

# 第 3 章 传热

3.1 概述

3.2 热传导

3.3 对流传热

3.4 传热过程计算

3.5 换热器



## 3.1 概述

---

3.1.1 传热过程在化工生产中的应用

3.1.2 传热的三种基本方式

3.1.3 实现传热的三种途径

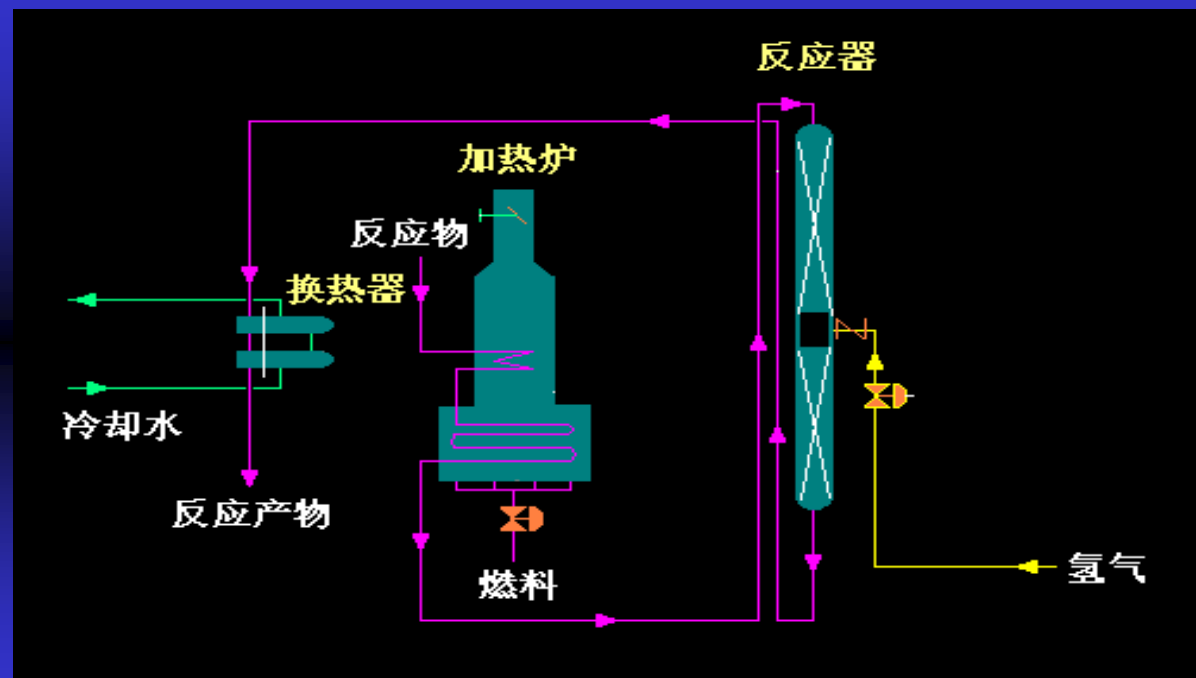
3.1.4 热载体及其选择

3.1.5 间壁式换热器的传热过程

3.1.6 热负荷的计算

### ● 3.1.1 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



### ●3.1.2 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** { 导体：自由电子在晶格间的运动  
非导体：通过晶格结构的振动来实现的

**液体：**机理复杂

## 二、对流

流体内部质点发生相对位移的热量传递过程。

- 自然对流
- 强制对流

## 三、热辐射

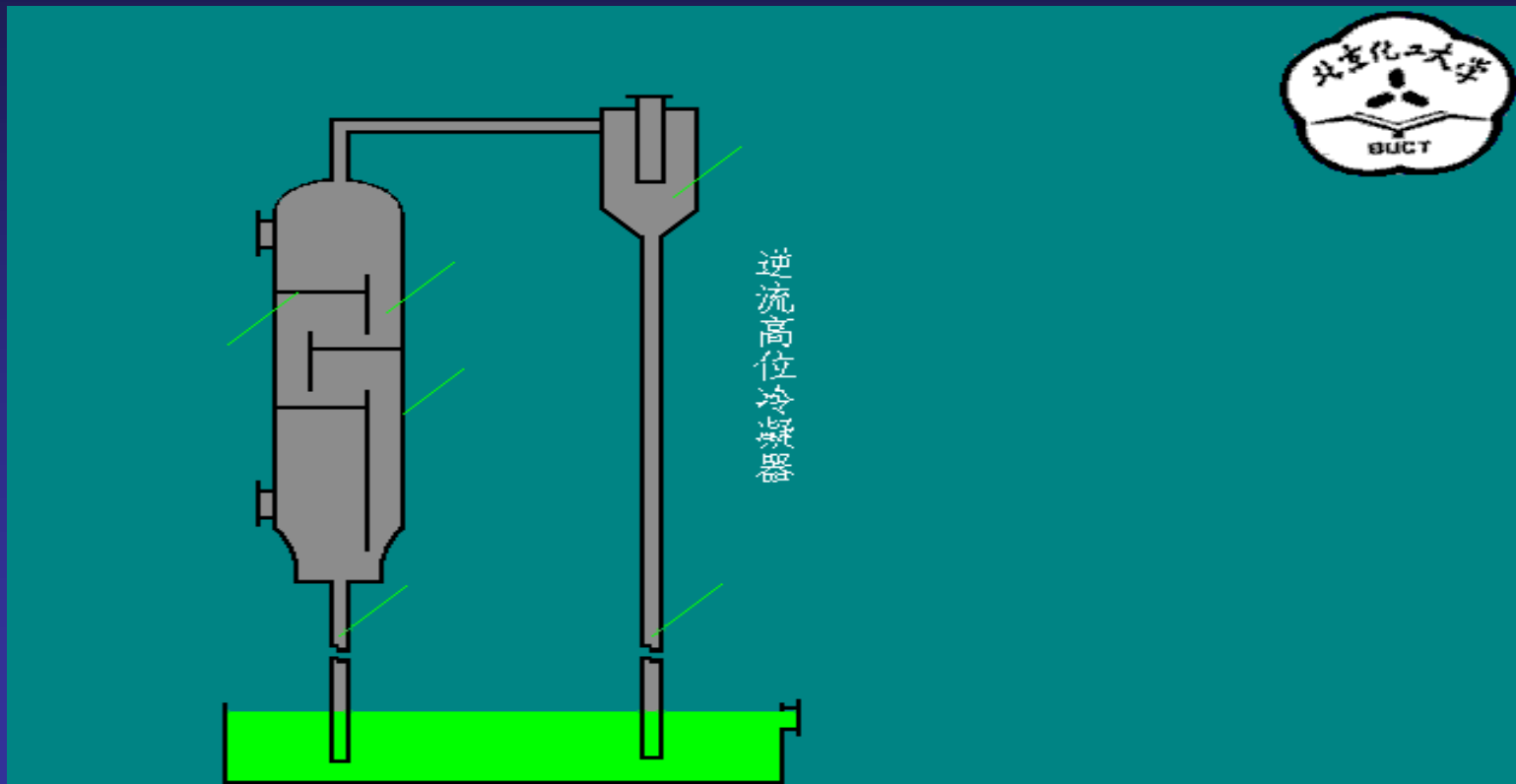
物体因热的原因发出辐射能的过程称为热辐射。

- 能量转移、能量形式的转化
- 不需要任何物质作媒介

### ● 3.1.3 实现换热的三种途径

#### 一、直接接触式

#### 板式塔



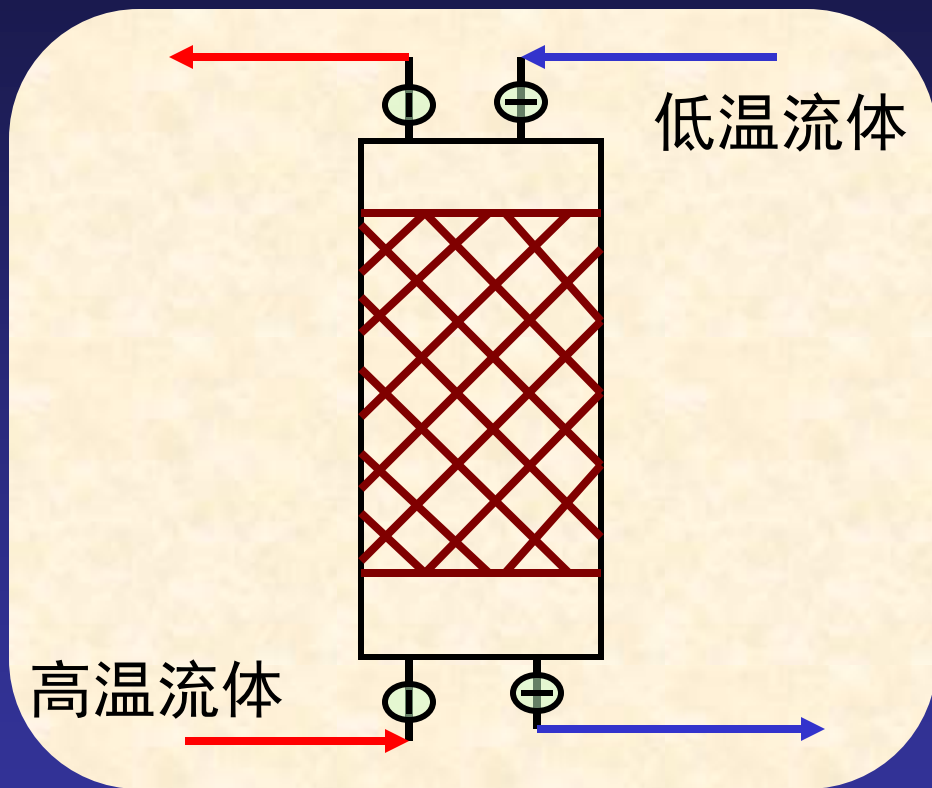
## 一、直接接触式

填料塔

直接接触式传热设备



## 二、蓄热式



### 优点:

- 结构较简单
- 耐高温

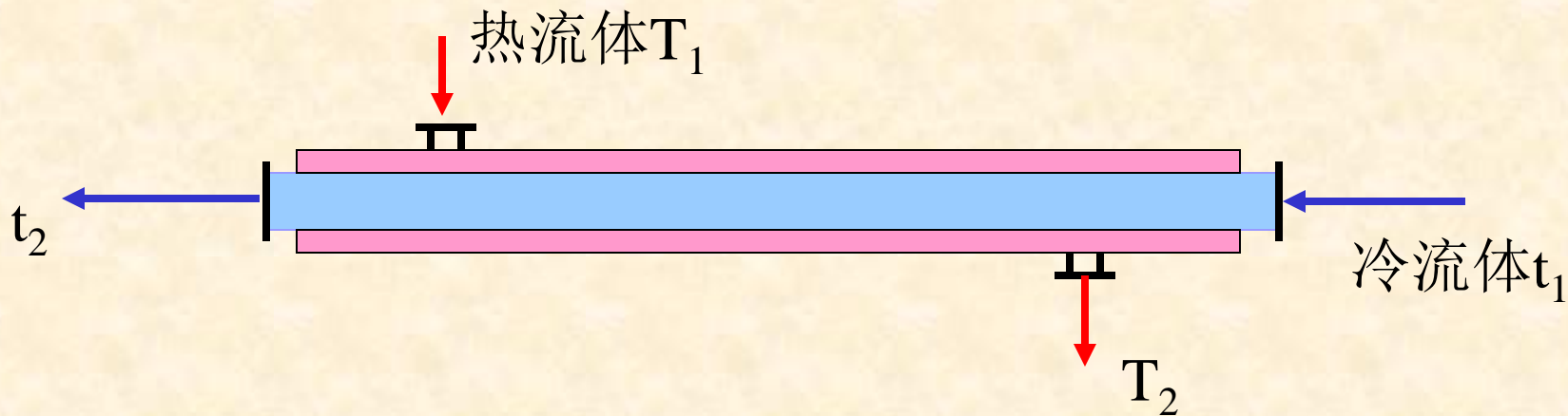
### 缺点:

- 设备体积大
- 有一定程度的混合



### 三、间壁式

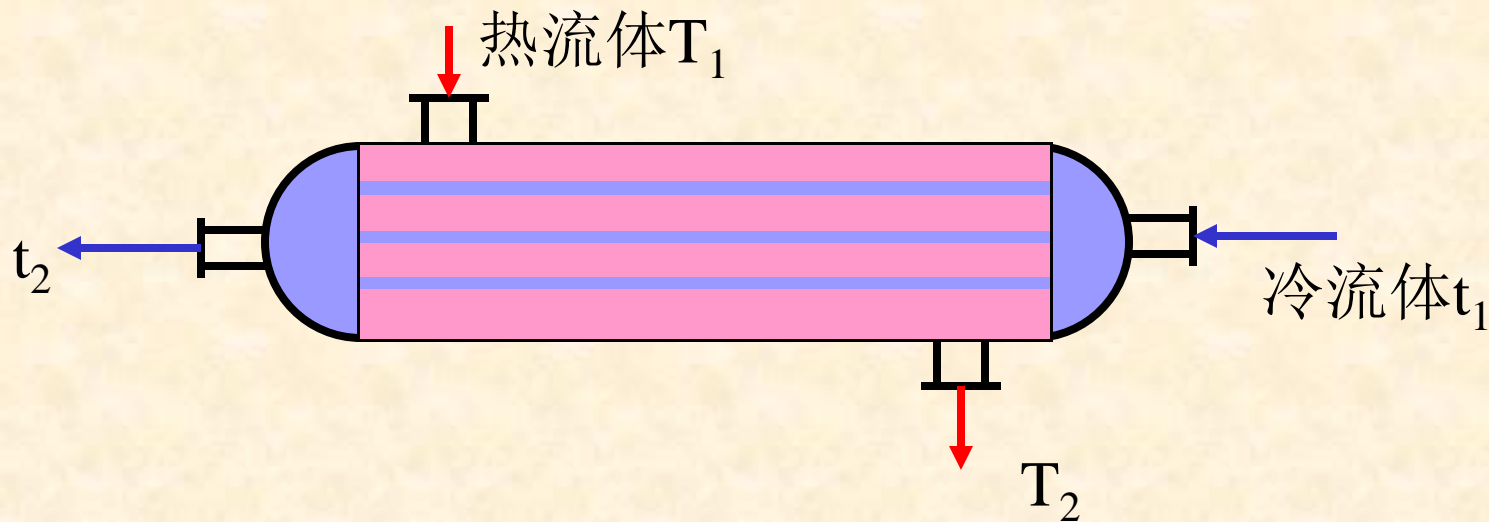
### 套管换热器



传热面为内管壁的表面积

### 三、间壁式

### 列管换热器



传热面为壳内所有管束壁的表面积

### ● 3.1.4 热载体及其选择

**加热剂：**热水、饱和水蒸气

矿物油或联苯等低熔混合物、烟道气等

用电加热

**冷却剂：**水、空气、冷冻盐水、液氨等

◆ 冷却温度 $>30^{\circ}\text{C}$  水

◆ 加热温度 $<180^{\circ}\text{C}$  饱和水蒸气

### ● 3.1.5 间壁式换热器的传热过程

#### 一、基本概念

**热负荷 $Q'$** ：单位时间内同种流体需要温升或温降时，吸收或放出的热量，单位 J/s或W。——工艺要求

**传热速率 $Q$** ：热流量，单位时间内通过换热器的整个传热面传递的热量，单位 J/s或W。

**热流密度 $q$** ：热通量，单位时间内通过单位传热面积传递的热量，单位 J/(s·m<sup>2</sup>)或W/m<sup>2</sup>。  $q = \frac{Q}{A}$

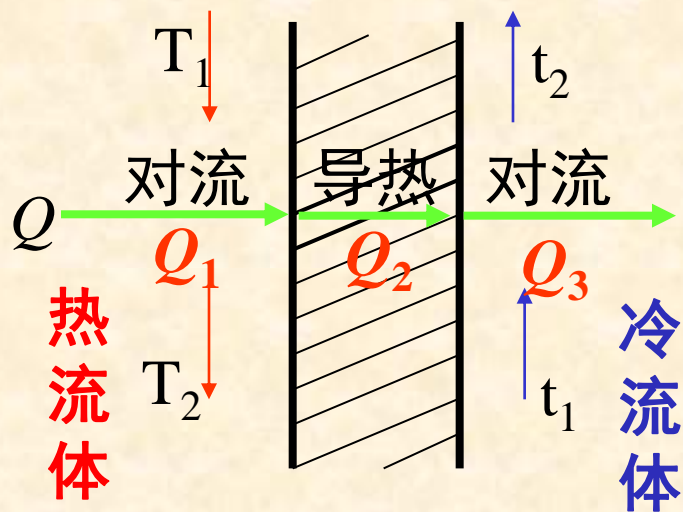
式中  $A$ ——总传热面积，m<sup>2</sup>。

## 二、稳态与非稳态传热

非稳态传热  $Q, q, t \cdots = f(x, y, z, \theta)$

稳态传热  $Q, q, t \cdots = f(x, y, z) \quad \frac{\partial t}{\partial \theta} = 0$

## 三、冷热流体通过间壁的传热过程



(1) 热流体  $\xrightarrow{Q_1(\text{对流})}$  管壁内侧

(2) 管壁内侧  $\xrightarrow{Q_2(\text{热传导})}$  管壁外侧

(3) 管壁外侧  $\xrightarrow{Q_3(\text{对流})}$  冷流体



说明:

稳态传热:  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$

总传热速率方程:

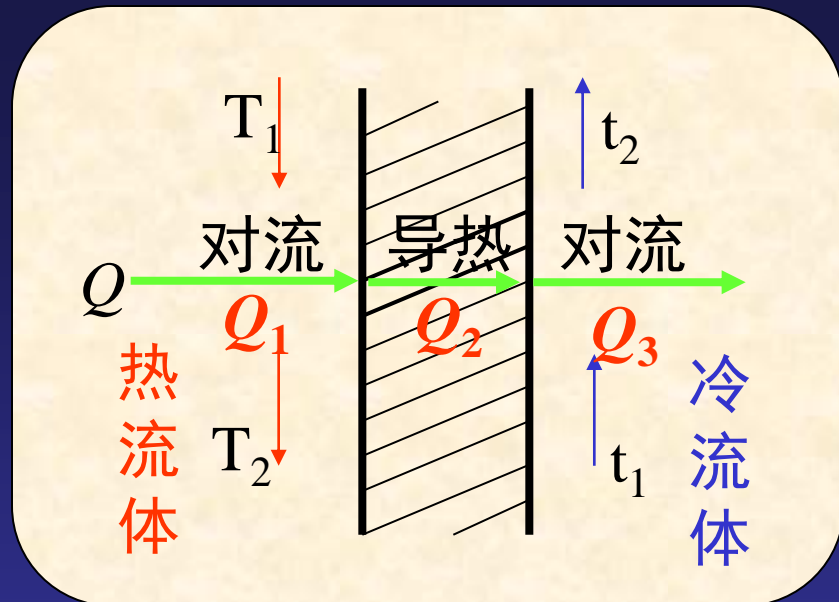
$$Q = KA\Delta t_m = \frac{\Delta t_m}{1/KA} = \frac{\text{总传热推动力}}{\text{总热阻}}$$

式中  $Q$ ——传热速率, W 或 J/s;

$A$ ——总传热面积,  $\text{m}^2$ ;

$\Delta t_m$ ——两流体的平均温差,  $^{\circ}\text{C}$ 或K。

$K$ ——总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$  或  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;



## 一、无相变时热负荷的计算——显热的计算

### 1、比热法

如果质量流量为 $q_{m1}$ 的热流体由温度 $T_1$ 降温至 $T_2$ ,则热负荷为:

$$Q = q_{m1} C_{p1} (T_1 - T_2)$$

如果质量流量为 $q_{m2}$ 的冷流体由温度 $t_1$ 升温至 $t_2$ ,则热负荷为:

$$Q = q_{m2} C_{p2} (t_2 - t_1)$$

其中,  $C_p$ 称为定压比热, 表示在恒压下单位质量的物质升高或降低 $1^{\circ}\text{C}$ 所吸收或放出的热量, 单位 $\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$  (或 $\text{kJ} / \text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )。由物性表查得。

## 2、热焓法

当物系的内能为 $U$ ，压力为 $P$ ，体积为 $V$ 时，其具有的焓为：

$$I = U + PV$$

由于 $U$ 、 $P$ 、 $V$ 均为状态函数，故 $I$ 也是状态函数，单位  $\text{kJ} / \text{kg}$   
在恒压下物系与外界交换的热量等于物系的始态与终态的焓差，  
即：

$$Q = q_m(I_1 - I_2)$$

### 思考题：

- (1) 试计算将1kg温度为10°C的水升高到70 °C所需热量。
- (2) 将250.95kJ的热传入1kg温度为10 °C的水中，问水温升高到多少？



## 二、有相变时热负荷的计算——潜热的计算

饱和蒸汽冷凝为同温度的液体所放出的热量或处于沸点的液体汽化为同温度下的饱和蒸汽时所吸收的热量，为冷凝（或汽化）潜热，可以采用下式计算：

$$Q = q_m r$$

$r$  —— 冷凝（汽化）潜热，单位kJ/kg，具体数值从物性表中可以查得。

思考：潜热与焓之间的关系。

例题： 计算压力为 $150\text{kN} / \text{m}^2$ ，流量为 $1500\text{kg} / \text{h}$ 的饱和水蒸汽冷凝后并降温至 $50^\circ\text{C}$ 所放出的热。

### 3.1.1 传热过程在化工生产中的应用

- 3.1.2 传热的三种基本方式

- 3.1.3 实现传热的三种途径

### 3.1.4 热载体及其选择

- 3.1.5 间壁式换热器的传热过程

- 3.1.6 热负荷的计算



热传导  
对流  
热辐射

直接接触式  
蓄热式  
间壁式

基本概念  
稳态与非稳态传热  
冷热流体通过间壁的传热过程

显热的计算  
潜热的计算

## 3.2 热传导

---

3.2.1 基本概念

3.2.2 傅立叶定律

3.2.3 导热系数

3.2.4 通过平壁的稳定热传导

3.2.5 通过圆筒壁的稳定热传导

## ● 3.2.1 基本概念

### 1 温度场和等温面

温度场：某时刻，物体内部或空间各点的温度分布。

$$t = f(x, y, z, \theta)$$

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

$x, y, z$  —— 某点的坐标；

$\theta$  —— 时间

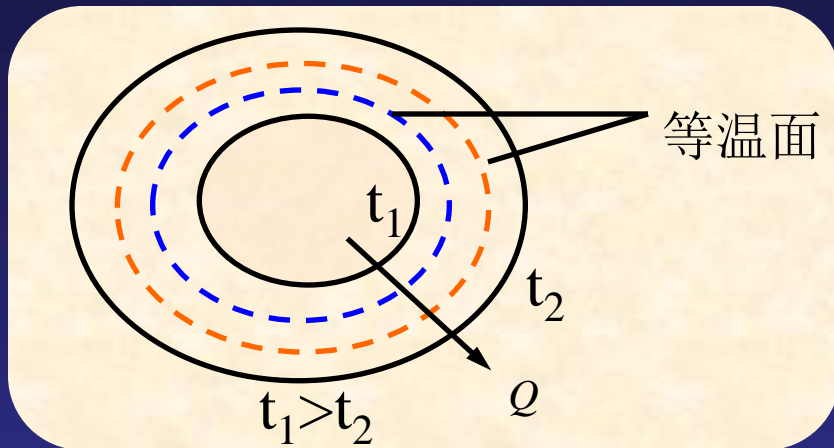
■ 不稳定温度场  $t = f(x, y, z, \theta)$

■ 稳定温度场  $t = f(x, y, z) \quad \frac{\partial t}{\partial \theta} = 0$

等温面：在同一时刻，温度场中所有温度相同的点组成的面。

特点：

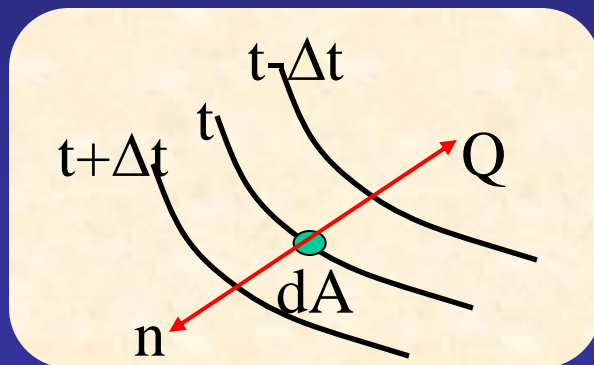
不同温度的等温面不相交。



## 2 温度梯度

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n}$$

- ◆ 温度梯度是一个点的概念。
- ◆ 温度梯度是一个向量。
- ◆ 一维稳定热传导  $dt / dx$



### ● 3.2.2 傅立叶定律

$$dQ = -\lambda dA \frac{\partial t}{\partial n}$$

式中  $dQ$  —— 热传导速率, W 或 J/s;

$dA$  —— 导热面积,  $m^2$ ;

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

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

#### 说明:

✚ 负号表示传热方向与温度梯度方向相反

✚ 用热通量来表示  $q = \frac{dQ}{dA} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$

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

✚  $\lambda$  表征材料导热性能的物性参数,  $\lambda$  越大, 导热性能越好

### ● 3.2.3 导热系数

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

- (1)  $\lambda$ 在数值上等于单位温度梯度下的热通量。
- (2)  $\lambda$ 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) 各种物质的导热系数

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

#### 1 固体

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

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

式中  $\lambda_0, \lambda$  ——  $0^\circ\text{C}, t^\circ\text{C}$ 时的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；  
 $a$  —— 温度系数。

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

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

## 3 气体

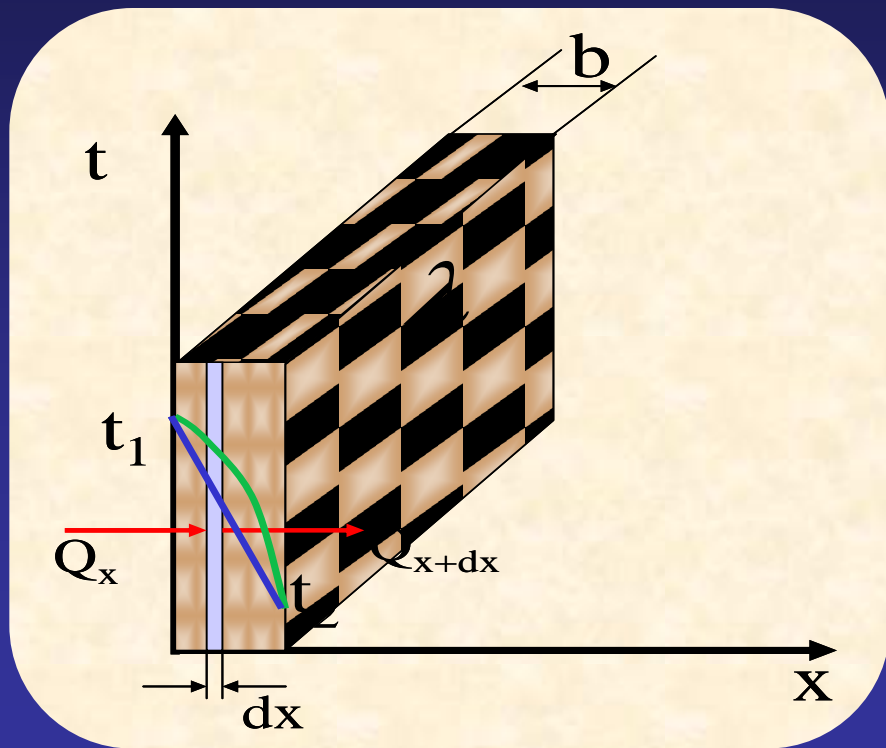
- $t \uparrow \lambda \uparrow$

气体不利于导热，但可用来保温或隔热。



### ● 3.2.4 通过平壁的稳态热传导

#### 1 通过单层平壁的稳态热传导



假设：

- (1)  $A$  大,  $b$  小;
- (2) 材料均匀;
- (3) 温度仅沿  $x$  变化, 且不随时间变化。

取  $dx$  的薄层, 作热量衡算:

$$Q_x = Q_{x+dx} + dx \cdot A \cdot \rho \cdot c_p \frac{\partial t}{\partial \theta}$$

对于稳定温度场  $\frac{\partial t}{\partial \theta} = 0$

$$Q_x = Q_{x+dx} = Q = \text{const}$$

傅立叶定律： $Q = -\lambda A \frac{dt}{dx}$

边界条件为： $x = 0$ 时， $t = t_1$   
 $x = b$ 时， $t = t_2$

得： $\int_0^b Q dx = - \int_{t_1}^{t_2} \lambda A dt$

设 $\lambda$ 不随 $t$ 而变  $Q = \frac{\lambda}{b} A(t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda A}}$

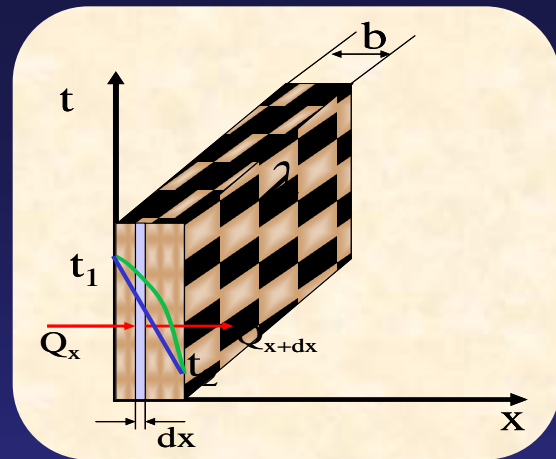
式中  $Q$  —— 热流量或传热速率，W或J/s；

$A$  —— 平壁的面积， $m^2$ ；

$b$  —— 平壁的厚度，m；

$\lambda$  —— 平壁的导热系数，W/(m °C)或W/(m K)；

$t_1, t_2$  —— 平壁两侧的温度，°C。



## 讨论

1. 可表示为  $Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\text{推动力}}{\text{热阻}}$

推动力:  $\Delta t = (t_1 - t_2)$       热阻:  $R = \frac{b}{\lambda A}$

2. 分析平壁内的温度分布

$$\int_0^b Q dx = - \int_{t_1}^{t_2} \lambda A dt$$

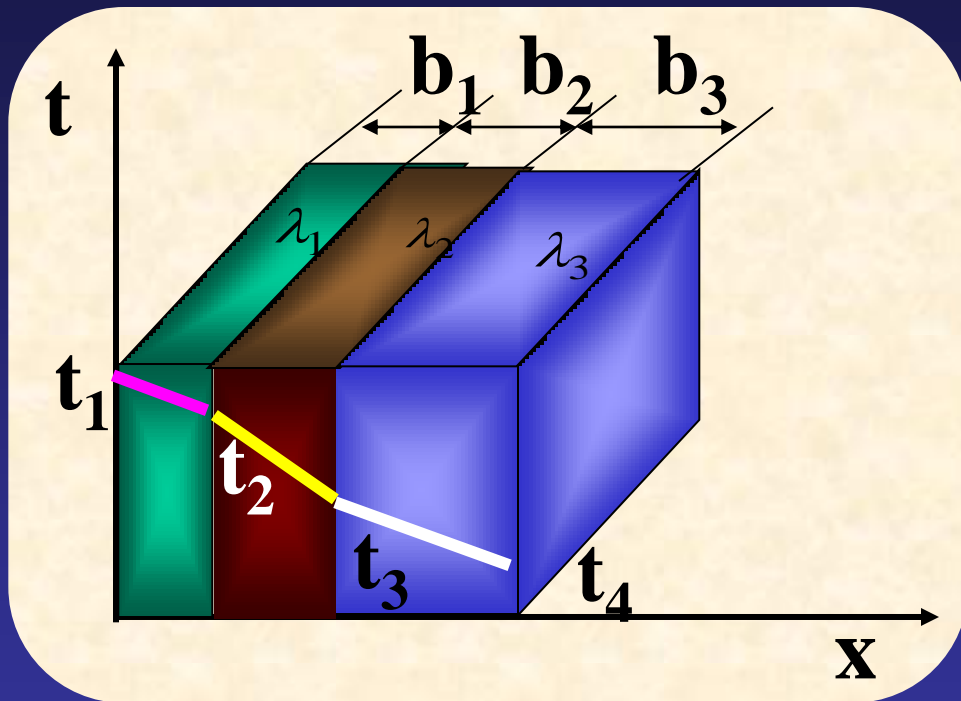
上限由  $x = b$  时,  $t = t_2$  改为  $x = x$  时,  $t = t$

$$Q = \frac{\lambda}{x} A(t_1 - t) \quad \Rightarrow \quad t = t_1 - \frac{Qx}{\lambda A}$$

3. 当  $\lambda$  随  $t$  变化时

按定性温度下的  $\lambda$  值。

## 2 通过多层平壁的稳态热传导



假设:

- (1)  $A$ 大,  $b$ 小;
- (2) 材料均匀;
- (3) 温度仅沿 $x$ 变化, 且不随时间变化。
- (4) 各层接触良好, 接触面两侧温度相同。

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 A}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 A}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 A}}$$

$$= \frac{\sum \Delta t_i}{\sum \frac{b_i}{\lambda_i A}} = \frac{t_1 - t_4}{\sum_{i=1}^3 \frac{b_i}{\lambda_i A}} = \frac{t_1 - t_4}{\sum R_i} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}}$$

推广至 $n$ 层:

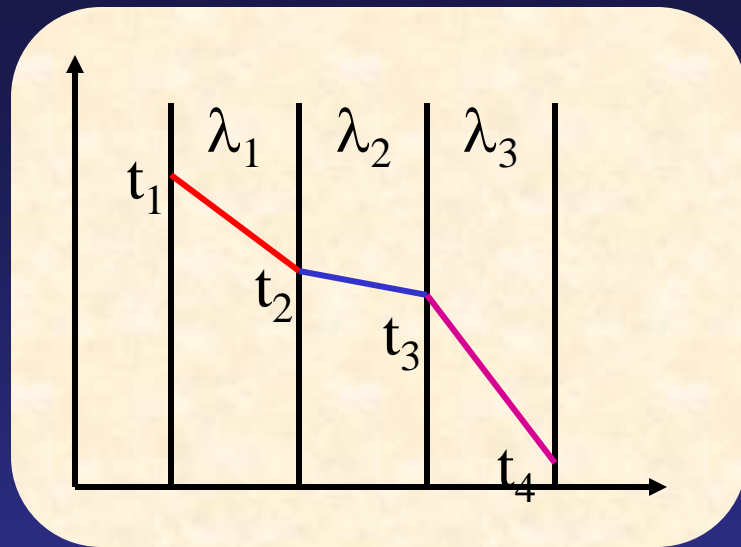
$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i A}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

各层温差:

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

## 思考题：

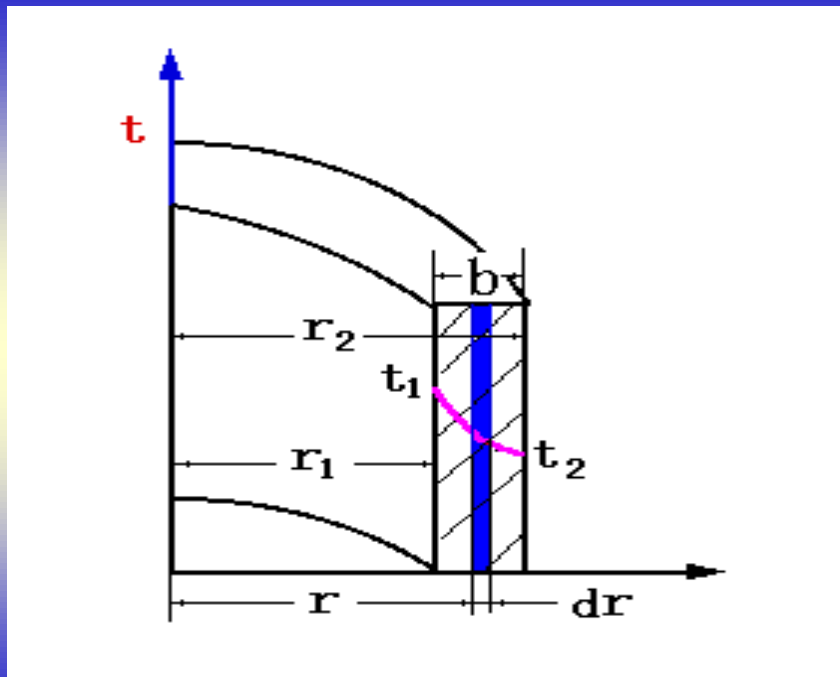
厚度相同的三层平壁传热，  
温度分布如图所示，哪一  
层热阻最大，说明各层 $\lambda$   
的大小排列。



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

### 3.2.5 通过圆筒壁的稳定热传导

#### 1 通过单层圆筒壁的稳定热传导



假定：

- (1) 稳定温度场；
- (2) 一维温度场。

取 $dr$ 同心圆筒，作热量衡算：

$$Q_r = Q_{r+dr} + 2\pi r l dr \frac{\partial}{\partial \theta}$$

对于稳定温度场  $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$

$$Q_r = Q_{r+dr} = Q = \text{const}$$

傅立叶定律  $Q = -\lambda A \frac{dt}{dr}$

$$Q = -\lambda A \frac{dt}{dr} = -\lambda \cdot 2\pi r l \frac{dt}{dr}$$

边界条件  $r = r_1$  时,  $t = t_1$   $r = r_2$  时,  $t = t_2$

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

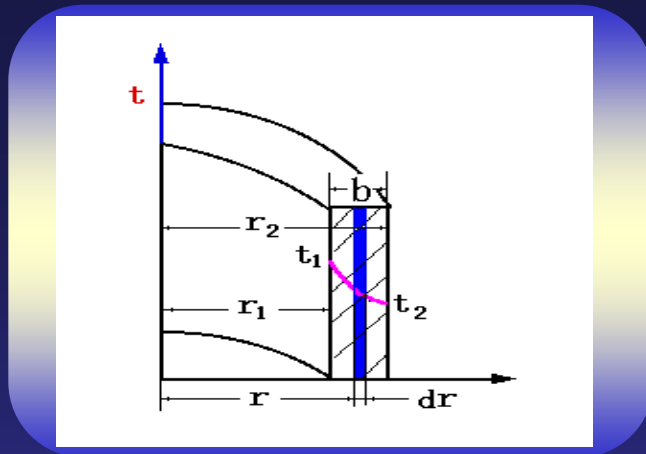
设  $\lambda$  不随  $t$  而变 
$$Q = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot l(t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \cdot l(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

式中  $Q$  —— 热流量或传热速率, W或J/s;

$\lambda$  —— 导热系数, W/(m·°C)或W/(m·K);

$t_1, t_2$  —— 圆筒壁两侧的温度, °C;

$r_1, r_2$  —— 圆筒壁内外半径, m。





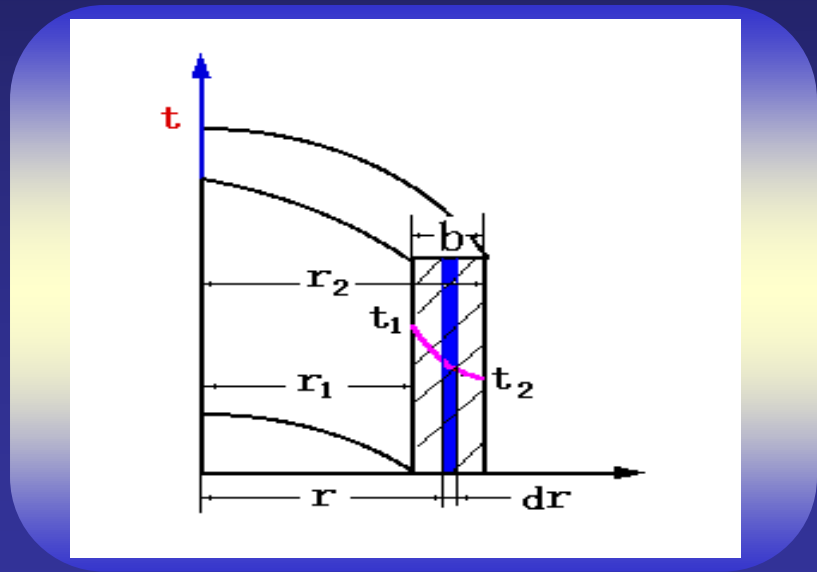
## 讨论:

### 1. 上式可以写为

$$Q = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot l(t_1 - t_2)(r_2 - r_1)}{(r_2 - r_1) \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\lambda \cdot (t_1 - t_2)(A_2 - A_1)}{b \ln \frac{A_2}{A_1}}$$
$$= \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{b}{\lambda A_m}} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\text{推动力}}{\text{热阻}}$$

$$A = 2\pi \cdot r l \quad b = r_2 - r_1$$

$$A_m = \frac{A_2 - A_1}{\ln A_2 / A_1} \quad \text{对数平均面积}$$



$$2. \quad \frac{r_2}{r_1} < 2 \quad A_m = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

### 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,  $t = t$

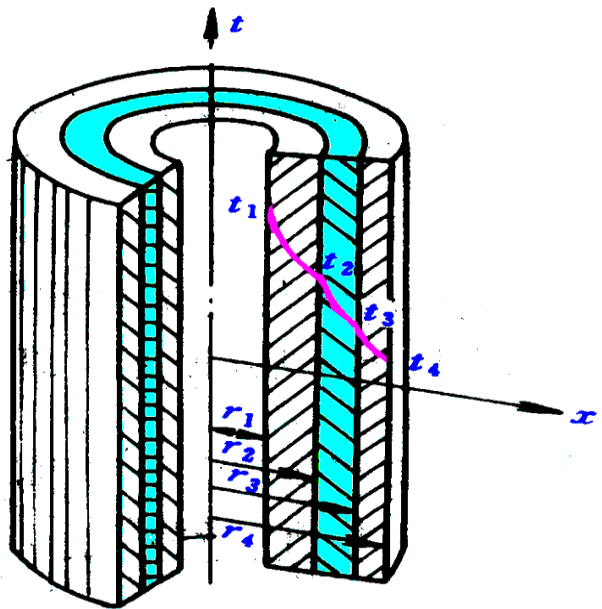
$$Q = -2\pi \cdot \lambda \cdot l (t - t_1) \ln \frac{r_1}{r} \quad \Rightarrow \quad t = t_1 - \frac{Q}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \ln \frac{r}{r_1}$$

$t \sim r$  成对数曲线变化(假设  $\lambda$  不随  $t$  变化)

4. 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。

## 2 通过多层圆筒壁的稳态热传导



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

对于 $n$ 层圆筒壁：

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

$$Q = 2\pi r_1 l q_1 = 2\pi r_2 l q_2 = 2\pi r_3 l q_3$$

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

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

## 思考题

内径为 $15mm$ ，外径为 $19mm$ 的钢管，其 $\lambda_1$ 为 $20\text{ W/m}^\circ\text{C}$ ，其外包扎一层厚度为 $30mm$ ， $\lambda_2$ 为 $0.2\text{ W/m}^\circ\text{C}$ 的保温材料，若钢管内表面温度为 $580^\circ\text{C}$ ，保温层外表面温度为 $80^\circ\text{C}$ ，设 $\lambda$ 不随 $t$ 而变，试求：

- (1) 每米管长的热损失；      (2) 保温层中的温度分布。

$$(1) \quad Q = \frac{2\pi L(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} = \frac{2\pi(580 - 80)}{\frac{1}{20} \ln \frac{9.5}{7.5} + \frac{1}{0.2} \ln \frac{39.5}{9.5}} = 439.97\text{W}$$

$$(2) \quad Q = \frac{2\pi L(t - t_3)}{\frac{1}{0.2} \ln \frac{39.5}{r}} = 439.97\text{W}$$

$$t = 80 + 350 \ln \frac{39.5}{r}$$

$$t = 80 + 350 \ln \frac{39.5}{9.5} = 578.75^\circ\text{C}$$

### 3.2.1 基本概念

- 3.2.2 傅立叶定律

### 3.2.3 导热系数

- 3.2.4 通过平壁的稳定热传导

- 3.2.5 通过圆筒壁的稳定热传导

