

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0388

电磁驱动高速弹丸成型模式与影响因素*

黄炳瑜^{1,2}, 陈学秒², 张旭平², 熊玮¹, 王桂吉², 张先锋¹, 税荣杰², 胥超², 谭福利²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了研究电磁驱动药型罩形成高速成型弹丸的可行性及弹丸成型特性, 基于CQ-7脉冲功率装置, 开展了电磁驱动线性药型罩形成弹丸技术实验。结合激光多普勒测速技术, 实现了电磁驱动药型罩形成弹丸的速度测量和侵彻铝靶验证。同时, 基于流体动力学软件和相应电磁仿真模块, 建立了电磁驱动弹丸成型的物理模型和数值模拟方法, 模拟了弹丸成型和侵彻铝靶的动力学过程, 利用实验结果验证了数值模拟方法的可靠性。在此基础上, 研究了等壁厚球缺型药型罩的结构参数以及加载能量对弹丸成型参数的影响规律。结果表明: 外曲率半径对弹丸的头部速度影响较小, 而头部速度会随壁厚的减小和加载能量的增大显著增加; 弹丸的长径比随外曲率半径和壁厚的减小、加载能量的增大呈逐渐增加的趋势。最后, 利用数值模拟方法预测并验证了利用电磁驱动技术获得高速度和大质量成型弹丸的可行性。

关键词: 电磁驱动; 高速成型弹丸; 线性药型罩; 球缺型药型罩; 成型模式

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Modes and influencing factors of electromagnetically driven high velocity formed projectile

HUANG Bingyu^{1,2}, CHEN Xuemiao², ZHANG Xuping², XIONG Wei¹, WANG Guiji²,

ZHANG Xianfeng¹, SHUI Rongjie², XU Chao², TAN Fuli²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: To investigate the feasibility and characteristics of high-velocity formed projectile formation driven by electromagnetic loading, exploratory experiments of projectile formation by electromagnetically driven the linear liner were conducted using the pulsed power generator CQ-7. Photon Doppler velocimeter (PDV) was employed to measure the velocity of the electromagnetic-driven projectiles and validate their penetration into aluminum targets. A physical model and numerical simulation method for electromagnetic-driven projectile formation were established using fluid dynamics software and corresponding electromagnetic simulation modules. The changes in current density and magnetic pressure during the electromagnetic loading stage were studied and the dynamic processes of projectile formation and penetration into aluminum targets were simulated. The numerical simulation method was verified through the comparison between numerical results and experimental data. Based on this, the influences of liner configuration and loading energy on the projectile formation parameters of equal wall thickness hemispherical liner were explored. The results indicate that the outer curvature radius has a minor impact on the head velocity of the projectile, while the head velocity significantly increases with decreasing wall

* 收稿日期: 2023-10-24; 修回日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(11972031, 92166201, 12141202);

第一作者: 黄炳瑜(1995—), 男, 博士研究生, 749883860@qq.com

通信作者: 张旭平(1988—), 男, 博士, 副研究员, xupingzhang@sina.cn

thickness and increasing loading energy. The aspect ratio of the projectile gradually increases with decreasing outer curvature radius and wall thickness, as well as increasing loading energy. The conversion between quasi-spherical and long rod-shaped projectile modes can be achieved by changing the structural parameters, and for the same structural parameter, the conversion between two modes can be achieved by controlling the loading energy. Finally, the feasibility of obtaining high-velocity and high-mass-formed projectiles using electromagnetic-driven technology was predicted using numerical simulation methods, and it can be figured out from the results that a projectile with a higher velocity and larger mass can be formed by increasing the loading energy and the sizes of the shaped liner, effectively breaking through the velocity limit of a traditional penetrator driven by explosive detonation.

Keywords: electromagnetically driven; high velocity formed projectile; linear liner; hemispherical liner; forming mode

爆炸成型弹丸是利用炸药的爆轰作用,将金属药型罩压垮、闭合形成的具有一定速度和结构形状的弹丸,并以动能对目标进行毁伤^[1]。根据不同的装药结构,可分为长杆形、准球形以及带围裙弹丸^[2-3]。弹丸的成型受装药类型、药型罩材料、药型罩结构参数、炸药性能和起爆方式等多种因素的影响,众多学者^[4-7]对弹丸的成型规律和侵彻性能开展了大量研究。由聚能装药的作用原理和有效装药理论^[8]可知,炸药爆轰过程中存在爆轰产物飞散、爆轰波传播过程难以控制、加载至药型罩上的能量不集中等问题;同时由于结构限制,装药存在加载极限,因此弹丸的侵彻威力很难进一步提高,目前,成型弹丸速度一般在 1 500~3 000 m/s。电磁驱动是利用脉冲功率装置产生的大电流(兆安量级)对负载结构进行放电、电流流经负载与其自身感应磁场相互作用产生强电磁力、对负载结构进行强烈压缩和高速驱动的实验技术。电磁驱动具有加载能量与驱动源大小成正比、加载波形易调节等优点,具备实现大幅提升弹丸速度及其侵彻威力的潜力,开展电磁驱动成型弹丸研究具有重要应用前景和价值。

根据负载结构(平面、柱面、丝阵等)的不同,电磁驱动可实现平面高速飞片发射、套筒内爆和聚能射流等加载,在冲击动力学、高能量密度物理领域和材料高压物理特性研究等方面已有广泛应用^[9-16]。电磁驱动技术理论上没有加载能力上限,美国 Sandia 实验室基于 Z 装置已实现速度高达 45 km/s 的厘米级尺寸铝飞片发射、 $10^4\sim 10^5$ m/s 的套筒内爆^[17]; Grace 等^[18]在 Shiva Star 装置上实现了头部速度达到 9 300 m/s、速度梯度小、侵彻能力强的金属射流,以上工作充分展现了电磁驱动技术在高速发射和聚能毁伤领域的极大应用潜力。中国在电磁驱动加载技术方面也取得较大进展:张旭平^[9]利用 CQ-7 装置实现了 10 km/s 以上小尺寸固体飞片发射和套筒内爆;Huang 等^[19]对电磁驱动药型罩的压垮过程和射流成型过程进行了研究,基于优化结构实现了头部速度为 11 300 m/s 的高速射流,为新型聚能毁伤技术研究提供了新的思路和技术基础。以上电磁驱动实验技术主要以飞片发射、套筒内爆、射流成型为主,关于成型弹丸尚未有相关报道。另外,电磁驱动成型弹丸经历金属药型罩压垮、闭合过程,从负载结构、电磁力作用方式、弹丸成型物理过程、工程应用方法等,均与电磁驱动飞片发射、套筒内爆、聚能射流存在显著不同。因此,系统开展电磁驱动药型罩形成高速弹丸成型模式与影响因素研究具有重要意义。

本文中,首先基于电磁驱动聚能实验技术,开展电磁驱动线性药型罩的速度历史测量和弹丸侵彻铝靶验证实验;然后结合三维磁流体动力学程序和流体动力学软件,构建电磁驱动线性药型罩形成高速弹丸的物理模型和数值模拟方法,并结合实验结果进行了可靠性验证;在此基础上,利用数值模拟方法系统地开展了电磁驱动球缺型药型罩形成弹丸的初步研究,分析弹丸成型过程,研究外曲率半径、壁厚和加载能量对弹丸成型模式和参数的影响规律;最后通过改变加载条件和药型罩尺寸,预测并验证利用电磁驱动技术获得高速度和大质量成型弹丸的可行性。

1 电磁驱动高速弹丸成型及侵彻实验

1.1 实验原理

电磁驱动线性药型罩或球缺型药型罩形成高速弹丸的原理见图 1,电流从正负极板的内表面流过,

感应磁场与电流相互作用产生磁压力 p , 驱动药型罩运动。驱动原理与电磁驱动平面飞片相近, 不同之处在于将平面飞片构型设计成带有一定弧度的线性药型罩或球缺型药型罩, 改变磁压力的加载方向, 使药型罩向内汇聚形成弹丸。

药型罩表面磁压力 p 与线电流密度 j 的平方成正比^[9]:

$$p = k\mu_0 j^2 / 2 \quad (1)$$

式中: k 为电极构型系数, μ_0 为真空磁导率。

1.2 实验设计

实验平台为中国工程物理研究院流体物理研究所研制的紧凑型大电流脉冲功率产生装置 CQ-7^[20], 装置在充电电压为 ± 65 kV 的条件下, 短路电流峰值可达 7 MA, 主要性能参数如表 1 所示。结合装置驱动能力, 设计一种平面对称的变壁厚线性药型罩, 其横截面为圆缺形, 内外曲率半径分别为 21.5 和 23.5 mm, 中心厚度为 0.75 mm, 长度和宽度分别为 20 和 10 mm, 材料选择无氧铜。

为了获取电磁驱动药型罩形成弹丸的成型结果, 采用光子多普勒测试技术 (photon Doppler velocimeter, PDV)^[21-22] 对成型过程中的弹丸速度进行了实时测量, 实验布局如图 2(a) 所示, 所采用探针直径为 2.5 mm, 通过探针固定装置安装在药型罩中轴线上。通过 Rogowski 线圈测量实验电流。

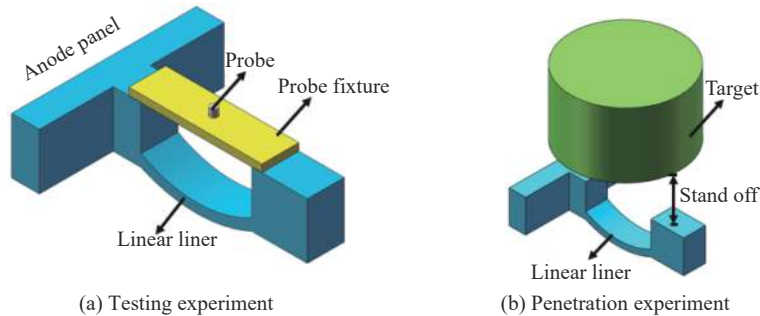


图 2 实验布局

Fig. 2 Layout of experiment

为了研究电磁驱动形成弹丸的毁伤能力, 同时考虑到所用药型罩质量较小, 靶板选择铝靶, 侵彻实验布局如图 2(b) 所示, 铝靶尺寸为 $\varnothing 50$ mm \times 60 mm, 炸高为 20 mm。针对上述药型罩和靶标, 进行了不同充电电压下的电磁驱动药型罩形成弹丸的速度测量和侵彻实验, 实验条件如表 2 所示。

1.3 实验结果

图 3 为实验所测的电流波形和速度演化曲线, 由实验结果可看出, 当充电电压从 ± 45 kV 加大到 ± 55 kV 时, 电流峰值由 3.06 MA 增大到 3.83 MA, 而电流半周期几乎保持不变。加载磁压力随电流增大

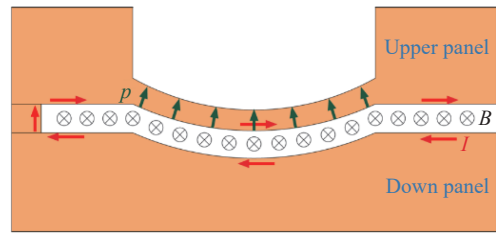


图 1 电磁驱动线性/球缺型药型罩原理图

Fig. 1 Illustration for driving linear/hemispherical liner by electromagnetic loading

表 1 CQ-7 的电参数

Table 1 Electrical parameters of CQ-7

电容/ μ F	电感/nH	电阻/m Ω	充电峰值电压	上升时间
20.48	4.12	3.35	± 65 kV	400~700 ns

表 2 实验条件

Table 2 Experimental conditions

实验	实验类型	充电电压/kV
Shot-1	PDV测速	± 45
Shot-2	侵彻铝靶	± 45
Shot-3	PDV测速	± 55
Shot-4	侵彻铝靶	± 55

而增大, 药型罩加速度随之增大, 导致弹丸最终速度增大, Shot-1 和 Shot-3 实验获得的弹丸头部速度分别为 2243 和 3306 m/s。

Shot-2 和 Shot-4 实验条件分别与 Shot-1 和 Shot-3 一致, 图 4 给出了两发实验侵彻铝靶实验结果照片。从靶面破坏情况可看出, 靶体在受侵彻时, 材料会受挤压导致表面产生翻边现象。由于所用线性药型罩为平面对称结构, 磁压力对药型罩向内的压垮作用主要体现在长度方向上, 药型罩在向内汇聚时长度会越来越短, 而宽度几乎保持不变。因此将靶面破坏情况分为长度和宽度方向分别测量, 如图 4 中的蓝线所示。Shot-2 和 Shot-4 实验弹丸在药型罩宽度方向上造成靶体开孔直径为 16.3 和 16.7 mm, 长度方向上的开孔直径为 14.2 和 17.1 mm, 二者差异的主要原因是 Shot-4 实验充电电压较高, 其形成弹丸速度更高, 因此开孔更大。

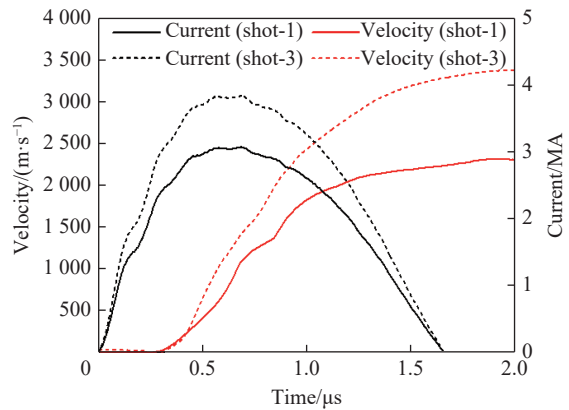


图 3 电流波形图和速度剖面

Fig. 3 Current and velocity profile

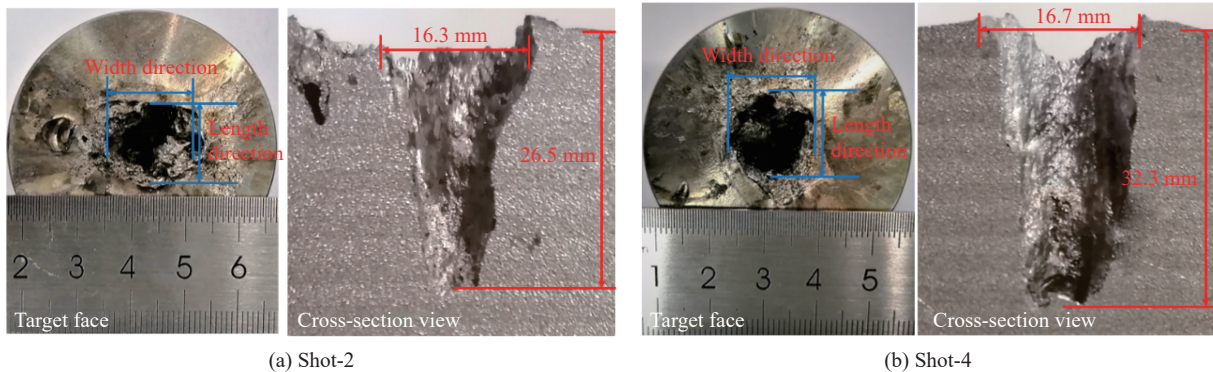


图 4 弹丸侵彻铝靶实验结果

Fig. 4 Experimental results for penetration of aluminum targets by projectiles

从图 4 可看出, 电磁驱动线性药型罩形成的弹丸对铝靶有一定的侵彻能力, 但侵彻孔道不光滑, 且观察到孔道中的铝材料出现了熔化又凝固的现象。分析认为, 电磁加载过程中焦耳热的产生导致侵彻体温度较高, 同时铝靶受到弹丸冲击产生温升, 二者共同作用使得受侵彻区域的温度超过铝的熔化温度。

2 电磁驱动高速弹丸成型及侵彻过程数值模拟

结合三维磁流体动力学程序和流体动力学软件对电磁驱动药型罩形成弹丸进行数值计算。首先采用磁流体动力学程序计算电流加载阶段, 得到磁场强度、电流密度、洛伦兹力等电磁学和力学参数。接着将磁压力作为初始边界条件重新载入流体动力学软件中进行求解, 得到完整的弹丸成型过程。

2.1 电磁加载过程数值仿真模型及参数

电磁驱动形成弹丸过程是电-磁-力-热的多场耦合过程, 三维磁流体动力学程序中将电磁计算、力学计算和热学计算相互耦合^[23-24], 其中采用有限元法求解电磁场, 采用边界元法求解周围空气和绝缘体的电磁场。程序采用拉格朗日算法, 三维模型中要求划分六面体网格, 如图 5 所示, 将模型导入计算程序并添加相关材料模型, 以电流作为输入条件, 即可完成计算。

由于高频电流的趋肤效应导致电流沿厚度方向分布不均匀, 因此划分网格时, 为减小趋肤效应的影

响,应根据趋肤深度沿厚度方向划分相应层数的网格。本文中厚度方向网格尺寸统一为 0.15 mm,线性药型罩的长度和宽度方向网格尺寸为 0.3 mm,而球缺型药型罩周向网格尺寸在 0.3~0.5 mm 之间。

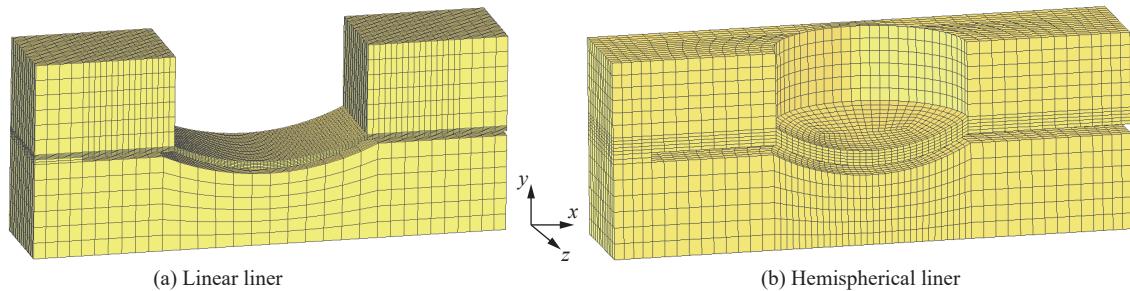


图 5 电磁加载过程数值模拟模型

Fig. 5 Numerical simulation models for electromagnetic loading process

极板材料为无氧铜,选用 Johnson-Cook 本构模型,该模型可用于模拟材料在高应变率和高温下的变形,状态方程选择 Mie-Gruneisen 状态方程,模型参数选取来源于文献 [25]。材料的电导率与温度、密度等密切相关,电导率模型选择 Burgess 模型^[26],只考虑固相和液相,参数见表 3,其中: V_0 为比体积; γ_0 为 Grüneisen 值; $\theta_{m,0}$ 为熔化温度; L_F 为熔化潜热; K 为判定材料电阻率的参数,对于某一特定金属材料, K 为常数。

表 3 无氧铜的 Burgess 电导率模型参数

Table 3 Parameters of Burgess electrical resistivity model for Cu-OFHC

$V_0/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	γ_0	$\theta_{m,0}/\text{eV}$	$L_F/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	K
0.112	2.00	0.117	0.13	0.964

2.2 弹丸成型及侵彻过程仿真模型及参数

采用流体动力学软件中的二维轴对称方法对弹丸成型及侵彻过程进行计算,弹丸成型模型和侵彻铝靶模型如图 6 所示。图 6(a) 中模型由药型罩及空气组成,药型罩采用拉格朗日算法,网格尺寸与三维

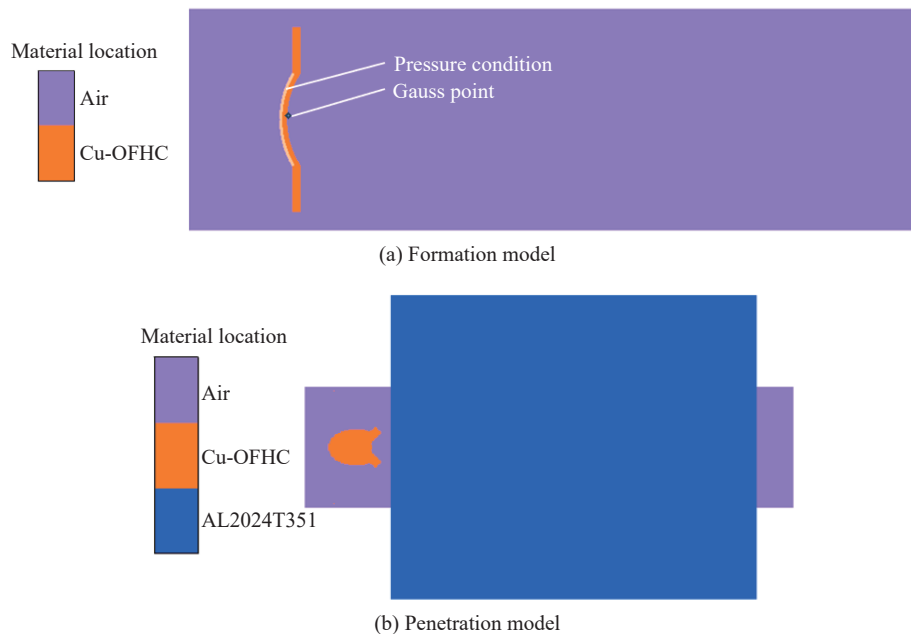


图 6 弹丸成型及侵彻过程仿真模型

Fig. 6 Numerical simulation models for projectile formation and penetration process

模型中网格尺寸一致,并在药型罩表面施加磁压力边界条件;空气采用欧拉算法,网格大小为 $0.2\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ 。在加载阶段,磁压力作用在拉格朗日网格上,当加载时间结束后,采用“Part Fill”功能将拉格朗日网格替换为欧拉网格,以防止拉格朗日网格畸变导致计算终止。计算一定时间后,建立靶板模型,进行侵彻计算,如图 6(b) 所示。靶板采用渐变网格,加密处网格大小为 $0.2\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$,在末端添加固定约束用来模拟靶板固定条件。模型中药型罩材料选择无氧铜(Cu-OFHC),靶板材料选择材料库中的 AL2024T351,两者均选用 Mie-Grüneisen 状态方程和 Johnson-Cook 本构模型,参数均来源于流体动力学软件材料库。

2.3 磁压力转换方法

通过三维磁流体动力学程序可以得到电流密度、磁场强度和洛伦兹力等信息,并不能获得加载过程中的磁压力曲线。由式(1)可知,磁压力与电流密度的平方成正比,且与电极构型系数 k 有关。 k 值大小与电极板材料、宽度及极板间隙等因素有关,本节通过磁流体动力学程序与流体动力学软件之间的耦合计算来确定 k 值。

通过磁流体动力学程序模拟实验 Shot-1,图 7(a) 给出了药型罩中心电流密度沿厚度的分布,由于趋肤效应,电流主要集中在加载面上,后续计算只考虑加载面上的电流密度。图 7(b) 为从线性药型罩的中心到端面的电流密度曲线,由于药型罩厚度从中心到两端由 0.75 mm 减小为 0.59 mm ,电流密度从中心到两端逐渐增大。

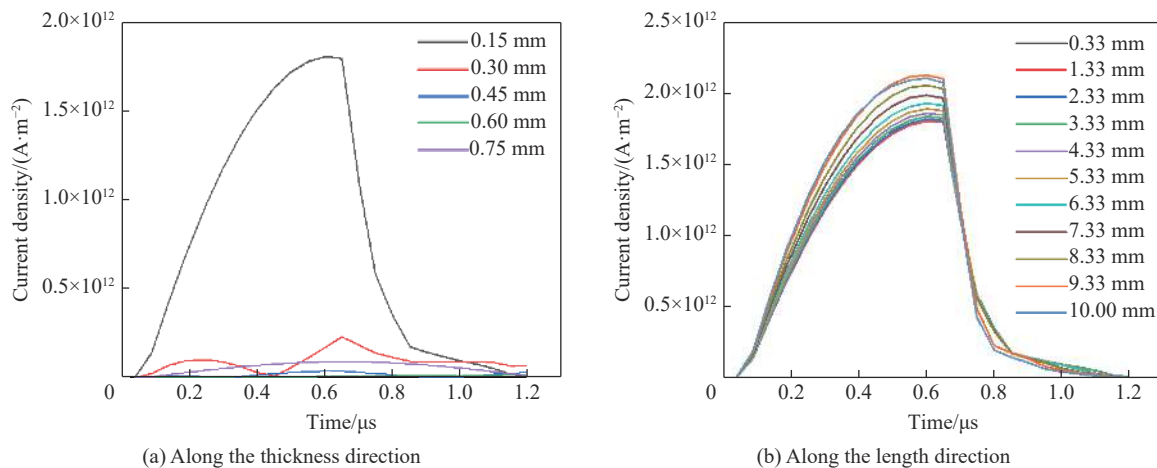


图 7 电流密度分布

Fig. 7 The distribution of current density

程序所得电流密度为面电流密度,结合网格尺寸计算得到线电流密度,代入式(1)即可得到不考虑 k 值的磁压力,该值远大于真实磁压力。故假定一个 k 值计算得到磁压力曲线,将其作为边界条件导入流体动力学软件后进行计算,由高斯点得到速度演化曲线,并与三维磁流体动力学程序输出的速度曲线进行对比,当二者接近时,该 k 值即为真实电极构型系数。当极板间隙为 0.5 mm , k 取 0.37 时,得到磁压力曲线见图 8。由磁流体动力学程序与流体动力学软件计算得到药型罩中心速度曲线较为吻合,如图 9 所示。

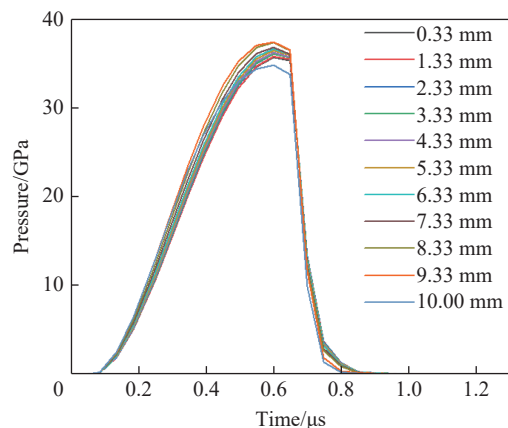


图 8 磁压力变化曲线 ($k=0.37$)

Fig. 8 Changing curves of magnetic pressure

2.4 弹丸成型和侵彻过程分析

磁流体动力学程序和实验得到的速度演化曲线如图 10 所示。由于三维磁流体动力学程序采用拉格朗日网格, 在计算后期网格大变形导致计算终止, 此时实验测量的速度已无明显的上升趋势。由图 10 可看出磁流体程序计算得到的速度演化趋势与实验测量结果一致, 在计算终止时刻, 对于 Shot-1, 其速度模拟值达到了 2 288 m/s, 实验值为 2 243 m/s, 误差为 2.0%, 对于 Shot-3, 其速度模拟值达到了 3 353 m/s, 实验值为 3 306 m/s, 误差为 1.4%, 证明了数值模拟方法的可靠性。

将由实验电流计算获得的加载磁压力导入模型中, 分别模拟了 Shot-1 实验和 Shot-3 实验。图 11 为数值模拟得到的 Shot-1 和 Shot-3 实验的弹丸成型过程, 可看出当磁压力开始加载, 整个药型罩发生变形, 在顶部压垮的同时, 由于药型罩口部厚度较薄, 其压垮速度较高, 弹丸成型方式类似于“W”折叠形。根据位移和预置靶位置, 可以确定到靶时间。Shot-1 实验所形成弹丸到达铝靶时刻为 7.2 μs , 由于 Shot-3 实验的充电电压较高, 弹丸速度更高, 到达铝靶时刻为 5.3 μs 。

图 12 为弹丸侵彻铝靶过程, 以弹丸到靶时间作为零点, 两发实验现象和侵彻过程相近。在开坑初期, 未完全压垮的药型罩口部首先与靶板碰撞。同时, 由于药型罩顶部不断压垮并在轴线发生碰撞, 弹丸头部有向射流演化的趋势, 且其速度更高, 弹丸头部会追赶上边缘同时对靶板进行侵彻。随着侵彻进行, 边缘材料沿着侵彻孔道向外翻转, 弹丸的直径和速度不断减小, 导致侵彻孔径逐渐减小, 最终呈现出漏斗状的破坏形貌。图 13 和表 4 对比了侵彻铝靶的实验和数值模拟结果, 可以看出, 数值模拟所得数据与实验结果误差较小, 进一步说明了数值模拟方法的可靠性。

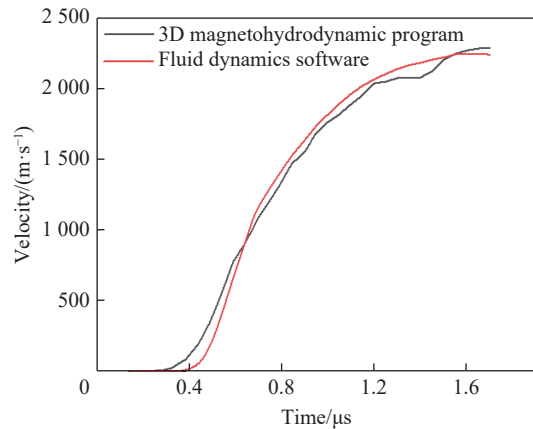


图 9 速度演化曲线对比

Fig. 9 Comparison of velocity evolution curves

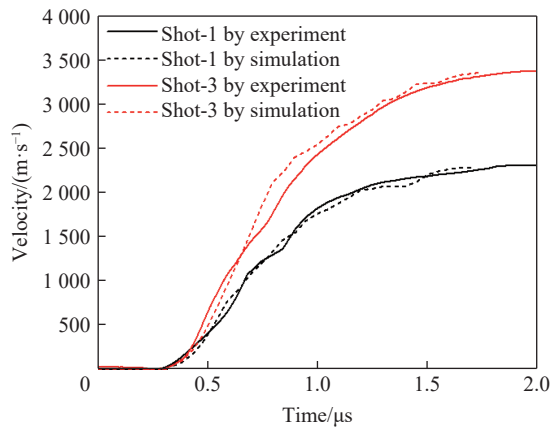


图 10 速度剖面

Fig. 10 Velocity profile

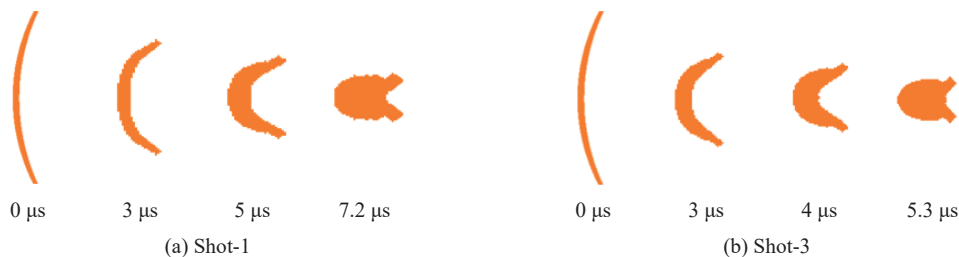


图 11 弹丸成型过程

Fig. 11 Formation processes of formed projectile

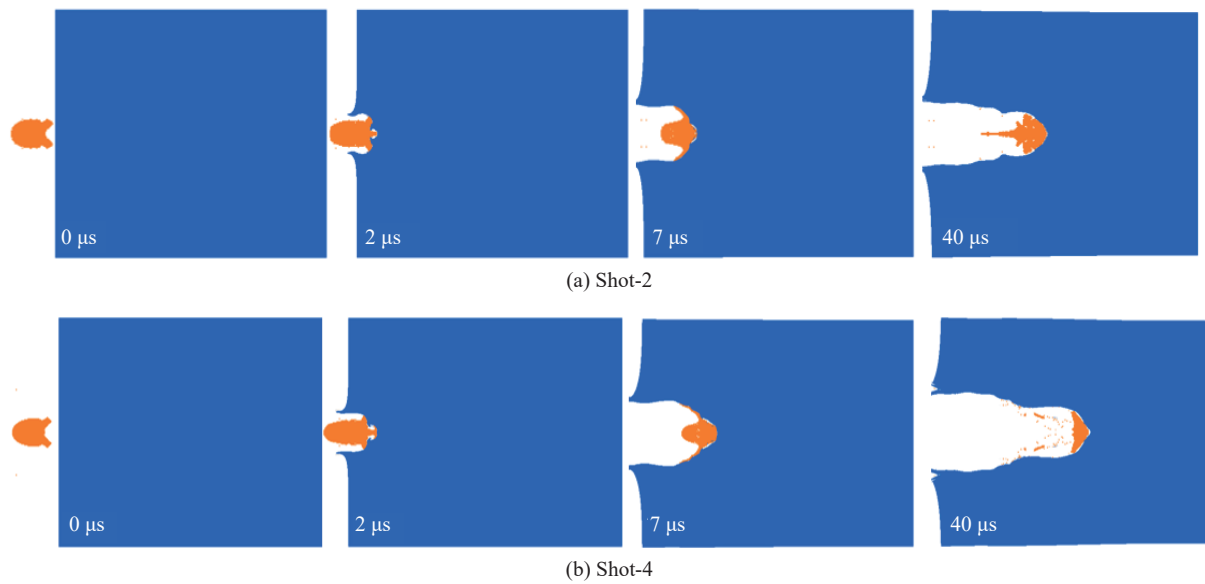


图 12 侵彻过程 (以弹丸到靶时间作为起始时刻)

Fig. 12 Penetration processes (Starting when the projectile arrivals at the target)

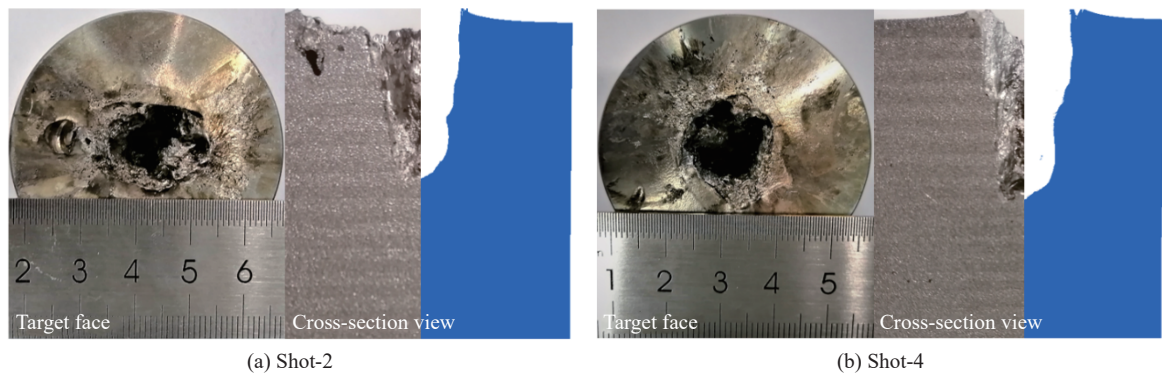


图 13 侵彻实验与数值模拟结果对比

Fig. 13 Comparison between penetration experiments and numerical simulations results

表 4 实验与数值模拟侵彻数据对比

Table 4 Comparison of the penetration data between experiments and numerical simulations

编号	方法	侵彻深度/mm	相对误差/%	开孔尺寸/mm	相对误差/%
Shot-2	实验	26.5	7.1	14.2×16.3	4.2
	计算	28.4		14.8	
Shot-4	实验	32.3	2.8	17.1×16.7	-3.0
	计算	33.2		16.6	

3 电磁驱动药型罩形成弹丸影响因素分析

传统炸药加载球缺型药型罩形成弹丸的研究中,药型罩内外曲率半径、顶部厚度和装药长径比是影响弹丸性能的主要因素。且由弹丸有效装药结构理论可知,当装药量达到极限值时,增加装药并不会显著增强弹丸性能。在验证数值模拟模型及参数可靠性的基础上,本节分析电磁驱动球缺型药型罩结构参数和加载能量对弹丸成型模式及成型参数的影响规律。

3.1 电磁驱动球缺型药型罩弹丸成型过程

电磁驱动等壁厚球缺型药型罩的弹丸成型计算中, 加载电流峰值为 3 MA、半周期为 1.3 μs , 药型罩口径 $\varnothing 10 \text{ mm}$ 、外曲率半径 10 mm、壁厚 0.75 mm。图 14 为球缺型药型罩的 1/4 模型, 同时显示了加载面上所选取同一半径下的不同单元。图 15 为各单元的电流密度变化曲线, 从图 15(a)~(c) 可看出, 不同单元的电流密度曲线几乎完全重合, 而图 14(d) 中在接近药型罩口部处不同位置单元的电流密度有一定波动, 但总体上仍表现出较好的一致性, 表明电磁驱动球缺型药型罩加载均匀性较好。

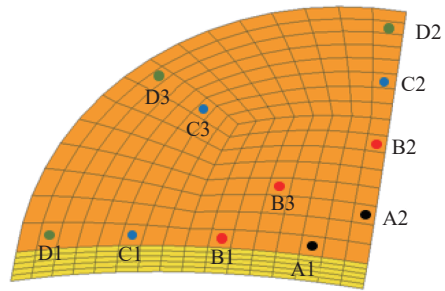


图 14 球缺型药型罩 1/4 模型
Fig. 14 1/4 model of the hemispherical liner

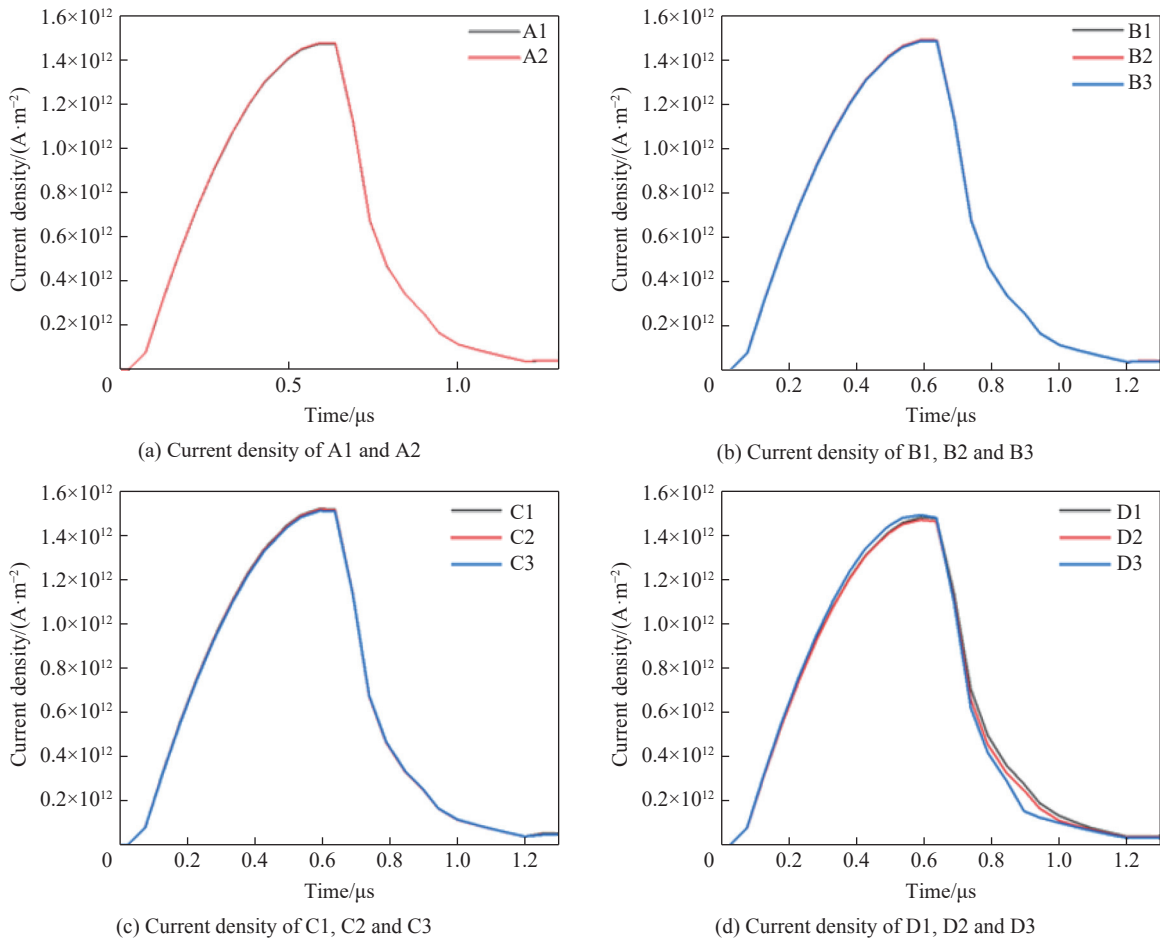


图 15 各单元电流密度曲线对比

Fig. 15 Comparison of current density curves for selected elements

图 16 为加载磁压力曲线, 图 17 为等壁厚球缺型药型罩的弹丸形成过程。可以看出, 磁压力由药型罩中心到边缘先增大后减小。当电容器开始放电, 磁压力瞬时加载至整个药型罩上, 药型罩整体被压垮、变形。随着磁压力增大, 药型罩变形加剧, 但由于磁压径向分量较小, 药型罩内表面仅产生压合而不会发生碰撞, 使靠近外表面的材料轴向运动受阻, 靠近内表面的材料轴向运动加快, 因而药型罩顶部逐渐加厚。由于边缘处磁压力相对较小, 且在向内运动的过程中受到电极的拉应力, 一部分药型罩发生断

裂,一部分药型罩材料在弹丸周围行成了类似“裙形”的结构。最终在 15 μs 时形成了速度均匀分布且稳定的弹丸构型,此时弹丸速度为 1320 m/s。

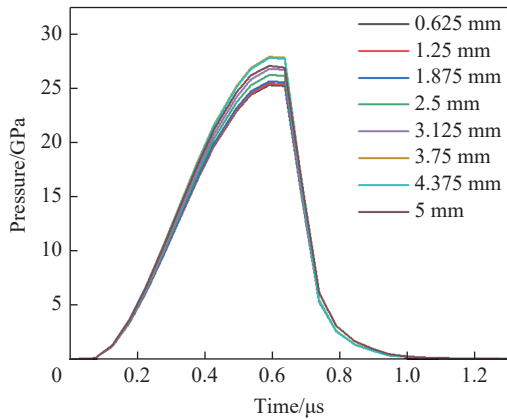


图 16 磁压力变化曲线

Fig. 16 Changing curves of magnetic pressure

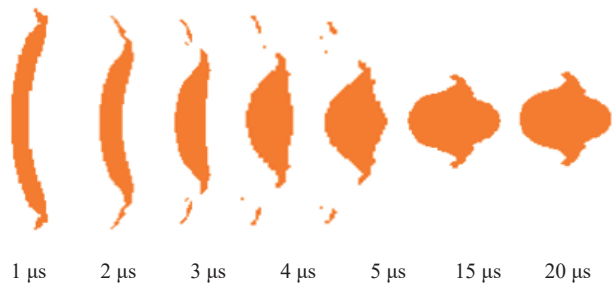


图 17 等壁厚球缺型药型罩的侵彻体形成过程

Fig. 17 Formation processes of penetrators of hemispherical flyer with equal wall thickness

3.2 电磁驱动球缺型弹丸成型模式影响因素分析

3.2.1 外曲率半径的影响

以球缺型药型罩口径 D 为量化指标,固定其壁厚为 $0.075D$,外曲率半径 R 的范围为 $0.8D \sim 1.2D$ (每种方案增加 $0.1D$),在同一加载条件下模拟得到弹丸成型图如图 18 所示,头部速度 v_{tip} 、头尾速度差 Δv 、长径比 l/d 的变化规律如图 19 所示。从图 19 可看出,当外曲率半径在 $0.8D \sim 1.2D$ 范围内,弹丸头部速度变化不明显,且头尾速度差仅为数米每秒,可认为在所计算的外曲率半径范围内,所有结构均形成了头尾速度一致的弹丸。结合图 18 可看出,曲率半径为 $0.8D$ 的药型罩形成了较大长径比的长杆状弹丸,这是因为较小的曲率半径改变了磁压力的作用方向,磁压力的径向分量更大,使单元更容易向轴线压合,而磁压力轴向分量变小导致弹丸速度略有降低。当外曲率半径在 $0.8D \sim 1.1D$,随着外曲率半径的增大,侵彻体成型模式由长杆状弹丸向准球形弹丸发展,且侵彻体速度略有提高。而当曲率半径为 $1.2D$ 时,弹丸长径比小于 1。准球形弹丸的飞行稳定性最好,长杆状弹丸侵彻能力较强,针对不同的作用条件,可选取不同的外曲率半径以形成不同形态的弹丸。本文主要研究各因素对弹丸成型的影响,不考虑具体作用条件,因此在后续的计算中将外曲率半径固定为 $0.9D$ 。

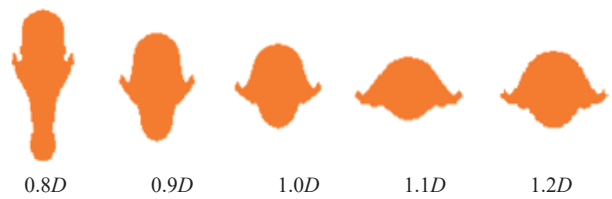


图 18 不同外曲率半径下弹丸成型图(30 μs)

Fig. 18 Formation shapes of projectiles with different external curvature radii (30 μs)

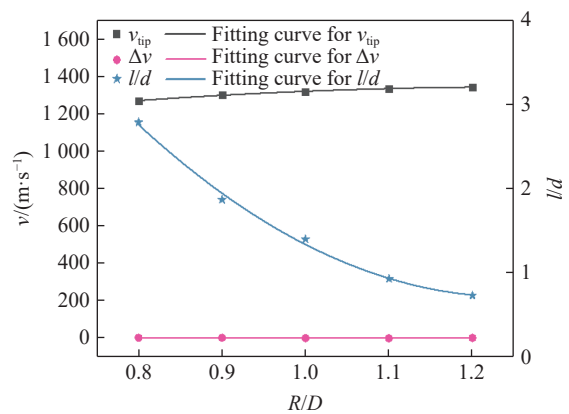


图 19 不同外曲率半径下弹丸参数变化

Fig. 19 Change of projectile parameters with different external curvature radius

3.2.2 壁厚的影响

壁厚 b 的范围为 $0.055D \sim 0.095D$ (每种方案增加 $0.01D$), 在同一加载条件下模拟得到弹丸成型图如图 20 所示, 头部速度 v_{tip} 、头尾速度差 Δv 、长径比 l/d 的变化规律如图 21 所示。可以看出, 随着壁厚的增大, 弹丸头部速度和长径比逐渐减小。当壁厚为 $0.055D$ 时, 头尾速度差达到最大值, 约 117 m/s , 可认为在所计算的壁厚范围内, 所有结构均形成了头尾速度几乎一致的弹丸。结合图 20 可发现, 壁厚对侵彻体形状也有较大影响。随着壁厚的增大, 侵彻体成型模式由长杆状弹丸向准球形弹丸发展, 且侵彻体速度有明显的下降。当壁厚为 $0.055D$ 时, 形成了较大长径比的长杆状弹丸, 且弹丸头部产生了颈缩。同样, 在后续计算中将壁厚固定为 $0.075D$ 。

3.2.3 加载能量的影响

保持电流半周期不变, 通过改变电流峰值 I_m 改变加载能量, I_m 的变化范围为 $2.50 \sim 3.50 \text{ MA}$ (每种方案增加 0.25 MA), 模拟得到的成型弹丸见图 22, 头部速度 v_{tip} 、头尾速度差 Δv 、长径比 l/d 的变化规律如图 23 所示。

从图 22 可看出, 当电流峰值达到 3.5 MA 时, 侵彻体被拉断为 3 个部分, 从头部到尾部, 三部分的速度分别为 2000 、 1820 和 1590 m/s 。这是由于磁压力过大, 导致药型罩顶部被压垮而不是翻转, 此时侵彻体速度梯度较大, 侵彻体头部出现颈缩和断裂, 尾部也因为较大的速度差产生断裂。因此在图 19 中仅列出电流峰值为 $2.50 \sim 3.25 \text{ MA}$ 范围内的弹丸参数, 从图 23 可看出, 弹丸头部速度随着电流峰值的增大呈线性增大趋势, 头尾速度差为数米每秒, 长径比也随电流峰值增大逐渐增大。结合图 22 可看出, 在合理的范围内, 在药型罩结构一定的情况下, 可以通过控制加载能量, 实现准球形弹丸和长杆状弹丸的成型模式转换。

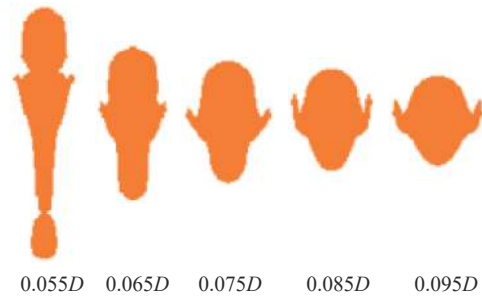


图 20 不同壁厚下弹丸成型图(30 μs)
Fig. 20 Formation shape of projectile with different thicknesses (30 μs)

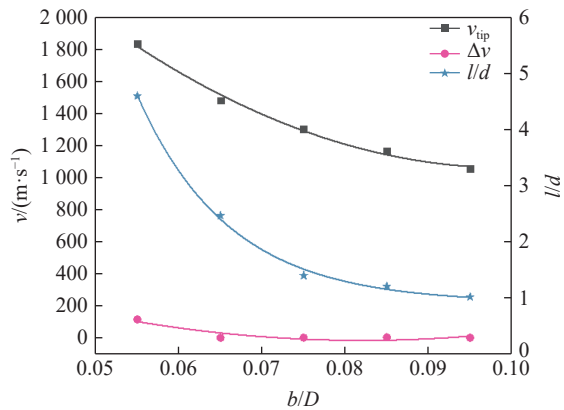


图 21 不同壁厚下弹丸参数变化曲线
Fig. 21 Changing curves of projectile parameters with different thicknesses

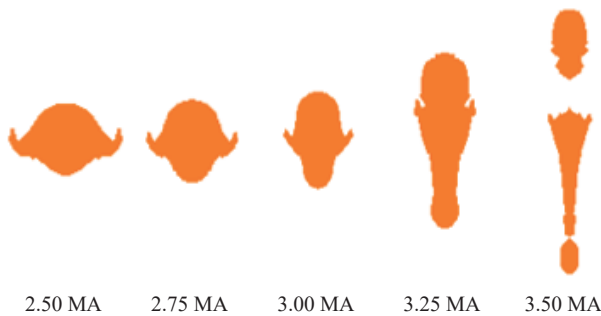


图 22 不同加载能量下弹丸成型图(30 μs)
Fig. 22 Formation shape of projectile with different loading energy (30 μs)

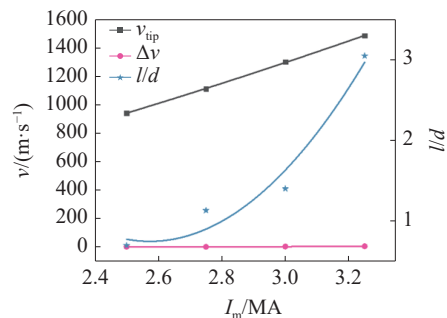


图 23 不同加载能量下弹丸参数变化曲线
Fig. 23 Changing curves of projectile parameters with different loading energy

3.3 电磁驱动形成大质量和高速度弹丸研究

由 3.2.3 可知, 采用更高的加载能量可获取更高速度的弹丸, 但加载能量过大会导致弹丸产生断裂, 影响其侵彻性能。本节保持半周期不变, 进一步提高电流峰值为 6MA, 通过多次模拟对比, 得到两组较优结果的结构参数: I. $D=10\text{ mm}$, $R=1.8D$, $b=0.075D$; II. $D=10\text{ mm}$, $R=2.4D$, $b=0.075D$ 。图 24 给出了 $30\text{ }\mu\text{s}$ 时刻弹丸的形态。对于结构 I, 此时弹丸头部速度为 4230 m/s , 头尾速度差为 120 m/s , 长径比为 4.03; 对于结构 II, 弹丸头部速度为 4178 m/s , 头尾速度差为 4 m/s , 长径比为 1.33, 两种结构得到的弹丸质量均为 0.48 g 。虽然所得弹丸质量较小, 但速度已突破传统炸药驱动所能达到的弹丸速度的极限。

与 3.1.2 节的模拟结果进行对比发现, 当电流峰值为 3 MA , 曲率半径为 $1.0D$ 时, 得到弹丸头部速度为 1320 m/s , 长径比为 1.40, 其形态与球缺型药型罩所得弹丸形态接近, 当电流峰值增大为 6 MA 时, 速度提高了 2.17 倍。炸药爆轰驱动药型罩形成弹丸的研究中, 药型罩结构具有较好的通用性, 即所得药型罩结构可适应不同尺寸的装药结构。而电磁驱动比炸药驱动更为复杂, 如上所述, 当加载能量增大时, 要获取同等形态的弹丸, 外曲率半径需要相应增大, 因此需要根据脉冲功率产生装置的加载能力进行合理的结构优化设计。

以上计算基于紧凑型脉冲功率参数, 受限于装置加载能力, 所用药型罩口径为 10 mm , 弹丸的质量仅有 0.48 g , 与爆轰驱动弹丸相比质量较小。但是, 电磁驱动加载能力与驱动装置相关, 以文献中 Shiva Star 装置的加载电流作为初始条件, 电流峰值为 7.23 MA , 半周期为 $16\text{ }\mu\text{s}$, 药型罩结构尺寸取 $D=30\text{ mm}$ 、 $R=3.0D$ 、 $b=0.075D$ 。 $30\text{ }\mu\text{s}$ 时弹丸成型图见图 25, 结果显示, 通过提高加载能量和增大药型罩尺寸, 电磁加载可形成更高速度、较大质量的弹丸, 基于 Shiva Star 装置参数所得弹丸头部速度可达 4432 m/s 、长径比 1.32、质量 14.2 g , 突破了传统炸药驱动所能形成弹丸的速度极限。



Structure I

Structure II

图 24 两组结构的弹丸形态($30\text{ }\mu\text{s}$)Fig. 24 Formation shapes of two sets of structures ($30\text{ }\mu\text{s}$)图 25 弹丸成型形状($30\text{ }\mu\text{s}$)Fig. 25 Formation shapes of projectile ($30\text{ }\mu\text{s}$)

4 结 论

基于电磁驱动线性药型罩形成高速弹丸实验, 建立了弹丸成型和侵彻靶板的数值模拟模型, 通过与实验结果的对比验证了数值模拟的可靠性。通过数值模拟分析了电磁驱动球缺型药型罩的弹丸成型过程, 获得了外曲率半径、壁厚及加载能量对弹丸成型参数及成型模式的影响规律, 主要结论如下:

(1) 利用 CQ-7 装置, 将峰值 3.83 MA 、半周期 $1.65\text{ }\mu\text{s}$ 的电流加载至长 20 mm 、宽 10 mm 、中心厚度 0.75 mm 的无氧铜线性药型罩上实现了头部速度 3306 m/s 、可侵彻铝靶 32.3 mm 深的弹丸发射, 建立了弹丸速度高、侵彻性能好的电磁驱动成型弹丸实验技术; 构建了电磁驱动药型罩弹丸成型的数值模拟方法, 所建立的数值模拟方法可以预测电磁驱动弹丸成型及侵彻过程, 数值模拟结果与实验结果吻合较好, 为成型弹丸结构设计奠定了技术基础;

(2) 通过数值模拟对电磁驱动大质量球缺型药型罩进行了设计, 模拟结果显示, 通过提高加载能量和增大药型罩尺寸, 电磁加载可形成更高速度、较大质量的弹丸; 当采用峰值为 7.23 MA , 半周期为 $16\text{ }\mu\text{s}$ 的电流时, 可获得头部达 4432 m/s 、质量 14.2 g 的高速弹丸, 有效突破了传统炸药爆轰驱动形成成型弹丸的速度极限;

(3) 通过数值模拟研究了外曲率半径、厚度、加载能量对电磁驱动球缺型药型罩的弹丸成型的影响, 基于本文所设计的药型罩结构, 外曲率半径对弹丸的头部速度影响较小, 而头部速度会随壁厚的减小和

加载能量的增大显著增加; 弹丸的长径比随着外曲率半径和壁厚的减小、加载能量的增大均呈逐渐增加的趋势; 采用不同的结构参数可以实现准球形弹丸和长杆状弹丸两种模式的转换; 针对同一结构参数, 可通过控制加载能量实现两种模式的转换。

参考文献:

- [1] 谭多望, 孙承纬. 成型装药研究新进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(1): 50–56. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)01-0050-07.
TAN D W, SUN C W. Progress in studies on shaped charge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(1): 50–56. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)01-0050-07.
- [2] 杨军, 蒋建伟, 门建兵. 准球形爆炸成型弹丸的形成、飞行及侵彻过程的数值模拟 [J]. *高压物理学报*, 2006, 20(4): 429–433. DOI: 10.11858/gywlb.2006.04.015.
YANG J, JIANG J W, MEN J B. Numerical simulation for formation flight and penetration of sphericity EFP [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(4): 429–433. DOI: 10.11858/gywlb.2006.04.015.
- [3] 刘建青, 顾文彬, 徐浩铭, 等. 多点起爆装药结构参数对尾翼 EFP 成型的影响 [J]. *含能材料*, 2014(5): 594–599. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.004.
LIU J Q, GU W B, XU H M, et al. Effects of multi-point initiation charge configuration parameters on EFP with fins formation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2014(5): 594–599. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.004.
- [4] 郭莎, 任新联, 周涛, 等. 翻转成型大长径比爆炸成型弹丸的数值模拟 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(27): 272–276. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.27.039.
GUO S, REN X L, ZHOU T, et al. Numerical simulation of large length diameter ratio overturn molding explosively formed penetrator [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(27): 272–276. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.27.039.
- [5] 黄炫宇, 李伟兵, 程伟, 等. 锥弧结合罩形成长杆状密实 EFP 的可行性 [J]. *含能材料*, 2019, 27(2): 90–96. DOI: 10.11943/CJEM2018051.
HUANG X N, LI W B, CHENG W, et al. Feasibility of the formation of long rod-shaped compacted explosively formed penetrator by cone-arc liner [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(2): 90–96. DOI: 10.11943/CJEM2018051.
- [6] 王伟, 徐琳, 王玥兮, 等. 准球形 EFP 成形因素的正交优化设计与试验验证 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(5): 22–25. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200513.001.
WANG W, XU L, WANG Y X, et al. Orthogonal optimization design and experimental study on formation process of quasi-spherical explosively formed projectile [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(5): 22–25. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20200513.001.
- [7] 张雪朋, 刘亚昆, 伊建亚, 等. 复合装药包覆式活性侵彻体成型及侵彻研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(7): 1–5. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.07.001.
ZHANG X P, LIU Y K, YI J Y, et al. Study on formation and penetration of the wrapped reactive projectile formed by double-layer shaped charge [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(7): 1–5. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2021.07.001.
- [8] 林加剑, 贾虎. 爆炸成型弹丸有效装药结构理论分析及试验研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2015, 35(1): 59–62, 67. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2015.01.016.
LIN J J, JIA H. Theoretical analysis and experimental research on the effective shaped charge with EFP [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, 35(1): 59–62, 67. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2015.01.016.
- [9] 张旭平. 电磁驱动实验技术及其加载下聚苯乙烯的动态行为研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.
- [10] DEGNAN J H, BAKER W L, ALME M L, et al. Multimegajoule electromagnetic implosion of shaped solid-density liners [J]. *Fusion Technology*, 1995, 27(2): 115–123. DOI: 10.13182/FST95-A30368.
- [11] DEGNAN J H, TACCETTI J M, CAVAZOS T, et al. Implosion of solid liner for compression of field reversed configuration [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2001, 29(1): 93–98. DOI: 10.1109/27.912947.
- [12] DOU J H, JIA X, HUANG Z X, et al. Theoretical and numerical simulation study on jet formation and penetration of different liner structures driven by electromagnetic pressure [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(3): 846–858. DOI: 10.1016/j.dt.2020.05.016.
- [13] DOU J H, JIA X, HUANG Z X, et al. Theoretical study of the jet formation of a shaped charge liner driven by strong electromagnetic energy [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(12): 5283–5290. DOI: 10.1109/tps.2019.2951112.

- [14] 王桂吉, 罗斌强, 陈学秒, 等. 磁驱动平面准等熵加载装置、实验技术及应用研究新进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(12): 121403. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0119.
WANG G J, LUO B Q, CHEN X M, et al. Recent progress on the experimental facilities, techniques and applications of magnetically driven quasi-isentropic compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(12): 121403. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0119.
- [15] 王桂吉. 磁驱动等熵压缩和飞片加载技术和实验研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007.
WANG G J. Research on magnetically driven isentropic compression and flyer plates [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2007.
- [16] 章征伟. 磁驱动固体套筒内爆理论与实验研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2020.
ZHANG Z W. Theoretic and experimental study on magnetically driven solid liner implosion [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2020.
- [17] KNUDSON M D, LEMKE R W, HAYES D B, et al. Near-absolute Hugoniot measurements in aluminum to 500 GPa using a magnetically accelerated flyer plate technique [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(7): 4420–4431. DOI: 10.1063/1.1604967.
- [18] GRACE F, DEGNAN J, ROTH C, et al. Shaped charge jets driven by electromagnetic energy [C]// Proceedings of the 28th International Symposium of Conference. Atlanta: International Ballistics Society, 2013: 15–26.
- [19] HUANG B Y, ZHANG X P, WANG G J, et al. Shaped charge liner collapse and jet formation by electromagnetic loading on high pulsed power generator [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2023, 51(10): 3140–3151. DOI: 10.1109/TPS.2023.3320665.
- [20] CHEN X M, LUO B Q, ZHANG X P, et al. A compact pulsed power driver with precisely shaped current waveforms for magnetically driven loading experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(8): 083910. DOI: 10.1063/5.0089939.
- [21] DOLAN D H. Extreme measurements with photonic Doppler velocimetry (PDV) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(5): 051501. DOI: 10.1063/5.0004363.
- [22] ZELLNER M B, VUNNI G B. Photon Doppler velocimetry (PDV) characterization of shaped charge jet formation [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 58: 88–97. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.05.012.
- [23] L'EPLATTENIER P, COOK G, ASHCRAFT C, et al. Introduction of an electromagnetism module in LS-DYNA for coupled mechanical-thermal-electromagnetic simulations [J]. *Steel Research International*, 2009, 80(5): 351–358. DOI: 10.2374/SRI08SP152.
- [24] L'EPLATTENIER P, ÇALDICHOURY I. Recent developments in the electromagnetic module: a new 2D axi-symmetric EM solver [C]// Proceedings of the 10th European LS-DYNA Conference. Würzburg, German, 2015.
- [25] 张旭平, 赵剑衡, 谭福利, 等. 磁驱动飞片的三维数值模拟及分析 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(4): 483–488. DOI: 10.11858/gywlb.2014.04.015.
ZHANG X P, ZHAO J H, TAN F L, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of magnetically driven flyer plates [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(4): 483–488. DOI: 10.11858/gywlb.2014.04.015.
- [26] BURGESS T J. Electrical resistivity model of metals [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Megagauss Magnetic-Field Generation and Related Topics. Santa Fe, NM, USA, 1986.

(责任编辑 王小飞)