

· 研究论文 ·

基于计算机图像处理技术的橡胶材料老化裂纹自动识别方法研究

徐云慧^{1*} 涂辉¹ 薛志远¹ 周微¹ ZAHEER ul Haq² 罗政刚¹ 王再学¹

(1. 徐州工业职业技术学院材料工程学院, 徐州 221140; 2. 上海交通大学化学化工学院, 上海 220240)

摘要: 橡胶材料在工业界有着广泛的应用, 老化是影响工业应用中使用的各种橡胶材料性能的关键因素, 橡胶材料老化后表面会出现龟裂裂纹。目前老化纹裂的观察主要依赖肉眼观察, 存在主观判断偏差、动态跟踪困难和难以量化等问题。本文提出了一种基于计算机图像处理技术的橡胶材料老化裂纹自动识别方法, 能够客观有效地识别和分析橡胶表面老化侵蚀的程度。研究涵盖了无拉伸状态下橡胶臭氧老化裂纹、不同拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹, 以及橡胶光老化和热氧老化裂纹的自动识别。结果表明, 该方法可以准确、快速地判断橡胶龟裂裂口的个数和裂纹面积, 从而确定龟裂裂口的程度以及橡胶的耐老化能力。这一研究结果为深入了解橡胶材料的老化过程提供了自动化识别方案, 为裂纹扩展的动态过程记录以及形态学与性能关系的建立提供了可能, 同时也为制定提高橡胶材料耐老化性能的策略提供了过程数据。

关键词: 橡胶老化; 表面裂纹; 图像处理; 自动识别

Research on Automatic Identification Method of Aging Cracks in Rubber Materials Based on Computer Image Processing Technology

XU Yun-hui^{1*}, TU Hui¹, XUE Zhi-yuan¹, ZHOU Wei¹, ZAHEER ul Haq²,
LUO Zheng-gang¹, WANG Zai-xue¹

(1. School of Materials Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 220240, China)

Abstract: Rubber materials are widely used in the industry. Aging is a key factor that affects the properties of various rubber materials used in industrial applications, and cracks appear on the surface of rubber materials after aging. At present, the observation of aging cracks mainly relies on visual observation, and there are problems, such as subjective judgment bias, dynamic tracking difficulties, and difficulty in quantification, which can objectively and effectively identify and analyze the degree of aging erosion of rubber surfaces using the automatic identification method of aging cracks in rubber materials based on the computer image processing technology proposed in this paper. The automatic identification of rubber ozone aging without a tensile state, rubber ozone aging under different tensile strain states, rubber light aging, and thermal oxygen aging cracks has been studied. The results show that through automatic identification, the number and area of rubber cracks can be accurately and quickly determined, so as to judge the degree of cracking, that is, the aging resistance of rubber, and provide an automatic identification scheme for an in-depth understanding of the aging process of rubber materials, providing the possibility for recording the dynamic process of crack propagation and establishing the relationship

2025-02-01 收稿, 2025-02-21 录用, 2025-03-27 网络出版

基金项目: 国家自然科学基金(基金号 52173103), 江苏省优秀科技创新团队项目(项目号 2021-149), 江苏省高校基础科学(自然科学)研究重大项目(项目号 23KJA430015), 徐州市高价值专利培育计划(项目号 XZ-HVP-2021-02)

* 通信联系人: 徐云慧, E-mail: xuyh@mail.xzcit.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.24.391

between morphology and performance, and providing process data for improving the aging resistance strategy of rubber materials.

Keywords: Rubber aging; Surface cracks; Image processing; Automatic identification

引用: 徐云慧, 涂辉, 薛志远, 周微, ZAHEER ul Haq, 罗政刚, 王再学. 基于计算机图像处理技术的橡胶材料老化裂纹自动识别方法研究. 高分子通报, 2025, 38(6), 931–941.

Citation: Xu, Y. H.; Tu, H.; Xue, Z. Y.; Zhou, W.; ZAHEER ul Haq, Luo, Z. G.; Wang, Z. X. Research on automatic identification method of aging cracks in rubber materials based on computer image processing technology. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2025, 38(6), 931–941.

橡胶材料因其弹性、耐久性和耐磨性等独特性能而广泛应用于各个行业, 但因其经常暴露于各种环境中, 橡胶制品表面易开裂, 使用寿命显著缩短, 老化加速^[1]。老化是橡胶工业中普遍存在的问题^[2,3], 其因素包括臭氧老化^[4,5]、热氧老化^[6]和光老化^[7]。这些因素会在橡胶基质内引发连锁反应^[8], 导致裂纹形成和机械性能丧失^[9]。准确识别和分析各种橡胶老化状况对于质量控制、寿命预测、开发更耐用的橡胶材料至关重要^[10]。尽管臭氧老化试验(《硫化橡胶或热塑性橡胶耐臭气龟裂静态拉伸试验》GB/T 7762-2014)、热氧老化试验(《硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验》GB/T 3512-2014), 以及光老化试验(《实验室光源暴露试验方法第2部分氙弧灯》GB/T 16422.2-2014)等国家标准都对实验结果记录和龟裂程度评定提出了要求, 但要求“记录单位面积上的裂纹数量或最大裂纹平均长度”并非易事, 传统方法通常依赖于人工检查或定性评估, 易导致主观评判不一致, 且无法有效观察初期细小裂纹并及时记录, 难以检测橡胶早期退化现象, 也无法采取有效的预防措施。随着数字成像和图像处理技术的不断进步, 本研究开发了一种基于图像增强、形态学与机器学习方法, 能够全自动、多场景适应、高效率、可扩展的橡胶材料老化裂纹自动识别技术, 所提出的方法能够自动识别与分析橡胶材料中的臭氧老化、热氧老化或光老化裂纹情况, 即通过利用高分辨率成像和先进的图像处理算法, 客观量化老化对橡胶制品造成的损害程度, 这项技术的引入能够改变橡胶老化的评估方式, 提供更准确、高效、客观和可靠的评估方法, 为材料老化研究提供了从数据采集到动态分析的一体化解决方案, 具有显著的学术价值与工程应用潜力。

1 实验部分

传统上, 对橡胶老化裂纹的判断主要依赖人工观察。例如: 在规定老化时长或应变暴露后, 通过目测来判断龟裂情况; 在任意规定应变条件下, 测定出现龟裂的时间、裂口数量和裂口长短等。然而, 当面对较多且不规则的龟裂裂纹时, 人工方法难以获得理想的裂口数量和裂口长短数值结果, 同时判断龟裂出现时间也需要时刻观察和记录。计算机图像学在改善橡胶裂纹图像质量上有着广泛的应用^[11–13], 包括图像增强技术、特征提取技术、裂纹标注等, 能够实现自动化的识别与计量, 大大节省人力消耗, 同时减少主观误差。橡胶试样老化裂纹自动识别过程如图1所示, 图1(a)为橡胶试样老化裂纹自动识别过程, 图1(b)为图像增强示意图, 图1(c)为亮度校正结构元素, 图1(d)为高斯低通算子。橡胶试样老化裂纹自动识别步骤见步骤1~步骤8。

步骤1, 照片拍摄。按照《硫化橡胶或热塑性橡胶耐臭气龟裂静态拉伸试验》GB/T 7762-2014国家标准进行橡胶试样臭氧老化试验, 或按照《硫化橡胶或热塑性橡胶 热空气加速老化和耐热试验》GB/T 3512-2014国家标准进行橡胶试样热氧老化试验, 或按照《实验室光源暴露试验方法第2部分氙弧灯》GB/T 16422.2-2014国家标准进行光老化试验, 经过规定的臭氧老化条件、热氧老化条件或紫外光老化条件后, 拍摄试样照片。

步骤2, 原始图像。将步骤1中拍摄的照片读取到计算机程序中, 记作“原始图像”。

步骤3, 图像增强。因橡胶试样的拍摄可能包含一定的背景区域, 因此消除背景影响非常重要, 通过计算机程序抑制“原始图像”背景, 增强试样的视觉观感, 使试样更清晰呈现, 增强特征

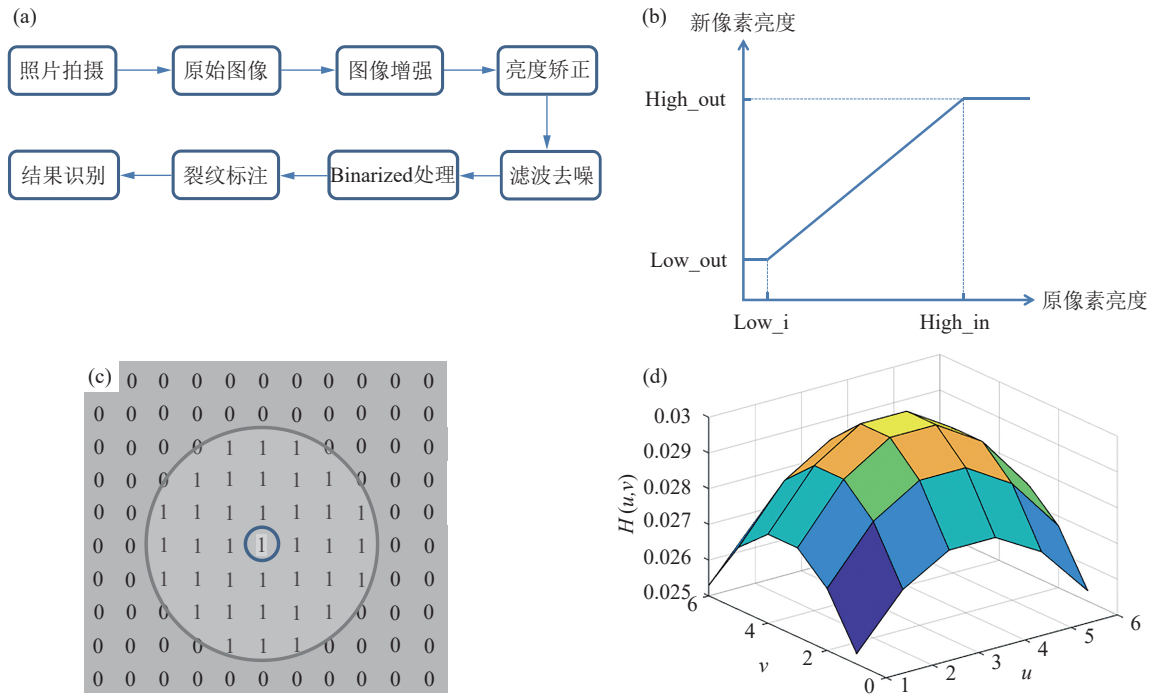


图1 橡胶试样老化裂纹自动识别过程及示意图:(a)老化裂纹自动识别过程;(b)图像增强示意图;(c)亮度矫正结构元素;(d)高斯低通算子

Figure 1 Automatic identification process and schematic diagram of aging cracks on rubber specimen: (a) identification process of aging crack; (b) image enhancement transformation; (c) schematic diagram of structural elements for bottom cap brightness correction; (d) gaussian low-pass filter

区域的观感,抑制非兴趣特征^[14],以便后续分割及计算老化面积。

$$I_2 = \left(\frac{I - \text{Low_in}}{\text{High_in} - \text{Low_in}} \right) \times (\text{Low_out} - \text{High_out}) + \text{High_out} \quad (1)$$

式中 I 是原始图像的像素值; Low_in 和 High_in 分别是输入图像的低和高灰度阈值; Low_out 和 High_out 分别是输出图像的低和高灰度阈值。 I_2 是调整后的图像的像素值。 Low_in 和 High_in 默认使用 $[0.10, 0.60]$, Low_out 和 High_out 默认使用 $[0, 1]$,从而突出 $0.1 \sim 0.6$ 之间的像素点(图1b)。

步骤4,亮度矫正。橡胶试样表面呈黑色,背景颜色更深,因此选择底帽运算进行亮度矫正,底帽运算也被称为黑帽运算,在图像形态学中是一种闭运算,能够突出图像中较暗的区域^[15]。将步骤3中增强后的图像进行亮度矫正,减少不同拍摄角度的亮度差异,并进行滤波处理,进一步消除噪声影响。

$$I_3 = \text{imbothat}(I_2) = \text{close}(I_2, \text{SE}) - I_2 \quad (2)$$

$$\text{close}(I_2, \text{SE}) = \text{erode}(\text{dilate}(I_2, \text{SE}), \text{SE}) \quad (3)$$

$$\text{dilate}(I_2, \text{SE}) = I_2 \oplus \text{SE} \quad (4)$$

$$(I_2 \oplus \text{SE})(x, y) = \max_{(s, t) \in \text{SE}} \{I_2(x - s, y - t) + \text{SE}(s, t)\} \quad (5)$$

$$\text{erode}(I_2, \text{SE}) = I_2 \ominus \text{SE} = \min_{(s, t) \in \text{SE}} \{I_2(x + s, y + t) - \text{SE}(s, t)\} \quad (6)$$

公式中, $\oplus$ 表示膨胀操作, $\ominus$ 表示腐蚀操作, (x, y) 是输出图像中的像素坐标, (s, t) 是结构元素SE中的元素坐标, $I_2(x - s, y - t)$ 是步骤3中图像 I_2 在坐标 $(x - s, y - t)$ 处的像素值, $I(x + s, y + t)$ 是原始图像 I 在坐标 $(x + s, y + t)$ 处的像素值, $\text{SE}(s, t)$ 是结构元素SE在坐标 (s, t) 处的值。SE是形态学上的结构元素,本文中默认使用SE是一个半径为15像素的圆盘形结构元素,如图1(c)。

步骤5,滤波去噪。为了减少图像的噪声以及突出图像的边缘,使用 6×6 的高斯低通算子和replicate边界填充滤波器进行滤波处理,得到RGB三通道彩色图像。

$$I_4(x, y) = \text{imfilter}(I_3, H, \text{'replicate'}) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N H(m, n) \cdot I_3(x + m, y + n) \quad (7)$$

对步骤4中图像 I_3 , H 是滤波器核(卷积核,如图1(d))。 M 和 N 分别是滤波器核在行和列方向上的半径, $H(m, n)$ 是滤波器核在位置 (m, n) 的值。 $I_3(x + m,$

$y+n$)是输入图像在位置 $(x+m, y+n)$ 的像素值。

对于边界处理, replicate 选项意味着在图像边界外的像素值将被复制,即边界上的像素值会延伸到边界外。这样可以避免边界处出现不连续的情况。具体来说,如果 $x+m$ 或 $y+n$ 超出了图像的边界,那么 $I_3(x+m, y+n)$ 将取边界上最近的像素值。例如,如果 $x+m < 1$ (即图像的最上边界),那么 $I_3(x+m, y+n)$ 将取 $I_3(1, y+n)$ 的值;如果 $x+m$ 大于图像的高度,那么 $I_3(x+m, y+n)$ 将取 $I_3(\text{height}, y+n)$ 的值。同样的规则适用于 $y+n$ 超出左右边界的情况。这种边界处理方式确保了滤波器核在图像边界处也能完整地应用,从而避免了边界处的图像信息丢失。

步骤6, Binarized 处理。将步骤5中“RGB三通道彩色图像”进行 Binarized 处理,转化成“二值化黑白图像”,能够区分出试样的基体和裂纹的不同颜色。

$$I_5 = \text{rgb2gray}(I_4) = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (8)$$

$$I_6 = \text{im2bw}(I_5, \text{level}) = \begin{cases} 1 & \text{if } I_5(x, y) > \text{level} \times \max(I_5) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

使用公式(8)将步骤7中的三通道彩色图像 I_4 转换成单通道的灰度图像, R是输入彩色图像的红色通道。G是输入彩色图像的绿色通道。B是输入彩色图像的蓝色通道,这些权重(0.299, 0.587, 0.114)是根据人眼对不同颜色的敏感度来确定的,绿色的权重最大,因为人眼对绿色的敏感度最高。 I_5 中像素范围是[0,255], 0表示纯黑, 255表示纯白, level是一个介于0和1之间的阈值,用于确定转换的界限,转换后的 I_6 中像素只有0与1,连续的1值即为联通的白色裂纹。

步骤7, 裂纹标注。将步骤6中形成“二值化黑白图像”里颜色较浅的裂纹区域标注出来。

步骤6中 I_6 图上的裂纹以白色像素显示,连通区域是由值为1的像素点组成的,而背景则是值为0的像素点。 Area_i 是第 i 个连通区域的面积, (x, y) 是第 i 个连通区域中的像素坐标,求和是对第 i 个连通区域中的所有像素进行的,因此,面积计算过程实际上就是对连通区域中的所有1进行计数。同时使用矩形框进行标注,这个矩形框是连通区域的像素所界定的最小矩形,它完全包含了该区域的所有像素点。

步骤8, 结果识别。通过计算机自动计算裂纹的数量(白色联通像素团块的个数)及面积(公式(10)中白色像素数)占总试样(试样区域的总像素)的比例,来判断裂口的程度。

$$\text{Area}_i = \sum_{(x,y) \in \text{region}_i} 1 \quad (10)$$

2 结果与讨论

实验选取暴露在臭氧环境中老化试验的胶条,包括无裂纹、少量裂纹和大量裂纹的图像,这些图像都带有模糊的背景和不均匀的光照条件。另外还对文献[16]和[17]中的实验样图进行识别,结果表明本文提出的方法能够有效识别各类橡胶的裂纹。

2.1 无拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹的自动识别

臭氧老化橡胶试样遵循相应的实验标准,本文方法能够有效识别臭氧老化裂纹的个数以及裂纹占总体橡胶面的比例,并且能标注出具体的氧化裂纹位置,裂纹长度和最大宽度能够精准计算得出。

本文提出的方法能够有效快速地进行橡胶臭氧老化裂纹的自动识别。臭氧老化实验条件为臭氧浓度 $(50 \pm 5) \times 10^{-8}$; 温度 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$; 相对湿度60%; 臭氧流速500 mL/min, 老化时间72 h。臭氧老化试样为长条状,宽度 (12 ± 0.2) mm,厚度 (2.0 ± 0.2) mm,总长度 (105 ± 0.5) mm,工作长度 (45 ± 0.5) mm(臭氧老化两边夹具夹住长度各30 mm)。经过对4组配方橡胶材料进行无拉伸应变状态下臭氧老化对比实验,实验配方见表1。

对4组配方进行了老化前后物理机械性能测试,测试结果见表2。由表2可知,无裂纹的1#配

表1 无拉伸应变状态下橡胶臭氧老化实验配方

Table 1 The rubber ozone aging experimental formulas without tensile strain state

配方	橡胶防护体系					合计 (份)
	化学防护剂			物理防护剂		
	防老剂	防老剂	防老剂	石蜡	微晶蜡	
	4010 NA (份)	4020 (份)	RD (份)	(份)	(份)	
1#	3.0	1.0	1.5	—	1.5	6.0
2#	2.5	1.5	1.5	—	1.5	5.5
3#	2.0	1.0	1.5	1.5	—	6.0
4#	3.0	1.0	1.5	—	—	5.5

注: 1#~4#配方其他材料份数相同: NR-1#, 30份; BR9000, 40份; SBR1502, 30份; 精细再生胶(60目), 5份; ZnO, 4份; SA, 3份; N220, 55份; 均匀剂RH100, 1.5份; 芳烃油, 5份; S, 1.5份; 促进剂NOBS, 1.3份; 防焦剂CTP, 0.2份。

表2 无拉伸应变状态下橡胶臭氧老化前后物理机械性能变化

Table 2 The changes of physical and mechanical properties of rubber before and after ozone aging without tensile strain

物理机械性能	老化前后 及老化系数	橡胶配方			
		1#	2#	3#	4#
邵 A 硬度	老化前	67	67	65	66
	老化后	69	69	69	69
	老化前后差	2	2	3	3
拉伸强度	老化前 (MPa)	22.34	22.75	21.69	22.19
	老化后 (MPa)	18.89	17.74	15.39	14.59
	老化系数 (%)	-15.4	-22.0	-29.0	-34.2
扯断伸长率	老化前 (%)	586	589	624	618
	老化后 (%)	420	403	306	229
	老化系数 (%)	-28.3	-31.6	-51.0	-62.9
300%定伸应力	老化前 (MPa)	8.93	8.38	8.56	8.13
	老化后 (MPa)	12.14	13.89	15.21	-
	老化系数 (%)	35.9	65.8	77.7	-
老化现象		无裂纹	少量裂纹	较多裂纹	大量裂纹

方试样, 老化前后邵 A 硬度值只升高 2, 且老化系数绝对值较低; 而老化后呈现少量裂纹的 2# 配方、较多裂纹的 3# 配方和大量裂纹的 4# 配方老化前后硬度差值、老化系数绝对值呈现增加趋势, 4 种配方的耐老化性比较为: 1# 配方耐老化性最好, 2# 次之, 3# 较差, 4# 最差。

1# 橡胶配方试样对应的无裂纹试样, 见图 2(a) 中的原始图像; 2# 橡胶配方试样对应的少量裂纹试样, 见图 2(b) 中的原始图像; 3# 橡胶配方试样对应的较多裂纹试样, 见图 2(c) 中的原始图像; 4# 橡胶配方试样对应的大量裂纹试样, 见图 2(d) 中的原始图像。对 4 种配方的试样原始图像进行自动识别, 无拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹的识别过程如图 2 所示。其中, 图 2(a) 为无裂纹的识别过程; 图 2(b) 为少量裂纹的识别过程; 图 2(c) 为较多裂纹的识别过程; 图 2(d) 为大量裂纹的识别过程。

无拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹自动识别结果见表 3。由表 3 可见: 1# 配方橡胶试样臭氧老化无裂口, 即采用防老剂 4010 NA (3.0 份)、防老剂 4020 (1.0 份)、防老剂 RD (1.5 份) 并用体系做化学防护, 采用微晶蜡 (1.5 份) 做物理防护, 橡胶耐臭氧老化性能最好; 4# 配方橡胶试样臭氧老化裂纹个数和裂纹面积占比均最大, 说明橡胶的耐臭氧老化性能最差, 即只采用化学防护剂不采用物理防护剂做防护体系, 臭氧防护效果差, 原因为臭氧与橡胶反应是在橡胶表面进行的, 物理防护剂蜡能在橡胶制品表面形成一层几微米厚的惰性

蜡膜, 将橡胶与空气中的臭氧隔离开, 在一定时间内使之不能发生反应, 采用物理防护法和化学防护并用才最有效; 采用同样化学防护体系, 微晶蜡做物理防护比石蜡做物理防护对臭氧的防护效果好, 原因是石蜡形成的防护膜较脆易裂, 且膜的致密性和粘附性差, 而微晶蜡相对石蜡更具韧性、致密性好、不易破碎, 在受到外力作用时, 微晶蜡形成的防护膜不容易出现裂缝和脱落情况, 从而更有效地阻隔臭氧对橡胶的作用, 防护效果更佳。

综上所述, 表 2 和表 3 的测试结果一致, 表明本文提出的基于计算机图像处理技术的橡胶材料老化裂纹自动识别方法与通过物理机械性能变化判断橡胶老化性的结果高度一致且呈正相关。

2.2 不同拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹的自动识别

本文提出的方法能够有效进行拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹的自动识别, 对 4# 橡胶配方试样通过在 6%、10%、20%、40%、80% 等不同拉伸应变状态下进行臭氧老化实验, 臭氧老化试样为长条状, 臭氧老化实验条件为臭氧浓度 $(75 \pm 5) \times 10^{-8}$; 温度 $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$; 相对湿度 60%; 臭氧流速 500 mL/min, 臭氧老化时间 110 h。不同拉伸应变下橡胶臭氧老化裂纹的自动识别过程如图 3 所示, 其中 6%、10%、20%、40% 和 80% 拉伸应变下的识别过程分别见图 3(a)~3(e)。对老化裂纹进行自动识别, 不同拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹的识别结果见表 4。在相同臭氧老化条件下,

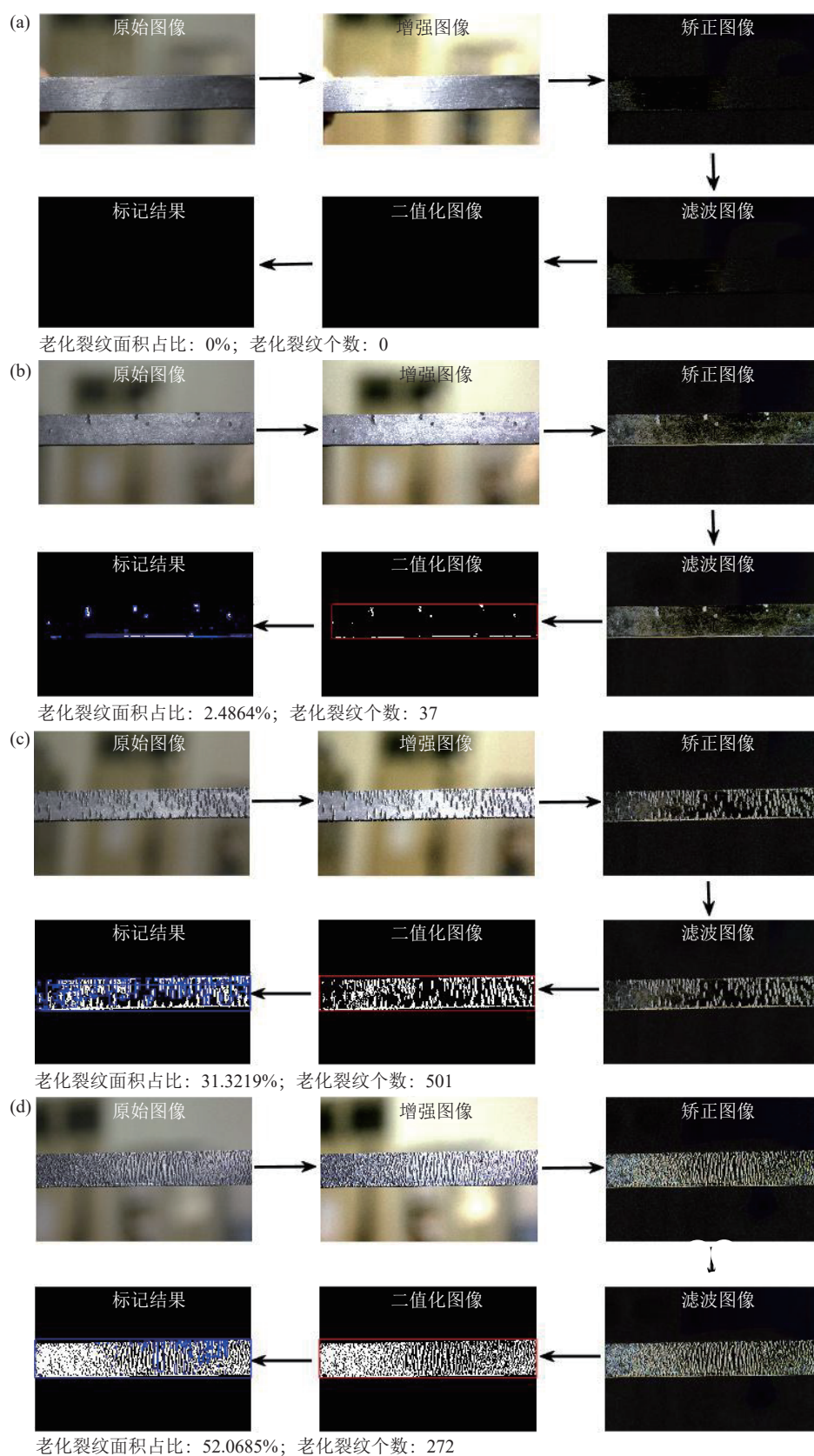


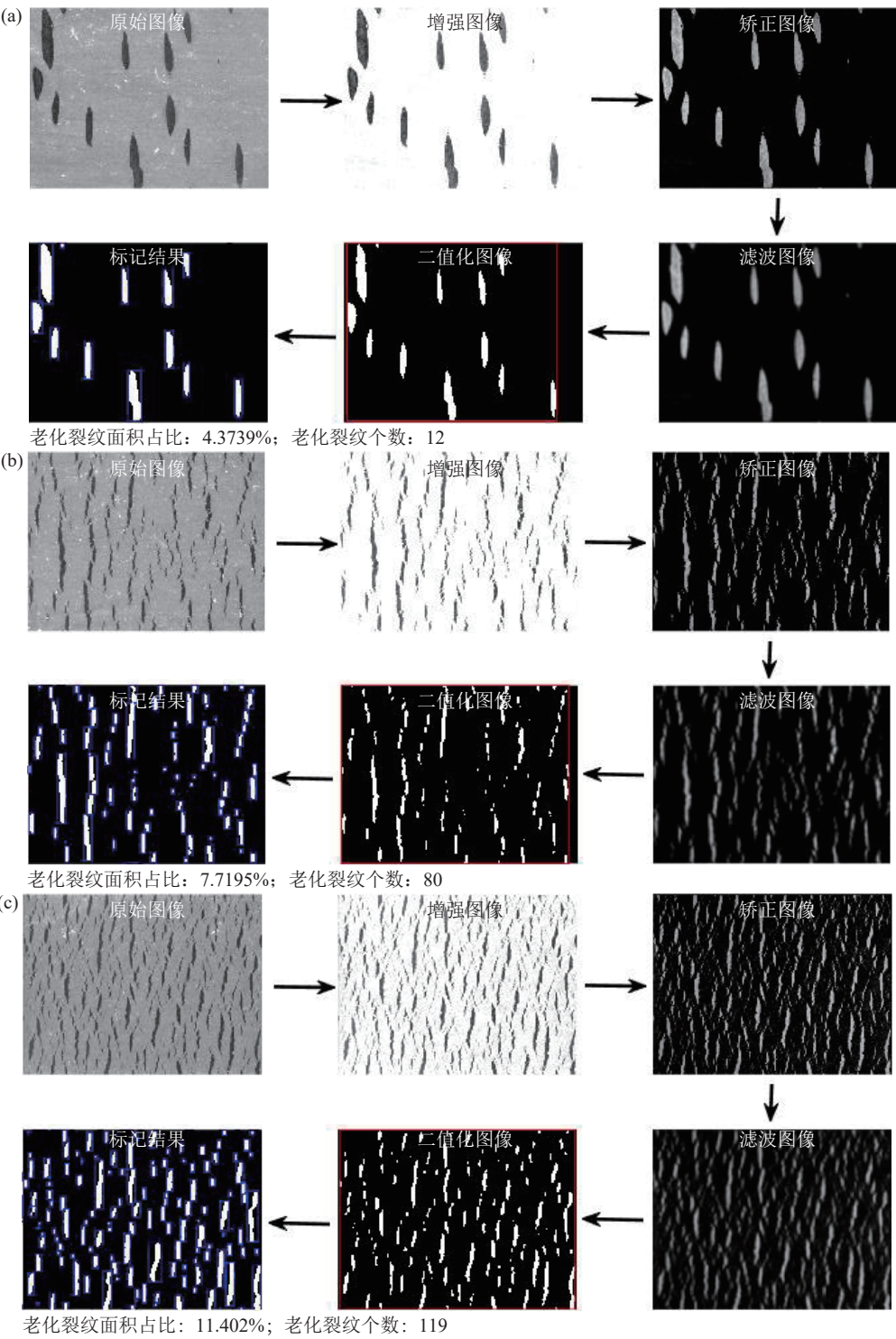
图2 无拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹自动识别过程:(a)无裂纹;(b)少量裂纹;(c)较多裂纹;(d)大量裂纹

Figure 2 Automatic identification process of aging cracks in rubber ozone under no tensile strain states: (a) crack-free; (b) a small amount; (c) more cracks; (d) a large number

表3 无拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹自动识别结果

Table 3 Automatic identification results of aging cracks in rubber ozone under no tensile strain state

序号	橡胶配方	裂纹现象	老化裂纹个数(个)	老化裂纹面积占比(%)
1	1#	无裂纹	0	0
2	2#	少量裂纹	37	2.4864
3	3#	较多裂纹	501	31.3219
4	4#	大量裂纹	272	52.0685



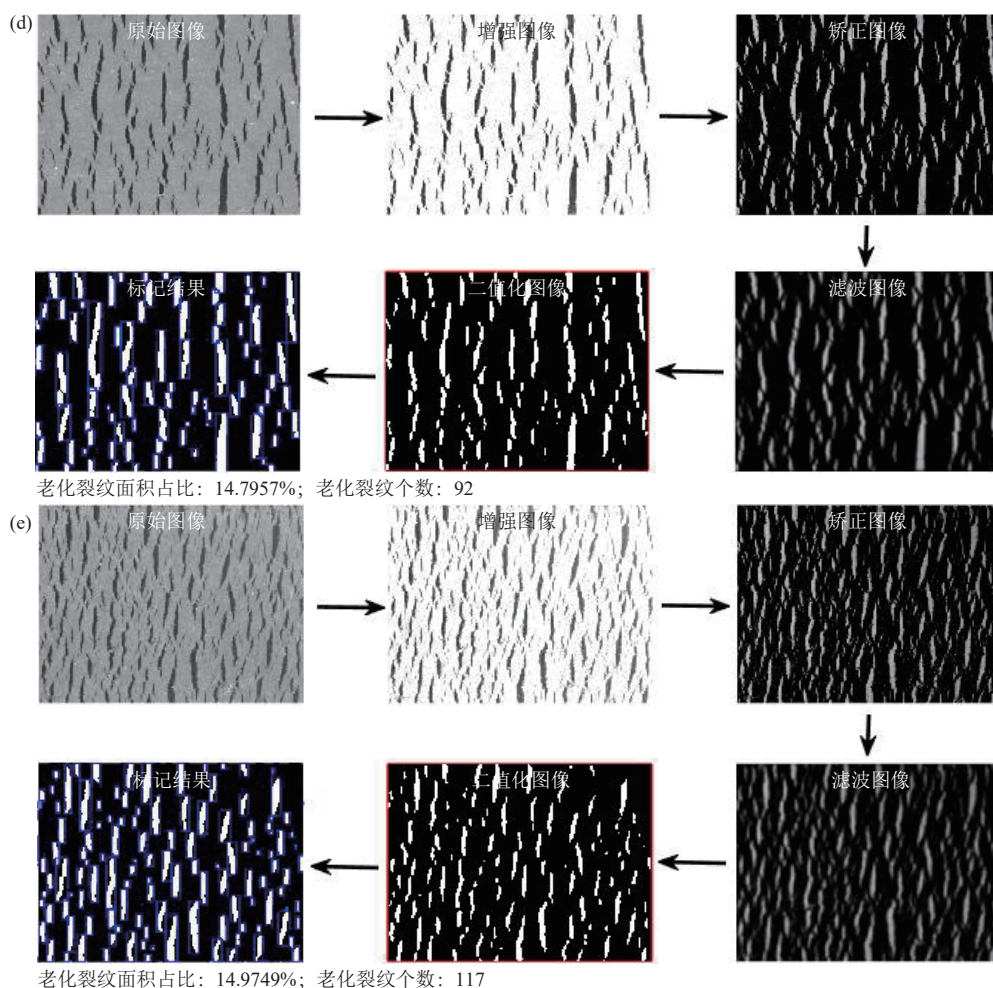


图3 不同拉伸应变下橡胶臭氧老化裂纹自动识别过程: (a) 6%; (b) 10%; (c) 20%; (d) 40%; (e) 80%

Figure 3 Automatic identification process of aging cracks in rubber ozone under different tensile strain states: (a) 6%; (b) 10%; (c) 20%; (d) 40%; (e) 80%

表4 不同拉伸应变状态下橡胶臭氧老化裂纹的自动识别结果

Table 4 Automatic identification results of aging cracks in rubber ozone under different tensile strain states

序号	拉伸应变(%)	裂纹现象	老化裂纹个数(个)	老化裂纹面积占比(%)
1	6	裂纹较少	12	4.3739
2	10	裂纹数量急剧增多	80	7.7195
3	20	裂纹个数继续增加	119	11.4020
4	40	裂纹个数有所减少, 但裂纹长度增加	92	14.7957
5	80	裂纹个数增加, 但裂纹面积增加较少	117	14.9749

随着拉伸应变率的增加, 试样的裂纹数量和裂纹面积占比整体呈上升趋势。然而, 当拉伸应变达到40%时, 裂纹数量虽有所减少, 但长裂纹数量增加, 裂纹面积占比上升了29.8%。进一步增加拉伸应变至80%时, 裂纹面积占比与40%拉伸应变时相当, 表明裂纹面积在40%左右达到饱和。这说明, 试样的裂纹数量和最大裂纹尺寸在超过40%应变后, 不会再有明显增加。

2.3 橡胶光老化和热氧老化裂纹的自动识别

本文所述方法能够有效实现橡胶光老化和热氧老化裂纹的自动识别。实验中, 对4#橡胶配方试样分别进行了光老化实验、热氧老化实验, 以及光老化和热氧老化共同作用实验等3种老化方式。裂纹识别结果及过程如图4所示, 其中光老化裂纹的识别过程见图4(a); 热氧老化裂纹的自动识别过程见图4(b); 光老化和热氧老化共同

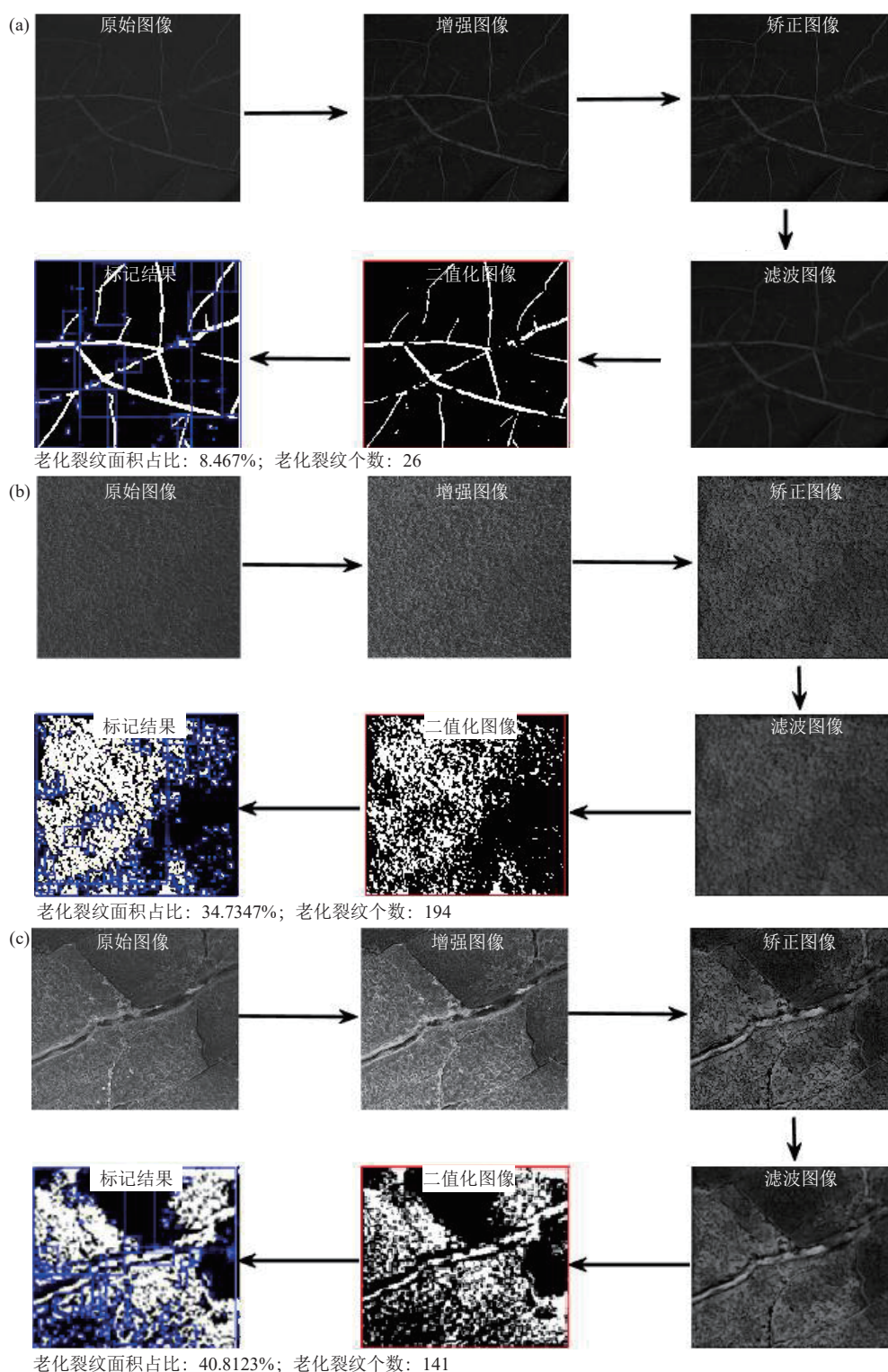


图4 橡胶光老化和热氧老化裂纹自动识别过程:(a)光老化裂纹;(b)热氧老化裂纹;(c)光老化和热氧老化共同作用裂纹

Figure 4 Automatic identification process of rubber photoaging and thermo-oxidative aging cracks: (a) photoaging aging cracks; (b) thermo-oxidative aging cracks; (c) the cracks under the combined action of photoaging and thermo-oxidative aging

作用下裂纹的自动识别过程见图4(c)。实验条件为紫外线强度(1.35 ± 0.02) W/m^2 /@340 nm、温度(80 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 时间48 h。对老化裂纹进行自动识别,

橡胶光老化和热氧老化裂纹的自动识别结果见表5。在同样的老化温度和老化时间下光老化的裂纹呈不规则的条形, 且数量较少, 热氧老化裂

表5 橡胶光老化和热氧老化裂纹的自动识别结果

Table 5 Automatic identification results of rubber photo-aging and thermo-oxidative aging cracks

序号	老化形式	裂纹现象	老化裂纹个数(个)	老化裂纹面积占比(%)
1	光老化	裂纹呈不规则条形, 数量较少	26	8.4670
2	热氧老化	裂纹呈小片絮状, 数量较多	194	34.7347
3	光老化和热氧老化共同作用	兼具条状和片絮状, 数量较多	141	40.8123

纹呈小片絮状, 数量较度, 且老化面积占比大; 当光老化和热氧老化共同作用时, 裂纹兼具条状和片絮状, 裂纹面积明显增大, 说明光和氧共同作用时, 对橡胶的老化作用更大。但老化裂纹个数比只进行热氧老化时裂纹个数少, 可能原因是在光和热共同作用下, 热氧老化造成的小片絮状变成了大的连续的条状裂口。

3 结论

传统上, 橡胶老化情况的评估需要记录老化龟裂裂纹出现的时间、裂纹数量和裂纹大小, 这对人工记录来说是一项不小的挑战。本文提出了一种基于计算机图像处理技术的橡胶老化裂纹自动识别方法, 能够有效识别各种复杂背景、不均衡光照以及不同类型老化的裂纹。同时, 橡胶裂纹深度并不按裂纹长度线性比例增长, 目前关于裂纹深度与橡胶性能之间关系的研究还相对较少。因此, 未来我们将继续深入研究这两者之间的关系, 以及以视频数据为载体的橡胶龟裂自动化识别方法, 以实现全自动、全过程的橡胶裂纹动态扩展数据记录的目标。

参考文献

- 1 Gehling, T.; Schieppati, J.; Balasooriya, W.; Kerschbaumer, R. C.; Pinter, G. Fatigue behavior of elastomeric components: a review of the key factors of rubber formulation, manufacturing, and service conditions. *Polym. Rev.*, **2023**, 63(3), 763–804.
- 2 Li, K. H.; Chen, Z. Y.; Shi, W. K. Rubber aging life prediction based on interpolation and improved time-temperature superposition principle. *Mater. Res. Express*, **2022**, 9(1), 015301.
- 3 Treib, C.; Loos, K.; Johlitz, M.; Lion, A. Ozone ageing:

experimental methods on pristine and protected natural rubber. *Continuum Mech. Thermodyn.*, **2022**, 34(6), 1563–1577.

- 4 Liang, M. C.; Fu, Z.; Guo, M.; Du, X. L.; Tan, Y. Q. Effect of ozone aging on the rheological and chemical properties of crumb rubber-modified bitumen. *Road Mater. Pavement Des.*, **2024**, 25(3), 529–546.
- 5 Tu, Y. P.; Wang, W.; Li, M.; Ding, L. J. A study on the influence of ozone on aging of HTV silicone rubber. In: *2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Virginia: IEEE, **2009**. 92–95.
- 6 Li, Z. X.; Kong, Y. R.; Chen, X. F.; Huang, Y. J.; Lv, Y. D.; Li, G. X. High-temperature thermo-oxidative aging of vulcanized natural rubber nanocomposites: evolution of microstructure and mechanical properties. *Chinese J. Polym. Sci.*, **2023**, 41(8), 1287–1297.
- 7 Lin, Y.; Chen, K.; Heng, C. L.; Dong, L. Y.; Liu, Z. Y.; Liu, Y. H. Gradient degradation behaviors of silicone rubber under UV-B radiation. In: *2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, Harbin: IEEE, **2024**. 1486–1489.
- 8 Zhao, W. F.; He, J.; Yu, P.; Jiang, X. L.; Zhang, L. Q. Recent progress in the rubber antioxidants: a review. *Polym. Degrad. Stab.*, **2023**, 207, 110223.
- 9 Wang, X. L.; Pan, H. W.; Yang, K.; Zhang, P. Cracking, structural, and mechanical property changes of SIBR and related elastomers during the ozone aging process. *Polym. Degrad. Stab.*, **2022**, 195, 109774.
- 10 Tayefi, M.; Eesaee, M.; Hassanipour, M.; Elkoun, S.; David, E.; Nguyen-Tri, P. Recent progress in the accelerated aging and lifetime prediction of elastomers: a review. *Polym. Degrad. Stab.*, **2023**, 214, 110379.
- 11 Hong, S. X.; Kuang, C.; Zhang, J. C.; Hou, D. S.; Zhang, J. R.; Liu, L. B.; Dong, B. Q. Visual analysis for microscopic cracking propagation of rubberized concrete. *Constr. Build. Mater.*, **2020**, 265, 120599.
- 12 Mohan, A.; Poobal, S. Crack detection using image processing: a critical review and analysis. *Alex. Eng. J.*, **2018**, 57(2), 787–798.
- 13 Wang, J. W.; Li, C.; Zhang, X.; Jiang, Y. J. Surface crack detection of rubber insulator based on machine vision. In: *Intelligent Robotics and Applications*. Cham: Springer International Publishing, **2021**. 175–185.
- 14 Panetta, K. A.; Wharton, E. J.; Agaian, S. S. Human visual system-based image enhancement and logarithmic contrast measure. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern.*, **2008**, 38(1), 174–188.
- 15 Zhou, H.; Shu, D. D.; Wu, C. J.; Wang, Q. X.; Wang, Q. B. Image illumination adaptive correction algorithm based on a combined model of bottom-hat and improved

- gamma transformation. *Arab. J. Sci. Eng.*, **2023**, 48(3), 3947–3960.
- 16 Zhou, M. Z.; Wang, H. R.; Guo, X.; Wei, Y. C.; Liao, S. Q. Synergistic effect of thermal oxygen and UV aging on natural rubber. *e-Polymers*, **2023**, 23(1), 20230016.
- 17 Treib, C.; Michael, J.; Alexander, L. Crack evaluation of ozone-aged elastomers. In: *Lectures Notes on Advanced Structured Materials 2*. Cham: Springer Nature Switzerland, **2024**. 103–121.