



第四章 材料的磨损失效模式与机理

主讲教师：杨振国

单 位：材料科学系

办 公 室：江湾校区先进材料楼 732

联系方式：zgyang@fudan.edu.cn
31243658 (O)

4.1 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

4.9 耐磨耐蚀复合管道的研发及应用

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及其物质损耗的现象叫磨损 (wear)。

● 磨损失效模式 (wear failure mode)

一个构件与另一构件或介质相互接触并运动、导致接触表面不断损耗而改变形状和尺寸所引起的失效。

磨损是五大失效模式之一，造成的经济损失很大，占到各国GDP的1%左右。它主要涉及各种相对运动的构件（零件、部件），因摩擦磨损引起的异常失效，因而受到广泛的重视和研究。

2. 磨损的多学科性质

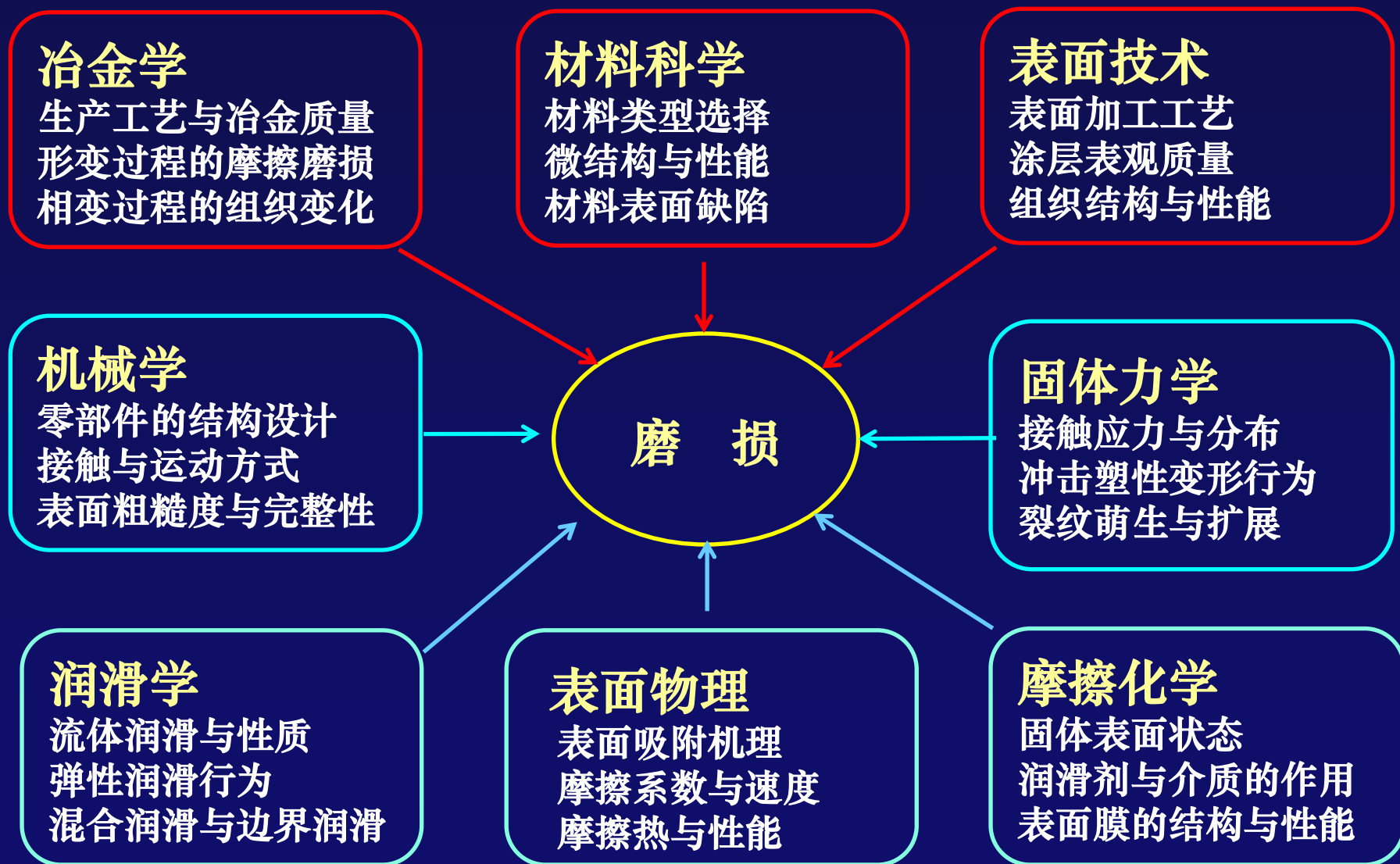


图4-1 磨损学科交叉性

3. 磨损行为

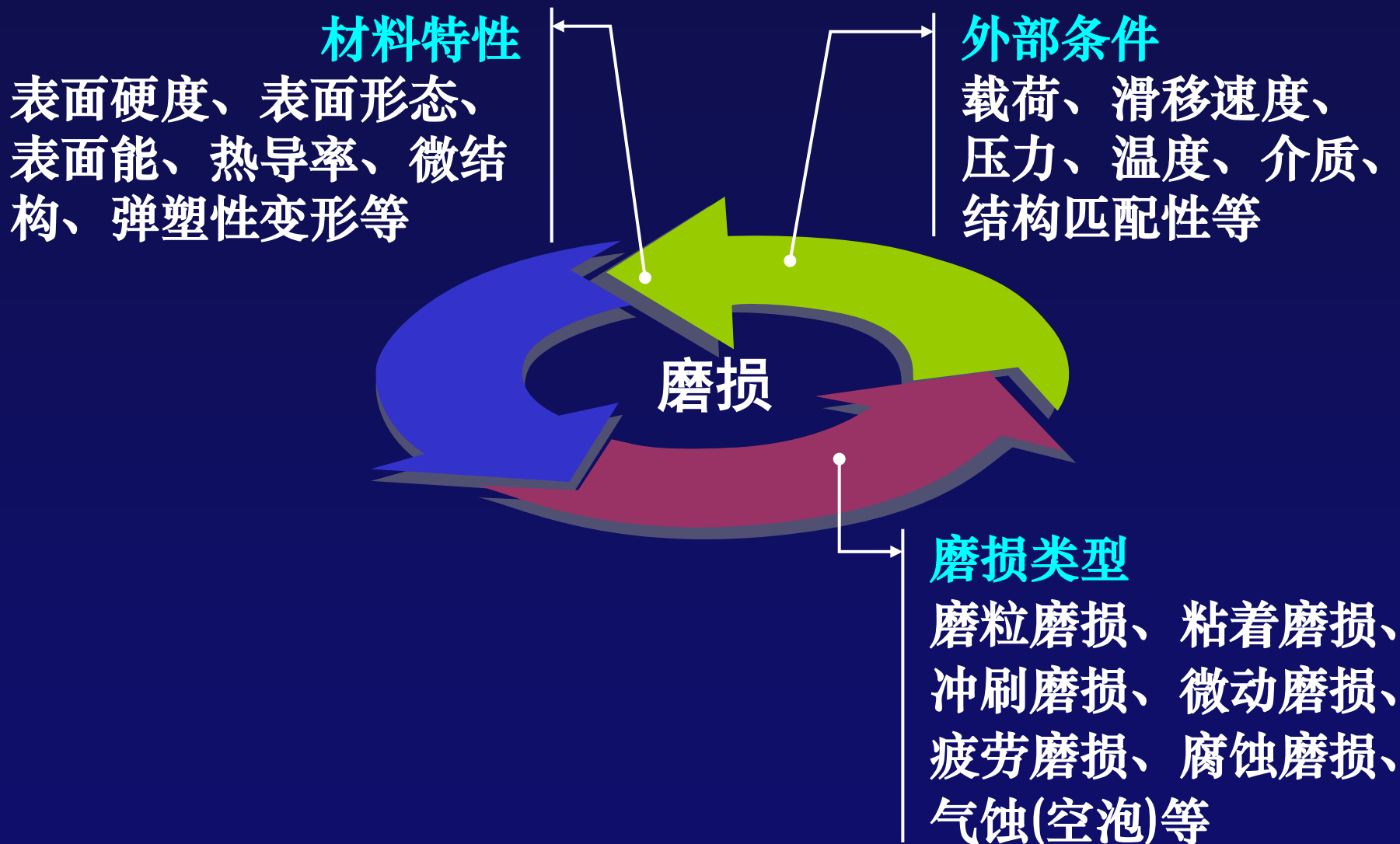


图4-2 摩擦磨损的相互关系

4.2 磨粒磨损 (abrasive wear)

● 定义

运动的硬颗粒导致摩擦构件表面产生破损、从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。

一般而言，磨粒磨损很少是由单一磨损机制引起的，常常是多种磨损机制的交互作用，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。

● 磨粒磨损的主要机制

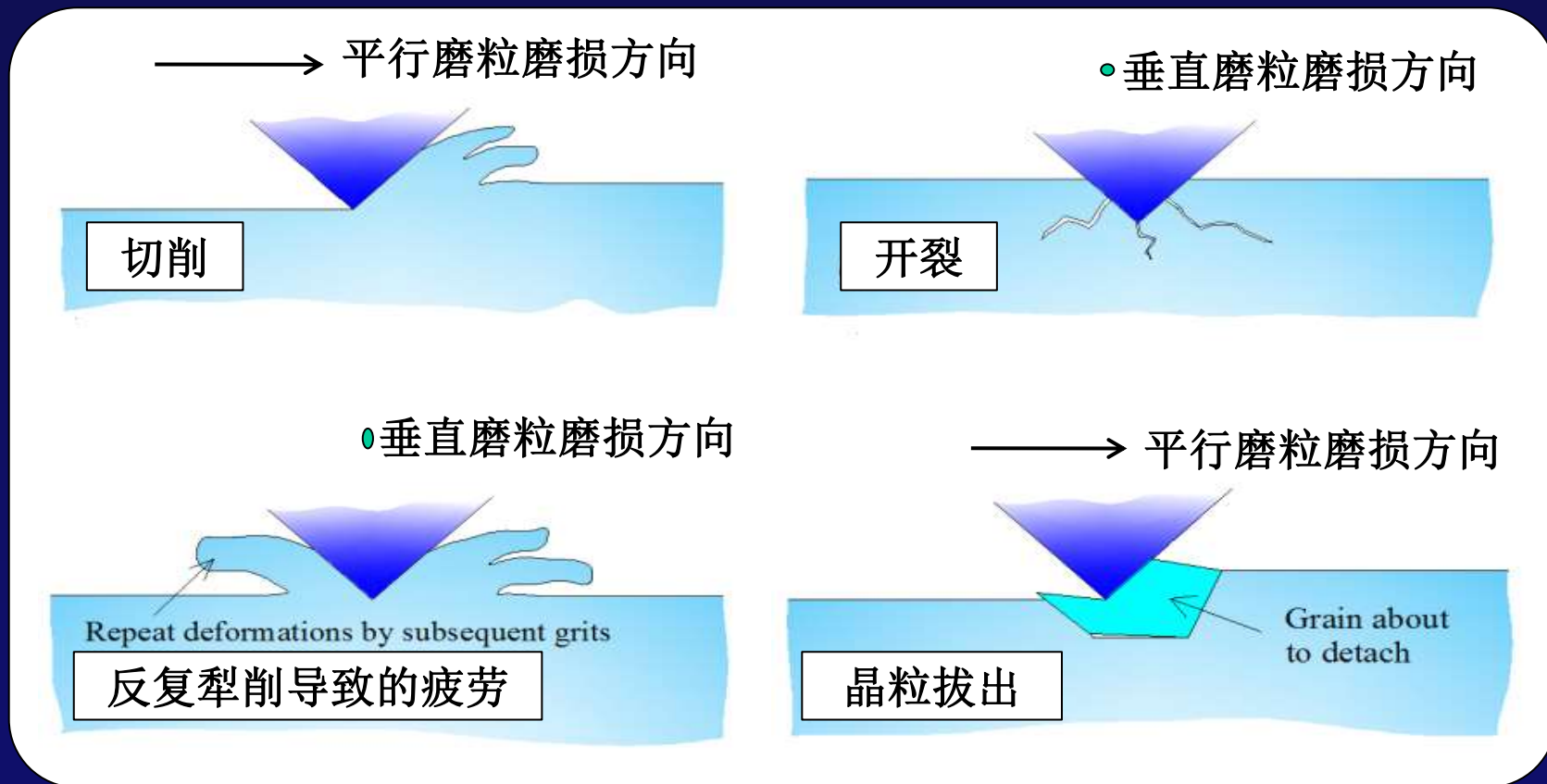
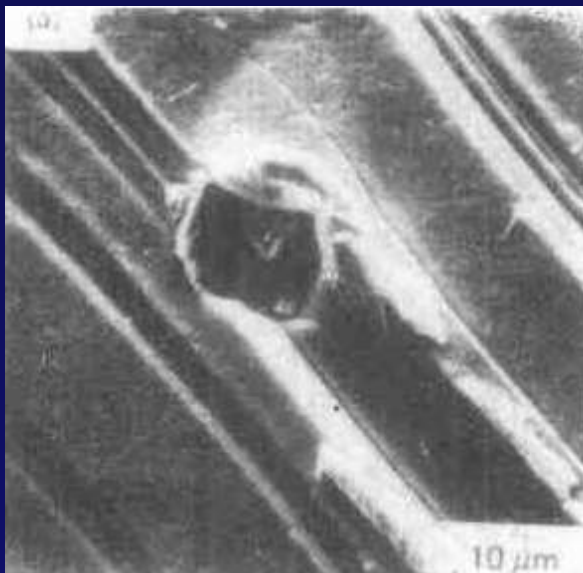


图4-3 磨粒磨损的四种机制

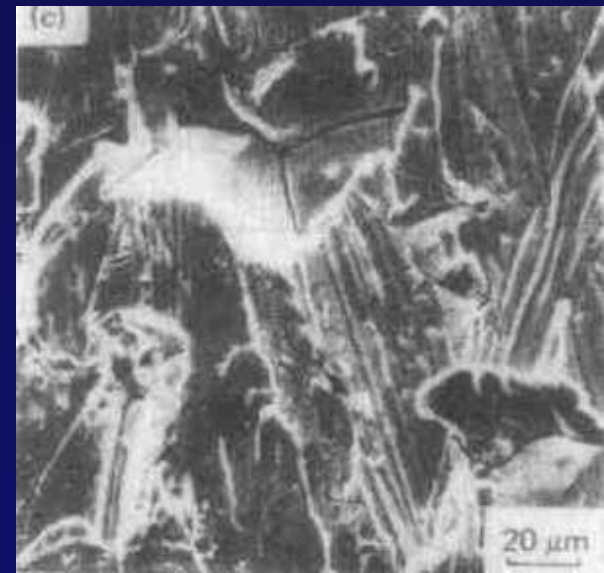
● 磨粒磨损的主要形貌



(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

● 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

- 改善表面硬度与韧性的匹配性（选材）
- 减缓磨粒数量（工况）
- 降低表面摩擦力

4.3 粘着磨损 (adhesive wear)

● 定义：两个相对接触运动的零部件，由于分子间吸引力的作用，产生局部的固相冷焊或粘接，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。

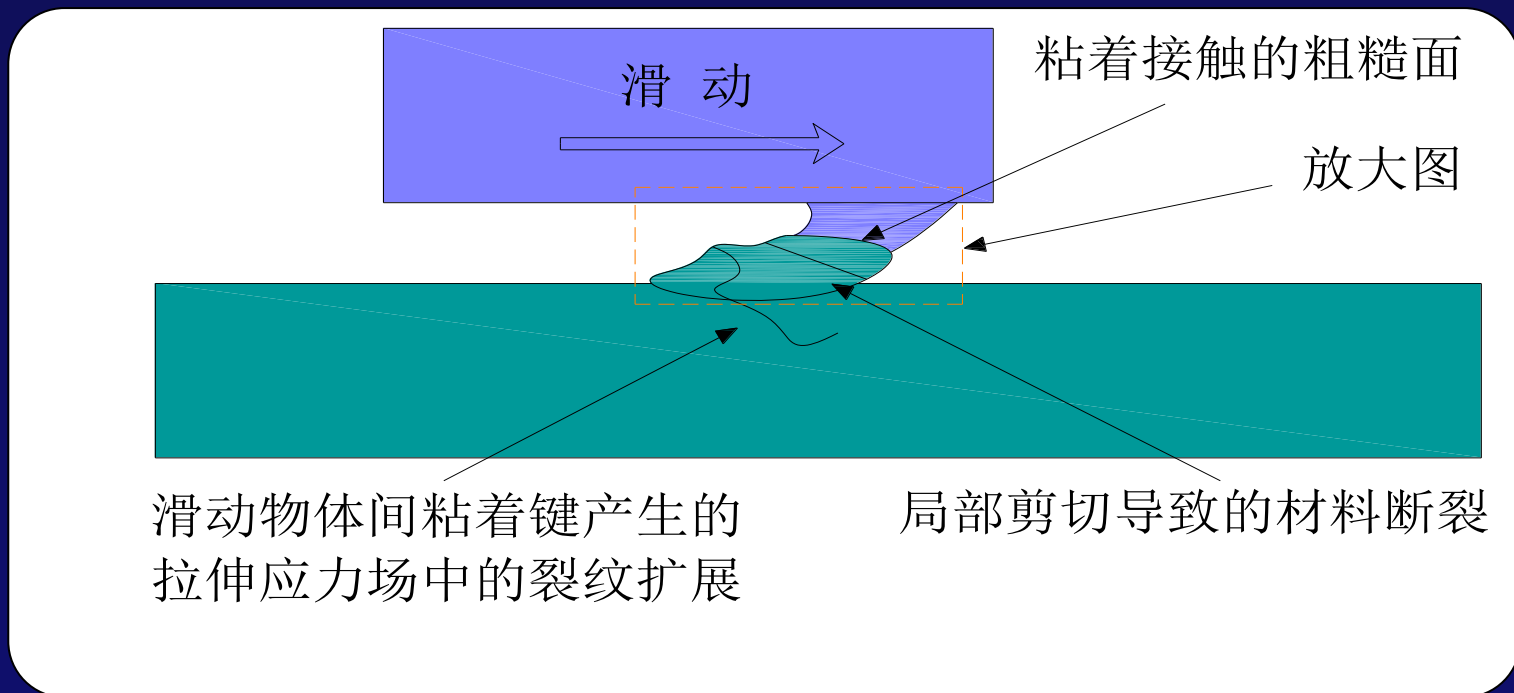


图4-6 粘着磨损的机理

● 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种材料
- 提高表面硬度
- 降低接触应力
- 减小表面粗糙度

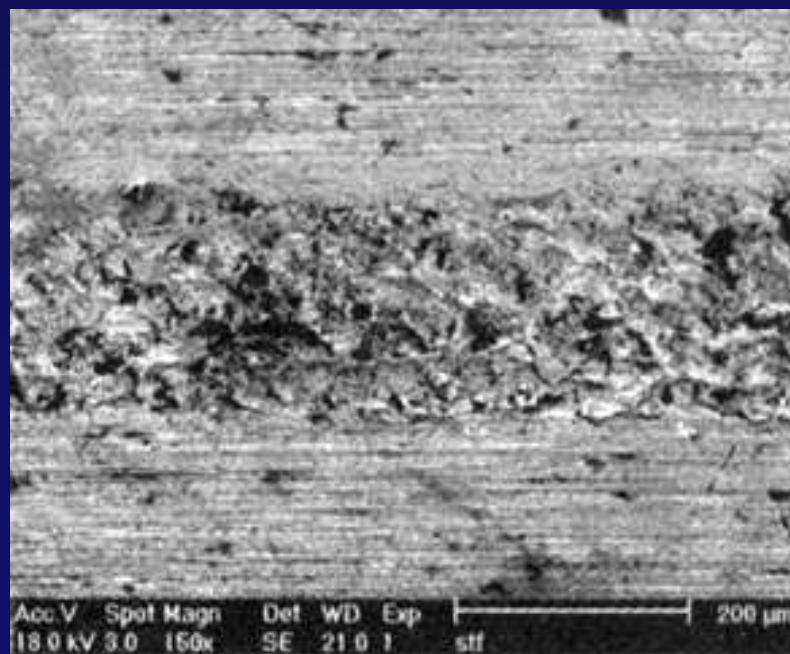


图4-7 粘着磨损的失效形貌

4.4 冲刷磨损 (erosive wear)

● **定义:** 颗粒或含颗粒流体冲击固体时, 表面局部材料因不断损失而造成的破坏现象

- 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, 一般占工业生产中磨损破坏总数的10%以上。

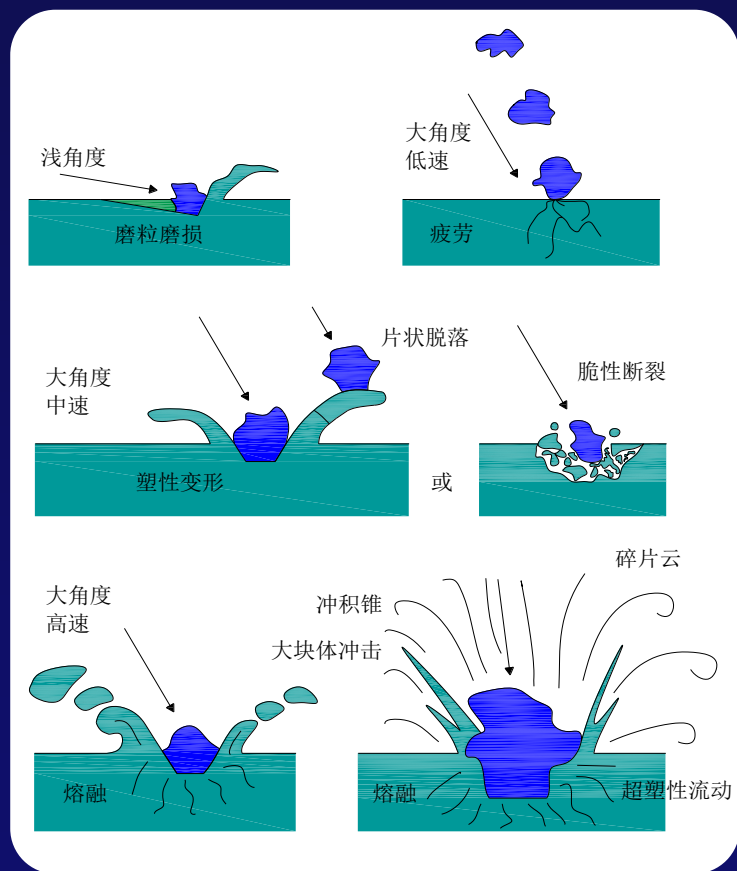


图4-8 冲刷磨损机理



(a) 弯管受蒸汽气泡的冲刷

(b) 月牙形冲刷形态

图 4-9 韧性材料的冲刷磨损形貌

4.5 微动磨损 (fretting wear)

- **定义：**两个接触构件间没有宏观上的相对运动，但在载荷作用下有小振幅相对振动（一般小于100 μm ），接触表面所产生的磨损称为微动磨损。

磨损失效过程大致如下：

- OA: 由于材料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。

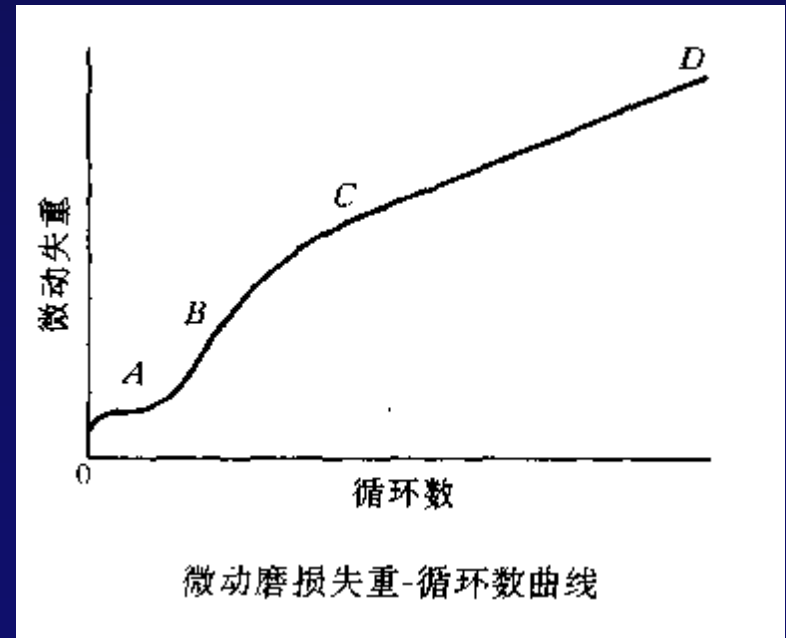


图4-10 微动磨损的损伤过程

第四章 材料的磨损失效模式与机理

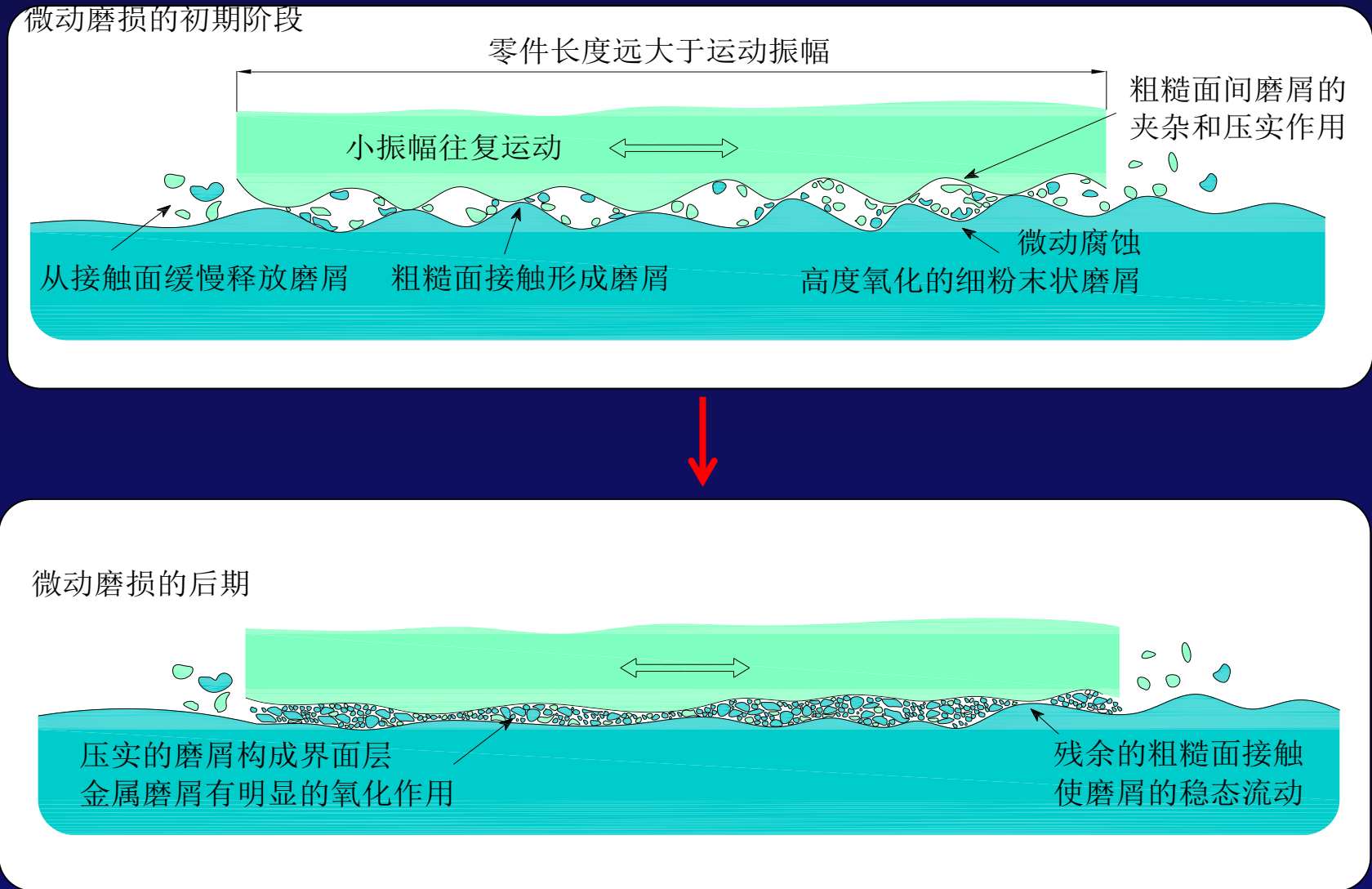


图 4-11 微动磨损不同阶段的损伤过程



(a) 螺栓的微动磨损

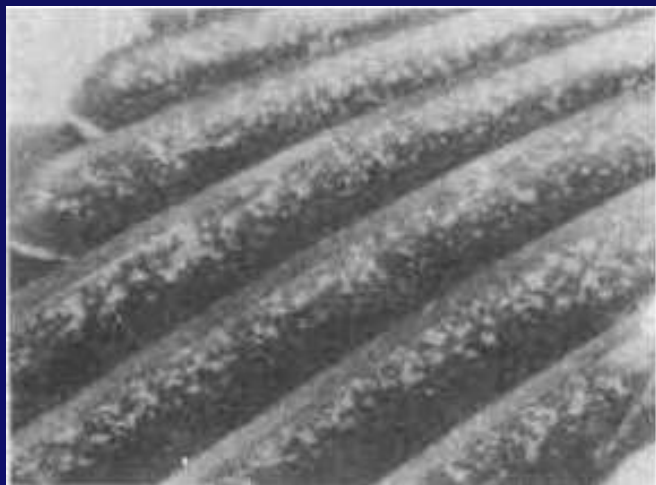


(b) 固定链条的微动磨损

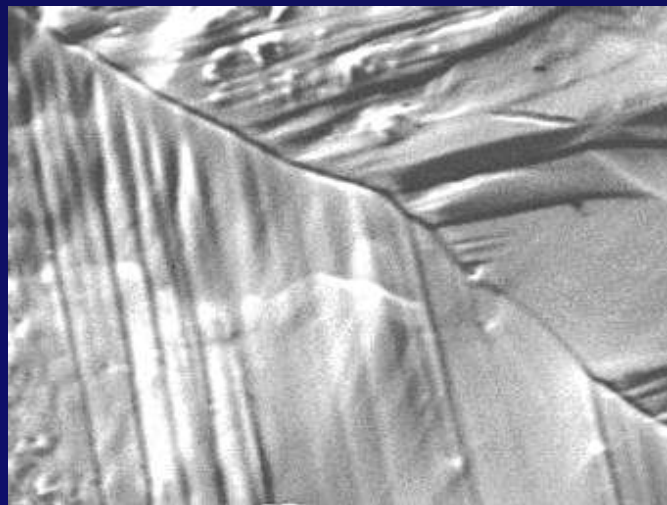
图 4-12 微动磨损的失效形貌

4.6 疲劳磨损 (fatigue wear)

- 定义：当两个接触构件作相对滚动或滑动时，若接触区产生的循环应力超过材料的疲劳强度时，表面将发生开裂，裂纹随后逐步扩展，最后开裂和剥落，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

● 损伤过程：

类似于疲劳断裂，存在裂纹萌生和扩展的过程。

● 防止措施：

- 提高表面硬度
- 提高材料韧度
- 降低表面粗糙度

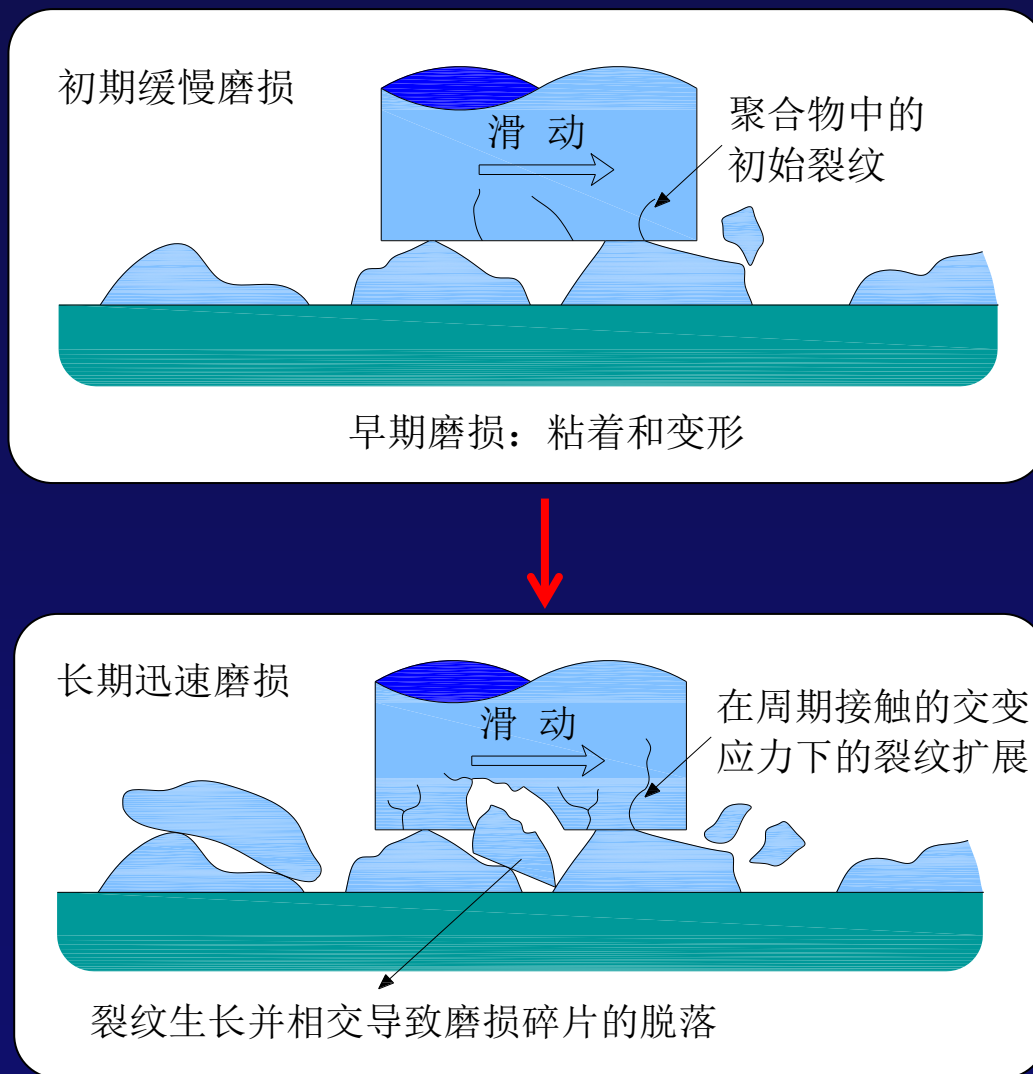


图 4-14 疲劳磨损的损伤过程

4.7 腐蚀磨损 (corrosive wear)

- 含颗粒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，还受到磨擦磨损，故称腐蚀磨损。

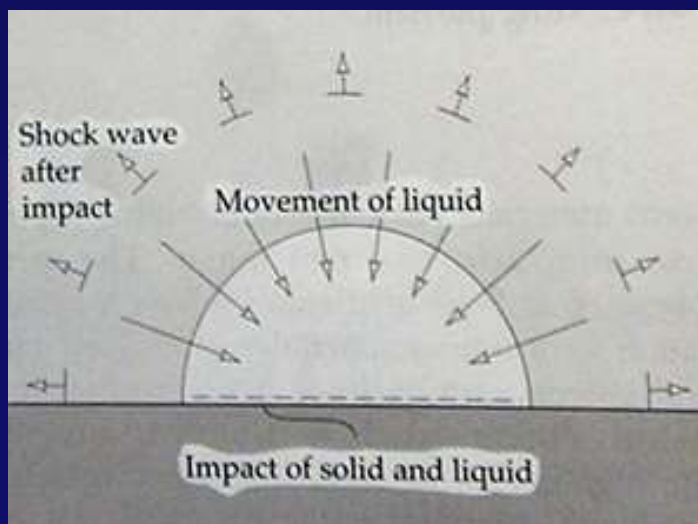
例如，沿海地区以海水为冷却介质的管道、阀门、泵体、变径管等都经历这种形式的腐蚀磨损。

● 防止措施

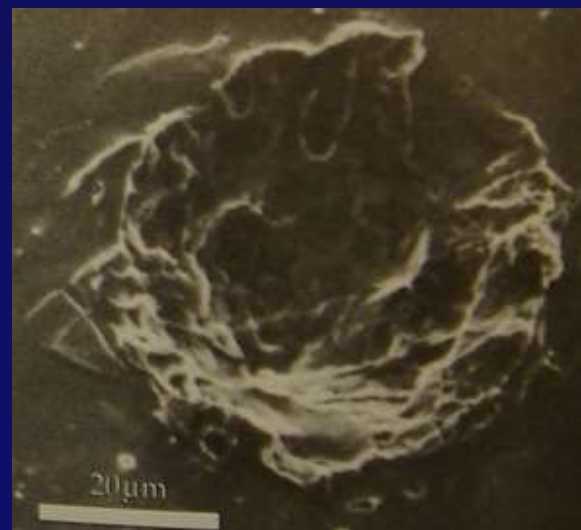
- 提高材料的耐磨耐蚀性 (耐磨耐蚀三元复合管)
- 流体介质的中和处理 (pH调整为7左右)
- 适当减低流体的流速 (防过度的冲刷)

4.8 气蚀 (cavitation)

- 当流体在局部区压力减小或遇阻时，将形成气泡或空泡破损，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将发生。气泡的萌生、长大和溃灭，将使限流部件表面受到破坏，有时称空泡腐蚀。



(a) 气蚀的产生



(b) 气蚀形貌

图 4-15 气蚀的损伤行为



(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
- 减少流体的空泡数(液体介质)或液滴数(气体介质)
- 减低流体的流速

4.9 耐磨耐蚀复合管道的研发及应用（参见另文）

(Development and application of wear-resistant and corrosion-resistant composite piping)

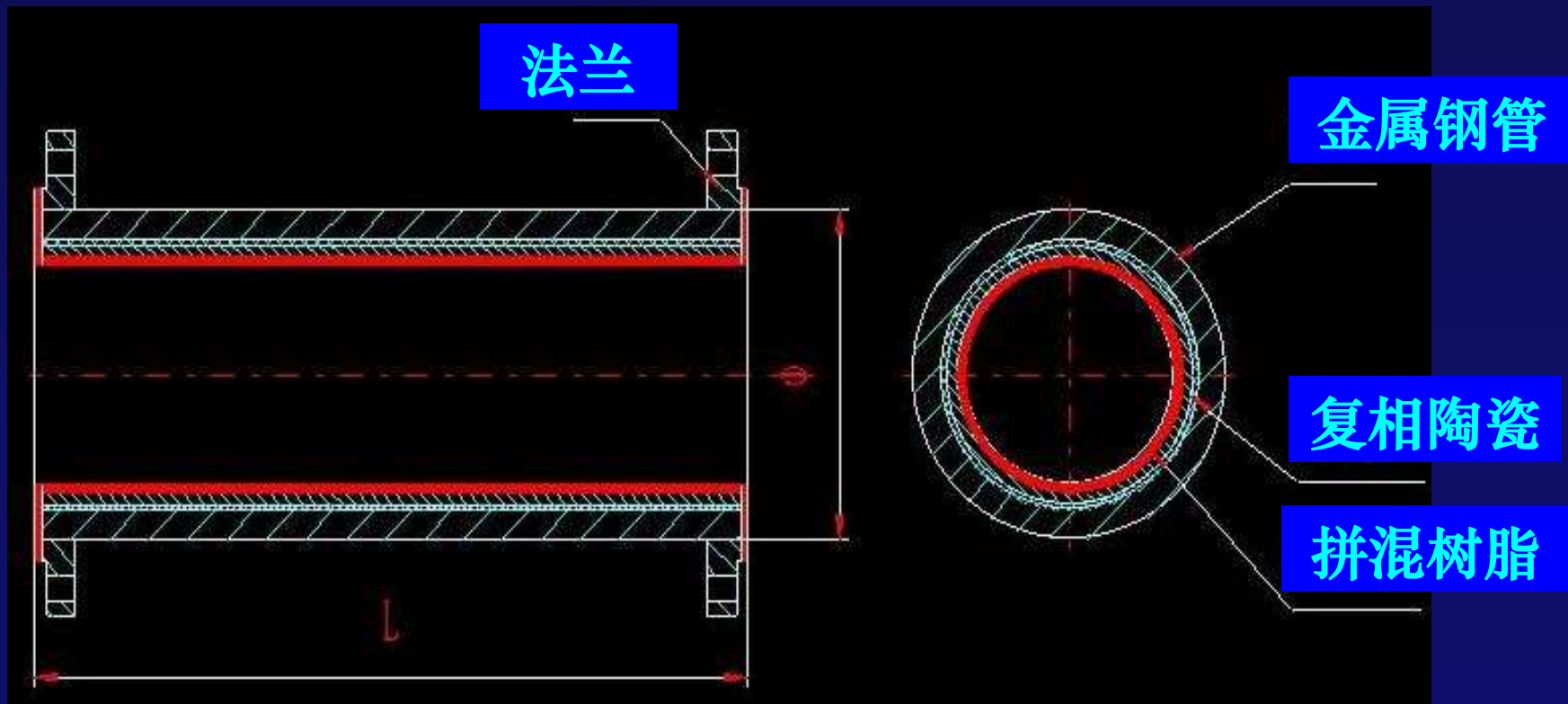


图 4-17 三元复合管的结构示意图

第四章 思考题



1. 什么叫磨损？它和断裂、腐蚀、畸变、衰减等有何不同？
2. 磨损具有多学科交叉的特征，概要说明它们间的相互关系。
3. 磨损的外部条件和内在条件有哪些？
4. 水有良好的润滑剂吗？良好的润滑剂一般具有哪些特点？
5. 什么叫磨粒磨损？基本特征和失效机制有哪些？
6. 粘着磨损是什么？它与磨粒磨损有哪些区别？
7. 什么样的固体材料具有最低的摩擦系数，因而它被用作润滑脂和润滑油中的添加剂？
8. 什么叫冲蚀磨损？为什么冲蚀磨损比普通磨损要严重得多？
9. 微动磨损有什么特点？举例说明微动磨损导致构件失效的案例。
10. 什么叫气蚀？它与局部腐蚀本质上有什么区别？
11. 缝纫机针头为什么会发热？怎样选材比较合理？怎样做才能把针头温度降到最低？