

第 8 章

非稳态导热

8.1 非稳态导热的基本概念

8.2 集总参数方法

8.1 非稳态导热的基本概念

非稳态导热 指物体温度和导热热流均随时间变化的导热。

非稳态导热过程可分成两大类：瞬态导热和周期性导热。

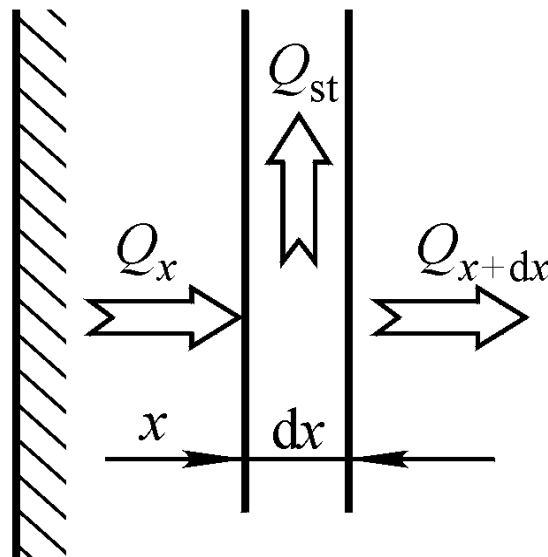
- 周期性非稳态导热：物体的温度按照一定的周期发生变化
- 瞬态导热：物体的温度随时间不断地升高或者降低，在经历相当长的时间后，物体的温度逐渐趋于周围介质的温度，最终到达平衡

8.1 非稳态导热的基本概念

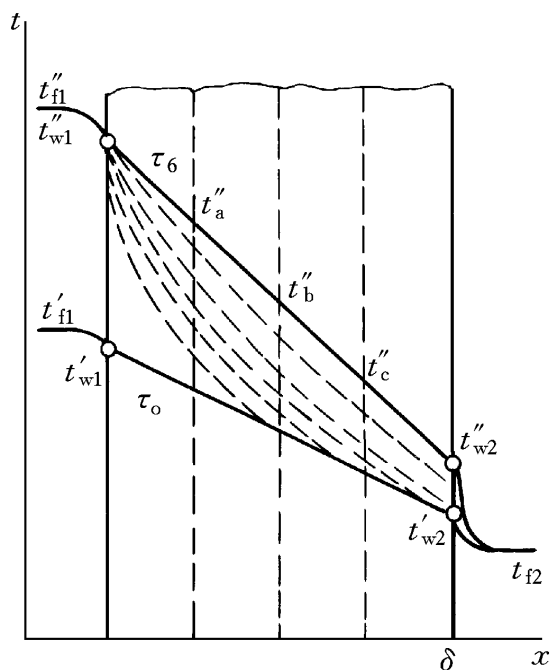
瞬态导热问题有以下两种基本类型：

- ✓ 确定物体内部某个位置达到预定温度所需要的时间；
- ✓ 经过一定时间之后物体内的温度分布以及温度的时间变化速率。

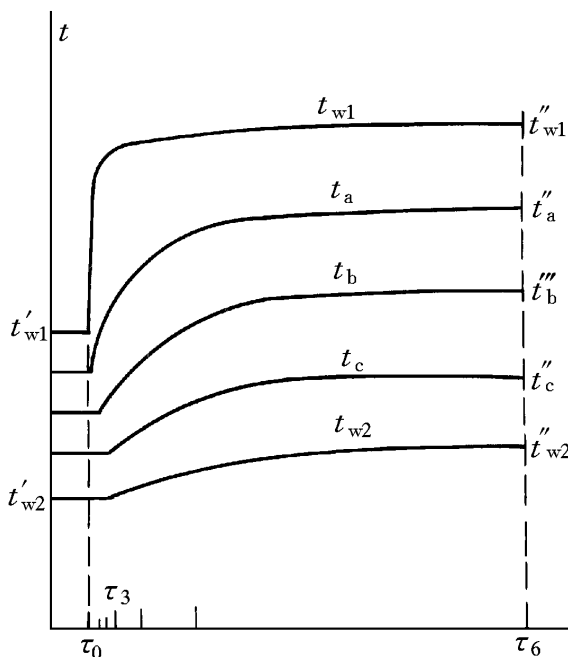
- 瞬态导热过程中同时存在着热量的传递和热量的储存（或释放）——与稳态导热最重要的区别。



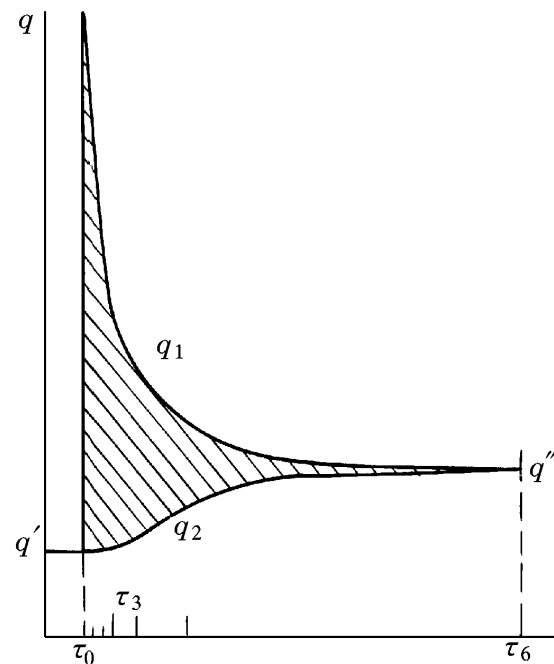
非稳态导热：物体的温度随时间而变化的导热过程。



(a)



(b)



(c)

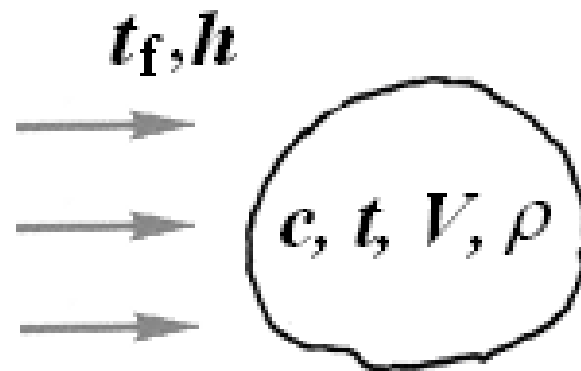
- 稳态导热过程中，室内空气与墙内表面之间的对流传热密度 q_1 等于墙外表面与室外空气之间的对流传热密度 q_2 ——要求室内外温度稳定很长时间
- 非稳态导热过程中， $q_1 \neq q_2$ ，两者差值为墙壁蓄热量
- 瞬态导热过程必定是伴随着物体的加热或冷却过程

物体加热或冷却过程中温度分布的变化可以分为三个阶段：

1. **非正规状况阶段**：物体内各处温度随时间的变化率不一样，温度分布受初始温度分布的影响较大；
2. **正规状况阶段**：物体内各处温度随时间的变化率具有一定的规律；
3. **新的稳态阶段**，理论上这需要无限长的时间，实际上经过一段时间后，物体各处的温度可以近似认为达到新的平衡。

8.2 集总参数方法

小型金属工件的热处理：把已加热的工件投入冷液体中，如果工件内部的导热热阻远小于外部的对流换热热阻，就可以认为在冷却过程中工件内任何位置随时都保持近似均匀的温度。



温度场只是时间的函数，与几何位置无关，称为“零维问题”。这种近似忽略物体内部导热热阻的求解方法就是集总参数分析方法。

$$t = f(\tau)$$

该物体的能量平衡关系为
$$-\rho c V \frac{dt}{d\tau} = hA(t - t_f)$$

瞬态导热问题的主要计算方法之一

- 定义过余温度 $\theta = t - t_f$

$$-\rho c V \frac{d\theta}{d\tau} = hA \theta$$

分离变量积分，用初始条件，得

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_f}{t_0 - t_f} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} \tau\right)$$

物体过余温度比随时间呈指数递减规律变化，从开始时刻等于1
逐渐变化到零。

- 任意时刻物体与流体间的热交换速率为

$$\Phi = -\rho c V \frac{d\theta}{d\tau} = hA\theta_0 \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} \tau\right)$$

时间常数

- 采用集总参数法分析，物体中的过余温度随时间按指数曲线变化， $\rho c V / (h A)$ 具有时间量纲，称为时间常数
- 时间常数 τ_c 表示非稳态导热过程已经进行到全程的 63.2%，离最终平衡状态还差 36.8%。这个指标被用来描述导热物体对外界温度瞬间变化做出反应的快慢程度，称为温度响应。
- 时间常数不仅取决于该物体的热物性、几何尺寸，还与对流传热表面传热系数有关
- 在非稳态温度测量过程中，时间常数越小，温度计的反应速度越快
 - 要求温度计体积热容小、比表面积大
 - 对流传热系数要大

- 集总参数分析方法是对实际非稳态导热过程的一种抽象和理想化的近似。实际上，任何物体内的导热热阻都不可能完全等于零。
- 传热意义上的 薄壁 和 厚壁 概念不能仅从厚度尺度出发来判断，而要用一个称为 毕渥数 的无量纲量来衡量

$$Bi = \frac{L_c / \lambda}{1/h} = \frac{hL_c}{\lambda}$$

毕渥数表示导热热阻与物体表面对流换热热阻的比值

根据精确解的分析结果，只要 $Bi < 0.1$ ，即可采用集总参数方法，所引起的计算误差不会超过5%。

采用这个不等式判据时，特征尺寸的取法应与精确解保持一致。

定型尺寸

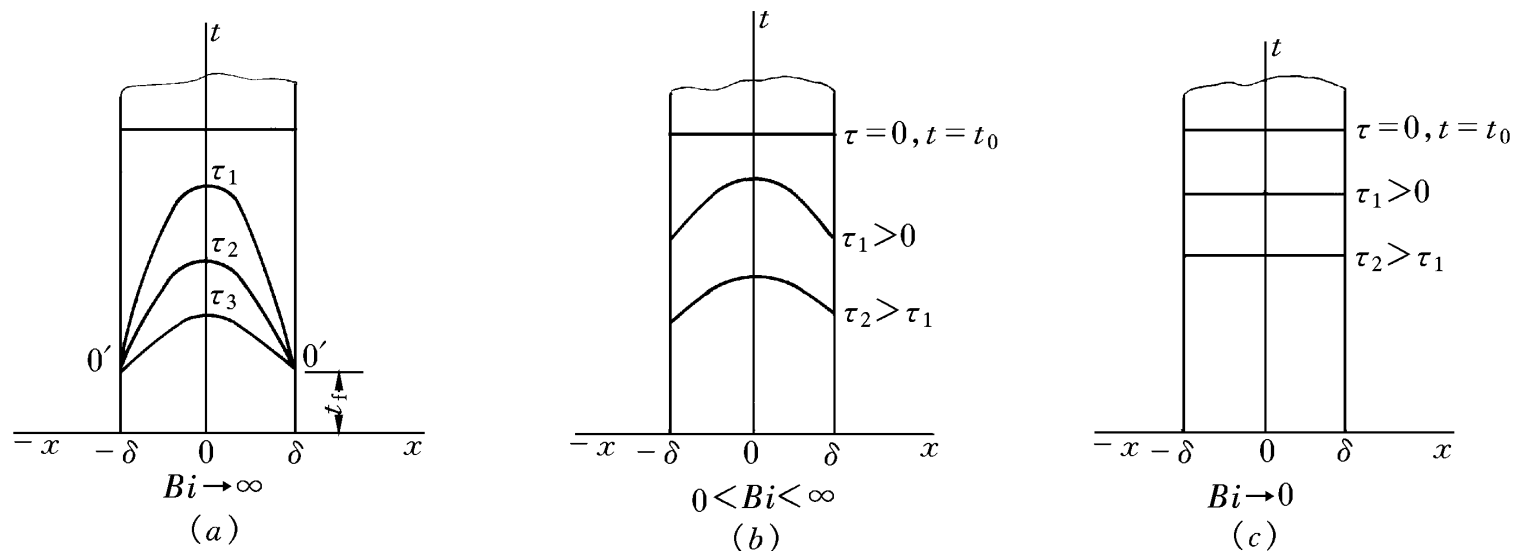
- 在分析规则形状的物体非稳态导热过程是否适合使用集总参数法时，应用 $Bi < 0.1$ 来判断，其中的定型尺寸 L 按如下规则选取：
 1. 平壁两侧为第三类边界条件，取平壁的半厚度 δ ；
 2. 圆柱体，取半径 R ；
 3. 球，取半径 R ；
- 若定型尺寸使用 V/A ，则要求 $Bi < 0.1M$ ，其中平壁、圆柱体、球的 M 值分别为 1、1/2、1/3

$$Bi = \frac{L_c / \lambda}{1/h} = \frac{hL_c}{\lambda}$$

当 $Bi \rightarrow \infty$ 时，对流传热系数 h 趋于无限大，即对流传热热阻趋于零，平壁的表面温度几乎从冷却过程一开始立即降低到等于流体的温度，定向点在平壁表面上。

当 $0 < Bi < \infty$ 时，属于常规情况。

当 $Bi \rightarrow 0$ 时，对流传热系数趋于零或热导率趋于无限大，物体内导热热阻很小，即温度分布趋于均匀一致，定向点在平壁的表面无穷远处。



厚壁



薄壁

- 例题8-1

P213 习题

- 8-1
- 8-2
- 8-5