

# CSTA

## 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟标准

T/CSTA 19-2021

---

### 太阳能热发电熔盐腐蚀性测试与评估方法

Molten salt corrosion testing and assessment methods for solar  
thermal power generation

2021-05-25 发布

2021-06-25 实施

---

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟 发布

# 目 次

目次.....	II
前言.....	III
1. 范围.....	1
2. 规范性引用文件.....	1
3. 术语和定义.....	1
4. 腐蚀试验方法.....	3
5. 腐蚀评价方法.....	6
6. 腐蚀试验报告.....	7
附录 A （规范性附录）熔盐腐蚀试验报告.....	9
附录 B （资料性附录）劣化层深度测量和局部腐蚀深度测量.....	11

# 前 言

本标准依据《标准化工作导则 第一部分：标准的结构和编写》（GB/T 1.1-2020）给定的规则起草。

本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由国家太阳能光热产业技术创新战略联盟提出。

本标准由国家太阳能光热产业技术创新战略联盟归口并解释。

本标准参加起草单位：中国科学院上海应用物理研究所、中山大学、北京工业大学、中盐金坛盐化有限责任公司、山西沃锦新能源股份有限公司、中国科学院电工研究所、浙江大学、中国特种设备检测研究院、中国科学院青海盐湖研究所。

本标准主要起草人：唐忠锋、王建强、钱渊、杨新梅、刘伟华、丁静、陆剑峰、鹿院卫、陈留平、蔚鹏、孙世光、王志峰、肖刚、赵博、王国华、袁建伟、吴玉庭、王怀有、魏明、王敏、张灿灿、凌长见、阴慧琴、汪洋、李娜。

本标准为首次发布。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至国家太阳能光热产业技术创新战略联盟秘书处（地址：北京市海淀区中关村北二条6号，100190，网址：<http://www.cnste.org>，邮箱：[cnste@vip.126.com](mailto:cnste@vip.126.com)）。

# 太阳能热发电熔盐腐蚀性测试与评估方法

## 1 范围

本标准规定了太阳能热发电熔盐对金属材料的腐蚀性测试及评估方法。

本标准适用于太阳能热发电熔盐对金属材料的腐蚀性测试和腐蚀性评价。

## 2 规范性引用文件

下列文件对本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 10123-2001 金属和合金的腐蚀 基本术语和定义

GB/T 14165-2008 金属和合金大气腐蚀试验现场试验的一般要求

GB/T 15970.1-2018 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第1部分：试验方法总则

GB/T 17897-2016 金属和合金的腐蚀 不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法

GB/T 18590-2001 金属和合金的腐蚀 点蚀评定方法

JB/T 7901-2001 金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法

ISO 17245-2015 Corrosion of metals and alloys. Test method for high temperature corrosion testing of metallic materials by immersing in molten salt or other liquids under static conditions

ASTM G1-03 (2017) Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens

ASTM G31-21 (2021) Standard practice for laboratory immersion corrosion testing for metals

ASTM G46-94 (2018) Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion

ASTM G111-97 (2018) Standard guide for corrosion tests in high temperature or high pressure environment, or both

JIS Z2292-2004 Method for high-temperature corrosion test of metallic materials by salt coating

JIS Z2293-2004 Methods for high-temperature corrosion test of metallic materials by dipping and embedding in molten salts

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 熔融盐 molten salt

熔融盐简称熔盐，是盐类熔化形成的熔体，由阳离子和阴离子组成的离子熔体。在标准温度和大气压下呈固态，而温度升高后存在于液相的盐类。

### 3.2 太阳能热发电熔盐 molten salt for solar thermal power generation

适用于太阳能热发电系统的熔盐传蓄热工质。

### 3.3 腐蚀 corrosion

金属材料表面和环境介质发生化学、电化学变化或物理溶解而产生的破坏或变质。通常采用腐蚀形态、单位面积的腐蚀失重、腐蚀深度、腐蚀速率等指标进行定性或定量评价。

### 3.4 腐蚀形态 corrosion morphology

金属材料腐蚀后的表面或内部结构的变化，一般从金属材料表面开始逐渐向内部发展，使金属材料外形或内部结构破坏。通常采用扫描电子显微镜来观测腐蚀后表面和内部结构变化。腐蚀类型从腐蚀形态上可以分为均匀腐蚀、局部性腐蚀。

均匀腐蚀是指接触熔盐介质的金属材料表面全面产生腐蚀的现象，其结果是导致金属材料表面均匀减薄。（化学或电化学反应在全部暴露的表面或大部分表面上均匀地进行）

局部性腐蚀是指腐蚀破坏集中发生在金属材料表面的特定局部位置，而其余大部分区域腐蚀十分轻微，甚至不发生腐蚀。

### 3.5 单位面积的腐蚀失重 corrosion weight change per unit area

金属材料单位面积下腐蚀前后的质量变化，是均匀腐蚀形态下金属材料腐蚀速率的定量评定方法，其单位是  $\text{g}/\text{cm}^2$ 。腐蚀前后试样重量损失  $(W) = m_0 - m_1$ ，其中  $m_0$  为腐蚀前试样质量，单位为  $\text{g}$ 。 $m_1$  为腐蚀后试样质量，单位为  $\text{g}$ 。单位面积失重  $(W/A) = (m_0 - m_1) / A$ ， $A$  为试样与熔盐接触的总表面积，单位为  $\text{cm}^2$ 。

### 3.6 腐蚀深度 corrosion depth

腐蚀的金属材料表面与其原始表面间的垂直距离，单位为  $\mu\text{m}$ 。腐蚀深度的表述方式：失重减薄厚度 ( $D_{\text{weight}}$ )、腐蚀损伤层深度 ( $D_{\text{damage}}$ )、劣化层深度 ( $D_{\text{degrade}}$ )、最大腐蚀深度 ( $D_{\text{max}}$ )。

### 3.7 腐蚀速率 corrosion rate

腐蚀速率：单位时间内，单位面积下金属材料腐蚀前后的质量变化，或单位时间内，金属材料平均损失的浓度厚度，其单位为  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

$$\text{腐蚀速率 } (\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}) = (1.0 \times 10^4 \times W) / (A \times T) \dots\dots\dots(1)$$

年腐蚀速率：根据多个时间点和长周期的腐蚀评估结果，一年按照 365 天即 8760 小时计，通过腐蚀速率的时间曲线推导出年腐蚀速率 ( $\mu\text{m}/\text{a}$ )，

$$\text{年腐蚀速率: } (\mu\text{m}/\text{a}) = (8.76 \times 10^7 \times W) / (A \times T \times D) \dots\dots\dots(2)$$

上述两个公式中：

W 为试样腐蚀前后的质量损失，单位为  $\text{g}$ ；

A 为表面积，单位为  $\text{cm}^2$ ；

T 为腐蚀时间，单位为  $\text{h}$ ；

D 为金属材料的密度，单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 3.8 腐蚀裕量 annual corrosion rate

腐蚀裕量又称腐蚀裕度，为考虑金属材料在使用期内受到接触介质（包括大气）腐蚀而预先增加壁厚裕量。是设备（容器、管道、法兰、阀门及泵等）在寿命期内因环境介质的腐蚀作用而导致设备失效时的最大允许腐蚀深度，单位为 $\mu\text{m}$ 。

## 4 腐蚀试验方法

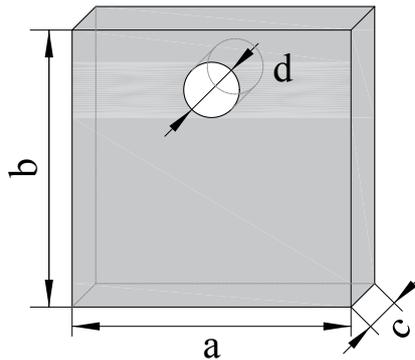
采用静态腐蚀测试方法即浸没法来测试或评价金属材料的耐腐蚀性能。将金属材料样品浸没在熔盐中，通过控制试验条件等因素来进行腐蚀测试，主要通过腐蚀形态、单位面积下腐蚀失重、腐蚀深度、腐蚀速率等指标来测试或评价金属材料耐腐蚀性能。

### 4.1 试验预处理

#### 4.1.1 试样准备

1) 试样数量：每组试验测试样品的平行试样不少于三块，且标记每一块试样。

2) 试样尺寸：熔盐腐蚀试样采用板状样品，推荐尺寸为 $10.0\text{ mm}\times 10.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ 。在试样打一个直径 $2.0\text{ mm}$ 孔（如图4.1所示），便于采用同质金属丝固定金属试样。



4.1 试样打孔示意图

3) 试样表面处理：根据GB/T 14165和ASTM G31-72（2004）给出一般要求来制备，推荐采用SiC水磨砂纸由200#、400#、800#逐级打磨至1500#，确保样品表面光滑平整。

4) 试样清洗：分别用丙酮、无水乙醇、去离子水超声清洗，冷风吹干后存放于干燥箱内。

5) 尺寸测量：采用测量精度为 $0.02\text{ mm}$ 的游标卡尺测量试样尺寸。每个方向至少测量3点，并取其平均值，计算试样的总表面积：

$$A=2(a\times b+a\times c+b\times c)+\pi dc-\pi d^2/2 \dots\dots\dots (3)$$

其中，a、b、c、d分别为试样长度(mm)、宽度(mm)、厚度(mm)和孔直径(mm)。

6) 试样质量：采用测量精度 $\leq 0.1\text{ mg}$ 的精密分析天平称量试样，每个试样称量三次以上，并取其平均值作为重量记录，推荐采用测量感量为 $0.01\text{ mg}$ 的精密天平称重。

7) 试样在坩埚内摆放要求：在一个坩埚容器内，应放同种材质金属材料，且金属材料间不相互接触。如果要验证不同金属材料的相互作用可同时放入指定的不同金属材料。

8) 试样固定方式：推荐采用同质金属材料坩埚，试样需要通过同质金属丝悬挂，避免测试试样与坩埚底部接触。选择与被测试金属材料同质的金属丝固定试样，确保试样与熔盐充分接触且试样彼此间不相互接触。

#### 4.1.2 熔盐

1) 固态盐：提供盐中的主要成分、杂质含量、编号标识。

2) 固态盐转运：将固态盐保存在两层以上密封袋中运输或存放在干燥器中运输，保证转运过程中固态盐不发生变化。

3) 固态盐储存：将固态盐转运到手套箱中，惰性气氛下将固态盐块机械破碎成便于取放的小颗粒，保存待测试。

#### 4.1.3 坩埚

1) 坩埚材质要求：坩埚材质采取与试样材质相同的金属材料。

2) 坩埚尺寸：考虑到实际测试方便，推荐坩埚内径为  $\Phi 67.0 \text{ mm} \times 100.0 \text{ mm}$ ，壁厚：2.0 mm，坩埚盖尺寸  $\Phi 71.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ 。

3) 坩埚清洗与储存：采用去污粉和丙酮清除表面油污，再分别用去离子水和分析纯级无水乙醇超声清洗。冷风吹干之后，放置在加热干燥箱中进行烘烤（温度：120℃，时间：8 h），将烘烤后坩埚存放于手套箱中备用。

#### 4.1.4 手套箱

腐蚀试验在惰性气氛保护的手套箱中进行，避免外界环境中的水、氧杂质对熔盐的污染。参考国标GB/T5832对手套箱内气体中微量水分进行测定和国标GB/T5831-86, GB/T6285-86, GB/T14852-93对惰性气体和手套箱气氛中痕量氧进行测定。手套箱中的保护气氛为 $\geq 99.99\%$ 纯度的氩气或氮气；压强为微正压，比大气压大200-500Pa；泄漏率 $< 0.001 \text{ vol.}\%/\text{h}$ ；含水量 $< 10 \text{ ppm}$ ，含氧量 $< 10 \text{ ppm}$ 。

#### 4.1.5 高温炉

腐蚀测试用高温炉的最高加热温度 $\geq 1000^\circ\text{C}$ ，温度控制精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，恒温区尺寸 $\geq \Phi 200 \times 200 \text{ mm}$ ，在设定温度下连续工作时间 $\geq 2000 \text{ h}$ ，加热炉的炉膛应在可变气氛条件下工作，满足测试要求。

### 4.2 试验方法

#### 4.2.1 试验温度

腐蚀测试试验的温度与金属材料在特定环境中的工作服役温度相关，推荐腐蚀测试温度为工作服役温度的 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

#### 4.2.2 试验时间

金属材料在特定环境中的腐蚀试验是为了评估其使用寿命，因此需要开展不同时间的腐蚀试验，并给出金属材料的腐蚀性能随时间的变化规律。腐蚀时间应选择5个点，分别为100 h, 200 h, 400 h, 600 h, 1000 h。

### 4.2.3 环境条件

腐蚀试验的测试条件与熔盐工作服役环境条件相同或相似（如是否有保护气氛，环境条件中的水氧含量等，并提供水氧含量的限制，一般不考虑压力变化对腐蚀的影响）。

### 4.2.4 坩埚密封

采用与被测金属材料同质的金属丝固定试样并放入与测试材质相同的坩埚中，为保证熔盐浸没试样，尽量将坩埚放置在下部。根据选用坩埚尺寸计算选择定量固态盐装入坩埚内，并盖上坩埚盖密封坩埚。坩埚顶盖外部焊接 $\Phi 15$  mm左右提拉圆环，便于取放坩埚。

### 4.2.5 恒温试验

将密封后坩埚放入高温炉中，在给定温度和给定时间下进行静态腐蚀试验。试验结束后，将坩埚从炉膛中取出、倒置，自然冷却至室温。将冷却后的坩埚打开，取出样品杆，拆下试样。在去离子水中超声清洗去除金属试样表面粘附的熔盐，冷风吹干后进行耐腐蚀性分析，同时取出坩埚内盐用于成分分析。

### 4.2.6 试验步骤

腐蚀试验的测试步骤如图4.2所示，具体如下。

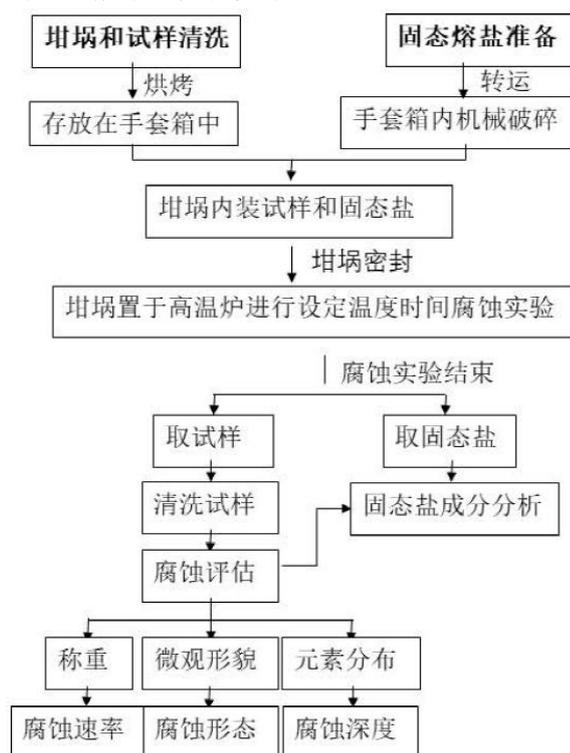


图4.2 腐蚀试验步骤示意图

### 4.2.7 试验安全

熔盐腐蚀试验的时间较长，温度高。高温长时间的腐蚀试验过程中要监控高温设备的运行状态以保证试验安全。

### 4.3 测试表征

### 4.3.1 试样称量

采用测量精度 $\leq 0.1\text{mg}$ 的精密分析天平称量清洗干燥后试样，每个试样称量三次以上，并取其平均值作为质量记录。

单位面积下腐蚀失重 $= (m_0 - m_1)/A$ ，其中 $m_0$ 为腐蚀前试样质量， $m_1$ 为腐蚀后试样质量， $A$ 为试样的表面积。

腐蚀速率：如金属材料发生了均匀腐蚀，采用失重计算出腐蚀速率，计算公式详见(1)，单位为 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。采用多个时间点和长周期的腐蚀评估，得出腐蚀速率随时间的演变规律，最终通过腐蚀速率的时间曲线推导出年腐蚀速率 $(\mu\text{m}/\text{a})$ 。如果金属材料发生了非均匀腐蚀，就采用最大腐蚀深度计算腐蚀速率。

### 4.3.2 试样显微分析

采用光学显微镜或扫描电子显微镜对试样的表面和截面进行显微结构分析，同时采用X射线能谱仪进行成分分布分析。

腐蚀形态：通过金属材料表面和截面的显微结构分析总结得出金属材料的腐蚀是均匀腐蚀还是局部性腐蚀。如果试样腐蚀是局部性腐蚀需确定腐蚀类型。

腐蚀深度：若金属材料的腐蚀是均匀腐蚀则通过微观结构分析和元素的深度分布分析给出 $D_{\text{damage}}$ 和 $D_{\text{degrade}}$ ；若金属材料的腐蚀呈现局部性腐蚀，则需给出 $D_{\text{max}}$ 。劣化层深度和最大腐蚀深度的检测请参照附录 B.1 和 B.2。

## 5 腐蚀评价方法

腐蚀失重、腐蚀减薄量、损伤层深度、劣化层深度、最大腐蚀深度和腐蚀形态是腐蚀评价的主要指标，结合熔盐腐蚀的特点，分别对每种评价指标做如下说明。

### 5.1 腐蚀失重

金属材料腐蚀通常是由于金属材料中成分的溶解导致质量损失，通过对腐蚀前后金属材料的质量损失称之为腐蚀失重，采用单位面积下腐蚀失重来表示：

$$\text{单位面积下腐蚀失重 } (\text{g}/\text{cm}^2) = (m_0 - m_1)/A$$

式中：

$m_0$ 、 $m_1$  分别为试验前后试样的重量，单位为 g；

$A$  为试样的总表面积，单位为  $\text{cm}^2$ 。

熔盐中的金属离子杂质通过置换反应沉积在金属材料表面使溶解失重与沉积增重共存，单位面积失重不能客观地反映金属材料的腐蚀程度。以单位面积失重作为腐蚀评价指标会存在较大误差。

### 5.2 腐蚀减薄量

腐蚀减薄量 $(\mu\text{m}) = 1.0 \times 10^4 \times (m_0 - m_1) / (D \times A)$ ， $m_0$ 、 $m_1$  分别为试验前后试样的质量，单位为 g； $D$  为金属试样的密度，单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ； $A$  为试样的总表面积，单位为  $\text{cm}^2$ ；腐蚀减薄量的单位为  $\mu\text{m}$ 。假设金属材料表层完全溶解，根据腐蚀失重、金属材料密度和试样表面积

计算得到的腐蚀减薄量。腐蚀失重的误差会增加腐蚀减薄量计算的误差。

### 5.3 腐蚀形态

金属材料腐蚀通常是从表面开始逐渐向内部发展,使金属材料的外形或内部结构遭到破坏。采用扫描电子显微镜可以观测腐蚀后金属材料表面和内部的结构。

### 5.4 损伤层深度

熔盐腐蚀使金属材料表面形成含有孔洞或微裂纹的损伤层,通过观测金属材料横截面的微观形貌来测量损伤层的深度能更加客观地反映金属材料的腐蚀程度。

### 5.5 劣化层深度

活性元素的扩散溶解除了在金属材料表层形成损伤层外还存在金属材料成分改变但尚未形成孔洞或裂纹的区域。金属材料成分的变化会导致性能的劣化,因此金属材料表面元素组分发生变化的区域被称为劣化层。理论分析和试验验证均表明,同一个腐蚀后试样的劣化层深度大于损伤层深度。采用 X 射线能谱仪对腐蚀后试样的横截面进行元素的线扫描分析来测量劣化层深度。劣化层深度能更加准确地反映金属材料的腐蚀深度。

### 5.6 最大腐蚀深度

对于局部性腐蚀来说腐蚀主要集中在金属材料表面一定的区域,采用扫描电子显微镜/X射线能谱仪研究其腐蚀特征和最大腐蚀深度。

采用  $D_{\text{degraded}}$  作为腐蚀评价指标,结合腐蚀失重进行综合评价。如果存在局域腐蚀,应采用最大局部腐蚀深度作为评价指标,结合腐蚀失重进行综合评价。

## 6 腐蚀试验报告

试验报告中应包含以下内容:

### 6.1 金属试样信息

试样的信息应包含批号,表面处理方式,清洗方式,成分,尺寸(表面积),质量。

### 6.2 熔盐信息

熔盐的批号,物理化学参数,杂质含量。

### 6.3 试验条件信息

试验前试样和坩埚的处理方式和保存方式,试验后试样的处理方式和保存方式。试验参数如腐蚀温度、腐蚀时间和腐蚀条件等。

### 6.4 试验数据

腐蚀试验后试样:质量( $m_1$ ),单位面积腐蚀失重( $\text{g}/\text{cm}^2$ ),每块试样的腐蚀速率,平均腐蚀速率。

腐蚀形态：通过腐蚀前后金属材料表面的微观结构得出腐蚀是均匀腐蚀还是局部性腐蚀。如果是局部性腐蚀，需给出局部性腐蚀的特征。

腐蚀深度：通过微观结构和元素的深度分布给出腐蚀损伤层深度（ $D_{\text{damage}}$ ）和劣化层深度（ $D_{\text{degraded}}$ ）。如果存在局部性腐蚀，需给出最大腐蚀深度（ $D_{\text{max}}$ ）。

附 录 A  
(规范性附录)  
熔盐腐蚀试验报告

金属试样信息			
名称		批号及来源	
加工方式		表面处理方式	
清洗方式			
成分			
尺寸 (表面积)	1.长×宽×厚 (表面积) 2.长×宽×厚 (表面积) 3.长×宽×厚 (表面积)	质量	1. 2. 3.
熔盐信息			
名称		批号	
物化参数			
坩埚信息			
坩埚材质		试样固定方式	
坩埚处理			
腐蚀试验参数			
熔盐用量		试验温度	
试验时间		试验压力	
腐蚀试验后的表征			
试样清洗方式			
重量	1. 2. 3.	单位面积失重 $\text{g/cm}^2$	1. 2. 3.
微观表征方式	<input type="checkbox"/> 表面 SEM <input type="checkbox"/> 截面 SEM <input type="checkbox"/> 表面 EDS <input type="checkbox"/> 截面 EDS <input type="checkbox"/> GI-XRD		
腐蚀试验后的结果			
腐蚀特征	<input type="checkbox"/> 均匀腐蚀 <input type="checkbox"/> 局部性腐蚀 (局部性腐蚀特征: _____)		
平均腐蚀速率	$\text{g/m}^2\cdot\text{h}$ $\mu\text{m/a}$	平均单位面积失重 $\text{g/cm}^2$	
腐蚀损伤层深度 ( $D_{\text{damage}}$ )		最大腐蚀深度( $D_{\text{max}}$ )	
腐蚀劣化层深度 ( $D_{\text{degrade}}$ )			

$D_{\text{weight}}$ : 通过腐蚀失重换算而得到的腐蚀深度, 是假设金属材料表层完全溶解, 根据失重量和金属材料的密度计算得到的腐蚀深度。

$D_{\text{damage}}$ : 采用 SEM 对腐蚀后试样的横截面进行观察, 测量腐蚀损伤层 (可观测到空洞和裂

纹) 的深度。

$D_{\text{degraded}}$ : 通过对腐蚀后试样的横截面进行成分深度分析, 是元素成分发生变化的深度。

$D_{\text{max}}$ : 腐蚀后试样局部性腐蚀区域的最大深度。

**附 录 B**  
**(资料性附录)**  
**劣化层深度测量**

**B. 1. 1 测量点的确定**

将腐蚀试验后的试样从宽度方向的中部切割开，利用金相试样制备的方法制备截面试样，采用 X 射线能谱仪对截面的元素进行面扫描分析。至少选取 5 个平均腐蚀的区域，进行元素分布的线扫描分析。

**B. 1. 2 测量基准面的确定**

腐蚀前的试样必须使用 SiC 水磨砂纸由 200#、400#、800#逐级打磨至 1500#，确保试样表面光滑平整。腐蚀后以试样表面为测量基准面。如果腐蚀后金属表面存在某种元素的富集层，应分别对试样截面的 Ni、Fe、Cr、Mo 等元素进行面扫描分析。通过对比几种元素的面分布图确定金属原始表面的位置。

**B. 1. 3 测量方法**

推荐采用扫描电子显微镜/ X 射线能谱仪分析截面的形貌及元素的深度分布。

## 局部腐蚀深度测量

### B. 2. 1 测量点的确定

将腐蚀试验后的试样从宽度方向的中部切割开，利用金相试样制备的方法制备截面试样，观测截面的形貌。至少选取 5 个局部腐蚀最严重的区域，测量局部腐蚀的深度。如果局部腐蚀最严重区域少于 5 个，测量每个局部腐蚀的深度。以每个局部腐蚀最深处为测量点。

### B. 2. 2 测量基准面的确定

详见 B.1.2。

### B. 2. 3 测量方法

采用扫描电子显微镜（SEM）观测试样截面的局部腐蚀区域，测量局部腐蚀的深度。

### B. 2. 4 局部腐蚀深度指标

B.2.4.1 平均局部腐蚀深度：试样截面上所有测量点深度的平均值。

B.2.4.2 最大局部腐蚀深度：试样截面上所有测量点深度的最大值。