

基于小波分析技术的高速撞击声发射源定位^①

刘武刚^② * ** 庞宝君 * 韩增尧 *** 孙 飞 * **

(* 哈尔滨工业大学 哈尔滨 150080)

(** 北京强度环境研究所 北京 100076)

(*** 中国空间技术研究院 北京 100094)

摘 要 针对在轨航天器遭受空间碎片撞击损伤的定位问题,利用二级轻气炮发射铝弹丸撞击铝板来模拟空间碎片对航天器结构的损伤;通过声发射传感器实时记录结构中的时域波形信号,结合板波的频散特性,分析了高速撞击穿孔损伤时波动在铝板中的传播模式。基于小波时频分析技术研究了高速撞击损伤的定位问题,分析了波速对定位精度的影响。结果表明,基于小波分析技术的高速撞击声发射源定位能够满足撞击损伤的定位要求,为解决航天器在轨遭受空间碎片撞击的损伤定位提供了一种新的方法。

关键词 空间碎片, 声发射, 高速撞击, 源定位, 小波分析

0 引 言

随着航天活动的迅速发展,人们越来越关注空间碎片对航天活动构成的威胁^[1-3],特别是对载人航天器的威胁。要保障航天员和航天器的安全,必须要测出航天器被碎片撞击损伤的部位和采取相应的应急措施。为此,需在载人航天器(如载人飞船)或长期在轨运行航天器的结构或部件上安装声发射传感器,当空间碎片撞击时,可以通过基于声发射技术的感知系统所记录的数据分析、判断、辨识撞击的位置和损伤特征,分析载人飞船及空间站等航天器受撞击的严重度,制定航天器受撞击后运行和航天员逃生方案。

目前对声发射研究主要集中在结构使用中出现损伤的监测^[4-6],如复合材料损伤和管道的泄漏损伤定位监测。从目前公开的文献来看,有开展撞击损伤声发射特征的研究^[7-9],但对超高速撞击损伤的定位研究并不多见。现有的少量报道主要通过实验室二级轻气炮试验获得撞击产生的声发射波动信号,利用传统的第一次门槛跨越技术得到时差来进行撞击的定位^[10]。如德国的 Schafer 等利用声发射传感器采集了二级轻气炮发射铝弹丸撞击铝板和复合材料板产生的声发射信号,用第一次过门槛定位方法

研究了撞击定位问题,得到了定位的结果。国内刘武刚等利用声发射共振型和宽带传感器采集了铝板的高速撞击声发射信号,进行了过门槛损伤源定位研究^[11,12]。

波源处的声发射波形,一般为宽频带尖脉冲,包含着波源的定量信息。在高速撞击声发射监测中,由于介质中波的传播特性和传感器频响特性的影响,加上高速撞击过程的复杂性,所测得的信号波形会变得非常复杂,与源波形有一定程度的不同。主要影响因素有波前延伸、热效应以及波的反射、折射、衍射、频散和波型转换等^[6,13-16]。这些因素的综合作用可引起波的衰减和波形的畸变。在采用第一次门槛跨越技术进行声发射源定位时,由于上述原因使得各通道不是在同一相位点上跨越门槛,会引起较大的误差。基于模态声发射理论,在实验室利用小波分析技术而实现的声发射源定位是目前研究比较多的定位方法^[17-19],可以减少由于第一次门槛跨越技术定位造成的误差,但在高速撞击损伤源定位上的还没有见到应用研究工作。本文针对在轨运行航天器遭受空间碎片撞击损伤的源定位问题,利用二级轻气炮发射铝弹丸撞击铝板来模拟空间碎片对航天器结构的损伤,通过声发射传感器实时记录结构中的时域波形信号,基于小波分析技术开展定位的精度和有效性技术研究。

① 空间碎片专项基金(KJSP2005-0206, 07202)资助项目。

② 男,1975年生,博士生,高级工程师;研究方向:航天器结构强度与损伤检测;联系人,E-mail: liuwugang@spacechina.com
(收稿日期:2008-01-21)

1 三角形声发射源定位模型

声源的定位方法可分为两大类,即区域定位法和点定位法(也称为时差定位法)。区域定位方法对传感器的安装没有特殊的要求,即不必按一定的阵列形式布置,声源的位置表示为一区域,定位精度不高。点定位方法分为线定位和面定位,面定位又可分为三角形定位和矩形定位等。这些方法都是根据声源信号到达同一阵列内不同传感器时所形成的一组时差,经过几何关系的计算确定声源的位置。由于三角形定位算法具有传感器位置可任意布置,适合应用在结构复杂的情况^[20]。本文采用任意三角形定位阵列进行撞击源的定位。设有三个传感器位于 $S_0(0,0)$, $S_1(x_1, y_1)$ 和 $S_2(x_2, y_2)$, 组成任意三角形阵列,如图 1 所示。

声源位于 $P(x, y)$, 距离 S_0 为 r , 分别以 $S_0(0,0)$, $S_1(x_1, y_1)$ 和 $S_2(x_2, y_2)$ 为圆心,以 $r + \delta_1$ 和 $r + \delta_2$ 为半径任一交于点 P , 则有

$$\delta_1 = PS_1 - PS_0 = \Delta t_{10}v \quad (1)$$

$$\delta_2 = PS_2 - PS_0 = \Delta t_{20}v \quad (2)$$

式中, v 为波速; Δt_{10} 、 Δt_{20} 为 Gabor 小波时频分析得到单一频率的模式波动时间。

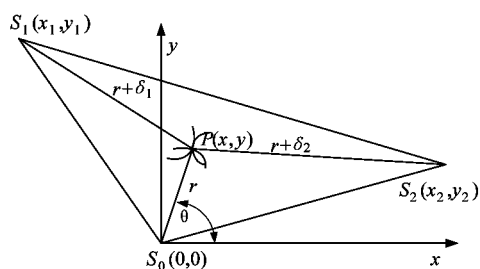


图 1 任意三角形定位方法

由图 1 的几何关系可得:

$$r = \frac{A_1}{2(x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1)} = \frac{A_2}{2(x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2)} \quad (3)$$

其中: $A_1 = x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2$; $A_2 = x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2$ 。

令 $K = \frac{(A_2 \delta_1 - A_1 \delta_2)}{B}$, $\tan \phi = \frac{A_1 y_2 - A_2 y_1}{A_1 x_2 - A_2 x_1}$

$B = [(A_1 x_2 - A_2 x_1)^2 + (A_1 y_2 - A_2 y_1)^2]^{1/2}$, 从而得到: $\cos(\theta - \phi) = K$; $\cos^{-1} |K| = \pm(\theta - \phi)$ 。

从 x_1, y_1, x_2, y_2 和时差 $\Delta t_{10}, \Delta t_{20}$ 就可确定 $\tan \phi$ 。

在 $-\pi$ 到 π 范围 B 始终是正。因此, K 可能是正或负, 则 $\cos(\theta - \phi) = K$ 有两个解。但 θ 的值必须使得 r 取正值。此时由 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$, 可以确定撞击源的位置 $P(x, y)$ 。

2 声发射波动小波变换

声发射信号是包含许多不同频率成分和波型的声波信号, 为了对高速撞击产生的声发射信号进行波动分析, 只取有限频率和单个方向的波动进行分析。假设结构中沿 x 方向传播的某单位幅度声发射信号, 由 ω_1 和 ω_2 两种频率导波在结构中的传播特性, 即已知波数随频率和变化关系 $k(\omega)$ 。则该声发射信号 $u(x, t)$ 可表示为:

$$u(x, t) = e^{-i(k(\omega_1)x - \omega_1 t)} + e^{-i(k(\omega_2)x - \omega_2 t)} \quad (4)$$

式中: $k(\omega_1), k(\omega_2)$ 分别为频率 ω_1, ω_2 处该模式导波的波数。

令

$$(k(\omega_1) + k(\omega_2))/2 = k(\omega)$$

$$(\omega_1 + \omega_2)/2 = \omega$$

$$(k(\omega_1) - k(\omega_2))/2 = \Delta k$$

$$(\omega_1 - \omega_2)/2 = \Delta \omega$$

在频率 ω 处, 该模式导波的波数为 $k(\omega)$, 则式(4)可改写为:

$$u(x, t) = 2 \cos(\Delta kx - \Delta \omega t) \times e^{-i(k(\omega)x - \omega t)} \quad (5)$$

声发射信号 $u(x, t)$ 的连续小波变换为 $WT_f(a, b)$, 则

$$WT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) \Psi' \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

选高斯函数为小波基函数波^[21]:

$$\Psi_g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp \left[-(\omega_0 t / \gamma)^2 / 2 + i \omega_0 t \right] \quad (7)$$

其傅立叶变换为:

$$\hat{\Psi}_g(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi\gamma/\omega_0}}{\sqrt{4\pi}} \exp \left[- \left(\frac{\gamma(\omega - \omega_0)}{\omega_0} \right)^2 / 2 \right] \quad (8)$$

其中: γ 和 ω_0 是正常数。令 $\omega_0 = 2\pi, \gamma = \pi \sqrt{2/\ln 2} = 5.336$ 。若 $\Delta \omega$ 足够小, 则 $\hat{\Psi}_g(a\omega_1) \approx \hat{\Psi}_g(a\omega_2) \approx \hat{\Psi}_g(a\omega_0)$, 得到小波变换的幅度为:

$$|WT_f(a, b)| = \sqrt{2a} |\hat{\Psi}_g(a\omega)| \cdot [1 + \cos(2\Delta kx - 2\Delta \omega b)]^{1/2} \quad (9)$$

将(8)式代入(9)式得:

$$|WT_f(a, b)| = \left| \frac{2\sqrt{a\pi\gamma/\omega_0}}{\sqrt{\pi}} \exp\left[\frac{\gamma(a\omega - \omega_0)}{\omega_0\sqrt{2}}\right] \right| \cdot [1 + \cos(2\Delta kx - 2\Delta\omega b)]^{1/2} \quad (10)$$

当 $a = \omega_0/\omega$ 和 $b = (\Delta k/\Delta\omega)x = x/v_g$ 时,式(10)取极大值。即在 $f = \omega/\omega_0 = 1/a$ 频率处,声发射信号小波变换幅度的峰值对应的时移 b 是该模态导波到达声发射传感器的时间。由于传统声发射源定位中声发射信号到达传感器的时间与设定阈值电压有关,影响声发射源定位的精度,而小波作为一种信号时频处理方法,对于非平稳信号的处理,具有特殊的优势。通过对声发射信号进行小波变换,使得到的声发射信号到达传感器的时间与设定阈值电压无关。

3 高速撞击试验

本文所研究的铝合金靶板为航天器常用材料 5A06,球形弹丸材料为 2A12。高速撞击试验用二级轻气炮来实现。弹丸的速度受弹丸质量的大小和气压等主要因素的影响。该撞击声发射试验在哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心进行。试验时,分别把不同直径的球形弹丸用二级轻气炮发射至一定的速度,然后在靶舱内撞击铝板。产生的声发射信号被美国泛美公司(Panametric-NDT)生产的 V182 超声传感器所采集,送到数字示波器中记录供后续分析。图 2 是 V182 进行相对校验扫频得到的频率响应曲线,分别是原始的等幅线形扫频输入信号和 V182 的相对灵敏度,可以看出相对灵敏度在 20kHz - 1.5MHz 频率范围内相当平坦。试验用铝板的尺寸为 600mm × 600mm × 5mm。整个实验模拟了主要成分为铝合金的空间碎片粒子撞击航天器表面

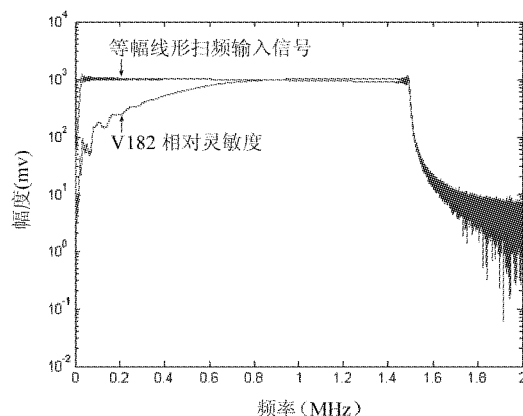
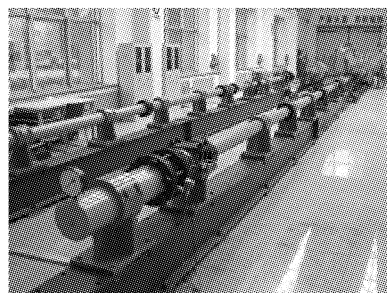
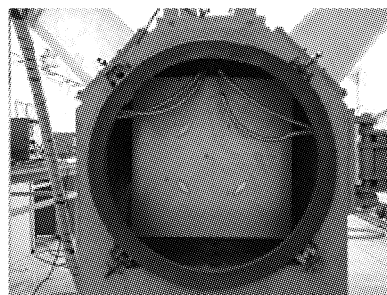


图2 V182 的频率响应曲线

的现象。弹丸速度由磁感应测速系统得到,涵盖了撞击速度 1 ~ 4km/s 的范围。在这个速度范围的撞击,靶板会出现成坑、层裂和击穿等超高速撞击的典型破坏现象。图 3 是实验设备的照片,图 3(a)是二级轻气炮,图 3(b)是实验靶件安装在靶舱中的情形。图 4 为传感器布置图。定位组中所用的三个声发射信号根据试验中的四个传感器中最先到达的选取。



(a) 二级轻气炮



(b) 靶舱及靶板

图3 超高速撞击实验设备

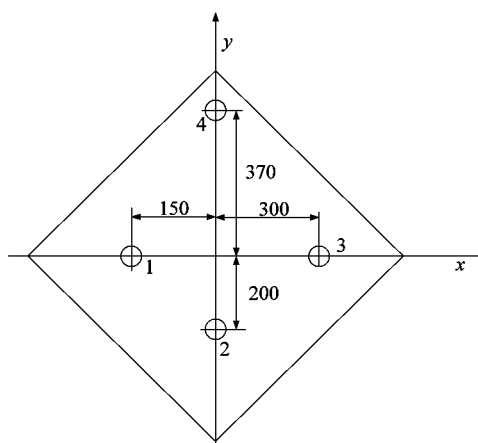


图4 传感器的布局

4 试验结果与分析

高速撞击试验的情况见表 1。

表 1 高速撞击试验情况

序号	弹丸直径 (mm)	撞击速度 (km/s)	损伤类型
1	3.23	3.333	穿孔
2	3.20	2.488	穿孔
3	3.20	2.415	穿孔

4.1 高速撞击损伤模态分析

根据第 2 小节声发射波动小波变换可以得到信号的时频能量(小波系数)分布。图 5 高速撞击试验的声发射波形,图 6 为试验用 5mm 铝板的频散曲线,图 7 为声发射时域信号及信号的能量分布图。

根据模态声发射理论,声发射波在薄板等结构中传播时,存在频散和多模态等特性,因此声发射源定位中涉及的声发射信号的到达时间和声发射信号的传播速度,应当考虑板波频散的多模态特性的影响。

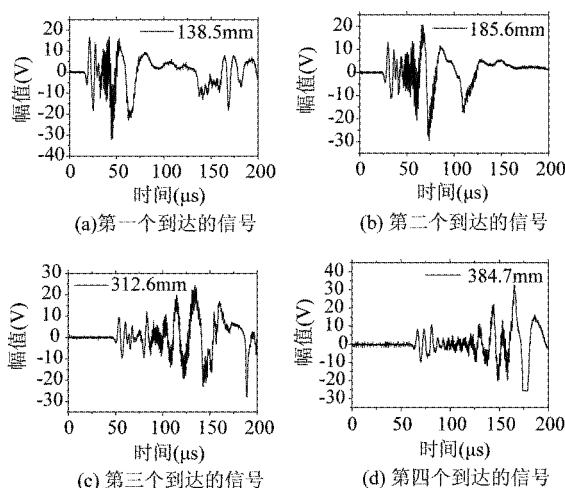


图 5 高速撞击试验的声发射波形

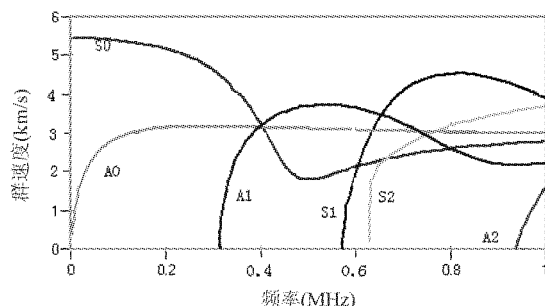


图 6 5mm 铝板的频散曲线

从图 7 可以看出,高速撞击穿孔损伤所产生的声发射信号的能量主要集中在 50kHz、160kHz、720kHz 三个频率附近,结合叠加的频散曲线,可知

这三个能量集中区分别属于波动模态的 A0、S0 和 S2 波。

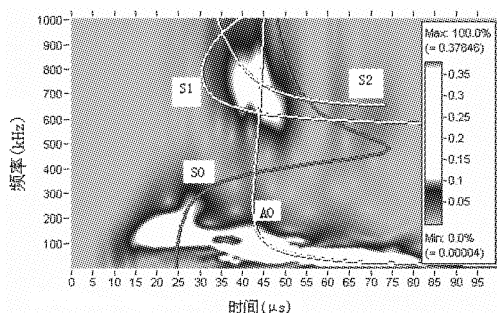


图 7 信号小波能量叠加频散曲线

4.2 小波分析定位结果

对所得到的声发射波动信号进行 Gabor 小波连续时频变换,可得信号在时频域上的能量分布,在一次定位组中的四个前后到达的声发射波动的小波变换能量分布见图 8。

从定位组中各信号的连续小波的能量分布可知,信号在 50kHz、160kHz 和 720kHz 三个频率处取得能量的最大值。720kHz 的信号小波能量分析见图 9。根据声发射信号小波变换幅度的峰值对应的时移是该模态导波到达声发射传感器的时间,可以得到计算定位所用的时差。

各次试验所得的声发射信号在 50kHz、160kHz 和 720kHz 的到达时间列于表 1。在定位算法中,所用到的波速对于指定的频率可以根据图 6 所用铝板的频散曲线得到, $v_g(50) = 2.4\text{km/s}$, $v_g(160) = 5.4\text{km/s}$, $v_g(720) = 2.2\text{km/s}$ 。

在传感器位置和弹丸质量不变而撞击速度和撞击位置改变的情况下,各次撞击经三角形定位算法计算得到撞击源的坐标见表 2。绝对误差为计算位置与实测位置之间距离的绝对值,相对误差为绝对误差与最大传感器间距的比值。可计算得相对误差小于 $\leq 5.2\%$ 。

4.3 波速对定位的影响

高速撞击的整个过程包括弹性变形、塑性变形、塑性流动和材料的气化等复杂的物理现象,目前的研究还没有适当的模型来描述^[16]。在基于小波分析的定位算法中,波速对定位结果的影响很大。高速撞击产生的声发射波动在传播过程中,由于各种因素的影响,实际的群速度相对铝板中传播的群速度存在一定的偏差。根据实测的各个传感器到达撞击源的距离和小波能量集中出现的时间,以到达时

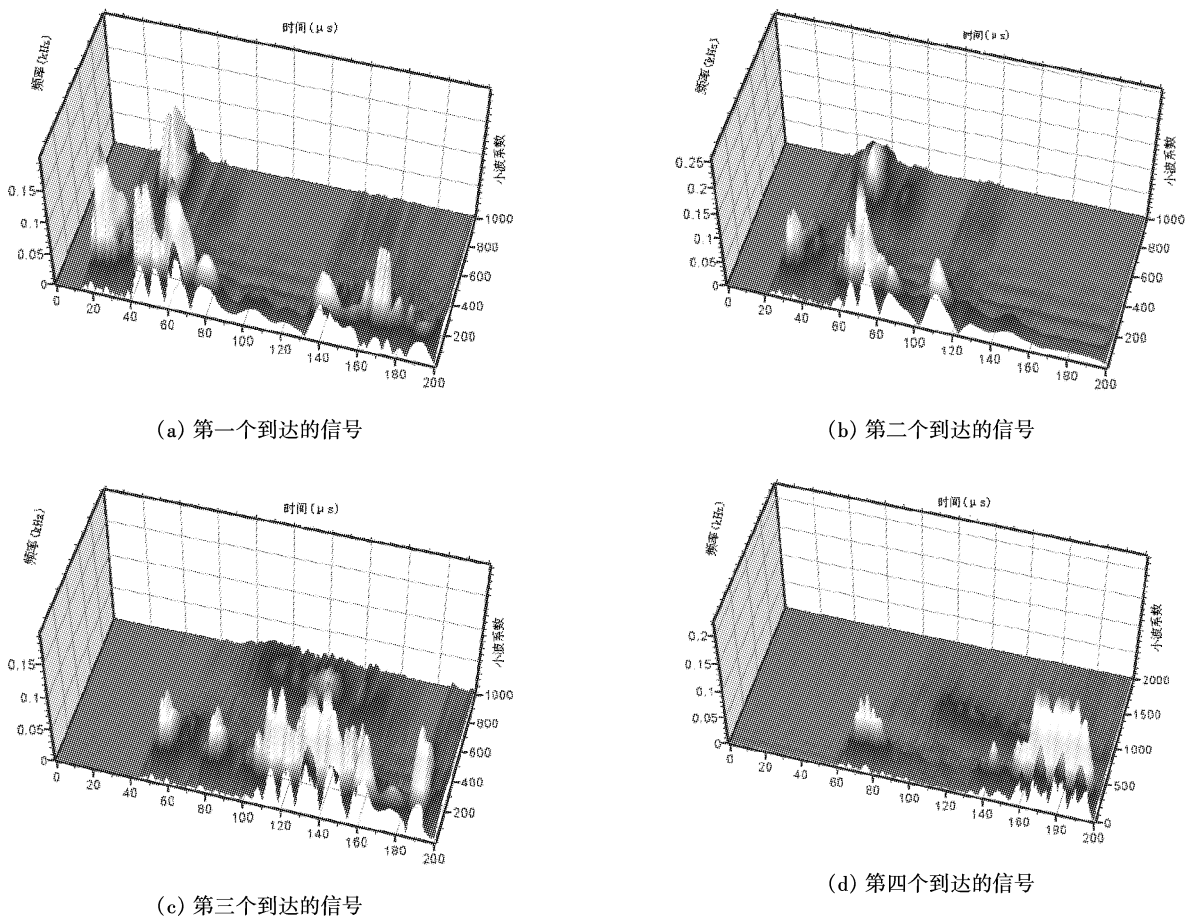


图 8 信号的小波时频能量分布

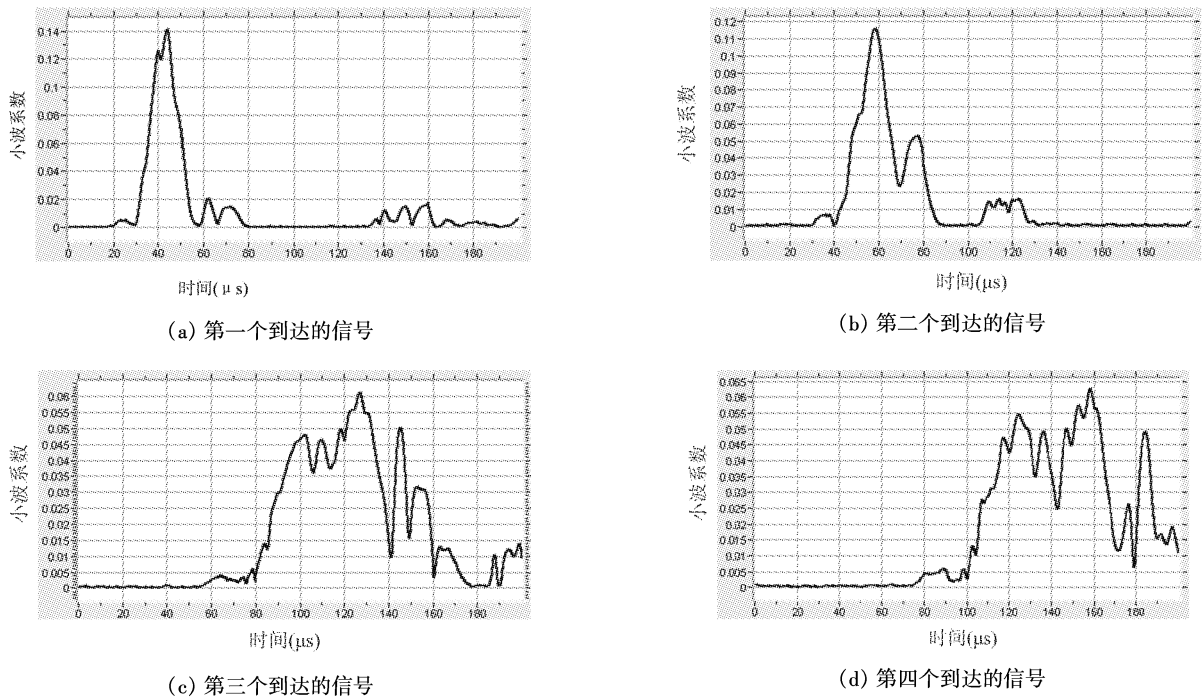


图 9 720kHz 波动信号的能量分布

间为横轴和距离为纵轴,直线的斜率即为指定频率的实际传播速度。用计算得到的速度再进行撞击源

位置的计算,定位结果列于表 3。由计算结果可以看出,定位的结果优于表 2。在表 3 中,实测得到的

50kHz 和 160kHz 低频波速基本保持不变,而 720kHz 高频波速度改变较大。根据频散曲线计算的定位结

果中,因采用指定频率的波速与实际波速存在一定偏差,导致定位的误差增大。

表 2 基于小波变换的高速撞击源定位结果

序号	频率 (kHz)	到达传感器的 时间(μ s)			计算结果 (mm)	实测结果 (mm)	波群速度 (km/s)	绝对误差 (mm)	相对误差 (%)
		1 #	2 #	3 #					
1	50	62.9	73.7	134.2	-11.4, -32.2		2.4	9.3	2.1
	160	25.0	33.9	57.7	-13.3, -15.3	-13.6, -23.1	5.4	7.8	1.7
	720	42.8	58.8	122.3	-13.1, -26.0		2.2	2.9	0.6
2	50	64.6	74.8	133.6	-16.1, -37.0		2.4	22.8	5.1
	160	24.3	33.2	57.0	-13.4, -15.2	-12.6, -14.4	5.4	1.1	0.2
	720	44.2	58.3	127.2	-17.6, -33.2		2.2	19.4	4.3
3	50	62.4	74.2	134.0	-11.8, -30.6		2.4	16.4	3.6
	160	24.4	33.5	157.1	-14.9, -15.4	-14.4, -14.4	5.4	1.2	0.3
	720	43.1	58.3	104.0	-22.0, -36.4		2.2	23.3	5.2

在表 2 中,三组定位计算的 50kHz、160kHz 和 720kHz 的最大相对误差分别为 5.1%、1.7% 和 5.2%;在表 3 中,在三组定位计算中,50kHz、160kHz 和 720kHz 的最大相对误差分别为 4.03%、2.38% 和 3.16%。

对比表 2 和表 3,利用 160kHz 在两次的源定位结果中,都获得了相对精度小于 2.5% 的结果。在实际应用中,由于撞击源的位置未知,得不到实测的波速。

表 3 实测波速高速撞击源定位结果

序号	频率 (kHz)	计算结果 (mm)	实测结果 (mm)	波群速度 (km/s)	绝对误差 (mm)	相对误差 (%)	波模态
1	50	-9.5, -31.0		2.345	8.9	1.98	A0
	160	-9.3, -13.3	-13.6, -23.1	5.154	10.7	2.38	S0
	720	-12.9, -25.9		2.197	2.89	0.64	S2
2	50	-8.3, -32.1		2.388	18.1	4.03	A0
	160	-12.3, -14.7	-12.6, -14.4	5.332	0.37	0.08	S0
	720	-9.5, -28.4		2.015	14.2	3.16	S2
3	50	-11.1, -30.1		2.379	16.1	3.57	A0
	160	-14.3, -15.1	-14.4, -14.4	5.360	0.72	0.16	S0
	720	-13.7, -18.9		2.895	4.66	1.03	S2

根据以上的研究,利用理论频散曲线计算波速并采用合适的频率计算撞击源的位置,能够得到满足需要的定位精度。

5 结 论

利用小波连续变换分析了超高速撞击试验得到的声发射波动信号,根据板波模态分析和小波时频能量的分布情况,提取了三个主要传播模式的特定频率来进行撞击源定位研究。结果表明:

(1)5mm 铝板高速撞击穿孔损伤存在三个波动模态:一阶反对称模态 A0,一阶对称模态 S0,三阶对称模态 S2。

(2)基于三个模态的能量最大值出现的时间来进行高速撞击的源定位,可获得满足工程要求的定位精度。其中用 160kHz 来进行源定位计算,可获得相对稳定的定位结果。

(3)受高速撞击物理过程和频散效应的影响,50kHz 和 160kHz 的群速度基本保持不变,高频 720kHz 的群速度相对前两个频率的群速度变化较大。

(4)采用理论频散曲线所得到的群速度来进行撞击源定位可以获得满足在轨航天器撞击损伤定位工程需要的精度。

由于小波分析技术的高速撞击源定位可以不受门槛选择的影响,从而可以快速对在轨运行的航天

器受空间碎片的撞击进行损伤源定位,实现了利用声发射感知技术来进行航天器遭受空间碎片撞击在轨损伤监测的可能。

参考文献

- [1] 张庆明,黄风雷. 空间碎片环境及其危害. 中国安全科学学报, 1996, 6(5):15-20
- [2] 宋丽芳. 中国制订未来空间碎片行动计划发展纲要. 中国航天, 2004(3):6-7
- [3] 李春来,欧阳自远,都亨. 空间碎片与空间环境. 第四纪研究, 2002, 22(6):540-551
- [4] 梁伟,张来斌,王朝晖. 声发射检测技术在管道泄漏信号识别中的应用. 科学技术工程, 2007, 7(8):1596-1601
- [5] 万振凯. 声发射技术在三维编织复合材料测试中的应用研究. 无损检测, 2003, 25(2):72-75
- [6] 姚力. 几种典型声发射信号的特征参数分布分析. 无损检测, 2004, 28(2):19-22
- [7] Ryan S, Schafer F, Spencer G, et al. An excitation function for hypervelocity impact-induced wave propagation in satellite structures. In: Proceedings of the 57th International Astronautical Congress, Valencia, Spain, 2006. IAC-06-B6.3.02
- [8] Schafer F, Spencer G, Ryan S, et al. Experimental and analytical study to investigate impact-induced wave propagation in spacecraft structures. In: Proceedings of the 57th International Astronautical Congress, Valencia, Spain, 2006. IAC-06-B6.3.11
- [9] 唐硕,庞宝君,韩增尧等. 单层板超高速撞击声发射波的频谱特征分析. 宇航学报, 2007, 28(4):1059-1064
- [10] Schafer F, Janovsky R. Impact sensor network for detection of hypervelocity impacts on spacecraft. In: Proceedings of the 55th International Astronautical Congress, Vancouver, Canada, 2004. IAC-04-IAA.5.12.2.04
- [11] 刘武刚,孙飞,庞宝君等. 高速撞击的声发射检测定位与在轨航天器感知系统方案研究. 见:第三届全国空间碎片专题研讨会论文集,北京,2005. 158-165
- [12] Wugang L, Fei S, Baojun P, et al. Acoustic emission detection and location for hypervelocity impact. In: Proceeding of the 4th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 2005. 661-664
- [13] 姚力,赖德明. 声发射源定位不确定度的计算. 无损检测, 2002, 24(11):461-463
- [14] 杨智春,于哲峰. 结构健康检测中的损伤检测技术研究进展. 力学进展, 2004, 34(2):215-223
- [15] 徐彦廷,孙茂成,李伟等. 声源定位问题研究及误差分析. 无损检测, 1999, 21(5):199-202
- [16] 马晓青,韩峰. 高速碰撞动力学. 北京:国防工业出版社. 1998. 270-285
- [17] 张平,施克仁,耿荣生等. 小波变换在声发射检测中的应用. 无损检测, 2002, 24(10):436-439
- [18] 杨建波,王阳,高虹等. 小波变换用于声发射波波达时间的研究. 无损检测, 2001, 23(11):482-484
- [19] 李晓梅,朱援祥,孙秦明. 基于小波包分析的声发射源定位方法. 武汉理工大学学报, 2003, 25(2):91-94
- [20] 李路明,张家骏,刘英山. 声发射三角网络定位方法的研究. 无损检测, 1996, 18(8):213-215
- [21] Gaul L, Hurlbauss S. Identification of the impact location on a plate using wavelets. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, 12(6):783-795

Acoustic emission detection and location for hypervelocity impacts based on wavelet transform

Liu Wugang^{* **}, Pang Baojun^{*}, Han Zengyao^{***}, Sun Fei^{* **}

(^{*} Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

(^{**} Beijing Institute of Structure & Environment Engineering, Beijing 100076)

(^{***} China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

Abstract

The study on location of hypervelocity impacts of space debris on a spacecraft was conducted as follows: a two-stage light gun was used to fire spherical aluminum balls with different diameters at various impact velocities to aluminum panels, which more closely simulated the damages caused by hypervelocity impacts of micrometeoroids and space debris on spacecraft. The acoustic emission (AE) impact signals were recorded by an oscillograph with AE sensors. The Lamb waves propagating modes in the plates were presented under the impact crater. The impact locations were computed with the algorithm of triangle sensor arrangement based on the Gabor wavelet transform. The affect of the wave velocity on location accuracy was discussed. The results show that the impact location based on the wavelet transform can provide a satisfied accuracy. This algorithm can effectively locate the impact point on in-orbit spacecraft.

Key words: space debris, acoustic emission, hypervelocity impact, localization, wavelet transform