

冬天，坐在铁
凳上感觉比坐
在木凳上冷

一杯热水放在
冷水中比放在
空气中冷得快

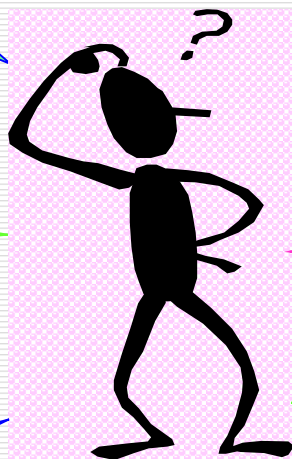
将 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水
加热到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$

将 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的汤
冷却到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

将水变成
水蒸气

将乙醇蒸
气冷凝

热水瓶能保温



热量如何传递——堆雪人后的暖宝宝



https://www.bilibili.com/video/BV17p4y1q7Hs?spm_id_from=33.337.search-card.all.click

第二章 热量传递 Heat Transfer

- 2.1 概述
 - 2.2 热传导
 - 2.3 对流传热
 - 2.4 传热系数经验关联式
 - 2.5 传热过程的计算
 - 2.6 换热器
-

2.1 概述

□ **传热**：根据热力学第二定律（熵增原理），凡存在温差，热量会自发的从高温向低温传递，这一过程称为**热量传递过程**，简称**传热过程**。

□ **在化工生产中，存在大量的传热问题**。例如：化学反应过程中，通常需要加入热量或移出热量以控制适宜的反应温度。而且，化工生产中的许多单元操作，如精馏、吸收、干燥等均直接或间接的与传热有关。此外，化工设备的保温，生产工程中热能的合理利用以及废热的回收等都涉及传热问题。

2.1 概述

□ 传热过程的目的

- 1.为使物料满足生产规定的操作温度需要加热或冷却;
- 2.为减少热量（冷量）损失需要保温;
- 3.为节能的需要对热量（冷量）进行回收利用。

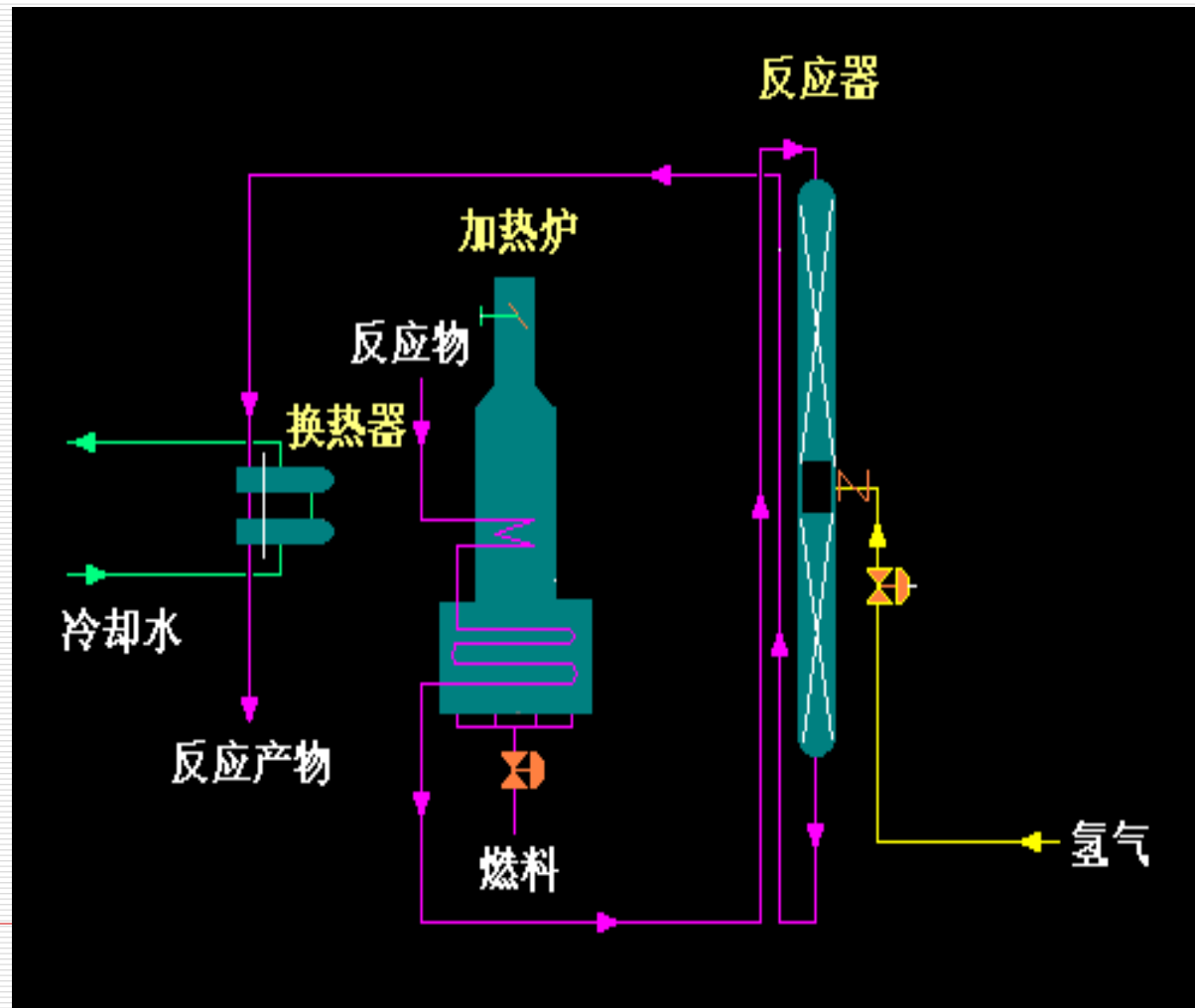
□ 本章的重点

传热的基本原理及其在化工生产中的应用。

传热过程在化工生产中的应用

- 加热或冷却
- 换热
- 保温
- 强化传热过程
- 削弱传热过程

探求实现和强化传热过程的有效途径以及防止和抑制传热过程的有效方法



2.1.1 传热的三种基本方式

一、热传导

热量从物体内温度较高的部分传递到温度较低的部分，或传递到与之接触的另一物体的过程称为热传导，又称导热。 **特点：**没有物质的宏观位移

- ◆ **气体** 分子做不规则热运动时相互碰撞的结果
 - ◆ **固体** 导电体：自由电子在晶格间的运动
非导电体：通过晶格结构的振动来实现的
 - ◆ **液体** 机理复杂
-

2.1.1 传热的三种基本方式



https://www.bilibili.com/video/BV1LA411i7JN/?spm_id_from=333.788.recommend_more_video.-1

2.1.1 传热的三种基本方式

二、热对流

流体内部质点**发生相对位移**的热量传递过程。

□ 根据流体在其与壁面之间的传热过程中所处的状态，传热可分为两类：

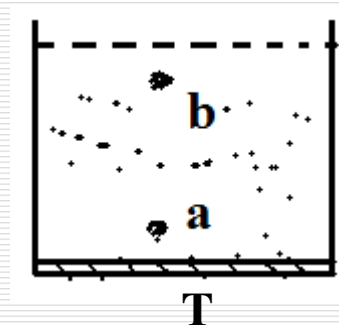
- 1、流体无相变：根据引起对流的原因，将流体的流动分为**强制对流**和**自然对流**。
 - 2、流体有相变：**蒸汽冷凝**和**液体沸腾**
-

A、自然对流

容器内盛有液体，容器底部有一加热板，加热板的温度恒定为 T 。加热过程中，加热板附近的液体a的温度必定高于远离加热板b处液体的温度，此温度差为 ΔT 。

$$\rho_a = \frac{\rho_b}{1 + \beta \Delta T}$$

β 为液体的体积膨胀系数



因为 $T_a > T_b$ ，则 $\rho_a < \rho_b$ ，这样，受热的分子不断上升，冷流体分子不断下降。造成了液体内质点的相对运动，热量从一处传到另一处。我们将这种由于流体本身各点的温度不同，引起密度差异形成流体质点的运动（传热过程中因流体冷热部分密度不同而引起的流动称为自然对流）

B、强制对流

通常我们在容器内安装一搅拌器，这样流体在外力作用下产生宏观流动，称为**强制对流**。

三、热辐射

物体因热的原因发出辐射能的过程称为热辐射。

特点

- 能量转移、能量形式的转化。热能-辐射能-热能
 - 不需要任何物质作媒介。
 - 任何物体，只要 $T > 0K$ ，均存在辐射传热。
-

热辐射

YouJEF bilibili

https://www.bilibili.com/video/BV1gV411t75U?spm_id_from=333.337.search-card.all.click

传热方式	机 理	先决条件	具体条件	特 点
热传导	微观粒子的动量交换	$\Delta T > 0$	接触	物质内传热 无宏观位移
热对流	冷热质团的混合	$\Delta T > 0$	混合	传导/对流的联合作用
热辐射	射线的辐射和吸收	$\Delta T > 0$	不需要	温度高时才明显($E \propto T^4$)

实际热交换过程中，上述三种基本传热方式通常不是单独存在的，而是两种或三种传热方式的组合，称为**复杂传热**。例如，超高温气体与固体壁面之间的换热就要同时考虑对流传热和辐射传热等。

2.1.2 传热中冷、热流体的热交换方式

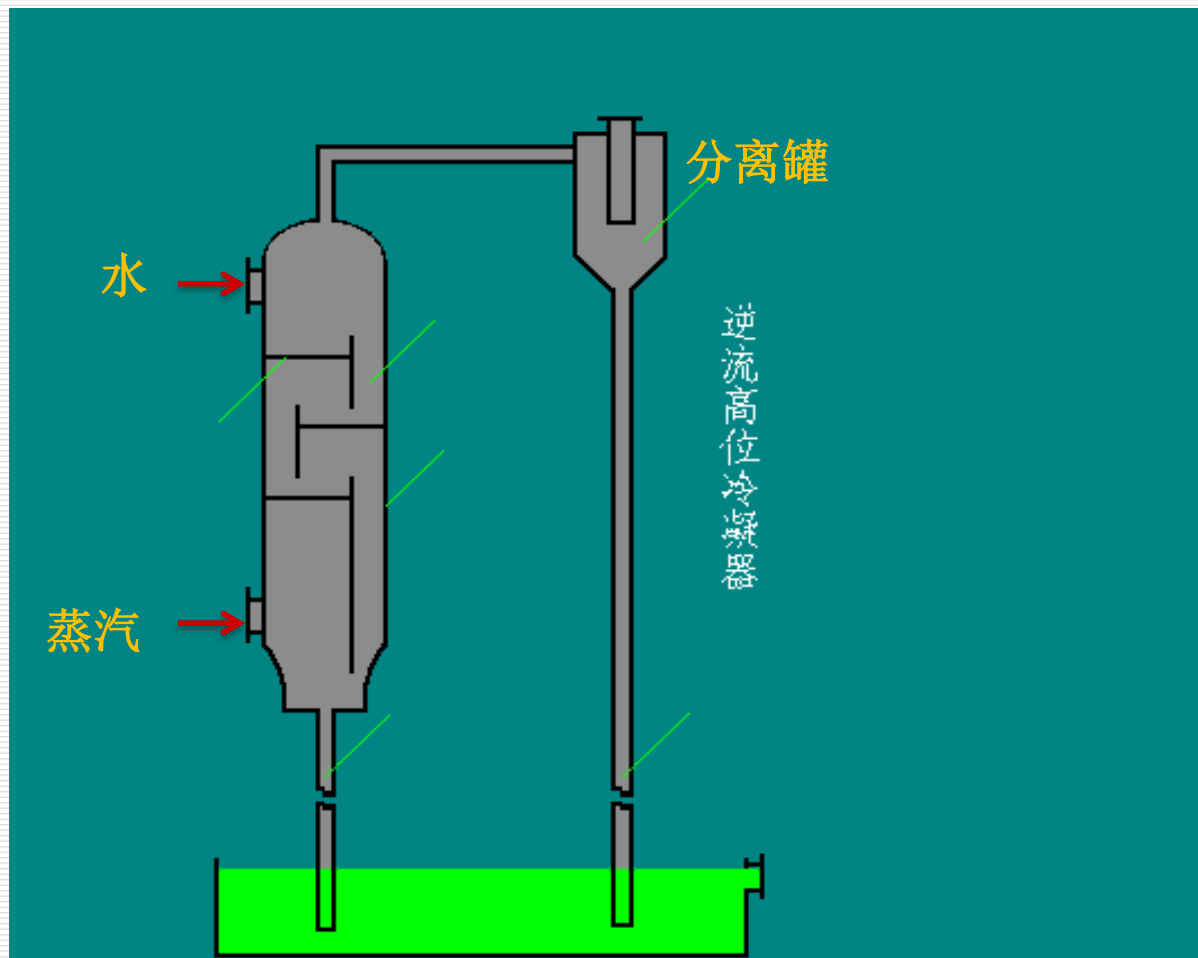
传热过程中冷热流体的热交换方式可分为：

□ 一、直接接触式传热

□ 二、间壁式传热

□ 三、蓄热式传热

一、直接接触式传热



干式逆流高位冷凝器

优点:

- 传热效果好
- 结构较简单
- 易于防腐蚀

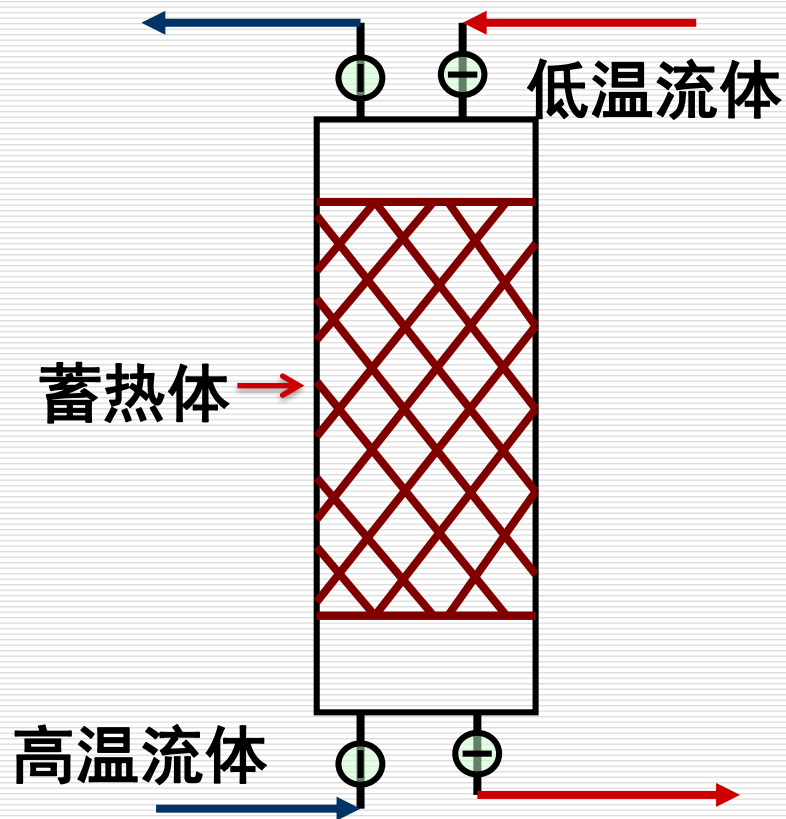
用途:

- 气体的冷却
- 蒸汽的冷凝

特点:

- 使用不多
- 机理复杂

二、蓄热式传热



优点:

- 结构较简单
- 耐高温

缺点:

- 设备体积大
- 有一定程度的混合
- 使用不多

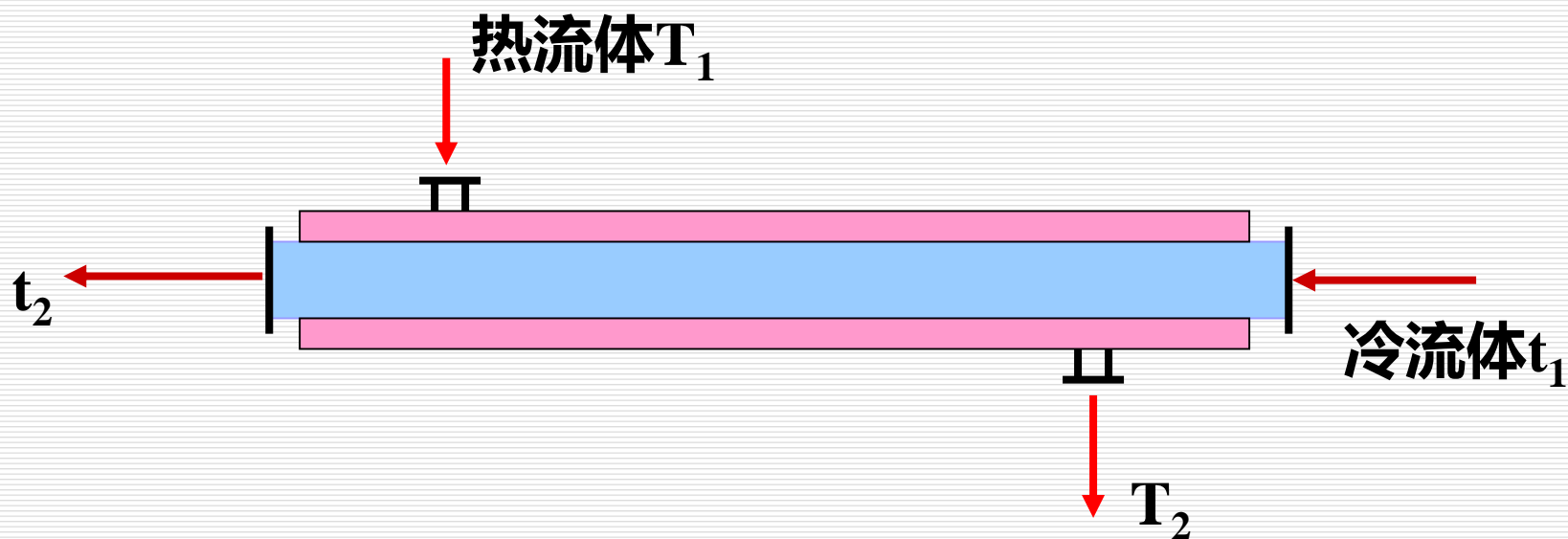
蓄热式换热器

三、间壁式传热

在多数情况下，化工工艺上不允许冷热流体直接接触，故直接接触式传热和蓄热式传热在工业上并不很多，工业上应用最多的是**间壁式传热**过程。

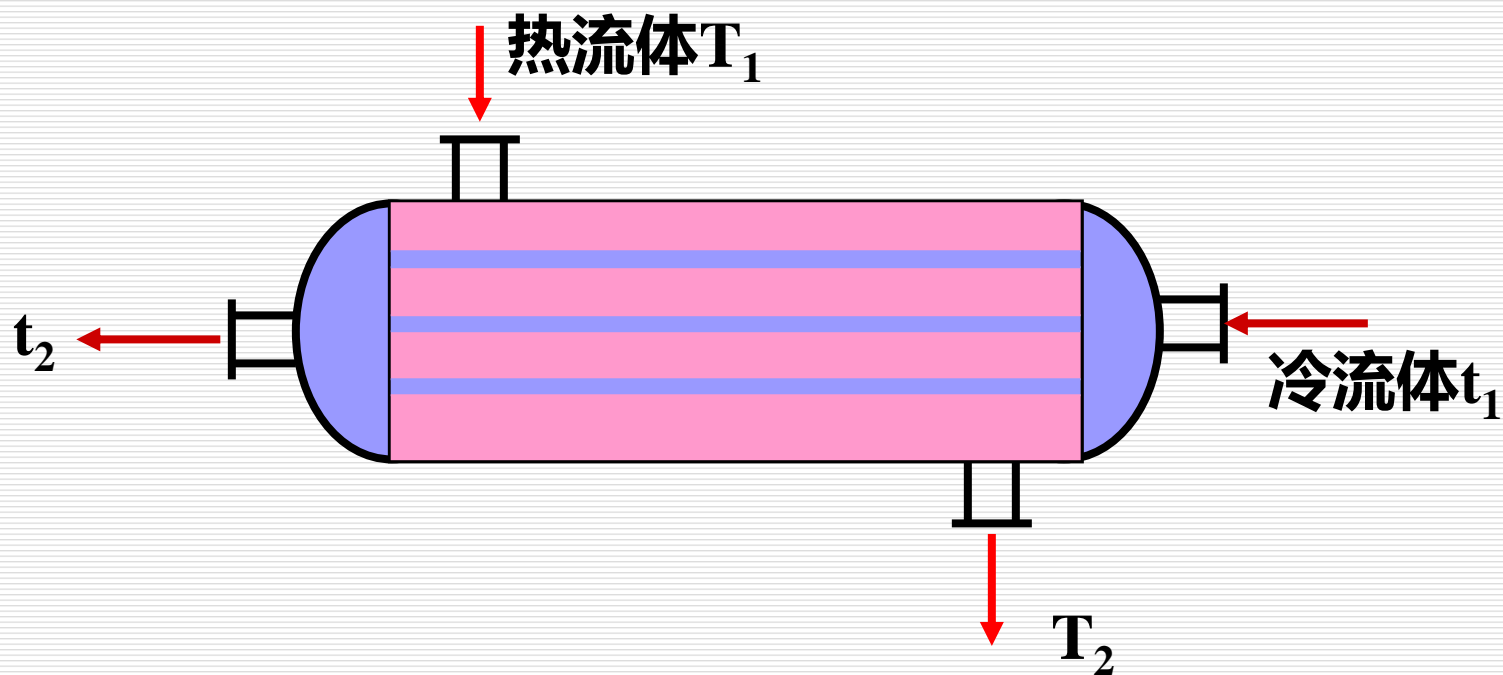
典型设备：套管式换热器和列管式换热器。

套管换热器



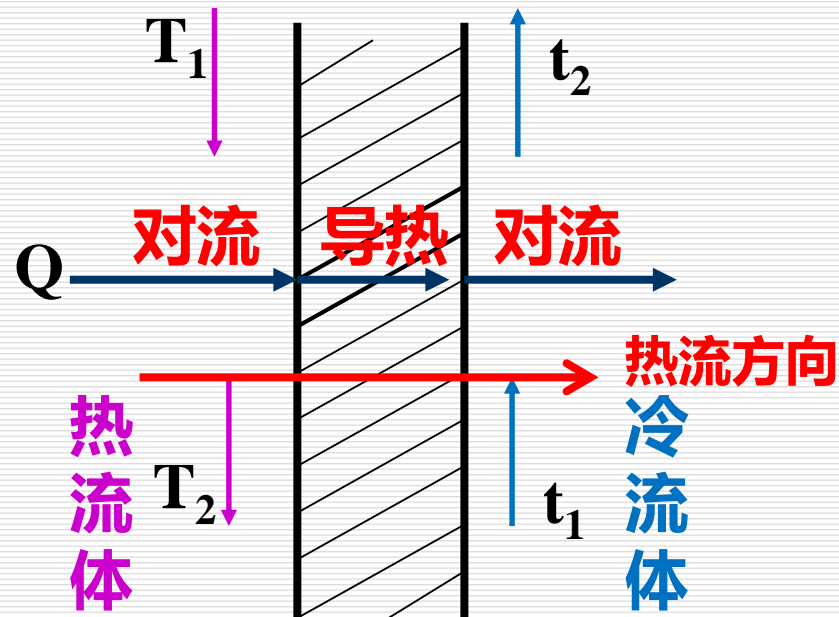
传热面为内管壁的表面积

列管换热器



传热面为壳内所有管束壁的表面积

冷热流体通过间壁的传热过程



- 热流体将热量传至固体壁面左侧 (**对流传热**)
- 热量自壁面左侧传递至壁面右侧 (**热传导**)
- 热量自壁面右侧传至冷流体 (**对流传热**)

2.1.3 载热体及其选择

加热介质：电加热；热水、饱和水蒸气；烟道气；矿物油联苯或二苯醚混合物及熔盐等低熔点混合物等

冷却介质：水、空气、冷冻盐水、液氨等

选择热载体的原则：

A 能满足工艺上要求达到的加热或冷却的温度。

B 温度易于调节。

C 饱和蒸气压小，加热过程中不会分解。

E 价格低廉，容易获得。

◆ 冷却温度 $> 30^{\circ}\text{C}$ 水是适宜的冷却介质

◆ 加热温度 $< 180^{\circ}\text{C}$ 饱和水蒸气是适宜的加热介质

2.2 热传导

2.2.1 基本概念和傅立叶定律

2.2.2 导热系数

2.2.3 通过平壁的稳定热传导

2.2.4 通过圆筒壁的稳定热传导

2.2.1 热传导的基本概念与傅立叶定律

(1) 温度场和等温面

温度场：某时刻，物体或空间各点的温度分布。

$$T = f(x, y, z, t)$$

式中： **T ——某点的温度, $^{\circ}\text{C}$;**

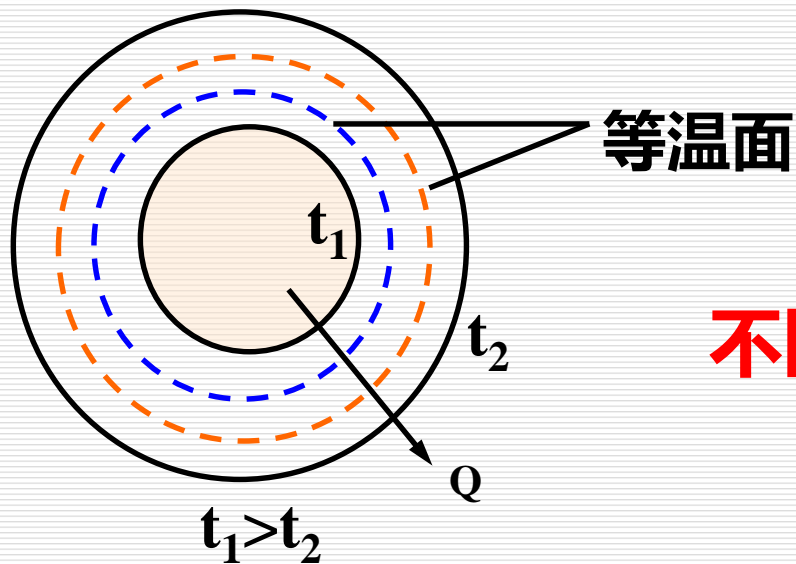
x, y, z ——某点的空间坐标;

t ——某一时刻。

非稳态温度场： $T = f(x, y, z, t)$

稳态温度场： $T = f(x, y, z) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0$

等温面： 在同一时刻，温度场中所有温度相同的点组成的面。

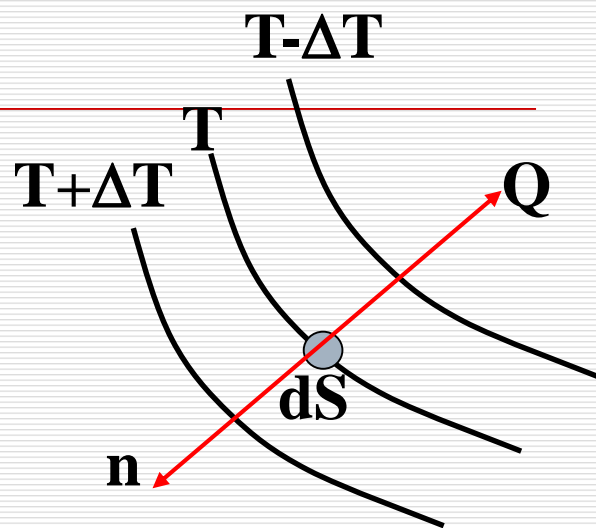


不同温度的等温面不相交

(2) 温度梯度

温度梯度：两等温面的温差与两等温面间的法向距离（最短）之比

$$\text{温度梯度} = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{\partial T}{\partial n}$$



◆ 温度梯度是一个向量：方向垂直于该点所在等温面，以温度增加的方向为正

◆ 一维稳定热传导 dT / dx

(3) 傅立叶定律

负号表示Q与温度梯度方向相反

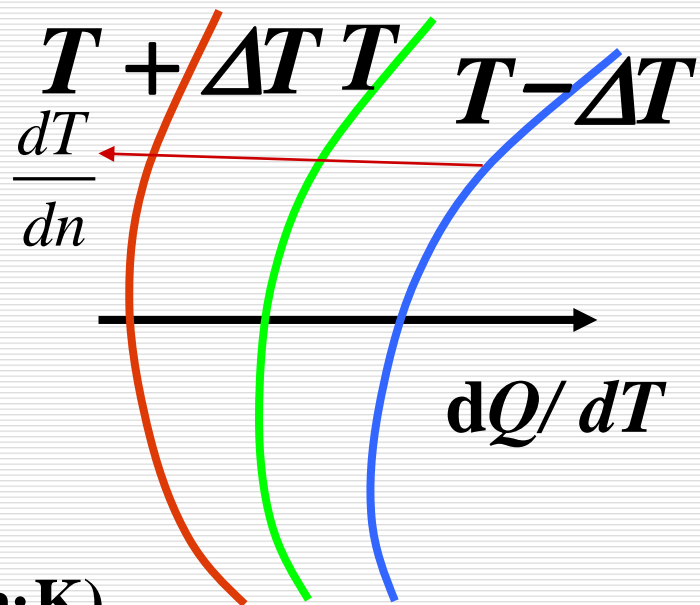
$$dQ = -\lambda dS \frac{\partial T}{\partial n}$$

式中 dQ —— 热传导速率, W或J/s;

dS —— 导热面积, m^2 ;

$\partial T / \partial n$ —— 温度梯度, $^{\circ}C/m$ 或 K/m ;

λ —— 导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 或 $W/(m \cdot K)$ 。



对照： 牛顿黏性定律，形式上很相似

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy}$$

(3)傅立叶定律

✚ 傅立叶定律表明：单位时间内的传热量与垂直于热流方向的导热截面积和温度梯度成正比。

✚ 负号表示传热方向与温度梯度方向相反。

✚ 单位时间、单位面积所传递的热量，称为**热量通量**或**热流密度**。所以**傅里叶定律**亦可表达为，**热量通量与温度梯度成正比**。

$$q = \frac{Q}{S}$$

✚ 对一维稳态热传导 $dQ = -\lambda dS \frac{dT}{dx}$

✚ λ 表征材料导热性能的物性参数， λ 越大，导热性能越好

2.2.2 热导率

$$\lambda = - \frac{q}{\partial T / \partial n}$$

- (1) λ 在数值上等于单位温度梯度下所传导的热通量。
- (2) λ 表征物质导热能力的大小，是分子微观运动的宏观表现。

$$\lambda = f(\text{结构, 组成, 密度, 温度, 压力})$$

(3) 各种物质的热导率

$$\lambda_{\text{金属固体}} > \lambda_{\text{非金属固体}} > \lambda_{\text{液体}} > \lambda_{\text{气体}}$$

1) 固体

- 金属: $\lambda_{\text{纯金属}} > \lambda_{\text{合金}}$
- 非金属: 同样温度下, ρ 越大, λ 越大。

在一定温度范围内: $\lambda = \lambda_0 (1 + at)$

式中: λ_0, λ — $0^\circ\text{C}, t^\circ\text{C}$ 时的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
 a — 温度系数, $1/\text{K}$ 。

对大多数金属材料 $a < 0, t \uparrow \lambda \downarrow$

对大多数非金属材料 $a > 0, t \uparrow \lambda \uparrow$

2) 液体

- 金属液体 λ 较高，非金属液体 λ 低，水的 λ 最大。
- 一般来说，纯液体的 λ 大于溶液的 λ
- $t \uparrow \lambda \downarrow$ (除水和甘油)

3) 气体

- $t \uparrow \lambda \uparrow$

气体不利于导热，但可用来保温或隔热。

在传热计算过程中，对于内外壁面温度差不多的固体， λ 的取值：

①取两侧壁面温度下的 λ 值的算术平均值：

$$\lambda_m = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$$

②取平均温度 $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$ 下的 λ 值

混合液体的热导率，按质量加和法估算：

$$\lambda_m = K \sum_{i=1}^n \lambda_i \omega_i$$

λ_m, λ_i —— 混合液和各组分的热导率，W/(m.K)；

ω —— 各组分的质量分数；

K —— 常数，对一般混合物或溶液， $K = 1$ ；对有机物的水溶液， $K = 0.9$ 。

混合气体的热导率，按摩尔加和法估算：

$$\lambda_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \lambda_i M_i^{1/3}}{\sum_i^n y_i M_i^{1/3}}$$

λ_m, λ_i —— 气体混合物和各组分的热导率，W/(m.K)；

y_i —— i 组分的质量分数；

M_i —— i 组分的摩尔质量，g/mol。

2.2.3 通过平壁的稳定热传导

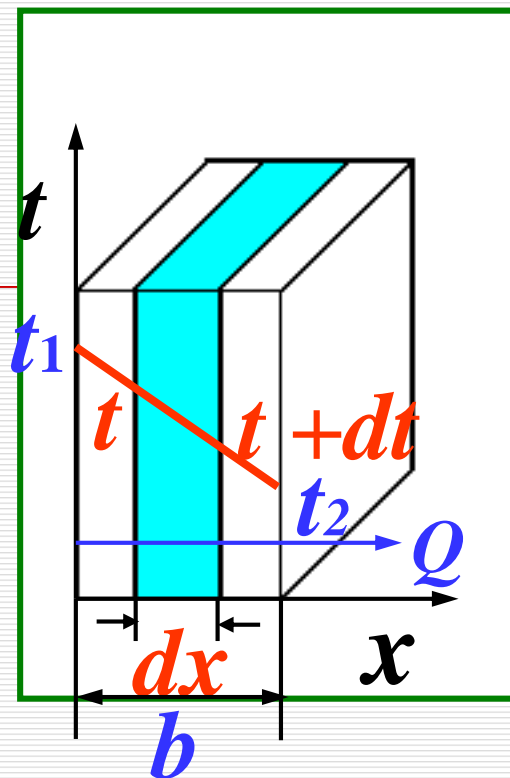
一、通过单层平壁的稳定热传导

当 x 由 $0 \rightarrow b$ 时, 则 t 由 $t_1 \rightarrow t_2$

对 $Q = -\lambda S \frac{dt}{dx}$ 分离变量, 积分

$$Q \int_0^b dx = -\lambda S \int_{t_1}^{t_2} dt$$
$$\therefore Q = \frac{t_1 - t_2}{b/\lambda S} = \frac{\Delta t}{R}$$

——单层平壁传热速率方程



假设:

- (1) S 大, b 小, 则忽略边缘热损失;
- (2) 材料均匀, 则 λ 为常数;
- (3) 温度仅沿 x 变化, 且不随时间变化。

一、通过单层平壁的稳定热传导

同理得：

$$Q = \frac{t_2 - t_3}{b_2 / \lambda_2 S}$$

式中： Q 亦可称为 **传热速率**，

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad \text{传热推动力}$$

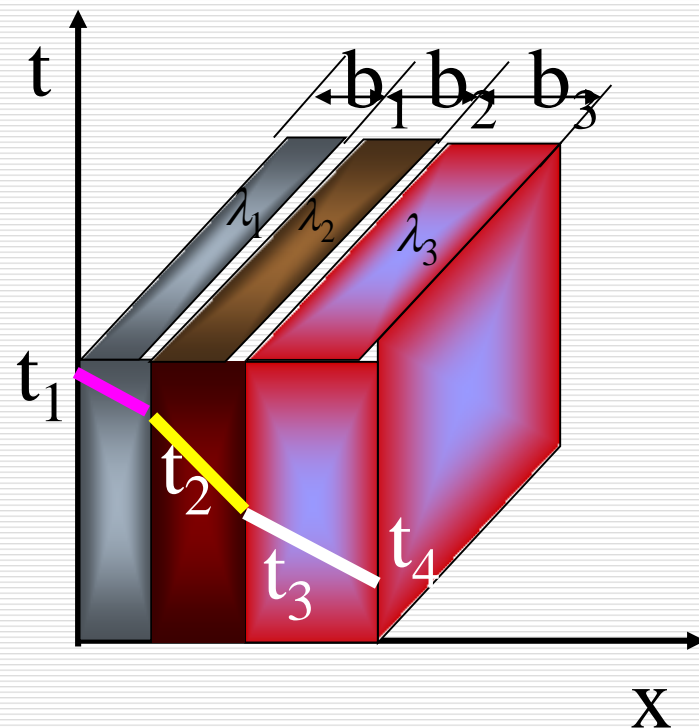
$$R = \frac{b}{\lambda S} \quad \text{传热阻力}$$

$$\text{传热速率} = \frac{\text{传热推动力}}{\text{传热阻力}}$$

二、通过多层(n 层)平壁的稳定热传导

稳定传热时, $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q$

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 S}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 S}} = \dots = \frac{t_n - t_{n+1}}{\frac{b_n}{\lambda_n S}}$$



若为三层平壁热传导，则 $Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 S}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 S}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 S}}$

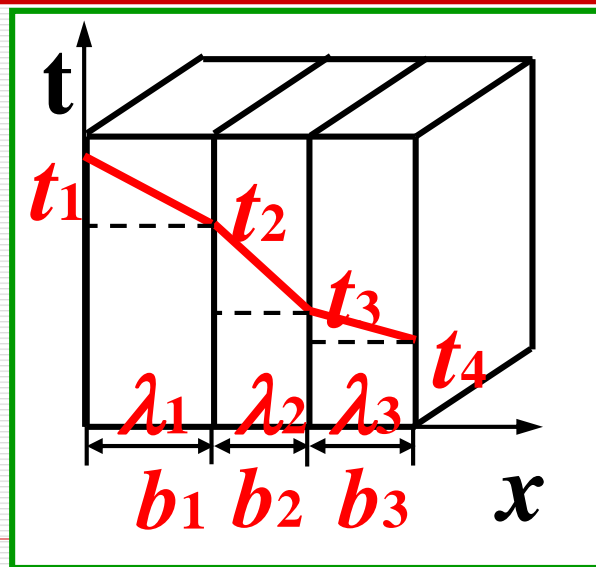
利用数学中的等比定律

$$Q = \frac{(t_1 - t_2) + (t_2 - t_3) + (t_3 - t_4)}{\frac{1}{S} \left(\frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{b_3}{\lambda_3} \right)} = \frac{(t_1 - t_4)}{\frac{1}{S} \left(\frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{b_3}{\lambda_3} \right)}$$

所以 n 层平壁热传导的公式为：

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{i+1})}{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i}} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}}$$

n 层平壁传热速率方程



串联热阻叠加原理：多层平壁导热是一种串联传热过程，串联传热过程的推动力为各分过程的温差之和，串联传热过程的总热阻为各分过程的热阻之和。只要有温差存在，就一定有热量传递，单位时间传递的热量的多少，取决于热阻的大小。

在多层平壁**稳定**热传导中，**各层平壁的温差降与该层的热阻成正比。**

$$(t_1 - t_2) : (t_2 - t_3) : (t_3 - t_4) = \frac{b_1}{\lambda_1 S} : \frac{b_2}{\lambda_2 S} : \frac{b_3}{\lambda_3 S} = R_1 : R_2 : R_3$$

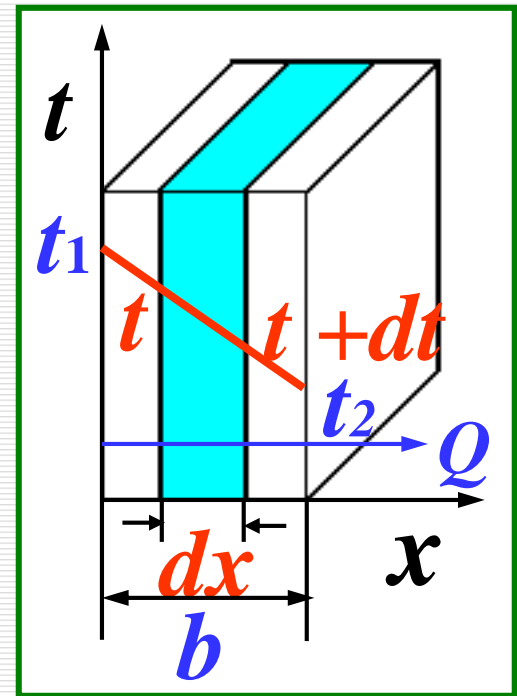
固体平壁内沿传热方向的温度分布

导热系数 λ 为常数时:

将 $Q = -\lambda S \frac{dt}{dx}$ 取积分上下限
 $x = 0, t = t_1; x = x, t = t$ 积分得:

$$Q = \lambda S \frac{t_1 - t}{x - 0} = \frac{\lambda S}{x} (t_1 - t)$$

$$t = -\frac{Q}{\lambda S} x + t_1$$



可见壁面温度 t 与 平壁距离 x 呈直线关系。

导热系数 λ 为变量时 $\lambda = \lambda_0 (1 + at)$

$$Q = -\lambda S \frac{d_t}{d_x} = -\lambda_0 (1 + at) S \frac{d_t}{d_x}$$

$$-Q d_x = \lambda_0 (1 + at) S d_t$$

$x = 0, t = t_1; x = x, t = t$ 代入积分得：

$$-Q \int_0^x d_x = \lambda_0 S \int_{t_1}^t (1 + at) d_t$$

$$-Qx = \lambda_0 S \left(t + \frac{1}{2} at^2 - t_1 - \frac{1}{2} at_1^2 \right)$$

可见壁面温度 t 与 平壁距离 x 呈**曲线关系**。

【例1】 某平壁厚度为 $0.37m$ ，内表面温度 t_1 为 $1650^{\circ}C$ ，外表面温度 t_2 为 $300^{\circ}C$ ，平壁材料的热传导系数 $\lambda=0.815(1+0.00093t)$ ， λ 的单位为 $W/m\cdot^{\circ}C$ ， t 的单位为 $^{\circ}C$ 。若将导热系数分别按常量（取平均导热系数）和变量计算时，求单位面积的传热量及平壁内温度分布。

解：（1）导热系数按常量计算

平均温度为：

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{1650 + 300}{2} = 975^{\circ}C$$

屏蔽材料的平均导热系数为：

$$\lambda_m = 0.815 \times (1 + 0.00093 \times 975) = 1.556 W / (m \cdot ^{\circ}C)$$

热量通量为:

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{\lambda}{b} (t_1 - t_2) = \frac{1.556}{0.37} (1650 - 300) = 5677 \text{ W} / \text{m}^2$$

设壁厚x处的温度为t:

$$t = -\frac{q}{\lambda} x + t_1 = -\frac{5667}{1.556} x + 1650 = 1650 - 3649 x$$

(2) 导热系数按变量计算

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = -0.815 \times (1 + 0.00093t) \frac{dt}{dx}$$

$$-q \int_0^b dx = -0.815 \times \int_{t_1}^{t_2} (1 + 0.00093t) dt$$

$$-qb = 0.815(t_2 - t_1) + \frac{0.00076}{2} (t_2^2 - t_1^2)$$

$$q = \frac{0.815}{0.37} (1650 - 300) + \frac{0.00076}{2 \times 0.37} (1650^2 - 300^2) = 5677 \text{ W} / \text{m}^2$$

上式的积分限将b换成x, t_2 换成t, 可得温度分布:

$$t = -1072 + \sqrt{7.41 \times 10^6 - 1.49 \times 10^7 x}$$

计算结果表明, 将导热系数按照常量或变量计算时, 所得的导热通量都是相同的, 而温度分布则不同, 前者为直线, 后者为曲线。因此, 在工程中计算热量通量时, 可取平均温度下的导热系数的数值, 即导热系数按照常数处理是可行的。

固体平壁内沿传热方向的温度分布

$$t = -\frac{Q}{\lambda S}x + t_1$$

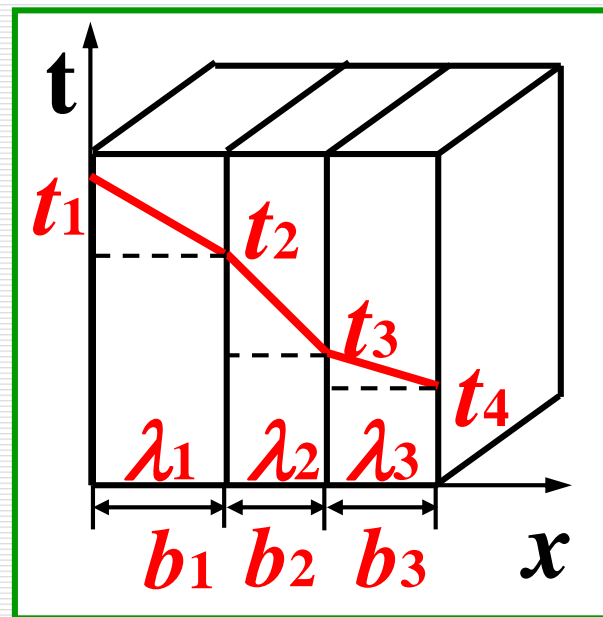
斜率 $-\frac{Q}{\lambda S}$, 截距 t_1 ,

固体平壁内沿传热方向的温度分布呈直线形状。

对三层平壁, 由图可判断

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的大小, $\left| -\frac{Q}{\lambda S} \right|$ 越大, λ 越小

$$\therefore \lambda_2 < \lambda_1 < \lambda_3, \quad t_2 - t_3 > t_1 - t_2 > t_3 - t_4$$



2.2.4 通过圆筒壁的稳定热传导

一、通过单层圆筒壁的稳定热传导

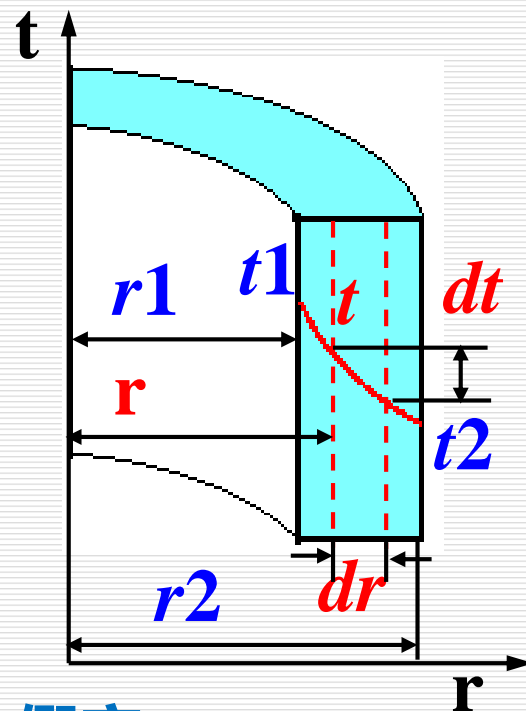
圆筒：长 L ，内、外半径 r_1 、 r_2 ，
内、外壁温度 t_1 、 t_2

传热面积：

$$S = 2\pi r L \quad (\text{变化量})$$

$$Q = -\lambda(2\pi r L) \frac{dt}{dr}$$

当 r 由 $r_1 \rightarrow r_2$ 时， t 由 $t_1 \rightarrow t_2$



假定：

- (1) 稳定温度场；
- (2) 一维温度场。

$$Q = -\lambda(2\pi rL)\frac{dt}{dr}$$

$$Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi L\lambda \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$Q \ln \frac{r_2}{r_1} = -2\pi L\lambda(t_2 - t_1)$$

$$Q = \frac{2\pi L\lambda(t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi L\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\Delta t}{R}$$

单层圆筒壁传热速率方程

讨论:

$$Q = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot L(t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

1. 上式可以写为：

$$Q = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot L(t_1 - t_2)(r_2 - r_1)}{(r_2 - r_1) \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\lambda \cdot (t_1 - t_2)(S_2 - S_1)}{b \ln \frac{S_2}{S_1}}$$
$$= \frac{(t_1 - t_2)}{b} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\text{推动力}}{\text{热阻}}$$
$$\lambda S_m \quad \text{对数平均面积} \quad S = 2\pi \cdot rL \quad b = r_2 - r_1 \quad \text{对数平均半径}$$

$$S_m = \frac{S_2 - S_1}{\ln S_2 / S_1} = \frac{2\pi L(r_2 - r_1)}{\ln 2\pi Lr_2 / 2\pi Lr_1} = 2\pi L \cdot r_m \quad r_m = \frac{r_2 - r_1}{\ln r_2 / r_1}$$

讨论:

算术平均值与对数平均值
相比, 计算误差仅为4%

2. 若 $\frac{r_2}{r_1} < 2$, 则 $S_m = \frac{S_1 + S_2}{2}$ $r_m = \frac{r_1 + r_2}{2}$

3. 圆筒壁内的温度分布

$$\int_{r_1}^{r_2} Q dr = - \int_{t_1}^{t_2} \lambda \cdot 2\pi \cdot r L dt$$

上限从 $r = r_2$ 时, $t = t_2$ 改为 $r = r$ 时, $t = t$

$$Q = -2\pi \cdot \lambda \cdot L (t - t_1) \ln \frac{r_1}{r} \Rightarrow t = t_1 + \frac{Q}{2\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \ln \frac{r}{r_1}}$$

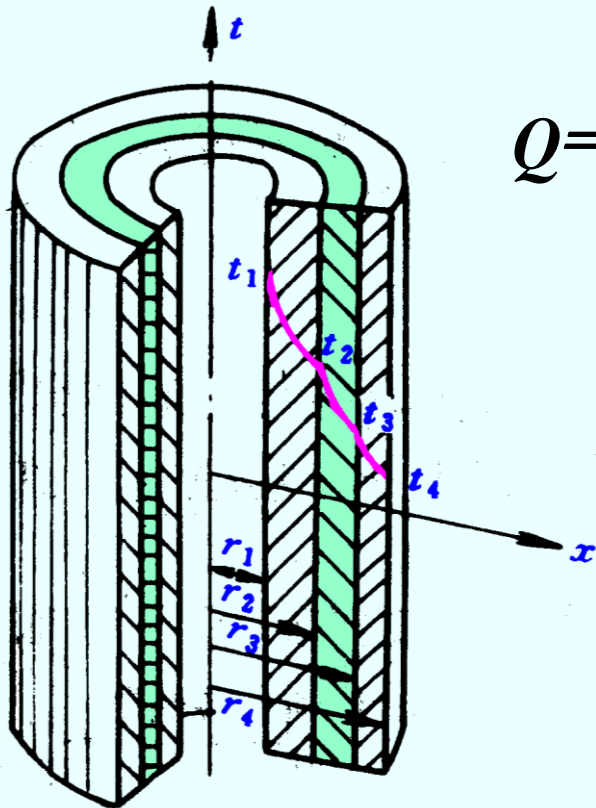
$t \sim r$ 成对数曲线变化(假设 λ 不随 t 变化)

二、通过多层（n层）圆筒壁的稳定热传导

以三层为例：

$$Q = \frac{2\pi L(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi L(t_2 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{2\pi L(t_3 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}$$
$$= \frac{2\pi L(t_1 - t_4)}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}$$

3层圆筒壁传热速率方程



二、通过多层（n层）圆筒壁的稳定热传导

对于n层圆筒壁：

$$Q = \frac{2\pi L(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i S_{mi}}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

$$Q = 2\pi \cdot r_1 L q_1 = 2\pi \cdot r_2 L q_2 = 2\pi \cdot r_3 L q_3 = \dots$$

$$r_1 q_1 = r_2 q_2 = r_3 q_3 = \dots$$

式中 q_1, q_2, q_3 分别为半径 r_1, r_2, r_3 处的热通量。

平壁：各处的 Q 和 q 均相等；圆筒壁：不同半径 r 处 Q 相等，但 q 却不等。

例题：

□ 有一 $\Phi 60\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的复合管，其导热系数为 45w/m.K ，外包一层厚 30mm 的石棉后，又包一层 30mm 软木，石棉和软木的导热系数分别为 0.16w/m.K , 0.04w/m.K ，试求：

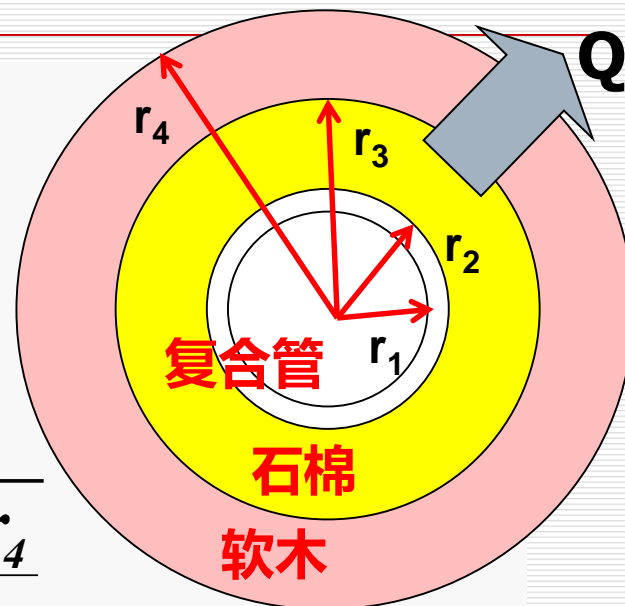
1. 已知管内壁面温度为 -105°C ，软木外侧温度为 5°C ，则每米管长损失的冷量为多少？
2. 若将两层保温材料互换，互换后石棉外侧温度为 5°C ，则每米管长损失的冷量为多少？

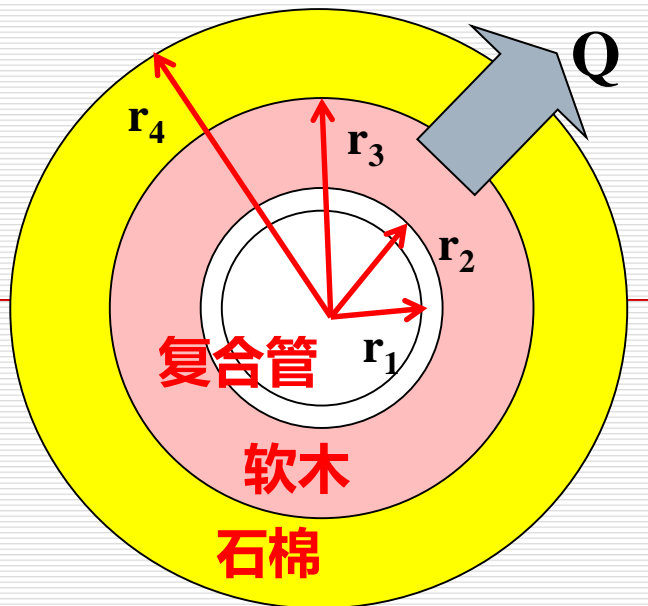
解：已知 $d_1=54\text{mm}$, $r_1=27\text{ mm}$; $d_2= 60\text{ mm}$, $r_2 = 30\text{mm}$;
 $d_3 = 120\text{mm}$, $r_3 = 60\text{mm}$; $d_4= 180\text{mm}$, $r_4=90\text{mm}$

$$Q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}$$

$$\left(\frac{Q}{L}\right)_1 = \frac{2\pi(T_1 - T_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}$$

$$= \frac{2\pi(-105 - 5)}{\frac{1}{45} \ln \frac{30}{27} + \frac{1}{0.16} \ln \frac{60}{30} + \frac{1}{0.04} \ln \frac{90}{60}} = -47.7\text{ W} / \text{m}$$





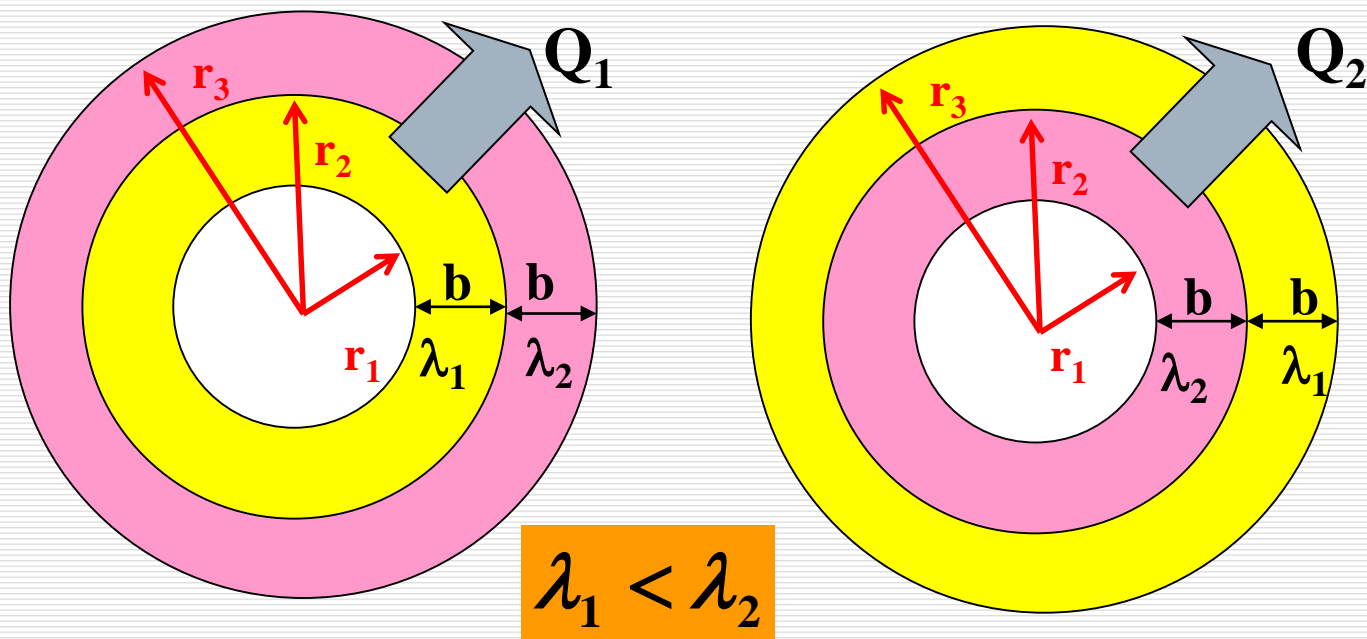
$$\left(\frac{Q}{L}\right)_2 = \frac{2\pi(-105-5)}{\frac{1}{45} \ln \frac{30}{27} + \frac{1}{0.04} \ln \frac{60}{30} + \frac{1}{0.16} \ln \frac{90}{60}} = -34.8 \text{ W / m}$$

$$\left|\left(\frac{Q}{L}\right)_2\right| < \left|\left(\frac{Q}{L}\right)_1\right|$$

结论：互换后每米损失的热量减少，由此可见**好的保温材料应包在管的内侧。**

课堂思考:

气温下降，应添加衣服，应把保暖性好的衣服穿在里面好，还是穿在外面好？



$$Q_1 = \frac{2\pi L(t_1 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{\Delta t}{R_1} \quad Q_2 = \frac{2\pi L(t_1 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{\Delta t}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)$$

$$R_1 - R_2 = \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} - \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)$$

$$= \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \left(\ln \frac{r_2}{r_1} - \ln \frac{r_3}{r_2} \right) = \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \times \ln \frac{r_2^2}{r_1 \times r_3}$$

$$= \frac{1}{2\pi L} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \times \ln \frac{r_2^2}{(r_2 - b)(r_2 + b)} > 0$$

>0

>0

$$\therefore Q_1 < Q_2$$

思考：保温杯的保温原理是什么？如何提高保温效果？



https://www.bilibili.com/video/BV12v411g7Qh?spm_id_from=333.337.search-card.all.click