

# 团 体 标 准

T/CNS 76—2022

---

## 核电厂蒸汽发生器传热管表面划伤 应力腐蚀敏感性试验方法

**Test method for stress corrosion cracking sensitivity of heat exchanger tube with  
surface scratch in steam generator of nuclear power plants**

2022 - 12 - 16 发布

2023 -04 - 01 实施

---

中国核学会 发布



# 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总体要求 .....	2
5 试样制备 .....	2
6 微观组织表征及局部力学性能测试 .....	2
7 腐蚀试验及分析 .....	3
8 试验结果分析及数据处理 .....	5
9 试验报告 .....	5
附录 A（资料性）划伤试样、锥形压头及表面划伤区域截面示意图 .....	6
附录 B（资料性）划伤区纳米压痕测试中压痕点排布方式示意图 .....	7
附录 C（资料性）表面划伤腐蚀截面裂纹统计表 .....	8
附录 D（资料性）表面划伤腐蚀截面典型裂纹图例 .....	9



## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核学会提出。

本文件由核工业标准化研究所归口。

本文件起草单位：广东腐蚀科学与技术创新研究院、中国科学院金属研究所、上海核工程研究设计院有限公司、生态环境部核与辐射安全中心。

本文件主要起草人：韩恩厚、孟凡江、王俭秋、李荣博、明洪亮、张志明、吴斌、鲍一晨、孙海涛、郭彦辉。



# 核电厂蒸汽发生器传热管表面划伤 应力腐蚀敏感性试验方法

## 1 范围

本文件描述了核电厂蒸汽发生器传热管表面划伤的微观组织结构表征和应力腐蚀试验测试方法，包含试样制备、分析表征方法、腐蚀试验及分析方法等。

本文件适用于核电厂蒸汽发生器传热管表面划伤应力腐蚀敏感性试验。

## 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 150.4 压力容器 第4部分：制造、检验和验收
- GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法
- GB/T 10126—2002 铁-铬-镍合金在高温水中应力腐蚀试验方法
- GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语
- GB/T 13298 金属显微组织检验方法
- GB/T 15970.1 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 17359 微束分析 能谱法定量分析
- GB/T 18907 微束分析 分析电子显微术 透射电镜选区电子衍射分析方法
- GB/T 19501 电子背散射衍射分析方法通则
- GB/T 36165 金属平均晶粒度的测定 电子背散射衍射（EBSD）法
- JB/T 12721 固体材料原位纳米压痕/划痕测试仪 技术规范
- JY/T 0583 聚焦离子束系统分析方法通则
- JY/T 0584 扫描电子显微镜分析方法通则

## 3 术语和定义

GB/T 6394、GB/T 10623、GB/T 19501、GB/T 36165和JB/T 12721界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**传热管表面划伤** **scratch on the surface of heat exchanger tube**

制造、运输及安装等环节中，在蒸汽发生器传热管表面形成的一种沟槽状的表面缺陷。

### 3.2

**划伤凹槽** **scratch groove**

表面划伤时，金属材料表面形成的沟槽状几何结构，可细分为划伤凹槽侧壁、划伤凹槽底部两个特征区域，如图A.1所示。

### 3.3

**塑性堆积区** **plastic accumulation zone**

表面划伤时，划伤凹槽两侧形成的“堆”状几何结构，如图A.1所示。

### 3.4

**划伤影响区** **scratch affected area**

表面划伤时，除划伤凹槽及塑性堆积区外的冷变形区域，其硬度高于基体材料，如图A.1所示。

## 4 总体要求

试验人员应具备相关的专业知识和试验经验。测试设备应按规定进行检定，保证相关试验参数和结果的可信度。

## 5 试样制备

- 5.1 试样用材应与核电厂蒸汽发生器传热管用材规格（壁厚、外径）和热处理状态相同。
- 5.2 若所需试样数量较多，也可将传热管进行截面等分（如四等份、六等份）剖割。切割时应应对传热管表面进行保护，避免传热管原始表面损伤。切割时应避免表面灼伤、氧化。传热管试样片的长度宜为10 mm~20 mm。
- 5.3 用于制备划伤试样的表面应无明显划伤、凹痕等缺陷。若发现试样表面状态不符合上述要求，该试样应予以废弃。
- 5.4 使用无水乙醇或丙酮和去离子水依次对试样进行超声清洗，每次超声清洗时间不宜低于30 min。
- 5.5 对传热管试样表面定量划伤时，宜使用YG8硬质合金材质的圆锥形划伤压头，圆锥夹角及尖端曲率的具体数值宜与工程划伤缺陷的相关参数接近，也可由测试要求确定。
- 5.6 对传热管试样表面定量划伤时，将试样安装至样品台，移动划伤压头使其与需制备表面划伤缺陷的区域相接触，调整划伤压头至所需制备的划伤深度所对应的进给量，并采用锁死机构锁紧划伤压头。划伤的速率宜为5 mm/s~15 mm/s。
- 5.7 对准备完毕的表面划伤试样，使用可获得深度信息的设备（如激光共聚焦显微镜等）进行表面三维形貌检测，校核试样划伤轮廓是否符合预期。将符合预期的试样进行标号，并装入干燥的样品袋封存。
- 5.8 同一试验的表面划伤试样在划伤过程中采用的划伤速率、划伤压头材质及几何尺寸等参数应保持相同。
- 5.9 每一个表面划伤试样的制备记录需包含但不限于所采用的划伤压头基本信息（材质、几何尺寸等）、划伤速率、划伤深度、划伤形貌、制备时间、环境温度、制备人员等信息。

## 6 微观组织表征及局部力学性能测试

### 6.1 金相检测

#### 6.1.1 试样制备

- 6.1.1.1 应按照GB/T 13298的规定执行。
- 6.1.1.2 宜采用以下试样制备方法：
  - a) 将表面划伤试样进行超声清洗；
  - b) 为保证试样磨抛质量，宜采用镶嵌方法将表面划伤试样制备成镶块；
  - c) 然后用水砂纸将试样截面逐级打磨至2 000号，最后用2.5 μm粒径的金刚石抛光膏进行机械抛光至镜面；
  - d) 试样磨抛时需用水冷却，防止试样的组织因受热而发生变化；
  - e) 经无水乙醇清洗、冷风吹干后，采用光学显微镜观察试样截面；
  - f) 确认截面无明显划痕后，进行刻蚀。
- 6.1.1.3 宜采用以下刻蚀方法：
  - a) 采用10 wt.%草酸溶液电解刻蚀传热管表面划伤试样，刻蚀电压宜为3 V~5 V，刻蚀时间宜为10 s~30 s，宜采用短时、多次的电解刻蚀方法；
  - b) 避免划伤区域刻蚀过度而影响金相组织观察。
- 6.1.1.4 所有试样刻蚀后均应立即用水冲洗，并用无水乙醇擦干、备用。

#### 6.1.2 表征方法

- 6.1.2.1 金相观察参照GB/T 13298的规定进行。
- 6.1.2.2 应在低放大倍数（50×~100×）下对试样金相组织进行检测，视野内应包含划伤区域的划伤凹槽、两侧塑性堆积区及划伤影响区。

6.1.2.3 采用高放大倍数（不宜低于500×）对特殊区域进行详细检测，放大倍数以看清金相组织结构为准，重点关注划伤凹槽、两侧塑性堆积区及划伤影响区域的金相组织。

6.1.2.4 可参照 GB/T 6394 的规定进行特定项的检测。

6.1.2.5 必要时，可在扫描电子显微镜下对金相组织进一步观察，重点关注划伤凹槽、两侧塑性堆积区及划伤影响区域的变形组织（如机械孪晶、变形带及晶界扭转等），可按 JY/T 0584 的规定进行。

## 6.2 其他微观组织结构表征

### 6.2.1 电子背散射衍射观察

6.2.1.1 必要时，可采用电子背散射衍射分析方法对划伤造成的微观组织结构转变进行分析表征。

6.2.1.2 重点关注晶粒尺寸及取向、晶界类型分布及残余应变等。

6.2.1.3 截面扫描区域要包含特征区域的最近邻表面，直至基体。选择视场时，应包含表面划伤区域的划伤凹槽、两侧塑性堆积区及划伤影响区。

6.2.1.4 检测也可按 GB/T 19501、GB/T 36165 的规定执行。

### 6.2.2 透射电镜观察

6.2.2.1 必要时，可采用透射电镜方法对制备的表面划伤透射试样进行透射明、暗场像形貌，选区衍射及高分辨观察，重点关注划伤凹槽近邻位置的晶粒尺寸、细晶层厚度、变形组织及晶体缺陷等结构变化。

6.2.2.2 检测可按照 GB/T 18907、JY/T 0583 的规定执行。

## 6.3 纳米压痕测试

6.3.1 使用纳米压痕仪进行测试，加载载荷宜为 15 mN，加载时间 10 s，保载 15 s。

6.3.2 应先在表面划伤试样远离划伤凹槽部位的区域进行测量，宜采用 3×3 阵列排布测试点，取平均值作为基体的硬度值。

6.3.3 对划伤试样截面纳米压痕测试时，纳米压痕点排布宜以划伤凹槽为中心，向四周呈放射状排布压痕点，从表面划伤凹槽的近邻位置连续测试至基体。

6.3.4 宜采用以下纳米压痕点排布方案：

- a) 如附录 B 所示，划伤凹槽底部区域设 3 列纳米压痕点（M1、M2、M3）；
- b) 顶端两侧近表层横向设 2 列纳米压痕点（L1、R1）；
- c) 凹槽两侧设与顶端近表层横向纳米压痕点成 30° 和 60° 角的 4 列纳米压痕点阵列（L2、L3、R2、R3）。

6.3.5 由于不同深度划伤的影响区大小存在差异，因此测试时，压痕点间的间距可以不同，但 L 列和 R 列的压痕点间距同 M 列纵向间距应保持一致。

## 7 腐蚀试验及分析

### 7.1 腐蚀试验

#### 7.1.1 试验仪器和设备

7.1.1.1 高压釜釜体、釜盖应采用不锈钢、镍基合金或哈氏合金等耐蚀合金制造，具体材料应与试验溶液相容。釜体宜为整体，特殊情况下也可施焊但应进行探伤。

7.1.1.2 釜体与釜盖之间及釜上引出的各测试孔均需具有良好的密封性能，在试验过程中不准有泄漏现象。

7.1.1.3 高压釜应设有安全保护装置，并定期更换安全保护装置，以保证其可靠性。

7.1.1.4 高压釜釜体、釜盖等高温承压构件应按照 GB/T 150.4 的要求进行制造、无损检测和验收，非按照 GB/T 150.4 制造的釜体及釜盖，应按此文件要求进行评估，经验收合格后方可使用。

7.1.1.5 釜内构件及试样架应采用耐高温耐腐蚀材料加工，如采用不锈钢、镍基合金等材料制成。

7.1.1.6 如若使用试样架，应保持试样架、试样、釜体、试样与试样之间均处于绝缘状态。

7.1.1.7 加热及控温装置应满足试验要求的升、降温速率，在试验温度下能长期保温，并且稳定、可靠、操作方便。试样应放置于高压釜均温区，并确保高压釜内热电偶位于试样附近，以便实时监测试样试验温度。宜采用电加热方式。

7.1.1.8 控温精度： $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 7.1.2 试样制备

7.1.2.1 可按照 GB/T 15970.1、GB/T 10126 执行。

7.1.2.2 试验中应设置平行试样，每种表面划伤平行试样不应少于 3 个。

7.1.2.3 在腐蚀试验前，为方便试样悬挂，可在试样边缘远离划伤区域的部位进行打孔。孔径宜为  $\Phi 2\text{ mm}$ ，打孔后应将毛刺去除，整个过程中应注意保护试样表面状态。

7.1.2.4 打孔后，试样应在无水乙醇或丙酮中进行超声清洗，超声清洗时间不应低于 30 min，取出后再用去离子水清洗，空气中吹干后备用。

### 7.1.3 试验溶液

7.1.3.1 采用电导率小于  $2\text{ }\mu\text{S/cm}$  的去离子水或蒸馏水配制试验溶液。

7.1.3.2 根据试验要求配制试验溶液，宜采用分析纯试剂。

### 7.1.4 试验条件

7.1.4.1 按照试验要求确定试验温度。

7.1.4.2 静态高压釜内压力为饱和蒸气压。当采用动态循环高压釜，压力按照试验要求确定，溶液应充满高压釜腔，外加压力高于该溶液饱和蒸气压，调节高压泵选择合适的溶液流量，确保高压釜内溶液在 1 h 内至少更换 1 次。

7.1.4.3 室温下静态高压釜内气相与液相体积比不应高于 2:3。

7.1.4.4 升温速率宜为  $50\text{ }^{\circ}\text{C/h}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。

7.1.4.5 每平方厘米试样面积对应的溶液量不少于 20 mL。

### 7.1.5 试验步骤

7.1.5.1 使用无水乙醇擦拭釜内和夹具，并用去离子水进行充分清洗。

7.1.5.2 试验温度不高于  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，宜采用表面包覆聚四氟乙烯热缩管的纯镍金属丝悬挂试样；当试验温度超过  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，应在聚四氟乙烯热缩管外面包套氧化锆陶瓷管或在试样钻孔部位采用氧化锆陶瓷管，以使试样与试样支架间绝缘。同时，保证高压釜关闭后，试样与高压釜内壁不直接接触。试样安装期间，应佩戴干净的工作手套。

7.1.5.3 按照试验要求调整溶液中的溶解氧浓度等参数。

7.1.5.4 检查测温、测压及安全保护装置均处于正常状态后，开始加热升温。

7.1.5.5 到达试验温度后，开始保温，此时作为试验开始时间，可选择 1000 h 作为一个周期，进行取样分析。若采用浓碱性或含氯介质等苛刻水化学条件时，可按需求适当缩短试验周期。每个周期结束后，取出相应时间对应的试样并更换新溶液，再进行下一周期试验。

## 7.2 分析表征

### 7.2.1 表面氧化产物形貌及成分

7.2.1.1 腐蚀试验后，将划伤试样取出，在去离子水中浸洗以去除表面的溶液介质，烘干试样，留存观察。

7.2.1.2 利用扫描电子显微镜获取划伤试样表面氧化产物的形貌，低放大倍数（不宜低于  $500\times$ ）下视野内应包含划伤凹槽、两侧塑性堆积区及划伤影响区。高放大倍数（不宜低于  $2000\times$ ）下，重点关注每个表面划伤试样划伤凹槽底部、两侧塑性堆积区和划伤影响区部位的表面腐蚀产物形貌。

7.2.1.3 使用扫描电子显微镜的能谱仪对典型腐蚀产物的外层氧化物化学组成进行分析，可按照 GB/T 17359、JY/T 0584 执行。

## 7.2.2 截面形貌表征

7.2.2.1 腐蚀试验完成后，将划伤试样取出，在去离子水中浸洗以去除表面的溶液介质，烘干试样，干燥皿保存。

7.2.2.2 宜采用以下截面形貌观察样品制备方法：

- a) 为保护试样表面氧化膜，减少磨抛截面对氧化膜的破坏，应对划伤试样外表面进行镀镍；
- b) 宜采用电镀或化学镀，形成一层与外表面紧密结合的镍层，镍层厚度宜为 20  $\mu\text{m}$ ~50  $\mu\text{m}$ ；
- c) 试样镀镍后用环氧树脂密封，用水砂纸将试样截面低转速（转速宜为 100 r/min~150 r/min）逐级磨至 3000 号，然后用 2.5  $\mu\text{m}$ 、1.5  $\mu\text{m}$  粒径的金刚石抛光膏逐级抛光；
- d) 无水乙醇清洗、冷风吹干后留存观察。

7.2.2.3 利用扫描电子显微镜获取划伤试样截面形貌，为更好地观察裂纹，宜使用背散射电子信号（BSE）。低放大倍数（不宜低于 500 $\times$ ）下视野内应包含划伤区域的划伤凹槽（底部及侧壁）、两侧塑性堆积区及划伤影响区。高放大倍数（不低于 2000 $\times$ ）下，重点关注每个划伤试样划伤凹槽（底部及侧壁）、两侧塑性堆积区和划伤影响区部位的裂纹数量及长度。

7.2.2.4 将各划伤试样各部位的截面观察情况记录在统计表内见表 C.1。

7.2.2.5 表面划伤腐蚀截面典型裂纹图如图 D.1 所示。

## 8 试验结果分析及数据处理

根据相应的标准化文件及本文件所述的表征方法进行分析及数据处理，同时对截面观察结果进行整理，结合表面划伤腐蚀截面裂纹统计表（见表 C.1），测试材料的应力腐蚀敏感性，获得表面划伤参数（深度、尖端曲率等）、微观组织结构变化和材料应力腐蚀敏感性的关系。

## 9 试验报告

应包括但不限于以下内容：

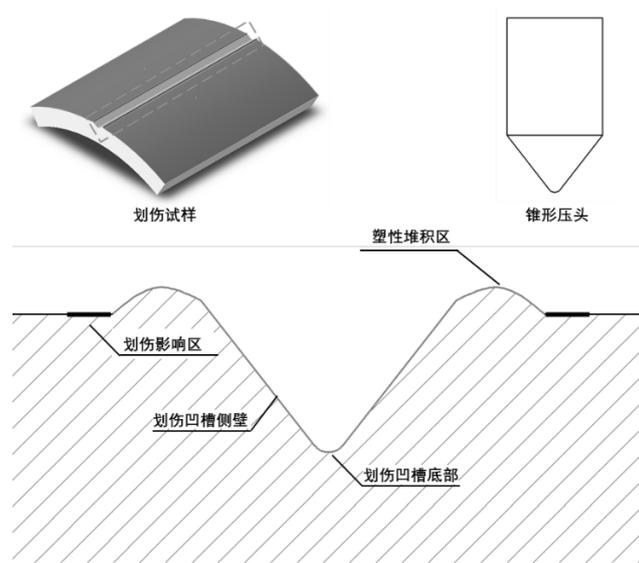
- a) 试验名称及本文件编号；
- b) 材料牌号；
- c) 试验设备；
- d) 试样形状尺寸、表面形貌、划伤参数、试样数量；
- e) 试验参数，如试验温度、压力和试验溶液等；
- f) 试验结果包括金相组织、晶粒尺寸、晶界类型分布、纳米压痕硬度分布、腐蚀试验表面氧化物形貌及成分、腐蚀试验截面裂纹的数量及长度等；
- g) 试验异常记录（如有）；
- h) 试验单位、试验人员和日期。

## 附录 A

(资料性)

### 划伤试样、锥形压头及表面划伤区域截面示意图

划伤试样、锥形压头和表面划伤区域的示意图如图A.1所示，划伤区域可细分为划伤凹槽底部、划伤凹槽侧壁、塑性堆积区和划伤影响区。



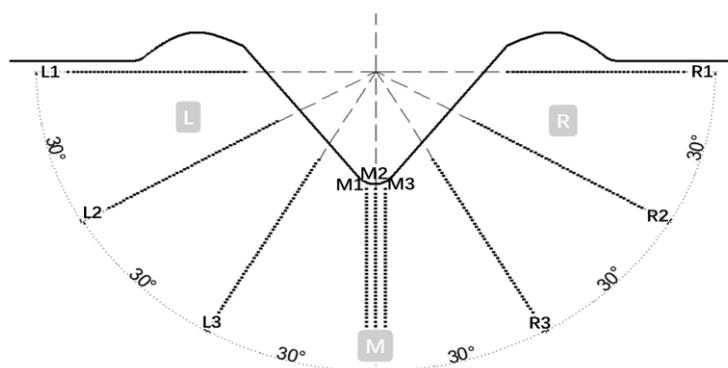
图A.1 划伤试样、锥形压头及表面划伤区域截面示意图

## 附录 B

(资料性)

## 划伤区纳米压痕测试中压痕点排布方式示意图

划伤区纳米压痕测试中压痕点的排布方式示意图如图B. 1所示。



标引序号说明:

L1、R1——顶端近表层横向的纳米压痕点分布;

M1、M2、M3——划伤凹槽底部区域的纳米压痕点分布;

L2、L3、R2、R3——凹槽两侧与顶端近表层横向纳米压痕点成30°和60°角的纳米压痕点阵列分布。

图B. 1 划伤区纳米压痕测试中压痕点排布方式示意图

附录 C

(资料性)

表面划伤腐蚀截面裂纹统计表

表面划伤腐蚀截面裂纹统计表模板如表C.1所示。

表C.1 表面划伤腐蚀截面裂纹统计表

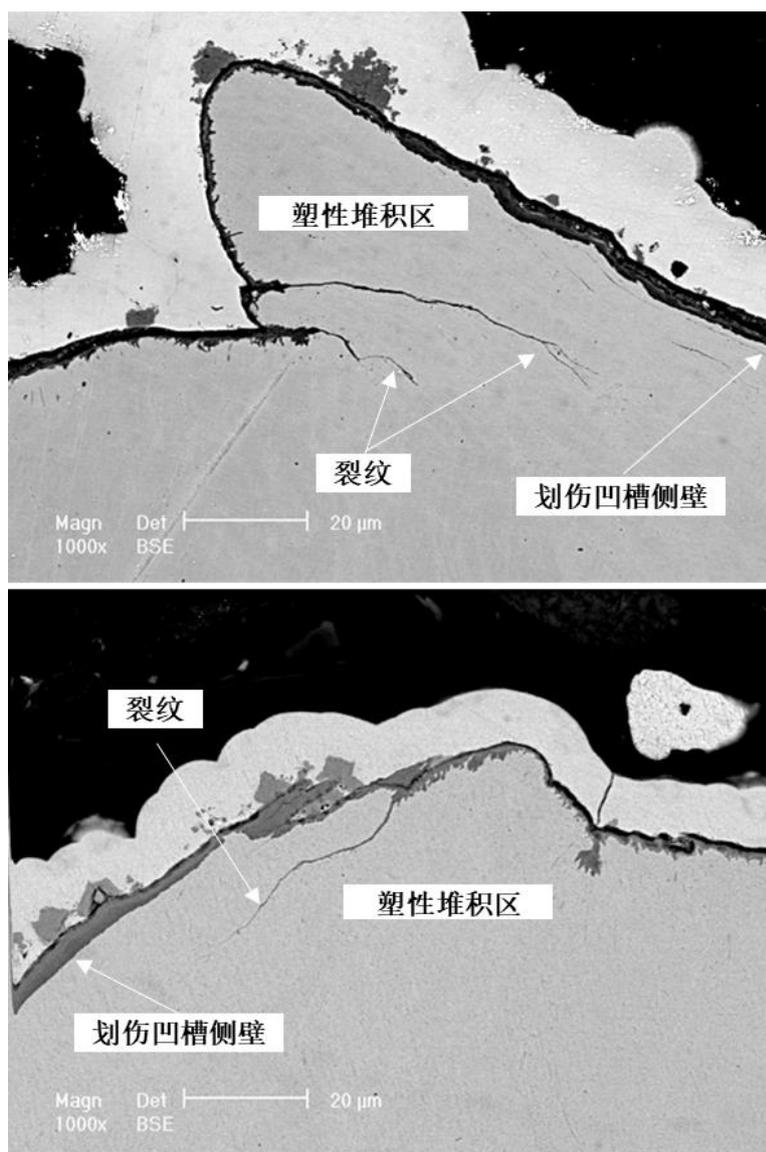
表面划伤腐蚀截面裂纹统计表												
划伤深度 μm	塑性堆积区			凹槽侧壁			凹槽底部			划伤影响区		
	裂纹数量	数量小计	裂纹长度 μm	裂纹数量	数量小计	裂纹长度 μm	裂纹数量	数量小计	裂纹长度 μm	裂纹数量	数量小计	裂纹长度 μm
腐蚀试验条件:							日期:			试验人员:		

## 附录 D

(资料性)

## 表面划伤腐蚀截面典型裂纹图

传热管表面划伤腐蚀截面典型裂纹图如图D.1所示。



图D.1 表面划伤腐蚀截面典型裂纹图