

ASTM E 1461-01 应用闪光法 测定热扩散系数的标准试验方法¹

译自 ASTM E 1461-01 《Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash method》 本文由中国热管理网整理。

1. 范围

1.1 本试验方法包含本质上是均匀的、各向同性的固体材料的热扩散系数的测定。借助本试验方法，可测量从 75 到 2800K 的范围为 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 的热扩散系数值。

1.2 本试验方法是试验方法 ASTM C 714 更详细的形式，而又具有材料、应用和温度的范围更宽广的可应用性和改善的测量精确度。

1.3 本试验方法适用于对能脉冲光谱不透明的材料测量，而对完全或变化透明材料可小心应用（见附录 XI）。

1.4 本试验方法意图允许广泛种类的仪器设计。在这种类型的一个试验方法中，建立覆盖所有接触的结构和程序的细节是不实际的，对没有有关技术知识的人可以提出困难 或停止或限制研究和
发展基本技术的完善

1.5 本试验方法适用于足够充分密集的材料测量，然而，在某些情况中，当用于多孔疏松样品时，也产生可接受的结果。由于孔积

率的大小、孔形状、孔分布的大小和参数都影响热扩散系数的行为，分析数据时必须极端谨慎。当用本方法得到的热扩散系数导出诸如导热系数等其他性能的时候，特别小心是明智的。

1.6 可以认为本试验方法是绝对的（或原生的）测量方法，因为不要求参考标准。应用参比材料去验证所采用的仪器的功能是可取和明智的。

1.7 严格地说，本方法只适用于均匀的固体材料。然而，在某些情况中，也产生在特定应用中可能有用的数据。

1.7.1 复合材料的测试——在本质上非均相和各向异性存在材料中时，用本方法得到的热扩散系数数据本质上可能是错误的。无论如何，当通常缺乏绝对精确度时，这样的数据在比较相似结构的材料中可能是有用的。

1.7.2 测试液体——在测定熔化材料的热扩散系数中发现本方法特别有用的应用。对于这种技术，必须使用特别结构的试样包封（specially constructed sample enclosures）。

1.7.3 测试层状材料——本方法也扩展去测试由不相似的材料做成的某些层状结构，其中的一层是未知的。在某些情况中，界面的接触传导也可被测定。

1.8 用国际单位（SI）表示的数据值是标准的。

1.9 寻找所有安全关系并非本标准的主旨。即使有的话，也是与应用有关。在应用之前先建立适当的安全与健康实际和确定规章的局限性，都是用户的责任。

2. 参考文件

2.1 ASTM 标准:

C 714 借助热脉冲法 (a Thermal Pulse Method) 的碳和石墨的热扩散系数的试验方法²

E 230 标准化的热电偶的温度-电动势表³

3 术语

3.1 本标准的术语定义

3.1.1 固体材料的导热系数 (thermal conductivity), λ

3.1.2 固体材料的热扩散系数 (thermal diffusivity), α

3.2 本标准的符号及其单位的规定

3.2.1 D —直径, m

3.2.2 k —在扩散方程的解中的常数

3.2.3 L —试样厚度, m

3.2.4 t —响应时间, s

3.2.5 t^* —无量纲时间 ($t^* = 4 \alpha_s t / D_r^2$)

3.2.6 T —温度, K (开尔文温标)

3.2.7 α —热扩散系数, m^2/s

3.2.8 λ —导热系数, W/m.K

3.2.9 β —要求达到最大强度的脉冲持续时间的分数

3.2.10 Δt_5 — $T(10t_{1/2})/T(t_{1/2})$

3.2.11 Δt_{10} — $T(5t_{1/2})/T(t_{1/2})$

3.3 本标准的下标符号：

3.3.1 o—环境

3.3.2 s—试样或样品

3.3.3 T—热电偶

3.3.4 x—百分比增量

3.3.5 C—Cowan（译者注：著者名，见参考文献 26）

3.3.6 R—比率

3.3.7 m—最大

3.3.8 t—时间

4 试验方法概括

4.1 薄圆状的小试样承受高强度短时间光幅射能脉冲，试样的前表面吸收能脉冲，记录在后表面引起的温度升高（温度记录图）。热扩散系数是根据试样的厚度、要求后表面温升达到它的最大值的一定百分比的时间计算的（图 1）。当测定试样在一个温度范围的热扩散系数时，必须在每个感兴趣的温度重复测试。大量出版物（1，2）⁴和综述文章（3，4，5）叙述了这种试验方法，在附录 X5 也可找到它的理论概括。

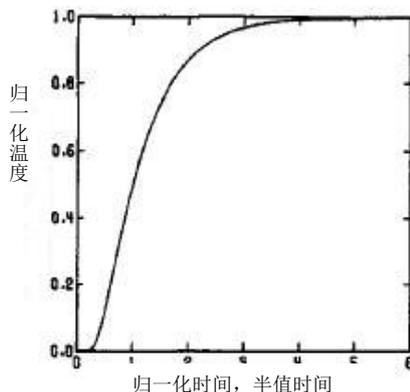


图 1 光闪射法的特征温度记录图

5 意义和应用

5.1 热扩散系数是诸如在瞬态热流条件下的设计应用、安全操作温度和质量保证等用途所需要的一个重要的性能。

5.2 光闪射法用于测量广泛范围固体材料的热扩散系数 α 值。由于试样几何简单、试样尺寸小、测量迅速和易处理、使用单一装置，这种方法特别有优点，尤其对在大温度范围有宽广热扩散系数值的材料。

5.3 在一定严格条件下，当本方法用于定量模式时，均匀和各向同性的不透明固体样品的比热容可被测定。

5.4 热扩散系数结果与比热容 (C_p) 和密度 (ρ) 一起可用于许多情况中，依照下列关系式去得到导热系数 (λ)：

$$\lambda = \alpha C_p \rho . \quad (1)$$

6 干扰

6.1 从原理来说，热扩散系数是从试样的厚度和描述热从试样的前面到它的背面的进程的特征时间函数得到的。测量的不定性的来

源与试样自身、温度测量、监测器及数据采集系统的性能、数据分析及更特别的细小脉冲时间效应、试样的加热不均匀和辐射热损失有关。这些不定性的来源可以认为是系统的，每次实验应当细心考虑。通过做大量重复实验和比较它们的结果，可以估算实际的随机误差（例如，噪音）。所获得结果的相对标准偏差是与测量相关的不定性的随机成分的一个很好的反映。对这些因素进行严格估计的指导方针见参考文献 31。更多热管理标准，请访问中国热管理网。

7 装置

测试装置的必要构成显示在图 2 中，有光闪射源、试样盛器 (sample holder)、环境包封（不透明）、温度感应检测器和记录器。

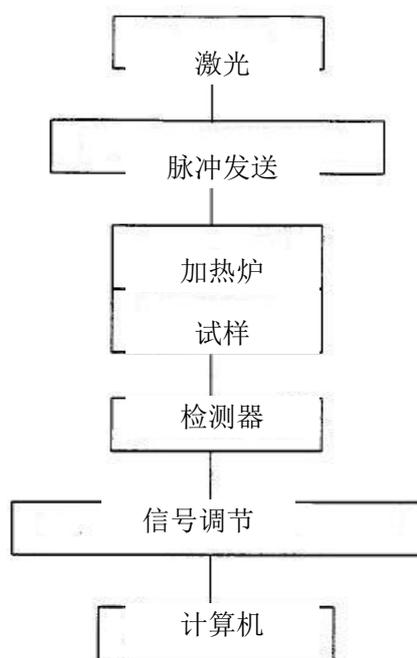


图 2 光闪射系统的方框图

7.1 光闪射源可以是脉冲激光、闪射灯或其他能够在短持续时间内产生大量能脉冲的装置。能闪射的持续时间应小于试样背面温度升高到它的最大值的一半所需时间 (the half of the maximum rise time) 的 2% (见图 1)。(译者注:在下文中,将 the half of the maximum rise time 译为最大温升时间的一半或时间半值。请注意,最大温升时间的一半或时间半值在本文中是一个有特定意义的概念。)

7.1.1 脉冲射击试样表面必须在空间上强度均匀。多数脉冲激光表现热斑点和在光束的一定区域实际上比周围有更高强度。由于这个原因,从脉冲激光直接应用未改性光束的系统应当采用比被测试样最大直径大一点的光束。在激光和试样之间的光学纤维的应用,实质上改善光束的均匀性(达到 95%)。由于这种方法几乎不产生边缘效应,对比天然光束激光,更大部分的能可以直接到达试样。

7.1.2 比较常用的激光是:红宝石(可见红光),Nd:玻璃,Nd:YAG(近红外线);然而,也可应用其他类型的激光。在有些情况中,适当的工程氙闪射源对所有最短温升时间能够提供可比较的性能。在许多应用中,氙闪射源在适当聚焦时是激光的替换物,可提供比较低成本和比较低(成本)的维护。(译者注:Nd是铈,YAG是钇铝石榴石。)

7.2 对于在室温之上和之下的测量,需要一个环境可控室(an environmental control chamber)。如果希望在保护的氛围中操作,

这个可控室必须对气体或真空密封不漏。包封应当与窗口一道固定，对闪射源必须是透明的。如果采用光学检测背面温升，则需要副窗口。在这样的情况中，用适当的滤光器使光学检测器免于直接暴晒于能光束是可取的。

7.3 加热炉或低温冷冻器应当与试样宽松（热）耦合，应当能够在一定的时间周期（等于 $5/2$ 的最大温升时间）维持试样温度恒定在最大温升的 4% 以内。加热炉可以是水平或垂直的。试样支持（物）也应当与试样宽松（热）耦合。试样支持物的结构可以同时收藏一个或几个试样，用后一种结构在数据和速度方面有实质的改善。

7.4 检测器可以是热电偶（见附录 X2）、红外测温器、光学高温计或任何其他手段——只要能够提供与小温升成比例的线性的电输出输入便可，它们应当能够检测在试样初始温度之上的 0.05K 变化。检测器及其采集器的放大器必须具有小于半值时间的 2% 的响应时间。在采用**本体热电偶**（intrinsic thermocouples）时，应当采用相同的响应要求。如果应用电子滤波器时，应当验证滤波器不歪曲温谱图的形状。当采用光学温度传感时，需要几种防范。传感器必须聚焦在试样背面的中心，也必须保护它隔离能束以便防止损害或饱和。**试样在炉中时，能束可能弹跳或发光**（When the specimen is housed in a furnace , the energy beam may bounce or shine **past the edges and enter the detector**）。为了避免这些，适当隔离是必要的。对于抗激光的防护，对所选择的波长不透明的非传导性的信号滤波器是很有用的。视窗和聚焦透镜在检测器的波长区必须不吸收

可估算出的辐射，这对红外检测器特别重要，意味着应当保证高温测量期间所有窗口表面受监测和保持免除可能导致能吸收的沉积。这种架构可能造成信号强度的损失和可以引起来自能源的不均匀的试样加热。

7.5 信号调节器包括加偏压输出环境温度读数的电路、测试信号滤波器、放大器和模拟-数字转换器。

7.6 数据记录

7.6.1 数据收集系统必须有足够的速度，以便保证在确定温度记录图上的最大温升的一半（half of the maximum temperature rise）中，时间分辨率至少是1%，该系统对最快的温度记录图是合格的。

7.6.2 记录的信号必须包含能够精确定义能脉冲开始时间的信息。

7.6.2.1 如果没有其他手段可采用，可应用由触发脉冲（闪射灯的激光）产生的必然信号。然而，在它应用电容器放电的开始作为“时间零点”（“time zero”）时，这可被考虑是边缘。

7.6.2.2 如果能脉冲的重心（the center of gravity）用作“时间零点”，则得到更精确的结果。这只用真实的脉冲形状记录和每个脉冲的出发点的起源便可确定。这也考虑每个脉冲的不同能，无论脉冲受不受控制。

7.6.3 希望应用在信号周期内能够预置程序的多速记录的数据记录系统，这就有可能温谱图居先和升起部分的高分辨率（快速）记录以及试样的延长冷却的低分辨率（慢速）记录（温谱图的冷却部

分用作热损失修正——见下文)。

7.6.4 在记录装置没有精确的内在的训练(诸如对数字系统)的情况下,必须周期性地验证计时精度以便保证最大温升时间的一半(the half of the maximum rise time)在最迅速期望的信号的2%以内被测量。

7.7 将诸如 He-Ne 激光或激光二极管等调整装置并入系统是实际的,有助于校验试样的定位。调准的光束在所有时间必须处于在与能脉冲路径共线的1%以内。

7.8 在紧靠试样中必须提供一孔(an aperture),以便保证能束的部分不因试样而发光,希望保持这一孔径接近试样的直径的95%。提供太小的孔将引起不均匀的试样加热和促使试样内的双轴热流;一个太大的孔将失去用途。在要求精确调节和有效的孔大小中,具有别针式试样悬挂(pin type sample suspension)的系统是必要的。

7.9 试样温度的测量是由可接受的手段来做的,诸如校准的热电偶、光学高温计、钾 RTD 等等,无论什么都有适当的温度范围。在所有的情况下,这样的一种装置必须与试样保持物(the sample holder)紧密接触或瞄准它。不推荐用热电偶接触试样,不接受热电偶埋置在试样内。(译者注:RTD 是电阻温度计)

7.10 温度控制器和/或程序器是将试样带进感兴趣的温度的。在希望在准确的温度执行测量时,当测试程序覆盖整个温度范围时,在多数情况下,不必要严格地停留在这些温度上。在期望热扩散系数在一个温度范围具有单一表现时,试图达到准确的温度是不经济的时间

方式。在期望测试期间试样承受内在转变时，这种情况下必须严密观察感兴趣的温度。

8. 试样

8.1 常用的试样是圆薄片，其前表面面积比能束小。典型的试样是直径 6~18mm。最佳厚度取决于估算的热扩散系数的大小，应当这样选择厚度——其达到最大温度的时间落在 40~200ms 范围内。在比较高的温度下希望比较薄的试样，以便将热损失校正最小化；然而，试样应当总是具有足够代表被测材料的厚度。典型的厚度范围是 1~6mm。由于热扩散系数与厚度的平方成比例，因此，在不同温度范围采用不同厚度可能是值得做的。同一厚度既用于低温下又用于高温下测量，一般说来是远离最佳的。

8.2 所选择的厚度不适当将不仅产生不必要的实验挫折，而且也可能是测量中的一个主要误差源。作为一个指导方针是，可以先用 2~3mm 厚的试样试验，然后在根据温谱图所得信息的基础上变化厚度测试（过度厚的试样完全可能压制信号）。

8.3 试样必须制备得端面平坦和在厚度的 0.5% 内是平行的，表面不均匀（坑洼，刮擦痕，斑纹）是不能接受的，因为这些将严重影响数据。

9 校正和验证

9.1 校正用于测量试样厚度的测微计，使厚度测量精度达到

0.2%以内。

9.2 光闪射法因其本身是一种绝对（直接）方法，因此它不要求校正。然而，测量的实际执行本身是有随机和系统误差的，因此，检验装置的性能是重要的，以便确定这些误差可能影响所产生的数据的程度。这可伴随测试一种或几种已知热扩散系数的材料而行。多数所应用的材料并非被证明是标准的，但由于有最好可采用的文献值，它们一般在工业范围是被接受的（见附录 X3）。

9.2.1 必须强调指出，应用参比材料去确定未知材料数据的有效性，已常常导致对精确度的无正当理由的叙述。只有在参比的性能（包括时间半值和热扩散系数值）与未知材料的很近似，以及参比和未知材料的温升曲线用同一方式测定的时候，参比的应用才是有效的。

9.2.2 当施加校正时，（除了与理论模型比较温升曲线之外）数据有效性的一个重要检验是变化试样的厚度。既然时间半值随 L^2 变化，那么减小试样厚度的一半，时间半值应当减小为原有值的 $1/4$ 。因此，如果人们用厚度明显不同的相同材料的、有代表性的试样得到相同的热扩散系数值，则结果可以保证是有效的。

10 测试程序

注 1——这是很实用的，即在执行测试之前，将很薄的均匀石墨或其他高辐射能力的涂料施加在待测试样的两个表面上。可用喷雾、涂刷、喷镀等施加涂料。这将提供试样吸收所施加的能的能力，尤其

是在高反射材料的情况下。

10.1 对于商业生产的系统，遵循制造者的用法说明。

10.2 任何系统，或者通过设计，或者通过调整程序，都必须保证下列：

10.2.1 当试样适当地**放在固定器** (mounted in holder) 上时，检查试样与用能束的同心度。

10.2.2 检查孔 (aperture) 和用能束覆盖在试样上。

10.2.3 **检测器的永久调整特点** (permanent alignment features)，或者适当调整检测器对准试样背面中心。

10.2.4 **在激光情况下的安全性互锁** (safety interlocks)，以便阻止激光束直接跑逸或在其中反射。

10.3 测试程序必须包含下列功能：

10.3.1 测定和记录试样厚度。

10.3.2 **将试样安放在它的固定器中** (in its holder)。

10.3.3 如果需要，在试样室设立真空或内部气体氛围。

10.3.4 除非系统将自动做，否则必须测定试样的温度。

10.3.5 特别是在低温下，使用能脉冲的最低功率水平也能够产生可测量的温升，以便保证检测器功能在它的线性范围内。

10.3.6 在脉冲传输后，监控未加工的或过程的温谱图以便确立范围内的性能。在多试样测试情况下，在做重复实验之前在相同的温度连续而按顺序地测试试样是可取的。

10.3.7 在所有情况下，在测试一个试样之前或期间，不论是人

工还是自动测试，都必须检验温度的稳定性在规定之内。不推荐在滑道上测试 (testing on a ramp)。

10.3.8 测定试样的环境温度和收集基线、瞬时温升和冷却数据，并按照第 11 条分析结果。

10.3.9 变化或按程序改变如所希望的环境温度，重复数据收集过程以便获得每个温度的测量。

10.3.10 如果需要，对试样的冷却或它的再加热，在相同的周期重复每个温度的测量。

11. 计算

11.1 首先确定基线和最大温升，以便给出温差 ΔT_{\max} 。确定从脉冲开始到背面温度达到 $\Delta T_{1/2}$ 所要求的时间，这就是时间半值 $t_{1/2}$ 。由试样厚度 L (m) 和时间半值 $t_{1/2}$ (s) 按下式计算热扩散系数 α ：

$$\alpha = 0.13879L^2/t_{1/2} \quad (2)$$

通过计算其他两个在温升曲线上的点的最小值检验实验的有效性，计算式如下：

$$\alpha = k_x L^2/t_x \quad (3)$$

式中： t_x = 温度升至 ΔT_{\max} 的 $x\%$ 所要求的时间。 k_x 值在表 1 中给出。

11.1.1 对不同 x 值所计算的 α 值实际上应当都是相同的。如果在 25、50 和 75% 的 ΔT_{\max} 的值在 $\pm 2\%$ 以内，则在时间半值的大体精度也许在 $\pm 5\%$ 内。假如 α 值在这个范围之外，那么应当分析响应曲线，进一步看是否有限脉冲时间、辐射热损失或不均匀加热效应存在。

表 1 不同百分比温升的常数 k_x 值

X (%)	k_x	X (%)	k_x
10	0.066108	60	0.162236
20	0.064251	66.67	0.181067
25	0.092725	70	0.191874
30	0.101213	75	0.210493
33.33	0.106976	80	0.233200
40	0.118960	90	0.303520
50

11.1.2 温度的辐射热损失效应的最实际确定，是用试样的温度和 $4 t_{1/2}$ 之后的背面温度响应测定的。推荐的方法是将 $\Delta T/\Delta T_{\max}$ 的实验值对 $t/t_{1/2}$ 和理论模型值一道作图。一些理论模型数值在表 2 中给出。

表 2 归一化温度值对理论模型时间

$\Delta T/\Delta T_{\max}$	$t/t_{1/2}$	$\Delta T/\Delta T_{\max}$	$t/t_{1/2}$
0	0	0.7555	1.5331
0.0117	0.2920	0.7787	1.6061
0.1248	0.5110	0.7997	1.6791
0.1814	0.5840	0.8187	1.7521

0.2409	0.6570	0.8359	1.8251
0.3006	0.7300	0.8515	1.8961
0.3587	0.8030	0.8656	1.9711
0.4140	0.8760	0.8900	2.1171
0.4660	0.9490	0.9099	2.261
0.5000	1.000	0.9262	2.4091
0.5587	1.0951	0.9454	2.6281
0.5995	1.1681	0.9696	2.9931
0.6369	1.2411	0.9865	2.6502
0.6709	1.3141	0.9950	4.3802
0.7019	1.3871	0.9982	5.1102
0.7300	1.4601

11.1.3 可以用下列方法制作的实验值和理论模型值的图线：基于计算机的数据采集系统在线制作；应用已列表的 $\Delta T/\Delta T_{\max}$ 和 $t/t_{1/2}$ 制作图线，和用在几个温升的百分比的相应实验数据。所有的归一化的实验曲线都必须通过点（ $\Delta T/\Delta T_{\max}=0.5$ ， $t/t_{1/2}=1.0$ ）。因此，要求包括25~35%和66.67~80%范围的计算，以便实验数据与理论曲线比较。

11.1.4 实验的归一化作图的例子分别显示在图3、图4和图5中，图3是接近理想情况的实验例，图4是具有有限脉冲时间的实验例，图5是具有辐射热损失的实验例。校正这些效应的各种方法也在

参考文献给出 (4, 15, 16, 17, 18, 19, 25, 26), 特别的例子在 11.2 和 11.3 给出。通过试样厚度的适当选择可以将校正最小化。有限脉冲时间效应随厚度的增大而减小, 而热损失随厚度的减小而减小。

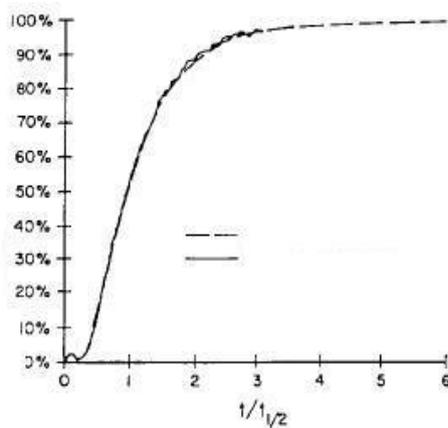


图 3 与数学模型比较的无量纲温度响应

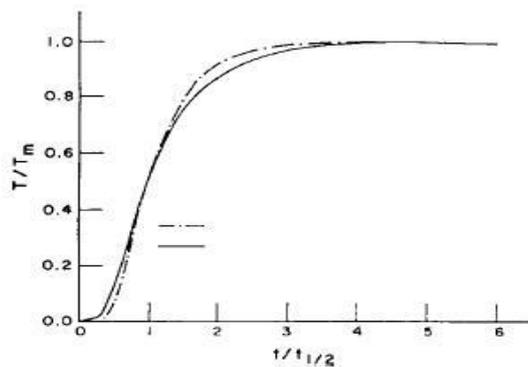


图 4 归一化的背面温升: 数学模型 (没有有限脉冲时间效应) 与具有有限脉冲时间的实验值比较

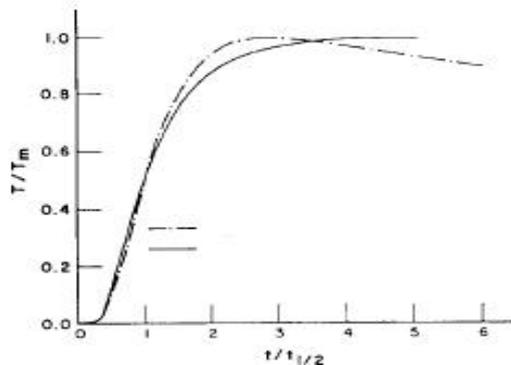


图 5 归一化的背面温升：数学模型（没有热损失）与具有辐射热损失的实验值比较

11.1.5 由于二维热流，不均匀加热效应也产生被减小的实验曲线的偏离模型的偏差。既然有不均匀加热的变数，便有偏差的变化。**热中心**（hot center）情况接近辐射热损失。**冷中心**（cold center）情况造成背面温升在 $4 t_{1/2}$ 之后连续明显升高。不均匀加热可以由能脉冲的本性或由对试样的前面的不均匀吸收引发，前者必须通过改变能源来减小，而后者可以通过添加**吸收层**（an absorbing layer）和应用**二层数学**（two-layer mathematics）（4，13）来减小。

11.2 有限脉冲时间效应通常可应用下式加以校正：

$$\alpha = K_1 L^2 / (K_2 t_x - \tau)$$

(4)

可用如图 6 所示的持续时间 τ 和最大强度 β 的时间的三角形代表能脉冲，对此是有效的。在应用光学检测器对着闪射灯脉冲时，激光能脉冲的脉冲形状应当可以确定，由此得到脉冲形状 β 和 τ 。用于

校正 $\alpha_{0.5}$ 的两个常数 K_1 和 K_2 的数值(在不同 β 值下)在表 3 中给出。

表 3 有限脉冲时间系数

β	K_1	K_2
0.15	0.34844	2.5106
0.28	0.31550	2.2730
0.29	0.31110	2.2454
0.30	0.30648	2.2375
0.50	0.27057	1.9496

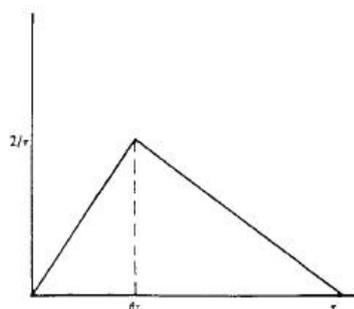


图 6 激光脉冲形状

11.3 热损失校正应当以应用 Clark 与 Taylor 的温升曲线数据 (25) 和 Cowan 的冷却曲线数据 (26) 为基础。这些校正是受不均匀加热效应影响的。除了从表面的辐射损失外, 冷却曲线校正还受向固定器 (the holders) 传导的损失影响。因此, 校正过程 (the correction procedure 方法?) 的误差是受不同现象影响的, 在确定这

些现象是否存在时，用这两种过程校正的热扩散系数的比较是有用的。

11.3.1 为了应用 Cowan 的冷却曲线校正，需确定在 5 和 10 倍实验的时间半值时的净温升时间对时间半值的净温升 (the net rise) 时间的比例，这些比例记做 Δt_5 和 Δt_{10} 。如果没有热损失，则 $\Delta t_5 = \Delta t_{10} = 2.0$ 。在 5 和 10 倍时间半值的情况下，校正因子 (K_c) 是从多项式拟合计算的：

$$K_c = A + B(\Delta t)^2 + C(\Delta t)^3 + D(\Delta t)^4 + E(\Delta t)^5 + F(\Delta t)^6 + G(\Delta t)^7 + H(\Delta t)^8 \quad (5)$$

式中：系数 A~H 的值在表 4 中给出。

热扩散系数校正用下列关系式计算：

$$\alpha_{\text{校正}} = \alpha_{0.5} K_c / 0.13885 \quad (6)$$

式中： $\alpha_{0.5}$ = 应用实验时间半值计算的未校正的热扩散系数值。

11.3.2 以 Clark 与 Taylor 的温升曲线数据为基础的热损失校正也应用比例技术 (24)。对于 $t_{0.75}/t_{0.25}$ ，也就是达到最大值的 75% 的时间除以达到最大值的 25% 的时间，其理想值是 2.272；由实验数据确定这个比例，然后由式 (7) 计算校正因子 K_R ：

$$K_R = -0.3461467 + 0.361578 (t_{0.75}/t_{0.25}) - 0.06520543 (t_{0.75}/t_{0.25})^2 \quad (7)$$

表 4 Cowan 校正的系数

系数	5 倍时间半值	10 倍时间半值
A	-0.1037162	0.054825246
B	1.239040	0.16697761
C	-3.974433	-0.28603437
D	6.888738	0.28356337
E	-6.804883	-0.13403286
F	3.856663	0.0240277586
G	-1.167799	0.0
H	0.1465332	0.0

在时间半值的热扩散系数校正值是 $\alpha_{\text{校正}} = \alpha_{0.5K_R} / 0.13885$ 。以许多其他比例为基础的校正也是可应用的。

12. 报告

12.1 报告最少应包含下列信息：

12.1.1 试样（材料）的识别和以前的历史；

12.1.2 试样厚度（m）；

12.1.3 温度（℃）；

12.1.4 在 $x=50\%$ 时、在所报告的温度的热扩散系数计算值，

m^2/s ；

12.1.5 有关接近 $x=25$ ，75% 以及 50% 时的计算值的陈述，或者简化的实验曲线 (the reduced experimental curve) 在每个温度下与模型比较；

12.1.6 有关在每个温度的重复测量结果的陈述；

12.1.7 陈述是否做了对热膨胀的数据校正；如果做了这种校正，必须报告所用的热膨胀值；

12.1.8 误差和用于热损失、有限脉冲时间效应校正方法的讨论；

12.1.9 围绕试样的环境；

12.1.10 与本标准要求的一致性的陈述。

12.2 此外，对报告是有益的：

12.2.1 指出检测器的响应时间，包括联合的电器 (the associated electronics) 的适当检查及其采用的方法；

12.2.2 能脉冲源；

12.2.3 能束不均匀性检查或所施加的方法的陈述；

12.2.4 温升检测器的类型。

13. 精确度和偏差

13.1 大量国家和国际?? (round robins) 已显示对大量材料的热扩散系数可得到 $\pm 5\%$ 的测量精度。在一份关于使用 ASTM 文件的独立报告中已详述这些程序的几种的结果。对于不透明材料未观测到偏差 (No evidence of bias has been noted for opaque

materials)。应用简单的数据采集和分析得到一般数值，而已显示——应用更精致的数据采集和数据分析可以提供有意义的精度。

13.2 上面的精度水平并不意味着试样的比热容和导热系数从热扩散系数测量可以推导相同的水平，因为这样的推论需要其他参数的输入值。

14. 关键词

14.1 光闪射法 (flash method); 红外检测器 (infrared detectors); 热电偶 (intrinsic thermocouples); POCO 石墨 (POCO graphite); 比热容 (specific heat capacity); 导热系数 (thermal conductivity); 热扩散系数 (thermal diffusivity); 瞬态温度测量 (transient temperature measurement)

附录

(非强制性信息)

X1. 测试不理想的试样

这一方法原先用于均匀不透明固体，现被发展，在适当的条件下可扩展到广泛的材料和场合，这包括疏散的复合材料 (6)、层状结构透明材料 (7, 8)、液体和涂料 (9, 10) 等不均相试样以及接触传导

和阻力的测量（11，12）。

X1.1 半透明或透明的试样必须做成对能脉冲是不透明的，做法是通过将很薄的、诸如金属薄膜的不透明材料的连续层沉积在两表面上。这样做，必须细心选择材料——将能承受试样将遭遇的温度和不因极不相同的热膨胀系数而产生裂纹和剥离。裂纹层将容许脉冲部分地渗透进试样的内部，将歪曲背面温度谱图；而剥离的涂料将产生局部加热、过分变薄和有意义的信号经常全部消失。

X1.1.1 最常用的涂料是黄金、铂、铝、镍和银。

X1.1.2 粉末薄喷涂层，诸如石墨，它自身通常不足以阻止能。

X1.1.3 高辐射率的涂料，例如金和铂，需要在试样的两表面上的石墨第二涂层，以便保证能脉冲在表面上将被吸收。

X1.2 用本方法测试液体和熔化材料是有优点的，因为试验进行的速度排除了对流传热。试样正常地封在这样的容器中，它具有在整个试验期间保持已知样品的厚度的能力，允许加热时过多的液体溢出，传输能脉冲到前面以及来自背面的温度信号具有最小的衰减。

X1.2.1 当可以使用透明顶窗和底窗成为密封舱时，液体试样将被假设为固体那样估算。

X1.2.2 当由于温度极限或材料相互作用而透明窗不可行时，合适的不透明材料将代之使用。在这种情况下，分析遵循 3 层计算。

X1.3 当热扩散系数与总厚度的比率 (the ratios of thermal diffusivity and the overall thickness) 在仪器的操作极限之内, 试验多层试样在多数情况下是可能的。这些情况 (6, 7) 的分析也包含必要的热损失和修正结论, 没有这些分析则用途变小。

X2. 热电偶型检测器

在一定条件下采用热电偶作信号检测是有优点的。在使用光学传感器是不实际的情况中, 诸如接近和在环境温度以下, 最经常地应用热电偶。有两种用法: 本体热电偶和焊珠点热电偶。

X2.1 对于本体热电偶, 它的两条线 (两条腿) 不是用焊珠点形式连结在一起, 而是分别独自做成与样品接触, 因而样品本身是电路的部分。对于两条线, 热电的 EMF (热电势) 在接触点产生。由于这些接触点不在样品的表面, 所以热电偶的净 EMF 紧密地反映表面温度。

X2.1.1 本体热电偶只能应用于导电性样品或用很薄导电层覆盖 (真空沉积金属, 导电涂料, 等等) 的非导电性样品。热电偶线常常做成尖锐的针, 然后对着样品或导电层被压。

X2.1.2 在本方法中, 术语“热电偶”也包括与传统的热电偶合金相比有不同形式的热电偶材料, 例如半导体, 它们能够提供足够的热电 EMF 可应用。

X2.2 在使用本体热电偶不实际时，有时应用焊珠点热电偶。在这些情况中，必须特别细心操作以便保证焊珠点热电偶真实反映样品背面的响应。

X2.3 本体热电偶优于焊珠点热电偶，是首选。

X2.4 热电偶材料不需要校正，因为所测量的信号绝对大小在热扩散系数计算中无实质意义。

X2.5 在热电偶条件下，响应时间（达到稳态值的 95% 的时间）可如下式定义（20）：

$$t_{95} = \frac{25}{\pi} \cdot \frac{D_T^2}{\alpha_s} \cdot \frac{\lambda_T}{\lambda_s}$$

(X2.1)

因此，低导热系数材料的小直径热电偶贴系在高导热系数和高热扩散系数材料的样品上，便产生最快速的响应时间。在可以假设热电偶响应是平滑上升的情况中（in that it can ……），式 X2.1 是误导的。响应事实上是阶跃式变化的，随后幂升到最终值。式 X2.2 是这种行为的最好描述：

$$\frac{T_t - T_0}{T_\infty - T_0} = 1 - (t - a) \cdot e^{-a^2} \cdot t^* \cdot E_r f_c(a \cdot t^*)$$

(X2.2)

式中： T_∞ 和 T_0 如图 X2.1 所示。 t^* ($t^* = 4 \alpha t / D_T^2$) 是无量纲时间。 a 用 $1 / (1 + 0.667 \lambda_T / \lambda_s)$ 逼近。为了得到最快速的响应，应当使用附压在高导热系数物质中的具有低导热系数的小直径合金热电偶线。例如，在铜底基上的 $25 \mu\text{m}$ 康铜线要求 $3 \mu\text{s}$ 达到稳态的 95%。然而，对于这个例子的逆反，例如，在康铜底基上的 $25 \mu\text{m}$ 铜线，发现达到稳态的 95% 需要 15ms, 比第一个例子缓慢 5000 倍。因此，应用热电偶时，基于材料热性质和几何选择适当的热电

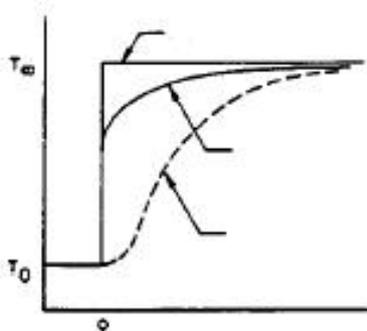


图 X2.1 热电偶响应特性

偶对瞬时响应的正确测量是必要的 (21)。

式 X2.1 和 X2.2 与热电偶可能的最小响应时间有关。热电偶的适当压贴是重要的，如果热电偶比较差地压贴到样品，则有效响应时间长得多。电导材料首选方法是点焊本体热电偶，即不是焊珠点热电偶，两条线独自压贴到样品，分开 1mm。对于电绝缘体，在点焊不是可行得地方，对着背面 **弹簧式加载** 热电偶 (spring-load the

thermocouple) 是有可能的。对于具有低热扩散系数的材料, 将热电偶点焊进高导热系数的金属薄片, 并弹簧式加载或粘贴这一金属片到样品, 这可能是首选。金属-环氧和石墨膏已成功地将各层粘结在一起。这消除了使用相对高热扩散系数的热电偶测量低导热系数材料样品的问题——可能导致很大的响应时间的问题 (见式 X2.1)。

X3. 参比材料

本标准发布的时候, 国家标准与技术研究院 (NIST-the National Institute of Standard and Technology) 还没有可应用的热扩散系数的标准参比材料 (SRM- Standard Reference Materials), 别的研究院所和海外也还没有可采用的参比。然而, 在文献中, 在工业接受的已用于查验用途的大量的参比材料上, 大量的数据是可采用的。

X3.1 热扩散系数的标准参比材料 (SRM) ——人们可以考虑有关标准, 例如导热系数的标准参比材料 (SRM) 的应用, 用于推导热扩散系数值。目前可采用:

X3.1.1 电解铁(分析材料 8420 和 8421——Research Material 8420 and 8421) . 它与 Armco 铁(阿姆科铁)很相似, 经常用于试验又不再制造。因此, 文献数据是完全可用的 (22, 23), 而且, 使用在附录 X4 中描述的方法计算这种材料的热扩散系数是十分合适的。

X3.1.2 POCO AXM-5QA 石墨（分析材料 8424、8425 和 8426）。虽然这种材料很广泛应用，但是用它需要极谨慎。因为用来切取 SRM 片的母块有的材料易变性（密度和电阻），所以热性能的大偏差同样存在。由于这一原因，伴随每片的数据在使用之前必须被改善。此外，这种材料的热扩散系数的温度依赖性，在接近周围环境时很明显，因此，它在这一区段的用途是可疑的。（样品温度的很小误差将导致热扩散系数的不相称的大变化。）

X3.2 已被研究的其他材料是：OFHC 铜, HP 铜, Pyroceram（耐高温陶瓷）, HP 铝, 镍和玻璃碳。有价值的总结和在文献中发现的热扩散系数值的数据银行，对宽广范围的材料提供推荐值，它们也是可采用的（24）。（译者注：Pyroceram——耐高温陶瓷，一种白色不透明的微晶玻璃）

X3.3 必须强调指出，应用参比材料去建立对未知材料的数据的有效性，已常常导致无根据的精度陈述。只有在参比的性能（包括半值时间和热扩散系数）与未知的近似，以及参比与未知的温升曲线是用同一方式测定的时候，参比的应用才是有效的。

X4. 比热容的测量和导热系数的计算

X4.1 在热扩散系数（ α ）、导热系数（ λ ）、比热容（ C_p ）和密度（ ρ ）之间的基本关系是

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}$$

(X4.1)

很需要允许使用已知的其他性能计算导热系数。已开发了一种测定方法，即是当以定性方式进行热扩散系数试验时，便可测定比热容。虽然这是吸引人的本方法的扩展，但是人们在执行中必须极小心操作，因为这也是误差很多的时候。在普通热扩散系数试验过程，能的量只对足以产生背面信号程度是重要的。对于在量热式中的操作，能水平必须知其是接近的、可控制和可重复的。在近似绝热条件下，很幸运，当试验已知比热容的试样之时，激光脉冲和检测器可校正到完全符合。测量将产生热扩散系数和以所达到的温度最大值的绝对值表示的有关能的测量。相对于人们用标准得到的，在这种“校正”之后测试未知试样，从它达到的温度最大值可计算比热容。为了这种过程是有效的，有几种必须满足的条件：

X4.1.1 能源必须能够在规定参数的功率（例如激光负荷的电压）基础上在整个时间周期再生能脉冲。

X4.1.2 检测器在整个时间周期必须保持它的灵敏性，没有漂移、增益变化和处于线性响应范围内。

X4.1.3 参比样品与未知试样在大小、性质、热辐射率和不透明性必须很近似，以便以相同程度逼近绝热行为。参比样品和未知试样应当涂上薄均匀石墨层，以便保证两种材料的热辐射能力是相同的。

X4.1.4 由于式 X4.1 只应用于这些材料，参比样品与未知试样必须是均匀和各向同性。非同性均匀和各向异性材料将常常产生错误数据。因为最大温升是从由具有高热扩散系数的成分提供的信号推导的，所以这种方法并非纯量热的。内部平衡在指出的时间之后可能发生。由于这个原因，对于具有大的各向异性材料（具有有序方向结构的典型复合物）和具有大不相同的热扩散系数的成分混合物，这种方法倾向于给出错误的比热容结果。

X4.1.5 参比样品与未知试样必须相互很接近地被测试，既指时间的短时（大概只相隔几分钟）也指热条件相同（严格相同的温度，相同的环境）。

X4.1.6 这种方法的验证是这样做：使用同样的如同用于校正一样的未知样品，用如同试验正常进行一样的严格时间间隔。相同的试验必须应用 3 种不同的厚度。来自这 3 种试验的每个温度的组合数据给予包含精度的良好测量。

X4.1.7 这是与差别有关的测量，具有“肩并肩”一起被测试的参比和未知两者以及在中间只有很小时间间隔，是很令人想要的。测试标准/样品/标准以便将由于脉冲能的变化误差减为最小，也是令人想要的。

X4.2 样品的密度可以从称重测量结果和计算的体积计算。应用热膨胀数据从室温密度计算每个温度的密度是正确的。详细情况请参考 ASTM E 228。

X4.3 根据热扩散系数、比热容和密度的测量值，应用式 (X4.1) 可计算导热系数。

X4.3.1 在应用比热容的测量值时，列在 X4.1.1~X4.1.7 下的约束也加到结果的导热系数。

X4.3.2 应用从不同于上文的测量的其他来源的比热容和密度数据是可允许的。

X4.4 报告用这种方法得到的比热容或热扩散系数，必须随之有：

X4.4.1 如在 X4.1.6 中给出的测定精度的陈述；

X4.4.2 在校正和试验脉冲之间消逝的时间；

X4.4.3 所用的校正样品。

X5. 理论

X5.1 理想情况——脉冲法的物理模型是在绝热材料平板的热行为上发现的，起初处于恒温的平板的一侧承受能的短脉冲。模型假设为：

一维热流；

平板的表面没有热损失；

在前表面均匀的脉冲吸收；

无限小的短脉冲持续期；
 在一很薄层的脉冲能吸收；
 平板材料均匀和各向同性；
 在实验条件内不随温度变化的性能恒定性。

在推导用以计算热扩散系数的数学表达式中，Parker (1) 从在具有均匀厚度 L 的热绝缘固体内的温度分布出发，如 Carslaw 和 Jaeger (27) 所给出的：

$$T(x,t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(x,0) dx + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \cdot \cos \frac{n\pi x}{L} \int_0^L T(x,0) \cos \frac{n\pi x}{L} dx$$

(X5.1)

式中， α 是材料的热扩散系数。如果辐射能的脉冲 Q 在前表面 $x=0$ 处在小厚度 g 中被瞬时和均匀吸收，在那瞬时的温度分布由下列的式子给出：

$$T(x,0) = \frac{Q}{\rho \cdot C \cdot g} \quad \text{当 } 0 < x < g \text{ 时}$$

(X5.2)

和

$$T(x,0) = 0 \quad \text{当 } g < x < L \text{ 时}$$

(X5.3)

用这一初始条件代入式 (X5.1)，式 (X5.1) 可变为

$$T(x,t) = \frac{Q}{\rho CL} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{L} \left(\frac{\sin \frac{n\pi g}{L}}{\frac{n\pi g}{L}} \right) \cdot \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2} \right) \right]$$

(X5.4)

式中， ρ 是材料的密度， C 是材料的比热容。由于 g 是不透明材料的一个微小量，所以

$$\sin \frac{n\pi g}{L} \approx \frac{n\pi g}{L}$$

(X5.5)

因此，在这一应用中，只有少数几项是需要的。

背面是 $x=L$ 处，温度历程可用下式表达：

$$T(L,t) = \frac{Q}{\rho CL} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2} \right) \right]$$

(X5.6)

两个无量纲的参数 v 和 ω 可以定义为

$$V(L,t) = \frac{T(L,t)}{T_M}$$

(X5.7)

$$\omega = \frac{\pi^2 \alpha t}{L^2}$$

(X5.8)

T_M 代表背面最高温度。式 (X5.6) ~ (X5.8) 组合便产生:

$$V = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp(-n^2 \omega)$$

(X5.9)

当 $V=0.5$, $\omega = 1.38$ 时,

$$\alpha = \frac{1.38 \cdot L^2}{\pi^2 t_{\frac{1}{2}}}$$

(X5.10)

或:

$$\alpha = 0.1388 \frac{L^2}{t_{\frac{1}{2}}}$$

(X5.11)

式中 $t_{1/2}$ 是要求背面达到最大温升的一半所需要的时间。脉冲实验示意地表示在图 X5.1 中。

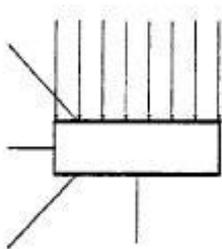


图 X5.1 光闪射法示意图

作为一个结果，创生了背面的特征温谱图（图 X5.2）。

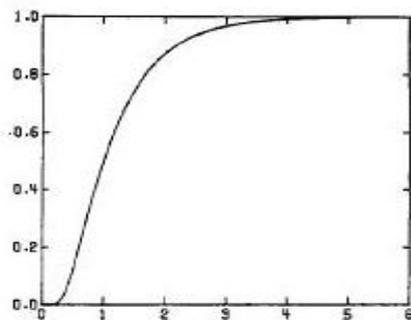


图 X5.2 脉冲法的特征温谱图

X5.2 非理想情况——实验期间，在接近这些假设的每一项在某种程度被违犯的时候，Parker 的解的不足几乎立即变得明显。于是，研究者渐渐地引进描述真实过程的不同理论和描述在违犯每种边界条件时校正计算的解。完美的校正应当包含所有存在的因素，但时至今日，还没有这样的总校正被发展，计算偏差的单一或成双的校正代之被引进。结果是——在应用这些校正之后，人们可以以一系列实质上可变化的数字结束。像历史上的那样，每位研究者在假设理想度和别的稳定性时，已聚焦于一个或另一个对理想模型的偏离，这是可理解的。这是由它们自身造成的原理的本质不足，因为所有参数实际上并发地、以被特别的实验条件规定的程度改变。有些情况，例如有长脉冲，可以加重一种条件；其他的可以引进别的偏差，例如由于使用强大的脉冲，造成前面的过分热损失，等等。因此，在与所分析的实验

条件协调中选择最适当的校正是研究者的责任。

例如，当测试高热扩散系数的薄试样时，有限的脉冲宽度效应严重出现（2，18，19，28，29）；而在测试厚试样时，辐射的热损失在高温变得占优势（25）。不均匀加热在任意热扩散系数实验期间都可出现（30）。当比试样小的圆表面自身被照射，或脉冲的通量密度在试样的整个表面上逐点变化时，这可能出现。对于同样的吸收能量，在试样的背面中心生成的温谱图的无量纲最大时间的一半，相当不同于由于均匀照射得到的。这种影响可通过增大试样的厚度和它的半径的比例而减小。相同的结果也能够实现，就是通过应用一个能把从试样背面得到的信号自动积分的温度测量系统。

选择最好的校正是很艰难的任务，已知的关于设备和试验参数的信息常常不足以致要谨慎地做。原则上，人们必须返回原来的假定：数据的精度取决于数学模型和实验模型之间的一致。对计算失常的实验数据施加校正的好处是使它与理想的解比较紧密吻合。因而，人们可以按照这些年发展的各种策划执行一系列校正，然后在联系理想的解中研究结果。

参考文献



中国热管理网
WWW.REGUANLI.COM

- (1) Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P., and Abbott, G. L., "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity Heat Capacity and Thermal Conductivity," *J. Appl. Phys.*, 32, Vol 9, 1979 (1961).
- (2) Watt, D. A., "Theory of Thermal Diffusivity of Pulse Technique," *Br. J. Apply. Phys.*, 17, Vol 231, 1966.
- (3) Righini, F., and Cezairliyan, A., "Pulse Method of Thermal Diffusivity Measurements. A Review," *High Temperature—High Pressures*, 5, 1973, pp. 481–501.
- (4) Taylor, R. E., "Heat Pulse Diffusivity Measurements," *High Temperatures*, 11, Vol 43, 1979.
- (5) Taylor, R. E., "Critical Evaluation of Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity," *Rev. Int. Htes. Temp. et Refract.*, 12, 1975, pp. 141–145.
- (6) Lee, T. Y. R., and Taylor, R. E., "Thermal Diffusivity of Dispersed English Translation: *High Temperatures—High Pressures*, 11(4), 744–8, 1973.
- (11) Begej, S., Garnier, J. E., Desjarlais, A. O., and Tye, R. P., "Determination of Thermal Gap Conductance Between Uranium Dioxide; Zircaloy-4 Interfaces," *Thermal Conductivity 16*, Larsen, D. C., Ed., Plenum Press, NY, 1983 pp. 211–219.
- (12) Begej, S., Garnier, J. E., Desjarlais, A. O., and Tye, R. P., "Ex-Reactor Determination of Thermal Contact Conductance Between Uranium Dioxide Zircaloy-4 Interfaces," *Thermal Conductivity 16*, Larsen, D. C., Ed., Plenum Press, NY, 1983, pp. 221–232.
- (13) Larson, K. B., and Koyama, K., "Measurement of Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity in Two-Layer Composite Samples by the Flash Method," in Proceedings 5th Thermal Conductivity Conference, University of Denver, Denver, CO, 1965, pp. 1-B-1 to 1-B-24.
- (14) Taylor, R. E., "Critical Evaluation of Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity," Report PRF-6764. Available from National Science Technical Information Service, Springfield, VA 22151, 1973.
- (15) Heckman, R. C., "Error Analysis of the Flash Thermal Diffusivity Technique," *Thermal Conductivity 14*, Klemens, P. G., and Chu, T. K., Eds. Plenum Publishing Corp., NY, 1974, pp. 491–498.
- (16) Sweet, J. N., "Effect of Experimental Variables on Flash Thermal Diffusivity Data Analysis," *Thermal Conductivity 20*, Hasselman, D. P. H., Ed., Plenum Publishing Corp., NY (in press). See also Sweet, J. N., "Data Analysis Methods for Flash Diffusivity Experiments," Sandia National Laboratory Report SAND 89-0260, (Available from NTIS), February, 1989.
- (17) Cape, J. A., and Lehman, G. W., "Temperature and Finite Pulse-Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity," *J. Appl. Phys.*, 34, Vol 1909, 1963.
- (18) Taylor, R. E., and Clark, III, L. M., "Finite Pulse Time Effects in Flash Diffusivity Method," *High Temperature—High Pressure*, 6, Vol 65, 1974.
- (19) Larson, K. B., and Koyama, K., "Correction for Finite Pulse-Time Materials," *Journal of Heat Transfer*, 100, Nov. 1978, pp. 720–724.
- (7) Lee, H. J., and Taylor, R. E., "Determination of Thermophysical Properties of Layered Composites by Flash Method," *Thermal Conductivity 14*, Klemens, P. G., and Chu, T. K., Eds. Plenum Publishing Corp., NY, 1974, pp. 423–434.
- (8) Taylor, R. E., Lee, T. Y. R., and Donaldson, A. B., "Thermal Diffusivity of Layered Composites," *Thermal Conductivity 15*, Mirkovich, V. V., ed., Plenum Publishing Corp., NY, 1978, pp. 135–148.
- (9) Goldner, F., Thesis, "A Microtransient Technique for the Determination of Fluid Thermal Diffusivities," The Catholic University of America, Washington, DC, No. 70-22, p. 142.
- (10) Chistyakov, V. I., "Pulse Method of Determining the Thermal Conductivity of Coatings," *Teplofiz. Vys. Tempe.*, 11(4), 832, 1976; Effects in Very Thin Samples Using the Flash Method of Measuring Thermal Diffusivity," *J. Appl. Phys.*, 38, Vol 465, 1967.
- (20) Henning, C. D., and Parker, R., "Transient Response of an Intrinsic Thermocouple," *J. Heat Transfer, Transactions of ASME*, 39, Vol 146, 1967.
- (21) Heckman, R. C., "Intrinsic Thermocouples in Thermal Diffusivity Experiments," Proceedings Seventh Symposium on Thermophysical Properties (Cezairliyan, A., Ed.), ASME, NY, 159, 1977.
- (22) Minges, M., "Analysis of Thermal and Electrical Energy Transport in POCO AXM-5Q1 Graphite," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 20, Vol 1161, 1977.
- (23) Taylor, R. E., and Groot, H., "Thermophysical Properties of POCO Graphite," *High Temperature—High Pressures*, 12, 147–60, 1980.
- (24) Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y., and Nicolaou, M., "Thermal Diffusivity," *Thermophysical Properties of Matter*, Vol 10, IFI/Plenum, NY, 1973.
- (25) Clark, L. M., III, and Taylor, R. E., "Radiation Loss in the Flash Method for Thermal Diffusivity," *J. Appl. Phys.*, 46, Vol 714, 1975.
- (26) Cowan, R. D., "Pulse Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperatures," *J. Appl. Phys.*, 34, Vol 926, 1963.
- (27) Carslaw H. S., and Jaeger, J. C., *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London, 1959.
- (28) Taylor, R. E. and Cape, J. A., "Finite Pulse-Time Effects in the Flash Diffusivity Technique," *Appl. Phys. Lett.*, 5 (10), 1964, p. 210.
- (29) Azumi, T. and Takahashi, Y., "Novel Finite Pulse-Width Correction in Flash Thermal Diffusivity Measurement," *Rev. Sci. Instrum.*, 52 (9), 1981, p. 1411.
- (30) Mackay, J. A. and Schriempf, J. T., "Corrections for Nonuniform Surface Heating Errors in Flash-Method Thermal Diffusivity Measurements," *J. Appl. Phys.*, 47, 1976, p. 1668.
- (31) Taylor, B. N., Kuyatt, C. E., "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurements Results," NIST Technical Note 1297, Gaithersburg, MD, 1994.

参考书目

- (1) Koski, J. A., "Improved Data Reduction Method for Laser Pulse Diffusivity Determination with the Use of Minicomputers," in *Proceedings of the 8th Symposium on Thermophysical Properties*, 2, The American Society of Mechanical Engineers, p. 94, New York (1981).
- (2) Degiovanni, A., "Correction de longueur d'impulsion pour la mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31 (3), p. 2199 (1988).
- (3) Thermitus, M. A. and Gaal, P. S., "Specific Heat Measurement in a Multisample Environment with the Laser Flash Method," in *Proceedings of the 24th International Thermal Conductivity Conference*, P. S. Gaal and D. E. Apostolescu eds., Technomic Publishing Co., Lancaster (1999).
- (4) Thermitus, M. A. and Gaal, P. S., "Specific Heat Capacity of Some Selected Materials with the Laser Flash Method," in *Proceedings of the 25th International Thermal Conductivity Conference*, C. Uher and D. Morelli eds., Technomic Publishing Co., Lancaster, p. 340 (2000).
- (5) Taylor, R. E., "Thermal Diffusivity of Composites," in *High Temperatures - High Pressures*, 15, p. 299 (1983).
- (6) Tye, R. P. (ed.), *Thermal Conductivity*, 1, Academic Press, London and New York (1969).
- (7) Larson, K. B. and Koyama, K., "Correction for Finite-Pulse-Time Effects in Very Thin Samples Using the Flash Method of Measurement Thermal Diffusivity," *J. Appl. Phys.* 38, p. 465 (1967).
- (8) Taylor, R. E., "Heat Pulse Diffusivity Measurements," *High Temperatures - High Pressures* 11, p. 43 (1979).
- (9) Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y., and Nicolaou, M. C., *Thermophysical Properties of Matter* 10, Thermal Diffusivity, IFI/Plenum Press, New York and Washington, p. 1609 (1973).
- (10) Taylor, R. E. and Maglic, K. D., "Pulse Method for Thermal Diffusivity Measurement," in *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods*, 1, *Survey of Measurement Techniques*, Plenum Press, New York and London (1984).
- (11) Suliyanti, M. M., Baba, T., and Ono, A., "Thermal Diffusivity Measurements of Pyroceram 9606 by Laser Flash Method," in *Proceedings of the 13th Japan Symposium of Thermophysical Properties*, p. 125 (1992).
- (12) "Standard Reference Materials: A Fine-Grained, Isotropic Graphite for Use as NBS Thermophysical Property RM's from 5 to 2500 K," NBS Special Publication 260-89, Gaithersburg (1984).
- (13) Heckman, R. C., "Error Analysis of the Flash Thermal Diffusivity Technique," in *Proceedings 14th International Thermal Conductivity Conference*, Plenum Press, New York (1976).
- (14) Degiovanni, A., Gery, A., Laurent, M., and Sinicki, G., "Attaque impulsionnelle appliquée à la mesure des résistances de contact et de la diffusivité thermique," *Entropie* 64, p. 35 (1975).
- (15) Wang, H., Dinwiddie, R. B., and Gaal, P. S., "Multiple Station Thermal Diffusivity Instrument," in *Proceedings of the 23rd International Thermal Conductivity Conference*, R. Dinwiddie, R. Graves and K. Wilkes eds., Technomic Publishing Co., Lancaster (1996).
- (16) Hasselman, D. P. H., and Donaldson, K. Y., "Effects of Detector Nonlinearity and Specimen Size on the Apparent Thermal Diffusivity of NIST 8425 Graphite," *Int. J. Thermophys* 11(3), p. 573 (1990).
- (17) Cezairliyan, A., Baba, T., and Taylor, R., "A High-Temperature Laser-Pulse Thermal Diffusivity Apparatus," *Int. J. Thermophys.* 15 (2), p. 317 (1994).
- (18) Baba, T., Cezairliyan, A., "Thermal Diffusivity of POCO AXM-5Q1 Graphite in the Range 1500 to 2500 K Measured by a Laser-Pulse Technique," *Int. J. Thermophys.* 15 (2), p. 343 (1994).
- (19) Beck, J. V., Dinwiddie, R. B., "Parameter Estimation Method for Flash Thermal Diffusivity with Two Different Heat Transfer Coefficients," in *Proceedings of the 23rd International Thermal Conductivity Conference*, R. Dinwiddie, R. Graves, K. Wilkes eds., Technomic Publishing Co., Lancaster p. 107 (1996).
- (20) European Cooperation for Accreditation EA-4/02, "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration," Edition 1, April 1997.
- (21) ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.