

· 港口 ·



内河水沙冲蚀条件下港口钢构件涂层损伤劣化的图像识别方法*

刘明维^{1,2}, 何加斌^{1,2}, 陈结³

(1. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆交通大学, 重庆 400074;

2. 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆交通大学, 重庆 400074; 3. 重庆江河工程咨询中心有限公司, 重庆 401120)

摘要: 为探究内河港口码头钢构件在水沙冲蚀条件下防腐涂层的损伤劣化规律, 通过自制的水沙加速冲蚀磨损装置开展不同冲蚀条件下涂层材料损伤劣化的试验研究, 基于图像识别技术对冲蚀损伤后的涂层表面形貌进行数字化和二进制化特征提取, 设定区分像素孔隙的灰度阈值, 用以定量分析涂层表面破坏形式和损伤劣化面积。结果表明: 当来流角度呈 45° 时, 涂层损伤劣化最严重且表面凹坑比和划痕比大致相同, 涂层损伤劣化面积随来流速度的增大呈指数扩大趋势; 当含沙量低于 45 kg/m^3 时, 含沙量的增大对涂层损伤劣化有促进作用, 但当超过 45 kg/m^3 后反而降低了涂层损伤劣化速率, 实现了在无损情况下对内河水沙冲蚀条件下钢构件涂层的损伤劣化规律分析。

关键词: 水沙冲蚀; 港口钢结构; 涂层; 损伤劣化; 图像识别

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0020-07

Image recognition method for damage and deterioration of coatings on harbor steel components under erosion conditions of inland river and sand

LIU Mingwei^{1,2}, HE Jiabin^{1,2}, CHEN Jie³

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing Jianghe Engineering Consulting Center Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: To explore the law of damage and degradation of anti-corrosion coatings on steel components of inland ports under water-sand erosion conditions, experimental research is conducted on the damage and degradation of coating materials under different erosion conditions using a self-made water-sand accelerated erosion wear device. Based on image recognition technology, digital and binary feature extraction is carried out to hedge the surface topography of coatings after corrosion damage. The gray threshold of distinguishing pixel pores is set to quantitatively analyze the damage form and degradation area of the coating surface. The results show that when the inflow angle is 45° , the damage and deterioration of the coating are the most serious, and the pitting ratio and scratch ratio are roughly the same. The damage and deterioration area of the coating increases exponentially with the increase of the inflow velocity. When the sand content is less than 45 kg/m^3 , the increase of the sand content can promote the damage and deterioration of the coating, but when it is more than 45 kg/m^3 , it reduces the damage and deterioration rate of the coating, which realizes the damage and deterioration law analysis of the steel component coating under the erosion condition of inland river and sand without damage.

Keywords: water and sand erosion; port steel structure; coating; damage and deterioration; image recognition

收稿日期: 2023-07-12

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (52279124); 重庆市技术创新与应用发展专项 (CSTB2022TIAD-KPX0097)

作者简介: 刘明维 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事港口工程设计计算理论方面的教学研究工作。

港口是国家交通的重要基础设施,是“公转水、铁转水”环节经济节能的关键一环,在“一带一路”倡议下,各个国家和地区的港口基础设施得到了极大发展。钢结构因强度高、制作方便等特点被广泛应用于港口码头建设中^[1]。然而据统计,世界各国每年由于腐蚀原因导致的损失约占金属总量的10%~20%,我国每年因金属腐蚀造成的直接经济损失高达数千亿元,占GDP的1%~4%,其中由于水环境腐蚀导致的损失大于33%^[2]。

涂覆有机涂层是目前适用范围最广、性价比最高的金属防腐方法^[3]。以长江上游某内河大型枢纽港为例,该港口作为三峡库区成库后内河框架直立式码头的典型代表,由于设计年限早,当时并无专门针对在内河大水位变幅、大流速水沙冲蚀等复杂服役条件下钢构件的相关防腐规范,因此仅参考JTS 153-3—2007《海港工程钢结构防腐技术规程》(现已废止)选取同品种配套的环氧沥青涂层体系进行防腐设计。然而,经现场调研发现,防腐涂层在经过约5个洪水期后损伤程度严重,实际应用效果远未达到设计年限10~20a的要求^[4],因此有必要深度探索内河水沙冲蚀条件下港口钢构件防腐涂层损伤劣化规律。

目前,国内外学者主要从厚度、质量和附着力等方面对涂层性能进行评价^[5]。然而水沙冲蚀作用下厚度测算不准确,质量或附着力检测又必将对涂层产生损伤,因此一些学者运用图像识别技术对涂层性能进行评价。图像识别技术的原理是将特征形貌数字化,然后对其进行预处理、图像特征识别、相关参数提取,从而定量表征材料表面形貌^[6]。

自1920年以来英美等国开始利用图像处理技术分析物体相关信息。Codaro等^[7]通过图像分析方法获得了金属结构在不同腐蚀状况下的凹坑形貌图;宫伟力等^[8]提出基于图像描述的煤岩CT图像孔隙结构多尺度精细描述方法,通过灰度阈值法和分割策略实现宏观裂纹和微小裂纹的识别、提取。高培虎等^[9]通过基于灰度阈值区分像素点孔隙的计算机层析成像方法,分析不同切片层数

对于热障涂层孔隙分布的影响。该技术经过多年的发展已经成熟,在金属、岩石以及涂层等领域均有所应用。与传统的厚度、附着力检测相比,在不对结构物造成损伤的情况下,该技术可以实现对结构的长时间监测,且采样过程简单,处理输出迅速。因此对内河水沙冲蚀条件下的钢构件涂层采用图像识别方法,可在无损情况下,快速识别涂层破坏形式与劣化面积,从而定量分析钢构件涂层的损伤劣化规律。

1 涂层水沙冲蚀试验研究

1.1 原材料

选用Q345钢与环氧沥青涂层制成30mm×30mm的正方形涂层试样。自主设计水沙加速冲蚀磨损试验装置,通过改变搅拌机转速与槽内含沙量模拟内河含沙水流冲击钢构件的冲刷效果,见图1a)。通过调节承载装置实现不同来流角度对涂层材料劣化的影响,见图1b)。

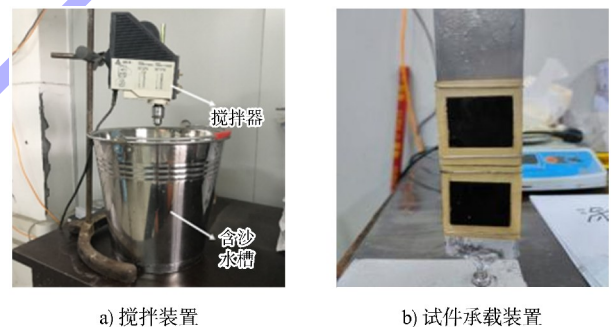


图1 自制水沙加速冲蚀试验装置

1.2 试验工况

使用水沙加速冲蚀磨损装置开展不同来流角度、不同来流速度和不同含沙量条件下的涂层试样损伤劣化试验。来流角度为0°、30°、45°、60°,来流速度为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s,含沙量为30、35、40、45、50 kg/m³,共计100种工况,试验时长150 min。

1.3 试验流程

将涂层试样按照工况开展水沙加速冲蚀劣化试验。试验完成后利用涂层测厚仪测量不同冲蚀条件下涂层材料的厚度,通过高清相机采集涂层材料表

面形貌图像，运用 Matlab 运行命令对其进行消噪、增强、二值化处理，得到不同来流条件下涂层材料

表面凹坑、划痕及劣化面积并统计凹坑比和划痕比。涂层材料的图像识别具体流程见图 2。

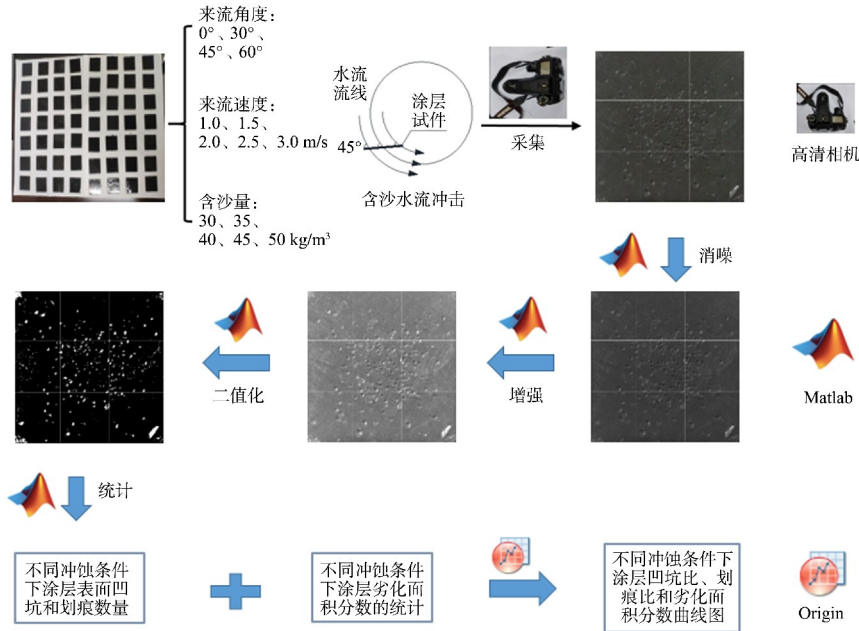


图 2 图像识别流程

2 涂层损伤劣化的图像识别方法

2.1 基本原理

涂层材料的表面形貌识别与评定，其基本原理是将特征形貌数字化，然后对图像进行预处理、图像特征识别、相关参数提取，并设定灰度阈值以区分像素孔隙缺陷，从而定量表征材料表面形貌。

2.2 图像处理

涂层材料的图像识别主要包括图像的采集、数字化、预处理以及二值特征提取等过程^[10-11]。

图像数字化是指将图像中每个位置的像素亮度进行量化，从而每一个像素都具有位置和灰度两种信息。由相机采集得到涂层形貌 RGB 图像，利用转换算法分离出 RGB 图像中像素点的亮度信息，将像素点的灰度信息通过矩阵记录，即可获得由像素点灰度值矩阵组成的整体图像。

图像预处理是指将图像在采集过程中由于涂层反光或者环境光泽度差异导致的图像信息识读困难问题，通过图像增强算法，突出图像中的关键信息，并削弱或去除非必要信息。目前常用的

图像预处理方法有图像去噪声、直方图均衡化和灰度变换等^[12]。本文选用灰度变换法将图像部分细节弱化后再进行灰度增强，突出涂层的冲蚀磨损特征。将原始图像进行灰度变换后得到灰度图像(图 3)。

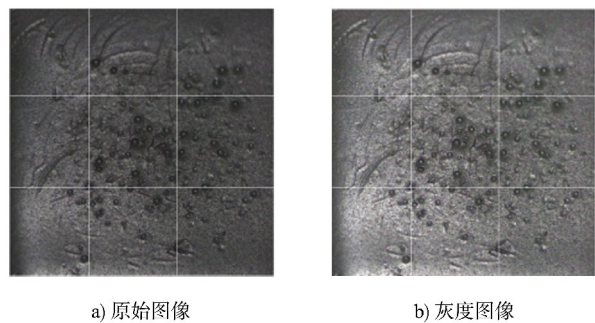


图 3 图像变换

通过灰度变换后图像的形貌特征得到初步凸显，但进一步定量描述涂层材料的损伤劣化特性，还需要对图像进行二值化处理，使图像呈现出黑白效果^[13]。将经过灰度变换后的图像分割成不同区域，利用涂层测厚仪测量出各区域的平均厚度，并记录该区域对应的灰度值，统计涂层表面平均厚度范围对应的灰度值范围作为划分灰度值的阈

值对图像进行二值化, 当像素点的灰度值大于阈值时赋值 255, 表示涂层完好部分; 灰度值小于阈值时赋值为 0, 表示涂层损伤部分, 最终效果见图 4。

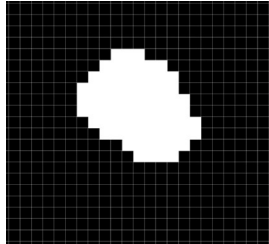


图 4 涂层劣化区域图像像素存储示意

2.3 涂层损伤特征识别

将二值化后的涂层材料表面形貌图像通过 Matlab 运行判断函数^[14], 统计劣化区域像素点, 即可定量分析劣化区域在总背景中的面积比例, 劣化区域像素点总数 S_i 为:

$$S_i = \sum p_i \quad (1)$$

式中: p_i 为像素点。

涂层试样的劣化区域的面积比 n 为:

$$n = \frac{\sum S_i}{S} \quad (2)$$

式中: S 为图像总像素值。

将二值化后的涂层材料表面形貌图像通过 Matlab 运行判断函数, 统计出像素贯通区域的长轴和短轴像素点数, 当长短比大于 2 时, 定义该劣化区域为划痕; 当长短比小于 2 时, 定义该劣化区域为凹坑。为直观体现单一影响因素对涂层损伤劣化的作用, 因此将凹坑数和划痕数转化为凹坑比 M 和划痕比 N :

$$M = \frac{A_i}{A} \quad (3)$$

$$N = \frac{B_i}{B} \quad (4)$$

式中: A_i 为单一影响因素下某一工况涂层试样凹坑数, A 为单一影响因素下不同工况涂层试样凹坑总数, B_i 为单一影响因素下某一工况涂层试样划痕数, B 为单一影响因素下不同工况涂层试样划痕总数。

3 结果和讨论

3.1 水沙冲蚀角度的影响

含沙量为 40 kg/m^3 、来流速度为 3.0 m/s 时, 冲刷 150 min 后, 通过高清相机拍摄和二值化处理得到来流角度分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 时的涂层试件原始表面形貌图像和二值图像, 见图 5。

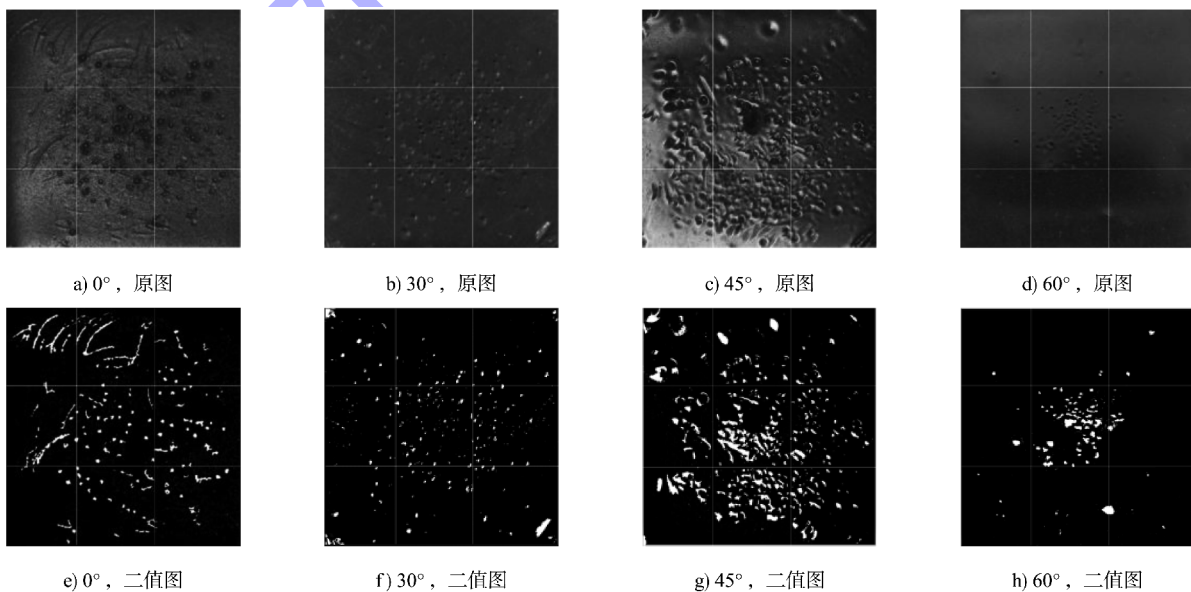


图 5 不同来流角度下涂层试件表面形貌原始图像及二值图像

由图5可知，原始图像中涂层表面平整度与光泽度差异较大，这是由制样过程、试验工况以及拍摄环境等多因素累积产生的现象。当来流速度为3.0 m/s，含沙量为40 kg/m³，冲蚀150 min以后，来流角度呈0°与45°的涂层表面产生严重损伤，出现大量划痕和凹坑；来流角度呈30°与60°的涂层表面则出现大量密集且微小的凹坑。通过Matlab运行判断函数得到涂层表面凹坑、划痕和劣化面积后，统计相应凹坑比、划痕比和劣化面积比，绘制不同冲蚀角度下涂层表面损伤特征见图6。

由图6可知，当水沙冲蚀角度呈0°时，涂层表面损伤划痕所占比重明显多于凹坑所占比重。因为在小角度时沿着涂层表面的水平切削作用占主导，因此涂层表面的划痕数量多，随着来流角度的增大，垂直于涂层表面的冲击作用逐渐占据主导作用，涂层表面凹坑数量开始逐渐多于划痕数量。涂层损伤劣化面积比随着冲蚀角度的增大劣化面积比逐渐增大，但当冲蚀角度呈45°时，凹

坑比、划痕比以及劣化面积比均明显突增，因此后续分析不同冲蚀速度和含沙量对钢构件涂层损伤劣化的影响时，着重选取来流角度45°作为典型工况。

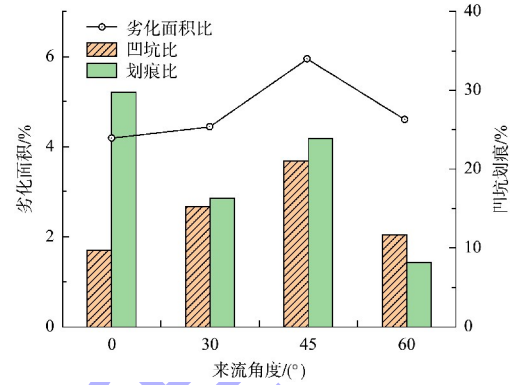


图6 不同冲蚀角度下涂层表面损伤特征

3.2 水沙来流速度的影响

来流角度为45°，含沙量为40 kg/m³时，冲刷150 min后，通过高清相机和二值化处理得到冲刷速度分别为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s时的涂层试件原始表面形貌图像和二值图像见图7。

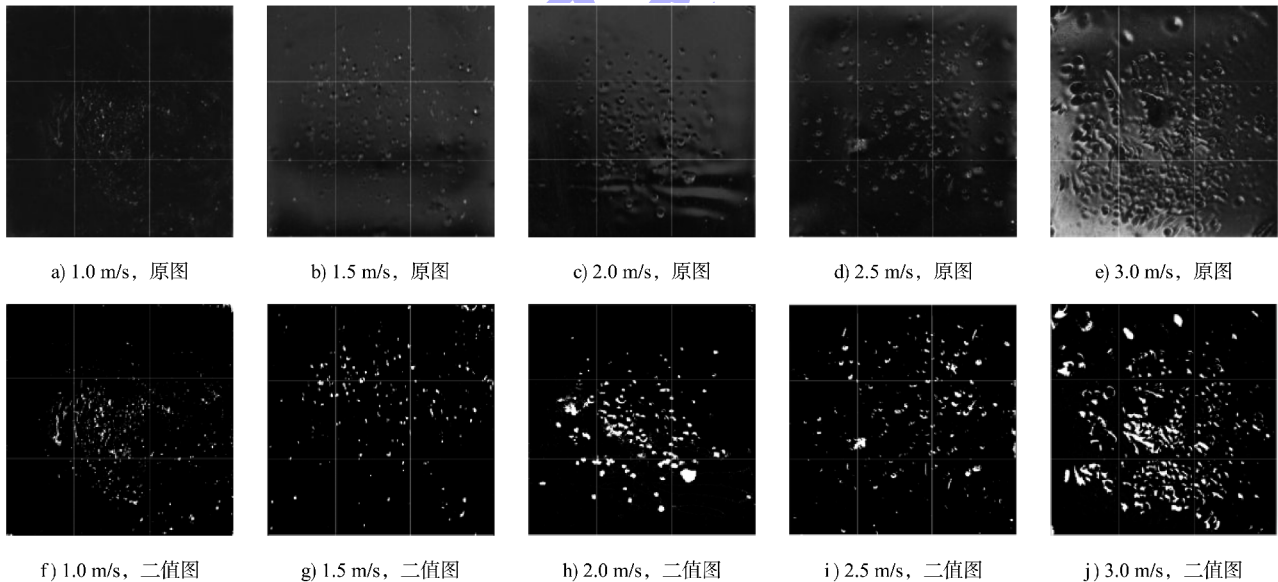


图7 不同来流速度下涂层试件表面形貌原始图像及二值图像

由图7可知，冲刷角度为45°时，涂层损伤劣化的形式兼具凹坑和划痕两种破坏形式，两者所占的比例大致相同。当来流速度较小时，涂层表面的损伤较为轻微，破坏区域没有连接成片。随着来流速度的增大，涂层整体的损伤劣化面积不

断增大，且当来流速度达到2.0 m/s以上时，单个凹坑或划痕的劣化面积明显增大，其中可能存在于一个使得泥沙颗粒得以大量启动的临界速度，当来流速度大于临界速度时，涂层损伤劣化效果急剧增大。通过Matlab运行判断函数得到涂层表面

凹坑、划痕和劣化面积后, 统计相应凹坑比、划痕比和劣化面积比, 绘制不同来流速度下涂层表面损伤特征见图 8。

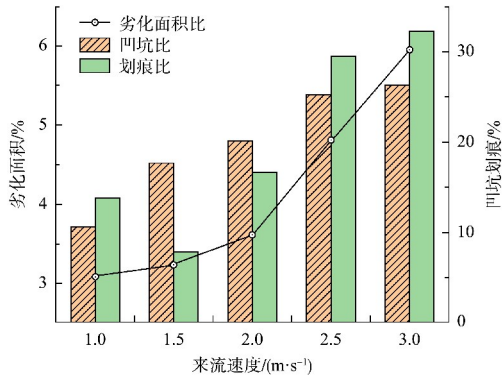


图 8 不同冲蚀速度下涂层表面损伤特征

由图 8 可知, 随着来流速度的增大, 涂层损伤劣化面积比呈指数扩大, 且从扩大趋势看确实

存在一个临界启动速度, 使得涂层损伤劣化面积比迅速增大, 这可以作为后续研究内容。当来流速度在 2.0 m/s 及以下时, 相应涂层表面的划痕比所占的比重始终小于凹坑比, 但当来流速度在 2.0 m/s 以上时, 相应涂层表面的划痕比所占的比重开始大于凹坑比, 且该趋势有扩大的倾向。可能因为随着来流速度的增大, 使得冲蚀装置内含沙水流流态紊乱, 而砂砾运动受流态影响, 使得砂砾碰撞到涂层表面后更容易弹开、划走, 而不是深入冲击。

3.3 含沙量的影响

来流角度为 45°, 来流速度为 3.0 m/s 时, 冲刷 150 min 后, 通过高清相机和二值化处理得到来含沙量分别为 30、35、40、45、50 kg/m³ 时的涂层试件原始表面形貌图像和二值图像见图 9。

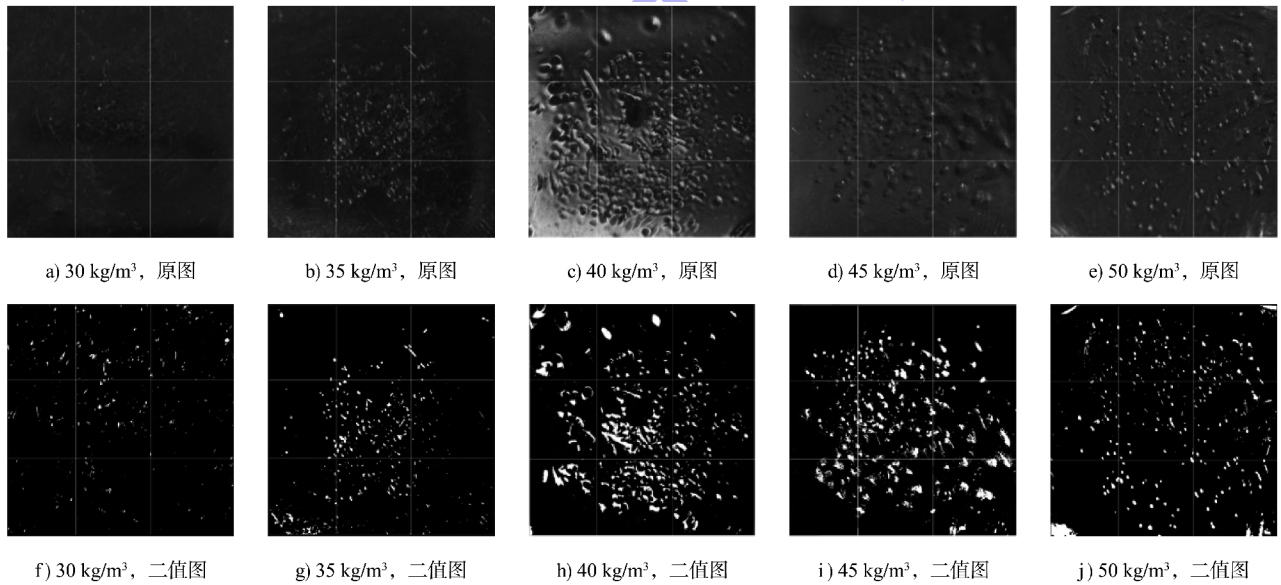


图 9 不同含沙量下涂层试件表面形貌原始图像及二值图像

由图 9 可知, 当含沙量为 30、35 kg/m³ 时涂层表面的损伤破坏较为轻微, 当含沙量达到 40、45 kg/m³ 时, 划痕的尺寸和凹坑的面积均明显增大且连接成片, 而当含沙量进一步增大以后, 不管从原始图像还是二值图像上都可以看出划痕和凹坑尺寸减小, 劣化面积有所下降。这是因为当含

沙量达到临界值后, 含沙量的增大将造成泥沙颗粒之间的碰撞加剧产生能量损耗, 反而缓解了涂层材料的损伤劣化^[15]。通过 Matlab 运行判断函数统计出涂层表面的凹坑、划痕和劣化面积后, 计算得到相应的凹坑、划痕比和劣化面积比, 绘制 45° 时不同冲蚀速度下涂层表面损伤特征见图 10。

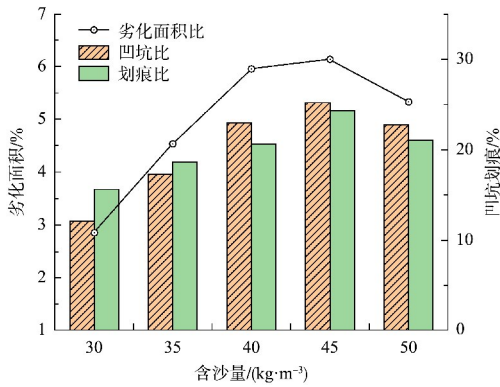


图 10 不同含沙量下涂层表面损伤特征

由图 10 可知，在 45° 冲刷条件下，不论含沙量多少，涂层的损伤劣化始终兼具划痕损伤和凹坑损伤两种形式，且两者所占比例相差无几。含沙量在 40 ~ 50 kg/m³ 之间存在着一个临界含沙量，当含沙量小于该临界值时，涂层表面的损伤劣化面积比随含沙量的增大而增大；当含沙量大于该临界值时，涂层表面的损伤劣化面积比随含沙量的增大反而有所下降。

4 结论

1) 通过自制的水沙加速冲蚀磨损装置可便捷地模拟码头钢构件在内河水沙冲蚀条件下的服役环境。

2) 将高清相机采集到的图像经过数字化和二值化特征提取以后，可以有效解决因涂层平整度、反光以及环境亮度导致的图像模糊、涂层损伤不明显等问题，突出涂层材料表面的损伤细节，进一步将二值化图像中的像素点通过软件处理、统计后，定量描述涂层材料表面的损伤劣化情况。

3) 内河水沙冲蚀条件下，来流角度为 45° 时，涂层的损伤劣化最严重，破坏形式兼具凹坑和划痕，此外随着来流角度的增大，涂层损伤劣化面积逐渐增大；涂层损伤劣化面积随流速度的增大呈指数扩大趋势，且在 1.0 ~ 3.0 m/s 之间存在一个使得泥沙大量启动的速度；当含沙量低于 45 kg/m³ 时，含沙量的增大对涂层损伤劣化有促进作用，但当含沙量超过 45 kg/m³ 后反而缓解了涂层的损伤劣化速率。

参考文献:

[1] 史炜洲, 童乐为, 陈以一, 等. 腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 53-60.

[2] 刘文杰. 水性带锈防锈涂料的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[3] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀防护技术[J]. 中国材料进展, 2014, 33(1): 26-31.

[4] 刘明维, 曾丽琴, 余杰, 等. 内河码头钢构件防腐涂层冲蚀特性及损伤模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 115-122.

[5] 刘姝麟, 廖家艳, 陆秋平. 应用于水运工程混凝土涂层测厚仪的精度分析[J]. 水运工程, 2021(4): 25-29.

[6] 孙东坡, 谢锋, 张先起, 等. 基于图像识别的水下地形冲刷过程监测[J]. 水利水运工程学报, 2011(3): 53-58.

[7] CODARO E N, NAKAZATO R Z, HOROVISTIZ A L, et al. An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation [J]. Materials science and engineering (A), 2002, 334(1): 298-306.

[8] 宫伟力, 吴小东, 张自翔, 等. 基于 CT 扫描的煤岩细观损伤特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 117-125.

[9] 高培虎, 贾涵, 王伟, 等. 热喷涂涂层孔隙结构表征研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(9): 3055-3070.

[10] 樊顾飞, 高昂, 王芳芳, 等. 基于图像识别技术的测压管群水深智能获取方法[J]. 水利水运工程学报, 2022(5): 123-128.

[11] 陈炳权, 刘宏立, 孟凡斌. 数字图像处理技术的现状及其发展方向[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 63-70.

[12] 丛波. 基于 MATLAB 的数字图像处理技术及应用[J]. 中国科技信息, 2011(5): 85-86, 89.

[13] 刘涛, 艾军, 张丽芳, 等. 基于图像处理技术的钢箱梁防腐涂层寿命预测实验研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(5): 407-412.

[14] 吴聪, 李伯全, 徐琳, 等. 氧化时间对纯钛表面微弧氧化涂层微孔参数的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 324-329.

[15] 曾丽琴. 大流速含沙水流环境下粘弹性防腐涂层的损伤试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

(本文编辑 赵娟)