

## 6.3.3 对流给热过程的数学描述

### 1、牛顿冷却定律

对照傅立叶定律

热传导：
$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\delta / \lambda A_m} = \frac{\Delta t}{\Delta R} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

对流传热：牛顿冷却定律  $q = \alpha(T_w - T)$

其中： $T_w$ ：壁温； $T$ ：流体主体温度； $\alpha$ ：给热系数  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

这是工程处理的一种方法,但这样的处理并未改变问题复杂性。

按牛顿冷却定律，实验的任务是测定不同情况下的给热系数，并将其关联成经验表达式以供设计时用。

## 2、对流给热系数 $\alpha$ 的量纲分析

$$\alpha = f(u, \rho, \mu, l, \beta g \Delta t, \lambda, c_p)$$

物性:  $\rho, \mu, c_p, \lambda$

固体表面的特性尺寸:  $l$

强制对流的流速:  $u$

自然对流特性速度:  $\beta g \Delta t$

变量8个, 基本量纲4个

根据  $\pi$  定理, 无量纲准数=8-4=4

即  $Nu = f(Re, Pr, Gr)$  分别为:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad \text{努塞尔}$$

$$Re = \frac{\rho l u}{\mu} \quad \text{雷诺}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad \text{普朗特}$$

$$Gr = \frac{\beta g \Delta t l^3 \rho^2}{\mu^2} \quad \text{格拉斯霍夫}$$

## 6.3.4 无相变流体 $\alpha$ 经验关联式

### 1、圆形直管内强制湍流 $\alpha_{\text{湍}}$

$$Nu = f(\text{Re}, \text{Pr})$$

$$\alpha_{\text{湍}} = 0.023 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^b$$

b { 0.4 流体被加热  
0.3 流体被冷却

或  $Nu = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^b$

讨论:

(1)任何经验公式应用时要注意三点:

其一: 适用范围  $\text{Re} > 10^4$  ,  $0.7 < \text{Pr} < 160$  , 低 $\mu$

其二: 定性温度:  $\frac{1}{2}(T_1 + T_2)$  或  $\frac{1}{2}(t_1 + t_2)$

其三: 特性尺寸 管径  $d$

例：有一列管式换热器，其管束由269根长3m，内径  $d=25\text{mm}$  的管子组成。管内走空气，流量为  $8000\text{kg/h}$ ，空气被加热。定性温度下，空气的  $c_p=1.01\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ， $\mu=2.01\times 10^{-2}\text{mPa}\cdot\text{s}$ ， $\lambda=2.87\times 10^{-2}\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ，求空气对管壁的给热系数。

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.3\sim 0.4} \quad \text{条件: } \text{Re} > 10^4 \quad 0.7 < \text{Pr} < 160 \quad \text{低 } \mu, l/d \rangle \quad 30\sim 40$$

解：

$$G = \frac{q_m}{\frac{1}{4}\pi d^2 n} = \frac{8000/3600}{0.785 \times 0.025^2 \times 269} = 16.84 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{G d}{\mu} = \frac{16.89 \times 0.025}{2.01 \times 10^{-5}} = 2.09 \times 10^4 > 10^4$$

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{1.01 \times 10^3 \times 2.01 \times 10^{-5}}{2.87 \times 10^{-2}} = 0.707 > 0.7$$

$$l/d = 150 > 30$$

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4}$$

$$= 0.023 \times \frac{2.87 \times 10^{-2}}{0.025} \times (2.09 \times 10^4)^{0.8} \times 0.707^{0.4}$$

$$= 65.7 (\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

## (2)公式的修正

### a.高黏度修正

$$\alpha = 0.027 \frac{\lambda}{d} \left( \frac{\rho d u}{\mu} \right)^{0.8} \left( \frac{C_p \mu}{\lambda} \right)^{0.33} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

对工程处理

$$\text{加热} \quad \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1.05 \quad \text{冷却} \quad \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = 0.95$$

### b. $2000 < \text{Re} < 10^4$ 过渡区

$$\alpha_{\text{过}} = f \alpha_{\text{湍}} \quad \alpha_{\text{过}} < \alpha_{\text{湍}}$$

$$\text{校正系数} \quad f = 1 - \frac{6 \times 10^5}{\text{Re}^{1.8}}$$

### c.弯管

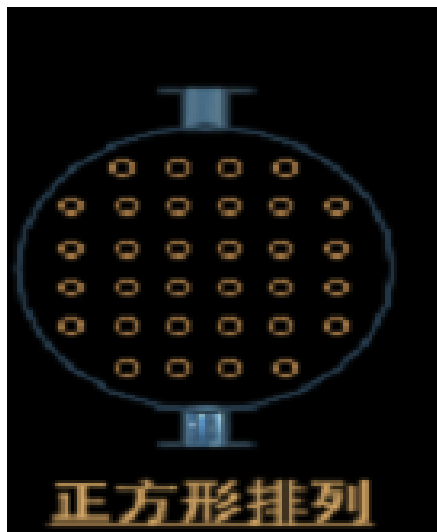
$$\alpha_{\text{弯}} = \alpha_{\text{湍}} \left( 1 + 1.77 \frac{d}{R} \right) \quad \alpha_{\text{弯}} > \alpha_{\text{湍}}$$

## d.非圆形管

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{d_e u_{\text{实}} \rho}{\mu} \right)^{0.8} p_r^b$$

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流通面积}}{\text{浸润周边}}$$

例



$$d_e = \frac{4 \times \frac{\pi}{4} (D_i^2 - n d_o^2)}{\pi (D_i + n d_o)}$$

(3)  $\alpha_{\text{湍}}$  计算式灵活应用

$$Nu = f(\text{Re}, \text{Pr})$$

$$\alpha_{\text{湍}} = 0.023 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^b$$

$b$  { 0.4 流体被加热  
0.3 流体被冷却

或

$$Nu = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^b$$



$$\alpha_{\text{湍}} = 0.023 \frac{\lambda}{d} \left( \frac{du\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left( \frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^b$$

$$= 0.023 \lambda^{1-b} c_p^b \rho^{0.8} \mu^{b-0.8} \frac{u^{0.8}}{d^{0.2}}$$

当**b=0.4**时，即为式（**6-46**）

$$\alpha_{\text{湍}} = B' \frac{u^{0.8}}{d^{0.2}}$$

改写成

**B'**为惯性综合系数

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left( \frac{u_2}{u_1} \right)^{0.8} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^{0.2}$$

因此

课堂讨论：

圆直管内处于高度湍流，无相变流体

1. 已知 $q_{v1}, d_1$ 时 $\alpha_1$ ，令 $d_1=d_2$ 使 $q_{v2}=2q_{v1}$ ，  
则 $\alpha_2 = \underline{2^{0.8}} \alpha_1$ 。

2. 已知 $q_{v1}, d_1$ 时 $\alpha_1$ ，令 $q_{v2}=q_{v1}$ 使 $d_2=1/2d_1$ ，  
则 $\alpha_2 = \underline{2^{1.8}} \alpha_1$ 。

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left(\frac{u_2}{u_1}\right)^{0.8} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0.2}$$

$$q_V = u \cdot \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \left(\frac{q_{V2}}{q_{V1}}\right)^{0.8} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1.8}$$

对照教材p185“由式（6-46）可以看出，在其它因素不变时， $\alpha \propto \frac{1}{d^{0.2}}$ ，说明管径 $d$ 对 $\alpha$ 影响不大”一段话要特别留意。

引申：

若 
$$\alpha_{\text{湍}} = 0.023 \lambda^{1-b} c_p^{b-0.8} \frac{(\rho u)^{0.8}}{d^{0.2}}$$

则改写成

$$\alpha_{\text{湍}} = B \frac{G^{0.8}}{d^{0.2}}$$

## 2、圆形直管内强制层流

$$Nu = 1.86(\text{Re Pr} \frac{d}{L})^{1/3} (\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14}$$

引入壁温下 $\mu_w$ 使计算复杂化，但对工程计算，可取以下数值：

液体	被加热时	$(\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14} = 1.05$
	被冷却时	$(\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14} = 0.95$

气体	$(\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14} \approx 1$
----	--

### 3、容积自然对流给热系数

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) = A(Gr \cdot Pr)^b$$

注意：

(1) ( $GrPr$ ) 乘积范围及相应的A,b 值。

见表6-3 (p188)

(2)定性尺寸与加热面方位有关，对水平管取管外径，对垂直管和板取垂直高度。

## 6.4 沸腾给热与冷凝给热

### 6.4.1 沸腾给热

**传热推动力：**  $t_w - t_s$

壁温与操作压强下液体的饱和温度之差。

1、两种沸腾：大容积与管内沸腾

2、**沸腾条件：**过热度 and 汽化核心

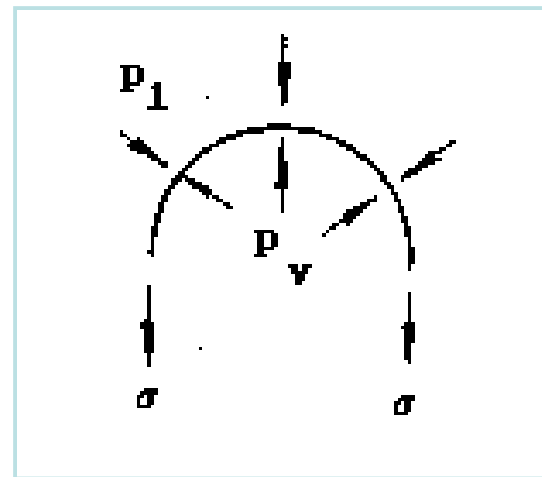
(1) 过热度：

$$\sigma \cdot 2\pi r = (p_v - p_1) \pi r^2$$

$$p_v - p_1 = \frac{2\sigma}{r}$$

为使气泡产生， $p_v > p_1$

过热度= $t - t_s$ ，并且，过热度与气泡半径有关，因而很难形成小气泡。



## (2) 汽化核心

气泡首先在粗糙表面凹缝中产生

∵ 表面功小, 对气泡有依托作用, 存在气泡胚胎。

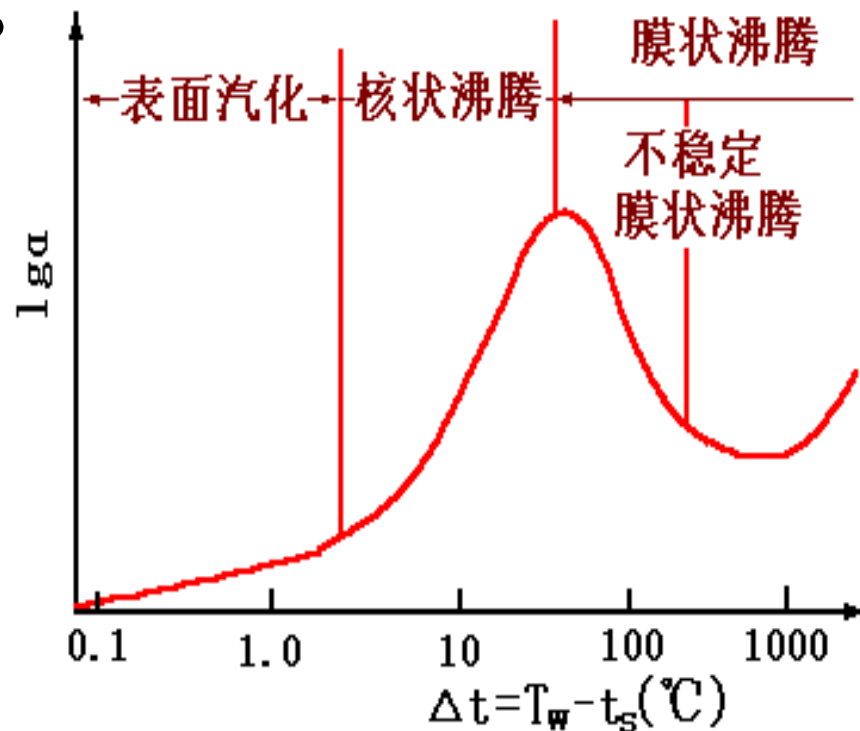
## (3) 核状和膜状沸腾 —— 大容积沸腾规律

① 核状沸腾好, 工业采用。

∵  $\alpha$  大, 壁温  $t_w$  较低

② 影响  $\alpha_{\text{沸}}$  因素多, 在核状沸腾下,  $\alpha_{\text{沸}} \propto \Delta t^{2.5}$

③ 沸腾过程的强化——  
表面粗糙化添加剂加入



牛顿冷却定律:

$$q = \alpha(T - T_w) = \alpha(t_w - t)$$

$\alpha = f(\text{物性, 操作特性, 几何尺寸})$

## 6.4.2 冷凝给热

### 1、膜状冷凝与滴状冷凝

传热推动力:  $t_s - t_w$

应用: 工业上从安全考虑, 冷凝器设计按膜状  
冷凝

$\therefore \alpha_{\text{滴}} > \alpha_{\text{膜}}$



## 1、直管外层流时（平均）冷凝给热系数

$$\alpha_{\text{垂直}} = 1.13 \left[ \frac{\rho^2 g r \lambda^3}{\mu L \Delta t} \right]^{1/4} \quad \alpha \propto \Delta t^{-1/4}$$

## 2、水平圆管管外层流冷凝给热系数：

$$\alpha_{\text{水平}} = 0.725 \left[ \frac{\rho^2 g r \lambda^3}{\mu d_0 \Delta t} \right]^{1/4}$$

## 讨论：

(1) 适用范围：  $Re \leq 2000$  层流

$$Re = \frac{d_e u_{\text{实}} \rho}{\mu} = \frac{4A' \cdot G}{\Pi \cdot \mu} = \frac{4W}{\mu \Pi} \quad \text{其中： } W: \text{ 冷凝量}$$

润湿周边  $\Pi$ ：垂直管外  $\Pi = \pi d_0$  水平管外  $\Pi = L$

(2) 定性温度:

$$\frac{1}{2}(t_s + t_w)$$

(3) 特性尺寸:

垂直管外 $L$ , 水平管外 $d_0$ , 水平管束外为 $nd_0$

(4) 两者关系:

$$\frac{\alpha_{\text{水平}}}{\alpha_{\text{垂直}}} = \left( \frac{0.725}{1.13} \right) \left( \frac{L}{d_0} \right)^{1/4} = 0.64 \left( \frac{L}{d_0} \right)^{1/4}$$

### 3、影响冷凝因素及强化思路

注意不凝性气体排除, 冷凝器上方设有排气口

强化思路—减少液膜厚度

# 6.5 热辐射

## 6.5.1 基本概念

### 1、热辐射

**辐射**—物体以电磁波方式传递热量过程。

**热辐射**—不同物体间互相辐射和吸收能量综合过程，其净结果热量高→低。

热辐射线可以在真空中传播，无需任何介质，这是热辐射与对流和传导的主要不同点。

## 2、黑体、白体、透射体

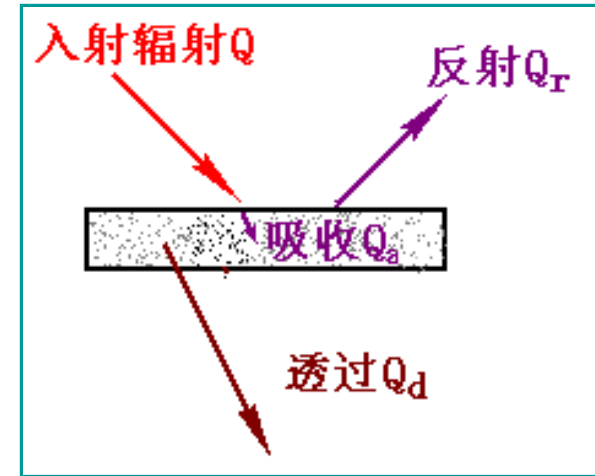
$$\frac{Q_{\lambda}}{Q_{\lambda}} = \frac{Q_a + Q_r + Q_d}{Q_{\lambda}}$$

$$1 = a + r + d$$

吸收率 反射率 透过率

黑体 $a=1$ ，白体 $r=1$ ，透热体 $d=1$   
固体和液体不允许热辐射透过，  
 $d=0$ ， $a+r=1$ 。

“黑”，“白”之分不据颜色  
雪霜  $a=0.985$  近似黑体，  
黑光金属  $r=0.97$  近似白体。



### 3、黑度

黑度  $\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\text{实际物体辐射能力}}{\text{黑体辐射能力}}$

黑度只与辐射物体本身情况有关，是物体的一种性质，而与外界无关。

## 6.5.2 固体辐射

### 一、黑体辐射能力 $E_b$

——斯蒂芬-波尔兹曼定律

$$E_b = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

即  $E_b \propto (\text{绝对温度})^4$

四次方定律表明，辐射传热对温度十分敏感。

$E_b$ : 黑体辐能力  $\text{W/m}^2$

$T$ : 绝对温度  $\text{K}$

$C_0$ : 黑体辐射系数,  $5.67\text{W}/(\text{m}^2.\text{K}^4)$

## 二、灰体辐射能力和吸收能力

### —基尔霍夫定律

**灰体：** 能够以相等的吸收率吸收所有波长辐射能的物体。

灰体也是理想物体，但是大多数的材料，在工业上应用最多的热辐射（波长在  $0.76-20\ \mu\text{m}$ ）范围，其吸收率随波长变化不大，因而可视为灰体。

基尔霍夫定律： $\varepsilon = \alpha$

(1) 在同一温度下，灰体的吸收率等于黑度。辐射能力愈大，其吸收能力愈大。

(2) 灰体辐射能力

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

(3) 对太阳辐射，气体辐射  $\varepsilon \neq a$



### 三、黑体之间辐射传热

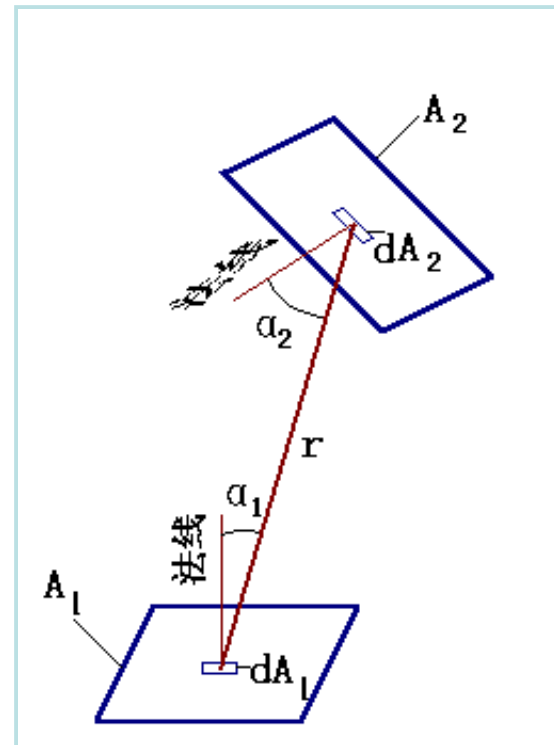
$$Q_{12} = Q_{1 \rightarrow 2} - Q_{2 \rightarrow 1}$$

由兰贝特定律推论可知

$$\begin{aligned} \therefore Q_{12} &= A_1 \varphi_{12} E_{b1} - A_2 \varphi_{21} E_{b2} \\ &= A_1 \varphi_{12} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \end{aligned}$$

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \frac{1}{r^2} dA_1 dA_2$$

$\varphi$  : 纯几何因素与表面性质无关



## 四、灰体之间辐射传热

$$Q_{12} = A_1 \varphi_{12} \varepsilon_s C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

理解为黑体间传热打了  $\varepsilon_s$  折扣。系统黑度  $\varepsilon_s$  表达式十分复杂。

实用有两种情况  $\varepsilon_s$  可简化：

(1) 两距离很近大平板：

$$\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$$

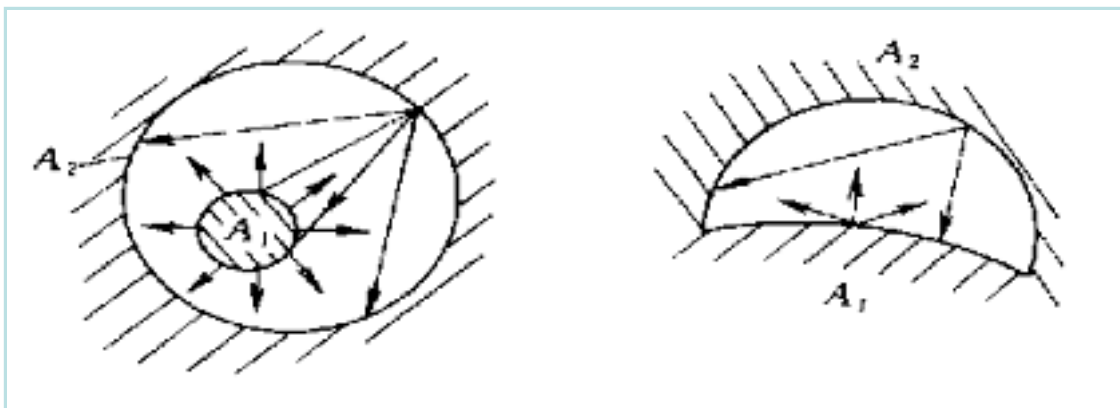
$$\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

(2) 内包系统：内包物系具有凸表面  $\varphi_{12} = 1$

且  $\frac{A_1}{A_2} \approx 0$ ，则  $\varepsilon_s = \varepsilon_1$

简化为：  $Q_{12} = \varepsilon_1 A_1 C_0 [(\frac{T_1}{100})^4 - (\frac{T_2}{100})^4]$

\* 气体管道内热电偶测温的辐射误差计算（例6-6）属于这种情况。



## 五、影响辐射的主要因素

### 1、温度影响

与  $T^4$  成正比，很敏感。与对流、传导不同。

### 2、几何位置影响

### 3、表面黑度的影响

\* 减少辐射散热时，可在表面上镀以黑度很小的银、铝等。

### 4、辐射表面之间介质的影响

\* 减少辐射散热，加遮热板（例6-7）

## 六、辐射给热系数 $\alpha_R$

高温设备（如管式炉）外壁对周围空气的散热，兼有辐射与自然对流作用

$$q_t = q_R + q_c = (\alpha_R + \alpha_c)(T_1 - T_2)$$

辐射    对流

**习题:**

**6, 7, 9, 10, 11**