

图像处理技术在传感器密封胶密封能力研究中的应用

□中航电测仪器股份有限公司 王小岗 刘超 黎文

【摘要】应变式传感器是目前应用比较广泛的一种传感器，盲孔灌封技术则是应变式传感器最常用的密封方法。在恶劣条件下，盲孔灌封结构达不到预期的密封效果，会导致传感器失效。本文介绍了一种借助图像处理技术研究传感器密封胶密封能力的方法。该方法设计试验，对钢板涂覆不同种类密封胶并将其放置在高温高湿环境中，通过定期显微镜拍摄，得到了钢板不同生锈状态的图像。进一步借助图像处理技术，对钢板生锈图像进行二值化，通过对比二值化图像中黑色像素点随时间变化的趋势，来判别钢板生锈情况的差异性，从而间接得出密封能力相对最优的一组密封胶，并通过实物验证支撑了该方法。

【关键词】应变式传感器；密封胶；密封能力；图像处理；二值化

文献标识码：A 文章编号：1003-1870（2024）12-0036-07

引言

电阻应变式传感器因其结构简单、寿命长、精度高、测量范围大、使用场合广等优点，被广泛应用于各个测控场景。正因为如此，电阻应变式传感器的应用环境也就比较复杂，有高湿度环境，有高温环境，有低温环境，有腐蚀环境，还有温度和湿度反复循环作用环境等。在这些使用条件下，如果传感器密封能力不好，其内部工作区域将会受到潮气、腐蚀气体、腐蚀液体、水、粉尘等介质的侵蚀，尤其是在多雨地区，长期的雨水浸泡冲刷，会使内部应变区域发生锈蚀，导致应变计不能正常工作，造成传感器的失效^[1]。

经过几十年的发展，目前电阻应变式传感器最常用的密封方法是盲孔灌封和焊接密封。虽然焊接密封相对可靠，但限于焊接工艺、焊接设备、成本等因素，盲孔灌封仍然是当前应用比较广泛的密封手段^[2-3]。

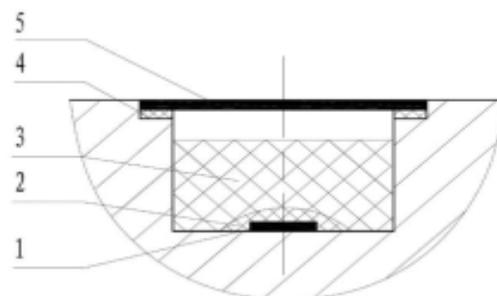
一种常见的盲孔灌封结构如图1所示。该结构密封分三个层次：

(1) 应变计1表面涂覆保护面胶2（通常为单组

份）。

(2) 应变盲孔内灌封双组份灌封胶3（单层或多层）。

(3) 应变孔通过粘接胶4，粘贴金属盖板5进行防护。



1- 应变计；2- 保护面胶；3- 双组份灌封胶；4- 粘接胶；5- 金属盖板

图1 常见应变孔盲孔灌封结构

传感器应变孔使用的防护胶均为硅橡胶，任何硅橡胶都具备一定的透水性，也就是存在水蒸气或者水分子透过防护胶与应变计接触的情况。这也进一步说明，对于图1所示的灌封结构，选择一组透水

性好、密封能力相对较优的密封胶，是该结构能否实现可靠密封的关键所在。

大部分研究人员目前采用以下两种方式验证密封胶密封能力：

(1) 实物验证法。将需要验证的密封胶涂覆在传感器实物内，将传感器放置在一定温度、湿度及大气压环境下进行试验，通过测量传感器的零点、绝缘阻抗等性能来判断密封能力或效果。该方法是最直接的方法。

(2) 送样检测法。即将需要验证的密封胶送到专业检测机构，参照《GB/T1037 塑料材料和片材透水蒸气性试验方法杯式法》或《ISO 1420-2001 Rubber- or plastics-coated fabrics - Determination of resistance to penetration》（橡胶或塑料涂覆织物的耐水渗透性测定方法）等方法，测定送检密封胶的透水率，反向推断其密封能力。该方法属于间接的方法。

上述两种方法均能实现密封胶密封能力的试验验证，但面对多种以及多轮次密封胶密封能力的验证时，则显现出试验周期长、验证成本高的现实问题。尤其对于工厂来说，可能会经常针对一些密封胶开展密封能力验证，上述两种方法则显得非常不经济。

基于以上问题，本文设计了简化试验以研究密封胶密封能力，并取得了明显效果，为高效开展传感器密封胶密封能力试验提供参考。

1 试验设计

1.1 试验原理

本试验基本原理见图2。圆形试验钢板（碳素钢板）放于透明玻璃杯底部，试验钢板上面涂一层面胶，面胶上面为灌密封胶。玻璃杯底部厚度均匀易

于观测，试验钢板在机械加工后不做热处理，不涂油，使其具备金属光泽，同时保持加工表面干燥、干净。水分子透过灌密封胶和面胶与钢板接触后，会导致钢板生锈。因此，该试验旨在通过玻璃杯底部试验钢板生锈情况来判断密封胶的密封能力，同时测量试验钢板生锈区域的绝缘电阻变化情况进行辅助判断，测量钢板生锈区域绝缘电阻需将钢板从玻璃杯底部取出，并将钢板表面面胶去除干净，测量方法如图3所示。钢板生锈情况与绝缘电阻大致对应关系如表1所示，生锈程度轻的绝缘电阻小，生锈程度重的绝缘电阻大。

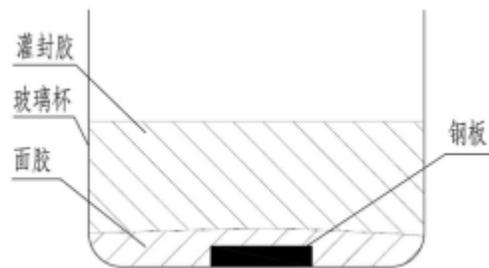


图2 密封试验

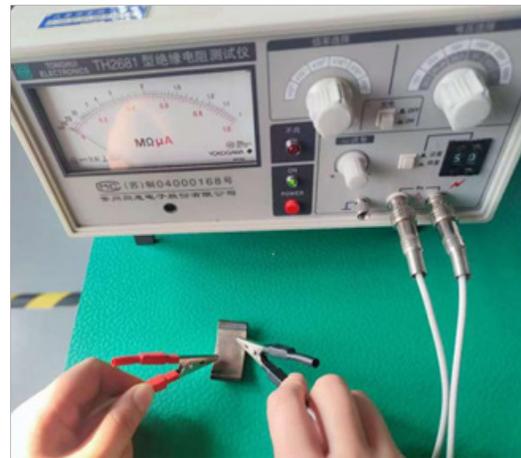


图3 测量钢板绝缘电阻

表1 绝缘电阻变化情况

单位：MΩ

生锈情况 (目视)	没有生锈	轻度生锈 (约1/4)	中度生锈 (约1/2)	重度生锈 (基本布满区域)
绝缘电阻 (电压50VDC)	0	1000 ~ 2000	2000 ~ 5000	≥5000

经过该试验初选后，可以将密封能力相对较优的密封胶在传感器实物上开展进一步验证。

在实际生产中，传感器往往采用化学镀镍的方

式进行表面处理，为了让试验最大限度接近实际，玻璃杯的侧壁也采用化学镀镍方式处理，以保证试验中胶水与粘接面的粘接状态与实物中一致。

1.2 试验分组

为了充分对比不同组合下的密封胶的密封能力, 试验选择了两种单组份面胶A、B, 两种双组份灌封胶C、D。其中双组份灌封胶C、D又有1:1和1:2两种配比。通过组合, 共有8组试验密封胶进行试验, 具体分组如表2所示。

表2 试验密封胶分组

组别	组合	备注
第一组	面胶A+ 灌封胶C	灌封胶C 配比1:1
第二组	面胶A+ 灌封胶C	灌封胶C 配比1:2
第三组	面胶A+ 灌封胶D	灌封胶D 配比1:1
第四组	面胶A+ 灌封胶D	灌封胶D 配比1:2
第五组	面胶B+ 灌封胶C	灌封胶C 配比1:1
第六组	面胶B+ 灌封胶C	灌封胶C 配比1:2
第七组	面胶B+ 灌封胶D	灌封胶D 配比1:1
第八组	面胶B+ 灌封胶D	灌封胶D 配比1:2

在正常状态下, 试验钢板的生锈情况变化较慢。为了缩短试验周期, 将试验件放置在100℃水蒸气中, 通过人为创造高温、高湿环境来加速试验。

在试验过程中分别观察试验件在0、24h、48h、72h、96h、120h、144h、168h的状态, 并通过显微镜拍摄, 获取试验钢板的生锈图像。

2 图像处理

显微镜拍摄到的试验图像, 通过人眼观察并不能准确地判断生锈情况。因此, 需要借助图像处理技术来更精准地完成试验分析工作。

通过显微镜拍摄到的图像为数字图像, 数字图像在计算机中采用二维数组 $f(x, y)$, 或者是一个 $M \times N$ 的二维矩阵(M 为图像行数, N 为图像的列数)表示和存储:

$$F = \begin{bmatrix} f(1,1) & \cdots & f(1,N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M,1) & \cdots & f(M,N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

数字图像在计算机中表示时, 被等间隔的网格划分成大小相同的小方格, 每一个小方格即为像素点, 对应到矩阵中, 就是具体的像素值, 该像素值代表了图像中某一个方块的平均亮度信息。因此, 图像在经过数字化处理之后, 得到的就是式(1)所示

的一个二维整数矩阵, 矩阵的大小由图像像素的多少决定。

通过图像处理, 对拍摄图像进行二值化, 提取图像像素矩阵中黑色像素数据, 得到黑色像素随时间变化的趋势。根据变化趋势, 就可以判断出哪一组密封胶的密封能力相对最优。

2.1 图像灰度化

显微镜拍摄得到的图像为彩色图像。彩色图像中每个像素均由R、G、B三个分量来决定, 而每个分量的取值范围都在0~255之间, 这样, 彩色图像的一个像素点就会有 $16777216 (256 \times 256 \times 256)$ 种颜色的变化, 这样会导致彩色图像的信息量过大。

灰度化就是使彩色图像的R、G、B分量相等的过程, 即 $R=G=B$ 。灰度图像中的一个像素点只有256(0~255)中颜色变化。图像灰度化的目的就是为了提高运算速度。

实施图像处理的第一步, 就是要将彩色图像转为灰度图像。

2.2 图像去噪

图像在采集、生成、传输等过程中, 由于采集设备缺陷、环境干扰、光照不均匀等原因, 会不可避免地产生噪声, 这对后续的处理尤其是图像分割、特征提取等操作产生直接影响。因此, 为了获取高质量的数字图像, 需要在图像处理前进行降噪处理。

图像降噪的方法有很多, 通过滤波的形式可以实现降噪。比较常用的滤波方法有均值滤波、中值滤波、自适应滤波、高斯滤波、同态滤波等。

均值滤波也称为线性滤波, 其基本原理是用每个像素和它周围像素计算出来的平均值替换图像中的每个像素。从频率域角度, 均值滤波是一种低通滤波器, 高频信号会被去掉。均值滤波可以帮助消除图像尖锐噪声, 实现图像的平滑。

中值滤波是一种非线性滤波, 是通过对临域内像素按灰度值排序的结果决定中心像素的灰度。中值滤波对于滤除脉冲干扰及图像扫描噪声最为有效, 还可以克服线性滤波带来的图像模糊问题。

自适应滤波可以利用前一时刻已得的滤波器参

数的结果，自动调节当前时刻的滤波器参数，以适应信号和噪声未知的或随时间变化的统计特性，从而实现最优滤波。

高斯滤波也是一种线性滤波，其原理是取滤波窗口内像素的均值作为输出。高斯滤波能够有效抑制噪声，平滑图像，相比于均值滤波，高斯滤波对图像模糊程度较小。

同态滤波是一种在频域中进行的图像对比度增强和压缩图像亮度范围的特殊方法。同态滤波能够减少低频并且增加高频，从而减少光照变化并锐化边缘细节。

每一种滤波方法都有其自身的优势，但也有不足之处，在应用中，要根据实际情况选取合适的滤波方法^[4-11]。

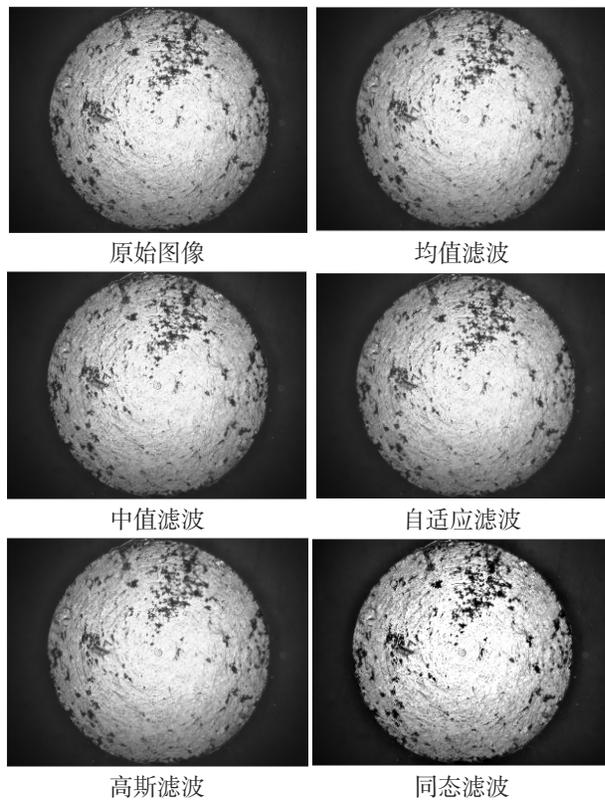


图4 不同滤波方法滤波结果

图4是采用不同的滤波方法对原始图像滤波后得到的图像。根据滤波结果，通过肉眼主观评价并不能准确判断哪一种滤波方法适用于试验图像的去噪，需要借助一些量化指标对去噪效果进行客观评价，从而做出取舍。本试验中采用峰值信噪比PSNR

来衡量滤波降噪效果。

PSNR表示信号最大可能功率与噪声功率的比值，单位为分贝(dB)。PSNR越大，表明去噪效果越好，图像质量越高。设原图像为I，滤波后的图像为J，二者大小一致，均为M×N，则图像J的PSNR计算公式为：

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (2)$$

通过显微镜得到图像为jpg格式，该格式RGB图像以8位色彩深度进行记录。

对于8位图像，MAXI=255。MSE表示图像J与图像I的均方误差，其计算公式为：

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i,j) - J(i,j)]^2 \quad (3)$$

随机选取3张试验图像，按照上述不同的方法进行滤波，并计算PSNR，结果如表3所示。从该表可以看出，在本试验图像采用中值滤波的方法去噪效果最好。

表3 各滤波方法的PSNR比较 单位：dB

	均值滤波	中值滤波	自适应滤波	高斯滤波	同态滤波
试验图像1	35.4842	43.3347	39.6301	37.5277	24.8302
试验图像2	32.1075	40.6735	35.8684	34.2322	24.3906
试验图像3	32.1982	40.2974	35.9658	34.2803	25.8692

2.3 图像二值化

图像的二值化，就是将图像上的像素点的灰度值设置为0或255，也就是将整个图像设置成只有黑白的视觉效果。通过对二值化后的图像像素值进行提取分析，便可统计黑色像素点或白色像素点个数，借助该统计数据来辅助分析生锈区域的扩大趋势或者非生锈区域的减小趋势。

对图像二值化处理，需要设置一个合适的全局阈值T，用于图像数据的分类。根据该阈值T，可以将原灰度图像像素值0~255分割成两部分，即小于T的像素和大于T的像素。小于T的像素会被判定为0，大于T的像素会被判定为255，从而得到我们需要的二值图。

在固定时间间隔使用最大类间方差的方法，可

以得到阈值。该方法能够按照图像的灰度特性，将图像分成目标和背景两部分，两部分的类间方差越大，构成图像的两部分差别就越大，也就意味着使用该方法能够得到一张更好的二值图。

假定滤波后的图像J，目标像素点占比为 ω_0 ，其平均灰度为 μ_0 ；背景像素点为 ω_1 ，其平均灰度为 μ_1 。图像J的总平均灰度记为 μ ，类间方差记为g，图像大小仍为 $M \times N$ 。图像中像素灰度值小于阈值T的像素个数为 N_0 ，像素灰度值大于阈值T的像素个数为 N_1 ，则有：

$$\omega_0 = N_0 / (M \times N) \quad (4)$$

$$\omega_1 = N_1 / (M \times N) \quad (5)$$

$$N_0 + N_1 = M \times N \quad (6)$$

$$\omega_0 + \omega_1 = 1 \quad (7)$$

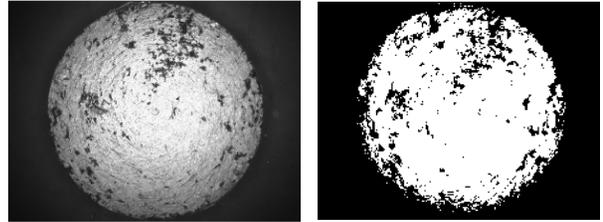
$$\mu = \omega_0 \times \mu_0 + \omega_1 \times \mu_1 \quad (8)$$

$$g = \omega_0 \times (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 \times (\mu_1 - \mu)^2 \quad (9)$$

按照式(9)通过遍历的方法，得到使类间方差最大的阈值T，之后都采用此阈值T判断分割图像。

借助于MATLAB函数，可以直接进行阈值T的计算及二值图的生成，其调用代码为：

`T=graythresh(J)`；%J为滤波后的图像，`graythresh`为最大类间方差函数`A=im2bw(J,T)`；%`im2bw`将灰度图像J转化为二值图`imshow(A,[])`；按照上述方法得到的二值图如图5所示。



原始图像 二值化图像

图5 二值化结果

3 试验结果

3.1 数据分析

借助于图像二值化处理，可以比较直观地统计出不同密封胶组合条件下试验钢板的生锈情况。

第一组密封胶连续试验7天(168h)拍摄的图像经过二值化处理后如图6所示。

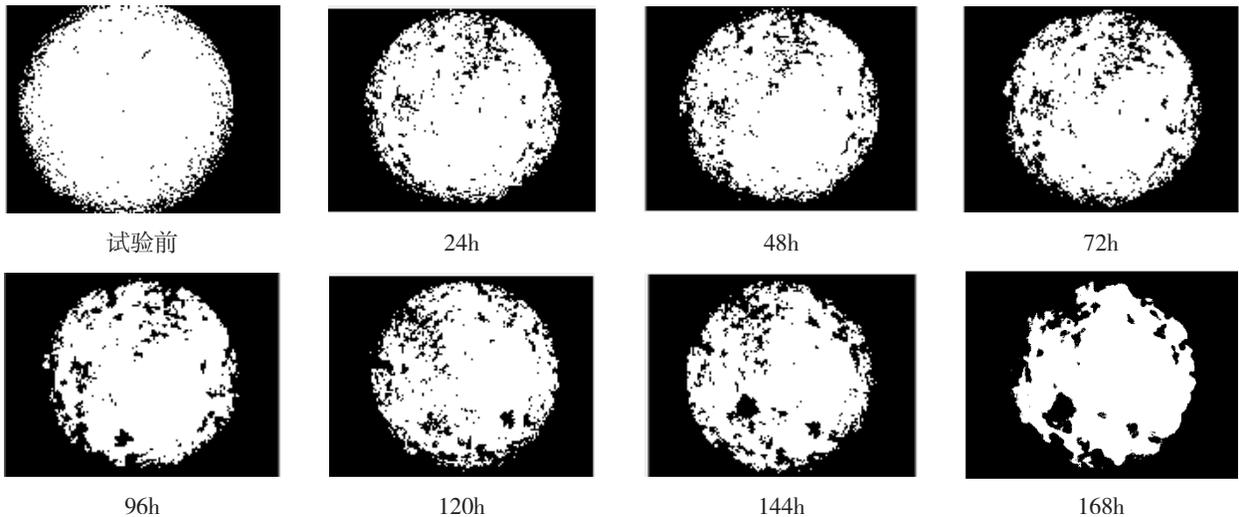


图6 第一组密封胶试验图像二值化照片

对8个试验组的图像全部进行二值化处理，其中黑色像素点个数随时间的变化趋势如图7所示。

并对8个试验组的钢板在试验前后进行绝缘阻抗

测试，如表4所示。

根据图7和表4数据，可以作出以下分析：

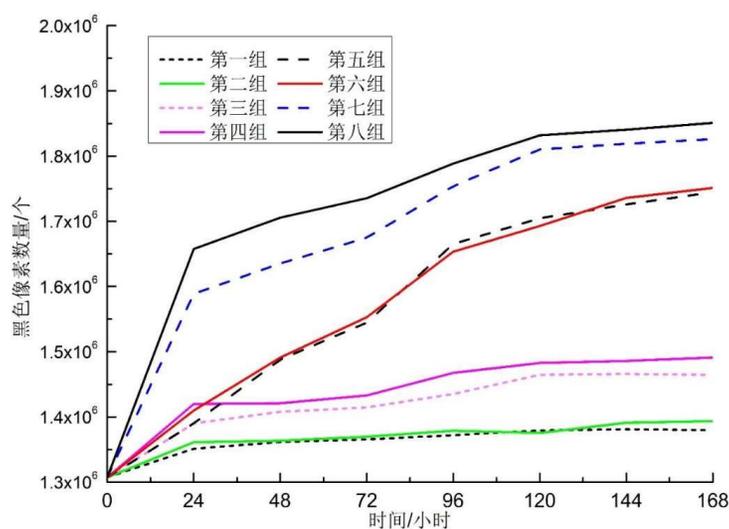


图7 黑色像素数量统计

表4 试验钢板绝缘电阻测试数据

单位: MΩ

序号	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组	第七组	第八组
试验前绝缘阻抗 (电压50VDC)	0	0	0	0	0	0	0	0
试验后绝缘阻抗 (电压50VDC)	0	0	57	69	254	266	342	458

(1) 由第一组、第二组数据和第五组、第六组数据可以看出, 面胶A 防水性能优于面胶B, 灌密封胶C 配比为1:1 和1:2 时防水性能基本没有差异。

(2) 由第三组、第四组数据和第七组、第八组数据可以看出, 灌密封胶D 配比为1:1 时防水性能优于配比为1:2 时的防水性能。

(3) 由第一组、第三组数据和第五组、第七组数据可以看出, 灌密封胶C 的防水性能优于灌密封胶D 的防水性能。

(4) 随着生锈程度越来越重, 试验钢板绝缘电阻的变化趋势和黑色像素点的变化趋势基本一致,

进一步佐证了上述不同密封胶防水性能试验的准确性。

根据8 个试验组分析数据, 最终确定出第一组和第二组, 即面胶A+ 灌密封胶C(1:1 或1:2) 的防水性能相对最优。

3.2 实物验证

制作6 件传感器, 分成两组, 分别使用第一组、第八组密封胶密封贴片孔, 在确保其余位置可靠密封后, 将贴片孔放在水中持续浸泡1 个月, 到期后检测零点、灵敏度与绝缘, 结果见表5、表6。

表5 使用第一组密封胶试验件放置前后测试数据

编号	放置前			水中放置1 个月以后		
	零点 (mV/V)	灵敏度 (mV/V)	绝缘 (MΩ)	零点 (mV/V)	灵敏度 (mV/V)	绝缘 (MΩ)
1	0.0189	2.0171	≥5000	0.0183	2.0173	≥5000
2	0.0057	2.0103	≥5000	0.0061	2.0105	≥5000
3	0.0125	2.0159	≥5000	0.0129	2.0160	≥5000

表6 使用第八组密封胶试验件放置前后测试数据

编号	放置前			水中放置1个月以后		
	零点 (mV/V)	灵敏度 (mV/V)	绝缘 (MΩ)	零点 (mV/V)	灵敏度 (mV/V)	绝缘 (MΩ)
1	0.0112	2.0113	≥5000	0.0120	2.0114	2300
2	0.0134	2.0134	≥5000	0.0139	2.0136	3800
3	0.0157	2.0078	≥5000	0.0151	2.0080	3500

根据表5,使用第一组密封胶的3件试验件在水中放置1个月以后,零点、灵敏度没有发生变化,绝缘阻抗仍然满足要求。根据表6,使用第八组密封胶的3件试验件在水中放置1个月以后,零点发生微小变化,灵敏度保持不变,但绝缘阻抗已经低于5000MΩ,不满足使用要求。该试验数据也从侧面支撑了前述分析结果。

4 结语

本文通过设置高温、高湿条件加速试验,得出试验钢板在不同配比成分的密封胶覆盖下生锈状态随时间变化的图像,并通过数字图像处理,统计出试验图像二值图中黑色像素点变化规律,分析出不同密封胶密封条件下试验钢板生锈状态随时间变化的趋势,从而得出防水性能相对最优的一组密封胶,为后续进一步实物验证提供依据。为提高该试验的准确性,在试验中需要注意以下几点:

(1) 显微镜型号: ISH300, 曝光时间: 5ms ~ 0.5s, 物镜变倍范围: 0.7—4.5X, 补偿光源: 白炽灯。拍摄过程中,显微镜的各项参数如曝光时间、物镜变倍范围(焦距)、补偿光源等要保持一致,同时周边环境如光照情况、振动情况等也需要保持一致,而且试验件拍摄位置也需要保持一致。

(2) 试验用的垫片在试验前要在显微镜下拍照,并通过图像处理进行筛选,筛选出黑色像素点数量相对比较接近的参与试验。

参考文献

[1] 许华峰,董燕.电阻应变式称重传感器的密封[J].衡器,1997,89:27-29.
 [2] 李军,李赋梅.电阻应变式称重传感器新型密封方法[J].自动化仪表,1995,3:1-4.
 [3] 王云章.应变式传感器胶封技术的研究[J]首

届全国称重技术研讨会论文集,1999,222-235.

[4] 陈银星.多图像去噪方法及应用[D].江门:五邑大学,2019.

[5] 陈彦.基于图像去噪方法的研究[J].数字技术与应用,2017,5:131-135.

[6] 高欣欣.几类数字图像降噪算法研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.

[7] 王波.滤除椒盐噪声的改进中值滤波算法比较[J].贵阳学院学报,2019,3:83-87.

[8] 张婷.视频通讯中的图像处理技术探讨[J].通讯技术,2020,5:76-77.

[9] 李晶晶,贾雪松,耿立明.数字图像去噪处理方法研究与实现[J].信息记录材料,2019,8:104-105.

[10] 杨成佳.图像去噪及其效果评估若干问题研究[D].吉林:吉林大学,2016.

[11] 燕红文,邓雪峰.中值滤波在数字图像去噪中的应用[J].计算机时代,2020,2:47-49.

作者简介

王小岗,中航电测仪器股份有限公司主任设计师,传感器技术专家,中国衡器专家委员会技术专家。荣获:汉航集团科技技术进步奖4项;“85”国家重点攻关项目2项;国家专利20余项;吉林省科学发明奖1项。