

基于分布式光纤温度传感的热防护结构脱粘识别方法研究

美格格¹, 施欣彤¹, 刘航², 单一男^{1,3}

¹大连交通大学詹天佑学院, 辽宁 大连

²中国铁路沈阳局集团有限公司大连机务段, 辽宁 大连

³中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

收稿日期: 2025年5月30日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月21日

摘要

本文研究了基于金属结构基体表面温度场在极短时间内的变化情况推断热防护结构的脱粘事件。分别采用有限元计算方法和基于光频域反射(OFDR)解调的瑞利散射分布式光纤传感技术, 对外界环境温度、热防护结构脱粘面积和脱粘厚度等可变因素下的金属结构基体表面温度场变化展开评价, 进而总结其内在联系。通过高空间分辨率的热力学仿真及光纤测量数据能够表明: 外界温度越高、热防护结构脱粘面积越大、脱粘厚度越大, 金属结构基体表面温度短时间内上升得越高, 且通过温度场梯度变化能够对热防护结构脱粘面积进行较精确的估计。

关键词

分布式光纤传感器, 光频域反射, 热防护结构, 脱粘监测

Study of Debonding Detection of Thermal Protection Structure Based on Distributed Optical Temperature Sensing

Gege Mei¹, Xintong Shi¹, Hang Liu², Yinan Shan^{1,3}

¹Zhan Tianyou College, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

²Dalian Locomotive Depot, China Railway Shenyang Group Co., Ltd., Dalian Liaoning

³CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong

Received: May 30th, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 21st, 2025

文章引用: 美格格, 施欣彤, 刘航, 单一男. 基于分布式光纤温度传感的热防护结构脱粘识别方法研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(4): 692-707. DOI: 10.12677/jsta.2025.134067

Abstract

This study investigates the inference of debonding events in thermal protection structures based on transient changes in the surface temperature field of a metallic substrate. Both finite element simulation and Rayleigh backscatter distributed optical fiber sensing technology, demodulated using Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR), were employed to evaluate variations in the substrate surface temperature field under variable factors, including ambient temperature, debonded area, and debond thickness. Subsequently, the intrinsic relationships were elucidated. High-spatial-resolution thermodynamic simulations and optical fiber measurement data demonstrate that: The higher the ambient temperature, the larger the debonded area, and the greater the debond thickness, the more pronounced the transient temperature rise on the metallic substrate surface. Furthermore, analysis of the thermal gradient enables a relatively precise estimation of the debonded area within the thermal protection structure.

Keywords

Distributed Optical Fiber Sensor, Optical Frequency Domain Reflectometry, Thermal Protection Structures, Debonding Detection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航天器在再入大气层过程中, 表面温度可达 2700℃ 以上, 其热防护系统(Thermal Protection System, TPS)的完整性至关重要。2003 年, “哥伦比亚”号航天飞机在起飞阶段, 因左翼 TPS 被绝热泡沫击中而出现脱粘, 导致再入大气层过程中, 高温气体侵入金属机翼结构内部, 造成了机翼结构失效, 最终航天飞机被气动力撕碎解体。由此可见, TPS 的脱粘事件会使结构局部抵御热流的能力下降, 严重威胁航天器的服役安全性, 极易造成人员伤亡和巨大经济损失。因此, 有必要设计一种能够在线实时监测 TPS 脱粘事件的可靠方法与技术。

目前, 利用无损检测方法与技术能够有效地识别绝热层脱粘, 其主要包括超声波检测[1]、超声导波检测[2]、微波检测[3]、X 射线检测[4]和散斑错位成像[5]等。但是以上无损检测技术都需要结构处于离线状态, 且检测时间较长, 同时也存在空间分辨率低等局限。分布式光纤传感器(Distributed Optical Fiber Sensor, DOFS)凭借全分布式测量、抗电磁干扰以及高环境适应性等优势, 成为结构健康监测领域的前沿技术。其中, 基于瑞利散射的光频域反射技术(Optical Frequency Domain Reflectometry OFDR)可实现毫米级空间分辨率, 为 TPS 脱粘的精准识别提供了可能[6]。

本文以隔热泡沫胶接铝合金结构作为研究对象, 利用有限元分析软件和基于瑞利散射的分布式光纤传感技术获得的高密度温度信息识别脱粘事件。考虑外界环境温度、热防护结构脱粘面积和脱粘厚度等可变因素, 对脱粘事件的识别效果开展研究。

2. 分布式光纤传感器温度测量原理

2.1. 基于瑞利散射的分布式光纤传感器解调原理

由于光纤中分子排列和杂质分布的随机性, 每根光纤的局部折射率不同, 导致背向瑞利散射光具有

独特且稳定的波长分布，这种稳定的散射信号被称为光纤的“固有纹理信息”。只要光纤状态不变，这种信号也不会改变。但当光纤局部因受力或温度变化发生形变时，该区域的散射光会偏移，通过对比形变前后的散射信号，可以准确识别光纤状态的变化位置和程度。

为提高分辨率，分布式光纤传感系统采用光频域反射技术(OFDR)。该技术将激光分为探测光和参考光，探测光进入光纤并产生背向散射，随后与参考光在探测器中干涉形成拍频信号[7]。拍频信号的频率与光程成线性关系，利用傅里叶变换可将其转换为不同位置的散射光强分布，从而实现高空间分辨率的定位与监测。图 1 为 OFDR 基本光学结构。

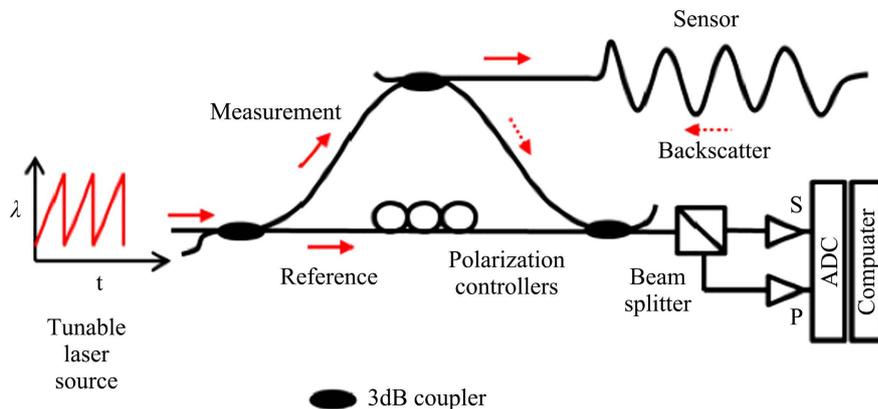


Figure 1. Basic optical structure of OFDR
图 1. OFDR 基本光学结构

2.2. 基于瑞利散射的分布式光纤传感器传感原理

使背向瑞利散射光产生相应的主要因素有两个：应变、温度，利用 OFDR 技术进行温度测量时，待测光纤将被看作一种连续分布的弱随机周期的布拉格光栅，上节说到温度变化会导致光被拉伸或者压缩，使得该位置及其附近的背向散射光发生偏离。这种偏离会导致局部反射光谱的漂移，光谱的移动量就反映了光纤中温度的大小，这就实现了使用 OFDR 技术进行温度传感。测试光纤进行首次测量后便成为了一个应变或温度传感器[8]，首次使用时存储的瑞利散射信号自然成为了基准测量数据。由应变 s 或者温度 T 响应得到的光谱漂移类似于共振波的漂移 $\Delta\lambda$ 或者光栅的光谱漂移 $\Delta\nu$ [9]，不考虑应变，OFDR 技术探测到的温度变化可写为如下形式

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_T \Delta T \tag{1}$$

整理得

$$\Delta T = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_r} \Delta\nu \tag{2}$$

其中 λ 为探测光波长， $\Delta\lambda$ 为波长移动量， ν 为探测光频率， $\Delta\nu$ 为光波频移量， K_T 为温度灵敏系数， ΔT 为温度的变化量， $\bar{\lambda}$ 为扫描的中心波长， c 是光速，根据公式即可得出温度信息。

2.3. 热传递理论

2.3.1. 热对流

热对流是指流体在不同温度下宏观运动引起的相对位移，是只存在于流体中并伴随不规则热运动的

流体分子的传热现象，是热传导和对流的复合作用。由于流动驱动力不同，一般将热对流分为自然对流和强制对流。自然对流是指由于温度不同，部分流体密度发生变化，从而造成流体的不同部分密度不同而自然发生的上下对流换热，热空气密度高，冷空气温度低，二者互相对流换热，这就是暖气的工作原理。发生自然对流的两个必要条件：温度不同与密度差异缺一不可，因此，如果只存在温差，不存在密度差异，也不一定会发生自然对流。强制对流是流体在外力作用下流动而产生的对流换热，空调就属于强制对流。

2.3.2. 热传导

热传导，又称为导热，本质是由于大量分子、原子或电子的互相撞击，使能量从物体温度较高部分传至温度较低部分的过程，是固体中热传递的主要方式。导热现象是在一定的空间和时间中进行的，和导热现象直接联系的基本物理量——温度，通常也是空间坐标和时间变量的函数。傅里叶定律揭示了导热体内热流密度向量与温度梯度之间的联系，而能量守恒定律将物体在空间和时间范围内的温度变化与传递的热量联系起来，因此从能量守恒定律出发，结合傅里叶定律可以建立起来表示导热现象基本规律的导热微分方程，对于具体问题还有：物体的几何形状、导热体的物性条件、初始瞬时物体内的温度分布，以及周围介质与所讨论物体表面间的换热情况等，并相应地称为几何条件、物理条件、初始条件及边界条件，或总称为单值性条件。只有在满足这些条件时，所求得的导热微分方程式的解才是所讨论具体问题中物体内的温度场。温度在空间三个坐标方向都改变的导热问题称为三维导热问题。实际问题中某一个空标方向或二个坐标方向的温度差异可以忽略，而只需研究二个坐标方向或一个坐标方向上温度的变化规律，这就是二维或一维导热问题。

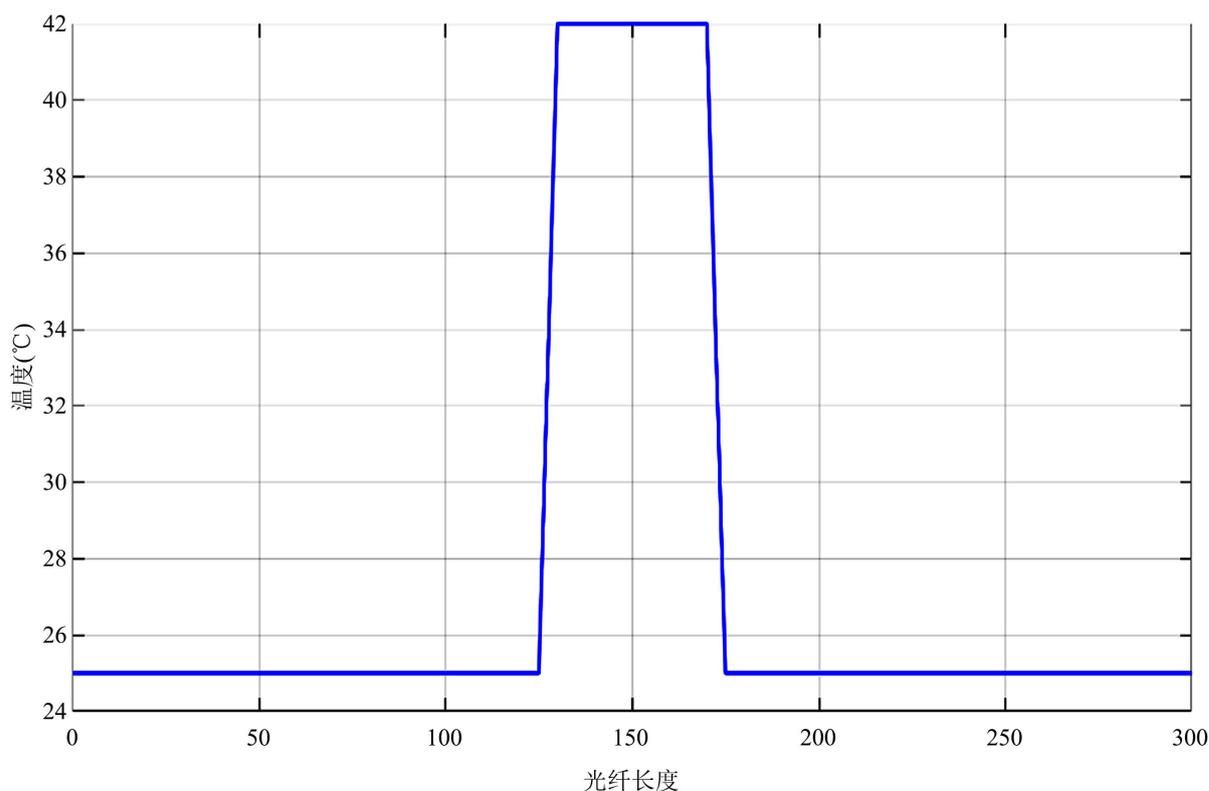


Figure 2. Theoretical temperature variation curve

图 2. 理论温度变量曲线图

稳态一维导热方程描述了在无内热源、稳态条件下，沿单一方向(x 方向)的温度分布规律。其控制方程为傅里叶导热定律的微分形式：

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (3)$$

通解为线性温度分布：

$$T(x) = C_1x + C_2 \quad (4)$$

联系整段温度变化，可将其表示为：

$$\begin{cases} T = C_1 \\ T(x) = C_2x + C_3 \\ T = C_4 \end{cases} \quad (5)$$

根据热传导理论，得到理论温度变量曲线图，图 2 为泡沫与空气接触面部分，光纤感受到的温度变化曲线，其中 C_1 表示室温下的温度， C_4 表示与加热板的温度。

3. 有限元仿真

3.1. 模型建立

首先确定模型构成与尺寸：绝热材料区域设为 $300 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，因此金属基体与加热板尺寸相应设为 $300 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ，以确保其完全覆盖。加热板用于提供热源。为简化操作和观察，将三维结构简化为二维平面模型进行建模。

建模过程包括：设置文件名、定义单元类型和材料参数、建立几何结构、进行布尔运算及划分网格。热分析涉及多种单元类型，其中 PLANE55 是一种适用于二维热分析的 4 节点单元，适合本模型使用。所需的材料参数依据热力学理论设定，详见表 1。

Table 1. Material property table

表 1. 材料属性表

材料名称	密度 kg/m ³	弹性模量 Pa	泊松比	热膨胀 系数/°C	比热 J/kg·°C	导热系数	初始温度/°C
1. 金属基体	7800	2.2E11	0.28	1.3E-006	448	70	25
2. 绝热泡沫	32	3E008	0.34	2E-005	1380	0.028	25
3. 空气	1.29	无	无	132.45	1007	0.0267	25
4. 加热板	2800	1.09E10	1.1	2.32E-005	875	121	25

通过 Create > Areas > Rectangle 命令依次创建三个长方形，尺寸分别为 $300 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ (金属基体)、 $300 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (绝热泡沫)和 $300 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ (加热板)。在绝热层中部再创建一个 $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的矩形，利用 Subtract 命令将其从绝热层中剪除，用于模拟脱粘结构。随后在相同位置添加一个相同尺寸的矩形，表示脱粘后形成的空气层。最后使用 Glue 命令将各部分几何连接，并分别赋予相应的材料属性。处理完成的模型如图 3 所示。

图中 A1~A4 分别对应表 1 中 1~4 号材料。使用 mesh tool 工具设置 Global Size 为 1，自动划分网格。划分网格后的模型如下图 4 所示。



Figure 3. Initial model diagram
图 3. 初始模型图



Figure 4. Grid model diagram
图 4. 划分网格模型图

3.2. 边界条件及求解与方案变量设定

由于实际模型尺寸较小，试验中加热板与空气之间的热对流在极短时间内就完成。为简化模拟，将空气区域建为实体，并假设其已与加热板完成热交换，属于瞬态导热[10]过程。因此，在分析设置中选择 Transient 分析类型。通过 Apply > Thermal > Temperature 下的 Uniform TEMP 命令，将初始温度设为 25℃，模拟环境温度，并将加热板和空气层设置为相同的初始温度(具体温度变化见表 2)。

Table 2. Temperature variable gauge
表 2. 温度变量表

温度/℃									
25	40	60	80	100	120	140	160	180	200

将监测时间设为 2 秒，时间步长为 0.1，其余参数保持默认，完成边界条件设置与建模。由于模拟中涉及三个变量，控制其中一个时，需保持其他两个不变。由于模型为二维简化形式，考虑接触面积变化时仅需调整脱粘区域的长度，宽度保持不变。同时，绝热泡沫厚度的变化通过光纤的相对布设位置[11]进行间接模拟。

温度变量共十组数据，控制接触面积变量时，光纤布设位置的厚度变量在模拟时处于相同的温度，由于温度最大值为 200℃，因此选择 100℃时，接触面积 50 mm × 30 mm，光纤布设位置的厚度为 2 mm 作为参考标准，统一将绝热材料厚度设置为 20 mm，接触面积变量[12]与光纤布设位置厚度变量数据见表 3、表 4 所示。

Table 3. Data table of control contact area variable
表 3. 控制接触面积变量数据表

接触面积/mm ²				
50	40	30	20	12

Table 4. Data table of control thickness variable
表 4. 控制厚度变量数据表

厚度/mm				
2	2.1	2.2	2.3	2.4

3.2.1. 温度变量

在 Ansys 主菜单中, 依次选择 General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 选项, 选择 DOF Solution 中 Nodal Temperature 查看不同温度下的云图, 由于温度差异不大, 因此云图的变化肉眼很难分辨, 因此, 在相同的子菜单下选择 Path Operations 选项, 按照顺序依次定义, 映射路径, 其中变量控制均严格按照上节所述变量表建立。通过路径查询相同脱粘面积, 相同光纤布设位置厚度的温度变化曲线图, 图 5 为温度变量云图, 图 6 为温度从 40℃ 至 200℃ 时, 光纤感受到的温度变化曲线, 其中 0 表示室温下的温度。

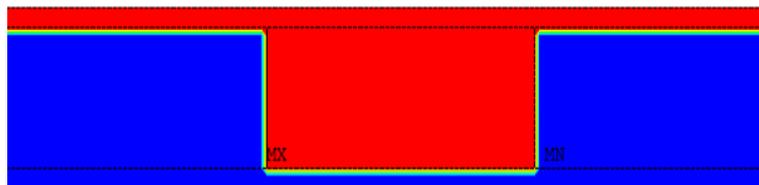


Figure 5. Heat map of temperature

图 5. 温度变量热力图

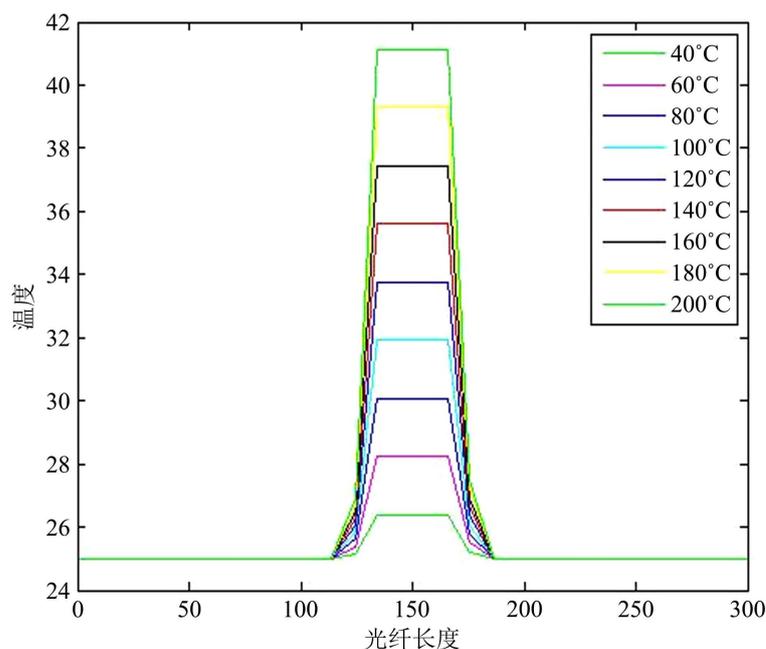


Figure 6. The processed temperature curve graph

图 6. 处理后的温度变量曲线图

3.2.2. 脱粘面积变量

在这一小节仍然重复上一小节的操作, 通过路径查询相同温度(100℃), 相同光纤布设位置厚度(2 mm)的温度变化曲线图, 图 7 为脱粘面积变量云图。

由于模型脱粘尺寸过小及 Ansys 软件自身计算误差的影响, 本次处理存在一些误差, 10 mm 处的数据因为尺寸太小, 误差过大, 不宜修正, 因此, 选择 12 mm 处进行分析, 图 8 为脱粘面积从 50 mm 至 12 mm 时, 光纤感受到的温度变化曲线图, 将所有数据整理在一起, 并使用 Matlab 进行数据处理, 最终整合后的图像。

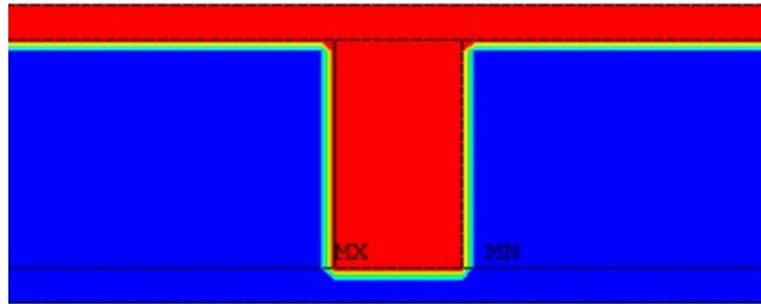


Figure 7. Variable cloud diagram of debonding area
图 7. 脱粘面积变量云图

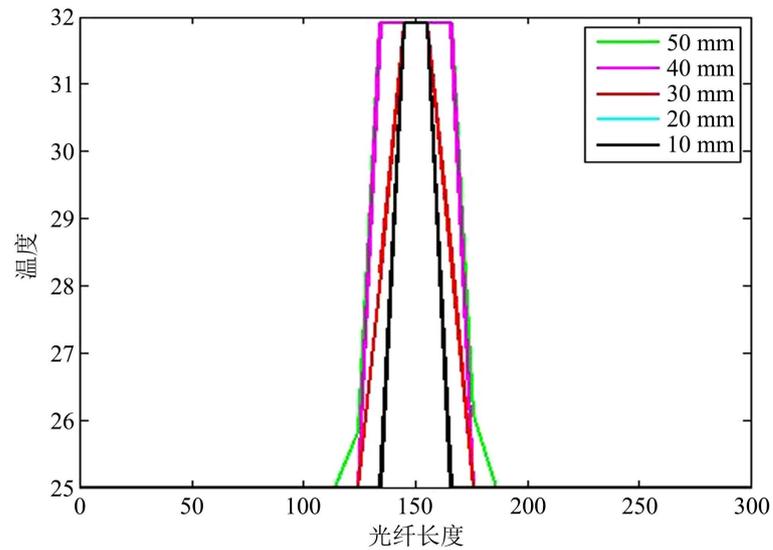


Figure 8. The variable influence curve of the debonding area after treatment
图 8. 处理后的脱粘面积变量影响曲线

3.2.3. 光纤布设位置厚度

在这一小节仍然重复上一小节的操作，通过路径查询相同温度(100℃)，相同脱粘面积(50 mm × 30 mm)的温度变化曲线图，图 9 为光纤布设位置的厚度变量云图。

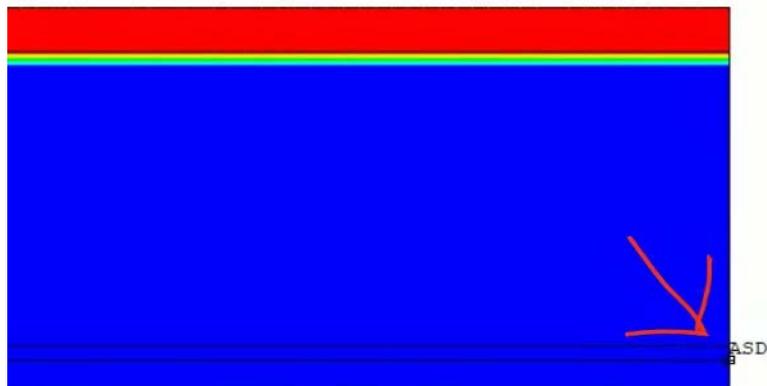


Figure 9. The thickness of the optical fiber layout
图 9. 光纤布设位置厚度

图 10 为光纤布设位置的厚度从 2 mm 至 2.4 mm 时, 光纤感受到的温度变化曲线图, 将所有生成的数据整理在一起, 使用 Matlab 软件进行处理, 处理图像。

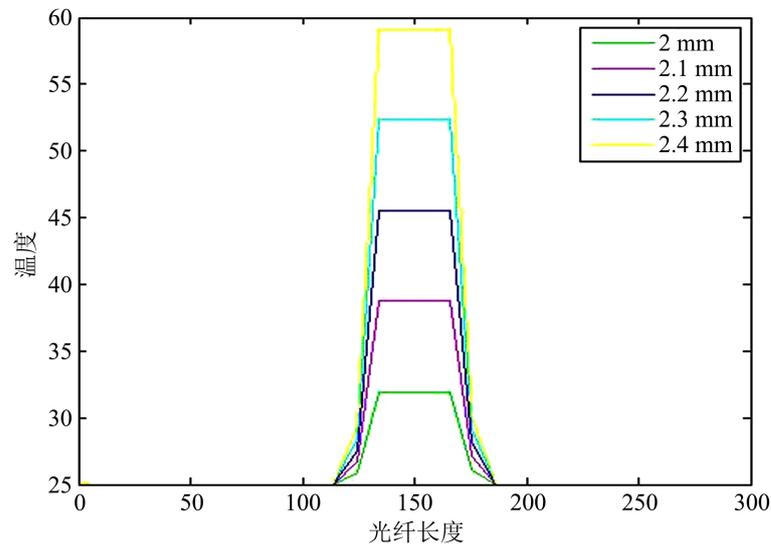


Figure 10. The thickness variable influence curve of the processed optical fiber layout position

图 10. 处理后的光纤布设位置的厚度变量影响曲线

4. 试验验证

4.1. 试验设备搭建

试验使用可以实现全分布式毫米级空间分辨率的应变和温度测量的由美国 Luna 公司的 ODiSI A 光纤分布式传感系统, 搭配力辰科技的 DB3EFS 恒温数显加热板石墨电热板实验室预热平台, 实现对温度实时改变及测量。光纤传感系统具体参数见表 5, 力辰科技的石墨加热板具体参数见表 6。

Table 5. Parameters of optical fiber sensing system

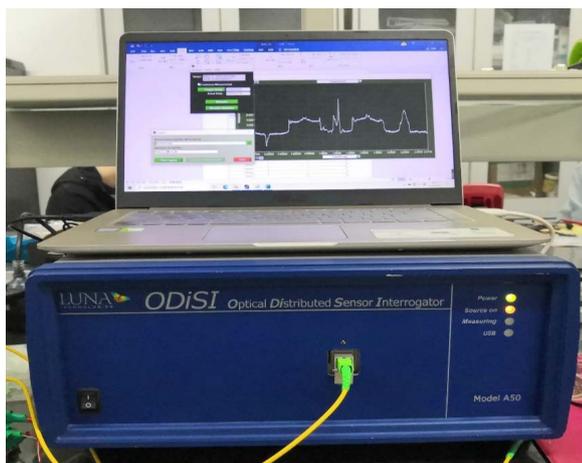
表 5. 光纤传感系统参数

参数	规格
型号	A50
最大传感长度	50 m
采样频率	2.5 HZ
最小传感间距	0.4 mm
最小传感间距长度	1 mm
波长准确度	1.5 pm
温度测量量程	-50°C~300°C
温度测量单次扫描重复性	±0.2°C
尺寸	36 cm × 32 cm × 17 cm
重量	8 Kg
功耗	50 W

Table 6. Parameters of graphite heating plate**表 6.** 石墨加热板参数

型号	重量	功率(KW)	加热尺寸	尺寸(mm)	最高温度	工作电压
DB-3EFS	30 Kg	3.6	600 × 400	600 × 550 × 210	420℃	AC 220 V 50 HZ

金属基体尺寸为 300 mm × 40 mm × 3 mm，绝热泡沫厚度尺寸分别为 200 mm × 40 mm × 1 cm、200 mm × 40 mm × 2 cm、200 mm × 40 mm × 3 cm、200 mm × 40 mm × 4 cm 和 200 mm × 40 mm × 5 cm 各四个，共 20 个，两个进行试验，两个作为备用，其余试验器件还包括热电偶，热电偶的主要作用是用来平衡室温及金属基体表面温度变化差异，图 11 为光纤传感系统实物图，图 12 为搭建好的试验设备图。

**Figure 11.** Optical fiber sensing system**图 11.** 光纤传感系统**Figure 12.** Test equipment**图 12.** 试验设备图

4.2. 试验过程

在现场试验中，试验方案与第三章使用 Ansys 数值模拟软件进行模拟的大体相同，只做了一处修改，由于在模拟中是通过改变光纤在金属基体中的位置来间接地代表光纤布设位置与绝热泡沫厚度的关系，在实验中，无法做到在金属基体中改变光纤的布设位置，只能保证光纤位于金属基体上表面，因此，将第三种方案改为改变绝热泡沫脱粘厚度。三种具体测量方案如下。

(1) 控制温度变量：改变绝热泡沫上表面温度，先采集室温基准，保证其他变量不变，温度从室温测到 200℃，温度变量见表 7。

Table 7. Temperature variable gauge
表 7. 温度变量表

温度/°C									
25	40	60	80	100	120	140	160	180	200

(2) 控制绝热泡沫脱粘面积变量：保证温度和绝热泡沫厚度变量不变，这里保证脱粘区域的宽度与绝热泡沫的宽度保持一致，因此，每次只需要更改脱粘区域[13]的长度就可以实现更改脱粘面积变量尺寸与Ansys 数值模拟阶段相同(共五组)，5 种厚度，9 种温度，不同脱粘面积共 225 组试验，下表 8 为控制接触面积变量数据表。

Table 8. Data table of control contact area variable
表 8. 控制接触面积变量数据表

脱粘面积大小				
12 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm

(3) 控制绝热泡沫厚度变量：保证温度和绝热泡沫变量不变，每次改变绝热泡沫厚度，从 1 cm 到 5 cm，表 9 为控制绝热泡沫厚度变量表。

Table 9. Adiabatic foam thickness variable
表 9. 绝热泡沫厚度变量

绝热泡沫脱粘厚度				
1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm

由于加热板温度上升比较缓慢，因此，在试验过程中，将所有变量进行汇总，同时控制 5 种绝热泡沫厚度，9 种温度，5 种绝热泡沫脱粘面积变量，共 225 组数据，具体试验步骤如下：

- (1) 将试件处于室温时的状态设为基准，考虑到室温可能会变化，在金属基体下表面装上三个热电偶，来作为温度补偿；
- (2) 将温度调整至 40°C；
- (3) 选择厚度为 5 cm 的绝热泡沫两块；
- (4) 将绝热泡沫中间长度调整为 12 mm，待几秒钟后测量一次，后将长度调整至 20 mm，再次测量，重复此过程，直至将长度调整至 50 mm；
- (5) 保证温度不变，调整厚度，选择厚度为 4 cm 的绝热泡沫两块，重复第四步，直至厚度调整为 1 cm；
- (6) 在第一组温度采集完毕后，将温度设置为 60°C，等待加热板升温至目标温度，回到第四步重新进行一遍，直至温度调整为 200°C，采集共 225 组数据。

4.3. 数据处理

图 13 为控制温度变量时，不同尺寸下光纤采集到的温度差值，图中淡黄色阴影区域即为脱粘区域大小，经预处理后的数据已完成去噪处理[14]，图中所示曲线仍存在少量的残余噪声分量源于不可控环境干扰因素，受限于当前技术条件无法完全消除，会出现些许误差，但不影响整体规律。

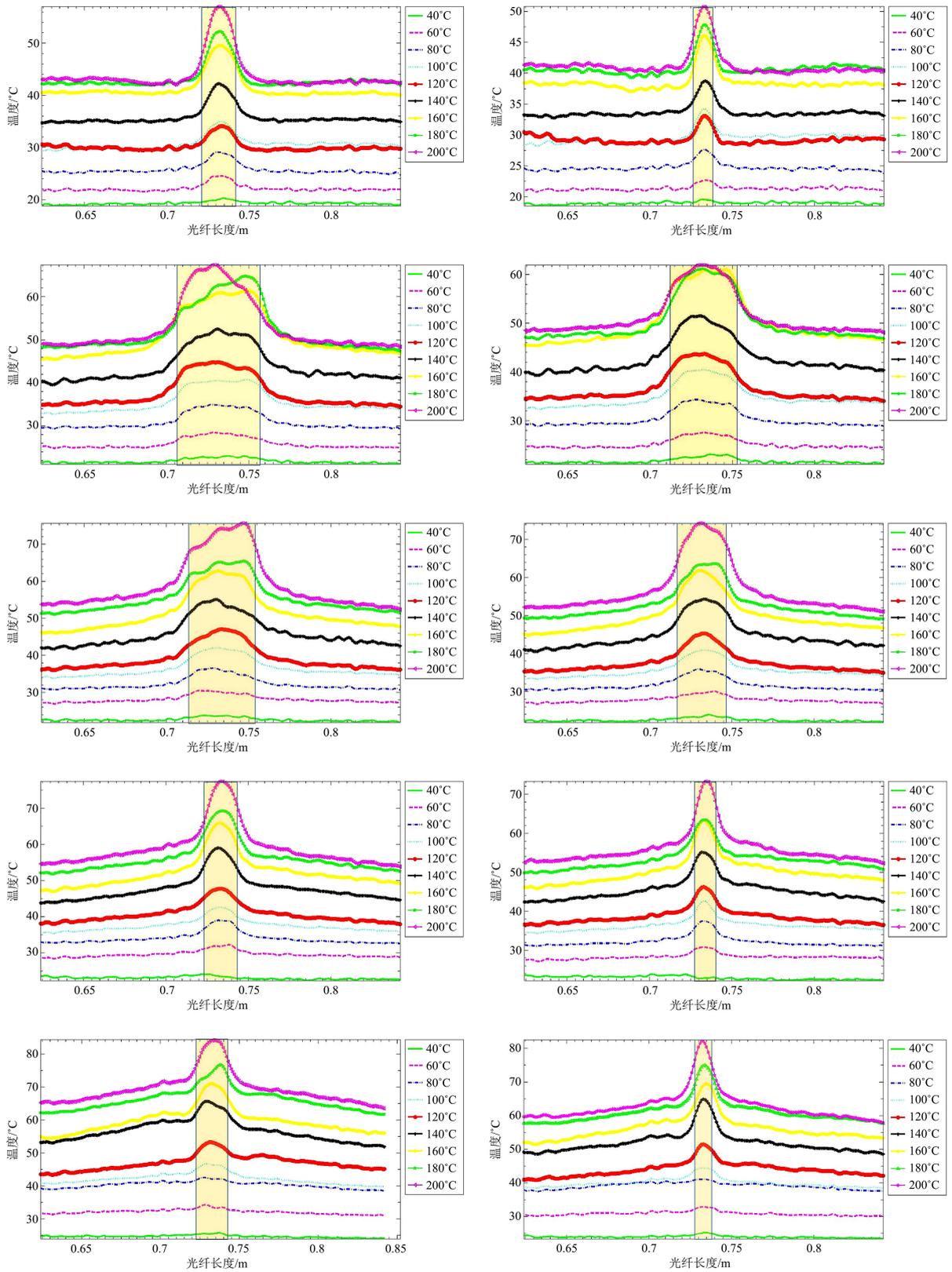


Figure 13. When controlling the temperature variable, the temperature difference collected by the fiber at different sizes
图 13. 控制温度变量时, 不同尺寸下光纤采集到的温度差值

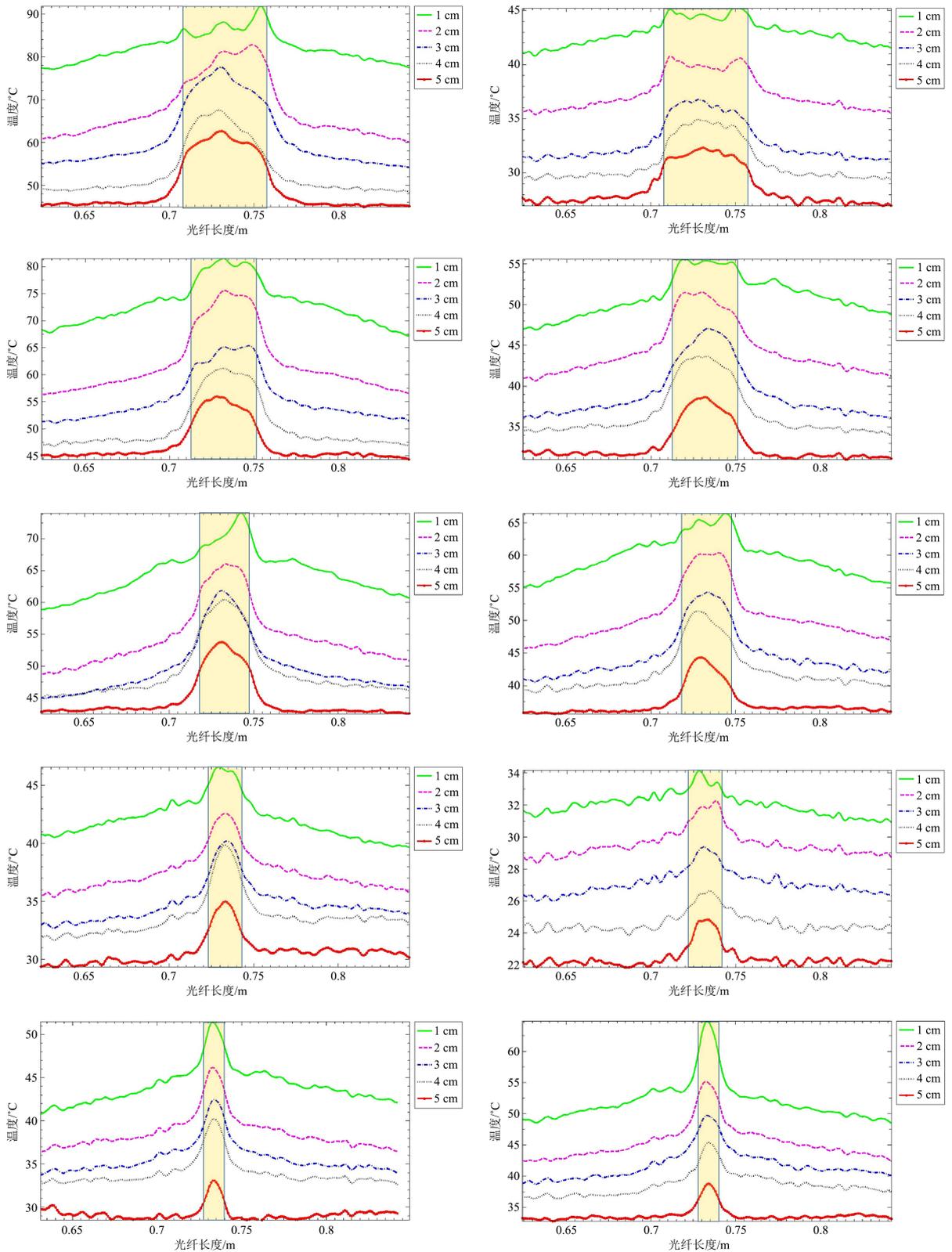


Figure 14. When controlling the thickness variables of different insulation foams, the temperature difference collected by the fiber at different temperatures and different debonding areas

图 14. 控制不同绝热泡沫厚度变量时，不同温度，不同脱粘面积下光纤采集到的温度差值

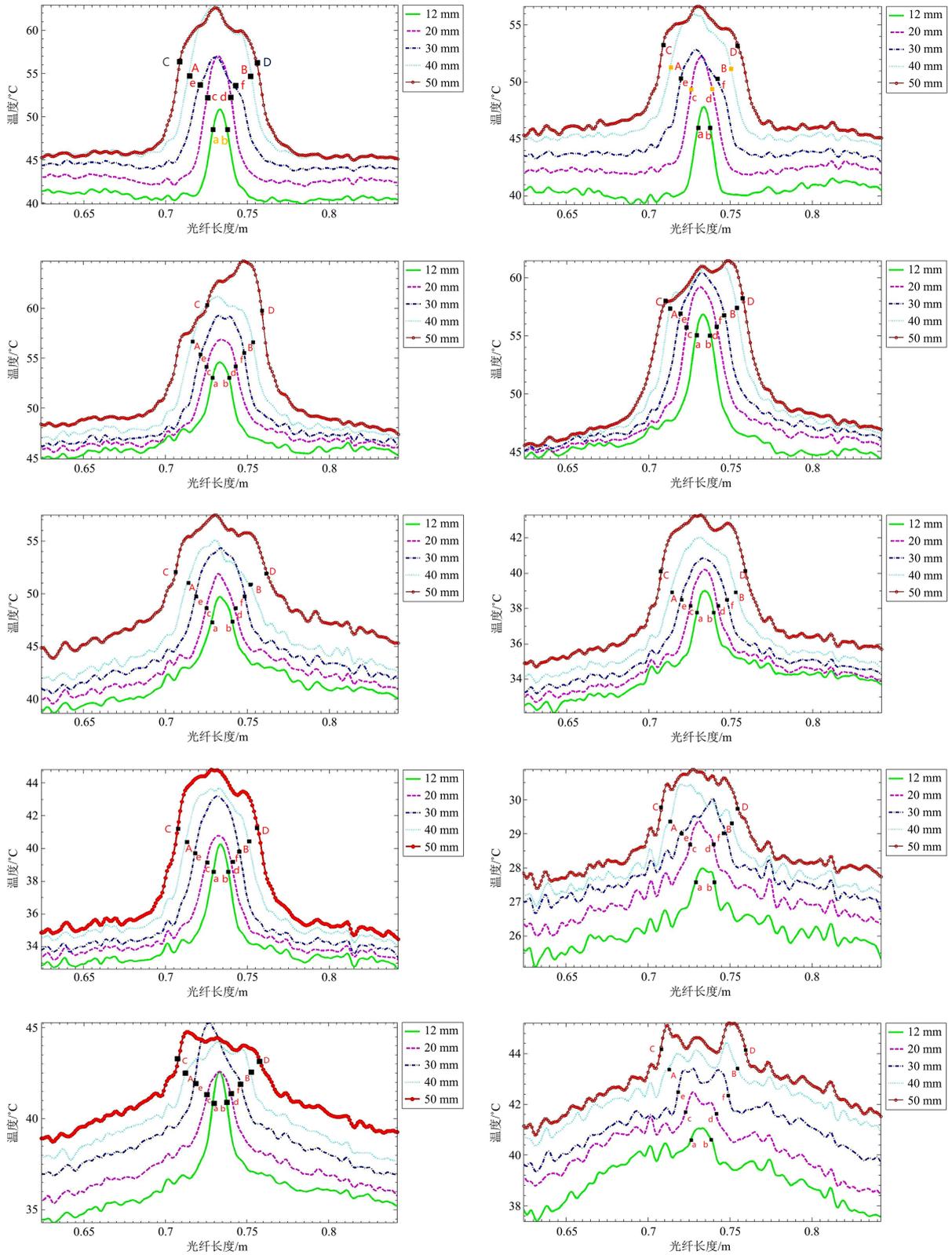


Figure 15. Temperature difference collected by optical fiber under different temperature and thickness when the debonding area of thermal insulation foam is controlled

图 15. 控制不同绝热泡沫脱粘面积大小时，不同温度，不同厚度下，光纤采集到的温度差值

图 14 为控制不同绝热泡沫厚度变量时, 不同温度, 不同脱粘面积下光纤采集到的温度差值, 图中淡黄色阴影区域为脱粘区域大小。

图 15 为控制不同绝热泡沫脱粘面积大小时, 不同温度, 不同厚度下, 光纤采集到的温度差值, 由于脱粘面积是变化的, 因此在图中使用, a, b, c, d, e, f 将不同面积进行标识, a, b 间脱粘面积为 12 mm, c, d 间脱粘面积为 20 mm, e, f 间脱粘面积为 30 mm, A, B 间脱粘面积为 40 mm, C, D 间脱粘面积为 50 mm。

4.4. 误差分析

挑选了具有代表性的数据进行误差分析, 如表 10~13:

Table 10. Debonding area values at the same thickness and different temperatures

表 10. 相同厚度不同温度下的脱粘面积值

面积	40	80	120	160	200
12	24	16	18	21	18
30	34	32	35	35	36
50	59	54	51	56	58

Table 11. Error value of debonding area at the same thickness and different temperatures

表 11. 相同厚度不同温度下的脱粘面积误差值

面积	40	80	120	160	200
12	12	4	6	9	6
30	4	2	5	5	6
50	4	4	1	6	8

Table 12. Debonding area values at the same thickness and different temperatures

表 12. 相同厚度不同温度下的脱粘面积值

面积	1	2	3	4	5
12	26	19	30	25	26
30	32	35	31	31	32
50	51	59	57	53	54

Table 13. Error value of debonding area at the same thickness and different temperatures

表 13. 相同厚度不同温度下的脱粘面积误差值

面积	1	2	3	4	5
12	14	7	18	13	14
30	2	5	1	1	2
50	1	9	7	3	4

由两组数据可得, 最大误差总是出现在脱粘面积为 12 mm 值的实验中, 分析其中原因, 主要是因为时间控制不够精准, 其次在实验中, 切割 12 mm 泡沫时, 由于厚度很小, 人工手切导致不可避免的物理误差存在, 导致最终结果出现较大误差。

5. 小结

本文对几种可以监测保温层脱粘损伤的技术进行分析, 选用背向瑞利散射的分布式光纤传感系统进行研究, 具体研究结果如下:

保温层发生脱粘损伤后, 其温度响应特性表现为: 当外界环境温度升高时, 传感系统测得的温度随之升高, 机体表面温度也相应升高, 此时温度发生显著变化的区域即标识出损伤位置。同样地, 若脱粘损伤的面积增大, 传感系统检测到的温度会升高, 机体表面温度也随之升高, 温度变化明显的区域同样对应着损伤区域。此外, 脱粘损伤的厚度增加时, 同样会导致传感系统测得的温度升高以及机体表面温度上升, 而温度梯度变化显著的区域即为该损伤所在的范围。

本文所用传感器均为上述提到的背向瑞利散射的分布式光纤传感系统, 该方法的有效性在有限元分析和试验中均得到了证明, 并且可以预见它能够在工程结构的可靠性分析和寿命评估中发挥重要作用。

参考文献

- [1] Guo, C., Xu, C., Xiao, D., Cheng, G., Zhong, Y. and Ding, J. (2024) Ultrasonic Resonance Evaluation Method for Deep Interfacial Debonding Defects of Multilayer Adhesive Bonded Materials. *Reviews on Advanced Materials Science*, **63**, Article ID: 20230172. <https://doi.org/10.1515/rams-2023-0172>
- [2] Pineda Allen, J.C. and Ng, C.T. (2022) Debonding Detection at Adhesive Joints Using Nonlinear Lamb Waves Mixing. *NDT & E International*, **125**, Article ID: 102552. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102552>
- [3] Liebezeit, S., Mueller, A., Leydolph, B. and Palzer, U. (2017) Microwave-induced Interfacial Failure to Enable Debonding of Composite Materials for Recycling. *Sustainable Materials and Technologies*, **14**, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.08.002>
- [4] Lai, G.D., Sang, L.P., Bian, Y.L., Xie, H.L., Liu, J.H. and Chai, H.W. (2024) Interfacial Debonding and Cracking in a Solid Propellant Composite under Uniaxial Tension: An *in Situ* Synchrotron X-Ray Tomography Study. *Composites Science and Technology*, **256**, Article ID: 110743. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110743>
- [5] 单一男, 武湛君, 徐新生, 等. 基于分布式光纤传感的隔热层脱粘识别研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 25-28.
- [6] 张旭莘. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] Zhao, S., Cui, J., Wu, Z. and Tan, J. (2020) Accuracy Improvement in of DR-Based Distributed Sensing System by Image Processing. *Optics and Lasers in Engineering*, **124**, Article ID: 105824. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105824>
- [8] 闫阳阳. 基于拉曼散射的分布式光纤温度传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [9] 周子超, 王小林, 张汉伟, 粟荣涛, 韩凯, 周朴, 许晓军. 基于分布式传感的全光纤放大器增益光纤纤芯温度测量[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 163-168.
- [10] 刘东宇. 考虑升温或降温过程瞬态温度响应的热传导结构拓扑优化方法研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- [11] 毛宁宁, 苏怀智, 李鹏鹏. 光纤传感器不同布设方式对应变传递的影响分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 120-123, 146.
- [12] 王花平. 分布式光纤传感器与被测结构的界面效应影响分析[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 32-42.
- [13] 徐浩, 王中枢, 马寅魏, 等. 基于分布式光纤的蜂窝夹层结构脱粘损伤监测[J]. 压电与声光, 2024, 46(3): 414-419.
- [14] 李正文, 陈嘉庚, 肖正原, 等. 分布式光纤声波传感器的相位噪声补偿方法与量化噪声影响分析[J]. 光学学报, 2025, 45(9): 377-384.