



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106896079 B

(45)授权公告日 2019.05.24

(21)申请号 201710146483.X

(22)申请日 2017.03.13

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 106896079 A

(43)申请公布日 2017.06.27

(73)专利权人 北京环境特性研究所  
地址 100854 北京市海淀区永定路50号

(72)发明人 段然 朱希娟 马静 吴杰

(74)专利代理机构 北京格允知识产权代理有限公司 11609

代理人 周娇娇

(51)Int.Cl.  
G01N 21/3563(2014.01)

(56)对比文件  
CN 105659830 B,2014.06.18,  
CN 102353691 A,2012.02.15,

CN 104076060 A,2014.10.01,  
JP 2017026433 A,2017.02.02,  
JP 6114687 B2,2017.04.12,  
US 2015110151 A1,2015.04.23,  
JP 5809089 B2,2015.11.10,  
JP 2005291711 A,2005.10.20,  
L.M.Hanssen et al..Evaluation of  
Blackbody Cavity Emissivity in the  
Infrared Using Total Intetrated Scatter  
Measurements.《International Journal of  
Thermophysics》.2007,第29卷(第1期),352-369  
页.

Chang-Da Wen et al..Emissivity  
characteristics of polished aluminum  
alloy surfaces.《International Journal of  
Heat and Mass Transfer》.2004,第48卷1316-  
1329.

审查员 麦佐艳

权利要求书2页 说明书7页 附图3页

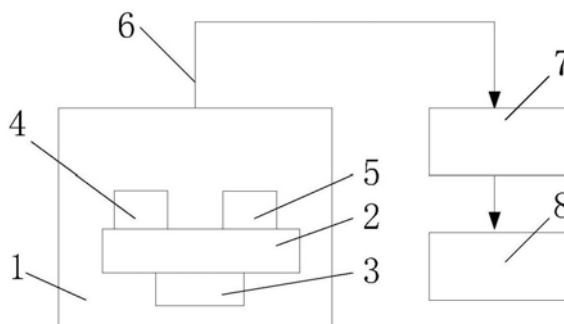
(54)发明名称

耐高温镍基合金材料的光谱发射率建模方法和测量系统

(57)摘要

公开了耐高温镍基合金材料的光谱发射率建模方法和测量系统,其中所述建模方法包括:根据待测耐高温镍基合金样件的服役环境确定样件的服役温度范围和波长范围;从样件的服役温度范围和波长范围中任意选取若干组测试温度和波长;针对每一组测试温度和波长,获取样件在当前测试温度和波长下的光谱发射率;基于若干组测试温度、波长和光谱发射率数据,拟合光谱发射率模型中的模型参数,得到样件的光谱发射率模型。本发明建立的耐高温镍基合金的光谱发射率模型,能够模拟镍基合金在各个温度和波长下的发射率,模拟的温度和波长范围宽、模拟结果与测试结果的吻合度高,从而为辐射换热模拟和防热设计提供高精度的发射率数据。

CN 106896079 B



1. 耐高温镍基合金材料的光谱发射率建模方法,其特征在于包括如下步骤:

S1. 根据待测耐高温镍基合金样件的服役环境确定样件的服役温度范围和波长范围;

S2. 从样件的服役温度范围和波长范围中任意选取若干组测试温度和波长;针对每一组测试温度和波长,获取样件在当前测试温度和波长下的光谱发射率;

S3. 基于若干组测试温度、波长和光谱发射率数据,拟合光谱发射率模型中的模型参数,得到样件的光谱发射率模型;

其中,所述光谱发射率模型为:

$$\varepsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \frac{T}{T_0} + \frac{a_2}{\sqrt{\lambda}} + \frac{a_3}{\lambda} + \frac{a_4}{\lambda^2}$$

式中, $\varepsilon(\lambda, T)$ 为样件的光谱发射率; $\lambda$ 为波长,单位为 $\mu\text{m}$ ;T为测试温度,单位为K; $T_0$ 代表室温,其取值为300K; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 为模型参数,无单位量纲。

2. 如权利要求1所述的光谱发射率建模方法,其特征在于,所述获取样件在当前测试温度和波长下的光谱发射率包括:

分别获取黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度;

按照如下公式确定样件的光谱发射率:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L_s(\lambda, T)}{L_b(\lambda, T)}$$

式中, $L_s(\lambda, T)$ 为样件在测试温度T和波长 $\lambda$ 下的辐射亮度, $L_b(\lambda, T)$ 为黑体在测试温度T和波长 $\lambda$ 下的辐射亮度。

3. 如权利要求2所述的光谱发射率建模方法,其特征在于,分别获取黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度包括:

将黑体温度分别设置为 $T_1$ 和 $T_2$ ,获取红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ ;

根据获取的 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ ,解算红外光谱仪的辐射信号关系式中样件和测试背景的几何因子 $G_1$ 和 $G_2$ ;

基于 $G_1$ 和 $G_2$ ,利用红外光谱仪的辐射信号关系式确定黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度;

其中,所述红外光谱仪的辐射信号关系式为:

$$S(\lambda) = R(\lambda) [G_1 L(\lambda, T) + G_2 L_0(\lambda)]$$

式中, $S(\lambda)$ 为红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值; $R(\lambda)$ 为红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的响应函数; $G_1$ 和 $G_2$ 分别为样件和测试背景的几何因子; $L(\lambda, T)$ 为待测的样件或黑体在测试温度T和波长 $\lambda$ 下的辐射亮度, $L_0(\lambda)$ 为测试背景在测试温度T和波长 $\lambda$ 下的辐射亮度。

4. 如权利要求3所述的光谱发射率建模方法,其特征在于,样件的光谱发射率为:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{S_s(\lambda, T) - S_0}{S_b(\lambda, T) - S_0}, \quad S_0 = G_2 R(\lambda) L_0(\lambda) = S_1(\lambda) - \frac{(S_2(\lambda) - S_1(\lambda)) L_b(\lambda, T_1)}{L_b(\lambda, T_2) - L_b(\lambda, T_1)}$$

式中, $L_b(\lambda, T_1)$ 为黑体表面温度为 $T_1$ 时、红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值, $L_b(\lambda, T_2)$ 为黑体表面温度为 $T_2$ 时、红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值; $S_s(\lambda, T)$ 为样件表面温度为T时、红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值, $S_b(\lambda, T)$ 为黑体表面温度为T时、红外

光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值。

5. 采用如权利要求1-4任一所述的方法进行光谱发射率建模的测量系统,其特征在于包括:真空室、加热单元、转动单元、黑体炉、测温单元、光路传输单元、红外光谱仪和控制器;其中,

加热单元设置在真空室内,用于承载、加热待测样件和黑体炉;

光路传输单元的两端分别与真空室和红外光谱仪连通,用于将待测样件或黑体的辐射能传入红外光谱仪;红外光谱仪将辐射能变为干涉光,并发送至控制器;

转动单元设置在真空室内,用于在控制器的控制下转动加热单元上的黑体和样件,使其辐射能分别经过光路传输单元进入红外光谱仪;测温单元用于探测待测样件或黑体的表面温度,并传送给控制器;

控制器根据测温单元发送的表面温度数据,控制加热单元对样件或黑体进行加热或者终止加热;控制器对接收的干涉光进行傅里叶变换,获取波长以及红外光谱仪的辐射信号输出值;基于若干组测试温度、波长和光谱发射率数据,拟合光谱发射率模型中的模型参数,得到样件的光谱发射率模型;

其中,所述光谱发射率模型为:

$$\varepsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \frac{T}{T_0} + \frac{a_2}{\sqrt{\lambda}} + \frac{a_3}{\lambda} + \frac{a_4}{\lambda^2}$$

式中, $\varepsilon(\lambda, T)$ 为样件的光谱发射率; $\lambda$ 为波长,单位为 $\mu\text{m}$ ;T为测试温度,单位为K; $T_0$ 代表室温,其取值为300K; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 为模型参数,无单位量纲。

6. 如权利要求5所述的测量系统,其特征在于,加热单元为钨板。

7. 如权利要求5所述的测量系统,其特征在于,测温单元为铂铑-铂热电偶。

## 耐高温镍基合金材料的光谱发射率建模方法和测量系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及高温部件热分析、气固辐射耦合换热模拟领域,尤其涉及耐高温镍基合金材料的光谱发射率建模方法和测量系统。

### 背景技术

[0002] 以下对本发明的相关技术背景进行说明,但这些说明并不一定构成本发明的现有技术。

[0003] 发射率是材料的固有属性,是飞行器的高温部件的热设计、排气系统的目标特性、隐身材料研制等领域所关注的主要参数,发射率的精度对于高温部件防热设计有着直接的影响。

[0004] 辐射传热问题主要存在于飞行器动力装置的防热设计,如广泛应用于飞机和巡航导弹的燃气轮机,其燃烧室和涡轮具有很高的温度,主要材料采用耐高温的镍基合金。随着发动机性能的不不断提升,燃烧室的温度也在不断升高,现如今,燃烧室的温度可达1800K甚至更高。为了防止火焰筒和高压涡轮的热损坏、提高使用期限,必须采用更加合理高效的冷却设计,保证部件温度在材料的允许范围内,这意味着要更好地了解燃烧室壁面冷却的传热过程,对大多数情况而言,由于燃烧室具有很高的压力,在燃烧室主燃区由高温气体向壁面传热的一大部分是辐射换热,同时,在火焰筒存在有效的气膜冷却的情况下,辐射换热甚至是唯一的由燃气到壁面的传热。壁面的全辐射出射度可由斯蒂芬-波尔兹曼公式 $M = \epsilon \sigma T^4$ 计算得到,可见辐射能量与温度的四次方成正比,也说明了当处于高温环境时,辐射换热的比重将会急剧的增大。公式中的 $\epsilon$ 为发射率。

[0005] 一方面,在计算固体壁面的辐射能量时,通常认为壁面的发射率不具有光谱选择性,即在全波长范围内具有相同的发射率,但是在燃烧室内,壁面的温度很高可达1500K,此时其辐射能量的峰值集中于中波附近,研究表明,燃烧室的主要材料高温镍基合金在中波波段的发射率随出射波长的变化会发生较大的变化,如图1所示,在中波的发射率由0.6变化至0.1。另一方面,辐射换热是燃气和固壁的耦合辐射换热,而气体辐射具有光谱选择性的,只在特定的波段发射和吸收能量,而这一发射/吸收波段正是位于中波的波段,因此必须分光谱计算固壁的发射率,否则会严重影响辐射传热计算的准确性。

[0006] 另一方面,燃烧室内由于燃烧的存在,相同材料不同结构处的温度差异很大(400K-1500K),同时由于飞行状态的不同,相同材料相同结构也会经历不小的温度变化。已知的是一般情况下金属的发射率会随温度的升高而升高,在燃烧室这种存在很大温度梯度的部件辐射换热计算中,必须采用随温度变化的发射率数据,否则会对计算的结果造成很大的误差。

### 发明内容

[0007] 根据本发明的一个方面,提供耐高温镍基合金材料的光谱发射率建模方法,包括如下步骤:

[0008] S1. 根据待测耐高温镍基合金样件的服役环境确定样件的服役温度范围和波长范围；

[0009] S2. 从样件的服役温度范围和波长范围中任意选取若干组测试温度和波长；针对每一组测试温度和波长，获取样件在当前测试温度和波长下的光谱发射率；

[0010] S3. 基于若干组测试温度、波长和光谱发射率数据，拟合光谱发射率模型中的模型参数，得到样件的光谱发射率模型；

[0011] 其中，所述光谱发射率模型为：

$$[0012] \quad \varepsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \frac{T}{T_0} + \frac{a_2}{\sqrt{\lambda}} + \frac{a_3}{\lambda} + \frac{a_4}{\lambda^2}$$

[0013] 式中， $\varepsilon(\lambda, T)$  为样件的光谱发射率； $\lambda$  为波长，单位为  $\mu\text{m}$ ； $T$  为测试温度，单位为 K； $T_0$  代表室温，其取值为 300K； $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  为模型参数，无单位量纲。

[0014] 优选地，所述获取样件在当前测试温度和波长下的光谱发射率包括：

[0015] 分别获取黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度；

[0016] 按照如下公式确定样件的光谱发射率：

$$[0017] \quad \varepsilon(\lambda) = \frac{L_s(\lambda, T)}{L_b(\lambda, T)}$$

[0018] 式中， $L_s(\lambda, T)$  为样件在测试温度  $T$  和波长  $\lambda$  下的辐射亮度， $L_b(\lambda, T)$  为黑体在测试温度  $T$  和波长  $\lambda$  下的辐射亮度。

[0019] 优选地，分别获取黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度包括：

[0020] 将黑体温度分别设置为  $T_1$  和  $T_2$ ，获取红外光谱仪在波长  $\lambda$  处的辐射信号输出值  $S_1(\lambda)$  和  $S_2(\lambda)$ ；

[0021] 根据获取的  $S_1(\lambda)$  和  $S_2(\lambda)$ ，解算红外光谱仪的辐射信号关系式中样件和测试背景的几何因子  $G_1$  和  $G_2$ ；

[0022] 基于  $G_1$  和  $G_2$ ，利用红外光谱仪的辐射信号关系式确定黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度；

[0023] 其中，所述红外光谱仪的辐射信号关系式为：

$$[0024] \quad S(\lambda) = R(\lambda) [G_1 L(\lambda, T) + G_2 L_0(\lambda)]$$

[0025] 式中， $S(\lambda)$  为红外光谱仪在波长  $\lambda$  处的辐射信号输出值； $R(\lambda)$  为红外光谱仪在波长  $\lambda$  处的响应函数； $G_1$  和  $G_2$  分别为样件和测试背景的几何因子； $L(\lambda, T)$  为待测的样件或黑体在测试温度  $T$  和波长  $\lambda$  下的辐射亮度， $L_0(\lambda)$  为测试背景在测试温度  $T$  和波长  $\lambda$  下的辐射亮度。

[0026] 优选地，样件的光谱发射率为：

$$[0027] \quad \varepsilon(\lambda) = \frac{S_s(\lambda, T) - S_0}{S_b(\lambda, T) - S_0}, \quad S_0 = G_2 R(\lambda) L_0(\lambda) = S_1(\lambda) - \frac{(S_2(\lambda) - S_1(\lambda)) L_b(\lambda, T_1)}{L_b(\lambda, T_2) - L_b(\lambda, T_1)}$$

[0028] 式中， $L_b(\lambda, T_1)$  为黑体表面温度为  $T_1$  时、红外光谱仪在波长  $\lambda$  处的辐射信号输出值， $L_b(\lambda, T_2)$  为黑体表面温度为  $T_2$  时、红外光谱仪在波长  $\lambda$  处的辐射信号输出值； $S_s(\lambda, T)$  为样件表面温度为  $T$  时、红外光谱仪在波长  $\lambda$  处的辐射信号输出值， $S_b(\lambda, T)$  为黑体表面温度为  $T$  时、红外光谱仪在波长  $\lambda$  处的辐射信号输出值。

[0029] 根据本发明的另一个方面，提供采用上述方法进行光谱发射率建模的测量系统，包括：真空室、加热单元、转动单元、黑体炉、测温单元、光路传输单元、红外光谱仪和控制

器;其中,

[0030] 加热单元设置在真空室内,用于承载、加热待测样件和黑体炉;

[0031] 光路传输单元的两端分别与真空室和红外光谱仪连通,用于将待测样件或黑体的辐射能传入红外光谱仪;红外光谱仪将辐射能变为干涉光,并发送至控制器;

[0032] 转动单元设置在真空室内,用于在控制器的控制下转动加热单元上的黑体和样件,使其辐射能分别经过光路传输单元进入红外光谱仪;测温单元用于探测待测样件或黑体的表面温度,并传送给控制器;

[0033] 控制器根据测温单元发送的表面温度数据,控制加热单元对样件或黑体进行加热或者终止加热;控制器对接收的干涉光进行傅里叶变换,获取波长以及红外光谱仪的辐射信号输出值;基于若干组测试温度、波长和光谱发射率数据,拟合光谱发射率模型中的模型参数,得到样件的光谱发射率模型;

[0034] 其中,所述光谱发射率模型为:

$$[0035] \quad \varepsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \frac{T}{T_0} + \frac{a_2}{\sqrt{\lambda}} + \frac{a_3}{\lambda} + \frac{a_4}{\lambda^2}$$

[0036] 式中, $\varepsilon(\lambda, T)$ 为样件的光谱发射率; $\lambda$ 为波长,单位为 $\mu\text{m}$ ;T为测试温度,单位为K; $T_0$ 代表室温,其取值为300K; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 为模型参数,无单位量纲。

[0037] 优选地,加热单元为钨板。

[0038] 优选地,测温单元为铂铑-铂热电偶。

[0039] 本发明建立的耐高温镍基合金的光谱发射率模型,能够模拟镍基合金在各个温度和波长下的发射率,模拟的温度和波长范围宽、模拟结果与测试结果的吻合度高,从而为辐射换热模拟和防热设计提供高精度的发射率数据。

## 附图说明

[0040] 通过以下参照附图而提供的具体实施方式部分,本发明的特征和优点将变得更加容易理解,在附图中:

[0041] 图1是示出本发明光谱发射率测量系统的结构示意图;

[0042] 图2是示出GH169在不同温度下发射率的测试结果和模拟结果对比图;

[0043] 图3是示出K77在不同温度下发射率的测试结果和模拟结果对比图;

[0044] 图4是示出K417G在不同温度下发射率的测试结果和模拟结果对比图;

[0045] 图5是示出DD5在不同温度下发射率的测试结果和模拟结果对比图;

[0046] 图6是示出DD125在不同温度下发射率的测试结果和模拟结果对比图。

## 具体实施方式

[0047] 下面参照附图对本发明的示例性实施方式进行详细描述。对示例性实施方式的描述仅仅是出于示范目的,而绝不是对本发明及其应用或用法的限制。

[0048] 本发明耐高温镍基合金材料的光谱发射率建模方法,包括如下步骤:

[0049] S1. 根据待测耐高温镍基合金样件的服役环境确定样件的服役温度范围和波长范围;

[0050] S2、从样件的服役温度范围和波长范围中任意选取若干组测试温度和波长;针对

每一组测试温度和波长,获取样件在当前测试温度和波长下的光谱发射率;

[0051] S3.基于若干组测试温度、波长和光谱发射率数据,拟合光谱发射率模型中的模型参数,得到样件的光谱发射率模型;

[0052] 其中,所述光谱发射率模型为:

$$[0053] \quad \varepsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \frac{T}{T_0} + \frac{a_2}{\sqrt{\lambda}} + \frac{a_3}{\lambda} + \frac{a_4}{\lambda^2}$$

[0054] 式中, $\varepsilon(\lambda, T)$ 为样件的光谱发射率; $\lambda$ 为波长,单位为 $\mu\text{m}$ ;T为测试温度,单位为K; $T_0$ 代表室温,其取值为300K; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 为模型参数,无单位量纲。

[0055] 本发明中测试温度和波长的组数可以根据实际需要进行确定,只要能够解算出光谱发射率模型中的模型参数即可,因此,上述的若干组可以是任意值,例如5组、或者更多组。当测试温度和波长的组数较少时,可以仅根据测试数据结算出光谱发射率模型中的模型参数,当测试温度和波长的组数较多时,可以根据实验设计原理对每组数据进行分析,舍弃掉其中误差较大的数据,然后再以剩下的有效数据拟合光谱发射率模型中的模型参。测试温度和波长的组数越多,模拟结果的准确性越高。

[0056] 为了验证本发明光谱发射率模型的模拟准确性,针对某种样件,可以分别通过试验测试其光谱发射率数据、和用本发明的光谱发射率模型模拟出其光谱发射率数据,然后将试验测试的结构与本发明模拟的结果进行比较。镍基高温合金主要应用于航空燃气轮机的燃烧室和排气系统,燃烧室内的温度约为400K至1600K,排气系统的温度约为300K至900K。在图2至图6的实施例中,分别选取GH169、K77、K417G、DD5、DZ125等五种典型的航空发动机热端部件材料(五种镍基合金的成分如表1所示)作为待测样件,每种样件通过试验测试得到的光谱发射率与波长的变化曲线、以及通过本发明的光谱发射率模型模拟出的光谱发射率与波长的变化曲线参见附图。图中横坐标为波长,纵坐标为光谱发射率,拟合的取值范围为3-10 $\mu\text{m}$ ,试验的范围为1-14 $\mu\text{m}$ 。针对上述五种镍基合金样件,其拟合光谱发射率模型中的模型参数如下表2所示。

[0057] 表1镍基合金各成分的质量分数(%)

[0058]

	GH169	K77	K417G	DZ125	DD5
C	max0.08	0.05-0.09	0.13-0.22	0.07-0.12	0.05
Cr	17.0-21.0	14.0-15.2	8.50-9.50	8.4-9.4	7.0
Ni	50.0-55.0	bal.	bal.	bal.	bal.
Co	max1.0	14.0-16.0	9.0-11.0	9.4-10.5	7.5
W	-	-	-	6.5-7.5	5.0
Mo	2.80-3.30	3.9-4.5	2.50-3.50	1.5-2.5	1.5

[0059]

Al	0.30-0.70	4.0-4.6	4.80-5.70	4.8-5.4	6.2
Ti	0.75-1.15	3.0-3.7	4.10-4.70	0.7-1.2	-
Fe	bal.	max0.5	max1.0	max0.30	-
Ta	-	-	-	3.6-4.1	6.5
Hf	-	-	-	1.2-1.8	0.15
Nb	4.75-5.50	2.5-3.3	-	-	-
Re	-	-	-	-	3.0
Si	max0.35	max0.20	max0.20	max0.15	max0.20
Mn	max0.35	max0.20	max0.20	max0.15	max0.20

[0060] 表2五种样件的光谱发射率模型中各参数拟合结果

[0061]

	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>
GH169	0.1389	0.02701	-0.6495	1.3791	-0.4525
K77	0.1421	0.024	-0.784	1.6657	-0.614
K417G	0.00334	0.01359	-0.4357	1.6129	-0.7512
DZ125	0.04527	0.00975	-0.4621	1.3738	-0.6233
DD5	0.1745	0.0153	-0.8057	1.7944	-0.7466

[0062] 从图2至图6可以看出,即使在延长了波长的范围,模型计算的结果与试验结果仍具有很高的吻合度,在1-14 $\mu\text{m}$ 内均是适用的,说明了本发明提出的光谱发射率模型具有较高的精确性。

[0063] 本领域技术人员可以根据实际情况选择合适的方式获取样件的光谱发射率,采用何种方式获取光谱发射率对本发明技术方案的实施没有任何影响。在一些实施例中,可以采用能量比较法获取样件的光谱辐射量,方法简单,准确性好。具体地,获取样件在当前测试温度和波长下的光谱发射率包括:

[0064] 分别获取黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度;

[0065] 按照如下公式确定样件的光谱发射率:

$$[0066] \quad \varepsilon(\lambda) = \frac{L_s(\lambda, T)}{L_b(\lambda, T)}$$

[0067] 式中,  $L_s(\lambda, T)$  为样件在测试温度  $T$  和波长  $\lambda$  下的辐射亮度,  $L_b(\lambda, T)$  为黑体在测试温度  $T$  和波长  $\lambda$  下的辐射亮度。

[0068] 优选地,分别获取黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度包括:



[0069] 将黑体温度分别设置为 $T_1$ 和 $T_2$ ,获取红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ ;

[0070] 根据获取的 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ ,解算红外光谱仪的辐射信号关系式中样件和测试背景的几何因子 $G_1$ 和 $G_2$ ;

[0071] 基于 $G_1$ 和 $G_2$ ,利用红外光谱仪的辐射信号关系式确定黑体和样件在当前测试温度和波长下的辐射亮度;

[0072] 其中,所述红外光谱仪的辐射信号关系式为:

$$[0073] \quad S(\lambda) = R(\lambda) [G_1 L(\lambda, T) + G_2 L_0(\lambda)]$$

[0074] 式中, $S(\lambda)$ 为红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值; $R(\lambda)$ 为红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的响应函数; $G_1$ 和 $G_2$ 分别为样件和测试背景的几何因子; $L(\lambda, T)$ 为待测的样件或黑体在测试温度 $T$ 和波长 $\lambda$ 下的辐射亮度, $L_0(\lambda)$ 为测试背景在测试温度 $T$ 和波长 $\lambda$ 下的辐射亮度。

[0075] 从代数角度来说,仅通过两组数据即可结算出样件和测试背景的几何因子 $G_1$ 和 $G_2$ ,例如上述实施例中仅以黑体温度分别为 $T_1$ 和 $T_2$ 时红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ 为基础解算样件和测试背景的几何因子 $G_1$ 和 $G_2$ 。本领域技术人员应当理解,为了提高解算结果的准确性,也可以采用更多组数据,例如,采用远多于两组的数据,首先通过实验设计原理对该多组数据进行分析,剔除其中误差较大的数据,然后以剩下的有效数据为基础解算红外光谱仪的辐射信号关系式中样件和测试背景的几何因子 $G_1$ 和 $G_2$ ,数据量越大,解算出几何因子 $G_1$ 和 $G_2$ 的准确性越高。

[0076] 在一些实施例中,按照如下公式计算样件的光谱发射率:

$$[0077] \quad \varepsilon(\lambda) = \frac{S_s(\lambda, T) - S_0}{S_b(\lambda, T) - S_0}, \quad S_0 = G_2 R(\lambda) L_0(\lambda) = S_1(\lambda) - \frac{(S_2(\lambda) - S_1(\lambda)) L_b(\lambda, T_1)}{L_b(\lambda, T_2) - L_b(\lambda, T_1)}$$

[0078] 式中, $L_b(\lambda, T_1)$ 为黑体表面温度为 $T_1$ 时、红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值, $L_b(\lambda, T_2)$ 为黑体表面温度为 $T_2$ 时、红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值; $S_s(\lambda, T)$ 为样件表面温度为 $T$ 时、红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值, $S_b(\lambda, T)$ 为黑体表面温度为 $T$ 时、红外光谱仪在波长 $\lambda$ 处的辐射信号输出值。

[0079] 如图1所示,本发明还提供了采用上述方法进行光谱发射率建模的测量系统,包括:真空室1、加热单元2、转动单元3、黑体炉4、测温单元(图中未示出)、光路传输单元6、红外光谱仪7和控制器8。真空室1主要是为了产生保护氛围,避免由于加热时样件5发生氧化而影响样件5的光谱发射率,同时消除大气中水蒸汽和 $CO_2$ 的吸收影响。

[0080] 加热单元2设置在真空室1内,用于承载、加热待测样件5和黑体炉4;

[0081] 光路传输单元6的两端分别与真空室1和红外光谱仪7连通,用于将待测样件5或黑体4的辐射能传入红外光谱仪7;红外光谱仪7将辐射能变为干涉光,并发送至控制器8;

[0082] 转动单元3设置在真空室1内,用于在控制器8的控制下转动加热单元2上的黑体4和样件5,使其辐射能分别经过光路传输单元6进入红外光谱仪7。通过使样件5与黑体4的辐射能分别经过同一光路进入红外光谱仪7,能够降低避免光路自身结构和光学特性对红外光谱仪探测结果的影响,提高本发明光谱发射率模型的精确性。

[0083] 测温单元用于探测待测样件5或黑体4的表面温度,并传送给控制器8;

[0084] 控制器8根据测温单元发送的表面温度数据,控制加热单元2对样件5或黑体4进行加热或者终止加热;控制器8对接收的干涉光进行傅里叶变换,获取波长以及红外光谱仪7

的辐射信号输出值；基于若干组测试温度、波长和光谱发射率数据，拟合光谱发射率模型中的模型参数，得到样件5的光谱发射率模型；其中，所述光谱发射率模型为：

$$[0085] \quad \varepsilon(\lambda, T) = a_0 + a_1 \frac{T}{T_0} + \frac{a_2}{\sqrt{\lambda}} + \frac{a_3}{\lambda} + \frac{a_4}{\lambda^2}$$

[0086] 式中， $\varepsilon(\lambda, T)$  为样件的光谱发射率； $\lambda$  为波长，单位为 $\mu\text{m}$ ； $T$  为测试温度，单位为K； $T_0$  代表室温，其取值为300K； $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  为模型参数，无单位量纲。

[0087] 黑体炉4用于辐射黑体能量，通过将样件5的辐射能量与黑体4辐射能量进行比较，可以校正背景辐射。

[0088] 优选地，加热单元2可以为钨板，结构简单，使用寿命长。

[0089] 优选地，测温单元为铂铑-铂热电偶，结构简单，测量准确性高。

[0090] 为了尽量减少干扰因素对测试结果的影响，采用红外光谱仪测量辐射时可以采取一定的措施防止加热单元的辐射被红外光谱仪探测到。例如，绝热材料覆盖加热单元，防止其辐射被红外热像仪接收，或者在样件周围包裹一层绝热材料，以减少样件的周向散热，使测试表面的温度分布均匀。

[0091] 虽然参照示例性实施方式对本发明进行了描述，但是应当理解，本发明并不局限于文中详细描述和示出的具体实施方式，在不偏离权利要求书所限定的范围的情况下，本领域技术人员可以对所述示例性实施方式做出各种改变。

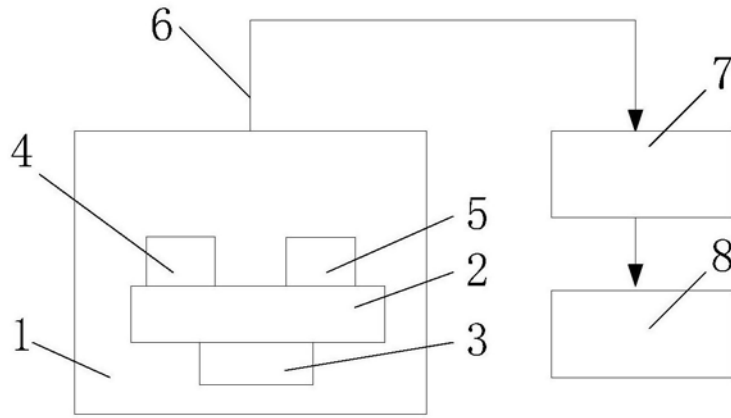


图1

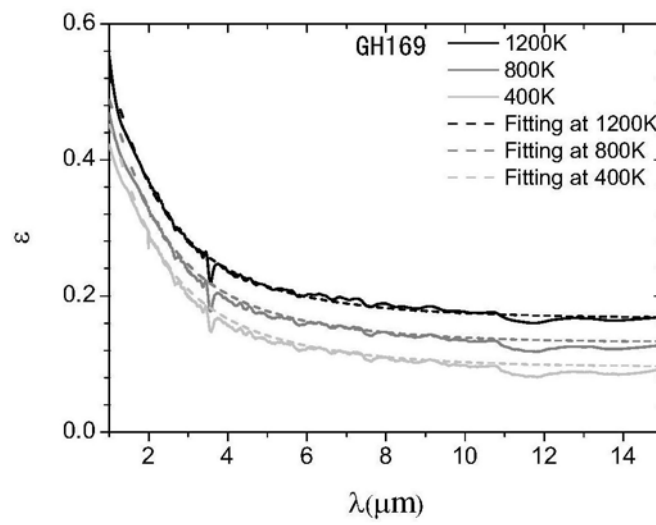


图2

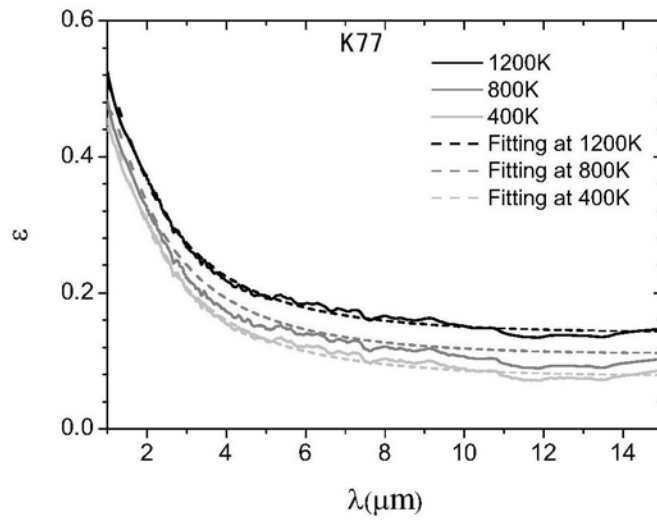


图3

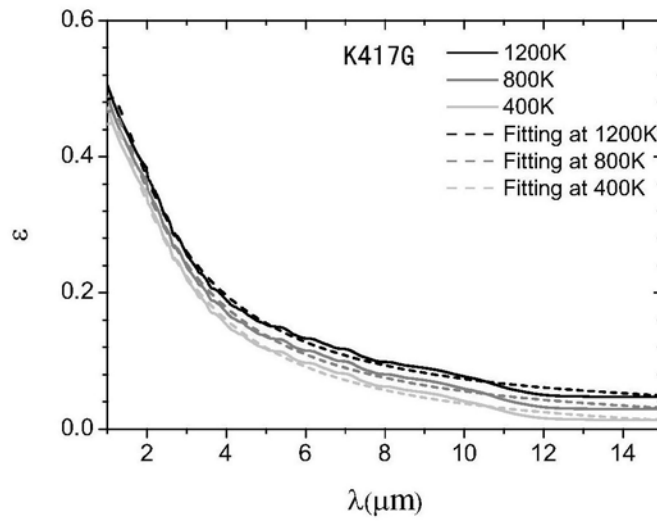


图4

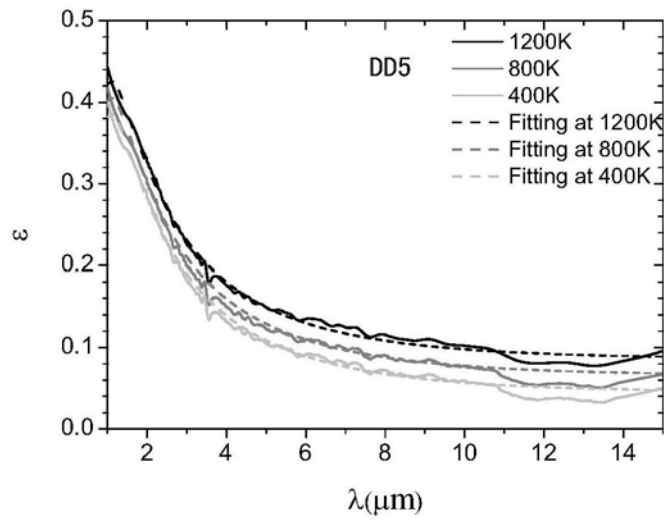


图5

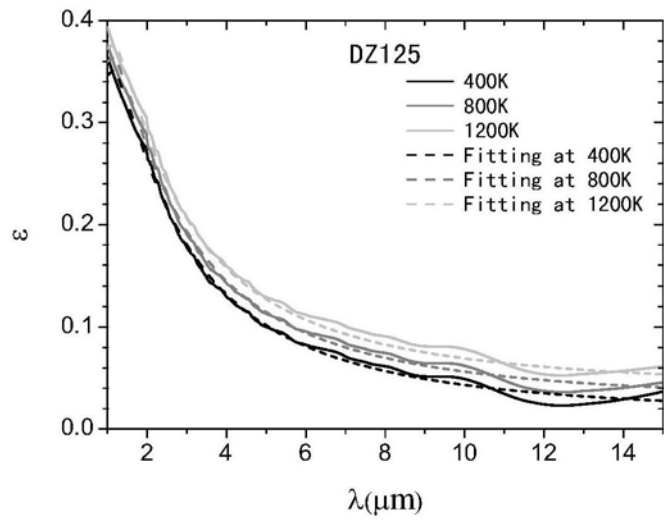


图6