

课程代码: B3I154730



工程热力学与传热学A

孔文俊

北京航空航天大学宇航学院

2024年5月17日

目录

- 第十章 传热学绪论
- 第十一章 稳态导热
- 第十二章 非稳态导热
- 第十三章 对流换热
- 第十四章 热辐射基本定律和物体的辐射特
- 第十五章 传热过程分析与换热器计算

传热学简介；导热，对流，辐射，传热过程

- 掌握热量传递的三种基本方式，即导热、对流、热辐射的物理概念和应用领域，知道传热学的发展简史。
- 掌握实际生活和工程应用中典型传热过程的分析方法，理解热量传递过程的主要环节及数学描述。
- 掌握传热系数的定义，理解传热过程热阻分析方法和计算过程。

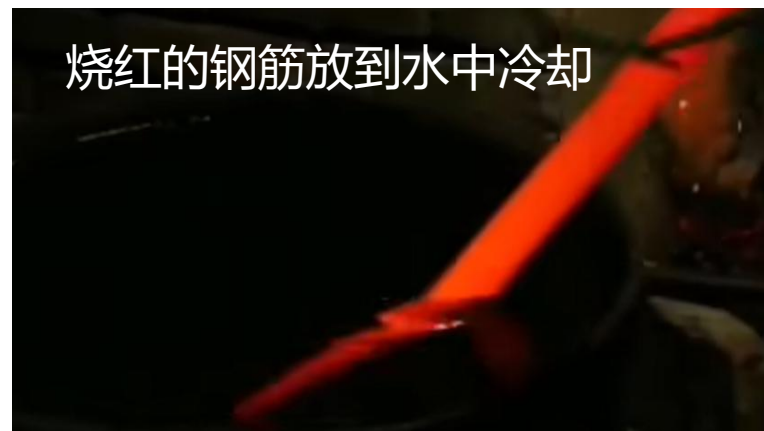
10-1 传热学概述

- **传热学**是一门旨在研究由于温差而可能在物体之间发生的能量传递的科学。
 - 研究热能传递规律的科学。
 - 热能传递过程的动力——温差

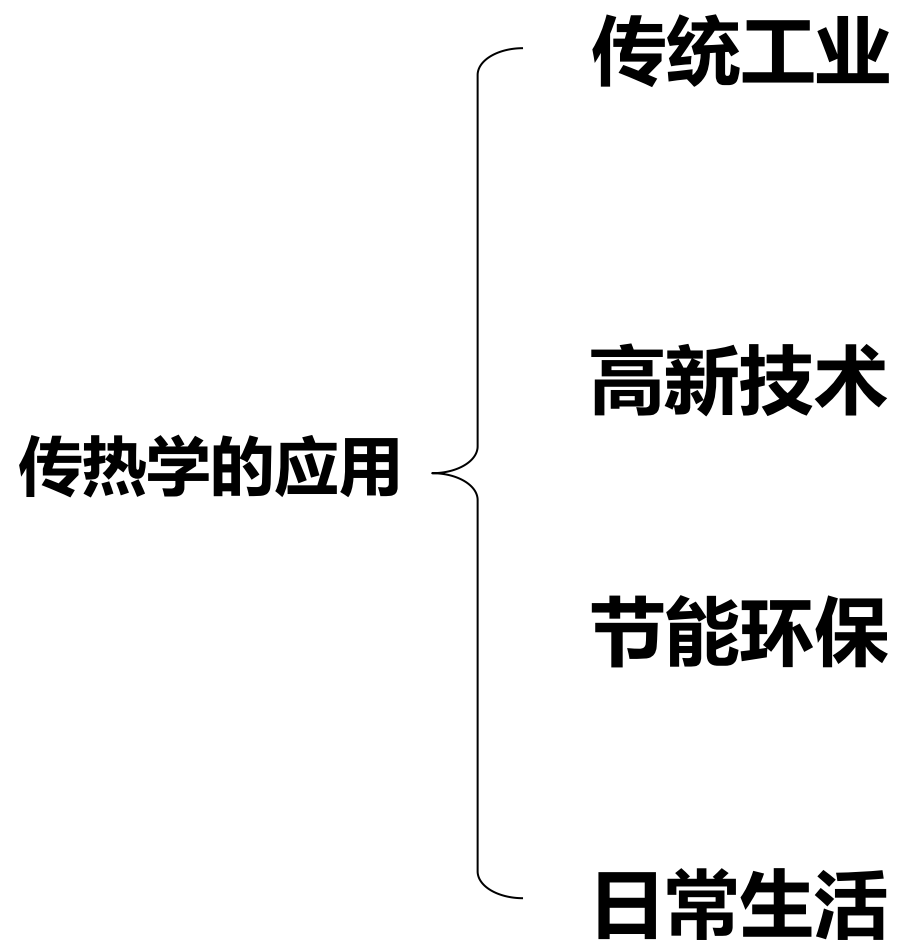
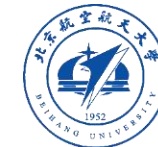


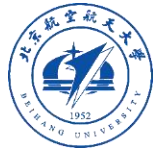
10-1 传热学概述

- 热力学 + 传热学 = 热工学 (热科学)
- **热力学**研究处于平衡状态的系统；它可以用于预测系统从一个平衡状态改变到另一个平衡状态所需的能量数；从热源添加或移除热量，或者系统对外做功，其中，温度决定了能量的品质。 (**不存在温差或压力差**)
- 但是热量通过什么方式取得或者给予呢？即使对于基本可逆过程，也无法告诉我们热量是如何从热源传递到系统中的。同时，热力学也不能用于预测热量变化的快慢，因为系统处于变化时是不平衡的。
- **传热学**研究有温差存在时的热能传递规律。
 - 热力学**可以用于预测钢筋-水组合的最终平衡温度，钢筋冷却过程损失的热量。热力学不会告诉我们达到这种平衡条件需要多长时间，也不会告诉我们在达到平衡条件之前经过一定时间后钢筋的温度会是多少。
 - 传热学**则可用于预测作为时间函数的钢筋和水的温度。
- 物理参数单位区别：热力学各物理量 (H 、 S 、 E 、 c_p 、 c_v 等) 不含时间；传热学主要物理量以时间为分母，单位时间内传递多少热能。传热学不仅仅试图解释**热能**是如何**传递**的，还试图预测在特定条件下，**热交换**将以何种**速率**进行。**传热速率**是传热学分析的目标，标志着传热学和热力学之间的区别。
- **联系**：热量传递过程的动力是温差，即热能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，则热能始终是守恒的。热力学第一定律和热力学第二定律是进行传热学研究的基础。传热学通过提供可用于建立能量传递速率的附加规则来补充热力学第一、第二定律。



10-1 传热学概述





10-1 传热学概述

传热问题的三种类型:

- 强化传热
- 削弱传热 (热绝缘)
- 温度控制

传热学的应用

传统工业

- 能源动力
- 石油化工
- 制冷空调

高新技术

节能环保

日常生活

传热学应用——传统工业



能源与动力是传热学最主要的应用领域



300MW的水-氢氢冷发电机组

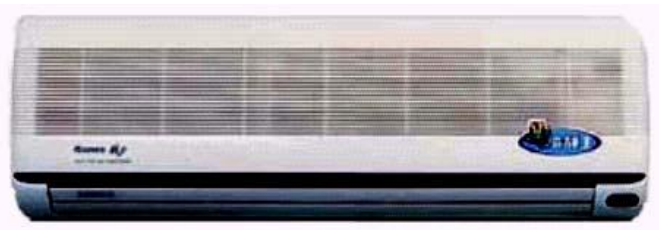


发电厂的冷却塔



核聚变装置

制冷空调中，大量的运用了散热片、换热器来达到热交换的目的



分体式空调

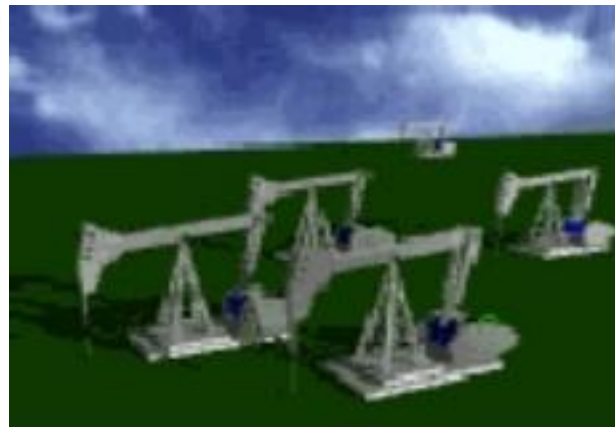
石油化工为传热学提供了用武之地



化工厂内各种热交换装置



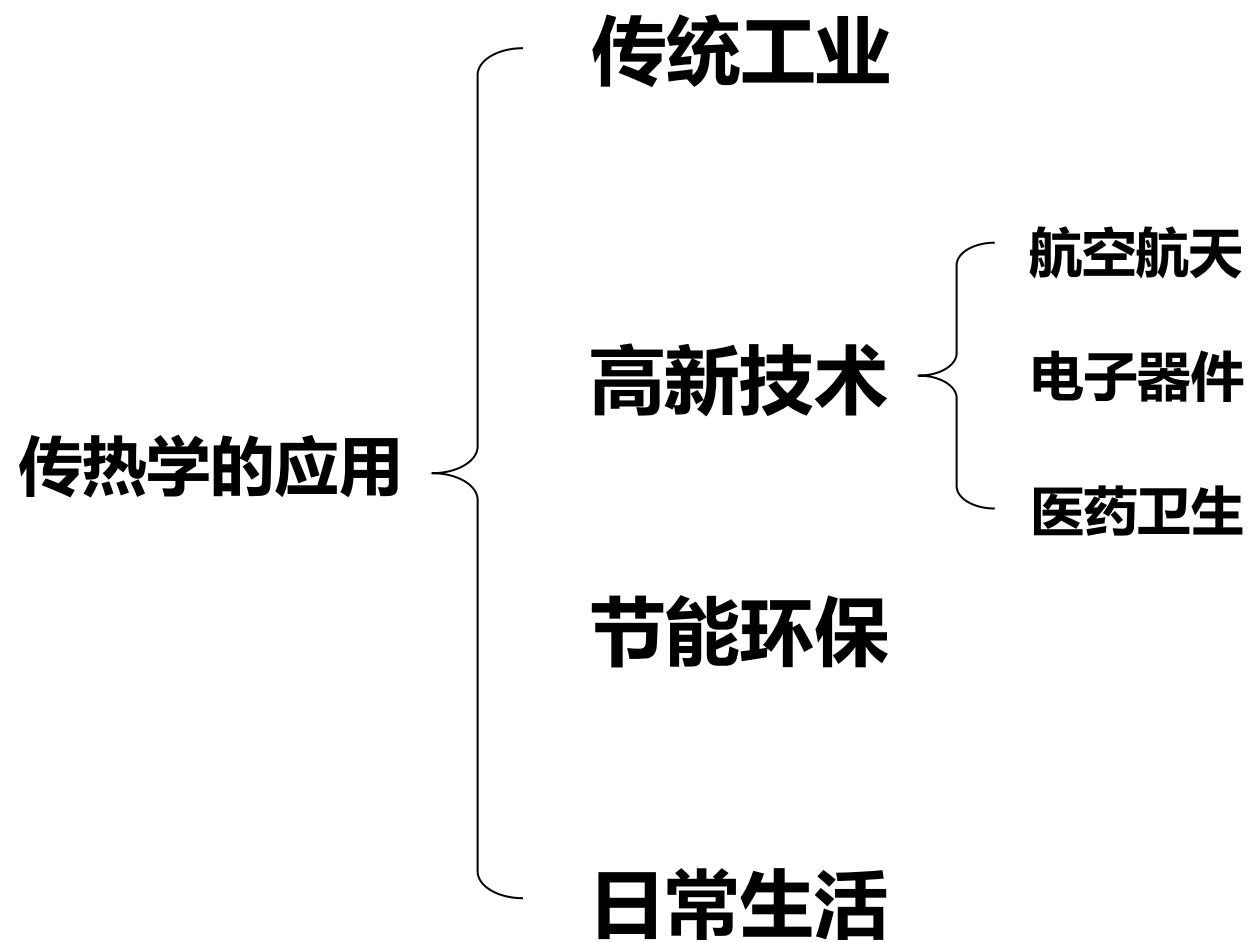
炼油厂星罗棋布的热力管道



石油开采现场



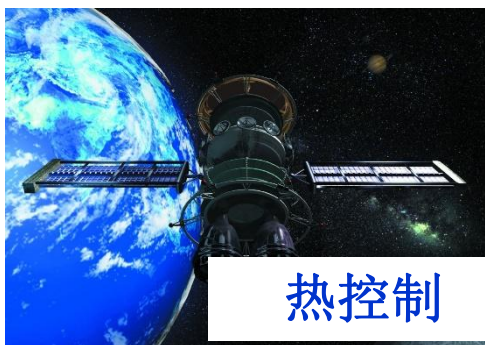
立式空调



传热学应用——高新技术

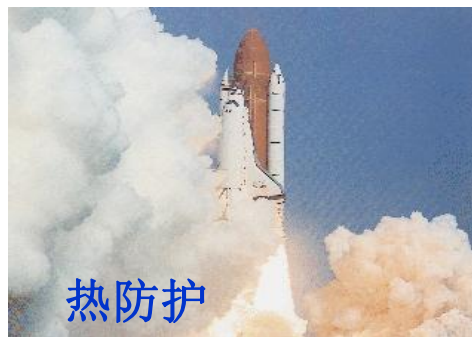


航空航天领域，航天飞机表面材料要求绝热良好；卫星上装有的太阳能吸收装置能提供卫星工作所需的部分能量。



热控制

航天器



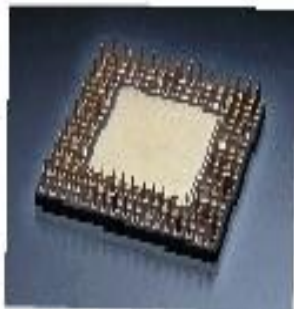
热防护

火箭升空

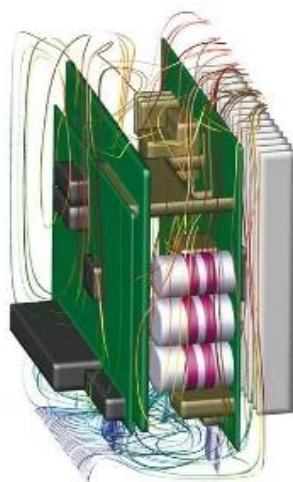
电子器件散热设计



电脑主板

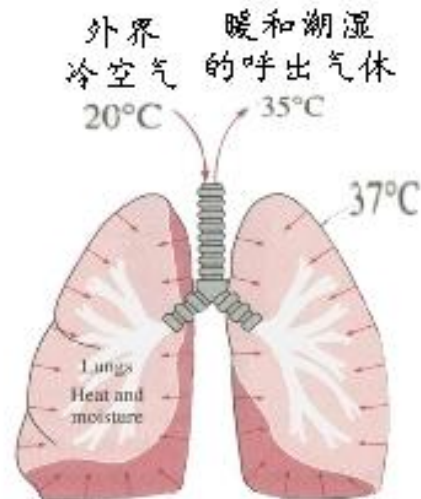


CPU
芯片

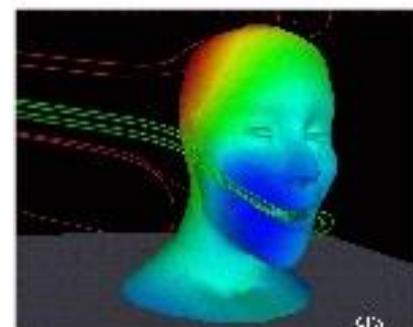


芯片内空气流动换热示意图

医药卫生：传热学广泛应用于激光手术、肿瘤高温治疗、低温外科、移植器官冷冻储存、疾病热诊断等技术中



人体肺部空气流动换热图

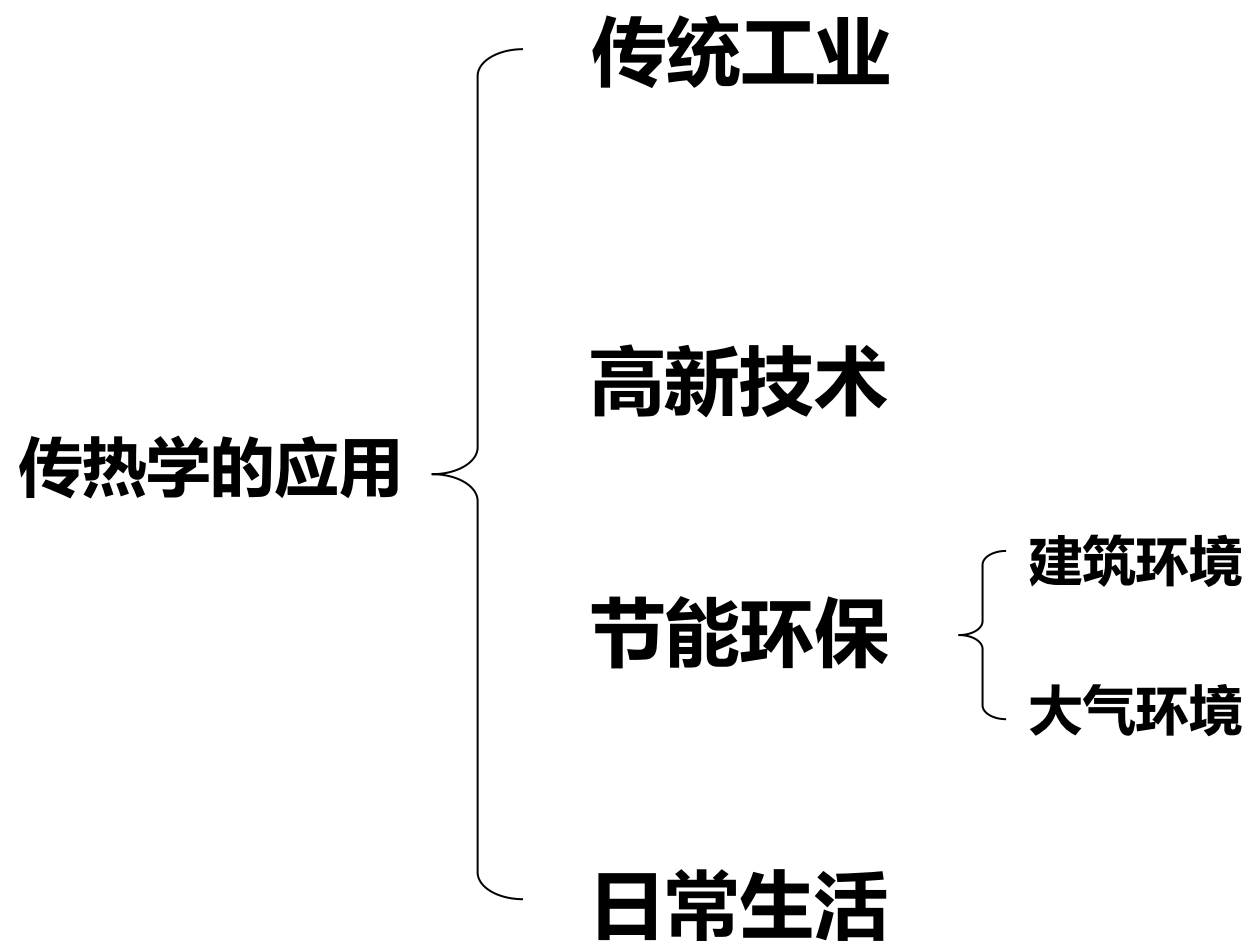


人体头部温度示意
(蓝色表示低温)



红外成像仪

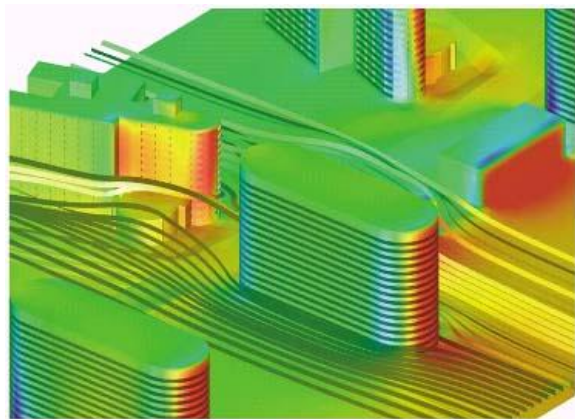
10-1 传热学概述



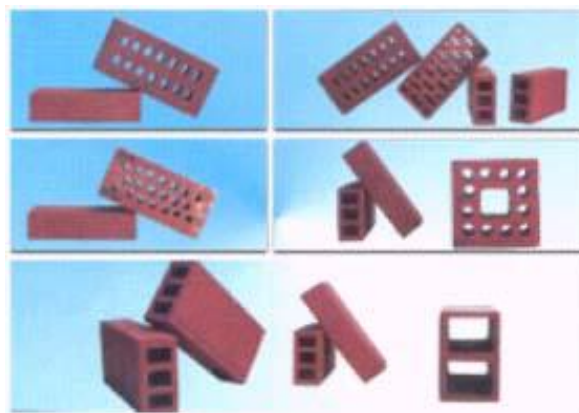
传热学应用——节能环保



建筑环境: 建筑上, 利用空气导热系数小的特点, 制成的空心砖具有良好的保温效果。



室外环境仿真



空心砖

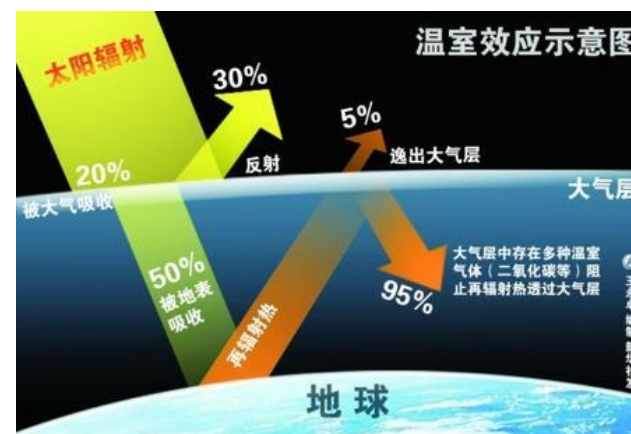


实心砖

大气环境



天气环境: 环境科学家估计,如果全球大气平均温度升高5-6度,目前南北极地区的冰雪将融化,地球上绝大部分陆地将被淹没。

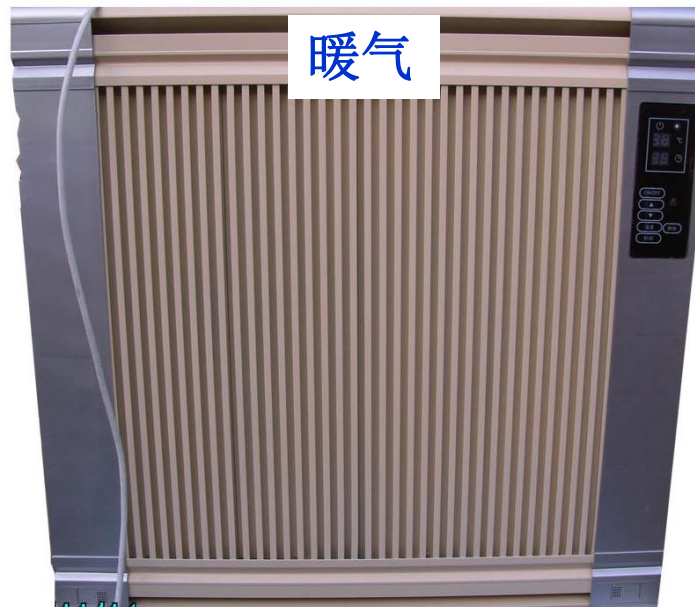


温室效应:大气中的二氧化碳含量增加近地表大气层起着温室玻璃的作用,太阳光可以射到温室,但热量很难发射出去,这样使得地球的温度升高。

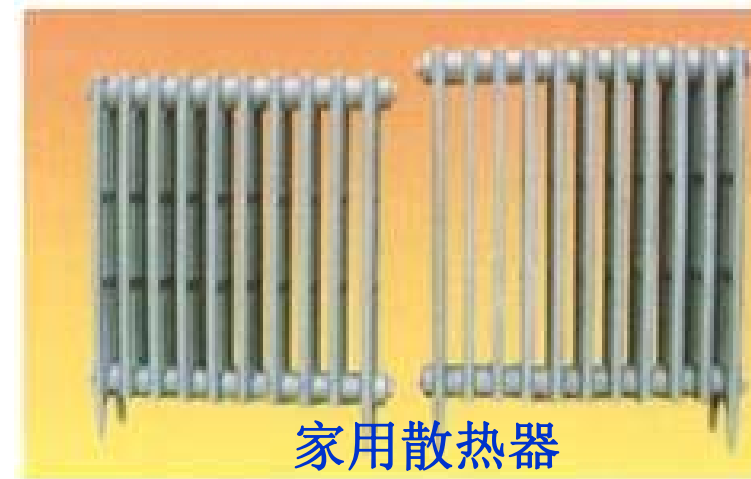
传热学的应用——日常生活



火炉



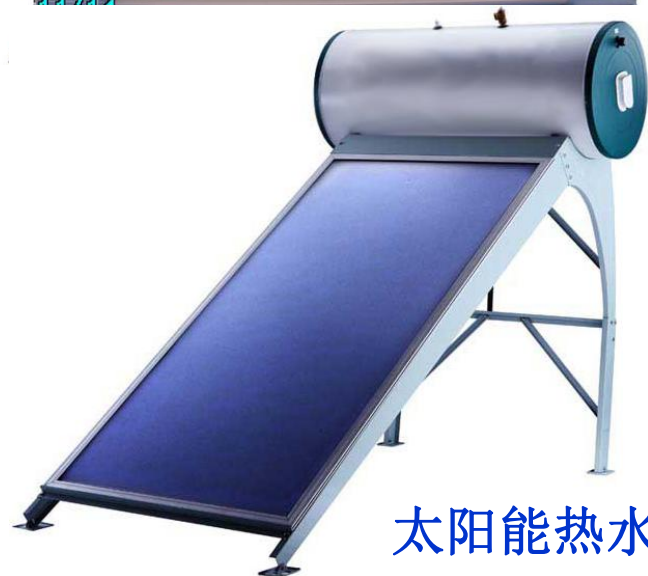
暖气



家用散热器



温室大棚

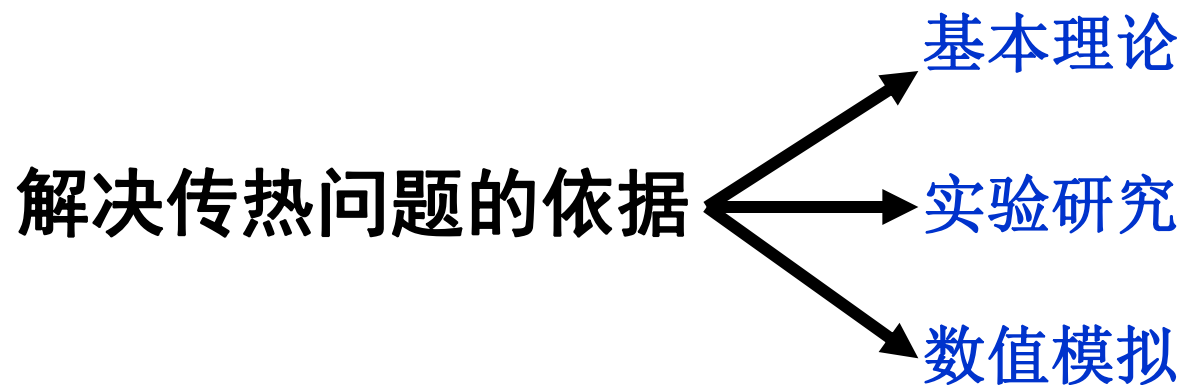
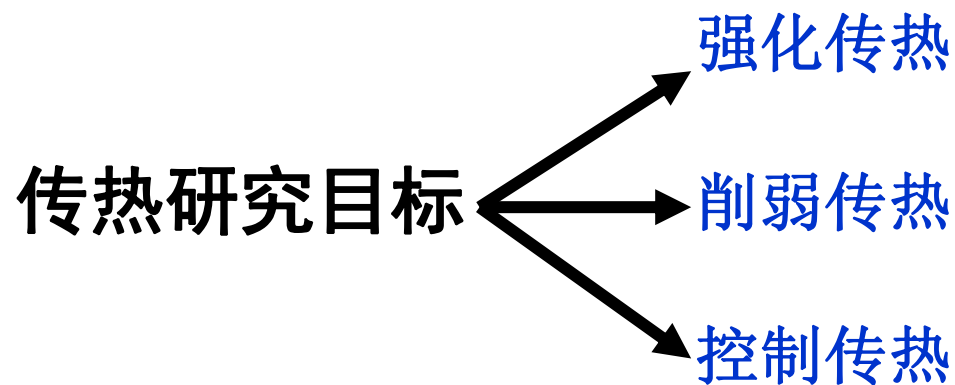


太阳能热水器

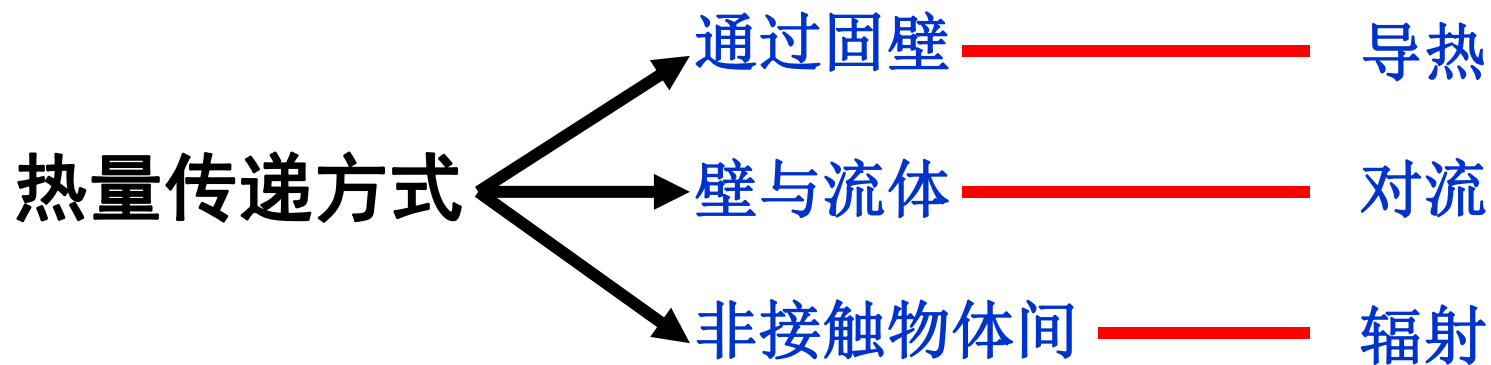
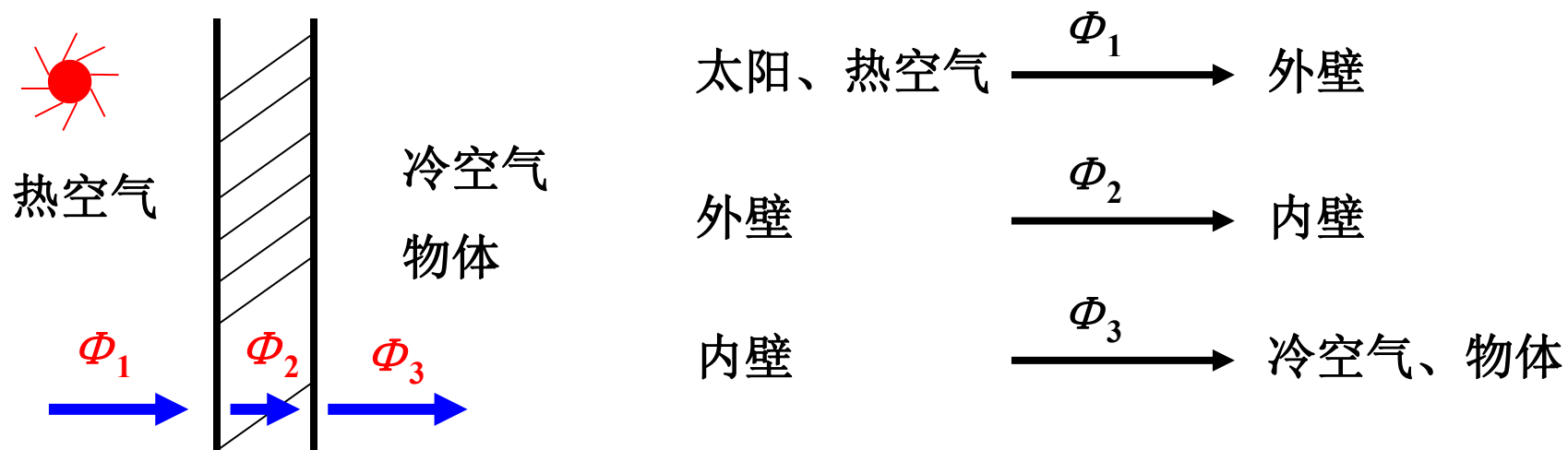


手套

10-1 传热学概述

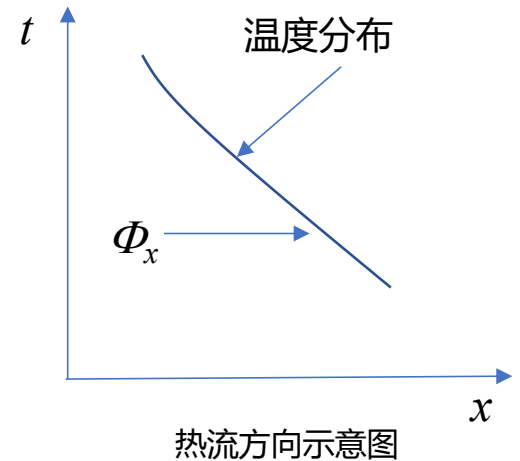
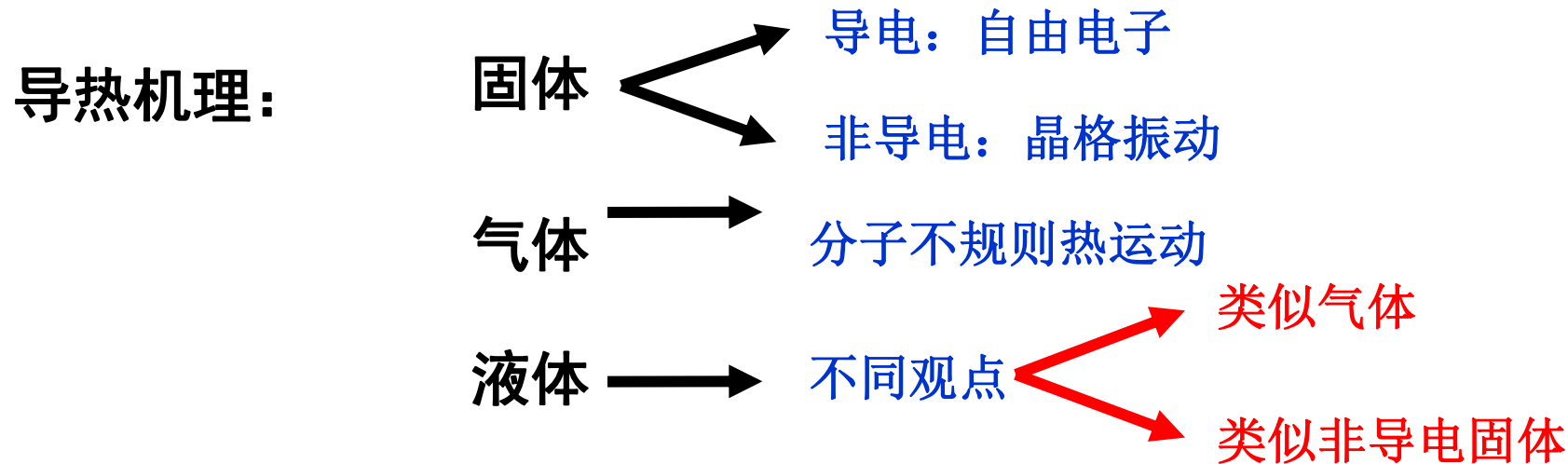


10-2 热量传递的三种基本形式



热传导

- 物体内部温度不同的各部分之间（同一物体或几个不同物体）不发生相对位移时，依靠分子、原子及电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递



- 热流量 Φ ，是指单位时间内通过某一给定面积 (A) 的热量，它与法线方向的温度梯度成比例：

$$\frac{\Phi}{A} \sim \frac{\partial t}{\partial x}$$

- 比例系数为常数时：

表示热量传递方向与温度升高方向相反。 导热系数，W/m.°C

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (10-1)$$

热流量，W 热流方向的温度梯度

傅里叶导热定律

热流密度又称面积热流量，

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (10-2)$$

例题10-1

- 一块厚度 $\delta=50\text{ mm}$ 的平板，两侧表面分别维持在 $t_{w1}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{w2}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试求下列条件下通过单位截面积的导热量：(1)材料为铜， $\lambda=375\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ；(2)材料为钢， $\lambda=36.4\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ；(3)材料为铬砖， $\lambda=2.32\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ；(4)材料为硅藻土， $\lambda=0.242\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

题解：假设：(1)一维导热问题；(2)稳态过程；(3)导热系数为常数。

- 分析：参见右图。据式(1-2)有 $q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}$
- 在稳态过程中，垂直于 x 轴的任一截面上的导热量都是相等的。将上式对 x 作从0到 δ 的积分得

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

所以：

$$q = \frac{-\lambda(t_{w2} - t_{w1})}{\delta} = \frac{\lambda(t_{w1} - t_{w2})}{\delta}$$

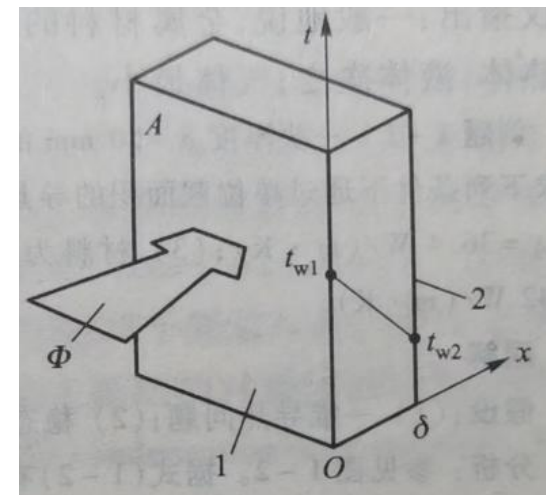
带入值计算：

铜： $q = 375\text{ W/(m}\cdot\text{K)} \times \frac{300\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}}{0.05\text{ m}} = 1.5 \times 10^6\text{ W/m}^2$

钢： $q = 36.4\text{ W/(m}\cdot\text{K)} \times \frac{300\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}}{0.05\text{ m}} = 1.46 \times 10^5\text{ W/m}^2$

铬砖： $q = 2.32\text{ W/(m}\cdot\text{K)} \times \frac{300\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}}{0.05\text{ m}} = 9.28 \times 10^3\text{ W/m}^2$

硅藻土： $q = 0.242\text{ W/(m}\cdot\text{K)} \times \frac{300\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}}{0.05\text{ m}} = 9.68 \times 10^2\text{ W/m}^2$



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约大3个数量级。因此，铜是热的良导体，而硅藻土砖则可起到一定的隔热作用。

热对流

对流：由于流体微团的宏观运动，使得流体各部分之间发生相对位移，冷热流体互相掺混所引起的热量传递过程。

对流发生在流体中，由于流体中分子不规则热运动，因而，热对流必然伴随着热传导现象

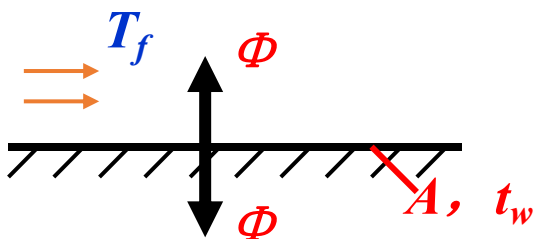
对流换热 \longrightarrow **流体与固体壁面间的热量传递过程**

自然对流、强迫对流、沸腾、凝结

当流体与壁面温度相差1K时，单位时间单位面积所传递的热量

表面传热系数（对流换热系数）， $W/m^2 \cdot K$

对流换热计算



牛顿冷却公式

$t_w > t_f$ 流体被加热时

$t_w < t_f$ 流体被冷却时

$$q = h(t_w - t_f) \quad (10-3)$$

$$q = h(t_f - t_w) \quad (10-4)$$

温差 Δt ，约定为正值，则牛顿冷却定律

$$q = h\Delta t \quad (10-5)$$

$$\Phi = hA\Delta t \quad (10-6)$$

$$h = f(v, t, \rho, c_p, a, \lambda, \beta, L, \Phi \dots \dots)$$

对流传热表面传热系数的大致数值范围



过 程	$h/[W/(m^2 \cdot K)]$
自然对流:	
空气	1 ~ 10
水	200 ~ 1 000
强制对流:	
气体	20 ~ 100
高压水蒸气	500 ~ 35 000
水	1 000 ~ 1 500
水的相变换热:	
沸腾	2 500 ~ 35 000
蒸汽凝结	5 000 ~ 25 000

热辐射

辐射: 物体通过电磁波来传递能量的方式 **热辐射:** 物体因热的原因而发出辐射能的现象

辐射换热: 辐射与吸收过程的综合结果造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递

辐射换热特点: 1) 可以在真空中进行;

2) 伴随能量形式转换;

3) 无时无刻不在进行。

理想辐射体——黑体 (最大吸收、辐射能力)

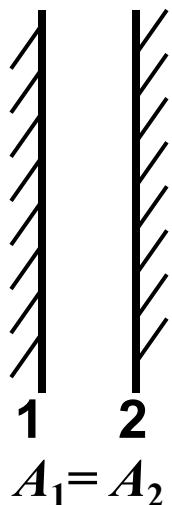
斯忒藩—波尔茨曼定律: 对黑体 $\Phi = A\sigma T^4$ (10-7)

斯蒂芬—波尔茨曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

实际物体辐射热量小于黑体: $\Phi = \varepsilon A\sigma T^4$ (10-8)

发射率 (黑度), $\varepsilon < 1$

注意: 上两式中, Φ 是物体自身向外辐射的热量, 不是辐射传热量。要计算辐射传热量须考虑投射到物体上的辐射热量的吸收过程。

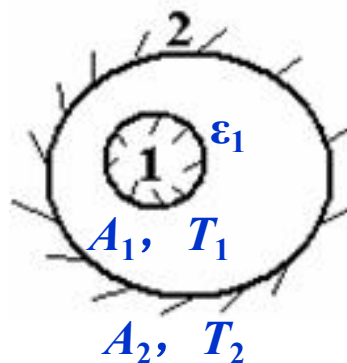


$$\Phi = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\Phi_1 = A_1 \sigma T_1^4$$

$$\Phi_2 = A_2 \sigma T_2^4$$

$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ 黑体

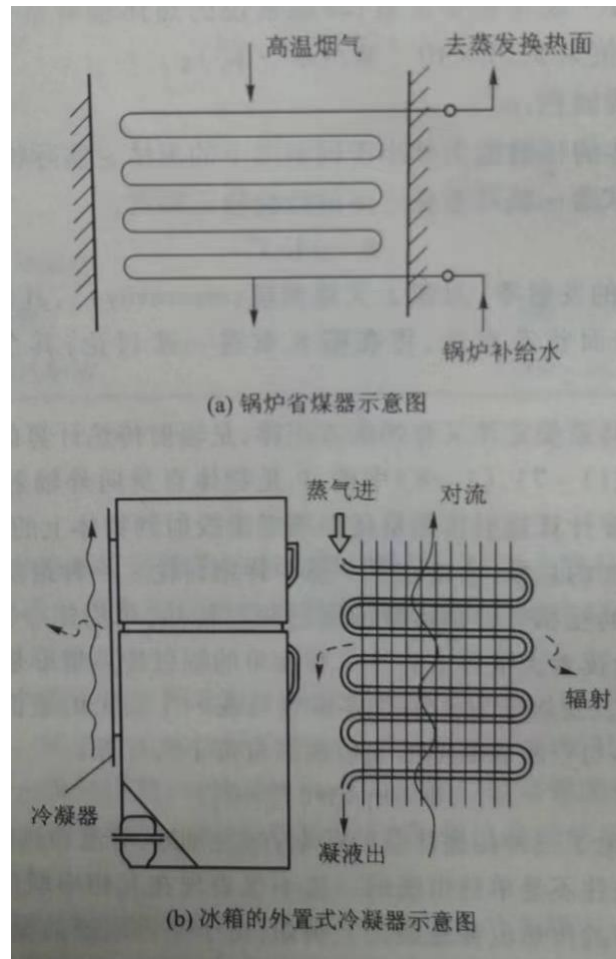
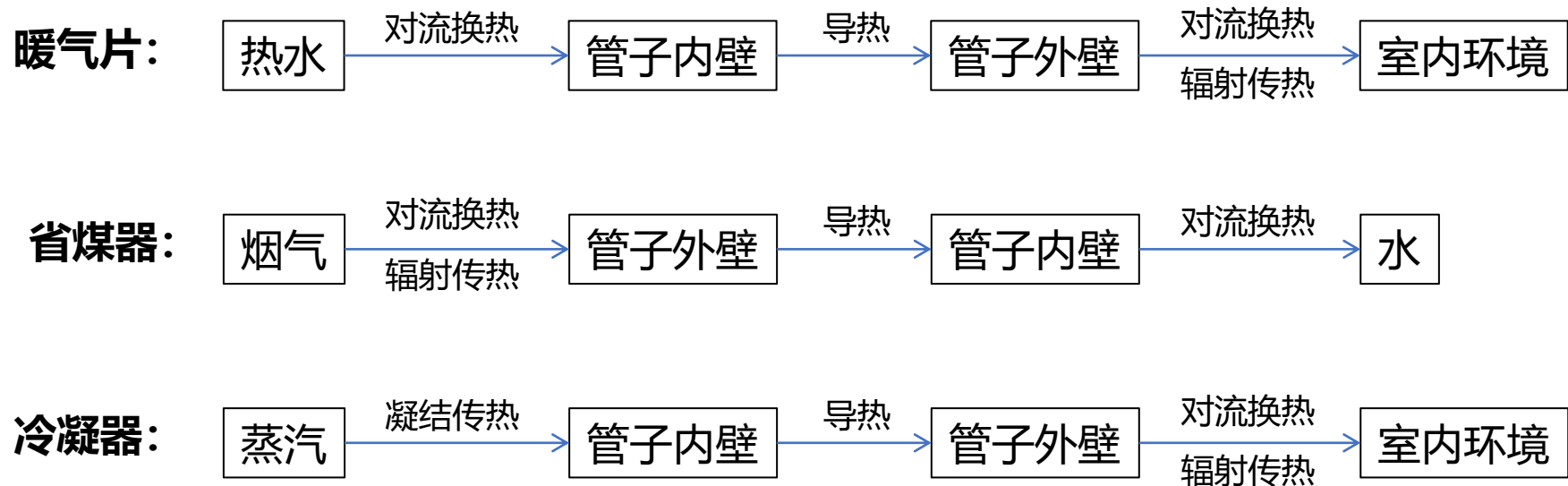


$$A_1 / A_2 \approx 0$$

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (10-9)$$

实际问题中各个环节的热量传递

暖气片、锅炉省煤器、家用冰箱外置式冷凝器热量传递各个环节的换热方式：



例题10-2

- 一根水平放置的蒸汽管道，其保温层外径 $d=583$ mm，外表面实测平均温度 $t_w=48$ °C。空气温度 $t_f=23$ °C，此时空气与管道外表面间的自然对流传热的表面传热系数 $h=3.42$ W/(m²·K)，保温层外表面的发射率 $\varepsilon=0.9$ 。试求：(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。

题解

- 假设：(1) 沿管子长度方向各给定参数都保持不变；(2) 稳态过程；(3) 管道周围的其他固体表面温度等于空气温度。
- 分析：此管道的散热有辐射传热和自然对流传热两种方式。自然对流传热量可按式(10-6)计算，管道外表面与室内物体及墙壁之间的辐射传热可以按式(10-9)计算。
- 计算：把管道每米长度上的散热量记为 q 。据式(10-6)，单位长度上的自然对流散热量为

$$\begin{aligned} q_{l,c} &= \pi d \cdot h \Delta t = \pi d h (t_w - t_f) \\ &= 3.14 \times 0.583 \text{ m} \times 3.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \times (48^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) \\ &= 156.5 \text{ W/m} \end{aligned}$$

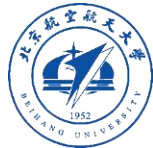
- 每米长度管子上的辐射换热量为

$$\begin{aligned} q_{l,r} &= \pi d \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 3.14 \times 0.583 \text{ m} \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \times \\ &\quad 0.9 \times [(48 + 273)^4 \text{ K}^4 - (23 + 273)^4 \text{ K}^4] \\ &= 274.7 \text{ W/m} \end{aligned}$$

- 于是每米长管道的总散热量为

$$q_l = q_{l,c} + q_{l,r} = 156.5 \text{ W/m} + 274.7 \text{ W/m} = 431.2 \text{ W/m}$$

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



例题10-3

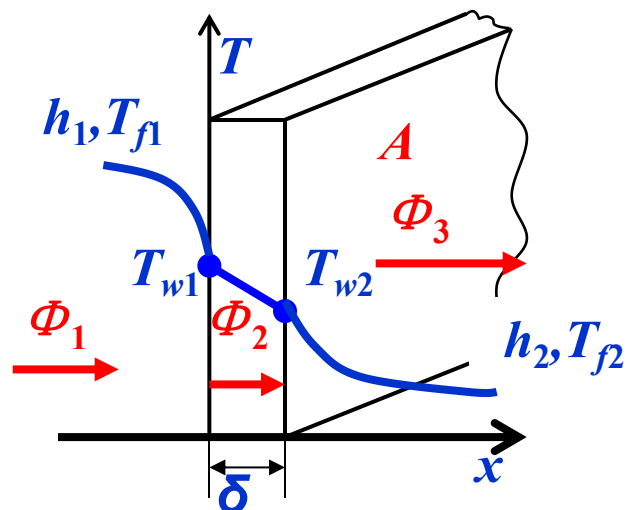
- 一块发射率 $\varepsilon=0.8$ 的钢板，温度为 27°C ，试计算单位时间内钢板单位面积上所发出的辐射能。
- 题解
- 假设：(1)钢板表面温度均匀；(2)表面发射率均匀。
- 计算：按式(10-8)，钢板单位面积上所发出的辐射能为

$$q = \varepsilon \sigma T^4 = 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \times (27 + 273)^4 \text{ K}^4 = 367.4 \text{ W}/\text{m}^2$$

讨论：注意，计算结果是钢板单位面积上辐射出去的能量，不是辐射传热量。如果室内环境温度 27°C ，那么钢板的辐射传热量是多少？

10-3 传热过程

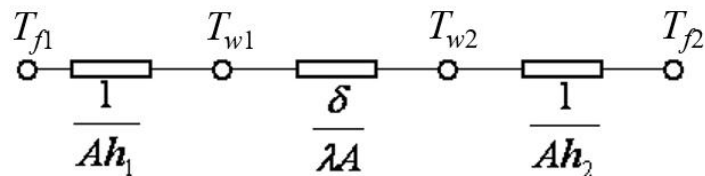
热流体通过壁面将热量传递给冷流体的过程。



$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= Ah_1(T_{f1} - T_{w1}) \\ \Phi_2 &= \frac{\lambda A}{\delta}(T_{w1} - T_{w2}) \\ \Phi_3 &= Ah_2(T_{w2} - T_{f2}) \end{aligned} \right\} \xrightarrow{\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi} \Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (10-10)$$

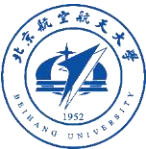
$$= Ak\Delta t \quad (10-11)$$

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\delta}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A}} \xleftrightarrow{\text{类比}} I = \frac{U}{R}$$



$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad \text{传热系数 W/m}^2\cdot\text{K} \quad (10-12)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (10-13)$$



例题10-4

- 对一台氟利昂冷凝器的传热过程作初步测算得到以下数据：管内水的对流传热表面传热系数 $h_1 = 8700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，管外氟利昂蒸气凝结换热表面传热系数 $h_2 = 1800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，换热管子壁厚 $\delta = 1.5 \text{ mm}$ 。管子材料是导热系数 $\lambda = 383 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的铜。试计算三个环节的热阻及冷凝器的总传热系数。欲增强传热应从哪个环节入手？

题解

- 假设：(1)稳态过程；(2)将圆管按厚度等于管子壁厚的平板处理。
- 计算：三个环节单位面积热阻的计算分别如下：

$$\text{水侧换热面积热阻: } \frac{1}{h_1} = \frac{1}{8700 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})} = 1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$\text{管壁导热面积热阻: } \frac{\delta}{\lambda} = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{383} = 3.92 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$\text{氟利昂蒸汽凝结面积热阻: } \frac{1}{h_2} = \frac{1}{1800} = 5.56 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

于是冷凝器的总传热系数为

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{1.15 \times 10^{-4} + 3.92 \times 10^{-6} + 5.56 \times 10^{-4}} = 1480 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

讨论：水侧、管壁导热和氟利昂蒸气侧的面积热阻分别占总热阻的17.0%、0.6%和82.4%。氟利昂蒸气侧的热阻在总热阻中占主要地位，它具有改变总热阻的最大潜力。因此，要增强冷凝器的传热，应先从这一环节入手，并设法降低这一环节的热阻值。

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. 对流换热和传热过程的区别，表面传热系数(对流换热系数)和传热系数的区别。

Thank you

10	第十章 传热学绪论：传热学简介；导热，对流，辐射，传热过程	掌握热量传递的三个基本方式，即导热、对流、热辐射的物理概念和应用领域，知道传热学的发展简史。掌握实际生活和工程应用中典型传热过程的分析方法，理解热量传递过程的主要环节及数学描述。掌握传热系数的定义，理解传热过程热阻分析方法和计算过程。	1	课堂教学（PPT+板书）
11	第十一章 稳态导热：导热基本定律；导热问题的数学描写；典型一维稳态导热问题的分析解；具有内热源的一维稳态导热问题	掌握傅立叶导热基本定律和导热系数的数学表达式，了解影响导热系数的各种因素。理解导热微分方程的推导过程，掌握不同条件下导热微分方程的数学表达式；了解求解导热问题的定解条件，包括三类边界条件的关系式。能够应用上述定律和计算公式对平壁和圆筒壁等物体的稳态导热问题进行分析和计算。	3	课堂教学（PPT+板书）
12	第十二章 非稳态导热：非稳态导热的概念；零维问题的分析方法 - 集中参数法；典型一维物体非稳态导热的分析解；半无限大物体的非稳态导热	了解导热微分方程解的唯一性定律和第三类边界条件下Bi数对平板中温度分布的影响；了解简单几何形状非稳态导热的分析和计算方法；掌握非稳态导热的概念，特点及类型；掌握集中参数法的概念和计算方法，掌握集中参数法的适用范围及应用举例。	2	课堂教学（PPT+板书）
13	第十三章 对流换热：对流换热概说；牛顿冷却公式及换热系数；对流换热微分方程组及单值性条件；速度边界层与温度边界层；边界层微分方程组；比拟理论；相似理论及其在对流换热中的应用；相似原理与量纲分析；对流传热的实验关联式	掌握对流换热问题的基本概念及影响对流换热的因素，理解对流换热微分方程组的推导过程。理解边界层的物理概念，掌握量纲分析法分析对流换热的边界层微分方程组的推导过程，掌握对流换热的边界层微分方程组的表达式及定解条件。了解相似原理与量纲分析及其应用；了解内部流动强制对流传热的实验关联式，外部流动强制对流的实验关联式，自然对流的实验关联式。	4	课堂教学（PPT+板书）
14	第十四章 热辐射基本定律和物体的辐射特性：热辐射现象的基本概念；黑体辐射的基本定律；固体和液体的辐射特性；实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系	能够认识热辐射的本质及辐射能传递过程中的基本特性，掌握黑体辐射的基本定律，包括普朗克定律、波尔兹曼定律、兰贝特定律，理解实际固体和液体的辐射特性，掌握热辐射过程中的基本概念。	3	课堂教学（PPT+板书）
15	第十五章 传热过程分析与换热器计算：传热过程的分析与计算；换热器的类型；换热器中传热过程平均温差的计算；换热器热计算；传热的强化与削弱	了解换热器的分类，熟悉主要的换热器形式，如交叉流换热器，板式换热器等各种类型换热器的原理；了解换热器传热过程中平均温差的计算方法，能够应用这种方法对典型换热器进行平均温差的计算；了解强化传热的概念，以及各种强化传热技术的分类等。	2	课堂教学（PPT+板书）