

无机材料热工基础

第二部分

第一章 窑炉气体力学

第二章 传 热

传热学是一门研究热能传递规律的科学

任何工业窑炉的传热均分为两类

- ❖ 一类是窑内加热物料的**有益传热现象**;
- ❖ 另一类是窑外热损失的**有害传热现象**;
- ❖ 窑炉工作环境和长寿高效与经济技术密切关联

维持炼铁高炉的长寿或者保护窑炉外环境--有益传热



高炉炉体图
blast furnace stack drawing

高炉用系列耐火制品 Series refractory product for blast furnace

-  不定型材料配合泥浆
Accessory slurry of unshaped material
-  致密粘土砖
compact clay brick
-  高铝砖
high-alumina brick
-  烧成铝炭砖
firing microcellular aluminum carbon brick
-  复合棕刚玉或刚玉莫来石
compound brown aluminum, corundum-mullite, orient topeaz-mullite
-  微孔烧成炭块或微孔烧成铝炭块
microcellular firing carbon piece, microcellular firing aluminum carbon piece
-  半石墨烧成炭块或半石墨质自焙炭块
semi-graphite firing carbon piece, self-baking carbon piece

第二章 传 热

传热有三种方式，即**传导、对流与辐射**。

实际传热过程，几种方式同时并存——**综合传热**。

在研究传热之前，首先建立温度场的概念。

温度场是传热的必要条件：物体（气-固-液）中存在温度差，热量总是从高温向低温流动。

温度场是空间与时间函数： $t = f(x, y, z, \tau)$

如果温度场不随时间改变，则称为稳定传热，反之为不稳定传热。例如：

A> 窑炉中的窑墙、窑顶，虽然各点温度不同，但不随时间而改变，属稳定传热。

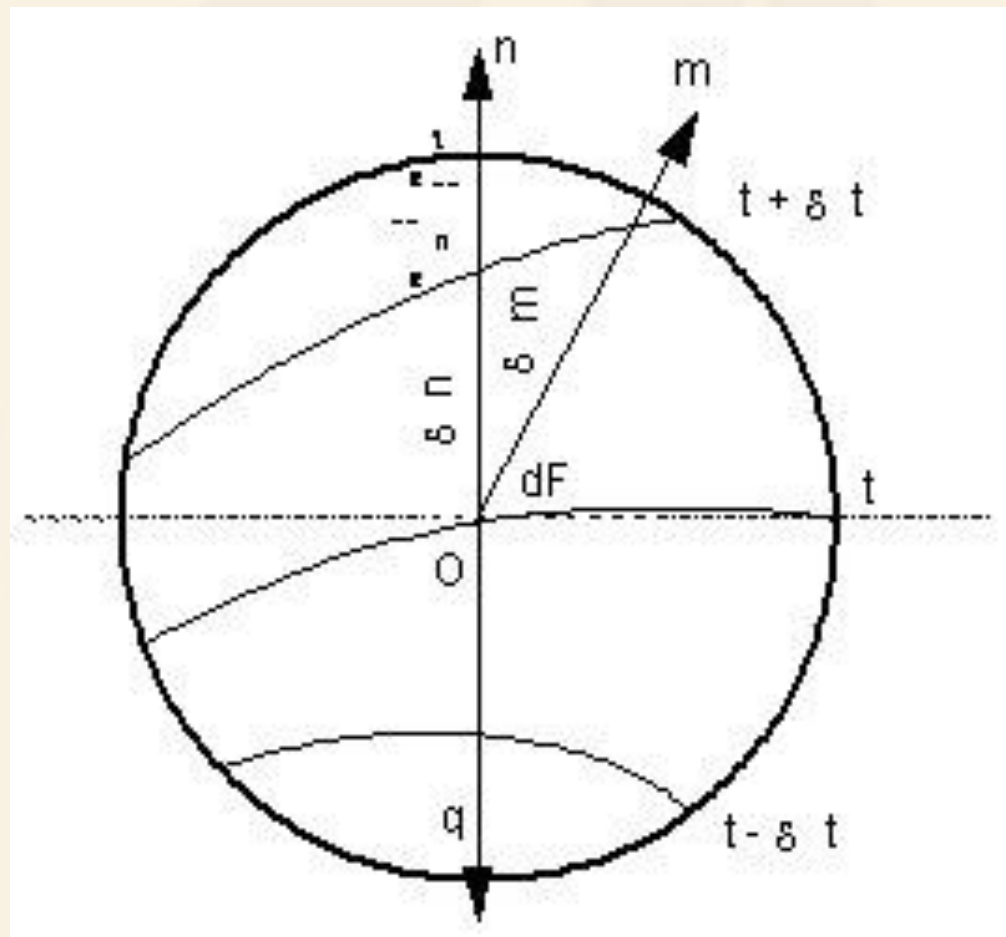
B> 在加热或冷却过程中，同一部位的温度都随时间改变，属不稳定传热。

温度梯度和热流

物体空间中，具有相同温度的各点相连接就得到等温面。

过任意一点 O 温度变化率最大的方向位于等温线的法线方向上。

等温面间温差 Δt 与其法线方向距离 Δn 之比值的极限称为温度梯度。记为 $Gradt$ 。



$$Gradt = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \Delta t / \Delta n = dt / dn$$

第一节 传导传热—导热

导热概念:

指物体各部分无相对位移或不同物体的直接接触，依靠物质的分子、原子、自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象。

本书仅关注导热现象的宏观规律。

一、导热基本定律 — 傅立叶定律

傅立叶在研究固体导热现象时确定：

单位时间内传递的热流量 Φ ，与温度降度以及垂直于导热方向的截面积 F 成正比

$$\Phi = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) \cdot F \quad W$$

对单位时间，单位面积所传递的热流量，即热流密度（热流通量）可表示为：

$$q = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) \quad W / m^2$$

这就是傅立叶定律的数学表达式。

λ : 材料的导热系数, 热导率.

表示物体内部温度降度为 $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 单位时间内通过单位面积的热流量, 它标志物质的导热能力。

$$\lambda = \Phi / [(-\partial t / \partial n) F] \quad \text{W} / (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

气体: $0.006 \sim 0.6 \text{W} / (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 分子运动和相互碰撞的结果

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

金属: $2.2 \sim 420 \text{W} / (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

非金属: $0.025 \sim 4 \text{W} / (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ <耐材、建材及隔热材料>

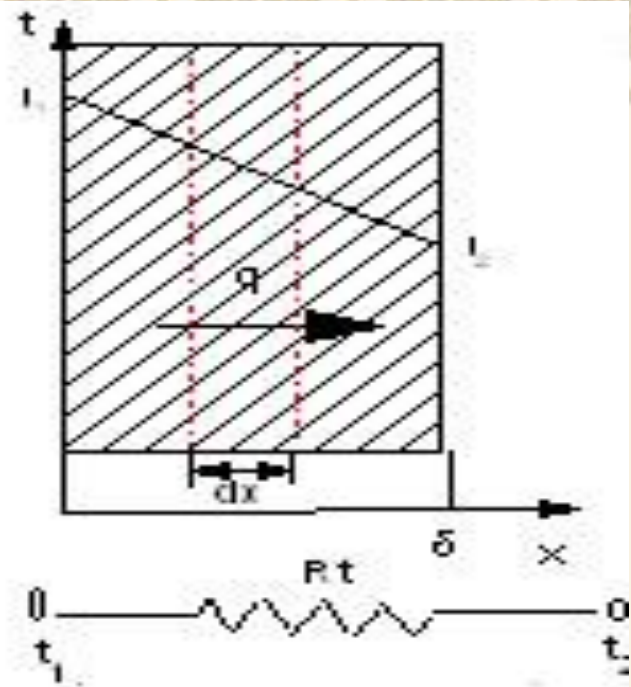
导热系数随温度而变化:

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 \pm \beta t) = \lambda_0 \pm b t_m$$

二、平壁导热

§1 通过单层平壁导热

设有一同质单层平壁如图所示，厚度 δ ， $t_1 > t_2$ ， λ 为常数，平壁温度只沿 x 方向变化。在 x 方向上取一厚度 dx ，



一维稳定导热傅立叶定律:

$$q = -\lambda dt / dx$$

分离变量得:

$$dt = -q / \lambda \cdot dx$$

积分:

$$t = -q / \lambda \cdot x + C$$

积分常数 C ，由边界条件确定，

当 $x=0$ ， $t=t_1$ ，得： $C=t_1$

$$t = t_1 - q / \lambda \cdot x$$

当 $x = \delta$, $t = t_2$, 得:

$$t_2 = -q / \lambda \cdot \delta + t_1$$

$$q = (t_1 - t_2) \cdot \lambda / \delta$$

通过面积 F 所传递的热流量

$$\Phi = q \cdot F = F (t_1 - t_2) \cdot \lambda / \delta$$

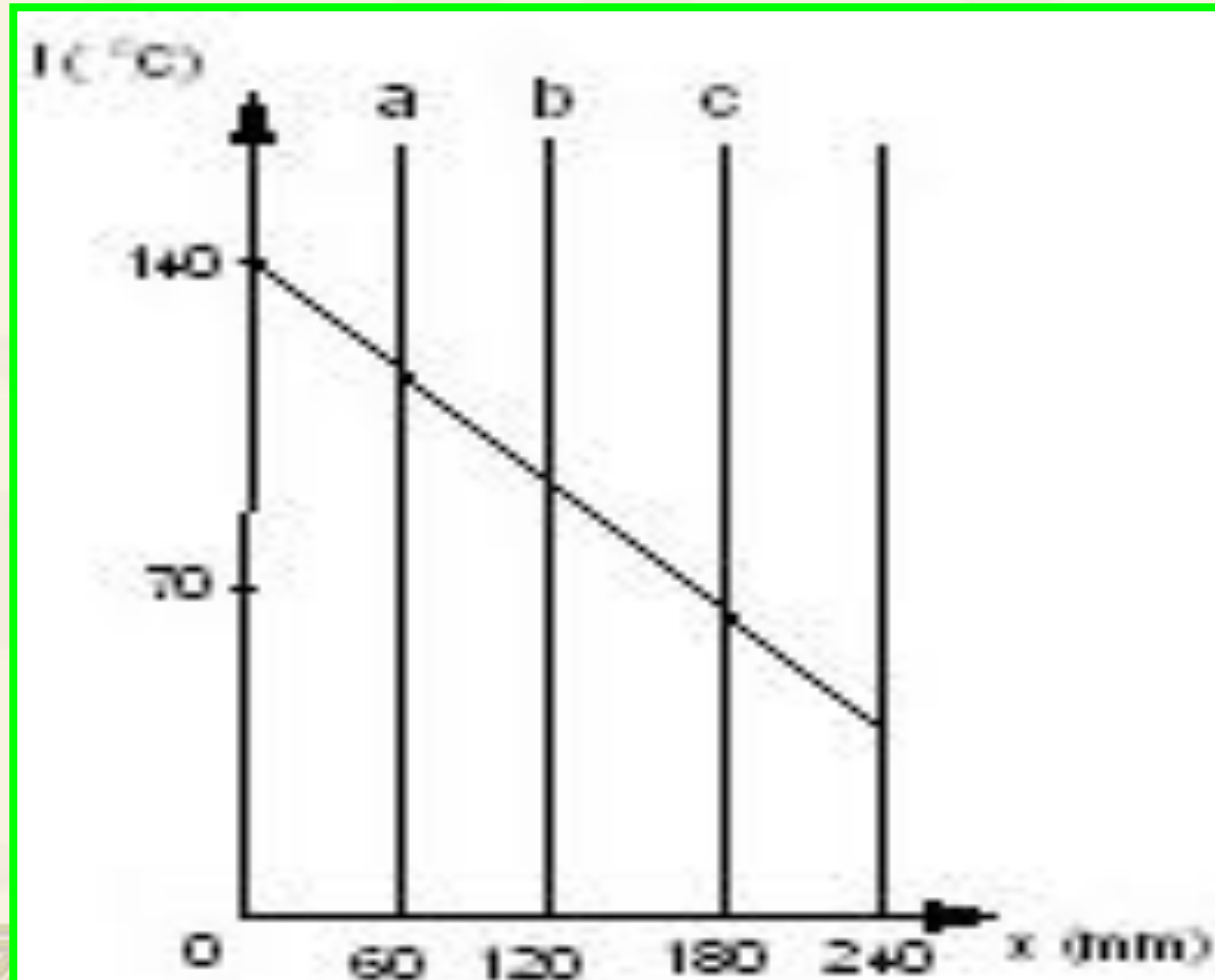
平壁内距离内表面 x 处温度的计算:

$$\begin{aligned} t_x &= t_1 - (q / \lambda) \cdot x = t_1 - [(t_1 - t_2) \cdot \lambda / \delta] / \lambda \cdot x \\ &= t_1 - [(t_1 - t_2) / \delta] x \end{aligned}$$

结论: 当材料的导热系数为常数时, 单层平壁内温度呈直线分布。

例1: 如图, 有一红砖墙, 其厚度 δ 为240mm(长度及宽度远远大于厚度, 可视为“一维”导热), 墙的两表面温度分别为 $t_1=140^\circ\text{C}$ 、 $t_2=20^\circ\text{C}$ 。

求: 通过此墙壁的热流密度 q 和平壁a、b、c各平面的温度 t_a 、 t_b 、 t_c ? 这些平面相距均为60mm。



解： 不考虑红砖的 λ 随温度变化，取 $\lambda=0.50\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$

$$\begin{aligned}q &= (t_1 - t_2) \lambda / \delta \\ &= (140-20) \times 0.50 / 0.24 = 250 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t_a &= t_1 - [(t_1 - t_2) / \delta] x \\ &= 140 - [(140-20)/0.24] \times 0.06 = 110^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

$$t_b = 80^{\circ}\text{C} \qquad t_c = 50^{\circ}\text{C}.$$

当 λ 为常数时单层平壁内温度按直线分布。

热阻概念：与电阻相似。欧姆定律 $I = U/R$

热流量： $\Phi = (t_1 - t_2) / (\delta/\lambda F) = \Delta t / R_t$

热流密度： $q = (t_1 - t_2) / (\delta/\lambda) = \Delta t / R'_t$

$R_t = \delta/\lambda F$ 为传热过程中的阻力，称为热阻 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

R_t 是传热总面积的热阻； $R'_t = \delta/\lambda$ 为单位面积的热阻
($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$) / W 。

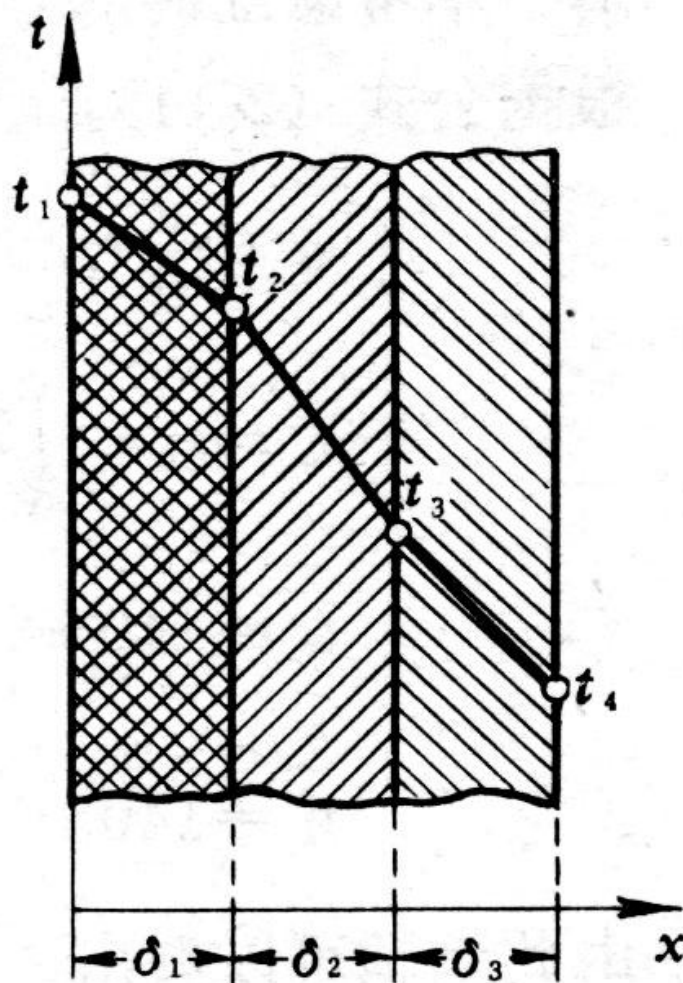
当在传热路径上**传热面积沿途不变**时，可采用单位面积热阻；

当**传热面积沿途变化**时，则采用总面积的热阻。

§ 2 多层平壁导热

由三种不同材料组成的多层平壁，如图：

每层厚度为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 ，导热系数为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ，均为常数。



内外表面温度为 t_1 和 t_4 ，且 $t_1 > t_4$ ，
层与层之间温度为 t_2 和 t_3 。

通过各层的热流量可表示为：

$$\Phi_1 = \lambda_1 / \delta_1 \cdot (t_1 - t_2) F = (t_1 - t_2) / R_{t1}$$

$$\Phi_2 = \lambda_2 / \delta_2 \cdot (t_2 - t_3) F = (t_2 - t_3) / R_{t2}$$

$$\Phi_3 = \lambda_3 / \delta_3 \cdot (t_3 - t_4) F = (t_3 - t_4) / R_{t3}$$

移项可得：

$$t_1 - t_2 = R_{t1} \Phi; \quad t_2 - t_3 = R_{t2} \Phi; \quad t_3 - t_4 = R_{t3} \Phi$$

通过该平壁热流量为：

$$\Phi = (t_1 - t_4) / (R_{t1} + R_{t2} + R_{t3}) = \Delta t / \sum R_t \quad W$$

三层平壁的总热阻为：

$$\sum R_t = R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} \quad \text{这和电阻串联的原理一样。}$$

对各层之间温度：

$$t_2 = t_1 - \Phi R_{t1}; \quad t_3 = t_1 - \Phi (R_{t1} + R_{t2}); \quad \text{或} \quad t_3 = t_4 + \Phi R_{t3}$$

对于多层第*i*层和*i*+1层之间温度：

$$t_{i+1} = t_1 - \Phi (R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{ti})$$

例2 某隧道烧成带的砌筑材料, 如下表:

窑墙内表面温度 $t_1 = 1400^\circ\text{C}$, 外表面温度 $t_5 = 80^\circ\text{C}$,

求: 热流密度 q 和各层温度分布?

砌筑材料	热导率 $W/(m \cdot ^\circ\text{C})$	砌筑厚度 (mm)
硅砖 (内层)	1.80	460
轻质砖 ($\rho = 1.30$)	0.79	230
轻质砖 ($\rho = 0.8$)	0.47	460
粘土砖 (外层)	0.81	113

解： 根据公式，现计算单位面积的热阻：

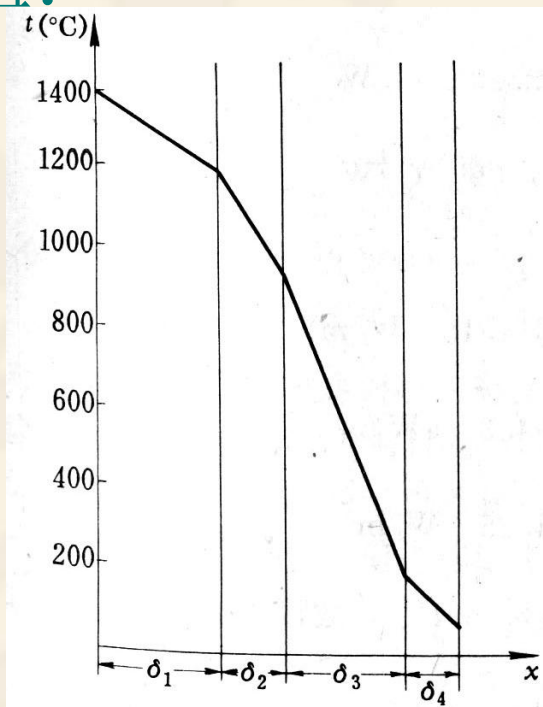
$$R'_{t1} = \delta_1 / \lambda_1 = 0.46 / 1.8 = 0.26 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C) / W}$$

$$R'_{t2} = 0.23 / 0.79 = 0.29 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C) / W}$$

$$R'_{t3} = 0.46 / 0.47 = 0.98 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C) / W}$$

$$R'_{t4} = 0.113 / 0.81 = 0.14 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C) / W}$$

$$q = (t_1 - t_5) / \sum R'_t = (1400 - 80) / (0.26 + 0.29 + 0.98 + 0.14) = 790 \text{ W/m}^2$$



$$t_2 = t_1 - q R'_1 = 1400 - 790 \times 0.26 = 1195 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_3 = t_1 - q (R'_1 + R'_2)$$

$$= 1400 - 790 \times (0.26 + 0.29) = 966 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_4 = t_1 - q (R'_1 + R'_2 + R'_3)$$

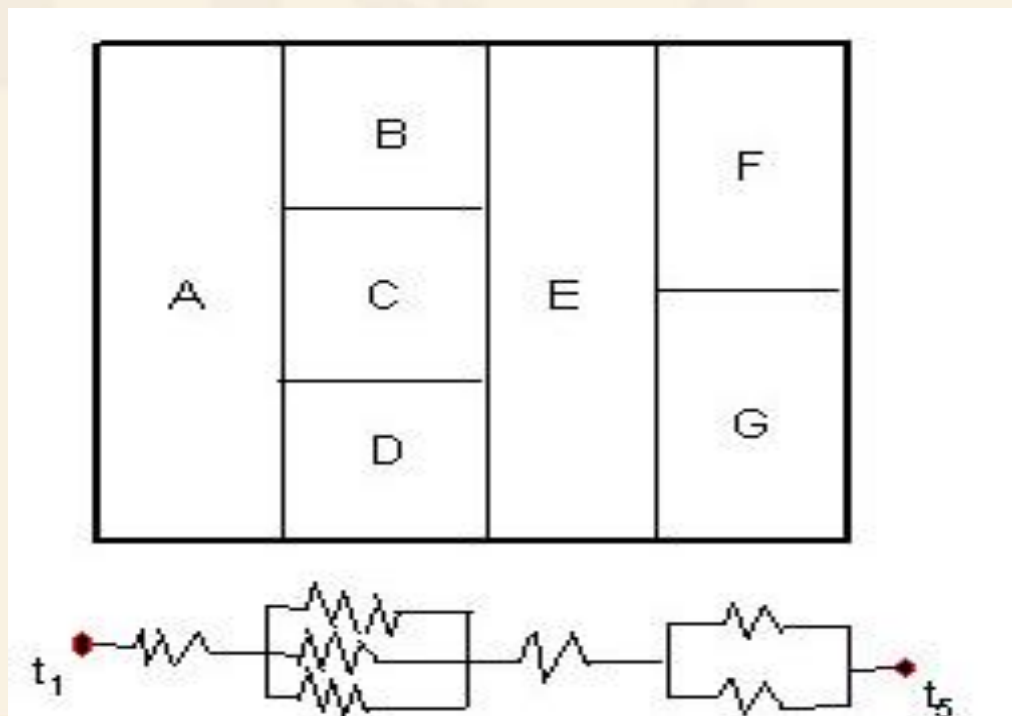
$$= 1400 - 790 \times (0.26 + 0.29 + 0.98) = 191 \text{ }^\circ\text{C}$$

§ 3 复合平壁的导热

工程上经常会碰到复杂的复合平壁，

可按照串联、并联方法进行计算，

其流量 Φ : $\Phi = (t_1 - t_2) / R_t \quad W$



通过复合壁一维串
联和并联的热传
导及模拟电路

一炉渣混凝土空心砌块，结构尺寸如图所示。炉渣混凝土的导热系数 $\lambda_1=0.79\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，空心部分的当量导热系数 $\lambda_2=0.29\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。试计算砌块的导热热阻。

解：该砌块高度方向可划分为**并联的七层**，其中四个相同的炉渣混凝土层的热阻（串联）为：

$$R_1' = \frac{\delta}{\lambda_1 A_1} = \frac{0.115}{0.79 \times 0.03 \times 1} = 4.85 \quad \text{C/W}$$

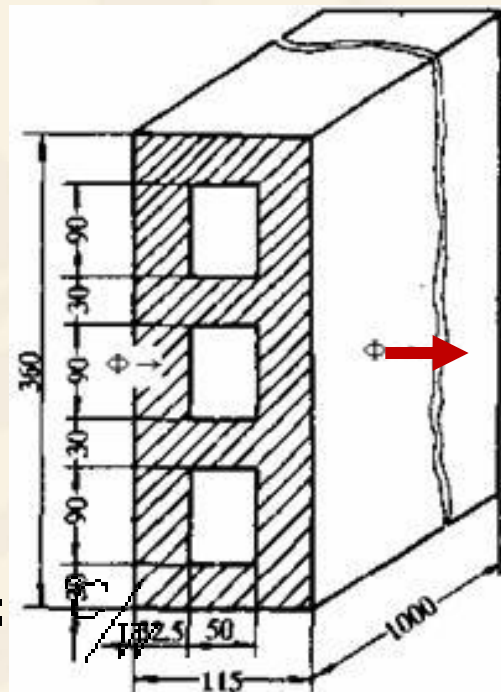
❖ 三个混凝土—空气层的热阻（串联）为：

$$R_1'' = 2 \frac{\delta_1}{\lambda_1 A_2} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A_2} = 2 \times \frac{0.0325}{0.79 \times 0.09 \times 1} + \frac{0.05}{0.29 \times 0.09 \times 1} = 2.83$$

❖ 砌块的总导热热阻为：
$$\sum R_1 = \frac{1}{4 \frac{1}{R_1'} + 3 \frac{1}{R_1''}} = 0.53 \text{C/W}$$

上述计算过程仅在主热流方向（**从左到右**）时正确。

❖ 请思考，如果主热流方向与图示方向垂直时，砌块的总导热热阻该如何计算？



三、圆筒壁导热

§ 1 通过单层圆筒壁导热：

单层圆筒壁如图：

参数：

内半径 r_1 ，

外半径 r_2 ，

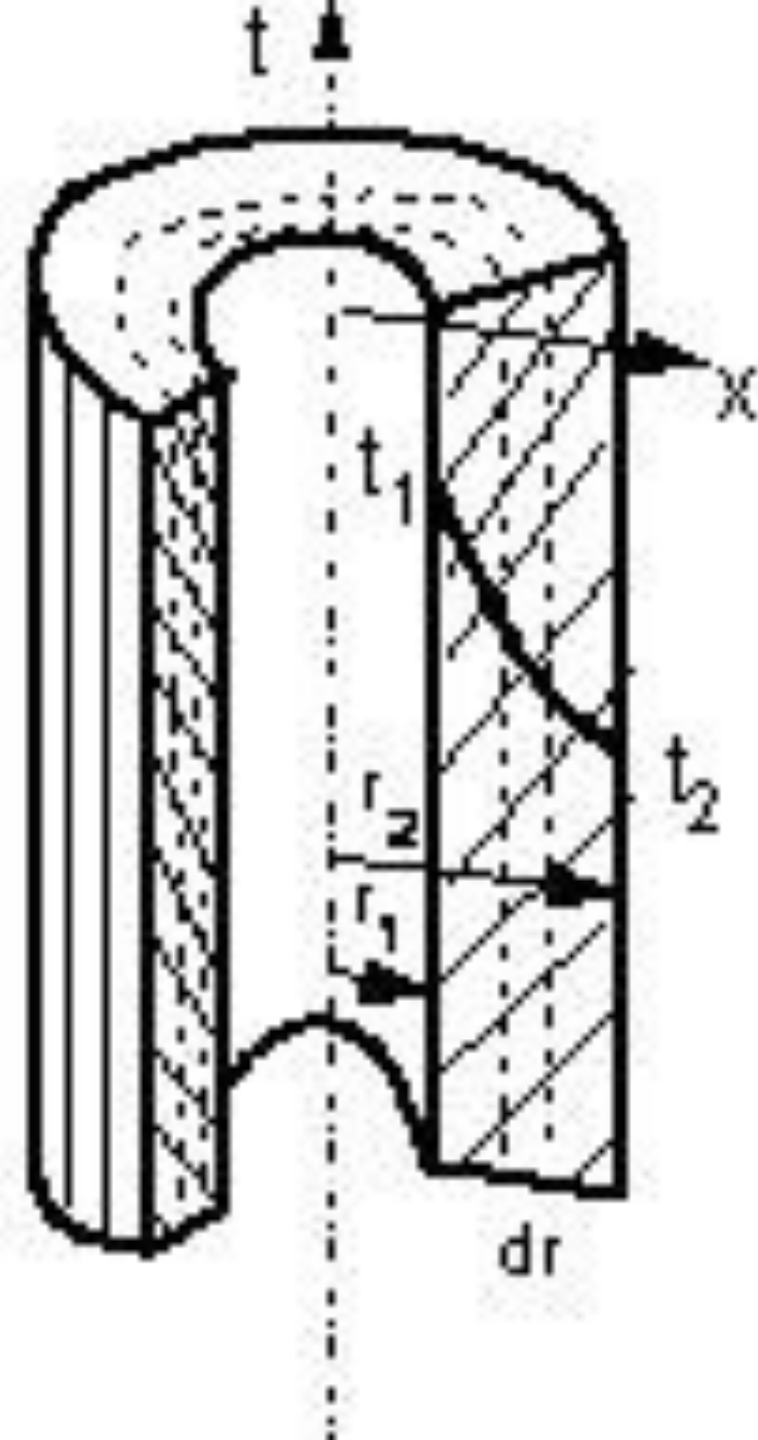
内外表面温度 t_1 和 t_2 ，

圆筒壁长度比直径大得多，

轴向长度为 l

圆筒壁内选定半径为 r

厚度为 dr 环形薄层



根据傅立叶定律：

$$\Phi = -F \lambda dt / dr = -\lambda (2\pi r l) dt / dr$$

分离变量并积分得到： $t = -[\Phi/(2\pi\lambda l)] \ln r + C$ 边

界条件

当 $r=r_1$, $t=t_1$ 代入得： $t_1 = -[\Phi/(2\pi\lambda l)] \cdot \ln r_1 + C$

当 $r=r_2$, $t=t_2$, 代入得： $t_2 = -[\Phi/(2\pi\lambda l)] \cdot \ln r_2 + C$

$$t_1 - t_2 = \left[\Phi / (2 \pi \lambda l) \right] \ln (r_2 / r_1) \\ = \left[\Phi / (2 \pi \lambda l) \right] \ln (d_2 / d_1)$$

整理得：

$$\Phi = (t_1 - t_2) / \left\{ \left[1 / (2 \pi \lambda l) \right] \cdot \left[\ln (d_2 / d_1) \right] \right\}$$

热流密度

$$q_l = \Phi / l = (t_1 - t_2) / \left\{ \left[1 / (2 \pi \lambda) \right] \cdot \left[\ln (d_2 / d_1) \right] \right\} \text{ W/m}$$

$$q_l = \Delta t / R_{t,l} \quad \text{W/m}$$

$$R_{t,l} = \left[1 / (2 \pi \lambda) \right] \cdot \left[\ln (d_2 / d_1) \right] \quad (\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) / \text{W}$$

$R_{t,l}$ —每米长度的单层圆筒壁导热热阻。

§ 2. 多层圆筒壁导热

设圆筒壁为三层，由三种不同的材料组成，内直径 d_1 ，外直径 d_4 ，中间各层直径 d_2 、 d_3 。内外表面温度 t_1 、 t_4 ，层与层间温度为 t_2 、 t_3 。

$$\text{热流密度 } q = (t_1 - t_4) / (R_{t,11} + R_{t,12} + R_{t,13});$$

$$R_{t,11} = [1 / (2 \pi \lambda_1)] \cdot [\ln (d_2 / d_1)]$$

$$R_{t,12} = [1 / (2 \pi \lambda_2)] \cdot [\ln (d_3 / d_2)]$$

$$R_{t,13} = [1 / (2 \pi \lambda_3)] \cdot [\ln (d_4 / d_3)]$$

对于 n 层圆筒壁，则 $q = (t_1 - t_{n+1}) / (R_{t,11} + R_{t,12} + \dots + R_{t,1n})$ ；
第 i 层与 $i+1$ 层的温度为：

$$t_{i+1} = t_1 - q (R_{t,11} + R_{t,12} + \dots + R_{t,1i}) \quad ^\circ\text{C}$$

例 蒸气管内径和外径分别为160mm和170mm，管外裹着两层隔热材料。第一层隔热材料的厚度 $\delta_2=30\text{mm}$ ，第二层厚度 $\delta_3=50\text{mm}$ ，管壁及两层隔热材料的导热系数为 $\lambda_1=58$ ， $\lambda_2=0.17$ ， $\lambda_3=0.09\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ，蒸气管内表面温度 $t_1=300^\circ\text{C}$ ，外表面温度 $t_4=50^\circ\text{C}$ ，试求每米长度蒸气管的热损失和各层之间温度。

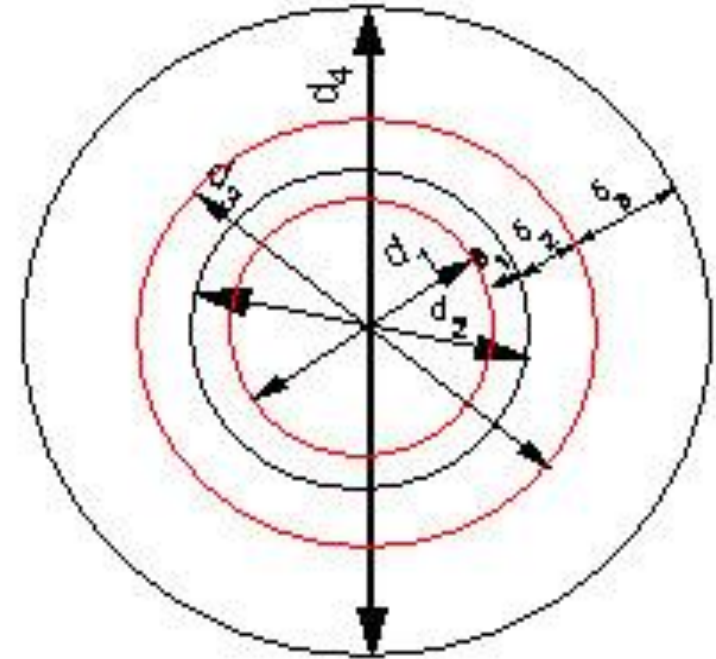


图2.9 例题4附图

解： $r_1 = d_1 / 2 = 0.08\text{m}$; $r_2 = d_2 / 2 = 0.085\text{m}$;
 $r_3 = r_2 + \delta_2 = 0.115\text{m}$; $r_4 = r_3 + \delta_3 = 0.165\text{m}$

各层热阻值

$$R_{t1} = [1 / (2\pi\lambda_1)] \cdot [\ln (r_2 / r_1)]$$
$$= [2\pi \times 58]^{-1} \cdot \ln (0.085 / 0.08) \approx 0$$

$$R_{t2} = [1 / (2\pi\lambda_2)] \cdot [\ln (r_3 / r_2)]$$
$$= [2\pi \times 0.17]^{-1} \cdot \ln (0.115 / 0.085) = 0.28$$

$$R_{t3} = [1 / (2\pi\lambda_3)] \cdot [\ln (r_4 / r_3)]$$
$$= [2\pi \times 0.09]^{-1} \cdot \ln (0.165 / 0.115) = 0.64$$

$$q = (t_1 - t_4) / \sum R = (300 - 50) / (0 + 0.28 + 0.64) = 272 \text{ W/m}$$

层间温度为：

$$t_2 = t_1 - q R_{t1} = 300 - 272 \times 0 = 300^\circ\text{C}$$

$$t_3 = t_1 - q (R_{t1} + R_{t2}) = 300 - 272 \times (0 + 0.28) = 224^\circ\text{C}$$

四、球壁的导热

如图，设有一空心球，内外表面半径和温度为 r_1 、 r_2 和 t_1 、 t_2 ；导热系数 λ 为常数。在壁内选定半径为 r ，厚度为 dr 的空心球层。

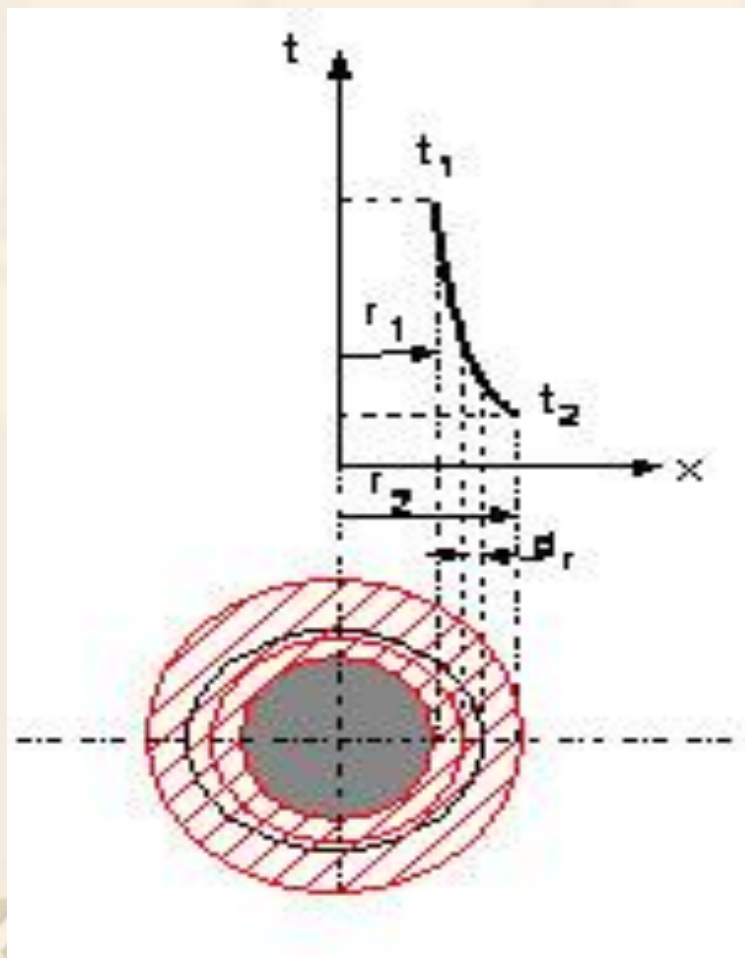


图2.10 单层球壁

根据傅立叶定律，每小时通过该层热流量为

$$\Phi = -\lambda F dt / dr = -\lambda (4\pi r^2) dt / dr$$

分离变量并积分：

$$t = (1/r) \cdot \Phi / (4\pi\lambda) + C \text{ 积分常数 } C$$

可由边界条件确定：

$$\text{当 } r=r_1, t=t_1, \text{ 有: } t_1 = (1/r_1) \cdot \Phi / (4\pi\lambda) + C$$

$$\text{当 } r=r_2, t=t_2, \text{ 有: } t_2 = (1/r_2) \cdot \Phi / (4\pi\lambda) + C$$

$$t_1 - t_2 = [\Phi / (4\pi\lambda)] (1/r_1 - 1/r_2)$$

$$\Phi = 4\pi\lambda (t_1 - t_2) / [(1/r_1) - (1/r_2)] \quad W$$

$$\text{圆筒壁 } \Phi = 2\pi\lambda l (t_1 - t_2) / \ln(d_2 / d_1)$$

$$\text{平壁 } \Phi = \lambda_1 F (t_1 - t_2) / \delta_1$$