

山东建筑大学

硕士学位论文

瞬态平面热源法测试导热系数的研究

姓名：孙亮亮

申请学位级别：硕士

专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：方肇洪

20070501

摘要

导热系数是衡量材料热物理性质的一个重要参数，关系到材料在很多领域内的应用。导热系数的测量理论和测试技术已经成为当今世界各国关心的热点。瞬态平面热源法是一种新的导热系数测试方法，它的优点包括：能够测试的试样种类多，可测试的导热系数范围大，测试时间短，测试精度高和试样制备简单。

本文主要是利用瞬态平面热源法测试材料的导热系数。瞬态平面热源法测定材料导热系数的原理是基于无限大介质中阶跃加热的圆盘形热源产生的瞬态温度响应。为此，需要首先求得理想情况下这一瞬态导热问题的解，然后就可以得出测试过程中探头表面平均温升的数学表达式，进而利用复合辛普森法就可以计算出探头表面的平均温升值。在瞬态平面热源法中，探头既被用作加热的热源又被用作温度传感器。通过测试探头电阻的变化，就可以得到探头表面的温升值。探头表面的温升与被测试样的导热性能有很大关系，因此利用计算出的温升值和测出的温升值就可以求解出被测试样的导热系数。

本文借助 Hot Disk 热常数分析仪的数据采集系统来获取探头表面在测试过程中的温升，并利用此温升来计算试样的导热系数。选取和计算了不锈钢、石英砂和水的导热系数，计算结果和 Hot Disk 热常数分析仪的测试值之间的相对误差分别是-0.08%, 1.12%和 1.05%。最后又分析了探头的热容和延迟时间对计算结果的影响。

关键词：导热系数，测试技术，瞬态平面热源法

The Study of Thermal Conductivity Measurement Using the Transient Plane Source Method

ABSTRACT

Thermal conductivity is a key thermophysical property of materials, which is crucial for a wide range of applications. Nowadays the theory and technique of thermal conductivity measurement has become a hot topic in the world. The transient plane source (TPS) method is a new technique for thermal conductivity measurement, which has many advantages including wide range of materials types, wide thermal conductivity range, short measuring time, high accuracy and easy sample preparation.

This thesis attempts to determine thermal conductivity using transient plane source method. The experimental principle of the TPS method is based on the transient temperature response of an infinite medium to step heating of a disk-shaped plane source. Therefore, it is necessary to derive the solution to this transient heat-conduction problem in ideal situation. And then the mathematical expression of the mean temperature rise in the sensor surface during experiment can be derived. Furthermore, the mean temperature rise in the sensor surface can be calculated by the multiple-application Simpson's rule. In the measurement of the TPS method, the sensor serves both as a heater and a temperature detector. The temperature rise in the sensor surface is accurately determined through resistance measurement. The temperature rise in the sensor surface is also highly dependent on the thermal transport properties of the test specimen surrounding the sensor. Hence, it is possible to determine the thermal conductivity of test specimen by analyzing the calculated value and the measured value of the temperature rise in the sensor surface.

This research obtains the temperature rise in the sensor surface resorting to the data acquisition system of Hot Disk Thermal Constant Analyzer, and then applies such temperature rise to determine the thermal conductivity of the test specimen. The thermal conductivities of stainless steel, Silicon Sand and water have been calculated, and the relative errors of the

calculated value versus the thermal conductivities measured with Hot Disk Thermal Constant Analyzer are -0.08%, 1.12% and 1.05% respectively. The effects of the heat capacity of sensor and the time delay have also been discussed.

Key Words: thermal conductivity, testing technique, transient plane source method

原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，论文中不含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得山东建筑大学或其他教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

学位论文作者签名：孙亮亮 日期2007.6.19

学位论文使用授权声明

本学位论文作者完全了解山东建筑大学有关保留、使用学位论文的规定，即：山东建筑大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权山东建筑大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它手段保存、汇编学位论文。

保密论文在解密后遵守此声明。

学位论文作者签名：孙亮亮 日期2007.6.19

导师签名：方平 日期2007.6.19

第一章 绪论

1.1 热物性研究概况

1.1.1 热物性的基本概念

物质的热物理性质，简称热物性^[1]。它表征物质固有的一些宏观性质，诸如表征导热能力的导热系数、表征均温能力的热扩散率、表征蓄热能力的比热容以及热膨胀系数、热辐射率和粘度等。每一种热物性都具有明确的物理意义。在许多不同的热物性参数之间，或者与其他物理量之间，通常存在着数学上的某种联系，使得我们能够从数学的角度认识、建立和描述热过程的各种规律，同时归纳和总结出物质新的热物理性质。从这个意义上讲，热物性也可以被称为是描述热过程性质最基本的特性单位。这里之所以称之为特性单位是因为不同的热物性参数描述的是物体固有的不同属性，它决定了某种条件下热过程的基本规律。

1.1.2 热物性的研究内容

热物性学是一门研究物质宏观热物理性质与微观结构之间规律性联系的科学。它的研究内容主要包括五个方面^[2]：热物性测试方法和装置的研究；固体和流体介质热物性在不同状态下的变化规律和影响因素的研究；宏观热物性与微观结构、化学组分、工艺因素关系的研究；热物性机理和微观粒子的研究；热物性数据库的建立和应用研究。

1.1.3 热物性的研究现状和动向

由于热物性学在科学技术发展中的作用日益巨大，世界各国在热物性学的研究方面都十分重视，投入了很大的力量，促进了热物性学的不断发展。

(1) 有关热物性的国际学术活动十分频繁。目前，已经有五个定期举行的热物性国际学术会议，即国际热物性会议（STP）、国际导热系数会议（ITCC）、国际热膨胀系数会议（IFES）、欧洲热物性会议（ETPC）和亚洲热物性会议（ATPC）。

(2) 从事热物性研究的机构越来越多。其中在国际上有较大影响的有美国的国家标准局（NBS）、英国的国家物理研究所（NPL）、前苏联科学院的高温研究所和热物理研究所以及联邦德国的物理技术研究所（PTB）的热学处等。此外，前苏联科学院的传热传质和热物理研究所、全苏热工研究所的石油、化工、冶金、建筑等工业部门的专业热物

理研究所也进行了大量的热物性测试研究工作；西德的慕尼黑工业大学和卡斯罗大学在工质热物性的测试研究方面也有很长的研究历史。

(3) 各国正在加紧建立自己的热物性数据库。由于热物性数据的重要性和热物性数据对各种因素非常敏感而引起的多样性，以及为了避免测试工作不必要的重复，一些国家正在系统搜集、科学整理和大量积累国际上已经测定的浩瀚的热物性数据，从而建立自己的热物性数据库。在热物性数据库工作方面，做得最有成效因而最有权威的是美国的普渡大学的热物性资料和数据分析综合中心 CINDAS。

(4) 有关热物性微观机理的研究、导热性能的研究以及热物性经验方程的研究非常活跃。微观机理方面的研究比热理论研究的历史更悠久，也更成熟。导热性能方面的研究，可以用分子、电子、声子和光子的碰撞理论分别对金属、无机非金属（包括晶体和非晶体）、流体的导热行为以及导热系数随温度的变化规律做出定性的比较满意的解释。经验方程方面的研究对于工程应用和新材料的配方设计等方面有较大的指导意义，如根据大量实验数据结果建立的计算导热系数的厄根（Eucken）方程、计算热膨胀系数的特纳（Turner）和科纳（Kerner）方程等。

(5) 热物性测试技术取得了可喜的进展。已经建立了对不同温度和状态以及不同物质的各种测试方法和装置，测试的温度范围已经扩大到从接近绝对零度到 3300K 左右。另外，在测试技术的研究中一个值得注意的动向是，随着计算机、红外线（包括热象仪）、激光、微电子技术、光声技术等新技术在热物性测试技术上越来越广泛的应用，使测试的准确度和精度不断提高，测试功能不断扩大，试样尺寸和体积明显减小，促使热物性测试技术不断向高速化、自动化、多功能化发展。测试技术研究的另一个动向是，为了对实际工程部件和整体的热物性进行直接的现场非破坏性的测试或检测，在导热系数、热发射率和吸收率等测试方面，已经研制出了多种形式不同原理的热物性小型化或便携式快速检测装置和仪器^[3,4]，其中有的还兼有对部件或材料进行探伤的功能^[4]。

(6) 热物性与材料科学交叉是一个令人瞩目的领域。通过隔热材料导热因子的理论分析影响导热系数诸因素的实验研究，建立和发展超级隔热材料的热设计原理。如美国哥伦比亚号航天飞机用的隔热瓦、美国琼斯门威拉研究和工程中心研制的导热系数比空气还小的明克（Mink）材料，都是按照热设计原理取得成功的实例。

1.2 导热系数的概念及测试方法分类

1.2.1 导热系数的定义及导热定律

统计表明, 导热系数是材料最常用的三个热物性参数之一^[5]。从日常生活、工业生产到高新科学技术领域, 都涉及到材料的导热性能。导热方面的早期发现主要归功于法国物理学家傅里叶 (Joseph Fourier), 他在 1822 年提出了所谓的傅里叶定律^[1,6,7]。傅里叶定律是对经验数据的概括, 通过对固体导热现象的研究, 清晰地阐明了热流同温度梯度之间的正比关系。傅里叶定律把单位时间内通过与热流垂直的单位面积的热量定义为热流向量, 用 \bar{q} 表示, 单位为 W/m^2 。傅里叶定律的数学表达式为:

$$\bar{q} = -\lambda \text{grad}T \quad (1-1)$$

其中, λ 称为导热系数, 单位是 $W/(m \cdot K)$, 它是表征物质导热能力的一个重要的物理参数。因为温度梯度是指向温度升高的方向, 而根据热力学第二定律, 热流总是朝着温度降低的方向, 所以负号用来表示热流向量方向与温度梯度的方向是相反的。将式(1-1)变换后, 可得:

$$\lambda = \frac{|\bar{q}|}{|\text{grad}T|} \quad (1-2)$$

可见, 导热系数 λ 的数值就是物体中单位温度降单位时间通过单位面积的导热量。不同物体之间的导热系数最大相差可以达到五个数量级^[7,8]。物体的导热系数不但因物质的种类而异, 而且还和物质的温度、压力等因素有关, 因此即使是同一物体在不同状况下的数值有时也会相差很大。在一些比较重要的工程计算中, 如果需要较准确的导热系数, 就必须通过实验来测定。

1.2.2 导热系数的测试方法分类

导热系数与物体的种类及其所处的状态有关。固体、液体与气体, 金属与介电质的内部结构不同, 导热的机理也有很大的差异。而且影响材料导热系数的物理、化学因素很多, 导热系数对物体的晶体结构、显微结构和组分的微小变化都非常敏感, 因此所有导热系数的理论计算方程式几乎都有较大的局限性。所以对于绝大多数物体, 现在还不能根据其结构和导热机理来计算其导热系数。导热系数的数值至今仍然主要依靠实验方法获得。

导热系数的测试方法很多，为了尽可能全面地反映出导热系数测试方法的概况，美国的普渡大学热物理性研究中心(TPRC)分析归纳了如下几种分类方法^[9]：

- (1) 根据导热过程的宏观机理分为稳态法和非稳态法；
- (2) 根据热流在试样中的流向分为纵向热流法和径向热流法；
- (3) 根据试样的形状分为棒体法、平板法、圆柱体法和圆球法等；
- (4) 根据是否直接测量热流区分为绝对法和比较法。

表 1-1 导热系数测试方法的名称和分类

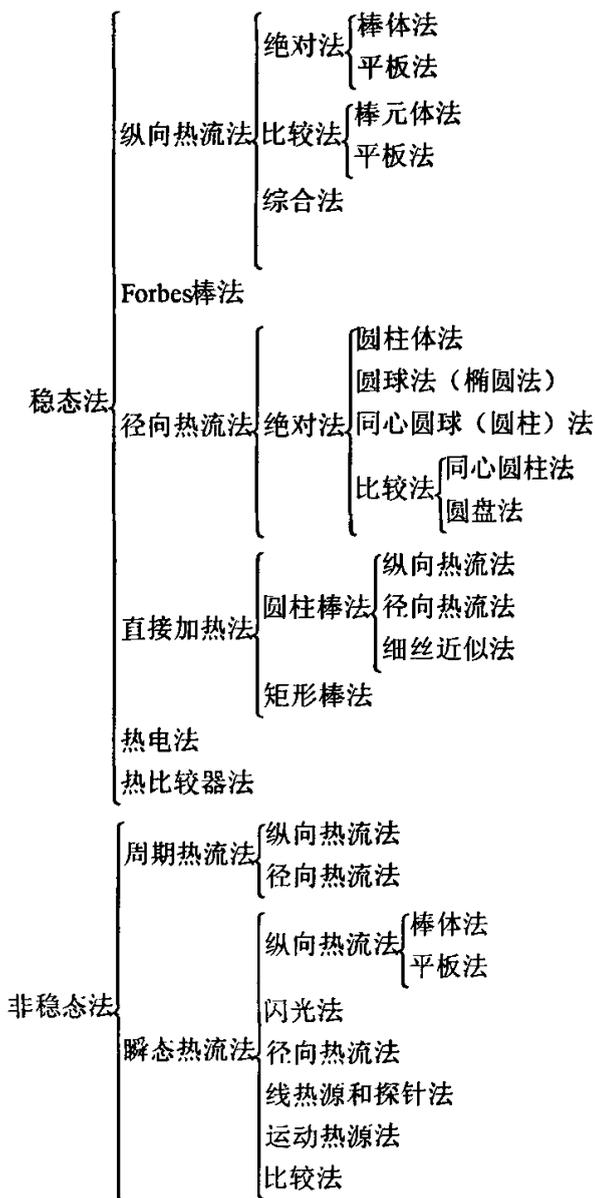


表 1-1 列出了导热系数测试方法的分类和名称。各种不同的导热系数测试方法都有其自身的优点、局限性和应用范围。因此，不能笼统地对测试方法的优劣进行比较，而应视具体情况而定。应该说，每一种测试方法都有其存在的价值。测试材料的导热系数时，应根据材料的特点、测试的要求以及测试时间、成本等因素，选取最佳的测试方法。表 1-2 列出了几种典型测试方法的优缺点和应用范围^[10-15]。

表 1-2 几种典型测试方法的应用范围和特点

方法名称	优点	缺点	温度范围 K	样品特征	测试范围 W/(m·K)
纵向热流法	精度高，测温范围大	高温时轴向热流损失不易控制	90-1300K	柱状金属及合金	10-500
径向热流法	精度高，适用高温导热	样品尺寸大，测试时间长	RT-2600	圆柱状固体和粉末	0.01-200
闪光法	可测多种热物性数据，测量周期短	设备昂贵，计算复杂	RT-3000	各向同性的圆形薄片	0.02-300
热线法	温差小，测试时间短	精度低，适合低导热系数材料	RT-1800	粉状耐火材料	0.02-2
直接电加热法	精度高，适合高温	局限于电导体，设备昂贵	400-3000	线状、杆状和管状电导体	10-200
热探针法	设备简单，测试时间短	计算复杂	RT-600	土壤，松散材料	—

1.3 几种典型的非稳态测试方法

根据导热过程的宏观机理不同，导热系数的测试方法可以分为两种^[9]：稳态法和非稳态法。在稳态测试方法中，试样内的温度分布是不随时间而变化的稳态温度场，当试样达到热平衡以后，借助测量试样每单位面积的热流速率和温度梯度，就可以直接得出试样的导热系数。在非稳态测试方法中，试样内的温度分布是随着时间而变化的非稳态温度场，借助测试试样温度变化的速率，就可以测定试样的热扩散率，从而得到试样的导热系数。

测定材料热物性的非稳态方法去除了各种稳态方法中“稳态”这个比较苛刻的要求，而测定试样中温度随时间的变化。因此，非稳态方法的测试时间短，通常只需几秒钟到

几分钟；同时，散热损失大大减小，试验装置往往得到很大的简化。此外，同一装置可以测试的参数范围扩大，并常常可以同时得到导热系数、热扩散率和比热的数据。

按照加热方式的不同，非稳态方法又大致可以分为周期性热流法和瞬态热流法。在周期性热流法中，加给试样的是固定周期的连续交替热流，引起温度波以相同的周期向试样内部传播，沿途振幅衰减。可以从温度波在试样中两点间测得的温度波衰减或相位滞后来确定材料的热扩散率，进而可以求出导热系数。与之不同的是，在瞬态热流法中加给试样的是连续的或单个脉冲热流。按照加热热源的形状不同，瞬态热流法又可以分为瞬态热线法，瞬态热带法和瞬态平面热源法等。

测定材料热物性的非稳态方法会涉及复杂的非稳态导热问题，对数据采集和处理的要求也大大提高，但是随着计算机技术的发展，这已经不再成为一个障碍。所以近几年来非稳态测试技术得到了飞速的发展，成为热物性测试技术的主流。

1.3.1 常功率平面热源法

常功率平面热源法是上世纪七十年代我国自主研发开发的测定材料热物性的非稳态方法^[1]，适用于建筑材料和隔热材料的热物性测试，还可以推广到含湿和低温冻土等材料的测试。这种方法的优点是试验装置简单、测试时间较短以及可以同时测定材料导热系数和热扩散率。由于当时计算机技术还不够普及，在开发该测试技术时采用了手工采集并处理数据的方法。该方法在我国热物性测试技术的发展历史上有较大的影响，至今许多学校仍把它作为非稳态导热和热物性测试的教学手段。

常功率平面热源法的测试原理是基于边界有恒定热流作用的一维半无限大物体中的温度响应，即假设半无限大介质初始温度均匀，为 t_0 。忽略加热器的热容量，加热器以恒定的功率加热，则可认为从 $\tau=0$ 时刻开始在边界上有恒定热流 q_w 的作用。记过余温度 $\theta=t-t_0$ ，有

$$\theta(x, \tau) = \frac{2q_w}{\lambda} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \quad (1-3)$$

其中

$$\operatorname{ierfc}(u) = \int_u^\infty \operatorname{erfc}(z) dz = \exp(-u^2) / \sqrt{\pi} - u \operatorname{erfc}(u) \quad (1-4)$$

称为余误差函数的一次积分。注意到 $\operatorname{ierfc}(0) = 1/\sqrt{\pi}$ 。则在壁面上($x=0$)的温升为

$$\theta(0, \tau) = \frac{2q_w}{\sqrt{\pi\lambda}} \sqrt{a\tau} \quad (1-5)$$

常功率平面热源法测试仪器的装置简图如图 1-1 所示。试样 I 由三块相同材料的平板组成，试样的厚度为 x_1 。三块试样的边长 L 应大于 x_1 的 8—10 倍，则试样 I 可以看作是“大平壁”，即认为是一维导热。在试样 I 和 III 之间有康铜箔通电加热。当加热时间不超过限定值时，试样 I、II 连接在一起以及试样 III 都可以看作是半无限大物体。

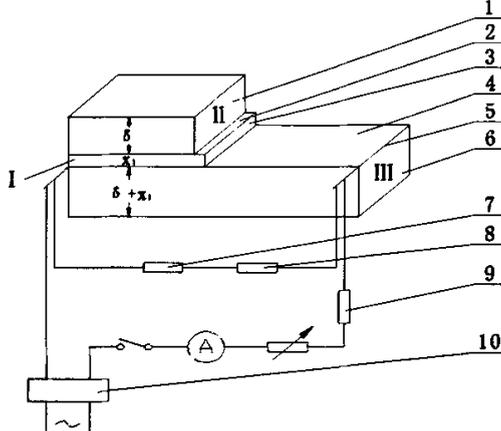


图 1-1 常功率平面热源法装置简图

1. 上辅助层 II
2. 温度 t_{x1}
3. 试样 I
4. 温度 t_0
5. 5~10 微米康铜箔
6. 下辅助层 III
7. 电阻 10000 欧
8. 电阻 10 欧
9. 电阻 0.01 欧
10. 稳压电源

康铜箔热源将均等地向两侧供热，则 $q_w = \frac{Q}{2A}$ 为单位面积康铜箔热源的发热量。用两个热电偶分别测得加热面上 ($x=0$) 和材料内部一点 ($x=x_1$) 处的温升，则有

$$\frac{\theta(x_1, \tau_1)}{\theta(0, \tau_0)} = \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_0}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_1}}\right)$$

或

$$\Phi = \frac{\theta(x_1, \tau_1)}{\sqrt{\pi} \theta(0, \tau_0)} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_1}} = \operatorname{ierfc}\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_1}}\right)$$

由实验测得的温升和相应的时间，可以确定函数 Φ 的值；再由式 (1-4) 所确定的函数关系可以确定以上函数的自变量 $\xi = \frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_1}}$ 。从而计算得到材料的热扩散率

$$a = \frac{x_1^2}{4\xi^2\tau_1} \quad (1-6)$$

由 a 值代入式 (1-5) 可得试样的导热系数

$$\lambda = \frac{2q_w}{\sqrt{\pi} \theta(0, \tau_0)} \sqrt{a\tau_0} \quad (1-7)$$

王补宣等^[16]对于常功率平面热源法中定解条件的实现、有效测试时间、功率及温度的测试技术、试样尺寸的选择以及测试误差的控制等进行了全面的理论和实验研究，并取得了比较满意的结果。

在以上基本的模型中忽略了加热器的热容量，在测试轻质材料时会造成较大的误差。考虑加热器的热容量但忽略加热器箱中的温差，即加热器按“集总热容”考虑时，该问题相应的边界条件应改为

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = q_w - C \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad x=0, \tau > 0 \quad (1-8)$$

其中 C 是单位面积加热器的热容量 [$J/(m^2 \cdot K)$]。

文献[17, 18]求解了这一问题，并进一步讨论了加热器热容量对常功率平面热源法测试的影响。

1.3.2 热线法

热线法 (Hot Wire Method) 最早是由 Stalhane 和 Pyk 在 1931 年提出和研制成功的^[19]。它适用于测定隔热材料及其它松散或粉末状的非金属材料。该方法的原理是：用一根细长的金属丝作为线热源夹在两块试样中或埋在松散材料中。金属丝通电以恒定的功率加热，记录金属丝的升温过程，可以求得材料的导热系数。

热线法的理论基础是无限大物体中线热源的非稳态导热问题。设介质的初始温度均匀，为 t_0 ，过余温度 $\theta = t - t_0$ ，线热源单位长度的发热率为 q_l (W/m)。这一问题是柱坐标系中的一维导热，其解已在文献[20]中给出，即在介质中的径向坐标为 r 的任一点在 τ 时刻的温升为

$$\theta(r, \tau) = -\frac{q_l}{4\pi\lambda} \text{Ei}\left(\frac{-r^2}{4a\tau}\right) \quad (1-9)$$

其中 $\text{Ei}(z) = \int_{-\infty}^z \frac{e^u}{u} du$ ($z < 0$)，是指数积分函数。注意到指数积分函数的定义域和函数值域均是负值。为方便实际的计算，可改用正的自变量 x ，指数积分函数也可用以下级数表达式计算

$$\begin{aligned}
 -\text{Ei}(-x) &= \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \\
 &= \ln\left(\frac{1}{x}\right) - \gamma - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k x^k}{k!k}, \quad (0 < x < \infty)
 \end{aligned} \tag{1-10}$$

其中 $\gamma = 0.577\ 216$ 是欧拉常数。当 $x \leq 0.05$ 时，忽略上式中的级数部分时产生的误差不超过 2%。此时有，

$$-\text{Ei}(-x) \approx \ln\left(\frac{1}{x}\right) - \gamma, \quad (0 < x < 0.05) \tag{1-11}$$

在热线法测试技术中，记热线的半径为 r_0 ，由以上解析解可得，线热源的温升可表示为

$$\theta(r_0, \tau) \approx \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4a\tau}{r_0^2}\right) - \gamma \right], \quad \left(\frac{a\tau}{r_0^2} \geq 5\right) \tag{1-12}$$

以上温度响应的函数关系式表明，当加热时间足够长以后， θ 与 $\ln\tau$ 之间趋近于线性关系，直线的斜率与介质的导热系数 λ 有关。

如果在两个不同的时刻 τ_1 和 τ_2 测得线热源的温升分别为 θ_1 和 θ_2 ，则可求得试样的导热系数为

$$\lambda = \frac{q_l}{4\pi(\theta_2 - \theta_1)} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1} \tag{1-13}$$

注意在用以上公式处理试验数据求出导热系数时应保证满足 $a\tau/r_0^2 \geq 5$ 的条件。此外也应该指出，在推导过程中采用了一维线热源的简化假设，即认为金属丝的直径是无限小，长度是无限大。在实际的测试仪器中不可能满足这些假设，因此有必要对试验结果进行修正^[21]。现在的热线法测试材料导热系数的仪器都已采用计算机采集和处理数据，因此可以根据在试验段采集的许多温度数据采用回归的方法求出材料的导热系数，以减小各别数据的随机误差对测试结果的影响，同时也可对得到的导热系数值进行修正和自动补偿^[22]。

在以上介绍的基本的热线法的基础上，又进一步发展了探针法^[23]、双热线法^[24, 25]、热带法^[26, 27]等测试技术。

1.3.3 激光脉冲法

测定材料热物性的非稳态方法中应用最广泛的是由 Parker 和 Jenkins^[28]等于 1961 年提出的闪光法 (Flash Method)。随着激光技术的发明和完善，许多研究者对该方法做

了进一步的发展和改进，改用更高强度的激光作为脉冲光源，形成了激光脉冲法（Laser Flash Method）。该方法突破了多年来经典方法的局限，具有许多独特的优点，目前已成为应用最广泛的测定材料热物性的非稳态方法。

激光脉冲法的主要优点是：

- (1) 测试的材料种类广泛，包括金属、合金、陶瓷、晶体等，但不适合测试低导热系数的材料。
- (2) 测试的温度范围广，可以从液氮温度到 2700℃ 左右。
- (3) 试样尺寸小，通常试样的直径为 10mm 左右，厚度为 1-3mm。
- (4) 测试速度快，达到试验温度后，从打激光到显示试验的热扩散率只要几秒钟。
- (5) 测试功能强，能用于测试材料的热扩散率、比热，并进而可以求得导热系数。

用激光脉冲法测试材料的热物性时采用圆盘形的试样，试样放置在一个可以控制温度的试验小室内，小室抽成真空以最大限度地减小试样表面的散热损失。试验开始时试样内部与周围环境达到温度的平衡（ $t = t_0$ ），然后对试样的一个表面用一个激光脉冲施加一定的能量，同时用红外测温设备检测并记录试样背面的温度响应，由此可计算得到试样的热扩散率。

激光脉冲法最基本的物理模型假设：

- (1) 忽略试样侧面（包括试样支架）引起的散热损失，且激光脉冲的能量在试样表面均匀分布。这样，可认为试样中维持一维导热；
- (2) 忽略试样两个端面的散热损失，即假设试样的两个端面均保持绝热；
- (3) 激光脉冲的持续时间大大小于试样达到热平衡的时间，由此假设激光脉冲的持续时间是无限短，即激光脉冲的能量看作是作用在试样表面的瞬时面热源。

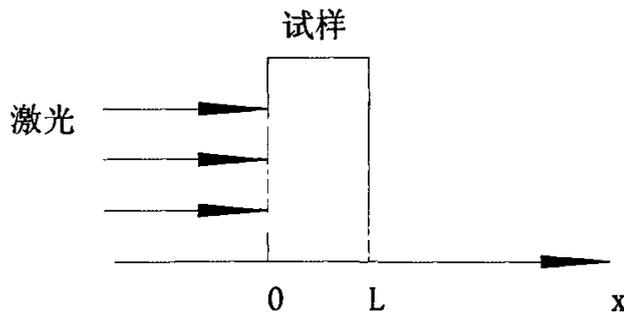


图 1-2 激光脉冲法的试样及坐标系

记试样的厚度为 L ，坐标如图 1-2 所示。激光脉冲投射到试样表面单位面积的能量为 $q(J/m^2)$ 。引进过余温度 $\theta = t - t_0$ ，在以上的假定下，试样中的非稳态导热过程可以用以下数学模型来描述

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{q}{\rho c} \delta(x-0) \delta(\tau-0), & 0 < x < L, \tau > 0 \\ \theta &= 0, & 0 < x < L, \tau = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} &= 0, & x = 0, \tau > 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} &= 0, & x = L, \tau > 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

作用在初始时刻的瞬时热源也可以看成是 δ 函数形式的初始温度分布，即激光的能量是被试样表面无限薄的一层所吸收，因此式 (1-13) 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, & 0 < x < L, \tau > 0 \\ \theta &= \frac{q}{\rho c} \delta(x-0), & 0 < x < L, \tau = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} &= 0, & x = 0, \tau > 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} &= 0, & x = L, \tau > 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

根据文献[20]中介绍的格林函数法，对于位于 x' 、作用于 τ' 时刻的一般的瞬时热源，在该一维有限厚度平壁导热系统中的格林函数为

$$G(x, \tau; x', \tau') = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{m^2 \pi^2 a (\tau - \tau')}{L^2}\right] \cos \frac{m \pi x'}{L} \cos \frac{m \pi x}{L} \quad (1-16)$$

对所研究的问题，瞬时热源作用在表面，即 $x'=0$ ， $\tau'=0$ 。由此得到试样中的过余温度响应为

$$\theta(x, \tau) = \frac{q}{\rho c L} \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{m^2 \pi^2 a \tau}{L^2}\right) \cos \frac{m \pi x}{L} \right] \quad (1-17)$$

定义无量纲时间 $Fo = a\tau/L^2$ ，则试样背面 ($x=L$) 的无量纲过余温度 $\Theta_1 = \rho c L \cdot \theta(L, \tau)/q$

可表示为

$$\Theta_1 = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \exp(-m^2 \pi^2 Fo) \quad (1-18)$$

Θ_1 与 Fo 的关系曲线标绘在图 1-3 中。

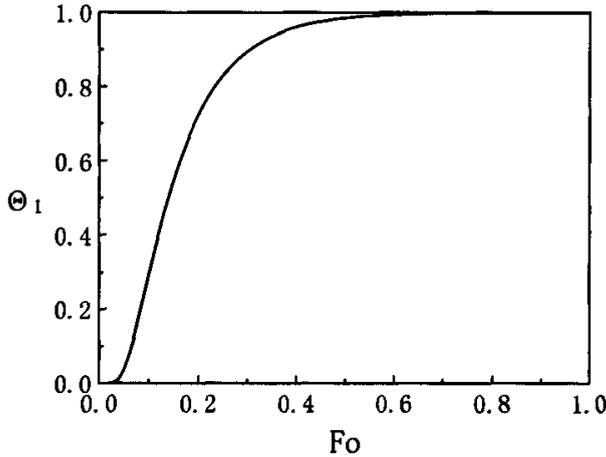


图 1-3 激光脉冲法中试样背面的温度

由以上函数式可以得到，当 $\Theta_1=0.5$ 时，有 $Fo = 0.139$ 。从试样测得的试样表面温升曲线可以确定温升达到其最大值一半时的时间 $\tau_{1/2}$ 。由此得

$$a = 0.139L^2/\tau_{1/2} \quad (1-19)$$

为了把激光脉冲法的测试范围扩大到不良导热材料和液体材料，研制和开发了激光脉冲法技术的一个变种，即在接受激光辐射的试样正面测试温度响应。有关的研究可参见文献[29]。

1.4 瞬态平面热源法的研究概述

1.4.1 瞬态平面热源法

瞬态平面热源法 (Transient Plane Source Method) 是瑞典的 Gustafsson 教授^[30]在瞬态热线法和瞬态热带法的基础上首先提出的。这三种方法在测试时探头都被放置在两片试样的中间，形成夹层结构，测试过程中探头既被用作加热热源又被用作温度传感器。热线法的理论基础是柱坐标中的一维瞬态导热问题；热带法则涉及二维瞬态导热。平面

热源法可将探头做成圆盘形或正方形，将涉及柱坐标中的二维或直角坐标系中的三维瞬态导热，理论基础更加复杂，但测试的精度提高，制取试样更加方便。现在比较常用的是圆盘形探头。

瞬态平面热源法是近几年发展起来的一种新的测试方法，它的特点是：

- (1) 能够测试的试样种类多，包括金属和非金属材料以及液体材料等；
- (2) 可测试的导热系数范围大，可以覆盖 $0.005-500W/(m \cdot K)$ 的范围，即几乎所有材料的导热系数；
- (3) 测试时间短，试样达到温度平衡后从开始加热到输出数据仅需数十秒；
- (4) 精度高，导热系数的测试精度可达 5%，热扩散率的精度可达 10%；
- (5) 要求的试样小，且试样制备简单。

瞬态平面热源法的缺点是由于受探头制作材料的限制，最高测试温度不超过 700°C ，不过这一指标今后还有改进的余地。

在瞬态平面热源法中，先把探头放置在两片试样中间，形成夹层结构，然后探头以恒定的功率加热试样，通过测试探头平均温度随时间的变化就可以得出试样的导热系数和热扩散率。在测试过程中，探头既被用作加热热源又被用作温度传感器。具体结构如图 1-4 所示。

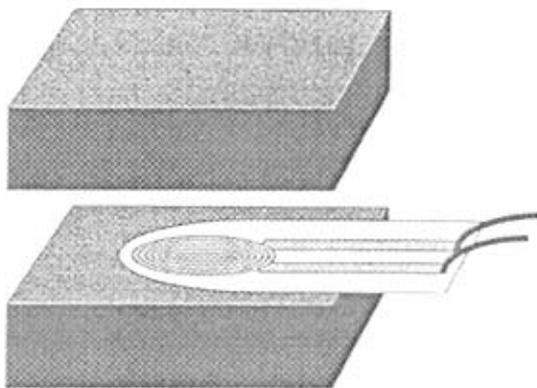


图1-4 瞬态平面热源法测试结构示意图

测试前试样与探头要和测试环境达到一样的温度，当试样被看作是无限大介质时，加热过程中只有探头和试样之间的热量交换，可以看作是有限尺度的面热源在无限大介质中的导热过程，形成的温度场可以用格林函数法来求解。其具体分析过程将在第二章中详述。

1.4.2 国外的研究情况

1979年 Gustafsson 教授最早用通以直流电并可忽略厚度的带状探头测试电绝缘固体材料^[31]的导热系数和热扩散率。这种由瞬态热线法发展而来的新的测试方法就是所谓的瞬态热带法。测试时探头被放置在两片试样的中间,形成夹层结构,测试过程中探头既被用作加热热源又被用作温度传感器。

1986年 Gustafsson 教授用附有绝缘层的带状探头测量了导电固体材料^[32]的导热系数和热扩散率。随着瞬态热带法的进一步发展,这种方法应用于许多种材料的热物性测试中,比如沙子^[33],铜粉^[34],高熔点的材料^[35],纯度非常高的金属和其他一些高导热系数的材料^[36]。瞬态热带法还被用来测试建筑材料^{[37][38]}的导热系数。

Gustafsson 教授为了提高测试的精度和制取试样的方便性,又将探头做成正方形或圆盘形,提出了瞬态平面热源法^{[39][40]}这种新的测试理论。比较常用的是圆盘形探头,即所谓的 Hot Disk 探头^[41],并以此为基础研制出 Hot Disk 热常数分析仪^{[42][43]}。

与瞬态热带法相比,瞬态平面热源法的测温灵敏性和精度更高,而且导热系数的测温范围和试样种类更宽,比如可以测量低温下陶瓷制品^[44],熔融状态下的硅^[45],临界温度下的超导材料^[46]以及临界相变处的多晶试样^[47]的导热系数。

在国外,瞬态平面热源法虽然是一种趋于成熟的导热系数测试技术,Gustafsson 教授等学者发表了很多关于这种测试方法的文章,但就所查阅到的文献来说还没未见瞬态平面热源法温度分布的详细推导。Hot Disk 热常数分析仪是具有国际领先水平的导热系数测试仪器,美国、欧洲和日本的许多国家实验室也在应用此仪器作材料导热系数方面的研究,但其导热系数测试软件的具体计算程序作为一项专利技术也不为外人所知。

1.4.3 国内的研究情况

徐慧等人介绍了瞬态热带法(THS)与瞬态平面热源法(TPS)实验原理、实验装置、电路以及其他参数的测定,并阐述了这些方法的优点^[48]。

黄犊子等人通过利用 Hot Disk 热常数分析仪对不锈钢标准件,冰和多孔介质的导热系数测量,证明该分析仪器能够适应不同材料的热物性^[49]。随后又利用 Hot Disk 热常数分析仪测试测定了常压、温度 233.115~273.115K 下四氢呋喃水合物的导热系数^[50]。

何小瓦等人介绍了瞬态平面热源法的测量原理以及常温下的测量装置,描述了采用 Pyroceram9606 热物理性能标准材料研究瞬态平面热源法在实际测试中各种试验参数对

测量准确度的影响，并由此考察这种测试方法和测试装置的测量准确度^[51]。

在国内，随着瞬态平面热源法的发展，近年来一些学者也开始关注这种导热系数测试方法和 Hot Disk 热常数分析仪。就所查阅到的文献来说，只是对瞬态平面热源法作了简要介绍，对其传热原理和测试原理并未作系统的理论分析；对 Hot Disk 热常数分析仪也只是从测试应用的角度对此仪器的适用性和测试精度作了分析。

1.5 本课题的基本情况

1.5.1 课题来源

本课题依托于国家自然科学基金资助项目（50476040）进行理论和实验研究。

1.5.2 课题的研究内容

(1) 通过分析瞬态平面热源法的传热原理，在一些理想条件下，建立瞬态平面热源法传热过程的数学模型，推导出瞬态平面热源法温度分布的解析解，并运用数值计算方法的求解出瞬态平面热源法的温度分布，进而可以分析各相关参数对温度分布的影响。

(2) 通过分析瞬态平面热源法的测试原理，并结合已求解出的瞬态平面热源法的温度分布，通过编制相应的计算程序求解理想状态下试样的导热系数。

(3) 在实验中修正传热模型，并在求解和编程过程中将解析解中未考虑的因素包括进来，最后将修正模型后的计算结果同理想情况下的计算结果进行比较分析，找出测试过程中对计算结果有重要影响的因素。

(4) 选取和计算若干个有代表性的物质的导热系数，并将计算结果与 Hot Disk 热常数分析仪的测试值进行比较，以验证所编制的导热系数计算程序的精度。

1.5.3 本课题的研究意义

首先，本研究主要负责为国家自然科学基金资助项目（50476040）提供热物性测试方面的技术支持。

其次，瞬态平面热源法是一种新型的导热系数测试方法，但目前国内对此方法还没有作专门的研究。对瞬态平面热源法传热模型进行深入研究，可以深化国内导热系数测试在此方面的研究。

再次，导热系数是表征材料导热性能的一个重要参数，它与材料的组成结构、密度、

温度等因素有关。材料导热系数的测量对于研究材料的各项热物性能都有着至关重要的作用。本课题的研究能够为更好的测试材料的导热系数提供一种新的方法，进而促进导热系数测试技术的发展和相应导热系数测定仪的研制。

第二章 瞬态平面热源法的理论分析

2.1 非稳态导热

在自然界和工程中，物体经常处于变化的环境中。环境条件的变化破坏了物体内部原有的平衡状态，其温度分布及热流都将相应地发生改变^[6]。如变化后的环境条件又稳定在某一个新的状态，那么经历一段时间后，物体内的温度分布又逐渐达到另一个新的平衡。从环境条件发生变化到新的平衡建立这段时间里，物体内的温度随时间变化，这段时间内的导热过程就是非稳态导热。如果环境本身是随时间改变的，那么整个导热过程都将是非稳态的。因此，非稳态导热问题所涉及的是，具有某一初始热状态的一定形状的物体受环境条件的作用后所引起的传热现象^[52]。

求解非稳态导热问题就是要确定在这种过程中物体内部温度场的变化规律。为此，首先要确定导热体所遵循的导热微分方程，并同时给出该物体初始瞬时温度分布的数学表达式，以及环境条件对物体热作用的描述，即初始条件及边界条件。

2.2 格林函数法在非稳态导热中的应用^[20]

2.2.1 格林函数的概念

物体中的温度分布随时间发生变化是由于内热源、边界的热作用以及初始温度分布共同作用的结果。这些热作用都可以看作是广义的热源。从时间的概念上说，热源可以使连续作用的；如果作用的时间足够短，则可以抽象为“瞬时”作用的热源。同样地，热源在空间上是有一定分布的，但如果热源作用的空间尺度足够小，也可以抽象为“点热源”，“线热源”和“面热源”。在各种不同种类的热源中，“瞬时点热源”虽然仅是一种数学上的抽象，却有着重要的意义。因为其他的各种热源都可以看作是许多瞬时点热源的集合，即把时间上持续的热源看成是许多前后相继的瞬时热源，把连续分布在空间中的热源看作是在空间中一次排列着的许多点热源。在特定几何条件下的导热系统中，在齐次边界条件和零初始条件下单位强度的瞬时点热源所产生的温度场称为热源函数，或格林（Green）函数。

对于二维和一维导热问题，也把由线热源和面热源引起的温度场称为相应的格林函数。对于线性的导热问题，由各种复杂的热源引起的温度场可以由许多这样的瞬时

热源引起的温度场的叠加得到。这就是热源法，或称格林函数法，是求解非稳态导热问题的基本思想。采用格林函数法可以求解带有随时间变化的热源项且具有非齐次性边界条件的导热微分方程，对于一维、二维和三维问题的解在形式上都可以表示得非常紧凑，而且解的物理意义比较清楚。

用格林函数法求解的困难在于找到格林函数，而格林函数的形式取决于特定问题的具体条件，包括几何条件、边界条件和坐标系的选取。因此，用格林函数法求解非稳态导热问题首先需要对特定定解条件的导热系统确定其格林函数。

2.2.2 无限大物体中的非稳态导热

一个形式简单而又较常用的格林函数是一维无限大介质中的格林函数。根据其定义，一维无限大介质中的格林函数应满足以下定解问题：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \delta(x-x')\delta(\tau-\tau') & -\infty < x < \infty, \tau > 0 \\ G &= 0 & -\infty < x < \infty, \tau = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial x} &= 0 & x \rightarrow \pm\infty \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

用分离变量法可以求得一维无限大介质中的格林函数，即瞬时平面热源在初始温度分布为零的无限大介质中引起的温度分布是

$$G(x, \tau; x', \tau') = \frac{1}{\sqrt{4\pi a(\tau - \tau')}} \exp\left[-\frac{(x - x')^2}{4a(\tau - \tau')}\right] \quad (2-2)$$

只要初始温度分布可以表示成单变量函数的乘积，多维齐次非稳态导热问题的解就可以由一维导热问题解的乘积的形式来构成。同样的，多维格林函数也可以由一维格林函数的乘积来构成。这是因为，按照其定义格林函数满足具有瞬时热源及齐次边界条件的导热方程，而瞬时热源的问题又等价于一个给定初始温度分布的问题。

因此，二维和三维问题的格林函数可以由一维格林函数的乘积来构成。在直角坐标系中三维无限大物体导热的格林函数为

$$G(x, y, z, \tau, x', y', z', \tau') = \frac{1}{8[\pi a(\tau - \tau')]^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(\tau - \tau')}\right) \quad (2-3)$$

2.3 瞬态平面热源法的数学模型

2.3.1 简化条件

瞬态平面热源法是一种非稳态测试方法，它是在瞬态平面热线法和瞬态平面热带法的基础上发展而来的。在瞬态平面热源法在测试过程中先把探头放在两片试样中间，形成夹层结构（如图 2-1 所示），然后探头以恒定的功率加热试样，通过测试探头表面平均温度随时间的变化就可以求出试样的导热系数和热扩散率。测试过程中探头既被用作加热热源又被用作温度传感器，现在比较常用的是圆盘形探头。

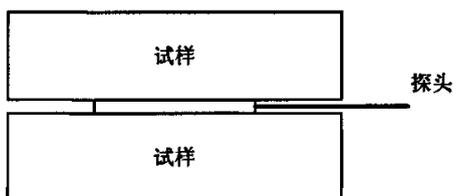


图 2-1 测试结构示意图

测试前试样与探头要和测试环境达到一样的温度，当试样被看作是无限大介质时，加热过程中只有探头和试样之间的热量交换，可以看作是有限尺度的面热源在无限大介质中的放热过程，形成的温度场可以用格林函数法来求解。在对瞬态平面热源法建立的数学模型中采用了以下简化假设：

- (1) 与圆盘形热源相比，试样可看作是均匀无限大物体；
- (2) 忽略圆盘形热源的厚度和热容；
- (3) 圆盘形热源均匀发热且功率保持不变。

2.3.2 理论推导

瞬态平面热源法测定材料热物性的原理是基于无限大介质中阶跃加热的圆盘形热源产生的瞬态温度响应。为此，有必要首先求得理想情况下这一瞬态导热问题的解。

根据上述假定条件可以建立以下数学模型。在均匀无限大介质中有一圆盘形平面热源，热源的半径为 r_0 ，厚度和热容均可忽略不计。整个圆盘形热源均匀发热，总发热功率为 $Q[W]$ ，即单位面积的发热率为 $q = \frac{Q}{\pi r_0^2} [W/m^2]$ 。建立如图 2-2 所示的直角坐标系，

其中 z 轴垂直圆盘所在的平面并且过圆心 O 点。

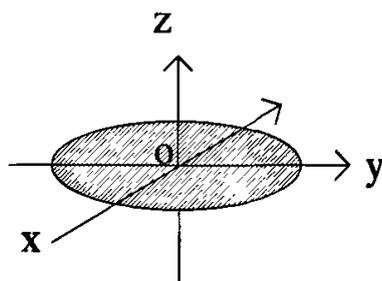


图 2-2 平面热源法的坐标系

无限大空间中，位于点 (x', y', z') 在 τ' 时刻发热量为 $\rho c [J]$ 的瞬时点热源的温度响应称为格林函数。在柱坐标系中 $x = r \cos \varphi$ ， $y = r \sin \varphi$ ， $x' = r' \cos \varphi'$ ， $y' = r' \sin \varphi'$ ，则式(2-3)可改写为

$$G(r, \varphi, z, \tau; r', \varphi', z', \tau') = \frac{1}{8\sqrt{\pi a(\tau - \tau')}} \exp\left[-\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\varphi - \varphi') + (z - z')^2}{4a(\tau - \tau')}\right] \quad (2-4)$$

在 xoy 平面上($z' = 0$)，圆心在 O 点，半径为 r' 的环形线热源(均匀发热)，在 τ' 时刻的瞬时发热量为 $Q_1 [J]$ 。它可以看作是许多强度为 $\frac{Q_1}{2\pi} d\varphi'$ 的瞬时点热源的集合，产生的温度分布为

$$\theta_1 = \int_0^{2\pi} \frac{Q_1}{2\pi\rho c} \frac{1}{8\sqrt{\pi a(\tau - \tau')}} \exp\left[-\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\varphi - \varphi') + z^2}{4a(\tau - \tau')}\right] d\varphi' \quad (2-5)$$

对式(2-5)积分得

$$\theta_1 = \frac{Q_1}{\rho c} \frac{1}{8\sqrt{\pi a(\tau - \tau')}} \exp\left[-\frac{r^2 + r'^2 + z^2}{4a(\tau - \tau')}\right] I_0\left[\frac{rr'}{2a(\tau - \tau')}\right] \quad (2-6)$$

其中 $I_0(x)$ 是零阶变形贝塞尔函数，且有 $I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(x \cos \theta) d\theta$ 。

连续发热的圆盘形热源可以看作是许多环形线热源(瞬时发热量为 $Q_1 = 2\pi q r' dr' d\tau' [J]$)的集合，产生的温度分布为

$$\theta_2 = \int_0^r \frac{2\pi q}{\rho c} \frac{1}{8\sqrt{\pi a(\tau - \tau')}} d\tau' \int_0^{\tau'} \exp\left[-\frac{r^2 + r'^2 + z^2}{4a(\tau - \tau')}\right] I_0\left[\frac{rr'}{2a(\tau - \tau')}\right] r' dr' \quad (2-7)$$

对式(2-7)进行变量代换及无因次化，整理得

$$\Theta_2(R, Z, Fo) = \frac{1}{2\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2 + Z^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right) R' dR' \quad (2-8)$$

其中 $Fo = \frac{a\tau}{r_0^2}$, $\Theta_2 = \frac{\lambda\theta_2}{\pi q_0}$, $R = \frac{r}{r_0}$, $R' = \frac{r'}{r_0}$, $Z = \frac{z}{r_0}$ 。

我们关注的是 $Z = 0$, 即 xoy 平面上的温度分布, 表示为

$$\Theta_2(R, 0, Fo) = \frac{1}{2\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right) R' dR' \quad (2-9)$$

测试中关心的是圆盘上的平均温度。对式 (2-9) 积分可以得圆盘上的平均温度分布

$$\bar{\Theta}(Fo) = \frac{1}{\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 R dR \int_0^1 \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right) R' dR' \quad (2-10)$$

对应的圆盘形热源的平均温升为

$$\bar{\theta}(Fo) = \frac{Q}{\lambda r_0 \sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 R dR \int_0^1 \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right) R' dR' \quad (2-11)$$

2.4 瞬态平面热源法的温度分布

2.4.1 贝塞尔函数^[53]

贝塞尔函数的表达式是 $I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(x \cos \theta) d\theta$, 如果利用数值积分的方法进行求解的话, 当 $x \rightarrow \infty$ 的时候, $\exp(x \cos \theta) \rightarrow \infty$, 则 $I_0(x) \rightarrow \infty$ 。当 x 比较大的时候对应的贝塞尔函数的值容易溢出。故采用级数的形式来就求解, 具体形式如下:

$$(1) \text{ 当 } 0 \leq x \leq 3.75 \text{ 时, } I_0(x) = \sum_{i=0}^6 a_i (x/3.75)^{2i} \quad (\text{最大误差} = 3 \times 10^{-8}); \quad (2-12)$$

$$(2) \text{ 当 } x > 3.75 \text{ 时, } I_0(x) = x^{-0.5} e^x \cdot \sum_{i=0}^8 b_i (3.75/x)^i \quad (\text{最大误差} = 2 \times 10^{-7}). \quad (2-13)$$

其中 a_i 和 b_i 是常数, 其具体取值分别见表 2-1 和表 2-2。

表 2-1 常数 a_i 的值

i	0	1	2	3	4	5	6
a_i	1.00	3.52	3.09	1.21	0.27	0.04	0.00

表 2-2 常数 b_i 的值

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$b_i \times 10^2$	39.89	1.33	0.23	0.16	0.92	2.06	2.64	1.65	0.39

2.4.2 辛普森积分法^[54]

数值积分可用于计算解析定义的或以列表给出的函数的积分，其基本准则是用多项式近似原函数，再用该多项式的积分近似原函数的积分。通过对节点横坐标做变换，可以导出不同的数值积分方法。辛普森法就是一种比较普遍的数值积分法。

辛普森法^[54]有两种互补的算法，即1/3法和3/8法。一个二次插值多项式可以由三个点决定， $x_1 = a$ ， $x_2 = (a+b)/2$ ， $x_3 = b$ ，记其对应的函数值分别是 f_1 ， f_2 ， f_3 。用一个二次多项式代换积分式 $I = \int_a^b f(x)dx$ 中的 $f(x)$ ，即可得1/3辛普森法：

$$I \approx \frac{h}{3}(f_1 + 4f_2 + f_3) \quad (2-14)$$

其中： $h = (b-a)/2$

若包括误差项在内，(2-14)式可以写为：

$$I = \frac{h}{3}(f_1 + 4f_2 + f_3) + E \quad (2-15)$$

其中： E 为误差项，且有 $E \approx -\frac{h^5}{90} f'''$ 。

将积分区间分为 n （偶数）个小区间，在每个小区间上逐个应用式 (2-14)，就得到了复合1/3辛普森积分公式：

$$I = \frac{h}{3}(f_1 + 4f_2 + 2f_3 + \dots + 2f_{n-1} + 4f_n + f_{n+1}) + E \quad (2-16)$$

其中 $h = (b-a)/n$ ， $f_i = f(a+(i-1) \cdot h)$ ， E 为误差项，表示为：

$E \approx -(b-a) \cdot \frac{h^4}{180} \overline{f''''}$ ，而 $\overline{f''''}$ 为 f'''' 在 $a < x < b$ 上的平均值。

3/8辛普森法将积分区间分为三个小区间，然后构造三次插值公式，进行积分得：

$$I = \frac{3h}{8}(f_1 + 3f_2 + 3f_3 + f_4) + E \quad (2-17)$$

其中 $h = (b-a)/3$, $f_i = f(a+(i-1) \cdot h)$, E 为误差项, 表示为: $E = -\frac{3h^5}{80} f'''$ 。

利用 1/3 法和 3/8 法这两种互补的算法构成的复合辛普森法, 可以同时计算偶数和奇数区间个数的积分。当区间个数为偶数时利用复合 1/3 辛普森法即可; 当区间个数为奇数时, 再前三个区间利用复合 3/8 法, 其余空间仍用 1/3。由于 1/3 法和 3/8 法误差的阶一样, 这样两种方法结合使用并不降低积分的精确度。

2.4.3 圆盘圆心处的温度分布

令 $R=0$ 由式 (2-9) 可得圆心处的温度响应为

$$\Theta_2(0,0,Fo) = \frac{1}{2\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 \exp\left(-\frac{R'^2}{4\sigma^2}\right) I_0(0) R' dR' \quad (2-18)$$

由于 $I_0(0)=1$, 则式 (2-18) 可以简化为

$$\Theta_2(0,0,Fo) = \frac{1}{2\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 \exp\left(-\frac{R'^2}{4\sigma^2}\right) R' dR' \quad (2-19)$$

由于 $\int_0^1 \exp\left(-\frac{R'^2}{4\sigma^2}\right) R' dR' = 2\sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{4\sigma^2}\right)\right]$, 则式 (2-19) 可以写为

$$\Theta_2(0,0,Fo) = \frac{1}{\sqrt{\pi^3}} \left[\sqrt{Fo} - \int_0^{\sqrt{Fo}} \exp\left(-\frac{1}{4\sigma^2}\right) d\sigma \right] \quad (2-20)$$

为求积分 $\int_0^{\sqrt{Fo}} \exp\left(-\frac{1}{4\sigma^2}\right) d\sigma$, 作变量置换, 令 $u = \frac{1}{2\sigma}$, 得

$$\int \exp\left(-\frac{1}{4\sigma^2}\right) d\sigma = \frac{1}{2u} \exp(-u^2) + \frac{\sqrt{\pi}}{2} [1 - \operatorname{erfc}(u)]$$

整理得
$$\int_0^{\sqrt{Fo}} \exp\left(-\frac{1}{4\sigma^2}\right) d\sigma = \sqrt{\pi Fo} \cdot \operatorname{ierfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right) \quad (2-21)$$

其中 $\operatorname{ierfc}(x)$ 是高斯误差补函数的一次积分值。

则圆盘圆心处的温度分布为

$$\Theta_2(0,0,Fo) = \frac{\sqrt{Fo}}{\sqrt{\pi^3}} \left[1 - \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{ierfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right) \right] \quad (2-22)$$

由式 (2-22) 可以看出圆盘圆心处的温度分布是时间 Fo 的单值函数, 此函数的图像如图 2-3 所示。

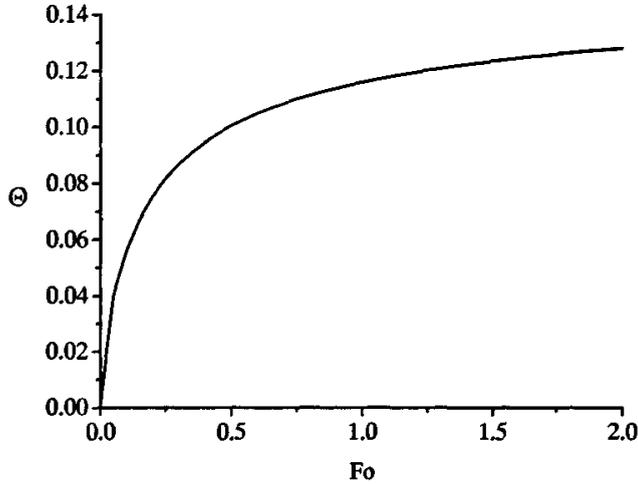


图 2-3 圆心处的温度分布

2.4.4 圆盘半径 r 处的温度分布

将式 (2-12) 和 (2-13) 分别代入式 (2-9) 中, 经整理得

当 $0 \leq \frac{RR'}{2\sigma^2} \leq 3.75$ 时,

$$\Theta_2(R, 0, Fo) = \frac{1}{2\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^{\sigma} \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) \cdot \sum_{i=0}^6 a_i \left(\frac{RR'}{7.5\sigma^2}\right)^{2i} \cdot R' dR' \quad (2-23)$$

当 $\frac{RR'}{2\sigma^2} \geq 3.75$ 时,

$$\Theta_2(R, 0, Fo) = \frac{1}{2\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^{\sigma} \exp\left(-\frac{(R-R')^2}{4\sigma^2}\right) \cdot \sum_{i=0}^8 b_i \left(\frac{7.5\sigma^2}{RR'}\right)^i \cdot \left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right)^{-0.5} \cdot R' dR' \quad (2-24)$$

利用 2.4.3 中的复合辛普森积分法对式 (2-23) 和 (2-24) 积分便可得圆盘半径 r 处的温度分布。由式 (2-23) 和 (2-24) 可以看出, 圆盘半径 r 处的温度分布与半径 r 和时间 Fo 有关, 其具体图像见图 2-4 和 2-5。

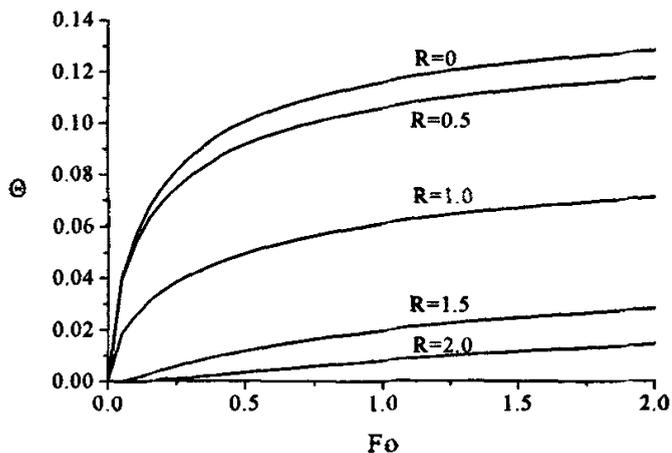


图 2-4 圆盘热源所在表面不同半径处的温

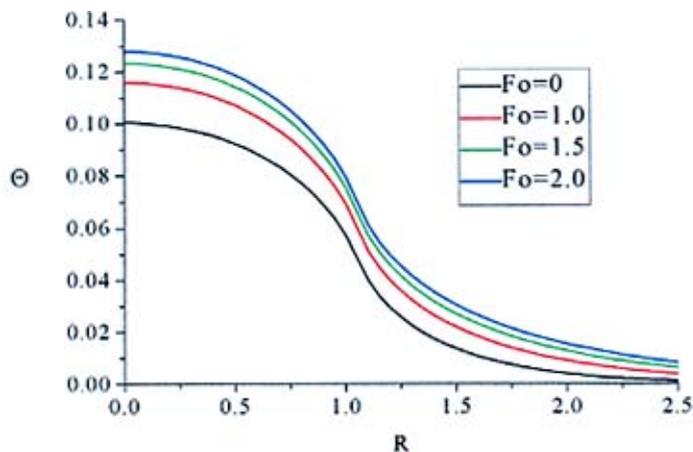


图 2-5 不同 Fo 下的温度分布

2.4.5 圆盘的平均温度分布

将式 (2-12) 和 (2-13) 分别代入式 (2-10) 中, 经整理得

当 $0 \leq \frac{RR'}{2\sigma^2} \leq 3.75$ 时,

$$\bar{\Theta}(Fo) = \frac{1}{\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 R dR \int_0^1 \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) \cdot \sum_{i=0}^6 a_i \left(\frac{RR'}{7.5\sigma^2}\right)^{2i} \cdot R' dR' \quad (2-25)$$

当 $\frac{RR'}{2\sigma^2} \geq 3.75$ 时,

$$\bar{\Theta}(Fo) = \frac{1}{\sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 R dR \int_0^1 \exp\left(-\frac{(R-R')^2}{4\sigma^2}\right) \cdot \sum_{i=0}^8 b_i \left(\frac{7.5\sigma^2}{RR'}\right)^i \cdot \left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right)^{-0.5} \cdot R' dR' \quad (2-26)$$

利用 2.4.3 中的复合辛普森法对式 (2-25) 和 (2-26) 积分便可得圆盘的平均温度分布。由式 (2-25) 和 (2-26) 可以看出圆盘圆心处的温度分布是时间 Fo 的单值函数，此函数的图像如图 2-6 所示。

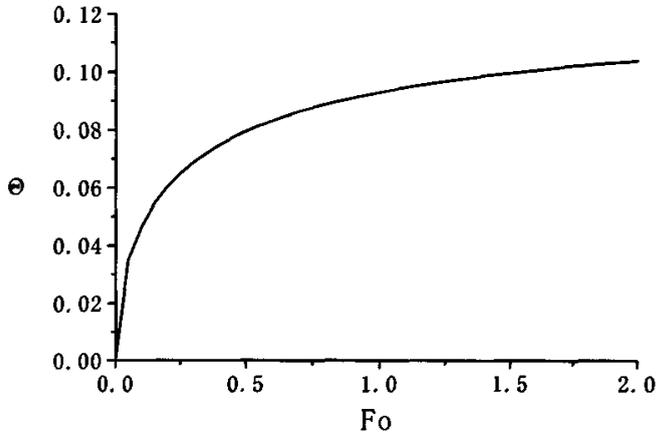


图 2-6 圆盘形热源的平均温度分布

2.4.6 结果与分析

- (1) 由图 2-3、2-4、2-5 和 2-6 中可以看出圆盘不同半径处的温度和圆盘的平均温度都是随时间不断升高的，而且温度升高的趋势也是一致的：刚加热时温度升高的比较快；随着时间的增长，温度升高的速度变慢。
- (2) 由图 2-4 可以看出，圆盘不同半径处的温度是不一样的，圆心处的温度最高，随着半径的增加温度减小并趋于初始温度。因此在无限远处试样的温度不受热源的影响，这与试样相对热源可看作无限大物体的假设条件一致。
- (3) 由图 2-5 可以看出，圆心处的温度梯度等于零，而其余半径处的温度梯度皆为负值，且随着半径的增加圆盘中温度梯度的绝对值逐渐增大，在半径 $R=1$ 处即圆盘热源的边界处达到最大，此后随着半径的增大温度梯度的绝对值开始减小，并逐渐趋近零。

2.5 瞬态平面热源法的测试原理

2.5.1 理论推导

瞬态平面热源法是一种非稳态测试方法，试样内的温度分布是随着时间而变化的非稳态温度场，借助测试试样温度变化的速率，就可以测定试样的热扩散率，从而得到试样的导热系数。在测试过程中，探头上通以恒定输出的直流电，由于温度升高，探头的

电阻值发生变化,从而使探头两端的电压发生变化;通过纪录在测试时间内电压的变化,就可以得到探头的电阻值随时间的变化,进而利用电阻温度系数就可以转变为探头表面的温升。

上节中已经推导出与加热热源相接触的试样表面的平均温度分布,在理想情况下,探头表面的温度与试样表面的温度一致,但在实际测试中,由于探头本身的有限厚度、探头外面的绝缘层的热阻以及探头与试样之间的接触热阻,探头的实际温度会高于试样表面的温度。

记

$$D(F_0) = \int_0^{\sqrt{F_0}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^{\sigma} R dR \int_0^{\sigma} \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right) R' dR' \quad (2-27)$$

则式(2-11)可以表示为

$$\bar{\theta}(F_0) = \frac{Q}{\lambda r_0 \sqrt{\pi^3}} D(F_0) \quad (2-28)$$

则在测试中探头的平均温升可表示为

$$\Delta T(\tau) = \Delta T_c + \frac{Q}{\lambda r_0 \sqrt{\pi^3}} D(F_0) \quad (2-29)$$

其中 ΔT_c 是绝缘层和接触热阻引起的温升,经过很短的一个初始时间后便可认为是常数。

根据式(2-29),温度变化 $\Delta T(\tau)$ 对 $D(F_0)$ 作图应该得到一条直线。通过变换不同的 F_0 ,用参数估计的方法拟合试验中实测的温升和按式(2-28)计算的理论温升,当 $\Delta T(\tau)$ 对 $D(F_0)$ 拟合直线的偏差平方和最小时,所取的 F_0 就是计算所需要的最佳值,并由此可以由相应的拟合直线的斜率求出导热系数。

2.5.2 直线拟合^[55]

2.5.2.1 一元线性回归方程与偏差的平方和

一元回归分析是一种确定两个变量 x 和 y 之间函数关系的方法。所谓一元指只有一个变量 x , 而因变量 y 在某种程度上是随 x 而变化的。如果两个变量之间的关系还是线性的,那么,研究这两个变量之间的关系问题,就成为一元线性回归分析。

2.5.2.2 最小二乘法

在科学或生产中,常常根据实测数据 $(x_i, y_i) (i=1,2,\dots,n)$ 去寻找自变量和因变量 x 和因变量 y 的一个近似表达式 $\hat{y} = f(x)$ 。换句话说,就是按平面上的几个点进行曲线拟合的问题,通常也称为给数据配曲线或找经验公式。

求回归系数所遵循的原则是:当将所求出的系数代入经验公式后计算出的数值,应与实测数据呈最佳近似。所谓最小二乘法,就是使含有随机误差的各实测值与回归值的偏差平方和 q 达到最小,从而确定回归系数 a 、 b 的方法。

从式 (2-33) 可知, q 值与 a 、 b 有关,要找出一组 a 、 b 值,使

$$q(a,b) \Rightarrow \text{最小}$$

根据数学中的极限定理,要使 q 达到最小,只要将式 (2-33) 分别对 a 、 b 求偏导数并使其结果等于零便可以。于是 a 、 b 满足方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial b} = 0 \end{cases} \quad (2-34)$$

的一组解。

这里

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = -2 \left(\sum_{i=1}^n y_i - n \cdot a - b \sum_{i=1}^n x_i \right) = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) \cdot x_i = -2 \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - b \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) = 0 \end{cases}$$

经整理得:

$$\begin{cases} n \cdot a + b \cdot \bar{x} = n \cdot \bar{y} \\ n \cdot a \cdot \bar{x} + b \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \end{cases} \quad (2-35)$$

其中平均值: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

方程组 (2-35) 通常称为“正规方程组”,解此方程组便可求得参数 a 、 b 。

2.6 本章小节

本章首先在一些假定条件下得出了理想状态下瞬态平面热源法的数学模型。然后又利用柱坐标系中二维无限大物体导热的格林函数推导出无限大介质中瞬时圆盘形热源在不同半径处的温度响应,进而得出圆盘形热源的平均温度响应和对应的平均温升。在推导出瞬态平面热源法温度响应解析解的基础上,为了便于数值积分的运算,首先运用贝塞尔函数的级数形式对上述积分中的被积函数进行简化。然后分别利用二重和三重辛普森积分求解出了圆盘形热源的不同半径处的温度响应和平均的温度响应。随后又分析了瞬态平面热源法的测试原理,利用最小二乘法拟合实际的温升和计算的温升,通过变换不同的傅里叶数可以获得不同的拟合直线,当所拟合直线的偏差平方和最小时对应的傅里叶数值就是计算中所需要的,进而由相应的拟合直线的斜率就可以求出导热系数。

第三章 瞬态平面热源法的实验研究

3.1 瞬态平面热源法的测试设备

本实验中采用的测试设备是 Hot Disk 热常数分析仪，其组成装置如图 3-1 所示。本文主要是借助 Hot Disk 热常数分析仪的数据采集系统来获取探头表面在测试过程中的温升，并利用此温升来计算试样的导热系数。同时本文又以 Hot Disk 的测试结果来验证所编制的基于瞬态平面热源法的导热系数计算程序的精度。



图 3-1 Hot Disk 热常数分析仪

3.1.1 探头

探头是瞬态平面热源法测试系统中的一个重要部件，它一方面作为加热热源加热试样使其在短时间内有温度变化，另一方面在加热的同时又作为温度传感器来记录试样的温度变化。这种加热元件与温度传感器合一的仪器设计，实现

了测试自动化，操作简单，测试精度高。

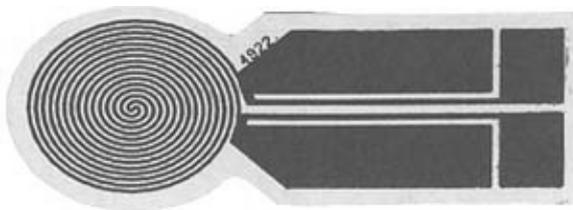


图 3-2 Hot Disk 探头结构

图 3-2 为 Hot Disk 热常数分析仪所配备的 Hot Disk 探头。Hot Disk 探头的中间是镍金属层， $10\mu\text{m}$ 厚的镍金属经过刻蚀处理后形成连续双螺旋的结构；外面是两层薄膜保护层，保护层一方面可以使探头具有一定的机械强度，另一方面可以保证探头在测试过程中的电绝缘性。在 $10\text{K}\sim 500\text{K}$ 的温度范围内，使用的保护层材料是 Kapton(聚酰亚胺)，保护层的厚度是 $25\mu\text{m}$ ，此种探头的厚度大概是 $60\mu\text{m}$ ；在 $500\text{K}\sim 1000\text{K}$ 的温度范围内，保护层材料是 Mica(云母)，厚度是 $100\mu\text{m}$ ，探头的厚度大概是 $210\mu\text{m}$ 。

Hot Disk 探头使用镍金属作为加热的元件，主要是因为镍金属的温度电阻系数比较大，给它施加一个很小的温升也会使它的电阻值发生明显的变化。因此，就可以很精确的通过测试探头的电阻变化来显示其温度变化。表 3-1 是 Hot Disk 探头对应不同温度下的温度电阻系数。

表 3-1 Hot Disk 探头的温度电阻系

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	温度电阻系数 (1/K)
0	0.00484
20	0.00470
30	0.00463
40	0.00456
50	0.00449
60	0.00443
70	0.00436
80	0.00430
90	0.00424
100	0.00418
110	0.00412
120	0.00406
150	0.00390
200	0.00368
300	0.00342
400	0.00149
500	0.00097
600	0.00086
700	0.00077
750	0.00074

3.1.2 数据采集系统

Hot Disk 热常数分析仪的数据采集系统主要出一个恒流电源、一个电压测量仪表和一个惠斯通电桥组成，其系统示意图如图 3-3 所示。

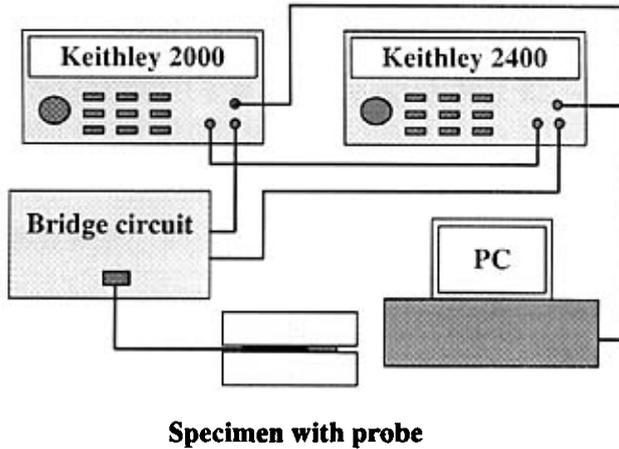


图 3-3 Hot Disk 系统示意图

Keithley 2400 是 Keithley 仪器公司生产的 2400 型数字源表，它用来给探头提供恒定的电流，可提供的电流范围是 $\pm 10\text{pA} \sim \pm 1\text{A}$ ，其能够提供的最大输出功率是 20W。

Keithley 2000 是 Keithley 生产的 2000 型数字多用表，它用来读取图 3 中 ΔU 的值。在测试中，Keithley 2000 起了三个作用：测试前，利用 ΔU 的值来调节图 3 中的 potentiometer（分压计）使 Bridge circuit（桥接电路）达到平衡，进而得出 R_0 的初始值；加热试样前，先在 40s 内平均读取 100 个时间点对应的 ΔU 的值，通过对这些值的分析可以看出试样的温度是否已经和测试环境达到一致；在加热时间内平均读取 200 个时间点所对应的 ΔU 的值，通过将些值转化为对应的电阻值的变化，就可以求出导热系数。

Bridge circuit (桥接电路)即所谓的惠斯通电路，一方面是用来测试 R_0 的值，另一方面是使通过探头的电流保持恒定，以保证探头的输出功率恒定。其具体结构如图 3-4 所示。

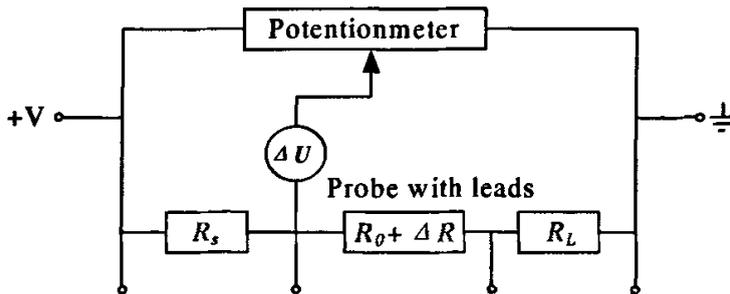


图 3-4 桥接电路原理图

其中 R_s 是标准电阻的电阻值， R_0 是探头在 $t = 0$ 时的电阻值， R_L 是探头所连接的导线

的电阻值, R_s 应与 R_0 和 R_L 之和基本接近; potentiometer 是分压计, 它的电阻值相当于 R_s 、 R_0 和 R_L 之和的 100 倍; ΔR 是测试过程中探头随温度升高而增加的电阻值; ΔU 是由于探头电阻增加而产生的电压变化; 桥接电路两端可提供的最大电压是 20V。

3.2 瞬态平面热源法的测试过程

3.2.1 测试前的准备工作

测试前需要将探头和试样在测试环境中放置两到三个小时, 使探头和试样与测试环境达到相同的温度, 以保证在测试过程中试样只与探头进行热量交换, 也就是说保证探头的加热作用是引起试样温度变化的唯一因素。另外, 还要在测试前一个小时将数据采集系统打开, 使之稳定, 以减少因系统本身因素而引起的误差。

3.2.2 测试参数

3.2.2.1 加热功率和测试时间

加热功率就是测试中探头用来加热试样的功率; 而测试时间是加热试样的时间, 同时也是记录电压变化的时间。对于导热系数较小的试样应选择低的加热功率和较长的测试时间; 而对于导热系数较大的试样应选择高的加热功率和较短的测试时间。

3.2.2.2 探头半径

探头半径的选择和被测试样的尺寸、热扩散率及测试时间有关。先引入探测深度的概念, 探测深度(Penetration depth) [39]是指加热过程中热流在试样中可以达到的最大深度。探头上任意一点到试样边缘上任意一点的距离必须大于探测深度, 以保证试样可被看作是无限大物体。探测深度可以表示为 $\Delta_p = K\sqrt{at_{mea}}$, 其中 K 是修正系数, 一般取 $K = 2$; a 是试样的热扩散率; t_{mea} 是总的测试时间。

再引入傅里叶数 Fo , Fo 是一个无因次时间, 可以表示为 $Fo = \frac{at_{mea}}{r_0^2}$ 。利用敏感系数的理论和大量的实验数据, 已有文献证明 Fo 的取值范围是 0.3 ~ 1.0 [42]。

当 $K = 2$ 时, $\Delta_p = 2\sqrt{at_{mea}}$, 将此时的 Δ_p 带入 Fo 的定义式并根据它的取值范围, 可

以得出 $1.1r_0 = \Delta_p = 2r_0$ 。

只要选择的探头能够使探测深度满足上面的取值范围，就可以认为选择的探头是合适的，但还需要用实际测试中得出的探测深度来验证一下。

3.3 实际测试中的参数补偿

3.3.1 热容补偿

在第二章推导试样的温度分布时假定加热热源的热容可以忽略不计，但实际的测试过程中，同样存在加热器（探头）的热容量引起的误差问题。在考虑加热器热容量时，可以采用加热器上温度均匀（等于测得的平均温度）的简化假定，则 τ 时刻施加给试样的实际加热量应为

$$q(\tau) = Q - C \frac{\partial \Delta T}{\partial \tau} \quad (3-1)$$

将上式中时间 τ 的一阶偏导数用中心差分代替，则上式可近似表示为

$$q(\tau_i) = Q - C \frac{\Delta T(\tau_{i+1}) - \Delta T(\tau_{i-1})}{\tau_{i+1} - \tau_{i-1}} \quad (3-2)$$

其中 C 是探头的热容量，即每升高 $1K$ 所吸收的热量， J/K 。

3.3.2 时间补偿

由于软件和硬件存在不可避免的延迟，在 $t = 0$ 时刻探头不能立刻以设定的功率加热试样，中间有一段时间的延迟，这段时间就称为延迟时间，记为 t_c 。

时间补偿后各测点对应的时间为

$$t'_i = t_i - t_c \quad (3-3)$$

式 (2-11) 可以改写成

$$\bar{\theta}(\lambda, a, t_i) = \frac{Q}{\lambda r_0 \sqrt{\pi^3}} \int_0^{\sqrt{at_i}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 R dR \int_0^1 \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right) R' dR' \quad (3-4)$$

由于时间上的延迟，探头在 t_i 时刻测出的温升应该表示为

$$\Delta T(t_i) = \Delta T_c + \frac{Q}{\lambda r_0 \sqrt{\pi^3}} D(a, t'_i) \quad (3-5)$$

$$\text{其中 } D(a, t_i) = \int_0^{\sqrt{at_i}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 R dR \int_0^1 \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right) R' dR' \quad (3-6)$$

t_i 时刻对应的傅里叶数为 $f(t_i) = \frac{at_i}{r_0^2} = \left(\frac{i}{200} - \tau_c\right) \cdot Fo$, 令 $\tau_c = \frac{t_c}{t}$, 则有

$$f(t_i) = \left(\frac{i}{200} - \tau_c\right) \cdot Fo \quad (3-7)$$

当 $i=1$ 时, $f(t_1) = \left(\frac{1}{200} - \tau_c\right) \cdot Fo$; 由 $f(t_1) \geq 0$, $Fo > 0$, 知 $\tau_c \leq 0.005$; 由 $\tau_c = \frac{t_c}{t}$, 得

$$0 \leq \tau_c \leq 0.005, \text{ 则 } 0 \leq t_c \leq 0.005 \cdot t.$$

当测试时间比较长时, t_c 就会比较大, 文献[56]指出延迟时间一般不会超过 0.1s, 则 t_c 的取值范围应该是 $0 \leq t_c \leq 0.005 \cdot t$ 且 $t_c \leq 0.1$ 。

由于 $\frac{\sqrt{at_i}}{r_0} = \sqrt{\left(\frac{i}{200} - \tau_c\right) \cdot Fo}$, 则式 (3-6) 可以改写为

$$D(i, Fo, \tau_c) = \int_0^{\sqrt{\left(\frac{i}{200} - \tau_c\right) \cdot Fo}} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \int_0^1 R dR \int_0^1 \exp\left(-\frac{R^2 + R'^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{RR'}{2\sigma^2}\right) R' dR' \quad (3-8)$$

则式 (3-5) 变为

$$\Delta T(t_i) = \Delta T_c + \frac{Q}{\lambda r_0 \sqrt{\pi^3}} D(i, Fo, \tau_c) \quad (3-9)$$

其中 $0.3 \leq Fo \leq 1.0$, $0 \leq \tau_c \leq 0.005$ 。

3.4 程序算法和流程示意图

在理论分析和实验研究的基础上, 编制了基于瞬态平面热源法测试原理的导热系数计算程序。此程序由一个主程序和两个子程序组成, 其中主程序流程图如图 3-5 所示, 热容补偿程序流程图如图 3-6, 时间补偿程序流程图如图 3-7 所示。

热容补偿程序是利用中心差分法来修正探头热容对实际加热功率的影响; 时间补偿程序是在时间延迟参数小于 0.5% 同时延迟时间小于 0.1s 的前提下, 通过比较同一个傅里叶数与不同时间延迟参数拟合的直线的偏差平方和来求解合适的时间延迟参数; 主程序是利用一个二分法迭代程序来寻找最佳的傅里叶数 Fo , 其根据是最佳的 Fo 对应的拟

合直线的偏差平方和在傅里叶数的取值范围 $0.3 \sim 1.0$ 之间最小。此外，式 (3-8) 中 $D(i, F_0, \tau_c)$ 的数值根据三重辛普森积分法计算得出。

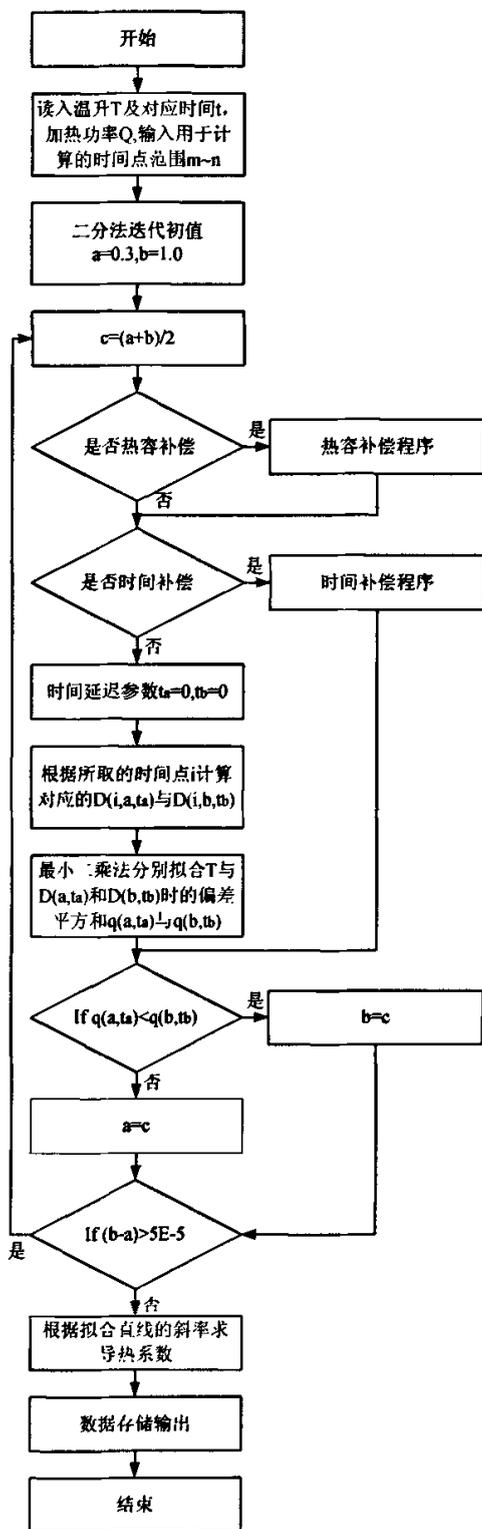


图 3-5 主程序流程图

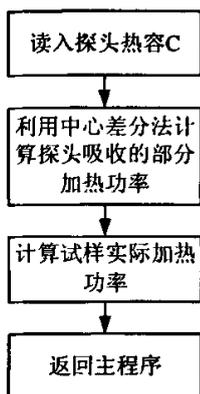


图 3-6 热容补偿程序流程图

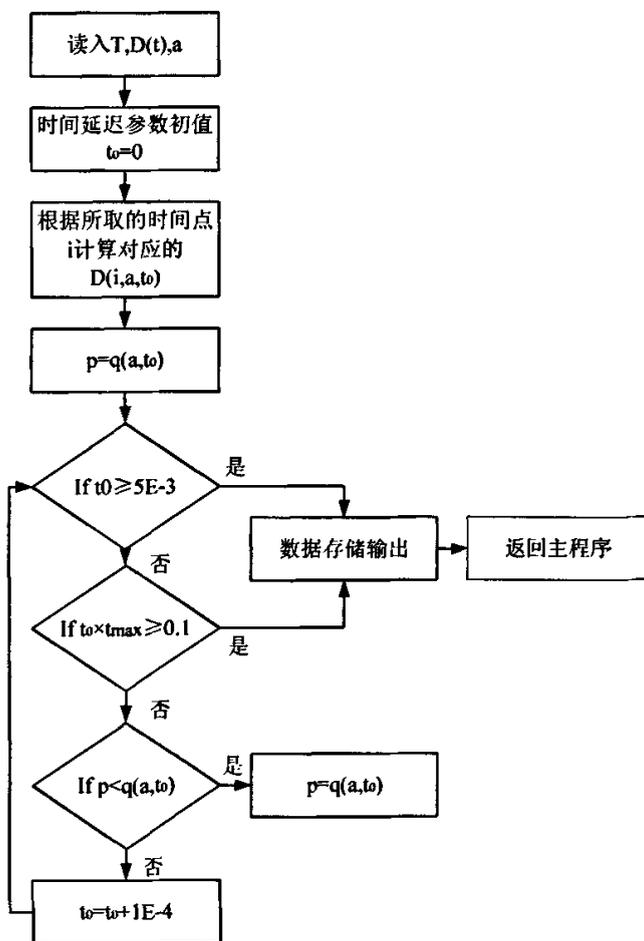


图 3-7 时间补偿程序流程图

3.5 原始数据与结果分析

3.5.1 试样与测试参数

本文选取不锈钢、石英砂和水这三种物质分别作为固体、松散物质和液体的代表，测试和计算了这三种试样的导热系数。测试前需要对探头半径、加热功率和测试时间三个参数进行设置，具体情况见表 3-2。

表 3-2 试样的测试参数

试样	探头		加热功率(W)	测试时间(s)
	半径(mm)	热容(J/K)		
不锈钢	6.403	9.84×10^{-3}	1	10
石英砂	6.403	9.84×10^{-3}	0.02	80
水	0.526	6.64×10^{-5}	0.008	3

对于不锈钢这样的固体试样，探头一般是根据试样的尺寸来选取的；对于石英砂这样的松散试样，在选择探头时不仅要考虑试样在容器内的尺寸，还要考虑颗粒之间的空隙对测试的影响，所以选择的探头半径应该至少是粒径的 10 倍；而对于水之类的液体试样，应选用最小的探头，这样需要的加热功率和测试时间都比较小，可以很大程度上减少对流换热对测试的影响。

加热功率和测试时间一般是根据试样的导热性能来选择的，导热性能比较好的试样需要的加热功率比较大而测试时间比较少，而导热性能比较差的试样则需要小的加热功率和长的测试时间。对于液体试样应该在有足够温升的前提下选择较小的加热功率和测试时间。

3.5.2 采集的温升值

本文计算所用的温升是利用 Hot Disk 热常数分析仪的数据采集系统获得的。在测试过程中，总的测试时间被平均分成二百个时间段，数据采集系统在测试过程中记录这二百个时间点对应的电压值，然后再根据电阻温度系数转化成温升值。表 3-3 显示了不锈钢、石英砂和水在测试过程中的温升值。

表 3-3 测试过程中采集的温升值

不锈钢			石英砂			水		
时间点	时间(s)	温升(K)	时间点	时间(s)	温升(K)	时间点	时间(s)	温升(K)
1	0.050	1.954	1	0.400	0.005	1	0.015	0.656
2	0.100	2.251	2	0.801	0.050	2	0.029	0.742
3	0.149	2.450	3	1.201	0.085	3	0.044	0.808
4	0.199	2.514	4	1.602	0.108	4	0.059	0.850
5	0.249	2.544	5	2.002	0.126	5	0.073	0.895
6	0.299	2.560	6	2.402	0.141	6	0.088	0.940
7	0.349	2.576	7	2.803	0.155	7	0.103	0.971
8	0.398	2.594	8	3.203	0.168	8	0.117	0.997
9	0.448	2.613	9	3.604	0.179	9	0.132	1.031
10	0.498	2.631	10	4.004	0.191	10	0.147	1.061
11	0.548	2.649	11	4.404	0.201	11	0.161	1.082
12	0.598	2.665	12	4.805	0.211	12	0.176	1.103
13	0.647	2.680	13	5.205	0.220	13	0.191	1.132
14	0.697	2.694	14	5.605	0.229	14	0.205	1.153
15	0.747	2.707	15	6.006	0.237	15	0.220	1.167
16	0.797	2.720	16	6.406	0.245	16	0.235	1.185
17	0.847	2.732	17	6.807	0.253	17	0.249	1.211
18	0.896	2.744	18	7.207	0.260	18	0.264	1.227
19	0.946	2.755	19	7.607	0.267	19	0.279	1.239
20	0.996	2.766	20	8.008	0.274	20	0.293	1.256
21	1.046	2.776	21	8.408	0.281	21	0.308	1.277
22	1.096	2.786	22	8.809	0.287	22	0.323	1.287
23	1.146	2.795	23	9.209	0.293	23	0.337	1.297
24	1.195	2.805	24	9.609	0.299	24	0.352	1.316
25	1.245	2.814	25	10.010	0.305	25	0.367	1.332
26	1.295	2.822	26	10.410	0.311	26	0.381	1.340
27	1.345	2.831	27	10.811	0.316	27	0.396	1.352
28	1.395	2.839	28	11.211	0.322	28	0.410	1.371
29	1.444	2.847	29	11.611	0.327	29	0.425	1.382
30	1.494	2.855	30	12.012	0.332	30	0.440	1.387
31	1.544	2.862	31	12.412	0.337	31	0.454	1.400
32	1.594	2.869	32	12.813	0.342	32	0.469	1.418
33	1.644	2.876	33	13.213	0.347	33	0.484	1.425
34	1.693	2.883	34	13.613	0.352	34	0.498	1.430
35	1.743	2.890	35	14.014	0.356	35	0.513	1.441
36	1.793	2.897	36	14.414	0.361	36	0.528	1.456
37	1.843	2.903	37	14.814	0.365	37	0.542	1.459
38	1.893	2.909	38	15.215	0.369	38	0.557	1.467
39	1.942	2.916	39	15.615	0.373	39	0.572	1.483
40	1.992	2.922	40	16.016	0.378	40	0.586	1.494

41	2.042	2.927	41	16.416	0.382	41	0.601	1.496
42	2.092	2.933	42	16.816	0.386	42	0.616	1.504
43	2.142	2.939	43	17.217	0.390	43	0.630	1.519
44	2.191	2.944	44	17.617	0.394	44	0.645	1.526
45	2.241	2.950	45	18.018	0.397	45	0.660	1.527
46	2.291	2.955	46	18.418	0.401	46	0.674	1.537
47	2.341	2.960	47	18.818	0.404	47	0.689	1.551
48	2.391	2.965	48	19.219	0.408	48	0.704	1.557
49	2.440	2.970	49	19.619	0.411	49	0.718	1.558
50	2.490	2.975	50	20.020	0.415	50	0.733	1.569
51	2.540	2.980	51	20.420	0.418	51	0.748	1.579
52	2.590	2.985	52	20.820	0.421	52	0.762	1.581
53	2.640	2.990	53	21.221	0.425	53	0.777	1.586
54	2.689	2.994	54	21.621	0.428	54	0.792	1.600
55	2.739	2.999	55	22.021	0.432	55	0.806	1.607
56	2.789	3.003	56	22.422	0.435	56	0.821	1.607
57	2.839	3.007	57	22.822	0.438	57	0.836	1.615
58	2.889	3.012	58	23.223	0.441	58	0.850	1.627
59	2.938	3.016	59	23.623	0.444	59	0.865	1.630
60	2.988	3.020	60	24.023	0.447	60	0.880	1.631
61	3.038	3.024	61	24.424	0.450	61	0.894	1.640
62	3.088	3.028	62	24.824	0.453	62	0.909	1.652
63	3.138	3.032	63	25.225	0.455	63	0.924	1.651
64	3.187	3.036	64	25.625	0.458	64	0.938	1.654
65	3.237	3.040	65	26.025	0.461	65	0.953	1.666
66	3.287	3.044	66	26.426	0.464	66	0.968	1.675
67	3.337	3.047	67	26.826	0.467	67	0.982	1.673
68	3.387	3.051	68	27.227	0.469	68	0.997	1.677
69	3.437	3.054	69	27.627	0.472	69	1.012	1.688
70	3.486	3.058	70	28.027	0.474	70	1.026	1.692
71	3.536	3.061	71	28.428	0.477	71	1.041	1.690
72	3.586	3.065	72	28.828	0.479	72	1.056	1.695
73	3.636	3.068	73	29.229	0.482	73	1.070	1.706
74	3.686	3.072	74	29.629	0.484	74	1.085	1.708
75	3.735	3.075	75	30.029	0.487	75	1.100	1.706
76	3.785	3.078	76	30.430	0.489	76	1.114	1.714
77	3.835	3.081	77	30.830	0.492	77	1.129	1.726
78	3.885	3.085	78	31.230	0.494	78	1.144	1.728
79	3.935	3.088	79	31.631	0.496	79	1.158	1.729
80	3.984	3.091	80	32.031	0.499	80	1.173	1.738
81	4.034	3.094	81	32.432	0.501	81	1.188	1.743
82	4.084	3.097	82	32.832	0.503	82	1.202	1.741
83	4.134	3.100	83	33.232	0.505	83	1.217	1.744

84	4.184	3.103	84	33.633	0.508	84	1.231	1.755
85	4.233	3.106	85	34.033	0.510	85	1.246	1.758
86	4.283	3.109	86	34.434	0.512	86	1.261	1.756
87	4.333	3.111	87	34.834	0.514	87	1.275	1.761
88	4.383	3.114	88	35.234	0.516	88	1.290	1.772
89	4.433	3.117	89	35.635	0.519	89	1.305	1.773
90	4.482	3.120	90	36.035	0.521	90	1.319	1.771
91	4.532	3.122	91	36.436	0.523	91	1.334	1.779
92	4.582	3.125	92	36.836	0.525	92	1.349	1.790
93	4.632	3.128	93	37.236	0.527	93	1.363	1.789
94	4.682	3.130	94	37.637	0.529	94	1.378	1.786
95	4.731	3.133	95	38.037	0.531	95	1.393	1.793
96	4.781	3.135	96	38.438	0.533	96	1.407	1.799
97	4.831	3.138	97	38.838	0.535	97	1.422	1.797
98	4.881	3.140	98	39.238	0.537	98	1.437	1.799
99	4.931	3.143	99	39.639	0.538	99	1.451	1.810
100	4.980	3.145	100	40.039	0.540	100	1.466	1.812
101	5.030	3.148	101	40.439	0.542	101	1.481	1.808
102	5.080	3.150	102	40.840	0.544	102	1.495	1.812
103	5.130	3.152	103	41.240	0.546	103	1.510	1.825
104	5.180	3.155	104	41.641	0.547	104	1.525	1.828
105	5.229	3.157	105	42.041	0.549	105	1.539	1.827
106	5.279	3.159	106	42.441	0.552	106	1.554	1.832
107	5.329	3.161	107	42.842	0.553	107	1.569	1.840
108	5.379	3.164	108	43.242	0.555	108	1.583	1.837
109	5.429	3.166	109	43.643	0.556	109	1.598	1.835
110	5.479	3.168	110	44.043	0.558	110	1.613	1.843
111	5.528	3.170	111	44.443	0.560	111	1.627	1.848
112	5.578	3.172	112	44.844	0.562	112	1.642	1.847
113	5.628	3.174	113	45.244	0.563	113	1.657	1.850
114	5.678	3.176	114	45.645	0.565	114	1.671	1.858
115	5.728	3.179	115	46.045	0.566	115	1.686	1.859
116	5.777	3.181	116	46.445	0.568	116	1.701	1.855
117	5.827	3.183	117	46.846	0.569	117	1.715	1.860
118	5.877	3.185	118	47.246	0.571	118	1.730	1.871
119	5.927	3.187	119	47.646	0.573	119	1.745	1.871
120	5.977	3.189	120	48.047	0.574	120	1.759	1.869
121	6.026	3.191	121	48.447	0.576	121	1.774	1.875
122	6.076	3.193	122	48.848	0.577	122	1.789	1.883
123	6.126	3.194	123	49.248	0.579	123	1.803	1.882
124	6.176	3.196	124	49.648	0.581	124	1.818	1.881
125	6.226	3.198	125	50.049	0.582	125	1.833	1.887
126	6.275	3.200	126	50.449	0.584	126	1.847	1.889

127	6.325	3.202	127	50.850	0.585	127	1.862	1.888
128	6.375	3.204	128	51.250	0.586	128	1.877	1.892
129	6.425	3.206	129	51.650	0.588	129	1.891	1.901
130	6.475	3.207	130	52.051	0.590	130	1.906	1.900
131	6.524	3.209	131	52.451	0.591	131	1.921	1.897
132	6.574	3.211	132	52.852	0.592	132	1.935	1.902
133	6.624	3.213	133	53.252	0.594	133	1.950	1.912
134	6.674	3.214	134	53.652	0.595	134	1.965	1.910
135	6.724	3.216	135	54.053	0.596	135	1.979	1.907
136	6.773	3.218	136	54.453	0.598	136	1.994	1.912
137	6.823	3.220	137	54.854	0.599	137	2.008	1.917
138	6.873	3.221	138	55.254	0.600	138	2.023	1.913
139	6.923	3.223	139	55.654	0.602	139	2.038	1.915
140	6.973	3.224	140	56.055	0.603	140	2.052	1.924
141	7.022	3.226	141	56.455	0.604	141	2.067	1.928
142	7.072	3.228	142	56.855	0.606	142	2.082	1.923
143	7.122	3.229	143	57.256	0.607	143	2.096	1.926
144	7.172	3.231	144	57.656	0.608	144	2.111	1.935
145	7.222	3.233	145	58.057	0.610	145	2.126	1.934
146	7.271	3.234	146	58.457	0.611	146	2.140	1.929
147	7.321	3.236	147	58.857	0.613	147	2.155	1.933
148	7.371	3.237	148	59.258	0.614	148	2.170	1.941
149	7.421	3.239	149	59.658	0.615	149	2.184	1.941
150	7.471	3.240	150	60.059	0.616	150	2.199	1.940
151	7.521	3.242	151	60.459	0.617	151	2.214	1.945
152	7.570	3.243	152	60.859	0.618	152	2.228	1.950
153	7.620	3.245	153	61.260	0.619	153	2.243	1.947
154	7.670	3.246	154	61.660	0.621	154	2.258	1.949
155	7.720	3.248	155	62.061	0.622	155	2.272	1.958
156	7.770	3.249	156	62.461	0.623	156	2.287	1.961
157	7.819	3.251	157	62.861	0.624	157	2.302	1.958
158	7.869	3.252	158	63.262	0.625	158	2.316	1.961
159	7.919	3.253	159	63.662	0.627	159	2.331	1.969
160	7.969	3.255	160	64.063	0.628	160	2.346	1.968
161	8.019	3.256	161	64.463	0.629	161	2.360	1.963
162	8.068	3.258	162	64.863	0.630	162	2.375	1.966
163	8.118	3.259	163	65.264	0.631	163	2.390	1.973
164	8.168	3.260	164	65.664	0.632	164	2.404	1.972
165	8.218	3.262	165	66.064	0.633	165	2.419	1.971
166	8.268	3.263	166	66.465	0.634	166	2.434	1.979
167	8.317	3.264	167	66.865	0.635	167	2.448	1.983
168	8.367	3.266	168	67.266	0.636	168	2.463	1.977
169	8.417	3.267	169	67.666	0.638	169	2.478	1.977

170	8.467	3.268	170	68.066	0.639	170	2.492	1.985
171	8.517	3.270	171	68.467	0.640	171	2.507	1.988
172	8.566	3.271	172	68.867	0.641	172	2.522	1.985
173	8.616	3.272	173	69.268	0.642	173	2.536	1.988
174	8.666	3.273	174	69.668	0.643	174	2.551	1.997
175	8.716	3.275	175	70.068	0.644	175	2.566	1.996
176	8.766	3.276	176	70.469	0.645	176	2.580	1.990
177	8.815	3.277	177	70.869	0.646	177	2.595	1.993
178	8.865	3.278	178	71.270	0.647	178	2.610	2.002
179	8.915	3.280	179	71.670	0.648	179	2.624	2.002
180	8.965	3.281	180	72.070	0.650	180	2.639	2.000
181	9.015	3.282	181	72.471	0.651	181	2.654	2.004
182	9.064	3.283	182	72.871	0.651	182	2.668	2.007
183	9.114	3.284	183	73.271	0.652	183	2.683	2.002
184	9.164	3.286	184	73.672	0.653	184	2.698	2.005
185	9.214	3.287	185	74.072	0.654	185	2.712	2.013
186	9.264	3.288	186	74.473	0.655	186	2.727	2.016
187	9.313	3.289	187	74.873	0.656	187	2.742	2.011
188	9.363	3.290	188	75.273	0.657	188	2.756	2.013
189	9.413	3.291	189	75.674	0.658	189	2.771	2.021
190	9.463	3.293	190	76.074	0.658	190	2.786	2.019
191	9.513	3.294	191	76.475	0.659	191	2.800	2.015
192	9.562	3.295	192	76.875	0.661	192	2.815	2.022
193	9.612	3.296	193	77.275	0.662	193	2.829	2.021
194	9.662	3.297	194	77.676	0.663	194	2.844	2.027
195	9.712	3.298	195	78.076	0.664	195	2.859	2.023
196	9.762	3.299	196	78.477	0.665	196	2.873	2.000
197	9.812	3.300	197	78.877	0.666	197	2.888	0.000
198	9.861	3.301	198	79.277	0.666	198	2.903	0.000
199	9.911	3.302	199	79.678	0.667	199	2.917	0.000
200	9.961	3.303	200	80.078	0.668	200	2.932	0.000

3.5.3 时间点的选取

测定试样的导热系数时，考虑试样相对于探头是无限大的，因此要求在测试过程中探头的热流不能达到试样的外边界；同时在数据的处理中考虑保护层两侧的温差是恒定的，因此要求处理的数据是两侧温差保持恒定之后的时间点所对应的数据。由上述两方面的要求知，在数据处理之前，必须舍去前面和后面的一些时间点所对应的数据。舍去的时间点的个数和探头保护层的厚度及试样与探头之间接触热阻的大小等有关，要根据具体的测试情况来酌情选取；但用来进行数据处理的时间点不能少于 100 个，以保证所

求导热系数的一般性。图 3-4 显示了不锈钢、石英砂和水在计算中所用到的时间点的范围。

表 3-4 时间点的范围

试样	时间点的范围	
	起点	终点
不锈钢	12	171
石英砂	17	176
水	26	192

3.5.3 计算结果与分析

在室温下利用 Hot Disk 热常数分析仪对上述三种试样进行了测试，并利用测试过程中获得温升和编制的程序分别计算出了三种试样在理想情况下、热容补偿后、时间补偿后和热补+时补后的导热系数，具体结果见表 3-5。

表 3-5 试样的导热系数计算结果

试样	计算结果 (W/m. K)	理想情况		热容补偿		时间补偿	
		计算值 (W/m. K)	相对误差 (%)	计算值 (W/m. K)	相对误差 (%)	计算值 (W/m. K)	相对误差 (%)
不锈钢	13.740	13.496	-1.78	13.518	-1.62	13.719	-0.15
石英砂	0.361	0.359	-0.55	0.361	0	0.359	-0.55
水	0.469	0.459	-2.13	0.462	-1.49	0.466	-0.64

在理想情况下，即不考虑探头热容和延迟时间对计算结果的影响，计算出的导热系数数值比较低。因为当不考虑加热器热容或延迟时间的影响时， $\Delta T(\tau)$ 对 $D(Fo)$ 拟合得出的直线斜率比实际情况下的直线斜率偏大，以至于计算的导热系数偏小。

表 3-6 热容补偿前后导热系数值的比较

试样	热容补偿	理想情况	相对误差 (%)
	(W/m. K)	(W/m. K)	
不锈钢	13.518	13.496	-0.16
石英砂	0.361	0.359	-0.55
水	0.462	0.459	-0.65

从表 3-6 可以看出，同一个加热器的热容量对不同材料导热系数的影响是不同的。对于热容量比较大的不锈钢，热容补偿前后的导热系数值相差比较小，加热器热容量的影响可以忽略不计；而对于热容量比较小的石英砂，热容补偿前后的数值相差比不锈钢的要大些。因此对于热容量比较小的试样，加热器热容量的影响就必须加以补偿。

表 3-7 时间补偿前后导热系数值的比较

试样	时间补偿	理想情况	相对误差 (%)
	(W/m. K)	(W/m. K)	
不锈钢	13.719	13.496	-1.63
石英砂	0.359	0.359	0
水	0.466	0.459	-1.50

从表 3-7 可以看出，时间补偿对不同材料导热系数的影响是不同的。一般来说，对于测试时间比较长的石英砂，时间补偿前后的导热系数值基本一致，延迟时间的对石英砂的影响可以不用考虑；而对于测试时间比较短的不锈钢和水，时间补偿前后的数值相差挺大，此时的时间补偿是必须要考虑的。因此，对于测试时间比较短的试样必须加以时间补偿。

表 3-8 导热系数计算结果与 Hot Disk 测试值的比较

试样	Hot Disk 测试值	计算结果	相对误差 (%)
	(W/m. K)	(W/m. K)	
不锈钢	13.751	13.740	-0.08
石英砂	0.357	0.361	1.12
水	0.474	0.469	-1.05

从表 3-8 可以看出，不锈钢、石英砂和水的导热系数计算结果和 Hot Disk 测试值相差不超过 2%，可见此计算结果具有一定的准确度。

3.6 本章小节

本文利用 Hot Disk 热常数分析仪的数据采集系统来获得计算导热系数所需的温升，为此，本章首先介绍了 Hot Disk 热常数分析仪的探头和数据采集系统。然后又对原来的数学模型进行了热容补偿和延迟时间补偿，以消除实际测试中探头热容和延迟时间对导

热系数的计算结果的影响。在上述理论分析的基础上又介绍了基于瞬态平面热源法的导热系数计算程序的算法和流程，该程序由一个主程序、一个热容补偿程序和一个时间补偿程序组成。选取和计算了不锈钢、石英砂和水的导热系数，其计算结果和 Hot Disk 热常数分析仪的测试值之间的相对误差分别是-0.08%,1.12%和 1.05%。同时，本文又分别比较分析了探头热容和延迟时间这两个因素对三种试样导热系数计算结果的影响。

第四章 结论

瞬态平面热源法是一种新的非稳态导热系数测试方法，它是在瞬态热线法和瞬态热带法的基础上发展起来的。瞬态热线法的理论基础是柱坐标中的一维瞬态导热问题；瞬态热带法则涉及二维瞬态导热；而瞬态平面热源法将探头做成圆盘形或正方形，将涉及柱坐标中的二维或直角坐标系中的三维瞬态导热，理论基础更加复杂，但测试的精度提高，制取试样更加方便。此外，它还具有能够测试的试样种类多，可测试的导热系数范围大，测试时间短等特点。从国内外该导热系数测试方法的发展和现状的分析来看，国外对于此项测试技术的研究已经趋于成熟，但国内在此方面还未作专门的系统研究。鉴于此，本文通过理论研究、数值计算和实验分析比较，探索瞬态平面热源法的传热理论和测试原理，为以后的研究打下基础。现将主要研究内容及结论总结如下：

(1) 瞬态平面热源法测定导热的原理是基于无限大介质中阶跃加热的圆盘形热源产生的瞬态温度响应。本文首先对瞬态平面热源法的传热模型在一些假定条件进行简化，得到了理想状态下的数学模型。然后又利用柱坐标系中二维无限大物体导热的格林函数推导出无限大介质中瞬时圆盘形热源在不同半径处的温度响应，进而得出圆盘形热源的平均温度响应和对应的平均温升。在圆盘形热源中，不同半径处的温度响应是一个二重积分，而平均温度响应和平均温升是一个三重积分。在整个推导过程中，格林函数法物理概念清晰，数学表达式简明，因而此方法便于计算高精度的非稳态导热问题。

(2) 在推导出瞬态平面热源法温度响应解析解的基础上，为了便于数值积分的运算，首先运用贝塞尔函数的级数形式对上述积分中的被积函数进行简化。然后分别利用二重和三重辛普森积分求解出了圆盘形热源不同半径处的温度响应和平均的温度响应。由计算出的温度分布可以看出：刚加热时温度升高的比较快；随着时间的增长，温度升高的速度变慢；圆心处的温度最高，随着半径的增加温度减小并趋于初始温度。

(3) 在实际测试中，导热系数的计算结果要受到探头热容和延迟时间的影响。通过进行热容补偿使计算用的加热功率理论值与试样在实际测试中获得的加热功率相一致，消除了探头热容对计算结果的影响。延迟时间补偿使探头表面的温升与实际的测试时间相对应，消除了延迟时间对计算结果的影响。

(4) 本文在上述理论分析的基础上编制了基于瞬态平面热源法的导热系数计算程序，该程序由一个主程序、一个热容补偿程序和一个时间补偿程序组成。计算导热系

数所需要的温升值由 Hot Disk 热常数分析仪的数据采集系统获得。为了验证程序的计算精度，选取了不锈钢、石英砂和水作为测试的试样，其导热系数的计算结果和 Hot Disk 热常数分析仪的测试值之间的相对误差分别是-0.08%, 1.12%和 1.05%。同时，本文又分别比较分析了探头热容和延迟时间对三种试样导热系数计算结果的影响，可以看出热容比较小的试样必须进行热容补偿，而测试时间比较短的试样也需要进行时间补偿。

参考文献

- [1] 奚同庚. 无机材料热物性学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981:8-9.
- [2] 杜洛金. 固体热物理性质导论—理论和测量[M]. 奚同庚, 王梅华译. 北京: 中国计量出版社, 1987:1-10.
- [3] 冯石开, 俞中原. 智能式导热系数测定仪[J]. 黑龙江自动化技术与应用, 1992, 11(3):51-55.
- [4] 羊梅君. 便携式超声探伤仪器的功能分析与设计[J]. 今日电子, 2004, 1:5-6.
- [5] K. D. Magic. Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods[M]. New York: Plenum Press, 1984:201-212.
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998:20-32.
- [7] 霍尔曼. 传热学[M]. 马庆芳, 马重芳, 王兴国译. 北京: 人民教育出版社, 1979:52-68.
- [8] 中国金属学会, 中国有色金属学会. 金属物理性能及测试方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 299-454.
- [9] Y. S. Touloukian. Thermophysical Properties of Matter, The Thermophysical Research Center Data Series[M], Vol. 2. New York: Plenum Press, 1970:13a-25a.
- [10] W. J. Parker, R. J. Jenkins. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity[J]. J. Appl. Phys. 1961, 32(9):1679-1681.
- [11] R. E. Taylor. Critical Evaluation of Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity[J]. Rev. Scient. Instru. 1962, 33(1):21-25.
- [12] J. A. Ape, G. W. Lehman. Temperature and Finite Pulse-Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity[J]. J. Appl. Phys. 1963, 34:1909-1903.
- [13] A. B. Donaldson. Radical Conduction Effects in the Pulse Method of Measuring Thermal Diffusivity [J]. J. Appl. Phys. 1963, 34:926-927.
- [14] A. M. Nathan. A Dynamic Method for Measuring the Specific Heat of Metals[J]. J. Appl. Phys. 1951, 22:234-235.
- [15] R. E. Taylor. An Investigation of the Heat Pulse Method for Measuring Thermal Diffusivity[J]. J. Appl. Phys. 1965, 16(4):509-515.
- [16] 王补宣, 韩礼钟, 王维成, 焦芝林. 同时测定热绝缘材料 α 和 λ 的常功率平面热源法[J]. 工程热物理学报, 1980,1(1):1-5.
- [17] 王补宣, 韩礼钟, 方肇洪. 常功率平面热源法加热器热容量的影响[J]. 工程热物理学报, 1983,

- 4(1): 38-45.
- [18]崔萍, 方肇洪. 改进的常功率平面热源法[J]. 山东建筑工程学院学报, 2001, 6(2):48-52.
- [19]Z. H. Fang, D. L. Xie, N. R. Diao, J. R. Grace, C. J. Lim. A New Method for Solving the Inverse Conduction Problem in Steady Heat Flux Measurement[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1997, 40(16):3947-3953.
- [20]贾力, 方肇洪, 钱兴华. 高等传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003:65-75.
- [21]王补宣, 虞维平. 热线法同时测定含湿多孔介质导热系数和导温系数的实验技术[J]. 工程热物理学报, 1986, 7(4):381-386.
- [22]于绍文. 计算机在热线导热仪中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1999, 20(2):177-180.
- [23]王补宣, 江亿. 利用热探针在现场同时测定松散介质 α 和 λ 的“加热-冷却法”[J]. 工程热物理学报, 1985, 6(3):249-254.
- [24]张永忠. 用双热丝法同时测定介质的导热系数和导温系数[J]. 工程热物理学报, 1991, 12(1): 50-53.
- [25]李强, 宣益民. 液体导热系数的双线式瞬态热线测试技术[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(7):678-679.
- [26]S. E. Gustafsson, E. Karawacki, M. N. Kahn. Transient Hot-Strip Method for Simultaneously Measuring Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Solids and Fluids[J]. J. Appl. Phys. 1979, 12:1411-1421.
- [27]T. Log. Thermal Conductivity Measurements Using a Short Transient Hot-Strip Method[J]. Rev. Sci. Instrum. 1992, 63(8):966-971.
- [28]W. J. Parker, R. W. Jenkins. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity[J]. J. Appl. Phys., 1961, 32(9).
- [29]Z. H. Fang, R. Taylor. Determination of Thermal Diffusivity of Liquids by Laser Flash Method[J]. High Temps. - High Pressures, 1987, 19:29-36.
- [30]S. E. Gustafsson. Transient Plane Source Techniques for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Solid Materials[J]. Rev. Sci. Instrum. 1990, 62(3):797-804.
- [31]S. E. Gustafsson. Transient Hot-Strip Method for Simultaneously Measuring Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Solids and Fluids[J]. J. Appl. Phys. 1979, 12:1411-1421.
- [32]S. E. Gustafsson. Transient Transport Studies of Electrically Conducting Materials Using the Transient Hot-Strip Technique[J]. J. Appl. Phys. 1986, 19:727-735.
- [33]N. S. Saxena, M. A. Chohan, S. E. Gustafsson. Interstitial Air Pressure Dependence of Effective

- Thermal Conductivity and Diffusivity of Rajasthan Desert Sand Using Transient Hot-Strip Method[J]. Jap. Journ. Appl. Phys. 1987, 26(1):51-54.
- [34]K. Bala, P. R. Pradhan, N. S. Saxena, M. P. Aaxena. Effective Thermal Conductivity of Copper Powers [J]. J. Appl. Phys. 1989, 22:1068-1172.
- [35]T. Log. Transient Hot-Strip Method for Simultaneous Determination of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Refractory Materials[J]. J. AM. Geram. Soc.1991, 74(3):650-653.
- [36]T. Log, M. Metallinou. Thermal Conductivity Measurements Using A Short Transient Hot-Strip Method[J]. Rev. Sci. Instrum. 1992, 63(8):2966-3971.
- [37]S. Singh, N. S. Saxena, D. R. Chaudhary. Simultaneous Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Some Building Materials Using the Transient Hot-Strip Method[J]. J. Appl. Phys. 1985, 18:1-8.
- [38]T. Log. Transient Hot-Strip (THS) Method for Measuring Thermal Conductivity of Thermally Insulating Materials[J]. Fire and Materials, 1993, 17:131-138.
- [39]S. E. Gustafsson. Transient Plane Source Technique for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Measurements of Solid Materials[J]. Rev. Sci. Instrum. 1991, 62(3):797-804.
- [40]S. E. Gustafsson. International Patent Application. No. PCT/SE89/00137.
- [41]B. M. Suleiman, S. E. Gustafsson, L. Borjesson. A Practical Cryogenic Resistive Sensor for Thermal Conductivity Measurements[J]. Sensors and Actuators, 1996, A57:15-19.
- [42]V. Bohac, M. K. Gustavasson, L. Kubicar, S. E. Gustafsson. Parameter Estimations for Measurements of Thermal Transport Properties with the Hot Disk Thermal Constants Analyzer [J]. Rev. Sci. Intrum. 2000, 71(6):2452-2455.
- [43]Instruction Manual, Hot Disk Constants Analyzer: Version 5.0, Hot Disk Inc.1999.
- [44]S. M. Suleiman, E. Karawacki, S. E. Gustafsson. Thermal Conductivity of the Ceramic Cectorite 130P between 88 and 280K Measured Using the Transient Plane Source Technique[J]. J. Appl. Phys.1992, 25:813-817.
- [45]Hideaki Naga. Thermal Conductivity Measurement of Molten Silicon by a Hot-Disk Method in Short-Duration Microgravity Environments[J]. Jpn. J. Appl. Phys. 2000, 39:1405-1408.
- [46]B. M. Suleiman, I. Ul-Haq, E. Karawacki, A. Maqsood, S. E. Gustafsson. Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of the Y- and Er- Substituted 1:2:3 Superconducting Compounds in the Vicinity of the Transition Temperature[J]. Phys. Rev. B, 1993, 48(6):4095-4102.

- [47]B. M. Suleiman, E. Kacawacki, S. E. Gustafsson. Thermal Conductivity and Diffusivity of KH_2PO_4 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ Polycrystalline Samples Near Their Phase Transitions[J]. J. Mater. Res.1994, 9(7): 1895-1898.
- [48]徐慧, 杨杰. 瞬态热带法和瞬态平面法测量材料热传导系数[J]. 测控技术, 2004, 23(11):71-73.
- [49]黄婊子, 樊栓狮. 采用 HOTDISK 测量材料热导率的实验研究[J]. 化工学报, 2003, s1:67-70.
- [50]彭浩, 樊栓狮, 黄婊子. 瞬变平面热源法测定常压下四氢呋喃水合物的导热系数[J]. 化学通报, 2005, 12:923-927.
- [51]何小瓦, 黄丽萍. 瞬态平面热源法热物理性能测量准确度和适用范围的标定—常温下标准 Pyroceram9606 热物理性能测量[J]. 宇航计测技术, 2006, 26(4):31-42.
- [52]B. V. Karlekar, R. M. Desmond. 工程传热学[M]. 刘吉萱译. 北京: 人民教育出版社, 1981:2-7.
- [53]许志宏. TQ—16 机 FORTRAN 语言常用算法程序集[M]. 北京: 化学工业出版社, 1982.
- [54]Shoichiro Nakamura. 科学计算引论—基于 MATLAB 的数值计算[M]. 梁恒等译. 北京: 电子工业出版社, 2002:153-156, 167-172.
- [55]田胜元, 萧曰嵘. 实验设计与数据处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996:121-124.
- [56]Yi He. Rapid Thermal Conductivity Measurement with a Hot Disk Sensor-Part 1. Theoretical Considerations[J]. Thermochimica Acta, 2005, 436:122-129.

后 记

回首研究生三年的学习生活，最让我难忘的是诸多老师、同学、朋友对我的学习和工作所提供的热情的指导和无私的帮助。在此，我要将最诚挚的谢意献给他/她们。

首先，本论文的顺利完成得益于我的导师方肇洪教授的悉心帮助与指导，从论文选题到论文撰写，无不倾注了导师的心血和汗水。方老师高尚的人格、渊博的学识、严谨不苟、精益求精的治学态度为我整个硕士研究生学习期间以至今后的学习工作中树立了榜样，将使我受益终生，在此表示最崇高的敬意和衷心的感谢。

另外还要感谢崔萍、周伟、李旻、陈卫翠等师兄师姐，刘惠、陈丽、满意等同学，余伟、赵强等师弟师妹们的热心指导和帮助，在此表示深深地感谢。

我的硕士学业能够顺利完成离不开家人的全力支持，在此表示真心地感谢。

最后，感谢山东建筑大学给我提供了继续学习的机会。

孙亮亮

2006年6月15日于山东建筑大学

攻读硕士学位期间发表的学术论文

1. 陈卫翠, 孙亮亮, 刘巧玲, 贾立群, 方肇洪. 高性能地埋管换热器钻孔回填材料的实验研究. 山东建筑热能动力论文集, 2006:19-22.
2. 孙亮亮, 陈卫翠, 方肇洪. 利用瞬态平面热源法测定材料的导热系数. 中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集, 2006:1378-1385.
3. Liangliang Sun, Zhiming Yu and Zhaohong Fang, Thermal conductivity measurements of grouts using transient plane Source Method, the 8th Asian Thermophysical Properties Conference (accepted).