



# 工程传热学 复习课

1. 热传导
2. 对流换热
3. 热辐射



## 题型

- 1. 简答题 5-6道
- 2. 分析题 2道
- 3. 计算题 3 道
  - 网上有样题可查阅



## 一、导热

- 傅立叶定律 (P11)；
- 导热热阻 (平、圆筒壁) (P19、23)；
- 直角坐标微分方程 (P15)；
- 柱坐标、球坐标一维导热微分方程(P16)；
- 变导热、变截面的温度曲线凹向判断；
- 无量纲数Bi、Fo的定义式和物理意义(P43、46)
- 集总参数的判定、温度场公式要记住(P46、44)。

# 第二章 稳态导热

## 一、基本概念

### 1. 温度场 (temperature field) :

- 用文字描述
- 温度不随时间变化的温度场，其中的导热称为稳态导热： $t = f(x, y, z, \tau)$   $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$

### 2. 等温面与等温线

- 定义
- 特征



### 3. 温度梯度 (temperature gradient, 方向和大小):

➤ 定义: 等温面法线方向的温度变化率

### 4. 傅立叶定律及导热系数

$$\lambda = -q / gradt \quad \text{w/m}\cdot\text{K} \quad \checkmark$$

$$\lambda_{\text{固体}} > \lambda_{\text{液体}} > \lambda_{\text{气体}}$$

$$\lambda_{\text{金属}} > \lambda_{\text{非金属}}$$

$$\lambda_{\text{合金}} < \lambda_{\text{纯金属}}$$

- 冬天，棉被经过晒后拍打，为什么会觉得暖和？
  
- 答：棉被晒后，水分蒸发，经拍打，大量空气进入棉絮空间，自然对流不易展开，由于空气导热系数低，故起到很好的保温作用。



## 5. 温度对导热系数的影响

- 一般地说,所有物质的导热系数都是温度的函数,不同物质的热导率随温度的变化规律不同。
- 纯金属的导热系数随温度的升高而减小。
- 一般合金和非金属的导热系数随温度的升高而增大。
- 在工业和日常生活中常见的温度范围内,绝大多数材料的导热系数可以近似地认为随温度线性变化,表示为: $\lambda = \lambda_0(1+bT)$



## 6. 导热微分方程

- 建立基础
- 表达式  $\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial t}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial t}{\partial z}) + \dot{\Phi}$  ✓
- 各项含义 ✓
- 热扩散率定义、出处、物理意义，与导热系数区别

## 7. 导热过程的单值性条件

8. 导热问题的求解方法:(1) 分析解法;(2) 数值解法;(3) 实验方法。

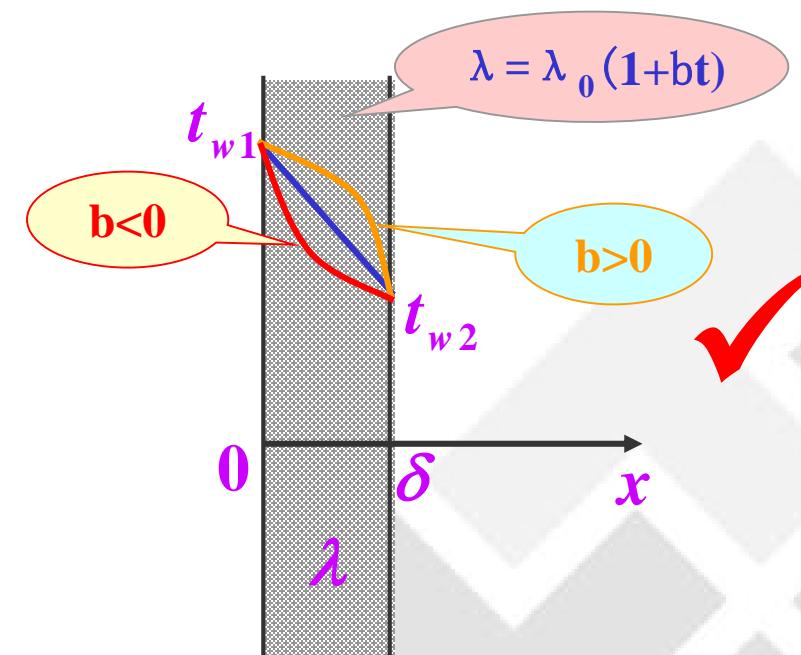


## 二、一维稳态导热

### 1. 通过平壁的导热 ✓

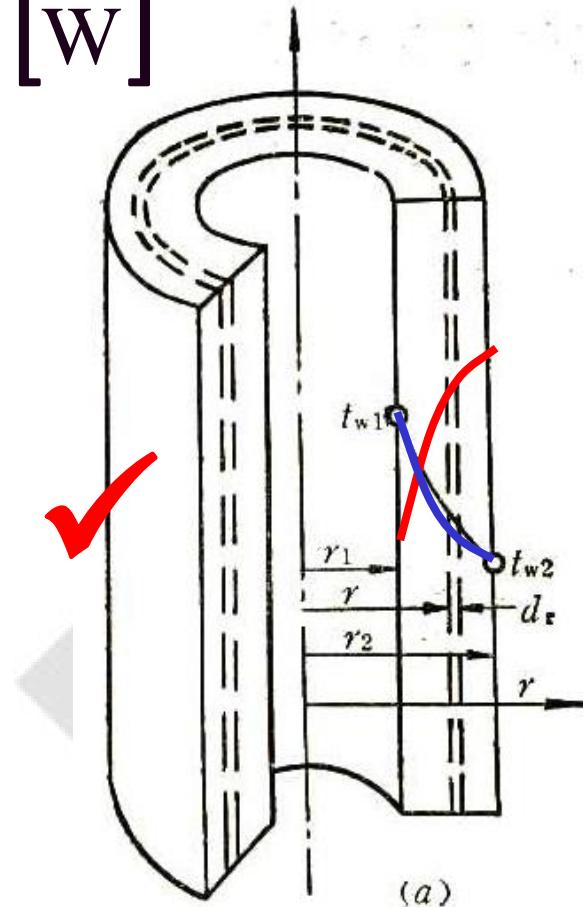
$$\begin{cases} q = -\lambda \frac{t_2 - t_1}{\delta} = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda} \\ \Phi = \frac{\Delta t}{\delta/(A\lambda)} \end{cases} \quad \checkmark$$

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$



## 2. 通过圆筒壁的导热

$$\checkmark \Phi = 2\pi r l q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_\lambda} \quad [\text{W}]$$





### 3. 通过球壁的导热

► 一维 ✓

### 4. 变截面或变导热系数问题

### 5. 内热源问题

### 6. 肋片导热分析

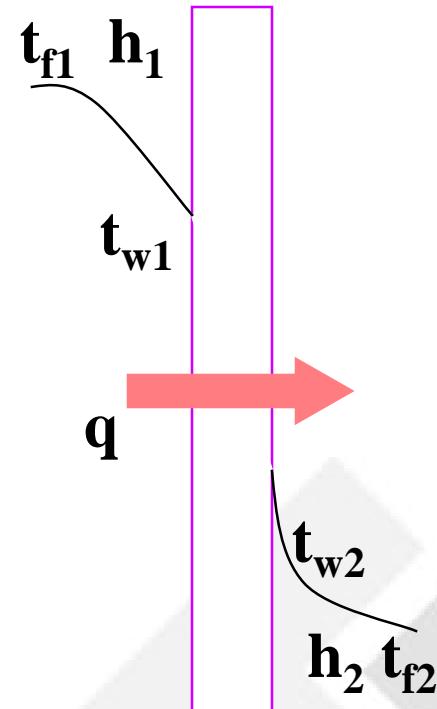


## 6. 肋片导热

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\delta}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A}} \quad [\text{W}]$$

为了增加传热量，可以采取哪些措施？

- 增加温差，但受工艺条件限制
- 减小热阻：
  - 金属壁一般很薄( $\delta$  很小)、热导率很大，导热热阻一般可忽略
  - 增大 $h_1$ 、 $h_2$ ，但提高 $h_1$ 、 $h_2$ 并非任意的
  - 增大换热面积  $A$  也能增加传热量



## ① 肋片导热的特点：

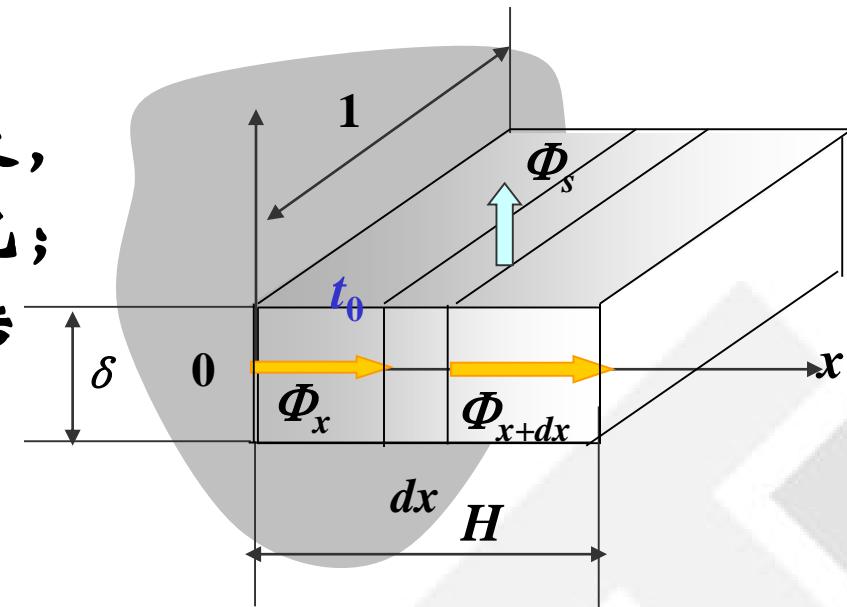
- 在肋片伸展的方向上有表面的对流换热及辐射换热，因而热流量沿传递方向不断变化。
- 肋片表面所传递的热量都来自(或进入)肋片根部，即肋片与基础表面的相交面。
- 分析目的：1)获得肋的温度分布；  
                  2)通过肋片散热量。



## ②通过等截面直肋的导热

假定：

- (1) 肋片在垂直屏幕方向很长，不考虑温度沿该方向的变化；
- (2) 材料的导热系数及表面传热系数为常数；
- (3)  $\delta/\lambda \ll 1/h$  (金属，导热系数大)，任一截面上温度均匀，温度仅沿x变化。



等截面内的温度分布：

$$\theta = \theta_0 \frac{e^{mx} + e^{2mH} e^{-mx}}{1 + e^{2mH}} = \theta_0 \frac{\cosh[m(x - H)]}{\cosh(mH)}$$

双曲函数：

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

双曲正弦

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

双曲余弦

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

双曲正切

$$\theta = \theta_0 \frac{e^{mx} + e^{2mH} e^{-mx}}{1 + e^{2mH}} = \theta_0 \frac{\cosh[m(x - H)]}{\cosh(mH)}$$

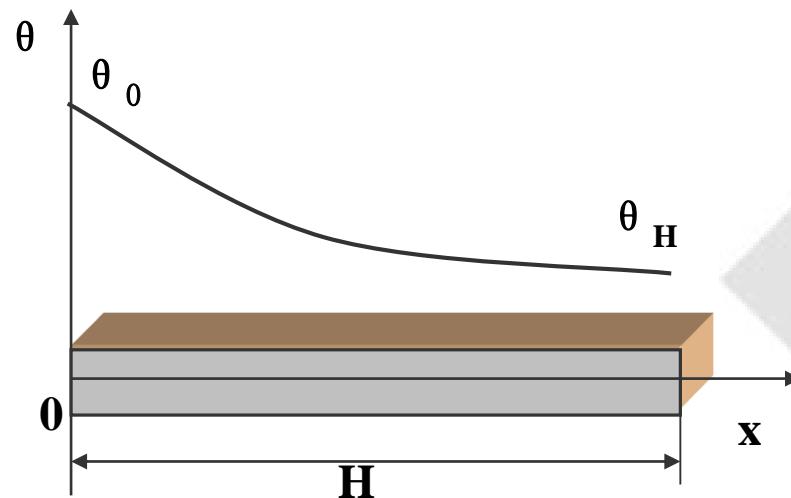
$$m = \sqrt{\frac{hP}{\lambda A_c}}$$

为一正常数，其倒数具有长度量纲，表征肋片导热性能、换热性能及几何结构之间的相对关系。

$$\theta = \theta_0 \frac{e^{mx} + e^{2mH} e^{-mx}}{1 + e^{2mH}} = \theta_0 \frac{\cosh[m(x - H)]}{\cosh(mH)}$$

当  $x=H$  时：  $\theta_H = \theta_0 \frac{\cosh(0)}{\cosh(mH)} = \frac{\theta_0}{\cosh(mH)}$

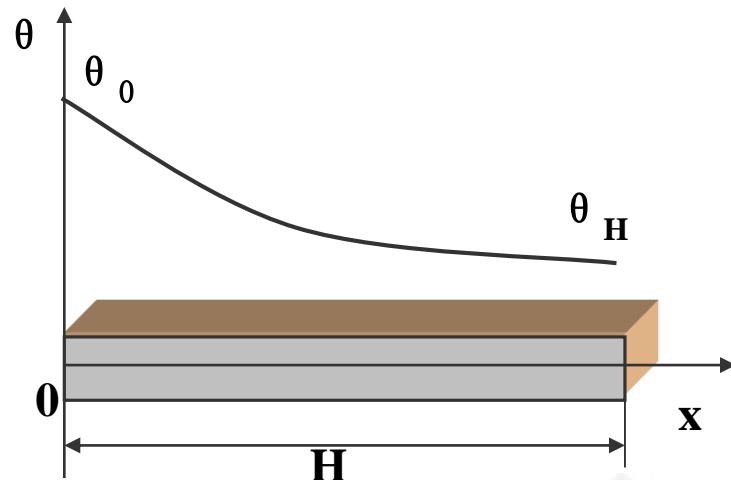
等截面直肋片中的温度变化为一双曲函数。





## 通过肋片散热量：

由肋片散入外界的全部热量  
都必须通过  $x = 0$  处的肋根  
截面。



$$\begin{aligned}\Phi_{x=0} &= -\lambda A \left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0} = -\lambda A_c \theta_0 (-m) \frac{\sinh(mH)}{\cosh(mH)} \\ &= \lambda A_c \theta_0 m \tanh(mH) = \frac{hP}{m} \theta_0 \tanh(mH)\end{aligned}$$



### ③ 肋效率(Fin efficiency)

从散热的角度评价加装肋片后换热效果。

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

对于等截面直肋，其肋效率为：

$$\eta_f = \frac{\frac{hP}{m} \theta_0 \tanh(mH)}{hPH\theta_0} = \frac{\tanh(mH)}{mH}$$

故肋效率只与( $mH$ )有关。

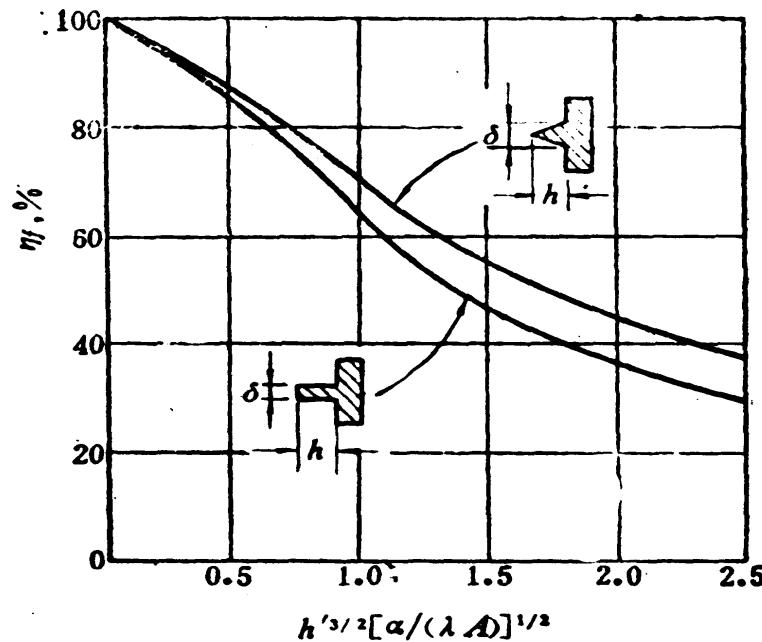


## 关于肋片效率的讨论

$$\eta_f = \frac{\tanh(mH)}{mH}$$

$mH$  的数值较小时， $\eta_f$  较高。

经济的肋片效率大约在  
 $\eta_f=0.64-0.76$  之间。



$$\eta_f = \frac{\tanh(mH)}{mH} \quad mH = \sqrt{\frac{2h}{\lambda\delta}} H$$

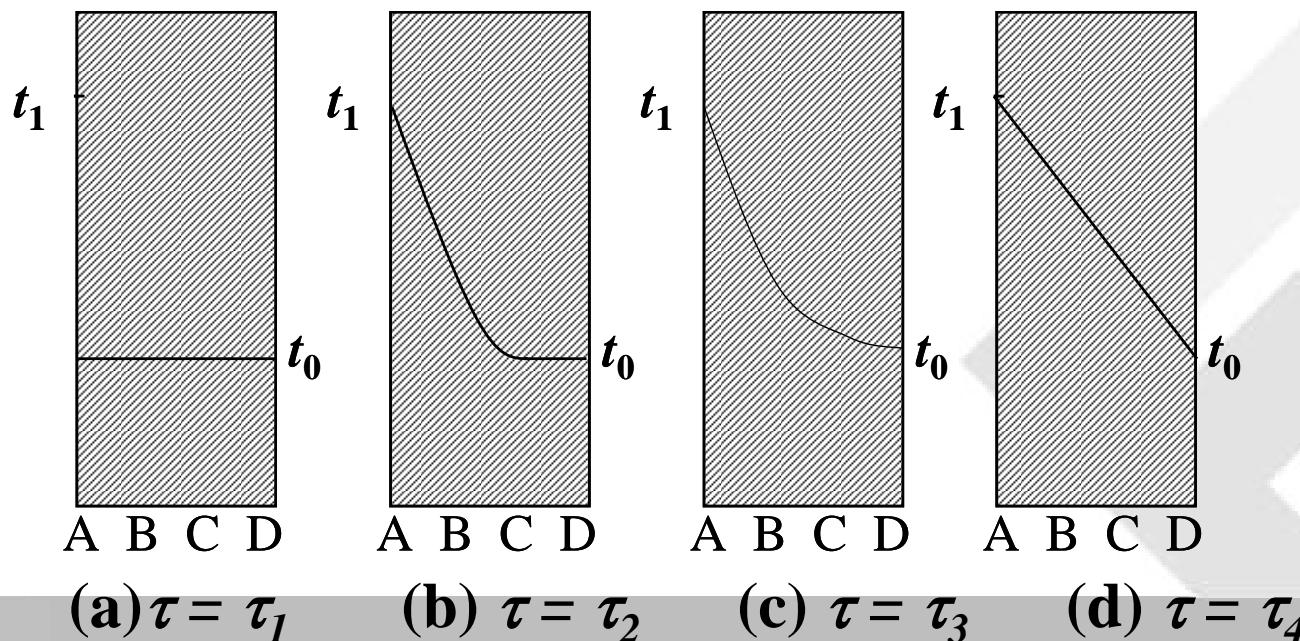
- 对于矩形肋，影响肋片效率的因素：肋片材料的热导率  $\lambda$ 、肋片表面与周围介质之间的表面传热系数  $h$ 、肋片的几何形状和尺寸 ( $P$ 、 $A$ 、 $H$ )
  - 热导率愈大，肋片效率愈高；
  - 肋片愈高，肋片效率愈低，肋片不宜太高；
  - 肋片愈厚，肋片效率愈高；
  - $h$  愈大，即对流换热愈强，肋片效率愈低。一般总是在表面传热系数较低的一侧加装肋片。

# 第三章 非稳态导热

## 一、非稳态导热过程

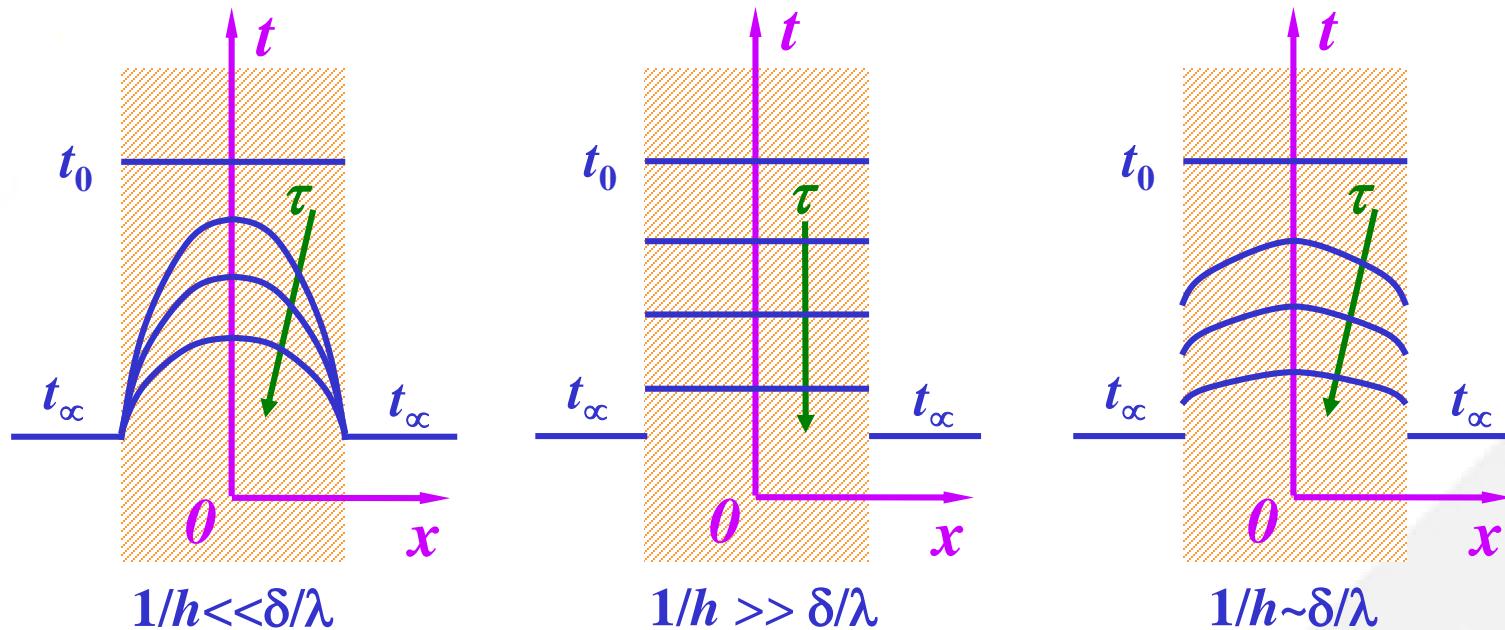
1. 非稳态导热：周期性和非周期性

2. 两个阶段：非正规状况阶段（初始状况阶段）、正规状况阶段





## ➤ 边界条件对温度分布的影响



## ➤ 毕渥数的表达式和物理意义 ✓

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

## 二、集总参数法

1. 集总参数系统定义、特征

2. 能量守恒  $\Rightarrow$  温度分布

$$F_0 = \frac{\tau}{l^2/a} \checkmark$$

$$\frac{\theta}{\theta_0} = e^{-\frac{hA}{\rho V c} \tau} = e^{-Bi_v \cdot \underline{Fo}_v} \checkmark$$

3. 时间常数定义、表达式、影响因素

4. 集总参数系统的判定

$$Bi_v \leq 0.1M \checkmark$$

### 三、一维非稳态导热的分析解

➤ **求解思路：**建立导热微分方程式，引进过余温度将非齐次方程组化为齐次方程，采用分离变量法求解温度表达式。

## ➤ 分析解的讨论

- 傅里叶数  $Fo$  对温度分布的影响
- 当  $Fo \geq 0.2$  时，平壁内所有各点过余温度的对数都随时间线性变化，并且变化曲线的斜率都相等，这一温度变化阶段称为非稳态导热的正规状况阶段。
- 毕渥数  $Bi$  对温度分布的影响

## ➤ 诺模图（海斯勒图）

➤ 利用线算图可求解温度及热量，注意只适用于  $Fo \geq 0.2$  的情况。

## 四、半无限大物体的非稳态导热

## 五、二维及三维非稳态导热

应用海斯勒线算图可以求出厚度为 $2\delta$ 的无限大平板、半径为 $R$ 的无限长圆柱体、及半径为 $R$ 的球体的温度分布和传导的热量。

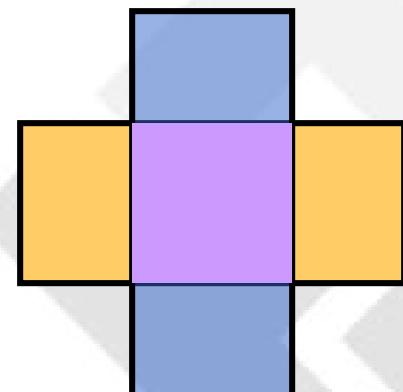
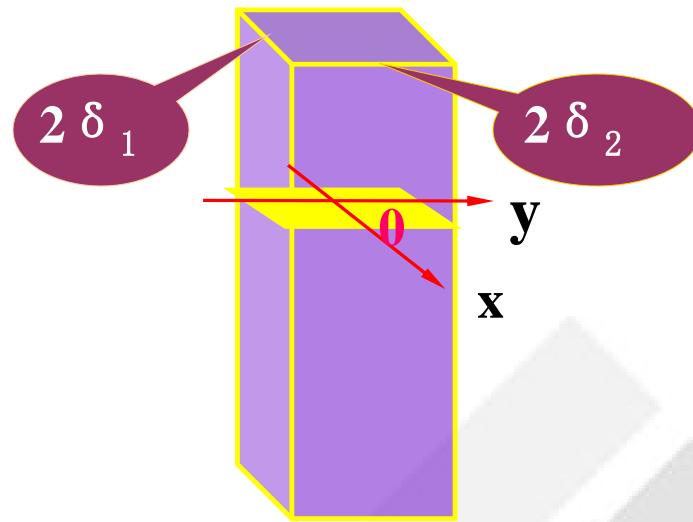
对非一维非稳态导热问题，能不能利用上面的一维非稳态导热线算图来进行求解呢？



## 4个例子

1. 矩形截面的长棱柱（正四棱柱）：可由两个大平板正交构成，因而温度分布为两个大平板对应的温度分布的乘积。

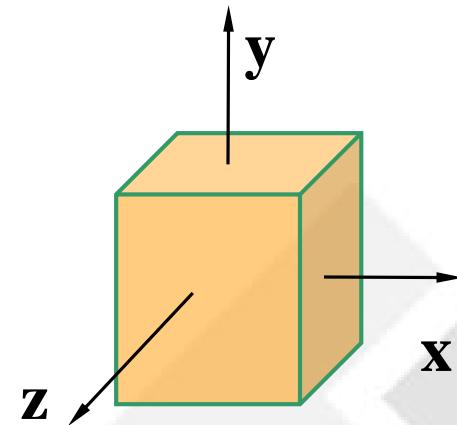
$$\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) = \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)_{p1} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)_{p2}$$





2. 矩形块体(立方体) 可由三个大平板正交构成, 因而温度分布为三个大平板对应的温度分布的乘积。

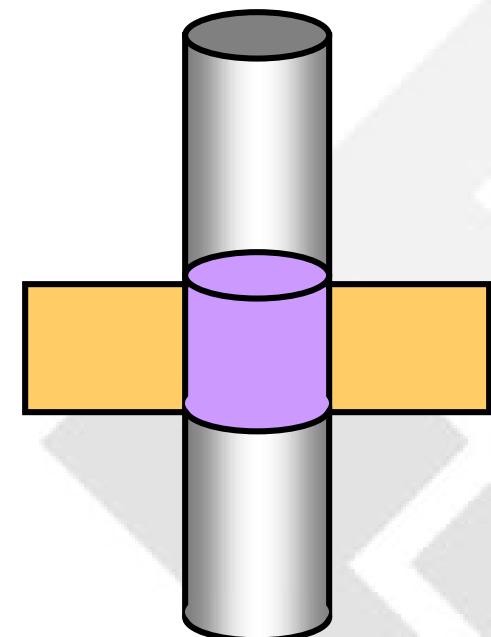
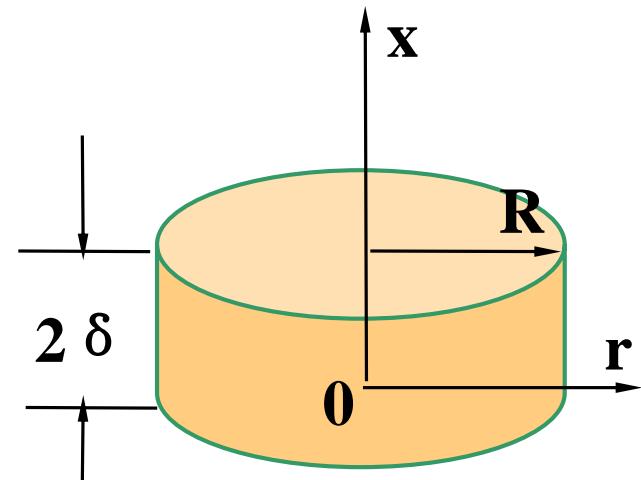
$$\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) = \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)_{p1} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)_{p2} \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)_{p3}$$





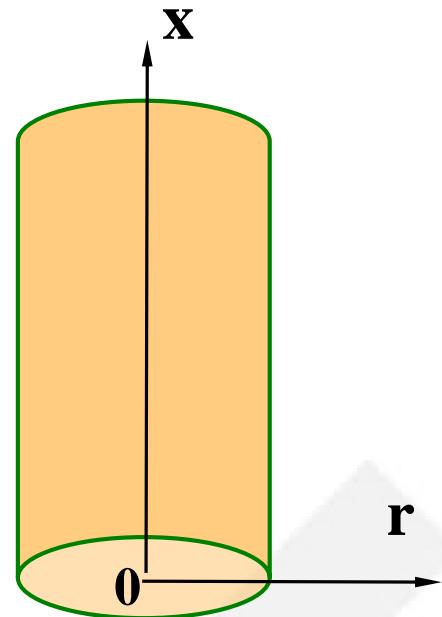
3. 短圆柱体可由一个长圆柱体和一个大平板正交构成，因而温度分布为一个长圆柱体和一个大平板对应的温度分布的乘积。

$$\left( \frac{\theta}{\theta_0} \right) = \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)_{p1} \cdot \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)_c$$





4. 半长圆柱体可由一个长圆柱体和一个半无限大固体正交构成，因而温度分布为一个长圆柱体和一个半无限大固体对应的温度分布的乘积。



$$\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) = \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)_c \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)_s$$



## 二、对流换热

- 大题在第五章，思考题在第四章；
- 所有经验关联式都不记；
- 记住所有特征数的定义和物理意义；
- 经验公式的修正方式需要知道；
- 会通过 $Re$ 判别流态（管内、平板）；
- 对流换热微分方程 $h=?$ 要记住；
- 动量方程、能量方程要了解其各项的物理意义；
- 边界层概念，速度剖面、温度剖面会画。

# 第四章 对流换热原理

## 一、对流换热概述

- 牛顿冷却公式  $h = \Phi / (A(t_w - t_\infty))$  ✓ 因此求解  $h$  是对流换热计算的核心问题。
- 对流换热微分方程式

$$h = - \frac{\lambda}{\Delta t} \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0}$$

- 对流换热影响因素：流速、流态、流动起因、换热面的几何因素、流体物性。

## 二、层流流动换热的微分方程组

- 不可压缩牛顿型流体二维对流换热问题，常物性假定。
    - 连续性方程
    - 动量微分方程(2个)
    - 能量微分方程
    - 对流换热微分方程
  - 求解途径
- 各项含义、能量微分方程与导热微分方程联系

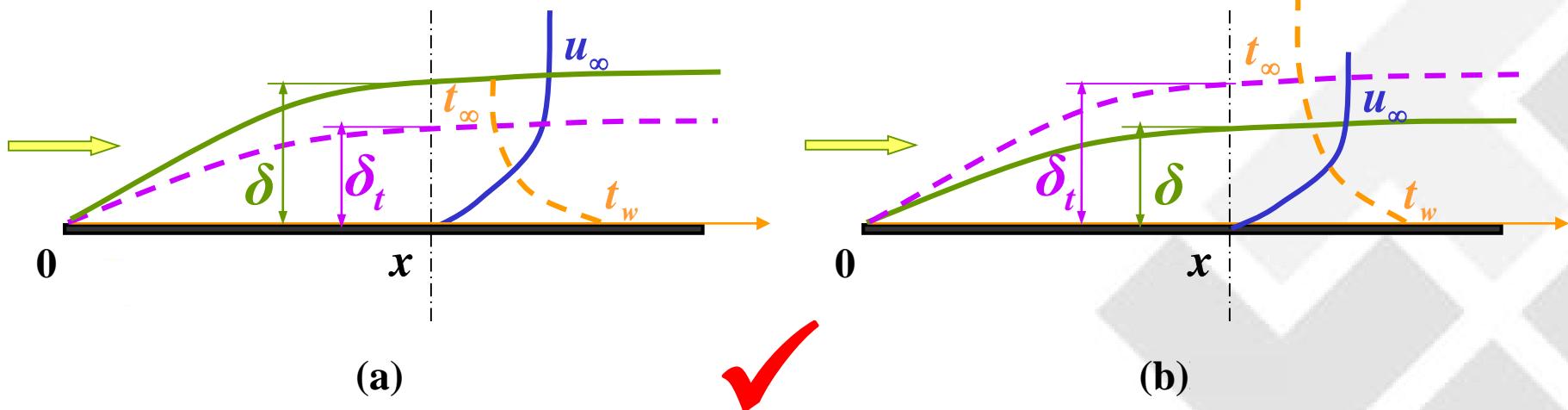
### 三、对流换热过程的相似理论

- 无量纲准则的表达式和物理意义 ✓
- $Eu$ 、 $Re$ 、 $Pr$ 、 $Gr$ 、 $Nu$  ( $Bi$ )
- 只有同类现象才有相似的可能性
- 对流换热准则关系式的实验获取方法



## 四、边界层 (Boundary layer) 理论

- 1. 边界层定义 ✓
- 2. 边界层厚度 (相对大小决定于 Pr)



### ➤ 3. 边界层微分方程组

➤ 基本思路：对微分方程组中的各项进行数量级比较，略去高阶小量。

➤ 简化条件： $Re$ 足够大、 $Pe$ 足够大

➤ 结论：忽略....、方程变化、物理特征

### ➤ 4. 边界层积分方程组及其求解

➤ 结论：计算结果与精确解相等。

## 5. 紊流流动换热

- 1) 紊流形成的影响因素
- 2) 紊流流动与传热特征
- 3) 紊流时均方程组

$$\text{Pr}_t = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_h}$$

紊流动量扩散率  
紊流热扩散率

- 4) 紊流模型
  - 普朗特动量传递模型
  - 双方程模型 (k- $\varepsilon$  模型 )

# 第五章 对流换热计算

## 一、管(槽)内流体受迫对流换热计算

- 基本概念：进口段与充分发展段
- 管内受迫对流换热的计算
  - 紊流与层流的准则关联式 ( $Re=2200 \sim 10^4$ ) 及修正公式 ✓
  - 注意：定性温度与定型尺寸的选择

$$\text{Re} = \frac{u_m d}{\nu} \leq 2200$$



—— 层流流动

$$\text{Re} \in (2200, 10^4)$$

—— 过渡流动

$$\text{Re} \geq 10^4$$

—— 湍流流动

## 二、流体外掠物体的对流换热计算

### 1. 外掠平板 ( $5 \times 10^5$ )

- 准则关联式，定性温度与定型尺寸

### 2. 外掠单管

- 边界层分离
- 准则关联式，定性温度与定型尺寸

### 3. 外掠管束

- 准则关联式，定性温度与定型尺寸

### 三、自然对流换热计算

1.无限空间自然对流换热：例如，热力管道表面散热

➤ 坚直平板在空气中自然冷却流动和换热特征

➤ 坚板自然对流换热的微分方程组

2.有限空间自然对流换热：例如，空气夹层

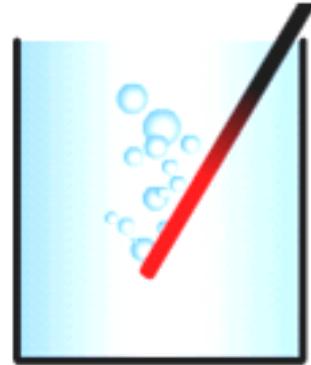
## 运用准则关系式时需要注意的问题



- a. 判断管内流动状态：湍流？层流？过渡？  
——确定用哪个准则关系式；
- b. 确定定性温度——查物性参数；
- c. 确定特征尺寸及特征流速；
- d. 清楚各个准则关系式的适用范围。

## 四、沸腾换热

### 1. 液体沸腾过程的分类和特征



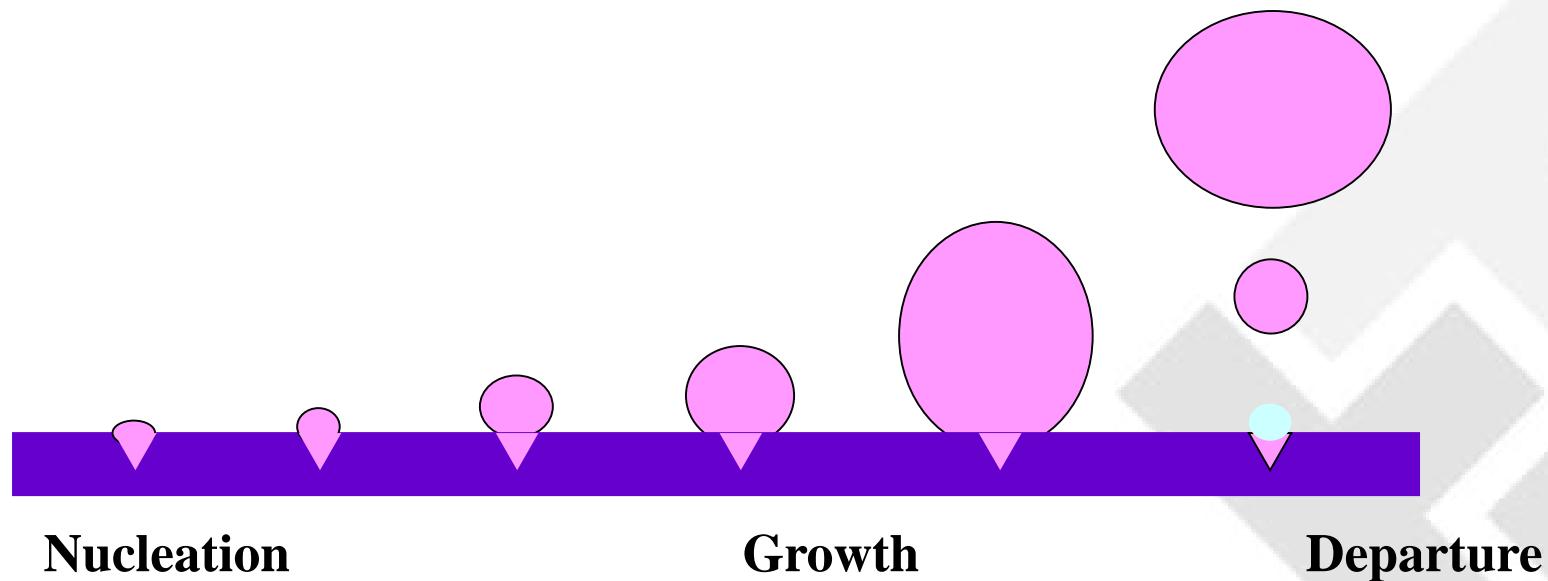
**定义：**在一定压力下液体与高于其饱和温度的壁面接触时就有可能在壁面上产生**沸腾现象**。

**产生条件：**  $t_w > t_s$

**特点：**液体的蒸汽泡首先在加热壁面的局部位置上产生，并逐步长大，直到在浮力和表面张力的共同作用下汽泡脱离加热表面。



汽化核心会随着壁面温度 $t_w$ 的升高，也就是壁面的过热度 $\Delta t_s = t_w - t_s$ 的增加而越来越多。汽化核心增多，产生的汽泡就多。



## 2. 液体中汽泡存在的条件

$$R \geq \frac{2\sigma T_s}{\gamma \rho_v (T_v - T_s)}$$

如果蒸汽泡要在液体中存在或者长大，汽、液界面上的液体温度必须等于或大于蒸汽的温度，以保持液体的汽化和同时向蒸汽传热。否则，蒸汽就会因向液体传热而凝结，汽泡内的蒸汽一旦出现凝结，力平衡一旦遭到破坏，汽泡就会迅速破灭。



### 3. 大容器沸腾曲线分析

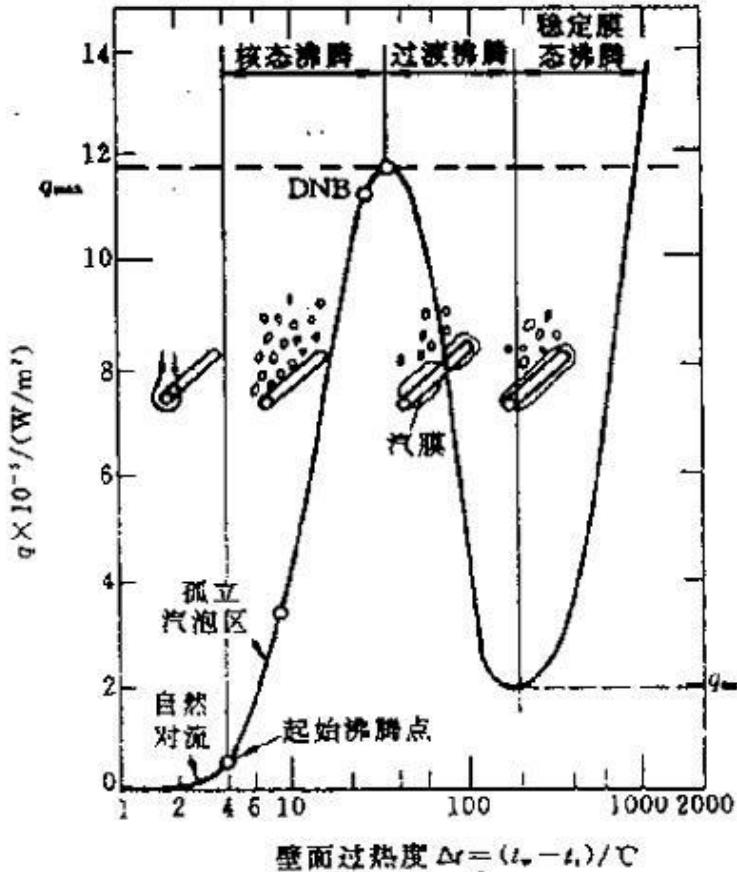
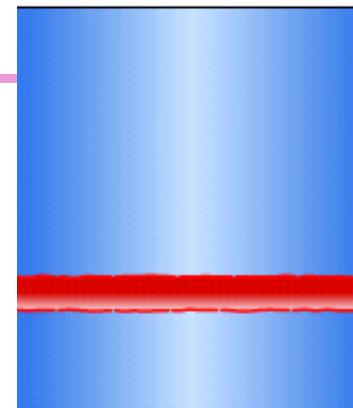
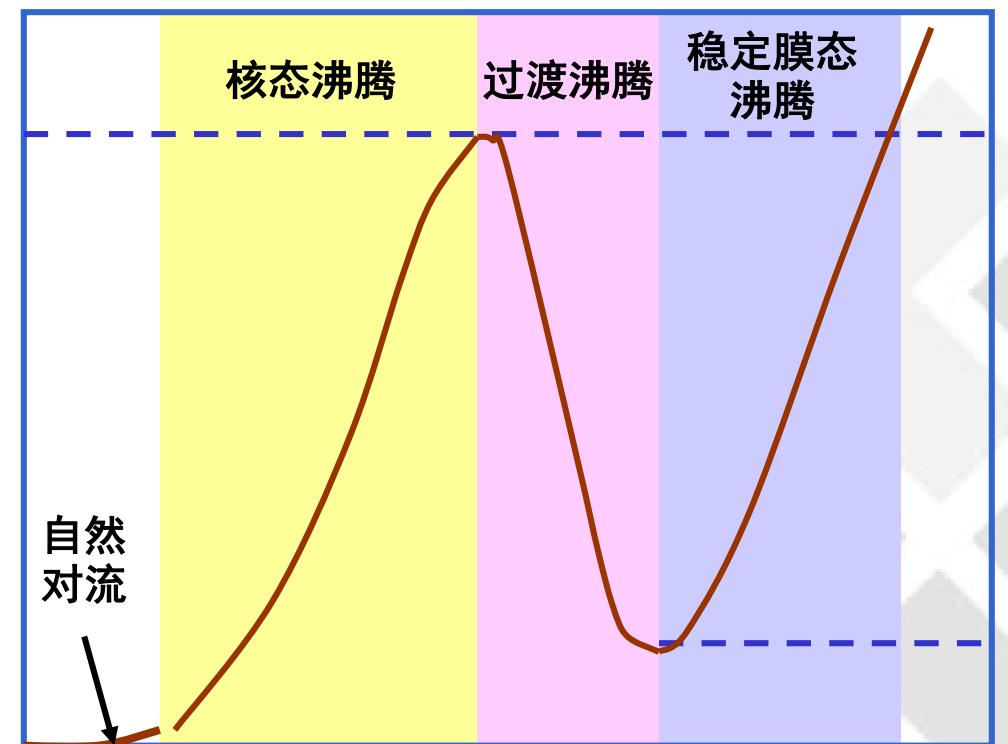


图4-32 饱和水在水平加热面上沸腾的典型曲线



铁棒烧毁

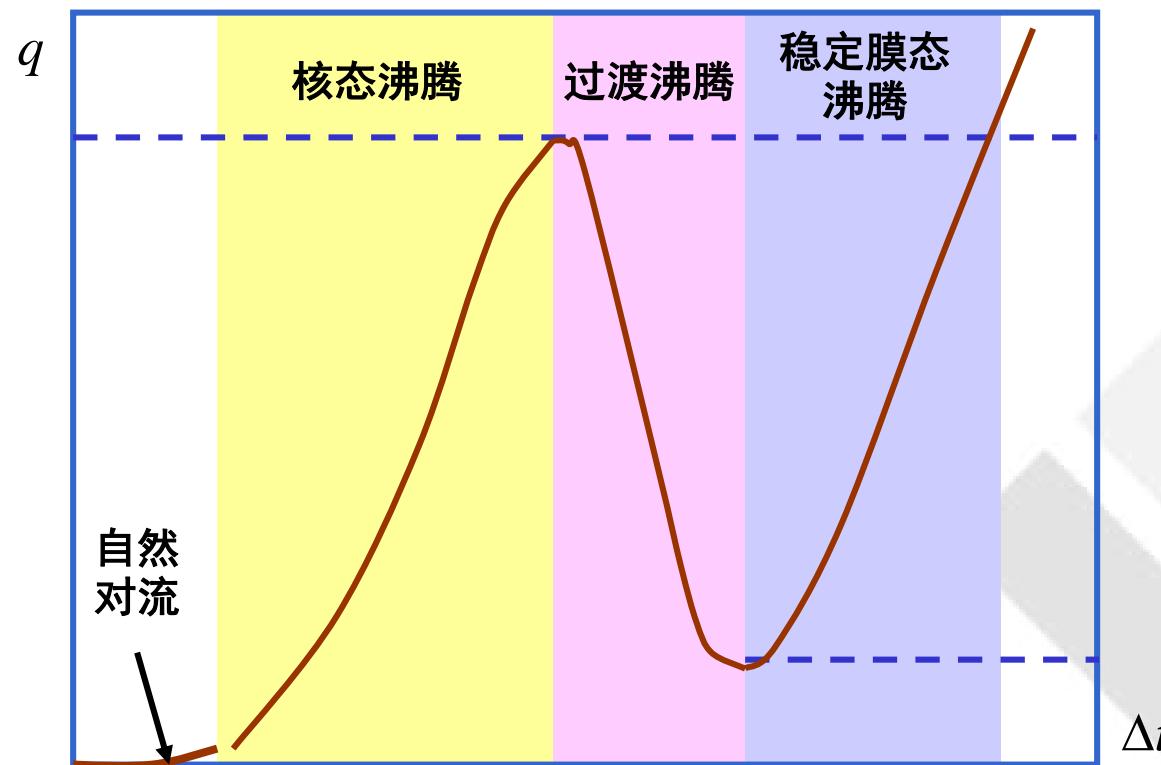
- (1) 上述热流密度的峰值 $q_{max}$ 有重大意义，称为临界热流密度，亦称烧毁点。一般用核态沸腾转折点DNB(Departure from Nuclear Boiling) 作为监视接近 $q_{max}$ 的警戒。这一点对热流密度可控和温度可控的两种情况都非常重要。
- (2) 对稳定膜态沸腾，因为热量必须穿过的是热阻较大的汽膜，所以换热系数比凝结小得多。

**复习1：**在液体沸腾过程中一个球形汽泡存在的条件是什么？为什么需要这样的条件？

在液体沸腾过程中一个球形汽泡存在的条件是**液体必须有一定的过热度**。这是因为从汽泡的力平衡条件得出  $p_v - p_l = \frac{2\sigma}{R}$ ，只要汽泡半径不是无穷大，蒸汽压力就大于液体压力，它们各自对应的饱和温度就不同有  $T_{vs} > T_{ls}$ ；又由汽泡热平衡条件有  $T_v = T_l$ ，而汽泡存在必须保持其饱和温度，那么液体温度  $T_l > T_{ls}$ ，即大于其对应的饱和温度，也就是液体必须过热。



**复习2：**画出大容器沸腾换热过程中热流密度随过热度的变化曲线(控制壁温加热用实线控制热流加热用虚线)，并指出沸腾的几个主要区域。



复习3：什么是沸腾换热的临界热流密度？

当沸腾换热达到临界热流密度时，在什么条件下才会对换热设备造成危害？

答：对于大容器饱和沸腾，核态沸腾和过渡沸腾之间热流密度的峰值称为临界热流密度。当沸腾换热达到临界热流密度时，高温下恒热流密度加热时会对换热设备造成危害。



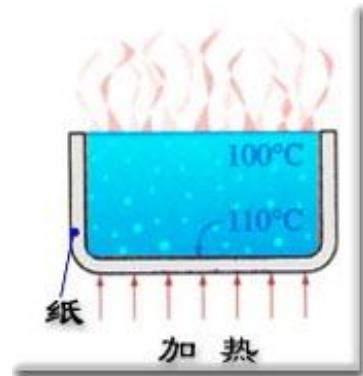
复习4：烧开水时，为什么一旦水烧干了，铝壶就很容易烧坏？



答：因为水侧（沸腾）时的表面传热系数远大于火焰侧的表面传热系数，没烧干时，壶底更接近于水的温度，所以不会达到铝的熔点。



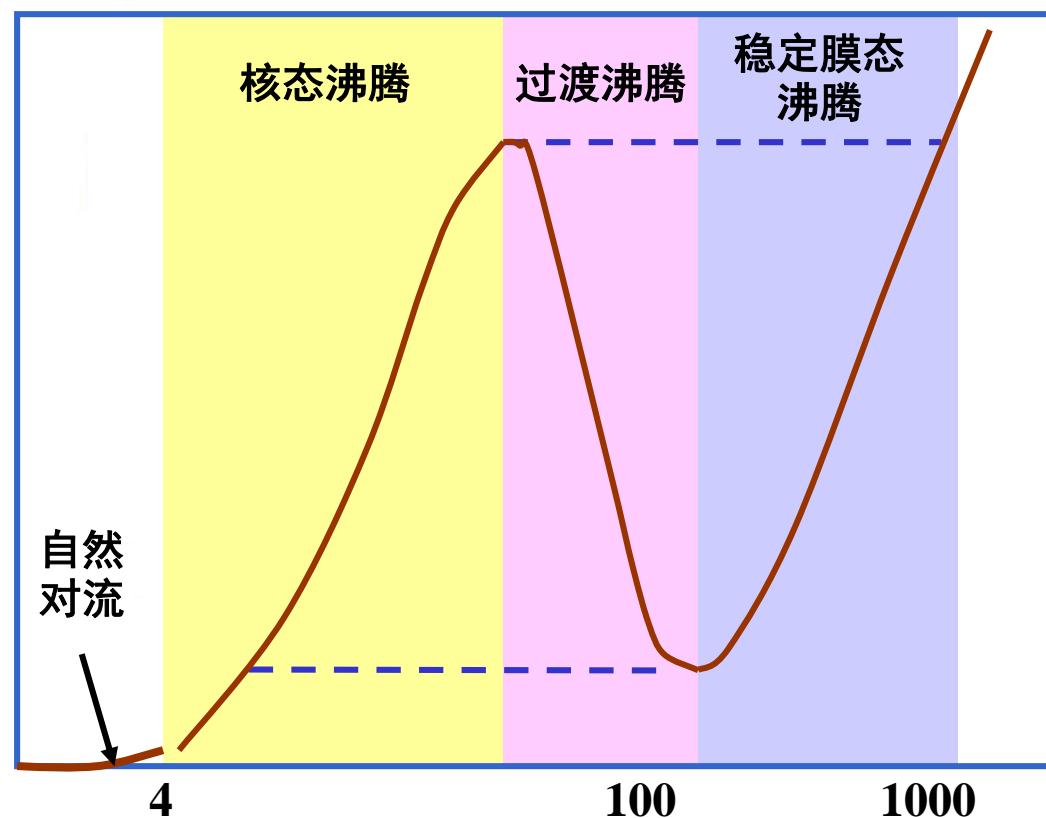
## 复习5：解释为什么用纸可以烧开 水？



答：水侧的热阻远小于加热侧的热阻，纸的温度更接近于水的温度，不会达到纸的着火点。



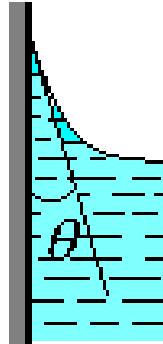
复习6：两滴完全相同的水珠分别落在 $120^{\circ}\text{C}$ 和 $400^{\circ}\text{C}$ 的铁板上，哪一滴先气化？



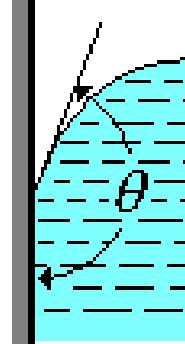
答：落在 $120^{\circ}\text{C}$ 铁板上的水珠先气化。因为水珠在 $120^{\circ}\text{C}$ 铁板上的沸腾属于核态沸腾，换热较强。在 $400^{\circ}\text{C}$ 铁板上的沸腾属于膜态沸腾，换热较弱。



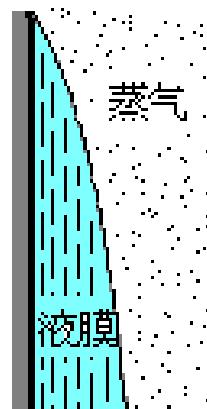
## 五、凝结换热



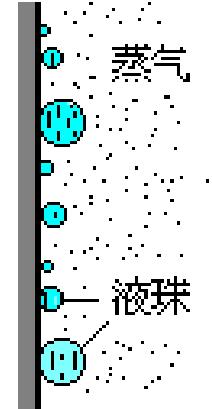
(a) 润湿能力强



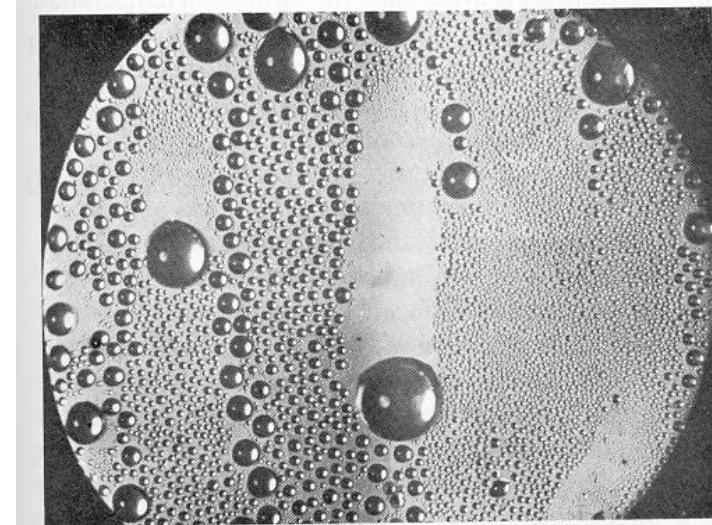
(b) 润湿能力弱



(c) 膜状凝结



(d) 珠状凝结





### 三、 热辐射

- 波尔兹曼常数要记，其他常数不用记；
- 角系数的求法（代数法）要知道，会利用其性质求解；
- 表面辐射热阻、空间辐射热阻会计算；
- 会画各种情况下的网络图（重点）；
- 黑体四大定律和实际物体的基尔霍夫定律要记住。

# 第六章 辐射换热原理

## 一、热辐射的基本概念

### 1. 热辐射的本质和特点

- 本质：电磁波
- 特点

### 2. 吸收,反射和透射

- 吸收率, 反射率及透射率的定义
- 透明体, 白体及黑体的定义

## 二、黑体辐射和吸收的基本性质

1. 辐射力  $E$ ：定义

2. 单色辐射力

3. 方向辐射力

➤ 立体角

4. 辐射强度

➤ 注意：辐射力是以发射物体的单位面积作为计算依据，而辐射强度是以垂直于发射方向的单位投影面积作为计算依据。

## 5. 黑体辐射的基本定律

- 普朗克定律
  - 给出黑体单色辐射力和波长、热力学温度之间的函数关系
- 维恩位移定律
  - 内容:  $\lambda_m T = 2.8976 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \approx 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$
  - 思考: 加热金属时, 试用维恩位移定律分析金属颜色随温度的变化。

- 斯蒂芬-玻尔兹曼定律  $E_b = \sigma_0 T^4$  ✓  $E_b = c_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4$
- 兰贝特余弦定律
  - 注意：漫辐射表面遵守兰贝特余弦定律

$$E_b = \pi I_\varphi = \pi I_b$$

- 波段辐射与辐射函数

$$\begin{aligned} F_b(\lambda_1 - \lambda_2) &= \frac{\Delta E_b}{E_b} \\ &= F_b(0 - \lambda_2) - F_b(0 - \lambda_1) \end{aligned}$$

## 6. 黑体的吸收特性

### 三、实际物体的辐射和吸收

#### 1. 实际物体的辐射——黑度（发射率）

- 定义、影响因素

#### 2. 实际物体的吸收——灰体

- 吸收比定义、影响因素
- 实际物体表面对波长（光谱）的选择性
- 灰体定义、成立条件

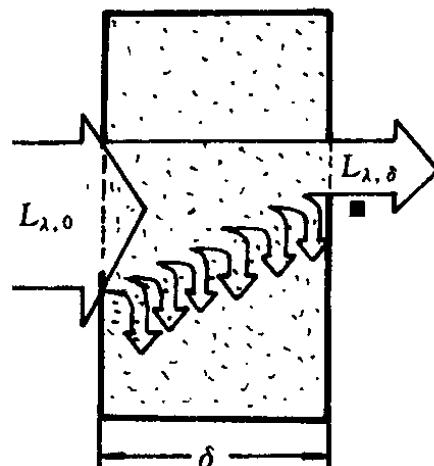
#### 3. 基尔霍夫定律表述、成立条件

### 三、气体的辐射和吸收

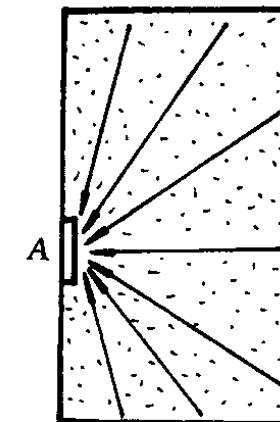
#### 1 气体辐射的特点

➤ 气体辐射和吸收对波长有选择性

光带
第一光带
第二光带
第三光带



(a) 气体吸收



(b) 气体辐射

$\text{CO}_2$
波长
36~3.02
01~4.8
.5~16.5



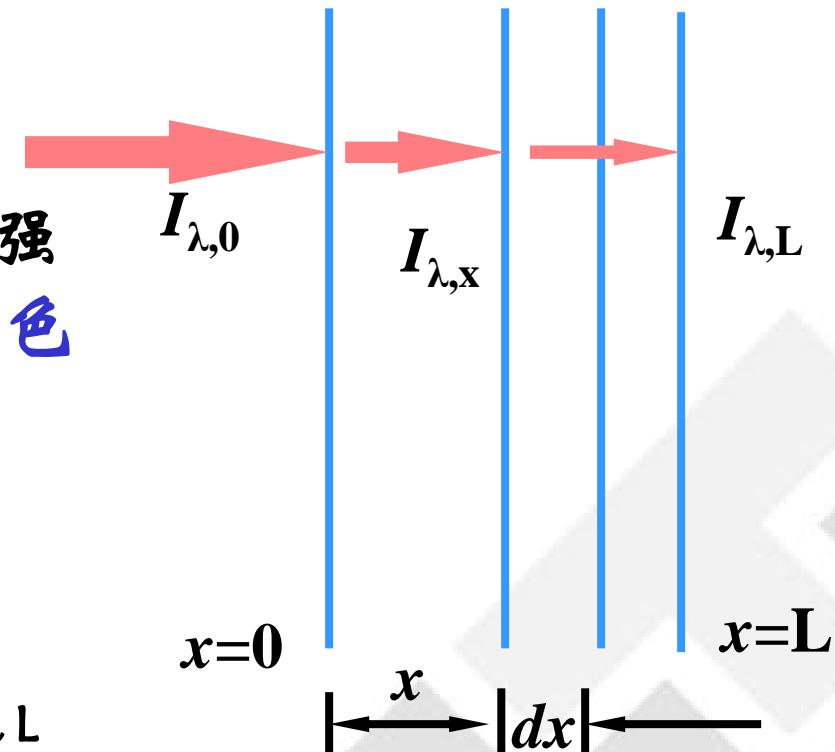
## 2. 气体的吸收定律

$$I_{\lambda L} = I_{\lambda 0} e^{-k_{\lambda} L}$$

$k_{\lambda}$ 为单位距离内单色辐射强度减少的百分数，称为单色减弱系数。

$$\frac{I_{\lambda L}}{I_{\lambda 0}} = e^{-k_{\lambda} L}$$

单色透射率  $\tau_{\lambda L}$



## 3. 气体的发射率

# 第七章 辐射换热计算

## 一、被透明介质隔开的黑体表面间的辐射换热

1. 角系数的概念

2. 角系数的性质



3. 角系数的计算：

➤ 成为纯粹的几何量的条件

## 二、被透明介质隔开的灰体表面间的辐射换热

1.有效辐射

2.表面辐射热阻 ✓

3.空间辐射热阻 ✓

4.网络法求解辐射换热 ✓

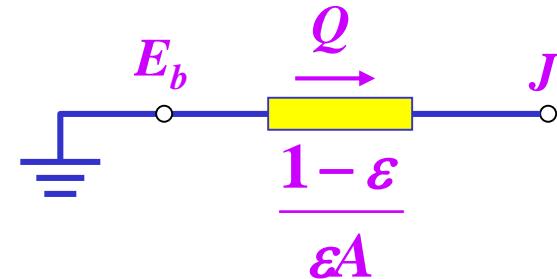
➤ 黑体表面、大房间、绝热表面、遮热板



$$Q = \frac{E_b - J}{\frac{1-\varepsilon}{A\varepsilon}}$$

表面辐射势差

表面辐射热阻



$$Q_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_2 X_{2,1}}}$$

两表面之间的  
空间辐射热阻

