文章编号：1000-5773(2013)05-0671-06

铝球弹丸高速正撞击铝网防护屏破碎特性的数值模拟研究*

管公顺，牛瑞涛，庞宝君

（哈尔滨工业大学航天学院航天工程系，黑龙江哈尔滨　150080）

摘要：采用 LS-DYNA 软件的光滑粒子算法，模拟铝球弹丸高速正撞击铝网防护屏，研究了弹丸撞击铝网防护屏破碎所形成的弹丸碎片云特性与弹丸撞击铝网位置的关系，分析了多层铝网防护屏叠加方式对弹丸撞击破碎的影响。结果表明，铝球弹丸撞击铝网防护屏所产生的碎片云形态随弹丸撞击位置的不同而不同，且弹丸碎片云前端出现触须状碎片簇，存在多处局部能量集中；弹丸撞击网丝交叉点时，弹丸碎片分布较均匀，碎片云主要扩展为薄膜状；多层铝网交错叠加时，弹丸碎片云扩散面积更大，剩余能量较小，有利于提高铝网防护屏的高速撞击防护能力。

关键词：铝网防护屏；高速撞击；破碎；碎片云；数值模拟

中图分类号：O347.1；V423.4　　**文献标识码**：A

1　引　言

空间碎片数量的日益增多加大了在轨航天器撞击失效的概率，加装防护屏是航天器防护毫米级空间碎片撞击失效的有效方法[1-2]。防护屏的作用体现在对空间碎片撞击动能的吸收和扩散等方面，即空间碎片破碎成由多个小粒子组成的碎片云团，并不断向四周膨胀扩展，从而使空间碎片的撞击动能分散作用到更大的舱壁面积上，可以避免因能量集中所造成的严重损伤[3]。鉴于航天器有效发射载荷的要求，轻质高效防护结构的开发受到普遍重视[4]。金属丝网具有面密度低、结构简单且可设计的特点，是一种有效的撞击防护材料，与相同材料的板状防护屏相比，在具有相同防护能力的情况下，可使防护屏的质量大大减轻[5-6]。空间碎片撞击防护屏破碎所形成的碎片云特性是防护结构设计的重要依据，Myagkov 等[7]建立了弹丸撞击丝网防护屏的弹塑性模型，分析了侵彻过程中弹丸与网丝的相互作用。Higashide 等[8]研究了柱状聚碳酸酯弹丸撞击钢网和铜网后碎片云质心速度与撞击速度的关系。然而，针对丝网不同撞击点以及多层丝网不同叠加方式对撞击粒子破碎所产生的碎片云特性效应的研究相对较少。本研究采用 LS-DYNA 软件模拟铝球弹丸高速正撞击铝网防护屏，在验证其有效性的基础上，模拟分析铝球弹丸高速正撞击铝网防护屏不同丝网位置时弹丸碎片云的形状、速度和能量分布特性，并考虑多层铝网叠加方式对弹丸碎片云的影响。

2　模型建立及有效性验证

2.1　模型建立

利用 Catia 软件建立编织型铝网仿真几何模型，该模型反映了网丝曲率对撞击弹丸破碎特性的影

* **收稿日期**：2011-10-14；**修回日期**：2012-02-07

基金项目：国家自然科学基金(11172083)；微小型航天器技术国防重点学科实验室开放基金(HIT.KLOF.MST.2012008)

作者简介：管公顺(1969—)，男，博士，副教授，主要从事超高速撞击动力学及航天器空间碎片防护技术研究.
E-mail：hitggsh@163.com

响，如图 1 所示。

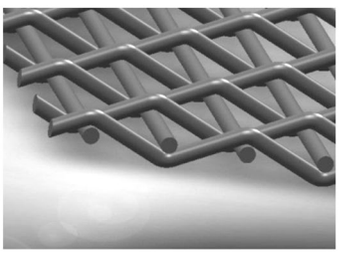


图 1 铝网几何模型

Fig. 1 The geometry model of Al mesh

本研究选用 Johnson-Cook 本构模型，考虑屈服应力的应变率效应，屈服应力表示为

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中：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 为应变率影响指数；m 为温度软化系数，由实验确定；ε_p 为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲的等效塑性应变率，$\dot{\varepsilon}_0$ 一般取 1.0 s^{-1}；T^* 为软化温度，定义如下

$$T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r) \quad (2)$$

式中：T_r 为参考温度，一般取室温；T_m 为常态下材料的熔化温度。本工作模拟研究所选材料的 Johnson-Cook 本构模型的具体参数见表 1[9]。

表 1 Johnson-Cook 本构模型参数

Table 1 Material parameters of Johnson-Cook constitutive model

Material	A/(GPa)	B/(GPa)	n	C	m	T_r/(K)	T_m/(K)
2017-T4 Al	0.270	0.426	0.34	0.015	1.0	300	775
5052 Al	0.265	0.426	0.34	0.015	1.0	300	650
5A06 Al	0.265	0.426	0.34	0.015	1.0	300	864

2.2 有效性验证

采用 LS-DYNA 软件的光滑粒子算法对铝球弹丸高速正撞击铝网防护屏进行数值模拟研究，防护结构如图 2 所示：铝网防护屏由 3 层铝网组成，其面密度与厚度与 0.5 mm 的 2A12 铝板相近；网丝直径 0.42 mm，丝间距 1.39 mm；后板是厚度为 0.5 mm 的 2A12 铝板。弹丸为 2017-T4 铝球，直径 3.97 mm，撞击速度 4.25 km/s，撞击角 0°。图 3 给出了铝网层和后板的数值模拟与实验后的损伤结果。

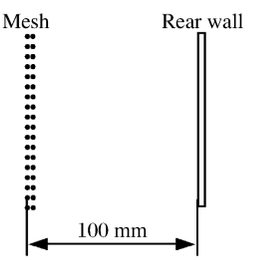
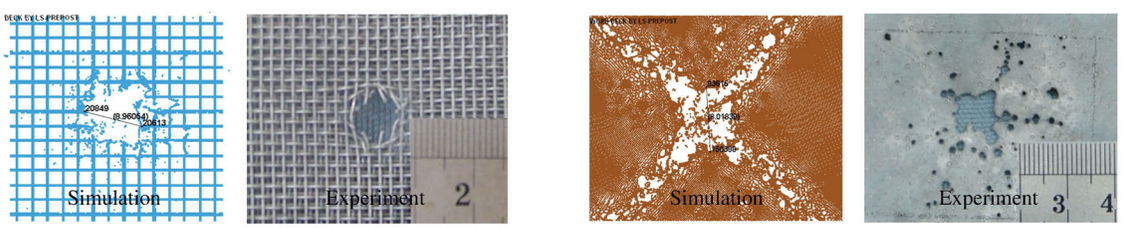


图 2 铝网防护结构示意图

Fig. 2 The diagram of Al mesh shield structure

通过对数值模拟与实验结果的比较发现，铝网层均出现不规则穿孔，穿孔尺寸的模拟结果为 8.96 mm，实验结果为 8.64 mm，二者基本一致。在模拟结果中，后板出现 2 条十字交叉穿孔带，交叉区域为撞击中心，且穿孔尺寸较大，为 8 mm。在实验结果中，后板亦出现带状穿孔分布趋势，且撞击中心穿孔尺寸较大，为 8.02 mm，与模拟结果基本一致，但穿孔带分布的均匀性比模拟结果相对较差，其原因主要为，当 3 层铝网叠加时无法完全保证各层网丝方向的一致性，从而造成弹丸破碎出现一定的随机性，进而使后板损伤存在一些偏差。数值模拟与实验结果的对比表明，二者在损伤形态与损伤尺寸方面均基本一致，因此，可以进一步开展模拟研究。



(a) Mesh bumper (b) Rear wall

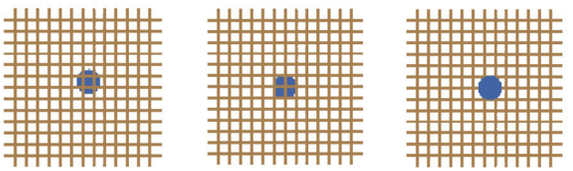
图 3 数值模拟与实验结果

Fig. 3 Numerical simulation results and experimental results

3 弹丸破碎特性分析

3.1 弹丸碎片云形态

由于铝网为非连续型结构,弹丸撞击铝网的位置不同,使网丝对弹丸的破碎效果不同,从而形成不同形态的弹丸碎片云。因此,本研究针对弹丸中心撞击点在铝网 3 个典型位置的情况进行数值模拟研究,包括撞击网格孔中心点(To blank,图 4(a))、撞击网丝交叉点(To cross,图 4(b))、撞击单网格丝线中点(To line,图 4(c))。模拟铝网防护屏由 3 层铝网组成,各层铝网网格重合叠加,网层间无间隙,网丝直径 0.42 mm,丝间距 1.39 mm。弹丸为 2017-T4 铝球,直径 3.97 mm,撞击速度 4.25 km/s,撞击角 0°。获取弹丸碎片云的终止物理时间为 1.0 μs。



(a) To blank (b) To cross (c) To line

图 4 弹丸中心撞击位置

Fig. 4 Impact position of projectile center

由于弹丸中心撞击铝网的位置不同,使弹丸所受网丝冲击载荷的分布发生变化,因此弹丸碎片云的分布形态明显不同。图 5 分别给出了弹丸正撞击铝网不同位置破碎所产生的弹丸碎片云的分布情况,其中侧视图为在弹丸撞击方向侧面观察到的弹丸碎片云分布形态,后视图为在弹丸后沿弹丸撞击方向观察到的弹丸碎片云分布形态。



(a) To blank (b) To cross (c) To line

图 5 不同撞击位置碎片云形态

Fig. 5 Debris cloud configurations for different impact points

当弹丸中心撞击位置处于网格孔中心时,弹丸中心与外围 4 个绕中心均匀分布的点状区域均有前置的触须状碎片簇,其中,中心触须状碎片簇比外围触须状碎片簇向前突出,表明其前端碎片速度更高,触须状碎片簇后是呈十字集中分布的弹丸主体碎片云,如图 5(a)所示,此时,弹丸碎片能量较为集中。当弹丸中心撞击网丝交叉点时,与撞击网格孔中心时相比,此时的碎片云中没有中心触须状碎片簇,且外围 4 个触须状碎片簇横向绕撞击中心旋转 45°,触须状碎片簇后的弹丸主体碎片云扩展成较大面积的近似于正方形的扁平薄膜状,如图 5(b)所示,此时,弹丸碎片能量较均匀地分布于碎片云中。当弹丸中心撞击单网格丝线中心时,与撞击交叉点时的情况相同,没有中心触须状碎片簇,同时外围触须状碎片簇数目由 4 个增加到 6 个,其中,丝线两侧的触须碎片簇比其它 4 条触须状碎片簇向前突出,表明其前端碎片速度更高,触须状碎片簇后是具有一定宽度的呈一字分布的弹丸主体碎片云,如图 5(c)所示,此时,弹丸碎片能量得到一定程度的分散。

由弹丸撞击铝网不同位置所形成的碎片云不同分布形态可知,弹丸中心撞击网丝交叉点时的弹丸破碎效果优于其它两种情况,此时的碎片云中不存在较大的局部碎片云能量集中,有利于减轻对铝网层后面被防护对象的撞击损伤。

3.2 弹丸碎片云速度特性

模拟时,铝网防护屏由 3 层铝网组成,各层铝网网格重合叠加,网层间无间隙,网丝直径 0.42 mm,丝间距 1.39 mm。弹丸为 2017-T4 铝球,直径 3.97 mm,撞击速度 4.25 km/s,撞击角 0°。模拟结果发现,当弹丸中心分别撞击网格孔中心点、网丝交叉点和单网格丝线中点时,弹丸碎片云的平均速度分别

为 3.88、3.95 和 3.93 km/s，由此可见，虽然弹丸中心撞击铝网的位置不同，造成了弹丸碎片云的形态不同，但弹丸碎片云的平均速度随撞击位置变化不大。

触须状碎片簇是铝网防护屏区别于铝板防护屏的弹丸碎片云形态，其速度分布沿纵向变化，定义 v_{front} 为触须状碎片簇最前端碎片速度，v_{core} 为最长触须状碎片簇几何中心碎片的速度。表 2 给出了不同撞击速度时的弹丸碎片云中 v_{front}、v_{core} 以及 v_{front}/v 的值，可以看出，最长触须状碎片簇的几何中心碎片速度 v_{core} 与弹丸初始撞击速度 v 相近，而其前端速度 v_{front} 高于弹丸初始撞击速度 v，在本研究模拟速度的范围内，v_{front} 比 v 均高出 20%左右。触须状碎片簇撞击速度过高不利于铝网防护屏后面目标的高速撞击防护。

在撞击过程中，防护屏的损伤破坏来自弹丸的撞击动能，表 3 给出了不同撞击速度时的弹丸初始动能 E_{k0} 和撞击铝网防护屏后的弹丸剩余动能 E_{k}，以及 E_{k} 与 E_{k0} 的比值，其中，弹丸剩余动能 E_{k} 为弹丸与防护屏撞击作用结束后，所有弹丸碎片所具有的动能之和，可由模拟软件直接输出。在不同撞击速度下，比较 E_{k} 与 E_{k0} 的比值可以发现，在本研究模拟速度的范围内，该比值均不随撞击速度的改变而发生较大变化，约为 0.8。

表 2 不同撞击速度下的触须状碎片云速度

Table 2 Velocity of debris clouds as palpus for different impact velocities

v/(km/s)	v_{front}/(km/s)	v_{core}/(km/s)	$(v_{\mathrm{front}}-v)\cdot v^{-1}$/(%)
2.2	2.60	2.20	18
3.2	3.75	3.25	17
4.2	5.20	4.45	23
5.2	6.40	5.30	23
6.2	7.70	6.10	24

表 3 不同撞击速度下的弹丸剩余动能

Table 3 Residual kinetic energy of projectile for different impact velocities

v/(km/s)	E_{k0}/(J)	E_{k}/(J)	$E_{\mathrm{k}}/E_{\mathrm{k0}}$
2.2	221	175	0.79
3.2	470	372	0.79
4.2	810	640	0.79
5.2	1240	990	0.80
6.2	1760	1420	0.81

3.3 多层铝网叠加方式对弹丸碎片云特性的影响

为研究多层铝网防护屏的叠加方式对弹丸碎片云特性的影响，本研究采用如图 6 所示的两种叠加方式进行高速撞击数值模拟，铝网防护屏由 3 层铝网组成，网丝直径 0.42 mm，丝间距 1.39 mm。图 6(a)为重合式叠加，即每层铝网网孔及网丝交叉点位置完全一致，弹丸中心撞击网丝交叉点。图 6(b)为交错式叠加，即将第二层铝网网格中心对准第一层和第三层铝网网丝交叉点，使弹丸中心撞击第一层铝网网丝交叉点的同时又对准第二层铝网网格中心。弹丸直径 3.97 mm，撞击速度分别取 2.2、3.2、4.2、5.2 和 6.2 km/s。



(a) Superposition (b) Interleaving

图 6 铝网防护屏叠加方式

Fig. 6 Combination modes of Al mesh bumper

对于重合式叠加铝网防护屏，弹丸以所选取的 5 个速度撞击铝网防护屏时均发生破碎。对于交错式叠加铝网防护屏，当撞击速度为 2.2 km/s 时，弹丸未发生破碎，如图 7(a)所示。而在其它撞击速度时，弹丸发生破碎，其碎片云分布如图 7(b)所示，说明交错式叠加铝网防护屏在低速时对弹丸的破碎能

力低于重合式叠加铝网防护屏。在弹丸碎片云形态方面,弹丸高速撞击交错式叠加铝网防护屏所产生的弹丸主体碎片云同样扩散成正方形薄膜状,但前端没有明显的触须状碎片簇。



(a) No fragmentation　　(b) Fragmentation

图 7　高速撞击交错式叠加铝网防护屏碎片云形态

Fig. 7　Debris clouds configurations for high-velocity impacting on Al mesh bumper with interleaving combination

图 8 给出了弹丸撞击铝网防护屏 1.0 μs 后,距离防护屏 12 mm 处的弹丸主体碎片所形成的正方形薄膜状碎片云边长 L 与弹丸初始撞击速度 v 的关系,可以发现,在不同撞击速度下,弹丸撞击交错式叠加铝网防护屏的弹丸碎片云扩展面积均大于弹丸撞击重合式叠加铝网防护屏所产生的弹丸碎片云的扩展面积,因此,交错式叠加铝网防护屏更利于弹丸撞击动能的扩散,有助于提高防护结构的高速撞击防护能力。

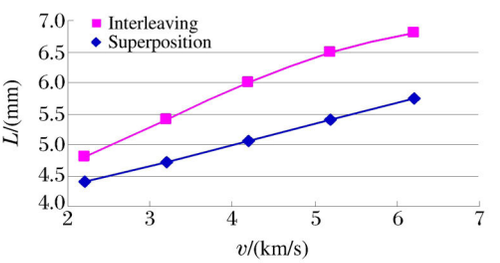


图 8　L 与 v 的关系

Fig. 8　Relationship between L and v

表 4 给出了铝球弹丸高速撞击两种叠加方式铝网防护屏后的弹丸剩余动能,在本研究模拟速度的范围内,弹丸撞击交错式叠加铝网防护屏后的弹丸剩余动能 E_{k2} 均小于弹丸撞击重合式叠加铝网防护屏后的弹丸剩余动能 E_{k1},表明交错式叠加铝网防护屏减轻高速撞击损伤的能力比重合式叠加铝网防护屏更强。可见,不同叠加方式的多层铝网防护屏的高速撞击防护能力存在差异。

表 4　铝网防护屏不同叠加方式下的弹丸剩余动能

Table 4　Residual kinetic energy of projectile for different combination modes of Al mesh bumper

v/(km/s)	E_{k0}/(J)	E_{k1}/(J)	E_{k2}/(J)
2.2	221	175	171
3.2	470	372	361
4.2	810	640	620
5.2	1 240	990	955
6.2	1 760	1 420	1 360

4　结　论

(1) 铝球弹丸高速正撞击铝网防护屏所产生的碎片云形态与弹丸撞击铝网的位置有关,且碎片云出现触须状碎片簇,形成多处局部能量集中。

(2) 弹丸高速撞击铝网网丝交叉点时,弹丸碎片分布较均匀,弹丸主体碎片云扩展为正方形薄膜状,有利于弹丸撞击能量的扩散。

(3) 多层铝网防护屏的高速撞击防护能力与铝网叠加方式有关,当多层铝网交错叠加时,弹丸碎片云扩散面积更大,剩余动能较小,有利于提高铝网防护屏的高速撞击防护能力。

References:

[1] Min G R, Xiao M X. Reliability design spacecraft module wall against meteoroid perforation [J]. Chinese Space Science and Technology, 1986(6): 45-48. (in Chinese)
闵桂荣, 肖名鑫. 防止微流星体击穿航天器舱壁的可靠性设计 [J]. 中国空间科学技术, 1986(6): 45-48.

[2] Lambert M. Hypervelocity impacts and damage laws [J]. Adv Space Res, 1997, 19(2): 369-378.

[3] Guan G S, Pang B J, Zhang W, et al. Crater distribution on the rear wall of Al-Whipple shield by hypervelocity impacts of Al-spheres [J]. Int Impact Eng, 2008, 35(12): 1541-1546.

[4] Horz F, Cintala M J, Bernhard R P, et al. Multiple-mesh bumpers: A feasibility study [J]. Int Impact Eng, 1995; 17: 431-442.

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

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

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

[8] Higashide M, Tanakab M, Akahoshi Y, et al. Hypervelocity impact tests against metallic meshes [J]. Int Impact Eng, 2006, 33: 335-342.

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

Numerical Simulation of Al Sphere Fragmentation under High-Velocity Normal Impacting Aluminum Mesh Bumper

GUAN Gong-Shun, NIU Rui-Tao, PANG Bao-Jun

(*Department of Astronautics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: Numerical simulation of aluminum sphere projectile high-velocity impacting aluminum mesh bumper was conducted with Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) arithmetic of LS-DYNA. The relationship between the debris clouds characteristic of projectile and the impact position on aluminum mesh bumper was studied. The effect on fragmentation of projectile from different combination mode of aluminum mesh bumper was analyzed. The results indicated that the debris clouds configuration from aluminum sphere projectile impacting aluminum mesh bumper was different with the different impact position on aluminum mesh bumper. The debris clouds as palpus was found in the front of projectile debris clouds. Some local kinetic energy concentrated appeared in the debris clouds. When a wire across point position was impacted, projectile debris clouds expand to form film configuration, and debris clouds distribution was more uniform. When aluminum mesh bumper was combined with interleaving mode, projectile debris clouds had more diffuse area and less residual kinetic energy. Aluminum mesh bumper combined with interleaving mode was helpful in enhancing the protection performance of shields.

Key words: aluminum mesh bumper; high-velocity impact; fragmentation; debris clouds; simulation