

单层板撞击成坑声发射辨识及参数估计研究

唐颀¹ 庞宝君¹ 韩增尧² 刘武刚³

(1 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150080) (2 中国空间技术研究院, 北京 100094)

(3 北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要 空间碎片撞击航天器的威胁对发展在轨感知系统提出需求, 为研制基于声发射技术的感知系统, 有必要研究利用声发射波形分析对防护结构进行损伤模式辨识的方法。文章利用超声传感器进行了铝弹丸超高速撞击单层板的声发射信号采集实验及其数值仿真, 并对波形在时域和频域内进行分析, 结果表明: 声发射波形的主波谷值随撞击速度增加而线性增加, 直到防护结构被击穿; 声发射波形中的高频分量与低频分量幅值之比存在一个区别成坑模式与击穿模式的阈值。基于上述结果提出了一种在撞击弹丸尺寸已知条件下辨识成坑模式并对其撞击速度及其弹坑尺寸进行估计的方案。

关键词 空间碎片 超高速撞击 声发射辨识 参数估计 数值仿真

1 引言

由于人类航天事业的发展, 在地球周围已经分布了大量的空间碎片, 加上其自然存在的微流星体, 空间碎片高速撞击给人类的航天活动带来了巨大的威胁^[1]。如果这些以超高速运行的粒子撞击到航天器的表面, 就会对航天器造成严重甚至于毁灭性的破坏。在此背景下, 有学者提出一种使用多传感器网络对航天器的表面进行监测的方案^[2], 通过此系统, 对航天器的表面受到的空间碎片撞击情况进行实时监控, 所得到的数据将成为损伤评估以及启动应急方案的重要依据。迄今为止, 各国专家提出的方案涵盖了多种类型的传感器。其中, 压电型的声发射传感器以其可以得到丰富的撞击数据、技术成熟、对航天器附加较小的载荷等优点, 具有较好的应用前景。

利用声发射传感器对空间碎片的撞击进行监测, 其技术基础就是超高速撞击中的声发射现象。传统的声发射技术, 主要是对力学环境下的材料失效、结构疲劳、裂纹萌生和扩展、机械加工等现象进行研究。对由于空间碎片超高速撞击航天器表面所引起应力波释放的现象(从广义上来看也可以称为“声发射现象”)进行研究的报导目前还较少。Schafer 与 Liu 都研究了超高速撞击的声发射定位^[2-3], William Prosser 以超高速撞击为目标研究了冲击载荷引起的声发射波, 并实际利用超高速撞击声发射实验进行测试, 观察到声发射波频率峰值随撞击速度的转移现象^[4-5]。本文针对特定参数的单层板防护结构进行了超高速撞击实验, 通过在特定位置安装的超声传感器来采集声发射波形信号; 同时进行了相同工况下的数值仿真, 与实验结果进行了对比, 并在有效性前提下对工况进行推广。利用上述手段, 获取了单层板在受到不同速度弹丸撞击时的声发射波形, 探讨利用其辨识成坑模式并估计其参数的可行性及方案。本文的研究为利用声发射信号定量评估由空间碎片超高速撞击所导致的航天器表面损伤奠定了技术基础。

收稿日期: 2007-10-10。收修改稿日期: 2007-12-29

2 超高速撞击声发射信号

2.1 高速撞击实验

实验在哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心的二级轻气炮 HGG-2 上进行。采用 600mm×600mm×5mm 的 5A06 靶件和直径 3.97mm 的 2017 铝弹丸。利用二级轻气炮,用弹丸发射 6 个不同的速度,撞击到靶件的表面,产生的声发射信号被 V182 超声探头所采集,送到数字示波器中记录供后续分析。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的现象。弹丸速度由磁感应测速系统得到,涵盖了 1km/s~4km/s 的范围。这个速度范围的撞击,将使靶板出现成坑、层裂和击穿等超高速撞击的典型破坏现象,如表 1 所示。

表 1 数值仿真和实验结果的损伤形态比较

撞击速度/(km/s)	实验损伤描述/mm	数值仿真损伤描述/mm
0.99	坑口 $\Phi 5.4$, 鼓包高度 0.5	坑口 $\Phi 5.6$, 鼓包高度 0.5
1.52	坑口 $\Phi 7.0$, 鼓包高度 1.4	坑口 $\Phi 7.0$, 鼓包高度 1.5
2.52	入口 $\Phi 8.6$, 出口 $\Phi 7.5$	入口 $\Phi 8.4$, 出口 $\Phi 7.3$
2.96	入口 $\Phi 9.5$, 出口 $\Phi 8.2$	入口 $\Phi 9.3$, 出口 $\Phi 7.1$
3.73	穿孔 $\Phi 10.2$	穿孔 $\Phi 9.6$
4.17	穿孔 $\Phi 10.7$	穿孔 $\Phi 10.0$

2.2 数值仿真及其校验

高速撞击实验可以获取可信度较高的声发射波形,然而能够实现的工况范围受到发射设备能力等实验条件的限制,信号采集系统也会引起波形畸变,并且实验的代价较大,所以有必要发展替代实验的数值仿真方法,补充研究数据。

迄今已经开展了大量的工作进行超高速撞击的数值仿真^[6-8],铝合金等金属材料材料模型和相关数据得到了深入研究,具有较高置信度,在此不再赘述。需要指出的是:这些研究大部分都是为了获取高速撞击现象的常规终点效应,鲜有针对声发射波形的例子。通常,三种算法可用于超高速撞击现象的数值仿真: Lagrange 算法、SPH 算法和 Lagrange-SPH 耦合算法。考虑到 Lagrange 算法在弹性动力学波动计算中得到广泛应用,而且比其他两种算法具有边界清晰的特点,因此本文采用了这种算法。

首先对实验的 6 种工况进行了数值仿真,对其结果与实验进行了对比。图 1 是其中一个工况的波形图,图 1(a)是实验测得的电压信号波形,图 1(b)是数值仿真得到的对应位置的靶板表面法向速度信号波形。如果考虑到由于声发射探头、前置放大器等测量元件对波形具有滤波作用,使得波形产生了一定畸变,而且实验中实际的弹着点和预测位置具有一定的偏差,并且不考虑约 90 μ s 之后的边界反射波型,则可以认为: Lagrange 算法得到的波形可以和实验波形得到较好的吻合。另一方面,前人研究中观察到的高频分量随着撞击速度的增加,也在数值仿真波形中体现了出来。数值仿真的损伤形态数据同时表明:数值仿真的坑口直径、穿孔直径和背面鼓包高度和实验结果都吻合较好,如表 1 所示。进一步考察传感器所引起的畸变,定义灵敏度为测量量和被测量的比值,即

$$s = M_e/M_s \quad (1)$$

式中 s 是所定义灵敏度; M_e 是实验波形特征点电压幅度; M_s 是数值仿真得到的对应点速度幅度。

表 2 中波形特征点处实验波形对数值仿真波形的灵敏度的直接对比也表明了数值仿真结果的有效性。如前文所述,由于探头及其他测量设备的频率特性,灵敏度在不同特征点处数值不同,然而

表中不同工况的对应特征点处灵敏度基本一致，证实了同一频率时灵敏度一致，即计算与实验结果的可比性。其分散可能是由于波源距离差异及波形差异引起。确定了数值仿真的有效性之后，本文将以此作为定量研究的主要手段。在声发射波的基本特性研究中，数值仿真排除了实验的偶然性和分散性，更有利于体现出基本规律。而且，数值仿真也方便计算出成系列的工况进行比较。

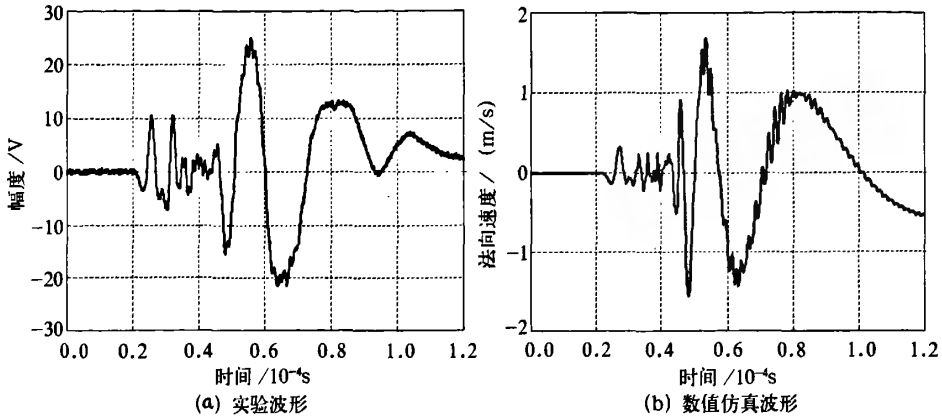


图1 0.99km/s 撞击产生的实验波形及数值波形

表2 各工况特征点灵敏度对比

撞击速度/(km/s)	谷值灵敏度/[V/(m/s)]	峰值灵敏度/[V/(m/s)]	传感器距离/mm
0.99	9.7	7.0	138
1.52	10.9	8.7	133
2.52	10.9	8.0	140
2.96	9.4	7.6	129
3.73	8.0	7.1	138
4.17	11.4	9.8	130

3 波形与撞击速度的关系

3.1 幅值的变化

从实验和数值仿真结果都可明显地观察到波形幅度随着撞击速度变化的现象。为深入研究，对100~6000m/s撞击速度的工况进行了数值计算。此撞击速度范围，处于超高速撞击现象的同一阶段，可以采用同一组材料模型，而且和实验进行的速度范围吻合。选取较明显的主波谷值和主波峰值作为幅度的特征参数进行对比。数据处理中，当撞击速度增高时，由于高频分量的增加，这两个特征点的提取发生困难。为此，采用300kHz的加窗低通FIR滤波器，滤掉高频分量。得到如图2所示距离弹着点135mm

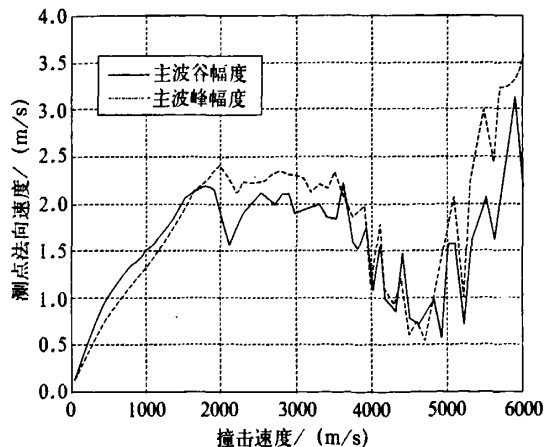
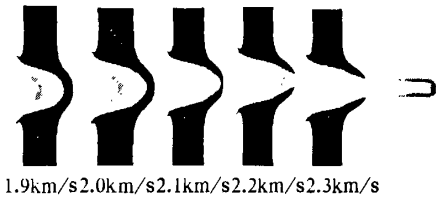


图2 测点法向速度与撞击速度的关系

处的质点速度随撞击速度的曲线。曲线可以较明显分为3个阶段。质点速度随撞击速度近似线性增加，然后在约2000m/s达到最大值；其后基本保持不变，在约3500m/s恒值阶段结束；曲线不规则波动，不再保持光滑。对比损伤形态随速度的发展，如图3、图4所示，可以看到：曲线最高点对应于靶板被击穿的过程，而较规则部分的终止对应于靶板上的弹孔由入口大、出口小的锥形孔，彻底发展为圆孔的过程。两条曲线最终都进入了不规则变化的状态，进一步观察波形可以看到这是由于波形在弹孔完全形成后即发生了变化，主波谷点和主波峰点都发生了较大移动，不再是同相位的对应点，即不再具备可比性所致，此时曲线失去意义。



1.9km/s/2.0km/s/2.1km/s/2.2km/s/2.3km/s

图3 随撞击速度增加，弹丸击穿靶板过程



3.3km/s 3.4km/s 3.5km/s 3.6km/s 3.7km/s

图4 随撞击速度增加，弹孔形成过程

3.2 频率的变化

正如引言中所指出，仅从时域波形也可看出高频分量会随着撞击速度改变而呈现一定规律。本节在频域内对此详细进行分析。处理数据得到50m/s~6000m/s撞击速度范围内一系列波形的Fourier频谱，其中3个较典型工况的频谱如图5所示。这些频谱的能量都集中在1.5MHz以下，与实验所用探头的范围基本一致。随着撞击速度的增加，高频峰值逐渐显现并且增强，而低频分量

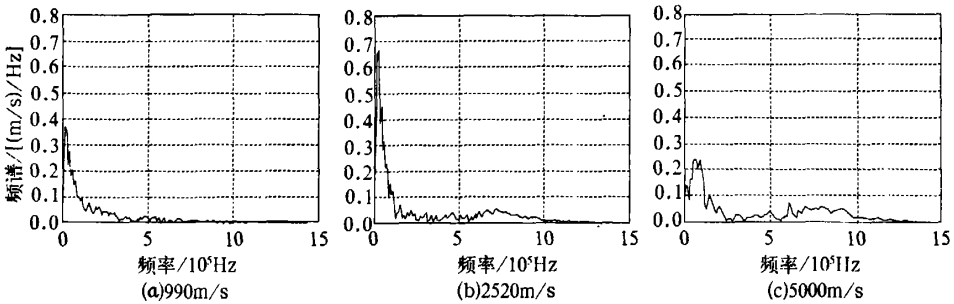


图5 不同撞击速度所产生测点法向速度的 Fourier 频谱

则相对减弱。鉴于此，选择将高频峰值与低频峰值的比值作为特征参数研究其随撞击速度的变化规律。观察发现所有的频谱都具有16.7kHz这个最低频率峰值，而高频峰值随撞击速度增加则逐渐增多，不妨取616.5kHz、900kHz两个较为明显的高频峰值。特征比值的结果如图6所示。随着撞击速度增加，特征比值先上升后下降，在5000m/s的位置出现峰值。如前文所述，击穿开始于约2000m/s，完成于约3500m/s，可以在这个速度范围内定义特征比值的阈值，小于此值为成坑模式，大于则为击穿模式。

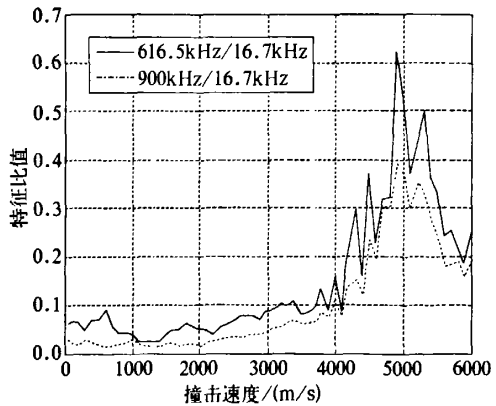


图6 特征比值与撞击速度的关系

3.3 理论分析

弹丸超高速撞击靶板的详细作用机理复杂, 仅从产生远场波形考虑, 这种作用可以简化为法向冲击力和径向冲击力的共同作用^[9]。其中, 前者主要在深度方向上侵彻靶板, 并引起弹丸冲击方向上的波动; 后者主要在孔径方向上侵彻靶板, 并引起靶板面内的波动。成坑撞击工况下, 法向冲击作用占主导地位, 由 Green 函数的性质, 对法向载荷的时间历程和 Green 函数进行卷积可以得到由此激励出的测点速度波形, 当载荷的作用时间足够短时, 卷积可以进一步简化成 Green 函数与载荷冲量相乘的形式。即如式(2)所示, 当 $t \gg \tau$ 时

$$\dot{w}(t) = \int_0^{\infty} \dot{G}(r, t-\tau) f(\tau) d\tau \approx \dot{G}(r, t) \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau = \dot{G}(r, t) I \quad (2)$$

式中 t 是时间变量; τ 是卷积中采用的积分变量; w 是测点法向位移, 对 t 求导得到法向速度, 以匹配所采用传感器的敏感类型; G 是板波的 Green 函数, 表示单位脉冲在距离为 r 的位置激励出的位移, 对 t 求导得到速度 Green 函数; f 是法向冲击力; I 是法向冲击载荷的冲量。可以看到: 波形的幅度与冲击载荷的冲量成正比。冲击载荷的冲量在一定条件下可以由冲量定理估计为

$$I = \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau \approx f(\tau_0) \Delta\tau = m(v_0 - v_1) \approx mv_0 \quad (3)$$

式中 m 是弹丸的质量; τ_0 是由中值定理估计的 τ 的平均值; v_0 是撞击速度; v_1 是弹丸撞击后的最终速度。

实验表明: 在本文中的成坑工况下, 弹丸与靶板最终将粘为一体, 共同以一个比撞击速度低得多的速度运动。因此此处忽略了弹丸的撞击后速度, 认为弹丸最终速度为零。综上所述: 式(2)和式(3)解释了成坑撞击模式下, 波形的幅度与撞击速度成正比的现象。

几个因素共同决定了上述规律的适用范围。

1) 一旦发生了穿孔或者反弹, 一部分动量会损失到穿出的弹丸和随之带出的靶板碎片上, 另外还有反弹的弹丸和碎片, 这些都会破坏式(3)成立的条件。

2) 虽然径向动量和法向动量互相独立, 但它产生了更多的板波模式, 叠加到总体的波形上, 从而改变了波形形状, 仅由法向冲量引起的波动分量便难以提取。

3) 式(2)建立在线弹性假设基础上, 但是高速撞击在局部会引起相当大的变形, 远远超出了这个范围, 当撞击速度足够大时, 这个局部强非线性对远场弹性波形影响变大, 式(2)随之失效。

本文的工况中, 径向冲击和动量损失在成坑模式下并不明显, 对应于图 2 中的线性增长阶段; 而刚开始被击穿之后, 径向冲击并不明显, 波形形状未发生太大变化, 但弹丸撞击后速度不可忽略, 故波形不再线性增长, 对应于图 2 中的曲线恒值段; 其后当弹坑进一步发展, 径向冲击和局部非线性因素也显现出来, 波形形状变化, 特征点将不再具有可比性, 对应于图 2 中的不规则段。

3.4 成坑撞击辨识及其参数估计方案

由主波谷值与撞击速度的关系以及特征比值阈值的存在, 在撞击弹丸尺寸已知的条件下可以得到一种容易实现的成坑撞击辨识方案。首先, 通过数值或者实验的方法标定特定防护结构的主波谷/撞击速度曲线以及高频分量与低频分量比值的阈值。然后, 通过自动化采集设备获取实际波形的主波谷值, 如果达到或者接近最大值, 再结合阈值条件可以判断出是否击穿; 如果是成坑模式, 则可反推撞击速度。最后则可以由适当的弹道极限方程确定出撞击坑的几何尺寸。

4 结论

本文实施了弹丸超高速撞击单层板防护结构的声发射实验及其数值仿真,对利用声发射波形对结构的成坑损伤模式进行辨识及其参数估计进行研究,得到以下结论:

- 1) 声发射波形的主波谷值随撞击速度增加而线性增加,直到防护结构被击穿;
- 2) 声发射波形中的高频分量与低频分量幅值之比存在一个区别成坑模式与击穿模式的阈值;
- 3) 在薄板的法向冲击模型上应用冲量定理,初步解释了幅值与冲击速度的关系;
- 4) 提出了一种在撞击弹丸尺寸已知条件下辨识成坑模式并对其撞击速度和弹坑尺寸进行估计的方案。

本研究的下一步工作是将本文的结论针对各种尺寸的弹丸及靶板进行验证,并寻求能够确定弹丸尺寸的方法。

参 考 文 献

- [1] 张庆明,黄风雷. 空间碎片环境及其危害[J]. 中国安全科学学报. 1996, 6(5): 15-20.
- [2] FRANK SCHAFFER, ROLF JANOVSKY. Impact Sensor Network for Detection of Hypervelocity Impacts on Spacecraft[J]. Acta Astronautica, 2007, 61(10): 901-911.
- [3] LIU WUGANG, SUN FEI, PANG BAOJUN, et al. Acoustic Emission Detection and Location for Hypervelocity Impact[C]. The Proceeding of 4th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 2005: 661-664.
- [4] WILLIAM H PROSSER. The Propagation Characteristics of the Plate Modes of Acoustic Emission Waves in Thin Aluminum Plates and Thin Graphite/Epoxy Composites Plates and Tubes[D]. Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University, 1991.
- [5] WILLIAM H PROSSER, MICHAEL R GORMAN, DONALD H HUMES. Acoustic Emission Signals in Thin Plates Produced by Impact Damage [J]. Journal of Acoustic Emission. 1999, 17(1-2): 29-36.
- [6] HIERMAIER S, KONKE D, STILP A J, et al. Computational simulation of the hypervelocity impact of Al-spheres on thin plates of different materials [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20: 363-374.
- [7] HAYHURST C J, CLEGG R A. Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20: 337-348.
- [8] 张伟,庞宝君,贾斌,等. 弹丸超高速撞击防护屏碎片云数值模拟[J]. 高压物理学报, 2004, 18(1): 47-52.
- [9] 唐颀,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[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 1059-1064.

作者简介

唐颀 1980年生,2004年获哈尔滨工业大学人机与环境工程专业硕士学位。现为哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心固体力学专业博士研究生,主要研究方向为空间碎片高速撞击防护结构的声发射损伤评估。

庞宝君 1963年生,1997年获哈尔滨工业大学固体力学学科博士学位。教授,博士生导师,主要研究方向为空间碎片超高速撞击航天器防护、航天器空间环境效应及其对策研究。

Research on Identification and Parameter Estimation of Cratering Induced by Impact on Single Plate with Acoustic Emission Signals

Tang Qi¹ Pang Baojun¹ Han Zengyao² Liu Wugang³

(1 School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

(2 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

(3 Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076)

Abstract Due to the threat of impact to spacecraft from space debris, the space debris in-suit detection system is required. For developing the detection system based on acoustic emission (AE) technique, means of failure mode identification by AE signals from hypervelocity impact on protection structure is necessary. AE waves were obtained with experiments of hypervelocity impact on single plate and numerical simulations and were analyzed in time domain and frequency domain. The results indicate that the main trough value increases linearly with the increase of impact velocity till the plate is penetrated. A threshold value that divides the penetration and cratering in the failure modes of plates can be defined on the ratio of high frequency component amplitude to low frequency one. A method was presented which identifies cratering mode of single-sheet plate and estimates the impact velocity and size of crater assuming certain diameter of projectile.

Key words Space debris Hypervelocity impact Acoustic emission Parameter estimation Numerical simulation

~~~~~  
(上接第24页)

## Analyses of Constellation Area Navigation Capacity and Key-Satellite

Zhu Sha Wang Hongqiang Li Xiang Mao Junjie

(School of Electronic Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** Area navigation capacity is an important parameter for evaluating navigation performance of constellation. The evaluation indexes of area navigation capability were presented, including standard deviation of geometry dilute of precision and variability of geometry dilute of precision from geometry dilute of precision, and the key-satellite of the navigation constellation was analyzed based on the indexes. The two indexes and area average geometry dilute of precision describe the area navigation capability in different ways. The indexes can fulfill different applications for determining the key-satellite of constellation for area navigation. The correlations between these indexes insure that the key-satellite is the same one in most cases.

**Key words** Area navigation Key-Satellite Availability GDOP Constellation

# 单层板撞击成坑声发射辨识及参数估计研究

作者: 唐硕, 庞宝君, 韩增尧, 刘武刚, Tang Qi, Pang Baojun, Han Zengyao, Liu Wugang  
作者单位: 唐硕, 庞宝君, Tang Qi, Pang Baojun(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨, 150080), 韩增尧, Han Zengyao(中国空间技术研究院, 北京, 100094), 刘武刚, Liu Wugang(北京强度环境研究所, 北京, 100076)  
刊名: 中国空间科学技术 **ISTIC PKU**  
英文刊名: CHINESE SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY  
年, 卷(期): 2008, 28(5)  
引用次数: 0次

## 参考文献(9条)

1. 张庆明, 黄风雷 [空间碎片环境及其危害](#) 1996(05)
2. FRANK SCHAFFER, ROLF JANOVSKY [Impact Sensor Network for Detection of Hypervelocity Impacts on Spacecraft](#) 2007(10)
3. LIU WUGANG, SUN FEI, PANG BAOJUN [Acoustic Emission Detection and Location for Hypervelocity Impact](#) 2005
4. WILLIAM H PROSSER [The Propagation Characteristics of the Plate Modes of Acoustic Emission Waves in Thin Aluminum Plates and Thin Graphite/Epoxy Composites Plates and Tubes](#) 1991
5. WILLIAM H PROSSER, MICHAEL R GORMAN, DONALD H HUMES [Acoustic Emission Signals in Thin Plates Produced by Impact Damage](#) 1999(1-2)
6. HIERMAIER S, KONKE D, STILP A J [Computational simulation of the hypervelocity impact of AISpheres on thin plates of different materials](#) 1997
7. HAYHURST C J, CLEGG R A [Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates](#) 1997
8. 张伟, 庞宝君, 贾斌 [弹丸超高速撞击防护屏碎片云数值模拟](#)[期刊论文]-[高压物理学报](#) 2004(01)
9. 唐硕, 庞宝君, 韩增尧 [单层板超高速撞击声发射波的频谱特征分析](#)[期刊论文]-[宇航学报](#) 2007(04)

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 [龚自正, 杨继运, 代福, 董洪建, 童靖宇, 向树红, 庞贺伟](#) [CAST空间碎片超高速撞击试验研究进展](#) -[航天器环境工程](#)2009, 26(4)  
超高速撞击试验是开展载人航天器及大型应用卫星空间碎片超高速撞击风险评估和防护设计的基础, 作为我国航天器环境效应和可靠性工程验证部门的北京卫星环境工程研究所在这个领域做了大量的工作. 文章介绍了二级轻气炮超高速撞击地面模拟试验技术、典型防护结构防护性能的超高速撞击试验验证、载人航天器外露材料超高速撞击特性、毫米级弹丸7 km/s以上超高速稳定发射技术探索、高性能防护结构研究等方面的若干近期进展, 展望了我国空间碎片防护需求和地面超高速撞击试验研究的发展方向.
2. 期刊论文 [龚自正, 杨继运, 张文兵, 童靖宇, 向树红, 庞贺伟, Gong Zizheng, Yang Jiyun, Zhang Wenbing, Tong Jingyu, Xiang Shuhong, Pang Hewei](#) [航天器空间碎片超高速撞击防护的若干问题](#) -[航天器环境工程](#)2007, 24(3)  
空间碎片对航天器的超高速撞击损伤已受到国内外的普遍重视, 如何在轨航天器对空间碎片进行有效防护是航天器长寿命、高可靠安全运行的重要保障. 文章概述了空间碎片环境现状、空间碎片超高速撞击特性、毫米级弹丸7 km/s以上超高速稳定发射技术探索、高性能防护结构研究等方面的若干近期进展, 展望了我国空间碎片防护需求和地面超高速撞击试验研究的发展方向. 重点介绍了航天器常用的Whipple防护结构及其各种衍生结构的防护性能和弹道极限方程(BLE), 评述了这些防护结构防护性能的优缺点.
3. 期刊论文 [张文兵, 龚自正, 杨继运, 童靖宇, 向树红, Zhang Wenbing, Gong Zizheng, Yang Jiyun, Tong Jingyu, Xiang Shuhong](#) [激光驱动飞片系统模拟空间碎片超高速撞击](#) -[航天器环境工程](#)2007, 24(3)  
文章介绍了北京卫星环境工程研究所采用激光驱动飞片系统将厚度5 μm的铝质飞片发射到8.3 km/s. 该驱动系统采用调Q钕玻璃激光, 脉宽15 ns, 最大能量达到20 J. 针对热控材料、舷窗玻璃及OSR等外部表面功能材料开展了超高速撞击实验研究, 取得初步研究成果. 实验结果表明激光驱动飞片技术可很好地用于模拟流星/空间碎片超高速撞击效应研究.
4. 会议论文 [闫军, 韩增尧, 曲广吉](#) [空间碎片超高速撞击损伤的综合评估方法研究](#) 2005  
密切结合空间碎片防护设计技术, 国际发展和国内需求, 对超高速撞击损伤评估方法进行了综合应用研究. 首先简要阐述了超高速撞击损伤评估技术研究的目的意义、主要方法和与风险评估的关系; 然后重点研究了用于撞击损伤评估的工程方法和数值方法的模型、算法、代码, 并进行了算例分析和仿真, 给出了损伤评估的结果比较、敏感度分析和应用原则; 最后作了简要总结和展望. 本文的目的主要在于为航天器超高速撞击损伤预测提供面向工程的解决方案.



法.

### 5. 学位论文 褚英志 空间碎片超高速撞击流体模拟研究 2004

该文详细说明了半无限体超高速撞击问题流体模拟的实验设备条件和方法,并对不同密度、不同撞击速度的常温液态半无限体撞击问题进行了实验研究,通过能量法和量纲分析法结合实验结果提出了关于坑径和坑深的经验公式,与已知的固体撞击实验结果进行了对比,吻合较好.证明了采用流体模拟实验技术可以较准确地获得半无限靶受超高速撞击时成坑的过程以及坑深和坑径等参数的变化规律.本文对熔融状态互不溶的金属组成的多层无间隔靶体撞击问题进行了流体模拟实验研究,实验结果表明,在一定条件下撞击成坑只发生于第一层靶体内.采用能量方法对该现象进行的数值分析表明,多层液靶的界面能对成坑过程具有显著的影响.该研究结果预示多层金属防护结构可以起到增强防护效应的作用,可以为航天器防护结构设计提供参考.为了掌握超高速撞击过程中发生的液化或汽化现象的机理,本文对超高速撞击过程产生的爆炸现象进行了初步流体模拟实验研究.液靶采用加热的植物油,液滴为常温水滴,实验结果记录了伴随爆炸现象的成坑过程以及坑深、坑径等变化规律,并对其机理进行了分析.高速撞击爆炸现象的研究由于受到加速装置发射能力的限制困扰着研究人员,利用不互溶的常温液体和高温液体之间的撞击可以清晰的展现撞击爆炸现象的全过程,分析其物理过程可以了解撞击爆炸的损伤特点和规律.同时,为了进一步验证实验研究的准确性,利用国内外通用的流体撞击数值分析方法对半无限流体撞击问题进行了分析,并对分析结果与实验结果进行了比较.本文在总结有关超高速撞击现象流体模拟技术的国内外研究进展的基础上,论述了流体模拟研究超高速撞击现象的理论基础,发展了流体模拟实验技术,并对不同的防护结构和撞击现象进行了模拟实验研究,在总结分析实验结果的基础上,分析了撞击成坑的发生、发展等规律,提出了经验公式,并进行了数值计算.所取得的成果对于超高速撞击现象的认识、掌握超高速撞击的规律具有理论意义,高速撞击损伤破坏行为机理的认识对空间碎片防护结构设计过程中材料选择以及结构设计具有工程指导意义.

### 6. 会议论文 张伟, 马文来, 贾斌, 庞宝君 典型空间碎片防护结构超高速撞击数值模拟 2003

微流星及空间碎片的超高速撞击威胁着长寿命、大尺寸航天器的安全运行,导致其严重的损伤和灾难性的失效.防护结构设计是航天器设计的一个重要问题,必须通过实验及数值模拟研究防护结构的防护性能.本文采用AUTODYN软件进行了铝合金、Nextel和Kevlar-epoxy防护结构二维超高速正撞击及斜撞击SPH法数值模拟,并同实验研究的结果进行了比较,验证了数值模拟方法的有效性.

### 7. 期刊论文 贾光辉, 黄海, 胡震东, 徐小刚, JIA Guang-hui, HUNAG Hai, HU Zhen-dong, XU Xiao-gang 空间碎片超高速撞击极限穿透比动能研究 - 宇航学报 2006, 27(5)

研究建立空间碎片对目标超高速撞击条件下临界穿透靶标的损伤特性的理论模型.基于临界穿透过程的数值模拟结果,系统分析了初始条件与临界穿透的关系,提出碎片临界穿透靶板的比动能概念,然后分析了临界穿透下的碎片比动能,认为比动能是速度的函数.最后,考虑碎片的实际撞击过程中最大着靶面积为变形面积,对比动能进行修正,获得了极限穿透条件下的真实比动能与速度无关的结论.

### 8. 期刊论文 贾斌, 盖芳芳, 马志涛, 庞宝君, JIA Bin, GAI Fang-fang, MA Zhi-tao, PANG Bao-jun 5A06铝合金单层板超高速撞击弹道极限分析 - 材料科学与工艺 2007, 15(5)

日益增长的空间碎片对在轨航天器的安全运行构成了严重威胁,毫米级空间碎片的防护已成为航天器结构设计必须考虑的问题之一.航天器的蒙皮是抵御空间碎片超高速撞击的最基本防护结构.采用数值仿真并结合试验验证的方法,对5 mm厚5A06铝合金单层板承受2A12铝合金球形弹丸正撞击下的弹道极限进行了研究.研究表明,在验证实验速度范围内,数值仿真结果与实验结果吻合良好;使用数值仿真对实验速度以上的区间进行拓展研究,获得了其弹道极限曲线和弹道极限方程;数值仿真和实验结果与已有经验方程对比表明,经验方程与具体材料的弹道极限有较大偏差,因此,应具体问题具体分析.

### 9. 期刊论文 唐硕, 庞宝君, 韩增尧, 刘武刚, TANG Qi, PANG Bao-jun, HAN Zeng-yao, LIU Wu-gang 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)

空间碎片撞击航天器的威胁对发展在轨感知系统提出需求,为研制基于声发射技术的感知系统,有必要研究超高速撞击产生的声发射信号波形特征.进行了铝弹丸超高速撞击单层板的实验,利用超声传感器采集到声发射波形,并使用小波变换对波形进行频谱分析.结果表明:在1~4km/s的撞击速度范围内,超高速撞击在单层板内引起的声发射波主要是A0模式、S0模式和S2模式的弹性板波;A0模式波形随撞击速度增大而减弱,其余2种模式则随之增强;成坑撞击波形具有较强的A0模式,击穿撞击波形具有较强的S0模式和S2模式.引入超高速撞击过程中的法向冲击作用和径向扩孔作用的概念,分析了上述规律.

### 10. 会议论文 杨继运 空间碎片超高速撞击数值仿真技术研究 2005

空间环境中日趋增多的空间碎片对航天器的超高速撞击已经对其构成了严重威胁,对于这类超高速撞击的研究对航天器的正常运行极为重要.单纯的地面模拟试验由于试验费用高、设计周期长以及发射速度偏低等缺点,要求使用超高速撞击数值仿真技术来弥补试验之不足.针对国内外在超高速撞击数值仿真领域的研究成果,详细分析总结了该领域所涉及的数值仿真技术,同时分析比较了国外现有用于数值仿真的相关流体代码及商业软件,为进一步开展空间碎片超高速撞击数值仿真工作奠定基础.

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_zgkjkxjs200805010.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgkjkxjs200805010.aspx)

下载时间: 2010年6月2日