

高速撞击声发射信号在铝板中的衰减规律

刘武刚¹, 王建民¹, 顾海贝¹, 于荣刚¹, 庞宝君²

(1. 北京强度环境研究所 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076;
2. 哈尔滨工业大学 空间碎片高速撞击中心, 哈尔滨 150080)

摘要:高速撞击声发射信号传播至传感器并被转换成电信号的过程中会发生信号幅值的衰减, 导致信号在损伤评估和源定位的误差增大。分析了衰减产生的原因, 得到了衰减的一般规律。为了分析高速撞击声发射信号中不同频率板波模态的衰减规律, 将高速撞击数值模拟声发射信号进行了小波信号高频和低频的重构并分别进行衰减规律的研究, 得到了此两种频率在铝板中的衰减规律, 研究了衰减系数和“等效幅值”随撞击速度的变化规律, 研究结果可以用于撞击源定位传感器布局优化及损伤程度评估等领域。

关键词:空间碎片; 高速撞击; 信号衰减; 声发射

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2012)12-0041-05

Attenuation of Acoustic Emission Signals from Hypervelocity Impact on Al Paltes

LIU Wu-Gang¹, WANG Jian-Min¹, GU Hai-Bei¹, YU Rong-Gang¹, PANG Bao-Jun²

(1. Science and Technology on Reliability and Environment Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;
2. Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Attenuation of acoustic emission signal occurs during its transmission to sensors on the aluminum plate. This would bring errors in damage evaluation and source location. In this paper, cause and rules of attenuation are analyzed and attained. In order to analyze the attenuation rules of waves in different frequency, the simulated acoustic emission signals from hypervelocity impact are reconstructed in higher and lower frequency, and their attenuation rules are analyzed separately. Their attenuation rules transmitting on aluminum plate are attained. In addition, rules of attenuation ratio and equivalent amplitude changing with impact velocity are analyzed as well. The results could have some applications in optimization of sensor array and damage evaluation.

Keywords: Space debris; Hypervelocity impact; Signal attenuation; Acoustic emission

自 1965 年前苏联第一颗人造卫星成功发射以来, 人类发射进入太空的航天器由于废弃或爆炸等原因在空间形成的空间碎片越积越多。空间碎片已经成为在轨运行航天器的一个潜在杀手。当航天器遭受此类空间碎片的撞击时, 最重要的是能够通过监测系统确定撞击的位置、撞击的损伤模式(穿孔或成坑)和撞击的严重程度等, 及时地把这些信息反馈给宇航员和地面控制人员, 以便宇航员和地面控制

人员采取及时逃离和其它必要措施, 确保宇航员和航天器的安全^[1-2]。目前对载人航天器遭受空间碎片撞击的安全性评估和保证航天员的生命安全提出了迫切的要求。

根据公开报道资料, 目前已经有美国、欧空局、日本、德国和中国等在开展此方面的研究^[1-11]。机构间空间碎片协调委员会(IADC)也把在轨撞击检测技术的进展作为每次会议讨论的重点内容。各国研究者对各种可能的监测技术进行了研究^[12-13], 声发射技术因其具有被动监测、适应性强等优点, 是目前研究最多的一种方案。早在 20 世纪 90 年代早期, 欧洲航天局在哥伦布舱结构上安装了总计 12 个

收稿日期: 2012-09-13

基金项目: 空间碎片专项基金资助项目(K0203210)

作者简介: 刘武刚(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事航天器结构强度试验与损伤评估、声发射技术应用研究。

超声传感器,开展了对哥伦布舱进行撞击损伤的检测和定位^[1];Prosser采用傅里叶变换分析了薄板高速撞击声发射信号^[3]。唐硕等利用声发射特征阈值的方法对撞击参数进行辨识,提出了撞击成坑声发射辨识及其参数估计方案^[14]。上述文献主要对利用声发射技术获得撞击信号和定位技术开展了研究,对撞击损伤模式还需要深入的研究。随着我国载人航天的推进以及空间探测研究的迅速发展,对载人航天器遭受空间碎片撞击的安全性评估和保证航天员的生命安全提出了迫切的要求。这就需要积极开展天基在轨空间碎片监测系统方案和关键技术的研究。当航天器遭受空间碎片撞击时,产生的波动在结构中传播,被声发射传感器接收,可以确定撞击发生位置和撞击损伤程度。信号在介质中传播至传感器并被转换成电信号的过程中,会由于信号衰减等因素导致源定位和损伤评估的误差增大,所以高速撞击声发射信号的衰减规律的研究是正确评价空间碎片撞击航天器造成的损伤和撞击源定位的前提。

通过研究高速撞击声发射信号在结构中的衰减规律,可以确定传感器在进行撞击源定位时的最大间距,实现传感器布局的优化;通过研究已知点的声发射信号特征,利用衰减系数得到未知点的声发射信号特征,实现高速撞击损伤程度评估与损伤模式识别。

1 声波衰减理论^[15]

声波在介质传播过程中,其能量随着传播距离的增加而逐渐减弱的现象称为声波的衰减。不同的波型有着不同的衰减规律。声波衰减的机理很复杂,对于结构复杂的介质进行理论分析则更难,一般都以实测结果评价其衰减程度。通常在声波传播过程中能量衰减有以下几种方式:声波的扩散衰减、声波的散射衰减及吸收衰减。

1.1 声波的扩散衰减(几何衰减)

不同振源在介质中产生的衰减是不一样的,它们的传播状态也各不相同。对于有限面积的声源来说,其声波将会扩散,随传播距离的增加扩散程度也将会加大。因此,单位面积下声波能量和声压将随着传播距离的增加而减小,这种随波阵面的扩散而引起的声波能量和声压的减少,称为扩散衰减或者几何衰减。在理想介质中,由于不考虑介质本身的能量损耗,仅考虑扩散衰减。在球面波声场中,声压与至声源的距离的平方成反比。

1.2 声波的散射衰减

当平面波在介质中传播时,在传播方向上遇到某个障碍物时,如果障碍物的尺寸远大于声波的波长,就发生反射和折射现象;如果障碍物的尺寸与声波波长可比时,就发生显著的绕射现象;如果障碍物的尺寸小于波长,声波可以绕过而继续传播,同时有一部分声能被这些障碍物散射掉。

1.3 声波的吸收衰减

在声波传播过程中,由于介质的吸收将声能转换成另一种形式的能量(最常见的为热能),而使声能减少的现象称为吸收衰减。和扩散衰减及散射衰减相比较,吸收衰减现象与介质的微观或准微观相联系。声波被介质吸收主要是由于介质的粘滞性、热弛豫等原因引起的。所谓吸收衰减可以粗略地认为质点的振动受到“抵制”而发生的。由此就比较容易理解在频率较高时,声能的吸收衰减也较大的原因。

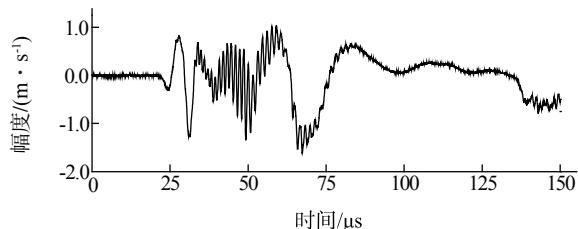
根据上述分析声波衰减的原因,可知高速撞击产生的声发射信号在平整铝板中的衰减主要由声波的扩散衰减和吸收衰减两部分组成。

2 高速撞击声发射信号数据的获得

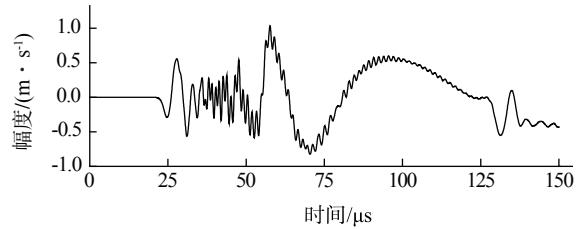
高速撞击试验是获得撞击声发射信号最直接的手段,但超高速撞击试验的费用较高且受到速度范围的限制,因此,高速撞击数值模拟已成为研究高速撞击声发射信号特征的有效手段。对高速撞击声发射信号衰减规律的研究,主要利用数值仿真获得的数据进行。所研究的球形弹丸材料为2A12,直径为3.20 mm,铝合金靶板的材料为5A06,厚度为5 mm,数值模拟仿真采用光滑流体粒子SPH法。数值模拟的方法和模型参数见文献[2]。数值仿真中采用表面法向速度来表示结构的响应,单位为m/s,在文中统一表示为“幅度/(m·s⁻¹)”。数据参考点分布在一条直线上,离撞击点有不同距离。图1分别为高速撞击数值模拟和试验得到的声发射波形信号的对比,可以看出数值仿真和超高速撞击的结果一致,说明了数值仿真的有效性与正确性。

3 声发射信号数据处理方法

高速撞击产生的声发射信号包含有丰富的频率,根据板波理论和波的衰减理论,板中存在不同频率模式的波,衰减取决于材料的粘滞性并与波的频率有关,信号中频率不同的成份其衰减规律也不同。



(a) 数值模拟



(b) 撞击试验

图1 撞击速度为3.33 km/s的数值模拟和撞击试验的声发射信号对比

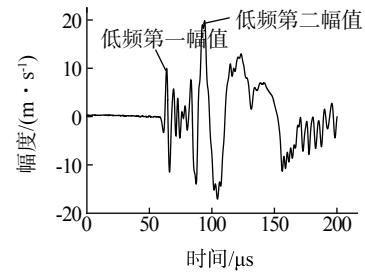
分析信号的衰减规律,应对不同的频率进行衰减规律研究,这会带来计算量大,处理时间长等问题,在实际应用中几乎是不可能的。为了适应工程实际应用中对数据快速处理的要求,需要进行超高速撞击声发射信号处理方法的研究。为了简化分析计算,同时基于对高速撞击声发射源定位技术和损伤特征的研究,可以将信号分为低频和高频部分处理。把高速撞击的声发射信号通过小波变换进行低频和高频信号的重构,分别得到信号的高频和低频部分。图2为高速撞击声发射信号经过小波重构后的低频和高频部分。在高速撞击的声发射波动高频和低频时域重构信号中,出现两个明显的波峰值。在经过小波变换重构的低频时域信号中,定义第一个出现的波峰值为低频第一峰值,第二个出现的波峰值为低频第二峰值。同样在重构的高频信号中,也先后出现高频第一峰值和高频第二峰值。

取低频第一峰值和低频第二峰值中的最大值作为分析低频衰减的计算数据,取高频第一峰值和高频第二峰值中的最大值作为高频信号衰减的计算数据,分别研究这些峰值随距离的变化关系。

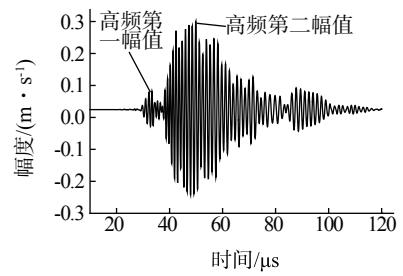
4 高速撞击声发射信号衰减规律

4.1 信号衰减规律

以撞击速度为2 km/s的撞击声发射信号为成坑损伤的代表进行分析。高速撞击的信号分别取自离撞击点距离为10, 20, 40, 80, 100, 150, 200,



(a) 低频



(b) 高频

图2 典型高速撞击信号的低频和高频重构幅值定义

300 mm的位置。分别提取重构后低频和高频信号的第一峰值和第二峰值幅度中的最大值作为信号衰减计算值,分别计算低频和高频信号的衰减规律。表1为低频和高频信号特征峰值的分布结果,图3为低频和高频信号的衰减曲线。

表1 撞击速度为2 km/s的特征峰值分布结果
(负值取绝对值)

信号位置 /mm	低频峰值幅度/(m·s⁻¹)			高频峰值幅度/(m·s⁻¹)		
	第一 峰值	第二 峰值	计算 值	第一 峰值	第二 峰值	计算 值
10	7.552	14.451	14.45	—	8.718	8.718
20	1.975	8.879	8.879	-0.434	3.44	3.44
40	0.944	-2.486	2.486	—	1.738	1.738
80	0.739	1.357	1.357	-0.109	0.427	0.427
100	0.661	1.348	1.348	-0.047	0.316	0.316
150	0.523	-0.752	0.752	-0.015	0.161	0.161
200	0.423	-0.642	0.642	—	-0.064	0.064
300	0.295	0.403	0.403	0.005	0.032	0.032

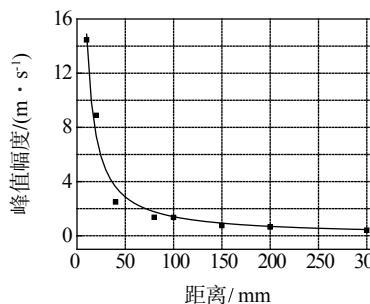
对图3中的曲线进行最小二乘拟合,得到低频信号幅度衰减规律为:

$$A = 24.0e^{-0.051x} \quad (1)$$

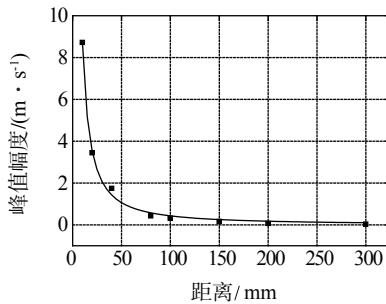
对于高频信号幅度衰减规律有:

$$A = 18.0e^{-0.075x} \quad (2)$$

记撞击声发射信号经过距离x后的幅度为A, A_0 为撞击点的信号幅度,称为等效幅值,式中 α 为



(a) 低频



(b) 高频

图 3 低频和高频信号衰减曲线

高速撞击声发射信号衰减系数。根据声学理论,吸收衰减和散射衰减都遵从指数规律。则超高速撞击声发射信号的衰减规律可表示为:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (3)$$

4.2 衰减系数和等效幅值随速度的变化规律

为了分析低频和高频信号随着撞击速度的变化规律,将各速度下的高速撞击信号分别进行信号重构并进行衰减规律的研究,得到的衰减系数和等效幅度见表 2,衰减系数随速度的变化规律见图 4。从中可以看出撞击速度在 1~4 km/s 范围内,低频幅值衰减系数基本保持在 0.047,而当撞击速度在 4~8 km/s 范围内时,高频衰减系数增大。高频信号的衰减系数随速度呈现出与低频衰减系数不同的变化

表 2 衰减系数和等效幅值随速度的变化关系

撞击速度 (km · s⁻¹)	衰减系数 α		等效幅值 A_0 /(m · s⁻¹)		损伤 类型
	低频	高频	低频	高频	
1.0	0.038	0.041	13.58	2.637	成坑
2.0	0.051	0.075	24.00	18.00	
3.0	0.048	0.104	17.83	57.34	锥形
4.0	0.047	0.120	20.92	127.9	穿孔
5.0	0.108	0.133	55.03	183.2	
6.0	0.180	0.139	179.9	231.1	圆柱形
7.0	0.237	0.160	456.0	340.1	穿孔
8.0	0.241	0.184	631.0	498.7	

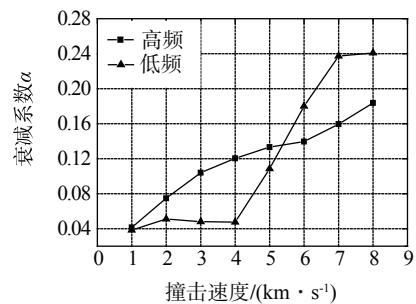


图 4 衰减系数随撞击速度的变化规律

规律,在撞击速度 1~8 km/s 范围内,衰减系数随撞击速度提高而增大。

低频信号等效幅值随撞击速度变化的规律见图 5,其变化规律基本与衰减系数一致。撞击速度在 1~4 km/s,低频信号等效幅值基本在 13~21 m/s 之间,而当速度在 4~8 km/s 时,等效幅值随着撞击速度提高而增大,在 8 km/s 时最大为 631.0 m/s。

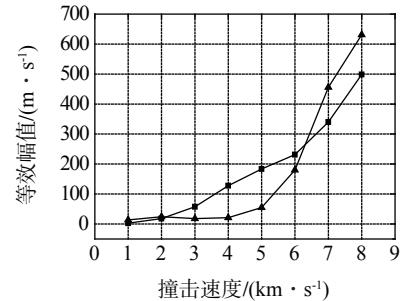


图 5 等效幅度随撞击速度的变化规律

从图 5 可以看出,高频信号等效幅值随撞击速度提高呈增长关系,说明了等效幅值与高速撞击速度及损伤类型相关。随着撞击速度的增加,高频信号的等效幅值能够用来表征撞击的损伤程度特征,即在已知撞击信号所得的高频信号部分的等效幅值时,可以求得撞击的速度。

5 结论

(1) 高速撞击声发射信号中低频和高频部分的衰减随撞击速度不同而不同。在 1~4 km/s 范围内,低频幅值衰减系数基本保持在 0.047,而当撞击速度在 4~8 km/s 范围内时,衰减系数随撞击速度增大而增大。在撞击速度 1~8 km/s 范围内,高频衰减系数随撞击速度提高而增大。

(2) 高频信号原始幅值随撞击速度增大呈增长关系。

6 讨论

上述结论是在所研究的条件下得出的,由于高速撞击物理现象的复杂性,高速撞击声发射信号在结构中的传播会受到结构材料、弹丸大小、靶板厚度、撞击速度等多参数的影响,随着对声发射撞击感知技术的开展,还需要深入研究这些因素对信号衰减规律的影响。

参考文献:

- [1] Schafer F, Janovsky R. Impact sensor network for detection of hypervelocity impacts on spacecraft [C]// 55th International Astronautical Congress. Vancouver, Canada: [s. n.], 2004.
- [2] 刘武刚, 庞宝君, 韩增尧, 等. 基于声发射的单层铝板高速撞击损伤类型识别[J]. 宇航学报, 2011, 32(3): 671—675.
- [3] Prosser W H, Gorman M R. Acoustic emission signals in thin plates produced by impact damage[J]. Journal of Acoustic Emission, 1999, 17(1/2): 29—36.
- [4] Iuzzolino A J, McKibben R B, Simpson A, et al. In-situ detection of a satellite breakup by the SPADUS instrument[C]// Proceedings of Third European Conference on Space Debris. Darmstadt German: ESA, 2001.
- [5] Iuzzolino A J, Economou T E, McKibben R B, et al. Final results from the space dust (SPADUS) instrument flown aboard the earth-orbiting ARGOS space-craft[J]. Planetary and Space Science, 2005(53): 903—923.
- [6] Bjorkman M D, Geiger J D, Wilhelm E E. Space station integrated wall design and penetration damage control (Task 3-Theoretical Analysis of Penetration Mechanics)[R]. N. G. C. M. S. F. Center, A. Mar-
- [7] Gaul L, Hurlebaus S. Identification of the impact location on a plate using wavelets[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 12(6): 783—795.
- [8] Graziani F, Ferrante M, Palmerini G B, et al. UNISAT Program: A university tool for space education. in 39th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit[C]// The American Institute of Aeronautics and Astronautics. Reno, Nevada: [s. n.], 2001.
- [9] Kim H M, Bartkowicz T J. An experimental study for damage detection using a hexagonal truss[J]. Computers and Structures, 2001(79): 173—182.
- [10] Porfilio M, Graziani F. A space debris impact detector for the UNISAT microsatellite[C]// 50th International Astronautical Congress. Amsterdam: [s. n.], 1999.
- [11] Liu Wu-Gang, Pang Bao-Jun, Sun Fei, et al. Acoustic emission detection and location for hypervelocity impact[C]// The Proceeding of 4th European Conference on Space Debris. Darmstadt: [s. n.], 2005.
- [12] 刘武刚, 庞宝君, 韩增尧, 等. 天基在轨空间碎片撞击监测技术的进展[J]. 强度与环境, 2008, 35(1): 57—64.
- [13] 刘武刚, 庞宝君, 韩增尧, 等. 天基在轨空间碎片撞击感知系统研究现状及关键技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2008(3): 1—5.
- [14] 唐硕, 庞宝君, 韩增尧, 等. 单层板撞击成坑声发射辨识及参数估计研究[J]. 中国空间科学技术, 2008(5): 59—68.
- [15] 杨明纬. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(上接第 24 页)

- Applied to Urban Water Management, 2003, 23(6): 791—792.
- [18] H. Prashanth Reddy, Shankar Narasimhan, S. Murty Bhallamudi. Simulation and state estimation of transient flow in gas pipeline networks using a transfer function Model [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(11): 3853—3863.
- [19] Zhang X J. Statistical leak detection in gas and liquid pipelines[J]. Pipe lines International, 1993(7): 26.
- [20] 程载斌, 王志华, 马宏伟. 管道应力波检测技术及研究进展[J]. 太原理工大学学报, 2003(4): 46—51.

shall Space Flight Center, and S. t. a. D. L. S. L. Avan, Editors. National Aeronautics and Space Administration, 1987.

- [21] Jinqiu Hu, Laibin Zhang, Wei Liang. Detection of small leakage from long transportation pipeline with complex noise[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011(24): 449—457.
- [22] 孙良. 基于模型的油气管道泄漏检测与定位方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [23] Jiangwen Wan, Yang Yu, Yinfeng Wu, et al. Hierarchical leak detection and localization method in natural gas pipeline monitoring sensor networks [J]. Sensors, 2012(12): 189—214.
- [24] 周廷鹤. 城市燃气管道的完整性管理[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 87—88.