

## SPH 算法在超高速碰撞数值模拟中的应用\*

崔伟峰<sup>1</sup>, 曾新吾<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** :采用大型动力学软件 Ls-dyna 中的 SPH 求解器,对球形弹丸超高速碰撞靶板的过程进行数值模拟。给出由于碰撞速度不同,而引起的不同的碎片云图像,以及不同的靶板破碎孔的尺寸。同时模拟了入射角度不同,而得到不同的超高速碰撞物理过程。初步分析结果表明数值模拟结果是合理的,较清晰地模拟了超高速碰撞下碎片云的生成、膨胀过程。另外,通过数值模拟结果与实验结果的分析,表明 SPH 方法得到的结果能描述相应的超高速碰撞现象。所以采用 SPH 算法针对超高速碰撞物理过程进行数值模拟是可行的。

**关键词** :超高速碰撞 SPH 算法 数值模拟 碎片云

中图分类号 :O389 文献标识码 :B

## Smoothed Particle Hydrodynamics Algorithm Applied in Numerical Simulation of Hypervelocity Impact

CUI Wei-feng<sup>1</sup>, ZENG Xin-wu<sup>2</sup>

(1. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Optoelectronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** :Based on the gridless SPH numerical technique of Ls-dyna hydrocode, the characteristics of debris clouds originating from impact of spherical projectile on the plate at different velocities were simulated. At the same time the different physical courses due to various impact angles were obtained. The simulation results show a good agreement with those from the experiments presented in the literature concerned. The generation and expansion of debris clouds were clearly simulated. It indicates that the SPH algorithm can make the qualitative description for phenomena of hypervelocity impact, thus proving the feasibility of the numerical simulation of hypervelocity impact on the basis of the SPH algorithm.

**Key words** :hypervelocity impact SPH algorithm numerical simulation debris clouds

超高速碰撞的数值仿真,需要一种代码能够描述材料较大的变形、材料强度梯度和材料的相变。光滑质点流体动力学(SPH)方法,是目前最好的离散化方法,可应用于超高速碰撞,它是 20 世纪 70 年代由天体物理学家首先发明的(即 Monaghan<sup>[1]</sup>,Benz<sup>[2]</sup>),并于 20 世纪 80 年代后期(Liberaky<sup>[3]</sup>),在结构力学的基础上,将其起扩展应用于质点流体力学。

SPH 方法的特点是在模拟物体大变形时,既可以克服 Euler 方法难于跟踪物质变形和不能识别材料界面形状的缺点,同时也解决了传统 Lagrange 方法在大变形下的网格扭曲(Distortion)问题,因此在工程上有很大的应用潜力。目前,SPH 方法的应用领域主要有:天体物理、燃气动力学、结构动力学(包括超高速碰撞)等<sup>[4]</sup>。本文采用 SPH 数值技术,就是为了清晰地给出描述出材料界面,得到超高速碰撞大变形过程的数值分析。

## 1 数值模拟分析

## 1.1 材料数据及模型

铝弹撞击铝靶的超高速碰撞过程是一个极其复杂的过程,对其完善的描述应包括连续介质力学的

\* 收稿日期 2006-09-28

作者简介:崔伟峰(1977—)男,博士生。

各个方面,而且还要考虑到溅射等问题,因此材料参数和模型的选取是超高速碰撞下非常重要的环节。由于超高速碰撞的特殊物理过程,材料强度本构关系模型要求可以描述材料的应力应变关系。目前,比较通用的方法是 Johnson-Cook 模型<sup>[5-7]</sup>,具体的表达式描述如下:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)[1 + C \ln(\varepsilon_p/\varepsilon_0)](1 - T^{*m}) \quad (1)$$

其中,材料参数  $A$   $B$   $n$   $C$  以及  $m$  应根据材料动力学试验推导。 $\varepsilon_p$  是等效塑性应变,  $\varepsilon_0$  是  $\varepsilon_0 = 1s^{-1}$  时的等效塑性应变率。

高压下材料的流体压力和密度、内能等的关系描述<sup>[8]</sup>,选用描述超高速碰撞问题的 Mie-Gruneisen 状态方程,其表述形式如下:

$$p - p_k = \gamma_G(E - E_k)/V \quad (2)$$

其中  $p_k$  和  $E_k$  分别为冷压和冷能。

计算时弹丸和靶板材料均为 LY12 铝,表 1 给出了数值模拟中采用的材料模型及状态方程的参数。其中,强度模型选用 Johnson-Cook 模型,状态方程为 Gruneisen 状态方程。

表 1 数值计算中采用的模型参数

Tab. 1 The parameters of algorithm for simulating

材 料	材料模型	状态方程
	Johnson-Cook 模型	Gruneisen
LY12 铝	$A = 265\text{MPa}$ $B = 426\text{MPa}$	$C = 5328\text{m/s}$
	$n = 0.34$ $C = 0.015$	$S_1 = 1.339$
	$m = 1.0$ $T_{melt} = 775\text{K}$	$\gamma_0 = 2.0$

在数值模拟中,首先参考文献[9],取球形弹丸直径为 9.53mm,碰撞速度为 6.68km/s,靶板厚度为 4.04mm。图 1 和图 2 给出了球形铝弹丸超高速撞击铝靶的结构示意图及相关的放大图。这里球形弹丸采用 SPH 节点进行建模,同时鉴于 SPH 方法求解计算时间较长,在铝靶板数学建模时,利用 SPH 节点和有限元单元结合划分建模,在破坏变形较大的中心区域采用 SPH 节点划分,而变形较小的外围区域采用有限元单元划分,既节省了计算时间,降低了对计算机内存的要求,又保证了计算的精度。

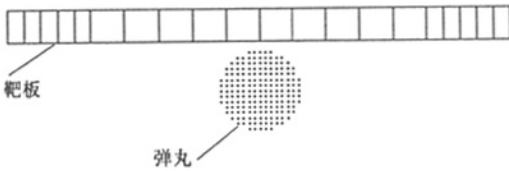


图 1 弹丸超高速撞击靶板结构示意图  
Fig. 1 The projectile and target structure

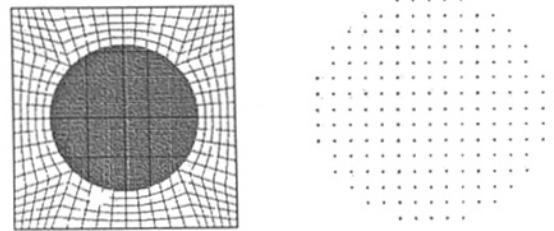


图 2 弹丸及靶板的模型放大图(左侧为靶板)  
Fig. 2 Magnification of projectile and target (the projectile is in left)

### 1.2 数值计算结果

图 3 给出了采用 SPH 算法进行超高速碰撞数值模拟结果与文献中给出的实验结果比较。由图可见,数值模拟结果与实验结果相似,弹丸碎片比较分散,形成碎片云的外壳比较薄。通过比较说明,采



图 3 超高速碰撞形成的碎片云 X 光照片与数值模拟结果的比较  
Fig. 3 Debris clouds from X photograph and simulation

用 SPH 算法进行超高速碰撞数值模拟能给出较清晰的碎片云图像,描述出相应的超高速碰撞现象。

弹丸的碰撞速度与撞击靶板后形成的碎片云的形状密切相关。图 4 给出的是弹丸分别以 2km/s、3km/s、4km/s、5km/s、6km/s、7km/s 的速度碰撞靶板时,得到的碎片云图像。

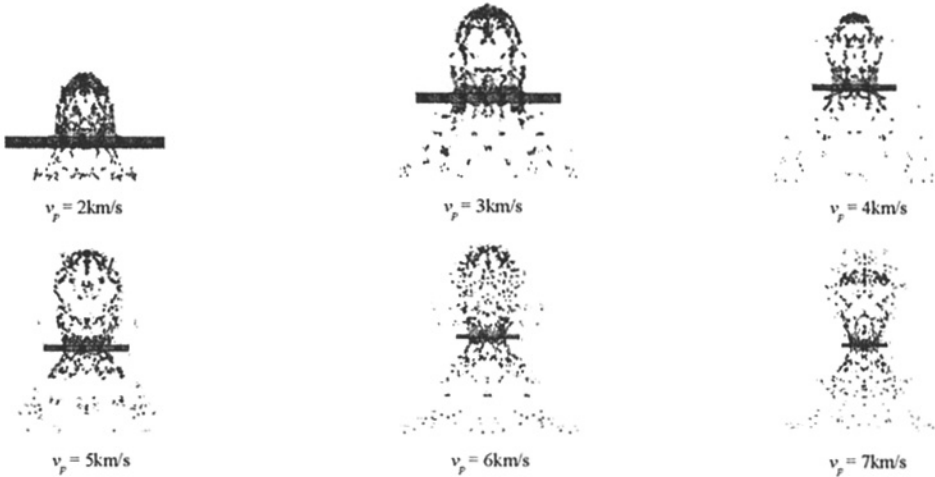


图 4 不同碰撞速度下得到的碎片云图像

Fig. 4 Debris clouds in various impact velocity

由图 4 可知,靶板背面喷出的碎片云形似一个拉长的气囊袋,在碎片云的前端及外围大部分为破碎的靶板材料,如图中浅色碎片云那部分。随碰撞速度的增加,碎片云拉长的程度也相应增加。图中给出了由于碰撞速度不同得到的不同的碎片云图形,数值模拟描绘了较清晰的超高速碰撞现象,较好地给出了超高速撞击物理过程。

由于碰撞速度不同,弹丸撞击靶板形成碎片云的孔的直径也不同。其经验公式<sup>[10]</sup>如下:

$$G = \frac{d_s}{d_p} = 0.658v_p \left( \frac{t_s}{d_p} \right)^{0.14} \exp \left[ 0.63 \left( \frac{t_s}{d_p} \right)^{0.43} \right] \quad (3)$$

式中,  $G$  为形成碎片云的靶板直径与弹丸直径的比值,  $t_s$  为靶板厚度。

由式(3)可知,在其他条件相同时,  $G$  与  $v_p$  呈线性关系。图 5 给出了由数值模拟和经验公式得到的由于碰撞速度不同而得到的  $G$  值。从图中可以看出,数值模拟结果得到的  $G$  值普遍小于经验公式得到的结果,但基本符合线性关系这一规律。只是在碰撞速度较高时,误差较大,说明由 SPH 方法得到的结果与经验公式基本吻合。

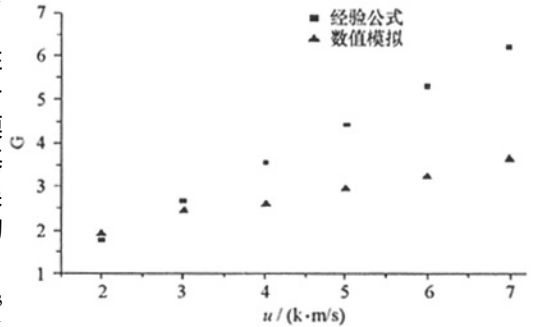


图 5 碰撞速度不同由数值模拟及经验公式得到的不同的  $G$  值

Fig. 5 The  $G$  value from simulation and empiric formula in various impact velocity

同时采用 SPH 方法数值模拟了弹丸以初速 4km/s 撞击靶板,改变入射角度得到相应的碎片云图像。图 6 给出了碰撞角度分别为 30°、45°、60°、70° 时模拟给出的碎片云情况。随着入射角度的增加,靶板背面的碎片云量逐渐减少,正面喷出的增加。当角度大于 60° 时,可能出现滑弹情况。

通过 SPH 方法研究铝弹丸超高速斜撞击铝靶板的数值模拟可知,超高速斜碰撞有效地分解了弹丸超高速撞击靶板所产生的碎片云,具有分散其造成损伤能量的特性,降低了其破坏性。并且具有一个临

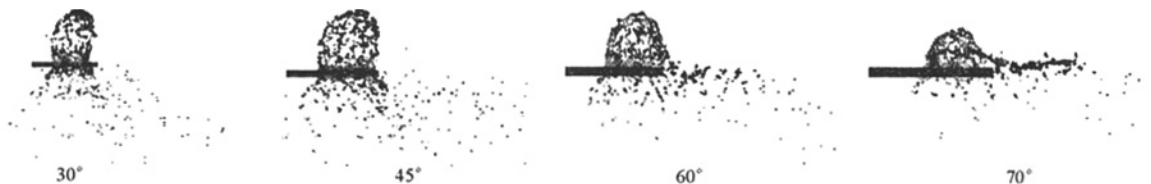


图 6 不同入射角度得到的碎片云图像

Fig. 6 Debris clouds in different impact angle

界入射角,大于此角度时将发生滑弹现象,此时对靶件造成的损伤较小。

## 2 实验结果比较

实验研究是发现与解决问题最直接最有效的方法,目前国内针对超高速碰撞的实验报道较少,研究多侧重方法和原理的探讨<sup>[11]</sup>。本文的实验是在电炮装置上进行 Mylar 膜飞片以 7km/s 的速度超高速撞击铝靶板的研究。实验中采用高速摄影得到膜飞片撞击铝靶板后形成的碎片云的变化过程。表 2 给出了超高速碰撞实验的具体参数。

表 2 铝靶板结构超高速碰撞实验条件

Tab. 2 The data parameters from hypervelocity impact experiment

靶板材料	飞片材料	前板厚度( mm )	后靶厚度( mm )	飞片速度( km/s )	飞片直径( mm )	飞片厚度( mm )
LY12 铝	Mylar 膜	0.5	3.0	7.0	4.0	0.15

图 7 是碎片云变化高速摄影图像。这里高速摄影的拍摄频率为每秒 250 万幅,即相邻两幅图像相差的时间为  $0.4\mu\text{s}$ ,图中较清晰地给出了  $0.8\mu\text{s}$  到  $5.6\mu\text{s}$  这一过程碎片云的膨胀运动过程,碎片云不仅具有轴向运动,而且还有径向发散运动。

图 8 是采用 SPH 算法针对飞片超高速撞击铝板的数值模拟结果。与实验结果比较,数值模拟结果较清晰地给出了膜飞片撞击靶板后,形成碎片云的膨胀运动过程,数值模拟结果与实验结果较为相符。因此,这里采用的 SPH 算法可以描述相应的超高速碰撞现象,得到基本正确的结果。

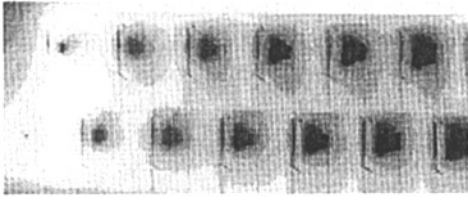


图 7 碎片云高速摄影图像示意图

Fig. 7 Debris clouds from high speed photography

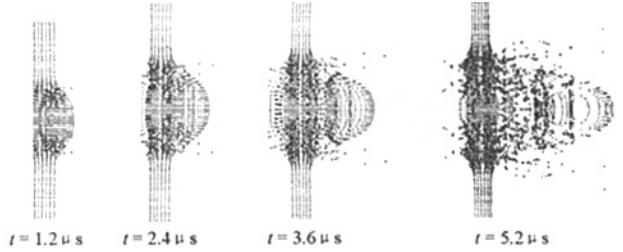


图 8 数值模拟得到的几个不同时刻碎片云示意图

Fig. 8 Debris clouds of simulation in the different moments

## 3 结论

(1) SPH 数值技术清晰地模拟出碎片云形成过程及形状,得到的结果与文献中给出的碎片云形状较为相符。

(2) 在不同的碰撞速度及角度下,SPH 数值技术模拟出了不同的碎片云特征。给出了不同条件下形成碎片云的孔的尺寸及特征,得到的结果与经验公式基本一致。

(3) 针对超高速碰撞实验进行数值模拟,得到碎片云图像与实验中利用高速摄影得到的结果较为一致,说明采用 SPH 方法能描述相应的超高速碰撞现象。

## 参考文献:

- [1] Monaghan J J. Shock Simulation by the Particle Method SPH[J]. Journal of Computational Physics, 1983, 52: 374 - 389.
- [2] Benz. Smooth Particle Hydrodynamics: A Review[R]. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Preprint No. 2884, 1989.
- [3] Libersky L D, Petschnek A G, Carney T C, et al. High Strain Lagrangian Hydrodynamics[J]. J. Comp. Phys., 1995, 109: 67 - 75.
- [4] Haug E, Gronenboom P, Kamoulakos A, et al. Application of SPH Techniques in the PAM-SCL Code Family[R]. PUCA 97, 273 - 282, ESI Group, 1997.
- [5] 机构间空间碎片协调委员会. 空间碎片防护手册[R]. 2000.
- [6] Pezzica G, Destefanis R, Faraut M. Numerical Simulation of Orbital Debris Impact on Spacecraft[J]. Structures under Shock and Impact, 275 - 284.
- [7] Katayama M, et al. Numerical Simulation of Space Debris Impacts on the Whipple Shield[J]. Acta Astronautica, 1997, 40(12): 859 - 869.
- [8] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] Piekutowski A J. Characteristics of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impact of Aluminum Spheres with Thin Aluminum Plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 14: 573 - 586.
- [10] Swift H F, Preonas D D, Dueweke P W, Bertke R S. Response of Materials to Impulsive Loading[J]. AFML-TR-70-135, 1970.
- [11] 王本利, 孔宪仁, 朱桂东, 等. 超高速碰撞数值模拟[J]. 宇航学报, 1995, 16(2): 41 - 45.



