

表面失效及防护

# 声发射在线监测酸性环境下 油气管材腐蚀研究综述

范舟, 胡敏, 张坤, 黄泰愚, 王子瑜

(西南石油大学 材料科学与工程学院, 成都 610500)

**摘 要:** 高含  $H_2S$  或特高含  $H_2S$  气藏越来越多投入开发利用, 给油气管材带来的腐蚀问题受到极大关注。声发射 (AE) 是一种无损在线监测技术, 具有在酸性环境下在线监测油气管材腐蚀的潜在应用。在前人研究的基础上, 综述了声发射在线监测腐蚀的原理以及从声发射波形信号中能提取到的与酸性环境下油气管材腐蚀相关的计数、绝对能量 (ABS)、累计能量、上升时间/幅度 (RA)、平均频率 (AVG frequency) 以及振幅分布值  $b$  值等参数, 并基于这些参数对气泡破裂、点蚀以及腐蚀裂纹产生等过程、腐蚀类型识别以及腐蚀源定位进行了综合分析。声发射在线监测技术在一定程度上能够有效识别酸性环境下油气管材腐蚀过程、类型以及定位腐蚀源, 从而提高腐蚀检出能力。声发射在线监测技术对酸性环境下油气管道腐蚀防护与监测具有重要意义。

**关键词:** 声发射 (AE); 在线监测; 腐蚀; 油气管材; 酸性环境

**中图分类号:** TG174.3; TE988 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)04-0245-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.04.035

## Review of On-line Monitoring of Oil and Gas Pipelines Corrosion in Acidic Environment by Acoustic Emission Technology

FAN Zhou, HU Min, ZHANG Kun, HUANG Tai-yu, WANG Zi-yu

(School of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**ABSTRACT:** More and more hydrogen sulfide or ultra-high hydrogen sulfide reservoirs are being developed and utilized, which has attracted much attention to the corrosion problems caused by oil and gas pipelines. Acoustic Emission (AE) is a non-destructive on-line monitoring technology with potential applications for online monitoring of oil and gas pipelines corrosion in acidic environment. Based on the previous studies, the principle of on-line monitoring of acoustic emission and the parameters related to corrosion of oil and gas pipelines in acidic environment, such as counting, absolute energy (ABS), accumulation energy, rise time/amplitude (RA), average frequency (AVG), and amplitude distribution value  $b$  were reviewed. Based on these parameters, the process of bubble rupture, pitting corrosion and corrosion cracking, the identification of corrosion types and the location of corrosion sources were analyzed. To a certain extent, acoustic emission on-line monitoring technology can effectively identify the corrosion process, corrosion type and location of corrosion source of oil and gas pipelines in acidic environment, so as to improve the ability of corrosion detection. Therefore, the acoustic emission on-line monitoring technology is

收稿日期: 2018-07-25; 修订日期: 2018-09-30

Received: 2018-07-25; Revised: 2018-09-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51474181)

Fund: Key Project of National Natural Science Foundation of China (51474181)

作者简介: 范舟 (1971—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为: 油气田材料加工及性能、腐蚀与控制工程以及无损检测。邮箱: fanzhou505@163.com

Biography: FAN Zhou (1971—), Male, Master, Associate professor, Research focus: oil and gas field material processing and performance, corrosion and control engineering and NDT. E-mail: fanzhou505@163.com

of great significance for the corrosion protection and monitoring of oil and gas pipelines in acidic environment.

**KEY WORDS:** acoustic emission; online monitoring; corrosion; oil and gas pipelines; acidic environment

高含  $H_2S$  或特高含  $H_2S$  气藏越来越多投入开发使用,  $H_2S$  及单质硫等含硫组分、 $CO_2$  等多腐蚀性组分溶解于水构成恶劣酸性环境<sup>[1]</sup>。酸性环境导致的油气管道腐蚀是一个全球性问题<sup>[2]</sup>, 作为管道腐蚀管理计划<sup>[3]</sup>的重要组成部分, 对损伤或失效的石油管道进行适当维护和定期检查可有效降低管道失效概率, 有助于维护管道安全运行。每年将耗费巨资用于油气生产环境中因腐蚀造成的维修和保养, 费用取决于管线钢结构状况, 包括腐蚀原因、腐蚀程度和腐蚀对结构性能的影响。

在管线钢结构性能失效之前, 在早期阶段必须采取可靠的检测方法, 其能够为监测、发现和识别钢腐蚀提供所需的反馈, 以期避免不必要的损失。声发射 (AE) 技术作为一种无损检测方法, 具有动态监测、对线性缺陷敏感、能够整体探测和评价整个结构中缺陷活动状态、可提供缺陷随外参数 (载荷、温度、时间) 变化的实时或连续信息以及对新设备进行验证性加载试验等优势 and 潜在的现场应用。为了能够在不损坏油气管道结构的情况下进行高效监测, 选择声发射 (AE) 在线监测技术对酸性环境下油气管道进行腐蚀监测, 具有广泛价值。酸性气体 ( $H_2S$ 、 $CO_2$ ) 和水的存在会引起碳钢和低合金钢的严重腐蚀, 在酸性气体环境中除了出现均匀腐蚀外, 还会出现氢脆现象<sup>[4]</sup>, 而最常见的是氢致开裂<sup>[5,6]</sup>、应力导向型开裂<sup>[7,8]</sup>以及硫化物应力开裂<sup>[9]</sup>。

为了减少腐蚀导致的事故以及提高高含  $H_2S$  或特高含  $H_2S$  气藏开发的经济、社会效益, 本文在前人研究的基础上, 综述了声发射技术在线监测含  $H_2S$  酸性环境下油气管材腐蚀的研究现状, 以期 AE 具有早期检定酸性环境下油气管材腐蚀的能力, 提高酸性气藏开发中油气管道腐蚀防护与监测水平。

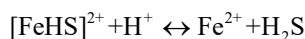
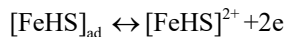
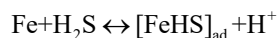
## 1 声发射监测腐蚀的原理

油气田中存在的酸性气体以  $H_2S$  为主,  $H_2S$  溶于水后对油气管材形成腐蚀, 主要形式有电化学失重腐蚀和硫化物应力腐蚀<sup>[10]</sup>, AE 可以有效地监测到这两类腐蚀产生的信号。 $H_2S$  腐蚀主要是影响氢原子聚集在晶界、夹杂物和缺陷处, 促进疲劳裂纹的萌生以及扩展, 严重降低疲劳性能, 带来极大安全风险<sup>[11]</sup>。

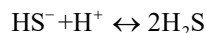
### 1.1 声发射对电化学腐蚀失重监测

$H_2S$  在水溶液中电离后将与油气管材发生电化学反应, 从而产生腐蚀, 铁基金属在硫化氢中的反应机理<sup>[12]</sup>如下。

阳极反应:



阴极反应:



在较高 pH 值下,  $FeS_x$  膜能稳定存在, 因此阳极反应为  $Fe/FeS_x$  膜界面的阳极溶解和  $Fe^{2+}$  扩散到  $FeS_x$  膜/溶液界面形成  $FeS$  沉淀以及膜的再溶解<sup>[13]</sup>。阳极反应产生的  $FeS$  附着在管壁, 当其形成和生长时会产生声发射信号; 阴极反应生成的氢气溢出溶液时氢气泡破裂会产生强烈的声发射信号<sup>[4]</sup>, 此为主要的声发射信号。

### 1.2 声发射对裂纹产生监测

根据钢的类型和机械载荷, 钢可能会发生不同形式的开裂, 最常见的是氢诱导开裂 (HIC)、应力导向氢诱导开裂 (SOHIC) 和硫化物应力开裂 (SSC)。按 NACE MR 0175/ISO 15156-1 的定义<sup>[14]</sup>, 在应力腐蚀过程中, 部分氢形成氢气泡排出, 另一部分氢在反应过程中获得足够的能量吸附在钢表面, 并扩散至钢材基体内部。在扩散过程中, 氢原子集聚在缺陷处, 如位错区、应力集中区等, 当足够量的氢集聚时, 形成氢分子, 就会在钢基体中造成应力集中, 超过屈服强度时就产生裂纹<sup>[15]</sup>, 在裂纹产生的一瞬间形成的声发射信号能够被 AE 信号采集器快速捕捉, 后经过放大、过滤和处理等方法将信号转变为可视化的波形图。

## 2 声发射在线监测信号的提取参数

图 1 给出了声发射典型波形, 从该信号中可以提取出几个时域中最常见的参数: 信号的峰值幅度、持续时间和计数。信号的能量也常被用于 AE 分析, 进

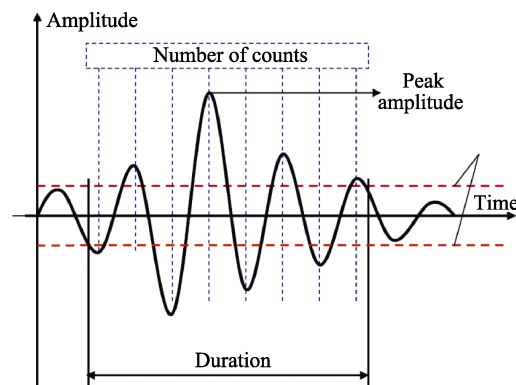


图 1 声发射波形及参数

Fig.1 AE waveform and characteristic parameters

行傅里叶变换后,可在频域中计算出其他参数。AE 分析有两类,一类是将所有 AE 事件在同一范围内的参数,进行分组分析;一类是计算累积能量或累积声发射事件数(产生声发射的一次材料局部变化称为一个声发射事件)进行分析。

## 2.1 声发射计数

许多研究学者认为声发射计数是研究酸性环境下钢腐蚀的参数之一。Smanio 等人<sup>[4]</sup>在实验中利用 AE 技术监测到三个连续的 HIC 信号,分别为孕育期、解离相和扩展相。孕育期表示为在钢中加入氢气后未发生裂纹,解离相产生于弱钢界面,扩展相是高内氢压下的裂纹扩展。随着时间的推移,裂纹扩展逐渐减弱,并最终停止,他们将声发射数据中的计数与频率参数来评估 HIC 的程度发现,在  $H_2S$  环境下,数据过滤后声发射与裂纹具有较好的相关性,但并没有发现 AE 数据与腐蚀信号具体的关联,只是证明存在相关性。ChengChiang Weng 和 RonTing Chen<sup>[16]</sup>研究中强钢不同载荷下氢致开裂(HIC)和硫化物应力腐蚀开裂(SSCC)的声发射信号特征,研究结果表明 SSCC 计数率比 HIC 明显高,并且随着载荷的增加,计数率随之增加,还发现不同变形阶段与声发射计数率存在相关性这一趋势可以用于评估腐蚀程度。

## 2.2 累积能量

累积能量是信号检波包络线下的面积,能反映事件的相对能量或强度,采用能量参数可以解决小幅度连续型声发射信号测量的问题。Smanio 和 Fregonese<sup>[4]</sup>研究三种不同钢种在不同浓度的酸性条件以及不同拉伸程度下 AE 腐蚀监测,对腐蚀源进行判别,他们认为产生声源信号的物理现象有电化学过程中  $H_2$  的产生、试样表面硫化物层的形成、氢致开裂或硫化物应力开裂,这一思路与 Aggelis 和 Kordatos 等<sup>[17]</sup>的一致。Smanio 在 2010 年的实验中通过控制不同的实验条件,研究累积能量与持续时间的变化规律,进而区分不同声源。图 2 为累积能量与时间的关系,表明 FeS 最先形成, HIC 有延迟,  $H_2$  释放稳定。

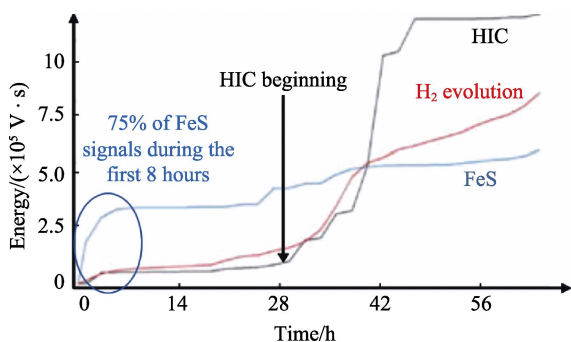


图 2 X65NSS 钢在 pH=4.5 和  $P=1$  MPa  $H_2S$  的试验过程中不同声源累积能量的变化

Fig.2 Evolution of cumulative energy of the different acoustic sources during a test performed on the X65 NSS steel at pH=4.5 and  $P=1$  MPa  $H_2S$

尽管在 SSC 实验中,直接鉴别裂纹是无效的,但是他们发现局部的 AE 信号密度与 SSC 存在较好的相关性。他们的工作证明 AE 可以有力辨别  $H_2S$  下的声源类别,累积能量参数是辨别 AE 声源信号的有效参数。

Cayard and Kane<sup>[18]</sup>和 Gingell and Garat<sup>[19]</sup>将应力腐蚀失效的试验与未失效的试验进行对比,通过记录 AE 累积能量的增加率来研究腐蚀情况,发现应力腐蚀失效时声发射累积能量增加率高于未失效试验。Smanio 等人<sup>[20]</sup>在酸性介质中用 AE 监测钢氢脆试验时发现 HIC 与声发射累积能存在相关性,由此证明声发射技术是监测  $H_2S$  环境下 HIC 和 SSC 有力的技术,并且可以提供关于孕育期和裂纹开裂的信息。由此,采用累积能量参数对腐蚀信号源的研究是有效的。

## 2.3 绝对 (ABS) 能量

ABS (Absolut energy) 能量的特征是对所有 AE 事件或命中所获得的能量的量化度量。Smanio 等人<sup>[17]</sup>发现 HIC 与 AE 绝对能量之间存在相关性,他们在酸性介质中用 AE 监测钢氢脆试验,结果表明,AE 是监测 HIC 和 SSC 的有效技术,可以提供关于孕育期和裂纹开裂的信息。图 3 为 X65SwS 在 pH 4.5、1 MPa  $H_2S$ 、EFC16 溶液中腐蚀产生的 ABS-持续时间关系图,他们的研究证明 AE 技术可以有效识别声发射源,对声源信号进行很好的分类,有助于工程应用。

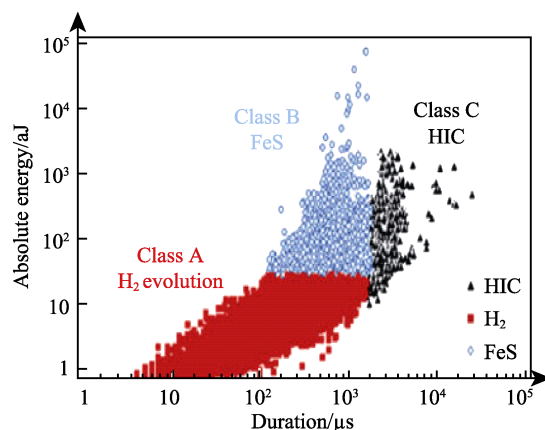


图 3 X65SwS 在 pH 4.5、1 MPa  $H_2S$ 、EFC16 溶液中腐蚀产生的 ABS-持续时间关系图

Fig.3 Relationship diagram for ABS- duration of X65SwS corrosion in pH 4.5, 1 MPa  $H_2S$  and EFC16 solution

## 2.4 上升时间/幅度 (RA) 值和平均频率 (AVG frequency)

RA 值和 AVG frequency 两个参数可以对声发射特性进行评估, Aggelis 和 Kordatos 等人<sup>[17,21,22]</sup>利用 RA 值和平均频率来分析,其可用 AE 参数(上升时间、最大振幅、计数和持续时间)定义。

RA value= Rise time/Amplitude, 表示波形的初始部分形状。

AVG frequency=Counts/Duration

其中上升时间为信号第一次越过门限至最终降至门限所经历的时间间隔;幅度为信号波形的最大振幅值,其不受门限的影响,通常可用于波源的类型鉴别以及强度和衰减的测量;振铃计数为越过门限信号的振荡次数,其受门限的影响;持续时间为第一次越过门限至最终降至门限所经历的时间间隔。

因此,一般来说,拉伸裂纹的特征是低的RA值(低上升时间和相对高的振幅),而剪切裂纹的特征是高的RA值(高上升时间和相对低的振幅)<sup>[23]</sup>。在H<sub>2</sub>S环境下,仅仅会出现硫化物应力腐蚀开裂,此为拉伸裂纹,因此该准则可以有效鉴别出裂纹源为拉伸

裂纹。AVG frequency和RA之间的比率定义为裂纹指数(CI),图4分别为RA值和AVG frequency与时间的关系图<sup>[24]</sup>,图中显示了较宽的平均频率频谱,平均频率值高达140~190 kHz,平均RA值很低,随着时间的推移逐渐增加到试件的破坏。由于不同时间出现的AE信号不同,可以认为,在不同的时间内,试样表面可能存在不同的声发射源类型,该研究比较遗憾的是没有出现详细的RA以及AVG frequency对声源分类的分析。但是研究表明,RA值以及平均频率与声源信号有较好的相关性,存在较明确的区间范围便于辨别声源,是声源信号分类的有效声发射参数。

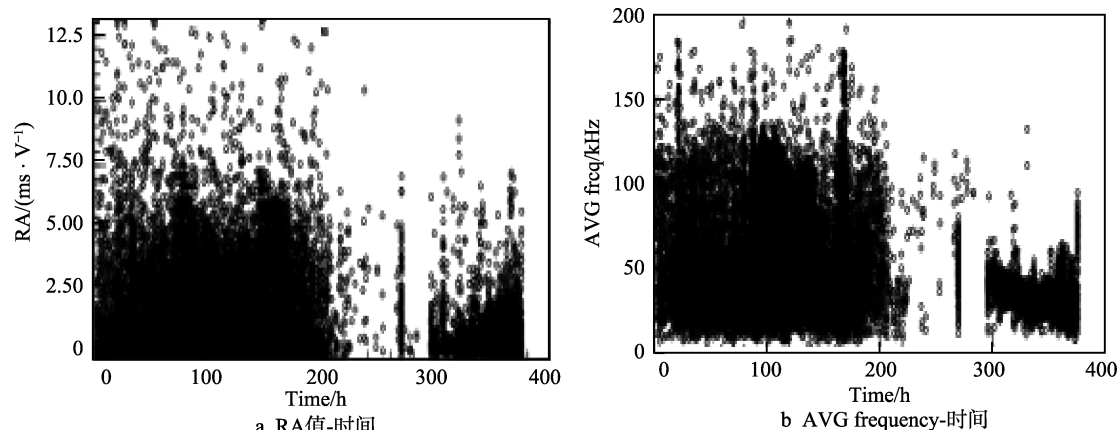


图4 不同参数与时间的关系

Fig.4 The relationship between different parameters and time: a) RA value-time; b) AVG frequency-time

## 2.5 振幅分布 $b$ 值

$b$  值可以很好地进行 AE 分析, Gutenberg 和 Richter 发现了地震学中的  $b$  值,用以了解地震的大小和频率之间的关系<sup>[25-29]</sup>,如方程式(1)所示。

$$\lg N = a - bM \quad (1)$$

式(1)中,  $M$  是事件的里氏震级,  $N$  是递增频率,  $a$  是经验常数,  $b$  值描述振幅分布。  $M$  与地震道中记录的最大振幅  $A_{\max}$  的对数成正比。

同样的原理在声发射方法中可以用来确定破裂过程中声发射波振幅分布的标度。在声发射技术方面, Colombo 等人<sup>[30]</sup>对公式进行了修正,见公式(2)。其中,  $A_{\max}$  是以分贝 (dB) 为单位的声发射事件的峰值振幅。

$$\lg N = a - bMA_{\max} \quad (2)$$

Xu 和 Wu 等<sup>[31]</sup>研究了 304 不锈钢在不同 pH 值 Cl<sup>-</sup> 浓度下点蚀过程的声发射信号。在研究过程中监测到两类信号,通过用不同参数进行分析,其中一种比较新颖的是  $b$  值的引入,不过他式(1)改写为幂率

形式,如式(3)。

$$n(a) = \left( \frac{a}{a_0} \right)^{-b} \quad (3)$$

式(3)中,  $n(a)$  是一个函数,可以定义为峰值振幅超过  $a$  的声发射部分;  $a_0$  为最低可检测的振幅。  $b$  值小于 1 说明存在大量超过  $a$  的声发射信号,并且越小,超过  $a$  的信号越多。

表 1 为实验中不同腐蚀过程的  $b$  值。可明显看出点蚀过程中的  $b$  值与阴极极化过程中的  $b$  值相似,这一结果也与以前的研究一致<sup>[32]</sup>,这表明点蚀的声发射源也是氢气泡的演化,但在实验中他们并没有观察到氢气泡,于是他们借助原子力显微镜 (AFM) 研究了凹坑内气体演化的动力学,发现由于氢气泡成核引起的 AFM 悬臂偏转瞬变在几十纳米的量级,很难被观察到。再者由于气泡会在坑外坍塌,因此很难观察到,但是  $b$  值结果却显示 H<sub>2</sub> 是明显存在的,由此可见声发射可以有效识别氢气的产生。

表 1 不同过程中的  $b$  值  
Tab.1  $b$ -value of different processes

Process	Cathodic polarization in solution 2	Pitting in solution 1	Pitting in solution 2	Pitting in solution 3	Pitting in solution 4	Pitting in solution 5
$b$ -values	0.12	Null <sup>a</sup>	0.14	0.19	0.10	0.11

a: The error of the linear fit is too large so the value seems invalid.



上述文献<sup>[25-32]</sup>均应用了  $b$  值计算公式, 腐蚀产生的气泡信号与  $b$  值存在较好的相关性, 因此  $b$  值是一种高效手段来监测腐蚀过程中产生的气泡信号。

### 3 声发射在线监测腐蚀信号分析

声发射广泛应用的一个难点在如何于从工业环境中的强背景噪声中识别出微弱的故障信号。采集器接收到的声发射信号中不仅含有与损伤密切相关的有效信息, 同时也掺杂大量干扰和噪声信号。

基于信号的分析技术涉及在足够短的时间内记录大量波形<sup>[33]</sup>, 这种方法与参数分析相比最突出的特点是它在滤波信号噪声方面表现更好, 可以更好地解释酸性环境下油气井管材料的腐蚀数据监测。

#### 3.1 噪声信号过滤

AE 信号的干扰主要来源于噪声信号, 噪声主要为外部来源, 即环境、交通、人类活动等以及仪器本身。仪器发生的波动会产生仪器或电子噪声, 包括热噪声、泄漏电流不稳定性和电源电压波动<sup>[34]</sup>。因此, 有必要区分与真实源有关的真实事件(如裂纹扩展或断裂现象)和与噪声源有关的虚假事件。Kouroussis 和 Anastassopoulos<sup>[35]</sup>提出了无监督模式识别 (UPR) 来区分信号, 并区分真实事件和噪声。UPR 应用数学或聚类算法将 AE 命中集合划分为在相同数据集中彼此接近的组或簇, 该算法可以区分相关数据的各种来源噪声。Gert Van Dijck 和 Marc M. Van Hulle<sup>[36]</sup>应用小波包分解从声发射信号中提取特征, 将噪声过滤, 然后使用提取的小波包系数来区分化工过程中重要的腐蚀类型。研究发现, 利用小波包分解提取特征时, 局部鉴别基算法 (LDB) 的准确率提高了 71.9%。

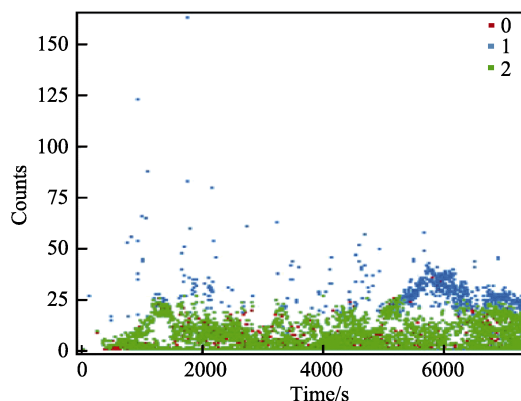
UPR 以及 LDB 可以有效过滤信号, 并提取出有用的信号, Kouroussis 和 Gert Van Dijck 等作者的研究对声发射的实际应用提供了理论指导。

#### 3.2 声发射在线监测腐蚀过程中信号的分类

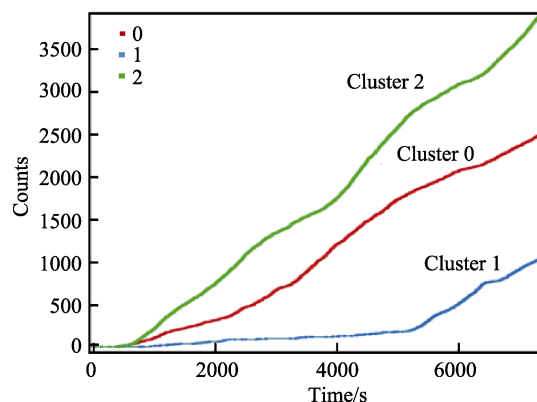
实际应用中常见的几种声源分类方法: 最大距离法<sup>[37]</sup>、K 均值法<sup>[38]</sup>、Forgy 法<sup>[39]</sup>、聚类法<sup>[40]</sup>和神经网络模型<sup>[41,42]</sup>方法等。常用 K 均值法, K-均值是一种简单的迭代算法, 其目的是使给定数目的聚类平方误差最小化。该算法从指定的初始簇开始, 分配剩余的点, 按最近邻分类的方法对一个预定义的簇进行分类。

Morizet 和 Godin 等<sup>[43]</sup>采用小波分析法对声发射信号进行分类, 引入一种新的评估工具变类矩阵 (ACM) 来测试错标类, 并对 RF 和 k-NN 算法进行了速度测试, 然后, 利用 RF-CAM 软件对实际腐蚀数据进行了应用, 得到了分类结果。但是此方法若要广泛应用于工业上就需要大量数据构建一个新的学习库。

Du 和 Li 等人<sup>[44]</sup>采用 K-均值聚类算法对声发射信号进行分类, 其特征参数包括计数、持续时间、上升时间、幅值和能量, 他们采用小波包分解方法 (DPW) 来提取声发射信号的频带能量以了解信号特征。DPW 是一种小波变换, 比离散小波变换 (DWT) 更能使信号通过更多的滤波器<sup>[45-48]</sup>。图 5 为聚类分析对比图, 0~2 表示经过分类后的不同簇。



a 聚类后随时间变化的计数



b 聚类后随时间变化的计数累积

图 5 不同参数在聚类后随时间变化的关系

Fig.5 The Relation of different parameters with time after clustering: a) count distribution with time after cluster analysis; b) count accumulation with time after cluster analysis

图 6b 中簇 1 的声发射信号在 5000 s 前增长较慢, 5000 s 后迅速增加, 这与裂纹从萌生到扩展的趋势是一致的, 其频带能量主要集中在高频波段 (250~320 kHz), 这与裂纹信号<sup>[37]</sup>的特点相一致, 因此, 簇 1 中的声发射信号被认为是由裂纹产生的。经过 5000 s 后, 簇 0 的声发射信号量逐渐增加 (图 6a), 与实验结果一致, 频带能量主要集中在低频 (100 kHz 以下)。簇 2 的 AE 信号在整个腐蚀过程中存在 (图 6c), 并稳定增加, 其频带能量主要分布在 150 kHz 以上。实验中, 通过目视观察, 在点蚀的全过程中出现了大量的气泡破裂现象, 表明声发射信号在点蚀和气泡破裂时产生的能量被合并。Du 等人根据学者<sup>[49,50]</sup>发现的点蚀频率在 3 到 125 kHz 之间得出结论, 簇 0 和簇 2 中的信号分别由点蚀和气泡破裂产生。

因此, 不同声发射源的声发射特性 (如点蚀、裂

纹和气泡破裂)有较大差异,这对腐蚀源的分析和判别有很大帮助。

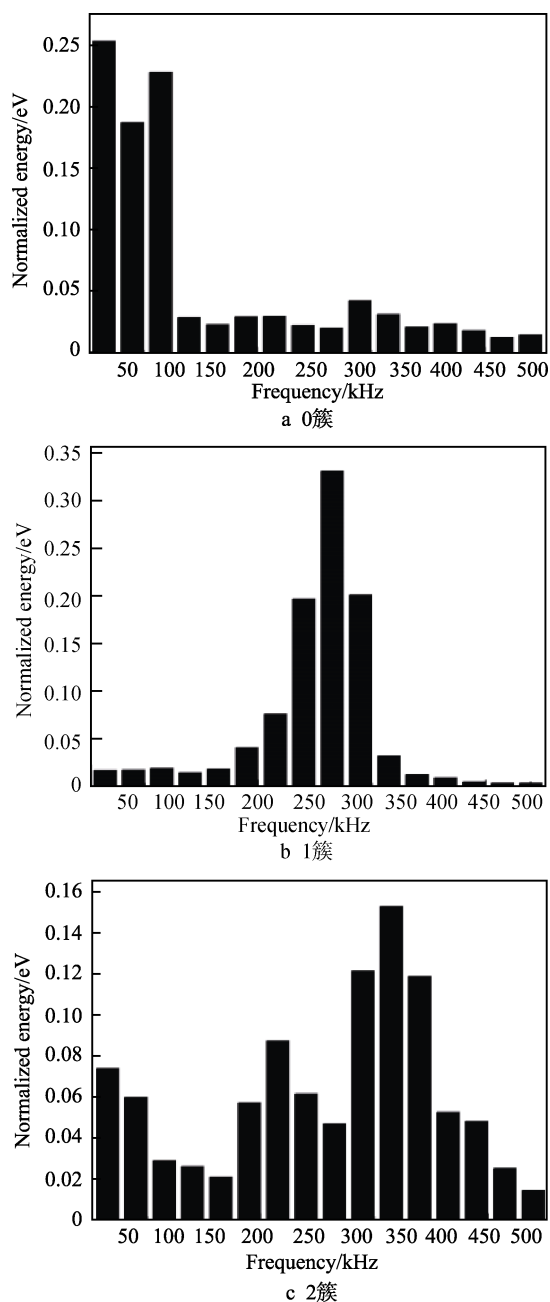


图 6 小波提取后簇的频带能量

Fig.6 Frequency band energy of the cluster after wavelet extraction: a) cluster 0; b) cluster 1; c) cluster 2

### 3.3 声发射在线监测的腐蚀源定位

酸性环境下油气井管腐蚀的发生、腐蚀引起的裂纹萌生、裂纹扩展和腐蚀位置的监测对于油气田正常安全运作是十分重要的。腐蚀导致的声源位置早期发现可以有效避免安全事故的发生,因此声源的定位是必不可少的研究。声发射源的位置由声发射传感器探测到的第一纵波到达时间之间的时间差计算出的纵波速度来确定。Calabrese 和 Galeano 等人<sup>[24]</sup>根据事件

位置和 AE 模式值识别 AE 源,这意味着可以利用声发射技术检测和定位腐蚀以及活性裂纹。

Grabec 和 Sachse<sup>[51]</sup>, Sribar 和 Sachse<sup>[52]</sup>以及 Kosel 等人<sup>[53]</sup>提出了通过反演碰撞响应函数和避免波动力学分析来源定位的类似方法。Ing 等<sup>[54]</sup>和 Ribay 等<sup>[55]</sup>通过时间反转技术提出声源定位,该方法需要三个步骤:(1)通过机械撞击结构的多个点并通过一个或多个表面安装的传感器测量相应的脉冲响应函数(IRF)来收集训练数据集;(2)在传感器上记录实际碰撞事件的信号;(3)识别训练数据集中的 IRF,该 IRF 给出与由实际冲击事件生成的 IRF 的最大相关性,从而确定相应的机械冲击点。

综上,此类神经网络法可以有效对声发射源进行监测和定位,只不过这种方法需要大量的数据进行反演才能最终获得准确的定位。

## 4 结语

1) 累积声发射命中次数可以早期检测腐蚀情况,声发射的累积命中率显著增加,则对应于腐蚀的开始。累积能量和绝对能量(ABS)的突然上升可能表示钢腐蚀引起的裂纹萌生。作为开始腐蚀和裂纹形成的一种分类方法,较宽的平均频率频谱值高达 140~190 kHz,平均 RA 值很低,随着时间的推移逐渐增加到试件的破坏。振幅分布  $b$  值低于 1.0 时油气管材存在缺陷,并且较小的  $b$  值意味着这些缺陷通常是由腐蚀产物形成的。

2) 通过腐蚀监测信号可对腐蚀声源进行定位。通过反演碰撞以及反转技术等人工神经网络法来达到定位效果,还可通过聚类分析对声发射源进行分类,可以很好地判别出裂纹、气泡以及点蚀。

3) 利用声发射技术在线监测酸性环境下油气管材腐蚀,同时需要注意声发射检测技术是动态检测方法,对材料敏感,极易受外界环境噪音干扰,对一些微弱的腐蚀信号造成漏检,因而需要降噪和去噪技术研究以及丰富的现场检测经验。

综上,声发射技术为一种有效的实时监测腐蚀的无损检测方法,其在酸性环境下油气管材腐蚀评价中的应用前景十分广阔。

### 参考文献:

- [1] 周小虎, 史雪枝, 熊昕东, 等. 高温高压酸性气藏完井管腐蚀评价与应用研究[C]//2013 中国油气田腐蚀与防护技术科技创新大会论文集. 贵阳: [出版者不详], 2013: 246-250.  
ZHOU Xiao-hu, SHI Xue-zhi, XIONG Xin-dong, et al. Corrosion evaluation and application of completion pipe in high temperature and high pressure acid gas reservoir[C]//2013 China oil and gas field corrosion and pro-

- tection technology innovation conference. Guiyang: [s. n.], 2013: 246-250.
- [2] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method[J]. Measurement, 2017, 103: 275-282.
- [3] KARIYAWASAM S, PETERSON W. Effective improvements to reliability based corrosion management[C]//2010 8th international pipeline conference. Alberta: American society of mechanical engineers, 2010: 603-615.
- [4] SMANIO V, FREGONESE M, KITTEL J, et al. Wet hydrogen sulfide cracking of steel monitoring by acoustic emission: discrimination of AE sources[J]. Journal of materials science, 2010, 45(20): 5534-5542.
- [5] WENG C C, CHEN R T. Acoustic emission characterization of steel in H<sub>2</sub>S solution subjected to tensile load[J]. Journal of the Chinese institute of engineers, 2011, 16(4): 489-498.
- [6] MERSON D, SERGEY D, IOFFE A, et al. Acoustic emission during hydrogen charging of a pipeline steel[J]. ISIJ international, 2011, 51(10): 1682-1687.
- [7] ALANEZI M A, FRANKEL G S, AGRAWAL A K. Susceptibility of conventional pressure vessel steel to hydrogen-induced cracking and stress oriented hydrogen-induced cracking in hydrogen sulfide-containing diglycolamine solutions[J]. Corrosion, 1999, 55(11): 1101-1109.
- [8] REVIE R W. Oil and gas pipelines: integrity and safety handbook[M]. State of New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [9] SMANIO V, FREGONESE M, KITTEL J, et al. Contribution of acoustic emission to the understanding of sulfide stress cracking of low alloy steels[J]. Corrosion science, 2011, 53(12): 3942-3949.
- [10] 艾志久, 范钰伟, 赵乾坤. H<sub>2</sub>S 对油气管材的腐蚀及防护研究综述[J]. 表面技术, 2015(9): 108-115.  
AI Zhi-jiu, FAN Yu-wei, ZHAO Qian-kun. Review on H<sub>2</sub>S corrosion of oil gas tubing and its protection[J]. Surface technology, 2015(9): 108-115.
- [11] HUANG B, YANG J, ZHANG H, et al. Influence of H<sub>2</sub>S corrosion on rotating bending fatigue properties of S135 drill pipe steel[J]. Transactions of the Indian institute of metals, 2017, 71(1): 1-9.
- [12] BOLMER P W. Polarization of iron in H<sub>2</sub>S-NaHS buffers[J]. Corrosion, 1965, 21(3): 69-75.
- [13] 李明, 李晓刚, 陈钢, 等. 硫化氢环境下氢扩散的影响因素[J]. 工程科学学报, 2007, 29(1): 39-44.  
LI Ming, LI Xiao-gang, CHEN Gang, et al. Factors affecting hydrogen diffusion in hydrogen sulfide environment[J]. Journal of engineering science, 2007, 29(1): 39-44.
- [14] NACE MR0175/ISO 15156-1:2015, Petroleum and natural gas industries-materials for use in H<sub>2</sub>S containing environments in oil and gas production-part 1: general principles for selection of cracking-resistant materials[S].
- [15] 杨明, 马晓勇, 龙云, 等. 碳钢在湿硫化氢环境中的应力导向氢致开裂行为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(12): 1226-1229.
- YANG Ming, MA Xiao-yong, LONG Yun, et al. Stress oriented hydrogen induced cracking behavior of carbon steel in wet H<sub>2</sub>S environment[J]. Corrosion & protection, 2014, 35(12): 1226-1229.
- [16] WENG C C, CHEN R T. Acoustic emission characteristics of a high-strength steel subjected to corrosive hydrogen sulfide solution[J]. Journal of the Chinese institute of engineers, 1993, 16(2): 195-202.
- [17] AGGELIS D G, KORDATOS E Z, MATIKAS T E. Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates[J]. Mechanics research communications, 2011, 38(2): 106-110.
- [18] CAYARD M, KANE R. Evaluation of various methods of reducing the duration of SSC qualification testing[J]. Corrosion, 1997, 57: 1-14.
- [19] GINGELL A, GARAT X. Observations of damage modes as a function of microstructure during NACE TM01-77/96 tensile testing of API 5L grade X60 linepipe steels[J]. Corrosion, 1999, 600: 1-9.
- [20] SMANIO V, KITTEL J, FREGONESE M, et al. Acoustic emission monitoring of wet H<sub>2</sub>S cracking of linepipe steels: application to hydrogen-induced cracking and stress-oriented hydrogen-induced cracking[J]. Corrosion science section, 2011, 67(6): 065002/1-065002/12.
- [21] 顾义磊, 王泽鹏, 李清森, 等. 页岩声发射 RA 值及其分形特征的试验研究[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(2): 78-86.  
GU Y L, WANG Z P, LI Q M, et al. Laboratory study on RA value fractal feature of shale acoustic emission under conventional triaxial compression[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(2): 78-86.
- [22] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission monitoring of reinforced concrete beams subjected to four-point-bending[J]. Applied acoustics, 2016, 117: 28-38.
- [23] COMMITTEE R T. Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete[J]. Materials & structures, 2010, 43(9): 1177-1181.
- [24] CALABRESE L, GALEANO M, PROVERBIO E, et al. Monitoring of 13% Cr martensitic stainless steel corrosion in chloride solution in presence of thiosulphate by acoustic emission technique[J]. Corrosion science, 2016, 111: 151-161.
- [25] OHTSU M. Mathematical theory of acoustic emission and moment tensor solution[J]. Journal of the society of materials science Japan, 1987, 36(408): 1025-1031.
- [26] RAO M V M S, LAKSHMI K J P. Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture[J]. Current science, 2005, 89(9): 1577-1582.
- [27] GUTENBERG B, RICHTER C F. Seismicity of the earth and associated phenomena[M]. Princeton: Princeton University Press, 1954.

- [28] LIU Xi-ling, PAN Meng-cheng, LI Xi-bing, et al. Acoustic emission *b*-value characteristics of granite under dynamic loading and static loading[J]. Chinese journal of rock mechanics & engineering, 2017, 36: 3148-3155.
- [29] SAGASTA F, MIZUTANI Y, VALVERDE I, et al. Influence of attenuation on the acoustic emission *b*-value for damage evaluation of reinforced concrete specimens[C]// 32th European conference on acoustic emission testing. Prague: [s. n.], 2016: 433-440.
- [30] COLOMBO I S, MAIN I G, FORDE M C. Assessing damage of reinforced concrete beam using “*b*-value” analysis of acoustic emission signals[J]. Journal of materials in civil engineering, 2003, 15(3): 280-286.
- [31] XU J, WU X, HAN E H. Acoustic emission during pitting corrosion of 304 stainless steel[J]. Corrosion science, 2011, 53(4): 1537-1546.
- [32] XU J, WU X, HAN E H. Acoustic emission during the electrochemical corrosion of 304 stainless steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions[J]. Corrosion science, 2011, 53(1): 448-457.
- [33] SHIOTANI T, OHTSU M, IKEDA K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation[J]. Construction & building materials, 2001, 15(5): 235-246.
- [34] BARANOV V M, KAPRALOV E Y, KARASEVICH V A. Acoustic and electrochemical noise methods in extreme-condition fatigue tests[J]. Measurement techniques, 2003, 46(10): 994-999.
- [35] KOUROUSSIS D A, ANASTASSOPOULOS A A, LENAÏN J C, et al. Advances in classification of acoustic emission sources[J]. Euro physical acoustics, 2001, 6: 1-4.
- [36] VAN D G, VAN H M M. Information theory filters for wavelet packet coefficient selection with application to corrosion type identification from acoustic emission signals[J]. Sensors, 2011, 11(6): 5695-5715.
- [37] GRABOWSKI K, GAWRONSKI M, NAKATANI H, et al. Distance-domain based localization techniques for acoustic emission sources: a comparative study[J]. Proceedings of SPIE—The international society for optical engineering, 2015, 94381T: 1-9.
- [38] ZHOU J, LIU L, YANG J. Acoustic emission signal denoising based on K-means clustering and wavelet analysis[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2013, 26(3): 69-73.
- [39] VANNIAMPARAMBIL P A, KHAN F, HAZELI K, et al. Novel optico-acoustic nondestructive testing for wire break detection in cables[J]. Structural control & health monitoring, 2013, 20(11): 1339-1350.
- [40] MOHAMMAD M, TAJUDDIN A, ABDULLAH S, et al. Fatigue damage monitoring using un-supervised clustering method of acoustic emission signal on SAE 1045 steel[J]. International journal of automotive & mechanical engineering, 2016, 13(3): 3584-3598.
- [41] KALAFAT S, SAUSE M G R. Acoustic emission source localization by artificial neural networks[J]. Structural health monitoring, 2015, 14(6): 1-15.
- [42] DENG A, ZHANG X, TANG J, et al. Localization of acoustic emission source based on chaotic neural networks[J]. Applied mathematics & information sciences, 2012, 6(3): 713-719.
- [43] MORIZET N, GODIN N, TANG J, et al. Classification of acoustic emission signals using wavelets and random forests: application to localized corrosion[J]. Mechanical systems & signal processing, 2016, 70(71): 1026-1037.
- [44] DU G, LI J, WANG W K, et al. Detection and characterization of stress-corrosion cracking on 304 stainless steel by electrochemical noise and acoustic emission techniques[J]. Corrosion science, 2011, 53(9): 2918-2926.
- [45] RUSSELL P C, COSGRAVE J, TOMTSIS D, et al. Extraction of information from acoustic vibration signals using gabor transform type devices[J]. Measurement science & technology, 1998, 9(8): 1282-1290.
- [46] KINGSBURY N. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals[J]. Applied & computational harmonic analysis, 2001, 10(3): 234-253.
- [47] SWELDENS W. The lifting scheme: a custom-design construction of biorthogonal wavelets[J]. Applied & computational harmonic analysis, 1996, 3(2): 186-200.
- [48] GU D, KIM J, KELIINU T, et al. Damage detection of rolling element bearing via acoustic emission signal using DWT applied a novel mother function[C]//18th international congress on sound and vibration 2011. Brazil: Rio de Janeiro, 2011: 3145-3152.
- [49] RAMADAN S, GAILLET L, TESSIER C, et al. Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique[J]. Applied surface science, 2008, 254(8): 2255-2261.
- [50] JIRARUNGSATIAN C, PRATEEPASEN A. Pitting and uniform corrosion source recognition using acoustic emission parameters[J]. Corrosion science, 2010, 52(1): 187-197.
- [51] GRABEC I, SACHSE W. Application of an intelligent signal processing system to acoustic emission analysis [J]. Journal of the acoustical society of America, 1989, 85(3): 1226-1235.
- [52] SRIBAR R, SACHSE W. An experimental investigation of the AE source location and magnitude on 2-D frame structures using intelligent signal processing[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(1): 145-163.
- [53] KOSEL T, GRABEC I I, MUZIC P. Location of acoustic emission sources generated by air flow[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1): 824-826.
- [54] ING R K, QUIEFFIN N, CATHELINE S, et al. In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process[J]. Applied physics letters, 2005, 87(20): 407.
- [55] RIBAY G, CATHELINE S, CLORENNEC D, et al. Acoustic impact localization in plates: properties and stability to temperature variation[J]. IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics & frequency control, 2007, 54(2): 378-385.