

# 高熵合金防护结构的超高速撞击数值模拟研究\*

尹云飞<sup>1</sup>, 杨秋足<sup>1</sup>, 郭家傲<sup>1</sup>, 李志强<sup>1,2,3,4</sup>

1. 太原理工大学航空航天学院, 山西 晋中 030600;
2. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;
3. 太原理工大学山西省力学基础学科研究中心, 山西 太原 030024;
4. 太原理工大学力学国家级实验教学示范中心, 山西 太原 030024)

**摘要:** 空间碎片问题是当今空间环境保护领域最紧迫的问题。目前的航天器防护结构多数为 Whipple 结构, 但主体缓冲屏材料多用铝合金材料。基于 AUTODYN 软件的光滑粒子流体动力学 (SPH) 法, 模拟研究了球形弹丸超高速撞击高熵合金防护结构, 分析了不同工况下碎片云数量、质量和动量等特性, 探讨了撞击速度以及结构厚度与弹丸直径之比 ( $t/D$ ) 对高熵合金防护结构超高速撞击特性的影响。结果表明, 在相同撞击条件下, 高熵合金防护结构产生的碎片云特性显著区别于铝合金防护结构: 碎片总量增加约 51.86%; 低质量碎片数量增加约 79.56%, 高质量碎片数量减少; 沿撞击方向碎片云的最大动量低于铝合金结构的 75% (多种弹丸直径下均成立)。影响因素分析表明: 碎片云膨胀程度主要受撞击速度控制 (速度越大, 膨胀越快), 受  $t/D$  的影响较小; 而危险碎片 (大质量/高动能) 的质量和动能则主要受  $t/D$  影响 (比值越高, 影响越大)。研究结果为高熵合金在新一代航天器防护结构中的工程应用提供了理论支持和参考。

**关键词:** 空间碎片; 超高速撞击; 高熵合金; 碎片云特性  
**中图分类号:** V423.4; O521.9; O347 **文献标识码:** A

人类航天活动随科技进步日益频繁, 空间碎片数量由此呈现显著上升趋势。目前, 据美国宇航局统计, 地球近地轨道上存在超过 11000 吨的太空碎片, 这将对之后的航天活动探索造成巨大的影响<sup>[1]</sup>。空间碎片的主要构成物质包含铝合金, 此外, 铝元素、锌元素以及钛元素所形成的各类氧化物也是重要组成部分, 这类碎片的平均密度大约为  $2.8 \text{ g/cm}^3$ 。碎片环绕地球运行过程中的运动速度主要取决于碎片所处具体轨道高度<sup>[2]</sup>。实际观测结果表明空间碎片覆盖较大尺寸跨度, 约 75 万个碎片尺寸处于 1~10 cm 之间, 约 1 亿个碎片尺寸分布在 1~10 mm 区间, 数量最为庞大的是亚毫米级 ( $<1 \text{ mm}$ ) 碎片, 其总量估计达百亿之巨<sup>[3]</sup>。因此研究空间碎片的防御问题对于未来的航天活动具有重要意义。

Whipple 提出的防护方案目前获得广泛应用, 该方案核心是在航天器舱体外部安装一层防护结构。空间碎片以超高速冲击这种防护结构, 导致碎片发生破碎现象与分散效应, 最终产生由大量微小碎片构成的云团, 该碎片云在扩散过程中显著耗散了碎片的动能, 并分散了冲击载荷, 从而大幅减轻了对内层舱壁的损伤<sup>[4]</sup>。该机制证实缓冲屏有效缓解空间碎片冲击, 显著降低空间碎片对航天器的威胁。在此基础上, 相关学者又提出了很多 Whipple 结构的改型, 结构构型方面, Cao 等<sup>[5]</sup>针对多层板结构提出了一种基于碎片映射方法的重建框架, 能够大幅度降低多层板超高速撞击数值模拟的计算时间, 并且在重建框架中考虑了碎片相互作用, 提高了模拟的准确性。Pai 等<sup>[6]</sup>对多层板结构进行了数值模

\*收稿日期: 2025-12-09; 修回日期: 2026-01-19;

基金项目: 国家自然科学基金 (12272255); 山西省自然科学基金 (202203021212292)

第一作者: 尹云飞 (2001—), 男, 硕士, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: 15735116167@163.com

通信作者: 李志强 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: lizhiqiang@tyut.edu.cn

拟和实验研究,并提出了一个全 3D 数值模拟模型以解决常用 2D 轴对称模型造成的误差,同时对能量变化、应力分布、塑性应变和变形等方面进行了分析验证。Cline 等<sup>[7]</sup>验证了弹丸异质性和多层板结构超高速撞击损伤的影响。Sathish 等<sup>[8]</sup>设计了一种包含间隔和自由边界织物系统的混合织物系统,并评估了该混合防护结构在不同冲击速度下的超高速冲击性能。Li 等<sup>[9]</sup>将 SiO<sub>2</sub>/玻璃纤维复合材料填充到防护结构里,并进行了一系列的超高速撞击实验,证明填充了 SiO<sub>2</sub>/玻璃纤维复合材料的防护结构防护性能优于铝合金防护结构。Pai 等<sup>[10]</sup>利用数值模拟技术验证了牛顿流体填充高性能纤维增强聚合物芯在填充式防护结构中的有效应用。Voillat 等<sup>[11]</sup>通过实验对比研究了泡沫铝合金作为夹芯板防护材料的应用前景。Ren 等<sup>[12]</sup>利用二级轻气炮对铝合金蜂窝夹芯板结构进行了超高速撞击实验,对比了普通铝合金弹丸和活性材料弹丸对夹芯板结构的损伤效果。Kamareh 等<sup>[13]</sup>对体心立方格纹核心夹层板的防护性能进行了数值模拟研究,并提出了防护性能更出色的 BCCz-II 结构。Önder<sup>[14]</sup>研究了具有波浪表面的防护结构对超高速撞击的反应,对具有四种不同表面波廓线的铝板进行了数值研究,以评估其对撞击弹丸的破碎性能。

针对防护结构材料,学术界也开展了选材方面研究,Putzar 等<sup>[15]</sup>对中国空间站所使用的编织材料填充式防护结构进行了 9 次超高速撞击实验,并得到了弹道极限方程,验证了编织材料填充式防护结构的可靠性。Duan 等<sup>[16]</sup>研究了复合材料外包装压力容器对空间碎片撞击的动态响应,并揭示了非灾难性损伤的特征和机制。Huang 等<sup>[17]</sup>烧制了 B<sub>4</sub>C/AL 做为防护结构的缓冲屏,并进行了超高速撞击实验,得到了其弹道极限方程,并分析了其防护机理。Ren 等<sup>[18]</sup>利用二级轻气炮对以 NdC/Al 2024 陶瓷金属复合材料为缓冲屏的 Whipple 防护结构进行了超高速撞击实验,分析了弹丸撞击对 NdC/Al 2024 保险杠的损伤过程和材料损伤状态。武强等<sup>[19]</sup>针对以 PTFE/Al 活性材料为防护屏的 Whipple 防护结构,开展不同弹丸尺寸、不同碰撞速度的超高速撞击实验,获得并分析了碎片云特性,结果表明,相较于同面密度铝合金材料,活性材料超高速撞击条件下的冲击起爆反应使得碎片云中具有侵彻能力的碎片大幅减少,从而显著提升航天器的防护能力。Ren 等<sup>[20][3]</sup>分别开展了以 PTFE/Al、PTFE/Ti 和 Al 2024 为缓冲层的 Whipple 防护板的超高速撞击实验,比较了两种反应材料的抗超高速撞击能力,结果表明,PTFE/Al 和 PTFE/Ti 活性材料的防护性能优于 Al 2024,且 PTFE/Al 活性材料的防护性能优于 PTFE/Ti,各种缓冲和吸能材料已经被开发出来,以减轻高速撞击的影响,包括可移动纤维束和速率敏感弹性体,这些材料都有一个共同的特点,即在动载荷下增强能量吸收和耗散,这已被证明是强烈依赖于应变率<sup>[21,22]</sup>。

综上所述,近年来国内外学者针对 Whipple 结构的结构改型和材料改变均做了大量工作,但多数防护结构采用铝合金、陶瓷、纤维等传统材料做为缓冲屏,依靠多层防护或填充复材来试图降低空间碎片动能,受材料本身属性、制备工艺等限制,防护性能有限。近年来高熵合金的兴起为缓冲屏材料的选择提供了新选项。高熵合金(HEA)属于先进多主元合金材料。该材料由多种金属元素以特定比例混合形成,其原子结构特征为长程化学无序,同时具有短程有序性,这种特殊的原子排布赋予了高熵合金超越常规合金的优异抗冲击性能<sup>[23]</sup>。

本研究将 CoCrFeNiTi 高熵合金材料创新性地应用于 Whipple 防护结构的缓冲屏。为评估高熵合金防护结构性能,建立球形弹丸高速撞击高熵合金防护结构数值模型,对不同撞击工况下的碎片云碎片数量、质量、动量以及影响因素进行了分析;同时与普通铝合金防护结构进行了对比,来准确评估高熵合金防护结构的防护性能,为空间碎片防护结构研究提供了新思路。

## 1 数值计算模型与有效性验证

### 1.1 数值计算模型

弹丸的可变形过程及其与防护板的相互作用会显著影响破碎形态与碎片谱,已有研究将弹丸动力学与目标响应耦合以模拟穿甲过程,从而为本研究中弹丸选取及离散方式提供了参考<sup>[24]</sup>,故本文应用 AUTODYN 软件的无网格光滑粒子流体动力学(SPH)方法,建立三维 SPH 粒子模型图 1 所示。

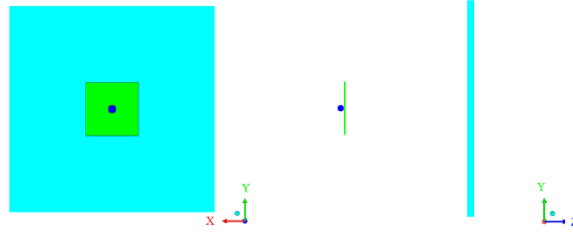


图 1 超高速撞击数值计算模型

Fig. 1 Numerical model for hypervelocity impact

为模拟空间碎片特性，弹丸材料选用 6061-T6 铝合金，该材料密度接近空间碎片；CoCrFeNiTi 高熵合金结构厚度为 0.84 mm，面密度为 0.54 g/cm<sup>2</sup>，与 2mm 厚的 2024-T4 铝合金结构等效，缓冲屏平面尺寸为 15\*15 mm；后板采用 6061-T6 铝合金，厚度为 4mm，平面尺寸为 60\*60 mm，后板与防护板间距为 100 mm。在数值模型中，弹丸及缓冲屏均采 SPH 粒子进行离散化表征，而后板则使用传统的实体单元进行建模。

## 1.2 材料模型及参数

针对超高速撞击过程中，材料所承受的高压、高应变率的极端工况，已有基于力学机理的模型将应变率敏感性与温升效应耦合起来，用以解释在高速冲击下材料宏观力学行为的转变，这为本文采用应变率-温度耦合的本构框架提供了理论依据<sup>[25,26]</sup>。为准确表征材料在高速冲击下的力学响应，选择采用 Johnson-Cook 模型。Johnson-Cook 模型常见于冲击动力学研究，该模型开发目标设定为准确预测金属材料动态响应特性，此响应特性出现在应变速率较高、塑性变形显著以及温度上升共同影响的条件下，具体表达式如下：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot (1 - T^*{}^m) \quad (1)$$

其中： $A$ 为初始屈服应力； $B$ 为应变硬化模量； $n$ 为应变硬化指数； $C$ 为应变率敏感系数； $m$ 为温度软化系数； $\varepsilon$ 为等效塑性应变； $\dot{\varepsilon}$ 为应变率； $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率； $T^*$ 为归一化温度。

此外使用 Mie-Grüneisen 状态方程描述极高压力环境中金属材料压力值（ $P$ ）与比内能（ $E$ ）的联系。具体表达式如下：

$$P = P_H + \gamma\rho(E - E_H) \quad (2)$$

其中： $\gamma$ 为 Gruneisen Gamma 系数，用于描述材料的可压缩性； $\rho$ 为材料密度； $P_H$ 和 $E_H$ 分别为冲击 Hugoniot 曲线上参考点的压力和比动能。

针对材料的损伤失效，已有研究建立了基于应力-应变和断裂准则的数值模型以刻画碎裂起始与扩展过程<sup>[27]</sup>，为本文选用损伤模型提供了参考。本文采用 Grady-Spall 模型和 JC 损伤模型来描述。Grady-Spall 模型是用于分析材料在动态加载（如高速冲击或爆炸）下发生层裂（spallation）时碎片尺寸分布的理论模型。表达式如下：

$$p_s = \sqrt{2\rho c_0^2 Y \varepsilon_c} \quad (3)$$

其中： $p_s$ 是主应力失效阈值； $\rho$ 为材料密度； $c_0$ 为材料体积声速； $\varepsilon_c$ 为临界失效应变，针对于铝合金材料，其临界失效应变 $\varepsilon_c$ 取值为 0.15<sup>[24]</sup>。Johnson-Cook 损伤模型属于半经验模型，广泛用于金属材料失效过程的动态预测，该模型特别适合高应变率条件、高温环境以及复杂应力状态，在这些条件下，能够准确分析材料的断裂现象。表达式如下：

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*) (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*) \quad (4)$$

其中： $\varepsilon_f$ 为断裂时的应变； $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 、 $D_5$ 是与材料有关的断裂常数； $\sigma^*$ 是应力与有效应力之比； $\dot{\varepsilon}^*$ 为有效塑性应变率。

本文涉及的材料所选模型及详细的材料参数呈现在表 1 材料所选模型、表 2，其中高熵合金材料参数源于参考文献[23]。

### 1.3 数值计算结果有效性验证

为检验数值计算方法的准确性，应用本文提出的计算方法及材料属性数据，对 Cherniae 文献中的超高速冲击试验现象开展模拟计算<sup>[29]</sup>。选取 6061-T6 铝合金作为弹丸、防护板和后板的材料，弹丸直径为 1mm，撞击速度为 7.102 km/s，防护板厚度设定为 0.4 mm。后板同样采用 0.4 mm，两板间距为 16 mm，建立三维计算模型。

对比结果如图 2 所示，上面是 Cherniae 的实验结果，下面是本文对应的仿真结果。仿真结果显示碎片云形态特征接近。碎片云特征参数对比数据见表 3，数据显示误差低于 5%，该精度范围符合误差控制目标，即使用的数值计算流程和材料属性数据可靠。

表 1 材料所选模型  
Table 1 Material Models Selected

Name of structure	State equation	Constitutive equation	Failure model
Projectile AL6061-T6	Gruneisen	JC	Grady
Protection plate AL2024-T4	Gruneisen	JC	Grady
Protective plate CoCrFeNiTi	Gruneisen	JC	Grady
Rear panel AL6061-T6	Gruneisen	JC	JC

表 2 材料具体参数  
Table 2 Specific Material Parameters

Model name	Motation	Unit	Material		
			AL6061-T6	AL2024-T4	CoCrFeNiTi
Gruneisen	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	2.703	2.785	6.42
	$\gamma$	-	1.970	2.0	1.9
	$C_0$	m/s	5240	5328	4902
	$S$	-	1.4	1.338	1.53
	$T_0$	K	293	293	-
	$T_m$	K	885	863	-
	$A$	MPa	324	325	381
Johnson-Cook	$B$	MPa	114	414	755
	$C$	-	0.002	0.015	0.0352
	$n$	-	0.42	0.2	0.78
	$\dot{\varepsilon}$	s <sup>-1</sup>	1.34	1	-
	$T_m$	K	925	925	1775
	$m$	-	1.0	1.0	0.76

Johnson-Cook	$D_1$	-	-0.77	-	-
	$D_2$	-	1.45	-	-
	$D_3$	-	-0.47	-	-
	$D_4$	-	0	-	-
	$D_5$	-	1.6	-	-
Model name	Motation	Unit	Material		
			AL6061-T6	AL2024-T4	CoCrFeNiTi
Grady	$\varepsilon_c$	-	0.15	0.15	0.2

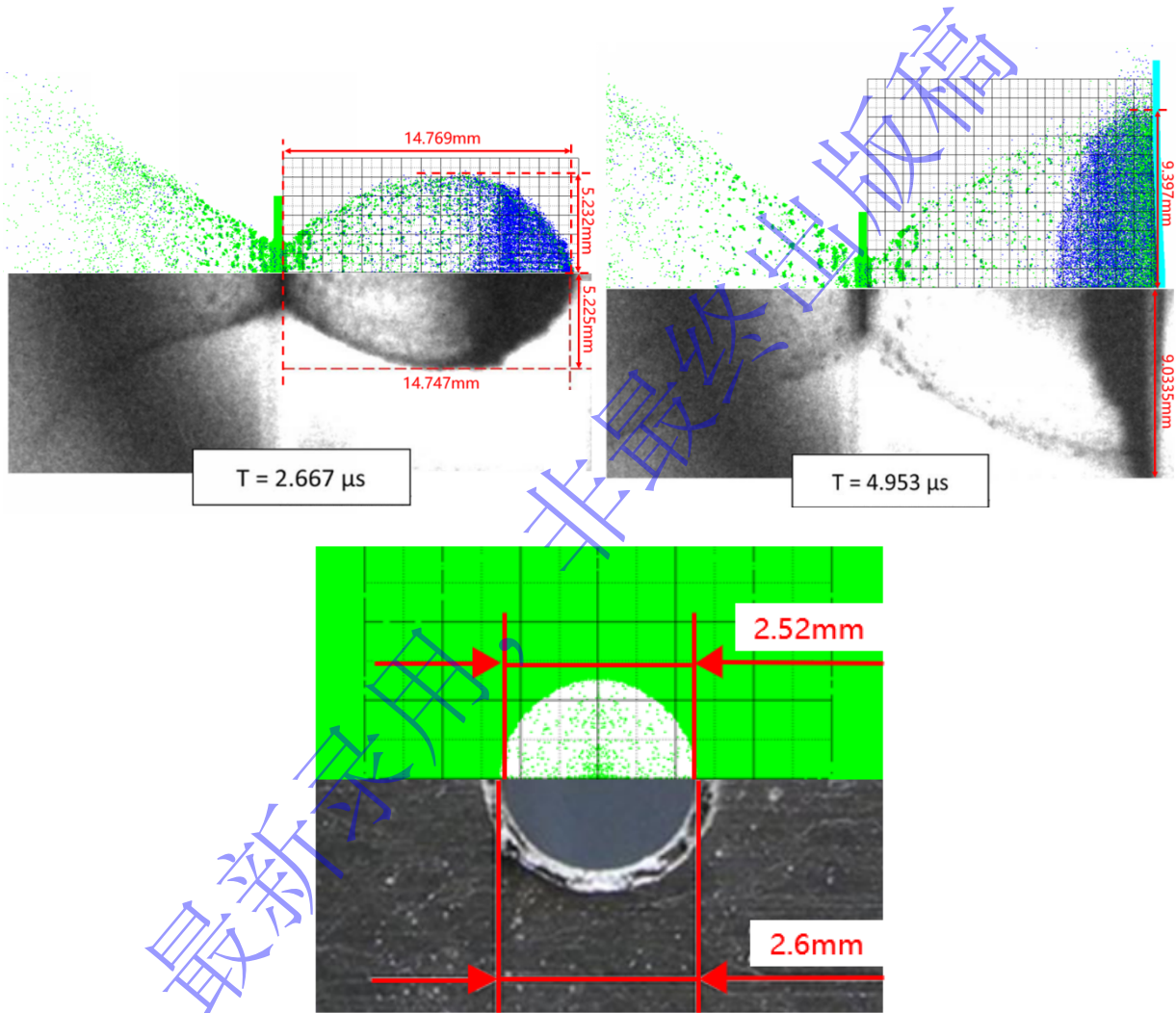


图 2 试验与仿真碎片云形貌尺寸对比

Fig. 2 Comparison of Morphology and Size Between Experimental and Simulated Debris Clouds

表 3 特征参数实验与仿真对比

Table 3 Comparison of Experimental and Simulation Results for Characteristic Parameters

Time/ $\mu s$	Characteristic Parameters	Experimental results /mm	Simulation results /mm	Error /%
2.667 $\mu s$	Fragmented	5.225	5.232	0.133

	cloud diameter			
	Fragmented	14.747	14.769	0.149
	cloud length			
4.953 $\mu$ s	Fragmented	9.0335	9.397	4.02
	cloud diameter			
	Diameter of damaged area	2.6	2.52	3.07

## 2 高熵合金防护结构碎片云特性对比分析

### 2.1 碎片云数量特性分析

本节统计了铝合金防护结构和高熵合金防护结构受不同弹丸直径以不同速度撞击时产生的碎片数量，受建模粒子尺寸限制（0.1 mm），仅统计尺寸大于 0.1 mm 的碎片。如图 3 所示，两种防护结构的碎片数量随弹丸直径和速度的变化规律如下：弹丸直径与碎片产生数量呈现正比例关系，弹丸直径越大，生成的碎片数量越多。保持弹丸直径不变，撞击速度增大，碎片数量随之上升。撞击速度为 3.5 km/s 时，两类防护结构碎片数量增长速率差异不明显，值得注意的是，随着弹丸直径和撞击速度的持续增大，碎片数量的增长率呈现显著的非线性跃升；同时每种撞击工况下，高熵合金防护结构均比铝合金防护结构产生更多的碎片，增长幅度约为 51.86%。

高熵合金具有较高的屈服强度和显著的应变硬化能力，在超高速撞击产生的高应变率条件下仍能保持较高承载水平，这使缓冲屏在撞击瞬间形成更强的应力波与剪切失稳区，促进弹丸和自身材料发生多点破碎。同时，相较铝合金，高熵合金具有更高的密度和声阻抗，弹丸与缓冲屏接触时可产生更强的压缩与反射冲击波，这种阻抗失配效应加剧了弹丸的初始破碎过程，使其在早期即被充分打散，故高熵合金防护结构可以产生更多的碎片数量，有利于降低弹丸的入射能量，减轻后板的损伤程度。

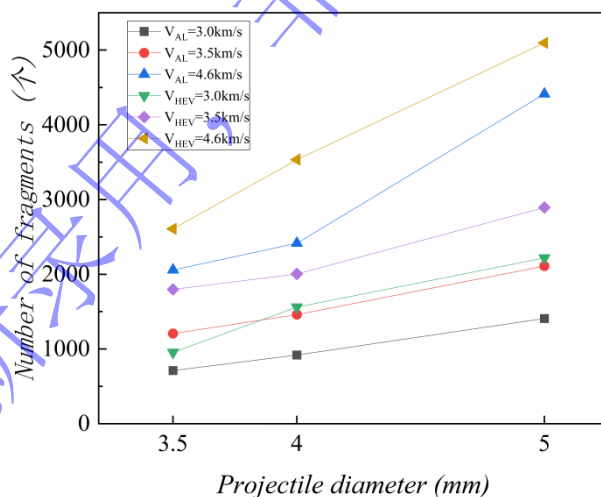


图 3 碎片数量变化图

Fig. 3 Fragment Count Variation Diagram

### 2.2 碎片云质量特性分析

基于上述分析结果可以确认：在同等撞击条件下，相较于传统材料防护结构，高熵合金防护结构能够更有效地破碎弹丸，导致碎片数量显著提升，并促使碎片云的空间分布趋于均匀化。为进行定量分析，选取直径均为 5 mm 的弹丸，针对两种防护结构，分别开展 3 km/s、3.5 km/s 及 4.6 km/s 速度的超高速撞击仿真，撞击后形成碎片云的质量分布数据完成系统统计，结果见图 4。对比分析表明：在所有测试速度下，高熵合金防护结构产生低质量碎片的数量均显著多于铝合金结构，其平均增长率

达到 79.56%。可见在低速工况下，高熵合金防护结构产生更多的低质量碎片，入射弹丸的面动量大幅度降低；数据分析指出，高熵合金防护结构形成的较大质量碎片颗粒，其数量占比低于铝合金结构，值得注意的是，二者间的数量差值随撞击速度提升呈现递减趋势。

高熵合金因其多主元随机固溶导致存在严重晶格畸变，使裂纹扩展路径复杂且易分叉。在超高速冲击下，材料更倾向于碎裂成大量小尺度碎片，而非形成完整的大块剥落，有效抑制大质量、高动能危险碎片的产生，显著降低其绝对数量，极大降低因大尺寸、高动能碎片对防护目标造成二次损伤的风险。

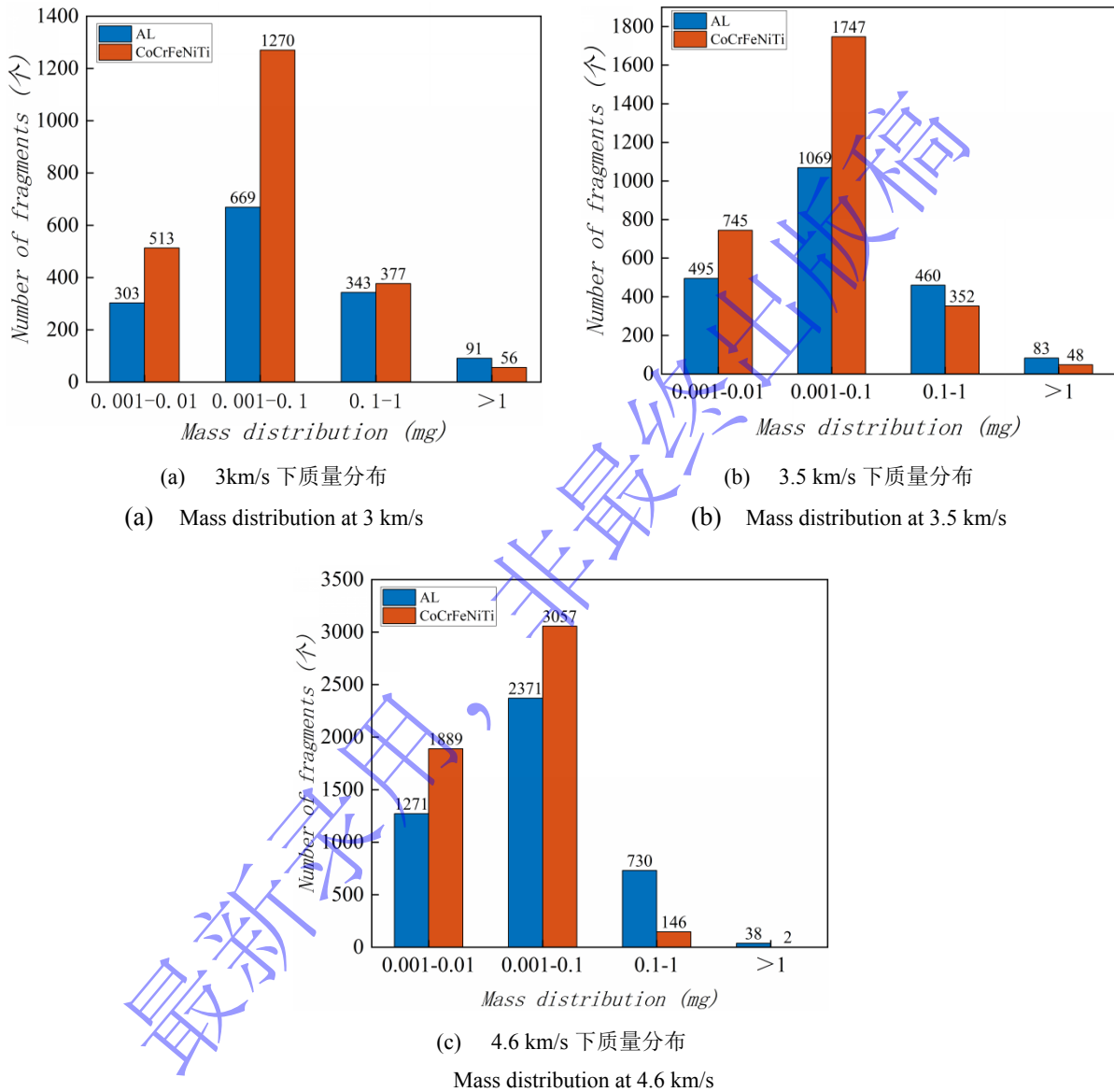


图 4 三种速度条件下两种防护结构碎片云质量分布  
Fig. 4 Mass distribution of debris cloud of two shields under three velocity conditions

### 2.3 碎片云动量特性分析

前文详细分析了两种防护结构碎片云数量及质量特性对比，为评估防护效果，本节从碎片云 Z 方向动量和进行分析，对比了超高速撞击下，两种结构后板的损伤状态，用以衡量其抵御穿透或失效

的能力。首先选取碎片云稳定状态，碎片云稳定状态即碎片云中的碎片不再碰撞和破碎，并且每个碎片保持其当前的运动状态<sup>[30]</sup>，根据 Autodyn 导出的碎片信息，确定碎片云中各碎片 Z 方向速度，计算出到达后板所需时间，根据所需时间以及碎片 X、Y 方向的速度，即可确定碎片最终到达后板的区域位置。定义公式如下：

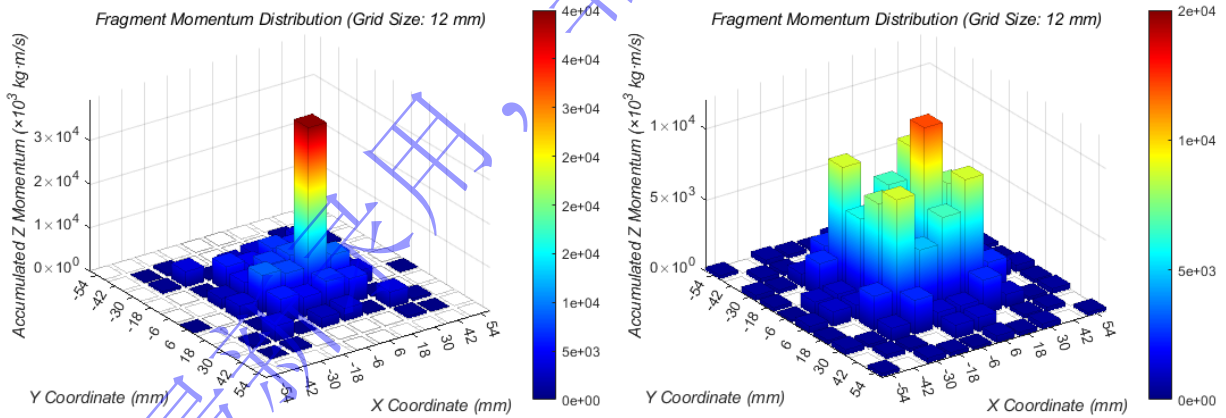
$$T = \frac{100 - Z_{Center}}{V_z} \quad (5)$$

$$(X,Y) = (X_{Center} + V_x T, Y_{Center} + V_y T) \quad (6)$$

其中： $T$ 是碎片到达后板的时间； $Z_{Center}$ 是碎片云稳定状态下 Z 方向坐标； $V_z$ 是碎片 Z 方向速度； $(X,Y)$ 是碎片在后板的坐标； $X_{Center}$ 是碎片云稳定状态下 X 方向坐标； $V_x$ 是碎片 X 方向速度； $Y_{Center}$ 是碎片云稳定状态下 Y 方向坐标； $V_y$ 是碎片 Y 方向速度。根据上述公式，将后板划分为等边的单元网格，统计每个单元网格内碎片的 Z 方向动量和。利用 Matlab 编写程序进行数据处理，得到铝合金防护结构和高熵合金防护结构 Z 方向动量和三维柱状图，如图 5 所示，左边为铝合金防护结构柱状图，右边为高熵合金防护结构柱状图。

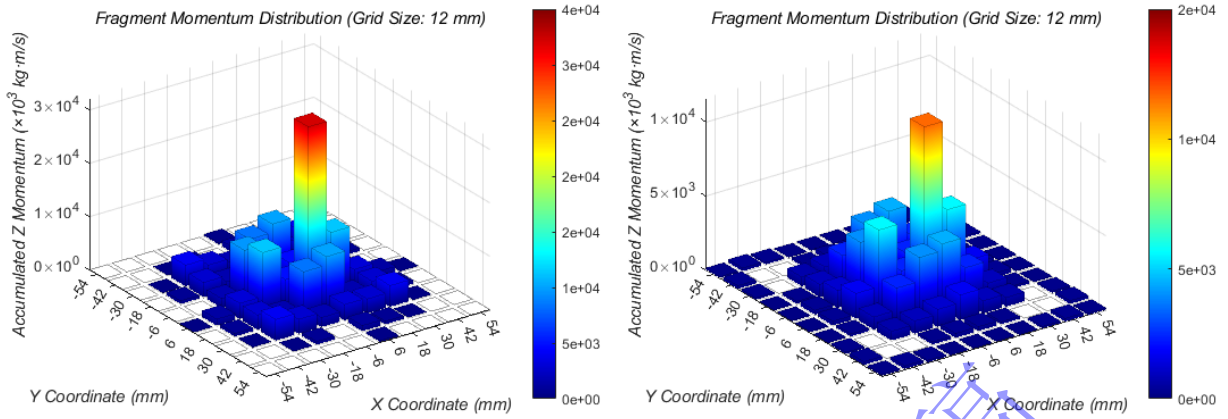
由图 5 可知，动量和最高值集中于后板中心区域，符合超高速撞击实验中后板损伤主要集中在中心区域；在同种工况（相同弹丸直径、相同撞击速度）下，高熵合金防护结构 Z 方向动量和均低于铝合金防护结构，在弹丸直径为 3.5 mm、4mm 的工况下，最大动量和未达到铝合金防护结构的 50%，在 5mm 工况条件下，该数值始终低于铝合金防护结构的 75%。

后板损伤区域分布观测显示，高熵合金防护结构损伤面积超过铝合金防护结构，其损伤程度显著低于铝合金防护结构。因高熵合金对高应变率高度敏感，塑性变形过程中可吸收并耗散大量冲击能量。入射动能更多转化为材料内部的塑性耗能和损伤演化能，而非碎片的平动动能，从而降低单个碎片的速度和动量。该损伤特性紧密对应 Whipple 防护结构基础机制，更有效执行载荷分布传递与能量耗散转化过程。



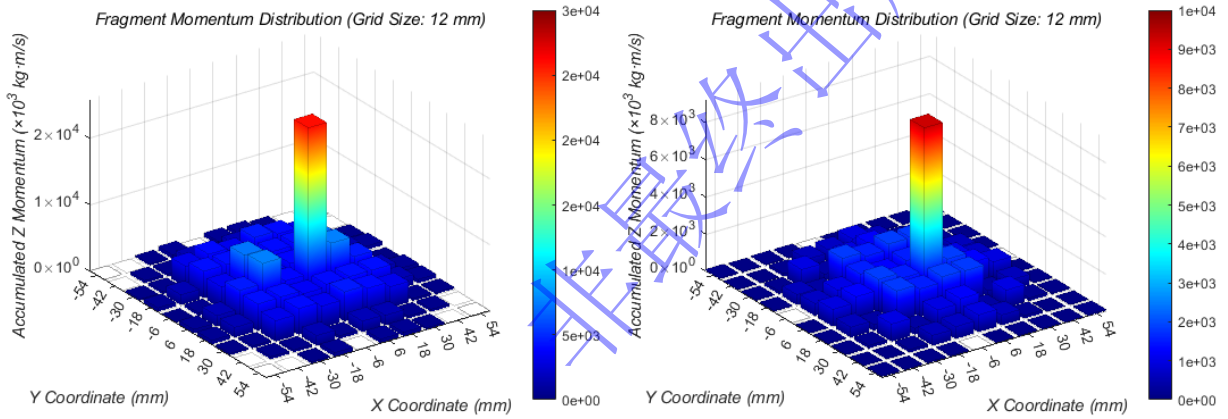
(a) 3km/s 下 3.5 mm 弹丸动量柱状图

(a) Bar Chart of Momentum for a 3.5 mm Projectile at 3 km/s



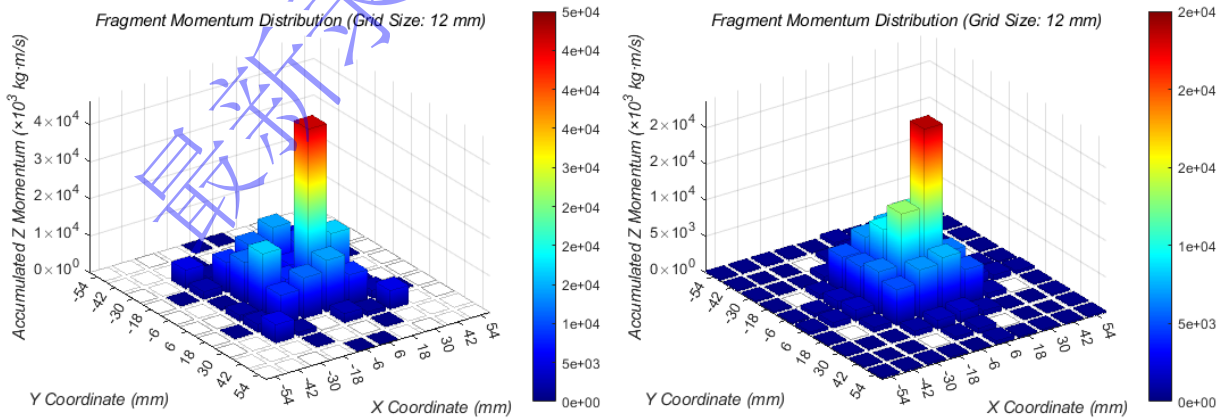
(b) 3.5 km/s 下 3.5 mm 弹丸动量柱状图

(b) Bar Chart of Momentum for a 3.5 mm Projectile at 3.5 km/s



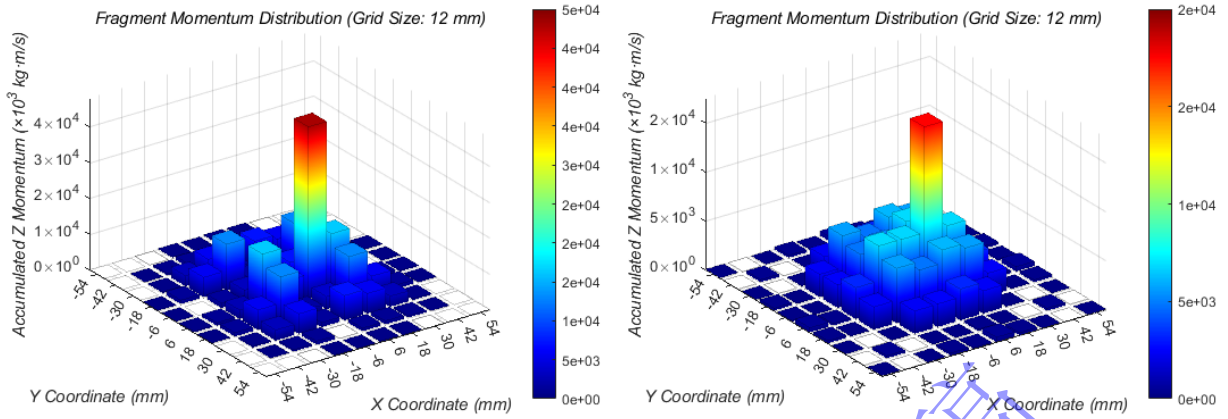
(c) 4.6 km/s 下 3.5 mm 弹丸动量柱状图

(c) Bar Chart of Momentum for a 3.5 mm Projectile at 4.6 km/s



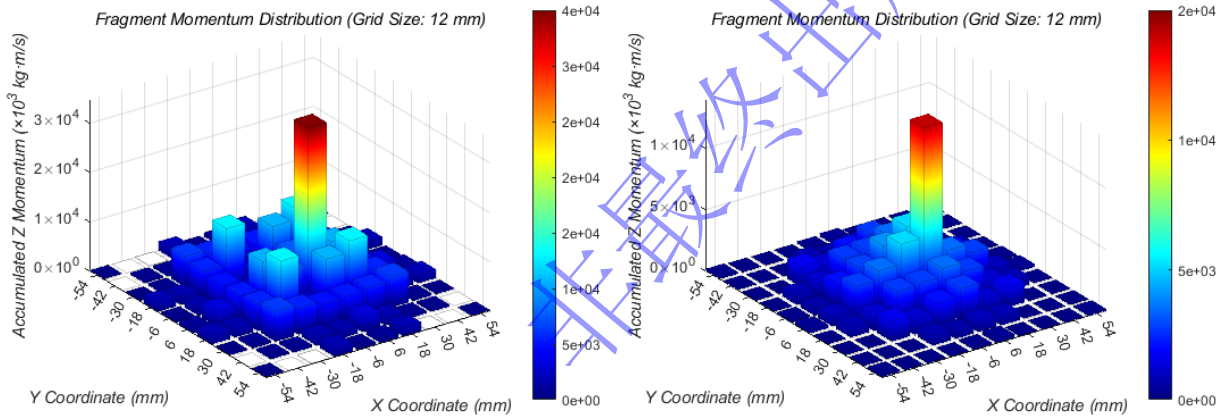
(d) 3km/s 下 4mm 弹丸动量柱状图

(d) Bar Chart of Momentum for a 4mm Projectile at 3 km/s



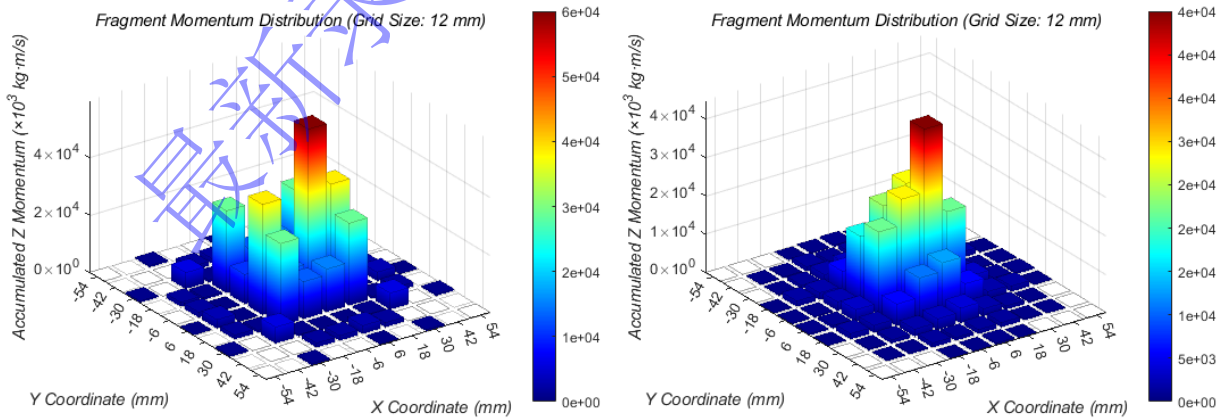
(e) 3.5 km/s 下 4mm 弹丸动量柱状图

(e) Bar Chart of Momentum for a 4mm Projectile at 3.5 km/s



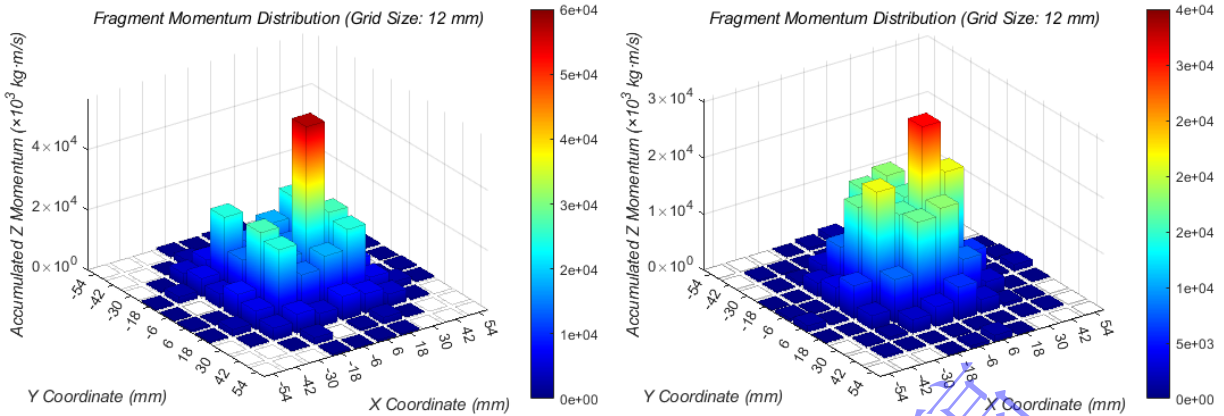
(f) 4.6 km/s 下 4mm 弹丸动量柱状图

(f) Bar Chart of Momentum for a 4mm Projectile at 4.6 km/s



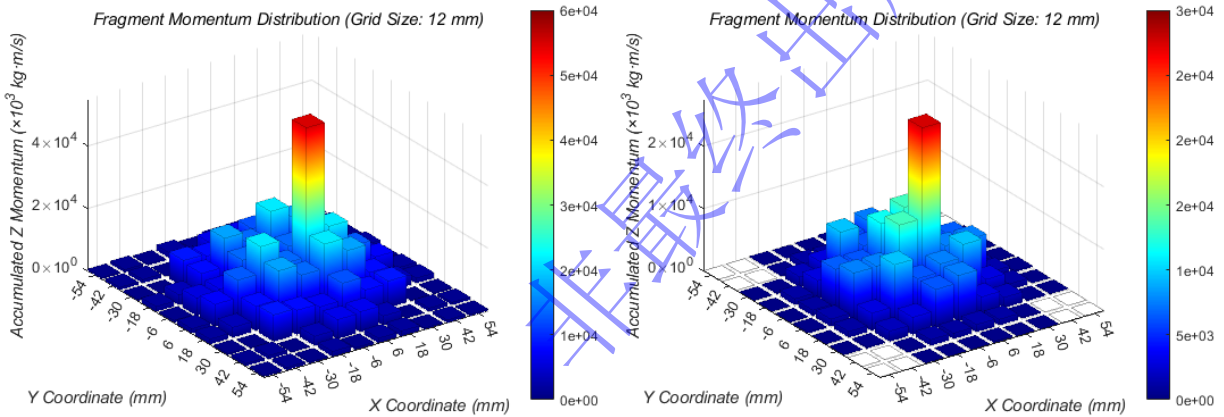
(g) 3km/s 下 5mm 弹丸动量柱状图

(g) Bar Chart of Momentum for a 5mm Projectile at 3 km/s



(h) 3.5 km/s 下 5mm 弹丸动量柱状图

(h) Bar Chart of Momentum for a 5mm Projectile at 3.5 km/s



(i) 4.6 km/s 下 5mm 弹丸动量柱状图

(i) Bar Chart of Momentum for a 5mm Projectile at 4.6 km/s

图 5 碎片 Z 方向动量图

Fig. 5 Momentum Diagram of Fragments in the Z-Direction

### 3 高熵合金防护结构撞击特性影响因素分析

本研究主要探究两个关键参数，即结构厚度/弹丸直径 ( $t/D$ ) 与弹丸撞击速度，对高熵合金防护结构抗冲击防护性能的影响。研究单一因素影响规律过程中，其余因素保持不变。同时，高熵合金缓冲屏的面密度在研究过程中保持不变，针对  $t/D$  的影响分析时，缓冲屏厚度  $t$  不变，仅调整弹丸直径  $D$ 。

#### 3.1 碎片云膨胀特性分析

本节重点关注外泡碎片云的膨胀行为，碎片云的径向/头部膨胀行为与经典流体动力学膨胀问题在数学形式上存在相似性，相关的气泡动力学建模框架可为碎片云散布的定量描述提供参考<sup>[31]</sup>，具体包括径向膨胀特征速度  $V_r$  和头部方向膨胀特征速度  $V_a$ ，主要研究了  $t/D$  和撞击速度对碎片云膨胀特性的影响，主要规律如图 6、图 7 所示。数据分析表明，碎片云膨胀速率随撞击速度增加明显提高，观测发现，碎片云外泡头部膨胀速度持续超过内核部分径向膨胀速度；同时，膨胀速度也随着  $t/D$  在

逐渐增大,但是变化并不明显,径向膨胀速度增长率为8.2%,头部膨胀速度增长率为5.5%,可见 $t/D$ 的变化对外泡碎片云膨胀速度的影响较小。

为得到进一步的规律,分析直径5mm弹丸的计算工况。碎片云直径变化与长度变化如图8、图9所示,二者均显示随时间推移的线性变化趋势。该趋势的增长率对应线性拟合斜率,增长率数值同撞击速度存在直接比例关系,撞击速度提高,碎片云膨胀速率相应增大。5 $\mu$ s时,不同计算工况产生的碎片云,其直径数值与长度数值差异较小,随着时间的增加,差距逐渐增大,在40 $\mu$ s左右,碎片云已经撞击到后板上,碎片云直径发生突变,碎片云长度达到防护结构与后板的距离。

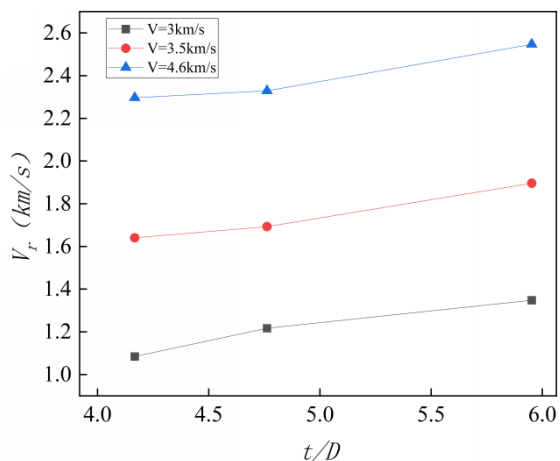


图 6 外泡碎片云径向膨胀速度

Fig. 6 Radial expansion velocity of the outer bubble debris cloud

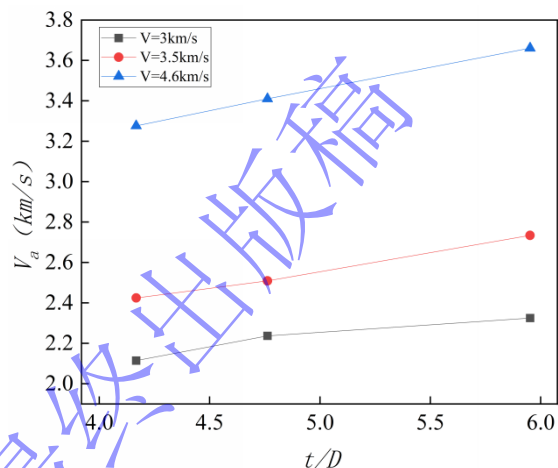


图 7 外泡碎片云头部膨胀速度

Fig. 7 Expansion velocity of the head of the outer bubble debris cloud

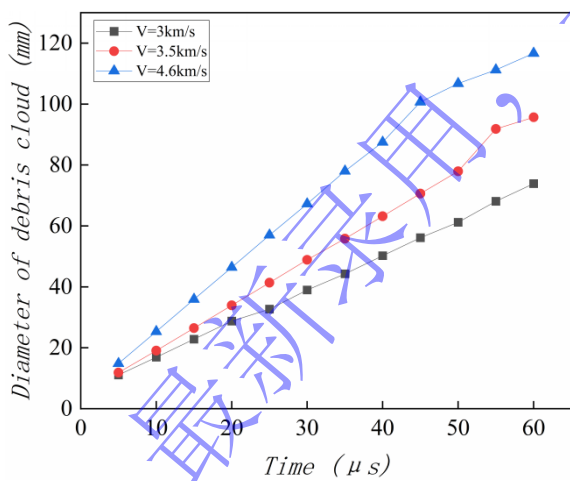


图 8 碎片云直径随时间变化图

Fig. 8 Plot of debris cloud diameter over time

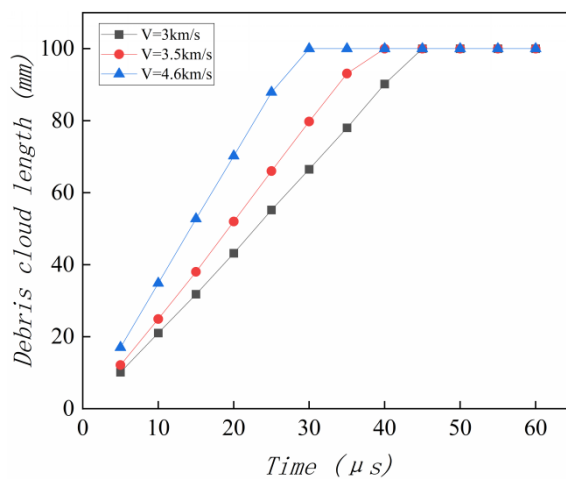


图 9 碎片云长度随时间变化图

Fig. 9 Plot of debris cloud length over time

### 3.2 碎片云危险碎片特性分析

本节分析超高速撞击后,碎片云中的危险碎片。这类碎片指结构受撞击后,碎片云达到稳定阶段,依然保持较高质量且动能数值显著的碎片,具体的量化公式<sup>[30]</sup>如下:

$$m \geq 450\pi \left[ \frac{6.62}{7860 \times \left(\frac{v}{5238}\right)^3} \right]^{\frac{54}{19}} \quad (7)$$

通过统计这些碎片的质量和动能，总结危险碎片特性与  $t/D$ 、撞击速度的关系。具体规律如图 10、图 11 所示。随着  $t/D$  增加，危险碎片质量逐渐增加，这是因为随着弹丸直径的增加，弹丸质量随之增加，进而危险碎片质量增加；在同一  $t/D$  下，随着撞击速度增加，弹丸破碎情况更加剧烈，致使危险碎片的质量有所下降。动能方面， $t/D$  越大，危险碎片所携带的能量越大，这也对应了危险碎片的质量逐渐增加；反而在同一  $t/D$  下，撞击速度越大，危险碎片所含动能在逐渐减小，可见高熵合金防护结构具有良好的防护性能。

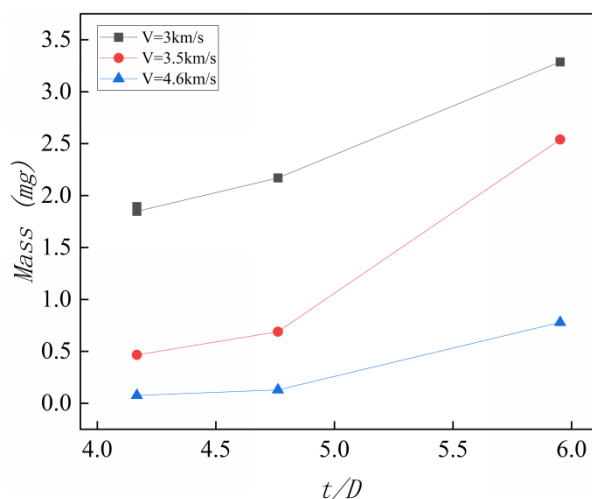


图 10 危险碎片质量分布

Fig. 10 Hazardous debris mass distribution

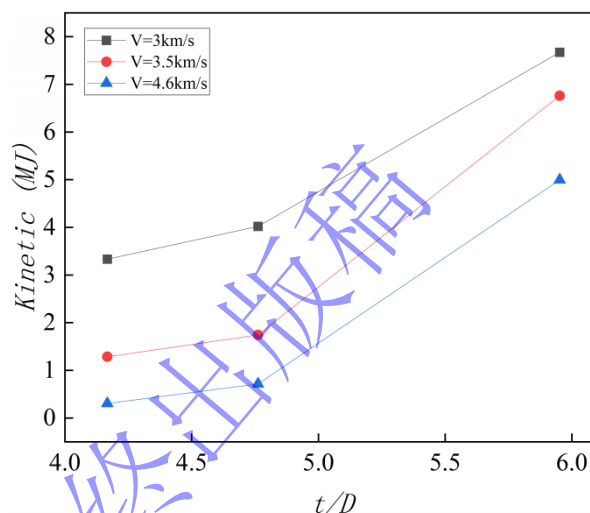


图 11 危险碎片动能分布

Fig. 11 Kinetic energy distribution of hazardous debris

## 4 结 论

本文采用光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法，系统性研究高熵合金防护结构在超高速撞击环境中的防护性能。研究中将其与广泛应用的铝合金防护结构进行了对比，并深入分析了关键因素对防护性能的影响规律。最终形成如下结论：

1) 高熵合金防护结构受弹丸撞击形成碎片云，其碎片数量相比铝合金防护结构更为突出。在相同工况下，高熵合金防护结构较铝合金防护结构的碎片数量增幅达 51.86%。低速撞击条件下，两类防护结构碎片数量增长程度无显著区别。

2) 相同弹丸撞击速度不同时，高熵合金防护结构产生的碎片云内较小质量碎片占比更大。对应地，较大质量碎片占比数值小于铝合金防护结构。该现象说明高熵合金防护结构促使弹丸更充分碎裂。

3) 高熵合金防护结构产生的碎片云，其碎片散布范围显著超过铝合金防护结构。同时，核心区域碎片动量总和数值明显小于铝合金防护结构对应数值。在 3.5 mm、4mm 工况下，动量和未达到铝合金防护结构的 50%，5mm 工况下也未达到铝合金防护结构的 75%。

4)  $t/D$  对于碎片云的膨胀程度影响较小，主要因素是撞击速度，撞击速度越高，碎片云膨胀速度越大，对应后板的损伤面越大；碎片云中危险碎片的质量和动能受  $t/D$  影响较大， $t/D$  越大，危险碎片的质量越高，对应的动能越大，对后板的损伤风险越大。

5) 高熵合金防护结构在超高速撞击下可诱导弹丸更充分破碎，碎片总数显著增加，低质量碎片占比提高而危险碎片减少；同时碎片云沿撞击方向的动量明显降低，使冲击载荷更均匀地分散到后板，从而减轻局部损伤并降低穿透风险，体现出优异的防护性能。

## 参考文献

- [1] ARSHAD M, BAZZOCCHI M C F, HUSSAIN F. Emerging strategies in close proximity operations for space debris removal: A review[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 228: 996-1022.
- [2] 邸德宁, 陈小伟, 文肯, 等. 超高速碰撞产生的碎片云研究进展[J]. *兵工学报*, 2018, 39(10): 2016-2047.  
DI D N, CHEN X W, WEN K, et al. A Review on the Study of Debris Cloud Produced by Normal Hypervelocity Impact upon a Thin Plate[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(10): 2016-2047.(in Chinese)
- [3] 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.  
GONG Z Z, ZHAO Q Y, LI M, et al. The Frontier Problem and Prospect of Space Debris Protection Research[J]. *Space Debris Research*, 2019, 19(3): 2-13. (in Chinese)
- [4] HE Q G, CHEN X W, CHEN J F. Finite element-smoothed particle hydrodynamics adaptive method in simulating debris cloud[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 175: 99-117.
- [5] CAO X, ZHOU J, XU H, et al. An SPH model reconstruction framework with fragment mapping method for multiplate structure hypervelocity impact simulation[J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(11): 8140-8157.
- [6] PAI A, KAWASE M, NISHIDA M, et al. 3D numerical and experimental investigation of hypervelocity impacts on dual bumper plate Whipple shields for spacecraft protection[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 232: 374-386.
- [7] CLINE C J, CHRISTIANSEN E L, MCCANDLESS R, et al. Preliminary experimental investigation of multi-shock shield performance against meteoritic and other lithic projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 203: 105324.
- [8] SATHISH KUMAR S K, KIM Y, CHA J, et al. Hybrid interspaced and free-boundary aramid fabric back bumper for hypervelocity impact shielding system[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 171: 104377.
- [9] LI J, WEN X Z, HUANG J, et al. Study on shielding performance of aerogel/fiberglass composite stuffed shield[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 173: 104467.
- [10] PAI A, MUJUMDAR N, PICCHOLIYA A, et al. Computational studies on hyper velocity impact of spherical projectiles on whipple shield with hybrid Newtonian fluid-filled core[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 220: 230-242.
- [11] VOILLAT R, GALLIEN F, MORTENSEN A, et al. Hypervelocity impact testing on stochastic and structured open porosity cast Al-Si cellular structures for space applications[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 120: 126-137.
- [12] REN S Y, WU Q, ZHANG P, et al. Damage effects of aluminum alloy honeycomb sandwich panel double-layer structure induced by reactive projectile hypervelocity impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 202: 112076.
- [13] KAMAREH F, PANG B, CAO W, et al. Proposing novel body-centered cubic lattice core sandwich panels as satellite structure[J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(11): 5779-5802.
- [14] ÖNDER A. Projectile fragmentation and debris cloud formation behaviour of wavy plates in hypervelocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 183: 104788.
- [15] PUTZAR R, ZHENG S, AN J, et al. A stuffed Whipple shield for the Chinese space station[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103304.
- [16] DUAN Y P, CHI R Q, PANG B J, et al. Experimental and numerical study of hypervelocity impact damage on composite overwrapped pressure vessels[J]. *Defence Technology*, 2024, 31: 58-72.
- [17] HUANG X, YIN C, RU H, et al. Hypervelocity impact damage behavior of B4C/Al composite for MMOD shielding application[J]. *Materials & Design*, 2020, 186: 108323.
- [18] REN S Y, LONG R R, ZHANG Q M, et al. The hypervelocity impact resistance behaviors of NbC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic-metal composites[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148: 103759.
- [19] 武强, 张庆明, 龚自正, 等. 活性 Whipple 结构超高速撞击防护性能实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(2): 021406.  
WU Q, ZHANG Q M, GONG Z Z, et al. Experimental investigation into performances of an active Whipple shield against

- hypervelocity impact[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2021, 41(2): 021406. (in Chinese)
- [20] REN S Y, ZHANG Q M, Wu Q, et al. Influence of impact-induced reaction characteristics of reactive composites on hypervelocity impact resistance[J]. *Materials & Design*, 2020, 192: 108722.
- [21] FAN J, TANG J, CAI Z, et al. Transverse impact response of movable fiber bundle with constant resistance[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2026, 310: 111105.
- [22] Ali SF, FAN J. Capturing dynamic behaviors of a rate sensitive, elastomer with strain energy absorptions and dissipation effects[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2021,13: 2150104.
- [23] 刘承哲, 王海福, 张甲浩, 等. 轻质高熵合金聚能射流毁伤混凝土靶行为研究[J]. *兵工学报*, 2024, 45(S1): 60-69.  
LIU C Z, WANG H F, ZHANG J H, et al. Research on Behavior of Lightweight High-entropy Alloy Jet Penetrating Concrete Targets[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(S1): 60-69. (in Chinese)
- [24] CAO S, FAN J. Numerical model for penetration process of a deformable projectile into ductile metallic target plate considering the interaction of projectile and target[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 195: 105107.
- [25] UDDIN MD J, FAN J. Interpretable Machine Learning Framework to Predict the Glass Transition Temperature of Polymers[J]. *Polymers*, 2024, 16(8): 1049.
- [26] FATEH ALI S, FAN J. Mechanism-Based Modeling of Strain Rate-Dependent Transition of Macromechanical Behavior Accompanied by Temperature Rise Effects of a Toughened Polymer Composite[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2024, 150(5): 04024015.
- [27] TANG J, FAN J, CHEN S. A numerical model for calculating the impact-induced depression[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 183: 104792.
- [28] 邸德宁, 陈小伟. 碎片云 SPH 方法数值模拟中的材料失效模型[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 948-956.  
DI D N, CHEN X W. Material failure models in SPH simulation of debris cloud[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2018, 38(5): 948-956. (in Chinese)
- [29] CHERNIAEV A, TELICHEV I. Weight-Efficiency of Conventional Shielding Systems in Protecting Unmanned Spacecraft from Orbital Debris[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2017, 54(1): 75-89.
- [30] HE Q G, CHEN J F, CHEN X W. Velocity-space analysis method for hazardous fragments in debris clouds[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 161: 104087.
- [31] ADEBA M M, FAN J. Framework and computational model of bubble dynamics under water[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(10): 106127.

# Numerical Simulation Study on Hypervelocity Impact of High-Entropy Alloy Protective Structure

YIN Yunfei<sup>1</sup>, YANG Qiuzu<sup>1</sup>, GUO Jia'ao<sup>1</sup>, LI Zhiqiang<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, Shanxi, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

3. Shanxi Basic Disciplines Research Center for Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

4. National Experimental Teaching Demonstration Center for Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** The space debris problem has become one of the most pressing challenges in the field of space environment protection. Most current spacecraft shielding systems adopt Whipple-type structures, in which aluminum alloys are commonly used as bumper materials. In this study, the smooth particle hydrodynamics (SPH) method implemented in the AUTODYN software is employed to numerically investigate the hypervelocity impact of spherical projectiles on high-entropy alloy (HEA) protective structures. The characteristics of the resulting debris clouds, including fragment number, mass distribution, and momentum, are systematically analyzed under various impact conditions. In addition, the effects of impact velocity and the ratio of bumper thickness to projectile diameter ( $t/D$ ) on the hypervelocity impact response of HEA shielding structures are examined. The results show that, under identical impact conditions, the debris cloud characteristics generated by HEA protective structures differ significantly from those of aluminum alloy structures: (1) the total number of fragments increases by approximately 51.86%; (2) the number of low-mass fragments increases by about 79.56%, while the number of high-mass fragments decreases; and (3) the maximum debris cloud momentum along the impact direction ( $Z$  direction) is less than 75% of that associated with aluminum alloy structures across multiple projectile diameters. Parametric analyses indicate that the expansion of the debris cloud is primarily governed by impact velocity, with higher velocities leading to faster expansion, while the influence of the  $t/D$  ratio is relatively minor. In contrast, the mass and kinetic energy of hazardous fragments (large-mass/high-energy fragments) are mainly affected by the  $t/D$  ratio, with higher values resulting in greater impact severity. These findings provide theoretical support and reference for the application of high-entropy alloys in next-generation spacecraft shielding structures.

**Keywords:** space debris; hypervelocity impact; high-entropy alloys (HEAs); fragment cloud characteristics