

T/CSCP

# 中国腐蚀与防护学会标准

T/CSCP 0004--2024

## 轨道交通动态杂散电流对埋地钢质管道腐蚀干扰评价方法

The evaluation method for corrosion interference of rail transit  
dynamic stray current on buried pipeline steels

2024年2月26日发布

2024年2月26日实施

中国腐蚀与防护学会发布

# 前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草

---本标准由河北省特种设备监督检验研究院、北京科技大学和中国特种设备检测研究院共同提出。

---本标准由中国腐蚀与防护学会标准化技术委员会归口。

---本标准负责起草单位：河北省特种设备监督检验研究院、北京科技大学和中国特种设备检测研究院。

---本标准主要起草人：刘超、马宏驰、倪晓、孙占远、李宁宁、王立贤、王昱、代文贺、赵博、程聪、安雁军、鲁翠平、刘晓旭、齐明、焦尚意、刘晨宇、李怀水、曹守印、张彦明、王宝良。

# 轨道交通动态杂散电流对埋地钢质管道腐蚀干扰评价方法

## 1 目的与范围

目的：本标准规定了轨道交通致杂散电流对埋地管道腐蚀的实验室评价方法、试样制备、溶液配置、试验装置、试验流程、结果评定和试验报告。

范围：适用于评价埋地管道在动态杂散电流干扰下的腐蚀行为、耐蚀性、腐蚀影响因素、腐蚀程度及发展趋势。

## 2 引用文件

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。所引标准如被修订,使用本标准的各方应参照所引标准的最新版本。

GB/T 21447-2018 钢质管道外腐蚀控制规范;

GB/T 19285-2014 埋地钢质管道腐蚀防护工程检验;

GB/T 40377-2021 金属和合金的腐蚀 交流腐蚀的测定 防护准则。

## 3 术语和定义

### 3.1 轨道交通 rail transit

在特定轨道上行驶的一类交通工具或运输系统,包括地铁、城铁、高速铁路等。

### 3.2 动态杂散电流 dynamic stray current

在管道与土壤之间流入或流出的杂散电流,包括直流杂散电流和交流杂散电流,一般指交流杂散电流。

### 3.3 埋地钢制管道 buried steel pipeline

埋入土壤中的钢质油气管道或其他钢质管道。

### 3.4 腐蚀干扰 corrosion interference

钢质管道在杂散电流干扰下的腐蚀减薄、穿孔或其它腐蚀损伤。

### 3.5 交流电密度 alternating current density

交流电在防腐层破损点处单位面积的电流流量。

## 4 试样制备

4.1 用于评价交流杂散电流干扰腐蚀的试样暴露面积应在  $1\text{cm}^2$  以上,为避免“趋肤”效应引起的腐蚀不均匀现象,暴露面积一般不超过  $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ ,推荐试样尺寸  $(15\text{mm} \sim 25\text{mm}) \times (15\text{mm} \sim 25\text{mm}) \times (2 \sim 5\text{mm})$ 。

- 4.2 采用电火花线切割加工试样，打磨至表面粗糙度 $\leq 3.2 \mu\text{m}$ ，或采用 600#以上水砂纸打磨。
- 4.3 为采用失重法评价腐蚀速率，试验前需要测试试样尺寸并称重，采用游标卡尺测量并记录试样尺寸（精确到 0.02mm）。试样清洗后，经无水乙醇或丙酮除油，吹风机吹干后备用。
- 4.4 试样采用铜导线焊接至试样背面，其余面和连接部位用硅胶或环氧树脂等密封，如图 1(a)所示，或者在试样背面加工直径 2-3mm 的螺孔，通过带螺纹的导线拧入试样背面，如图 1(b)，除试样暴露面之外，其余表面和螺纹导线均须密封。

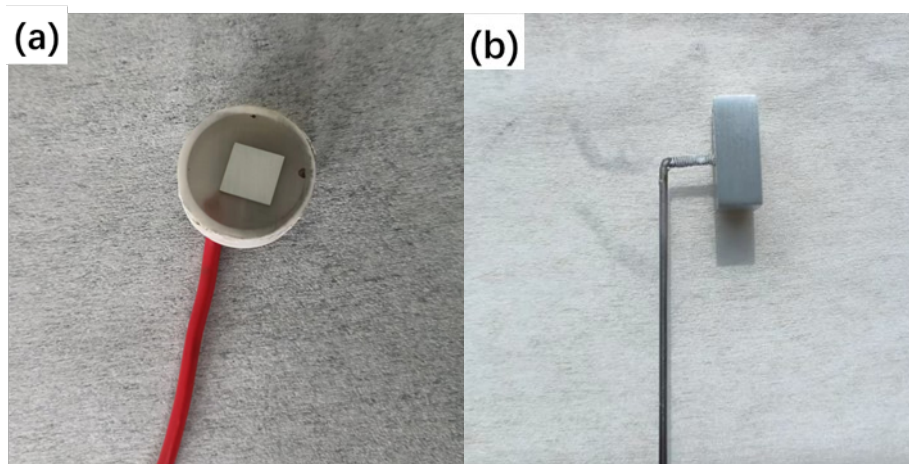


图 1 试样实物图

- 4.5 在进行试样尺寸及重量测量时，必须带干净的橡胶手套，并使用干净无油污的测量工具。
- 4.6 试验前，用天平（天平精度不应低于0.0001克）测量试样原始重量并记录。
- 4.7 所有试验都必须采用相同制备方法和具有相同形状、尺寸和表面粗糙度的试样来进行，试验平行试样应不少于 3 个。
- 4.8 为了限定试样的暴露面积，使非工作表面与溶液隔绝，须对试样的非工作面进行封样处理，封样方法须保证试验过程中密封良好。

## 5 溶液介质

- 5.1 配制模拟溶液的化学药品等级为分析纯或化学纯，溶剂为去离子水。
- 5.2 将现场实土经自然干燥、粉碎、过筛（20 目），然后烘干（105°C、24h）后与去离子水按 1:1 混合搅拌均匀，静置 24h 后提取浸出液，采用离子色谱仪测试离子种类和浓度，并采用 pH 计测试浸出液 pH 值。根据现场实土的化学分析结果，配置相对应的土壤模拟溶液。模拟溶液配制应遵循以下原则：
- 5.2.1 遵循电荷守恒、阴阳离子的物质的量守恒。在阴阳离子物质的量相当时，以物质的量较多的离子计算（既可保证模拟溶液与环境腐蚀性相近，又可加速试验，且方便计算）。
- 5.2.2 选用常见化学试剂。
- 5.2.3 为确保含量较少离子浓度的模拟精度，按离子物质的量由少到多依次配制。
- 5.2.4 如需调节溶液 pH，采用质量分数 5% 的氢氧化钠、盐酸或醋酸等调节，pH 调节过程尽量不引入体系之外的离子。
- 5.3 如无特殊要求，试验温度可选择为  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

## 6 试验装置

## 6.1 电化学测试装置

6.1.1 交流干扰下的电化学测试装置如图2所示，包括交流干扰和电化学测试两个回路。采用电化学工作站进行电化学测试，WE表示工作电极；RE表示参比电极；CE表示辅助电极。交流干扰部分由信号发生器提供交流信号，施加在工作电极跟对电极2（石墨棒、铂片等）之间，使试样表面产生交流杂散电流干扰。

6.1.2 电流测量仪器：采用万用表或其它交流电流计测试或显示交流回路中施加的交流电流。电流表的测试精度应不大于 0.1mA。

6.1.3 电容：为阻止两个回路的相互干扰及过滤交流回路中可能存在的直流分量，交流回路须串联一个电容（470  $\mu$ F左右），避免电化学测试系统对交流回路产生干扰；

6.1.4 电感：电化学测试回路须串联一个足够大的电感（25H左右）防止交流电对电化学测试系统产生干扰。

6.1.5 定值电阻：交流回路中可串联一个电阻（10~100 $\Omega$ ），防止试样表面阻抗变化引起交流电流密度的较大波动。

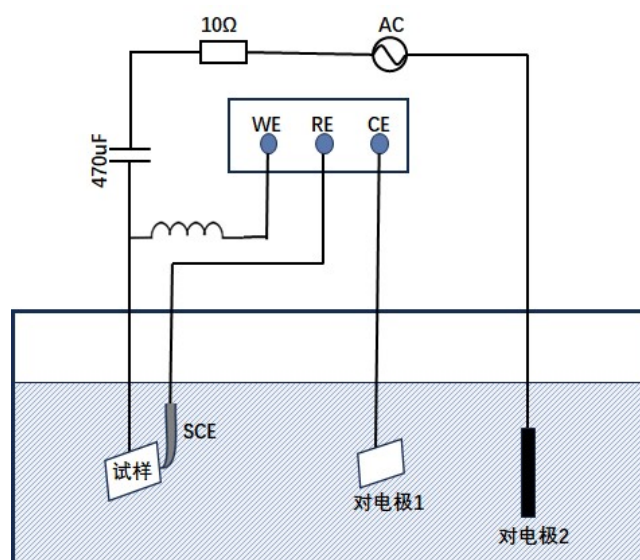


图2 交流干扰下电化学装置示意图

## 6.2 浸泡腐蚀试验

6.2.1 交流干扰下的浸泡腐蚀试验如图3所示，试验装置包括浸泡容器、交流信号发生器、石墨棒等惰性辅助电极以及电流测量仪器。

6.2.2 采用玻璃烧杯或有机玻璃容器等作为试验容器，试样通过铜导线或带螺纹钢棒连接，并固定于试验容器中，使暴露面完全浸没于溶液介质中。除工作区域外，其余部分均须绝缘密封。

6.2.3 采用多个平行样时，可将多个平行样进行串联，分别浸泡于不同试验容器中，保证每个容器中试样工作面与石墨辅助电极平行相对，且间距尽量保持一致。

6.2.4 如对温度有特殊要求，可将试验容器置于恒温槽（如水浴锅），在设定的恒定温度下进行试验。

6.2.5 电路连接完毕，调整输出电压/电流和频率，电流大小和频率参数设置参考现场监测值，测试特定交流杂散电流干扰下的腐蚀行为。试验结束后观察腐蚀形貌、并按照本标准第9条的公式计算平均腐蚀速率，以定量评价交流干扰下的腐蚀情况。

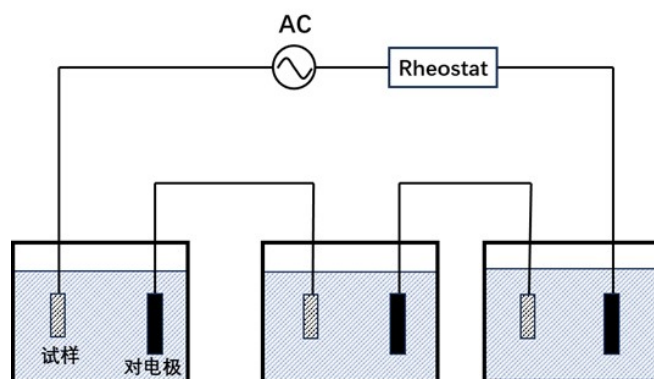


图 3 交流干扰下的浸泡腐蚀装置示意图

## 7 试验流程

### 7.1 土壤理化性质分析

7.1.1 在轨道交通附近待评估管道或构件周围 2 米以内，与管道相同埋深的位置取实土 1~2kg，采用自封袋装袋密封，带回实验室进行相关理化分析。

7.1.2 取 0.5~1kg 左右的实土，称重后采用烘干机烘干 24h，然后称量所剩干土的重量，计算实土含水量。

7.1.3 另取一部分实土，对土壤中的离子种类和浓度分析，具体方法详见 5.2。

### 7.2 现场动态杂散电压、电流信号采集

7.2.1 在轨道交通附近待评估管道或构件周围进行动态杂散电流的监测和检测，测试动态干扰电压和动态杂散电流的频率、电流大小及特征，为随后的电化学测试及腐蚀评估提供参数依据，详细测试方法参见 GB/T 19285-2014。

7.2.2 直流干扰管地电位测试。在管道正上方地面布置 CSE 参比电极，使用数字万用表、便携式自动平衡记录仪记录管地电位相对自然腐蚀电位的偏移值。

7.2.3 交流干扰电压测量。在管道正上方地面布置 CSE 参比电极或者直径不小于 15mm 的钢棒，使用交流电压表测量管道与 CSE 参比电极或者钢棒之间的电压。

7.2.4 交流干扰电流密度测试。在管道附近土壤内插入裸露面积为  $1\text{cm}^2$  便携式棒状探头，使用交流电流表测试电流数值，把电流数据除以  $1\text{cm}^2$  得到交流电流密度

### 7.3 电化学阻抗测试

7.3.1 试样浸入溶液后，按照图 2 连接好电路。首先在 -1.2 V 极化约 60 s 以去除制样过程中表面生成的氧化膜；然后在开路下浸泡约 15min，使电极表面达到稳定状态（一般开路电位上下波动幅度在 10min 内不超过 10 mV 即可认为其处于稳态）；

7.3.2 待体系稳定后，即可进行电化学阻抗测试。测试频率范围一般为 100kHz 到 0.01Hz，采用幅值为 10 mV 的正弦波。

7.3.3 记录不同频率下的扰动电压-电流响应，得到电化学阻抗谱的 Nyquist 图和 Bode 图。

### 7.4 动电位极化测试

7.4.1 动电位极化曲线测试的试验装置如图 2 所示。

7.4.2 从某一初始电位开始动电位扫描至终止电位，并记录电流随时间的变化。测试扫描速度为 0.5mV/s，扫描范围宜相对开路电位-0.5~1.0V。

7.4.3 绘制电位-电流密度曲线，采用塔菲尔外推法得到腐蚀电流密度。

## 7.5 浸泡腐蚀实验

7.5.1 按照4.2和4.4制备试样，每组试样至少三块平行试样。

7.5.2 用分析纯试剂和去离子水配置模拟溶液，并调整pH。

7.5.3 溶液注入试验容器中，应保证溶液体积与试样表面积的比值在200ml/cm<sup>2</sup>以上。如对温度有需求，需将试验容器置于恒温槽中，加热到规定温度。

7.5.4 试验溶液达到规定温度后，将试样固定于试验容器中，按图3接好线路，在给定的交流干扰条件下进行连续浸泡腐蚀试验，试验时间应不少于48h。

7.5.5 如采用图1(b)所示的试样进行交流电流下的腐蚀评定时，首先按照本标准的第4条进行制样，然后称量待测方块试样的原始重量 $M_0$ （精确到0.0001g），采用游标卡尺测量其暴露面尺寸（精确到0.02  $\mu\text{m}$ ）。

7.5.6 将带螺纹的钢棒拧入试样背面，采用704硅胶将试样背面和侧面以及钢棒浸入溶液部分密封，只保留待测暴露面，待硅胶干燥后进行浸泡腐蚀试验。试验结束后首先采用金相电镜或扫描电镜观察腐蚀产物形貌，然后将试样表面的密封硅胶等密封材料剥离干净，拧下钢棒，采用除锈液（50%盐酸+3-10g六次甲基四胺）除掉表面腐蚀产物后，采用分析天平称量除锈后的试样重量 $M$ ，并通过9.2中的公式计算腐蚀速率。

## 8 试验结果

8.1 电化学阻抗谱应选择合适的等效电路进行拟合，得到电荷转移电阻或极化电阻等参数，以此表征材料在交流干扰下的电化学阻抗或耐蚀性大小。

8.2 根据极化曲线的形状特征，分析腐蚀机理和腐蚀类型，通过拟合得到的自腐蚀电流密度评价材料的耐蚀性大小，初步评估腐蚀速率。

8.3 浸泡试验结束后，分别采用光学显微镜和扫描电镜对金属表面的腐蚀形貌进行观察。宜对腐蚀产物宏观形貌进行拍照，以便与清除腐蚀产物后的基体表面作对比。

8.4 如需要对腐蚀产物进行成分分析，可采用能谱（EDS）、X射线衍射（XRD）、X射线光电子能谱（XPS）、拉曼光谱（Raman spectra）等方法。

8.5 试验结束后，一般需采用除锈液除掉表面腐蚀产物，然后依次采用去离子水清洗、酒精或丙酮除油、脱水、冷风吹干，采用分析天平进行称重，并通过光学显微镜或扫描电镜进行腐蚀形貌观察分析。

8.6 若腐蚀形貌表现为点蚀或蚀坑，需要对点蚀坑的大小、深度等信息进行统计分析，可采用体式显微镜、激光共聚焦显微镜、轮廓仪等对局部腐蚀特征进行检测分析。如试验设备受限，也可按GB/T 18590测量点蚀深度。

## 9 腐蚀评定

钢制管道在交流杂散电流干扰下的腐蚀形态往往存在均匀腐蚀与点蚀两种形式，试验结果应该采用以上两种方法同时评定，具体方法满足本标准体系第8、10部分的要求，也必须满足相关国家标准的规定。

9.1 试验结束后，首先根据宏观腐蚀形貌，初步判断腐蚀类型。若为均匀腐蚀，则通过失重法

计算平均腐蚀速率；若存在局部腐蚀形态（如点蚀等），则通过蚀坑大小、深度等来评价局部腐蚀损伤程度。

9.2 试验材料在交流干扰下的腐蚀程度、腐蚀快慢等可用平均腐蚀速率来评定，单位取 mm/a。平均腐蚀速率计算公式如下：

$$K = \frac{M_0 - M}{S * t}$$

$$R = \frac{365 \times 24}{1000} \times \frac{K}{\rho} = 8.76 \frac{K}{\rho}$$

式中：K——腐蚀速度，g/m<sup>2</sup>.h；

S——试样工作面积，m<sup>2</sup>；

t——试验时间，h；

M<sub>0</sub>——试验前试片的重量，g；

M——清除腐蚀产物后试片的重量，g；

R——年腐蚀深度，mm/a；

ρ——试验金属的密度，g/cm<sup>3</sup>；

如有特殊需要，试验结果也可按照其它腐蚀速率单位表示，但需要在报告中说明。

9.3 平均腐蚀速率取至少 3 个平行试样的平均值，当某个平行式样的腐蚀速率与平均值相对偏差超过 30%时，应舍弃该数值。计算结果按 GB/T 8170 进行数值修约，修约到小数点后二位。

9.4 应采用平均腐蚀速率和点蚀深度作为交流杂散电流干扰下的腐蚀评价方法。

9.5 以较大的 5-10 个点蚀坑的平均深度作为平均点蚀深度，试样表面存在的最大点蚀深度作为该试验条件下的最大点蚀深度，以这两个指标作为评定点蚀程度的评价指标。对点蚀程度的评价可参考 T/CSCP 0021—2017《低合金结构钢点蚀试验方法》，也可按照国标 GB/T 18590 给出的标准图（以密度、大小和平均深度为参考指标）对点蚀程度进行评级（见附录）。

## 10 试验报告

10.1 每个试验都应写入报告。

10.2 试验报告中应根据标准简要说明试验结果。

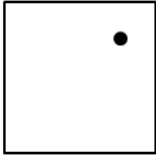


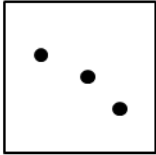


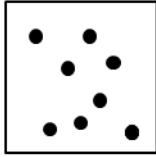


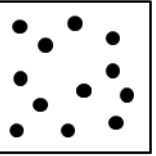


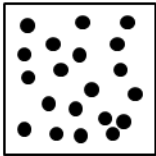


10.3 试验报告应包含的信息，如下所示：

- (1) 材料的成分和产品的形式，供方与产品说明，材料的热处理状态等；
  - (2) 试验环境与试验时间；
  - (3) 计算待测材料的腐蚀速率[mm/a]；
  - (4) 试验前后的试样宏观形貌以及试验后试样除锈后的腐蚀形貌；
  - (5) 腐蚀产物及分布情况说明；
  - (6) 点蚀坑特征，应包括：形状、大小、深度（平均深度和最大深度）、分布情况和点蚀坑与微观结构（面、边、缝隙等）的相对位置；
  - (7) 点蚀程度评价。
-



## 附录

按照 GB/T 18590 中标准评级图，根据大小、密度和深度对蚀坑进行评级。A 和 B 列与金属表面的点蚀范围有关，A 列为单位面积点蚀坑数量的评价方法，B 列为点蚀坑平均尺寸的评价方法，C 列为平均深度的评级方法。评级为 A-3，B-2，C-3 可以认为是代表蚀坑的密度为  $5 \times 10^4$  个/ $\text{m}^2$  的一种典型评级，平均蚀坑开口为  $2.0\text{mm}^2$ ，平均蚀坑深度为  $1.6\text{mm}$ 。

	A 密度	B 尺寸大小	C 深度
1	 $2.5 \times 10^3/\text{m}^2$	 $0.5\text{mm}^2$	 $0.4\text{mm}$
2	 $1 \times 10^4/\text{m}^2$	 $2.0\text{mm}^2$	 $0.8\text{mm}$
3	 $5 \times 10^4/\text{m}^2$	 $8.0\text{mm}^2$	 $1.6\text{mm}$
4	 $1 \times 10^5/\text{m}^2$	 $12.5\text{mm}^2$	 $3.2\text{mm}$
5	 $5 \times 10^6/\text{m}^2$	 $24.5\text{mm}^2$	 $6.4\text{mm}$

蚀坑的标准评级图