文章编号:1000-5773(2013)03-0391-07

丝网防护屏碎片云特性数值模拟研究*

庞宝君,林　敏,张　凯,傅　翔

(哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心,黑龙江哈尔滨　150080)

摘要:丝网作为一种颇具潜力的轻质防护屏候选材料,在新型防护结构开发中具有广泛的应用前景。为了掌握丝网防护屏超高速撞击特性,采用数值仿真方法模拟球形弹丸分别撞击连续型防护屏和丝网防护屏,研究相同厚度及面密度的2种防护屏受到弹丸撞击后产生的碎片云形态、质量、速度和动量分布的差异。结果表明,丝网防护屏碎片云随撞击位置不同呈现不同形态,但碎片云前端均存在带状碎片分布区域。在丝网防护屏产生的碎片云中,碎片主要分布于碎片云后端,丝网不能有效地减缓入射弹丸速度,其作用主要为切割弹丸。弹丸撞击2种防护屏后,弹丸破碎形成的碎片云中相同部位呈现不同速度变化规律。丝网防护屏碎片云动量密度峰值均高于相同厚度连续型防护屏碎片云,而相同面密度的2种防护屏碎片云动量密度峰值接近。

关键词:丝网防护屏;连续型防护屏;碎片云;数值仿真

中图分类号:O347.3　　**文献标识码**:A

1　引　言

微流星体和空间碎片的超高速撞击可能损伤航天器的关键系统,进而导致航天器发生灾难性失效,威胁航天器的安全运行[1]。目前航天器对毫米级微流星体和空间碎片的防护,主要是基于加装防护屏的被动防护,弹丸撞击防护屏后破碎形成碎片云,减少了动量通量密度并降低了速度,进而对航天器提供有效的保护。面对日益恶化的空间碎片环境,新型轻质高效的防护结构开发受到了越来越多的重视。丝网以其具有结构简单、面密度低等优点,成为一种颇具应用潜力的防护屏材料。对防护屏按结构分类,可将丝网定义为非连续型防护屏,相应地,薄板可定义为连续型防护屏。Christiansen对网格双防护结构进行了研究,建立了其撞击极限方程,在相同防护效果的基础上,与Whipple防护结构相比,可减轻30%的质量[2-3];Hörz通过实验,研究了丝网及连续型防护屏的区别,观察到丝网防护屏与连续型防护屏在损伤形态、最大坑深等方面存在明显区别,对丝网防护屏在防护结构中应用的可行性进行了探索[4-6];Magkov通过理论分析,研究了丝网参数对弹丸破坏效应的影响规律,并进行了简单的数值计算[7-8]。

目前,对于丝网防护屏的研究成果多为实验性的定性分析,相对于连续型防护屏,丝网防护屏的研究还很不充分。数值仿真作为一种辅助手段,在空间碎片超高速撞击研究中具有重要的作用,它不仅能弥补实验条件的不足,还可充分了解撞击的全过程以及超高速撞击现象的内在机理,并可直接获得碎片云的定量物理数据。本研究在数值仿真手段有效性已取得验证的基础上[9],对球型弹丸超高速正撞击丝网防护屏和连续型防护屏产生的碎片云进行定量研究。研究撞击相同厚度及相同面密度的丝网防护屏和连续型防护屏后碎片云的质量、速度和动量分布特性,并考虑撞击位置对碎片云形态和分布的影响。

* **收稿日期**:2011-09-01;**修回日期**:2011-10-18

作者简介:庞宝君(1963－),男,博士,教授,主要从事空间碎片防护研究. E-mail:pangbj@hit.edu.cn

通讯作者:林　敏(1980－),男,博士研究生,主要从事超高速撞击数值仿真研究. E-mail:linmin813@yahoo.cn

2 数值仿真方案

采用 LS-DYNA 971 版本 SPH 算法对球型弹丸超高速撞击丝网防护屏和连续型屏进行数值模拟。弹丸材料为 2017-T4 铝合金，直径 $D=4.0$ mm，撞击速度 $v=4.0$ km/s；丝网和连续型防护屏材料均为 5A06 铝合金，丝网防护屏丝径 $d_w=0.5$ mm，丝线间距 $l=1.8$ mm，连续型防护屏厚度 $h=1.0$ mm，本算例中，$h=1.0$ mm 的连续型防护屏与 6 层丝网面密度近似相同。对于弹丸和防护屏，均采用 Mie-Grüneisen 状态方程(EOS Type 4)和 Johnson-Cook 材料模型(Material Type 15)表征材料性能[10-11]。Johnson-Cook 材料模型参数见表 1，表 1 中，A 为材料在准静态下的屈服强度，B 和 N 为应变硬化的影响参数，C 是应变率影响指数，M 为温度软化系数，T_{melt} 为熔点，T_{room} 为室温。

表 1 Johnson-Cook 材料模型参数

Table 1 Johnson-Cook material parameters

Material	A/(GPa)	B/(GPa)	N	C	M	T_{room}/(K)	T_{melt}/(K)
2017-T4 Al	0.270	0.426	0.34	0.015	1.0	300	775
5A06 Al	0.265	0.426	0.34	0.015	1.0	300	864

Mie-Grüneisen 状态方程参数见表 2，表中，ρ_0 为材料密度，G 为剪切模量，c_0 为体积声速，S 为冲击波波速和波后质点速度之间线性关系的斜率，Γ_0 为 Grüneisen 参数。

表 2 Mie-Grüneisen 状态方程参数

Table 2 Mie-Grüneisen equation of state parameters

Material	ρ_0/(g/cm^3)	G/(GPa)	c_0/(km/s)	S	Γ_0
2017-T4 Al	2.79	27.6	5 379	1.29	2.0
5A06 Al	2.64	27.0	5 328	1.338	2.0

弹丸撞击防护屏后，随着时间 t 的增加，碎片云经历了从加速膨胀阶段到匀速膨胀阶段的过程，当 $t=7.0$ μs 时，碎片云完全脱离靶板，并得到了充分扩散，可以作为数据统计的时间点。本研究所有撞击工况中碎片云物理参量均选取 $t=7.0$ μs 时的值作为统一比较分析标准。

3 数值仿真结果及分析

3.1 碎片云形态分析

连续型防护屏与丝网防护屏受到弹丸撞击后在观察板形成的损伤形态明显不同，损伤形态可间接反映碎片云的形态和能量分布。在低速段撞击实验中，连续型防护屏受到弹丸撞击后，在观察板形成一个圆形的损伤区域，最大弹坑位于区域中心，弹坑呈半球形，界面光滑；而丝网防护屏受弹丸撞击后，在观察板形成截然不同的损伤形态，一般在损伤区域中间有多个较大的弹坑，弹坑界面不光滑，围绕着这些弹坑，有数目不等的触须状分布的小弹坑[8-9]。采用数值仿真方法研究丝网防护屏受到弹丸撞击后形成的碎片云形态，鉴于丝网防护屏的非连续性，考虑撞击位置对碎片云形态的影响。

对弹丸与丝网防护屏的撞击，按撞击位置的不同分为 4 种情况分别进行模拟。撞击位置分别为：网格中心位置(Center)、丝线交叉点(Cross)、线(Line)、偏移点(Offset)，如图 1 所示。

图 2 为弹丸分别从 4 种撞击位置撞击单层丝网形成的碎片云形态。由图 2 可知，随着撞击位置的不同，碎片云形态存在明显差异。以弹丸入射速度为 z 轴正向，建立笛卡尔坐标系，方向 1 定义为从 z 轴正向观察 xy 平面；方向 2 定义为从 $x(y)$ 轴观察 $y(x)z$ 平面，图 2(a)、图 2(c)、图 2(e)、图 2(g)分别显示从方向 1 视角观察所得碎片云形态图；图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)、图 2(h)分别显示从方向 2 视角观

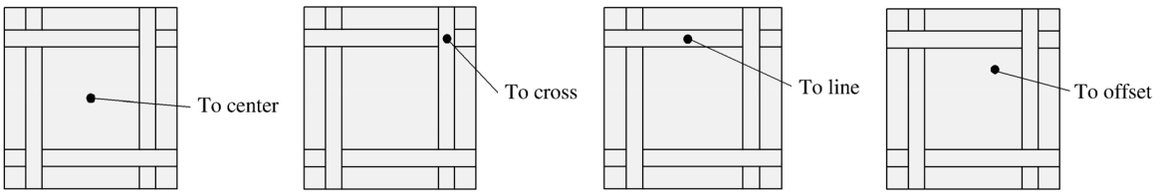


图 1　撞击点位置示意图

Fig. 1　Diagrams of impact position

察所得碎片云形态图。图 2(a)、图 2(b)为当撞击位置是网格中心位置时碎片云形态图，图 2(a)显示碎片云有 4 条明显的带状碎片区域，4 条带状区域互相垂直；图 2(b)显示碎片云前端共形成 5 条带状碎片区域，除图 2(a)所示 4 条外，在碎片云中心位置存在 1 条碎片带状分布区域，其方向与 z 轴平行；图 2(c)、图 2(d)为当撞击位置是交叉点时碎片云形态图，图 2(c)显示碎片云有 4 条带状碎片区域，中间为一矩形碎片区域，4 条带状区域与矩形区域的夹角均为 45°，图 2(d)表明，带状区域主要位于碎片云前端，带状区域粒子速度较高；图 2(e)、图 2(f)为当撞击位置是线时碎片云形态图，图 2(e)显示碎片云有 4 条带状碎片区域，中间区域粒子呈竖条状分布，图 2(f)表明，带状碎片区域位于碎片云前端；图 2(g)、图 2(h)为当撞击位置是偏移点时碎片云形态示意图，由图可知，碎片云分布不规则，但仍有带状碎片区域，综合图 2(g)、图 2(h)两图，可知，共有 3 条带状碎片分布区域，带状区域碎片速度较高。

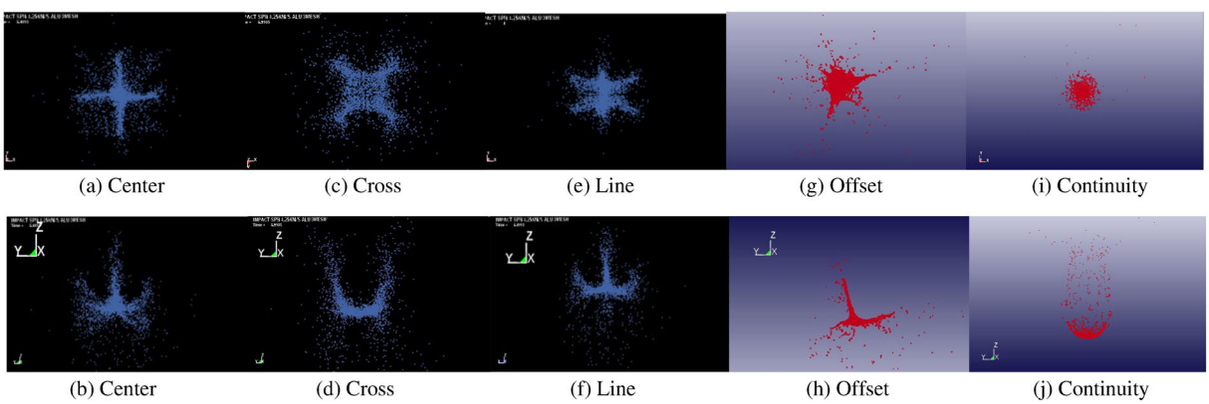


图 2　碎片云形态图

Fig. 2　Configuration of debris clouds

弹丸撞击连续型防护屏时，碎片云呈椭球形，以 z 轴为中心对称分布(如图 2(i)、图 2(j)所示)，碎片集中于碎片云前端[2]。综合弹丸从丝网防护屏 4 种撞击位置分别撞击后形成的碎片云形态，并与弹丸撞击连续型防护屏后产生的碎片云形态相比较，可知：当弹丸撞击丝网防护屏后，碎片云随着撞击位置的变化呈现不同的形态，但碎片云前端均呈现带状分布，大部分碎片集中于碎片云后端；碎片云的对称性也随着撞击位置的不同而变化，当撞击位置为 Center 时，碎片云以 z 轴为中心对称分布，而当撞击位置为 Offset 时，碎片云分布则不具有对称性。2 种防护屏产生的碎片云形态存在明显差别。

在仿真过程中，丝网防护屏受弹丸撞击后形成的碎片云在低速段($v\leqslant 5$ km/s)时呈现相同的形态，带状碎片区域大小、长度随速度变化而改变，此变化规律还需进一步的深入研究。

3.2　质量分布特性

连续型防护屏和丝网防护屏受到弹丸撞击后碎片云质量分布也存在着较大差别。图 3 为相同厚度的 2 种防护屏受弹丸撞击后向前碎片云质量轴向分布图，由图可知，当球型弹丸撞击连续型防护屏后，弹丸碎片主要集中于碎片云前端，85.2%的弹丸碎片集中于距碎片云前端 3 mm 的区域内，随着与碎片云前端距离的增大，碎片质量逐步减少。球型弹丸撞击丝网防护屏偏移点位置(Offset)后，弹丸碎片质量分布范围大于弹丸撞击连续型防护屏产生的碎片。碎片云前端质量分布较少，弹丸碎片主要集中在

距离碎片云前端 4～8 mm 的区域内，碎片云质量随着与碎片云前端距离的增加，呈现先增加后减少的变化趋势。

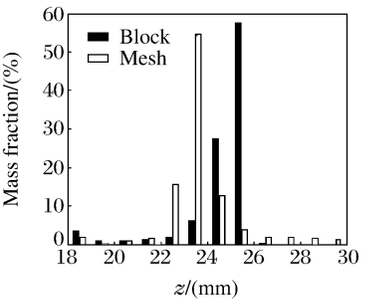


图 3 碎片云质量沿轴向的分布

Fig. 3 Mass distribution of the debris clouds along axis direction

3.3 速度分布特性

连续型防护屏和丝网防护屏受到弹丸撞击后，碎片云的速度特性也存在较大差别。弹丸撞击相同厚度连续型防护屏和丝网防护屏后破碎形成的碎片云整体速度特性如表 3 所示。

表 3 平均速度一栏中，弹丸撞击丝网防护屏后碎片云平均速度随撞击位置变化不大，平均速度在 3.80 km/s 左右，而弹丸撞击相同厚度的连续型防护屏后，碎片云平均速度为 2.95 km/s，这与文献[2]中的结论“丝网不能有效地减缓弹丸入射速度，其作用主要是切割弹丸”相吻合。连续型防护屏和丝网防护屏碎片云整体速度特性中存在一个明显的区别：当弹丸撞击连续型防护屏后，弹丸碎片速度均小于弹丸入射速度；而弹丸撞击丝网防护屏后，弹丸碎片中有一定数量的碎片速度大于弹丸入射速度。通过结合前文丝网防护屏碎片云形态的分析可知，这些碎片主要分布于带状区域。当与后续靶板发生 2 次碰撞时，带状分布区域的碎片由于较高的速度，碎片发生液化、汽化的可能性高于相同撞击条件时弹丸与连续型防护屏碰撞所产生的碎片。

表 3 连续型防护屏与丝网防护屏速度特性比较

Table 3 Comparison of velocity characteristics of continuous shield and mesh shield

Parameter	Position				
	Block	Center	Cross	Line	Offset
Average velocity/(km/s)	2.95	3.78	3.85	3.82	3.80
Percentage of the particles/(%)	0	6.21	4.07	8.57	7.87

Note: The second line in Table 3 represents the average velocity of debris cloud, which was produced after the projectile respectively impacted the four positions of the mesh shield and the continuous shield at the speed of 4 km/s; the quantity percentage of the particles, which velocity is higher than impact velocity, is shown in Line 3.

比较撞击连续型防护屏和丝网防护屏后弹丸碎片云相同部位粒子的速度变化，如图 4 所示。图 4(a)是弹丸撞击连续型防护屏后，其碎片云前端、中部、尾部粒子速度变化图，由图可知，当弹丸撞击靶板后，冲击波入射方向与粒子运动方向相反，产生拉伸波，使得弹丸粒子速度降低。冲击波经弹丸尾部反射后，波运动方向与粒子运动方向相同，产生压缩波，提升前端粒子速度。在1.2μs时，碎片云进入等

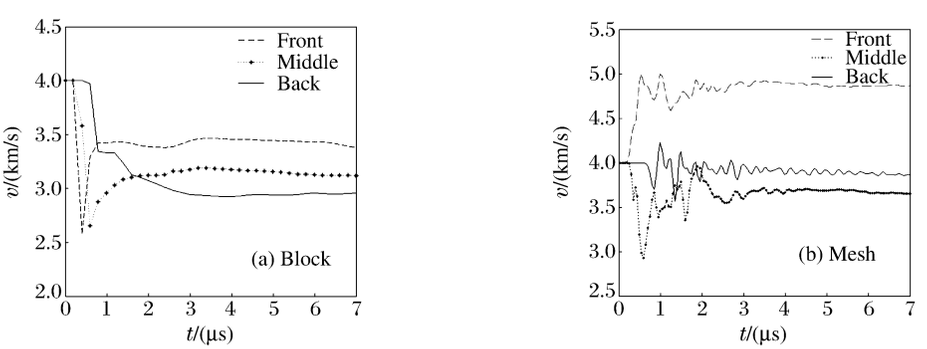


图 4 弹丸粒子速度

Fig. 4 Velocity of the nodes in projectile

速膨胀阶段。图4(b)是弹丸撞击丝网防护屏偏移点(Offset)后,其碎片云前端、中部、尾部粒子速度变化图。由于丝网防护屏的非连续性,经撞击位置产生的冲击波进入弹丸时,在撞击位置前端,冲击波运动方向与粒子运动方向相同,使得部分粒子速度大于弹丸入射速度;在撞击位置后端,冲击波运动方向与粒子运动方向相反,其变化规律与弹丸撞击连续型防护屏类似。同时,在本例中,尾部粒子速度高于中部粒子速度。在 2.0 μs 时,碎片云进入等速膨胀阶段。由弹丸碎片云中不同部位粒子在撞击连续型防护屏和丝网防护屏后速度变化可知,撞击 2 种防护屏,弹丸产生的动态响应存在较大区别。

3.4　动量分布特性

图 5 为弹丸撞击相同厚度连续型防护屏和丝网防护屏后,入射速度方向剩余动量示意图。由图 5 可知,对于丝网防护屏,入射速度方向剩余动量随撞击位置变化不明显,但对于连续型防护屏与丝网防护屏则存在明显差异。弹丸撞击连续型防护屏后,入射速度方向剩余动量为初始动量的 73.45%,而撞击丝网后,剩余动量为初始动量的 94.42%;对比相同面密度的连续型防护屏和多层丝网防护屏,可发现剩余动量比较接近。

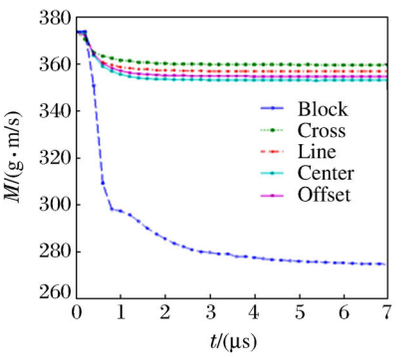


图 5　剩余动量

Fig. 5　Resultant momentum

从剩余动量角度不能有效地区分撞击位置对后板损伤的影响,因而提出动量密度这一概念评估碎片云对后板的损伤效应。动量密度定义为单位面积内所承受的动量,是忽略了时间效应后动量的累积效果,可在一定程度上评估碎片云对后板的损伤。本研究中,$\widetilde{M}$ 表示动量密度,单位为 Mg/(s·m)。图 6(a)~图 6(f)分别为弹丸撞击相同厚度连续型防护屏和丝网防护屏后弹丸碎片沿 z 轴方向动量密度示意图,图中动量密度值为每平方毫米面积内的累积动量值。

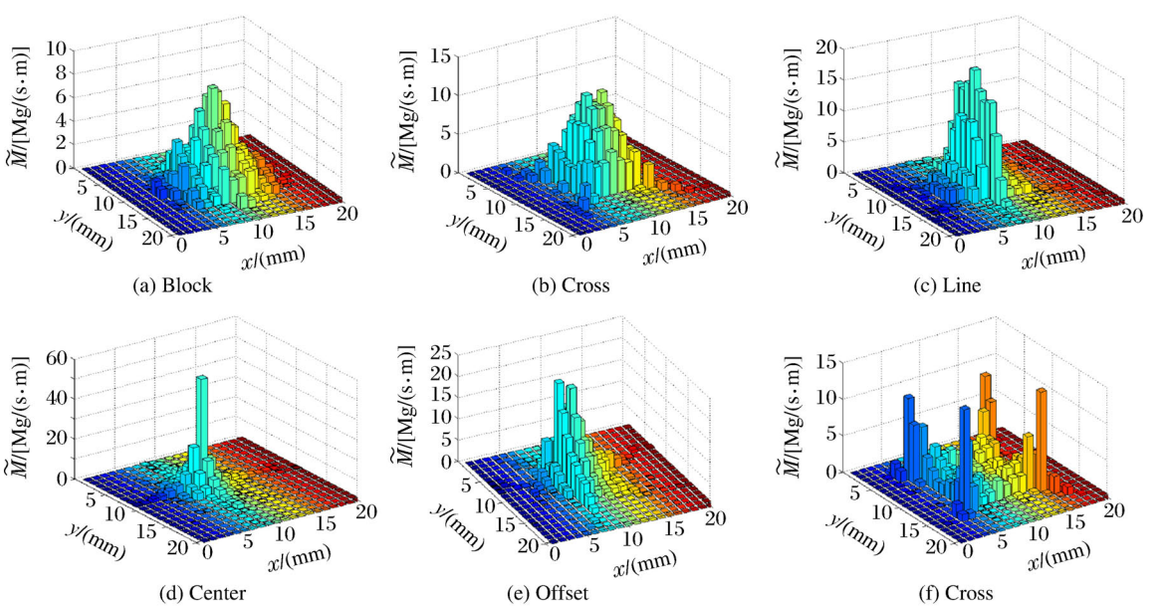


图 6　动量密度示意图

Fig. 6　Momentum density

图 6(a)为连续型防护屏动量密度示意图。动量密度最大值为 7.9 Mg/(s·m),位于中心位置。从中心位置往外扩散,动量密度逐步减少,动量密度在 xy 平面投影为圆形。图 6(a)与弹丸撞击连续型防

护屏后在观察板形成圆形损伤区域，弹坑界面光滑的实验现象较为吻合，因而动量密度可在一定程度上评估碎片云对后板的损伤。

图 6(b)为撞击位置是 Cross 时动量密度示意图。动量密度最大值为 11.76 Mg/(s·m)，位于中心区域，随着与中心位置距离的增大，动量密度逐步减少。动量密度在 xy 平面投影为矩形，在矩形 4 节点处存在带状分布区域，与相邻各边夹角均为 45°，同时，由图可知，带状分布区域，动量密度要小于中心区域。

图 6(c)为撞击位置是 Line 时动量密度示意图。动量密度最大值为 19.4 Mg/(s·m)，位于中心位置。撞击时，Line 平行于 x 轴，动量密度主要垂直于 x 轴分布，图中 4 条带状区域，动量密度值较小。动量密度在 xy 平面投影近似为矩形，矩形中垂直于 x 轴的中垂线区域，动量密度值较大。

图 6(d)为撞击位置是 Center 时动量密度示意图。动量密度最大值为 55.5 Mg/(s·m)，位于中心位置，随着与中心位置距离的增大，动量密度迅速下降。动量密度在 xy 平面投影为十字形分布。

图 6(e)为撞击位置是 Offset 时动量密度示意图。动量密度最大值为 22.2 Mg/(s·m)，绝大部分动量分布于峰值一侧，在 xy 平面投影为不规则形状，但仍可观察到带状区域，带状区域动量密度较小。

由图 6(a)～图 6(e)可知，丝网防护屏碎片云动量密度峰值均高于连续型防护屏，分布对称性随撞击位置而改变。随着撞击位置从 Cross、Line、Offset、Center 变化，动量密度峰值逐步增大。从撞击概率出发，撞击位置为偏移点时，概率最大，因而弹丸撞击丝网防护屏后，碎片云分布不规则，对后板的破坏，大部分损伤位于最大弹坑一侧，同时有一定数目的带状分布区域，这与实验观察到的现象基本吻合[8-9]。

比较相同面密度的连续型防护屏和丝网防护屏动量密度可以发现，动量密度峰值较为接近，多层丝网与单层丝网防护屏相比，动量密度峰值减少，在 xy 平面投影区域形状相似，中心位置处动量密度减少，在边缘处，动量密度增加。图 6(b)、图 6(f)分别为撞击位置为 Cross 时，单层和 3 层丝网弹丸碎片动量密度分布图；随着层数增加，动量从中心位置往边缘处流动，动量密度峰值可出现在带状分布区域，这与文献[8]的实验现象吻合，如图 7 所示。

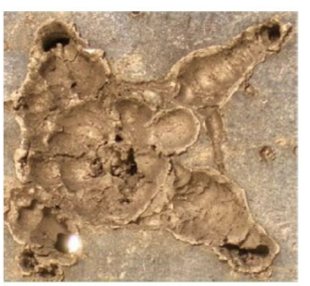


图 7 丝网撞击实验示意图[8]

Fig. 7 Experiment of projectile impacting mesh[8]

4 结 论

通过对球型弹丸正撞击连续型防护屏和丝网防护屏的模拟，研究发现 2 种防护屏产生的碎片云在形态、质量、速度和动量分布中存在着明显不同。

(1) 弹丸正撞击连续型防护屏形成的碎片云为椭球形，以 z 轴为中心对称分布；弹丸正撞击丝网防护屏碎片云随撞击点不同，呈现不同的形态，但碎片云前端均有带状碎片分布。

(2) 弹丸撞击连续型防护屏后，其碎片主要集中于碎片云前端；撞击丝网防护屏后，弹丸碎片主要分布于碎片云后部。

(3) 丝网不能有效地减缓入射弹丸的速度，但能有效地切割弹丸。弹丸形成的碎片云中粒子速度变化规律不同于连续型防护屏产生的碎片云，表明弹丸撞击连续型和丝网防护屏，其动态响应存在明显不同。

(4) 引入动量密度评估碎片云对后板的损伤，丝网碎片云动量密度峰值均大于同厚度连续型防护屏碎片云动量密度峰值，表明撞击丝网后产生的碎片云较之连续型防护屏碎片云有更大的动量集中，相同面密度的多层丝网和连续型防护屏碎片云动量密度峰值接近，防护效果近似。

应用数值仿真方法初步研究了丝网防护屏碎片云形态以及质量、速度和动量分布特性，丝网防护屏防护特性是能有效地切割、粉碎弹丸，但不能有效地扩散碎片云，碎片云动量分布较为集中。因而在轻质防护结构的开发过程中，丝网防护屏应与其他防护屏结合使用，发挥各自防护特性，在降低防护结构整体质量的同时，提高防护能力。

References:

[1] Zhang W, Pang B J, Zou J X. Meteoroid and space shielding concepts for spacecraft [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 32(2): 18-22. (in Chinese)
张　伟,庞宝君,邹经湘. 航天器微流星体及空间碎片防护方案 [J]. 哈尔滨工业大学学报,1999,32(2):18-22.

[2] Christiansen E L. Advanced meteoroid and debris shielding concepts, AIAA 90-1336 [R]. Houston, Texas: NASA/Johnson Space center, 1990.

[3] Christiansen E L, Kerr J H. Mesh double-bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection [J]. Int J Impact Eng, 1993, 14(1-4): 169-180.

[4] Hörz F, Cintala M. Comparison of continuous and discontinuous bumpers: Dimensionally scaled impact experiments into single wire meshes, NASA-TM 104749 [R]. Washington, D C, USA: National Aeronautics and Space Administration, 1992.

[5] Hörz F, Cintala M. Impact experiments multiple-mesh target: Concept development of a lightweight collisional bumper, NASA-TM 104749 [R]. Washington, D C, USA: National Aeronautics and Space Administration, 1993.

[6] Hörz F, Cintala M, Bernhard R P. Multiple mesh bumpers: A feasibility study [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17(1-3): 431-442.

[7] Myagkov N N, Goloveshkin V A, Shumikhin T A. On hypervelocity penetration of the mesh-bumper strings into a projectile [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(3): 468-475.

[8] Myagkov N N, Shumikhin T A. Experimental and numerical study of peculiarities at high-velocity interaction between a projectile and discrete bumpers [J]. Int J Impact Eng, 2010, 37(9): 980-994.

[9] Pang B J, Lin M, Niu R T. Simulation and validation of mesh shields under hypervelocity impact [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(Suppl 1): 24-28. (in Chinese)
庞宝君,林　敏,牛瑞涛. 超高速撞击网状防护结构仿真模型的建立与验证 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(增刊 1):24-28.

[10] Walsh J M, Rice M H, Mcqueen R G. Shock-wave compression of twenty-seven metal [J]. Phys Rev, 1957, 108(2): 196-216.

[11] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high strain rate [J]. J Appl Phys, 1980, 51(3): 1498-1504.

Numerical Simulation of Debris Cloud Characteristics of the Mesh Shields

PANG Bao-Jun, LIN Min, ZHANG Kai, FU Xiang

(*Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: The hypervelocity impact interaction of the sphere projectile with continuous shield and mesh shield, which were of the same thickness or area density, was investigated numerically. The study was aimed at mastering the hypervelocity impact characteristics of the mesh shield and applying effectively it in development of lightweight shields. The study involved the differences in the morphology and the distribution of momentum, velocity and mass of the debris clouds generated by impacting two kinds of shields. The calculations show that the morphologies of the debris cloud vary with the impact locations when a projectile impact the mesh shield, and there is the linear distribution of debris in the front of debris cloud. Comparison between the continuous shield and the mesh shield with the same thickness, the maximum of momentum density in the mesh shield is higher than that in the continuous shield, while the maximums of momentum density are almost near in the two kinds of shields with the same area density. The mesh shield does not effectively slow the penetration velocity of projectile, but can break it up. The dynamical response of the projectile varies with the shields. Impacting the mesh shield, the main part of debris is at the rear end of the debris cloud, which is different from the case of continuous shield.

Key words: mesh shield; continuous shield; debris cloud; numerical simulation