

第一章

➤ **传热学**是研究有温差存在时热量传递规律的学科。

- 1) 物体内部只要存在温差，就有热量从物体的高温部分传向低温部分；
- 2) 物体之间存在温差时，热量就会自发的从高温物体传向低温物体。

➤ 根据物体温度与时间的关系，热量传递过程可分为两类：**稳态传热过程**和**非稳态传热过程**。

传热学研究的对象是热量传递规律。

➤ **热流量**：单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量，记为 ϕ ，单位 W。

➤ **热流密度（面积热流量）**：单位时间内通过单位面积的热量称为热流密度，记为 q ，单位 W/m^2 。

► 热量传递的三种基本方式：

1. 热传导（导热）：物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称热传导。

导热的基本规律（傅立叶定律）：

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx}$$

λ 称为**热导率**，又称**导热系数**，表征材料导热性能优劣的参数，是一种物性参数，单位： W/mK 。不同材料的导热系数值不同，即使同一种材料导热系数值与温度等因素有关。金属材料最高，良导电体，也是良导热体，液体次之，气体最小。

2. 热对流：是指由于流体的宏观运动，从而使流体各部分之间发生相对位移，冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程。

对流仅发生在流体中，对流的同时必伴随有导热现象。

对流换热：指流体流经固体表面时流体与固体表面之间的热量传递现象。

1) 根据对流换热时 **是否发生相变** 分：相变对流换热和单相对流换热。

2) 根据引起 **流动的原因** 分：自然对流和强制对流。

对流换热的基本规律 **< 牛顿冷却公式 >** $q = h\Delta t$ $\Phi = Ah\Delta t$

h — 比例系数（表面传热系数），单位 $W/(m^2 \cdot K)$ 。

h 的物理意义：单位温差作用下通过单位面积的热流量。

一般地，**就介质而言**：水的对流传热比空气强烈；

就传热方式而言：有相变的强于无相变的；强制对流强于自然对流。

3. **热辐射**：物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。因热的原因而发出辐射能的现象称为热辐射。

辐射传热：辐射与吸收过程的综合作用造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递称辐射传热。

- 导热、对流两种热量传递方式，只有在有物质存在的条件下，才能实现，而热辐射不需中间介质，可以在真空中传递，而且在真空中辐射能的传递最有效。
- 在辐射传热过程中，不仅有能量的转移，而且伴随有能量形式的转换。
- 辐射传热是一种双向热流同时存在的换热过程，即不仅高温物体向低温物体辐射热能，而且低温物体向高温物体辐射热能。
- 把吸收率等于1的物体称黑体，是一种假想的理想物体。
- 实际物体辐射热流量根据斯忒藩——玻耳兹曼定律求得：

$$\Phi = \varepsilon A \sigma T^4$$

- 传热过程：热量由壁面一侧的流体通过壁面传到另一侧流体中去的过程称传热过程。

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$$

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

第二章

温度场: 温度场是指在各个时刻物体内部各点温度所组成的集合, 又称温度分布。

稳态温度场: 是指物体各点的温度随空间坐标而不随时间变化的温度场称稳态温度场。

非稳态温度场: 是指物体中各点的温度分布随空间坐标和时间而变化的温度场称非稳态温度场。

等温面: 同一时刻、温度场中所有温度相同的点连接起来所构成的面。

等温线: 用一个平面与等温面相交, 平面与等温面的交线称为等温线。

温度不同的等温面或等温线彼此不能相交。

在连续的温度场中, 等温面或等温线不会中断, 它们或者是物体中完全封闭的曲面(曲线), 或者就终止于物体的边界上。

等温线图的物理意义: 若等温线图上每两条相邻等温线间的温度间隔相等时, 等温线的疏密可反映出不同区域导热热流密度的相对大小。

热流线: 热流线是一组与等温线处处垂直的曲线, 通过平面上任一点的热流线与该点的热流密度矢量相切。

影响导热系数的因素：物质的种类、材料成分、温度、湿度、压力、密度等。 $\lambda_{\text{金属}} > \lambda_{\text{非金属}}; \lambda_{\text{固相}} > \lambda_{\text{液相}} > \lambda_{\text{气相}}$

➤ 对于任何导热过程，完整的数学描写包括导热微分方程和单值性条件。

初始条件：初始时间温度分布的初始条件；

边界条件：导热物体边界上温度或换热情况的边界条件。

① 非稳态导热定解条件有两个；

② 稳态导热定解条件只有边界条件，无初始条件。

➤ 导热问题的常见边界条件可归纳为以下三类

1) 规定了边界上的温度值，称为**第一类边界条件**。对于非稳态导热，这类边界条件要求给出以下关系式： $\tau > 0$ 时 $t_w = f(\tau)$

2) 规定了边界上的热流密度值，称为**第二类边界条件**。对于非稳态导热， $\tau > 0$ 时 $-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = f_2(\tau)$

3) 第三类边界条件规定了边界上物体与周围流体间的表面传热系数及周围流体的温度。 $-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f)$

➤ 热扩散率： $a = \lambda / (\rho c)$ ① a 越大，表示物体受热时，其内部温度扯平的能力越大。② a 越大，表示物体中温度变化传播的越快。所以， a 也是材料传播温度变化能力大小的指标，亦称导温系数。

➤ 典型一维稳态导热问题：

平壁导热 $\Phi = \frac{\Delta t}{\delta / (\lambda A)}$ $q = \frac{\Delta t}{\delta / \lambda}$

面积热阻 R_A ：单位面积的导热热阻称面积热阻。

热阻 R ：整个平板导热热阻称热阻。

圆筒壁的导热： $\Phi = \frac{2\pi\lambda l(t_1 - t_2)}{\ln(r_2/r_1)}$ $R = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda l}$

球壳导热： $\Phi = \frac{4\pi\lambda(t_1 - t_2)}{1/r_1 - 1/r_2}$ $R = \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

➤ 串联热阻叠加原则：在一个串联的热量传递过程中，若通过各串联环节的热流量相同，则串联过程的总热阻等于各串联环节的分热阻之和。

肋片：指依附于基础表面上的扩展表面。

作用：增大对流换热面积及辐射散热面，以强化换热。

$$\text{肋片效率} = \frac{\text{实际散热量}}{\text{假设整个肋表面处于肋基温度下的散热量}}$$

第三章 非稳态热传导

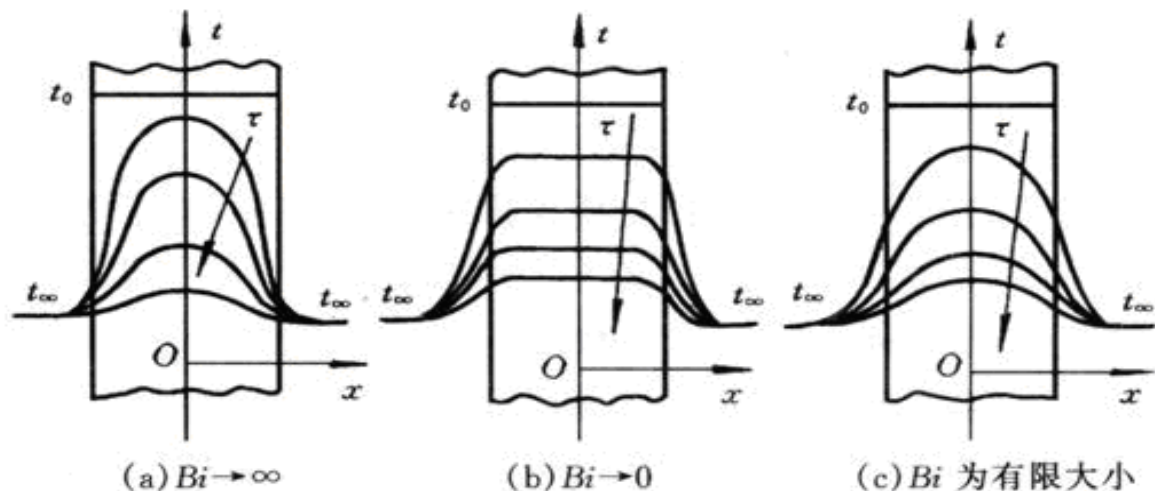
非稳态导热的定义： 物体的温度随时间而变化的导热过程称非稳态导热。

周期性非稳态导热： 物体的温度随时间而作周期性的变化。

瞬态非稳态导热： 物体的温度随时间的推移逐渐趋近于恒定的值。

非正规状况阶段(右侧面不参与换热)： 温度分布显现出部分为非稳态导热规律控制区和部分为初始温度区的混合分布。

正规状况阶段(右侧面参与换热)： 当右侧面参与换热以后，物体中的温度分布不受初始温度影响，主要取决于边界条件及物性，此时，非稳态导热过程进入到正规状况阶段。



毕渥数: $Bi = \frac{\delta/\lambda}{1/h} = \frac{\delta h}{\lambda}$

Bi 物理意义: Bi 的大小反映了物体在非稳态条件下内部温度场的分布规律。

特征数 (准则数): 表征某一物理现象或过程特征的无量纲数。

特征长度: 是指特征数定义式中的几何尺度。

集中参数法: 忽略物体内部导热热阻、认为物体温度均匀一致的分析方法。此时, $Bi \rightarrow 0$, 温度分布只与时间有关, 即 $t = f(\tau)$, 与空间位置无关, 因此, 也称为**零维**问题。

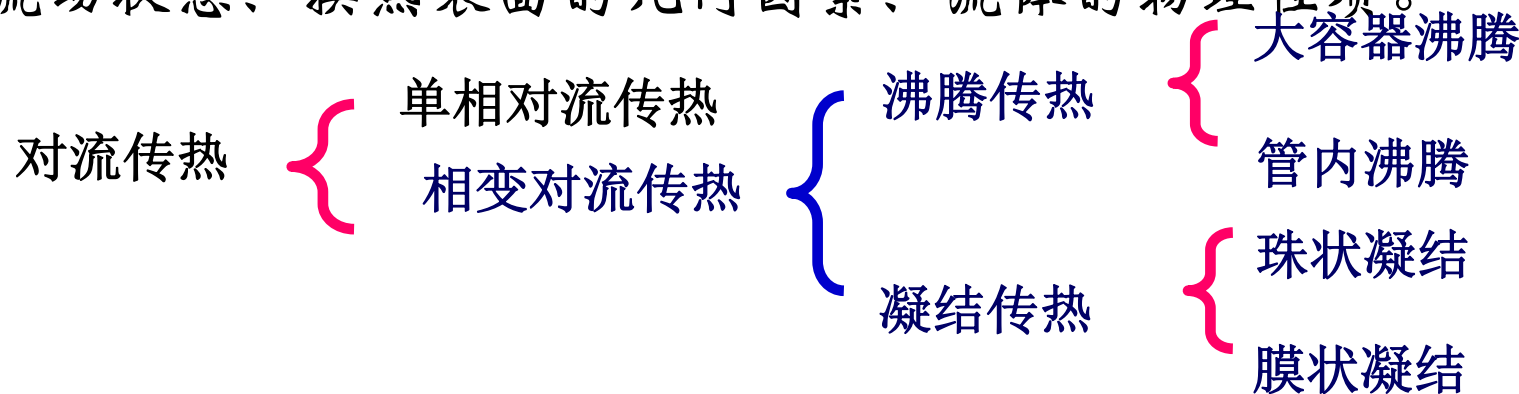
$$Bi_v = \frac{h(V/A)}{\lambda} \quad Fo_v = \frac{a\tau}{(V/A)^2} \quad \frac{\theta}{\theta_0} = e^{-1} = 36.8\% \quad \boxed{\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_\infty}{t_0 - t_\infty} = e^{-\frac{hA}{\rho V c} \tau}} \quad B_{iv} = \frac{h(V/A)}{\lambda} < 0.1M$$

当 $\tau = 4 \frac{\rho V c}{hA}$ 时, $\frac{\theta}{\theta_0} = 1.83\%$ 工程上认为 $\tau = 4 \tau_c$ 时导热体已达到热平衡状态

第五章 对流传热的理论基础

研究对流传热的方法：分析法、实验法、比拟法、数值法。

影响表面传热系数的因素：流体流动的起因、流体有无相变、流体的流动状态、换热表面的几何因素、流体的物理性质。



在对流传热的流场中：**边界层区**——必须考虑粘性对流动的影响，要用N-S方程求解。**主流区**——边界层外，流速维持不变，流动可以作为理想流体的无旋流动，用描述理想流体的运动微分方程求解。

在固体表面附近流体速度发生剧烈变化的薄层称为**流动边界层**。边界层分为层流边界层和湍流边界层。湍流边界层包括**湍流核心**、**缓冲层**、**层流底层**。在层流底层中具有较大的速度梯度。

在固体表面附近流体温度发生剧烈变化的薄层称为**热边界层**。

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5.0}{\sqrt{\text{Re}_x}}$$

$$c_f = 0.664 \text{Re}_x^{-1/2}$$

$$\frac{h_x x}{\lambda} = \text{Nu}_x = 0.332 \text{Re}_x^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \Rightarrow \overline{\text{Nu}} = \frac{\bar{h} l}{\lambda} = 0.664 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{Nu}_x = \frac{c_f}{2} \text{Re}_x \quad \delta = \delta_t \text{Pr}^{1/3} = 5x \text{Re}^{-1/2}$$

$$S_t = \frac{\text{Nu}}{\text{Re Pr}} \quad \text{斯坦顿 (Stanton) 数}$$

$$x < x_c \text{ 时, 层流, } \text{Nu}_x = 0.332 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

$$x > x_c \text{ 时, 湍流, } \text{Nu}_x = 0.0296 \text{Re}^{\frac{4}{5}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

第六章 相似原理及量纲分析

同类现象:用相同形式且具有相同内容的微分方程式所描述的现象。

相似的概念:对于两个同类的物理现象,如果在相应的时刻及相应的地点与现象有关的物理量一一对应成比例,则称此两现象彼此相似。

判别两现象相似的条件:

①只有同类现象才能谈相似。

②**单值性条件相似:**初始条件、边界条件、几何条件、物理条件。

③**同名的已定特征数相等。**

获得相似准则数的方法:相似分析法和量纲分析法。

相似分析法:在已知物理现象数学描述的基础上,建立两现象之间的一些列比例系数,尺寸相似倍数,并导出这些相似系数之间的关系,从而获得无量纲量。

量纲分析法:在**已知相关物理量**的前提下,采用量纲分析获得无量纲量。

国际单位制中的7个基本物理量：

长度[m]，质量[kg]，时间[s]，电流[A]，温度[K]，物质的量[mol]，发光强度[cd]

相似原理的重要应用：

1.相似原理在传热学中的一个重要的应用是指导试验的安排及试验数据的整理。

2.相似原理的另一个重要应用是指导模化试验。

自然对流亦有层流和湍流之分。

自然对流传热可分成大空间和有限空间两类。

$$Gr = \frac{g \alpha \Delta t l^3}{\nu^2}$$

数是浮升力/粘滞力比值的一种量度。

瑞利数：

$$Ra = Gr Pr = \frac{g \alpha_v \Delta t l^3}{\alpha \nu}$$

| 特征数名称 | 定义 | 释义 |
|---------------|--|--|
| 毕渥数 Bi | $\frac{hl}{\lambda}$ | 固体内部导热热阻与其界面上换热热阻之比(注意, λ 为固体的导热系数) |
| 傅里叶数 Fo | $\frac{\alpha\tau}{l^2}$ | 非稳态过程的无量纲时间,表征过程进行的深度 |
| 格拉晓夫数 Gr | $\frac{g\beta^3 a\Delta t}{\nu^3}$ | 浮升力与粘性力之比的一种度量 |
| j 因子 | $StPr^{1/3}$ | 无量纲表面传热系数 |
| 努塞尔数 Nu | $\frac{hl}{\lambda}$ | 避面上流体的无量纲温度梯度(注意 λ 为流体的导热系数) |
| 普朗特数 Pr | $\frac{\eta c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$ | 动量扩散厚度与热量扩散厚度之比 |
| 雷诺数 Re | $\frac{ul}{\nu}$ | 惯性力与粘性力之比的一种度量 |
| 斯坦顿数 St | $\frac{Nu}{RePr}$ | 一种修正的奴塞尔数,或视为流体实际的换热热流密度与流体可传递最大热流密度之比[注意 $Nu/(RePr) = h/(\rho c_p \mu) = h\Delta t/(\rho c_p u\Delta t)$]。 |

第七章 相变对流传热

凝结传热现象：蒸汽与低于饱和温度的壁面接触时，将汽化潜热释放给固体壁面，并在壁面上形成凝结液的过程，称凝结传热现象。

凝结换热的分类：根据凝结液与壁面浸润能力不同分为**膜状凝结与珠状凝结**。

膜状凝结：

定义：凝结液体能很好地湿润壁面，并能在壁面上均匀铺展成膜的凝结形式，称膜状凝结。

特点：壁面上有一层液膜，凝结放出的相变热（潜热）须穿过液膜才能传到冷却壁面上，此时液膜成为主要的换热热阻。

珠状凝结：

定义：凝结液体不能很好地湿润壁面，在壁面上形成一个个小液珠的凝结形式，称珠状凝结。

特点：凝结放出的潜热不须穿过液膜的阻力即可传到冷却壁面上。所以，在其它条件相同时，珠状凝结的表面传热系数定大于膜状凝结的传热系数。 $h_d = 5-10h_f$

珠状凝结好，但是难于实现，因此工业上多采用膜状凝结。

膜状凝结分析解：
$$\delta = \left[\frac{4\lambda_l \eta_l (t_s - t_w) x}{rg \rho_l^2} \right]^{\frac{1}{4}}$$

竖壁的平均表面传热系数：
$$h_x = \left[\frac{rg \lambda_l^3 \rho_l^2}{4\eta_l (t_s - t_w) x} \right]^{\frac{1}{4}} \quad h_v = 1.13 \left[\frac{rg \lambda_l^3 \rho_l^2}{\eta_l l (t_s - t_w)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

倾斜壁
$$h = 0.943 \left[\frac{rg \lambda_l^3 \rho_l^2 \sin \theta}{\mu_l l (t_s - t_w)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

水平管
$$h_H = 0.729 \left[\frac{rg \lambda_l^3 \rho_l^2}{\mu_l d (t_s - t_w)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

球表面
$$h_S = 0.826 \left[\frac{rg \lambda_l^3 \rho_l^2}{\mu_l d (t_s - t_w)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

竖壁液膜流态
$$Re = \frac{4hl(t_s - t_w)}{\eta r}$$
 对水平管，用 πd 代替上式中的 l 即可。

影响膜状凝结的因素：1. 不凝结气体；2. 蒸气流速；3. 过热蒸气；4. 液膜过冷度及温度分布的非线性；5. 管子排数；6. 管内冷凝；7. 凝结表面的几何形状

沸腾：指液体吸热后在其内部产生汽泡的汽化过程。

沸腾传热：物质由液态变为气态时发生的换热过程。

按流动动力分：

大容器沸腾(池沸腾)和 强制对流沸腾(管内沸腾)。

从主体温度分：

a) **过冷沸腾**：指液体主体温度低于相应压力下饱和温度，壁面温度大于该饱和温度所发生的沸腾，称过冷沸腾。

b) **饱和沸腾**：液体主体温度达到饱和温度，壁面温度高于饱和温度所发生的沸腾称为饱和沸腾。

大容器饱和沸腾的全部过程，共包括4个换热规律不同的阶段：

自然对流、核态沸腾、过渡沸腾和稳定膜态沸腾。 其特点：温差小，换热强度大，工业设计中应用该段。

影响沸腾传热的因素：1 不凝结气体；2 过冷度；3 液位高度；4 重力加速度；5 沸腾表面的结构。

第八章 热辐射基本定律及辐射特性

可见光， $0.38—0.76\ \mu\text{m}$ 。 $0.76—1000\ \mu\text{m}$ 为红外线区域。工业上有实际意义的热辐射区域一般为 $0.1—100\ \mu\text{m}$ 。

物体对热辐射的吸收、反射和穿透 $\alpha + \rho + \tau = 1$

对于大多数的固体和液体： $\tau = 0, \alpha + \rho = 1$

对于不含颗粒的气体： $\rho = 0, \alpha + \tau = 1$

对于黑体： $\alpha = 1$

镜体或白体： $\rho = 1$

透明体： $\tau = 1$

黑体、白体和透明体的定义是针对全波长而言的，由于可见光只占整个波长的一小部分，故物体对辐射能量的吸收能力的大小不能凭物体的颜色来判断。

反射又分镜反射和漫反射两种。

辐射力：单位时间内，物体的单位表面积向半球空间发射的所有波长的能量总和。 (W/m^2)；

光谱辐射力：单位时间内，单位波长范围内(包含某一给定波长)，物体的单位表面积向半球空间发射的能量。 (W/m^3)；

立体角：球面面积除以球半径的平方称为立体角，单位：sr(球面度)。

定向辐射强度：单位时间内，物体在垂直发射方向的单位面积上，在单位立体角内发射的一切波长的能量。

1) Planck定律(第一个定律)：描述了黑体辐射能按波长的分布规律。

$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1}$$

λ_m 与T的关系由Wien位移定律： $\lambda_m T = 2.8976 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

2) Stefan-Boltzmann定律： $E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4$

3) Lambert 定律： $\frac{d\Phi(\theta)}{dA d\Omega} = I \cos \theta$



➤ 黑体的辐射力由斯忒藩-玻耳兹曼定律确定，辐射力正比于热力学温度的四次方；

黑体的辐射能量按波长的分布服从普朗克定律；

黑体的辐射能量按空间方向的分布服从兰贝特定律；

黑体的光谱辐射力峰值所对应的波长由维恩位移定律确定。

➤ 发射率 (也称为黑度) ε ：相同温度下，实际物体的半球总辐射力与黑体半球总辐射力之比。

方向发射率 实际物体的定向辐射强度与黑体的定向辐射强度之比。

光谱发射率 实际物体的光谱辐射力与黑体的光谱辐射力之比。

漫射体：表面的方向发射率与方向无关，即定向辐射强度与方向无关的物体。

灰体：光谱吸收比与波长无关的物体称为灰体。

实际物体的辐射特性并不完全与这些理想物体相同，实际物体的辐射力并不完全与热力学温度的四次方成正比；实际物体的定向辐射强度也不严格遵守Lambert定律，等等。

选择性吸收：投入辐射本身具有光谱特性，因此，实际物体对投入辐射的吸收能力也根据其波长的不同而变化，这叫选择性吸收。

吸收比：物体对投入辐射所吸收的百分数，通常用 α 表示，即

$$\alpha = \frac{\text{吸收的能量}}{\text{投入的能量(投入辐射)}}$$

Kirchhoff 定律的不同表达式

| 层 次 | 数学表达式 | 成立条件 |
|--------|--|--------------------|
| 光谱，定向 | $\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha(\lambda, \theta, \varphi, T)$ | 无条件， θ 为天顶角 |
| 光谱，半球 | $\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$ | 漫射表面 |
| 全波段，半球 | $\varepsilon(T) = \alpha(T)$ | 与黑体处于热平衡或对漫灰表面 |

第九章 辐射传热的计算

角系数：把表面1发出的辐射能中落到表面2上的百分数称为表面1对表面2的角系数，记为 $X_{1,2}$ 。

角系数的性质：

1. 角系数的相对性

$$A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$$

2. 角系数的完整性

$$X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + \cdots + X_{1,n} = 1$$

3. 角系数的可加性

$$X_{1,2} = X_{1,2a} + X_{1,2b} \quad X_{2,1} = X_{2a,1} \frac{A_{2a}}{A_2} + X_{2b,1} \frac{A_{2b}}{A_2}$$

角系数的计算方法：直接积分法、几何分析法

代数分析法：三个表面组成的封闭系统

$$X_{1,2} = \frac{A_1 + A_2 - A_3}{2A_1} \quad X_{1,3} = \frac{A_1 + A_3 - A_2}{2A_1} \quad X_{2,3} = \frac{A_2 + A_3 - A_1}{2A_2}$$

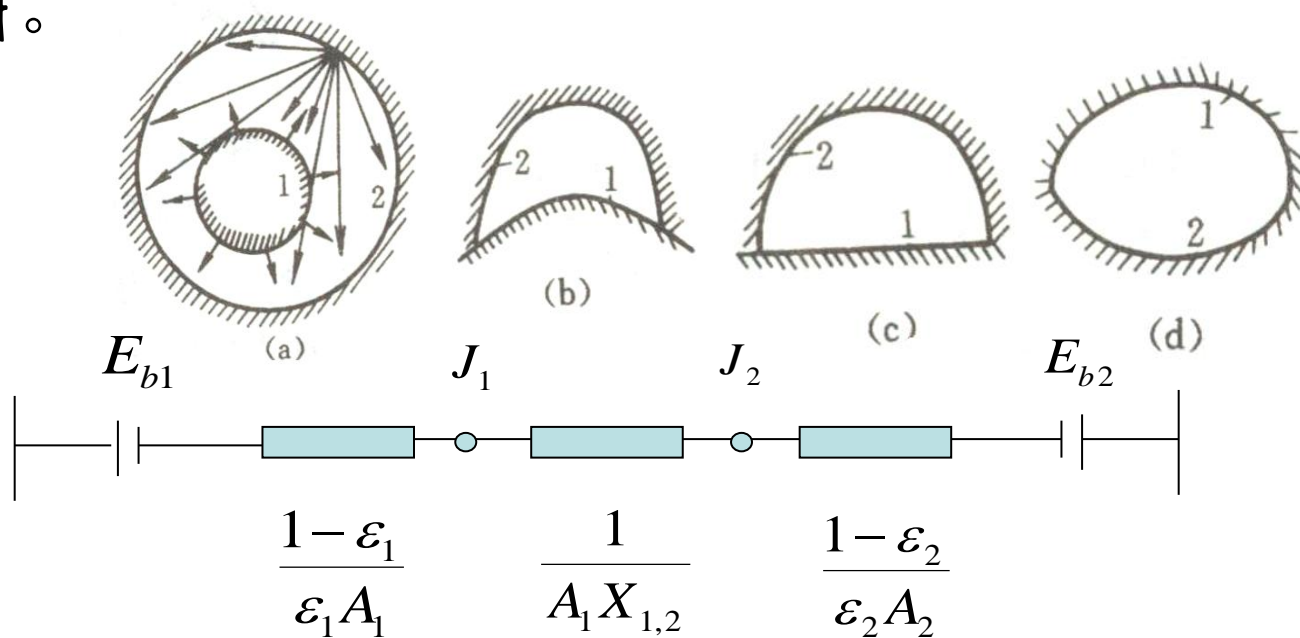
任意两个非凹表面间的角系数（交叉线法）

$$X_{1,2} = \frac{\text{交叉线之和} - \text{不交叉线之和}}{2 \times \text{表面} A_1 \text{的断面长度}}$$

两漫灰表面组成的封闭系统的辐射换热计算

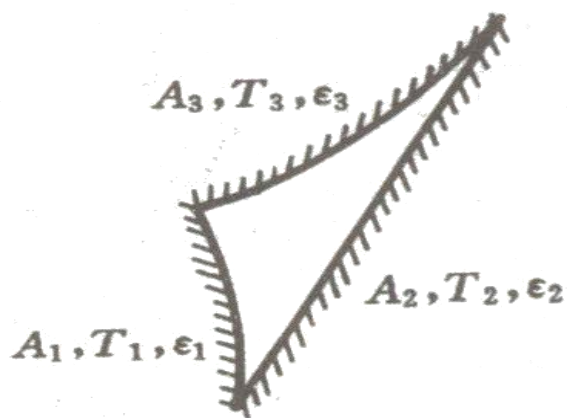
1) 投入辐射：单位时间内投射到单位面积上的总辐射能。

2) 有效辐射：单位时间内离开单位面积的总辐射能为该表面的有效辐射。

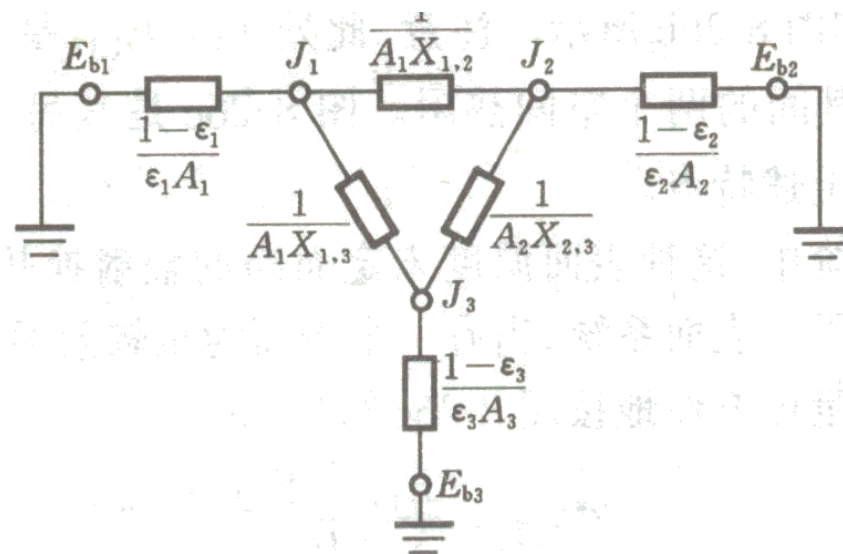


$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

多表面系统的辐射传热



(a) 由三个表面组成的封闭系统



(b) 三表面封闭腔的等效网络图

强化辐射传热的主要途径有两种：增加发射率；增加角系数。
削弱辐射传热的主要途径有三种：降低角系数；降低发射率；加入遮热板。

第十章 传热过程分析与换热器计算

传热过程：一侧的热流体通过固体壁面把热量传给另一侧冷流体的过程。

传热过程分析求解的基本关系为传热方程式， $\Phi = kA(t_{f1} - t_{f2})$

1. 通过平壁的传热过程计算 $\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\delta}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A}} \quad k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$

2. 通过圆筒壁的传热过程计算 $q_l = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 \pi d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{h_2 \pi d_2}} = k_l(t_{f1} - t_{f2})$

3. 通过肋壁的传热：肋面总效率 $\eta_o = \frac{(A_1 + \eta_f A_2)}{A_o}$

肋化系数 $\beta = A_o / A_i$

传热系数 $k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_o \eta_o \beta}}$

在表面传热系数较小的一侧采用肋壁是强化传热的一种行之有效的办法。

临界热绝缘直径

$$d_{cr} = \frac{2\lambda}{h_o}$$

1. 当裸管的外径 $> d_{cr}$ 时，保温层越厚，保温效果越好
2. 当裸管的外径 $< d_{cr}$ 时，保温层厚度要超过某一厚度后才起作用。
3. 要考虑较小的 λ 的保温材料，使 d_{cr}

通常将导热系数 λ 值小于 $0.14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 的材料称为隔热材料。

换热器：把热量从热流体传递给冷流体的热力设备。

按换热器操作过程分为：间壁式、混合式及蓄热式(或称回热式)三大类。在三类换热器中以间壁式换热器应用最广。

对数平均温差：

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}$$

算术平均温差：

$$\Delta t_{m, \text{算术}} = \frac{\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}}{2}$$

复杂布置时换热器平均温差：

$$\Delta t_m = \psi(\Delta t_m)_{ctf}$$

增强传热的方法

- (1) 扩展传热面
- (2) 改变流动状况
- (3) 使用添加剂改变流体物性
- (4) 改变表面状况
- (5) 改变换热面形状和大小
- (6) 改变能量传递方式
- (7) 靠外力产生振荡，强化换热