

第十五章

传热基本原理

§ 15-1 传导

热量传递的三种基本方式：**导热**（热传导）、**对流**（热对流）和**热辐射**

• 1 **射** **导热**（热传导）（Conduction）

- (1) 定义：指温度不同的物体各部分或温度不同的两物体间直接接触时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象
- (2) 物质的属性：可以在固体、液体、气体中发生
- (3) 导热的特点： a 必须有温差； b 物体直接接触； c 依靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而传递热量； d 在引力场下单纯的导热只发生在密实固体中。

(4) 导热的基本定律:

1822 年, 法国数学家 Fourier:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}]$$

上式称为 Fourier 定律, 号称导热基本定律, 是一个一维稳态导热。其中:

q_x : 热流量, 单位时间传递的热量 [W]; q : 热流密度, 单位时间通过单位面积传递的热量; A : 垂直于导热方向的截面积 [m²]; k (or λ) : 导热系数 (热导率) [W/(m K)]。

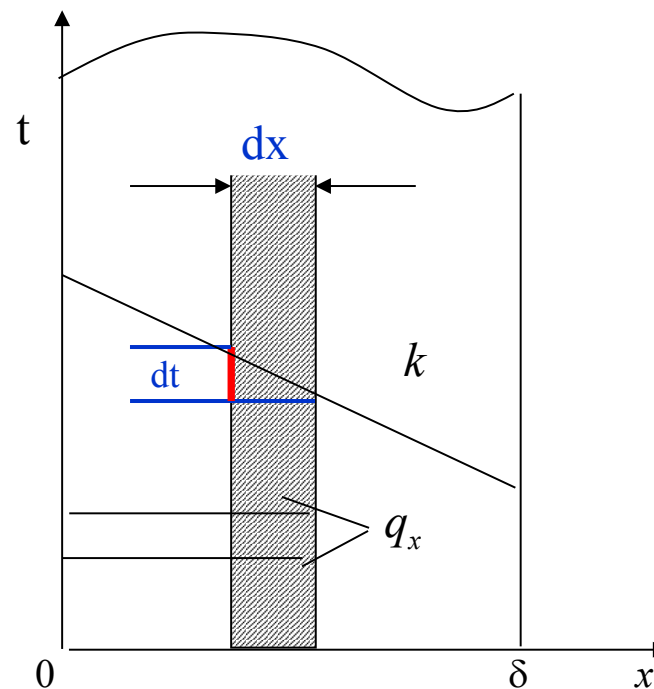


图 15-1 一维稳态平板内导热

(5) 一维稳态导热及其导热热阻

如图 15-2 所示, 稳态 $\Rightarrow q = \text{const}$, 于是积分 Fourier 定律有:

$$q \int_0^\delta dx = -\lambda \int_{t_{w1}}^{t_{w2}} dt \Rightarrow q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\Delta t}{r_{\lambda}}$$

$$\Phi = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{A\lambda}} = \frac{\Delta t}{R_{\lambda}}$$

$$R_{\lambda} = \frac{\delta}{A\lambda} \quad \text{—— 导热热阻}$$

$$r_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda} \quad \text{—— 单位导热热阻}$$

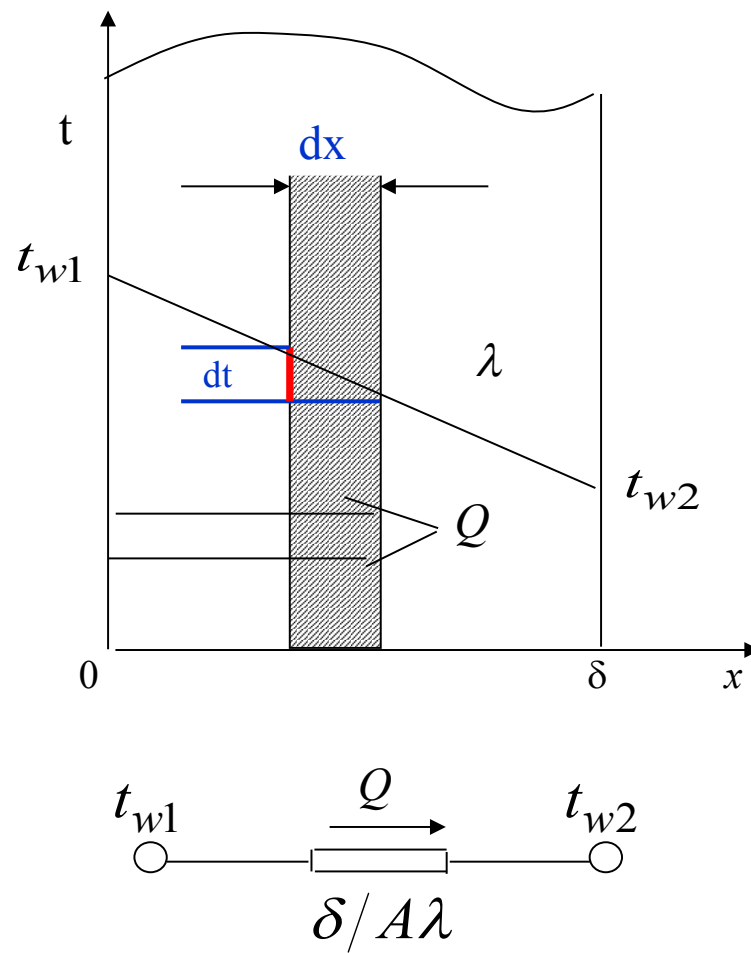


图 15-2 导热热阻的图示

§ 15 – 2 导热系数 λ

- 表征材料导热能力的大小，是一种物性参数，与材料种类和温度关。

例 题 15-1

例题 15-1 一块厚度 $\delta = 50 \text{ mm}$ 的平板，两侧表面分别维持在 $t_{w1} = 300^\circ \text{C}$, $t_{w2} = 100^\circ \text{C}$ 。试求下列条件下的热流密度。

- (1) 材料为铜， $\lambda = 375 \text{ W/(mK)}$ ；
- (2) 材料为钢， $\lambda = 36.4 \text{ W/(mK)}$ ；
- (3) 材料为铬砖， $\lambda = 2.32 \text{ W/(mK)}$ ；
- (4) 材料为铬藻土砖， $\lambda = 0.242 \text{ W/(mK)}$ 。

解：一维稳态导热公式有：

铜: $q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 375 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 1.5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$

钢: $q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 36.4 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 1.46 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

铬砖: $q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 2.32 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 9.28 \times 10^3 \text{ W/m}^2$

硅藻土砖: $q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 0.242 \times \frac{300 - 100}{0.05} = 9.68 \times 10^2 \text{ W/m}^2$

讨论: 由计算可见, 由于铜与硅藻土砖导热系数的巨大差别, 导致在相同的条件下通过铜板的导热量比通过硅藻土砖的导热量大三个数量级。因而, 铜是热的良导体, 而硅藻土砖则起到一定的隔热作用

§ 15 — 3 对流（热对流）（Convection）

(1) 定义：流体中（气体或液体）温度不同的各部分之间，由于发生相对的宏观运动而把热量由一处传递到另一处的现象。

(2) 对流换热：当流体流过一个物体表面时的热量传递过程，他与单纯的对流不同，具有如下特点：

- a 导热与热对流同时存在的复杂热传递过程
- b 必须有直接接触（流体与壁面）和宏观运动；也必须有温差
- c 壁面处会形成速度梯度很大的边界层

(3) 对流换热的分类

无相变：强迫对流和自然对流

有相变：沸腾换热和凝结换热

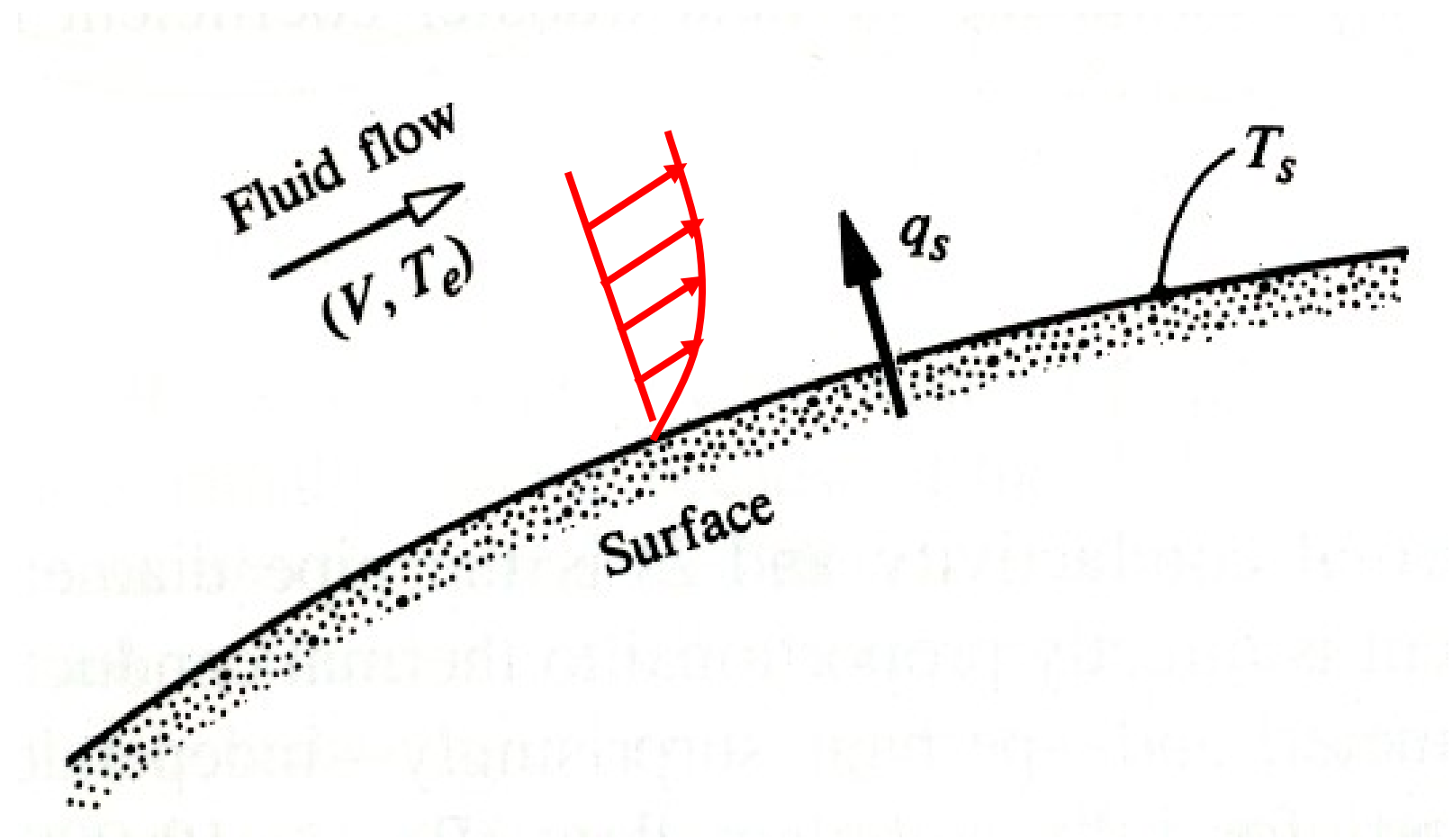
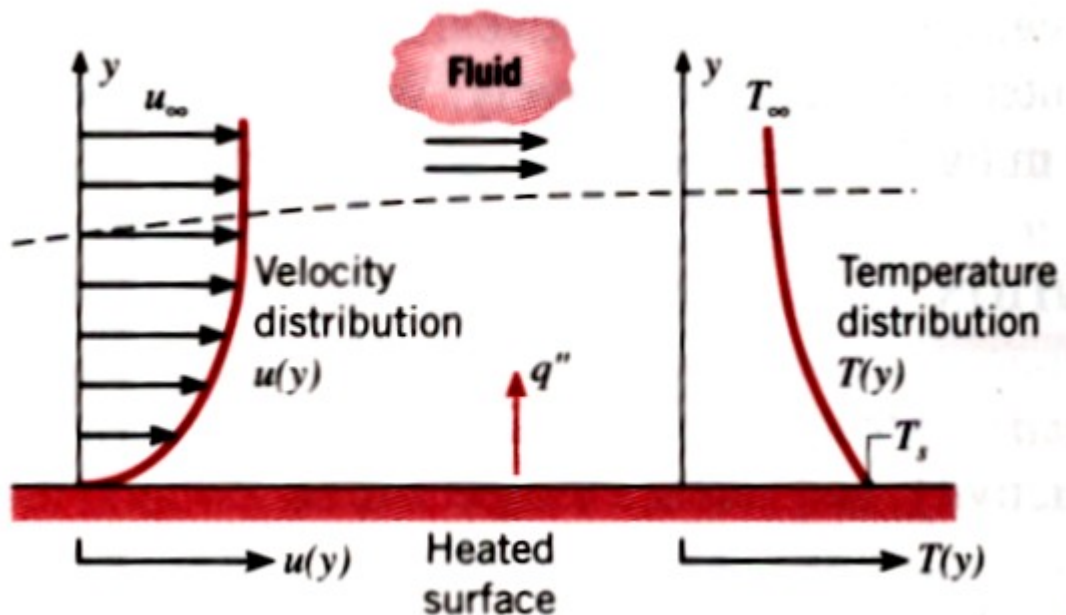


图 15-4 对流换热中边界层的示意图

(4) 对流换热的基本计算公式——牛顿冷却公式



$$\Phi = hA(t_w - t_\infty) \text{ [W]}$$

$$q = \Phi / A$$
$$= h(t_w - t_f) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Convection heat transfer coefficient

Φ — 热流量 [W]，单位时间传递的热量

q — 热流密度 [W/m²] h — 表面传热系数 [W/(m²·K)]

A — 与流体接触的壁面面积 [m²]

t_w — 固体壁表面温度 [°C] t_∞ — 流体温度 [°C]

(5) 对流换热系数（表面传热系数）

(Convection heat transfer coefficient)

$$h = \Phi / (A(t_w - t_\infty)) \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

—— 当流体与壁面温度相差 1 度时、每单位壁面面积上、单位时间内所传递的热量

影响 h 因素：流速、流体物性、壁面形状大小等

$$\Phi = \frac{\Delta t}{1/(hA)} = \frac{\Delta t}{R_h}$$

$$q = \frac{\Delta t}{1/h} = \frac{\Delta t}{r_h}$$

(6) 对流换热热阻:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{1/(hA)} = \frac{\Delta t}{R_h}$$

$$q = \frac{\Delta t}{1/h} = \frac{\Delta t}{r_h}$$

$$R_h = 1/(hA) \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}]$$

$$r_h = 1/h \quad [m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}]$$

Thermal resistance for convection

§15 – 4 热辐射 (Thermal radiation)

(1) 定义：有热运动产生的，以电磁波形式传递能量的现象

(2) 特点： a 任何物体，只要温度高于 0 K ，就会不停地向周围空间发出热辐射； b 可以在真空中传播； c 伴随能量形式的转变； d 具有强烈的方向性； e 辐射能与温度和波长均有关； f 发射辐射取决于温度的 4 次方。

(3) 生活中的例子：

- a 当你靠近火的时候，会感到面向火的一面比背面热；
- b 冬天的夜晚，呆在有窗帘的屋子内会感到比没有窗帘时要舒服；
- c 太阳能传递到地面
- d 冬天，蔬菜大棚内的空气温度在 0°C 以上，但地面却可能结冰。

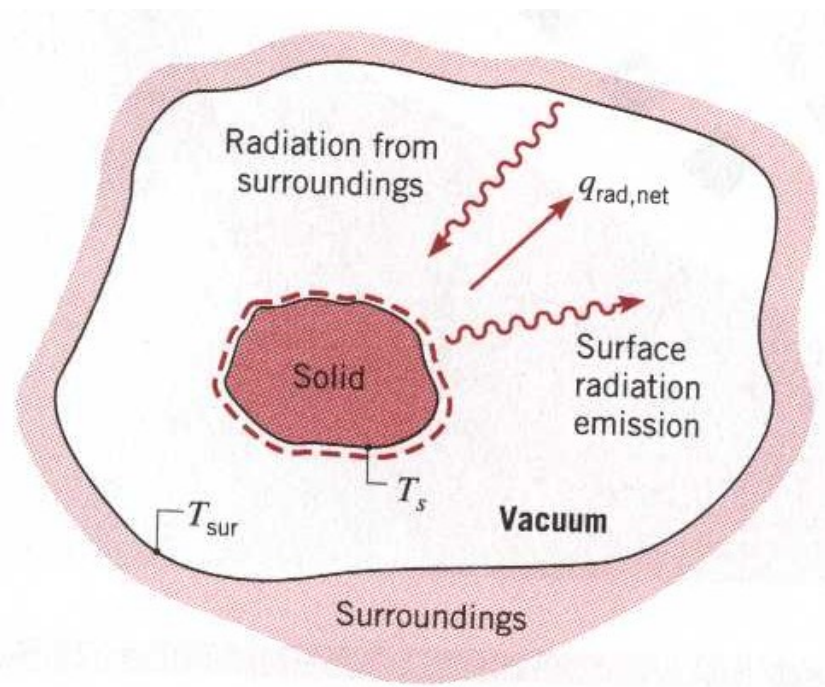
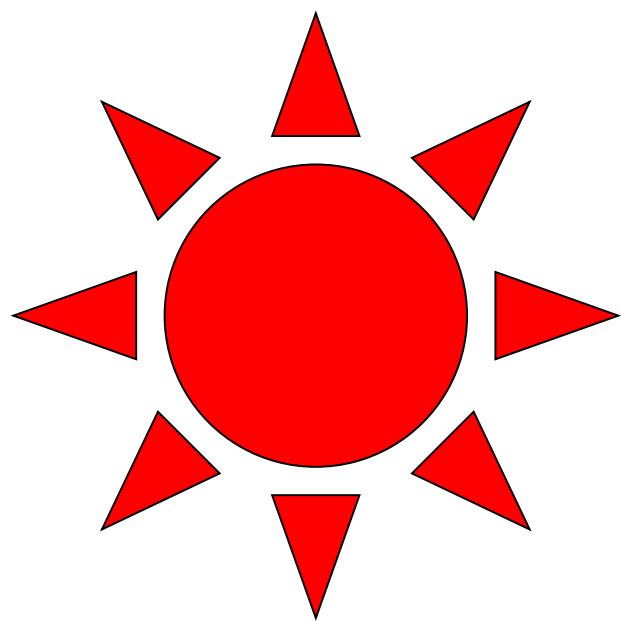


图 15 — 6

(4) **辐射换热**：物体间靠热辐射进行的热量传递，它与单纯的热辐射不同，就像对流和对流换热一样

(5) **辐射换热的特点**

- a 不需要冷热物体的直接接触；即：不需要介质的存在，在真空中就可以传递能量
- b 在辐射换热过程中伴随着能量形式的转换
物体热力学能 \rightarrow 电磁波能 \rightarrow 物体热力学能
- c 无论温度高低，物体都在不停地相互发射电磁波能、相互辐射能量；高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体辐射给高温物体的能量；总的结果是热由高温传到低温

(6) **辐射换热的研究方法：**假设一种黑体，它只关心热辐射的共性规律，忽略其他因素，然后，真实物体的辐射则与黑体进行比较和修正，通过实验获得修正系数，从而获得真实物体的热辐射规律

(7) **黑体的定义：**能吸收投入到其表面上的所有热辐射的物体，包括所有方向和所有波长，因此，相同温度下，黑体的吸收能力最强

(8) **黑体辐射的控制方程：** Stefan-Boltzmann 定律

$$\Phi = A\sigma T^4 \quad q = \sigma T^4$$

真实物体则为： $\Phi = \varepsilon A\sigma T^4$

(9) **两黑体表面间的辐射换热**

$$\Phi = A\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

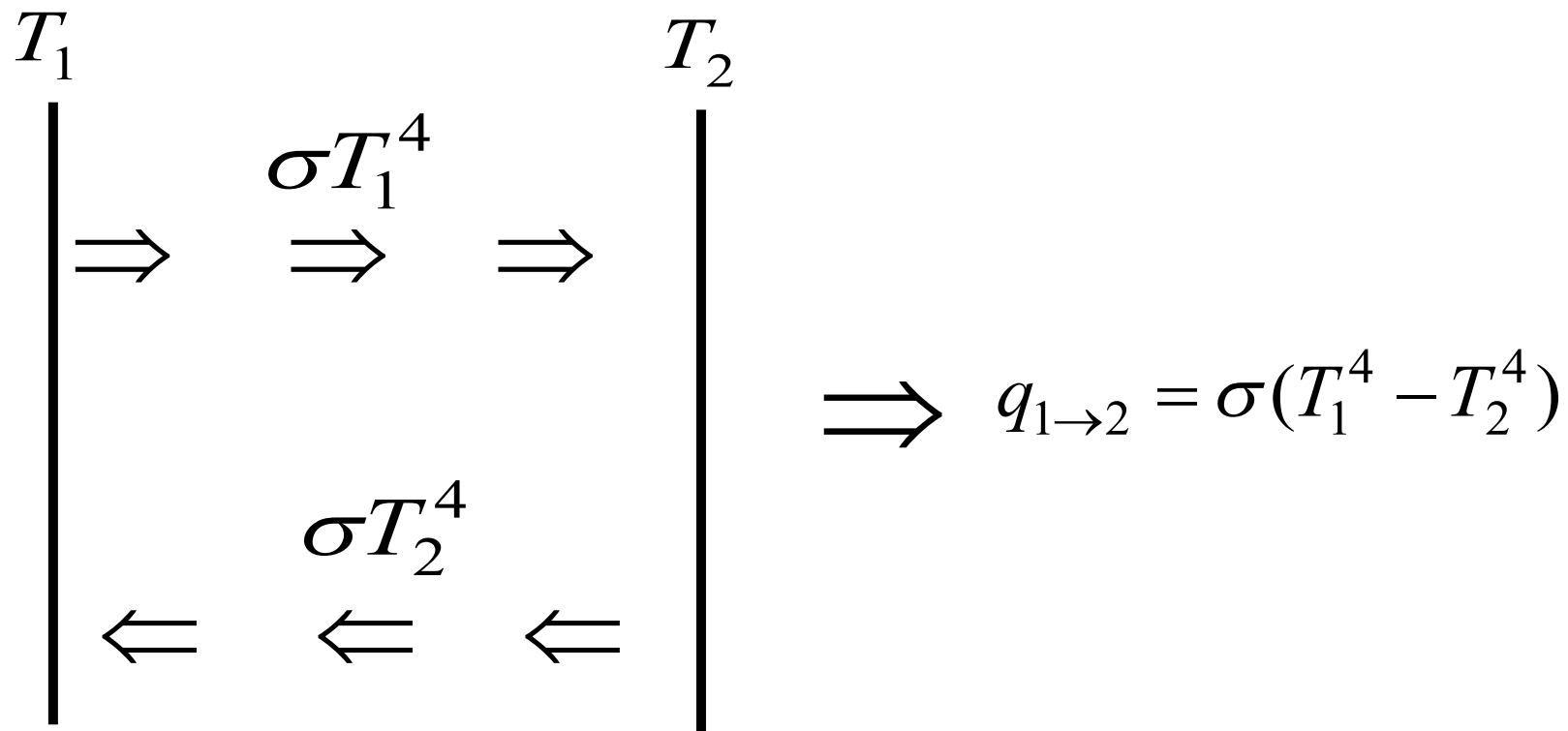


图 15 — 7 两黑体表面间的辐射
 换热

例 题 15-2

- 一根水平放置的蒸汽管道，其保温层外径 $d=583\text{ mm}$ ，外表面实测平均温度及空气温度分别为 $t_w = 48^\circ\text{C}$, $t_f = 23^\circ\text{C}$ ，此时空气与管道外表面间的自然对流换热的表面传热系数 $h=3.42\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ ，保温层外表面的发射率 $\varepsilon=0.9$

问：（1）此管道的散热必须考虑哪些热量传递方式；
（2）计算每米长度管道的总散热量。

解：

（1）此管道的散热有辐射换热和自然对流换热两种方式。

q_l

（2）把管道每米长度上的散热量记为

当仅考虑自然对流时，单位长度上的自然对流散热

$$\begin{aligned}q_{l,c} &= \pi d \cdot h \Delta t = \pi d h (t_w - t_f) \\&= 3.14 \times 0.583 \times 3.42 \times (48 - 23) \\&= 156.5 (W / m)\end{aligned}$$

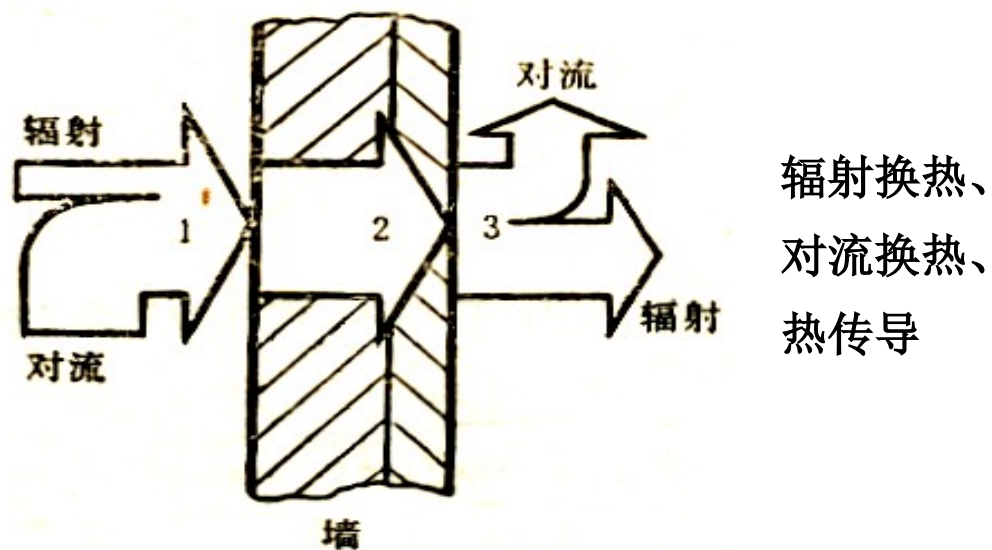
近似地取管道的表面温度为室内空气温度，于是每米长度管道外表面与室内物体及墙壁之间的辐射为：

$$\begin{aligned}q_{l,r} &= \pi d \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \\&= 3.14 \times 0.583 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.9 \times [(48 + 273)^4 - (23 + 273)^4] \\&= 274.7 (W / m)\end{aligned}$$

讨论： 计算结果表明， 对于表面温度为几至几十摄氏度的一类表面的散热问题， 自然对流散热量与辐射具有相同的数量级， 必须同时予以考虑。

§ 15-5 组合传热和总传热系数

- 1 传热过程的定义：两流体间通过固体壁面进行的换热
- 2 传热过程包含的传热方式：**导热、对流、热辐射**



辐射换热、
对流换热、
热传导

图 15 — 8 墙壁的散
热

3 一维稳态传热过程中的热量传递

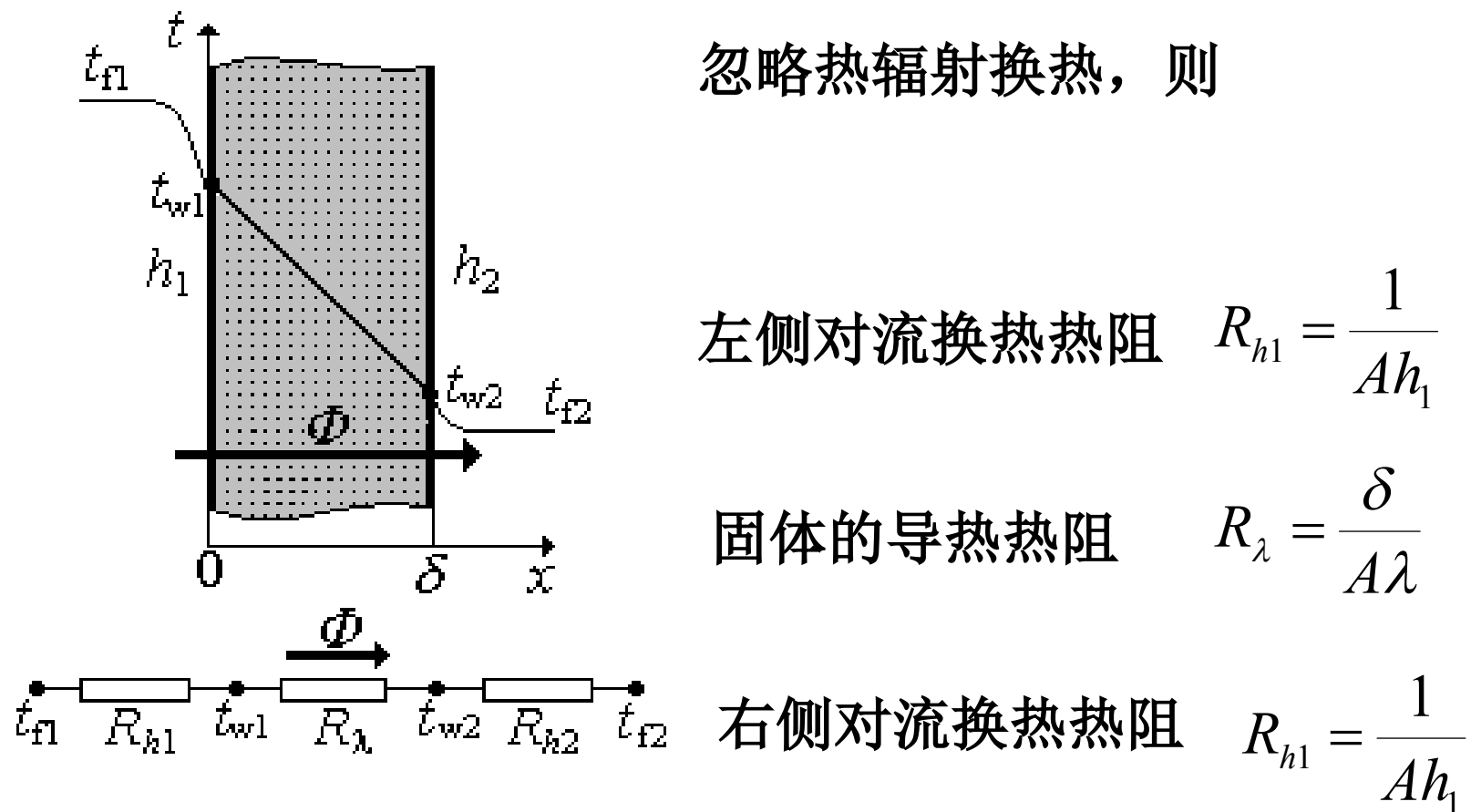


图 15 — 9 一维稳态传热过程

上面传热过程中传递的热量为：

$$\Phi = \frac{(t_{f1} - t_{f2})}{R_{h1} + R_{\lambda} + R_{h2}} = \frac{(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2}} \quad (15-10)$$

传热系数

$$\Phi = Ak(t_{f1} - t_{f2}) = Ak\Delta t$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{r_{h1} + r_{\lambda} + r_{h2}} \longrightarrow \text{单位热阻或面积热阻}$$

传热系数 $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ ，是表征传热过程强烈程度的标尺，
不是物性参数，与过程有关。

a k 越大，传热越好。若要增大 k ，可增大
注意：

h_1 , λ , h_2 或减小 δ

b 非稳态传热过程以及有内热源时，不能用热阻分析法

c h_1 、 h_2 的计算方法及增加 k 值的措施是本课程的重要
内容

§15 – 6 本章小结:

(1) 导热 $\Phi = -A\lambda \frac{dt}{dx}$

Fourier 定律:

(2) 对流换热

Newton 冷却公式: $\Phi = Ah\Delta t$

(3) 热辐射

Stefan-Boltzmann 定律: $\Phi = A\sigma T^4$

(4) 传热过程

(5) 组合传热

思考题：

1. 热量传递的基本方式及传热机理。
2. 一维傅立叶定律的基本表达式及其中各物理量的定义。
3. 牛顿冷却公式的基本表达式及其中各物理量的定义。
4. 黑体辐射换热的四次方定律基本表达式及其中各物理量的定义。
5. 传热过程及传热系数的定义及物理意义。
6. 热阻的概念：对流热阻，导热热阻的定义及基本表达式。
7. 接触热阻，污垢热阻的概念。
8. 使用串联热阻叠加的原则和在换热计算中的应用。
9. 对流换热和传热过程的区别。
10. 导热系数，表面传热系数和传热系数之间的区别。

作业

- 15.3