

CoCrFeMnNi 高熵合金聚能射流及侵彻靶板数值模拟研究

孟钰权¹, 雷蓉², 刘姗姗^{1*}, 吴小宝¹, 宋卫东¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081;

2. 中国人民解放军 93160 部队, 北京 100071)

摘要: 现代装甲防护技术的持续发展对聚能战斗部的毁伤威力提出了更严峻的挑战。传统药型罩材料因其综合性能局限, 已成为提升侵彻深度的主要制约因素。高熵合金因其独特的多元设计, 展现出高强度、高硬度、优异的动态断裂韧性等核心潜力, 被视为极具前景的新型药型罩候选材料。在此背景下, 通过激光熔化 (SLM) 技术制备了 CoCrFeMnNi 高熵合金, 并对该高熵合金开展了静、动态力学性能测试与研究, 确定了 CoCrFeMnNi 高熵合金材料的 Johnson-Cook (J-C) 动态本构模型以及相关参数。利用 LS-DYNA 建立了紫铜和高熵合金 2 种材料的聚能射流形成模型, 并对紫铜和高熵合金聚能射流的形成过程和侵彻靶板过程进行了数值模拟。研究结果表明, 相较于紫铜, 高熵合金药型罩能形成更稳定、连续的射流, 其独特的成型与拉断机理最终转化为更深的侵彻深度, 证实了高熵合金在提升毁伤效能方面的显著优势。

关键词: 高熵合金; 聚能射流; 药型罩; 侵彻靶板; 有限元模拟

中图分类号: TJ410.34; O521.9; O347.1

文献标识码: A

当前及未来战场, 面临着装甲防护技术革命性升级带来的严峻挑战。为满足现代战争日益增长的毁伤效能需求, 亟需发展新一代高效聚能穿甲技术。聚能穿甲武器是一种应用“空心装药效应”的战斗部, 其原理是通过该效应使金属药型罩形成高温高压高速射流, 以此穿透装甲等坚硬目标。其中, 药型罩材料是决定最终毁伤效能的关键因素, 药型罩材料的力学性能直接决定射流的形成、延伸、稳定性和穿透能力。紫铜作为药型罩材料开发使用已超过 70 年, 然而传统紫铜药型罩已接近其理论性能极限, 铜的强度和动态屈服强度有限, 导致形成的射流在高速拉伸下易过早颈缩、断裂, 限制了有效射流长度、穿深和后效, 严重影响聚能装药战斗部的侵彻性能。为突破上述瓶颈, 开发下一代聚能战斗部, 对新型药型罩材料提出了以下几点需求: 首先, 材料须兼具极高的动态强度与良好的动态韧性以确保射流在高速拉伸中不易断裂。此外需要追求更高的材料密度, 高密度直接决定了射流的动量。因此, 对开发满足上述条件的新型药型罩材料产生了迫切的需求[1-3]。

近年来, 高熵合金因其独特的晶格畸变效应和“鸡尾酒效应”, 展现出作为下一代药型罩材料的巨大潜力。其通过成分设计可同时实现高强度、高韧性、优异的耐热性及可调控的密度, 从而精准满足药型罩对动态力学性能与高密度的苛刻需求。这些超越传统合金的卓越特性, 使高熵合金成为极具前景的新型药型罩候选材料[4-6]。因此, 中外科学界都对高熵合金这一概念进行了很多探讨, 在高熵合金的动态力学性能方面, 胡等人对几种典型高熵合金的动态力学特性与变形机理开展了研究, 其研究的面心立方结构 CoCrFeMnNi 和体心立方结构 TaNbHfZrTi 高熵合金均在动态下表现出明显的应变率效应, 具有良好的动态屈服强度和应变硬化能力[7-10]。此外, 为探索高熵合金在聚

收稿日期: 2025-11-21; 修回日期: 2026-01-20

基金项目: 国家自然科学基金 (12172056, 11972092, 12002049); 计算物理国家重点实验室 (6142A05230102)

作者简介: 孟钰权 (1995-), 男, 博士研究生, 主要从事高熵合金动载下的力学行为和变形机理研究。

E-mail: yqmengtyut@163.com

通讯作者: 刘姗姗 (1993-), 女, 博士研究生, 主要从事高熵合金动载下的力学行为和变形机理研究。

E-mail: liushanshan0104@163.com

能战斗部中药型罩射流性能的具体表现,也有一些学者利用实验和数值仿真开展了相关研究。Liu 等人

开发的钨基高熵合金展现出卓越的自锐能力,其侵彻性能因此显著优于传统钨基高熵合金 10%-20%,与传统材料普遍发生的“蘑菇头”变形形成鲜明对比[7]。鄢等人系统研究了 CrMnFeCoNi 高熵合金的动态力学行为,模拟验证了高熵合金射流形成边界的合理性,并进一步揭示了射流高速拉伸断裂演化规律,探索该合金用作药型罩的适用性[11]。刘等人基于 CoCrFeNiTi 高熵合金的动态力学性能,通过数值模拟和威力实验相结合的方法,验证了该材料作为药型罩的可行性[12]。然而,既有研究多局限于单一的数值模拟或实验测试,未能实现二者的结合印证,且缺乏对射流最终侵彻能力的深入探讨。

本研究首先通过增材制造技术制备了 CoCrFeMnNi 高熵合金,并进行了静、动态力学性能测试与研究,从而确定了其动态本构模型的相关参数,并在此基础上分别建立了铜和高熵合金两种材料的聚能射流形成模型,采用 LS-DYNA 有限元方法以这两种材料作为药型罩时的射流形成过程进行数值模拟,并对射流成型的过程进行理论分析,揭示了二者射流的成型和拉断机理。此外,还建立紫铜和高熵合金侵彻靶板模型,并研究了高熵合金聚能射流侵彻靶板的行为,该研究可为利用高熵合金设计聚能战斗部提供一定的指导。

1 高熵合金力学性能及本构关系

1.1 试样制备

采用选区激光熔化 (SLM) 技术制备了 CoCrFeMnNi 高熵合金,如图 1 所示。3D 打印样品通过带有最高激光功率 500 W 的 BLT-S200 SLM 3D 打印机制备。打印试件时激光功率选为 275W,扫描速率为 950 mm/s,打印层厚 40 μm ,最终打印出样品规格为 70 mm \times 40 mm \times 18 mm 的高熵合金块体。分别选取 3 个扫描方向制得 3 块合金锭。将制得的合金块体进行水淬,然后对其通过线切割取样,分别获得静态和动态力学性能测试所需的试件。取样完成后,对所取得试样进行打磨抛光处理。砂纸磨至 2000#划痕方向一致后,用金属试样抛光机抛光处理。

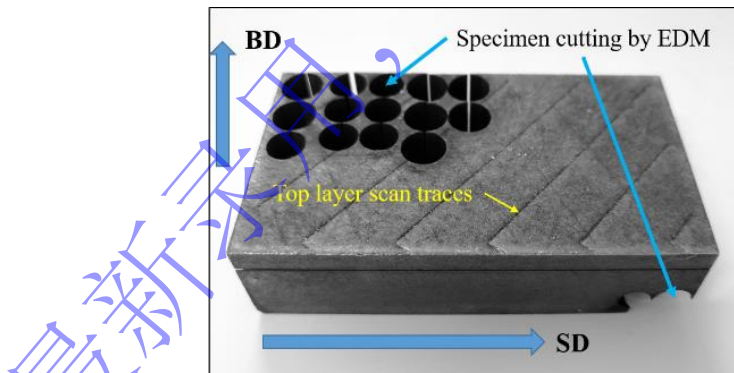


图 1 SLM 打印的 CoCrFeMnNi 高熵合金块体

Fig.1 CoCrFeMnNi high-entropy alloy bulk fabricated by SLM printing

1.2 准静态、动态力学性能测试

为开展准静态力学性能测试,首先通过线切割与精密机加工制备出 $\Phi 6\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的圆柱试样。试样两端经 800#砂纸打磨以确保表面平整度,并在实验前于其端部均匀涂抹凡士林润滑剂,以有效降低压缩过程中端面摩擦约束对测试结果的影响。所有压缩实验均在万能试验机上完成,采用恒定的 0.001 s^{-1} 应变率进行加载。材料的动态力学性能通过霍普金森压杆装置(图 2)进行测试。

测 收稿日期: 2025-11-21; 修回日期: 2026-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(12172056, 11972092, 12002049); 计算物理国家重点实验室(6142A05230102)

作者简介: 孟钰权(1995-),男,博士研究生,主要从事高熵合金动载下的力学行为和变形机理研究。

E-mail: yqmengtyut@163.com

通讯作者: 刘姗姗(1993-),女,博士研究生,主要从事高熵合金动载下的力学行为和变形机理研究。

E-mail: liushanshan0104@163.com

试时，打击杆撞击入射杆产生入射应力波，使试样发生高速变形，并同步产生反射波与透射波。通过下列理论公式计算，可获得动态力学应力-应变曲线。

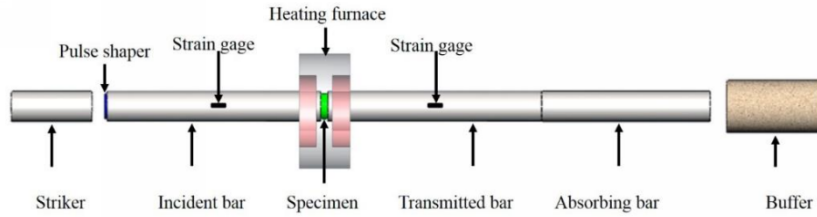


图 2 分离式霍普金森压杆装置示意图

Fig.2 Schematic Diagram of a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) device

基于一维应力波理论，可通过粘贴在压杆上的电阻应变片所测得的入射波、反射波和透射波信号，由应力平衡条件可推导出：

$$\varepsilon' = -\frac{2C}{l_0} \varepsilon_R \quad (1)$$

$$\varepsilon = -\frac{2C}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_R) dt \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{A}{A_0} E \varepsilon_T \quad (3)$$

其中， R 和 T 分别表示测试记录的入射、反射和透射波。

实验所得的数据经上述公式处理后，得出不同应变率下试件的动态力学真实应力应变如图 3。可以看到采用 SLM 制备的 CoCrFeMnNi 高熵合金表现出显著的应变率效应，屈服强度从准静态下的 545 MPa 增加到动态加载下的 727 MPa (1300 s^{-1} 和 3200 s^{-1}) 以及 754 MPa (4500 s^{-1})。

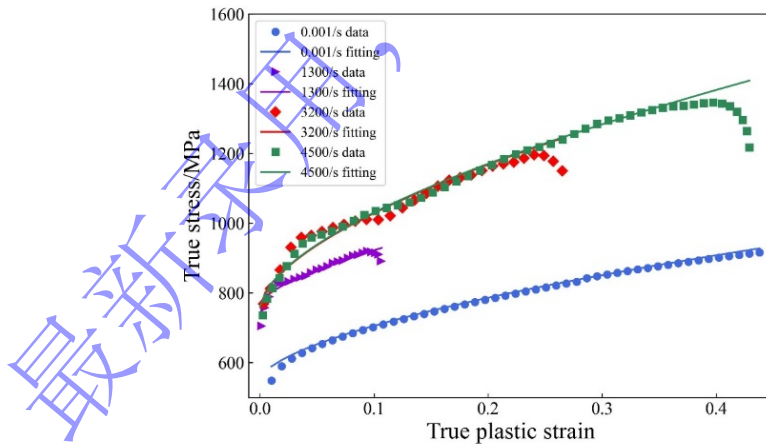


图 3 CoCrFeMnNi 高熵合金在准静态，动态力学应力-应变曲线以及相应的 Johnson-Cook 本构模型拟合曲线

Fig. 3 Quasi-static and dynamic mechanical stress-strain curves, and the fitted curve of the Johnson-Cook constitutive model for CoCrFeMnNi high entropy alloy

1.3 本构模型参数及状态方程

在涉及大变形、高应变率与显著温度变化的工况下，Johnson-Cook (J-C) 本构模型能够有效模拟金属材料的动态力学行为及失效过程。本研究采用该模型来描述高熵合金在高速侵彻及大变形下的应变硬化、应变速率硬化和热软化效应[13-14]：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left[\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right]^1 \right) \quad (4)$$

式中： ε 为等效塑性应变； $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率； $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率； T 为温度； T_r 为室温； T_m 为熔化温度； A 、 B 、 C 、 m 和 n 为常量。

通过对实验数据的拟合，确定了相关的参数。得出 CoCrFeMnNi 高熵合金的 J-C 模型为：

$$\sigma = (550 + 780\varepsilon^{0.6}) \left(1 + 0.14 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left[\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right]^1 \right) \quad (5)$$

此外，完整的 J-C 本构模型需要的参数由表 1 给出：

表 1 CoCrFeMnNi 高熵合金的 J-C 参数

Tab. 1 The J-C parameters of CoCrFeMnNi HEA

$\rho_0/$ (g·cm ⁻³)	$A/$ (MPa)	$B/$ (MPa)	n	C	m	$C_p/$ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\dot{\varepsilon}_0$	$T_{melt}/$ K
7.96	550	780	0.6	0.14	1	452	1×10 ⁻³	1793

为准确模拟金属射流的侵彻机理，其本构模型必须包含能够精确刻画材料在高压状态下压力-体积关系的状态方程。通常，相关参数需要通过平板撞击试验或者分子动力学模拟近似得到。本研究采用 Jiang 等人通过平板撞击试验测得的 CoCrFeMnNi 高熵合金的冲击压缩 Mie-Grüneisen 状态方程[15]。这些参数包括 Hugoniot 弹性极限、体声速 C 、线性拟合系数 S 和 Grüneisen 参数 γ 。具体参数见表 2。

表 2 CoCrFeMnNi 高熵合金压缩状态方程参数

Tab. 2 Dynamic properties of CoCrFeMnNi HEA

Materials	HEL/GPa	$C_0/(m·s^{-1})$	S	γ
CoCrFeMnNi	2.58	3.81~3.92	1.36	1.78

2 聚能射流成型数值模拟与理论分析

2.1 聚能射流数值模拟模型及参数

基于装药结构的几何对称特性及线起爆方式，本研究将三维问题简化为二维平面应变模型进行分析。在此简化框架下，线起爆等效为点起爆条件。建立的二维数值模型如图 4 所示，建模过程中采用 cm-g- μ s 单位制体系。在数值模拟方法上，选用 SOLID162 单元进行网格划分，并采用自适应网格技术解决药型罩大变形导致的网格畸变问题。接触定义采用以下方案：炸药与药型罩界面使用 CONTACT_2D_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 算法，药型罩自接触采用 CONTACT_2D_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 算法。

模型关键几何参数如下，药型罩采用 1.5 mm 等厚度设计，母线长度 15 mm，锥角 80°，装药高度 16 mm。起爆方式设置为顶端棱边同步起爆，确保爆轰波传播的对称性。

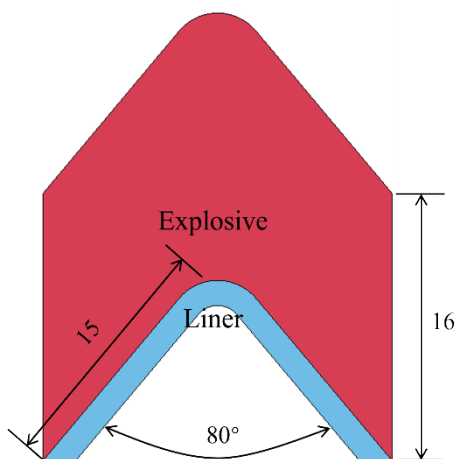


图4 聚能射流结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of a shaped charge jet

数值模拟中，炸药的爆轰过程通过 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型进行描述，该模型需配合 JWL 状态方程共同定义 TNT 炸药的化学能释放与压力-体积关系。相关的材料参数如表 3 所示：

表 3 炸药材料参数

Tab. 3 Explosive material parameters

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_0/GPa	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$P_{CC}/(\text{GPa})$
371.2	3.231	4.15	0.95	0.3	1.78	4.192	6930	34

2.2 聚能射流数值模拟结果

在初始压垮阶段，爆轰波阵面直接作用于锥形药型罩表面，使其各微元沿法线方向向对称轴加速运动。当对称位置的罩体微元在轴线碰撞时，部分材料发生射流形成所必需的塑性流动，形成初生射流与杵体。此时爆轰波尚未完全传播至整个装药，药型罩仅完成约 30%-50%的压垮过程。在加速汇聚阶段，在爆轰产物持续膨胀作用下，未完全压垮的药型罩继续向对称面汇聚。这一过程中，后续汇入的罩体材料不断为射流头部补充质量和动能，使其速度从初始的 2000-3000 m/s 提升至峰值（通常可达 7000-9000 m/s）。该阶段射流的形成效率直接决定了最终侵彻能力。在拉伸断裂阶段，当药型罩完全压垮后，射流不再获得新的质量补充。由于先形成部分速度高、后形成部分速度低，射流内部形成显著的速度梯度。在梯度作用下，射流不断拉伸变细，单位长度质量持续下降，最终导致颈缩断裂。这一拉伸过程虽降低了射流密度，却使其获得更长的有效作用长度。

图 5 描述了 CoCrFeMnNi 高熵合金线型聚能射流的形成与拉伸演化过程。由图可知，射流与杵体的长度随时间延长而增加，时序分析表明在 $t=5 \mu\text{s}$ 时，药型罩保持初始形态。至 $15 \mu\text{s}$ ，罩体已显著变形并向对称轴闭合， $20 \mu\text{s}$ 时完成闭合并形成初始射流， $25 \mu\text{s}$ 后，爆轰产物持续作用使射流质量进一步增加，到 $40 \mu\text{s}$ ，因射流内部形成速度梯度而产生明显颈缩，标志着射流最终成型。通常以 2000 m/s 的射流微元为界，一侧为杵体，另一侧为射流。图 5 中清晰可见该分界线，符合金属射流的一般形成规律[16-17]。

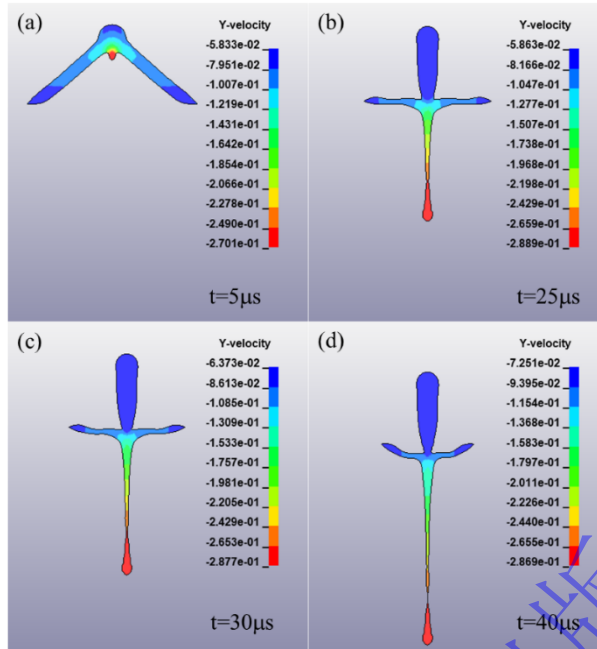


图 5 CoCrFeMnNi 高熵合金射流成型与拉伸演化时序图

Fig. 5 Temporal sequence of jet formation and stretching evolution in CoCrFeMnNi high entropy alloy

为了进行对比，体现高熵合金作为药型罩的优势，采用传统材料紫铜进行了同样的聚能射流模拟，紫铜的聚能射流模拟结果如图 6 所示，可以看到整个射流过程与高熵合金基本类似，但是可以看到射流长度明显低于高熵合金，在 25 μs 头部就出现拉断现象，最终形成的射流相比高熵合金也没有稳定细长，因此，从射流形态来看，高熵合金相比紫铜具有较好的效果。

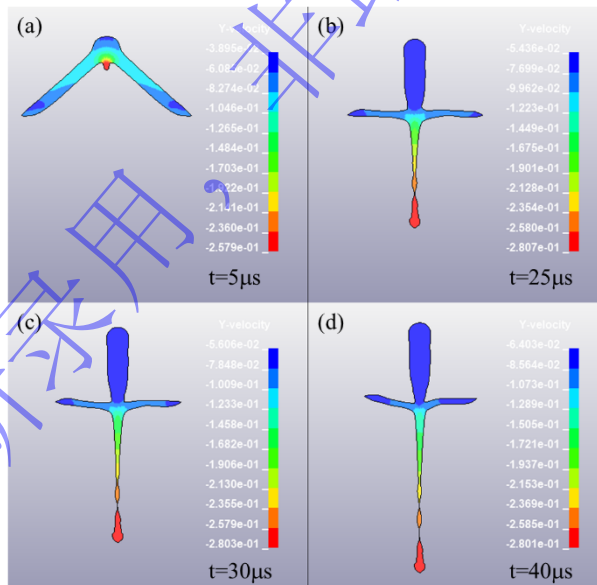


图 6 金属紫铜射流成型与拉伸演化时序图

Fig. 6 Temporal sequence of jet formation and stretching evolution in metallic copper

射流头部速度是一个评价射流效果好坏的重要参数，因此，在相同模拟条件下，我们比较了高熵合金和紫铜的最终射流头部速度，如图 7 所示，其中高熵合金的头部速度约为 4.29 km/s，紫铜的射流速度约为 4.07 km/s。可以看到高熵合金作为药型罩的情况，头部射流速度略高于紫铜，这就意味着相较侵彻毁伤能力会更强。

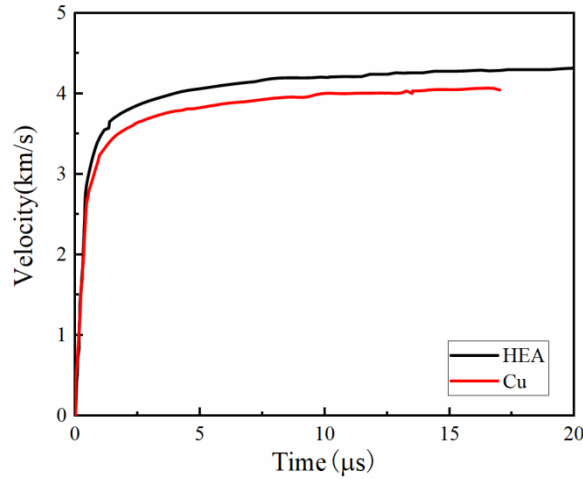


图 7. 高熵合金与紫铜射流成型中头部速度的演化时序图

Fig. 7. Temporal evolution of head velocity in high entropy alloy and copper jet formation

3 射流侵彻靶板数值模拟

为了检验所设计结构材料是否满足实际应用需求，并对新型材料药型罩的性能进行对比分析，本研究建立了线型射流侵彻模型，分别对铜和 CoCrFeMnNi 高熵合金作为药型罩材料时的射流侵彻性能进行了计算与评估[16]。为探究不同药型罩材料对超高硬度装甲的毁伤效应，本研究特选用厚度为 10 cm 高氮钢作为侵彻目标，材料使用 J-C 本构及失效模型，参数见表 4。

表 4 靶板的 J-C 参数

Tab. 4 The J-C parameters of target board

A/GPa	B/GPa	n	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	C	m	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	P_C/GPa
1.5	2.6	0.82	1×10^{-3}	0.009	1.05	3	0	0.78	0	0	-900

如图 8，图 9 所示，分别为高熵合金药型罩聚能射流与紫铜药型罩聚能射流的侵彻演化过程，在侵彻靶板结果中，可明显看出在相同侵彻高度情况下高熵合金作为药型罩材料所形成的聚能射流的侵彻深度更高，侵彻效果更好。表 5 给出了两种材料作为药型罩侵彻相同厚度靶板的侵彻深度，其中高熵合金侵彻深度约为 3.12 cm，而紫铜约为 0.73 cm。

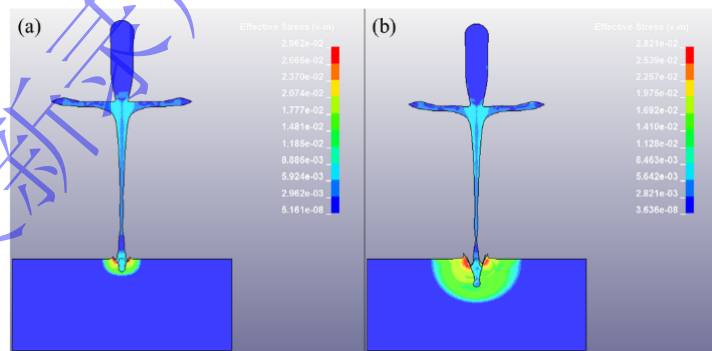


图 8 高熵合金侵彻靶板演化图

Fig. 8 Evolution of high entropy alloy penetrating into a target plate

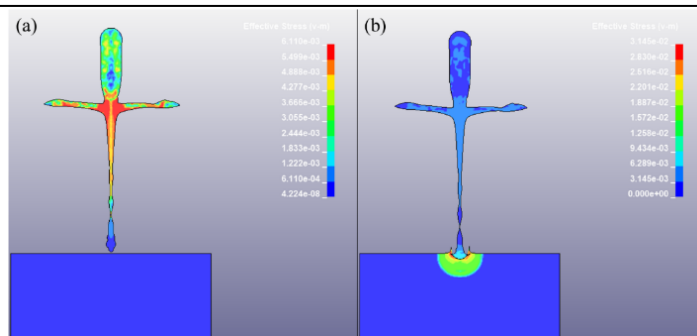


图9 紫铜侵彻靶板演化图

Fig. 9 Evolution of copper penetrating into a target plate

表5 高熵合金和紫铜侵彻靶板的深度

Tab. 5 Penetration depths of high entropy alloys and copper into target plates

Material	Target Thickness/cm	Penetration Depths/cm
HEA	10	3.12
Cu	10	0.73

4 结 论

本文通过静态压缩实验和霍普金森压杆实验探究了 CoCrFeMnNi 高熵合金的静态和动态力学性能，确定了其 Johnson-Cook 本构方程；采用 LS-DYNA 有限元程序，对二维模型射流的形成机理进行了计算与分析，并以紫铜为对照对象进行了药型罩形成金属射流的仿真模拟，模拟了聚能射流的侵彻靶板过程，探究以高熵合金为药型罩的侵彻能力；实验仿真结果主要结论如下：

(1) 与传统紫铜药型罩相比，CoCrFeMnNi 高熵合金因其更优异的力学性能，能形成更细长、更稳定的射流。其射流头部速度也更高，分别约为 4.29 km/s（高熵合金）与 4.07 km/s（紫铜）。

(2) 在侵彻靶板的数值模拟中，高熵合金相比紫铜药型罩具有更好的侵彻深度和侵彻效果。其中高熵合金侵彻深度约为 3.12 cm，而紫铜约为 0.73 cm。

(3) 采用 CoCrFeMnNi 高熵合金作为新一代的药型罩材料是有一定的潜在价值的，值得更进一步探究其可行性。

参考文献

- [1] 刘志跃, 翟俊昭. 铝铜药型罩射流与侵彻数值模拟[J]. 高压物理学报, 2019, 33(6): 064107.
LIU Z Y, ZHAI J Z. Numerical Simulation on the Performance of Shaped Charge with Explosively Welded Aluminum Copper Liner[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6): 064107.
- [2] 任会兰, 郭婷婷, 宁建国. 聚能射流对氧化铝陶瓷靶的侵彻特性研究[J]. 高压物理学报, 2011, 25(6): 526-532.
REN H L, GUO T T, NING J G. Failure Characteristics of Alumina Penetrated by Shaped Charge Jet[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(6): 526-532.
- [3] 孙建军, 李如江, 杨玥, 等. 辅助药型罩材料对线型聚能射流性能影响的数值仿真[J]. 高压物理学报, 2018, 32(6): 065106.
SUN J J, LI R J, YANG Y, et al. Numerical Simulation of the Effect of Auxiliary Liner Material on the Performance of Linear Shaped Charge Jet[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(6): 065106.
- [4] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal

- Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(5):299-303.
- [5] KUMAR S S, PARASHAR A. Effect of lattice distortion and nanovoids on the shock compression behavior of (Co-Cr-Cu-Fe-Ni) high entropy alloy[J]. *Computational Materials Science*, 2022, 209.
- [6] PARK J, MIN, et al. Strain rate effects of dynamic compressive deformation on mechanical properties and microstructure of CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. *Materials Science & Engineering A Structural Materials Properties Microstructure & Processing*, 2018.
- [7] Liu X F, Tian Z L, Zhang X F, et al. "Self-sharpening" tungsten high entropy alloy. *Acta Materialia*, 2020, 186: 257-266
- [8] 王璐,马胜国,赵聃,等. AlCoCrFeNi 高熵合金在冲击载荷下的动态力学性能[J]. *热加工工艺*. 2018
WANG L, MA S G, ZHAO D, et al. Dynamic Mechanical Properties of AlCoCrFeNi High-entropy Alloys under Impact Load[J]. *Hot Working Technology* 2018, 47-24
- [9] 胡孟磊. 典型高熵合金的动态力学特性与变形机理研究[D]. 北京理工大学, 2022
HU M L, Investigation on the Dynamic Mechanical Characteristics and Deformation Mechanisms of Typical High-entropy Alloys[D]. Beijing Institute of Technology, 2022
- [10] HU M L, SONG W D, DUAN D B, et al. Dynamic behavior and microstructure characterization of TaNbHfZrTi high-entropy alloy at a wide range of strain rates and temperatures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences* 2020. 105738
- [11] 鄢阿敏, 乔禹, 戴兰宏. 高熵合金药型罩射流成型与稳定性. *力学学报*, 2022, 54(8): 2119-2130
YAN A M, QIAO Yu, DAI L H. Formation and stability of shaped charge liner jet of CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(8): 2119-2130
- [12] 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. *Acta Armamentarii*, 2024,45(S1):60-69.
- [13] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//*Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. Hague, the Netherlands: IBC, 1983: 541 -547.
- [14] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21 (1):31 -48
- [15] JIANG Z, HE J, WANG H, et al. Shock compression response of high entropy alloys. *Materials Research Letters*, 2016, 4(4): 226-232
- [16] 王芳, 蒋建伟, 门建兵. 钨铜射流成形的细观数值模拟分析[J]. *兵工学报*, 2018, 39(2): 245-253.
WANG F, JIANG J W, MEN J B. Mesoscopic Numerical Simulation on the Formation of Tungsten-copper Shaped Charge Jet[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(2): 245-253.
- [17] 贾鑫, 黄正祥, 徐梦雯, 等. 聚能射流对厚壁移动靶的侵彻理论与数值模拟分析[J]. *兵工学报*, 2019, 40(8): 1553-1561.
JIA X, HUANG Z X, XU M W, et al. Theoretical Model and Numerical Study of Shaped Charge Jet Penetrating into Thick Moving Target[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(8): 1553-1561.

Numerical Simulation of CoCrFeMnNi High Entropy Alloy Shaped Charge Jet and Penetrating Target

MENG Yuquan¹, LEI Rong², LIU Shanshan^{1*}, WU Xiaobao¹, SONG Weidong¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Unit 93160 of the People's Liberation Army of China, Beijing 100071, China)

Abstract: The continuous advancement of modern armor protection technology has imposed more severe challenges on the damage power of shaped charge warheads. Traditional liner materials, due to their limited comprehensive performance, have become a major constraint in improving penetration depth. High-entropy alloys (HEAs), owing to their unique multi-principal element design, exhibit core potentials such as high strength, high hardness, and excellent dynamic fracture toughness, making them highly promising candidate materials for new-generation liners. In this study, the CoCrFeMnNi high-entropy alloy was prepared via selective laser melting (SLM) technology, and the mechanical properties were tested under quasi-static and dynamic loadings. The Johnson-Cook (J-C) dynamic constitutive model and related parameters for the CoCrFeMnNi HEA were determined. Using LS-DYNA, shaped charge jet formation models for both copper and high-entropy alloy were established, and numerical simulations were carried out on the jet formation process and target penetration process for copper and the HEA. The research results indicate that, compared with copper, the HEA liner can form a more stable and continuous jet. Its unique formation and stretching-breakup mechanisms ultimately result in greater penetration depth, confirming the significant advantage of high-entropy alloys in the enhanced damage effect.

Keywords: high entropy alloy; shaped charge jet; liner; penetrating target; finite element simulation