

天津大学

硕士学位论文

Hot Disk法导热系数测定仪的开发

姓名：赵世迁

申请学位级别：硕士

专业：测试计量技术及仪器

指导教师：李艳宁

20090801

摘要

随着工业发展和能源危机的出现,保温材料的品种不断增多,对其性能方面的要求也不断提高。保温材料的导热系数是用来衡量绝热及保温材料的导热特性和保温性能的重要参数,对导热系数的测定已成为人们日益关注的工作,导热系数的测量方法和仪器也在不断的完善和改进。

导热系数测定方法分为稳态法和瞬态法。目前稳态法中广泛使用的是基于双试件保护平板法的导热系数测定仪。然而双试件保护平板法普遍存在着测量时间过长、测量范围小、对试件制备要求高、测量结果受接触热阻影响且测量范围小等缺点。而目前瞬态法中应用最广的是热线法,但热线法只适用于导热系数小于 $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的各向同性均质材料导热系数的测定。

针对目前国内已有的导热系数测定仪的上述缺点,本课题开发了一种基于 TPS 方法用 Hot Disk 作为探头的导热系数测定仪。TPS 法指瞬态平面热源法,属瞬态法的一种,该方法可将导热系数测量时间大大缩短,从双试件保护平板法的 3-5 小时缩短为几秒到几分钟,同时避免了接触热阻对测量结果的影响;相比于热线法,它可以测量导热系数大于 $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的材料,且既可测量各向同性材料又可测量各向异性材料。本仪器的测量范围广,适用于金属、陶瓷、塑料等材料,也适用于液体、气体等材料的导热系数检测。

本论文介绍了种基于 TPS 方法用 Hot Disk 作为探头的导热系数测定仪的现状和所存在的问题,阐述了 TPS 瞬态平面热源技术及 Hot Disk 法的具体原理,从机械、电子两方面设计了 Hot Disk 法导热系数测定仪的仪器,提出测量原理和电路,设计数据采集和处理软件,并设计出合适的传感器,介绍了不同形式的样品对应的详细的测量方式以及数据的处理分析方式,根据采集的数据计算样品的导热系数,分析了影响导热系数测量值的主要因素以及如何减小影响,并对 Hot Disk 法导热系数测定仪进行校准和标定,指出了仍然存在的问题。

关键词: 热盘法 瞬态平面热源技术 导热系数 热扩散率

ABSTRACT

With the development of industry and the appearance of energy crisis, many kinds of heat insulators appear, at the same time there are more demands on their performances. The measurement of thermal conductivity which indicates the capability of heat conduction has been paid more and more attention, as a result that the methods of measurement of thermal conductivity has also been improved.

While there are so many disadvantages in the GHP(Guarded Hot Plate thermal conductivity measuring method), which has been used widely at present, for example, excessively long hours needed for the measurement, and the highly strict requirements for the samples' preparation, etc. as well as the Hotwire Method, which can not be used in measuring material with the thermal conductivity higher than $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ and is not suitable for anisotropy material. Therefore, this paper introduces a new type of thermal conductivity measuring method, based on the theory of TPS (Transient plane source techniques or thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials). This new apparatus can shorten the measuring time greatly, which is even more than 3 hours in GHP method, and only seconds to minutes needed now. On the other hand, this apparatus could measure the material with higher thermal conductivity of both anisotropy and isotropy.

This paper includes the following aspects: the principle used in the measurement--TPS method; the mechanic designing of this apparatus; the electric circuits designing; and the designing of the sensor used in this apparatus; as well as the software used to collect data and the way to analyze these data; then we discuss the character and the performance of this new apparatus.

KEY WORDS: TPS, Hot Disk, Thermal conductivity, Thermal diffusivity

独创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：赵世迁 签字日期： 2009 年 8 月 日

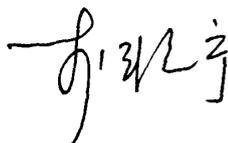
学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 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，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：赵世迁

导师签名：



签字日期： 2009 年 8 月 日

签字日期： 2009 年 8 月 日

第一章 绪论

导热系数是个重要的热物理参数,反映材料的热工性能,是鉴别材料保温性能优良的主要标志,对工程设计有重要作用。导热系数的应用十分广泛,特别是在石油、化工、材料、军工生产等部门的有关传热设计中是必不可少的。为了使工程设计合理,节省能源和原材料,提高产品的质量,都需要有准确且可靠的导热系数等热物理参数的资料。本课题设计的导热系数测定仪可用于固体、粉末、涂层、薄膜、液体、各向异性材料等的测定。

近几年,随着我国建筑节能法规和标准的出台,建筑业对建筑节能越来越重视。因此,准确测得建筑材料的导热系数,对于工程合理选材及工程验收具有十分重要的意义。然而伴随材料科学的飞速发展,对材料的测试方法提出了更高的要求,即不断拓宽应用范围、提高测试精度和测试速度。因此需要不断地改进传统测试方法,并采用全新的测量技术。

本章首先介绍了导热及导热系数的基本含义,接着通过导热系数测定仪的国内外发展现状的分析总结了目前 Hot Disk 型导热系数测定仪所存在的问题,提出了本仪器设计的特点及对其研究的目的和意义,总结了本课题的主要工作。

1.1 引言

热量总是自动地从温度较高的物体传给温度较低的物体。因此,只要物体内部或物体之间有温度差,就必然发生传热现象。热量自高温处传给低温处是自发过程。传热的基本形式只有三种,即热传导、对流传热、辐射传热。热传导简称导热,是指物质各部分之间没有相对位移,而是直接接触发生能量传递的现象,即它是依靠物质分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而进行的一种热量传递现象,可以发生在固体、液体和气体中。在导热过程中,热量从温度较高的物体传到与之接触的温度较低的物体,或者从一个物体中温度较高的部分传到温度较低的部分^[1]。导热系数是用来衡量材料的导热特性和保温性能的重要参数,材料绝热性能的高低由材料本身的导热系数大小决定。导热系数是物体固有的物性参数,取决于材料的成分、空隙度、吸水性、含水量、内部结构和热传导时的环境与温度等诸多因素^[2]。绝热材料是保温、保冷、隔热材料的总称,是指不易传热的、对热流具有显著阻抗性的材料或材料复合体,一般指导热系数小于等于 $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 的材料。在建筑和工业中采用良好的保温技术与材料,是节约能源、

改善居住环境和使用寿命的一个重要方面。为了节约能源，工业领域、建筑领域都在研究、生产绝热材料。绝热材料的导热系数愈小，其绝热性能愈好。绝热材料的导热系数的精确测量对于环境工程、建筑工程、工业工程、科研、节能等都有重要意义。

一般来说，可以通过理论和实验两种途径来确定物质的导热系数^[3]。理论方法指根据物质的导热机理，分析导热的物理模型，通过理论方式做出较为复杂的数学分析和计算来得到导热系数。目前除少数物质，如某些气体、液体、纯金属外，还难于从理论上分析和计算出各种物质的导热系数。另一种方法是通过实验测定物质的导热系数，由于导热系数随物质成分、结构的变化而不同，实验测定导热系数就成为研究物质热物性的主要途径。

采用实验的方法确定材料导热系数的方法主要分为两大类：稳态法和非稳态法(瞬态法)^[2]。稳态法的特点是试件内的温度分布是不随时间而变化的稳态温度场，当试样达到热平衡后，借助测量试样单位面积的热流速率和温度梯度，就可以直接测定试件的导热系数。非稳态法的特点是试件内的温度分布是随着时间而变化的非稳态温度场，借助测量试件的温度变化速率，测定试件的热扩散系数，再根据试件的其他参数计算得到试件的导热系数。这里热扩散系数指是物体中某一点的温度的扰动传递到另一点的速率的量度，是导热系数与容积热容之比，单位为 m^2/s 。

导热系数的测试方法很多，为了尽可能全面地反映出已有导热系数测试方法的概貌，美国普渡大学热物理性能研究中心(T.P. R.C) 的 CINDAS 分析归纳了如下几种分类方法：

- (1) 根据导热过程的宏观机理分为稳态法和非稳态法；
- (2) 根据热流在试样上的流向分为轴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。

图 1-1 列出了目前公认的导热系数测试方法的分类和名称^[4-7]。各种不同的导热系数测试方法都有其自身的优点、局限性、应用范围和方法本身所带来的不准确性。因此，不能笼统地对测试方法的优劣进行评判，而应视具体情况而定。

基于傅立叶导热定律描述的稳态条件进行测量的方法主要适用于在中等温度下测量中低导热系数的材料，这些方法包括^[8-9]：热板法、保护热板法、热流法、保护热流法、沸腾换热法等。而动态(瞬时)方法，如热线法、激光闪射法，主要用于测量高导热系数材料或在高温条件下测量。此外，还有一些测量方法或测量技巧，包括热脉冲法、准稳态测量法、恒功率平面热源法、瞬态平面热源法(TPS)^[10, 11]等。

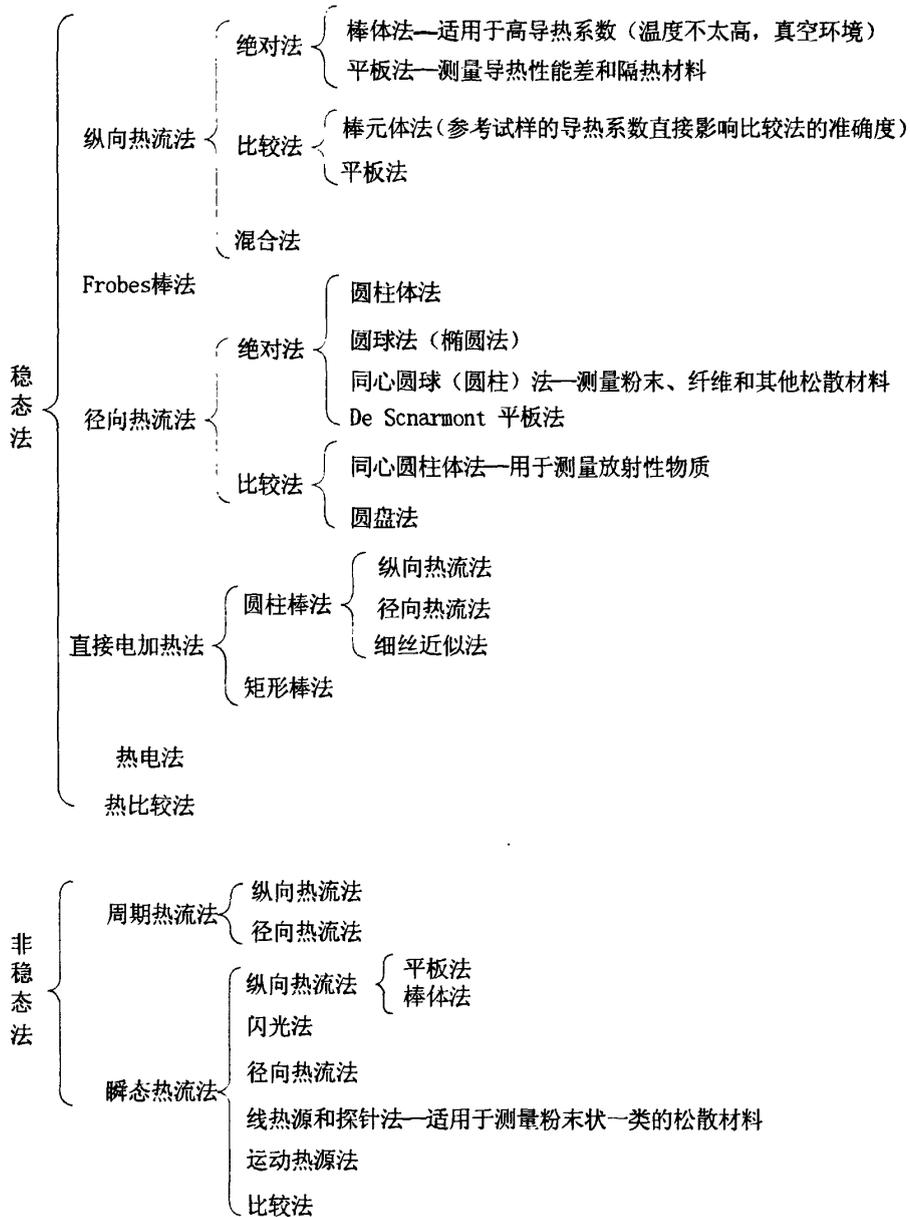


图 1-1 热物性(导热系数)测试方法名称及分类

最早的测量采用的是静态方法，其主要特点是在已知样品的壁厚上建立温度梯度，并控制从一边传递到另一边的热量，然后根据傅里叶热传导的基本定理，计算出样品的导热系数。最常用的热流是一维的，但有时也会使用其它的形式。在测量中最常用的是防护热板法^[12](Guarded Hot Plate thermal conductivity measuring method, GHP)。GHP是指防止热量通过边界从系统散发出去的一种设

置，例如在样品周围设置热障。在这些方法中，热量在样品中传递的计算模型都比较简单。该方法也是ASTM、ISO等机构发布的标准测量方法的基础。有了标准的指导，理论上可以在实验室建立自己的GHP。

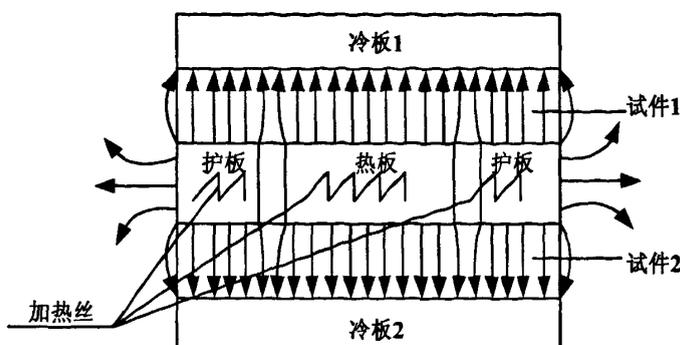


图1-2 防护热板法(GHP)导热原理示意图

这些方法存在以下一些缺点：

(1)为了使散发到环境中热量达到最小，要求样品的尺寸很大。因为样品的面积越大，其周边的影响就会越小；

(2)由于该方法一般用于绝热材料，这些材料的导热系数很低，要在样品的壁厚上建立温度梯度必须花费很长的时间；

(3)温度梯度通常较大，国家标准中推荐 10°C 、 20°C 或者 $^{\circ}\text{C}$ ，实际测量中有时甚至达到 $50\text{-}60^{\circ}\text{C}$ ，导热系数的测量结果最多只能是该温度范围内的平均值，测量结果不能反映样品中存在的相变或发生的反应；

(4)静态法存在的最大问题是热电偶与样品表面的接触电阻对传热性能的影响，其中的差异所引起的误差尚无法进行补偿，该误差往往会造成材料的绝热性能测量值过高。当温度很高、样品是良导热体或样品表面比较粗糙时，接触电阻产生的问题更为严重。所以当导热系数高于 $2\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 时，GHP 就不能作为导热系数的标准测量方法。

与静态法不同，瞬态法^[13-15]在测量时发出一个信号从而在样品中产生热量，同时测量温度对时间的响应。我们可以分别测量热扩散系数和导热系数，也可以对它们进行同时测量。与静态法相比，瞬态法的优越性在于它可以避免接触电阻的影响，这使它可以对很大范围的导热系数进行精确测量，从而扩大了适用材料的范围。

激光发射法是测量热扩散系数最常用的瞬态方法。它一般不能对聚合物等热扩散系数较小的材料进行测量，在此我们不做详细说明，只作简要的介绍。该方

法适用于测量各向同性材料、固体材料，也可以对如金属这样的良导热体进行测量；测量可以在高温下进行，而且测量迅速。由于该方法只能得出热扩散系数，因此要计算导热系数，还必须从其它的测量中获得热容值。误差在两次测量中的传播会降低测量的精确度。

热线法^[16]也是一种常用的瞬态法。热线法的测量设备比较简单，只要将规定直径和长度的金属线的两端用连接器连接起来，并使之与样品接触，然后在导线中通入电流产生热量。导线温度的变化取决于样品的冷却效率。根据样品温度随时间的变化计算导热系数，该方法不需要太多的硬件。简单的设计使之成为测量液体导热系数的理想工具。但在测量固体导热系数时碰到一些困难，由于液体可以轻易地将导线润湿，而要使固体与导线保持良好的接触则非常难。

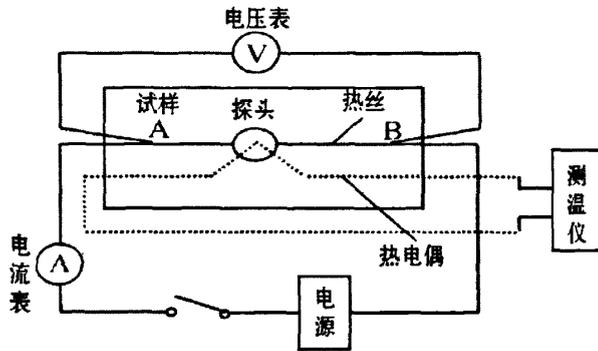


图1-3 热线法测试装置示意图

热带法^[17]也是在热线法基础上开发出来，只是将金属线压成扁平的金属带，提高与样品表面的接触。由于带状物有一定的面积，因此可以用来同时测量热扩散系数和导热系数。热带法与热线法的工作原理一样，都是将电流通过金属产生热量，样品的性质决定了热量传递到样品中的方式。金属带只能用于测量绝缘的样品。要得到较好的测量结果，样品表面的粗糙度应当非常小。许多商业测试方法都基于热带法和热带理论，也就是把金属带置于基体上，另一面与样品接触。最终的响应只有一半来自样品，另一半来自已知导热系数的基体，从而降低了测量的灵敏度。

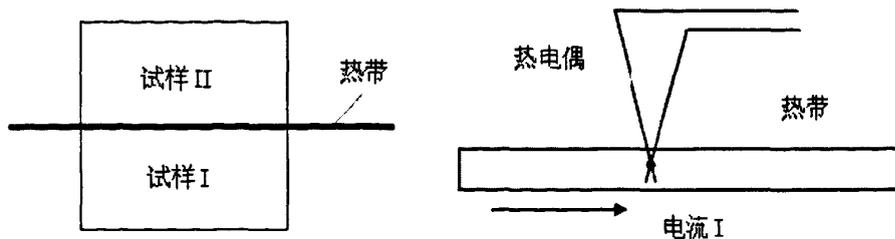


图1-4 热带法示意图

最近在热带法基础上开发出了瞬态平面热源技术(Transient Plane Source Method, TPS), 该方法也被称为“Gustafsson”探头法或 Hot Disk 法^[10-11]。与热带方法相比, TPS 探头可以看成由金属丝(一般采用金属镍)弯成的同心圆环, 并在圆环的两面覆盖有抗腐蚀性和机械性能良好的聚合物保护层。在本方法中, 探头是由导电金属镍经刻蚀处理后形成的连续双螺旋结构的薄片, 外层为附有一层保护层, 它令探头具有一定的机械强度, 同时保持探头与样品之间的电绝缘性。探头通常被放在两片样品中间进行测试。探头的温升是时间的函数。探头既是温度传感器有作为加热源(自加热传感器)。然后利用对应的模型和边界条件对响应进行分析。

在测试过程中, 电流通过镍丝时会产生的热量, 热量会同时向探头两侧的样品进行扩散。热量在材料中扩散的速率依赖于材料的热扩散系数和导热系数等热特性。通过记录温度与探头的响应时间, 材料的这些特性可以被计算出来。由于 Hot Disk 探头既是热源又是温度传感器, 因而本方法非常快捷和便利, 同时也相当精确。

与其他方法相比, Hot Disk 法的优点有:

- (1)直接测量热传播, 可以节约大量的时间;
- (2)不会和静态法一样受到接触热阻的影响;
- (3)无须特别的样品制备, 只需相对平整的样品表面;
- (4)可用于固体、粉末、涂层、薄膜、液体、各向异性材料等的测定

在过去二十年中, 瞬态平面热源技术被越来越多地被研究人员应用于各种不同类型材料的热物性的测试。瞬态平面热源技术被越来越多地被研究人员应用于各种不同类型材料的热物性的测试。

1.2 Hot Disk 法导热系数测定仪的国内外发展现状和存在问题

目前, 国外已经有基于 Hot Disk 原理的商品化导热系数测定仪, 如:

(1)瑞典凯戈纳斯有限公司, THERMAL CONSTANTS ANALYSER TPS 2500S 型导热系数测定仪, 可用于固体、粉末、涂层、薄膜、液体和各向异性材料等导热系数、热扩散系数和热容的快速测定。

导热系数测定范围 $0.005\sim 500\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

热扩散系数: $0.1\sim 100\text{mm}^2/\text{s}$

热容: 最大 $5\text{MJ}/\text{m}^3\text{k}$

测量时间: 1~1280 秒

重复性误差: 小于 3%

准确度: 优于 5%

温度范围: 标准测量: 室温

带有熔炉: 室温~ 750°C

带有循环器: $-20^\circ\text{C}\sim 180^\circ\text{C}$

样本最小尺寸: 0.5mm 高, 直径 2mm(圆柱形样本), 无须特别的样品制备, 只需相对平整的样品表面

材料类型: 金属、合金、陶瓷、硅片、聚合物、粘结剂、纸、织物等

满足 ISO 标准(ISO/DIS22007-2.2)

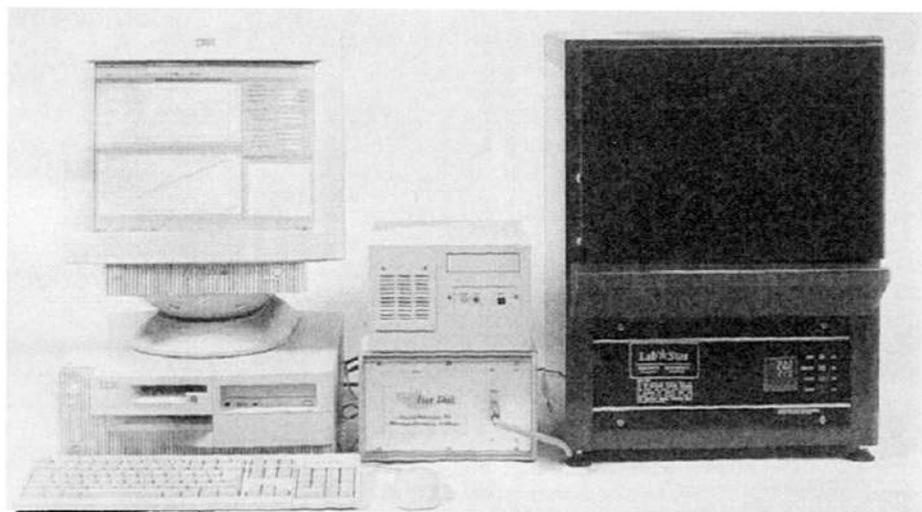


图 1-5 瑞典凯戈纳斯有限公司 TPS 2500S 型导热系数测定仪

(2)法国赛塔拉姆仪器公司(SETARAM Instrumentation), Mathis TCi™导热系数分析仪, 可用于直接及间接测量 (计算)各种固体, 粉末和液体的蓄热系数、热扩散系数与导热系数, 无损测试。

导热系数测定范围: $0\sim 100\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

测量时间: 0.8~5 秒

样本最小尺寸: 17mm(直径)

样本最大尺寸: 不限

最小厚度: 一般为 0.5mm, 依据材料的导热性而定

最大厚度: 不限

温度范围: $-58^{\circ}\text{F} \sim 392^{\circ}\text{F}$ ($-50^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$)

准确度: 优于 5%

材料类型: 固体, 液体, 粉末和膏体

目前国内尚未有厂家生产基于 Hot Disk 法的导热系数测定仪。国外厂家的产品最明显的优点是测量速度快, 一般几秒钟到几分钟就可完成样品的导热系数的测定或者间接测定, 所用时间远远低于现在的防护板法^[12]; 且对样品的制备要求很低, 只需要平整的接触面和相对较小的尺寸维度就能完成测量。存在的问题主要有: 测量精度较低, 误差为 5%; 重复性差, 重复测量的误差值较大。

1.3 本课题的研究意义、目的和主要内容

导热系数是个重要的热物理参数, 反映了材料的热工性能, 是鉴别材料保温性能优良与否的重要标志, 对工程设计有极其重要的作用。为了使工程设计合理, 节省能源和原材料, 提高产品的质量, 都需要有准确且可靠的导热系数等热物理参数的资料。近几年, 随着我国建筑节能法规和标准的出台, 建筑业对建筑节能越来越重视。因此, 准确测得建筑材料的导热系数, 对于工程合理选材及工程验收具有十分重要的意义。然而伴随材料科学的飞速发展, 对材料的测试方法提出了更高的要求, 即不断拓宽应用范围、提高测试精度和测试速度。因此需要不断地改进传统测试方法, 并采用全新的测量技术。

导热系数测定仪是绝热材料的绝热性能和质量监测的关键仪器, 广泛应用于计量和质检部门对绝热材料的检定, 以及科研和生产单位对新型绝热材料的研制。但目前国内已有的导热系数测定仪存在着测量精度不高、测量时间很长、测量范围小, 且不能进行低温测量等问题, 这严重制约了绝热材料的开发研制、生产以及使用。

针对已有导热系数测定仪存在的问题, 本课题开发了一种基于 Hot Disk 方法的导热系数测定仪。本仪器将导热系数测量时间大大缩短, 从一般双平板保护法的 3 个小时缩短为几秒到几分钟, 另外本仪器可以进行测量温度低于室温的测量, 且测量范围广, 可以测量陶瓷、金属甚至液体等材料的导热系数。本论文的

主要内容包括该仪器的测量原理、测量装置的设计与实现，测量结果的计算与分析等内容，具体工作包括以下几个方面：

1. 绪论，介绍了已有导热系数测定仪的工作原理和 Hot Disk 法原理测量导热系数的仪器的现状，分析了目前 Hot Disk 法导热系数测定仪所存在的问题，提出了本课题的研究意义、目的和主要内容。

2. Hot Disk 法导热系数测定仪的测量原理，阐述了 Hot Disk 法导热系数测定仪的测量原理——TPS 瞬态平面热源技术及 Hot Disk 法的原理，推导了导热系数的计算公式，为导热系数的机械设计、电路设计、数据处理、软件设计和仪器的标定提供了理论依据。

3. 提出 Hot Disk 法的技术指标，然后结合 Hot Disk 导热系数测定仪的设计要求，设计了机械探头和电子电路，并提出了探头的评价指标和评价方法。

4. 样品测试和数据处理分析及导热系数的计算，介绍不同形式的样品对应的详细的测量方式以及数据的处理分析方式，如何根据采集的数据计算样品的导热系数。

5. Hot Disk 法导热系数测定仪的校准和精度分析，分析影响导热系数测量值的主要因素以及如何减小影响，并对 Hot Disk 法导热系数测定仪进行校准和标定。

6. 总结与展望，对本论文内容进行了总结，指出了所做工作和有待改进的地方，并对今后的工作进行了展望。

第二章 Hot Disk 法导热系数测定仪的测量原理

本章将阐述 Hot Disk 法导热系数测定仪的测量原理——TPS 瞬态平面热源技术及 Hot Disk 法的具体原理。

人们已经开发出许多用于测量材料传热性能的方法,然而伴随材料科学的飞速发展,对材料的测试方法提出了更高的要求,即不断拓宽应用范围、提高测试精度。对于很多新材料,成分、工艺参数和使用条件上的微小变化都会影响材料的行为和性能。要发挥新材料的最大优越性,对其性能的准确测量非常重要。因此需要不断地改进传统的测试方法,并采用全新的测量技术。而我们常常很难从教科书和参考资料中获得足够的相关数据,因此对实际样品的测量变得非常的必要。

2.1 瞬态平面热源法(TPS)的基本原理

为简化模型,这里先假定 TPS 瞬态过程是在各向同性介质中发生。各向同性介质的导热系数独立于温度,与外界的温度无关。设 $T(x, y, z, t)$ 是各向同性介质中点 $P(x, y, z)$ 处在 t 时刻时的温度值,根据傅里叶定律^[18,19],在三维各向同性介质中热传导的方程式为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{K}{\rho c} \quad (2)$$

这里:

κ : 热扩散率(Thermal Diffusivity), 单位 m^2/s

K : 导热系数(Thermal Conductivity), 单位 $W/(m \cdot K)$

ρ : 密度, 单位 g/m^3

c : 比热容(Specific Heat Capacity), 单位 $J/(kg \cdot K)$

ρc : 容积热容(Volumetric Heat Capacity, VHC), 单位 $J/(m^3 \cdot K)$ 温度变化较小时, 可以认为 ρ 和 c 是不变的, 与温度无关。

假设在各向同性介质中存在着热源 $Q(x, y, z, t)$, 当 $t=0$ 时刻时打开这个热源, 则方程(1)修正为^[19]:

$$\frac{Q}{\kappa \cdot \rho c} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1a)$$

即

$$\frac{Q}{\rho c} + \kappa \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1b)$$

通常 $Q(x, y, z, t)$ 是位置 (x, y, z) 与时间的函数, 是在 (x, y, z, t) 点上单位时间内, 单位体积上发出的热量或者单位体积上损耗的热量, 单位为 $J/(m^3 \cdot K)$ 。

方程(1)的通解($Q=0$ 时)是:

$$T = T_0 + \frac{1}{(4\pi\kappa t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4\kappa t}\right), \quad (t > 0) \quad (3)$$

其中 T_0 是初始的温度值。由于内热源 Q 的存在, 根据方程(3)给出的基础解, 方程(1a)的解可表示为:

$$T(\vec{r}, t) = T_0 + \int_0^t \int_{V'} \frac{Q(\vec{\xi}, t')}{\rho c} \frac{1}{[4\pi\kappa(t-t')]^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{(\vec{r}-\vec{\xi})^2}{4\kappa(t-t')}\right) d^3 \vec{\xi} dt' \quad (4)$$

由于点 $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 是一个瞬态点热源, 仅在 $t'=0$ 时刻产生热量, 那么 $Q(\vec{\xi}, t') = Q_0 \delta(\vec{\xi} - \vec{r}) \delta(t')$ $Q(\vec{\xi}, t') = Q_0 \delta(\vec{\xi} - \vec{r}_0) \delta(t')$ 这里 $\delta(x)$ 是狄拉克函数。从(4)式可以得到瞬态点热源的解:

$$T(\vec{r}, t) = T_0 + \frac{Q_0 / \rho c}{(4\pi\kappa t)^{3/2}} \left(-\frac{(\vec{r} - \vec{r}_0)^2}{4\kappa t}\right) \quad (5)$$

注意到由于包含了时间和体积, $\frac{Q_0}{\rho c}$ 在(5)中的单位变成了 Km^3 。可以验证, 在数值上, Q_0 可以认为是点热源所释放的总热量:

$$H = \int_{V'} \int_0^t Q(\vec{\xi}, t') d^3 \vec{\xi} dt' = Q_0 \quad (6)$$

从(5)中可以看到, 内热源确实使样品的温度升高了 $\Delta T = T(\vec{r}, t) - T_0$, 由于:

$$H = \int_{-\infty}^{\infty} \rho c \Delta T d^3 \vec{r} = Q_0 \quad (7)$$

另外考虑到:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{4\kappa t}\right) = (4\pi\kappa t)^{1/2} \quad (8)$$

因此, (4)式的通解就是瞬态点对时间和体积的积分。根据(4)式解出热扩散系数 κ , 然后根据热扩散系数与导热系数的关系计算出导热系数的值。

2.2 单环热源

Hot Disk 传感器由双螺旋的镍丝构成, 可以认为是有一定数量的同心圆环构成^[9]。首先考虑在 $z'=0$ 处的平面上半径为 a 的单个圆环。如果用柱坐标系, 热源的强度可以表示为:

$$Q = Q_0 \delta(r' - a) \delta(z') \delta(t') \quad (9)$$

t 时间内释放的总热量为:

$$\begin{aligned} H &= \int_V Q dV dt' \\ &= \int_0^\infty Q r' dr' \int_0^{2\pi} d\theta' \int_{-\infty}^\infty dz' \int_0^\infty dt' = 2\pi a Q_0 \end{aligned} \quad (10)$$

因此, 从数值上说, Q_0 是圆环在单位长度上释放的热量。

在柱坐标系中, 对任一点在样本位置 $\vec{r} = (r, \theta, z)$, 相对于源点的位置 $\vec{\xi} = (r', \theta', z')$ 容易证明, $(\vec{r} - \vec{\xi})^2 = r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - \theta') + (z - z')^2$ 。假定热源在 $z'=0$ 平面上, 根据方程(4), 由瞬态环热源引起的温度上升为^[19]:

$$\begin{aligned} & T(r, \theta, z, t) - T_0 \\ &= \frac{1}{\rho c (4\pi \kappa t)^{3/2}} \int_0^\infty e^{-[r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - \theta')]/4\kappa t} \\ & \quad \times Q_0 \delta(r' - a) \delta(z') r' dr' \int_0^{2\pi} d\theta' \int_{-\infty}^\infty e^{-(z-z')^2/4\kappa t} dz' \\ &= \frac{e^{-z^2/4\kappa t} e^{-(r^2 + a^2)/4\kappa t} Q_0}{\rho c (4\pi \kappa t)^{3/2}} \int_0^{2\pi} e^{ra \cos(\theta - \theta')/2\kappa t} a d\theta' \\ &= \frac{2\pi a Q_0 e^{-(r^2 + a^2 + z^2)/4\kappa t}}{\rho c (4\pi \kappa t)^{3/2}} I_0 \left(\frac{ra}{2\kappa t} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中:

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \cos \theta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \sin \theta} d\theta \quad (12)$$

是贝塞尔函数的零阶的第一类修正。

当单环热源是连续的，热源的强度可表达为：

$$Q = Q_0 \delta(r' - a) \delta(z') u(t') \quad (13)$$

其中 $u(t)$ 是单位阶跃函数：

$$u(t') = \begin{cases} 0 & \text{for } t' < 0 \\ 1 & \text{for } t' \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

$t=0$ 时刻热源被打开，并且一直保持打开状态，那么在 t 时刻时，热源环所释放的总热量为：

$$\begin{aligned} H(t) &= \int_{V'} Q dV' dt' \\ &= \int_0^{\infty} Q_0 \delta(r' - a) r' dr' \int_0^{2\pi} d\theta' \int_{-\infty}^{\infty} \delta(z') dz' \times \int_0^t u(t') dt' = 2\pi a Q_0 t \end{aligned} \quad (15)$$

因此，可以明确 $2\pi a Q_0$ 是热源功率消耗的总量，即 $P_0 = 2\pi a Q_0$

为了得到连续圆环引起的温度上升，需要做一些变换，把(11)中的 t 变为 $t-t'$ ，对时间 t' 进行积分得到：

$$\begin{aligned} T(r, \theta, z, t) - T_0 &= \\ &= \frac{2\pi a Q_0}{\rho c (4\pi \kappa t)^{3/2}} \int_0^t \frac{e^{-(r^2 + a^2 + z^2)/4\kappa(t-t')}}{(t-t')^{3/2}} \times I_0 \left(\frac{ra}{2\kappa(t-t')} dt' \right) \end{aligned} \quad (16)$$

在方程(11)中， $2\pi a Q_0$ 是热源释放出的总的热量，单位是 J(焦耳)，但是在方程(16)中， $2\pi a Q_0$ 是热源输出的总功率，单位是 J/s，因为这里还没有对时间进行积分。

2.3 Hot Disk 传感器

Hot Disk 传感器设计为在整个圆盘结构上有相同的功率密度，可以看作是由 m 个间距相同的镍丝做成的同心圆环。假设 a 是最大圆环的半径，则最小的环的半径为 $\frac{a}{m}$ ，加热丝的总长度为：

$$L = \sum_{i=1}^m 2\pi l \frac{a}{m} = (m+1)\pi a \quad (17)$$

假定热源是连续的，在 $t=0$ 时刻开启，那么：

$$Q = Q_0 \sum_{l=1}^m \left(r' - \frac{la}{m} \right) \delta(z') u(t') \quad (18)$$

同理，可以计算出传感器在 $0 \sim t$ 时间内释放的总热量为：

$$\begin{aligned} H &= \int_V Q(\xi', t') dV dt \\ &= \int_0^{\infty} Q_0 \sum_{l=1}^m \delta \left(r' - \frac{la}{m} \right) \delta(z') r' dr' \int_0^{2\pi} d\theta' \\ &\quad \times \int_0^{\infty} dz' \int_0^t u(t') dt' = \pi a(m+1) Q_0 t = L Q_0 t \end{aligned} \quad (19)$$

和期望的一样，传感器线圈上单位长度单位时间释放的热量仍然为 Q_0 ， $\pi a(m+1)Q_0 = P_0$ 是 Hot Disk 的输出功率。

由 Hot Disk 引起的温度上升可以通过对方程(4)积分得到，热源的强度由方程(18)得到，在方程(16)用 $\frac{a}{m}$ 替换 a ，对 l 求和，得到：

$$\begin{aligned} \Delta T(r, z, t) &= \frac{2\pi Q_0}{\rho c} \int_0^t \frac{dt'}{[4\pi\kappa(t-t')]^{3/2}} \\ &\quad \times \sum_{l=1}^m \frac{la}{m} e^{-(r^2 + (l^2 a^2 / m^2) + z^2) / 4\kappa(t-t')} \times I_0 \left(\frac{r la}{2m\kappa(t-t')} \right) \\ &= \frac{P_0}{\rho c m(m+1)} \int_0^t \frac{dt'}{[4\pi\kappa(t-t')]^{3/2}} \\ &\quad \times \sum_{l=1}^m l e^{-(r^2 + (l^2 a^2 / m^2) + z^2) / 4\kappa(t-t')} \times I_0 \left(\frac{r la}{2m\kappa(t-t')} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

这里用到了 $\pi a(m+1)Q_0 = P_0$ 。

在 Hot Disk 测量方法中，我们仅关心传感器近表面处的温度变化。因此，令 $z \rightarrow 0$ ，方程(20)变为：

$$\Delta T(r, t) = \frac{P_0}{\rho c m(m+1)} \int_0^t \frac{dt'}{[4\pi\kappa(t-t')]^{3/2}}$$

$$\times \sum_{l=1}^m l e^{-(r^2+(l^2 a^2/m^2)+z^2)/4\kappa(t-t')} I_0\left(\frac{rla}{2m\kappa(t-t')}\right) \quad (21)$$

引入变量 σ 令

$$\sigma^2 = \frac{\kappa(t-t')}{a^2} \quad (22)$$

那么 $dt' = -2\sigma a^2 d\sigma/\kappa$, 当 $t'=0$ 时, $\sigma = \frac{\sqrt{\kappa t}}{a}$, 当 $t'=t$ 时, $\sigma=0$ 。因此, 方程(21)变为:

$$\begin{aligned} \Delta T(r,t) &= \frac{P_0}{2\pi^{3/2} m(m+1)\rho c} \int_{\sqrt{\kappa}/a}^0 \left(\frac{-d\sigma}{\kappa\sigma^2 a}\right) \times \sum_{l=1}^m l e^{-((r^2/a^2)+(l^2/m^2))/4\sigma^2} I_0\left(\frac{rl}{2m\sigma^2}\right) \\ &= \frac{P_0}{2\pi^{3/2} am(m+1)K} \int_0^{\sqrt{\kappa t}/a} \left(\frac{d\sigma}{\sigma^2}\right) \times \sum_{l=1}^m l e^{-((r^2/a^2)+(l^2/m^2))/4\sigma^2} I_0\left(\frac{rl}{2m\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (23)$$

这里

$$\tau = \frac{\sqrt{\kappa t}}{a} \quad (24)$$

是一个无量纲的参数, 称为特征时间比, $K = \kappa\rho c$ 是导热系数。

方程(23)描述了在 $z=0$ 平面上任一点(即传感器表面)通过电流后的温度上升。但是在 Hot Disk 测量过程中, 只能测得传感器本身的温度上升, 因此, 需要确定传感器自身的平均的温度上升。对同心圆在总长度上对温度取平均值 $\Delta\bar{T}(r, \tau)$:

$$\Delta\bar{T}(\tau) = \frac{1}{L} \int_0^{2\pi} \Delta T(r, \tau) \sum_{k=1}^m \delta\left(r - \frac{k}{m}a\right) r d\theta \quad (25)$$

把方程(23)带入方程(25), 考虑到 $L = (m+1)\pi \cdot a$, 传感器表面处的温度上升可以表达为:

$$\begin{aligned} \Delta\bar{T}(\tau) &= \\ &= \frac{1}{(m+1)\pi a} \frac{P_0}{2\pi^{3/2} am(m+1)K} \int_0^{\sqrt{\kappa t}/a} \frac{d\sigma}{\sigma^2} \sum_{k=1}^m \frac{ka}{m} \sum_{l=1}^m l e^{-((k^2/a^2)+(l^2/m^2))/4\sigma^2} I_0\left(\frac{kl}{2m\sigma^2}\right) 2\pi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \sum_{k=1}^m l e^{-((k^2/a^2)+(l^2/m^2))/4\sigma^2} I_0\left(\frac{kl}{2m^2\sigma^2}\right) 2\pi \\ & = \frac{P_0}{\pi^{3/2} aK} D(\tau) \end{aligned} \quad (26)$$

这里 $D(\tau)$ 是无量纲的时间函数, 由下式给出^[19,20,21]:

$$D(\tau) = \frac{1}{m^2(m+1)^2} \int_0^\tau \frac{d\sigma}{\sigma^2} \sum_{k=1}^m k \sum_{l=1}^m l e^{-((k^2+l^2)/m^2)/4\sigma^2} \times I_0\left(\frac{kl}{2m^2\sigma^2}\right) \quad (27)$$

从方程(26), 我们看到 Hot Disk 传感器的平均温度上升与 $D(\tau)$ 成比例。

用 Hot Disk 传感器测定样品的导热特性时, 在 $t=0$ 时刻接上恒流源, 那么传感器的温度变化将作为时间的函数记录下来。通过监测 Hot Disk 传感器的阻值变化, 就能测得 Hot Disk 传感器表面区域平均的温度上升:

$$R = R_0 [1 + \alpha \Delta \bar{T}(\tau)] \quad (28)$$

其中, R 是 Hot Disk 传感器 t 时刻的总电阻, R_0 是 $t=0$ 时刻的电阻值, α 是 Hot Disk 传感器的电阻温度系数(TCR), 对镍来说, α 是已知的。根据公式(28), 我们能准确确定 $\Delta \bar{T}(\tau)$ 。如果知道 t 与 τ 的关系, 就能画出 $\Delta \bar{T}(\tau)$ 与 $D(\tau)$ 的函数曲线, 该曲线应该是一条直线, 并且直线的斜率是 $\frac{P_0}{\pi^{3/2} aK}$, 由此可以计算出导热系数 K 。但是, 因为 $\tau = \frac{\sqrt{\kappa t}}{a}$, 而热扩散率 κ 是未知的, 合适的 τ 值也是不确定的。为了计算 K , 经常画出不同 κ 值下 $\Delta \bar{T}(\tau)$ 与 $D(\tau)$ 的函数曲线, 正确的 κ 值应该使 $\Delta \bar{T}(\tau)$ 与 $D(\tau)$ 服从线性关系。这一优化过程可以通过软件来实现, 直到找到最优化的 κ 值。在实际操作过程中, 可分别测量材料的密度和比热容, 这样的话, κ 只由 K 一个参数决定。因此导热系数和热扩散率可以同时从上述方法中获得。

第三章 Hot Disk 法导热系数测定仪设计

本章首先提出了 Hot Disk 法导热系数测定仪的技术指标和基本功能，并结合这些指标提出了对测头和电子电路的设计要求，然后分别设计了 HotDisk 测头和电子电路。

3.1 常见的温度测量方法

自然界中几乎所有的物理化学过程都与温度紧密相关，因此温度是工农业生产、科学试验以及日常生活中需要普遍进行测量和控制的一个重要物理量。

温度测量方法根据温度传感器的使用方式，通常分为接触法测温与非接触法测温两类^[22,23]。

接触法测温 由热平衡原理可知，两个物体接触后，经过足够长的时间达到热平衡，它们的温度必然相等。如果其中之一为温度计，就可以用它对另一个物体实现温度测量，这种测温方式称为接触法。其特点是，温度计要与被测物体有良好的热接触，使两者达到热平衡。因此，测温准确度较高。

接触式测温仪表比较简单、可靠，测量精度较高；但因测温元件与被测介质需要进行充分的热交换，需要一定的时间才能达到热平衡，所以存在测温的延迟现象，同时受耐高温材料的限制，不能应用于很高的温度测量，温元件要与被测物体接触，往往要破坏被测物体的热平衡状态，并受被测介质的腐蚀作用。因此，对感温元件的结构、性能要求苛刻。

非接触法测温 利用物体的热辐射能随温度变化的原理测定物体温度，这种测温方式称为非接触法。它的特点是：不与被测物体接触，也不改变被测物体的温度分布，热惯性小。从原理上看，用这种方法测温上限很高，通常用来测定 1000℃ 以上的移动、旋转或反应迅速的高温物体的表面温度。非接触式仪表测温是通过热辐射原理来测量温度的，测温元件不需与被测介质接触，也不会破坏被测物体的温度场，反应速度一般也比较快；但受到物体的发射率、测量距离、烟尘和水气等外界因素的影响，其测量误差较大。实现这种测温方法可利用物体的表面热辐射强度与温度的关系来检测温度。有全辐射法、部分辐射法、单一波长辐射功率的亮度法及比较两个波长辐射功率的比色法等。

表 3-1 接触法与非接触法测温特性

	接触法	非接触法
特点	测量热容量小的物体有困难；测量移动物体有困难；可测量任何部位的温度；便于多点集中测量和自动控制	不改变被测介质温场，可测量移动物件的温度，通常测量表面温度
测量条件	测温元件要与被测对象很好接触；接触测温元件不要使被测对象的温度发生变化	由被测对象发出的辐射能充分照射到检测元件；被测对象的有效发射率要准确知道，或者具有重现的可能性
测量范围	容易测量 1000℃ 以下的温度，测量 1200℃ 以上的温度有困难	测量 1000℃ 以上的温度较准确，测量 1000℃ 以下的温度误差大
准确度	通常为 0.5%~1%，依据测量条件可达 0.01%	通常为 20℃ 左右，条件好的可达 5~10℃
响应速度	通常较慢，约 1~3 分钟	通常较快，约 2~3 秒，即使迟缓的也在 10 秒内

根据温度测量所依据的物理定律和所选择作为温度标志的物理量，测量方法还可以归纳成下列几类：

膨胀测温法 采用几何量(体积、长度)作为温度的标志^[24]。最常见的是利用液体的体积变化来指示温度的玻璃液体温度计。还有双金属温度计和定压气体温度计等。

压力测温法 采用压强作为温度的标志^[25]。属于这一类的温度计有工业用压力表式温度计、定容式气体温度计和低温下的蒸汽压温度计三种。

磁学测温法 根据顺磁物质的磁化率与温度的关系(见顺磁性)来测量温度^[26]。磁温度计主要用于低温范围，在超低温(小于 1K)测量中，是一种重要的测温手段。

声学测温法 采用声速作为温度标志，根据理想气体中声速的二次方与开尔文温度成正比的原理来测量温度^[27]。通常用声干涉仪来测量声速。这种仪表称为声学温度计。主要用于低温下热力学温度的测定。

频率测温法 采用频率作为温度标志，根据某些物体的固有频率随温度变化的原理来测量温度^[28]。这种温度计叫频率温度计。在各种物理量的测量中，频率(时间)的测量准确度最高(相对误差可小到 1×10^{-14})，近些年来频率温度计受到人

们的重视, 发展很快。石英晶体温度计的分辨率可小到万分之一摄氏度或更小, 还可以数字化, 故得到广泛使用。此外, 核磁四极共振温度计也是以频率作为温度标志的温度计。例如氯酸钾中 Cl 的共振频率随温度变化, 而且不同来源的氯酸钾都具有相同的频率-温度关系。

辐射测温法 物体在任何温度下都会发出热辐射(红外线或可见光), 辐射测温法采用光谱辐射度(即光谱辐射亮度)或辐射出射度(即辐射通量密度)作为温度标志^[29]。

电学测温法 采用某些随温度变化的电学量作为温度的标志。属于这一类的温度计主要有热电偶温度计、电阻温度计和半导体热敏电阻温度计。

热电偶温度计 是一种在工业上使用极广泛的测温仪器^[30]。热电偶由两种不同材料的金属丝组成。两种丝材的一端焊接在一起, 形成工作端, 置于被测温度处; 另一端称为自由端, 与测量仪表相连, 形成一个封闭回路。当工作端与自由端的温度不同时, 回路中就会出现热电动势(见温差电现象)。当自由端温度固定时(如 0℃), 热电偶产生的电动势就由工作端的温度决定。热电偶的种类有数十种之多。有的热电偶能测高达 3000℃ 的高温, 有的热电偶能测量接近绝对零度的低温。

电阻温度计 根据导体电阻随温度的变化规律来测量温度。最常用的电阻温度计都采用金属丝绕制成的感温元件。主要有铂电阻温度计和铜电阻温度计。低温下还使用铈铁^[31]、碳和锗电阻温度计。

精密铂电阻温度计 目前是测量准确度最高的温度计^[32], 最高准确度可达万分之一摄氏度。在 -273.34℃~630.74℃ 范围内, 它是复现国际实用温标的基准温度计。中国还广泛使用一等和二等标准铂电阻温度计来传递温标, 用它作标准来检定水银温度计和其他类型温度计。

半导体热敏电阻温度计 利用半导体器件的电阻随温度变化的规律来测定温度, 其灵敏度很高。主要用于低精度测量^[33]。

根据本论文中的设计的特点, 本设计采用的是电阻温度计的方式来测量样本的温度, 属接触式电学测温的方法。具体的设计及采取这种设计的理由将在后文中阐述。

3.2 Hot Disk 法导热系数测定仪的总体设计

本课题设计的导热系数测定仪的总体要求如下:

- (1) 测量对象: 金属、合金、陶瓷、硅片、聚合物、粘结剂、纸、织物等, 以隔热材料为主;
- (2) 样本最小尺寸: 0.5mm 高, 直径 2mm(圆柱形样本), 无须特别的样品制

备，只需相对平整的样品表面

- (3) 测量温度范围：室温~120℃；
- (4) 温度测量精度：≤0.001℃；
- (5) 测量相对误差：≤3%；
- (6) 重复性误差：小于 1%
- (7) 电源：12V 直流供电；
- (8) 导热系数测定范围：0.005~500 W / (m·K)
- (9) 热扩散系数：0.1~100mm²/s
- (10)测量时间：1~120 秒

总的来说，Hot Disk 法导热系数测定仪由加热元件、温度传感器和数据采集处理系统组成。图 3-1 给出了本仪器的总体结构示意图。

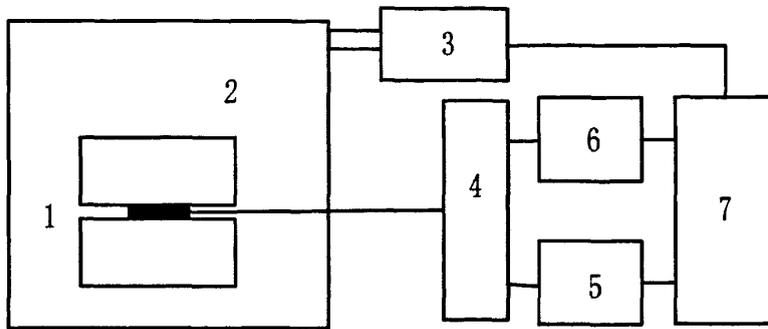


图3-1 Hot Disk法导热系数测定仪的总体结构

1.样品及探头 2.保护容器 3.调温装置 4.电桥 5.电压源 6.电压测量电路 7.计算机

本论文中设计了一个薄层圆盘形的阻值依赖于温度的金属箔作为样品探头，探头系由导电金属镍经刻蚀处理后形成的连续双螺旋结构的薄片，外层附有一层保护层。探头既是加热元件又是敏感元件，作为给样品加热同时监测温度的传感器使用。

测试时，探头被夹在两片样品中间，形成类似三明治的结构(见图 3-2)，在探头上通过恒定输出的直流电，由于热效应，探头的温度的增加，探头的电阻发生变化，从而在探头两端产生电压变化，通过记录在一段时间内电压和电流的变化，可以较为精确地得到探头和被测样品中的热流信息。

实际测量时探头的电阻变化可以用下式表示^[34]：

$$R(t) = R_0 [1 + \alpha \Delta T + \overline{\alpha \Delta T(\tau)}] \quad (29)$$

R_0 是探头在瞬态记录前的电阻, α 是热阻系数(TCR), $\overline{\Delta T(\tau)}$ 是假设探头和被测样品完全接触时的平均温度上升值:

$$\Delta T(\tau) = P_0 \cdot \frac{D(\tau)}{\pi^{3/2} r K} \quad (30)$$

在方程(30)中, P_0 是探头释放的热, K 是被测样品的导热系数, r 是探头的半径, τ 可以由下式得到:

$$\tau = \frac{\sqrt{at}}{r} = \sqrt{\frac{t}{\Theta}} \quad (31)$$

a 是被测样品的热扩散系数, t 是测试时间, Θ 是特征测量时间($\Theta = \frac{r^2}{a}$)。将(30)

式代入(29)式, 并设 $R^* = R_0 \cdot [1 + \alpha \Delta T_1]$ 和 $C = \frac{\alpha R_0 \cdot P_0}{\pi^{3/2} \cdot r \cdot K}$, (29)式可以写成

$$R(t) = R^* + C \cdot D(\tau) \quad (32)$$

将测得的电阻 $R(t)$ 对 $D(\tau)$ 作图应当得到一条直线。通过反复变换 Θ 进行拟合, 寻找正确的 Θ 数值, 使 $R(t)$ 对 $D(\tau)$ 的直线相关性达到最大。热扩散系数可以由 $a = \frac{r^2}{\Theta}$ 得到, 导热系数由直线的斜率 C 计算得到。

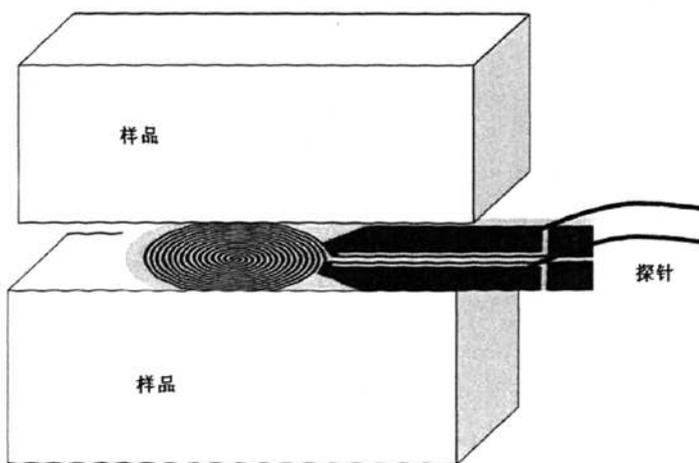


图 3-2 平面热源探头放置于样品中间形成三明治结构

3.3 探头的设计

前文中提到, 温度传感器按传感器与被测介质的接触方式可分为两大类^[34,35,36]: 一类是接触式温度传感器, 一类是非接触式温度传感器。

接触式温度传感器的测温元件与被测对象要有良好的热接触, 通过热传导及对流原理达到热平衡, 这时的示值即为被测对象的温度。这种测温方法精度比较高, 并可测量物体内部的温度分布。但对于运动的、热容量比较小的及对感温元件有腐蚀作用的对象, 这种方法将会产生很大的误差。

非接触测温的测温元件与被测对象互不接触。常用的是辐射热交换原理。此种测温方法的主要特点是可测量运动状态的小目标及热容量小或变化迅速的对象, 也可测量温度场的温度分布, 但受环境的影响比较大。

由于本设计中要求 TPS 的探头既是加热元件又是温度敏感元件, 必须与样品试件相接触, 故本设计选用的是接触式测量。TPS 探头可以有很多不同的变化:

- (1) 传感器电阻的形状可以有很多形式;
- (2) 金属导体的厚度可以在很大的范围内选择;
- (3) 电阻的特性依赖于所选的金属导体的电气特性。

在进行探头设计时, 应根据测量的目的、要求及条件, 综合考虑下列各项, 合理地设计探头:

- (1) 需要的加热电流;
- (2) 要求的驱动电压;
- (3) 使用温度范围, 准确度及测量误差是否满足测量要求;
- (4) 传感器的材质、形状及响应速度;

选型要考虑的另一方面是将非欧姆阻抗减少到最低限度, 探头的阻抗应该是理想的线性欧姆阻抗, 特别是在用直流电压做驱动电压时。

探头作为加热元件, 那么就需要探头有良好的热性能, 在通过电流时能迅速的发出大量的热量; 探头同时也是传感器, 监测温度的变化, 所以探头必须有较高的温度系数, 这样才能灵敏地监测温度的变化。图 3-3 给出了一个 Hot Disk 探头的外观。探头金属箔片蚀刻成双线螺旋结构, 然后在两侧覆盖上一层薄膜作为电气的隔离。从图中可以清楚地看到探头的结构: 探头的头部是双螺旋结构, 下部四个触点用来接引线^[36]。

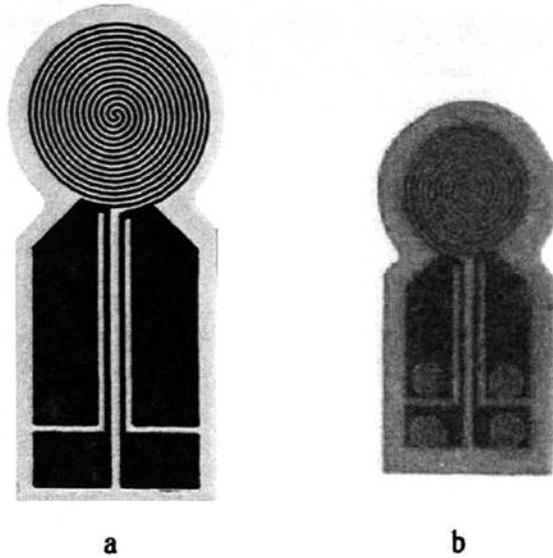


图 3-3 具有双线螺旋结构的探头，可作为加热/传感器件

a. 探头的设计图 b. 加工后的探头实物图

3.3.1 探头的机械尺寸

本文将探头的加热丝设计成双螺旋形状^[37]，这样探头就相当于由多个间距相同的同心圆环所组成的结构同时电流可以从一端流到另一端。

本文中所设计的螺旋形的最大直径为 15mm，可看作是由 10 个同心圆环等距排列构成的结构，线宽为 0.35mm，线与线之间间距也是 0.35mm，厚度为 100 μm (限于现有的加工技术，加工 10 μm 的厚度难度太大，可加工的最小的厚度为 100 μm)。

探头的外层附有一层隔离层，根据最终的温度，可以采用聚酰亚胺(polyimide)，云母(mica)，氮化铝(aluminum nitride)和氧化铝(aluminum oxide)作为电气隔离的薄膜。外层保护层的厚度令探头具有一定的机械强度，同时保持探头与样品之间的电绝缘性。

3.3.2 探头的电气特性

本论文中用金属镍作为加热/温度传感器的金属箔，因为镍的电阻率很高，发热效果好，同时它在较大的温度范围内能保持相当高的电阻温度系数(TCR)。

探头的螺线部分为阿基米德螺线，在极坐标系下，螺线部分的方程为：

$$r = \pm a\theta = \pm 0.2229\theta \quad (33)$$

其中 r 为极径，单位是 mm ， a 是螺线的比例系数， $a = 0.2229$ ， θ 是极角，单位是弧度。

上文中提到，本设计中螺线直径 $D = 15\text{mm}$ ，螺线宽度 $d = 0.35\text{mm}$ ，两条螺线最末点位置对应的角度为：

$$\theta_{1m} = 11.375\pi \quad \theta_{2m} = 10.5\pi \quad (34)$$

展开长度为：

$$\begin{aligned} L_1 &= \int_0^{\theta_{1m}} R d\theta = \int_0^{\theta_{1m}} \frac{a}{2} \theta^2 \Big|_0^{\theta_{1m}} = \frac{a}{2} \theta_{1m}^2 (\text{mm}) \\ L_2 &= \frac{a}{2} \theta_{2m}^2 (\text{mm}) \end{aligned} \quad (35)$$

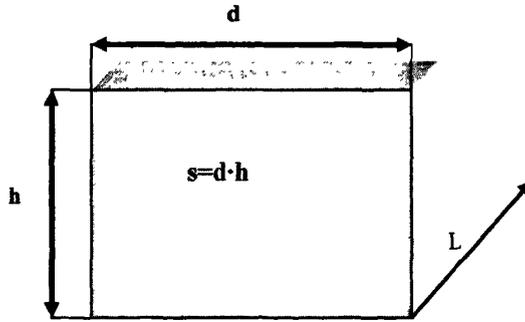


图 3-4 探头螺线截面示意图

d : 螺线的宽度 h : 螺线的厚度 s : 螺线的截面积

电阻值为：

$$\begin{aligned} R_{all} &= R_1 + R_2 \\ &= \frac{\rho}{s} (L_1 + L_2) = \frac{\rho}{s} \frac{a}{2} (\theta_{1m}^2 + \theta_{2m}^2) \\ &= \frac{\rho}{s} \frac{d}{\pi} (\theta_{1m}^2 + \theta_{2m}^2) = \frac{\rho}{h} \frac{1}{\pi} (\theta_{1m}^2 + \theta_{2m}^2) \\ &= 239.64\pi \frac{\rho}{h} (\Omega) \end{aligned} \quad (36)$$

已知镍铬合金材料电阻率 $1.0 \times 10^{-6} (\Omega \text{m})$ ，若加热膜镍丝的厚度 $h = 100\mu\text{m}$ ，

$$R_{all} = 239.64 \pi \frac{\rho}{h} \approx 7.52(\Omega) \quad (37)$$

这里计算的探头的阻值时是将探头头部的螺旋线展开,再按照展开的长度计算电阻值,当然也可以按照前文中提到的公式 $L = \sum_{l=1}^m 2\pi l \frac{a}{m} = (m+1)\pi a$ 来计算展开线长度,再计算阻值。两者会有微小差别,因为后者是前者的近似计算方法,不是准确的计算。注意到这里计算的是探头螺旋形螺线的阻值,未将肩部和引线的阻值计算在内。双螺旋结构是探头上用于加热和测量温度的主要部分,其余部分作为支撑和引线的触点。

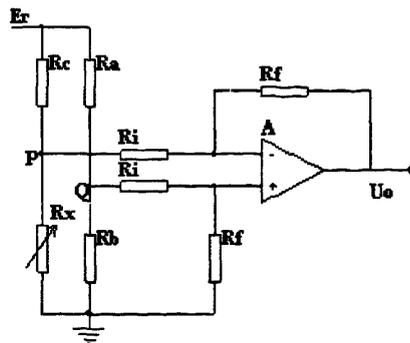
3.4 测量电路的设计

根据前面的叙述,本设计的测量电路由以下几部分组成:能量源(电压源),测量桥路,放大电路及数据采集电路。

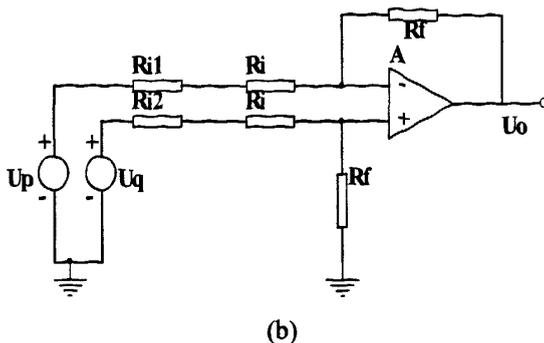
近年来发展起来的温度自动测量方法多数采用桥式电路,实际上是温度-电压转换电路。用运算放大器组装的温度测量系统具有精度高、性能稳定的特点。本论文中,测量信号的源信号采集采用的是桥式电路,后接有运放构成的放大电路,具体电路将在下面的章节中阐述。

3.4.1 测量电路

图 3-5 给出温度自动测量电路^[38,39],图(a)为基本原理图,这是一种差动放大运算电路。其输入端为带有温度敏感元件的桥式电路,桥路的三个臂为电阻 R_a 、 R_b 、 R_c ,第四个臂为 Hot Disk 探头,电阻值为 R_x 。 E_r 为电桥的参考电压,经过桥臂分压以后,P 点和 Q 点电压可分别表示为:



(a)



(b)
图 3-5 温度测量电路
(a)桥式电路 (b)差动等效电路

$$U_p = E_r \frac{R_x}{R_p + R_x} \quad (38)$$

$$U_q = E_r \frac{R_b}{R_a + R_b} \quad (39)$$

U_p 和 U_q 分别为差动放大器的两个输入电压，该电路的输出电压方程为：

$$U_o = \frac{R_f}{R_i} (U_q - U_p) \quad (40)$$

图 3-5(b)为(a)的等效形式。 U_p 和 U_q 作为独立信号源加在运算电路的差动输入端， R_{i1} 和 R_{i2} 分别表示两个信号源 U_p 和 U_q 的内阻。 $U_q = \frac{E_r R_b}{R_a + R_b}$ ，它等于 R_a 和 R_b 的分压比与参考电压 E_r 的乘积，该值是恒定的。内阻 R_{i2} 是常数，与温度变化无关。 $U_p = \frac{E_r R_x}{R_x + R_c}$ ，它等于 R_x 和 R_c 的分压比与参考电压 E_r 的乘积。这是随温度变化的信号电压。内阻 R_{i1} 决定于桥臂电阻 R_x 和 R_c ，由于 R_x 随温度变化，所以 R_{i1} 也随温度变化。

由图 3-5(b)可以得到输出信号的方程：

$$U_o = \frac{R_f}{R_i + R_{i1}} \left(\frac{R_i + R_f + R_{i1}}{R_i + R_f + R_{i2}} U_q - U_p \right) \quad (41)$$

若温度发生变化， R_x 随之变化， U_p 也相应变化，等效内阻 R_{i1} 也随之变化，

因此，在输出端便得到一个随温度变化的输出电压 U_o 。实际方程 U_o 给出了这种变化的隐含关系。当取 $R_x \gg R_{11}$, R_2 时，上式可以简化成 $U_o = \frac{(U_q - U_p)R_f}{R_x}$ 。

$$U_o = U_q - U_p = E_r \left(\frac{R_x}{R_x + R_c} - \frac{R_b}{R_b + R_a} \right) \quad (42)$$

选择桥路电阻为：

$$R_a = R_b \gg R_c, \quad R_x = 1000\Omega, \quad R_c \approx R_x。$$

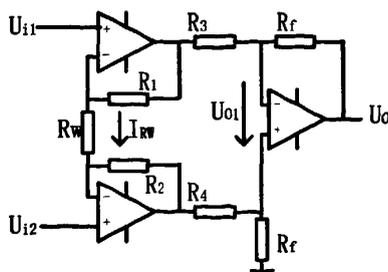
设 R_x 在温度变化 ΔT 时的变化量是 r ，则有： $r = R_x \cdot \alpha \Delta T$ ，且 $r \ll R_x$ ，那么得到：

$$U_o = \frac{E_r \cdot R_x \cdot \alpha \Delta T}{(R_x + R_c)} = \frac{1}{2} E_r \cdot \alpha \Delta T \quad (43)$$

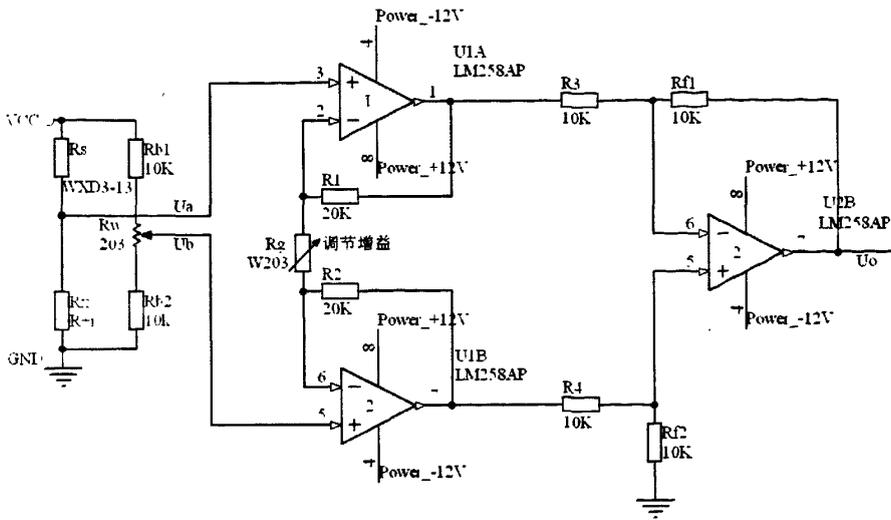
所以 $U_o \propto \Delta T$ ， U_o 与 ΔT 具有线性关系，测量出 U_o 就可以得到 ΔT 。

3.4.2 温度测量的实际电路

图 3-6 给出了温度测量的实际电路^[38,39]。在实际电路中采用了电桥和仪用放大电路^[39]。仪用放大电路见图 3-6(a)。该电路由两部分组成，前级采用同相放大电路，后级采用差动比例电路，可获得较高的共模抑制比，增强电路的抗干扰能力。该电路能有效地克服 3 个运放参数选择上相互对应的要求，可以将输入的微弱电信号放大数千倍。



a)



b)

图 3-6 温度测量的实际电路。

a) 仪用放大电路 b) 实际应用的测量电路

$$\text{由 } I_{R_w} = \frac{U_{i1} - U_{i2}}{R_w} = \frac{U_i}{R_w} \quad (44)$$

$$U_{o1} = I_{R_w} (R_1 + R_2 + R_w) \quad (45)$$

$$A_{U1} = \frac{U_{o1}}{U_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_w} + 1 \quad (46)$$

当 $R_1 = R_2$ 时, 有:

$$A_{U1} = 2 \cdot \frac{R_1}{R_w} + 1 \quad (46a)$$

A_{U2} 可由差动比例电路计算, 通常取 $R_3 = R_f$, $R_4 = R_f$, 则 $A_{U2} = 1$, 总的放大倍

数为 $A = 2 \cdot \frac{R_1}{R_w} + 1$, 当 R_1 为定值时, 调节 R_w 的阻值就可以方便地调节增益。

在图 3-6(b)中, R_x 是传感器的电阻值, R_s 是传感器串联电阻的阻值, R_L 是传感器的引线电阻, 这里要求 $R_s = R_x + R_L$ 。对图 3-6(b)而言, $A = 2 \cdot \frac{R_1}{R_s} + 1$,

$$U_o = U_{ab} = \frac{A}{2} V_{cc} \cdot \alpha \Delta T, \text{ 故 } U_o \propto \Delta T。$$

3.5 数据采集电路

数据采集系统是计算机控制系统的基础,功能取决于现场的要求及计算机的功能,一个数据处理系统的好坏,主要取决于它的速度和精度。特别是工业生产过程中的数据采集系统,往往要求在保证精度的条件下,具有实时控制功能。

本课题的数据采集系统是基于 PC 机的,选择数据采集卡时需要考虑以下几个问题:

- (1) 分辨力和精度。它是数据采集系统的核心—A/D 转换器的位数要求以及对传感器的精度、分辨率的要求;
- (2) 确定模拟量输入通道数;
- (3) 输入输出信号的范围;
- (4) 便携性;
- (5) 性价比。

表 3-2 USB7360 系列数据采集模块的功能

USB7360 系列数据采集模块	
AD 部分	12 位 AD/75K 最高采样速率 或 12 位 AD/500K 最高采样速率 或 16 位 AD/100K 最高采样速率 AD 带 8K 硬件缓存 FIFO(可带可不带) AD 带程控增益(可带可不带)
DA 部分	12 位 4 路 DA 或 无 DA 功能
IO/计数部分	TTL 电平 IO/计数 或 光隔 IO/计数(光隔 16 路 DI/计数输入 5V/12V/24V 开关量输入电平可选, 光隔 16 路 DO 输出可配接 PS002 继电器板)

根据本课题温度数据采集的需要,选择了中泰的 USB7360 数据采集卡。USB7360 系列多功能数据采集模块^[40]适用于提供了 USB 接口的 PC 系列微机,具有真正热插拔、即插即用(PnP)功能。其操作系统可选用目前流行的 Windows 系列、高稳定性的 Unix 等多种操作系统以及专业数据采集分析系统 Lab VIEW /

Lab Windows CVI 等软件环境。在硬件的安装上非常简单，使用时只需将 USB7360 的 USB 接口插入计算机内任何一个 USB 接口插座中，其模入、模出、I/O 信号、脉冲输入及脉冲输出信号均由模块上的双排针插头与外部信号源及设备连接。经过 USB 接口，采集卡可以直接连接到笔记本电脑或者台式机上就可以使用，这就避免了安装 PCI 采集卡时必须拆开机箱将 PCI 卡插到主板 PCI 插口才能使用的弊病，也不必重启电脑。表 3-2 列出了 USB7360 系列数据采集模块的功能，详细的功能参看后面的章节。

模入部分，用户可根据实际需要选择单端或双端输入方式，其 A/D 转换启动方式可以选用程控频率触发。A/D 转换后的数据结果通过先进先出存储器 (FIFO) 缓存后由 USB 总线读出。

模出部分，用户可根据控制对象的需要选择不同的量程。

开关量部分，本模块有 16 路数字量输入和 16 路数字量输出接口，光隔 16 路输出可配接 PS002 继电器板。

计数部分，本模块有 3 路 16 位字长的计数器

3.5.1 数据采集卡的主要技术参数

1. USB 指标:

处理器及 USB 接口芯片: CY7C68013

通讯方式: USB 接口

通讯距离: 小于 5 米

通讯协议: USB2.0

2. 模入部分(标*为出厂标准状态,下同):

输入通道数: 单端 48 路 * ; 双端 24 路

输入信号范围: 0~5V, 0~10V*, ±5V

输入阻抗: $\geq 10M\Omega$

程控增益: $\times 1^*$; $\times 10$; $\times 100$;

输入通道选择方式: 单通道程序指定/多通道自动扫描

A/D 转换精度/最高采样速率: 7360 型 12 位 AD/75K

A/D 采样程控频率: 7360 型: 1KHz/10KHz/25KHz/50KHz/75KHz

A/D 启动方式: 程控触发

FIFO 存储器容量: 8K \times 16bit(全满)/4K \times 16bit(半满)

通道切换时间: (模拟开关导通时间+放大器建立时间) $\leq 2\mu\text{S}$

A/D 转换非线性误差: $\pm 1\text{LSB}$ (A/B 型), $\pm 2\text{LSB}$ (C 型),

3. 模出部分:

输出通道数：4 路

输出范围：电压方式：0~5V, ±5V, 0~10V*, ±10V, 0~20 mA, 4~20 mA

输出阻抗：≤2Ω(电压方式)

D/A 转换分辨率：12 位

电压输出方式负载电流：≤10mA

4. 电源功耗：+5V(±10%)≤500mA(自供电, 不建议长期使用)

+9V(±10%)≤500mA(外供电)

5. 使用环境要求：工作温度：10℃~40℃

相对湿度：40%~80%

存贮温度：-55℃~+85℃

6. 尺寸：裸板尺寸：长×宽=162.9mm×102.6mm

外形(模具)尺寸：长×宽×厚 =190mm×109mm×36mm

3.5.2 数据采集卡的工作原理

USB7360 系列多功能数据采集模块主要由多路模拟开关选通电路、高精度放大电路、模数转换电路、DC/DC 电路、先进先出(FIFO)缓冲存储器电路、模数转换电路、开关量输入输出电路、定时/计数器电路和接口控制逻辑电路、供电电路等部分组成。

1. 模入部分

1.1 高速多路模拟开关选通电路

本电路由 6 片 CD4501(或同类产品)及跨接选择器 JP2 组成, 用以从 48 路单端信号或 24 路双端信号中选择其中一路, 送入后端的放大器电路处理。

1.2 高速高精度、差分、可编程增益放大器电路

该电路由片高速高精度放大器 LF347、LM351 组成, 用以对通道开关选中的模拟信号进行变换处理, 以提供模数转换电路所需要的信号。

1.3 高速模数转换电路

本模块选用 B-B 公司的 A/D 器件 ADS7822(12 bit)、ADS7818(12 bit)或 ADS8325(16 bit)作为本卡的模数转换器件。采用外部精密基准电源。

1.4 先进先出(FIFO)缓冲存储器电路

本电路用于将 A/D 转换的数据结果及通道代码进行缓冲存储。并相应的给出“空”, “半满”和“全满”的标志信号。用户在使用过程中可以随时根据这些标志

信号的状态以单次或批量的方式读出 A/D 转换的结果。

2. 模出部分

模拟量输出部分由 D/A 转换器件 DAC7615 和有关的基准源、运放、调零调满电位器、阻容件和跨接选择器组成。依靠改变跨接套(JP6~JP15)的连接方式,可分别选择不同的输出量程。

D/A 部分具有上电电压输出选择功能,当模块加电时,本模块将根据 JP7 跳线的位置,选择输出不同的电压。

3. 接口控制逻辑电路

接口控制逻辑电路用来将 USB 总线控制逻辑转换成与各种操作相关的控制信号。

4. 供电电路

供电电路由 DC/DC 芯片 LM340 及其外围电路组成外供电电路,以满足 USB 总线自供电功率的不足。外供电需输入 8-15V 的直流电源,插座中心为正极。

3.5.3 输入输出插座接口定义

本模块 60 芯扁平电缆插座 J4 的信号定义见表 3-3,本模块 40 芯扁平线插座 J5 的信号定义见表 3-4。用户可根据需要选择连接信号线(单端)或信号线组(双端),进行 AD 接线。为减少信号杂波串扰和保护通道开关,凡不使用的信号端应就近与模拟地短接,这一点在小信号放大使用时尤其重要。

表 3-3 J4 模拟输入输出信号端口定义(括号内表示双端方式)

插座引脚号	信号定义	插座引脚号	信号定义
1	模拟地)	2	模拟地
3	CH1(CH1+)	4	CH2(CH2+)
5	CH3(CH3+)	6	CH4(CH4+)
7	CH5(CH5+)	8	CH6(CH6+)
9	CH7(CH7+)	10	CH8(CH8+)
11	CH9(CH9+)	12	CH10(CH10+)
13	CH11(CH11+)	14	CH12(CH12+)
15	CH13(CH13+)	16	CH14(CH14+)
17	CH15(CH15+)	18	CH16(CH16+)
19	CH17(CH17+)	20	CH18(CH18+)
21	CH19(CH19+)	22	CH20(CH20+)
23	CH21(CH21+)	24	CH22(CH22+)
25	CH23(CH23+)	26	CH24(CH24+)
27	CH25(CH1-)	28	CH26(CH2-)
29	CH27(CH3-)	30	CH28(CH4-)
31	CH29(CH5-)	32	CH30(CH6-)
33	CH31(CH7-)	34	CH32(CH8-)
35	CH33(CH9-)	36	CH34(CH10-)
37	CH35(CH11-)	38	CH36(CH12-)
39	CH37(CH13-)	40	CH38(CH14-)
41	CH39(CH15-)	42	CH40(CH16-)
43	CH41(CH17-)	44	CH42(CH18-)
45	CH43(CH19-)	46	CH44(CH20-)
47	CH45(CH21-)	48	CH46(CH22-)
49	CH47(CH23-)	50	CH48(CH24-)
51	模拟地	52	模拟地
53	电压 DA0	54	电压 DA1
55	电压 DA2	56	电压 DA3
57	电流 DA0	58	电流 DA1
59	电流 DA2	60	电流 DA3

表 3-4 J5 开关量及脉冲输入端口定义

插座引脚号	信号定义	插座引脚号	信号定义
40	DO16 开关量输出	39	DO15 开关量输出
38	DO14 开关量输出	37	DO13 开关量输出
36	DO12 开关量输出	35	DO11 开关量输出
34	DO10 开关量输出	33	DO9 开关量输出
32	DO8 开关量输出	31	DO7 开关量输出
30	DO6 开关量输出	29	DO5 开关量输出
28	DO4 开关量输出	27	DO3 开关量输出
26	DO2 开关量输出	25	DO1 开关量输出
24	开关量输出数字地	23	开关量输出数字地
22	开关量输出供电	21	开关量输出供电
20	DI16 开关量输入	19	DI15 开关量输入
18	DI14 开关量输入	17	DI13 开关量输入
16	DI12 开关量输入	15	DI11 开关量输入
14	DI10 开关量输入	13	DI9 开关量输入
12	DI8 开关量输入	11	DI7 开关量输入
10	DI6 开关量输入	9	DI5 开关量输入
8	DI4 开关量输入	7	DI3 开关量输入
6	DI2 开关量输入	5	DI1 开关量输入
4	CLK2 脉冲输入	3	CLK1 脉冲输入
2	CLK0 脉冲输入	1	开关量/脉冲输入数字地

3.5.4 安装及注意事项

本模块的安装十分简便，无需将主机机壳打开，也无需关电。本模块有两种供电方式，即自供电方式和外供电方式，若选择自供电方式供电，将本模块插入主机的任何一个空余 USB 接口插座即可；若选择外供电方式，必须给模块提供 8-15V 的直流电源，然后将模块与计算机用 USB 线连接。

本模块采用的模拟开关是 CMOS 电路，容易因静电击穿或过流造成损坏，所以在打开模块盒或用手触摸本模块电路板时，应事先将人体所带静电荷对地放掉，同时应避免直接用手接触器件管脚，以免损坏器件。

本模块 USB 接口允许从计算机上带电插拔。模块上的跨接选择器，使用中应严格按照说明书进行设置操作。设置模块跨接套和安装接口带缆时均应在关电状态下进行。

当模入通道不全部使用时，应将不使用的通道就近对地短接，不要使其悬空，以避免造成通道间串扰和损坏通道。

为保证安全及采集精度，应确保系统地线(计算机及外接仪器机壳)接地良好。特别是使用双端输入方式时，为防止外界较大的共模干扰，应注意对信号线进行屏蔽处理。

3.6 数据采集软件的设计

在测量过程中应采用合适的频率和时间间隔采集电压。由于测量过程比较短(TPS 瞬态过程一般不超过 60 秒)，因此要求的采样频率较高，在整个测量过程中至少要采到 100 个数据点，即要求每秒至少采集到两个数据点。

由于瞬态过程很短，探头的功率有限，因此测量过程中传感器表面的温度上升很小，大约在 0.7℃左右，对应电桥的输出电压很小，虽然经过放大电路的放大，采集卡采到的前级的输出电压仍比较小(毫伏级)，为了更加清晰地显示出温度的变化趋势，有必要对采集到的数据进行数字滤波处理和程控放大处理。

本论文中软件设计为每次连续采样 8 组数，每组 334 个采样点，这样每次采集到的是 2672 个数据点，取其平均值作为采集到的最终数据记录下来。设计为每秒采集两次数据点。软件中预留了采样数调整的接口，可根据实际使用情况调整采样数。数据点采样进电脑后存入文件，实验结束后，根据采集到的数据点进行分析，经过计算处理后得到最终的结果。实验数据将即时显示在软件界面上。

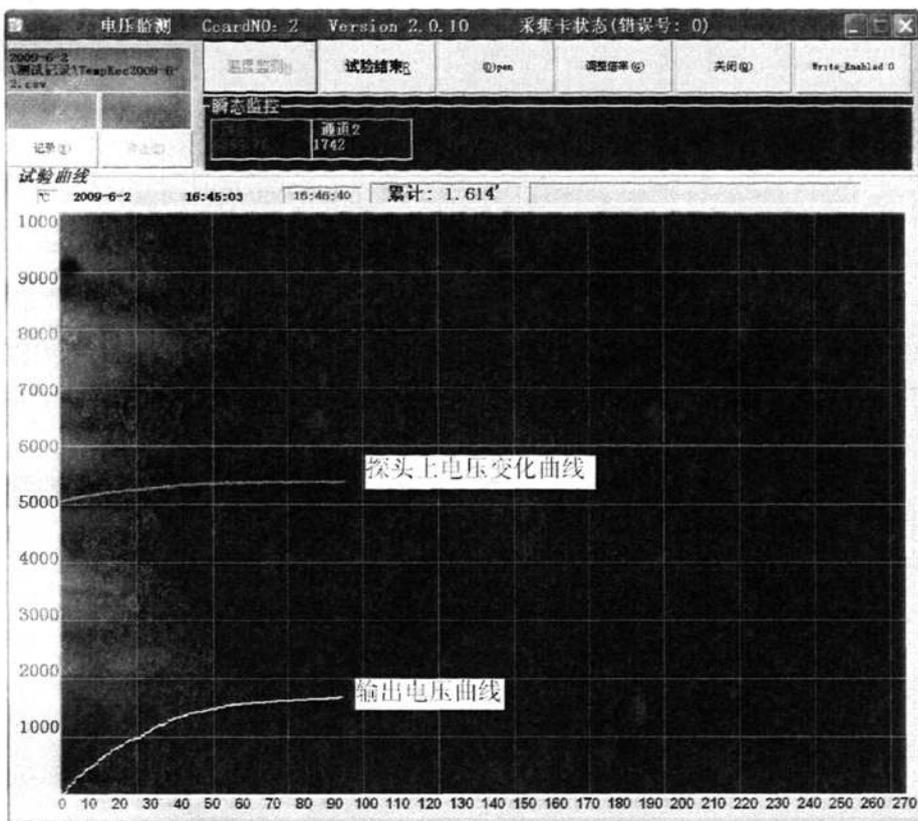


图 3-7 数据采集模块软件截图

第四章 样品测试和数据处理

热量在各向同性材料和各向异性材料中传播过程会有差异，试件尺寸的不同也会影响测量的结果，因此，本文中在对不同材料、不同尺寸的试件测量时，将修整 TPS 方法中某些参数，采用不同的方法进行针对性的测量。本章将对各向同性材料的 TPS 实验为例，对常见的两种样本进行测量，介绍详细的测量过程和数据处理分析的方法，以及最终如何计算出导热系数的过程。

4.1 各向同性大样本材料

4.1.1 总的测量过程

用电桥记录探头阻值的瞬态变化。电桥初始是平衡的，用一个伏特计来监测电桥不平衡输出的信号，并将信号送入电脑中，如图 4-1 所示， R_s 是串联电阻， R_L 是探头引线的全部电阻， R_0 是初始状态下为加热时的阻值， ΔR 是探头在测量过程中阻值的变化量， ΔU 是由探头阻值变化引起的桥路的不平衡输出。在实验测量过程中应该保持室温恒定。

在这种布置下，探头与一个电阻串联，要求在瞬态的测量过程中，电阻的阻值为严格保持为一个恒定的值。探头和串联电阻由一个精密电位计连接，电位计的阻值应当大于串联电阻和探头总阻值的 100 倍以上。桥路接的电源能提供 20V 的电压和最大 1A 的电流。串联电阻的阻值 R_s ，应该接近探头(包括探头引线处)的初始阻值， $R_0 + R_L$ ，以保证在测量过程中探头的功率输出是一个稳定的值。

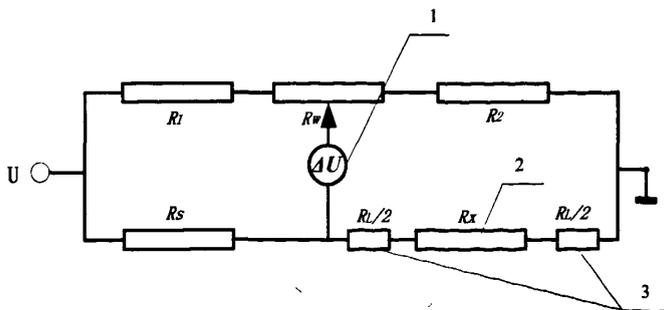


图 4-1 用于记录探头阻值变化的桥路图

1. 电位计 2. 探头 3. 探头引线

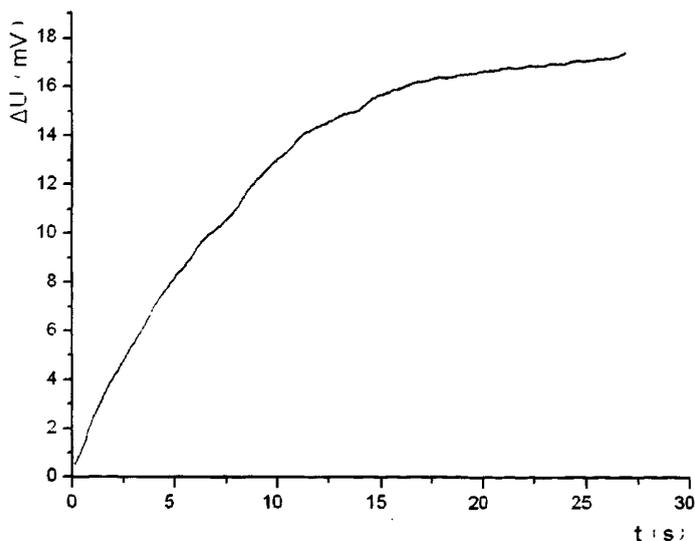


图 4-2 电桥的输出随时间变化图

4.1.2 测试样品的准备

对各向同性大样本材料，样本的形状可以是圆柱形，方形或者长方形。没有必要加工成特定的形状，只要样本与传感器的接触平面足够光滑平整。

样本的厚度要求与其材料的属性有关。因为 TPS 过程中热量的扩散与样本材料的热特性相关，必须保证热波在热流方向在测量的时间内进入样本的厚度不大于样本自身的厚度。

样本尺寸选择的标准是尽可能的减少外表面对测量结果的影响。样本的大小应该满足这样的要求：从探头的双螺旋的任何部分到样本外表的任何部分的距离大于双螺旋线的平均直径。

样本与传感器接触的表面应当是平整、光滑的，样本应夹住 Hot Disk 探头的两侧表面。

由于下面的原因，在实验中没有使用导热胶将样本与传感器粘合：

- (1) 只使用薄层导热胶很难获得良好的热接触
- (2) 导热胶显著增加了隔离层的热容，延迟了传感器和样本表面的温度差
- (3) 很难在传感器的两侧获得厚度严格相同的导热胶的厚度，这使得热流不能同步的从传感器传导到样本与传感器的接触面。

在较大温度范围内测试时，由于热膨胀，或者状态转换，或者相位转换或者

其他一些原因某些，材料在测试过程中其外观尺寸可能会发生显著的变化。因此在放置传感器时，注意所用的加紧力，保证不影响样本的属性。

对于软材料，夹紧力不能压缩样本，从而改变样本的导热性能。

4.1.3 测试过程

1 将探头放置在被测样本两个表面之间。在试验台上夹紧或者组装样本/探头，样本中的总温升一般不高于 2K。这就意味着样本的热力学状态在测试过程中基本不改变，样本的热属性可认为在实验之前就达到了热平衡。

2 将组装完后的样本/探头放置在一个恒温的容器内，组成完整的系统，这样就能达到测量过程中温度稳定的要求。

3 在实验之前平衡电桥。对一个初始阻值在 1-50 欧姆的传感器，应当选择合适的电压使电桥的输出不超过 1mA，避免在实验前大电流对探头提前加热，影响后面的测量结果。

4 在测量过程中应用合适的频率和时间间隔采集电压。建议采集数据的频率是这样的，在测量过程中至少有 100 个数据点。如果用本方法测量液体的导热性能，测量时间必须限制在 1s 之内，以保证液体中的对流不会对测量造成干扰^[36]。

表 4-1 对具有不同导热系数的材料推荐的实验参数^[36]

	金属合金	致密陶瓷	钢	陶瓷	聚合物	绝缘材料
导热系数 W/mK	170	40	14	1.5	0.19	0.028
热扩散系数 (mm ² /s)	69	11	3.7	0.96	0.11	0.75
温升 K	0.3	0.3	1.0	0.8	1.3	2.5
探头直径 mm	15	6.4	6.4	6.4	6.4	15
样本厚度 mm	30	10	10	10	15	30
样本直径 mm	90	40	40	40	40	90
测量时间 s	5	10	10	40	160	160
输出功率 W	4	3	2	0.5	0.25	0.1

5 读出电压的读数 $\Delta U(t)$ 后，用下式计算温升：

$$\Delta T(t) = \frac{(R_S + R_L + R_0)\Delta U(t)}{[J_0 R_S - \Delta U(t)](aR_0)} \quad (47)$$

此处: R_L 是引线的总阻抗

R_S 是串联阻抗

R_0 是探头的初始阻抗

α 是探头的电阻温度系数(TCR)

J_0 是在瞬态过程的开始时通过传感器的电流—这个电流可以很容易确定, 通过测量电桥的电压, 在加热电流停止之前、瞬态过程的最后结束的时刻, 然后再除以 $(R_L + R_S + R_0)$ 。

6 改变测试温度, 以满足样本对温度的要求, 确保温度公式在每个温度点都是成立的。

同一实验条件下最好多次测量。同一温度点至少要测量三次。每个连续的实验都应该等系统稳定在初始选择的温度点。到达热平衡的时间随所测的样本大小、形状和导热性能而不同。

在最高温度点完成实验后, 应该冷却后在同一温度点或者更低的温度点重复一次测量, 这样可以检测出样本的属性由于高温而产生的退化。

4.1.4 计算导热系数

对于探头中小的温升, 我们有

$$R(t) = R_0[1 + \alpha \cdot \Delta T(t)] \quad (48)$$

这里 $\Delta T(t) = T(t) - T_0$ 是探头的平均温升, R_0 是 T_0 温度时探头的初始阻值, α 是探头的电阻温度系数(TCR)

温升可以看成由两部分组成, 一部分代表绝缘层的温度差, 另一部分是样本表面在瞬态测量过程中的温度变化(参看方程(29)), 表达为:

$$\Delta T(t) = \Delta T_i(t) + \Delta T_s(t) \quad (49)$$

这里:

$\Delta T_i(t)$ 是探头绝缘层的温升

$\Delta T_s(t)$ 是样本表面的温升

假定探头近似看成是一组同心圆且间距相同, 导热系数方程的解

$$\Delta T_s(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r \lambda} D(\tau) \quad (50)$$

这里 P_0 是探头的输出功率, r 是探头最外层环的半径, λ 是样本材料的导热系数, τ 定义为

$$\tau = \sqrt{\frac{t}{\theta}} \quad (51)$$

其中: $\theta = \frac{r^2}{\alpha}$

$D(\tau)$ 是无维度的时间函数, 定义为:

$$D(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^r \sigma^{-2} \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(\frac{-(l^2+k^2)}{4m^2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2m^2\sigma^2}\right) \right] d\sigma \quad (52)$$

其中: m 是同心圆的数目,

σ 是积分变量,

I_0 是修正的零阶 Bessel 函数。

考虑到硬件和软件不可避免的延时, 因此引入时间修正 t_c 。这意味着传感器的全功率输出可能不在 $t=0$ 时刻, 相应地引入一个时间修正。通过将方程 5 中的 τ 替换为 τ_c , 这里

$$\tau_c = [(t-t_c)/\theta]^{1/2} \quad (53)$$

通常修正时间的数量级是 1/2 次方, 并且不大于总测量时间的 0.5%。

如果绝缘层很薄并且功率输出是常数, 那么 $\Delta T_i(t)$ 在一个较短的时间后变成一个常数, 稳定到这个常数的时间取决于相关时间 δ^2/α_i , 这里 δ 是隔离层的厚度, α_i 是隔离层的热扩散系数。对一个典型的带隔离的探头, 相关时间少于 10ms, 温差达到稳定的时间少于 100ms。

热接触电阻可能随实验的初始温度不同而不同, $\Delta T_i(t)$ 确保测得的是样本材料真实属性。

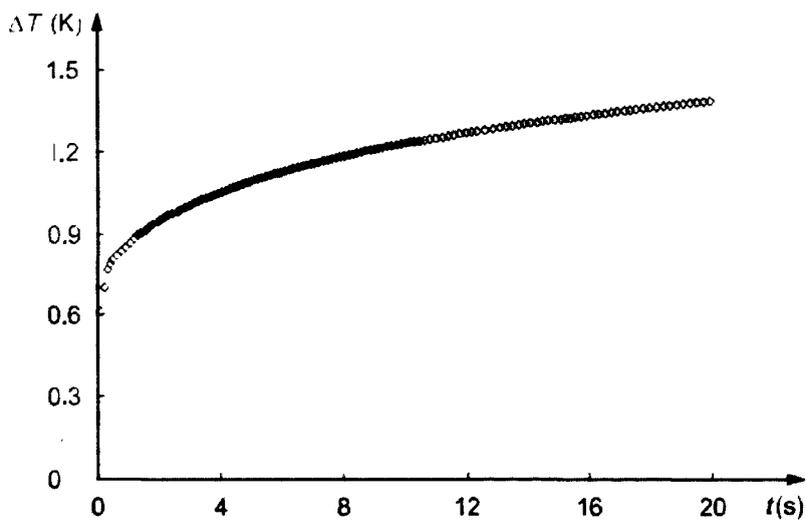
如果热扩散系数和时间修正是已知的, 温升 $\Delta T_s(t)$ 和 $D(\tau)$ 有线性关系, 此处, 例子中给出, $\Delta T_i = 0.6566$, $\Delta T_s(t) = 1.894D(\tau)$

导热系数和热扩散系数的计算第一步是热扩散系数 α 的迭代过程, 时间修正 τ_c 作为优化的变量。通过迭代, $\Delta T_s(t)$ 和 $D(\tau)$ 建立起线性关系(通过最小二乘拟合方法), 热扩散系数和时间修正在迭代的最后一步得到。最终导热系数 λ 从这条直线的斜率推导得到。

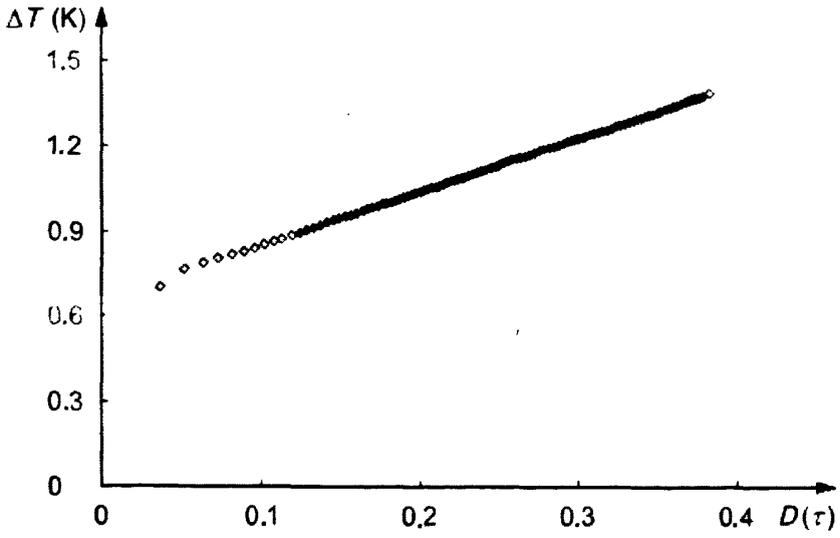
一开始选择的时间窗可能使实验点偏离理论直线，通过移除离散点，可以从分析中得到正确的时间窗。残余误差清楚地显示出了偏离点。

由于样本的尺寸是有限的，过一段时间后，它的边界可能会影响温升。在残差图中这个偏离会很明显，因此在瞬态过程结束时，如果有偏离点，那么这些偏离点都应被删除。

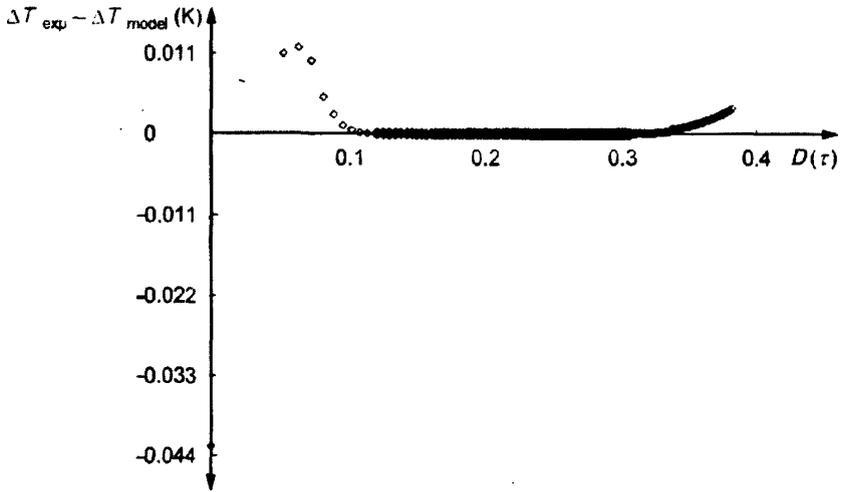
从统计学的观点看，探测厚度所用的表达式，可以表达为探测厚度必须大于双螺旋探头的半径且小于探头的直径，这样就能从同一个实验中确定导热系数和热扩散系数。



a)温度随时间升高的曲线



b)温升与 $D(\tau)$ 的曲线



c)温度残差的变化 $D(\tau)$

图 4-3 温升随时间变化的图形

$D(\tau)$: 时间函数; t : 时间; ΔT : 温升; $\Delta T_{\text{exp}} - \Delta T_{\text{model}}$ 温度残差

从同一块挤塑聚苯板中取料，制作两块样本分别编号为 a 和 b，两样本尺寸均为 $100 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$ ，密度为 25 g/cm^3 。导热系数测试结果具体如下表所示，可以看到，测量结果与标准值接近，误差在 5% 以内。

表 4-2 导热系数测试结果*

编号	样本 a W/(m·K)	样本 b W/(m·K)	平均值 W/(m·K)	标准值 W/(m·K)	绝对误差 W/(m·K)	相对误差 %
1	0.0284	0.0283	0.02835	0.028	-0.00035	-1.25
2	0.0271	0.0272	0.02715	0.028	0.00085	3.04
3	0.0285	0.0286	0.02855	0.028	-0.00055	-1.96
平均	0.02800	0.02803	0.02802	0.028	-0.00002	-0.06

*实验在环境温度 25℃ 时进行，表中标准值指 25℃ 时挤塑聚苯板的导热系数值

4.2 薄板样本

在对薄板样本的测量实验解导热系数方程时，假定样本的上表面和下表面没有热量损失，那么样本受热部分的温升可以表达为：

$$\Delta T_s(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r \lambda} E(\tau) \quad (54)$$

此处

$$E(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^\tau \sigma^{-2} \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(\frac{-(l^2+k^2)}{4m^2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2m^2\sigma^2}\right) \right] \times \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^\infty \exp\left[-\frac{i^2}{\sigma^2} \left(\frac{h}{r}\right)^2\right] \right\} \quad (55)$$

h 是薄板样本的厚度， σ 是积分变量。在真空中或者在空气中做实验一般能够满足上下表面的热损失可以忽略的要求。将 $E(\tau)$ 代替上面计算中用的 $D(\tau)$ ，这样就得到了薄板样本的导热系数计算方法。图 4-4 描述了 $D(\tau)$ 与 $E(\tau)$ 的函数关系。

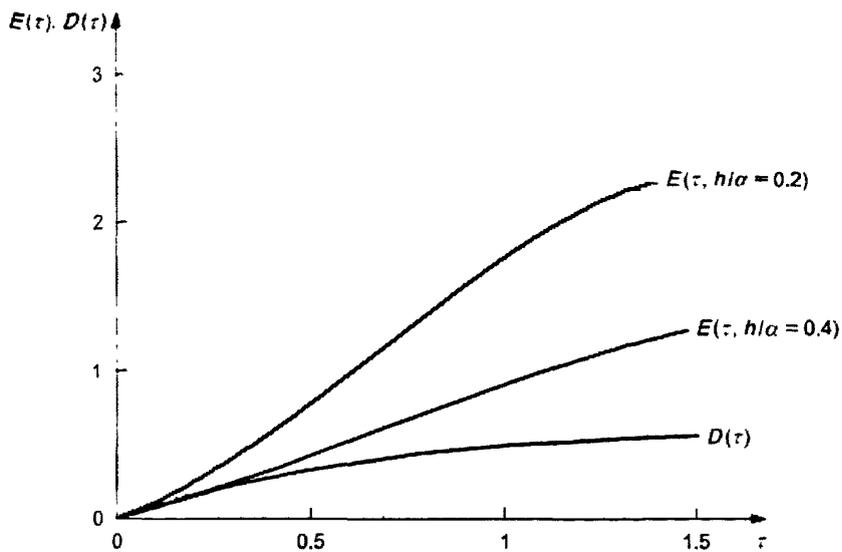


图 4-4 $D(\tau)$ 与 $E(\tau)$ 的函数关系图(同心圆环的圈数是 10)

第五章 Hot Disk 法导热系数测定仪的校准和精度分析

系统各部分软硬件调试通过以后，需要对整机进行调试，以达到以下两个目的：首先是测试全部程序和测量电路运行时是否正常，其次是对整机性能进行评估。

导热系数测定仪的关键模块是温度测量模块，只有温度测量是正确的，导热系数的计算才是正确的。Hot Disk 方法是绝对测量方法，允许操作人员不按照参考材料进行标定和校准，可直接追溯到 SI 单位(比如温度，时间，长度和电压)。

5.1 仪器的标定

Hot Disk 设备应从以下几个方面标定：

- 探头最外环螺线的平均直径，用移测显微镜测量；
- 用于记录电桥的输出电信号的时间基准；
- 电压的采集系统；
- 用作传感器探头敏感元件的材料的电阻温度系数(TCR)；

5.2 仪器的校准

应当时常检查仪器，对仪器进行校准^[41]，最好是通过测量标准参比板的导热系数和热扩散率。对标准参比板而言，导热系数和热扩散率都是已知的。如果没有合适的参比板，可以测量一些各向同性、导热系数等参数已知的，具有良好热稳定性和重复性的常见材料来进行验证，比如钢铁，陶瓷和有机玻璃等。

5.3 温度模块的实验与结果

利用恒温水浴装置控制温度，我们选择几个有代表性的温度分别进行测量，并计算其误差。我们选取 0℃ 为基准，测量不同温度下对应的传感器测温模块的电压输出变化，实验结果如表 5-1 所示。

表 5-1 传感器温度模块测温结果*

水浴温度(°C)	电压值变化量 $\Delta U(\text{mV})$	ΔU 对应的温度变化 (°C)	误差(%)
10	1242.341	10.101	1.01
20	2477.612	20.143	0.72
30	3713.816	30.194	0.65
40	4946.527	40.216	0.54
50	6182.632	50.265	0.53

*此实验中，电桥驱动电压为 10V，放大电路的放大倍数为 10，所用的探头电阻温度系数 $\alpha=0.00246/^{\circ}\text{C}$

平均误差为：

$$\Delta\% = (1.01\% + 0.72\% + 0.65\% + 0.54\% + 0.53\%) / 4 = 0.69\%$$

可以看到误差 < 1%，满足我们的实验要求。

5.4 精度和偏差分析

通常在室温或者接近室温下实验，导热系数的准确度估计在 2%-5%之间，而热扩散率的准确度在 5%-10%之间。

如果实验在同样的温度，用同样的传感器和设备重复，与第一次实验的偏离确实非常小，因为采用的是同样的 TCR，同样的探头半径，同样的功率输出和同样的时间窗来计算数据。在这些实验中，导热系数和热扩散系数重复性在 1% - 2%。

Hot Disk 的准确度从公式 $\Delta T(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r \lambda} D(\tau)$ 推导。导热系数的准确度是直接依赖于测量的准确度、功率输出的分辨率。探头半径、样本厚度和温升直线迭代后 $D(\tau)$ 之间的函数关系。

用于描述导热系数的模型并没有包含实际试验时遇到所有的初始条件和边界条件，包括下面的：

a) 要求双螺旋结构同心圆环数目不少于 10，除非校准包括对外轮廓线半径的修正。

b) 探头的比热可以根据探头材料的大小、厚度(10 μm)，两侧的隔离层(7-100 μm)估计出来。功率损失在一个持续 10s 平均温升为 2K 时估计为 1mW。

c) 典型探头设计时，从螺旋形到引线上的热损失估计不超过 1mW。

d) 薄板的测量要求估计两个样板外表面隔热层的热量损失。

通常来说, 计算温升最少需要 100 个数据点(时间和电压)。为了实现计算, 至少需要分别提供三个阻值、TCR(电阻温度系数)和 a 。串联电阻的阻值 R_s , 是与标准电阻直接比较确定的。其他的电阻直接与串联电阻比较得到的。作为对比, TCR 的不确定度估计为 2%, 因为衡量这一数值必须要测电阻和温度。这意味着, 在单次测量中, 记录的温度的精度大约是 2%。但是, 当重复同一实验在相同的温度, 使用相同的 TCR 计算, 各次实验的温升与其他的区别很小, 可以忽略。

由于 Hot Disk 的探头(包括镍丝和聚合物的隔离层)有自己的比热容, 这在实验过程中会影响到探头温度的变化, 需要对此进行修正。修正后的数值作为一个常量, 在分析数据时, 软件会将此常量考虑到实验数据(参见方程(49))中修正实验的结果。

第六章 总结与展望

工业领域、建筑领域中保温材料的导热系数是用来衡量绝热及保温材料的导热特性和保温性能的重要参数,反应材料的热工性能,是鉴别材料保温性能优良的主要标志,对工程设计有重要作用。导热系数的应用十分广泛,特别是在石油、化工、材料、军工生产等部门的有关传热设计中。为了使工程设计合理,节省能源和原材料,提高产品的质量,设计人员需要有准确而可靠的导热系数等热数据。本课题设计的导热系数测定仪主要用于测量各种绝热材料和非良导热材料的导热系数。

导热系数测定方法分为瞬态法和稳态法,目前国内外在导热系数测量过程中广泛使用的是静态法中的基于双试件保护平板法和瞬态法中的热线法。然而双试件保护平板法普遍存在着测量时间过长、测量范围小、对试件制备要求高、测量结果受接触热阻影响且测量范围小等缺点。而热线法只适用于导热系数小于 $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的各向同性均质材料的导热系数的测定。

针对目前国内已有的导热系数测定仪的上述缺点,本课题开发了一种基于 TPS 方法用 Hot Disk 作为探头的导热系数测定仪。TPS 法指瞬态平面热源法,属瞬态法的一种,该方法可将导热系数测量时间大大缩短,从一般双试件保护平板法的 3-5 个小时缩短为几秒到几分钟,同时避免了接触热阻对测量结果的影响。本仪器的测量范围广,适用于金属、陶瓷、塑料等材料,也适用于液体、气体等材料的导热系数检测。

本论文的从测量原理、测量装置的设计与实现,测量结果的计算与分析等方面对仪器装置结构、硬件电路、程序设计、数据分析算法等逐一进行了阐述,分析了实验结果,并指出了仍然存在的问题。

本课题的主要工作和结论总结如下:

- 1.介绍了基于 Hot Disk 法原理测量导热系数的仪器的现状和所存在的问题,提出了本课题的目的和意义。
- 2.阐述了 Hot Disk 法导热系数测定仪的测量原理——TPS 瞬态平面热源技术及 Hot Disk 法的具体原理。
- 3.分别从机械、电子两方面设计了 Hot Disk 法导热系数测定仪的机构,提出测量设备的测量原理图和电路图,并设计出合适的探头。
- 4.介绍不同形式的样品对应的详细的测量方式以及数据的处理分析方式,根据采集的数据计算样品的导热系数。

5.分析影响导热系数测量值的主要因素以及如何减小影响,并对 Hot Disk 法导热系数测定仪进行校准和标定。

但是,仪器仍存在着一些不足之处,有待在下一步工作中进一步完善,具体包括:

1. 仪器还未完全实现智能化操作,例如在初始化测量前需要手工调节串联电阻的阻值预调平衡;

2. 在低温和高温测量时,需要附加一个温度可调节的保护容器以保证测量过程中样品四周的环境温度保持稳定;

3. 可以针对不同的被测样本和测试环境设计不同的探头,采用不同的尺寸,不同的材料,不同的保护层等等,使 Hot Disk 法适用范围更广,针对性更强。

参考文献

- [1] 曹玉璋, 邱绪光, 实验传热学, 北京: 国防工业出版社, 1998, 4~3
- [2] 宦旻, 绝热材料低温导热系数的测试, 保温材料和建筑节能, 2001, 3: 37~39
- [3] 陈则韶, 葛新石, 量热技术和热物性测定, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 50~51
- [4] 冯石开, 俞中原, 智能式导热系数测定仪, 黑龙江自动化技术与应用, 1992, 11(3): 51~55
- [5] 钱滨江, 伍贻文, 常家芳等, 简明传热手册, 北京: 高等教育出版社, 1983: 376~407
- [6] 中华人民共和国国家技术监督局, GB/T 10295-1988 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定—热流计法, 中华人民共和国国家标准, 北京: 中国标准出版社, 1989-10-01
- [7] Parker, J.W., Jenkins, J.R., Butler, P.C. and Abbott, G.I., Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity, J. Appl. Phys., 32, 1961: 1679-1685.
- [8] 孔祥谦, 绝热材料导热系数测定方法的发展[J]应用科技, 1982, (01).
- [9] S.E. Gustafsson, Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 797-804.
- [10] Y. He / Thermochemica Acta 436 (2005) 122-129
- [11] 陈昭栋: 平面热源法瞬态测量材料热物性的研究, 电子科技大学学报, 2004, 33(5): 551~554
- [12] 戴白祝, 刘震涛等, 热流测量与热流计, 北京: 计量出版社, 1986: 45~46
- [13] 何小瓦, 瞬态平面热源法热物理性能测量精度和适用范围的标定——常温下标准材料奥氏体不锈钢的热物理性能对比测试[J], 宇航材料工艺, 2007, (06).
- [14] 于帆, 张欣欣, 何小瓦. 材料热物理性能非稳态测量方法综述[J], 宇航计测技术, 2006, (04).
- [15] 李华新, 张名木, 刘志平. 关于测试材料热物性热脉冲法的新探讨[J], 计量学报, 1997, (01).
- [16] 李保春, 董有尔. 热线法在导热系数测量中的应用[J], 物理测试, 2005, (04) : 32-34
- [17] 于帆, 张欣欣. 热线法测量材料导热系数的实验研究[J], 计量学, 2005, 26(1): 27-29

- [18] 王兴安、孟祥墉、徐益峰, 用局部加热法测量不良导热材料的导热系数, 上海机械学院学报, 1989, 11(1)
- [19] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, second ed., Oxford Science Publications, New York, 2000.
- [20] S.E. Gustafsson, B. Suleiman, N.S. Saxena, I. ul Haq, *High Temp.-High Press.* 23 (1991) 289-293.
- [21] V. Bohac, M.K. Gustavsson, L. Kubicar, S.E. Gustaffson, *Rev. Sci.Instrum.* 71 (2000) 2452-2455.
- [22] 王魁汉, 温度测量实用技术, 北京: 机械工业出版社, 2006
- [23] International Organization for Standardization, ISO/DIS 22007-1, *Plastics—Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity —Part 1: General principles*, 2008
- [24] 姜忠良, 温度的测量与控制, 北京: 清华大学出版社, 2005
- [25] 韦靖, 浅谈蒸汽压力式温度计和气体压力式温度计的原理, 使用与校正, 计量技术, 2005, 1(2), 37~39
- [26] L.G.Rubin, B.L.Brandt, H.H.Sample, 宋德华; 低温测温学近代发展评论(II)(续)[J];低温与特气; 1984年03期; 23-28
- [27] 彭珍.声学法温度场检测技术研究[D], 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2008, (02)
- [28] 锁凯声, 标准石英频率温度计[J], 计量技术, 1999, (04)
- [29] 唐韬, 辐射测温法及其在落管测温中的应用研究[D], 中国优秀博硕士学位论文全文数据库(硕士), 2005, (04)
- [30] 陈浩, 邓忠华, 余红梅. 热电偶测温系统原理及应用[J], 制造业自动化, 2004, (09).
- [31] 林鹏, 张庆庚, 毛玉柱, 王振华. 国产铂钴电阻温度计的电阻-温度特性[J]. 低温工程, 1994, (02)
- [32] 王征. 标准铂电阻温度计检定中的数据处理[J] 上海计量测试, 2000, (06).
- [33] 杜建通, 张荣玲, 吴裕远. 微型硅半导体低温温度计的特性与制作工艺[J]. 低温与超导, 1998, (02)
- [34] 黄犊子, 樊栓狮, 采用 HOTDISK 测量材料导热系数的实验研究, 化工学报, 2003, 54(增刊): 67-70.
- [35] 高魁明, 热工测量仪表, 新华书店北京发行所发行: 冶金工业出版社出版, 1986, 174~175
- [36] International Organization for Standardization, ISO/DIS 22007-2, *Plastics—Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity —Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method*, 2008
- [37] 徐开先等, 实用新型传感器及其应用, 辽宁: 科学技术出版社, 1995

- [38] (日)远坂俊昭 , 测量电子电路设计—模拟篇 , 彭军 译, 北京: 科学出版社, 2006,
- [39] 王松武, 赵旦峰等, 常用电路模块分析与设计指导, 北京:清华大学出版社 , 2007
- [40] USB-7360 硬件说明书, 北京中泰研创科技有限公司
- [41] 黄亮.瞬态表面温度传感器动态校准技术研究[D.. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2007, (05)

发表论文和参加科研情况说明

参与的科研项目：

1. 低温高精度导热系数测定仪的开发，横向合作项目。
2. 带夹紧力测量机构的导热系数测定仪开发，横向合作项目。

专利申请：

李艳宁, 李超, 赵世迁等。申请专利“带锁紧机构的导热系数低温测定装置”，
申请号/专利号：200820074919

致 谢

本论文的工作是在我的导师李艳宁副教授的悉心指导下完成的,李艳宁副教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢两年来李艳宁老师对我的关心和指导。

李艳宁副教授悉心指导我们完成了实验室的科研工作,在学习上和生活上都给予了我很大的关心和帮助,在此向李艳宁老师表示衷心的感谢。

胡茂银工程师、邵克宁工程师和谷春风工程师对于我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间,李超、李雯、苏琪、董来鑫、张奎、倪庆旭、曾悠兵、徐学明、李季波、王文安等同学对我论文中的研究工作给予了热情帮助,在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢我的父亲和母亲,他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

赵世迁

2009-08-25