

◇ 研究报告 ◇

HRB400 焊接试样拉伸全过程声发射信号 时频能量特征*

崔俊^{1,2} 赖于树^{1,2†} 刘琪^{1,2} 孙岩³ 张东⁴

(1 重庆三峡学院电子信息与工程学院 重庆 404100)

(2 智能信息处理与控制重庆市高校重点实验室 重庆 404100)

(3 重庆三峡学院土木工程学院 重庆 404100)

(4 重庆文理学院电子电气工程学院 重庆 402160)

摘要 为了深入研究未焊透 HRB400 螺纹钢拉伸全过程声发射信号特征,开展了完整和未焊透试样的拉伸实验,通过 SAEU2S 型数字声发射系统对损伤特性进行实时监测。结合金属材料力学行为特性,根据计数率将全过程划分成不同的阶段,采用伪 Margenau-Hill(PMH) 分布进行了时频分析并利用小波包变换对信号进行了能量分析。结果表明:声发射特性参数能够很好地描述焊接对材料力学性能的影响,PMH 分布具有良好的时频聚集性,未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。实验结果为声发射技术应用于钢结构工程未焊透缺陷的识别提供了参考依据。

关键词 HRB400, 声发射, 未焊透, 伪 Margenau-Hill(PMH) 分布, 小波包变换

中图法分类号: TU511.3+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)04-0488-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.04.007

Time-frequency and energy characteristics of acoustic emission signals during tensile process of HRB400 welded specimens

CUI Jun^{1,2} LAI Yushu^{1,2} LIU Qi^{1,2} SUN Yan³ ZHANG Dong⁴

(1 College of Electronic Information and Engineering Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China)

(2 Key Laboratory of Intelligent Information Processing and Controlling in Universities, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China)

(3 College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China)

(4 College of Electronic and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract In order to study the acoustic emission signal characteristics of the whole stretching process of HRB400 non-penetration welded threaded steel, tensile tests of intact and non-penetration welded specimens were conducted by using SAEU2S type digital acoustic emission system to monitor the damage characteristics in real time. Combined with mechanical behavior of metallic materials, the whole process is divided into different stages according to the counting rate. The pseudo Margenau-Hill (PMH) distribution and wavelet

2017-10-18 收稿; 2017-12-28 定稿

*重庆市基础与前沿研究计划项目 (cstc2014jcyjA30006), 重庆市教委科技项目 (KJ1401022), 百科融创产学研合作协同育人项目 (201602011029), 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJ1711280), 重庆高校创新团队建设计划项目

作者简介: 崔俊 (1991-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向: 声发射无损检测与信号处理。

† 通讯作者 E-mail: laser121@sina.com

packet transform are used to analyze the time-frequency domain and energy of the signals. The results show that acoustic emission characteristic parameters can well describe the influence of welding on the mechanical properties of materials. The PMH distribution has good time-frequency aggregation and there is a significant difference in frequency and energy between the welds and the whole sample during the tensile process. The experimental results provide a reference for the application of AE technology in the identification of incomplete penetration defects in steel structure engineering.

Key words HRB400, Acoustic emission, Non-penetration welded, Pseudo Margenau-Hill, Wavelet packet transform

1 引言

声发射又称为应力波发射,是物体在受到外界作用或形变时快速释放能量产生瞬态弹性波的一种物理现象。声发射检测对活动性缺陷非常敏感,能够探测到结构在外力作用下缺陷的活动情况,稳定缺陷不会产生声发射信号。大多数材料在形变和断裂过程中都伴有声发射,Kaiser对多种金属材料研究发现材料在形变过程中的声发射是不可逆的,即Kaiser效应。这一结论得到了广泛的应用^[1],成为了声发射技术的重要依据。由于声发射技术是利用传感器采集结构内部形变产生的信号,不会对被检测对象产生任何损伤,具有实时性、预警性和动态性等特点,其广泛用于桥梁、混凝土、建筑、管道、航空等行业^[2-5]。螺纹钢具有成型能力很好、价格便宜、耐腐蚀、强度高等优点而广泛使用于桥梁、建筑等工程结构。使用过程中,经常需要对其进行焊接,焊接质量受操作人员素质、电流、电压等外界因素影响较大,往往容易产生咬边、夹渣、气孔、未焊透等缺陷质量问题,其安全性和使用功能必然退化。因此,采用科学合理的检测手段对其安全可靠性能进行合理的评估是安全作业的重要基础。

目前,对焊缝检测的主要技术有超声检测、磁粉检测、X射线检测、涡流检测等^[6-8],信号源都只能依靠仪器产生,而声发射技术能够对已发生损伤的结构进行评价,且信号来自被测对象本身,信号更为真实可靠。为了推动该技术的实践应用,国内外学者通过实验的方法来研究相关结构材料的特性,并取得了一定的进展。张耀庭等^[9]对HRB400钢筋进行了单调拉伸及低周疲劳性能实验研究,得出HRB400钢筋的基本力学性能参数、应变幅值-疲劳周期数和应变幅值-强度退化系数关系式及疲劳参数的取值。张一辉等^[10]进行了Q235B钢板拉伸损伤实验,发现由于焊接原因在屈服阶段出现双

峰现象。莫亚婧等^[11]对Q345钢进行了拉伸及三点弯曲实验,发现不同阶段声发射特征参数有不同的特征表现。周猛等^[12]对镀镍钢带进行了拉伸,发现试样发生塑性变形、颈缩和断裂时,声发射信号明显增加,颈缩阶段其幅值大都分布在43~79 dB范围内。张颖等^[13]通过对Q345试样细观损伤的声发射量化评价实验发现声发射与金属塑性材料的微孔洞损伤有一致的对应关系,且声发射累积撞击计数的变化就直接对应着材料的不同损伤阶段。Zaki等^[14]用声发射技术对锈蚀钢筋混凝土构件进行了监测,发现通过声发射参数分析能够对钢结构的早期腐蚀进行识别。Droubi等^[15]用声发射方法对碳钢焊接接头不同缺陷进行检测和识别,发现声发射技术对不同焊接缺陷非常敏感。钱骥等^[16]通过高强钢丝和拉索的张拉破坏实验,获得了不同声发射源的时频特征。

声发射信号产生及信号的本质特性与材料内部的损伤有着密切的关系,本文通过对完整和未焊透螺纹钢进行拉伸实验,分析声发射特征参数并结合声发射信号进行时频能量分析来动态评估其内部裂纹扩展情况,研究材料损伤与声发射信号特征的对应关系。

2 实验方案及声发射信号采集

2.1 制备实验试样

制作未焊透和完整螺纹钢试样各两根,未焊透试样焊接点在试样中线位置,焊接方式采用对接焊。为了让传感器和试样能够有效地耦合,实现声发射信号的实时采集,靠近试样两端各焊接同种材料的小钢块各一块,采用点焊方式焊接。焊接标准采用THJ422,低碳钢电碳钢焊条。如图1所示即为试样的结构和几何尺寸,其中传感器之间的距离为250 mm。实验所用试样直径均为10 mm。

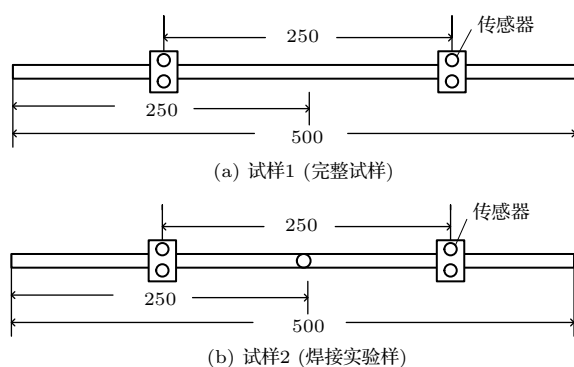
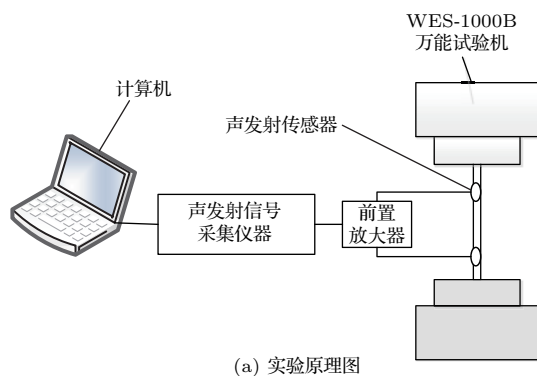


图1 试样的结构及尺寸 (单位:mm)

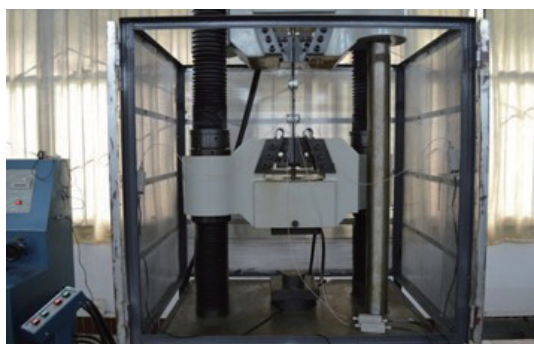
Fig. 1 Structures and sizes of samples (Unit: mm)

2.2 实验设备及装置

实验采用SAEU2S数字声发射采集系统,此系统采用USB2.0能实现四通道数据实时高速传输。SAEU2S软件系统具有丰富的功能,可以按照不同需求快速输出信号。采用WES-1000B型数字显示万能试验机,该试验机可输出最大力值为1000 kN,能实现恒定速度和恒定位移控制。实验原理图及实验装置图见图2。



(a) 实验原理图



(b) 实验装置图

图2 实验原理及装置图

Fig. 2 The experiment principle and device diagram

2.3 实验内容及测试方法

多次重复开展螺纹钢拉伸破坏声发射实验,实时采集声发射数据。为了达到更好的效果,在试样上布置四个传感器并使用耦合剂将传感器粘贴于打磨光滑的试样表面,为了使传感器固定良好,用胶带将已耦合良好的传感器固定好,并通过断铅(HB0.5 mm)实验检测各个传感器耦合情况。实验过程保持恒定的加载速度,声发射数据采集同步进行。声发射仪参数合理设置,由于噪声对实验信号采集的影响很大,实验前必须采取合理的措施,该实验噪声主要来源于螺纹钢与仪器连接处的摩擦。在螺纹钢与仪器连接处缠绕适当的透明胶带,利用分离自由的接触表面,降低噪声对实验带来的影响。采样频率为5 MHz,阈值40 dB,滤波设置直通,峰值定义时间(PDT)为300 μ s,撞击闭锁时间(HLT)为1000 μ s。多次实验表明,该设置能够有效排除噪声的干扰。实验机设置的拉伸速率为5 mm/min,实验过程中由于焊接处裂纹的扩展,载荷持续下降,直至螺纹钢完全断裂。多次实验表明,在不同加载速度下采集的声发射数据明显不同,但揭示的规律特征一致。

3 实验结果及分析

声发射信号分为突发型信号和连续型信号两种情况。焊接钢声发射信号主要来源于显微裂纹形成不断积累扩展成宏观裂纹过程中伴随大量声发射事件而产生的信号。本实验采用四通道声发射仪同步采集声发射数据,经过对四通道采集的数据分析研究发现,数据具有一致性。因此,后续的一系列分析均以二通道数据为例。

3.1 声发射参数及拉伸实验力学特性分析

计数率和载荷历程在一定程度上能够反映声发射事件的强弱。图3分别是通过对试样施加拉力开始到实验结束的声发射振铃计数与到达时间直方图和试样拉伸载荷历程曲线图。

完整试样拉伸实验过程中声发射计数率和到达时间的关系如图3(a)所示,在拉伸后不久出现了短暂强烈的计数率,结合实际情况,考虑这是由于实验初期母材和机械咬合摩擦而引起的噪声信号。此后的整个过程中30 s以前声发射计数率几乎为0,从30 s开始声发射信号强度明显增强,计数率也随

之开始有明显的升高,一直持续到实验结束。未焊透试样拉伸实验过程中声发射计数率和到达时间的关系如图3(b)所示,由图3(b)可知,在30 s以前,声发射计数率较低,和完整试样的计数率变化情况基本相符。这是由于实验初期材料处于弹性形变范围之内,位错运动少,拉伸激发而产生的声发射信号比较微弱。在30 s以后到36 s随着载荷的增大,材料发生不可逆变形产生了强烈的声发射信号,计数率较之前上升明显。36 s之后主要由于焊接点发生了塑性形变,产生了强烈的声发射信号,计数率随之急剧上升,且一直维持在高水平范围小幅波动,强度明显高于36 s之前的阶段,在拉伸断裂前的瞬间声发射信号强度达到最大。

完整试样和未焊透试样拉伸载荷历程曲线图如图3(c)和图3(d)所示,比较发现:在30 s以前,两者载荷历程曲线变化规律几乎一致,这是因为两种试样的母材相同,实验初期材料处于弹性形变范围内且形变主要发生在母材上;未焊透试样后期载荷略高于完整试样,这主要是由于焊接热影响,使得未

焊透试样在焊接区域强度增加;随着载荷的不断增加,未焊透试样在很短时间的塑性形变过程就发生了断裂,而完整试样在很长的塑性历程却未发生断裂,这说明由于未焊透原因,导致焊接试样整体的塑性变形能力急剧下降。

以上差异表明,声发射计数率的变化及载荷历程均能够有效地反映拉力实验中材料的损伤程度。根据材料破坏过程力学特性,并结合声发射计数率与时间的关系,将本次实验全过程大致划分成不同的阶段,以便于更进一步的分析。阶段划分如表1所示。

表1 试样各阶段划分

Table 1 Different periods of tensile process for samples

	弹性形变	塑性形变	焊缝塑性形变
试样1	0~30 s	30~141 s	
试样2	0~30 s	30~36 s	36~51 s

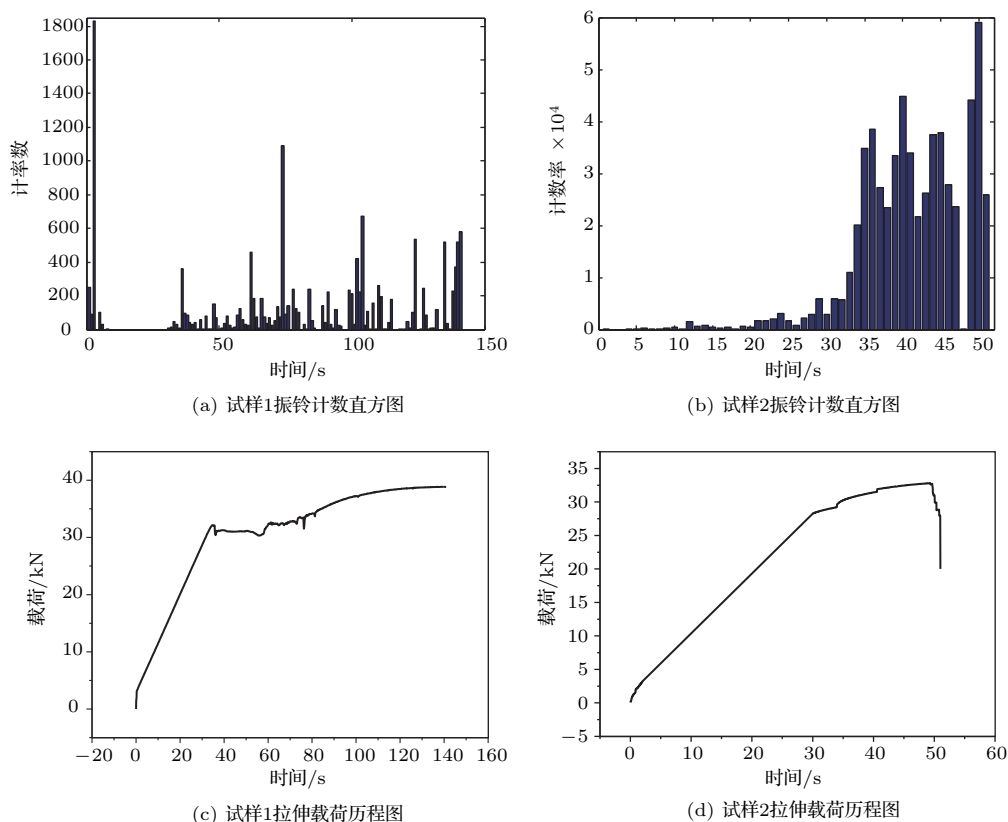


图3 声发射事件计数率及载荷历程曲线图

Fig. 3 AE event count rate and load history curve graph

3.2 破坏各阶段声发射信号时频分析

时域分析是直接的时间域中对系统进行分析,具有直观和准确的优点。频域分析的目的是把比较复杂的时间历程波形,通过频域变换分解为若干单一的谐波分量来进行研究,以获得信号的频率结构以及各谐波和相位信息。诸多在时域难以显现或者不能发现的问题,将时域信号变换至频域后容易辨别和发现。传统的傅里叶变换缺乏局域性的信息,而科恩类时频分布的一种伪 Margenau-Hill(PMH)分布具有真边缘性、弱支撑性、良好的时频聚集性等优点,故选取 PMH 分布对信号作时频分析。

20 世纪 40 年代后,科恩发现众多时频分布可以统一表示为

$$C_S(t, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \cdot k(\xi, \tau) \times e^{-i(\xi t + \omega \tau - \xi u)} d\xi du d\tau, \quad (1)$$

当 $k(\xi, \tau) = \cos(\xi\tau/2)$ 时,为 Margenau-Hill 分布,若对变量 τ 加窗函数 $h(\tau)$ 时, $h(\tau)$ 能够达到减少交叉项的目的。此时,称该分布为 PMH 分布,可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{PMH}_S(t, w) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \cdot \cos(\xi\tau/2) \\ & \times e^{-i(\xi t + \omega \tau - \xi u)} d\xi du d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)~式(2)中, $C_S(t, w)$ 表示时频分布; $s(t)$ 为要分析的信号; u 表示时间; τ 表示时移; $*$ 表示共轭, ξ 是频移参数; $k(\xi, \tau)$ 为核函数。

图4~图6是截取的拉伸实验不同阶段的时频图。由图4~图6可知:

(1) 试样1和试样2在弹性形变阶段由于材料内部只发生原子间距离的伸长或缩短,只引起了原子间的势能变化^[17],所以产生的声发射信号强度相对较低,信号相对比较平稳。试样1频带主要集中在 115 kHz 附近,在 170 kHz 处有小范围集中,产生的 150 kHz 以上高频信号相对较少,有少量低频信号产生。试样2频带主要集中在 110 kHz~160 kHz 范围内,频带范围较试样1更宽。

(2) 试样1和试样2在塑性形变阶段由于材料发生了塑性屈服损伤,声发射信号强度增大,由时频图显示可知试样1频带主要集中在 150 kHz 附近。试样2频带相对分散,在 130 kHz~180 kHz 范围内较为集中,同时在 250 kHz 处也产生了明显集中。和弹性阶段相比,试样1、试样2在 150 kHz 以上高频信号增加明显。

(3) 试样2在焊缝塑性形变阶段,其声发射信号强度在整个过程达到最大,其频带范围在整个过程中达到最广,高频信号达到整个过程最大值,频带主要集中在 0 kHz~180 kHz 范围内,在 300 kHz 附近产生了一定程度的集中。

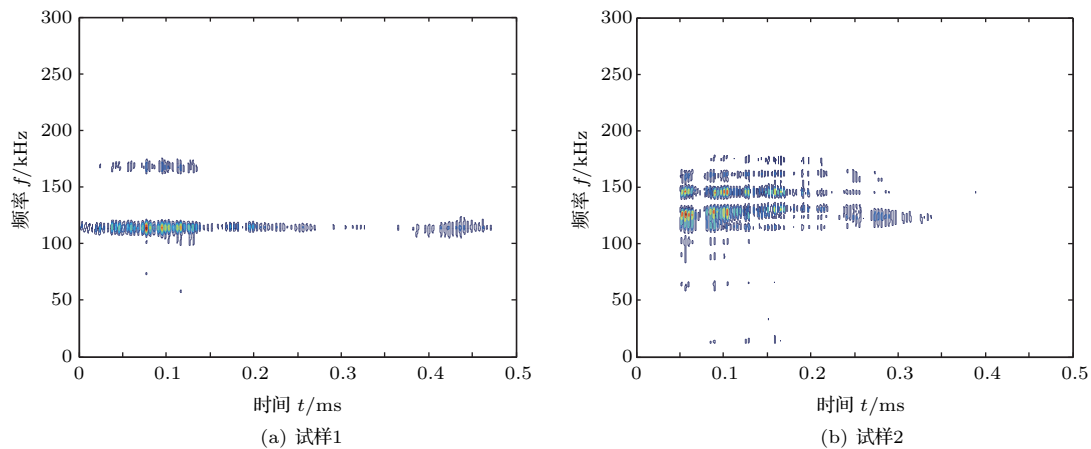


图4 试样弹性形变阶段时频图

Fig. 4 Time-frequency diagram of elastic deformation stage of specimen

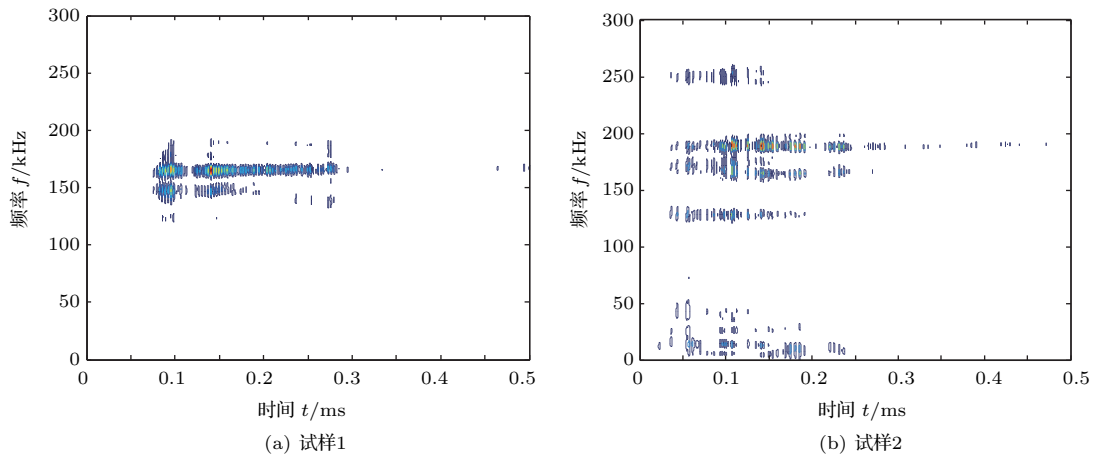


图5 试样塑性变形阶段时频图

Fig. 5 Time-frequency diagram of plastic deformation phase of specimen

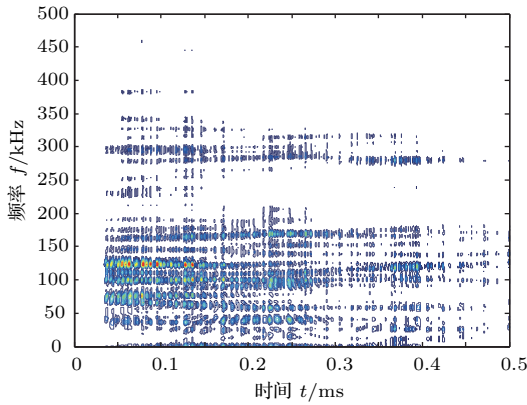


图6 试样2焊缝塑性阶段时频图

Fig. 6 Time-frequency diagram of Sample 2 plastic phase in welding

3.3 破坏各阶段频段能量分析

设 $\{h_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 是正交尺度函数 $\phi(t)$ 对应的正交低通实系数滤波器, $\{g_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 是正交小波函数 $\psi(t)$ 所对应的高通滤波器, 其中 $g_n = (-1)^n h_{1-n}$, 则它们满足以下两个尺度方程和小波方程:

$$\begin{cases} \phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \phi(2t - k), \\ \psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k \phi(2t - k). \end{cases} \quad (3)$$

为便于表示小波包函数, 引入以下新的记号:

$$\begin{cases} \mu_0(t) := \phi(t), \\ \mu_1(t) := \psi(t). \end{cases} \quad (4)$$

于是,

$$\begin{cases} \mu_0(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \mu_0(2t - k), \\ \mu_1(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k \mu_0(2t - k). \end{cases} \quad (5)$$

通过 μ_0, μ_1, h, g 在固定尺度下可定义一组称为小波包的函数,

$$\begin{cases} \mu_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \mu_n(2t - k), \\ \mu_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \mu_n(2t - k), \end{cases} \quad (6)$$

由递归定义的函数 $\mu_n, n = 0, 1, 2, \dots$ 称为由正交尺度函数 $\mu_0 = \phi$ 确定的小波包。

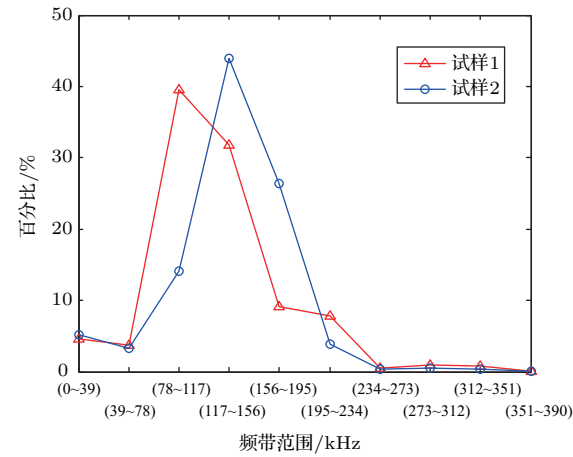
通过小波包分解对各频段的能量进行分析, 才能得到原始信号的局部特征。小波包变换在信号能量分析上的优点尤为突出, 能够对信号分析得更精细, 能对高频部分进行准确分析, 且不会混叠和丢失。通过反复比较, 本实验选取常用的 db3 小波对信号进行分解。

为了频段划分更为精确, 考虑到采样频率为 5 MHz, 对信号进行了 6 层分解, 对应最低频段为 0~39 kHz, 基本满足划分要求。已有研究表明金属裂纹声发射信号所在频段范围为 100 kHz~300 kHz, 中心频率为 150 kHz 左右, 为便于有效分析, 截取 0~390 kHz 有效频段进行分析。表 2 是经小波包 6 层分解后 0~390 kHz 频段分量重构信号的频谱范围和分量对照关系。

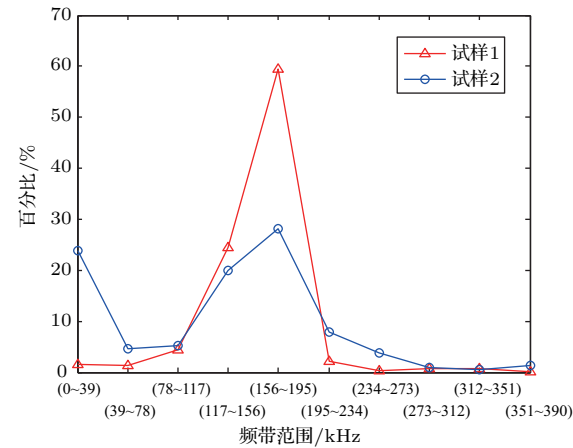
由于经过小波包分解后, 所有经过高频滤波的分量频谱顺序均翻转一次而形成格雷码序列。图 7 是不同阶段各频段能量占该阶段总能量百分比统

计折线图,由图7可知:

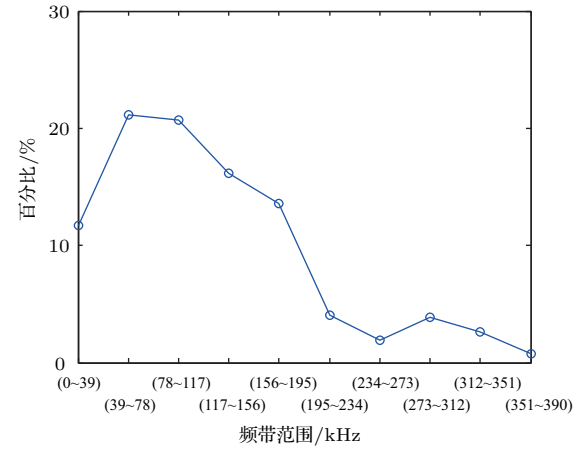
(1) 弹性阶段试样1和试样2能量主要集中在 78 kHz~195 kHz 频段,其 200 kHz 以上高频段能量占比极少。



(a) 试样1与试样2弹性形变阶段对比



(b) 试样1与试样2塑性形变阶段对比



(c) 试样2焊缝塑性形变阶段

图7 试样各阶段频段能量百分比

Fig. 7 Comparison of band energy ratio at different stages of sample

表2 重构信号分量频谱范围

Table 2 The frequency spectrum range of reconstructed signal components

序号	小波包分量	频段范围/kHz
1	(6,0)	0~39.10
2	(6,1)	39.10~78.13
3	(6,3)	78.13~117.19
4	(6,2)	117.19~156.25
5	(6,6)	156.25~195.31
6	(6,7)	195.31~234.38
7	(6,5)	234.38~273.44
8	(6,4)	273.44~312.50
9	(6,12)	312.50~351.56
10	(6,13)	351.56~390.63

(2) 塑性阶段试样1试样2由于发生了不可恢复的塑性变形,裂纹扩展更为剧烈,高频成分开始明显增加。试样1在 78 kHz~117 kHz 低频段能量百分比由弹性阶段的 40 大幅下降到 5 左右,在 156 kHz~195 kHz 高频段能量百分比由原来的 10 迅速升高至 60; 试样2由于焊接原因 156 kHz~195 kHz 高频段能量百分比基本持平, 195 kHz 以上频段能量占比有小范围升高。这是由于焊接改变了材料的冲击韧性,使其抗拉强度增大。

(3) 焊接塑性形变阶段 270 kHz 极高频段能量显著上升, 占比达到整个过程的最大。39 kHz~117 kHz 低频段能量百分比由前阶段的 4 急剧增加到 22, 频段能量在整个实验过程中最为复杂。

4 结论

(1) 通过对 HRB400 未焊透和完整试样拉伸实验研究并用伪 PMH 分布、小波包频段能量分析表明, 频带和能量分布均能够准确反映未焊透和完整试样在拉伸过程中的各个阶段声发射特性。

(2) 未焊透和完整试样在各阶段声发射信号特征明显不同, 频带范围也有明显的差异, 究其原因, 是焊接使材料机械性能发生了改变, 进而改变了材料的声发射特性。

(3) 整个实验过程中, 试样1和试样2在弹性阶段由于声发射信号来自材料本身弹性形变, 声发

射信号微弱,计数率与幅值相对较低,频段能量占比关系基本相同。试样在塑性阶段由于载荷逐步增大,开始发生塑性形变,声发射计数率有较大幅度的增加,频带变宽,主要集中在130 kHz~180 kHz之间,信号特征明显。试样在焊缝塑性形变阶段,信号能量强度急剧增加,达到全过程最大。39 kHz~117 kHz低频能量相比塑性阶段上升明显,273 kHz以上高频能量达到全过程最大值。这是由于试样存在未焊透焊缝,在断裂前产生了更为丰富的声发射信号。

参 考 文 献

- [1] Neklyudov I M, Stoev P I, Eckert J, et al. On the Kaiser effect in bulk metallic glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, 353(32-40): 3769-3771.
- [2] 钱骥, 孙利民, 蒋永. 桥梁拉索损伤声发射监测研究进展[J]. *应用声学*, 2016, 35(4): 369-376.
Qian Ji, Sun Limin, Jiang Yong. Advances in acoustic emission technique to cables health monitoring[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2016, 35(4): 369-376.
- [3] 赖于树, 熊燕, 程龙飞. 混凝土受载试验全过程声发射特性研究与应用[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(3): 380-386.
Lai Yushu, Xiong Yan, Cheng Longfei. Study of characteristics of acoustic emission during entire loading tests of concrete and its application[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(3): 380-386.
- [4] 焦敬品, 何存富, 吴斌, 等. 管道声发射泄漏检测技术研究进展[J]. *无损检测*, 2003, 25(10): 519-523.
Jiao Jingpin, He Cunfu, Wu Bin, et al. Advance in acoustic emission techniques for pipeline leak detection[J]. *Non-destructive Testing*, 2003, 25(10): 519-523.
- [5] 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.
- [6] 郝丰, 刘恩凯. 相控阵超声检测技术在核电设备贯穿件焊缝检测中的应用[J]. *压力容器*, 2015, 32(7): 63-69.
Hao Feng, Liu Enkai. Application of phased array technique on nuclear power equipment for penetrations welds[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2015, 32(7): 63-69.
- [7] 周正干, 滕升华, 江巍, 等. 焊缝X射线检测及其结果的评判方法综述[J]. *焊接学报*, 2002, 23(3): 85-88.
Zhou Zhenggan, Teng shenghua, Jiang Wei, et al. Research on defect detection and evaluation in welds with X-rays[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2002, 23(3): 85-88.
- [8] 黄建明, 林俊明. 焊缝电磁涡流检测技术[J]. *无损检测*, 2004, 26(2): 95-98.
Huang Jianming, Lin Junming. Eddy current inspection technique for welded lines[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(2): 95-98.
- [9] 张耀庭, 赵壁归, 李瑞鸽, 等. HRB400钢筋单调拉伸及低周疲劳性能试验研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(4): 121-129.
Zhang Yaoting, Zhao Bigui, Li Ruige, et al. Monotonic and low cycle fatigue testing and research for HRB400 steel[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(4): 121-129.
- [10] 张一辉, 张文斌, 许飞云, 等. Q235B钢板拉伸损伤试验的声发射特性[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(15): 156-161.
Zhang Yihui, Zhang Wenbin, Xu Feiyun, et al. Acoustic emission characteristics of Q235B steel plates tensile damage tests[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(15): 156-161.
- [11] 莫亚婧, 李秋峰, 何才厚, 等. Q345钢拉伸及弯曲损伤裂纹声发射监测实验研究[J]. *南昌航空大学学报: 自然科学版*, 2015, 29(1): 55-60.
Mo Yajing, Li Qiufeng, He Caihou, et al. Experimental about monitoring the crack of the Q345 steel after tensile and bending by acoustic emission[J]. *Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology: Natural Science Edition*, 2015, 29(1): 56-60.
- [12] 周猛, 龙士国, 马增胜, 等. 镀镍钢带拉伸断裂过程的声发射特征[J]. *压电与声光*, 2012, 34(1): 121-124.
Zhou Meng, Long Shiguo, MA Zengsheng, et al. Characteristics of acoustic emission signals of nickel plated steel under tensile fracture condition[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2012, 34(1): 121-124.
- [13] 张颖, 王子兴, 周俊鹏, 等. Q345试件细观损伤的声发射量化评价实验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(4): 40-45, 60.
Zhang Ying, Wang Zixing, Zhou Junpeng, et al. Experimental study on acoustic emission quantitative assessment of Q235 specimen's mesomechanical damage[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(4): 40-45, 60.
- [14] Zaki A, Chai H K, Behnia A, et al. Monitoring fracture of steel corroded reinforced concrete members under flexure by acoustic emission technique[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 136: 609-618.
- [15] Droubi M G, Faisal N H, Orr F, et al. Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 134: 28-37.
- [16] 钱骥, 孙利民, 蒋永. 高强钢丝断裂声发射试验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(4): 54-59.
Qian Ji, Sun Limin, Jiang Yong. Acoustic emission tests for highstrength wire breakage[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(4): 54-59.
- [17] 郑修麟. 工程材料力学行为[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.