DOI: 10.11883/bzycj-2016-0263 文章编号: 1001-1455(2018)03-0616-06

旋转对爆炸成型杆式侵彻体毁伤威力的影响*

李 鹏,李 刚,袁宝慧,周 涛,敬怡东
(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,结合数值模拟方法,设计了一种爆炸成型杆式侵彻体战斗部。基于复合装药的爆轰加载控制方式,使得药型罩成型为密实的杆式侵彻体,通过调整半预制药型罩的斜置角度,对毁伤元的旋转速度施加控制,进而提高其空中飞行姿态的稳定性,提高毁伤元的毁伤威力。对不同斜置角度的战斗部原理样机进行了静爆实验,实验结果与模拟结果的对比表明,半预制药型罩斜置角度为 1.5°时,爆炸成型杆式侵彻体的着靶姿态最好,对 45 钢靶板侵彻深度最大。通过药型罩斜置,在保证杆式侵彻体成型质量的同时,可以有效提高侵彻体的侵彻威力。

关键词: 战斗部;药型罩;复合装药;杆式侵彻体;飞行稳定性
中图分类号: O389;TH414.2 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

空地精确制导炸弹、巡航导弹、战术导弹等已经成为现代防空导弹体系的首要防御对象,这类导弹目标的共同特点是壳体拥有大壁厚,普通破片或杆式战斗部毁伤元通常难以穿透其壳体,更难以将来袭目标引燃/引爆,导致现有防空导弹战斗部无法有效拦截精确制导炸弹等厚壁目标[1]。因此,对大厚壁弹药进行高效毁伤的需求非常迫切。为进一步提升对大壁厚空地弹药的有效毁伤能力,多爆炸成型侵彻体(multiple explosively-formed penetrators,MEFP)战斗部技术被提出。MEFP 战斗部由聚能装药发展而来,方式是将前置药型罩转换成周向布置的药型罩[2-3]。MEFP 战斗部采用传统装药结构时,对周向 EFP 的成型难以控制。复合装药可以有效控制爆轰波的形状及对破片的加载速度,但复合装药在 MEFP 战斗部的应用较少[4-5]。为了提高侵彻体的成型质量,并满足药型罩集成数量和远距离侵彻威力的要求,通过采用复合装药的方式,设计一种大长径比的爆炸成型杆式侵彻体战斗部。爆炸成型杆式侵彻体战斗部形成的毁伤元长径比大,类似“子弹”,成型过程中容易受到扰动,影响飞行稳定,旋转可以有效提高杆式侵彻体的飞行稳定性[6-7]。侵彻体飞行姿态以及飞行稳定性对侵彻体的毁伤效能具有很大影响,因此分析大长径比侵彻体飞行稳定性有重要意义。本文中,设计一种爆炸成型杆式侵彻体战斗部,通过采用复合装药方式控制侵彻体成型,采用对药型罩斜置的方式,促使爆炸成型杆式侵彻体旋转进而控制杆式侵彻体飞行的稳定性,最终提高爆炸成型杆式侵彻体的毁伤威力。

1 旋转原理

本文中所设计的杆式侵彻体,在爆轰加载时容易受到扰动,影响侵彻体的毁伤效果,因此通过斜置药型罩的方式,使侵彻体在飞行过程中自旋转,提高其飞行稳定性。试验所设计战斗部的药型罩沿战斗部周向排布,在装药中心起爆模式下,爆轰波对圆周方向上的每一枚药型罩的加载状况为:波阵面的指向与药型罩表面法向指向重合;由于药型罩刻槽有一定角度,致使药型罩上各微元速度方向不一致,并且有两个速度分量,一个是沿药型罩中心法线方向的分量,另一个是沿垂直于药型罩中心法线方向的分量;最终药型罩在形成杆式侵彻体的同时发生自旋转,旋转轴为药型罩质心的速度方向,如图 1 所示。图 1 中,v_i 和 v_j 是爆轰加载结束时药型罩端点处微元速度 v 的 2 个分量,v_i 方向垂直于药型罩整体初速度 v_0 方向,v_j 方向与 v_0 方向平行,α 为药型罩的斜置角度,β 为药型罩质心在战斗部端面投影和药型

* 收稿日期: 2016-08-25; 修回日期: 2016-11-14
第一作者: 李 鹏(1985—),男,博士研究生; 通信作者: 袁宝慧,li17802929487@163.com。

罩端面中心分别与战斗部端面中心连线之间的夹角。根据图 1 中的几何关系，爆炸成型杆式侵彻体初始旋转角速度的计算公式[8]为：

$$v_i = v\sin\alpha\cos\beta \tag{1}$$

$$\omega = \frac{2v}{L} = \frac{2v\sin\alpha\cos\beta}{L} \tag{2}$$

式中：v_i 为爆炸成型杆式侵彻体的自旋转速度，ω 为爆炸成型杆式侵彻体的自旋转角速度，L 为药型罩跨度。

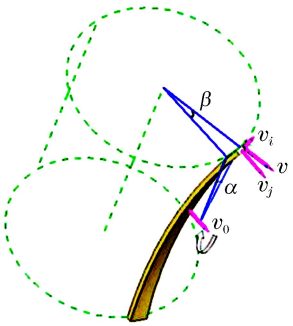


图 1 爆炸成型杆式侵彻体自旋转示意图

Fig. 1 Schematic of rotation of an explosively-formed rod-like penetrator

2　样机设计

2.1　样机基本结构

根据试验所设计的爆炸成型杆式侵彻体战斗部原理样机，除药型罩斜置角度不同外，其他结构均相同。原理样机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。∅127 mm 的轴向单束集成战斗部样机的基本结构如图 2 所示，药型罩为半预制结构，通过在等壁厚的壳体上刻槽制得，单枚药型罩外观为狭长的条带状，长度与宽度的比值接近 8∶1，药型罩斜置一定角度。药型罩的具体结构参数：战斗部口径，127 mm；药型罩跨度，120 mm；内弧半径，180 mm；外弧半径，188 mm；药型罩质量，单枚 74 g；刻制数量，30 枚；斜置角度，0°、1.5°、3.0°、4.5°。

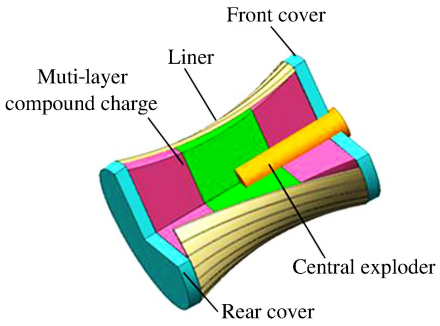


图 2 药型罩斜置战斗部原理样机结构

Fig. 2 Structure of the principle prototype of the warhead with obliquely-placed liner

本文所述的 127 mm 口径战斗部，两端装药为金属驱动能力低的 TNT 炸药，中心装药为金属驱动能力高的 JHLD-1 炸药。分层复合装药的设计目的是，使药型罩弧顶与两端形成较大的速度差，以形成具有较大长径比的杆式侵彻体；药型罩斜置一定角度的设计目的是，使药型罩在受到爆轰加载后各微元速度方向不一致，在形成杆式侵彻体的同时自旋转，控制飞行稳定性。

2.2　侵彻体成型数值模拟

本文中，采用爆炸动力学分析软件 AYTODYN-3D 进行数值模拟，模型的一个药型罩端面中心设置一个拉格朗日速度追踪点，以确定爆轰加载结束时药型罩在此处微元的速度，战斗部的模型及杆式侵彻体成型过程如图 3 所示。

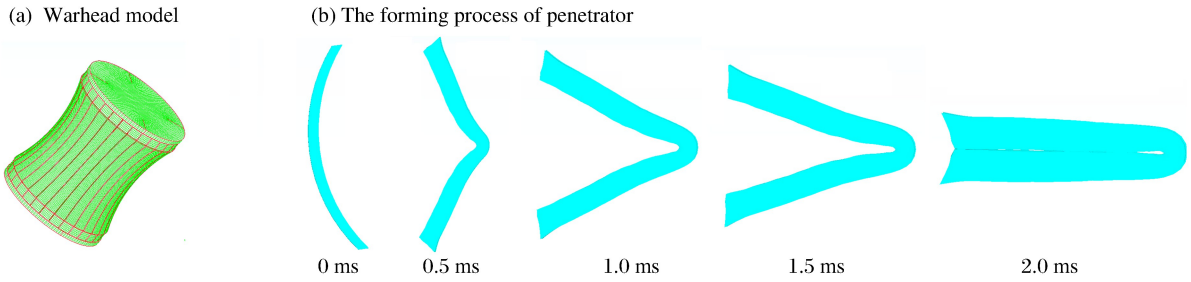


图 3 ∅127 mm 战斗部模拟模型及杆式侵彻体的成型过程

Fig. 3 The simulation model for the ∅127 mm warhead and the formation process of the rod-like penetrator

由图 3 可以看出，爆轰加载结束后药型罩存在速度梯度，药型罩在 0.5 ms 时向后翻转，在 2.0 ms 时成型为整体密实的杆式侵彻体。由于侵彻体尾部闭合时存在剩余速度，使侵彻体尾部厚度小于其头部厚度。药型罩斜置不同角度的战斗部随成型的杆式侵彻体的成型结果如图 4 所示。

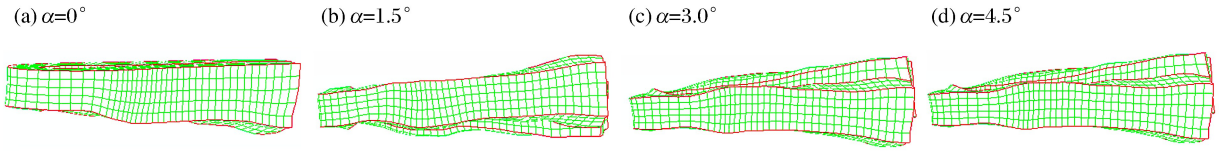


图 4 药型罩斜置不同角度的侵彻体成型结果

Fig. 4 Forming results of penetrators for liners with different oblique angles

由图 4 可以看出，随着药型罩斜置角度的增大，成型侵彻体出现弯曲现象，并且尾部出现明显错位。这说明侵彻体的成型质量与药型罩斜置角度直接相关。药型罩不斜置时，侵彻体长度为 61 mm，最大截面尺寸为 7 mm×17 mm，长径比达到 3.5∶1；药型罩斜置 1.5°时，侵彻体长度为 60 mm，最大截面在尾部，尺寸为 7 mm×18.5 mm，长径比达到 3.2∶1；药型罩斜置 3.0°时，侵彻体长度为 59 mm，最大截面在尾部，尺寸为 7 mm×19.5 mm，长径比达到 3∶1；药型罩斜置 4.5°时，侵彻体已不能保证成型质量。根据图 4 所示结果，为保证侵彻体成型质量，对药型罩斜置角度进行设计：战斗部 1#、2#、3# 对应的斜刻度数分别为 0°、1.5°、3.0°。侵彻体成型后速度可根据药型罩速度随时间的变化曲线获得，飞散方向速度-时间变化曲线如图 5 所示。

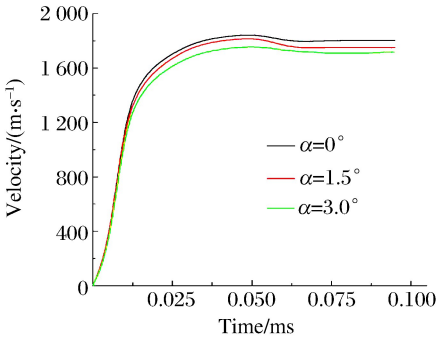


图 5 单枚药型罩速度随时间的变化

Fig. 5 Velocity of a single liner varying with time

由图 5 可以看出，药型罩斜置角度在 0°～3.0°变化时，药型罩速度随时间变化的趋势基本相同：0～0.02 ms区间内，药型罩速度快速升高；0.02～0.05 ms区间内，药型罩速度平缓升高；0.05 ms 后，药型罩速度稍有降低；0.06 ms 后，药型罩速度保持不变。药型罩速度下降是由药型罩向后翻转变形所致。药型罩的最终速度随倾斜角度增大而略有降低。

图 5 所示药型罩的速度在 0.03～0.05 ms 基本保持一致且达到最大值，这说明爆轰加载时间为 0.03 ms。爆轰加载结束时杆式侵彻体的外形如图 6 所示，药型罩形状为近似直杆状，此时拉格朗日速度追踪点的切线速度即为药型罩绕其几何中心旋转时端面的切线速度，此时的药型罩角速度即为成型杆式侵彻体的自旋转角速度，切线速度随时间的变化曲线如图 7 所示。

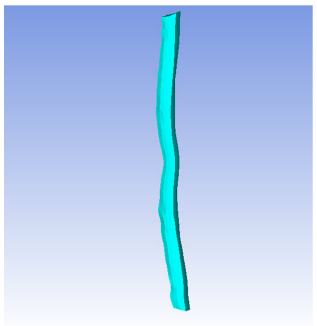


图 6 爆轰加载结束时药型罩的形状

Fig. 6 The liner shape at the end of detonation loading

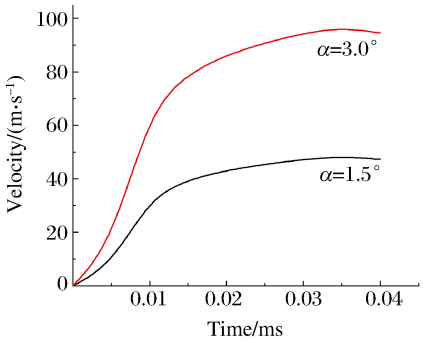


图 7 追踪点切线速度随时间的变化

Fig. 7 Tangent velocity varying with time at tracking point

由图 7 可以看出，追踪点切线速度在 0.02 ms 时间内快速升高，之后变化平缓，在 0.03 ms 后基本不变。在 0.03 ms 时刻，药型罩斜置 1.5°时追踪点切线速度为 21.4 m/s，药型罩斜置 3.0°时追踪点切线速度为 42.9 m/s。根据切线速度公式 $v=\omega L/2$ 计算角速度，计算结果即为侵彻体自旋转模拟角速度。另外根据数值模拟结果，在药型罩斜置 0°时，拉格朗日速度追踪点在爆轰加载结束时的速度为 1 635 m/s，即 $v_0=1\ 635$ m/s。根据式(1)和式(2)，可以计算追踪点切线速度和角速度的理论值。理论计算结果和模拟结果基本一致，如表 1 所示。

表 1　自旋转的模拟结果和理论计算结果

Table 1　Simulation result and theoretical calculation result of rotation

倾斜角度/(°)	模拟切线速度/(m·s^{-1})	模拟角速度/(rad·s^{-1})	理论切线速度/(m·s^{-1})	理论角速度/(rad·s^{-1})
1	47.3	0.81×10^3	42.5	0.79×10^3
2	94.6	1.62×10^3	85.5	1.49×10^3

2.3　侵彻体侵彻靶板数值模拟

模拟杆式侵彻体的侵彻过程，模型中杆式侵彻体选用药型罩斜置 1.5°时的成型侵彻体，靶板长度为 100 mm，宽度为 100 mm，厚度为 40 mm。杆式侵彻体的侵彻过程如图 8 所示。由图 8 可以看出：在 0.49 ms 时杆式侵彻体与靶板接触，0.54 ms 时侵彻结束，侵彻体贯穿靶板；贯穿靶板时，侵彻体轻微偏转，同时受稀疏波影响，侵彻体的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，靶板穿孔边缘处的材料翻转，形成唇边。

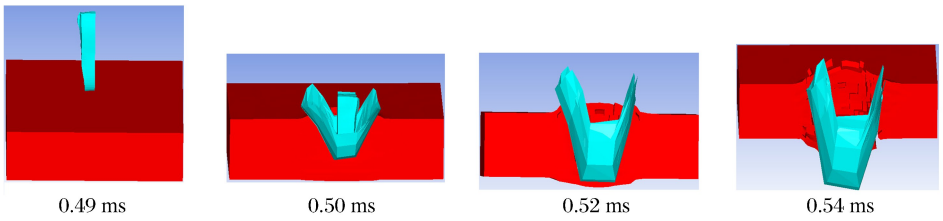


图 8　杆式侵彻体侵彻过程

Fig. 8　The penetration process of the rod-like penetrator

3　实验研究

根据药型罩斜置角度的不同，对各编号战斗部制备原理样机 2 发，通过分析实验结果，确定斜置角度对杆式侵彻体毁伤威力的影响。

3.1　实验布局

战斗部原理样机及实验布局如图 9 所示。3 种药型罩斜置角度不同的战斗部靶场布局均相同，在距爆心 3 m 处布设厚度为 40 mm 的 45 钢威力靶共 2 张，靶板全弧长为 2 m，用以考察各战斗部形成的杆式侵彻体的着靶姿态以及毁伤威力，4 路通断靶布置在威力靶上，用以记录杆式侵彻体的着靶速度。

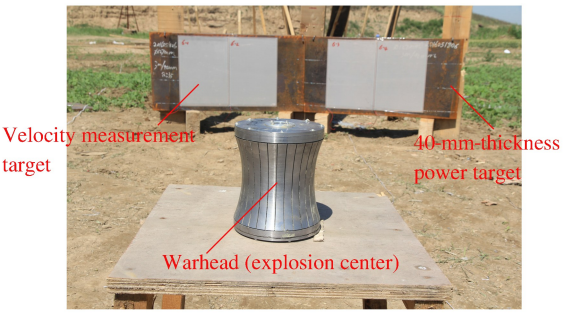


图 9　战斗部静爆实验布局

Fig. 9　Layout of static detonation experiment on warhead

3.2　实验结果

战斗部 1#、2#、3# 对威力靶的侵彻，相应的穿孔数/命中数分别为 0/6、4/8 和 0/6。可以看出，药型罩斜置角度为 1.5°时，爆炸成型侵彻体对距爆心 3 m处厚度为 40 mm 的 45 钢板的毁伤效果明显提升，可以穿透钢板且穿透率为 50%。

药型罩斜置不同角度的成型杆式侵彻体对威力靶侵彻实验结果如图 10 所示，模拟结果如图 11 所

示。由图 10～11 可以看出，杆式侵彻体对靶板的侵彻，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，靶板上孔边缘材料向外翻转，形成唇边。由图 10(a)和图 11(a)可以看出，孔在靶板表面呈现类圆形，底部呈锥形，孔径为 30 mm，锥深为 33 mm；由图 10(b)和图 11(b)可以看出，孔为贯穿孔，侵彻体侵彻过程中出现轻微偏转，造成孔轻度倾斜，入射方向孔径为 28 mm 大于出射方向孔径 26 mm；由图 10(c)和图 11(c)可以看出，孔在靶板表面的形状不规则，呈类椭圆状，椭圆长径为 35 mm，短径为 30 mm，锥深为 27 mm。

图 10 和图 11 的实验和模拟结果显示，药型罩倾斜 1.5°，成型杆式侵彻体的侵彻效果最好。这说明，在保证侵彻体成型质量的同时，使杆式侵彻体自旋转，可以有效提高杆式侵彻体对目标的侵彻深度。在距爆心3 m处布设的通断靶所记录的侵彻体的平均速度和数值模拟的杆式侵彻体的初始速度，对应战斗部 1#、2#、3# 的侵彻体实验速度分别为 1 353、1 336、1 309 m/s，模拟速度分别为 1 205、1 191、1 143 m/s。可以看出，侵彻体实验速度比模拟速度高 12.2%～14.5%。药型罩斜置 0°～3.0°时，对杆式侵彻体沿飞行方向的速度的影响很小，因此进行对比时，速度对杆式侵彻体的毁伤影响可以忽略。

因此，本文中所设计的战斗部，通过药型罩斜置一定角度，控制爆炸成型杆式侵彻体的转速进而提升杆式侵彻体的飞行稳定性，最终提高了杆式侵彻体的毁伤威力。



图 10 杆式侵彻体实验侵彻结果

Fig. 10 Penetration results of experiments on rod-like penetrators

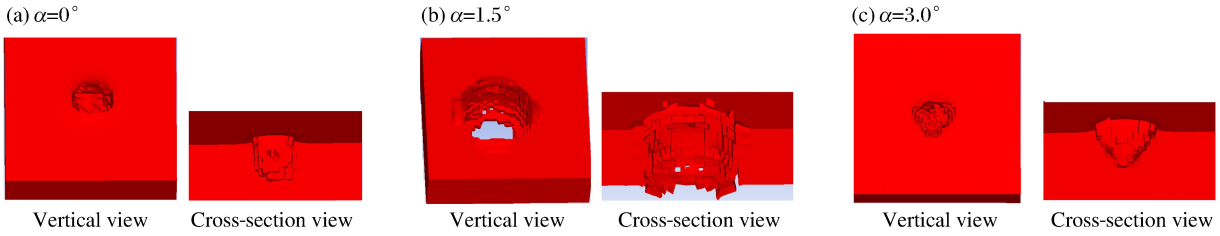


图 11 杆式侵彻体模拟侵彻结果

Fig. 11 Penetration results of simulations on rod-like penetrators

4 结 论

本文中，设计了一种爆炸成型杆式侵彻体战斗部，战斗部药型罩可形成具有高威力的大长径比杆式侵彻体，满足毁伤元密度高和威力大的需求；探讨了药型罩斜置角度对爆炸成型杆式侵彻体毁伤威力的影响。

从数值模拟结果可知，在药型罩斜置角度为 0°～3.0°时，得到的侵彻体整体密实、呈杆状，且长径比可达到 3.5∶1。这说明，分层复合装药与斜置药型罩的结构匹配设计思路是可行的，药型罩斜置角度较小时对杆式侵彻体的成型没有影响。

对本文中设计的 3 种斜刻槽角度不同的战斗部进行样机设计，开展数值模拟及静爆实验研究。结果表明，本文设计的战斗部，药型罩斜置角度小于 1.5°时对杆式侵彻体成型效果影响较小，当药型罩斜刻角度为 1.5°时，杆式侵彻体毁伤能力明显提高。这说明，在保证杆式侵彻体成型质量的同时，对药型罩斜置适当角度，可以有效提升杆式侵彻体空中飞行姿态的稳定性并明显提高杆式侵彻体的毁伤威力。

参考文献：

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

[2] 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]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(1):135-139.

[3] 赵长啸，龙源，余道强，等，切割式多爆炸成形弹丸成形及对钢靶的穿甲效应[J]. 爆炸与冲击，2013,33(2):186-193.
ZHAO Changxiao, LONG Yuan, YU Daoqiang, et al. Formation of incised multiple explosively-formed projectiles and their armor-piercing effect against steel target[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(2):186-193.

[4] 吴成，赵士津，李申，等. 定向战斗部复合装药爆轰的超压区域及破片增益特性的机理分析[J]. 北京理工大学学报，2015,35(8):777-782.
WU Cheng, ZHAO Shijin, LI Shen, et al. Study on the features of fragments gains and super-pressure field in a directed warhead with double charge lamination[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015,35(8):777-782.

[5] 周涛，程淑杰，王辉，等. DNTF 基含铝炸药复合装药的驱动特性[J]. 火炸药学报，2015,38(5):46-50.
ZHOU Tao, CHENG Shujie, WANG Hui, et al. Research on driving characteristic for compound charge of DNTF-based aluminized explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015,38(5):46-50.

[6] 王儒策，赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京：北京理工大学出版社，1993.

[7] 张维，郝秀平. 基于旋转稳定和尾翼稳定的弹丸飞行稳定性研究[J]. 装备制造技术，2014(1):155-157.
ZHANG Wei, HAO Xiuping. Analysis of projectile flight stability based on empennage and rotation stability[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(1):155-157.

[8] 孙传杰，路中华，卢永刚，等. 可控旋转离散杆空间运动分析[J]. 爆炸与冲击，2008,28(4):378-383.
SUN Chuanjie, LU Zhonghua, LU Yonggang, et al. Motion analysis of a controllable rotation discrete rod[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(4):378-383.

Influence of rotation on damage power of an explosively-formed rod-like penetrator

LI Peng, LI Gang, YUAN Baohui, ZHOU Tao, JING Yidong

(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In order to further improve the damage efficiency of a multiple explosively-formed penetrator warhead, the multiple explosively-formed rod-like penetrator warheads were designed by composite charge and were researched by numerical simulation. Based on the detonation loading control method by composite charge, the liners can be formed to be dense rod-like penetrators. By adjusting the oblique angle of a half-prefabricated liner, the rotation speed of the penetrator is controlled and the stability of its flight attitude in the air is controlled. And then, the damage power of the penetrator was improved. The principle prototypes of the warheads with different oblique notching angles were designed and the static blasting experiments were performed. The comparison between the experimental results and the numerical simulation ones displays that the impact attitude of the explosively-formed rod-like penetrator is the best and its penetration into the steel-45 plate is the deepest, when the oblique angle is 1.5°. At the base of ensuring the formed quality, the penetration power of the rod-like penetrator can be improved significantly by obliquely placing the liner.

Keywords: warhead; liner; composite charge; rod-like penetrator; flight stability

（责任编辑　张凌云）