



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113820052 B

(45) 授权公告日 2023.06.02

(21) 申请号 202110996058.6

(22) 申请日 2021.08.27

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113820052 A

(43) 申请公布日 2021.12.21

(73) 专利权人 天津大学  
地址 300354 天津市津南区海河教育园区  
内雅观路135号

(72) 发明人 王志勇 康凯 李传威 王世斌  
李林安

(74) 专利代理机构 北京东方灵盾知识产权代理  
有限公司 11506  
专利代理师 张丛

(51) Int. Cl.  
G01L 1/24 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 104568249 A, 2015.04.29

CN 107976299 A, 2018.05.01

JP 2013004578 A, 2013.01.07

JP 2020026992 A, 2020.02.20

US 2016139044 A1, 2016.05.19

US 2023016600 A1, 2023.01.19

WO 2018043438 A1, 2018.03.08

Zhiyong Wang, et al..Determination of  
plane stress state using terahertz time-  
domain spectroscopy.《Scientific RepoRts》  
.2016,1-6.

审查员 于陶然

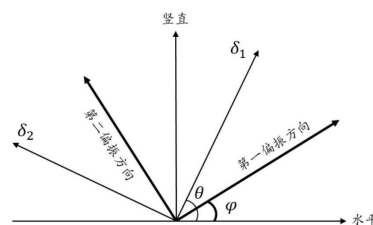
权利要求书2页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

用于介电材料中应力的表征方法

(57) 摘要

用于介电材料中应力的表征方法,包括:经由平行调制、第一前偏振调制、聚焦调制对源太赫兹波进行第一调制并使其穿过试样的一区域后经由平行调制、第一后偏振调制、聚焦调制后作为第一信号被接收;经由平行调制、第二前偏振调制、聚焦调制对源太赫兹波进行第二调制并使其沿经第一调制后的太赫兹波相同的方向穿过试样的上述区域后经由平行调制、第二后偏振调制、聚焦调制后作为第二信号被接收;计算第一信号与第二信号的幅值差异,从而获得在该区域的两个主光轴的方向和在所述两个主光轴方向上的折射率差,以表征该区域的主应力差的强度及其方向。



1. 一种用于介电材料中应力的表征方法,其特征在于,包括:

步骤a. 经由平行调制、第一前偏振调制、聚焦调制对源太赫兹波进行第一调制并使其穿过试样的一区域后经由平行调制、第一后偏振调制、聚焦调制后作为第一信号被接收;

步骤b. 经由平行调制、第二前偏振调制、聚焦调制对源太赫兹波进行第二调制并使其沿经第一调制后的太赫兹波相同的方向穿过试样的上述区域后经由平行调制、第二后偏振调制、聚焦调制后作为第二信号被接收;

步骤c. 计算第一信号与第二信号的幅值差异,从而获得在该区域的两个主光轴的方向和在所述两个主光轴方向上的折射率差,以表征该区域的主应力差的强度及其方向;

其中,所述第一前偏振调制与第一后偏振调制的调制方向彼此正交,并且所述第二前偏振调制与第二后偏振调制的调制方向也彼此正交;

所述第一前偏振调制与第二前偏振调制的偏振方向不同。

2. 如权利要求1所述的表征方法,其特征在于,步骤a和步骤b均在暗场环境中进行。

3. 如权利要求1所述的表征方法,其特征在于,所述源太赫兹波为经由时域太赫兹系统所发射的太赫兹波,其频率0.2-3THz。

4. 如权利要求1所述的表征方法,其特征在于,所述区域为直径为3mm-7mm的圆形区域。

5. 如权利要求1所述的表征方法,其特征在于,试样的所述区域的主应力差为 $\Delta\sigma = \Delta n/C$ ,其中, $\Delta\sigma$ 为第一主应力方向与第二主应力方向上的主应力差, $\Delta n$ 为两个主光轴方向上的折射率差,C为在所述太赫兹波的作用下该材料的应力光学系数,其中,两个主应力的方向与两个主光轴的方向一致。

6. 如权利要求1至5中任一项所述的表征方法,其特征在于,穿过试样后被接收的太赫兹波的电场信号的幅值为

$$A = \sin 2(\theta - \varphi) \cdot \sin \frac{\pi f d C \cdot \Delta \sigma}{c},$$

其中,f为源太赫兹波的频率,d为试件的厚度,c为光速, $\theta$ 为试件中第一主应力的方向, $\varphi$ 为前偏振调制的方向;所述的第一主应力的方向 $\theta$ 与主应力差 $\Delta\sigma$ 为待测量,所述的穿过试样后被接收的太赫兹波的电场信号的幅值为实验测量量。

7. 如权利要求6所述的表征方法,其特征在于,在第一偏振调制方向为0,第二偏振调制方向为 $\pi/4$ 的情况下,记所述的第一信号的幅值为 $A_1$ ,第二信号的幅值为 $A_2$ ,所述第一主应力的方向 $\theta$ 为

$$\theta = -\frac{1}{2} \arctan \frac{A_1}{A_2}, \text{ 并且所述主应力差为}$$

$$\Delta \sigma = \frac{c}{\pi f t C} \cdot \arcsin \frac{A_1}{\sin 2\theta} \text{ 或 } \Delta \sigma = -\frac{c}{\pi f t C} \cdot \arcsin \frac{A_2}{\cos 2\theta};$$

$$\text{或者,所述主应力差可通过 } \Delta \sigma = \frac{c}{2\pi f t C} \cdot \left( \arcsin \frac{A_1}{\sin 2\theta} - \arcsin \frac{A_2}{\cos 2\theta} \right) \text{ 求得。}$$

8. 如权利要求5至7中任一项所述的表征方法,其特征在于,在所述太赫兹波的作用下该材料的应力光学系数C可通过查表或标定实验确定;或者,材料的应力光学系数C通过下述标定实验测得:

步骤a. 经由平行调制、标定前偏振调制、聚焦调制对源太赫兹波进行调制并使其穿过试样的一区域后经由平行调制、标定后偏振调制、聚焦调制后作为标定信号被接收；

步骤b. 对一已知应力分布的区域的试件进行步骤a所述的标定测量, 其中, 所述的已知应力分布的区域为四点弯加载的纯弯曲区域或拉伸加载的均匀应力区域；

步骤c. 计算标定信号的幅值差异, 从而获得在该区域的两个主光轴的方向及在所述两个主光轴方向上的折射率差, 结合步骤b所述的已知应力分布, 计算材料的应力光学系数C；

其中, 所述标定前偏振调制与标定后偏振调制的调制方向彼此正交, 并且所述标定前偏振调制与水平方向呈 $45^\circ$ 。

9. 如权利要求8所述的表征方法, 其特征在于, 已知的主应力差 $\Delta\sigma$ , 第一主应力方向 $\theta$ 和被接收的太赫兹波的电场信号A求得, 所述的应力光学系数C为

$$C = \frac{c \cdot \arcsin \frac{A}{\sin 2(\theta - \varphi)}}{\pi f d \Delta \sigma}。$$

## 用于介电材料中应力的表征方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于材料测试表征技术领域,尤其涉及一种用于介电材料中应力的表征方法。

### 背景技术

[0002] 在测量不透光电介质中的应力方面,现有技术局限于单点测量在于其复杂的实验步骤而难以获得全场应力,因此难以实现快速全场测量。

[0003] 在材料加工和使用过程中,材料的内部应力是材料失效和破坏的因素之一,特别是在多层粘接结构中。使用“偏光仪”观察透明材料,可以直观地获得内部应力的大小和方向,这种方法无法用于不透明材料内部应力的获取。不透明材料的内部应力可以通过小孔法获得,但是这是有一种有损的方法。

[0004] 太赫兹波对于大多数的介电材料有良好的透过性,因此可以基于太赫兹波,建立一种测量不透明介电材料内部应力的无损检测方法。近年来,由于太赫兹系统的小型化和低成本化的趋势,越来越多的工业、民用产品流水线在配合太赫兹成像系统完成快速无损检测。太赫兹无损检测广泛应用于塑料材料、陶瓷材料和半导体材料等的检测。塑料材料在承受载荷出现应变的状态下由各向同性变成各向异性并展现出对光的双折射的现象,不透明的塑料材料的内部应力可以由太赫兹波测量。陶瓷基复合材料通常用于制造航空发动机叶片表面的热障涂层。太赫兹波可以透过热障涂层,并检测涂层内部各种成分厚度;其内部的应力也可以由太赫兹波测量。半导体中的应力应变可以提高芯片性能,例如应变硅技术物理拉伸或压缩硅晶体,进而增加载流子迁移率并增强晶体管的性能。半导体中的应力同样可以由太赫兹波测量。

[0005] 因此,亟待提出一种能够快速测量不透光的电解质试样中各点处的应力的方法,一方面对测量效率提出了很高的要求,计算量不能大,否则难以通过快速逐点扫描的方式获得全场应力分布;同时,对测量准确性也提出了很高的要求,并且不能对试样造成破坏。目前尚未见到能够满足上述快速、无损、准确等诸多要求的测试或表征方法。

### 发明内容

[0006] 为了部分地在一定程度上解决上述技术问题,本发明提出了一种用于介电材料中应力的表征方法,其特征在于,包括:步骤a.经由平行调制、第一前偏振调制、聚焦调制对源太赫兹波进行第一调制并使其穿过试样的一区域后经由平行调制、第一后偏振调制、聚焦调制后作为第一信号被接收;步骤b.经由平行调制、第二前偏振调制、聚焦调制对源太赫兹波进行第二调制并使其沿经第一调制后的太赫兹波相同的方向穿过试样的上述区域后经由平行调制、第二后偏振调制、聚焦调制后作为第二信号被接收;步骤c.计算第一信号与第二信号的幅值差异,从而获得在该区域的两个主光轴的方向和在所述两个主光轴方向上的折射率差,以表征该区域的主应力差的强度及其方向;其中,所述第一前偏振调制与第一后偏振调制的调制方向彼此正交,并且所述第二前偏振调制与第二后偏振调制的调制方向也

彼此正交。

[0007] 进一步而言,所述第一前偏振调制与第二前偏振调制的偏振方向不同。

[0008] 进一步而言,步骤a和步骤b均在暗场环境中进行。

[0009] 进一步而言,所述源太赫兹波为经由时域太赫兹系统所发射的太赫兹波,其频率0.2-3THz。

[0010] 进一步而言,所述区域为直径不超过3mm-7mm的圆形区域。

[0011] 进一步而言,试样的所述区域的主应力差为 $\Delta\sigma = \Delta n/C$ ,其中, $\Delta\sigma$ 为第一主应力方向与第二主应力方向上的主应力差, $\Delta n$ 为两个主光轴方向上的折射率差,C为在所述太赫兹波的作用下该材料的应力光学系数,其中,两个主应力的方向与两个主光轴的方向一致。

[0012] 进一步而言,穿过试样后被接收的太赫兹波的电场信号的幅值为

$$[0013] \quad A = \sin 2(\theta - \varphi) \cdot \sin \frac{\pi fdC \cdot \Delta\sigma}{c},$$

[0014] 其中,f为源太赫兹波的频率,d为试件的厚度,c为光速, $\theta$ 为试件中第一主应力的方向, $\varphi$ 为前偏振调制的方向;所述的第一主应力的方向 $\theta$ 与主应力差 $\Delta\sigma$ 为待测量,所述的穿过试样后被接收的太赫兹波的电场信号的幅值为实验测量量。

[0015] 进一步而言,在第一偏振调制方向为0,第二偏振调制方向为 $\pi/4$ 的情况下,记所述的第一信号的幅值为 $A_1$ ,第二信号的幅值为 $A_2$ ,所述(第一)主应力方向 $\theta$ 为

$$[0016] \quad \theta = -\frac{1}{2} \arctan \frac{A_1}{A_2}, \text{ 并且所述主应力差为}$$

$$[0017] \quad \Delta\sigma = \frac{c}{\pi ftC} \cdot \arcsin \frac{A_1}{\sin 2\theta} \text{ 或 } \Delta\sigma = -\frac{c}{\pi ftC} \cdot \arcsin \frac{A_2}{\cos 2\theta};$$

$$[0018] \quad \text{或者,所述主应力差可通过 } \Delta\sigma = \frac{c}{2\pi ftC} \cdot \left( \arcsin \frac{A_1}{\sin 2\theta} - \arcsin \frac{A_2}{\cos 2\theta} \right) \text{ 求得。}$$

[0019] 进一步的,在所述太赫兹波的作用下该材料的应力光学系数C可通过查表或标定实验确定;或者,材料的应力光学系数C通过下述标定实验测得:步骤a.经由平行调制、标定前偏振调制、聚焦调制对源太赫兹波进行调制并使其穿过试样的一区域后经由平行调制、标定后偏振调制、聚焦调制后作为标定信号被接收;步骤b.对一已知应力分布的区域的试件进行步骤a所述的标定测量,其中,所述的已知应力分布的区域为四点弯加载的纯弯曲区域或拉伸加载的均匀应力区域;步骤c.计算标定信号的幅值差异,从而获得在该区域的两个主光轴的方向及在所述两个主光轴方向上的折射率差,结合步骤b所述的已知应力分布,计算材料的应力光学系数C;其中,所述标定前偏振调制与标定后偏振调制的调制方向彼此正交,并且所述标定前偏振调制与水平方向呈 $45^\circ$ 。

[0020] 进一步而言,已知的主应力差 $\Delta\sigma$ ,第一主应力方向 $\theta$ 和被接收的太赫兹波的电场信号A求得,所述的应力光学系数C为

$$[0021] \quad C = \frac{c \cdot \arcsin \frac{A}{\sin 2(\theta - \varphi)}}{\pi fd \Delta\sigma}。$$

[0022] 本发明的有益效果包括但不限于：此方法、装置及系统适用于各种介电材料中的内部应力场的测量。此方法针对介电材料的内部应力表征问题，给出了一种无损的非接触的得到材料内部应力场的新型检测手段。此方法可以便利得获得材料内部的应力场信息，包括主应力差的分布和第一主应力的分布。主应力差是材料失效行为的重要判据之一。基于主应力差的分布，可以预测材料内部发生应力集中现象的具体位置。更重要的是，此方法是一种定性且可以定量表征方法，主应力差的大小可以检验具体结构的设计是否合理，具体零件是否合格和具体服役调剂下是否安全。而主应力方向对结构的设计，尤其是纤维增强材料的设计优化有重要意义。此方法还可以具体地检测材料的纤维增强方向排布是否合理。

## 附图说明

[0023] 后文将参照附图以示例性而非限制性的方式详细描述本发明的一些具体实施例。附图中相同的附图标记标示了相同或类似的部件或部分。本领域技术人员应该理解，这些附图未必是按比例绘制的。

[0024] 图1示出了根据本发明实施例的偏振时域太赫兹系统的基本结构和组成；

[0025] 图2示出了偏振方向与主应力方向，包括第一偏振方向和第二偏振方向；

[0026] 图3示出了根据本发明实施例中所使用的四点弯加载测试装置的主要作用单元；

[0027] 图4示出了根据本发明实施例中受到四点弯加载的试样的俯视图和侧视图，从图中ROI为测量区域；

[0028] 图5示出了根据本发明实施例中受到四点弯加载的试样的ROI区域中6个测量点的太赫兹信号及其对应的点的主应力差，以体现不同应力作用下的太赫兹信号的变化；

[0029] 图6示出了根据本发明实施例中受到四点弯加载的试样的ROI区域的太赫兹波的信号的幅值分布，即太赫兹波信号的峰值与谷值的差；

[0030] 图7示出了根据测得的折射率差值和计算得到的主应力差值，以及根据不同点的折射率差值和主应力差值所拟合得到的用于表示应力光学系数的拟合线；

[0031] 图8示出了根据本发明另一实施例的用于测定或标定试样的光学应力系数的实验装置-对径受压圆盘测试实验装置；

[0032] 图9示出了根据本发明另一实施例的用于测定或标定试样的光学应力系数的实验装置作业时的圆盘状的试样的受加载情况及ROI测试区域；

[0033] 图10中的(a)和(b)分别示出了根据本发明实施例的对径受压圆盘在受到加载时测试区域中主应力方向的解析解的全场分布(即各点处的主应力方向的解析解)及其对应的主应力差的解析解；

[0034] 图11中的(a)和(b)分别示出了根据本发明实施例的对径受压圆盘在受到加载时测试区域中不同点处穿过的太赫兹波信号的幅值(分布)，其中图11a中 $\varphi = 0$ ，图11b中 $\varphi = \pi/4$ ；

[0035] 图12中的(a)和(b)分别示出了通过本发明实施例的太赫兹测试方法结合测得的光学应力系数所计算得到的对径受压圆盘在受到加载时测试区域中主应力方向的测试结果的全场分布(即各点处的主应力方向的实验解)及其对应的主应力差的实验解；

[0036] 图13中的(a)和(b)分别示出了通过本发明实施例的太赫兹测试方法结合测得的

光学应力系数所计算得到的实验解与理论解的对比。

### 具体实施方式

[0037] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明。可以理解的是,此处所描述的具体实施例仅仅用于解释相关发明,而非对该发明的限定。另外还需要说明的是,为了便于描述,附图中仅示出了与发明相关的部分。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发明。

[0038] 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。此外,还需要说明的是,本申请中使用的例如前、后、上、下、左、右、顶、底、正、背、水平、垂直等表示方位的术语仅仅是为了便于说明,用以帮助对相对位置或方向的理解,并非旨在限制任何装置或结构的取向。

[0039] 首先需要说明的是,根据本发明实施例,仅对两主应力方向(两条主光轴方向)之间的折射率差的计算就可以表征待测试样的不同位置处的主应力方向及其差值的大小程度(定性而非精确定量),此处“表征”的含义在于大体估算应力/应力差分布情况,这样的效率很高。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0040] 进一步,如图1所示,用于测试介电材料试样105的偏振时域太赫兹系统/装置(polarization sensitive THz-TDS system/device)100包括发射天线109、第一透镜108、第一偏振镜107、第二透镜106、第三透镜104、第二偏振镜103、第四透镜102和接收天线101,以及用于对试样105进行四点弯曲加载的加载装置110,该加载装置110中含有如图3所示的加载架20、加载座夹具201、固定座夹具202、加载座203、固定座204和力传感器205等以实现矩形试样105的四点弯曲加载并测量加载力大小,鉴于四点弯曲实验及相关装置为实验力学中的惯用技术手段和常见装置,本公开中不再对其结构和操作方式予以赘述。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0041] 应当注意的是,根据本发明实施例的实验一般是在暗场环境下进行的,所述暗场环境是指环境中没有除发射天线109以外的太赫兹发射源,并且太赫兹波从发射天线109、第一透镜108、第一偏振镜107、第二透镜106、第三透镜104、第二偏振镜103、第四透镜102最终被接收天线101接收的太赫兹信号幅值较低,接近于噪声的震荡幅值。应当注意的是,此处所述的太赫兹波未经过受力试件105的调制。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0042] 进一步,发射天线109所发出的源太赫兹波呈发散状,形成为凸透镜的第一透镜108对其进行第一平行调制使其调制为平行光束后入射第一偏振镜107后经由形成为凸透镜的第二透镜106进行调制形成为聚焦的光束入射穿过处于四点弯曲加载状态的试样105的一任意区域,在光束(即太赫兹波)穿过试样105后,经由形成为凸透镜的第三透镜104进行调制后形成为平行光束后通过第二偏振镜103进行第二次偏振调制后穿过形成为凸透镜的第四透镜102受到聚焦调制后被接收天线101作为第一信号被接收。应当注意的是,在上述测量装置和测量过程中,第一偏振镜107和第二偏振镜103的偏振方向彼此正交。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0043] 随后,调节改变第一偏振镜107的偏振方向使其与原偏振方向不同,并调节第二偏

振镜103的偏振方向,使其与调节后的第一偏振镜107的偏振方向仍保持彼此正交,然后重复上述测试过程,使得入射光仍穿过上述第一次测试的相同的区域,第二次测试后接收天线101接收到的信号记为第二信号。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0044] 在上述系统中,太赫兹波(光束)由两个可旋转的光敏天线发射和接收,两个天线的偏振方向被设置成正交。设置第一偏振镜107和第二偏振镜103的部分目的在于获得较高的消光比(extinction rate),他们的偏振方向被设置成与发射天线109和接收天线101一致,即第一偏振镜107的偏振方向与发射天线109的偏振方向一致、第二偏振镜103的偏振方向与接收天线101的偏振方向一致。第二透镜106的作用在于使得太赫兹波以光斑的形式聚焦于并且穿过试样105。光斑的直径约为5mm。上述系统的高可靠频率范围为0.2~2.5THz。实际上,太赫兹波经聚焦调制后在试件表面所形成的光斑区域;受太赫兹波波长和技术限制,远场太赫兹波经透镜聚焦形成的光斑约为3mm-7mm,优选为4mm-6mm,进一步优选为5mm,因此通过二维位移平台逐点扫描成像可以得到更大区域的场信息,可见,本发明采用时域太赫兹系统的另一个技术优势(有益效果)在于其测量的视场范围大。

[0045] 此外,上述加载装置110为如图3所示的可进行四点弯加载和单轴压加载的装置,并且配备有传感器205以测量加载力的值,其最大测量值为2000N,测试精度为0.6N,其中用于加载的驱动装置为两台未示出的步进电机,其最大扫描范围(maximum scanning range)为50mm×50mm,重复定位精度为2μm。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0046] 太赫兹波的传播可以用琼斯矩阵(Jones Matrix)表示,发射天线所发出的偏振太赫兹波的电场信号可以表示为

$$[0047] \quad E_0 = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \cdot e^{i(2\pi ft + \delta_0)} \quad (1)$$

[0048] 其中, $f$ 和 $t$ 分别为频率和时间, $\varphi$ 为偏振方向与水平方向之间的夹角, $\delta_0$ 为太赫兹波的初始相位。

[0049] 太赫兹波依次穿过第一偏振镜107、受到加载的试样105和第二偏振镜103后,接收天线101所最终受到的太赫兹波的电场信号可以表示为:

$$[0050] \quad E_1 = R \cdot Q_\varphi \cdot J_\theta \cdot Q_\varphi \cdot E_0 \quad (2)$$

[0051] 其中,

$$[0052] \quad Q_\varphi = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin \varphi \cdot \cos \varphi \\ \sin \varphi \cdot \cos \varphi & \sin^2 \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[0053] \quad J_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[0054] \quad Q_\varphi = \begin{bmatrix} \cos^2\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) & \sin^2\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[0055] \quad R = \begin{bmatrix} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$



[0056] 矩阵 $Q_{\varphi}$ 和矩阵 $Q_{\varphi'}$ 为第一偏振镜107和第二偏振镜103的琼斯矩阵,体现第一偏振镜107和第二偏振镜103对太赫兹波信号的影响(本公开中太赫兹、太赫兹波、太赫兹光波等近义词如未特别释义具有相同含义), $J_0$ 为受到加载作用的试样的琼斯矩阵,体现加载作用及所产生的应力对太赫兹波的影响, $\theta$ 为第一主应力方向,向量 $R$ 代表太赫兹接收天线,其仅能够接收所述电场信号中沿 $\varphi + \pi/2$ 方向偏振的信号部分。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0057] 图2示出了偏振方向与主应力方向,综合公式1和公式2, $E_1$ 可以被简化为:

$$[0058] \quad E_1 = \sin 2(\theta - \varphi) \cdot \sin \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \cdot e^{i\left(2\pi ft + \delta_0 + \frac{\pi}{2} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}\right)} \quad (7)$$

[0059] 当太赫兹波穿过受到加载的试样105,其在应力双折射的作用下分(disassembled)为两束偏振太赫兹波。不同的传播速度引起两束偏振太赫兹波之间的相位差。在两束偏振太赫兹波都穿过试样之后,他们将在透过第二偏振镜103之后合成为太赫兹信号 $E_1$ , $E_1$ 的幅值可以表示为:

$$[0060] \quad A = \sin 2(\theta - \varphi) \cdot \sin \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \quad (8)$$

[0061] 其中, $\delta_1 - \delta_2$ 为两条主光轴之间的应力引起的相位差,当试样的厚度 $d$ 为常数时, $\delta_1 - \delta_2$ 可以通过公式表示为

$$[0062] \quad \delta_1 - \delta_2 = \frac{2\pi fd}{c} \Delta n \quad (9)$$

[0063] 其中, $f$ 为太赫兹波的频率, $c$ 为光速。 $\Delta n$ 为应力双折射所引起的两条主光轴之间的折射率差,其可以表示为

$$[0064] \quad \Delta n = C \cdot \Delta \sigma \quad (10)$$

[0065] 其中, $C$ 为应力光学系数,主应力差 $\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ ,综合以上公式可见,幅值 $A$ 包含了第一主应力方向 $\theta$ 和主应力差 $\Delta \sigma$ 的信息。因此,两次幅值 $A$ 的测量结果对于解出有两个未知数 $\theta$ 和 $\Delta \sigma$ 的方程式必要的且足够的。如果能从实验中分别测得 $\varphi = 0$ 和 $\pi/4$ 时的穿过试样105的太赫兹波的幅值 $A$ ,则第一主应力方向 $\theta$ 和主应力差 $\Delta \sigma$ 可以通过下式(11)和(12)计算:

$$[0066] \quad \theta = -\frac{1}{2} \arctan \frac{A|_{\varphi=0}}{A|_{\varphi=\pi/4}} \quad (11)$$

$$[0067] \quad \Delta \sigma = \frac{c}{\pi ft C} \cdot \arcsin \frac{A|_{\varphi=0}}{\sin 2\theta} \quad (12)$$

[0068] 同理,通过计算 $\varphi = \pi/4$ 时的幅值 $A$ 也可以计算出主应力差 $\Delta \sigma$

$$[0069] \quad \Delta \sigma = -\frac{c}{\pi ft C} \cdot \arcsin \frac{A|_{\varphi=\pi/4}}{\cos 2\theta} \quad (13)$$

[0070] 为了获得更精确的结果,可以测量 $\varphi$ 为不同值时的多组主应力 $\Delta \sigma$ ,并对主应力差取平均以获得更精确的最终结果。

[0071] 接下来,为了进一步获得通过主光轴之间的折射率差精确地获得主应力差,既可

以通过查表获得业已录得的应力光学系数也可以通过标定实验来测量不同试样的应力光学系数C。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0072] 测定材料试样的应力光学系数C的实施例之一

[0073] 本实施例所使用的试样由PTFE(聚四氟乙烯, Poly tetra fluoroethylene, 简称为PTFE)制成,采用了四点弯曲实验以确定其应力光学系数C,图4中的虚线部分示出了测量区域(即ROI区域),该区域的尺寸为28mm×2mm,其扫描步长为0.5mm。在这个区域中主应力的方向是不变的,只是大小有变化。

[0074] 基于弹性力学理论,该ROI区域中沿x轴方向的主应力差可以通过下式(14)计算

$$[0075] \quad \Delta\sigma(x) = \frac{6pl}{dh^3}x \quad (14)$$

[0076] 其中,l、d和h为图4中所示的弯曲的试样105的几何尺寸,p为静态压力,表1中列出了该试样的相关参数的值。由上式(14)可见,主应力差 $\Delta\sigma$ 与x坐标值成正比,在测量区域中,第一主应力方向 $\theta$ 始终为 $\pi/2$ ,根据应力光学效应,应力会调制穿过试样的太赫兹时域信号。图5示出了弯曲试样的实验数据,其中,太赫兹时域信号被沿着x轴方向分别测量了6个点,每个点之间间隔2.5mm。这些点处的穿过的太赫兹波的波形在图5中示出,可见信号的幅值明显受到了应力的调制。接下来,测量区域中的所有点的太赫兹时域信号都被测量,并且通过峰值到谷值的差(peak-trough difference)来计算其幅值,即波形的最大值和最小值之间的差。图6中给出了测量区域中幅值的分布,可见,该幅值由于主应力差 $\Delta\sigma$ 的不断增加而从左到右增加。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0077] 表1.四点弯实验参数

	材料	d	l	h	p	测量区域	步长
[0078]	PTFE	9 mm	20 mm	32 mm	784 N	28 mm × 2 mm	0.5 mm

[0079] 在根据本发明实施例的弯曲实验中,第一偏振镜107的偏振方向角 $\phi$ 设置为 $\pi/4$ ,鉴于 $A|_{\phi=\pi/4}$ 可以在弯曲实验中测得(即 $\phi = \pi/4$ 时太赫兹波穿过试样后的信号的幅值),由应力双折射所产生的折射率差 $\Delta n$ 能够得以确定,在上述公式(10)中,应力光学系数C为折射率差 $\Delta n$ 与主应力差 $\Delta\sigma$ 之间的比值,图7示出了根据本发明实施例的实验测得的 $\Delta n$ 和 $\Delta\sigma$ 的结果,相关性系数C根据实验测定的结果通过线性拟合得到,所使用的PTFE材料的最终测得的应力光学相关性系数C为 $-2.4 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$ 。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0080] 在上述应力光学系数C被测得后,可以用于通过公式(10)-(12)由幅值场来计算应力场,从而快速准确地定量计算获得待测试样的全场的应力分布。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0081] 测定材料试样的应力光学系数C的实施例之二

[0082] 根据本发明的本实施例所使用的试样30由PTFE制成,采用了对径受压圆盘实验以确定其应力光学系数C。

[0083] 图8中示出了该试验所使用的实验装置的核心单元,包括加载架40以及设置于加载架的固定座404、固定座夹具402、力传感器405、试样30、加载座403等,其中,试样30被加载座夹具401和固定座夹具402加载,力传感器405用于测量加载压力载荷p的大小。图9中的

红线部分示出了测量区域,该区域为直径45mm的圆形,其扫描步长为0.5mm。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0084] 表2.对径受压圆盘实验参数

	材料	$d$	$r$	$p$	测量区域直径	步长
[0085]	PTFE	11 mm	25 mm	1000N	45 mm	0.5 mm

[0086] 基于弹性力学理论,对径受压圆盘上应力场的解析解可以表示为

$$\begin{cases}
 \sigma_x = \frac{2p}{\pi d} \left\{ \frac{(r+y)x^2}{[(r+y)^2+x^2]^2} + \frac{(r-y)x^2}{[(r-y)^2+x^2]^2} - \frac{1}{2r} \right\} \\
 \sigma_y = \frac{2p}{\pi d} \left\{ \frac{(r+y)^3}{[(r+y)^2+x^2]^2} + \frac{(r-y)^3}{[(r-y)^2+x^2]^2} - \frac{1}{2r} \right\}, \\
 \tau_{xy} = \frac{2p}{\pi d} \left\{ \frac{(r+y)^2 x}{[(r+y)^2+x^2]^2} - \frac{(r-y)^2 x}{[(r-y)^2+x^2]^2} \right\}
 \end{cases} \quad (16)$$

[0088] 其中, $p$ 是施加的载荷, $r$ 和 $d$ 是试件的半径和厚度。第一主应力方向 $\theta$ 和主应力差 $\Delta\sigma$ 可以计算为:

$$\begin{cases}
 \Delta\sigma = 2\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\
 \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right)
 \end{cases} \quad (17)$$

[0090] 图10a和b展示了对径受压圆盘试样30的第一主应力方向 $\theta$ 和主应力差 $\Delta\sigma$ 的解析解。

[0091] 重复上述实施例中在时域太赫兹系统中进行的太赫兹穿透试样30的实验,在将偏振镜的偏振角度设置为不同角度时,测量了太赫兹波的振幅 $A$ 的分布;分别在 $\varphi = 0$ 和 $\varphi = 45^\circ$ 的条件下,扫描对径受压圆盘试样30上的各个点的太赫兹信号,在扫描过程中加载是静态的。图11a和b给出了不同设置下测量到的穿过圆盘试样30的太赫兹波的振幅分布。若假设已知 $C$ 的值,则根据公式(11) - (13)就可以计算第一主应力方向 $\theta$ 和主应力差 $\Delta\sigma$ 。为了确定 $C$ 的值,定义误差函数 $H(C)$ 的表达式为

$$H(C) = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_{i0})^2}{n} \quad (18)$$

[0093] 其中, $\Delta\sigma_i$ 为通过公式(11) - (13)计算的实验结果, $\Delta\sigma_{i0}$ 为公式(17)给出的主应力差解析解, $n$ 为实验区域内的测量点数量。当误差函数取得最小值时,此时的 $C$ 为材料的应力光学系数。再通过公式(11) - (13)由幅值场来计算应力场,从而获得全场的应力分布图,如

图12所示。然而,应该理解的是,本申请在此方面不受限制。

[0094] 对比图12所示的实验实际测量结果和图10所示的理论解析解,可以发现主应力差和主应力方向的分布的测量值都接近于理论值,仅在主应力方向的突变处存在较大误差。此误差是由于此方法的太赫兹波聚焦光斑大小较大,对于应力场突变处的表征受限于空间分辨力限制。可见,实验测量值与理论值基本一致,可以验证此方法的有效性。

[0095] 进一步的,如图13a和b所示,根据本发明实施例之二的对径原盘实验的太赫兹波穿透幅值表征方法所获得的测试结果与理论解析解的平均误差较小,而解析解是在理想情况下得到的,实际测试情况收到温度场、磁场/电场、湿度场等众多外界影响因素,可以认为实验结果更接近真实情况,可见本申请的方法、系统和或装置具有实用性和工业应用价值。

[0096] 以上描述仅为本申请的较佳实施例以及对所运用技术原理的说明。本领域技术人员应当理解,本申请中所涉及的发明范围,并不限于上述技术特征的特定组合而成的技术方案,同时也应涵盖在不脱离所述发明构思的情况下,由上述技术特征或其等同特征进行任意组合而形成的其它技术方案。例如上述特征与本申请中公开的(但不限于)具有类似功能的技术特征进行互相替换而形成的技术方案。

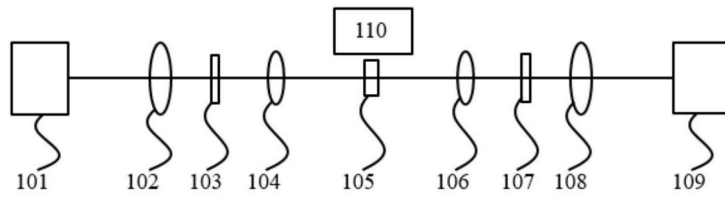


图1

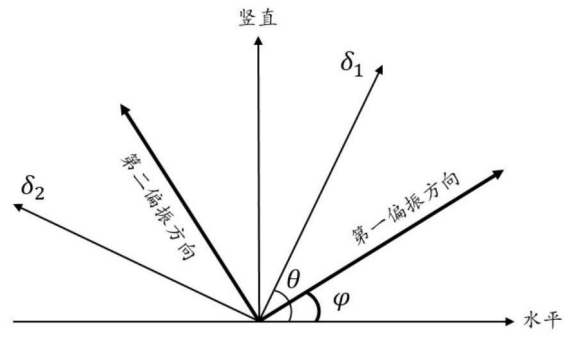


图2

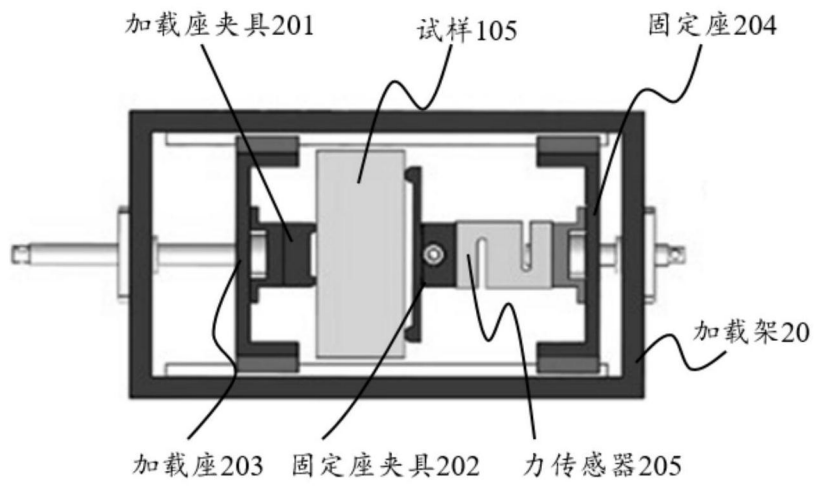


图3

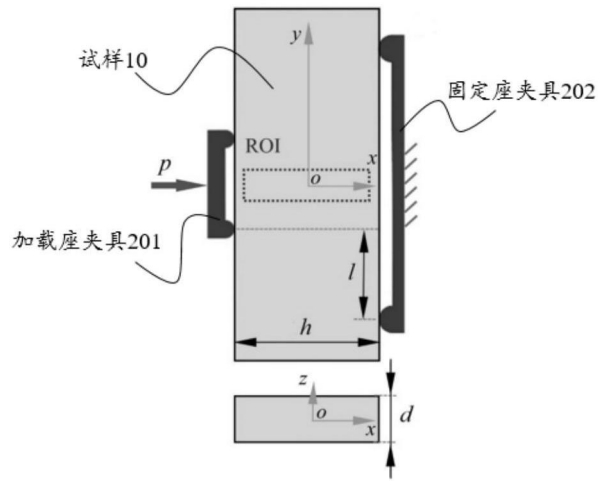


图4

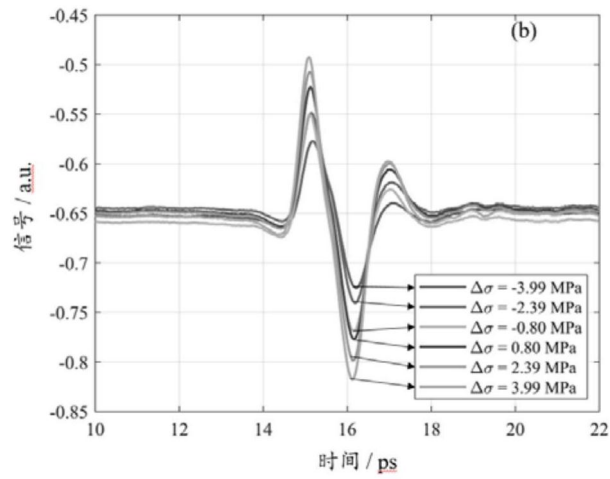


图5

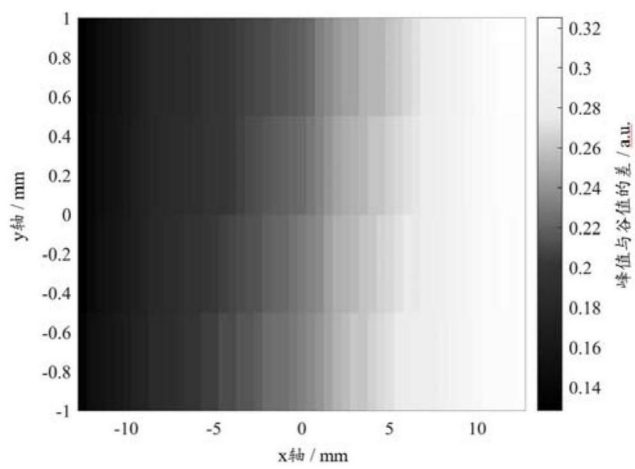


图6

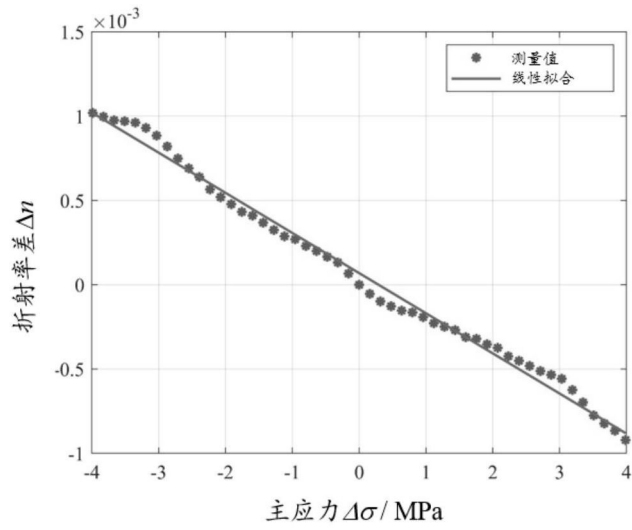


图7

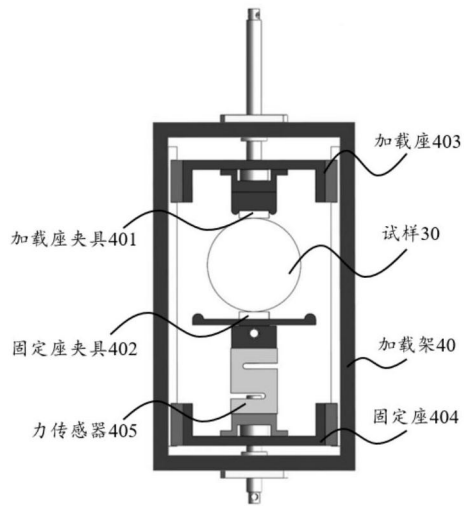


图8

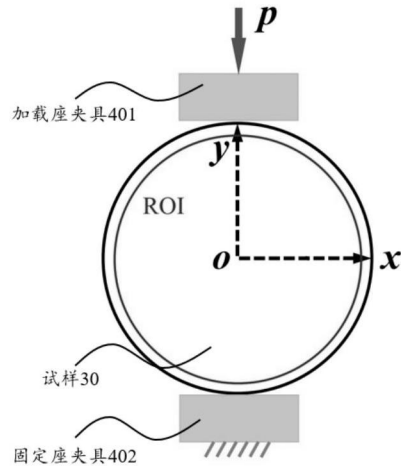


图9

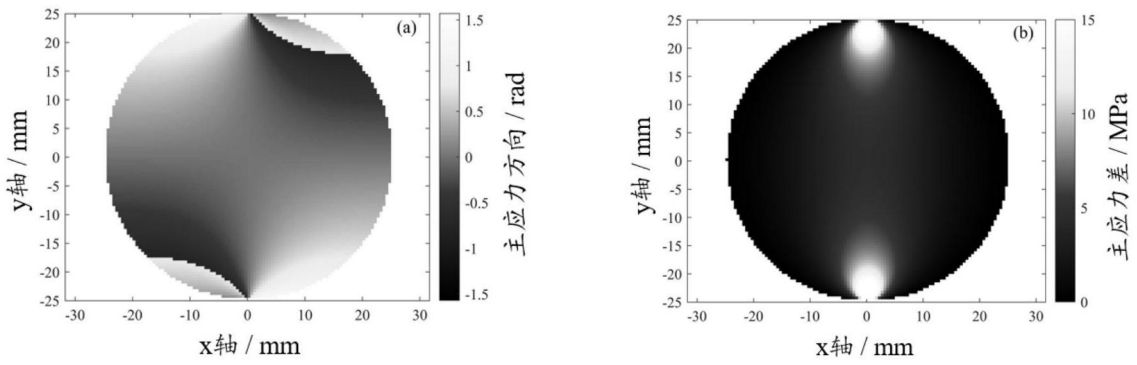


图10

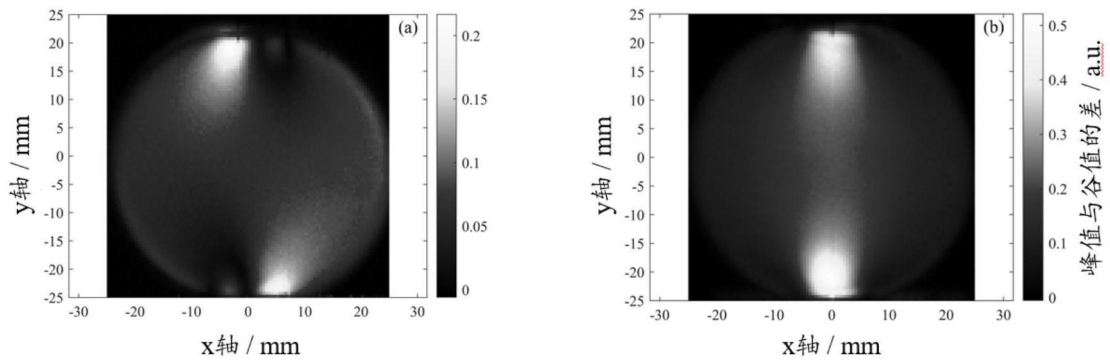


图11



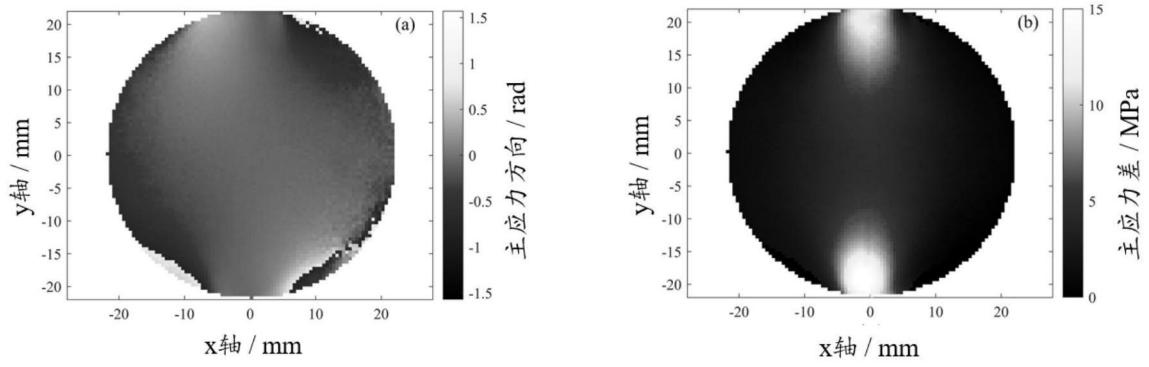


图12

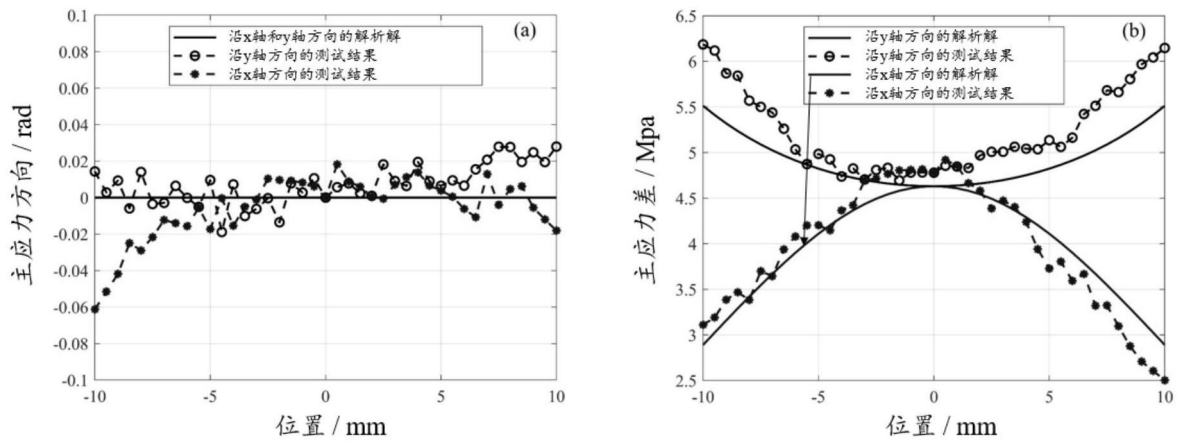


图13