

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5164

Zr 基非晶合金药型罩结构对金属射流演化的影响

钟昊宇^{1,2}, 韩继龙¹, 王志军²

(1. 中国兵器工业集团第五二研究所, 浙江 宁波 315000 2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘 要: 聚能装药结构是一种利用门罗效应产生高速金属射流的特殊装药结构, 广泛应用于石油射孔、爆破钻孔、岩石破碎等工程领域。非晶合金射流具有优异的侵彻能力和扩孔效应, 可用于提升聚能装药结构的综合侵彻能力。针对 Zr 基非晶合金复合药型罩的射流演化, 开展了系统研究。基于有限元数值模型, 对 Zr 基非晶合金在高应变率下的射流形态进行模拟, 探究了不同聚能装药结构对 Zr 基非晶合金射流的影响规律, 得出最优几何装药结构与最佳炸高, 探究高应变率下 Zr 基非晶合金射流的形态, 为其在聚能装药领域的应用提供理论支持。结果表明, 非晶合金药型罩可产生特殊射流, 将非晶合金与铜复合制备药型罩, 可保证聚能射流具有一定侵彻深度, 同时提高开孔孔径, 增强后效。

关键词: 聚能射流; Zr 基非晶合金; 药型罩; 复合材料

中图分类号: TG139+.8; E932.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)03-0314-09

Research on the Evolution of Metallic Jets with Different Structural Parameters of Zr-based Amorphous Alloy Liner

ZHONG Haoyu^{1,2}, HAN Jilong¹, WANG Zhijun²

(1. 52 Institute of China North Industries Group, Ningbo 315000, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A shaped charge structure is a special charge structure that utilizes the Munroe effect to generate high-speed metal jets and is widely applied in engineering fields such as oil perforation, blasting drilling, and rock fragmentation. Amorphous alloy jets exhibit superior penetration capabilities and hole-enlargement effects, making them effective for enhancing the overall penetration capability of shaped charge structures. A systematic investigation into the jet evolution characteristics of Zr-based amorphous alloy composite liners was presented. Using finite element numerical modelling, the jet formation behavior of Zr-based amorphous alloys under high strain rates was simulated. By analysing the influence of various shaped charge configurations on the jet performance of Zr-based amorphous alloys through finite element modelling, the jet formation characteristics of Zr-based amorphous alloys under high strain rate conditions were simulated. The investigation examined how different shaped charge configurations affect the jet performance, determining both the optimal charge geometry and the standoff distance. The high-strain-rate jet morphology was thoroughly characterized, providing theoretical support for applications in shaped charge design. The results demonstrate that amorphous alloy liners can generate distinctive jet formations. The composite liners fabricated by combining amorphous alloys with copper not only ensure adequate penetration depth of the shaped charge jet but also significantly increase the perforation diameter while enhancing postpenetration effects.

Key words: shaped charge jet; Zr-based amorphous alloy; liner; composite material

自 19 世纪聚能效应被发现以来, 其应用研究也不断深入。美国学者 Munroe 和德国学者 Neumann

的相关研究表明在空心装药对准金属板引爆^[1], 且金属板力学性能满足要求的情况下, 金属板在爆轰

收稿日期: 2025-07-29

基金项目: 中国博士后科学基金(2022M722927)

作者简介: 钟昊宇, 1998 年生, 硕士, 主要从事非晶合金研究。Email: zhonghaoyu@nwpu.edu.cn

通信作者: 韩继龙, 1988 年生, 博士, 副研究员, 主要从事聚能装药研究。Email: 740258960@qq.com

王志军, 1984 年生, 博士, 教授, 研究方向为先进高熵合金开发与应用。Email: zhjwang@nwpu.edu.cn

引用格式: 钟昊宇, 韩继龙, 王志军. Zr 基非晶合金药型罩结构对金属射流演化的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(3): 314-322.

ZHONG H Y, HAN J L, WANG Z J. Research on the evolution of metallic jets with different structural parameters of Zr-based amorphous alloy liner[J]. Foundry Technology, 2026, 47(3): 314-322.

波压力下加速、压垮后会形成射流,增加侵彻深度^[2]。门罗效应发现后,药型罩的概念也被提出,铜因其密度高(8.9 g/cm^3)、声速高(4.7 km/s)、延展性和导热性良好、价格低廉等广泛应用于药型罩制备。

但随着现代化钻探技术发展,石油射孔对扩孔深度与孔径的要求日益增加,传统铜材料制备的药型罩难以满足现代化钻孔、岩石破碎的侵彻需求。为提升铜药型罩的综合侵彻能力,中外学者提出了两种主要手段,第一种是提升铜的纯度和细化铜的晶粒度;第二种方法是通过将铜药型罩与其它含能材料药型罩复合,制备材料复合药型罩^[3-4]。非晶合金具备高断裂强度、高硬度、高化学成分活性等优势,且非晶合金在高应变率下会形成由离散粒子组成的特殊射流,有望与传统材料进行复合,提升聚能装药结构的综合侵彻能力^[5-7]。

非晶合金最早发现于 20 世纪 30 年代,德国科学家 Kramer^[8]首次通过热蒸沉积法成功制备了非晶态的 Sb。哈佛大学学者 Turnbull^[9]于 1951 年研究发现液态金属快速过冷至熔点之下可抑制其晶核的形成,该发现为非晶合金的制备提供了理论基础。1960 年加州理工学院的 Klement 和 Duwez^[10]利用喷枪对金属液体进行快速冷却,制备出了 $\text{Au}_{75}\text{S}_{25}$ 非晶合金薄片。随后贝尔实验室的陈鹤寿团队首次以 10^3 K/s 的冷却速率成功制备了长度为 $1\sim 3\text{ mm}$ 的 Pd 基非晶合金棒材。该研究标志着非晶合金块体的成功制备,同时为非晶合金于聚能装药上的应用提供了可能性^[11]。为进一步推广非晶合金的应用,降低其制备成本,Inoue 等^[12-15]通过控制金属熔体非均质形核,采用 B_2O_3 包覆净化法实现了较低过冷度下多主元的非晶合金制备,此项发现极大降低了非晶合金的制备成本。随后,Inoue 团队于 2000 年成功开发出 Cu 基、Co 基的非晶合金。

目前非晶合金材料已广泛应用于航空航天、国防军工、医疗、汽车等领域^[16]。真空压铸法制备的 Zr 基非晶合金可用于新能源汽车锁盖,手机外壳等领域^[17]。同时 Fe 基非晶合金因其优异的力学性能和耐腐蚀性可作为涂层材料提升传统合金的表面性能^[18]。此外,非晶合金作为一种新兴的活性含能材料,可在高温高压环境下发生剧烈的爆燃反应,这种特性也使得非晶合金在聚能装药等领域有着广泛的应用前景^[19-20]。

Zr 基非晶合金形成的射流具有良好的连续性,由于射流本质是离散粒子,因此不会因头尾速度差产生颈缩现象,射流成型稳定后,其密度基本不会随时间变化,密度大小分布从轴心到表面逐渐递减^[20-22]。

经过长达数十年的研究,目前非晶材料的制备成本已经大幅降低,并且制备工艺也较为成熟,Zr 基非晶合金具有良好的工程应用前景。前期相关研究发现 ZrAlNiCu 非晶合金是一种处于亚稳态的材料,在冲击或是高温条件下,由亚稳态向稳态(非晶态到晶态)转变。转变过程伴随内部化学反应,而释放大量的热,可作为一种含能材料应用于药型罩当中。相关研究表明,在射流侵彻靶板时非晶射流可发生晶化反应,释放能量扩大侵彻孔径^[22-23]。此外,Zr 基非晶合金射流由分散性较大的高速粒子组成,其射流特点十分适合于扩大侵彻孔径^[24-27]。但非晶合金药型罩相较于传统药型罩仍存在侵彻深度不足等问题,且射流离散型较大,对装药高径比等结构参数有着严苛的要求。为进一步提升聚能装药结构的扩孔能力,同时保证射流的侵彻深度,本文将 ZrAlNiCu 非晶合金与高纯无氧铜进行复合,并通过数值模拟研究其射流形态。进行正交实验并优化药型罩结构参数,探索 Zr 基非晶复合药型罩的最佳装药高径比,为非晶合金在聚能装药领域的应用提供理论支持^[27-31]。

1 Zr 基非晶药型罩的数值模型与实验验证

自门罗效应被用于石油射孔、爆破钻孔、岩石破碎等工程领域以来,随着钻孔要求的不断提升,作为聚能装药结构的核心构件,药型罩的研究也不断深入。针对不同侵彻需求,各国先后设计出单锥形、双锥形、郁金香形等不同结构的药型罩。其中双锥药型罩采用上锥角与下锥角相互配合的几何结构,通过设计上、下锥不同的角度,可以提升金属射流的稳定性,延长其断裂时间,从而提高侵彻深度。除此之外,双锥药型罩可以针对不同侵彻扩孔需求灵活配置上、下锥材料,以达到更好的侵彻效果。在爆轰波的作用下,双锥药型罩的上锥部分会被率先压垮,形成头部射流。因此通过改变上、下锥的材料组成,可以控制射流头部与随进射流的组成。

为保证药型罩的穿深与后效,同时兼顾加工成本,设计聚能装药结构与加工成型的药型罩实物如图 1a 和 b 所示。药型罩上部锥角为 60° ,由高纯无氧铜组成,用于保证侵彻深度;下部锥角为 100° ,由 Zr 基非晶合金组成,用于增加射流扩孔直径,上、下锥之间通过内螺纹连。图 1a 所示药型罩结构,上、下锥角变化幅度较小,便于加工成型。药型罩上、下锥分界明显,便于实现内外药柱起爆时爆轰波耦合叠加。药型罩采用变壁厚结构,有利于提升射流的连续性、侵彻深度。

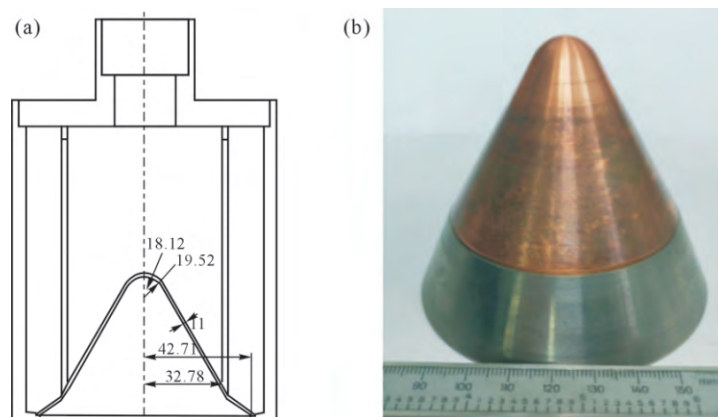


图1 双锥药型罩:(a) 结构图;(b) 实物图

Fig.1 Geometrical configurations of different liners: (a) schematic; (b) photograph

1.1 双锥罩数值模型

聚能装药射流形态主要通过有限元法进行模拟,主要使用的模拟软件有 LS-dyna、S-ALE、Autodyn 等^[32-34]。其中,针对射流成型及形态分析,Autodyn 软件已具有相当的应用基础,并有实验结果多次验证其模拟准确度^[31]。模拟试验采用 Autodyn-2D 欧拉网格域,建立 Zr 基非晶合金药型罩及聚能装药结构的数值仿真模型,数值模型中装药、药型罩材料及其状态方程、本构方程列于表 1,且状态方程可靠性已由文献[16-18]验证。

表1 材料状态方程及强度模型
Tab.1 Material state equation and strength model

Component	Material	Equation of state	Strength model
Explosive	8701	JWL	-
Liner	Oxygen-free high-conductivity	Shock	-
Liner	Zr-based amorphous alloy	Lee-tarve	-
Target materials	45#Steel	Shock	Johnson-cook

Shock 冲击状态方程为:

$$D_s = c_0 + S_c u_p \quad (1)$$

式中, D_s 为冲击速度; S_c 为常数; c_0 为固体材料的声速; u_p 为冲击波加载后的粒子速度。

Johnson-Cook 本构方程如式(2)所示:

$$\sigma = [A_1 + B_1(\bar{\epsilon}_p)n](1 + C_1 \ln \epsilon^*)[1 - (T^*)^m] \quad (2)$$

$$\epsilon^* = \epsilon_p / \epsilon_0 \quad (3)$$

式中, σ 为等效应力; n 为应变强化指数; A_1 为参考应变率和温度下材料的屈服强度; B_1, C_1, m 分别为应变强化系数、应变率敏感系数和温度软化系数; $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变; ϵ^* 为参考应变率下的无量纲应变率; ϵ_p 为应变率; ϵ_0 为参考应变率。

采用 JWL 状态方程描述爆炸气体的膨胀,表达

式为:

$$P(V) = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} \quad (4)$$

式中, A, B, R_1, R_2, w 为常数,与炸药种类相关; V 为爆炸产物的相对比容, $V = \rho_0 / \rho$, ρ_0 为爆炸产物的初始密度, ρ 为爆炸产物的密度。

Lee-Tarver 模型常用于点火和扩散模拟计算,该模型假设点火从局部热点开始,并由局部热点向外扩散,并将反应过程分为点火,扩散,反应完成 3 个阶段,反应速率由式(5)给出。

$$\frac{d\lambda_z}{dt} = 1(1-x)^b(\eta_s - 1 - a)^c + G_1(1-\lambda_z)^c \lambda_z^d p^\gamma + G_2(1-\lambda_z)^e \lambda_z^g p_1^\gamma \quad (5)$$

式中, λ_z 为已反应炸药的质量分数; η_s 为受冲击的未反应炸药相对密度; p_1 为局部压力, Mbar; t 为时间, μs ; $I, a, b, x, G_1, c, d, \gamma, G_2, e, g$ 和 z 均为常数。

据上述方程建立数值仿真模型如图 2 所示,实际制备材料参数如表 2 所示。

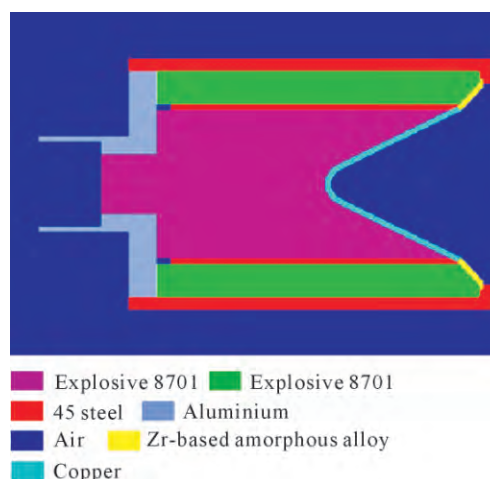


图2 Zr 基非晶药型罩数值模型示意图

Fig.2 Numerical model schematic of the Zr-based amorphous alloy liner

表2 材料参数
Tab.2 Material parameters

Material	Density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Gruneisen, γ	$c_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_c	Temperature /K
Copper	8.900	2.00	3 958	1.497	300
Zr-BMGs	6.400	-	4 400	0.580	300
45#Steel	7.896	2.17	4 569	1.490	300

2 数值仿真

2.1 正交试验设计与分析

聚能装药结构引爆过程中,双锥药型罩受内、外药柱殉爆形成的爆轰波加载。在此种爆轰波加载状态下,Zr 基非晶合金双锥罩形成的射流主要受罩高比、装药高径比、壁厚 3 个因素影响。根据上述影响因素建立 $L_9(33)$ 型正交表。影响因素与水平如表 3 所示。表 3 中 δ 为药型罩壁厚, f 为罩高比, f_1 为装药高径比,其表达式如下:

$$f=h_1/h \quad (6)$$

$$f_1=H/d_0 \quad (7)$$

式中, h_1 为药型罩上锥高度; h_2 为药型罩下锥高度; H 为装药高度; d_0 为装药直径。

表3 影响因素与水平
Tab.3 Influencing factors and levels

Serial number	δ/mm	f	f_1
1	1.4	4.21:1	0.8
2	1.8	5.36:1	1.0
3	2.2	6.58:1	1.2

表 4 为正交试验的试验参数及试验结果,表中 T 为射流断裂时间, S 为射流头部速度。由表 4 中正交模拟试验得出射流断裂前形态如图 3 所示。图 3

表 4 数值仿真方案与结果

Tab.4 Numerical simulation scheme and results

Serial number	δ/mm	f_1	f	$T/\mu\text{s}$	$S/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	1.4	0.8	4.21:1	4.598	6 996.9
2	1.4	1.0	5.36:1	3.077	9 456.9
3	1.4	1.2	6.58:1	3.450	9 616.5
4	1.8	1.2	4.21:1	2.159	15 555.0
5	1.8	0.8	5.36:1	6.244	11 760.0
6	1.8	1.0	6.58:1	3.413	8 261.6
7	2.2	1.0	4.21:1	4.001	7 576.3
8	2.2	1.2	5.36:1	2.998	11 223.0
9	2.2	0.8	6.58:1	6.558	6 154.6

中黄色部分表示 Zr 基非晶射流,蓝色部分表示高纯无氧铜射流。由图 3 可得,Zr 基非晶复合药型罩形成的射流头部由铜射流组成,可完成初步侵彻。中、后部由非晶射流和铜射流组合构成,可完成侵彻孔的扩孔,进一步增大穿深与侵彻孔径。相较于纯铜药型罩形成的射流,Zr 基非晶复合药型罩形成的射流具备多元侵彻的优势,通过两种不同射流复合,增加药型罩的扩孔能力与穿深能力。

2.2 Zr 基非晶合金复合药型罩结构参数相关性分析

将表 4 中 δ, f, f_1 作为自变量, T 作为因变量进行线性回归分析,模型公式为:

$$T=8.671+1.013\delta-7.327f_1+0.444f \quad (8)$$

该模型 R^2 为 0.846,表明 δ, f, f_1 可以解释 T 的 84.6% 变化原因。对模型进行 F 检验时发现式(8)模型可以通过 F 检验($F=9.132, p=0.018<0.05$)。 δ, f, f_1 中至少一项会对 T 产生影响关系, δ 的回归系数值为 1.013 ($t=1.339, p=0.238>0.05$),意味着 δ 并不会对 T 产生影响关系; f_1 的回归系数值为 -7.327 ($t=-4.843, p=$

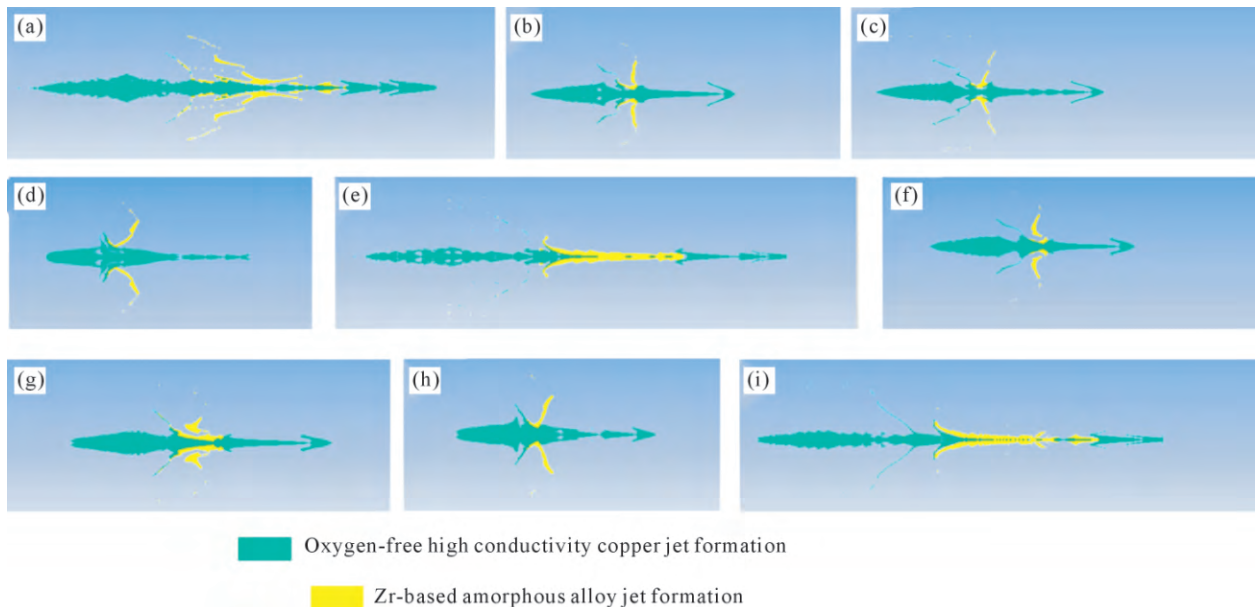


图3 表4中模拟射流断裂前形态示意图:(a~i) 1~9号结构参数仿真结果

Fig.3 Schematic diagram of jet formation before fracture in Table 4: (a~i) jet formation analysis of types 1~9 structural liners

0.005<0.01), 意味着 f 会对 T 产生显著的负向影响关系; f 的回归系数值为 0.444 ($t=1.467, p=0.202>0.05$), 意味着 f 并不会对 T 产生影响关系。综上所述, f_1 会对 T 产生显著的负向影响关系, 但是 δ 和 f 并不会对 T 产生影响关系。

将 δ, f, f_1 作为自变量, 而将 S 作为因变量进行线性回归分析, 模型公式为:

$$S=292.228-46.517 \times \delta+956.917 \times f_1-101.592 \times f \quad (9)$$

模型 R^2 为 0.221, 意味着 δ, f, f_1 可以解释 S 的 22.1% 变化原因。对模型进行 F 检验时发现式(9)模型并没有通过 F 检验 ($F=0.474, p=0.714>0.05$), 表明 δ, f, f_1 并不会对 S 产生影响关系, 因而不能具体分析自变量对于因变量的影响关系。

聚能装药结构引爆时, 内药柱起爆, 爆轰波先加载在高纯无氧铜上锥部分, 随后外药柱殉爆, 将爆轰波加载于非晶下锥。爆轰波加载过程是非连续性的, 因 Zr 基非晶合金形成的射流是离散的高速粒子, 炸药输入的能量一部分转变为非晶射流的动能。装药高径比增加, 非晶射流的离散性越大, 粒子速度也越快。而药型罩上锥部分形成的铜射流受装药高径比的影响较小。罩高比主要影响射流的爆轰波的加载状态, 罩高比减小, 非晶部分增多, 导致炸药爆炸产生的能量主要转化为铜射流的动能。上、下锥部获得动能差距较大, 因此射流断裂时间提前, 此时药型罩头部射流稳定性较差。罩高比减小, 非晶下锥部与炸药接触面积增大, 获得动能增多, 上、下锥部获得动能逐渐接近, 因此药型罩形成的射流不易被拉断, 射流稳定性较好, 但射流头部速

度降低。

由表 4 可得, δ 为 1.8 mm 时, 药型罩射流成型稳定。由图 3 可得罩高比为 $f(h_1/h_2)=6.58:1$ 时非晶射流与铜射流配制合理。射流头部由铜射流组成, 非晶粒子分布在射流中部, 具较好的凝聚性, 被充分拉长且未发生断裂, 此种状态下非晶粒子能够充分发挥侵彻扩孔作用。由式(8)分析可得装药高径比未影响射流稳定性的主要因素。为进一步优化射流的侵彻能力, 需确定此种结构下的最佳的装药高径比与最佳炸高, 从而获得有最佳侵彻效果的聚能装药结构。

2.3 Zr 基非晶复合药型罩最佳装药高径比分析

分析表 4 可得装药高径比较大时, 射流的速度会大幅提升。不同材料密度不同, 输入相同能量时获得的速度不同。因此, 头部铜射流速度和中、后部非晶射流存在一定的速度差, 输入能量过大会进一步增大两部分射流的速度差, 影响射流的稳定性, 降低其毁伤效果。

为研究不同装药高径比下, Zr 基非晶复合药型罩射流的演化规律, 确定药型罩壁厚 $\delta=1.8$ mm 时, 罩高比 $f(h_1/h_2)=6.58:1$ 下的最佳装药高径比, 在不同装药高度下模拟其射流成型过程。

试验参数与结果如表 5 所示, 表 5 中 T 为射流断裂时间, S 为射流头部最大速度, L 为射流断裂时长度。不同装药高度下的 Zr 基非晶复合药型罩射流断裂前形态图 4 所示。由图 4 可得, 在装药高径比达 1.4 后射流断裂时长度有显著增加。结合表 5 分析可得, 在装药高径比达 1.4 时, 输入能量达到阈值, 使得爆轰波速度进一步提升, 在爆轰波的耦合叠加下, 射流

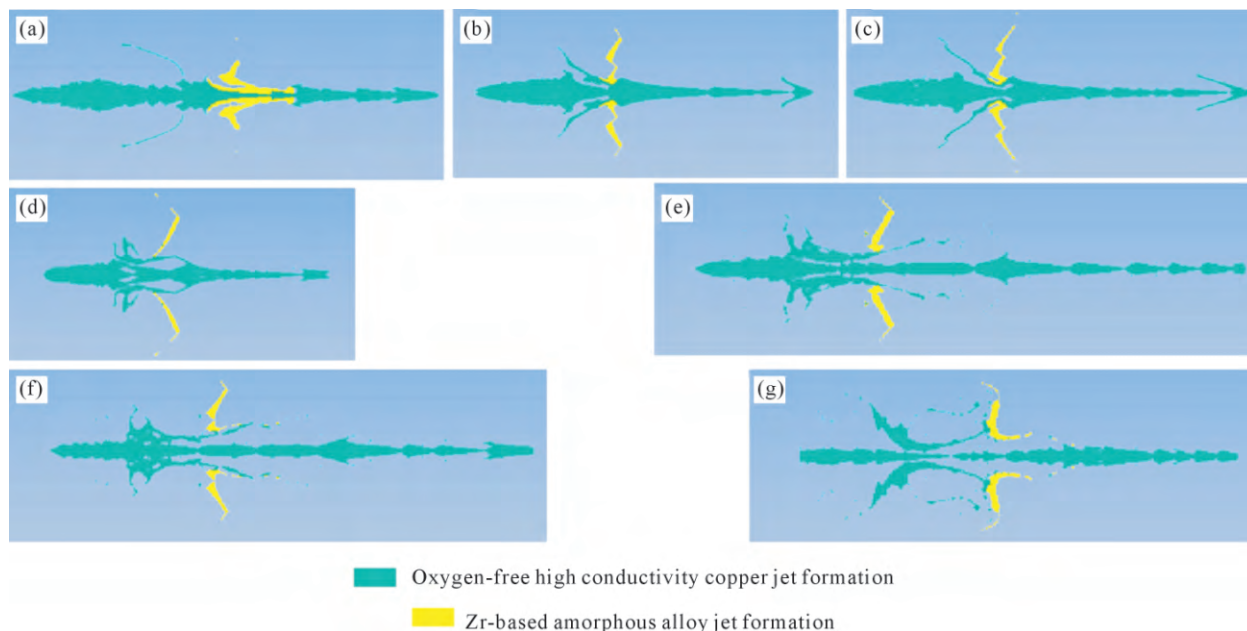


图 4 不同装药高径比下 Zr 基非晶药型罩射流形态演化: (a) 0.8; (b) 1.0; (c) 1.2; (d) 1.4; (e) 1.6; (f) 1.8; (g) 2.0

Fig.4 Evolution of jet morphology for Zr-based amorphous alloy liners with different charge height-to-diameter ratios: (a) 0.8; (b) 1.0; (c) 1.2; (d) 1.4; (e) 1.6; (f) 1.8; (g) 2.0

表5 不同装药高径比下Zr基非晶合金射流模拟结果
Tab.5 Simulation results of Zr-based amorphous alloy jet under different charge height-to-diameter ratios

δ/mm	f	f_1	$T/\mu\text{s}$	$S/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	L/mm
1.8	6.58:1	0.8	4.141	6 902.8	220.8
1.8	6.58:1	1.0	3.163	11 221.0	173.8
1.8	6.58:1	1.2	3.524	11 246.0	174.1
1.8	6.58:1	1.4	2.597	17 640.0	137.2
1.8	6.58:1	1.6	3.103	16 602.7	213.6
1.8	6.58:1	1.8	3.391	7 675.9	201.4
1.8	6.58:1	2.0	3.200	3 031.1	163.3

头部速度显著增加,在极短的时间内,射流可充分拉长。在不同装药高径比下射流断裂前头部速度、射流断裂时间和射流断裂时长度的演化规律如图5所示。

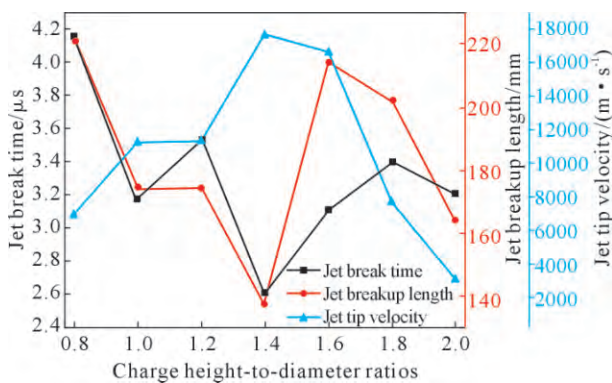


图5 不同装药高径比下的射流头部速度、射流断裂时间和射流断裂时长度

Fig.5 Jet tip velocity, breakup time and breakup length under different charge height-to-diameter ratios

由图5可得,随着装药高径比的增加,射流断裂时间先减小后增加,最终达到稳态。射流头部速度随装药高径比的增加,先增加并在达到峰值后缓慢下降,而射流断裂时长度随着装药高径比增加先降低。在装药高径比达1.4时射流头部速度达到峰值,此装药高径比下,射流被快速拉断,极不稳定。装药高径比为1.4时未引起装药壳体提前破裂,较高的能量可使Zr基非晶合金药型罩快速压垮,部分高速粒子快速飞出,因此射流速度测量值较高。装药高径比为1.6时,45#钢壳体提前破裂,提前泄压,部分

能量由壳体破裂出释放,射流头部速度小幅下降的同时,射流可充分伸展。随着装药高径比进一步增加,装药壳体破损剧烈,爆轰波不再耦合叠加,爆轰波因壳体破裂发生干涉,使得射流速度降低,射流稳定性也受到大幅度扰动,射流断裂时间提前,射流断裂时长度减小。装药高径比为1.6时,射流形态主要受耦合叠加的爆轰波影响,提前泄压仅对射流形态形成轻微干扰,此时,射流速度合理,射流可充分拉伸,同时射流具有较高的稳定性。

聚能射流的综合侵彻能力由射流稳定性与射流头部速度共同决定。结合表5和图5分析可得,在1.6倍装药高径比下,射流头部速度合理,且在此装药高径比下,射流主要受耦合叠加的爆轰波影响,射流断裂时间回升至3.103 μs, Zr基非晶药型罩头部射流充分拉伸,射流断裂时长度可达213.6 mm,具备较强侵彻穿深能力,射流的头部速度最大可以达到16 602.7 m/s。此种装药高径比下,射流稳定性较装药高径比为1.4有较大提升。结合图4射流头部形态判断,装药高径比为1.6时射流头部呈圆锥形排布,射流头部凝聚性较强,Zr基非晶合金形成的随进射流充分拉伸,此种射流状态具有较好的综合侵彻和扩孔能力。

2.4 优化结构最佳炸高分析

对于一定结构的聚能装药结构,其毁伤能力受炸高影响较大。炸高过低射流无法充分拉伸,炸高过高拉伸长度超过自身材料拉伸极限而断裂,这两种状态均对毁伤效果产生不利影响。为进一步优化聚能装药结构的综合侵彻能力,采用数值模拟的试验方法,确定优化后聚能装药结构的最佳炸高。图6为聚能射流速度模拟方案及试验结果。图6a中于药型罩形成射流杆体头部与尾部设置测速点,对其速度进行检测,检测结果如图6b所示,分析图中速度曲线可得,射流断裂前头部速度可达16 347.1 m/s。基于超聚能射流结构基础,在装药上采用内外药柱叠加的爆压耦合结构。该结构在引爆炸药时可形成耦

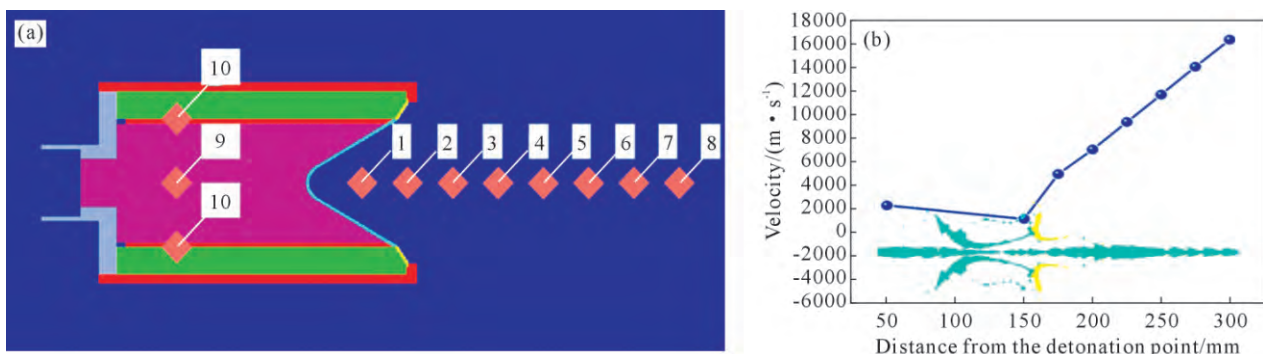


图6 射流速度模拟:(a)测速点位置;(b)射流断裂前速度分布

Fig.6 Simulation of jet velocity: (a) location of velocity measurement points; (b) velocity distribution before jet breakup

合爆轰波使得头部速度略高于传统超聚能射流(最高约 15 213.0 m/s)^[35]。如图 6b 所示,随着射流的行程增加,射流头部速度缓慢降低,但降低幅度较小,测度点范围内,射流头部速度基本保持不变。因此,优化后的聚能装药结构的最佳炸高主要受射流稳定性影响。

为确定射流断裂前长度,对优化后药型罩射流形态随时间变化过程进行模拟。模拟结果如图 7 所示,起爆后,内药柱被率先引爆,在药型罩轴线附近形成局部高压区。图 7b 中,分割内、外药柱的 45# 钢壳体破裂,内药柱产生的爆轰波已扩展到外药柱表面,对外药柱施加冲击,迅速将外药柱引爆;图 7c 中,外药柱被殉爆,同时形成爆轰波;图 7d 中,外药柱中的爆轰波以弧形向外传播,落后于内药柱爆轰波。此时,内药柱爆轰气体不断向外膨胀引爆外药柱,同时也使内爆压降低,被引爆的外药柱爆压明显高于此时刻内爆压,使内爆压发生强反射,并在轴线上耦合叠加增强形成高压冲击波。耦合叠加的冲击波迅速压垮药型罩,使其形成高速金属射流。射流于引爆后 3.103 μs 拉断,聚能射流长度为 213.6 mm。此时,聚能射流达到断裂前最大拉伸长度,接触靶标可在保证射流连续性的情况下,对靶标进行高效侵彻。由图 6b 中射流头部速度计算可得 3.103 μs ,射流头部前进距离约为 60 mm,考虑到装配公差,优化后聚能装药结构最佳炸高范围为(60 $\pm$ 10) mm。

2.5 实验验证

为了验证数值模型的合理性,同时该装药结构

验证大炸高下的侵彻能力,设计静爆试验如图 8 所示。试验现场布置如图 8a 所示,药型罩上部为高纯无氧铜;下锥部为 Zr 基非晶;炸药装药为 8 701;名义压药密度为 1.70 g/cm³;炸高为 220 mm;炸药与药型罩之间采用虫胶漆黏结。靶柱为 45# 钢,尺寸为 $\phi 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。

射流侵彻靶板穿孔如图 8b 所示。非晶射流的入孔形貌及数值仿真结果见图 8b 和 c,图中靶柱表面烧蚀现象明显。这种烧蚀现象是由 Zr 基非晶合金射流接触靶板后氧化释能灼烧所致,靶板侵彻孔洞入口处有明显的扩张行为。数值仿真中的入孔直径为 29.53 mm,侵彻深度为 138.08 mm。数值仿真与试验相比,入孔直径的误差为 17.97%,侵彻深度的误差为 2.46%。显然,数值仿真的入孔直径误差较大,这是因为没有考虑 Zr 非晶射流的扩孔效应。数值模拟靶板穿孔形态与靶试实验接近,且穿深误差较小,证明数值模型有效可靠。分析图 8b 侵彻穿孔入口形态可知,侵彻孔洞入口处明显宽于中部和底部,说明 Zr 基非晶药型罩在侵彻过程中起到了明显的扩孔作用,该聚能装药结构于 4 倍最佳炸高下内仍具有较强侵彻和扩孔能力。

3 结论

(1)模拟了 Zr 基非晶药型罩的射流形态,验证了其射流与侵彻模式更加多元,头部铜射流完成开孔,中、后部的 Zr 基非晶和铜形成的混合射流可完成扩孔,并进一步提升穿深。

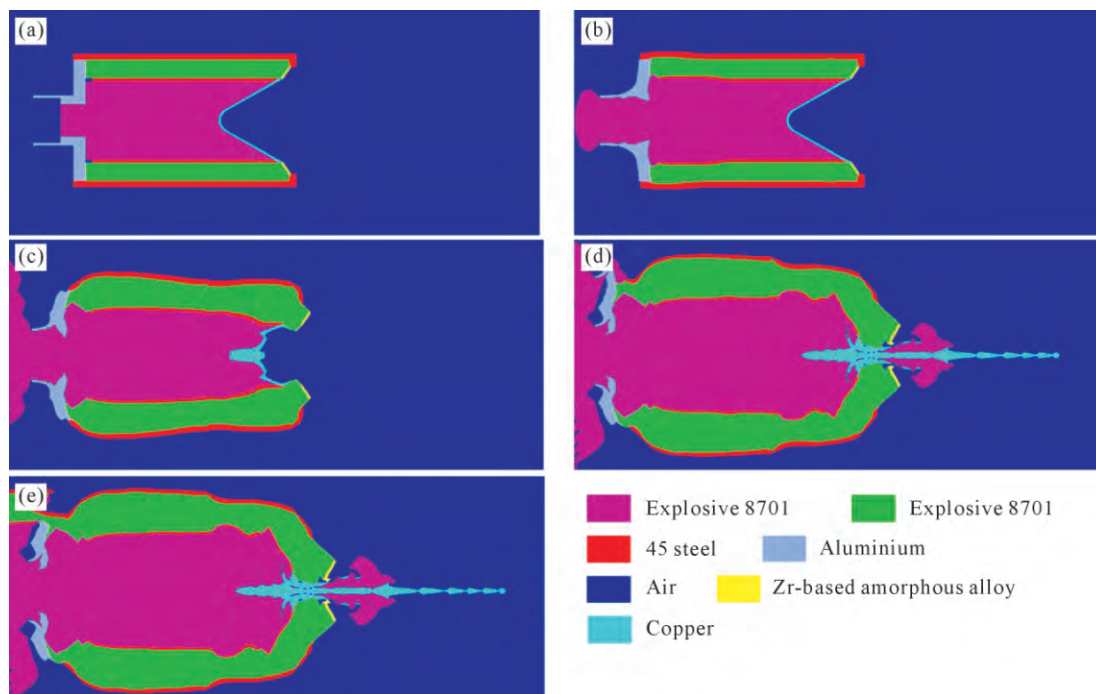


图 7 聚能装药优化结构射流随时间演变:(a) 0 μs ; (b) 1 μs ; (c) 2 μs ; (d) 3 μs ; (e) 3.103 μs

Fig.7 Temporal evolution of the shaped charge jet with the optimized structure: (a) 0 μs ; (b) 1 μs ; (c) 2 μs ; (d) 3 μs ; (e) 3.103 μs

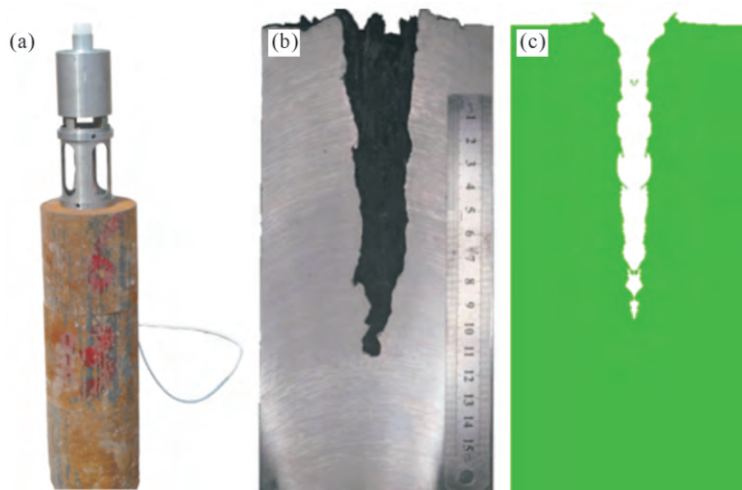


图8 静爆试验:(a)静爆试验布置图;(b)射流侵彻后靶板;(c)有限元模型模拟侵彻后靶板

Fig.8 Static detonation test: (a) setup of the static explosion test; (b) target plate after jet penetration; (c) finite element model simulation of the penetrated target plate

(2)探究了装药高径比、装药高度、药型罩壁厚三个结构因素对射流的稳定性、头部速度的影响规律,因爆轰波的非连续加载和双锥罩上下锥的材料差异,罩高比为Zr基非晶合金复合药型罩射流稳定性的主要影响因素,罩高比增加射流头部速度不断增加,射流稳定性降低。

(3)确定了1.6倍装药高径比为Zr基非晶合金药型罩的最佳装药高径比,此种炸高下形成的射流头部速度最大可以达到16 602.7 m/s,具备较高侵彻能力的同时射流稳定性较好,确定了优化后聚能装药最佳炸高范围为 (60 ± 10) mm。

(4)靶板穿孔孔深数值仿真结果与试验结果的误差仅为2.46%,穿孔形貌与模拟结果相近。数值模拟与试验结果符合较好,验证了数值模型的可靠性,证明了该聚能装药结构于4倍最佳炸高下仍具有较强侵彻和扩孔能力。

参考文献:

- [1] MUNROE C E. Modern explosives[J]. Scribners Magazine, 1888 (3): 563-576.
- [2] NEUMANN M. Einiges über brisante Sprengstoffe[J]. Gesamte Schiess-und Sprengstoffwesen, 1911, 47: 2233-2240.
- [3] 徐文龙,王成,徐斌.超聚能射流形成过程机理研究[J].兵工学报,2018,39(2): 261-268.
XU W L, WANG C, XU B. Investigation of hyper shaped charge jet formation theory[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(2): 261-268.
- [4] 孟凡迪.铜基药型罩的动态性能及射流仿真研究[D].大连:大连理工大学,2020.
MENG F D. Study of dynamic properties and jet simulation for Cu-based liners[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [5] GENG Y X, LYU K Y, ZAI C F, ZHANG Z J, KUNWAR A. A high-strength TiB₂-modified Al-Si-Mg-Zr alloy fabricated by laser powder-bed fusion[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters),

2025, 38: 542-554.

- [6] BIAN Z, HE G, CHEN G L. Compressive mechanical properties and fracture morphology of Zr_{52.5}Cu_{17.9}Ni_{14.6}AlTi₅ bulky amorphous alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2000, 13(6): 1141-1147.
- [7] DUAN L P, WANG K, WANG E A, JIA P. Precipitation of α -Fe from Fe_{84.2}Si₄B_{12.8} ($x=1, 3$) amorphous alloys under high magnetic field annealing [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34: 1163-1172.
- [8] KRAMER J. Über nichtleitende metallmodifikationen[J]. Annalen der Physik, 1934, 411(1): 37-64.
- [9] TURNBULL D. Kinetics of solidification of supercooled liquid mercury droplets [J]. The Journal of Chemical Physics, 1952, 20 (3): 411-424.
- [10] KLEMENT W, WILLENS R H, DUWEZ P. Non-crystalline structure in solidified gold-silicon alloys[J]. Nature, 1960, 187: 869-870.
- [11] DUTOIT M, CHEN H S. Frequency and temperature dependence of ultrasonic attenuation in glassy Pd-Si-based metal alloy[J]. Applied Physics Letters, 1973, 23(7): 357-358.
- [12] INOUE A, ZHANG T, MASUMOTO T. The structural relaxation and glass transition of La-Al-Ni and Zr-Al-5Cu amorphous alloys with a significant supercooled liquid region[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1992, 150(1-3): 396-400.
- [13] INOUE A, ZHANG T, MASUMOTO T. Glass-forming ability of alloys[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1993, 156-158: 473-480.
- [14] INOUE A, ZHANG W, ZHANG T, KUROSAKA K. Cu-based bulk glassy alloys with high tensile strength of over 2 000 MPa[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2002, 304(1-3): 200-209.
- [15] INOUE A, SHEN B L, KOSHIDA H, KATO H, YAVARI A R. Ultra-high strength above 5 000 MPa and soft magnetic properties of Co-Fe-Ta-B bulk glassy alloys [J]. Acta Materialia, 2004, 52(6): 1631-1637.
- [16] NOORBAKSH R Z, OSTOVAN F, TOOZANDEHJANI M. Fe-based amorphous alloy coatings: A review[J]. Advanced Engineering Materials, 2024, 26(11): 2302184.
- [17] 李阳嘉,王成勇,丁峰,赖志伟,唐学成,陆菲,刘旺杰,杨慧雯,

- 申曦. 锆基非晶合金螺纹孔铣削加工工艺优化研究[J]. 工具技术, 2025, 59(3): 65-72.
- LI Y J, WANG C Y, DING F, LAI Z W, TANG X C, LU F, LIU W J, YANG H W, SHEN X. Research on process optimization of thread hole milling in zirconium-based amorphous alloys[J]. Tool Engineering, 2025, 59(3): 65-72.
- [18] 李纪阳. 激光熔覆 Fe 基非晶合金涂层的研究现状[J]. 湖南有色金属, 2024, 40(4): 74-79.
- LI J Y. Research progress on laser cladding Fe-based amorphous alloy coating[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2024, 40(4): 74-79.
- [19] 崔平, 许艳丽, 翟安琪, 张芮郢, 徐喆航. 锆基非晶合金含能射流大炸高形态与毁伤性能试验研究[J]. 火工品, 2025(3): 53-59.
- CUI P, XU Y L, ZHAI A Q, ZHANG R Z, XU Z H. Experimental investigation on the shape and damage performance of Zr-based amorphous alloy energetic jet under high stand-off[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2025(3): 53-59.
- [20] 王志裕, 智小琦, 王洪伟, 于永利. 锆基非晶合金破片侵彻碳纤维及后效 LY12 靶的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(9): 123-133.
- WANG Z Y, ZHI X Q, WANG H W, YU Y L. Experimental study of Zr-based amorphous alloy fragmentation penetration through CFRP and post-effective LY12 targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(9): 123-133.
- [21] HAN J L, CHEN X, DU Z H, FU H M, CHENG C, XU L Z, WANG J B, DU C X. Compressive mechanical properties of W-particle/Zr-based amorphous alloy composites[J]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 085206.
- [22] HAN J L, CHEN X, DU Z H, FU H M, JING Y D, YUAN T, CHENG C, DU C X, XU L Z. Application of W/Zr amorphous alloy for shaped charge liner[J]. Materials Research Express, 2019, 6(11): 115209.
- [23] HAN J L, CHEN X, DU Z H, FU H M, HUANG D W. Design and penetration of a new W-particle/Zr-based amorphous alloy composite liner[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42: 364.
- [24] 胡勇, 闫红红, 闫志杰, 党淑娥, 李永堂. $Zr_{50}Ti_5Cu_{18}Ni_{17}Al_{10}$ 块体非晶合金的热稳定性[J]. 铸造技术, 2010, 31(2): 158-161.
- HU Y, YAN H H, YAN Z J, DANG S E, LI Y T. Thermal stability of $Zr_{50}Ti_5Cu_{18}Ni_{17}Al_{10}$ bulk amorphous alloy[J]. Foundry Technology, 2010, 31(2): 158-161.
- [25] 索忠源, 姜峰, 王鑫, 张志浩, 王毅坚. 退火对 $Ti_{35}Zr_{30}Be_{24}Cu_{7.5}Co_{3.5}$ 块体非晶合金耐磨性的影响[J]. 铸造技术, 2017, 38(11): 2640-2642.
- SUO Z Y, JIANG F, WANG X, ZHANG Z H, WANG Y J. Effect of annealing on wear resistance of $Ti_{35}Zr_{30}Be_{24}Cu_{7.5}Co_{3.5}$ bulk amorphous alloy[J]. Foundry Technology, 2017, 38(11): 2640-2642.
- [26] 张震, 王金贺, 李正坤, 付华萌, 杨红旺, 李宏, 朱正旺, 张海峰. 锆基非晶合金及其复合材料的非等温晶化动力学行为[J]. 铸造技术, 2023, 44(8): 763-770.
- ZHANG Z, WANG J H, LI Z K, FU H M, YANG H W, LI H, ZHU Z W, ZHANG H F. Non-isothermal crystallization kinetics of zirconium-based amorphous alloys and composites[J]. Foundry Technology, 2023, 44(8): 763-770.
- [27] OUYANG X Q, LONG W Y, BIAN J Z, GAO C, LU A X. Si_3N_4 -doped $Zr_{50}Al_{15}Ni_{10}Cu_{25}$ glassy alloy by mechanical alloying and sintering process[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17: 1125-1128.
- [28] SUCHKOV A N, BAZDNIKINA E A, BONDAREVA J V, FIRSOV D G, EVLASHIN S A, MOROKHOV P V, GORBUNOV D S, POPOVA K A, PETROVSKIY V N, OVSYANKIN I R, SAMOKHIN A V, FADEEV A A, PESIN A M, PUSTOVOITOV D O, KOZLOV I V, SEVRYUKOV O N. Impact of manufacturing method on the properties of bulk amorphous $Zr_{35}Ti_{30}Be_{25}Cu_{10}$ alloy[J]. Intermetallics, 2025, 185: 108859.
- [29] LIU J F, LONG Y, JI C, ZHONG M S, LIU Q. The influence of liner material on the dynamic response of the finite steel target subjected to high velocity impact by explosively formed projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 109: 264-275.
- [30] ZHUO L C, ZHANG Y H, CHEN Q Y, LIANG S H, CHEN L, ZOU J T. Fabrication and properties of the W-Cu composites reinforced with uncoated and nickel-coated tungsten fibers[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 71: 175-180.
- [31] 韩继龙. 新型 W/Zr 非晶复合药型罩的成型机理及毁伤研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- HAN J L. Research on the forming mechanism and damage performance of novel W/Zr amorphous composite liners[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [32] 杨佳浩, 吴越, 王天根, 李淦. 填充介质对组合式多药型罩射流的影响研究[J/OL]. 兵器材料科学与工程, 2025. <https://doi.org/10.14024/j.cnki.1004-244x.20250717.001>.
- YANG J H, WU Y, WANG T G, LI G. Research on the influence of packing medium on the jet of combined multi-charge liner[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2025. <https://doi.org/10.14024/j.cnki.1004-244x.20250717.001>.
- [33] 王艺臻, 尹建平, 张雪朋, 伊建亚, 李旭东. 聚能射流动态侵彻威力预测模型[J]. 兵工学报, 2025, 46(6): 285-292.
- WANG Y Z, YIN J P, ZHANG X P, YI J Y, LI X D. A prediction model for dynamic penetration of shaped charge jet[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(6): 285-292.
- [34] LI J R, LU Y G, LIANG B, XU H W, CHEN X, ZHANG J. Numerical study and theoretical model of shaped charge jet penetrating into thick-walled target with following velocity[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2024, 2024(1): 7646255.
- [35] 胡晓敏, 刘迎彬, 胡晓艳, 孙森, 赵家骏. 药型罩结构对超聚能射流性能影响的数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2019, 40(9): 41-45.
- HU X M, LIU Y B, HU X Y, SUN M, ZHAO J J. Numerical Simulation on the effect of the structure of hypercumulation formation shaped charge liner[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2019, 40(9): 41-45.

(责任编辑: 杨浩雪)