

中国腐蚀与防护学会标准

T/CSCP 0019--2024

电网金属设备防腐蚀运维诊断策略 技术导则

Technical guidelines for anti-corrosion operation and
maintenance diagnosis strategy of power grid equipment

2024-11-04 发布

2024-12-04 实施

中国腐蚀与防护学会 发布

前 言

本文件基于电网金属构件的腐蚀安全状态评估，在此基础上提出了适用于电网金属构件防腐蚀策略。

本文件按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

本文件由中国腐蚀与防护学会（CSCP）提出并归口。

本文件属于中国腐蚀与防护学会的团体标准。

本文件主要起草单位：国网浙江省电力有限公司电力科学研究院，北京科技大学，国网智能电网研究院有限公司

本文件参加起草单位：广州天韵达新材料科技有限公司、国家材料腐蚀与防护科学数据中心、北京材料基因工程高精尖创新中心、广州市南沙区贝科耐蚀新材料研究院、新兴铸管股份有限公司、首钢集团有限公司、杭州意能电力技术有限公司。

本文件主要起草人：柳森，李晓刚，程学群，胡家元，杨小佳，郝文魁，陈云，李治国，宋小宁，李延伟、温小涵，孙雷，李清，王昕煜，陈永峰，张达威，杨建炜，王昌辉，刘锬，刘超，杨体绍，杨吉可，杜翠薇，刘智勇，张博威，骆鸿，马宏驰，杨柳，朱仁政

目 录

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语..... 1

4 一般规定..... 2

5 防腐蚀诊断程序..... 2

6 环境腐蚀性等级评估..... 4

7 防腐蚀干预时机..... 4

8 腐蚀安全等级..... 5

9 金属防腐蚀预判模型..... 6

附录 A 环境腐蚀性等级划分..... 8

附录 B 金属腐蚀分级评估方法..... 9

附录 C 金属腐蚀图像定量分析方法..... 10

1 范围

本文件规定了电网金属构件防腐蚀运维诊断策略，策略包括基于电网金属的图像识别技术、电网金属构件防腐蚀干预时机、基于大数据的环境腐蚀性评估技术，在以上评估基础上开展金属构件的防腐运维策略。

本文件适用于电网金属构件防腐蚀运维诊断，在此基础上构建电网金属构件的防腐蚀策略。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 15957-1995 大气环境腐蚀性分类

GB/T 19292.1-2018/ISO 9223-2012 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性分类

DL/T2055-2019 输电线路钢结构腐蚀安全评估导则

T/CSCP 0035.5-2017 低合金结构钢实验室腐蚀试验 第5部分:低合金结构钢模拟干湿交替腐蚀试验的一般规程

T/CSEE 0076-2018 输电线路钢制杆塔腐蚀状态评估导则

ISO 12944-2 腐蚀环境分类

DL/T 1424-2015 《电网金属技术监督规程》

DL/T 1425-2015 《变电站金属材料腐蚀防护技术导则》

DL/T 1453-2015 《输电线路铁塔防腐蚀保护涂装》

JGJ/T 251-2011 《建筑钢结构防腐蚀技术规程》

GB/T 19292.1-2003 《金属和合金的腐蚀大气腐蚀性:分类》

GB 50545-2010 《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》

Q/GDW 11717-2017 《电网设备金属技术监督导则》

3 术语

3.1 金属 galvanized steel

指在碳钢基础上进行镀锌表面处理的钢。

3.2 腐蚀速率 corrosion rate

指金属材料在特定环境下腐蚀减薄或腐蚀失重与暴露时间的比值。

3.3 大气腐蚀等级 atmospheric corrosion grade

指按照大气腐蚀性将大气腐蚀类型划分的等级标准。

3.4 图像识别 image identification

指根据环境影响因子大小相关联的材料腐蚀函数。

3.5 腐蚀大数据技术 corrosion big data technology

指利用大数据技术处理腐蚀科学问题的技术及方法，包括多源异构的腐蚀数据采集、数据挖掘、模拟仿真及数据共享等。

3.6 防腐蚀运维 Anti-corrosion operation and maintenance

指对电网钢构件进行腐蚀防护管理的行为。

4 一般规定

a) 电网金属构件防腐蚀策略应结合现场金属实际构件类型进行分类制定相应的策略，并与日常巡视、检测相结合。运行维护单位应全面做好设备和部件的腐蚀状态评估，为状态检修提供科学依据；

b) 金属防腐蚀策略制定应贯彻安全第一、预防为主和过程控制的方针，积极识别正在和将要发生腐蚀的部位，在线路钢结构腐蚀状态分析评估的基础上，逐步开展线路状态检修工作，提前提出防腐维护或更换措施，并制订检修计划；

c) 当采用本标准中不同方法对同一对象的评估结果存在差异时，应以最严重的评估结果为准；

d) 本标准提出的防腐蚀策略可用于现场腐蚀策略评估制定，是现场的快速腐蚀策略制定的简便方法，基于电力行业的安全特性和要求，其分析的结果将是保守的；

e) 金属构件防腐蚀策略除执行本标准外，尚应严格执行电力安全工作规程的有关规定，并执行符合现有的国家标准规定，不得降低原有防腐蚀安全程度；

5 防腐蚀诊断程序

5.1 要求

电网金属构件防腐蚀运维诊断策略由诊断策略前准备、腐蚀形貌宏观检查、环境腐蚀性评估、腐蚀测量与试验、综合防护策略制定五个步骤组成，应按照顺序开展并给出相关结果。

5.2 策略前准备

5.2.1 开展防腐蚀策略前的准备工作，包括明确防腐蚀对象与范围，收集相关的金属资料与数据。

5.2.2 收集的资料和数据应包括但不限于：

- a)金属设备原始资料，如设计图纸、计算书、质量证明文件、施工记录、竣工报告等；
- b)腐蚀环境信息，如地理位置，大气和土壤腐蚀性，污染物信息等；
- c)运行历史数据，如服役年限、故障和维护历史、以往的检测记录等；

5.3 腐蚀形貌宏观检查

5.3.1 开展金属构件腐蚀形貌的宏观检查，主要是对金属构件进行目测评价，并拍照记录，对照腐蚀特征图谱，利用图像识别技术对图谱进行腐蚀安全等级划分。图像识别技术主要是对图像锈斑尺寸或腐蚀面积进行测量。

5.3.2 经过本步骤的评估，金属结构防腐蚀策略可以归为以下几类中的一种：

- a)无需处理，评估金属构件处于微弱腐蚀状态；
- b)需关注，需要开展环境腐蚀性等级评估及腐蚀剩余寿命预测；
- c)立即处理，需要针对性的进行防腐蚀维护；
- d)重新评估，需要进一步明确腐蚀性环境因子，并针对性的开展防腐蚀运维；

5.4 环境腐蚀性评估

依据腐蚀形貌的宏观检查结果，需要对现场环境腐蚀性进一步测量，采用传感器技术对现场碳钢、锌、铜、铝的腐蚀速率进行测量；同时对环境腐蚀因子进行测量，测量的环境因子包含但不限于温度、湿度、二氧化硫、二氧化氮、PM2.5、氯离子等。应进行连续同步测量，数据采集间隔不低于5分钟/次，测量时间不少于30天。

5.5 腐蚀剩余寿命预测

依据腐蚀形貌的宏观检查结果，需要对金属设备的腐蚀剩余厚度进行参数测量，需要一定的特殊装备对金属的厚度、基体的厚度进行测量。

5.6 综合防护策略

5.6.1 依据前面步骤的结果对输电线路钢结构的腐蚀状态进行诊断性评价，确定是否需要进行防腐维护或更换。必要时还应分析腐蚀的原因，评估安全寿命，提出防腐措施等。对评估结果应建立档案备查。

5.6.2 基于本步骤评估的结果，钢结构防腐蚀策略被归为以下几类中的一种：

- a)无需处理，在未来的检测周期中检测；
- b)实施防腐维护措施缓解腐蚀；
- c)更换或修复、加固结构。

6 环境腐蚀性等级评估

6.1 评估方法

6.1.1 大气环境腐蚀性等级分为 C1、C2、C3、C4、C5、CX 六个腐蚀等级，见附录 A。

6.1.2 确定金属构件腐蚀速率，其计算方法依据附录 A，依据碳钢或金属环境腐蚀速率确定金属铁塔构件所处环境等级。

6.2 评估手段

6.2.1 一般采用腐蚀试片法进行腐蚀速率的直接测定，测试方法按 GB/T19292.4 执行。当标准碳钢试样和标准锌试样的评定结果不一致时，应取较重的腐蚀等级。

6.2.2 在需要短时间内评估环境腐蚀性等级时，需要采用在线监测方法，对金属构件所处环境中金属的腐蚀速率进行测量，测量包括碳钢和镀锌层腐蚀速率。

6.2.2 当环境中明显存在污染物，或者需要明确环境腐蚀性因子时，需要进一步对环境因子进行测量，测量的环境因子包含但不限于温度、湿度、二氧化硫、二氧化氮、PM2.5、氯离子等。

6.2.3 腐蚀环境评估可先根据线路路径区域内类似工程钢结构的腐蚀历史情况，简单判定环境腐蚀等级。对新铁塔或类似钢结构在 6 年以内即发生重腐蚀的地区，可判定为 CX 腐蚀环境；对新铁塔或类似钢结构在 10 年以内即发生重腐蚀的地区，可判定为 C5 腐蚀环境；对新铁塔或类似钢结构在 15 年以内发生重腐蚀的地区，可判定为 C4 及以上腐蚀环境。

6.3 评估周期

6.3.1 对于利用腐蚀试片法对环境腐蚀性评估，评估周期应为 1 年、2 年、4 年、8 年。

6.3.2 对于利用在线监测方法评估环境腐蚀性，现场监测时间不少于 1 个月，数据采集间隔不少于 5 分/次。

7 防腐蚀干预时机

7.1 防腐蚀状态评级

依据 DL/T2055-2019 中输变线路杆塔典型腐蚀图谱对应的腐蚀等级，也即 A—微腐蚀、B—弱腐蚀、C—轻腐蚀、D—中腐蚀、E—重腐蚀、F—极重腐蚀六个腐蚀等级；

7.2 最佳干预时机

7.2.1 对金属表面腐蚀状态进行分级，明确当前金属表面腐蚀安全等级，实际可在金属表面腐蚀各个安全等级下进行腐蚀干预；

7.2.2 明确无论当前金属构件经过何种防腐蚀运维，当前状态若处于中腐蚀状态为当前策略中最佳防腐干预时机；

8 腐蚀安全等级

依据金属结构的腐蚀演化规律与各阶段典型形貌特征，将一般钢构件分为6个腐蚀程度等级，各等级对应的具体描述如下：

(1)A 级：微腐蚀

钢铁基体与表面镀锌层均完好。没有明显可见锈蚀，也没有明显颜色变化。表面镀锌层保持原来的青灰色或青白色，表面光滑平整。

(2) B 级：弱腐蚀

钢铁基体完好，镀锌层发生较明显腐蚀。钢铁基体没有明显锈蚀，但表面镀锌层颜色发生变化。局部镀锌层颜色变成暗灰色或灰黑色，或出现白锈、锌盐产物。

(3)C 级：轻腐蚀

镀锌层腐蚀消耗显著，钢铁基体出现轻微点锈，但点锈尚未联结成片。表面镀锌层出现棕色锈点，用手摸粗糙不平，有毛刺感，表明已露出钢铁基体。如果为均匀腐蚀，锈蚀面积 $<3\%$ ；如果为局部腐蚀，单个黄锈斑的面积 $<1\text{cm}^2$ 。

(4)D 级：中腐蚀

钢铁基体发生中等程度腐蚀。钢结构表面出现明显的黄锈，黄锈已初步联结成片，较大面积锈斑主要在构件边角产生。如果为均匀腐蚀， $3\% \leq \text{锈蚀面积} < 10\%$ ；如果为局部腐蚀， $1\text{cm}^2 \leq \text{单个黄锈斑的面积} < 4\text{cm}^2$ ，有可见蚀坑时最大腐蚀深度 $<0.5\text{mm}$ 。

(5) E 级：重腐蚀

钢铁基体发生较重腐蚀。钢结构表面出现较大的黄锈并联结成片，边角和中间区域均产生。如果为均匀腐蚀， $10\% \leq \text{锈蚀面积} < 33\%$ ；如果为局部腐蚀， $4\text{cm}^2 \leq \text{单个黄锈斑的面积} < 9\text{cm}^2$ ，有明显蚀坑， $0.5\text{mm} \leq \text{最大腐蚀深度} < 1\text{mm}$ 。

(6)F 级：极重腐蚀

钢铁基体发生严重腐蚀。表面出现大面积黄锈，且常伴随黄锈联结成片或分层、起壳、穿孔现象。如果为均匀腐蚀，锈蚀面积 $\geq 33\%$ ；如果为局部腐蚀，单个黄锈斑的面积 $\geq 9\text{cm}^2$ ，或有严重蚀坑，最大腐蚀深度 $\geq 1\text{mm}$ 。

9 金属防腐蚀预判模型

9.1 一般要求

9.1.1 依据金属所处状态及环境腐蚀性等级，对需要制定防腐蚀策略的金属构件，应进行腐蚀预判；

9.1.2 现场腐蚀寿命预判可测量金属剩余厚度，并与金属初始厚度进行比较，当整体失厚超过碳钢基体厚度的 80%时，认为金属构件已超过服役年限，此时无需进行腐蚀预判，需进行防腐蚀运维工作；

9.1.3 对于现场测量尚未失效的金属构件，需进行防腐蚀运维时机预判，并确定最佳防腐蚀干预时机；

9.1.4 以上工作确定了金属最佳防腐蚀干预时机，结合实际金属服役过程，进一步建立金属防腐蚀预判模型。

9.1.5 一般认为，处于中腐蚀状态时为金属构件的最佳防腐蚀干预时机，其他特殊情况应依据时机试验结果进行分析；

9.2 防腐蚀模型预判过程

9.2.1 利用金属腐蚀图像识别技术，对现有服役金属的腐蚀状态进行评价，结合本项目第二部分工作，将金属腐蚀状态分为微腐蚀、弱腐蚀、轻腐蚀、中腐蚀、重腐蚀以及极重腐蚀 6 个状态；

9.2.3 当腐蚀图像识别判断金属当前腐蚀状态处于微腐蚀、弱腐蚀或轻腐蚀时，此时无需进行防腐蚀运维，进入预判模型的下一个阶段，即进行基于大数据技术的腐蚀进程预测及寿命评估，也即本项目第三部分工作，通过金属腐蚀进程预测，评估金属达到中腐蚀所需要的时间，给出预期时间；

9.2.4 当腐蚀图像识别判断金属当前腐蚀状态处于中腐蚀时，应立即进行防腐蚀运维工作；

9.2.5 当腐蚀图像识别判断金属当前腐蚀状态处于重腐蚀或极重腐蚀时，进入预判模型的下一个阶段，即进行基于大数据技术的腐蚀进程预测及寿命评估，也即本项目第三部分工作，此时通过金属腐蚀进程预测模型，对影响金属的环境腐蚀性因子进行分析，针对影响金属腐蚀的环境因子进行防腐蚀方法设计，并进行防腐蚀运维施工；

9.2.6 处于微腐蚀、弱腐蚀或轻腐蚀部分，当腐蚀预判时机来临之前，应再次进行腐蚀图像识别，判断金属是否已达中腐蚀，如达到中腐蚀，即进行防腐蚀运维施工；

9.2.7 以上防腐蚀运维结束后，在一定的防腐蚀巡检期限内，再次进行电网金属腐蚀图像识别，并重复进行以上防腐蚀预判模型。

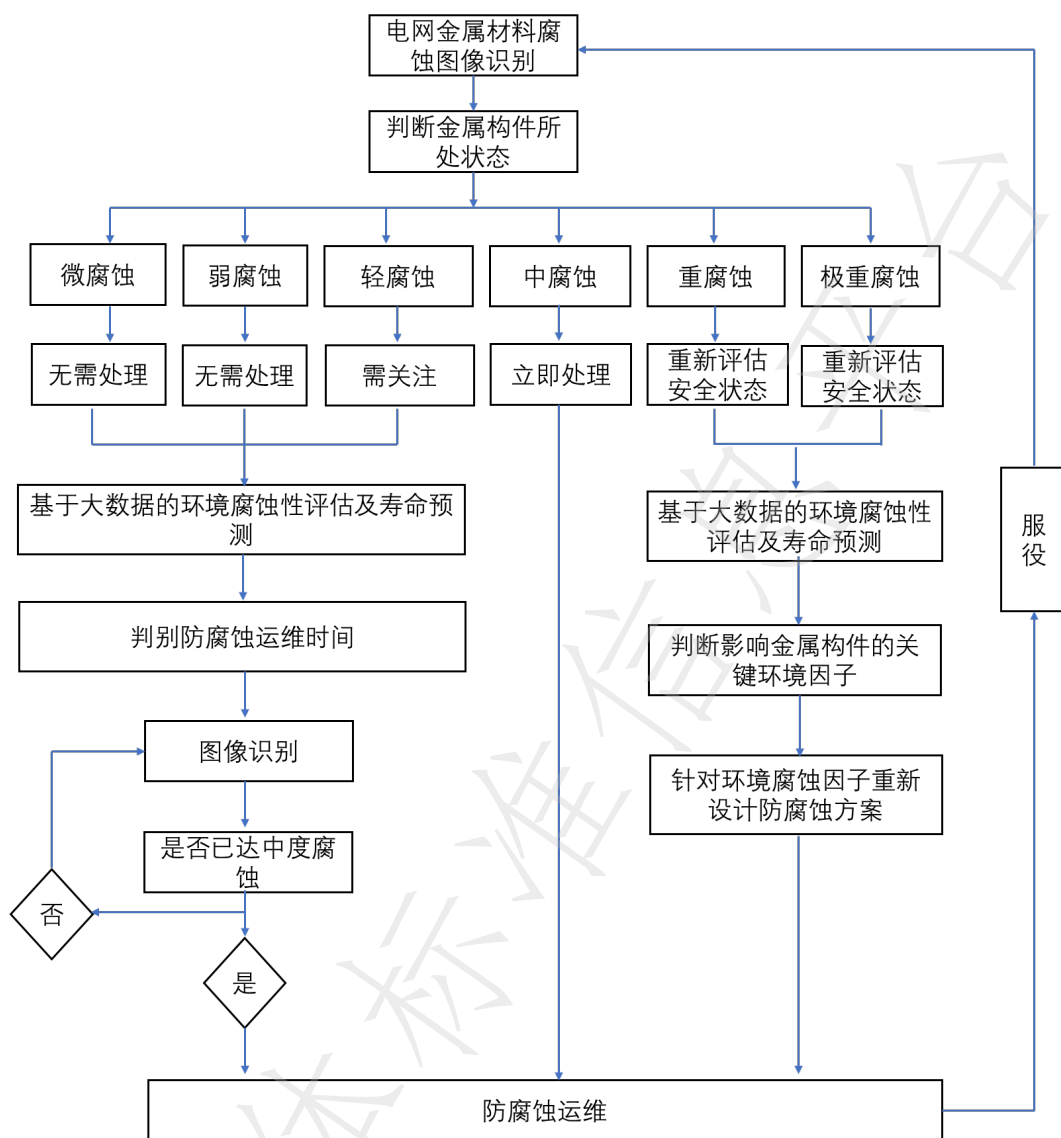


图 1 防腐蚀预判模型

附录 A 环境腐蚀性等级划分

表 1 不同大气腐蚀等级判定依据及扣分标准

腐蚀性等级	金属腐蚀速率 r_{corr}					基本扣分 S_i	权重 W_i	应扣分值 C_i
	单位	碳钢	锌	铜	铝			
C1	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	≤ 10	≤ 0.7	≤ 0.9	忽略	0	5	0
	$\mu\text{m}/\text{a}$	≤ 1.3	≤ 0.1	≤ 0.1	----			
C2	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	$10 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$0.7 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$0.9 < r_{\text{corr}} \leq 5$	≤ 0.6	1	5	5
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$1.3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$0.1 < r_{\text{corr}} \leq 0.7$	$0.1 < r_{\text{corr}} \leq 0.6$	----			
C3	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	$200 < r_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 12$	$0.6 < r_{\text{corr}} \leq 2$	2	5	10
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$0.7 < r_{\text{corr}} \leq 2.1$	$0.6 < r_{\text{corr}} \leq 1.3$	----			
C4	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	$400 < r_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < r_{\text{corr}} \leq 5$	3	5	15
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$2.1 < r_{\text{corr}} \leq 4.2$	$1.3 < r_{\text{corr}} \leq 2.8$	----			
C5	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	$650 < r_{\text{corr}} \leq 1500$	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 10$	4	5	20
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$4.2 < r_{\text{corr}} \leq 8.4$	$2.8 < r_{\text{corr}} \leq 5.6$	----			
CX	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	$1500 < r_{\text{corr}} \leq 5500$	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 90$	$r_{\text{corr}} > 10$	5	5	25
	$\mu\text{m}/\text{a}$	$200 < r_{\text{corr}} \leq 700$	$8.4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$5.6 < r_{\text{corr}} \leq 10$	----			

附录 B 金属腐蚀分级评估方法

研究腐蚀对象的腐蚀形貌、腐蚀面积、最小剩余厚度、最大腐蚀深度、力学实验等腐蚀损伤的定量评估方法，结合图像统计计算单个钢构件腐蚀程度，针对不同腐蚀安全等级，设定每个等级的腐蚀像素占比（单个钢构件腐蚀像素数/单个钢构件总像素数 $\times 100\%$ ）要求如下：A级：0%，B级： $\leq 0.1\%$ ，C级： $\leq 3\%$ ，D级： $\leq 10\%$ ，E级： $\leq 33\%$ ，F级： $\leq 100\%$ 。

表 2 输变电金属构件腐蚀分级评估方法

腐蚀安全等级	评价状态	腐蚀像素占比
A级：微腐蚀	正常	0%
B级：弱腐蚀	正常	$\leq 0.1\%$
C级：轻腐蚀	注意	$\leq 3\%$
D级：中腐蚀	异常	$\leq 10\%$
E级：重腐蚀	异常	$\leq 33\%$
F级：极重腐蚀	严重	$\leq 100\%$

附录 C 金属腐蚀图像定量分析方法

基于 HSV 颜色空间的颜色分割技术处理后的图像，图 2(a)-(g)中左侧为原始图像，右侧为高亮显示的黄色锈蚀区域。通过设定特定的 HSV 阈值，将黄色锈蚀区域从材料表面提取出来，并定量计算其面积占比。

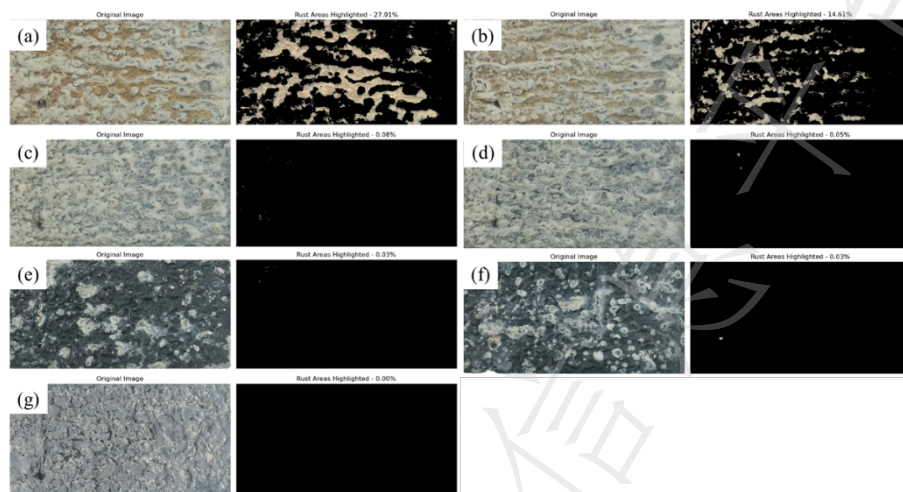


图 2 颜色分割处理后的锈蚀区域(黄色)与其他区域(黑色)，分别是：周浸 7 周(g)、6 周(f)、5 周(e)、4 周(d)、3 周(c)、2 周(b)、1 周(a)开始防护

采用基于二维傅里叶变换的频率域分析方法，量化腐蚀后表面的纹理变化。傅里叶变换将图像从空间域转换为频率域，能够捕捉到腐蚀过程中高频和低频成分的变化，如图 3-图 5 所示。高频成分的增强通常反映了腐蚀产物分布的不均匀性，而低频成分则与表面腐蚀产物的均匀分布有关。通过对腐蚀表面频率特征的分析，可以揭示腐蚀的进展过程，尤其是高频区域的变化，预示着腐蚀的局部加剧。表面粗糙度图中，红色区域遍布全图，显示腐蚀程度和范围大幅增加，表面极为不均匀。在热力图中，颜色进一步向外围扩散，表明灰度级的变化非常剧烈，表面纹理已不再均匀。由此通过统计热力图中红色区域面积，即可统计铜及铝合金锈蚀面积。

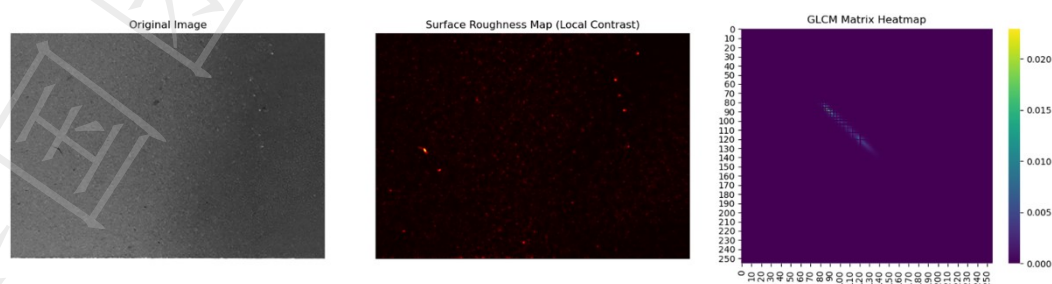


图 3 两周后采取防护手段时的最终涂层形貌

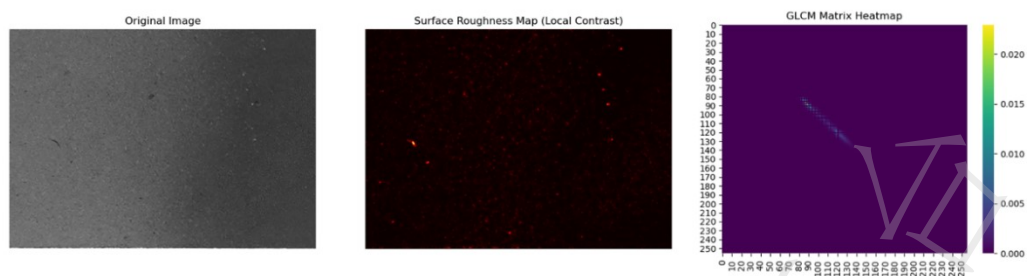


图 4 四周后采取防护手段时的最终涂层形貌

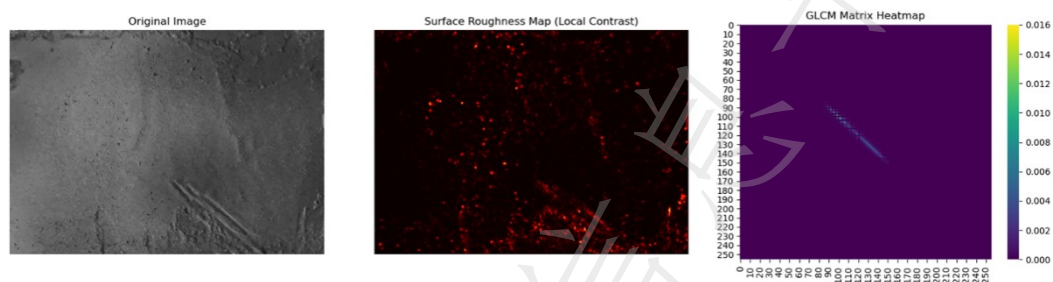


图 5 六周后采取防护手段时的最终涂层形貌