爆　炸　与　冲　击
Explosion and Shock Waves

DOI：10.11883/bzycj-2025-0248

杆状弹丸头形对其超高速撞击薄板的影响分析*

文　肯，柯发伟，邹胜宇，李　毅

（中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所，四川 绵阳 621000；
飞行器流体物理全国重点实验室，四川 绵阳 621000）

摘　要：弹丸超高速撞击薄板时，弹丸材料在复杂波系作用下通常会发生变形、破碎甚至相变现象，形成二次碎片云。已有研究表明，杆状弹丸头形将对其超高速撞击薄板产生影响。本文主要以SPH数值仿真为手段，开展了平头、半球头、锥头等典型头形杆状弹丸超高速撞击薄板的数值仿真。结果表明，大钝角锥头和平头与薄板撞击产生的冲击波最强、弹体破碎最为剧烈、弹体质量和轴向动能损失最大，小钝角锥头、尖锥头及半球头次之。对弹头与薄板撞击产生冲击波过程进行了建模分析，结果显示存在一弹头临界半锥角（与撞击速度、弹靶材料相关），使得弹体破碎最为剧烈，该结果成功解释了不同文献中锥形弹头撞击效果的差异。本文可为非球形空间碎片防护设计等超高速碰撞研究提供一定参考。

关键词：杆状弹丸，弹头形状，超高速碰撞，薄板，冲击波

中图分类号：O383　　　　**国标学科代码：**13035　　　　**文献标识码：**A

Head-shape effects on the hypervelocity impact between a rod onto a thin plate

WEN Ken, KE Fa-wei, ZOU Sheng-yu, LI Yi

(Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China; National Key Laboratory of Aerospace Physics in Fluids, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: When a projectile impacts a thin plate at hypervelocity, the projectile material usually undergoes deformation, fragmentation, even phase transition under the action of complex wave system, forming a secondary debris cloud. It has been shown that the rod's head shape affects the hypervelocity impact between the rod and a thin plate. A series of SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) numerical simulations of the hypervelocity impact by the rods with flat head, hemispherical head and cone head at impact velocities of .3.30km/s and 6.0km/s and length-to-diameter ratio of 2/1 and 3/1 were carried out. Simulation results show that the intense of the shock wave and the failure in the material are affected by the head shape of the rod. With the impact across the plate, the mass loss and kinetic energy loss of the rod are related with the head shape. Obtuse cone head and flat head impact produce the strongest shock wave, most intense projectile fragmentation, and largest loss of rod mass and kinetic energy. A model of the intact between the rod and the plate, as well as the shock wave generation during the impact was built. The model shows that there exists a critical half-cone angle (related to the impact velocity and the target material), which makes

*收稿日期：2025-08-04；修回日期：2025-10-11；
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（12202481）；
第一作者、通信作者：文　肯（1994－　），男，博士，工程师. E-mail: wenkensc@163.com。

the continuous interaction between rod and plate, makes the fragmentation of the rod projectile the most violent. For the hypervelocity impact of projectiles with different shapes, in a previous work, the impact-induced shock wave in a cone is more severe than that of a sphere or a rod, while another work has an inconsistent result. The model was successfully used to explain the contradict results. This paper can provide some references for the research of hypervelocity impact and the protection design of space debris.

Keywords: rod-shaped projectile; warhead shape; hypervelocity impact; thin plate; shock wave

多层屏蔽结构（如 Whipple 结构）被广泛研究和应用于空间碎片超高速碰撞防护[1][2][3]，其核心机理是利用前板与弹丸的超高速碰撞使弹丸发生破碎、相变，分散能量以保护后续结构[4]。

由于较好的对称性，球状弹丸和杆状弹丸（长/短圆柱、圆盘）正撞击薄板问题目前被研究最多。对于球状弹丸，学者们通过实验和理论分析，揭示了球形弹丸撞击下冲击波传播规律、碎片云形成机制以及靶板损伤特性[5][7][8][9]。Grady 和 Kipp[8]提出了球形弹丸撞击压力演化的两阶段模型，而 Wen 等人[9][10]基于构建了椭球面波系传播模型（GPM）。研究表明，影响球状弹丸撞击薄板效应的主要有弹丸直径与薄板厚度之比（厚径比）、撞击速度、撞击角度及弹靶材料等。

而对于柱状弹丸，Piekutowski[5]实验显示，圆盘弹丸撞击碎片云内部有一柱状结构，由弹丸和薄板材料共同构成；而长圆柱弹丸撞击碎片云内部有较明显弹体残余。近年来，Miller 等[11][12][13]开展了不同长径比柱形弹丸撞击实验，显示圆柱形撞击碎片云分布受圆柱长径比和撞击姿态影响大，对于正撞击，碎片云类似于双圆台结构；对于非正撞击，碎片云为非对称分布。锥形、方形等其他形状弹丸的超高速撞击问题，现有分析多针对其对弹道极限特性[14]。由于在穿甲与侵彻领域的应用，长杆弹丸超高速/高速撞击半无限/厚靶的问题得到了广泛关注[15][16]。马文来等[17]、徐博坤等[18]采用数值模拟手段对弹丸形状对超高速撞击的影响进行了分析。综合来讲，当前研究已表明弹丸形状，特别是头形，对薄板超高速撞击有影响，但如何描述其影响及影响机理仍需进一步研究。

本文采用 SPH 方法，选取平头、锥头、半球头等典型杆状弹丸，开展了超高速撞击数值仿真，对比分析了不同头形弹丸的破碎及碎片云特性，结合撞击冲击波产生过程建模，分析了头形对弹体破碎影响机理，并进一步对照解释了文献中锥形弹丸仿真结果。

2 不同头形弹丸超高速撞击仿真设置

2.1 仿真方法及参数校验

超高速撞击产生碎片云的过程涉及到材料剧烈破碎，通常采用 SPH(Smoothed particle method)方法仿真。利用 AUTODYN 软件 SPH 方法对撞击试验开展 2D 轴对称数值仿真。弹丸材料 2A12 铝和薄板材料 Al-6061 铝，均选用 Shock 状态方程，Johnson-Cook 强度模型和 Grady Spall Model 失效模型来表征，相关的材料参数见表 1。SPH 计算中一阶、二阶人工粘性均取 2.5。SPH 粒子大小为 0.01 mm。

表 1 2A12 铝和 Al-6061 铝材料参数

Table 1 Material parameters for 2A12 Al and Al-6061-T6 in simulations

物理量	Al 2A12	Al 6061-T6
密度, g/cm3	2.784	2.703
参考温度, K	300.00	300.00
比热, J/kg·K	850.00	885.00
Grüneisen 系数	2.00	1.97
参数 C1, m/s	5370.00	5240.00
参数 S1	1.29	1.40

参数 S2	0.00	0.00
剪切模量, MPa	28600.00	27600.00
初始屈服强度, MPa	325.00	290.00
最大屈服应力, MPa	760.00	680.00
硬化系数	310.00	125.00
硬化指数	0.185	0.10
dG/dP	1.865	1.80
dG/dT, kPa/K	-17620.00	-17000.00
dY/dP	0.017	0.01891
熔化温度, K	1220.00	1220.00

利用超高速撞击试验结果校核数值仿真方法和材料参数。试验在中国空气动力研究与发展中心开展。选取圆柱弹丸、球状弹丸试验作为对比。对照试验共有 3 次，试验中弹丸材料为 2A12 铝，质量均约为 0.75g，形状尺寸为：铝球，直径 *D*=8.00mm；铝长圆柱，长度 *L*=9.16mm、底面直径 *D*=6.11mm；铝短圆柱（或圆盘），长度 *L*=2.78mm、底面直径 *D*=11.18mm。薄板材料为 Al-6061 铝，厚度为 1.00mm。撞击速度均约为 3.30km/s。详细试验参数见表 2。需要说明，试验设计工况均是攻角为 0°的正撞击，但实际试验中弹丸发生了轻微偏转，表 2 记录了弹丸实际攻角。

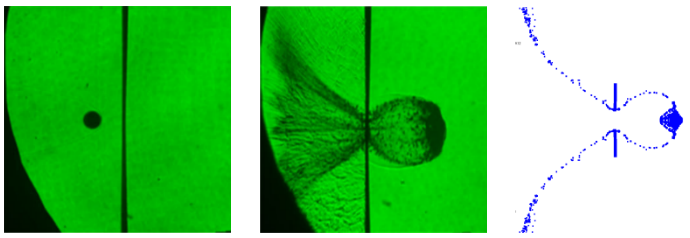
表 2 超高速撞击地面试验参数

Table 2 the set-up of the hypervelocity impact tests

编号	弹丸材料	弹丸形状	弹丸尺寸(mm)	弹丸质量(g)	撞击速度(km/s)	弹丸攻角(°)	薄板材料	薄板厚度(mm)
T01	2A12 铝	球	*D*=8.00	0.7478	3.29	—	Al-6061 铝	1.00
T02	2A12 铝	圆柱(L/d=3/2)	*D*=6.11，*L*=9.16	0.7490	3.27	-3.5°	Al-6061 铝	1.00
T03	2A12 铝	圆柱(L/d=1/4)	*D*=11.18，*L*=2.78	0.7332	3.34	-1.5°	Al-6061 铝	1.00

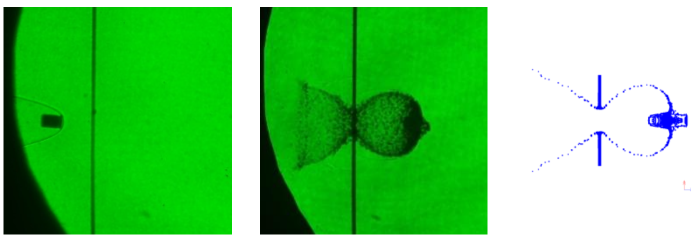
仿真中弹丸和薄板的尺寸及撞击速度与试验完全相同。试验碎片云图像与相同时刻的仿真图像对比结果如图 1 所示。由图可见，由于柱形弹丸本身带有轻微攻角，试验中碎片云图像也相应有一定倾斜。2D 轴对称仿真结果仅显示了碎片云的一个切面，该切面沿撞击轴旋转可得到真实的碎片云空间特征；而试验结果是从碎片云侧面拍摄的阴影照片，存在侧向上的叠加效果。综合考虑，数值仿真结果与试验结果较为吻合。可以认为，采用的数值仿真方法和材料参数在模拟不同形状弹丸（球形、长圆柱和短圆柱）超高速撞击碎片云时是有效的。

球形
D=8.00mm



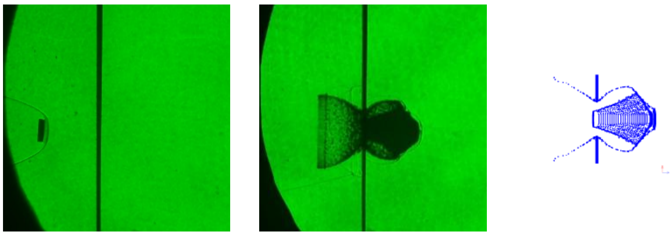
−3.4μs　12.6μs　仿真，12.6μs

圆柱形
D=6.11mm，*L*=9.16mm



−4.8μs　11.2μs　仿真，11.2μs

圆盘形
D=11.18mm，L=2.78mm



−7.9μs　　8.1μs　　仿真，8.1μs

图 1 超高速撞击碎片云试验和仿真结果对比

Figure 1 Comparison of hypervelocity impact debris cloud in tests and simulations

2.2 工况设置

选定弹丸材料为 2A12 铝，质量均约为 0.75g，薄板材料为 Al-6061 铝，厚度为 1.00mm，撞击攻角均为 0°，开展杆状弹丸的超高速撞击仿真。选定 2/1、3/1 两个典型长径比，及 3.30km/s、6.0km/s 两个撞击速度，共设置 4 组仿真工况。每组仿真中，分别设置平头、半球头、两个钝锥头（半锥角大于 45°）、两个尖锥头（半锥角小于 45°），如图 2 所示。详细的数值仿真工况设置见表 3。

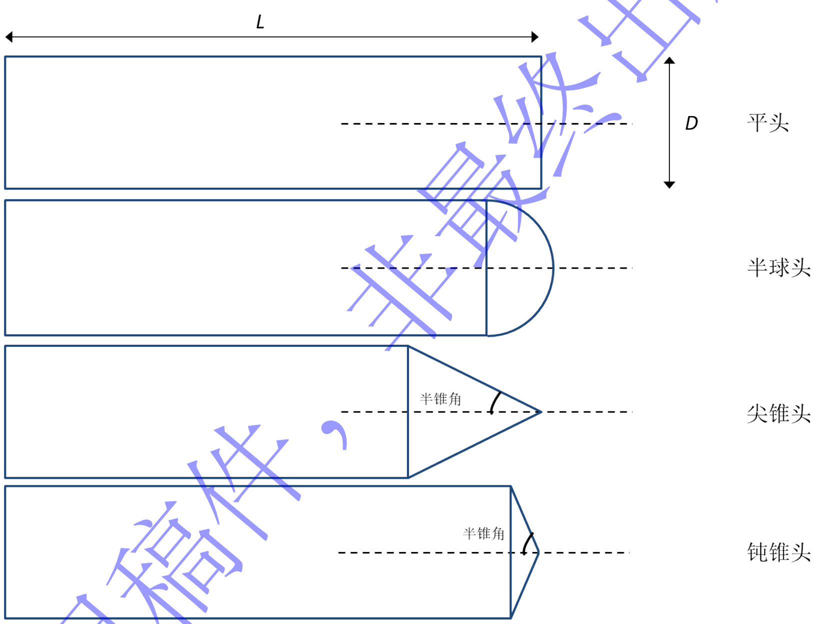


图 2 不同头形杆状弹丸示意图

Figure 2 Schematic of rod projectiles with different heads

表 3 不同长径比柱形弹丸超高速撞击数值仿真工况设置

Table 3 Numerical simulation case settings for rod projectiles with different aspect ratios

编号	弹丸尺寸(mm)	弹头形状	半锥角（°）	速度(km/s)	编号	弹丸尺寸(mm)	弹头形状	半锥角（°）	速度(km/s)
S111	D=5.55，L=11.09	平头	-	3.30	S211	D=4.85，L=14.54	平头	-	3.30
S112	D=5.55，L=11.09	半球	-	3.30	S212	D=4.85，L=14.54	半球	-	3.30
S113	D=5.55，L=11.09	钝锥 1	70.22	3.30	S213	D=4.85，L=14.54	钝锥 1	67.55	3.30
S114	D=5.55，L=11.09	钝锥 2	54.27	3.30	S214	D=4.85，L=14.54	钝锥 2	50.43	3.30
S115	D=5.55，L=11.09	尖锥 1	42.82	3.30	S215	D=4.85，L=14.54	尖锥 1	38.89	3.30

S116	D=5.55，L=11.09	尖锥 2	29.07	3.30	S216	D=4.85，L=14.54	尖锥 2	25.83	3.30
S121	D=5.55，L=11.09	平头	-	6.00	S221	D=4.85，L=14.54	平头	-	6.00
S122	D=5.55，L=11.09	半球	-	6.00	S222	D=4.85，L=14.54	半球	-	6.00
S123	D=5.55，L=11.09	钝锥 1	70.22	6.00	S223	D=4.85，L=14.54	钝锥 1	67.55	6.00
S124	D=5.55，L=11.09	钝锥 2	54.27	6.00	S224	D=4.85，L=14.54	钝锥 2	50.43	6.00
S125	D=5.55，L=11.09	尖锥 1	42.82	6.00	S225	D=4.85，L=14.54	尖锥 1	38.89	6.00
S126	D=5.55，L=11.09	尖锥 2	29.07	6.00	S226	D=4.85，L=14.54	尖锥 2	25.83	6.00

3 不同头形杆状弹丸超高速撞击仿真结果

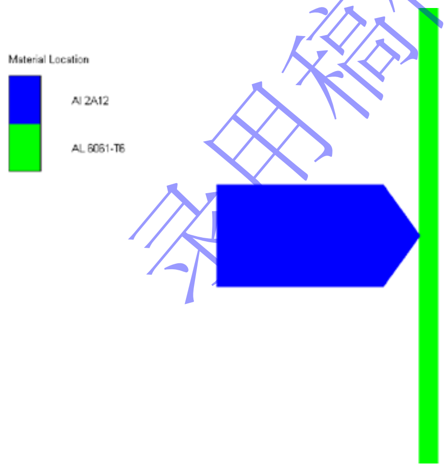
3.1 典型撞击过程

弹丸超高速撞击过程包含碰撞前、碰撞中和碰撞后三个阶段，其中碰撞前指弹丸和薄板接触以前；碰撞中是指碰撞发生开始，冲击波在弹丸和薄板内传播、作用，直至弹丸破碎过程结束为止；碰撞后指碎片云自由扩散阶段。

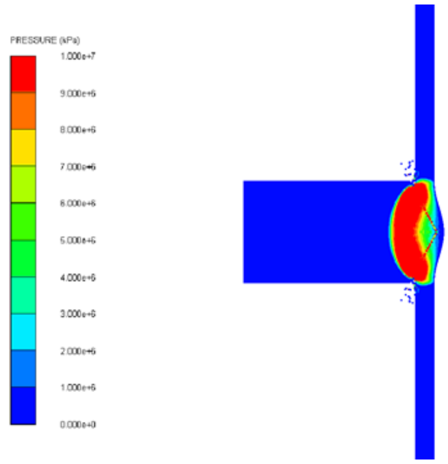
以工况 S114 为例，其碰撞前与碰撞中的界限为弹靶初次接触，其典型情况如图 3（a），图中弹丸为 Al 2A12 材料，薄板为 Al 6061-T6 材料，弹丸头部即将与薄板发生接触。

碰撞中，弹丸前沿不断与薄板发生碰撞，产生冲击波向弹丸和薄板内传播。此时，弹丸头部被剧烈压缩，在薄板背面反射稀疏波作用下，弹丸头部将发生破碎。弹丸内部的冲击波将不断向弹丸后传播，并在薄板背面、弹丸侧面等反射的稀疏波追赶作用下逐渐耗散衰减。典型情况如图 3（b）、图 3（c）。图示为对称剖面的压力云图，以展现材料内冲击波传播情况。当冲击波到达弹丸背面时，将产生反射稀薄波，该反射稀疏波与冲击波后的追赶稀疏波相互作用，将造成弹丸尾部破碎（层裂）。对于长杆弹丸，弹丸内的冲击波在达到弹丸尾部前已被完全卸载，弹丸尾部通常保持完整。

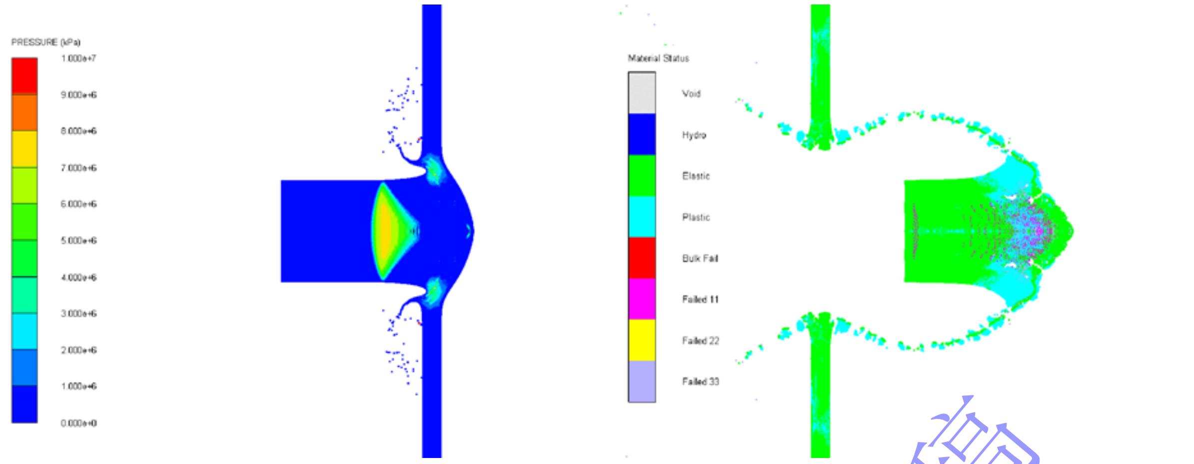
碰撞后，碎片云将在惯性作用下自由扩散，典型情况如图 3（d）。图示为对称剖面的材料损伤状态，以展示材料的破碎失效情况。



(a) 弹丸头部与薄板即将接触
(a) Projectile head about to contact plate



(b) 弹丸头部与薄板正面发生碰撞，冲击波向材料内传播
(b) Projectile head impacts the plate, shock waves propagate into materials



(c)冲击波向材料内传播，并在弹丸侧向、薄板背面稀疏波作用下逐渐衰减

(c) Shock waves continuously propagate and attenuate by the rarefaction waves from projectile sides and plate back

(d) 杆状弹丸头部、尾部发生破碎，形成碎片云团，碎片云在惯性作用下扩散

(d) head and tail of rod fragment, and a debris cloud forms and diffuse inertially

图 3 杆状弹丸超高速撞击薄板的典型碰撞过程示意

Figure 3 Schematic of typical collision process for hypervelocity impact

3.2 冲击波传播和材料失效模拟

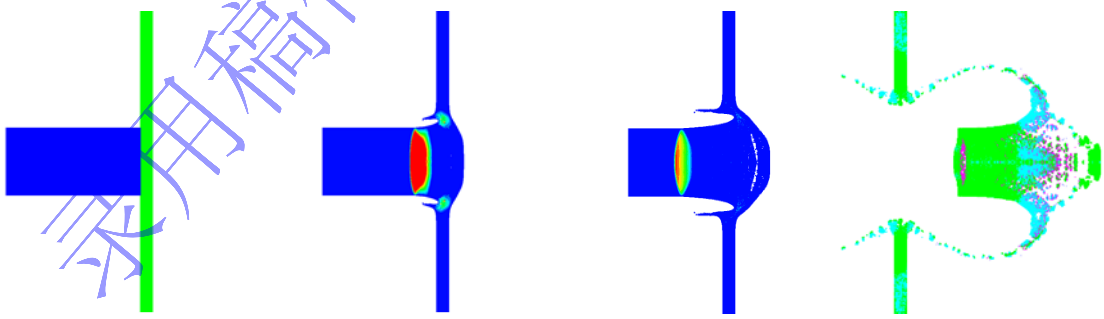
上述 24 组工况的撞击过程中的冲击波传播情况、弹丸失效情况（碎片云特性）对比如图 4（由于文本所限，仅展示其中撞击速度为 3.3km/s、弹丸长径比为 2/1 的 6 组）。

由于弹头形状影响，在弹丸与薄板发生碰撞时，弹头部各位置与薄板正面发生碰撞的时序特征也会发生变化。由图可知，冲击波强度而言，S113>S111>S114>S112>S115>S116。

冲击波的变化将导致其作用引起的弹丸尾部材料失效和破碎发生变化。由图可知，从弹丸尾部的失效程度来看，基本符合 S113>S111>S114>S112>S115>S116。值得注意的是，该次序与弹丸内冲击波强度排序一致。

其他几组撞击过程中的波传播情况类似。需要说明，在长径比增大时，弹丸冲击波受到侧向卸载更强烈，导致弹丸尾部的失效明显减弱。在撞击速度增大时，弹丸内冲击波初始压力、速度明显增大，导致弹丸头部、尾部的失效和破碎显著增强。相关结果可见附件数据。

S111



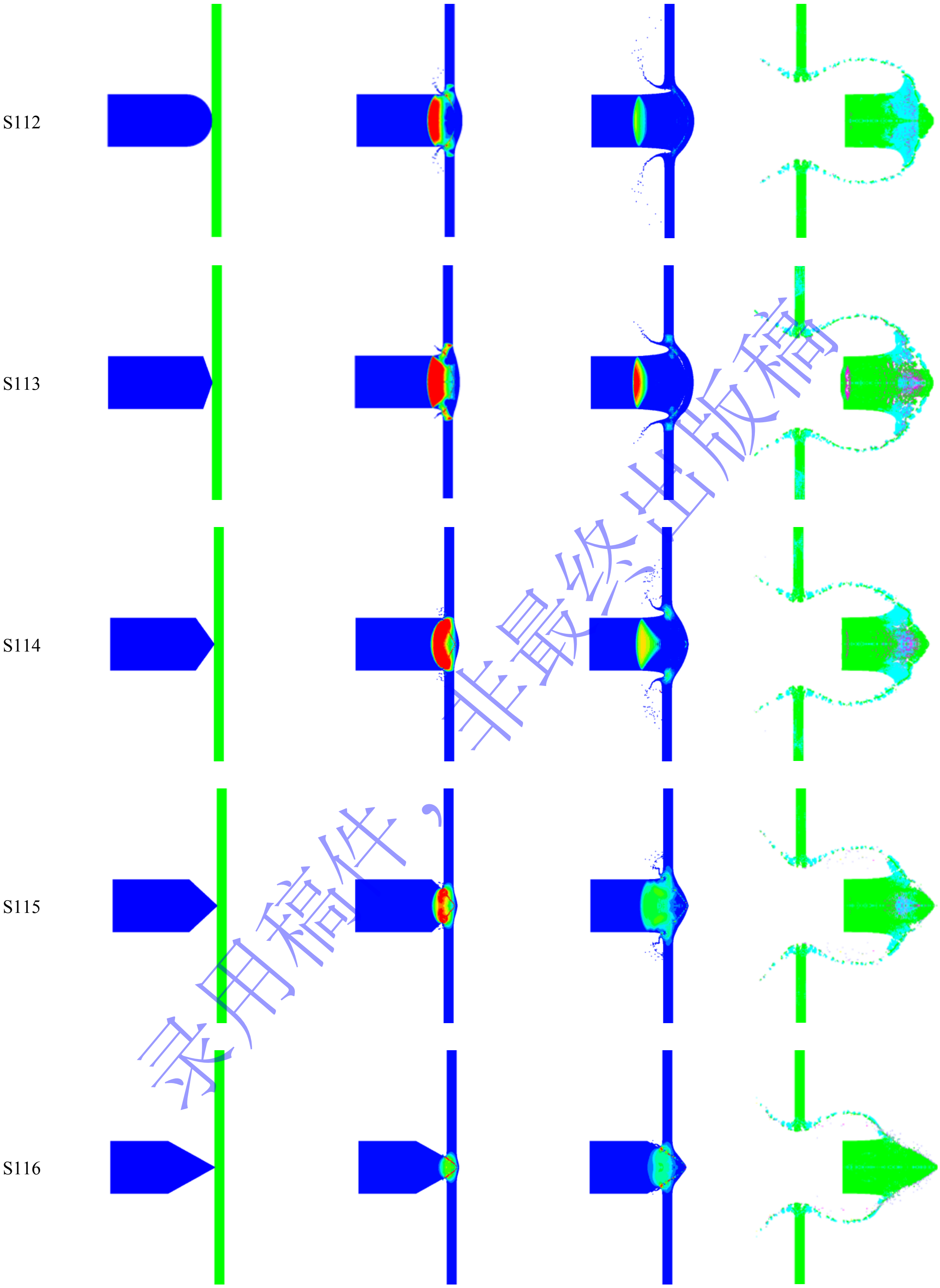


图 4 撞击速度 3.3km/s、弹丸长径比 2/1，不同头形杆状弹丸内的冲击波传播、材料失效（碎片云）仿真结果

Figure 4 Simulation results of shock wave propagation, material failure (debris clouds) within projectiles of different heads@ V_0 = 3.3km/s, L/D = 2/1

4 不同头形杆状弹丸超高速撞击仿真对比分析

4.1 弹丸的质量损失和轴向动能损失

为进一步分析薄板对杆状弹丸造成影响，统计撞击结束后的弹丸初始质量 m_0、剩余质量 m 和初始动能 E_0、剩余轴向动能 E，并计算弹丸撞击后的质量损失 m_{loss} 及轴向动能损失 E_{loss}。

$$\begin{aligned} m_{\text{loss}} &= \frac{\Delta m}{m_0}\times 100\% \\ E_{\text{loss}} &= \frac{\Delta E}{E_0}\times 100\% \end{aligned} \tag{1}$$

表 4 不同头形杆状弹丸撞击薄板的质量损失和轴向动能损失

Table 4 Mass loss and axial kinetic energy loss for rods with different heads impacting onto thin plate

编号	剩余弹丸质量，g	剩余弹丸轴向动能，J	质量损失	轴向动能损失	编号	剩余弹丸质量，g	剩余弹丸轴向动能，J	质量损失	轴向动能损失
S111	6.77E-01	3.25E+03	9.56%	20.26%	S211	6.74E-01	3.39E+03	9.46%	16.37%
S112	6.96E-01	3.37E+03	-1.75%	9.52%	S212	7.10E-01	3.53E+03	-1.12%	7.67%
S113	6.82E-01	3.23E+03	3.08%	15.70%	S213	6.82E-01	3.39E+03	3.96%	12.32%
S114	6.32E-01	3.04E+03	4.00%	15.20%	S214	6.35E-01	3.21E+03	6.02%	12.75%
S115	5.70E-01	2.80E+03	7.09%	16.18%	S215	6.24E-01	3.19E+03	2.70%	8.65%
S116	5.17E-01	2.57E+03	1.22%	9.82%	S216	5.62E-01	2.92E+03	1.92%	6.41%
S121	3.12E-01	5.30E+03	58.32%	60.66%	S221	4.97E-01	8.70E+03	33.24%	35.08%
S122	5.61E-01	9.21E+03	18.14%	25.34%	S222	6.58E-01	1.11E+04	6.29%	12.18%
S123	2.80E-01	4.79E+03	60.21%	62.18%	S223	4.35E-01	7.61E+03	38.74%	40.46%
S124	4.94E-01	8.07E+03	24.97%	31.90%	S224	5.87E-01	9.91E+03	13.12%	18.51%
S125	4.67E-01	7.72E+03	23.88%	30.09%	S225	5.57E-01	9.52E+03	13.15%	17.53%
S126	3.72E-01	6.28E+03	28.92%	33.34%	S226	5.02E-01	8.63E+03	12.39%	16.33%

将统计得到的质量损失和轴向动能损失进行对比，如图 5、图 6。图中序号、连线均无物理意义，仅为清晰显示各组特征。由图可知：质量损失和轴向动能损失的趋势几乎完全一致；质量损失随着撞击速度增大、长径比减小而增大。

需要说明的是，这里剩余弹丸质量和剩余弹丸轴向动能均由 AUTODYN 软件生成，其原理是根据 SPH 粒子间距判断粒子是否属同一实体，将同一实体粒子质量求和得到实体质量。在 S112、S212 工况中，弹丸撞击薄板后，弹体几乎无破碎，且其前端与薄板粒子紧密贴合，部分薄板粒子质量被计入剩余弹体质量，故出现质量损失、轴向动能损失为负数的非物理现象。其他工况中弹体和薄板粒子分散足够远，无此情形。

显然，对于不同撞击速度、长径比的杆状弹丸而言，平头（横轴 1 系列）和钝锥头（横轴 3 系列）的弹体质量/轴向动量损失最大，半球头（横轴 2 系列）、钝锥头（横轴 4 系列）及尖锥头（横轴 5、6 系列）的弹头质量/轴向动量损失最小。该结论与上文中对冲击波、失效的观测相符合。

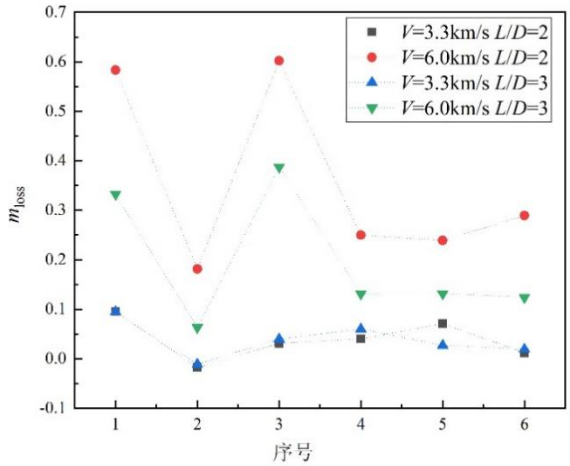


图 5 不同工况下弹丸轴向动能损失统计图

Figure 5 Statistical result of projectile mass loss

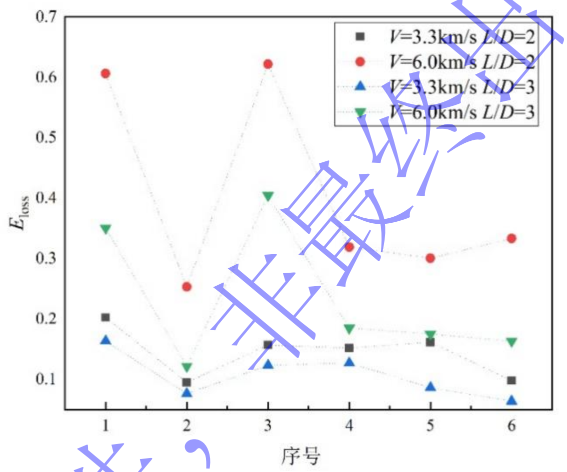


图 6 不同工况下弹丸质量损失统计图

Figure 6 Statistical result of projectile axial kinetic energy loss

4.2 撞击冲击波产生过程分析

就上文的结果而言，有一点需要我们特别说明，即为何在钝锥头 1，锥头造成弹体冲击波衰减、质量损失等几乎无变化，甚至是相较平头更大，而对于钝锥头 2 及尖锥头，冲击波明显衰减、质量损失显著降低。

用锥形弹头与薄板的碰撞过程建模来解释该现象。分析可知，弹丸头部与薄板发生碰撞时，除了底面外，其侧面还将与薄板发生碰撞。在轴对称面上表示，撞击点为 A，撞击产生的冲击波分别以 U_{SP} 和 U_{ST} 的速度向弹丸和薄板内扩散，弹丸和薄板内的冲击波的波后区域用虚线阴影表示，如图 7。

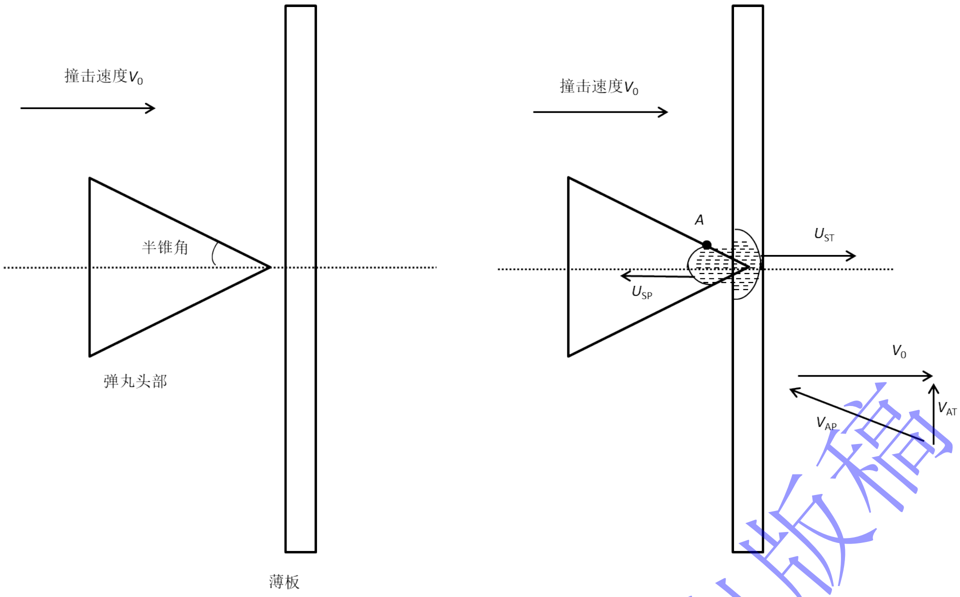


图 7 圆台形弹丸超高速撞击薄板的波系分析坐标示意

Figure 7 Schematic coordinate system for wave system analysis of hypervelocity impact of frustum head on thin plate

碰撞点相对弹丸的移动速度大小 V_{AP} 为

$$V_{AP}=\frac{V_0}{\cos\alpha} \tag{2}$$

相对薄板的移动速度大小 V_{AT} 为

$$V_{AT}=V_0\cdot\tan\alpha \tag{3}$$

为简化问题，本文中弹丸薄板材料均为铝，得 $U_{PP}=U_{PT}=V_0/2$、$U_{SP}=U_{ST}$。"冲击波速度—粒子速度"形式的 Hugoniot 关系：

$$U_{SP}=C_0+S_0U_{PP} \tag{4}$$

由此可知，弹丸/薄板内的冲击波速度与撞击速度 V_0 成线性关系。当弹丸和薄板材料相同时，其内部冲击波速度也相同。此时，撞击点移动速度和冲击波速度的大小关系则同样由撞击速度和圆台半锥角确定。

此时，存在一临界半锥角 $\alpha_{0\min}$，若半锥角大于 $\alpha_{0\min}$，则增大撞击速度 V_0 总可使碰撞点相对薄板的运动速度大于薄板内冲击波速；若半锥角小于 $\alpha_{0\min}$，则无论如何增大撞击速度，碰撞点相对薄板的运动速度始终小于薄板内冲击波速度，撞击一发生，薄板材料即开始产生反溅。

有以下确定 U_{ST} 和 V_{AT} 相等条件的公式

$$\alpha_0=\arctan\left(\mathrm{C}_0/V_0+\mathrm{S}_0/2\right) \tag{5}$$

而对于该临界角度，若半锥角大于该临界角度，则弹头侧面和薄板发生的撞击总是先于冲击波达到，即撞击点的相对撞击速度保持 V_0。而当半锥角小于该临界角度，则弹头侧面和薄板发生的撞击将晚于冲击波到达，撞击点实际与薄板发生碰撞的相对速度将小于 V_0，从而导致弹体受到的薄板冲击减弱。

4.3 结果运用

对于本文工况，3.3km/s 的撞击速度，α_0 为 66.5°；6.0km/s 的撞击速度，α_0 为 57.5°。即本文涉及的工况中钝锥 1 大于临界值，故其冲击波并未有明显减小。而对于球形弹丸，可认为是平头至钝锥头

至尖锥头变化的耦合过程，故其弹体内冲击波同样有较明显减小。

马文来等[17]开展了长/短圆柱、圆锥、球形弹丸超高速撞击数值模拟，弹丸和薄板均为铝合金材料。其结果显示，长圆锥弱于短圆锥弱于球弹丸弱于圆柱弹丸。许坤博等[18]开展了球形、圆柱形、圆锥形、盘形等不同工况下的超高速撞击数值模拟，弹丸和薄板均为铝合金材料。其结论显示，长圆锥弱于其他形状弱于短圆锥。两者结论有差异，但由临界半锥角可作解释。

在马文来等[17]算例中，撞击速度为 6.5km/s 时，当圆柱锥尖为撞击面时，对于在弹丸前端后 3mm 处的压力，长圆锥（长径比为 2.89，半锥角为 19.1°）撞击小于短圆锥（长径比为 1.16，半锥角为 40.8°）撞击小于球弹丸撞击小于圆柱弹丸撞击。根据临界半锥角计算，对于 6.5km/s 的撞击速度，α_0 为 56.2°。故对此工况，长圆锥、短圆锥的半锥角均小于临界半锥角，弹靶发生非持续碰撞，弹丸前端压力明显小于球弹丸、圆柱弹丸。

在许坤博等[18]算例中，当撞击速度为 5.0km/s 时，长径比为 1/3.46（半锥角 73.9°）的圆锥形弹丸撞击端面中心点的压力峰值最大，长径比为 3.46/1（半锥角 16.1°）的圆锥形弹丸撞击端面中心点的压力峰值最小，其余形状压力峰值居中。根据临界半锥角计算，对于 5.0km/s 的撞击速度，α_0 为 60.2°。故上述算例，短圆锥的半锥角均大于临界半锥角，弹靶发生持续碰撞，弹丸前端压力更强；短圆锥的半锥角小于临界半锥角，弹靶发生非持续碰撞，弹丸前端压力较小。

从以上结果看，由于仅考虑长锥形、短锥形，并不能准确描述其与薄板撞击的强度，如文献[17]中得到的结论长短圆锥均小于球形、柱形，文献[18]中得到的结论长圆锥大于球形。而通过临界半锥角，很好地描述了锥形弹丸对薄板的超高速撞击特性。

5 结论

弹丸与薄板的超高速撞击过程受其头形影响。大钝角锥头和平头与薄板撞击产生的冲击波最强、弹体破碎较为剧烈、弹体质量损失和轴向动能损失较大，较小钝角锥头、尖锥头及半球头次之。对弹头与薄板撞击产生冲击波过程的建模分析显示，存在一弹头临界半锥角（与撞击速度、弹靶材料相关），使得弹体破碎最为剧烈，该结论可成功解释了不同文献中锥形弹头撞击效果的差异。

致谢 本工作得到国家自然科学基金委青年科学基金项目（项目编号：12202481）资助，特此致谢。

参考文献

[1] 龚自正, 高珂佳, 宋光明, 等. 超高速碰撞研究在航天领域的应用现状与展望[J]. 现代应用物理, 2018, 9(4): 1-12. **DOI:** 10.12061/j.issn.2095-6223.2018.040101.

[2] 龚自正, 赵秋艳, 李明, 等. 空间碎片防护研究前沿问题与展望[J]. 空间碎片研究, 2019, 19(3): 2-13.

[3] LIOU J C, OPIELA J H, COWARDIN T H, at al. Successful hypervelocity impacts of DebrisLV and DebriSat[J]. Orbital Debris Quarterly News, 2014, 18(3): 3-5.

[4] WHIPPLE F L. Meteorites and space travel[J]. Astronomical Journal, 1947, 52: 132-137.

[5] PIEKUTOWSKI A J. Debris cloud produced by the hypervelocity impact of non-spherical projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26:165-172. **DOI:**10.1016/j.ijimpeng.2006.09.067.

[6] ZHANG P L, XU K B, LI M, et al. Study of the shielding performance of a Whipple shield enhanced by Ti-Al-nylon impedance-graded materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 124: 23-30. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2018.08.005.

[7] 郝伟江, 龙仁荣, 张庆明, 等. 球形弹丸超高速撞击靶板时背表面材料破碎的数值模拟分析[J]. 高压物理学报, 2019, 33(02): 79-85. **DOI:** 10.11858/gywlxb.20180651.

[8] GRADY D E, KIPP M E. Experimental measurement of dynamic failure and fragmentation properties of metals[J].

International Journal of Solids Structures, 1995, 32(17/18): 2779-2791. **DOI:** 10.1016/0020-7683(94)00297-A.

[9] WEN K, CHEN X W, DI D N. Modeling on the shock wave in spheres hypervelocity impact on flat plates[J]. Defence Technology, 2019, 15(4): 457-466. **DOI:** 10.12783/ballistics2019/33210.

[10] WEN K, CHEN X W. Analysis on the stress wave and rarefaction wave produced by hypervelocity impact of spheres onto thin plates[J]. Defence Technology, 2020, 16(5): 969-979. **DOI:** 10.1016/j.dt.2019.11.017.

[11] MILLER J, DAVIS B, JUDD T, et al. The development of experimental hypervelocity impact capabilities with non-spherical projectiles[J]. Orbital Debris Quarterly News, 2020, 24(3): 4-7.

[12] MILLER J. Implication of debris fragment shape on shield protection capability[J]. Orbital Debris Quarterly News, 2018, 22(4): 2-4.

[13] MILLER J, DAVIS B, MCCANDLESS R, et al. Experimental hypervelocity impacts of non-spherical projectiles on whipple shields[J]. Orbital Debris Quarterly News, 20221, 25(4): 2-5.

[14] 宋光明, 武强, 李明, 等. 超高速撞击下空间碎片形状效应研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(3): 45-52. **DOI:** CNKI:SUN:JSCX.0.2020-03-009.

[15] 陈小伟. 穿甲/侵彻问题的若干工程研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39: 316-351. **DOI:** 10.3321/j.issn:1000-0992.2009.03.006.

[16] 焦文俊, 陈小伟. 长杆高速侵彻问题研究进展[J]. 力学进展, 2019, 49: 201904. **DOI:** CNKI:SUN:LXJZ.0.2019-00-004.

[17] 马文来, 张伟, 庞宝君, 等. 超高速撞击弹丸形状效应数值模拟研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1174-1177. **DOI:** 10.3321/j.issn:1000-1328.2006.06.010.

[18] 徐坤博, 龚自正, 侯明强, 等. 超高速撞击中的弹丸形状效应数值模拟研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(5): 570-575. **DOI:** 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.05.005.