◇ 研究报告 ◇

基于声发射统计信息的2.25Cr-1Mo钢 早期损伤判别方法*

王雪琴1 邱 枫2 彭宁伟1 姚俊宇1 张 颖1†

(1 常州大学安全科学与工程学院 常州 213164)(2 中国石化青岛安全工程研究院 青岛 266104)

摘要: 裂纹开裂是金属材料常见的损伤失效形式之一。而材料失效会经历从早期微小损伤到宏观变形的微观 组织动态演化过程,如何在材料发生宏观变形之前,能够及早地发现损伤至关重要。该文基于对材料损伤失 效过程不同声源的机理分析,提出了以不同声源信号数的统计占比值κ这一变量来判定表征材料早期损伤阶 段的判别指标,制备6个含不同缺陷的不带堆焊层和带堆焊层的2.25Cr-1Mo钢试件,采用声发射技术对试件 的弯曲损伤全过程进行在线测试,获得了6个试件早期损伤阶段的声学数据,通过对比分析以幅值和能量为 主的单一参量以及基于支持向量机的多元参量κ值的统计结果,证明了利用κ值可以有效地对不带堆焊层和 带堆焊层的2.25Cr-1Mo钢试件的早期损伤阶段进行判别,其中不带堆焊层试件的κ值范围为1:3.1~1:3.6 之间,带堆焊层试件的κ值范围为1:2.2~1:2.6之间,具有明显的区分度。 关键词: 2.25Cr-1Mo钢;弯曲过程;声发射技术;早期损伤;多元统计;判别方法 中图法分类号: TG115.28 文献标识码:A 文章编号: 1000-310X(2023)01-0159-07 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.021

Early damage identification method of 2.25Cr-1Mo steel based on acoustic emission statistics

WANG Xueqin¹ QIU Feng² PENG Ningwei¹ YAO Junyu¹ ZHANG Ying¹

 $(1 \ \ College \ of \ Safety \ Science \ and \ Engineering, \ Changzhou \ University, \ Changzhou \ 213164, \ China)$

(2 Qingdao Institute of Safety Engineering, Sinopec, Qingdao 266104, China)

Abstract: Crack cracking is one of the common damage failure forms of metal materials, and material failure will experience the dynamic evolution process of microstructure from early micro damage to macro deformation. How to find the damage as soon as possible before the macro deformation of materials is very important. Based on the mechanism analysis of different sound sources in the process of material damage and failure, this paper puts forward the variable of the statistical ratio κ of different sound source signals to determine the discrimination index characterizing the early damage stage of materials. Six 2.25Cr-1Mo steel specimens without surfacing layer and with surfacing layer with different defects were prepared, and the whole bending damage process of the specimens was tested online by acoustic emission technology. The acoustic data of six specimens in the early damage stage were obtained. By comparing and analyzing the statistical results of single

²⁰²¹⁻¹¹⁻¹⁴ 收稿; 2022-03-28 定稿

^{*}中国石油化工股份有限公司科技攻关项目 (320108), 江苏省市场监督管理局科技计划项目 (KJ207515), 江苏省研究生科研与实践创新 计划项目 (KYCX20_2586)

作者简介: 王雪琴 (1998-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向: 承压设备健康监测及评价。

[†]通信作者 E-mail: aezy163@163.com

parameter dominated by amplitude and energy and multivariate parameter κ based on support vector machine (SVM), it is demonstrated that κ value can effectively distinguish the early damage stage of 2.25Cr-1Mo steel specimens without surfacing layer and with surfacing layer. The κ value range of specimens without surfacing layer is 1 : 3.1–1 : 3.6, and the κ value range of specimens with surfacing layer is 1 : 2.2–1 : 2.6.

Keywords: 2.25Cr-1Mo steel; Bending process; Acoustic emission technology; Early injury; Multivariate statistics; Discrimination method

0 引言

金属材料损伤失效是材料内部结构改变及能量耗散的过程。其中有一部分能量以应力波的形式释放出来,通过对应力波产生和释放过程的监测,就可以获知材料失效整个过程的损伤行为,进而得到材料的损伤演化规律。随着计算机技术、传感器技术、信号采集与处理技术等的发展,已有多种测试及分析手段在材料损伤领域得到应用。其中,声发射(Acoustic emission, AE)技术^[1]就是一种近些年发展较快的比较适用于材料损伤检测的技术,具有实时监测、覆盖范围广以及对工作环境不敏感等优势^[2-4]。

目前,对于金属材料损伤失效的力学特性研究 甚多,其中有少数学者对金属材料的AE特性进行 了研究。张昌稳等^[5]对不同焊接缺陷Q345钢试样 进行拉伸试验检测获得了不同类型缺陷所对应的 AE特性。Ennaceur等^[6]利用AE技术监测压力容 器用钢的裂纹扩展,获得了不同裂纹扩展阶段的 AE参数特征,为利用AE监测技术预测压力容器剩 余寿命提供了可能。Su等^[7]采用Q235钢、H62黄 铜和304不锈钢,对其在塑性和高温蠕变变形过程 中的AE响应进行了实验研究,结果表明AE技术可 以有效地区分蠕变和塑性变形。Panin等^[8]对3种 类型的17Mn1Si钢缺口试样进行AE监测实验,研 究其断裂演化过程与AE信号之间的联系。龙宪海 等^[9] 结合断口扫描电子显微镜观察及X射线能谱 分析的手段,将30CrMnSi合金钢三点弯曲损伤过 程分为裂尖塑性变形、裂纹亚临界扩展和裂纹失 稳扩展3个阶段,并提出了不同阶段的声发射源机 理。李建宇等^[10]利用AE技术对铝合金正段和切 断两种断面取向的试件进行单轴拉伸试验,获得了 铝合金在不同应力状态下的微损伤演化规律。崔俊 等^[11]利用AE技术开展对完整和未焊透HRB400 螺纹钢的不同损伤阶段的特性研究,结果表明焊透 和完整试样在拉伸过程中的各阶段频域和能量存 在显著差异。

以上研究表明,对于金属材料AE信号的特性 研究停留在对材料受载过程不同阶段的AE信号特 性分析,以及材料发生损伤阶段的AE信号参数特 性分析,然而,大多数金属构件从早期微小损伤到宏 观裂纹出现需要经历一段时间的微观组织动态演 化过程,这个过程材料的局部应力周期性地得到释 放,且伴随着AE信号的产生,该过程是评价材料发 生损伤的关键阶段。虽然可以有效地获取单个微裂 纹扩展的声信号并提取出其波形和特征参数,但因 材料内部声源的不均匀性和复杂性,导致获取的单 个微裂纹扩展的声信号的差异性较大,以致于很难 以单个信号来准确地判别材料是否发生裂纹扩展。

本文将从统计特性的角度对材料早期损伤阶段的AE信号进行分析,以2.25Cr-1Mo钢为研究对象,提取出不同试样早期损伤阶段的声学数据,着重分析不同试样早期损伤阶段的特征参数统计特性,计算不同试件在早期损伤阶段声信号的特征参数的比例指标,构建不同试样的典型AE信号样本数据,利用机器学习的方法,确定2.25Cr-1Mo钢裂纹扩展的判别指标范围,为材料裂纹扩展损伤的早期监测进行了前期探索性研究。

1 材料损伤失效与声发射源分析

材料损伤失效会经历一段时间的微观组织动 态演化过程,由于材料内部微观组织的损伤机制不 同,致使产生的AE信号源特征也会有所不同。当材 料内部时发生极少数夹杂物及二相粒子形状姿态 的调整,会释放出低能量的应力波,AE信号能量及 活性均较低,而对应着相对较高的持续时间,产生的 多为连续型信号。当材料内部发生微观组织晶粒的 位错、塞积及滑移运动,会产生大量高能量和高振 铃计数的声信号,而持续时间相对较短,产生的多为 混合型信号。当材料内部发生位错塞积引起的微裂 纹萌生或扩展,会产生大量能量高但持续时间相对 较短的声信号,产生的多为突发型信号^[11]。大量研 究表明,虽然在这个过程中可以有效地获取单个微 裂纹扩展的声信号,但是研究其单个信号的参数特 征的意义并不大,因为在实际工况中,想要从大量 噪声背景中去识别有效的裂纹信号的难度是很大的,也无法通过获取的几个有效信号去判别材料的 安全性及可靠性。

本文从统计过程信息的角度出发,分析裂纹形 成到发生发展成宏观裂纹这整个早期损伤过程的 AE信号的规律。主要将AE信号源分为两类,第一 类是由于微裂纹萌生或扩展所产生的能量高但持 续时间短的信号,第二类为其他所有微观组织损伤 机制所产生的AE信号。同时,在此基础上提出了以 不同声源产生信号数之间的占比值这一变量来判 定材料是否发生损伤,建立的关系式为

$$\kappa = \frac{\sum H_1}{\sum H_2} = \frac{\sum H_1}{\sum (H - H_1)},$$
 (1)

式(1)中, κ 为不同声源产生的信号数之间的比例 值; $\sum H$ 为早期损伤阶段的有效信号总数; $\sum H_1$ 为早期损伤阶段微裂纹萌生扩展信号数; $\sum H_2$ 为 早期损伤阶段其他声源产生的信号数。

2 实验过程

2.1 实验试件制备

实验材料选取2.25Cr-1Mo钢,制备两种材料类型和3种预制缺陷的2.25Cr-1Mo钢试件,试件总长340 mm,宽30 mm,厚20 mm,预置缺陷位于试件的正中间,分别在试件两端布置传感器,且两个传感器到预置缺陷的距离相等,如表1所示。

| 表1 | 三点弯曲试件规格 | Z |
|----|----------|---|
| | | - |

Table 1Specifications of three-pointbending specimen

| 代号 | 试件类型 | 预制缺陷尺寸/mm |
|----|-------|-----------|
| B1 | 不带堆焊层 | 0 |
| B2 | 不带堆焊层 | 1 |
| B3 | 不带堆焊层 | 2 |
| B4 | 带堆焊层 | 0 |
| B5 | 带堆焊层 | 1 |
| B6 | 带堆焊层 | 2 |

2.2 实验装置简介

加载系统采用 SANS 万能电子拉伸机,AE采集 系统采用美国 PAC 公司 PCI-2 全数字声发射仪,传 感器采用频率范围为100 ~ 1000 kHz 的温度传感 器,前置放大器采用2/4/6前置放大器,如图1所示。



图 1 三点弯曲过程实验图 Fig. 1 Experimental diagram of three-point bending process

实验开始前,按表2设置好实验参数,将试样放 置在SANS万能电子拉伸机,预置缺陷放置下侧,将 传感器耦合于试件上,为了消除噪声,在进行弯曲前 对试件先进行预弯曲,保证夹具与试件的结合部位 无噪声干扰。在实验过程中记录采集AE信号,万能 电子拉伸机采用位移控制方式,以1 mm/s的速度 施加载荷,在试件弯曲过程中声发射PCI-2检测仪 记录参量信息,同时利用瞬态波形存储器同步存储 波形文件,直到实验结束。

表2 AE仪器参数设定

Table 2 Parameter setting of AE instrument

| 门槛/ | 放大器 | 采样频率/ | 采样 | E | 时间/μ | s |
|------------------|-------|-----------------------|------|-----|------|-----|
| $^{\mathrm{dB}}$ | 增益/dB | $(Mbit \cdot s^{-1})$ | 长度/个 | 峰值 | 撞击 | 撞击 |
| | | | | 定义 | 定义 | 闭锁 |
| 40 | 40 | 1 | 1024 | 300 | 600 | 600 |

2.3 实验结果分析

为了获取完整的早期损伤阶段声学数据,保证 数据的有效性,本文将对试件三点弯曲过程的前 100 s的数据进行分析。

图2是B1~B6试件弯曲过程幅值/载荷/累计 能量历程曲线。结合幅值与载荷历程图,可看出随 着载荷的增加,在一段时间内会集中产生大量的 AE信号,此时试件已开始发生微观损伤;结合载荷 与累计能量历程图,可以明显看出随着载荷的增加, 能量也在不断的增加;在前100 s时间内,刚开始试 件的累计能量显著增加,一定时间后,累计能量增长 率逐渐下降直至趋于平衡,此时试件已开始产生宏 观变形。 应用声学



图 2 B1~B6 试件弯曲过程幅值/载荷/累计能量历程曲线 Fig. 2 Amplitude/load/cumulative energy history curve of B1–B6 specimens during bending

3 早期损伤阶段声信号单一特征参数统计 分析

3.1 不同试件早期损伤阶段的声学数据

根据以上6个试件的AE特性分析可知,试件 发生损伤时会产生大量AE信号且会持续一段时 间,在此时间段内,试件累计能量显著增长,持续 一段时间后,随着试件活性的降低,累计能量率逐 渐降低。因而,本文将以从试件开始产生声信号为 起始点,然后以各个试件累计能量增长率转折点 的出现时间以及试件出现宏观变形的时间为终点, 此时间段即为试件的早期损伤阶段。由图2可知, B1~B3试件出现大量AE信号的时间持续40 s左 右,B4~B6试件出现大量AE信号的时间持续35 s 左右。因此,本文选用不同试件发生早期损伤阶段 的声学数据时间段以及所产生的AE信号数,如表3 所示。

表 3 不同试件的早期损伤阶段的声信号统计 Table 3 Statistics of early damage stages of different specimens

| 试件 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|
| 时间段/s | $20\!\sim\!60$ | $30\!\sim\!70$ | $20\!\sim\!60$ | $20\!\sim\!55$ | $10{\sim}45$ | $15\!\sim\!50$ |
| 信号数/个 | 84 | 37 | 81 | 64 | 37 | 70 |

可知,同一种材料试件在同一条件下三点弯 曲试验的早期损伤阶段所产生的AE信号数是不同 的;同样地,不同材料含相同缺陷的试件在同一条件 下三点弯曲试验的早期损伤阶段所产生的AE信号 数的也是不同的。因此,单单统计试件早期损伤阶 段的AE信号数目是没有什么规律性的。

3.2 不同试件早期损伤阶段幅值特征参数统计 分析

AE信号强度能够较好地描述试件发生损伤时 的声发射源特征,AE信号的幅值是表征信号强度 的重要参量之一,故选取幅值参量进行分区统计。 以幅值45 dB为分界线进行统计分析,将试件发生 早期损伤阶段的信号划分成不同的取值区间,不同 材料试件在早期损伤阶段不同幅值区间的AE撞击 数分布情况如表4所示。

在公式(1)的基础上,计算6个试件早期损伤阶 段的幅值区间统计占比值 *κ*₁,结果如表5所示。

表 4 不同材料试件早期损伤阶段幅值分区统计信号数 Table 4 Statistical signal number of amplitude zoning in early damage stage of samples of different materials

| 幅值区间 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|----------------------------|----|----|----|----|----|----|
| > 45 dB | 26 | 12 | 27 | 24 | 13 | 22 |
| $\leqslant 45~\mathrm{dB}$ | 58 | 25 | 54 | 40 | 24 | 48 |

表5 不同试件早期损伤阶段幅值分区统计占比值 Table 5 Statistical proportion of amplitude zoning in early damage stage of different specimens

| 试件 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
| κ_1 | 1:2.2 | 1:2.1 | 1:2 | 1:1.7 | 1:1.9 | 1:2.2 |

可看出,试件在早期损伤阶段的幅值分区统 计占比值 κ_1 有着相似的规律,幅值40~45 dB 的区间与幅值46~99 dB的区间的 κ_1 值范围为 1:1.7~1:2.2之间。不带堆焊层试件的 κ_1 值范围 为1:2~1:2.2之间,且随着试件缺陷的增长,不带 堆焊层试件的 κ_1 值的范围呈增长的趋势;带堆焊层 试件的 κ_1 值范围为1:1.7~1:2.2之间,且随着试 件缺陷的增长,带堆焊层试件的 κ_1 值的范围呈下降 的趋势。

3.3 不同试件早期损伤阶段能量特征参数统 计分析

AE信号的能量也是表征信号强度的重要参量 之一,故选取能量进行分区统计。以能量15为分界 线进行统计分析,将不同试样早期损伤阶段的信号 划分成不同的取值区间,不同材料试件在早期损伤 阶段的不同能量区间的AE撞击数分布情况如表6 所示。

在公式(1)的基础上,计算出6个试件早期损伤 阶段的能量区间统计占比值 *κ*₂,结果如表7所示。

表 6 不同材料试件早期损伤阶段能量分区统计 信号数

Table 6Statistical signal number of en-
ergy zoning in early damage stage of sam-
ples of different materials

| 能量区间 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|----------------|----|----|----|----|----|----|
| > 15 | 17 | 7 | 13 | 15 | 9 | 15 |
| $\leqslant 15$ | 67 | 30 | 68 | 49 | 28 | 55 |

表7 不同试件早期损伤阶段能量分区统计占比值

Table 7 Statistical proportion of energy zoning in early damage stage of different specimens

| 试件 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|------------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|
| κ_2 | 1:4 | 1:4.3 | 1:5.3 | 1:3.3 | 1:3.1 | 1: 3.5 |

可以看出,不同试件在早期损伤阶段的能量 分区统计占比值 κ_2 有着相似的规律, κ_2 值范围为 1:3.1~1:5.3之间。不带堆焊层试件的 κ_2 值范围 为1:4~1:4.3之间,且随着试件缺陷的增长,不带 堆焊层试件的 κ_2 值的范围呈下降的趋势;带堆焊层 试件的 κ_2 值范围为1:3.1~1:3.5之间。

4 基于SVM的早期损伤阶段多元参量统 计分析

4.1 基于 SVM 的多元参量统计分析原理

根据上述研究表明,单一特征参量能够在一定 程度上反映材料早期损伤阶段的声源特性,但对于 分界线的准确性要求很高,分界线选取的不同,获得 的分区统计占比值κ的范围也不同,以致于分界线 的确定过于绝对化、线性化、片面化,使得不同试件 的统计结果之间的差距较大,仅仅依赖单一变量统 计分析结果进行信号分类识别的误差大。因此需要 借助于数学工具,采用智能化的分析手段,通过从某 一个或几个特征参量的变化来确定材料早期损伤 阶段微裂纹萌生或扩展的状态识别。

多元统计分析方法是通过对多个随机变量观 测数据进行分析,研究变量之间的相互关系,并 且揭示这些变量内在的变化规律。而支持向量机 (Support vector machine, SVM)是建立在统计学 习理论基础上的一种数据挖掘方法,能非常成功地 处理回归问题(时间序列分析)和模式识别(分类问 题、判别分析)等诸多问题,并可推广于预测和综合 评价等领域和学科。SVM的机理是寻找一个满足 分类要求的最优分类超平面,使得该超平面在保证 分类精度的同时,能够使超平面两侧的空白区域最 大化。理论上,SVM能够实现对线性可分数据的最 优分类,通过寻找超平面对给定的向量进行分类。 当特征数为2的时候,根据数据集中样本的二维特 征值,将其作为x坐标和y坐标,绘制在二维平面中, 其中实心圆形和空心圆形分别代表不同分类的样 本点,对于不同声源的识别,即试样是否发生微裂纹 萌生或扩展,SVM方法在于从其中找出一个直线, 能够将两类样本点分离开,从而确定分类结果。

对于具备p个特征的数据,其特征向量为p维 向量,SVM计算的是能够将两类样本数据完全分 离开来的p - 1维超平面,给定训练样本集 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \cdots, l, x \in R^n, y = \{\pm 1\},$ 超平面记作 $(w \cdot x) + b = 0$,为使分类面对所有样本正确分 类并且具备分类间隔,就要求它满足如下约束: $y_i[w \cdot x) + b] \ge 1, i = 1, 2, \cdots, l$ 。计算出分类间隔 为2/||w||,因此,构造最优超平面的问题就转化为在 约束式下求

$$\min \phi(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \|w\|^2 = \frac{1}{2} (w' \cdot w).$$
 (2)

为了解决该个约束最优化问题,引入Lagrange 函数:

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\| - a(y((w \cdot x) + b) - 1), \quad (3)$$

式(3)中,a > 0为Lagrange乘数。约束最优化问题的解由Lagrange函数的鞍点决定,并且最优化问题的解在鞍点处满足对w和b的偏导为0,将该QP问

题转化为相应的对偶问题,即:

$$\max Q(a) = \sum_{j=1}^{l} a_j - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{l} \sum_{j=1}^{l} a_i a_j y_i y_j (x_i \cdot x_j),$$
$$\sum_{j=1}^{l} a_j y_j = 0, \quad j = 1, 2, \cdots, l,$$
$$a_j \ge 0, \quad j = 1, 2, \cdots, l,$$
(4)

解得最优解 $a^* = (a_1^*, a_2^*, \cdots, a_l^*)^{\mathrm{T}}$ 。

计算最优权值向量 w* 和最优偏置 b*,分别为

$$w^* = \sum_{j=1}^{l} a_j^* y_j x_j,$$
 (5)

$$b^* = y_i - \sum_{j=1}^{l} y_j a_j^* \left(x_j \cdot x_i \right), \tag{6}$$

其中,下标 $j \in \{j | a_j^* \succ 0\}$ 。因此得到最优分类超 平面 $(w^* \cdot x) + b^* = 0$,而最优分类函数为

$$f(x) = \operatorname{sgn} \left\{ (w^* \cdot x) + b^* \right\}$$
$$= \operatorname{sgn} \left\{ \left(\sum_{j=1}^l a_j^* y_j(x_j \cdot x_i) \right) + b^* \right\}, \ x \in \mathbb{R}^n.$$
(7)

4.2 基于 SVM 的早期损伤阶段声信号识别结果 统计分析

本文采用上述 B1~B6 试件早期损伤阶段的声 学数据,按照不带堆焊层和带堆焊层的试件类型, 构建出3种不同的训练样本集。其中,训练样本集 包含两类AE信号数据。一类是指同时满足幅值 > 45 dB且能量> 15 的声信号,即代表损伤过程中 的微裂纹萌生或扩展所产生的声信号;另一类是指 满足幅值 < 45 dB或能量 < 15 的声信号,即代表损 伤过程中的其他所有微观组织损伤机制所产生的 声信号,如表8所示。

表8 不同的训练样本集

Table 8 Composition of different trainingsample sets

| 训练样本集 | 样本集1 | 样本集2 | 样本集3 |
|-------|-------|------|--------------|
| 数据类型 | 不带堆焊层 | 带堆焊层 | 不带堆焊层 + 带堆焊层 |
| 信号数目 | 174 | 140 | 314 |
| 一类信号 | 36 | 33 | 69 |
| 二类信号 | 138 | 107 | 245 |

由表8可知,训练样本集1是由174个不带堆焊 层试样的典型AE信号构成,其中一类信号为36个, 二类信号为138个;训练样本集2是由140个带堆焊 层试样的典型AE信号构成,其中一类信号为33个, 二类信号为107个;训练样本集3是由314个不带堆 焊层和带堆焊层试样的典型AE信号构成,其中一 类信号为69个,二类信号为245个。将上述3种训 练样本集分别导入SVM中进行学习与调试,得到 B1~B6试件的识别结果,并计算其统计占比值κ, 如表9所示。

表9 SVM 识别结果统计占比值

Table 9Statistical proportion of SVMrecognition results

| 试样 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| κ_3 | 1:3.1 | 1: 3.6 | 1:3.3 | 1:2.2 | 1:2.2 | 1:2.6 |
| κ_4 | 1:3.1 | 1: 3.6 | 1:3.3 | 1:2.2 | 1:2.2 | 1:2.6 |
| κ_5 | 1: 3.2 | 1:3.6 | 1:3.5 | 1:2.2 | 1:2.2 | 1:2.5 |

从上述结果可看出,无论是用不带堆焊层、带 堆焊层还是两种类型所有数据组合的典型AE信 号作为训练样本集,采用SVM进行模式识别的结 果统计出来的 κ 值范围基本一致, κ 值都保持在 1:2.2~1:3.6之间。同时,通过对比不带堆焊 层和带堆焊层两类的不同缺陷试件的 κ 值范围,发 现同类试件的 κ 值无较大差异,但又因每个单一试 件内部结构的差异性和不均匀性, κ 的值也不是完 全相同;通过对比不带堆焊层试件与带堆焊层试件 的 κ 值范围,能明显发现两类试件的 κ 值范围具有 显著的区分度,其中不带堆焊层试件的 κ 值范围为 1:3.1~1:3.6之间,带堆焊层试件的 κ 值范围为 1:2.2~1:2.6之间,其中带堆焊层比不带堆焊层 试件的 κ 值更大,说明带有堆焊层试件开裂信号呈 现得更加丰富。

5 结论

(1) 在材料损伤失效过程不同声源机理分析的基础上,提出了不同声源产生AE信号统计占比值 κ 的关系式,得到了基于AE统计信息的材料早期损 伤判别方法。

(2) 采用SVM对6个试件进行多元参量统计 特性分析,得到不带堆焊层试件的κ值范围为 1:3.1~1:3.6之间,带堆焊层试件的κ值范围 为1:2.2~1:2.6之间。

(3) κ值的数据表明含不同缺陷的同类试件之间的κ值并无较大差异,而不同类试件之间的κ值 具有明显的区分度。带有堆焊层比不带堆焊层的 2.25Cr-1Mo钢试件开裂信号要呈现得更加丰富,依 据κ值范围可以实现材料早期损伤的判别。

参考文献

- Drouillard T F. Acoustic emission: the first half century[C]. Presented at the 12th International Acoustic Emission Symposium, 1994.
- [2] Bogomolov L M, Ilichev P V, Novikov V A, et al. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation[J]. Annals of Geophysics, 2004, 47(1): 10.4401/ag-3259.
- [3] Kwon J R, Lyu G J, Lee T H, et al. Acoustic emission testing of repaired storage tank[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2001, 78(5): 373–378.
- [4] Finlayson R D, Friesel M, Carlos M, et al. Health monitoring of aerospace structures with acoustic emission and acousto-ultrasonics[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2001, 43(3): 155–158.
- [5] 张昌稳, 叶辉, 李强, 等. 不同缺陷 Q345 钢试样拉伸试验的声发射特征 [J]. 石油化工设备, 2013, 42(4): 5-9.
 Zhang Changwen, Ye Hui, Li Qiang, et al. Acoustic emission characteristics of tensile test of Q345 steel samples with different defects[J]. Petrochemical Equipment, 2013, 42(4): 5-9.
- [6] Ennaceur C, Laksimi A, Herve C, et al. Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(3): 197–204.
- [7] Su F, Li T, Pan X, et al. Acoustic emission responses of three typical metals during plastic and creep deformations[J]. Experimental Techniques, 2018, 42(19): 685–691.
- [8] Panin S V, Byakov A V, Vlasova I V. Acoustic emission study on the effect of notch shape and temperature on elastic energy release during impact testing of 17Mn1Si pipe steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 210: 288–299.
- [9] 龙宪海, 阳能军, 王汉功. 基于声发射技术的 30CrMnSi 钢断裂机理研究 [J]. 材料工程, 2011(1): 17-22.
 Long Xianhai, Yang Nengjun, Wang Hangong. Study on fracture mechanism of 30CrMnSi steel based on acoustic emission technology[J]. Materials Engineering, 2011(1): 17-22.
- [10] 李建宇, 贾中汇, 张扬扬. 铝合金在不同应力状态下微损伤演 化的声发射研究 [J]. 实验力学, 2020, 35(4): 650–658.
 Li Jianyu, Jia Zhonghui, Zhang Yangyang. Acoustic emission study on micro damage evolution of aluminum alloy under different stress states[J]. Experimental Mechanics, 2020, 35(4): 650–658.
- [11] 崔俊, 赖于树, 刘琪, 等. HRB400 焊接试样拉伸全过程声发 射信号时频能量特征 [J]. 应用声学, 2018, 37(4): 488-495. Cui Jun, Lai Yushu, Liu Qi, et al. Time frequency energy characteristics of acoustic emission signals during the whole tensile process of HRB400 welded specimens[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(4): 488-495.