

中国腐蚀与防护学会标准

T/CSCP0002-2023

金属材料及其防护涂层在热-力-化交互 作用下的高温腐蚀测试方法

**Test method for high temperature corrosion of metallic
materials and their protective coatings under the
interactive environments of heat, stress and chemicals**

2023 年 11 月 6 日发布

2023 年 11 月 6 日实施

中国腐蚀与防护学会 发布

前 言

本文件按照 GB-T 1.1-2020 给出的规则起草。

本文件由东北大学提出。

本文件由中国腐蚀与防护学会标准化技术委员会归口。

本文件负责起草单位：东北大学。

本文件参加起草单位：中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司、中国科学院金属研究所。

本文件主要起草人：耿树江、王福会、张涛、胡琪、潘俊安、吴勇、孙清云、夏思瑶、朱圣龙。

金属材料及其防护涂层在热-力-化交互 作用下的高温腐蚀测试方法

1. 适应范围

本文件规定了金属材料及其防护涂层在热（高温）、力（拉应力）、化（腐蚀介质）交互作用下腐蚀性能测试的试验设备及仪器、试样、试验条件、试验步骤以及试验结果的评定等内容。

2. 规范性引用文件

以下文件中的条款由于本文件的引用而成为本文件的条款。标注公布日期的引用文件，其修订版不能自动成为本文件的条款，根据本文件达成协议的各方可协商是否使用引用文件的修订版。

GB-T 38430-2019 金属和合金的腐蚀 金属材料在高温腐蚀条件下的等温暴露氧化试验方法

GB-T 38231-2019 金属和合金的腐蚀 金属材料在高温腐蚀条件下的热循环暴露氧化试验方法

GB-T 38804-2020 金属材料高温蒸汽氧化试验方法

GB-T 10125-2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

HB 7740-2017 燃气热腐蚀试验方法

3. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 热

高温（200~1000 °C）。

3.2 力

拉应力。

3.3 化

腐蚀介质（沉积盐+空气、沉积盐+空气+水蒸气）。

3.4 热-力-化交互作用

高温、拉应力和腐蚀介质的协同作用。

4. 试验设备及仪器

热-力-化交互作用下的高温腐蚀测试系统包括加热炉及温控系统、拉应力加载系统和水蒸气发生系统，其示意图如图 1 所示。

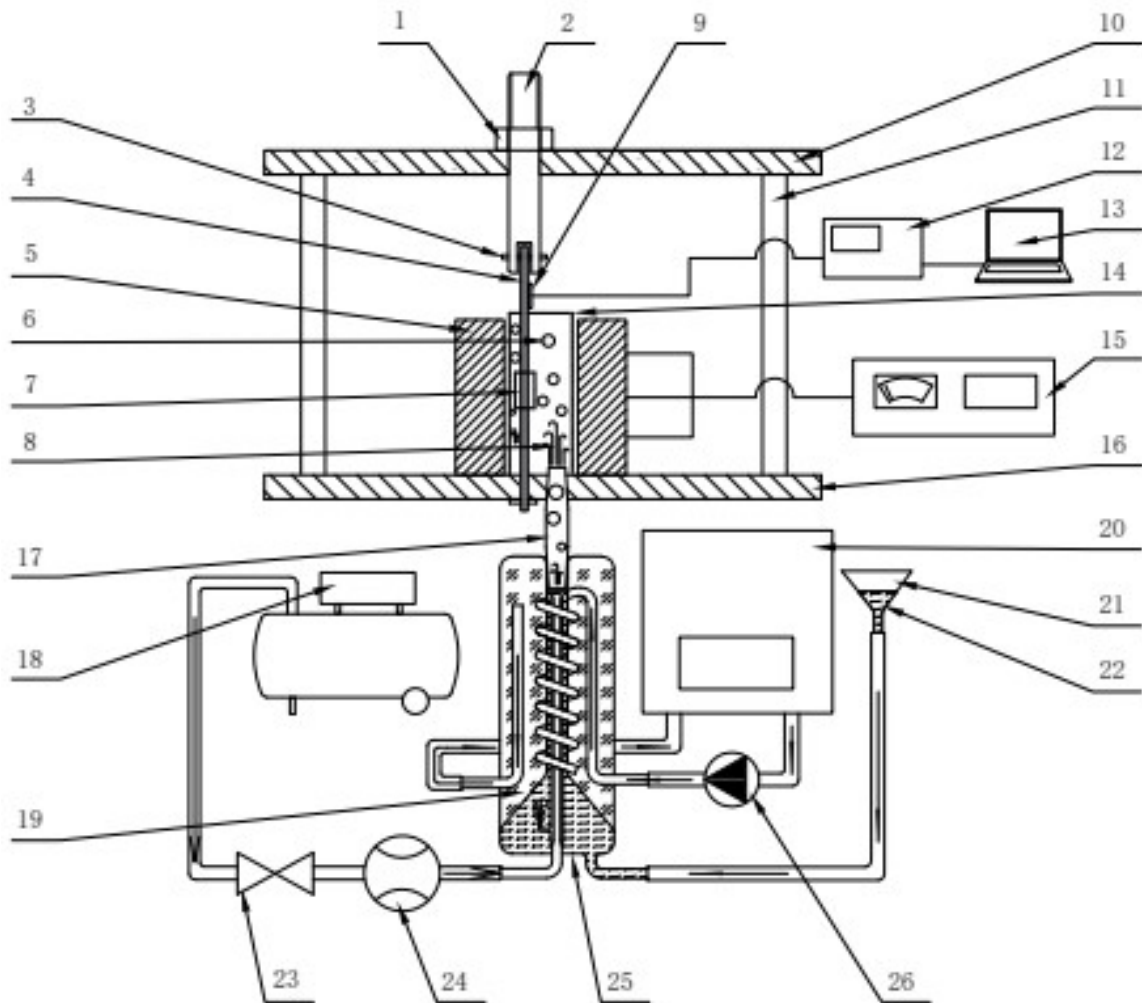


图 1. 热-力-化交互作用下的高温腐蚀测试系统

说明：

1—螺母；

2—螺杆（下端开槽）；

3—固定销；

4—试样；

5—管式炉；

6—水蒸气；

- | | |
|----------------|--------------|
| 7—试样有效区域； | 8—空气； |
| 9—应变片； | 10—顶板； |
| 11—支撑杆； | 12—应变仪； |
| 13—计算机； | 14—石英管（无磨口）； |
| 15—温度控制仪； | 16—底板； |
| 17—石英管（下端带磨口）； | 18—空气泵； |
| 19—循环水； | 20—温控水箱； |
| 21—漏斗； | 22—去离子水； |
| 23—控制阀； | 24—流量计； |
| 25—加热套管； | 26—动力泵。 |

4.1 加热炉及温度控制系统

4.1.1 加热炉采用立式管式炉，确保试样均匀加热。根据试样尺寸推荐管式炉尺寸为 $\Phi 180\text{ mm}\times 130\text{ mm}$ ，炉膛内石英管的直径为 $\Phi 30\text{ mm}$ 。

4.1.2 加热炉配备的温度控制仪应准确，其温控精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

4.1.3 试验前应先采用独立可移动的测温热电偶在目标温度下校验加热炉，确定加热炉内均温区的尺寸，并保证均温区内的各点温度保持在表 1 所规定的允许偏差范围内，测温热电偶位置需要靠近试样。

表 1 均温区内温度的允许偏差

温度范围/ $^\circ\text{C}$	≤ 200	$> 200\sim 500$	$> 500\sim 800$	$> 800\sim 1000$	> 1000
温度偏差/ $^\circ\text{C}$	± 1	± 2	± 3	± 5	协商确定

4.1.4 试样涂盐区放置在炉子均温区内。

4.2 拉应力加载系统

4.2.1 拉应力加载系统包括加载力台架和测量加载力的应变仪。

4.2.2 加载力台架包括顶板、底板、螺杆、螺母及固定销等，所用的金属材料需具有坚固耐用、不易变形、化学性质稳定和耐腐蚀性好等特性。

4.2.3 加载力台架的顶板和底板可以通过支撑杆上的螺母进行上下调节，并保证上下台面水平（加热炉垂直放置在底板上），且顶板和底板间距要参照试验炉高度进行调节。

4.2.4 加载力台架底板中心位置留有圆孔作为通气管的插入口，推荐直径为 15 mm，实

现水蒸气通入炉膛内。

4.2.5 加载力台架底板中心孔旁留有长方形孔，推荐尺寸为 10.2 mm×3.2 mm，便于试样穿过。

4.2.6 加载力台架顶板中心位置留有圆孔，实现螺杆穿过。

4.2.7 螺杆推荐长度为 280 mm，直径为 16 mm。在一端开槽，用于固定样品。槽深度为 15 mm，间距为 3.2 mm，在槽中间处加工出直径为 3.2 mm 的固定销插孔。

4.2.8 应变片紧贴在试样上端，其基底尺寸应小于试样宽度。推荐使用型号为 BX120-05AA 的常温单轴应变片（敏感栅尺寸：0.5 mm×0.5 mm，基底尺寸：3 mm×2 mm，PVC 导线长度：1 m）。应变片的粘贴方法及注意事项见附录 A。

4.2.9 应变片导线端应与应变仪紧密相连，防止加载过程中脱落。

4.2.10 加载时，试样的顶端与螺杆的开槽处相连，底端穿过底板，均用金属销固定。螺杆的另一端位于顶板上方，并旋拧于螺母上。应变仪测量应力的操作方法见附录 B。

4.3 水蒸气发生系统

4.3.1 水蒸气发生系统需配备控温精度为±1℃的水箱。

4.3.2 加热套管的外管接头分别与水箱和动力泵相连，实现水循环。内管接头一端与空气泵相连，另一端作为去离子水的进水口。

4.3.3 加热套管上方与带磨口的石英管相连，石英管通过台架底板中心圆孔伸入炉膛。

4.3.4 空气泵配备玻璃转子流量计调节空气流速，将水蒸气带入管式炉中。

4.4 涂盐装置

采用涂盐装置在试样有效区域均匀涂盐，涂盐装置主要包括喷笔、空气泵和电热板等，见示意图 2。

4.4.1 空气泵的工作压力范围为 0.4~0.7 MPa，喷笔口径推荐尺寸 0.3 mm。

4.4.2 电热板的工作面需选用在 150℃以下无翘曲变形、抗腐蚀性能好的材质。

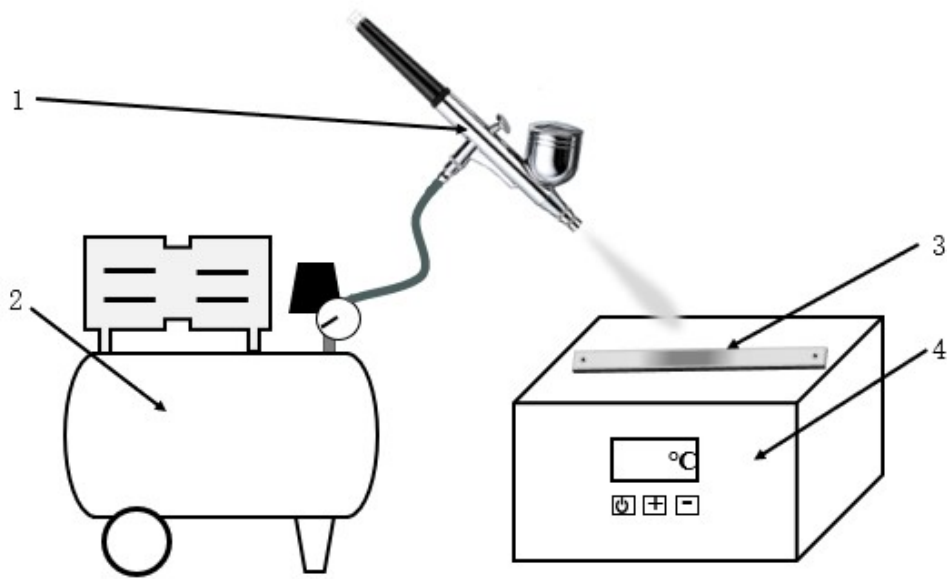


图2 涂盐装置

说明：

- | | |
|----------|--------|
| 1—喷笔； | 2—空气泵； |
| 3—待涂盐试样； | 4—电热板。 |

5. 试样

5.1 形状和尺寸

采用片状试样，试验前应测量试样尺寸，至少测量3次，测量精度为 ± 0.02 mm。推荐尺寸为200 mm \times 10 mm \times 3 mm，试样两端开孔，孔的直径为3 mm。

5.2 金属试样

5.2.1 试样应进行表面检查，有明显缺陷（夹杂、气孔、裂纹）的试样应剔除。

5.2.2 试样表面应通过机械打磨至2000#，确保去除切削加工影响层。

5.3 防护涂层试样

涂层应完全涂覆基体表面，符合相应的技术要求。

5.4 高温腐蚀试验前，推荐采用乙醇或丙酮等溶剂清洗试样，并将试样存放于干燥器中。

6. 试验条件

6.1 试验介质

6.1.1 试验介质根据材料服役环境确定。

6.1.2 试验用盐要预先配制。如配制由95 wt.% Na_2SO_4 (化学纯) + 5 wt.% NaCl (化学纯)

组成的混合盐，将它们按相应质量称重后，用去离子水将其配制成过饱和溶液，用喷笔喷于试样表面，保证试样烘干后盐的单位面积沉积量。

6.1.3 空气流速通过玻璃转子流量计调节，防止流速过低导致进入炉膛的水蒸气含量低，或流速过高将去离子水带入炉中。

6.2 试验温度

试验温度范围一般为 200~1000 °C，范围也可放宽，具体温度根据相关技术要求确定。

6.3 试验时间

当试样温度达到设定的目标温度时定义为试验开始，当试样在目标温度下保温规定的时间后开始降温定义为试验终止。

6.4 加载力大小

加载力由实际测试要求确定，通常为 50~200 MPa。

7. 试验步骤

以高温+沉积盐+空气+水蒸气+拉应力环境为例，若腐蚀介质中不含腐蚀盐或水蒸气，可略过相应步骤。

7.1 涂盐

7.1.1 将试样放置在电热板上预热至 100~130 °C，将配制好的相应盐溶液用喷笔均匀喷洒在预热试样的有效区域（根据试样在加热炉中均温区的尺寸确定），待水分蒸干后在试样表面形成均匀的盐膜。可多次喷洒、干燥，达到试验要求的单位面积沉积量。

7.1.2 对周期性试验的试样，待试样冷却至室温取出。需水洗去除表面残余盐分，然后重新涂盐进行下一个试验周期。

7.2 施加拉应力

将试样固定在螺杆和底板之间，试样固定后需粘贴应变片，再连接应变仪。待炉温升至目标温度，旋拧螺母使螺杆相对于试样架向上移动获得拉应力。通过观察应变仪上的数值确定拉应力的大小。然后撤去应变片和应变仪，进行后续高温试验。

7.3 通入水蒸气

打开温控水箱，加热至目标温度，然后打开动力泵实现水循环。打开空气泵，调节空气流速至合适范围，使空气和水蒸气进入炉膛。

8. 试验结果的评定

截取均温区部分试样进行宏观和微观分析。

8.1 宏观分析

对试样表面进行数码拍照（分辨率在 720P 以上），记录试样表面的宏观特征，包括腐蚀产物的形貌、色泽、裂纹、剥落和其它特征。

8.2 微观分析

用扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射仪（XRD）和透射电子显微镜（TEM）等设备分析腐蚀产物表面和截面的形貌、成分和相结构。

9. 试验报告

试验报告至少应包括以下内容：

- a) 试样材料牌号和状态；
- b) 试样成分；
- c) 试样有效区尺寸和表面积；
- d) 试样规格和数量；
- e) 注明本标准编号；
- f) 试验温度；
- g) 试验时间；
- h) 加载力大小；
- i) 腐蚀介质；
- j) 单位面积盐含量；
- k) 水蒸气含量；
- l) 空气流量；
- m) 试验中异常现象；
- n) 试样外观变化；
- o) 腐蚀产物的物相组成；
- p) 试验日期及人员。

附录 A
(资料性)
应变片的粘贴方法及注意事项

A.1 检查

A.1.1 外观检查：观察基底和导线端的连接处是否有脱落倾向，并剔除敏感栅内有锈点、气泡和霉斑的应变片。

A.1.2 质量检查：用万用表检测应变片的电阻值是否合格，剔除测量阻值与原电阻阻值相差较大的应变片。

A.2 试样表面清洁

试样表面待粘贴处需平整光滑，无油污和锈点，可用浸有酒精或丙酮的棉球擦拭至棉球无污迹。

A.3 应变片粘贴

试样待粘贴部位清洗干净后，在选好的应变片基底上均匀地涂上应变胶，并精确放在要粘贴处。并用手指朝一个方向滚压几十秒，挤出多余的胶水和空气。再用胶水粘贴应变片根部的导线端，防止加载力过程中受力过大导致脱落。待胶水完全固化后，才可进行加载力试验。应注意涂胶水前事先带好手套或在应变片上盖上一张聚乙烯塑料薄膜，以免按压时粘手。

A.4 注意事项

A.4.1 不要用手直接接触应变片的基底（敏感栅）部位。

A.4.2 连接应变仪使用时，若平衡后显示的测量通道为过载，表明电阻异常，可用万用表测试应变片和导线的电阻来判断应变片或导线是否损坏。

A.4.3 初始测量时，应力随时间的变化曲线起伏较大。这是由于导线和应变片通电时会缓慢发热导致电阻值逐渐变化，需等待一定时间后待应变片和导线达到热平衡，重新开始平衡、测量。

附录 B (资料性)

静态应变仪测量应力的操作方法示例及注意事项

B.1 总则

应变仪使用范围广，可对应变、应力、载重、位移、扭矩等进行测量。这里示出的操作方法主要针对应力的测量。不同型号的应变仪，其面板稍有不同，操作方法也有区别，细节性操作要根据相应型号应变仪的说明书，此处则以 YSV 8310 型号静态应变仪为例。

B.2 分析软件安装

应变仪连接的电脑需要安装相应的测试分析软件（购买应变仪时会附赠相应的软件安装盘），安装时，相关参数一般按照默认设置，无需修改。

B.3 仪器连接

B.3.1 常用 1/4 桥接法，将应变仪与应变片的两根导线端相连。

B.3.2 打开电源，仪器预热 30 min 后，将 USB 线和计算机 USB 接口相连。

B.4 硬件驱动的安装

计算机首次连接应变仪时，需安装硬件驱动，安装成功后，之后每次相连都不必重新安装。

B.4.1 在计算机的“设备管理器”中找到“通用串行总线控制器”，选中最新的未能识别的硬件（带有黄色感叹号标志）。

B.4.2 右键选择“更新驱动程序软件”，再选择“浏览计算机以查找驱动程序软件(R)”，找到相应的软件路径（一般为默认路径），进行驱动安装。

B.4.3 驱动安装完毕后，先拔出应变仪的 USB 线，再重新插入到计算机 USB，此时的硬件驱动已安装成功。

B.5 测量应力的操作步骤

B.5.1 打开测试软件后选择待用的静态应变测试系统，并通过“查找”功能搜索到静态应变仪。

B.5.2 设置测量通道的数量，并将不参与测量的通道关闭。

B.5.3 将通道的测量内容选择为“应力”，并设置相关参数，如 1/4 “桥路”、“无补偿形式”、“应变片电阻”为 $120\ \Omega$ ；“灵敏系数”为 2.0、“弹性模量”为 0.18（单位： $10^{12}\ \text{Pa}$ ）等，具体参数数值需确定后再输入。

B.5.4 参数设置完毕后，需进行通道平衡。“平衡”后，测量通道有数字显示的（不论大小）则视为通道正常。若有测量通道显示“过载”，说明通道异常，需检查应变片和导线质量是否合格，粘贴是否规范等情形。

B.5.5 可根据实际需求选择测量方式，如“单次测量”，“定时采集”和“高速采样”。设定好相关的参数，如采样间隔，次数，频率等。根据表格数据或时程曲线图，确定是否加载到所需应力值。

B.5.6 当加载到所需应力值并稳定一段时间后，即可逐一撤去应变片，应变仪和计算机。

B.6 注意事项

B.6.1 仪器应尽可能远离强磁场，尽可能用双绞线连接应变片。

B.6.2 为保证测量稳定性，应变片需连接牢固。

B.6.3 仪器尽量避免长时期在含有腐蚀性环境中工作。

B.6.4 仪器日常存放的环境要防震，防潮以及防尘，避免阳光直射等。