

超高速撞击中的弹丸形状效应数值模拟研究

徐坤博¹, 龚自正^{1,2}, 侯明强¹, 代福¹, 郑建东¹

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 文章用 AUTODYN 仿真软件对球形、圆锥形、圆柱形和盘形 4 种不同形状弹丸超高速撞击 Whipple 防护结构所产生的碎片云形貌特征及对后墙的毁伤程度进行了数值仿真研究。对比分析结果指出: 质量与速度相等的 4 种不同形状弹丸撞击缓冲屏所产生的碎片云有明显差异; 弹丸长径比越小, 穿过缓冲屏后的破碎程度越大; 在 5 km/s 撞击速度下, 球形弹丸对后墙的毁伤程度最小, 而圆柱形弹丸的毁伤程度最大。这说明弹丸的形状对超高速撞击结果有显著影响, 在航天器超高速撞击风险评估和防护工程设计中应充分考虑弹丸的形状效应。球形弹丸的弹道极限曲线在防护结构的碎片防护能力评价时存在高估的问题, 在实际工作中要特别注意这一点。

关键词: 空间碎片; 超高速撞击; 弹丸形状效应; 数值仿真

中图分类号: V520.7; TB115

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2010)05-0570-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.05.005

0 引言

随着人类航天活动的日益频繁, 空间碎片数量急剧增长, 与航天器相撞的风险在增加。由于平均相对撞击速度可达 10 km/s, 会对航天器造成严重的撞击损伤后果, 因此对航天器的在轨长寿命、高可靠安全运行构成了现实威胁。空间碎片防护设计已成为航天器(特别是载人航天器)设计必不可少的环节和航天技术领域的研究热点之一。

航天器的碎片撞击风险评估与防护设计需要大量的超高速撞击特性数据。为了获取空间碎片超高速撞击特性数据, 国内外开展了大量的地面模拟试验研究。空间碎片超高速撞击特性与模拟弹丸的材料、质量、形状、速度、撞击方向、环境温度等因素密切相关。

长时间以来, 为地面试验模拟方便, 研究人员通常选用标准球形弹丸开展空间碎片撞击特性的研究。实际上绝大多数空间碎片的实际形状并非球形, 有圆锥形、圆柱形、盘形等。因此, 为了较真实地反映空间碎片的超高速撞击特性, 必须研究非球形弹丸对航天器的损伤和对防护结构防护性能

的影响。人们常使用二级轻气炮来进行速度小于 7 km/s 的空间碎片超高速撞击模拟试验。近年来, 为了模拟速度大于 7 km/s 的空间碎片撞击试验, 还发展了许多可发射非球形弹丸的新的超高速发射技术, 例如: 阻抗梯度飞片超高速发射技术(HVL)^[1]可将盘形钛飞片的速度发射至 19 km/s, 定向聚能加速器(ISCL)^[2-3]可将长径比为 1~1.5 圆柱状弹丸的速度发射至 11.5 km/s, 等。这些新的超高速发射技术可发射形状各不相同的弹丸, 这就给试验数据之间的分析比对带来了可能。由于空间碎片形状多种多样, 而目前的试验技术可以模拟的碎片形状有限, 且实际的试验成本高、耗时长, 所以开展超高速撞击数值仿真研究是实际试验的有力补充手段, 经济高效, 可方便地用于非球形弹丸超高速撞击特性的研究。

1972 年 Robert H. Morrison 最早在国际上开展超高速撞击弹丸形状效应的研究^[4], 他通过试验获得了在撞击速度接近 7 km/s 时不同质量与长径比的圆柱形、球形弹丸对航天器典型 Whipple 防护结构的撞击毁伤效果。此后, Evans^[5]、Williamsen^[6-7]、

收稿日期: 2010-05-12; 修回日期: 2010-08-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 (项目编号: 2010CB731600) 和国家国防科工局空间碎片专项 (项目编号: KJSP06209, KJSP06210) 资助项目

作者简介: 徐坤博 (1984—), 女, 硕士研究生, 专业研究方向为空间碎片防护。E-mail: xkb_cat@sina.com。龚自正 (1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 现任国家国防科工局空间碎片防护专家组副组长, 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。

Hu Kuifeng^[8]、Beissel^[9]等人用数值模拟方法相继开展了超高速撞击弹丸形状效应的研究,并得到不同形状弹丸的弹道极限曲线。国内的张伟等人^[10-11]基于等效球形直径对多种形状弹丸的撞击特性做了数值模拟研究。徐金中^[12]利用光滑粒子流体动力学(SPH)方法在进行空间碎片超高速碰撞数值仿真研究时,也涉及到了对弹丸形状效应的讨论。这些初步研究结果显示,非球形弹丸沿主轴方向撞击时,其对航天器的损伤比球形弹丸大,各种非球形的弹丸对防护结构的损伤均大于球形弹丸。对于双层板防护结构,危害程度的估计比实际高1倍,对单层板防护结构则高出3倍。总的来说,国内外对超高速撞击弹丸形状效应的研究不多,也不充分。

在超高速撞击中弹丸的质量占主导地位,本文用AUTODYN仿真软件,对质量相等的球形、圆锥形、圆柱形和盘形4种不同形状的弹丸撞击典型Whipple防护结构的效果进行数值仿真,通过对碎片云形貌特征和对后墙的毁伤程度的分析对比研究了超高速撞击弹丸形状效应,这些工作为非球形空间碎片超高速撞击航天器的风险评估和防护设计提供了依据。

1 非球形弹丸超高速撞击仿真方案

本文选取了质量相同的球形、圆锥形、圆柱形与盘形4种弹丸来进行超高速撞击形状效应研究,对于非球形弹丸又选择了1~2种不同的长径比,具体参数见表1。选取典型Whipple防护结构作为撞击靶,其中缓冲屏厚1.2 mm,间距100 mm,后墙厚3.2 mm。防护结构和弹丸材料均为AL6061-T6铝合金。圆锥弹丸的撞击姿态为圆锥顶点撞击,圆柱与盘形弹丸的撞击面则为端面。所有仿真均为正撞击。

仿真利用AUTODYN-2D显式非线性动力学分析软件。考虑到超高速碰撞包含防护屏穿孔、碎片相变与碎片云生成等过程,仿真时使用SPH方法。仿真中粒子大小为0.1 mm。材料状态方程选用shock状态方程(即Hugoniot方程),强度模型选用Johnson-Cook模型,失效模型采用最大拉应力模型。

仿真分两个部分,第一部分研究弹丸质量和速度相同时,不同形状的弹丸所产生的碎片云特性;第二部分分析4种不同形状的弹丸对后墙的毁伤特性。

表1 4种不同形状弹丸仿真参数
Table 1 Parameters of projectiles of 4 different shapes in simulations

形状	长径比	直径/mm	长度/mm	质量/mg	速度范围/(km·s ⁻¹)
球形	1	3.42	--	56.6	1~13
圆柱形	3/1	2.08	6.2	56.6	1~13
圆柱形	5/1	1.75	8.7	56.6	1~13
圆锥形	1/3.46	6.52	1.88	56.6	1~13
圆锥形	3.46/1	2.85	9.86	56.6	1~13
盘形	1/5	4.30	0.86	56.6	1~13
盘形	1/3	3.63	1.21	56.6	1~13

2 数值仿真结果与分析

2.1 碎片云形貌分析

在5 km/s速度下圆锥形弹丸撞击缓冲屏产生的碎片云形貌如图1所示。其中图1(a)为长径比1/3.46的圆锥形弹丸碎片云,图中弹丸穿过缓冲屏后破碎比较完全,最大的碎片直径不到1 mm,且全部碎片都分布在泡状结构中的一个圆柱形中。图1(b)为长径比3.46/1的圆锥形弹丸碎片云,锥形弹丸在距离弹丸顶点约60%的地方断裂为两截,但整体上依然保持圆锥的形貌。两种长径比的圆锥形弹丸最大的不同在于缓冲屏的穿孔直径和穿过缓冲屏后的破碎程度,前者穿孔直径大且破碎更完全。

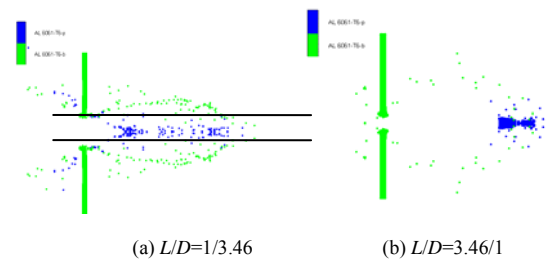


图1 圆锥形弹丸以5 km/s速度撞击缓冲屏的碎片云形貌
Fig. 1 Debris cloud morphology of the buffer impacted by conical projectiles at velocity of 5 km/s

在5 km/s速度下圆柱形弹丸撞击缓冲屏产生的碎片云形貌如图2所示。两种圆柱形弹丸的碎片云轮廓类似菱形,弹丸头部被侵蚀,但整体上依然保留原有形态。模拟结果显示,长径比为5/1的圆柱形弹丸在1~15 km/s速度范围内撞击缓冲屏时,始终保持着圆柱状,只是在撞击方向上的剩余长度有所减少。例如,当撞击速度为15 km/s时,穿过缓冲屏后,圆柱形弹丸长度由初始的8.7 mm变为4 mm左右,缩短了54%。而长径比为3/1的弹丸

在 15 km/s 碰撞速度下，穿过缓冲屏后变为长度不到 1 mm、形状不规则的大碎片。所以圆柱形弹丸的长径比对碎片云形状有显著影响，长径比越大穿透效果越好。

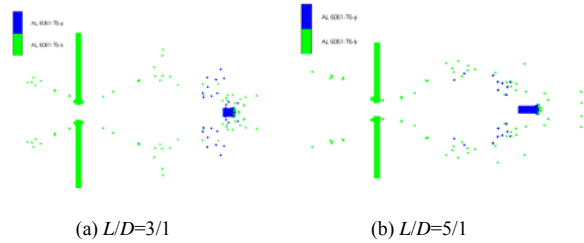


图2 圆柱形弹丸以 5 km/s 速度撞击缓冲屏的碎片云形貌
Fig. 2 Debris cloud morphology of the buffer impacted by cylindrical projectiles at velocity of 5 km/s

在 5 km/s 速度下盘形弹丸撞击缓冲屏产生的碎片云形貌如图 3 所示。

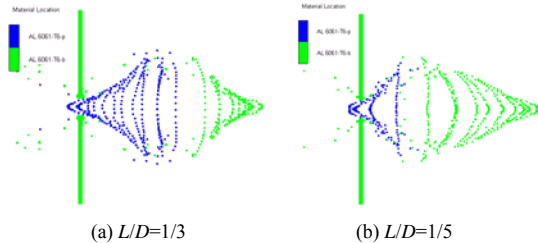


图3 盘形弹丸以 5 km/s 速度撞击缓冲屏的碎片云形貌
Fig. 3 Debris cloud morphology of the buffer impacted by disk projectiles at velocity of 5 km/s

由图 3 可见，整个碎片云轮廓同圆柱形弹丸碎

片云一样呈近似菱形，菱形内碎片云在垂直飞行方向上有明显分层，其中撞击溅射出的缓冲屏碎片的层数随长径比的减小而增加，弹丸材料的碎片云层数则随长径比的减小而减少，碎片云头部顶点随长径比的减小而逐渐出现平面。

2.2 碎片云特征参数分析

图 4 为按照盘形弹丸碎片云形貌绘制的碎片云特征参数示意图，其他形状弹丸碎片云特征参数也可在图中对应找出。如图 4 所示，选取缓冲屏穿孔直径 D_H 、碎片云宽度 D_W 、碎片云膨胀距离 L_E 、缓冲屏碎片界面位置 L_I 以及碎片云前端速度 V_F 和径向速度 V_E 为特征参数^[12]，我们来考察不同形状弹丸的碎片云形状尺寸、速度等特征参数。

在 5 km/s 速度下几种不同形状弹丸撞击缓冲屏 10 μs 后产生的碎片云特性参数在表 2 中给出。由表 2 数据可见，当撞击速度一定时，盘形与圆柱形弹丸（共 4 种）的长径比从小到大变化时，缓冲屏碎片界面位置 L_I 逐渐增加；碎片云膨胀距离 L_E 和碎片云宽度 D_W 则相差不大，说明这 4 种弹丸的碎片云轮廓相似。长径比由小变大的两种圆锥形弹丸碎片云参数的最大不同则体现在碎片云宽度 D_W 与径向速度 V_E 上： D_W 增加了 76%， V_E 增加了 145%。

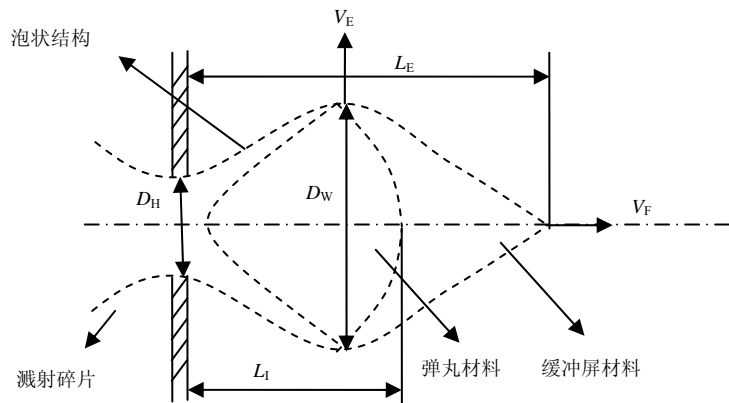


图4 碎片云特征参数示意图
Fig. 4 Sketch map of characteristic parameters of debris cloud

表 2 5 km/s 速度下非球形弹丸撞击缓冲屏 10 μs 后碎片云特征参数

Table 2 Characteristic parameters of debris clouds of the buffer impacted by non-spherical projectiles at velocity of 5 km/s ($t=10 \mu s$)

形状	长径比	L_E/mm	D_W/mm	L_I/mm	$V_F/(km \cdot s^{-1})$	$V_E/(km \cdot s^{-1})$	时间/ μs
盘形	1/5	48.86	30.22	10.21	5.26	1.39	10
盘形	1/3	49.63	31.51	26.10	5.30	1.56	10
圆柱形	5/1	57.74	29.78	45.76	5.11	1.53	10
圆柱形	3/1	48.17	34.00	42.36	5.66	1.82	10
圆锥形	1/3.46	46.20	25.35	42.81	4.78	1.09	10
圆锥	3.46/1	47.78	44.71	47.78	5.29	2.67	10

质量相同、长径比不同的几种弹丸撞击缓冲屏产生的穿孔直径 D_H 随撞击速度的变化曲线如图 5 所示。图中可以看出, 所有形状的弹丸撞击产生的穿孔直径 D_H 都随撞击速度的增加而增加。当长径比小于 1 时, 穿孔直径与撞击速度的关系可以近似为线性关系; 当长径比大于 1、撞击速度大于 7 km/s 时, 穿孔直径增加的速度变缓, 所以这几条曲线呈现出非线性。而长径比为 3.46/1 的圆锥形弹丸的曲线则呈现三次函数的形状, 但总体趋势是上升的。

图 5 中共列出了 7 个长径比例的 4 种形状弹丸的穿孔直径 D_H 与撞击速度之间的曲线, 其中球形、圆柱形和盘形 3 种弹丸的曲线排列呈现出规律性: 盘形弹丸的曲线位于上方, 球形的居中, 圆柱形的位于下方, 长径比小的又位于上方; 小长径比圆锥形弹丸的曲线位于图的最上方, 大长径比圆锥形弹丸的曲线位于图的最下方。

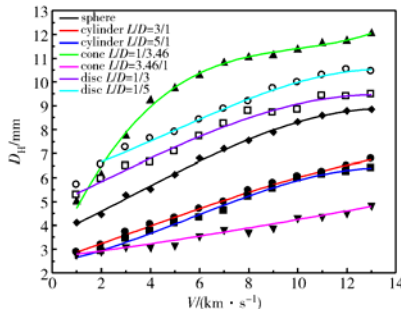


图 5 质量相同的 4 种形状弹丸的穿孔直径 D_H 随撞击速度的变化曲线

Fig. 5 Perforation diameters(D_H) versus impact velocities for projectiles of 4 different shapes with the same mass

图 6 是撞击速度为 5 km/s 时, 4 种形状弹丸撞击端面中心点处的压力随时间变化曲线。从图中可以看出长径比为 1/3.46 的圆锥形弹丸撞击端面中心点的压力峰值最大, 即达到 117 GPa; 长径比为 3.46/1 的圆锥形弹丸压力峰值最小, 为 47 GPa, 所以当它撞击缓冲屏时弹丸破碎程度最小, 几乎是完整地穿过缓冲层, 穿透过程中对缓冲屏上孔洞的扩孔作用没有其他弹丸明显, 因此它的穿孔直径最小。这也是对图 5 的一个解释。

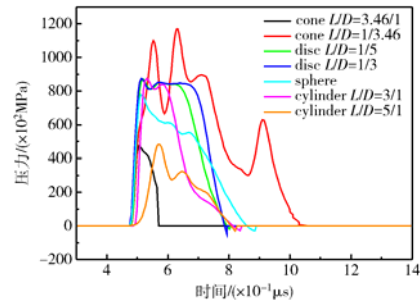


图 6 撞击速度为 5 km/s 时 4 种形状弹丸撞击端面中心点压力时间曲线

Fig. 6 The loading pressure at the center point of the projectile's impact interfaces versus time for projectiles of 4 different shapes at velocity of 5 km/s

2.3 对后墙的毁伤分析

图 7 是速度为 5 km/s 时相同质量的 4 种不同形状弹丸超高速撞击对后墙毁伤形貌, 毁伤特征参数见表 3。

球形弹丸超高速撞击缓冲屏后产生的碎片云对后墙的毁伤形貌如图 7(a)所示。碎片云撞击后墙产生的穿孔直径为 3.08 mm, 穿孔后二次碎片云中存在一块从后墙上剪切下来的盘形大碎片, 它的平均厚度为 0.6 mm, 直径为 4.6 mm, 约为穿孔直径的 1.5 倍, 这是由于后墙在冲击过程中发生层裂所致, 其速度约为 720 m/s, 估算动量为 19.41(g·m)/s。

长径比为 1/5 的盘形弹丸超高速撞击缓冲屏后产生的碎片云对后墙的毁伤形貌如图 7(b)所示。碎片云撞击后墙产生的穿孔直径为 8.64 mm, 穿孔后二次碎片云中存在从后墙上剥落的较大不规则碎片, 其中最大两块碎片等效球形直径分别为 1.6 mm 和 1.2 mm, 速度分别为 232 m/s 和 1.12 km/s, 其动量分别为 1.34(g·m)/s 和 2.74(g·m)/s。

长径比为 1/3.46 的圆锥形弹丸超高速撞击缓冲屏后产生的碎片云对后墙的毁伤形貌如图 7(c)所示。在撞击缓冲屏时, 圆锥形弹丸破碎比较完全, 所以它对后墙的穿孔较小, 直径仅为 4.2 mm。如果使用基于粒子间距识别方法来判别二次碎片云中较大碎片的分布, 可以发现其中最大的碎片等效球形直径仅为 0.3 mm。

表 3 后墙毁伤特征仿真结果

Table 3 Simulation results of rear wall damage impacted by projectiles

弹丸形状	长径比	直径/mm	长度/mm	质量/g	弹丸速度/(km·s ⁻¹)	后墙穿孔直径/mm
球形	1	7	--	0.4849	5	3.08
盘形	1/5	10.46	2.09	0.4849	5	8.64
圆柱形	3/1	4.24	12.72	0.4849	5	10.24
圆锥形	1/3.46	13.35	3.86	0.4849	5	4.20
圆锥形	3.46/1	5.84	20.2	0.4849	5	6.51

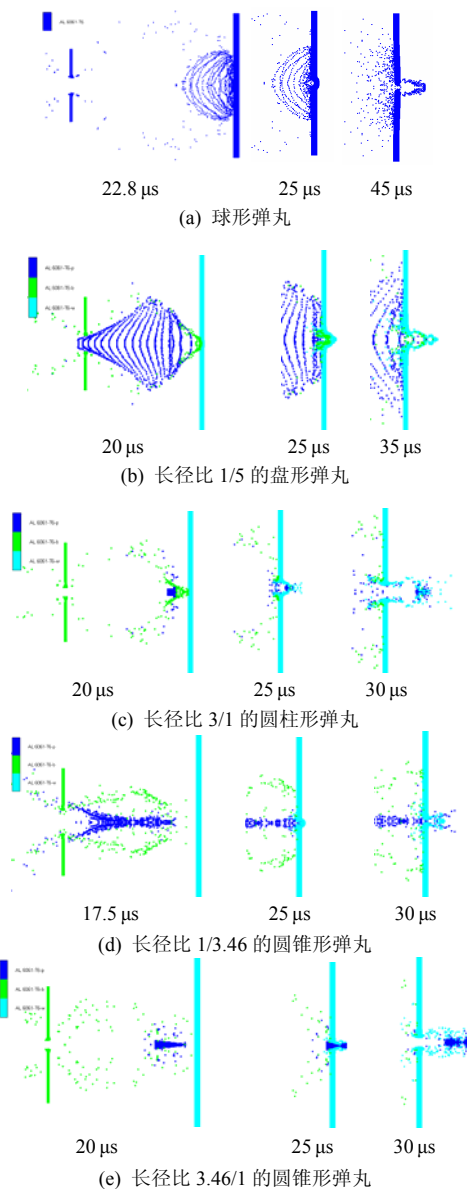


图7 4种不同形状弹丸超高速撞击的碎片云对后墙的毁伤形貌

Fig. 7 Morphology of the rear wall damage caused by debris clouds for projectiles of 4 different shapes

由于长径比为 $3/1$ 的圆柱形弹丸和长径比为 $3.46/1$ 的圆锥形弹丸以 5 km/s 速度撞击并穿过缓冲屏时, 弹丸并没有完全破碎, 所以对后墙的损伤比较大, 它们的后墙穿孔直径分别为 10.24 mm 和 6.51 mm , 分别是球形弹丸的 3.32 倍和 2.11 倍。它们穿孔后的二次碎片云中仍然存在没有完全破碎的弹丸碎片。为了更好地说明问题, 图8给出了长径比为 $3.46/1$ 的圆锥形弹丸形成的二次碎片云形貌, 由图可以看出, 弹丸仍然没有破碎完全, 而是碎裂为3块较大的碎片, 其中最大的碎片直径约为 5.5 mm , 速度为 $4.8 \sim 4.9 \text{ km/s}$, 这几乎与初始碰

撞速度相当。

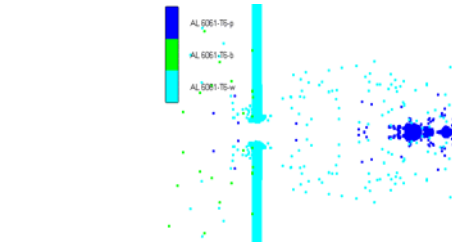


图8 长径比为 $3.46/1$ 的圆锥形弹丸撞击后墙形成的二次碎片云形貌

Fig. 8 The secondary debris cloud morphology of the rear wall impacted by conical projectiles with the aspect ratio of $L/D=3.46/1$

通过以上分析我们可以看出: 首先, 这4种弹丸撞击缓冲屏产生的碎片云对后墙的毁伤程度与弹丸穿过缓冲屏后的破碎程度有关, 这与他人对球形弹丸撞击研究所得到的结论相同; 其次, 相同质量、相同速度弹丸破碎的程度与其形状特别是长径比有关, 当长径比大于1时, 长径比越大弹丸越不易破碎, 所以它对后墙的毁伤也更严重; 再次, 后墙的毁伤程度与弹丸碰撞接触面的形状有关, 弧面与平面毁伤效果类似, 锥面的毁伤程度最为严重。

最后再简要地说说球形弹丸的毁伤问题。在弹道极限曲线的破碎段即撞击速度为 $3 \sim 7 \text{ km/s}$ 区间段, 球形弹丸在这几种形状中的毁伤能力最小。在实际的空间碎片环境中, 存在较多的是非球形碎片, 如果仅使用球形弹丸所获得的弹道极限曲线去评估防护结构的防护能力, 会存在防护能力高估的问题。因此, 用基于球形弹丸所获得的弹道极限方程对航天器遭受空间碎片撞击风险进行评估是非保守的(即低估了撞击风险)。

3 结论

对质量相同的球形、圆锥形、圆柱形与盘形4种弹丸超高速撞击典型 Whipple 防护结构的数值仿真结果的对比分析显示, 弹丸形状对碎片云特征、缓冲屏穿孔直径和后墙的毁伤程度有显著影响:

1) 质量与速度相同的4种弹丸超高速撞击缓冲屏产生的碎片云特征有明显差异。在 5 km/s 速度撞击下, 非球形弹丸的长径比越小, 弹丸破碎程度越大。

2) 4种形状弹丸超高速撞击缓冲屏产生的碎片云对后墙的毁伤形貌、程度和二次碎片云特征有明显差别。在撞击速度为 5 km/s 时, 球形弹丸的毁

伤能力最小, 圆柱形弹丸毁伤能力最大。

3) 球形弹丸的弹道极限曲线在防护结构的碎片防护能力评价时存在高估的问题, 因此在撞击风险评估和防护工程设计中要特别注意这一点。

参考文献 (References)

- [1] 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 Engng*, 2006, 33: 799-811
- [2] Walker J D, Grosch D J, Mullin S A. A hypervelocity fragment launcher based on an inhibited shaped charge[J]. *Int J Impact Engng*, 1993, 14: 763-774
- [3] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. Protection manual[M], 2008-04-17
- [4] Morrison R H. A preliminary investigation of projectile shape effects in hypervelocity impact of a double-sheet structure, NASA TN D-6944[R], 1972
- [5] Evans S, Williamsen J E. Orbital debris shape and orientation effects on impact damage to shuttle tiles, AIAA2006-2221[R]
- [6] Williamsen J E, Evans S. Predicting orbital debris shape and orientation effects on spacecraft shield ballistic limits based on characteristic length[J]. *Int J Impact Engng*, 2006, 33: 862-871
- [7] 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 Engng*, 2008, 35: 1870-1877
- [8] Hu Kuifeng, William P, Schonberg. Ballistic limit curves for non-spherical projectiles impacting dual-wall spacecraft systems[J]. *Int J Impact Engng*, 2003, 29: 345-355
- [9] Beissel S R, Gerlach C A, Johnson G R. A quantitative analysis of computed hypervelocity debris clouds[J]. *Int J Impact Engng*, 2008, 35: 1410-1418
- [10] 张伟, 管公顺, 贾斌, 等. 弹丸形状对超高速撞击厚合金靶成坑影响的数值模拟[J]. *高压物理学报*, 2008, 22(4): 343-349
- [11] 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
- [12] 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: 国防科学技术大学学位论文, 2008

欢迎订阅 2011 年《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管, 南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办的双月刊, 是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要介绍国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献、专题报告和学术动态, 包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等。不拘泥于行业(如机械、交通、农业、生物、能源、航空、航天、航海、建筑、地震等)和测试项目(如振动、冲击、力位移、噪声等)。

本刊是中文核心期刊, 美国 EI Compendex 数据库收录用刊, 并为中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)、中国期刊全文数据库(CJFD)、中国科学文献计量评价研究中心的数据库源期刊、中国物理文摘等多家国内外重要数据库的收录及来源期刊。本刊逢双月末出版, 国内外公开发行人, 中国标准连续出版物号 ISSN1004-6801, CN32-1361/V, 邮发代号 28-239。每本定价 8 元, 全年 48 元。欢迎对本刊感兴趣的单位和个人到当地邮局订阅, 也可直接汇款至本刊编辑部订阅。

编辑部地址: 南京市御道街 29 号;

邮编: 210016;

电话: (025) 84893332

E-mail: qchen@nuaa.edu.cn