

一种基于偏振热像的金属疲劳损伤评估方法

汪方斌^{1,2,4*}, 孙凡^{1,2}, 朱达荣^{1,2,4}, 刘涛^{1,2,4}, 王雪^{1,2}, 王峰³

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技术重点实验室, 安徽 合肥 230601;

³偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

⁴工程机械智能制造安徽省教育厅重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 为克服红外热像法的不足,提出一种基于表面红外偏振热像特征的金属疲劳损伤评估方法。首先给出金属疲劳损伤评估偏振热成像的理论基础,然后通过实验说明疲劳损伤过程表面微观形貌的变化规律,再基于 Tsalis 熵进行目标图像分割并分析其特征,最后通过主成分分析进行特征选择并构建基于 BP(back propagation)神经网络的非线性预测模型。结果表明,模型训练、验证、测试结果与实际实验测量值具有较好的相关性,Q235 平板试件的拉-拉疲劳损伤预测平均误差小于 20%。

关键词 测量; 自发辐射; 偏振成像; 红外热像法; 金属疲劳损伤; 损伤评估

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1412002

Metal Fatigue Damage Assessment Based on Polarized Thermography

Wang Fangbin^{1,2,4*}, Sun Fan^{1,2}, Zhu Darong^{1,2,4}, Liu Tao^{1,2,4}, Wang Xue^{1,2}, Wang Feng³

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

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

³ Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China;

⁴ Anhui Education Department Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract To overcome the shortcomings of infrared thermography, a novel method of metal fatigue damage assessment based on the characteristics of surface infrared polarized thermal imaging is proposed in this paper. First, the theoretical basis of polarized thermal imaging for metal fatigue damage assessment is provided. Then, the change rule of surface micromorphology in the process of fatigue damage is experimentally explained. Next, the target image is segmented and analyzed using the Tsalis entropy algorithm. Finally, the feature selection is performed using principal component analysis and a nonlinear prediction model based on back propagation (BP) neural network is constructed. Experimental results show that during the process of metal fatigue damage, the results of model training, verification, and test have a good correlation with the actual experimental data, and the average prediction error of tension and tension fatigue damage for the specific test target Q235 plate is less than 20%.

Key words measurement; spontaneous emission; polarization imaging; infrared thermography; metal fatigue damage; damage assessment

OCIS codes 110.6820; 120.5410; 160.3900; 100.4993

1 引 言

疲劳失效是机械结构及零部件失效的主要形

式,宏观上没有明显的塑性变形且难以检测和预防,因而构件的疲劳破坏往往会造成巨大的经济损失甚至危及生命。传统的疲劳损伤检测方法通过对材

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-04-02; 录用日期: 2020-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61871002, 51805003)、偏振光成像探测技术安徽省重点实验室开放基金(2018-KFJJ-03)、安徽省自然科学基金(1808085ME125)、安徽省教育厅高校自然科学重大项目(KJ2017ZD42)、安徽省重点研究与开发计划项目(1804a09020009)

* E-mail: wangfb@ahjzu.edu.cn

料、设备与构件的相关部位进行检测,可以有效地发现已发展成形的宏观缺陷或大部分微观缺陷,但需要花费大量时间和财力,且对于机械结构中的早期损伤难以做到有效的诊断和评价^[1]。

研究表明,金属疲劳损伤是一个复杂的能量耗散过程^[2]。在此过程中,金属材料接收输入的机械能,引起不可恢复的非弹性形变并改变材料内部的缺陷数量与分布,使内摩擦和位错运动引起的原子振荡加剧而向周围环境中耗散能量,表现为疲劳生热现象,在宏观上表现为材料表面温度的变化。因此,近年来基于温度场演化特征的材料静力学/疲劳和失效机理的研究得到快速发展。如:樊俊铃^[3]通过宏微观力学和连续热力学理论,推导了疲劳能量耗散计算方法,结合局部热扩散方程,建立了物理意义明确的疲劳极限快速评估方法。朱达荣等^[4]研究了低周疲劳过程热力学熵产率与累积熵产变化特征,在此基础上,建立了基于热力学熵的金属低周疲劳寿命预测模型。Wang 等^[5]以循环塑性区能量耗散率作为疲劳裂纹扩展的指标,通过对疲劳裂纹尖端区耗散过程的描述,提出了一种局部分析疲劳裂纹扩展速率的方法。de Finis 等^[6]考虑疲劳试验中涉及的所有热源,开发了一种新的热成像数据分析程序,提出了一种估计疲劳极限的新技术。这些研究采用实时、无损、非接触式的红外热像技术来监测材料疲劳的物理过程和热耗散,建立了多种疲劳损伤准则和寿命预测模型,从疲劳损伤和能量转化的角度快速地评定材料的疲劳性能,为降低疲劳试验成本提供了新的思路^[7-8]。红外热像仪测温的瓶颈在于其精确性^[9],高精度测温目前还存在较多困难,尤其是需要记录非常微小的温度变化时。原因如下:

1) 疲劳热像法主要关注材料或构件表面的能量耗散。红外图像在生成和传输过程中,会不可避免地受到热像仪成像特点及环境干扰等因素引起的随机噪声、起伏背景干扰与热扩散效应的影响,导致图像模糊、边缘扩散、可视程度降低^[10];

2) 材料加工的局限性以及环境腐蚀、锈蚀等均可能给红外热像带来很大的噪声,增加了通过红外热像进行金属工件缺陷检测的难度^[11];

3) 温度场信号并不是材料的固有特性,易受材料本身的热扩散性质和热边界条件的影响。目前用于疲劳损伤观测的红外热像仪在监测实际表面温度时,需先设定好物体的实际表面发射率并假定保持不变,而实际的目标表面发射率与表面显微结构有关且在疲劳损伤过程中不断变化,故通过疲劳温升

信息直接研究材料的疲劳性能往往存在争议^[8];

4) 采集的温度数据是试件上某个区域内的平均温度,直接用于估算材料的疲劳极限时,没有考虑疲劳损伤过程中表面微观形貌改变,表面微观形貌改变会造成表面发射率变化,进而可能会引入虚假的温度不均匀性,导致一些可疑的结果^[12-15]。

从物理上来讲,能量耗散属于自发辐射,自发辐射的本质是电磁波,电场和磁场相互正交,并且垂直于自发辐射的传播方向,具有偏振特性^[16]。研究表明,观测目标的自发辐射偏振信息与探测器观测角有关,从多个不同方向进行偏振成像,不仅可以获得自发辐射的强度信息(通过辐射定标可转换为温度信息),而且通过解析可以得到目标材料性质、表面粗糙度、温度、辐射率等,从而可将目标识别从表面结构上升到空间结构^[17-18]。理论研究与实验已经证实,相对传统红外光强成像,红外偏振成像可以显著提高目标之间的对比度、减小复杂环境影响、凸显物体轮廓和物体细节、提升红外图像质量^[19]。相对金属材料而言,由于表面具有光滑性,偏振度较大,偏振测量仪器无需准确辐射量校准就可以达到相当高的精度^[20-25]。

基于上述分析,本文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,提出一种新的基于表面红外偏振热像特征的金属疲劳损伤评估方法。以 Q235 低碳钢平板试件疲劳损伤为研究对象,通过搭建金属红外偏振热像疲劳损伤检测实验系统,分析金属疲劳过程中表面形貌及温度特性的变化,给出金属疲劳过程中表面热红外偏振特征的提取方法,利用主成分分析(PCA)选择图像均值及方差表征金属疲劳损伤过程中红外偏振热像的特征量,建立了基于 BP(back propagation)神经网络非线性系统的预测模型,并对金属构件的疲劳损伤程度进行评估。

2 理论基础

金属疲劳损伤过程将机械能转变为热能、储能、弹塑性应变能和滞弹性内耗等其他形式的能量,其中绝大部分能量是以热能进行释放的,宏观表现为材料或构件表面温度场的变化。

根据广义胡克定律,对于均匀的弹性体,热应力和应变之间的关系满足^[26]

$$\Delta \epsilon_{ii} = \frac{1-2\nu}{E} \Delta \sigma_{ii} + 3\alpha \Delta T, \quad (1)$$

式中: $\Delta \epsilon_{ii} = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$ 为主应变的变化; $\Delta \sigma_{ii} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ 为主应力的变化; α 为线膨胀系数; ΔT

为温度变化; E 为弹性模量, ν 为泊松比。

对绝热、可逆的弹性体而言,其热力学方程有

$$\Delta T = \frac{3\alpha TK \Delta \epsilon_{ii}}{\rho C_V}, \quad (2)$$

式中: T 为绝对温度; C_V 为等容比热容; ρ 为密度; K 为体积模量。由等容比热容和等压比热容 C_p 之间的关系可以得出

$$\Delta T = -\frac{\alpha T}{\rho C_p} \Delta \sigma_{ii}. \quad (3)$$

(3)式表明,在机械载荷的作用下,能量耗散使金属材料表面温度变化,温度变化与应力/应变有关。因此,通过红外热像法监测金属材料表面温度可以实现材料或构件疲劳性能参数的监测。

研究表明,疲劳损伤过程中,金属材料的阻尼系数随着疲劳载荷反转的次数变化而变化,反映了在循环应力作用下以温度形式向外耗散的耗散能,且满足^[27]

$$\delta = \frac{W_p}{2W}, \quad (4)$$

式中: W_p 是单位体积的耗散能; W 为单位体积储存的最大能量。

根据振动学理论,在自由振动过程中,金属材料阻尼与连续两点的振动峰值 A_1 、 A_2 的衰减比对数成正比^[28-29],即

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2}. \quad (5)$$

金属材料在循环加载过程中,由于位错滑移而在金属表面产生随机分布的表面起伏。本研究将连续两个表面起伏高度看成是自由振动的两个连续峰值,(4)式和(5)式表明,表面粗糙度的演化反映了疲劳损伤过程中塑性应变能的变化,反映了疲劳

损伤程度。

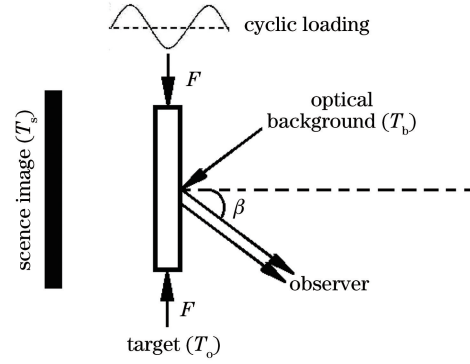


图1 疲劳损伤偏振热成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarized thermal imaging for fatigue damage

假设在疲劳损伤过程中,光学背景温度为 T_b , 场景温度为 T_s , 所发出的热辐射为非偏振光,金属材料的表面温度为 T_o , 疲劳损伤偏振热成像如图1所示,则相机沿目标表面法向 β 角观测获得热辐射的垂直偏振分量 L^s 和平行偏振分量 L^p 分别为

$$\begin{cases} L^s(\beta) = P(T_o)\epsilon_s(\beta) + P(T_b)r_s(\beta) + \frac{1}{2}P(T_s) \\ L^p(\beta) = P(T_o)\epsilon_p(\beta) + P(T_b)r_p(\beta) + \frac{1}{2}P(T_s) \end{cases}, \quad (6)$$

式中: ϵ_s 、 r_s 与 ϵ_p 、 r_p 分别是热辐射发射率、反射率的垂直分量和平行分量; $P(T)$ 是温度为 T 时 Planck 黑体辐射。考虑到金属物体透射率非常小且吸收的能量全部自发辐射,根据 Kirchhoff 定律,发射率与反射率满足

$$\begin{cases} \epsilon_s(\beta) = 1 - r_s(\beta) \\ \epsilon_p(\beta) = 1 - r_p(\beta) \end{cases}, \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式可得

$$\begin{cases} L^s(\beta) = P(T_o) + [1 - \epsilon_s(\beta)][P(T_b) - P(T_o)] + \frac{1}{2}P(T_s) \\ L^p(\beta) = P(T_o) + [1 - \epsilon_p(\beta)][P(T_b) - P(T_o)] + \frac{1}{2}P(T_s) \end{cases}. \quad (8)$$

传统热像仪监测疲劳损伤试件时,通常预设 $\epsilon_s = \epsilon_p = \epsilon$, 接收的辐射量为

$$L_t = L^s(\beta) + L^p(\beta) = P(T_o) + [1 - \epsilon(\beta)][P(T_b) - P(T_o)] + P(T_s). \quad (9)$$

当采用偏振相机进行采集时,根据偏振度的定义,有

$$D_{op} = \frac{|L^s(\beta) - L^p(\beta)|}{L^s(\beta) + L^p(\beta)} = \frac{|[\epsilon_s(\beta) - \epsilon_p(\beta)][P(T_b) - P(T_o)]|}{P(T_o) + [2 - \epsilon_s(\beta) - \epsilon_p(\beta)][P(T_b) - P(T_o)] + P(T_s)}. \quad (10)$$

注意到,金属材料疲劳损伤的本质是在交变载荷的作用下,分切应力最大的滑移面上滑移阻力最

小的位错首先开始滑移,随着循环次数的逐渐增加,塑性变形增大,在部分晶粒的局部区域出现滑移线,

经过多次应力循环后,在表面形成驻留滑移带。滑移带表面产生“挤出脊”和“压入沟”,使材料表面粗糙化^[30]。粗糙化的结果,增大了发射面积,改变了金属材料的发射率^[31]。因此,通过偏振成像不仅能够获得与传统热像仪测量温度对应的辐射量,还可以得到目标材质、辐射率等更多信息,能够增强红外图像质量、减小复杂环境的影响。

3 疲劳损伤实验与偏振热像获取

3.1 红外偏振成像的原理

假设目标自发辐射 Stokes 矢量为 $S_{in} = [S_0, S_1, S_2, S_3]$, 其中, S_0 表示自发辐射的强度, S_1 为水平方向的线偏振分量, S_2 为 45° 方向的线偏振分量, S_3 与圆偏振有关, 在实际测量中很小, 可以忽略。则该自发辐射透过偏振方位角为 α 的偏振成像系统获得的图像 $I(\alpha)$ 为

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 2\alpha + S_2 \sin 2\alpha)。 \quad (11)$$

当 α 等于 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 时, 计算的 Stokes 参量为

$$\begin{cases} S_0 = \frac{2}{3}[I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \\ S_1 = \frac{4}{3}\left[I(0^\circ) - \frac{1}{2}I(60^\circ) - \frac{1}{2}I(120^\circ)\right], \\ S_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}[I(60^\circ) - I(120^\circ)] \end{cases}, \quad (12)$$

相应地, 自发辐射的偏振度 P 和偏振角 θ 为

$$P = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} / S_0, \theta = \frac{1}{2} \arctan(S_1 / S_2)。 \quad (13)$$

3.2 实验设备与实验材料

选取电液伺服疲劳试验机(长春机械院 SDS-200)作为实验系统, 采用红外偏振相机(PolarCamera-IR-640)进行偏振热像观测, 采用 3D 轮廓测量仪(基恩士 VR-3000)对表面微观形貌进行观测。SDS-200 疲劳试验机最大负荷为 ± 200 kN, 最大位移为 ± 75 mm, 可用于较大载荷疲劳监测以及静态测试。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

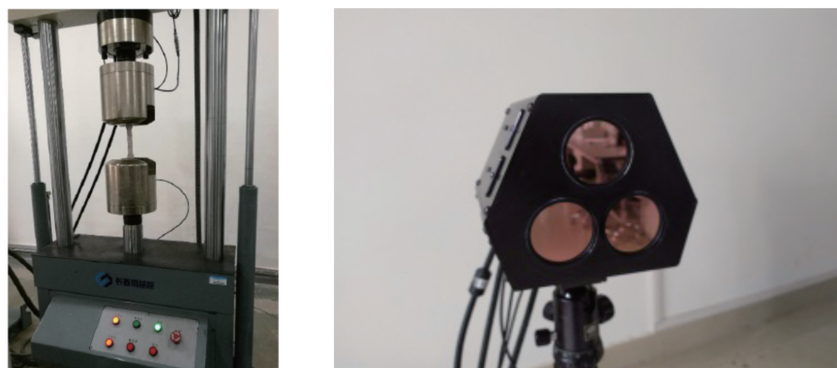


图 2 疲劳试验机(左)与红外偏振相机(右)

Fig. 2 Fatigue testing machine (left) and infrared polarization camera (right)

三个偏振方向的图像进行实时配准校正, 对偏振 Stokes 进行实时计算并显示。

试样材料为 Q235 碳素结构钢(GB/T 3075-2008), 屈服值在 235 MPa 左右, 含碳量适中, 力学性能好, 强度、塑性和焊接性能可以得到较好的配合, 用途非常广泛。试验采用的 Q235 试样在疲劳试验机上测得其屈服载荷为 35 kN。该试样由同一批次材料经激光切割加工所得, 试样的几何尺寸见图 3。

对材料试样所含成分进行分析(innov x-5000 荧光光谱仪), 得到材料所含元素的质量分数如表 1 所示。通过拉伸试验获得材料的屈服强度为 300 MPa、抗拉强度为 415 MPa。

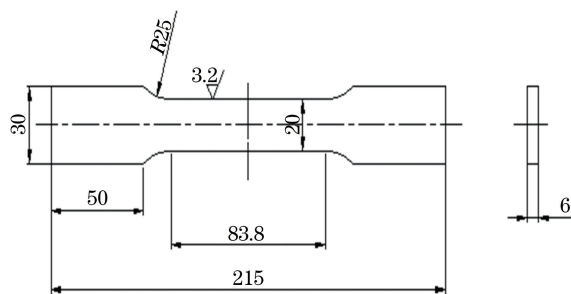


图 3 试样参数(单位: mm)

Fig. 3 Specimen parameters (unit: mm)

表 1 Q235 化学成分参数

Table 1 Chemical composition of Q235

C	Si	Mn	Cr	Co	S	P	Fe
0.220	0.230	0.650	0.044	0.081	0.045	0.040	98.73

3.3 实验过程

试验前,将试样两侧表面用砂纸轴向打磨抛光并进行发黑处理以提高表面发射率。实验分成两组进行,一组用于测量疲劳过程表面微观形貌的变化,一组用于测量疲劳过程中的偏振热像。

测量疲劳过程表面微观形貌时,将试样固定在电液伺服疲劳试验机上,试件下端固定,上端承受拉伸载荷。施加频率为 10 Hz、幅值为 23.1 kN、均值为 18.9 kN 的正弦恒应变幅拉-拉疲劳载荷,利用试验机自带的计数器记录疲劳周次。达到一定周次时将其卸下并利用三维(3D)轮廓测量仪测量其表面形貌,记录不同疲劳周次下的试样表面高度信息,进而提取表面三维形貌。相同实验共做 4 次。

测量疲劳过程偏振热像时,将试样固定在电液伺服疲劳试验机上,试件下端固定,上端承受拉伸载荷。施加频率为 10 Hz、幅值为 23.1 kN、均值为 18.9 kN 的正弦恒应变幅拉-拉疲劳载荷,利用试验

机自带的计数器记录疲劳周次。在试样前相应角度(观测角 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$)处架设红外偏振成像系统,镜头距试样表面 1 m。达到一定周次时进行一次红外偏振成像,直至试件断裂。相同实验共做 10 次。

为减小环境因素可能造成的干扰,实验过程在暗室内进行,且保持室内温度不变。偏振成像时,将成像目标与成像系统作为整体利用黑板对外界进行隔离。

4 实验结果与讨论

4.1 表面微观形貌演化

为直观地反映疲劳损伤过程中试样表面形貌变化,依据 3D 轮廓测量仪获取的试样表面高度信息,绘制了一根试件在不同疲劳循环周次直至断裂时的表面三维形貌,如图 4 所示。由图中可见,疲劳损伤初始阶段表面凸出峰、谷较少,随着循环次数的增加,表面峰、谷密度逐渐增加,峰、谷值也相应增大,试样表面侵入、挤出效应明显。

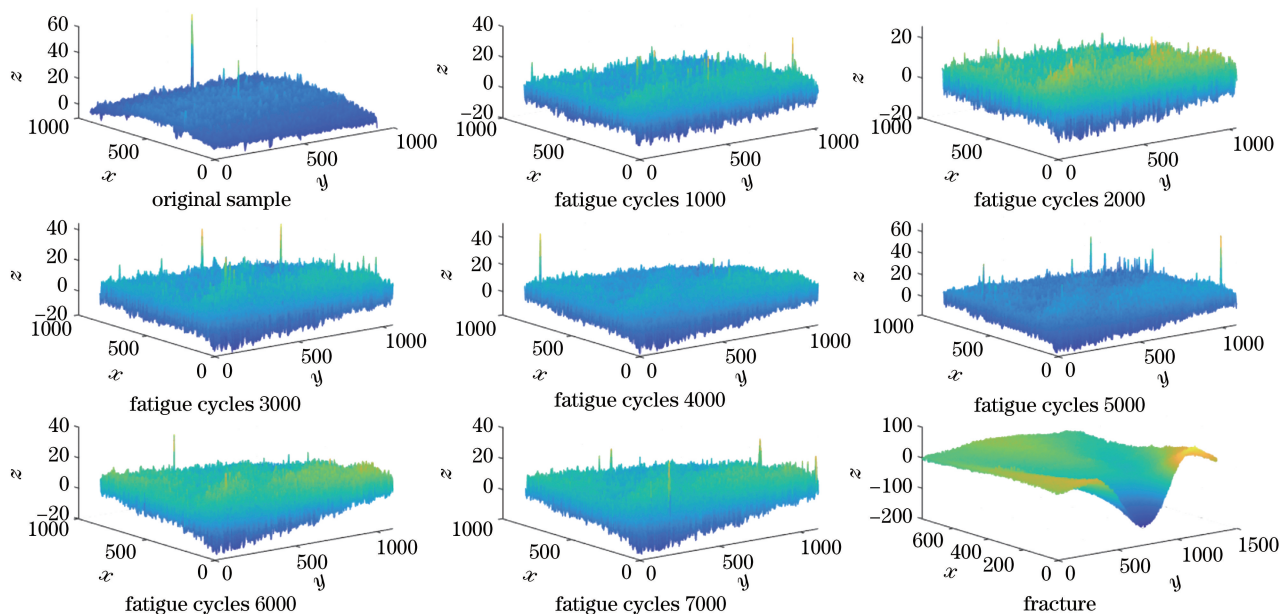


图 4 金属试件疲劳过程中表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of metal specimen during fatigue

由图 4 和图 5 可见,Q235 平板试件在不同疲劳周次下表面微观形貌不断演化,粗糙度、相关长度随着疲劳周次的改变而改变,从粗糙度来看,变化趋势与文献[27]的一致。

4.2 热像偏振特征提取

通过偏振成像,获得不同疲劳周次时 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 三个偏振方位角的疲劳损伤自发辐射光强图像 $I(0^\circ), I(60^\circ), I(120^\circ)$,然后通过(8)、(9)式解析出 Stokes 参量 S_0, S_1, S_2 图像及偏振度 D_{OP} 偏振角

A_{OP} 图像,如图 6~7 所示。

为进一步显示自发辐射的特征,基于 Tsalis 熵方法分割图 6 中所示的试件区域,并以试件区域各图像的均值 $\bar{I}(0^\circ), \bar{I}(60^\circ), \bar{I}(120^\circ), \bar{S}_0, \bar{S}_1, \bar{S}_2, \bar{P}, \bar{\theta}$ 表征试件整体红外偏振特征量,同时以试件区域方差 $I^2(0^\circ), I^2(60^\circ), I^2(120^\circ), S_0^2, S_1^2, S_2^2, P^2, \theta^2$ 表征试件局部红外偏振特征与整体的差异,计算过程如图 8 所示,各特征量疲劳过程中变化情况如图 9 所示。

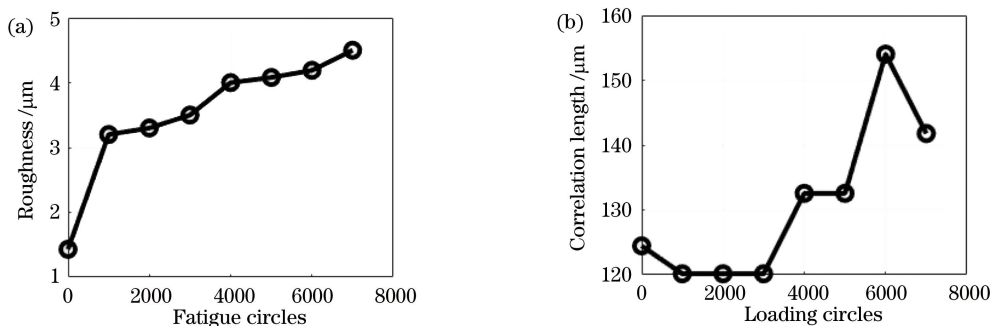


图 5 疲劳过程(断裂前)表面粗糙度、相关长度变化。(a)表面粗糙度;(b)相关长度
Fig. 5 Evolution of roughness and correlation length during fatigue (before fracture).

(a) Roughness; (b) correlation length

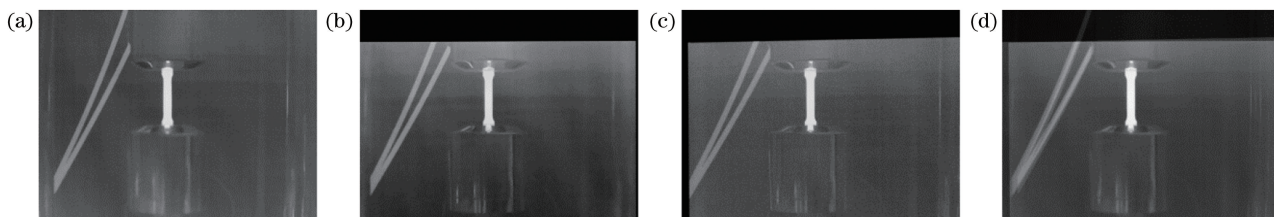


图 6 自发辐射偏振方位角图像及偏振解析图像。(a) $I(0^\circ)$ 图像;(b) $I(60^\circ)$ 图像;(c) $I(120^\circ)$ 图像;(d) S_0 图像
Fig. 6 Polarized azimuth images and S_0 image of spontaneous emission after registration.

(a) $I(0^\circ)$; (b) $I(60^\circ)$; (c) $I(120^\circ)$; (d) S_0

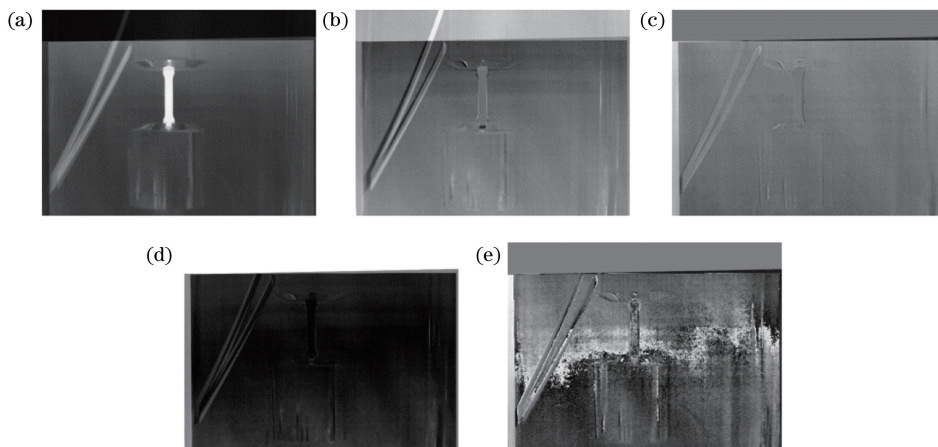


图 7 解析后 Stokes 参量和偏振图像。(a) S_0 图像;(b) S_1 图像;(c) S_2 图像;(d) D_{OP} 图像;(e) A_{OP} 图像

Fig. 7 Stokes parameters and polarization images after analysis. (a) S_0 ; (b) S_1 ; (c) S_2 ; (d) D_{OP} ; (e) A_{OP}

从图 9 可以看出,可表征温度场信息的自发辐射光强图像 $I(0^\circ)$ 、 $I(60^\circ)$ 、 $I(120^\circ)$ 以及 Stokes 参数 S_0 呈现出相似的变化规律,这一规律与疲劳过程中的试件温度变化有着紧密的联系,与试件表面温升曲线的变化规律相符合。偏振度 P 作为最本质的偏振信息,其曲线变化可以较好地表征试件表面形貌的演变。疲劳过程中,偏振度曲线不断变化。试件在疲劳损伤初始阶段,表面较为光滑、粗糙度小,偏振度大;随着疲劳演化,粗糙度增大,表面逐渐粗糙,偏振度减小;这与红外偏振的双向反射分布函

数(BRDF)模型相符合。在疲劳损伤前,试件表面微观形貌不规则,宏观表现为偏振角较小,随着疲劳实验的进行,由于表面侵入、挤出的作用,表面纹理呈现一定的规则性,因而偏振角 θ 增大到一定程度后基本保持不变。由偏振理论可知,Stokes 参量 S_1 、 S_2 包含了强度与偏振度、偏振角的多维信息。

4.3 主成分分析

自发辐射偏振热像的特征量较多,每个特征均从不同角度反映了疲劳损伤的程度。考虑到各特征表现的度各不相同,为减少计算量、降低信息冗

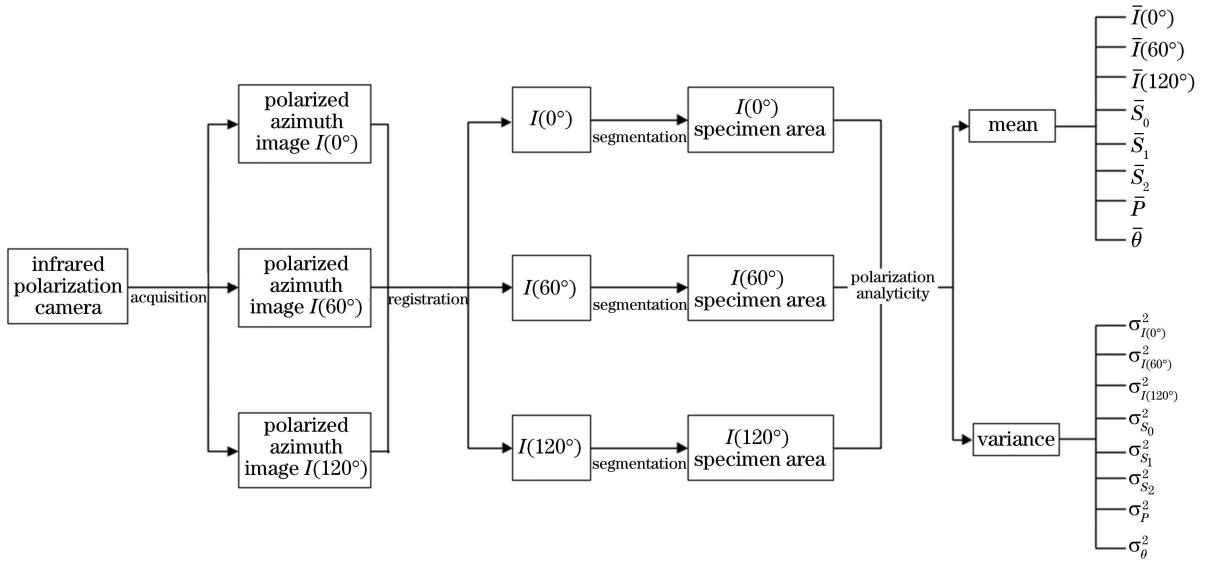


图 8 红外偏振特征提取流程

Fig. 8 Infrared polarization feature extraction process

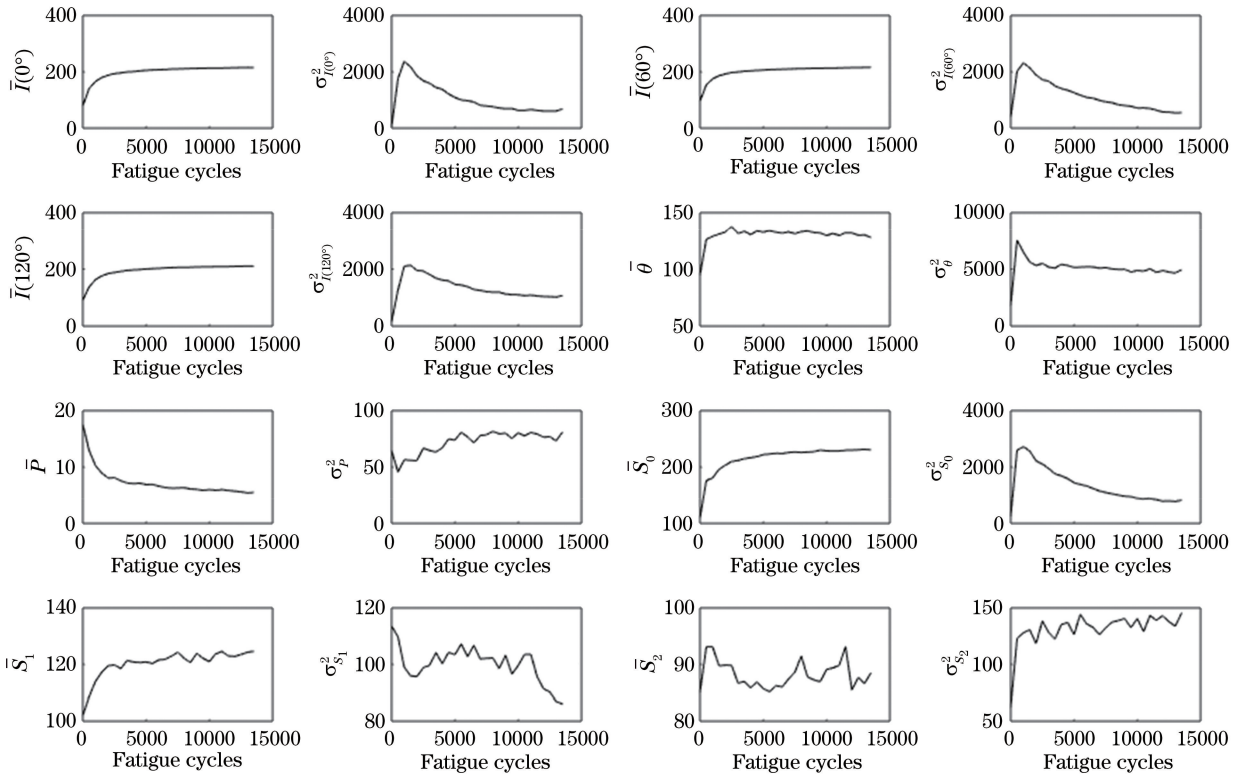


图 9 金属试件疲劳过程特征变化

Fig. 9 Feature changes of metal specimen during fatigue

余,本文首先对红外偏振特征量进行主成分分析,提取与试件疲劳损伤程度更为密切的特征。

设有 n 个样本以及 p 个评价指标 \mathbf{X} ,其规范化矩阵为 \mathbf{Z} ,相关系数矩阵为 \mathbf{R} ,其中: \mathbf{X} 的矩阵元素为 $x_{ij} (i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,p)$; \mathbf{Z} 的元素 $z_{ij} =$

$$(x_{ij} - \bar{x}_j) / \bar{S}_j, \quad \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}, \quad \bar{S}_j =$$

$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}$; \mathbf{R} 的元素 r_{ij} 反映指标 \mathbf{Z}_i 与 \mathbf{Z}_j 的相关程度。求解相关矩阵 \mathbf{R} 的特征值 λ , 其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_q \geq 0$, 特征值对应的规范正交特征向量为 $\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_q)$, 则 q 个主成分为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{q1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{q2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1q} & a_{2q} & \cdots & a_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

特征值 λ_i 即为该主成分的方差,反映了主成分在描述被评价对象时所起的作用大小。定义主成分 y_i 的方差对总方差的贡献率为

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j}, \quad (15)$$

定义前 m 个主成分的累积方差贡献率为

表 2 特征量方差贡献率及累计方差贡献率

Table 2 Contribution rates of feature quantity variance and cumulative variance

Parameter	\bar{S}_0	S_0^2	\bar{P}	P^2	$\bar{\theta}$	θ^2	$\bar{I}(0^\circ)$	$\bar{I}^2(0^\circ)$
$\omega_i/\%$	32.50	27.29	11.23	7.37	5.30	4.54	4.23	3.01
$\rho/\%$	32.50	59.79	71.02	78.39	83.69	88.23	92.46	95.47
Parameter	$\bar{I}(60^\circ)$	$I^2(60^\circ)$	$\bar{I}(120^\circ)$	$I^2(120^\circ)$	\bar{S}_1	S_1^2	\bar{S}_2	S_2^2
$\omega_i/\%$	1.76	1.23	0.87	0.31	0.17	0.09	0.06	0.04
$\rho/\%$	97.23	98.46	99.33	99.64	99.81	99.90	99.96	100

BP 是一种单向传播的多层前向网络,包括输入层、隐含层和输出层,通过误差反向传播算法进行实现,其具体实现过程是:先依次计算隐含层输出 $H_j = g(\sum_{i=1}^n \omega_{ij} - \alpha_j)$ 和输出层输出 $f_k = \sum_{j=1}^l H_j \omega_{jk} - b_k$,再根据输出值和真实值的误差更新网络权值和阈值,即

$$\begin{cases} \omega_{ij} = \omega_{ij} + \mu H_j (1 - H_j) x_i \sum_{k=1}^m \omega_{jk} e_k \\ \omega_{jk} = \omega_{jk} + \mu H_j e_k \\ \alpha_j = \alpha_j + \mu H_j (1 - H_j) \sum_{k=1}^m \omega_{jk} e_k \\ b_k = b_k + e_k \end{cases}, \quad (17)$$

式中: l, m, n 为隐含层、输出层、输入层节点数; g 是隐含层到输出层神经元之间的传递函数; $(\omega_{ij}, \alpha_j), (\omega_{jk}, b_k)$ 分别是隐含层、输出层的权值和阈值; μ 为学习率; e_k 为预测结果误差。为了避免陷入死点而难以得到最优值及可能因训练次数而降低收敛速率等问题,将隐含层、输出层激活函数选定为双曲正切函数 $f(\mu) = \frac{2}{1 + \exp(-2u)} - 1$ 和对数函数 $f(\mu) = \frac{1}{1 + \exp(-u)}$ 。网络的训练精度通过实验来确定。

$$\rho = \sum_i^m \lambda_i / \sum_j^n \lambda_j. \quad (16)$$

为达到降维目的,取累积方差贡献率 ρ 达到 70%~90% 的前 m 个主成分取代原来的 p 个指标。

实验过程中采集样本数量 $n = 10$,提取特征数量 $p = 16$,对这 16 个特征量进行主成分分析,各特征量方差贡献率 ω_i 及累计方差贡献率见表 2。

4.4 非线性预测模型

本文以主成分分析提取的特征作为输入构建基于 BP 神经网络的非线性模型,进行疲劳损伤程度的预测。

在本文中,选取方差贡献率前 8 个特征量 $\bar{S}_0, S_0^2, \bar{P}, P^2, \bar{\theta}, \theta^2, \bar{I}(0^\circ), I^2(0^\circ)$ 作为搭建 BP 神经网络的输入特征量($\rho = 95.47\%$)。考虑到金属试件最终断裂时的疲劳周次并不固定,引入损伤因子 D 对损伤进行量化^[8]。设金属试件破坏时循环加载总次数为 d ,等应力幅加载,取任一循环次数 d_0 时,其损伤因子定义为 $D_0 = d_0/d$,从而将试件的疲劳周次归一化到 0~1,本文以损伤因子 D 作为预测网络输出。

4.5 疲劳损伤预测

以 Matlab2014a 为平台搭建 BP 网络,取 $l = 8, m = 1, n = 8$,隐含层神经元传递函数为 tansig,输出层神经元的传递函数为 trainlm。取 10 组金属试件疲劳损伤实验数据为样本,从样本中随机选取 70% 的数据作为训练数据,15% 作为验证数据,15% 作为测试数据。对网络进行训练得到训练、验证、测试结果如图 10 所示,图中 R 为线性相关系数。

由图 10 可以看出,模型训练、验证、测试结果说明预测输出与实验测量的疲劳周次具有较好的相关性。

为进一步说明模型预测的精度,另取 3 组同一批次试样进行试验,将记录好的数据输入到已训练好的预测模型。结果显示,该 3 组数据在不同疲劳周次时预测的平均误差为 16.3%、14.4%、19.2%。其中一根试件的预测结果如表 3 所示。

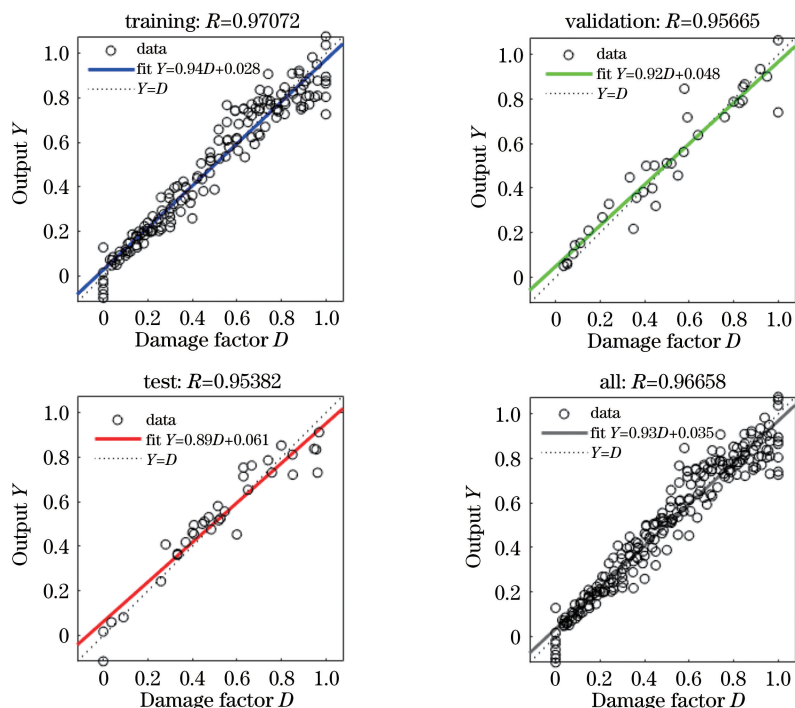


图 10 模型训练、验证、测试及整体数据集运行结果

Fig. 10 Results of model training, validation, test and all datasets

表 3 某根测试试件疲劳损伤预测结果

Table 3 Prediction results of fatigue damage for a tested piece

Fatigue cycles	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
Predication cycles	644	765	1641	2107	2372	2904	4169	4654	4949
Error /%	28.8	23.5	9.3	5.3	5.0	3.2	19.1	16.3	9.9
Fatigue cycles	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000
Predication cycles	4284	5387	4801	5253	7073	8229	10023	8983	7372
Error /%	14.3	2.0	19.9	19.1	1.0	9.7	25.2	5.6	18.0
Fatigue cycles	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500
Predication cycles	8383	8348	7524	9030	10233	11229	10283	10520	10184
Error /%	11.7	16.5	28.3	17.9	11.1	6.4	17.7	19.0	24.5

从表 3 可以看出,本文方法预测结果与实际疲劳周次之间的相对差值均在 30% 以内,这表明基于表面红外偏振热像特征的金属疲劳损伤寿命预测方法具有较好的有效性。

5 结 论

金属表面自发辐射具有偏振特性,利用偏振成像可以获得能够反映目标材料性质、表面纹理与粗糙度、温度场、辐射率等信息的偏振图像,从而将目标识别从表面上升到多维空间结构,提高了目标识别的精度。

本文首先给出金属疲劳损伤评估偏振热成像的

理论基础,从原理上说明了通过偏振成像改进热像法评估金属疲劳损伤的可能性。然后搭建了一个金属红外偏振热像疲劳损伤检测实验系统,并利用该系统观测了疲劳损伤过程表面粗糙度的变化和自发辐射的偏振图像。观测结果表明,疲劳损伤过程的表面微观形貌处于不断变化之中;自发辐射 Stokes 参量图像从不同角度给出了不同的信息,通过主成分分析选取目标区域图像均值和方差等 8 个参量作为特征量,构建基于 BP 神经网络非线性模型进行疲劳损伤状态预测。预测结果表明,模型训练、验证、测试结果与实际实验测量值具有较好的相关性,证明了本文方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Zhou Z G, Liu S M. Nondestructive evaluation of early stage plasticity and fatigue damage of aluminum alloy using nonlinear ultrasonic method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 41-46, 53. 周正干, 刘斯明. 铝合金初期塑性变形与疲劳损伤的非线性超声无损评价方法 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 41-46, 53.
- [2] Kaleta J, Blotny R, Harig H. Energy stored in a specimen under fatigue limit loading conditions [J]. Journal of Testing and Evaluation, 1990, 19(4): 326-333.
- [3] Fan J L. High cycle fatigue behavior evaluation of Q235 steel based on energy dissipation [J]. Chinese Journal of Mechanical, 2018, 54(6): 1-8. 樊俊铃. 基于能量耗散的 Q235 钢高周疲劳性能评估 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 1-8.
- [4] Zhu D R, Xu D J, Liu T, et al. Thermodynamic entropy characteristics analysis and life prediction model of metal low cycle fatigue processes [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(16): 1904-1910. 朱达荣, 徐德军, 刘涛, 等. 金属低周疲劳过程热力学熵特征分析及寿命预测模型 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(16): 1904-1910.
- [5] Wang X G, Ran H R, Jiang C, et al. An energy dissipation-based fatigue crack growth model [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 114: 167-176.
- [6] de Finis R, Palumbo D, Ancona F, et al. Fatigue limit evaluation of various martensitic stainless steels with new robust thermographic data analysis [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 74: 88-96.
- [7] Zhang Y L, Zhang H C, Zhao J X, et al. Review of non-destructive testing for remanufacturing of high-end equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 80-90. 张元良, 张洪潮, 赵嘉旭, 等. 高端机械装备再制造无损检测综述 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 80-90.
- [8] Liu T, Lü S P, Wang F B, et al. Feature extraction and entropy analysis of metal surface thermography in low cycle fatigue process [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(1): 23-29. 刘涛, 吕盛坪, 汪方斌, 等. 低周疲劳过程金属表面热像特征提取及其熵分析 [J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(1): 23-29.
- [9] Liu Y X, Zhang J, Du Y C. Infrared imaging temperature measurement for a shielded surface by diffuse medium [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091201. 刘永翔, 张健, 杜永成. 弥散介质遮蔽表面的红外成像测温方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091201.
- [10] Xie J, Yang X Y, Xu C H, et al. Infrared thermal images detecting surface defect of steel specimen based on morphological algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(3): 146-150. 谢静, 杨晓燕, 徐长航, 等. 基于形态学方法的工件表面缺陷红外热像检测技术 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2012, 36(3): 146-150.
- [11] Xie J, Xu C H, Chen G M. An infrared thermo image processing framework based on MRF model to detect surface defect on a metal element [J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(11): 20-23. 谢静, 徐长航, 陈国明. 基于 MRF 模型的金属工件红外热像表面缺陷检测 [J]. 石油矿场机械, 2012, 41(11): 20-23.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Yang R Z, He Y Z, Gao B, et al. Inductive pulsed phase thermography for reducing or enlarging the effect of surface emissivity variation [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(18): 184103.
- [15] Bai L B, Tian S L, Cheng Y H, et al. Reducing the effect of surface emissivity variation in eddy current pulsed thermography [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(4): 1137-1142.
- [16] Niu J Y, Li F M, Ma L X. The theoretical analysis of thermal infrared emission polarization and experimental verification [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(2): 88-93. 牛继勇, 李范鸣, 马利祥. 热红外自发辐射偏振特性分析以及验证实验 [J]. 光电工程, 2014, 41(2): 88-93.
- [17] 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.
- [18] Zhao Y Q, Ma W M, Li L L. Progress of infrared polarimetric imaging detection [J]. Flight Control & Detection, 2019(3): 77-84.

- 赵永强, 马位民, 李磊磊. 红外偏振成像进展[J]. 飞控与探测, 2019(3): 77-84.
- [19] Ma S, Bai T Z, Cao F M, et al. Infrared polarimetric scene simulation based on bidirectional reflectance distribution function model[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3357-3361.
马帅, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 基于双向反射分布函数模型的红外偏振仿真[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3357-3361.
- [20] Wang Q, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager[J]. Chinese Journal of Optics, 2018, 11(1): 92-99.
王琪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 分孔径红外偏振成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(1): 92-99.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Wang Z. Model of polarized thermal emission from rough metal surface[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 707-711.
汪震. 金属表面热红外偏振特性的模型研究[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 707-711.
- [24] Wang Z, Hong J, Ye S, et al. Study on effect of metal surface roughness on polarized thermal emission[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(8): 1500-1503.
汪震, 洪津, 叶松, 等. 金属表面粗糙度对热红外偏振特性影响研究[J]. 光子学报, 2007, 36(8): 1500-1503.
- [25] Wang Z, Qiao Y L, Hong J, et al. Thermal emission polarization of metal plate at different viewing angles [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(6): 49-52.
汪震, 乔延利, 洪津, 等. 金属板热红外偏振的方向特性研究[J]. 光电工程, 2007, 34(6): 49-52.
- [26] Fan J L, Guo X L, Wu C W. Fatigue characterisation based on quantitative infrared thermography [J]. Mechanics and Engineering, 2012, 34(6): 7-17.
樊俊铃, 郭杏林, 吴承伟. 疲劳特性的红外热像定量分析方法研究进展[J]. 力学与实践, 2012, 34(6): 7-17.
- [27] Mortezaei V, Haghshenas A, Khonsari M M, et al. Fatigue analysis of metals using damping parameter [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 91: 124-135.
- [28] Nowick A S, Berry B S. An elastic relaxation in crystalline solids[M]. New York: Academic Press, 1972.
- [29] Haghshenas A, Khonsari M M. Damage accumulation and crack initiation detection based on the evolution of surface roughness parameters [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 107: 130-144.
- [30] Man J, Obrtlík K, Polák J. Extrusions and intrusions in fatigued metals. Part 1. State of the art and history [J]. Philosophical Magazine, 2009, 89(16): 1295-1336.
- [31] Zhang D S, Yu Y, Chen L. Study of the emissivity feature on the rough surface [J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2006, 25(3): 74-76.
张大舜, 于洋, 陈亮. 粗糙表面的发射率特性研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2006, 25(3): 74-76.