



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114199811 B

(45) 授权公告日 2022. 11. 25

(21) 申请号 202111414946.9

CN 111239019 A, 2020.06.05

(22) 申请日 2021.11.25

US 2015000405 A1, 2015.01.01

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114199811 A

何箐等. 等离子喷涂常规和纳米8YSZ热障涂层的性能.《中国表面工程》.2008,第21卷(第06期),第18-22页.

(43) 申请公布日 2022.03.18

Dongdong Ye et al..Quantitative Determination of Porosity in Thermal Barrier Coatings Using Terahertz Reflectance Spectrum: Case Study of Atmospheric-Plasma-Sprayed YSZ Coatings.《TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY》.2020,第10卷(第4期),第383-390页.

(73) 专利权人 北京金轮坤天特种机械有限公司

地址 101113 北京市通州区张家湾镇广源西街11号

Dongdong Ye et al..Nondestructive Evaluation of Thermal Barrier Coatings Interface Delamination Using Terahertz Technique Combined with SWT-PCA-GA-BP Algorithm.《Coatings》.2020,第10090859-1至10090859-12页.

(72) 发明人 何箐 王璐 李建超

(74) 专利代理机构 北京荟英捷创知识产权代理

事务所(普通合伙) 11726

专利代理师 李也庚

审查员 张佳宁

(51) Int. Cl.

G01N 21/3563 (2014.01)

G01N 21/3586 (2014.01)

权利要求书1页 说明书9页 附图4页

(56) 对比文件

CN 113109294 A, 2021.07.13

CN 111751314 A, 2020.10.09

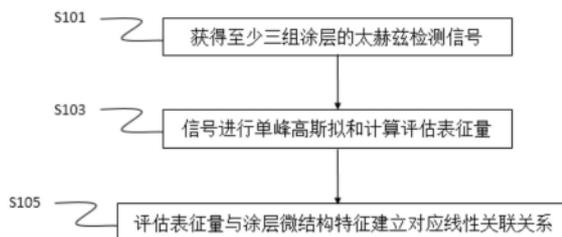
CN 111060019 A, 2020.04.24

(54) 发明名称

表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征方法和装置

(57) 摘要

本发明提供了表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法,方法包含:获得至少三组涂层的太赫兹时域光谱信号;根据太赫兹时域光谱信号进行单峰高斯拟合计算评估表征量;将评估表征量与测得的涂层微结构特征进行线性拟合,获得涂层微结构特征与评估表征量的关联性关系。通过采用上述的技术方案便于将太赫兹无损检测在实际的服役状态和制备状态下实施,更加贴近日常检测的需求和状态,提高检测的精度,满足检测的要求。



1. 一种表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法,其特征在于,包括:

获得至少三组涂层的太赫兹时域光谱信号;

根据所述太赫兹时域光谱信号进行单峰高斯拟合计算评估表征量,包括:经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,获得第一回波的第一峰高A1和第一半高宽FWHM1,获得第二回波的第二峰高A2和第二半高宽FWHM2;包括计算第一峰高A1与第二峰高A2的峰高差,  $\Delta H = A1 - A2$ ;计算摒除厚度影响因素的峰高差值 $\delta_h$ ,  $\delta_h = (A1 - A2) / d$ ,d为样品的实际厚度参量值;计算第一半高宽FWHM1和第二半高宽FWHM2的差值,  $\Delta FWHM = FWHM2 - FWHM1$ ;计算摒除厚度影响因素的半高宽差值 $\delta_F$ ,  $\delta_F = (FWHM2 - FWHM1) / d$ ,d为样品的实际厚度参量值;获得评估表征量 $\delta_r$ ,  $\delta_r = \delta_h * \delta_F$ ;

将所述评估表征量与测得的涂层微结构特征进行线性拟合,获得所述涂层微结构特征与所述评估表征量的关联线性关系;所述涂层微结构特征由定量金相法测得,所述涂层微结构特征包括陶瓷涂层孔隙率和/或未熔粒子含量。

2. 根据权利要求1所述的表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法,其特征在于:所述热障涂层是陶瓷涂层,所述陶瓷涂层是8YSZ型热障涂层,陶瓷涂层底部具有基体和至少一层金属粘结层。

3. 根据权利要求1或2所述的表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法,其特征在于:对于不同批次工件或试片表面不同位置的涂层进行测量,获得的太赫兹反射信号和其线性规律进行对比反推,表征评价不同批次涂层的微结构特征,进而反馈涂层的质量和性能特征。

4. 一种表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的表征装置,其特征在于,包括:

第一获得模块,用于获得至少三组涂层的太赫兹时域光谱信号;

第一计算模块,用于根据所述太赫兹时域光谱信号计算评估表征量,包括:经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,获得第一回波的第一峰高A1和第一半高宽FWHM1,获得第二回波的第二峰高A2和第二半高宽FWHM2;包括计算第一峰高A1与第二峰高A2的峰高差,  $\Delta H = A1 - A2$ ;计算摒除厚度影响因素的峰高差值 $\delta_h$ ,  $\delta_h = (A1 - A2) / d$ ,d为样品的实际厚度参量值;计算第一半高宽FWHM1和第二半高宽FWHM2的差值,  $\Delta FWHM = FWHM2 - FWHM1$ ;计算摒除厚度影响因素的半高宽差值 $\delta_F$ ,  $\delta_F = (FWHM2 - FWHM1) / d$ ,d为样品的实际厚度参量值;获得评估表征量 $\delta_r$ ,  $\delta_r = \delta_h * \delta_F$ ;

第二获得模块,用于将所述评估表征量与测得的涂层微结构特征进行线性拟合,获得所述涂层微结构特征与所述评估表征量的关联线性关系;所述涂层微结构特征由定量金相法测得,所述涂层微结构特征包括陶瓷涂层孔隙率和/或未熔粒子含量。

5. 一种表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征方法的应用装置,其特征在于,包括:

第三获得模块,用于获得涂层的太赫兹时域光谱信号;

第二计算模块,用于根据所述太赫兹时域光谱信号计算评估表征量;

转换模块,用于利用所述评估表征量和权利要求4的表征装置所得的所述关联线性关系得到涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征。

## 表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及航空发动机涡轮叶片的无损检测技术领域,具体而言,主要是一种采用反射式太赫兹信号表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法。

### 背景技术

[0002] 航空发动机是飞机的心脏,被称为现代工业的皇冠,而涡轮叶片则更被誉为皇冠上的明珠。热障涂层技术是目前先进航空发动机涡轮叶片热防护所必须采用的核心关键技术。热障涂层的使用可以通过降低结构材料表面温度以延缓热端部件服役寿命,其可靠性要求较高,一旦出现局部质量异常导致的涂层剥落,将会导致涡轮叶片烧蚀穿孔或发动机故障。

[0003] 热障涂层的均匀涂覆技术,可直接影响涡轮叶片的抗氧化、隔热效果、热不均匀性及气膜冷却效果,热障涂层内部超标缺陷直接影响涂层性能,严重降低发动机可靠性。行业内热障涂层传统检测方法一般为抽样破坏检测,该方法存在检测效率低、检测结果片面和破坏工件等问题。对于均质、多相、多界面的热障涂层而言,没有精确可靠的测定手段,就无法建立高性能设计方案与生产工艺之间的客观数据联系,探索最优化的涂层生产工艺也就缺乏客观数据支持;多因素影响下导致的裂纹、分层、氧化等内部微观缺陷,会显著影响热障涂层服役寿命和涡轮叶片使役可靠性,发展先进非破坏式检测技术迫在眉睫。目前,对于寻找一种科学合理、精准有效的快速无损检测方法替代传统有损检测技术是具有迫切的需求。

[0004] 近几年来,超声波检测技术和红外热波检测技术被逐渐应用开展研究工作。虽然超声波检测技术和红外热波检测技术在缺陷检测方面有着良好的优势,但是其超声波检测技术所需的耦合剂也带来了潜在的污染影响,而红外热波检测技术也表现出了分辨率达不到超声波检测技术精度的弊端。

### 发明内容

[0005] 本发明解决的问题是现有对涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征测量精度差的问题。为解决上述问题,本发明提供表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法,包括:

[0006] 获得至少三组涂层的太赫兹时域光谱信号;

[0007] 根据所述太赫兹时域光谱信号进行单峰高斯拟合计算评估表征量;

[0008] 将所述评估表征量与测得的涂层微结构特征进行线性拟合,获得所述涂层微结构特征与所述评估表征量的关联线性关系。

[0009] 上述方案中,通过获得太赫兹时域光谱信号的方式进行检测,并且利用检测到的太赫兹时域光谱信号进行单峰高斯拟合计算评估表征量,与涂层微结构特征进行比对,可以得到涂层微结构特征和评估表征量的对应关系,以便于实际测量时,根据由太赫兹时域光谱信号计算而得的评估表征量得到相应的涂层微结构特征。便于将太赫兹无损检测在实

际的服役状态和制备状态下实施,更加贴近日常检测的需求和状态,提高检测的精度,满足检测的要求。

[0010] 优选的技术方案中,所述根据所述太赫兹时域光谱信号计算评估表征量包括:

[0011] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,利用摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波峰高差值和半高宽差值相乘,可以避免上述的峰高差值和半高宽差值受到厚度影响。

[0012] 优选的技术方案中,所述根据所述太赫兹时域光谱信号进行单峰高斯拟合计算评估表征量包括:

[0013] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,获得第一回波的第一峰高A1和第一半高宽FWHM1,获得第二回波的第二峰高A2和第二半高宽FWHM2;

[0014] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,获得摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波峰高差值和半高宽差值,包括:计算第一峰高A1与第二峰高A2的峰高差, $\Delta H=A1-A2$ ;计算摒除厚度影响因素的峰高差值 $\delta_h$ , $\delta_h=(A1-A2)/d$ ,其中d为样品的实际厚度参量值;

[0015] 计算第一半高宽FWHM1和第二半高宽FWHM2的差值, $\Delta FWHM=FWHM2-FWHM1$ ;计算摒除厚度影响因素的半高宽差值 $\delta_F$ , $\delta_F=(FWHM2-FWHM1)/d$ ,其中d为样品的实际厚度参量值;

[0016] 所述根据太赫兹时域光谱信号进行单峰高斯拟合计算评估表征量包括:获得评估表征量 $\delta_r$ , $\delta_r=\delta_h*\delta_F$ 。

[0017] 优选的技术方案中,所述涂层微结构特征由定量金相法测得,所述涂层微结构特征包括陶瓷涂层孔隙率和/或未熔粒子含量。

[0018] 通过定量金相法测量陶瓷涂层孔隙率和/或未熔粒子含量,可以获得较为准确的陶瓷涂层孔隙率和/或未熔粒子含量,以便为上述的评估表征量提供准确的比对对象。而且,结合上述的表征方法,只要利用定量金相法测量的涂层微结构特征,即可形成上述的对应关系,以便于日后检测时针对不同的情形中使用太赫兹无损测量得到太赫兹时域光谱信号进而得到对应的涂层微结构特征。

[0019] 所述热障涂层是陶瓷涂层,所述陶瓷涂层是8YSZ型热障涂层,陶瓷涂层底部具有基体和至少一层金属粘结层。

[0020] 优选的技术方案中,所述对于不同批次工件或试片表面不同位置的涂层进行测量,获得的太赫兹反射信号和其线性规律进行对比反推,表征评价不同批次涂层的微结构特征,进而反馈涂层的质量和性能特征。

[0021] 本发明提供一种测量涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法,

[0022] 获得至少三组涂层的太赫兹时域光谱信号;

[0023] 根据所述太赫兹时域光谱信号进行单峰高斯拟合计算评估表征量;

[0024] 将所述评估表征量与测得的涂层微结构特征进行线性拟合,获得所述涂层微结构特征与所述评估表征量的关联线性关系。

[0025] 该方法采用无损检测技术,具备无损检测的非接触特性和非破坏性,相比于破坏式检测而言,无损检测的非接触模式将会大大减少检测的成本。同时无损检测的非破坏性使得产品检测之后的复用性将会大提高。而且上述方法操作边界,传统的破坏式检测过程,操作步骤繁杂,往往要经过制备、磨抛、观察和分析等步骤,才能获取最终的检测结果。而先进的太赫兹无损检测方式只需要将被测样品放置于无损检测系统设备中即可获得相应的

数据,大大简化了操作步骤,提升了检测的操作便捷性。

[0026] 该方法从技术角度具有高效、高精度和便捷的优势,可以快速的建立特定工艺条件下标准工艺样品和偏离工艺样品特征,建立规律,并应用于实际生产环节。本方法同时考量了多种微结构因素对于太赫兹信号拟合参量计算值的影响,构建了对应的关联线性关系。以定性表征陶瓷涂层微结构——孔隙率、未熔粒子以及两者之和的方法,为工艺过程稳定性的发展提供了有利的支撑。

[0027] 本发明提供一种表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征方法的表征装置,包括:

[0028] 第一获得模块,用于获得至少三组涂层的太赫兹时域光谱信号;

[0029] 第一计算模块,用于根据所述太赫兹时域光谱信号计算评估表征量;

[0030] 第二获得模块,用于将所述评估表征量与测得的涂层微结构特征进行线性拟合,获得所述涂层微结构特征与所述评估表征量的对应关系。

[0031] 本发明提供一种表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征方法的应用装置,包括:

[0032] 第三获得模块,用于获得涂层的太赫兹时域光谱信号;

[0033] 第二计算模块,用于根据所述太赫兹时域光谱信号计算评估表征量;

[0034] 转换模块,用于利用所述评估表征量和利用上述表征装置所得的所述对应关联线性关系得到涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征。

## 附图说明

[0035] 图1是本发明的一种表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征方法的主要流程示意图;

[0036] 图2为本发明的表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法之实施例1所得的孔隙率和评估表征量变化规律的关联性示意图;

[0037] 图3为本发明的表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法之实施例2所得的未熔粒子含量和评估表征量变化规律的关联性示意图;

[0038] 图4是本发明的表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法之实施例3所得的孔隙率、未熔粒子含量之和与评估表征量变化规律的关联性示意图;

[0039] 图5是本发明的一个实施例中表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征方法的表征装置的示意图;

[0040] 图6是本发明的一个实施例中表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征方法的应用装置的示意图。

## 具体实施方式

[0041] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更为明显易懂,下面结合附图对本发明的具体实施例做详细的说明。

[0042] 图1是本发明的一个实施例中表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法的主要流程示意图,上述方法包括:

[0043] S101、获得至少三组涂层的太赫兹时域光谱信号;

[0044] 具体的,为了体现出来不同的制备工艺对于微结构特征的影响,可以在符合生产工艺条件下,以及偏离生产工艺条件下采用大气等离子喷涂工艺分别制备不同微结构特征的陶瓷涂层。陶瓷涂层可以为8YSZ陶瓷涂层,陶瓷涂层具有基体和至少一层金属粘结层。

[0045] 其中,需要用反射式太赫兹无损检测样品的36个角度,每个角度检测20次,对于同一样品的36个角度、每个角度20次信号数据进行均值化处理。

[0046] 优选的,涂层微结构特征由定量金相法测得,涂层微结构特征包括陶瓷涂层孔隙率和/或未熔粒子含量。定量金相法是利用图像软件,选取符合要求的孔隙和/或未熔粒子,进行定量金相法的实测工作,其中包含均值化多组处理操作。

[0047] 通过定量金相法测量陶瓷涂层孔隙率和/或未熔粒子含量,可以获得较为准确的陶瓷涂层孔隙率和/或未熔粒子含量,以便为上述的评估表征量提供准确的比对对象。而且,结合上述的表征方法,只要利用定量金相法测量的涂层微结构特征,即可形成上述的对应关系,以便于日后检测时针对不同的情形中使用太赫兹无损检测得到太赫兹时域光谱信号进而得到对应的涂层微结构特征。

[0048] S103、根据太赫兹时域光谱信号进行单峰高斯拟合计算评估表征量;具体包括:

[0049] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,利用摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波峰高差值和半高宽差值相乘,可以避免上述的峰高差值和半高宽差值受到厚度影响。

[0050] 更具体的,该步骤包括:

[0051] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,获得第一回波的第一峰高A1和第一半高宽FWHM1,获得第二回波的第二峰高A2和第二半高宽FWHM2;

[0052] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,利用摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波峰高差值和半高宽差值,计算第一峰高A1与第二峰高A2的峰高差, $\Delta H=A1-A2$ ;计算摒除厚度影响因素的峰高差值 $\delta_h$ , $\delta_h=(A1-A2)/d$ ,其中d为样品的实际厚度参量值;

[0053] 计算第一半高宽FWHM1和第二半高宽FWHM2的差值, $\Delta FWHM=FWHM2-FWHM1$ ;计算摒除厚度影响因素的半高宽差值 $\delta_F$ , $\delta_F=(FWHM2-FWHM1)/d$ ,其中d为样品的实际厚度参量值;

[0054] 获得评估表征量 $\delta_r$ , $\delta_r=\delta_h*\delta_F$ 。

[0055] S105、将评估表征量与测得的涂层微结构特征进行线性拟合,获得所述涂层微结构特征与所述评估表征量的关联线性关系。

[0056] 对于不同批次工件、试片表面不同位置的涂层进行测量,获得的太赫兹反射信号和其线性规律进行对比反推,表征评价不同批次涂层的微结构特征,进而反馈涂层的质量和性能特征。

[0057] 由于涂层微结构物理参量——孔隙率、未熔粒子含量以及二者之和的增加,对应的反射式太赫兹信号拟合的评估表征量会随之上升,两者表现出了线性关联的关系。所以,可以通过获得太赫兹时域光谱信号的方式进行检测,并且利用检测到的太赫兹时域光谱信号进行运算,与涂层微结构特征进行比对,可以得到涂层微结构特征和评估表征量的对应关系,以便于实际测量时,根据由太赫兹时域光谱信号计算而得的评估表征量得到相应的涂层微结构特征。便于将太赫兹无损检测在实际的服役状态和制备状态下实施,更加贴近日常检测的需求和状态,满足检测的要求。

[0058] 为了更加清楚地介绍上述表征方法,特举以下三个实施例具体说明。虽然以下三

个实施例中都是采用反射式太赫兹无损检测技术,但是本申请并不排除其它的太赫兹无损检测方式,例如透射式太赫兹无损检测。

[0059] 实施例1——反射式太赫兹信号表征热障涂层陶瓷层孔隙率的方法:

[0060] 本实例是基于太赫兹反射式无损检测方式,以8YSZ型陶瓷热障涂层为样品对象,进行反射式太赫兹信号拟合参量值表征涂层孔隙率具体实施的说明。具体实施方法步骤如下:

[0061] 步骤1:在生产工艺条件下,以及偏离生产工艺条件下,采用大气等离子喷涂工艺制备不同微结构特征的陶瓷涂层。

[0062] 具体的,步骤1的陶瓷涂层为8YSZ,陶瓷涂层底部具有基体和至少一层金属粘结层。

[0063] 具体的,步骤1的微结构特征为陶瓷涂层孔隙率,采用定量金相法获得,定量金相法是利用图像软件,选取符合要求的孔隙,进行定量金相法的实测工作,其中包含均值化多组处理操作等等。

[0064] 步骤2:获得不同涂层的太赫兹时域光谱信号,选取第一回波、第二回波进行单峰高斯拟合,计算摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波的峰高差值  $\Delta H/d$  和半高宽差值  $\Delta FWHM/d$ ,并采用差值乘积获得值作为评估表征量。

[0065] 具体的,反射式太赫兹无损检测会对样品的36个角度进行实施,每个角度检测20次,对于数据处理则是对于同个样品的36个角度、每角度20次信号数据进行均值化处理。基于此,再进行第一、二回波单峰选取和高斯拟合处理过程。

[0066] 具体的,反射式太赫兹信号拟合参量的计算值包含①两波高斯单峰拟合的峰高差  $\Delta H=A_1-A_2$ ;②排除厚度影响因素的两波高斯单峰拟合峰高差,即摒除厚度影响因素的峰高差值  $\delta_h=(A_1-A_2)/d$ ,其中d为样品对应的实际厚度;③两波高斯单峰拟合的半高宽之差  $\Delta FWHM=FWHM_2-FWHM_1$ ;④排除厚度影响因素的两波高斯单峰拟合半高宽之差,即摒除厚度影响因素的半高宽差值  $\delta_f=(FWHM_2-FWHM_1)/d$ ;⑤对微结构影响信号进行乘积放大处理,得到评估表征量  $\delta_r=((A_1-A_2)/d) \times (FWHM_2-FWHM_1)/d$ 。

[0067] 步骤3:将不少于三组涂层  $\delta_r$  数据进行线性拟合,获得涂层微结构差异和评估表征量变化规律的关联性。线性规律如表1和图2所示。

[0068] 表1

孔隙率 (%)	$(\Delta A/d) * (\Delta FWHM/d)$
3.92	1.66703
7.85	4.06688
9.29	4.25759

[0070] 具体的,随着涂层微结构物理参量(孔隙率)的增加,对应的反射式太赫兹信号拟合参量的计算值  $\delta_r$  会随之上升,两者表现出了线性关联关系。

[0071] 步骤4:对于不同批次工件、试片表面不同位置的涂层进行测量,获得的太赫兹反射信号和步骤3的线性规律进行对比反推,表征评价不同批次涂层的微结构特征——孔隙率,进而反馈涂层的质量和性能特征。

[0072] 实施例2——反射式太赫兹信号表征热障涂层陶瓷层未熔粒子含量的方法:

[0073] 本实例是基于太赫兹反射式无损检测方式,以8YSZ型陶瓷热障涂层为样品对象,

进行反射式太赫兹信号拟合参量值表征涂层未熔粒子含量具体实施的说明。具体实施方法步骤如下：

[0074] 步骤1：在生产工艺条件下，以及偏离生产工艺条件下，采用大气等离子喷涂工艺制备不同微结构特征的陶瓷涂层。

[0075] 具体的，步骤1的陶瓷涂层为8YSZ，陶瓷涂层底部具有基体和至少一层金属粘结层。

[0076] 具体的，步骤1的微结构特征为陶瓷涂层未熔粒子含量，采用定量金相法获得，定量金相法是利用图像软件，选取符合要求的未熔粒子，进行定量金相法的实测工作，其中包含均值化多组处理操作等等。

[0077] 步骤2：获得不同涂层的太赫兹时域光谱信号，选取第一回波、第二回波进行单峰高斯拟合，计算摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波的峰高差值  $\Delta H/d$  和半高宽差值  $\Delta FWHM/d$ ，并采用差值乘积获得值作为评估表征量。

[0078] 具体的，反射式太赫兹无损检测会对样品的36个角度进行实施，每个角度检测20次，对于数据处理则是对于同个样品的36个角度，每角度20次信号数据，进行均值化处理。基于此，再进行第一、二回波单峰选取和高斯拟合处理过程。

[0079] 具体的，反射式太赫兹信号拟合参量的计算值包含①两波高斯单峰拟合的峰高差  $\Delta H = A1 - A2$ ；②排除厚度影响因素的两波高斯单峰拟合峰高差，即摒除厚度影响因素的峰高差值  $\delta_h = (A1 - A2) / d$ ，其中  $d$  为样品对应的实际厚度；③两波高斯单峰拟合的半高宽之差  $\Delta FWHM = FWHM2 - FWHM1$ ；④排除厚度影响因素的两波高斯单峰拟合半高宽之差，即摒除厚度影响因素的半高宽差值  $\delta_f = (FWHM2 - FWHM1) / d$ ；⑤对微结构影响信号进行乘积放大处理，得到评估表征量  $\delta_r = ((A1 - A2) / d) \times ((FWHM2 - FWHM1) / d)$ 。

[0080] 步骤3：将不少于三组涂层  $\delta_r$  数据进行线性拟合，获得涂层微结构差异和评估表征量变化规律的关联性。线性规律如表2和图3所示。

[0081] 表2

[0082]	未熔粒子含量 (%)	$(\Delta A/d) * (\Delta FWHM/d)$
	2	1.66703
	7.5	4.06688
[0083]	8.3	4.25759

[0084] 具体的，随着涂层微结构物理参量——未熔粒子含量的增加，对应的反射式太赫兹信号拟合参量的计算值  $\delta_r$  会随之上升，两者表现出了线性关联关系。

[0085] 步骤4：对于不同批次工件、试片表面不同位置的涂层进行测量，获得的太赫兹反射信号和步骤3的线性规律进行对比反推，表征评价不同批次涂层的微结构特征——未熔粒子含量，进而反馈涂层的质量和性能特征。

[0086] 实施例3——反射式太赫兹信号表征热障涂层陶瓷层孔隙率与未熔粒子的方法：

[0087] 本实例是基于太赫兹反射式无损检测方式，以8YSZ型陶瓷热障涂层为样品对象，进行反射式太赫兹信号拟合参量值表征涂层孔隙率与未熔粒子含量具体实施的说明。具体

实施方法步骤如下：

[0088] 步骤1：在生产工艺条件下，以及偏离生产工艺条件下，采用大气等离子喷涂工艺制备不同微结构特征的陶瓷涂层。

[0089] 具体的，步骤1的陶瓷涂层为8YSZ，陶瓷涂层底部具有基体和至少一层金属粘结层。

[0090] 具体的，步骤1的微结构特征为陶瓷涂层孔隙率和未熔粒子含量之和，采用定量金相法获得，定量金相法是利用图像软件，选取符合要求的孔隙和未熔粒子，进行定量金相法的实测工作，其中包含均值化多组处理操作等等。

[0091] 步骤2：获得不同涂层的太赫兹时域光谱信号，选取第一回波、第二回波进行单峰高斯拟合，计算摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波的峰高差值  $\Delta H/d$  和半高宽差值  $\Delta FWHM/d$ ，并采用差值乘积获得值作为评估表征量。

[0092] 具体的，反射式太赫兹无损检测会对样品的36个角度进行实施，每个角度检测20次；对于数据处理则是对于同个样品的36个角度，每角度20次信号数据，进行均值化处理。基于此，再进行第一、二回波单峰选取和高斯拟合处理过程。

[0093] 具体的，反射式太赫兹信号拟合参量的计算值包含①两波高斯单峰拟合的峰高差  $\Delta H = A_1 - A_2$ ；②排除厚度影响因素的两波高斯单峰拟合峰高差，即摒除厚度影响因素的峰高差值  $\delta_h = (A_1 - A_2) / d$ ，其中d为样品对应的实际厚度；③两波高斯单峰拟合的半高宽之差  $\Delta FWHM = FWHM_2 - FWHM_1$ ；④排除厚度影响因素的两波高斯单峰拟合半高宽之差，即摒除厚度影响因素的半高宽差值  $\delta_f = (FWHM_2 - FWHM_1) / d$ ；⑤对微结构影响信号进行乘积放大处理，得到评估表征量  $\delta_r = ((A_1 - A_2) / d) \times ((FWHM_2 - FWHM_1) / d)$ 。

[0094] 步骤3：将不少于三组涂层  $\delta_r$  数据进行线性拟合，获得涂层微结构差异和评估表征量变化规律的关联性。线性规律如表3和图4所示。

[0095] 表3

[0096]	孔隙率和未熔粒子含量 (%)	$(\Delta A/d) * (\Delta FWHM/d)$
	5.92	1.66703
	15.35	4.06688
	17.59	4.25759

[0097] 具体的，随着涂层微结构物理参量——孔隙率和未熔粒子含量之和的增加，对应的反射式太赫兹信号拟合参量的计算值  $\delta_r$  会随之上升，两者表现出了线性关联关系。

[0098] 步骤4：对于不同批次工件、试片表面不同位置的涂层进行测量，获得的太赫兹反射信号和步骤3的线性规律进行对比反推，表征评价不同批次涂层的微结构特征——孔隙率和未熔粒子含量之和，进而反馈涂层的质量和性能特征。

[0099] 图5是本发明的一个实施例中涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的表征装置的结构示意图。表征装置包括：

[0100] 第一获得模块，用于获得至少三组涂层的太赫兹时域光谱信号；

[0101] 第一计算模块，用于根据太赫兹时域光谱信号计算评估表征量；

[0102] 第二获得模块，用于将评估表征量与测得的涂层微结构特征进行线性拟合，获得涂层微结构特征与评估表征量的对应关系。

[0103] 其中，第一计算模块用于进行以下的计算：

[0104] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,利用摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波峰高差值和半高宽差值相乘,可以避免上述的峰高差值和半高宽差值受到厚度影响。

[0105] 具体的,第一计算模块用于进行以下的计算:

[0106] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,获得第一回波的第一峰高A1和第一半高宽FWHM1,获得第二回波的第二峰高A2和第二半高宽FWHM2;

[0107] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,利用摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波峰高差值和半高宽差值,计算第一峰高A1与第二峰高A2的峰高差,  $\Delta H = A1 - A2$ ; 计算摒除厚度影响因素的峰高差值  $\delta_h, \delta_h = (A1 - A2) / d$ , 其中d为样品的实际厚度参量值;

[0108] 计算第一半高宽FWHM1和第二半高宽FWHM2的差值,  $\Delta FWHM = FWHM2 - FWHM1$ ; 计算摒除厚度影响因素的半高宽差值  $\delta_F, \delta_F = (FWHM2 - FWHM1) / d$ , 其中d为样品的实际厚度参量值;

[0109] 获得评估表征量  $\delta_r, \delta_r = \delta_h * \delta_F$ 。

[0110] 图6是本发明的一个实施例中一种涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的应用装置的结构示意图。应用装置包括:

[0111] 第三获得模块,用于获得涂层的太赫兹时域光谱信号;

[0112] 第二计算模块,用于根据太赫兹时域光谱信号计算评估表征量;

[0113] 转换模块,用于利用评估表征量和表征装置所获得的对应关联线性关系得到涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征。

[0114] 其中,第二计算模块用于进行以下的计算:

[0115] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,利用摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波峰高差值和半高宽差值相乘,可以避免上述的峰高差值和半高宽差值受到厚度影响。

[0116] 具体的,第二计算模块用于进行以下的计算:

[0117] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,获得第一回波的第一峰高A1和第一半高宽FWHM1,获得第二回波的第二峰高A2和第二半高宽FWHM2;

[0118] 经过第一回波、第二回波单峰高斯拟合后,利用摒除厚度影响因素的第一回波和第二回波峰高差值和半高宽差值,计算第一峰高A1与第二峰高A2的峰高差,  $\Delta H = A1 - A2$ ; 计算摒除厚度影响因素的峰高差值  $\delta_h, \delta_h = (A1 - A2) / d$ , 其中d为样品的实际厚度参量值;

[0119] 计算第一半高宽FWHM1和第二半高宽FWHM2的差值,  $\Delta FWHM = FWHM2 - FWHM1$ ; 计算摒除厚度影响因素的半高宽差值  $\delta_F, \delta_F = (FWHM2 - FWHM1) / d$ , 其中d为样品的实际厚度参量值;

[0120] 获得评估表征量  $\delta_r, \delta_r = \delta_h * \delta_F$ 。

[0121] 虽然本发明披露如上,但本发明并非限于此。任何本领域技术人员,在不脱离本发明的精神和范围内,均可作各种更动与修改,因此本发明的保护范围应当以权利要求所限定的范围为准。

[0122] 最后,还需要说明的是,在本文中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者

设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0123] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的表征装置和应用装置而言,由于其与上述实施例公开的表征涡轮叶片热障涂层陶瓷层微结构特征的方法,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。

[0124] 当然,本发明还可以有其它多种实施例,在非背离本发明精神及其实质的情况下,熟悉本领域的技术人员可根据本发明作出各种相应的改变和变形,但这些相应的改变和变形都应属于本发明权利要求的保护范围。

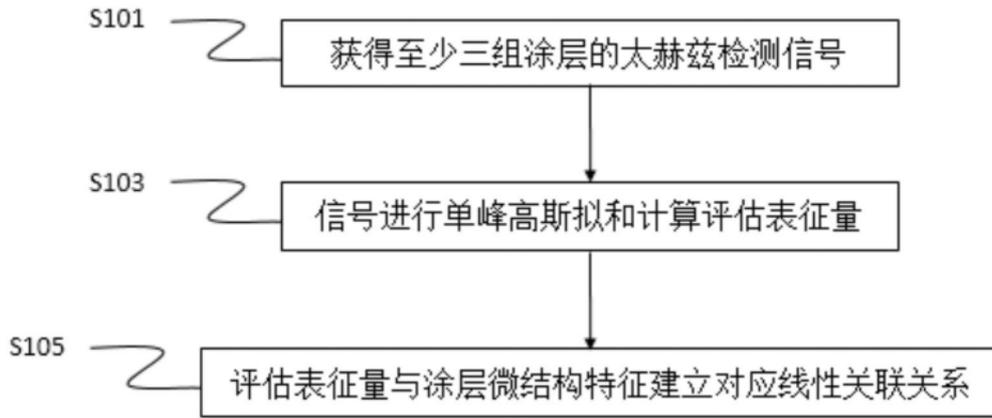


图1

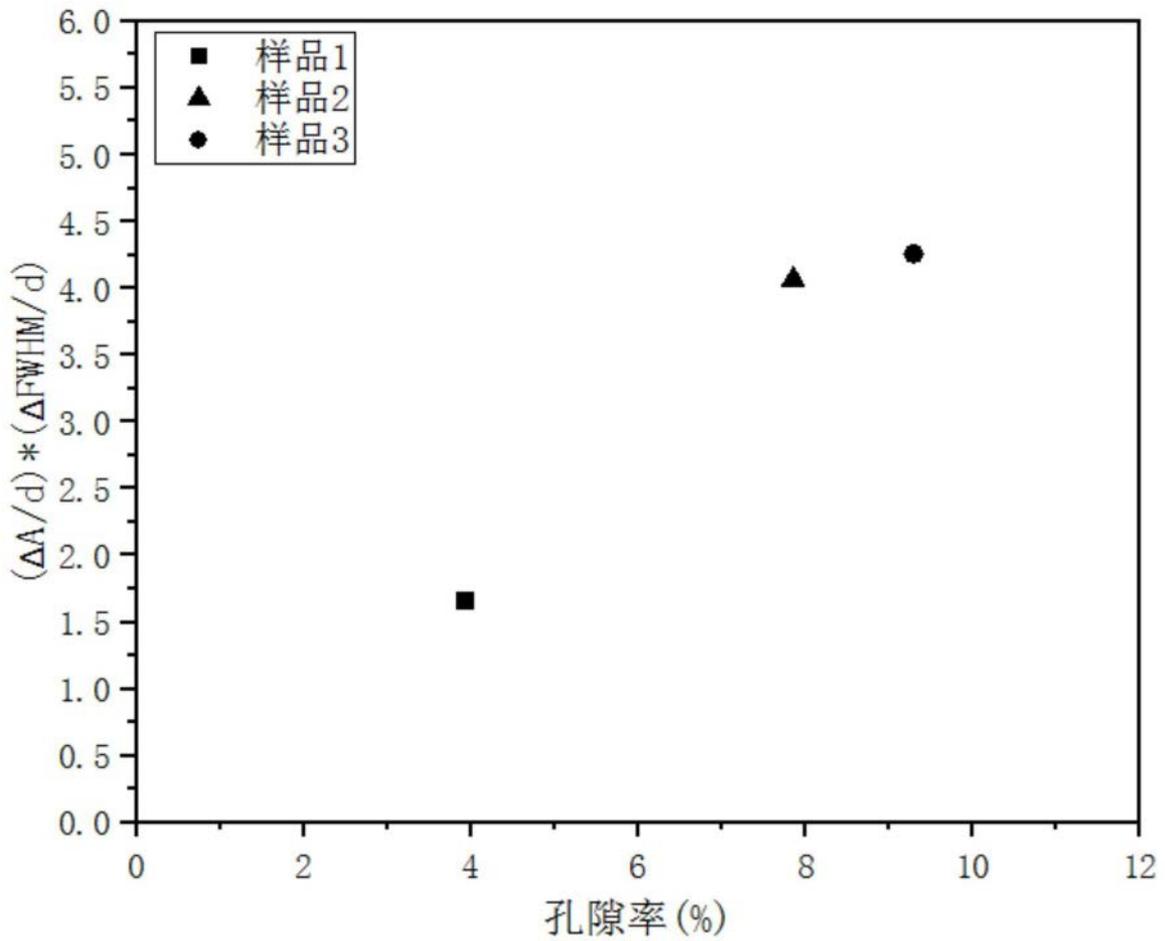


图2

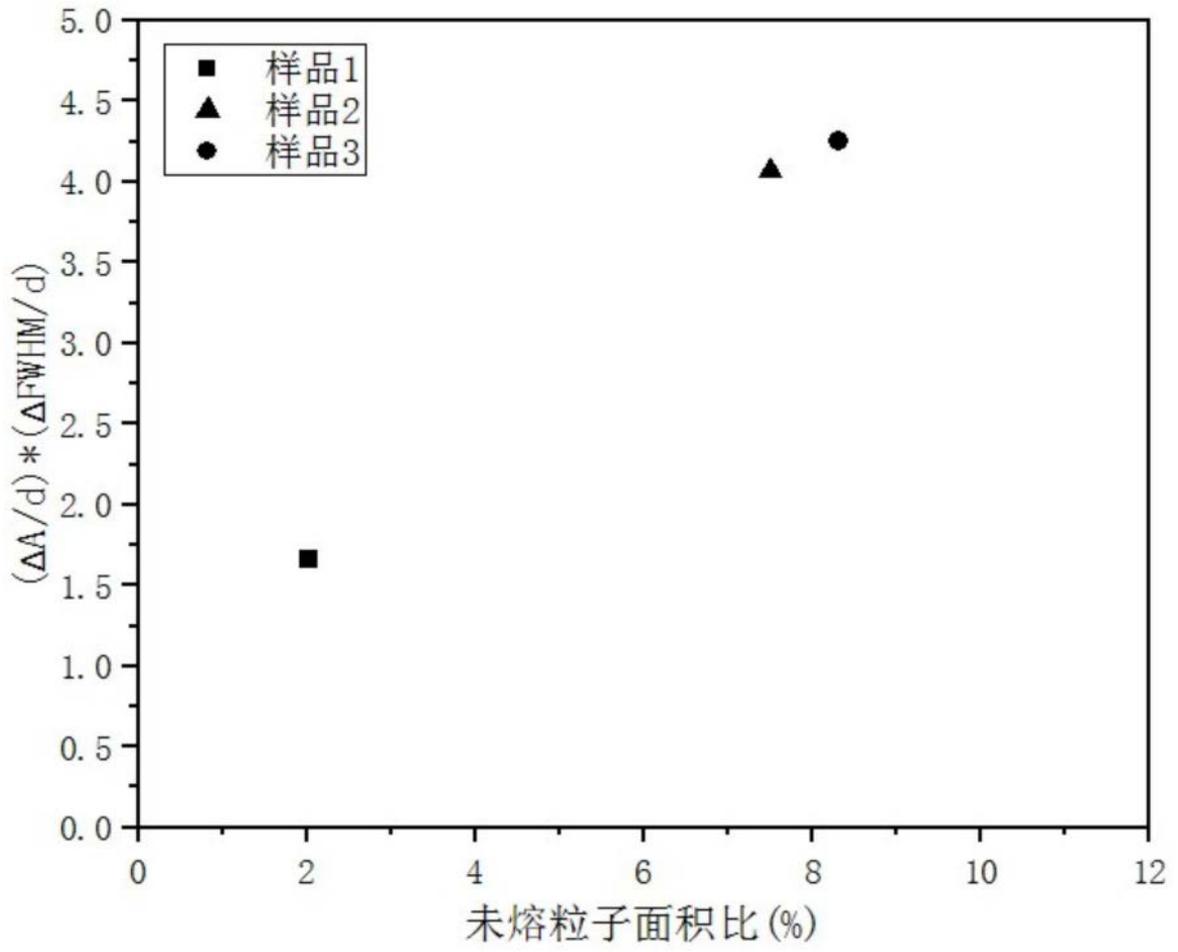


图3

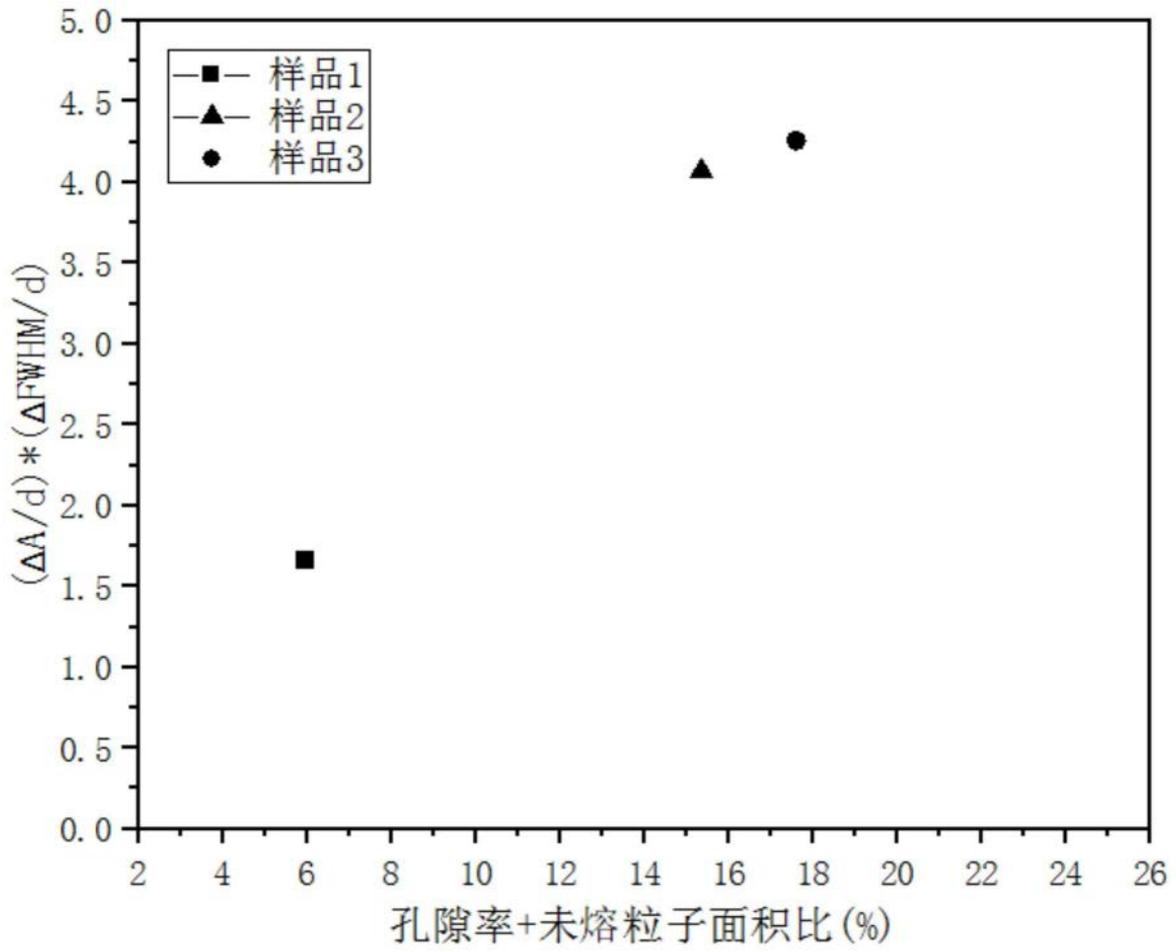


图4



图5



图6