

摘 要

在火灾科学中,可燃物的热物性对研究火灾的产生和发展有着至关重要的作用。木材是一种典型可燃物,因此本文开展了木材导热特性的测试研究。

本文首先简要介绍了木材热物性测试的研究背景,回顾了目前国内外的热物性测试、木材传热特性及平板导热仪的研究现状和存在的问题。

在对已有的稳态平板导热仪进行调研分析之后,参照导热系数测试仪的国家标准,利用热管传热块,均温性好的优点,本文设计了热管式平板导热测试仪,介绍了其一维稳态导热的原理,并建立了完整的测试系统。热管式均温板为热管式平板导热仪的主要设计部分,本文采用计算软件 ANSYS 对热管式均温板进行了模拟设计,并采用 ANSYS 对热管式平板导热仪中木材试样和玻璃标样的温度场进行模拟,对模拟计算结果的分析表明,采用热管式平板导热仪进行测试符合一维稳态导热的原理。

在热管式平板导热仪测试试验台上,分别对气干横纹阔叶材,气干横纹针叶材,气干顺纹材,不同含水率的红松和落叶松,不同纹理的木材试样进行测试,获得了 35℃~85℃温度下的木材导热系数随温度、含水率以及纹理方向变化的数据。

同时,本文建立了热管式平板导热仪测木材导热系数的计算模型,应用计算软件 ANSYS 对试样内部的温度场进行数值模拟计算,通过模拟计算进一步修正试验测试结果,以提高导热系数的测量精度。

最后本文分析总结了被测木材的导热系数随温度、含水率和纹理方向变化的规律,如下:在室温到 100℃范围内,木材的导热系数先随着温度升高而增大,当温度升高到约 80℃时出现一个峰值,然后随着温度进一步升高呈减小的趋势;在相同温度下,同种木材的导热系数随着含水率增加而增加;木材顺纹导热系数与横纹导热系数的比值大约在 1.8~2 之间。

本文得到国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409600)“火灾动力学演化与防治基础”资助。

关键词:稳态平板法;热物性;木材;温度;含水率

ABSTRACT

In the research of fire, the heat properties of combustible substance is very important to the study of occurrence and spread of fire. Wood is a kind of typical combustible substance. So it is significant to research the measurement of the wood heat conductivity.

In this paper, the research background of this project was briefly introduced. And the current situation of the research of materials' heat properties, wood s' heat properties and plate equipment measuring materials' heat properties was also introduced.

After researching those existed plant equipments measuring heat conductivity, a new type of equipment—heat pipe plant equipment was designed and made, according to relative national standards of China. This equipment took advantage of the heat transfer characteristic of heat pipe. In designing the equipment, an equal temperature plate with heat pipe is the maily designed part. By applying the soft of ANSYS to compute the temperature distribution of this plate, suck a plate was designed. In this paper, the analysis of the computing result of simulated temperature distribution in wood sample by using the soft of ANSYS showed that the measurement of heat conductivity with the designed equipment accorded with the theory of one-dimension steady heat conduction. Then a test system involving the equipment was set up.

In this research, the across-grain and the along-grain samples of broadleaf and conifer, the samples of redpine and larch of different moisture content, and the samples of different grain were measured by heat pipe plant equipment. Their heat conductivities in temperature range from 35°C to 85°C were obtained.

A calculation model was set up which simulates temperature distribution in wood sample. This model was resolved out by the software of ANSYS. The heat conductivity of wood was furtherly modified by this model.

The rules of the heat conductivity varying with temperature, moisture content and wood' s grain was given. There were conclusions as follow: in the temperature range from room temperature to 100°C, the heat conductivity of wood increases with the increasing temperature. At 70°C~80°C, the heat conductivity reaches a peak, and then its value decreases while temperature grows. At the same temperature, the higher moisture content of wood was, the bigger the heat conductivity of wood was. As for one wood, the heat conductivity of across grain sample is 1.8~2 times that of along grain sample.

Keywords: state method, heat property, wood, temperature, moisture content

主要符号表

λ	导热系数, $W/m \cdot K$	U_5	热电偶 4 的热电势, mV
F	表面积, m^2	U_6	热电偶 4 的热电势, mV
a	试样的长度, m	U_7	热电偶 4 的热电势, mV
b	试样的宽度, m	U_8	热电偶 4 的热电势, mV
c	比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$	U_9	热电偶 4 的热电势, mV
G_1	试验前试样质量, kg	x	笛卡尔坐标, m
G_2	试验后试样质量, kg	Δt	试样冷热面之间的温差, $^\circ C$
q_1	试样内的热流密度, W/m^2	λ	导热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
q_2	标样内的热流密度, W/m^2	δ	厚度, m
t	温度, $^\circ C$	$\delta_{\text{试样}}$	试样的厚度, m
U_1	热电偶 1 的热电势, mV	$\delta_{\text{玻璃标样}}$	玻璃标样的厚度, m
U_2	热电偶 2 的热电势, mV	ρ	密度, kg/m^3
U_3	热电偶 3 的热电势, mV	τ	时间, s
U_4	热电偶 4 的热电势, mV	Fo	傅里叶数, $a\tau/\delta^2$

学号 20208199

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，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 浙江大学 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谢意。

学位论文作者签名：黄君丽 签字日期：2005 年 03 月 09 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 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、缩印或扫描等复制手段保存、
汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：黄君丽

导师签名：胡...木

签字日期：2005 年 03 月 09 日

签字日期：2005 年 3 月 9 日

学位论文作者毕业后去向：上海

工作单位：上海明光电子有限公司

电话：

通讯地址：

邮编：

第一章 绪论

1.1 课题的研究背景

自人类有史以来,火灾就一直是危害人类最持久、最剧烈的灾害之一。它遍及森林草原、城市乡村、天上地下,不仅吞噬生命财产,而且破坏人类赖以生存的宝贵而有限的自然资源,造成环境污染,引发生态失衡。火灾防治已经成为社会安全保障的重要组成部分。据最新统计,不含森林、草原火灾在内,我国火灾年平均损失近 200 亿元;仅 2000 年全国就发生火灾 18.86 万起,死 3021 人,伤 4404 人;该年共发生特大火灾 61 起,造成 529 人丧生,其中,河南洛阳东都商厦“12.25”特大火灾一次死亡 309 人,焦作“3.29”特大火灾造成 74 人死亡的惨剧。我国人均森林面积只有世界人均的 1/5.8,但却是森林火灾频发的国家。据统计,从 1950 年到 1998 年共发生森林火灾 68 万次,年均森林受害率 5.99%,是世界年均森林受害率的 6 倍,每年造成的直接经济损失达 70~100 亿元。

火灾直接危及人民的生命、财产,造成环境污染,引发生态失衡,是人类面临的重大灾害之一。因此,为了预防火灾产生,减少火灾损失,进行消防保护,需要了解各种可燃物酿成火灾的微观机理,而对火灾环境下材料传热进行研究是其十分重要的一环。

火灾的形成与发展过程与流体流动、传热传质及化学反应密切相关^[1-5]。火灾最显著的特征之一是产生大量的热量以及高温环境,正是这些热量以及高温环境促使和维持火灾的产生和发展。在整个火灾科学的形成与发展过程中,传热学的作用举足轻重,要了解各种可燃物酿成火灾的微观机理,对高温环境下、不同热流条件下的代表性可燃物的热物性测试在火灾研究中是相当重要的。

木材是一种典型的可燃物,作为常用的建筑材料其最大的缺点是容易燃烧,火灾的发生往往与木质构件和木制品容易引燃有关。根据对火灾统计资料分析,世界各国火灾事故中,建筑物火灾造成的损失占首要位置。而且一旦发生火灾,给人民生命财产造成直接威胁,损失极大。多数火灾发生的住宅,其中 70%的结构是木结构,约有 21%建筑物火灾与木材、织物等易燃物有关。我国消防部门的研究表明,火灾过程中火势的扩大与人员伤亡大都与建筑物内装饰用的木质材料等可燃、易燃材料有直接关系^[6]。火灾中“热、可燃物、助燃物”是最重要的三个因素,对木材这种典型可燃物进行传热研究,从分析可燃物在不同温度下的热学性质入手,探索可燃物的热量传递规律正是抓住了火灾过程中的主要矛盾。

为给火灾科学发展提供基础,为方便火灾环境下的可燃材料(如具有代表性可燃物木材等)的传热特性的研究,本研究课题设计了新型的热管式平板导热仪,并应用该导热仪对木材热物性进行理论与试验研究。希望能建立更加合理精确的火灾模型

提供研究基础和分析手段。

木材是天然高分子有机体,组成木材的化学成分、化学结构和物理结构都极其复杂。这些都给理论上研究木材的热学性质带来困难。许多介绍木材传热特性的文献中,多数都仅仅给出某种木材,在常温范围内某一温度下、某一含水率下(或者绝干材、气干材)的热物性数据。而比较全面地分析影响木材热学性质的各种因素及变化规律文献较少。因此,为了深入了解木材在温度变化下的热物理性质,进而探索其在高温条件下(例如火灾过程)的导热机理,发现其热量传递规律,对木材传热特性进行实验测试和模型研究具有很重要理论意义和实用价值。

1.2 国内外木材传热特性的研究现状

木材的传热特性很大程度上取决于其自身的物理性质,这些物理性质包括:导热系数、比热、热扩散率、密度、含水率等。由于这些木材的内部特性参数,特别是热物理性质对其内部的热传导过程,以及水分和气体的流动过程影响很大,而且各种性质之间有着复杂相互影响和关联,因此有必要对其进行重点研究。

此外,目前大多数的木材传热模型研究发现,模型中采用参数的重要性:模型于实验结果之间的满意度并不依赖于模型的复杂程度,而是依赖于引入参数的数量和对这些参数值进行测量、估算所做的努力^[7]。一直以来,国内这方面的基础研究是一个薄弱环节,有关木材传热特性的研究文献相关较少,而且所涉及的研究范围主要是室温下的木材热物理性质,既缺乏比较通用的经验性方程,也缺少适用于一定范围的理论方程。而这方面国外的研究就相对成熟,不仅进行了大量的实验研究,总结归纳出有关木材热物理性质的经验方程,同时提出了很多适用性强的理论方程。下面对前人的研究进行回顾和简要的综述。

1.2.1 国内木材传热特性的研究现状

我国比较早开展木材传热特性研究的单位,是中国林业科学研究院木材工业研究所^[8]。80年代他们采用热脉冲方法,对33种国产木材(含水率在10~16%)在室温(13.9~26℃)时的导热系数作了测定。测量得到的木材导热系数在不同树种之间有较大的差异,其中最大值为:0.239 J/(ms℃),而最小值为:0.072 J/(ms℃),平均值为:0.124 J/(ms℃),并且发现木材的导热系数明显随着密度的增大而增大。

热脉冲法实验装置的示意图见图 1-1。待侧试样准备二块,每块横截面尺寸均为120mm×120mm,其中二块厚度为40mm,一块为12mm。薄试样夹在二块厚试件的中间,薄试样下面放平板电加热器,并在薄试样上下表面的中央各放置一热电偶,在较短的加热时间段(τ_1)内,接通加热器使试样温度升高,记录加热过程中某一时刻(τ)薄试样上表面温度的升高值及切断加热器后某一时刻(τ_2)薄试样下表面温度升高值。再按照下式计算出试样的热扩散系数:

$$a = \frac{x^2}{4\tau'y^2} \quad (1.1)$$

上式中:

a ——试样的热扩散系数, m^2/s ;

x ——薄试样的厚度, m ;

τ' ——由接通加热器电路开始至记录薄试样上表面温度所经过的时间, s ;

y —— $B(y)$ 的自变量,

$$B(y) = \frac{\theta'(x, \tau')(\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_2 - \tau_1})}{\theta_2(0, \tau_2)\sqrt{\tau'}} \quad (1.2)$$

上式中:

τ_2 ——由接通加热器电路开始至记录薄试样下表面温度所经历的时间, s ;

$\theta'(x, \tau')$ ——薄试样上表面温度升高值, $^{\circ}\text{C}$;

$\theta_2(x, \tau_2)$ ——薄试样下表面温度升高值, $^{\circ}\text{C}$ 。

计算出 $B(y)$ 值后由函数 $B(y)$ 表查得 y 值^[8], 再按下式计算导热系数:

$$\lambda = \frac{Q\sqrt{a}(\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_2 - \tau_1})}{\theta_2(0, \tau_2)\sqrt{\pi}} \quad (1.3)$$

式 (1.3) 中:

Q ——热流强度, KJ/m^2 ; 由仪器指示的电压和电阻计算:

$$Q = \frac{0.86V^2}{SR} \quad (1.4)$$

式 (1.4) 中:

V ——电压, V ;

R ——电阻, Ω ;

S ——加热器面积, m^2 。

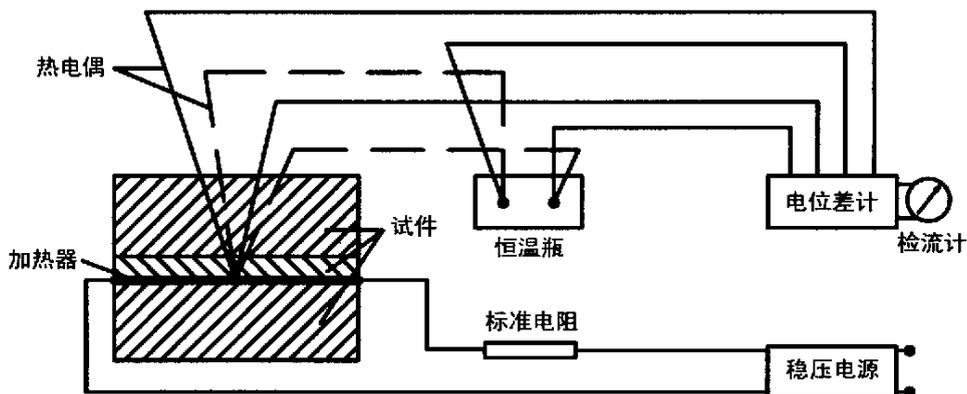


图 1.1 热脉冲法实验装置示意图

采用上述热脉冲方法, 1987年东北林业大学的李文深等人^[9], 对红松、落叶松和水曲柳等3种气干木材的热传导问题进行了研究。他们将实验数据进行线性和非线性拟合, 发现导热系数和比热随温度变化呈指数变化的规律, 但是其中的指数系数都比较小。因此他们认为在实验温度 20~80℃ 范围内, 气干材(含水率约在 12%)的导热系数、比热与温度的关系按指数函数的幂级数形式展开, 应接近于线性关系或者二次多项式关系。尽管这三种木材都属于针叶材, 但由于试样种类少, 无法归纳成具有统一形式的经验方程式。

90年代, 中南林科院的侯祝强^[10, 11]等人在前人实验研究的基础上, 对常温下(20~100℃)的木材传热过程进行了理论分析, 他提出含水率处于纤维饱和点以下木材的导热系数是包含热传导、对流扩散和辐射3种传热方式在内的等效导热系数。但是他认为在 20~100℃ 温度范围内, 辐射传热的影响和木材结构中的空气扩散可以忽略。这样, 只需考虑木材内部固体物质的热传导、束缚水和水蒸气的扩散对导热系数的影响。从而推导出气干材的导热系数公式:

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_v + \lambda_{bw} \quad (1.5)$$

式中:

λ_s ——与木材固体物质热传导相对应的导热系数;

λ_v ——与水蒸气扩散对应的导热系数;

λ_{bw} ——与束缚水扩散对应的导热系数。

然而, 尽管上述公式考虑了木材传热过程中内部水分的蒸发与水蒸气的扩散行为, 但是忽略了温度变化时, 木材结构的微通道效应对水蒸气扩散的影响, 因而随着温度的升高, 利用(1.5)式的计算结果与李文深等人的实验结果误差较大。

1992年福建林学院的杨庆贤应用物理力学中绝缘固体的热传导理论对木材的传热性质进行了分析, 推导出绝干木材横纹导热系数的半经验理论公式。他认为木材可以看作是绝缘性固体材料, 其热传导的能量是由声子传递的, (根据固体晶体导热理论推导出的公式:)

$$\lambda = 1.302 \times 10^{-3} \rho u \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^{3/2} D \left(\frac{\Theta_D}{T} \right) \exp(7.978 \sqrt{\frac{\rho_A}{\rho}}) \quad (1.6)$$

式中:

λ ——木材的横纹导热系数, W/mK;

ρ ——木材的绝干密度, Kg/m³;

u ——木材中的声速(横纹), m/s;

Θ_D ——木材的 Debye 特性温度, 由下式确定:

$$\Theta_D = \frac{hu}{k} \left(\frac{3}{4\pi v} \right)^{1/3} \quad (1.7)$$

式(1.7)中: h ——Planck 常数, k ——Boltzman 常数, v ——木材中单位晶胞体积,

取 $675.7 \times 10^{-30} \text{ m}^3$ [12], $D(\frac{\Theta_D}{T})$ ——查表可得。

随后, 杨庆贤^[13]等人相继应用上述理论方法推导了木材比热和热扩散率等热物性参数的理论表达式, 但由于木材结构的复杂性, 既不是纯粹的晶体也不是纯粹的非晶体, 建立在固体晶体中声子导热理论上的公式显然是有误差的, 而且声子的传播能力与温度变化密切相关, 主要表现为声子平均自由程的大小。如何确定随着温度变化, 声子平均自由程的变化, 以及木材的各向异性对声子自由程的影响都是非常困难的。因此根据上述理论公式得到的计算结果与前人的实验结果误差较大。

1994年 高瑞堂等^[14]从木材的微观结构出发, 根据木材单晶结构模型, 在杨庆贤等人的研究基础上, 应用晶体固体理论和热力学关系, 推导出适用于常温条件下的木材状态方程。并且指出木材在常温下, 其定压热容 C_p 与温度的关系是二次三项式的函数关系, 木材的热力学函数是温度 T 和体积 V 的函数。

同样由于木材微观结构和组成成分的复杂性, 在进行木材传热特性参数的理论推导过程中, 研究人员不得不进行必要的假设和简化, 因而使其理论表达式的精度受到影响, 理论值和实验值的符合程度无法令人满意。有些研究者进行了其他研究方法的尝试。2003年 钟云志^[15]等以前人的实验数据为依据, 利用统计学方法推导了木材热扩散率的经验回归方程。在他们的研究中, 考虑了温度、含水率、密度、声速等影响因子的相互作用和影响, 对热扩散率与各影响因子进行了偏相关分析, 剔除了次要因子, 建立了热扩散率和重要因子的经验回归方程。得到的理论模型计算值与实验数据吻合较好。但是他们从统计学的相关分析中得到结论是: 温度、含水率对热扩散率没有显著影响。这与大多数的试验研究结论是相矛盾的。钟云志等人认为这可能与供统计分析的实验数据本身就是在温度变化不大的情况下和气干条件下有关。显而易见的是: 一方面说明这种统计学分析方法的局限性, 另一方面也说明了国内目前, 对木材传热特性参数与其影响因素(如温度、含水率、热流方向、密度等)之间变化关系的实验研究数据比较缺乏。因此对木材传热特性的研究, 离不开有效的实验测试手段, 这应该是一个必要的前提。而普适性的理论模型还需要进一步的总结摸索。

2003年 浙江大学胡亚才、王玉芝^[16]采用准稳态法测量了红松和落叶松的导热系数, 热扩散系数和比热。

1.2.2 国外木材传热特性的研究现状

有关木材的传热传质研究, 早在上世纪初 1912年 Dunlap^[17]就测定了 20种木材在 $0 \sim 106^\circ\text{C}$ 范围内绝干木材的平均比热, 结果发现: 各种木材在此温度范围内平均比热的平均值为 $1.369 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ 。他根据试验结果提出了计算绝干木材真实比热的经验方程式:

$$C_0 = 1.114 + 0.004867 T \quad \text{J/g}^\circ\text{C} \quad (1.8)$$

式中: T ——木材的温度, $^\circ\text{C}$ 。

此后, Кириллов^[18] 根据试验结果提出另一经验方程式:

$$C_0 = 1.17 + \left(1 + \frac{T}{100}\right)^{0.2} + 0.377 \quad \text{J/g}^\circ\text{C} \quad (1.9)$$

式(1.9)适用的温度范围是 0~100°C。

比较(1.8)、(1.9)式的计算结果,可以发现式(1.8)所得的结果明显小于式(1.9)。Емуенко认为 Dunlap 在试验中采用热量计法,这种方法由于试样温度的不均匀和因试样存在向周围环境散热损失,致使测量值小于实际值。

如果把木材视为木材内部固体物质、水分和空气组成的三相系统,那么考虑到木材在温度变化的同时,对水分的吸附过程会发生放热反应,对其比热变化会产生很大的影响。因此基于温度和含水率变化的考虑,Кириллов提出了以下木材比热的经验方程式:

$$C_w = 1.17 \left[W \left(1 + \frac{T}{100} \right) \right]^{0.2} \quad (1.10)$$

式中:W——木材的含水率,适用范围是:W=10~150%,温度20~100°C。

1957年 Кантер 根据松木、栎木、桦木和落叶松等木材热学性质的测量结果,编制了不同温度和含水率时木材比热图,按图查询求得的数据在工程应用上比较方便,而且与式(1.10)计算结果相近似。

尽管以上这些经验方程的适用条件有一定的局限性,但是有关木材热学性质的实验研究,对于各种实际情况下木材热传导问题的理论求解有着重要的意义。鉴于大多数情况下木材传热是一个非稳态导热过程,因此其传热特性参数是随空间、时间和温度等变化的,这就给木材传热过程的数学求解带来很大的困难。针对各种具体环境下(比如火灾、高温干燥等)木材的传热过程建立的模型,无论其模型的形式和复杂程度如何,模型中各种表征传热特性参数的确定才是求解的关键。而大多数情况下需要根据实验数据来确定这些参数,包括定解条件(边界条件和初始条件),从而对方程进行求解,得到木材内部的热流分布和温度分布,总结分析具体环境下木材的传热规律。这方面,国外学者特别是欧美研究人员作了大量的工作。

由于木材物质、空气和水的导热系数不同,以及木材本身的复杂结构,决定了木材的热物性参数不可能是一个常数。它受到热流方向、密度、温度和含水率以及木材种类等多种因素的影响,因而国外学者都非常重视研究木材本身性质与影响其性质的各种因素之间的关系。他们的研究往往致力于探究传热过程中木材热物性参数的变化规律,寻求木材热物理性质变化及其影响因子之间的相互关系。

Кириллов指出热流方向对木材传热性质影响显著:同种木材顺纹方向的导热系数远大于横纹方向的导热系数。根据他的试验结果,这个比值随着树种的不同在1.8~3.5之间;同时比值与木材含水率也有关,含水率高的要比含水率低的小一些。而根据木材工程手册^[19],木材的顺纹导热系数值是横纹导热系数的2.0-2.8倍。另外,木材存在的多孔性使得热传导过程中热流要通过木材物质和孔隙两个部分进行传递,但孔隙中空气的导热系数比木材固体物质的导热系数小很多,因此木材的孔隙率或者密度对木材的传热过程有显著的影响,特别是温度变化的情况下木材孔隙内部的热量传

递方式将更复杂。

首先，木材的密度本质上取决于木材种类，但是它对于不同的树种以及同一棵树的内部不同部分都是变化的。Maclean^[20]的实验结果表明木材的导热系数有明显地随密度增加而增大的趋势，他提出了以下经验方程式：

$$\lambda = 0.0238 + 0.2005\rho_0 \quad (1.11)$$

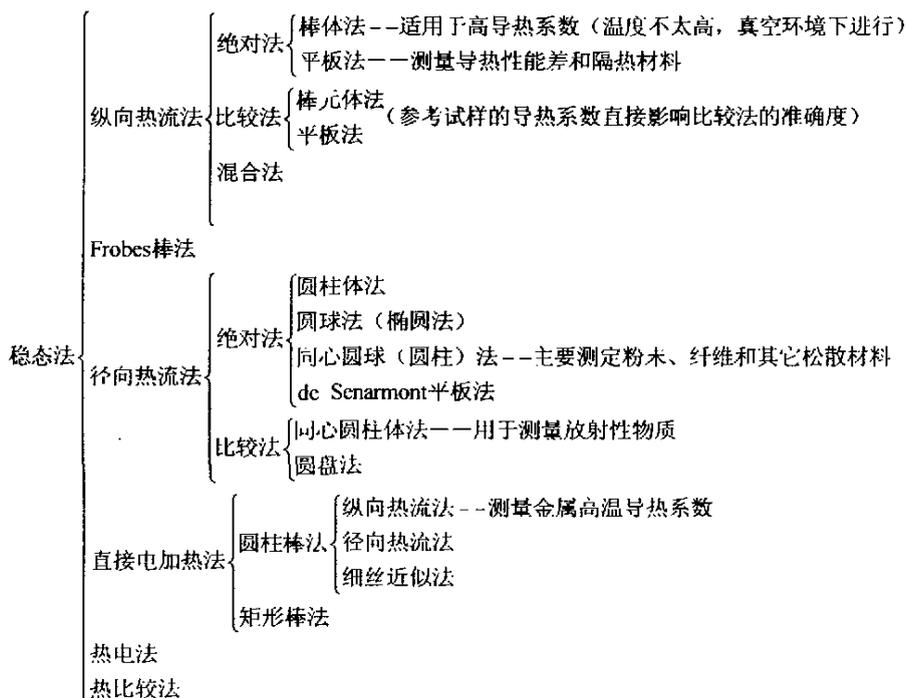
式中： ρ_0 ——木材的绝干密度；

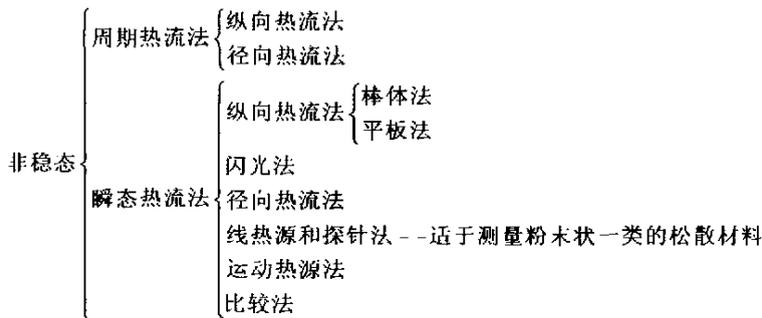
木材的含水率同样会影响其传热过程，一般含水率受到木材种类和储存条件影响。

1.3 国内外平板导热仪的研究现状

材料热物性的各种测试方法一般可分为两大类：稳态法和非稳态法。稳态法：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，就可以直接测定试样的导热系数。非稳态法：试样内的温度分布是随着时间而变化的非稳态温度场，借助测量试样的温度变化速率，测定试样的热扩散系数 a ，而毋需测量热流速率，由 $\lambda = apc$ 求得导热系数。

表 1.1 热物性测试方法的分类





目前世界上公认的热物性测试方法名称及分类^[21-25]如表 1.1 所示。其中纵向热流法中的平板法是目前应用最多的一种热物性测试方法。

平板法是一种试样形状为圆盘形或方板形的纵向热流法。平板法的物理模型是一维导热，即在圆形或方板形试样内产生一个纵向的一维热流。为维持平板试样内纵向的一维热流，通常采用两条途径：（1）利用试样的自身防止热损。把试样做得很薄、直径很大，成为 $d/\delta \geq 10$ 的圆形平板，使试样冷面和热面的中心区域有较好的等温面，等温面之间产生均匀的一维热流。试样中心区作为测试区，而试样中心区以外的部分起到防止径向热损的自身隔热套作用。（2）外加径向隔热套。为防止试样的径向热损和底向热损，在试样或主发热器底部径向和底向分别安装边发热器和底发热器。由于所采用的途径不同或同一途径中采用的恒温措施不同则产生不同型式的平板导热仪。与其它方法相比较，其优点是：（1）试样容易制备；（2）具有相当高的测试准确度和试验温度。

但是无论稳态平板法还是准稳态平板法，它们测试理论都以一维导热模型^[26,27]为基础，在实际测试中会存在以下问题^[28]：（1）试样中热量的传递难以满足一维导热；（2）样品上下接触面之间存在空气隙；（3）散热速率必需正确测量。

根据平板法材料热物性测试原理，国内外研制了各种型式的平板导热仪，现介绍如下。

1.3.1 国内平板导热仪研究现状

1990年黎明化工研究院刘淑琴^[29]等人研制的RTM—G5型稳态法平板导热仪能简而易而准确地测试绝热材料和复合材料的导热系数。

1990年东南大学施明恒、薛宗荣^[30]等人采用准稳态恒热流平板法实现了快速测定烟丝的各项热物性，并解决了测试中的一些技术问题。

东南大学在导热仪研制方面做了大量的工作，现已具有几种不同型式的导热仪如：SE-I 准稳态法非金属材料热物性测定仪、SEI-1 准稳态法非金属材料热物性测定仪、KNIII-100J 防护热板导热率测试装置、KNIII-200J 防护热板导热率测试装置，以及KNIII-300J 系列防护热板导热率测试装置，这个系列是1983年由东南大学动力系与中国测试技术研究院（成都）共同研制的标准型装置，1985年通过由国家计量局

组织的鉴定,其中中温(热面温度到 220°C)和高温(热面温度到 630°C)的两套测试装置达到同类装置的国际水平,可作为我国绝热材料导热系数测定的标准装置。经中国测试技术研究院1986-1990连续五次用美国标准局的标准试样反复校核结果,偏离从 $\pm 0\%$ 到 $\pm 1.4\%$ (包括人员因素在内)。

1994年同济大学热能工程系研制了TFD—1型双试样防护热板法导热仪^[31],防护热板法导热仪是用于测定绝热材料导热系数或热阻的精密测定仪器。它由热板、冷板、试样夹紧机构和温度测量与控制系统等组成。其测定试样的厚度是 $20\sim 50\text{mm}$,测定的温度范围是常温 $\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

1995年哈尔滨建筑大学^[32]自行研制了一套综合导热试验台,是集准稳态法、常功率法和热脉冲法为一体的平面热源测试装置,通过不同组合来实现测试热物性参数的目的。

1997年南京林业大学黎爱纯等^[33]应用了稳态热流计法平板导热仪测试人造板导热系数。稳态热流计法测试材料导热系数是基于一维稳态导热的原理,当被测材料的厚度、试样两侧的温差和通过试样的热流已知时,即可根据傅立叶导热定律确定试材的导热系数。其实验本体为热流计式的平板导热仪。试样两侧的水套内分别通过恒温水,以维持试样两面为等温面;导热仪周围由绝热材料保温,以减少试样侧面的散热损失,热流密度 q 用热流传感器测量。

1997年黎爱纯^[34]应用防护热板法对中密度纤维板导热系数进行了测定。其热防护装置主均热板由黄铜制成,冷却器由黄铜板焊接而成,恒温水浴的冷却水在冷却器内逗遛向盘香式流动。为保证冷却面的温度均匀,要求冷却器进出口水温相差不大;为防止散热,四周用泡沫塑料绝热;为减少试件与均热板和冷却器间的接触热阻,测定仪上下两个面均用弹簧压紧,其上有刻度,以保证两面弹簧压力均匀。

1998年中国纺织大学采用稳态双平板法^[35],对几种不同纤维材料的导热系数进行测定。其实验装置中,热板有二块直接通直流电发热的薄膜对称复合而成;冷侧均温板为二平行布置的蛇形冷却管的铜板,二蛇形管头尾逆向引入、引出冷却水,以保证冷板的均温性。

2000年中国科学院低温技术实验中心,利用带有防护热板的平板导热仪测量了高分子聚合材料的导热系数^[36],其测量装置如图1.2所示。其热板和冷板皆采用无氧铜材料,冷板的冷量由恒温乙二醇溶液提供;测温装置采用直径 $d=0.1\text{mm}$ 的差分热电偶;试样取为圆形,直径与防护加热板相等,厚度取为 10mm 。同年,郑州大学吕新广等人^[37]应用稳态平板法对弹性金属塑料瓦实际模型的导热系数进行了测定。

2000年浙江海洋学院沈雅钧等人^[38]根据准稳态平板法测试材料热物性的原理,建立了在 -30°C 至室温范围内的导热系数和比热实验测试装置,测定了石棉、岩棉板、硅棉板以及聚苯乙烯泡沫塑料等几种常见绝热保温材料的导热系数和比热。其实验装置中的加热器采用 $\phi=0.1\text{mm}$ 的康铜丝用无衬底的绕制方法绕制而成,输入电流由直流稳压电源供给,用直流毫安表与交直流电压表测定加热电流和电压,加热面温度以及两表面间温度差用两台直流电位差计同时测定。

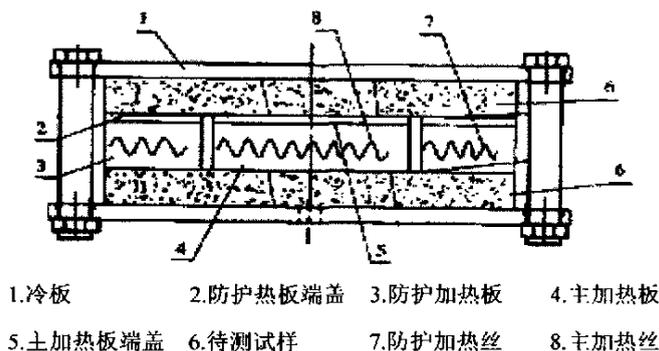


图 1.2 中国科学院防护热板式平板导热仪示意图

2001 年桦林轮胎股份有限公司卢建航等人^[39]应用准稳态平板法测定了 9.00~2016PR 轮胎的外胎、内胎、垫带、胶囊材料的导热系数和比热。实验装置中采用厚度为 $20\mu\text{m}$ 的高电阻康铜箔平面加热片。

2003 年浙江大学胡亚才, 王玉芝^[16]和俞自涛采用准稳态平板导热仪研究了红松, 落叶松, 柳桉等木材的导热特性, 试验装置的示意如图 1.3。

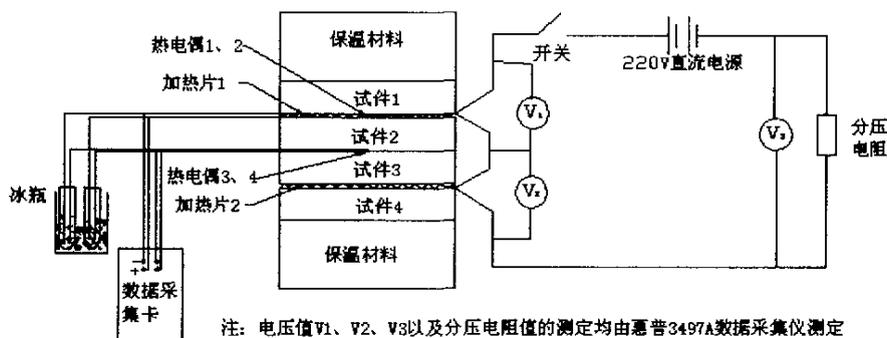


图 1.3 准稳态法测试装置的结构以及仪表接线原理示意图

2003 年本人与导师胡亚才^[40]又结合该准稳态导热测试台研究了一种新的求解木材导热系数的瞬态法, 将实验测量数据与通过 Laplace 变换求解得到的定热流加热时一维导热微分方程的短时间计算公式进行结合分析, 并实际测定了常温下红松和落叶松的导热系数。实验和分析结果表明该瞬态计算模型比准稳态法和正规状态法更加能满足一维导热条件, 计算模型中所要求的 $Fo \leq 0.5$ 的条件在实验中容易满足, 所采用的温度随时间变化的短时间公式比一般瞬态法所采用的公式更为简洁, 所测定的导热系数精度较高。其基本原理如下:

如图 1.4 所示厚为 δ 拟无限大平板, 初始温度为 t_0 , 当在平板一侧的整个平面上以恒定功率的热源加热, 另一侧保持绝热时, 其数学描述为:

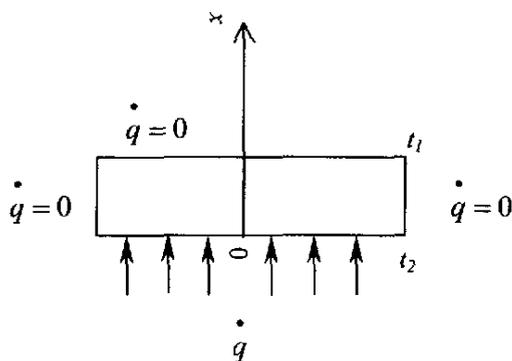


图 1.4 无限大平板

$$\alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad \tau = 0 \quad t = t_0,$$

$$x = 0, -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \dot{q}, \quad (1.12)$$

$$x = \delta, \frac{\partial t}{\partial x} = 0,$$

利用 Laplace 变换, 可求得任一瞬时 x 方向温度分布的通解为:

$$t - t_0 = \frac{\dot{q}}{\lambda} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \sqrt{\frac{4a\tau}{\pi}} \left[\exp\left(-\frac{k_{n1}^2}{4\tau}\right) + \exp\left(-\frac{k_{n2}^2}{4\tau}\right) \right] - \sqrt{a} \left[k_{n1} \operatorname{erfc}\left(\frac{k_{n1}}{2\sqrt{\tau}}\right) + k_{n2} \operatorname{erfc}\left(\frac{k_{n2}}{2\sqrt{\tau}}\right) \right] \right\} \quad (1.13)$$

$$\text{其中 } K_{n1} = \frac{2n\delta + x}{\sqrt{a}}, \quad K_{n2} = \frac{2(n+1)\delta - x}{\sqrt{a}}$$

在一定的计算精度下, 当时间 τ 越短, 该式所需计算的项数越少, 所以我们将式 (1.13) 叫做短时间公式, 当取加热刚开始的一段时间进行研究, 即 τ 很小时, 可以舍去 $n \geq 1$ 项, 取 $n = 0$, 则:

$$t - t_0 \approx \frac{\dot{q}}{\lambda} \left\{ \sqrt{\frac{4a\tau}{\pi}} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) + \exp\left(-\frac{(2\delta - x)^2}{4a\tau}\right) \right] - \left[x \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}\right) + (2\delta - x) \operatorname{erfc}\left(\frac{2\delta - x}{\sqrt{4a\tau}}\right) \right] \right\} \quad (1.14)$$

$$\text{令 } t - t_0 = CD(\tau, x), \text{ 其中 } C = \frac{\dot{q}\delta}{\lambda},$$

$$\text{令 } D(\tau, x) = \sum_{n=0}^{\infty} 2\sqrt{Fo} \left[\operatorname{ierfc}\left\{\frac{2n + x/\delta}{2\sqrt{a\tau}}\right\} + \operatorname{ierfc}\left\{\frac{2(n+1) - x/\delta}{2\sqrt{a\tau}}\right\} \right] = D(Fo, \frac{x}{\delta}) \quad (1.15)$$

$$\text{令 } \theta_1 = t_1 - t_0, \quad \theta_2 = t_2 - t_0,$$

在加热面即 $x=0$ 处, $t(\tau, 0)$ 随时间的变化为

$$\theta_1(\tau) = t_1 - t_0 = \frac{\dot{q}\delta}{\lambda} D_1(Fo, 0) \quad (1.16)$$

$$D_1(Fo, 0) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{Fo} \left[\text{ierfc}\left(\frac{n}{\sqrt{Fo}}\right) + \text{ierfc}\left(\frac{n+1}{\sqrt{Fo}}\right) \right]$$

在绝热面即 $x = \delta$ 处, $t(\tau, \delta)$ 随时间的变化为

$$\theta_2(\tau) = t_2 - t_0 = \frac{\dot{q}\delta}{\lambda} D_2(Fo, 1) \quad (1.17)$$

$$D_2(Fo, 1) = \sum_{n=0}^{\infty} 4\sqrt{Fo} \text{ierfc}\left(\frac{n+0.5}{\sqrt{Fo}}\right), \text{ 其中 } Fo = \frac{\alpha\tau}{\delta^2}$$

由于当 $Fo < 0.5$ 时 $D_1(Fo, 0) = \sum_{n=0}^{\infty} 2\sqrt{Fo} \left[\text{ierfc}\left(\frac{n}{\sqrt{Fo}}\right) + \text{ierfc}\left(\frac{n+1}{\sqrt{Fo}}\right) \right] \approx \sqrt{Fo}$ 则

$$\theta_1(\tau) = C_1 \sqrt{Fo} \quad (1.18)$$

通过准稳态测试试验台, 对待测木材试样进行测试, 将采集的试验数据按以下步骤处理。

1) 拟合法求 C_r 由式 (1.18) 得

$$\theta_1(\tau) = C_1 \sqrt{Fo} = C_r \sqrt{\tau}, \text{ 其中 } C_r = \frac{\dot{q}}{\sqrt{\lambda\rho c_p}}, \text{ 则有 } t_1(\tau) = C_r \sqrt{\tau} + t_0, \text{ 通过实验可测}$$

得 t_0 和 $t_1(\tau)$, 采用线性拟合法即可求得 C_r [17]

2) 求 $\lambda\rho c_p$

$$\lambda\rho c_p = \left(\frac{\dot{q}}{C_r}\right)^2 \quad (1.19)$$

3) 求 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ 由 (1.17) 式除以 (1.18) 式得

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{C_2 D_2(Fo, 1)}{C_1 \sqrt{Fo}} = \frac{D_2(Fo, 1)}{\sqrt{Fo}} = f(\sqrt{Fo}), \quad (C_1 = C_2 = C = \frac{\dot{q}\delta}{\lambda}) \quad (1.20)$$

由式 (1.20) 求得 $\sqrt{Fo} = f^{-1}\left(\frac{\theta_2}{\theta_1}\right)$, $Fo = [f^{-1}\left(\frac{\theta_2}{\theta_1}\right)]^2$,

$$\frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{Fo\delta^2}{\tau} \quad (1.21)$$

根据实验测得的 $t_0, t_1(\tau)$ 和 $t_2(\tau)$ 求 $\frac{\theta_2}{\theta_1}$

4) 求 λ 和 c_p 由 (1.19) 式和 (1.11) 式求 λ , 其中 δ 和 τ 可直接测量, \dot{q} 可由测量的电流, 电压及试样截面积求得。

$$\lambda = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c_p} \times \lambda \rho c_p} = \sqrt{\frac{\delta^2 Fo}{\tau} \times \left(\frac{\dot{q}}{C_r}\right)^2} = \frac{q \delta \sqrt{Fo}}{C_r \sqrt{\tau}} \quad (1.22)$$

式中所求导热系数 λ 为中间温度 $t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$ 时材料的导热系数。

$$c_p = \lambda / (\alpha \rho) \quad (1.23)$$

5) 计算 Fo , 验证是否满足 $Fo \leq 0.5$ 的条件, 若不满足则重新选择计算所用的实验数据以满足该条件。

1.3.2 国外平板导热仪研究现状

英国国家物理实验所 (NPL) [41], 为了服务于英国建筑工业的发展, 而致力于低导热系数的测量。该国家物理实验所也为制定欧洲的导热系数测定标准做了大量贡献。其研制的防护热平板导热仪如图 1.5 所示, 它用来测量玻璃纤维板的导热系数。

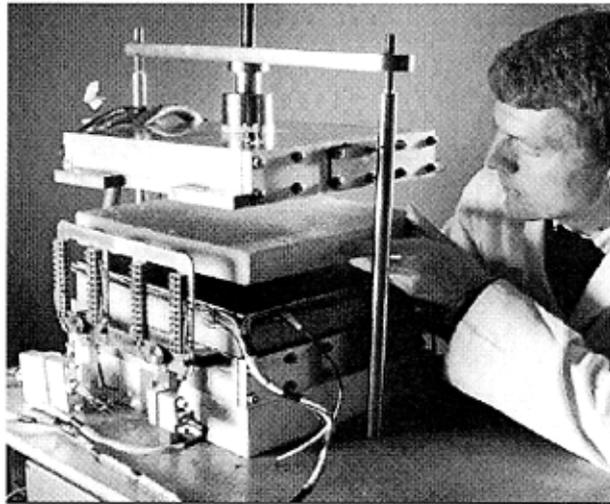


图 1.5 英国国家物理实验所 (NPL) 研制的平板导热仪装置图

英国国家物理实验所 (NPL) 所研制的几种平板导热仪的基本参数如表 1.2 所示。后来, NPL 又研制了两种新型的 305mm 的热防护平板导热仪, 一种是真空热防护导热仪, 其使用范围 $-50^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 可用来测量低导热系数真空绝热板, 且其冷板的发射率是已知的, 当试样和冷板之间有孔隙时, 可以测量试样表面的发射率。另一种是低温热防护平板导热仪, 使用温度范围是 $-170^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

表 1.2 英国国家物理实验所研制导热仪的基本参数

导热仪的类型	导热系数测量范围	温度范围	试样尺寸	试样厚度	测量误差
	W/m.k	℃	mm	mm	%
热防护平板法	0.01~2	-20~80	305×305	25~50	±2.5
热防护平板法	≥0.1	5~40	610×610	25~250	±1.5
防护热流计法	0.02~0.1	0~40	610×610	10~200	±5.0
防护热流计法	0.1~3	10~60	Φ50	1~20	±6.0

美国安特公司^[32]按照美国材料试验标准 (ASTM) 研制了防护型热流计法测量材料导热系数。

美国国家标准技术研究所 (NIST) 的建筑火灾实验室^[33], 针对 90K~900K 温度范围内的绝热材料, 研制了一种新型热防护板平板导热仪。应用有限元软件 ANSYS, 证明了这种新型热防护板平板导热仪能满足试样内部的一维导热。其纵向剖面图如图 1.6 所示。

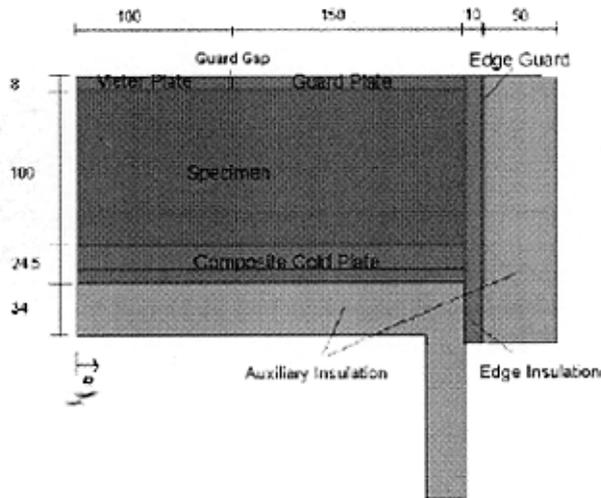


图 1.6 设计的防护热板导热仪的纵向剖面图

德国耐驰仪器制造有限公司^[34]是全球顶尖级的热分析与热物性测试仪器专业生产企业之一。它向国际市场提供一系列质量一流的具有世界领先技术的热物性测试仪器。它推出了保护热板法导热仪 456 系列见表 1.3 所示, 测量原理如图 1.7 所示。

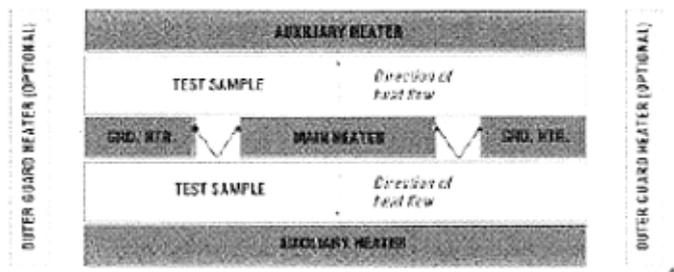


图 1.7 保护热板法导热仪测量原理图

表 1.3 耐驰保护平板法导热仪 456 系列的技术数据

	GHP 456/1	GHP 456/2	GHP 456/3	GHP 456/4	GHP 456/5
试样形状	圆形	方形			
试样尺寸 (最大)	直径 20cm 厚度 5cm	直径 30cm 厚度 7.5cm	直径 35cm 厚度 7.5 cm	直径 45cm 厚度 10cm	直径 60cm 厚度 15cm
推荐试样厚度	2.5cm	5cm	5cm	7.5cm	10cm
测量导热 系数范围	0.014 to 2.0 w/mK	0.007 to 2.0 W/mK			
测量的 温度范围	-180 to 650℃ -290 to 1200F	-30 to 650℃ -20 to 1200F	25 to 550℃ 77 to 1020F	0 to 200℃ 32 to 400F	
可重复性	+/- 1%				
误差	+/- 4%				
使用条件	115V - 50/60Hz - 30A 或者 230V - 50/60Hz - 20A				

1.4 本课题的研究内容

(1) 依据国标 GB10294-88 和 GB10295-88 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定以及本课题研究目的设计热管式平板导热仪。

(2) 建立热管式平板导热仪测试系统。采用高精度的 HP3497A 数据采集仪, 对自制热电偶进行标定, 对试验所需的木材试样进行制备和培养。

(3) 对测试热管式平板导热仪测试系统进行调试。

(4) 采用热管式平板导热仪有选择性地对气干横纹针叶材, 气干横纹阔叶材, 气干顺纹材, 不同含水率的落叶松和红松, 不同纹理的四种木材进行导热系数测试。

(5) 通过计算机模拟进一步对试验测试导热系数进行修正, 提高试验测试的精度。

(6) 对试验测试求得的导热系数进行误差分析, 并与其它测试方法的测试结果进行比较验证。

(7) 分析总结被测木材的导热系数随温度, 含水率和纹理方向的变化规律, 总结相应的规律关联式。

1.5 本章小结

本章提出了研究木材热物性测试的背景, 分析了解决这些问题的必要性, 并阐明了进行相关研究的意义。

本章回顾了目前国内外的本课题研究现状和存在的问题。最后介绍了本课题的主要研究内容。

第二章 热管式平板导热仪

为设计热管式平板导热仪,本章介绍了稳态平板导热仪的主要类型及平板导热仪国家标准中的主要技术要求,介绍了所设计的热管式平板导热仪的主要结构及测试原理。本章详细介绍了热管式平板导热仪中热管式均温板的计算设计以及并采用 ANSYS 软件模拟计算了试样在导热仪中的温度分布。

2.1 稳态平板导热仪的类型

稳态平板法是基于使试件内建立起一维导热过程,以测定材料导热系数的一种方法。由于平板试件的配置不同,可分为:(1)单平板法;(2)双平板法;(3)平板比较法。这些方法的实验设备各有特点,但最关键的一点是都需在试件内设法建立起一维稳态温度场,以便于准确地计量通过试件的导热流量及试件两侧表面的温度。

常见的稳态平板导热仪又分为防护型热平板导热仪和热流计式平板导热仪。

2.1.1 防护型热平板导热仪

防护型热平板导热仪的原理是,在稳态条件下,防护热板装置的中心计量区域内,在具有平行表面的均匀板状试样中,建立类似于以两个平行均温平板为界的无限大平板中存在的一维恒定热流。

为保证中心计量单元建立一维热流和准确测量热流密度,加热单元应分为在中心的计量单元和由隔缝分开的环绕计量单元的防护单元。并且需要有足够的边缘绝热或(和)外防护套,特别是在远高于或低于室温下运行的装置,必须设置外防护套。

通过测定稳定状态下流过计量单元的一维恒定热流量 Q 、计量单元的面积 A 、试件冷、热表面的温度差 ΔT ,可计算出试件的热阻 R ($R = \frac{\Delta T \cdot A}{Q}$) 或导热率

$$C_{\lambda} (C_{\lambda} = \frac{1}{R})。$$

根据这一原理可建造两种型式的防护热板装置,双试件式导热测试仪和单试件式导热测试仪。双试件式装置中,在两个几乎相同的试件中间夹一个加热单元,试件的外侧各设置一个冷却单元,热流由加热单元分别经两侧试件传给两侧的冷却单元,如图 2.1。在单试件式装置中,加热单元的一侧用绝热材料和背防护单元代替试件和冷却单元,如图 2.2。绝热材料的两表面应控制温差为零,无热流通过。

如图 2.1 和 2.2,为保证一维稳态导热,防护型热平板导热仪使用了防护加热器,防护面板,背防护加热器等,使得装置较为复杂。

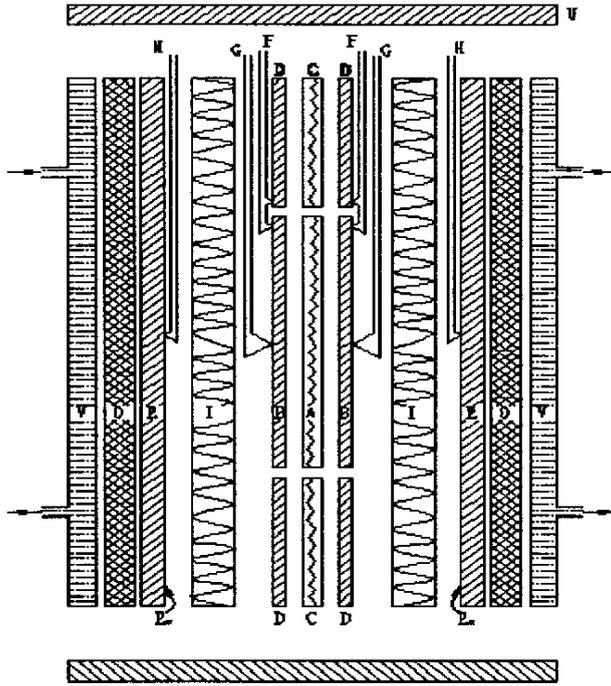


图 2.1 双试件式装置

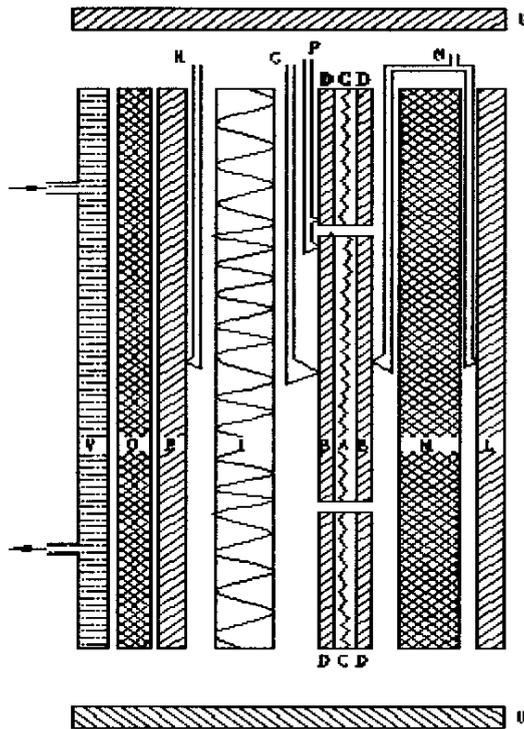


图 2.2 单试件式装置

A—计量加热器 B—计量面板 C—防护加热器 D—防护面板 E—冷面加热器
 E_s—冷面冷却器 F—平衡检测温差热电偶 G—加热单元表面测温热电偶 H—冷却单元表面测
 温热电偶 I—被测试件 L—背防护加热器 M—绝热层 O—绝热层 V—冷却水套 U—外防护套

2.1.2 热流计式平板导热仪

热流计装置的典型布置如图 2.3 所示。当热板和冷板在恒定温度的稳定状态下，热流计装置在热传感器中心测量部分和试件中心部分建立类似于无限大平壁中存在的单向稳定热流。假定测量时具有稳定的热流密度为 q 、平均温度为 T_m 和温差为 ΔT 。用标准试件测得的热流量为 Q_s 、被测试件测得为 Q_u 、则标准试件热阻 R_s 和被测试件热阻 R_u 的比值为：

$$\frac{R_u}{R_s} = \frac{Q_s}{Q_u}$$

如果满足确定导热系数的条件，且试件厚度 d 为已知，可算出试件的导热系数。

热流计装置由加热单元、一个（或两个）热流传感器、一块（或两块）试件和冷却单元组成。图 2.3a 为单试件不对称布置，热流传感器可以面对任一单元放置。图 2.3b 为单试件双热流传感器对称布置。图 2.3c 为双试件对称布置。其中两块试件应该基本相同，由同一样品制备。亦可在加热单元的另一侧面另加热流传感器和冷却单元构成双向装置如图 2.3d 和 e。如果满足国标要求，各种布置均将得到相同的结果。

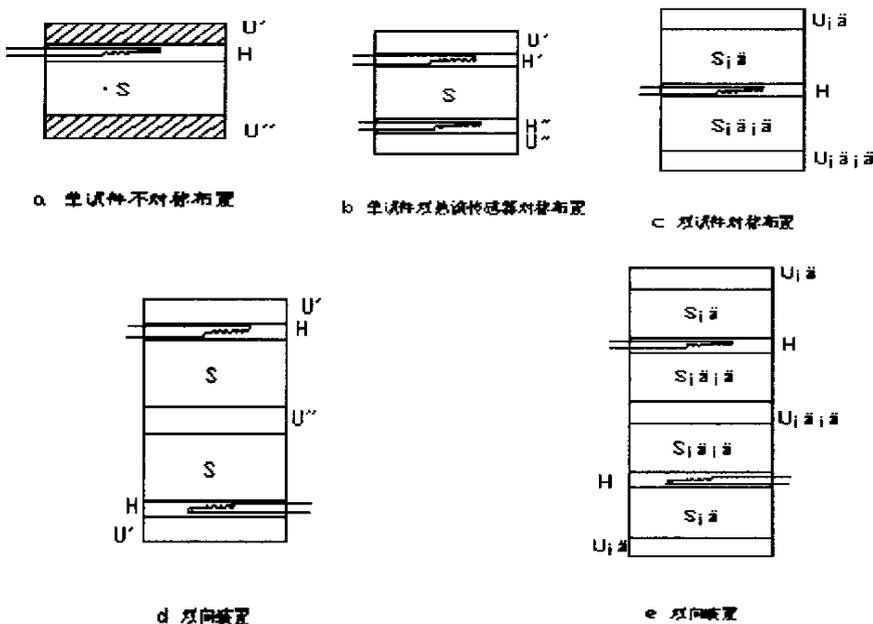


图 2.3 热流计装置的典型布置图

U, U' — 冷却和加热单元； H, H', H'' — 热流传感器

2.2 设计的主要技术要求

本文所设计的热管式平板导热仪结合了防护性平板导热仪和热流计式平板导热仪的特点，是根据中华人民共和国国家标准 GB10294—88，^[42] 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定（防护热板法）和国家标准 GB10295—88^[42] 而设计的。

为便于实验室之间比较,推荐导热测试装置的标准尺寸系列如下:

- a.直径(或边长)为 0.3m;
- b.直径(或边长)为 0.5m;
- c.直径(或边长)为 0.2m(仅用于测定匀质材料);
- d.直径(或边长)为 1.0m(用于测定厚试件).

主要的技术要求如下:

1. 加热单元

加热单元是由加热器和均温面板组成，面板通常由高导热系数的金属制成。其表面不应与试件和环境有化学反应。工作表面应加工成平面，在所有工作条件下，平面度应优于 0.025%，如图 2.4。板表面的平面度应定期检查。在运行中面板的温度不均匀性应小于试件温差的 2%。所有的工作表面应处理到在工作温度下的总半球辐射率大于 0.8。

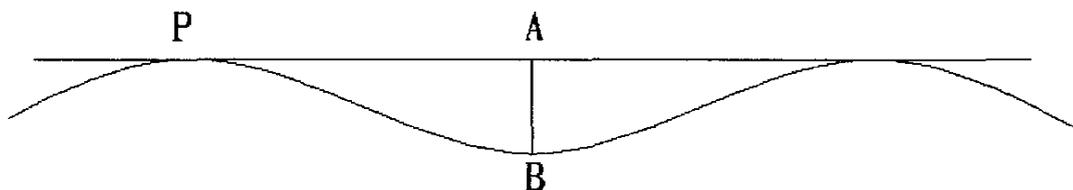


图 2.4 工作表面

2. 冷却单元

冷却单元表面尺寸至少应与加热单元的尺寸相同。冷却单元可以是连续的平板，但最好与加热单元类似。它应维持在恒定的低于加热单元的温度。板面的温度不均匀性小于试件温差的 2%。可采用金属板中通过恒温的流体或冷面加热器和插入电加热器与冷却器之间的绝热材料组成。或者两种方法结合起来使用。

冷却单元与试件相接触的平面度应优于 0.025%，并且处理使其总半球辐射率大于 0.8。

2.3 热管式平板导热仪的结构

由于防护型平板导热仪装置的结构较为复杂，操作测试不方便，而热流计式平板导热仪所使用的热流计较为昂贵，且在导热仪中不易布置，因此本文结合这两类导热仪的特点，设计了热管式平板导热仪。

如图 2.5 所示，本文设计的热管式平板导热仪主要由底座，加热台，热管式均热板，热管式均冷板，冷却水槽和导向杆组成。

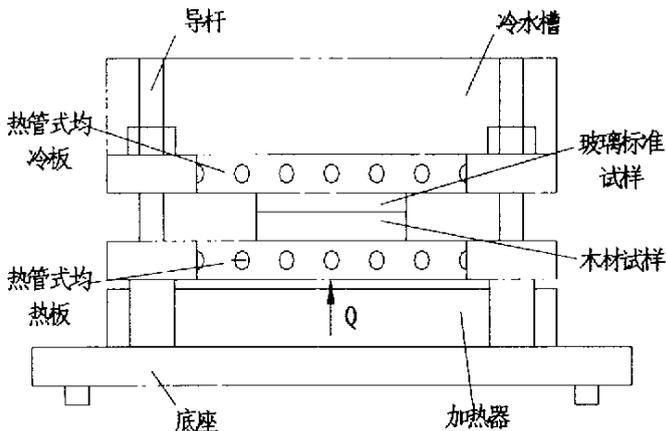


图 2.5 热管式平板导热仪装置图

(1) 底座所起的作用是支撑整个热管式平板导热仪，采用的是普通钢板，其尺寸为 $350 \times 350 \times 40$ mm。

(2) 加热器为加热过程提供热量，加热功率为 1000W，采用的是普通电阻丝，电阻丝直径为 $\Phi 0.72$ mm，加热槽宽为 5 mm。方形加热器四周边及底部铁皮包嵌，底部保存水平光滑。加热丝引线（两根）可接电流表、电压表和调压器，加热器的外形尺寸为 300×300 mm。

(3) 热管式均热板，将加热器的热量均匀地传递给试样，并保持一个温度均匀的平面采用的是普通钢板，板的外形尺寸为 $300 \times 300 \times 20$ mm，孔间距为 30 mm，孔径为 $\Phi 10$ mm。板侧各打孔九只，孔深 300 mm，两侧孔中心相差 ≤ 0.5 mm，各孔口螺纹深度 8 mm，配 $\Phi 10$ mm 螺栓塞子密封，塞子厚 5 mm，注液（蒸馏水）后塞子周边焊牢密封。

(4) 热管式均冷板，将通过试样的热量均匀地带走，并保持一个温度均匀的冷面，其设计同热管式均热板。

(5) 冷却水槽，将热管式均冷板上的热量带走。冷却水槽外接水箱，测试时水槽内水流动将热量带走。

(6) 导向杆起定位与压紧的作用。

2.4 热管式平板导热仪的测试原理

从图 2.5 可知在热管式平板导热仪中, 被测木材试样和玻璃标样按图 2.6 放置, 玻璃标样紧贴在木材试样的上面。设木材试样和玻璃标样的导热系数分别为 λ_1 和 λ_2 , 通过木材试样和玻璃标样的热流密度分别为 q_1 和 q_2 。

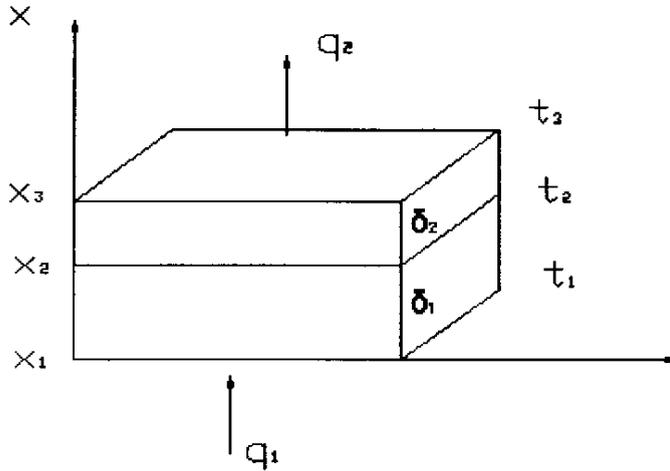


图 2.6 木材试样和玻璃标样

当木材试样和玻璃标样达到一维稳态导热状态时, 分析木材试样中的一维导热过程, 可直接由下面傅立叶定律求解:

$$q_1 = -\lambda_1 \frac{dt}{dx} \quad (2.1)$$

式中:

q_1 - 热流密度, W/m^2 ;

$\frac{dt}{dx}$ - 试件内的温度梯度, $^{\circ}C/m$;

λ_1 - 木材试样的导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 。

导热系数 λ_1 一般可表示为温度的函数 $\lambda_1(t)$ 。将 $\lambda_1(t)$ 代入式 (2.1) 则傅立叶定律的表达式为

$$q_1 = -\lambda_1(t) \frac{dt}{dx} \quad (i)$$

分离变量后积分, 并注意到热流量 q 与 x 无关, 得

$$q_1 \int_{x_1}^{x_2} dx = - \int_{t_1}^{t_2} \lambda_1(t) dt \quad (j)$$

将式 (j) 右方乘以 $(t_2 - t_1) / (t_2 - t_1)$ 得

$$q_1 \int_{x_1}^{x_2} dx = - \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda_1(t) dt}{t_2 - t_1} (t_2 - t_1) \quad (k)$$

显然, 式中 $\int_{t_1}^{t_2} \lambda_1(t) dt / (t_2 - t_1)$ 项是 λ_1 在 t_1 与 t_2 范围内的积分平均值, 可用 $\bar{\lambda}_1$ 来表示。于是式 (k) 可写成

$$q_1 = \frac{\bar{\lambda}_1(t_2 - t_1)}{x_2 - x_1} = \frac{\bar{\lambda}_1(t_2 - t_1)}{\delta_1} \quad (2.2)$$

式中 δ_1 为木材试样厚度。

当被测试样上下表面的温差不大时, 材料导热系数对温度的依变关系往往可以表示成下列线性关系:

$$\lambda_1 = \lambda_0(1 + bt) \quad (2.3)$$

在这种情况下, 式 (2.2) 中的 $\bar{\lambda}_1$ 就是算术平均值平均温度 $\bar{t} \left(= \frac{t_1 + t_2}{2} \right)$ 下的 $\bar{\lambda}_1$ 值。

同理对玻璃标样, 在稳定状态下有

$$q_2 = \frac{\bar{\lambda}_2(t_3 - t_2)}{x_3 - x_2} = \frac{\bar{\lambda}_2(t_3 - t_2)}{\delta_2}$$

式中 δ_2 为玻璃标样的厚度, $\bar{\lambda}_2$ 即 $\int_{t_2}^{t_3} \lambda_2(t) dt / (t_3 - t_2)$ 为玻璃标样的导热系数 λ_2 在 t_2 与 t_3 范围内的积分平均值, 由于玻璃的导热系数与温度是非线性关系, 如式

(2.4), 所以 $\bar{\lambda}_2$ 并非算术平均温度 $\bar{t} \left(= \frac{t_2 + t_3}{2} \right)$ 下的 $\bar{\lambda}_2$ 值。

$$\lambda_2(t) = 2 \times 10^{-7} t^2 - 0.0006t + 0.7174 \quad (2.4)$$

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{\int_{t_2}^{t_3} (2 \times 10^{-7} t^2 - 0.0006t + 0.7174) dt}{t_3 - t_2} \quad (2.5)$$

将 t_2, t_3 代入式 (2.5) 即可求得 $\bar{\lambda}_2$, 将所求得的 $\bar{\lambda}_2$ 代入式 (2.4) 即可求得相应的温度 \bar{t} , 则 $\bar{\lambda}_2$ 为 \bar{t} 温度下玻璃的导热系数。

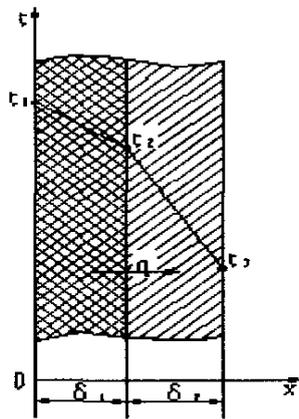


图 2.7 双层壁导热

如图 2.7 达到稳定时 $q_1=q_2$, 所以存在以下关系式,

$$\frac{\bar{\lambda}_1(t_2-t_1)}{\delta_1} = \frac{\bar{\lambda}_2(t_3-t_2)}{\delta_2}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\delta_1(t_2-t_3)}{\delta_2(t_1-t_2)}$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_2\delta_1(t_2-t_3)}{\delta_2(t_1-t_2)} \quad (2.6)$$

由于 λ_2 已知, $\delta_1, \delta_2, t_1, t_2$ 和 t_3 可以较为精确测得, 则由式 (2.6) 可求试样 1 的导热系数 λ_1

2.5 热管式均温板的设计

由一维稳态导热原理知, 对于平板导热测试仪, 为提高导热系数的测量精度, 则要求被测试样内的温度场尽量接近理想的一维稳态温度场, 这对于均温板的均温性要求非常高。通常平板导热仪的均温板由高导热系数的金属制成, 如铜板。但由于加热器中电阻丝分布通常如图 2.8 所示, 均温板的整个面上受热不均匀, 会影响均温板工作表面上的温差精度, 从而影响导热系数的测量精度。

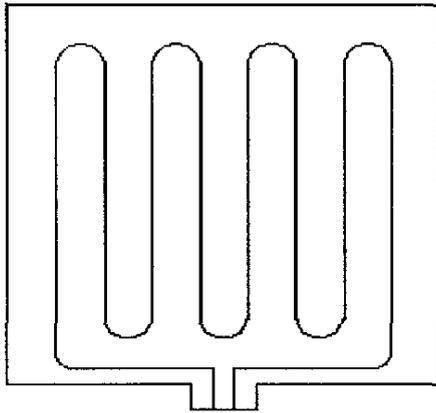


图 2.8 电加热器

热管有良好的导热性, 均温性好, 利用热管技术的热管式均温板的应用很广泛, 在工业生产的许多地方都用到热管式均温板, 如橡胶、塑料的定型制作等。本文也利用热管式均温板设计了一种新的平板导热仪装置, 以下将介绍本课题研究中热管式均温板的设计。

图 2.9 为利用热管原理设计的均温平板。在平板的厚度方向上布置一些圆孔通道, 使其作为热管, 将工作介质 (本文中工作介质为水) 充入管中封好。如图 2.5 电加热器在均热板下侧, 紧贴热管式均热板的下表面, 提供热量加热均热板, 木材试样在均热板上侧, 紧贴均热板。玻璃标样紧贴木材试样, 其上表面紧贴热管式均冷板的下表面, 均冷板的上面放置冷却水槽。热管式均温板水平放置, 工作时, 管底部的工质吸收板下侧的热量后在管中升温沸腾蒸发, 在管内上方, 饱和蒸汽冷凝并放出汽化潜热。在圆孔通道中, 通道的下方为饱和水, 通道的上方为饱和蒸汽, 因此在板的上表面形成一个均温的热面, 在板的下表面形成一个均温的冷面。对于热管式均热板, 它吸收加热器的热量形成均温面, 其温度高于试样, 则通过此均温热面将热量均匀传递给木材试样。对于热管式均冷板, 板的下表面是一个均温面, 其温度低于玻璃标样, 则通过此均温面将通过玻璃标样的热量均匀传递给冷却水槽。

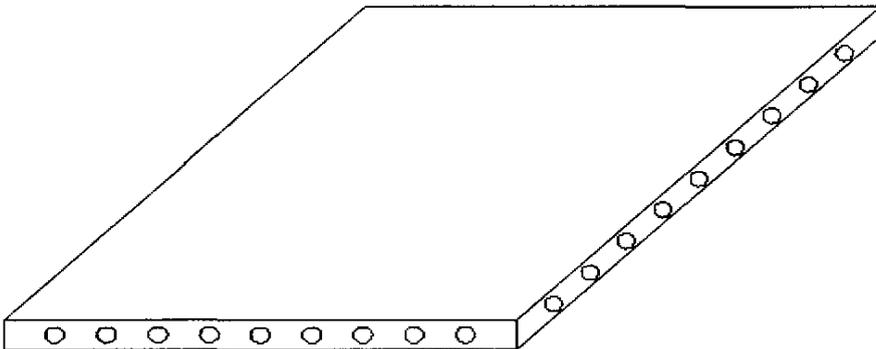


图 2.9 均热板示意图

本文所设计的热管式均温板采用的是钢板, 平板表面尺寸为 $300 \times 300\text{mm}$, 厚度为 40mm , 要求平板工作表面在 200°C 温度范围内的某一温度下工作, 根据国家标准 GB10294-88 有效工作表面内的最大温差应不超过试件温差的 2% 。根据热管轴向等温的特性以及均热平板几何尺寸的比例关系和有效工作表面范围内热传递的对称性, 取如图 3.5 所示的单元体截面, 运用直角坐标系下的二维稳态导热微分方程:

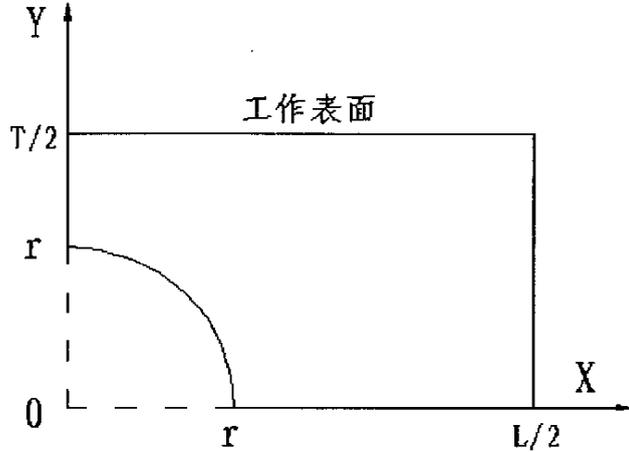


图 2.10 传热计算的单元截面

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (2.7)$$

其中, t 为温度, x 为横坐标, y 为纵坐标。

配合圆孔内的热管工作介质与均温平板间的蒸发或冷凝相变传热, 及均温平板工作表面与其面上物体之间的导热传热等边界条件, 利用差分方法对该定解问题进行数值编程计算, 可得出单元体截面内各节点的温度。边界条件具体由如下关系式近似简化表示:

$$\text{当 } x = 0, r < y < L/2 \text{ 时, } \frac{\partial t}{\partial x} = 0$$

$$\text{当 } y = 0, r < x < T/2 \text{ 时, } \frac{\partial t}{\partial y} = 0$$

$$\text{当 } x = L/2 \text{ 时, } \frac{\partial t}{\partial x} = 0$$

当 $y = T/2$ 时, 均温平板在空载时与环境空气之间存在自然对流换热。

当 x, y 在圆弧边界上时, 热管内工质与均热平板间存在相变对流换热。

其中, r 为圆孔半径, $T/2$ 为 $1/2$ 板厚, $L/2$ 为 $1/2$ 孔间距。

本文采用了 ANSYS 软件对导热方程 (2.7) 进行数值计算, 分别计算了不同孔径, 不同孔间距和不同工作温度下图 2.10 单元截面的温度场分布。

下面所描述的是当热管式均温平板作为均热板时的计算结果。事实上, 当热管式均温平板作为均冷板时, 根据热管的工作原理及特性, 计算结果与此类似, 本文

将不再另外描述。图 2.11 为某一孔内工作介质温度时，工作表面上的温度在一个孔间距内的分布。由于平板厚度方向上开孔的影响，使工作表面上的温度分布呈波浪形，波峰位于孔中心的正上方，波谷位于两孔中间点的正上方，温度分布变化的周期即为孔间距，有效工作表面上的最大温差即为波峰与波谷两处的温度之差。

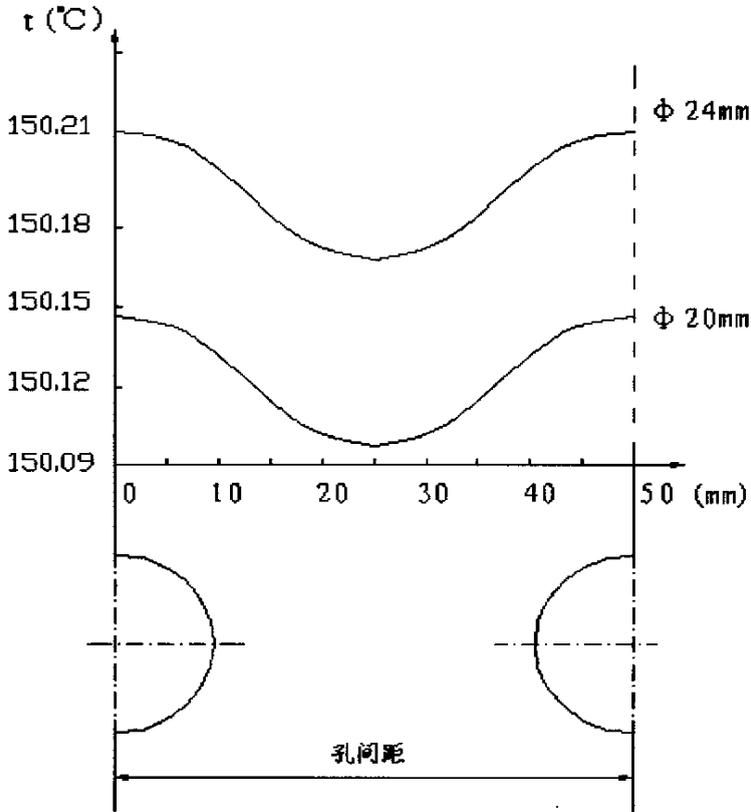


图 2.11 有效工作表面上的温度在一个孔间距内的分布
(工作温度为 150°C ，孔间距 50mm)

图 2.12 为某一孔间距时有效工作表面上的最大温差随工作表面上平均温度的变化关系。由图 2.12 可以看出，当圆孔直径一定时，随着工作温度的升高，有效工作表面上的最大温差 Δt 总体呈增大的趋势，而且随着圆孔直径的增大，此最大温差的数值和变化幅度也越来越大。此说明开孔后对平板内温度场带来的影响。

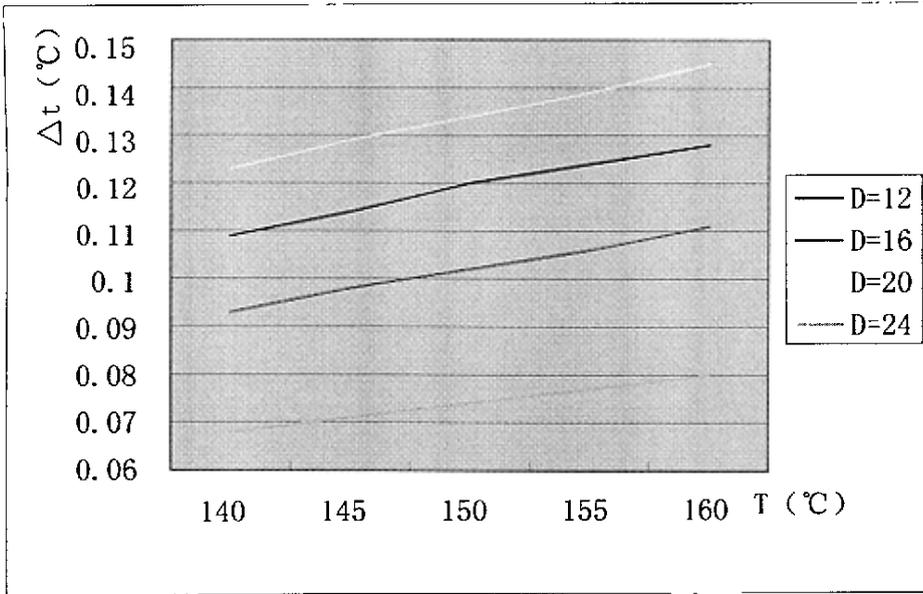


图 2.12 有效工作表面上最大温度随表面工作温度的变化关系
(孔间距 $L=50\text{ mm}$)

图 2.13 为某一表面工作温度时,有效工作面上的最大温差随孔间距的变化关系;图 2.14 为某一表面工作温度时,有效工作面上的最大温差随圆孔直径的变化关系。由这两组曲线可以看出,在同一圆孔直径时,孔间距越大,最大温差也越大;在同一孔间距时,圆孔直径越大,最大温差也越大,且随着孔间距和圆孔直径的增大,最大温差的变化幅度也越来越大。

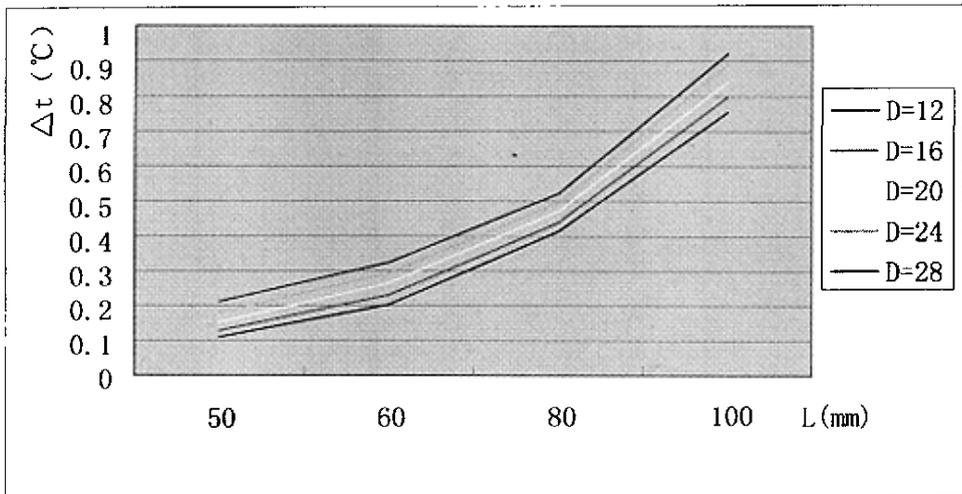


图 2.13 有效工作表面上最大温差随孔间距的变化关系
(表面工作温度 143 °C)

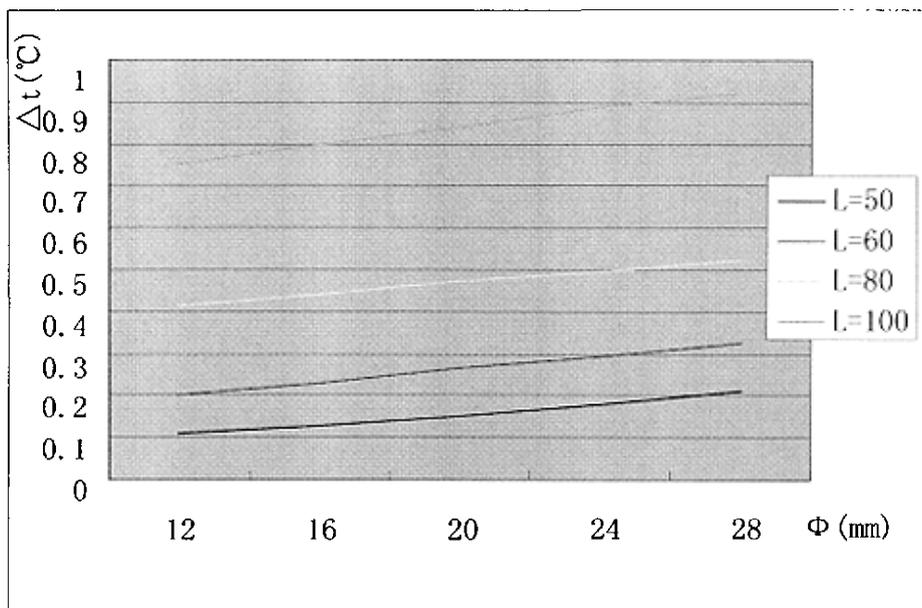


图 2.14 有效工作表面上最大温差随圆孔直径的变化关系
(表面工作温度 180℃)

由所有上述计算结果可以看出,要减小有效工作表面上的最大温差,必须减小小孔间距和圆孔直径,也即须使用较小孔径圆孔通道和较小孔间距的热管式均热平板。

应用以上传热计算结果,并根据国标对均温板温差的要求设计热管式均热平板。选取孔径为 10mm,孔间距为 30mm,在平板上、下表面均为空气自然对流冷却即均热平板作为热管的冷凝段条件下进行工作表面的最大温差计算。图 2.15 为表面工作温度为 147℃时表面的温度分布情况,此时均温板表面的最大温差不超过 0.042℃ (147.118-147.076=0.042)。通过计算不同工作温度时的表面温度分布可知,当表面工作温度在 80~200℃范围内任意一温度值时,有效工作表面上最大温差值为 0.276℃,满足设计要求。

从以上分析可知,用热管技术对均热平板进行温度场控制,使其有效工作表面上的最大温差控制在很小的范围内,是完全可行的;当利用热管技术时,在均热平板厚度方向上布置的圆孔通道,其孔径越小,孔间距越小,得出的有效工作表面上的最大温差也越小,即温差控制的精度越高。在实际应用时,在满足加工条件的情况下,应尽量使用较小孔径和孔间距的热管式均热平板。

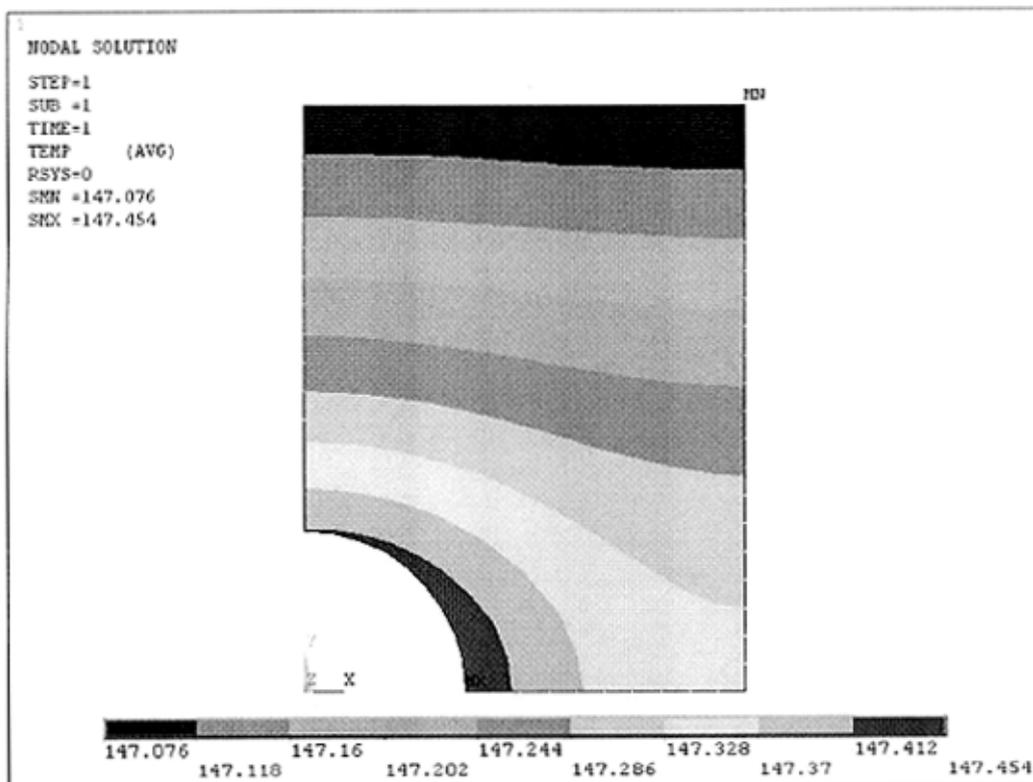


图 2.15 表面工作温度为 147℃ 时表面的温度分布

2.6 热管式平板导热仪的一维稳态温度场

采用平板导热仪测导热系数,关键在于能在被测试样内部建立一维稳态温度场。对于热流计式导热仪装置,由于侧向热损,不可能在试件和热流传感器的整个面积上建立一维热流,因此在测试时要特别注意通过试件和热流传感器边缘的热损失,这是热流式导热仪装置的缺点之一。对于热管式平板导热仪,为减少边缘热损失,用保温材料在试件周围以及整个导热仪装置四周进行保温。

同时为考查试样在热管式平板导热仪内能否达到一维稳态导热,本文采用计算软件 ANSYS 进行模拟,观察试样内的温度分布情况。

如图 2.16 所示,实际测试时热管式平板导热仪被放置在一个木槽中,导热仪的四周为保温材料(如图 2.16 阴影部分所示)。以玻璃标样,木材试样和紧围在它们周围的同一厚度的保温材料(也即图 2.16 中虚线框内的部分)为模拟计算的对象。考虑到对称性,仅取这一对象的四分之一进行计算,计算的结果如图 2.17 和 2.18 所示。图 2.18 为图 2.17 的局部放大图,以便于观察玻璃标样和木材试样内的温度分布情况。

从图 2.18 中温度层的平行分布可看出,在试样的中心部分几乎为完全的一维热流流动,在接近试样边缘处,热流方向有所偏移。在试样的同一平面层取中心点温

度与距中心点不同距离处点的温度值（如图 2.18 中数字所示）进行比较，温差分布为 $96.596-96.592=0.004^{\circ}\text{C}$ 和 $96.596-96.583=0.013^{\circ}\text{C}$ ，可看出试样的中心部分同一平面层的温差极小可忽略不及，中心部分可视为一维导热。因此采用热管式平板导热仪能在试样内部建立一维稳态温度场，而且为提高测量精度，测温点应尽量布置在试样的中心部分。

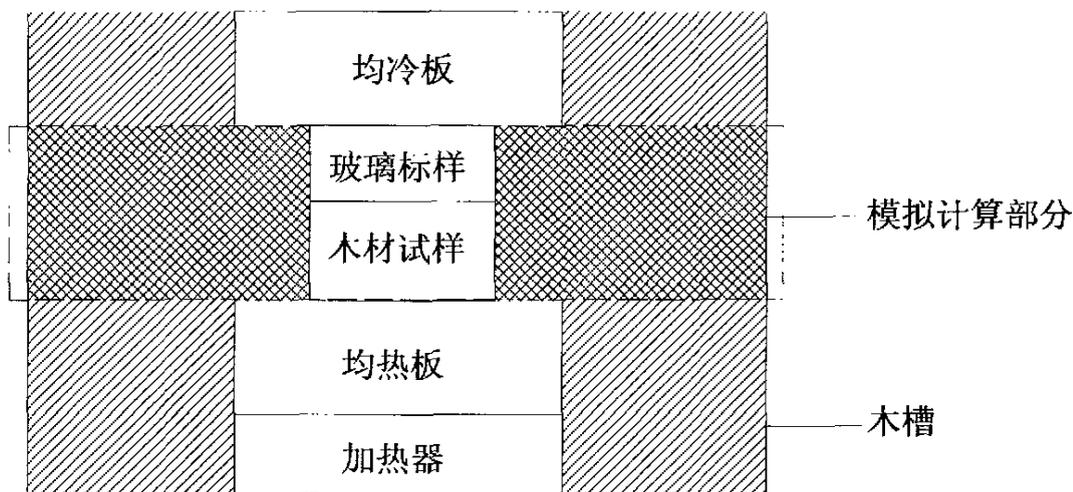


图 2.16 导热仪测试示意图

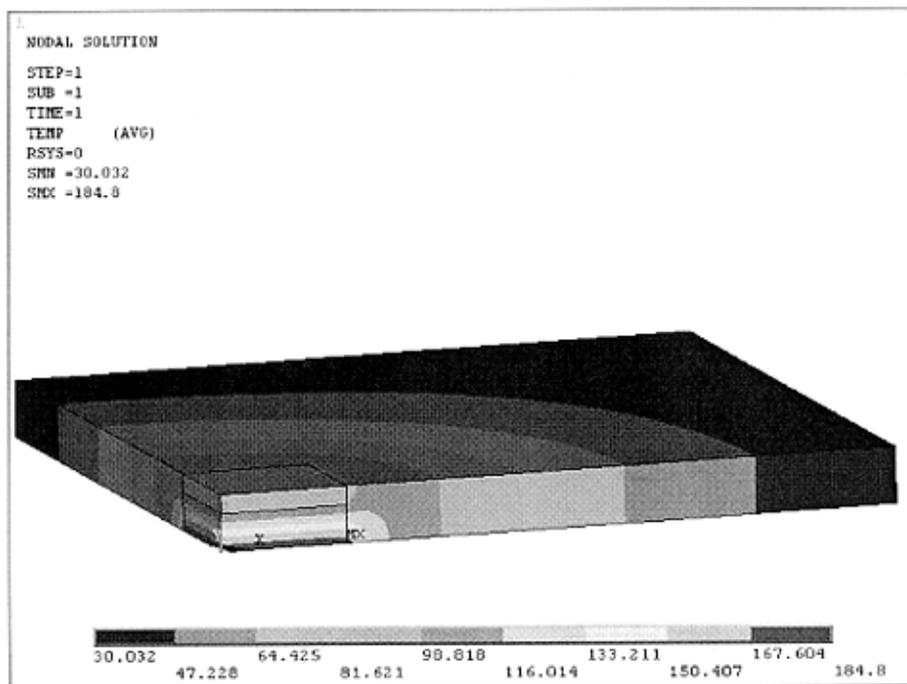


图 2.17 ANSYS 计算结果图

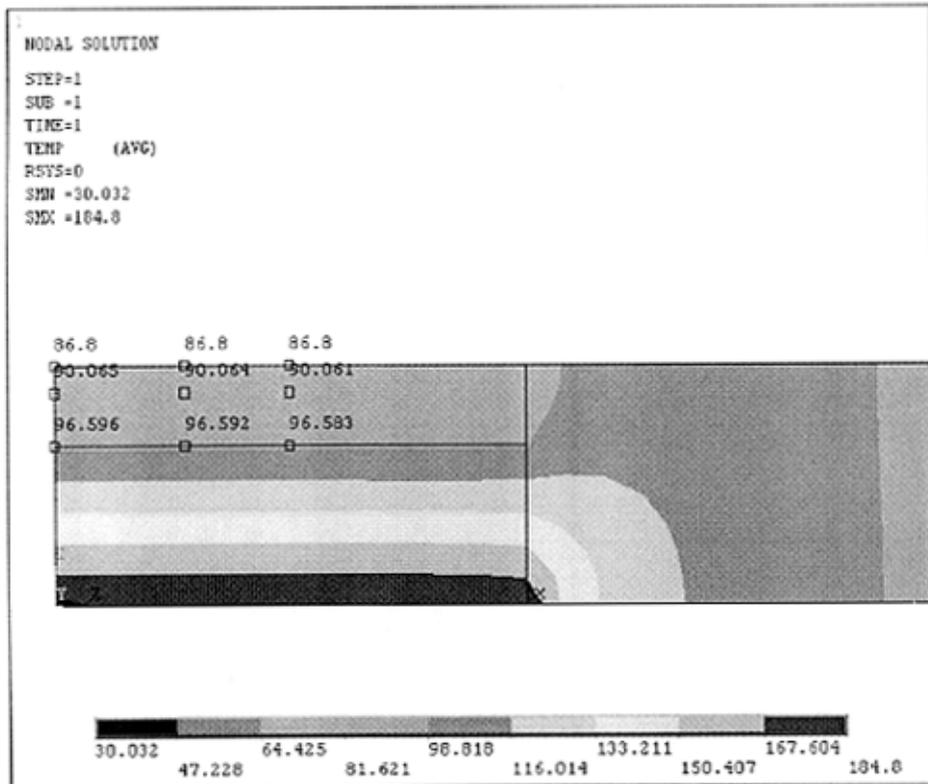


图 2. 18ANSYS 计算结果局部放大图

2.7 本章小节

本章主要介绍了以下内容：

(1) 介绍了防护型平板导热仪和热流计式平板导热仪这两种常见稳态平板导热仪的原理及结构。

(2) 根据平板导热仪的国家标准介绍了平板导热仪设计的主要技术要求。

(3) 介绍了本文所设计的热管式平板导热仪的主要结构。

(4) 采用 ANSYS 软件对热管式均温板工作表面的均温性进行计算，计算结果表明热管技术能有效地控制工作表面的均温性，均温板中孔径越小，孔间距越小，则工作表面的均温性越好。

(5) 采用 ANSYS 软件模拟木材试样和玻璃标样在热管式平板导热仪中的温度分布，对计算结果进行分析，证明了采用热管式平板导热仪进行测量是符合一维稳态导热原理的。

第三章 热管式平板导热仪测试系统及测试过程

根据第二章所设计的热管式平板导热仪，本章建立了完整的热管式平板导热仪测试系统。为进行木材导热系数的测试，本章也介绍了测试条件的准备，包括试样的制备，测温所用热电偶的选择与标定，以及数据采集仪的选择。最后还介绍了导热系数的测试过程和注意事项。

3.1 测试系统简介

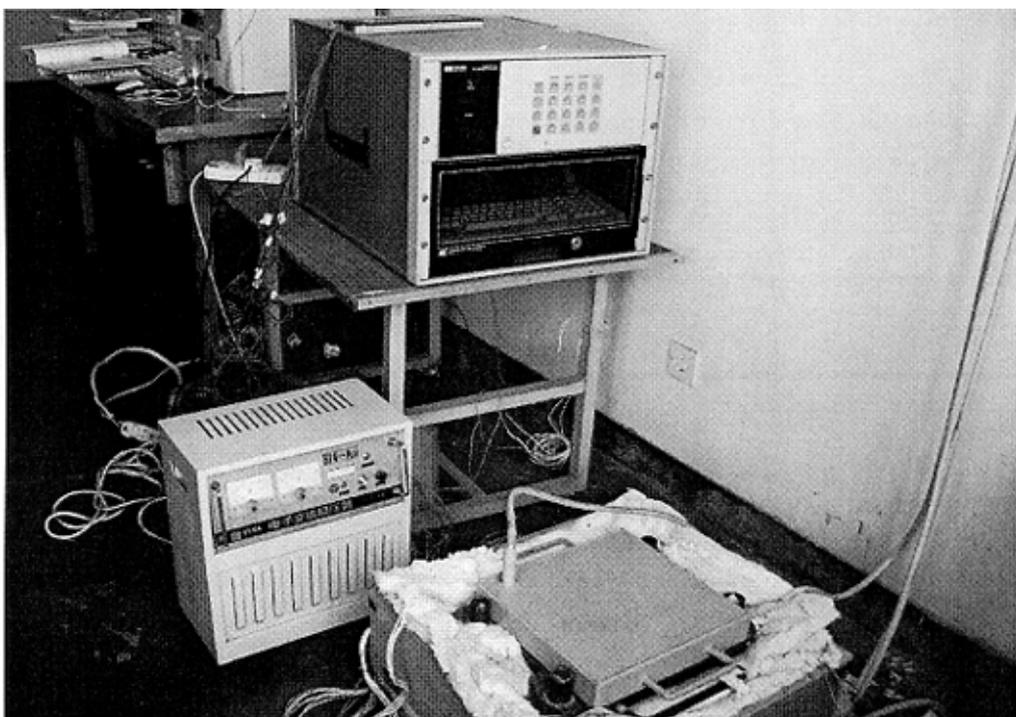


图 3.1 热管式平板导热仪测试系统

热管式平板导热仪测试系统如图 3.1 所示。该系统主要可分为三个部分。

第一部分为热管式平板导热仪与被测木材试样和玻璃标样。木材试样和玻璃标样被放置在热管式平板导热仪的均热板和均冷板之间，导热仪底面与四周用保温材料保温，以减少侧面散热，保证木材试样内部能建立一维稳态温度场。

第二部分为数据采集处理系统。温度感应元件用两对直径为 0.25mm 的镍铬—康铜热电偶。热电偶的温差电势使用精确度为 $1\mu\text{V}$ 的惠普数据采集仪 3497A 测定，由一台 PC 机对数据进行处理，将测得的温差电势转换为相应的温度。

第三部分为加热电源控制系统。稳压器，可调电压，数字交流电压表，数字交流

电流表。

3.2 测试条件的准备

在进入试验测试阶段前主要需准备好待测试样，测量温度所使用的热电偶以及数据采集系统。

3.2.1 试样的制备及要求

1、试样的制备要求

为了满足准稳态导热模型，对试样的制作要求如下：

- 1) 各试样的大小尺寸尽可能与标准试样玻璃的尺寸相同；
- 2) 无限大平板法对于导热性能比较差的物体($\lambda \leq 2.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)，要求选择平板

试样的尺寸时，满足条件：
$$\delta \leq \frac{1}{6}L \sim \frac{1}{10}L$$
 (δ 为试样厚度， L 为试样长度和宽度)；

3) 试样各面加工均应平整，能够接合紧密，这样可以避免形成缝隙，造成测试结果产生误差；

- 4) 试样各相邻面均应呈准确的直角；
- 5) 试样上尽量避免存在疤痕、裂缝等缺陷。

本文试验前将木材加工成尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的试样，横纹试样的 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 平面与木材纹理相平行，测试时让热流方向与木材纹理相垂直进行。顺纹试样的 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 平面与木材纹理相垂直，测试时让热流方向沿木材纹理方向进行。

2、试样湿度的培养

为了测定不同湿度下木材的热物性，需要将试样培养成具有不同的含湿量。培养湿度的方法有两种：

1) 解吸法：将潮湿的试样进行解吸（自然风干或强迫减湿），使试样的湿度逐渐减少，以便控制试样的各种不同的含湿量。

2) 加湿法：这种方法又可分为以下几种：

- a) 在恒温恒湿状况下进行培养；
- b) 用水雾（雾化水）淋洒；
- c) 浸在室温水中的；
- d) 浸在比室温高的热水中。

方法 a)、b) 适用于材料不宜浸入水中的试样，如玻璃棉、矿棉及强度较低的多孔材料。对于具有一定强度的块状材料采用方法 a)、b)，在短时间内达不到要求的湿度时，可采用方法 c)。方法 d) 用于试样浸在室温水内短时间达不到所要求的吸湿量时，如软木等。

因为试验时室温为 30℃ 左右, 本文试验木材的湿度培养采用方法 c)。为了保证湿度的稳定, 通过上述方法培养的湿试样需要放入密封塑料袋或者密封容器内稳定 3~8 日后再进行试验(视试样的密实程度而定, 如红松需稳定时间要长达要一周, 落叶松、白松所需时间较短 3~4 天即可)。

3.2.2 温度的测量

1. 测温手段

温度测量仪表依据它们的测量方式, 通常分为接触法和非接触法两类。

1) 接触法: 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, 则它们的温度必然相等。如果其中之一为温度计, 就可以用它来测量另一个物体的温度, 这种测量方式叫做接触法。

2) 非接触法: 温度计不与被测物体接触, 而是利用物体的热辐射能(或亮度)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。

试验中我们采用的是接触法。

2. 温度计的选择

在使用温度计时, 应根据测量的目的、要求及条件、综合考虑下列各项, 选取合适的温度计。

- 1) 与被测物体温度呈单值函数关系。
- 2) 使用温度范围, 准确度及测量误差是否满足测量要求。
- 3) 传感器的材质、形状及响应速度。
- 4) 温度计的使用寿命及可靠性、互换性。
- 5) 温度计的读数, 安装和使用是否方便。
- 6) 遥测, 自动记录, 控制, 报警的可能性。

由于热电偶测量精度高、成本低、使用方便、耐久性好, 并且测量信号便于传递和自动记录, 可实现在各种工况下的连续测量等优点。自 1821 年塞贝克发现热电效应以来, 已发展了 300 多种热电极材料构成不同的热电偶, 其中广泛使用的有 40~50 种热电偶。常用标准型的热电偶如表 3.1 所示。

铂铑 10—铂热电偶: 是贵金属热电偶; 物理、化学性能稳定, 熔点高, 又有较好的复现性、精确性, 宜在氧化性和中性气氛中使用。热电势小, 热电特性的非线性较大, 如不加保护管, 不宜在还原性气体、金属蒸气、金属氧化物、氧化硅和氧化硫等气氛中使用。

铂铑 30—铂铑 6: 简称为双铂铑热电偶, 属贵金属热电偶; 抗污染能力强, 在 1800℃ 高温时仍有较好稳定性, 适用于氧化性的介质; 但灵敏度低, 热电势在各种热电偶中最小, 需配用灵敏度高的显示仪表。在室温时候的热电势极小, 使用时无须对参比端温度进行修正或补偿。

镍铬—镍硅热电偶：是贱金属热电偶；因作为热电极的合金中含有大量的镍，故有较强的抗氧化性和抗腐蚀性，化学稳定性好，复制性好，热电势较大，热电特性呈线性。但在还原性介质、硫化物气氛及 500℃ 以上温度使用时易被腐蚀，必须加保护管；其精度低于铂铑—铂热电偶

镍铬—康铜热电偶：它的热电势最大，比铂铑—铂热电偶高 10 倍左右，热电特性的线性也好，且价格便宜。但不能用于高温，长期使用的温度上限为 600℃，短期可达 800℃

铜—康铜热电偶：它的热电势仅次于镍铬—康铜热电偶；它在低温时精确度高，可测量 -200℃ 的低温，是常用的低温热电偶；它的热电极易复制；但铜极易氧化，故测量上限不能太高。

表 3.1 常用普通热电偶的主要性能

热电偶	分度号	使用温度/℃		允许偏差			主要优缺点
		长期	短期	等级	范围/℃	允许误差/℃	
铂铑 ₁₀ | 铂	S	最高 1300	最高 1600	I	0~1100	±1	使用温度高，性能稳定，精度高，但价格贵。
					1100~1600	±[1+(t-1100)×10 ⁻³]	
		II	0~600	±1.5			
			600~1600	±0.25%t			
铂铑 ₃₀ | 铂铑 ₆	B	最高 1600	最高 1800	II	600~1700	±0.25%t	测量温度高，常温下热电势小。
				III	600~800	±4	
					800~1700	±0.5%t	
镍铬 | 镍硅	K	按热电偶丝直径不同 -200~1300		I	-40~1100	±1.5 或 ±0.4%t	精度较高，价格便宜。
				II	-40~1300	±4.5 或 ±0.75%t	
				III	-200~40	±4.5 或 ±1.5%t	
铜 | 康铜	J	按热电偶丝直径不同 -400~750		I	-40~750	±1.5 或 ±0.4%t	便宜，适用与还原性强的气体中。
				II	-400~750	±4.5 或 ±0.75%t	
镍铬 | 康铜	E	按热电偶丝直径不同 -200~900		I	-40~+800	±1.5 或 ±0.4%t	稳定性好，灵敏度高，价格低廉。
				II	-40~+900	±4.5 或 ±0.75%t	
				III	-200~+40	±4.5 或 ±1.5%t	

E 型热电偶价格低廉，热电势较大，是常用的热电偶。本试验台的测量温度范围在 20℃~100℃ 之间，且今后也将在 100℃~200℃ 范围内进行测量。经过综合考虑，本试验台选用 E 型镍铬—康铜热电偶，直径为 Φ0.25mm。

3. 热电偶的制作、标定以及布置

1) 热电偶的制作

本试验台所采用的热电偶是由直径为 0.25mm 的镍铬丝和康铜丝组合而成。首先，分别取 5m 长的镍铬丝和康铜丝，并将它们穿在两根绝缘套管中，然后，用电焊机焊接结点，焊接接头宜小。为了使热电偶与被测试件更好接触，把焊接接点压扁擦光；

为了防止铜丝和康铜丝碰接,将其伸在试样的一段(约 5cm 长)用透明胶带粘贴固定。接着,取 1m 长直径为 0.5mm 的包有塑料皮的铜导线作为补偿导线,分别与热电偶的镍铬丝和康铜丝的另一端焊接,焊接结点作为热电偶的冷结点。将这两个冷结点分别插入两个装有油的试管里,并将结点侵入油中。再将这两个试管放入盛有冰水混合物的保温瓶中。

2) 热电偶的标定

为了将测得的热电偶“冷”、“热”结点之间产生的温差电动势换成温度,必须预先标定热电偶的温差热电势与温度的换算系数。

热电偶标定所用的仪表为:501 型超级恒温器、精确度为 0.1°C 的标准温度计、精确度为 $1\mu\text{V}$ 的惠普数据采集仪 3497A、计算机、热电偶、保温瓶。标定系统装置连接如图 3.2 所示。

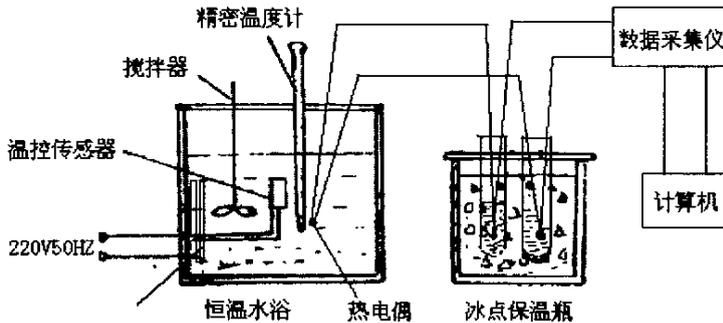


图 3.2 热电偶标定系统示意图

具体操作如下:

- (1) 将惠普数据采集仪 3497A 的数据线与计算机 COM1 端口相连。
- (2) 将与热电偶的铜丝相接的补偿导线接在数据采集仪 3497A 的数据采集卡的正极接口上,与热电偶的康铜铜丝相接的补偿导线接在数据采集卡负极接口上。然后将数据采集卡插在数据采集仪的插槽内。
- (3) 将热电偶固定在标准温度计上,使热电偶热结点处在标准温度计的水银球的位置,保证它们处在同一测温点。
- (4) 向 501 型超级恒温器的试验筒内加水至液面距盖板约 30mm,切勿加水过满造成升温后液体会受热膨胀而溢出。
- (5) 将固定有热电偶的标准温度计插入到超级恒温器中,并加以固定防止温度计在工作时振动影响测温,以及保证温度计的水银球和热电偶的热结点浸没在水中。
- (6) 打开数据采集仪开关,打开连接数据采集仪的计算机并将数据采集程序打开,进入实验室数据采集系统的测试界面。
- (7) 将超级恒温器的电源插头插入电源,开启电源及电动泵开关。
- (8) 将接触温度计调至所需温度,开启加热开关,直到恒温指示灯开始呈明灭状态,表示恒温器内的温度已进入恒温。

(9) 点击计算机采集界面中的“开始测试”按钮，试验测试系统开始测试。

(10) 读取标准温度计上温度值，同时点击计算机采集截面上的“保存当前数据”，一个温度值标定完成。

(11) 进行下一个温度标定时，应再慢慢旋动接触温度计旋钮，把温度调整至所需值，然后重复步骤 8~10 的操作过程。

在标定热电偶过程中，发现所测热电偶的热电势受周围环境电磁场的干扰、影响较大，图 3.3 表示了周围电磁场对热电偶温差热电势的影响，超级恒温器的电源线接通电源时，温差热电势上下波动比较严重。这说明周围环境的电磁场对热电偶的热电势影响相当大，因此使用时应将热电偶屏蔽接地。热电偶屏蔽前后的热电势随时间变化的情况如图 3.4、图 3.5 所示。可见，屏蔽后热电偶的热电势趋于稳定。

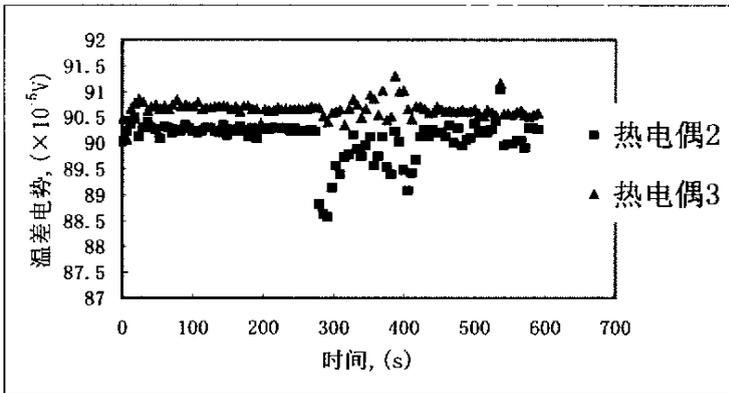


图 3.3 观察热电偶的电动势受外界各种电磁场的干扰的影响

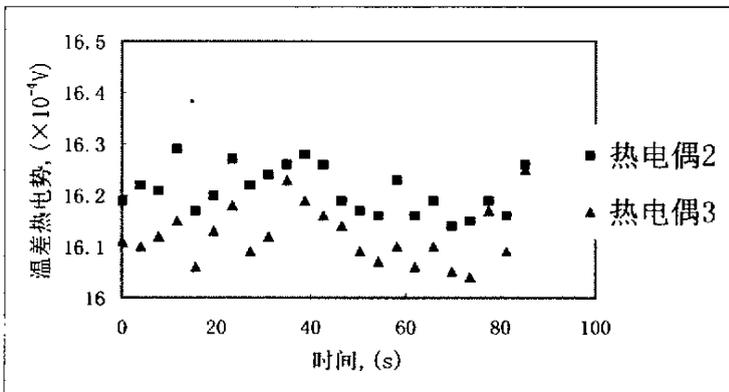


图 3.4 屏蔽前在 40.25℃时热电偶温差热电势随着时间的变化

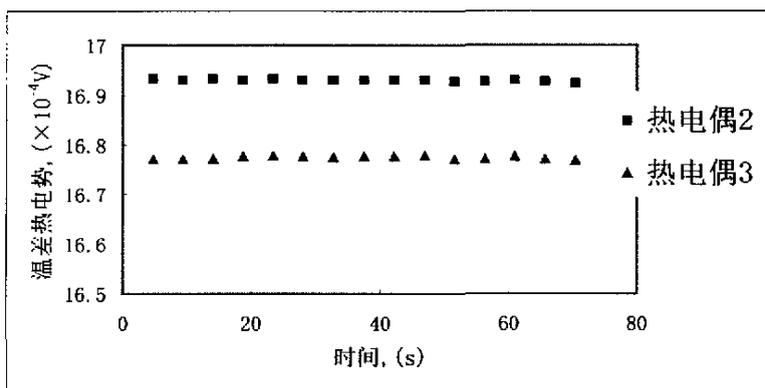


图 3.5 屏蔽后在 41.95°C 时热电偶温差热电势随着时间的变化

本文试验所采用热电偶的标定是在 20°C 至 95°C 温度区间进行的, 每隔 5°C 标定一次。经标定, 每个热电偶的温差热电势与温度都有各自的相应换算关系式 $t = f(U)$, 见 (3.1)~(3.5) 式, 其中热电偶 1、热电偶 2 的标定结果还可参见图 3.6、图 3.7。

$$\text{热电偶 1 标定结果为: } t_1 = -0.076U^2 + 14.635U + 0.38811; \quad (3.1)$$

$$\text{热电偶 2 标定结果为: } t_2 = -0.0781U^2 + 14.682U + 3.6702; \quad (3.2)$$

$$\text{热电偶 3 标定结果为: } t_3 = -0.0723U^2 + 14.551U + 4.2156; \quad (3.3)$$

$$\text{热电偶 4 标定结果为: } t_4 = -0.0766U^2 + 14.653U + 3.7723; \quad (3.4)$$

$$\text{热电偶 5 标定结果为: } t_5 = -0.0742U^2 + 14.592U + 4.0256; \quad (3.5)$$

$$\text{热电偶 6 标定结果为: } t_6 = -0.0745U^2 + 14.597U + 4.0656; \quad (3.6)$$

$$\text{热电偶 7 标定结果为: } t_7 = -0.0736U^2 + 14.578U + 4.1852; \quad (3.7)$$

$$\text{热电偶 8 标定结果为: } t_8 = -0.0727U^2 + 14.552U + 4.3115; \quad (3.8)$$

$$\text{热电偶 9 标定结果为: } t_9 = -0.0745U^2 + 14.592U + 4.0552; \quad (3.9)$$

$$\text{热电偶 10 标定结果为: } t_{10} = -0.0635U^2 + 14.362U + 5.1735; \quad (3.10)$$

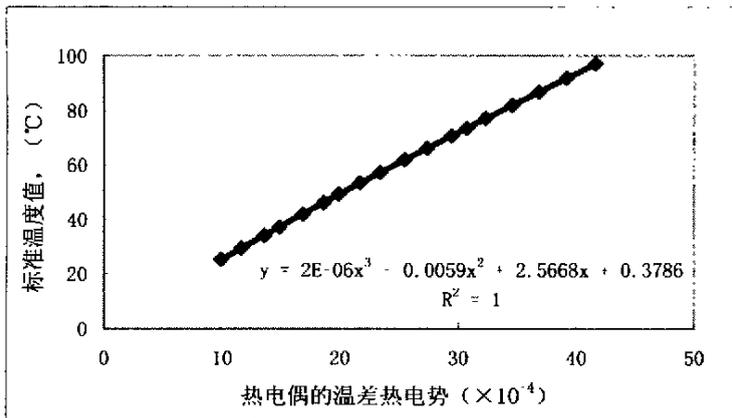


图 3.6 热电偶 1 的标定温度值与温差电势的关系

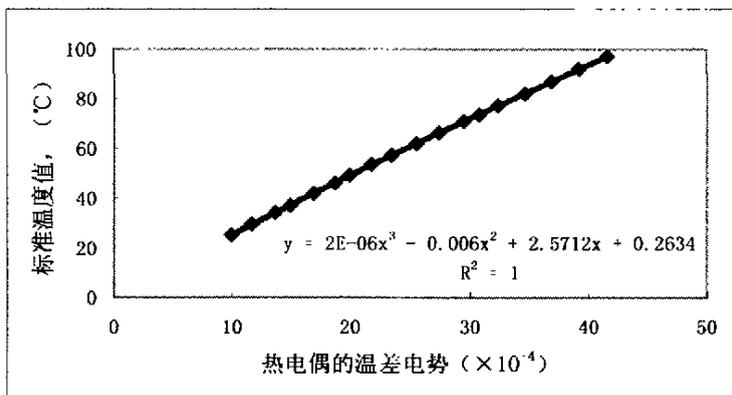


图 3.7 热电偶 2 的标定温度值与温差电势的关系

3) 热电偶的布置

试验时，分别在木材试样的热面、木材试样的冷面和玻璃试样的冷面上各布置三个热电偶。以每个面上三个热电偶温度的算术平均值作为加热面和绝热面的中心温度。此外，为了测试试样周围的环境温度，在试样附近也布置一个热电偶。

热电偶的使用要求：

- (1) 热电偶冷结点的正负极分别插入两个装有油的试管里，然后将试管放在冰水混合物里。
- (2) 每个热电偶用恒温水浴标定，得出热电偶的热电势与温度之间的函数关系式。
- (3) 使用热电偶时，注意接地屏蔽，以防周围环境的各种电磁场的干扰。

3.2.3 数据采集系统

本试验台的计算机数据采集系统由温度传感器—热电偶、HP3497A 数据采集仪（如图 3.8 所示）、方正电脑、数据传感线以及数据处理程序等构成。

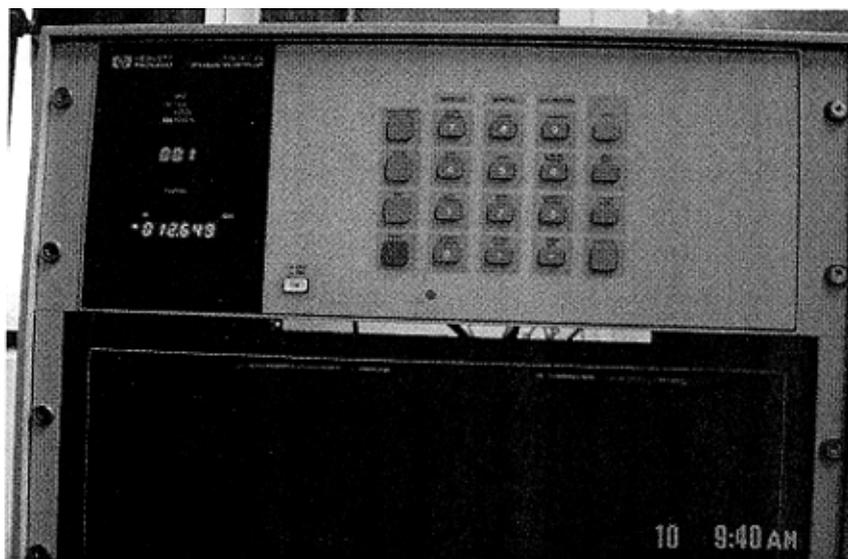


图 3.8 HP3497A 数据采集仪

温差热电势的实时检测与显示，试验过程的在线动态显示。可以动态、直观地显示被测对象的温度变化。

图 3.9 所示为计算机实时测试界面。数据实现了自动记录、存储、绘图和列表及打印。数据的即时存储，可以防止数据丢失；本测试系统还建有历史数据项目，可以存储多次实验数据，以便查看以前的实验数据。

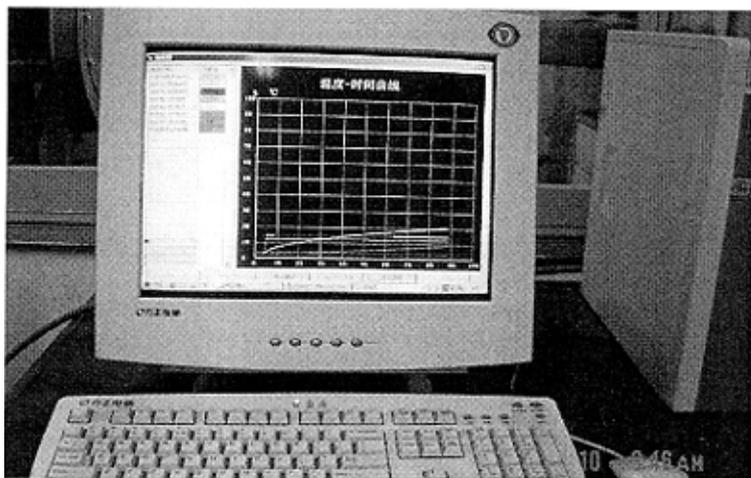


图 3.9 实时测试界面

采用了上述系统硬件以及测试仪表，被测对象的测试温差热电势、电压精度可达 $1\mu\text{V}$ ，测试信号波动的最大误差在 0.3% 以内。

3.3 测试过程

1、测试步骤：

- 1) 试验前试样的准备（包括试样的制备、湿度培养、试样尺寸测量、试样的称

量)；

2) 按照试验电路图连接试验装置的电路；

3) 将热电偶的补偿导线的冷结点插入冰瓶，使热电偶的补偿端温度维持在 0°C ，另一端接入到数据采集仪上；

4) 将木材试样和玻璃试样放置在均热板的正中心，玻璃试样在木材试样的上面，再依次放均冷板和水槽，利用导向杆定位，均冷板和水槽的自重可将试样压紧；

5) 在导热仪四周填充保温材料打开数据采集仪开关，启动连接数据采集仪的计算机并将数据采集程序打开；

6) 将调压器的输出电压调至某一设定值并保持不变；

7) 将加热电路开关置“ON”，同时点击计算机采集界面上的“开始测试”按钮，试验测试系统开始工作；

8) 观察并记录试样内温升速率，和温度波动情况。

9) 试样内温度场接近时，根据条件判断试样内温度场是否达到稳定状态，若稳定则先点击“停止测试”按钮，再点击“保存当前数据”，然后将加热电路断开；

10) 一次试验结束，等试样冷却之后再行下次测量；

2、测试过程中注意事项：

1) 检查热电偶导线是否被屏蔽；

2) 检查冰瓶是否有冰；

3) 注意将热电偶布置在试样的中心位置；

4) 试验过程中注意观察温升速率，估计达到稳定的时间。

3.4 本章小结

基于第二章所设计的热管式平板导热仪，本章主要包括以下内容：

(1) 介绍了热管式平板导热仪系统，主要包括测试部分，数据采集处理系统和加热电源控制系统三部分。

(2) 介绍了在进入测试阶段时，测试条件的准备，主要包括试样的制备，测温所用热电偶的选择与标定以及数据采集系统。

(3) 介绍了进行导热系数测量的测试过程和其中的注意事项。

第四章 数值分析与计算机建模

本文在设计导热仪与木材导热系数测试中都利用了计算机软件 ANSYS。在第二章热管式平板导热仪的设计中, 本文已采用 ANSYS 计算热管式均温板的均温性, 设计了热管式均温板, 并利用 ANSYS 模拟了热管式平板导热仪内被测木材试样和玻璃标样的温度分布, 证明了采用该测试方法符合一维稳态导热原理。因此本章将较详细介绍数值计算方法^[44,45], 有限元法及 ANSYS 数值计算软件。另外本章还将建立稳态法热物性测试计算模型, 应用 ANSYS 软件对一维稳态导热模型进行数值计算。

4.1 数值计算方法

数学物理方法用来求解工程技术问题是当代科学的一大成果。对微分方程求出它的已给边界条件下的精确解析解, 虽然已有完整的理论, 但是真正能解出的只有极少数的几种简单情况, 特别在二维和三维问题中更是如此。这是因为客观事物的多样性, 不可能用有限的解析函数来描述。为了满足生产和工程上的需要必须应用近似计算。

有限差分法和有限单元法都是正在被广泛应用的两种近似计算方法。

有限差分法从微分方程出发, 将区域经过离散处理后, 近似地用差分、差商来代替微分、微商。这样微分方程和边界条件的求解就可归结为求解一个线性代数方程组得到的是数值解。这种方法特别适用于现代数字电子计算机的运算。但在数值计算技术不发达的过去, 高阶线性代数方程组的求解是一项非常烦人的工作, 所以人们宁愿寻求近似的解析解。

古典的变分计算就是寻求级数形式的近似解析解。它是从泛函出发, 对泛函求极值(数学上称为变分)得到满足相应微分方程和边界条件的某一函数, 在泛函中代入经过选择的试探函数并经变分运算, 就可得到微分方程的近似解析解。这种方法首先出现在求解弹性力学的问题中, 由于弹性力学是以最小能量原理作为它的普通物理条件, 而泛函求极小值就是这个物理实质的数学表示, 所以这种方法也称为能量变分法或简称能量法(雷列-里兹法)。近代变分计算和古典变分计算的区别就在于对区域作了离散处理。数字电子计算机的出现, 赋予离散计算巨人的生命力。高阶线性代数方程组的解算已经不再成为困难。所以有限差分法现在也有了很大的发展, 在工程领域中具有广泛的应用。

有限单元法是对古典近似计算的归纳和总结。它吸取了有限差分法中离散处理的内核, 又继承了变分计算中选择试探函数并对区域积分的合理方法。在有限单元法中, 试探函数的定义和积分计算范围, 不是整个区域, 而是从区域中按实际需要划分出来的单元。这就克服了古典变分计算中由于不作离散处理而不能求解复杂问题的缺点。在有限单元法中, 由于对单元作了积分计算, 就充分估计了不同单元对节点参数的不

同贡献，从而克服了有限差分法中不考虑单元本身特性的缺点。

有限差分法的概念和应用已经相当长久了，有限单元法则从六十年代与电子计算机的应用一起开始了飞速的发展。有限差分法局限于规则的差分网格（正方形网格，矩形网格或正三角形网格），显得死板僵硬。它只看到了节点的作用，对于把节点联结起来的单元本身特性是不予注意的，而正是这些单元，它们是构成整体的基本细胞，在各节点温度（或其它物理量）的计算过程中，单元会起到自己应有的“贡献”。有限单元法恰好是抓住了单元的贡献，使得这种方法具有很大的灵活性和适应性，特别适用于具有复杂形状和条件的物体。

在本课题木材热物性测试中，将引入有限元数值计算方法，建立一维稳态法热物性测试的计算模型，应用 ANSYS 软件对被测试样的温度响应进行计算模拟。

4.2 有限元法及 ANSYS 软件介绍

有限元法是一种强有力的数值计算方法，通过有限元法对模型进行数值计算模拟，可得出试样内部的温度场、热流场的分布。用这样的方法来处理试验数据可得到精度较高的结果。

4.2.1 有限元技术分析简介

在工程技术领域内，对于许多力学问题或场问题，有时可以建立它们应遵循的基本方程，即常微分方程或偏微分方程和它们相应的边界条件。但是用解析法求出它们的解析解往往相当困难，只有当方程性质比较简单，而且边界相当规则的少数问题可以得到解析解。对于大多数工程技术问题，则很少有解析解。另外一些工程技术问题连它们的微分方程也难于建立，更无法求解。为此人们曾提出两种古典的近似求解方法，也就是有限差分法与变分法，来弥补求解上的不足。

有限差分法实质是将由物理模型建立的微分方程及其相应的边界条件离散化，建立相应的差分方程组来代替原方程，求解方程组从而得到近似的数值解。但当遇到几何形状复杂的边界条件或者模型的时候，它的求解精度往往受到限制，甚至求解变得不可能。

变分法是研究泛函极值问题的一种方法，泛函中变量是由函数的选取所确定的，因此泛函是函数的函数。在实际的工程技术问题中，有时直接对微分方程的边值问题求解非常困难，但从变分原理可知，微分方程边值问题的解等价于相应的泛函极值问题的解，所以将微分方程的边值问题转化成泛函的变分问题来求解反而容易。19 世纪初，李兹（Ritz）提出了直接从求解泛函的极值问题出发，把泛函的极值问题转化为函数的极值问题，最终以解线性代数方程组求得近似解，人们把这种方法叫做变分问题的直接法。

有限元法就是变分问题直接法中的一种有效方法，它利用离散化的概念直接对研

究的问题(对象)进行离散化处理,省略了有限差分法中需建立微分方程的中间环节,并使有限元法在利用变分原理时,只要假定求解函数分段连续就可以了,降低了变分法中函数需整体连续的要求,并把数值解与解析解结合起来。从整体而言,有限元法是数值解;从分段而言,它又是解析解。

有限元法能够得到迅速的发展与愈来愈多的应用,除了高速电子计算机的出现与发展提供了充分有利的条件外,还与有限元法所具有的优越性是分不开的。

在固体力学及其它的连续体力学中,只有一些特殊类型的位移场和应力场能求得微分方程的解。对于多数复杂的实际问题却得不到相应的解析解。但是运用有限元法来完成这些复杂问题的分析是非常合适的,而且也是十分有效的。因为它是利用离散化的方法,将无限自由度的连续体力学问题变为有限单元节点参数来进行计算。尽管这种解是近似的,但是对于某个特殊问题,可以通过选择单元的形状和大小来使结果的精度满足实际的需要。这里说的是力学方面的问题,当然对于其它领域,同样能够通过计算得到满足要求精度的近似解。

有限元法的另外一个优点,在于引入边界条件的办法比较简单。边界条件不需要进入单个有限元的方程,而是求得整个集合体的代数方程后再引进,所以对内部和边界上的单元都能采用相同的场变量函数,而且当边界条件改变时,场变量函数不需要改变。

有限元法不仅适应于复杂的几何形状和边界条件,而且能处理各种复杂的材料性质问题,例如材料的各向异性,非线性,随时间或温度而变化的材料性质问题。特别它还可解决非均质连续介质的问题,这使得其应用范围极为广泛。因此它自然也成为求解木材这种各向异性、热物性随着温度而变化的材料的热物性测试数据处理的最佳工具。

4.2.2 温度场有限元分析

以下将对温度场进行有限元的分析^[46]。三维非稳态导热微分方程式可以写成:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + q = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (4.1)$$

相应的变分极值为(对 t_i 节点求偏导):

$$\begin{aligned} \frac{\delta J^{(e)}}{\delta t_i} = & \iiint_{V_e} \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t_i} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \frac{\partial}{\partial t_i} \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) + \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \frac{\partial}{\partial t_i} \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right) - \left(q - \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} \right) \frac{\partial t}{\partial t_i} \right] dV \\ & + \iint_{S_2} q \frac{\partial t}{\partial t_i} dS_2 + \iint_{S_3} \alpha (t - t_\infty) \frac{\partial t}{\partial t_i} dS_3 \end{aligned} \quad (42)$$

由于采用的是等参元模型,所以有: $t = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta, \zeta) t_i$ 。

故有:

$$\begin{aligned}\frac{\partial t}{\partial t_i} &= N_i \\ \frac{\partial}{\partial t_i} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial t_i} \right) = \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial t_i} \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) &= \frac{\partial N_i}{\partial y}; \quad \frac{\partial}{\partial t_i} \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right) = \frac{\partial N_i}{\partial z}\end{aligned}\quad (4.3)$$

这样变分可写为:

$$\begin{aligned}\frac{\partial J^{(e)}}{\partial t_i} &= \iiint_{ve} [\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z}] dV + \iiint_{ve} (\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} - q) N_i dV \\ &+ \iint_{s_2} q N_i dS_2 + \iint_{s_3} \alpha (t - t_\infty) N_i dS_3\end{aligned}\quad (4.4)$$

令:

$$A_{qij}^e = \iiint_{ve} [\lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + \lambda \frac{\partial N_j}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z}] dV \quad (4.5)$$

$$A_{bij}^e = \iint_{s_3} \alpha N_i N_j dS_3 \quad (4.6)$$

$$B_{ij}^e = \iiint_{ve} \rho c N_i N_j dV \quad (4.7)$$

$$f_i^e = \iiint_{ve} q N_i dV - \iint_{s_2} q N_i dS_2 + \iint_{s_3} \alpha t_\infty N_i dS_3 \quad (4.8)$$

利用以上各式, 可以推出单元变分为:

$$\frac{\partial J^e}{\partial t_i} = \sum_{j=1}^n [A_{aj}^e t_j + A_{bij}^e t_j + B_{ij}^e \frac{\partial t_j}{\partial \tau}] - f_i^e = \sum_{j=1}^n (A_{ij}^e t_j + B_{ij}^e \frac{\partial t_j}{\partial \tau}) - f_i^e \quad (4.9)$$

若写成矩阵的形式, 得:

$$\frac{\partial J^e}{\partial t_i} = [A_{a1}^e + A_{b1}^e \quad A_{a2}^e + A_{b2}^e \quad \dots \quad A_{an}^e + A_{bn}^e] \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_n \end{bmatrix} + [B_{i1}^e \quad B_{i2}^e \quad \dots \quad B_{in}^e] \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial \tau} \\ \frac{\partial t_2}{\partial \tau} \\ \dots \\ \frac{\partial t_n}{\partial \tau} \end{bmatrix} - f_i^e \quad (4.10)$$

从上式中可以看出，某个节点（此处为 t_i 节点）的变分形式，它和单元中其它节点都有关系。

在总体合成的时候，某个节点的变分应该是所有与这个节点有关联的单元变分之和。也就是：

$$\frac{\partial J}{\partial t_i} = \frac{\partial J^a}{\partial t_i} + \frac{\partial J^b}{\partial t_i} + \dots + \frac{\partial J^p}{\partial t_i} \quad (4.11)$$

这里假设单元 a, b, \dots, p 与 t_i 有关。

一般来讲，位于角点的节点应有八个单元对它有“贡献”，而位于边中点的节点只有四个单元对它有“贡献”，当然，边界的情况又应另外处理了。

上式中的 $[t]$ ， $[\frac{\partial t}{\partial \tau}]$ 矩阵即代表着相应节点的温度和温度对时间偏导；如果是稳态温度场分析，温度对时间偏导项为 0。解由式 (4.11) 得到的代数方程，就可以知道整个温度场的结点温度分布 $[t]$ 了。

4.2.3 ANSYS 软件介绍

本文计算所采用的工程计算软件是美国 ANSYS 公司的 ANSYS 软件^[44,45]，是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件，广泛应用于核工业、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、轻工等工业及科学研究。

1、ANSYS 的特点

1) 用户界面

尽管 ANSYS 程序功能非常强大，涉及范围广，但是它友好的图形用户界面 (GUI) 及优秀的程序构架使得其易学易用 (见图 4.1)。该程序使用了基于 Motif 标准的易于理解的 GUI。通过它可以方便地交互访问程序的各种功能、命令、用户手册和参考材料，并可一步一步地完成整个分析，因而使 ANSYS 易于使用。同时程序提供了完整的在线说明和状态途径的超文本帮助系统，以协助有经验的用户进行高级应用。在用户界面中，ANSYS 程序提供了四种通用方法输入命令：菜单，对话框，工具杆，直接输入命令。其中工具杆是指使用界面上的工具 Bar 中快捷按钮。

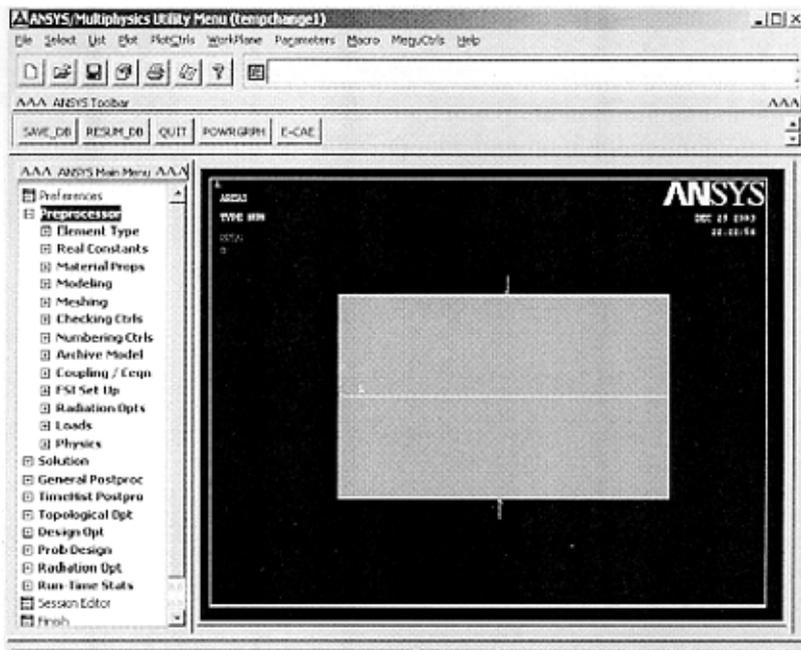


图 4.1 ANSYS 用户界面

2) 图形

交互式的图形是 ANSYS 程序中不可分割的组成部分，图形对于校验前处理数据和在后处理中检查求解结果都是非常重要的。程序中的 PowerGraphics 能够迅速地完成几何图形及计算结果的显示，它的主要功能包括：

- 在实体模型和有限元模型上的边界条件显示；
- 计算结果的彩色等值线显示；
- 随时间或模型中的一条轨迹而变化的结果图形；
- 动画显示，包括变形动画、时间历程结果动画、Q 切片动画和等值面动画；

3) 处理器

ANSYS 按功能作用可分为若干个处理器：包括一个前处理器 (Preprocessor)，一个求解器 (Solution)，两个后处理器 (POST1 和 POST26)，几个辅助处理器 (如设计优化器)。它的前处理器用于生成有限元模型，定义随后求解中所需的各种参数和材料特性，并且可以划分网格，为求解做准备；求解器用于施加载荷和边界条件，然后完成求解运算；后处理器用于获取并检查求解结果，以对模型做出评价，进而进行其它需要改进的计算。

4) 数据库

ANSYS 程序使用统一的集中式数据库来存贮所有模型数据及求解结果见图 4.2 所示。模型数据，包括实体模型、有限元模型和材料性质，都是通过前处理器写入数据库的；载荷和求解结果通过求解器写入数据库；后处理结果通过后处理器写入数据库。数据一旦写入数据库中，程序如果需要即可为其它处理器所用，也就是说可以共享数据库中的数据，从而把几个处理器结合在一起了。

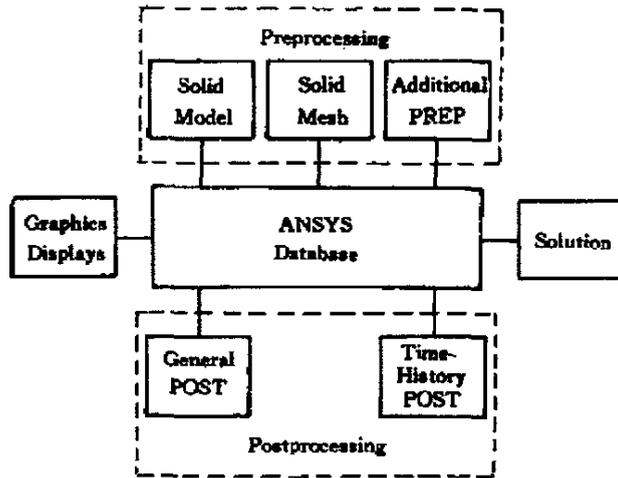


图 4.2 ANSYS 集中式数据库关系图

5) 文件格式

文件格式可用于将数据从程序的一部分传输到另一部分，存贮数据库以及存贮程序输出。这些文件包括数据库文件、计算结果文件、图形文件等等。程序生成的文件或者是 ASCII 格式，或者是二进制格式。在缺省设置下，ANSYS 程序生成外部格式（IEEE 标准）的二进制文件，该格式允许在不同的硬件系统中移置。比如说，当某一 ANSYS 用户在某一计算机系统中生成模型几何数据后，这些数据就可方便地传输给另一系统中的 ANSYS 用户。

6) 程序的可用性

ANSYS 程序实现了异种异构平台的网络浮动：它可以运行于 Windows95、Windows NT 环境下的 PC 机、工作站及 UNIX 操作系统下的各种工作站，直至巨型计算机。

2、ANSYS 的使用方法

有限元分析是对物理现象（几何与载荷工况）的模拟，是对真实情况的数值近似。通过对分析对象划分网格，求解有限个数值来近似模拟真实环境下的无限个未知量。

ANSYS 分析过程中包含以下三个主要步骤：

1) 创建实体模型与有限元模型

这个步骤也就是前处理，它包括创建实体模型，定义单元属性，划分网格，模型修正等几项内容。

现在的有限元分析模型一般都用实体模型建模，这个有点类似于 CAD。ANSYS 是以数学的方式表达结构的几何形状，可以方便地在模型里划分节点和单元，在几何实体边界上施加载荷。但是实体模型并不参与有限元分析，因为所有施加的边界载荷或约束都是最终传递到有限元模型上的节点或单元上进行求解的。有四种途径创建 ANSYS 中的有限元模型：

- 直接在 ANSYS 里建立并划分有限元网格；
- 在其它软件（如 CAD）中创建实体模型，然后通过数据接口读入，经过修

正以后划分有限元网格;

- 直接创建节点和单元
 - 在其它软件中创建有限元模型, 将节点和单元数据读入 ANSYS。
- 2) 施加载荷并求解

如何施加载荷这里不作详细说明, 下面介绍 ANSYS 中的载荷分类:

- 自由度载荷 DOF—即节点载荷值, 在热分析中指的是温度 (TEMP);
- 集中载荷—也叫力载荷或者点载荷, 在热分析中指的是热流率(HEAT);
- 面载荷—作用在表面的分布载荷, 在热分析中为对流 (CONV) 和热流密度 (HFLUX);
- 体积载荷—作用在体积或场域内的载荷, 在热分析中为热生成率 (HGEN);
- 惯性载荷—结构质量或惯性引起的载荷 (如重力, 角速度)。

在实体模型上加好载荷以后, 就可以进入求解器中求解。求解初始化时, 程序将几何体上的载荷自动转化到有限元模型上。完成求解前的检查工作后就可以计算了。

3) 查看计算结果

这也就是后处理过程, ANSYS 有两个后处理器, 分别是 POST1 和 POST26。前者叫做通用后处理器, 只能观看整个模型在某一时刻的结果; 后者叫做时间—历程后处理器, 可以观看模型在不同时间段或子步历程上的结果, 常用于处理瞬态或动力分析结果。

用 POST1 进行后处理可以完成的工作有:

将数据结果读入数据库	用图像显示计算结果
合成表面结果	用表格形式列出结果
映射结果到某一路径上	分析计算误差

POST26 可用于检查模型中指定点的分析结果与时间、频率等的函数关系。它有許多分析功能, 可以从简单的图形显示和列表到诸如微分和响应频谱生成的复杂操作。它的一个典型用途是在瞬态分析中以图形表示结果项与时间的关系或在非线性分析中以图形表示作用力与挠度的关系。它的所有操作都是对变量进行的, 是结果项与时间 (或频率) 的简表。结果项可以是节点处的位移, 单元的热流量, 节点处产生的力, 单元的应力或磁通量。其主要工作有:

定义和存贮 POST26 变量	产生图形输出
计算结果列表	进行变量运算或产生响应谱

从上面可见, 产生图形输出以及计算结果列表是重点, 也是后处理主要完成的任务。本文关心的也是这两个方面。

利用上面三个主要步骤, 可以解决温度场求解问题。

4) 耦合场分析

(1) 定义

耦合场分析是指在有限元分析的过程中考虑了两种或者多种工程学科 (物理场) 的交叉作用和相互影响 (耦合)。例如压电分析考虑了结构和电场的相互作用; 它主要解决由于所施加的位移载荷引起的电压分布问题, 反之亦然。其他的耦合场分析还

有热-应力耦合分析, 热-电耦合分析, 流体-结构耦合分析, 磁-热耦合分析和磁-结构耦合分析等等。

(2) 类型

耦合场分析的过程取决于所需解决的问题是由哪些场的耦合作用, 但是, 耦合场的分析最终可归结为两种不同的方法: 序贯耦合方法和直接耦合方法。

序贯耦合解法是按照顺序进行两次或更多次的相关场分析。它是通过把第一次场分析的结果作为第二次场分析的载荷来实现两种场的耦合的。例如序贯热-应力耦合分析是将热分析得到的节点温度作为“体力”载荷施加在后序的应力分析中来实现耦合的。

直接耦合解法利用包含所有必须自由度的耦合单元类型, 仅仅通过一次求解就能得出耦合场分析结果。在这种情形下, 耦合是通过计算包含所有必须项的单元矩阵或单元载荷向量来实现的。例如利用单元 SOLID5, PLANE13, 或 SOLID98 可直接进行压电分析。

对于不存在高度非线性相互作用的情形, 序贯耦合解法更为有效和方便, 因为可以独立的进行两种场的分析。例如, 对于序贯热-应力耦合分析, 可以先进行非线性瞬态热分析, 再进行线性静态应力分析。而后可以用热分析中任意载荷步或时间点的节点温度作为载荷进行应力分析。这里耦合是一个循环过程, 其中迭代在两个物理场之间进行, 直到结果收敛到所需要的精度。

直接耦合解法在解决耦合场相互作用具有高度非线性时更具优势, 并且可利用耦合公式一次性得到最好的计算结果。直接耦合解法的例子包括压电分析, 伴随流体流动的热传导问题, 以及电路-电磁场耦合分析。求解这类耦合场相互作用问题都有专门的单元供直接选用。

4.3 应用 ANSYS 分析稳态导热问题

应用 ANSYS 软件分析本文中一维稳态导热问题, 计算达到稳态时, 试样内温度分布, 与试验测试到的温度场进行比较以进一步验证本文的实验研究结果。

4.3.1 选取分析模块

针对不同的分析领域, ANSYS 包含许多的分析模块, 其中 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTTRAN、ANSYS/ED 五种模块中包含热分析功能, 本文选取 ANSYS/Mechanical 模块进行热冲击分析。

ANSYS 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程, 用有限元法计算各节点的温度, 并导出其它热物理参数; 热分析包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式。此外, 还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。

ANSYS 可以进行稳态热分析和瞬态热分析。稳态法热物性测试属于稳态传热分

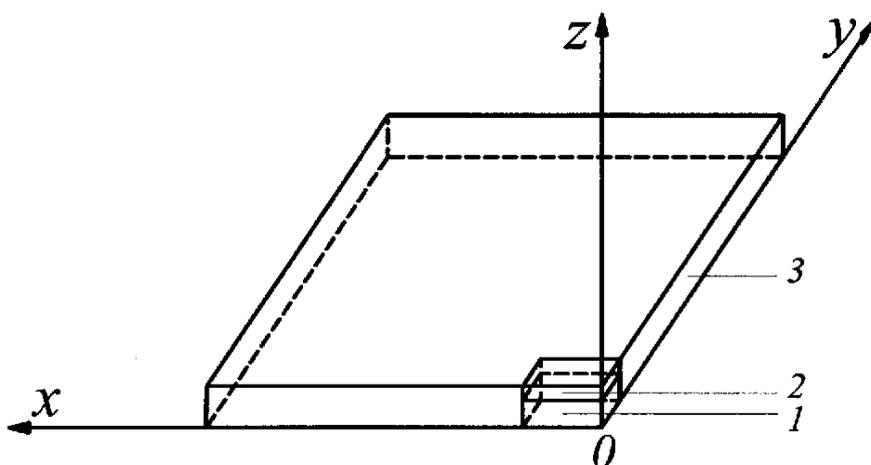
析，稳态热分析用于计算一个系统达稳定时的温度场及其它热参数。

4.3.2 建模

1) 建立实体模型

由本文采用的是三维实体模型如图 4.1 所示。

稳态法热物性测试计算模型与稳态法热物性试验台架的试验条件相符合。木材试样的尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 15\text{mm}$ ，玻璃试样的尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 7.50\text{mm}$ ，试样四周保温材料外部尺寸为 $540\text{mm}\times 540\text{mm}\times 180\text{mm}$ 。由问题的对称性，仅取图 3.7 热管式平板导热仪上木材试样，玻璃试样以及周围保温材料的为模拟对象，取其中的左后四分之一部分做为分析对象。计算的实体模型示意图见图 4.3 所示。



1—木材试样 2—玻璃试样 3—保温材料

图 4.3 准稳态法热物性测试计算模型示意图

2) 有限元模型

针对三维轴实体模型的热分析，有限元单元类型选取 Plane55。Plane55 为具有二维导热能力 4 节点热分析单元，每个节点有一个温度自由度，见图 4.4 所示。单元网格划分是根据需要通过指定不同边界线上的划分的等分数，应用 mapped 方式将模型划分成四边形。

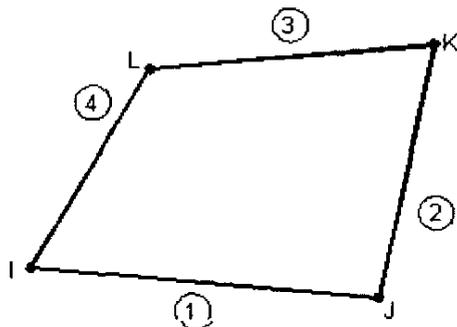


图 4.4 Plane55 热分析单元

4.3.3 定义材料属性

在 ANSYS 软件的如图 4.3 所示的界面中输入三种材料的属性主要包括

(1) 木材为各向异性材料, 其横纹导热系数是顺纹导热系数的三倍, 参考 5.3 试验所求得的价值来确定 λ_{xx} 、 λ_{yy} 和 λ_{zz} , 输入木材的密度 ρ 和比热 C 。

(2) 玻璃为非各向异性的材料, 输入玻璃试样在相应温度下的导热系数 λ , 玻璃试样的密度 ρ 为 2500kg/m^3 和比热 C 为 $230\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

(3) 保温材料为硅酸铝纤维, 其导热系数 λ 为 0.03621W/mK , 密度 ρ 为 160.25kg/m^3 , 比热 C 为 $836.8\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

4.3.4 定义边界条件和施加载荷

如图 4.3 模型的右侧和前侧可视为绝热边界条件, 保温材料的左侧和后侧则视为自然对流边界条件, 木材试样下表面与玻璃标样的上表面则是给定温度的边界条件, 木材试样与玻璃标样接触面处则是待求温度场。

4.3.5 计算并查看结果

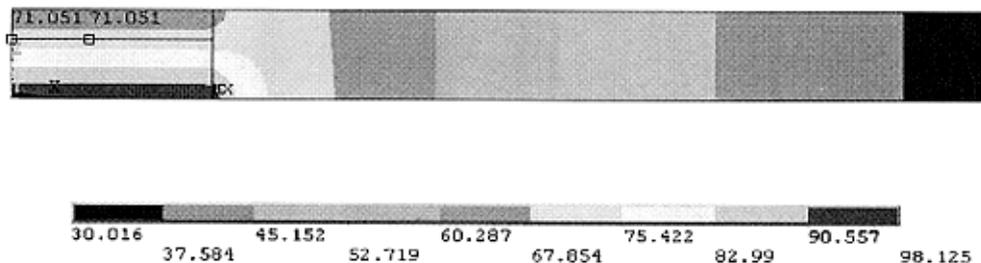


图 4.5 含水率为 15.75% 的红松的 ANSYS 计算结果

图 4.5 是以含水率为 15.75% 的红松为例的 ANSYS 计算结果, 在第五章中, 将利用此计算模型的计算结果与实测温度场进行比较, 对实验测量所求得的导热系数值进行修正。

4.4 本章小结

由于本课题的研究主要利用了数值计算软件 ANSYS，因此本章较详细地介绍了数值计算方法，有限元法及 ANSYS 数值计算软件。并应用 ANSYS 软件对热管式平板导热仪中一维稳态导热模型进行了数值计算，建立稳态法热物性测试计算模型。具体内容如下：

(1) 介绍了有限元法的应用领域，论述了应用有限元法进行数值计算的数学基础。

(2) 介绍了 ANSYS 软件的基本特点以及它的使用方法；介绍了该软件使用的模型和单元的特点，ANSYS 功能符合我们计算目的，能够用来进行计算。

(3) 以含水率为 15.75% 的红松为例，具体介绍了如何应用 ANSYS 软件对一维稳态导热模型进行了数值计算。在第五章中将通过此数值计算对试验测试所求得的导热系数作进一步的修正，以提高测试精度。

第五章 木材热物性测试结果分析

本章将试样的试验数据进行处理,求得各被测试样的导热系数,并通过计算机模拟计算修正测试结果,然后对测试结果进行误差分析,最后通过各被测试样的导热系数分析不同温度,不同含水率和不同纹理对木材导热特性影响的规律。

5.1 实验数据处理

将制备好的试样按第三章的测试过程进行试验,待试样内的温度场稳定时,采集数据实验数据。

5.1.1 待测试样

为研究木材导热系数随温度的变化制备了气干横纹针叶材,气干横纹阔叶材和气干顺纹木材三组试样如表 5.1, 5.2 和 5.3。

表 5.1 横纹针叶材

试样	长度 a (mm)	宽度 b (mm)	厚度 δ (mm)	烘干前质量 G_1 (g)	烘干后质量 G_2 (g)	含水率 W (%)
落叶松	97.77	99.74	15.14	110.489	103.1304	6.66
红松	99.65	99.78	14.96	98.211	88.64525	9.74
白松	97.72	99.4	14.78	80.235	73.70387	8.14
杉木	100.58	97.54	15.18	70.123	60.432	13.82
马尾松	100.12	98.23	15.02	65.602	58.69411	10.53

表 5.2 横纹阔叶材

试样	长度 a (mm)	宽度 b (mm)	厚度 δ (mm)	烘干前质量 G_1 (g)	烘干后质量 G_2 (g)	含水率 W (%)
西南桦	100.22	98.84	15.03	56.323	50.899	9.63
椴木	99.76	97.98	14.97	56.238	51.120	9.10
柳桉 1#	100.02	99.42	15.14	47.243	42.675	9.67
柳桉 2#	100.34	97.52	15.18	46.986	41.850	10.93
柳桉 3#	98.54	99.90	14.86	47.562	42.459	10.73

表 5.3 顺纹木材

试样	长度 a (mm)	宽度 b (mm)	厚度 δ (mm)	烘干前质量 G_1 (g)	烘干后质量 G_2 (g)	含水率 W (%)
----	--------------	--------------	---------------------	--------------------	--------------------	--------------

落叶松	100.08	99.74	15.14	113.256	100.832	10.97
红松	99.95	97.78	14.96	96.024	88.256	8.09
白松	97.70	99.74	14.76	80.846	71.662	11.36
杉木	100.58	97.42	15.12	71.865	63.493	11.65
马尾松	100.12	99.98	15.22	64.868	57.882	10.77

为研究木材导热率随含水率的变化,制备了不同含水率的落叶松和红松两组试样如表 5.4 和 5.5。

表 5.4 不同含水率的落叶松

试样	长度 a (mm)	宽度 b (mm)	厚度 δ (mm)	烘干后质量 G_1 (g)	加湿后质量 G_2 (g)	含水率 W (%)
落叶松 1#	97.84	99.92	15.06	84.473	109.563	22.9
落叶松 2#	99.95	98.95	14.98	88.978	110.012	19.12
落叶松 3#	98.69	99.64	14.76	96.201	110.12	12.64
落叶松 4#	100.32	99.52	15.17	99.349	109.985	9.67
落叶松 5#	100.12	99.86	15.02	104.439	113.521	8

表 5.5 不同含水率的红松

试样	长度 a (mm)	宽度 b (mm)	厚度 δ (mm)	烘干后质量 G_1 (g)	加湿后质量 G_2 (g)	含水率 W (%)
红松 1#	97.86	100.10	15.125	67.478	48.004	28.86
红松 2#	100.10	99.22	14.945	67.183	51.859	22.18
红松 3#	97.90	99.62	14.76	66.768	53.615	19.7
红松 4#	100.58	97.36	15.165	67.924	57.219	15.75
红松 5#	98.86	99.68	15.12	68.853	60.850	11.62
红松 6#	100.10	99.86	14.98	69.216	66.650	3.7

为研究同种木材不同纹理方向对其导热系数影响的规律,制备了以下四组试样如表 5.6。

表 5.6 不同纹理的试样

试样	长度 a (mm)	宽度 b (mm)	厚度 δ (mm)	烘干前质量 G_1 (g)	烘干后质量 G_2 (g)	含水率 W (%)
马尾松横纹	99.98	100.02	15.12	67.562	60.65041	10.23
马尾松纵纹	100.10	99.88	14.98	68.256	61.00721	10.62
西南桦横纹	98.86	99.86	15.04	110.23	99.08575	10.11
西南桦纵纹	99.76	100.12	15.02	110.86	100.6498	9.21
椴木横纹	100.08	98.90	15.12	99.25	89.6426	9.68
椴木纵纹	98.94	98.96	14.98	99.31	90.39196	8.98
柳桉横纹	100.21	99.86	15.00	65.23	58.81137	9.84
柳桉纵纹	100.08	99.88	15.02	66.75	60.56895	9.26

5.1.2. 试样达到稳定状态时的测试数据

数据采集仪所采集的是热电势信号 U ，采集程序所输出的温度值 t 是经过温差热电势与温度的换算关系式 $t = f(U)$ 得到的。在本文试验中为提高测温精度，每根热电偶都经过标定，都有各自的温差热电势与温度换算关系式 $t_i = f_i(U_i)$ 。本研究中，对数据采集仪进行控制的自编程序中，每个测点的温度值 t_i 都是根据相应热电偶各自的温差热电势与温度的换算关系式 $t_i = f_i(U_i)$ ，式 (3.1)~(3.10) 求得的。

为得到热物性的准确值，导热测试仪和试件必须有充分的热平衡时间。热平衡时间与导热测试仪的构造、控制方式、几何尺寸以及试件的热性质和厚度有关。观察试件的平均温度以及温差来检查热平衡状态。依据国家标准 GB10295—88，在 300s 的时间间隔进行观察，直到 5 次读数所得到的温度值相差在 $\pm 1\%$ 之内，并且不在一个方向上单调变化为止，上下板的温差波动在 3% 以内。

以下将以 2004. 10. 15 日含水率为 15. 75% 的红松达到稳定时的实验数据为例分析试样达到稳态时数据的采集与处理。

表 5.7 试样的温度采集

时间	T ₁	T ₂	T ₃	.....	T ₇	T ₈	T ₉
(s)	(°C)	(°C)	(°C)	.....	(°C)	(°C)	(°C)
2342.52	98.098	98.331	98.102	.....	62.048	62.088	62.027
2345.61	98.073	98.175	98.130	.....	62.039	62.076	62.031
2350.12	98.085	98.298	98.099	.....	62.058	62.091	62.047
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
2615.59	98.121	98.182	98.152	.....	62.050	62.088	62.041
2620.24	98.096	98.167	98.132	.....	62.036	62.062	62.035
2625.56	98.102	98.143	98.125	.....	62.057	62.095	62.052
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
2733.88	98.079	98.195	98.130	.....	62.028	62.051	62.019
2739.25	98.105	98.201	98.163	.....	62.051	62.078	62.043
2744.62	98.099	98.153	98.124	.....	62.020	62.047	62.013

设木材试样的热面为表面 1，试样的冷面也即玻璃试样的热面为表面 2，玻璃标

样的冷面为表面 3。表面 1，表面 2 和表面 3 的均温分别为

$$t_{\text{均温}1}=(t_1+t_2+t_3)/2, \quad t_{\text{均温}2}=(t_4+t_5+t_6)/2, \quad t_{\text{均温}3}=(t_7+t_8+t_9)/2。$$

表面 1 与表面 2 的均温差，表面 2 与表面 3 的均温差分别为 $\Delta t_{1,2}=t_{\text{均温}1}-t_{\text{均温}2}$ ， $\Delta t_{2,3}=t_{\text{均温}2}-t_{\text{均温}3}$ 。

表 5.8 温度值的处理

时间 t	均温 1 $t_{\text{均温}1}$	均温 2 $t_{\text{均温}2}$	均温 3 $t_{\text{均温}3}$	表面 1 与表面 2 的均温差 $\Delta t_{1,2}$	表面 2 与表面 3 的均温差 $\Delta t_{2,3}$
(s)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
2340.52	98.125	70.099	62.054	28.026	8.045
2345.61	98.142	70.125	62.045	28.017	8.08
2350.12	98.131	70.114	62.033	28.017	8.081
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2615.59	98.150	70.101	62.053	28.049	8.048
2620.24	98.139	70.092	62.041	28.047	8.051
2625.56	98.127	70.124	62.061	28.003	8.063
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2733.88	98.132	70.120	62.030	28.012	8.090
2739.25	98.155	70.135	62.062	28.02	8.073
2744.62	98.125	70.113	62.027	28.012	8.086

设 300s 内表面 1，表面 2 和表面 3 的均温最大值和最小值分别为 $(t_{\text{均温}1})_{\text{max}}$ ， $(t_{\text{均温}2})_{\text{max}}$ ， $(t_{\text{均温}3})_{\text{max}}$ ， $(t_{\text{均温}1})_{\text{min}}$ ， $(t_{\text{均温}2})_{\text{min}}$ ， $(t_{\text{均温}3})_{\text{min}}$ ，表面 1 与表面 2 的均温差最大值和最小值，表面 2 与表面 3 的均温差最大值和最小值分别为 $(\Delta t_{1,2})_{\text{max}}$ ， $(\Delta t_{1,2})_{\text{min}}$ ， $(\Delta t_{2,3})_{\text{max}}$ ， $(\Delta t_{2,3})_{\text{min}}$ 。则 300s 内各表面的均温波动分别为：

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{(t_{\text{均温}1})_{\text{max}} - (t_{\text{均温}1})_{\text{min}}}{(t_{\text{均温}1})_{\text{min}}} \times 100\% \\ &= \frac{98.616 - 98.125}{98.125} \times 100\% \\ &= 0.5\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_2 &= \frac{(t_{\text{均温}2})_{\text{max}} - (t_{\text{均温}2})_{\text{min}}}{(t_{\text{均温}2})_{\text{min}}} \times 100\% \\ &= \frac{70.235 - 70.065}{70.065} \times 100\% \\ &= 0.2\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_3 &= \frac{(t_{\text{均温}3})_{\text{max}} - (t_{\text{均温}3})_{\text{min}}}{(t_{\text{均温}3})_{\text{min}}} \times 100\% \\ &= \frac{62.091 - 62.017}{62.017} \times 100\% \\ &= 0.119\%\end{aligned}$$

表面 1 与表面 2 的均温差波动, 表面 2 与表面 3 的均温差波动分别为

$$\begin{aligned}\eta_4 &= \frac{(\Delta t_{1,2})_{\text{max}} - (\Delta t_{1,2})_{\text{min}}}{(\Delta t_{1,2})_{\text{min}}} \times 100\% \\ &= \frac{28.323 - 28.003}{28.003} \times 100\% \\ &= 1.1\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_5 &= \frac{(\Delta t_{2,3})_{\text{max}} - (\Delta t_{2,3})_{\text{min}}}{(\Delta t_{2,3})_{\text{min}}} \times 100\% \\ &= \frac{8.123 - 8.010}{8.010} \times 100\% \\ &= 1.4\%\end{aligned}$$

由以上 $\eta_1 \sim \eta_5$ 可知试样已达到稳定状态。

5.1.3 玻璃标样的导热系数

本文的试验测试采用玻璃标样为参比样。玻璃是以石英砂、纯碱、石灰石为主要原料, 外加助溶剂、脱色剂、着色剂等辅助原料, 经高温熔融, 成型、冷却而成的固态物质。主要成分有 SiO_2 、 B_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 、 BaO 、 ZnO 、 PbO 、 Al_2O_3 等。

普通钠玻璃主要组成为: SiO_2 : 71%~73%; Na_2O : 15%~16%; CaO : 8%~9%; MgO : 2%~3%; Al_2O_3 : 1.5%~2%。

按照玻璃结构的无定形—晶子学说, 玻璃是一种具有近程有序区(晶子), 而远程无序(网络)的无定型物质。组成玻璃的 SiO_2 , 每个硅原子处在中心, 周围被四个氧原子所包围, 形成硅氧四面体, 2~4 个硅氧四面体按照一定方式有序地排列, 组成一个微小的晶子。玻璃中存在无数的微小晶子, 这些晶子之间的相互连接组成网络, 但其排列是毫无规律的。玻璃中的碱金属、碱土金属离子无规律分散填充在中间。使得玻璃具有各向同性的特征。玻璃光学、电学、热学和力学性质都与它的

方向和位置没有任何关系。

玻璃的比热为 $0.33 \sim 1.05 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ，线膨胀系数为 $5 \times 10^{-7} \text{ K} \sim 150 \times 10^{-7} \text{ K}$ 。玻璃的导热系数很小，为 $0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右。根据美国普渡大学热物性研究中心的热物性手册 THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER VOLUME^[47]，非金属固体的热物性分册，查得玻璃在 $20^\circ\text{C} \sim 220^\circ\text{C}$ 范围内导热系数与温度的关系式为：

$$\lambda = 2 \times 10^{-7} t^2 - 0.0006t + 0.7174 \quad (5.1)$$

5.1.4 计算木材试样的导热系数

根据式 (2.6) 可求得木材试样导热系数的计算式

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{玻璃}} \delta_{\text{木材}} (t_{\text{均温}2} - t_{\text{均温}3})}{\delta_{\text{玻璃}} (t_{\text{均温}1} - t_{\text{均温}2})} \quad (5.2)$$

式中所求 λ 为试样在温度 $t_m = \frac{t_{\text{均温}1} + t_{\text{均温}2}}{2}$ 时的导热系数， $\lambda_{\text{玻璃}}$ 为玻璃在温度 $t_{\text{均温}2}$

与 $t_{\text{均温}3}$ 之间导热系数的积分平均值，由式 (2.5) 可求得。 $\delta_{\text{木材}}$ 、 $t_{\text{均温}1}$ 、 $t_{\text{均温}2}$ 和 $t_{\text{均温}3}$

分别从表 5.5 和 5.8 查得如下：

$$\begin{aligned} \delta_{\text{木材}} &= 0.0146 \text{ m} & \delta_{\text{玻璃}} &= 0.0075 \text{ m} \\ t_{\text{均温}1} &= 98.125^\circ\text{C} & t_{\text{均温}2} &= 70.113^\circ\text{C} & t_{\text{均温}3} &= 62.027^\circ\text{C} \\ t_m &= \frac{t_{\text{均温}1} + t_{\text{均温}2}}{2} = \frac{98.125 + 70.113}{2} \approx 84.12^\circ\text{C} \\ \lambda_{\text{玻璃}} &= 0.5012 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k}) \end{aligned}$$

将以上数据代入式 (5.2) 则木材试样的导热系数为 $0.125 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ ，则含水率为 15.75% 的红松在 84.12°C 时的导热系数为 $0.125 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 。

5.2 计算机模拟修正

虽然木材试样表面平整，玻璃标样表面光滑，但两者的接触面并不能保证总是完全紧密接触，而测温热电偶布置在木材试样的上表面，温度 t_2 总是木材试样上表面的温度，但未必总是玻璃标样下表面的温度，由此使测量存在一定误差，因此本文采用计算软件 ANSYS 进行修正计算。

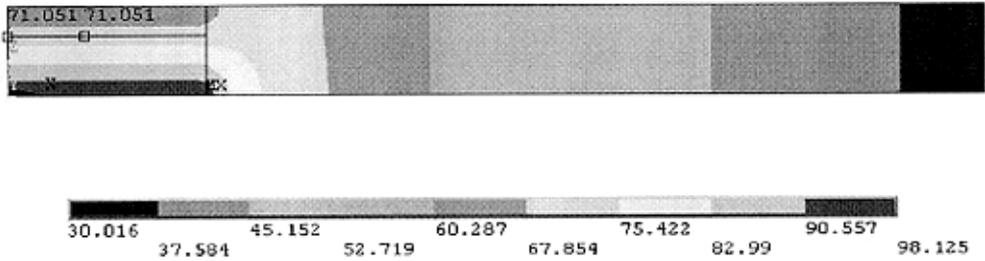


图 5.1 含水率为 15.75% 的红松的 ANSYS 计算结果

按 4.3 步骤进行计算机模拟，将以上所求得的木材试样的导热系数 λ 作为物性参数在 4.3.3 中输入，进行计算并查看计算结果。

将 ANSYS 计算所得的温度值 t'_2 与布置在木材试样上的热电偶所测量的温度值 $t_{均温2}$ 进行比较，若计算值与实测值之间误差在 1% 以内，则被测试样的导热系数值取 5.1.4 中的计算结果。若计算值与实测值之间误差超过 1%，则在 ANSYS 的计算模型中调整木材试样的导热系数值 λ_2 ，重新计算 t'_2 并与实测值进行比较，如此循环调整，直到计算值与实测值之间误差在 1% 以内，这时 ANSYS 的计算模型中最后输入的导热系数值 λ_2 则为被测木材试样的导热系数。

以含水率为 15.75% 的红松为例，按 4.3 步骤进行计算机模拟，将 5.1.4 中所求得的木材试样的导热系数 $\lambda = 0.125$ 作为物性参数在 4.3.3 中输入，进行计算并查看计算结果（图 5.1）。其中木材试样与玻璃标样接触面处温度的计算值为 $t'_2 = 71.051$ °C，与实测温度值 $t_{均温2} = 70.113$ °C 之间的误差为 1.34%，不满足误差要求，则需调整 λ_2 的值重新计算 t'_2 ，直到最后计算值与实测值的误差为 0.972%，这时被测木材试样的导热系数值为 0.123 W/(m·k)。

5.3 测试误差分析

估计试验中测量误差^[48-53]的范围，指出误差的性质以及产生误差的原因，有利于对影响试验准确性的关键环节进行控制与改进，评价测试结果的可靠性。因此，对准稳态法木材热物性测试试验进行误差分析是十分必要的。

根据误差测试理论^[58-61]，本文测试中导热系数的误差计算情况如下。

$$\lambda = \frac{\lambda_{玻璃} \delta_{木材} (t_{均温2} - t_{均温3})}{\delta_{玻璃} (t_{均温1} - t_{均温2})} = \frac{\lambda_{玻璃} \delta_{木材} \left(\frac{t_4 + t_5 + t_6}{3} - \frac{t_7 + t_8 + t_9}{3} \right)}{\delta_{玻璃} \left(\frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} - \frac{t_4 + t_5 + t_6}{3} \right)} \quad (5.3)$$

则根据间接测量中系统误差的传递公式，求解得导热系数的系统误差为：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} &= \frac{\Delta\lambda_{\text{玻璃}}}{\lambda_{\text{玻璃}}} + \frac{\Delta\delta_{\text{木材}}}{\delta_{\text{木材}}} + \frac{\Delta\delta_{\text{玻璃}}}{\delta_{\text{玻璃}}} + \sum_{i=1}^9 \frac{\Delta t_i}{t_i} \\ &= \delta_{\lambda_{\text{玻璃}}} + \delta_{\delta_{\text{木材}}} + \delta_{\delta_{\text{玻璃}}} + \sum_{i=1}^9 \delta_{t_i} \end{aligned} \quad (5.4)$$

式中： $\Delta\lambda_{\text{玻璃}}$ —玻璃试样的导热系数引起的绝对误差； $\Delta\delta_{\text{木材}}$ —测量被测试样的厚度引起的绝对误差； $\Delta\delta_{\text{玻璃}}$ —玻璃试样的厚度引起的绝对误差； $\Delta t_i/t_i$ —第 i 根热电偶测量温度时的相对误差。

由于玻璃的导热系数与温度之间的函数关系为 $\lambda=f(t)$ ，由误差分析理论得，

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{玻璃}} &= f'(t)\Delta t \\ \delta_{\lambda_{\text{玻璃}}} &= \frac{\Delta\lambda_{\text{玻璃}}}{\lambda_{\text{玻璃}}} = \frac{f'(t)\Delta t}{\lambda_{\text{玻璃}}} \end{aligned} \quad (5.5)$$

由于热电偶的热电势与温度之间的函数关系为 $t_i=f(U_i)$ ，由误差分析理论得

$$\begin{aligned} \Delta t_i &= f'_i(U_i)\Delta U_i \\ \delta_{t_i} &= \frac{\Delta t_i}{t_i} = \frac{f'_i(U_i)\Delta U_i}{t_i} \end{aligned} \quad (5.6)$$

以下仍以 2003 年 11 月 15 日的落叶松 1# 热物性测试试验为例，估算热管式平板导热仪测木材导热系数的误差情况。

由于木材试样和玻璃标样的厚度均用游标卡尺测量，被测试样厚度的系统误差 $\delta_{\text{木材}}=0.253\%$ ；玻璃标样厚度的系统误差 $\delta_{\text{玻璃}}=0.264\%$ ；玻璃导热系数的误差 $\delta_{\lambda_{\text{玻璃}}}=0.213\%$ ；热电偶测温的相对误差 $\delta_{t_1}=0.67894\%$ ， $\delta_{t_2}=0.60491\%$ ， $\delta_{t_3}=0.088843\%$ ， $\delta_{t_4}=0.066013\%$ ， $\delta_{t_5}=0.084547\%$ ， $\delta_{t_6}=0.63202\%$ ， $\delta_{t_7}=0.093801\%$ ， $\delta_{t_8}=0.086197\%$ ， $\delta_{t_9}=0.070006\%$ 。将以上各误差值代入式 (5.4)，求得导热系数的相对误差为 1.812%。

5.4 木材导热系数的测试结果比较

以下将本文所得导热系数分别与本人采用瞬态法测试的结果^[40]以及王玉芝采用准稳态测试法^[16]的测量结果进行比较如表 5.9，由于另外两种方法测量的木材试样中只有部分与本文的相同，因此只能作部分比较。

表 5.9 含水率为 15.75% 的红松在不同温度下导热系数的比较

温度 导热系数 测试法	40 (°C)	49 (°C)	59 (°C)	73 (°C)	78 (°C)
稳态平板法	0.110	0.112	0.118	0.120	0.122
准稳态法	0.111	0.111	0.117	0.120	0.121
瞬态法	0.103	0.104	0.105	0.119	0.119

从表 5.9 分析可知,采用稳态平板法测得的导热系数最大,准稳态法次之,瞬态法测得的导热系数最小。

5.5 导热系数结果分析

本节将根据 5.3 节的木材导热系数数据结果,通过图表分析和拟合关联式分别讨论不同温度,不同含水率和不同纹理对木材导热特性的影响。

5.5.1 温度对导热系数的影响

我们知道温度变化使得木材内部的传热方式发生变化,不同的传热过程表现为木材导热系数的显著变化。根据所测得的 10 种气干横纹针叶材和气干横纹阔叶材在不同温度下的导热系数,我们得到了以下实验结果,如图 5.2, 5.3。

从图 5.2 和图 5.3 可以发现:在 35°C~85°C 的温度范围内,导热系数与温度之间的关系曲线中出现一个峰值,即导热系数先随着温度升高而增大,且其增长的速度先大后小,然后下降。在温度 70°C~80°C 范围内,导热系数受温度的影响较小。其原因可解释为:在低温时以木材导热为主,随着温度的升高,木材固体分子和所含自由水分子热运动增加,孔隙中空气的导热和孔壁间辐射换热也增强,所以木材的导热系数随着温度升高而增大。但由于木材的多孔性和含水性,随着温度的升高,木材的气孔受热膨胀气体体积所占比重增大以及自由水受热蒸发变成水蒸气,都造成木材导热能力减小,以致与固体分子导热能力的增大相抵消,于是此时导热系数不再随温度发生变化。随着温度的继续升高到 80°C 以上自由水变成水蒸气后,气体导热逐渐占优势,木材综合导热能力呈减小趋势。

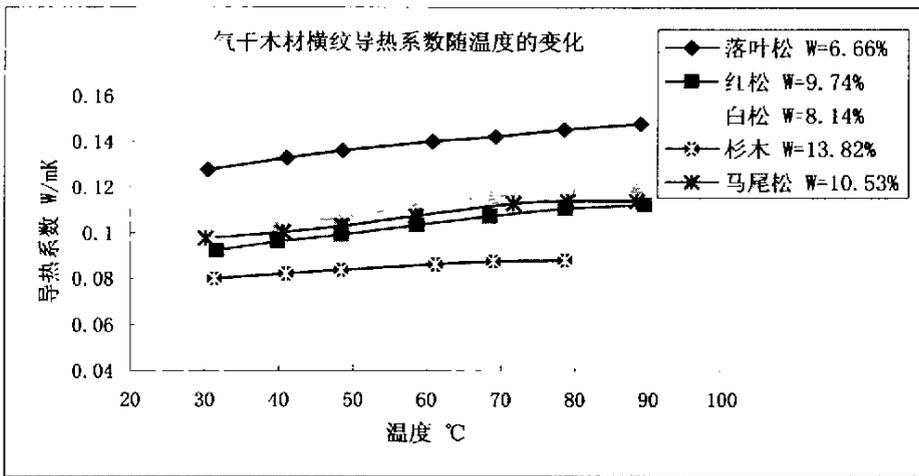


图 5.2 针叶材横纹导热系数随温度的变化

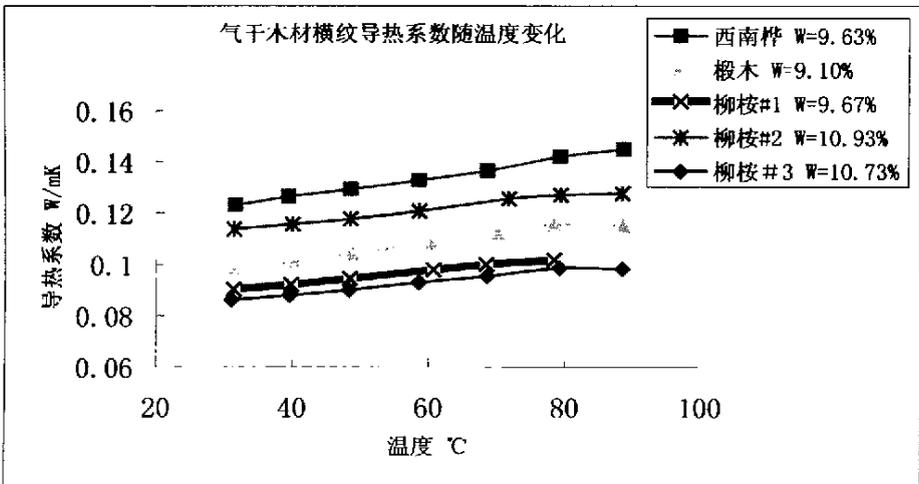


图 5.3 阔叶材横纹导热系数随温度的变化

这样的实验结果与各种文献^[54~56]中前人的研究结果是吻合的。实验结果也验证了大多数的文献资料中的结论：木材这种多孔材料，如果温度上升导热系数就增大，而且一般成线性增加。

但更为重要的是，需要从实验数据中得到有关木材导热系数和温度之间变化规律，总结出有效、可靠的经验关联式。与以往的研究相比，能提供更加简洁、直观的温度与导热系数的关系，并且便于在实际问题中应用。

我国一些学者^[14]曾对红松、落叶松和水曲柳等三种气干材（含水率在12%左右）进行实验测试，得到了20~80℃范围内，气干材横纹导热系数与温度的关系具有指数函数关系，而且指出：由于指数中的温度系数较小，仍然接近于线性关系或二次多项式关系。但是在他们的研究中均未给出这两种关系的具体表达式。此外，由于试样只有3种，有可能存在一定的偏差。

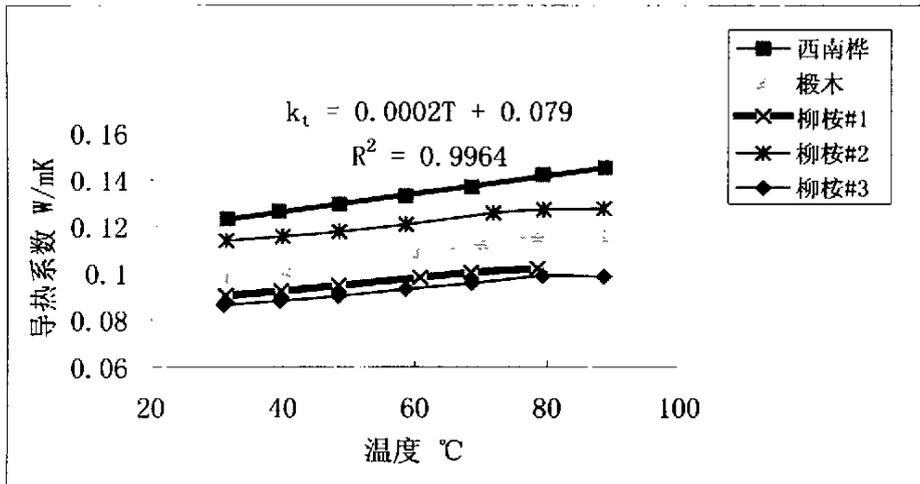


图 5.4 气干阔叶材横纹导热系数经验关联式的拟合结果

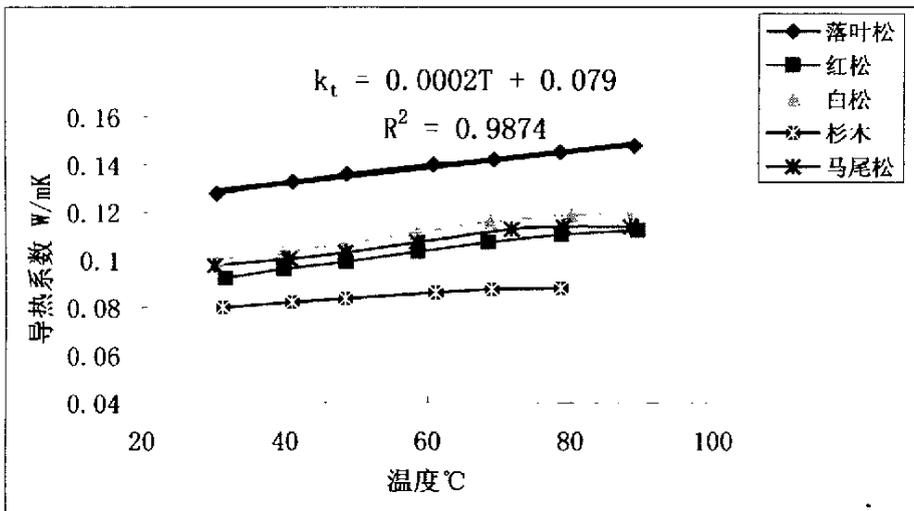


图 5.5 气干针叶材横纹导热系数经验关联式的拟合结果

我们对表 5.1 和 5.2 中所列的 10 种木材横纹导热系数测试数据进行了曲线拟合, 结果发现, 这 10 种木材的横纹导热系数随温度变化曲线的线性拟合关联式具有统一的形式。

$$\lambda_t = 0.079 + 2 \times 10^{-4} T \quad R^2 = 0.99 \quad (5.16)$$

式中, λ_t ——木材横纹导热系数, W/mK; 式 (3.16) 中的 T 单位是 °C。上式适用于温度范围: 25~100°C; 含水率: 7~15% 的气干材横纹导热系数的估算。

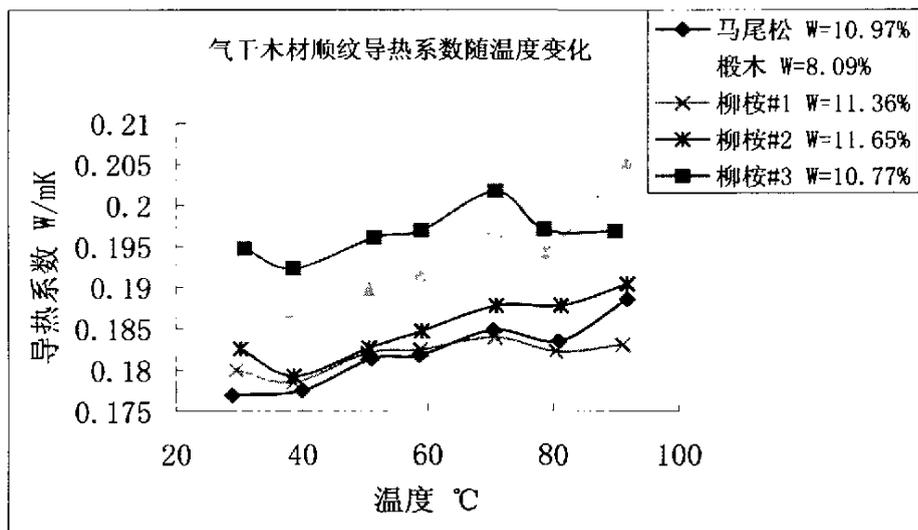


图 5.6 气干材顺纹导热系数随温度的变化

根据所测得的 5 种气干材的顺纹导热系数得图 5.6, 从图 5.6 中我们可以看出, 尽管顺纹导热系数变化的总体趋势是随着温度升高而增加, 但并不像横纹导热系数那样早明显的单调增加的线性关系, 而是在不同的温度段有不同的变化。首先, 在 25~40°C 之间, 顺纹导热系数有一个明显下降的趋势; 之后, 才随着温度的升高而增加; 但是到达 75°C 左右 (不同树种间略有差异), 导热系数再次出现一个下降的趋势, 随后增加。在已有研究中大家都认为木材顺纹导热系数和横纹导热系数之间存在差异, 但相关文献中并未提到木材顺纹导热系数随温度变化的这种规律, 笼统地认为与横纹导热系数的变化规律相同。

经分析认为, 顺纹导热系数随温度变化的这种规律应该与木材本身的多孔结构有关, 热流经过木材内部不同路径, 显然热传输方式是不同的。根据 Siau^[57] 的假设, 如果把木材微元结构看作是由细胞壁物质、水分和空气组成的热传导通道; 那么细胞壁固体物质、水分 (水蒸气、自由水和束缚水) 和空气的导热系数分别为: 0.3192 W/m°C, 0.5502 W/m°C, 0.02394 W/m°C, 从中可以发现木材中水份的导热系数变化对整体的贡献占据主要地位。在温度 25~100°C 之间, 木材孔隙间水份的对流换热对整个传热特性的影响很大。此时, 温度的改变引起木材内的水分重新分布, 而水分的迁移情况与木材内部孔道是否畅通关系很大。在 Plumb^[58] 的研究中假设了这种情况: 随着温度的升高, 木材中存在的水蒸气在孔隙中流动触及到细胞壁后会产生凝结, 形成的束缚水直到遇到另外的孔隙而后再蒸发, 这种过程一直持续到水分到达木材表面。因此, 我们认为, 在外界温度不高, 加热缓慢的情况下, 木材内部这种蒸发和凝结过程对木材的传热特性影响显著; 而木材顺纹导热系数随温度的复杂变化, 与木材内部孔隙结构不均匀性及水分迁移过程是密切相关的。进一步考察木材的微观结构, 可以为深入了解木材的传热特性提供帮助。

此外, 经过对图 5.6 中相关实验数据的曲线拟合, 发现不同树种间的木材顺纹导热系数随温度变化具有大致相同规律: 顺纹导热系数与温度具有 n 次多项式的关系

($n \geq 2$), 但无法用一个统一的经验关联式进行表述。

5.5.2 不同含水率

根据不同含水率的落叶松和红松的导热系数作图 5.7 和图 5.8, 可以看出随着含水率的增加, 木材的横纹方向上的导热系数不断增大。由落叶松的横纹导热系数与温度的关系曲线(图 5.7)发现, 随着红松含水率的降低, 导热系数与温度曲线的峰值的出现逐渐向高温推移。

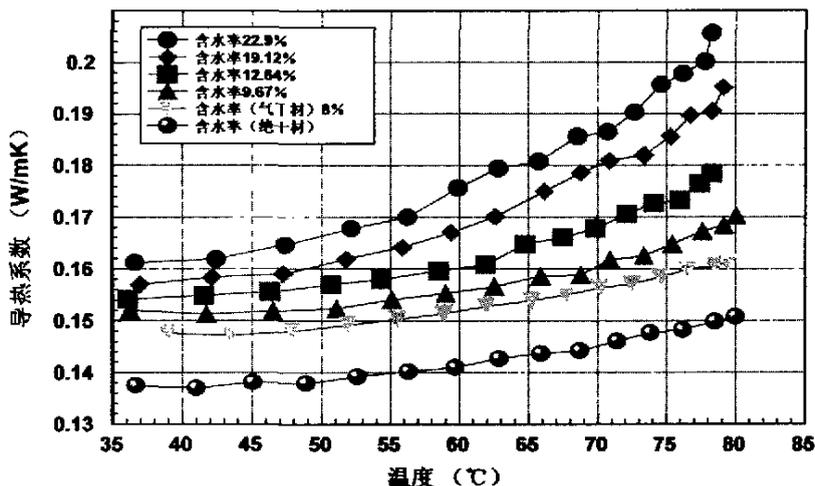


图 5.7 含水率、温度对落叶松导热系数的影响

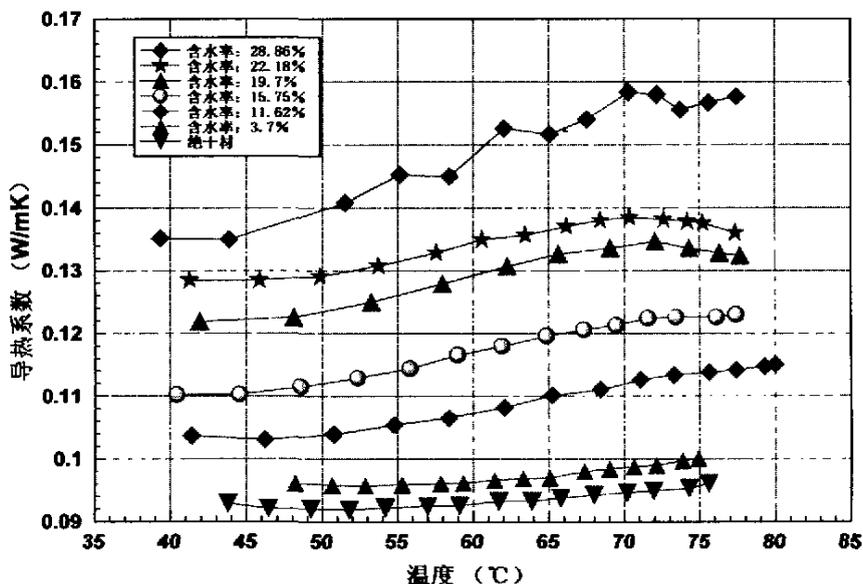


图 5.8 含水率、温度对红松导热系数的影响

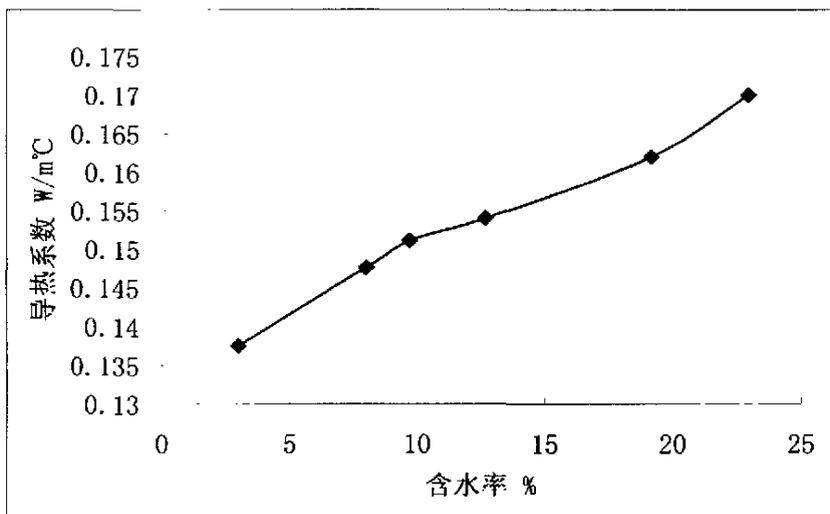


图 5.9 不同含水率下落叶松的横纹导热系数

图 5.8 和 5.9 所示为木材含水率、温度和导热系数之间的关系。可以看出，随着含水率的增加，木材的横纹导热系数不断增大。而且由图 5.9，在实验温度范围内，导热系数随含水率增加大致成线性增加。我们知道，水的导热系数约为空气导热系数的 25 倍，从图 5.8 中我们明显可以看到，尽管不同含水率下木材导热系数随温度变化的趋势大致相同，但随着水分的增加，木材导热系数增加幅度却大大提高，说明在温度不太高的情况下，木材中的水分对整体导热系数的贡献很大。我们对落叶松和红松的实验数据进行分析，得到含水率在 25% 以下的木材横纹导热系数可以用下式进行估算：

$$\lambda_2 = \lambda_1 [1 - 0.015(W_1 - W_2)] \quad (5.17)$$

式中， λ_1, λ_2 ——分别为含水率 W_1 和 W_2 时的导热系数， $W/m^\circ C$ 。

Kollmann 提出木材横纹导热系数与含水率的关系表达式为：

$$\lambda_2 = \lambda_1 \left(1 + \frac{W_2 - W_1}{100}\right) \quad W/m^\circ C \quad (5.18)$$

Maclean 提出如下方程式：对于含水率小于 40% 时，

$$\lambda = 0.0238 + \rho_0 (2 + 0.0406W) \times 10^{-4} \quad W/m^\circ C \quad (5.19)$$

式中， ρ_0 ——木材的绝干密度， kg/m^3 。

我们将实验得到的结果与 Kollmann^[59] 和 Maclean^[60] 提出的公式计算结果进行比较，尽管 Kollmann 和 Maclean 提出的公式应用范围比较宽泛，但是与实验值相比，误差较大。而且在国内木材实际应用的场合，含水率一般在 8~15% 之间，通常均小于纤维饱和点，即含水率小于 25%，因此我们认为采用式 (5.17) 进行计算是可行的。

5.5.3 不同纹理

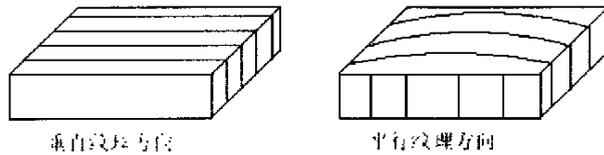


图 5.10 木材切割的纹理方向

为了考察热流方向对木材导热系数的影响，将木材按照不同的纹理方向——顺纹（热流平行于纹理方向）和横纹（热流垂直于纹理方向）切割成相同尺寸的试样并分别进行同等条件下的导热系数测试。

按照图 5.10 中不同的纹理方向对木材导热系数进行测量。测试结果如图 5.11、5.12 和表 5.11 所示。

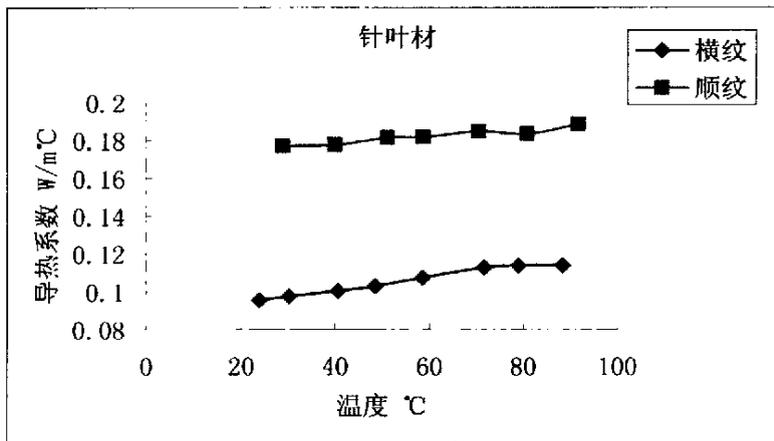


图 5.11 针叶材（马尾松）的各向异性导热系数

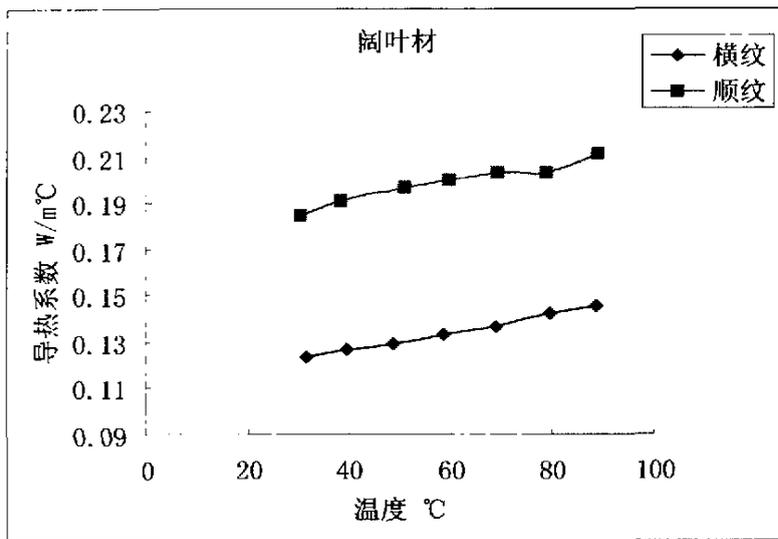


图 5.12 阔叶材（西南桦）的各向异性导热系数

表 5.11 常温下（25°C）木材不同纹理方向导热系数实验值比较

树种	含水率 (%)	顺纹导热系数 (W/m°C)	横纹导热系数 (W/m°C)	比值
马尾松	10.53	0.1769	0.0956	1.85
西南桦	9.63	0.2112	0.1232	1.72
椴木	9.10	0.1880	0.0977	1.92
柳桉	9.68	0.18	0.0903	1.99

从图 5.10 和 5.11 所示的实验结果可以看出，由于木材存在各向异性，因此无论对于针叶材还是阔叶材，它们的导热系数都与热流穿过木材的纹理方向有关。很明显，木材的顺纹导热系数大于其横纹导热系数，而且两者的比值大约在 1.8~2 之间，这个结果与有关文献中数值非常接近。Maclean^[60]指出顺纹导热系数与横纹导热系数之比的变化范围在 2.25~2.75 之间，近似平均值为 2.5。木材学^[61]提出几种木材顺纹方向与横纹方向的比值为：红松，2.5；椴木，3.1；柞木，2.7。Кириллов 测得云杉、松木、桦木、水青冈和栎木 5 种木材顺纹与横纹方向的导热系数之比为 1.8~3.5。但是大多数的研究者都只是提出了这一实验现象，而并就产生这种差异的原因进行讨论。我们认为这应该归咎于木材分子结构的复杂性，需要从木材的微观结构上进行实验观察，才能得到比较合理的解释。出现这种差异的原因可能与细胞壁内分子链结构的构成方向有关。木材细胞壁是由以微纤维束方式排列的长链型分子聚合物构成的。这些微纤维绝大部分都分布在细胞的径向轴线上。显然，平行于微纤维排列方向的导热系数要大于与此方向相交叉方向的导热系数。在木材传热过程中，热量传递是靠分子能量的平衡进行的，构成木材细胞壁的纤维素链状分子的分子链方向对平衡的阻力比其垂直方向明显要小。因此，我们可以推测细胞壁的纤维走向对于导热的各向异性有很大影响。

以上分析了木材横纹导热系数与顺纹导热系数随温度的不同变化规律，通过比较可以发现木材不同方向上导热能力的差异。而我们更关心的是木材各向异性对热量传递的影响，因为这关系到实际应用过程的环节，我们在生活中常常可以看到大部分木制品或木材建筑材料的使用表面是平行于木材纤维方向的，这就意味着垂直于纤维方向（横纹）的导热系数是非常重要的。当然，木材顺纹导热系数也是需要我们关注的，特别是两者之间的差异关系

此外，我们还从图 5.11 和 5.12 中发现，木材顺纹导热系数与横纹导热系数的比值并不随着温度的变化而出现较大的差异，而是基本保持相同的增长趋势。这说明，从木材导热系数整体变化趋势来看，在温度范围 25~100℃之间的变化幅度是比较小的，而且可以认为木材顺纹和横纹导热系数随温度变化大致遵循相同的规律。因此，从我们的实验结果及已有的研究记录，可以推断：常温下（20~100℃）气干木材（含水率在 8~15%）的导热系数随温度变化，不论是横纹方向还是顺纹方向都遵循指数变化规律，其中指数中的温度系数的大小决定了顺纹导热系数或者横纹导热系数与温度的近似关系，并与树种、含水率和密度等因素有关。

5.6 本章小结

本章根据试验测量数据计算了气干横纹针叶材，气干横纹阔叶材和气干顺纹木材，不同含水率的红松和落叶松，以及不同纹理方向的几种木材的导热系数。并进行了计算机模拟修正和测试误差分析。对木材的热物性变化规律进行了分析总结，得出木材的热物性随温度、含水率和纹理方向变化的规律。本章主要结论如下：

（1）木材的导热系数不是一个常数，它受热流方向、温度、含水率、木材缺陷等因素的影响而有不同程度的波动，其中尤以含水率和温度的影响较显著。

（2）在 35℃~85℃的温度范围内，木材导热系数与温度之间的关系曲线中出现一个波峰，即导热系数先随着温度升高而增大，当温度升高到一定程度，导热系数受温度的影响趋于平缓，然后导热系数开始有下降趋势。

（3）随着含水率的增加，木材的横纹方向上的导热系数不断增大。由红松的导热系数与温度的关系曲线（图 5.8）可以发现，随着红松含水率的降低，导热系数与温度曲线的峰值的出现逐渐向高温推移。

（4）针叶材和阔叶材的导热系数都与热流穿过木材的纹理方向有关，通常其顺纹导热系数大于横纹导热系数，而且两者的比值大约在 1.8~2 之间。

第六章 全文总结和展望

6.1 全文总结

本文是国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409600)“火灾动力学演化与防治基础”子课题之一。由于火灾直接危及人民的生命、财产,造成环境污染,引发生态失衡,是人类面临的重大灾害之一。因此,为了预防火灾产生,减少火灾损失,进行消防保护,研究各种可燃物的传热特性是其十分必要的。为研究典型可燃物——木材的传热特性,本文研究设计了热管式平板导热仪,并进行了相应的测试与分析。本文的主要内容如下:

(1) 本文首先简要介绍了木材热物性测试的研究背景,回顾了目前国内外的热物性测试、木材传热特性及平板导热仪的研究现状和存在的问题。

(2) 为设计热管式平板导热仪以测量木材的导热特性,本文研究了现有的平板导热仪,主要包括防护型平板导热仪和热流计式平板导热仪。在分析这两种导热仪优缺点的基础上,本文创新性地应用热管传热快,均温性好的优点,并参照平板导热仪的国家标准设计了热管式平板导热仪。热管式平板导热仪设计的重点在于热管式均温板的设计,本文采用计算软件 ANSYS 对热管式均温板工作表面的均温性进行了模拟和设计,并得到以下结论:利用热管技术能有效地对均温板的均温性进行控制;均温板的孔径和孔间距越小,则热管式均温板的均温性越好。这一结论对于热管式均温板在其它工程领域的应用也有参考价值。

(3) 本文采用 ANSYS 软件对热管式平板导热仪内木材试样和玻璃标样的温度场进行模拟,从模拟计算的结果可以看出采用热管式平板导热仪进行测试,木材试样和玻璃标样的内部存在一维稳态温度场,证明这一测试方法是符合一维稳态的测试原理。

(4) 将热管式平板导热仪与数据采集处理系统和加热电源控制系统相联结,本文建立了完整的热管式平板导热仪测试系统。

(5) 为研究温度,含水率和纹理方向对木材导热特性的研究,本文制备了五种气干横纹针叶材,五种气干横纹阔叶材,五种气干顺纹材,不同含水率的红松,落叶松和不同纹理的四种木材,并进行了导热系数的测试。对于测试结果本文进行了误差分析和计算机模拟验证,最后将本文测得的导热系数与采用瞬态法和准稳态法的部分测量结果进行了比较。依据所测得的各试样的导热系数分析了在 35℃至 85℃范围内不同种类木材导热系数随温度,含水率和纹理方向的变化规律,并总结了相应的关联式。本文研究得到的结论如下:在 35~85℃的温度范围内,木材的横纹导热系数先随着温度升高而增大,当温度升高到一定程度(70~80℃),导热系数受温度的影响较小,变化不明显,之后随着温度升高导热系数呈减小的趋势(图 5.12~5.5);在相同

温度下,随着含水率的增加,木材的横纹导热系数不断增大;木材顺纹导热系数与横纹导热系数的比值大约在 1.8~2 之间。

6.2 展望

本文采用热管式平板导热仪测量木材导热系数方面的研究是比较初步的,希望能为今后木材热物性的测试研究以及热管式平板导热仪的改进工作打下基础。因此,仍有很多方面需要进一步完善:

(1) 本文采用了一维稳态法测木材导热系数,由于试样达稳定状态所需的时间较长,每次测试至少需 36 小时,因此因此受研究时间限制,本文只在 35℃~85℃温度区间对木材的热物性进行了测试,85℃以上高温环境下木材热物性的变化规律有待于进一步研究。

(2) 由于本文试验研究所采用的热管式平板导热仪是我们自行研制的,通过已进行的调试和测试工作发现,该导热仪还需进一步改进,以更好地保持试样内部一维稳态温度场和更准确地测量通过试样的热流密度,由此可提高该导热仪的测试精度。

(3) 本文只测量了部分木材不同温度下,不同含水率和不同纹理方向的导热系数,要进一步研究木材的导热规律,还需对更多种类的木材进行测试研究。

参 考 文 献

- [1] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 周建军编著, 火灾学简明教程, 中国科学技术大学出版社(第一版), 1995.
- [2] 范维澄主编, 火灾科学导论, 湖北科学技术出版社(第一版), 1993.
- [3] 李雯, 陈军, 程晓航, 火灾科学的研究与展望, 火灾科学, 1998, 7(3): 47-52.
- [4] 范维澄, 陈莉, 卧室火灾危险度的双重性模型, 中国科学技术大学学报, 1994, 24(2): 220-224.
- [5] 范维澄, 崔镏, 建筑火灾综合模拟评估在大空间建筑火灾中的初步应用, 中国科学技术大学学报, 1995, 25(4): 479-485.
- [6] 满文焕, 浅谈木材材料和建筑防火, 建筑人造板, 1995(4): 14-17.
- [7] Hukka, A. Evaluation of parameter values for a high-temperature drying simulation model using direct drying experimental. *Drying Technology*, Vol. 15(3&4): 1213-1229, 1997.
- [8] 沈楹元等, 建筑材料热物理性能, 中国建筑工业出版社, 1981: 38.
- [9] 木材热传导问题的研究, 东北林业大学学报, 1987, 15(4): 56~65
- [10] 木材导热系数的研究, 林业科学, 1992, 28(2): 153~160
- [11] 杨菊秋, 侯祝强, 胡九如, 气干材导热系数的温度特性, 中南林学院学报, 1996, 16(2): 58~61
- [12] 钱学森, 物理学讲义, 北京: 科学出版社, 1962: 326.
- [13] 杨庆贤, 木材热学参数的理论表达式, 福建林学院学报, 2001, 21(4): 329~331
- [14] 高瑞堂, 隋振璋, 木材的热力学函数, 东北林业大学学报, 1994.3, 22(2): 68-75.
- [15] 钟云志, 钟义山, 木材导温系数模型的研究, 西北林学院学报, 2003, 18(2): 84-86.
- [16] 王玉芝, 木材热物性测试的理论及试验研究, 浙江大学硕士论文, 2003.
- [17] Dunlap, F. The specific heat of wood. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Bulletin N110, Washington, D.C. 1912.
- [18] Кириллов Н.М. Расчет процессов тепловой обработки древесины при интенсивном теплообмене. Гослесбумиздат. Москва, 1959.
- [20] Maclean, J.D., *Thermal conductivity of wood, Piping and Air Conditioning*. Vol.13:380-391, 1941.

- [21] K.D.Maglic, A.Cezairliyan, V.E.Peletsky, *Compendium of Thermophysical Property Measurement methods*, Vol.1 Plenum Press, New York and London, 1984, 125-165.
- [22] 陈则韶, 葛新石, 顾毓沁, 量热技术和热物性测定, 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [23] 朱德忠, 热物理测量技术, 清华大学出版社, 1986.
- [24] 蒋章焰, 何文欣, 陈文芳等译, 传热学测试方法, 国防工业出版社, 1987.
- [25] B.A.奥西波娃 著, 传热学实验研究, 高等教育出版社, 1982.
- [26] 林中鹤, 稳态平板法实验样品的绝热分析, 华中师范大学学报, 1994, 28(1): 56-58.
- [27] 徐永, 稳态平板法测不良导体导热率的误差的研究, 集美大学学报 1998, 3(1): 46-48.
- [28] 魏品良, 用稳态平板法测定不良导体导热系数的实验研究, 苏州丝绸工学院学报, 1998, 18(3): 57-59.
- [29] 刘淑琴, 用稳态法导热仪测定聚氨酯硬泡导热系数, 黎明化工, 1990, (4): 41-43.
- [30] 施明恒, 薛宗荣等, 烟丝热物性测试方法的研究, 烟草科技, 1990, 15-17.
- [31] 杨惠林, 徐骏华, 高准确度防护热板法导热仪, 同济大学学报, 1994, 22(2): 259-262.
- [32] 张斌, 曲海涛, 非、准稳态法综合导热实验台的设计与实验研究, 哈尔滨建筑大学学报, 1995, 28(4): 68-72.
- [33] 黎爱纯, 稳态热流计法导热仪测试人造板导热系数, 南京林业大学学报 1997, 21(3): 99-102
- [34] 黎爱纯, 中密度纤维板导热系数的测定, 林产工业学报, 1997, 24(2): 27-30.
- [35] 孙丽萍, 晏雄, 纤维导热性能的研究, 玻璃钢/复合材料, 1998, (2): 5-7.
- [36] 吕昶, 郭廷玮, 朱庭英, 高分子聚合材料的导热系数测定, 制冷学报, 2000, 3: 14-18.
- [37] 吕新广, 李延雷等, 弹性金属塑料瓦的导热系数确定及导热性能分析, 机械科学与技术, 2000, 19(6): 975-976, 980.
- [38] 沈雅钧, 金俭雄等, 绝热保温材料热物性的准稳态法测试, 浙江海洋学院学报, 2001, 20(1): 41-44.
- [39] 卢建航, 孙宏等, 用准稳态法测定橡胶及橡胶基复合材料的导热系数和比热容, 轮胎工业, 2001, 21(5): 305-309.
- [40] 胡亚才, 黄君丽, 洪荣华, 俞自涛 一种瞬态法测木材导热系数的理论与实验研究, 浙江大学学报工学版, 2004.5 (收录)。
- [41] Measurement of Thermal Conductivity of Insulations and Low Conductivity Materials. <http://www.npl.co.uk>
- [42] 中华人民共和国国家标准, 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定, GB10294-88

和 GB10295-88。

- [43] 李菊香, 热管式均热平板的研究与应用, 能源研究及利用 1996.3
- [44] 王国强主编, 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践, 西北工业大学出版社, 1999.
- [45] 陈精一, 蔡国忠编著, 电脑辅助工程 ANSYS 使用指南, 中国铁道出版社, 2001.
- [46] 沈季胜, 活塞热冲击与随机传热过程的研究, 浙江大学博士论文, 2001.
- [47] Thermophysical Properties Research Center Purdue University, THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER VOLUME 2
- [48] 周纪芴编, 回归分析, 华东师范大学出版社, 1993
- [49] 俞忠原编著, 实验设计与数据分析, 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1991
- [50] 徐大中, 糜振骝编, 热工测量与实验数据整理, 上海交通大学出版社, 1991
- [51] 陈久宇, 林见编著, 观测数据的处理方法, 上海交通大学出版社, 1987
- [52] 牛长山, 徐通模编, 试验设计与数据处理, 西安交通大学出版社, 1988
- [53] 涂颀, 章熙民等编, 热工实验基础, 高等教育出版社, 1986
- [54] Steinhagen, H.P., Computerized finite-difference method to calculate transient heat conduction with thawing. Wood and Fiber Science, Vol.18 (3):460-467, 1985.
- [55] Khattabi, A., Steinhagen, H.P., Numerical solution to two-dimension heating of logs. Holz als Roh- und Werkstoff, Vol.50:308-312, 1992.
- [56] Steinhagen, H.P., Thermal properties of wood, green and dry, from -40 to 100°C: A literature review. USDA Forest Service General Technical Report FPL-9, Forest Products Laboratory, Madison, WI. 1977.
- [57] Siau, J.F. Transport Process in Wood. Springer-Verlag, New York. 1984.
- [58] Plumb, P.A., Spolek, G.A., Olmstead, B.A., Heat and mass transfer in wood during Drying. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.28 (9):1669-1678, 1985.
- [59] Kollmann, F.F.P., Principles of wood science and technology I, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1968.
- [60] Maclean, J.D., Thermal conductivity of wood, Piping and Air Conditioning. Vol.13:380-391, 1941.
- [61] 成俊卿主编, 木材学, 中国林业出版社, 1985, 495-498, 207.

致 谢

在本论文完成之际，谨向我的导师胡亚才教授致以最真诚的谢意。两年多来，胡老师以其广博的理论和丰富的实践经验，在科研方面对我进行了悉心的指导和培养。对于问题，胡老师常常有着深刻的洞察力和非常活跃的思维，这深深启发了我该如何思考问题，享受思考的快乐。对于事物及人的发展，胡老师有着高瞻远瞩的发展眼光，也影响了我该如何更高角度地看待问题。此外，胡老师亦文亦酒，幽默风趣的豪爽个性也令我钦佩不已。感谢胡老师一直以来对我的严格要求和全面培养，使我在诸多方面得到发展，他不仅是我求学路上的导师，更是我人生路上永远的导师。

衷心感谢导师洪荣华高级工程师，在整个试验研究过程中，在许多次具体的试验工作中，洪老师总是从最初的严到最后的教，使我增长了许多实践经验，他更以严谨的工作作风，忘我的工作精神和对学生无私的指导帮助精神，使我深受影响，开始形成踏实细致的良好工作态度。尤其令我钦佩的是洪老师忘我的工作精神，为了尽快解决问题，他常常不顾寝食。在今后的工作中，我还要多方面向他学习。

真挚感谢导师王建平副教授，他的渊博学识和平易近人，令我影响深刻。感谢吴杰老师、张艾艾老师和冯军老师，感谢他们帮助我解决了试验过程中的许多问题。感谢热工教研室其他老师：屠传经教授、吴存真教授、孙志坚副教授、朱华副教授等老师在科研和学习上对我的帮助和指导。

感谢师兄俞自涛，一直以来师兄对我在学习和生活上都很关心，本课题的完成得到了师兄从始至终的指导与帮助，也感谢师兄以他宽厚热情的对人对事态度影响了我。感谢师姐王玉芝，在帮助她做试验的日子里，我学到了许多实验知识与技能，为自己能较为独立地进行课题研究打下了基础。感谢实验室的其他同学：张雪东、魏林生、范利武、田甜、贺云根、刘兴慧，感谢他们在试验及论文撰写过程中给我许多帮助。

感谢我亲爱的父母，在遥远的家乡他们牵念着女儿的方方面面，女儿每一点的进步都凝聚着他们最无私的爱和最深的支持。感谢男友陈必春，给我关心体贴和不倦的支持与鼓励。感谢亲人的爱使这一段求学旅程充满阳光，希望我能不断以些许成绩带给他们欣慰与快乐。

黄君丽

2005年1月于求是园