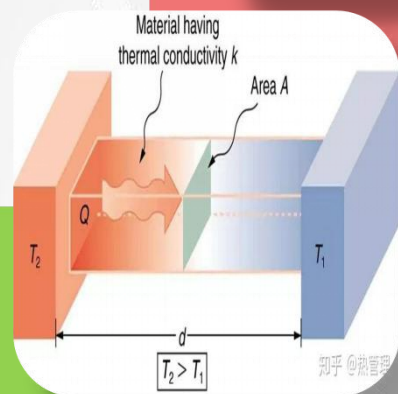


# 传热学

## 稳态导热III

授课老师：苗雨



# 目录

## CONTENTS



華東理工大學

01

课前回顾及  
导引

02

通过翅片的  
导热问题

01

## 课前回顾及导引

## 课前回顾及导引

1

热阻串联的表达式？ $\frac{1}{Ak} = \frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2}$

2

热阻并联的表达式？ $Ak = Ah_1 + \frac{A\lambda}{\delta} + Ah_2$

3

多层平壁导热问题热流密度的计算公式

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}$$

4

多层圆筒壁导热问题热流量的计算公式

$$\Phi = \frac{2\pi l(t_1 - t_4)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{\lambda_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{\lambda_3}}$$





# 课前回顾及导引



# 02

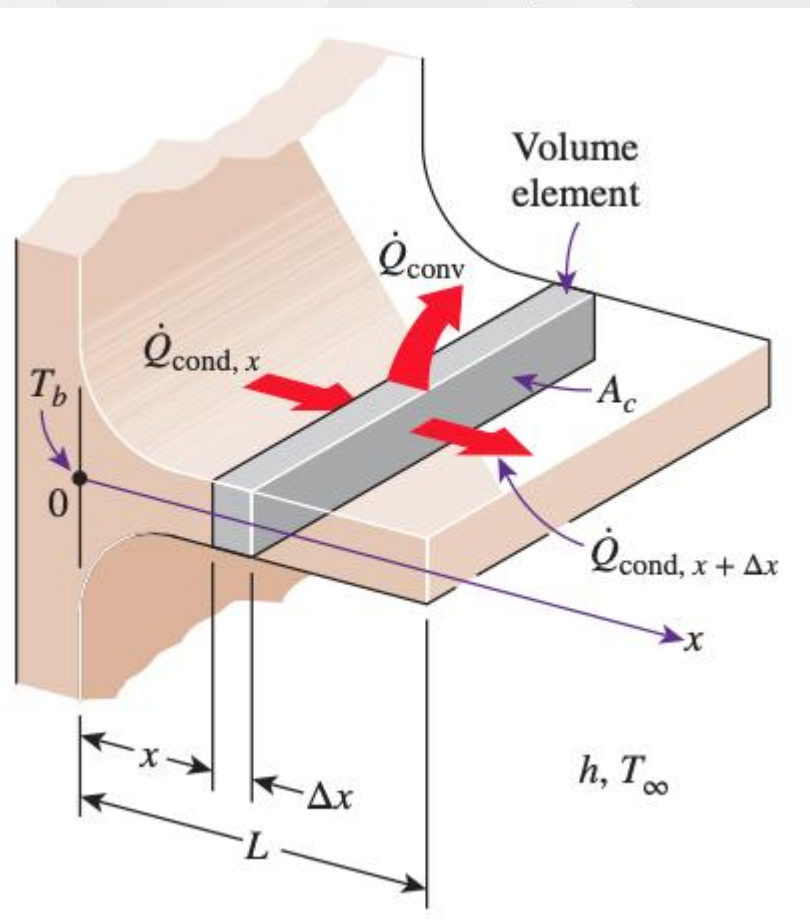
## 通过翅片的导热问题

- 翅片的定义及典型结构
- 翅片的加工
- 翅片的导热特点
- 通过等截面直肋的导热
- 肋效率
- 肋面总效率
- 翅片的选用



## 翅片的定义及典型结构

牛顿冷却公式  $\phi = hA\Delta t$



在材料消耗量增加较少的条件下  
能较多地增大面积



翅片：又称肋片（fin），依附于基础表面上的扩展表面

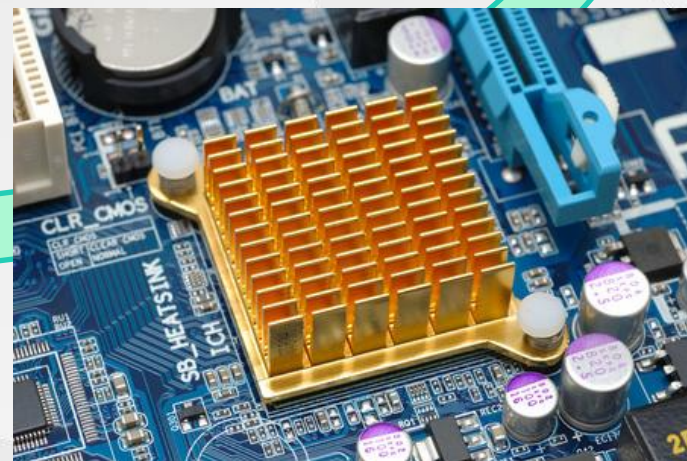
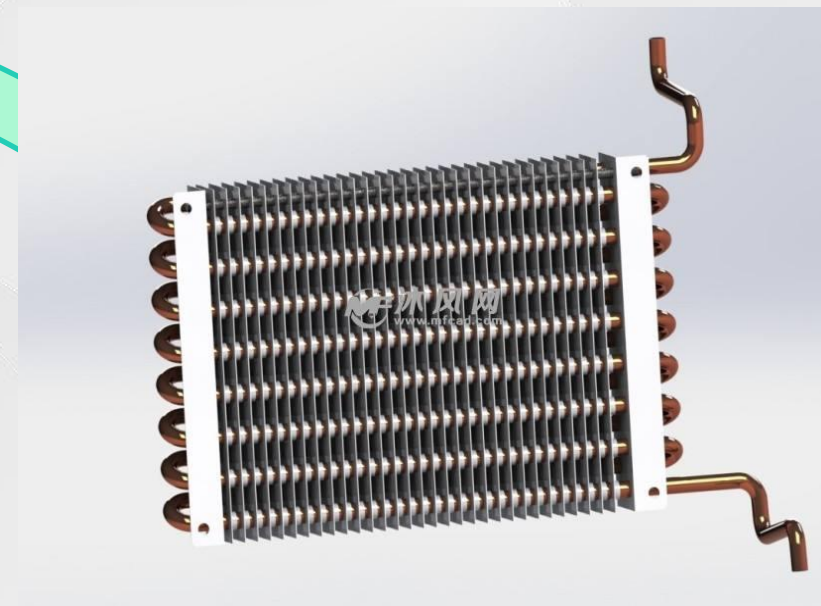




## 翅片的定义及典型结构



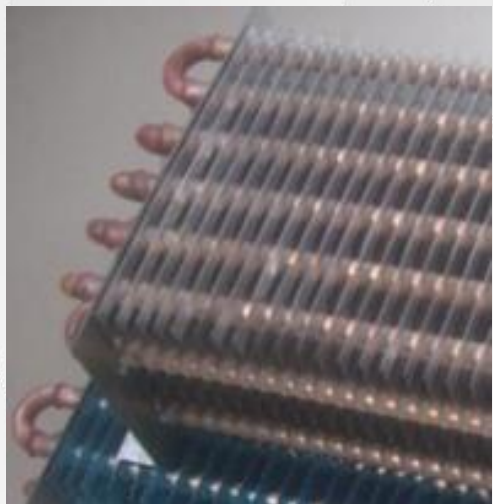
翅片的  
广泛的应用







## 翅片的定义及典型结构



大套片



平片



三角形波纹片



正弦波纹片



开缝片



针肋



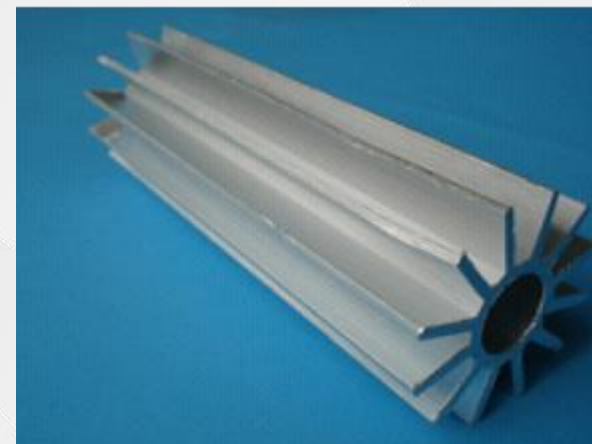
01

02

肋片的典型  
结构



直肋



04

03

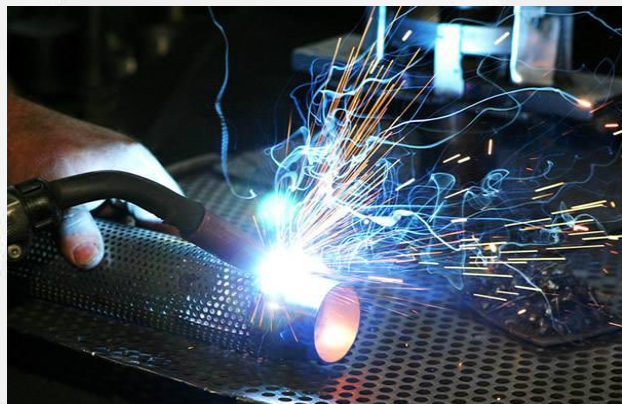


环肋





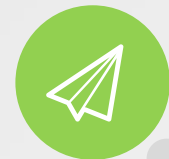
## 翅片的加工



管子整体轧制或  
缠绕、嵌套金属薄片



胀管



浸镀



焊接





## 翅片的加工：电子散热器

### 挤压工艺

成本低  
高宽比小，翅片厚

### 粘接工艺

尺寸没有限制，  
散热片和基底可用不同材料  
成本高

### 型锻工艺

尺寸没有限制，  
散热片和基底可用不同材料，  
翅片和基底接触更好  
成本高



### 铸造工艺

成本低，适用于复杂结构  
热导率较挤压工艺低，尺寸有限制

### 折叠工艺

尺寸没有限制，  
散热片和基底可用不同材料  
成本高，且翅片较脆弱

### 切削工艺

成本低，能加工大高宽比的散热器  
散热片和基底必须是同种材料

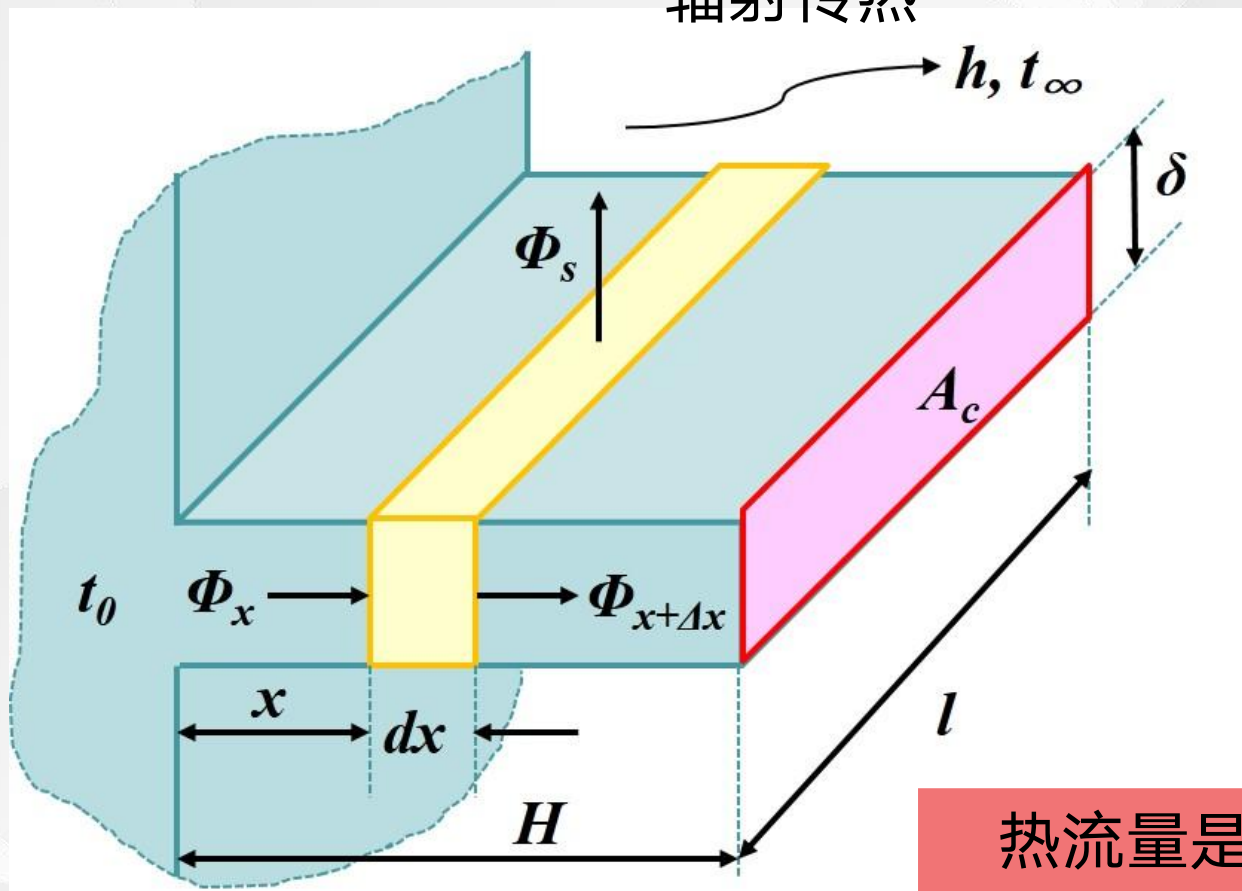




## 肋片的导热特点

$$\left( \begin{array}{c} \text{Rate of heat} \\ \text{conduction into} \\ \text{the element at } x \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Rate of heat} \\ \text{conduction from the} \\ \text{element at } x + \Delta x \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Rate of heat} \\ \text{convection from} \\ \text{the element} \end{array} \right)$$

对流传热  
辐射传热

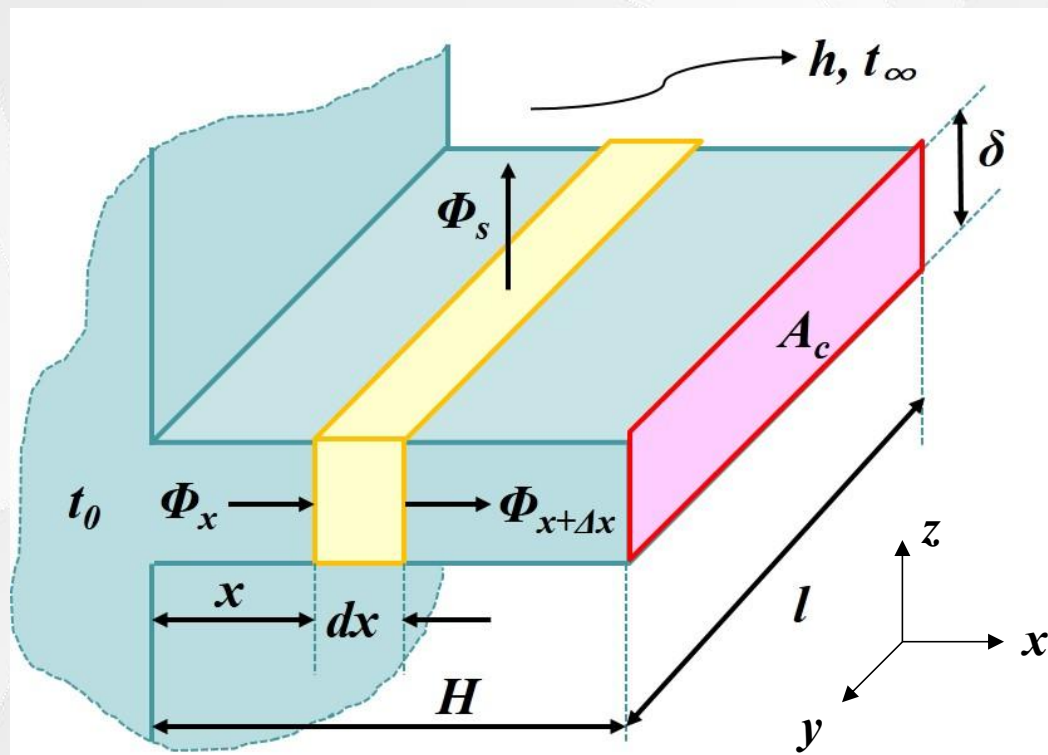


热流量是不断变化的



## 通过等截面直肋的导热

### 等截面直肋



翅片温度在垂直于纸面方向  
不发生变化

$$\frac{dt}{dy} = 0$$

表面上的换热热阻  $1/h$  远  
远大于翅片中的导热热阻  
 $\delta/\lambda$

$$\frac{dt}{dz} = 0$$

$t_0$  大于周围流体温度  $t_\infty$

包括对流传热及辐射  
传热在内的复合换热的  
表面传热系数  $h$

导热系数  $\lambda$ 、  
表面传热系数  $h$ 、  
沿翅高方向横截面积  $A_c$   
均为常数



## 通过等截面直肋的导热



$$\Phi_x = \Phi_{x+\Delta x} + \Phi_s$$



微元体表面散热量

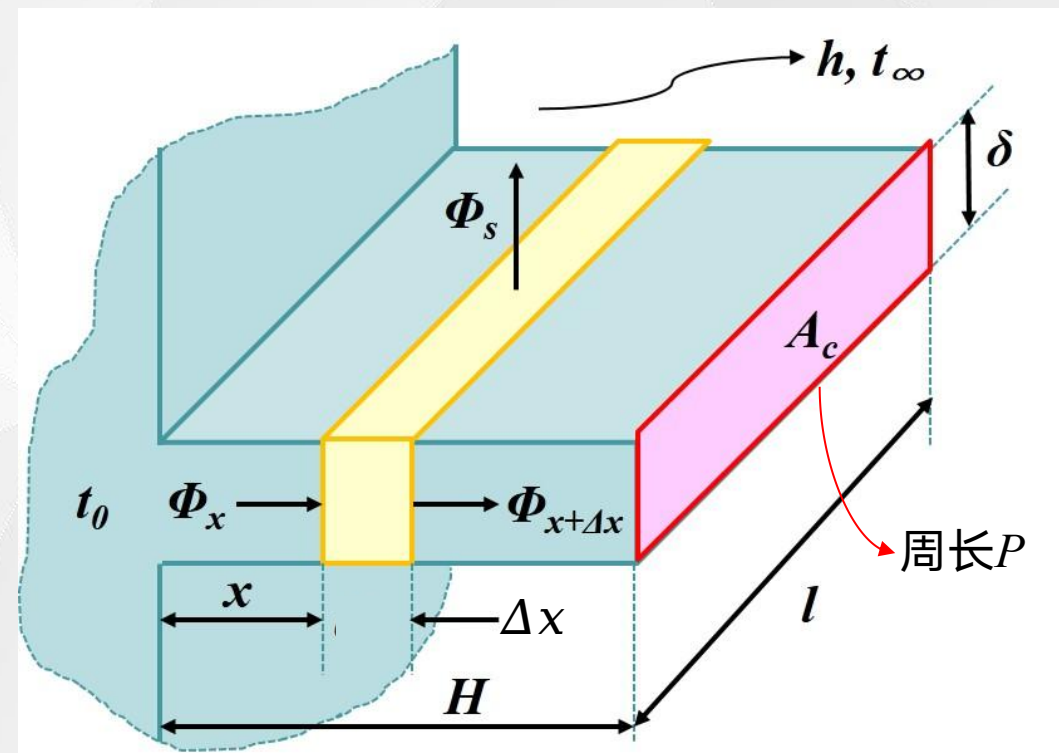
$$\Phi_s = Ah(t - t_\infty) = (P\Delta x)h(t - t_\infty)$$



$$\frac{\Phi_{x+\Delta x} - \Phi_x}{\Delta x} + hP(t - t_\infty) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d\Phi}{dx} + hP(t - t_\infty) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dx} \left( -\lambda A_c \frac{dt}{dx} \right) + hP(t - t_\infty) = 0$$



关于温度的二阶非齐次常微分方程

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{hP(t - t_\infty)}{\lambda A_c}$$





## 通过等截面直肋的导热

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{hP(t - t_\infty)}{\lambda A_c}$$

引入过剩温度 (excess temperature)

$$\theta = t - t_\infty$$

二阶齐次常微分方程

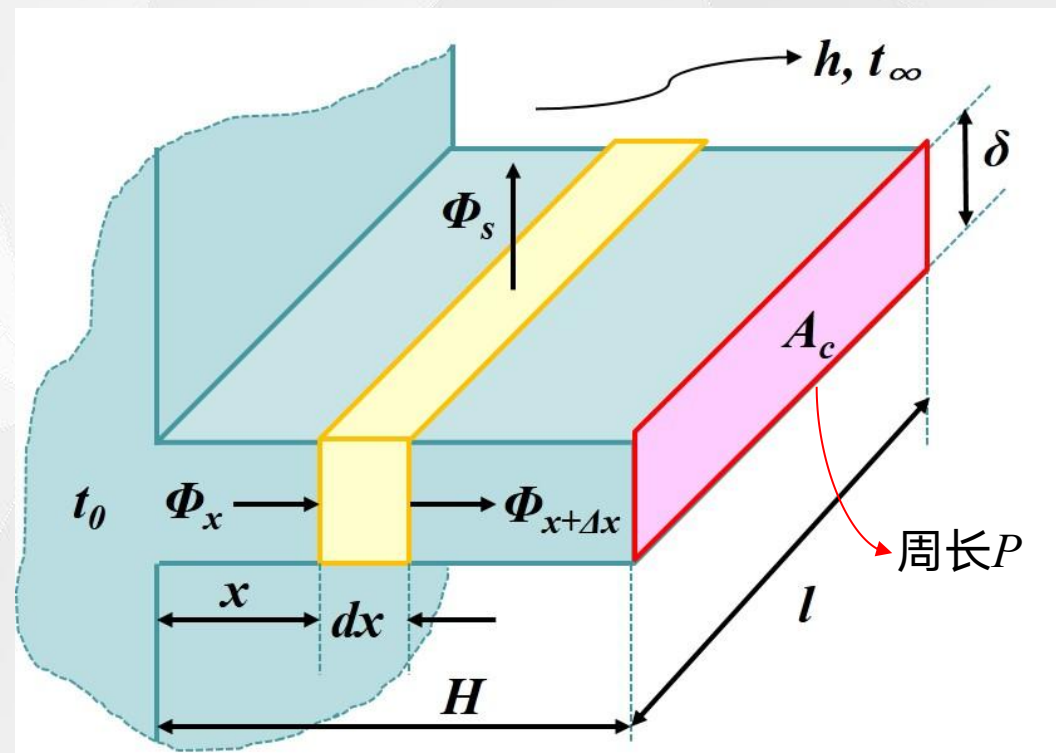
$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} = m^2 \theta \quad m^2 = \frac{hP}{\lambda A_c}$$



翅片无限长，并且末端温度趋近于环境温度



翅片末端绝热





## 通过等截面直肋的导热



翅片无限长，并且末端温度趋近于环境温度  
边界条件

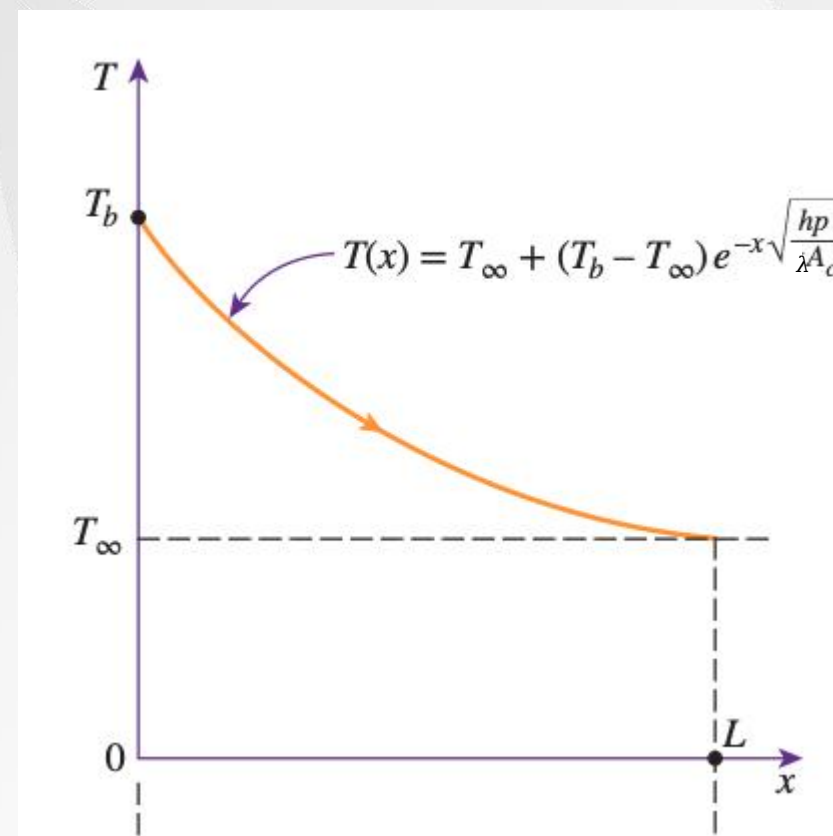
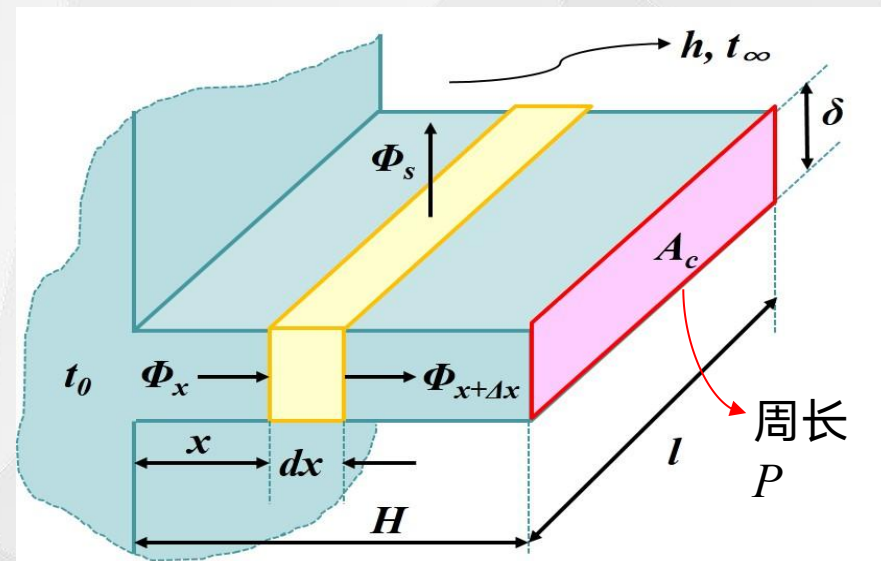
$$x = 0, \theta = \theta_0 = t_0 - t_\infty$$

$$x = \infty, \theta = 0$$

温度分布  $\theta = \theta_0 e^{-mx}$

通过 $x=0$ 肋根截面的热流量

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





## 通过等截面直肋的导热



翅片末端绝热

边界条件

$$x = 0, \theta = \theta_0 = t_0 - t_\infty$$

$$x = H, \frac{d\theta}{dx} = 0$$

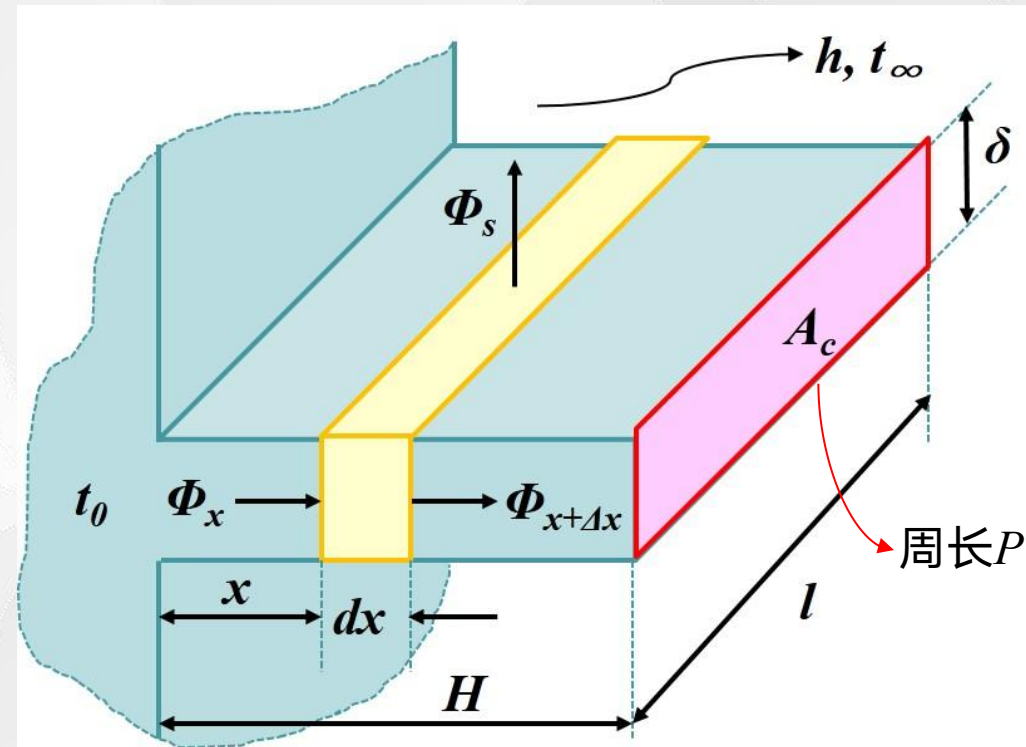
温度分布

$$\theta = \theta_0 \frac{\cosh m(x - H)}{\cosh mH}$$

$$\theta_H = \frac{\theta_0}{\cosh mH}$$

通过 $x=0$ 肋根截面的热流量

$$\begin{aligned} \Phi_{x=0} &= -\lambda A_c \left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0} = -\lambda A_c \theta_0 (-m) \frac{e^{mH} - e^{-mH}}{e^{mH} + e^{-mH}} \\ &= \lambda A_c \theta_0 m \cdot \tanh mH = \sqrt{hP\lambda A_c} \theta_0 \cdot \tanh mH \end{aligned}$$



双曲余弦函数  $\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$

双曲正切函数  $\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$



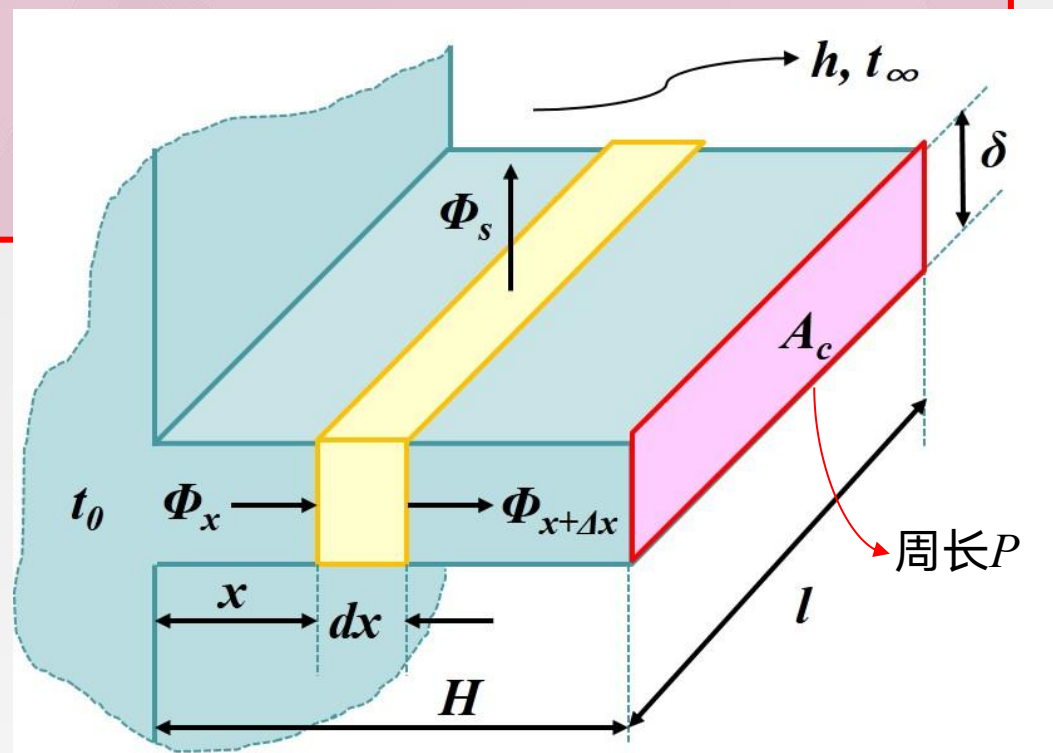


## 通过等截面直肋的导热

例题1：现有一铝制等截面直肋，翅基横截面 $2\text{mm} \times 40\text{mm}$ ，翅片长度为 $30\text{mm}$ 。假设对流辐射综合换热系数为 $30\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，周围环境温度为 $25^\circ\text{C}$ ，翅基温度为 $90^\circ\text{C}$ ，铝的导热系数为 $210\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，计算以下几种情况下翅片的温度分布和热流量：

(a) 假设翅片为无限长

(b) 假设翅顶绝热





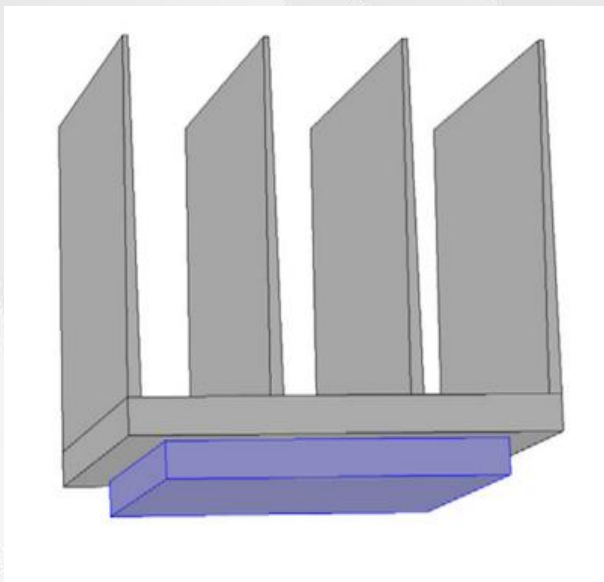
## 通过等截面直肋的导热

例题2：一芯片散热器上有100个铝制等截面直肋，如下图所示。假设对流辐射综合换热系数为 $15\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ，周围环境温度为 $30^\circ\text{C}$ ，翅基温度为 $100^\circ\text{C}$ 。翅片长度为 $1\text{cm}$ ，翅顶周长为 $2\text{cm}$ ，翅片厚度为 $2\text{mm}$ 。假设翅顶绝热，试计算总散热量。



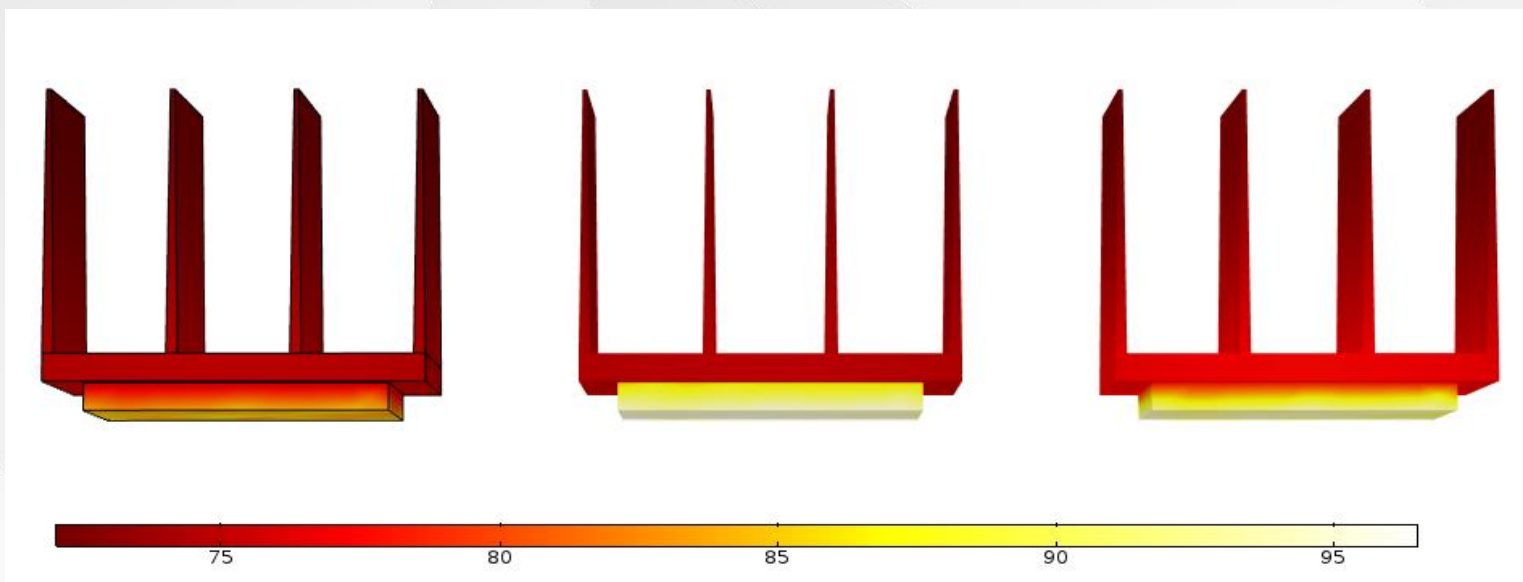


## 实例拓展：电子芯片散热模拟



散热器（灰色）和电子芯片（紫色）的模型几何

只模拟固体零件



理想接触（左）、空气层（中）和导热硅脂层（右）配置的温度绘图





## 肋效率

肋效率 (fin efficiency) :  
表征肋片散热的有效程度

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



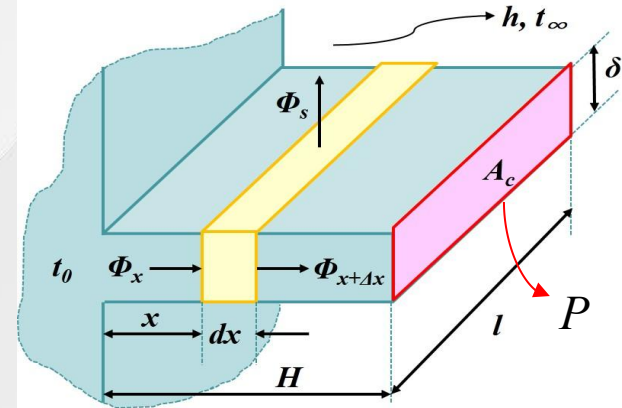
假定肋片长度  $l$  比其厚度  $\delta$  要大得多 ( $2l \approx P$ )

等截面直肋的效率

$$\eta_f = \frac{\sqrt{hP\lambda A_c} \theta_0 \cdot \tanh mH}{hPH\theta_0} = \frac{\tanh mH}{mH}$$



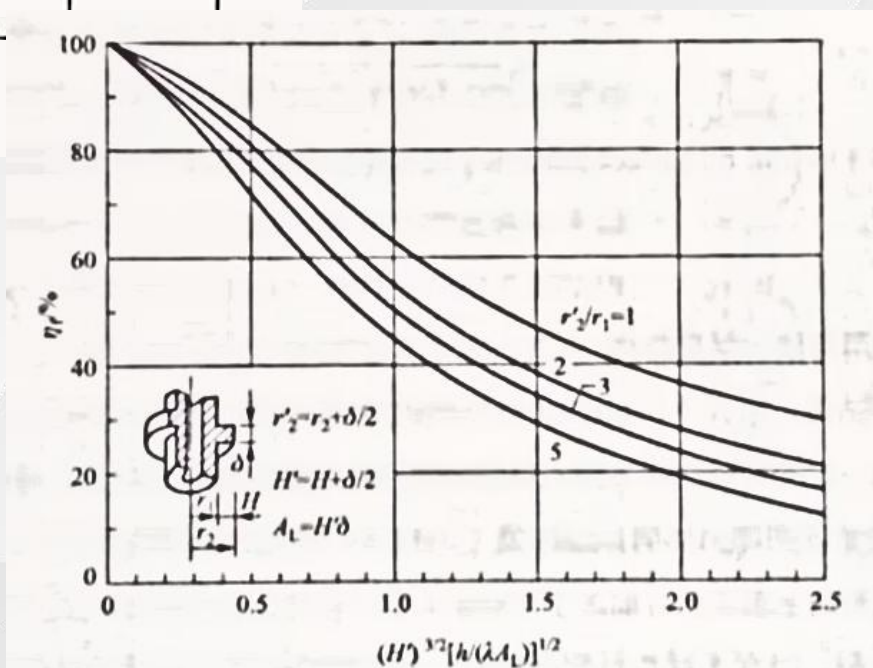
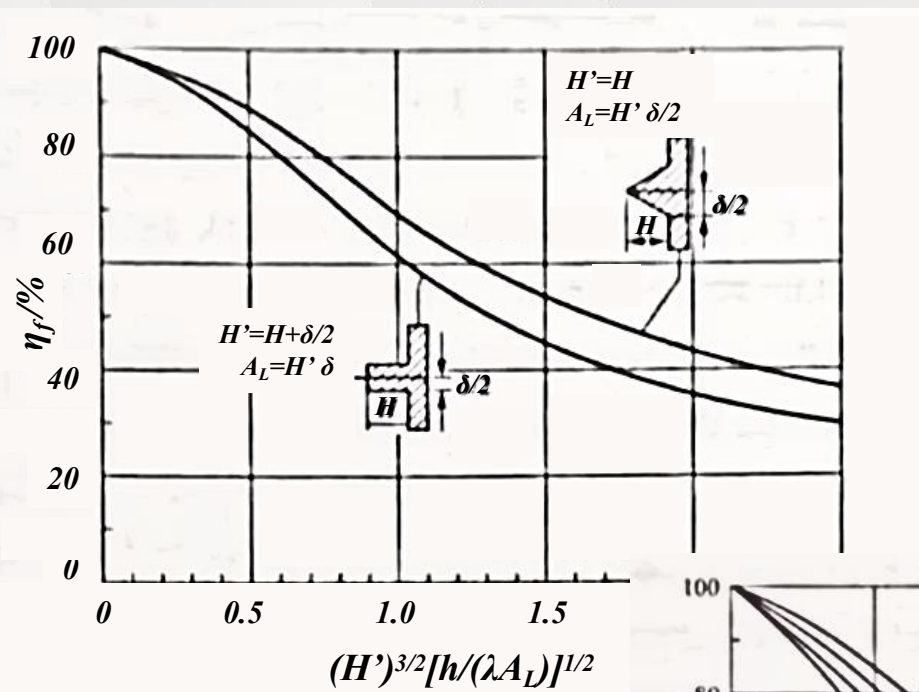
$$m^2 = \frac{hP}{\lambda A_c}$$





## 肋效率

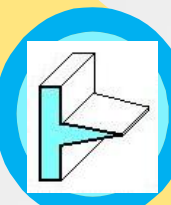
肋片效率曲线：表示各种肋片的理论解的结果



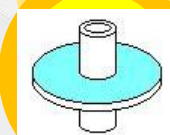
矩形截面直肋



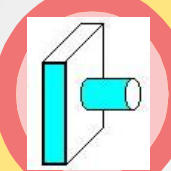
三角形直肋



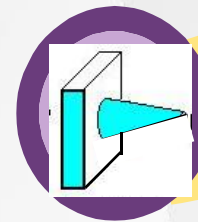
环肋



等截面针肋



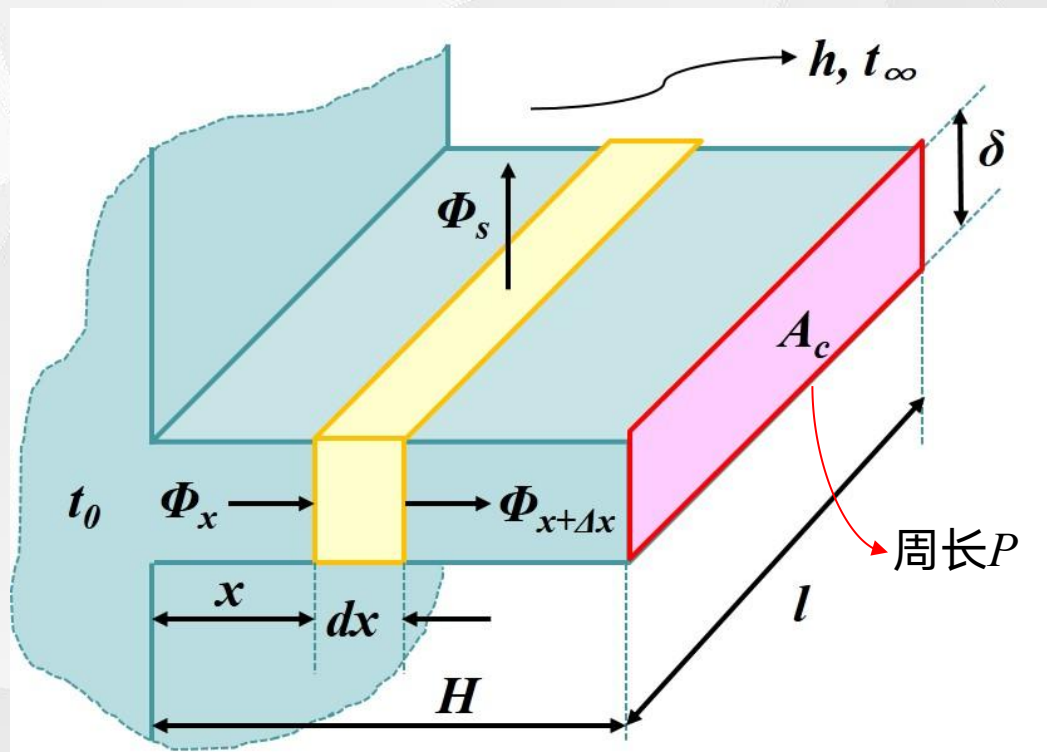
三角形针肋





## 肋效率

例题3：现有一等截面直肋，材料是1%碳钢。翅片横截面为 $2\text{cm} \times 1\text{m}$ ，翅片长度 $17\text{cm}$ 。假设对流辐射综合换热系数为 $23\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，周围环境温度为 $25^\circ\text{C}$ ，翅基温度为 $230^\circ\text{C}$ 。试计算散热量和肋效率。







## 肋面总效率

$t_f$  = 流体的温度

$h$  = 流体与整个表面的表面传热系数

$A_f$  = 肋片的表面积

$A_r$  = 两个肋片之间的根部表面积

$t_0$  = 根部温度

$A_0 = A_f + A_r$ , 所有肋片与根部面积之和

$\eta_f$  = 肋效率

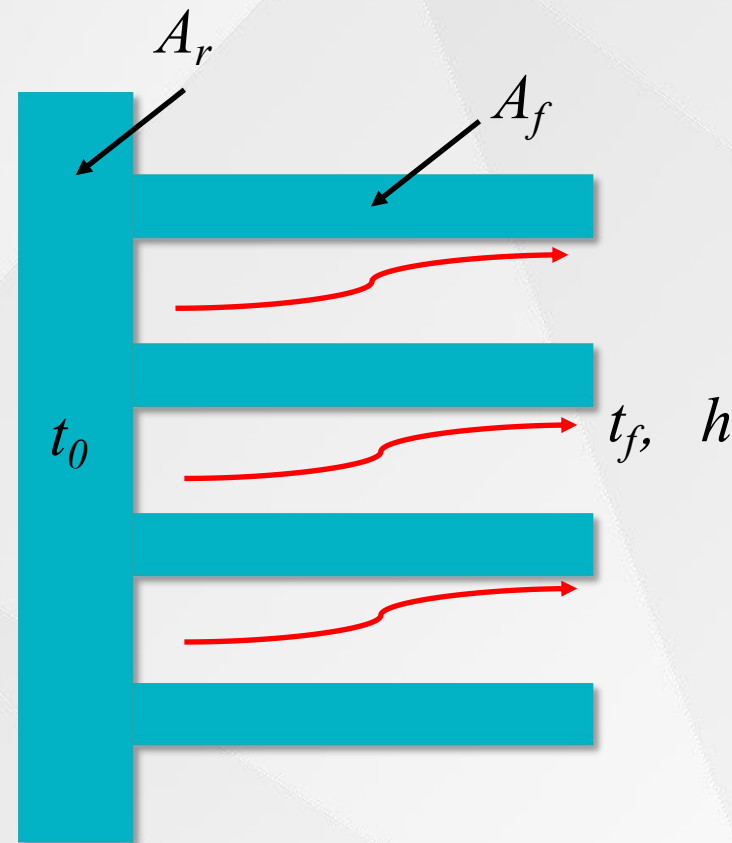
对流换热量

$$\begin{aligned}\Phi &= A_r h(t_0 - t_f) + A_f \eta_f h(t_0 - t_f) = h(t_0 - t_f)(A_r + A_f \eta_f) \\ &= A_0 h(t_0 - t_f) \left( \frac{A_r + A_f \eta_f}{A_0} \right) = A_0 \eta_0 h(t_0 - t_f)\end{aligned}$$

肋面总效率 (overall fin surface efficiency)

$$\eta_0 = \frac{A_r + A_f \eta_f}{A_0}$$

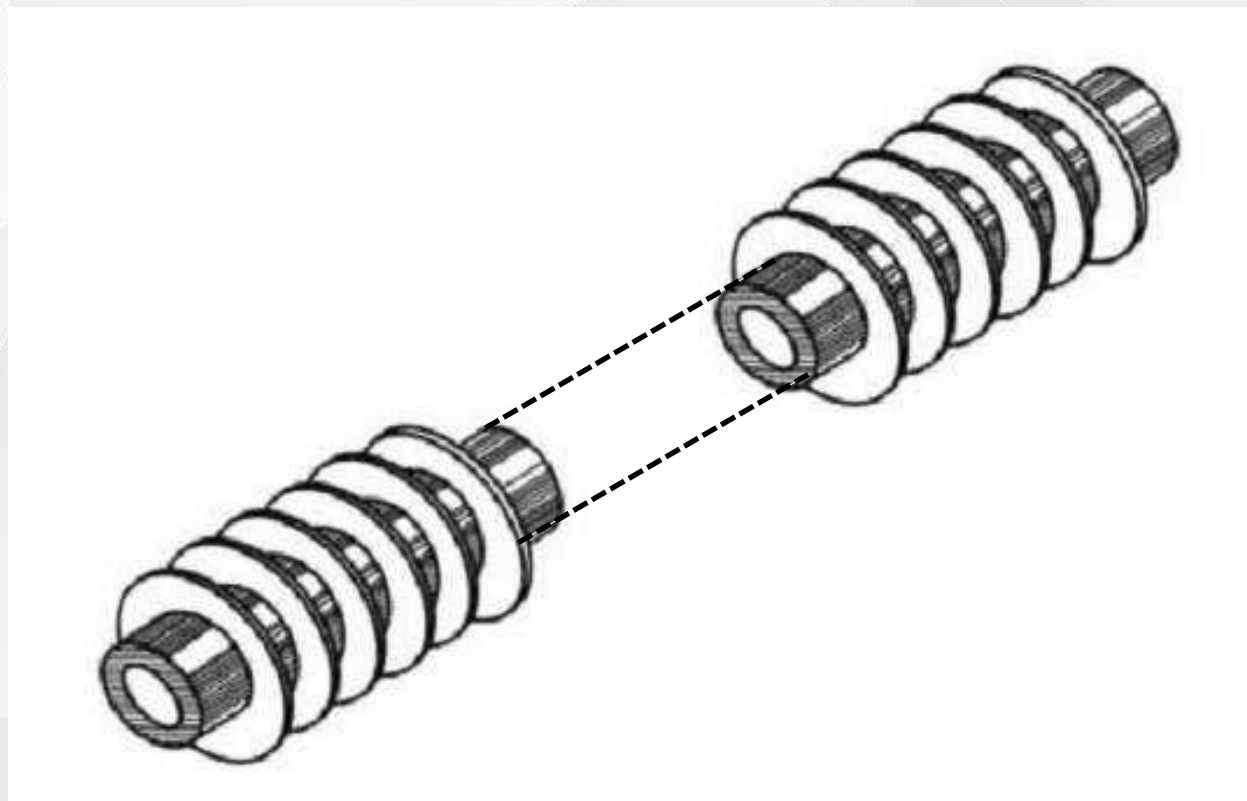
肋面总效率高于肋效率





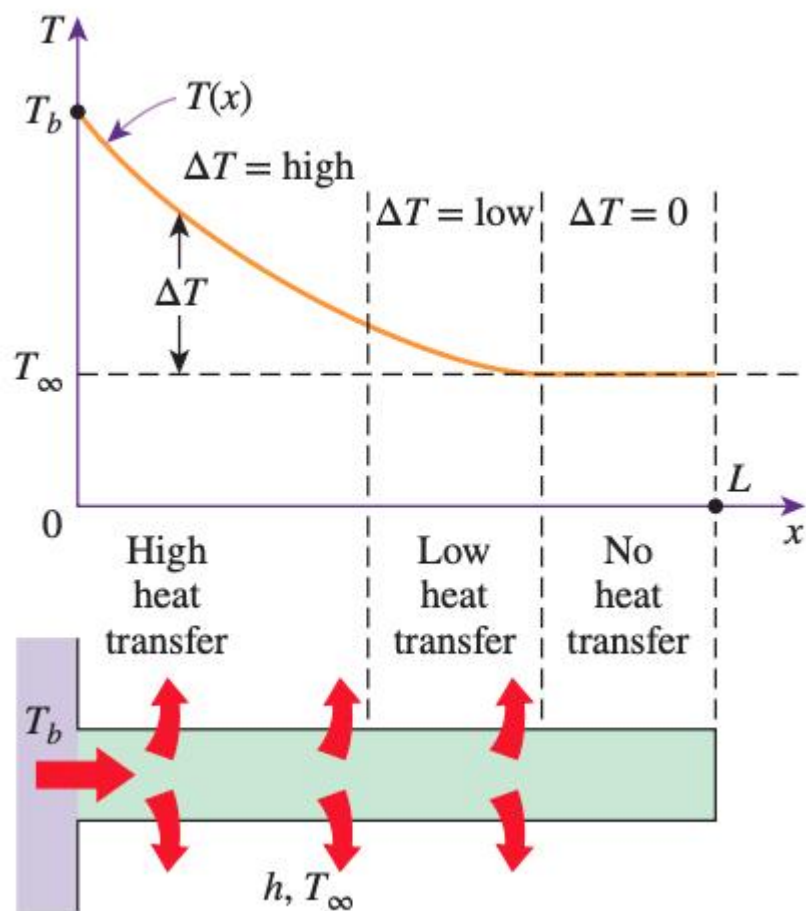
## 肋面总效率

例题4：为了强化换热，在一根长0.94m，外径为25mm的管子上装有300个铝制矩形剖面的环肋，翅片厚1.0mm。翅片边缘距离管中心28mm，管两端各留有20mm的安装段。环肋效率为0.82，求肋面总效率。





## 翅片的选用



Heat transfer  
ratio:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{fin}}}{\dot{Q}_{\text{long fin}}} = \frac{\sqrt{hpkA_c}(T_b - T_{\infty}) \tanh mL}{\sqrt{hpkA_c}(T_b - T_{\infty})} = \tanh mL$$

The variation of heat transfer  
from a fin relative to that from an  
infinitely long fin

$mL$	$\frac{\dot{Q}_{\text{fin}}}{\dot{Q}_{\text{long fin}}} = \tanh mL$
0.1	0.100
0.2	0.197
0.5	0.462
1.0	0.762
1.5	0.905
2.0	0.964
2.5	0.987
3.0	0.995
4.0	0.999
5.0	1.000





## 翅片的选用

增加翅片加大了对流传热面积，减小总面积热阻 ( $1/h$ )

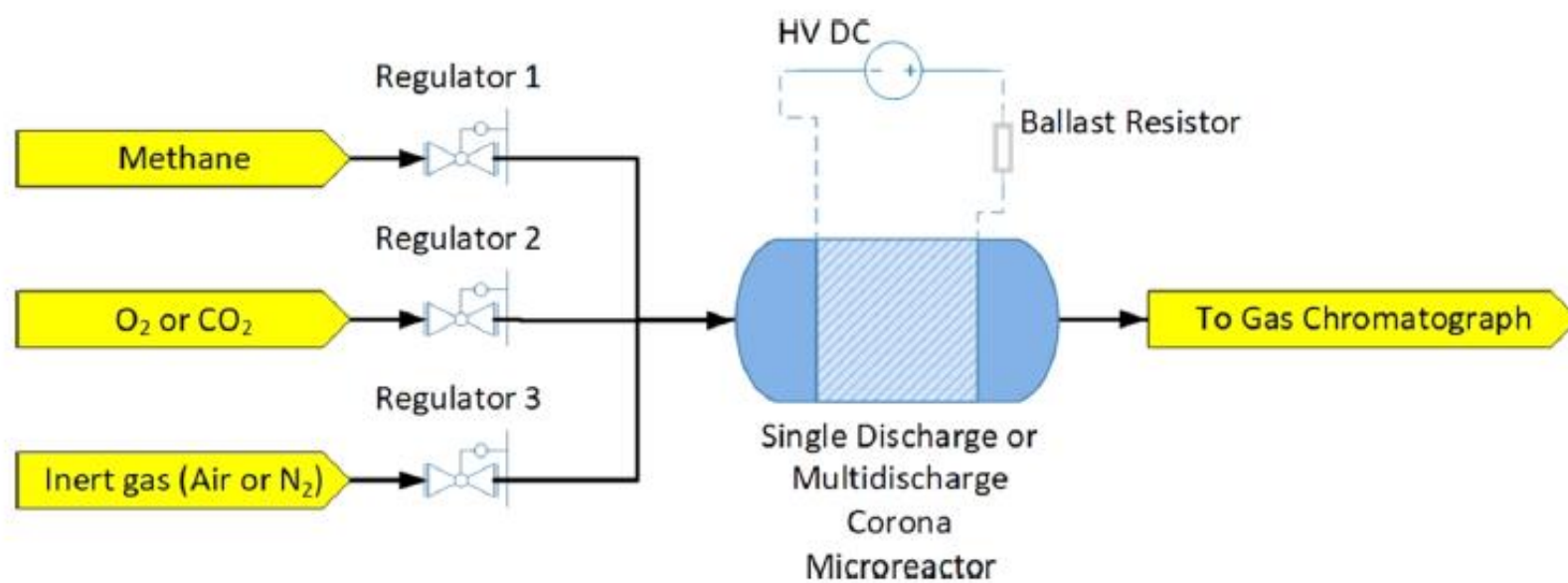
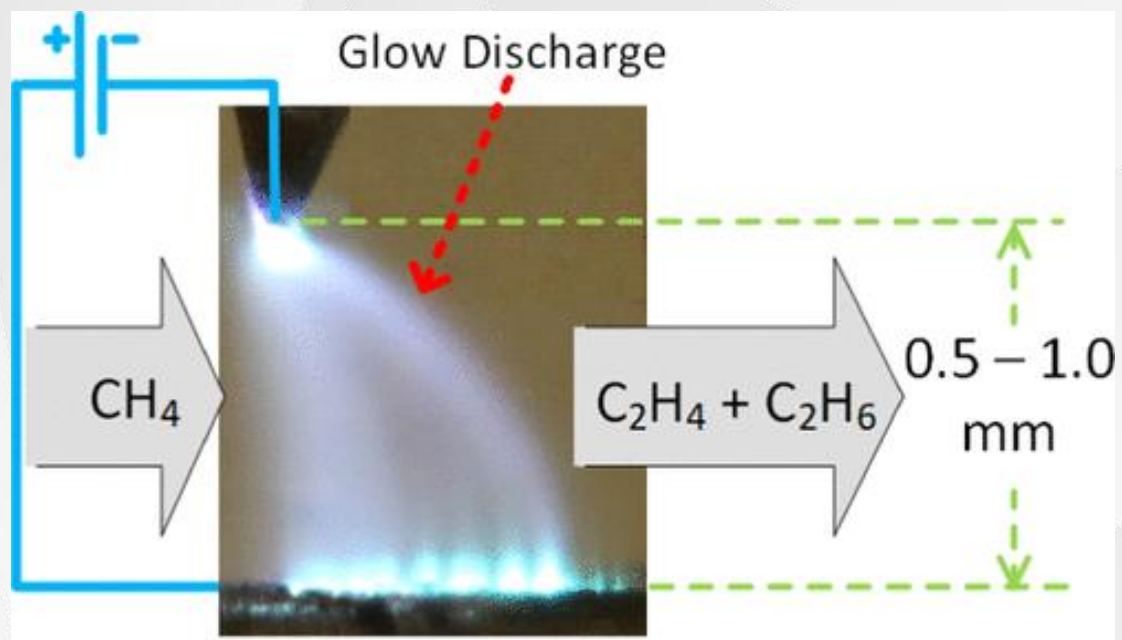
采用翅片增加了通过固体的导热热阻 ( $\delta/\lambda$ )

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

对于等截面直肋，当  $Bi \leq 0.25$  时，加肋总是有利的  
一般工程应用中，翅片总是用导热系数高的金属做成



## 实际应用





## 预习小测验答案

1.(多选题, 1分)

以下肋片的典型结构包括哪些?

A. 针肋

B. 环肋

C. 直肋

D. 大套片

ABCD

2.(多选题, 1分)

以下关于等截面直肋导热的描述正确的是?

A. 肋片根部的温度大于周围流体温度

B. 肋片温度在垂直于纸面方向不断发生变化

C. 表面上的换热热阻  $1/h$  远远大于肋片中的导热热阻  $\delta/\lambda$

D. 肋片顶端不是绝热的

AC

3.(多选题, 1分)

以下关于通过肋片的导热问题, 描述错误的是? BD

A. 肋片中沿导热热流传递方向上热流量是不断变化的

B. 肋面总效率小于肋效率

C. 肋片是利用增加换热面积来增加对流传热量的

D. 肋片不会增加通过固体的导热热阻





## 课后作业

作业：《传热学》P91 2-86

