

高精度电光调制椭偏应力传感系统

陈敏¹, 理智², 刘巍^{2*}, 罗子人²

(1. 中冶赛迪信息技术有限公司, 重庆 401329

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: **目的:** 为了实现精密制造中关键部件残余应力的高精度检测, 建立了电光调制椭偏应力传感系统。对工程中常见的304不锈钢材料在单轴拉伸应力条件下的椭偏信号响应进行了研究。**方法:** 首先, 基于反射椭偏的基本原理, 建立了不同光轴方向上椭偏信号与单轴拉伸金属试样寻常折射率和异常折射率的关系。其次, 针对不锈钢材料, 优化了椭偏应力传感的工作点。通过对比消光点和非零线性工作点的椭偏信号, 证明了非零线性条件适用于应力信号的传感。最后, 针对不同光轴方向下, 应力引起的椭偏信号进行了测量。**结果:** 实验结果表明: 针对304不锈钢, 系统的最低应力检测限为7.84 kPa, 系统的应力检测精度优于7.84 kPa。**结论:** 该系统可用于精密制造中, 金属工件高精度应力检测的要求。

关键词: 光弹性; 应力双折射; 椭偏; 残余应力; 电光调制;

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

High-Precision Electro-Optic Modulated Ellipsometric Stress Sensing System

CHEN Min¹, LI Zhi², LIU Wei^{2*}, LUO Zi-ren²

(1. CISDI Group Co., LTD. Chongqing, 401329, China

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100190, China)

Abstract: **Objective:** To achieve high-precision detection of residual stress in key components in precision manufacturing, an electro-optic modulated ellipsometric stress sensing system was established. The ellipsometric signal response of common stainless steel materials under uniaxial tensile stress conditions in engineering was studied. **Method:** First, based on the basic principles of reflection ellipsometry, the relationship between the ellipsometric signal and the ordinary and extraordinary refractive indices was established for different optical axis directions. Next, for stainless steel materials, the working point of ellipsometric stress sensing was optimized. By comparing the ellipsometric signals at the extinction point and the non-zero linear working point, it was proven that the non-zero linear condition is suitable for stress signal sensing. Finally, the ellipsometric signals caused by stress under different optical axis directions were measured. **Result:** The experimental results show that for 304 stainless steel, the system's minimum stress detection limit is 7.84 kPa, and the stress detection accuracy of the system is better than 7.84 kPa. **Conclusion:** This system can be used for high-precision stress detection requirements in metal workpieces in precision manufacturing.

Key words: Photoelasticity; Stress birefringence; Ellipsometry; Residual stress; Electro-optic modulation

1 引言

核心元件的残余应力是影响精密测量及制造系统性能的重要因素。它可能出现在材料元件的成型、退火、抛光、涂层以及机械组装过程中。残余应力会给元件带来一些不利影响，如元件的表面变形、机械裂纹和强度损伤，从而影响它们后续服役过程中的寿命以及精度。因此，准确测量和控制关键元件的应力分布，减少其对系统的不利影响，在设计、制造和使用精密元件的过程中具有重要意义。此外，准确的应力测量和控制也有助于偏振控制、新光学元件的设计和制造等^[1,2]。

由于残余应力复杂的成因和极大的随机性，理论上很难确定其大小和方向。同时，随着近年来，精密制造技术的发展，对材料元件的测量和控制需求不断增加。以光刻机为例，其微动工件台精度需达到 nm 级，这对材料应力及应变的检测精度也提出了更高的要求。在实践中，通常使用实验方法来测量应力，如 X 射线衍射(XRD)方法^[3,4]和斯托尼曲率法^[5-7]。然而，这些方案对残余应力的测量精度约为 10MPa 量级，无法满足精密制造技术的要求。

残余应力是金属元件、陶瓷、光学元件和复杂几何结构意外故障的重要原因，但难以测量和预测。通常有两种类型的测试方法来评估残余应力和操作安全性：破坏性测试和非破坏性测试。由于破坏性应力测量方法不适合用于残余应力的检测和估计，从而光学非破坏性测试近年来越来越受到关注，主要是因为其高精度和高灵敏度的非破坏性优势。目前，主要的光学非破坏性测试技术包括光纤光学、电子散斑、红外热成像和内窥镜以及太赫兹技术^[8-10]，为元件表面或内部的非破坏性测试提供了有效工具。此外，通过测量光学元件的光路差异或相位差异来进行应力测量的研究思路，这在光学非破坏性测试领域具有很大的应用价值。

根据光弹性原理，应力的存在导致折射率的变化，进而在光学元件中引起双折射。因此，应力与双折射密切相关。量化双折射以计算应力已成为光学元件应力测量的主要方法^[11,12]。然而，针对精密制造中普遍使用的金属元件，其应力的精密测量仍然是围绕工程技术界的一个难题。椭圆偏振是一种基于光学双折射的应力测量方法，基于反射式椭圆偏振检测技术，提出了一种针对光学镀膜中残留应力进行检测的方法，通过光学薄膜应变时的应力双折射引起的椭圆参数的变化，测定薄膜的应力，其精度可达到 35 kPa^[13]，证明了椭圆偏振技术是一种高精度的光学薄膜应力测量方案。为进一步提升应力检

测的灵敏度，本文提出了一种采用高频电光调制的反射椭圆偏振应力传感系统，针对工程中常用的 304 不锈钢工件优化了测试系统的工作条件，并在单轴拉伸的工况下，测量了应力引起的双折射信号。结果表明，该传感系统具有光路简单，测量精度高等特点。

2 基于电光调制的椭圆偏振应力测试系统

2.1 应力测试系统的硬件构成

如图 1 所示，实验系统由一套基于电光调制的椭圆传感器和一个应力加载装置组成。基于电光调制的椭圆传感器采用了起偏器-样品-电光调制器(EOM)-检偏器结构，用于获取样品界面折射率在不同应力下的变化。光源采用氩氦激光器，其发射的 633 nm 波长的激光垂直穿过 135° 方位角的起偏器，并以 78° 的入射角照在样品表面，光斑直径约 3 mm，光波经样品反射后，通过铌酸锂晶体电光调制器(Thorlabs, EO-AM-NR-C1)调制(调制频率 1kHz)，经过一方位角为 90° 的检偏器，最终该线偏振光波的光强由光电探测器测量。

不同于传统的椭圆偏振测量，其关注的是椭圆参数，将测量周期(通常为 1s)内的采集到的偏振光的光强变化通过快速傅里叶变换至频域，在频域内分析信号与样品所受应力之间的关系。

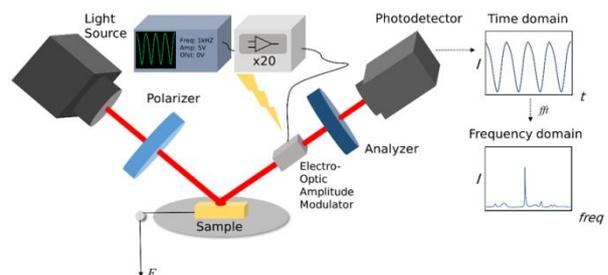


图 1 高精度电光调制的椭圆偏振应力系统

Fig. 1 High-precision electro-optic modulated ellipsometric stress sensing system

测试样品采用了长宽为 25 mm×10mm、厚度为 2.5 mm 的“工”字形不锈钢样件，样品表面经抛光至表面粗糙度 Ra=0.08 后作为反射面，反射入射光波。为了避免边界周围的应力集中，探测光在样品的中心区域反射，中心区域横截面为 5mm×2.5mm。

为了建立椭圆偏振信号与试样应力之间的对应关系，本文设计了一种可与椭圆传感器耦合的手动应力加载装置。该装置的三维结构设计图和实物图如图 2 所示。装置由样品台、铅锤和牵引机构组成。其中样品台由一固定支承块和一活动支承块组成，两支

承块上均有用于定位样品的限位销。牵引机构将铅锤拉力传导到样品台, 对样品产生拉力 F , 其大小由铅锤重量决定, 即 $F=mg$ 。在本实验中, 铅锤质量由一组 10g 的砝码调节, 通过增减砝码数量, 铅锤质量从 0g 起以 10g 为分度递增。受到应力作用时, 椭圆信号随之改变。将样品台绕样品表面的法线旋转 90° , 可获得两个正交方向上的椭圆信号与应力之间的关系。

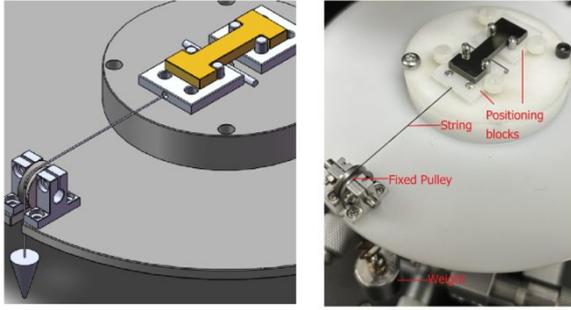


图 2 应力加载装置
Fig. 2 The stress-loading device

3 基于椭圆的应力传感原理

反射椭圆测量的是入射光波与样品表面相互作用后, 反射光波的偏振态。由于界面厚度和介电常数对平行于入射面的 p 光影响很大, 而对垂直于入射面的 s 光影响很小, 因此以 s 光为基准来测量 p 光的偏振态。对于各向同性界面, 椭圆参数 ρ 可通过正交琼斯矩阵

$$J = \begin{pmatrix} R_{pp} & 0 \\ 0 & R_{ss} \end{pmatrix} \text{ 求得}^{[14]}:$$

$$\rho = \frac{R_{pp}}{R_{ss}} = \tan \psi e^{i\Delta}, \quad (1)$$

其中, R_{pp} 和 R_{ss} 分别是 p 光和 s 光的复反射系数, ψ 是椭圆振幅, Δ 是相位。

而对于各向异性界面, p 光与 s 光相关。因此,

琼斯矩阵一般非正交, 从而有 $J = \begin{pmatrix} R_{pp} & R_{sp} \\ R_{ps} & R_{ss} \end{pmatrix}$, 另

两个椭圆参数 R_{sp} 和 R_{ps} 由

$$\rho_{sp} = \frac{R_{sp}}{R_{ss}} = \tan \psi_{sp} e^{i\Delta_{sp}}, \quad (2)$$

$$\rho_{ps} = \frac{R_{ps}}{R_{ss}} = \tan \psi_{ps} e^{i\Delta_{ps}}, \quad (3)$$

确定。

传统的反射椭圆无法获得所有椭圆参数, 因而无法获得各向异性介质的信息。然而, 对于单轴拉伸试样, 光轴具有几何对称性, 琼斯矩阵退化为对角矩阵, 即 $R_{sp} = R_{ps} = 0$, 此时 p 光和 s 光可以独立反射, 故可利用反射椭圆来推断样品界面信息。

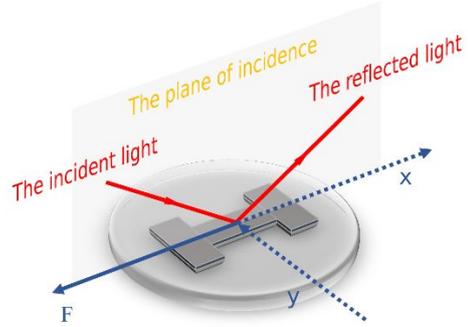


图 3 探测光照射样品示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the incident light on the test sample

具体地, 对于图 3 中使用的单轴拉伸的金属样品, 根据几何对称性, 光轴平行于拉应力方向。因此考虑两种情况: 光轴平行于入射面法线的 y 方向, 以及光轴平行于入射面的 x 方向。此时, 琼斯矩阵满足对角形式, 斯奈尔定律可表示为:

$$n_1 \sin \phi_1 = n_o \sin \phi_o = n_e \sin \phi_e, \quad (4)$$

其中 n_1 为空气的折射率, ϕ_1 为入射角, n_o 和 n_e 为单轴拉伸应力条件下材料的寻常折射率和异常折射率, ϕ_o 和 ϕ_e 为其相应的折射角。

1) 光轴平行于 y 方向

此时, s 光平行于光轴, 并完全转换为异常光, 其对应折射率为 n_e , 而 p 光垂直于光轴, 并转换为寻常光, 其对应折射率为 n_o , 因此有 $R_{sp} = R_{ps} = 0$, R_{pp} 和 R_{ss} 满足

$$R_{pp} = \frac{\frac{\cos \phi_o}{n_o} - \frac{\cos \phi_1}{n_1}}{\frac{\cos \phi_o}{n_o} + \frac{\cos \phi_1}{n_1}}, \quad (5)$$

$$R_{ss} = \frac{n_1 \cos \phi_1 - n_e \cos \phi_e}{n_1 \cos \phi_1 + n_e \cos \phi_e}, \quad (6)$$

由于椭圆信号主要提供的是 p 光的信息, 可将 R_{pp} 作为重点来分析此时的工件界面处的应变。根据公式 (5), R_{pp} 主要受材料寻常折射率的影响。因此, 当光轴法向平行于入射平面时, 椭圆信号对

单轴拉伸试样的寻常折射率敏感。

2) 光轴平行于 x 方向

此时, s 光垂直于光轴, 并完全转换为寻常光, 同样有 $R_{sp}=R_{ps}=0$, R_{pp} 和 R_{ss} 满足:

$$R_{pp} = \frac{\frac{\cos \phi_o}{n_e} - \frac{\cos \phi_1}{n_1}}{\frac{\cos \phi_o}{n_e} + \frac{\cos \phi_1}{n_1}}, \quad (7)$$

$$R_{ss} = \frac{n_1 \cos \phi_1 - n_o \cos \phi_o}{n_1 \cos \phi_1 + n_o \cos \phi_o}, \quad (8)$$

其中 $\cos \phi_o$ 满足:

$$\cos \phi_o = \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_o^2} \sin^2 \phi_1}, \quad (9)$$

根据公式 (7) 以及公式 (9), R_{pp} 不仅受异常折射率 n_e 的影响, 同时受到寻常折射角的余弦 $\cos \phi_o$, 或寻常折射率 n_o 的影响。

然而, 对于单轴应力下的金属材料, 寻常折射率 n_o 和异常折射率 n_e 并非相互独立, 或者说 n_o 可被诠释为 n_e 的函数。因此, 当光轴平行于 x 方向时, 椭圆信号可用于测量单轴拉伸工件的异常折射率。

4 测量实验与结果

4.1 电光调制椭圆传感器工作点的优化

基于反射椭圆的传感器, 须根据样品特点优化入射角, 起偏器方位角, 检偏器方位角等工作条件, 以提高测量的灵敏度。通常情况下, 选择接近厄布儒斯特角位置的入射角可以获得灵敏的椭圆测量信号。

在图 4 中, 计算了不锈钢的椭圆参数与入射角的关系。对于典型的不锈钢材料, 其折射率 $n=2.7568$, 消光系数 $k=3.7920$ ^[13], 从图 4 可以看出, 样品的厄布儒斯特角接近入射角 78° 。此时, 椭圆振幅 ψ 约为 27.5° , 相位 Δ 为 -90° 。因此, 优化应力测量的入射角为 78° 。

在传统的椭圆技术中, 通常要求起偏器和检偏器的方位角设置在椭圆的消光点附近^[15], 此时, 探测光强的变化 δI 与椭圆参数的变化满足二次函数关系, 即

$$\delta I \propto \left[(\delta \psi)^2 + \frac{1}{4} \sin^2 2\psi (\delta \Delta)^2 \right], \quad (10)$$

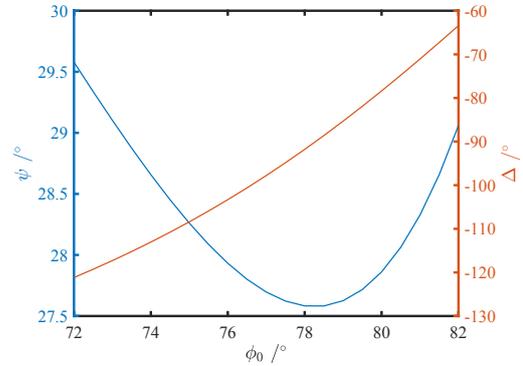


图 4 不同入射角条件下不锈钢的椭圆参数幅值 ψ 及相位 Δ
Fig. 4 The ellipsometric amplitude ψ and phase Δ of stainless steel at different angles of incidence / The variation of the ellipsometric amplitude ψ and phase Δ of stainless steel with the angle of incidence

公式 (10) 表明, 工作在消光点附近, 椭圆参数微小变化时, 传感信号存在灵敏度不足的问题。

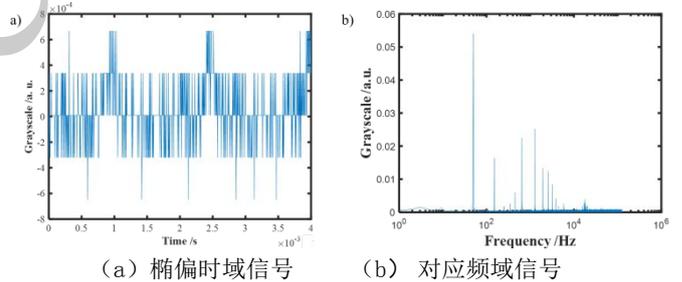


图 5 消光点附近的椭圆信号
Fig. 5 The ellipsometric signal in the proximity of the extinction point; (a) the signal in the ellipsometric time domain; (b) the respective signal in the frequency domain

为此, 需将工作点设置非零线性工作点上^[16], 又由于在厄布儒斯特角附近, 椭圆参量 $\delta \psi \approx 0$, 从而有

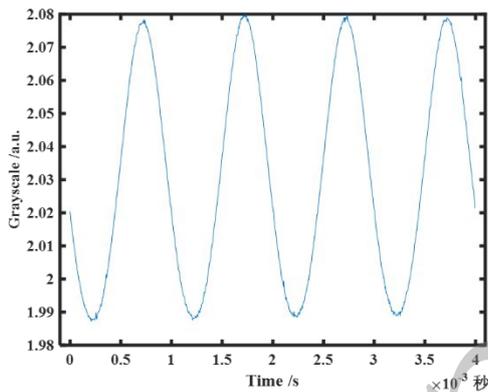
$$\delta I \propto \sin 2A \sin 2\psi \cos(2P + \Delta) \delta \Delta, \quad (11)$$

其中 A 为检偏器方位角, P 为起偏器方位角。当 $A = 45^\circ, P = 180^\circ - \frac{\Delta}{2}$ 时, 或 $A = 135^\circ, P = 45^\circ - \frac{\Delta}{2}$ 时, δI 取得最大值。

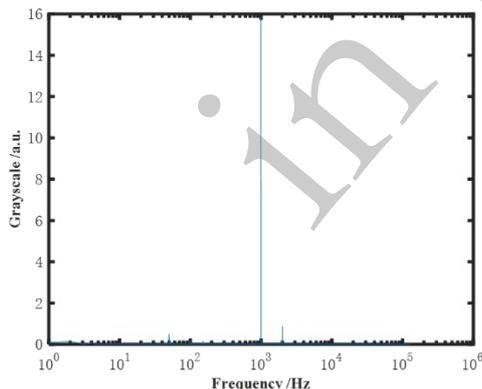
当 $A = 45^\circ$, $P = 45^\circ - \frac{\Delta}{2}$ 时, 或 $A = 135^\circ$, $P = 180^\circ - \frac{\Delta}{2}$ 时, δI 取得最小值。

而在胥布儒斯特角 78° 处, $\Delta = 90^\circ$, 从而可将起偏器方位角设置在 $P = 90^\circ$, 检偏器方位角设置在 $A = 135^\circ$ 。

图 5, 图 6 对比了分别在消光点附近和非零线性工作点时, 经样件反射后的椭偏的时域及频域信号。图 5 中, 由于起偏器及检偏器方位角设置在消光点附近, 此时, 时域上所探测到的光强近乎为零, 而在频域上表现为噪声占主导。然而当起偏器方位角为 90° , 检偏器方位角为 135° 时, 椭偏传感器工作在非零线性工作点上, 由于反射光波经过电光调制器时, 延迟相位经过 1 kHz 正弦信号的调制, 最终检测的光强信号在时域上也呈现为相应的弦信号, 而在频域上, 展现为 1 kHz 处的独立信号。



(a) 椭圆时域信号



(b) 对应频域信号

图 6 非零线性工作点附近的椭圆信号

Fig. 6 The ellipsometric signal in the proximity of the non-zero linear work point; (a) the signal in the ellipsometric time domain; (b) the respective signal in the frequency domain

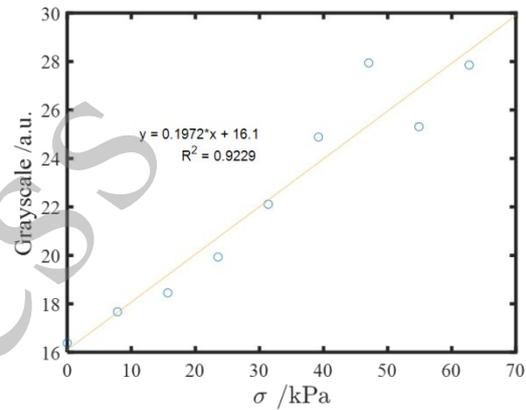
4.2 样件应力的测量

图 7 分别给出了相互正交的光轴方向下, 频域

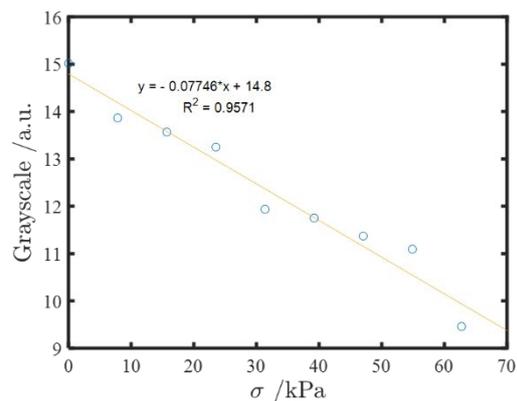
内, 样件的椭圆信号与应力的对应关系。当光轴平行于 x 方向时, 椭圆信号随应力线性增加; 而当光轴平行于 y 方向时, 椭圆信号随应力线性降低。

由于 304 不锈钢的屈服强度约为 200 MPa 左右, 故此, 在施加的应力条件下, 材料满足弹性形变。当光轴平行于 x 方向时, 材料被拉伸, x 方向的应变增加, 而当光轴平行于 y 方向时, y 方向的应变减小。即椭圆信号来源于不同方向上应变变化导致的折射率的相应变化。

同时, 可以看到在两个正交方向上, 电光调制椭圆应力系统所检测应力的最低检测限约为 7.84 kPa, 当光轴平行于 x 方向时, 检测精度优于 7.84 kPa (此时, 系统分辨率约为 0.8 灰度, 7.84 kPa 引起的灰度变化约为 1.2 灰度)。可满足精密制造系统中对材料所受应力进行精密检测的要求。



(a) 光轴平行于 x 方向



(b) 光轴平行于 y 方向

图 7 不同光轴方向下 304 不锈钢的椭圆应力测量

Fig. 7 The ellipsometry of the stress on the 304 stainless steel at different directions of the optical axis; (a) optical axis parallel to the x-direction; (b) optical axis parallel to the y-

direction

5 结论

本文根据精密制造领域中对关键样件进行低应力检测的要求, 提出了一种基于电光调制椭圆的非接触应力测量的方案, 针对工程领域中常用的 304 不

锈钢样件, 优化了椭圆测量应力的工作条件。实验表明 999, 针对 304 不锈钢, 当入射角为 78° 的时候, 在非零线性设置下, 基于电光调制的椭圆应力系统应力的最低检测限约为 8 kPa, 检测精度为 8 kPa。基本满足高精度应力检测的要求。

参考文献:

- [1] 肖石磊, 李斌成. 光学元件残余应力无损检测技术概述[J]. 光电工程, 2020, 47(8):190068-190068-190068-190011.
XIAO S L, LI B C. Overview of Non-Destructive Testing Techniques for Residual Stress in Optical Components [J]. Optoelectronic Engineering, 2020, 47(8):190068-190068-190068-190011. (in Chinese)
- [2] Peixoto C, Valentim PT, Sousa PC, et al. Injection molding of high-precision optical lenses: A review [J]. Precision Engineering, 2022, 76:29-51.
- [3] 马晓晖, 毛晶, 龙丽霞等. XRD 测试材料表面微区残余应力[J]. 实验室科学, 2022, 25(2):10-13, 18.
MA X H, MAO J, LONG L X, et al. XRD Testing of Micro-Area Residual Stress on Material Surfaces [J]. Laboratory Science Laboratory, 2022, 25(2):10-13, 18. (in Chinese)
- [4] 许光, 邢力超, 张婷等. X 射线衍射法测量高温合金波纹管残余应力[J]. 压力容器, 2021, 38(7):32-37.
XU G, XIN L C, ZHANG T, et al. Measurement of Residual Stress in High-Temperature Alloy Bellows by X-Ray Diffraction Method [J]. Pressure Vessel, 2021, 38(7):32-37. (in Chinese)
- [5] 包亦望, 马德隆. 陶瓷涂层的残余应力评价及其尺寸效应[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8):1033-1038.
BAO Y W, MA D L. Evaluation of Residual Stress in Ceramic Coatings and Its Size Effects [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(8): 1033-1038. (in Chinese)
- [6] 刘明智, 梁康, 熊巍等. 沉积参数对磁控溅射镀金膜层残余应力与微观形貌的影响[J]. 导航与控制, 2020, 19(6):98-104.
LIU M Z, LIANG K, XIONG W, et al. Effect of Deposition Parameters on Residual Stress and Microstructure in Magnetron Sputtering Au Thin Films [J]. Navigation and Control, 2020 (6), 98-104. (in Chinese)
- [7] 郑锦华, 李志雄, 刘青云, 梅诗阳. 负偏压对高界面强度类金刚石薄膜制备的影响[J]. 材料工程, 2023, 51(10)
ZHENG J H, LI Z X, LIU Q Y, et al. Effect of negative bias voltage on preparation of diamond-like carbon films with high interfacial strength [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(10) (in Chinese)
- [8] Kajihara Y, Takahashi R, Yoshida I, et al. Measurement method of internal residual stress in plastic parts using terahertz spectroscopy[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2021, 4:46-52.
- [9] Farahani BV, Direito F, Sousa PJ, et al. Electronic Speckle Pattern Interferometry for fatigue crack monitoring[J]. Procedia Structural Integrity, 2022, 37:873-879.
- [10] Yadav N, Wachtarczyk K, Gąsior P, et al. In - line residual strain monitoring for thermoplastic automated tape layup using fiber Bragg grating sensors[J]. Polymer Composites, 2022, 43(3):1590-1602.
- [11] 李克武, 王爽, 刘梓良等. 双弹光级联的差频调制型应力双折射测量[J]. 光学学报, 2023, 43(4):0412001-0412001-0412010.
LI K W, WANG S, LIU Z L, et al. Stress Birefringence Measurement Based on Double Cascaded Photoelastic Modulation with Differential Frequencies[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(4):0412001-0412001-0412010. (in Chinese)
- [12] 张伟, 杨林, 刘灿. 一种基于光弹调制器的应力双折射测量方法[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(2):64-69.
ZHANG W, YANG L, LIU C, A Stress Birefringence Measurement Method Based on Photoelastic Modulator [J]. OPTICS & OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY, 2021, 19(2):64-69. (in Chinese)
- [13] Wang C, Liu W, Niu Y, et al. Using the Reflection Ellipsometry to Detect the Stress for the Gold Coating Reflection Mirrors[J]. Microgravity Science and Technology, 2022, 34(5):98.
- [14] Azzam R, Bashara N, Ballard SS. Ellipsometry and Polarized Light[M]. North Holland, 1978.

- [15] Arwin H. Off-Null Ellipsometry Revisited: Basic Considerations for Measuring Surface Concentrations at Solid/Liquid Interfaces[J]. Journal of colloid and interface science, 1993, 156(2):377-382.
- [16] Linear off null working condition for total internal reflection imaging ellipsometry to detect subtle electron density change[J]. SPIE, 2020.

作者简介:



陈敏(1979-), 男, 四川成都人, 硕士, 高级工程师, 上海交通大学固体力学专业, 主要从事多领域耦合系统的联合仿真。E-mail: min.chen@cisdi.com.cn

理智(1983-), 男, 河北人, 工程师, 主要研究光机电系统耦合设计。E-mail: lizhi@imech.ac.cn



刘巍(1983-), 男, 湖北武汉人, 博士, 助理研究员, 中国科学院力学所一般力学专业, 主要从事椭圆传感技术。

Email: liuwei@imech.ac.cn

罗子人(1980-), 男, 湖南人, 博士, 研究员, 中国科学院数学与系统科学研究院, 主要从事精密物理测量。Email: luoziren@imech.ac.cn

in press