

文章编号 1004-924X(2017)05-1135-07

焊接缺陷磁光成像动态检测与识别

高向东*, 蓝重洲, 陈子琴, 游德勇, 李国华
(广东工业大学机电工程学院, 广东广州 510006)

摘要: 为了实现焊接缺陷的自动检测, 研究一种交变磁场激励下焊缝表面及亚表面缺陷的磁光成像动态无损检测方法。分析了基于法拉第磁致旋光效应的焊接缺陷磁光成像机理, 并结合交变磁场原理推导出励磁变化与动态磁光成像的关系。探索低碳钢板的亚表面焊缝磁光成像特征试验, 验证了所提方法可用于检测焊缝亚表面的未熔合缺陷。最后对高强钢焊缝特征的动态磁光图像进行分析, 采用主成分分析法和支持向量机(PCA-SVM)模式识别方法建立了焊接缺陷分类模型。试验结果表明, 所提方法可以识别高强钢焊件中的焊缝特征(未熔透、裂纹、凹坑和无缺陷), 缺陷分类模型的整体识别率达到92.6%, 能够实现焊缝表面及亚表面缺陷的自动检测。

关键词: 动态磁光成像; 焊接缺陷; 交变磁场; 模式识别

中图分类号: TG441.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1135

Dynamic detection and recognition of welded defects based on magneto-optical imaging

GAO Xiang-dong*, LAN Chong-zhou, CHEN Zi-qin, YOU De-yong, LI Guo-hua

(School of Electromechanical Engineering,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)
* Corresponding author, E-mail: gaoxid666@126.com

Abstract: To realize automatic inspection of welded defects, a dynamic magneto-optical imaging non-destructive detection of weld surface and subsurface defects under alternating magnetic field excitation was researched. The welded defect magneto-optical imaging mechanism based on Faraday magneto optical effect was analyzed and employed to derive the relationship between excitation variation and dynamic magneto-optical imaging by combining with alternating magnetic field principle. The subsurface weld magneto-optical imaging feature test of low-carbon steel was investigated, verifying that the proposed method could be used to detect incomplete penetration defects of weld surface. Finally, dynamic magneto-optical image of high-strength steel weld feature was analyzed and weld defect classification model was constructed through Principal Component Analysis and Support Vector Machine (PCA-SVM) mode recognition method. The result shows that the proposed method can recognize weld features (penetration, crack, sag and perfectness) in high-strength steel weldment with the entire recognition rate of defect classification model reaches to 92.6%, subsequently the

收稿日期: 2017-01-02; 修订日期: 2017-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51675104); 广东省科技计划资助项目(No. 2016A010102015); 广州市科技计划资助项目(No. 201510010089)

automatic inspection of weld surface and subsurface defects can be realized.

Key words: dynamic magneto-optical imaging; welded defect; alternating magnetic field; pattern recognition

1 引言

焊接缺陷检测方法主要有超声检测、射线检测、磁粉探伤和涡流检测等,这些方法在保证焊接产品质量方面起到了重要的作用,但是它们也存在一定的局限性,例如射线检测对人体有害;超声和涡流检测难以对焊接缺陷直观成像;磁粉检测对工件表面要求严格,主要限于检测表面缺陷^[1-3]。基于法拉第磁致旋光效应的磁光成像技术作为一种新的可视化无损检测方法,用交变磁场激励使试件产生层状涡流,通过磁光成像探测由缺陷处涡流引起的法向磁场,获得缺陷的磁光图像^[4-5]。该技术已应用于飞机铆钉的缺陷检测,也被用于其它合成材料检测^[6-7]。近年来,磁光成像技术被用于微间隙焊缝的识别,可精确检测间隙小于 0.1 mm 的平板紧密对接焊缝^[8-9]。在磁场恒定的条件下,焊接缺陷的磁光图像可作为判别焊接质量的依据^[10]。然而在单一磁场激励下,所采集到的焊接缺陷磁光图像包含的信息有限,有时会丢失一些有用信息。因此,本文研究了一种其于焊缝特征动态磁光成像的焊接缺陷无损检测方法。用交变磁场励磁焊件,通过控制磁场频率和磁光成像采样频率,获取不同磁场方向下焊接缺陷的磁光图像,并应用信息更为丰富的动态磁光图像以及主成分分析法和支持向量机分类,建立了焊接缺陷分类模型。

2 磁光成像原理及试验装置

2.1 磁光成像

磁光成像基于法拉第磁旋光效应^[11-12],线性偏振光在介质中传播时,若在平行于光传播方向施加一个磁感应强度为 B 的磁场,则该线性偏振光的偏振角发生旋转。该偏振角 θ 称为法拉第磁旋角,可以表示为:

$$\theta = VBL, \quad (1)$$

其中:比例系数 V 为费尔德常数, L 为偏振光穿过介质的有效长度。

图 1 为焊缝磁光成像的工作原理。交变磁轭

在焊件上产生交替变化的磁场,通过磁光传感器采集焊缝的动态磁光图像。光源 LED 经过偏振器后生成线性偏振光,磁光探头由磁光介质及镜面涂层构成,入射线偏振光通过磁光介质后,经由镜面涂层反射再次通过磁光介质,检偏器检测到相应的光信号并由 CMOS 相机成像。在未施加外加磁场的情况下,检偏器检测到的光强为:

$$I = I_0 \cos^2(2\alpha), \quad (2)$$

在施加磁场的情况下,反射光的强度表示为:

$$I = I_0 \cos^2 2(\alpha + \theta), \quad (3)$$

其中: I_0 为入射线偏振光强度, α 为未施加外磁场下固有的线偏振光偏转角度, θ 为施加外磁场下的法拉第磁旋角。

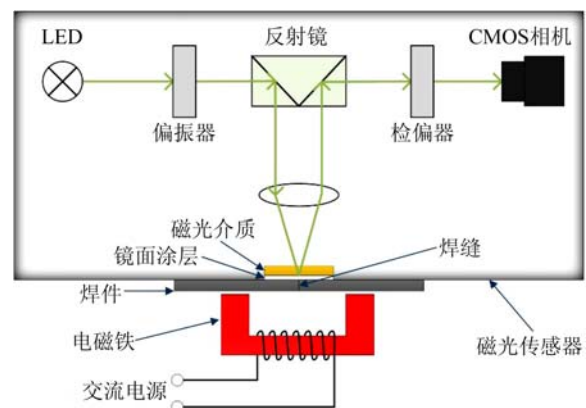


图 1 焊缝磁光成像原理图

Fig. 1 Schematic diagram of seam magneto-optical imaging

2.2 试验系统

图 2 为动态磁光成像试验装置示意图。试验装置主要由三轴运动平台、磁光传感器、交变磁铁、工控机和图像采集系统组成,通过控制三轴运动平台采集焊缝的动态磁光图像。磁光传感器的 CMOS 相机分辨率为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$,采样频率为 75 frame/s。施加的交变频率为 50 Hz,励磁电压的调节范围为 $0 \sim 200 \text{ V}$ 。根据采样定理,试验采集的动态磁光图像为欠采样,然而试验旨在采集代表不同方向的焊缝磁场分布的动态磁光图像。相比恒定磁场激励下的静态磁光图像,动态磁光图像包含了更多的焊缝磁特征。

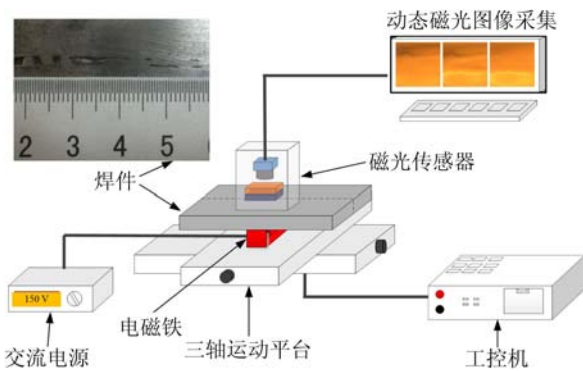


图 2 动态磁光成像系统

Fig. 2 Dynamic magneto-optical imaging system

3 动态磁光成像分析

3.1 交变磁场原理

交变磁场由交流电磁铁产生, t 时刻的励磁电压 $E(t)$ 与交变磁场强度 $H(t)$ 分别为:

$$E(t) = E_{\max} \sin(2\pi ft), \quad (4)$$

$$H(t) = H_{\max} \sin(2\pi ft), \quad (5)$$

其中: f 为交变磁场频率, E_{\max} 为励磁电压幅值, H_{\max} 为磁场强度幅值。如图 3 所示, 将交变磁场施加在导磁性材料上, 材料上形成的感应磁场为 $B(t)$, 通过调节 E_{\max} 可以得到相应的感应磁场强度。

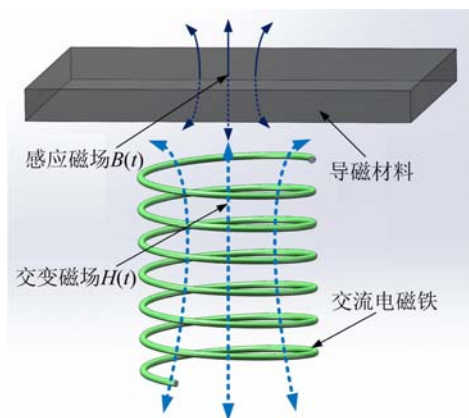


图 3 交变磁场示意图

Fig. 3 Schematic of alternating magnetic field

3.2 交变磁场成像分析

磁光薄膜的磁滞回线如图 4 所示, 在磁场强度为 $\pm 2 \text{ kA/m}$ 的情况下, 磁光薄膜的饱和磁化强度为 $\pm 2.5 \text{ mT}$, 对应的法拉第磁旋角为 $\pm 7.5^\circ$ 。其中, “+”号表示线性偏振光转过一个

方向为正的法拉第磁旋角, “-”号表示线性偏振光转过一个反方向的法拉第磁旋角。

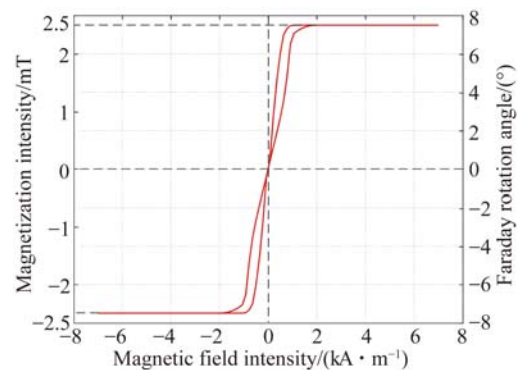


图 4 磁光薄膜的磁滞回线

Fig. 4 Hysteresis loop of magneto-optical film

图 5 为用磁光传感器对交流电磁铁一端磁轭成像的示意图, 励磁电压幅值为 50 V 。在两个励磁周期 (40 ms) 内磁光传感器可规律地采集到 3 帧动态磁光图像。图 5 中的 (1)、(2)、(3) 为两个励磁周期内采集的 3 帧图像, 由于磁场的变化, 磁光图像的对比度也随之变化。

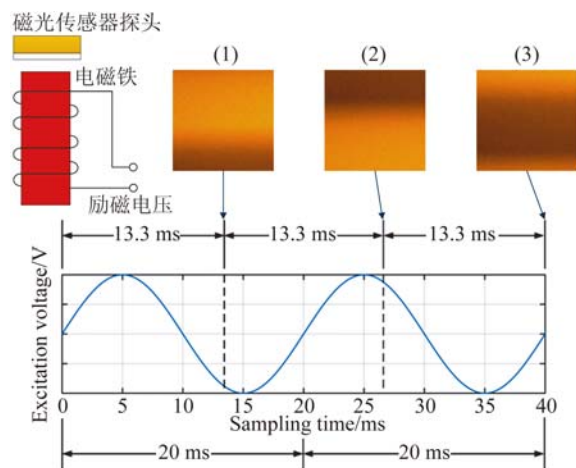


图 5 交变磁场激励下的动态磁光图像

Fig. 5 Dynamic MO images induced by alternating magnetic field

通过改变励磁电压幅值 E_{\max} , 采集不同励磁强度激励下的动态磁光图像, 进而得出交变磁场强度幅值 H_{\max} 同法拉第磁旋角 θ 的关系。图 6 为磁光传感器采集到的不同励磁电压下的单帧动态磁光图像, 其中还包括在恒定磁场激励下对应的磁光图像对比度, 渐变亮、渐变暗的图案分别代表正、负磁场激励下的成像效果。单帧动态磁光图

像在交变磁场的激励下,在一幅图像内能够呈现出正、负磁场激励下的成像效果。随着磁场强度的增大,磁光图像亮、暗特征变化越来越明显,直到励磁电压约为 90 V 时,图像对比度不再发生明显变化。此时磁光传感器所感应的法拉第磁旋角已达到饱和。

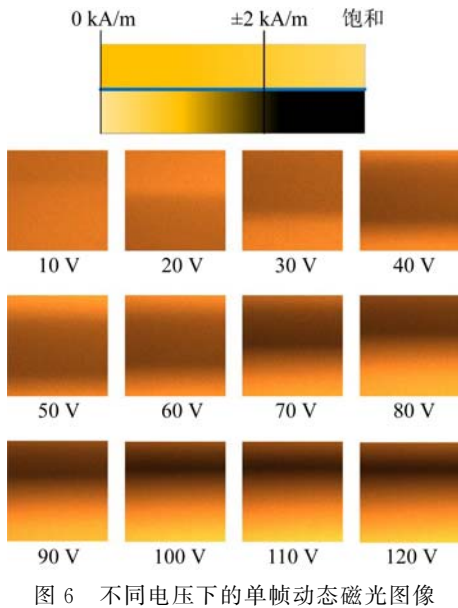


图 6 不同电压下的单帧动态磁光图像

Fig. 6 Single frame of dynamic MO images under different excitation voltages

3.3 亚表面焊缝的交变磁场成像

用交变磁场对导磁性材料励磁,试件上会产生感应磁场,感应磁场方向同施加的交变磁场方向一致。由于材料的导磁系数不同,磁感应强度发生相应变化。试件的磁感应强度定义为:

$$B = \mu_0 (H + M), \quad (6)$$

其中: H 为电磁铁磁轭的磁场强度, M 为试件的磁化强度, μ_0 为真空磁导率。随着试件厚度的增加,试件内部的磁感应强度会因为磁场强度的衰减而减小。根据磁荷定理可知,在距离电磁铁磁轭 r 处磁荷 q 的磁场强度 H_q 为^[13]:

$$H_q = \frac{q}{4\pi\mu_0 r^2}. \quad (7)$$

可见磁场强度 H 与磁极到试件的距离 r 的平方成反比。为了研究交变磁场激励下亚表面焊缝的成像情况,设计了如图 7 的试验。焊件由两块对称的 Q235 钢板两端点焊而成,其尺寸为 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。在焊缝两侧施加交变磁场,磁光传感器探头置于焊缝上方采集磁光图

像。磁光传感器可以在两个励磁周期(40 ms)内规律地采集到 3 帧动态磁光图像,励磁电压幅值设置为 150 V。图 7(a)为直接对焊缝成像的试验,图 7(b)为在一块钢板(2 mm 厚)间隔的情况下对焊缝的成像。图 7 右侧的(1)、(2)、(3)为采集的 3 帧焊缝动态磁光图像。随着厚度的增加,焊件的磁感应强度减小,磁光图像的焊缝特征变得模糊。

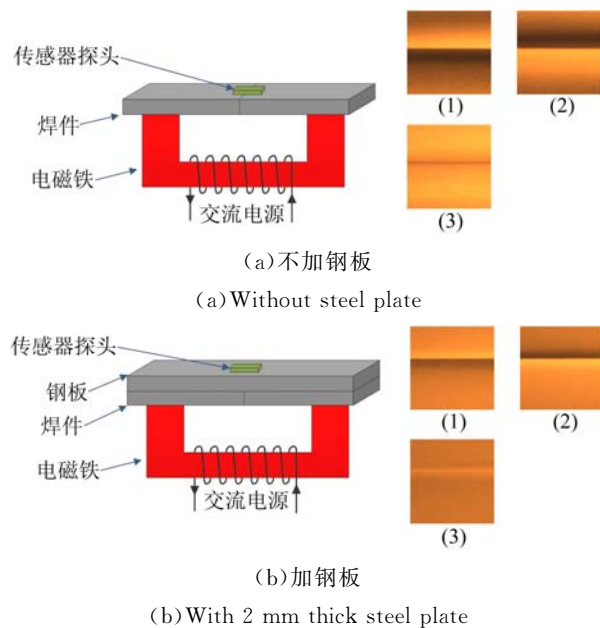


图 7 不同深度下的焊缝动态磁光成像

Fig. 7 Dynamic seam MO images under different layer thicknesses

4 焊接缺陷分类模型

4.1 焊接缺陷动态磁光图像分析

为进一步分析磁光图像,试验又选用尺寸为 $150 \text{ mm}(L) \times 50 \text{ mm}(W) \times 12 \text{ mm}(H)$ 的高强钢焊件作为研究对象。其焊接工艺为大功率激光对接焊,焊接时激光束的起始位置分别与焊缝有 2, -2 mm 的偏差,导致试验焊件出现未熔透、凹坑和裂纹等缺陷。焊件表面凹坑及裂纹的大小和形状可以测量。由试验可知,在励磁电压为 150 V 时焊件缺陷的动态磁光成像效果最佳。表 1 为采集到的焊接缺陷动态磁光图像,焊缝特征分别为无缺陷、裂纹、凹坑及未熔透。其中列出了未熔透的剖面图,右侧为采集的第 1, 2, 3 帧焊缝的动态磁光图像。

表 1 焊接缺陷动态磁光图像

Tab. 1 Dynamic MO images of welded defects

缺陷类型	实物图	第 1 帧	第 2 帧	第 3 帧
无缺陷				
裂纹				
凹坑				
未熔透				

试验采集到的每 3 帧动态磁光图像分别代表了在不同励磁方向下焊接缺陷的磁场分布特征。图 8 为焊接缺陷实物图、3 帧动态磁光图像及第 110 列的像素灰度分布情况。从灰度曲线图可以看出,3 帧磁光图像在一定程度上包含了缺陷特征。第 1 帧图像的灰度曲线在 0~100 pixel 处出现波峰,第 2 帧图像在该处的波动更明显,而第 3 帧图像的灰度分布比较均匀。提取焊接缺陷对应的每 3 帧动态磁光图像的所有列像素信息,作为焊接缺陷分类模型的样本数据。

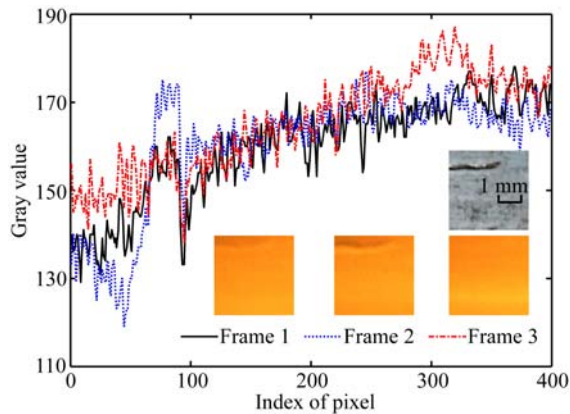


图 8 焊接缺陷 3 帧磁光图像第 110 列像素点灰度值
Fig. 8 Gray value of 110th column pixel in 3 frame MO images of welded defect

4.2 焊接缺陷特征提取

主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)通过线性变换将原始数据变换为一组各维度线性无关的表示,用于提取数据的主要特征分量^[14]。这里提取出 3 帧动态磁光图像的列像素,

用 PCA 降低列像素维度作为焊接缺陷分类模型的输入样本。采集的磁光图像尺寸为 400 pixel×400 pixel,用最近邻法将磁光图像降采样至 50 pixel×50 pixel,这样可在保留原图像特征信息的前提下提高 PCA 的处理速度。降采样后的图像可以表示为 50×50 的矩阵 Y 。首先将 Y 标准化处理得到标准化矩阵 \bar{Y} ,然后通过正交变换将 \bar{Y} 转换为另一矩阵:

$$P=U^T \bar{Y}, \quad (8)$$

其中: $P=[P_1, P_2, \dots, P_{50}]$, P_i 是 1×50 的列向量,为 \bar{Y} 的主成分; U 为一个 50×50 的正交矩阵,第 i 列向量 u_i 为对应的协方差矩阵 C 的第 i 个特征向量。该协方差矩阵可以表示为:

$$C=\frac{1}{50} \bar{Y}^T \bar{Y}, \quad (9)$$

其中: C 的第 i 个特征值 λ_i 和对应的特征向量 u_i 可以由以下公式求出:

$$C u_i = \lambda_i u_i, \quad i=1, 2, \dots, 50. \quad (10)$$

故第 i 个主成分(P_i)的贡献率可以表示为:

$$K_i = \frac{\lambda_i}{S} = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{50} \lambda_j} \times 100, \quad (11)$$

其中: S 为所有特征值的总和。图 9 为其中一幅降采样缺陷磁光图像的 PCA 贡献率比例分布。分析磁光图像的贡献率,发现前 3 个主成分(P_1, P_2, P_3)包含了 90% 以上的原始图像信息,故将它们作为磁光图像的输入样本。把每 3 帧动态磁光图像作为一个缺陷样本特征,缺陷输入参数为 $X(n)=[P_1(3n-2); P_2(3n-2); P_3(3n-2); P_1(3n-1); P_2(3n-1); P_3(3n-1); P_1(3n); P_2(3n); P_3(3n)]$, $n=1, 2, \dots, 500$ 。其中, $P_1(3n-2)$ 表示第 $3n-2$ 帧磁光图像的第一列主成分, $X(n)$ 为一个 450×1 的列向量。

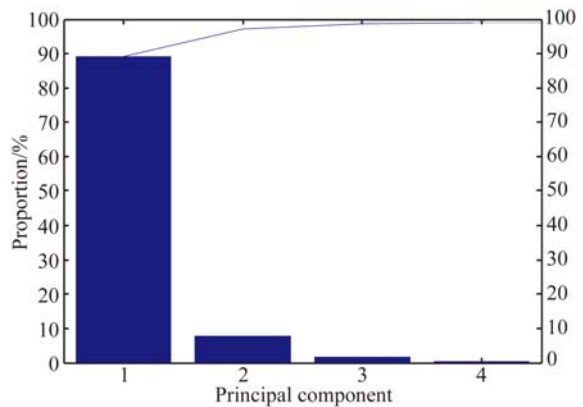


图 9 降维磁光图像的主成分贡献率
Fig. 9 PCs contribution rate of dimension reduced MO images

4.3 焊接缺陷分类

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是一种常用的机器学习方法,用于模式识别、分类及回归分析等^[15]。SVM 用于分类缺陷样本 $\mathbf{X}(n)$ 的决策函数定义为:

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^m \lambda(n) y(n) K(\mathbf{X}(n) \mathbf{X}) + b \right), \quad (12)$$

式中: $y(n)$ 为第 n 个训练样本 $\mathbf{X}(n)$ 的分类标签, $\lambda(n)$ 和 b 分别为拉格朗日系数和阈值, m 为训练样本数量。采用的核函数为径向基函数(Radical Basic Function, RBF), 该函数可表示为:

$$K(\mathbf{X}(n) \mathbf{X}) = \exp(-\gamma \|\mathbf{X}(n) - \mathbf{X}\|), \quad (13)$$

式中 γ 表示核参数。RBF 核函数适用性强, 且具有较宽的收敛域, 是比较理想的分类函数。通过求解式(14)~式(16)的最优问题, 可以获得式(12)描述的决策函数 $f(x)$ 。

$$\max_{\lambda} \left\{ \sum_{n=1}^m \lambda(n) - \frac{1}{2} \sum_{n,l=1}^m \lambda(n) \lambda(l) y(n) y(l) K(\mathbf{X}(n) \mathbf{X}) \right\}, \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^m \lambda(n) y(n) = 0, \quad (15)$$

$$0 \leq \lambda(n) \leq C, \quad (16)$$

式中 C 为惩罚因子, 用于控制对错分样本的惩罚程度。通过网格搜索得到核参数 γ 和惩罚因子 C 的最优值。

4.4 焊接缺陷分类结果分析

试验共采集 1 500 幅焊接缺陷的动态磁光图像, 经过 PCA 处理后得到 500 个特征向量作为分类样本。表 2 为 PCA-SVM 焊接缺陷分类模型的分类结果, 测试集中无缺陷样本有 60 个, 未熔透和凹坑样本各 70 个, 裂纹样本为 50 个。无缺陷样本表面较为平整, 区别不大; 未熔透样本在深度和位置上不一; 凹坑样本为块状或条纹状的塌陷; 裂纹样本为宽度小于 0.5 mm 的条状缺陷及肉眼无法识别的损伤。试验沿着焊缝缺陷的不同位置与不同角度获取磁光图像, 在构建分类模型时训练集和测试集中都包含部分该缺陷的磁光图像,

故将训练集与测试集的比例设为 1 : 1。通过训练集构建上述 SVM 分类模型, 输入测试集得到分类结果。从表 1 可以看出, 采集到的磁光图像与实际焊缝特征类似, 无缺陷和未熔透与其它缺陷磁光图像有较明显的差异, 识别率分别可达到 100% 和 94.3%。试验中沿着焊缝连续采集动态磁光图像, 有时只能采集到焊接缺陷的局部特征, 这也导致部分深度较浅的凹坑缺陷被错分为无缺陷。部分裂纹为较细的条形缺陷, 凹坑则为较大的块状和条形缺陷, 由于小部分凹坑和裂纹缺陷比较相似, 故这两类样本之间也会存在错分。凹坑和裂纹的识别率分别为 84.3% 和 92%。

表 2 PCA-SVM 模型焊接缺陷分类结果

Tab. 2 Classification result of welded defects by PCA-SVM

样本类别	样本数量	训练集	测试集	识别结果	正确率/%
无缺陷	120	60	60	60	100
未熔透	140	70	70	66	94.3
凹坑	140	70	70	59	84.3
裂纹	100	50	50	46	92

5 结 论

本文通过研究交变激励下焊接缺陷的磁光成像原理, 提出了一种动态磁光成像的焊接缺陷无损检测方法。通过试验得到了交变磁场强度与动态磁光图像对比度的关系以及焊缝亚表面的动态磁光图像。试验证明在交变磁场激励下, 采集的每 3 帧焊缝动态磁光图像能代表不同磁场方向下的焊缝磁场分布信息。然后, 研究了高强钢的焊接缺陷动态磁光成像分类模型, 以每 3 帧焊接缺陷动态磁光图像的列像素作为一个缺陷样本的特征输入, 构造了 PCA-SVM 分类模型。分类结果表明, 该方法可识别焊接成形中未熔透、凹坑、裂纹及无缺陷等焊缝特征, 识别率分别为 94.3%, 84.3%, 92% 和 100%。所提方法可实现焊缝表面及亚表面缺陷的自动检测。

参考文献:

[1] GHARSALLAH M B, BRAIEK E B. Weld inspection based on radiography image segmentation with

level set active contour guided off-center saliency map [J]. *Advances in Materials Science & Engineering*, 2015, 2015: 871602-1-10.

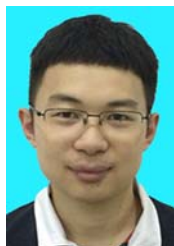
[2] TABATABAEIPOUR M, HETTLER J, DELRUE S, et al. Non-destructive ultrasonic examination of

- root defects in friction stir welded butt-joints [J]. *NDT & E International*, 2016, 80: 23-34.
- [3] MIZUKAMI K, MIZUTANI Y, TODOROKI A, *et al.*. Detection of delamination in thermoplastic CFRP welded zones using induction heating assisted eddy current testing[J]. *NDT & E International*, 2015, 74: 106-111.
- [4] FITZPATRICK G L, THOME D K, SKAUGSET R L, *et al.*. Magneto-optic/eddy current imaging of aging aircraft: a new NDI technique [J]. *Materials Evaluation*, 1993, 51(12):1402-1407.
- [5] RADTKE U, ZIELKE R, RADEMACHER H G, *et al.*. Application of magneto-optical method for real-time visualization of eddy currents with high spatial resolution for nondestructive testing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36(3):251-268.
- [6] LE M, LEE J, SHOJI T. A simulation of magneto-optical eddy current imaging [J]. *NDT & E International*, 2011, 44(8):783-788.
- [7] 程玉华, 周肇飞, 尹伯彪. 磁光/涡流实时成像检测系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 797-801.
- CHEN Y H, ZHOU ZH F, YIN B B. Study on magneto optical/eddy current imaging system for real-time testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 797-801. (in Chinese)
- [8] GAO X D, CHEN Y Q, YOU D Y, *et al.*. Detection of micro gap weld joint by using magneto-optical imaging and Kalman filtering compensated with RBF neural network [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 84: 570-583.
- [9] 高向东, 莫玲, 萧振林, 等. 微间隙焊缝磁光成像卡尔曼滤波跟踪算法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(4): 67-72.
- GAO X D, MO L, XIAO ZH L, *et al.*. Micro-gap weld tracking based on Kalman filtering of magneto-optical images [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(4):67-72. (in Chinese)
- [10] 高向东, 李国华, 萧振林, 等. 焊接缺陷的磁光成像小波多尺度识别及分类[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 930-936.
- GAO X D, LI G H, XIAO ZH L, *et al.*. Detection and classification of welded defects by magneto-optical imaging based on multi-scale wavelet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 930-936. (in Chinese)
- [11] TSE W K, MACDONALD A H. Giant magneto-optical Kerr effect and universal Faraday effect in thin-film topological insulators [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(5): 057401.
- [12] RICHERT H, SCHMIDT H, LINDNER S, *et al.*. Dynamic magneto-optical imaging of domains in grain-oriented electrical steel [J]. *Steel Research International*, 2016, 87(2): 232-240.
- [13] 王庆国, 潘华锦, 张灵振, 等. 漏磁法无损检测中铁磁材料内部磁场分布的研究[J]. *无损检测*, 2001, 23(1): 6-8.
- WANG Q G, PAN H J, ZHANG L ZH, *et al.*. A research on the distribution of magnetic field in ferromagnetic materials for magnetic leakage flux nondestructive testing [J]. *Nondestructive Testing*, 2001, 23(1): 6-8. (in Chinese)
- [14] 李海森, 张艳宁, 姚睿, 等. 基于主成分分析的直线运动模糊参数估计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2656-2663.
- LI H S, ZHANG Y N, YAO R, *et al.*. Parameter estimation of linear motion blur based on principal component analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2656-2663. (in Chinese)
- [15] 韩彦彬, 白广忱, 李晓颖, 等. 基于支持向量机柔性机构动态可靠性分析[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(11): 86-92.
- HAN Y B, BAI G ZH, LI X Y, *et al.*. Dynamic reliability analysis of flexible mechanism based on support vector machine [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(11): 86-92. (in Chinese)

作者简介:



高向东(1963—),男,河南郑州人,教授,博士生导师,1988年于中南大学获得硕士学位,1998年于华南理工大学获得博士学位,主要从事焊接自动控制的研究。E-mail:gaoxd666@126.com



蓝重洲(1991—),男,江西赣州人,硕士研究生,2013年于南昌航空大学获得学士学位,主要从事焊接自动控制和图像处理等方面的研究。E-mail:alexlanzc@126.com