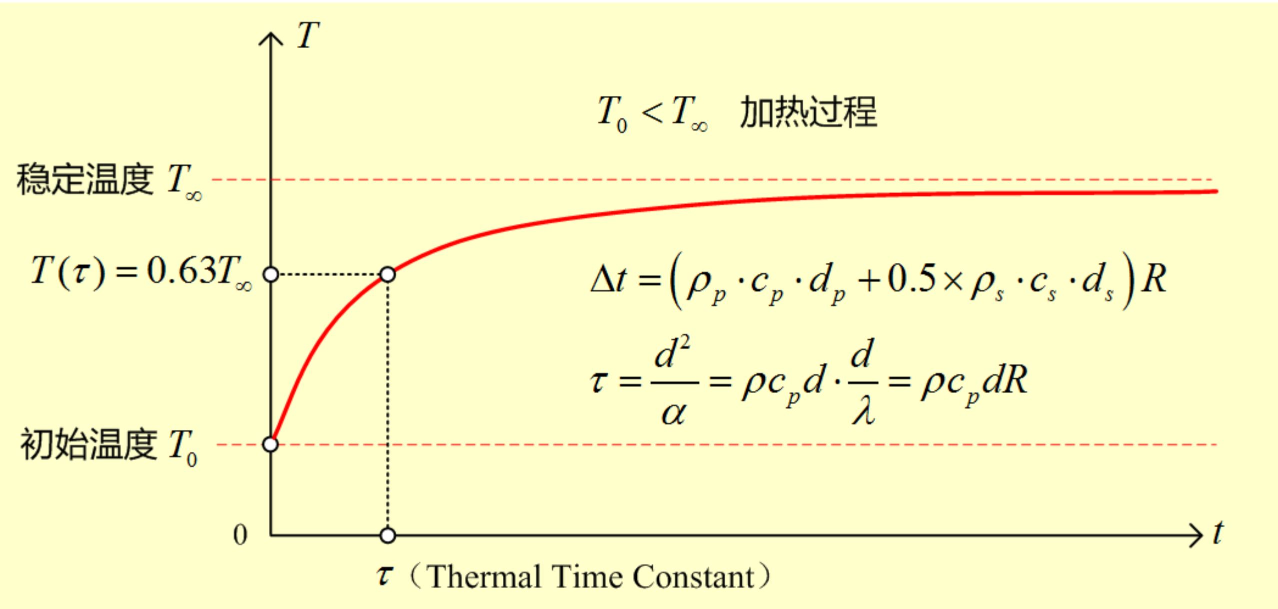
热时间常数的定义及其在防护热板法导热系数测试仪器中的应用

Definition of Thermal Time Constant and Its Application in Guarded Hot Plate Test Instrument for Thermal Conductivity



上海依阳实业有限公司
www.eyoungindustry.com

摘要：为了彻底深入了解防护热板法导热系数测试过程中国际标准方法 ISO 8302 和 A-S-T-M C177 对热稳定测试间隔时间的界定，本文从热时间常数的定义着手，进行了详细的推导，揭示出热时间常数的物理意义以及防护热板法热稳定性判断的整个详细过程，通过此详细过程的结果指出国际标准 ISO 8302 和国家标准中存 GB/T 10294 在的错误，并对国际标准中的热时间常数经验公式进行了修正，最后采用 MapleSim 仿真模拟计算结果验证了修正公式的正确性。

关键词：热时间常数，防护热板法，导热系数，测试间隔，数值模拟，MapleSim

1. 问题的提出

针对较小热阻的防隔热材料，一般采用防护热板法导热仪测试其导热系数和热阻值。目前国际上针对防护热板法导热仪的标准测试方法有两个，一个是国际标准 ISO 8302，另一个是美国 A-S-T-M C177，而我国相应的标准 GB/T 10294 则是完全照搬了 ISO 8302 标准。在这两个标准中，都提到了测试过程中达到热平衡的判断条件，即在一定时间间隔 Δt 内各个性能参数随时间的变化稳定在规定范围内。

为了便于判断测试时间间隔 Δt 并用于操作和控制程序，在 GB/T 10294 和 ISO 8302 中都给出了计算 Δt 的经验公式和式中各个参数的定义和单位：

$$\Delta t = \left(\rho_p \cdot c_p \cdot d_p + \rho_s \cdot c_s \cdot d_s\right) R \qquad (1)$$

国标 GB/T 10294 给出式中各参数的定义如下：

$\rho_p;\rho_s$—— 加热单元面板材料和试件的密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；

$c_p;c_s$ —— 加热单元面板材料和试件的比热容，单位为焦每千克（ J/kg ）；

$d_p;d_s$—— 加热单元面板材料和试件的厚度，单位为米（ m ）；

R —— 试件的热阻，单位为平方米开每瓦（ m^2K/W ）

而在 ISO 8302 标准中对 $c_p;c_s$ 的定义则完全相反，ISO 8302 定义 $c_p;c_s$ 为加热单元面板材料和试件的热容（thermal capacity），单位反而为焦每千克每开（ $J/(kg \cdot K)$ ）。

按照公式(1)，只有 $c_p;c_s$ 为比热容，单位为 $J/(kg \cdot K)$ 时，最终得到的是 J/W 量纲，这

才是纯时间单位Δt的量纲（s）。这就是说在 ISO 8302 中对公式(1)中$c_p;c_s$的物理意义定义错误，但单位定义是对的；而在国标 GB/T 10294 中，定义$c_p;c_s$的物理意义是正确的，但在此处所做的单位定义发生了错误。实际上，在国标 GB/T 10294 中的“符号和单位”定义表中，所进行的$c_p;c_s$定义都为比热容，单位都定义为$J/(kg\cdot K)$。

另外，在国际标准 ISO 8302 中，同样在翻译过来的国标 GB/T 10294 中，都没有提到判断Δt的经验公式的依据和由来。而在美国 A-S-T-M　C177 标准中，对Δt的判断并没有给出经验公式，只是提到Δt的判断需要基于系统的热时间常数，在标准的“NOTE 19”中对热时间常数给出了如下解释：

系统的热时间常数是在系统的阶跃热扰动之后达到固定值 1/e（37%）的所需时间。恒功率模式下的热时间常数是达到 37%最终温度时所需时间，恒温模式下的热时间常数是达到 37%最终功率时所需时间。系统的热时间常数可以近似从系统组件的热扩散系数获得，但通常通过实验确定。

NOTE 19—The thermal time constant of the system is the time required to come to within 1/e (37 %) of the fixed value after a step thermal disturbance of the system. The thermal time constant in the constant power mode is the time required to come to within 37 % of the final temperature. The thermal time constant in the constant temperature mode is the time required to come to within 37 % of the final power. The thermal time constant of a system can be approximated from the thermal diffusivities of the system components, but is generally determined experimentally.

实际上，A-S-T-M　C177 的这段描述中信息量很大，主要涉及以下几方面内容：

（1）稳态判断测试间隔时间Δt可能就是所谓的系统热时间常数；

（2）此热时间常数是系统达到 37%热平衡温度或 37%热平衡热流所消耗的时间，如果知道了热时间常数，也能对进入热平衡的时间做出判断。

（3）文中提到了两种加热方式，一种是恒功率加热方式，另一种是恒温加热方式。这两种加热方式往往决定了稳态时间的长短，通常恒功率加热方式达到稳态的时间要远长于恒温加热方式。

（4）恒功率加热方式采用温度来判断稳定，恒温加热方式采用加热功率来判断稳定。

（5）没有提到热时间常数是在那种加热方式下的热时间常数。

为了彻底深入了解上述两个国际标准中对热稳定测试间隔时间的界定，本文从热时

间常数的定义着手，进行相关的推导，揭示出热时间常数的物理意义以及防护热板法热稳定性判断的整个详细过程。

2. 热时间常数的基本概念

针对防护热板法导热系数测试，试件一般为正方形平板，设面积为 A，厚度为 d。

在恒功率加热方式下，恒定功率 Q 使得试件从初始温度 T_0 升高到 T_∞ 后最终达到稳定，假设恒定功率全部用于试件的温升，加载的恒定功率等于试件的温升速率，则时间内部的温度随时间 t 的变化 $T(t)$ 为：

$$Q = \frac{\lambda\left(T_\infty - T\right)A}{d} \tag{2}$$

$$\frac{\lambda\left(T_\infty - T\right)A}{d} = \rho c_p \frac{\partial T(t)}{\partial t}V; \quad T(0) = T_0 \tag{3}$$

式中 λ 表示试件的导热系数，单位 W/mK；ρ 表示试件的密度，单位 kg/m^3；c_p 表示试件的比热容，单位 $J/(kg \cdot K)$；V 代表试件的体积，单位 m^3。边界条件是试件的初始时刻温度 $T(0)$ 为 T_0，并假设其中的热物理性能参数在规定的温度范围内是常数。

对公式(3)求积分，那么试件温度随时间变化 $T(t)$ 的关系式为：

$$\begin{aligned} &T(t) = T_\infty + \left(T_0 - T_\infty\right)e^{-\frac{\lambda A}{\rho c_p dV}t} = T_\infty + \left(T_0 - T_\infty\right)e^{-\frac{t}{\tau}} \\ &\tau = \frac{\rho c_p dV}{\lambda A} = \frac{d^2}{\alpha}; \quad \lambda = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \end{aligned} \tag{4}$$

式中 τ 定义为试件的热时间常数，单位为 s；其中 α 为试件的热扩散系数，单位 m^2/s。

3. 热时间常数的应用

3.1. 防护热板法温度稳定测量时间间隔判据

在防护热板法中，试件达到热平衡状态的判据，是将一系列温度等参数的测量值按照一定时间间隔取值进行比较，连续四个时间间隔的采集数据波动在规定范围内。按照防护热板法标准的规定，这个时间间隔应等于防护热板装置的热时间常数。

对于防护热板装置中的试件，试件存在热面和冷面，在这里所做的假设是样品温度

随时间变化总是均匀的，防护热板装置中的试件温度是整体变化，其数值等于试件的平均温度，即热面温度与冷面温度的平均值。

按照公式(4)，防护热板装置在恒功率加热方式下试件的温度变化如图 3-1 所示。

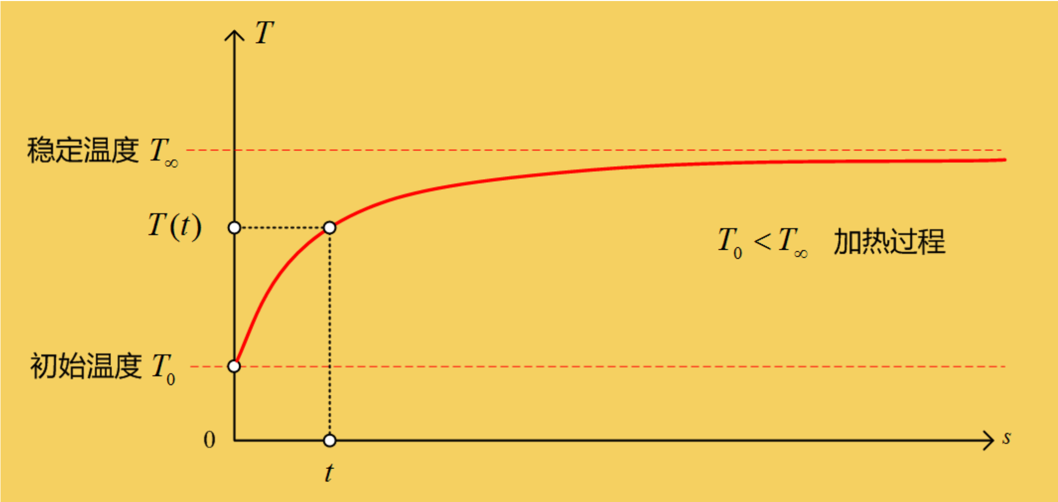


图 3-1 恒功率加热过程中试件温度随时间变化曲线

从公式(4)可以看出，时间的热时间常数与试件的厚度和热扩散系数有关。为了更直观的了解试件的热时间常数，将热时间常数表达为：

$$\tau = \frac{\rho c_p dV}{\lambda A} = \frac{\rho c_p V}{A} \cdot \frac{d}{\lambda} = \rho c_p d \cdot \frac{d}{\lambda} \qquad (5)$$

公式(5)所定义的热时间常数由两部分相乘，一部分 $\rho c_p d$ 代表试件的热容，而 d/λ 则代表试件的热阻 R，由此可以得到试件热时间常数的另外一种表达方式：

$$\tau = \rho c_p dR \qquad (6)$$

根据公式(4)，可以推导出样品温度达到 $T(t)$ 时所消耗的时间 t：

$$t = -\tau \ln\left(\frac{T_\infty - T(t)}{T_\infty - T_0}\right) = \tau \ln\left(\frac{T_\infty - T_0}{T_\infty - T(t)}\right) \qquad (7)$$

式中 $T_\infty - T_0$ 是达到恒功率加热所导致的总温升值，$T_\infty - T(t)$ 为 t 时刻后的剩余温升值。

如果 $(T_\infty - T(t))/(T_\infty - T_0) = 0.37$，则 $t = \tau$。这也就是说，在恒功率加热模式下，当试件温度从起始温度升至最终稳定温度的 63%时所用的时间，即为热时间常数。由此可见，A-S-T-M C177 中规定热常数时间为达到最终稳定温度的 37%时所用时间是不正确的。

特别需要注意的，这里所谓的最终稳定温度并不是试件的热面温度，而是试件热面

和冷面温度的平均值，即试件的平均温度，即上式中的$T_\infty=(T_{hot}+T_0)/2$。那么对应于防护热板法中试件的热时间常数粗略可以等于：

$$\tau=\rho c_p dR/2 \tag{8}$$

公式(8)就是 ISO 8302 中给出的测量时间间隔经验公式(1)的表达形式和物理意义，只是在公式(1)还考虑了恒功率加热单元面板所需要的时间，这里就不再详细描述经验公式(1)的推导过程，只给出 ISO 8302 经验公式的修正，即：

$$\Delta t=\left(\rho_p\cdot c_p\cdot d_p+0.5\times\rho_s\cdot c_s\cdot d_s\right)R \tag{9}$$

3.2. 纯 NIST 1450d 标准参考材料测试中的热时间常数

选择 NIST 1450d 标准参考材料作为试件，其热物理性能参数如表 3-1 所示。

表 3-1 NIST 1450d 标准参考材料热物理性能参数

厚度 mm	密度 kg/m^3	比热容 $J/(kg\cdot K)$	导热系数 $W/(m\cdot K)$	热阻 m^2K/W
30	118	1010	0.033	0.909

那么根据公式(8)得到此试件的热时间常数为$\tau=1625s=0.451h$，这与采用 MapleSim 软件数值模拟计算结果完全一致，如图 3-2 所示。

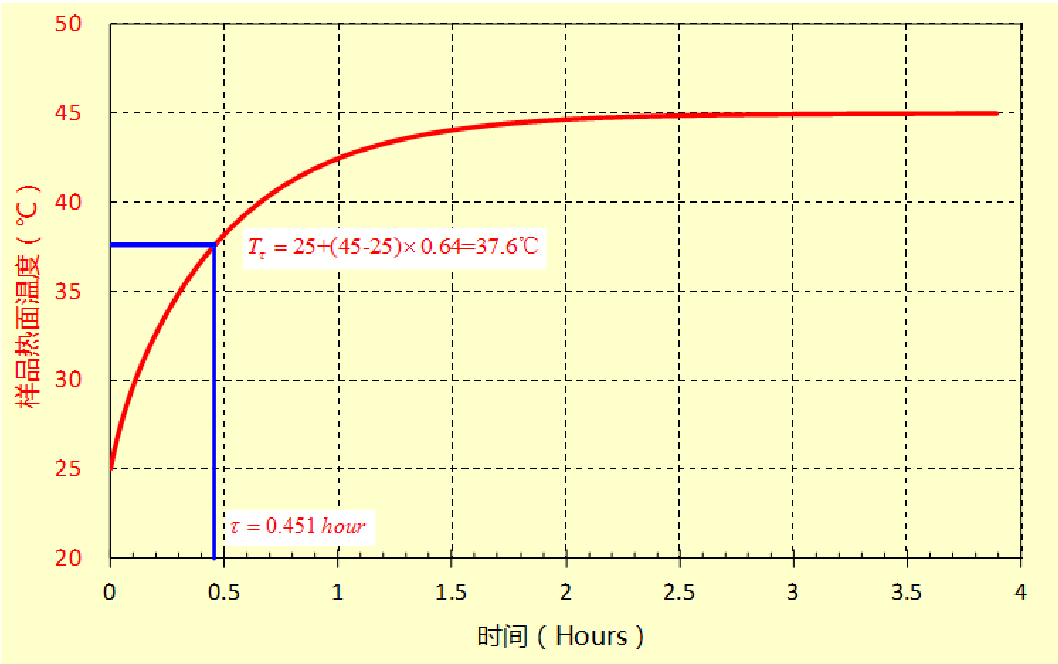


图 3-2 试件热面温度变化曲线以及热面温度升高到 63%恒定温度的时间

3.3. 考虑金属热板时 NIST 1450d 标准参考材料测试中的热时间常数

在防护热板法测试 NIST 1450d 标准参考材料试件时，还需要考虑金属热板对系统热时间常数的贡献。如果选择纯铝作为热板，其热物理性能参数如表 3-2 所示。

表 3-2 纯铝热板热物理性能参数

厚度 mm	密度 kg/m^3	比热容 $J/(kg\cdot K)$	导热系数 $W/(m\cdot K)$	热阻 m^2K/W
10	2702	903	237	4.22×10^{-5}

那么根据公式(9)得到热板和试件的热时间常数为 $\tau=23803s=6.61h$ ，这与采用 MapleSim 软件数值模拟计算结果完全一致，如图 3-3 所示。

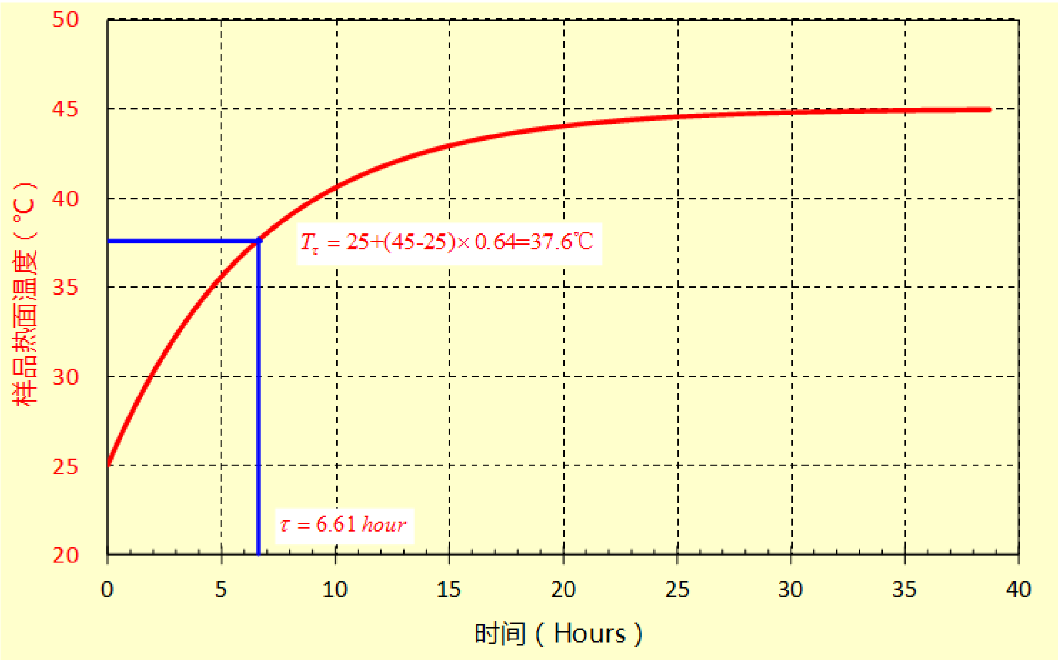


图 3-3 带铝质热板试件热面温度变化曲线以及热面温度升高到 63%恒定温度的时间

3.4. 稳态时间的判断

通过上述推导、计算和数值模拟计算验证，可以通过被测试件和防护热板法装置中热板的热物理性能计算得到导热系数测试过程中的热时间常数，通过获得的热时间常数，也能推算出测试过程进入稳态的时间。

根据公式(7)关于测试时间与热时间常数的关系，结合以上求出的热时间常数，可以估算达到温度所需的时间。

如果假设 T_∞=45℃，T_0=25℃，$T(t)$=24.95℃为达到了稳定温度，那么试件达到稳定所

用的总时间为$t = 6\tau$。那么对于纯 1450d 样品测试时的热时间常数$\tau = 0.451h$，对应的达到稳态的时间约为$2.7h$，这与图 3-2 所示的模拟计算结果一致。同样，对于带有铝质热板和 1450d 样品测试时的热时间常数$\tau = 6.61h$，对应的达到稳态的时间约为$39.7h$，与图 3-3 所示的模拟计算结果一致。

由此可见，实际达到稳态的时间要远大于热时间常数所代表的时间，热时间常数所代表的时间量只能作为判断是否稳定的测试时间间隔。

4. 结论

针对防护热板法导热系数测量装置，详细介绍了目前国际和国内标准测试方法中如何判断达到稳态进行测量判断的时间间隔，通过防护热板法装置的动态传热过程分析得出以下结论：

（1）结合 ISO 8302 和 A-S-T-M C177 这两个防护热板装置国际标准测试方法，揭示了界定判断达到稳定的测试时间间隔的来龙去脉，明确了热时间常数的物理意义，并用热时间常数来定义测试时间间隔。

（2）在 ISO 8302 和 GB/T 10294 中，热时间常数的经验公式中存在参数定义和单位的错误，经验公式中的物理量应定义为比热容，单位为$J/(kg \cdot K)$，由此就能正确描述经验公式中各个参数的物理意义，并符合标准方法中对符号和相应单位定义的统一性。

（3）在 A-S-T-M C177 标准中对热时间常数的定义存在严重错误。针对恒功率加热方式，正确的热时间常数定义是达到 63%最终恒定温度时所经历的时间，而不是 C177 中规定的 37%。同样，针对恒温加热方式，正确的热时间常数定义是达到 63%最终恒定热流时所经历的时间，而不是 C177 中规定的 37%。

（4）对 ISO 8302 和 GB/T 10294 中给出的经验公式需进行修正，需要将公式中的试件热容项除以 2。

（5）以上这些结论都经过了 MapleSim 软件模拟仿真计算的验证。