



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113390602 B

(45) 授权公告日 2022. 09. 09

(21) 申请号 202110569789.2

(22) 申请日 2021.05.25

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113390602 A

(43) 申请公布日 2021.09.14

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 苑朝凯 姜宗林

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.  
G01M 9/06 (2006.01)

(56) 对比文件

US 2005143938 A1, 2005.06.30

CN 110057444 A, 2019.07.26

CN 111551344 A, 2020.08.18

审查员 杜娟

权利要求书3页 说明书11页 附图7页

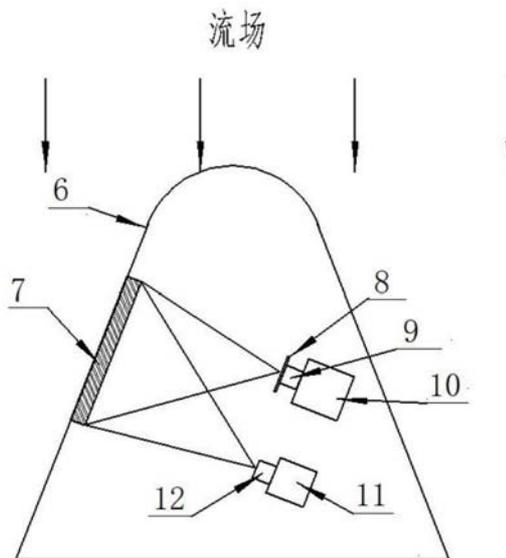
(54) 发明名称

一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统及方法

(57) 摘要

本发明属于温敏漆测量技术领域,针对流场总温高引起温敏漆涂层的炭化、脱落,从而严重限制了温敏漆测量技术应用的问题,本发明公开了一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统及方法,测量敏感单元与模型表面呈齐平式安装,激发光源和扩束镜连接,成像镜头和滤光片依次加装在相机前端,扩束镜照亮区域和成像镜头成像区域相重合,并覆盖整个测量敏感单元,激发光源照射测量敏感单元产生辐射光,经由成像镜头收集后被相机接收。该方法用于测量高超飞行器真实飞行环境下全场细致的气动热特征;内嵌式温敏漆测量方法不受模型外形限制;由于温敏漆喷涂于量热层内壁面,与流场物理上隔离,不改变模型表面粗糙度,完全不影响流场的流动特性。

CN 113390602 B



1. 一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,其特征在于,该测量系统包括测量敏感单元、激发光源、扩束镜、滤光片、成像镜头、相机,

所述测量敏感单元设置为内嵌式结构,测量敏感单元与模型表面呈齐平式安装,激发光源和扩束镜连接,所述成像镜头和滤光片依次加装在相机前端,扩束镜照亮区域和成像镜头成像区域相重合,并覆盖整个测量敏感单元,激发光源照射测量敏感单元产生辐射光,经由成像镜头收集后被相机接收;

所述测量敏感单元制作方法,包括如下步骤:

(1) 确定测量敏感单元外形:

控制测量敏感单元外形

与所测试区域实验模型的外形一致,并且测量敏感单元与模型表面齐平安装;

(2) 确定量热层厚度和材质:

通过求解非稳态热传导方程确定量热层内壁温度变化历程,计算结果与温敏漆应用温度范围进行对比,根据温敏漆的应用范围和内壁温变化选择量热层材质或厚度;

(3) 玻璃基底:

通过实验环境的气动压力决定玻璃基底厚度,玻璃基底外形与量热层内壁面保持一致;

(4) 喷涂温敏漆:

对量热层内壁面进行清洁,之后采用喷涂装置在量热层内壁面喷涂温敏漆涂层,干燥;

(5) 量热层与玻璃基底胶合:

对玻璃基底表面进行清洁,在玻璃基底与温敏漆相互接触一侧均匀喷涂高温光学胶,再将玻璃基底与量热层相胶合,固化。

2. 根据权利要求1所述一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,其特征在于,所述测量敏感单元设置为由量热层、温敏漆层和玻璃基底构成的结构,通过量热层内壁温反演外壁热流。

3. 根据权利要求2所述一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,其特征在于,所述量热层为吸热元件,其设置为金属材质,外形与实验模型相同,其外壁面与高超声速流场相接触;量热层的厚度与量热层材料及所测试气动热流密度、测试时间相关。

4. 根据权利要求2所述一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,其特征在于,所述测量敏感单元通过玻璃基底承受气动压力,当量热层厚度较厚足够承受气动压力时,省略玻璃基底。

5. 根据权利要求2所述一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,其特征在于,所述温敏漆层喷涂在量热层内壁面,通过温敏漆层测量内壁温随时间的变化,量热层外壁面与高超声速流场相接触,高温流场对外壁面的气动加热通过热传导至量热层内壁面,基本物理过程为非稳态热传导的过程,控制方程为式(1):

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

其中,T为温度,t为时间,x、y、z为笛卡尔坐标系的三个坐标轴, $\alpha$ 为量热层材料的热扩散系数,测量量热层内壁温度后通过求解热传导反问题确定外壁面的热流密度。

6. 根据权利要求1所述一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,其特征在于,量

热层加工过程如下：

当量热层厚度较厚时，量热层通过确定的外形、厚度、材质参数直接加工，加工后量热层内壁面进行抛光处理，表面粗糙度小于Ra1.6；当量热层厚度较薄直接加工困难时，量热层采用金属箔进行制备，表面粗糙度小于Ra1.6，量热层的外形通过玻璃基底外形控制，量热层外壁面粗糙度与实验模型粗糙度要求保持相同。

7. 一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量方法，采用权利要求1-6任意一项所述基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统，其特征在于，采用共轭梯度法辨识内嵌式温敏漆外壁热流，即通过迭代正则化方法，将热传导反问题转换为热传导正问题、灵敏度问题和伴随问题三个适定问题控制目标函数最小化，包括如下求解步骤：

- (1) 给定外壁热流分布迭代初值；
- (2) 通过求解热传导正问题控制方程确定量热层内壁面温度；
- (3) 计算目标函数式是否迭代收敛，如果已迭代收敛则停止计算；如未迭代收敛则继续计算；
- (4) 求解伴随问题控制方程，确定梯度方向；
- (5) 分别计算共轭系数和下降方向；
- (6) 求解灵敏度问题控制方程并确定迭代步长；
- (7) 确定下一迭代步量热层外壁热流分布；
- (8) 重复(2) - (7)步直至目标函数收敛。

8. 根据权利要求7所述一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量方法，其特征在于，所述目标函数式J、共轭系数 $\gamma$ 及迭代步长 $\beta$ 对应的公式如下：

$$J[q(x_i, y_i, 0, t)] = \sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=1}^{im} [T(x_i, y_i, N, t) - Y(x_i, y_i, N, t)]^2 \quad (5)$$

$$\gamma^n = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [J'^n(x_i, y_i, N, t)]^2}{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [J'^{n-1}(x_i, y_i, N, t)]^2} \quad (6)$$

$$\beta^n = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [T(x_i, y_i, N, t) - Y(x_i, y_i, N, t)] \Delta T(x_i, y_i, N, t)}{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [\Delta T(x_i, y_i, N, t)]^2} \quad (7)$$

式中T为温度，t为时间，x、y、z为笛卡尔坐标系的三个坐标轴，定义N为量热层在z方向上的厚度，z=0为量热层外壁面，z=N为量热层内壁面， $T(x_i, y_i, N, t)$ 表示外壁热流为 $q(x_i, y_i, 0, t)$ 时求解得到的内壁面温度， $Y(x_i, y_i, N, t)$ 表示实验测量得到的内壁温度值， $t_f$ 为测试时间，im为测量相机像素数，上标n为迭代步数， $J'^n(x_i, y_i, N, t)$ 为第n迭代步时的梯度方向函数。

9. 根据权利要求7所述一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量方法，其特征在于，采用忽略量热层内的横向热传导效应确定迭代初值，从而加速迭代收敛的方法，具体包括如下步骤：

假定量热层内壁面及侧壁无热损失，则单位面积量热层在某一时间间隔内传入其中的热量应等于量热层蓄积的热量，即：

$$q = \int_0^N \rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} dz \quad (8)$$

$q$ 为热流,  $T$ 为温度,  $t$ 为时间,  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为笛卡尔坐标系的三个坐标轴,  $N$ 为量热层在 $z$ 方向上的厚度,  $\rho$ 为量热层材料密度,  $c$ 为量热层材料比热, 当量热层密度和比热为常数时, 上式可写为:

$$q = \rho c N \frac{dT_{ave}(x, y, t)}{dt} \quad (9)$$

当测试时间大于量热层响应时间后用内壁面温度 $T$ 代替 $z$ 方向的平均温度 $T_{ave}$ , 则上式变为:

$$q = \rho c N \frac{dT(x, y, N, t)}{dt} \quad (10)$$

测量得到的量热层内壁面温度变化历程后经式(10)处理得到外壁热流密度的迭代初值。

## 一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于温敏漆测量技术领域,具体涉及一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统及方法。

### 背景技术

[0002] 高超声速吸气动力飞行器利用空气中的氧气工作,无需携带氧化剂,且具有比冲高、结构简单、允许水平起降等优势,未来有望实现更加便捷、安全和低成本的天地往返飞行。相对火箭动力飞行器,吸气动力飞行器为了获取更好的气动性能采用了大量尖前缘结构,而且高超声速吸气动力飞行器的机身、推进系统和热防护系统采用一体化设计,飞行器外流和推进系统内流存在强烈的耦合作用。这些特征使得高超声速飞行器各部件的设计强烈依赖于热流密度场的精细测量结果,例如:

[0003] 1) 燃烧室:燃烧室是冲压发动机设计的核心问题之一,要保证在有限空间、有限时间内将化学能最大限度的转换为热能。热流密度是研究燃烧室燃烧过程的重要物理量,也是评估其燃烧状态、燃烧效率及相关性能的必要条件,不考虑壁面热流损失对流动状态、燃烧效率及推力等参数的评估会产生明显偏差。此外,对于双模态燃烧室,模态转换通过控制释热分布使气流热雍塞形成热流喉道代替物理喉道,壁面热流测量结果是精准控制模态转换的前提条件。

[0004] 2) 进气道:进气道是冲压发动机的气动部件,其功能是捕获足够的空气并进行高效率的减速压缩,向燃烧室提供一定压力、温度和流量的空气。为保证在飞行包线内的性能,要求在整个飞行包线内具有良好的启动能力和宽马赫数范围内稳定高效工作的性能,而进气道性能不仅与其几何构型相关,更涉及进气道中的边界层转捩、激波与边界层及激波与激波的相互作用等复杂的流动过程,而这些复杂流动区域恰恰伴随着明显的热流密度变化,使得热流密度测量成为分析这些复杂流动的有力手段,热流密度测量结果是进气道优化设计的基础参数。

[0005] 3) 热防护系统:吸气动力飞行器的燃烧室承受了气动加热与燃烧释热的双重加热问题,导致壁面热流很高,需要主动冷却才能保证正常工作。以机载燃料为冷却剂的再生冷却通过燃料温升和裂解反应吸收热量进行热防护。燃烧室壁面热流密度的分布及峰值热流的位置是热防护系统设计的最主要依据,主要原因是再生冷却过程中燃料在临界区与裂解区物性参数急剧变化,一旦发生壅塞,单位面积冷却通道能够通过冷却剂流量就下降,流量的下降会反过来导致冷却燃料温度的进一步提高,形成正反馈机制,最终导致整个冷却系统的失败。

[0006] 鉴于热环境特性对飞行器设计的重要性,热流密度测量技术一直是高超声速领域的研究重点,发展了热电偶、直写热电堆型热流计、Gardon热流计等单点测量技术。然而,高超声速飞行器气动热特性是飞行器气动外形、热防护系统设计的重要参数,由于激波与激波/边界层的相互作用、转捩、湍流、分离等复杂物理过程,造成飞行器气动热特性异常复杂,受限于单点测量技术的空间分辨率,若干点的测量结果不能反映整体的热流分布特征,

尤其是针对上述情况等热流梯度大、热流分布复杂的区域,需要热流密度场测量技术以获取全场精细热流分布特征。

[0007] 温敏漆(TSP)是近年来发展较为快速的面测量技术,利用光致发光的热猝灭效应,其辐射强度随温度的升高而降低,通过测量温敏漆的辐射强度变化确定温度变化,结合材料的物性参数确定热流密度。但目前主要应用于常规风洞。常规风洞的实验流场总温较低,与高超飞行器真实的高总温飞行环境存在明显的差异。国内外HEG、HIEST和JF-12等高温风洞实验结果表明:真实飞行环境流场高总温特性是限制温敏漆应用的主要原因。流场总温高造成模型表面温升较高,引起温敏漆涂层的炭化、脱落。同时,高总温流场常伴随着气体辐射现象,气体辐射光与温敏漆辐射光在光谱上存在重叠,无法通过滤光片等方法消除,从而严重限制了温敏漆测量技术的应用。

[0008] 综上所述,高超声速飞行器设计极大地依赖于热流密度场的精细化测量结果,但目前尚缺乏高总温条件下的热流密度场测量技术,因此,如何研发一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量方法,具有重要的现实意义。

## 发明内容

[0009] 针对现有技术中存在的问题,本发明的目的在于提供一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统及方法,用于测量高超飞行器真实飞行环境下全场细致的气动热特征,扩展了温敏漆测量方法的应用范围,解决了高总温条件下缺乏气动热全场测量技术的难题。另外,对于舵翼等复杂外形区域,常规测量技术由于模型遮挡而无法观测,而复杂是针对飞行器模型外壁面而言,其内壁面并不复杂,因而内嵌式温敏漆测量方法不受模型外形限制;由于温敏漆喷涂于量热层内壁面,与流场物理上隔离,不改变模型表面粗糙度,完全不影响流场的流动特性。

[0010] 本发明采取的技术方案为:

[0011] 一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,其特征在于,该测量系统包括测量敏感单元、激发光源、扩束镜、滤光片、成像镜头、相机。

[0012] 所述测量敏感单元设置为内嵌式结构,测量敏感单元与模型表面呈齐平式安装,激发光源和扩束镜连接,所述成像镜头和滤光片依次加装在相机前端,扩束镜照亮区域和成像镜头成像区域相重合,并覆盖整个测量敏感单元,激发光源照射测量敏感单元产生辐射光,经由成像镜头收集后被相机接收。

[0013] 进一步的,所述测量敏感单元设置为由量热层、温敏漆层和玻璃基底构成的结构,通过量热层内壁温反演外壁热流。

[0014] 更进一步的,所述量热层为吸热元件,其设置为金属材质,外形与实验模型相同,其外壁面与高超声速流场相接触;量热层的厚度与量热层材料和所测试气动热流密度、测试时间相关。

[0015] 更进一步的,所述测量敏感单元通过玻璃基底承受气动压力,当量热层厚度较厚足够承受气动压力时,可省略玻璃基底。

[0016] 更进一步的,所述温敏漆层喷涂在量热层内壁面,通过温敏漆层测量内壁温随着时间的变化,量热层外壁面与高超声速流场相接触,高温流场对外壁面的气动加热通过热传导至量热层内壁面,基本物理过程为非稳态热传导的过程,控制方程为式(1):

$$[0017] \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

[0018] 其中,T为温度,t为时间,x、y、z为笛卡尔坐标系的三个坐标轴, $\alpha$ 为量热层材料的热扩散系数。测量量热层内壁温度后通过求解热传导反问题确定外壁面的热流密度。

[0019] 进一步的,所述测量系统设置于实验模型内部,当模型内部空间尺寸较小时,采用半模进行实验,测量系统置于风洞外部;所述激发光源和滤光片选取与测量敏感单元的温敏漆层的辐射特性相匹配。

[0020] 进一步的,所述测量敏感单元制作方法,包括如下步骤:

[0021] (1) 确定测量敏感单元外形:

[0022] 控制测量敏感单元外形与所测试区域实验模型的外形一致,并且测量敏感单元与模型表面齐平安装;保证不改变实验模型气动热环境。

[0023] (2) 确定量热层厚度和材质:

[0024] 通过求解非稳态热传导方程确定量热层内壁温度变化历程,计算结果与温敏漆应用温度范围进行对比,根据温敏漆的应用范围和内壁温变化选择量热层材质或厚度;

[0025] (3) 玻璃基底:

[0026] 通过实验环境的气动压力决定玻璃基底厚度,玻璃基底外形与量热层内壁面保持一致,当量热层厚度较厚时可省略玻璃基底;

[0027] (4) 喷涂温敏漆:

[0028] 对量热层内壁面进行清洁,之后采用喷涂装置在量热层内壁面喷涂温敏漆涂层,自然洁净环境下干燥;

[0029] (5) 量热层与玻璃基底胶合:

[0030] 对玻璃基底表面进行清洁,在玻璃基底与温敏漆相互接触一侧均匀喷涂高温光学胶,再将玻璃基底与量热层相胶合,自然环境下固化,所采用光学胶透射率不低于90%。

[0031] 更进一步的,所述步骤(2)中量热层加工过程如下:

[0032] 当量热层厚度较厚时,量热层通过确定的外形、厚度、材质参数直接加工,加工后量热层内壁面进行抛光处理,表面粗糙度小于Ra1.6;当量热层厚度较薄直接加工困难时,量热层采用金属箔进行制备,表面粗糙度小于Ra1.6,量热层的外形通过玻璃基底外形控制。量热层外壁面粗糙度与实验模型粗糙度要求保持相同。

[0033] 一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量方法,采用所述基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,采用共轭梯度法辨识内嵌式温敏漆外壁热流,即通过迭代正则化方法,将热传导反问题转换为热传导正问题、灵敏度问题和伴随问题三个适定问题控制目标函数最小化,包括如下求解步骤:

[0034] (1) 给定外壁热流分布迭代初值;

[0035] (2) 通过求解热传导正问题控制方程确定量热层内壁面温度;

[0036] (3) 计算目标函数式是否迭代收敛,如果已迭代收敛则停止计算;如未迭代收敛则继续计算;

[0037] (4) 求解伴随问题控制方程,确定梯度方向;

[0038] (5) 分别计算共轭系数和下降方向;

[0039] (6) 求解灵敏度问题控制方程并确定迭代步长;

[0040] (7) 确定下一代步量热层外壁热流分布；

[0041] (8) 重复 (2) - (7) 步直至目标函数收敛。

[0042] 进一步的,所述目标函数式J、共轭系数  $\gamma$  及迭代步长 $\beta$ 对应的公式如下:

$$[0043] \quad J[q(x_i, y_i, 0, t)] = \sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=1}^{im} [T(x_i, y_i, N, t) - Y(x_i, y_i, N, t)]^2 \quad (5)$$

$$[0044] \quad \gamma^n = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [J'^n(x_i, y_i, N, t)]^2}{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [J'^{n-1}(x_i, y_i, N, t)]^2} \quad (6)$$

$$[0045] \quad \beta^n = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [T(x_i, y_i, N, t) - Y(x_i, y_i, N, t)] \Delta T(x_i, y_i, N, t)}{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [\Delta T(x_i, y_i, N, t)]^2} \quad (7)$$

[0046] 通过坐标系定义, N为量热层在z三个方向上的厚度,  $z=0$ 为量热层外壁面,  $z=N$ 为量热层内壁面,  $T(x_i, y_i, N, t)$  表示外壁热流为 $q(x_i, y_i, 0, t)$ 时求解得到的内壁面温度,  $Y(x_i, y_i, N, t)$  表示实验测量得到的内壁温度值,  $\Delta T(x_i, y_i, N, t)$  为温升变量,  $t_f$ 为测试时间,  $im$ 为测量相机像素数, 下标 $i$ 为像素索引值, 上标 $n$ 为迭代步数,  $J'^n(x_i, y_i, N, t)$  为第 $n$ 迭代步时的梯度方向。

[0047] 进一步的, 采用忽略量热层内的横向热传导效应确定迭代初值, 从而加速迭代收敛的方法, 具体包括如下步骤:

[0048] 假定量热层内壁面及侧壁无热损失, 则单位面积量热层在某一时间间隔内传入其中的热量应等于量热层蓄积的热量, 即:

$$[0049] \quad q = \int_0^N \rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} dz \quad (8)$$

[0050]  $q$ 为热流,  $T$ 为温度,  $t$ 为时间,  $x, y, z$ 为笛卡尔坐标系的三个坐标轴,  $N$ 为量热层在热流施加方向上(沿 $z$ 轴方向)的厚度,  $\rho$ 为量热层材料密度,  $c$ 为量热层材料比热, 当量热层密度和比热为常数时, 上式可写为:

$$[0051] \quad q = \rho c N \frac{dT_{ave}(x, y, t)}{dt} \quad (9)$$

[0052] 当测试时间大于量热层响应时间后用内壁面温度 $T$ 代替 $z$ 方向的平均温度 $T_{ave}$ , 则上式变为:

$$[0053] \quad q = \rho c N \frac{dT(x, y, N, t)}{dt} \quad (10)$$

[0054] 测量得到的量热层内壁面温度变化历程后经式(10)处理得到外壁热流密度的迭代初值。

[0055] 本发明的有益效果为:

[0056] 本发明提出了一种内嵌式温敏漆测量方法, 发明内容包括: 内嵌式温敏漆测量原理、测量敏感单元设计方法、测量系统构成及参数确定方法、数据处理方法和加速迭代算法。该方法用于测量高超飞行器真实飞行环境高总温条件下热流密度场的测量, 其主要优

点为：

[0057] 1) 由于温敏漆采用内嵌式喷涂,与流场物理隔离,避免了高总温条件下温敏漆涂层的炭化、脱落及辐射效应的影响,扩展了温敏漆测量方法的应用范围,解决了高总温条件下缺乏气动热全场测量技术的难题。

[0058] 2) 对于舵翼等复杂外形区域,常规TSP测量技术由于模型遮挡而无法观测,而复杂是针对飞行器模型外壁面而言,其内壁面并不复杂,因而内嵌式温敏漆测量方法不受模型外形限制;

[0059] 3) 由于温敏漆采用内嵌式喷涂,不改变模型表面粗糙度,完全不影响流场的流动特性。

## 附图说明

[0060] 图1为本发明中内嵌式温敏漆测量敏感单元结构示意图;

[0061] 图2为本发明中内嵌式温敏漆测量系统的结构示意图;

[0062] 图3为本发明中坐标系定义示意图;

[0063] 图4为本发明中共轭梯度算法抗噪性能分析示意图;

[0064] 图5为本发明中局部峰值热流分布对应的内壁面温度变化历程图;

[0065] 图6为本发明中线性热流分布对应的内壁面温度变化历程图;

[0066] 图7为本发明中阶跃热流分布对应的内壁面温度变化历程图;

[0067] 图8为本发明中局部峰值热流分布的辨识结果与精确值对比示意图;

[0068] 图9为本发明中局部峰值热流分布的辨识结果与精确值对比示意图;

[0069] 图10为本发明中局部峰值热流分布的辨识结果与精确值对比示意图;

[0070] 图11 (a) 为本发明中辨识结果与精确值的差异图;

[0071] 图11 (b) 为本发明中辨识结果与精确值的差异图;

[0072] 图11 (c) 为本发明中辨识结果与精确值的差异图;

[0073] 其中,1、量热层;2、温敏漆层;3、玻璃基底;4、内壁面;5、外壁面;6、模型;7、测量敏感单元;8、滤光片;9、成像镜头;10、相机;11、激发光源;12、扩束镜。

## 具体实施方式

[0074] 下面结合附图详细说明本发明。

[0075] 实施例1

[0076] 如图2所示,一种基于内嵌式温敏漆的气动热全场测量系统,其特征在于,该测量系统包括测量敏感单元7、激发光源11、扩束镜12、滤光片8、成像镜头9、相机10。

[0077] 所述测量敏感单元7设置为内嵌式结构,测量敏感单元7与模型6表面呈齐平式安装,激发光源11和扩束镜12连接,所述成像镜头9和滤光片8依次加装在相机10前端,扩束镜12照亮区域和成像镜头9成像区域相重合,并覆盖整个测量敏感单元7,激发光源11照射测量敏感单元7产生辐射光,经由成像镜头9收集后被相机10接收。

[0078] 测量系统安置于实验模型6内部;当模型6内部空间尺寸较小时,可采用半模进行实验,测量系统置于风洞外部。激发光源11照射温敏漆涂层产生辐射光,经由成像镜头9收集后被相机10接收。激发光和温敏漆涂层的辐射光具有不同的光谱特征,在成像镜头9前加

装滤光片8可避免激发光进入成像系统。激发光源11和滤光片8的选取需要与温敏漆的辐射特性相匹配。

#### [0079] 实施例2

[0080] 在实施例1的基础上,不同于实施例,本发明的又一实施例,如图1所示,测量敏感单元7设置为由量热层1、温敏漆层2和玻璃基底3构成的结构,通过量热层1内壁温反演外壁热流。

[0081] 量热层1为吸热元件,其设置为金属材质,外形与实验模型6相同,其外壁面5与高超声速流场相接触;量热层1的厚度与量热层1材料和所测试气动热流密度、测试时间相关。

[0082] 测量敏感单元7通过玻璃基底3承受气动压力,当量热层1厚度较厚足够承受气动压力时,可省略玻璃基底3。

[0083] 温敏漆层2喷涂在量热层1内壁面4,通过温敏漆层2测量内壁温随时间的变化,量热层1外壁面5与高超声速流场相接触,高温流场对外壁面5的气动加热通过热传导至量热层1内壁面4,基本物理过程为非稳态热传导的过程,控制方程为式(1)。因此,测量量热层1内壁温度后通过求解热传导反问题即可确定外壁面5的热流密度。

$$[0084] \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

[0085] 其中,T为温度,t为时间,x、y、z为笛卡尔坐标系的三个坐标轴, $\alpha$ 为量热层1材料的热扩散系数,测量量热层1内壁温度后通过求解热传导反问题确定外壁面5的热流密度。

[0086] 温敏漆的测温原理是利用光致发光的热猝灭效应测量温度变化,其辐射强度随温度的升高而降低,通过测量温敏漆的辐射强度变化即可获得温度变化。由于温敏漆层2与高超声速流场物理隔离,且量热层1不透光,从而克服了高超飞行器真实飞行条件下温敏漆涂层炭化、脱落的问题,并规避了辐射现象的影响。

#### [0087] 实施例3

[0088] 在实施例2的基础上,本发明的又一实施例,如图1所示,测量敏感单元7制作方法,包括如下步骤:

[0089] (1) 确定测量敏感单元7外形:

[0090] 测量敏感单元7外形与所测试区域实验模型6的外形保持一致,并且测量敏感单元7与模型6表面齐平安装,保证不改变实验模型6气动热环境。

[0091] (2) 确定量热层1厚度和材质:

[0092] 对所要测量的气动热环境进行分析,估计热流密度峰值,初步给定量热层1材质(常用金属材质,如铜、铝、不锈钢等)和厚度,通过求解非稳态热传导方程确定量热层1内壁温度变化历程,计算结果与温敏漆应用温度范围进行对比,若超出应用范围或内壁温变化太小则改变量热层1材质或厚度,重新求解热传导方程,最终确定量热层1材质和厚度的最优选择。

[0093] (3) 玻璃基底3:

[0094] 当量热层1厚度较厚可承受气动压力时可不采用玻璃基底3,其它情况时,玻璃基底3外形与量热层1内壁面4保持一致。玻璃基底3厚度由实验环境的气动压力决定。

[0095] (4) 量热层1加工:

[0096] 当量热层1厚度较厚时,量热层1通过确定的外形、厚度、材质等参数直接加工,加

工后量热层1内壁面4进行抛光处理,表面粗糙度小于Ra1.6;当量热层1厚度较薄直接加工困难时,量热层1采用金属箔,表面粗糙度小于Ra1.6,此种情况下量热层1的外形主要通过玻璃基底3外形控制,量热层1外壁面5粗糙度与实验模型6粗糙度要求保持相同。

[0097] (5) 喷涂温敏漆:

[0098] 对量热层1内壁面4进行清洁,去除油污、灰尘等,之后利用喷涂装置在量热层1内壁面4喷涂温敏漆涂层,自然洁净环境下干燥。

[0099] (6) 量热层1与玻璃基底3胶合:

[0100] 对玻璃基底3表面进行清洁,去除油污、灰尘等,在玻璃基底3与温敏漆相接触一侧均匀喷涂高温光学胶,之后将玻璃基底3与量热层1相胶合,自然环境下固化。所采用光学胶透射率不低于90%。

[0101] 实施例4

[0102] 在上述实施例的基础上,本发明的又一实施例,气动热流反演方法。

[0103] 量热层内发生的基本物理过程是非稳态热传导过程,故由测量得到的内壁温度计算外壁热流属于热传导反问题,该问题在数学上是不适定的,无法直接求解,本发明利用共轭梯度法将不适定的热传导反问题转换为优化问题进行求解。

[0104] 共轭梯度法属于迭代正则化方法,将热传导反问题转换为热传导正问题、灵敏度问题和伴随问题三个适定问题使目标函数最小化。求解过程为:

[0105] (1) 给定外壁热流分布初始值。

[0106] (2) 通过求解热传导正问题控制方程确定量热层内壁面温度。

[0107] (3) 计算目标函数式是否收敛,如果已收敛则停止计算;如未收敛则继续计算;

[0108] (4) 求解伴随问题控制方程,确定梯度方向。

[0109] (5) 分别计算共轭系数和下降方向;

[0110] (6) 求解灵敏度问题控制方程并确定迭代步长。

[0111] (7) 确定下一代步量热层外壁热流分布。

[0112] (8) 重复(2)-(7)步直至目标函数收敛。

$$[0113] \quad J[q(x_i, y_i, 0, t)] = \sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=1}^{im} [T(x_i, y_i, N, t) - Y(x_i, y_i, N, t)]^2 \quad (2)$$

[0114] 式中 $T(x_i, y_i, N, t)$ 表示外壁热流为 $q(x_i, y_i, 0, t)$ 时求解得到的内壁面温度, $Y(x_i, y_i, N, t)$ 表示实验测量得到的内壁温度值, $t_f$ 为测试时间, $im$ 为测量相机的像素数,下标 $i$ 为像素索引值。共轭梯度法通过迭代找出满足内壁温度分布的外壁热流分布,迭代过程为:

$$[0115] \quad q^{n+1}(x_i, y_i, 0, t) = q^n(x_i, y_i, 0, t) - \beta^n P^n(x_i, y_i, N, t) \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

[0116] 式中: $n$ 为迭代步数, $\beta$ 为步长, $P$ 为下降方向,

$$[0117] \quad P^n(x_i, y_i, N, t) = J'^n(x_i, y_i, N, t) + \gamma^n P^{n-1}(x_i, y_i, N, t) \quad (4)$$

[0118] 式中: $J'$ 为梯度方向, $\gamma$ 为共轭系数,

$$[0119] \quad \gamma^n = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [J'^n(x_i, y_i, N, t)]^2}{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [J'^{n-1}(x_i, y_i, N, t)]^2} \quad (5)$$

[0120] 初始迭代时 $\gamma^0=0$ 。迭代过程中,通过求解热传导正问题确定给定外壁热流情况

下的内壁面温度 $T(x_i, y_i, N, t)$ ;通过求解灵敏度问题确定迭代步长 $\beta$ ;通过求解伴随问题确定下降方向 $P$ 。三个问题的控制方程为:

[0121] 1) 热传导正问题:

[0122] 热传导正问题的控制方程为:

$$[0123] \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

[0124] 边界条件为:

$$[0125] \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = q(x, y, z, t) \quad (z=0, t>0) \quad (7)$$

$$[0126] \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (z=N, t>0) \quad (8)$$

$$[0127] \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x=0, L, t>0) \quad (9)$$

$$[0128] \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (y=0, M, t>0) \quad (10)$$

[0129] 初始条件为:

$$[0130] \quad T = T_0 (t=0) \quad (11)$$

[0131] 式中 $T$ 为温度; $T_0$ 为初始温度,为常数; $t$ 为时间; $\alpha$ 为量热层材料的热扩散系数; $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为笛卡尔坐标系的三个坐标轴; $k$ 为量热层材料的导热系数; $L$ 、 $M$ 、 $N$ 为量热层在三个方向上的长度; $q(x, y, z, t)$ 量热层壁面热流分布,符号定义如图3所示。

[0132] 2) 灵敏度问题

[0133] 灵敏度方程为:

$$[0134] \quad \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

[0135] 边界条件为:

$$[0136] \quad -k \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = \Delta q(x, y, z, t) \quad (z=0, t>0) \quad (13)$$

$$[0137] \quad -k \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = 0 \quad (z=N, t>0) \quad (14)$$

$$[0138] \quad -k \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = 0 \quad (x=0, L, t>0) \quad (15)$$

$$[0139] \quad -k \frac{\partial \Delta T}{\partial y} = 0 \quad (y=0, M, t>0) \quad (16)$$

[0140] 初始条件为:

$$[0141] \quad \Delta T = 0 (t=0) \quad (17)$$

[0142] 式中 $\Delta T$ 温升变量,求解灵敏度方程后,可确定迭代步长为:

$$[0143] \quad \beta^n = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [T(x_i, y_i, N, t) - Y(x_i, y_i, N, t)] \Delta T(x_i, y_i, N, t)}{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [\Delta T(x_i, y_i, N, t)]^2} \quad (18)$$

[0144] 3) 伴随问题

[0145] 伴随问题的控制方程为:

$$[0146] \quad \rho c \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

$$[0147] \quad -k \frac{\partial \lambda}{\partial z} = 0 \quad (z=0, t>0) \quad (20)$$

$$[0148] \quad -k \frac{\partial \lambda}{\partial z} = 2(T-Y)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i) \quad (z=N, t>0) \quad (21)$$

$$[0149] \quad -k \frac{\partial \lambda}{\partial x} = 0 \quad (x=0, L, t>0) \quad (22)$$

$$[0150] \quad -k \frac{\partial \lambda}{\partial y} = 0 \quad (y=0, M, t>0) \quad (23)$$

$$[0151] \quad \lambda = 0 \quad (t=t_f) \quad (24)$$

[0152] 式中 $\delta(\cdot)$ 为脉冲函数, $\lambda$ 为拉格朗日乘数变量,求解伴随问题后,可确定梯度方向为:

$$[0153] \quad J' [q(x_i, y_i, N, t)] = \lambda(x_i, y_i, 0, t) \quad (25)$$

[0154] 根据上述理论,采用共轭梯度法的求解过程为:

[0155] (1) 给定 $q^0(x_i, y_i, 0, t)$ 初始值;

[0156] (2) 通过求解热传导正问题控制方程(6)-(11)确定量热层内壁面温度 $T(x_i, y_i, N, t)$ ; (3) 计算目标函数式(2)是否收敛,如果已收敛则停止计算;如未收敛则继续计算; (4) 求解伴随问题控制方程(19)-(25),确定梯度方向 $J' [q(x_i, y_i, N, t)]$ 。

[0157] (5) 由式(4) (5) 分别计算共轭系数 $\gamma^n$ 和下降方向 $P^n$ ;

[0158] (6) 求解灵敏度问题控制方程(12)-(17),结合式(18)确定迭代步长 $\beta^n$

[0159] (7) 由式(3)确定下一代步量热层外壁热流 $q^{n+1}(x_i, y_i, 0, t)$

[0160] (8) 重复(2)-(7)步直至收敛。

[0161] 共轭梯度算法在计算目标函数、共轭系数及搜索步长时常采用的公式为:

[0162] 目标函数:

$$[0163] \quad J[q(x_i, y_i, 0, t)] = \sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=1}^{im} [T(x_i, y_i, N, t) - Y(x_i, y_i, N, t)]^2 \quad (26)$$

[0164] 共轭系数:

$$[0165] \quad \gamma^n = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [J'^n(x_i, y_i, N, t)]^2}{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [J'^{n-1}(x_i, y_i, N, t)]^2} \quad (27)$$

[0166] 搜索步长:

$$[0167] \quad \beta^n = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [T(x_i, y_i, N, t) - Y(x_i, y_i, N, t)] \Delta T(x_i, y_i, N, t)}{\sum_{t=0}^{t_f} \sum_{i=0}^{im} [\Delta T(x_i, y_i, N, t)]^2} \quad (28)$$

[0168] 如图3所示,坐标系定义N为量热层在z方向上的厚度,  $z=0$ 为量热层外壁面,  $z=N$ 为量热层内壁面,  $T(x_i, y_i, N, t)$ 表示外壁热流为  $q(x_i, y_i, 0, t)$ 时求解得到的内壁面温度,  $Y(x_i, y_i, N, t)$ 表示实验测量得到的内壁温度值,  $t_f$ 为测试时间,  $im$ 为测量相机像素数,  $J'^n(x_i, y_i, N, t)$ 为梯度方向。

[0169] 由于高超声速风洞气动加热过程基本为准定常过程,本发明提出对上述公式进行简化,省略积分项,从而减小计算量,提高计算效率并降低对计算内存的需求。针对准定常过程,简化后的目标函数、共轭系数及搜索步长为:

$$[0170] \quad J[q(x_i, y_i, 0)] = \sum_{i=1}^{im} [T(x_i, y_i, N, t_A) - Y(x_i, y_i, N, t_A)]^2 \quad (29)$$

$$[0171] \quad \gamma^n = \frac{\sum_{i=0}^{im} [J'^n(x_i, y_i, N, t_A)]^2}{\sum_{i=0}^{im} [J'^{n-1}(x_i, y_i, N, t_A)]^2} \quad (30)$$

$$[0172] \quad \beta^n = \frac{\sum_{t=0}^{im} [T(x_i, y_i, N, t_A) - Y(x_i, y_i, N, t_A)] \Delta T(x_i, y_i, N, t_A)}{\sum_{t=0}^{im} [\Delta T(x_i, y_i, N, t_A)]^2} \quad (31)$$

[0173] 式中  $t_A$  为用于辨识的内壁温度图像采集时刻。

[0174] 实施例5

[0175] 在上述实施例的基础上,本发明的又一实施例,迭代加速算法。

[0176] 共轭梯度法通过不断的迭代找出满足量热层内壁温度分布的外壁热流,迭代初值  $q^0(x_i, y_i, 0, t)$  影响算法的收敛速度,对辨识过程计算耗时影响较大。一般情况下  $q^0(x_i, y_i, 0, t)$  无法给出具体的分布,只能给定为常数,造成计算时间较长。本发明提出了采用忽略量热层内的横向热传导效应确定迭代初值,从而加速迭代收敛的方法,具体包括如下步骤:

[0177] 假定量热层内壁面及侧壁无热损失,则单位面积量热层在某一时间间隔内传入其中的热量应等于量热层蓄积的热量,即:

$$[0178] \quad q = \int_0^N \rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} dz \quad (32)$$

[0179] N分别为量热层在热流施加方向上的厚度,  $\rho$ 为量热层材料密度,  $c$ 为量热层材料比热,当量热层密度和比热为常数时,上式可写为:

$$[0180] \quad q = \rho c N \frac{dT_{ave}(x, y, t)}{dt} \quad (33)$$

[0181] 当测试时间大于量热层响应时间后可用内壁面温度  $T$  代替平均温度  $T_{ave}$ ,则上式变为:

$$[0182] \quad q = \rho c N \frac{dT(x, y, N, t)}{dt} \quad (34)$$

[0183] 测量得到的量热层内壁面温度变化历程后经式(34)处理得到外壁热流密度的迭代初值。

[0184] 测量系统参数确定

[0185] 合理设计测量系统需要确定相机采样深度、激发光源强度/稳定性及敏感漆涂层厚度。对于本发明提出的测量方法,应首先根据共轭梯度算法的抗噪性能在给定所需热流精度的条件下确定温度的测量精度要求,再结合误差传递理论确定相机采样深度、激发光源强度/稳定性及敏感漆涂层厚度。如图4所示,针对局部峰值热流分布,热流密度最大值 $q_{\max}=2.35E7W/m^2$ ,热流密度最小值 $q_{\min}=1.0E6 W/m^2$ 时共轭梯度算法的抗噪性能分析,在此情况下温度测量精度为 $\pm 0.2K$ 、 $\pm 0.5K$ 及 $\pm 1.0K$ 时,共轭梯度方法辨识得到的热流值与精确值间的最大差异不超过2.6%、6.5%和12.9%。

[0186] 验证算例:

[0187] 验证该测量方法的可行性,主要需验证利用温敏漆测量得到内壁温辨识外壁热流的可行性。验证过程为:

[0188] (1) 确定量热层参数,并给定外壁热流分布;

[0189] (2) 数值求解三维非稳态热传导方程,获得量热层内壁面温度随时间的变化历程,以此结果模拟温敏漆测温结果;

[0190] (3) 利用式(34)确定外壁热流迭代初值;

[0191] (4) 利用共轭梯度法辨识外壁热流分布;

[0192] (5) 根据辨识得到的外壁热流分布和给定的热流分布进行对比,确定测量方法的可行性。

[0193] 针对高超声速气动热实验中典型的局部峰值热流、线性热流和阶跃热流分布情况进行数值验证。三种算例量热层材料均选定为铜,对应的材料密度为 $8920kg/m^3$ ,比热为 $386J/(kg \cdot K)$ ,热导率为 $398W/(m \cdot K)$ ,热流密度最大值 $q_{\max}=2.35E7W/m^2$ ,热流密度最小值 $q_{\min}=1.0E6 W/m^2$ ,量热层尺寸为: $200*200*0.8mm(x*y*z)$ 。

[0194] 在给定热流分布情况下,三种热流分布对应的量热层 $y=100mm$ 内壁处温度随时间的变化历程如图5、6、7所示。

[0195] 取 $t_A=10ms$ ,利用共轭梯度法结合内壁面温度分布图像对外壁热流分布进行辨识,提取 $y=100mm$ 处的辨识结果与精确值进行对比,如图8、9、10所示。从图中可见辨识结果与精确值完全重合。进一步做定量对比,图11(a)、图11(b)、图11(c)为辨识结果与精确值间的差异,从图中可确定算例辨识误差小于0.2%,表明本发明提出的方法切实可行。

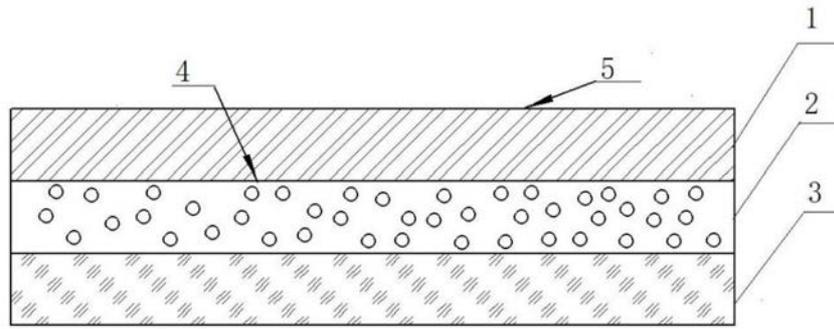


图1

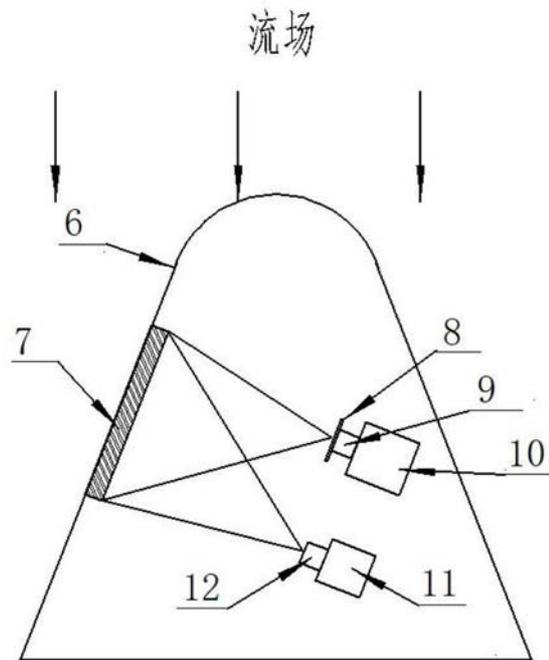


图2

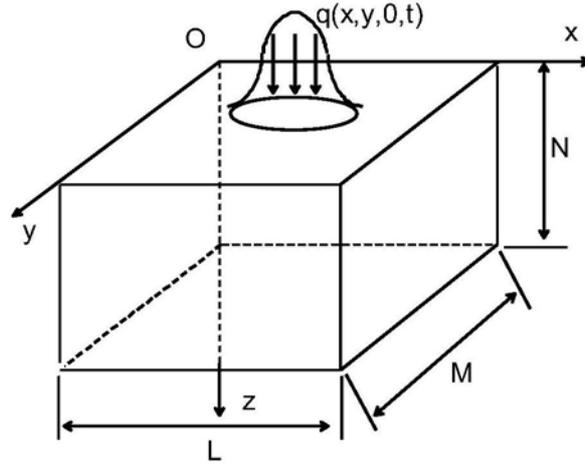


图3

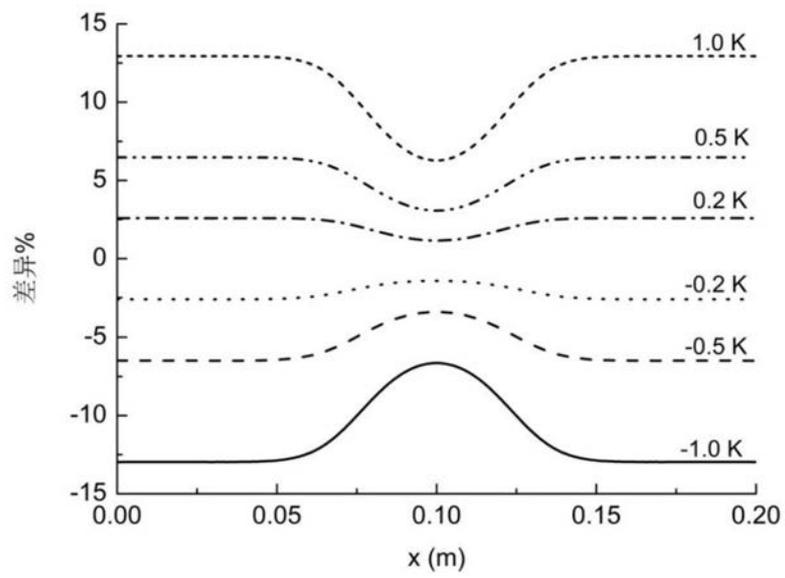


图4

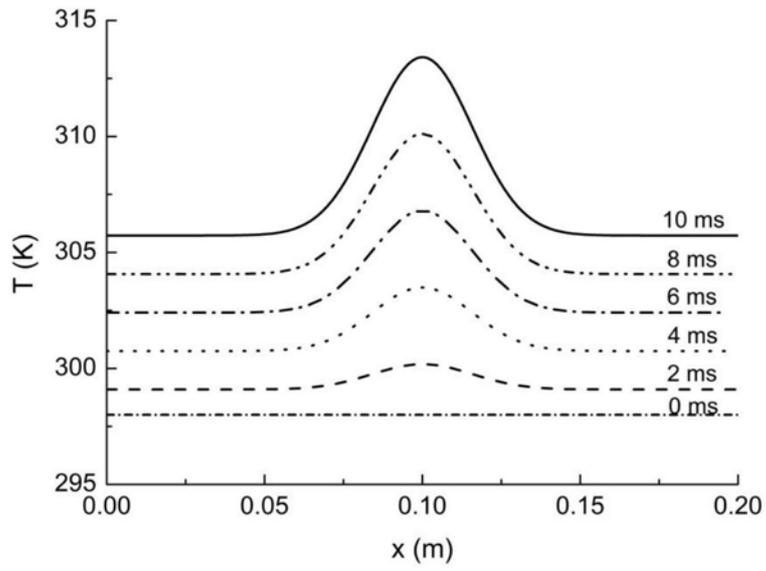


图5

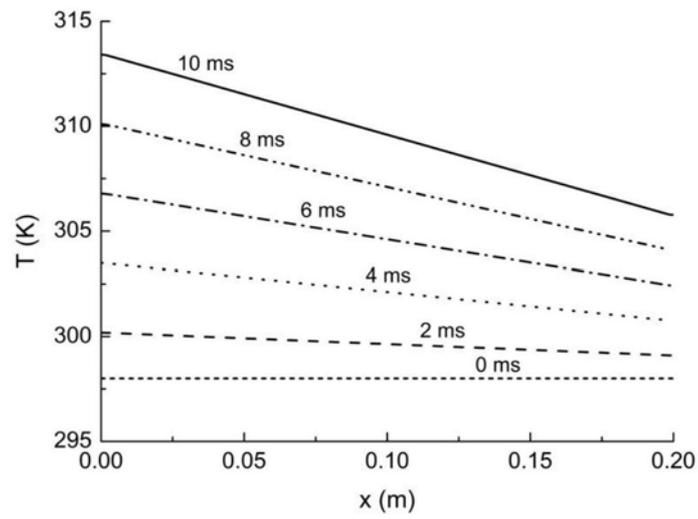


图6

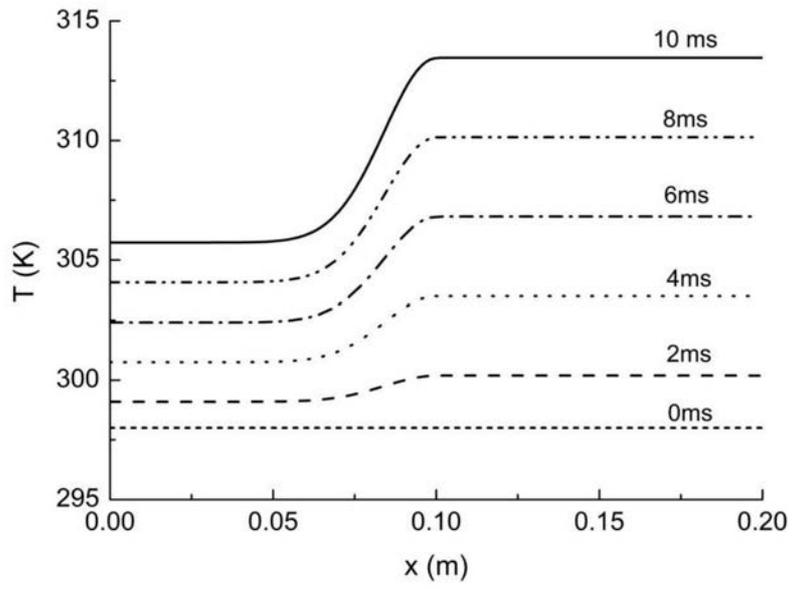


图7

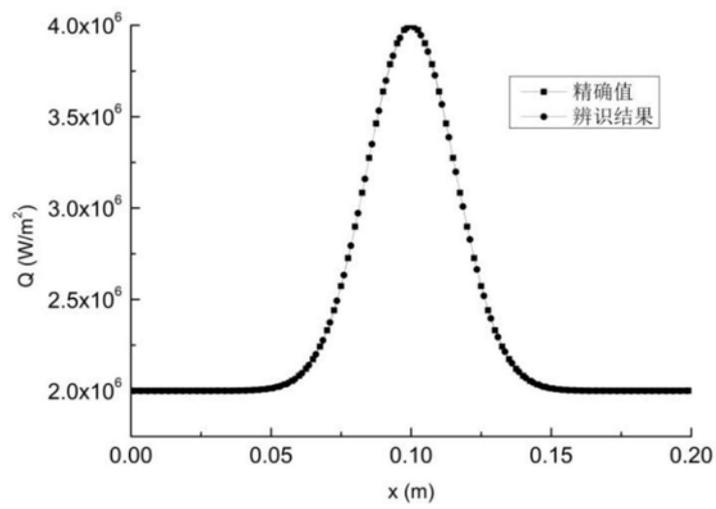


图8

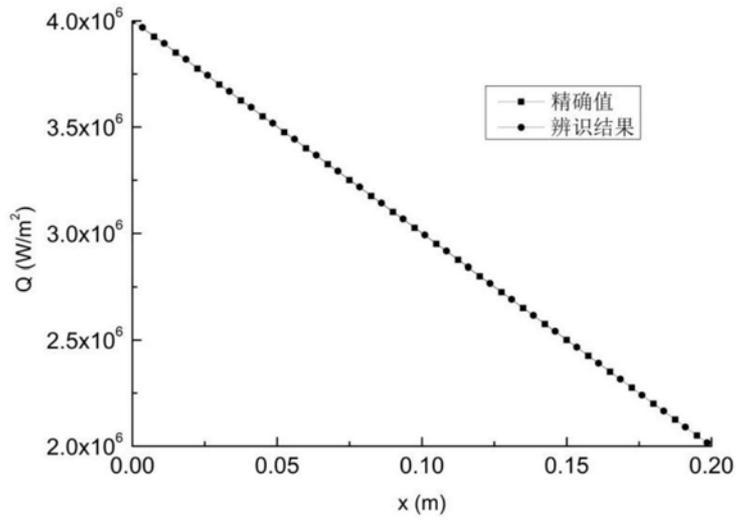


图9

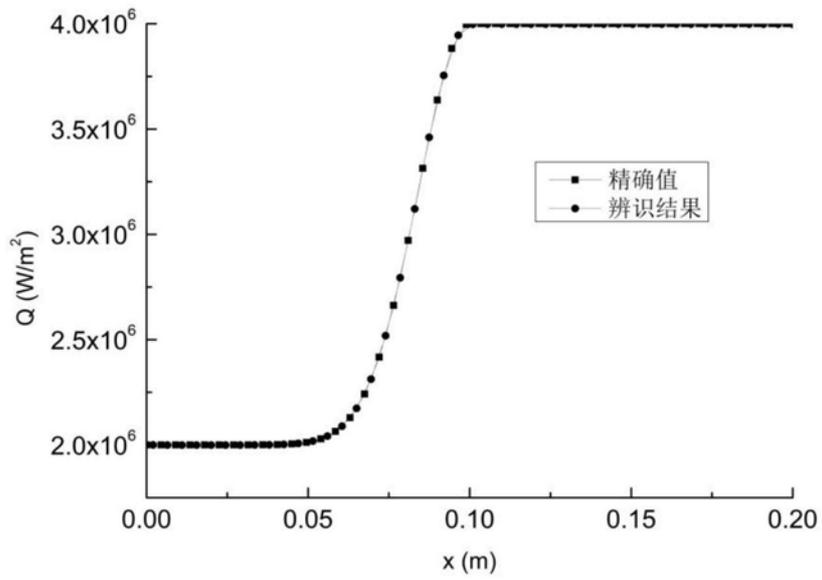


图10

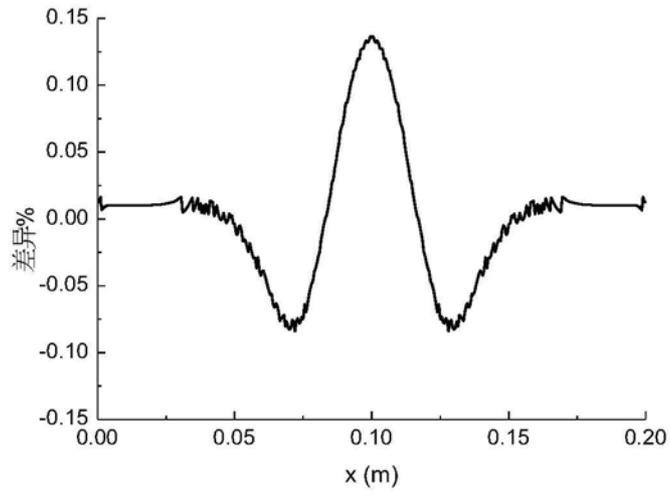


图11 (a)

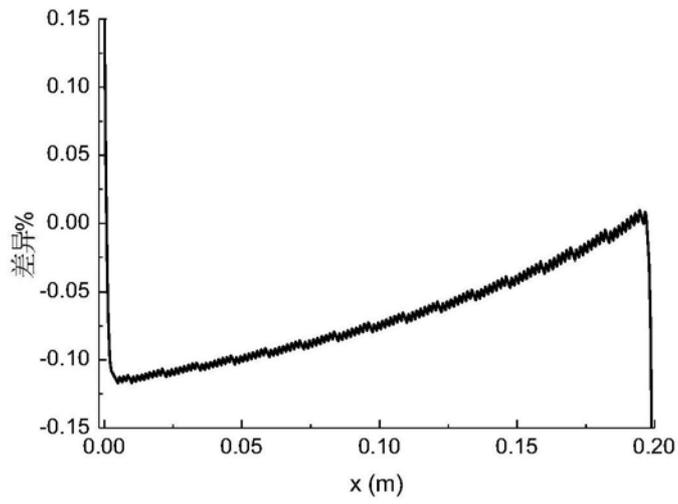


图11 (b)

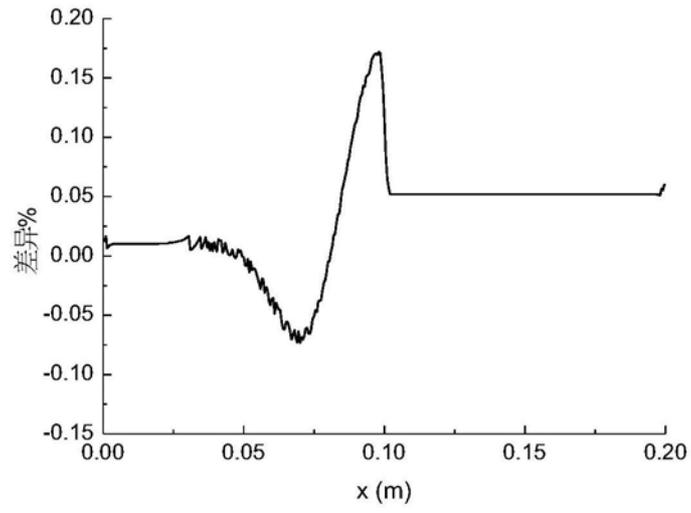


图11 (c)