文章编号：1000-5773(2012)01-0007-11

基于特征长度的非球形弹丸超高速撞击碎片云特性研究*

徐坤博，龚自正，侯明强，郑建东，杨继运

（北京卫星环境工程研究所，可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室，北京　100094）

摘要：根据ORDEM2000模型和卫星标准解体模型(SBM)，确定空间中真实空间碎片的典型形状和撞击姿态。利用AUTODYN仿真软件，基于碎片特征长度，对立方体、方形薄片超高速撞击产生的碎片云进行三维数值模拟，从形状、质量分布、速度分布与能量分布深入分析碎片云特性，并与通用的球形标准弹丸进行比对。结果表明：弹丸形状及撞击姿态对碎片云特性有显著影响，立方体和方形薄片弹丸角撞击时产生的毁伤能力最大，而球形弹丸最小。因此，基于标准球形弹丸获得的弹道极限方程低估了航天器遭受空间碎片撞击损伤的风险，而基于真实碎片特征长度的弹丸形状效应研究将对现行的球形弹丸弹道极限方程(或曲线)做出更合理的修正。

关键词：空间碎片；超高速撞击；碎片云；弹丸形状效应；数值仿真

中图分类号：V423；O347　　**文献标识码**：A

1　引　言

空间碎片又被称为“空间垃圾”，是人类自有航天活动以来留在空间的废弃物，如失效卫星、运载火箭轨道级、碰撞解体碎片等。空间碎片以平均10 km/s的超高速运动，对航天器具有极大的破坏力。目前，空间碎片防护设计已成为航天器(特别是载人航天器和大型应用卫星)设计必不可少的环节，是国际航天技术领域的研究热点之一。

为了便于地面实验模拟，航天器空间碎片防护研究(包括超高速撞击实验、撞击风险评估和防护设计)中均使用标准的球形弹丸，但是空间碎片的实际形状却并非球形。所以，开展非球形弹丸对航天器的损伤以及对防护结构防护性能的影响研究，对获得空间中真实碎片的超高速撞击特性是十分必要的，是航天器空间碎片防护技术深化和完善的重要内容。

早在1972年，Morrison[1]就开展了弹丸形状对超高速撞击特性影响的研究，通过实验初步获得了当撞击速度接近7 km/s时不同质量和长径比的圆柱形、球形弹丸对航天器典型Whipple防护结构的撞击毁伤效果。此后，Christiansen[2]、Hu[3]等人为了考察弹道极限方程的精度，也对弹丸形状效应进行了实验和数值仿真研究。由于弹丸质量在超高速撞击效应中占主导地位，所以这些研究都是基于弹丸质量相同这个前提进行的，即在进行数据对比分析时，将非球形弹丸尺寸换算为与之质量相等的球形弹丸直径(等效球形直径)。此外，由于当时正处于新型非球形弹丸超高速发射技术[4-5]发展的高峰期，所

* **收稿日期**：2010-09-07；**修回日期**：2011-03-13

基金项目：国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB731600)；国家国防科工局空间碎片专项(KJSP06209)

作者简介：徐坤博(1984－)，女，硕士，助理工程师，主要从事航天器空间碎片防护研究. E-mail：xu_kb@sina.com

通讯作者：龚自正(1964－)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事航天器空间碎片超高速撞击防护、材料动态力学性能和高压物理研究. E-mail：gongzz@263.net

以当时的弹丸形状效应研究更多关注于这些技术所能发射的圆柱、圆盘或圆锥形弹丸。国内，张伟、徐金中等人用数值模拟方法分别研究了柱状弹丸[6]、椭圆状弹丸[7]以及其它形状弹丸[8-9]撞击产生的碎片云特性，这些研究也都是基于等效球形直径开展的。

以前的弹丸形状效应研究存在两点不足：(1) 圆柱、圆盘或圆锥形不能代表空间碎片的典型形状；(2) 质量参数并不是目前空间碎片观测和空间碎片模型(包括环境模型和工程模型)中直接获取的参数。而弹丸形状效应研究必须基于空间碎片环境模型所提供的空间碎片典型形状，其结论才能更准确地应用于航天器撞击风险评估和防护设计。为此，Schonberg 等人[10]利用基于空间碎片环境模型中雷达反射截面积确定的特征长度，对形状效应进行了仿真研究，重新获得的弹道极限曲线与 Hu 等人[3]的结果存在明显差异。随后，Williamsen 等人[11-12]模拟了在卫星解体模型中出现比例最高的立方体和长方体弹丸，获得的弹丸撞击姿态也从单一的圆柱或圆盘端面撞击发展为多种三维撞击姿态。

本研究根据空间碎片环境模型选定空间碎片的典型形状，基于典型形状的特征长度，采用 AUTODYN 仿真软件，对碎片超高速撞击产生的碎片云进行三维仿真，从形状、密度和质量分布、速度和能量分布等方面深入分析碎片云特性，研究空间碎片超高速撞击形状效应。

2 空间碎片的形状及撞击姿态选择

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration，NASA)的空间碎片工程模型(Orbital Debris Engineering Model，ORDEM)是国际上公认的用于在轨航天器空间碎片撞击风险评估和防护设计的标准模型。ORDEM 是基于空间探测数据和一定的数学模型得到的特定高度地球轨道上空间碎片通量随空间碎片尺寸、速度和方向等参数变化的模型[13]，ORDEM 2000 是目前的通用版本。该模型中的一个重要组成部分是卫星标准解体模型(Standard Breakup Model，SBM)，它描述了卫星或碎片解体后的形状、数量、密度以及与未解体前的相对速度。

根据 SBM 模型中对碎片形状及数量的描述，选取仿真形状。表 1 给出了卫星地面解体实验碎片的形状分布[14]，其中 n_{tot} 为碎片总数，n_{large} 为大碎片数量(大碎片共 112 片)，n_{small} 为其余小碎片数量。可见，立方体和方形薄片状碎片数量最多，分别占总量的 58.79%和 13.19%，可以作为空间碎片的典型形状。因此，本研究选取立方体和方形薄片作为仿真形状，另外再选取通用的标准球形弹丸作为与之对比的形状。

表 1 卫星撞击解体实验中碎片的形状分布[14]

Table 1 Distribution of fragment shapes from satellite orbital characterization impact test[14]

Shape	n_{tot}	n_{large}	n_{small}	Shape	n_{tot}	n_{large}	n_{small}
Flat plate	36	9	27	Rod	96	0	96
Curled plate	60	33	27	Cylinder	12	2	10
Cuboid	15	10	5	Cuboid and plate	2	2	0
Sphere	1	0	1	Cube	2 799	0	2 799
Flake	628	0	628	Other	1 112	56	1 056

本研究采用 ORDEM 和 SBM 模型中的碎片特征长度 L_{C} 作为衡量碎片的基本参数。L_{C} 与雷达探测的碎片雷达横截面(RCS)直接相关，每一个拥有相同雷达横截面积但形状不同的物体，其特征长度 L_{C} 都相同。L_{C} 是物体 3 个正交维度上长度的平均值，这 3 个维度分别是[10]：维度 A，物体最大尺寸所在维度，即物体最长体对角线；维度 B，物体在与 A 垂直方向上的最大尺寸所在维度，即物体在与 A 轴垂直的平面上投影的最大尺寸所在维度；维度 C，物体在与 A、B 垂直方向上的最大尺寸所在维度，即物体在与 A、B 所在平面的法线方向上投影的最大尺寸所在维度。

根据以上定义，不同形状(见图 1)的特征长度 L_{C} 为

球形 $$L_{\mathrm{C}} = D \tag{1}$$

立方体 $$L_C=\frac{L}{3}\left(\sqrt{3}+\frac{2\sqrt{6}}{3}+\sqrt{2}\right) \tag{2}$$

方形薄片 $$L_C=\frac{1}{3}\left[(2L^2+T^2)^{1/2}+\frac{2L(L^2+T^2)^{1/2}}{(2L^2+T^2)^{1/2}}+\frac{2TL}{(L^2+T^2)^{1/2}}\right] \tag{3}$$

式中:D 为球形弹丸直径,L 为立方体和方形薄片边长,T 为方形薄片厚度。根据 SBM 模型的假设,当方形薄片边长 $L<1$ mm 时,薄片厚度 $T=L$,当 $L>1$ mm 时,$T=L^{0.26}$。

下面分析 3 种形状的撞击姿态。由于球体具有中心对称结构,因此当它以超高速撞击航天器时,造成的危害与其撞击姿态无关;但是对于立方体、方形薄片弹丸,超高速撞击航天器造成的危害却与其撞击时的姿态直接相关。Williamsen 等人[12]将立方体与方形薄片的撞击姿态划分为 26 种,如图 2 所示。图 2 中每个箭头代表 1 种撞击姿态。在水平方向上共均布着 8 种姿态,即 4 个“面撞击”和 4 个“边撞击”;在垂直方向上有上、下 2 个“面撞击”;在水平方向向上、向下倾斜 45°方向上,各有 8 种撞击姿态,分别为 4 个“边撞击”和 4 个“点撞击”。根据立方体和方形薄片自身的轴对称结构,这 26 个方向可分别简化为 3 个和 5 个方向。简化后的撞击方向及其撞击概率(P)如图 3 所示。需要说明的是,这里讨论的撞击姿态与撞击角度是两个不同的概念,撞击角度是速度矢量与靶板法向的夹角。本研究中的所有仿真均为正撞击,撞击速度方向为 x 轴方向。

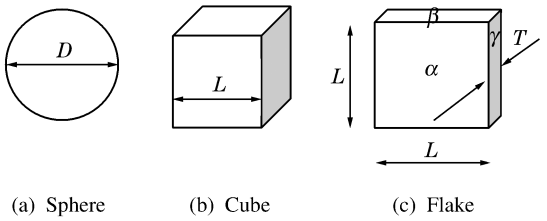


图 1 3 种弹丸形状示意图

Fig. 1 Sketch of three kinds of projectile shape

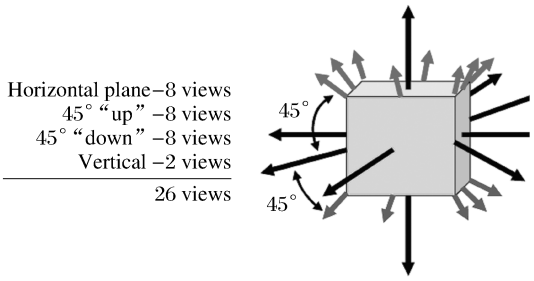


图 2 立方体的 26 种撞击姿态[12]

Fig. 2 Impact orientations of cube considered using the 26-view methodology[12]

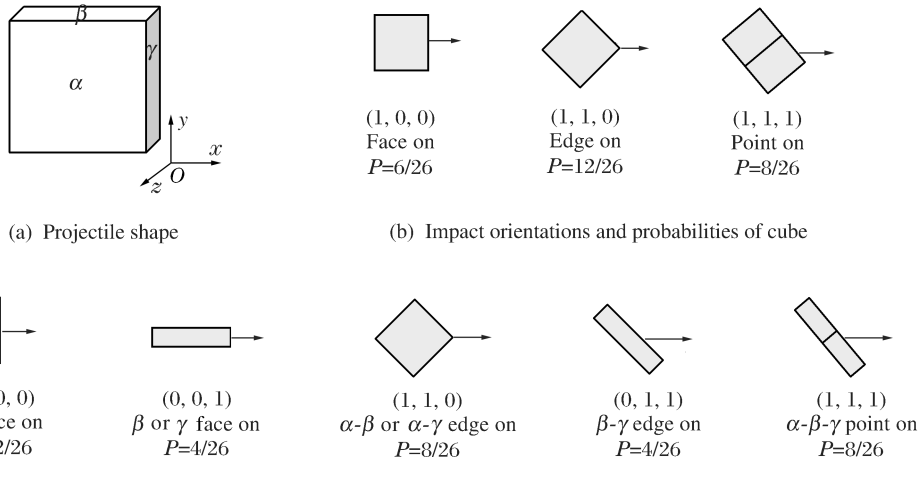


图 3 立方体与方形薄片弹丸的撞击姿态与撞击概率[12]

Fig. 3 Impact orientations and probabilities of cube and flake[12]

3 数值仿真方法

利用光滑粒子流体动力学(Smooth Particle Hydrodynamics,SPH)方法及 ANSYS AUTODYN 3-D 显式非线性动力学分析软件进行仿真分析。弹丸及被撞击的缓冲屏材料均为 AL6061-T6 铝,缓冲屏厚 1.2 mm。三维仿真中 SPH 粒子大小为 0.2 mm。材料状态方程选用冲击状态方程,强度模型选用 Johnson-Cook 模型,失效模型采用材料最大应力模型。仿真中弹丸的特征长度均为 4 mm,撞击速度为 5 km/s。

由于撞击后碎片云中弹丸和缓冲屏材料不会完全破碎,碎片的质量不一,在超高速撞击下一些碎片还会发生熔化或气化,所以质量特性分析需要在碎片云中识别出每个固态碎片,并得到每个碎片的动力学参数,即需要碎片识别方法。本研究采用 AUTODYN 程序中集成的一种碎片识别方法:当一个 SPH 粒子的材料状态达到其失效准则时,对于 AL6061-T6 铝,则为最大拉应力大于 2.6 GPa 时,识别程序认为该粒子与其最大拉应力方向上紧邻的粒子断裂。随后,该程序会将单独存在的粒子(即与周围粒子都发生断裂)从碎片云中滤出,将剩下的粒子识别为碎片。简而言之,该方法识别出来的碎片为未达到最大拉应力失效准则的粒子群,每个粒子群中至少有 2 个粒子。

4 数值仿真结果与讨论

4.1 弹丸形状对缓冲屏穿孔直径的影响

在计算缓冲屏穿孔尺寸时,选取与穿孔面积相同的圆形直径 D_h(等效直径)作为穿孔尺寸的特征值。设 S_h 为穿孔面积,S_p 为弹丸在缓冲层上的投影面积,即与缓冲屏作用的最大截面积。

球体和立方体(特征长度均为 4 mm)的 D_h、S_h/S_p 随撞击速度 v 的变化曲线如图 4(a)和图 4(b)所示。从图 4(a)中可以看出,所有曲线都随速度的增加呈现非线性上升,当撞击速度 v 大于 3 km/s 时,3 种不同撞击姿态的立方体穿孔直径 D_h 均大于球形弹丸的 D_h;当撞击速度 v 在 1～4.85 km/s 范围内时,角撞击产生的穿孔直径为 3 种撞击姿态中最大;当撞击速度在 4.85～10 km/s 范围内时,边撞击产生的穿孔直径位于所有曲线的上方,说明在该速度范围内边撞击对于缓冲屏的毁伤最大。图 4(b)显示:当撞击速度为 1 km/s 时,S_h/S_p 均接近于 1,说明弹丸穿过缓冲屏时几乎没有破碎,只是在缓冲屏上留下一个略大于自身大小的孔;随着撞击速度的增加,弹丸的 S_h/S_p 以不同斜率增加;撞击速度越大,弹丸在缓冲屏上的穿孔相对于自身的截面积越大;立方体弹丸面撞击的 S_h/S_p-v 曲线位于所有曲线的最上方,球形弹丸 S_h/S_p-v 曲线的斜率最小。

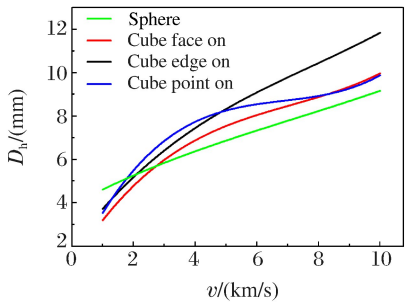


图 4(a) 球体与立方体弹丸的 D_h 随撞击速度 v 的变化曲线

Fig. 4(a) Equivalent penetration diameter D_h versus impact velocity v for sphere and cube projectiles at different impact orientations

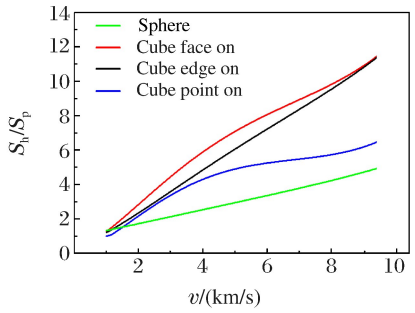


图 4(b) 球体与立方体弹丸的 S_h/S_p 随撞击速度 v 的变化曲线

Fig. 4(b) Ratio of penetration area and projection area (S_h/S_p) versus impact velocity v for sphere and cube projectiles at different impact orientations

方形薄片的 D_h、S_h/S_p 随撞击速度 v 的变化曲线如图 5(a)和图 5(b)所示。当同一弹丸以相同速度、不同姿态撞击缓冲屏时,穿孔直径从大到小依次为:α-β 或 α-γ 边撞击、α-β-γ 角撞击、β-γ 边撞击、β 或 γ 面撞击,而 α 面撞击在撞击速度小于 5.3 km/s 时穿孔直径最大,撞击速度大于 5.3 km/s 后上升幅度减小。由图 5(b)可知,撞击速度较高时,β-γ 边撞击和 β 或 γ 面撞击的 S_h/S_p 曲线高于其它曲线。

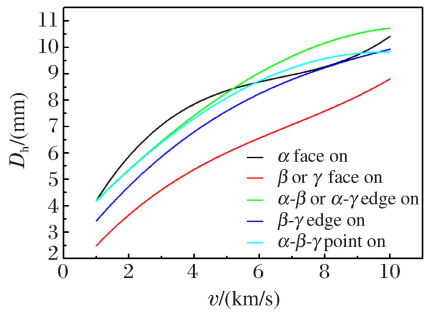


图 5(a)　方形薄片弹丸的 D_h 随撞击速度 v 的变化曲线

Fig. 5(a)　Equivalent penetration diameter D_h versus impact velocity v for flake projectiles at different impact orientations

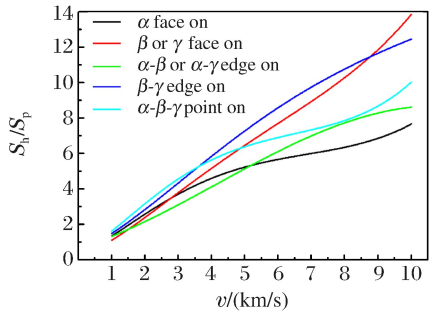


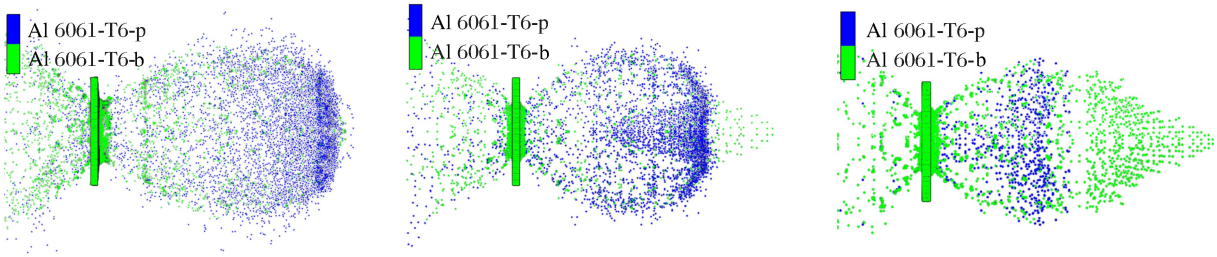
图 5(b)　方形薄片弹丸的 S_h/S_p 随撞击速度 v 的变化曲线

Fig. 5(b)　Ratio of penetration area and projection area (S_h/S_p) versus impact velocity v for flake projectiles at different impact orientations

4.2　弹丸形状对碎片云形状的影响

在 3 种弹丸的撞击碎片云图(共 9 种情况)中,只有球形、立方体面撞击与方形薄片 α 面撞击的碎片云形状为 x 轴对称,如图 6 所示,其余均相对于 xy 或 xz 面对称,如图 7 所示。

图 6 中 Al 6061-T6-p 表示弹丸材料,AL6061-T6-b 表示缓冲屏材料。可见:相比球形弹丸,立方体面撞击的碎片云增加了一个全部由缓冲层碎片组成的圆锥状头部,并且在碎片云中心处形成了一个内部圆锥;方形薄片 α 面撞击碎片云则在撞击方向上明显被拉伸,形成梭状。



(a) Sphere　　(b) Cube, face on　　(c) Flake, α face on

图 6　关于 x 轴对称的碎片云形貌

Fig. 6　Shapes of debris clouds which are symmetric about the x-axis

图 7 为立方体和方形薄片两种弹丸以其它撞击姿态撞击缓冲屏产生的碎片云在 xy、xz 平面内的形貌图。立方体边撞击(见图 7(a))时:xy 面内的碎片云发生径向膨胀,并在头部产生一个碎片密度较大的弧,该弧将增大碎片云对后墙的毁伤能力;在 xz 面内,碎片云径向尺寸缩小;总体来看,立方体边撞击碎片云呈贝壳状。立方体角撞击碎片云(见图 7(b))虽然在 xy 面上呈现不规则形貌,但它仍然关于 xy 面对称,弹丸产生的碎片集中在碎片云头部的 3 条弧上。

方形薄片 β 或 γ 面撞击(见图 7(c))时,碎片云与立方体弹丸边撞击相似,也呈贝壳状,在头部产生一条密度较大的弧。方形薄片 β-γ 边撞击碎片云与前者类似,只是沿 x 轴旋转了 90°,如图 7(d)所示。方形薄片 α-β 或 α-γ 边撞击碎片云关于 xz 面对称,弹丸碎片相对集中在碎片云 z 轴正方向,如图 7(e)所示。方形薄片 α-β-γ 角撞击时,碎片云头部中与方形薄片 3 条边对应的位置上出现 3 条密度

较大的碎片弧，如图 7(f)所示。

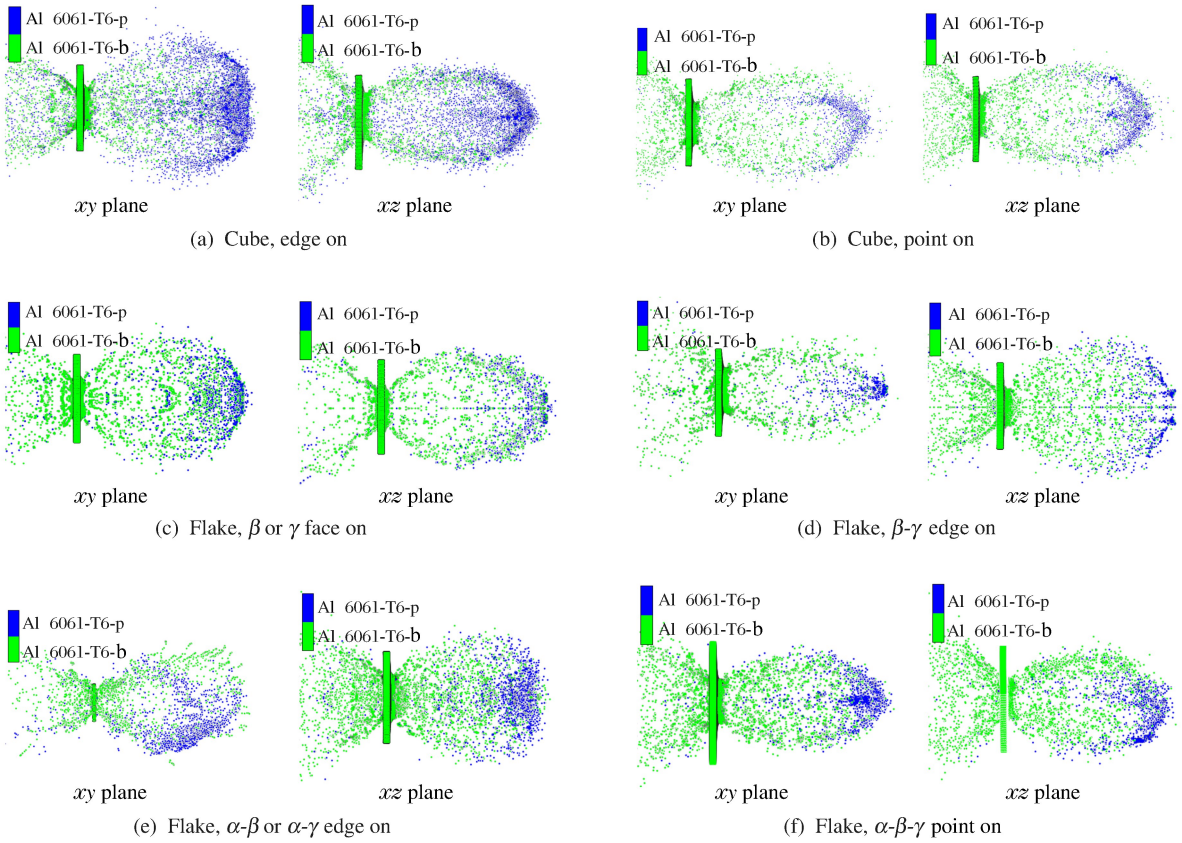


图 7 关于 xy 和 xz 平面对称的碎片云形貌

Fig. 7 Shapes of debris clouds which are symmetric about the xy plane

4.3 弹丸形状对碎片云质量特性的影响

立方体面撞击碎片云的识别结果如图 8 所示。图 8 中的碎片大多集中在前端，与图 6(b)对比后可以看出，碎片云中一些很小的粒子消失了。在消失的粒子中，头部尖端和轮廓外层粒子为碎片云外部泡状结构，它是在因碰撞产生的冲击波作用下碎裂飞散形成的，撞击到后墙上将会产生分散的小弹坑，对后墙的毁伤威力不大，在很多碎片云模型中都忽略其对后墙的加载作用。

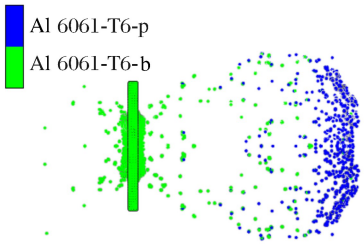


图 8 立方体面撞击碎片云碎片识别结果

Fig. 8 Fragments distinguish of a cube projectile at face impact orientation

表 2 给出了不同形状弹丸以不同撞击姿态撞击时产生的碎片云质量特性。表 2 中：n 为碎片数量；$m_{\max}$、m_{tot}、m_{f}、m_{r}分别为最大碎片质量、碎片云总质量、前向碎片云质量(沿撞击方向分布于缓冲屏前的碎片云质量)和向后溅射碎片云质量(缓冲屏后的碎片云质量)，这 4 个数据均为碎片识别后的数据。因为只有前向碎片云才对后墙造成毁伤，所以最大碎片质量 $m_{\max}$取前向碎片云中碎片的最大质量。表 2 中的数据表明：就碎片数量和碎片总质量而言，球形弹丸最大，这是由于特征长度相同时，球形弹丸的质量最大(如特征长度为 4 mm 时，球形弹丸质量为 91 mg，立方体弹丸质量为 33 mg，方形薄片弹丸质量为 38 mg)；立方体和方形薄片弹丸面撞击产生的最大质量碎片比其它撞击姿态都小，说明撞击速度相同时面撞击后弹丸的破碎程度最大，而角撞击后弹

表 2　不同形状弹丸和撞击姿态的碎片云质量特性

Table 2　Mass characteristics of debris clouds for different projectile shapes and impact orientations

Projectile shape	Impact orientation	n	m_{max}/(mg)	m_{tot}/(mg)	m_f/m_{tot}/(%)	m_r/m_{tot}/(%)
Sphere		1 316	3.70	75.06	80.7	19.3
Cube	Face on	1 200	0.33	37.84	83.1	16.9
	Edge on	910	0.95	55.67	67.5	32.5
	Point on	433	1.56	41.84	69.9	30.1
Flake	α face on	412	0.28	44.80	63.1	36.9
	β or γ face on	324	1.69	41.76	69.6	30.4
	β-γ edge on	316	4.37	44.23	75.5	24.5
	α-β or α-γ edge on	407	1.56	41.87	67.7	32.3
	α-β-γ point on	355	5.73	42.90	68.2	31.8

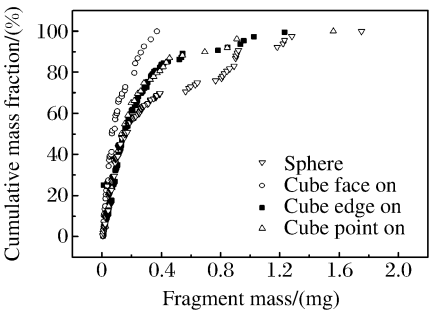
丸的破碎程度最小,且质量最大的碎片出现在方形薄片角撞击碎片云中;就前向碎片质量占总碎片质量的比例而言,球形弹丸和立方体面撞击较高。

图 9 给出了 3 种弹丸前向碎片云中碎片累积质量分数,即碎片质量小于某一值的所有碎片质量之和占碎片总质量的百分数。图 9 中,纵坐标值越大,碎片云中碎片破碎得越小,即弹丸和缓冲屏破碎越完全;曲线终点对应的横坐标为最大碎片质量,纵坐标值为 100%。在图 9(a)中:立方体面撞击曲线位于其它曲线上方,说明该撞击姿态下形成的碎片质量最小;立方体弹丸边撞击和角撞击曲线相似;球形弹丸曲线位于最下方。在图 9(b)、图 9(c)中,方形薄片弹丸 α 面撞击曲线位于最上方,其次是 β 面撞击和 α-β 边撞击曲线,接着是 α-β-γ 角撞击,β-γ 边撞击产生的碎片破碎程度最小。

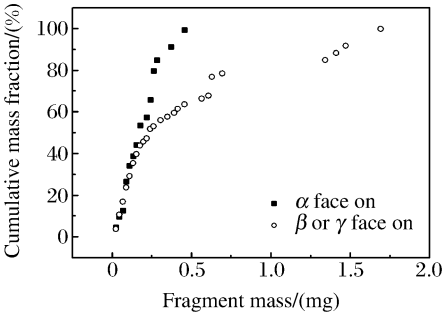
4.4　弹丸形状对碎片云速度特性的影响

立方体弹丸面撞击碎片云速度矢量分布如图 10 所示,图中箭头方向代表速度方向,箭头起点的粒子颜色及箭头长短代表速度大小。从图 10 中可以看出,碎片云头部速度方向基本沿撞击方向向前,且速度最大;碎片速度的径向分量随碎片云直径的增加而增大,说明碎片云轮廓上的径向速度最大,膨胀也最快。

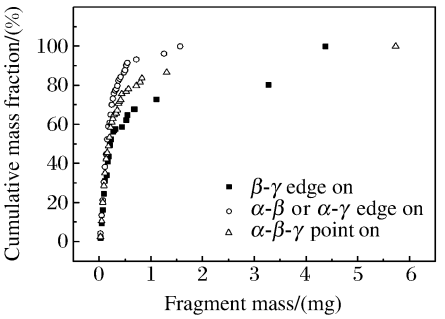
仿真中,碎片云头部速度 v_f 定义为碎片云最前端粒子的 x 轴速度,碎片云径向速度 v_r 定义为碎片云直径最大处的粒子在 yz 平面内的速度。图 11 为碎片云头部速度随撞击速度 v 的变化曲线。从图 11 中可以看出,所有头部速度均与撞击速度呈线性关系;在撞击速度相同的情况下,立方体角撞击和方形薄片 α 面撞击的头部速度最大。



(a) Sphere and cube



(b) Flake face on



(c) Flake, edge on and point on

图 9　不同形状弹丸和撞击姿态的碎片累积质量分数

Fig. 9　Cumulative mass fraction of the fragments for different projectile shapes and impact orientations

图 12 为碎片云径向速度随撞击速度变化的曲线。对于立方体弹丸，如图 12(a)所示，当撞击速度相同时，边撞击的径向速度最大，说明在相同时间内边撞击碎片云的径向膨胀距离最大，如果此时弹丸完全破碎，那么其碎片云的能量也就最分散。对于方形薄片弹丸，如图 12(b)所示，β-γ 边撞击的径向速度最大，但考虑到它的碎片云形状是贝壳状，因此图中的径向速度只能说明其在一个方向上的膨胀速度。

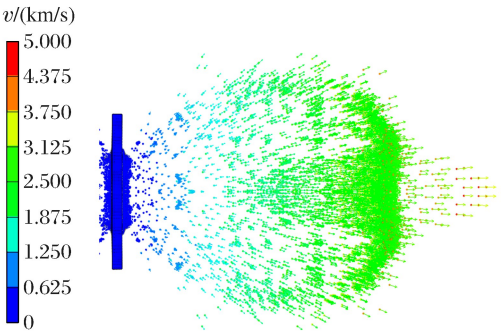


图 10　立方体面撞击碎片云速度矢量分布

Fig. 10　Velocity vectorgraph of debris cloud produced by cube at face impact

4.5　弹丸形状对碎片云能量特性的影响

仅分析碎片云质量分布或速度分布不足以预测碎片对防护结构后墙的毁伤程度，因此，有必要对碎片云的能量分布进行研究。图 13 为立方体面撞击的碎片云能量分布图。可以看出，能量较高的红色碎片分布在碎片云中心及靠近缓冲屏两侧，而碎片速度大的头部区域和碎片密集区域的能量并不高。

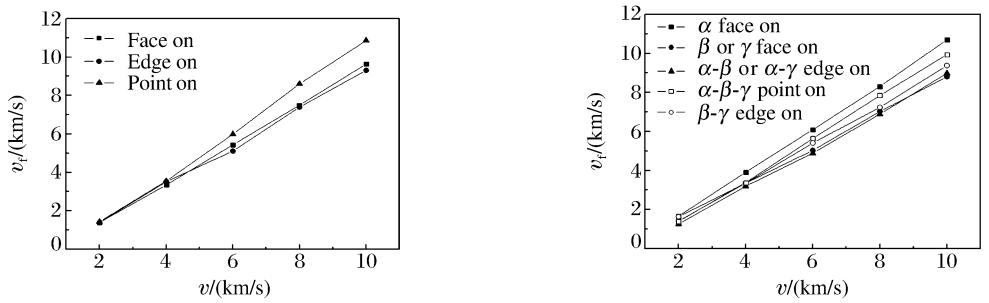


图 11　立方体和方形薄片弹丸的碎片云头部速度随撞击速度变化曲线

Fig. 11　Front velocity of debris cloud versus impact velocity for different projectile shapes and impact orientations

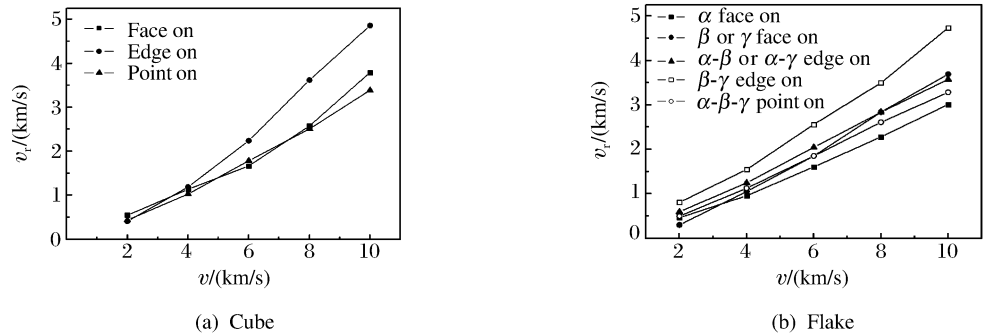


图 12　立方体和方形薄片弹丸的碎片云径向速度随撞击速度变化曲线

Fig. 12　Radial velocity of debris cloud versus impact velocity for different projectile shapes and impact orientations

表 3 列出了立方体和方形薄片弹丸在不同撞击姿态下碎片云中最大质量碎片的动能和动量计算结果。其中，碎片坐标的定义与图 13 相同，E_k 为动能，P_x、P_y、P_z 分别为 x、y、z 方向上的动量。计算结果表明，方形薄片 β-γ 边撞击、α-β-γ 角撞击、β 或 γ 面撞击产生的最大质量碎片的动能明显高于其它撞击姿态，且它们的 x 轴坐标也相对较大，位于碎片云头部。碎片沿 x 轴方向的动量是预测其对后墙毁

表 3　碎片云中最大质量碎片的动能及动量计算结果

Table 3　Calculated energy and momentum of the maximum mass fragment

Projectile shape	Impact orientation	Coordinates/(mm)	E_k/(mJ)	P_x/(mg·m/s)	P_y/(mg·m/s)	P_z/(mg·m/s)
Sphere		(3.1,1.85,5.7)	79	445	179	594
Cube	Face on	(8.5,9.6,1.7)	199	263	243	44
	Edge on	(2.9,4.8,0.5)	21	110	148	69
	Point on	(2.9,−2.3,−5.8)	45	222	−132	−270
Flake	α face on	(5.4,0.63,8.8)	25	69	2	96
	β or γ face on	(35.9,−0.19,−2.5)	13 400	6 720	−26	−421
	β-γ edge on	(38.9,0.57,−3.0)	38 600	18 300	−12	−1 410
	α-β or α-γ edge on	(3.7,1.7,−6.5)	95	380	95	−370
	α-β-γ point on	(31.3,4.8,7.3)	36 500	19 700	2 690	4 660

伤的重要参数。根据表 3 中的数值,可以预测方形薄片 α-β-γ 角撞击产生的大质量碎片对后墙的毁伤最大。

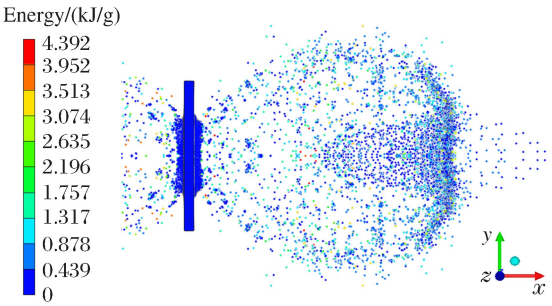


图 13　立方体面撞击碎片云能量分布

Fig. 13　Debris cloud energy distribution of cube at face impact

5　结　论

根据 ORDEM2000 模型和 SBM 模型对空间中真实碎片形状和数量的描述,确定了空间碎片的最典型形状和撞击姿态。利用 AUTODYN 仿真软件,基于空间碎片特征长度对立方体、方形薄片超高速撞击产生的碎片云进行仿真,并与通用的球形标准弹丸进行比对。结果表明,弹丸形状及撞击姿态对碎片云的形状、密度和质量分布、速度和能量分布等特性有显著影响,具体表现为:(1) 不同形状弹丸超高速撞击产生的碎片云形貌显著不同,撞击姿态对立方体、方形薄片弹丸的碎片云形貌影响很大;(2) 在相同撞击速度下,立方体角撞击和方形薄片 α-β 边撞击对缓冲层的穿孔最大,而球形弹丸最小;(3) 碎片质量特性表明,立方体面撞击与方形薄片 α 面撞击产生的碎片破碎较完全;(4) 在相同的撞击速度下,方形薄片 α 面撞击的碎片云头部速度最大,立方体弹丸边撞击的碎片云径向速度最大,方形薄片角撞击碎片云的头部 x 轴动量最大;(5) 综合来看,立方体弹丸和方形薄片弹丸角撞击的毁伤能力最大,而球形弹丸的毁伤能力最小。

通常使用的球形弹丸弹道极限曲线是实际空间碎片撞击弹道极限曲线的上限。换句话说,基于球形弹丸弹道极限曲线获得的航天器遭受空间碎片撞击风险评估结果低估了撞击损伤风险。这一点在撞击风险评估和防护工程设计中应予以充分重视。

空间碎片观测和空间碎片模型(包括环境模型和工程模型)中用碎片特征长度作为标识、描述碎片的基本参数;另一方面,在撞击风险评估和防护设计中处于核心位置的弹道极限方程(或曲线)是用弹丸的临界直径作为主要指标。因此,基于真实空间碎片特征长度的弹丸形状效应研究是对弹道极限方程(或曲线)更合理的修正。

References:

[1] Morrison R H. A preliminary investigation of projectile shape effects in hypervelocity impact of a double-sheet structure, NASA TN D-6944 [R]. Washington D C: National Aeronautics and Space Administration, 1972.

[2] Christiansen E L, Justin H K. Projectile shape effects on shielding performance at 7 km/s and 11 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1997, 20(1-5): 165-172.

[3] Hu K, Schonberg W P. Ballistic limit curves for non-spherical projectiles impacting dual-wall spacecraft systems [J]. Int J Impact Eng, 2003, 29(1-10): 345-355.

[4] Thornhill T F, Chhabildas L C, Reinhart W D, et al. Particle launch to 19 km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33(1): 799-811.

[5] Protection manual, IADC-WD-00-03 [R]. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 2008.

[6] Zhang W, Pang B J, Luo D K, et al. Investigation into material state characterization of debris cloud created by cylindrical projectile impact on bumper [J]. Chinese Space Science and Technology, 2001, 3: 53-59. (in Chinese)
张 伟, 庞宝君, 罗德坤, 等. 柱状弹丸撞击防护屏形成碎片云材料状态特性研究 [J]. 中国空间科学技术, 2001, 3: 53-59.

[7] Ma W L, Zhang W, Guan G S, et al. Numerical simulation of debris cloud produced by ellipsoidal projectile hypervelocity impact on bumper [J]. Materials Science & Technology, 2005, 13(3): 294-298. (in Chinese)
马文来, 张 伟, 管公顺, 等. 椭球弹丸超高速撞击防护屏碎片云数值模拟 [J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(3): 294-298.

[8] Zhang W, Ma W L, Guan G S, et al. Numerical simulation of non-spherical projectiles hypervelocity impact on spacecraft shield configuration [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(3): 240-245. (in Chinese)
张 伟, 马文来, 管公顺, 等. 非球弹丸超高速撞击航天器防护结构数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(3): 240-245.

[9] Xu J Z. Research on the characteristics of debris clouds produced by hypervelocity impacts of space debris and the design and optimization of the shielding structure using SPH method [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 120-133. (in Chinese)
徐金中. 空间碎片超高速撞击特性及其防护结构优化设计的 SPH 研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 120-133.

[10] Schonberg W P, Williamsen J E. RCS-based ballistic limit curves for non-spherical projectiles impacting dual-wall spacecraft systems [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33(1-12): 763-770.

[11] Williamsen J E, Evans S W. Predicting orbital debris shape and orientation effects on spacecraft shield ballistic limits based on characteristic length [J]. Int J Impact Eng, 2006, 33(1-12): 862-871.

[12] Williamsen J E, Schonberg W P, Evans H, et al. A comparison of NASA, DoD, and hydrocode ballistic limit predictions for spherical and non-spherical shapes versus dual- and single-wall targets, and their effects on orbital debris penetration risk [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35(12): 1870-1877.

[13] Liou J C, Matney M J, Phillip D, et al. The new NASA orbital debris engineering model ORDEM2000, NASA/TP-2002-210780 [R]. USA: NASA Johnson Space Center, 2002.

[14] Mcnight D S, Johnson N L, Fudge M L, et al. Satellite orbital debris characterization impact test (SOCIT) series data collection report, NAS 9-19215 [R]. Colorado Springs, CO, USA: Kaman Sciences Corporation, 1995.

Debris Cloud Characteristics of Non-Spherical Projectile Based on Characteristic Length

XU Kun-Bo, GONG Zi-Zheng, HOU Ming-Qiang,
ZHENG Jian-Dong, YANG Ji-Yun

(*National Key Laboratory of Science and Technology on Reliability and Environment Engineering, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: The effects of non-spherical projectile shape on hypervelocity impact are investigated for the cube and flake projectiles, which are the typical shapes of orbital debris in ORDEM2000 and Standard Breakup Model (SBM), by using AUTODYN-3D hydrocode simulations. The characteristics of the debris clouds produced by the hypervelocity impact based on the characteristic length of projectile are analyzed from their shape, mass, velocity and energy distributions, respectively, and are compared with the common used sphere projectile. The simulated results show that the shape and impact orientations of projectile have obvious influences on the debris cloud distribution, and moreover, the point impacts of the cube and flake have the maximum penetration capability, whereas the sphere is minimal. This means that the meteoroids and orbital debris impact risks of spacecrafts would be underestimated using the spherical projectile-based Ballistic Limit Curves (BLC). The projectile shape effects based on the real characteristic length of orbital debris will make more reasonable corrections for the BLC.

Key words: meteoroids and orbital debris; hypervelocity impact; debris cloud; projectile shape effect; numerical simulation