

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.016

烧蚀防热材料热物性参数辨识方法

潘威振¹, 易法军²

(1.北京空间飞行器总体设计部,北京 100094; 2.哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所,哈尔滨 150001)

摘要: 烧蚀材料热物性参数对防热性能至关重要,本文设计了原始材料和碳化材料的测温实验模型,在非氧化条件下进行风洞实验,通过恒定热流边界的加热实验,获取材料内部温度测点的温度响应。通过传热反问题方法,利用原始材料和碳层材料的温度历程,辨识了材料随温度变化的热物性参数。

关键词: 烧蚀防热材料;热物性参数;辨识

中图分类号:V45 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2022)S-0100-09

An Identification Method for Thermal Properties of Ablative Thermal Protection Materials

PAN Weizhen¹, YI Fajun²

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The thermal property of thermal protection materials is important for their performance. A thermal experiment model of raw and carbonized materials is designed. Under non-oxidizing conditions, the wind tunnel experiments are carried out, and the temperature response of the temperature measurement points inside materials is obtained through the heating experiment of the constant heat flux boundary. By the method of inverse heat transfer problem, and the temperature response of raw and carbonized materials, the thermal properties varying with temperature of materials are identified.

Key words: thermal protection materials; thermal properties; identification

当飞行器到达行星表面或者完成飞行任务后返回地球时,通常会以极高速进入行星大气,在飞行器穿越大气层飞行过程中(即进入、降落、着陆过程),飞行器与大气层相互作用,其机械能转化其周围气体的内能,在飞行器前体表面形成高温流场,高温流场对飞行器表面施加强烈的对流和辐射加热,如图 1 所示。随着飞行器进入速度和大气密度的增加,其表面热流随之增加,当飞行器以中等速度进入时,通常速度小于 7.5 km/s,表面热流较小,即小于 1 MW/m^2 ^[1];当进入速度超过 8 km/s 时,热流将超过 1.5 MW/m^2 ^[2],因此需要热防护系统(Thermal protection system, TPS)保障飞行器

内部设备和人员免受高温流场的影响。

在 TPS 设计中,防热材料起到至关重要的作用,其中烧蚀防热材料在受热时通过材料的热解吸

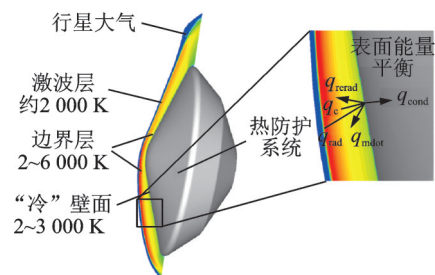


图 1 飞行器表面与大气层相互作用

Fig.1 Interaction between aircraft surface and atmosphere

收稿日期:2022-04-20;修订日期:2022-06-28

通信作者:潘威振,男,工程师,E-mail:hitpwz@126.com。

引用格式:潘威振,易法军.烧蚀防热材料热物性参数辨识方法[J].南京航空航天大学学报,2022,54(S):100-108.
PAN Weizhen, YI Fajun. An identification method for thermal properties of ablative thermal protection materials[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 100-108.

收热量,而热解产生的碳层表面辐射系数增加,材料表面通过热辐射向外界散热增加,同时,热解过程中产生大量热解气体通过质量引射效应进入材料表面边界层,产生热阻塞作用,进一步阻止热流向内部结构传递,其隔热机理如图2所示^[3],使得烧蚀耐热材料的隔热效率大大提高,加上烧蚀耐热材料密度普遍较低,因此烧蚀型耐热材料在再入飞行器和星际探索中得到广泛应用^[4-5]。

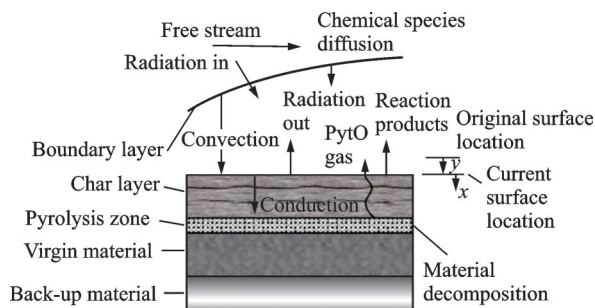


图2 烧蚀型耐热材料隔热机理

Fig.2 Thermal protection mechanism of ablative materials

在飞行器再入过程中,气动热中的一部分传输到TPS,导致耐热材料温度逐渐升高。耐热材料在升温过程中,通过以下两个过程逐渐发生反应并被移除。随着温度升高,耐热材料逐步发生热解反应,在热解反应过程中,材料的热解相(通常是树脂基体)逐渐发生热解生成热解气体和碳层,自身质量减少。热解气体通过扩散和对流穿过材料内部孔隙进入边界层。在传输过程中随着温度升高还会发生二次反应。第二个转化过程是指基体残余碳层和非热解相(通常是碳或者碳化硅纤维)的烧蚀过程^[6],根据不同的再入环境,烧蚀可以是多相化学反应(氧化、氮化)、相变(升华)和机械剥蚀(开裂)。在烧蚀材料质量损耗过程中,其热物性参数变化对于材料温度响应、热解反应速度等起到至关重要的作用。

然而,在TPS设计中,烧蚀耐热材料的热物性参数存在较大不确定性,因此为保证系统安全,通常设计较大的安全余量。目前针对耐热材料热物性参数,主要是通过分析实验数据降低材料性能参数的不确定性,即对地面实验或者飞行实验数据进行正问题分析,对比计算模型预测结果和实验数据,并通过有限的参数调整,实现模型预测和数据更好地匹配,从而得到定性的结论。例如对热物性参数的识别仅限于对材料公称参数的简单缩放,并未对材料热物性参数的变化进行充分研究。

针对材料热物性参数测量的方法很多,对于热导率,常用的测量方法包括防护热板法^[7]、线性热源法^[8]、循环加热法^[9]、激光闪射法^[10]等,比热容测

量常用差示扫描量热法^[11],然而,这些测试通常是对稳定材料的单点测试,对于热物性参数随温度变化的材料测试过程周期较长。对于某些复合材料不同方向性能差别较大,用传统的测量方法难以实现。最重要的是,在许多情况下,材料(如耐热材料)的使用条件与测试环境有很大的不同,而且材料在升温过程中发生变化,使得测试结果不实用。利用传热反问题方法,对材料内部传热过程进行反演,可以利用内部测点温度估计材料热物性参数。通过模拟服役环境,可以确定相应环境的材料热物性参数。因此,有必要建立一种利用传热反问题方法来识别耐热材料热物性参数的方法。

反问题是相对于正问题而言,正问题是由原因推知结果,即由条件推出响应,而在工程实际问题中,某些条件参数,如初始条件、边界条件以及材料性能参数等很难通过测试完全确定,而系统的响应,如应变、温度历程等可以通过测量获得,这就需要通过已知的响应信息,识别这些系统中未知的条件参数。反问题就是通过比较容易测量获得的结果数据推知原因的过程。求解反问题的目标在于通过优化方法获得使正分析得到的响应和已知响应差异最小的参数值,也就是求解满足某种条件的最优解。和正问题相比,反问题有着一些显著的特点。

(1)非线性:反问题一般都是非线性的,而且很难将其转化为线性问题,这增加了求解过程的难度。

(2)不稳定性:反问题通常不满足解的适定性条件,即存在性、唯一性和稳定性,进一步增加了求解难度。

(3)计算量大:反问题通常需要反复计算,需要耗费大量的计算时间。

在大部分工程问题中涉及的都是正问题,即模型的参数和边界条件是已知的,以此求解系统的响应或模型输出。但是对于特定的问题(包括本文涉及的TPS设计问题),反问题分析方法能够得出更加精确的结果。

由于传热反问题自身的特殊性和复杂性,其求解方法在理论和实践方面都有许多尚未解决的问题^[12]。目前,传热反问题的求解方法通常是通过利用某种满足适定性要求的问题近似替代不适定问题,其中Tikhonov^[13]、Alifanov^[14]和Beck^[15]等学者针对反问题分别提出了不同的克服不适定性的方法,即Tikhonov正则化方法^[16]、顺序函数法^[17]和迭代正则化方法等,这些方法都是在修改相应最小二乘问题的基础上使问题适定。

Tikhonov正则化方法是由Tikhonov为求解传

热反问题提出的,针对含测量误差的温度数据,计算时在最小二乘方程中引入光滑项从而减小问题的不适定性。顺序函数法是一种顺序方法,通过对比当前时刻之后某段时间的计算温度和测量温度估计当前的未知参数,常用于边界热流估计。在初始计算时,材料表面初始热流、内部测点初始温度和有限未来时刻的测量温度为已知条件,利用初始热流预先估计有限未来时刻的热流,将估计热流代入控制方程进行正问题求解,获得有限未来时刻的计算温度。通过比较未来时刻计算温度和测量温度修正未来时刻的热流预估值,反复修正直至二者足够接近,此时未来时刻的热流预估值即辨识结果,依次进行上述步骤直至最后时刻,实现热流的顺序辨识。与顺序函数法不同,迭代方法是一种全域解决方法,给定未知参数一个初始猜测值,采用传热模型计算获得测点温度值,通过对比计算温度和测量温度对未知参数进行修正,直到计算温度和测量温度偏差足够小,所得结果即是未知参数的近似解。

随着传热反问题应用逐渐增加,对计算精度、收敛性、稳定性、计算效率等方面的要求也越来越高。很多学者对不同的反问题求解方法进行了对比研究,以寻求效果最优的求解方法。

Beck等^[18]利用实验温度数据,分别采用顺序函数法、迭代方法和Tikhonov方法求解传热反问题,辨识材料表面热流,并将辨识结果进行对比。对比结果表明,顺序函数法在精度和计算效率方面均优于其他两种方法;迭代正则化方法和Tikhonov正则化方法所得辨识结果接近,计算效率均较低,相比而言,Tikhonov正则化方法计算比迭代正则化方法计算效率更低。Marcos等^[19]研究了烘焙过程中的传热反问题,通过全域方法和顺序方法分别求解传热反问题,计算获得壁面温度曲线。通过对比发现,二者均能获得高精度辨识结果,其中后者效率更高,但是由于顺序计算会造成误差累积,因此对于含误差数据顺序算法的计算结果较差。石友安等^[20]通过顺序函数法和共轭梯度法(Conjugate gradient method, CGM)分别求解传热反问题,利用激波风洞实验温度数据,分别辨识了实验材料表面热流,通过与实验测试数据对比,验证了两种方法的计算精度、抗噪性能、稳定性。邵元培等^[21]分别利用顺序函数法和CGM求解变几何域传热反问题,辨识变几何域表面热流,利用算例对比分析了温度测量噪声、表面后退量及其测量误差等对辨识结果的影响。对比结果表明,两种算法对温度测量误差都具有较好的稳定性,但是对表

面后退量测量误差比较敏感。Cui等^[22]分别通过CGM、Levenberg-Marquardt(LM)方法和最小二乘法求解瞬态非线性反问题,对铬镍铁合金随温度变化的热导率进行辨识,通过算例对比了3种方法的辨识精度、稳定性和收敛性。结果表明,三者计算精度相当,CGM稳定性最好,计算效率最低,LM方法和最小二乘法计算效率高,但是稳定性稍差。文中在LM法中引入松弛因子获得改进LM方法,提高了算法的稳定性。通过对比发现,LM方法是求解温度相关的热导率的最佳方法。Pan等^[23]提出一种分段辨识方法,提高了LM方法辨识变热物性参数的收敛性,对材料多种热物性参数进行辨识。

通过文献中对不同方法的对比结果可以看出,顺序函数法虽然计算效率较高,但是对测量误差很敏感;而迭代正则化方法稳定性好,但辨识结果的全局收敛性不能保证,在初始值偏差较大时,易出现局部收敛的结果;而Tikhonov方法如果采用迭代法作为优化方法,其计算精度与迭代法类似,但计算效率更低。

总结国内外利用迭代正则化方法进行参数辨识的研究成果发现,迭代正则化方法对测量误差稳定、辨识精度较高、不需要未知参数的先验信息,因此被应用于金属材料、建筑材料、流体、生物组织等多种材料的参数辨识。其中LM方法因其收敛速度快最为常用。然而,迭代正则化方法对计算初始值还存在一定依赖性,若初始值选取不当易造成局部收敛的情况,其中文献[23]提出一种分段辨识方法,提高了LM方法辨识变热物性参数的收敛性。

本文的目标是根据测量的烧蚀耐热材料的温度历程估计材料的热物性参数。对于烧蚀耐热材料,在受热过程中经历3个阶段的变化,分别为未发生热解的原始材料、热解过程材料和完全热解后的碳化材料,原始材料和碳化材料,分别考虑其在室温到热解起始温度和室温到热解终止温度,可以认为二者在对应温度范围内不发生物理化学变化,其材料热物性参数仅与温度相关。

1 实验试样

为利用耐热材料进行加热实验,测量材料内部不同测点位置的温度响应,用于进行材料热物性参数辨识,设计耐热材料实验模型,示意图和实物图如图3所示,其中测温柱塞为利用耐热材料制备的测温部件,测温柱塞内部温度通过内部不同深度位置布置的热电偶测量,热电偶测点分别布置在防

热材料测温柱塞内部轴线上距离材料受热表面 5、8、11 和 20 mm 位置处,测温热电偶通过测温电缆导出。为防止高温情况下测温热电偶绝缘层损坏导致短路,在耐热材料内部利用双孔陶瓷管保护热电偶两极。耐热套与测温柱塞为同种材质,用于降低径向传热的影响。将二者固定在金属铝板上获得材料实验模型。

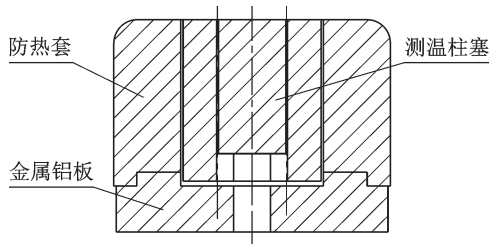


图3 材料实验模型示意图

Fig.3 Diagram of TPS experimental model

2 热流状态标定实验

为辨识耐热材料在飞行环境中的热物性参数,利用风洞实验模拟飞行环境,获得材料实验模型在风洞实验中的温度响应,并用来进行传热反问题分析,辨识耐热材料在风洞环境下的参数。

在利用耐热材料进行风洞实验前,需要标定风洞实验状态,利用柱塞式热流计可以对辐射热流和对流热流进行瞬态标定^[24-25]。柱塞式热流计结构示意图如图4所示。图中圆柱形敏感芯体通过隔热材料与周围材料隔热,减少标定过程中的热交换,标定过程中柱塞表面受热,引起柱塞内部敏感芯体温度升高,通过与敏感芯体相连的热电偶测量敏感芯体的温度响应,利用其温度响应即可获得柱塞热流计表面瞬态热流。

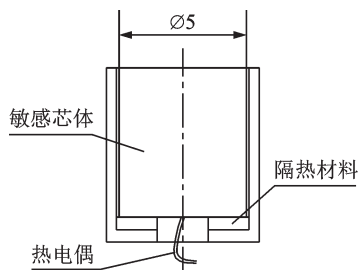


图4 柱塞式热流计示意图

Fig.4 Schematic diagram of plunger type heat flux probe

柱塞式热流计根据集总热容法原理标定热流,集总热容法实质是假设瞬态过程中材料内部温度是均匀的,即不考虑材料内部的温度梯度。由傅里叶定律可知,对于一维传热,材料表面热流 q'' 和热导率 k 、表面温度梯度具有如下关系

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

由式(1)可知,在同等热流条件下,若材料热导率足够大,则材料内部温度梯度可以忽略。在应用集总热容法时,利用材料的导热热阻和材料与环境的换热热阻之比作为衡量材料热导率大小的指标,该比值是一个无量纲参数,称为毕渥数 Bi 。

$$Bi = \frac{R_{\text{cond}}}{R_{\text{conv}}} = \frac{L/(kA)}{1/(hA)} = \frac{hL}{k} \quad (2)$$

式中: R_{cond} 和 R_{conv} 分别为传导热阻和表面对流热阻, L 和 A 分别为材料厚度和表面积, h 为表面换热系数。当满足 $Bi \ll 1$ 时,则材料内部的导热热阻远小于表面对流换热热阻,因此,材料内部温度梯度可以忽略不计。假定材料内部温度均匀分布是合理的。因此材料表面能量平衡可以表示为

$$q''A\Delta t = C_p m \Delta T \quad (3)$$

式中: C_p 为材料比热容, $m = \rho AL$ 为材料质量, ρ 为材料密度,因此可得

$$q'' = \rho C_p L \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (4)$$

在满足 $Bi \ll 1$ 的条件下,可以通过测量材料升温过程中的温度响应,利用式(4)计算表面热流。

为了标定热流状态及其均匀性,设计如图5所示的热流标定模型,标定模型外形与实验模型一致,在标定模型受热面中心和周向分别开孔放置3个热流计,如图中所示1#、2#、3#热流计分别为3支相同规格的柱塞热流计。

本文采用的柱塞式热流计敏感芯体为 $\varnothing 5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的紫铜,其中的柱塞芯体为紫铜圆

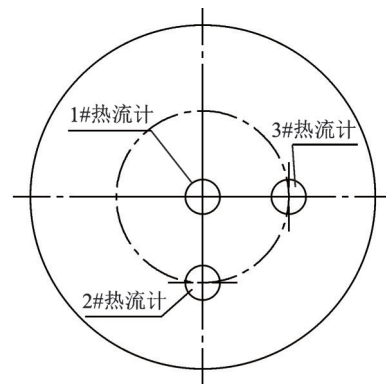


图5 热流标定模型设计图和实物图

Fig.5 Design and physical drawings of heat flux calibration model

柱体, $\delta = 6 \text{ mm}$, $k = 385 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 对流换热系数以自然对流计算 $h = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。因此

$$Bi = \frac{h\delta}{k} = \frac{25 \times 0.006}{385} \ll 0.1 \quad (5)$$

满足集总热容法的应用条件, 因此可以通过柱塞热流计的温度响应利用式(4)获得表面热流。

为进行原始材料热物性参数辨识, 利用氩气作为工作气体, 进行加热实验。首先设定在氩气环境下 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 的热流状态, 利用热流标定模型标定。标定过程中, 加热时间约 4 s , 其中 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 状态标定曲线如图6所示, 图中1#、2#、3#分别表示3个柱塞式热流计在标定过程中的温度响应曲线。

计算获得3支柱塞热流计热流状态如表1所示。

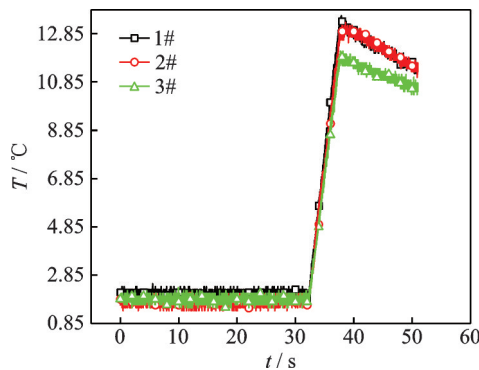


图6 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 热流标定曲线

Fig.6 Heat flux calibration curves under heat flow value of $50 \text{ kW}/\text{m}^2$

表1 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 热流标定结果

Table 1 Heat flux calibration results under heat flow value of $50 \text{ kW}/\text{m}^2$

编号	1#	2#	3#	均值	标准差
热流/ $(\text{kW}\cdot\text{m}^{-2})$	51.58	50.32	47.10	49.66	2.31

从表1可以看出, 热流状态均值约为 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$, 标准差 $2.31 \text{ kW}/\text{m}^2$, 热流标准差约为均值的5%, 说明在驻点位置热流均匀性能够保证。

为获得碳化层材料, 并利用碳化层材料进行碳层参数辨识, 需要标定 $500 \text{ kW}/\text{m}^2$ 的热流状态。

利用热流标定模型分别标定 $500 \text{ kW}/\text{m}^2$ 热流状态, 获得升温速率, 并通过集总热容法式(4)计算表面热流。计算得到柱塞热流计的标定结果, 如表2所示。从表中可以看出, 标定结果热流均值与1#位置接近, 标准差约为热流均值的10%。

表2 热流状态标定结果

Table 2 Calibration results of heat flux states

状态	kW/m^2				
	1#	2#	3#	均值	标准差
500	521.75	573.56	467.99	521.10	52.79

3 原始材料加热实验

为辨识原始材料的热物性参数, 利用原始材料在 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 热流状态下进行风洞实验, 根据实验获得的温度数据可以进行原始材料热物性参数辨识。将实验模型通过水冷工装安装在支架上进行实验。

利用标定的热流状态, 对耐热材料不同实验模型进行恒定热流加热实验, 实验之前腔体保持真空, 实验开始后, 以氩气作为工作气体, 经过电离形成高温等离子体并由喷管喷出, 加热安装在水冷工装中的实验模型, 通过数据记录仪记录材料实验模型内部测点温度历程。

实验后, 材料实验模型表面已经发生部分热解, 从侧视图可以看出, 材料热解仅发生在表面附近, 表面以下部分与原始材料一致。

实验记录的温度和压力数据如图7所示。图中测点1、测点2、测点3、测点4和“表面”对应的曲线分别为耐热材料内部布置的4个热电偶测点中第1、2、3、4路测点和表面高温计的温度数据。

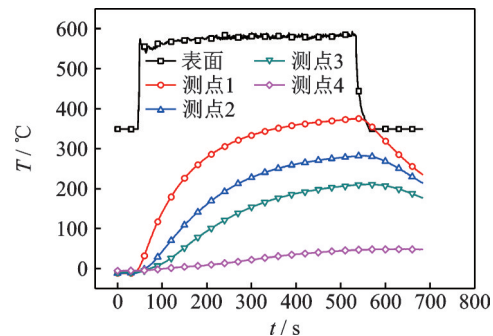


图7 耐热材料 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 测试数据

Fig.7 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ test data of thermal protection material

从图7中可以看出, $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 热流条件下, 测点1最高温度在 $300\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此测点1位置的原始材料仅部分发生热解。利用实验数据中耐热材料发生热解之前的部分数据, 通过反问题方法, 可以辨识原始材料热物性参数。

4 材料碳化实验

为获取完全热解的耐热材料碳层材料, 利用 $500 \text{ kW}/\text{m}^2$ 热流加热材料模型 600 s , 获取材料内部测点的温度历程, 如图8所示。从图中可以看出, 实验过程中, 测点1位置最高温度约为 $1040 \text{ }^\circ\text{C}$, 测点2位置的最高温度约为 $870 \text{ }^\circ\text{C}$, 满足材料碳化的温度要求, 因此可以认为实验后, 材料表面到测点2间的部分已完全热解为碳化材料。为防止材料内部热电偶损坏, 后续在材料碳化实验

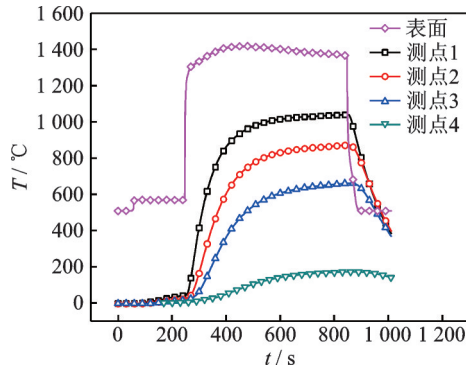


图8 在500 kW/m²热流下加热600 s的温度历程
Fig.8 Temperature history heated by heat flux of 500 kW/m² for 600 s

和碳层材料加热实验时,利用500 kW/m²的热流状态进行实验。

上述材料碳化实验前后材料质量和尺寸记录如表3所示。从表中可以看出,碳化过程中耐热材料质量变化3.14 g,而尺寸变化很小,因此材料内部发生了体积烧蚀。

表3 碳化实验材料质量和尺寸变化

Table 3 Changes of mass and size in material carbonization experiment

状态	质量/g	平均高度/mm	质量变化/g	高度变化/mm
实验前	176.09	46.22		
碳化后	172.95	45.79	3.14	0.43

5 碳化材料加热实验

为获得碳化后耐热材料的热物性参数,利用500 kW/m²热流状态分别加热完全碳化的耐热材料模型150 s,获得材料内部测点的温度历程,如图9所示,其中模型测点温度趋势一致,测点1热电偶最高温度约900 °C,测点2位置最高温度约700 °C,能够反映碳化材料室温到900 °C的热物性参数。

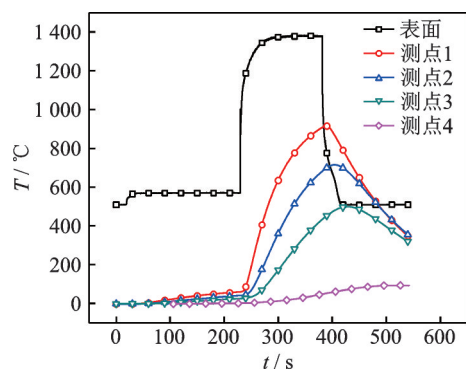


图9 碳层材料500 kW/m²热流加热150 s温度历程
Fig.9 Temperature history of carbon layer heated by 500 kW/m² heat flux for 150 s

碳层材料加热前后材料的质量和尺寸记录如表4所示,从表中可以看出,碳层材料加热实验前后质量变化较低,最大值分别约为0.18 g,考虑到实验前后的称量误差和实验模型拆装过程中不可避免的磨损,质量变化可以忽略不计。实验前后材料尺寸变化也较小。这说明在利用碳层材料进行参数辨识实验过程中材料基本未发生变化。

表4 碳层材料加热前后质量和尺寸变化

Table 4 Changes of mass and size of carbon layer material before and after heating

状态	质量/g	平均高度/mm	质量变化/g	高度变化/mm
加热前	172.95	45.79		
加热后	172.88	46.09	0.07	-0.30

6 利用风洞实验数据辨识参数

利用原始材料和碳化材料加热实验获得的温度数据,通过迭代方法求解传热反问题,可以辨识出原始材料和碳化材料随温度变化的热物性参数。对于原始材料,比热容可以通过传统测试方法获得,且可以通过单一参数辨识方法获得材料热导率;碳化材料疏松多孔,比热容测试难以进行,且测量结果误差较大,拟通过多参数辨识方法获得材料随温度变化的比热容和热导率。

(1)原始材料热物性参数辨识结果

在风洞实验中,为辨识原始材料热导率,分析耐热材料在50 kW/m²热流状态条件下的温度响应,在温度开始上升之后的150 s左右,测点1的温度达到300 °C,如图10所示,在加热150 s时间范围内,测点1位置到实验模型背壁之间的材料均为原始材料,未发生热解。因此,以测点1的温度历程作为温度边界条件,通过对测点1位置和背壁之间的材料进行传热反问题分析,通过LM方法可以辨识原始材料热导率随温度的变化历程。

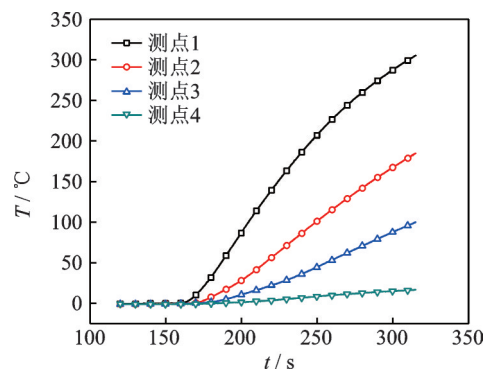


图10 原始材料热物性参数辨识温度历程
Fig.10 Temperature history of raw material parameter identification

在参数辨识过程中,需求解传热问题。由于实验过程中通过隔热套隔离敏感芯体和水冷工装,因此侧向传热可以忽略;敏感芯体背壁和氧化铝基板之间留有空隙,因此背壁给定自然对流边界条件,对流换热系数设定为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

利用图10中隔热材料在 $50 \text{ kW}/\text{m}^2$ 恒定热流状态条件下的温度响应辨识的热导率结果如图11所示,图中10、20分别对应温度间隔为10和 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热导率辨识结果,另一条曲线为二者均值。可以看出,不同温度间隔的辨识结果变化趋势一致,随着温度间隔增大,参数随温度的波动减少。参数均值能够代表参数随温度的变化趋势。

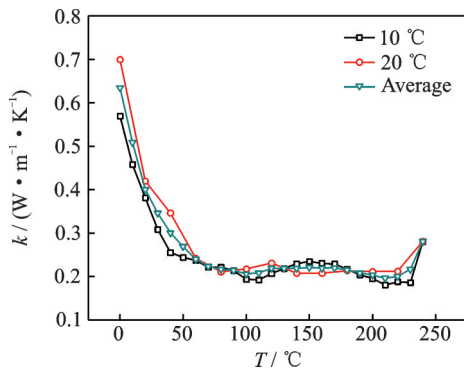


图11 原始材料模型参数辨识结果

Fig.11 Parameter identification results of raw material

为验证辨识结果,将原始材料热导率的辨识结果添加到材料烧蚀模型中,结合原始材料比热容测试结果,分别以4个材料实验模型实验数据中测点1的温度历程作为表面温度边界条件,计算内部测点位置处的温度响应,与实验结果对比如图12所示。

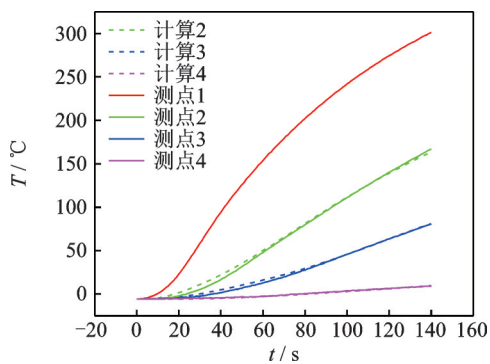


图12 隔热材料仿真计算温度响应与实验结果对比

Fig.12 Comparison of simulation temperature responses and experimental results of thermal materials

图12中,“测点1”为作为温度边界条件的测点1温度历程实验数据,“计算2~4”分别为利用材料热导率辨识结果进行仿真计算获得的测点2、3、4位置的温度响应结果,“测点2~4”为实验测试获得的对应测点位置温度历程。从图中可以看出,在

$300 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,仿真计算结果和实验测量结果变化趋势相同,2、3、4测点温度值接近。说明原始材料热导率辨识结果能够反映材料发生热解反应前材料内部的传热过程。

(2) 碳层材料热物性参数辨识结果

在获取隔热材料碳层材料实验过程中,测点2的最高温度超过 $800 \text{ }^\circ\text{C}$,因此受热表面和测点2之间的材料已经完全热解成为碳层材料,因此可以利用表面温度和测点1、2的温度数据辨识碳层材料的热物性参数。针对受热表面和测点2之间的材料进行研究,分别利用图9中碳层材料测点2的温度历程作为背壁温度边界,以表面温度和测点1的温度历程构建目标函数,运用迭代方法求解一维传热反问题,辨识材料的热导率和比热容。

在参数辨识过程中,需反复求解传热问题。传热问题中受热表面热流设定为标定结果,受热表面吸收率可以通过表面平衡温度和热流标定结果确定。碳层材料热导率和比热容辨识结果分别如图13所示。

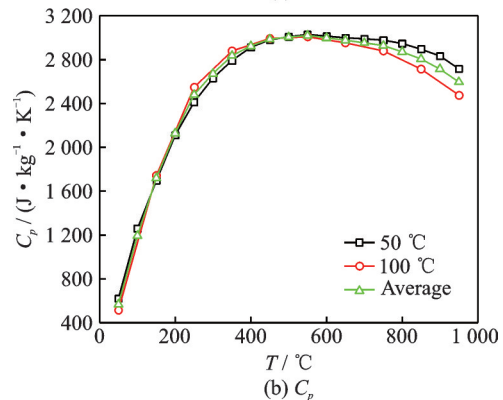
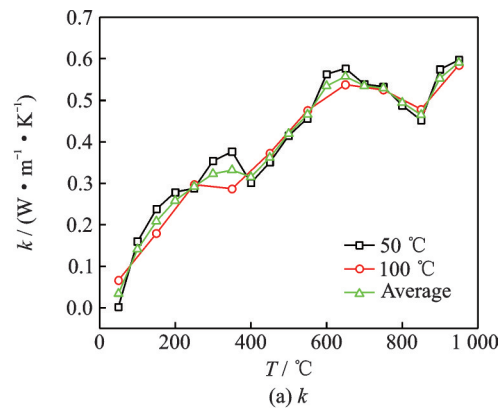


图13 碳层材料热物性参数辨识结果

Fig.13 Identification results of carbon layer material parameters

从图中可以看出,不同模型辨识结果趋势相同,热导率随温度整体呈逐渐增加的趋势,比热容随温度升高先增加后略有降低。材料温度从室温到 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,热导率约从 $0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到

0.7 W/(m·K);材料比热容从约 700 J/(kg·K)增加到 2 970 J/(kg·K),之后缓慢降低到 2 610 J/(kg·K)。

对于热导率可以利用四次多项式对辨识结果拟合,作为碳层材料随温度变化的热导率;对于比热容,可以两个实验模型辨识结果的均值作为碳层材料比热容辨识结果,如图 14 所示。

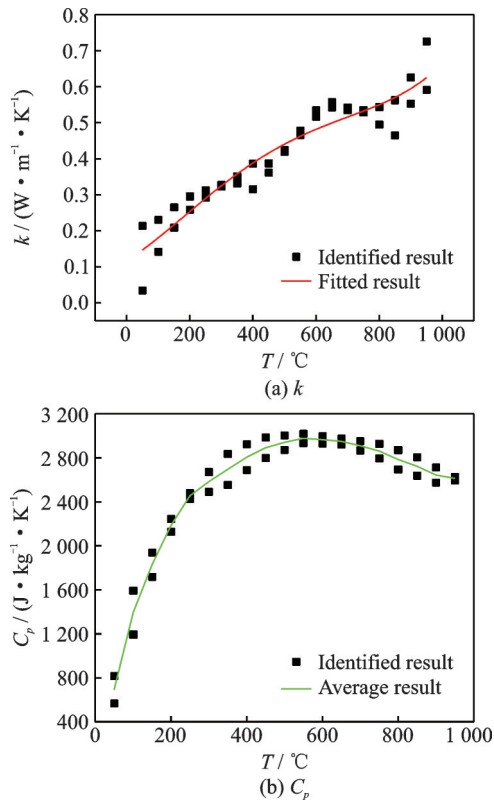


图 14 碳层材料热物性参数辨识结果拟合曲线

Fig.14 Fitting curves of identification results of carbon layer material parameters

7 结 论

本文设计了耐热材料实验模型,分别进行了原始材料和碳化材料热物性参数辨识实验,并利用实验数据辨识了原始材料、碳化材料的热物性参数,获得如下结论。

(1)在非氧化条件下,以恒定热流作为边界条件,进行了原始材料风洞实验,获得材料内部测点位置温度随时间的变化历程。实验中测点 1 温度达到 300 °C 之前,测点 1 和背壁之间的材料未发生热解,以测点 1 数据作为温度边界,以测点 2、3 的温度数据构建目标函数,通过 LM 方法求解传热反问题,辨识了原始材料随温度变化的热导率。

(2)在非氧化条件下,以恒定热流作为边界条件,进行了碳化材料风洞实验,获得实验温度数据,通过本文的 LM 多参数辨识方法求解传热反问题,辨识了碳化材料随温度变化的比热容和热导率。碳化材料热导率整体呈上升趋势,材料温度从室温

到 900 °C 时,热导率约从 0.1 W/(m·K)增加到 0.7 W/(m·K);材料比热容从约 700 J/(kg·K)增加到 2 970 J/(kg·K),之后缓慢降低到 2 610 J/(kg·K)。

参考文献:

- [1] WILLCOCKSON W H. Mars pathfinder heatshield design and flight experience introduction[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1999, 36(3): 374-379.
- [2] EDQUIST K T, HOLLIS B R, JOHNSTON C O, et al. Mars science laboratory heat shield aerothermodynamics: Design and reconstruction[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2014, 51(4): 1106-1124.
- [3] LAUB B, VENKATAPATHY E. Thermal protection system technology and facility needs for demanding future planetary missions[C]//Proceedings of Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science. Lisbon, Portugal: [s.n.], 2004(544): 239-247.
- [4] 吴晓宏,陆小龙,李涛,等.轻质烧蚀材料研究综述[J].航天器环境工程,2011,28(4):313-317. WU Xiaohong, LU Xiaolong, LI Tao, et al. A review of researches of light-weight ablators[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(4): 313-317.
- [5] 程海明,洪长青,张幸红.低密度烧蚀材料研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(5):1-11. CHENG Haiming, HONG Changqing, ZHANG Xinghong. An overview on low-density ablators[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(5): 1-11.
- [6] HELBER B, TURCHI A, SCOGGINS J B, et al. Experimental investigation of ablation and pyrolysis processes of carbon-phenolic ablators in atmospheric entry plasmas[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier Ltd, 2016, 100: 810-824.
- [7] DAVID S. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12: 89-98.
- [8] LOBO H, COHEN C, UNIUERSITY C. Measurement of thermal conductivity of polymer melts by the line-source method[J]. Polymer Engineering & Science, 1990, 30(2): 65-70.
- [9] VISSER E P, VERSTEEGEN E H, VAN E W J P. Measurement of thermal diffusion in thin films using a modulated laser technique: Application to chemical-vapor-deposited diamond films[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(7): 3238-3248.
- [10] 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: 336-341.
- [11] MORAD N A, IDREES M, HASAN A A. Specific heat capacities of pure triglycerides by heat-flux differential scanning calorimetry[J]. Journal of Thermal Analysis, 1995, 45: 1449-1461.
- [12] 康传刚. 求解非线性不适定问题的几类迭代方法[D]. 上海: 上海大学, 2009.
KANG Chuangang. Several type of iterative methods for solving nonlinear ill-posed problems[D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.
- [13] TIKHONOV A N, GLASKO V B. Use of the regularization method in non-linear problems[J]. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1965, 5(3): 93-107.
- [14] ALIFANOV O M. Methods of solving ill-posed inverse problems[J]. Journal of Engineering Physics, 1983, 45(5): 1237-1245.
- [15] BECK J V. Nonlinear estimation applied to the problem inverse heat conduction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1970, 13: 703-716.
- [16] TIKHONOV A N, GONCHARSKY A V, STEPANOV V V, et al. Numerical methods for the solution of ill-posed problems[M]. [S.l.]: Springer, 1995.
- [17] KEANINI R G, LING X, CHERUKURI H P. A modified sequential function specification finite element-based method for parabolic inverse heat conduction problems[J]. Computational Mechanics, 2005, 36(2): 117-128.
- [18] BECK J V, BLACKWELL B, HAJI-SHEIKH A. Comparison of some inverse heat conduction methods using experimental data[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(17): 3649-3657.
- [19] MARCOS B, BOULET M, OUSEGUI A, et al. Comparison of global and sequential methods for an inverse heat transfer problem[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2011, 19(6): 793-814.
- [20] 石友安, 曾磊, 钱炜祺, 等. 测热试验中瞬态热流的反演研究[J]. 工程热物性学报, 2013, 34(12): 2366-2370.
SHI Youan, ZENG Lei, QIAN Weiqi, et al. Research on dynamic heat flux estimation in experiment[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(12): 2366-2370.
- [21] 邵元培, 钱炜祺, 周宇, 等. 变几何域传热的表面热流反演方法[J]. 计算力学学报, 2013, 30(2): 296-301.
SHAO Yuanpei, QIAN Weiqi, ZHOU Yu, et al. Estimation of surface heat flux for variable geometry inverse heat conduction problem[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(2): 296-301.
- [22] CUI Miao, ZHAO Yi, XU Bingbing, et al. Inverse analysis for simultaneously estimating multi-parameters of temperature-dependent thermal conductivities of an Inconel in a reusable metallic thermal protection system[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 480-488.
- [23] PAN Weizhen, YI Fajun, ZHU Yanwei, et al. Identification of temperature-dependent thermal conductivity and experimental verification[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(7): 075005-1-075005-7.
- [24] NAWAZ A, GORBUNOV S, TERRAZAS-SALINAS I, et al. Investigation of slug calorimeter gap influence for plasma stream characterization[C]//Proceedings of the 43rd AIAA Thermophysics Conference. New Orleans, Louisiana: AIAA, 2012: 1-15.
- [25] HIGHTOWER T M, OLIVARES R A, PHILIPPIDIS D. Thermal capacitance (slug) calorimeter theory including heat losses and other decaying processes: NASA-TM-2008-215364[R]. [S.l.]: NASA, 2008.

(编辑: 胥橙庭)