

第二章 材料设备的腐蚀防护与保温

本章主要内容：

- 1、材料设备的腐蚀与防护基本原理
- 2、设备腐蚀防护技术
- 3、材料的选用
- 4、保温目的
- 5、保温材料介绍
- 6、保温结构与施工

参考书

- 金属腐蚀理论及应用 魏宝明主编
- 金属腐蚀学 朱日彰等编写
- 腐蚀电化学原理 曹楚南编著
- 腐蚀工程 M.G.方坦纳, N.D.格林著
左景伊译

国内主要专业杂志

- 中国腐蚀与防护学报
- 腐蚀与防护
- 腐蚀科学与防护技术
- 材料保护
- 表面技术
- 全面腐蚀控制
- 四川化工与腐蚀控制

国外主要专业杂志

- Corrosion
- Material Performance

National Association of Corrosion Engineers

NACE（美国腐蚀工程师协会）

- Corrosion Science
- British Corrosion Journal

2.1 绪论

- 什么是腐蚀？

定义：金属材料和周围环境发生化学或电化学的作用而破坏。

工程材料和周围环境发生相互作用而破坏。

三个基本要素：

腐蚀的对象

腐蚀的性质

腐蚀的后果

- 耐蚀性 指材料抵抗环境介质腐蚀 的能力
- 腐蚀性 指环境介质腐蚀材料的强弱程度
- 腐蚀过程的本质

金属 → 金属化合物

$\Delta G < 0$, 自发过程

不可逆过程

● 腐蚀的危害

1. 造成巨大的经济损失
2. 造成金属资源和能源的浪费
3. 造成设备的破坏事故
4. 阻碍新技术的发展

经济损失包括直接损失和间接损失

- 直接损失：指采用防护技术的费用和发生腐蚀破坏以后的维修、更换费用和劳务费用。
- 间接损失：指设备发生腐蚀破坏造成停工、停产；跑、冒、滴、漏造成物料流失；腐蚀使产品污染，质量下降，设备效率降低，能耗增加；在计算壁厚时需增加腐蚀裕度，造成钢材浪费等。

举例

- 1975年美国芝加哥一个大的炼油厂一根15cm的不锈钢弯管破裂引起爆炸和火灾，停车6周，这次腐蚀事故总维修费50万美元，停车造成的税收损失高达500万美元。

美国：	1949年	55亿美元
	1960~1969年	150~200亿美元
	1975年	700亿美元
	1982年	1269亿美元
	1995年	8000亿美元
英国：	1969年	13.65亿英镑（27.3亿美元）

• 腐蚀的分类

按环境分类:

大气腐蚀 土壤腐蚀 海水腐蚀
高温气体腐蚀 化工介质腐蚀

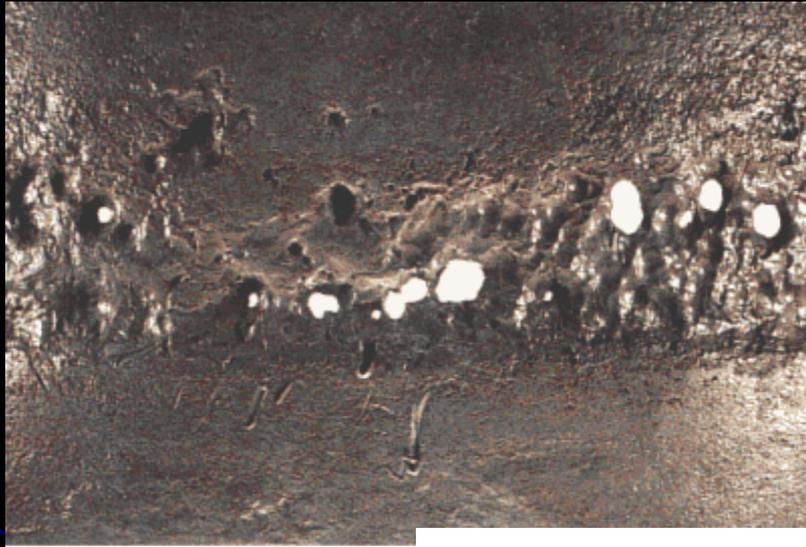
按形态分类:

全面腐蚀 局部腐蚀

按相互作用的性质:

化学腐蚀 电化学腐蚀 物理腐蚀

设备材料腐蚀图片



设备材料腐蚀图片



2.2 腐蚀与防护基本原理

1、 金属的化学腐蚀

金属的化学腐蚀是指金属与环境介质发生化学作用，生成金属化合物并使材料性能退化的现象。

(1) 金属氧化及其氧化膜

自然界中大多数金属氧化的结果都是在其表面上形成一层氧化物固相膜。金属氧化膜要对金属起到良好的保护作用，还必须满足以下条件：

- ① 生成的金属膜必须致密、完整，能把金属表面全部遮盖住。
- ② 金属氧化物本身是稳定、难熔和不挥发的，不易与介质作用而被破坏。
- ③ 氧化膜与基体结合良好，有相近的热胀系数，不会自行或受外界作用而剥离脱落。
- ④ 氧化膜有足够的强度、塑性，足以经受一定的应力、应变的作用。

(2) 钢铁的气体腐蚀

① 高温氧化:

➤ 200~300℃ 表面;

➤ 570℃ 以下 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 ;

➤ 温度超过 570℃ 时, 在氧化膜内层生成 FeO 。

➤ 温度高于 800℃, 表面上就开始形成多孔、疏松的“氧化皮”。

② 脱碳: 脱碳是指在腐蚀过程中, 除了生成氧化皮层外, 与氧化皮层相连的内层渗碳体 Fe_3C 与介质中的氧、氢、二氧化碳、水等作用(见 P48 页), 生成的气体降低了膜的保护作用。

防止: 增加气体介质中 CO 和 CH_4 的含量或在钢中添加铝和钨。

③**氢蚀**：温度超过200~300℃，压力高于30.4MPa时，氢将对钢产生显著作用，使钢剧烈脆化，造成氢蚀。

在第一阶段是可逆氢脆，在一定条件下韧性又可以部分或全部恢复。

第二阶段是氢蚀阶段。在该阶段，侵入并扩散到钢中的氢与不稳定化合物发生反应

防止：降低含碳量、加合金元素

④**铸铁的肿胀**：铸铁的肿胀实际上是一种晶间气体腐蚀。腐蚀性气体沿晶界、石墨夹杂物和细微裂缝渗入到铸铁内部，发生氧化作用。由于氧化物的生成，铸铁体积变大，产生肿胀，其强度大大降低。

防止：见适量硅（5%—10%）

(3) 防止钢铁气体腐蚀的方法

- a. 合金化:**元素Cr、Al、Si等改善钢铁材料抗氧化性能最有效的合金元素，与氧的亲合力比铁强，在氧化性介质中首先与氧结合形成极稳定的 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 ，这些氧化物结构致密，能够牢固地与金属基体结合，形成有效的保护层。
- b. 改善介质:**通过设法改善介质成分，可以减轻乃至消除某些特定环境条件下的腐蚀危害。
- c. 应用保护性覆盖层:**利用金属或非金属涂层将金属和气体介质隔离开来，是防止气体腐蚀的有效途径。实质是抗氧化合金元素的表面合金化。
- d. 耐高温氧化的陶瓷覆盖层:**采用热喷涂或等离子喷涂的方法，可以将耐热氧化物喷涂在金属表面形成耐高温氧化的陶瓷覆盖层，达到抗高温氧化的目的。

2、金属的电化学腐蚀

金属在电解质介质中所发生的腐蚀，称为电化学腐蚀。

(1) 金属的电化学腐蚀及发生条件

金属的电化学腐蚀原理在本质上与熟知的铜—锌原电池是一样的，这种引起金属腐蚀的短路原电池，叫做腐蚀原电池。

- 金属或合金常常是化学成分不均一，含有各种杂质和合金元素
- 存在组织结构不均一
- 物理状态不均一
- 表面氧化（保护）膜不完整

引起金属表面的电极电位不同，在电解质溶液中就形成了腐蚀原电池。

腐蚀电池

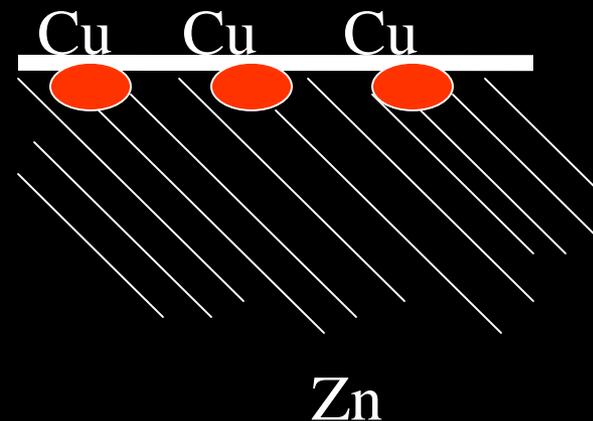
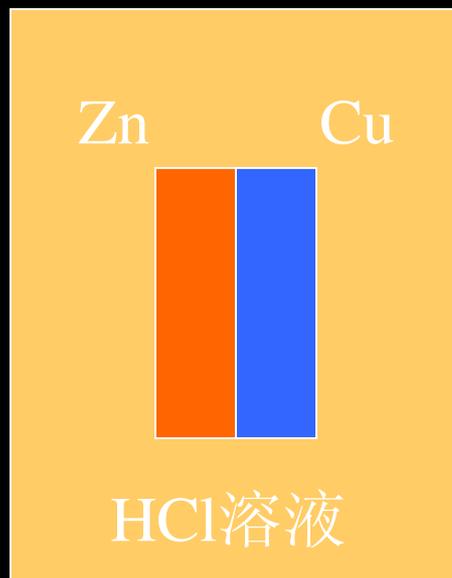
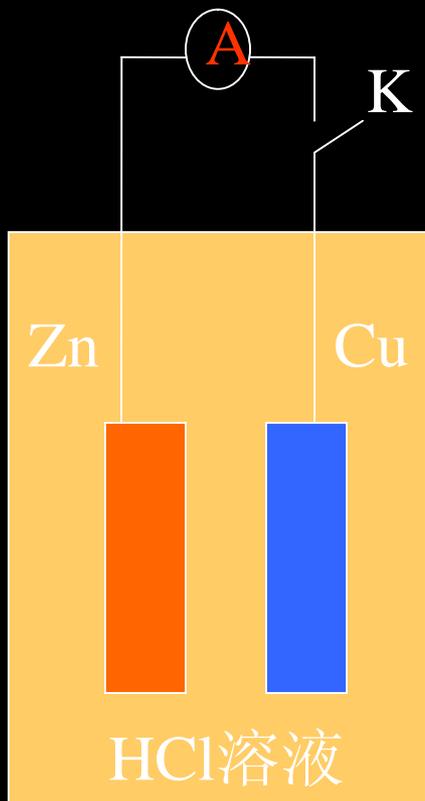
- 腐蚀电池的工作过程
- 什么是腐蚀电池



腐蚀电池的定义：只能导致金属材料破坏而不能对外界作功的短路原电池。

腐蚀电池的特点：

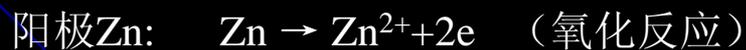
- ◆ 腐蚀电池的阳极反应是金属的氧化反应，结果造成金属材料的破坏。
- ◆ 腐蚀电池的阴、阳极短路（即短路的原电池），电池产生的电流全部消耗在内部，转变为热，不对外做功。
- ◆ 腐蚀电池中的反应是以最大限度的不可逆方式进行。



(a) Zn块和Cu块通过导线联接

(b) Zn块和Cu块直接接触 (短路)

(c) Cu作为杂质分布在Zn表面



腐蚀电池的构成

➤ 腐蚀电池的工作环节

➤ 阳极反应



产物有二种：

可溶性离子，如 $Fe - 2e = Fe^{2+}$

不溶性固体，如 $2Fe + 3H_2O = Fe_2O_3 + 6H^+ + 6e$

➤ 阴极反应



- 常见的去极化剂（氧化剂）是 H^+ 和 O_2
- $2\text{H}^+ + 2\text{e} = \text{H}_2$ 析氢腐蚀或氢去极化腐蚀
- $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} = 2\text{H}_2\text{O}$ （酸性溶液中）
- $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} = 4\text{OH}^-$ （中性或碱性溶液中）

➤ 电流回路

金属部分：电子由阳极流向阴极

溶液部分：正离子由阳极向阴极迁移

- 以上三个环节既相互独立，又彼此制约，其中任何一个受到抑制，都会使腐蚀电池工作强度减少。

➤ 形成腐蚀电池的原因

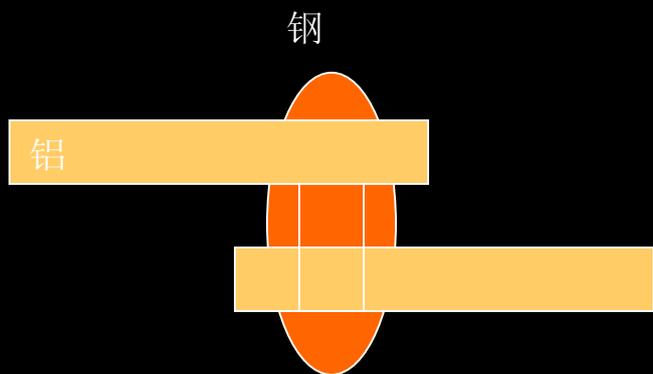
金属方面

- 成分不均匀
- 组织结构不均匀
- 表面状态不均匀
- 应力和形变不均匀
- 热处理差异

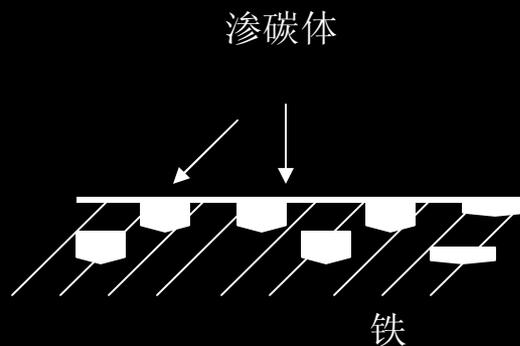
环境方面

- 金属离子浓度差异
- 氧含量的差异
- 温度差异

腐蚀电池形成原因举例



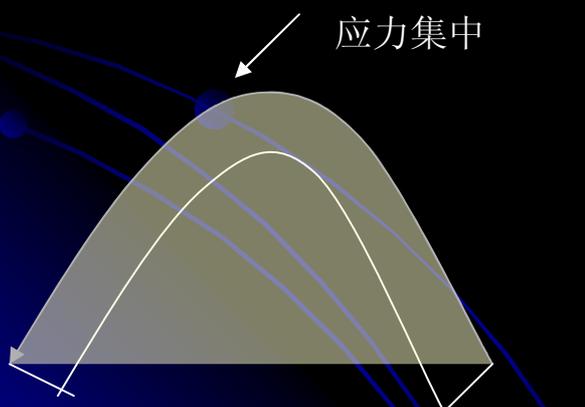
(a) 不同金属组合



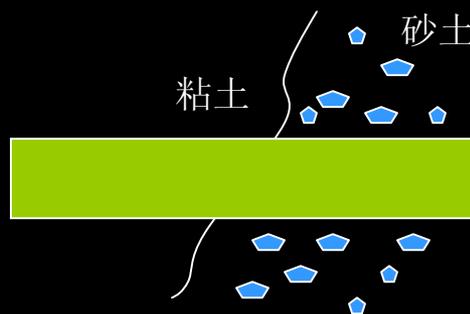
(b) 金属中含杂质



(c) 表面状态不同



(d) 应力及形变差异



(e) 氧浓度差异



(f) 金属离子浓度差异

➤ 腐蚀电池的种类

大电池（宏观腐蚀电池）：指阳极区和阴极区的尺寸较大，区分明显，肉眼可辨。

微电池（微观腐蚀电池）：指阳极区和阴极区尺寸小，肉眼不可分辨。

*大电池的腐蚀形态是局部腐蚀，腐蚀破坏主要集中在阳极区。

**如果微电池的阴、阳极位置不断变化，腐蚀形态是全面腐蚀；如果阴、阳极位置固定不变，腐蚀形态是局部腐蚀。

➤ 腐蚀过程的产物

初生产物：阳极反应和阴极反应的生成物。

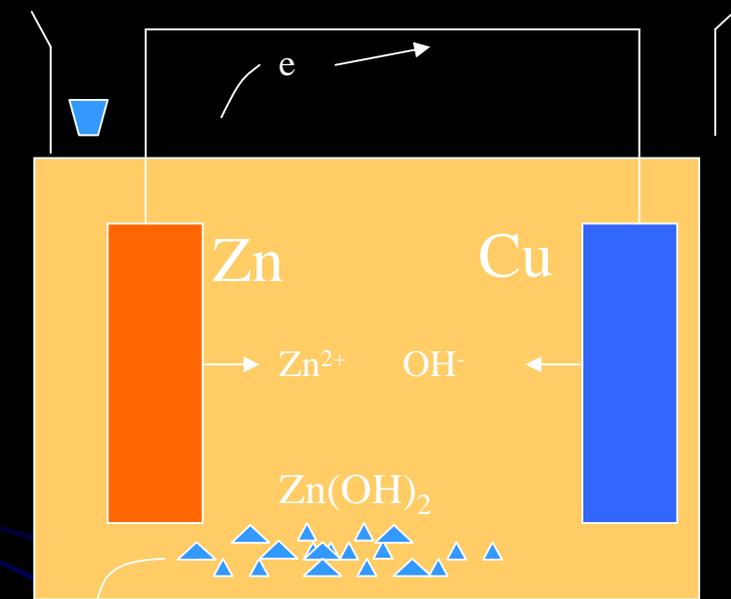
次生产物：初生产物继续反应的产物。

初生产物和次生产物都有可溶和不可溶性产物。

* 只有不溶性产物才能产生保护金属的作用。

腐蚀过程的产物

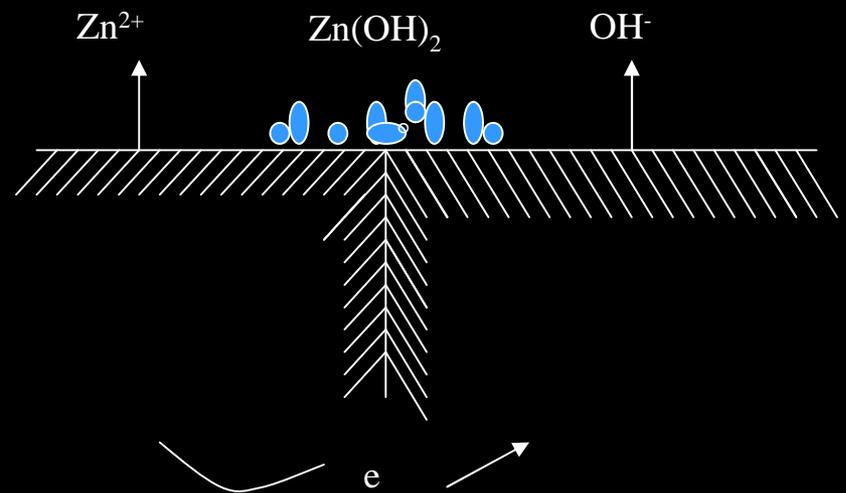
Zn—Cu 电偶电池



NaCl溶液

[直立电极]

NaCl溶液



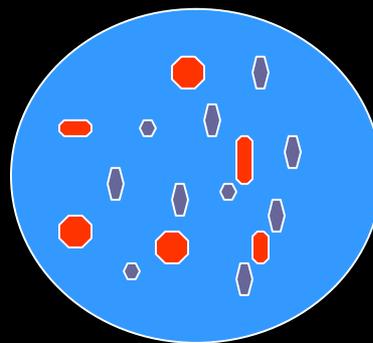
水平电极

盐水滴实验

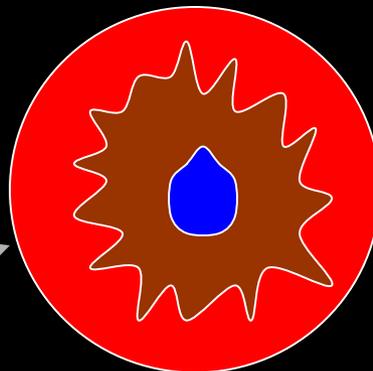
3%NaCl+铁氰化钾+酚酞



Fe



[初始外观]



[其后外观]

蓝色：显示 Fe^{2+} (阳极区)

红色：显示 OH^- (阴极区)

棕色：铁锈

如果使用脱氧液滴，则不会出现初始外观。

西安建筑科技大学

➤ 腐蚀电池的极化

极化现象

- 原电池的极化

实验现象:

欧姆定律:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{E_{\text{阴}} - E_{\text{阳}}}{R}$$

极化现象: 电流接通后, 电池电动势降低的现象叫电池的极化现象。

• 阳极极化和阴极极化

阳极极化：电位偏离初始电位正移。

阴极极化：电位偏离初始电位负移。

* 腐蚀电池的极化包括阳极的阳极极化和阴极的阴极极化，不过两者的极化程度和方向不相同。

● 极化值

极化程度的大小用极化值表示，记为 ΔE 。

$$\Delta E = E - E_0 \quad \Delta E_a = E_a - E_0 > 0$$

$$\Delta E_c = E_c - E_0 < 0$$

过电位

$$\eta_a = E_a - E_{ea} > 0 \quad \eta_c = E_c - E_{ec} < 0$$

*极化现象是由于电极反应存在阻力造成的，改变电流的大小，腐蚀电流也随之改变，通常把电极的电位与电流密度的关系用极化曲线来表示。

➤钝化

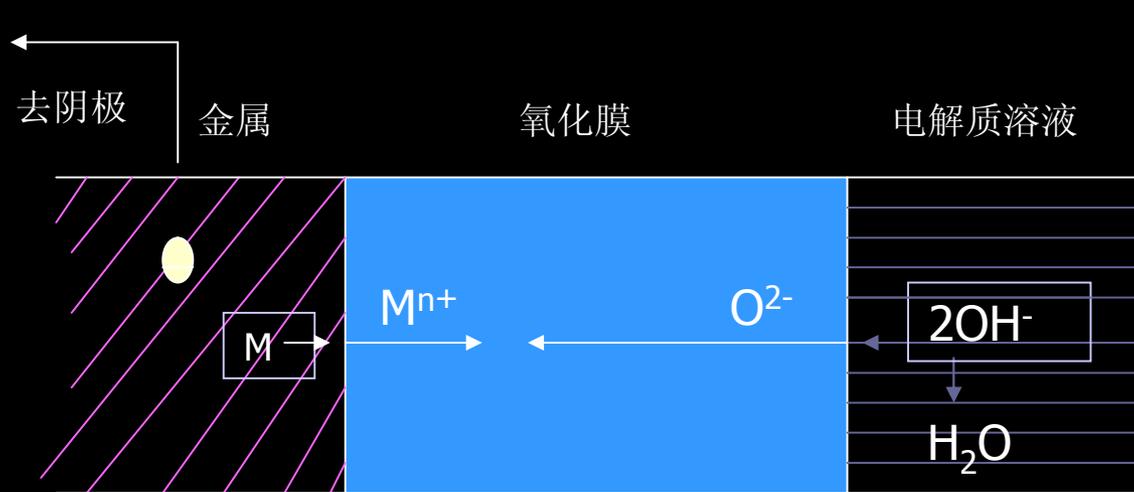
钝化就是金属与介质作用后，失去其化学活性，变得更为稳定的现象。

使金属发生钝化的物质称为钝化剂。

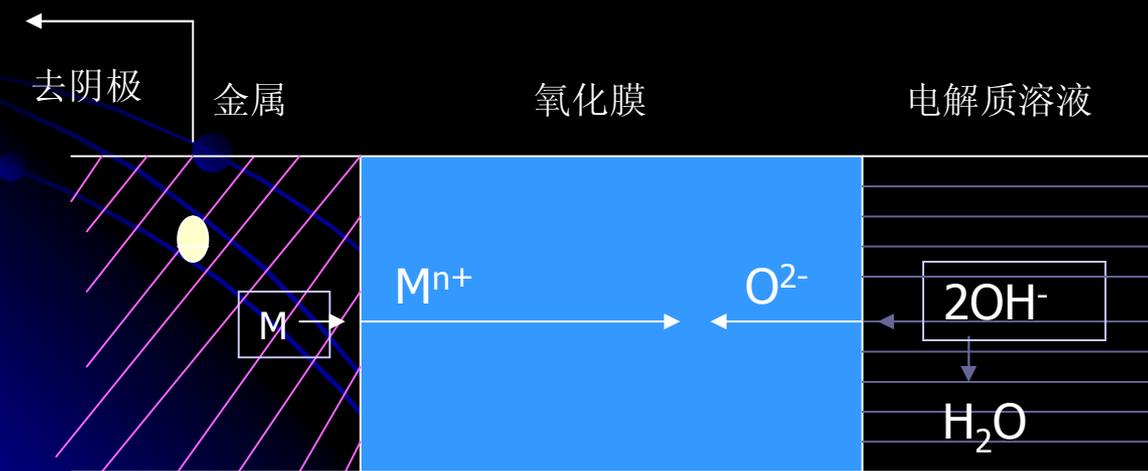
① 成相膜理论认为，当金属溶解时，可在金属表面生成一层致密的、覆盖性良好的固体产物。这些产物作为一个独立的相存在，把金属和溶液机械地隔离开来，从而使金属的溶解速度大大降低，使金属转入钝态。

② 吸附理论认为，引起金属钝化并不一定要形成固相膜，而只要在金属表面或部分表面上形成氧或含氧粒子的吸附层。这种吸附层改变了金属/溶液表面的结构，使金属反应的活化能显著升高，故金属同腐蚀介质的化学反应速度将显著减小。

表面氧化膜生长机理



(a) 阴离子迁移为主



(b) 金属离子迁移为主

(4) 氢去极化和氧去极化腐蚀

①氢去极化腐蚀：以氢离子还原反应为阴极过程的腐蚀称为氢去极化腐蚀，简称析氢腐蚀。显然，只有当金属的电极电位较氢电极的平衡电位为负时，才有可能发生析氢腐蚀。

氢去极化过程包括以下几个步骤：



d. 氢分子形成气泡，从表面逸出。

迟缓放电理论认为控制反应速度的步骤是放电，而复合理论认为，放电速度很快，控制反应的速度地复合成氢分子的这一步。

♂影响氢去极化腐蚀的主要因素

- 金属材料的性状**：材料与表面状态不同其氢过电位值不同，氢过电位值愈大，氢去极化腐蚀速度愈小，反之亦然。若杂质相的氢过电位很小，就会加速金属的腐蚀。
- pH值减小**，氢离子浓度增大，氢电极电位变得更正，加速金属的腐蚀
- 阴极区的面积增加**，氢过电位减小，阴极极化率降低，析氢反应加快，从而导致腐蚀速度增大。
- 温度升高**也使氢过电位减小，而且温度升高，阳极反应和阴极反应都将加快，所以腐蚀速度随温度的升高而增大。

✧② 氧去极化腐蚀: 在中性和碱性溶液中, 由于氢离子的浓度较低, 析氢反应的电位较负, 一般金属腐蚀过程的阴极反应往往不是析氢反应, 而是溶液中的氧的还原反应, 此时腐蚀去极化剂是氧分子。这类腐蚀称为氧去极化腐蚀, 简称吸氧腐蚀。只有当金属的电极电位较氧电极的平衡电位为负时, 才有可能发生吸氧腐蚀。

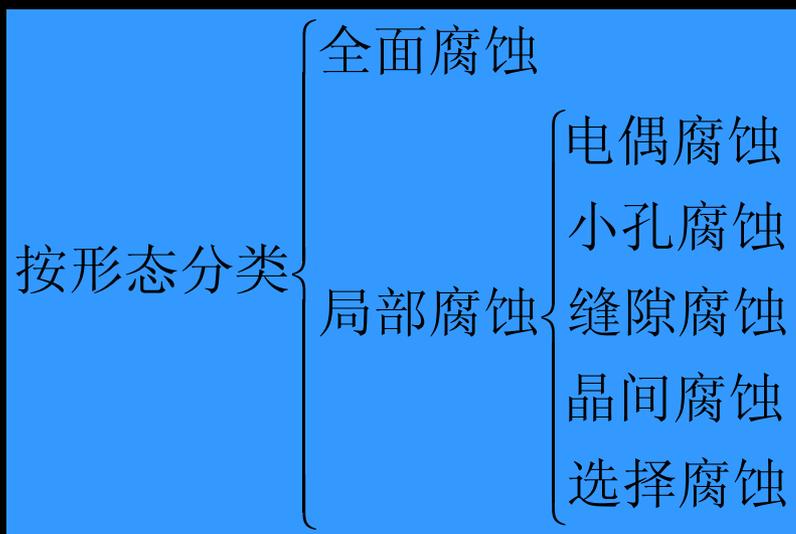
氧去极化过程有以下几个步骤组成:

- a. 氧通过气/液界面传质, 由空气进入溶液;
- b. 溶解氧通过对流扩散均布在溶液中;
- c. 氧以扩散方式通过电极表面的扩散层, 到达金属的表面;
- d. 氧在金属表面进行还原反应。

影响氧去极化腐蚀的主要因素：

- 阳极材料电极电位降低则氧去极化腐蚀的速度增大。
- 溶解氧浓度增大，氧去极化腐蚀速度随之增大。但当溶解氧浓度提高到使腐蚀电流密度达到该金属的临界钝化电流密度时，金属将由活化溶解态向钝化态转化，其腐蚀速度就会显著降低。
- 溶液流速越大，腐蚀速度也就越大。但当流速增大到氧的还原反应不再受浓差极化控制时，腐蚀速度便与流速无关。对于可钝化金属，金属便转入钝态。
- 盐浓度的增大，溶液的电导率增大，腐蚀速度将有所提高。但当盐浓度高到一定程度后，腐蚀速度反而会随盐浓度的提高而减慢。
- 温度升高氧的扩散和电极反应速度加快，因此在一定温度范围内，随温度升高腐蚀速度加快。但温度升高又会降低氧的溶解度（敞口系统），使金属的腐蚀速度减小。

3、金属腐蚀破坏的形态



(1) 全面腐蚀

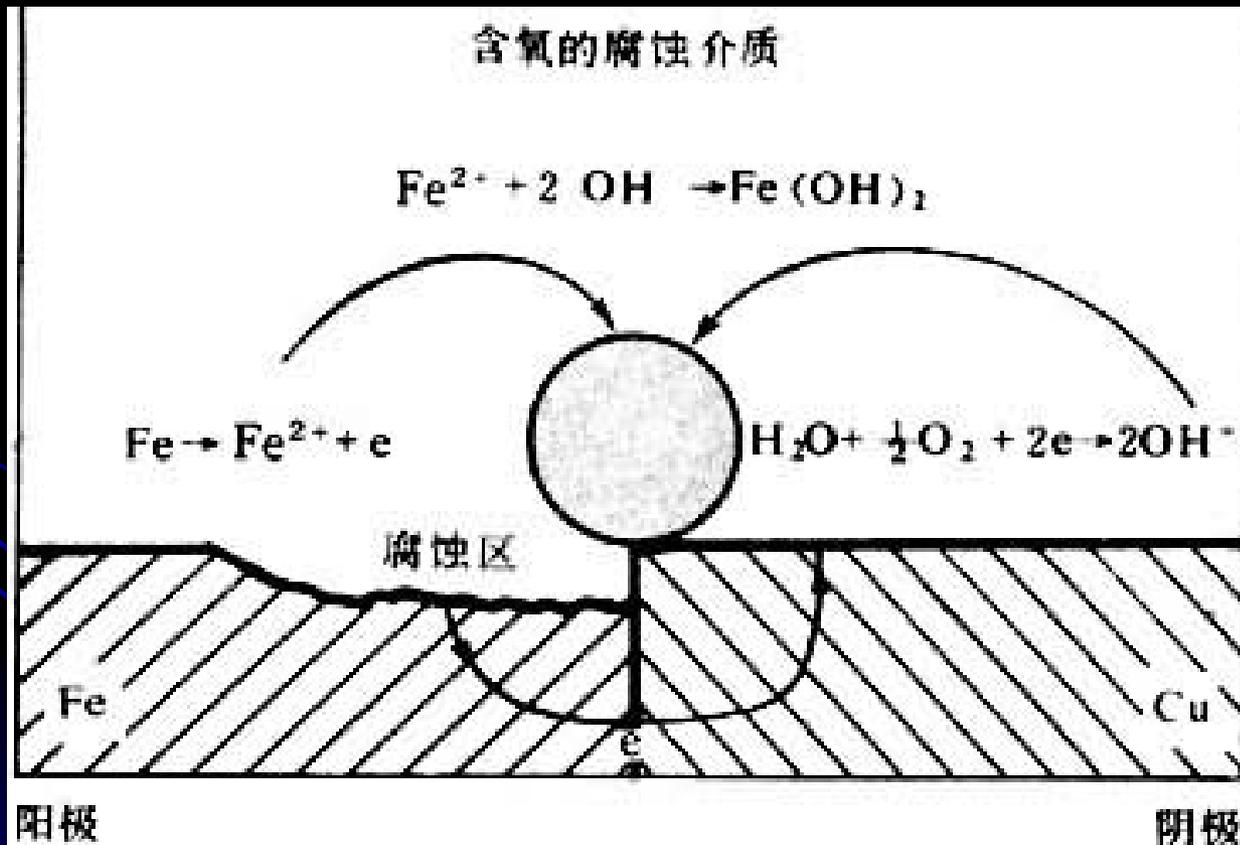
腐蚀分布在整个金属表面，结果使金属构件截面尺寸减小，直至完全破坏。纯金属及成分组织均匀的合金在均匀的介质环境中表现出该类腐蚀形态。

(2) 局部腐蚀

腐蚀集中在金属表面局部地区，而其它大部分表面几乎不腐蚀，称为局部腐蚀。

① 电偶腐蚀

两种金属在同一介质中接触，由于腐蚀电位不相等，因而它们之间便有电偶电流流动，使电位较低的金属溶解速度增加，造成接触处的局部腐蚀；而电位较高的金属，溶解速度反而减小，这就是电偶腐蚀，亦称接触腐蚀或双金属腐蚀。



防护:

- 正确选材:** 电偶腐蚀的推动力是互相接触的金属之间存在电位差。显然这种电位差越大, 电偶腐蚀就越严重。因此, 设备设计时应尽量避免异种合金互相接触。难以避免接触时, 应尽可能选取电偶序中相距较近的合金, 或者对相异合金施以相同的镀层。此外, 采用绝缘性的表面保护层以及绝缘材料垫圈等都是防止电偶腐蚀的有效方法。
- 消除面积效应:** 电偶对中阴极金属与阳极金属面积比, 对电偶腐蚀影响极大, 大阴极、小阳极的电偶, 将使阴极电流密度剧增, 造成严重腐蚀
- 添加适当的缓蚀剂,** 也可以有效地控制电偶腐蚀。

② 小孔腐蚀

在金属表面局部地区出现向深处发展的腐蚀小孔，而其余地区不被腐蚀或者只有很轻微的腐蚀，这种腐蚀形态称为小孔腐蚀，简称孔蚀或点蚀。

孔蚀的影响因素及其控制主要包括以下几方面的内容：

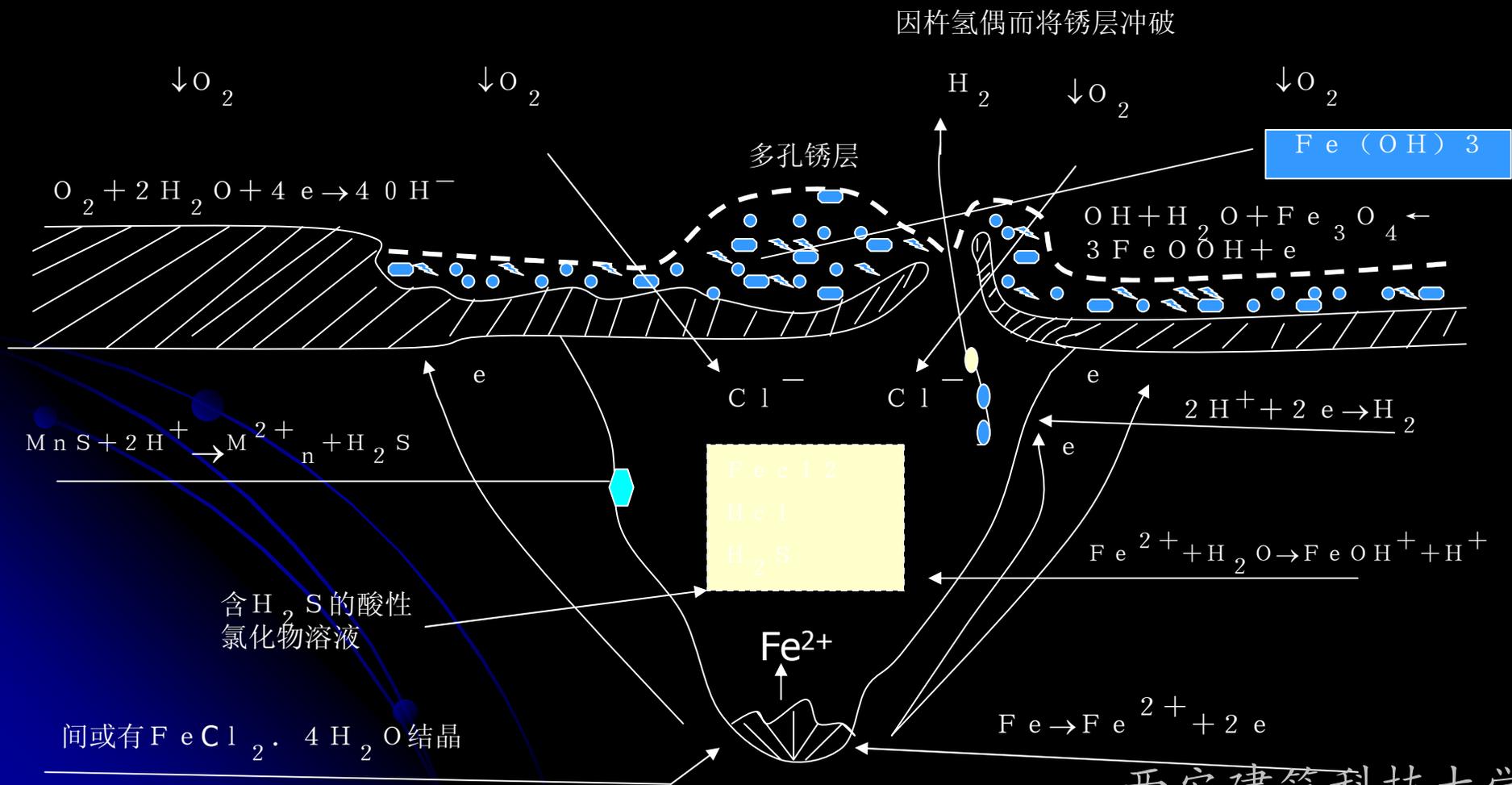
- **合金的成分和组织**：孔蚀的敏感性与合金的成分、组织以及冶金质量有密切的关系。
- **介质的组成和状况**：大多数的孔蚀是在含有卤族元素化合物的介质中发生的，因此，为预防孔蚀应尽量降低介质中卤素。此外，对溶液进行搅拌、循环或通气也有利于预防和减轻孔蚀。
- **缓蚀剂**：硝酸盐、铬酸盐、硫酸盐及碱等能增加钝化膜的稳定性或有利于受损的钝化膜的再钝化，因而都是有效防止孔蚀的缓蚀剂。
- **阴极保护**：利用阴极保护法，使金属的电极电位控制在孔蚀保护电位以下，就可以抑制孔蚀。

起源于硫化物夹杂的碳钢孔蚀机理示意图

根据 W r a n g l e n

↓O₂ ↓O₂ ↓O₂ ↓O₂ ↓O₂ ↓O₂

中性充气氯化钠溶液



③ 缝隙腐蚀

- 金属部件在介质中，由于金属与金属或金属与非金属之间形成特别小的缝隙(一般在0.025~0.1mm之间)，使缝隙内介质处于滞流状态，引起缝内金属的加速腐蚀，这种局部腐蚀称为缝隙腐蚀。

- 缝隙腐蚀的机理与孔蚀很相似，其区别主要在于腐蚀的初始段。在腐蚀形态上，孔蚀的蚀孔窄而深，而缝隙腐蚀的蚀坑则相对地广而浅。

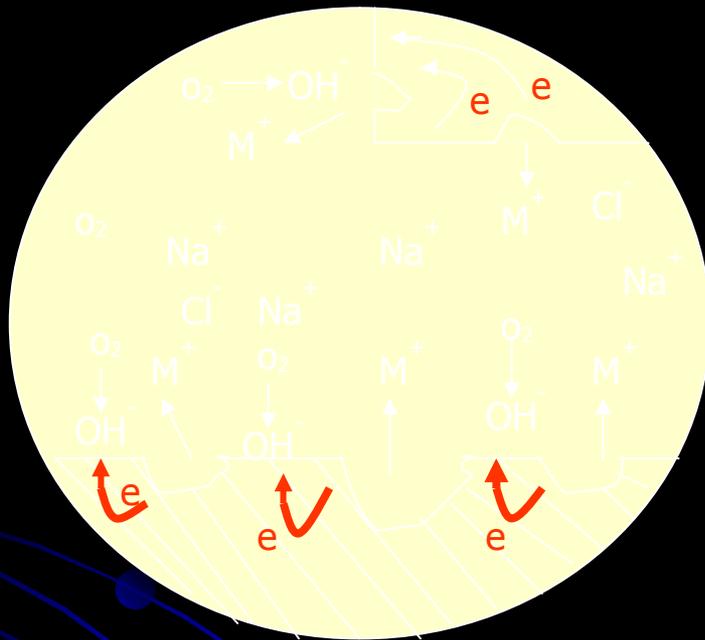
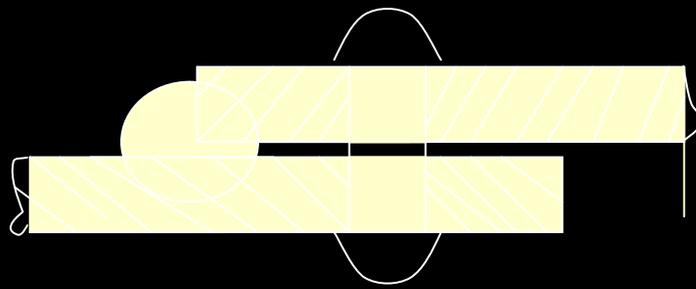
- 缝隙腐蚀的影响因素与孔蚀的相似：

◆防护

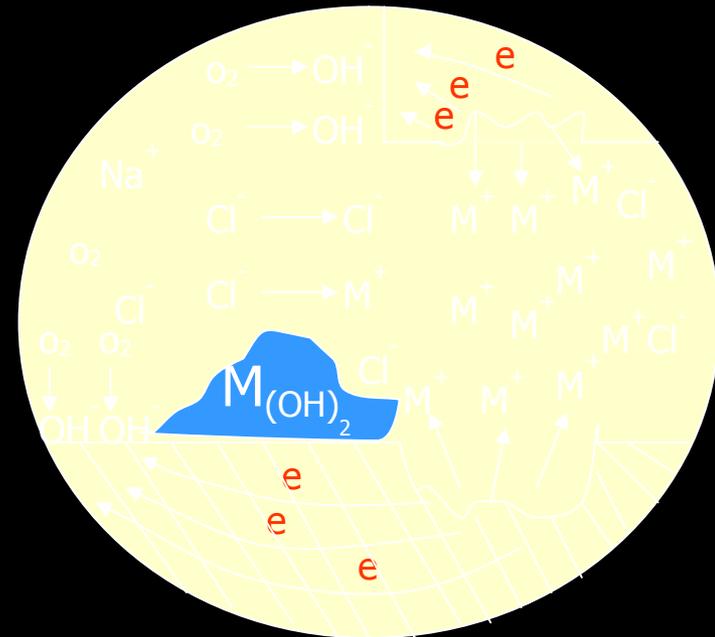
- 控制缝隙腐蚀除可以采取防止孔蚀的相似措施外，设计中还应尽量注意结构的合理性，尽可能避免形成缝隙和积液的死角。

- 对不可避免的缝隙，要采取相应的保护措施。

- 另外，尽量控制介质中溶解氧的浓度，使溶氧浓度低于 5×10^{-6} ，这样在缝隙处就很难形成氧浓差电池。



初期阶段



后期阶段

金属在海水中（中性氯化物溶液）缝隙腐蚀

局部腐蚀

④ 晶间腐蚀

腐蚀沿着金属或合金的晶粒边界区域发展，而晶粒本体的腐蚀很轻微，称为晶间腐蚀。是一种由材料微观组织电化学性质不均匀引发的局部腐蚀。

贫化理论认为晶界与晶内的电极电位的形成，形成一晶界区为阳极，晶粒本体为阴极的微观腐蚀电池。

晶间腐蚀的控制应着眼于材料本身的成分和组织。以奥氏体不锈钢敏化型晶间腐蚀为例：

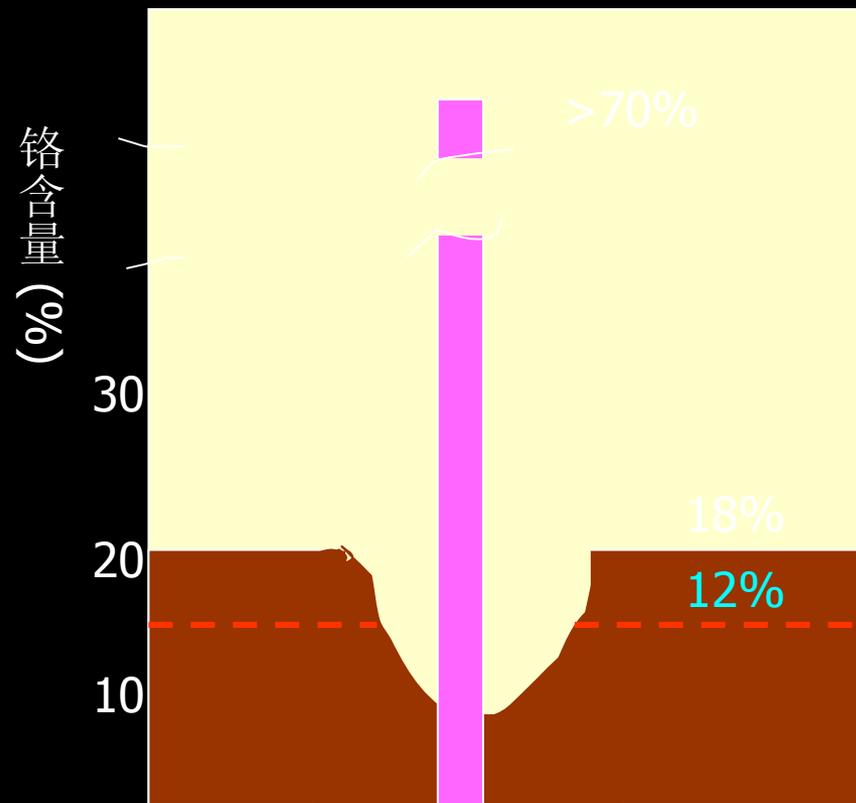
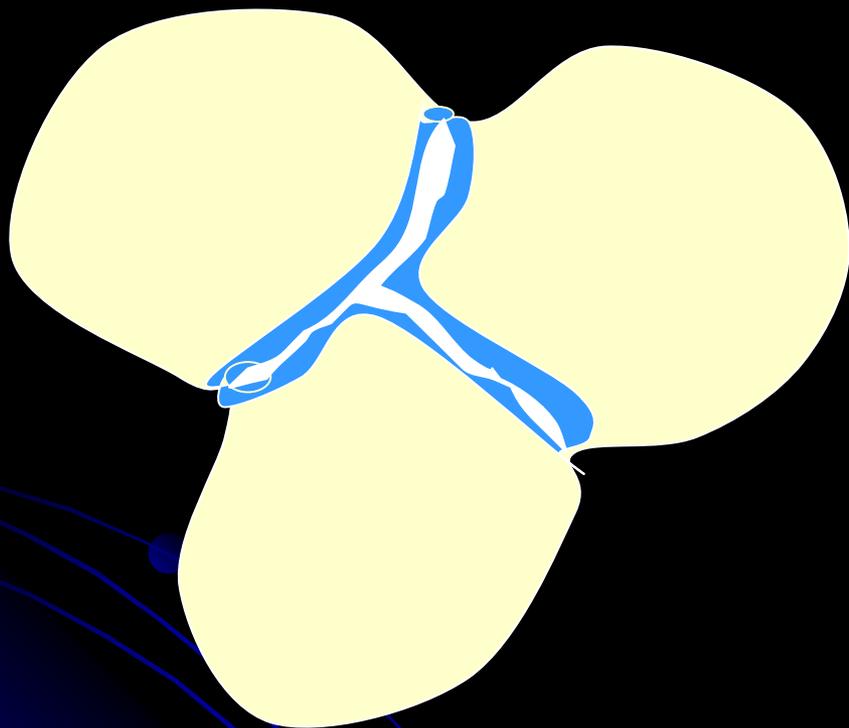
- 降低钢的含碳量
- 稳定化处理
- 重新固溶处理

⑤ 选择性腐蚀

多元合金在电解质溶液中由于组元之间化学性质的不均匀，构成腐蚀电池。

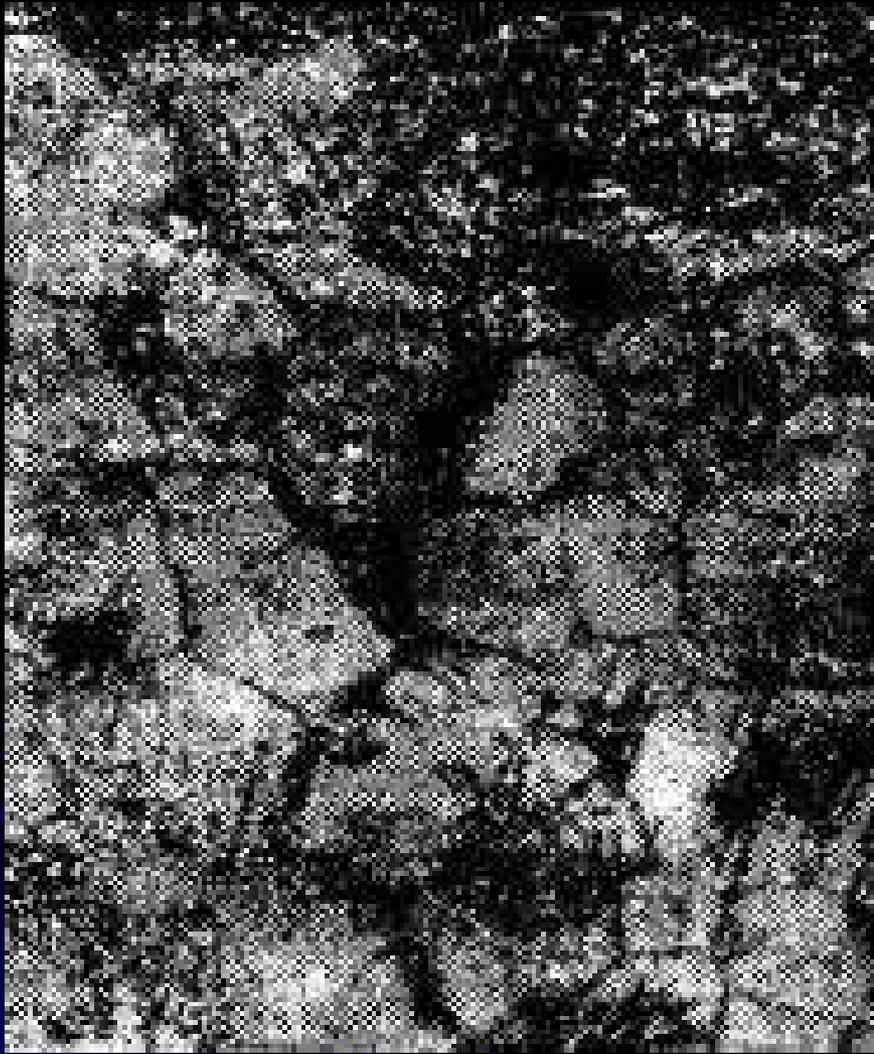
 $(Fe,Cr)_{23}C_6$

 贫铬区



晶界上的 $(Fe,Cr)_{23}C_6$

不锈钢晶界上铬的析出和贫铬区的形成



晶间腐蚀

(3) 应力作用下的腐蚀

结构和零件的受力状态是多种多样的，如拉伸应力、交变应力、冲击力、振动力等。不同应力状态与介质协同作用所造成的环境敏感断裂形式各不相同。

① 应力腐蚀开裂:材料在静应力和腐蚀介质共同作用下发生的脆性开裂破坏现象称为应力腐蚀开裂，简称应力腐蚀。应力腐蚀是危害最大的腐蚀形态之一。应力腐蚀应是电化学腐蚀和应力机械破坏互相促进裂纹的生成和扩展的过程。

敏感的合金、特定的介质和一定的静应力是发生应力腐蚀的三个必要条件。对于一定的材料，其应力腐蚀只在特定的介质中发生。这种材料与敏感介质的组合关系，称为应力腐蚀体系。

应力腐蚀的机理分为阳极溶解和氢脆机理两种。

- 阳极溶解机理**：该机理认为应力腐蚀裂纹的形成与扩展是阳极通道的形成与其延伸的过程。

- 氢脆机理**：认为阴极析氢反应在金属表面形成的吸附氢原子渗入内部引起氢脆，是导致应力腐蚀的主要原因。

要避免应力腐蚀或对应力腐蚀加以控制，应主要考虑以下几方面的措施：

- 正确选材**：根据介质情况正确选材，避免构成应力腐蚀体系，或者减轻材料对应力腐蚀的敏感性。

- 合理设计、改进制造工艺**：结构设计应尽量减少应力集中效应，制造工艺应避免造成残余拉应力，采取表面强化方法，使零件表面产生残余压应力，以期抵消或削弱拉应力的作用。

- 改善环境介质**：一方面设法消除或减少介质中促进应力腐蚀的有害物质；另一方面可以向介质中加入适当的缓蚀剂。

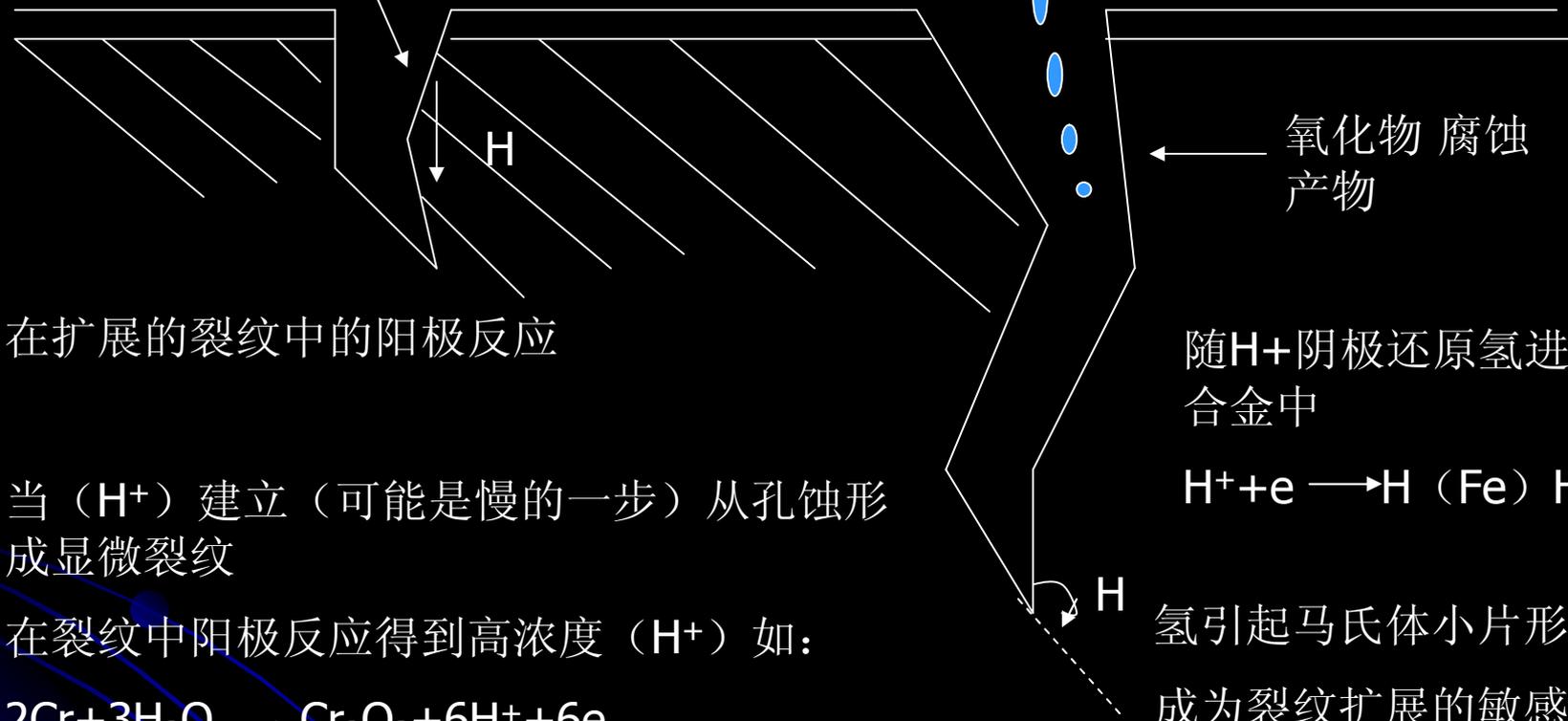
- 电化学保护**：外加电流极化，使金属的电位远离应力腐蚀敏感区。但对氢脆敏感的材料则不能采取阴极保护。

钝化表面上的阴极反应:



H₂出口

Cl⁻离子使钝化膜破坏产生的孔蚀



在扩展的裂纹中的阳极反应

当 (H⁺) 建立 (可能是慢的一步) 从孔蚀形成显微裂纹

在裂纹中阳极反应得到高浓度 (H⁺) 如:



随H⁺阴极还原氢进入合金中



氢引起马氏体小片形成成为裂纹扩展的敏感途径

在氯化物介质中奥氏体不锈钢裂纹形成和扩展模型

(根据Rhodes)

② **腐蚀疲劳**: 腐蚀介质和交变应力协同作用所引起的材料破坏的现象, 称为腐蚀疲劳。

同应力腐蚀和机械疲劳相比, 腐蚀疲劳的特点主要表现在:

- a. 腐蚀疲劳没有真实的疲劳极限。
- b. 腐蚀疲劳在任何腐蚀介质中都可能发生, 但必须交变应力和腐蚀介质同时作用条件下, 才能产生腐蚀疲劳。
- c. 腐蚀疲劳性能与载荷频率、应力以及载荷波形有密切关系。
- d. 腐蚀疲劳裂纹往往是多源的; 与应力腐蚀相比, 腐蚀疲劳裂纹的扩展很少有分叉的情况。

腐蚀疲劳的控制主要采取以下几方面的措施。

- **正确选材**: 一般地讲, 耐孔蚀的材料腐蚀疲劳性能好; 对应力腐蚀敏感的材料, 其腐蚀疲劳性能则较差
- **合理设计、改进制造工艺** 结构设计应避免应力集中。表面强化处理和表面合金化可以显著提高腐蚀疲劳性能

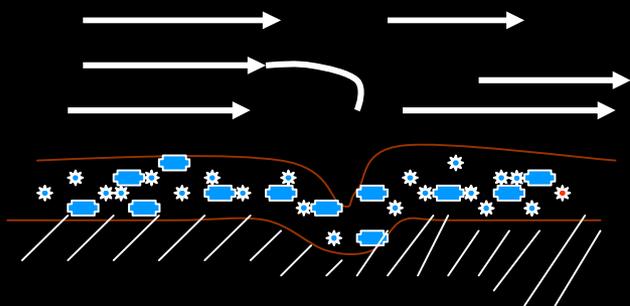
- 改善介质条件**：如封闭体系中水中的除氧，以及水中添加铬酸盐等缓蚀剂均可延长钢材的腐蚀疲劳寿命。

- 电化学保护**：阴极保护常用于海洋环境金属结构的腐蚀疲劳控制，效果良好。

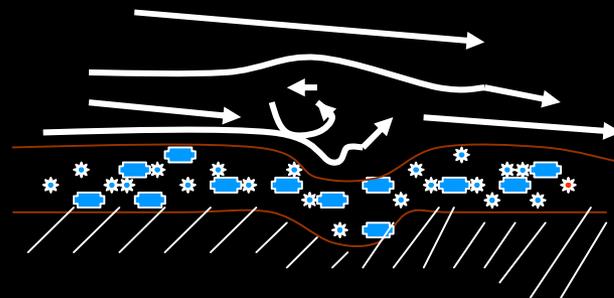
③ **磨损腐蚀**：流体介质与金属之间或金属零件间的相对运动，引起金属局部区域加速腐蚀破坏的现象称为磨损腐蚀，简称磨蚀。磨蚀又可分为湍流腐蚀、空泡腐蚀和摩振腐蚀。

A)湍流腐蚀：在设备或部件的某些特定部位，介质流速急剧增大形成湍流，由此造成的腐蚀称为湍流腐蚀。湍流一方面加速了阴极去极化剂的供应量，同时也增加了流体对金属表面的切应力，若流体中含有固体颗粒，则金属表面的磨损腐蚀将更加严重。

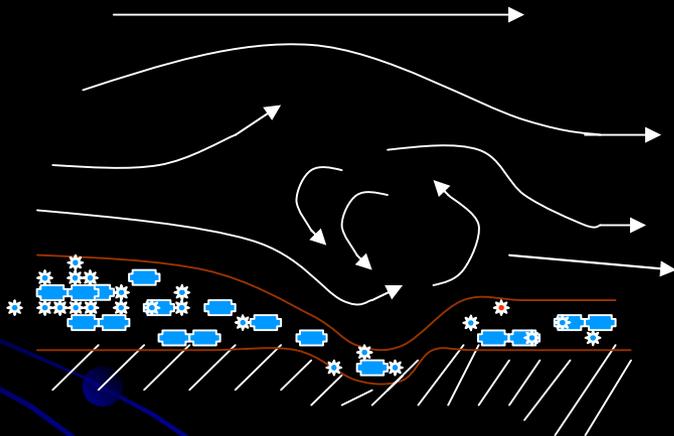
湍流腐蚀的控制可采取合理选材、改善设计、降低流速、去除介质中的有害成分、覆盖防护层和电化学保护等多种方法。



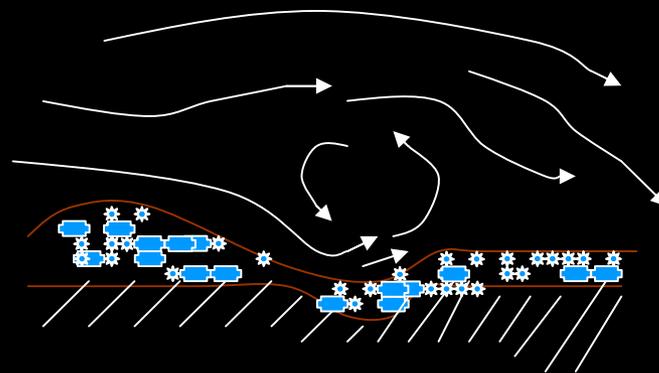
(a)



(b)



(c)



(d)

湍流造成磨损腐蚀坑的机理

根据C. LOSS等，转引自《Conosion Processes》 P177

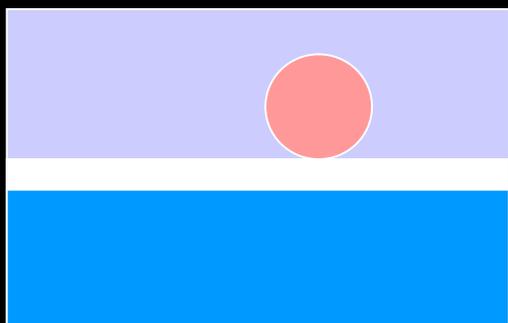
B)空泡腐蚀： 流体与金属构件作高速相对运动，在金属表面局部区域产生湍流，且伴随有气泡在金属表面生成和破灭，使金属呈现与孔蚀类似的破坏特征，这种腐蚀称为孔泡腐蚀，也称气蚀。

控制空泡腐蚀的有效方法首先是合理选材；或在构件上涂加保护层；减弱或吸收气泡破裂时的高压冲击波；提高构件表面的光洁度；在构件设计时应根据水力学原理，尽可能避免造成压力突变区，防止气泡的生成。

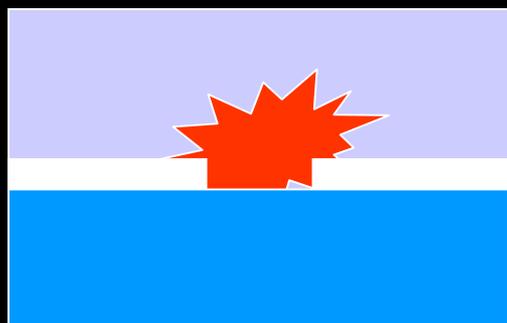
C)摩振腐蚀：摩振腐蚀是指在加有荷载的互相紧密接触的两构件表面之间，由于微小振动和滑动，使接触面出现麻点或沟纹，并在其周围存在着损伤微粒（腐蚀产物）的腐蚀破坏现象。摩振腐蚀也叫微动腐蚀、磨损氧化。摩振腐蚀的机理主要有磨损-氧化和氧化-磨损两种理论。

减少或抑制摩振腐蚀，可采取以下几方面的措施：

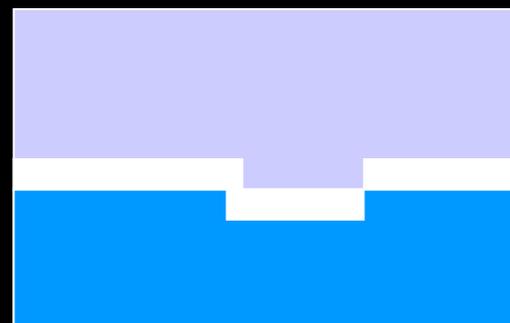
●阻止接触面的相对微动 在构件设计时通过增大接触面的法向应力，可阻止相对微动，并添加垫圈以吸收振动。另外在安装与检修时，要尽量紧固相接触的工件。



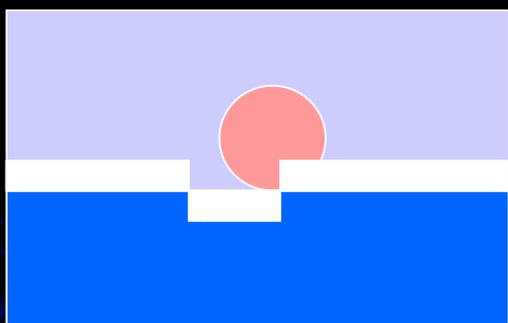
(1) 形成气泡



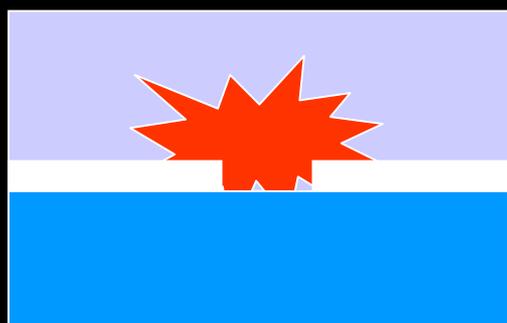
(2) 气泡破灭，膜破坏



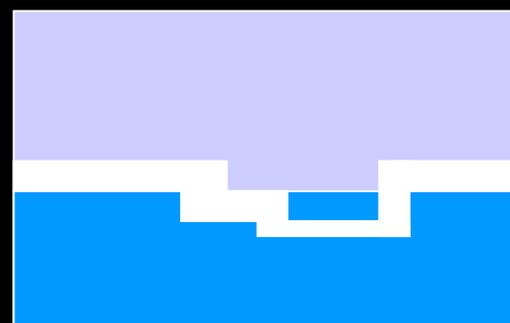
(3) 重新成膜



(4) 形成新气泡



(5) 气泡破灭，膜毁坏

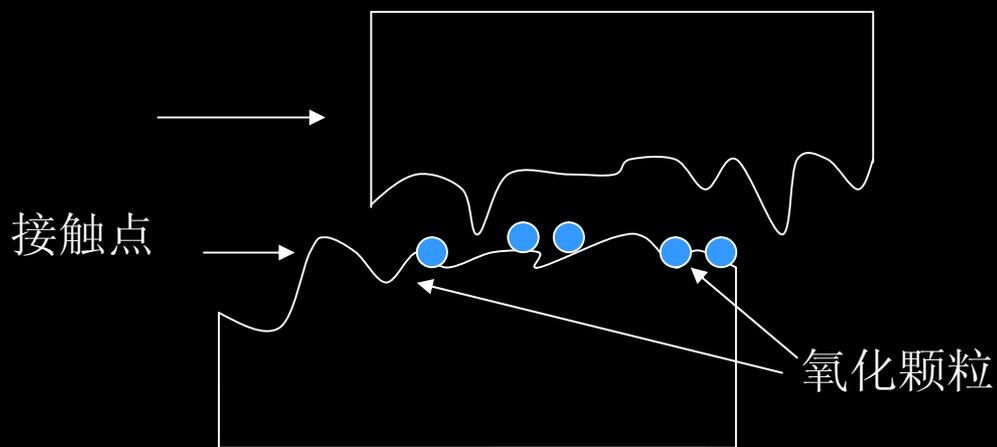
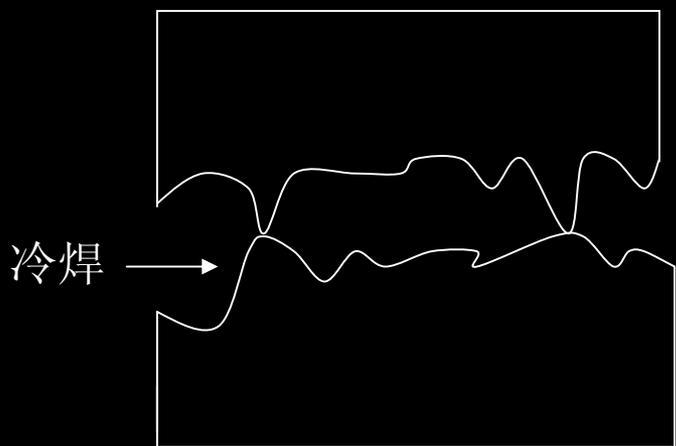


(6) 重新成膜

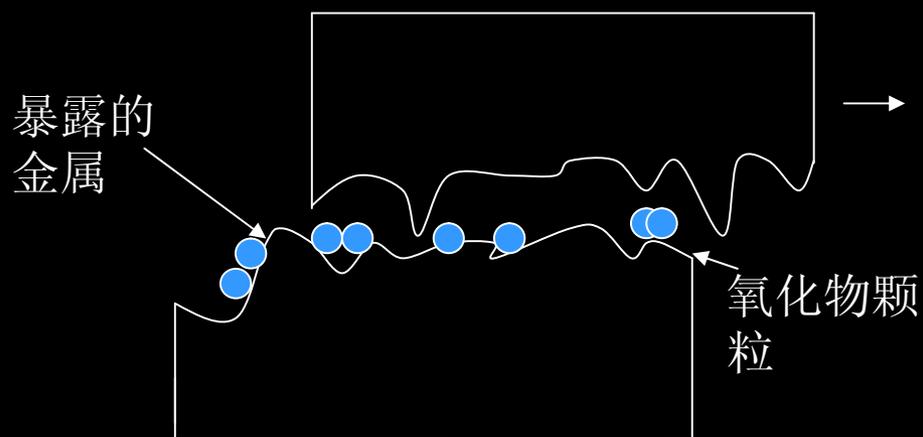
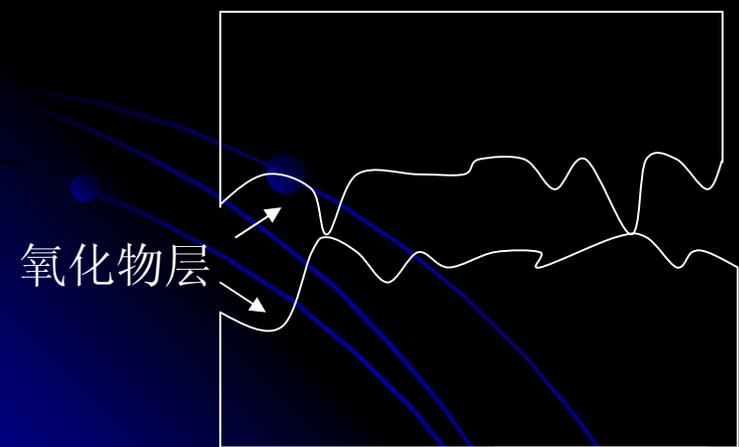
空泡腐蚀各步骤示意图

(根据 Henlee)
西安建筑科技大学

前



磨损——氧化理论



摩擦腐蚀理论示意图

西安建筑科技大学

- 使用润滑剂:通过润滑作用减小摩擦系数，减少磨损。
- 表面电镀:在金属表面电镀镉、锌等低熔点金属，能减小摩擦系数；若电镀铬等高熔点金属，则不易发生冷焊。
- 提高接触金属的硬度:通过合理选材、表面氮化、表层冷变形强化等措施，均可提高接触面的硬度，从而减轻摩擦腐蚀。

(4) 微生物腐蚀

由于介质中存在着某些微生物而使金属的腐蚀过程加速的现象，称之为微生物腐蚀，也简称为细菌腐蚀。并非微生物本身对金属的腐蚀，而是它们生命活动的结果直接或间接地对金属腐蚀过程产生影响。

- 1) 微生物对金属腐蚀过程的影响主要体现在以下几个方面：
 - ①代谢产物具有腐蚀作用。如硫酸、有机酸和硫化物。
 - ②改变环境介质条件。如：pH值、溶解氧等。
 - ③影响电极极化过程。
 - ④破坏非金属保护覆盖层或缓蚀剂的稳定性。

●2) 常见的细菌腐蚀:

①**厌氧性细菌腐蚀:**影响地下钢铁设备、构件腐蚀性最为重要的厌氧菌是硫酸盐还原菌（SRB）。这种菌能使硫酸盐还原成硫化物，而硫化物与介质中的碳酸等物质作用生成硫化氢，进而与铁反应形成硫化铁，加速了钢铁的腐蚀。

②**好氧性细菌的腐蚀:**指适于并仅能在含有游离氧的环境中繁殖生存的一类微生物，如硫氧化菌、铁细菌、硫代硫酸盐氧化菌等。以硫氧化菌为例，它可将元素硫和含硫化合物氧化成硫酸，造成腐蚀性极强的环境，导致材料的快速腐蚀。

③**厌氧与好氧联合作用下的腐蚀:**在实际环境中，由于好氧菌的腐蚀往往会造成厌氧的局部环境，使厌氧菌也得到繁殖，这样两类细菌的腐蚀与繁衍相辅相成，更加速了金属的腐蚀。细菌联合作用腐蚀的情况很普遍。

3) 细菌腐蚀的控制:

原则上凡能够抑制细菌繁殖或电化学腐蚀的措施，都有助于防止或削弱金属的细菌腐蚀。采取的措施主要包括：

- 使用杀菌剂或抑菌剂：根据细菌种类及介质选择高效、低毒和无腐蚀性的药剂。
- 改变环境条件：提高介质的pH值及温度（ $\text{pH}>9.0$ ，温度 $T>50^{\circ}\text{C}$ ）、排泄积水、改善通气条件、减少有机物营养源等。
- 覆盖防护层：采用涂覆非金属覆盖层或金属镀层使构件表面光滑、在有机涂层中加入适量杀菌剂等方法，可避免细菌的附着，减少细菌成垢机会，防止真菌对涂层的破坏。
- 阴极保护：阴极保护使构件表面附近形成碱性环境，抑制细菌活动。

4、非金属材料的腐蚀

非金属材料与环境介质作用，性能发生蜕化，甚至完全丧失使用功能的现象，称为非金属材料的腐蚀。

非金属材料的组成和结构与金属完全不同，两者的腐蚀原理也有着本质的区别。除石墨外，非金属材料的导电性很差或完全不导电，所以即使将其置于电解质溶液中，也不会发生电化学腐蚀。非金属材料的腐蚀主要是由物理作用和化学作用引起的。

(1) 非金属无机材料的腐蚀

设备腐蚀防护方面涉及的耐蚀非金属无机材料，大多属于硅酸盐材料。

如：硅酸盐搪瓷的腐蚀实质上是搪瓷釉的腐蚀。

硅酸盐搪瓷釉的主要成分为 SiO_2 ，并含有多种碱金属或碱土金属氧化物。它具有很好的耐酸性，而耐碱性较差。
对键瓷科技大学

(2) 非金属有机材料的腐蚀

非金属有机材料的腐蚀与金属的腐蚀完全不同，其腐蚀过程主要是物理的或化学的作用，而不是电化学过程。

①**物理腐蚀**: 高分子材料的物理腐蚀就是其在介质中的溶解。整个溶解过程分为溶胀和溶解两个阶段。

非晶态: 线型结构溶胀后能溶解，体型结构只能溶胀

晶态: 难溶胀和溶解。

防止措施: 针对具体的介质条件选材

极性原则: 非极性的高分子材料不易溶于极性溶剂中; 极性高分子材料不易溶于非极性溶剂中。

溶解度参数原则: 溶解度参数是一个近似描述溶剂分子之间或高分子材料大分子链间作用力大小的参数。当溶剂溶解度参数与高分子材料溶解度参数的差值小于1.7时为不耐溶剂腐蚀; 大于2.5为耐溶剂腐蚀; 1.7~2.5为有条件的耐溶剂腐蚀。

②**化学腐蚀**:高分子材料的大分子中总含有一些具有一定活性的极性基团。这些极性基团与特定的介质发生化学反应,导致了材料性能的改变,从而造成了材料的老化或者裂解破坏,即为高分子材料的化学腐蚀。

水解反应:高分子链中O、N、Si等原子能与碳原子构成极性键,这些极性键能与水发生水解。

氧化反应:大分子链上存在易被氧化的薄弱环节,能与氧等作用而发生讲解。

取代反应:碳链中的氢原子被其它原子或原子团所取代。

交联反应:使高分子化合物成为网状,交联度的大小会影响性能。

③**微生物腐蚀**:微生物(包括真菌、霉菌及细菌)作用引起的腐蚀。许多高分子材料,如天然橡胶、大部分的含有增塑剂的热固性塑料和热塑性塑料等都含有微生物所必需的养分,因此只要有合适的温度和湿度,微生物便会在这些材料上生活与繁殖,导致设备的腐蚀

④**应力腐蚀**：高分子材料的应力腐蚀是高分子材料在受力状态下所发生的物理或化学腐蚀，并使材料在低于正常断裂应力下产生银纹、裂纹、直至断裂的现象。

应力腐蚀不仅与介质有关，也与高分子材料的性质有关。

三、设备腐蚀防护技术

1、腐蚀防护设计

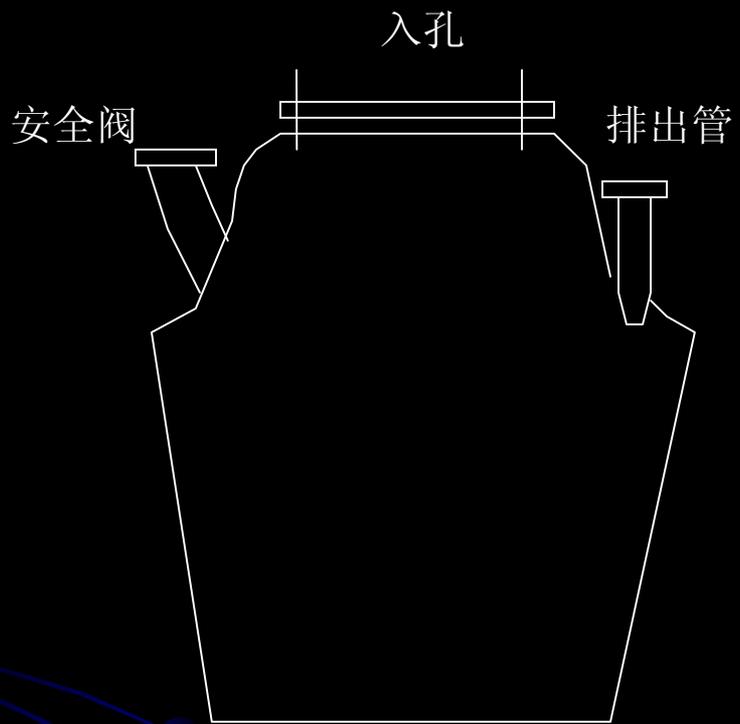
腐蚀防护设计除正确选材外，具体还包括防蚀方法的选择、防蚀结构设计、防蚀强度设计以及满足防蚀要求的加工方法。

(1) 防蚀结构设计

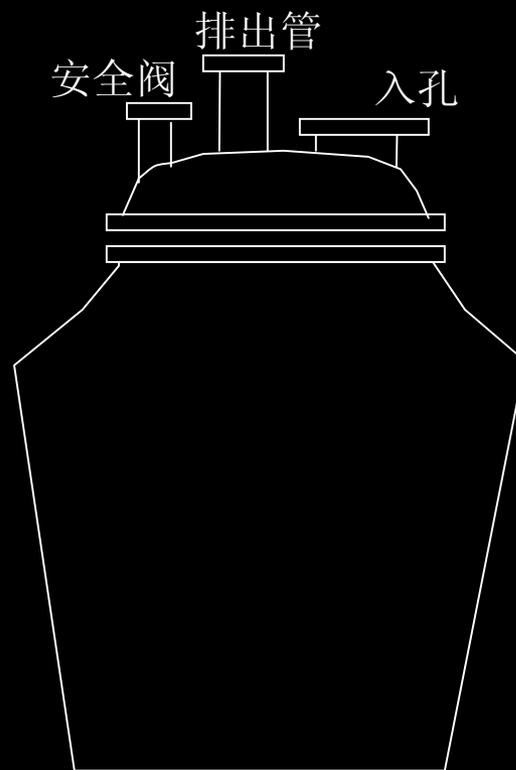
在设备的结构设计中，应同时考虑腐蚀防护方面的要求，包括下述原则：

① 构件形状尽量简单、合理

简单的结构件易于采取防腐措施、排除故障，便于维修、保养和检查。

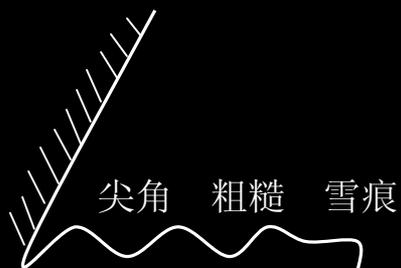


不良

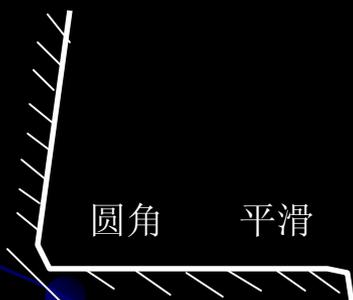


良

尽量集中附件、简化主体设计



[不良]



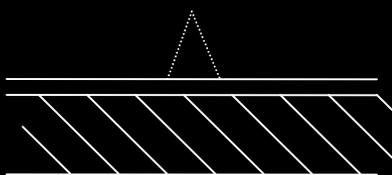
[良]



[不良 (焊接缺陷)]



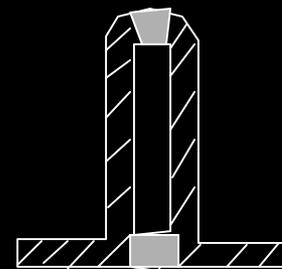
[良]



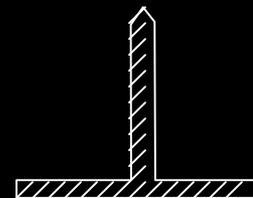
[良 (磨去凸出物)]



[良 (填充孔隙)]

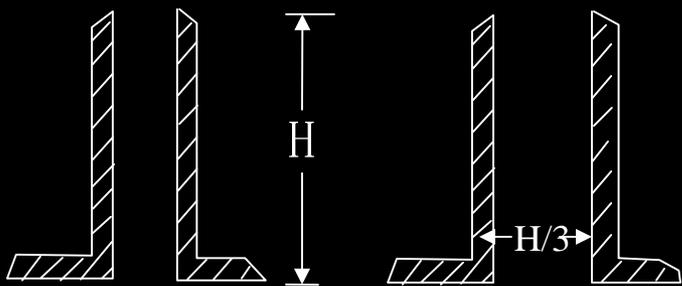


[较好]



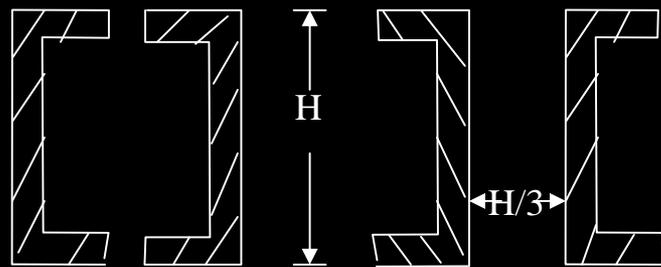
[最好]

表面;应简单、平滑、清洁，避免尖角和切痕。焊缝应整理和打磨，除去凹出物，填充孔隙，突出的紧固件愈少愈好



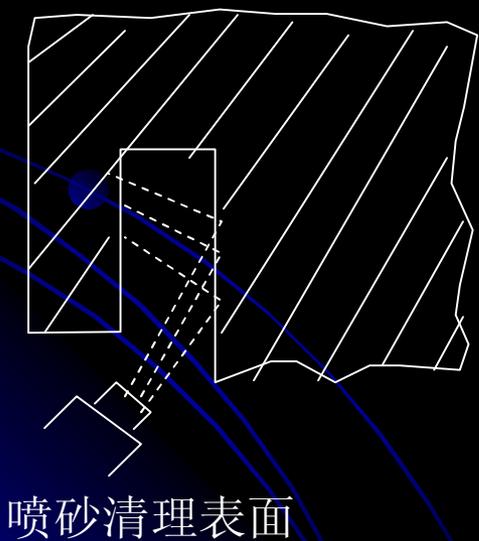
不良

良

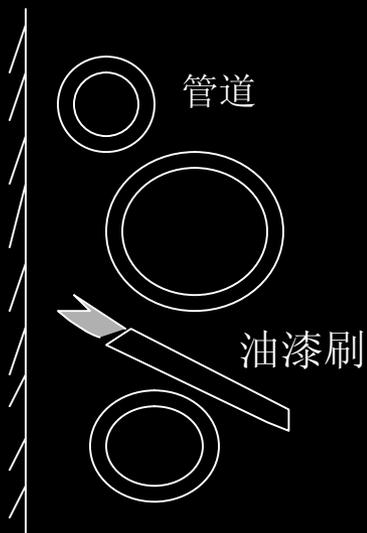


不良

良



喷砂清理表面



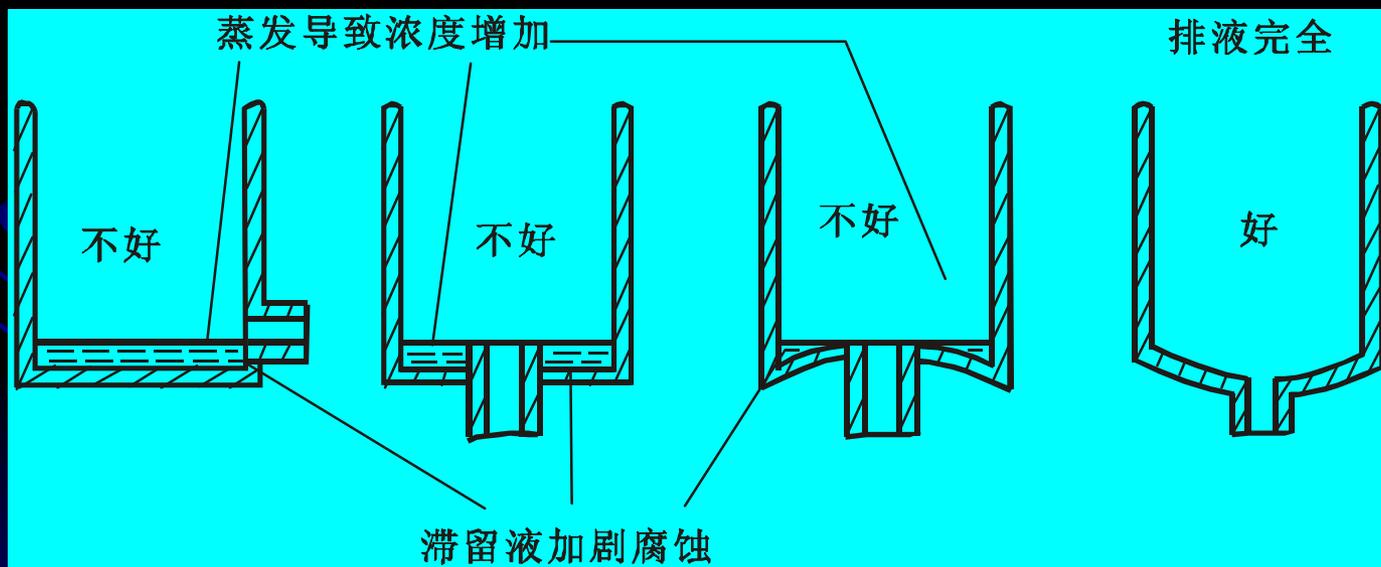
管道

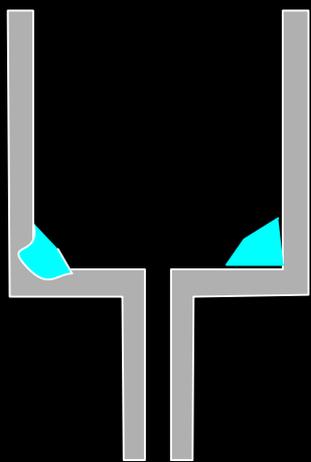
油漆刷

设备结构应考虑表面清理、防腐蚀施工、检查和维修的需要

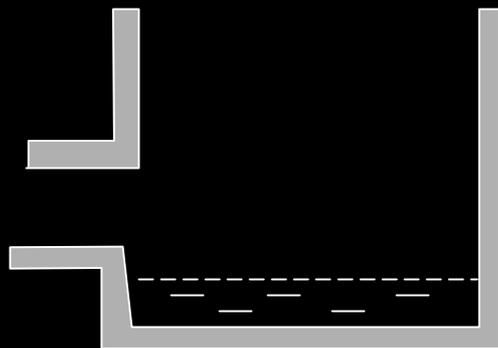
② 避免残留液和沉积物造成腐蚀

设备、容器出口管及底部的结构设计，应力求将其内部的液体排净，避免滞留的液体、沉积物造成浓差腐蚀或沉积物腐蚀。构件布置要合理，避免水分积存，且要易于油漆和维修。在可能的情况下，贮液容器内部应尽量设计成流线型。

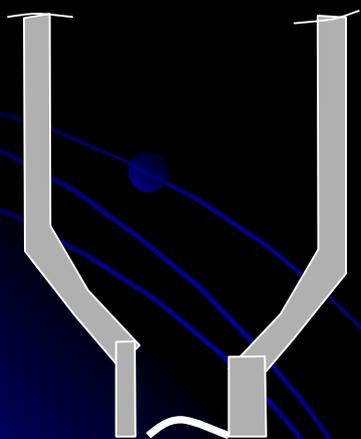
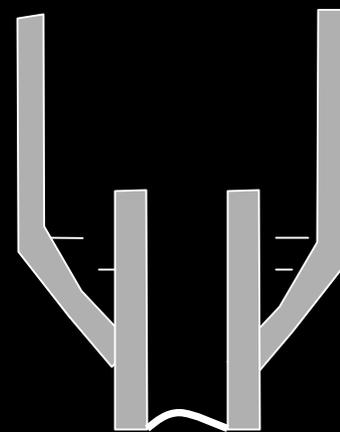




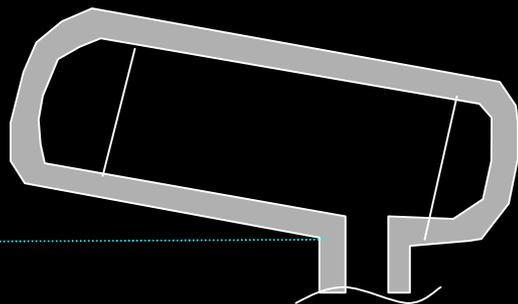
不良（聚积沉淀）



不良（液体停滞）

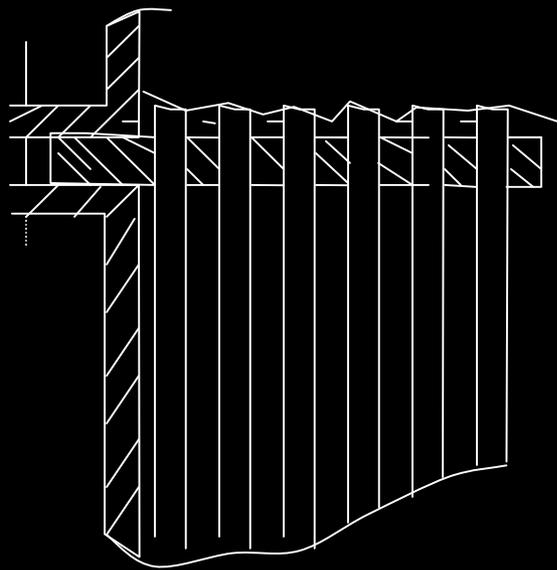


良

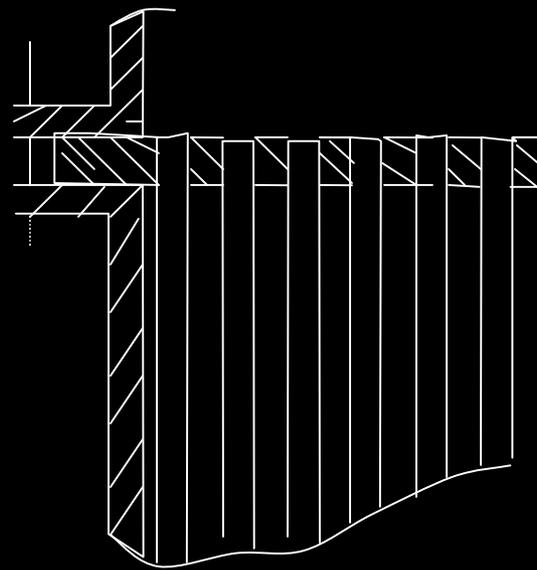


良（卧式容器向出口倾斜）

贮罐和容器
应有利于排液



不良（液体残苒）



良

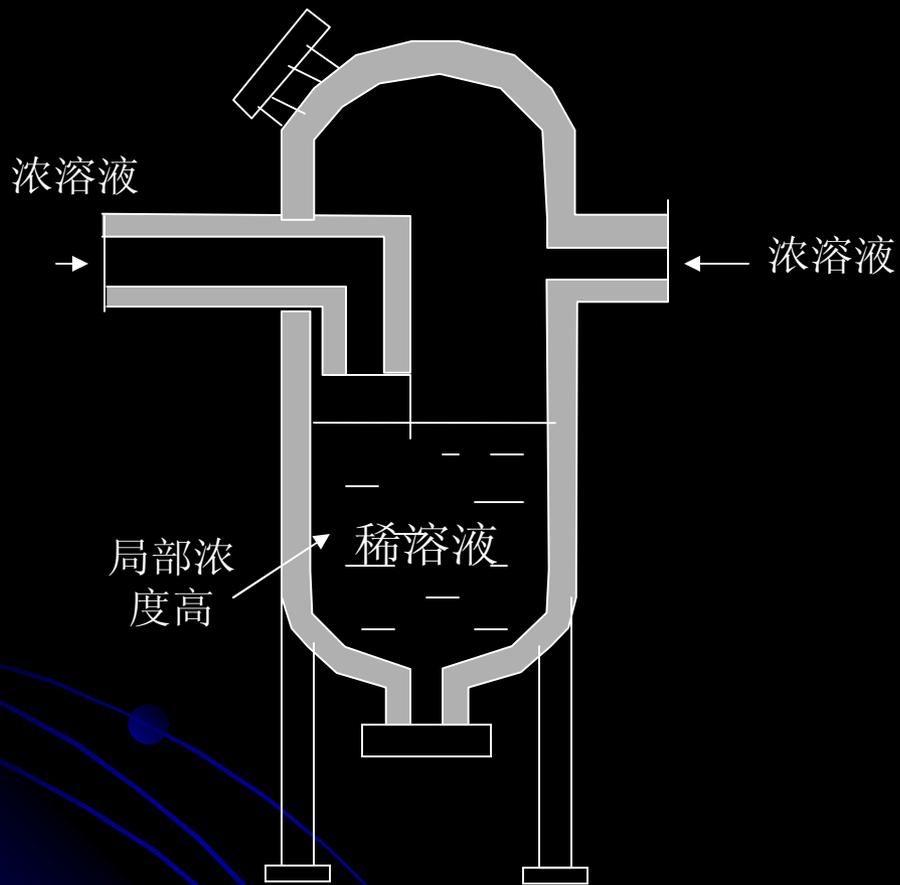
立式热交换器上端管束应与管板平齐

消除浓度不均：

为了使溶液中各部分的浓度和充气情况趋向均匀，在必要时应设置搅拌装置；

在向容器中加入浓液时，加入管最好安装在容器中心；

管壳式热交换器的气液交界面是腐蚀严重的部位，这里容易造成有害成分浓缩、温度不均匀、高速气流冲刷。如有可能，提高液面使管束完全浸没，是保护管束的有效措施。

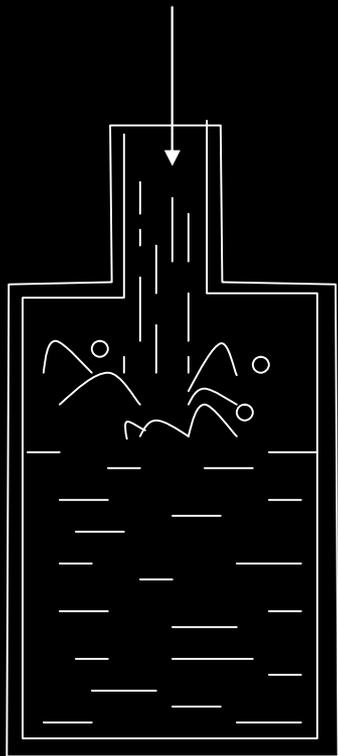


不良

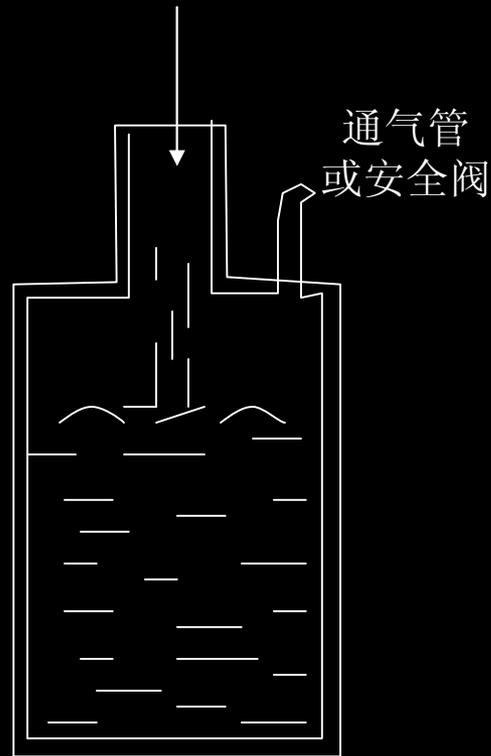


良（避免浓度不均）

浓溶液的进口管应安装在容器中心



不良（液体飞溅，使
器壁积聚凝液和污垢）

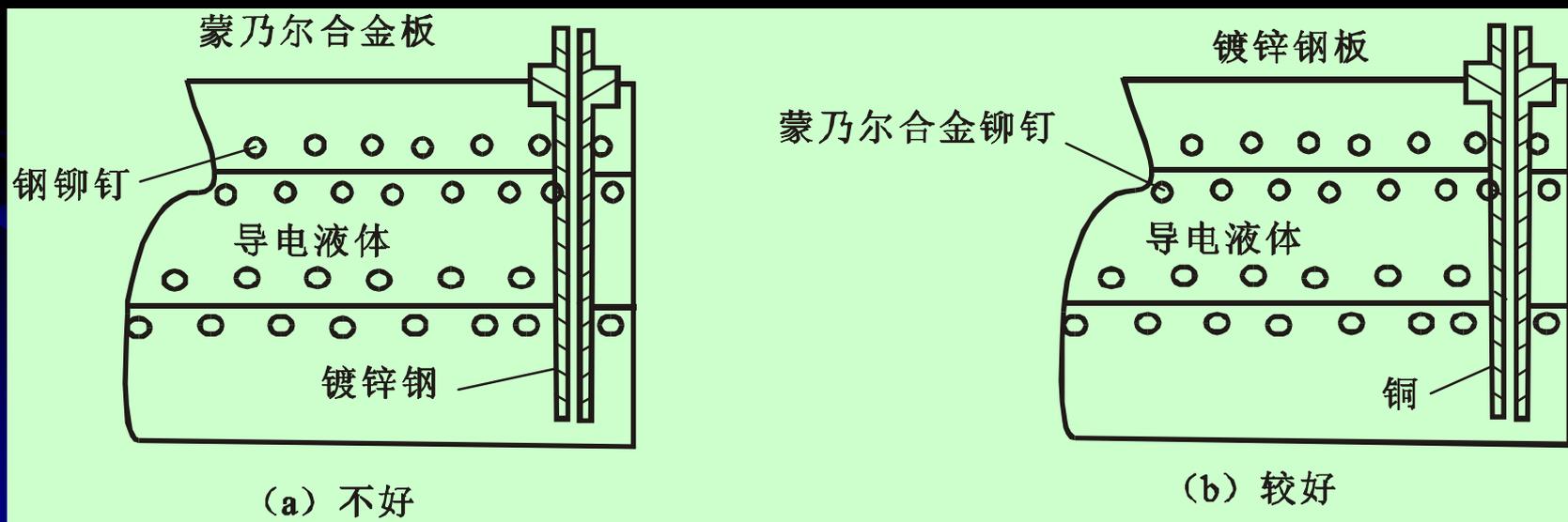


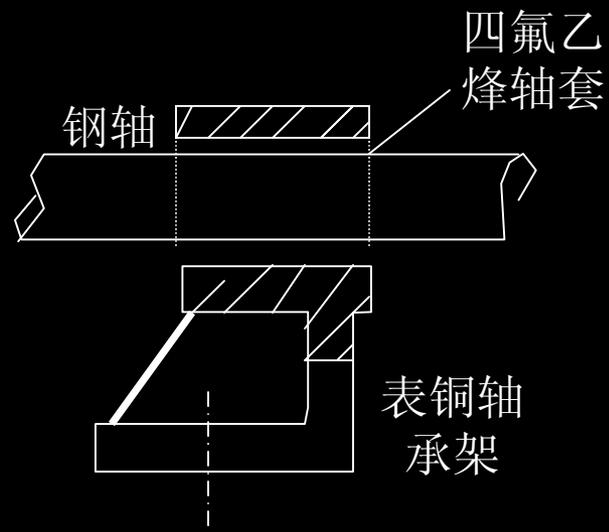
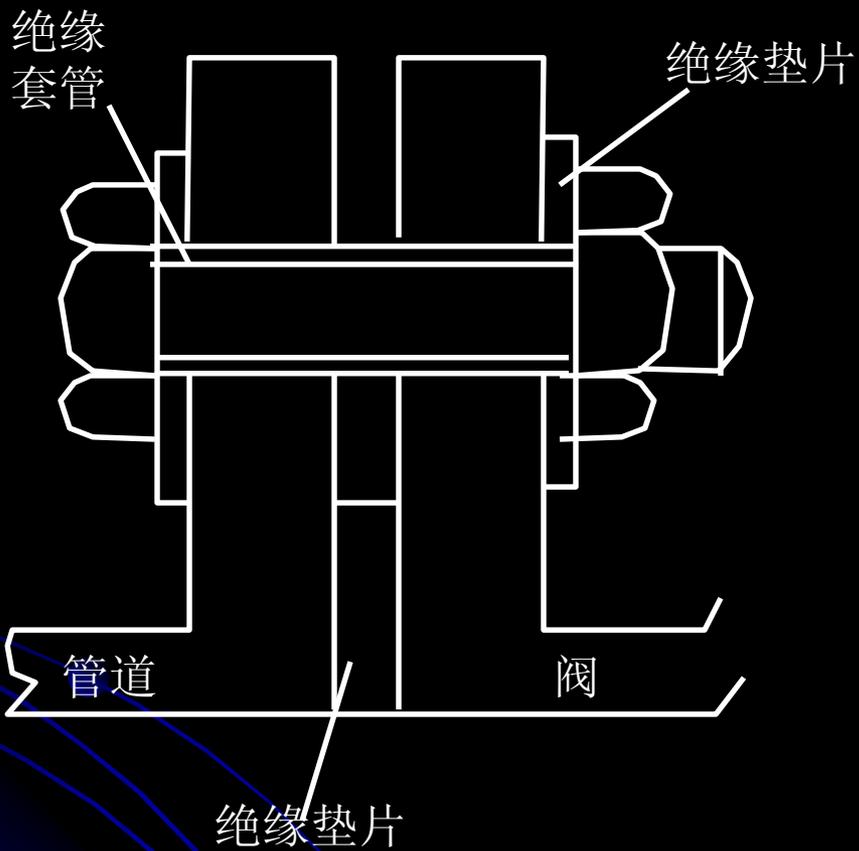
良（液体飞溅小）

加液管插入容器中心 减少飞溅

③ 防止电偶腐蚀

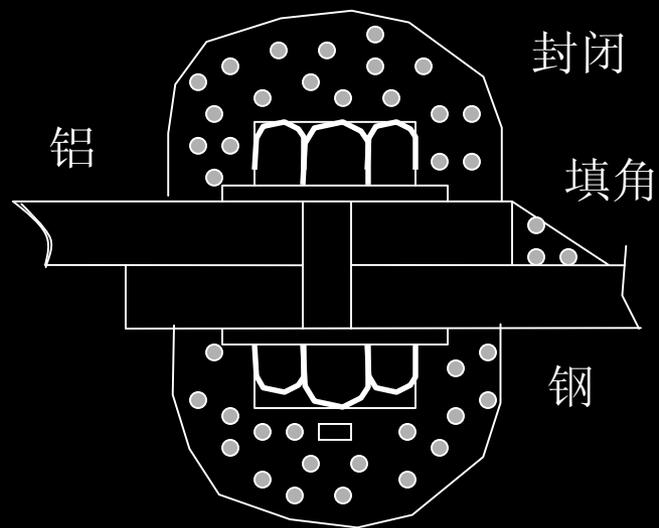
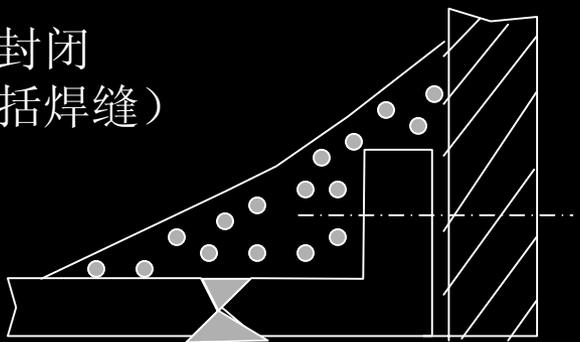
在同一结构中应尽量采用相同的材料；在必须采用不同金属组成同一设备时，选用在电偶序中相近的材料。不同金属连接时，应尽量采用大阳极小阴极的有利结合，避免大阴极小阳极的危险连接。



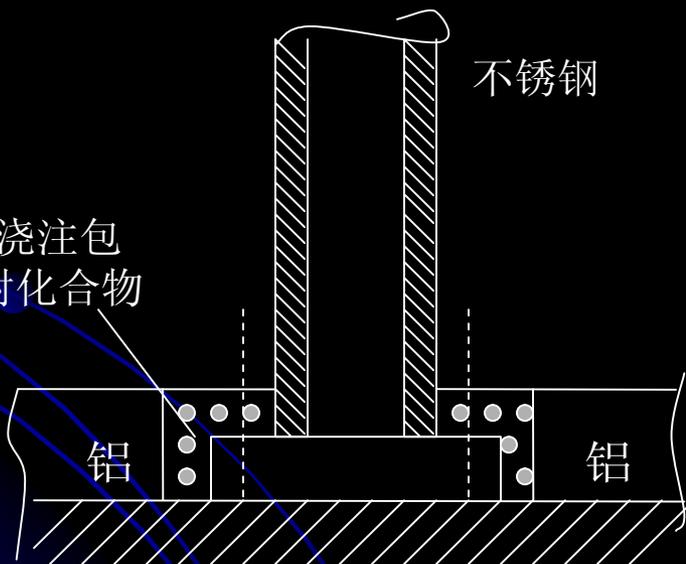


用绝缘的方法防止电偶腐蚀

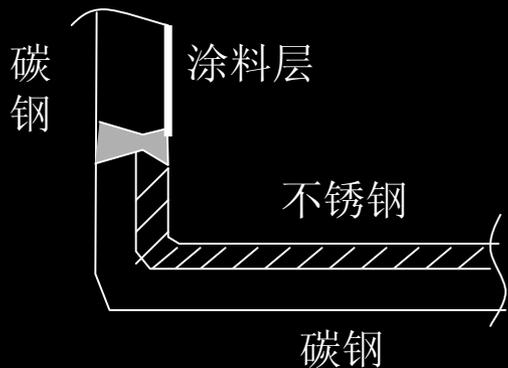
封闭
(包括焊缝)



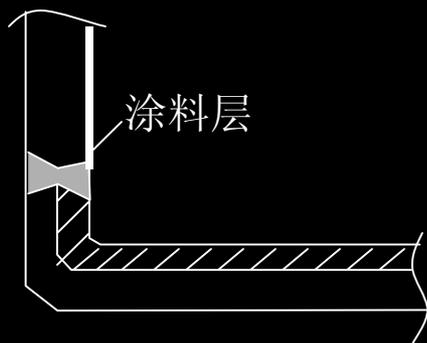
浇注包
封化合物



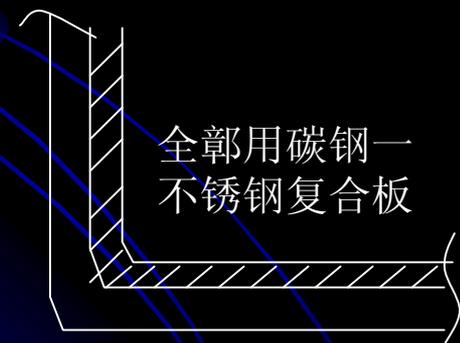
用封闭的方法
防止电偶腐蚀



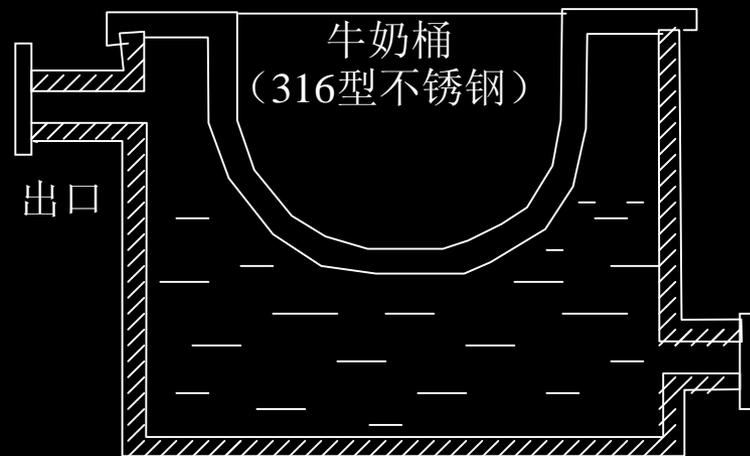
「不良」



「良」



「最好」



碳钢，内表面涂漆

碳钢漆膜孔隙内发
生腐蚀造成穿孔。

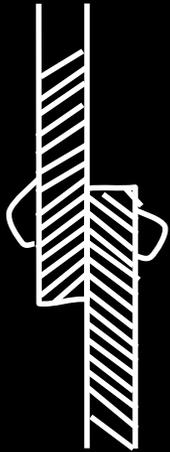
避免涂漆造成小阳极大
阴极的电偶腐蚀电池

④ 防止缝隙腐蚀

在设备装置上总是有各种各样部件的连接，除焊接外还有铆接、销钉连接、螺栓连接、法兰连接等等。这些连接都带来了大量的缝隙，这些缝隙的存在，对构件的防蚀不利。

为了防止缝隙腐蚀，可采用如下措施：

- a. 尽可能以焊接代替铆接。
- b. 改善铆接状况，在铆缝中可填入一层不吸潮的垫片。
- c. 容器底部的处置。容器底部不要直接与多孔基础（如土壤）接触，要用支座等与之隔离开。
- d. 法兰连接处垫片不宜过长，尽量采用不吸湿的材料作垫片。
- e. 避免加料时溶液飞溅到器壁，引起沉积物下的缝隙腐蚀。因此加料口应尽量接近容器内的液面。



不良



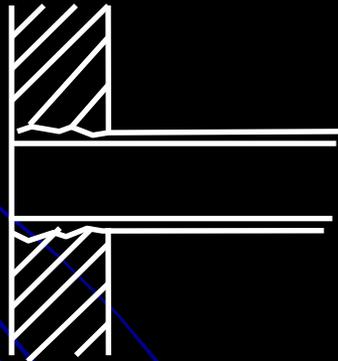
不良



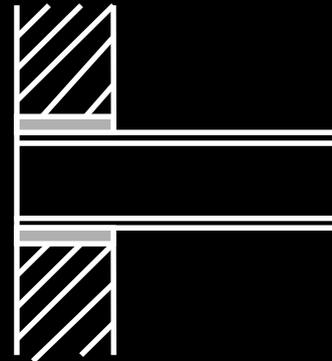
较好



较好

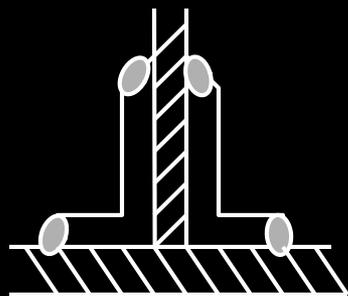


不良（螺纹联接）

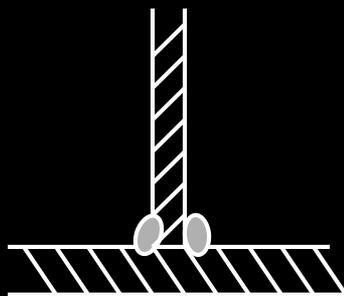


良（钎焊）

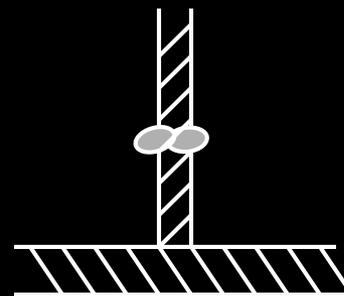
用焊接代替铆接和螺纺联接



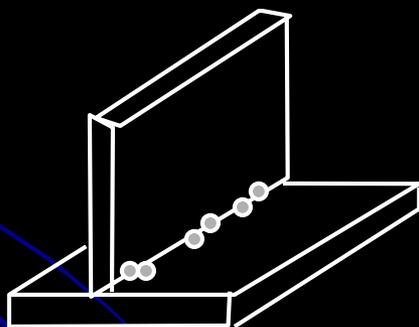
不良



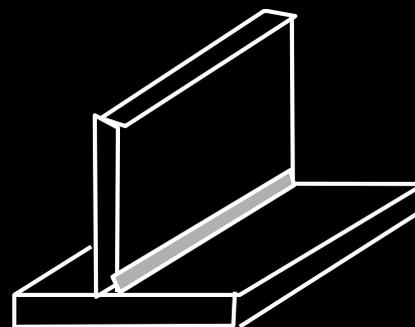
较好(角焊)



最好(对接焊)



不良(间断焊)

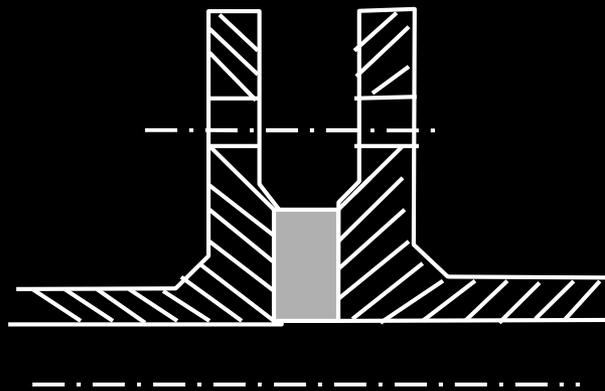


良(连续焊)

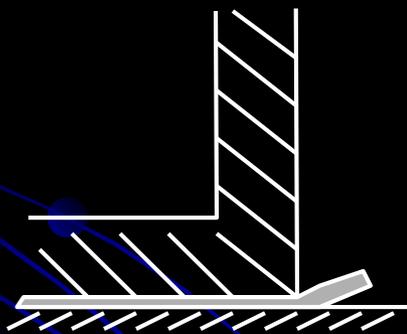
选择焊接工艺，避免缝隙



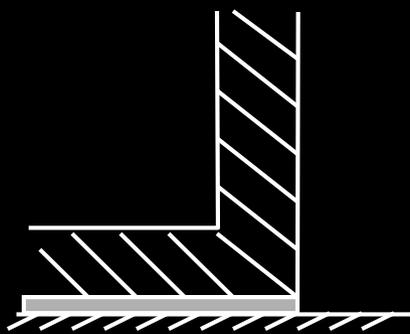
不良（垫片空缺）



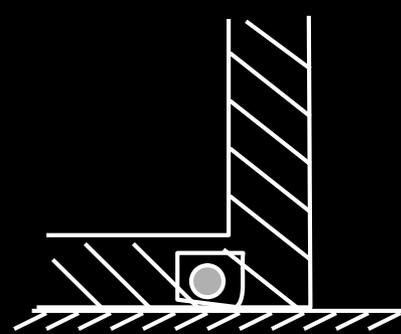
良（垫片平齐）



不良（垫片突出）

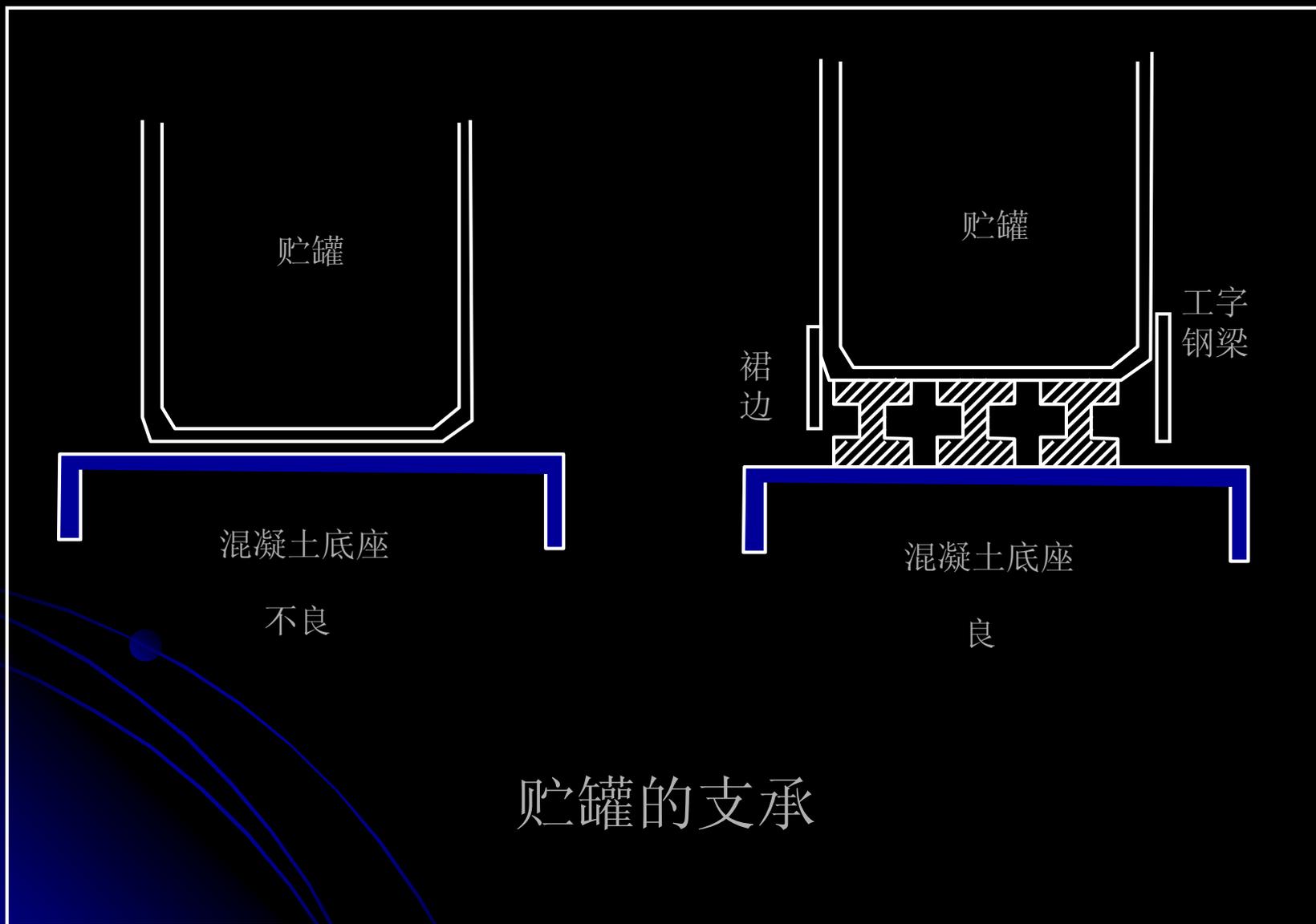


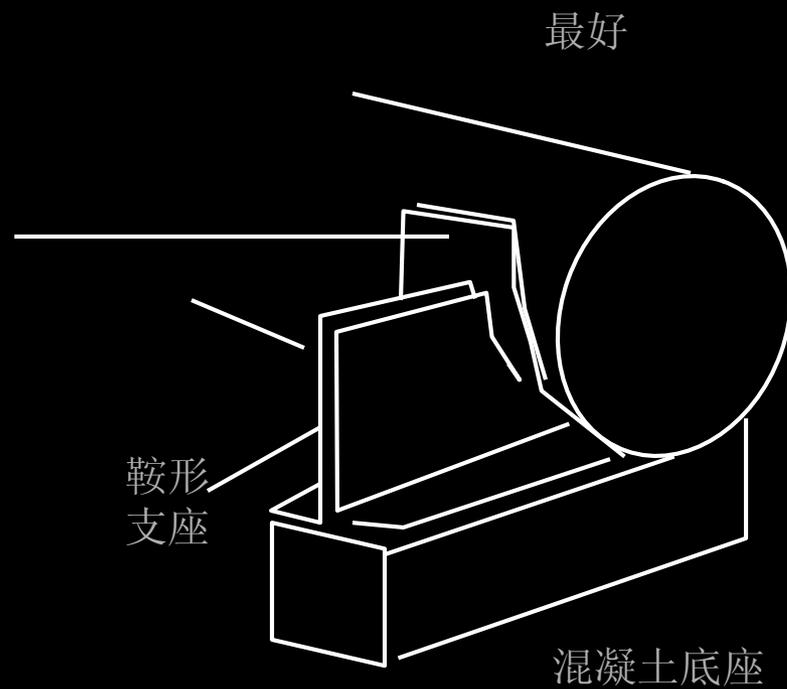
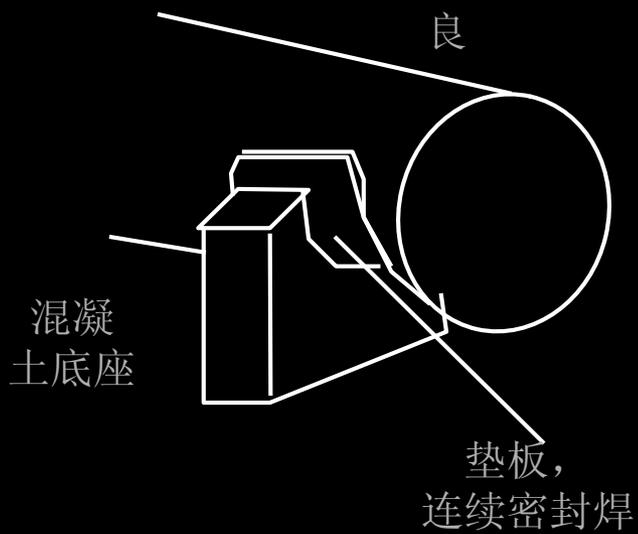
良（垫片平齐）



最好（“O”型密封圈）

垫片的尺寸要适宜



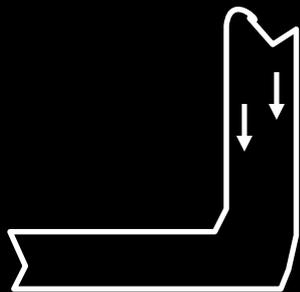


水平容器的支承

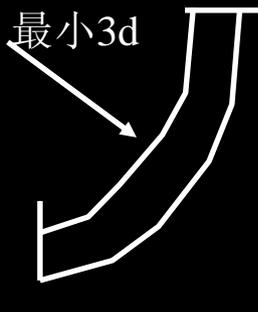
⑤ 防止液体的湍流腐蚀

设计时应注意避免过度的湍流、涡流。

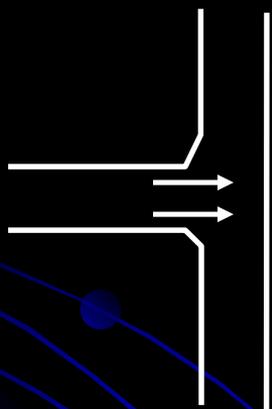
- a. 管线的弯曲半径应尽可能大，尽量避免直角弯曲。
- b. 在高流速接头部位，不要采用T型分叉结构，应采用曲线逐渐过渡结构
- c. 流速要适当。
- d. 管道系统中流动截面积不要突然改变，以避免扰动流动状态。
- e. 减少气体中夹带的气泡，悬浮固体物质，除去气体和蒸气中的冷凝液滴，可以大大降低液流和气流对设备的磨损。



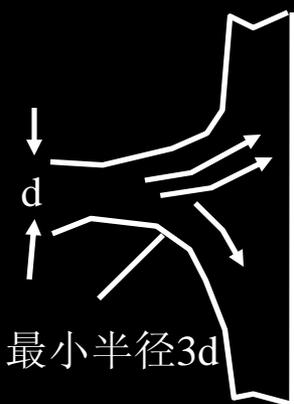
不良



良



不良



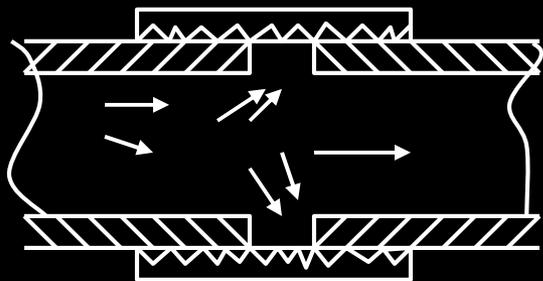
最小半径 $3d$

良

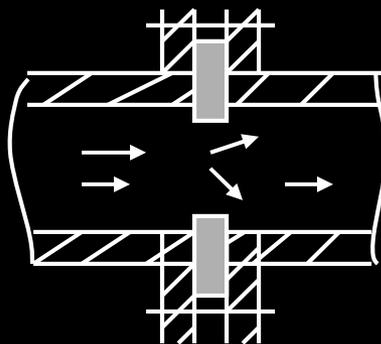


良

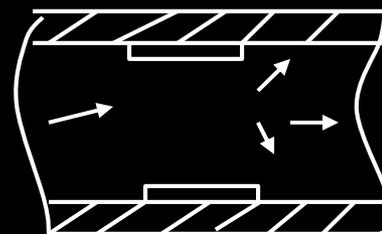
避免流动方向突然变化



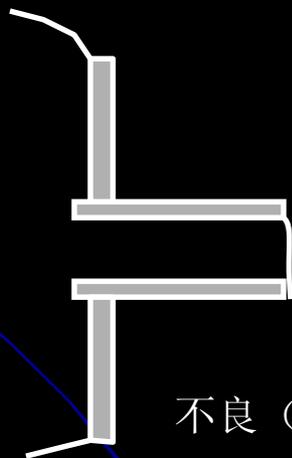
不良（螺纹联接空穴）



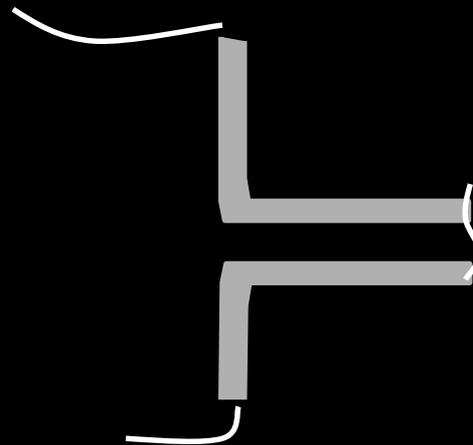
不良（垫片突出）



不良（厚垫环）

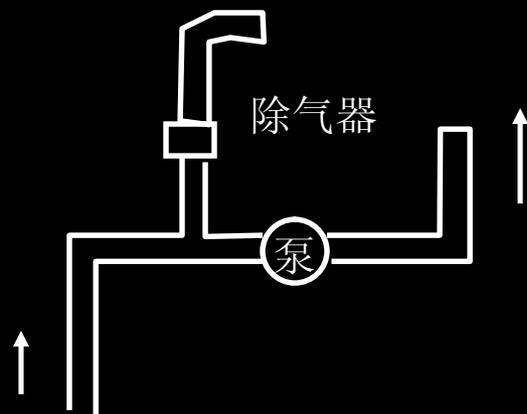
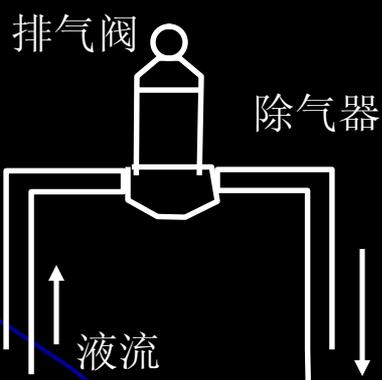
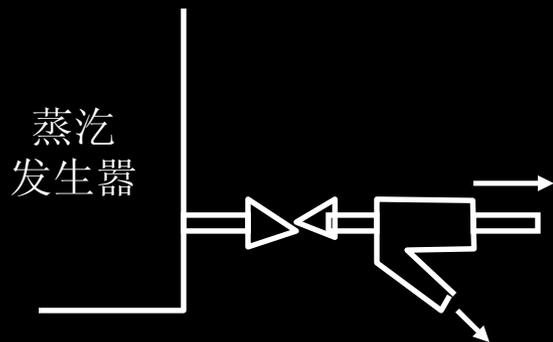


不良（接管突入容器）

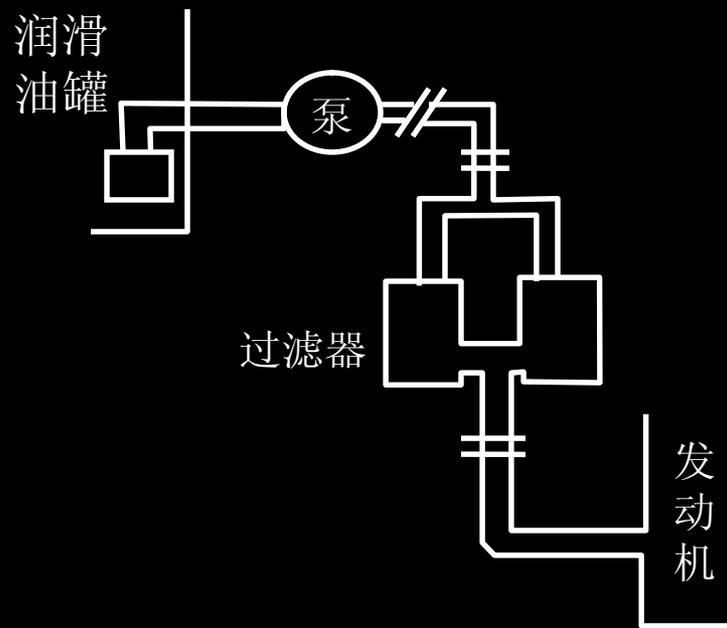
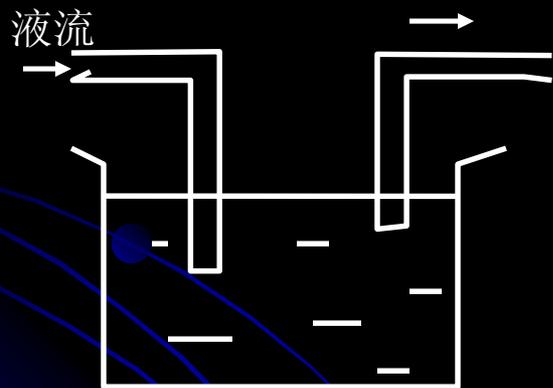
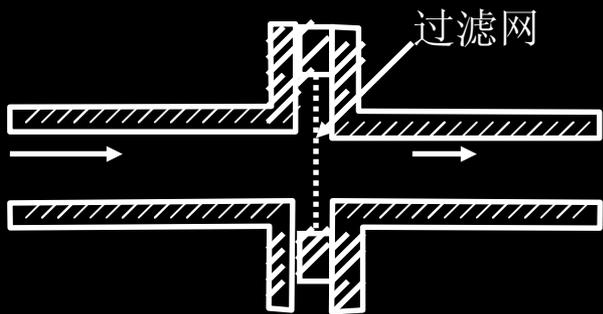


良（流线化）

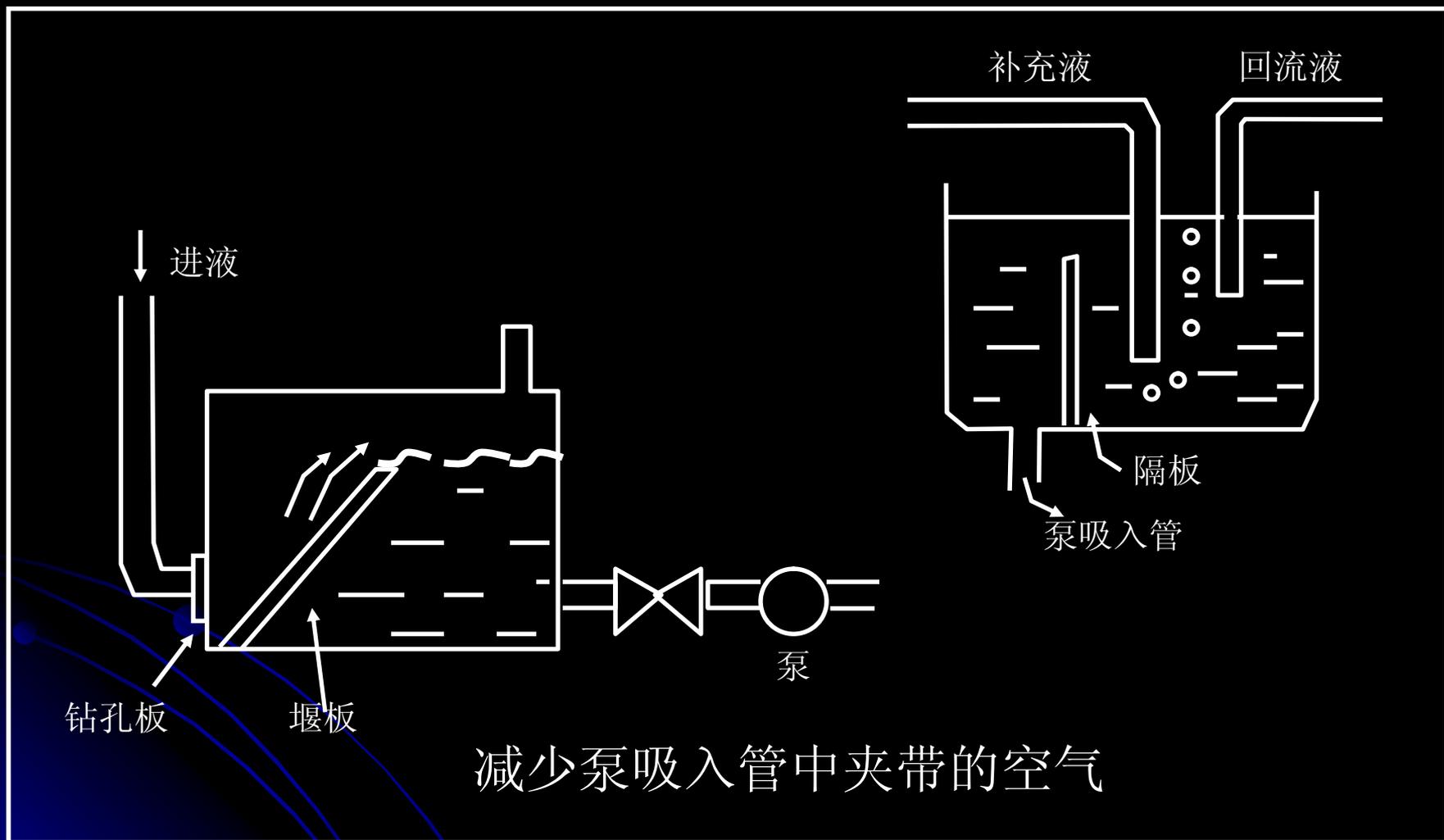
避免截面突然变化引起湍流

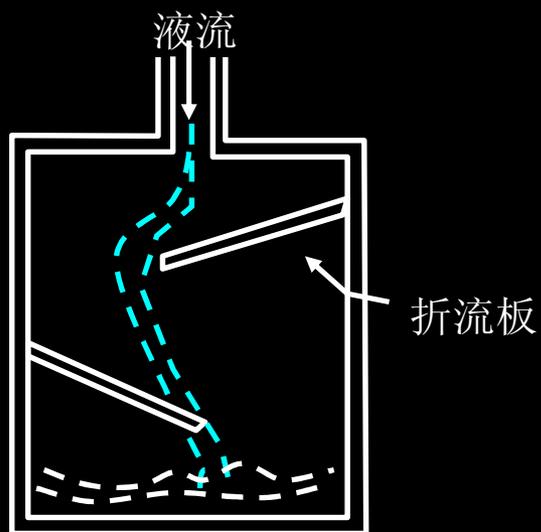
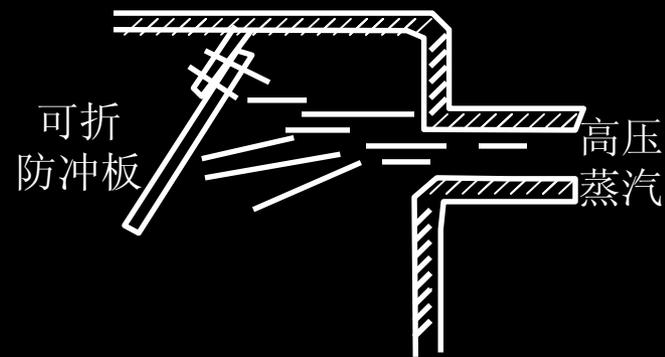
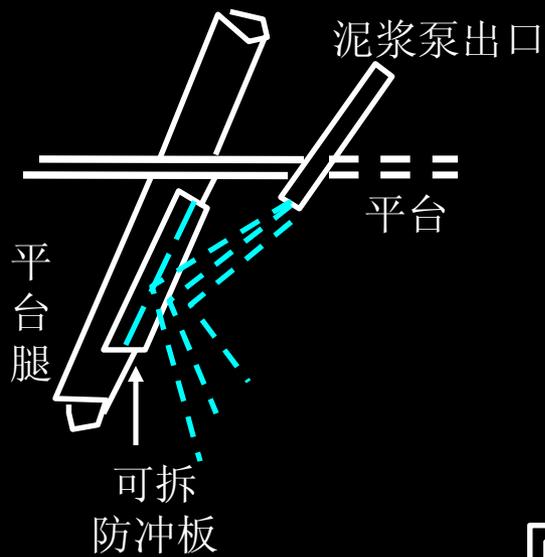


从气体中除去凝液，从液流除支空气



除去液流中悬浮固体污物

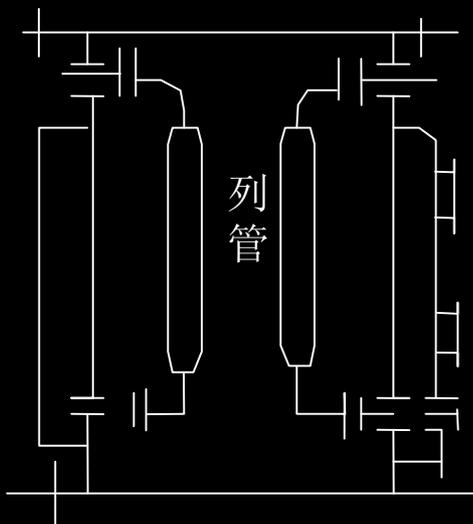




避免流体的直接冲击

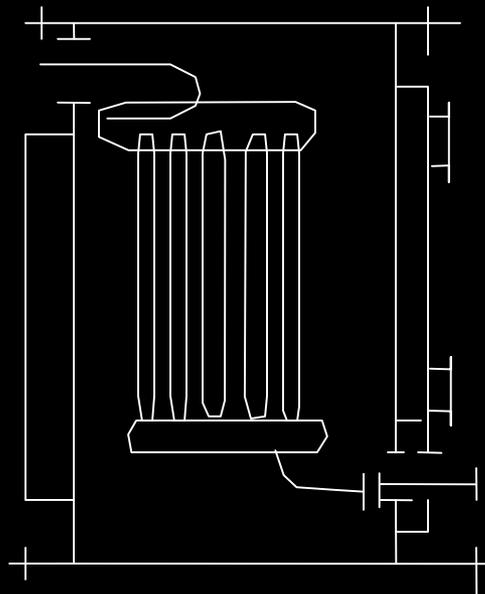
⑥ 避免应力过分集中

- a. 零件在改变形状或尺寸时，不应有尖角而应以圆角过渡；当设备的筒体与容器底的厚度不等而施焊时，应当把焊口加工成相同的厚度。
- b. 设备上尽量减少聚集的、交叉的和闭合的焊缝，以减少残余应力。施焊时应保证被焊接金属结构能自由伸缩。
- c. 热交换管的管子与花板的连接采用内孔焊接法比胀管法好，这样既减少缝隙，又减小应力腐蚀破裂的危险性。



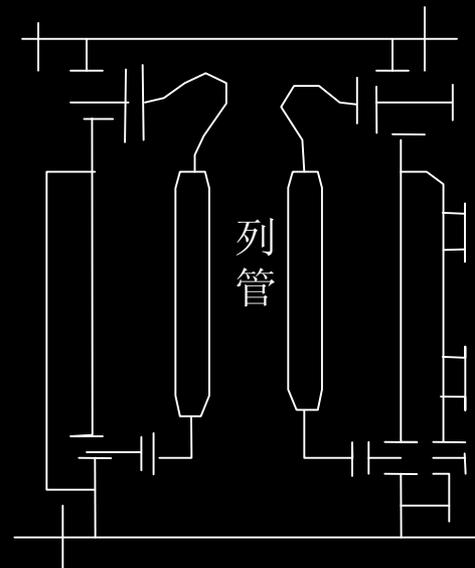
[原结构]

通蒸汽温度升高后，列管受热膨胀，使列管与塔壁焊接处，管与法兰焊接处发生腐蚀裂纹。



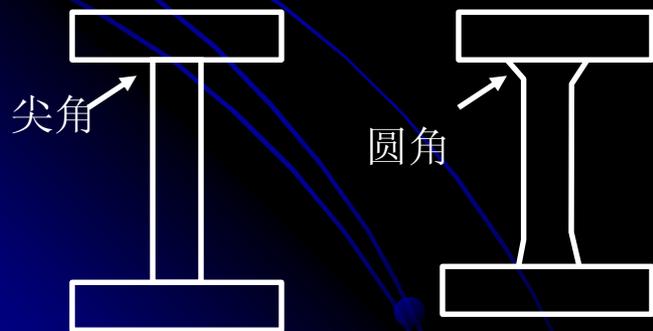
[环形结构]

列管改为环形，受热后可以膨胀，减少了腐蚀破裂，但加工困难。



[U型结构]

列管增加U型膨胀节，受热后可以膨胀，实际使用来发生SCC现象



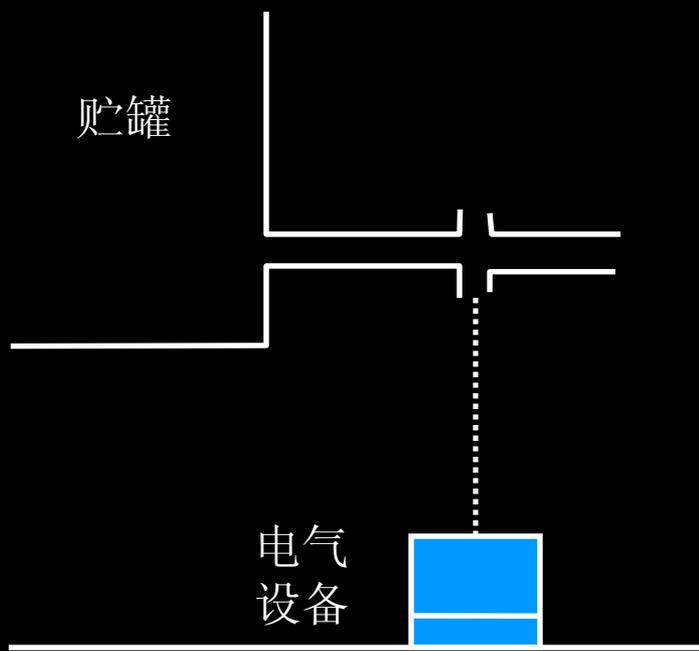
触媒干燥塔结构改进，消除热膨胀产生的应力

避免应力集中

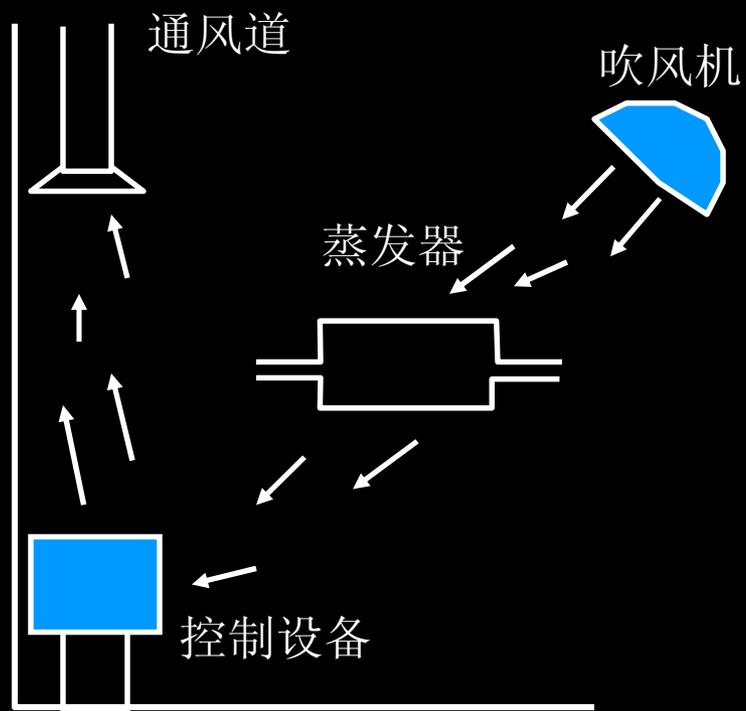
⑦ 设备和构筑物的位置要合理

a. 设备装置的布置应尽量避免相互之间可能产生的不利或有害影响，如贮液设备、液体输送设备或排泄设备应与电控设备留有一定的安全距离。

b. 电气控制等设备应尽可能避开具有腐蚀性的环境，如在含有或可能泄漏 Cl_2 、 HCl 、 H_2S 等腐蚀性和有毒性气体的局部环境中，要尽量避免布置电气设备或未做防腐处理的其他设备。

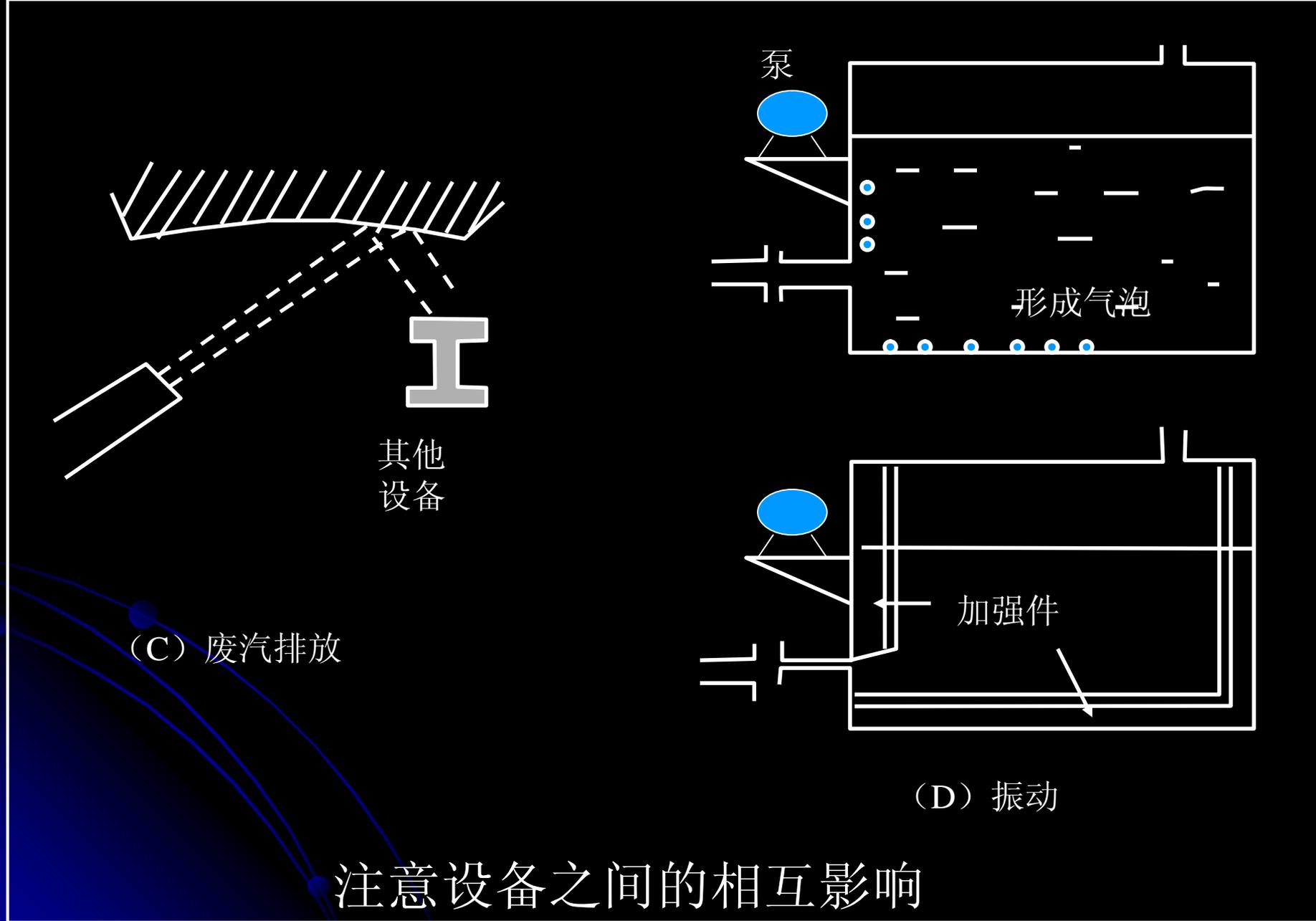


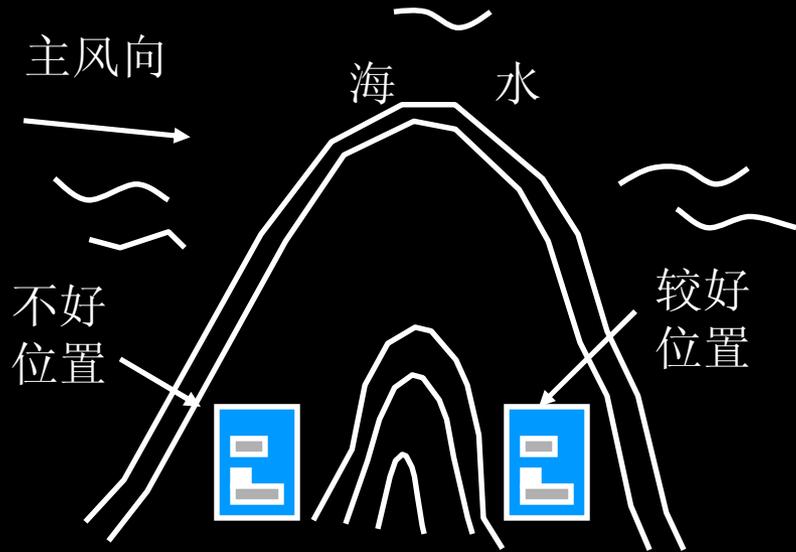
(a) 腐蚀液体泄漏



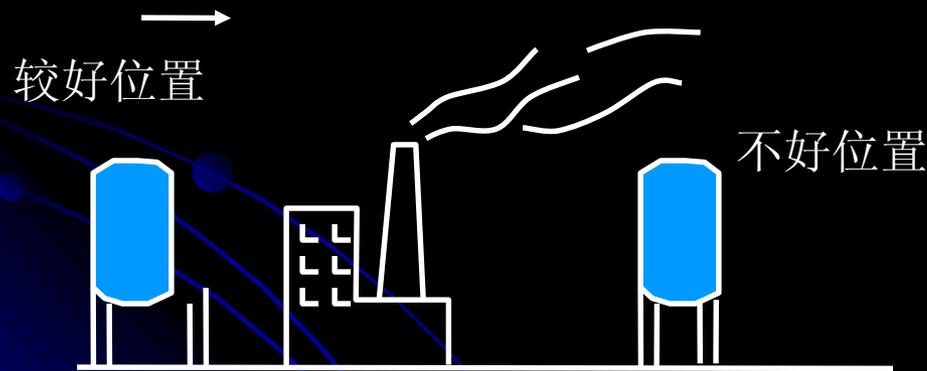
(b) 腐蚀性气流

注意设备之间的相互影响

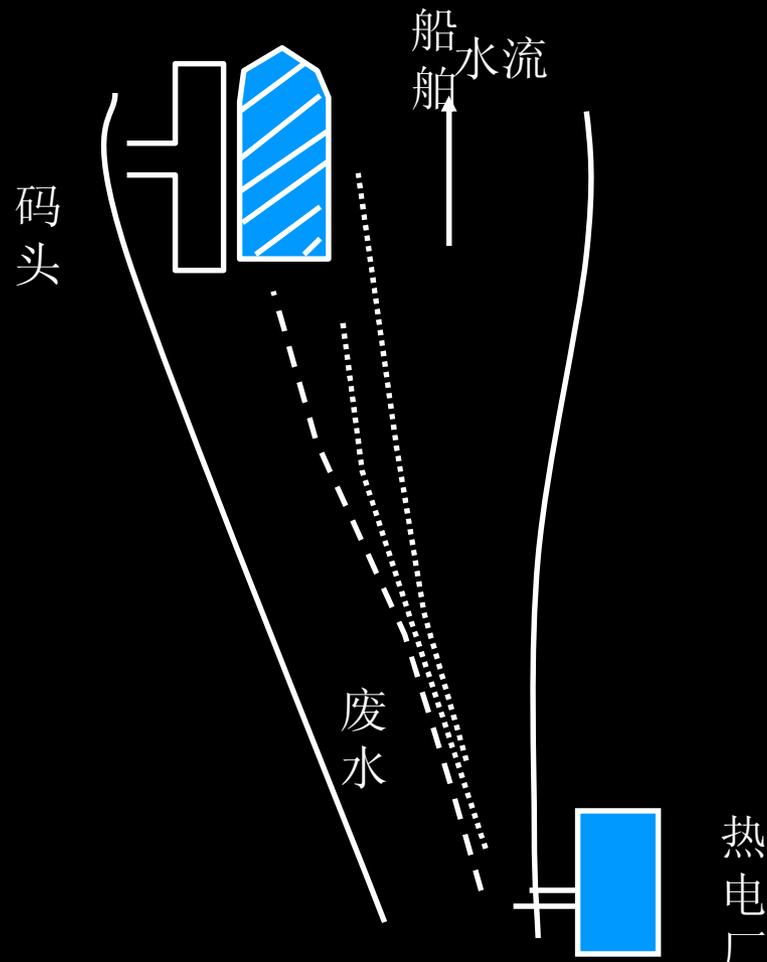




(A) 腐蚀性大气



(B) 腐蚀性烟尘



(C) 污染的水流

选择适当的位置十分重要

(2) 防蚀强度设计

防蚀强度设计中主要应考虑到材料的腐蚀裕量、局部腐蚀强度以及材料腐蚀强度变化等3个方面的因素。

① **腐蚀裕量的选择**:对于全面腐蚀的情况,在未考虑环境腐蚀算出构件材料尺寸时,应根据这种材料在使用的介质中的腐蚀速度留取恰当的裕量,这样就可以保证原设计的寿命要求。腐蚀裕量的考虑要根据构件使用部位的重要性及使用年限来决定。

② **局部腐蚀的强度设计**:对于晶间腐蚀、孔蚀、缝隙腐蚀等只有采取正确选材或控制环境介质,注意结构设计等措施来防止。对于应力腐蚀断裂、腐蚀疲劳,如果材料的数据资料齐全,就有可能做出合适可靠的设计。

③ **材料耐蚀强度特性的变化**:在加工及施工处理时,可能会引起材料耐蚀强度特性的变化,应加以注意。如某些不锈钢在焊接时,由于敏化温度影响而造成晶间腐蚀,使材料强度下降,可能会在使用中造成断裂事故。

(3) 其它防蚀设计

在选用材料时如使用防蚀涂料、电化学保护、缓蚀剂或电镀、化学镀、化学转化膜等其它工艺性防腐蚀措施等。

2、设备的电化学保护

电化学保护是根据金属电化学腐蚀原理对金属设备进行保护的一种有效方法。按照作用原理不同，电化学保护分为阴极保护和阳极保护两类。

(1) 阴极保护

用一定的方法使被保护的金属设备发生阴极极化以减小或防止其腐蚀的方法称为阴极保护。实现阴极保护的方法通常有两种：

① 外加电流的阴极保护：将被保护的金属设备与直流电源的负极相接，进行阴极极化。优点是可以调节电流和电压，适用范围广，可用在要求大保护电流的条件下，当使用不溶性阳极时，其装置耐用。缺点是必须要进行经常维护、检修，要配备直流电源设备；附近有其它金属设备时可能产生干扰腐蚀，需要经常的操作费用。

② **牺牲阳极的阴极保护**:在被保护的金属设备上连接一个电位更负（相对于被保护的金属设备而言）的金属（如钢铁设备上连接锌等），使被保护金属设备发生阴极极化，这种方法称为牺牲阳极的阴极保护（也称牺牲阳极保护）。优点是**不用外加电流；施工简单，管理方便，对附近设备没有干扰**，因此，适用于**安装电源困难、需要局部保护的场合**。缺点是**能产生的有效电位差及输出电流量都是有限的，只适于需要小保护电流的场合**。且**电流调节困难，阳极消耗大，需定期更换**。

●**使用阴极保护时应考虑以下几方面的问题：**

- a. 腐蚀介质必须是电解质溶液，能够离子导电。
- b. 被保护设备在其腐蚀介质中要易于阴极极化。
- c. 钝态金属设备不宜采用阴极保护。
- d. 结构、形状复杂的金属设备不宜采用阴极保护。
- e. 由氢脆敏感性材料制作的金属设备不宜采用阴极保护。

(2) 阳极保护

将被保护的金属设备进行阳极极化，使其由活化态转入钝化态，从而减轻或防止金属设备腐蚀的方法称阳极保护。

阳极保护适用于那些电位正移时，金属设备在所处的介质中有钝化行为的金属-介质体系。否则阳极极化不但不能防止腐蚀，反而会加速腐蚀。

阳极保护的适用条件与特点：

- a. 某些活性阴离子含量高的介质中不宜采用阳极保护。这些活性离子如 Cl^- 在高浓度下能局部地破坏钝化膜并造成孔蚀。
- b. 与阴极保护一样，阳极保护也存在遮蔽效应。若阴、阳极布局不合理，可能造成有的地方已钝化，有的地方过钝化，有的地方尚处在活化态。
- c. 与阴极保护相比，成本高、工艺复杂。因为阳极保护需要辅助阴极、直流电源、测量及控制保护电位的设备。

(3) 阴极保护与阳极保护的比较

阴极保护和阳极保护都属于电化学保护，适用于保护处于电解质溶液中的金属设备，但它们又有各自的特点。

① 从原理上讲，任何金属都可实施阴极保护（有负保护效应者除外）。阳极保护则是有条件的，它只适用于金属-介质体系具有钝化行为的金属设备的保护，否则会加速腐蚀。

② 阴极保护时，保护效果取决于阴极极化的程度，极化电流不代表腐蚀速度的大小。阳极保护时，必须通过阳极极化建立钝态，极化电流的大小能反映腐蚀速度的快慢。

③ 阴极保护时，电位的偏移只会影响保护效果，不会造成腐蚀速度的显著变化（自钝化金属除外）。阳极保护时，电位的偏离可能造成腐蚀速度加快。

④ 当介质具有强氧化性时，采用阴极保护需要大电流阴极极化。采用阳极保护时，由于钝化膜建立容易，易于进行阳极保护，且效果较好。

⑤ 阴极保护时析氢反应对具有氢脆敏感性的设备有造成氢脆的可能性。阳极保护时，析氢发生在辅助阴极上，被保护设备不会有产生氢脆的可能性。

⑥ 阴极保护时，辅助电极是阳极，在强氧化性介质中容易腐蚀，选择合适的阳极材料是一大难事。阳极保护时，辅助电极是阴极，其本身就处于被保护状态。

3、设备环境介质的控制

对介质的特性进行人为控制，能有效地减轻介质对设备的腐蚀程度。

改变介质的腐蚀特性一般有两种途径：

(1) 控制环境介质中的有害成分

控制环境介质成分的方法主要有以下几种：

① 除去介质中的有害成分

据电化学腐蚀原理，凡能抑制腐蚀原电池阴、阳极过程的措施都能达到防蚀的目的。除氧是改善金属耐蚀性的有效途径。除氧的方法主要有加热除氧法和化学除氧法。

加热除氧法就是将水加热至沸点温度以除去溶解在水中的氧。

化学除氧法是往水中加入化学药品，消耗掉水中溶解氧，达到除氧的目的。常用的化学除氧剂主要有联氨、亚硫酸钠等。

② 控制介质的pH值

设备中常用金属的腐蚀速度与介质pH值有关。要减轻腐蚀，应控制介质的pH值在适宜的范围。控制介质pH值的方法是向介质中加入碱性或酸性化学药剂。

③ 降低气体介质的湿度

当气体介质中湿度过高时，其凝结水就会在材料表面上形成水膜，加速材料的腐蚀。因此降低气体的湿度是减缓金属腐蚀的有效措施之一。

降低湿度的方法包括用干燥剂吸收水分、采用冷凝法除去水分或提高温度降低湿度，使水蒸气无法凝结。

(2) 缓蚀剂

缓蚀剂是一种在很低的浓度下，能阻止或减缓金属在腐蚀性介质中腐蚀速度的化学物质或复合物。作为缓蚀剂必须具备的条件是用量极少（千分之几至百分之几）、有较好的防蚀效果和不改变介质的其它化学性质。

① 分类

常用的有两种方法，即化学组成分类法和影响电极过程分类法。

按化学组成可分为无机缓蚀剂（硝酸盐、铬酸盐、碳酸盐、钼酸盐等）和有机缓蚀剂（醛类、胺类、杂环化合物等）。

按对电极过程的影响可分为阳极缓蚀剂（铬酸盐、硅酸钠、苯甲酸钠等）、阴极缓蚀剂（ SbCl_3 、 AsCl_3 、锌盐、聚磷酸盐及多数有机缓蚀剂）、混合型缓蚀剂（琼脂、生物碱、亚硝酸二环己胺等）。

② 缓蚀机理

根据缓蚀剂的不同作用特点，可分为以下几种作用机理：

- **吸附理论**认为，介质中缓蚀剂的极性基团定向吸附排列在金属的表面，形成连续吸附层，从而排除了水分子或氢离子等腐蚀介质的侵入或者使金属与腐蚀介质隔离，使介质的分子或离子很难接近金属表面，起到缓蚀作用。

- 成膜理论认为，缓蚀剂的分子能与金属或腐蚀性介质的离子发生化学作用，在金属表面生成具有保护作用的、不溶或难溶的化合物膜层，使金属不能接触到腐蚀性介质，从而起到缓蚀的作用。

- 电极过程抑制理论认为，缓蚀剂的加入能够抑制金属在介质中形成的腐蚀电池的阳极过程、阴极过程或同时抑制这两个过程，从而使腐蚀速度减慢，亦即起到了缓蚀的作用。

③ 影响缓蚀作用的因素及缓蚀剂的应用

不同的缓蚀剂只对特定的金属在特定的腐蚀介质中具有缓蚀作用。且缓蚀剂的缓蚀作用又受缓蚀剂浓度、温度、介质流速及pH值等因素的影响。

- 水溶性缓蚀剂具有多种用途，可作为酸、碱、盐及中性水溶液介质的缓蚀剂。

- 油溶性缓蚀剂最主要和最广泛的用途就是溶解在油、脂中制成各种防锈油、防锈脂。

- 气相缓蚀剂是能够不断地自动挥发，从而能充满需要缓蚀的空间而起到缓蚀作用的一类缓蚀剂。它主要是用作密闭包装中的缓蚀剂。

4、电镀、化学镀、化学转化膜防护

(1) 电镀

电镀是使电解液中的金属离子在直流电作用下，于阴极（待镀零件）表面沉积出金属而成为镀层的工艺过程。

(2) 化学镀

化学镀是利用一种合适的还原剂，使溶液中的金属离子还原并沉积在基体表面的过程，它也被称为自催化镀或无电电镀。化学镀与电镀不同，它不需要通以直流电，而将镀件直接浸入化学镀液即可。化学镀可以在金属、半导体、非导体材料上直接进行；由于不存在电流分布问题，所以在深孔、盲孔和复杂内腔的内表面上可以获得均匀镀层；化学镀得到的镀层孔隙少、致密，具有很好的耐磨性，很高的硬度。化学镀的缺点是镀液本身不稳定，因而对镀液的维护要求较高，通常需加热设备；另外化学镀成本高，镀层有较大脆性。

(3) 化学转化膜

金属表面的原子层与某些特定介质的阴离子反应后，在金属表面生成的膜层称为转化膜。

转化膜可分为电化学转化膜和化学转化膜两大类。其中化学转化膜还包括化学氧化膜、铬酸盐膜和磷酸盐膜。

- 电化学转化膜的形成是将待处理的金属作为阳极，在酸性或碱性电解液中采用控制阳极电流或电压的方法进行阳极氧化来获得膜层的。

- 化学转化膜是将待处理的金属在适宜的金属盐溶液中，通过简单的浸渍，在金属表面生成的膜层。对铝、锌、铁、铜等金属均可采用。

5、浸镀、渗镀、包镀及热喷涂防护

(1) 浸镀

浸镀（热镀）就是把金属制件浸入熔融金属液中形成镀层的方法。因此，镀层金属的熔点必须比被镀基体金属的熔点低得多。

(2) 渗镀

渗镀是采用扩散处理方法，将一种或几种元素从表面扩散到基体金属中去，形成渗层，以改变表面层的化学成分及组织，从而改善金属材料表面性能。这种方法也称为表面合金化。

(3) 包镀

将被保护金属坯料放在保护金属板中间，加以热轧，靠机械力、热扩散使保护金属与被保护金属粘合在一起称为包镀。

(4) 热喷涂

热喷涂也叫热喷镀。它是利用高温热源，通过特殊设备-喷枪，将涂层材料加热至熔融或接近熔融状态，高速喷至工件表面，并形成防护层的过程。

6、衬里防护技术

根据衬里材料的性质和施工方法的不同可将衬里防腐技术分为玻璃钢衬里和橡胶衬里。

(1) 玻璃钢衬里

玻璃钢是利用玻璃纤维的增强作用和粘合树脂的耐蚀作用使玻璃钢成为一种既易于增加涂层厚度又可增加涂层机械性能的覆盖层。

(2) 橡胶衬里

橡胶衬里具有良好的物理、机械、耐蚀和耐磨性能。作为衬里层，具有与基体粘附力强、施工容易、检修方便、衬后设备增重少等特点。

在衬里用橡胶中，天然橡胶的使用量占70%。随着合成橡胶工业的发展，合成橡胶在衬里中的应用越来越多，常用的合成橡胶多为丁苯橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶、丁基橡胶和磺化聚乙烯橡胶等。

玻璃钢



▲株洲冶炼厂500m²大型冷却塔及溜槽制作安装



► 缠绕成型的大型烟道及配件

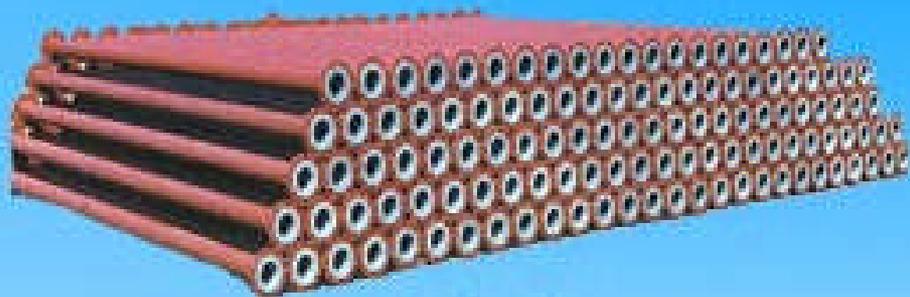


▲湖南郴州冶炼厂使用的玻璃钢电解槽



▲模压成型的导接溜槽

聚四氟乙烯简称F4，享有“塑料王”的美誉，采用F4衬里，F30喷涂及PO滚塑等新工艺



衬塑管道



衬塑管道



衬塑接头



衬塑弯脖



衬塑四通



衬塑阀门

硫化橡胶衬里

衬胶-盐酸专用汽车槽罐



7、有机涂料防护

涂料防护是通过手工刷涂或机械喷涂等方法，在设备的内外表面上粘合一层有机涂料覆盖层，将腐蚀介质与基体表面隔离开来的一种防护技术。

常用的耐蚀材料有醇酸树脂涂料，酚醛树脂防腐涂料，呋喃树脂防腐涂料，环氧树脂防腐涂料，沥青防腐涂料，乙烯树脂防腐涂料，橡胶防腐涂料，有机硅耐热防腐涂料，富锌防腐涂料，塑料防腐涂料等。

呋喃树脂材料

呋喃砂浆砌花
岗岩地面



呋喃胶泥砌
砖板池槽



酚醛树脂

酚醛树脂防腐材料对浓度小于 70% 的硫酸、任何浓度的盐酸、氢氟酸、醋酸、大部分有机酸及大多数有机溶剂、二氧化硫、氯化氢及大部分 $PH < 7$ 的酸性盐类等均耐蚀。用于玻璃钢衬里、砖板衬里。

酚醛胶泥衬砌
酚醛浸渍石墨板防
腐蚀





湖南株洲冶炼厂十万吨锌电解厂房地面主体
防腐及玻璃钢电解槽制作安装施工现场



**湘潭电化集团有限公司
电解二氧化锰车间地面、水沟防腐施工现场**



中国石化巴陵分公司 150kt/a
硫酸生产装置，设备制作安
装及防腐保温施工现场

西安建筑科技大学



湖南郴洲化工集团大型盐酸贮罐制作并内衬
丁基橡胶、外衬玻璃钢防腐蚀施工现场

西安建筑科技大学



湖南长沙振升铝材有限公司大型
污水处理池采用玻璃钢衬里防腐蚀

西安建筑科技大学



湖南湘潭钢铁集团公司宽厚板
轧机工程环氧地坪施工现场

西安建筑科技大学



广西兴美祥钛白粉厂技改
扩建中酸解锅采用橡胶衬
里作隔离层，然后加衬砖
板防腐蚀施工现场



衡阳二七二厂钛白粉分厂 500m³

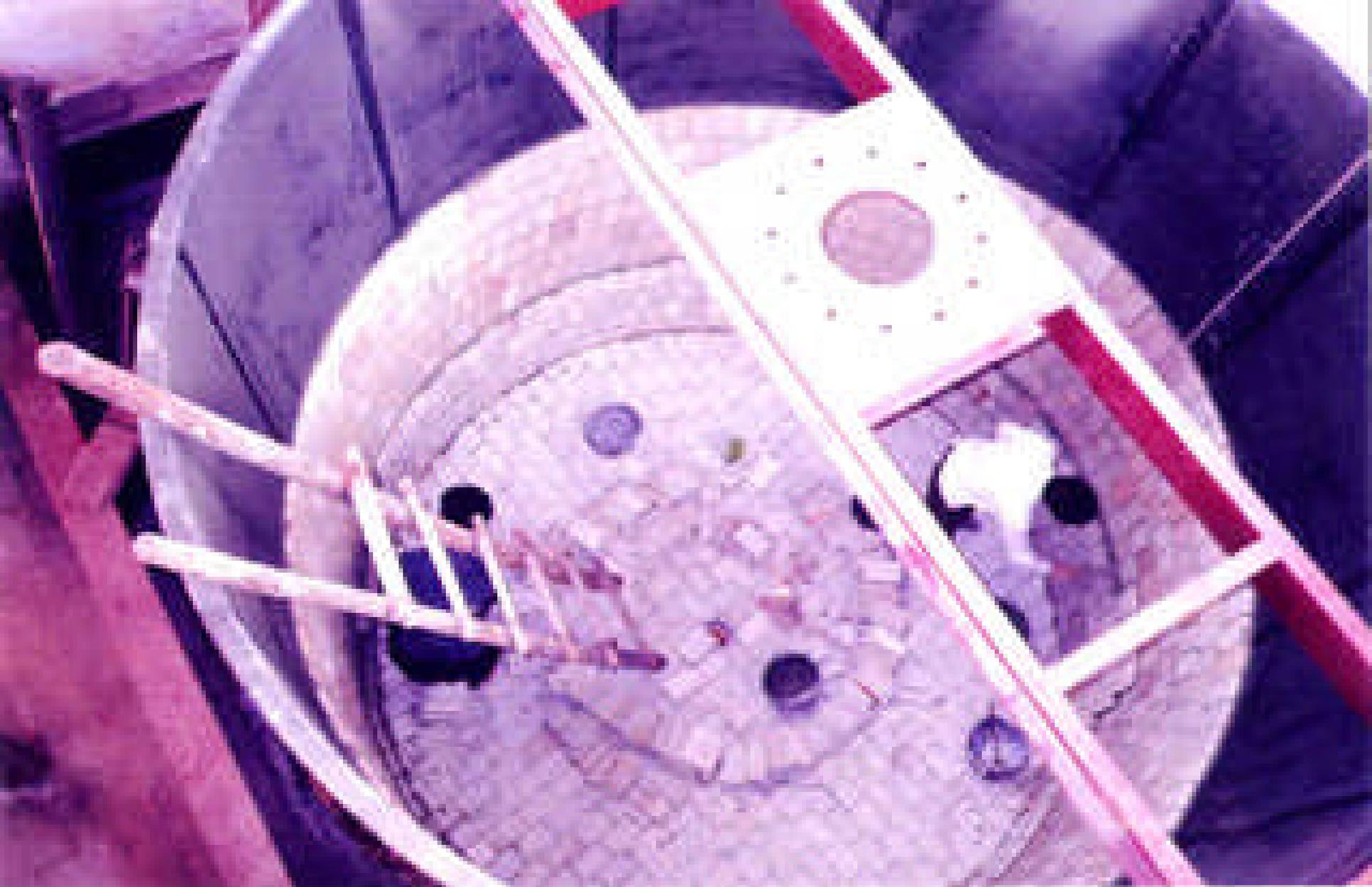
水泥砗钛液沉降槽采用现场衬丁基橡胶二层防腐

安建筑科技大学



株洲电厂脱硫塔内衬丁基橡胶

西安建筑科技大学



广东省韶关市化工厂钛白车间钛液预热锅采用衬胶后加
衬瓷板复合防腐蚀施工现场钛白行业施工业绩

四、材料的选用

1、材料选取的基本原则

材料的选取除了根据不同设备在功能、工艺要求、工作环境条件等方面的特殊要求进行针对性选取外，还应遵循如下几条基本原则：

(1) 材料的耐蚀性能要满足要求

根据设备所处的环境条件，选择耐蚀性能好、能满足生产要求的材料。

(2) 材料的物理、机械和加工工艺性能要满足要求

作为整体的工程结构材料，在具有一定耐蚀性的前提下，一般还要有一定的强度、抗冲击韧性、弹性和塑性，即所选材料的物理、机械和加工工艺性能要满足设备设计与加工制造的要求。

(3) 要力求最好的经济效益

要优先选用国产、便宜的材料。

2、选材时应考虑的因素

- (1) 设备或构件的工作环境是选材必须明确的条件，使用者与设计者应密切配合，详细列出环境介质参数。
- (2) 参考已有的腐蚀数据资料，选出在相应腐蚀环境下的耐蚀材料。
- (3) 从事故调查的分析记录中吸取教益。
- (4) 腐蚀试验。
- (5) 经济与耐用的综合考虑。
- (6) 在选材同时，还应考虑与之相适应的防护措施。
- (7) 材料最后的选定，还应考虑其加工性能、焊接性能，加工后是否会降低其耐蚀性能，否则会前功尽弃。

§ 2.2 设备的保温

一、保温的目的与设置

1、保温的目的

保温的目的主要包括3个方面：

- (1) 减少热损失，节能，降低总费用
- (2) 满足热水用户的使用要求
- (3) 满足一定的劳动卫生条件，保障人身安全

2、保温设置

为了保证人身安全，保护运行检验人员避免烫伤，下列情况应设置保温：

- ①当管道或设备外表面的温度 $>50^{\circ}\text{C}$ 时；
- ②要求介质温度保持稳定的管道和设备；
- ③为防止管道、设备中介质冻结或结晶时；
- ④管道、设备内介质温度较高，需经常操作维护而又容易引起烫伤的部位；
- ⑤寒冷地区敷设在地沟、吊顶、搁楼层以及室外架空的管道。

二、保温材料

- 保温性能好是对保温材料的最基本要求，导热系数是保温材料最重要的性质，作为保温材料，要求导热系数越小越好。
- 应有良好的耐温性，有一定的使用温度范围，性能稳定，能长期使用。
- 保温材料的容重要小，并有一定的孔隙率，一般不宜超过 $600\text{kg} / \text{m}^3$ 。容重小，减轻保温管道的重量，减少支架。
- 为满足施工的要求，保温材料的抗压强度应大于 0.3MPa 。
- 保温材料应无毒，对金属无腐蚀作用，可燃物少，吸水率低，易于制造成型，而且价格要便宜。
- 为了使保温层不受损坏，延长使用寿命，在保温层外面通常还要加一层保护层，保护层内含可燃物及有机物极少，有良好的防水性能，耐压强度好，不易燃烧，不易开裂或脱皮，导热系数低，一般不超过 $0.33\text{W} / (\text{m}\cdot^{\circ}\text{K})$

常见保温材料



聚氨酯发泡



高压聚乙烯发泡板材(PEF)



玻璃棉管



岩棉



硅酸铝毡



橡塑海棉
西安建筑科技大学

三、保温结构与施工

管道和设备的保温结构由保温层和保护层两部分组成。

1、对保温结构的选用要求：

- (1) 保证设备和管道的热损失不超过允许值；
- (2) 保温结构应有足够的机械强度；
- (3) 处理好保温结构和管道、设备的热伸缩；
- (4) 宜就地取材，做到简单、可靠，节省材料；
- (5) 为缩短工期，保证质量，尽可能采用工厂预制成型，减少现场制作。
- (6) 保温结构的保护层，应根据安装的环境条件和防雨防潮要求选用。
并作到外表平整、美观。

2、常用的保温结构的形式：

●**绑扎式结构**是将保温材料用铁丝固定在管道上，外包以保护层，适用于成型保温材料如预制瓦、管壳和棉毛毡等。这类保温结构应用较广，结构简单，施工方便，外形平整美观，使用年限较长。

- **浇灌式保温结构**主要用于地下无沟敷设。用于北方地区地下水位低、土质干燥的地方，是一种比较经济的型式。施工时可预先做好模子，套在管道外部，然后采用现场发泡浇灌。这类保温结构整体性好，保温效果也好，同时可延长管道的使用寿命。
- **整体压制式保温结构**是将沥青珍珠岩在热态下，在工厂内用机械力量把它直接挤压在管子上，制成整体式保温管。沥青珍珠岩使用于介质温度不超过 150°C 的设备和管道。
- **喷涂式保温结构**是现代化的一种施工技术，它适用于大面积和特殊设备的保温。具有劳动强度低、原材料消耗少、保温结构的整体性好和保温效果好等特点。其保温材料一般有膨胀珍珠岩、硅酸铝纤维以及聚氨酯泡沫塑料等。
- **其它**还有胶泥式、填充式，因其施工方法繁琐落后，费工费时，保温性能差，近年来已很少使用，已被其它保温结构所取代。

3、保护层

(1) 作用：要取得比较理想的保温效果，除选择好保温材料外，还必须选择好保护层，才能延长保温结构的使用寿命。

(2) 保护层种类：

- 金属保护层有铝皮、镀锌铁皮。
- 非金属保护层有铝箔玻璃布保护层、铝箔牛皮纸保护层、玻璃丝布保护层、油毡玻纤布保护层、油毡铁丝网沥青胶泥保护层、石棉水泥保护层、玻璃钢外壳保护层等。