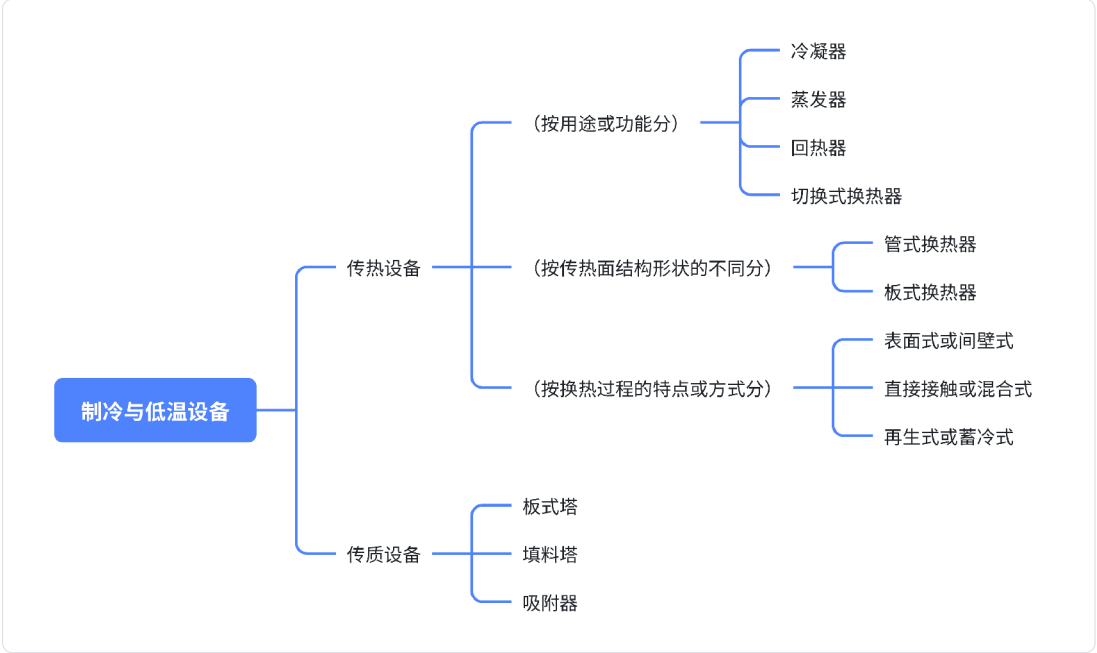


第一章 - 绪论

潘文豪 | 今天创建

制冷与低温设备的分类



传热设备的研究和发展趋势

传热机理的探讨

- 液膜形成机理
- 气泡形成机理
- 两相流动模型
- 霜层形成机理
- 场协同理论

设备结构、材料的改进和创新

- 适应新型制冷剂的新设备
- 微通道流动与传热
- 依靠外来能量增强传热
- 增强换热流体的扰动
- 改变换热表面的状况
- 选用新型换热材料

新型换热器材料

- 聚合物
 - 强化措施：使用聚合物基体复合材料
- 金属 / 金属泡沫
 - 重量轻（由约 90% 的空气组成）
 - 高比表面积
 - 高气体渗透性 + 高导热性（开孔泡沫金属）
 - 抗热冲击、高温、潮湿和热循环

- 高强度和韧性，适用于高压条件
 - 材料（孔径大小和分布 ）易于控制
 - 可加工性和可焊接性允许形成复杂部件
 - 良好的噪音衰减性能
- 碳 / 碳泡沫 / 石墨
 - 特点
 - 成本较低
 - （一般）热导率：聚合物材料 < 碳相关换热器 < 金属材料换热器
 - 脆性较大
- 陶瓷与陶瓷合金
 - 优点：耐高温（可承受 1400 摄氏度的操作温度）；耐腐蚀和化学侵蚀
 - 缺点：硬，机械加工性能差；多孔性；脆性；传热性能差
 - 应用：陶瓷基体复合材料

	聚合物	金属	碳材料	陶瓷
密度	低 - 中	中 - 高	低 - 中	中 - 高
热导率	低	中 - 高	中 - 极高	低 - 高
可承受温度	低	中(500 - 1000)	极高	高
耐化学性	中 - 好	差 - 中	好	极好
机械性	差	好	差 - 中	（铸造）好
成型与连接	容易	一般	困难	困难
成本	相对低	中 - 高	中 - 高	中 - 高
主要不足	机械强度低	耐腐蚀性、耐污性差	承压能力弱、易碎	材料固有脆性

传质设备的研究和发展趋势

在精馏领域，出现了填料塔逐步取代板式塔的趋势

第二章 - 常用换热设备

潘文豪 | 昨天创建

管式换热器

管壳式换热器

结构形式

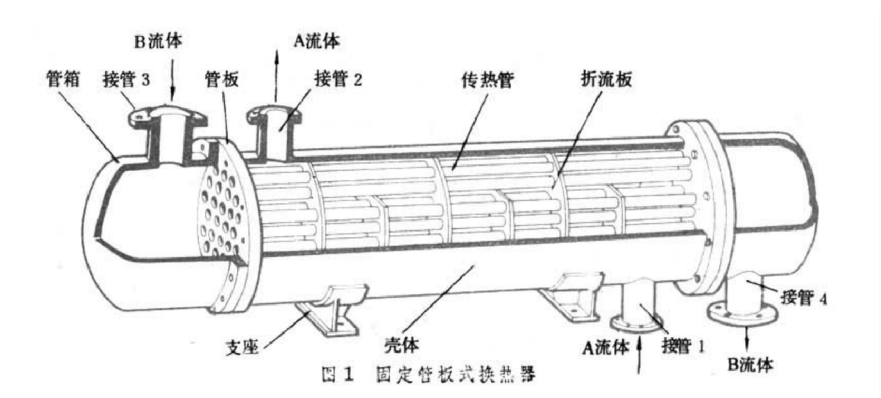
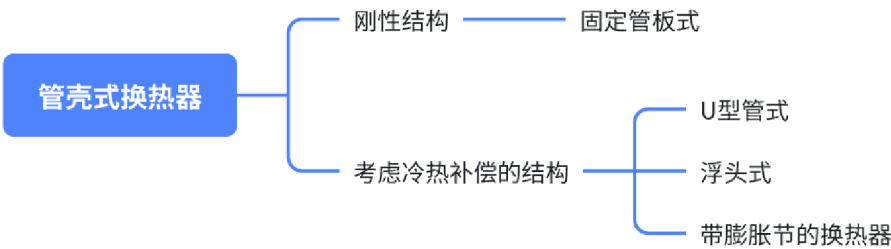


图 1 固定管板式换热器

固定管板式

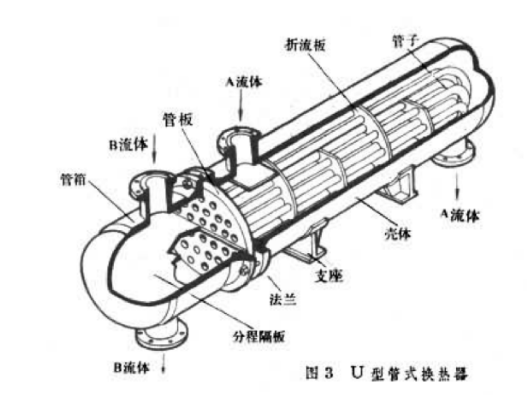


图 3 U 型管式换热器

U型管式

- 固定管板式
 - 优点：结构简单、制造成本低

- 缺点
 - 参与换热的两流体温差受限（在壳体设置膨胀节减小热应力）
 - 管子无法机械清洗，只能化学清洗，因此要求壳程流体不易结垢
- 适用范围：温差应力范围适当，壳程压力不高
- U型管式
 - 优点
 - U型端不加固定，可自由伸缩，减小热应力
 - 相对于浮头式结构简单，造价较低
 - 管子可拆卸清洗
 - 缺点
 - U形管内部不易清洗，需要管程流体不易结垢
 - 管束中心的管子被外层管子遮盖，损坏时难以更换
 - 相同直径壳体内，U形管排列数目比直管少，传热面积较小
 - 适用范围：可用于两流体温差大的场合，以及高压流体换热

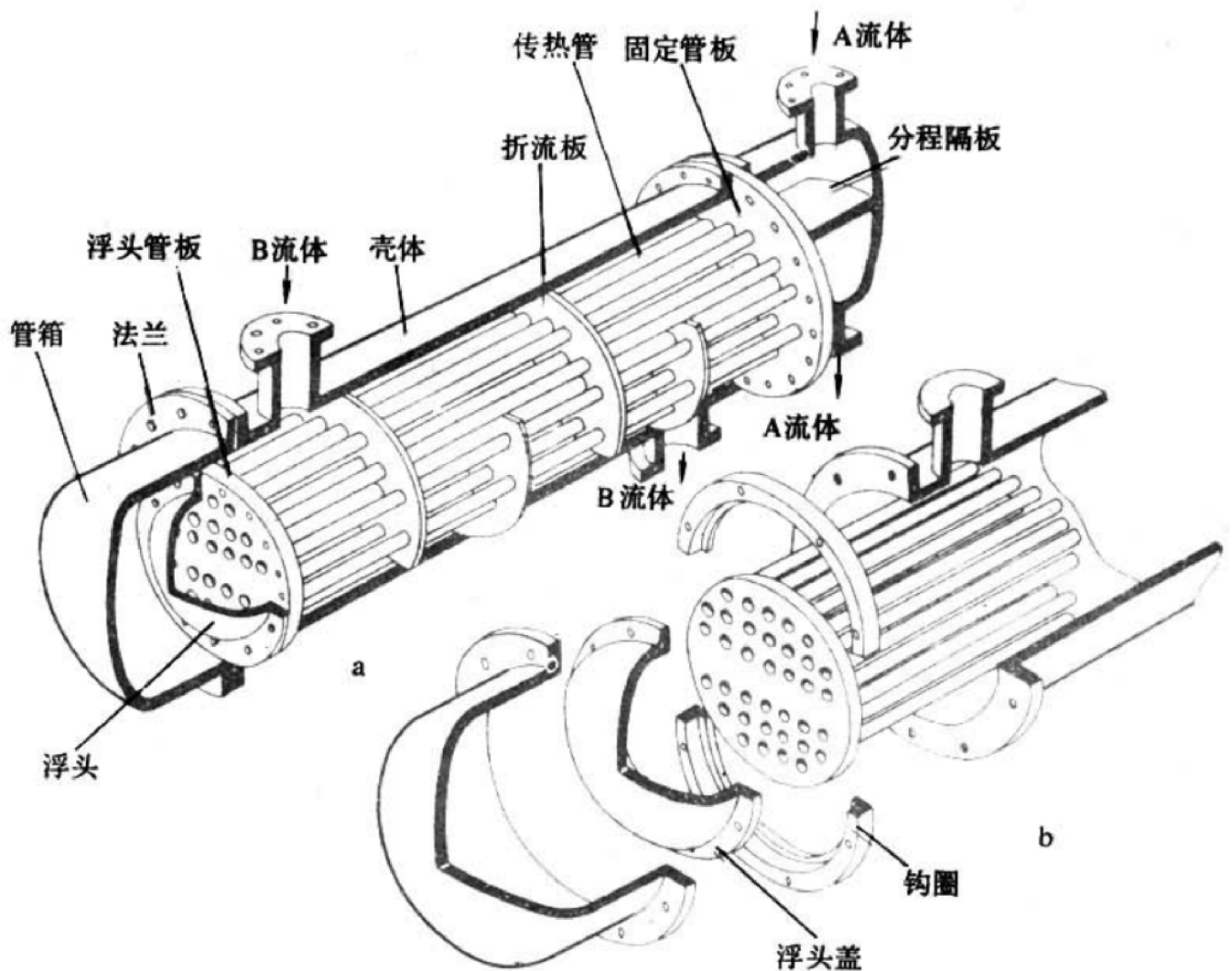


图2 浮头式换热器

浮头式

• 浮头式

- 结构特点：管子一端固定在固定管板上，另一端固定在浮头管板上，固定管板被法兰夹持，浮头可自由移动
- 优点
 - 壳体和管束轴向无约束，不会产生破坏性热应力
 - 管束可抽出，用机械方式清洗
- 缺点：相对于固定管板式，结构复杂，造价高
- 适用范围：适用于温度波动和温差大的场合

典型结构

- 管子在管板上的固定
 - 胀接：连接严密，易于更换

- 普通焊接：加工要求较低，接头易被腐蚀，不易更换
- 铺锡焊：空分装置常用，管子可以密排，但工作压力较高时可能松脱
- 管子在管板上的排列：等边三角形或正方形
- 管板
 - 固定管板式：不可拆
 - U型管式 / 浮头式：可拆
- 分程隔板：将换热器管程分为不同流程（1,2,4,6,8,10,12）
- 纵向隔板 / 折流板 / 支承板
 - 纵向隔板 / 折流板：提高壳程流体的流速，强化壳程流体的换热（螺旋折流板：减小流动死区，强化传热）
 - 支撑板：若壳程有相变过程，则不须加折流板，但管子太长时可加支撑板防止下垂

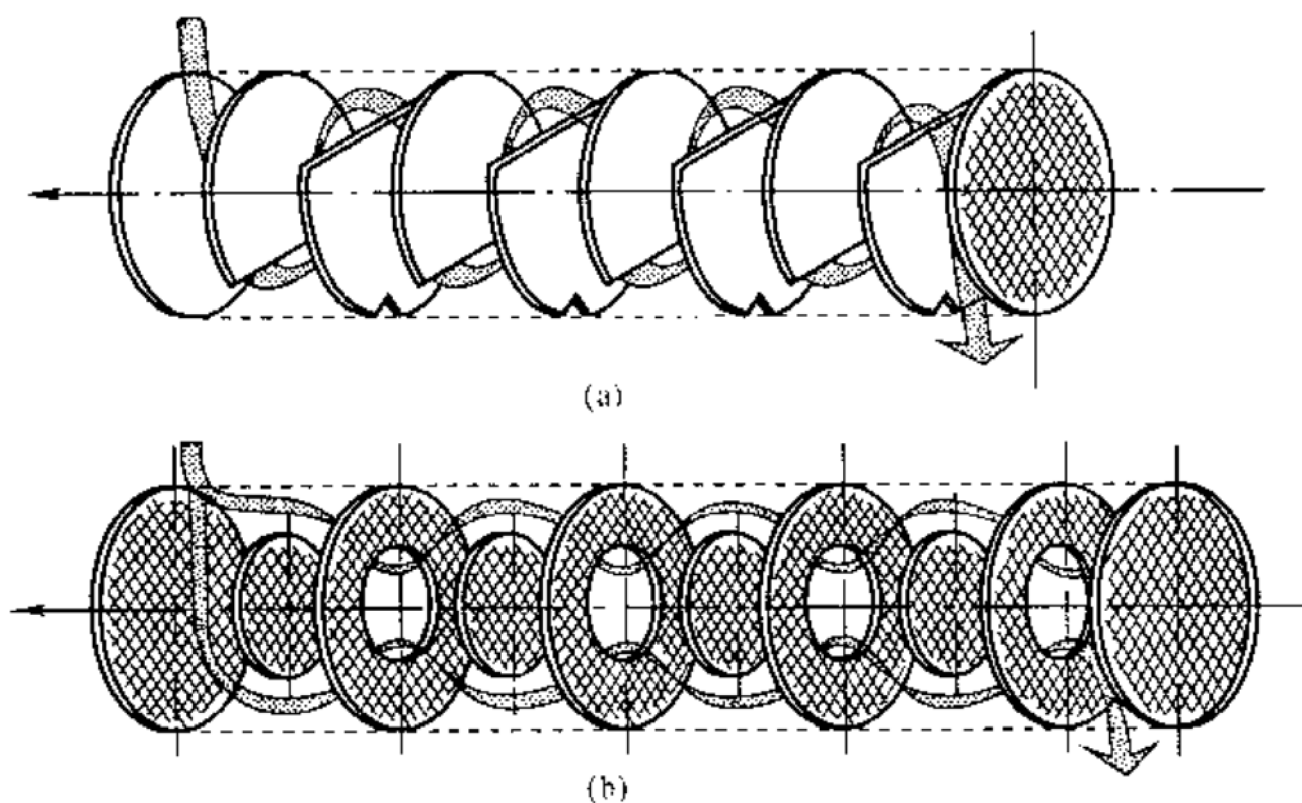


图 2-6 不同折流板形式时的介质流动图

固定管板式：弓形（圆缺形）折流板；U型管式：盘型 / 环形折流板

绕管式换热器

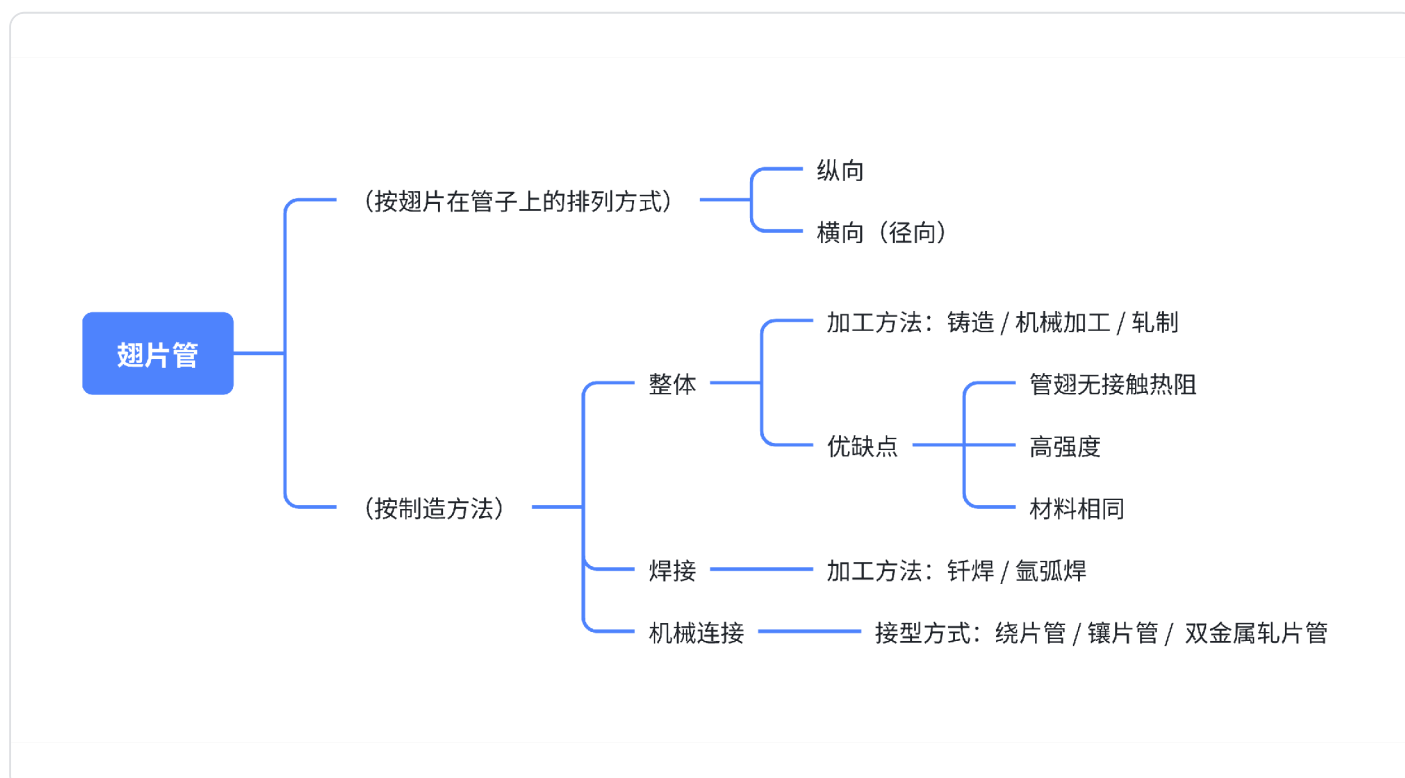
- 结构形式：中心管 - 垫条 - 传热管 - 垫条 - - 传热管 - 垫条 - 外壁（中心管起支撑作用，管层之间用垫条形成流体通道）
- 优点
 - 结构紧凑，单位容积传热面积大

- 可同时进行多种介质传热
- 传热管的热膨胀可自行补偿
- 适用于高压流体间换热
- 容易实现大型化
- 应用领域：化肥、空分、天然气液化

套管式换热器

- **结构：**基本部件是由直径不同的两根或多根标准管子套在一起形成的套管。
- **优点：**结构紧凑、简单，两种流体可实现逆流换热。
- **缺点：**环隙通道清洗困难，接头多时容易泄漏，单位换热面积的金属耗量较大。
- **适用范围：**适用于流量不大、传热面积较小的场合，在一些制冷及气体液化装置中用到。

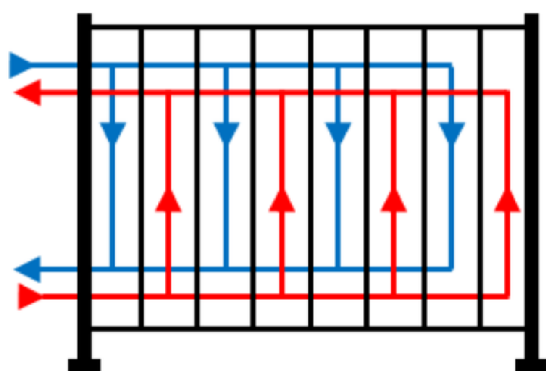
翅片管式换热器



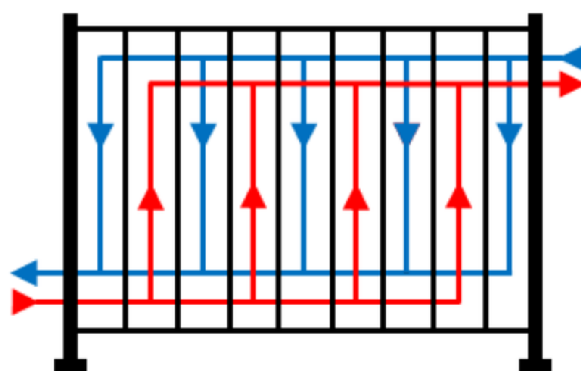
- 优缺点
 - 优点
 - 传热能力强，与光管比，传热面积增加 2~10 倍，传热系数提高 1~2 倍
 - 结构紧凑，同样负荷下所需空间小
 - 管子与翅片可用不同材料，材料利用更合理
 - 缺点：造价较高，翅片侧流动阻力大

板式换热器

- 基本结构：由板片、密封垫片、固定压紧板、活动压紧板、压紧螺柱和螺母、上下导杆、前支柱等零部件组成。
- 板片形式：水平波纹、人字形波纹、圆弧波纹
 - 人字形波纹应用最广，其倾角越大，换热越强，流阻越大（注意流体竖直流动）
- 板片分区：进口区（角孔）、分配区、传热区
- 流程组合
 - 简单流程组合



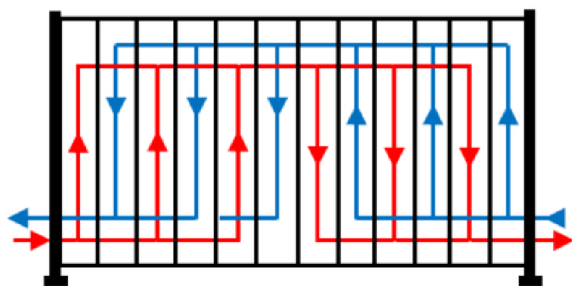
“U”形流程组合



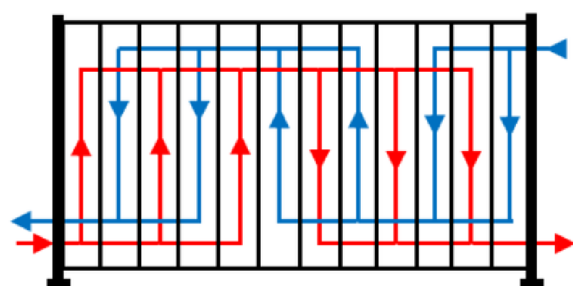
“Z”形流程组合

- 混合流程组合

$$\frac{\text{热流体等流道流程数} \times \text{热流体单程流道数}}{\text{冷流体等流道流程数} \times \text{冷流体单程流道数}}$$



$\frac{2 \times 3}{2 \times 3}$ 等程



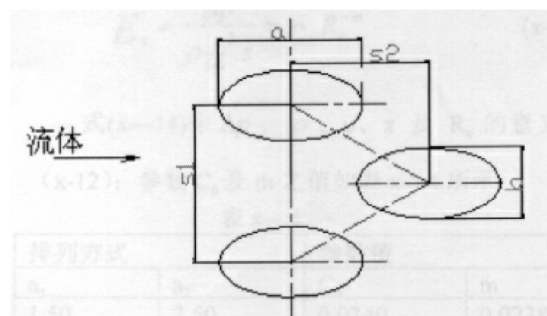
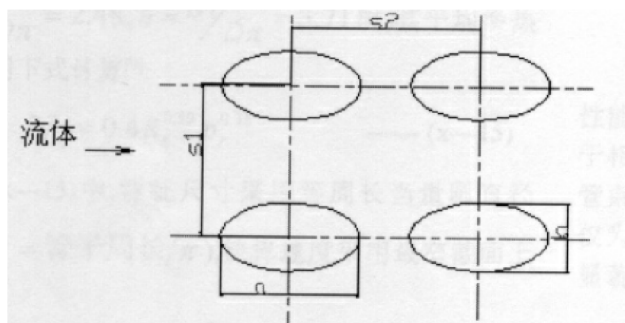
$\frac{2 \times 3}{3 \times 2}$ 不等程

若需要逆流换热，冷热流体必须等程；否则顺流和逆流会交替出现

- 优点
 - 传热系数大（2000~8000），比管壳式大 2~3 倍，相同压力损失下传热量是管壳式的 6~7 倍
 - 传热温差小，因为传热系数大，湍流强烈
 - 热损失小，仅有板片边缘及周边密封垫暴露在大气中，不需采用保温措施
 - 结构紧凑，单位容积的有效换热面积大，节省空间
 - 适应性强，板片和流程组合可变
 - 用途广泛
 - 操作灵活，维修方便
- 缺点
 - 内容积小，需设储液器
 - 板片间距小，易堵塞，对水质要求高，要求水处理
 - 板间易结冰冻裂
 - 做冷凝器时只能用于水源热泵等水质较好的场合

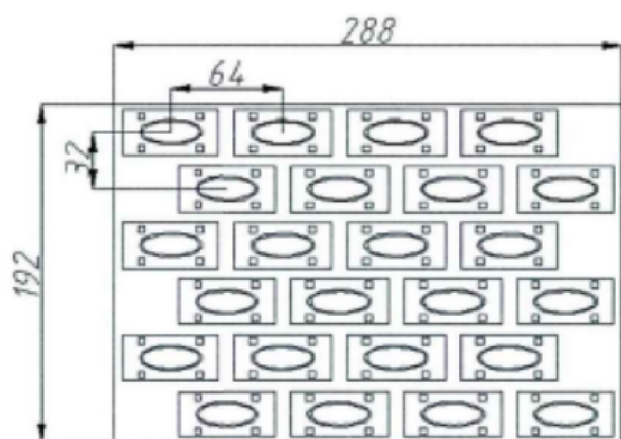
椭圆管换热器

- 椭圆管相对圆管的优势：流动阻力小、传热系数大
 - 椭圆管呈流线型，在横掠气流中，流体分离点后移，减少了管后的漩涡区
 - 椭圆管前半部分的边界层比圆管薄
- 椭圆管束的排列方式

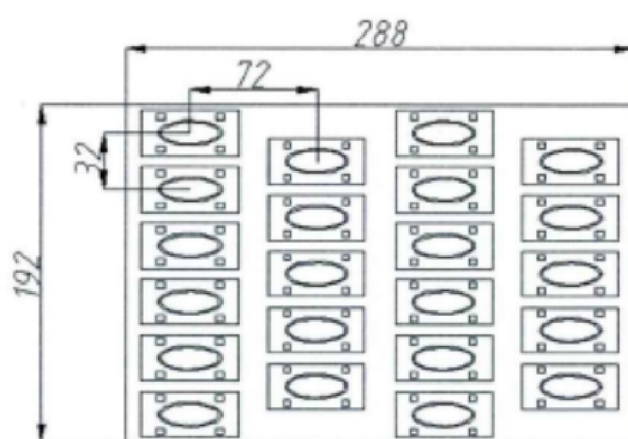


顺排与叉排椭圆管束

- 传热系数：顺排略低于叉排
- 流动阻力：顺排比叉排低得多



错排椭圆管束



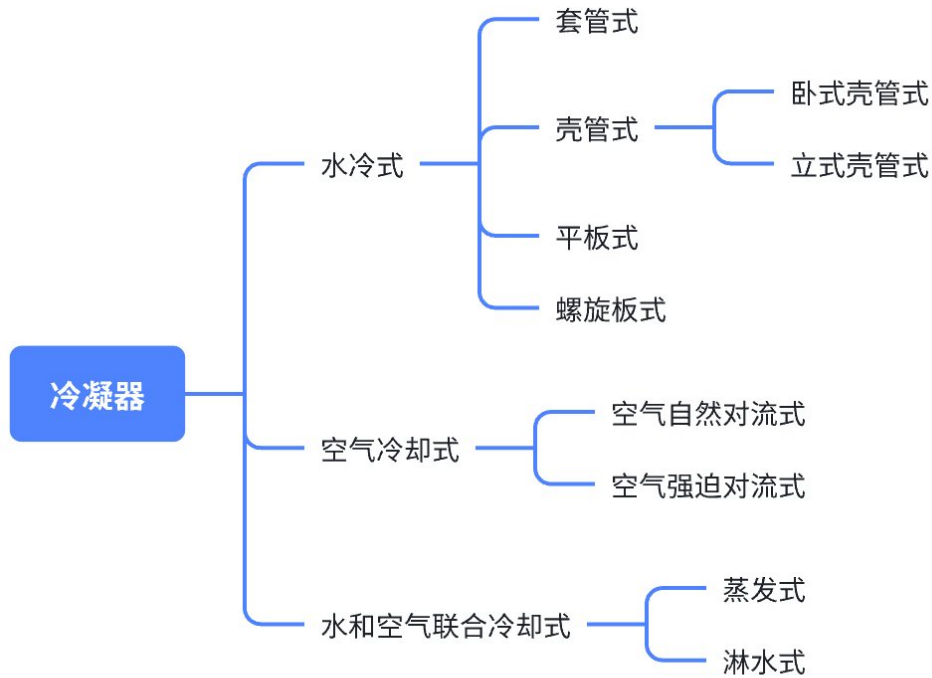
错列椭圆管束

错排与错列翅片椭圆管束

- 传热量：错列传热量高约 20%
- 流动阻力：错列压降大约 10%
- 扭曲椭圆管换热器的特点
 - 紧密排列，尺寸和质量小
 - 克服折流板换热器横向冲刷的振动
 - 加强了流体的横向混合，增强了流体的扰流程度
 - 壳程流体为纵向流
 - 减小了折流板换热器壳程流体压降
 - 避免了折流板与壳体连接部位的流动死区与结垢
 - 增加了有效换热面积
 - 克服折流板换热器横向冲刷的振动（同上）
 - 壳程采用管束多点自支撑的结构
 - 壳程流道具有一体化以及网格化的特点

- 壳程通道内流体周期性地冲击换热管壁面，强化流体的纵向混合，提高换热效果

第四章 - 冷凝器



水冷式冷凝器

- 主要特点
 - 冷凝温度低
 - 换热系数大
 - 能效比高
 - 多用于大中型机组，但需要冷却水源
- 冷却水来源：冷却塔人工冷却、地下水、地表水（工程问题：水质处理）

套管式冷凝器

同轴套管式换热器

- 特点
 - 两管同轴，大管套小管
 - 内管走水，外观走制冷剂，逆流换热
 - 将套管卷制以减小尺寸

- 螺旋管：强化传热，固定内管

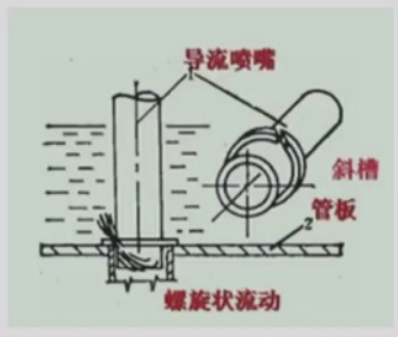
多管束套管式换热器

- 特点
 - 内部为多管构成管束结构，有利于提高水的流速
 - 内管走制冷剂，分液头均匀分液
 - 采用麻花状内管束，加强扰动，强化传热，同时提高管束强度
- 优缺点
 - 优点：传热系数高，结构简单，易制造
 - 缺点：金属耗量大，冷却水流动阻力大
- 适用场合：小型氟利昂制冷装置（冷量小于 40kW）

壳管式冷凝器

立式壳管式冷凝器

● **结构：**由筒体（壳体）、管板和管束（传热管）等部件构成。

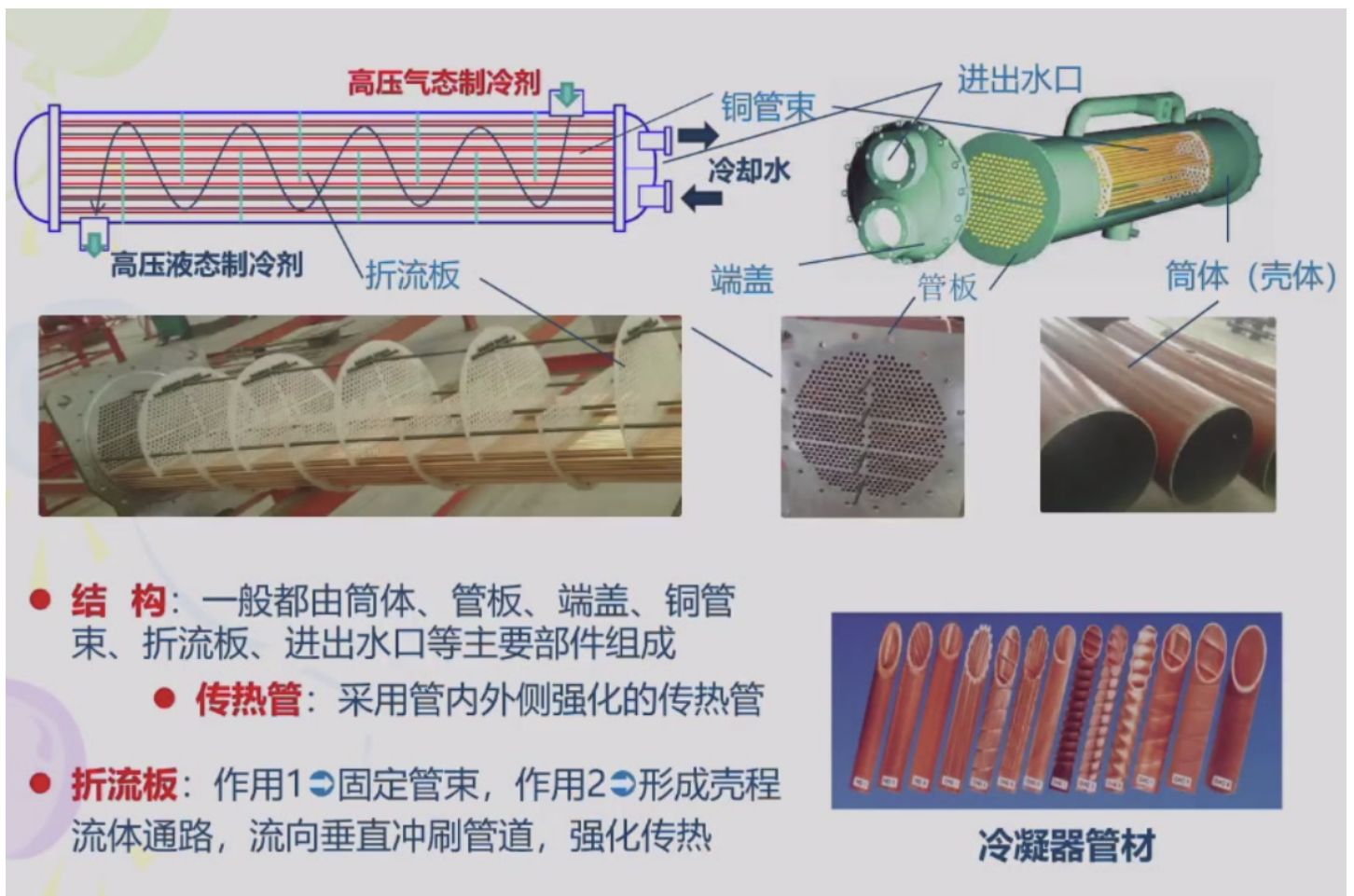




- 为了使冷却水均匀地分配到每根管内，冷凝器顶部装有**配水箱**，每根管的管口上装有一只**导流管嘴**。冷却水通过导流管嘴上的斜槽流入管中，并以**螺旋线状**沿管内壁流下--→形成一层很薄的水膜，充分吸收制冷剂放出的热量，提高效率。
- 冷凝器管一般采用无缝钢管。
- 可露天安装，也可以装在冷却水塔的下面，简化冷却水系统。

- 优点
 - 冷却流量大，流速高，传热系数较高（600~700）
 - 垂直安装，占地面积小，可露天安装

- 冷却水直通且流速大，对水质要求较低
- 运行过程中可以清洗
- 置于空气中，管道泄露易发现
- 缺点
 - 传热系数小于卧式壳管式（重力作用下存在顺流，制冷剂液膜增厚）
 - 体积大于卧式壳管式
 - 易结垢，需经常清洗
 - 冷却水进出口温差小，耗水量大
 - 高度大，操作不便，需设操作平台

卧式壳管式冷凝器

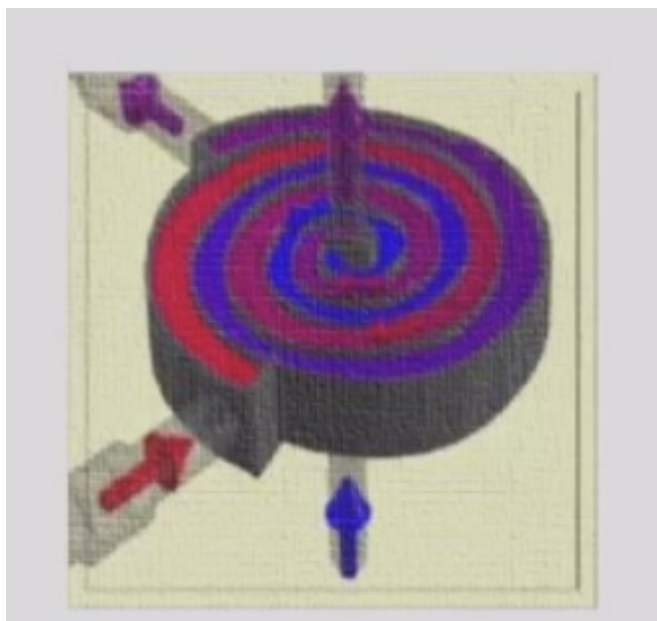


- 优点
 - 结构紧凑，体积小
 - 传热系数大
 - 冷却水进出口温差大，耗水量小
 - 布置在室内，操作方便

- 缺点
 - 对水质要求高
 - 清洗不方便，且清洗时必须停运
 - 冷却水流动阻力大
 - 制冷剂泄露不易被发现
- 适应范围：大中型氨和氟利昂制冷系统

平板式（略）

螺旋板式



螺旋板式换热器流动示意图

结构

由两个螺旋盖加上顶盖和接管构成。两种介质在螺旋形通道内逆向流动，一种介质由中心流入，边缘流出；另一种由边缘流入，中心流出。按结构形式可分为不可拆式和可拆式两种。

优缺点

- 优点
 - 结构紧凑，单位容积内有效传热面积大
 - 流体允许流速高，滞留层薄，传热系数大
 - 流体流速快，脏物不易滞留（单通道，无流动死角）
- 缺点
 - 对焊接质量要求高，检修困难
 - 重量大，刚性差，运输和安装时要特别注意

空气冷却式冷凝器

传统空气冷却式冷凝器

- 自然对流：以家用冰箱板管式冷凝器为例
 - 热量由冷凝盘管传给冰箱背板，再由背板传给空气
 - 要求胶合剂具有良好的导热性能
 - 散热量小于 100 W
- 强迫对流
 - 结构形式：立式 I 型、立式 L 型、卧式 V 型
 - 从风扇方向可分为：吹风式、吸风式
 - 迎面风速：2~3m/s
 - 特点
 - 传热系数小：一般 25~35
 - 冷凝温度受环境温度影响大
- 优点
 - 不需要冷却水，节约用水
 - 可露天布置，节省机房面积
- 缺点
 - 传热系数低
 - 气温高时，冷凝压力高
 - 传热管外有翅片，清洗不便
- 适用场合：中小型氟利昂装置，特别是缺水地区或运输式制冷装置

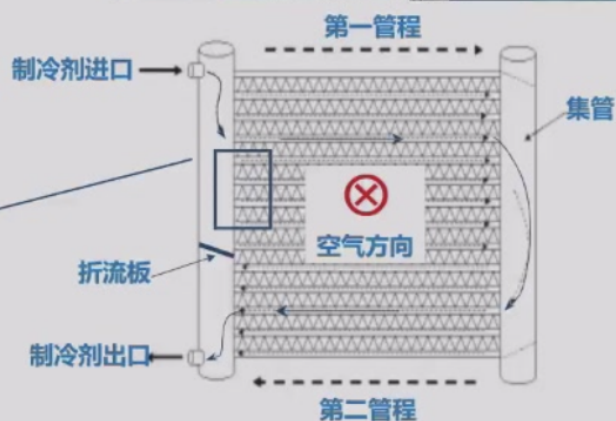
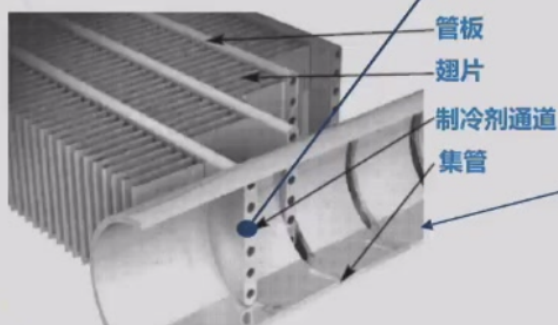
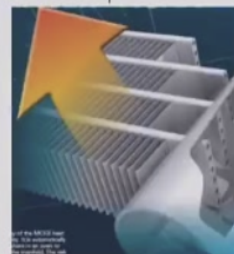
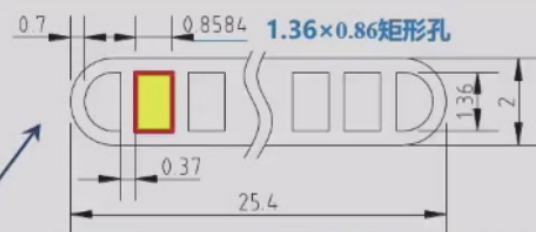
微通道空气冷却式冷凝器

● 微通道换热器的结构与流程

● 特点

- 全铝结构，节约铜材，换热系数大
- 翅片结构决定其容易积灰、集柳絮

- 采用微通道换热器的风冷式冷水机组产品已经得到工程应用
- 目前只能作冷凝器，由于除霜问题难以解决，还不能作热泵室外机的换热器

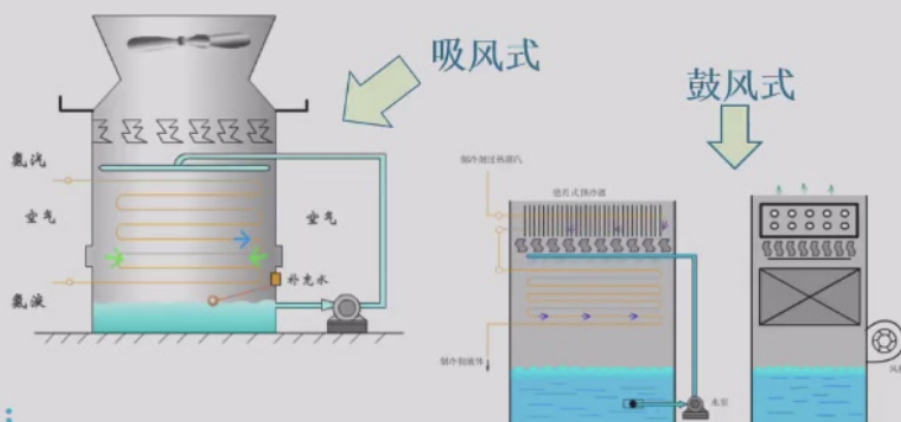


蒸发式和淋水式冷凝器

空气冷却式冷凝器：水和空气联合冷却式冷凝器

● 蒸发式冷凝器

- 吸风式
- 鼓风式



- 吸风式优点是箱内保持负压，水的蒸发温度低；缺点是带有水滴的湿、热空气流经风机，风机零件易腐蚀损坏。
- 鼓风式优缺点与吸风式相反。

● 淋水式冷凝器

- 优点：耗水量小；
室外布置，节省机房面积；
冷凝面积比风冷式、水冷式少，运行经济性好。
- 缺点：造价高；
清洗、维修较麻烦。

制冷剂在管内冷凝，冷却水通过上部的水槽流洒在蛇形盘管上，呈膜状流下。制冷剂放出的热量通过管壁传给水膜，再由水膜传给空气，依靠空气自然对流将热量带走，少部分热量由水的蒸发带走。传热管通常为光滑钢管。

冷凝器热工性能（看课件吧）

1. 传热过程

➤ 水冷式、风冷式、蒸发式冷凝器的传热过程相似

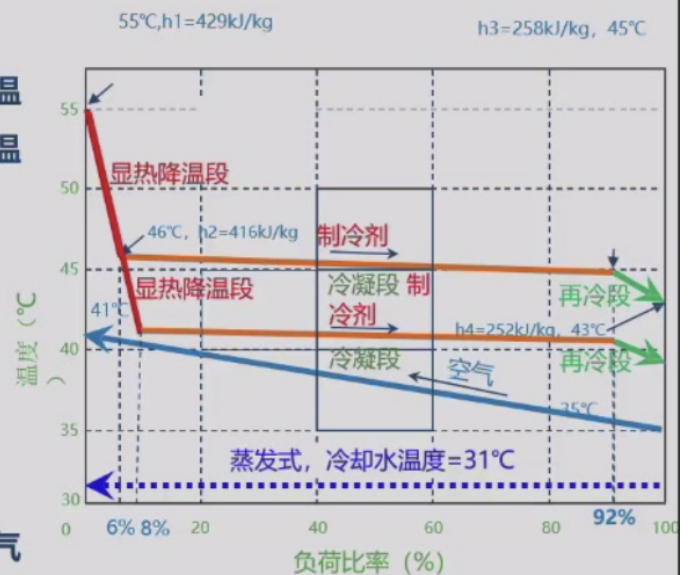
➤ 制冷剂：降低过热、冷凝和再冷三个阶段

○ 冷凝段：约80%以上的冷凝负荷，制冷剂的温度基本不变（但因存在流动阻力，故制冷剂温度略有降低）

➤ 冷却介质

○ 水冷式、风冷式：冷却水和空气获得冷凝热，温度升高

○ 蒸发式：主要是利用盘管外侧喷淋冷却水蒸发时的气化潜热而使盘管内制冷剂蒸气凝结，故冷却介质（冷却水）的温升幅度较小



制冷剂的冷凝过程

○ 制冷剂侧

➤ 制冷剂状态

- 过热蒸气、两相状态、过冷液
- 管内的流型

➤ 凝结形式

- 膜状凝结：换热系数小
- 珠状凝结：换热系数大

➤ 冷凝壁面的表面状态

- 壁面粗糙会使液膜积聚变厚，热阻增大

➤ 传热面油膜

- 例如：氨冷凝器会沉积润滑油膜

➤ 不凝性气体

- 制冷剂蒸气中含有空气等不凝性气体时，冷凝温度升高
- 聚集的气体会占据换热空间，减小传热面积；气膜会降低传热系数

○ 冷却介质侧

➤ 流速

- 流速高：换热增强，减少积垢，但流阻大；流速过高，还会产生冲刷腐蚀
- 流速低：流动阻力小，泵/风扇能耗小，但换热系数小
- 最佳流速
 - 水：<1~1.5m/s(氟利昂)
 - 空气：2~4 m/s (再大起不了作用，同时增加风扇能耗和噪声！)

➤ 传热面结垢

- 水冷式、蒸发式：水垢、锈蚀
- 风冷式：灰尘、锈蚀

✦ 传热系数计算

通过平壁面的传热: $k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$

通过圆筒壁的传热: $k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}}$ (以外表面为基准面)

(考虑污垢热阻) 通过圆筒壁的传热: $k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + R_{si} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + R_{so} + \frac{1}{h_o}}$

在工程上, 为了简化计算, 通常把以上复杂的热传递过程用一个总传热系数来表示, 用 K 来表示。当传热面为圆管形状时, 常常以外传热表面为基准面, 总传热系数的计算式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + R_{so} + \frac{bd_0}{\lambda d_m} + R_{si} \frac{d_0}{d_i} + \frac{d_0}{\alpha_i d_i}} \quad (8-1)$$

式中 α_i 、 α_o ——传热面内、外两侧流体的表面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$];

d_i 、 d_o ——管子的内、外径(m);

b ——管子壁厚(m);

λ ——传热面材料的热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];

R_{si} 、 R_{so} ——管子内、外壁污垢热阻 [$\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$];

d_m ——管子中间面直径(m)。

- 铜、水、空气的热导率 λ 分别是: $383.79 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $0.599 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $0.0244 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
- 静止/流动气体和液体的换热系数 α 分别是: $4\text{-}20/10\text{-}500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $70\text{-}300/200\text{-}1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- 冷凝面/蒸发面R12的换热系数 α 是 $1600/1700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

平均对数温差法

冷热流体最大温差: $\Delta t_{\max} = \{\Delta t', \Delta t''\}_{\max}$

冷热流体最小温差: $\Delta t_{\min} = \{\Delta t', \Delta t''\}_{\min}$

对数平均温差: $\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \Delta t_{\max} - \ln \Delta t_{\min}}$

传热量: $\Phi = kA\Delta t_m$

➤ 污垢系数（或污垢热阻）

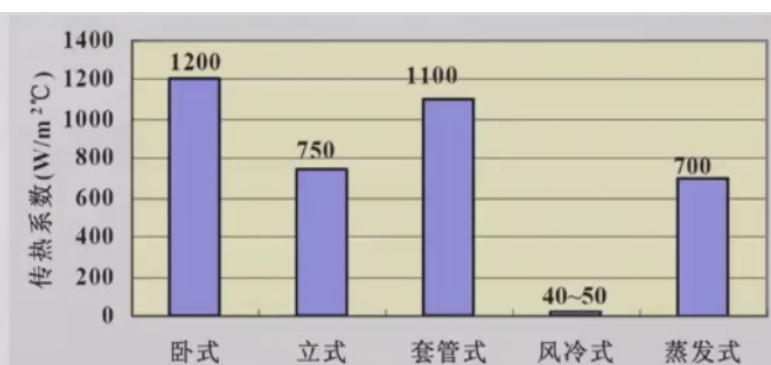
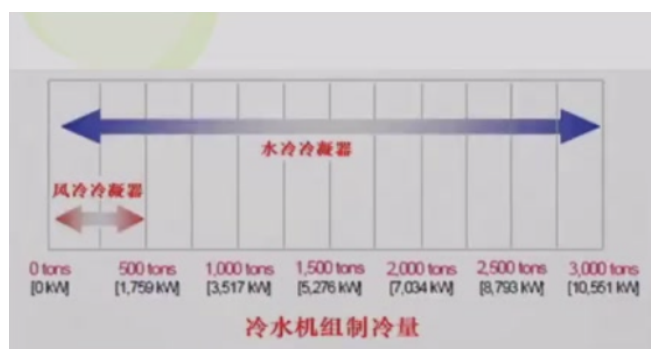
○ 水冷式冷凝器 $R_{\text{污垢}} =$
 $0.018 \sim 0.05 \text{ m}^2\text{C}/\text{kW}$ [产品
标准: $0.044 \text{ m}^2\text{C}/\text{kW}$]

○ 风冷式冷凝器 $R_{\text{污垢}}$
 $= 0.1 \sim 0.3 \text{ m}^2\text{C}/\text{kW}$

水冷式冷凝器传热热阻比例



冷凝器选择原则（看课件吧）



- 冷凝器总的冷凝面积应能满足实际运行的最大负荷工况要求，并有一定裕量。
- 冷凝器的台数，一般与压缩机对应，但不宜过多，2-4台为宜，不考虑备用。
- 立式冷凝器适用于水质较差而水源丰富地区，一般用于氨系统；
卧式冷凝器适用于水温较低、水质较好的场合，氨或氟利昂系统均可使用；
淋水式冷凝器适用于空气相对湿度较低、水源不足和水质较差的场合，目前用于氨制冷系统较多；
蒸发式冷凝器由于耗水量很小，特别适用于水源缺乏、干燥地区；
风冷式冷凝器在水源缺乏、干燥地区使用，一般用于中小型氟利昂系统。
- 当冷却水为循环使用时，立式冷凝器和卧式冷凝器均可使用。
- 从设备费和维护费用看，蒸发式冷凝器最高。