DOI: 10.11858/gywlxb.20251275

高熵合金防护结构的超高速撞击数值模拟研究

尹云飞[1], 杨秋足[1], 郭家傲[1], 李志强[1,2,3,4]

（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, 主体缓冲屏多采用铝合金材料。采用 AUTODYN 软件的光滑粒子流体动力学（smoothed particle hydrodynamics, SPH）方法, 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, 在相同的撞击条件下, 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%; 小质量碎片数量增加约 79.56%, 大质量碎片数量减少; 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, 受 t/D 的影响较小, 且撞击速度越大, 膨胀越快; 而危险碎片（大质量或高动能碎片）的质量和动能则主要受 t/D 影响, 且 t/D 越高, 影响越大。研究结果可为高熵合金在新一代航天器防护结构中的工程应用提供理论支持和参考。

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 **文献标志码:** A

随着人类航天活动的日益频繁, 空间碎片数量呈现显著上升趋势。据美国宇航局统计, 目前, 地球近地轨道上存在超过 11 000 t 的空间碎片, 这将对航天探索造成巨大的影响[1]。空间碎片的主要构成物质是铝合金, 除此之外, 由铝、锌、钛元素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 g/cm^3。碎片环绕地球运行的速度主要取决于碎片所处轨道高度[2]。实际观测结果表明, 空间碎片的尺度跨度较大, 约 7.5×10^5 个碎片的尺寸处于 1～10 cm 之间, 约 1×10^8 个碎片的尺寸分布在 1～10 mm 区间, 数量最为庞大的是亚毫米级（小于 1 mm）碎片, 其总量估计达百亿之巨[3]。因此, 研究空间碎片防御问题对于未来的航天活动具有重要意义。

目前, 应用最广泛的空间碎片防护方案是由 Whipple 提出的, 其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该防护结构, 导致碎片发生破碎和分散, 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动能, 并分散冲击载荷, 从而大幅减轻了对内层舱壁的损伤[4]。研究证实, 缓冲屏有效地缓解了空间碎片冲击, 显著降低了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。在结构构型方面, Cao 等[5] 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, 可大幅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的相互作用, 提高了模拟的准确性。Pai 等[6] 对多层板结构进行了数值模拟

* **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

和实验研究，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、塑性应变和变形等进行了分析验证。Cline 等[7] 验证了弹丸异质性对多层板结构超高速撞击损伤的影响。Sathish 等[8] 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[9] 将 SiO_2/玻璃纤维复合材料填充到防护结构中，并进行了一系列超高速撞击实验，证明了填充 SiO_2/玻璃纤维复合材料的防护结构的防护性能优于铝合金防护结构。Pai 等[10] 通过数值模拟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[11] 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[12] 采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[13] 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，提出了防护性能更出色的 BCCz-Ⅱ结构。Önder[14] 研究了具有波浪表面的防护结构对超高速撞击的响应，对具有 4 种不同表面波廓线的铝板进行了数值模拟研究，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的研究。Putzar 等[15] 对中国空间站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，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[16] 研究了复合材料外包裹压力容器对空间碎片撞击的动态响应，揭示了非灾难性损伤的特征和机制。Huang 等[17] 将烧制的 B_4C/Al 作为防护结构的缓冲屏，开展了超高速撞击实验，得到了其弹道极限方程，由此分析了其防护机理。Ren 等[18] 利用二级轻气炮对以 NdC/Al2024 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/Al2024 保险杠的损伤过程以及材料损伤状态。武强等[19] 针对以 PTFE/Al 活性材料为防护屏的 Whipple 防护结构，开展了不同弹丸尺寸、不同碰撞速度的超高速撞击实验，获得了碎片云特性，结果表明，相较于同面密度的铝合金材料，活性材料在超高速撞击下的冲击起爆反应使碎片云中具有侵彻能力的碎片大幅减少，从而显著提升防护能力。Ren 等[20] 开展了以 PTFE/Al、PTFE/Ti 和 Al2024 为缓冲层的 Whipple 防护板的超高速撞击实验，比较了 2 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 Al2024，且 PTFE/Al 活性材料的防护性能优于 PTFE/Ti。研究人员还开发了各种缓冲和吸能材料，以减轻高速撞击的影响，包括可移动纤维束、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[21−22]。

综上所述，国内外学者针对 Whipple 结构的材料选择和结构改型做了大量工作，但是多数防护结构采用铝合金、陶瓷、纤维等传统材料作为缓冲屏，依靠多层防护或填充复材试图降低空间碎片动能，受材料本身属性、制备工艺等限制，其防护性能有限。近年来，高熵合金（high-entropy alloys, HEA）的兴起为缓冲屏材料的选择提供了新选项。高熵合金属于先进的多主元合金材料，由多种金属元素以特定比例混合而成，其原子结构特征是长程化学无序但短程有序，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[23]。

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的性能，建立球形弹丸高速撞击高熵合金防护结构数值模型，对不同撞击工况下碎片云的碎片数量、质量、动量以及影响因素进行分析；同时，与普通铝合金防护结构进行对比，准确评估高熵合金防护结构的防护性能，以期为空间碎片防护结构研究提供新思路。

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和碎片谱，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的选取及离散方式提供了参考[24]。应用 AUTODYN 软件的无网格光滑粒子流体动力学（smoothed particle hydrodynamics, SPH）方法，建立了三维模型，如图 1 所示。

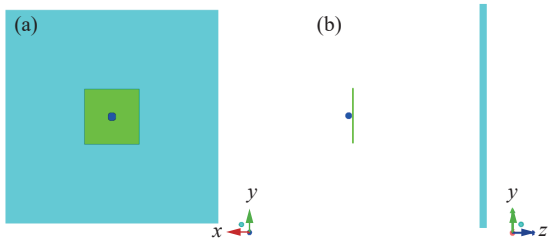


图 1　超高速撞击数值计算模型

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，其密度接近空间碎片；CoCrFeNiTi 高熵合金结构的厚度为 0.84 mm，面密度为 0.54 g/cm^2，与 2 mm 厚的 2024-T4 铝合金结构等效，缓冲屏的平面尺寸为 15 mm×15 mm；后板采用 6061-T6 铝合金，厚度为 4 mm，平面尺寸为 60 mm×60 mm，后板与防护板的间距为 100 mm。在数值模型中，弹丸及缓冲屏均采用 SPH 粒子进行离散，而后板则采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，已有的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，这为本研究采用应变率-温度耦合的本构框架提供了理论依据[25−26]。为准确表征材料在高速冲击下的力学响应，选用 Johnson-Cook 模型。Johnson-Cook 模型主要用于预测金属材料在高温、高应变速率、大塑性变形影响下的动态响应特性，具体表达式为

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

式中：σ为材料的等效应力，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，ε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。

采用 Mie-Grüneisen 状态方程描述极高压力环境中金属材料的压力(p)与比内能(e)的关系，表达式如下

$$p = p_{\mathrm{H}} + \gamma\rho(e - e_{\mathrm{H}}) \tag{2}$$

式中：γ为 Grüneisen 系数，用于描述材料的可压缩性；ρ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，用以刻画碎裂起始与扩展过程[27]。本研究采用 Grady-Spall 模型和 Johnson-Cook 损伤模型来描述材料损伤。

Grady-Spall 模型是用于分析材料在动态加载(如高速冲击或爆炸)下发生层裂时碎片尺寸分布的理论模型[28]，表达式为

$$p_{\mathrm{s}} = \sqrt{2\rho c_0^2 Y\varepsilon_{\mathrm{c}}} \tag{3}$$

式中：p_{s}为主应力失效阈值；c_0为材料的体积声速；Y为屈服应力；ε_{c}为临界失效应变，对于铝合金材料，ε_{c}=0.15[24]。

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，特别适合高应变率、高温以及复杂应力状态下材料断裂现象的分析，表达式如下

$$\varepsilon_{\mathrm{f}} = [D_1 + D_2\exp(D_3\sigma^*)](1 + D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 + D_5T^*) \tag{4}$$

式中：ε_{f}为材料断裂时的应变，D_1、D_2、D_3、D_4、D_5为与材料有关的断裂常数，σ^*为应力与有效应力之比，$\dot{\varepsilon}^*$为有效塑性应变率。

本研究涉及的材料模型及详细的材料参数列于表 1 和表 2，其中：T_m 为熔化温度，T_0 为参考温度，C_0 和 S 为冲击速度-粒子速度曲线的斜率和截距，高熵合金材料参数源于文献 [23]。

表 1　材料所选模型

Table 1　Material models

Structure	Material	Equation of state	Constitutive equation	Failure model
Projectile	Al6061-T6	Grüneisen	Johnson-Cook	Grady
Protection plate	Al2024-T4	Grüneisen	Johnson-Cook	Grady
Protection plate	CoCrFeNiTi	Grüneisen	Johnson-Cook	Grady
Rear panel	Al6061-T6	Grüneisen	Johnson-Cook	Johnson-Cook

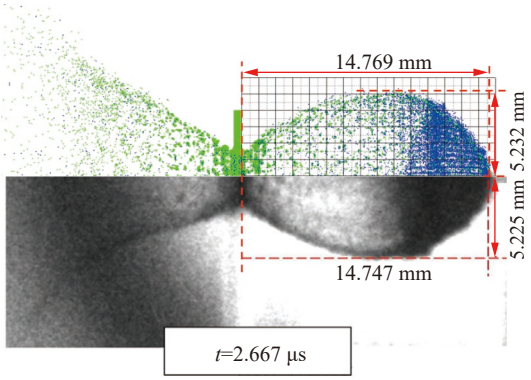
表 2　材料参数

Table 2　Material parameters

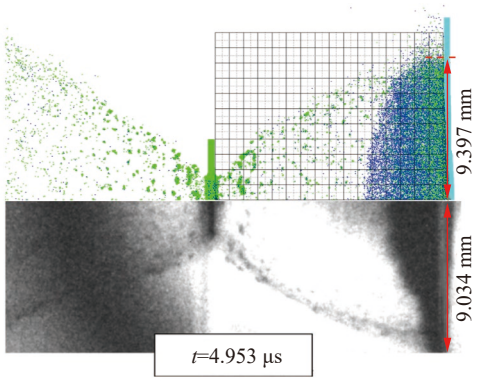
Material	ρ/(g·cm^{-3})	γ	C_0/(m·s^{-1})	S	T_0/K	T_m/K
Al6061-T6	2.703	1.97	5240	1.40	293	885
Al2024-T4	2.785	2.0	5328	1.338	293	863
CoCrFeNiTi	6.42	1.9	4902	1.53		1775
Material	A/MPa	B/MPa	C	n	$\dot{\varepsilon}_0$/s^{-1}	m
Al6061-T6	324	114	0.002	0.42	1.34	1.0
Al2024-T4	325	414	0.015	0.20	1.0	1.0
CoCrFeNiTi	381	755	0.0352	0.78		0.76
Material	ε_c	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
Al6061-T6	0.15	−0.77	1.45	−0.47	0	1.6
Al2024-T4	0.15					
CoCrFeNiTi	0.20					

1.3　数值计算结果有效性验证

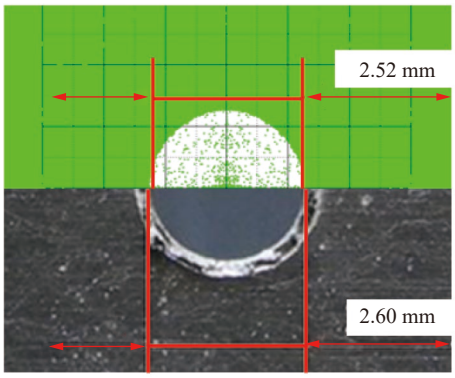
为检验数值计算方法的准确性，应用本研究提出的计算方法及材料参数，对 Cherniaev 等[29] 的超高速冲击实验现象开展模拟计算。弹丸、防护板和后板材料选取 6061-T6 铝合金；弹丸直径为 1 mm，撞击速度为 7.102 km/s；防护板厚度设定为 0.4 mm；后板的两板间距为 16 mm，厚度均为 0.4 mm。建立三维计算模型，得到的对比结果如图 2 所示。模拟结果显示，碎片云的形态特征接近。碎片云数据显示，实验与数值模拟结果的相对误差低于 5%，说明本数值计算流程和材料数据可靠。



(a) Morphology of fragment cloud at 2.667 μs



(b) Morphology of fragment cloud at 4.953 μs



(c) Diameter of the damaged area

图 2　模拟(上)与实验(下)[29] 得到的碎片云形貌对比

Fig. 2　Comparison of morphology between simulated (upper) and experimental (lower)[29] debris clouds

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

统计了铝合金防护结构和高熵合金防护结构在不同直径弹丸以不同速度撞击下产生的碎片数量，受建模粒子尺寸(0.1 mm)限制，仅统计尺寸大于 0.1 mm 的碎片，结果如图 3 所示。可以看出：弹丸直径(D)越大，碎片数量(N)越多；保持弹丸直径不变，则碎片数量随撞击速度(v_0)的增大而增多；当撞击速度为 3.5 km/s 时，2 类防护结构的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；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%。

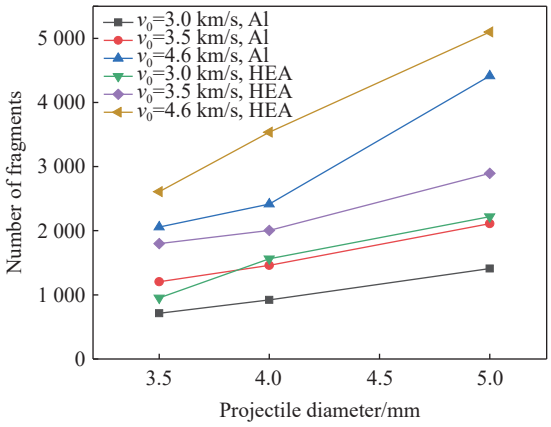


图 3　不同撞击速度下 2 种防护结构的碎片数量变化

Fig. 3　Variations of fragments number of two protective structures under different impact velocities

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的承载水平，使得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，相较于铝合金，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以产生更强的压缩和反射冲击波，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，因此，高熵合金防护结构可以产生更多的碎片，有利于降低弹丸的入射能量，减轻后板的损伤程度。

2.2　碎片云质量

基于上述分析结果可以得出：在相同的撞击条件下，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，导致碎片数量显著增加，并促使碎片云的空间分布趋于均匀化。为了进行定量分析，选取直径均为 5 mm 的弹丸，针对 2 种防护结构，分别开展 3.0、3.5 和 4.6 km/s 的超高速撞击模拟，撞击后形成的碎片云质量分布统计结果如图 4 所示。在所有撞击速度下，高熵合金防护结构产生的小质量碎片数量均显著多于铝合金防护结构，平均增幅达到 79.56%；高熵合金防护结构形成的较大质量碎片颗粒数量占比低于铝合金防护结构，两者之间的数量差随撞击速度的提升呈递减趋势。

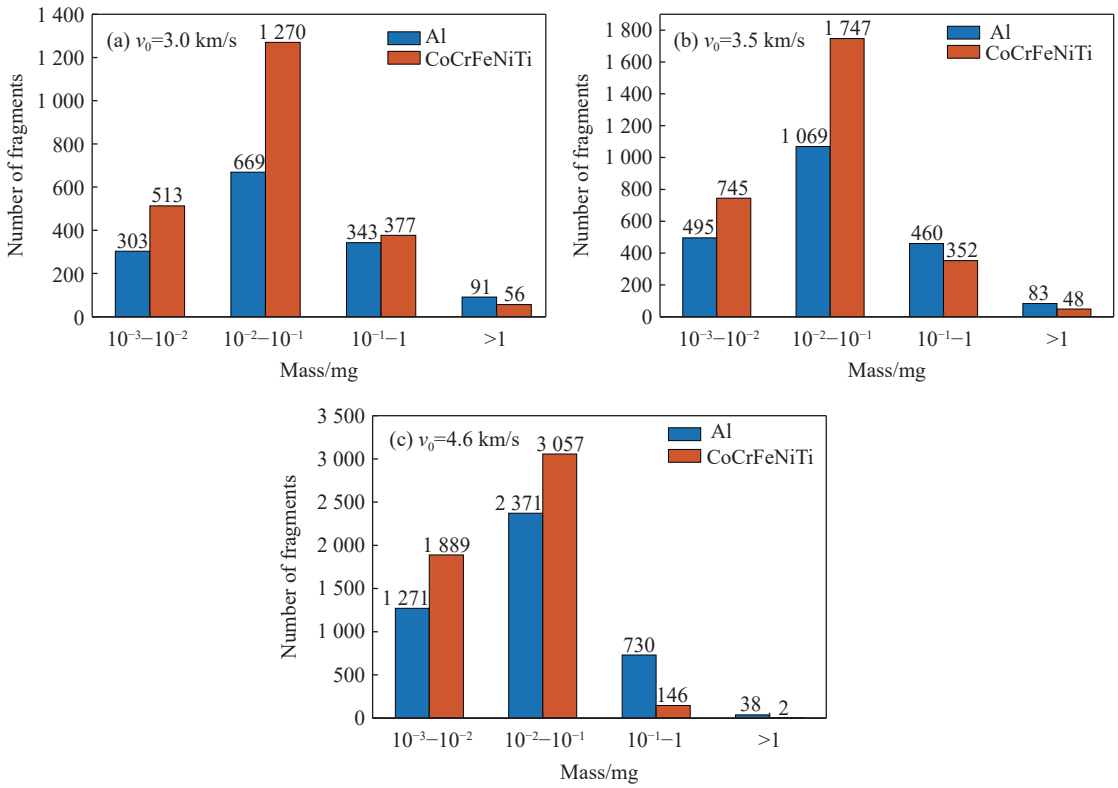


图 4　不同撞击速度下 2 种防护结构的碎片云质量分布

Fig. 4　Mass distribution of debris cloud of two protective structures under different impact velocities

高熵合金因多主元随机固溶而具有严重的晶格畸变，裂纹扩展时，路径复杂且易分叉。因此，在超高速冲击下，高熵合金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，从而有效抑制大质量、高动能危险碎片的产生，显著降低其绝对数量，极大地降低大尺寸、高动能碎片对防护目标造成二次损伤的风险。

2.3　碎片云动量

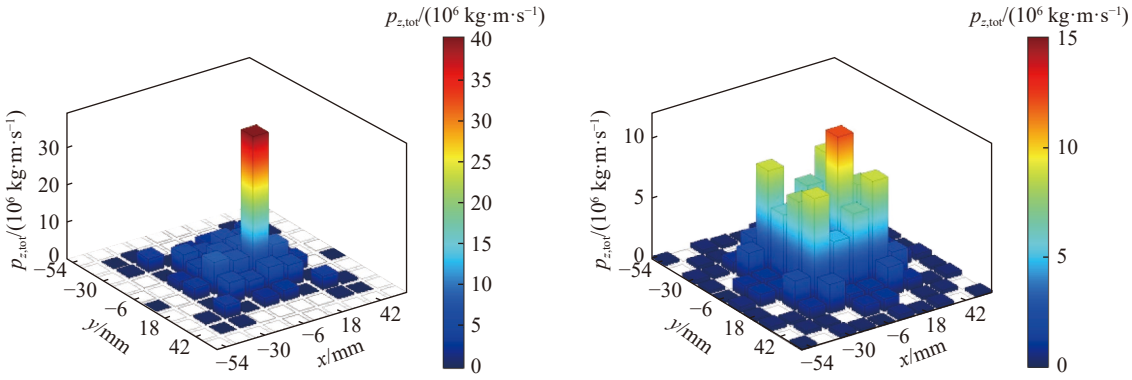
为评估防护效果，选用碎片云 z 方向动量和($p_{z,\mathrm{tot}}$)进行分析。对比了超高速撞击下 2 种防护结构后板的损伤状态，以衡量其抵御穿透或失效的能力。首先，选取碎片云稳定状态，即碎片云中的碎片不再碰撞和破碎并且每个碎片保持其当前的运动状态[30]，根据 AUTODYN 导出的碎片信息，确定碎片云中各碎片的 z 方向速度(v_z)，进而计算碎片到达后板所需时间(t_f)，根据所需时间以及碎片 x、y方向的速度(v_x、v_y)，确定碎片最终到达后板的区域位置。定义公式如下

$$t_\mathrm{f}=\frac{100-z_\mathrm{Center}}{v_z} \tag{5}$$

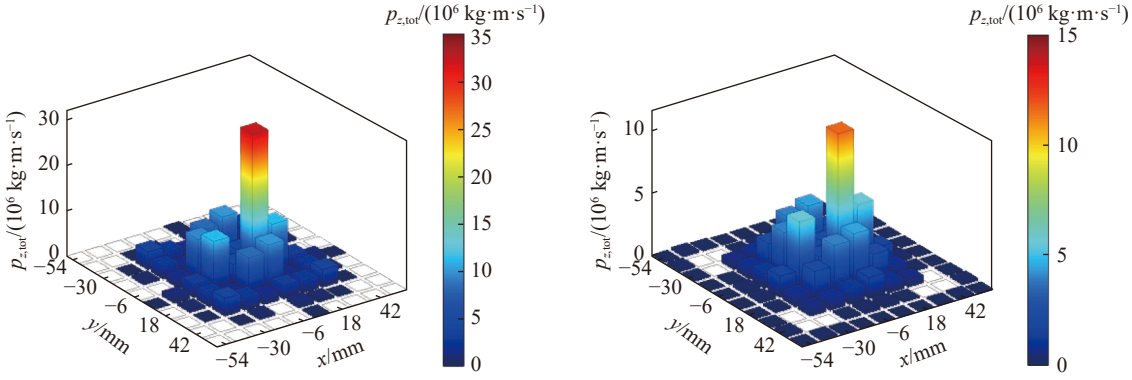
$$(x,y)=(x_\mathrm{Center}+v_x t,\ y_\mathrm{Center}+v_y t) \tag{6}$$

式中：x_Center、y_Center、z_Center分别为碎片云稳定状态下 x、y、z 方向的坐标，(x,y)为碎片在后板的坐标。根据式 (5) 和式 (6)，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 $p_{z,\mathrm{tot}}$。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的 $p_{z,\mathrm{tot}}$，如图 5 所示。

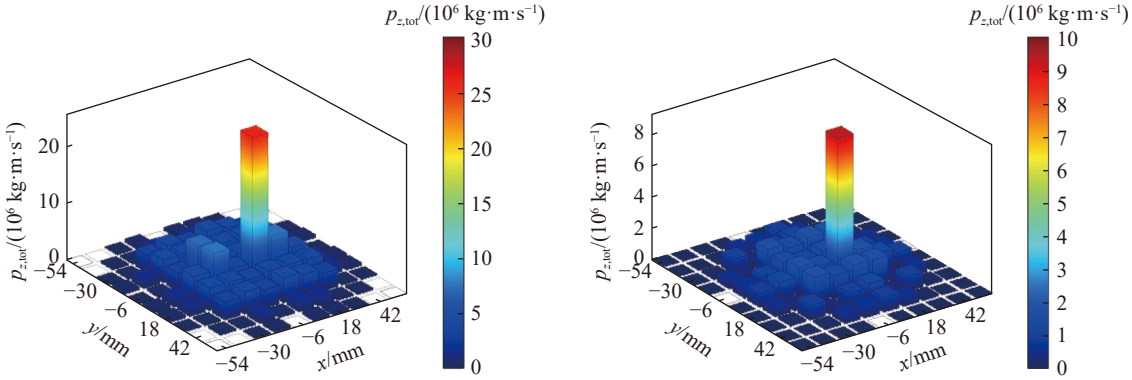
由图 5 可知：$p_{z,\mathrm{tot}}$ 的最大值集中于后板中心区域，与超高速撞击实验中后板损伤主要集中在中心区域的现象相符；在弹丸直径和撞击速度相同的条件下，高熵合金防护结构的 $p_{z,\mathrm{tot}}$ 均低于铝合金防护结构的 $p_{z,\mathrm{tot}}$，在弹丸直径为 3.5、4.0 mm 的工况下，$p_{z,\mathrm{tot}}$ 的最大值未达到铝合金防护结构的 50%，在 5.0 mm 工况下，$p_{z,\mathrm{tot}}$ 的最大值低于铝合金防护结构的 75%。



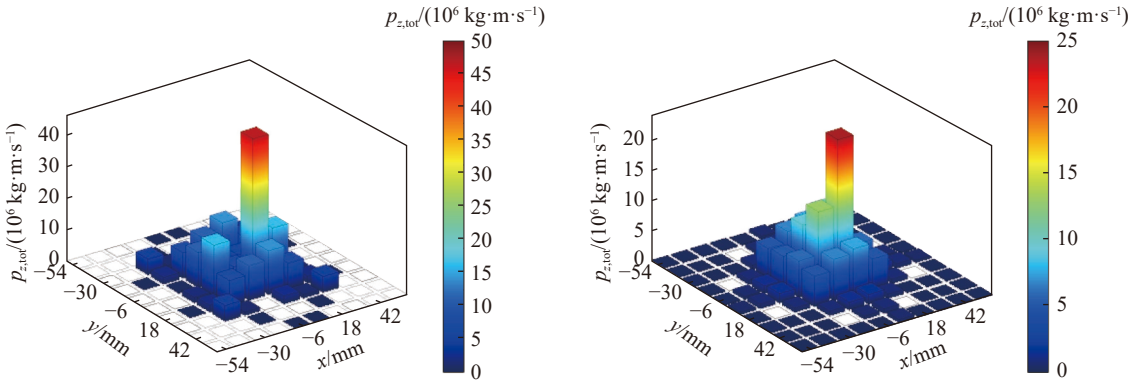
(a) Fragment momentum distribution for a 3.5 mm projectile at 3.0 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)



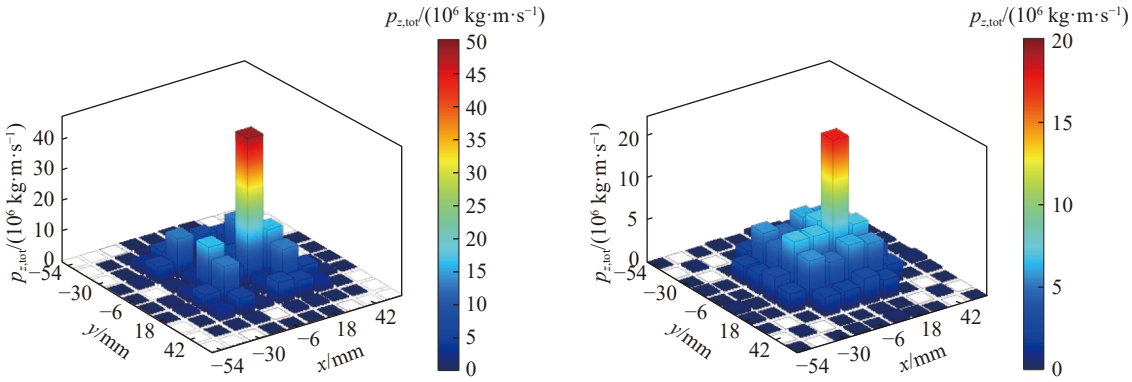
(b) Fragment momentum distribution for a 3.5 mm projectile at 3.5 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)



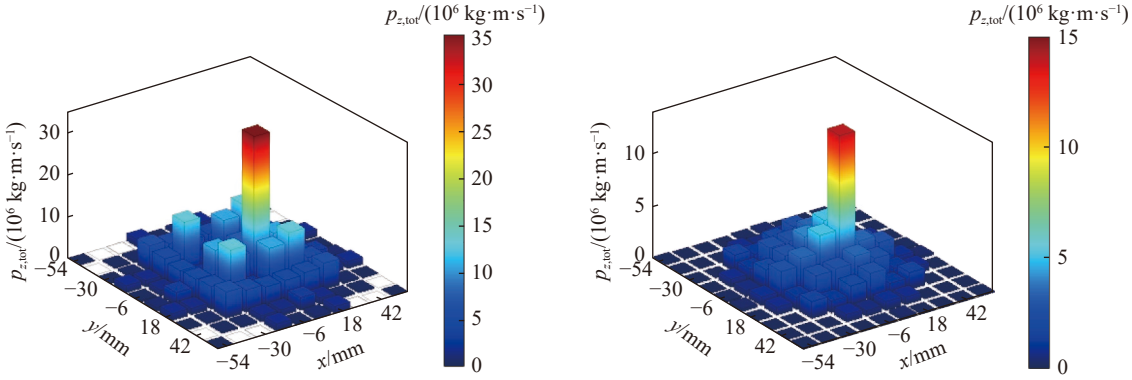
(c) Fragment momentum distribution for a 3.5 mm projectile at 4.6 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)



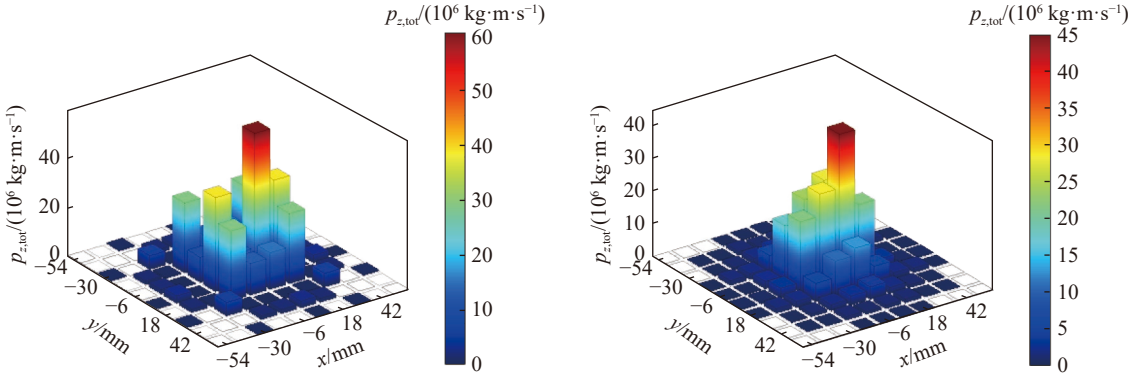
(d) Fragment momentum distribution for a 4.0 mm projectile at 3.0 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)



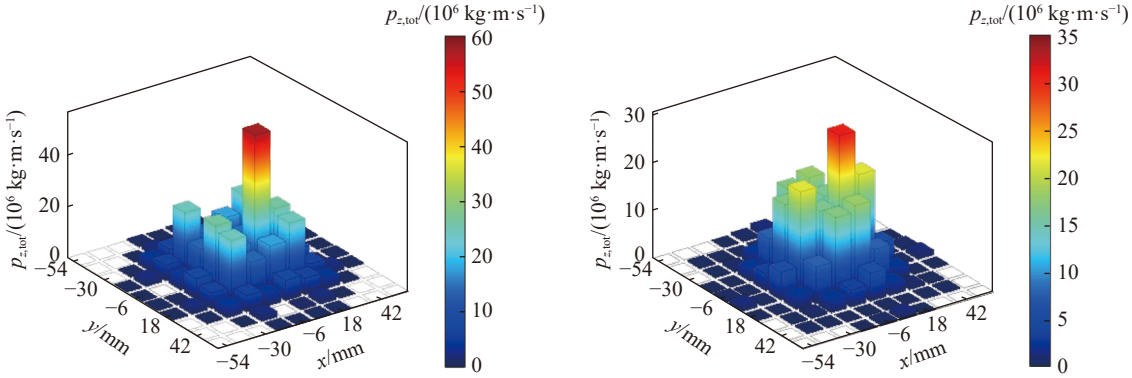
(e) Fragment momentum distribution for a 4.0 mm projectile at 3.5 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)



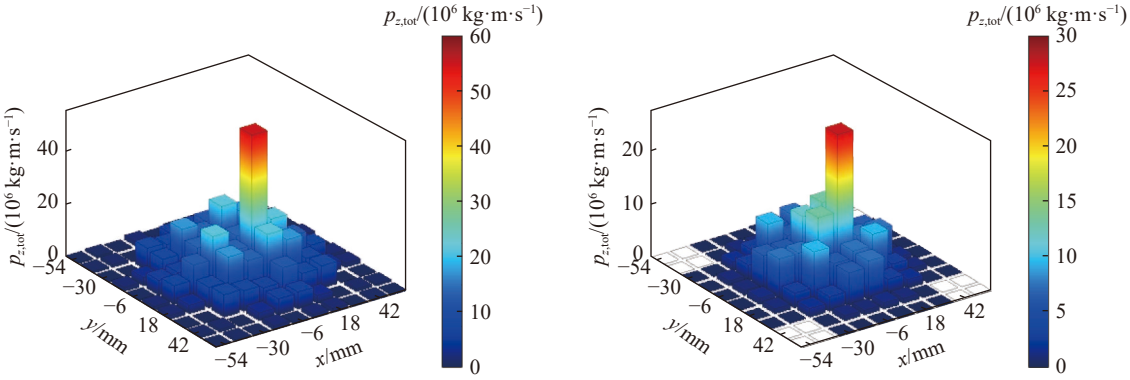
(f) Fragment momentum distribution for a 4.0 mm projectile at 4.6 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)



(g) Fragment momentum distribution for a 5.0 mm projectile at 3.0 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)



(h) Fragment momentum distribution for a 5.0 mm projectile at 3.5 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)



(i) Fragment momentum distribution for a 5.0 mm projectile at 4.6 km/s (left: aluminum alloy; right: HEA)

图 5　碎片的 z 方向动量和分布

Fig. 5　Fragment momentum distribution in the z-direction

后板损伤区域分布显示，高熵合金防护结构的损伤面积超过铝合金防护结构，损伤程度显著低于铝合金防护结构。因为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，致使入射动能更多地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。该损伤特性与 Whipple 防护结构的防御机制更加契合，能够有效地执行载荷分布传递与能量耗散转化过程。

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 2 个影响高熵合金防护结构抗冲击防护性能的关键参数，即结构厚度与弹丸直径之比 t/D、弹丸撞击速度 v_0。在研究 v_0 的影响规律时，保持 t/D 等因素不变；研究 t/D 的影响时，保持 v_0、高熵合金缓冲屏的面密度、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

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[31]可为碎片云散布的定量描述提供参考，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。t/D 和 v_0 对高熵合金防护结构碎片云膨胀特性的影响如图 6 和图 7 所示。可以看出，碎片云膨胀速率随 v_0 的增大明显提高，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 的增大逐渐增大，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%，说明 t/D 对外泡碎片云膨胀速度的影响较小。

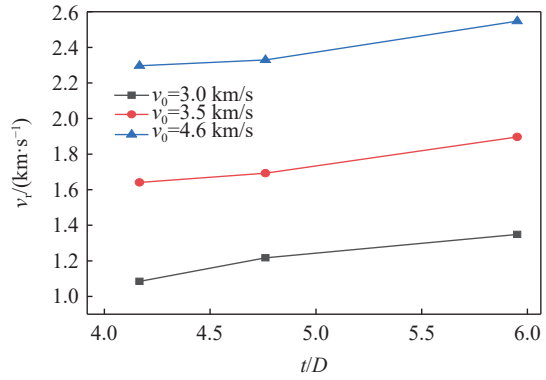


图 6　外泡碎片云径向膨胀速度

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

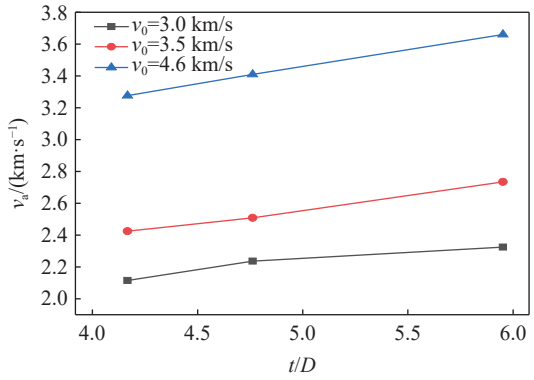


图 7　外泡碎片云头部膨胀速度

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

为进一步得到碎片云膨胀规律，以弹丸直径 D=5.0 mm 的工况为例进行计算。高熵合金防护结构的碎片云直径和长度随时间的变化如图 8 和图 9 所示，两者均随时间推移呈线性变化趋势，且撞击速度越大，线性变化越显著。5 μs 时，不同工况中碎片云的直径和长度的差异较小；随着时间的增加，差异逐渐增大；在 40 μs 左右，碎片云撞击到后板，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。

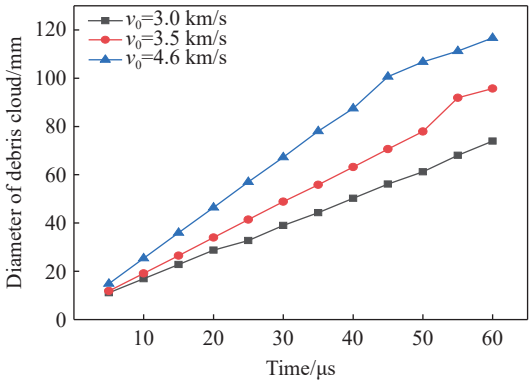


图 8　碎片云直径随时间变化

Fig. 8　Variations of debris cloud diameter with time

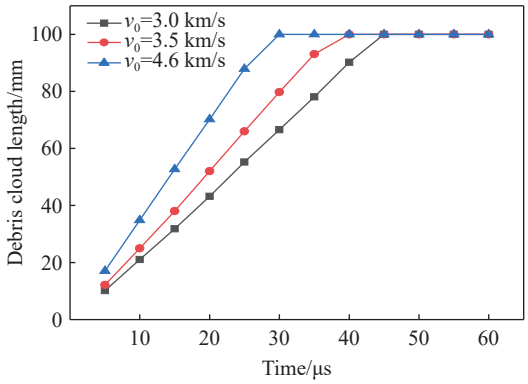


图 9　碎片云长度随时间变化

Fig. 9　Variations of debris cloud length with time

3.2　碎片云的危险碎片特性

危险碎片是指结构遭受撞击后，碎片云达到稳定阶段时，依然保持较大质量和较高动能的碎片，其量化公式[30] 如下

$$m \geqslant 450\pi\left[\frac{6.62}{7860\left(\dfrac{v}{5238}\right)^{2/3}}\right]^{54/19} \tag{7}$$

高熵合金防护结构的危险碎片质量和动能与 t/D 及 v_0 的关系如图 10 和图 11 所示。随着 t/D 增加，危险碎片质量逐渐增大，这是因为，随着弹丸直径的增加，弹丸质量和危险碎片质量增加；在同一 t/D 下，随着 v_0 增加，弹丸破碎得更加剧烈，致使危险碎片的质量下降。在动能方面，t/D 越大，危险碎片所携带的动能越大，与危险碎片质量增加相对应；然而，在同一 t/D 下，v_0 越大，危险碎片动能越小，说明高熵合金防护结构具有良好的防护性能。

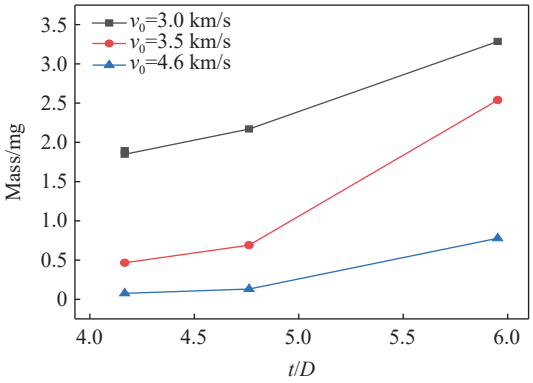


图 10　危险碎片质量分布

Fig. 10　Mass distribution of hazardous debris

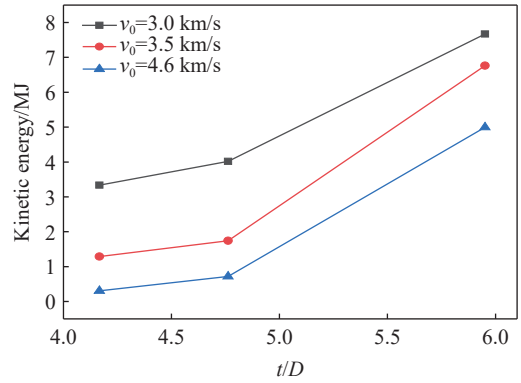


图 11　危险碎片动能分布

Fig. 11　Kinetic energy distribution of hazardous debris

4 结　论

采用 SPH 方法研究了高熵合金防护结构在超高速撞击环境中的防护性能，并将其与应用广泛的铝合金防护结构进行对比，深入分析了关键因素对防护性能的影响规律，得到如下结论：

(1) 弹丸撞击下高熵合金防护结构产生的碎片数量显著多于铝合金防护结构，相同工况下增幅达 51.86%；但在低速撞击条件下，两者产生的碎片数量无明显差异；

(2) 相同弹丸以不同速度撞击时，高熵合金防护结构使碎片云中小质量碎片占比更大，表明其能促使弹丸更充分碎裂；

(3) 高熵合金防护结构的碎片云散布范围更大，且核心区域碎片动量和显著低于铝合金防护结构，当弹丸直径为 3.5 和 4.0 mm 时，高熵合金防护结构的碎片云动量和不足铝合金防护结构的 50%，当弹丸直径为 5.0 mm 时，则不足 75%；

(4) 碎片云膨胀程度主要受撞击速度影响，且撞击速度越高，碎片云膨胀越大，后板损伤面越大；而危险碎片的质量和动能主要受 t/D 影响，且 t/D 越大，危险碎片的质量和动能越大，后板损伤的风险越高；

(5) 超高速撞击下，高熵合金使弹丸更充分地破碎，碎片总数增加，小质量碎片占比提高，而危险碎片数量减少，同时，碎片云的动量降低，冲击载荷更均匀地分散，后板局部损伤减轻，穿透风险降低，防护性能优异。

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.

[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.

[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 Q, XU H D, 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 H, 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 L, 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 J, CAO W X, 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 G, 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 G, YIN C, RU H Q, et al. Hypervelocity impact damage behavior of B_4C/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/Al2024 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.

[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 T, TANG J Q, CAI Z Q, et al. Transverse impact response of movable fiber bundle with constant resistance [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2026, 310: 111105.

[22] ALI S F, FAN J T. Capturing dynamic behaviors of a rate sensitive, elastomer with strain energy absorptions and dissipation effects [J]. International Journal of Applied Mechanics, 2021, 13(9): 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(Suppl 1): 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(Suppl 1): 60–69.

[24] CAO S, FAN J T. 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 J, FAN J T. Interpretable machine learning framework to predict the glass transition temperature of polymers [J]. Polymers, 2024, 16(8): 1049.

[26] FATEH ALI S, FAN J T. 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 Q, FAN J T, CHEN S H. 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.

[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 T. 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[1], YANG Qiuzu[1], GUO Jia'ao[1], LI Zhiqiang[1,2,3,4]

（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. Currently, most spacecraft shielding systems adopt Whipple-type structures, in which aluminum alloys are commonly used as bumper materials. In this study, the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method implemented in the AUTODYN software was 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, were 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 were 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, namely: the total number of fragments increases by approximately 51.86%; the number of small-mass fragments increases by about 79.56%, while the number of large-mass fragments decreases; and 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 is relatively minor. In contrast, the mass and kinetic energy of hazardous fragments (large-mass/high-energy fragments) are mainly affected by t/D, 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