

文章编号: 1000-5773(2008)04-0377-07

超高速碰撞碎片云特征的 SPH 方法数值分析*

徐金中, 汤文辉, 徐志宏

(国防科学技术大学理学院技术物理研究所, 湖南长沙 410073)

摘要: 采用光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法对不同形状的弹丸超高速碰撞形成的碎片云特性作了模拟分析, 给出了靶孔直径和碎片云宽度随碰撞速度的变化规律、同一速度下不同形状的弹丸累积碎片分布规律、同种弹丸不同速度下的累积碎片分布规律、弹丸初始半径范围内的碎片云无量纲向前总动量 M_D/M_0 随膨胀距离 L_E 的变化以及碎片云前端速度的变化规律等。通过数据拟合, 进一步给出了累积碎片百分数与碰撞速度和碎片质量的近似函数关系, 计算表明该函数关系与数值结果吻合得很好。

关键词: 超高速碰撞; 碎片云; 光滑粒子流体动力学

中图分类号: O385

文献标识码: A

1 引 言

随着人类空间活动的日益频繁, 地球近地轨道上散落着大量的碎片, 对在轨航天器的安全构成了极大的威胁, 因此航天器的防护成为当前航天器设计中的一个十分重要的问题。为此, 有必要详细地了解空间碎片超高速碰撞形成的碎片云特性, 为航天器的防护设计提供新的思路和技术依据。

光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, 简称 SPH) 是一种纯 Lagrange 粒子方法, 它不需要使用网格, 可以避免有限元方法中的网格扭曲或负体积问题, 因而尤其适合于计算空间碎片的超高速碰撞问题。1993 年, Libersky 等^[1] 率先将材料强度效应引入 SPH 方法, 成功进行了高速碰撞数值模拟。Hiermaier 等^[2] 使用 SPH 方法对不同材料的超高速碰撞碎片云作了模拟, 结果表明, 材料类型对碎片云形状和弹坑尺寸有较大影响。

本研究采用 SPH 方法, 自编程序, 对不同形状弹丸超高速碰撞形成的碎片云特征作了数值模拟, 分析了碎片云形状特性、质量特性、速度及动量特性。

2 SPH 程序设计

本研究采用 Fortran 语言编制了含弹塑性效应的三维 SPH 程序, 使用该程序也可以进行一维和二维问题的数值模拟。整个程序由主程序、配置粒子子程序、核函数及其导数计算子程序、人工粘性和人工热流子程序、用于近邻粒子搜索的虚拟网格划分子程序、确定粒子所属网格子程序以及近邻粒子搜索子程序组成。主程序段主要用于计算当前时刻各粒子的物理量, 包括: 密度、应变张量、旋转率张量、压力、应力张量、加速度、内能、粒子的运动位置。配置粒子子程序可根据输入参数的不同来分别计算球形、圆盘形和柱状弹丸 (包括平头弹、尖头弹和卵形弹) 的正碰撞和斜碰撞问题。SPH 方法数值计算的关键部分是近邻粒子的搜索, 它是由后 3 个子程序共同完成, 在程序设计时应特别注意参数传递时的一一对应关系。同时, 结构化的程序设计将有利于变量的增删和材料模型的修改。需要说明的是, 自编程

* 收稿日期: 2007-12-21; 修回日期: 2008-03-14

作者简介: 徐金中 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事超高速碰撞动力学研究. E-mail: xujinzhong080@163.com

序还没有形成友好的图形界面及相应的后处理程序,这一部分可通过编写 Visual C++ 或 Visual Basic 程序逐步得到实现。

3 物态方程

在超高速碰撞中,物态方程的选择对计算结果的影响较大。由于 Mie-Grüneisen 物态方程形式简单,参数容易确定,因此是最常用的一种物态方程,其形式^[3]如下

$$p(\rho, e) = \left(1 - \frac{1}{2}\Gamma\eta\right)p_H(\rho) + \Gamma\rho e \quad (1)$$

$$p_H = \begin{cases} a_0\eta + b_0\eta^2 + c_0\eta^3 & \eta > 0 \\ a_0\eta & \eta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a_0 = \rho_0 C^2$, $b_0 = a_0[1 + 2(S-1)]$, $c_0 = a_0[2(S-1) + 3(S-1)^2]$, S 是冲击波速度与波后粒子速度的线性比例系数。

4 本构模型

为了描述材料的非线性力学响应,需要引入合适的本构模型,较常用的是 Johnson-Cook 粘塑性本构模型^[4],该模型的屈服应力表示为

$$Y_{JC} = (A + B\bar{\epsilon}^n)[1 + C\ln(\dot{\epsilon}_p/\dot{\epsilon}_0)](1 - T^{*m}) \quad (3)$$

式中: A, B, C, n, m 为材料参数; $\dot{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率,无量纲温度 $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$, T_r 为参考温度, T_m 为熔化温度。

温度 T 采用如下的增量形式来表示

$$\Delta T = \frac{\alpha}{\rho c_p} \int \sigma d\epsilon_p \quad (4)$$

式中: α 是塑性功转化为热能的比例分数,一般取 0.9; ρ 为密度, c_p 为定压比热。

5 失效准则

在超高速碰撞中,碎片云的形成原因主要是由于冲击波在自由面反射形成的稀疏波相互作用造成的层裂破坏,因此主要是拉伸失效。最简单的失效判据是最小拉压力准则^[5],即当 SPH 粒子的拉伸压力大于某一临界值 p_{min} 时,粒子则被认为瞬间失效,一旦粒子失效,它就不能再承受任何拉伸载荷。

6 碎片的识别

为了了解碎片的质量及动量分布,确定尺寸较大的碎片,碎片的识别必不可少。由于 SPH 粒子本身的离散性以及超高速碰撞产生的高温高压,采用一般的失效判据并不能判定哪些粒子构成了一个碎片的整体。这里采用一种“近邻的近邻”的方法来识别碎片。

对于某一时刻的粒子状态,从任意一个粒子 i 开始碎片搜索,首先判断它是否为潜在碎片粒子(即构成碎片云的粒子),如果是,搜索其一个光滑长度之内的近邻粒子 j ,如果 j 粒子是潜在碎片粒子且不属于其它碎片,则对 j 粒子的一个光滑长度之内的近邻粒子进行搜索,直到没有可搜索的近邻粒子,则这些粒子构成了一个碎片,然后进行下一个碎片的搜索。如果所有粒子已搜索完,且被定义为某一碎片的构成粒子,则碎片搜索结束。图 1 给出了采用上述方法得到的碎片识别的结果,图左半部为没有搜索的碎片云图,右半部为搜索后的碎片云图。



图 1 碎片识别

Fig. 1 The identification of fragments

7 数值分析

球形弹丸直径 $D=9.53$ mm, 圆盘形弹丸直径 $D=9.53$ mm、长度 $L=3.3$ mm, 柱状弹丸直径 $D=4.4$ mm、长度 $L=13.2$ mm, 靶板厚度 $h_t=2.22$ mm, 弹靶材料均为铝, 碰撞速度为 $3.0\sim 6.66$ km/s。物态方程参数见文献[6], 本构模型参数详见文献[2]。

7.1 碎片云形状特性

弹丸形状的不同会造成超高速碰撞碎片云形状特征的明显差异。图 2 给出了碰撞速度 $v_0=6.66$ km/s 时 3 种弹丸的碰撞碎片云图。从图中可以看出, 球形弹丸的碰撞碎片云前端呈半球形分布; 圆盘形弹丸的碰撞碎片云有一个圆盘形的头部, 弹丸碎片沿轴向的膨胀明显大于其它两种弹丸, 当弹丸长径比很小时, 就会出现如文献[7]所示的内部柱状结构; 而柱状弹丸的碰撞碎片云前端有一锥状突出, 弹丸碎片沿轴向几乎没有膨胀。从形状上来看, 数值结果与文献[3]和文献[7]给出的实验图像吻合得较好, 这也验证了自编程序的有效性。

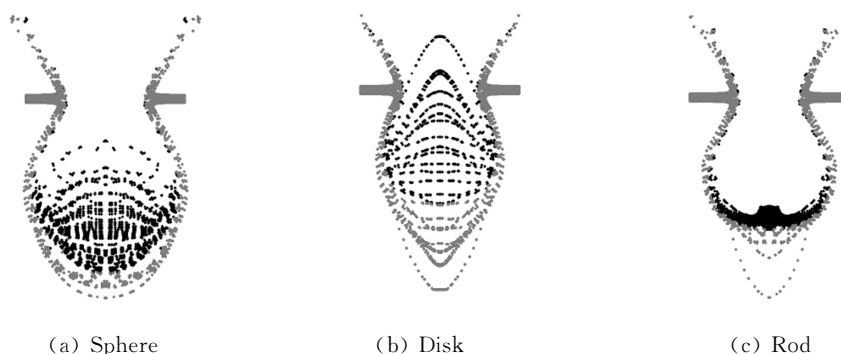


图 2 $v_0=6.66$ km/s 时的超高速碰撞碎片云

Fig. 2 The debris clouds of hypervelocity impacts at $v_0=6.66$ km/s

超高速碰撞碎片云示意图如图 3 所示, 其中 D_H 、 D_W 、 L_E 、 L_1 和 V_F 分别为靶板孔洞直径、碎片云宽度、碎片云的膨胀距离、弹靶碎片界面位置以及碎片云前端速度。表 1 列出了无量纲孔洞直径 D_H/D 、碎片云宽度 D_W/D 、膨胀距离 L_E 的计算值。比较球形弹丸超高速碰撞靶洞直径的实验结果[8]和数值结果, 可以看出, 二者吻合得很好。图 4 给出了无量纲靶孔直径 D_H/D 、碎片云宽度 D_W/D 以及弹靶碎片界面位置 L_1/L_E 随碰撞速度的变化。从图 4(a) 可以看出, 对于 3 种弹丸而言, 靶孔直径随碰撞速度的增加而线性增加。观察图 4(b), 碎片云宽度不随速度的增大而增大。由图 4(c) 可见, 对于圆盘形和柱状弹丸而言, 开始时 L_1/L_E 随碰撞速度的增大而快速减小, 当速度大于 5 km/s 时, L_1/L_E 几乎为常数。

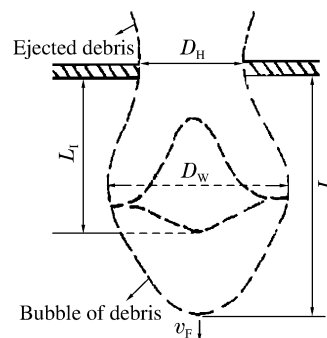


图 3 碎片云示意图

Fig. 3 The sketch map of debris clouds

表 1 D_H/D 、 D_W/D 、 L_E 的计算值

Table 1 The simulated results of D_H/D , D_W/D and L_E

Projectile shapes	Experimental D_H/D	Calculated D_H/D	D_W/D	L_E /(cm)	Time/(μ s)
Sphere	2.07	2.09	4.7520	5.15	7.48
Disk	—	2.09	3.6763	5.15	6.08
Rod	—	3.94	8.4318	5.15	6.63

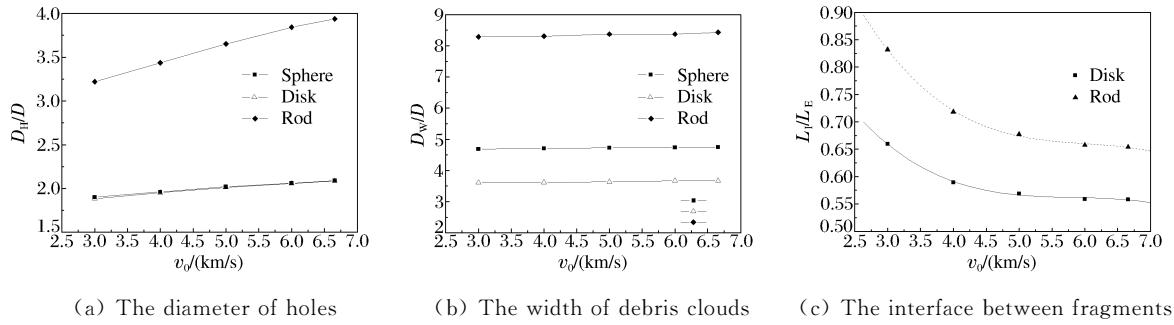


图 4 无量纲碎片云尺寸随碰撞速度的变化

Fig. 4 Dimensionless sizes of debris clouds versus impact velocities

7.2 碎片云的质量特性

碎片云的质量特性如表 2 所示。表中的 m_{tot} 、 m_f 、 m_r 、 m_p 和 m_{max} 分别表示碎片云总质量(包括前向碎片云和喷射尾罩)、前向碎片云质量、喷射尾罩质量、弹丸质量和最大碎片质量(介于 $0.5L_E$ 和 L_E 之间的碎片)。对介于 $0.5L_E$ 和 L_E 之间的最大碎片而言,球形弹丸和圆盘形弹丸相差不大,而柱状弹丸则明显大于前两者,也就是说,从最大碎片质量来看,柱状弹丸的破坏能力最强。

表 2 碎片云的质量特性

Table 2 The mass characteristics of debris clouds

Projectile shapes	m_{tot}/m_p	m_f/m_p	m_r/m_p	$m_{max}/(g)$
Sphere	8.22	6.15	2.07	0.10
Disk	6.83	4.76	2.07	0.05
Rod	5.94	4.03	1.91	0.36

图 5 给出了前向碎片云质量沿对称轴的分布情况。最大值位于前向碎片云尾部(即靶板背面附近区域),因为这个区域的粒子速度最小,其破坏能力也很小,可不予关注。除此之外,3 种弹丸的质量分布明显不同,球形弹丸的碎片云质量最大的区域位于距碎片云前端 1.5~2.0 cm 的区域,圆盘形弹丸的质量分布比较平均,柱状弹丸质量最大的区域处于弹靶碎片界面附近,其它区域质量很小。

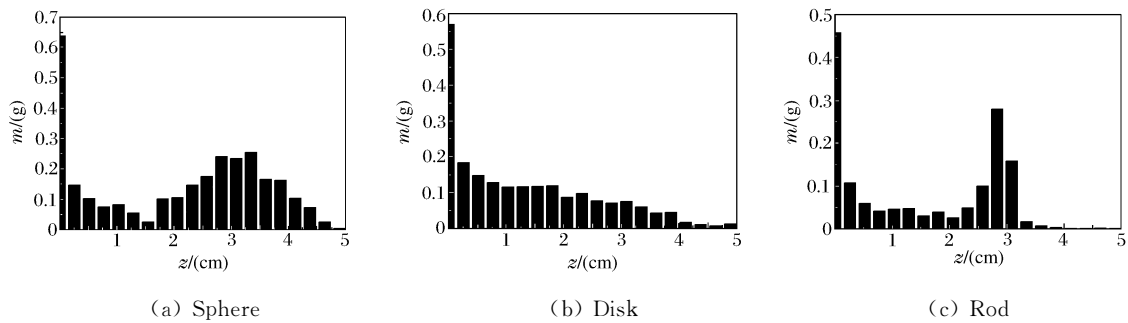


图 5 碎片云质量沿对称轴的分布

Fig. 5 The mass distributions of debris clouds along the symmetrical axis

根据前面提到的碎片识别方法,本研究分析了前向碎片云中的累积碎片百分数(即碎片质量小于某一值时的碎片数量占碎片总数的百分数)随碎片质量的变化规律。图 6 给出了 $v_0 = 6.66$ km/s 时 3 种弹丸的累积碎片百分数随碎片质量的变化。图 7 给出了 3 种速度下球形弹丸累积碎片百分数随碎片质量的变化。由图可知,同一速度下不同形状的弹丸累积碎片分布情况几乎相同,同种弹丸不同速度下的碎片分布规律比较相似,大多数碎片都非常小,质量小于 0.1 g,仅有 1~4 个碎片的质量大于 0.2 g,小

于 0.4 g, 这个结果与文献[9]中的计算结果非常相似。

根据图 6 和图 7 中的数值结果, 通过拟合, 本文给出了累积碎片百分数与碰撞速度和碎片质量的近似函数关系, 计算表明该函数关系与数值结果吻合得很好, 其形式如下

$$f(v_0, m) = z_0(v_0) + [100 - z_0(v_0)] \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{100m}{t_1(v_0)}\right] \right\} \quad (5)$$

$$z_0(v_0) = 29.5 - 11.0v_0 + 1.76v_0^2 \quad (6)$$

$$t_1(v_0) = 8.1 - 1.8v_0 + 0.13v_0^2 \quad (7)$$

式中: 速度 v_0 的单位是 km/s, 碎片质量 m 的单位是 g。

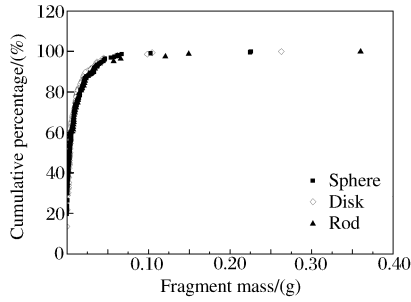


图 6 $v_0 = 6.66$ km/s 时 3 种弹丸的累积碎片百分数随碎片质量的变化

Fig. 6 Cumulative percentage of fragments for three projectiles at $v_0 = 6.66$ km/s versus fragment mass

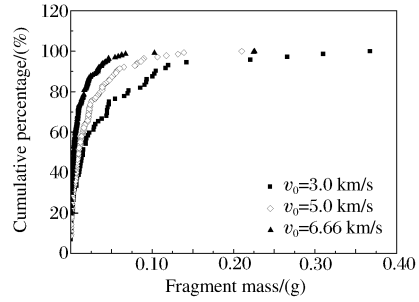


图 7 3 种速度下球形弹丸累积碎片百分数随碎片质量的变化

Fig. 7 Cumulative percentage of fragments for the sphere versus fragment mass

7.3 碎片云的动量及速度特性

动量是衡量碎片云毁伤效应的重要参数。表 3 列出了碰撞速度 $v_0 = 6.66$ km/s 时碎片云动量的计算结果。表中 $mv(+)$ 和 $mv(-)$ 分别表示沿对称轴方向的向前和向后的碎片云动量。碎片云的单位面积动量分布如图 8 所示。由图可见, 碎片云动量沿对称轴逐渐增大, 最大值位于碎片云前端。设 M_0 为弹丸初始动量, M_D 为沿对称轴方向的弹丸初始半径范围内的碎片云向前总动量。图 9 给出了不同速度下球形弹丸 M_D/M_0 随膨胀距离 L_E 的变化。由图可见, 不同速度下弹丸的 M_D/M_0 的变化规律基本相似, 对于碰撞速度 v_0 分别为 3.0、5.0、6.66 km/s 的情况, 当 $L_E = 5.15$ cm 时, M_D/M_0 分别为最大值的 30%、21% 和 15%。图 10 给出了 $v_0 = 6.66$ km/s 时 3 种弹丸的 M_D/M_0 随膨胀距离 L_E 的变化。对于球形、圆盘形和柱状弹丸, 当膨胀距离 L_E 分别等于 D 、 $1.7L$ 和 $1.3L$ 时, M_D/M_0 达到最大值, 之后随着碎片云的不断膨胀, M_D 迅速衰减, 当 $L_E = 5.15$ cm 时, 3 种弹丸的 M_D/M_0 分别为最大值的 15%、33% 和 37%。图 9 和图 10 的结果一方面说明, 在采用双层或多层防护结构时, 防护屏与后墙间距越大, 防护屏的防护效果越好; 另一方面也表明圆盘形弹丸和柱状弹丸的破坏能力要明显强于球形弹丸。

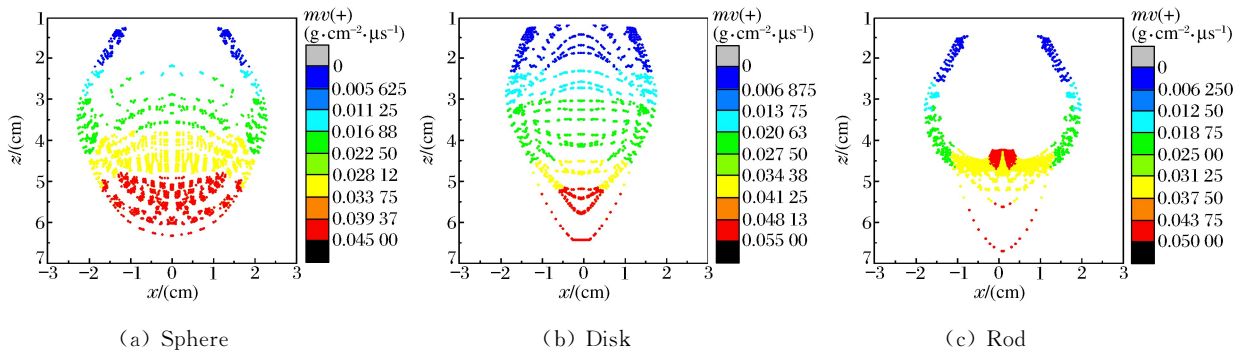


图 8 碎片云的单位面积动量分布

Fig. 8 The unit area momentum distributions of debris clouds

表 3 碎片云动量的计算结果

Table 3 The computational momentum of debris clouds

Projectile shapes	Target $mv(-)$ /(kg · m/s)	Projectile $mv(-)$ /(kg · m/s)	Total $mv(-)$ /(kg · m/s)	Target $mv(+)$ /(kg · m/s)	Projectile $mv(+)$ /(kg · m/s)	Total $mv(+)$ /(kg · m/s)
Sphere	1.1519	0.1412	1.2931	3.5353	6.2745	9.8098
Disk	0.8460	0.1672	1.0132	3.8733	1.5326	5.4059
Rod	0.6436	0.0704	0.7140	1.4791	2.8363	4.3154

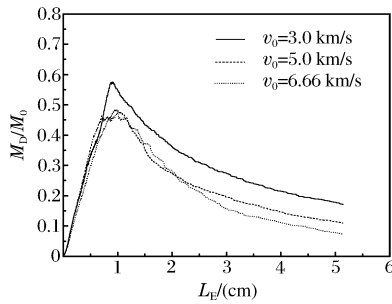
图 9 不同速度下球形弹丸 M_D/M_0 随膨胀距离 L_E 的变化

Fig. 9 M_D/M_0 with different velocities for spherical projectile versus expansion distance L_E

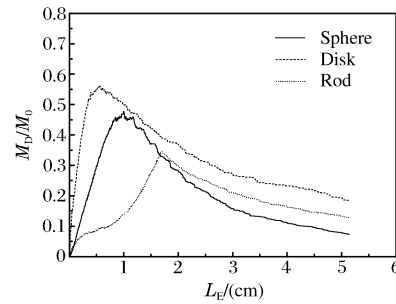
图 10 $v_0 = 6.66$ km/s 时 3 种弹丸的 M_D/M_0 随膨胀距离 L_E 的变化

Fig. 10 M_D/M_0 for three projectiles at $v_0 = 6.66$ km/s versus expansion distance L_E

碎片云前端速度随碰撞速度的变化如图 11 所示。由图可见,前端速度随碰撞速度的增大而线性增大。在同一碰撞速度下,球形弹丸和柱状弹丸的碎片云前端速度基本相等,圆盘形弹丸碎片云前端速度约为前两者的 1.1 倍。

8 结 论

采用 SPH 方法对超高速碰撞形成的碎片云特性作了模拟分析,得到如下结论:

(1) 弹丸形状的不同会造成超高速碰撞碎片云形状特征的明显差异。球形弹丸的碰撞碎片云前端呈半圆形分布;圆盘形弹丸的碰撞碎片云有一个圆盘形的头部;而柱状弹丸的碰撞碎片云前端有一锥状突出,弹丸碎片沿轴向几乎没有膨胀。从形状上来看,数值结果与文献[3]和文献[7]给出的实验图像吻合得较好,这也验证了自编程序的有效性。

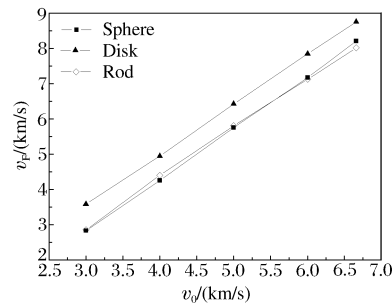
(2) 对于 3 种弹丸而言,孔洞直径随速度的增大而线性增大。

(3) 同一速度下不同形状的弹丸累积碎片分布情况几乎相同,同种弹丸不同速度下的碎片分布规律比较相似,大多数碎片都非常小,质量小于 0.1 g,仅有 1~4 个碎片的质量大于 0.2 g 小于 0.4 g。

(4) 给出了累积碎片百分数与碰撞速度和碎片质量的近似函数关系,计算表明该函数关系与数值结果吻合得很好。

(5) 弹丸初始半径范围内的碎片云总动量 M_D 的分析结果表明, M_D 随着碎片云的不断膨胀而迅速衰减,球形弹丸的衰减幅度大于其它两种弹丸。一方面说明在采用双层或多层防护结构时,防护屏与后墙间距越大,防护屏的防护效果越好,另一方面也表明圆盘形弹丸和柱状弹丸的破坏能力要明显强于球形弹丸。

(6) 碎片云前端速度与碰撞速度成线性关系。同一碰撞速度下,球形弹丸和柱状弹丸的碎片云前端速度基本相等,圆盘形弹丸的碎片云前端速度约为前两者的 1.1 倍。

图 11 碎片云前端速度随碰撞速度的变化
Fig. 11 Residual velocity versus impact velocity

References:

- [1] Libersky L D, Petschek A G. High Strain Lagrangian Hydrodynamics [J]. J Comput Phys, 1993, 109(1): 67-71.
- [2] Hiermaier S, Konke D, Stipl A J, et al. Computational Simulation of the Hypervelocity Impact of Al-Spheres on Thin Plates of Different Materials [J]. Int J Impact Eng, 1997, 20(1-5): 363-374.
- [3] Petschek A G, Libersky L D. Cylindrical Smoothed Particle Hydrodynamics [J]. J Comput Phys, 1993, 109(1): 76-80.
- [4] Randles P W, Libersky L D. Smoothed Particle Hydrodynamics; Some Recent Improvement and Applications [J]. Comput Method Appl Mech Eng, 1996, 139(3-4): 375-408.
- [5] Chen J K, Medina D F. The Effects of Projectile Shape on Laminated Composite Perforation [J]. Composite Science and Technology, 1998, 58(10): 1629-1639.
- [6] Tang W H, Zhang R Q. Introduction to Theories of Equation of State and Its Calculations (2nd Ed) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 321-326. (in Chinese)
汤文辉, 张若棋. 物态方程理论及计算概论(第2版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 321-326.
- [7] Piekutowski A J. Debris Clouds Produced by the Hypervelocity Impact of Nonspherical Projectiles [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26(1-10): 613-624.
- [8] Piekutowski A J. Holes Produced in Thin Aluminum Sheets by the Hypervelocity Impact of Aluminum Spheres [J]. Int J Impact Eng, 1999, 23(1): 711-722.
- [9] Livingstone H G, Verolme K, Hayhurst C J. Predicting the Fragmentation Onset Velocity for Different Metallic Projectiles Using Numerical Simulations [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26(1-10): 453-464.

Numerical Analysis of the Characteristics of Debris Clouds Produced by Hypervelocity Impacts Using SPH Method

XU Jin-Zhong, TANG Wen-Hui, XU Zhi-Hong

*(Institute of Technical Physics, College of Science, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)*

Abstract: The characteristics of debris clouds produced by hypervelocity impacts are simulated and analyzed by smoothed particle hydrodynamics (SPH). The variational laws of the diameter of holes, the width of debris clouds, the cumulative percentage of fragments, the dimensionless momentum M_D/M_0 and the residual velocity are given. By fitting computational data, the cumulative percentage of fragments as a function of the fragment mass and the impact velocity is presented. The computational results show that the function agrees with SPH results very well.

Key words: hypervelocity impacts; debris clouds; smoothed particle hydrodynamics