DOI: 10.11883/bzycj-2016-0356　　**文章编号**: 1001-1455(2018)04-0883-08

一种杆式多爆炸成型侵彻体战斗部*

李　鹏,李　刚,袁宝慧,周　涛,孙兴昀
(西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

摘要: 为进一步提高周向多爆炸成型侵彻体战斗部的毁伤效能,设计了一种爆炸成型杆式侵彻体战斗部。结合数值模拟方法,对侵彻体的成型过程及飞散效果进行模拟,分析了外衬对侵彻体成型质量的影响,并设计出侵彻体结构密实的杆式 MEFP 战斗部。制备了有外衬和无外衬两种战斗部原理样机并进行静爆实验。实验结果表明,无外衬战斗部成型侵彻体对 3 m 处 40 mm 厚 45 钢板平均穿深为 27 mm,有外衬战斗部成型侵彻体可贯穿 3 m 处 40 mm 厚 45 钢板;侵彻体对靶板的侵彻实验结果与模拟结果一致。通过设计外衬结构,战斗部成型侵彻体的成型质量和侵彻威力都大幅度提高。

关键词: 药型罩;速度梯度;杆式侵彻体;数值模拟;静爆实验
中图分类号: O389;TJ414.2　　**国标学科代码**: 13035　　**文献标志码**: A

国内外研究人员对爆炸成型侵彻体(explosively formed penetrator, EFP)战斗部进行了大量研究,相关技术已经很成熟[1-2]。为了提高成型侵彻体数量,多爆炸成型侵彻体(multiple explosively formed penetrator, MEFP)战斗部被提出。MEFP 战斗部由 EFP 战斗部技术发展而来,通过把置于装药前向的药型罩移植到装药周向[3],形成一种毁伤元集成数量高、侵彻能力较强的新型高威力战斗部。MEFP 战斗部对现代战争产生了重要影响,尤其在防空反导技术领域应用十分广泛。

通过优化球缺形药型罩和线形药型罩结构参数控制 EFP 的形状和成型质量[4-5],MEFP 战斗部的综合毁伤能力已有大幅度提升。但是,针对大壁厚目标,其毁伤威力仍有不足,这是由于周向 EFP 的成型质量难以控制。内衬或外衬对 EFP 的成型结果有重要影响,这在 EFP 形成尾翼的研究中已有应用[6-7],但在 MEFP 战斗部中的应用尚未见报道。

在保证杆式侵彻体成型数量的前提下,为了进一步提高成型侵彻体的侵彻能力,本文中在周向多线形 EFP 战斗部的基础上,设计出一种新型杆式 MEFP 战斗部,利用在药型罩布置对称外衬的方法控制侵彻体成型质量,并通过对新型杆式 MEFP 战斗部的数值模拟和战斗部原理样机的静爆实验,对其毁伤威力进行评估。

1　战斗部设计

设计了无外衬和有外衬两种杆式 EFP 战斗部,如图 1 所示。除外衬外,两种战斗部的基本结构相同,主要由半预制毁伤元壳体及装药构成,起爆方式为中心起爆,战斗部口径为 128 mm。

无外衬 EFP 战斗部的结构如图 1(a)所示,药型罩是以战斗部中心轴为旋转轴的等壁厚旋成体,单枚药型罩对应角度为 12°,跨度为 120 mm,厚度为 4.5 mm,内弧半径与外弧半径均为 220 mm,质量为 44 g,数量为 30 枚,对应角度为 12°,材料为纯铁,端盖均为 4.5 mm 厚 45 钢,装药采用 B 炸药;图 1(b)与图 1(a)所示战斗部的区别在于,图 1(b)所示战斗部单枚药型罩外侧有两个外衬,两个外衬相对于药型罩几何中心对称,外衬为以战斗部中心轴为旋转轴的旋成体,对应角度为 12°,材料为紫铜。外衬贴于距药型罩端部 10 mm 处,厚壁侧靠近药型罩几何中心,薄壁侧靠近药型罩端部。单枚药型罩具体结构参数如表 1 所示。

* **收稿日期**: 2016-11-23; **修回日期**: 2017-04-17
第一作者: 李　鹏(1985—　),男,博士; **通信作者**: 袁宝慧,li17802929487@163.com。

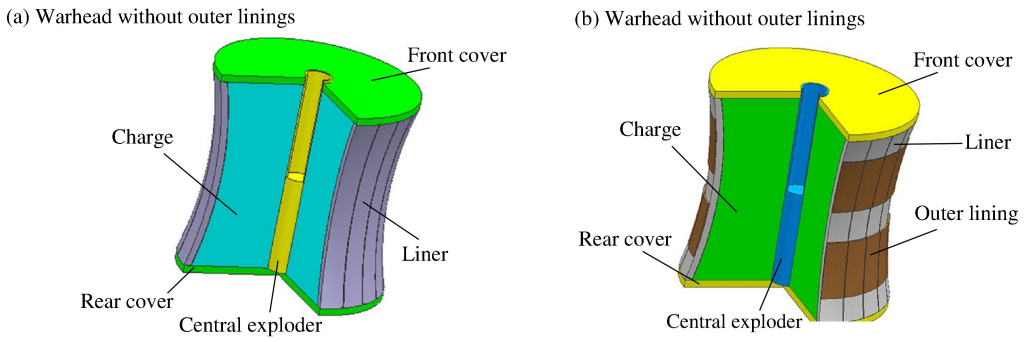

图 1 战斗部结构示意图

Fig. 1 Illustration of warhead structure

2 数值模拟

采用爆炸动力学分析软件 AUTODYN-3D 进行数值模拟，由于战斗部为中心对称结构，因此只需建立 1/4 模型。战斗部的毁伤元、端盖部件采用 ALE 结构化网格，装药及空气区域采用 Euler 算法。线形 EFP 装药的网格尺寸一般为 0.5～2.0 mm[8]，本文中网格尺度为 1 mm，网格总数量为 393 023，设置流固耦合计算，在其中 1 枚药型罩上设置拉格朗日速度追踪点，记录炸药停止作用时药型罩上各点速度分布。计算过程中，B 炸药采用 JWL 状态方程，参数为 AUTODYN 软件自带参数；纯铁和紫铜材料的状态方程采用描述冲击波速度和物质点速度的 Shock 模型，参数见表 1，其中 ρ 为密度，C 为材料的绝热声速，S 为材料系数，γ 为 Grüneisen 常数；材料本构模型取为 Johnson-Cook 模型，参数见表 2，其中 G 为有效应力；A、B、c、m 和 n 为材料常数，T_r 为绝对温度，T_m 为材料的熔化温度。

表 1 材料状态方程参数

Table 1 Material parameters of equation of state

材料	ρ/(g·cm^3)	C/(km·s^{-1})	S	γ	Material	ρ/(g·cm^3)	C/(km·s^{-1})	S	γ
纯铁	7.86	4.61	1.730	2.0	紫铜	8.96	3.94	1.489	2.02

表 2 材料本构模型参数

Table 2 Material parameters of constitutive model

材料	G/GPa	A/MPa	B/MPa	n	c	m	T_m/K	T_r/K
纯铁	64	469	802	0.401	0.019	0.432	1 832	293
紫铜	80	500	320	0.280	0.064	1.060	1 790	293

2.1 无外衬战斗部

战斗部模型及杆式侵彻体整体飞散效果如图 2 所示。图 2(a)中，在战斗部模型 1 枚药型罩设置了拉格朗日速度追踪点，药型罩为对称结构，因而只需在一侧设置 10 个拉格朗日速度追踪点，相邻拉格朗日追踪点间距为 5 mm。由图 2(b)可知，EFP 均匀分布在垂直于战斗部中心轴的中心平面上，以战斗部中心为中心呈辐射状，所有侵彻体均分布在以辐射中心为圆心的圆周上，说明侵彻体速度方向沿着垂直于战斗部中心轴的方向，且速度大小相同。模拟时确定炸药作用时间的方法如下：以标记拉格朗日速度追踪点的单枚药型罩为研究对象，将其速度不再发生变化的时间定义为炸药作用结束时间。

单枚药型罩速度的变化曲线如图 3(a)所示；炸药作用结束时，根据拉格朗日速度追踪点，确定药型罩速度梯度如图 3(b)所示。由图 3(a)可知，在 0.035 ms 时，单枚药型罩速度基本不再变化，因此炸药作用结束时间为 0.035 ms。由图 3(b)可以看出，炸药作用结束后，药型罩存在速度梯度，距离药型罩几何中心 35 mm 距离内，速度变化较小，速度梯度不明显，35 mm 后药型罩速度梯度较大，原因是起爆后受端盖的影响产生稀疏波，致使端部速度较小。

杆式 EFP 的成型过程如图 4 所示。由图 4 可知，药型罩在炸药作用结束后向后翻转，在 3 ms 时尾部闭合，最终在 4 ms 时成型为杆式侵彻体。侵彻体头部形成空腔，原因是炸药作用结束后，药型罩头部速度梯度较小，翻转不完全；尾部向外侧翘起，原因是炸药作用结束时，受稀疏波影响，尾部速度梯度过大，导致尾部在 3 ms 闭合后分离。侵彻体长度约为 56 mm，宽为 12 mm，最小厚度为 9 mm，最大厚度为 22.52 mm。

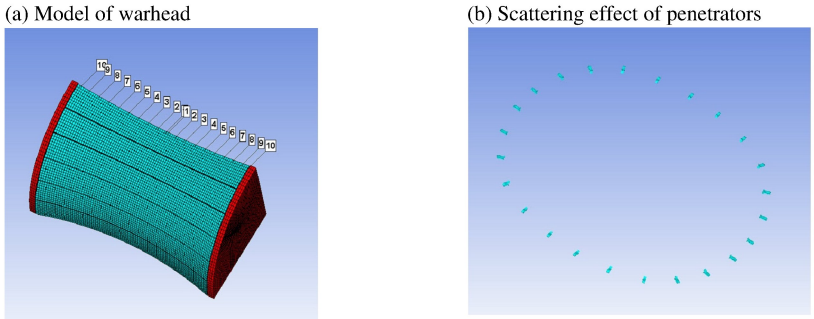

图 2　无外衬战斗部模型及杆式侵彻体整体飞散效果

Fig. 2　Model of warhead without outer linings and scattering effect of penetrators

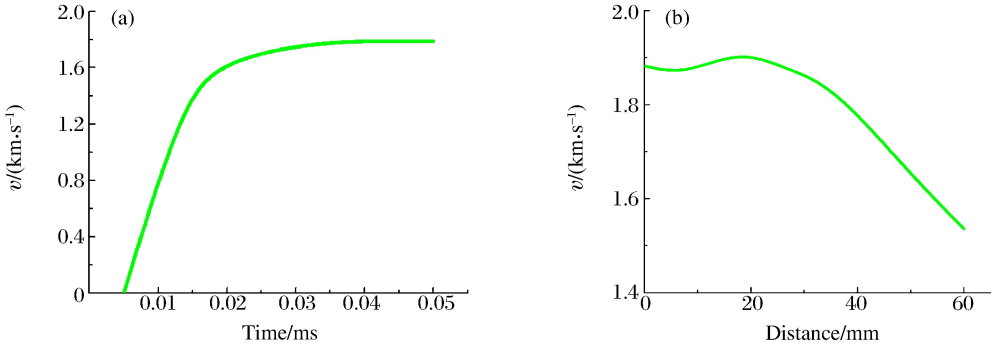

图 3　单枚药型罩速度随时间变化及速度梯度

Fig. 3　Velocity variation by time (a) and velocity gradient of single liner (b)

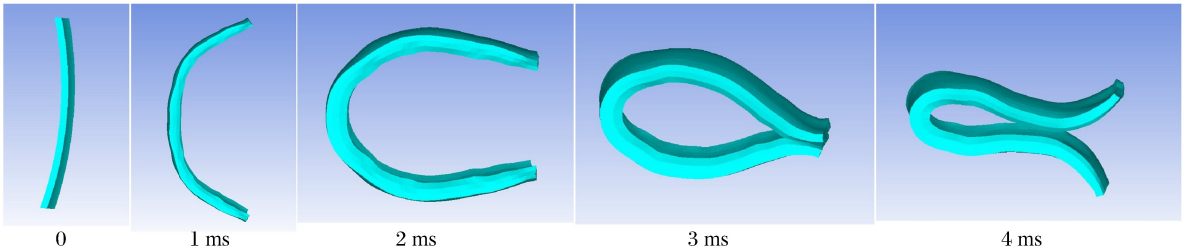

图 4　杆式爆炸成型侵彻体成型过程

Fig. 4　Forming process of rod-shaped penetrator

2.2　有外衬战斗部

根据图 3 和图 4 仿真结果，设计外衬结构，优化药型罩速度梯度，使药型罩头部受爆轰加载后闭合。外衬选用铜材料，以充分利用外衬的阻抗作用[9]。冲击波从低阻抗材料 A 传入高阻抗材料 B 中，材料 A 和材料 B 的压力-粒子速度曲线如图 5 所示。图 5 中，p_1 所对应曲线 A 上点与原点连线斜率即为冲击阻抗，其表达式为：

$$\lambda = \rho_0 U_s \tag{1}$$

式中：λ 为材料 A 阻抗，ρ_0 为材料 A 密度，U_s 为冲击波速度。

材料 A 和材料 B 接触后，在界面上，为了达到平衡，压力 p_1 减小，如图 5(a)所示。将曲线 A 经 p_1 对应点画一条反射曲线(AR)，与曲线 B 交与 p_2 点，p_2 即为材料 B 所受压力。此时，由图 5(b)可知，冲击波阵面达到界面，压力波向 A 传播，在冲击波和压力波作用下，材料 A 所受压力由 p_1 变为 p_1-p_2。

根据上述理论，设计外衬结构进而优化药型罩速度梯度，外衬结构参数取值如下：跨度为 35 mm，最大厚度和最小厚度分别为 1.0 和 0.5 mm，内弧半径和外弧半径分别为 220 和 315.7 mm。

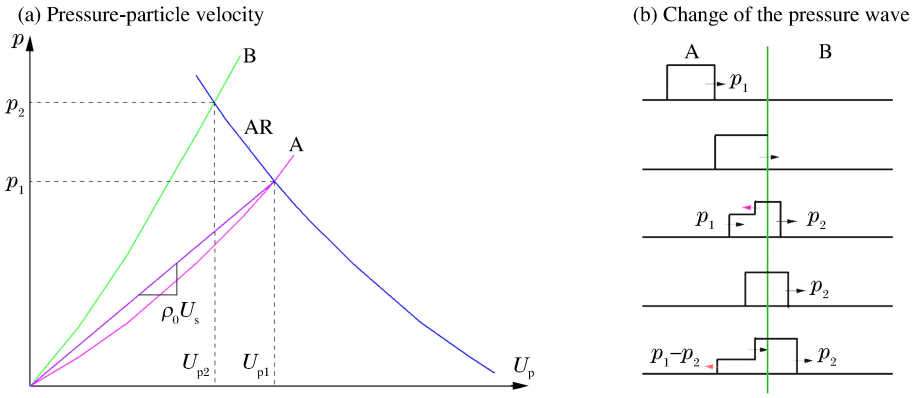

图 5 冲击波由低阻抗介质传入高阻抗介质

Fig. 5 Shock wave transmitting from low impedance medium to high impedance medium

战斗部模型及杆式侵彻体整体飞散效果如图 6 所示。由图 2(b)和图 6(b)可以看出，有外衬战斗部和无外衬战斗部侵彻体飞散效果基本相同，说明外衬不影响侵彻体的飞散效果。外衬不改变装药结构，因而有外衬战斗部炸药作用结束时间同样为 0.035 ms，如图 7(a)所示。炸药作用结束时，根据拉格朗日速度追踪点，确定药型罩速度梯度如图 7(b)所示。由图 7(b)可知，炸药作用结束后，药型罩存在速度梯度，距药型罩几何中心 30 mm 距离内速度梯度明显，距药型罩几何中心 30～40 mm 距离内速度变化趋于平缓，端部速度梯度略小于靠近药型罩几何中心位置的速度梯度。

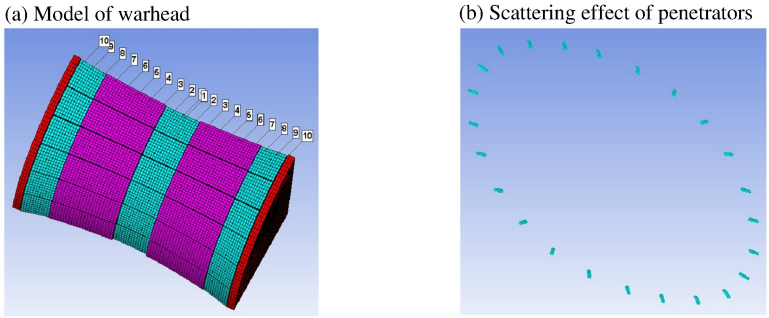

图 6 有外衬战斗部模型及杆式侵彻体整体飞散效果

Fig. 6 Model of warhead with outer linings and scattering effect of penetrators

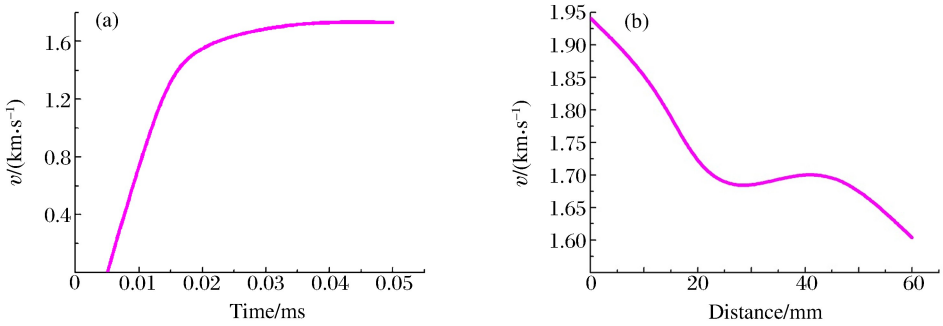

图 7 单枚药型罩速度随时间变化及速度梯度

Fig. 7 Variation of velocity with time (a) and velocity gradient of single liner (b)

杆式爆炸成型侵彻体成型过程如图 8 所示。由图 8 可以看出，药型罩在炸药作用结束后，在外衬的作用下发生翻转，与图 4 进行对比，有外衬战斗部药型罩发生向后翻转时首先由头部开始闭合，逐渐向端部闭合，最终在 4 ms 时形成密实的杆式侵彻体，此时，侵彻体与外衬开始分离。侵彻体整体密实，尾部约 8 mm 长度的材料轻微向外侧翘起，原因与无外衬战斗部形成侵彻体类似，尾部速度梯度过大。侵彻体厚度约 9 mm，有外衬的地方略薄，约为 8 mm，原因是有外衬阻挡，材料向周围流动，头部和尾部略厚，约 9.5 mm，宽度约 12 mm，长度约 64 mm，长径比约为 5∶1。

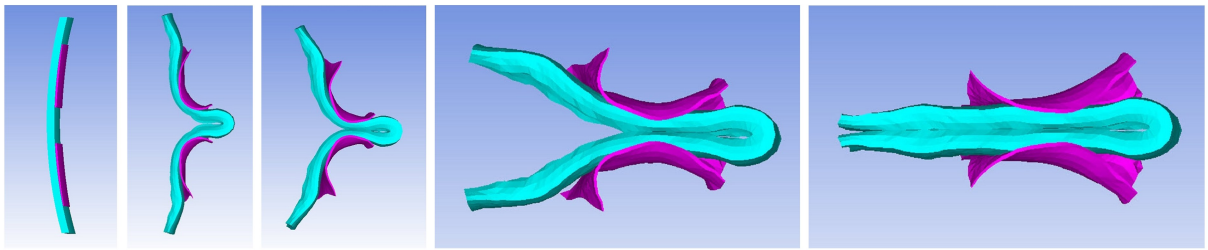

图 8　爆炸成型侵彻体成型过程

Fig. 8　Penetrator's formation process

2.3　杆式侵彻体侵彻过程

模拟杆式侵彻体的侵彻过程，侵彻体为对称结构，因此只建立 1/2 模型，模型中杆式侵彻体选用有外衬战斗部形成的侵彻体，靶板长 100 mm、宽 50 mm、厚 40 mm，靶板网格尺寸为 1 mm，除侵彻方向的两个面外，其他面设置边界条件 $v=0$，材料的侵蚀因子为 1.1。

杆式侵彻体的侵彻过程如图 9 所示。由图 9 可知，在 0.39 ms 时杆式侵彻体与靶板接触，0.44 ms 时侵彻结束，侵彻体贯穿靶板。侵彻过程中，侵彻体微度倾斜，造成穿孔轻微倾斜，同时受稀疏波影响，侵彻体材料由头部向尾部翻转，未与靶板接触的材料继续对靶板进行侵彻。

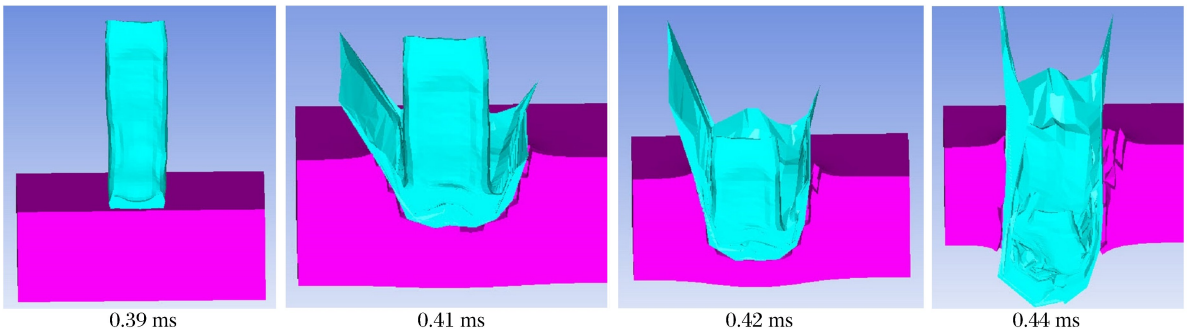

图 9　杆式侵彻体侵彻过程

Fig. 9　Process of penetration by rod-shaped penetrator

3　实　验

3.1　实验布局

战斗部原理样机共两发，无外衬和有外衬战斗部各 1 发，两发战斗部实验布局相同，距爆心 3 m 处布设两面 40 mm 厚度 Q235 钢威力靶，靶板弧长 2 m。

战斗部原理样机及外衬如图 10 所示，静爆实验布局如图 11 所示。由图 11 可知，在距爆心 3 m 处的威力靶上布设了通断测速靶，用以记录侵彻体的碰靶速度。具体测速原理为：测速仪器通过导线连接战斗部和通断测速靶，当战斗部起爆后，连接战斗部的导线断开，测速仪计时，侵彻体击中测速靶后计时结束，据此计算可得侵彻体在此时间段内的平均速度。

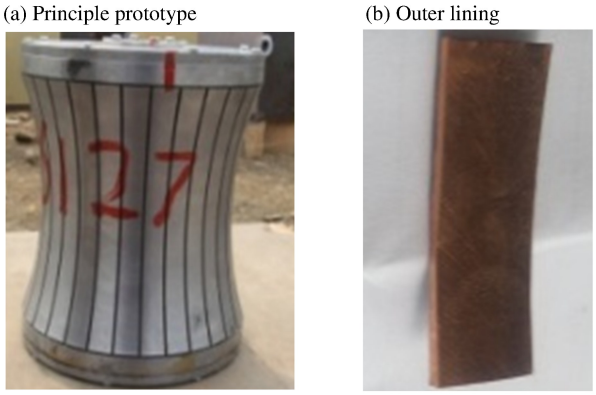

图 10 战斗部样机及外衬

Fig. 10 Warhead and outer lining

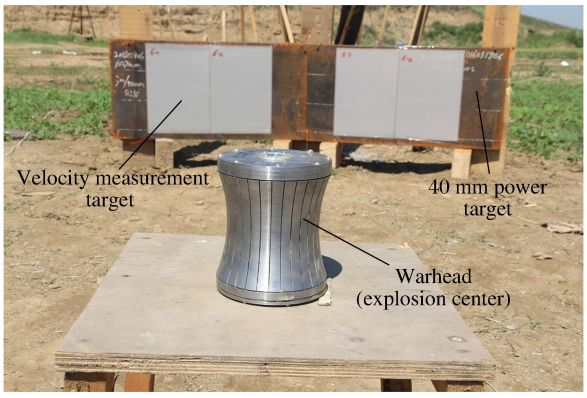

图 11 静爆实验布局

Fig. 11 Setup of static explosion experiment

3.2 实验分析

两发战斗部杆式侵彻体分布如图 12 所示，其中位于上方的孔为杆式侵彻体的侵彻孔，位于下方的孔为外衬的侵彻孔，黄色涂漆为无外衬战斗部杆式侵彻体侵彻孔，白色为有外衬战斗部杆式侵彻体侵彻孔。由图 12 可知，无外衬战斗部和有外衬战斗部形成的杆式侵彻体基本处于同一水平平面上，且分布均匀，与模拟结果一致。

图 12 杆式侵彻体分布

Fig. 12 Distribution of penetrators

杆式侵彻体对靶板侵彻实验结果和模拟结果如图 13 和图 14 所示。将图 13 和图 14 对比可知，杆式侵彻体对靶板侵彻的实验结果与模拟结果基本吻合，侵彻孔均接近圆形，侵彻体侵彻过程中，由于稀疏波影响，靶板孔边缘材料向外翻转，形成唇边。由图 13(a)和图 14(a)可以看出，无外衬战斗部杆式侵彻体对对钢靶板的侵彻孔未穿透靶板，但孔在靶板表面的形状较圆整，经过测量，孔径为 40 mm，锥深为 27 mm；由图 13(b)和图 14(b)可以看出，有外战斗部衬杆式侵彻体对钢靶板的侵彻孔为贯穿孔，入射方向孔径为 33 mm，出射方向孔径为 31 mm。无外衬战斗部杆式侵彻体和有外衬战斗部杆式侵彻体对钢靶板的穿孔，孔壁均残留有铁材料，说明侵彻体在侵彻过程中材料损失较为严重。

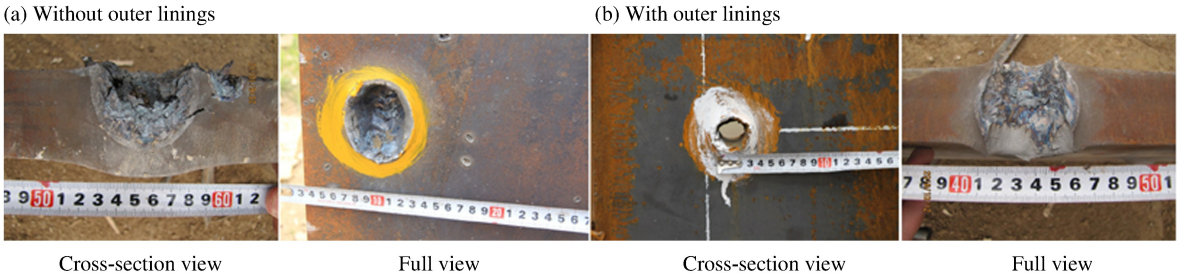

图 13 杆式侵彻体毁伤实验效果

Fig. 13 Rod-shaped penetrator's damage effect produced in experiment

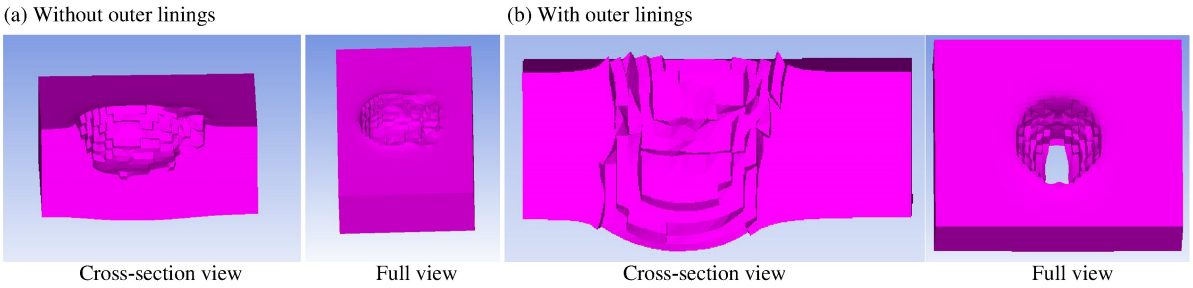

图 14　杆式侵彻体毁伤模拟效果

Fig. 14 Rod-haped penetrator's damage effect produced in simulation

由图 3 和图 7 可以看出，无外衬杆式侵彻体模拟速度约为 1 649 m/s，有外衬杆式侵彻体模拟速度约为 1 610 m/s。实验测得无外衬杆式侵彻体速度为 1 715 m/s，有外衬杆式侵彻体速度为 1 674 m/s，均与模拟速度相吻合。侵彻体速度实验结果大于模拟结果的原因是，炸药的实际密度等参数与数值模拟时参数的选定存在差异；另外，数值模拟时为了简化模型，药型罩采用全预制结构，实验时，药型罩结构为半预制，增加了约束条件，导致实测速度略大于模拟速度。

4　结　论

（1）无外衬战斗部，成型得杆式侵彻体头部有明显腔体，尾部闭合后向外侧翻转；有外衬战斗部成型侵彻体整体密实，长径比更大，约为 5∶1。

（2）无外衬和有外衬两种杆式爆炸成型侵彻体战斗部的成型侵彻体实际分布和实测速度均与模拟结果相吻合，侵彻体对靶板的侵彻实验结果与模拟结果基本吻合。无外衬杆式侵彻体对 3 m 处 40 mm 厚 45 钢板的穿孔孔径为 40 mm，锥深为 27 mm；有外衬杆式侵彻体的穿孔孔径为 33 mm，可以贯穿 3 m 处 40 mm 厚 45 钢板，相比于无外衬杆式侵彻体，其侵彻威力明显增加。

（3）实验结果表明，通过布置外衬可以控制杆式侵彻体的成型质量，从而提高其侵彻威力。

参考文献：

[1]　相升海，徐文龙，张建，等. 刻槽式 MEFP 的成型及侵彻钢靶模式[J]. 爆炸与冲击，2015，35(1)：135-139.
XIANG Shenghai，XU Wenlong，ZHANG Jian，et al. Groove type MEFP formation and penetrating steel target's pattern[J]. Explosive and Shock Waves，2015，35(1)：135-139.

[2]　CARDOSO D，TEIXEIRA-DIAS F. Modelling the formation of explosively formed projectiles (EFP)[J]. International Journal of Impact Engineering，2016，93：116-127.

[3]　吴峰，孔毓琦，柳科学，等. 周向 MEFP 式战斗部结构设计与仿真[J]. 机械制造与自动化，2013，42(3)：110-114.
WU Feng，KONG Yuqi，LIU Kexue，et al. Structural design and simulation of circumferential warhead with MEFP[J]. Machine Building and Automation，2013，42(3)：110-114.

[4]　梁振刚，蒋建伟. 周向 MEFP 成型规律数值分析[J]. 弹箭与制导学报，2015，35(2)：57-60.
LIANG Zhengang，JIANG Jianwei. A numerical analysis on the forming law of circumferential MEFP[J]. Journal of Projectiles，Rockets，Missiles and Guidance，2015，35(2)：57-60.

[5]　尹建平，王志军，熊永家，等. 药型罩曲率半径对周向 MLEFP 成型的影响[J]. 含能材料，2013，21(4)：512-516.
YIN Jianping，WANG Zhijun，XIONG Yongjia，et al. Influence of liner curvature on formation of circumferential multiple linear explosively formed penetrators[J]. Chinese Journal of Energetic Material，2013，21(4)：512-516.

[6]　时党勇，张庆明，翟喆，等. 形成尾翼爆炸成型弹丸的贴片方法[J]. 火工品，2009(6)：46-49.
SHI Dangyong，ZHANG Qingming，ZHAI Zhe，et al. Foil method of producing explosively formed projectile with star-shaped tail[J]. Initators and Pyrotechnics，2009(6)：46-49.

[7]　朱传胜. 带隔板爆炸成型弹丸战斗部成型技术研究[D]. 南京：南京理工大学，2014.

[8] 苟瑞君.线性爆炸成型侵彻体形成机理研究[D].南京:南京理工大学,2006.
[9] MEYERS M A.材料的动力学行为[M].张庆明,刘彦,黄风雷,等译.北京:国防工业出版社,2006:134-137.

A rod-shaped explosively formed penetrator warhead

LI Peng, LI Gang, YUAN Baohui, ZHOU Tao, SUN Xingyun
(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In order to further improve the damage capacity of the multiple explosively formed penetrator (MEFP) warhead, we designed a rod-shaped and explosively formed penetrator warhead. We firstly investigated the formation process and scattering effect of the penetrator were investigated using numerical simulation, and presented a design of rod-shaped warhead penetrators based on the analysis of the influence of the warhead's outer linings on the penetrator's formation process. Then we fabricated two principal prototypes of the penetrator warhead, one with and the other without outer linings, and performed the static explosion experiments to find out about their damage effects. The results show that the average penetration depth on the 40 mm-thick-45 steel, 3 m apart from the detonation center by the warhead penetrators without outer linings, is 27 mm., while those with outer linings can completely penetrate the target. Moreover, the penetration results of the experiment and the simulation are consistent with each other, thereby concluding that our design can significantly improve the formation quality and the penetration power of the rod-shaped penetrators.

Keywords: liner; velocity gradient; rod-shaped penetrator; numerical simulation; static explosion experiment

(责任编辑 王玉锋)