

第六章 热传递的基本原理

热学的研究内容

热 学 —— 研究自然界中物质与冷热有关的性质及与冷热相联系的各种规律的科学

热力学——研究热能和其他形式能量之间转换的规律
(第二、三、四、五章)

传热学——研究由温差引起的热传递的规律
(第六、七、八章)

第八章 自学

6.1 热传递的条件

热量传递及其条件

- **热量传递**：热传递，简称传热，生活中无处不在
- **热力学第二定律**：热量总是自发地从温度较高部分向温度较低部分传递，温差的存在是热机工作的前提。
- 温差传热传热是典型的**不可逆过程**。

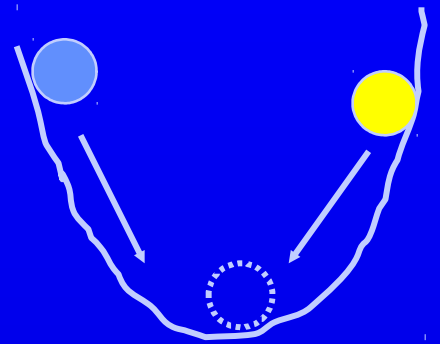
传热问题

需强化传热的问题：增强传热量、缩小设备尺寸、控制运行温度或提高生产力

需削弱传热的问题：减少传热量、避免散热损失或者保持合适的工作温度

非平衡态

- 非平衡态：系统总是存在着某种力（梯度）和流，使系统的宏观性质发生改变。
- 系统接近平衡态时，流与力的关系接近于线性。系统总是经过一定的输运过程，自发地趋于平衡态。
- 力不平衡—速度梯度—动量输运
- 热不平衡—温度梯度—热量输运
- 物质不平衡—浓度梯度—质量输运



传热过程的方向性

- 温差 Dt ——热的非平衡态——热传递的动力！
- 自然界和工农业生产中普遍存在温差，传热是一种普遍的现象。
- 力 (梯度)——温度梯度 dt/dx
- 流——热流量 Φ 、热流密度 q
- 高温物体 (部分) 自发地传递热量 → 低温物体 (部分)

热流量和热流密度

热流量 (Heat flow)：单位时间上的传热量。

Φ 单位 W(J/s)

热流密度 (Heat flux)：单位面积热流量。

$q = \Phi / A$ 单位 W/m²

稳态传热过程 (steady state) —— 热流不随时间而改变：

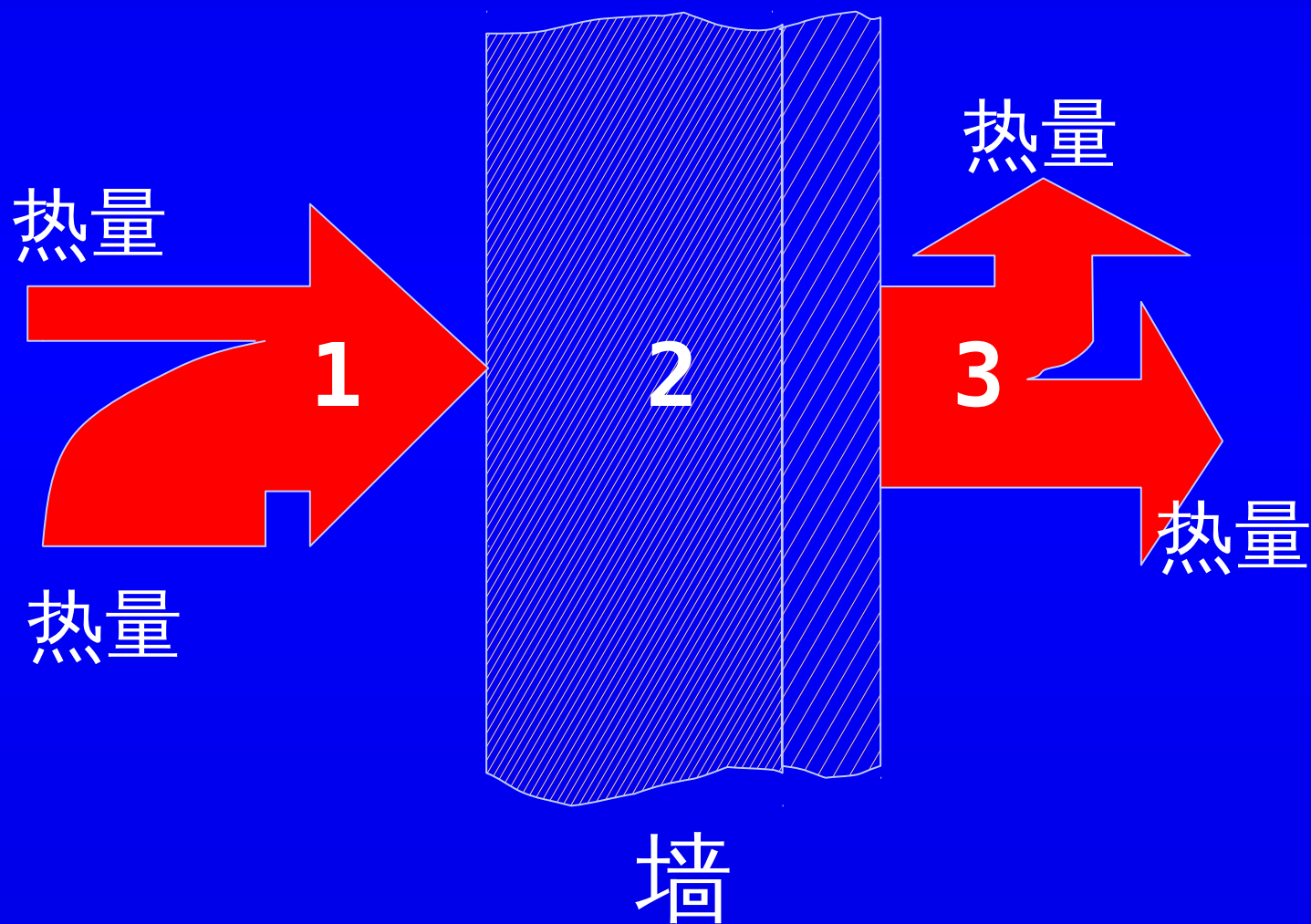
6.2 传热的基本模式

传热的普遍性

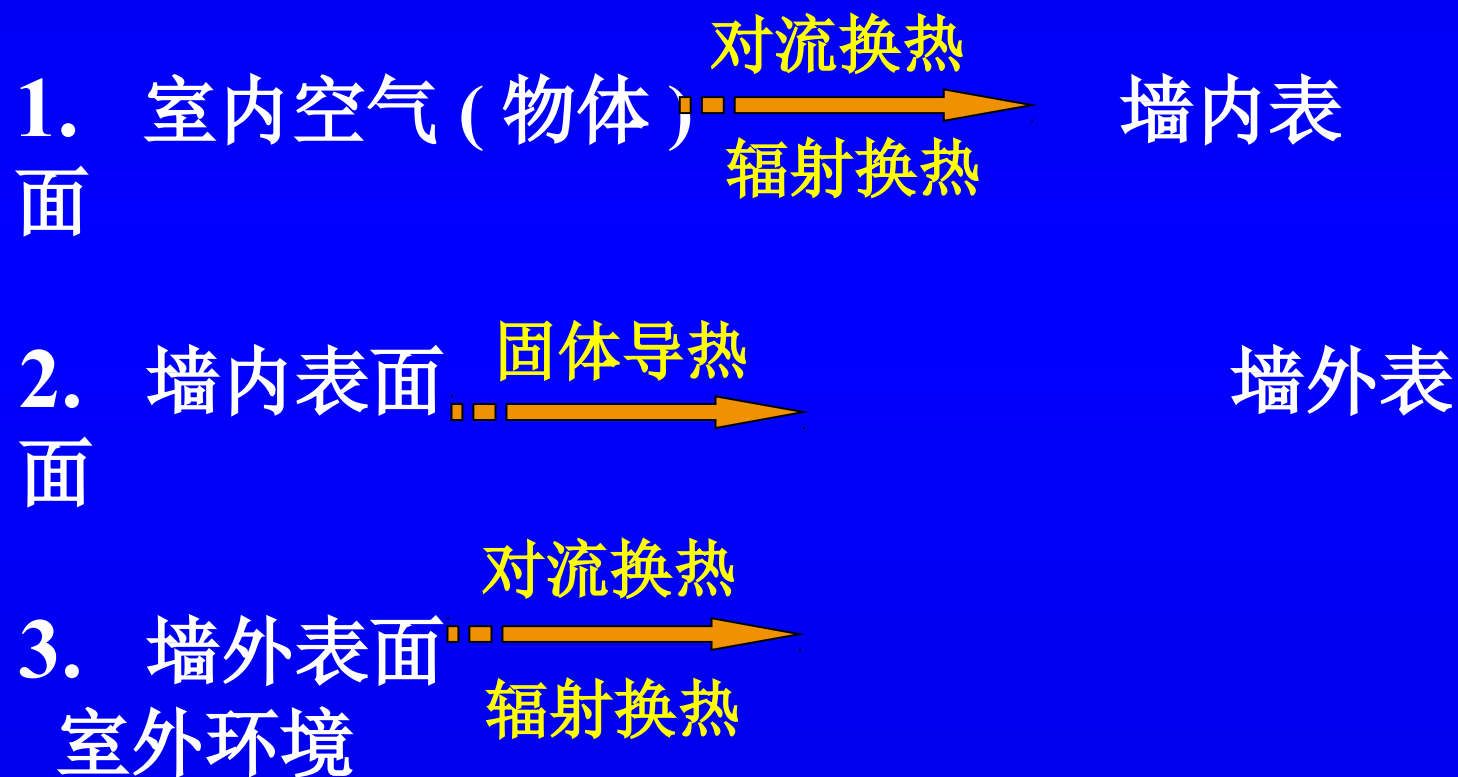
- 三种传递方式：导热、对流、辐射



传热举例

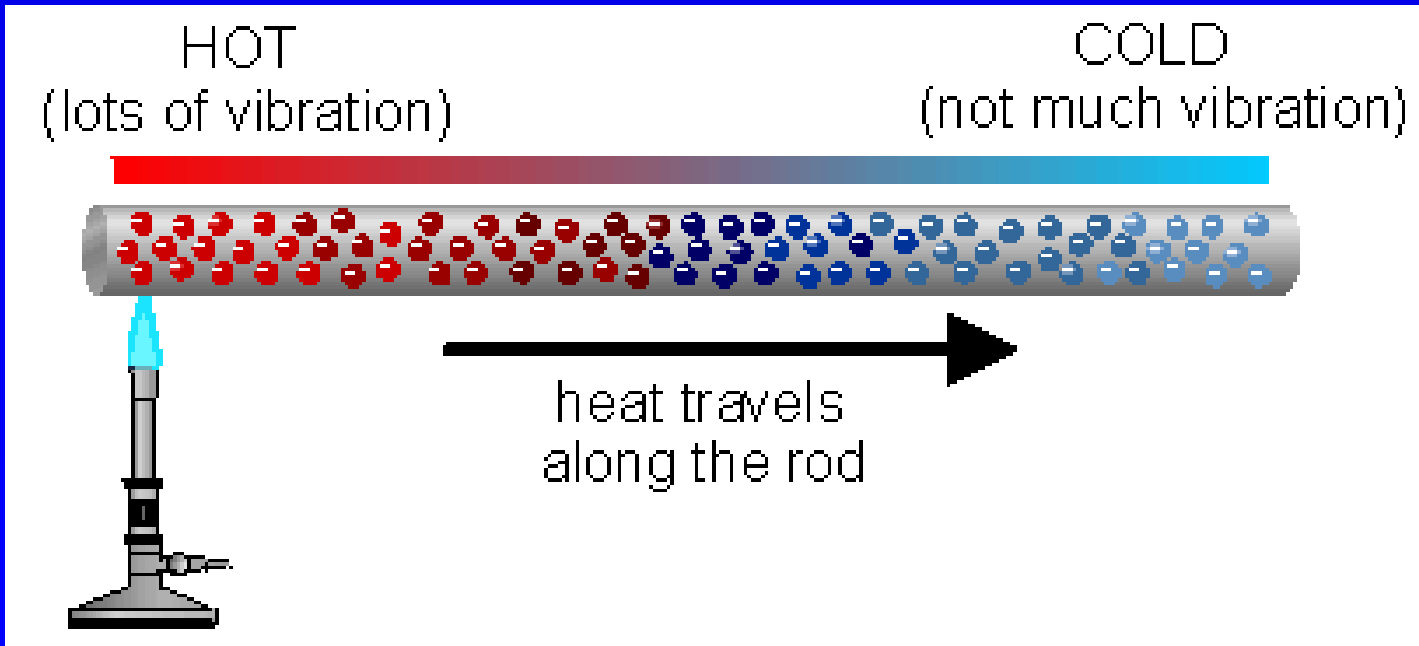


分为三个过程：



模式 1：导热（热传导）

- **微观机理：**物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时，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。
- 导热可在**固体、液体及气体**中发生。
- 纯粹的导热只发生在密实的固体中（液体、气体会有对流）。



导热机理：

- 气体：气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果
- 导电固体：自由电子运动
- 非导电固体：晶格结构振动产生的弹性波
- 液体：观点 1（类似气体）、观点 2（类似非导电固体）

模式 2：对流

- **定义：** 由于流体宏观运动，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。
- **分类 1：** 相变对流（沸腾、凝结）、无相变对流
- **分类 2：** 自然对流（流体冷热部分密度不同引起的流动）、强迫对流（风机等驱动介质流动引起的对流）

模式 3：辐射

定义：由物体因温度（热）原因而发出电磁波传递能量的方式。

- 任何物体只要温度高于 0K 都会发出热辐射
- 热辐射可以穿过真空
- 同一物体既发射热辐射，又接收热辐射
- 低温物体也向高温物体发射热辐射
- 同温物体之间也收发热辐射，只是收发相等

6.3 导热

导热基本定律

1804 年 法国物理学家傅里叶（ J. B. J. Fourier 1786~1830 ）根据实验提出了导热基本定律

$$\Phi \propto A \frac{dt}{dx} \quad \Rightarrow \quad \Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

式中： Φ — 热流量， W ；

q — 热流密度， W/m²；

A 一壁面积， m²；

λ 一导热系数或热导率， W/m.K.

dt/dx — 温度梯度，

“ - ” 表示热量向温度降低的方向传递。

平壁导热的计算 (稳态)

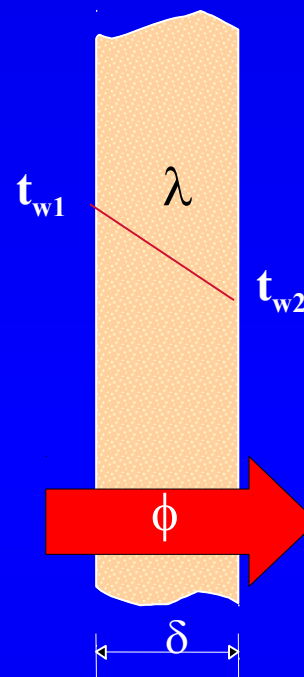
大平壁导热是典型的导热问题:

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} A \Delta t \quad q = \frac{\Phi}{A} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t$$

式中: δ — 壁厚, m;

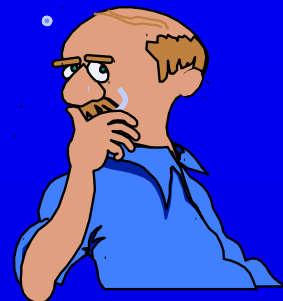
Δt — 壁两侧表面的温差,

$$\Delta t = t_{w1} - t_{w2}, \text{ } ^\circ\text{C}$$



通过平壁的导热

导热系数怎么求?



导热系数

- 物质的热物性参数，表征物质导热能力的大小，由实验确定。
- 可以查附录 (p.201) B4 ~ 9 。
- 一般 $\lambda_{\text{金属}} > \lambda_{\text{非金属}}$ ； $\lambda_{\text{固体}} > \lambda_{\text{液体}}$ ； $\lambda_{\text{液体}} > \lambda_{\text{气体}}$
- 导热系数因物质种类不同而有不同的数值。
- 与温度、湿度、压力和密度等因素密切相关。
- 水是导热系数最大的液体（液态金属除外）
- 干空气是导热系数最小的气体

气体、液体及固体的 λ

① 气体： $0.006 \sim 0.6 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$

气体的导热系数随温度的升高而增大。

② 液体： $0.07 \sim 0.7 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$

不同的液体其导热系数随温度变化的趋势是不同。

③ 固体：

金属： $12 \sim 418 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$

纯金属的导热系数随温度的升高而减少；大部分合金的导热系数随温度升高而增大。

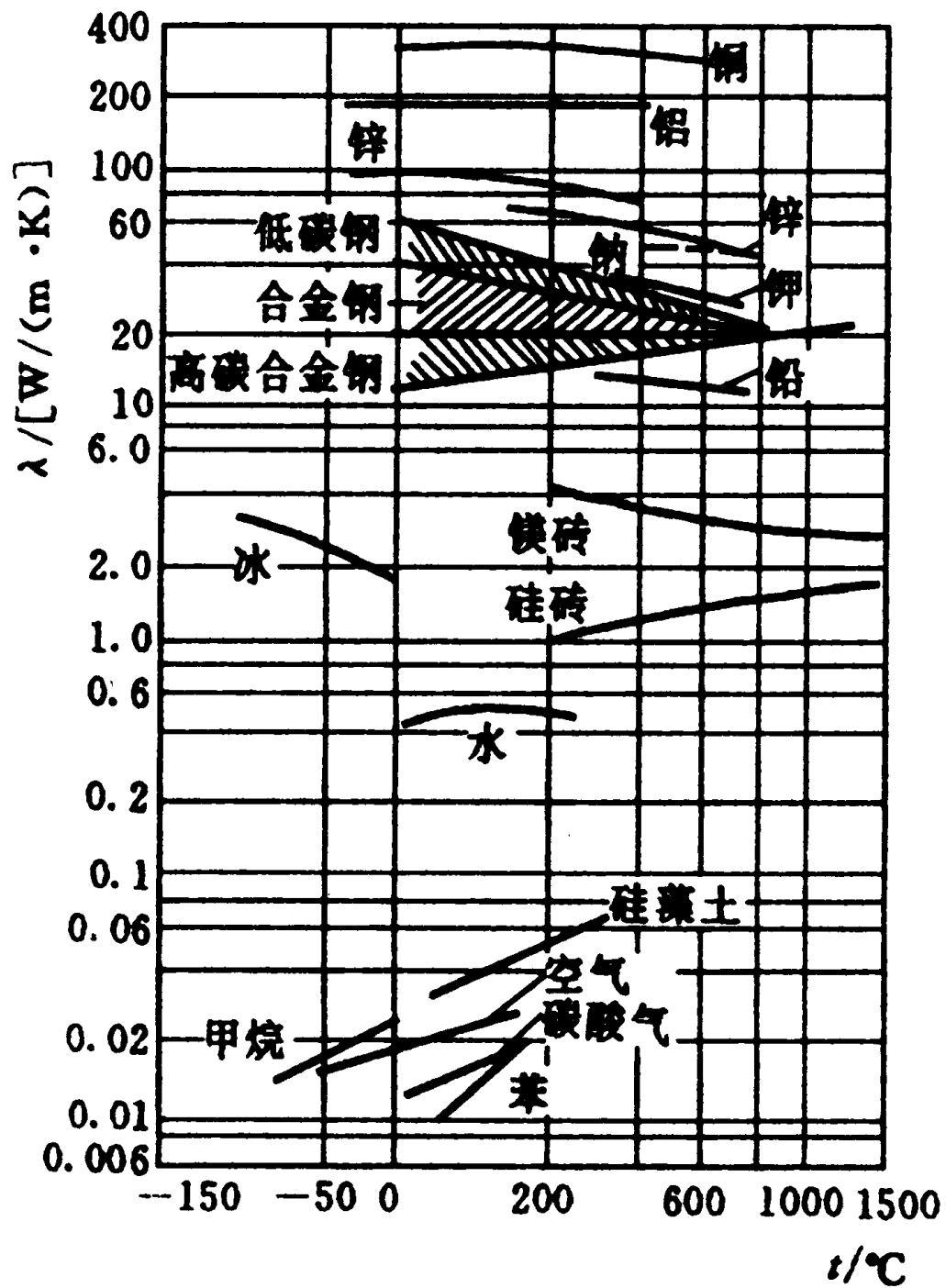
非金属：包括建筑材料和隔热保温材料， $0.025 \sim 3.0 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$

其导热系数都随温度的升高而增大。

保温材料

- **保温材料**：导热系数小于 $0.12\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 的材料。
- 如：岩棉、泡沫塑料、膨胀珍珠岩、膨胀蛭石、微孔硅酸钙制品和硅藻土制品等。
- 保温材料的特性：多孔性；湿度的影响，防潮。



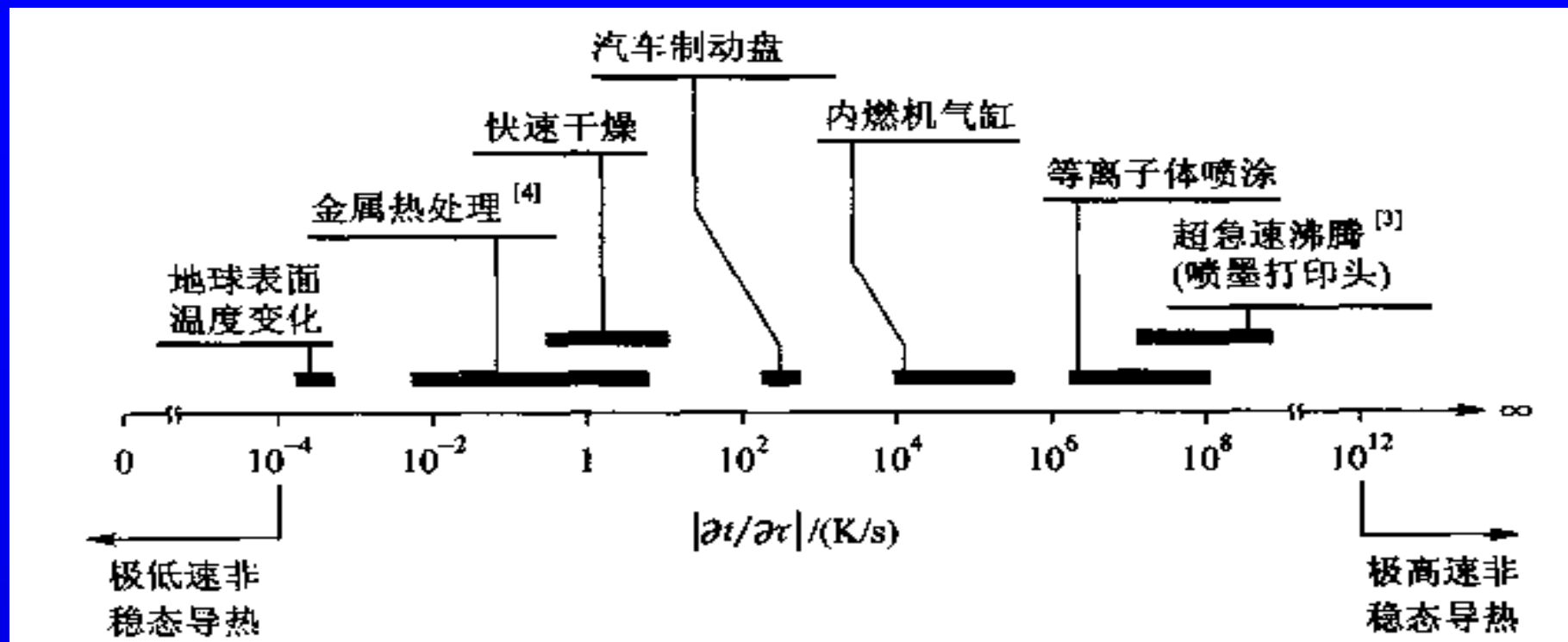
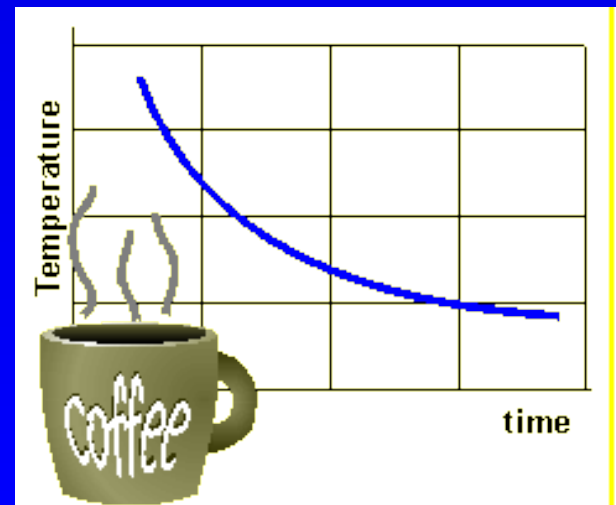


非稳态导热

导热系统内温度场随时间而变化

$$t = f(\tau)$$

特点：具有延时性和衰减性。



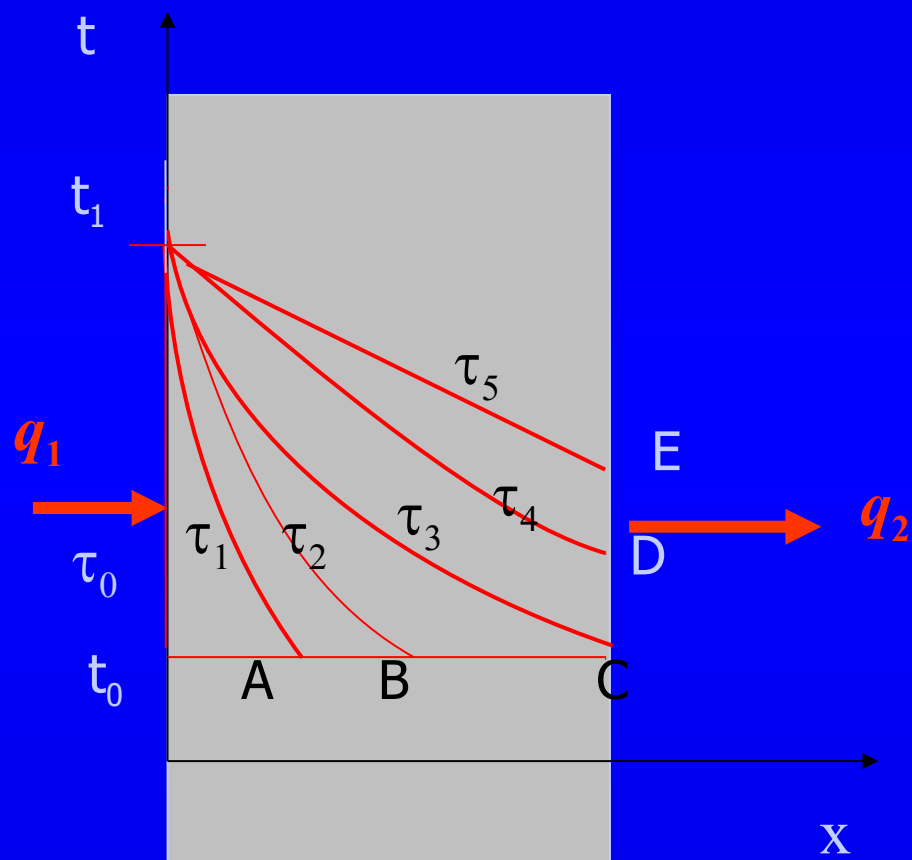
实例 1：井水的冬暖夏凉（慢）

由于土壤的热扩散率很低，地面上的温度变化传到地下十几米处所需时间约为半年，造成夏季的升温效应到冬季才在地下水中体现，冬天的低温现象则到夏天才在井水中体现。

实例 2：热泡式喷墨打印头（快）

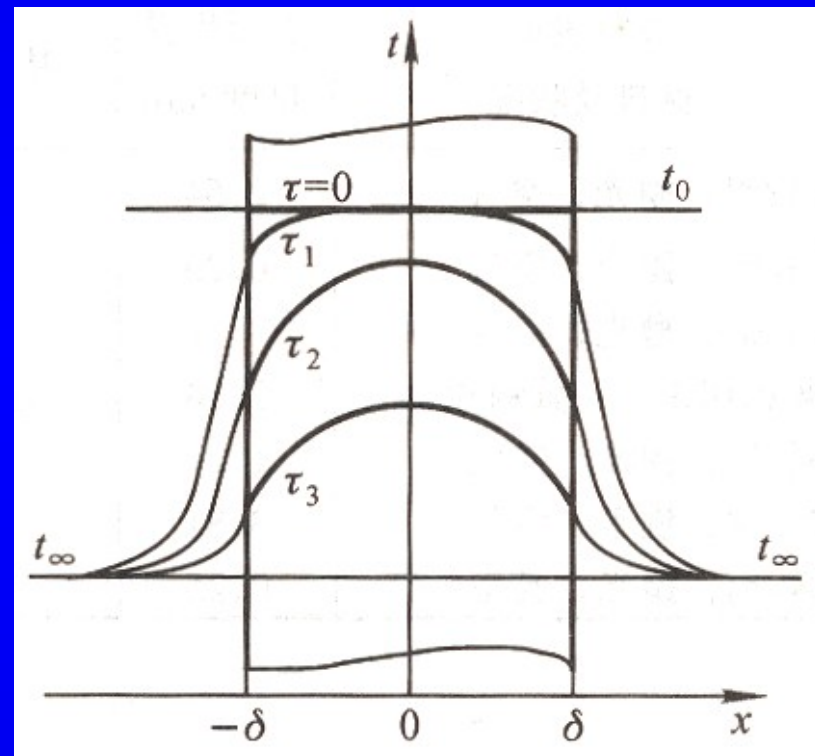


实例 3



单侧受热

实例 4



整体同时受热或冷却

热扩散率 $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ (m^2/s), 又称导温系数

- 物性参数, 表明了物质导热特性与其储热性能之比。
- 导热能力 λ 越强, 储热能力 ρc 越弱, 则传递温度变化能力越强。
- ρc 是单位体积的物体温度升高 1°C 所吸收的热量。
- a 的数值大 (λ 大或 ρc 小), 意味着在热量传递过程中, 沿途用于使物体温度升高的热量 ρc 少, 使物体各点的温度能较快的升高。

6.4 对流换热

对流换热基本定律

1701 年英国科学家牛顿在估算烧红铁棒的温度时，提出了 $q \propto \Delta t$ ，后人进一步研究后将成果归功于牛顿。

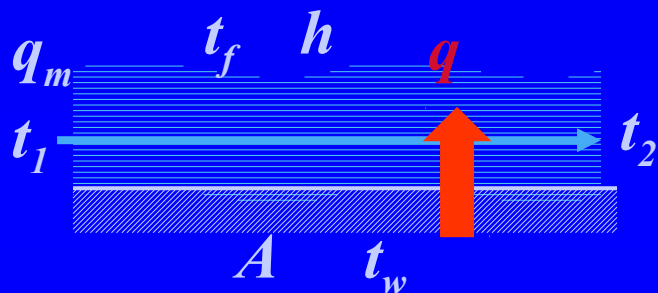
牛顿冷却公式：

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

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

表示对流换热的强弱

不是物性参数



哪些因素会影响 h 的大小？



h 的影响因素

流动的起因：强迫对流、自然对流

$$h_{\text{强制}} > h_{\text{自然}}$$

流动状态：层流、湍流

$$h_{\text{湍流}} > h_{\text{层流}}$$

流体的热物性： ρ 、 c_p 、 μ 、 λ

流体的相变：单相、相变

$$h_{\text{相变}} > h_{\text{单相}}$$

换热面的几何因素：尺寸、形状

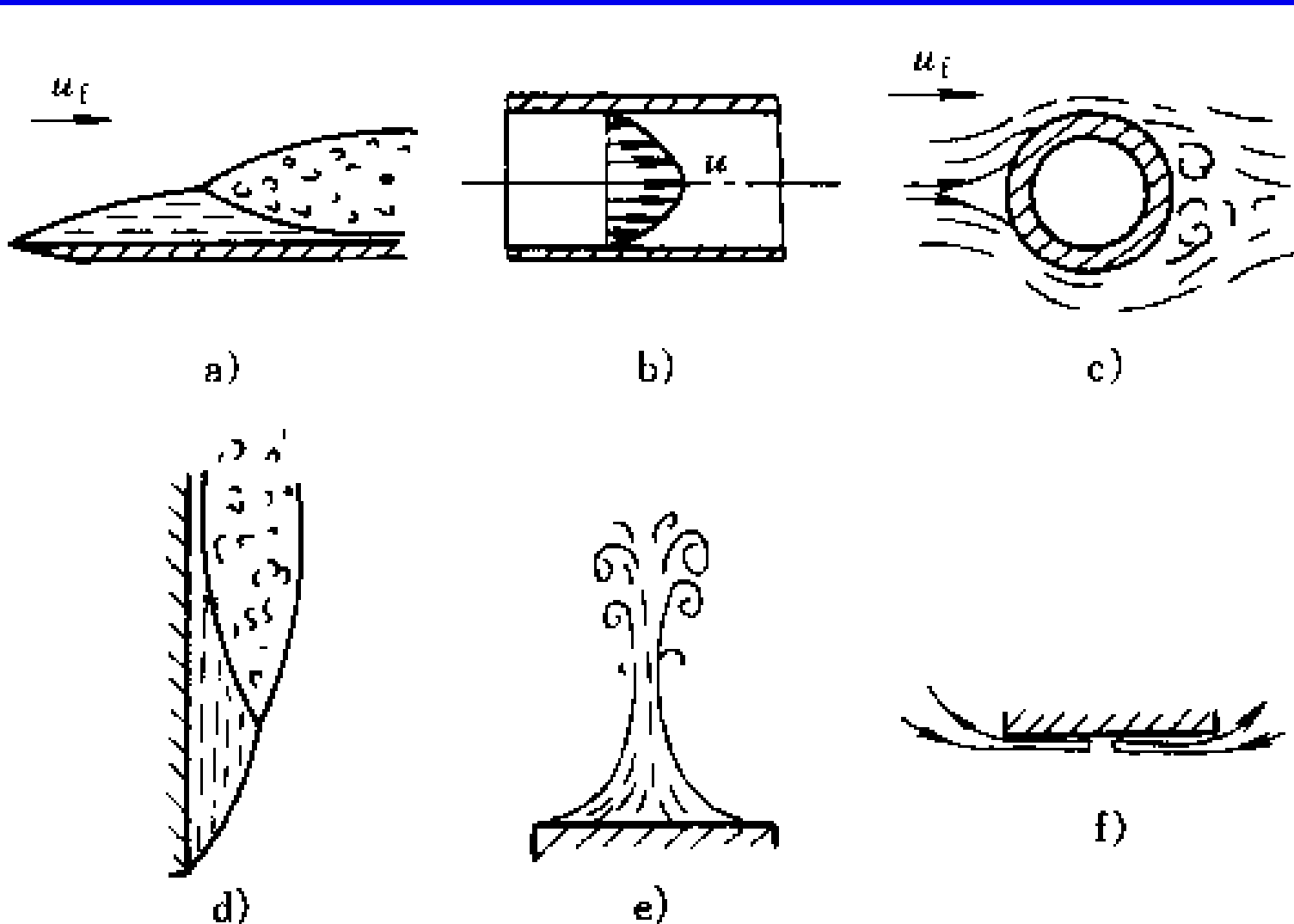
换热面的相对位置：如内部流动：管内、槽道内

外部流动：平

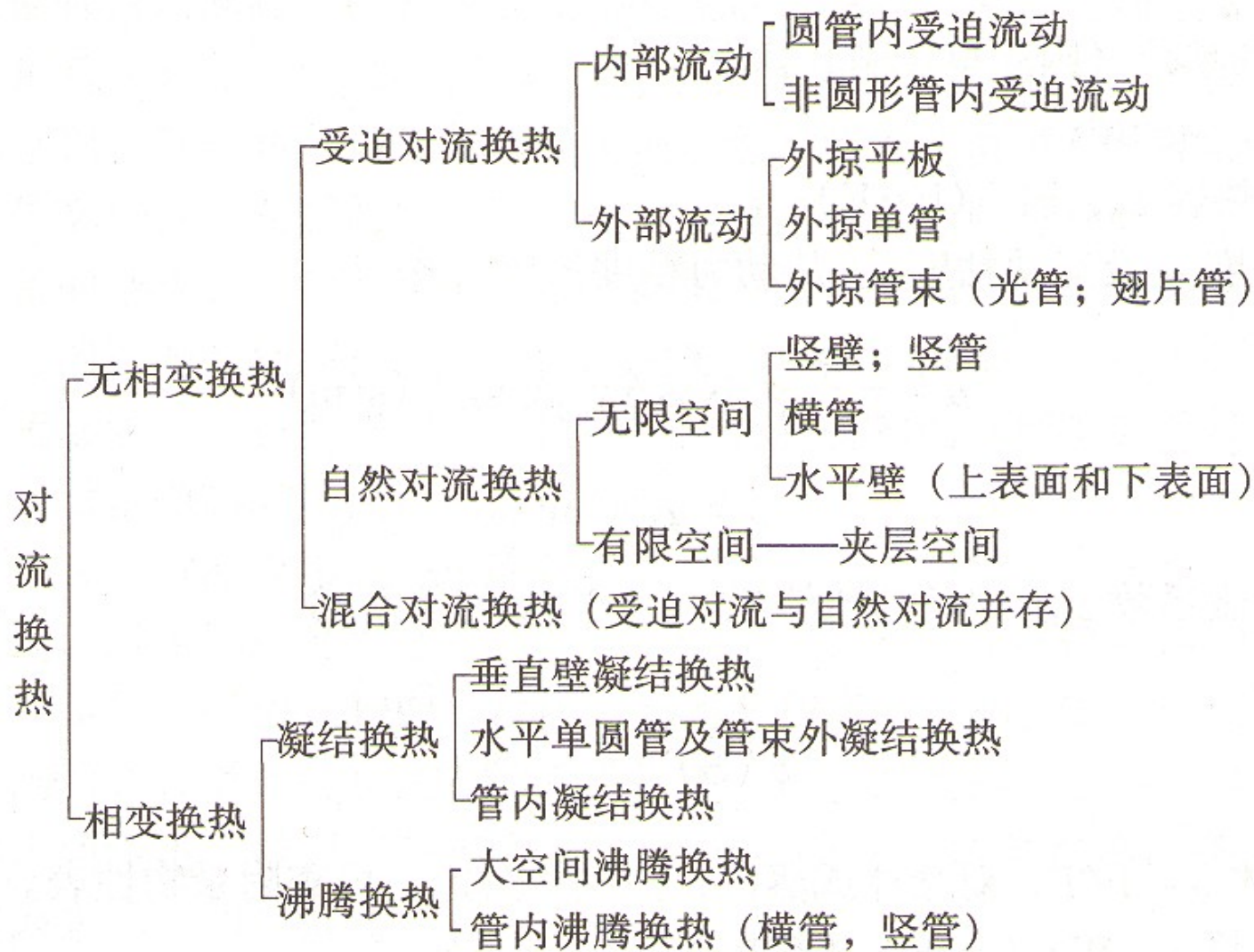
如强迫对流：
板、圆管、管束

$$h = f(u, t_w, t_f, \lambda, c_p, \rho, \eta, l \dots)$$

不同形式对流传热



对流换热的分类



h 的数值范围

表 6-2 表面传热系数 h 的大致数值范围

对流换热形式	$h[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
自然对流:	
空气	3~10
水	200~1000
油	10~60
强迫对流:	
气体	20~100
高压水蒸气	500~3500
水	1000~15000
油	50~2000
相变换热:	
水沸腾	2500~25000
水蒸气凝结	5000~15000
有机蒸气凝结	500~2000

解决对流换热问题的途径——求 h

1. 分析求解。

a) 分析解（**精确解**）：根据边界层理论，得到边界层微分方程组→常微分方程→求解。

b) 积分法（**近似解**）：假设边界层内的速度分布和温度分布，解积分方程。

2. 相似原理或量纲分析（**实验解**）： $Nu=f(Re,Pr)$

$$Nu=f(GrPr)$$

3. 比拟求解（**比拟解**）： $C_f \rightarrow h$

4. 数值求解（**数值解**）

层流和紊流

- 对流换热的真正发展是 19 世纪末叶以后的事情。1880 年，英国科学家雷诺（O. Reynolds 1842~1912）认为对流体流动起决定性影响的参数是雷诺数 Re

$$Re = \frac{\rho u L}{\eta} = \frac{u L}{\nu}$$

L 取当量直径 $d_e = \frac{4A_c}{P}$

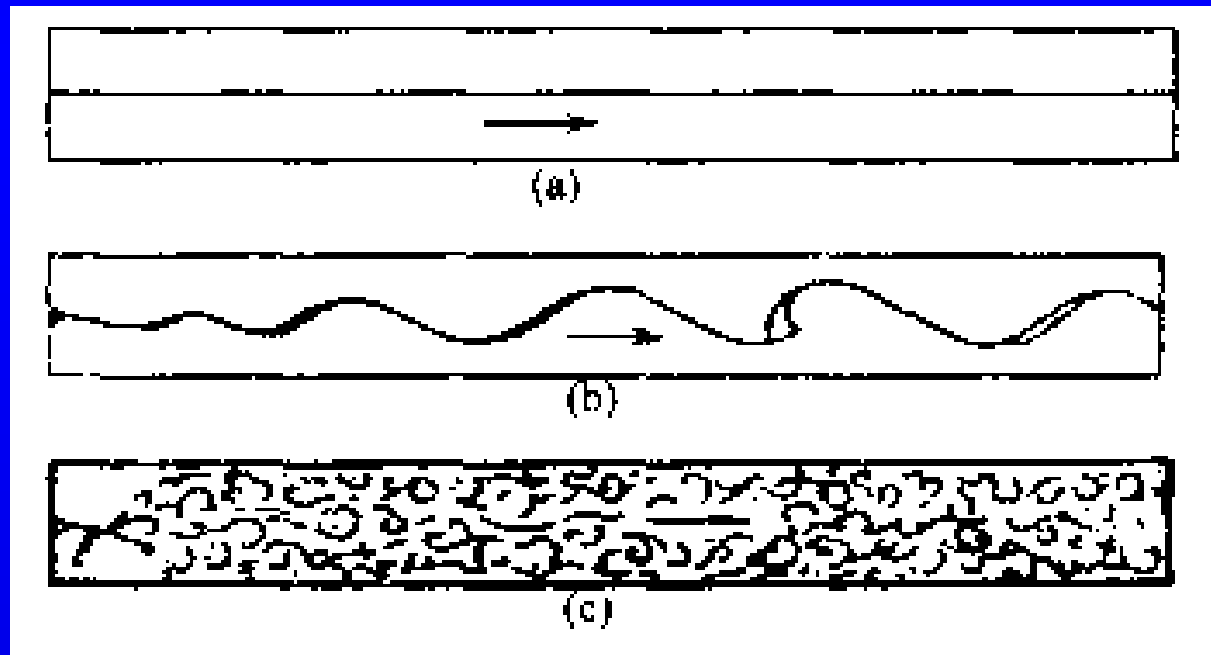
如，对于内、外管径为 d_1 和 d_2 的同心套管的环形通道：

$$d_e = 4A_c / P = d_2 - d_1$$

对于边长为 $a \times b$ 的矩形通道： $d_e = 2ab / (a + b)$

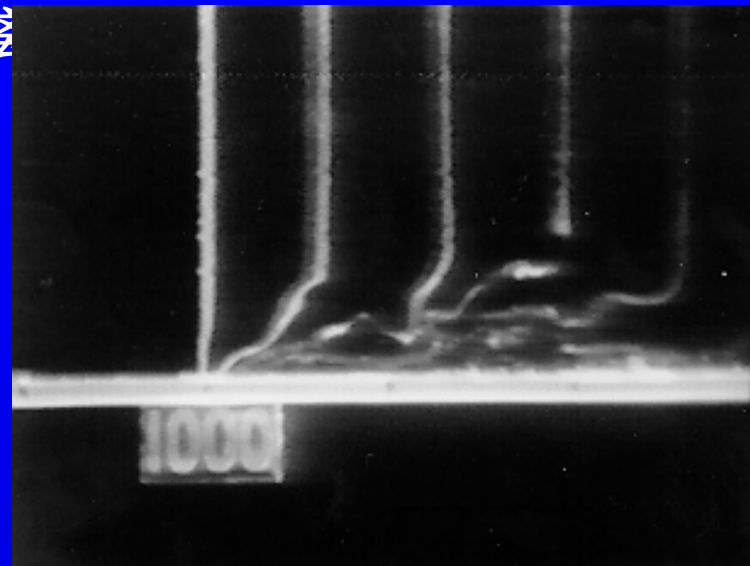
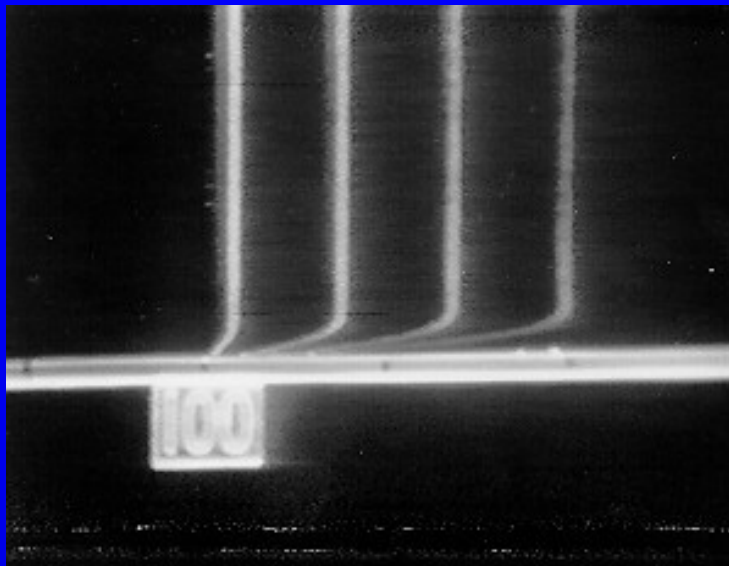
例如管内流动：临界 $Re_c=2300$

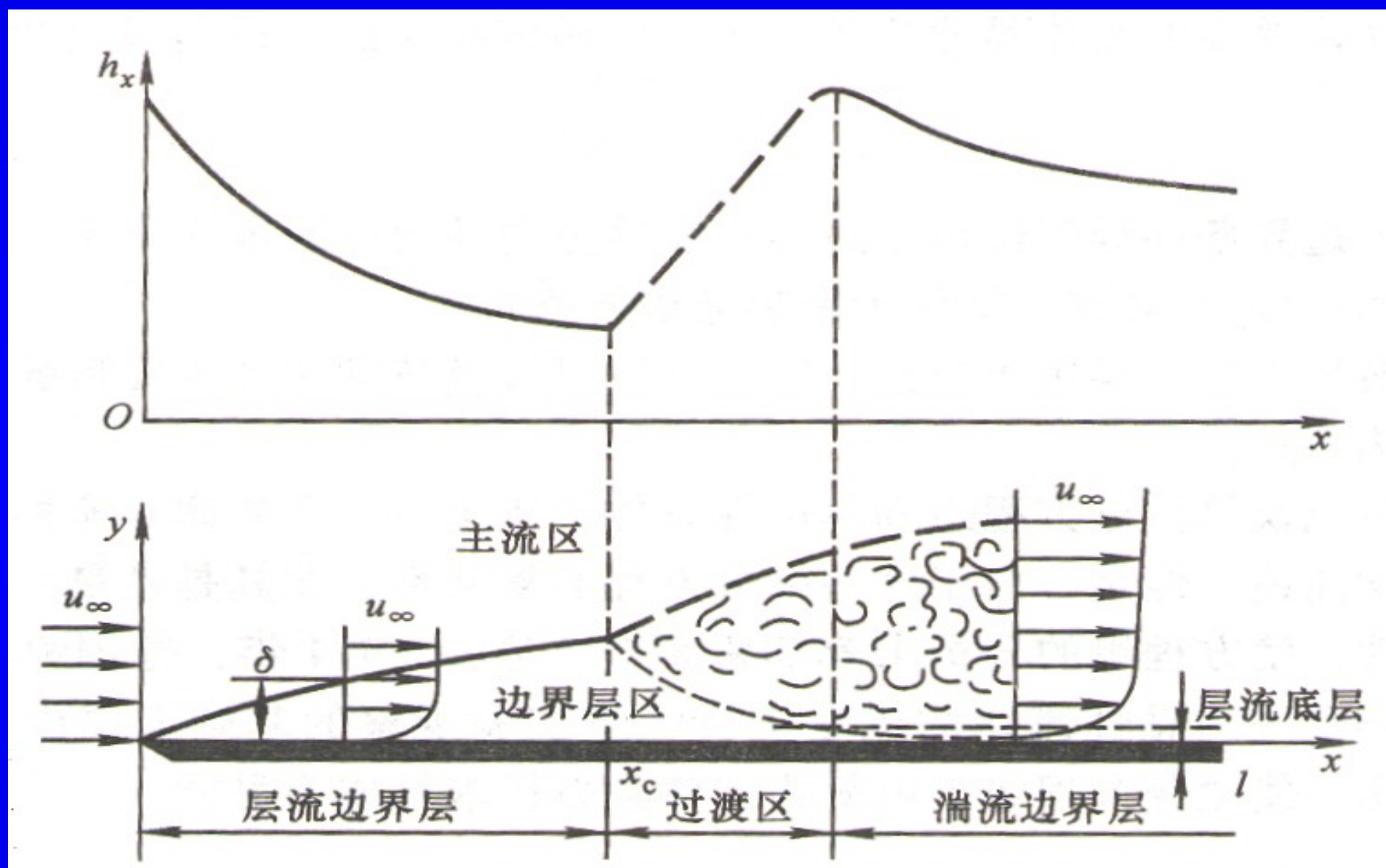
$Re < 2300$	层流
$2300 < Re < 10^4$	过渡态
$Re > 10^4$	旺盛紊流



边界层的概念

- 1904 年德国科学家普朗特提出
- 速度边界层：垂直于壁面的方向上流体流速发生显著变化的流体薄层。
- 速度边界层厚度 $\delta(x)$: 从壁面到速度变化达到 $u/u_\infty = 0.99$





热边界层的概念

- 热边界层：当流体流过平板，平板的温度 t_w 与来流流体的温度 t_∞ 不相等时，在壁面上方形形成温度发生显著变化的薄层。
- 热边界层的厚度 $\delta_t(x)$ ：当壁面与流体之间的温差达到壁面与来流之间的温差的 **0.99** 倍时，
 $(t_w - t) / (t_w - t_\infty) = 0.99$ 该点到壁面之间的距离 $\delta_t(x) / \delta(x) = \frac{1}{1.026} \text{Pr}^{-1/3}$
- 普朗特数 **Pr**：反映流体的动量扩散速率与热量扩散速率之比，流体物性对换热影响的一个准则。

无摩擦流体—— 0

液态金属—— 0.005~0.05

气体—— 0.5~1.5

一般液体—— 0.8~1000

很粘的油—— 1000~ ∞

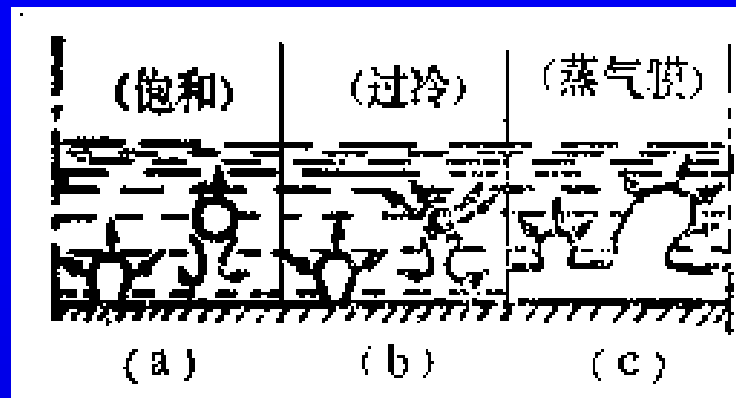
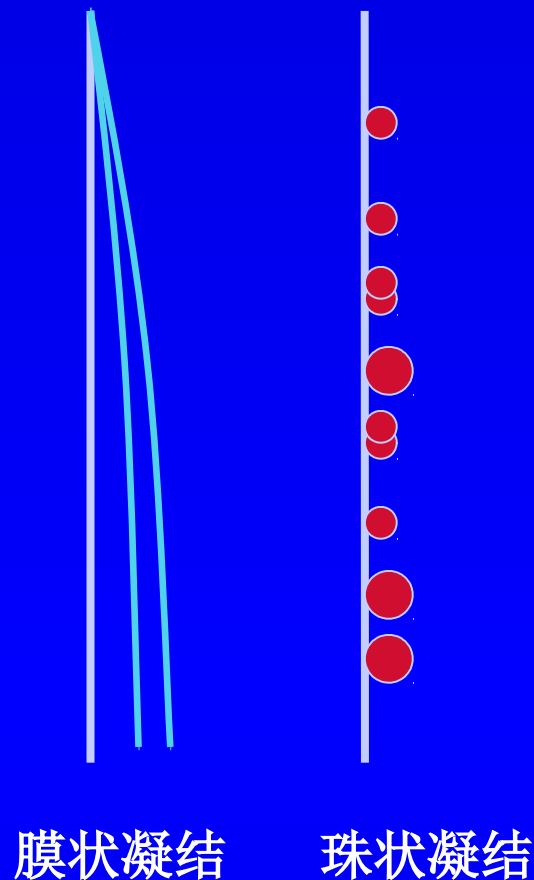
$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad \begin{cases} \text{Pr} = 1, & \delta = \delta_t \\ \text{Pr} > 1, & \delta > \delta_t \\ \text{Pr} < 1, & \delta < \delta_t \end{cases}$$

相变换热

- 凝结：蒸汽同低于饱和温度的冷壁接触，有两种凝结方式：膜状凝结（换热差）、珠状凝结（换热好）。

$$h_{\text{珠状}} \gg h_{\text{膜状}}$$

- 沸腾：存在过热度或失压都能导致沸腾的发生。核态沸腾 (a)
(b)、膜态沸腾 (c，形成气膜)

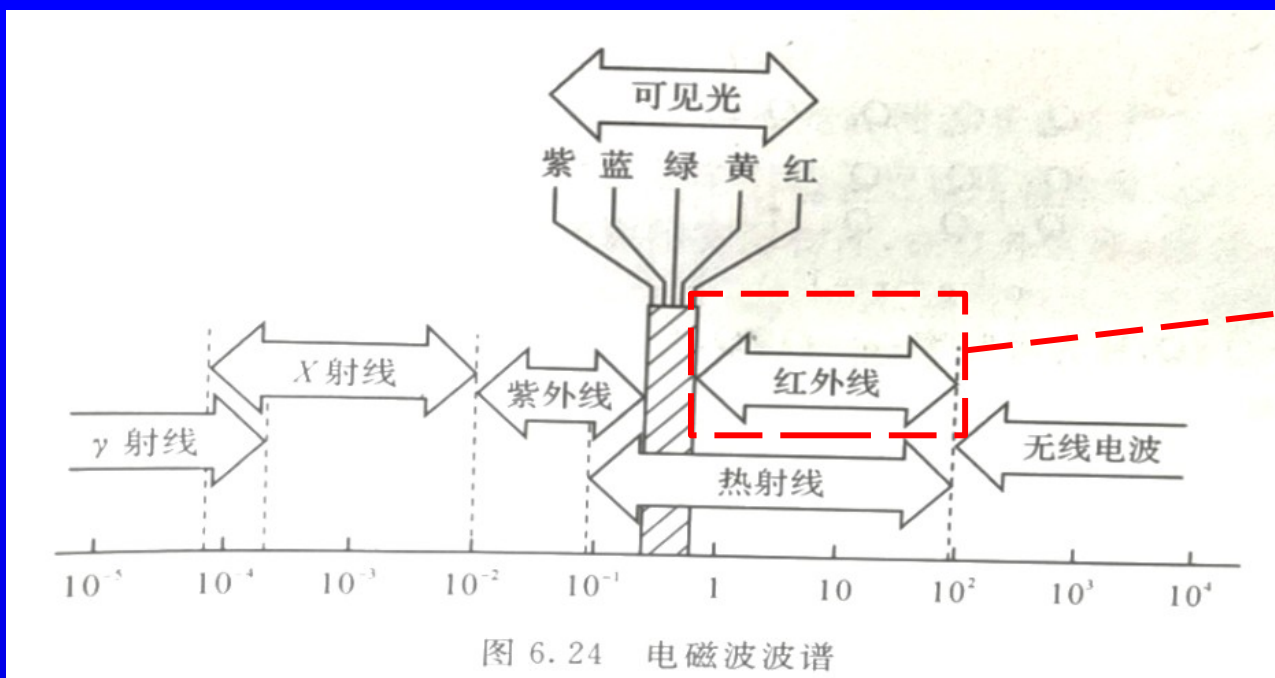


6.4 辐射换热

辐射换热

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）来传递能量。

特点：伴随着能量形式的转换、温度大于 0K 就会发生、既是发射体也是吸收体、无需介质



热辐射的波长范围以红外区段为主

辐射基本定律

斯蒂芬 -- 波尔兹曼定律 (Stefan-Boltzmann law) :

$$E_b = \sigma T^4 \quad W / m^2$$

式中: E_b --- 黑体辐射力, W/m^2

σ --- 黑体辐射常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$

T --- 热力学温度, K

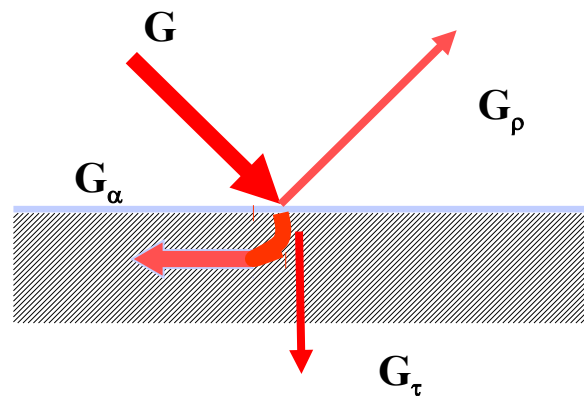
黑体: 一种理想辐射体与吸收体, 全部吸收外来射线

实际物体: $E < E_b$ (同温下)

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad W / m^2$$

辐射表面特性

- 发射率（黑度） $\varepsilon = E / E_b < 1$
- 吸收率： $\alpha = \text{吸收能量} / \text{总能量} < 1$
- 反射率： $\rho = \text{反射能量} / \text{总能量} < 1$
- 透过率： $\tau = \text{透过能量} / \text{总能量} < 1$
- 黑体：物体能全部吸收外来射线
- 白体：物体能全部反射外来射线
- 透明体：物体能全部透过外来射线
- 灰体：吸收率与波长无关
- 漫灰表面： $\varepsilon = \alpha$

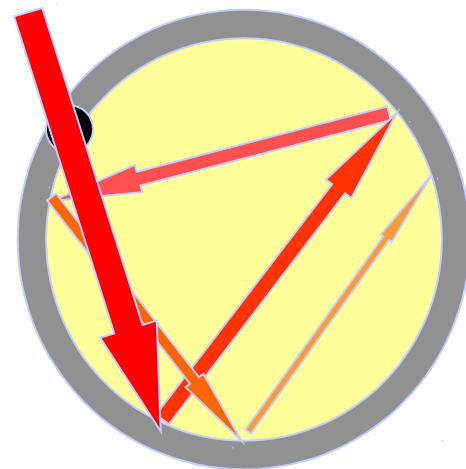


$$\alpha = \varepsilon = 1$$

$$\rho = 1$$

$$\tau = 1$$

$$\alpha_\lambda = \alpha = \text{常数}$$



人工空腔黑体

温室气体辐射

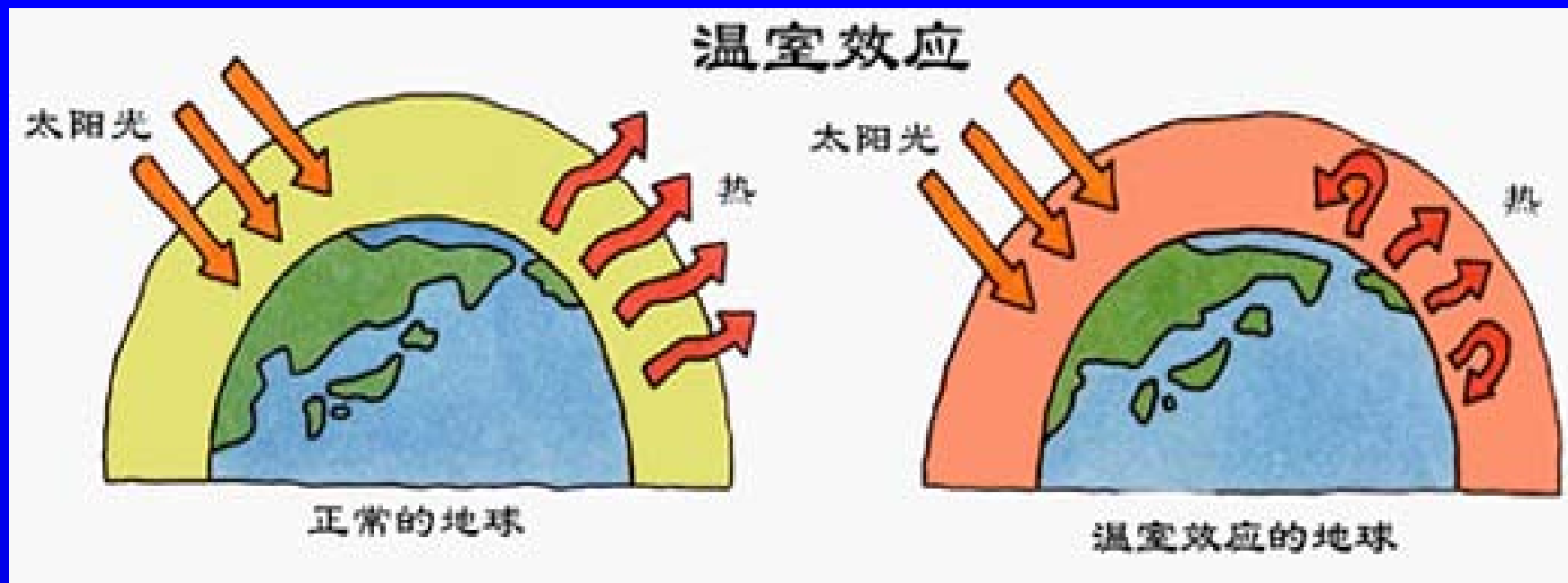
- ❶ 单原子气体和空气、氢气、氧气、氮气等分子结构对称的双原子气体可以看作是热辐射的透明体。
- ❷ 二氧化碳、水蒸汽、二氧化硫、甲烷、氟利昂（制冷剂）等三原子和多原子气体则在某些波段具有相当的辐射和吸收能力。

表 6-4 几种温室气体的影响

温室气体	来 源	主要危害
二氧化碳(CO ₂)	矿物燃料燃烧:发电、汽车尾气等	二氧化碳吸收红外辐射——能量逃逸 大气的主要形式
一氧化二氮 (N ₂ O)	种植用氮肥	能量吸收能力是二氧化碳的 270 倍
甲烷 (CH ₄)	沼 气、煤提炼、牲畜、细菌、腐烂的垃圾等	据推测,远古时期出现过一次大规模的甲烷 泄漏,造成地球温度急升,导致物种灭绝。
三氟化氮 (NF ₃)	半导体加工、太阳能电池制造和 液晶显示器制造中应用	在大气中的寿命可长达 740 年之久,其存储 热量的能力是二氧化碳的 12000~20000 倍。

大气温室效应

- CO_2 不吸收短波，只吸收长波，于是，地球表面的热量就散不出去，使地表温度升高，地球变暖。
- 象 CO_2 这类会使地球变暖的气体称为温室气体（包括水蒸汽、 SO_2 、甲烷、氟利昂等）。约 60 % 是人类大量使用化石燃料产生。



课程思政：碳达峰、碳中和

两会代表共议碳中和

03/07 19:30-21:30



中国力争 2030 年

前实现碳达

峰， 2060 年前实

现碳中和。

“**碳达峰**”是指在某一个时点，二氧化碳的排放不再增长达到峰值，之后逐步回落。

“**碳中和**”是指国家、企业、产品、活动或个人在一定时间内直接或间接产生的二氧化碳或温室气体排放总量，通过植树造林、节能减排等形式，以抵消自身产生的二氧化碳或温室气体排放量，实现正负抵消，达到相对“零排放”。

课程思政：碳达峰、碳中和

新华网视频

[https://haokan.baidu.com/v?
vid=10465252547454986037](https://haokan.baidu.com/v?vid=10465252547454986037)

讨论题及作业题

- 谈谈你对于大气温室效应的分析及应对策略
- 碳达峰、碳中和背后的全球博弈及对我国能源结构的影响
- 习题： 6-2, 3, 16, 20