DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0785-08

基于小波的蜂窝板面超高速撞击声发射信号损伤特征提取*

刘 源,庞宝君,迟润强,曹武雄,张志远
(哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:为了通过超高速撞击声发射信号识别蜂窝结构受空间碎片撞击后的损伤状态,提出一种基于小波的损伤特征提取方法。采用超高速撞击声发射技术,以铝合金蜂窝板为研究对象,通过超高速撞击实验获取实验信号。分析超高速撞击声发射信号的时频特征及板波模态等特征,采用 Daubechies 小波变换将信号中模态分离,根据小波系数计算各尺度小波能量分数及小波能量熵特征,分析各特征参数与损伤间的关系,并通过 Kruskal-Wallis 检验方法验证各特征值对损伤识别的贡献。结果表明:小波能量分数和小波能量熵具有一定的损伤模式分类能力;250 kHz 以上的小波能量分数具有良好的损伤模式分类能力;非超声部分的低频信号对损伤识别存在干扰。

关键词:超高速撞击;声发射;小波变换;蜂窝板;损伤模式;Kruskal-Wallis 检验
中图分类号:O384 **国标学科代码**:1303530 **文献标志码**:A

空间碎片对大型航天器长期在轨安全运行构成严重威胁[1],其中毫米级别的空间碎片威胁最大,因为其体积小难以通过观测手段获知其准确运行轨道并进行规避。为保障航天器在轨安全运行,人们提出一种能够实现对空间碎片超高速撞击事件进行感知的系统,称为在轨感知系统,主要具有感知事件发生、撞击源定位及损伤模式识别等能力,其中损伤模式识别是目前研究的重点和难点。研究表明,基于声发射技术的在轨感知系统具有较好的可实现性及较高的定位能力。

在国际上,开发了 LAD-C(由气凝胶、PVDF 薄膜构成的撞击源定位系统)、DIDS(由声发射、超声、加速度传感器组成无线传感器网络的航天器健康监测系统)、MDD(基于声发射技术的空间碎片探测系统)等基于声发射技术的在轨感知系统[2-4]。

在我国,也针对多种典型航天器结构受超高速撞击在轨感知技术进行研究,开发了多种超高速撞击源定位技术,并针对平板结构初步提出了超高速撞击损伤模式识别方法[5-8]。

蜂窝板由双层蒙皮、黏合剂层和蜂窝芯构成,主要特点是质量轻、比强度和比刚度高、隔热性能优良,是一种典型、常用的卫星结构。对蜂窝板的超高速撞击极限特性有了相关研究[9-10],但目前针对蜂窝板受空间碎片超高速撞击的损伤模式及声发射信号特性研究较少,需要开展深入研究。

空间碎片超高速撞击在轨感知技术主要是,通过感知系统获取信号,分析信号的特征,利用信号特征识别撞击事件、定位撞击源、辨识损伤模式。由于超高速撞击过程中材料发生弹、塑性形变及相变等物理过程,产生的声发射信号包含信息复杂,根据模态声发射理论,超高速撞击声发射信号是由多个模态、较宽频域的板波组成。因此,难以通过对个别信号特征分析得出靶板的损伤模式。尤其是在蜂窝板结构中,信号受蜂窝芯和黏合剂层的影响,传播规律与平板中有较大区别。

为了通过声发射信号识别蜂窝板面上的损伤模式,需在实验的基础上,设计和优选特征参数,合理建立模式识别模型。超高速撞击声发射是一种非平稳信号,小波分析具有较好的时频局部化性质,可以实现这种非平稳信号的时频分析。

* **收稿日期**:2016-01-20;**修回日期**:2016-04-24
基金项目:空间碎片专项十二五项目;中央高校基本科研业务费专项项目(HIT. NSRIF. 2015029)
第一作者:刘 源(1987—),男,博士研究生;**通信作者**:迟润强,chirq@hit.edu.cn。

研究蜂窝板上的超高速撞击声发射信号的特征参数，需通过超高速撞击实验获取声发射信号，分析信号的时频及模态特征，本文中提出一类基于小波变换的特征参数，并通过非参数检验方式，验证各个参数对损伤模式识别的分类能力。

1 损伤特征提取方法

为实现损伤模式识别，需首先提出与损伤模式相关的各特征参数，称为损伤特征。研究表明，与薄平板中相似，在蜂窝板中声发射信号的衰减仍满足指数衰减规律，且模态的基本特征相近[11]，其传播速度略低于同厚度平板的波速[12]。因此，与平板上具有相似规律，蜂窝板的制作工艺和结构参数对声发射信号有一定扰动。根据铝合金平板中超高速撞击声发射信号的研究可知，它包含多个分布于较宽的频谱范围的板波模态[13-14]。由于超高速撞击声发射信号各个模态、频率的分量衰减特征不同，在传播过程中各分量是以一定规律各自变化的。假设在板面上的信号为 $f(d)$，则：

$$f(d)=\sum_{i=1}^{m} f_i(d) \tag{1}$$

式中：m 为分量的个数，d 为传感器距离信号源的距离，$f_i(d)$ 为单一频率、模态的分量。

小波变换是时间频率的局部化分析，它通过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化，能够自动适应时频信号分析的要求，从而可聚焦到信号的任意细节。假设数据采集系统在距离撞击源位置 d' 处采集信号序列 $f(n)$，n 为信号中采样点的数量，采用小波变换可以对信号进行 N 层分解。第 i 层分解的系数进行重构，可得到高频重构系数 $D_i(n)$ 和低频重构系数 $A_i(n)$，则信号序列 $f(n)$ 可以表示为各个重构系数之和：

$$f(n)=D_1(n)+A_1(n)=\sum_{i=1}^{j} D_j(n)+A_j(n)=\sum_{i=1}^{N+1} D_i(n) \tag{2}$$

重构信号将信号序列 $f(n)$ 分解为频谱范围在 $[0,f_s/2^N)$、$[f_s/2^N,f_s/2^{N-1})$、…、$[f_s/2^N,f_s]$ 的 $N+1$ 个尺度，通过这种方法可以将信号重构为不同频段上的信号分量，对低频信号能量集中部分进行细分。每个尺度下信号的能量可用小波系数平方和表示：

$$E_i=\sum |D_i(n)|^2 \qquad i=1,2,\cdots,N+1 \tag{3}$$

信号的总能量记为 $f(n)$ 的能量：

$$E=\sum |f(n)|^2 \tag{4}$$

各频带能量 E_i 在总能量中占有的分数为：

$$P_i=E_i/E \tag{5}$$

为了分析有效信号的信息，选取一个固定时窗，时窗的长度为 Δt，分析自到达时刻 t_0 到 $t_0+\Delta t$ 时间段内的部分小波能量熵，如图 1 所示。时窗长度即为传感器距离撞击源最远时，超高速撞击声发射信号中最快和最慢分量到达传感器的时差为：

$$\Delta t=L\left(\frac{1}{v_{\min}}-\frac{1}{v_{\max}}\right) \tag{6}$$

式中：L 为信号最长传输距离，$v_{\min}$ 为最慢速度，$v_{\max}$ 为最快速度。

由于蜂窝板是各向异性材料，其小波分解后各尺度的能量比是随着传播方向和距离改变的。为了综合评价这种变化，根据 Shannon 理论，采用小波能量熵[15]表征信号各尺度能量分布的不确定度。对固定时窗内的超高速撞击声发射信号进行小波分解，各尺度的能量分数 P_i 时窗内的小波能量熵为：

$$H=-\sum_{i=1}^{N+1} P_i\log_2 P_i \tag{7}$$

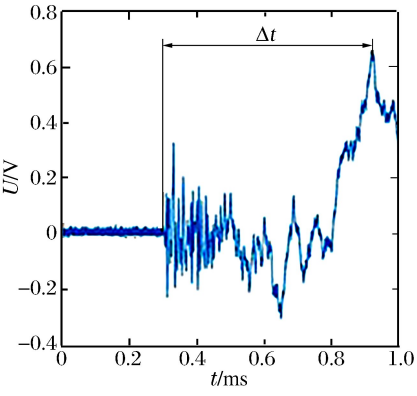

图 1 时间窗选取示意图

Fig. 1 Schematic diagram of time window selection

2　超高速撞击实验

蜂窝板尺寸为 600 mm×600 mm，前后蒙皮面板的厚度为 0.8 mm，铝蜂窝芯的高度为 20 mm，基本结构为边长为 4 mm 的正六边形，蜂窝芯厚度 0.025 mm，蒙皮面板及蜂窝芯的材料均为 5A06 铝合金。传感器安装在蜂窝板后蒙皮面板上，如图 2 所示，以板面中心为原点，各个传感器顺时针排列，传感器 1～8 距离板中心的距离分别为 240、170、210、200、310、220、260、150 mm，在前蒙皮面板的正中心装置一片 100 mm×100 mm 的 PVDF 传感器，用于测量弹丸到达蜂窝板面的时间。

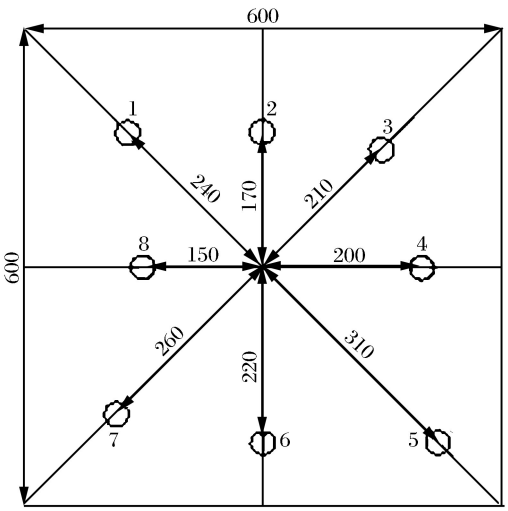

图 2 传感器装置示意图

Fig. 2 Sketch of sensor positions on target plate

采用∅3.2 mm 的 2017 铝合金球形弹丸，利用二级轻气炮发射弹丸撞击蜂窝板试件。获得有效信号的超高速撞击实验 42 次，蜂窝板面上的超高速撞击声发射信号 336 组。采集系统的采集频率为 20 MHz，采集时间为 1 ms。

在工程上，蒙皮后面板是否被击穿，是判断安装于航天器内部的部组件是否受到空间碎片撞击威胁及是否影响航天器在轨安全运行性的重要判据之一，为此将蜂窝板后面板损伤模式分为成坑和穿孔两类。

(1)成坑：蜂窝板后蒙皮面板被撞击损伤后其撞击位置不透光，进一步又可细分为背侧未弯曲、有较小程度弯曲、发生层裂、有较少材料剥落等几种损伤模式；

(2)穿孔：蜂窝板后蒙皮面板被撞击损伤后撞击位置透光，进一步又可细分为靶板背面有较大剥落、撞击坑与剥落相遇造成的孔洞等几种损伤模式，为了安全起见将临界情况也归入该类。

蜂窝板的撞击极限曲线，如图 3 所示。图 3 表明，在上述损伤定义下，蜂窝板后面板产生穿孔损伤的临界条件。通过超高速撞击实验测速系统，获得弹丸与蜂窝板撞击前的飞行速度。

根据图 3 中弹道极限曲线可以推测损伤情况，比对蜂窝板的实际观察得知，形成成坑损伤 10 次、穿孔损伤 31 次、临界穿孔 1 次(其中将成坑记为 0，穿孔记为 1)。典型成坑、穿孔损伤工况如图 4 所示。

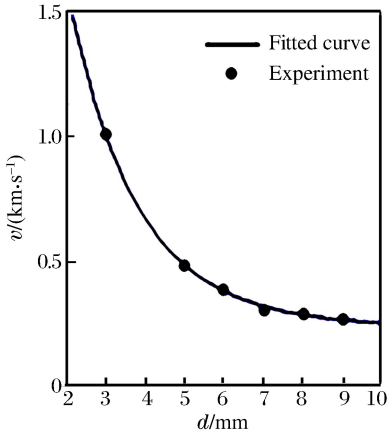

图 3 蜂窝板弹道极限曲线

Fig. 3 Ballistic limit curve of honeycomb core sandwich

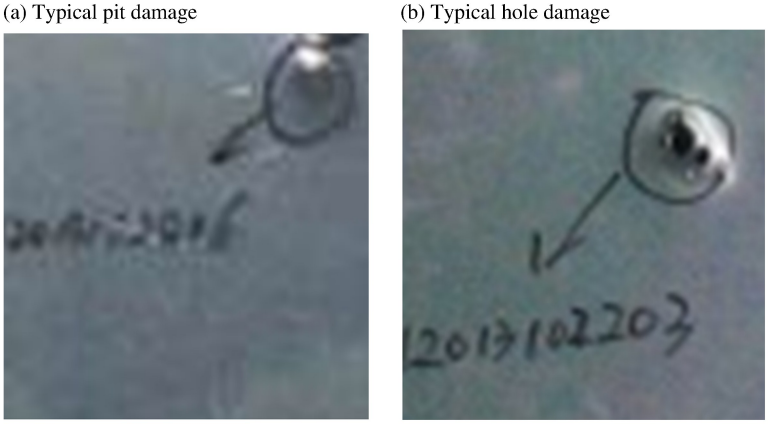

图 4 蜂窝板后蒙皮面板超高速撞击损伤情况

Fig. 4 Hypervelocity impact damage of back panels of honeycomb core sandwich

3 信号特征分析

信号在蜂窝板面的传播与平板上有一定差异，由于蜂窝芯及黏合剂的影响，导致信号的衰减、波速、频谱等特征发生改变，因此先分析超高速撞击声发射信号的时频及模态特征。

3.1 时域特征

图 5 为蜂窝板受撞击产生成坑和穿孔损伤时超高速撞击声发射信号波形，可知信号由传播速度较快的超声部分和尾部的非超声部分构成。为分析超声部分的信号时域特征，设计截止频率为 20 kHz 的高通滤波器，去掉非超声的部分，滤波结果如图 6 所示。经统计，传播距离在 100～350 mm 时，信号头部的超声部分幅值均小于 0.5 V，其幅值远低于同撞击工况时铝合金平薄板中的信号幅值[16]。这是由于黏合剂层对声发射信号具有阻尼效应，蜂窝壁也会造成漏波，这些都会增大结构的声阻抗。通过分析全部 336 组信号，发现各信号峰值与撞击载荷、传播距离之间没有直接对应关系，这与第 1 节中对信号能量的分析吻合。

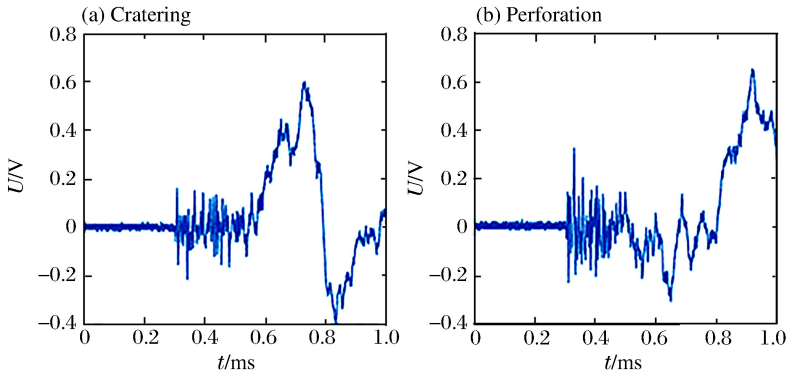

图 5 蜂窝板的超高速撞击声发射信号波形

Fig. 5 Oscillograph of hypervelocity impact acoustic emission signal in honeycomb core sandwich

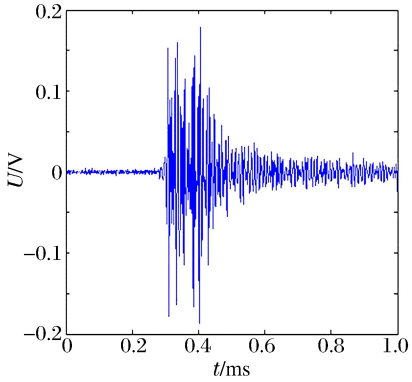

图 6 高通滤波信号

Fig. 6 Signal by high-pass filtering

从衰减和波速两方面考虑，蜂窝板均具有各向异性性[11]：各个方向上信号仍满足指数衰减，衰减系数在 0.06～0.12 范围内变化，信号的衰减速度远大于平板中情况；超高速撞击声发射信号中 160 kHz 的最快 S0 模态波速约为 5 km/s，50 kHz 的 A0 模态波速范围为 600～800 m/s，各模态速度随方向的变化而变化，速度大小与同厚度平板中波速接近[11]。这说明，蜂窝板中信号幅值受传播方向、传播距离等多方面因素影响，难以度量它与信源的关系；鉴于蜂窝板中声发射信号特定频率范围的波速与平板中相近，因此可以采用平板中的频散曲线分析蜂窝板中超高速撞击声发射信号的模态信息。

3.2 板波模态特征

分析全部数据可知，蜂窝板面超高速撞击声发射信号分布的频谱范围在 360 kHz 以下较宽的频域。使用 Gabor 小波包变换，可得信号的时间、频率关系，如图 7 所示，主要能量分布在 50～350 kHz 范围。导入 S0 及 A0 模态的频散曲线，可以发现蜂窝板中的超高速撞击声发射信号小波包系数与该频散曲线基本吻合，说明信号中包含 S0 和 A0 两种模态，其中 S0 模态的中心频率约为 150 kHz，A0 模态的中心频率约为 100 kHz。

由于超高速撞击声发射信号中各模态及其中心频率仅与板型有关[8]，因此各个工况下信号的模态特征是相近的。

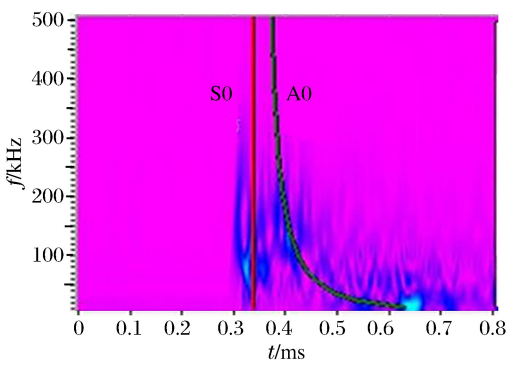

图 7 信号模态

Fig. 7 Modal acoustic emission of signal

4　声发射信号特征与损伤的关系

4.1　小波能量分数

由于采样率设置为 20 MHz，远高于信号的最高频率，直接进行小波变换会产生较多不包含有效信息的高频分量，且计算效率较低。因此通过信号重采样使其降为 1 MHz，此时仍满足奈奎斯特采样率。采用 Daubechies 小波变换进行 4 层分解，得到分解后小波各尺度的频带，见表 1。

表 1　信号频带划分

Table 1　Frequency band division of signal

尺度	小波系数	频带范围/kHz
1	$D_1(n)$	0～62.5
2	$D_2(n)$	62.5～125
3	$D_3(n)$	125～250
4	$D_4(n)$	250～500
5	$D_5(n)$	500～1 000

根据式(3)～(5)得到全部 336 组实验数据各小波各尺度的能量分数。根据图 3 可知，固定弹丸尺寸的前提下，是否形成穿孔只与弹丸的速度有关。各尺度小波能量分数与弹丸速度的关系，如图 8 所示。

由图 8 可知：$D_1(n)$的能量分数始终在一个值附近变化，与弹丸速度关系不明显，根据图 7 中的小波系数可知，该尺度主要由信号尾部的非超声部分构成；$D_2(n)$的能量分数在 1～1.5k m/s 速度范围间较高，并且低速情况的分布范围高于高速情况；$D_3(n)$的能量分数以 1.5 km/s 为中心左右对称分布，根据图 7 中的小波系数可知，该尺度包含了信号超声段频率的中心部分，是信号的主要成分；$D_4(n)$、$D_5(n)$均以 1.5 km/s 为中心分布，随着频段变高，超高速撞击能量分数逐渐增大，低速部分逐渐减小，该规律明显适用于 $D_2(n)$～$D_5(n)$，与正态分布较接近。

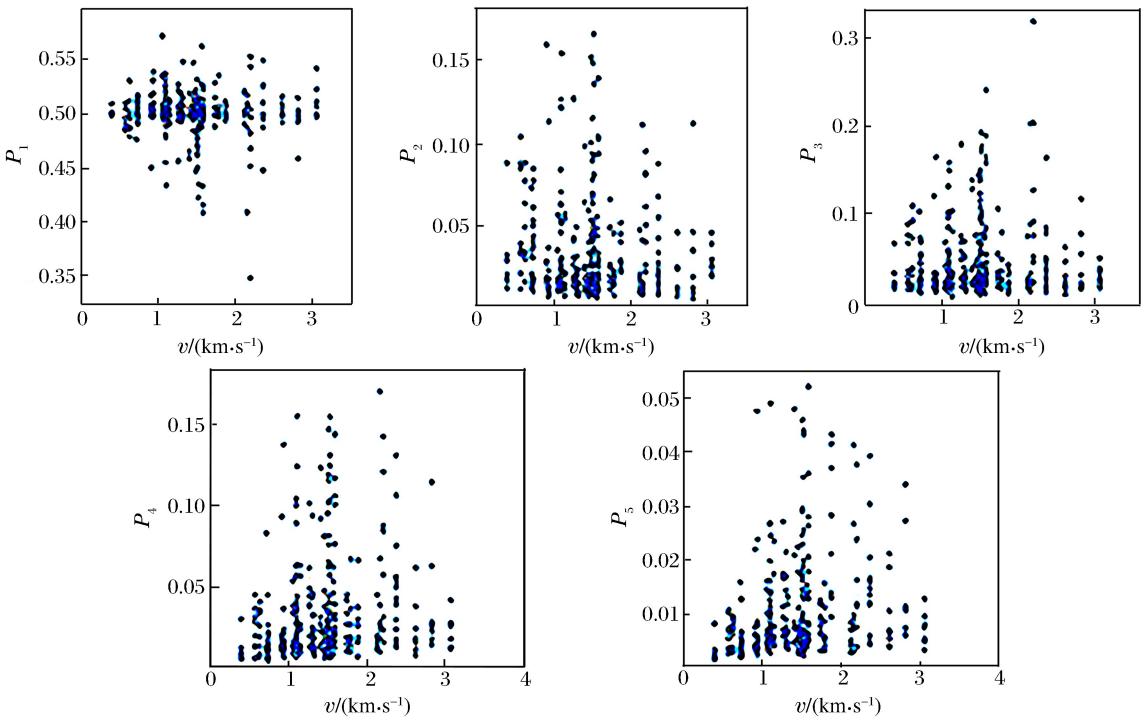

图 8　各频带能量分数与弹丸速度关系

Fig. 8　Relationship between energy fraction of every frequency band and projectile velocity

4.2　小波能量熵

重采样信号，使其采样率降至 1 MHz，并根据式(6)选取时间窗，使信号中包含 S0 和 A0 模态中完整超声部分，时间窗长度为 650 μs。采用 Daubechies 小波变换对时窗内信号进行 4 层分解，得到 5 个尺度的重构信号，由式(7)得到全部 336 组实验数据的小波能量熵 H。小波能量熵与弹丸速度的关系，

如图 9 所示。由图 9 可知:小波能量熵随着弹丸速度变化中心对称分布,在 1～2.2 km/s范围内变化范围最大;当弹丸为 1 km/s 以下速度时,形成成坑损伤,小波能量熵的范围随速度的增加逐渐变大,说明声发射信源的强度不断增加,振动的复杂程度也不断增加;当弹丸速度大于 2.2 km/s 时,部分能量以弹丸剩余动能的形式离开蒙皮面板,导致声发射信源强度降低,振动的复杂程度也降低了。

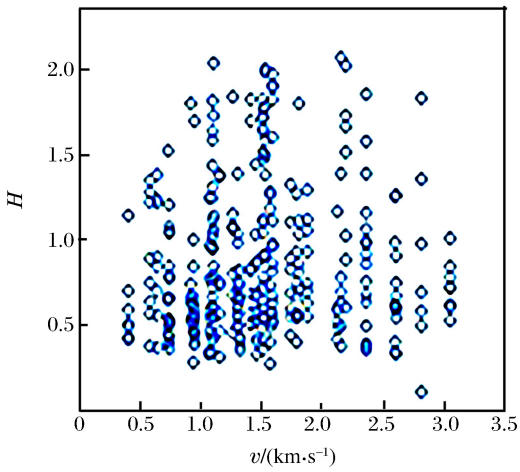

图 9 小波能量熵与弹丸速度关系

Fig. 9 Relationship between wavelet energy entropy and projectile velocity

5 Kruskal-Wallis 检验

为评价 $D_1(n)$～$D_5(n)$及 H 共 6 个参数在损伤模式识别中的作用,优选损伤参数组合,使被选择的参数既能体现相同类别的相似性,又能体现不同类别的差异性,采用 Kruskal-Wallis 检验对参数进行评价。

Kruskal-Wallis 检验忽略样本自身的大小,用样本的标号表示,选取单个特征中每个类别的编号均值,通过比较每个类别平均值之间的距离评价该样本对分类的贡献,即评价某个特征参数分类能力的相对大小。假设总共 N 个样本,分为 K 类,每类包含 N_K个样本,计算的基本步骤为:(1)列出全部样本的参数值$\{x_i, i=1,2,\cdots,N\}$;(2)按照参数值的大小对样本排序;(3)计算每类样本编号的平均值$\{R_1, R_2, \cdots, R_K\}$;(4)计算秩和统计量 κ_{KW}。

κ_{KW}为组间平方和与全体样本秩方差的商:

$$\kappa_{KW}=\frac{\sum_{i=1}^{K}N_i\left(\frac{R_i}{N_i}-\frac{N+1}{2}\right)^2}{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{N_j}\left(R_{ij}-\frac{N+1}{2}\right)^2}=\frac{12}{N(N+1)}\sum_{i=1}^{K}\frac{R_i^2}{N_i}-3(N+1) \tag{8}$$

对这 6 个参数分别进行 Kruskal-Wallis 检验,其中 κ_{KW}越大、越符合正态分布,分类能力越好,越适合作为损伤识别的特征参数,结果见表 2。其中:$D_4(n)$、$D_5(n)$两个参数的渐进显著性指标为 0,符合正态分布,κ_{KW}最大,最适合作为损伤特征参数;$D_2(n)$、$D_3(n)$、H 三个参数的显著性水平均约为 0.07,κ_{KW}在 3.2 附近,分类能力越好;$D_1(n)$的显著性水平为 0.735,不服从正态分布,κ_{KW}最小,不适宜作为损伤特征参数,根据图 7,信号尾部非超声振动能量大,掩盖了 50 kHz 附近信号的 S0 及 A0 模态,这说明超高速撞击声发射信号尾部的非超声振动信号与损伤模式无关。

表 2 Kruskal-Wallis 检验结果

Table 2 Results of Kruskal-Wallis test

参数	κ_{KW}	显著性水平
$D_1(n)$	0.115	0.735
$D_2(n)$	3.206	0.073
$D_3(n)$	3.304	0.069
$D_4(n)$	24.815	0
$D_5(n)$	35.672	0
H	3.268	0.071

为验证该结论,计算 $D_2(n)$～$D_5(n)$的小波能量熵,其 κ_{KW}为 4.627,显著性水平为 0.031,满足正态分布,分类能力提高了。这也说明,低频部分影响损伤模式分类能力,主要是由尾部的非超声振动部分信号引起的。

6 结　论

采用超高速撞击实验获取信号，根据工程需求提出了成坑、穿孔的损伤模式，分析了超高速撞击声发射信号基本的时频特征规律，并通过近似手段识别了其板波模态特征，提出了两类基于小波的损伤特征参数，分析了它与损伤模式的关系，最后采用 Kruskal-Wallis 检验评价了这两种特征参数的损伤模式分类能力。结论如下：

(1)蜂窝板面超高速撞击声发射信号的小波能量分数具有一定损伤模式分类能力，可以作为判别成坑或穿孔的损伤模式的特征参量，当信号的采样率为 1 MHz 时，经 Daubechies 小波 4 层分解得到 5 个频域尺度的小波能量分数，频域越高，对损伤模式分类的能力越强；

(2)蜂窝板面超高速撞击声发射信号尾部低频振动与损伤无关，并且包含能量较大，干扰损伤模式分类；

(3)蜂窝板面超高速撞击声发射信号的小波能量熵具有一定损伤模式分类能力，去掉信号的低频分量后小波能量熵的识别能力有所提升。

在未来的工作中，应继续深入探索、研究多种典型声发射特征参数，选择并建立合理的损伤模式识别模型，识别蜂窝板面上的损伤模式，并进一步深度探索蜂窝板损伤的具体模式及损伤程度。

参考文献：

[1] Upper stage explosion places LEO satellites at risk[J/OL]. Orbital Debris Quarterly News, 2013,17(1):8[2016-04-24]. https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv17i1.pdf.

[2] Liou J C, Giovane F, Corsaro R, et al. LAD-C: A large area debris collector on the ISS[C]// 36th COSPAR Scientific Assembly. Beijing, China, 2006:36.

[3] Prosser W H, Madaras E I. Distributed impact detector system (DIDS) health monitoring system evaluation[R]. Hampton: Langley Research Center, 2010.

[4] Spencer G, Schäfer F, Tanaka M, et al. Design and initial calibration of micrometeoroid space debris detector (MDD)[C]// Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris. Darmstadt, Germany: ESA, 2005:18-20.

[5] 刘武刚，庞宝君，韩增尧，等. 基于小波分析技术的高速撞击声发射源定位[J]. 高技术通讯，2009,19(2):181-187.
Liu Wugang, Pang Baojun, Han Zengyao, et al. Acoustic emission detection and location for hypervelocity impacts based on wavelet transform[J]. Chinese High Technology Letters, 2009,19(2):181-187.

[6] Liu Z D, Pang B J. A method based on acoustic emission for locating debris cloud impact[C]// 4th International Conference on Experimental Mechanics. 2009:7522.

[7] 张凯，庞宝君，林敏. 碎片云撞击声发射信号能量特征小波包分析[J]. 振动与冲击，2012,31(12):125-128.
Zhang Kai, Pang Baojun, Lin Min. Wavelet packet analysis for acoustic emission signals caused by debris cloud impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(12):125-128.

[8] 熊秋鹏. 基于神经网络技术的空间碎片损伤模式识别研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2012.

[9] Taylar E M, Glanville J P, Clegg R A, et al. Hypervelocity impact on spacecraft honeycomb: Hydrocode simulation and damage laws[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29(1):691-702.

[10] Nia A A, Razavi S B, Majzoobi H H. Ballistic limit determination of aluminum honeycombs: Experimental study [J]. Materials Science and Engineering A, 2008,488(1):273-280.

[11] Liu Y, Pang B J, Jia B, et al. Modal acoustic emission based location method in honeycomb core sandwich structure[C]// Sixth European Conference on Space Debris. 2013:183.

[12] Chakraborty N, Rathod V T, Mahapatra D R, et al. Guided wave based detection of damage in honeycomb core sandwich structures[J]. NDT & E International, 2012,47(7):27-33.

[13] 唐颀. 高速撞击板波特性与声发射空间碎片在轨感知技术[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2008.

[14] 刘武刚. 基于声发射的空间碎片在轨撞击感知技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2008.

[15] Rosso O A, Blanco S, Yordanova J, et al. Wavelet entropy: A new tool for analysis of short duration brain electrical signals[J]. Journal of Neurosci Methods, 2001,105(1):65-75.

[16] 向明江.屏舱声发射信号耦合对在轨感知系统定位的影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

Wavelet transformation based damage feature extraction of hypervelocity impact acoustic emission signal on honeycomb core sandwich

Liu Yuan, Pang Baojun, Chi Runqiang, Cao Wuxiong, Zhang Zhiyuan

(*Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *Heilongjiang, China*)

Abstract: In this work, a hypervelocity impact acoustic emission signal feature extraction method was proposed to detect damages experienced by the honeycomb core sandwich structure impacted by space debris by using hypervelocity impact acoustic emission signals. Varieties of hypervelocity impact acoustic emission signals were obtained through experiments based on the hypervelocity impact acoustic emission on the aluminum honeycomb core sandwich, their time-frequencies and the modes of the waves on the honeycomb plate were analyzed, the modes of the signals were differentiated, and the wavelet energy fraction and entropy were calculated, both by using the Daubechies wavelet decomposition, with the relationship between these parameters and the damage delineated and the contribution of each parameter gauged by the Kruskal-Wallis test. The results show that, to a certain degree, the wavelet energy fraction and the entropy of information are able to identify the damage patterns. Specifically, the energy fraction with a frequency above 250 kHz exhibits a better identifying capability, while signals of a lower frequency out of the ultrasonic range exert disturbance on the damage identification.

Keywords: hypervelocity impact; acoustic emission; wavelet transformation; honeycomb core sandwich; damage pattern; Kruskal-Wallis test

(责任编辑 丁 峰)