

文章编号: 1001-4888(2024)01-0001-06

基于高光谱成像技术的软材料 应变-反射率相关性研究^{*}

栾和鹏, 霍宗泽, 韦慧心, 王志勇, 李传崑, 李林安, 王世斌

(天津大学 机械工程学院力学系, 天津 300350)

摘要: 基于高光谱成像技术, 本文深入研究了应变对典型软材料——硅胶光谱反射率的调制作用。首先, 基于托伦斯-斯派洛反射模型, 建立了应变通过改变材料表面形貌进而对其光谱反射率进行调制的理论模型; 其次, 通过共聚焦显微镜获取不同应变状态下样品材料表面微观形貌, 计算得到样品表面粗糙度, 并预测了表面光谱应变-反射率比例系数; 最后, 利用高光谱相机实际测量了不同应变状态下材料表面的光谱反射率, 结果表明, 在 475nm~535nm 光谱波段内, 压缩后硅胶的反射率随应变增大而线性减小, 与理论模型预测结果吻合良好。基于本文的研究成果, 有望发展一种利用反射率直接测量材料应变的实验技术。

关键词: 硅胶; 反射率; 高光谱成像

中图分类号: O341

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-23-038

0 引言

高光谱成像技术起源于 20 世纪 80 年代初, 区别于传统成像技术只有红、绿、蓝 3 个成像波段, 高光谱成像技术在光谱维度上进行了细致地分割。在紫外光到可见光再到红外光的光谱范围内, 高光谱图像中每一个像元都有几十到几百个连续狭窄波段的光强信息, 因此高光谱成像技术具有信息量大的优点。

由于不同物体具有不同的反射光谱, 而物体的光谱特性与其微观结构、物理和化学性质紧密关联, 因此可以基于物体对光谱的吸收及反射规律探究物体的结构及组成。近年来有部分学者利用高光谱成像技术研究了软材料的力学和机械性能, 取得了很多有意义的研究成果。RIVERA 等^[1]运用高光谱图像分析了不同成熟阶段“马尼拉”芒果果皮的机械损伤, 根据 650nm~1100nm 波长的光谱图像可以很好地区分芒果损伤区和完好区。GOSSELIN 等^[2]将高光谱成像技术用于聚合物薄膜质量控制, 他们使用成像光谱仪(400nm~1000nm)对每个样品进行成像并进行力学测试, 利用多分辨率多变量图像分析(MR-MIA)提取出与薄膜成分和力学性能相关性最高的光谱特征。GOWEN 等^[3]利用近红外高光谱成像技术对受振动影响的双孢蘑菇的水基质进行识别, 通过观察差分光谱和偏最小二乘回归(PLSR)系数, 观察到了水基质扰动引起的样品光谱变化。

近年来, 软材料由于其优异的性能在机械工程、生物医学等方面获得了越来越广泛的应用, 一些学者针对软材料的力学性能开展了大量研究^[4-9]。在软材料力学行为的研究过程中, 准确测量其变形场和应变场至关重要。目前, 由于数字图像相关技术(DIC)测量精度高、操作简便, 已广泛应用于软材料

^{*} 收稿日期: 2023-02-22; 修回日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972248)

通信作者: 王世斌(1966—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 固体实验力学。Email: shbwang@tju.edu.cn

变形测量^[4-6]。TANG 等^[4]利用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)模拟隧道在双轴静应力和高应变率动态扰动耦合作用下的破坏特性,实验中采用二维 DIC 对破坏过程进行监测,通过分析变形前后的参考图像,计算出了变形前后的全场位移场。ABSHIRINI 等^[5]采用 DIC 计算了在拉伸载荷作用下具有缺口和裂纹的 PMMA 板的应力强度因子,实验研究了缺口和裂纹几何形状对应力强度因子的影响,并通过参考图像和变形图像的相关性确定了位移场。KNAUSS 等^[6]将 DIC 与扫描隧道显微镜结合应用于微观尺度下 MEMS 薄膜的力学参数、断裂强度的测量,通过实验研究了 DIC 的结果如何受到几个过程参数的影响,如子集大小、面外变形、位移梯度和测量中引入的扫描噪声。然而,利用 DIC 测量变形时,需要在被测物体表面喷涂散斑,对于软材料、生物材料来说,喷涂散斑很可能会改变材料表面的力学性能,因此,发展一种无标记的软材料变形测量方法,在软材料的力学行为研究中有一定的应用前景。本文初步探索了变形对软材料光谱反射率的调制作用,并深入分析了其机理。基于该机理有望发展一种针对软材料的变形测量方法,它既不需要与被测物体进行接触,也不需要与被测物体表面制作标志,就可以实现基于软材料自然表面信息的变形测量。

之前虽然有部分学者对生物软组织的光谱图像进行了探索,但是利用光谱信息进行力学-光谱学耦合关系的研究相对较少。本文利用高光谱成像技术采集处于不同应变状态下软材料(硅胶)的光谱图像,研究了软材料的应变对光谱曲线的调制作用,所得结果可为发展基于光谱数据的应变测量技术提供参考。

1 理论模型

生物软材料在其工作过程中常常会发生较大的变形,进而使其表面微观形貌产生较为显著的改变,而这个显著的微观形貌改变会使其反射光谱数据产生一个较明显、可观察的变化。因此,变化后的反射光谱包含了材料的表面变形信息。在本节,我们将建立一个应变调制软材料表面反射率的光谱模型,为后面的实验研究提供理论基础。

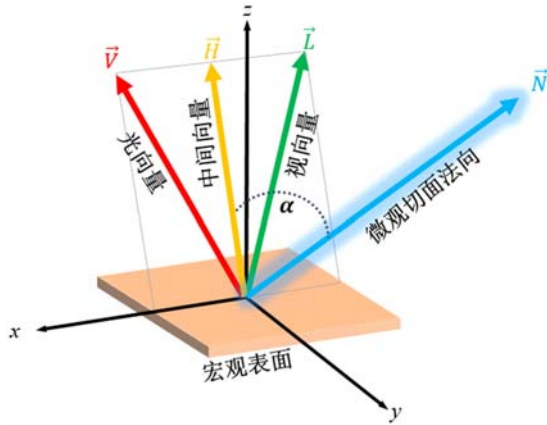


图 1 镜面反射示意图

Fig. 1 Specular reflection diagram

图 1 给出了本文所使用的光学模型,各向量的空间关系如图所示,其中, x - y 平面表示被测物体的宏观表面, z 为它的法向方向, $\vec{L}$ 为一点处入射光方向的单位向量, $\vec{V}$ 为相机光轴的单位向量; $\vec{H} = (\vec{V} + \vec{L})/2$ 为入射光和相机光轴的中间向量, $\vec{N}$ 为该点处微观切面的法向方向, α 为向量 $\vec{N}$ 和 $\vec{H}$ 的夹角。在本文的实验测量过程中,入射光和相机光轴都垂直于样品的宏观表面,所以 $\vec{L}$ 、 $\vec{V}$ 和 $\vec{H}$ 均为 $(0, 0, 1)$ 。

设待测表面变形前微观形貌为 $h_0(x, y)$, q_{x_0} 和 q_{y_0} 为形貌函数在 x 、 y 方向的导数,即

$$q_{x_0} = \frac{\partial h_0(x, y)}{\partial x}, \quad q_{y_0} = \frac{\partial h_0(x, y)}{\partial y} \quad (1)$$

因此,微观切面的法向方向可表示为

$$\vec{N}(i, j) = (-q_{x_0}, -q_{y_0}, 1) \quad (2)$$

根据反射光学中的托伦斯-斯派洛模型^[10],对于曲面上一点,其反射率可以表示为

$$R_s = \frac{F}{\pi} \cdot \frac{D}{\vec{N}(i, j) \cdot \vec{L}(i, j)} \cdot \frac{G}{\vec{N}(i, j) \cdot \vec{V}(i, j)} \quad (3)$$

式中: F 为菲涅尔反射系数; D 为微切面的比例; G 为几何衰减因子。具体地,根据托伦斯-斯派洛模型^[10],几何衰减因子系数的计算公式为

$$G = \min \left\{ 1, \frac{2(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{V})}{\vec{H} \cdot \vec{V}}, \frac{2(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{L})}{\vec{H} \cdot \vec{V}} \right\} \quad (4)$$

菲涅尔反射系数的计算公式为

$$F = \frac{1}{2} \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left\{ 1 + \frac{c(g+c)-1)^2}{(c(g-c)+1)^2} \right\} \quad (5)$$

式中: $c = \vec{V} \cdot \vec{H}$, $g^2 = n^2 + c^2 - 1$ 。微切面比例系数 D 的计算公式为

$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \alpha} \exp \left[\frac{-\tan^2 \alpha}{m^2} \right] \quad (6)$$

式中, n 为样品折射率, 本文取硅胶的折射率 $n = 1.4$ 。

在托伦斯计算机图形学的反射模型中^[10], m 值用来描述光线被反射时的散射程度。然而, 由于 m 取值与物质材质的成分和形态都有关系, 实际中多通过实验测量来确定 m 值。本文经过计算发现 m 取值为 0.4 时表面反射率的拟合效果较好, 因此式(6)中取 $m = 0.4$ 。

样品材料受到载荷后发生变形, 其微观形貌函数变为 $h_1(x, y)$ 。在小变形假设下, 变形前后微观形貌函数的关系可表达为

$$h_1(x, y) = h_0[(1 + \epsilon_x)x, (1 + \epsilon_y)y] \quad (7)$$

微观形貌改变后, 其在 x, y 方向的梯度 q_x 和 q_y 也相应发生改变, 根据式(2)可知这会使微观表面法向量 $\vec{N}(i, j)$ 发生改变, 并最终对变形后的硅胶样品表面反射率 R_s 产生影响。

2 实验

本节将通过实验方法验证第 1 节提出的理论模型, 证明材料表面反射率与其应变的相关性。本文选用硅胶作为实验材料, 通过自主研发的微型原位加载装置对样品材料进行加载。首先, 利用激光共聚焦显微镜测量样品材料在不同应变下的微观形貌; 然后, 通过式(3)给出的理论模型预测样品表面反射率随应变的变化规律; 最后, 通过高光谱相机测量不同应变下样品材料的表面反射率, 得到反射率随应变变化的实验曲线; 将实验测得的实验曲线与第 1 节根据理论模型预测的模拟曲线进行对比, 理论预测与实验结果吻合良好。

2.1 基于微观形貌的反射率预测

本文使用 Olympus OLS5000 型共聚焦显微镜对硅胶样品的表面形貌进行观察, 所用的镜头倍数为 $5\times$ 。该显微镜基于激光共聚焦原理, 可以通过获得样品表面的三维空间形貌图像, 进而获得表面形貌的高度信息。该显微镜的水平分辨率为 1nm , 高度分辨率为 0.5nm 。

实验所用硅胶样品为 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的矩形块, 其弹性模量为 1.2GPa 。利用图 2(a)所示

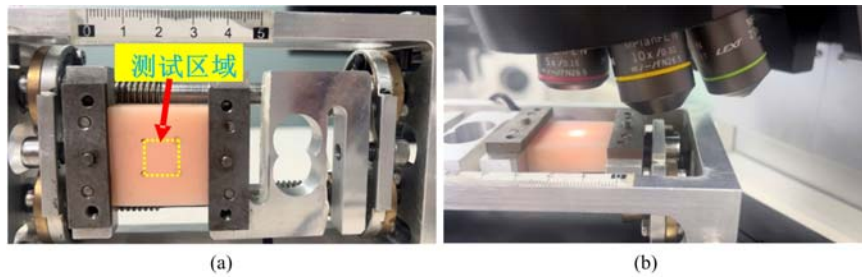


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental installation drawing

的加载装置对样品进行加载, 样品在 $0\text{kPa} \sim 17\text{kPa}$ 的载荷下被压缩。为了减小加载端圣维南区域的影响, 选取硅胶样品中间 $7.5\text{mm} \times 7.5\text{mm}$ 的正方形区域进行实验测量和分析。测试区域的具体位置如图 2(a)所示。

利用激光共聚焦显微镜测量硅胶样品在不同载荷下的表面形貌, 实验示意图如图 2(b)所示。测量

区域的实际尺寸为 $2560\mu\text{m} \times 2560\mu\text{m}$, 图像尺寸为 $1024\text{pixel} \times 1024\text{pixel}$ 。

根据采集到的三维空间形貌数据, 可以计算样品材料表面形貌的梯度。由于共聚焦显微镜直接给出离散点的高度信息, 本文用数值微分代替式(1)的梯度计算:

$$q_x(i, j) = \sum_{l=-1}^1 \frac{h(i+1, j+l) - h(i-1, j+l)}{6\Delta} \quad (8)$$

式中: h 为离散点的高度值; Δ 为图像中相邻像素点间的空间距离, 本文取 $2.5\mu\text{m}$ 。

图 3 给出了在硅胶的加载过程中, 不同应变下 x 方向梯度 q_x 的平均值。从图中可以看出, 随着压缩载荷增加, 硅胶样品表面微观形貌的梯度 q_x 逐渐增大。

根据式(3)中的理论模型, 结合实验测量的表面梯度数据可以预测对应的表面反射率, 计算结果如图 4 所示。由图 4 可知, 反射率随着应变的增大而降低, 并且近似服从线性规律。根据实验数据拟合的应变-反射率曲线的斜率为 0.28, 数据的均方根误差为 2.1×10^{-3} 。

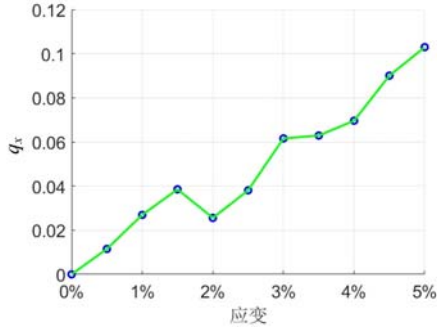


图 3 表面梯度 q_x 随应变的变化曲线

Fig. 3 Curve of surface gradient q_x with strain

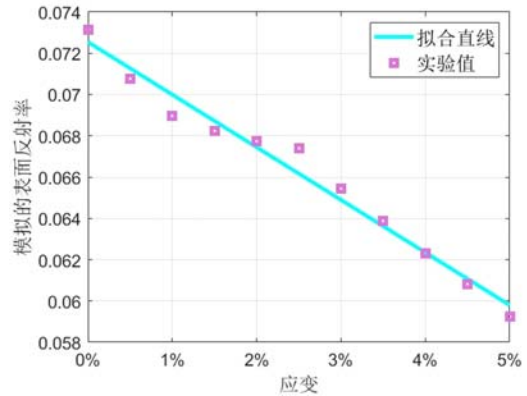


图 4 基于粗糙度数据的应变-反射率关系的理论模拟结果

Fig. 4 Theoretical simulation results of strain-reflectivity relationship based on roughness data

2.2 基于高光谱相机的反射率测量

使用高光谱相机来测量样品在不同应变状态下的光谱反射率。本文采用双利合谱公司的 GaiaField 型光谱相机, 其光谱波段为 $377\text{nm} \sim 1024\text{nm}$, 光谱分辨率为 2.8nm 。根据每次加载时的光谱图像, 获得不同加载状态下硅胶标定区域反射率信息。

为了有效对比本节光谱反射率实验数据和 2.1 节基于形貌数据的反射率预测结果, 本节实验的压缩加载范围与 2.1 节保持一致。实验装置如图 5 所示, 从左到右依次是测力计、原位加载装置和高光谱相机。

图 6 为无应变时硅胶样品表面在 575nm 波长下的反射率伪彩色图像, 为了避免加载端圣维南区域的影响, 取图中虚线所示边长为 7.5mm 的正方形区域内反射率的平均值作为样品的表面反射率。

图 7(a) 为 $475\text{nm} \sim 535\text{nm}$ 波长范围内典型载荷下的反射率光谱曲线。不同物体的光谱特性与其内在结构、理化性质密切相关, 物体内的成分对光的吸收和反射与波长相关, 所以硅胶样品的光谱曲线是由硅胶本身的特性决定的。在图 7(a) 中可以看出, 在 $475\text{nm} \sim 535\text{nm}$ 波段内, 压缩载荷对光谱曲线有稳定且明显的调制效果, 样品表面反射率随着应变的增大而逐渐减小。为了进一步分析应变与反射率之间的定量关系, 图 7(b) 给出了 475nm 、 490nm 、 505nm 、 520nm 、 535nm 等 5 个波长下反射率随应变变化的实验曲线, 图中 k 为不同波长下拟合直线的斜率。图 7(b) 中, 从上到下的斜率 k 分别为 0.31、0.31、0.30、0.29、0.28, 其平均值为 0.30。

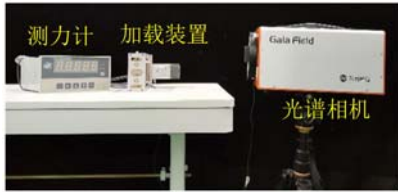


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental apparatus diagram

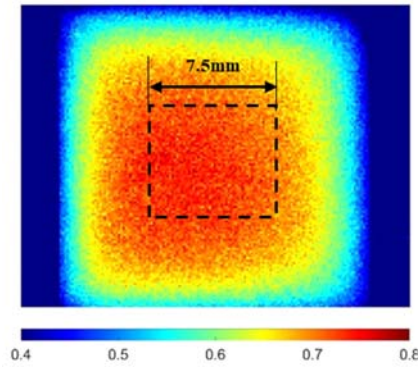
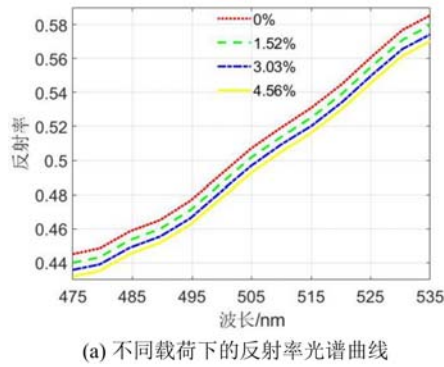
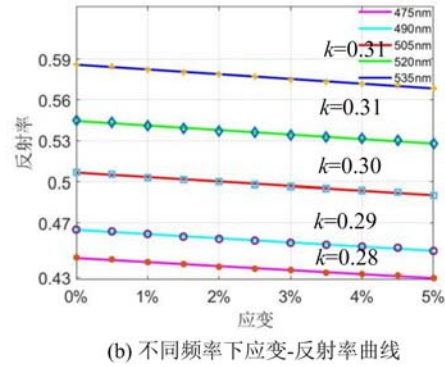


图 6 样品未加载时的反射率分布图

Fig. 6 Reflectance distribution map when the sample is not loaded



(a) 不同载荷下的反射率光谱曲线



(b) 不同频率下应变-反射率曲线

图 7 应变-反射率关系的实验测量结果

Fig. 7 Experimental measurement results of strain-reflectivity relationship

在 2.1 节中,通过式(3)预测了反射率随应变的变化关系,其结果如图 4 所示。在本节中,利用实验方法测量了反射率随应变的变化,其结果如图 7(b)所示。在理论预测和实验测量结果中,反射率均随应变线性变化。在图 4 和图 7(b)中,应变-反射率的线性斜率分别为 0.28 和 0.30,吻合良好。实验结果与模拟结果的差异主要来源于如下几个方面:首先,真实硅胶样品的反射光除了表面反射外,还包括材料内部的散射光,而在理论模型中未考虑这个部分;其次,在样品材料受载过程中其折射率会发生改变,而在理论模型中假定折射率是定值;最后,实验中入射光线和光谱相机光轴并不是理想地垂直于样品表面,也会对实验结果有一定影响。

3 结论

本文深入研究了应变对软材料反射率的调制作用。首先,基于粗糙表面的光学反射模型,建立了一个应变调制材料表面反射率的理论模型;其次,通过共聚焦显微镜测量了硅胶样品在不同应变状态下的表面三维形貌,并利用本文建立的理论模型预测了反射率随应变的变化曲线;最后,利用高光谱相机测量了硅胶样品表面反射率随应变的变化关系。理论预测和实验测量都表明,反射率随着压缩载荷的增大而降低,并且在小变形条件下近似服从线性规律。压应变和反射率之间线性系数的理论预测值与实验测量值吻合良好,从而验证了本文理论模型的正确性。

基于本文的研究结果,有望发展一种基于反射率精确测量的软材料应变测量方法。该方法将不需要对样品表面做任何处理,也不需要表面安放传感器,因此会大大提高应变测量的便捷性,在无标记无接触的应变测量领域有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] RIVERA N V, GÓMEZ-SANCHIS J, CHANONA-PÉREZ J, et al. Early detection of mechanical damage in mango using NIR hyperspectral images and machine learning[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 122:91–98.
- [2] GOSSELIN R, RODRIGUE D, GONZA R, et al. Potential of hyperspectral imaging for quality control of polymer blend films[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(6):3033–3042.
- [3] GOWEN A, TSENKOVA R, ESQUERRE C, et al. Use of near infrared hyperspectral imaging to identify water matrix co-ordinates in mushrooms (*agaricus bisporus*) subjected to mechanical vibration[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2009, 17(1):363–371.
- [4] TANG Z, YAO W, ZHANG J, et al. Experimental evaluation of PMMA simulated tunnel stability under dynamic disturbance using digital image correlation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 92:103039.
- [5] ABSHIRINI M, DEHNAVI M Y, BENI M A, et al. Interaction of two parallel U-notches with tip cracks in PMMA plates under tension using digital image correlation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014, 70:75–82.
- [6] KNAUSS W G, CHASIOTIS I, HUANG Y. Mechanical measurements at the micron and nanometer scales[J]. *Mechanics of Materials*, 2003, 35:217–231.
- [7] ZHANG D S, AROLA D D. Applications tissues of digital image correlation to biological[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2004, 9(4):691–699.
- [8] NAZARI A, SOAPPMAN M, BAJAJ D, et al. New approaches for examining fatigue and fracture in hard tissues [J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47:325–336.
- [9] WANG H W, KANG Y L, ZHANG Z F. Size effect on the fracture toughness of metallic foil[J]. *International Journal of Fracture*, 2003, 123:177–185.
- [10] COOK R L. A reflectance models for computer graphics[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 1982, 15(3):307–316.

Study on the strain-reflectivity correlation of soft materials based on hyperspectral imaging technology

LUAN Hepeng, HUO Zongze, WEI Huixin, WANG Zhiyong,

LI Chuanwei, LI Linan, WANG Shibin

(Department of Mechanical, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Based on hyperspectral imaging technology, this article delves into the modulation effect of strain on the spectral reflectivity of a typical soft material-silica gel. Firstly, based on the Torrens-Sparrow reflection model, this paper establishes a theoretical model for modulating the spectral reflectivity of materials by changing their surface morphology under strain. Secondly, the surface micromorphology of the sample material under different strain states was obtained through confocal microscopy, and its roughness was calculated, and the surface spectral strain-reflectivity ratio was predicted. Finally, the spectral reflectivity of the material surface under different stain states was measured using a hyperspectral camera. The results showed that in the spectral band range of 475nm to 535nm, the reflectivity of compressed silica gel linearly decreased with increasing strain, which is in good agreement with the predicted results of the theoretical model. Based on the research results of this article, it is expected to develop a new experimental technology that directly measures material strain using reflectivity.

Keywords: silica gel; reflectivity; hyperspectral imaging