《热力学与传热学基础》

传热学小结

（2024）

《热力学与传热学基础》期末考试

- 时间：1月5日 周日 19:00 21:00
- 地点：六教-6C300
- 考试为闭卷，仅考传热学部分
- 考试需携带计算器。
- 考前答疑：1月4日下午2-5点，李兆基楼A549-1

考试题型

- 简答题：5-6道 (30-40分)
- 计算题：3-5道 (60-70分)
- 考试重点：课本及讲义PPT内容，涉及基本概念、公式以及换热计算分析等

一、导 热

1、基本定律及概念

① 温度场、温度梯度、导热系数、热扩散率、内热源强度、热阻、肋片效率等基本概念；

② Fourier定律的内容、表达式及其适用条件；

③ 掌握导热问题的数学描述方法，能够正确建立导热问题的物理模型和数学模型；

导热微分方程及简化

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}=a\nabla^{2}t+\frac{\dot{\Phi}}{\rho c}$$

单值性条件（定解条件）

物理条件；时间条件；边界条件（三类）

2、稳态导热

① 一维稳态导热（平壁、圆筒壁、球壳）

1）无内热源定常一维稳态导热：Fourier定律直接积分，A(x)已知；

2）热导率是温度的函数、有内热源的一维稳态导热：导热微分方程的定解问题。

② 肋的一维稳态导热

1）肋片作用

2）肋片效率定义

3、非稳态导热

① <u>一维瞬态导热</u>

- 瞬态导热的特点
- 正规状况阶段的特点
- Fo的含义及其对瞬态导热的影响
- Bi的含义及其对瞬态导热的影响

② <u>集总参数法: 方程的建立、求解；时间常数</u>

二、对流换热

1、基本概念及方程

① 表面传热系数（牛顿冷却公式）及影响因素

② 对流换热的微分方程组（各项物理意义）

③ 边界层理论及对方程组的简化：

—边界层理论的主要内容；

—应用边界层理论简化对流换热微分方程组；

—Pr数的物理意义及其对边界层的影响。

2、相似理论

① 物理现象相似的定义

② 相似的性质：努塞尔数Nu、雷诺数Re、普朗特数Pr

③ 根据相似理论进行传热学实验

④ 对实际问题如何保证模型与原型的相似

强迫对流：Re、Pr，同一流体： Re

自然对流：Gr、Pr，同一流体： Gr

3、单相强迫对流换热

① 内部问题：进口段与充分发展段；

外部问题：脱体（原因），横掠圆管h随φ的变化

② 物性、管道弯曲、流态对管内充分发展段对流换热的影响；

③ 计算：准则关联式

适用条件、定性温度、特征尺度；准则数。

4、自然对流换热

① 起因、影响因素、边界层特点

三、热辐射换热

1、基本概念与定律

① 吸收、反射与透射；

② 黑体、灰体、漫表面；

③ 辐射强度、辐射力（定向、光谱）、发射率；

④ 基本定律：Planck, Stefen-Boltzmann,

Wien, Lambert, Kirchhoff

2、热辐射换热

① 角系数的定义及确定角系数的代数法

② 有效辐射

③ 表面热阻及空间热阻

④ 辐射换热计算---网络法

四、传热及换热器

1、传热过程

① 传热系数、传热热阻

2、换热器及传热计算

① 平均传热温差

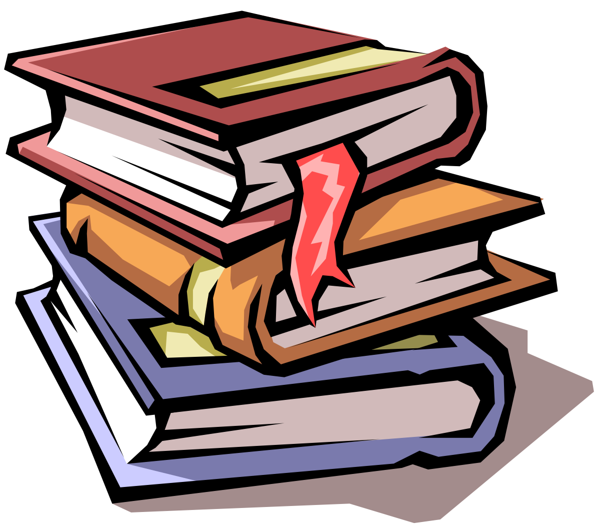
② 换热器传热计算的平均温差法

③ 换热器的强化传热与削弱

注 意

- 各类准则数的定义、物理意义应熟练掌握：Fo（Fo_V）、 Bi（Bi_V）、Nu、 Re 、Pr；
- 热阻及等效图贯穿全部传热学部分；
- 基本概念和理论的灵活应用是重点。

预祝同学们
期末考出好成绩！

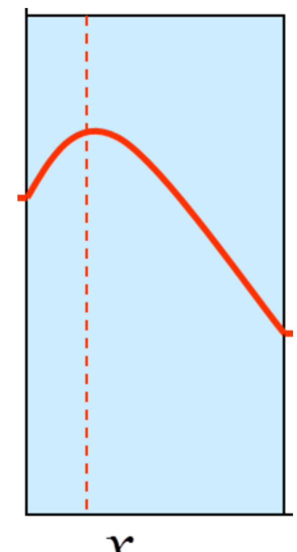


练习题

1. 一厚度为δ的平壁被用作核反应堆的屏蔽，壁内表面(x=0)受到射线的照射，这些射线一部分在屏蔽内被吸收，因此具有内热源的作用。壁内单位体积产生的热量可以根据以下关系确定：$\dot{\Phi} = Ae^{-\alpha x}$，式中，A为常量，α为屏蔽材料的吸收比，且为常量。

(1) 若平壁的内外表面分别维持恒定温度t_1、t_2，试求平壁内的温度分布；

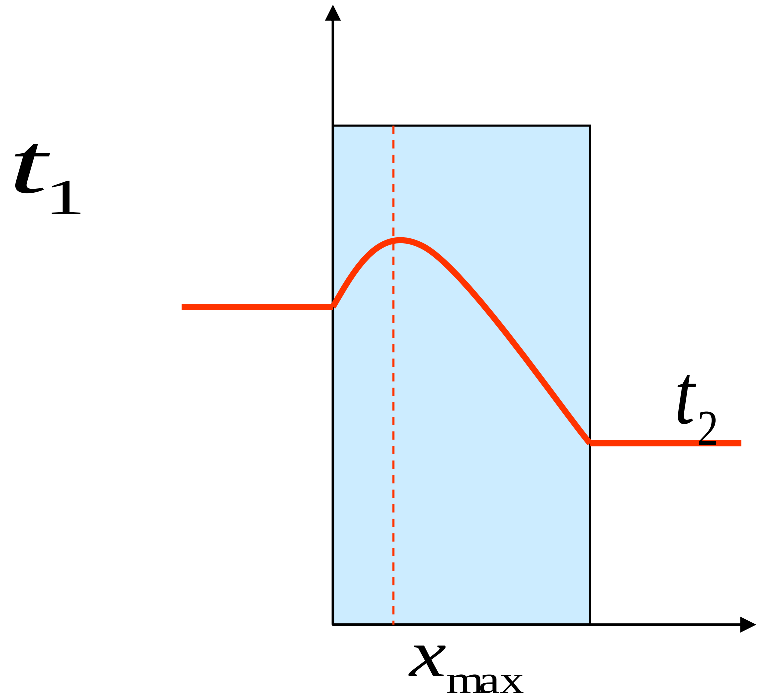
(2) 确定平壁内温度达到最大值的位置。



解：

（1）数学模型

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \dfrac{A}{\lambda} e^{-\alpha x} = 0 \\ x = 0, t = t_1 \\ x = \delta, t = t_2 \end{cases}$$



求解：

$$t = t_1 + \frac{A}{\lambda\alpha^2}(1 - e^{-\alpha x}) - \frac{A}{\lambda\delta\alpha^2}(1 - e^{\alpha\delta})x + \frac{t_2 - t_1}{\delta}x$$

（2） $$\frac{dt}{dx}=\frac{A}{\lambda\alpha}e^{-\alpha x}-\frac{A}{\lambda\delta\alpha^{2}}(1-e^{-\alpha\delta})+\frac{t_2-t_1}{\delta}$$

令 $\frac{dt}{dx}=0$ ，可解得：

$$x_{\max}=-\frac{1}{\alpha}\ln\left[\frac{1}{\delta\alpha}(1-e^{-\alpha\delta})+\frac{\lambda\alpha}{A}\frac{t_2-t_1}{\delta}\right]$$

2.一边长为30cm的正方形薄平板，内部有电加热装置，垂直放置于静止空气中，板一侧绝热。空气温度为35°C。为防止内部电热丝过热，板表面温度不允许超过150 °C。平板表面辐射换热的表面传热系数为9 W/(m^2.K)。试确定电热器所允许的最大功率。

解:

本题为大空间自然对流与辐射组成的复合换热问题:

定性温度： $t_m = \frac{1}{2}(t_w + t_f) = 92.5^0 C$

$$\lambda = 0.0315 W / m.K$$

空气物性： $\upsilon = 22.36 \times 10^{-6} m^2 / S$

$$Pr = 0.6895$$

$$Gr = \frac{g\alpha(t_w - t_f)l^3}{\upsilon^2} = \frac{9.807 \times (150 - 35) \times 0.3^3}{(273 + 92.5)(22.36 \times 10^{-6})^2} = 1.665 \times 10^8$$

由教材（P284）式（10-77）及表10-5

$$Nu = 0.59 \times (Gr\,Pr)^{\frac{1}{4}} = 0.59 \times (1.665 \times 10^{2} \times 0.6895)^{\frac{1}{4}} = 61.07$$

$$h = \frac{Nu.\lambda}{l} = \frac{61.07 \times 0.0315}{0.3} = 6.41 W/(m^{2}.K)$$

平板散热量，即电热器所允许得最大功率。

$$\Phi = (h + h_r) A (t_w - t_f)$$

$$= (6.41 + 9) \times 0.3^{2} \times (150 - 35) = 159.5 W$$

3. **一常物性流体同时在温度与之不同的两根直管内流动，且两管内直径间的关系为$d_1=2d_2$，若流动与换热均已处于湍流充分发展区域（$Nu_f=0.023Re_f^{0.8}Pr_f^n$），试确定下列两种情形下两管内平均对流换热系数的比值：**

（1）两管内流体的平均流速相等；

（2）两管内流体的质量流量相等。

解：

$$Nu_f = C_1 Re_f^{0.8} Pr^n$$

$$h = C_1 \frac{\lambda}{d} Re_f^{0.8} Pr^n = C_1 \frac{\lambda}{d} (\frac{ud}{\nu})^{0.8} Pr^n$$

对常物性流体，$\lambda, \mathrm{Pr}, \nu$ 均为常数，所以

(1) $u_1 = u_2$

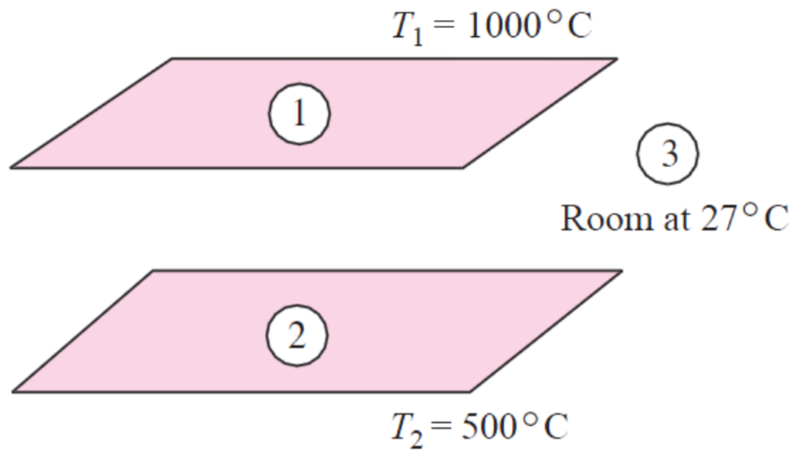
$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{u_1^{\ 0.8}}{d_1^{\ 0.2}} \frac{d_2^{\ 0.2}}{u_2^{\ 0.8}} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0.2} = (0.5)^{0.2} = 0.87$$

(2) $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\quad u_1 = \dfrac{\dot{m}_1}{\frac{\pi}{4} d_1^{\ 2} \rho} \quad u_2 = \dfrac{\dot{m}_2}{\frac{\pi}{4} d_2^{\ 2} \rho}$

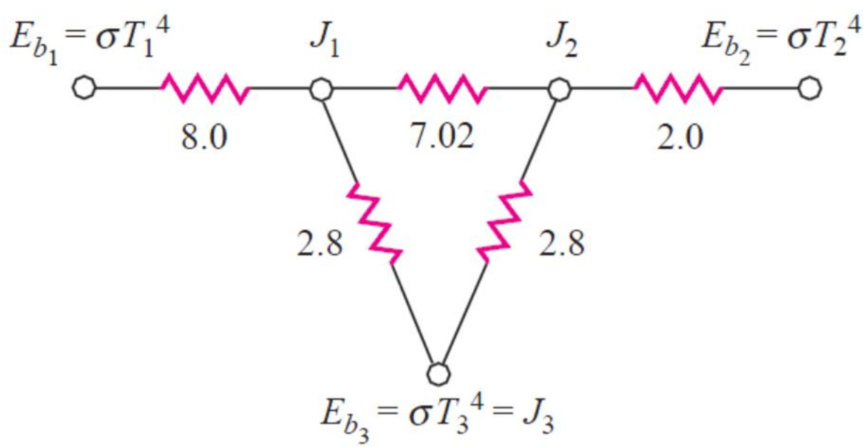
$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{1}{d_1^{\ 2}} \Big/ \frac{1}{d_2^{\ 2}} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = 0.25$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{u_1}{u_2}\right)^{0.8} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0.2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{1.6} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0.2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{1.8} = 0.287$$

4. 两块0.5×1.0 m的平行板间隔0.5 m，如图所示。一块板保持在1000 ℃ ，另一块保持在500 ℃ 。板的发射率分别为0.2和0.5。这些板位于一个大的房间里，房间的墙壁保持在27℃。板之间以及与房间之间进行热交换，仅考虑彼此面对的板表面。计算每个板和房间的净换热量。



(a)



(b)

The total heat received by the room is

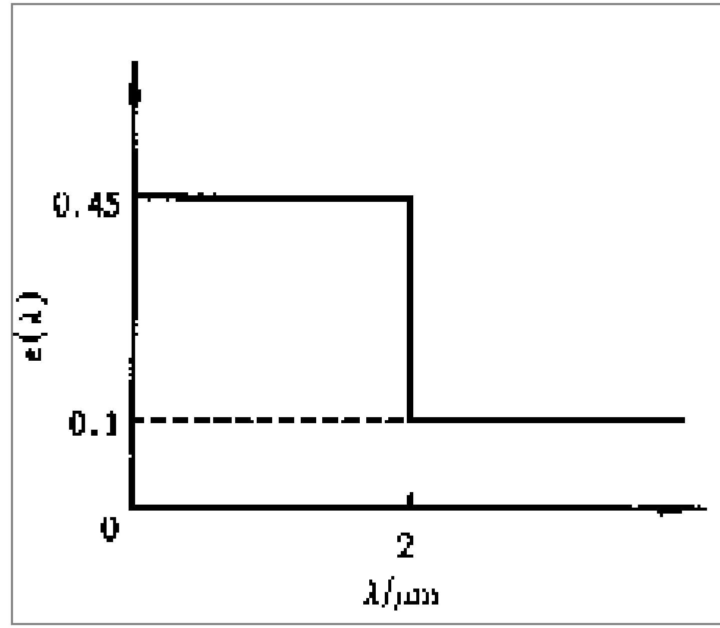
$$q_3 = \frac{J_1 - J_3}{1/A_1 F_{13}} + \frac{J_2 - J_3}{1/A_2 F_{23}}$$

$$= \frac{33.469 - 0.4592}{2.797} + \frac{15.054 - 0.4592}{2.797} = 17.020 \text{ kW}$$

5. 直径为0.8mm，长20mm的圆柱形钨丝，封闭在真空灯泡内，靠电流加热至稳定的温度T_i=2900K。钨丝的光谱发射率如图，试确定：

(1) 电流中断后，钨丝的起始冷却率；

(2) 灯丝冷却至1000K所需要的时间。



假定在任何时刻钨丝温度均匀，冷却过程中发射率为常数，ρ=19300kg/m^2；c=185J/(kg.K)

解:

(1) 电流中断瞬间，灯丝向外辐射的能量与其内能的减少成正比，即:

$$\varepsilon\sigma AT^4 = -Mc\frac{dT}{d\tau} \qquad \frac{dT}{d\tau} = -\frac{\varepsilon\sigma AT^4}{\rho(\pi d^2/4)lc} = -\frac{4\varepsilon\sigma T^4}{\rho dc} \quad (1)$$

其中钨丝的发射率可由下式结合表11-1求得:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon c\lambda E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} = \frac{\int_0^2 \varepsilon(\lambda)E_{b\lambda}d\lambda + \int_2^\infty \varepsilon(\lambda)E_{b\lambda}d\lambda}{E_b} = 0.352$$

将数据代入（1）式得:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \times \mathrm{F}_{b1} + \varepsilon_2 \times (1 - \mathrm{F}_{b1})$$

$$\left.\frac{dT}{d\tau}\right|_{\tau=\tau_0} = -1977\ K/s$$

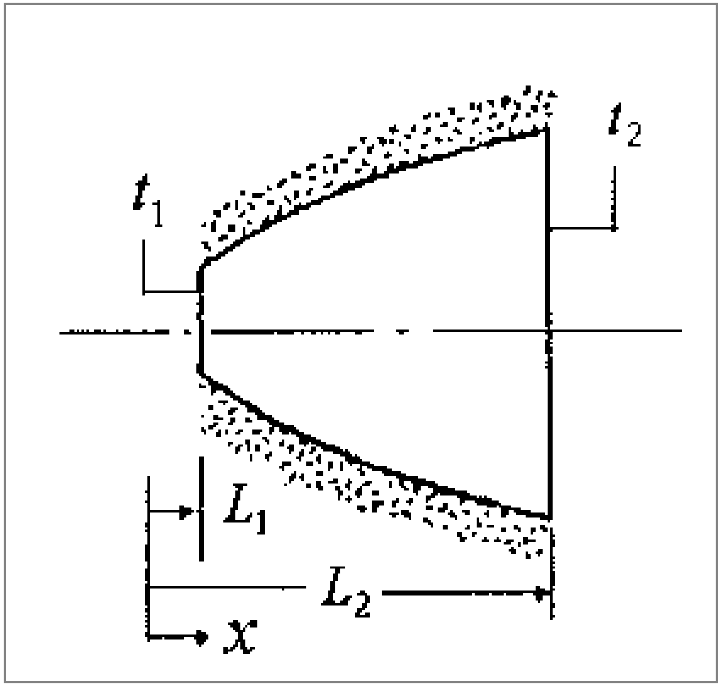
（2）对式（1）分离变量积分，可得：

$$\frac{4\varepsilon\sigma}{\rho dc}\int_0^{\tau} d\tau = -\int_{T_i}^{T}\frac{dT}{T^4} = \frac{1}{3}(\frac{1}{T^3}-\frac{1}{T_i^3})$$

当T=1000K时

$$\tau = \frac{\rho dc}{12\varepsilon\delta}(\frac{1}{T^3}-\frac{1}{T_i^3}) = 11.44s$$

6. 如图所示之实心旋转体（垂直于x方向的截面为圆），直径与x的关系为：$d=ax^{1/2}$，式中a为常数，物体侧面绝热。旋转体内沿x方向的导热为一维稳态导热，$x=L_1$，表面温度为t_1；$x=L_2$，表面温度为t_2。



试导出：

(1) 物体内的温度分布$t(x)$；

(2) 热流密度$q(x)$。

解：

(1) $$A(x)=\frac{\pi}{4}d^2=\frac{\pi}{4}a^2x$$

由傅里叶定律得：

$$\phi=-A(x)\lambda\frac{dt}{dx}=-\frac{\pi}{4}a^2x\lambda\frac{dt}{dx}$$

$$\frac{4\phi}{\pi a^2\lambda}\frac{dx}{x}=-dt \qquad \frac{4\phi}{\pi a^2\lambda}\int_{L_1}^{x}\frac{dx}{x}=-\int_{t_1}^{t}dt$$

$$\frac{4\phi}{\pi a^2\lambda}\ln\frac{x}{L_1}=-(t-t_1) \qquad (1)$$

同理 $$\frac{4\phi}{\pi a^2\lambda}\ln\frac{L_2}{L_1} = -(t_2 - t_1) \qquad (2)$$

两式相比得：

$$\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} = \frac{\ln\dfrac{x}{L_1}}{\ln\dfrac{L_2}{L_1}} \quad \Longrightarrow \quad t = t_1 + \frac{\ln\dfrac{x}{L_1}}{\ln\dfrac{L_2}{L_1}}(t_2 - t_1)$$

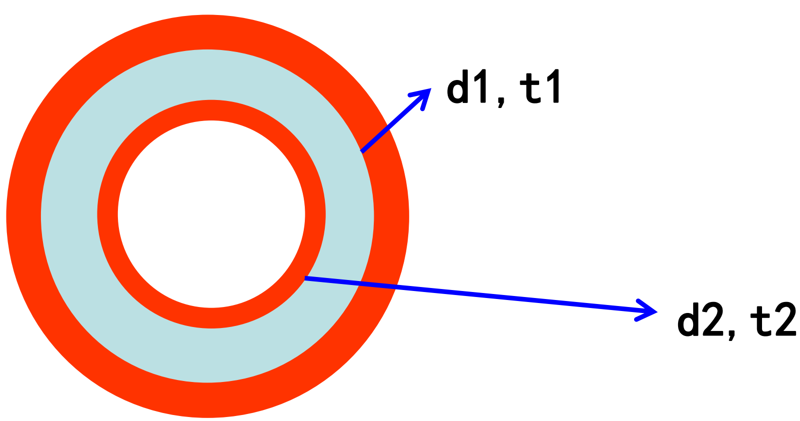
(2) $$\frac{dt}{dx} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{L_2}{L_1}} . \frac{1}{x}$$

$$\phi = -\frac{\pi}{4} a^2 x \lambda . \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{L_2}{L_1}} . \frac{1}{x} = -\frac{\pi}{4} a^2 \lambda \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{L_2}{L_1}}$$

$$q(x) = \frac{\phi}{A(x)} = -\frac{\lambda}{x} \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{L_2}{L_1}}$$

7. 测定颗粒状物料导热系数的圆球导热仪，由外直径为d_2的小球壳和内直径为d_1的大球壳同心装配而成，在两球壳间填充颗粒状物料。内球壳内设电加热器，内球外壁面和外球内壁面设热电偶测取壁面温度。

（1）由Fourier定理推导稳态加热条件下，已知d_1、d_2、t_2（内球外壁温度）、t_1（外球内壁温度）和加热功率Φ，求导热系数λ的计算式。



解：

（1） $$\phi = -A\lambda\frac{dt}{dr} = -4\pi r^2\lambda\frac{dt}{dr}$$

$$-\phi\frac{dr}{4\pi r^2} = \lambda dt$$

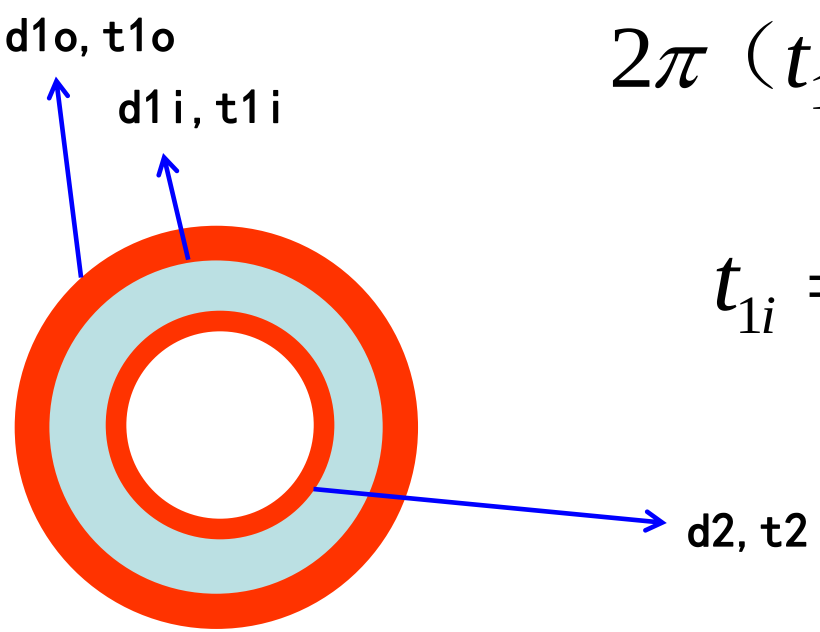
$$-\frac{\phi}{4\pi}\int_{r_2}^{r_1}\frac{dr}{r^2} = \lambda\int_{t_2}^{t_1}dt$$

$$\frac{\phi}{4\pi}(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}) = \lambda(t_1-t_2)$$

$$\lambda = \frac{\phi}{4\pi(t_2-t_1)}(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{r_1}) = \frac{\phi}{2\pi(t_2-t_1)}(\frac{1}{d_2}-\frac{1}{d_1})$$

（2）实验过程中，偶然事故引起外球内壁热电偶损坏，若要修理，必须中断实验，将外球壳卸下。请你提出一种无需修理又可获得近似值的测试方法。(已知球壳的厚度δ和导热系数λs)。

解：测取外表面温度，由下式求内表面温度



$$\frac{\phi}{2\pi(t_{1i}-t_{1o})}\left(\frac{1}{d_{1i}}-\frac{1}{d_{1o}}\right)=\lambda_s$$

$$t_{1i}=t_{1o}+\frac{\phi}{2\pi\lambda_s}\left(\frac{1}{d_{1i}}-\frac{1}{d_{1o}}\right)$$