

传热学

Heat transfer

张靖周

能源与动力学院

第二章

导热基本定律及 稳态导热

2-1 导热的基本概念及傅立叶定律

一、温度场

■ 某时刻空间所有各点温度分布的总称

温度场是时间和空间的函数：

$$T = f(x, y, z, \tau)$$

稳态温度场： $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \Rightarrow$ 稳态导热

非稳态温度场： $\frac{\partial T}{\partial \tau} \neq 0 \Rightarrow$ 非稳态导热

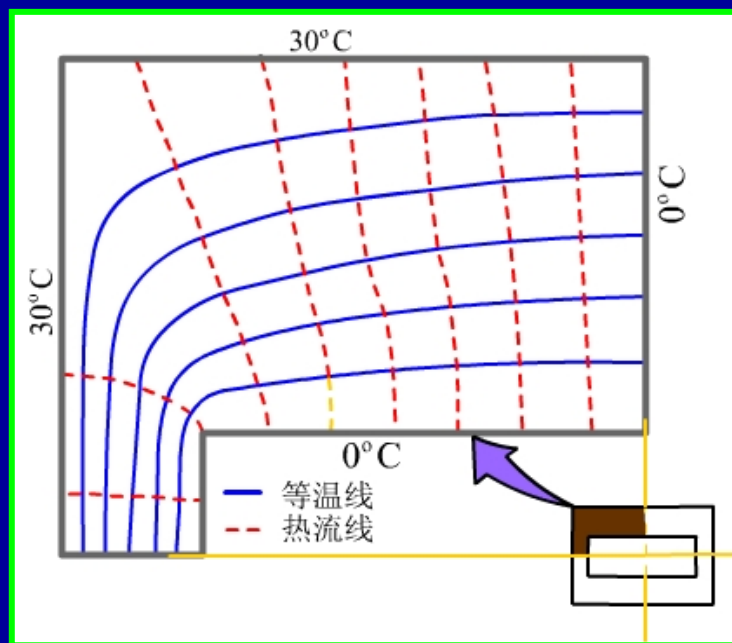
一维温度场： $T = (x, \tau) \Rightarrow$ 一维导热

二维温度场： $T = (x, y, \tau) \Rightarrow$ 二维导热

特例：一维稳态导热 $T = f(x)$

二、等温面与等温线

- **等温面**：同一时刻、温度场中所有温度相同的点连接起来所构成的面
- **等温线**：用一个平面与各等温面相交，在这个平面上得到一个等温线簇



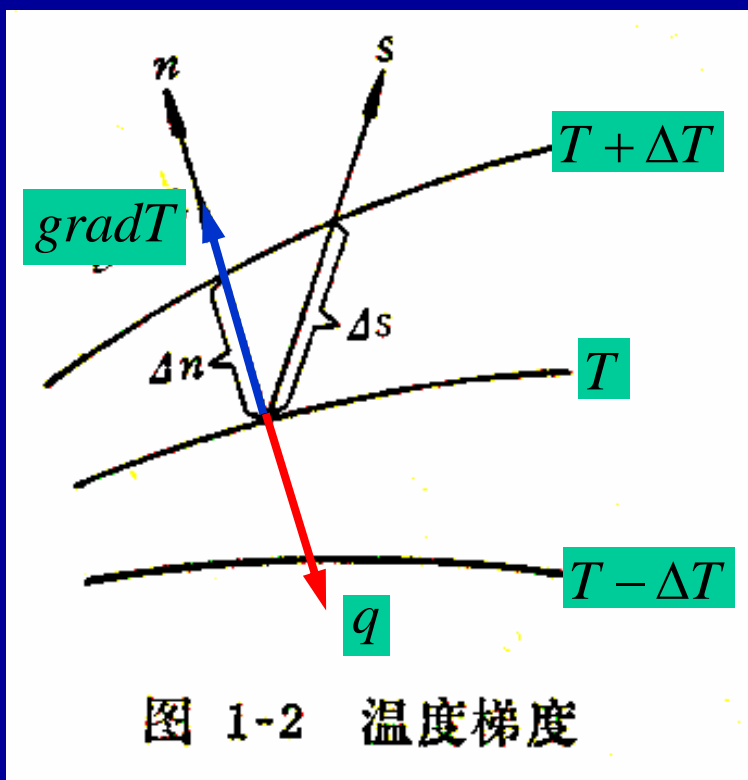
等温面与等温线的特点：

- (1) 温度不同的等温面或等温线彼此不能相交
- (2) 在连续的温度场中，等温面或等温线不会中断，它们或者是物体中完全封闭的曲面（曲线），或者就终止与物体的边界上
- (3) 等温面上没有温差，不会有热传递

物体的温度场通常用等温面或等温线表示

三、温度梯度

思考：A点所在的等温线温度为 T ，与之相邻的一个等温线温度为 $T+\Delta T$ ，问A点的温度变化率为多少？



■ 温度变化率的大小与方向有关

不同的等温面之间，有温差，有导热

$$\frac{\Delta T}{\Delta n} \neq \frac{\Delta T}{\Delta s}$$

温度梯度：沿等温面法线方向上的温度增量
与法向距离比值的极限， $\text{grad}T$

$$\text{grad } T = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} \vec{n} = \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n}$$

直角坐标系：

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}$$

注：温度梯度是向量；正向朝着温度增加的方向 ★

温度降度： $-\text{grad}T$

四、热流密度矢量

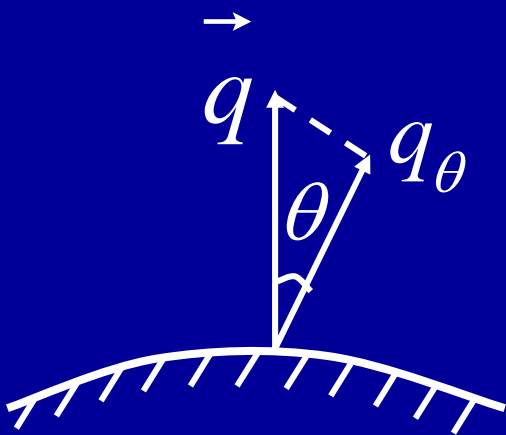
■ **热流密度**：单位时间、单位面积上所传递的热量；

不同方向上的热流密度的大小不同 q [W/m²]

■ **热流密度矢量**：等温面上某点，以通过该点处最大热流密度的方向为方向、数值上正好等于沿该方向的热流密度 \vec{q}

直角坐标系中：

$$\vec{q} = q_x \vec{i} + q_y \vec{j} + q_z \vec{k}$$



$$q_\theta = \left| \vec{q} \right| \cos \theta$$

五、傅里叶定律

1822年，法国数学家傅里叶（Fourier）在实验研究基础上，发现**导热基本规律**——傅里叶定律

导热基本定律：垂直导过等温面的热流密度，正比于该处的温度梯度，方向与温度梯度相反

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

λ ：热导率（导热系数） $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})]$

“-”：表征热流方向沿着温度降度方向，与温度梯度方向相反。**满足热力学第二定律。**

直角坐标系中：

$$\vec{q} = q_x \vec{i} + q_y \vec{j} + q_z \vec{k} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}$$

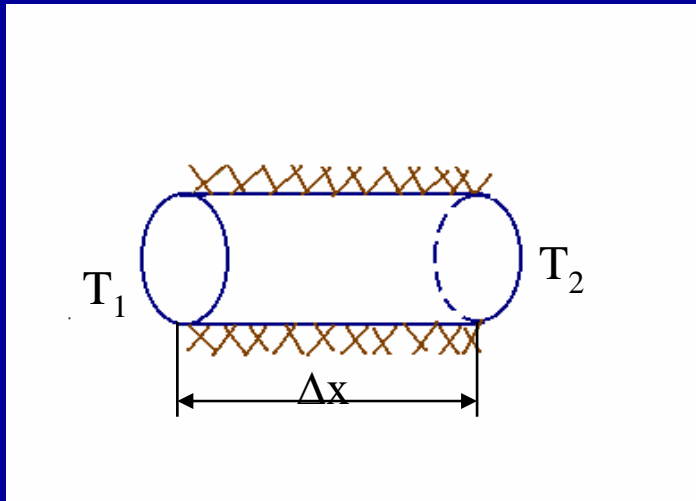
$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

注：傅里叶定律的上述表达式只适用于各向同性材料和不考虑非傅里叶效应的情况 ★

各向同性材料：热导率在各个方向是相同的

傅里叶定律创立过程的启示

- 根据热传导实验得到的纯属现象学的一个定律，经过数学上的处理推广而得到的规律性总结



本构关系(源于现象)

$$Q \propto A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x}$$



$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T$$

- 傅里叶定律的形式也是需要不断完善的

2-2 热导率（导热系数）

$$\lambda = \frac{\vec{q}}{-\text{grad } T} \quad \text{— 物质的重要热物性参数}$$

热导率的数值就是物体中单位温度梯度、单位时间、通过单位面积的导热热量 $[\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$

热导率的数值表征物质导热能力大小。实验测定

影响热导率的因素：物质的种类、材料成分、温度、湿度、压力、密度等

■ **不同物质热导率的差异：**构造差别、导热机理不同

$$\lambda_{\text{金属}} > \lambda_{\text{非金属}}; \lambda_{\text{固相}} > \lambda_{\text{液相}} > \lambda_{\text{气相}}$$

$$\lambda_{\text{纯铜}} = 398 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}); \lambda_{\text{大理石}} = 2.7 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

$$0^\circ\text{C}: \lambda_{\text{冰}} = 2.22 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

$$\lambda_{\text{水}} = 0.551 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

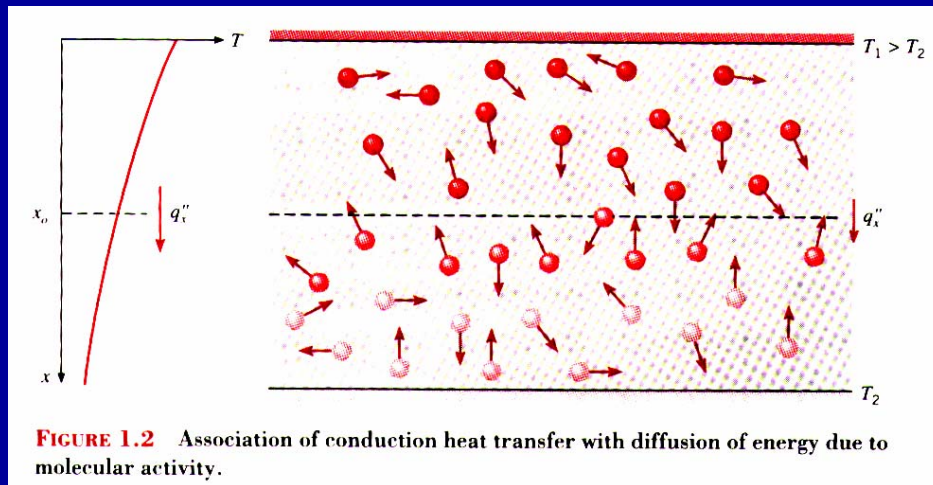
$$\lambda_{\text{蒸汽}} = 0.0183 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

一、气体的热导率

$$\lambda_{\text{气体}} \approx 0.006 \sim 0.6 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

$$0^\circ\text{C}: \lambda_{\text{空气}} = 0.0244 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}); 20^\circ\text{C}: \lambda_{\text{空气}} = 0.026 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

1、导热机理： 由于分子的热运动和相互碰撞时发生的能量传递



当物质相变到气态时，原先存在于液态或固态的分子键大大地松开并使分子间的距离增大，分子可沿任何方向自由地运动，其运动范围只受容器边界壁面或其他分子碰撞的限制

气体分子运动理论：常温常压下气体热导率可表示为：

$$\lambda = \frac{1}{3} \bar{u} \rho l c_v$$

\bar{u} ：气体分子运动的均方根速度

l ：气体分子在两次碰撞间平均自由行程

ρ ：气体的密度； c_v ：气体的定容比热

$$T \propto \frac{M}{2} \bar{u}^2$$

气体温度正比于分子运动的动能

M ：气体的分子量

2、影响气体热导率的主要因素

- **气体的分子质量**：分子质量小的气体（ H_2 、 He ）热导率较大 — 分子运动速度高
 - **气体的温度**：气体分子运动速度和定容比热随 T 升高而增大。气体的热导率随温度升高而增大
 - **气体的压力**：一般情况下，随压力升高，气体的密度增大、平均自由行程减小、而两者的乘积保持不变。除非压力很低或很高，在 $2.67 \times 10^{-3} \text{MPa} \sim 2.0 \times 10^3 \text{MPa}$ 范围内，气体的热导率基本不随压力变化
- 混合气体热导率不能用部分求和的方法求；只能靠实验测定

分子质量小的气体 (H_2 、He) 热导率较大 — 分子运动速度高

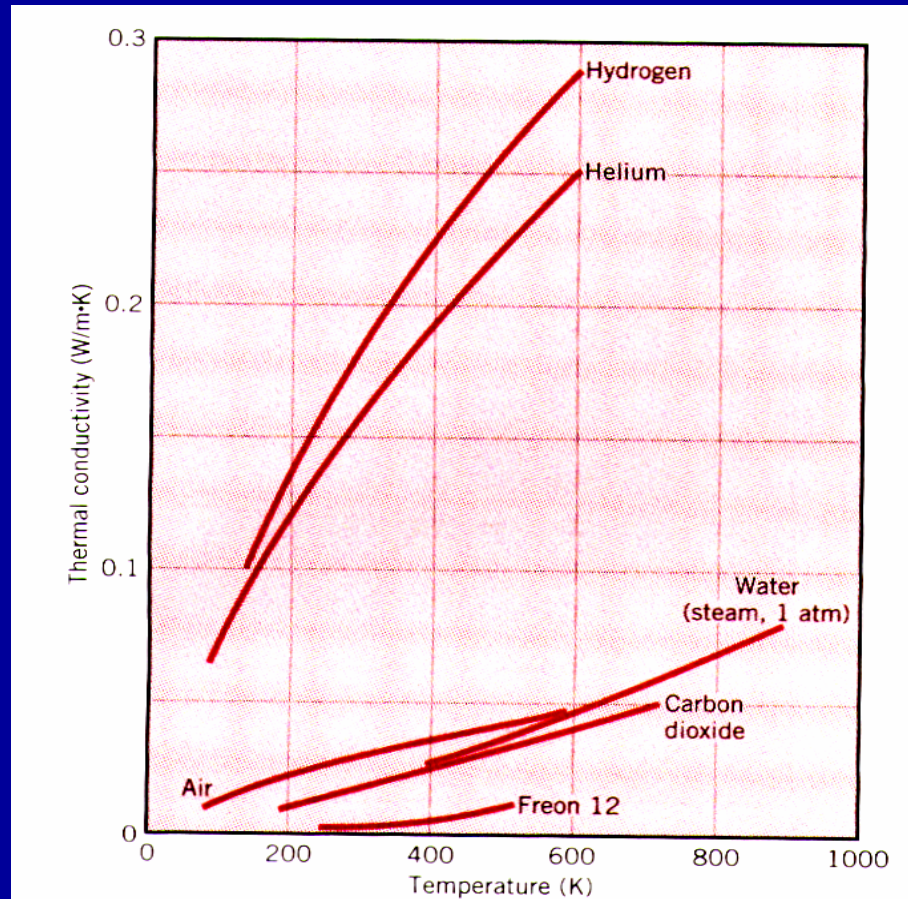


FIGURE 2.6 The temperature dependence of the thermal conductivity of selected gases at normal pressures.

二、固体的热导率

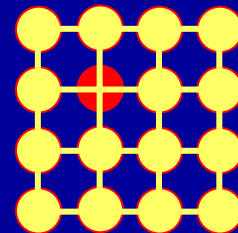
1、**导热机理**：依靠自由电子的迁移

晶格振动波迁移（声子）

晶格中原子、分子在其平衡位置附近的热振动形成的弹性波

晶格：理想的晶体中分子在无限大空间里排列成周期性点阵，即所谓晶格

晶体的状态（晶态）：完全有序的周期性排列是固体中分子聚集的最稳定的状态



理想晶体中分子力占主导地位

(1) 金属的热导率: $\lambda_{\text{金属}} \approx 12 \sim 418 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$

纯金属的导热: 依靠自由电子的迁移和晶格的振动
主要依靠前者

金属导热与导电机理一致; 良导电体为良导热体:

$$\lambda_{\text{银}} > \lambda_{\text{铜}} > \lambda_{\text{金}} > \lambda_{\text{铝}}$$

主要影响因素 $T \uparrow \Rightarrow \lambda \downarrow$

— 晶格振动的加强干扰自由电子运动

$$10\text{K} : \lambda_{\text{Cu}} = 12000 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

$$15\text{K} : \lambda_{\text{Cu}} = 7000 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

(2)合金的导热：依靠自由电子的迁移和晶格的振动；
主要依靠后者

合金：金属中掺入任何杂质将破坏晶格的完整性，
干扰自由电子的运动 $\Rightarrow \lambda \downarrow$

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

如：常温下： $\lambda_{\text{纯铜}} = 398 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ， $\lambda_{\text{黄铜}} = 109 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$

金属的加工过程也会造成晶格的缺陷 $\Rightarrow \lambda \downarrow$

主要影响因素 $T \uparrow \Rightarrow \lambda \uparrow$

温度升高、晶格振动加强、导热增强

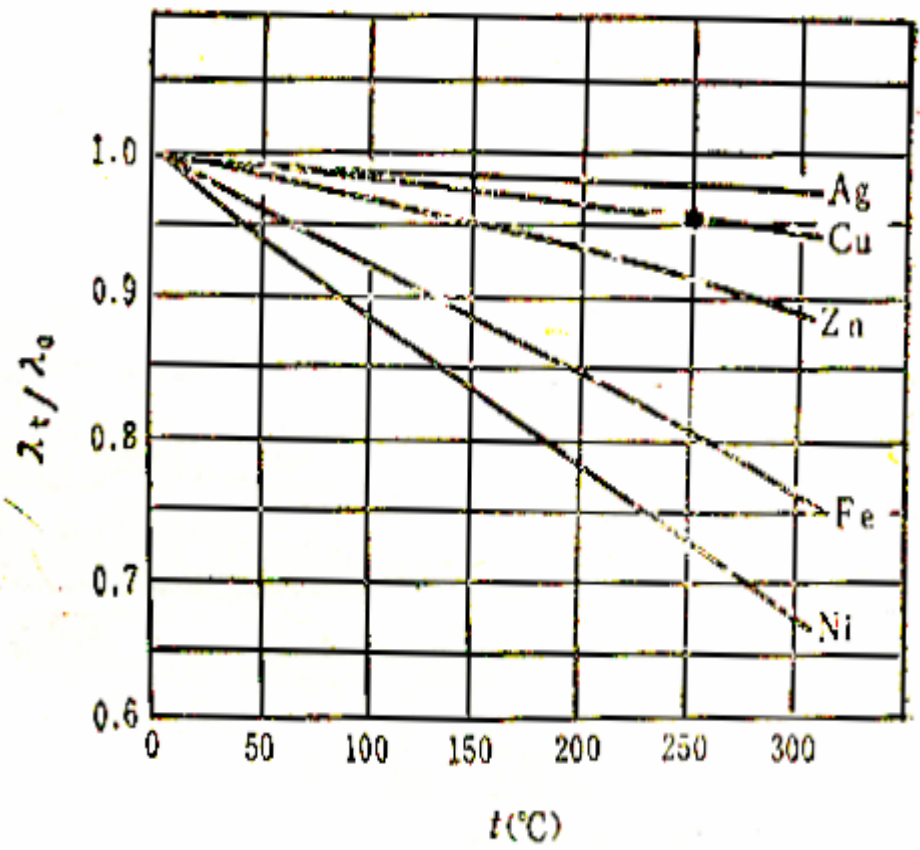


图 1-8 金属的导热系数

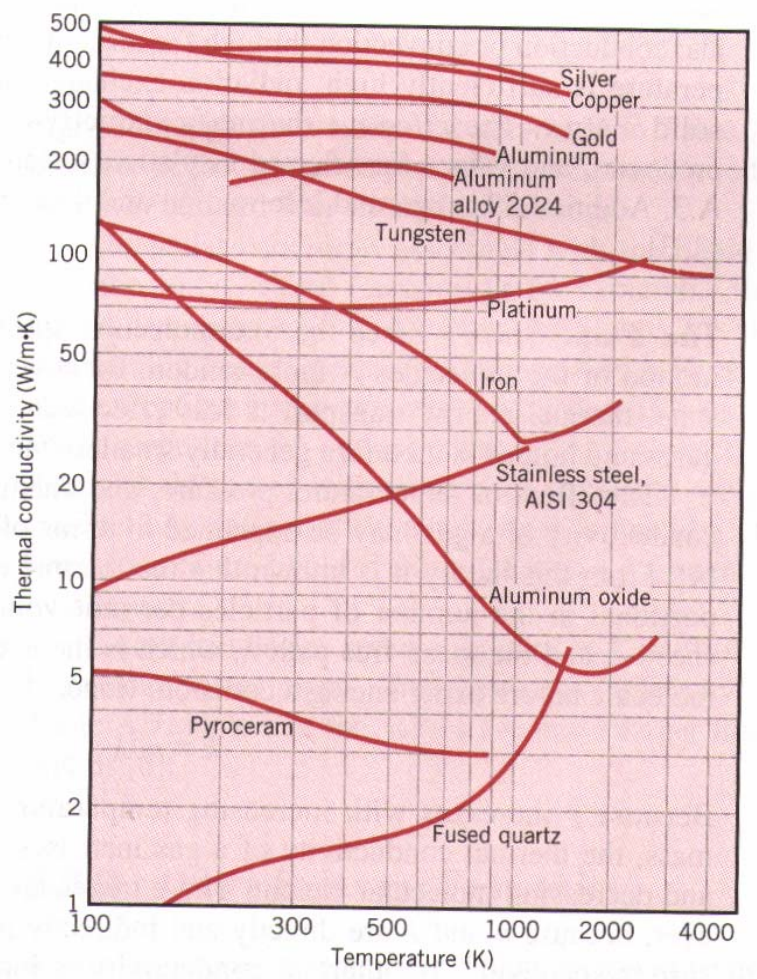


FIGURE 2.5 The temperature dependence of the thermal conductivity of selected solids.

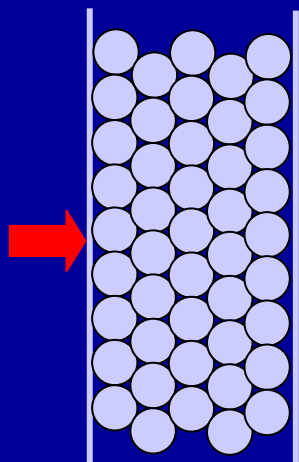
(3) 非金属的热导率:

非金属的导热: 依靠晶格的振动传递热量; 比较小
建筑和隔热保温材料: $\lambda \approx 0.025 \sim 3 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$

$$T \uparrow \Rightarrow \lambda \uparrow$$

大多数建筑材料和绝热材料具有多孔或纤维结构

■ 多孔材料的热量传递包含多种机制



- 结构实体的导热;
- 穿过微小孔隙的导热与对流;
- 孔隙间表面的辐射

严格地说, 多孔性结构的材料不再是均匀
的连续介质, 所谓导热系数只能是把它当
作连续介质时的表观导热系数

多孔材料的热导率与密度和湿度有关

$$\rho \downarrow、\text{湿度} \downarrow \Rightarrow \lambda \downarrow$$

保温材料：国家标准规定，温度低于350度时热导率小于 0.12W/(mK) 的材料（绝热材料）

思考：冬天，棉被经过晒后拍打，为什么感觉特别暖和？

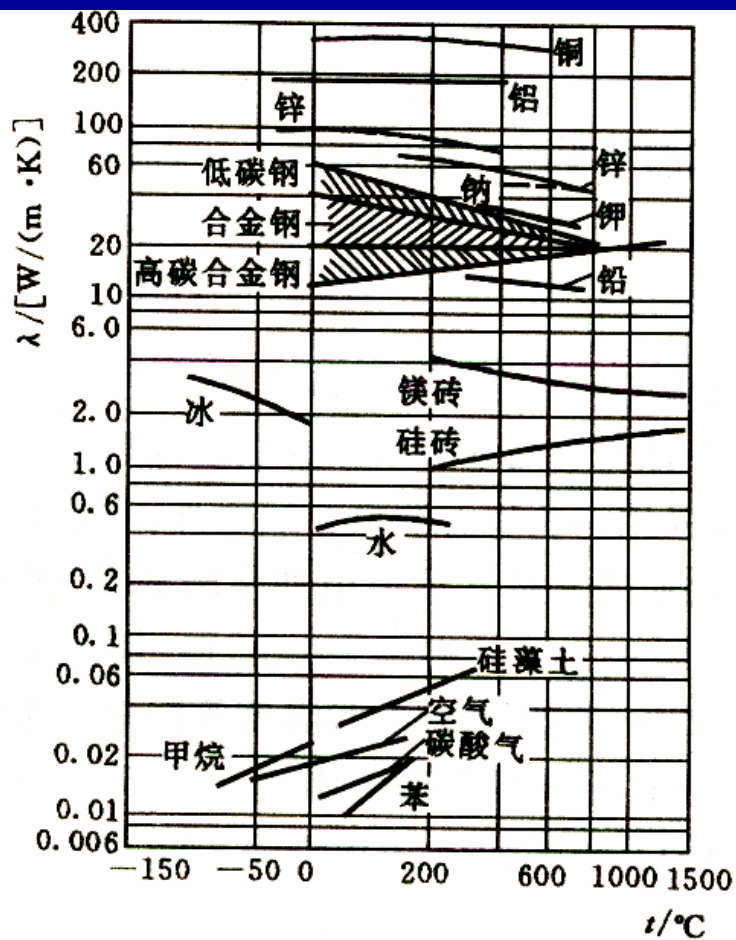


图 2-3 导热系数对温度的依变关系

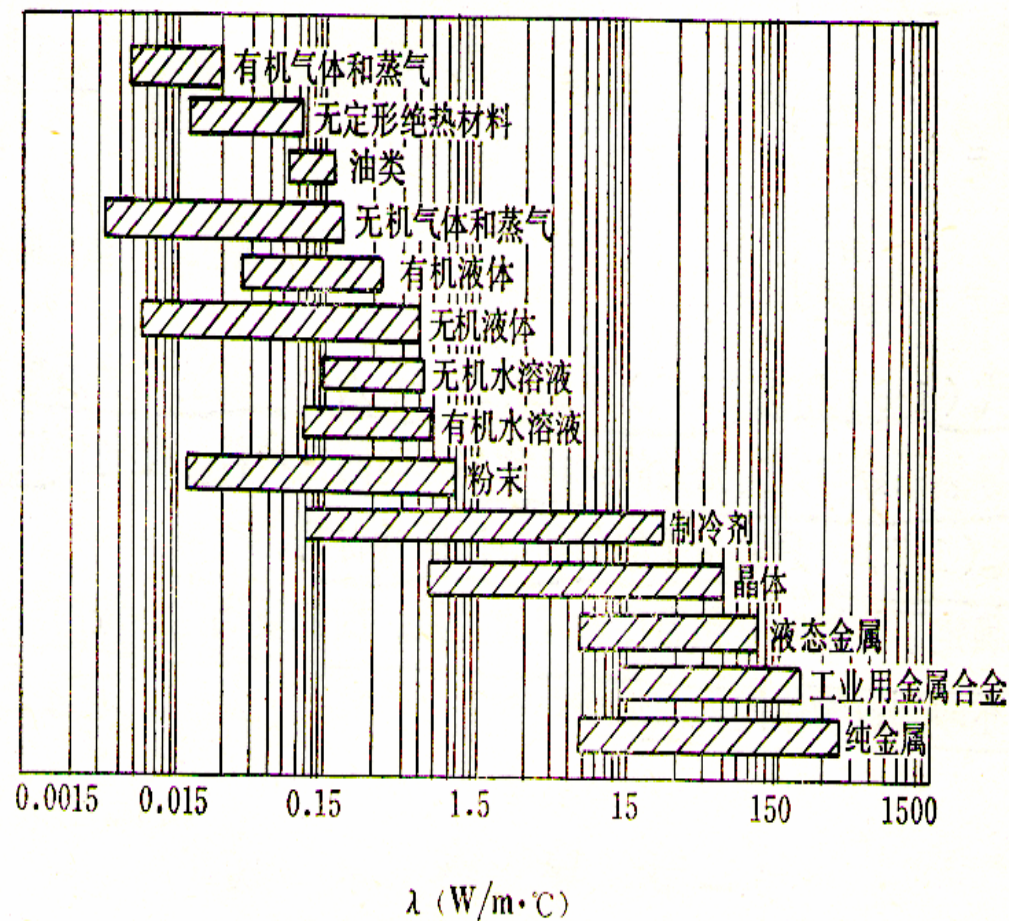
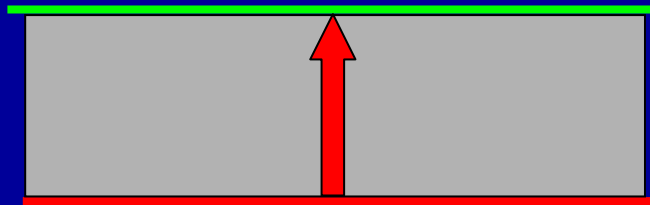


图 1-4 各类物质导热系数的范围

思考

用稳定法平板导热仪对某厂提供的保温试材的导热系数进行测定，试验时从低温开始，依次在6个不同温度下测得6个导热系数值。这些数据表明该材料的导热系数随温度升高而下降，这一规律与绝热保温材料的导热机理不符，经检查未发现实验装置有问题，试分析问题可能出在哪里？



三、液体的热导率

$$\lambda_{\text{液体}} \approx 0.07 \sim 0.7 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

$$20^\circ\text{C}: \lambda_{\text{水}} = 0.6 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$$

液体的导热： 主要依靠晶格的振动

在分子力和分子运动的竞争中，**液态是两者势均力敌的状态**

理想气体中分子运动占绝对优势——**完全无序模型**

理想晶体中分子力占主导地位——**完全有序模型**

完全无序模型和完全有序模型的理论都很成熟

液体的情况介于两个极端之间，非常难以处理，至今没有统一的理论模型

通常研究液体的办法是从两头逼近：或者把它看作非常稠密的实际气体，或者把它看作热运动非常剧烈的破损晶体，两方面各自能说明一些问题

大多数液体（分子量 M 不变）： $T \uparrow \Rightarrow \rho \downarrow \Rightarrow \lambda \downarrow$

水和甘油等强缔合液体，分子量变化，并随温度而变化。在不同温度下，热导率随温度的变化规律不一样

液体的热导率随压力 p 的升高而增大 $p \uparrow \Rightarrow \lambda \uparrow$

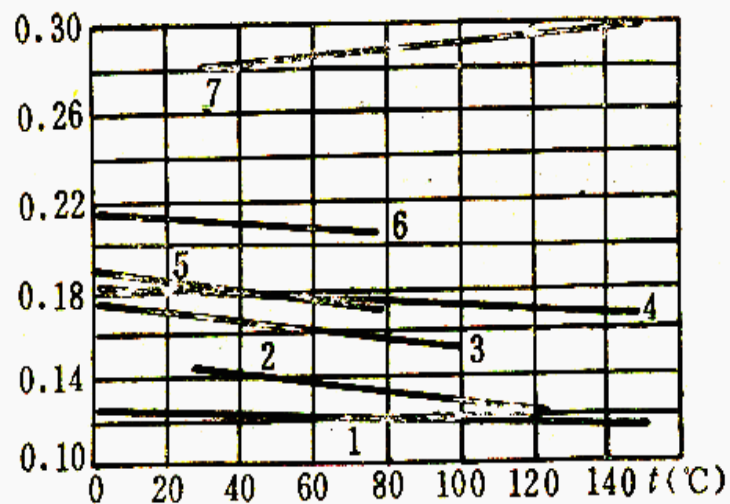
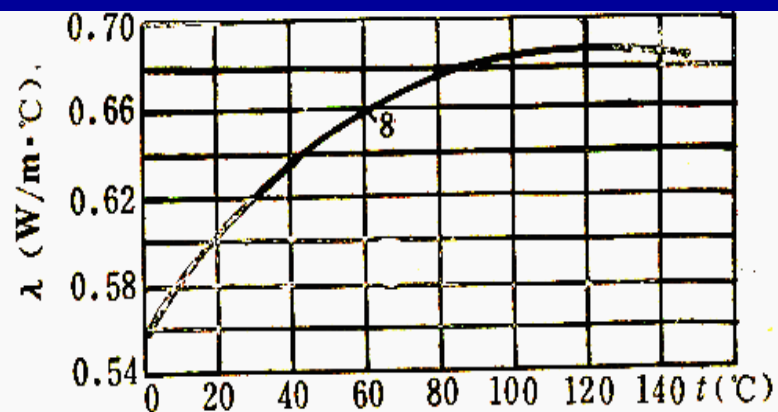


图 1-7 液体的导热系数

1—凡士林油；2—苯；3—丙酮；4—蓖麻油；5—乙醇；6—甲醇；7—甘油；8—水

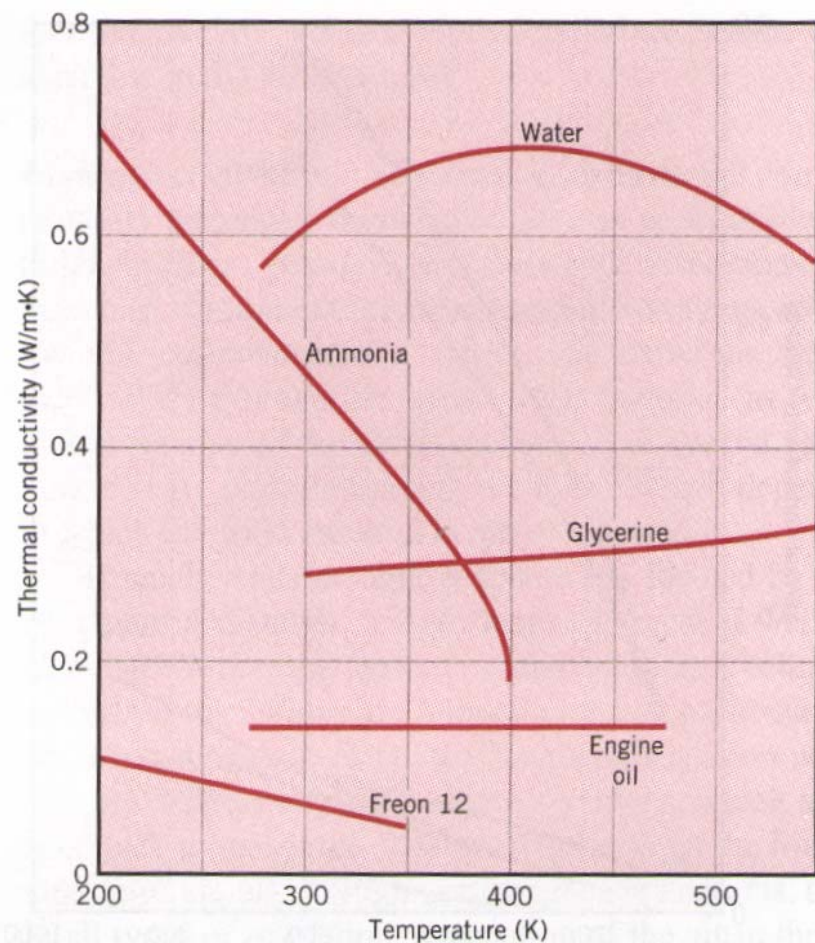
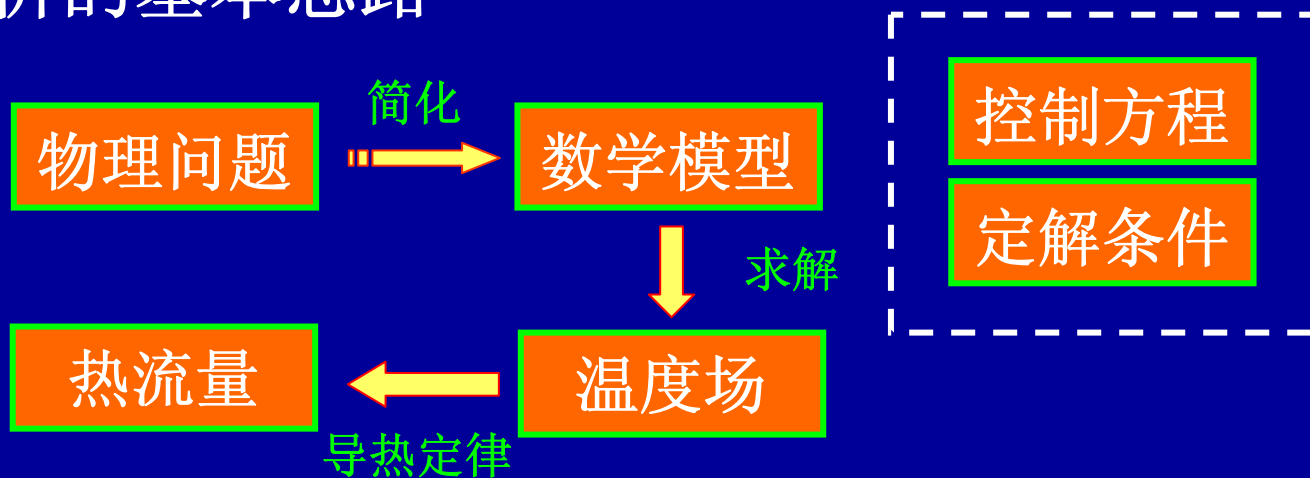


FIGURE 2.7 The temperature dependence of the thermal conductivity of selected nonmetallic liquids under saturated conditions.

2-3 导热微分方程式及单值性条件

理论解析的基本思路



$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } T \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

- 建立导热体内的温度分布计算模型是导热理论的首要任务
- 理论基础：傅里叶定律 + 热力学第一定律

一、导热微分方程式

1、物理模型假设：

(1) 所研究的物体是各向同性的连续介质

(2) 热导率、比热容和密度均为已知

(3) 物体内具有内热源；强度 q_v [W/m^3];

内热源均匀分布； q_v 表示单位体积的导热体在单位时间内放出的热量

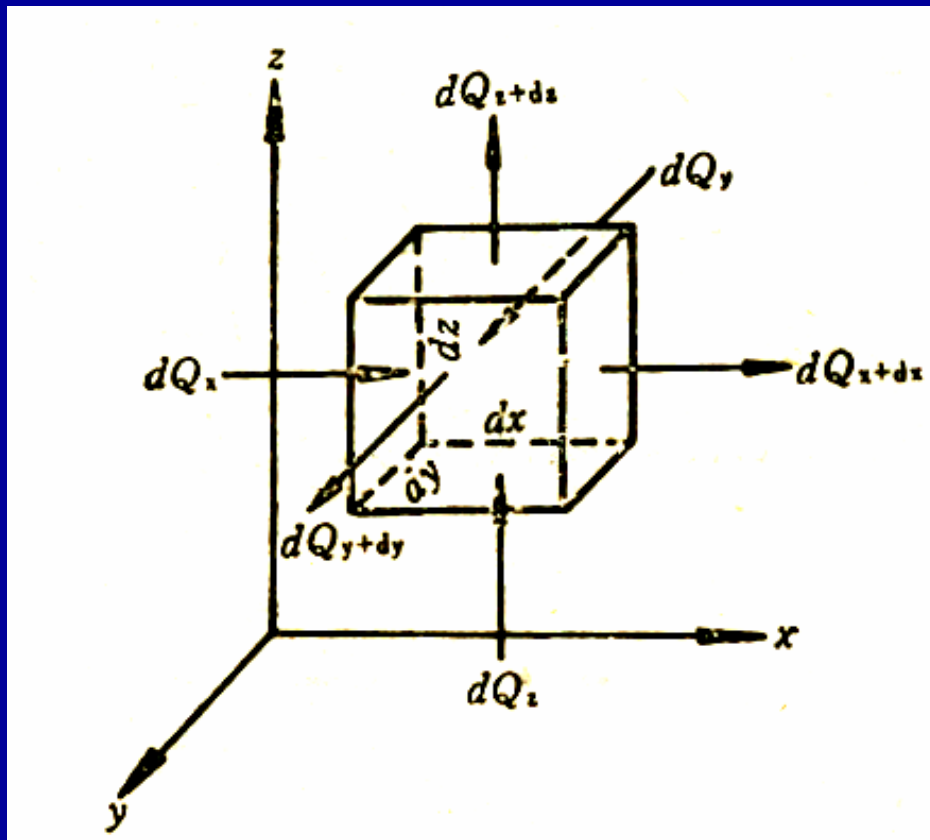
化学反应
电流通电
熔化过程

$$q_v = \rho A Q_0 e^{-E/RT}$$

(4) 各项参数连续变化，可微分求导

2、推导过程

在导热体中取一微元体，能量平衡分析



热力学第一定律:

$$Q = \Delta U + W$$

$$W = 0, \therefore Q = \Delta U$$

$d\tau$ 时间内微元体中:

[导入与导出净热量]

+ [内热源发热量]

= [热力学能的增加]

数学模型建立基本思路

能量平衡分析

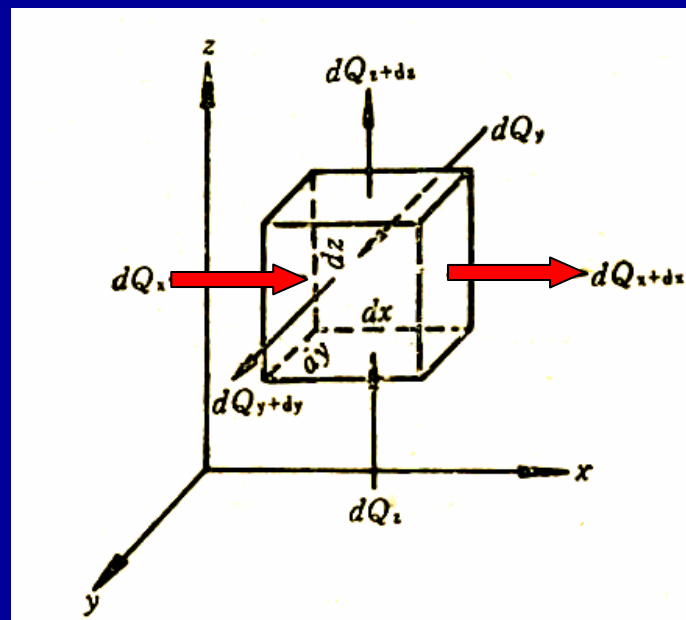
(1) 导入与导出微元体的净热量

A. $d\tau$ 时间内、沿 x 轴方向、经 x 处 $dydz$ 表面导入的热量:

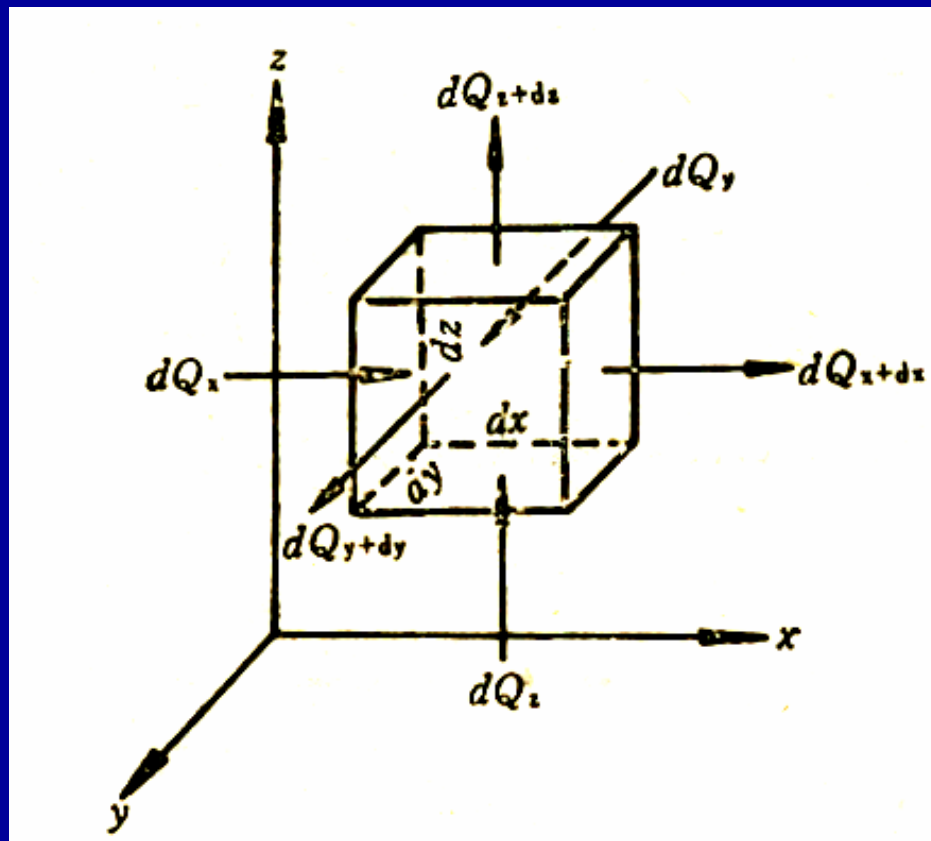
$$dQ_x = q_x \cdot dydz \cdot d\tau \quad [\text{J}]$$

B. $d\tau$ 时间内、沿 x 轴方向、经 $x+dx$ 表面处 $dydz$ 导出的热量:

$$dQ_{x+dx} = q_{x+dx} \cdot dydz \cdot d\tau \quad [\text{J}]$$



$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$$



C. $d\tau$ 时间内、沿 x 轴方向导入与导出微元体净热量:

$$dQ_x - dQ_{x+dx} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz \cdot d\tau \quad [\text{J}]$$

$d\tau$ 时间内、沿 x 轴方向
导入与导出微元体净热量:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz \cdot d\tau \quad [\text{J}]$$

$d\tau$ 时间内、沿 y 轴方向
导入与导出微元体净热量:

$$-\frac{\partial q_y}{\partial y} dx dy dz \cdot d\tau \quad [\text{J}]$$

$d\tau$ 时间内、沿 z 轴方向导
入与导出微元体净热量:

$$-\frac{\partial q_z}{\partial z} dx dy dz \cdot d\tau \quad [\text{J}]$$

D. 导入与导出净热量:

$$[I] = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dy dz d\tau \quad [J]$$

利用傅里叶定律:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$[1] = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz d\tau \quad [J]$$

(2) 微元体中内热源的发热量

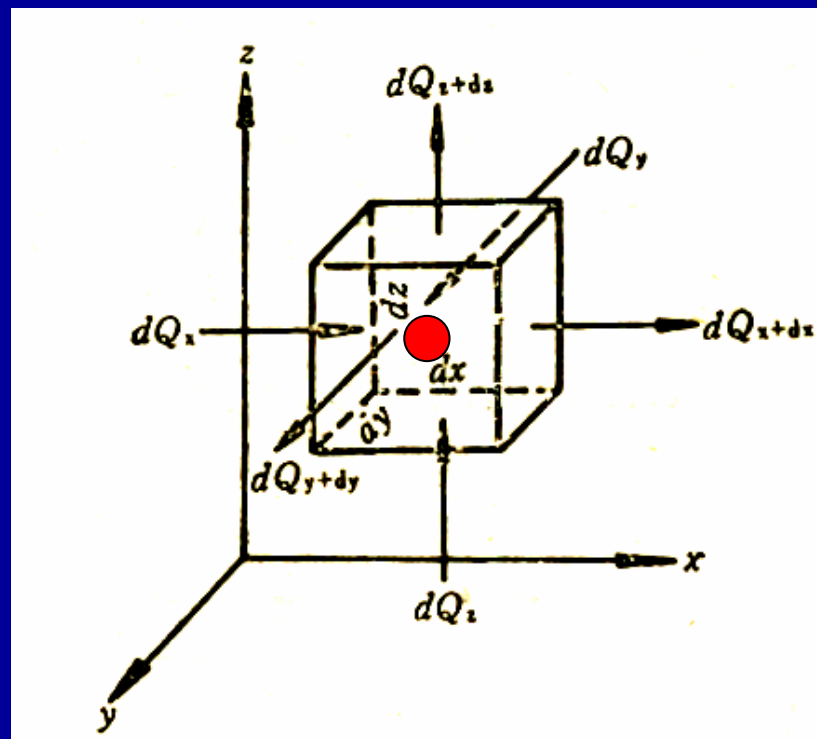
$d\tau$ 时间内微元体中
内热源的发热量:

$$[2] = q_v \cdot dx dy dz \cdot d\tau \quad [\text{J}]$$

(3) 微元体热力学能的增量

$d\tau$ 时间内微元体中热
力学能的增量:

$$[3] = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot dx dy dz \cdot d\tau \quad [\text{J}]$$



$$(mcdT = \rho dx dy dz c \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau)$$

■ 能量守恒

由 [1]+ [2]= [3]:

导热微分方程式、导热过程的能量方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v$$

若物性参数 λ 、 c 和 ρ 均为常数:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho c}$$

或写成:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho c}$$

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$ — 热扩散率(导温系数) [m²/s]

∇^2 — 拉普拉斯算子

思考:

钢棒和木棒哪一个感受
温度变化强烈?



如果两者的导热系数相同,
但 ρC_p 不同, 又有何影响?

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad \text{— 热扩散率（导温系数）} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

热扩散率 a 反映了导热过程中材料的导热能力（ λ ）与沿途物质储热能力（ ρc ）之间的关系

- λ 值大，说明在相同的温度梯度下可以传递更多的热量；
- ρc 值小，单位体积物体温度升高1度所需的热量少，沿程温度变化快

a 值大，即 λ 值大或 ρc 值小，说明物体的某一部分一旦获得热量，该热量能在整个物体中很快扩散

热扩散率表征物体被加热或冷却时，物体内部各部分温度趋向于均匀一致的能力

在同样加热条件下，物体的热扩散率越大，物体内部各处的温度差别越小。

$$a_{\text{木材}} = 1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}, \quad a_{\text{铝}} = 9.45 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$a_{\text{木材}} / a_{\text{铝}} \approx 1/600$$

a 反应导热过程动态特性，研究不稳态导热重要物理量

若物性参数为常数且无内热源:

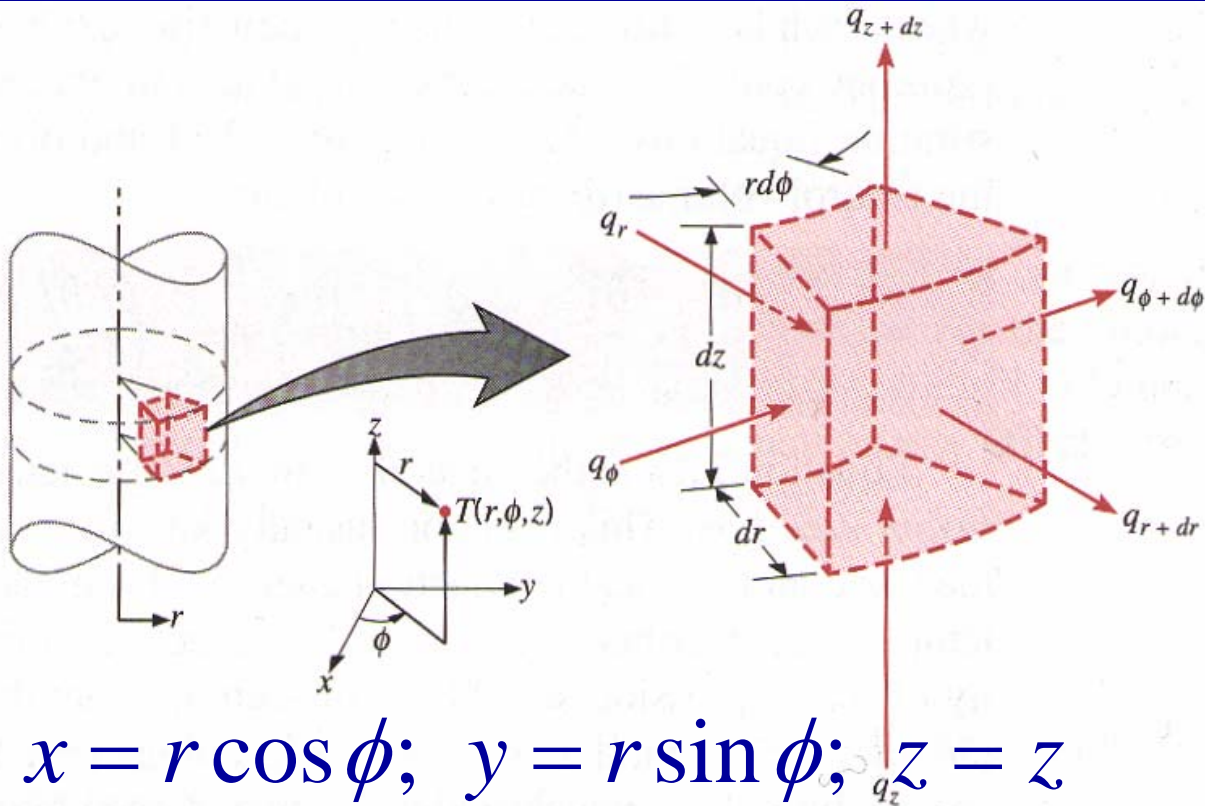
$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad \text{or} \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T$$

若物性参数为常数、无内热源稳态导热:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

圆柱坐标系

(r, Φ, z)



$$q_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$q_\phi = -\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi}$$

$$q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \vec{i} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \right)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v$$

球坐标系 (r, θ, Φ)

$$q_r = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$$

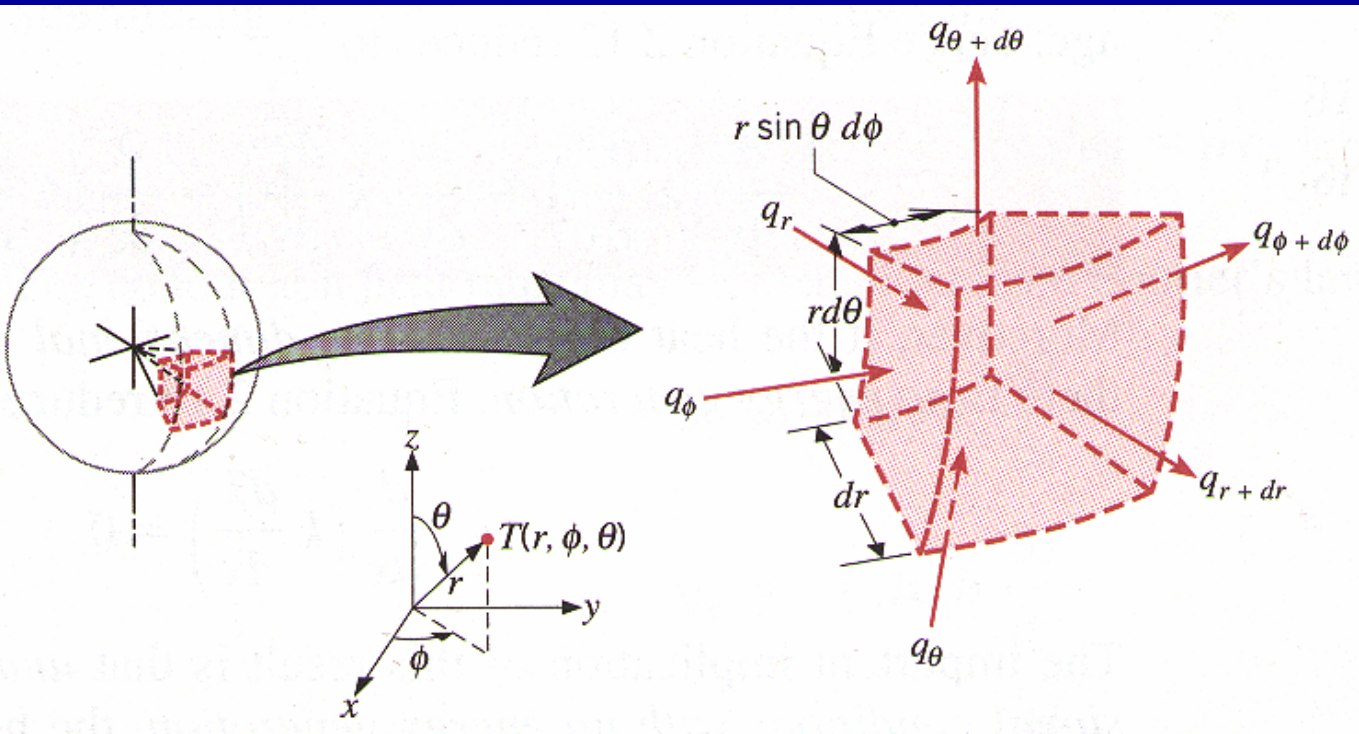
$$q_\theta = -\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

$$q_\phi = -\lambda \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \phi}$$

$$x = r \sin \theta \cdot \cos \phi; \quad y = r \sin \theta \cdot \sin \phi; \quad z = r \cos \theta$$

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad} T = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \vec{i} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \vec{j} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \phi} \vec{k} \right)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + q_v$$



二、 导热过程的单值性条件

导热微分方程式：

它描写物体的温度随时间和空间变化的关系；
它没有涉及具体、特定的导热过程。通用表达式。

对特定的导热过程：需要得到满足该过程的补充说明条件的唯一解

■ **单值性条件**：确定唯一解的附加补充说明条件

■ **完整数学描述**：导热微分方程 + 单值性条件

单值性条件包括四项：**几何、物理、时间、边界**

1、几何条件 说明导热体的几何形状和大小

如：平壁或圆筒壁；厚度、直径等

2、物理条件 说明导热体的物理特征

如：物性参数 λ 、 c 和 ρ 的数值，是否随温度变化；有无内热源、大小和分布；是否各向同性

3、时间条件 说明在时间上导热过程进行的特点

稳态导热过程不需要时间条件 — 与时间无关

对非稳态导热过程应给出过程开始时刻导热体内的温度分布 $T|_{\tau=0} = f(x, y, z)$

时间条件又称为初始条件

例： $T|_{\tau=0} = T_0$

4、边界条件

说明导热体边界上过程进行的特点
反映过程与周围环境相互作用的条件

边界条件一般可分为三类：

第一类、第二类、第三类边界条件

(1) 第一类边界条件

已知任一瞬间导热体边界上温度值： $T|_s = T_w$

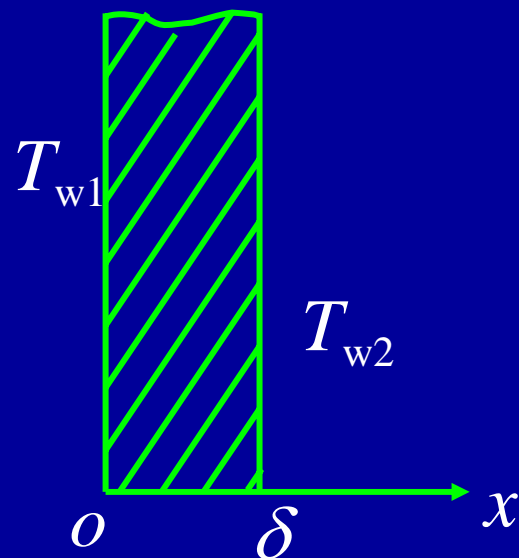
s — 边界面； $T_w = f(x, y, z)$ — 边界面上的温度

稳态导热： $T_w = \text{const}$

非稳态导热： $T_w = f(\tau)$

例： $x = 0, T = T_{w1}$

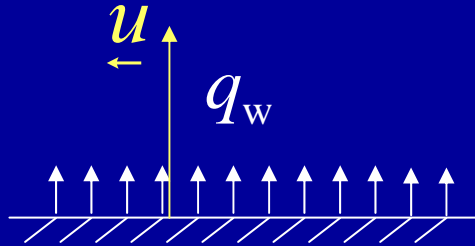
$x = \delta, T = T_{w2}$



(2) 第二类边界条件

已知物体边界上热流密度的分布及变化规律:

$$q|_s = q_w = f(x, y, z, \tau)$$



根据傅里叶定律:

$$q_w = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w, \quad - \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = \frac{q_w}{\lambda}$$

第二类边界条件相当于已知任何时刻物体界面法向的温度梯度值

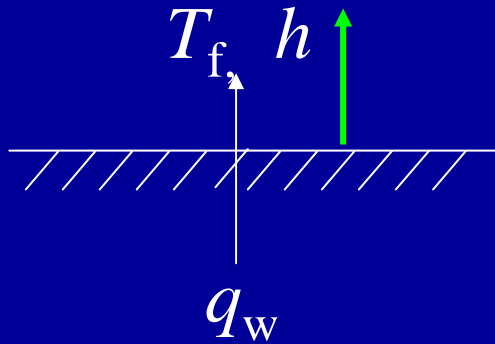
稳态导热: $q_w = \text{const}$ 非稳态导热: $q_w = f(\tau)$

特例: 绝热边界面

$$q_w = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = 0$$

(3) 第三类边界条件★

当物体壁面与流体相接触进行对流换热时，已知任一瞬间边界面周围流体的温度和表面传热系数



牛顿冷却定律：

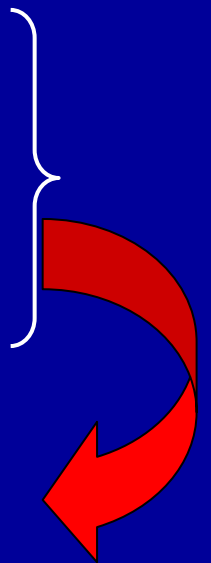
$$q_w = h(T_w - T_f)$$

傅里叶定律：

$$q_w = -\lambda(\partial T / \partial n)_w$$

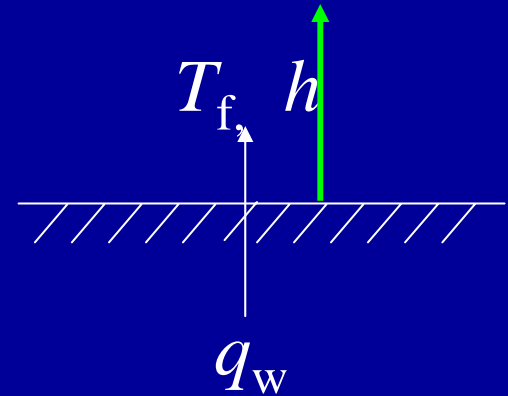
$(\partial T / \partial n)_w$ —壁面外法线方向的温度梯度

$$-\lambda(\partial T / \partial n)_w = h(T_w - T_f)$$



假设 $T_w < T_f$

物体表面温度比内部高，则沿 n 方向温度升高，即：



$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w > 0 \quad \longrightarrow \quad -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w < 0$$

假设 $T_w > T_f$

物体表面温度比内部低，则沿 n 方向温度降低，即：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w < 0 \quad \longrightarrow \quad -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w > 0$$

思考

在任意直角坐标系下，对于以下两种关于第三类边界条件的表达形式，你认为哪个对，哪个不对，或者都不对？陈述你的判断和理由。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T_f - T_{x=0})$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T_{x=0} - T_f)$$



$x = 0$

导热微分方程式的求解方法

积分法、杜哈美尔法、格林函数法、拉普拉斯变换法、分离变量法、积分变换法、数值计算法

导热微分方程 + 单值性条件 + 求解方法 → 温度场

本讲要点

- 掌握传热学中的专业术语
温度场、温度梯度、等温线(面)
- 掌握傅里叶定律的一般表达式
- 掌握导热机理和导热系数的主要影响因素
气体、固体(纯金属、合金、非金属、保温材料)
- 了解导热微分方程的推导思路、基本形式
微元控制体，能量平衡分析
- 理解单值性条件
尤其是边界条件
- 初步掌握热扩散系数的概念和物理意义