

疲劳损伤过程金属表面偏振热像纹理特征实验研究

朱达荣^{1,2,3*}, 杨善骥^{1,2}, 汪方斌^{1,2,3}, 雷经发^{1,2,3}, 王大桂^{1,2}, 栾庆磊^{1,2}

¹安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;

²安徽建筑大学建筑机械故障诊断与预警重点实验室, 安徽 合肥 230601;

³工程机械智能制造重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 红外热像是检测金属疲劳损伤状况有效的方法,但是忽略了疲劳损伤过程中表面显微结构对自发辐射的影响,难以从微观角度对红外热像特征进行完整解释。金属疲劳是一个复杂的能量耗散过程,自发辐射具有偏振特性。在红外热像法中引入偏振探测,不仅能够获取温度场信息,而且能够获得包含发射率变化的表面纹理信息。基于此,搭建拉伸疲劳实验平台和偏振热像采集平台,以 Q235 低碳钢材料为研究对象,获取循环载荷作用下金属材料表面的热红外偏振图像,利用灰度共生矩阵(GLCM)提取偏振方位角、偏振度以及斯托克斯(Stokes)参量等热像纹理信息,分析金属疲劳损伤过程中金属材料的表面形貌的演化过程。实验结果表明,金属构件偏振热像纹理特征随着疲劳损伤周次不断变化,共生矩阵统计量呈现一定规律性。

关键词 表面光学; 红外偏振; 疲劳损伤; 热像纹理; 灰度共生矩阵

中图分类号 TP391.4; TH39

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0424001

Texture Characteristics of Polarized Thermal Images on Metal Surfaces in Fatigue Damage Process

Zhu Darong^{1,2,3*}, Yang Shanji^{1,2}, Wang Fangbin^{1,2,3}, Lei Jingfa^{1,2,3}, Wang Dagui^{1,2}, Luan Qinglei^{1,2}

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Key Laboratory of Construction Machinery Fault Diagnosis and Early Warning Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

³Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract Infrared thermography is an effective method for the detection of metal fatigue damage conditions. However, it does not consider the effect of surface microstructure on spontaneous emission in the fatigue damage process; thus, interpreting the infrared thermal image characteristics from a microcosmic perspective is difficult. Metal fatigue is a complex energy dissipation process, and spontaneous emission has polarization properties. By incorporating polarization detection into infrared thermography, besides temperature field information, surface texture information including emissivity change can also be obtained. Based on the foregoing, this paper obtained the thermal infrared polarization images of the metal material surface under cyclic load using Q235 low carbon steel as the research object by constructing a tensile fatigue test platform and a polarization thermal image acquisition platform. We investigated the evolution processes of surface morphology of metal materials during metal fatigue

收稿日期: 2021-01-28; 修回日期: 2021-02-27; 录用日期: 2021-03-19

基金项目: 安徽省自然科学基金(2008085UD09, 1808085ME125)、安徽省教育厅高校自然科学研究项目(KJ2020A0487, KJ2019A0795, KJ2018JD22, KJ2020JD18)、安徽省重点研发计划(1804a09020009)、安徽省高校优秀青年人才支持计划(gxyqzd2018058, gxyq2017025)

通信作者: *gkj@ahjzu.edu.cn

damage by using the gray level co-occurrence matrix (GLCM) to extract the thermal image texture information, such as polarization azimuth, polarization degree, and Stokes parameters. The results of the experiments show that the texture features of polarized thermal images of metal components change with fatigue damage cycles, and the co-occurrence matrix statistics exhibit some regularity with cycles.

Key words optics at surfaces; infrared polarization; fatigue damage; thermal image texture; gray level co-occurrence matrix

1 引言

疲劳失效是在反复应力作用下,金属材料损伤逐步累积、性能发生劣化的一种常见现象,具有显著的突发性和隐蔽性^[1]。传统的疲劳损伤检测方法无法对金属构件的早期损伤进行准确有效的评估,且耗时长、流程繁琐^[2]。

金属疲劳损伤过程伴随着复杂的能量耗散。当外界对金属构件做功时,导致不可逆的塑性形变并引起内部微缺陷不断演化,材料内部微观结构发生变化,内部形变区域的内能和动能发生改变,直接体现为材料表面的温度变化^[3]。近年来,基于能量耗散的红外热像法取得长足发展。姚磊江等^[4-6]重点关注低周疲劳领域,推导热传导方程,探究热耗散能与储能之间的内在联系,明确耗散能、储能以及疲劳损伤状态之间的定量关系,提出损伤累积理论和寿命预测模型。Wang 等^[7]对基于温度的定量热像法进行了改进,并在单轴疲劳领域内提高了寿命评估的效率与精度,提出了基于固有耗散能的定量热像法。易湘斌等^[8]利用红外热像技术获取不锈钢材料的温度信息,使用远场长焦显微镜实时采集表面形貌的显微图像,对不锈钢的疲劳损伤进行研究,验证了疲劳损伤过程中试样表面温度和微观形貌之间存在相关性,并总结出局部塑性应变是试样温度上升的主要原因。由此可见,热耗散是疲劳损伤过程中的重要能耗现象,直接引起材料表面温度场的变化,反映了内部微观缺陷的演化过程和金属材料的损伤状态。因此,红外热像法是检测金属疲劳损伤状况有效的途径和方法,具有实时无损的显著优点。但是红外热像法的测温精度还有待进一步提高,主要表现在:1) 目前在进行疲劳损伤状态观测时,默认物体实际表面的发射率是恒定不变的,而金属在循环载荷作用下表面微观形貌不断变化,使得实际表面的反射率是持续变化的,直接通过疲劳过程中的温度场变化研究材料的疲劳性能时难以获得精确可靠的结果;2) 红外热像法通过获取金属表面的自发辐射并基于表面的温度变化评

估材料的损伤状态,但获取的自发辐射在传输的过程中容易受到环境或背景起伏的干扰,尤其是测量微小温度变化时,难以获得足够的测量精度^[9]。

金属疲劳过程中的能量耗散以热辐射的形式消逝在空气中^[10]。从物理学的角度来看,热辐射属于自发辐射,具有偏振特性。在红外成像探测中引入偏振检测,能有效抑制背景杂波,提高目标与背景的对比度,增加目标物的信息量,有利于目标检测和识别,可显著提升对温差小或热对比度低目标的探测识别能力,可减小红外偏振特性较弱背景的影响。另一方面,偏振探测能够有效揭示材料的微物理特性,一次成像可以获得 Stokes 参量、偏振度与偏振角、椭圆度与椭圆角等高维参数,从而将目标识别从表面结构上升到空间结构,增强目标的解译能力。基于此,本文在红外热像法的基础上引入偏振探测,通过实验研究疲劳过程中金属材料表面形貌变化,选取灰度共生矩阵(GLCM)作为描述工具,分析疲劳损伤金属表面红外偏振热像纹理特征的演化规律。

2 理论基础

2.1 粗糙表面红外偏振反射原理

研究表明,金属疲劳过程中,应变能使金属内部显微结构的自由能升高,出现位错增殖、位错组态演化等一系列不平衡自组织现象,使金属表面出现局部化塑性变形和“侵入-挤出”效应^[11],之后产生随机分布的表面起伏,金属表面的微观形貌和纹理特征不断改变^[12],使金属表面在不同的损伤阶段具有不同的表面发射率^[13]。

假设疲劳损伤过程金属表面的粗糙度常数为 σ ,根据微面元理论,金属表面的双向反射分布函数(BRDF)可以表示为

$$f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{4\sigma^2} \cdot \frac{1}{\cos^4\theta} \cdot \frac{\exp(-\tan^2\alpha/2\sigma^2)}{\cos\theta_i \cos\theta_r} G(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r), \quad (1)$$

式中: λ 表示光波波长; $G(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ 为遮蔽函数;

α 表示表面平均法线 z 与目标表面微元法线 n 的夹角; θ_i, ϕ_i 分别表示入射光波的入射角和方位角; θ_r, ϕ_r 分别表示反射光波的反射角和方位角。 β 表示入射方向与目标表面微元法线 n 之间的夹角^[14]。 $\alpha, \beta, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ 之间满足

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \beta} \\ \cos(2\beta) = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\phi_r - \phi_i) \end{cases} \quad (2)$$

根据基尔霍夫和能量守恒定律, 在反射半球空间内对 BRDF 进行积分, 可求得定向半球反射率

(DHR) 为

$$\rho_{\text{DHR}}(\theta_i, \lambda) = \iint_{\Omega_r} f_{k,j}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\Omega_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_{k,j}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\phi_r \quad (3)$$

由定向半球反射率, 可以得出定向半球发射率 (DHE) 为

$$\epsilon_{\text{DHE}}(\theta_i, \lambda) = 1 - \rho_{\text{DHR}}(\theta_i, \lambda) = 1 - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_{k,j}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\phi_r \quad (4)$$

从而可以求出目标表面的红外辐射偏振的 Stokes 矢量表达式为

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \rho_{\text{DHR}}(\theta_i, \lambda) \begin{bmatrix} I_{\text{bg}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \epsilon_{\text{DHE}} \cdot I_{\text{obj}} = \begin{bmatrix} I_{\text{obj}} + \iint_{\Omega_r} f_{00} \cos \theta_r d\Omega_r \cdot (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \iint_{\Omega_r} f_{10} \cos \theta_r d\Omega_r \cdot (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \iint_{\Omega_r} f_{20} \cos \theta_r d\Omega_r \cdot (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \\ \iint_{\Omega_r} f_{30} \cos \theta_r d\Omega_r \cdot (I_{\text{bg}} - I_{\text{obj}}) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $I_{\text{obj}}, I_{\text{bg}}$ 分别为目标、背景的辐射量。由(5)式可以看出, 通过红外偏振热像测量, 一次偏振探测不仅可以获得多个偏振方位角辐射、Stokes 参量、偏振度等多个偏振热像参数, 而且将目标识别从表面结构上升到空间结构, 增强目标的解译能力^[15]; 另一方面, 红外偏振热像探测在获得表征物体表面温度的自发辐射强度的同时还可获得包含目标发射率变化的表面纹理信息。因此, 在红外热像法的基础上, 引入偏振探测, 将有助于提高金属构件疲劳损伤状态检测的精度。

2.2 热像偏振检测原理

假设金属表面自发辐射的 Stokes 矢量为 $S = [I Q U V]^T$ ^[16], 其中 I 表示总光强; Q 表示水平光强与垂直光强之差; U 表示 45° 与 135° 方向线偏振光的光强之差; V 与圆偏振有关, 实际测量值很小, 通常情况下忽略^[17]。当其经过偏振方位角为 θ 的偏振成像系统后, 透射到红外探测器的光强 I_{out} 可表示为

$$I_{\text{out}} = [I_{\text{in}} + Q_{\text{in}} \cos(2\theta) + U_{\text{in}} \sin(2\theta)] / 2. \quad (6)$$

选用偏振方位角为 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 的实验系统, 解算获得的自发辐射 Stokes 矢量为

$$\begin{cases} I_{\text{in}} = S_0 = 2 [I_{\text{out}}(0^\circ) + I_{\text{out}}(60^\circ) + I_{\text{out}}(120^\circ)] / 3 \\ Q_{\text{in}} = S_1 = 2 [2I_{\text{out}}(0^\circ) - I_{\text{out}}(60^\circ) - I_{\text{out}}(120^\circ)] / 3, \\ U_{\text{in}} = S_2 = 2\sqrt{3} [I_{\text{out}}(60^\circ) - I_{\text{out}}(120^\circ)] / 3 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $I_{\text{out}}(0^\circ), I_{\text{out}}(60^\circ), I_{\text{out}}(120^\circ)$ 为成像系统在 3 个偏振方位角获得的偏振热像。从而可以解析出发射辐射的偏振度 P 为

$$P = \sqrt{(S_1^2 + S_2^2)} / S_0. \quad (8)$$

3 实 验

3.1 纹理特征表征

疲劳过程中金属材料表面形貌持续变化, 热像包

含了纹理特征的变化, 而纹理是灰度分布在空间位置上反复出现形成的, 则相隔一定距离的像素之间必然存在对应的灰度关系, 因此, 利用 GLCM 描述红外偏振热像在方向、变化幅度、相邻间隔等方面的信息^[18]。

三维空间的曲面在二维图像上, 相邻一定间隔长度的两个像素灰度等级的联合分布表现了纹理特征。假设坐标为 (x, y) 的像素点的灰度为 i , 距离为 (D_x, D_y) 的像素点灰度为 j , 则定义灰度为 (i, j) 的

两个像素点同时存在的概率为

$$P(i, j, d, \theta) = \left\{ (x, y) \left| \begin{array}{l} f(x, y) = i, f(x + D_x, y + D_y) = j \\ x = 0, \dots, M - 1, y = 0, \dots, N - 1 \\ i, j = 0, \dots, L - 1 \end{array} \right. \right\}, \quad (9)$$

式中： L 为灰度值的级数； θ 为特定两个像素点的匹配方向，通常取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 。研究表明：细纹理区域，较大GLCM数值远离对角线且分布于整幅图像；粗纹理区域，较大的GLCM数值集中于对角线附近，呈现出较强的统计特性。为准确描述纹理特征信息，取对比度(contrast)、相关性(correlation)、能量(energy)和逆差矩(homogeneity)4个GLCM统计参量进行描述^[19]。

1) 对比度(contrast)

$$C_{\text{contrast}} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} |i - j|^2 P(i, j, d, \theta). \quad (10)$$

对比度反映纹理图像的清晰度和沟纹深浅程度。对比度越大，说明纹理沟纹越深，清晰度越高，视觉效果越好；对比度越小，说明纹理沟纹越浅，清晰度越低。

2) 相关性(correlation)

$$C_{\text{correlation}} = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i - \mu_x) \times (j - \mu_y) P(i, j, d, \theta), \quad (11)$$

式中： μ_x, μ_y 与 σ_x, σ_y 分别为 $\sum_{i=0}^{L-1} P(i, j, d, \theta)$ 的均值与标准差，反映了GLCM各元素在行、列上的相似程度。当GLCM元素值较接近时，相关性较大；当GLCM元素值相差较大时，相关性较小。

3) 能量(energy)

$$C_{\text{energy}} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} [P(i, j, d, \theta)]^2. \quad (12)$$

能量反映图像灰度的分布均匀情况和纹理的粗细程度，当能量值较大时，说明纹理较规则和均一。

4) 逆差矩(homogeneity)

$$C_{\text{homogeneity}} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{P(i, j, d, \theta)}{1 + (i - j)^2}. \quad (13)$$

逆差矩反映图像纹理的同质性，用于度量图像纹理局部变化，其值大，则说明图像纹理的不同区域间缺少变化，局部非常均匀。

3.2 实验准备与过程

选取Q235碳素结构钢(GB/T 3075—2008)作为实验材料，屈服值在235 MPa左右，含碳量适中，

力学性能好，强度、塑性和焊接性能有较好的配合，用途非常广泛。在疲劳试验机上测得采用的Q235试样屈服载荷为35 kN。该试样由同一批次材料经激光切割加工所得，在实验前，用砂纸对试样表面进行抛光打磨并发黑处理，进一步提高金属表面发射率。试样参数如图1所示。

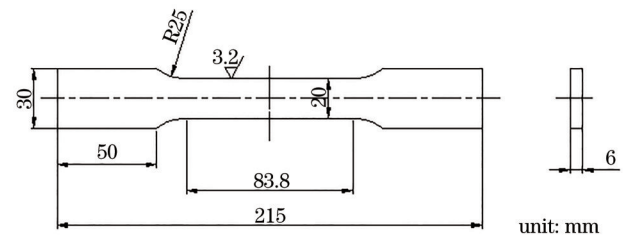


图1 试样参数

Fig. 1 Sample parameters

PolarCamera-IR-640型热红外偏振相机能够实时获取场景沿原始偏振方向($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$)的红外图像，并提供单帧采集和连续采集功能，可对三个偏振方向的图像进行实时配准校正。将试样固定在电液伺服疲劳试验机上，并施加频率为10 Hz、幅值为23.1 kN、均值为18.9 kN的正弦载荷，并在试样前架设红外偏振成像系统，镜头距试样表面1.2 m。每达到500周次时进行一次红外偏振成像，直至试件断裂。为减小环境因素可能造成的干扰，实验过程在暗室内进行，实验环境中空气介质稳定，不存在强对流，环境温度为室温 25°C 。

4 结果与讨论

金属表面的纹理是金属疲劳过程中重要的特征变化^[20]，通过纹理的演变能够较为直观地感受金属的疲劳程度，记录Q235试件在疲劳过程中的纹理变化，不同疲劳周次下金属表面的纹理演化如图2所示。

从图2可以明显看出，金属表面纹理在疲劳损伤过程中呈规律性变化。疲劳初期，裂纹稀疏整齐，随着疲劳的进行，晶粒滑移，裂纹开始扩展，金属表面逐渐粗糙，直至疲劳后期，金属表面整齐结构被破坏，形成致密的粗糙层。

实验过程中，获取了不同偏振方位角($0^\circ, 60^\circ,$

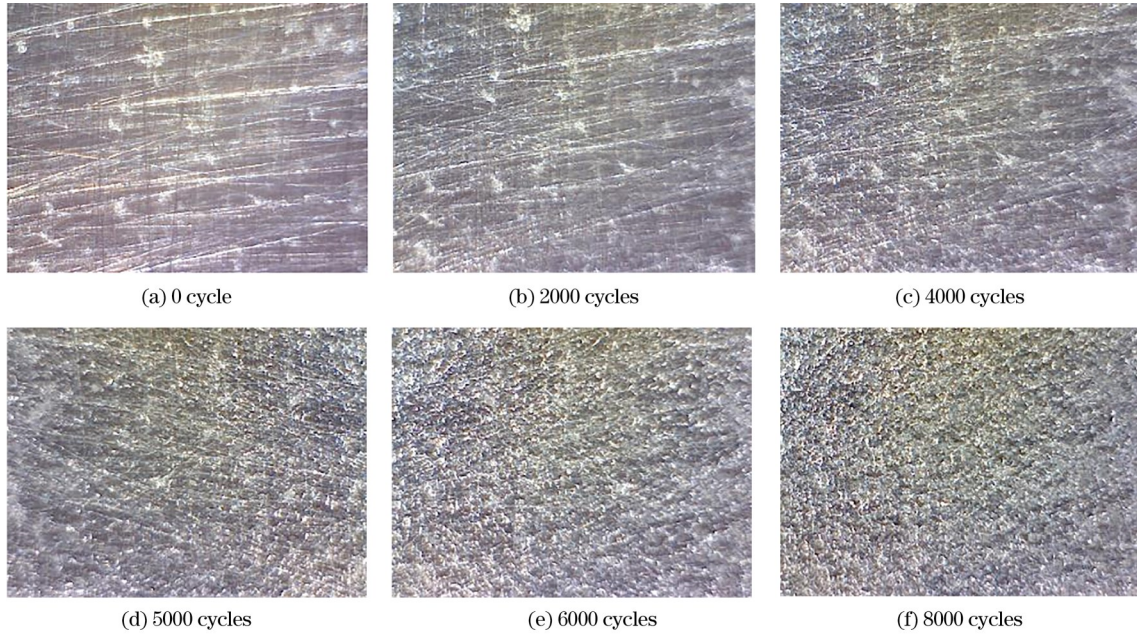


图 2 不同疲劳周次下金属表面的纹理演化

Fig. 2 Texture evolution of metal surfaces under different fatigue cycles

120°)的热红外偏振图像 $I(0^\circ)$ 、 $I(60^\circ)$ 、 $I(120^\circ)$,如图 3 所示,疲劳周次均为 8000。进一步结合(7)、(8)式,

解算获得的 Stokes 参量图像和偏振度(DOP)图像如图 4 和图 5 所示。

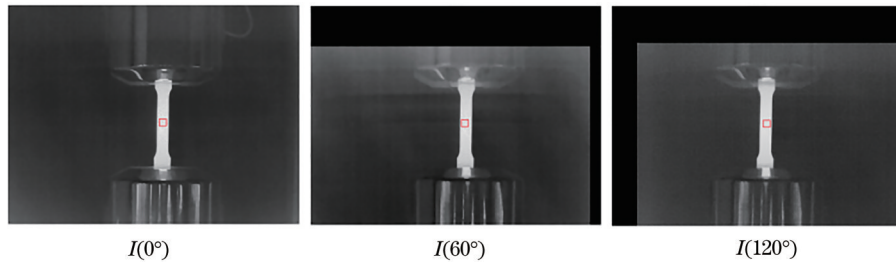


图 3 不同偏振方位角的热红外偏振图像

Fig. 3 Thermal infrared polarization images with different polarization azimuths

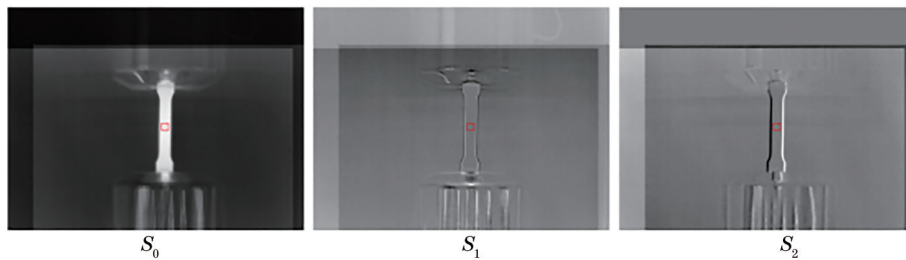


图 4 S_0 、 S_1 、 S_2 图像

Fig. 4 S_0 、 S_1 、 S_2 image

观察图 3~5 可知,不同偏振方位角图像、Stokes 矢量图像以及偏振度图像能够完整描述红外偏振图像信息,表示目标的本质状态特征。不同偏振方位角图像由成像系统直接采集获得,目标模糊,细节不明显; S_0 图像直接反映红外辐射总强度,对比

度差异明显,细节信息较少,而 S_1 和 S_2 图像描述了材料表面不同偏振方位角的起偏信息差异,能够有效地捕获目标的轮廓与边缘特征;偏振度图像包含了纹理信息和边缘细节部分。因此,红外偏振成像可以显著提高目标之间的对比度,减小复杂环境影

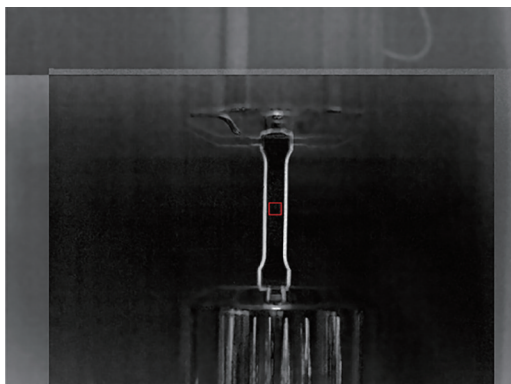


图 5 偏振度图像

Fig. 5 Degree of polarization image

响,突现物体轮廓和物体细节,提升红外图像质量,提高测量精度^[21]。

为进一步分析疲劳损伤过程中偏振热像纹理特征的变化,选取不同偏振方位角图像、Stokes 参量图像以及偏振度图像的中心区域,利用灰度共生矩阵作为描述工具提取不同偏振方位角图像、 S_0 、 S_1 、 S_2 以及偏振度图像的灰度共生矩阵纹理特征,以灰度共生矩阵统计量对比度、相关性、能量和逆差矩

4 个典型参数进行描述,共提取 21 个特征,在循环载荷的作用下,各特征参数的演化规律如图 6 所示。

由图 6 可以看出:不同图像的 GLCM 纹理特征参数均呈现规律性变化,在疲劳实验前用砂纸对试件进行抛光打磨后,表面光滑,纹理较为均匀且较细,沟纹较浅,图像对比度较小,图像相关系数也较小,图像纹理均匀,使得能量和逆差矩较大^[22];在疲劳初期,应力集中,产生微裂纹,使得表面的裂纹槽进一步加深,图像对比度增加到最大值,在轴向拉力的作用下,金属表面纹理沟纹加深,且纹理方向较为一致形成条纹,纹理变粗,纹理均匀性减小,图像的相关性显著增加,能量减小,逆差矩减小;在循环载荷的作用下,试件逐渐失效,内部弹性势能不断释放,图像对比度逐渐减小并趋于稳定,由于轴向拉力的持续作用,金属表面纹理方向保持一致,相关性较大且稳定,金属试件逐渐变形,表面纹理变细,能量略微增大并基本保持不变;随着疲劳周次的增加,由于“侵入-挤出”效应,表面纹理均匀性增大直至疲劳失效,逆差矩逐步增大并保持稳定。

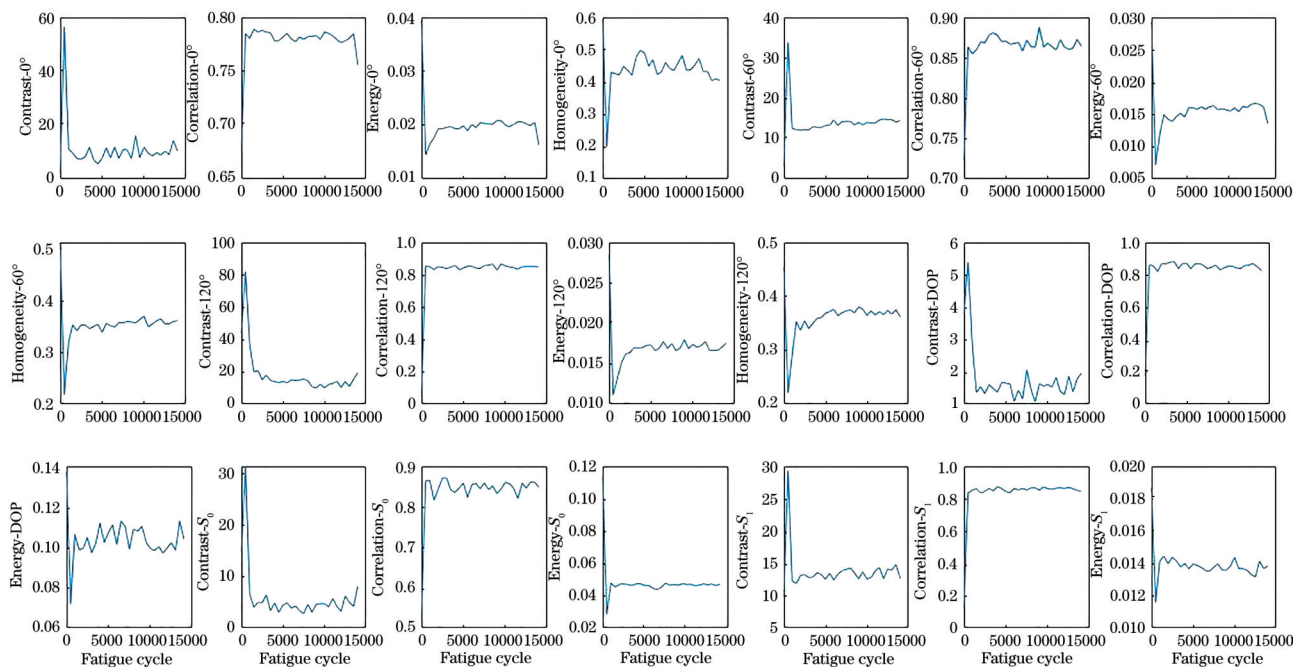


图 6 不同图像的 GLCM 纹理特征参数演化规律

Fig. 6 Evolution of GLCM texture feature parameters of different images

5 结 论

红外热像法是检测金属疲劳损伤状况有效的方法与途径,但是忽略了疲劳损伤过程中表面显微

结构对自发辐射的影响,不能从微观角度对疲劳损伤过程中的红外热像特征进行全面有效的解释。同时,金属疲劳是一个复杂的能量耗散过程,具有自发辐射的偏振特性,红外偏振成像能够在获取温

度场信息的同时突显目标的纹理信息。

在红外热像法的基础上引入偏振检测,从疲劳过程中金属材料的表面形貌变化出发,通过搭建疲劳实验平台和偏振热像采集平台,选取灰度共生矩阵作为描述工具提取图像纹理特征,分析热偏振图像纹理特征的演化规律:1)在热像检测的基础上融入偏振探测技术,综合利用金属试件在疲劳损伤过程中的红外偏振特征,可以提升红外热像法对金属构件疲劳损伤检测的解译能力;2)金属试件在疲劳损伤过程中的热偏振图像的纹理特征均呈现规律性变化。

参 考 文 献

- [1] Peng Z C. Research on methods for structural life prediction and time-dependent reliability analysis using cumulative fatigue damage theories[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
彭兆春. 基于疲劳损伤累积理论的结构寿命预测与可变可靠性分析方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [2] Sun J, Chen S Y, Qu Y P, et al. Review on stress corrosion and corrosion fatigue failure of centrifugal compressor impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(2): 217-225.
- [3] Fan J L, Guo X L, Wu C W. A new application of the infrared thermography for fatigue evaluation and damage assessment[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44: 1-7.
- [4] Yao L J, Tong X Y, Lü S L. Fatigue damage model based on energy dissipation[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(5): 522-525.
姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 基于能量耗散的疲劳损伤模型[J]. 机械强度, 2004, 26(5): 522-525.
- [5] Li N, Tong X Y, Yao L J. Temperature response and the micrograph change of pure copper under low cycle fatigue[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2006, 24(5): 754-757.
李娜, 童小燕, 姚磊江. 纯铜低周疲劳中的温度响应与微观形貌变化[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(5): 754-757.
- [6] Yao L J, Li B, Tong X Y. Experimental study of the correlation between energy dissipation and surface microstructure evolution during fatigue[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(2): 225-228.
姚磊江, 李斌, 童小燕. 疲劳过程热耗散与表面微观结构演化相关性的试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(2): 225-228.
- [7] Wang X G, Crupi V, Jiang C, et al. Energy-based approach for fatigue life prediction of pure copper[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 104: 243-250.
- [8] Yi X B, Liang Z F, Shen J C, et al. Study on the 304 stainless steel fatigue performance based on the infrared thermal image microscopy observation technology[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2017, 44(5): 519-522, 575.
易湘斌, 梁泽芬, 沈建成, 等. 基于红外热像显微观测技术的 304 不锈钢疲劳性能研究[J]. 化工机械, 2017, 44(5): 519-522, 575.
- [9] Hwang S, An Y K, Kim J M, et al. Monitoring and instantaneous evaluation of fatigue crack using integrated passive and active laser thermography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 119: 9-17.
- [10] Gosar A, Nagode M. Energy dissipation under thermomechanical fatigue loading[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 43: 160-167.
- [11] Karuskevich M, Karuskevich O, Maslak T, et al. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 39: 116-121.
- [12] Tong X Y, Li H X, Yao L J, et al. Feature extraction and analysis of surface microscopic image of pure copper subjected low cycle fatigue[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(9): 1446-1450.
童小燕, 李洪旭, 姚磊江, 等. 纯铜低周疲劳表面显微形貌的特征提取与分析[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(9): 1446-1450.
- [13] Nunak T, Rakruangdet K, Nunak N, et al. Thermal image resolution on angular emissivity measurements using infrared thermography[C]// Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, March 18-20, 2015, Hong Kong, China. [S.l.:s.n.], 2015.
- [14] Wang F B, Yi L, Wang F, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surfaces based on diffuse reflection optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1129002.
汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1129002.
- [15] Chen W L, Wu J L, Xu W B, et al. Quantitative analysis based on infrared polarization characteristic of black body[J]. Journal of Infrared and Millimeter

- Waves, 2017, 36(6): 767-775.
陈伟力, 武敬力, 徐文斌, 等. 基于黑体红外偏振特性的定量分析探索[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(6): 767-775.
- [16] Chen W L, Wang S H, Jin W Q, et al. Research of infrared polarization characteristics based on polarization micro-surface theory[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, 33(5): 507-514.
陈伟力, 王淑华, 金伟其, 等. 基于偏振微面元理论的红外偏振特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(5): 507-514.
- [17] Yang M, Xu W B, Tian Y Z, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1511001.
杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1511001.
- [18] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1973, SMC-3(6): 610-621.
- [19] Wang Z Z. Research on the classification method of remote sensing images based on texture and spectral information fusion[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
王知鸞. 基于纹理及光谱信息融合的遥感图像分类方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [20] Wang F B, Sun F, Zhu D R, et al. Metal fatigue damage assessment based on polarized thermography [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1412002.
汪方斌, 孙凡, 朱达荣, 等. 一种基于偏振热像的金属疲劳损伤评估方法[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1412002.
- [21] Zhang Z, Liu X Y, Wang J L, et al. Division-of-time long-wave infrared high frame frequency polarization imaging experiment[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2019, 34(5): 508-514.
张哲, 刘欣悦, 王建立, 等. 分时型长波红外高帧频偏振成像实验研究[J]. 液晶与显示, 2019, 34(5): 508-514.
- [22] Zhu D R, Xu L, Wang F B, et al. Evolution of metal surface topography during fatigue[J]. Metals, 2017, 7(2): 66.