

空间碎片超高速碰撞数值分析

徐金中¹, 汤文辉¹, 徐志宏¹, 龚自正²

(1. 国防科学技术大学 理学院 技术物理研究所, 长沙 410073; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 采用光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法对空间碎片超高速碰撞问题作了模拟分析, 给出了靶孔直径和碎片云宽度随碰撞速度的变化、累积碎片分布、碎片云无量纲向前总动量随膨胀距离的变化、碎片云前端速度的变化规律以及碎片云速度矢量等。

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

文章编号: 1673-9093(2008)01-0001-05

1 前言

近些年来, 随着人类对空间资源需求的不断增加以及空间科学研究的不断发展, 大量的人造卫星、航天飞机、月球及火星探测器等被发射到外太空, 产生了大量的空间碎片。碎片的空间分布数量和密度的急剧增加对在轨航天器的安全造成了极大的威胁。如何进行有效的空间防护成为当前航天器设计领域的一个热点和难点问题。因此, 空间碎片超高速碰撞特性及规律研究就显得尤为重要。

空间碎片超高速碰撞问题十分复杂, 理论研究困难重重, 实验研究又有一定的局限性, 因此数值方法是研究该问题的重要手段。自1977年Monaghan提出光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, 简称SPH) 方法以来, 该方法迅速发展并在各个领域得到了应用。SPH方法是一种纯拉格朗日粒子方法, 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。

本文自编SPH程序, 对不同形状弹丸的超高速碰撞作了数值模拟, 分析了碎片云形状、质量、速度及动量等特性。

2 碎片的识别

为了得到碎片的质量及动量分布, 确定哪些碎片的尺寸较大, 碎片的识别必不可少。这里采用一种“近邻的近邻”的方法来识别碎片。碎片搜

索示意图如图1所示。假设粒子 i 是第一个碎片的任意一个粒子 (图中灰色粒子), 搜索其一个光滑长度之内的近邻粒子 j 。如果 j 粒子不是碎片边界粒子 (图中黑色粒子), 则继续搜索 j 粒子的一个光滑长度之内的近邻粒子。如果 j 粒子是碎片边界粒子, 则停止对 j 粒子的近邻粒子进行搜索。如果构成碎片1的所有粒子已经没有可搜索的近邻粒子, 则该碎片搜索结束。继续以同样的方法搜索碎片2和碎片3, 当所有碎片云粒子均没有可搜索的近邻粒子, 碎片搜索完成。

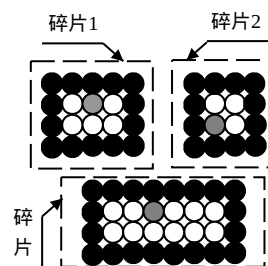


图1 碎片搜索示意图

Fig.1 The sketch of fragment search

3 数值分析

计算采用Mie-Grüneisen物态方程和Johnson-Cook本构模型, 其参数分别见文献[2]和[3]。球形弹丸直径 $D=9.53$ mm, 平板形弹丸直径 $D=9.53$ mm、长度 $L=3.3$ mm, 杆形弹丸直径 $D=4.4$ 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。

3.1 碎片云形状特性

超高速碰撞碎片云示意图如图2所示, 其中

收稿日期: 2008-01-07

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。联系电话: (0731) 4573276; E-mail: xujinzhong080@163.com。

D_H 、 D_W 、 L_E 、 L_I 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。

不同形状的弹丸超高速碰撞形成的碎片云有其特有的形状特性和内部结构。图3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。由图可见，球形弹丸的碰撞碎片云前端呈半圆形分布，靶板碎片沿轴向的碰撞很小；平板形弹丸的碰撞碎片云有一个平板形的头部，弹丸碎片沿轴向的膨胀明显大于其他两种弹丸；而杆形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[4]~[6]给出的实验图像吻合较好，这也验证了自编程程序的有效性

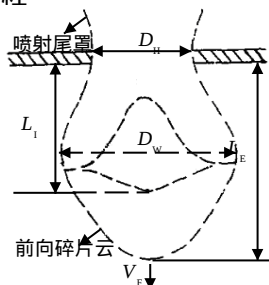
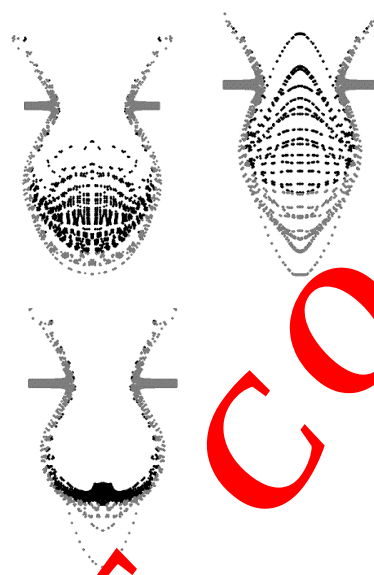


图2 碎片云示意图

Fig.2 The sketch of debris clouds

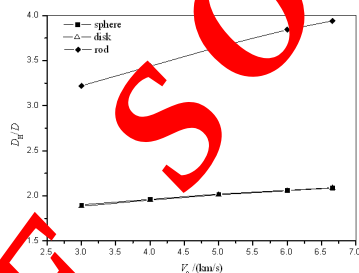


(a) 球形弹丸 (b) 平板形弹丸 (c) 杆形弹丸

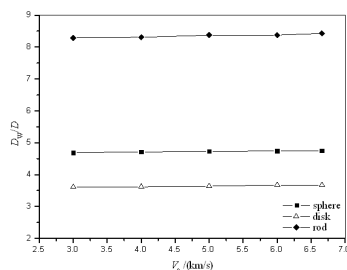
图3 $V_0=6.66$ km/s时的超高速碰撞碎片云

Fig.3 The debris clouds of hypervelocity impacts at $V_0=6.66$ km/s

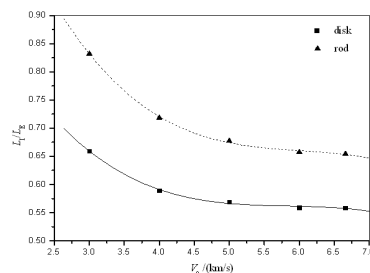
图4给出了无量纲靶孔直径 D_H/D 、碎片云宽度 D_W/D 以及弹靶碎片界面位置 L_I/L_E 随碰撞速度的变化。由图4(a)可见，当弹丸直径相同且碰撞速度也相同时，球形弹丸和平板形弹丸碰撞形成的靶孔直径大小相同，对3种弹丸而言，靶孔直径随碰撞速度线性增加。观察图4(b)，碎片云宽度不随速度的增大而增大，也就是说，对于一定的 h/D ，当碎片云的膨胀距离一定时，碎片云宽度与碰撞速度无关。由图4(c)可见，对于平板形和杆形弹丸而言，开始时 L_I/L_E 随碰撞速度的增大而快速减小，当速度大于5 km/s时， L_I/L_E 几乎为常数。



(a) 靶孔直径



(b) 碎片云宽度



(c) 弹靶碎片界面

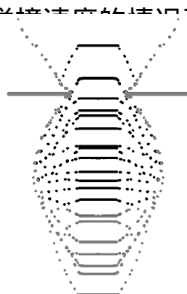
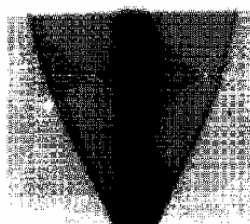
图4 无量纲碎片云尺寸随碰撞速度的变化

Fig.4 Dimensionless sizes of debris clouds vs impact velocities

值得注意的是，对于平板形弹丸而言，以上得到的碎片云图尽管与文献[4]的实验图像吻合很好，

但并没有出现文献[5]中所描述的内部柱状结构。本文分析认为可能是由于平板形弹丸的长径比 (L/D

较大所造成的。为了验证这一分析，在不改变弹丸长度 L 、靶板厚度 h 和碰撞速度的情况下，令弹丸直径 $D=20L$ ，对平板靶再次作了模拟，计算结果如图5。从图5(a)和实验图像^[5]的对比来看，第1期



(a) 实验图像 (b) 数值模拟结果

图5 $D=20L$ 时平板形弹丸的计算结果

Fig.5 The computational results of the disk with $D=20L$

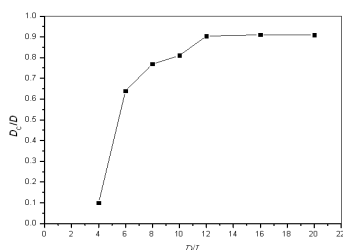


图6 无量纲内部柱状结构直径 D_c/D 随弹丸直径与长度比值 D/L 的变化

Fig.6 The dimensionless diameter of inner columnar structure

D_c/D vs. the ratio of D to L

3.2 碎片云的质量特性

表1列出了碎片云质量的计算结果。表中的 m_{tot} 、 m_f 、 m_r 、 m_p 和 m_{max} 分别表示碎片云（包括前向碎片云和喷射尾罩）总质量、前向碎片云质量、喷射尾罩质量、弹丸质量和最大碎片（介于 $0.5L_E$ 和 L_E 之间的碎片）质量。对于 $0.5L_E$ 和 L_E 之间的最大碎片而言，球形弹丸和平板形弹丸相差不大，而杆形弹丸则明显大于前两者，也就是说，从最大碎片质量来看，杆形弹丸对航天器的威胁更大。

表1 碎片云质量的计算结果

tbl.1 The computational mass of debris clouds

弹丸形状	m_{tot}/m_p	m_f/m_p	m_r/m_p	m_{max}/g
球形	8.22	6.15	2.07	0.10
平板形	6.83	4.76	2.07	0.05
杆形	5.94	4.03	1.91	0.36

应用以上提到的碎片识别方法，本文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

为内部柱状结构的直径，图6给出了 D_c/D 随弹丸直径与长度比值 D/L 的变化。由图可知，当 $D/L \approx 4$ 时柱状结构开始产生；而后 D_c/D 随 D/L 的增大而逐渐增大；如果 $D/L \geq 12$ ，则 D_c/D 基本保持不变，约为0.9。

碎片超高速碰撞数值分析

3

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7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8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并小于0.4 g，这个结果与文献^[7]的计算结果非常相似

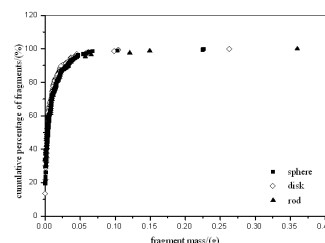


图7 $V_0=6.66$ km/s时3种弹丸的累积碎片百分数随碎片质量的变化

Fig.7 Cumulative percentage of fragments vs fragment mass

for three projectiles at $V_0=6.66$ km/s

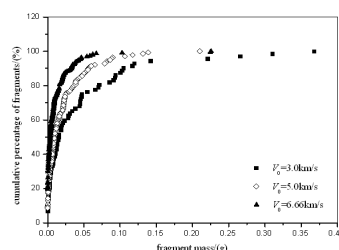


图8 3种速度下球形弹丸累积碎片百分数随碎片质量的变化
Fig.8 Cumulative percentage of fragments vs. fragment mass for the sphere projectile

通过对数值结果进行拟合，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很好，其形式如下：

$$f(V_0, m) = Z_0(V_0) + [100 - Z_0(V_0)][1 - e^{-\frac{100m}{t_1(V_0)}}] \quad (1)$$

$$Z_0(V_0) = 29.5 - 11.0V_0 + 1.76V_0^2 \quad (2)$$

$$t_1(V_0) = 8.1 - 1.8V_0 + 0.13V_0^2, \quad (3)$$

式中： V_0 为碎片碰撞速度，km/s； m 为碎片质量，g。

3.3 碎片云的速度特性

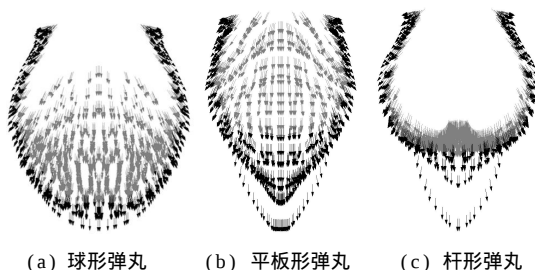


图9 碎片云速度矢量
Fig.9 The velocity vectors of debris clouds

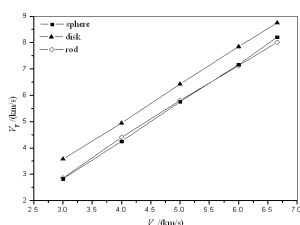


图10 碎片云前端速度随碰撞速度的变化
Fig.10 Residual velocity vs. impact velocity

3.4 碎片云的动量特性

碎片云中最大碎片的质量固然是衡量碎片云毁伤性能的重要参数，但如果其动量较小，则对航天器的损伤也较小，即碎片质量的大小并不能完全决定碎片云对航天器造成的损伤的大小，因而需要进一步分析碎片云动量特性。单位面积上的累积动量沿径向的分布如图11所示。

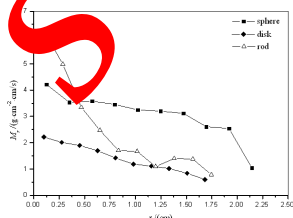
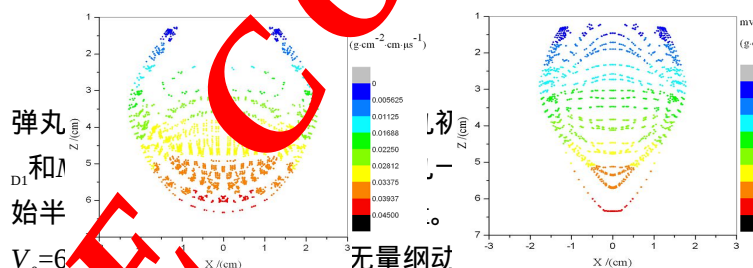


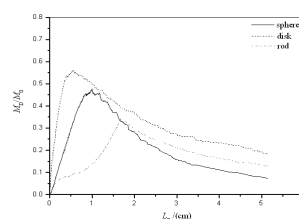
图11 单位面积上的累积动量沿径向的分布
Fig.11 The unit area momentum along the radial direction

从图中可以看出，球形和平板形弹丸单位面积上的累积动量沿径向的分布较为均匀，而杆形

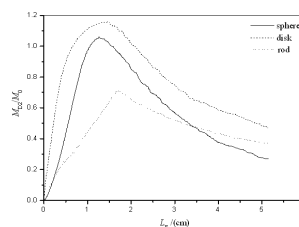
碎片云的速度矢量如图9所示。从中可以看出碎片云前端的粒子基本是沿着弹丸初始速度方向运动，沿碎片云径向的速度分量很小。碎片云前端速度随碰撞速度的变化如图10所示。由图可见二者成线性关系。同一碰撞速度下，球形弹丸和杆形弹丸的碎片云前端速度基本相等，平板形弹丸的碎片云前端速度约为前两者的1.11倍。



离 L_E 的变化。对于球形、平板形和杆形弹丸，当碎片云距离 L_E 分别等于 D 、 $1.7L$ 和 $1.3L$ 时， M_{D1} 达到最大值，之后随着碎片云的不断膨胀， M_{D1} 迅速衰减，当 $L_E=5.15$ cm时，3种弹丸的 M_{D1} 分别为最大值的15%、33%和37%，而 M_{D2} 则分别衰减为最大值的28%、44%和57%。这个结果一方面说明，在采用双层或多层防护结构时，缓冲墙与后墙间距离越大，防护屏的防护效果越好，另一方面也表明平板形弹丸和杆形弹丸对航天器的威胁要明显大于球形弹丸。碎片云单位面积上的动量分布如图13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。



(a) 一倍初始半径



(b) 两倍初始半径

图12 无量纲动量随膨胀距离的变化
Fig.12 The dimensionless momentum vs. expansion

distance

(a) 球形弹丸

(b) 平板形弹丸

(c) 杆形弹丸

图13 碎片云的单位面积动量分布

Fig.13 The unit area momentum distributions of debris clouds

4 结论

采用SPH方法对超高速碰撞形成的碎片云进行了模拟分析，得到如下结论：

(1) 球形弹丸的碰撞碎片云前端呈半圆形分布；平板形弹丸的碰撞碎片云有一个平板形的头部；而杆形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。

(2) 对于平板形弹丸而言，当 $D/L \approx 4$ 时柱状结构开始产生；而后 D_c/D 随 D/L 的增大而逐渐增大；如果 $D/L \geq 12$ ，则 D_c/D 基本保持不变，约为0.9。

(3) 碎片云的宽度几乎不随碰撞速度的变化而变化，靶孔直径随碰撞速度的增大而线性增大。

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

(5) 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模拟结果吻合得很好。

(6) 速度矢量分布表明，碎片云前端的碎片基本是沿着弹丸初始速度方向运动，沿碎片运动方向的速度分量很小。碎片云前端速度与碰撞速度基本成线性关系。

(7) 无量纲碎片云总动量的分析结果表明，随着碎片云的不断膨胀，无量纲总动量的衰减幅度明显大于其他两种弹丸。这迅速达到最大值而后又迅速

速衰减，球形弹丸

一方面说明在采用Whipple防护结构时，增加缓冲墙与后墙间距可以明显提高防护性能，另一方面也表明平板形弹丸和杆形弹丸对航天器的威胁要明显大于球形弹丸。

参考文献 (References)

- [1] Libersky L D, Petschek A G. High strain Lagrangian hydrodynamics[J]. J Comput Phys, 1993, 109: 67-71
- [2] 汤文辉, 张若棋, 等. 物态方程理论及计算概论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999
- [3] Hiermaier S, Konke D, Stip A J, et al. Computational simulation of the hypervelocity impact of al spheres on thin plates of different materials[J]. Int J of Impact Engng, 1997, 20: 363-374
- [4] Petschek A G, Libersky L D. Cylindrical smoothed particle hydrodynamics[J]. J Comput Phys, 1993, 109: 76-80
- [5] Piekutowski A J. Debris clouds produced by the hypervelocity impact of nonspherical projectiles[J]. Int J of Impact Engng, 2001, 26: 613-624
- [6] Piekutowski A J. Holes produced in thin aluminum sheets by the hypervelocity impact of aluminum spheres[J]. Int J of Impact Engng, 1999, 23: 711-722
- [7] Livingstone H G, Verolme K, Hayhurst C J. Predicting the fragmentation onset velocity for different metallic projectiles using numerical simulations[J]. Int J of Impact Engng, 2001, 26: 453-464