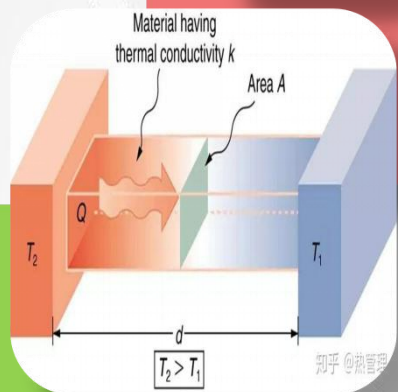




# 传热学

## 稳态导热II

授课老师：苗雨



# 目录

## CONTENTS



華東理工大學

01

课前回顾及  
导引

02

热阻及其串  
并联性质

03

通过多层  
壁的导热  
问题

01

## 课前回顾及导引

## 课前回顾及导引

1 一维无内热源的稳态导热单层平壁问题热流量的表达式

$$\Phi = A\lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta}$$

2 一维无内热源的稳态导热单层圆筒壁问题热流密度的表达式

$$q = \frac{\lambda}{r} \frac{t_1 - t_2}{\ln(r_2/r_1)}$$

3 一维无内热源的稳态导热单层球壳问题热流密度的表达式

$$q = \frac{\lambda}{r^2} \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

4 直角坐标系下x方向无内热源稳态导热微分方程的简化式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) = 0$$

5 当导热面积A沿热流密度矢量方向改变时，热流量的表达式

$$\Phi = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A(x)}}$$

6 热阻的一般表达式

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





# 课前回顾及导引



# 02

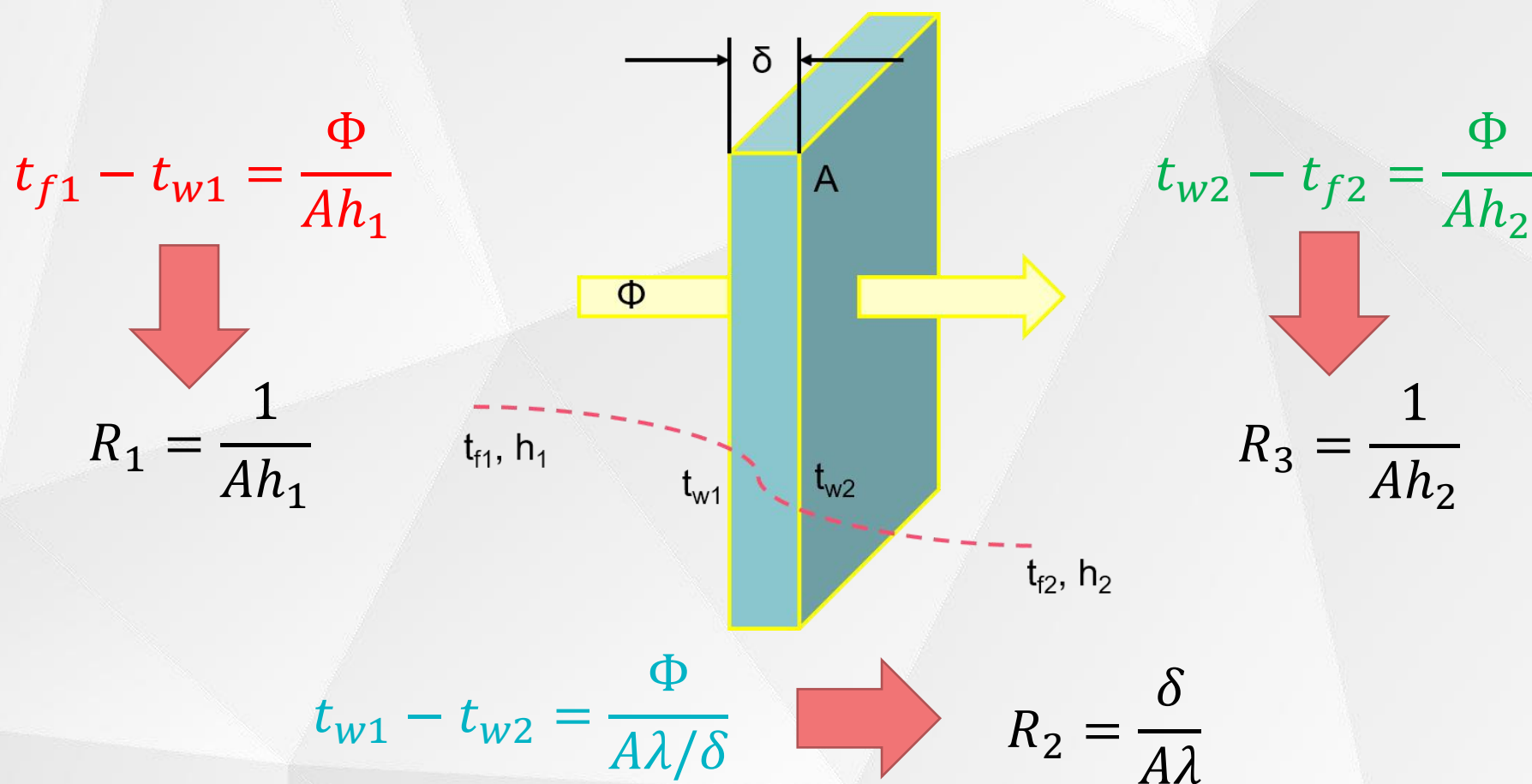
## 热阻及其串并联性质

- 热阻定义及相关概念
- 热阻的串联性质
- 热阻的并联性质



## 热阻定义及相关概念

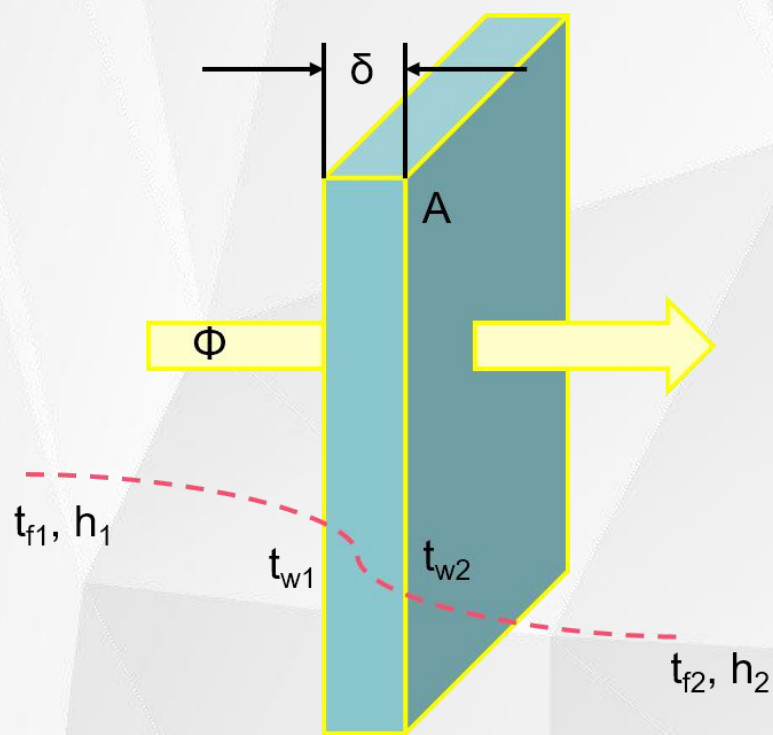
**热阻**：当有热量在物体上传输时，在物体两端温度差与热源的功率之间的比值





## 热阻定义及相关概念

$$\left. \begin{aligned} t_{f1} - t_{w1} &= \frac{\Phi}{Ah_1} \\ t_{w1} - t_{w2} &= \frac{\Phi}{A\lambda/\delta} \\ t_{w2} - t_{f2} &= \frac{\Phi}{Ah_2} \end{aligned} \right\} t_{f1} - t_{f2} = \Phi \left( \frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2} \right) = \frac{\Phi}{Ak}$$



### 传热系数k

- 表征传热过程强烈程度的标尺
- 不仅取决于传热过程的流体的种类，还与过程本身有关（流速大小、有无相变）

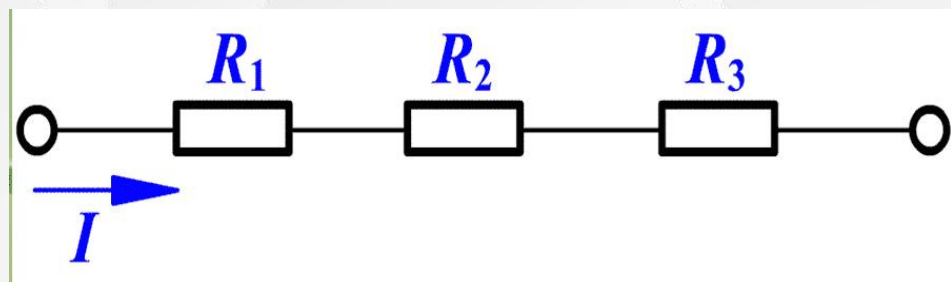
$$\frac{1}{Ak} \text{ 总传热热阻}$$





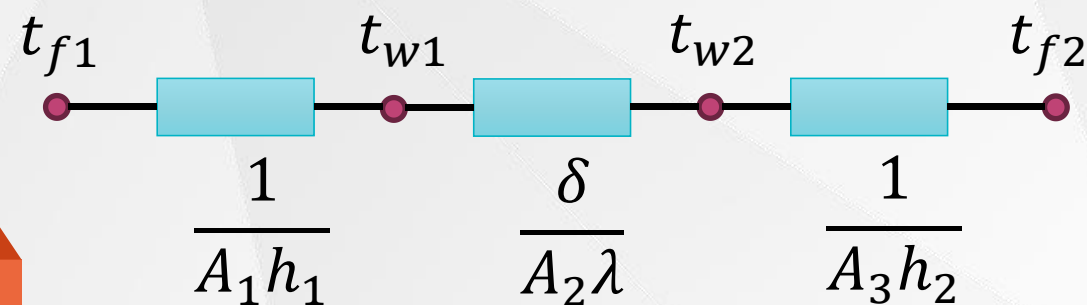
## 热阻的串联性质

电阻的串联性质



$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

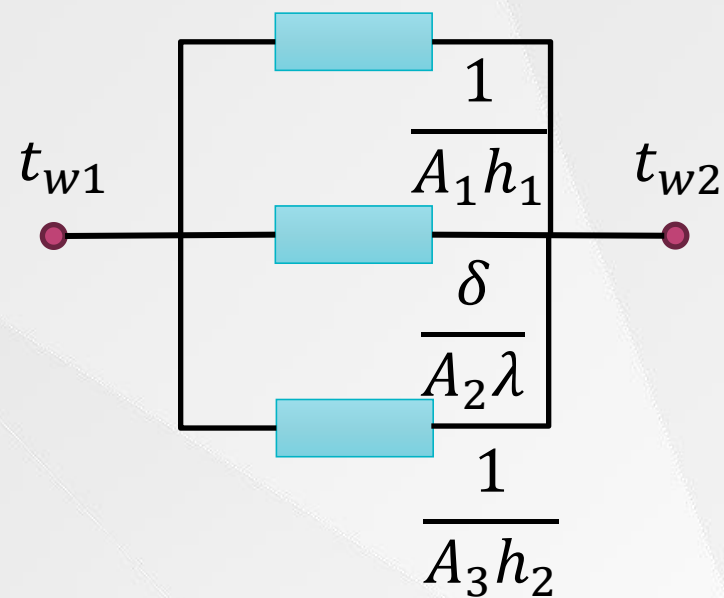
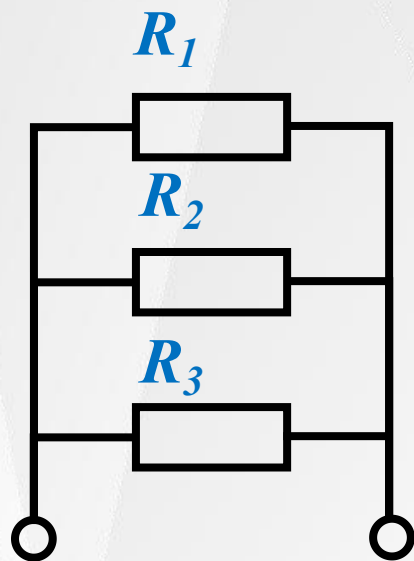
热阻的串联性质



$$\frac{1}{Ak} = \frac{1}{A_1 h_1} + \frac{\delta}{A_2 \lambda} + \frac{1}{A_3 h_2}$$



## 热阻的并联性质



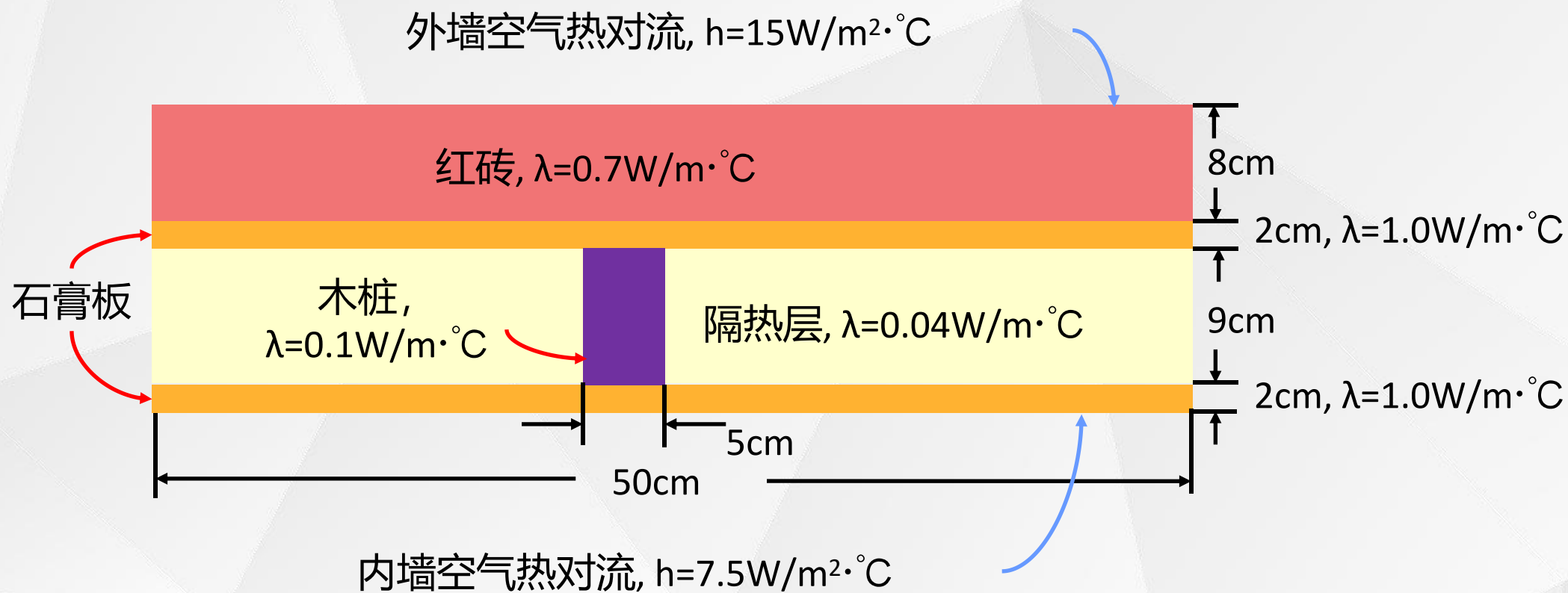
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$Ak = A_1 h_1 + \frac{A_2 \lambda}{\delta} + A_3 h_2$$



## 热阻的串并联性质

例题1：如下图所示，计算单位尺寸组合墙的热阻。





## 实例拓展：芯片封装散热

封装材料

1

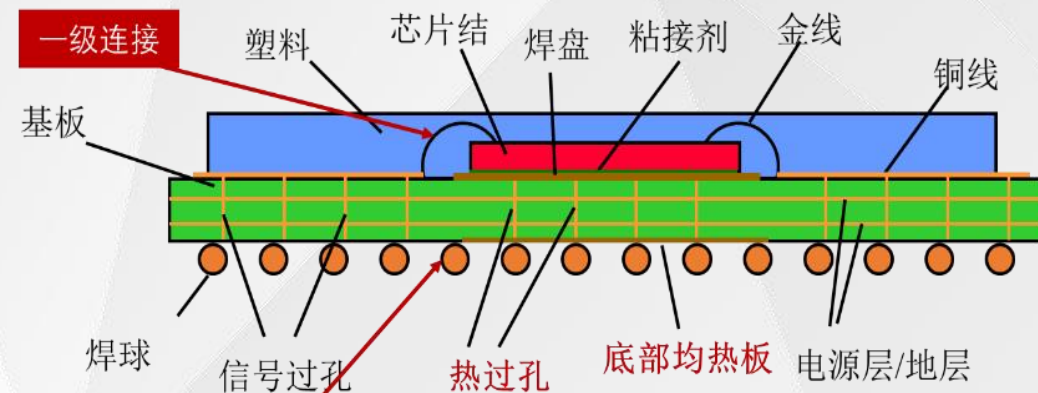
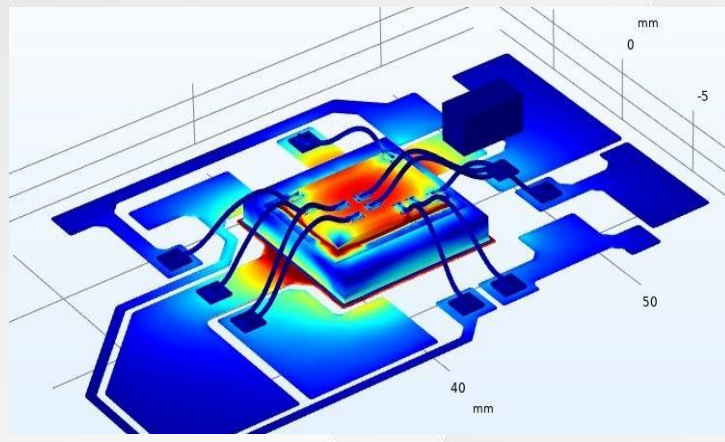
塑封

2

胶封

3

金属或陶瓷



二级连接

简化

结-壳-空气散热

壳

结

板

结-板-空气散热

结-壳热阻

壳-空气热阻

结-板热阻

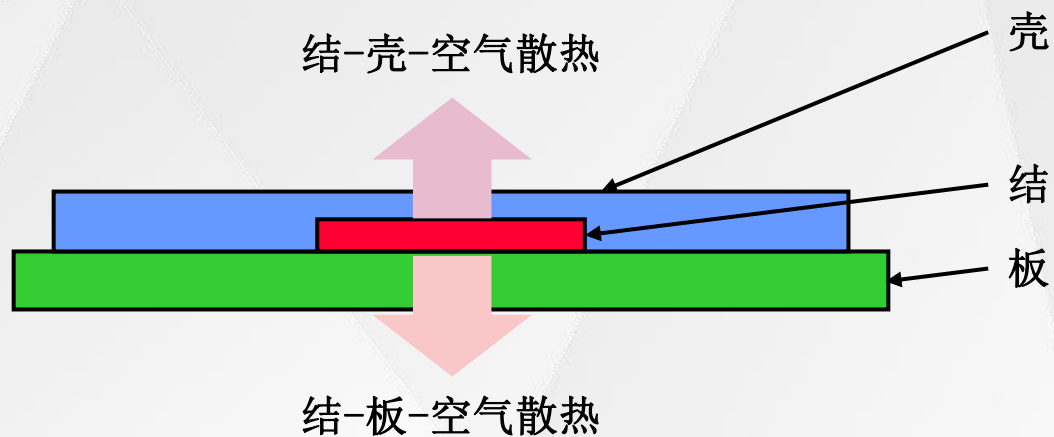
板-空气热阻





## 热阻的串并联性质

例题2：封装好的集成电路主要由芯片结、电路板和封装壳组成，其结构如下图所示。结-壳热阻为 $2.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，壳-空气热阻为 $15^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，结-板热阻为 $8^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，板-空气热阻为 $25^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。那么结-空气热阻为多少？如果封装散热量为 $5\text{W}$ ，空气温度是 $25^{\circ}\text{C}$ ，那么外壳和结温分别是多少？



# 03

## 通过多层壁的导热问题

- 通过多层平壁的导热
- 通过多层圆筒壁的导热
- 通过多层球壳的导热



## 通过多层壁的导热问题

由几层不同材料叠在一起  
组成的复合壁



01

02

04

03

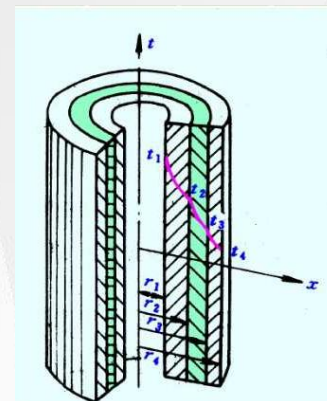
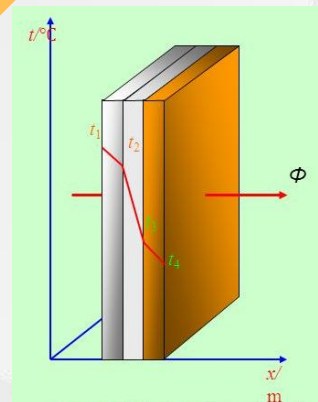
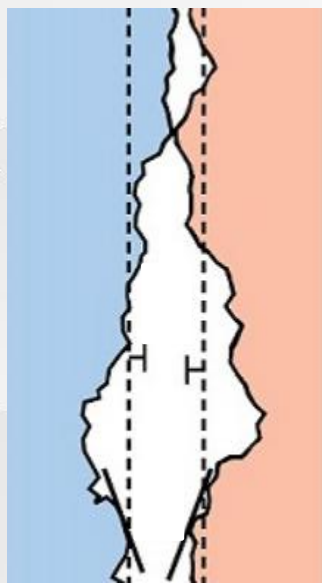
层与层之间接触良好，  
没有引入接触热阻



适用于任意层的多层壁

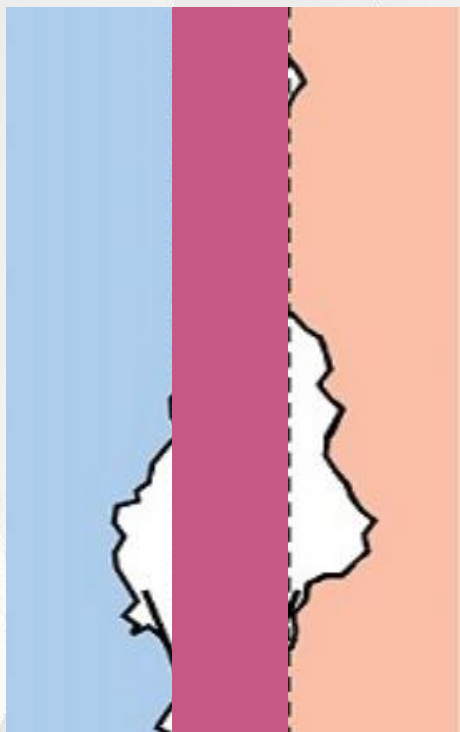


分为多种结构





## 实例拓展：热界面材料



机械性能稳定

经受温度循环及严酷的工作环境

导热系数

需要较高，减少界面热阻



柔性或顺应性

更能贴合粗糙表面

厚度

热阻与它的厚度成正比

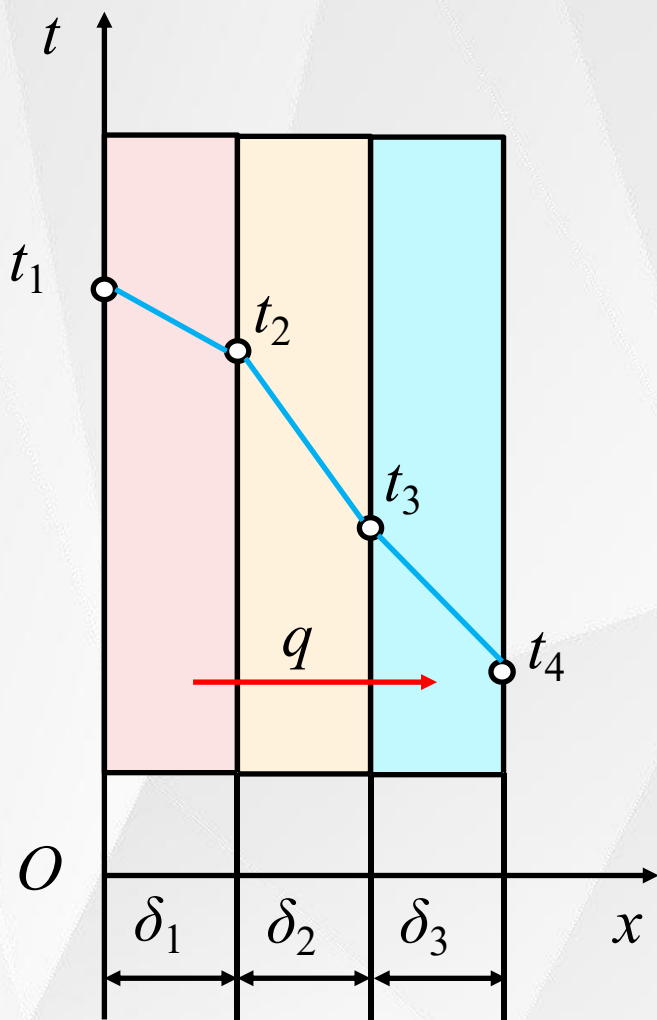




## 通过多层平壁的导热

已知:

- 各层厚度( $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ )
- 导热系数( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ )
- 多层壁两外表面的温度( $t_1, t_4$ )
- 确定通过这个多层壁的热流密度 $q$ 以及各层平壁的层间温度( $t_2, t_3$ )
- 假设层间接触良好



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

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

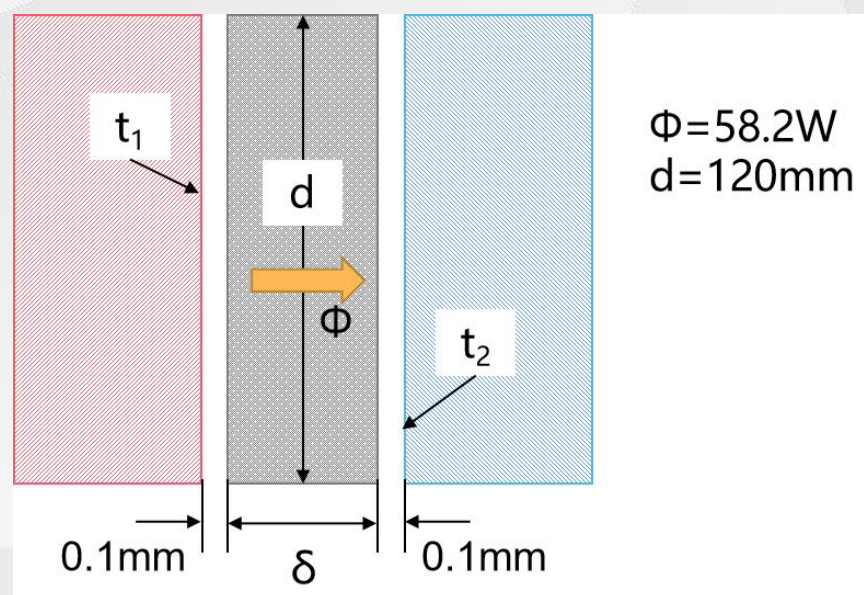
层间温度

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}$$

$$t_3 = t_4 + q \frac{\delta_3}{\lambda_3}$$

## 通过多层平壁的导热

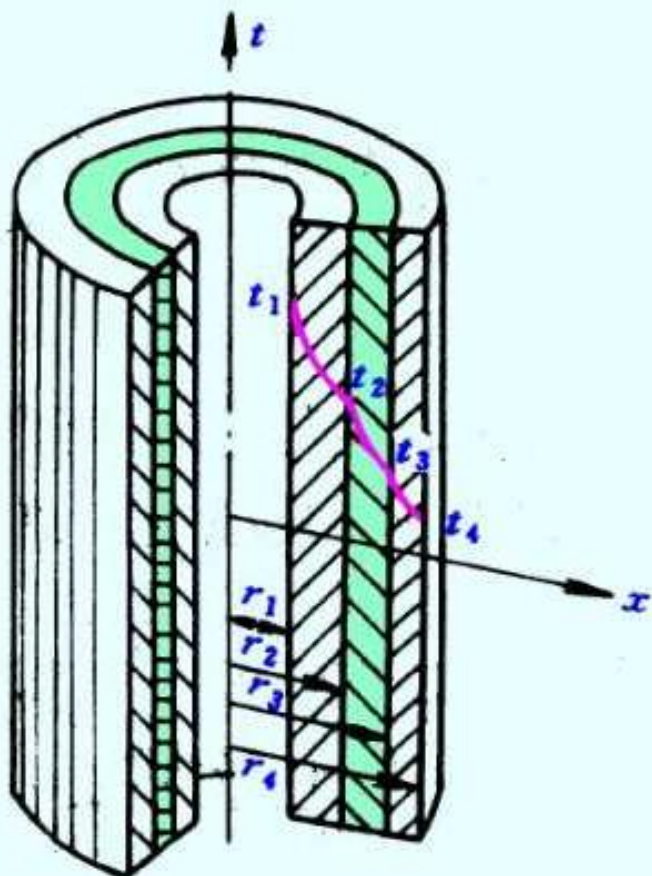
例题3：在平板导热系数测定装置中，试件厚度 $\delta$ 远小于直径 $d$ 。由于安装制造不好，试件与冷、热表面之间均存在着一个厚度 $\delta_a=0.1\text{mm}$ 的空气缝隙。设热表面温度 $t_1=180^\circ\text{C}$ ，冷表面温度 $t_2=30^\circ\text{C}$ ，空气缝隙的导热系数分别是 $\lambda_1=0.0372\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $\lambda_2=0.0267\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。试计算空气缝隙的存在给导热系数的测定带来的误差。通过空气缝隙的辐射传热可以忽略不计。



## 通过多层圆筒壁的导热

已知:

- 各层半径( $r_1, r_2, r_3, r_4$ )
- 导热系数( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ )
- 多层壁两外表面的温度( $t_1, t_4$ )
- 确定通过这个多层壁的热流量 $\Phi$ 以及各层平壁的层间温度( $t_2, t_3$ )
- 假设层间接触良好



层间温度

$$\Phi = \frac{t_1 - t_4}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{2\pi l(t_1 - t_4)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{\lambda_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{\lambda_3}}$$

$$\frac{t_1 - t_2}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1}} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{\lambda_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{\lambda_3}}$$

$$\frac{t_3 - t_4}{\frac{\ln(r_4/r_3)}{\lambda_3}} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{\lambda_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{\lambda_3}}$$



## 通过多层圆筒壁的导热

例题4：一蒸气锅炉炉膛中的蒸发受热面管壁受到温度为 $1000^{\circ}\text{C}$ 的烟气加热，管内沸水温度为 $200^{\circ}\text{C}$ ，烟气与受热面管子外壁间的复合换热表面传热系数为 $100\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，沸水与内壁间的表面传热系数为 $5000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，管子壁厚 $6\text{mm}$ 、管壁 $\lambda=42\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、外径为 $52\text{mm}$ 。试计算下列三种情况下受热面单位长度上的热负荷：

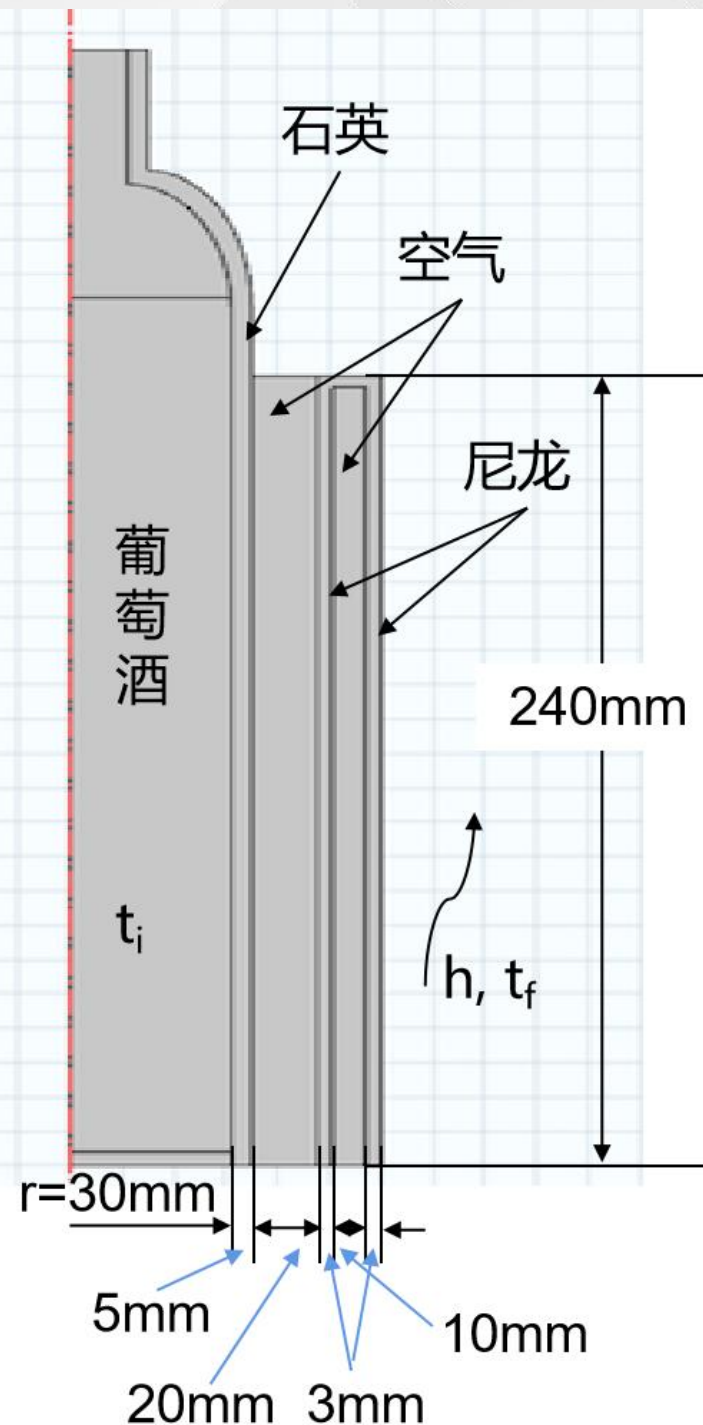
- (1) 换热表面是干净的；
- (2) 外表面结了一层厚为 $1\text{mm}$ 的烟灰，其 $\lambda=0.08\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ；
- (3) 内表面上又有了一层厚为 $2\text{mm}$ 的水垢，其 $\lambda=1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。





## 通过多层圆筒壁的导热

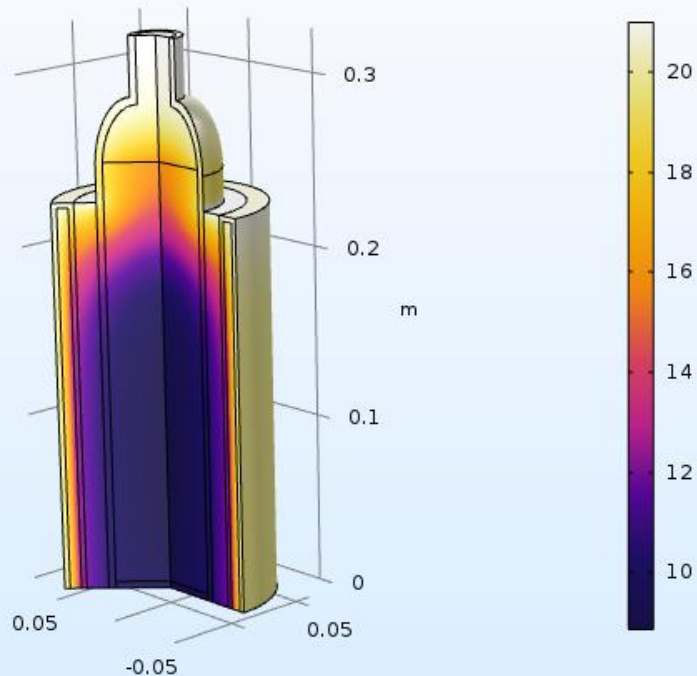
例题5：无冰葡萄酒冷却器可以实现将葡萄酒短时间在高温下保持低温状态。它通常由带有充气双层壁的开放式圆筒组成，尺寸如图所示。葡萄酒装在石英瓶中，石英的导热系数 $\lambda_1=0.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，组成冷却器的材料尼龙的导热系数 $\lambda_2=0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，石英与尼龙间空气的导热系数 $\lambda_3=0.0251\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，尼龙夹层间空气的导热系数 $\lambda_4=0.0259\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。冷却器外表面传热系数为 $12\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。环境温度 $t_f=31^\circ\text{C}$ ，为了使葡萄酒保持在口感较佳的 $12^\circ\text{C}$ ，冷却器需要阻挡多大的热流量？



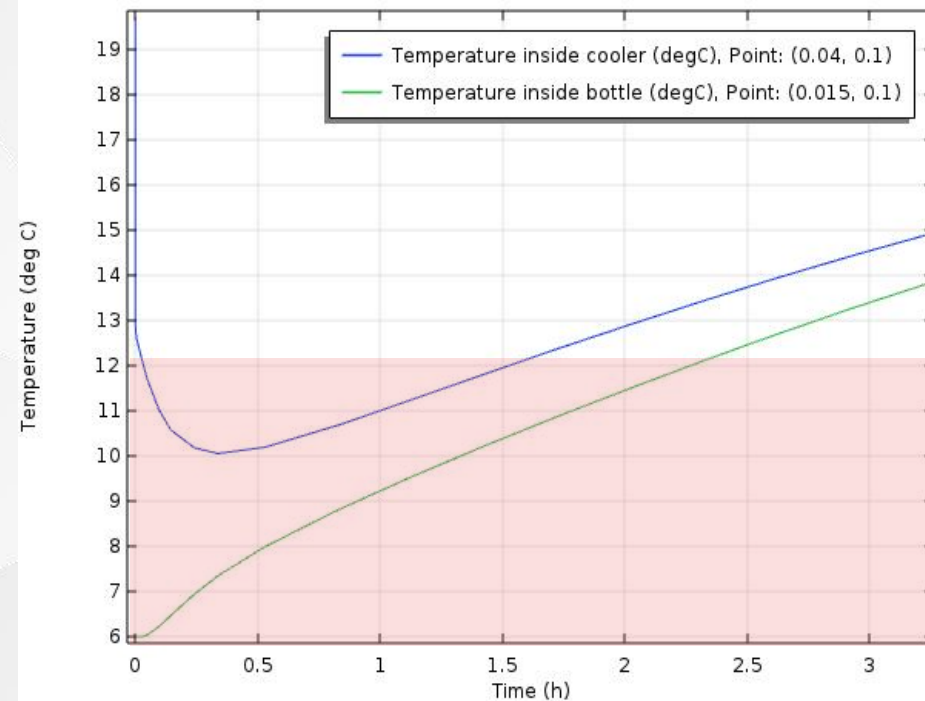


# 通过多层圆筒壁的导热

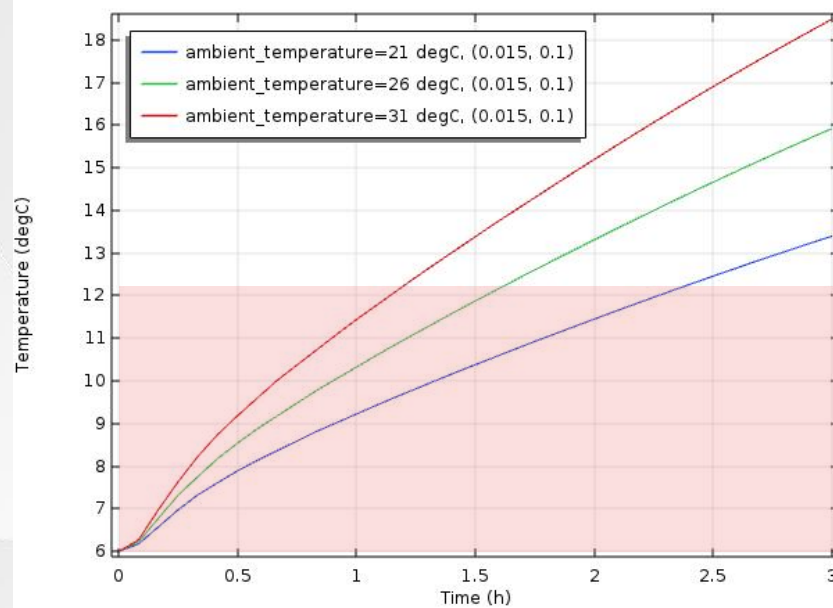
Time=1 h Surface: Temperature (degC)



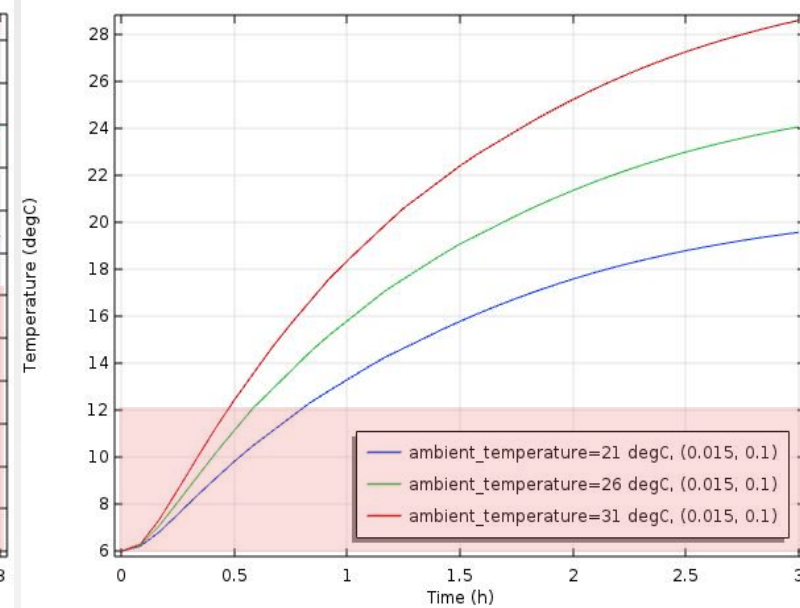
Temperature in bottle and cooler. Ambient temperature 21 deg C.



Temperature (degC): beverage in bottle



Temperature (degC): beverage in bottle without cooler

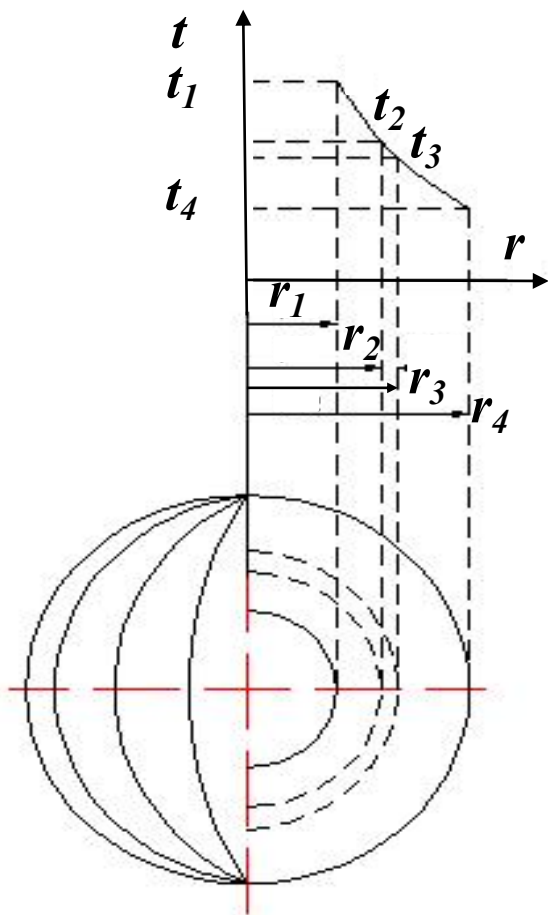




## 通过多层球壳的导热

已知:

- 各层半径( $r_1, r_2, r_3, r_4$ )
- 导热系数( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ )
- 多层壁两外表面的温度( $t_1, t_4$ )
- 确定通过这个多层壁的热流量 $\Phi$
- 假设层间接触良好

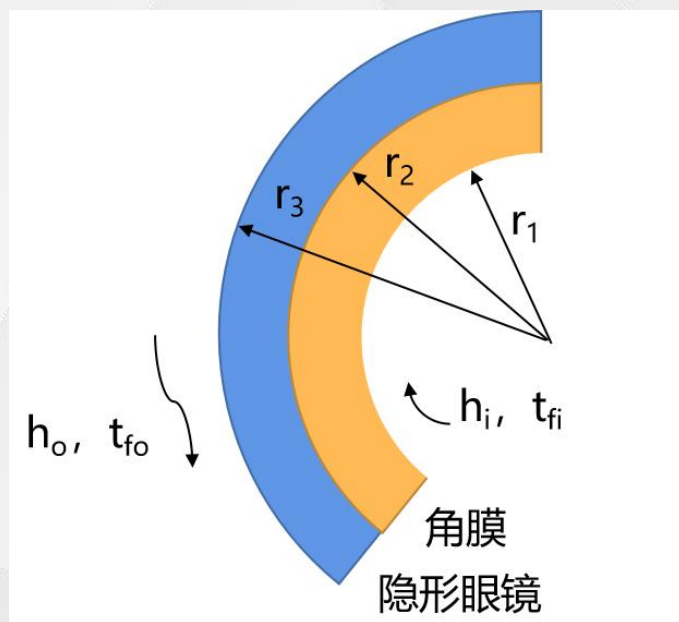
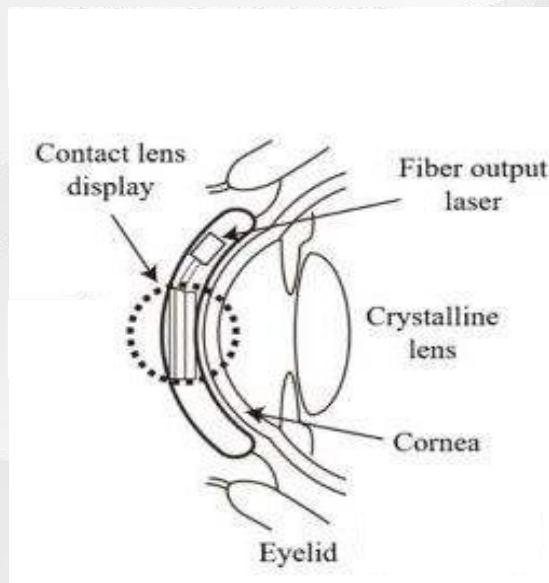


$$\Phi = \frac{t_1 - t_4}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{1}{4\pi\lambda_1} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{1}{4\pi\lambda_2} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right) + \frac{1}{4\pi\lambda_3} \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)}$$



## 实例拓展：隐形眼镜散热

例题6：人的眼睛在完成生物功能的过程中生成的热量要通过角膜散到周围环境中，其散热条件与是否带有隐形眼镜片有关。设角膜及隐形镜片均呈球状，且两者间接触良好，无接触热阻。角膜及镜片所张的中心角占了三分之一的球体。试确定在下列条件下不戴镜片及戴镜片时通过角膜的散热量： $r_1=10\text{mm}$ ， $r_2=12.5\text{mm}$ ， $r_3=16.3\text{mm}$ ， $t_{fi}=37^\circ\text{C}$ ， $t_{fo}=20^\circ\text{C}$ ， $h_i=12\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ， $h_o=6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ， $\lambda_1=0.35\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， $\lambda_2=0.8\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。







## 预习小测验

1.(多选题, 1分)

传热系数 $k$ 的大小取决于哪些因素?

ABD

- A. 材料的导热系数
- B. 参与传热过程的流体种类
- C. 传热面积
- D. 流速的大小

2.(多选题, 1分)

以下关于多层壁导热问题, 描述正确的是

BCD

- A. 多层壁导热问题只适用于有限层的多层壁
- B. 多层壁是由几层不同材料叠在一起组成的复合壁
- C. 多层壁导热问题中层与层之间接触良好, 没有引入接触热阻
- D. 多层壁导热问题主要包括通过多层平壁的导热、通过多层圆筒壁的导热、通过多层球壳的导热

3.(多选题, 1分)

以下关于热阻的描述正确的是

AC

- A. 串联热阻叠加原则与电学中串联电阻叠加原则相对应
- B. 并联热阻叠加原则与电学中并联电阻叠加原则无关
- C. 热阻是当有热量在物体上传输时, 在物体两端温度差与热源的功率之间的比值
- D. 传热系数 $k$ 可以表征传热过程强烈程度,  $k$ 越小, 传热越强烈



## 课后作业

作业：《传热学》 P78 2-9  
P79 2-12

