

中國計量大學

CHINA JILIANG UNIVERSITY

硕士学位论文

MASTER DISSERTATION

基于热成像的背胶石墨膜面向导热系数  
测试方法研究

Research on Test Method for In-plane  
Thermal Conductivity of Glued Graphite Film  
Based on Thermal Imaging

作 者 陈玥

校内导师 叶树亮 教授

校外导师 林振兴 高工

专业领域 仪器仪表工程

中国计量大学

二〇二〇年六月

Research on Test Method for In-plane  
Thermal Conductivity of Glued Graphite Film  
Based on Thermal Imaging

By  
Yue Chen

A Dissertation Submitted to  
China Jiliang University  
In partial fulfillment of the requirement  
For the degree of  
Master of Engineering

China Jiliang University

June, 2020

## 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，也不包含为获得中国计量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：

签字日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 中国计量大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 中国计量大学 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：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

中图分类号 TB941  
UDC 620

学校代码 10356  
密级 公开

中國計量大學

CHINA JILIANG UNIVERSITY

硕士学位论文

MASTER DISSERTATION

基于热成像的背胶石墨膜面向导热系数  
测试方法研究

Research on Test Method for In-plane  
Thermal Conductivity of Glued Graphite Film  
Based on Thermal Imaging

作者	陈玥	专业领域	仪器仪表工程
校内导师	叶树亮 教授	校外导师	林振兴 高工
学科专业	工学硕士	论文类型	应用研究

二〇二〇年六月

## 致 谢

时光如梭，转眼间三年的研究生学习生活已接近尾声。站在毕业的门槛上，回首往昔，奋斗和辛劳成为丝丝的记忆，甜美与欢笑也都尘埃落定，心中留下更多的是不舍与眷恋。求学期间，我得到了很多老师、同学、朋友以及家人的关怀和帮助。籍此论文完成之际，我要向所有给予我支持、帮助和鼓励的人表示我最诚挚的谢意。

首先，非常感谢研究生导师叶树亮教授，为我的课题创造了良好的实验环境，并将该课题在应用领域推广，形成产品，实现它应有的价值。同时，叶老师优秀的品质及宽厚的为人，深深地影响了我。在他的带领下，我学会“仰望星空，踏实求索”的工作态度，收获了认真严谨的科研精神，养成了整洁有序的实验习惯。

在课题研究过程中，最想感谢的是侯德鑫老师。他严密的逻辑思维及认真的科研态度令人佩服，他为我打开了科研的大门，看到另一个世界。在他的悉心指导下，我逐渐掌握了科研的基本方法，提高了独立解决问题的能力 and 发现问题的敏感性。同时，也很感谢工贸所其他老师的悉心教导，日常生活中分享诸多有用的科研技巧，开拓了我的科研视野；在每个科研节点都给予许多有价值的指导和建议。

至此，再次感谢工贸所的各位老师，祝愿老师们工作顺利，桃李满园。

在科研实践中，还获得了工作组内姚行洲、方旭、崔若璐、王同辉、洪婷婷、郑燕鹏、张绩松、胡杨、张亦舒、朱鑫浩、董泽文、张廷尧等同门诸多帮助，与他们一同经历的一场场讨论、一个个实验、一次次头脑风暴，都是科研生活中精彩而难忘的风景线，他们的陪伴与支持让我三年研究生涯丰富多彩。在此对他们表示衷心的感谢，祝福他们身体健康、学业有成。

同时很感激我的家人，求学路上一直支持我、鼓励我，尽力为我创造良好的学习条件。他们的关心陪伴与悉心教导，是我不断努力前进的动力。感恩他们多年来的对我的抚养与培育！

最后，衷心感谢百忙之中评审论文、参与答辩的专家与教授。

陈玥

2020年6月

## 基于热成像的背胶石墨膜面向导热系数测试方法研究

**摘要：**石墨膜作为高导热材料广泛应用于电子设备的散热中，面向导热系数是反映其性能优劣的重要参数。目前行业内一般仅对石墨裸材进行测试，而缺少直接测量背胶石墨膜面向导热系数的方法，给石墨膜厂家的品质管理与用户的热设计带来不便。针对背胶石墨膜的准稳态应用场景及多层复合结构的特点，结合热成像技术与稳态方法，提出热流环路积分法进行面向导热系数测试。主要包括：

（1）为避免应用场景与测试等效场景不一致而引入的系统性偏差，采用稳态的思路进行测试。通过对小区域进行环路积分，消除传热不均匀引起的测量误差。为降低样品表面换热及隔热环热损失的影响，采用数值仿真手段确定各环节热损失比例，提出用未放置样品的标定实验评估热损失功率的方法提高测试的准确性，避免复杂的绝热措施。

（2）根据测试原理提出系统热平衡的判断指标，分析热平衡影响因素，对系统稳定性及热平衡时间进行优化。针对热像仪测温时变且非均匀的问题，分析偏置系数非均匀性及其时变特性，并标定热像仪增益系数，提出在 20s 内进行外部合作黑体校正，减小热像仪测温引入的不确定度。

（3）在理论分析的基础上，研制针对背胶石墨膜面向导热系数的测试装置。基于多种规格石墨膜产品和具有参考数据的金属薄片进行实验，结果证明方法的有效性。但背胶石墨膜测试数据和基于裸材参数理论估计值存在偏差，表明基于裸材数据计算背胶石墨膜导热系数易引入其他参数误差，实际应用中应直接对背胶石墨膜进行测量。

**关键词：**石墨膜；导热系数；热成像；面向传热；热流环路积分

**分类号：**TB941；UDC620

## **Research on Test Method for In-plane Thermal Conductivity of Glued Graphite Film Based on Thermal Imaging**

**Abstract:** Graphite film is a high thermal conductivity material, which is widely used in the heat dissipation of electronic equipment. At present, only bare graphite is measured in the industry. There is not a method to direct measure the thermal conductivity of the glued graphite film, which brings inconvenience to the quality management of graphite film manufacturers and the thermal design of users. According to the quasi-stationary application scenario and the characteristics of multi-layer composite structure, combined with thermal imaging technology and steady-state method, a heat flow loop integration method is proposed to test the in-plane thermal conductivity. The main contents include:

(1) In order to avoid the systematic deviation, which is caused by the inconsistency between the application scenario and the test equivalent scenario, the steady-state method is adopted. Through loop integration in small area, the measurement error caused by uneven heat transfer is eliminated. In order to reduce the influence of heat transfer on the surface of the sample and the heat loss of the heat insulation ring, the heat loss ratio of each link is determined by numerical simulation. The method, which evaluating the heat loss power by an experiment without the sample, is proposed to improve the accuracy of the test and avoid the complicated heat insulation measures.

(2) According to the test model and influencing factors of heat balance, the judgment index of system heat balance is put forward, and the system stability and heat balance time are optimized. Aiming at the problem of time-varying and non-uniform temperature measurement of thermal imager, the non-uniformity of bias coefficient and its time-varying characteristics are analyzed, and the gain coefficient of thermal imager is calibrated. And using the external cooperative blackbody correction within 20s to reduce the uncertainty of temperature measurement of thermal imager.

(3) On the basis of theoretical analysis, a device for measuring the thermal conductivity of graphite film was developed. Experiments are carried out based on various specifications of graphite film products and metal sheets with reference data.

The results show that the method is effective. However, there is a deviation between the measured data and the theoretical estimation based on the bare material parameters, which indicates that other parameter errors are easy to be introduced into the calculation of the thermal conductivity of the glued graphite film based on the bare material data. In practical application, the glued graphite film should be directly measured.

**Keywords:** graphite film; thermal conductivity; thermal imaging; in-plane heat transfer; thermal flow circular loop integration

**Classification:** TB941; UDC620



## 目 次

摘要 .....	I
目次 .....	IV
图清单 .....	VII
表清单 .....	VIII
1 绪论 .....	1
1.1 课题研究背景和意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 稳态法 .....	2
1.2.2 非稳态法 .....	4
1.3 论文研究内容及组织结构 .....	6
1.3.1 论文主要研究内容 .....	6
1.3.2 论文组织及结构 .....	7
1.4 本章小结 .....	7
2 基于热成像面向导热系数测量方法 .....	9
2.1 背胶石墨膜结构 .....	9
2.2 多层薄膜导热系数的等效问题 .....	10
2.3 热流环路积分法基本原理 .....	12
2.4 系统结构及测试模型 .....	13
2.5 本章小结 .....	15
3 测试系统热损失模型分析与验证 .....	16
3.1 热损失模型分析及补偿 .....	16
3.1.1 热损失组成 .....	16
3.1.2 热损失标定方法 .....	17
3.2 热损失补偿结果分析 .....	18
3.2.1 热损失比例仿真分析 .....	18
3.2.2 热损失补偿准确性验证 .....	20
3.3 热损失补偿适用范围讨论 .....	20
3.3.1 测试环路半径的选择范围 .....	21
3.3.2 加热功率的设定范围 .....	22
3.4 本章小结 .....	22

4 系统热平衡及稳定性分析 .....	24
4.1 系统热平衡及判断标准 .....	24
4.2 热平衡时间优化 .....	25
4.3 环境变化对系统稳定性的影响 .....	26
4.3.1 对样品热传导的影响 .....	27
4.3.2 热沉缓冲能力评估 .....	27
4.3.3 增强系统稳定性措施 .....	28
4.4 本章小结 .....	29
5 热像仪测温影响分析 .....	30
5.1 样品发射率及环境杂散光 .....	30
5.2 测温时变与非均匀性分析 .....	31
5.2.1 验证方法 .....	31
5.2.2 结果分析 .....	32
5.3 基于外部合作黑体的实时校正 .....	35
5.3.1 外部合作黑体校正方法 .....	35
5.3.2 合作黑体校正效果分析 .....	36
5.4 本章小结 .....	37
6 实验验证测试系统 .....	38
6.1 测试平台搭建 .....	38
6.1.1 实验装置搭建 .....	38
6.1.2 软件平台设计 .....	39
6.1.3 控制系统设计 .....	40
6.2 测试结果 .....	42
6.2.1 重复性评估 .....	42
6.2.2 准确性评估 .....	43
6.3 关于等效参数的讨论 .....	43
6.3.1 裸材参数与背胶石墨膜等效参数 .....	43
6.3.2 等效厚度 .....	46
6.4 本章小结 .....	46
7 总结与展望 .....	48
7.1 总结 .....	48
7.2 展望 .....	49

参考文献 .....	50
------------	----

## 图清单

图 2.1 石墨膜工作原理 .....	9
图 2.2 背胶石墨膜成品结构 .....	10
图 2.3 背胶石墨膜三层模型及其匀质等效模型 .....	10
图 2.4 三层石墨膜和等效均值材料的闪光法测试模拟结果对比 .....	11
图 2.5 点热源激励下薄片表面温度分布 .....	12
图 2.6 测试系统基本结构 .....	13
图 2.7 梯度计算方法 .....	14
图 3.1 热损失主要途径 .....	16
图 3.2 系统传热模型 .....	17
图 3.3 轴对称二维仿真模型 .....	18
图 3.4 石墨膜面向导热系数测试时的温度场 .....	19
图 3.5 不同半径测试环线下的热损失 .....	19
图 3.6 不同测试环路下热损失补偿效果 .....	21
图 3.7 不同加热功率下热损失补偿效果 .....	22
图 4.1 冷热端温度与样品热流的相关性 .....	25
图 4.2 轴对称二维仿真模型 .....	25
图 4.3 热沉参数与热平衡时间的影响 .....	26
图 4.4 表面受脉冲干扰热损失影响比例 .....	27
图 4.5 系统稳定性装置优化 .....	28
图 5.1 背胶石墨膜样品 .....	30
图 5.2 时变特性验证系统 .....	32
图 5.3 增益系数时变情况 .....	32
图 5.4 增益系数非均匀性 .....	33
图 5.5 偏置系数时变特性 .....	33
图 5.6 相对初始时刻非均匀性时变情况 .....	34
图 5.7 合作黑体校正装置 .....	35
图 5.8 合作黑体校正后非均匀性效果 .....	36
图 5.9 增益系数标定结果 .....	37
图 6.1 实验装置和热平衡时的温度场数据 .....	38
图 6.2 上位机软件界面 .....	39

图 6.3 测试流程图 .....	40
图 6.4 下位机系统框图 .....	41
图 6.5 导热系数重复性测试结果 .....	42
图 6.6 背胶石墨膜样品密度偏差和导热系数偏差 .....	45

## 表清单

表 2.1 背胶石墨膜各层材料参数 .....	11
表 2.2 等效的均质材料参数 .....	11
表 3.1 热损失补偿前后准确性 .....	20
表 6.1 A 企业石墨膜样品测试结果.....	42
表 6.2 金属薄片准确性验证实验 .....	43
表 6.3 裸材样品的闪光法测试数据 .....	44
表 6.4 石墨膜样品测试数据和基于裸材预测的数据对比 .....	44
表 6.5 裸材来源相同的三种规格样品测试数据 .....	46

# 1 绪论

## 1.1 课题研究背景和意义

石墨是一种典型的各向异性导热材料，面向导热能力良好，且远优于纵向导热能力。应用中可起到良好的均热作用，能有效防止电子产品局部过热现象产生，改善电子产品的性能。因其耐高温、可塑性强、重量轻等特点，常作为优良导热材料以薄膜形态广泛应用于IC、LED、散热片、电脑、手机等电子设备散热方案中。

高导热石墨膜作为电子技术领域广泛应用的散热材料，其热特性参数在热管理工程应用中具有重要地位。导热系数是判断导热材料性能优劣的重要参数，通常情况下，导热系数越高，说明材料的导热性能越好，同时价格也越高。石墨膜的导热性能的优劣受到样品的密度、厚度等参数的影响，在选择石墨膜产品时，通常关注其规格参数及对应的导热系数，尤其是体现其均热能力的面向导热系数<sup>[1]</sup>。

由于石墨膜用场景多为贴附于电子设备外壳进行辅助散热，而石墨本身属于高导电材料，且容易产生粉末碎屑。为避免使用过程中存在短路、导电等安全隐患。实际应用中，通常对石墨裸材进行背胶绝缘，经过复合绝缘的单、双面胶、包边、穿孔、排除底膜等废料等一系列模切工艺处理，得到背胶的石墨膜成品。

目前行业内一般采用闪光法等瞬态方法对石墨裸材进行测试，并将其测试结果作为性能指标。但对于多层复合而成的背胶石墨膜，目前暂时缺少直接测量其面向导热系数的方法。在实际应用中，客户使用的是准稳态传热下的背胶石墨膜，而非石墨裸材。且结构不同，等效场景不同，裸材的数据不能代替背胶石墨膜数据，有必要针对背胶石墨膜进行热特性评估测试。

直接测量背胶石墨膜的面向导热系数，不仅可以给电子设备的热管理方案的设计者提供更符合实际的性能参数，还可以给石墨膜厂家提供另一种评价产品的指标，以及新的品质控制角度。

此外，对背胶石墨膜导热系数的准确测量不仅对于了解材料的导热性能，进行稳态导热过程分析具有重要的意义，而且对材料性能的分析 and 评估以及对于新型材料的研究和应用都具有非常重要的作用。

## 1.2 国内外研究现状

导热系数是材料热物性的重要参数,如何实现准确快速测量是各行业焦点。直接测量导热系数测试方法根据其定义引申而出,即通过测量材料两端温度梯度及通过二者之间热流量即可计算得到导热系数。对于薄膜材料,热通量和温度梯度的难以做到精确测量,根据公式直接测量热导率难以实现<sup>[2]</sup>。因此,除了直接测量导热系数的方法,根据材料的热导率、比热容和热扩散率具有相关性的特点,还可以先对材料热扩散率的测量,并结合其密度、比热容等参数的方法,推导出导热系数。

不同结构的薄膜的传热特性各异,需要对其工作温度范围、薄膜的几何形状和尺寸、所需测量精度等因素进行综合评估,以确定合适的测试方法<sup>[3]</sup>。

按照宏观热传导过程,导热系数的测试方法可分为稳态法和非稳态法<sup>[4]</sup>。前者是在热稳态条件进行测试的方法,测试温度分布不随时间发生变化;而后者通常在瞬态或其他非稳态条件下进行测试,利用温度分布随时间发生变化规律计算导热系数<sup>[5]</sup>。以下分别从稳态方法和非稳态方法两个大类,综合介绍各测试方法的原理及特点。

### 1.2.1 稳态法

稳态法的基本测试思路是在样品上施以稳定的热激励,形成稳态一维传热,并根据形成的温度梯度及流经单位面积的热流密度,导热系数可基于傅里叶定律计算得到。在实际应用中,背胶石墨膜工作于准稳态匀热的场景下,与稳态法测试状态更为相近。同时,石墨膜的热物性受工作环境温度等因素影响较大,所以稳态法测试较非稳态法在准确度上更具有优势。

稳态法难点在于温度梯度及加热功率的测量需准确,因此需要确保流经样品的热流恒定,且对测试过程中不必要的热流路径加以约束,以降低减小热流密度估计误差。而行业内现行测量方法,对样品导热系数和接触热阻进行评估,并且要求样品尺寸、测量传感器的布置以及传热环境进行绝热保护符合一定条件,以减小热损失。同时为了提高准确性,确保温度梯度信噪比足够高,许多稳态法测试方法适用于低导热系数材料的纵向导热系数测试,如恒定热流法、保护热板法等<sup>[6]</sup>。

对于薄片形态的材料而言,热电偶无法如测试块状材料时一般,通过嵌入测温的方法,降低温度测量的误差及接触热阻引入的影响。同时薄片纵向传热的截面积较小,总体热阻较大,其他传热途径引入的热损失不可忽略。也有研

究者尝试将若干层薄片材料叠加，使测试样品厚度增加，进而采用块状材料的检测思路进行测试<sup>[7]</sup>。

石墨膜为各向异性材料，且其面向导热性能更佳，常见面向导热系数测试的方法包括稳态的微桥法<sup>[8,9]</sup>、并联热导法及其改进方法<sup>[10-13]</sup>。

### （1）微桥法

微桥法主要用于亚微米级厚度的小尺寸薄膜导热系数测试，其基本原理是受冷端与热端的热传导，样品表面形成一定的温度梯度，到达热稳态时，满足稳定的一维传热，由加热功率、冷热端温度、测试点距离等参数可求得样品的导热系数<sup>[8]</sup>。为减小热辐射或对流换热引起的热耗散，该测试通常要求在真空中进行<sup>[9]</sup>。在上述原理的基础上衍生出电热微桥法<sup>[14]</sup>、T桥测量法<sup>[15]</sup>、双热偶测量法<sup>[16]</sup>及采用环形双热阻测试结构测试等方法。这些改进方法在一定程度上消除样品与热沉之间的温度突变的影响，但依旧不可避免地要考虑样品与加热器、热沉之间的接触热阻及边界散热的影响<sup>[17]</sup>。针对这个问题，研究者们通过在真空或良好绝热环境中实验、根据数学模型计算旁路热损失、通过对比法估算热损失的总量等方法减少热损失干扰，有研究指出热辐射损失的热量小于0.03%，因此在精度要求不高时，热辐射带来的热损失可以忽略不计<sup>[18]</sup>。

### （2）并联热导法

并联热导法的思路是通过两次测试的对比，消除传热路径中串并联热导，该方法能有效解决稳态法常见的接触热阻或旁路传热的问题。研究者们针对各种具体对象提出改进措施，如Aaron<sup>[10]</sup>应用并联热导法对单晶材料的面向导热系数进行测试。用夹持器将长度约为0.5~4.0毫米的样品固定，两端分别固定加热片及散热装置分别作为热源与热沉，二者之间采用热导率较低的材料固定；热电偶布置在两端夹持器中。通过是否放置样品的实验对比，得到流经样品的热流量，进而结合几何参数可以计算出样品的导热系数。Teertstra<sup>[11]</sup>也应用该方法对燃料电池中的电解质膜进行导热系数测试。

但是这种方法忽略接触电阻的影响，导致低估导热系数<sup>[12,19]</sup>。为了解决这个问题，Sadeghi等研究者<sup>[13]</sup>在测试燃料电池的气体扩散层时，对比两种不同长度的材料的测试结果，并使用端部效应热阻解卷积的方法，对接触热阻和空气对流热损失进行修正。采用并联热导法的基本测试思路，结合Sadeghi对修正热损失的方法，Gholami<sup>[20]</sup>提出双长度法测试石墨膜的面向导热系数，实际测试中使用多组不等长的样品在同一条件下同时实验以减小误差，并给出三种不同石墨样品的测试结果。



稳态法测试原理基于稳态热传导方程，其中间测量为温度梯度，大多数稳态测试方法采用热电偶进行点温度的测量。相较热敏电阻、热电偶等接触式测温手段，红外热成像测温技术具有非接触、高分辨地获取整个温度场数据的优势，近年来受到较多研究者的关注，部分研究者也结合热成像技术探索新的热物性测试方法<sup>[21-23]</sup>。

### 1.2.2 非稳态法

非稳态法是目前被广泛采用的热物性测量方法，在国内外已经形成很多基于非稳态法的热扩散率测量方法和实验设备。该方法一般测量时间短，具有可同时测量热扩散率、导热系数和比热容等多个热物性参数的优势。同时，非稳态测试相比于稳态法更为灵活，可测试的材料繁多，也包含较宽的温度和热物性区间<sup>[25]</sup>。

非稳态法测量原理是根据待测材料的温度响应情况推导出其导热系数。非稳态法的基本特点是实验过程中材料的温度分布随时间变化，即材料内部发生非稳态导热过程<sup>[24]</sup>。与稳态方法相比，非稳态法大多将测量中间量转换为测量响应的温升-时间量，如激励后的温升-时间关系，或是周期热激励下测试点热响应的相位差。降低热传导对加热功率及测温精度高要求，避免测温测热流噪声问题。

非稳态法具体实现原理多样，实现热激励的方式多样化，有激光加热、电流加热，加热的形式又可分为单脉冲加热、周期加热、持续稳定加热。由于石墨具有高导电性，因此还有通过赋予其一定电压进行自身加热<sup>[26,27]</sup>。不局限于接触加热方式，或是传热过程中各样的热损失，也不受加热功率测量及测温设备的精度局限，很多方法可以忽略传热中装置与样品间接触热阻、热量除了流经样品还可能在装置上有旁路支流、样品受空气对流造成热损失、测试环境中的辐射热损失等热损失带来的干扰。

常见的测量方法包括 $3\omega$ 、热线法、热带法和瞬态平面热源法等，还有测试热扩散系数的激光闪射法、光热偏转法、周期热流法、交流量热法等<sup>[28-33]</sup>。以下详细介绍用于薄片材料热物性测试的方法。

#### （1）激光闪射法

激光闪射法也称闪光法、激光脉冲法，是20世纪60年代由Parker提出的一种测定热扩散率常用的非稳态方法<sup>[34]</sup>。闪光法最开始主要用于薄膜材料的法向热扩散率的测量，测量原理是将一束均匀激光脉冲打在一定厚度的圆形薄试样前

表面，在试样背面产生瞬间的温度变化，并对该温度响应作测量和记录，由该非稳态导热过程的数学模型及解析解，可得到试样的热扩散率值<sup>[35,36]</sup>。

激光闪射法现已推广到测量高温以及存在大量辐射热损失时的面向热扩散率测试中，Burl Donaldson等<sup>[37]</sup>研究者对样品暴露在能量场中的表面暴露在能量源中存在的产生辐射效应。Sanghyun Lee等<sup>[38]</sup>学者采用各向同性石墨作为测试对象，研究激光能级对面向、法向热扩散率测试结果的影响，提出采用热扩散系数作为本征热扩散系数，能够将激光能级的影响。Ruffio<sup>[39]</sup>提出3D激光闪射法，通过前后表面非均匀激光预测三维传热情况，得到的面向、纵向热扩散率的标准偏差大大降低。

现在行业内测试石墨膜面向导热系数多数要采用闪光法，石墨不同方向的热导率有很大的差异，陆续有研究者提出运用该方法测试石墨材料的面向导热系数的方法及相关改进方法。为解决石墨膜面向导热系数测试问题，闪光法仪器厂家开发特殊附件，如水平方向导热系数测试的德国耐驰LFA447<sup>[40]</sup>。其激励和观测单元采购透射式结构，因此石墨膜两端需要有镂空区域，导致柔性石墨膜放样后可能容易产生不平整、褶皱等问题。

### （2）瞬态平面热源法

瞬态平面热源法最先由Gustafsson<sup>[41]</sup>基于热线法改进而来，其原理是将特制探头同时作为热源和温度传感器置于样品中，根据瞬态温度响应与数学模型可以直接得到导热系数和热扩散率。后续提出许多改进方法，如朱玉祥<sup>[42]</sup>结合BP神经网络分析影响因素降低测试误差，Lei Z<sup>[43]</sup>通过限制样品内部温度梯度，以避免试验温度可能引起的局部热对流与双相滞后效应的影响。但该方法由于受探头制作材料的限制，不仅在测试前需要对样品进行制样，在高导热系数材料测试中不具优势。

### （3）基于热波传播相位差的方法

Angstrom方法是一种用交流电加热热扩散率测量方法。该方法根据样品表面测量的温度谐波分量与热波传播方向的相位差计算来测量样品的热扩散率，在此基础上，结合体积密度和比热的热扩散率推导出热导率<sup>[44]</sup>。Zhu Y<sup>[45]</sup>考虑沿轴向传播过程中的热损失，在扩散方程中引入线性热损失项，不仅提高该方法精度，而且实现测量热扩散率和导热系数同时测量。

交流量热法采用频率、脉冲恒定的激光加热样品，用温度传感器测量薄膜样品的热响应，根据测试点处的温度波的衰减及相移计算样品的热扩散率<sup>[46]</sup>。Chen<sup>[47]</sup>设计新的测试结构，将该方法推广至横向和纵向两个方向热扩散率的测

量应用中。许自强<sup>[48]</sup>对该方法进行研究，并在此基础上组建自动测试系统，实现薄膜热扩散率的自动化测量。

3 $\omega$ 方法也是一种利用温度响应频率确定材料的导热系数的方法，其根据沉积于样品中的金属丝，同时实现加热与测温，以频率为 $\omega$ 周期电路加热用2 $\omega$ 调制温度信息，可在3 $\omega$ 电压谐波分量中分析出样品的导热系数<sup>[49]</sup>。Jaime<sup>[50]</sup>使用两个不同宽度的传感器，同时测量基底和薄膜的热导率，而无需采用标准样品进行对比分析。苏国萍等研究者<sup>[51]</sup>提出三个不同方向的微型金属探测器进行测试的方法，可同时确定SiC晶体在X、Y、Z方向的导热系数。

上述非稳态的方法测试对象均为单一匀质材料，而背胶石墨膜属于多层复合结构，且通常应用于准稳态传热的场景中。由于导热系数是描述匀质材料的物理量，背胶石墨膜的导热系数是指在其准稳态传热场景下的匀质等效后的性能参数。而非稳态法从原理上不能支持背胶石墨膜的导热系数测试，需要考虑稳态的测试方法。

## 1.3 论文研究内容及组织结构

### 1.3.1 论文主要研究内容

本文针对具有多层复合结构的背胶石墨膜，研究一种基于热成像的面向导热系数测试方法。通过热像仪获取样品表面温度场数据，基于此求得包围热源的测试环路上各点的温度梯度，通过对温度梯度进行环路积分，消除热流不均匀的影响。该方法将样品粘贴平整粘贴于平台上即可测试，操作简单。

由于石墨膜在实际应用中的工作状态接近热稳态，通过稳态的方法测试结果能更准确评估其工作状态下的散热能力。针对稳态的方法热损失通常较大的问题，通过热损失补偿的方法修正表面热损失和旁路热损失。

根据测量原理搭建模型，采用数值仿真的方法分析热损失比例、环路选择、加热功率设定等模型合理性问题，并优化加热模型，减少热平衡等待时间。针对热像仪测温存在非均匀性与时变特性的情况，对热像仪测温误差来源及传递进行详细分析，并提出适当标定后测量相对温度可以有较高精度。

最后搭建导热系数测试检测平台，采用不同规格背胶石墨膜样品进行重复性验证，用导热系数已知的标准样品验证测试方法的准确性。最后对比背胶石墨膜与裸材的测试结果，讨论复合材料与裸材的关系及等效厚度的问题，对测试方法进行补充。

### 1.3.2 论文组织及结构

根据上述研究内容，本文将分为以下七个章节进行阐述：

第一章介绍课题的研究背景，说明直接测试背胶石墨膜进行热物性的意义及重要性。综述国内外针对石墨膜的面向导热系数的检测方法，了解稳态法与非稳态法的特点与难点，最后阐述本文主要研究内容。

第二章分析背胶石墨膜结构特点及常见分类，分析其多层复合结构在不同测试场景下等效模型的差异。根据背胶石墨膜的特点，提出热流环路积分法测试其面向导热系数，介绍测试的基本原理与导热系数推导过程，并详细说明测试系统结构及测试模型构成。

第三章根据测试系统传热模型，分析主要热损失影响来源，基于并联传热等效模型的分析，提出通过未放置样品的标定实验确定热损失功率并进行补偿。通过仿真评估热损失比例及标定误差对测试结果影响。最后在测试环路与加热功率的选择范围下，讨论热损失补偿能力。

第四章根据测试系统特点，提出在实践中热平衡状态的判断指标，仿真分析影响系统热平衡的因素，分析环境变化对测试系统稳定性的影响，并提出降低热平衡等待时间与提高系统稳定性的措施。

第五章针对热像仪测温时变且存在显著非均匀性的现象，对热像仪测温误差来源进行分析，通过实验验证其偏置系数与增益系数对热流环路积分法的影响，并提出基于合作黑体的外部校正措施，以减小测温环节引入的误差。

第六章分别从硬件平台搭建与上下位机软件设计的角度，阐述采用热流环路积分法进行石墨膜面向导热系数测试的具体工程实现过程。设计实验结果的评价体系，通过大量实验验证测试的重复性，采用标准样品验证准确性，并讨论石墨裸材与背胶石墨膜参数以及等效厚度问题。

第七章回顾并总结全文的主要研究内容和主要结论，并对后续研究工作和未来发展方向提出展望。

## 1.4 本章小结

本章介绍了背胶石墨膜的应用背景，但行业中仅提供裸材数据，而缺少直接测量导热系数的测试方法。分析薄膜的面向导热系数测试技术的国内外的研究现状，发现背胶石墨膜应用于准稳态的工作场景中，相较于非稳态的方法，采用稳态法进行测试，能更准确地反应其热物性。而稳态的测试方法面临热传导中较大的旁路热损失的影响。由此提出本文的研究内容：结合热成像技术与

稳态测试思路，提出一种能够直接测试背胶石墨膜面向导热系数的简单方法，并提出热损失补偿方法保证测量的准确性。本章的最后，对论文的组织结构进行阐述。

## 2 基于热成像面向导热系数测量方法

本章从背胶石墨膜的工作原理及结构特点出发，定量分析瞬态的方法测试其面向导热系数存在的偏差情况。并考虑采用稳态的测试思路，避免应用场景与测试场景的不一致引起的偏差。结合热成像技术，提出热流环路积分法测量面向导热系数的方法，并对该方法的基本原理与系统结构进行阐述。

### 2.1 背胶石墨膜结构

石墨膜是一种典型的各向异性柔性导热材料，在市场上常见石墨膜分为天然石墨膜和人工石墨膜两种。天然石墨膜是天然鳞片石墨经过高倍膨胀化后被压延压制而成的石墨膜，而人工石墨膜是采用具有高定向度的PI膜通过在惰性气氛下加压碳化，并经过高温石墨化制备而得。而后者更薄，且其导热能力也是前者的2~10倍，因此用于电子设备散热材料的高导热石墨膜通常为人工的石墨膜，也是本文主要测试对象类型。

石墨膜传热性能各向异性，其面向传热能力远优于其纵向传热能力，面向导热系数高达 $300\sim 1500\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，而纵向导热系数仅为 $3\sim 15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。因此石墨膜具有良好的均热能力，可将局部高温区域的热量分散至整个散热面，如图2.1所示。通常与散热器配合使用，及时将设备外壳的热量匀开并导出，能有效防止电子产品局部过热现象产生，改善电子产品的性能。

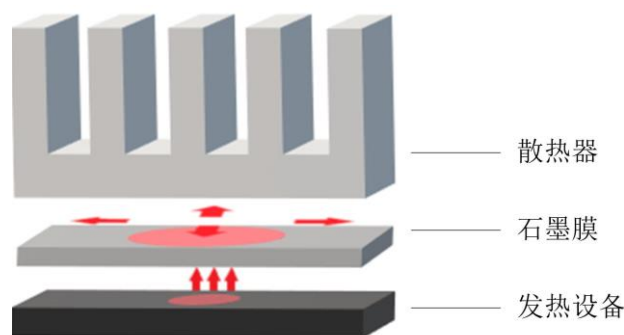


图 2.1 石墨膜工作原理

石墨膜应用的场景多为电子设备，而石墨本身为高导电材料，容易产生粉末碎屑，存在短路、导电等安全隐患。应用中，通常分别在石墨裸材两面复合绝缘的单、双面胶，再将其贴附于电子设备如手机电池壳等发热区域表面辅助

散热。因此石墨膜成品一般采用绝缘胶层双面复合与包边的方式进行绝缘。

石墨膜成品的结构如图2.2所示，一般包含单面胶、石墨裸材、双面胶、离型膜。其中，单面胶及双面胶层可以细化为绝缘基底与胶层。离型膜为产品过程中起到保护作用的材料，实际使用时需剥除离型膜，再将石墨膜粘贴至需要散热区域。为增加石墨膜的传热量，在热设计中双层、三层对贴等方案十分常见。石墨裸材的厚度范围通常为 $5\mu\text{m}\sim 70\mu\text{m}$ ，单、双面胶层厚度可根据具体需求定制，各层厚度约 $5\sim 20\mu\text{m}$ 不等，因此石墨膜成品较薄者厚度仅为十几微米，较厚者约为一百多微米。由于背胶石墨膜厚度较小，在稳态面向传热过程中，可以忽略其纵向传热的影响。

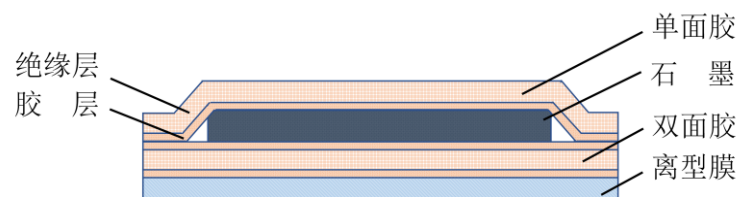


图 2.2 背胶石墨膜成品结构

## 2.2 多层薄膜导热系数的等效问题

背胶石墨膜是由多种材料组成，其结构属于多层复合结构。而导热系数是一种描述单一匀质材料的热物性参数，对于背胶石墨膜而言，需进行匀质等效后，再讨论其导热系数。同时，由于背胶石墨膜多应用于准稳态传热的场景中，与非稳态方法中瞬态传热的测试场景存在差异。为定量评估二者不一致而引入的等效参数定义偏差情况，对比分析背胶石墨膜及其匀质等效模型的测试情况。

如图2.3所示，将石墨膜用一种几何参数相同的假想材料替代，并且该假想材料在应用场景中与真实石墨膜具有基本一致的传热性能，则该假想材料的导热系数为真实待测背胶石墨膜的等效导热系数。

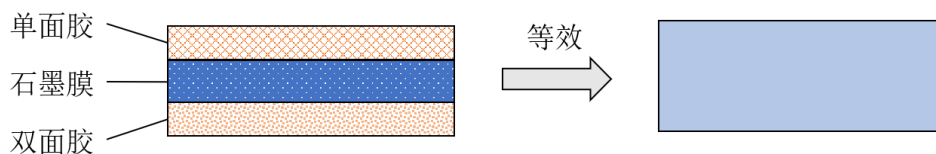


图 2.3 背胶石墨膜三层模型及其匀质等效模型

假设各层材料的参数如表2.1所示，对背胶石墨膜进行匀质等效。若忽略各层材料间的接触热阻，可根据串并联传热原理，推算其在稳态传热场景下的等效参数，如表2.2所示。

为定量评估非稳态传热在多层复合材料传热过程中的差异，以闪光法为例，考察背胶石墨膜三层结构及其均值等效模型的测试结果。建立闪光法测试面向导热系数的传热模型，假设下挡片的孔径为5mm，上挡片环状开口的内径为10.2mm，外径12.6mm。通过下挡片开孔区域，用宽度为1ms的矩形脉冲对样品进行激励，并记录环状开口区域内样品表面的平均温度。

表 2.1 背胶石墨膜各层材料参数

各层材料	厚度 ( $\mu\text{m}$ )	比热容 ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	纵向导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	面向导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
单面胶	15	2000	1200	0.25	0.25
石墨层	25	850	1900	10	1500
双面胶	20	2000	800	1	1

表 2.2 等效的均质材料参数

	厚度 ( $\mu\text{m}$ )	比热容 ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	纵向导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	面向导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
稳态等效	60	1330	1358	0.73	625

分别对背胶石墨膜三层模型及其均质等效模型进行激励，将二者观测信号归一化后如图2.4所示。三层模型的二分之一温升时间约为7.82ms；等效模型的二分之一温升时间约为6.75ms。二者相对偏差约15%。这意味着如果根据二分之一温升时间来计算面向导热系数，会有较大偏差。

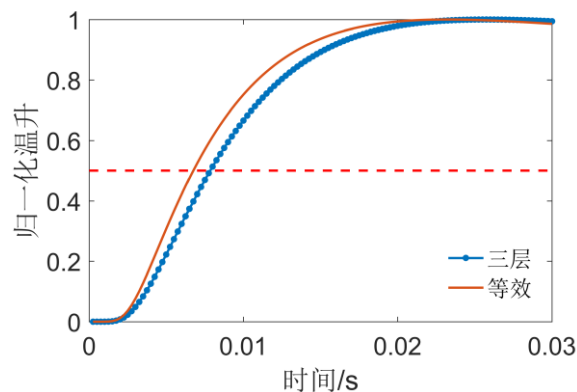


图 2.4 三层石墨膜和等效均值材料的闪光法测试模拟结果对比

若背胶石墨膜各层材料参数的厚度提高，则基于两种模型所测的导热系数差异会更大；反之，则差异减小。因此，若采用闪光法等瞬态方法测试背胶石墨膜的面向导热系数，由于应用场景与测试时的等效场景不一致，将引入较大



的系统性偏差。对于背胶石墨膜面向导热系数，应考虑使用稳态的测试方法。

## 2.3 热流环积分法基本原理

一般稳态法测试方法是测试样品上建立稳定的一维传热，再通过测量流经样品的热流及形成的温度梯度，最后根据傅里叶定律，可计算导热系数。

用热量传导量表示傅里叶定律，有：

$$q = -k_{\parallel} \cdot \frac{dT}{dx} \cdot A \quad (2-1)$$

其中 $q$ 为单位时间内通过给定截面的热量，单位为W。 $k_{\parallel}$ 为材料的导热系数，单位为W/(m·K)。 $A$ 为传热截面面积，单位为m<sup>2</sup>。 $T$ 为温度，单位为K。 $x$ 为在导热面上的距离，单位为m，则 $\frac{dT}{dx}$ 为截面方向上的温度变化率。

对厚度为 $D$ 的薄片以恒定功率的点热源持续加热，引起平面方向的热传导在待测薄片达到热平衡后，测量并记录薄片表面温度分布 $T(x,y)$ ，如图2.5。

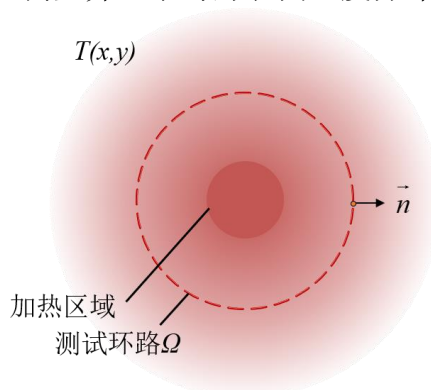


图 2.5 点热源激励下薄片表面温度分布

为降低对热源的要求，避免测试过程中热源非均匀激励产生的影响，本方法不利用单点热流密度来计算导热系数，而是对传热截面上的热流密度进行积分，利用热流总功率的连续性来计算导热系数。

选择一个完全截断薄片热传导的截面为测试截面，测试截面与薄片表面的交线为测试环路 $\Omega$ 。由于石墨膜厚度较小，可忽略其纵向温度梯度。根据薄片表面温度场数据，计算测试环路上各点沿法线方向的温度梯度并将其沿测试环路进行线积分。积分结果乘以薄片厚度，即为截面方向上的温度变化率与传热截面面积的乘积，有

$$D \cdot \oint_{\Omega} \frac{\partial T(x,y)}{\partial n(x,y)} dl = \frac{dT}{dx} \cdot A \quad (2-2)$$

其中点 $(x,y)$ 为测试环路上的点， $\partial T(x,y)/\partial n(x,y)$ 表示温度场在 $(x,y)$ 点沿环路

法线方向向外的方向导数。

估计通过测试截面的热流总功率 $q_n$ ，结合式（2-1）、式（2-2）得到待测薄片的面向导热系数 $k_{//}$ ，有

$$k_{//} = \frac{q_n}{D \cdot \oint_{\Omega} \frac{\partial T(x, y)}{\partial n(x, y)} dl} \quad (2-3)$$

本方法不利用单点热流密度来计算导热系数，而是对传热截面上的热流密度进行积分，利用热流总功率的连续性来计算导热系数，称之为“热流环路积分法”。因表面热损失和散热面积正相关，本方法可以通过减小测试区域，有效减小表面热损失，同时可以避免对流和辐射散热等因素干扰，从而提高测试区域表面热损失估计的准确性。

## 2.4 系统结构及测试模型

测试系统结构如图2.6所示，将样品平整地粘附于热源、隔热环和热沉的表面。电热片产生的热量经导热柱传至样品，并在样品上形成从中部向边缘的径向热传导。待测试系统达到热平衡状态后，热像仪在样品的正上方进行温度采集，记录样品表面温度场 $T(x, y)$ 。结合样品参数及加热功率等数据可计算样品的面向导热系数。

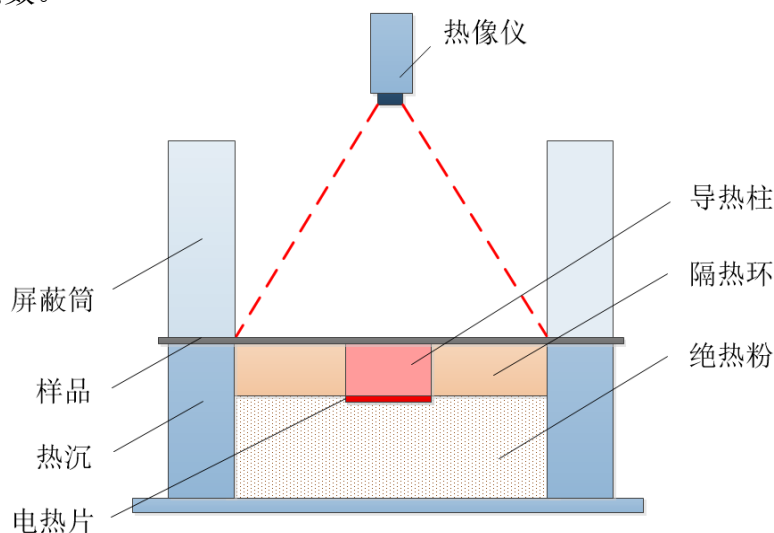


图 2.6 测试系统基本结构

测试系统中，导热柱与热沉均采用导热系数较高的铝合金制作，使二者在热平衡状态时可等效为匀热块。隔热环采用低导热系数的ABS树脂制成，置于导热柱与热沉之间，提供一定的热。同时，其硬度较高且易于加工，可保证测

试区域的平整，使较为柔软的石墨膜在贴附时不容易产生褶皱。

为了减少旁路热损失，使用绝热粉对隔热环与电热片下部区域进行填充。在样品上方放置屏蔽筒，减小测试区域周围空气扰动，降低对流换热引入的热损失，还可以减少环境杂散热辐射对热像仪测温的影响。

根据测试结构，电热片产生的热量在流经导热柱后，可通过以下三个路径传热：

- (1) 通过隔热环传递到热沉，记其功率为 $q_{ins}$ ；
- (2) 通过样品的面向传热至热沉，记其功率为 $q_n$ ；
- (3) 通过样品表面与环境的热交换，记其功率为 $q_{surf}$ 。

记热源功率为 $q_{heat}$ ，则系统热平衡时，根据能量守恒定律有：

$$q_{heat} = q_{ins} + q_n + q_{surf} \quad (2-4)$$

在样品表面选择一个位于隔热环上方的闭合测试环路 $\Omega$ ，使该环路完全包围加热区域。根据式（2-3），面向导热系数测量模型为：

$$k_{||} = \frac{q_{heat} - q_{loss}}{D \cdot \oint_{\Omega} \frac{\partial T(x, y)}{\partial n(x, y)} \cdot dl} \quad (2-5)$$

其中，热损失功率 $q_{loss}$ 为：

$$q_{loss} = q_{ins} + q_{surf} \quad (2-6)$$

式（2-5）中， $k_{||}$ 为背胶石墨膜总体的等效面向导热系数， $D$ 为石墨膜总厚度。由于石墨膜的绝缘层和胶层面向导热贡献几乎为零，因此， $k_{||}$ 亦可替换为裸材面向导热系数， $D$ 替换为裸材厚度。

对于热像仪采集到的样品表面温度场信息处理，关键是对沿环路法线方向向外的方向导数 $\partial T(x, y)/\partial n(x, y)$ 的准确计算。由于选取测试环路较小，为了降低可能存在的温度数据空间分辨率及测温噪声的影响，计算测试环路上各点的法向温度梯度时，利用该点行、列分项梯度拟合近似得到。

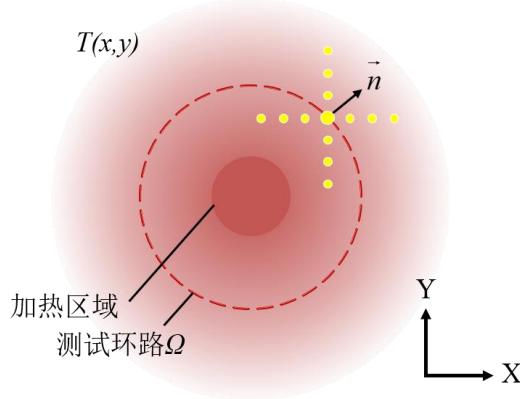


图 2.7 梯度计算方法

如图2.7所示，在样品表面温度场中建立直角坐标系，以描述两正交传热主轴方向，记为 $\mathbf{X}$ - $\mathbf{Y}$ 。对环路上的一点，分别沿其 $\mathbf{X}$ 轴、 $\mathbf{Y}$ 轴方向等间距取一系列采样点，通过多点拟合分析得到两方向的温度梯度。最后，根据二者沿测试点法线方向分量，计算得到该点的法向方向温度梯度。

## 2.5 本章小结

本章介绍背胶石墨膜的工作原理及多层复合结构的特点，分析多层薄膜导热系数的等效问题。验证瞬态测试方法测试背胶石墨膜面向导热系数时，存在应用场景与测试的等效场景不一致引入的系统性偏差。结合稳态的测试方法与热成像技术，提出热流环路积分法进行面向导热系数测量。对测量原理进行推导和分析，并简单介绍测试系统结构、测试模型与温度梯度的计算方法。

### 3 测试系统热损失模型分析与验证

上一章已介绍本文方法的测试模型，在热源产生的热量除了流经样品外，还有表面换热、隔热环传热等热损失途径。为提高测试结果的准确性，本章围绕热损失补偿开展研究，一方面基于传热模型分析，提出热损失补偿思路；另一方面通过仿真分析与实验验证，评估热损失补偿的可行性及效果。

#### 3.1 热损失模型分析及补偿

##### 3.1.1 热损失组成

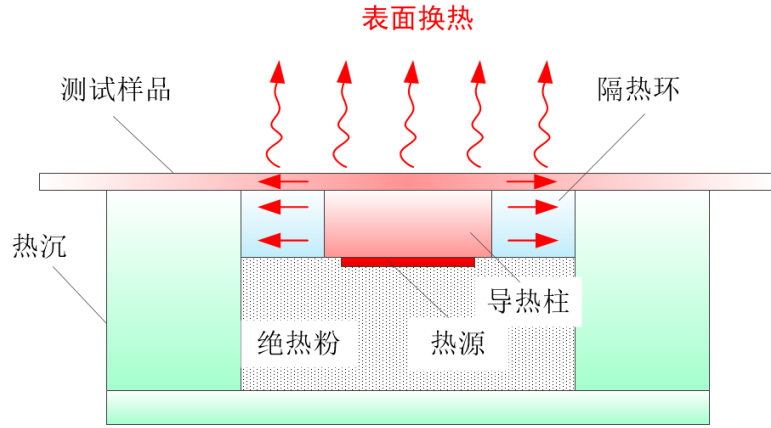


图 3.1 热损失主要途径

如图3.1所示，热损失主要途径可以用以下三个模型描述：

##### (1) 样品表面换热模型

根据 样品表面对流换热量 $q_{conv}$ ：

$$q_{conv} = h \cdot \sum_{(x,y) \in \Omega} (T(x,y) - T_a) \cdot s \quad (3-1)$$

式中 $\Omega$ 为测试环路所包围区域， $T(x,y)$ 为热像仪观测的每个像素位置的温度， $T_a$ 为环境温度， $s$ 为热像仪瞬时视场面积。

根据斯特藩-玻尔兹曼定律，样品表面辐射换热量 $q_{rad}$ ：

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \sum_{(x,y) \in \Omega} (T(x,y)^4 - T_a^4) \cdot s \quad (3-2)$$

综合式 (3-1) 与 (3-2)，样品表面热损失 $q_{surf}$ 为：

$$q_{surf} = q_{surf} + q_{conv} \quad (3-3)$$

## (2) 样品传热模型

$$q_n = \oint_{\Omega} k_{\parallel} \cdot \frac{\partial T(x, y)}{\partial n(x, y)} \cdot D \cdot dl \quad (3-4)$$

式中 $n(x, y)$ 为测试环路上该点法线方向单位长度,  $k_{\parallel}$ 为样品的面向导热系数,  $D$ 为样品厚度。

## (3) 隔热环传热模型

$$q_{ins} = \frac{T_{src} - T_{sink}}{R_{ins}} \quad (3-5)$$

$R_{ins}$ 为隔热环热阻,  $T_{src}$ 为导热柱温度,  $T_{sink}$ 为热沉温度。

综上, 结合热平衡方程电热片加热功率 $q_{heat}$ 为

$$q_{heat} = q_{ins} + q_n + q_{surf} \quad (3-6)$$

式中,  $q_{heat}$ 为通过隔热环传递到热沉的功率,  $q_n$ 为通过石墨膜面向传热至热沉的功率,  $q_{surf}$ 为通过石墨膜表面散热到环境的功率。

## 3.1.2 热损失标定方法

根据热损失模型可知, 隔热环传热功率由隔热环自身热阻、导热柱与热沉的温差共同决定。在合理可靠的稳态传热测试系统中, 隔热环热阻一般不会发生变化, 具有良好的重复性。其次, 样品表面热损失模型较为复杂, 但是在没有空气扰动、气压湿度较为稳定的测试场景中, 样品表面换热情况及温度分布变化较小, 通过石墨膜表面的散热功率也较为稳定。

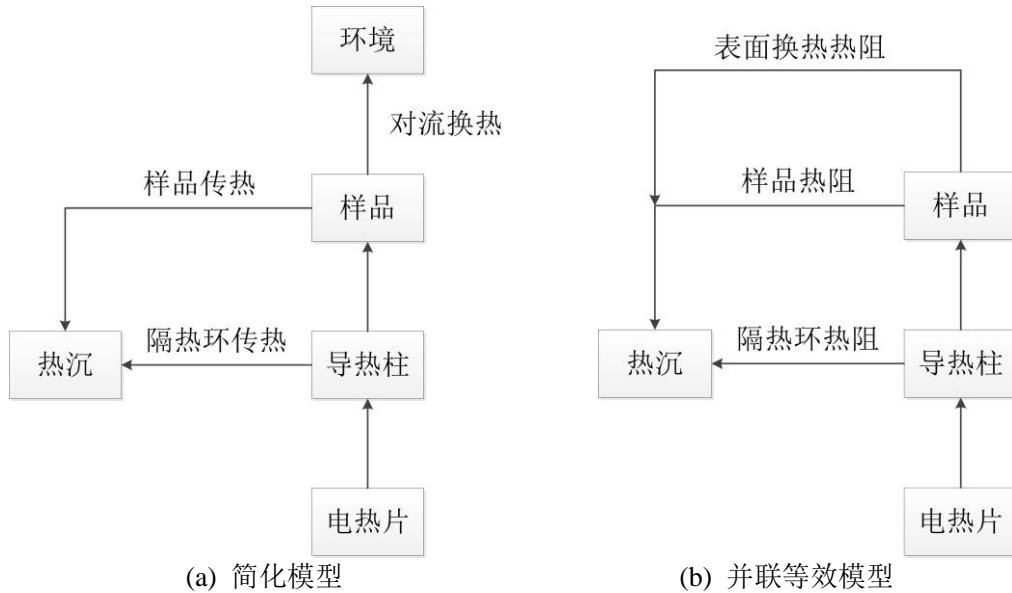


图 3.2 系统传热模型

根据传热途径划分, 热流可简化为如图3.2(a)所示的传热模型。由于测试系

统处于开放的环境下，环境与热沉温度相等，二者均可视为系统热沉。则将传热模型等效为如图3.2(b)所示的并联模型。因此可采用相同装置执行一次不粘贴样品的测试确定隔热环的损失功率。

为减小测试工作量，测试时可调节加热功率使得热源和热沉在热平衡时的温差及径向温度分布曲线与标定时相近，则热损失可近似如下计算：

$$q_{loss} = q_{heat,cal} \cdot \frac{T_{src,test} - T_{sink,test}}{T_{src,cal} - T_{sink,cal}} \cdot \alpha(r) \quad (3-7)$$

其中， $q_{heat,cal}$ 表示标定时的加热功率， $T_{src,cal}$ 、 $T_{sink,cal}$ 分别为标定时的热源、热沉温度， $T_{src,test}$ 和 $T_{sink,test}$ 为测试时的热源、热沉温度， $\alpha(r)$ 为不同半径的环路对应的热损失修正系数，可通过仿真得到。

为减小测试不确定度，每次测试前都应进行一次热损失标定。在测试环境发生显著变化时建议重新标定。

## 3.2 热损失补偿结果分析

### 3.2.1 热损失比例仿真分析

系统热激励环节需要准确测量电热片的加热功率、准确估计系统中的热损失，以保证流经测试环路功率的准确性。其中，电热片的功率可以通过电学的方法进行测量，测量结果的精度一般较高。而样品表面换热情况复杂，各次实验测温误差也可能存在差异，总体热损失不易准确估计。若是总热损失功率不大，则可保证热损失补偿对测试结果的影响较小。

为测试中热损失比例情况，通过数值仿真的手段进行分析。按照测试系统结构建立轴对称二维仿真模型，如图3.3所示。

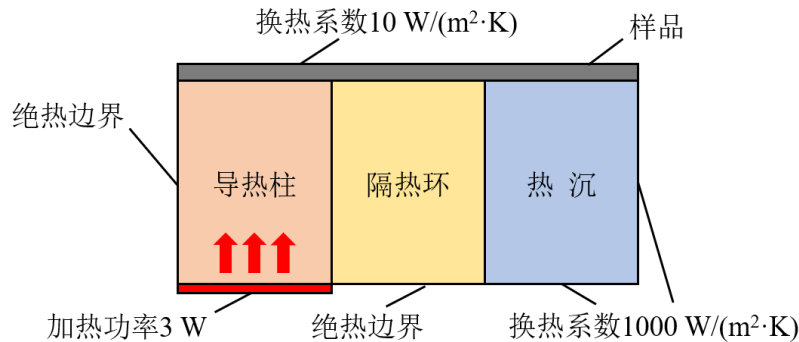


图 3.3 轴对称二维仿真模型

其中，样品参数如表2.1所示，设样品表面换热系数为 $10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ；导热柱

为铝柱，其直径为25mm；隔热环为ABS树脂环，其外径为50mm，导热系数为 $0.2\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ；热沉为铝环，其外径为75mm，外表面边界条件设为 $1000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，使其与环境温差较小；电热片功率为3W，在导热柱的下表面均匀加热。

仿真所得系统热平衡后的温度分布如图3.4所示，对比等温线可以发现，导热柱内部温度均匀，其与热沉的平均温差为 $19.6^\circ\text{C}$ ；隔热环内部等温线平行，说明其中热流为均匀地径向传热，与预期相符。

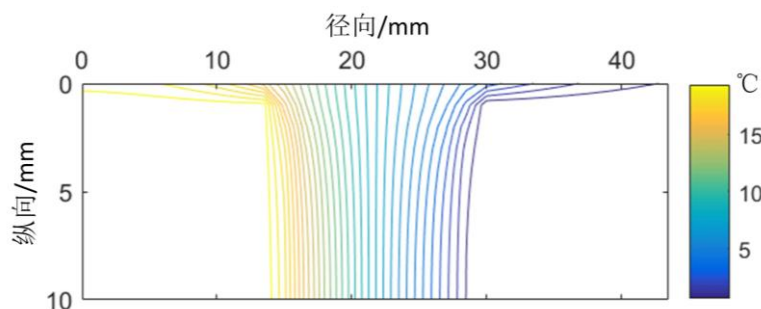


图 3.4 石墨膜面向导热系数测试时的温度场

样品表面换热模型较为复杂，需评估在与加热区域距离不同时，热损失是否存在较大差异。通过仿真分析导热柱与热沉之间的所有环路热损失情况，即在与系统中心径向距离为 $16.7\sim 26.7\text{mm}$ 处设置测试环线，得到选择不同半径环路测试时对应的热损失，如图3.5所示。选择与加热区域距离越远的测试环路，测试结果热损失越多，这些环路的热损失功率为 $0.53\sim 0.65\text{W}$ ，即占总热损失比为 $17.3\%\sim 21.7\%$ 。

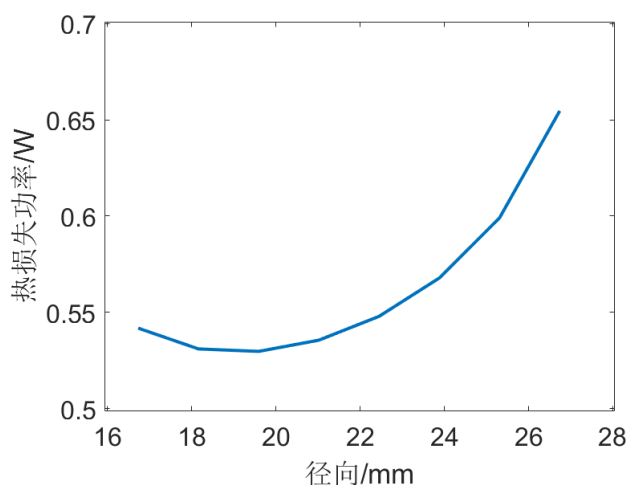


图 3.5 不同半径测试环线下的热损失

以 $21.0\text{mm}$ 处环线的测试为例，分析各项热损失占比情况。分别对样品与隔



热环的径向热流进行积分计算，得到样品面向传热功率为2.46W，隔热环径向传热功率为0.23W，可推算出样品表面热损失的功率为0.31W。即热损失占比约为总热损失的2/5。

若样品厚度更小，或导热系数更小，则样品的热阻增加，系统热损失比例也会增加。对比市场上主流的背胶石墨膜规格数据，测试中热损失占比通常在30%以内。因此，若在热损失标定环节存在10%的误差，将给导热系数测试结果引入约为3%的误差。

### 3.2.2 热损失补偿准确性验证

对不同T2、1060、304等6种不同牌号的金属薄片进行多次面向导热系数测试，并将测试结果与其导热系数参考值对比，分析热损失补偿前后测试结果的准确性。对比12次实验热损失补偿结果，如表3.1所示。在测试导热系数较小的304不锈钢样品时，存在较大的热损失的情况，本文方法也能进行有效的补偿。热补偿后的测试结果较补偿前的偏差整体降低，较补偿前的平均相对偏差为19.6%，补偿后降至4.4%，说明热损失补偿提高有效测试结果准确性。

表 3.1 热损失补偿前后准确性

实验序号	样品牌号	相对偏差	
		补偿前	补偿后
1	1060	20.9%	9.0%
2	1060	1.1%	3.8%
3	T2	0.1%	3.1%
4	T2	1.1%	5.1%
5	T2	2.2%	1.8%
6	304	70.6%	6.7%
7	304	51.9%	0.7%
8	304	54.7%	2.9%
9	H62	7.0%	3.1%
10	H62	0.3%	8.8%
11	5020	4.1%	4.0%
12	A3	21.5%	4.2%
均值		19.6%	4.4%

### 3.3 热损失补偿适用范围讨论

在实际测试中，不同测试条件下，系统存在不同程度的热损失。如选取的

分析区域离热源越远、加热功率越大，传热过程中热损失越大。若测试条件设置不好，导致热损失补偿失效，无法准确估计热流量。由于测试环路的选择范围与加热功率的设定范围对热损失影响较大，以下针对这两个测试条件进行热损失补偿适用范围进行详细讨论。

### 3.3.1 测试环路半径的选择范围

由于表面热损失和散热面积正相关，因此减小测试区域可以有效减小表面热损失。其次，测试区域表面的对流和辐射散热模型和周围环境有关，面积越大则干扰因素越复杂，减小测试区域面积可以提高对流和辐射散热模型的稳定性和重复性，从而提高测试区域表面热损失估计的准确性。因此选择测试环路应尽量小。

同时考虑在稳态传热过程中，不可避免在导热柱、隔热环与样品间存在一定的接触热阻，使导热柱的边界区域产生较大的温度突变，给测试结果引入较大不确定性。一般在选择环路时，其半径应预留比加热区域大15~20%的距离，避免接触热阻的影响。如设备中导热柱半径为12.5mm，则选取的测试环路半径应大于14.5mm。

选择不同测试环路，测试区域的表面换热引入的热损失也不同。若未对该影响进行补偿，直接使用电热片加热功率计算，所选择的环路半径越大，实际流经样品的热流功率越少，导致测得导热系数值虚高越多。

为分析不同测试环路测试下热损失补偿有效性，对比同一次测试中，分别选择15.0~18.0mm半径区间内的7个环路进行独立分析，补偿前后结果如图3.6(a)所示，补偿后不同环路的差异减小。

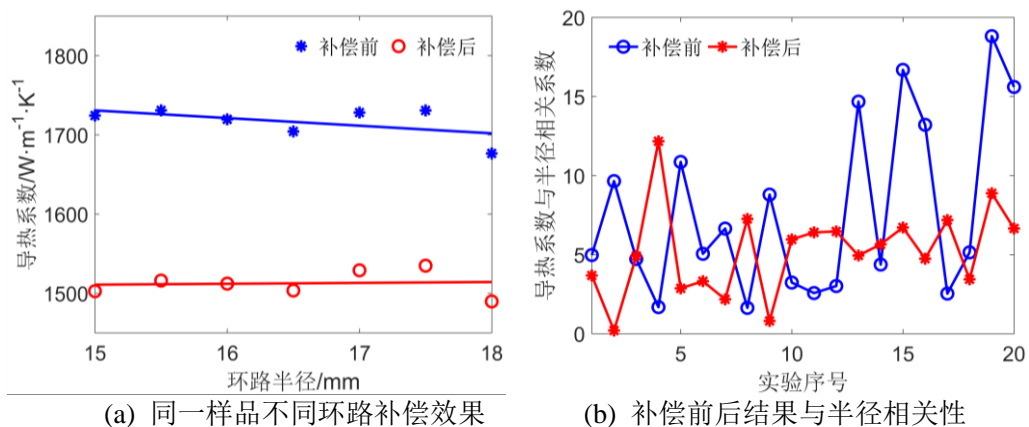


图 3.6 不同测试环路下热损失补偿效果

对不同款背胶石墨膜进行多次测试，分析各次测试结果与环路半径的相关

程度。如图3.6(b)所示,补偿后导热系数与半径相关性降低,多组实验相关系数的均值从补偿前的6.2降至补偿后的4.2,说明热损失补偿重复性较好。

综上所述,采用热损失补偿方法已能有效补偿半径为15.0~18.0mm测试环路的测试结果。

### 3.3.2 加热功率的设定范围

加热功率的设定首先需要考虑样品表面温度梯度的信噪比是否足够大,降低热像仪数据采集测温噪声的干扰的影响。在样品传热性能允许的情况下,测试系统处于热平衡状态时,热源与热沉的温差应比热像仪测温噪声大一个量级,使温度数据受测温不确定度影响较小。

但加热功率不能过大。由于热损失补偿方法是基于简化的测温模型设计的,在加热功率过大时,样品温度急剧升高,其对流换热系数发生变化,样品表面热损失模型将复杂化,隔热环与绝热粉引入的热损失增加,且不能简单地用线性模型描述,此时补偿方法将会失效。具体表现为进行热损失补偿后,不同加热功率下测试结果差异较大或测试结果与加热功率具有较强的相关性。

综合上述分析,设置加热功率使热源与热沉的温差为5~10℃为宜。为分析不同加热功率下热损失补偿情况,随机选用1.5~3.9W范围内的功率,对同一规格的背胶石墨膜进行测试,热源与热沉的温差区间为5.5~11.2℃。

热损失补偿前后的测试结果如图3.7所示。补偿后,测试结果一致性较好且与加热功率无明显相关性,说明在1.5~3.9W功率范围内热损失补偿适用。

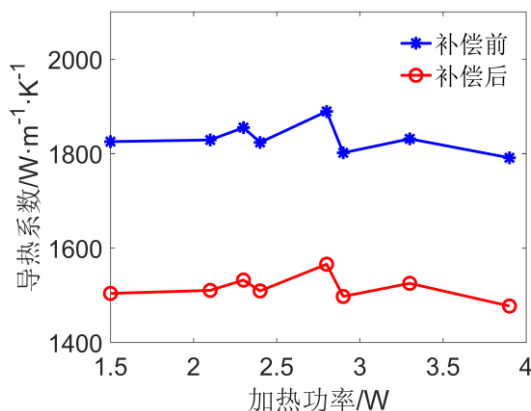


图 3.7 不同加热功率下热损失补偿效果

## 3.4 本章小结

本章根据测试模型,分析测试系统中存在的热损失路径,基于并联等效的

思路提出通过未放置样品的标定实验确定热损失功率并进行补偿。通过仿真评估背胶石墨膜的测试中热损失占比在30%之内，其标定误差对测试结果影响较小。分析多款金属薄片的测试，补偿后测试结果与文献参考值的相对偏差从19.6%降至4.4%，说明热损失补偿有效提高测试的准确性。最后讨论热损失补偿的适用范围，分析发现在15.0~18.0mm半径的测试环路下，1.5~3.9W功率范围内热损失补偿适用。

## 4 系统热平衡及稳定性分析

本文测试方法属于稳态的测试方法，即需要在系统处于热平衡状态下进行测量。由于测试模型的热损失补偿效果较好，理论上测试系统无需增加措施与外界隔绝，但是需要考虑系统的热平衡与稳定性。本章将围绕系统是否进入热平衡状态以及测试系统是否易受外界影响等问题进行研究。

### 4.1 系统热平衡及判断标准

对于与外界接触的物体，热平衡状态是指：在同一时间内，物体同外界以及物体内部各部分之间，吸收和放出的热量恰好相抵消的状态。

系统未达到热平衡状态时，测试系统与外界的热交换并未稳定，经过样品的热流量及系统热损失都有变化。结合环路积分法的测试原理，热流环路积分值与流经环路的热流量成正比，采用热流变化情况判断系统是否进入热平衡的最佳标准。

但考虑到热像仪在实验过程中实时观测温度场，并计算当前时刻的环路积分值，将会给测试系统增加不必要的数据存储与运算负担，且不利于多通道测试中对热像仪的复用，因此需寻找其他直观的指标作为判断标准。

根据稳态法的测试导热系数的原理，温度梯度的变化与热流量正相关。多数稳态测试方法的传热模型是一维传热，在冷端温度控制能力强的应用场景中，仅用试样温度变化情况也可作为判断热平衡的标准<sup>[52]</sup>。

由于热流环路积分法计算导热系数时，为了消除热源激励不均匀的影响，测试结果是基于闭合环路上各点法向温度梯度情况综合分析而得，而非简单的一位传热模型。若采用两个热电偶分别检测加热区域与热沉区域的温度，以二者温差变化情况作为判断热平衡的标准，则需要分析单一方向的冷热端温差与热流变化情况是否具有足够的相关性。

仿真分析开始测试后60min中，测试系统中冷热端温度变化与流经样品的热流量变化情况如图4.1(a)所示。流经样品热流量在13.6min后的变化不超过1%，认为系统已进入热平衡状态。冷、热两端温差在13.4min后变化不超过1%。

绘制二者相关性变化曲线如图4.1(b)，在13.4min时二者相关程度已达到99.7%，并随时间推移无限接近于100%。由此可知，样品面间传输的热流量与冷热端温差变化相似度高，冷热端温差达到热平衡时也可等同于测试系统达到

热平衡，可作为判断系统热平衡的指标。

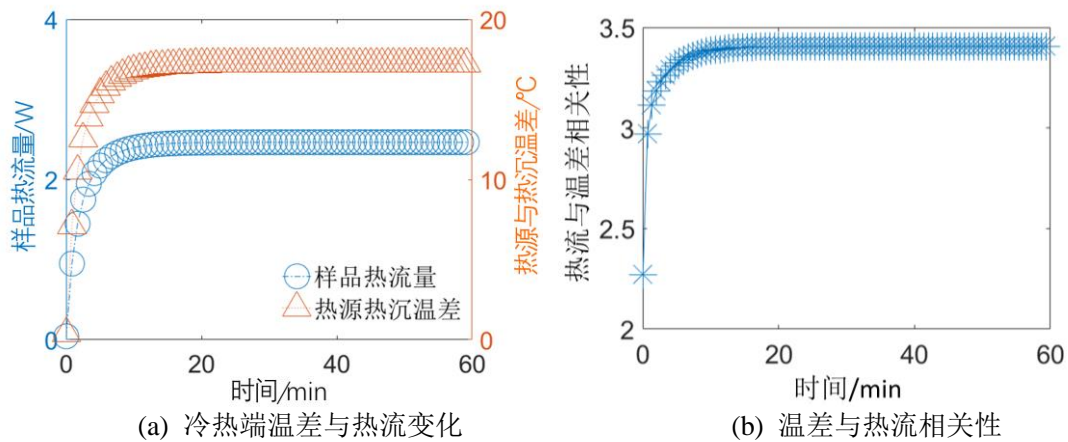


图 4.1 冷热端温度与样品热流的相关性

在实际操作过程中，还需多观测5min的温度数据，以辅助判断温差是否趋于稳定，结合热电偶测温精度及测试系统的热传递情况，认为当导热柱与热沉温度梯度在5min内变化不大于0.2°C时，测试系统达到热平衡状态，此时测得数据有效。

## 4.2 热平衡时间优化

为提高测试效率，根据传热模型优化系统进入热平衡所需时间。系统热平衡表现为加热、传热、冷却各环节的热流均恒定。由于加热环节中，电热片提供功率的稳定；传热环节中，导热柱与隔热环需要根据热损失情况设计，而样品是测试过程中的自变量，不应对其性能过分约束。热平衡时间的优化主要考虑热沉参数影响。

建立如图4.2的仿真模型，分别对热沉的导热系数、热容量、换热能力对热平衡时间的影响进行分析。其中，换热能力包括换热表面积与对流换热系数。

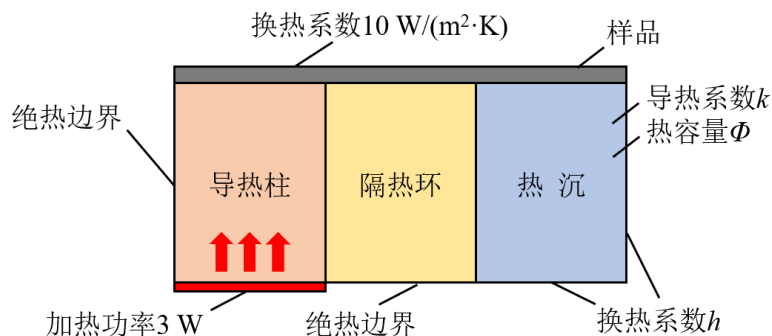


图 4.2 轴对称二维仿真模型

仿真得到热沉材料的各参数变化对系统热平衡时间影响，如图4.3所示，发现热平衡时间对热沉的导热系数较为敏感。由图4.3(a)曲线可知，热沉的导热系数与热平衡时间成负相关，当导热系数大于 $100\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时，热平衡时间基本稳定在 $13.6\text{min}$ 附近，再增加热沉导热系数对热平衡时间已无明显改善。

热容量、换热能力对热平衡时间的影响如图4.3(b)、(c)两图所示。当热沉材料的导热系数较高时，无论这两个参数放大至现有模型的万倍还是降低百倍，测试系统进入热平衡状态所需的时间几乎不发生改变。而当热沉材料的导热系数较低时，热容量与热平衡所需时间成反比。此时可通过增加的热容量来优化热平衡时间。

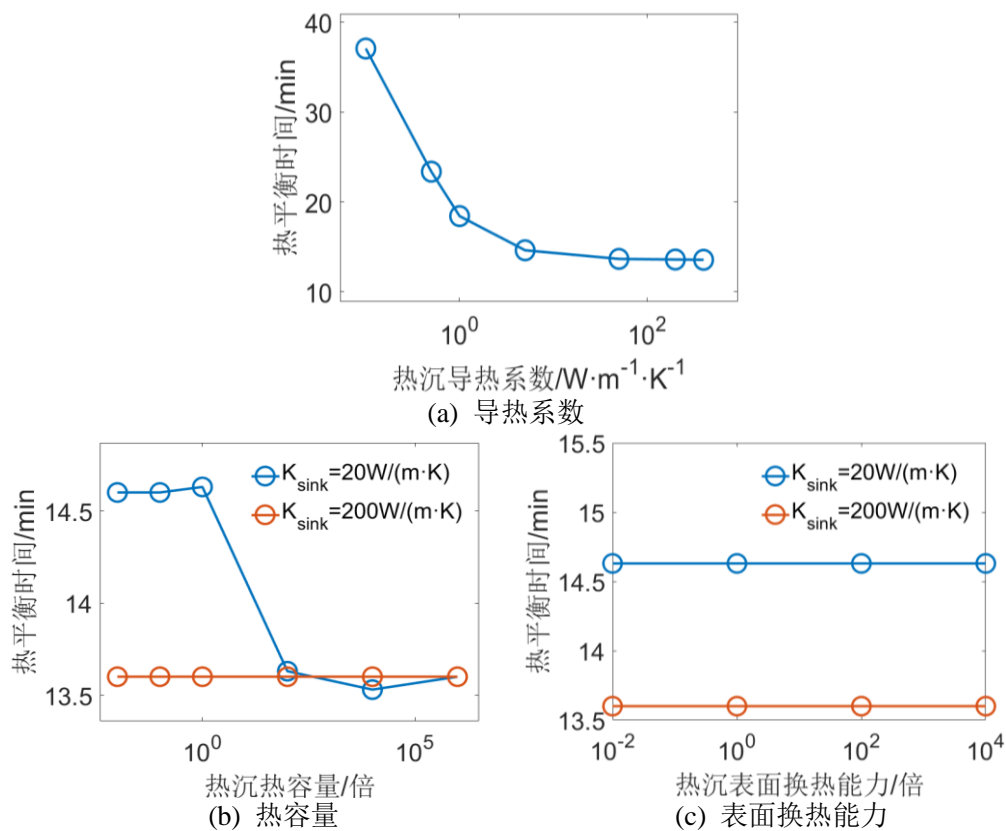


图 4.3 热沉参数与热平衡时间的影响

因此，选择导热系数较高的铝合金制作热沉，测试常见的背胶石墨膜，测试系统仅需 $10\sim 30\text{min}$ 可达到热平衡。

#### 4.3 环境变化对系统稳定性的影响

与一般的稳态方法需要对加热主体采用真空或绝热等保护措施不同，本测

试方法在室温稳定时,采用第3章所述的热损失补偿后,即可直接进行测试。若环境温度波动较大时,对于本文测试系统,样品表面与热沉外侧是暴露于空气中,可与环境空气进行对流换热,需要讨论室温波动对系统的稳定性的影响。

以某次样品表面热流为2.5W的实验为例,假设各表面换热系数 $h=10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,定量讨论干扰热量 $Q_N$ 对测试的影响。

#### 4.3.1 对样品热传导的影响

分析环境干扰热在样品表面影响原本稳定的对流换热的情况。假设该干扰仅通过对流换热传递,分析该干扰对测试系统原本流经样品的热量产生多大比例的影响。

根据对流换热公式,有

$$Q_N = h \cdot A \cdot (T_{air} - T_{test}) \quad (4-1)$$

其中A表示样品表面积,其值为 $2.87 \times 10^{-3} \text{m}^2$ , $T_{air}$ 与 $T_{test}$ 分别表示环境温度与样品温度。代入数据,可推导出干扰热流量与环境样品温差的关系:

$$Q_N = 0.0115 \times (T_{air} - T_{test}) \quad (4-2)$$

进而可评估不同程度热损失对应的室温变化情况,如图4.4所示。若希望环境干扰对测试产生的影响小于10%,则应保证测试过程中室温变化尽量小于 $10.2^\circ\text{C}$ 。

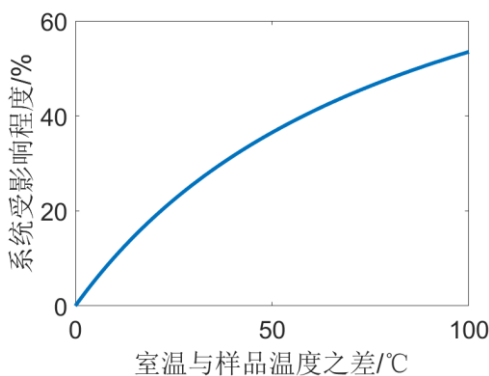


图 4.4 表面受脉冲干扰热损失影响比例

#### 4.3.2 热沉缓冲能力评估

由于热容量较大,对于环境温度的变化,热沉可起到较大的缓冲作用。

假设环境变化引入的干扰量全部被热沉吸收,不考虑其他影响。计算热沉升温 $0.2^\circ\text{C}$ 需要的热量 $\phi_{sink}$ ,有

$$\Phi_{sink} = c_{sink} \cdot m_{sink} \cdot \Delta T_{sink} \quad (4-3)$$



其中 $c_{sink}$ 、 $m_{sink}$ 分别为热沉的比热容与质量。 $\Delta T_{sink}$ 为热沉温升温度。

并假设干扰热量 $Q_N$ 仅通过对流换热的方式对热沉产生该影响，有

$$Q_N = h_{sink} \cdot A_{sink} \cdot (T_{air} - T_{sink}) \quad (4-4)$$

其中，热沉为铝合金所制，代入铝合金的热物性及热沉的规格参数，可得 $Q_N=15.30W$ 。结合热沉对流换热面积等数据进行计算，可得到测试过程中，热沉可缓冲温度变化小于 $55.7^{\circ}C$ 的环境干扰。

由于实际情况中还需要考虑样品、隔热环等其他传热途径，热沉所起的缓冲作用会有所减弱。

#### 4.3.3 增强系统稳定性措施

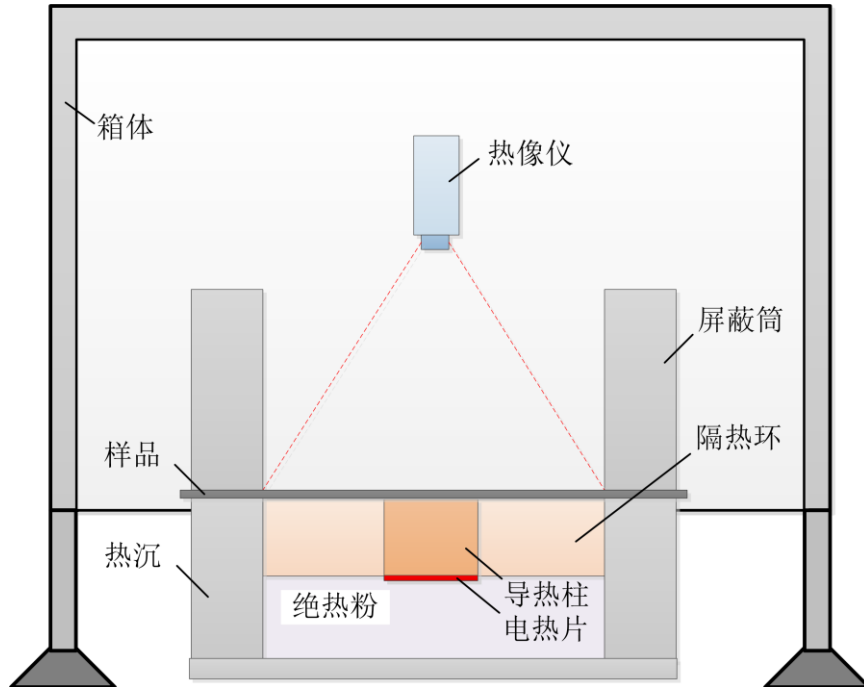


图 4.5 系统稳定性装置优化

由前文分析知，系统稳定性关键环节为样品表面及热沉外侧的对流换热，且样品表面更易受室温波动的影响，因此需要对样品上方的空间进行适当的绝热。如图4.5所示，在装置实现上，在样品上方放置屏蔽筒可以减少样品表面空气对流。同时，为了更好地隔绝外界温度扰动，将加热平面及以上的部分置于相对密闭的箱体内。在的室温波动较大的测试环境中，可在箱壁适当增加保温措施。

此外，由于热沉的热容量大，在传热过程中是缓冲外界室温波动干扰的重要环节。由式（4-4）可知，在保证各环节导热正常的前提下，理论上热沉的热

容量越大，测试系统稳定性也越好。因此，若希望进一步改善稳定性，可增加热沉的体积，或改用比热容更大的材料，甚至对采用恒温水浴等方式确保热沉温度恒定。

#### 4.4 本章小结

本章围绕系统热平衡状态及稳定性展开分析。首先介绍测试可采用样品热流量或冷热端温差作为系统热平衡状态的判断标准，并详细阐述其依据。其次从热沉的导热系数、热容量、换热能力角度讨论热平衡时间优化的可能性。优化后，测试系统仅需10~30min可达到热平衡。最后分别分析样品及热沉二者表面换热情况对测试系统的稳定性的影响，验证系统稳定性的同时，基于该分析提出增强测试系统稳定性的措施。

## 5 热像仪测温影响分析

温度梯度的准确测量是保证导热系数准确测量的重要环节。而实际测温中，会受到环境与热像仪内部测温特性的干扰，比如：石墨膜表面发射率较低，环境中的杂散光可能影响传入热像仪辐射强度；热像仪测温模型中存在一定非均匀性与时变情况，同时，该影响采用热像仪内置的非均匀性校正（nonuniformity correction, NUC）无法有效解决等问题。本章主要从样品表面发射率与热像仪的测温两部分进行分析环境上述影响。

### 5.1 样品发射率及环境杂散光

石墨膜质地柔软，具有一定延展性，可用石墨膜成品上的双面胶粘贴于测试平面。石墨裸材为银灰色、略带金属光泽的薄膜，发射率较低。查表知石墨化后的碳在100℃时，表面发射率仅为0.76。石墨膜成品背侧通常用胶粘贴透明或黑色哑光或镜面光滑的绝热膜，由于材料及工艺存在不确定性，因此石墨膜成品的表面发射率也没有固定的值，且发射率都较低，不能直接应用于定量的红外测温场景中。

由于在测试前对样品进行表面发射率测试的成本较高，为降低环境中杂散光的影响，考虑在测试前给石墨膜的观测面上均匀喷涂高发射率的黑体漆，如图5.1。选用TASCO红外测温专用的合成树脂涂料黑体漆，其标称发射率为0.94，满足测试要求。由于黑体漆的面向导热系数远低于测试样品，同时喷涂过程保证漆层均匀平整，因此发射率引入的不确定度较小。

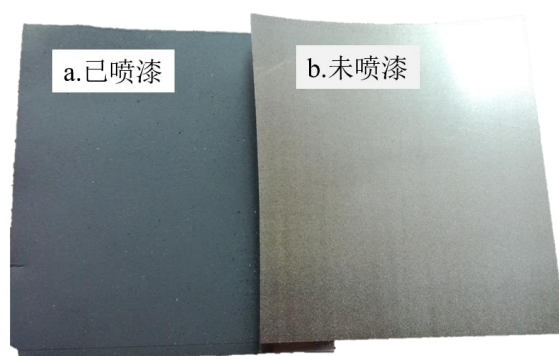


图 5.1 背胶石墨膜样品

为避免测试环境中的杂散光进入热像仪干扰测试数据，将观测部分置于的

相对密闭的箱体内部，同时在样品上方设计屏蔽筒，在一定程度上屏蔽热像仪与样品辐射传递路径中的杂散光干扰，同时降低样品上表面空气对流换热对系统热平衡状态的影响。

## 5.2 测温时变与非均匀性分析

测试中石墨膜表面温度变化约为 $10^{\circ}\text{C}$ ，因此热像仪输出灰度值和观测目标辐射温度之间关系可用如下线性模型描述：

$$T_o = g \cdot D + b + n \quad (5-1)$$

其中， $T_o$ 表示目标辐射温度， $D$ 表示热像仪输出灰度值， $g$ 为增益系数， $b$ 为偏置系数， $n$ 为随机噪声。式（5-1）中 $g$ 和 $b$ 与时间有关，即反映其时变特性；与空间有关，则反映其非均匀性。

根据式（5-1）， $T_o$ 的误差可根据标定时 $g$ 和 $b$ 引入的误差综合分析得出。根据式（2-5），若偏置系数 $b$ 与位置无关，则在计算温度梯度时并不会传递不确定度；而增益系数 $g$ 的测试不确定度会直接传递至温度梯度计算结果。非均匀性是指不同像元的增益系数和偏置系数不一致，该误差会通过梯度计算和线积分传递至测试结果。时变特性是指像元的增益系数和偏置系数可能随时间发生变化。若不考虑时变特性，则标定、非均匀性校正，即可有效降低测温影响。但由于时变特性的存在，给标定过程带来误差，也导致非均匀性校正失效。因此时变特性是测温不确定度的关键因素。

### 5.2.1 验证方法

为考察热像仪时变情况评估其影响，设计热像仪对两个恒温对象的观测实验。通过对比两不同温度物体的热图，评估增益系数时变特性；持续观测恒温对象，获得偏置系数随时间变化信息。

验证系统示意图如图5.2(a)所示。其中，观测对象A为表面喷涂黑体涂层的铜板，使其温度稳定于室温，并利用热电偶实时测量其温度以确保其温度波动小于 $0.1^{\circ}\text{C}$ ；观测对象B为中温精密黑体辐射源LUMA SENSER M310H，使之稳定在 $42^{\circ}\text{C}$ 。热像仪采集到的热图像如图5.2(b)、(c)图所示。

黑体辐射源的温度稳定性指标为8小时内波动 $0.5^{\circ}\text{C}$ ，可近似视作恒定辐射源。同时，为减小黑体标靶非均匀性的影响，仅对视场中心局部区域数据进行分析。

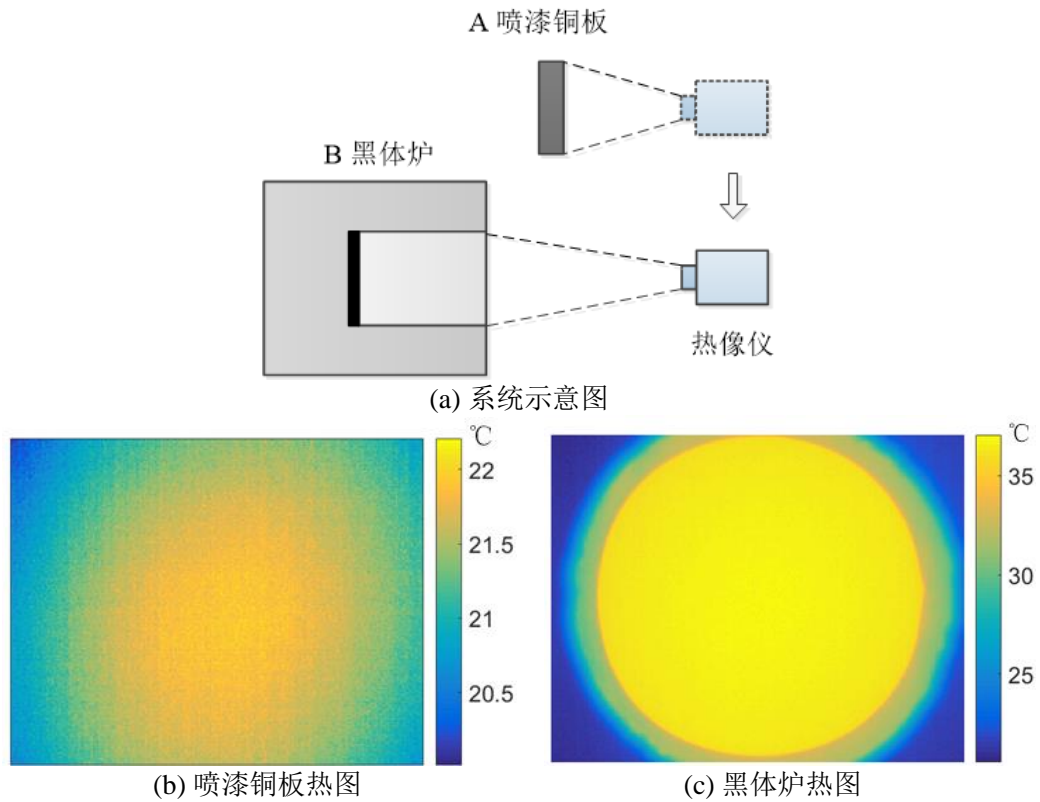


图 5.2 时变特性验证系统

### 5.2.2 结果分析

基于上述对比实验，分析增益系数时变特性、增益系数的非均匀性、偏置系数的时变特性及偏置系数的非均匀性。

#### (1) 增益系数时变特性

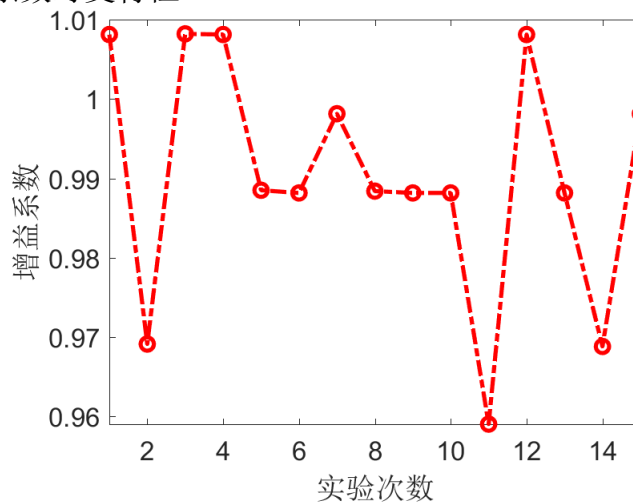


图 5.3 增益系数时变情况

通过一天内多组实验分析增益系数的时变特性，考查铜板A和黑体辐射源B的热像仪测温值相对实际温度的增益系数。如图5.3，15次测量标准差仅为0.015，与随机噪声水平相当，增益系数时变情况不剧烈，因此可以忽略该影响，而将其折合在随机噪声中考虑。

### （2）增益系数的非均匀性

为评估增益系数在焦平面上非均匀程度，考察A、B热图各点增益量的均匀情况，如图5.4所示。其中，空间上均值分布的标准差为0.004，可见增益系数非均匀性不明显，亦可折合到随机噪声中，基本可忽略。

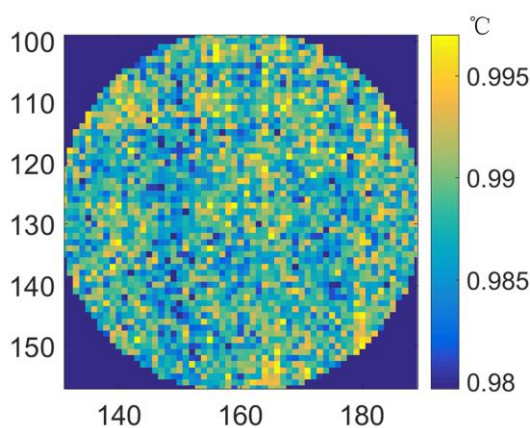


图 5.4 增益系数非均匀性

### （3）偏置系数的时变特性

偏置系数的时变特性表现为持续观测物体时的测温波动，分析铜板热图中像元随时间变化情况，最糟糕的像元测温变化曲线如图5.5。在8min内该点测温值有明显上升趋势，曲线同时表明观测过程中伴随近1.5℃的测温升高。

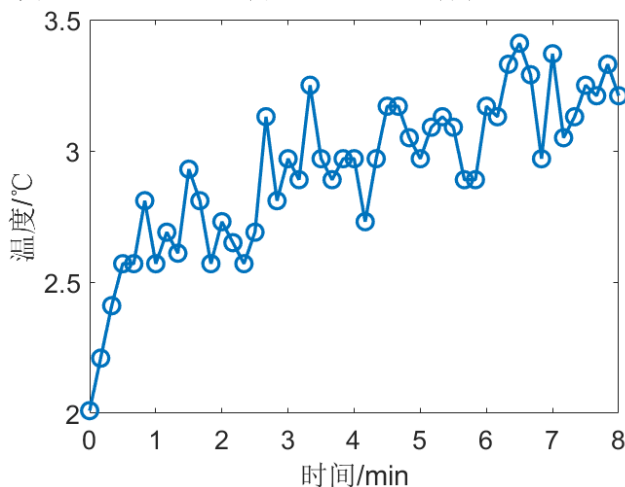


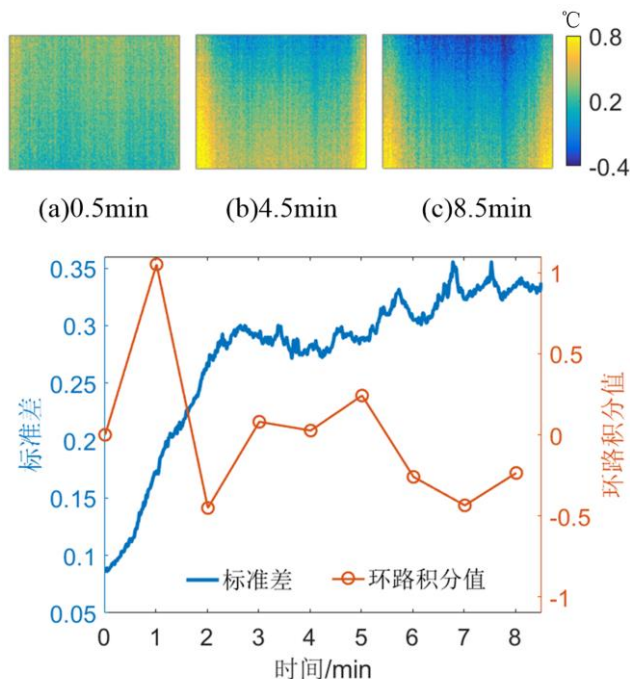
图 5.5 偏置系数时变特性

#### (4) 偏置系数的非均匀性

如图5.2(b)铜板热图像,图中存在中心高温、边缘低温的非均匀分布,两区域温差高达 $3^{\circ}\text{C}$ ,热像仪内置的NUC也无法消除,需要寻找合适的评价手段定量描述该非均匀分布。

常见非均匀性评价方法倾向于采用标准差及其变式作为指标,对视场整体进行非均匀性评估<sup>[53,54]</sup>。为准确描述上述具有明显形状特征的非均匀现象,同时兼顾本测试中误差传递,采用环路积分值作为非均匀性的评价指标。用环路上各点径向温度梯度的积分结果描述环路两侧温度变化的剧烈程度。该影响可等效为虚假的内部热源的叠加干扰,积分值绝对值越接近零,说明非均匀性对测试结果的影响越小。取半径为55个像素的环路分析图5.2(b)铜板热图,计算得环路积分值为1.98。

图5.5已说明像元测温存在漂移现象,由于焦平面由多个像元组成,该现象势必造成焦平面测温偏置系数非均匀性变化。以NUC时刻为初始时刻,对比不同时刻与初始时刻铜板热图之差的变化情况,如图5.6(a)、(b)、(c)。8.5min内,不同测温区域已产生约 $1^{\circ}\text{C}$ 的偏差。如图5.6(d)所示,环路积分值变化趋势不明显,而采用标准差变化曲线呈明显上升趋势,在20s、75s、160s时,标准差分别达到0.1、0.2、0.3,表明非均匀现象随时间推移加剧。



(d)标准差与环路积分值随时间变化情况

图 5.6 相对初始时刻非均匀性时变情况



综上所述，热像仪增益系数与位置无关，可忽略其对测试结果的影响。而热像仪的非均匀分布与实际测试时样品表面温度场分布相近，因此测温不确定度来源主要为偏置系数。

同时，在采用单一黑体辐射源对增益系数进行标定的场景下，需要约20min的等待时间，以保证黑体温度稳定。由于测温偏置系数存在时变，标定时不同时刻对同一温度点的10次测量极差高达 $1.96^{\circ}\text{C}$ ，导致增益系数标定结果的相对标准差为8.20%。

因此增益系数的非均匀性与时变特性对热流环路积分法测试过程的影响可以忽略，因此对测试结果的影响仅考虑增益系数标定的结果及偏置系数的影响。综合二者，测试结果不确定度为8.68%。其中，偏置系数时变是主要不确定来源，需要考虑采用合适的校正手段降低时变对标定与测试的影响。

### 5.3 基于外部合作黑体的实时校正

#### 5.3.1 外部合作黑体校正方法

常规处理非均匀性的方法有基于图像处理或统计学的场景校正法与基于标准辐射源的校正方法<sup>[55-57]</sup>。前者会导致一定的数据失真，不利于后续定量的数值分析，因此采用标准辐射源的校正思路。

根据短时间内测温噪声小于长时间测温漂移，且短时间内非均匀性分布稳定的特点，结合标准辐射源的校正思路，提出合作黑体校正方法。该方法用热像仪观测外部标准物，以获得偏置系数非均匀分布情况，进而用该分布修正实测热图非均匀性。

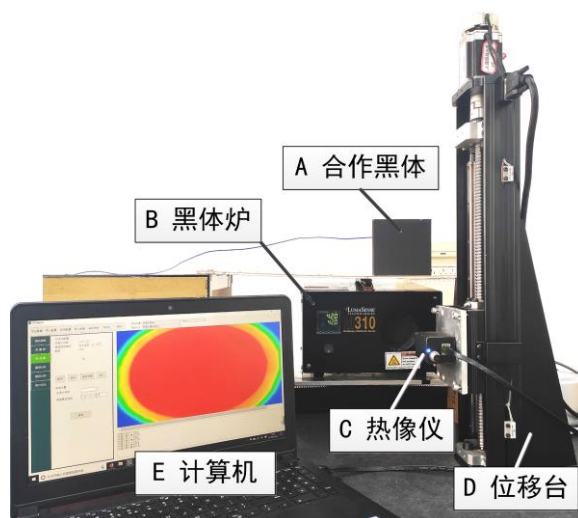


图 5.7 合作黑体校正装置



以增益系数标定实验为例，介绍合作黑体校正系统，如图5.7。系统由合作黑体、观测对象、热像仪、一维运动平台与计算机组成。与时变特性验证平台类似，A罩内为合作黑体，即控温的喷漆铜板；B罩内为测试对象，即黑体辐射源；C为FLIR A35热像仪；D为一维运动位移台，每隔1min将热像仪运动到A或B之前，记录一次热像仪测温数据，A、B两热图之差即为校正结果图；E为计算机，对实验数据进行处理分析。

校正的误差来源取决于合作黑体的均匀性，可以全部折合到随机噪声。而随机噪声可在积分过程中消除，保证该措施的有效性。

由于执行热像仪NUC后，像元特性在一定时间内较为稳定<sup>[57]</sup>，因此建议两种校正措施同时施行。根据上述对非均匀性时变情况分析，若希望测温标准差小于0.1，建议在获得校正数据后20s内完成测试对象的数据采集。

### 5.3.2 合作黑体校正效果分析

图5.8(a)、(b)分别为室温黑体热图校正前后效果，非均匀分布强度明显减少。对比校正前后热图的标准差，校正前标准差0.51，校正后标准差0.06。对比合作黑体修正前后，不同环路的环路积分值，如图5.8(c)。校正后十个环路的环路积分值均值从2.35减小至0.22，校正后标准差为0.22，说明该校正方法有效。

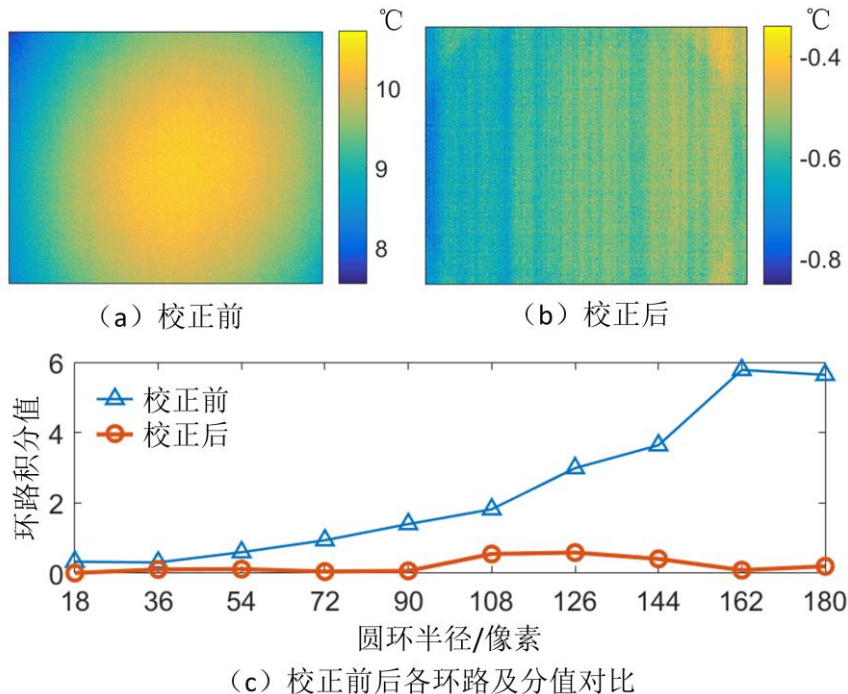


图 5.8 合作黑体校正后非均匀性效果

结合合作黑体校正方法与两点法，用黑体辐射源对热像仪进行增益系数标定，结果如图5.9。增益系数标定结果均值1.01用于热像仪测温修正模型中，而多次标定的标准差仅为0.01，相对标准差为0.99%。相比校正前的8.20%，改善明显。

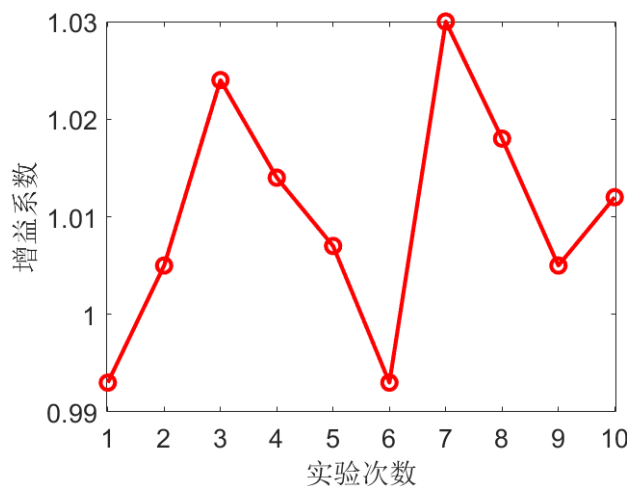


图 5.9 增益系数标定结果

## 5.4 本章小结

本章对热流环路积分法的测温模型影响因素进行分析，提出热像仪增益系数标定和偏置系数非均匀性是主要不确定度来源，且二者均受时变特性影响。基于两个恒温辐射源对热像仪时变特性实验分析，认为增益系数均匀且稳定，而偏置系数时变且非均匀，为测温不确定度的主要来源。因此提出使用外部合作黑体在20s内进行实时偏置系数校正的措施，校正后偏置系数非均匀性引入的影响降低至0.37%，增益系数标定结果相对标准差为0.99%。

## 6 实验验证测试系统

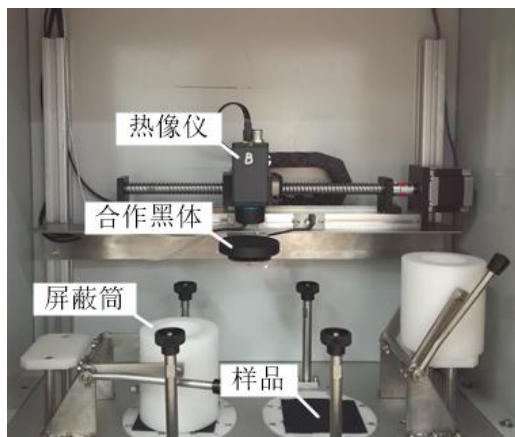
综合第二~五章对测试系统优化的成果，本章搭建面向导热系数自动化测试平台，并采用该平台测试不同材料、不同规格的样品，对本文测试方法的有效性进行验证。最后就实际测试过程中样品等效参数问题进行讨论。

### 6.1 测试平台搭建

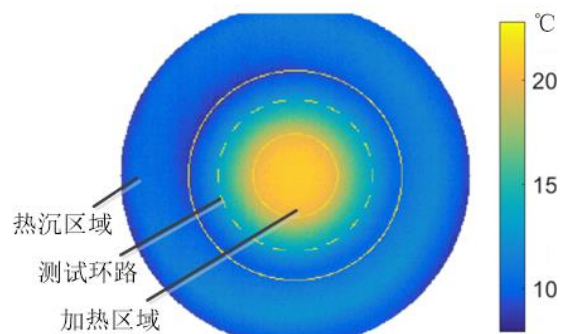
#### 6.1.1 实验装置搭建

如图6.1(a)所示，为提高测试效率，设计可同时进行双路测试的实验装置。各测试单元中，采用陶瓷电热片给样品提供稳定的热激励，为保证导热柱与热沉温差约为5~10摄氏度，电热片功率可根据样品实际热阻进行调节。测试过程中实时监测导热柱与热沉的温度，并根据二者温差判断系统是否进入热平衡。当测试系统进入热平衡状态后，根据回路中的电压电流可计算得到实际的加热功率。并用热像仪FLIR A35采集样品表面温度场，其像素分辨力约为0.3mm。

为抑制随机噪声的影响，热平衡后，热像仪以50Hz帧频持续采集500帧数据，某次实验观测得到的温度场情况如图6.1(b)所示。对测试环路的温度梯度值进行积分，环路上各点的温度梯度通过左右（或上下） $\pm 2\text{mm}$ 区域内数据直线拟合得到。根据加热功率、热损失功率、样品厚度与环路积分值可计算出样品的导热系数。样品表面需均匀喷涂红外测温专用的黑体漆，并使用其标称发射率对测试结果进行修正。



(a) 实验装置



(b) 温度场数据

图 6.1 实验装置和热平衡时的温度场数据

### 6.1.2 软件平台设计

基于MFC与OpenCV开发一款与测试装置配套的上位机软件。操作者完成装样后，通过该软件可实现自动化测试，自动控制测试的启停、判断系统的稳定，并计算出测试结果。软件界面如图6.2所示，主要分为以下几个功能区域：

（1）控制区域：该区域可手动控制测试的启停、测试参数的导出与导入，具备离线分析、参数存档功能。

（2）显示区域：实时显示样品表面的温度分布情况，并具备单点温度监控、感兴趣区域显示、区域均值计算等功能。

（3）参数区域：在该区域可配置热像仪、热激励及样品的参数，测试结果将根据这些参数计算导热系数。同时可进行热像仪的开断、自动对焦、NUC等预调试操作。

（4）信息区域：反馈软件操作状态及测试状态，在测试过程中，能实时监测导热柱与热沉温度数据，并输出系统是否进入热平衡状态的判断结果，测试结束后输出测试结果。

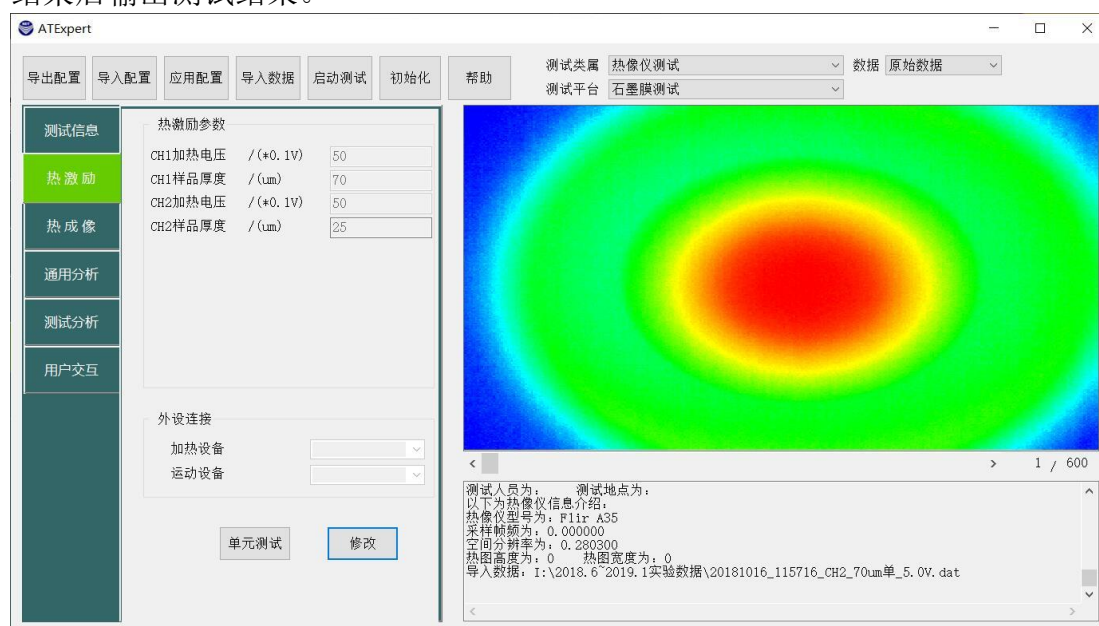


图 6.2 上位机软件界面

软件对外有两大数据交互对象，一是下位机，软件通过串口与其进行通讯，可实现配置热激励参数、读取热电偶数据、控制运动平台启停与运动速率等功能。其次是与热像仪交互，通过 GigE 协议，可完成热像仪寄存器参数配置及热成像数据的高速读取。

软件内部实现的测试流程如图 6.3 所示。用户放置样品、配置参数后，点击“开始测试”按键，程序自动完成电热片加热功率控制、电机运动、热像仪实时采集数据，在信息栏实时更新导热柱与热沉温度及热图像，并自动判断系统是否进入热平衡。待系统进入热平衡后，采集合作黑体及样品表面温度场数据，用环路积分法分析，并输出导热系数测试结果。

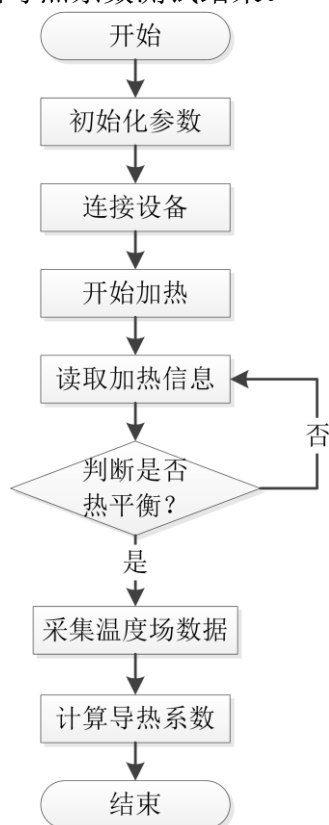


图 6.3 测试流程图

### 6.1.3 控制系统设计

测试装置需要下位机能与上位机进行交互，可根据上位机指令控制加热的启停，并能给样品实施稳定的热激励，同时向上位机反馈准确的加热功率及热源与热沉温度实时数据等信息，以判断系统是否进入热平衡。

此外，为了满足两装置同时测试及对热像仪校正，下位机还需实现热像仪的在两通道与合作黑体上方定点运动。

为满足这些需求，基于STM32F103开发嵌入式测控系统，其系统框图如图 6.4所示。

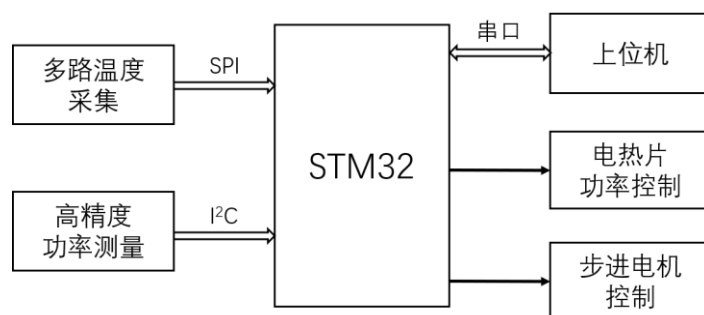


图 6.4 下位机系统框图

测控系统各部分设计思路如下：

(1) 在各路测试装置的导热柱、热沉处分别置入T型热电偶。采用MAX31856对热电偶进行温度补偿及温度数据的转换。通过油浴测温实验，与标准铂电阻数据进行对比，拟合修正后测温误差小于1%。实现对导热柱与热沉温度的准确测量，为基于此的测试系统热平衡的判断及热损失的标定实验提供保障。

(2) 在负载回路中串联 $0.05\Omega$ 的采样电阻，采用INA219对电热片的电压及采样电阻的电压进行测量，进而计算电热片的实际加热功率。与示波器测试结果对比，电压测量偏差0.08%，测得回路中电流偏差0.62%，测量功率误差小于1%，满足对加热功率准确测量的要求。

(3) 与上位机之间通过RS232串口通信，根据上位机指令，设置测试装置的热激励功率与启停。其中各帧数据格式为：帧头、命令码、数据、检验和、帧尾组成。其中，帧头、帧尾均由两个固定字符组成；命令码根据通讯数据或指令进行分类，约定封装与解析时的指令或数据的类型与格式。为了保证传输的可靠性，对各帧数据进行异或校验，同时上下位机收到数据后均返回应答帧。

(4) 由于需要根据不同测试场景需供给不同加热功率。加热装置为陶瓷电加热片，其电阻值约 $9\sim 14\Omega$ 。为使功率在 $0.5W\sim 10W$ 范围内可调，调压单元将输入电压15V电压转化为程序控制的输出电压，实现电热片供给电压在 $2\sim 12V$ 可调，调节步长小于 $0.1V$ 。

(5) 采用丝杆滑台承载热像仪进行一维运动，通过调节给步进电机输入的信号，使热像仪可在合作黑体、两通道的测试样品上方往返或悬停。

(6) 内置故障判断措施，对导热柱温度数据进行监控，以防加热区域过热等情况；同时对配置参数进行约束，增加紧急停止热激励及丝杆运动功能，确保测试装置的安全性。

## 6.2 测试结果

### 6.2.1 重复性评估

从三家石墨膜企业采购多种规格的产品进行重复性测试。对A企业七款样品进行测试，每种规格分别取3个样品，测试结果如表6.1所示，各组测试的相对标准差均在3%以内。

表 6.1 A 企业石墨膜样品测试结果

石墨膜规格	测试 1	测试 2	测试 3	均值	标准差	相对标准差
17 $\mu\text{m}$ 单层背胶	945	977	984	969	20.8	2.1%
17 $\mu\text{m}$ 双层背胶	529	524	539	531	7.6	1.4%
25 $\mu\text{m}$ 单层背胶	672	674	667	671	3.6	0.5%
25 $\mu\text{m}$ 双层背胶	800	829	805	811	15.5	1.9%
40 $\mu\text{m}$ 单层背胶 a 款	681	663	657	667	12.5	1.9%
40 $\mu\text{m}$ 单层背胶 b 款	642	660	651	651	9.0	1.4%
40 $\mu\text{m}$ 双层背胶	725	713	755	731	21.6	3.0%

注：实验结果为导热系数，单位： $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

对B企业的三种厚度的背胶石墨膜进行重复性测试结果如图6.5(a)，厚度为17 $\mu\text{m}$ 、25 $\mu\text{m}$ 、32 $\mu\text{m}$ 样品的相对标准差分别为3.28%、1.50%、2.13%。

对C企业基于批次25 $\mu\text{m}$ 的裸材而采用不同背胶方案的三款石墨膜样品进行测试，测试结果如图6.5(b)所示。石墨膜原膜、单层背胶、三层背胶样品的相对标准差分别为0.64%、0.69%、0.42%。

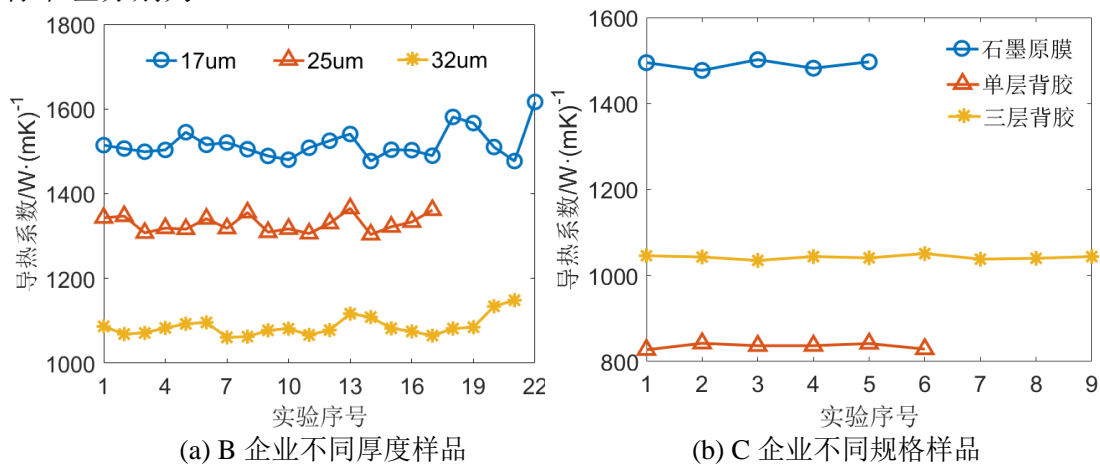


图 6.5 导热系数重复性测试结果

三家企业样品几组重复性测试中，相对标准差最大为3.28%，说明本方法的



测试结果一致性较好。

### 6.2.2 准确性评估

由于背胶石墨膜缺乏权威参考导热系数，为评价本文测试方法的准确性，选择具有热物性参考值的金属薄片作为测试对象，验证测试方法的准确性。购入紫铜、黄铜、铁、纯铝等六种导热系数较高的金属材料，并制备成不同厚度的薄片作为样品。测试结果如表6.2所示，对比各材料的文献中的参考导热系数，本文方法的测试结果相对偏差最大一次测试为10.2%，除该次实验之外，其余测试偏差均在10%以内。

表 6.2 金属薄片准确性验证实验

编号	材料	厚度/mm	参考值	测试值	相对偏差/%
1	T2	0.39	407	386	-5.1
2	T2	0.39	407	400	-1.8
3	T2	0.58	407	394	-3.1
4	H62	0.39	108.9	115	5.7
5	H62	0.48	108.9	108	-0.5
6	A3	0.3	80	83.3	4.2
7	A3	0.49	80	71.8	-10.2
8	5020	0.46	138	132	-4.0
9	1060	0.17	234	255	9.0
10	1060	0.17	234	255	9.0
11	1060	0.46	234	225	-3.8
12	304	0.34	16	17.1	6.7
13	304	0.44	16	16.1	0.7
14	304	0.44	16	16.5	2.9

注：实验结果为导热系数，单位： $W/(m \cdot K)$ 。

## 6.3 关于等效参数的讨论

### 6.3.1 裸材参数与背胶石墨膜等效参数

理论上，结合裸材的测试数据与各胶层参数，可以计算背胶石墨膜的性能参数。为考查裸材与背胶石墨膜测试数据一致性，对裸材参数与背胶石墨膜等效参数进行分析。

要求B厂家按照其正常生产流程及质检要求，对各规格背胶石墨膜的裸材取



样测试，并提供测试数据，如表6.3所示。三款规格的裸材样品密度基本一致，面向导热系数最大相差约13%。

表 6.3 裸材样品的闪光法测试数据

石墨裸材规格	实际厚度 ( $\mu\text{m}$ )	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
17 $\mu\text{m}$	18	1.979	1588
25 $\mu\text{m}$	26	1.882	1398
40 $\mu\text{m}$	40	1.978	1464

由于背胶石墨膜中，石墨裸材的面向导热系数远大于胶层的面向导热系数。因此在面向导热过程中，后者的贡献可忽略不计。理论上背胶石墨膜的等效导热系数可以通过裸材的面向导热系数进行估算：

$$k_{\parallel, \text{eff}} = k_{\parallel} \cdot \frac{D_{\text{graph}}}{D_{\text{total}}} \quad (6-1)$$

其中， $D_{\text{graph}}$ 、 $D_{\text{total}}$ 分别为石墨裸材厚度与背胶石墨膜总厚度， $k_{\parallel}$ 、 $k_{\parallel, \text{eff}}$ 分别为石墨裸材面向导热系数与背胶石墨膜等效导热系数。

根据式（6-1）对各规格背胶石墨膜的导热系数进行预测，并将其与表6.1中本文方法测试结果对比，如表6.4所示。

表 6.4 石墨膜样品测试数据和基于裸材预测的数据对比

石墨膜规格	厚度 ( $\mu\text{m}$ )	实测密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	预测密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	预测导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	实测导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	相对偏差
17 $\mu\text{m}$ 单层背胶	35	1.785	1.424	771	969	23%
17 $\mu\text{m}$ 双层背胶	90	1.002	1.308	600	531	-12%
25 $\mu\text{m}$ 单层背胶	40	1.317	1.514	874	671	-26%
25 $\mu\text{m}$ 双层背胶	80	1.548	1.514	874	811	-7.5%
40 $\mu\text{m}$ 单层背胶 a 款	65	1.354	1.563	901	667	-30%
40 $\mu\text{m}$ 单层背胶 b 款	55	1.222	1.684	1065	651	-48%
40 $\mu\text{m}$ 双层背胶	125	1.467	1.590	937	731	-25%

对比发现理论预测的背胶石墨膜等效导热系数与本文测试结果存在较大差异，且大部分测试值比预测值偏高，最大偏差高达48%。

由于前文已通过金属薄片等样品验证本文的测试方法的准确性，远小于该

误差。因此猜想该差异可能源于样品标称参数与实际参数不符，即在样品制作过程中，单、双层背胶工艺可能引入误差，使背胶样品各层厚度、各层密度等的实际参数与各层标称参数可能存在较大差异，导致式（6-1）描述的预测公式有较大偏差，使实测值与预测值的偏差很大。

为考察该猜想的可能性，整理出各规格样品的厚度与密度数据实测值，如表6.3所示，并基于裸材密度与背胶石墨膜各层厚度等参数，按式（6-2）对背胶石墨膜的平均密度进行预测。

$$\rho_{est} = \frac{\rho_c \cdot D_c + \rho_g \cdot (D_{total} - D_c)}{D_{total}} \quad (6-2)$$

其中， $\rho_c$ 为裸材密度， $\rho_g$ 为胶层的平均密度，取近似值 $0.9\text{g/cm}^3$ ，因石墨的密度远大于其它材料的密度，因此 $\rho_g$ 存在小量误差也对后续分析结论影响不大； $D_c$ 为裸材厚度， $D_{total}$ 为背胶石墨膜的总厚度。

将背胶石墨膜的导热系数实测值与预测值作差，密度的实测值与预测值作差，得到二者关系如图6.6所示。可以发现，导热系数的偏差与密度的偏差存在正相关性，当导热系数实测值偏高时，实测密度也偏大。在背胶石墨膜中石墨的密度比其他材料的密度大，因此密度偏大说明其中石墨材料占比更大，背胶石墨整体导热系数也偏高，存在合理性。因此，背胶石墨膜与基于裸材的测试数据预测值不一致，最大可能是源于产品的标称参数不够准确。

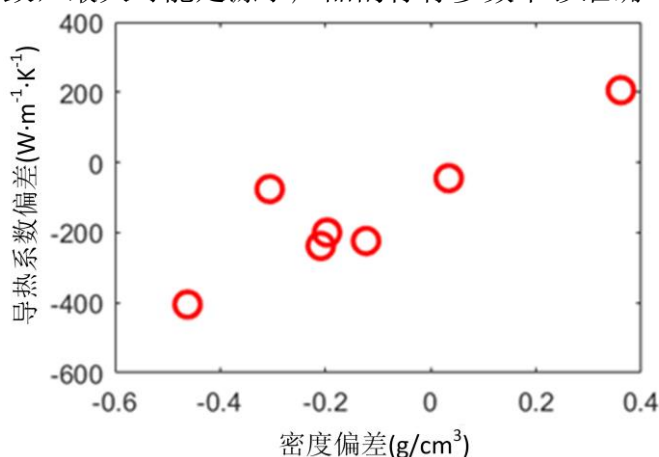


图 6.6 背胶石墨膜样品密度偏差和导热系数偏差

用本文方法对C企业三种裸材来源相同的不同规格样品进行测试，分别将测试结果等效为背胶石墨膜导热系数与裸材导热系数，如表6.5所示。发现三款样品等效裸材导热系数基本一致，分别为1491、1504、1487。由于三种规格样品的裸材来源相同，该等效导热系数相近，与预期相符。

表 6.5 裸材来源相同的三种规格样品测试数据

规格	总厚度 ( $\mu\text{m}$ )	裸材厚度 ( $\mu\text{m}$ )	等效背胶石墨膜导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	等效裸材导热系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
裸材	25	25	1491	1491
单层背胶	45	25	835.6	1504
三层背胶	107	75	1043	1487

综合B、C两企业样品的等效裸材参数与背胶石墨膜的情况，发现不同厂家的品质控制存在较大差别。若基于裸材的测试数据，直接对背胶石墨膜的导热系数等效分析，将有较大可能引入其他参数误差的风险。在此情况下，直接测量背胶石墨膜的面向导热系数，在实际应用过程中是有必要的。

### 6.3.2 等效厚度

待测参数为“等效面向导热系数”。使用热流环路积分法进行测试，其基本公式如下：

$$\text{等效面向导热系数} = \frac{\text{传热截面热流总功率}}{\text{温度梯度环路积分} \times \text{等效厚度}} \quad (6-3)$$

根据等效导热系数这个参数的使用场景不同，计算时使用的“等效厚度”也不同，从而导致数值上存在差异。一般有如下三种做法：

(1) 使用石墨膜标称总厚度计算：如果导热系数测试结果是用于热设计的仿真分析，且仿真模型中是将整个石墨膜用一种单一均匀材质来近似，则应该使用石墨膜标称厚度计算，该计算结果称为“等效石墨膜导热系数”；

(2) 使用石墨膜中裸材部分的标称厚度计算：石墨膜厂家会提供裸材的导热系数值，如果希望将背胶石墨膜测试结果与该数据对照，且石墨膜中除石墨材料外其它材料对面向传热贡献可忽略，则可以使用裸材标称厚度计算；该计算结果称为“等效裸材导热系数”；

(3) 使用样品实测总厚度计算：这种方法计算得到的是测试样品的实际等效导热系数，但这种方法得到的导热系数值，在用于分析石墨膜散热性能时需要结合石墨膜实际厚度进行，因此使用不方便，对热设计、生产环节的品质控制等实践指导意义不大。

## 6.4 本章小结

本章介绍自动测试平台的搭建，上、下位机的设计思路及测试流程。并采

用该测试平台进行重复性与准确性验证。测试多种规格背胶石墨膜产品进行重复性实验，结果表明相对标准差在4%以内；14个金属薄片样品进行测试，结果与文献数据的相对偏差都在11%以内。对本文方法测试数据和基于裸材参数理论估计值的差异进行讨论，发现基于裸材数据计算背胶石墨膜导热系数的做法，容易引入其他参数误差，实际应用中应直接测试背胶石墨膜参数。

## 7 总结与展望

### 7.1 总结

目前行业内一般采用闪光法等瞬态方法对石墨裸材进行测试，并将其测试结果作为性能指标，暂时缺少直接测量背胶石墨膜面向导热系数的方法。而采用瞬态测试方法测试，存在应用场景与测试时的等效场景不一致情况，将引入较大的系统性偏差。石墨膜用户在热设计和产品质量管理中需要一种能够直接测试背胶石墨膜面向导热系数的简单方法。

因此提出热流环路积分法测试背胶石墨膜的面向导热系数，并对该方法中热损失、热像仪测温、热平衡状态等关键环节进行分析，研制一台针对背胶石墨膜的面向导热系数测试装置，并获得以下成果：

(1) 针对背胶石墨膜的准稳态工作场景及多层复合结构的特点，提出热成像技术与稳态方法结合的热流环路积分法进行导热系数测试。该方法通过对小区域热流的环路积分消除传热不均匀引起的测量误差，降低测试过程中的热损失，避免一般稳态法中复杂的绝热措施。

(2) 针对测试模型中样品表面换热及隔热环热传导引入的热损失，基于并联传热等效模型的分析，提出通过未放置样品的标定实验确定热损失功率并进行补偿。通过仿真评估背胶石墨膜的测试中热损失占比在30%之内，其标定误差对测试结果影响较小。分析多款金属薄片的测试，补偿后测试结果与文献参考值的相对偏差从19.6%降至4.4%，说明热损失补偿有效提高测试的准确性。

(3) 对热流环路积分的测温模型影响因素进行分析，认为热像仪偏置系数时变且非均匀，为测温不确定度的主要来源。因此提出使用外部合作黑体在20s内进行偏置系数校正的措施。校正后偏置系数非均匀性引入的影响降低至0.37%，增益系数标定结果相对标准差为0.99%。

(4) 研制一台面向导热系数自动测试装置，并对其稳定性进行评估，对热平衡时间进行优化。通过实验验证该测试装置的准确性与重复性，采用14个金属薄片样品进行测试，结果与文献数据的相对偏差都在11%以内；采用多种规格背胶石墨膜产品进行重复性实验，结果表明相对标准差在4%以内。对本文方法测试数据和基于裸材参数理论估计值的差异进行讨论，发现基于裸材数据计算背胶石墨膜导热系数的做法，容易引入其他参数误差，实际应用中应直接测试背胶石墨膜参数。

## 7.2 展望

相较其他导热系数测试方法，热流环路积分法优势在于能直接测量背胶石墨膜的导热系数且无需复杂的绝热或制样措施。通过理论和仿真分析以及实验研究，验证本文测试系统的稳定性，且从重复性与准确性两个角度验证该方法的有效性。但因论文工作时间有限，热流环路积分法还可对以下几个方面进行拓展研究：

（1）现阶段工作已验证测试背胶石墨膜的可行性，而该方法的测试对象并不局限于文中所提到的石墨膜或金属薄片。理论上其他薄膜材料都在该方法的适用范围内，因此对该方法的测试对象可进一步丰富。

（2）热流环路积分法可基于很小的测试区域进行，测试结果代表的只是该局部区域内材料的表观导热系数，因此可拓展该方法用于评估非均匀材料在平面内面向导热系数的分布特性。

（3）本文以背胶石墨膜在电子设备散热等低温应用为测试背景，仅了解样品在室温环境下的导热能力。而在中高温应用场景下，其热物参数随温度变化的特点不可忽略，因此将本方法拓展至中高温环境，可进一步研究样品热物性。

## 参考文献

- [1] 周春玉, 曾亮, 吉莉等. 石墨烯及其复合材料导热性能的研究现状[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(6): 94-100.
- [2] 何龙.  $3\omega$  法在薄膜界面热阻测量中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [3] 厉阳. 基于热成像的薄型材料热扩散率快速无损检测[D]. 杭州: 中国计量学院, 2016.
- [4] 张建生, 杨君友, 朱文等. 薄膜热导率测试方法研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(7): 103-107.
- [5] 杨杰. 平面热源法对建筑保温材料热导率和热扩散率的测试研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [6] 贾斐霖, 李林, 史庆藩. 稳态法测算导热系数的原理[J]. 材料科学与工程学报, 2011, (4): 609-613.
- [7] 蔡北虎, 董德平, 屈金祥. 国产石墨薄膜低温导热系数测量[J]. 低温工程, 2008, (1): 29-32.
- [8] 吕安新. 薄膜热物性的测试系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [9] 宋青林. 薄膜热学特性研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2004.
- [10] Aaron K, Tang X, Tritt T M. Measurement of the in-plane thermal conductivity of single crystals by the parallel thermal conductance technique[C]. South Carolina, USA: IEEE, 2005: 87-90.
- [11] Teertstra P, Karimi G, Li X. Measurement of in-plane effective thermal conductivity in PEM fuel cell diffusion media[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(3): 1670-1675.
- [12] Alhazmi N, Ismail M S, Ingham D B, et al. The in-plane thermal conductivity and the contact resistance of the components of the membrane electrode assembly in proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2014, 270(4): 59-67.
- [13] Sadeghi E, Djilali N, Bahrami M. A novel approach to determine the in-plane thermal conductivity of gas diffusion layers in proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(7): 3565-3571.
- [14] Jo I, Pettes M T, Kim J, et al. Thermal Conductivity and Phonon Transport in Suspended Few-Layer Hexagonal Boron Nitride[J]. Nano Letters, 2013, 13(2): 550-554.
- [15] Jang W, Bao W, Jing L, et al. Thermal conductivity of suspended few-layer graphene by a modified T-bridge method[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(13): 133102.1-133102.5.
- [16] H. J. Goldsmid, M. M. Kaila, G. L. Paul. Thermal conductivity of amorphous silicon[J]. Physica Status Solidi, 2006, 76(1): K31-K33.
- [17] Jo I, Pettes M T, Lindsay L, et al. Reexamination of basal plane thermal conductivity of suspended graphene samples measured by electro-thermal micro-bridge methods[J]. AIP Advances, 2015, 5(5): 053206.1-053206.12.

- [18] 姜辉. 基于石墨烯/铜复合材料的散热薄膜导热性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [19] 张乃华. 基于 TPS 法的薄膜导热系数测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [20] Gholami A, Ahmadi M, Bahrami M. A modified steady state method for measurement of in-plane thermal conductivity[C]. Alabama, USA: IEEE, 2016: 22-26.
- [21] 徐立强, 王欣, 赵乾等. 红外热成像法测量薄膜热物理参数[J]. 光学技术, 2019, 45(06): 641-646.
- [22] Greppmair A, Stoib B, Saxena N, et al. Measurement of the in-plane thermal conductivity by steady-state infrared thermography[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(4): 1-8.
- [23] 厉阳, 侯德鑫, 叶树亮. 基于热成像的材料热扩散率测量方法研究[J]. 计量学报, 2017, 38(01): 28-33.
- [24] 刘建庆, 孙建平, 陈跃飞. 非稳态法测量材料热扩散率方法综述[J]. 计量技术, 2009, (12): 26-29.
- [25] 王强. 基于保护平面热源法的隔热材料热物性测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [26] 蔡岸. 薄膜材料热物性及其测试新装置的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [27] 徐珊. 基于瞬态电热技术微尺度材料热扩散率和导热系数的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [28] 翟德怀. 基于 Hot Disk 的薄板材料导热系数测量方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [29] Zacharia S G, Siddiqui A O, Lahiri J. In situ thermal diffusivity determination of anisotropic composite structures: Transverse diffusivity measurement[J]. NDT & E International, 2012, 48: 1-9.
- [30] 项永亮, 周亚素, 王思. TCI 导热仪测试材料导热系数的影响因素分析[J]. 中国测试, 2016, 42(7): 136-140.
- [31] Mendioroz A, Fuente-Dacal R, Apinaniz E, et al. Thermal diffusivity measurements of thin plates and filaments using lock-in thermography[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(7): 074904.1-074904.9.
- [32] 陈玉凤. 光热偏转技术测量非金属薄膜的热物性[D]. 济南: 济南大学, 2008.
- [33] 李颜龙. 基于  $3\omega$  方法的薄膜热导率测试系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [34] Parker W J, Butler C P. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity[J]. Appl Phys, 1961, 32: 1679-1684.
- [35] 王晓娜, 厉阳, 侯德鑫等. 基于热成像的薄片材料热扩散率快速无损检测[J]. 计量学报, 2016, 37(3): 260-264.
- [36] Ruoho M, Valset K, Finstad T, et al. Measurement of thin film thermal conductivity using the laser flash method[J]. Nanotechnology, 2015, 26(19): 195706.1-195706.6.



- [37] Chu F I, Taylor R E, Donaldson A B. Thermal diffusivity measurements at high temperatures by the radial flash method[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(1): 336-341.
- [38] Lee S, Kim D. The evaluation of cross-plane/in-plane thermal diffusivity using laser flash apparatus[J]. *Thermochimica Acta*, 2017, 653: 126-132.
- [39] Ruffio E, Saury D, Petit D. Improvement and comparison of some estimators dedicated to thermal diffusivity estimation of orthotropic materials with the 3D-flash method[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 64(64): 1064-1081.
- [40] 刘珊, 徐梁, 曾智强. 微米级超薄石墨膜的导热性能测试[J]. *炭素*, 2017, (04): 42-45.
- [41] Gustafsson S E, Karawacki E, Khan M N. Determination of thermal conductivity tensor and the heat capacity of insulating solids with the transient hot-strip method[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52(4): 2596-2600.
- [42] 朱玉祥. 改进型瞬态平面热源法的实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [43] Lei Z, Zhu S K, Pan N. Transient Methods of Thermal Properties Measurement on Fibrous Materials[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2010, 132(3): 39-51.
- [44] Santos W N D, Santos J N D, Mummery P, et al. Thermal diffusivity of polymers by modified angstrom method[J]. *Polymer Testing*, 2010, 29(1): 107-112.
- [45] Zhu Y. Heat-loss modified Angstrom method for simultaneous measurements of thermal diffusivity and conductivity of graphite sheets: The origins of heat loss in Angstrom method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 92(1): 784-791.
- [46] 王勇, 戴景民. 材料热扩散率的非稳态测量与应用[J]. *功能材料*, 2015, 46(S1): 5-10.
- [47] Chen G, Tien C L, Wu X, et al. Thermal diffusivity measurement of GaAs/AlGaAs thin-film structures[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1994, 116(2): 325-331.
- [48] 许自强, 唐祯安, 黄正兴等. 基于交流量热法的薄膜热扩散率自动测试系统的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, (08): 797-800.
- [49] 邓玉杰. 基于  $3\omega$  法体块和薄膜材料热物性的研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [50] Alvarez-Quintana J, Rodriguez-Viejo J. Extension of the  $3\omega$  method to measure the thermal conductivity of thin films without a reference sample[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2008, 142(1): 232-236.
- [51] 苏国萍, 唐大伟, 郑兴华等.  $3\omega$  方法测量各向异性 SiC 晶体的导热系数[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(11): 1885-1888.
- [52] GB/T 8722-2008, 石墨材料中温导热系数测定方法[S].
- [53] 夏丽昆, 张成. 一种基于数字技术的凝视型焦平面热像仪均匀性检测方法研究[J]. *计量与测试技术*, 2015, 42(12): 55-56.
- [54] 乐丽珠, 陆正杰, 王小凤等. 空间噪声等效温差测试方法研究[J]. *红外技术*, 2016, 38(6): 519-523.

- [55] 周达标, 王德江, 霍丽君等. 基于梯度场景的非均匀校正方法[J]. 光学学报, 2017, 37(05): 346-355.
- [56] 张玉存, 侯新玉, 林洪彬. 基于红热图像测温技术的图像二维无网格消噪方法[J]. 计量学报, 2015, 36(04): 379-383.
- [57] 栗宇路, 杨波, 夏菲等. 热像仪暗角补偿研究[J]. 红外技术, 2017, 39(03): 226-231.
- [58] Rainieri S, Bozzoli F, Pagliarini G. Characterization of an uncooled infrared thermographic system suitable for the solution of the 2-D inverse heat conduction problem[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(8): 1492-1498.

## 作者简历

姓名：陈玥，性别：女，民族：汉，出生年月：1995-07-01，籍贯：广西壮族自治区南宁市。

2013-09至2017-06 桂林电子科技大学学士；

2017-09至2020-06 中国计量大学硕士。

参加项目：

浙江省自然科学基金“LY18F030011”项目资助。

攻读硕士学位期间发表的学术论文：

1、侯德鑫，陈玥，叶树亮. 基于热成像的背胶石墨膜面向导热系数测试方法[J]. 化工学报, 2019, 70(S2): 76-84.

2、陈玥，侯德鑫，叶树亮. 石墨膜热导率测试中热像仪测温不确定度传递[J]. 激光与红外, 预计2020年10月份刊出.