

# 第 6 章

## 传热机理与传热速率方程

### 6.1 引言

### 6.2 热传导

### 6.3 对流与对流传热

### 6.4 热辐射

# 6.1 引言

- 传热学是研究热量传递的普遍规律及其工程应用的一门科学。
- 只要存在温度差，热量将自发地从高温物体传向低温物体，是典型的不可逆过程。
- 由于温度差在自然界、工业生产以及日常生活中普遍存在，所以热量传递无疑是世界上存在最普遍、发生最频繁的物理现象。

我国的经济已经连续 20 多年保持高速发展，总量已经跻身世界前列。但是我们也为此付出了非常高昂的能源、资源和环境代价。在各工业产业领域，如能源、冶金、化工、建筑、建材、交通，乃至机械、轻工等行业中，我国的单位产值能耗比发达国家高得多。

- 为了经济的可持续发展，必须把**节能和减排**放在首要地位。

# 研究内容

---

- 研究**热量**传递规律及控制和优化**热量**传递过程方法的科学。
- **热量**：在**温差**作用下传递的**热能**的数量。
- **热能**：**热力学能**。据统计，目前我国，通过热能形式被利用的能源占总能源利用的90%以上，世界各国平均超过85%。
- 热能传递过程的动力：**温差**

# 传热学中连续介质的假定

---

- 假定：所研究的物体中温度、密度、速度、压力等物理参数都是空间的连续函数。
- 气体：只要被研究物体的几何尺寸远大于分子间的平均自由程，连续介质的假设即成立。

说明：一个大气压、常温下空气分子的平均自由程约为 $0.07\mu\text{m}$ 。由此可见，除非研究到微米级别几何尺度的热量传递现象，或者高空极其稀薄气体热量传递问题，常规尺度的物体都满足这一假定。

# 传热学与工程热力学的关系

---

热力学+传热学=热科学

- **热力学**：系统从一个平衡态到另一个平衡态的过程中传递热能的多少。

温度 $t_m$ , 热量 $Q$

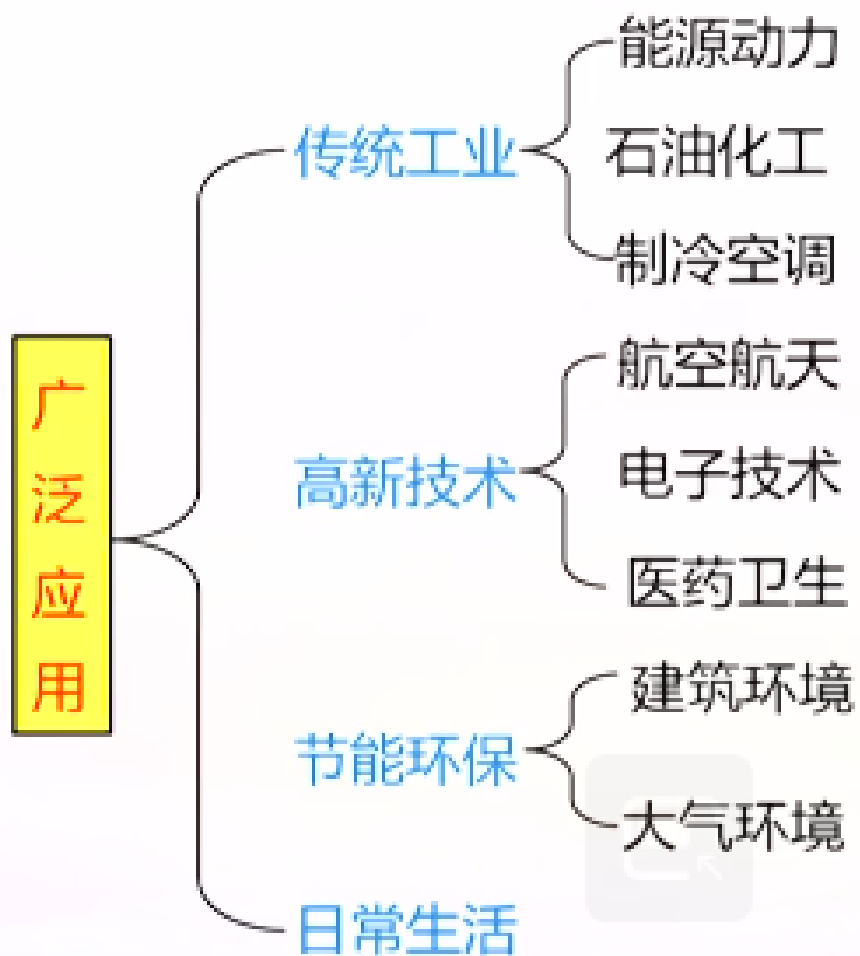
- **传热学**：热能传递的过程，热量传递的速率。

温度 $t(x, y, z, \tau)$ , 温度随时间和空间的变化

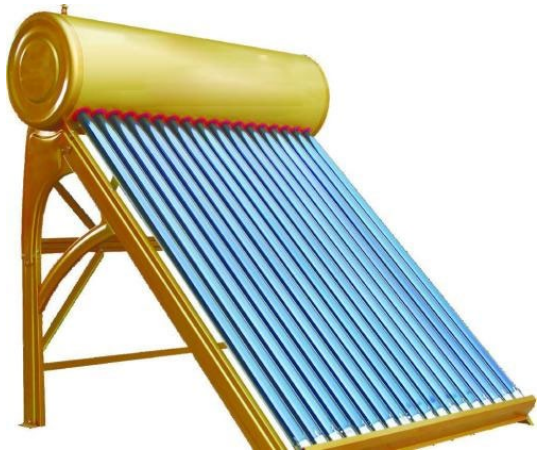
热量 $Q = f(\tau)$ , 热量随时间的变化

传热学以热力学第一定律和热力学第二定律为基础，即热量始终从高温热源向低温热源传递，如果没有能量形式的转化，热量始终是守恒的。

# 传热学应用领域



- 日常生活



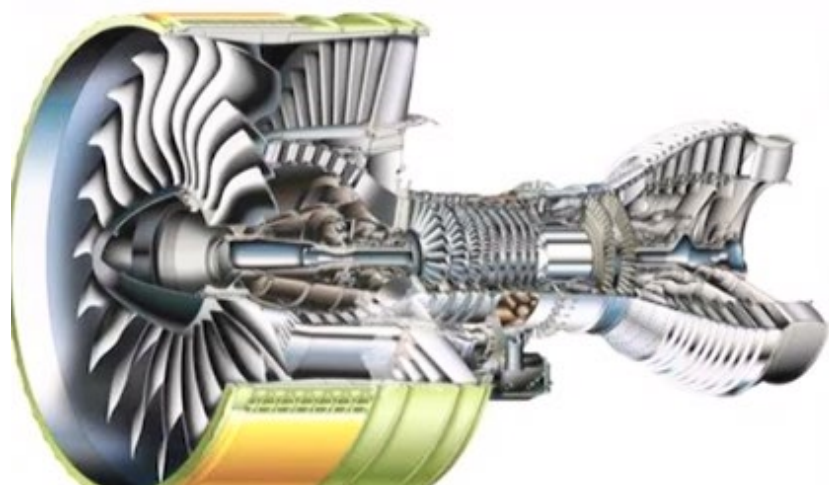


- 传统工业

能源与动力是传热学最主要的应用领域



热力发电厂



燃气轮机叶片冷却

- 高新技术

## 电子技术

随着大规模集成电路技术的迅速发展，电子芯片单位面积的功率逐渐增加，散热问题已经成为电子技术发展的关键问题



电脑主板



CPU芯片

- 节能环保

## 建筑环境

供热通风空调和燃气产品的开发、设计和实验研究

建筑物的热工计算和环境保护

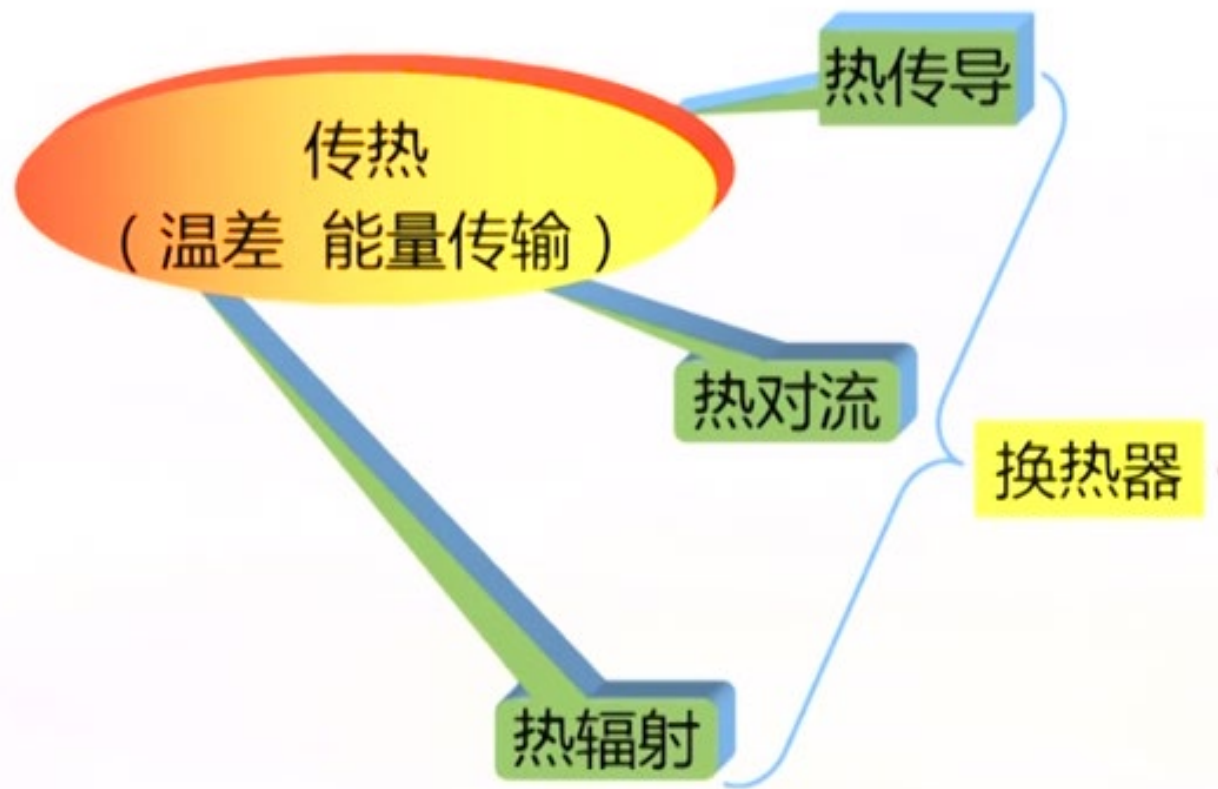
各种供热、供冷设备管道的保温、隔热材料及建筑围护结构材料等的研制及其热物理性质的测试、热损失的分析计算

# 科学技术中三种类型的传热问题

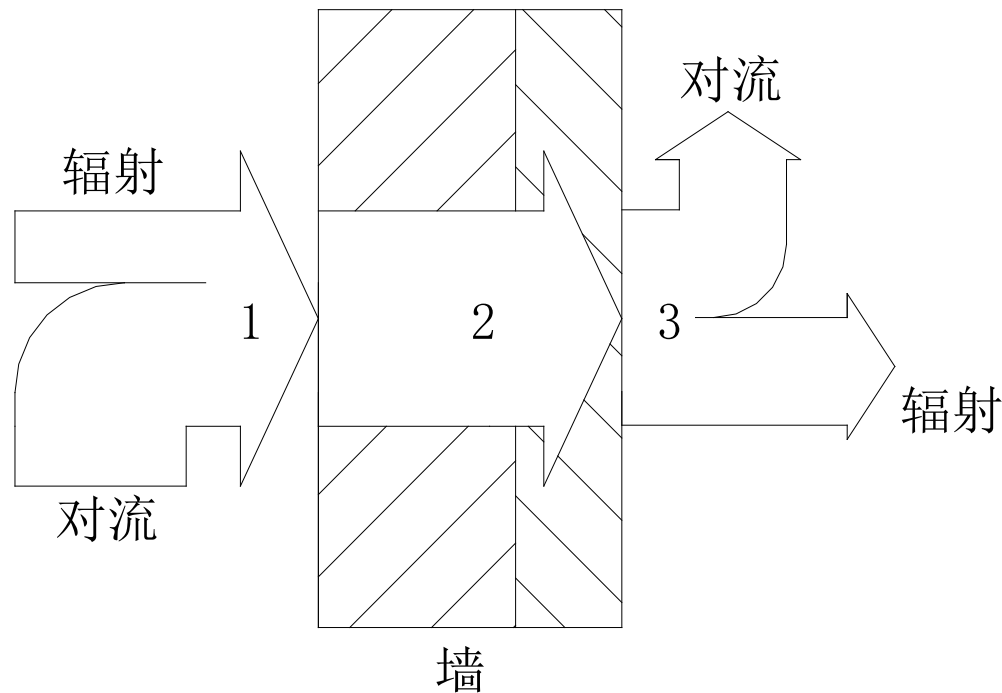
---

- **强化传热**：在一定的条件下增加所传递的热量
- **削弱传热**：或称为热绝缘，在一定的温度下使热量的传递减到最小
- **温度控制**：为了使一些设备能够安全经济运行，或者为了得到优质产品，对热量传递中物体关键部位的温度进行控制

# 传热的三种基本方式



传热学的课程体系



墙壁在冬季的散热。整个过程可以分为三段。

1. 热量由室内的空气以对流传热、墙与室内物体间的辐射传热方式传热给墙内表面；
2. 墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面；
3. 墙外表面以空气对流传热、墙与室外物体间的辐射方式把热量传给室外的环境。

- 三种基本传热方式，有不同的传递机理和热流速率方程。求解各种传热问题时，必须遵循这些机理和热流方程。
- 能量（热量）守恒定律也不可或缺。

一切传热问题都必须在这两类基本规律的指导下求解。能量守恒定律是贯穿传热学始终的基本规律。

- 分析物体的传热现象时，必须注意区分所取的研究对象是一个控制容积还是一个控制表面，这两者的能量守恒关系存在原则性的差别。

- 控制容积的瞬时能量守恒原则是：

**进入**控制容积的热流量 - **流出**控制容积的热流量 + 控制容积中**内热源**的瞬时热功率 = 控制容积中**储热量的增加速率**

- 表面不具备蓄热能力，针对控制表面的能量守恒关系中体积蓄热项将不存在（面热源项仍可以存在），即：如果没有内热源的话，进出热流量将随时保持相等。



## 6.2 热传导

### 6.2.1 傅里叶定律：导热热流速率方程

#### • 连续介质假设

只有在密实的固体中才发生纯导热，如果是多孔材料，那么传热过程中一般将同时伴随有对流和辐射。

发生热传导的两个物体必须直接接触。

● **导热**，也称为**热传导**，是指具有较高能级的粒子向较低能级的粒子传递能量的过程，它是一种建立在物质微观粒子随机运动基础上的扩散行为。

● 导热的特点：

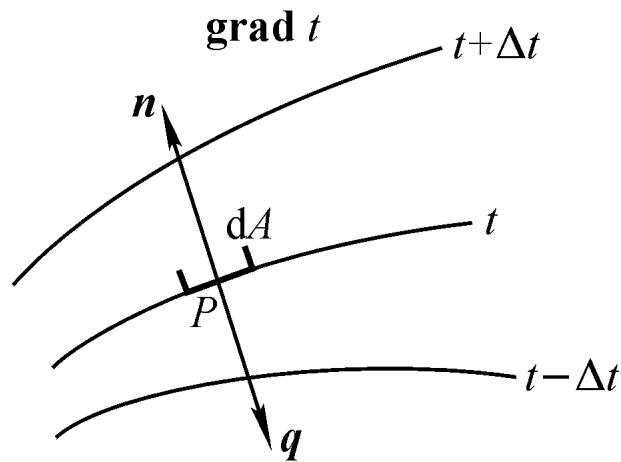
- ✓ 必须有温差
- ✓ 物体直接接触
- ✓ 在引力场的作用下，**单纯的**导热一般只发生在密实的固体中

● **导热是物质的属性，导热过程可以在固体、液体和气体中发生。**

- 常用术语、概念

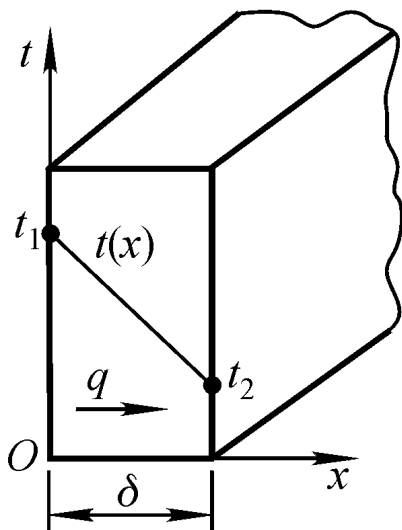
温度场，温度梯度，稳态温度场，非稳态温度场  
或 瞬态温度场，一维温度场，等温面，等温线  
等。

等温线（面）的基本性质。



- 物体内部任意点  $P$  温度变化率最大的方向位于等温线的法线方向上。称该最大温度变化率为温度梯度，记做  $\text{grad } t$

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n} \mathbf{n} = \frac{\partial t}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial t}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial t}{\partial z} \mathbf{k}$$



- 通过大平壁的热流量（传热速率）与两侧表面的温度差和传热面积成正比，而与平壁的厚度成反比

$$\Phi = qA = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{\lambda}{\delta} A \Delta t$$

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad \text{或者} \quad q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

- 该式称为 傅里叶定律。

式中： $q$  为导热的热流密度，表示通过单位导热面积的导热热流量， $\text{W}/\text{m}^2$ ； $\lambda$  是壁面的导热系数，表明材料导热能力的大小， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

式中负号仅用来表示热量传递的方向永远和温度梯度  $dt/dx$  的正方向相反。

传热面积  $A$  必须与传热方向垂直，或是传热方向上的投影面积。

# 一维稳态导热及导热热阻

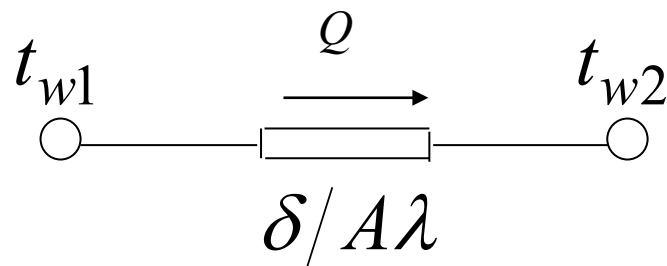
类比于欧姆定律

$$Q = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{t_1 - t_2}{\delta / \lambda A} = \frac{t_1 - t_2}{R_\lambda}$$

✓ 热流相当于电流

✓ 温差相当于电位差

✓ 热阻相当于电阻



✓ 对于不同的传热方式，热阻  $R_\lambda$  的表达是不一样的。如上面的大平壁导热，热阻就表示为：

$$R_\lambda = \delta / \lambda \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}$$

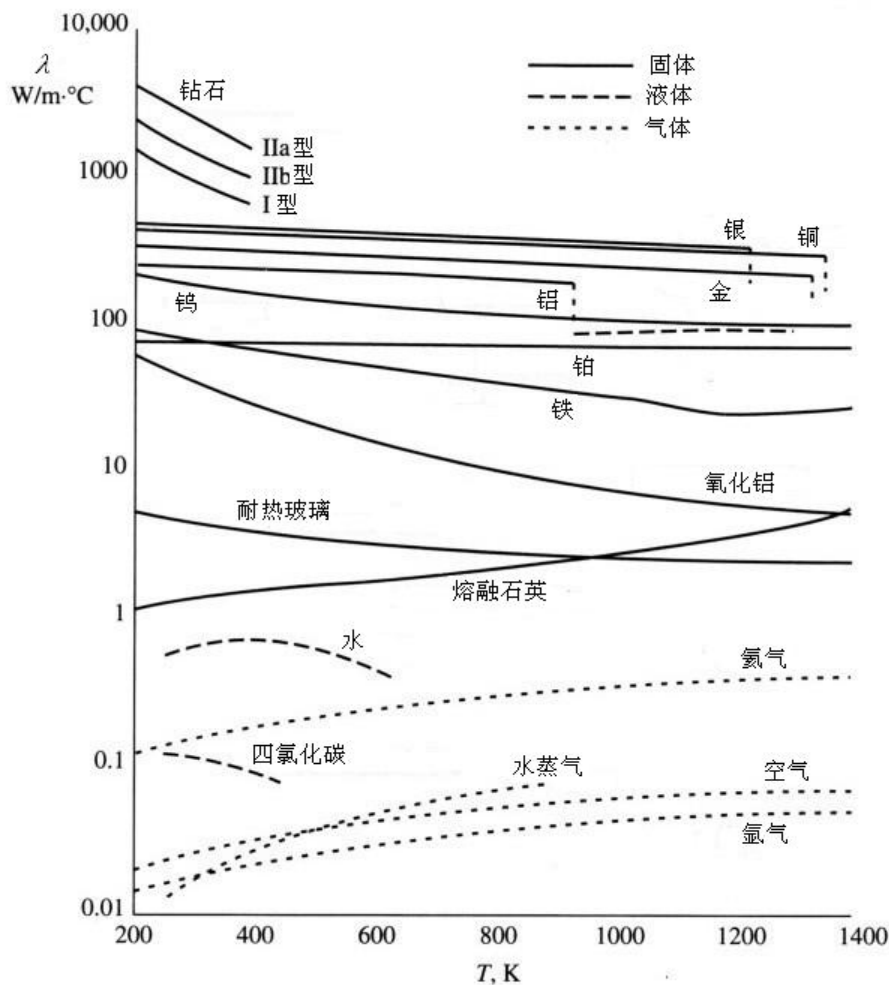
热阻是物性参数吗？

## 6.2.2 导热系数和热扩散率

材料的热物性分成两大类：

- 一类是热力学性质，指系统所处的平衡状态参数，如密度、比热容等；
- 一类是输运性质，像导热系数以及动量扩散率等。

在传热学中这两类性质均会用到，后者尤其显得重要。



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

- 不同材料的导热系数差别很大，而且物质的纯净程度以及物理状态的变化（密度、温度、压力、含湿量等）有所不同。
- **保温材料**，或称**隔热材料**受到特别关注。国家标准规定，平均温度在350°C以下时，导热系数不超过  $0.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的才称为保温材料。实际应用中一般经常选用导热系数在  $0.07 \sim 0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。
- **航天工程与超低温中的超级绝热材料表观导热系数** 只有  $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，且一般具有各向异性的特点。



- 材料导热系数随温度的变化可表示为以下的线性函数：

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bt)$$

$\lambda_0$  代表0°C时材料导热系数的理论值， $b$  表示导热系数的温度变化率。

导热系数与材料的种类和温度有关

25

- 热扩散率，也称为导温系数。表示在加热或冷却过程中物体内部温度趋于均匀一致的能力，单位是  $\text{m}^2/\text{s}$ ：

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

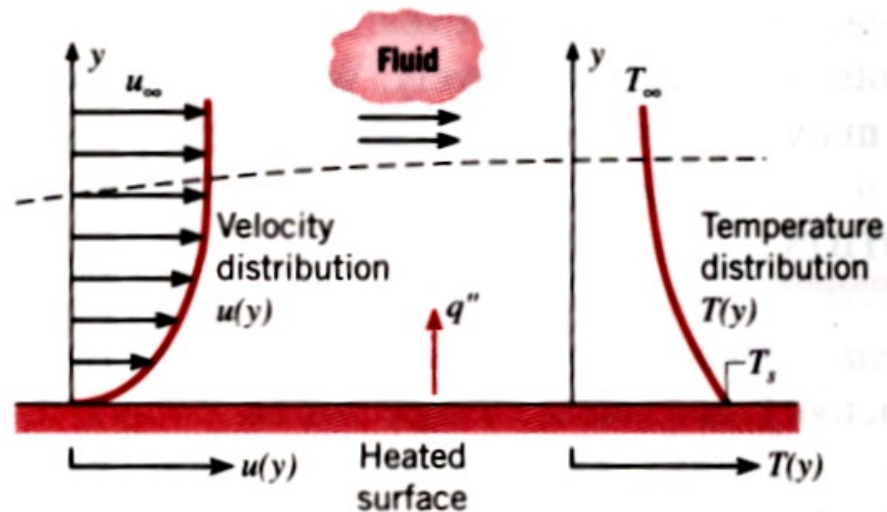
- 在稳态导热问题中  $a$  不会出现，但在非稳态导热问题中它非常重要。

25

## 6.3 对流与对流换热

**热对流定义：**流体中温度不同的各部分之间，由于发生相对宏观运动而把热量由一处传递到另一处的现象，是热量传递的另一种**基本方式**。

**特点：**只发生在流体中，并伴随有微观粒子热运动而产生的导热



# 热对流

---

$$q = mc_p (t_2 - t_1) \quad (W / m^2)$$

- ✓ 单位面积是指垂直于流动方向的面积
- ✓ 流体与周围流体及流体内部存在相互混合或者通过分子、原子等微观粒子热运动而进行的热传递过程

**热对流发生在流体的内部**

# 对流传热

在工程上遇到的实际传热问题，都是流体与固体直接接触时的传热，故传热学把流体与固体间的传热称为对流传热。

**定义：**流体流过一个物体表面时的热量传递过程。

**特点：**

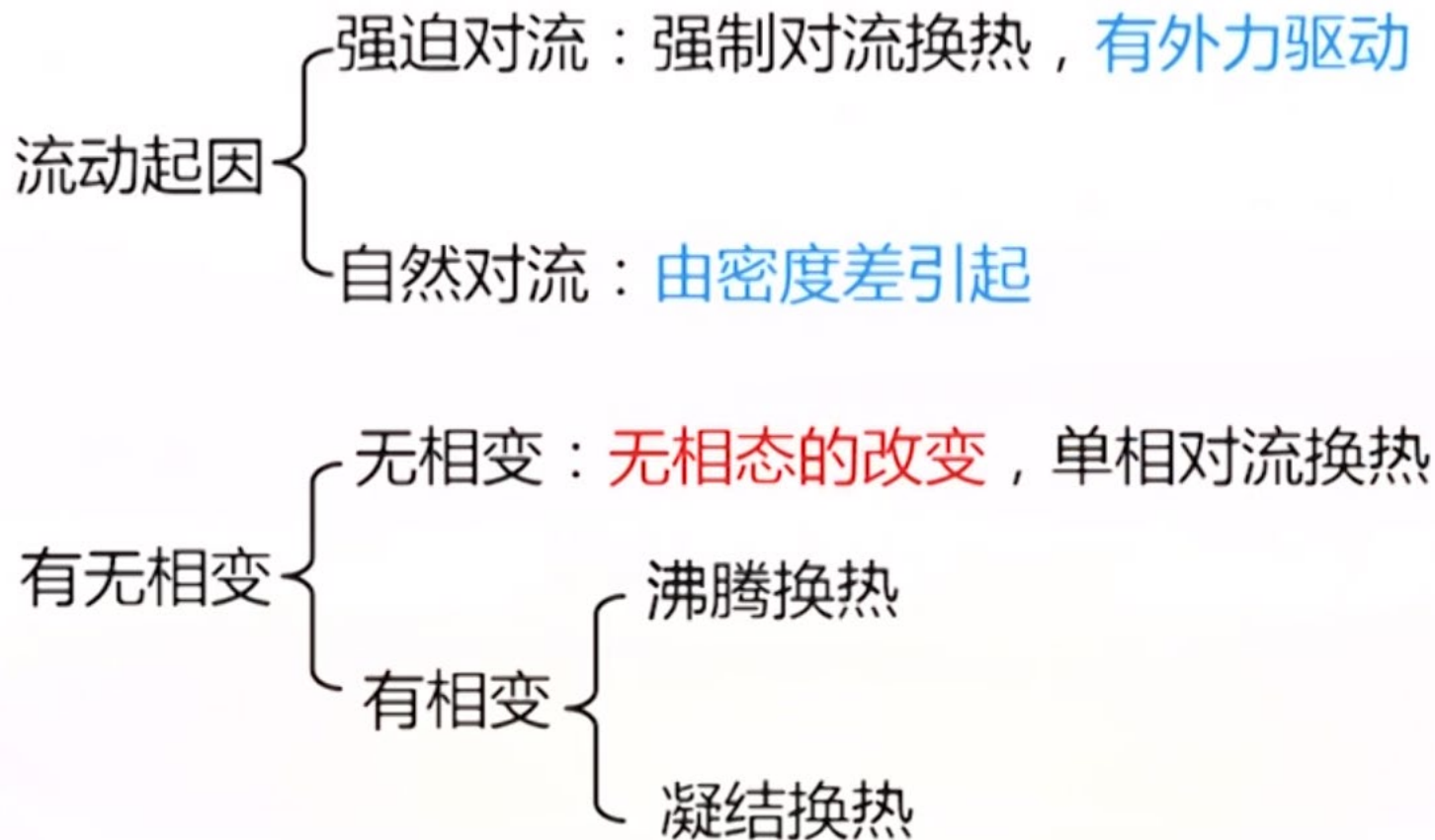
- 导热（流体内部，不是固体内部）与对流同时存在的复杂热传递的过程
- 必须有直接接触（流体与壁面）和宏观运动
- 壁面处会形成速度梯度很大的边界层。

**不是**基本传热方式

对流换热是导热和热对流两种传热方式联合作用的结果

# 对流换热分类

---



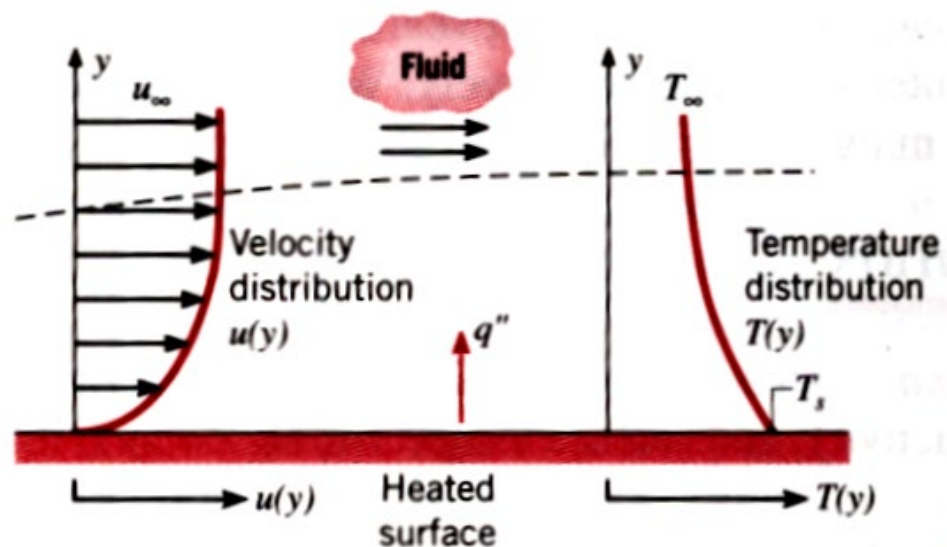
# 牛顿冷却公式

$$q = h(t_w - t_f) = h\Delta t \quad \text{W/m}^2$$

$t_w$ —固体表面的温度，K

$t_f$ —流体温度，K

$h$ —表面传热系数，  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ，



# 表面传热系数

---

$h$ —表面传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

**物理意义:** 指单位面积上, 当流体同壁面之间为单位温差, 在单位时间内所能传递的热量。它的大小决定了该对流传热过程的强弱。

**特点:** 不是物性参数, 与过程密切相关

**影响因素:** 流体的物性

- ✓ 流动状态 (层流、湍流)
- ✓ 流动起因 (强制对流、自然对流)
- ✓ 换热表面的形状、大小与布置
- ✓ 流体有无相变 (凝结换热、沸腾换热)

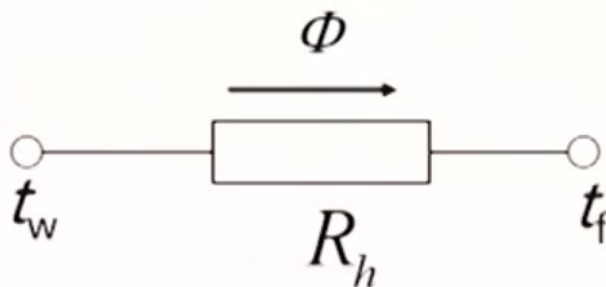
# 对流传热热阻

$$\Phi = hA(t_w - t_f) = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{hA}} = \frac{t_w - t_f}{R_h}$$

$R_h = \frac{1}{hA}$  称为对流换热热阻，单位为K/W。

$$R_c = 1/h \quad \text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

对流换热等效电路图：





## 表面传热系数大致范围

过程		[W/(m <sup>2</sup> .K)]
自然对流	空气	1 ~ 10
	水	200 ~ 1000
强制对流	气体	20 ~ 100
	高压水蒸气	500 ~ 3500
	水	1000 ~ 15000
水的相变换热	沸腾	2500 ~ 35000
	蒸汽凝结	5000 ~ 25000

## 6.4 热辐射

**热辐射**指物质内部因微观粒子的热运动而激发出来的电磁波（或光子）能量。

• **特点：**

- ✓ 任何物体，只要温度高于0K，就会不停地向周围空间发出热辐射
- ✓ 具有强烈的方向性
- ✓ 辐射能与温度和波长有关

- 导热或对流以冷、热物体的直接接触来传递热量
- 热辐射依靠物体表面对外发射可见和不可见的射线（电磁波，或者说光子）传递热量

# 辐射换热研究方法

---

**研究方法:** 假设一种黑体，只关心辐射换热的共性规律，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。

**黑体:** 能吸收投入到其表面上的所有热辐射的物体，包括所有的方向和波长。相同温度下，黑体的吸收能力最强。

# 黑体辐射力

Stefan-Boltzmann定律:

➤对于绝对黑体, 有:

$$q_b = \sigma T_b^4$$

$q_b$ —绝对黑体辐射力,  $\text{W}/\text{m}^2$

$\sigma$ —绝对黑体辐射系数,  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$T$ —热力学温度,  $\text{K}$

投射辐射: 受射表面单位面积上接受到的辐射热。

黑体不仅具有最高发射能力, 同时也具有最高的吸收能力, 它吸收全部外来的投射辐射能量

# 实际物体辐射力

- 一切实际物体的辐射能力都低于同温度下绝对黑体的辐射力：

$$q_b = \varepsilon_b \sigma T_b^4$$

- $\varepsilon_b$ 是实际物体表面的发射率，称为黑度，其值处于0~1之间。
- 表面发射率的影响因素：物质种类、表面温度、表面状况（金属抛光）

实际物体表面只能吸收外来投射辐射中的一部分

吸收比  $\alpha$ ：外来投射辐射中被吸收的份额

- 辐射热交换

- 辐射热平衡 : 两物体表面温度相等, 发射和吸收过程仍在进行, 但其净交换量为零。

- 物体表面与其环境之间的辐射热交换

$$q = \varepsilon \sigma \left( T_w^4 - T_{\text{sur}}^4 \right)$$

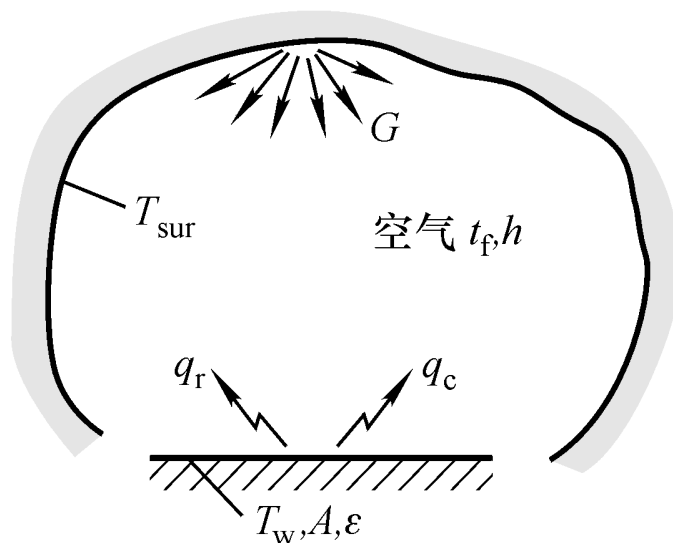
- 复合换热 或称 综合换热

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_c = A\varepsilon\sigma \left( T_w^4 - T_{\text{sur}}^4 \right) + h_c A \left( T_w - T_f \right)$$

$$\Phi = (h_r + h_c) A \left( T_w - T_f \right) = h A \left( T_w - T_f \right)$$

$h$  称为复合换热表面传热系数,  $h_r$  则称为 辐射换热的表面传热系数。

$$h_r = \varepsilon \sigma \left( T_w^4 - T_{\text{sur}}^4 \right) / \left( T_w - T_f \right)$$



# 热量传递的三种方式



注意：

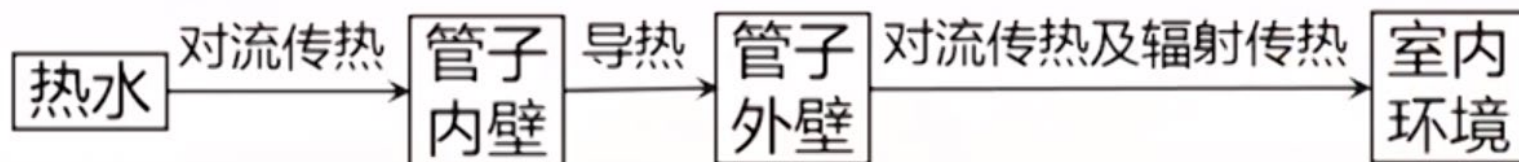
- 热传导、热对流和热辐射三种热量传递基本方式往往不是单独出现的；
- 分析传热问题时首先应该弄清楚有哪些传热方式在起作用，然后再按照每一种传热方式的规律进行计算。
- 如果某一种传热方式与其他传热方式相比作用非常小，往往可以忽略。

# 热量传递的三种方式

---

- 分析一个复杂的实际热量传递过程由哪些串联环节组成，以及在同一环节中有哪些热量传递方式起作用，是求解实际热量传递问题的基本功。

暖气片：





# 例题

- P173
- 例6-1
- 例6-2
- 例6-3

# 作业

- P176
- 思考题：6-5, 6-6, 6-9
- 习题：6-3, 6-5, 6-8