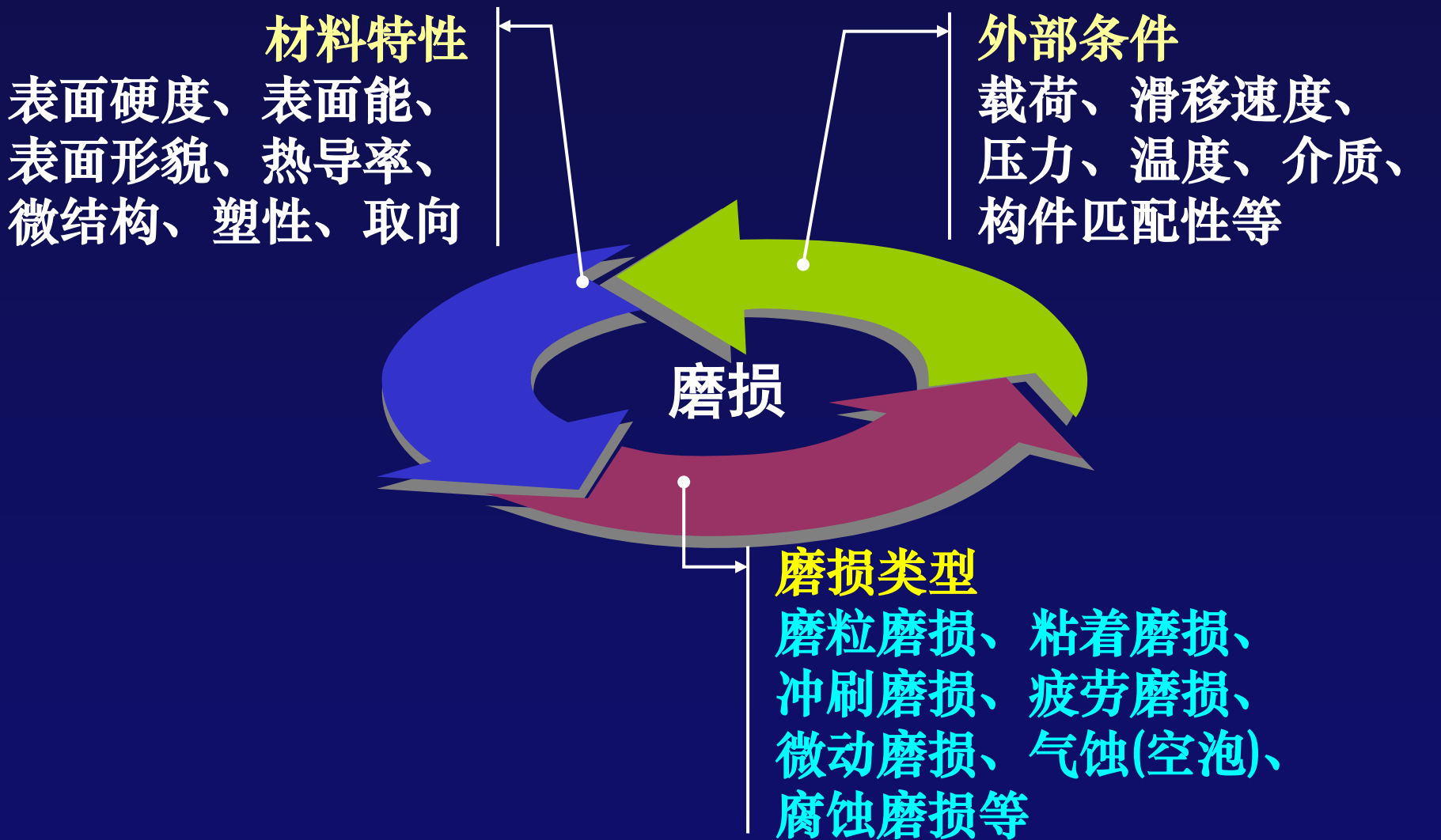


图4-2 磨损的因果关系

4.2 磨粒磨损（abrasive wear）

- 定义

运动的硬颗粒使被摩擦的构件表面产生破损而分离出磨屑或划伤的磨损现象，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，常常是多种磨损机制的相互作用，并随磨损条件的变化从一种磨损机制转变为另一种磨损机制。

第四章 材料的磨损失效形式与机理

● 磨粒磨损的主要机制

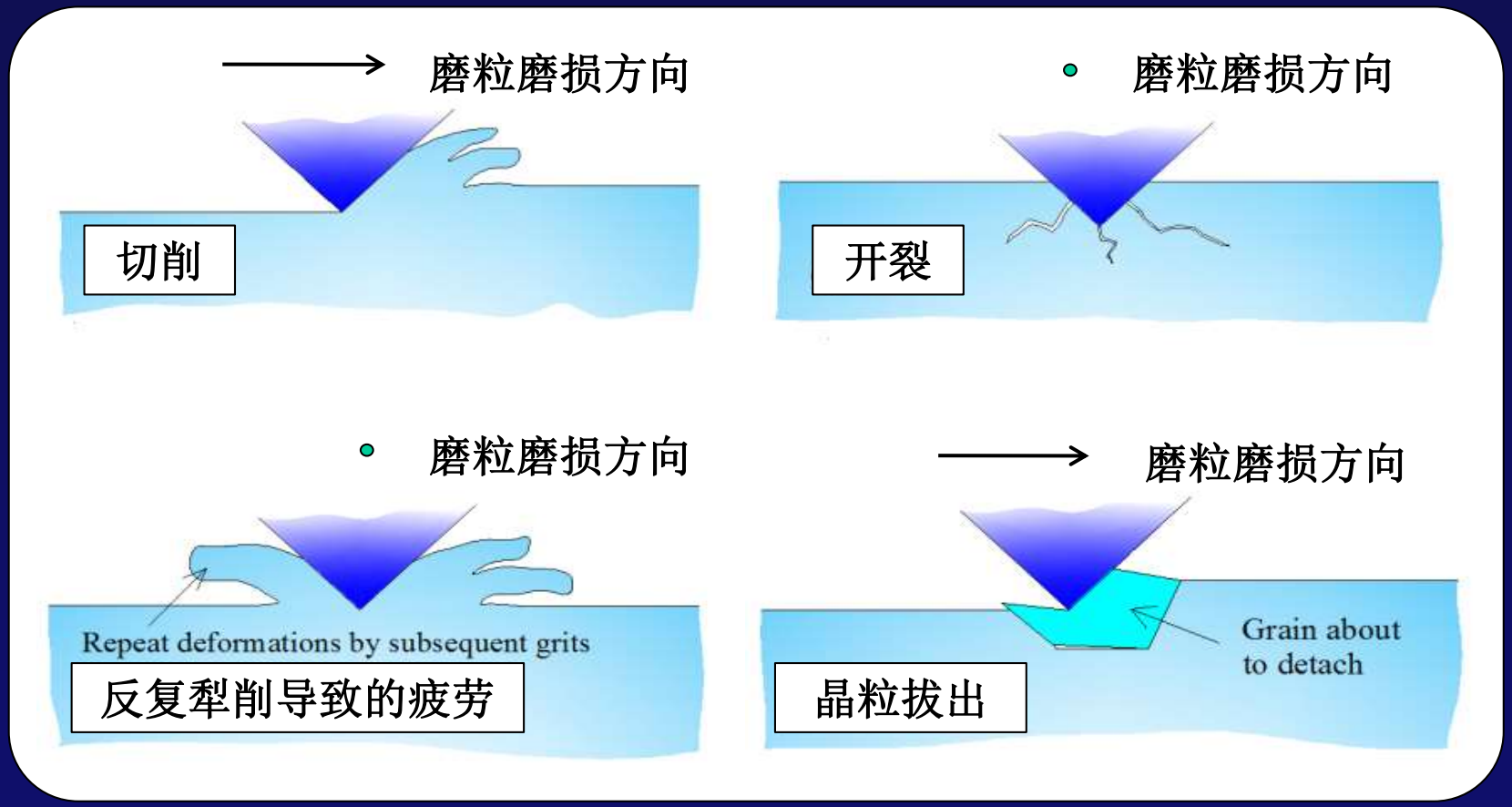
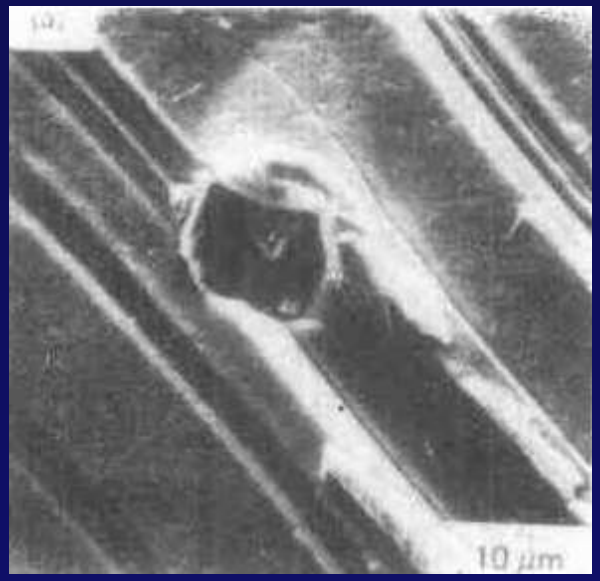


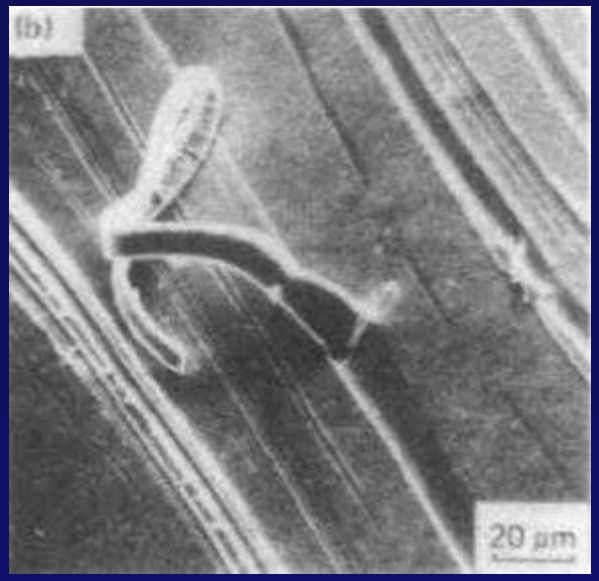
图4-3 磨粒磨损的四种机制

第四章 材料的磨损失效形式与机理

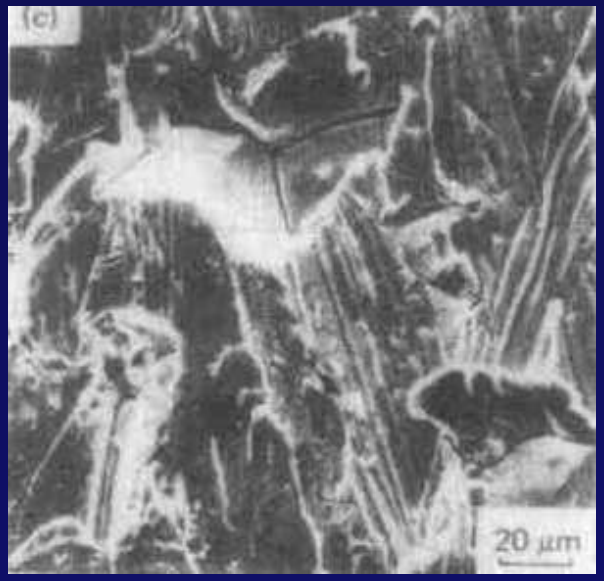
- 磨粒磨损的主要形貌



（a）微观犁沟



（b）微观切削

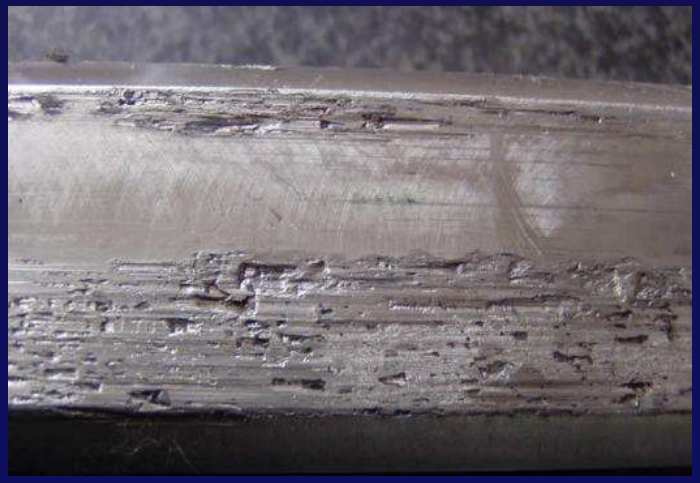


（c）微观断裂(剥落)

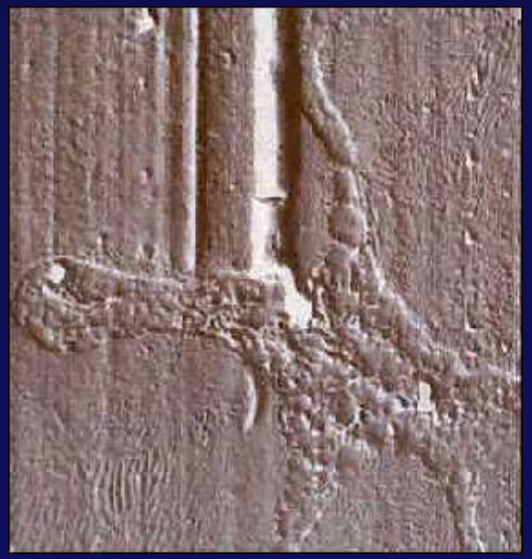
图4-4 三种不同形式的磨粒磨损形貌

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 典型磨粒磨损形貌

- 预防措施

(1) 改善表面硬度与韧性的匹配性（选材）；

(2) 减少磨粒数量（工况）；

(3) 减低表面的摩擦力。

4.3 粘着磨损（adhesive wear）

● 定义：两个相对运动的接触零件，由于分子间吸引力作用，产生固相局部“冷焊”或粘接，使材料从一表面转移至另一表面引起的磨损，称为粘着磨损。

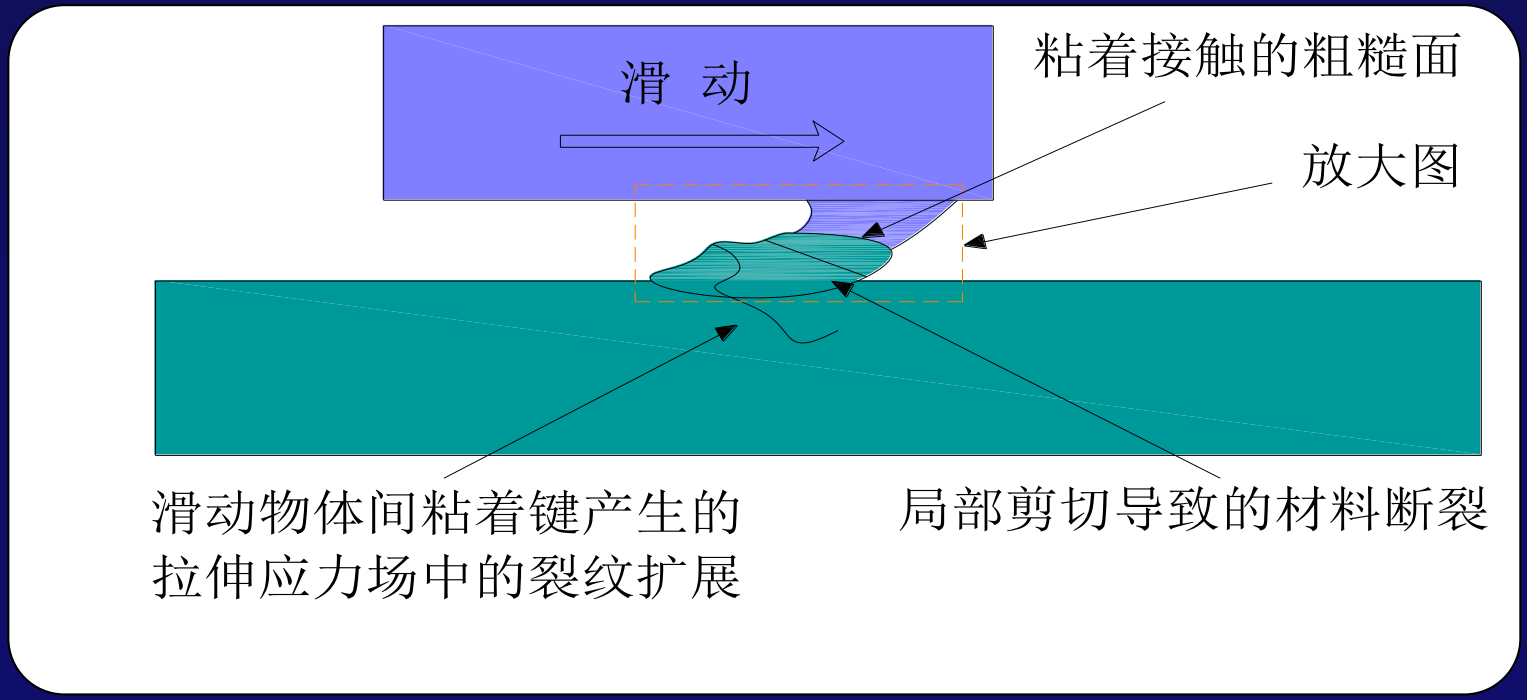


图4-6 粘着磨损的机理

第四章 材料的磨损失效形式与机理

● 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

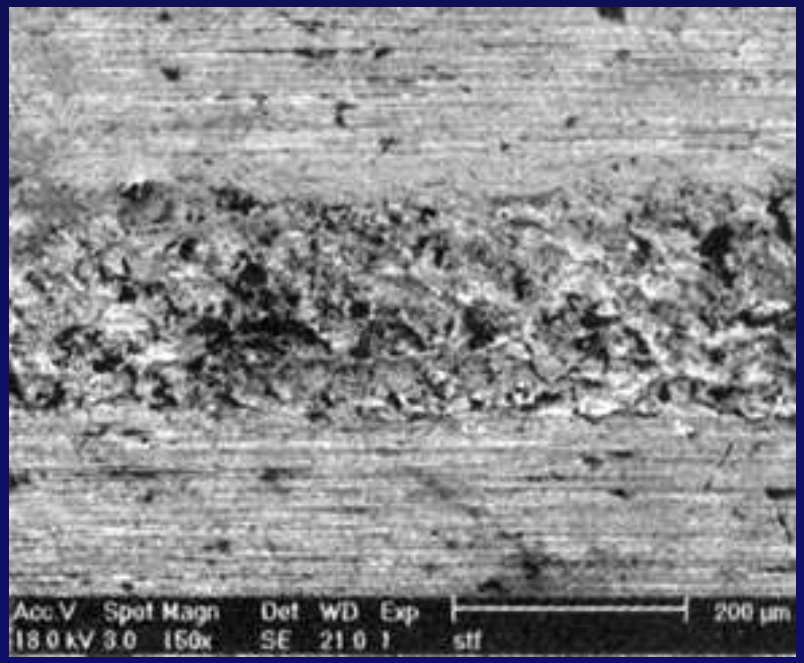


图4-7 粘着磨损的失效形貌

第四章 材料的磨损失效形式与机理

4.4 冲刷磨损（erosive wear）

- 定义：含颗粒的流体(液体或汽体)冲击固体表面时，表面局部材料不断损失所造成的破坏现象。
  - 韧性材料的微切削
  - 脆性材料的微脆断
  - 弹性体材料的疲劳和刺穿

- 冲刷磨损引起的失效占工业生产中出现磨损破坏总数的10 %以上。

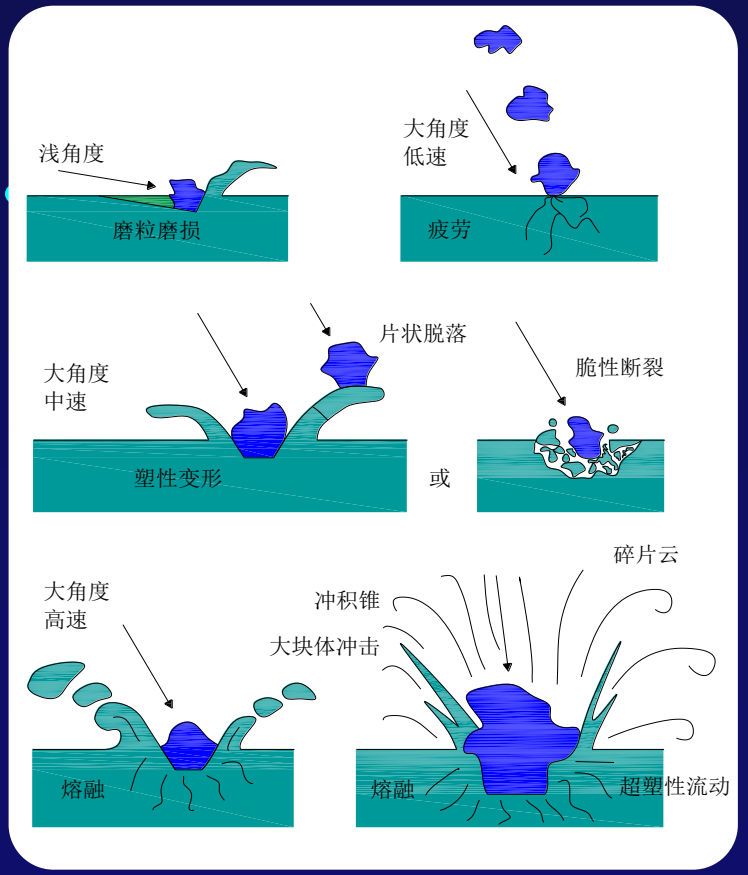
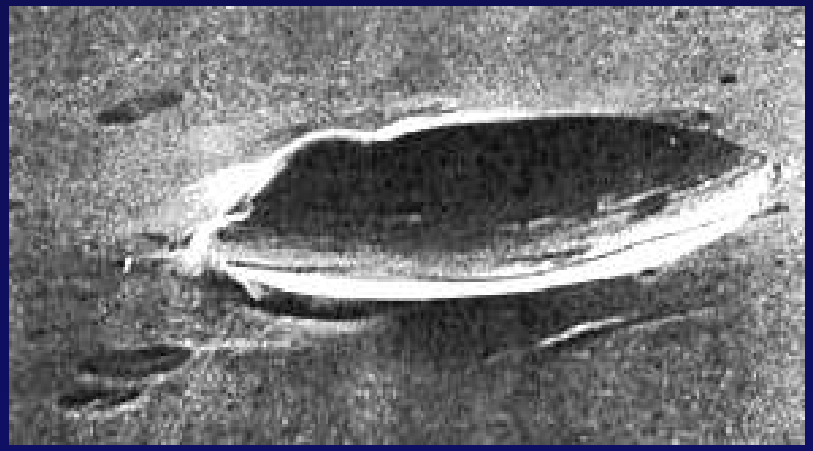


图4-8 冲刷磨损机理

（a） 蒸汽管道的冲刷形态



（b）月牙形冲刷形态

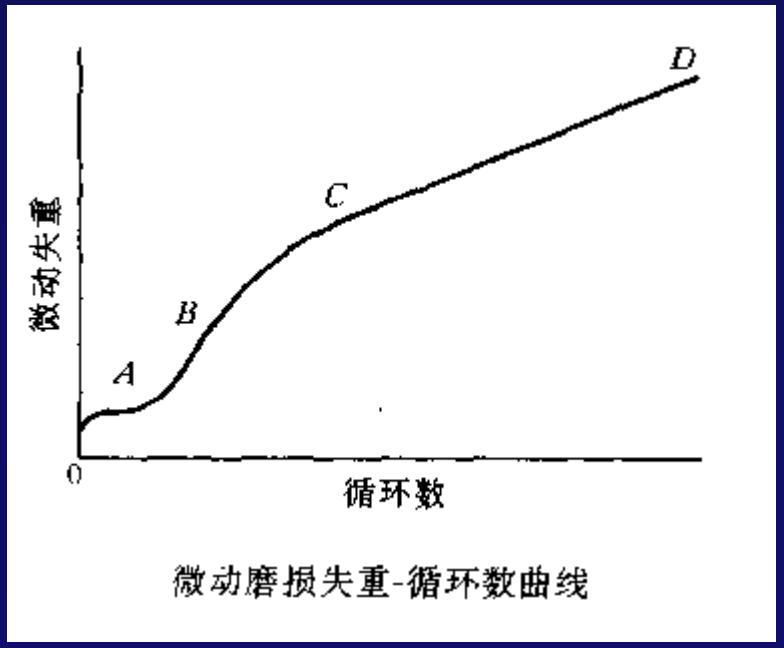
图 4-9 典型韧性材料的冲刷磨损形貌

4.5 微动磨损 （fretting wear）

● 定义： 两个接触物体表面间没有发生宏观的相对运动，但在载荷作用下产生小振幅相对振动（一般小于100um）， 接触表面所产生的磨损称为微动磨损。

其磨损失效机理大致如下：

- 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: 最后达到稳定的磨损率。



微动磨损失重-循环数曲线

图4-10 微动磨损的损伤过程

第四章 材料的磨损失效形式与机理

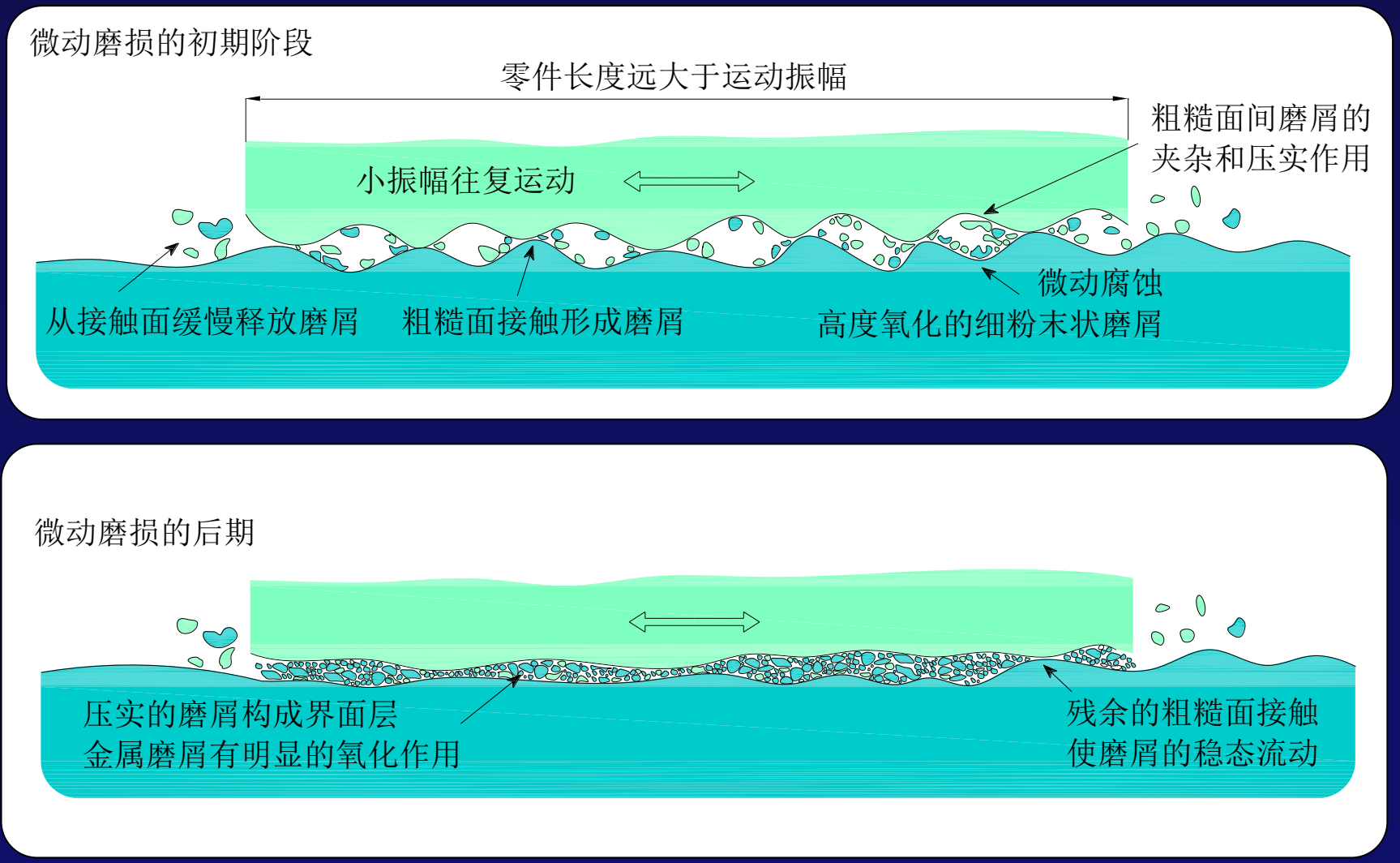


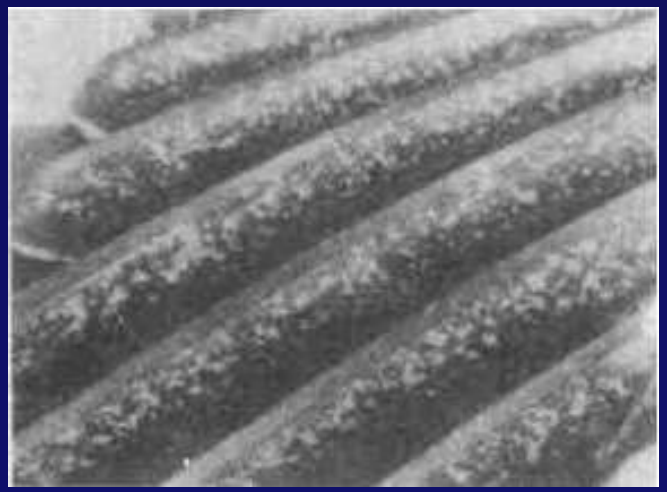
图 4-11 微动磨损不同阶段的损伤过程

（a）螺栓的微动磨损　　（b）固定链条的微动磨损

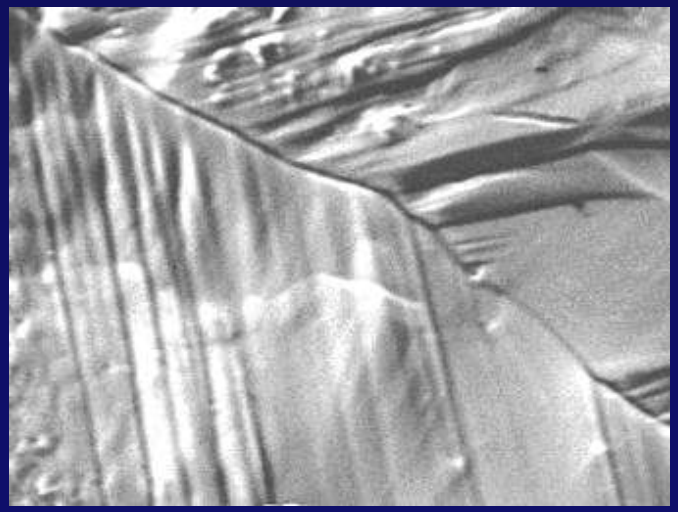
图 4-12 微动磨损的失效形貌

4.6 疲劳磨损（fatigue wear）

- 定义：当两个接触体相对滚动或滑动时，在接触区产生的循环应力超过材料的疲劳强度时，表面会产生裂纹，随后裂纹逐步扩展，最后部分开裂和剥落，这种磨损过程叫疲劳磨损。



（a）齿轮节圆上的辉纹



（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

- **损伤过程：**

  类似于疲劳断裂，存在裂纹萌生及其扩展的过程。

- **防止措施**
  - 提高表面硬度
  - 提高材料韧度
  - 提高构件心部和表面强度
  - 降低表面粗糙度

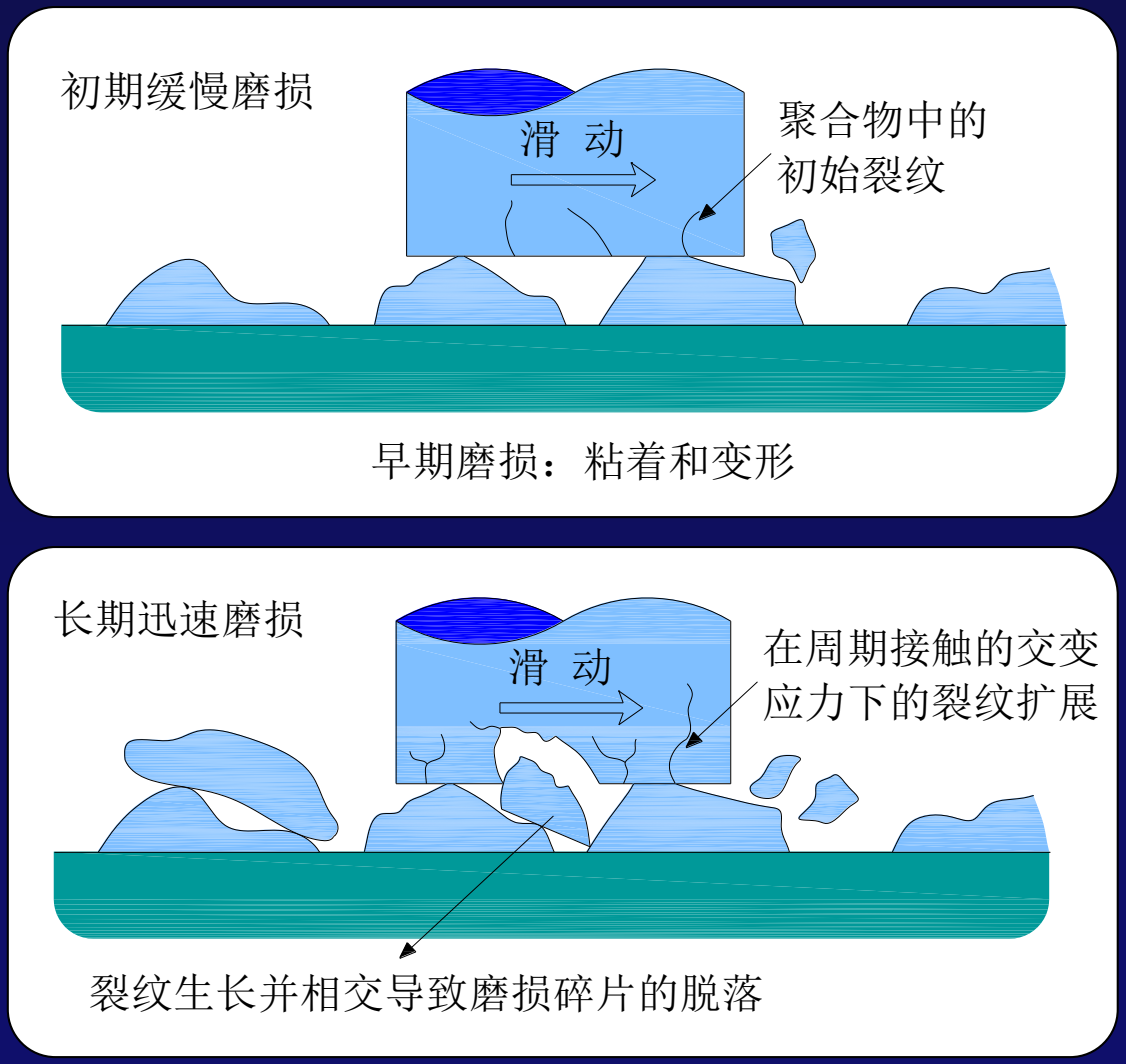


图 4-14 疲劳磨损的损伤过程

4.7 腐蚀磨损 （corrosive wear）

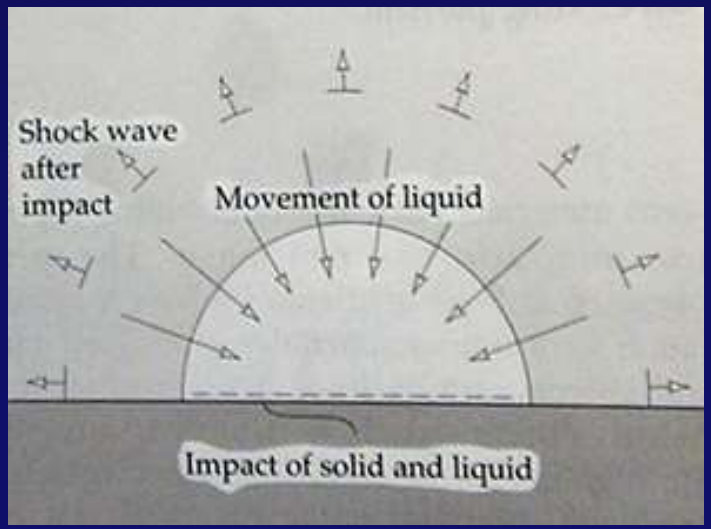
- 当含颗粒的腐蚀性流体沿构件表面流动时，其表面不仅受到电化学腐蚀为主，还受到颗粒的磨擦磨损，故称为腐蚀磨损。

例如，沿海地区以海水为冷却介质的管道、阀门、泵体、变径管等都经历了这种形式的腐蚀磨损。

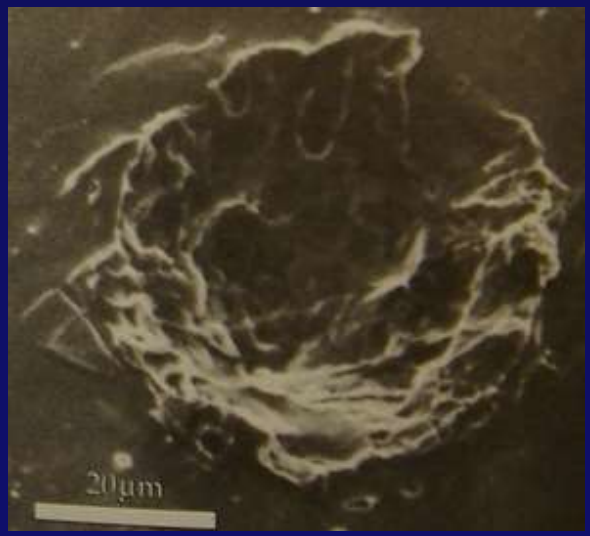
- 防止措施
  - 提高材料的耐磨耐蚀性（耐磨耐蚀三元复合管）
  - 流体介质的中和处理 （pH调整为7左右）
  - 适当减低流体的流速 （防过度的冲刷）

4.8 气蚀 （cavitation）

- 当流体在局部区压力减小或遇阻时，将产生气泡，这种现象在高速流动且有局部搅动的水力机械或气流机械的过流部件中会发生。气泡萌生、长大和溃灭，将使限流部件表面受到破坏。有时称为空泡腐蚀。



（a）气蚀的产生



（b）气蚀形貌

图 4-15 气蚀的损伤过程 和形貌

（a）冲刷宏观形貌　　（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

- 提高材料抗冲蚀性
- 改善材料表面光洁度
- 减少流体中的空泡 (液体介质) 或 液滴 (气体介质)
- 适当减低流体的流速

第四章 思考题

1. 什么叫磨损？它和腐蚀、断裂、畸变、衰减有什么不同？
2. 磨损具有多学科交叉的特征，试概要说明它们间的相互关系。
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？好的润滑剂通常具有哪些特性？
5. 什么叫磨粒磨损？其基本特征和失效机制是哪些？
6. 粘着磨损是什么？它与磨粒磨损本质上有哪些区别？
7. 什么样的固体材料有最低的摩擦系数，因而它常被用作为润滑脂和润滑油中的添加剂？
8. 什么叫冲蚀磨损？为什么冲蚀磨损比一般的磨损要严重得多？
9. 微动磨损有哪些特点？试举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什么区别？
11. 缝纫机的针头为什么会发热？应该使用什么材料制造？ 怎样才能将温度降低到最小？