超高速撞击航天器二次碎片云能量特性分析

贾光辉 黄 海

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 为了评估空间碎片超高速撞击航天器的碎片云破坏能力,挖掘超高速撞击数值模拟结果数据的应用价值,基于 ϕ9.53mm铝球以 6.64 km/s速度对 2.2mm铝靶撞击的 Ls-Dyna/SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic)数值模拟研究结果,对靶后碎片云的粒子动能进行求和统计,建立了碎片云比动能概念和函数形式;碎片云比动能综合考虑了靶后所有碎片云粒子的动能,反映了一定距离处垂直于撞击方向平面上单位面积上的碎片云粒子所蕴含的撞击能量;应用碎片云比动能概念,揭示出随着演化距离的增加,碎片云能量的衰减规律;通过不同速度条件下的 SPH计算,得到了碎片云的比动能函数的曲线形式随撞击速度的变化规律;最后对采用 2种材料模型进行数值模拟所对应的结果误差进行碎片云比动能函数的曲线比较,反映出数值模拟中不同材料模型引起的差异.

关 键 词: 碎片; 航天器; 穿透; 数值模拟; 材料模型

中图分类号: V 414

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)03-0257-04

Characters on kinetics energy of debris cloud in spacecraft

Jia Guanghui Huang Hai

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To assess damage by debris cloud after orbital debris impacts and perforates plate of spacecraft, and to use adequately LS-dyna/SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) computer simulation result of the orbital debris hypervelocity impacting the plate, depending on the result about ϕ9.53mm aluminium sphere impacting 2.2mm aluminium target at 6.64 km/s, debris cloud kinetic energy per area (DCPKE) and DCPKE formula was put forwarded after statistically cumulating of debris particles behind plate. DCPKE includes kinetic energy of all particles in debris cloud and define the damage ability in area of plane behind spacecraft plate perpendicular to the impacting direction. DCPKE can be used to describe rule of debris cloud kinetic energy, which decrease with the distance. Depending on computer simulation of several impact velocity cases, the DCPKE curves were gained to show difference of impact velocities. DCPKE was also used to analyze material strength model influence, it can show quantificationally difference between two material models.

Key words: debris; spacecraft; perforating; computer simulation; strength of materials

超高速撞击是飞行器在轨运行过程中可能遇到的碎片撞击问题的动力学重要特征. 在研究早期,通常采用直接实验的手段,在诸如飞行器面板撞击损伤特性描述和防护结构设计等方面有很多研究成果[1]. 但由于飞行器多数不会被击穿,且传统观念认为航天器击穿标志着功能完全失效. 因此对击穿航天器后碎片云的损伤特性的研究极少,以至于产生误区:航天器壁板穿孔小,则内部受到的毁伤就小的误区. 要改变这一局面,同时准确回答航天工程中出现的击穿但功能不损伤等复

收稿日期: 2006-04-18

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2004035267); T John D. and Catherine T. MacArthur Foundation (05-85102-000-GSS)

作者简介: 贾光辉(1966-),男,山西新绛人,副教授, jiaguanghui@buaa.edu.cn.

杂问题,就急需要对击穿航天器的二次碎片特性进行刻画,从而定量地预测其对内部部件构成的损伤程度.

但是,超高速撞击形成的碎片云具有二次碎片数量多、速度高、飞散范围大、分布不均匀、离散化飞散等特性,使得试验观测极为困难.为此本文选用计算快捷、重复性好的数值模拟手段,对数值模拟得出的海量数据进行数据挖掘,将计算结果与初始条件直接关联,观察关键参数的影响规律,将数值模拟结果提高到理论层面.作者认为:基于试验的感性认识、应用便捷的数值模拟手段、对丰富的数据结果进行分析,是研究超高速撞击的理想途径.

为此本文首先选取文献[2]中的试验实例,应用与该实例相符的 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamic)数值模拟结果,对碎片云粒子的能量分布进行统计,提出超高速撞击形成的碎片云比动能概念,并结合实例对该函数进行分析,明确关键参数的含义.然后,应用这一概念,将超高速撞击的初始条件(如速度)直接反映在碎片云比动能曲线上,从而全面定量地反映出入射参数对碎片云特性的影响.最后论文再次应用这一概念,将数值模拟中使用的材料模型进行分析,从碎片云比动能曲线给出定量反映材料模型的差异,这一技术对于解决数值模拟中材料模型问题具有一定的参考价值.

1 基于试验的超高速撞击模拟算例

文献[2]中给出如下算例:铝球直径9.53mm,以6.64km/s速度垂直撞击厚度2.2mm薄铝板.球直径/靶板厚度为4.33,为薄板超高速撞击问题.试验(图1)表明撞击后生成了完整的碎片云,其前端速度高、后部速度低,最大速度与球的入射速度接近,薄板的穿孔约28mm.

本文采用2种材料模型(Steinberg高应变率模型和流体模型),应用 SPH 方法对上述算例进行了计算,表1显示的靶孔直径计算结果及相应的试验结果表明:Steinberg高应变率模型的计算结果最为接近试验结果,说明该模型考虑到材料的剪切模量和屈服强度随压力增加而强化、随温度增加而减小的特性,适于描述材料的极高应变率行为.

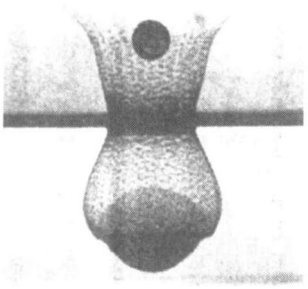


图1 超高速撞击试验图片

表1 超高速撞击形成的靶孔直径

材料模型	状态方程	靶板孔直径/mm
Steinberg	MIE_GRUNEISEN	29
流体模型	MIE_GRUNEISEN	32

注:试验靶板孔直径28mm.

表2给出了不同瞬时的弹靶界面最大压力,说明采用 MIE_GRUNEISEN 状态方程的材料模型得到的撞击压力与一维冲击波理论分析结果相符.这是由于 MIE_GRUNEISEN 状态方程可以考虑冲击压缩条件下材料的冲击波速度与材料点的运动速度之间的关系,从而可真实反映超高速撞击过程的实际的弹/靶界面压力.

表2 超高速撞击过程中弹靶界面瞬时最大压力

材料模型	状态方程	最大压力/GPa			
		0.4μs	0.8μs	1.0μs	1.4μs
Steinberg	MIE_GRUNEISEN	142.27	90.72	78.16	65.78
材料模型	MIE_GRUNEISEN	142.03	92.24	77.22	66.88

注:一维理论 ϕ10mm铝球以7.0km/s速度对2.5mm,Hugoniot压力95Gpa[3].

本算例数值仿真结果见图2.与文献[2]的试验结果相比,碎片云速度分布存在头部大、尾部小的典型速度分布特征,符合试验结果,碎片云的形状也与试验结果相近,可见采用 SPH 方法以及 Steinberg高应变率模型所得到的计算结果基本符合实际情况(若 SPH 粒子数量,会更加符合试验),可用于下一步的分析.



图2 SPH计算粒子运动结果

2 靶后碎片云比动能概念

基于上述的超高速撞击算例的模拟结果,考虑到如下条件,对碎片云粒子动能进行统计分析:

1)碎片云充分发育后,靶后粒子运动自相似[4],即:

$$\frac{r_p}{x_p} = \frac{V_{rp}}{V_{xp}} = k_p \qquad (1)$$

式中, x_p, r_p 分别是碎片云粒子 P 离开撞击点的距离和离开撞击轴线的径向距离; V_{rp}, V_{xp} 是轴向速度和径向速度;而 k_p 是位置函数,与时间 t 无关. 实际上 k_p 表示碎片云粒子 P 在整个碎片云演化过程中的直线轨迹的斜率.

2) 在靶后确定距离的铅垂面内,碎片云粒子撞击点位置确定,与 t 无关.

这是由于碎片云遵从自相似律的必然结果. 因为当碎片云发育完善后,其粒子以不变的速度,沿着固定的直线轨迹运动,那么对于任意距离上的铅垂面,显然撞击点是确定不变的.

3) 能量的统计与飞散的距离无关.

由于碎片云发育完善后,粒子之间彼此不再干扰,因此,其速度不变,从而其能量是守恒的. 所改变的就是碎片云在不同距离的铅垂面上扫过的圆域面积不同. 对于本算例而言,碎片云在飞至 10 cm 前,已经遵循自相似.

对于 10 cm 处,在垂直于原始撞击线的垂直平面上,所有碎片云粒子将在不同时刻通过该平面,对该平面形成粒子撞击的累积效应. 以该平面内撞击点为圆心,在面内构造面积相同的同心圆环,对各环形分区的碎片云粒子动能进行统计求和,可得到碎片云粒子的单位圆环面积上的动能之和具有如式 (2)所示的函数形式:

$$\bar{E}_s = \frac{A\mathrm{e}^{(-2r^2/W^2)}}{W\sqrt{\pi/2}} \qquad (2)$$

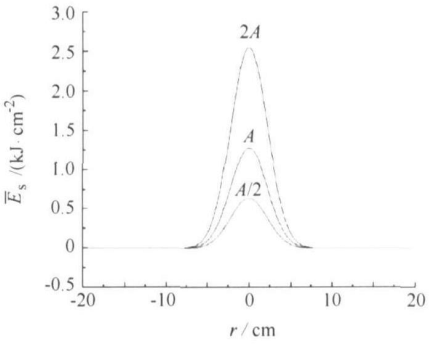
式中, $\bar{E}_s$ 称为碎片云比动能, 10^5 J/cm^2,与数值模拟使用的单位呼应; A, W 为确定撞击条件下的参数.

式 (2)刻画了碎片云粒子的能量分布规律,给出了碎片云比动能 $\bar{E}_s$ 与离开撞击线的径向距离 r 的高斯形式函数关系,式 (2)说明:中心处 $\bar{E}_s$ 最大,随 r 增加, $\bar{E}_s$ 逐渐减小 (见图 3).

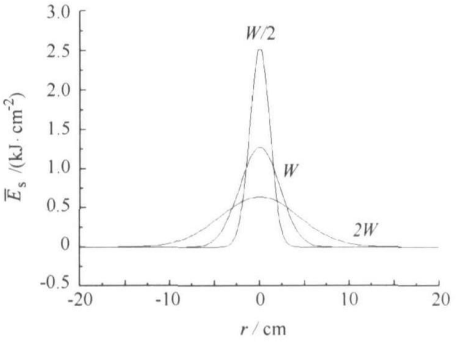
对于式 (2)进行分析,可知: A 代表了碎片云的最大能量密度,通常它与总能量相关;而 W 代表碎片云能量分布参数,它影响碎片云能量的径向分布. 式 (2)对 r 的积分等于碎片云总动能.

根据模拟结果,假想在 10 cm, 20 cm, 30 cm 的距离上,垂直撞击方向布置圆形靶,则可得到对应距离上碎片云比动能分布函数中的 A, W 系数如下:

L = 10 cm	A = 0.070 20	W = 4.344 71
L = 50 cm	A = 0.014 04	W = 21.723 6
L = 100 cm	A = 0.007 02	W = 43.447 1



a　A的影响



b　W的影响

图 3　碎片云 $\bar{E}_s$ 的径向分布规律

对于该算例,分析不同距离上的比动能,可以得到比动能函数曲线 (见图 4),可见随着距离的增加,比动能峰值下降很快 (见图 5),而分布范围随之加宽,这表明了能量守恒原理在碎片云演化方面的具体体现.

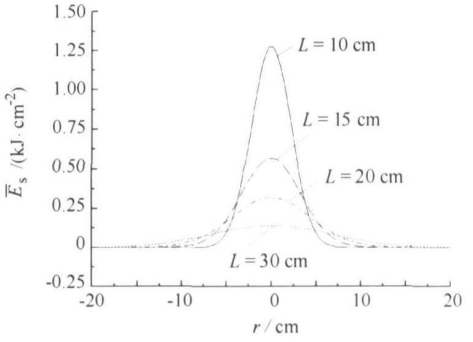


图 4　不同 r上 $\bar{E}_s$ 分布曲线

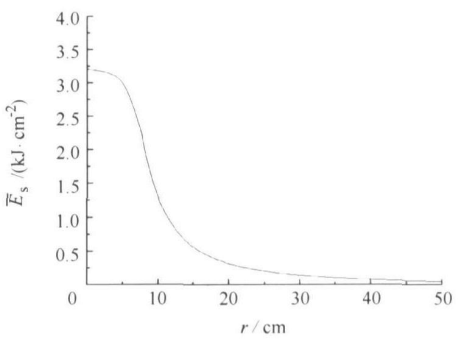


图 5　$\bar{E}_s$ 随 r的变化曲线

令 $A_{10}=0.070\,2$, $W_{10}=4.344\,71$ 分别表示靶后 10 cm 处碎片云 $\bar{E}_s$ 分布函数中参数值. 引入无量纲变量: $L_\lambda=L/10$, $L>10$ cm, 由式 (2) 可知: 变量 $A=A_{10}/L_\lambda$, $W=W_{10}L_\lambda$, $\bar{E}_s$ 可以写为

$$\bar{E}_s=\frac{A_{10}\,\mathrm{e}^{(-2r^2/W_{10}^2L_\lambda^2)}}{W_{10}\,L_\lambda^2\,\sqrt{\pi/2}} \tag{3}$$

可见, $\bar{E}_s=\bar{E}_s(L_\lambda, r)$ 是靶后无量纲距离 L_λ 和 r 的函数.

当 $r=0$ 时, 为碎片云中心的比动能密度, 它是各个距离上的最大比动能:

$$\bar{E}_s=\frac{A_{10}}{W_{10}\,L_\lambda^2\,\sqrt{\pi/2}} \tag{4}$$

3 撞击速度和材料模型分析

作者基于不同的撞击速度条件下的数值模拟结果, 应用上述碎片云比动能概念和思想, 对 10 cm 距离上的碎片累计动能进行了统计分析, 见图 6, 获得了不同撞击速度下的比动能曲线. 图 6 说明随着撞击速度的增加, 比动能峰值在增加, 同时, 具有相同比动能量值的比动能范围也在增加.

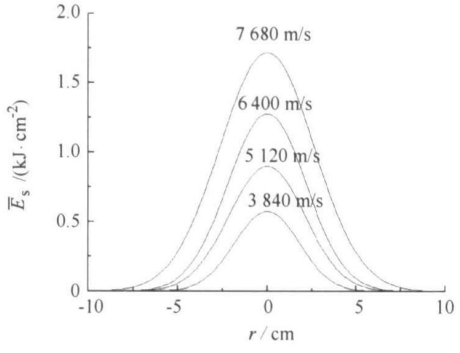


图 6 $\bar{E}_s$ 曲线与撞击速度

作为可以量化测量的比动能曲线, 具有定量刻画碎片云的能力, 那末能否将此标准作为衡量材料模型的准确性上, 为此, 作者对流体模型和 Steinberg 模型进行了模拟计算, 获得了靶后 10 cm 处的比动能分布曲线, 见图 7. 该图反映出这二曲线较为接近, 由于前面通过比较说明了 Steinberg 模型的正确性, 那末, 作为初步分析, 可以认为流体模型是超高速撞击数值模拟的较好地近似.

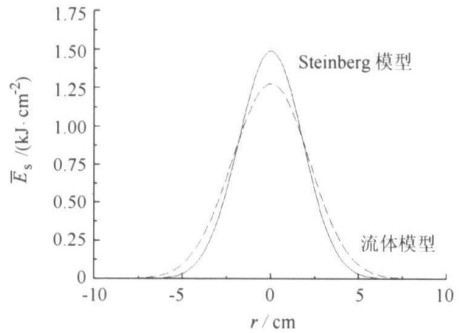


图 7 材料模型与 $\bar{E}_s$ 曲线

4 结 论

本文基于超高速撞击数值模拟研究结果, 通过对碎片云中粒子动能的统计分析, 建立了碎片云比动能的概念. 然后, 应用碎片云比动能概念, 对于碎片云的二次破坏能力进行了评估. 得到如下结论:

1) 基于数值模拟方法得到的丰富数据, 应当进一步挖掘这些数据的应用价值;

2) 碎片云比动能综合考虑了靶后所有碎片的动能, 给出一种统计意义上的单位面积上的撞击动能的量化指标. 该指标反映了碎片云蕴含的动能, 便于作为碎片云二次破坏能力的量化评判指标;

3) 应用碎片云比动能概念, 可以得到不同速度下碎片云的比动能曲线的具体形式, 揭示出随着演化距离的提高, 碎片云能量的离散化进程;

4) 应用碎片云比动能概念, 可以在能量意义上动态地显示出材料模型带来的结果误差, 可更好地标定数值模拟中材料模型的正确性.

参考文献 (References)

[1] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. Protection manual[R]. IADC-04-03, 2004

[2] Lacerda D, Lacome J. Simulations of hypervelocity impacts with smoothed particle hydrodynamics[R]. DYNAUS Report, 2003

[3] Faraud M, Destefanis R, Palmieri D, et al. SPH simulations of debris impacts using two different computer codes[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23: 249 - 260

[4] 贾光辉, 空间碎片超高速撞击飞行器数值模拟应用研究[D]. 北京: 北京航空航天大学宇航学院, 2005
Jia Guanghui. Application study on computer simulation of fragment impacting spacecrafts[D]. Beijing: School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005 (in Chinese)

[5] Cour-Palais B G, Crews J L. A multi-shock concept for spacecraft shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 10: 135 - 146

[6] Michel L, Frank S, Tobias G. Impact damage on sandwich panels and multi-layer insulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26: 369 - 380

(责任编辑: 张 嵘)