

附 瞬态热线法原理

瞬态热线法是利用测量热丝的电阻来测量物质导热系数的，基于 1976 年 Healy JJ 提出的理论【1】，其理想模型为：在无限大的各向同性、均匀物质中置入直径无限小、长度无限长、内部温度均衡的线热源，初始状态下二者处于热平衡状态，突然给线源施加恒定的热流加热一段时间，线热源及其周围的物质就会产生温升，由线热源的温升即可得到被测物体的导热系数。其控制方程是简单的傅里叶方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (1)$$

式中：

- T 为温度，
- t 为时间，
- a 为被测物质的热扩散系数， $a = \lambda / \rho C_p$ ， λ 为被测物质的导热系数， ρ 与 C_p 分别为被测物质的密度和定压比热容。

假设被测物质的物性参数在加热过程中为常数，将初始时刻的线热源与被测物质的温度记为 T_0 ，任意时刻任意位置的温升记为 ΔT ，则有：

$$\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_0 \quad (2)$$

方程(1)可写为：

$$\frac{\partial \Delta T(r, t)}{\partial t} = a \nabla^2 (\Delta T(r, t)) \quad (3)$$

初始条件和边界条件分别为：

$$\Delta T(r, 0) = 0, \quad t \leq 0 \quad (4)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} (r \frac{\partial T}{\partial r}) = -\frac{q}{2\pi\lambda} = \text{const}, \quad t \geq 0 \quad (5)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \Delta T(r, t) = 0, \quad t \geq 0 \quad (6)$$

式中： q 为单位长度线热源的加热功率，在模型中假定流体的 a 、 ρ 、 λ 、 C_p 等物性均为恒量，当线热源半径 r_0 足够小、 t 足够长时，对方程(3)求解并进行多项式展开，可以得到热线的温升为：

$$\Delta T_{id}(r_0, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln t + \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \left(\frac{4a}{r_0^2 C} \right) = A \ln t + B \quad (10)$$

其中 $A = q / 4\pi\lambda$ ， $B = A \cdot \ln(4a / r_0 C)$ ； $C = e^\gamma$ ， γ 为欧拉常数， $\gamma = 0.5772\cdots$ ；

由式(10)可知，在 $r = r_0$ 处的热线温升与时间的对数成线性关系，因此可以分别从 $\Delta T \sim \ln t$ 线性关系的斜率 A 和截距 B 得到导热系数和热扩散系数，即：

$$\lambda = \frac{q}{4\pi A} = \frac{q}{4\pi (d\Delta T_{id} / d \ln t)} \quad (12)$$

$$a = \frac{r_0 C}{4} \exp(B/A), \quad t = 1s \quad (13)$$

利用瞬态热线法进行导热系数的实验研究，正是基于式(12)进行的。

从式(12)中可以看出，只需要知道加到热丝上的单位长度的加热功率以及热丝受热后引起的温升与时间的对数关系，就可以求得导热系数。