ICS 77.040.01
CCS H 20

团　　体　　标　　准

T/CNS 52—2021

核电厂金属材料高温高压水中环境促进开裂声发射监测试验方法

Test method for acoustic emission monitoring of environmentally assisted cracking in high temperature pressurized water for metallic materials used in nuclear power plants

2021-07-26 发布　　2021-11-01 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　试验仪器和设备 …… 2
5　试样制备和要求 …… 3
6　试验条件和步骤 …… 3
7　数据处理 …… 4
8　质量保证 …… 4
9　试验报告 …… 5
附录 A（资料性）　带有 AE 监测系统的高温高压循环水中环境促进开裂测试装置 …… 6
附录 B（资料性）　AE 数据处理方法 …… 7

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：中国科学院金属研究所、上海核工程研究设计院有限公司。

本文件主要起草人：谭季波、张震、陈松、韩恩厚、吴欣强、徐健、陈轩、戴扬。

核电厂金属材料高温高压水中环境促进开裂声发射监测试验方法

1 范围

本文件规定了核电厂用金属材料在高温高压水条件下利用声发射监测环境促进开裂的试验方法和相关技术要求。

本文件适用于具有一定标距长度的圆形、矩形横截面试样以及紧凑拉伸试样在360 ℃及以下水介质中环境促进开裂声发射监测试验。

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 228 金属材料 室温拉伸试验方法

GB/T 6398 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法

GB/T 15248 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法

GB/T 15970.7 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第7部分：慢应变速率试验

GB/T 20120.1 金属和合金的腐蚀 腐蚀疲劳试验 第1部分：循环失效试验

T/ CNS 4 核电厂金属材料高温高压水中腐蚀疲劳试验方法

T/ CNS 5 核电厂金属材料高温高压水中应力腐蚀裂纹扩展试验方法

3 术语和定义

T/ CNS 4—2018、T/ CNS 5—2018、GB/T 15970.7—2000 、GB/T 20120.1—2006 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

声发射 acoustic emission；AE

材料中局部能量源快速释放而产生瞬态弹性波的现象。

3.2

撞击 hit

超过阈值并使某一通道获取数据的任何信号。

3.3

声发射波形 AE waveform

声发射信号电压随时间的变化。

3.4

振铃计数 count

声发射信号波形中超过门槛信号的振荡次数。

3.5

幅度　amplitude

声发射信号波形的最大振幅值。

3.6

能量　energy

信号检波包络线下的面积。

3.7

持续时间　duration

信号第一次越过门槛至最终降至门槛所经历的时间间隔。

3.8

上升时间　rise time

信号第一次越过门槛至最大振幅所经历的时间间隔。

3.9

爆发型信号　burst signal

对材料中发生一个独立声发射事件有关的分立信号的定性描述。

3.10

连续型信号　continuous signal

对由声发射事件快速出现而产生的持续信号水平所作的定性描述。

4　试验仪器和设备

4.1　高压釜

4.1.1　高压釜釜体、釜盖应采用不锈钢或镍基合金等耐蚀合金制造。釜体一般为整体，特殊情况下也允许施焊，但应进行无损检测。

4.1.2　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，在试验过程中不准许有泄漏现象。

4.1.3　可以模拟典型轻水堆核电站服役循环水环境，可在 360 ℃、20 MPa 及以下环境中长期稳定运行。

4.1.4　高压釜应设有安全保护装置，并定期检查安全保护装置的可靠性。

4.1.5　按照标准 GB/T 150.4—2011，对釜体、釜盖等高温承压构件进行无损检测，经检测合格后方可使用。

4.1.6　试样架推荐采用耐高温耐腐蚀材料制造，如采用奥氏体不锈钢、镍基合金等材料制成。

4.1.7　附录 A 中图 A.1 给出了推荐的高温高压循环水系统和高压釜结构示意图。

4.1.8　推荐高压釜应配备外部冷却水循环系统，以保护位移传感器、力传感器、密封圈及其他不耐高温试验部件。

4.2　加载装置

4.2.1　高压釜需配备加载装置，推荐试验装置配备压力平衡装置，平衡釜内水压对拉伸杆施加的压力。

4.2.2　在高温高压水环境下能够实现力控制和位移控制加载模式。

4.2.3　能够实现慢应变速率拉伸、恒载荷和恒位移，或三角波、梯形波等波形的加载。

4.2.4　图 A.1 给出了推荐的加载装置示意图。

4.3 加热及控温装置

4.3.1 推荐采用电加热方式。

4.3.2 加热装置及控温仪器应具有满足试验要求的升温速度，在试验温度下能长期保温，并且稳定、可靠、操作方便。尽量保持高压釜内温度均匀，并确保高压釜内热电偶在试样附近，实时监测试样处试验温度。

4.3.3 控温精度：±1 ℃。

4.4 AE 监测系统

4.4.1 AE 探头的测试频率范围应不低于 100 kHz～900 kHz。

4.4.2 推荐 AE 探头与波导杆之间利用医用凡士林进行耦合，断铅试验时，信号幅度应不低于 95 dB。

4.4.3 AE 采集卡应具备至少 18 位的 A/D 转换器，能够实现低至 17 dB 的幅度阈值设定；AE 采集卡应具有至少双通道采集功能，采样率不低于 10 M/s。

4.4.4 AE 软件应能够记录信号波形流；常规 AE 特征参数，包括但不限于振铃计数、上升时间、持续时间、幅度、绝对能量、峰值频率、中心频率。

5 试样制备和要求

5.1 试样的材料要求

试样材料为核电厂用金属材料，包括碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢、镍基合金、锆合金等，取样应具有代表性。

5.2 试样的形状尺寸

圆形和矩形横截面试样、紧凑拉伸试样宜按 GB/T 228—2002、GB/T 15248—2008、GB/T 6398—2000 执行。

5.3 试样加工

试样的取样部位和取向应按有关标准或双方协议。所采用的机加工在试样表面产生的残余应力和加工硬化应尽可能小。

5.4 表面粗糙度

试样标距段表面粗糙度一般应优于 0.8 μm，也可根据需求决定。

5.5 试样保存

试样应在干燥皿中密封保存，防止试样氧化、受杂质污染，尤其是易氧化的低合金钢、碳钢等材料。

6 试验条件和步骤

6.1 溶液配制

6.1.1 采用电导率小于 1 μS/cm 的去离子水或蒸馏水配制试验溶液。

6.1.2 根据试验要求，采用分析纯级试剂配制试验溶液。

6.2 试验条件

6.2.1 对于动态循环高压釜，溶液应充满高压釜腔，压力高于该溶液饱和蒸气压。
6.2.2 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。
6.2.3 推荐升温速度控制在 70 ℃/h～100 ℃/h。

6.3 试验步骤

6.3.1 将 AE 试验探头贴于加载轴上，将 AE 参考探头贴于加载装置上。
6.3.2 进行空载荷预试验以确定加载装置的背景噪声。
6.3.3 将预试样安装在夹具上进行预加载，载荷大小应高于正式试验中的最大载荷，高于 5%为宜，以消除试验过程中夹具变形产生的信号。
6.3.4 试样安装在夹具上，安装后同轴度良好。
6.3.5 高压釜拧紧后，将试验溶液配制好后注入储水罐及高压釜中，并按具体试验要求调节压力、流量、溶解氧。
6.3.6 确认测温、测压及安全保护装置均处于正常状态后，开始加压并达到压力设定值，确认无泄漏后开始加热升温。
6.3.7 当温度、压力稳定到试验目标值后，推荐保温 24 h，测量高压釜系统的 AE 背景噪声信号，结合加载装置背景噪声和高压釜系统噪声设定 AE 数据采集系统的幅度阈值。
6.3.8 设置环境促进开裂的试验参数，开始试验。
6.3.9 试验结束后，关闭 AE 采集系统，并将试样取出，妥善保存。

7 数据处理

7.1 数据记录

7.1.1 记录试验过程中 AE 信号累计撞击随时间的演变规律。典型的高温高压水应力腐蚀开裂过程中累计撞击随时间的演变规律如附录 B 中图 B.1 所示。
7.1.2 记录 AE 波形。
7.1.3 记录试样标距段表面裂纹宏观形貌。
7.1.4 记录试样的裂纹源、裂纹扩展区等的形貌。

7.2 数据处理

7.2.1 分析 AE 累计撞击随时间的变化规律，特别是 AE 累计撞击速率。
7.2.2 分析 AE 波形特征，包括爆发型信号和连续型信号；AE 波形分析主要使用振铃计数、上升时间、持续时间、幅度、绝对能量、峰值频率以及中心频率等特征参数。
7.2.3 推荐采用定量递归方法分析 AE 波形。定量递归理论及具体处理步骤见附录 B。
7.2.4 利用聚类分析方法(K 均值聚类以及层次聚类等)结合 AE 特征参数对不同波形 AE 信号分类。
7.2.5 关联环境促进开裂微观特征与不同类型 AE 信号。一般而言，爆发型信号来源于裂纹扩展，连续型信号与塑性变形有关。

8 质量保证

8.1 试验人员要求

本文件所规定的试验涉及高温高压特殊工况，试验人员应具备相关高温高压水循环系统基本操作

技能及电化学专业背景知识以及 AE 信号处理技能，以提高试验可操作性及结果可信度。

8.2 试验系统校准要求

按照相关规定定期对加载装置力传感器、位移传感器、高精度线性可变差动变压位移传感器、高压釜热电偶、预热器热电偶、溶解氧探头、压力传感器、pH 探头、AE 探头等进行标定，并在有效期内使用。

9 试验报告

本试验报告应包括但不限于以下内容：

a) 本文件编号；
b) 材料名称、热处理状态和拉伸性能；
c) 试样形状尺寸、表面状态、取样位置、取样方向；
d) 试验参数，如：应变速率、载荷大小、加载波形、温度、压力、溶解氧浓度等水化学参数；
e) 试验结果，包括裂纹形貌、断口形貌、AE 波形、AE 特征参数等；
f) 试验异常记录(如有)；
g) 试验人员和日期。

附　录　A
（资料性）
带有 AE 监测系统的高温高压循环水中环境促进开裂测试装置

推荐的带有 AE 监测系统的高温高压循环水中环境促进开裂测试装置如图 A.1 所示。

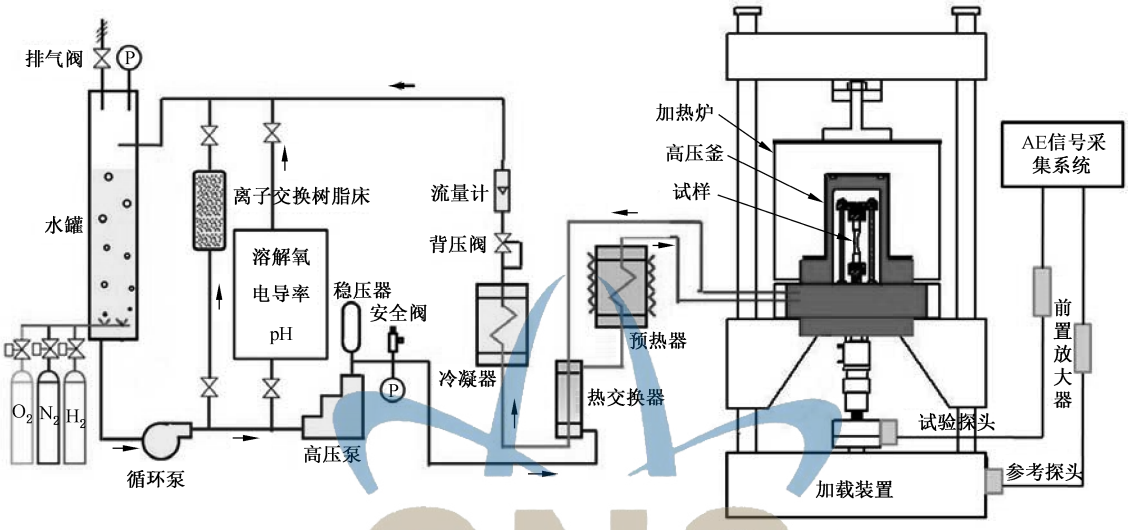


图 A.1　带有 AE 监测系统的高温高压循环水中环境促进开裂测试装置

附 录 B
（资料性）
AE 数据处理方法

B.1 AE 波形通常属于一维时间序列，可以使用时间延迟嵌入来重建以获得对应的系统轨迹。

B.2 本文件推荐采用虚假最近邻方法和交互信息方法来确定嵌入维数和时间延迟两个参数，建议选择嵌入维数和时间延迟分别是 5 和 4。

B.3 AE 信号的递归图可以根据公式(B.1)计算：

$$R_{i,j}=H(\varepsilon-||x_i-x_j||),i,j=1,\cdots,N \quad \cdots\cdots(B.1)$$

其中 $R_{i,j}$ 是由 0 和 1 组成的 $N\times N$ 矩阵，0 代表递归图中可以递归的黑点，1 代表递归图中不可以递归的白点；H 是哈密顿算符；$||...||$ 计算 x_i 和 x_j 之间的欧几里德距离；ε 是阈值，定义为 AE 时间序列的标准偏差；递归图中有三种模式，包括单个点、对角线、垂直和水平线；推荐从递归图中提取递归率(R)、确定率(D)、香依熵(E)和平均对角线长度(L_{mean})等参数定量表征这三种模式。

B.4 R 表示递归图中可递归点的密度，用公式(B.2)计算。

$$R=\frac{1}{N^2}\sum_{i,j=1}^{N}R(i,j) \quad \cdots\cdots(B.2)$$

B.5 D 表示在所有递归点中形成至少 λ_{min} 长度的对角线的递归点所占比率，用公式(B.3)计算，推荐 λ_{min} 为 2。

$$D=\frac{\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{N}\lambda P(\lambda)}{\sum_{\lambda=1}^{N}\lambda P(\lambda)} \quad \cdots\cdots(B.3)$$

$P(\lambda)$是对角线长度的直方图。

B.6 L_{mean} 表示递归图中平均对角线长度，可以用公式(B.4)计算。

$$L_{mean}=\frac{\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{N}\lambda P(\lambda)}{\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{N}P(\lambda)} \quad \cdots\cdots(B.4)$$

B.7 E 是分布 $p(\lambda)$的香依熵。E 反映的是递归图中对角线的复杂程度，可以用公式(B.5)计算。

$$E=-\sum_{\lambda=\lambda_{min}}^{N}p(\lambda)\ln p(\lambda) \quad \cdots\cdots(B.5)$$

B.8 定量递归方法为在特定编译平台安装开源的 CRPT(Cross Recurrence Plot Toolbox) 工具包，获取对应的定量递归特征参数，然后进行 AE 信号分类。

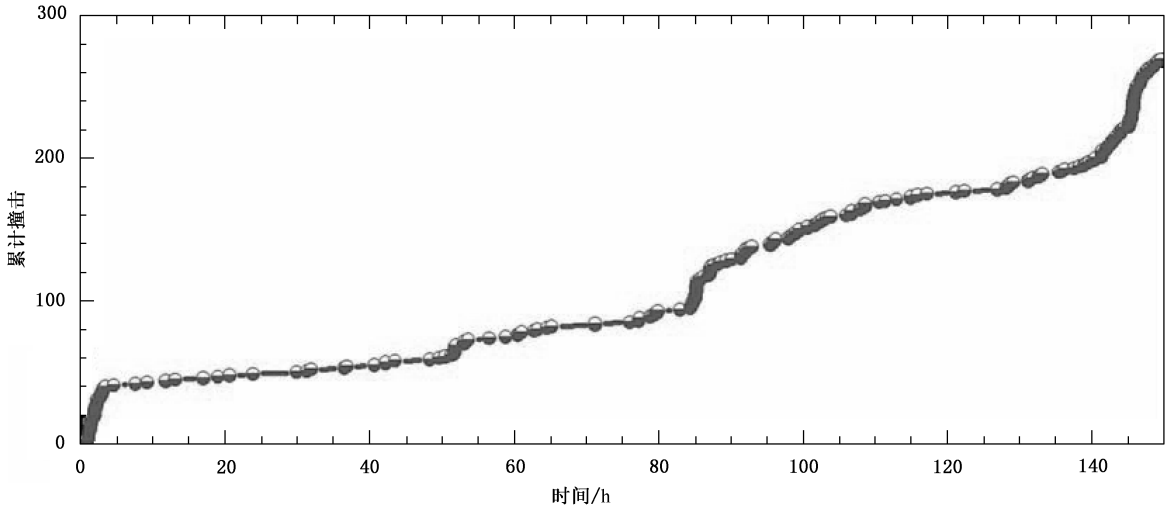


图 B.1　典型的累计撞击随时间的演变规律

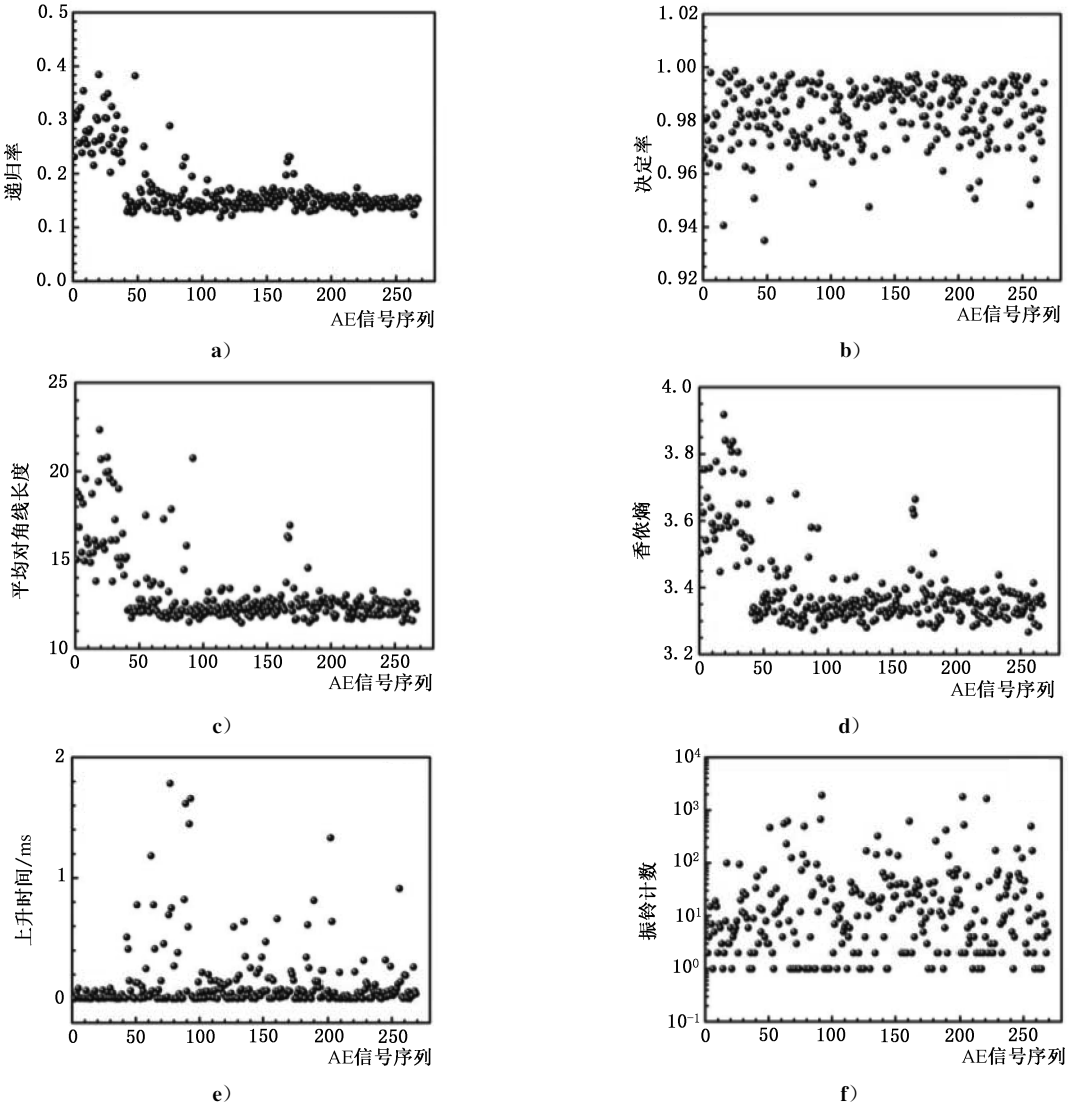
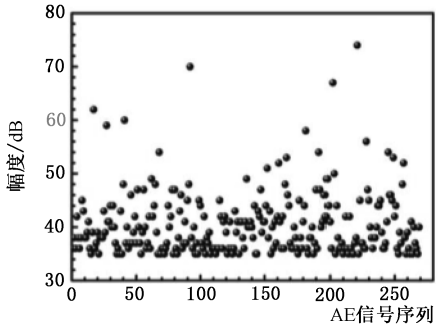
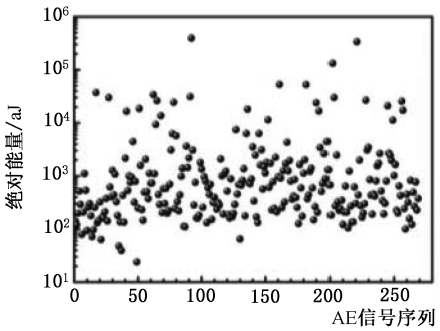


图 B.2　AE 信号的定量递归参数和传统特征参数



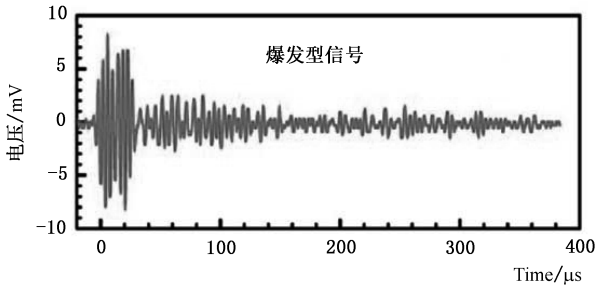
g）



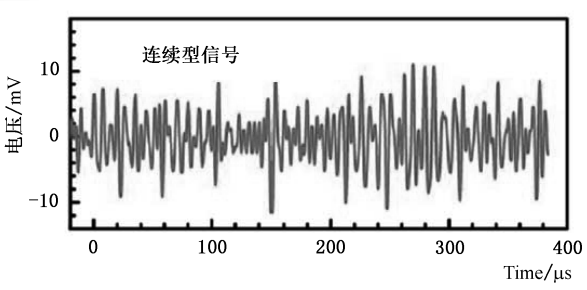
h）

a～d）定量递归参数；
e～h）传统特征参数。

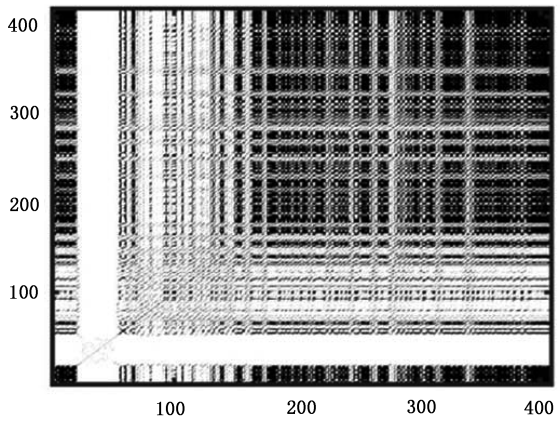
图 B.2　AE 信号的定量递归参数和传统特征参数（续）



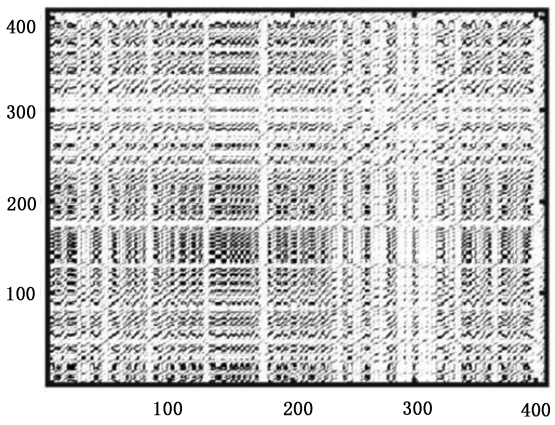
a）



b）



c）



d）

a）和 c）爆发型波形及其递归图；
b）和 d）连续型波形及其递归图。

图 B.3　典型 AE 波形及其对应的递归图

中 国 核 学 会
团 体 标 准
核电厂金属材料高温高压水中环境促进
开裂声发射监测试验方法
T/CNS 52—2021
*
中 国 标 准 出 版 社 出 版 发 行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销
*
开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 25 千字
2022 年 1 月第一版 2022 年 1 月第一次印刷
*
书号:155066·5-3782 定价 18.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107

T/CNS 52-2021

码上扫一扫 正版服务到