



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117147028 B

(45) 授权公告日 2024. 04. 26

(21) 申请号 202311102436.7

(22) 申请日 2023.08.30

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 117147028 A

(43) 申请公布日 2023.12.01

(73) 专利权人 安徽工程大学  
地址 241000 安徽省芜湖市鸠江区北京中路安徽工程大学

(72) 发明人 叶东东 李瑞 王卫泽 潘家保  
黄继波 方焕杰 徐洲 吴飞翔  
许书恒 胡立鹏 武轶文 印长东  
周海婷 黄新春 王培勇 易健武

(74) 专利代理机构 北京盛询知识产权代理有限公司 11901  
专利代理师 张浩伟

(51) Int. Cl.  
G01L 5/00 (2006.01)  
G01L 1/24 (2006.01)  
G06F 30/27 (2020.01)  
G06N 3/0464 (2023.01)  
G06N 3/09 (2023.01)

G06N 20/00 (2019.01)

G06F 119/08 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 113820052 A, 2021.12.21

CN 113820053 A, 2021.12.21

US 2022373458 A1, 2022.11.24

Dongdong Ye 等.Characterization of thermal barrier coatings microstructural features using terahertz spectroscopy.Surface and Coatings Technology.2020,1-10.

白玉梅;徐颖强;孟宏君.温度梯度下热障涂层残余应力的解析模型研究.热加工工艺.(20),

白玉梅 等.温度梯度下热障涂层残余应力的解析模型研究.热加工工艺.2020,第49卷(第20期),119-122.

叶东东;王卫泽.热障涂层太赫兹无损检测技术研究进展.表面技术.2020,(第10期),135-146.

审查员 杨晓林

权利要求书2页 说明书7页 附图3页

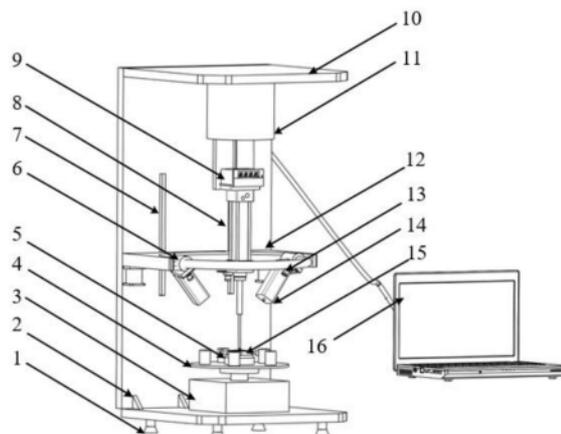
(54) 发明名称

一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置及检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置及检测方法,装置包括:原位磁控压痕模块:用于获取压痕深度-载荷关系曲线,计算热障涂层残余应力;多自由度太赫兹模块:用于获取在压痕过程中的太赫兹时域光谱数据,表征热障涂层残余应力的变化;机器学习评价模块:用于基于所述原位磁控压痕模块的压痕数据与所述太赫兹时域光谱数据和热障涂层不同温度梯度下的残余应力,结合机器学习算法建立评价模型,分析太赫兹信号和残余应力之间的关系。本发明能够全面、准确地评估热障涂层不

同温度梯度下的残余应力,实时监测其变化情况。



1. 一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,其特征在于,包括:

原位磁控压痕模块:用于获取压痕深度-载荷关系曲线,计算热障涂层残余应力;

其中,所述原位磁控压痕模块包括:

磁流变液液压活塞:用于通过控制通电线圈的电流强度改变磁流变液的状态分布,控制活塞圆盘的升降,进而控制压痕圆头的微上升和下降过程;

压力传感器:用于监测所述磁流变液液压活塞运动过程中的压力载荷;

DIC摄像装置:用于校准压痕圆头与热障涂层表面接触位置以及测量压痕深度;

多自由度太赫兹模块:用于获取在压痕过程中的太赫兹时域光谱数据,表征热障涂层残余应力的变化;

机器学习评价模块:用于基于所述原位磁控压痕模块的压痕数据与所述太赫兹时域光谱数据和热障涂层不同温度梯度下的残余应力,结合机器学习算法建立评价模型,分析太赫兹信号和残余应力之间的关系。

2. 根据权利要求1所述的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,其特征在于,所述检测装置还包括温控模块,所述温控模块用于对热障涂层样品进行温度梯度的控制。

3. 根据权利要求2所述的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,其特征在于,所述温控模块包括:

电阻带加热装置:用于对样品进行高温加热;

液氮冷却装置:用于对所述样品进行快速冷却;

温度传感器:用于实时监测所述热障涂层样品的温度。

4. 根据权利要求3所述的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,其特征在于,对所述热障涂层样品进行温度梯度的控制,包括:

对所述热障涂层样品进行温度梯度加载,引入不同应力状态变化,提供可控的温度载荷。

5. 根据权利要求1所述的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,其特征在于,计算所述热障涂层残余应力的方法为:

$$\sigma_i = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{R \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot (\sqrt{R} - \sqrt{R - h_i})^{3/2} - \sum_{i=1}^n \left( P_i \cdot \frac{R \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot (\sqrt{R} - \sqrt{R - h_i})^{3/2} \right)$$

其中, $\sigma_i$ 表示第*i*次压痕的残余应力, $R$ 表示压痕圆头的球形半径,即压头半径, $E$ 表示热障涂层弹性模量, $\mu$ 表示泊松比, $h_i$ 表示第*i*次压痕深度, $P_i$ 表示第*i*次压痕的载荷, $n$ 表示进行压痕的次数。

6. 根据权利要求1所述的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,其特征在于,所述多自由度太赫兹模块包括:三维定位摄像装置、全角度移动机构以及太赫兹发射器和太赫兹接收器;

所述三维定位摄像装置,用于识别空间位置并将调节信息传输至所述全角度移动机构;

所述全角度移动机构,用于基于所述空间位置同步调整太赫兹设备;其中,所述空间位置包括热障涂层和压痕计的位置;

所述太赫兹发射器和太赫兹接收器,用于接收热障涂层表面反射光线,获取太赫兹时

域光谱信息;其中,通过计算机将所述太赫兹时域光谱信息转换为太赫兹时域光谱数据并进行显示。

7. 根据权利要求6所述的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,其特征在于,获取所述太赫兹时域光谱数据后,还包括:

对所述太赫兹时域光谱数据进行噪声去除和数据清洗以及特征提取;

将太赫兹时域光谱数据进行傅里叶变换,得到频域谱和相位谱,提取所述频域谱的峰值作为第一太赫兹特征参数,对所述相位谱进行解包裹处理,去除相位跳跃后计算曲线的斜率作为第二太赫兹特征参数;所述第一太赫兹特征参数和所述第二太赫兹特征参数共同作为表征残余应力的全周期变化的特征参数。

8. 根据权利要求1所述的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,其特征在于,所述机器学习评价模块包括卷积神经网络单元,所述卷积神经网络单元用于建立CNN回归预测模型,并通过交叉验证方法对所述CNN回归预测模型进行优化。

9. 一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置的检测方法,其特征在于,包括:

基于原位磁控压痕模块获取压痕深度-载荷关系曲线,计算热障涂层残余应力;

通过多自由度太赫兹模块获取在压痕过程中的太赫兹时域光谱数据,表征热障涂层残余应力的变化;

基于所述原位磁控压痕模块的压痕数据与所述太赫兹时域光谱数据和热障涂层不同温度梯度下的残余应力,结合机器学习算法建立评价模型,分析太赫兹信号和残余应力之间的关系;

其中,所述原位磁控压痕模块包括:

磁流变液液压活塞:用于通过控制通电线圈的电流强度改变磁流变液的状态分布,控制活塞圆盘的升降,进而控制压痕圆头的微上升和下降过程;

压力传感器:用于监测所述磁流变液液压活塞运动过程中的压力载荷;

DIC摄像装置:用于校准压痕圆头与热障涂层表面接触位置以及测量压痕深度。

## 一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置及检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及图层检测技术领域,尤其涉及一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置及检测方法。

### 背景技术

[0002] 热障涂层(Thermal barrier coatings,TBCs)是一种常用于航空航天、燃气涡轮等高温工程领域的表面保护涂层。在高温环境下,热障涂层可以有效减少基底材料的热损失,并提高材料的耐热性能,从而延长设备的使用寿命。然而,在热循环工况和不同热梯度条件下,且受到机械载荷的影响,导致热障涂层的热膨胀,而引起残余应力的产生和积累,导致热障涂层出现龟裂和剥落等问题。残余应力的存在可能会影响热障涂层的性能和可靠性,因此对热障涂层的残余应力进行准确评估和监测是至关重要的。

[0003] 传统的残余应力测量方法主要包括X射线衍射法、中子衍射法、光栅法等,这些方法具有一定的精度,但通常需要离线测量,对于实时监测和原位评估残余应力并不适用。

[0004] 为了克服传统方法的局限性,原位太赫兹检测技术逐渐成为热障涂层残余应力评估的新手段。太赫兹是一种电磁波,波段在0.1-10THz之间。作为一种新的无损检测技术在红外和微波之间的频率范围,具有很强的穿透能力,能够穿透一些非金属材料,并对材料的电磁波响应进行检测。因此成为了热障涂层残余应力检测的理想工具,太赫兹波与物质的相互作用主要包括吸收、散射和折射等过程,这些变化可以用来表征材料的物理性质和残余应力。通过检测太赫兹辐射的强度、频谱和相位等特征,可以推断材料内部的残余应力情况。

[0005] 因此,本发明旨在提供一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置及检测方法,通过太赫兹技术结合压痕法,实现对热障涂层的残余应力进行准确、全面的评估。该装置能够在热循环过程中实时检测太赫兹信号和压痕数据,并引入机器学习算法建立评价模型,从而实现对热障涂层在不同温度梯度下的残余应力的预测和评估。通过该装置和方法,可更全面了解热障涂层的残余应力分布及变化规律,为材料设计和工程应用提供可靠的数据支持,该技术在航空航天、能源等领域具有广泛的应用前景。

### 发明内容

[0006] 本发明旨在解决现有技术的不足,提出一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置及检测方法,是对传统固定式太赫兹设备的创新改进,且巧妙的将多自由度太赫兹设备与压痕法结合,对热障涂层残余应力进行精准评估。

[0007] 一方面,为实现上述目的,本发明提供了一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,包括:

[0008] 原位磁控压痕模块:用于获取压痕深度-载荷关系曲线,计算热障涂层残余应力;

[0009] 多自由度太赫兹模块:用于获取在压痕过程中的太赫兹时域光谱数据,表征热障涂层残余应力的变化;

[0010] 机器学习评价模块:用于基于所述原位磁控压痕模块的压痕数据与所述太赫兹时域光谱数据和热障涂层不同温度梯度下的残余应力,结合机器学习算法建立评价模型,分析太赫兹信号和残余应力之间的关系。

[0011] 优选地,所述检测装置还包括温控模块,所述温控模块用于对热障涂层样品进行温度梯度的控制。

[0012] 优选地,所述温控模块包括:

[0013] 电阻带加热装置:用于对样品进行高温加热;

[0014] 液氮冷却装置:用于对所述样品进行快速冷却;

[0015] 温度传感器:用于实时监测所述热障涂层样品的温度。

[0016] 优选地,对所述热障涂层样品进行温度梯度的控制,包括:

[0017] 对所述热障涂层样品进行温度梯度加载,引入不同应力状态变化,提供可控的温度载荷。

[0018] 优选地,所述原位磁控压痕模块包括:

[0019] 磁流变液液压活塞:用于通过控制通电线圈的电流强度改变磁流变液的状态分布,控制活塞圆盘的升降,进而控制压痕圆头的微上升和下降过程;

[0020] 压力传感器:用于监测所述磁流变液液压活塞运动过程中的压力载荷;

[0021] DIC摄像装置:用于校准压痕圆头与热障涂层表面接触位置以及测量压痕深度。

[0022] 优选地,计算所述热障涂层残余应力的方法为:

$$[0023] \quad \sigma_i = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{R \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot (\sqrt{R} - \sqrt{R - h_i})^{3/2} - \sum_{i=1}^n \left( P_i \cdot \frac{R \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot (\sqrt{R} - \sqrt{R - h_i})^{3/2} \right)$$

[0024] 其中, $\sigma_i$ 表示表示第*i*次压痕的残余应力,R表示压痕圆头的球形半径,即压头半径,E表示热障涂层弹性模量, $\mu$ 表示泊松比, $h_i$ 表示第*i*次压痕深度, $P_i$ 表示第*i*次压痕的载荷,n表示进行压痕的次数。

[0025] 优选地,所述多自由度太赫兹模块包括:三维定位摄像装置、全角度移动机构以及太赫兹发射器和太赫兹接收器;

[0026] 所述三维定位摄像装置,用于识别空间位置并将调节信息传输至所述全角度移动机构;

[0027] 所述全角度移动机构,用于基于所述空间位置同步调整太赫兹设备;其中,所述空间位置包括热障涂层和压痕计的位置;

[0028] 所述太赫兹发射器和太赫兹接收器,用于接收热障涂层表面反射光线,获取太赫兹时域光谱信息;其中,通过计算机将所述太赫兹时域光谱信息转换为太赫兹时域光谱数据并进行显示。

[0029] 优选地,获取所述太赫兹时域光谱数据后,还包括:

[0030] 对所述太赫兹时域光谱数据进行噪声去除和数据清洗以及特征提取;

[0031] 将太赫兹时域光谱数据进行傅里叶变换,得到频域谱和相位谱,提取所述频域谱的峰值作为第一太赫兹特征参数,对所述相位谱进行解包裹处理,去除相位跳跃后计算曲线的斜率作为第二太赫兹特征参数;所述第一太赫兹特征参数和所述第二太赫兹特征参数共同作为表征残余应力的全周期变化的特征参数。

[0032] 优选地,所述机器学习评价模块包括卷积神经网络单元,所述卷积神经网络单元用于建立CNN回归预测模型,并通过交叉验证方法对所述CNN回归预测模型进行优化。

[0033] 另一方面,为了实现上述目的,本发明还提供了一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置的检测方法,包括:

[0034] 基于原位磁控压痕模块获取压痕深度-载荷关系曲线,计算热障涂层残余应力;

[0035] 通过多自由度太赫兹模块获取在压痕过程中的太赫兹时域光谱数据,表征热障涂层残余应力的变化;

[0036] 基于所述原位磁控压痕模块的压痕数据与所述太赫兹时域光谱数据和热障涂层不同温度梯度下的残余应力,结合机器学习算法建立评价模型,分析太赫兹信号和残余应力之间的关系。

[0037] 与现有技术相比,本发明具有如下优点和技术效果:

[0038] (1) 本发明能够实现高精度无损评估:通过原位压痕实验和太赫兹时域光谱数据采集,能够全面、准确地评估热障涂层不同温度梯度下的残余应力,实时监测其变化情况;实现全周期特征参数:利用机器学习算法结合太赫兹特征参数和热障涂层材料参数,构建评价模型,能够表征热障涂层残余应力的全周期变化,提高评估的精度;实现检测自动化和智能化:多自由度太赫兹设备与先进磁控压痕计的应用提高了检测效率和精度。

[0039] (2) 本发明是实现热障涂层残余应力的原位太赫兹检测,并结合多个参数和机器学习算法进行全面、准确的评估,为热障涂层的性能评价和材料研究提供了一种高效可靠的方法。

## 附图说明

[0040] 构成本申请的一部分的附图用来提供对本申请的进一步理解,本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请,并不构成对本申请的不当限定。在附图中:

[0041] 图1为本发明实施例的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置的整体结构示意图;

[0042] 图2为本发明实施例的电阻带加热模块组件的结构示意图;

[0043] 图3为本发明实施例的液氮散热模块组件的结构示意图;

[0044] 图4为本发明实施例的原位磁控压痕机构的结构示意图;

[0045] 图5为本发明实施例的太赫兹时域光谱组件的结构示意图;

[0046] 图6为本发明实施例的热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置的使用方法流程图;

[0047] 其中,1-可调脚垫,2-加强筋,3-液氮散热装置,4-旋转置物板,5-固定器,6-接收器滑套,7-第一滑槽,8-磁流变液液压活塞,9-数显表,10-上顶板,11-控制集成器,12-太赫兹设备支架,13-第一三维定位摄像头,14-太赫兹发射器,15-待测热障涂层样品,16-计算机,17-固定旋转螺钉,18-旋转轴套,19-加热组件,20-电阻带,21-下底板,22-热传导金属杆,23-散热片夹具,24-液氮散热片,25-第一电机组件,26-DIC摄像头,27-第二滑槽,28-X轴移动块,29-压力传感器,30-第一伸缩杆,31-第二伸缩杆,32-压痕圆头,33-第一磁流变液腔体,34-第二磁流变液腔体,35-通电线圈,36-单向阀,37-弹簧,38-活塞升降板,39-第二三维定位摄像头,40-太赫兹接收器,41-圆环转台固定杆,42-太赫兹设备支架扣件,43-

圆环转台,44-第二电机组件,45-发射器滑套。

### 具体实施方式

[0048] 需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施例来详细说明本申请。

[0049] 需要说明的是,在附图的流程图示出的步骤可以在诸如一组计算机可执行指令的计算机系统中执行,并且,虽然在流程图中示出了逻辑顺序,但是在某些情况下,可以以不同于此处的顺序执行所示出或描述的步骤。

[0050] 本发明提出了一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置,如图1,包括:

[0051] 原位磁控压痕模块:用于获取压痕深度-载荷关系曲线,计算热障涂层残余应力;

[0052] 多自由度太赫兹模块:用于获取在压痕过程中的太赫兹时域光谱数据,表征热障涂层残余应力的变化;

[0053] 机器学习评价模块:用于基于所述原位磁控压痕模块的压痕数据与所述太赫兹时域光谱数据和热障涂层不同温度梯度下的残余应力,结合机器学习算法建立评价模型,分析太赫兹信号和残余应力之间的关系。

[0054] 检测装置还包括温控模块,用于对热障涂层样品进行温度梯度的控制。

[0055] 温控模块包括电阻带加热装置、液氮冷却装置、温度传感器;

[0056] 电阻带加热装置(如图2):用于对样品进行高温加热;调节固定旋转螺钉,通过固定器将待测样品固定在加热组件中,待测样品与旋转置物板相对固定且与热传导金属杆接触;

[0057] 液氮冷却装置(如图3):用于对所述样品进行快速冷却;其中,液氮散热片和热传导金属杆固定在散热片夹具上,通过液氮与热传导金属杆的直接接触实现降温散热;

[0058] 温度传感器:用于实时监测所述样品的温度,集成在电阻带加热装置和液氮冷却装置中,可实时监测温度。

[0059] 对热障涂层样品进行温度梯度的控制,包括:

[0060] 对热障涂层样品进行温度梯度加载,引入不同应力状态变化,提供可控的温度载荷。具体为,热障涂层样品从室温25℃加热到1100℃;在原位磁控压痕计加载时,以每40min加热215℃,并持续保温30min,70分钟为一个梯度准则,持续加热5次达到1100℃;在原位磁控压痕计卸载时,以每40min冷却215℃,并持续保温30min,70分钟为一个梯度准则,持续冷却5次达到25℃。

[0061] 原位磁控压痕模块包括磁流变液液压活塞、压力传感器、DIC摄像装置、数显表、压痕计、压痕圆头;

[0062] 磁流变液液压活塞:用于通过控制通电线圈的电流强度改变磁流变液的状态分布,控制活塞圆盘的升降,进而控制压痕圆头的微上升和下降过程;磁流变液液压活塞上方固定在X轴移动块上,下方与所述压力传感器相连接;

[0063] 压力传感器:用于监测所述磁流变液液压活塞运动过程中的压力载荷;

[0064] DIC摄像装置:用于校准压痕圆头与热障涂层表面接触位置以及测量压痕深度,DIC摄像装置固定在压力传感器旁;

[0065] 数显表:用于显示通电线圈的电流数值、和压力传感器的载荷数值,数显表与X轴

移动块相对固定；

[0066] 压痕计：包括所述第一、第二伸缩杆和压痕圆头，固定在压力传感器下表面，用于获取压痕深度-载荷关系曲线，其中，压痕深度-载荷关系曲线通过计算机呈现；

[0067] 压痕圆头：在载荷作用下与待测热障涂层表面进行接触或压紧，用于获取在表面的压痕凹坑。

[0068] 磁流变液通过单向阀，在第一磁流变液腔体和第二磁流变液腔体流通，通过控制通电线圈的电流强度而改变磁流变液的状态分布，从而控制活塞圆盘的升降，进而精确控制压痕圆头的微上升和下降过程；通过改变通电线圈的电流大小，调节磁场的强弱，从而改变磁流变液中磁颗粒的排列状态。

[0069] 当电流通入线圈时，产生磁场，使磁流变液中的颗粒排列，导致液压活塞受到压力作用而上升。而当电流断开时，磁场消失，磁流变液中的颗粒恢复无序排列状态，液压活塞受到外界压力作用而下降；固定器由4根以90°周向分布安装的旋转螺钉固定待测样品位置。

[0070] 进一步的，热障涂层残余应力，由基于压痕数据的数学模型计算得到：

$$[0071] \quad \sigma_i = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{R \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot (\sqrt{R} - \sqrt{R - h_i})^{3/2} - \sum_{i=1}^n \left( P_i \cdot \frac{R \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot (\sqrt{R} - \sqrt{R - h_i})^{3/2} \right)$$

[0072] 其中， $\sigma_i$ 表示第*i*次压痕的残余应力，*R*表示压痕圆头的球形半径，即压头半径，*E*表示热障涂层弹性模量， $\mu$ 表示泊松比，*h<sub>i</sub>*表示第*i*次压痕深度，*P<sub>i</sub>*表示第*i*次压痕的载荷，*n*表示进行压痕的次数。

[0073] 压头半径、弹性模量和泊松比是热障涂层的基本物性参数，而压痕深度和压痕载荷则是实验获得的数据。通过多次压痕实验，可以得到不同压痕深度下的载荷数据，并利用这些数据计算出残余应力。

[0074] 多自由度太赫兹模块，可获取在温度梯度下压痕卸载过程的全周期太赫兹时域光谱数据，用于表征热障涂层残余应力的变化程度。

[0075] 多自由度太赫兹模块包括三维定位摄像装置、全角度移动机构以及太赫兹发射器和太赫兹接收器；

[0076] 三维定位摄像装置：分别安装在太赫兹发射器和接收器上，可识别空间位置并将调节信息传输到全角度移动机构，实现定位功能；

[0077] 全角度移动机构：可根据热障涂层和压痕计的位置进行同步调整太赫兹设备，在圆环转台上做周向粗调节，滑套可旋转带动太赫兹设备做细调节，以确保太赫兹发射器和接收器以合适角度进行检测；

[0078] 太赫兹发射器和太赫兹接收器，固定在圆环转台的滑套上，可多角度多方位调节发射不同角度的入射光线，接收热障涂层表面反射光线，在计算机上显示获取太赫兹时域光谱数据。

[0079] 进一步的，太赫兹时域光谱数据，可表征不同温度梯度下的压痕卸载过程的残余应力；

[0080] 对太赫兹时域数据进行预处理和特征提取包括：

[0081] 对太赫兹时域数据进行噪声去除和数据清洗，特征提取。将太赫兹时域信号进行

傅里叶变换,得到频域谱和相位谱,提取频域谱的峰值作为第一太赫兹特征参数,相位谱需要经过解包裹处理,去除相位跳跃后计算曲线的斜率作为第二太赫兹特征参数;可作为表征残余应力的全周期变化的特征参数。

[0082] 机器学习评价模块包括卷积神经网络单元,卷积神经网络单元用于建立CNN回归预测模型,并通过交叉验证方法对所述CNN回归预测模型进行优化。

[0083] 基于原位磁控压痕模块的压痕数据和多自由度太赫兹模块采集的太赫兹时域光谱数据,以及热障涂层在不同温度梯度下的残余应力数据,结合卷积神经网络(Convolutional Neural Networks,CNN);将太赫兹第一特征参数、第二太赫兹特征参数、压痕面积、弹性模量以及泊松比作为输入,残余应力作为输出,建立CNN回归预测模型,并通过交叉验证等方法进行模型的优化,以确保模型具有较好的泛化能力和预测准确度。

[0084] 本实施例还提供了一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置的检测方法,包括:

[0085] 基于原位磁控压痕模块获取压痕深度-载荷关系曲线,计算热障涂层残余应力;

[0086] 通过多自由度太赫兹模块获取在压痕过程中的太赫兹时域光谱数据,表征热障涂层残余应力的变化;

[0087] 基于所述原位磁控压痕模块的压痕数据与所述太赫兹时域光谱数据和热障涂层不同温度梯度下的残余应力,结合机器学习算法建立评价模型,分析太赫兹信号和残余应力之间的关系。

[0088] 本实施例还提供了一种热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置的使用方法,如图6,包括:

[0089] S1、放置热障涂层样品并通过固定器进行固定,根据所述涂层样品的待测位置调整原位磁控压痕计、太赫兹发射器和太赫兹接收器的位置;

[0090] S2、开启电阻带加热装置和液氮冷却装置,加载温度梯度;所述原位磁控压痕计工作,输入电流控制磁流变液液压活塞升降,带动压痕圆头,获取卸载阶段压痕深度-载荷曲线;同时所述太赫兹发射器发射脉冲信号,在待测位置反射后被所述太赫兹接收装置接收,通过计算机显示太赫兹时域数据;

[0091] S3、基于压痕数据建立数学模型计算残余应力,通过所述太赫兹时域数据提取太赫兹第一特征参数和第二特征参数;

[0092] S4、基于CNN算法,建立热障涂层残余应力评价模型,经过交叉验证,对模型进行优化。

[0093] 热障涂层残余应力的原位太赫兹检测装置的工作原理为:

[0094] 如图1所示,首先调节可调脚垫1,使整个装置处于水平状态。在旋转置物板4上放置待测热障涂层样品15,并调节固定器5上的固定旋转螺钉17,定位待测热障涂层样品15。随后调节固定在控制集成器11上的第二滑槽27和X轴移动块28,使压痕圆头32对准待测区域。再调节第一滑槽7,在Y轴方向移动到合适位置,结合第一三维定位摄像头13和第二三维定位摄像头39的位置识别,调节太赫兹发射器14和太赫兹接收器40的角度,使发射的太赫兹信号经过热障涂层的反射信号可以被太赫兹接收器40接收。

[0095] 如2图所示,调节旋转轴套18,调节固定器5,固定旋转螺钉17固定待测热障涂层样品15。开启加热组件19,通过电阻带20进行升温,与液氮散热装置3配合使用,形成温度梯

度。

[0096] 如3图所示,液氮散热装置3固定在下底板21上,通过热传导金属杆22进行散热传导。液氮散热片24固定在散热片夹具23上。

[0097] 如图4所示,原位磁控压痕模块包括,首先通过第一电机组件25调节磁流变液液压活塞8在第二滑槽27的位置,以及调节X轴移动块28的位置,进行初步定位。再通过给通电线圈35加电流,使第二磁流变液腔体34充满磁场,磁流变液在第二磁流变液腔体34和第一磁流变液腔体33之间通过单向阀36移动,实现可调节活塞升降板38的位置,进而实现加载和卸载,弹簧37起到缓冲作用。

[0098] 如图5所示,通过第二电机组件44调节太赫兹设备支架扣件42在第一滑槽7的位置,初步调节太赫兹设备支架12在Y轴上的位置。圆环转台43通过圆环转台固定杆41固定在太赫兹设备支架12上。结合第一三维定位摄像头13和第二三维定位摄像头39的定位信息,调节发射器滑套45和接收器滑套6的周向位置,可实现太赫兹发射器14发射的太赫兹信号经过待测热障涂层样品15的反射信号能被太赫兹接收器40接收到。

[0099] 以上,仅为本申请较佳的具体实施方式,但本申请的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本申请揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本申请的保护范围之内。因此,本申请的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

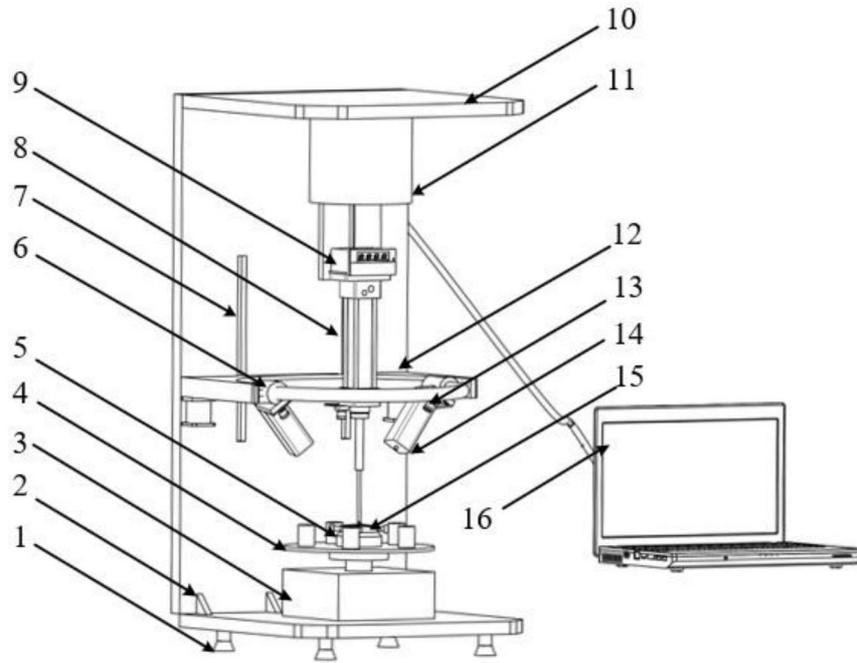


图1

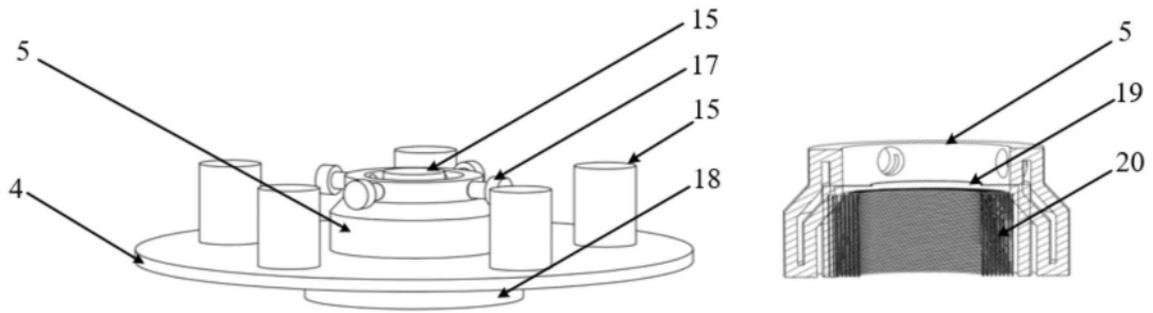


图2

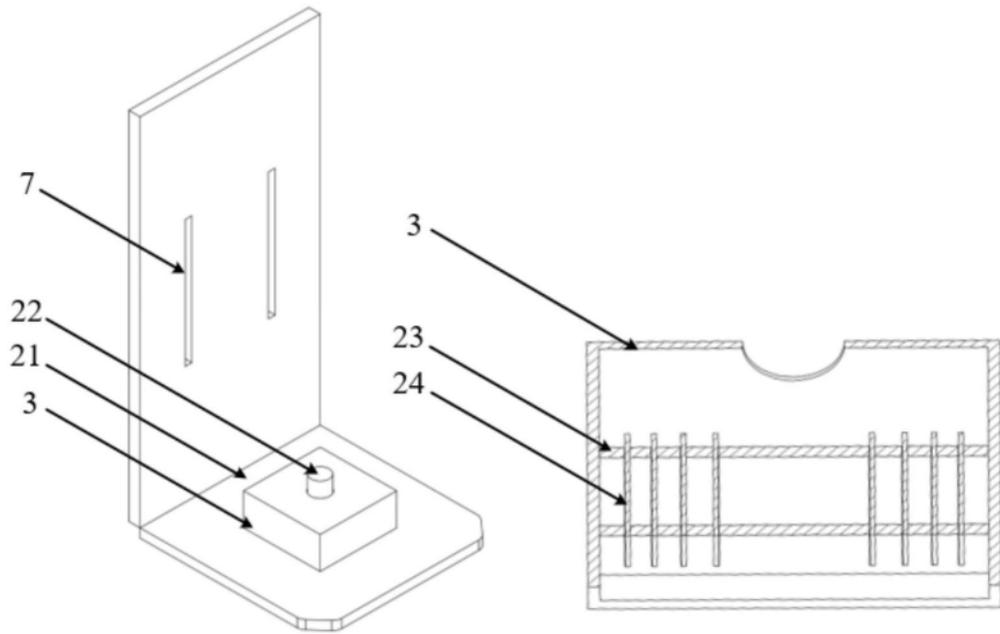


图3

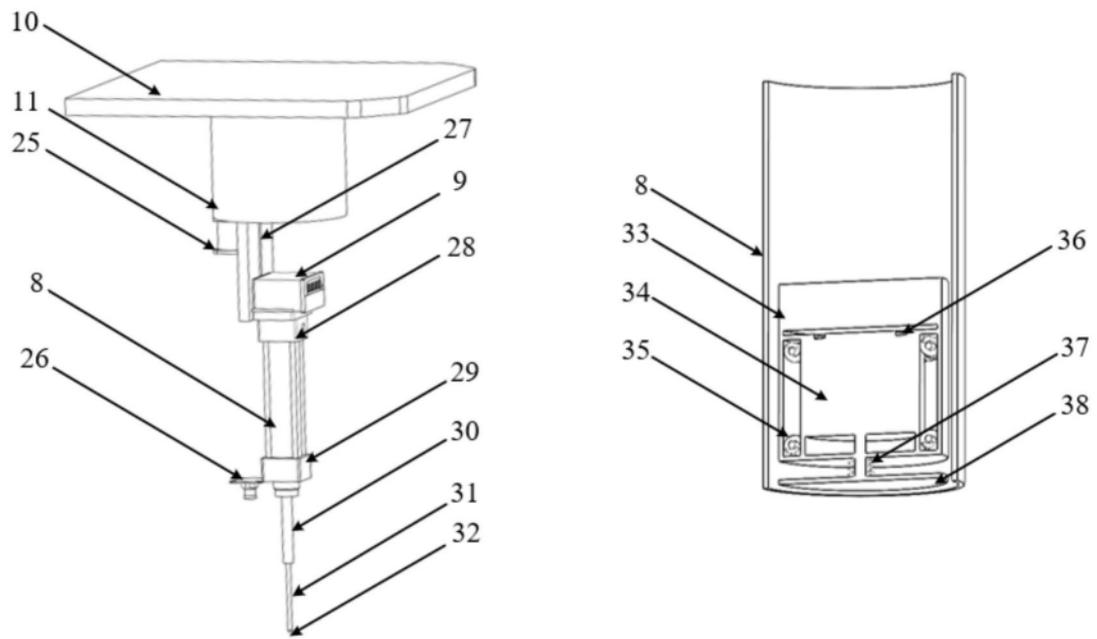


图4

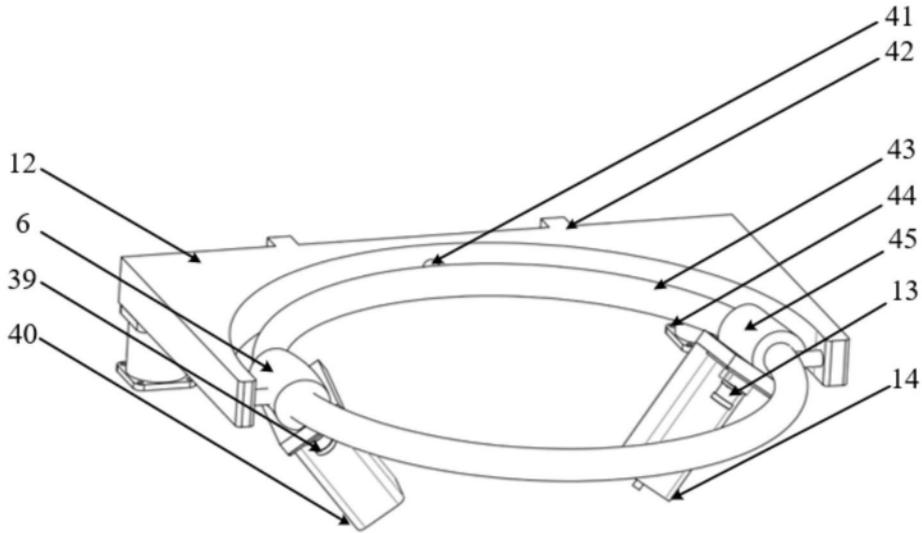


图5

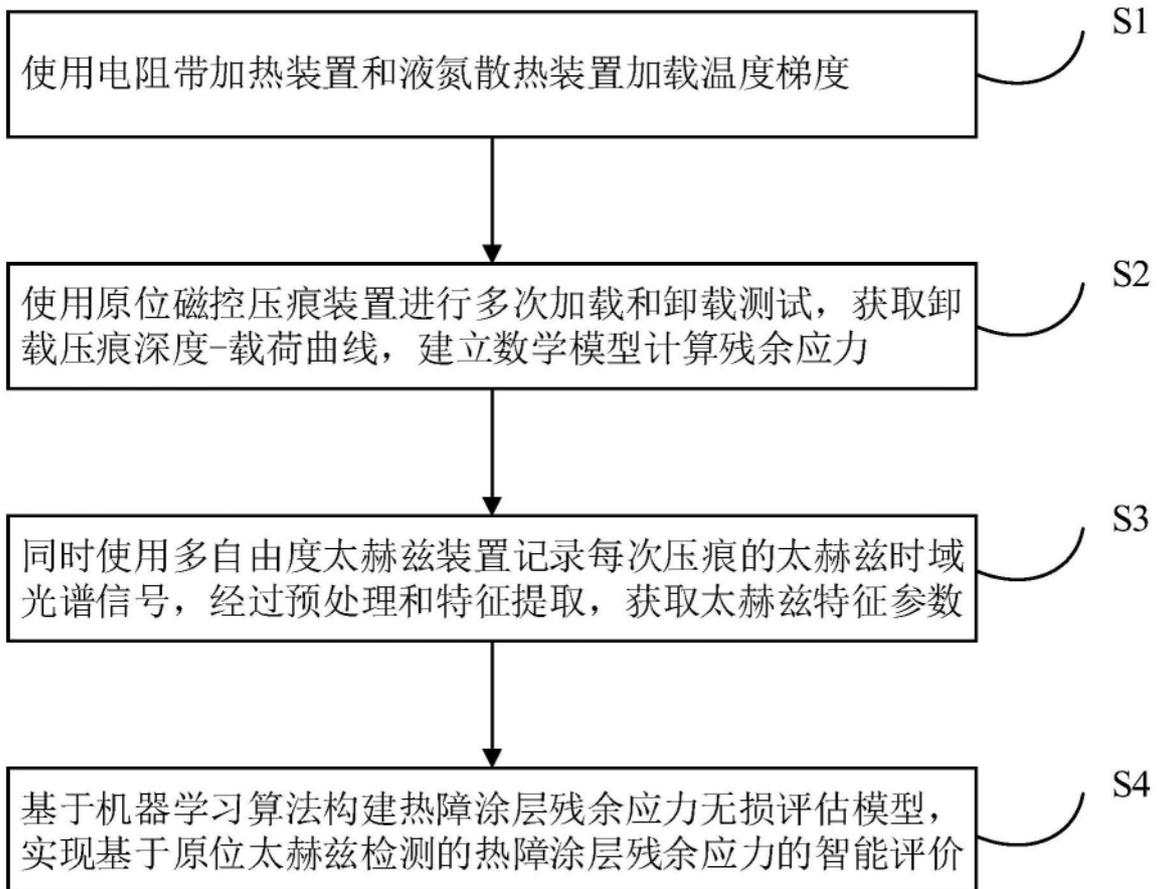


图6