

《热工基础》

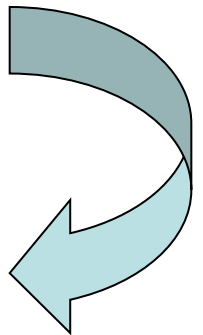
第二篇：传热学

Heat Transfer

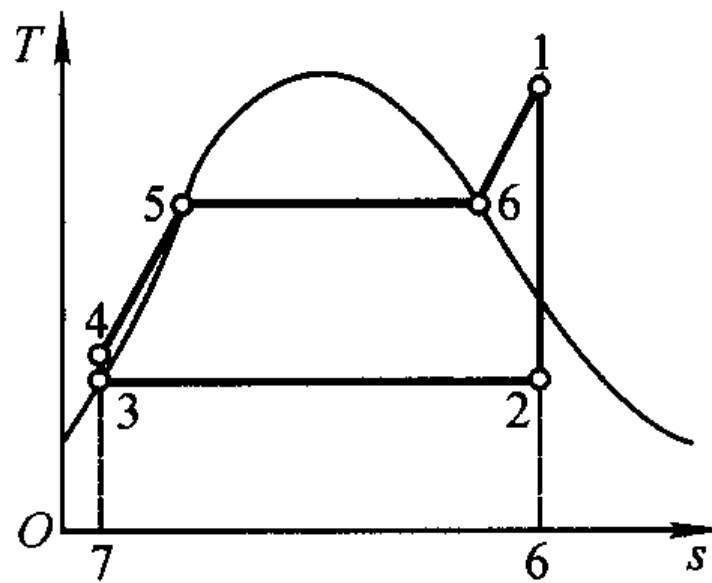
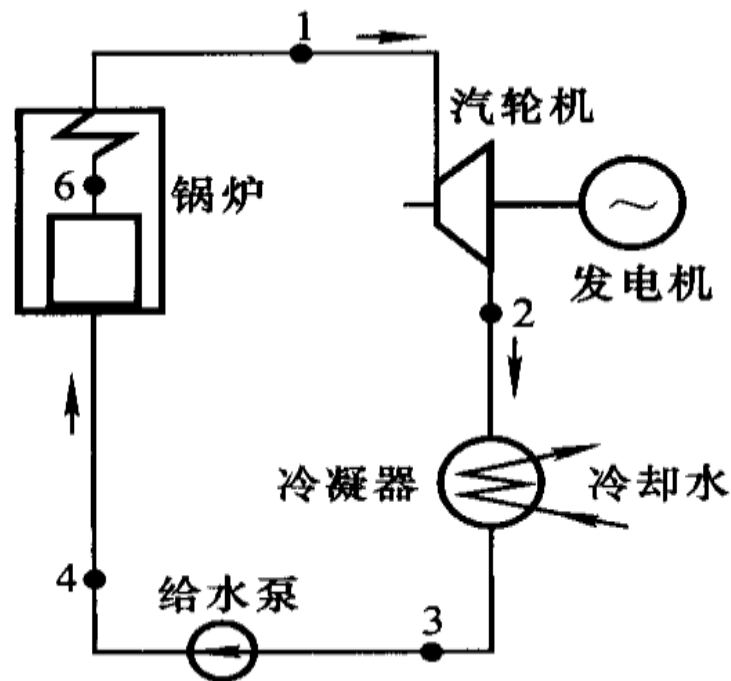
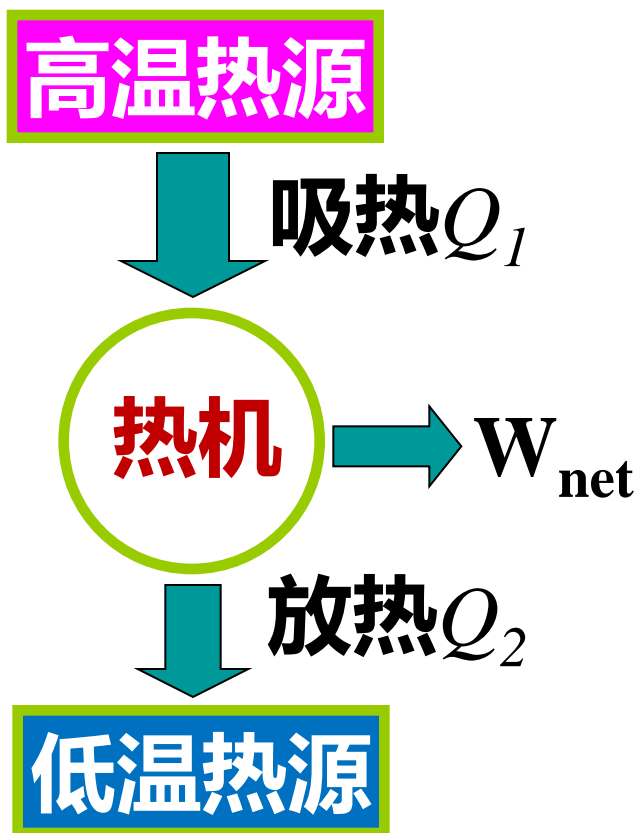
传热学概述

- 研究热量传递规律的一门科学
- 热量传递的机理、规律、计算和测试方法
- 热力学第二定律：热量可以自发地由高温热源传给低温热源。有温差就会有传热。

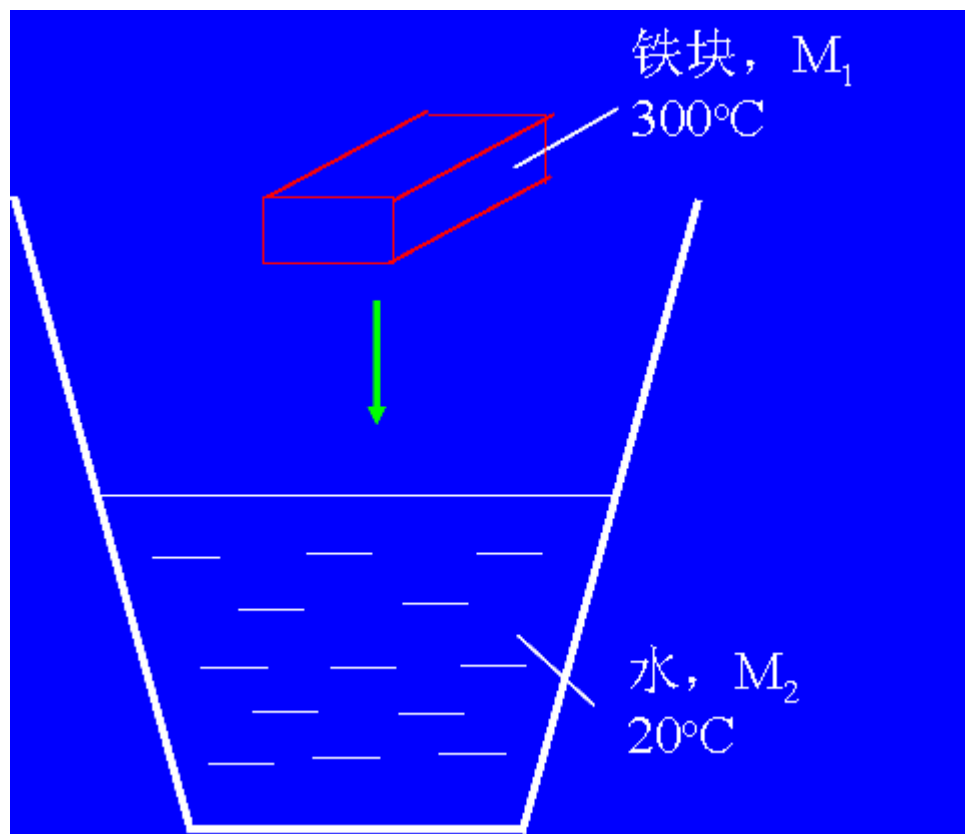
存在温差而发生的热能的转移



热能利用率和传热过程密切相关。



传热学与工程热力学研究的问题不同



热力学: T_m, Q

传热学:

$$T = f(x, y, z, \tau)$$

$$Q = f(\tau)$$

在下列技术领域大量存在传热问题

**动力、化工、制冷、建筑环境、机械制造、
新能源、微电子、核能、航空航天、
微机电系统 (MEMS)、新材料、纳米技术、
军事科学与技术、生命科学与生物技术...**

日常生活

- 1.人体为恒温体，若房间温度都是 20° ，那么在冬天和夏天在房间里穿的衣服能否一样？为什么？
- 2.夏天在同是 20° 的空气和水中，为什么感觉冷热不一样？
- 3.将一碗热粥放在一盆冷水里，为了使热粥冷的快点，是搅动热粥还是水？
- 4.一粗一细两个棍子，一端同时接触同一热源，另一端的温度变化哪个快？
- 5.把一杯热水和一杯冷水放进冰箱，哪一杯先结冰？
- 6.夏天在太阳底下，能否实现物体温度比环境温度还低？

传热学的研究内容与方法

- 传热学研究对象:

由于温度差所引起的能量传递过程，包括有相变和组分混合时伴随有物质迁移（传质）的能量传递过程

- 主要研究内容:

温度分布（对流换热问题还必须涉及速度分布）；热量传递的速率；传热的强化与弱化

- 分析方法:

宏观分析方法（理论分析，数值模拟，实验研究，比拟（类比）法）

- 学习传热学课程的主要目的:

掌握传热学的基本概念、基本理论与基本分析计算和实验研究方法，为后续专业课程及研究生课程的学习，为今后研究、处理、解决实际传热工程问题奠定必要的技术理论基础。

- 本课程不涉及传质内容

传热学的研究内容与方法

- **第八章 热量传递的基本方式**
- **第九章 热传导（稳态、非稳态、数值解基础）**
- **第十章 对流换热(强迫对流、自然对流、沸腾与凝结换热)**
- **第十一章 热辐射换热**
- **第十二章 传热过程与换热器**

第八章

热量传递的基本方式

Basic Modes of Heat Transfer

本章需掌握内容

基本概念：

- ① 热传导、热对流、热辐射三种热量传递基本方式的机理及特点
- ② 热流量、热流密度、导热系数、对流换热、表面传热系数、热阻等基本概念

知识运用：

- ① 平壁的一维稳态导热公式
- ② 对流换热的牛顿冷却公式

作 业

8-1

8-3

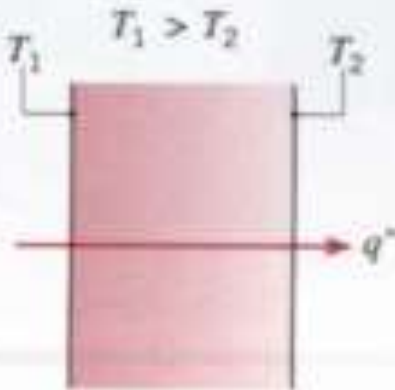

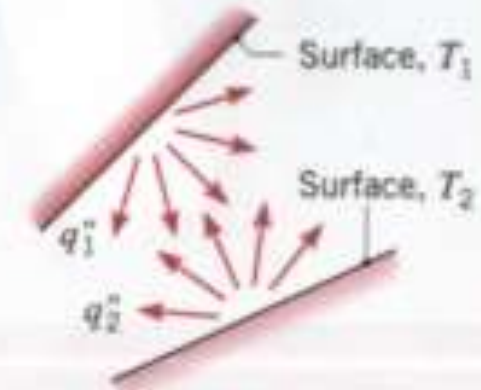
8-5

第八章 内容

- 8-1 热传导
- 8-2 热对流与对流换热
- 8-3 热辐射
- 8-4 传热过程

8-0. 热量传递的基本方式

基本方式：热传导；热对流；热辐射

Conduction through a solid or a stationary fluid	Convection from a surface to a moving fluid	Net radiation heat exchange between two surfaces
		

热传导（导热）

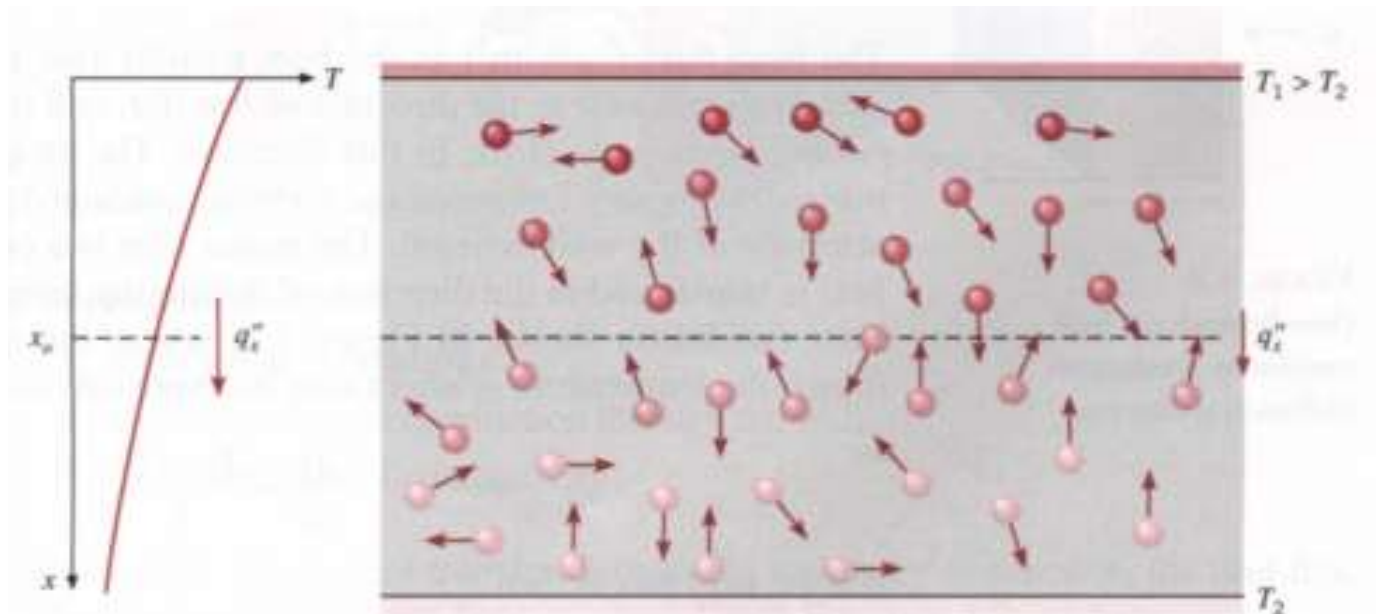
对流换热

辐射换热

8-1.热传导 (heat conduction)

热传导的定义

在物体内部或相互接触的物体表面之间，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现象，简称导热。



热传导的特点

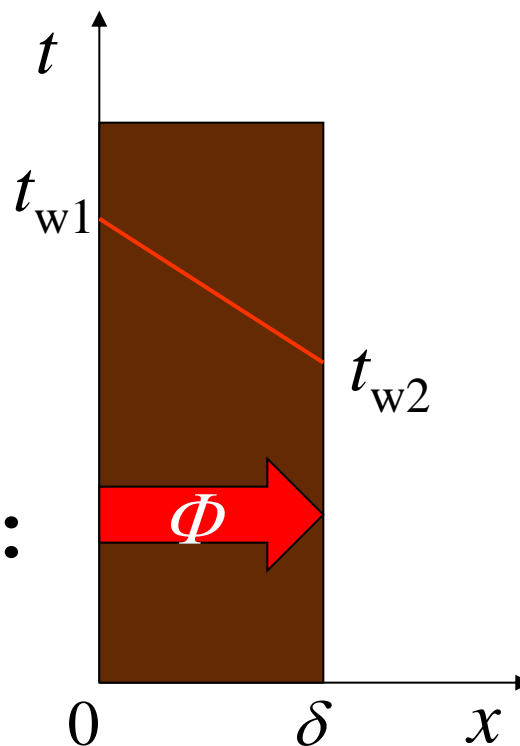
1. 依靠热传导，热量由高温传向低温；
2. 可以发生在固体和静止流体中，在运动流体中同样存在；
3. 参与导热的各部分（或不同物体）应直接接触。

导热基本定律：Fourier-Biot定律

- Biot (1804) 根据实验结果得出;
- Fourier (1807) 在实验基础上, 加以理论概括;
- 一般称之为Fourier定律。

对如图所示的大平壁, Biot提出:
热流量

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



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

一维稳态导热，热流量 Φ (单位时间传递热量, W):

- 与平壁表面面积 A 及两侧表面的温差 $t_{w1} - t_{w2}$ 成正比;
- 与平壁厚度 δ 成反比;
- 与平壁材料的导热性能 λ 有关。

热导率 λ , W/(m·K):

- 或称导热系数，反映材料的导热能力，热导率愈大，材料导热能力愈强，是物性参数。

热导率 λ , $W/(m \cdot K)$:

- **或称导热系数, 反映材料的导热能力, 热导率愈大, 材料导热能力愈强, 是物性参数。**

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

$$\lambda_{\text{纯铜}} = 398 W/(m^{\circ}C);$$

$$\lambda_{\text{水}} = 0.6 W/(m^{\circ}C);$$

$$\lambda_{\text{空气}} = 0.026 W/(m^{\circ}C) \quad (20^{\circ}C)$$

热流密度 q

单位时间通过单位面积的热量，或单位面积的热流量， W/m^2

$$q = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

以微分形式表示：

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

注意：这里 q 的意义与热力学中不同。

称为一维导热的Fourier定律，其物理意义为： q 指向温度降低方向，大小与 λ 、 dt/dx 成正比。

温度： T （热力学）， t （传热学）

8-2. 热对流与对流换热

热对流(thermal convection)

简称对流，指由于流体的宏观运动，致使不同温度的流体相对位移而产生的热量传递现象——流体团块掺混。

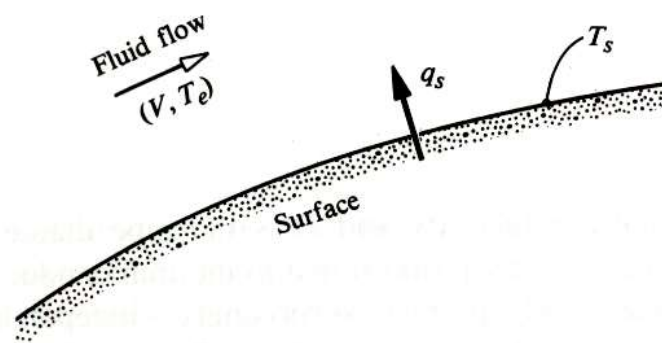
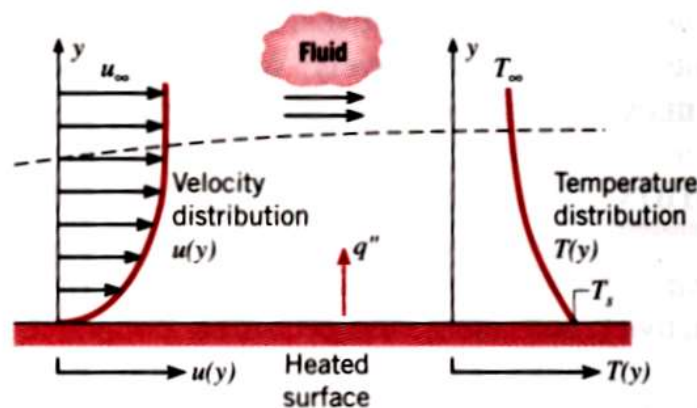
只发生在流体中，伴随有微观粒子热运动产生的导热。

对流换热(convective heat transfer)

流体与固体表面间的换热，是导热与热对流的综合作用。不属于基本传递方式。

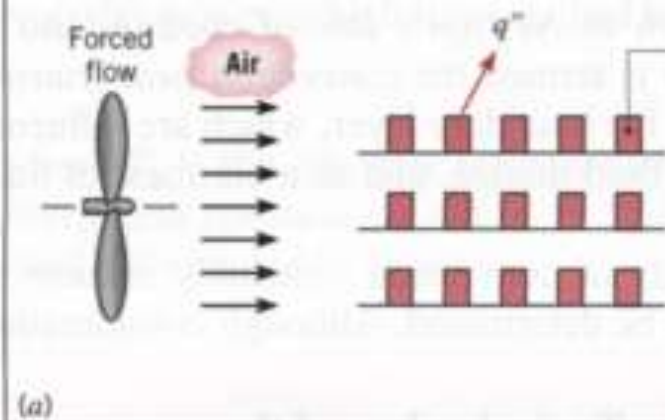
对流换热的特点

- (1) 流体流过固体表面时，粘滞力作用使紧贴物体表面的流体静止，热量传递只以导热方式进行；
- (2) 离开固体表面，流体有宏观运动，热对流方式将发生作用；
- (3) 流体与固体表面间的热量传递是导热和热对流两种基本传热方式共同作用的结果。

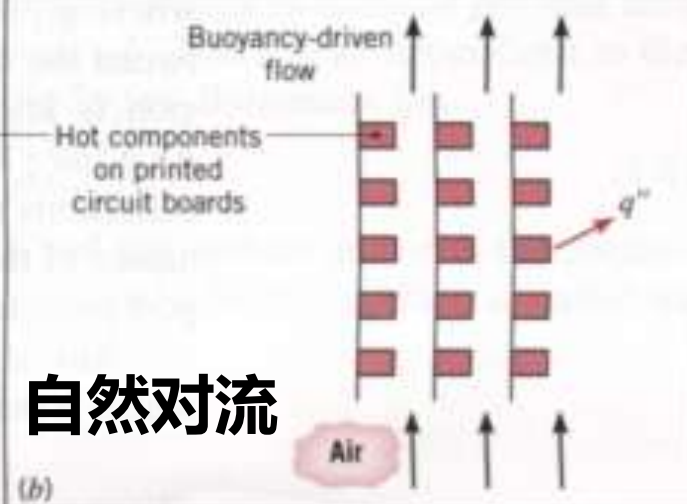


对流换热的分类

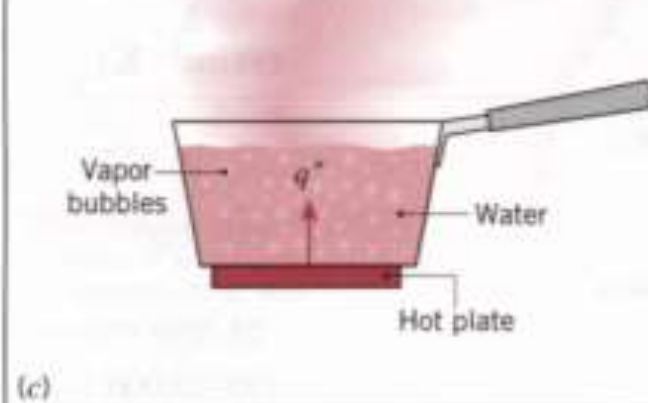
强迫对流



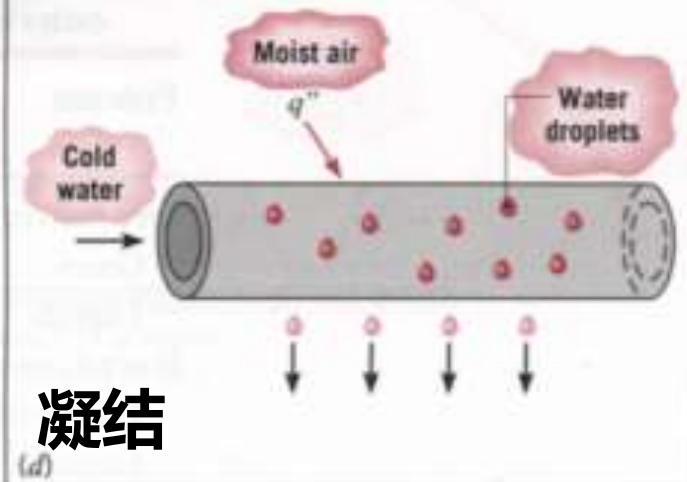
自然对流



沸腾



凝结



对流换热的Newton冷却定律 (1701年)

$$\Phi = Ah(t_w - t_f); \quad q = h(t_w - t_f)$$

t_w : 为壁面温度; t_f 为流体温度;

h : **表面传热系数** (对流换热系数) 单位:
W/(m²·K) or W/(m²·°C)

影响因素很多, **对流换热的主要研究内容之一即确定 h** 。牛顿冷却定律只构造出 h 的定义式, 并未从根本上解决对流换热的计算。

牛顿冷却公式的由来

- 1701年牛顿在实验中发现：一杯热水一经倒出，它就开始冷却。最初冷却的很快，随后会变得平稳。经过一段较长时间后，水的温度最终会与室温保持一致
- 牛顿总结了这类问题。得出结论：一个热的物体的冷却速率与该物体和周围环境的温度差成正比

表面传热系数的影响因素

h 的大小反映对流换热的强弱，与以下因素有关：

- (1) 流体的物性（热导率、粘度、密度、比热容等）；**
- (2) 流体流动的形态（层流、紊流）；**
- (3) 流动的成因（自然对流或受迫对流）；**
- (4) 物体表面的形状、尺寸；**
- (5) 换热时流体有无相变（沸腾或凝结）。**

一些表面传热系数的数值范围

对流换热类型	表面传热系数 h W / (m ² ·K)
空气自然对流换热	1 ~ 10
水自然对流换热	50 ~ 1000
气体强迫对流换热	20 ~ 100
水强迫对流换热	1000 ~ 15000
水沸腾	2500 ~ 35000
蒸汽凝结	5000 ~ 35000

8-3. 热辐射

辐射：物体受某种因素的激发而向外发射辐射能的现象

辐射现象的两种理论：电磁理论与量子理论

电磁波的数学描述： $c = \lambda \nu$

c — 某介质中的光速, $c = c_0 / n$

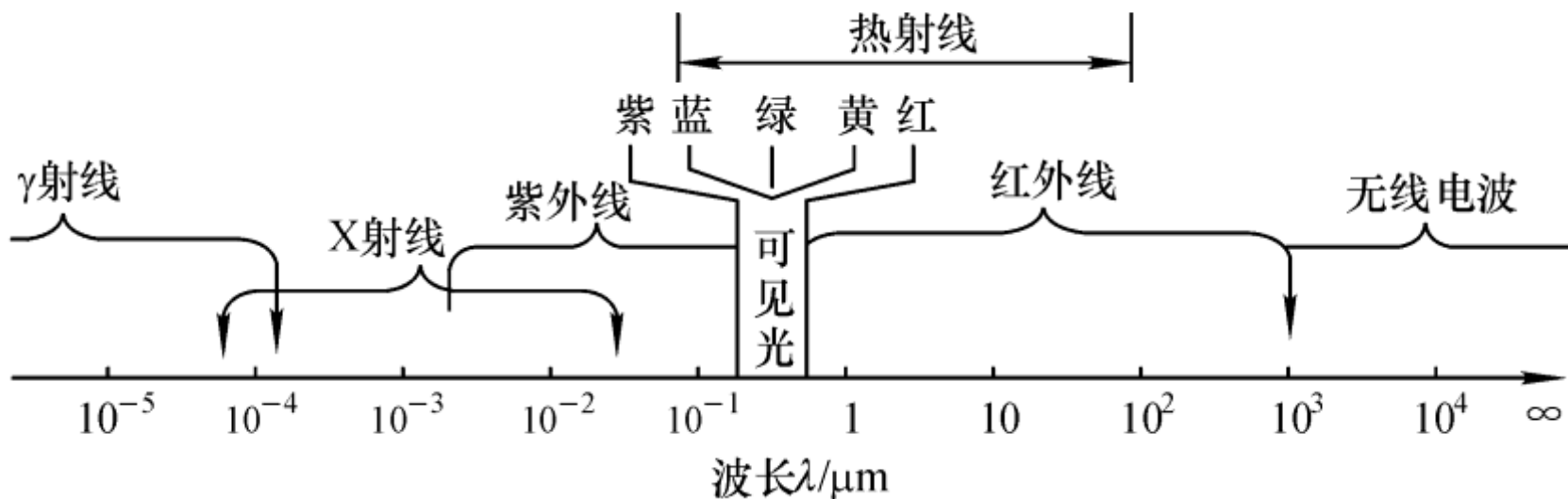
$c_0 \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为真空中的光速

n 为介质的折射率

λ — 波长, 常用 μm 为单位, $1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

ν — 频率, 单位 $1/\text{s}$

电磁波的波谱



γ 射线、X 射线、紫外线、

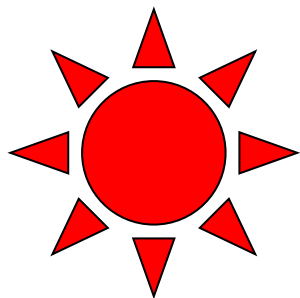
可见光: $0.38 < \lambda < 0.76 \mu\text{m}$

红外线: $0.76 < \lambda < 10^3 \mu\text{m}$

无线电波: $\lambda > 10^3 \mu\text{m}$

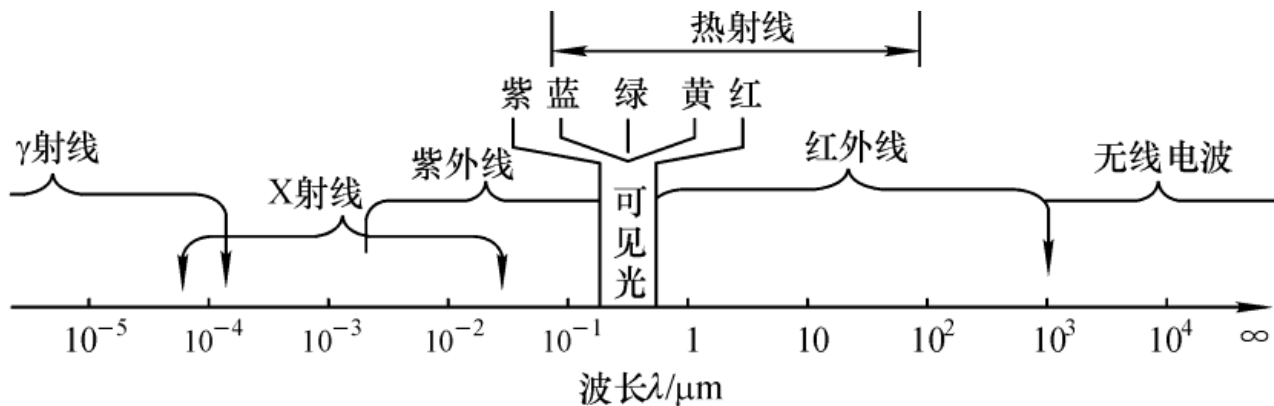
微波: $10^3 < \lambda < 10^6 \mu\text{m}$

热辐射



由于物体内部微观粒子的热运动而使物体向外发射辐射能的现象。

理论上热辐射的波长从零到无穷大，但在日常生活和工业常见温度范围内，波长主要在 $0.1\mu\text{m}$ 至 $100\mu\text{m}$ 之间,包括部分紫外线、可见光和部分红外线三个波段。



热辐射的主要特点

(1) 所有温度大于 0 K 的物体都具有发射热辐射的能力，温度愈高，发射热辐射的能力愈强。

发射热辐射时： 内能  辐射能

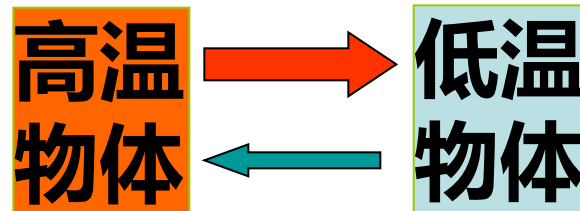
(2) 所有实际物体都具有吸收热辐射的能力。

吸收热辐射时： 辐射能  内能；

(3) 热辐射不依靠中间媒介，可以在真空中传播。

热辐射的主要特点

(4) 物体间以热辐射方式进行的热量传递是双向的。



(5) 在红外范围内，绝大多数固体和液体的发射和吸收均只发生在表面以下很浅的距离内，即仅取决于材料表面的性质、特征和温度，与其内部状况无关。

黑体辐射的Stefen-Boltzmann定律

黑体（ black body ）：亦称绝对黑体，是具有最大辐射能力和吸收能力的理想物体。注意这里的黑体一般并不意味着颜色是黑的，只有对可见光，颜色才是重要的。

Stefen-Boltzmann定律：

$$\Phi_b = A \sigma T^4$$

A：物体参与辐射的表面积， m^2 ；

σ ：Stefen-Boltzmann常数， $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

辐射换热

以热辐射的方式进行的能量交换。

影响物体之间的辐射换热量因素：

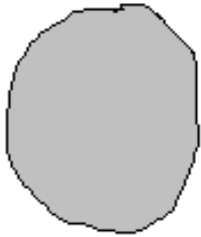
- **物体本身的温度、辐射特性**
- **物体的大小、几何形状**
- **相对位置**

实际物体发射的辐射能

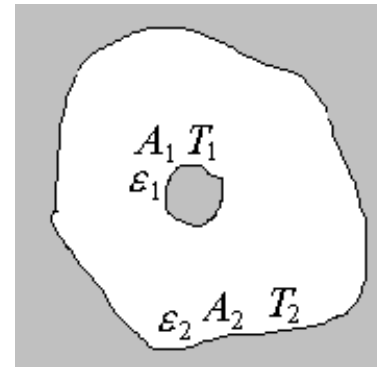
$$\Phi = \varepsilon A \sigma T^4$$

ε 称为实际物体的发射率,也称为黑度, $\varepsilon < 1$ 。

$A_1 \varepsilon_1 T_1$



$A_2 \varepsilon_2 T_2$



$A_1 \ll A_2$

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

讨论

(1) 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；

(2) 分析传热问题时首先应该弄清楚有那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。

(3) 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。

8-4. 传热过程

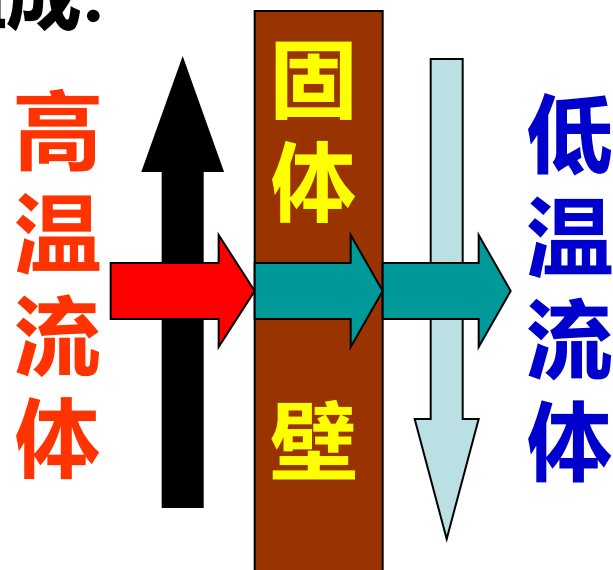
传热过程： 热量从一侧的流体通过固体壁面传递到另一侧流体的过程。

传热过程由三个相互串联的环节组成：

(1) 热量从高温流体以对流换热（或对流换热 + 辐射换热）的方式传给壁面；

(2) 热量从一侧壁面以导热的方式传递到另一侧壁面；

(3) 热量从低温流体侧壁面以对流换热（或对流换热 + 辐射换热）的方式传给低温流体。



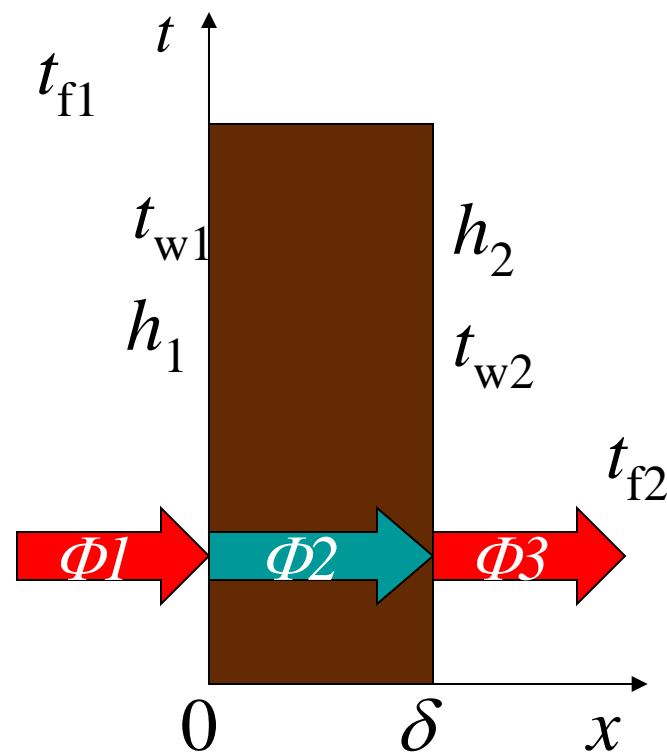
通过平壁的稳态传热过程

假设： t_{f1} 、 t_{f2} 、 h_1 、 h_2 不随时间变化； λ 为常数。

(1) 左侧的对流换热

(2) 平壁的导热

(3) 右侧的对流换热



通过平壁的稳态传热过程

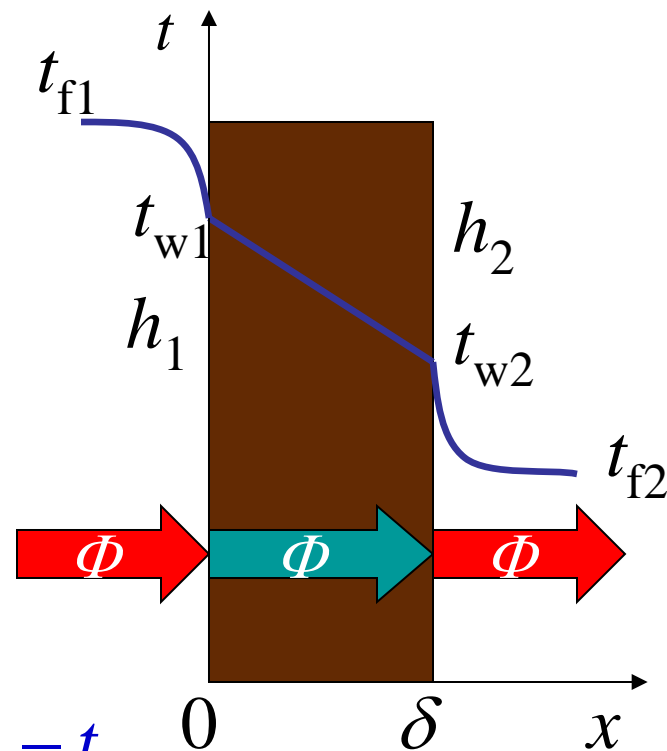
假设： t_{f1} 、 t_{f2} 、 h_1 、 h_2 不随时间变化； λ 为常数。

(1) 左侧的对流换热

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= Ah_1(t_{f1} - t_{w1}) = \frac{t_{f1} - t_{w1}}{\frac{1}{Ah_1}} \\ &= \frac{t_{f1} - t_{w1}}{R_{h1}}\end{aligned}$$

(2) 平壁的导热

$$\Phi_2 = A\lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{A\lambda}} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_\lambda}$$



(3) 右侧的对流换热

$$\Phi_3 = Ah_2 (t_{w2} - t_{f2}) = \frac{t_{w2} - t_{f2}}{\frac{1}{Ah_2}} = \frac{t_{w2} - t_{f2}}{R_{h2}}$$

在稳态情况下，以上三式的热流量相同，可得

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_{h1} + R_{\lambda} + R_{h2}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_k}$$

$$R_k = R_{h1} + R_{\lambda} + R_{h2} \quad R_k \text{称为传热热阻。}$$

传热系数

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

$$k = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right)^{-1}$$

称为传热系数(overall heat transfer coefficient), W/m².K

通过平壁的热流密度

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = k\Delta t$$

热阻

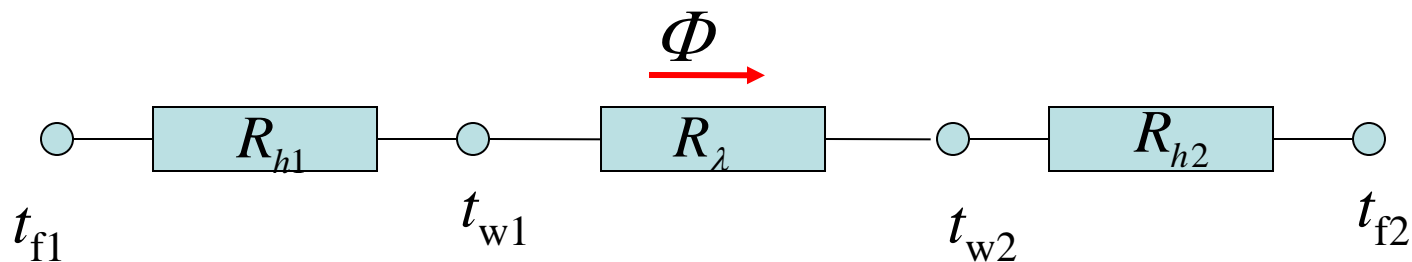
导热: $\Phi = \frac{\Delta t}{\delta / (A\lambda)}$ $q = \frac{\Delta t}{\delta / \lambda}$

对流换热: $\Phi = \frac{\Delta t}{1 / (Ah)}$ $q = \frac{\Delta t}{1 / h}$

与电学中欧姆定律比较

$\Delta t \rightarrow U$ 驱动势

$Q(\text{热流}) \rightarrow I(\text{电流})$ $\underbrace{\frac{1}{Ah} \quad \frac{\delta}{A\lambda}}_{\text{热阻}} \rightarrow R \quad \text{电阻}$



$$\begin{aligned}
 R_{h1} &= \frac{1}{Ah_1}; & R_{\lambda} &= \frac{\delta}{A\lambda}; & R_{h2} &= \frac{1}{Ah_2} \\
 R_k &= \frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} R_{h1} &= \frac{1}{Ah_1}; \\ R_{\lambda} &= \frac{\delta}{A\lambda}; \\ R_{h2} &= \frac{1}{Ah_2}; \end{aligned}} \right\} \begin{aligned} \Phi &= \frac{\Delta t}{R_k} \\ \Phi &= \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2}} \end{aligned}$$

R_k 称为传热热阻，单位K/W，由三个热阻串联而成。

第8章 小结

重点掌握以下内容：

(1) 热传导、热对流、热辐射三种热量传递基本方式的机理及特点；

(2) 热流量、热流密度、导热系数、对流换热、表面传热系数、传热系数、热阻等基本概念；

(3) 灵活运用平壁的一维稳态导热公式、对流换热的牛顿冷却公式、通过平壁的一维传热过程计算公式进行相关物理量的计算