

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.12.018

# 锌基合金电镀层斑点缺陷多光谱成像检测方法

靳双燕<sup>1\*</sup>, 李浩亮<sup>2</sup>

(1. 郑州工商学院 信息工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 由于电镀层表面复杂的光学特性, 斑点缺陷的光谱向量与背景噪声存在多维耦合, 导致传统方法难以有效分离光谱序列中的噪声数据。在噪声干扰下, 斑点缺陷的尺度变化规律缺乏系统性表征, 导致特征集构建不完整, 无法覆盖多尺度缺陷形态, 影响检测与定位的可靠性。为了解决这些问题, 提出了一种基于多光谱成像的检测方法。通过分析多光谱成像数据的内在低秩特性, 建立频谱间的噪声数据模型, 输出正常与含噪信号的常量值, 根据常量值减去光谱序列中每一行的对应数, 完成去噪; 在获得去噪数据后, 针对锌基合金电镀层斑点的光谱向量与权重特征, 采用多尺度融合求得斑点缺陷的尺度变化规律, 整合形成全面特征集; 基于这一规律构建全面特征集后, 采用空间映射算法处理特征数据, 生成反映缺陷特性的波频变化矩阵, 通过分析矩阵参数锁定电镀层斑点缺陷在光谱维度的具体位置, 实现缺陷的精准定位。实验数据表明, 所提方法在信噪比、缺陷特征可视化及光谱匹配度3个关键指标上均显著优于对比方法, 能够精准识别锌基合金电镀层中露铁斑、麻点斑等缺陷的轮廓、分布及光谱特征, 且检测结果与实际值高度吻合。

**关键词:** 锌基合金电镀层斑点缺陷; 多光谱成像检测; 噪声数据; 光谱向量; 空间映射

**中图分类号:** TN223; TQ153

**文献标识码:** A

## Multi spectral imaging detection method for spot defects in zinc-based alloy electroplating coatings

Jin Shuangyan<sup>1\*</sup>, Li Haoliang<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou Technology and Business University, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Due to the complex optical properties of the surface of electroplated coatings, there is multidimensional coupling between the spectral vectors of spot defects and background noise, making it difficult for traditional methods to effectively separate noise data from spectral sequences. Under noise interference, the scale variation law of spot defects lacks systematic characterization, resulting in incomplete feature set construction and inability to cover multi-scale defect morphology, which affects the reliability of defect detection and localization results. To address these issues, a detection method based on multispectral imaging has been proposed. By analyzing the inherent low-rank characteristics of multispectral imaging data, a noise data model between spectra is established, and the constant values of

收稿日期: 2025-07-14

修回日期: 2025-09-11

通信作者: 靳双燕(1987—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为图像处理, email: jinshuang6020@126.com

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61801434); 河南省高等学校重点科研项目计划(25B520039)

引用信息: 靳双燕, 李浩亮. 锌基合金电镀层斑点缺陷多光谱成像检测方法[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(12): 139-145.

Jin Shuangyan, Li Haoliang. Multi spectral imaging detection method for spot defects in zinc-based alloy electroplating coatings[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(12): 139-145.

normal and noisy signals are output. The noise is removed by subtracting the corresponding number in each row of the spectral sequence from the constant value. After obtaining the denoised data, the spectral vectors and weight features of the spots on the zinc-based alloy electroplating layer are analyzed. The multi-scale fusion method is adopted to obtain the scale variation law of the spot defects, and a comprehensive feature set is formed by integrating them. After constructing a comprehensive feature set based on this rule, the spatial mapping algorithm is used to process the feature data, generating a frequency variation matrix that reflects the defect characteristics. By analyzing the parameters of the matrix, the specific position of the spot defect in the electroplating layer in the spectral dimension is locked, achieving precise defect location. Experimental data shows that the proposed method is significantly superior to the comparative method in three key indicators: signal-to-noise ratio, defect feature visualization, and spectral matching. It can accurately identify the contour, distribution, and spectral characteristics of defects such as iron spots and pitting spots in zinc-based alloy electroplating coatings, and the detection results are highly consistent with the actual values.

**Keywords:** spot defects in zinc-based alloy electroplating layer; multi spectral imaging detection; noise data; spectral vector; space mapping

锌基合金凭借出色的耐腐蚀、耐磨及装饰特性，被广泛应用于汽车零部件、电子元器件和五金工具等行业。不过，其在电镀时表面易产生斑点等瑕疵，既影响产品外观，还可能削弱其耐腐蚀性能与使用寿命。因此，开发一种高效、准确的锌基合金电镀层斑点缺陷检测方法显得尤为重要。多光谱成像技术作为一种新兴的无损检测技术，通过获取目标物体在不同光谱波段下的图像信息，能够实现对物体表面缺陷的精准识别和定位。近年来，多光谱成像技术在金属表面缺陷检测领域展现出了巨大的应用潜力，通过构建多光谱成像检测系统，可实现对锌基合金电镀层斑点缺陷的快速、准确检测，为锌基合金电镀层的质量控制提供有力支持。

现有的传统方法存在一定局限性，例如：Mi J R等<sup>[1]</sup>提出基于无铅电子供体-受体MOF的斑点缺陷X射线检测。利用光电性能与晶体结构特性，采集电子供体表面的缺陷特征并映射为射线频谱形式。通过X射线识别供体表面光斑点的波形与幅值差异实现缺陷检测。X射线检测虽规避了可见光波段的光学干扰，但电镀层表面原子排布异质性会导致X射线衍射信号出现类似的多维耦合问题，使得缺陷信号仍可能被基底晶体结构噪声淹没。黄志海等<sup>[2]</sup>提出基于多光谱图像特征融合的IC器件表面缺陷检测方法，构建了多光谱图像特征融合模块，在YOLO框架下建立了双路特征提取通道，构建多光谱图像特征融合端对端缺陷检测模型。但是该方法忽略了多光谱图像采集过程中固有的噪声问题。张毅等<sup>[3]</sup>提出基于深度学习的工件涡流热成像的缺陷

检测。通过热像仪记录被检测对象表面温度变化，通过深度学习模型对涡流热成像数据进行特征提取、选择和融合，重构完整缺陷，实现缺陷的自动识别与定位。该方法未预先开展去噪操作，致使深层及表面微小缺陷的信息易被背景噪声掩盖，难以识别。化春键等<sup>[4]</sup>提出基于改进YOLOv7-tiny的多光谱苹果表层缺陷检测方法。在主干网络中使用坐标注意力(CA)机制聚合坐标信息，优化了对缺陷的定位精度。但是，上述方法忽略了对缺陷尺度变化规律的提取，导致其缺陷检测准确性不够理想。

综上所述，本文提出一种锌基合金电镀层斑点缺陷多光谱成像检测方法。采用低秩矩阵近似法进行多光谱检测成像去噪，降低因成像噪声导致的成像特征混淆、细节特征噪声覆盖的影响，提高检测精准度。结合多尺度特征融合，提取锌基合金电镀层斑点的光谱向量和尺度特征，将其作为后续成像检测的规律参照。采用空间映射求得斑点缺陷光谱维度，生成波频变化的矩阵序列，在序列中按照维度向量查找满足斑点缺陷的波频变化位置，实现多光谱成像检测。

## 1 锌基合金电镀层多光谱噪声抑制

在电镀层多光谱数据处理中，因电镀层表面复杂光学特性，斑点缺陷的光谱向量与背景噪声存在多维耦合，导致传统方法难以有效分离光谱序列中的噪声数据<sup>[5]</sup>。为解决这一难点问题，提出基于低秩特性的去噪方法，该方法通过解析成像数据的光谱低秩结构，构建噪声统计模型并分离本底信号常

量值,采用行向量差分运算实现噪声抑制,为后续特征提取奠定基础。

假设观测矩阵为 $\mathbf{Y}$ ;谱间差异噪声为 $N$ ;含噪声的光谱信息为 $\mathbf{X}$ ,二者间的关系可由 $\mathbf{Y}=\mathbf{X}+N$ 来描述。依据红外多光谱扫描仪的成像机制,确定锌基合金电镀层的一个完整扫描周期<sup>[6]</sup>,并将各谱段对应的时间序列数据予以设定为 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ …… $y_p(t)$ ,分别与观测矩阵的行向量 $y_1$ 、 $y_2$ …… $y_p$ 进行对比。锌基合金电镀层多光谱噪声转换问题,用以下关系式表达:

$$\min_x \|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\|_F^2, \text{ s.t. rank}(\mathbf{X}) \leq r \quad (1)$$

式中: $\min_x$ 为噪声最小; $\|\mathbf{Y}-\mathbf{X}\|_F^2$ 为范数平方,其等于矩阵中所有元素 $\sum_{i,j} \|\mathbf{Y}_{ij}-\mathbf{X}_{ij}\|^2$ 的求和结果; $r$ 为范数<sup>[7]</sup>。通过低秩约束,能够从高维耦合的光谱数据中分离出噪声,缓解噪声对缺陷特征的干扰。

由于矩阵 $\mathbf{X}$ 的秩函数既不连续也不具备凸性,为使 $\mathbf{X}$ 能够更适应观测矩阵 $\mathbf{Y}$ ,运用凸松弛法<sup>[8]</sup>将公式(1)转化为核范数最小化问题进行求解,其关系式可表示为:

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \min_x \|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\|_F^2 + \lambda \|\mathbf{X}\|_* \quad (2)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}$ 表示通过求解该优化问题得到的去噪后的矩阵估计值; $\lambda$ 为噪声系数; $\|\mathbf{X}\|_*$ 表示矩阵 $\mathbf{X}$ 的核范数。

当多光谱间存在共有噪声时,这类噪声在不同谱段间呈现的分布特性一致性较高。多光谱检测器的像元响应信号与入射光通量在特定区间内存在线性关联,即:

$$y(t) = a\hat{\mathbf{X}} x(t) + b \quad (3)$$

式中: $y(t)$ 为检测响应信号均值; $x(t)$ 为增益系数<sup>[9]</sup>; $a$ 为偏置参数; $b$ 为线性系数。

当 $a=1$ 、 $b=n(t)$ 时,将 $n(t)$ 视为没有噪声时信号的真实值,即可得到噪声模型为:

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (4)$$

若检测到的锌基合金电镀层信号未出现横向条纹,那么该噪声即为常量噪声 $m_y$ ,即:

$$y(t) = x(t) + n_c \quad (5)$$

$$m_y = E[y] = E[x] + E[n_c] = m_x + n_c = n_c$$

式中: $n_c$ 为随机干扰<sup>[10]</sup>; $m_x$ 为原始期望信号; $E[x]$ 、 $E[y]$ 、 $E[n_c]$ 分别为观测信号、原始信号、通信噪声的期望均值。

考虑到检测到的多光谱数据在不同频段中呈现的分布强度不同,取光谱频段信号均值作为噪声剔除的参照值。在单个周期内,针对序列中的每一

行数据,减去其对应的噪声常量,便能达成谱间噪声的去除:

$$x(t) = y(t) - m_{y-p} \quad (6)$$

式中: $m_{y-p}$ 为上一行谱段噪声均值<sup>[11]</sup>。通过上述公式的一系列运算,能够有效去除光谱序列中的噪声,解决噪声难以分离的难点问题,减少噪声对后续缺陷特征提取和定位的干扰。

## 2 基于多尺度融合与注意力加权的斑点缺陷特征集构建

对锌基合金电镀层多光谱成像数据进行去噪处理后,噪声干扰得到有效抑制,为缺陷特征分析创造了条件。然而,锌基合金电镀层斑点缺陷在图像中呈现出多样的大小、形状和光谱特性。单一尺度的特征提取方法难以全面、准确地表征这些复杂的斑点缺陷,无法同时捕捉缺陷的细微光谱差异和整体形态特征。为提高多光谱成像检测的精度与效率,需有效整合可见光与红外图像的互补特征,兼顾不同分辨率细节信息,同时采用注意力机制提升对多尺度缺陷特征的敏感性,以提取关键信息,为后续检测算法提供精准支持。

设计多尺度特征提取模块,其中包含特征提取 $M_{IR}$ 和生成 $M_{VS}$ 模块。 $M_{IR}$ 与 $M_{VS}$ 能够实现锌基合金电镀层斑点缺陷的自适应调节,采用 $F_{IR}$ 、 $F_{VS}$ 来表示不同模块对特征提取的贡献度<sup>[12]</sup>。

特征权重生成模块由一个大小为 $[I*I]$ 的归一化层构成。将 $F_{VS}$ 、 $F_{IR}$ 进行拆分,可得到特征向量 $C_1 \sim C_n$ ,其中, $n$ 为通道数量。在 $M_{IR}$ 中,特征向量 $C_1 \sim C_n$ 需要通过卷积层运算处理后求得特征的具体权重;而在 $M_{VS}$ 中,可见光图像特征向量,需要与像素 $Q_{IR}$ 、 $Q_{VS}$ 相乘加权,通过激活函数<sup>[13]</sup>进行归一化处理,求得归一化后的权重 $S_{IR}$ 、 $S_{VS}$ ,计算公式为:

$$S_{IR} = \frac{e^{F_{IR} \times Q_{IR}}}{e^{F_{IR} \times Q_{IR}} + e^{F_{VS} \times Q_{VS}}} \quad (7)$$

$$S_{VS} = \frac{e^{F_{VS} \times Q_{VS}}}{e^{F_{IR} \times Q_{IR}} + e^{F_{VS} \times Q_{VS}}} \quad (8)$$

式中: $e^{F_{IR} \times Q_{IR}}$ 、 $e^{F_{VS} \times Q_{VS}}$ 分别为锌基合金电镀层的散热量<sup>[14]</sup>和光谱相关信息。

将归一化后的权重 $S_{IR}$ 、 $S_{VS}$ 分别与红外图像和可见光图像中元素进行逐层自适应加权,求得输出特征向量 $Y_{IR}$ 、 $Y_{VS}$ 为:

$$Y_{IR} = S_{IR} \odot x(t) F_{IR} \quad (9)$$

$$Y_{VS} = S_{VS} \odot x(t) F_{VS} \quad (10)$$

将上述镍基合金斑点缺陷向量和权重特征进行融合，得到斑点缺陷特征的尺度变化规律的斑点缺陷特征集<sup>[15]</sup> $F_M$ ：

$$F_M = c(Y_{IR}, Y_{VS}, MaxP(F_{IR}), MaxP(F_{VS})) \quad (11)$$

式中： $MaxP(F_{IR})$ 为特征通道连接操作<sup>[16]</sup>， $MaxP(F_{VS})$ 为池化操作； $c$ 为融合系数。通过这一系列操作，成功整合形成了全面的斑点缺陷特征集，为后续准确分析锌基合金电镀层斑点缺陷的尺度变化规律以及进一步的缺陷检测和分析提供了丰富且有效的特征信息。

### 3 电镀层斑点缺陷多光谱成像检测

基于上述过程获得的锌基合金电镀层斑点缺陷特征的尺度变化规律的斑点缺陷特征集 $F_M$ ，采用主成分分析方法进行缺陷检测。通过线性变换将高光谱数据映射到低维空间，在空间中查找吻合 $F_M$ 缺陷点。保留波频变化，并利用波段的线性组合来描述锌基合金电镀层斑点缺陷关系，通过逐一的层次比对实现斑点缺陷和高精度检测。

利用 $X$ 来表示多光谱检测图像中包含的主要信息，设有 $m$ 个维度的检测样本<sup>[17]</sup> $X=(x_1+x_2+...+x_m)$ ，将检测数据输入到 $k$ 维空间中，生成满足 $F_M$ 变化的锌基合金电镀层斑点缺陷波频变化矩阵<sup>[18]</sup> $b_i$ ：

$$b_i = x_m - m_1 + F_M \sum_{j=1}^m x_j \quad (12)$$

式中： $m_1$ 为锌基合金电镀层斑点缺陷维度(位置、大小、形状)； $x_j$ 为检测样本的波频变化均值。

采用协方差矩阵来计算斑点缺陷点与检测样本之间的光谱差值 $C$ ：

$$C = \frac{1}{m} b_i X^2 T \quad (13)$$

式中： $X^2$ 为检测样本光谱方差<sup>[19-20]</sup>。 $X^2$ 的大小反映了斑点缺陷点与检测样本在光谱特征上的差异程度， $X^2$ 越大，说明两者差异越大，越有可能存在斑点缺陷。

按照光谱方差 $C$ 的大小进行降序排列，提取主成分作为主行为对。通过光谱在锌基合金电镀层表面的反射光线均匀度来进行判断，根据光谱差值和维度<sup>[20]</sup>比对，输出检测迭代结果，以此实现电镀层斑点缺陷多光谱成像检测：

$$BV_{m,n,k} = \frac{BV_{m,n,i} / BV_{m,n,t}}{C} \quad (14)$$

式中： $BV_{m,n,i}$ 为基于像素 $i$ 的位置比值； $BV_{m,n,t}$ 为基于光谱波段 $t$ 的位置比值； $BV_{m,n,k}$ 为检测结果，当 $BV_{m,n,k}$ 数值为1时，判定存在斑点缺陷并输出检测结果，从

而实现电镀层斑点缺陷的多光谱成像检测。

## 4 性能测试

### 4.1 测试环境

为验证文中提出锌基合金电镀层斑点缺陷多光谱成像检测方法的实际应用性能，为满足深度学习训练中对缺陷数据采集的需求，搭建多光谱成像与可见光联合检测实验平台(如图1所示)。将多光谱成像相机采集到的数据输入到测试平台中，对数据进行分析求得实验结果。实验相关详细参数如表1所示。实验的研究对象为多种不同批次、不同工艺参数下生产的锌基合金电镀层样本，这些样本涵盖了不同厚度(范围在5~20  $\mu\text{m}$ 之间)、不同表面粗糙度( $R_a$ 值介于0.2~1.0  $\mu\text{m}$ )以及不同合金成分比例(锌含量在80%~95%之间，其余为多种微量合金元素)的电镀层，以尽可能模拟实际生产中的复杂情况。



图1 多光谱成像检测实验环境示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental environment for multispectral imaging detection

表1 实验相关详细参数

Tab.1 Detailed parameters related to the experiments

名称	参数/内容
光谱通道数	32 通道
光照强度	500~2 000 ux
光照角度	45°入射
湿度	40%~60% RH
背景干扰	黑色吸光板
曝光时间	10~100 ms
特征提取	反射率、吸光度

### 4.2 基于信噪比的多光谱成像检测去噪结果

基于文中提出的低秩矩阵近似法多光谱成像去噪方法，以检测图像的信噪比为指标，并与文献[2]提出的器件表面缺陷多光谱图像特征融合检测

方法(特征融合的缺陷检测方法)、文献[4]提出的基于改进YOLOv7-tiny的多光谱缺陷检测方法进行对比分析,得到实验结果如图2所示。

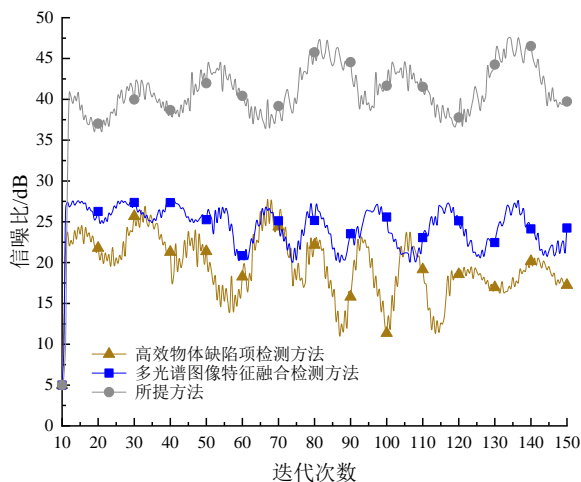


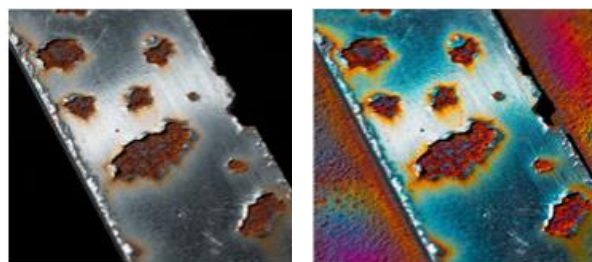
图2 3种检测方法信噪比曲线

Fig.2 Signal to noise ratio curves of three detection methods

从图2中可以看出,所提方法的信噪比曲线始终保持在较高水平,其均值达 $(42.3 \pm 2.1)$  dB,相比之下,特征融合的缺陷检测方法信噪比均值为 $(23.6 \pm 3.2)$  dB,改进YOLOv7-tiny的缺陷检测方法的信噪比均值为 $(26.8 \pm 2.5)$  dB,所提方法的信噪比均值显著高于对比方法(较热成像法提升79.2%,较特征融合合法提升57.8%)。且所提方法的信噪比波动范围在38.5~45.6 dB之间,相对另外两种方法(特征融合的缺陷检测方法波动范围为18.2~28.7 dB,改进YOLOv7-tiny的缺陷检测方法波动范围是21.3~30.1 dB)更为平稳。随着迭代次数增加,所提方法的信噪比增长趋势稳定,能持续有效去噪提升图像质量,而另外两种对比方法在部分迭代次数区间内,信噪比提升效果不明显甚至有波动下降。由此可见,3种方法中所提方法的信噪比曲线分布范围最高且与另外两种方法差距显著,说明所提方法针对原始图像去噪效果好,得到的检测特征不受噪点覆盖影响,特征表达清晰,为后续基于多光谱图像进行锌基合金电镀层斑点缺陷的准确检测和分析奠定了良好基础。

#### 4.3 锌基合金电镀层斑点缺陷多光谱成像检测结果

考虑到锌基合金电镀层斑点缺陷有很多种,为进一步验证多光谱成像检测的实际应用性能,给出露铁斑以及麻点斑两种斑点缺陷案例。将多光谱检测图像与原始图像进行对比,得到实验结果如图3和图4所示。



(a) 原始图像

(b) 处理后的图像

图3 露铁斑点缺陷多光谱检测结果

Fig.3 Multispectral detection results of exposed iron spot defects



(a) 原始图像

(b) 处理后的图像

图4 麻点斑缺陷多光谱检测结果

Fig.4 Multispectral detection results of pitting spot defects

从图3的实验结果可以发现,对于露铁斑缺陷,原始图像仅展现出金属本色与锈迹间较为简单的对比,而经所提方法多光谱成像后,不同光谱响应使得露铁斑缺陷与金属基底呈现出丰富的色彩差异,能够极为清晰且精准地凸显出露铁斑缺陷的轮廓、在电镀层表面的分布状况以及与周围正常区域的显著差异,使得露铁斑的存在清晰可见,检测结果在准确性方面表现出色,能够准确地识别出露铁斑的具体位置与形态。从图4的实验结果可以发现,对于麻点斑缺陷同样如此,原始图像对麻点斑的呈现较为模糊,仅能看出大致的异样区域,而多光谱成像后的图像中,麻点斑缺陷被细致地展现出来,其边缘轮廓更为清晰,分布情况也更为明确。不同光谱响应让麻点斑与金属基底的色彩对比明显,大大提升了麻点斑缺陷的辨识度,检测结果的细致度很高,能够发现微小的麻点斑缺陷,且对其形态和分布的描述极为准确。总之,无论是露铁斑还是麻点斑的缺陷情况,所提方法检测结果与实际结果之间的吻合度均较高,充分彰显了所提多光谱成像检测方法在准确识别锌基合金电镀层斑点缺陷方面的卓越能力,能够为实际生产中的质量检测提供可靠且精细的依据。

#### 4.4 基于光谱值的镍基合金电镀层斑点缺陷检测结果

将多光谱图像剪裁为像素600×700，通过训练得到90条光谱曲线并取得平均值，将3种方法的检测光谱与真实光谱进行对比分析，得到实验结果如图5所示。

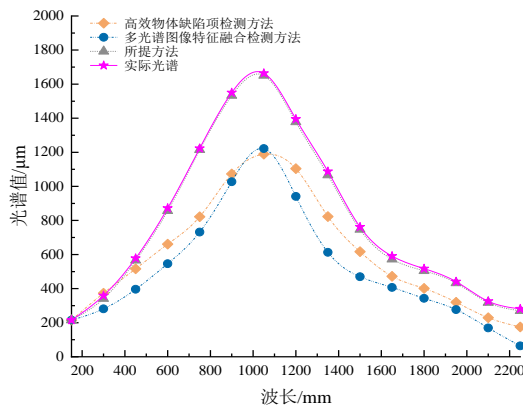


图5 3种方法平均光谱曲线

Fig.5 Average spectral curve of three methods

从图5中可以看出，所提方法的平均光谱曲线与实际光谱曲线展现出了极高的吻合度。具体而言，在波长对应关系方面，所提方法的光谱曲线能够精准地反映出实际光谱在不同波长下的光谱值变化情况，二者几乎完全重合。在曲线拐点的位置上，所提方法的光谱曲线拐点与实际光谱曲线的拐点位置高度一致，这意味着所提方法能够准确捕捉到光谱特性发生变化的关键位置。相比之下，另外两种方法的平均光谱曲线与实际光谱曲线存在较为明显的偏差，在波长对应关系上不能准确反映实际光谱值，在曲线拐点位置上也与实际光谱存在差异。这充分表明，所提方法在成像检测结果方面针对镍基合金电镀层斑点缺陷的检测精准度较高，能够可靠地获取与实际相符的光谱信息，其实际应用性能相较于另外两种方法具有显著优势，能够为镍基合金电镀层的质量检测提供更为准确和有效的依据。

## 5 结论

针对电镀层斑点缺陷检测中传统方法面临的噪声分离难、特征集构建不完整以及波频变化矩阵生成受干扰等问题，提出基于多光谱成像的检测方法，通过剖析数据低秩特性去噪、多尺度融合构建全面特征集、空间映射算法生成并分析波频变化矩阵，实现斑点缺陷精准定位。实验表明，该方法在

信噪比、缺陷特征可视化及光谱匹配度方面显著优于对比方法，可精准识别锌基合金电镀层中露铁斑、麻点斑等缺陷的轮廓、分布及光谱特征，检测结果与实际高度吻合。

## 参考文献

- [1] Mi J R, Li Q W, Li B Y. Efficient direct x-ray detection and imaging based on a lead-free electron donor-acceptor MOF[J]. ACS applied materials & interfaces, 2024, 16(7): 9002-9011.
- [2] 黄志海, 邓耀华, 吴光栋. IC 器件表面缺陷多光谱图像特征融合检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 24-33.
- [3] 张毅, 范玉刚. 基于深度学习与域自适应的工件涡流热成像的缺陷检测[J]. 红外技术, 2024, 46(3): 347-353.
- [4] 化春键, 孙明春, 蒋毅, 等. 基于改进 YOLOv7-tiny 的多光谱苹果表层缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(10): 236-244.
- [5] 张维召, 王静. 汽车后门外板电泳前基板团斑缺陷分析[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(8): 41-44.
- [6] 王麟博, 蔡长龙, 梁海锋, 等. 采用真空电弧离子镀膜技术制备厚铬膜的机械特性研究[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(1): 64-71.
- [7] 胡广华, 涂千禧. 基于光度立体和双流特征融合网络的工业产品表面缺陷检测方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(10): 112-123.
- [8] 张斌, 郭宇会, 杨小平, 等. 辊径对 Cu-Fe-P 铜合金轧制带材表面微观缺陷及性能的影响[J]. 锻压技术, 2024, 49(9): 122-128.
- [9] 王楠, 李震, 李佳盟, 等. 融合多光谱成像与深度学习的作物植株叶绿素检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S2): 260-269.
- [10] 刘俊泽, 贺英彩, 马秀琴, 等. 不同燕麦品种种子自然老化表型和多光谱变化特征[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3688-3697.
- [11] 方靖岳, 文之豪, 朱海涛, 等. 基于集成法布里-珀罗微腔阵列的 16 通道快照式多光谱成像[J]. 物理学报, 2024, 73(7): 164-173.
- [12] 狄荣育, 马晓珊, 李广运, 等. 空间目标多光谱成像仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(8): 36-40, 397.
- [13] 李敏, 王慧琴, 王可, 等. 基于卷积神经网络的城墙多光谱成像病害检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2024,

- 61(4): 542-550.
- [14] 葛宏义, 郭春燕, 蒋玉英, 等. 基于可见光和先进成像技术的粮食不完善粒快速检测研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 30-42.
- [15] 魏松岩, 孟祥强, 衣晓宾, 等. “一带一路”区域国产中高分辨率宽波段多光谱卫星数据获取技术研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(4): 776-782.
- [16] 吴鑫, 徐宝腾, 刘家林, 等. 基于 RGB-NIR 滤波阵列的引入权重系数的加权引导滤波去马赛克方法[J]. 光子学报, 2024, 53(9): 47-57.
- [17] 李广一, 朱涛, 杨欢红, 等. 火电厂区域分布式光伏支架表面锌铝合金镀层的腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(4): 1-5.
- [18] 张俊林, 黄宁, 李冬晓, 等. 单电源 VPPA-GTA 双面穿孔焊缺陷机理分析与工艺优化[J]. 热加工工艺, 2023, 52(1): 147-151, 156.
- [19] 姜修成, 张正加, 王猛猛, 等. 基于特征值分解和自适应滤波的极化相位优化方法[J]. 遥感学报, 2024, 28(3): 781-792.
- [20] 游大朋, 杨静, 张露, 等. Re-YOLOv5: 一种基于结构重参数化的钢材缺陷检测方法[J]. 测控技术, 2024, 43(3): 9-21.
- \*\*\*\*\*
- \*上接 116 页\*
- [60] 郑细鸣, 范荣玉. 膜表面纳米 TiO<sub>2</sub> 修饰层的构建及其抗蛋白质污染性能研究[J]. 膜科学与技术, 2018, 38(4): 8-13.
- [61] Zhang L, Wang Q, Chen Y, et al. S-scheme heterojunction-mediated charge transfer in TiO<sub>2</sub>/CdS for enhanced CO<sub>2</sub> photoreduction[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(15): 2308125.
- [62] Chen X, Li J, Wang S, et al. Atomically dispersed Pt on oxygen-defective TiO<sub>2</sub> for photocatalytic methane conversion[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, 145(8): 4796-4807.
- [63] Kim S, Park J, Lee H, et al. On-chip PEC biosensor for real-time pathogen detection using TiO<sub>2</sub> nanowire arrays[J]. *Nature Water*, 2023, 1(4): 301-311.
- [64] Wang X, Li Y, Jiang J, et al. Ag/TiO<sub>2</sub> hybrid nanoarray-integrated microfluidic SERS sensor for heavy metal detection[J]. *Analytical Chemistry*, 2024, 96(5): 2012-2020.
- [65] Garcia A, Martinez V, Lopez F, et al. Light-switchable TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> membranes for adaptive oil-water separation and pollutant degradation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(19): 202400517.
- [66] Liu R, Wang D, He Y, et al. NIR-responsive TiO<sub>2</sub> nanotube drug delivery system for synergistic photothermal/antibacterial therapy[J]. *Biomaterials*, 2024, 306: 122480.
- [67] Chen B, Lin S, Shi J, et al. TiO<sub>2</sub>-CuS nanocoating for photothermal eradication of bacterial biofilms[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 480: 148211.
- [68] Wu S, Huang F, Li Z, et al. Mg<sup>2+</sup>-incorporated TiO<sub>2</sub> coating promotes osseointegration of orthopedic implants[J]. *Bioactive Materials*, 2023, 28: 432-445.