

发散形环形切割装置的数值模拟仿真

李旭东,尹建平,陈杰

(中北大学 机电工程学院,太原 030051)

摘要: 目前环形切割装置产生的无论是射流还是 EFP 都不太稳定,在飞行过程中由于空气动力都会导致侵彻体偏斜,靶板的侵彻达不到预期的穿孔效果。针对该问题,设计了一种发散形的环形切割装置,利用 AUTODYN 软件,对这种环形切割装置在不同发散角下进行了数值模拟仿真。仿真结果表明,当发散角度在 7° 左右时,可以达到最佳开孔效果,且比现有环形切割装置开孔直径大;侵彻过程中也不存在内偏现象。

关键词: 发散形装置;环形切割;数值模拟;侵彻靶板

本文引用格式: 李旭东,尹建平,陈杰. 发散形环形切割装置的数值模拟仿真[J]. 兵器装备工程学报,2017(5):126-129.

Citation format: LI Xu-dong, YIN Jian-ping, CHEN Jie. Numerical Simulation of Divergent Shaped Annular Cutting Device [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017(5):126-129.

中图分类号: TG413

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2017)05-0126-04

Numerical Simulation of Divergent Shaped Annular Cutting Device

LI Xu-dong, YIN Jian-ping, CHEN Jie

(School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: At present, either the jet or the EFP is produced by this kind of combat that is not quite stable. In the course of flight due to aerodynamics, it will lead to deviations occur, so that the penetration of the target plate does not achieve the desired perforation effect. This paper designs a divergent shaped ring cutting device, using the AUTODYN software, and the numerical simulation of the circular cutting device under different divergence angle is carried out. The simulation results show that when the divergence angle is about 7° , the best opening effect can be achieved and is larger than that of the existing ring cutting device. Penetration process will not exist within the bias phenomenon.

Key words: divergence form; annular cutting; simulation; penetration target plate

由于现代舰艇内有多个水密隔舱或其他舱室,单级即使能穿透舰艇的壳体,对舰艇整体的破坏能力有限。现有聚能串联战斗部的前级多使用相对较小的穿透孔径能力的前级战斗部,限制了随进弹丸的口径和装药量。所以为了提高串联战斗部的威力,需要设计一种能侵彻大圆孔的前级战斗部^[1]。

王成^[2]采用内外壁微元及内外装药质量分别相等的方法设计了 W 型聚能装药战斗部,吴成通过增加药型罩内壁厚或减小外壁厚使内外壁质量相等的质量补偿方法实现等

动量原则的药型罩。但是采用内外壁等动量的方法会导致内外壁压垮不同步,对侵彻体成型造成不良影响。对靶板的侵彻也会随着侵彻深度的加深侵彻孔径越来越小。

段嘉庆^[3]提出的综合等动量与内外壁压垮同步的方案在一定程度上可以解决环形射流内偏,但是形成的射流直径偏小,容易断裂和偏移。

本研究提出的发散形的环形切割装置,对药型罩和装药结构做了改进,当药型罩受到爆轰作用时,药型罩内外壁向中间压垮,形成比较粗的射流,速度较大,在空气动力的影响

收稿日期:2016-12-29;修回日期:2017-01-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11572291)

作者简介:李旭东(1991—),男,硕士研究生,主要从事战斗部设计与高效毁伤技术研究。

下不容易断裂和偏移^[4],随着侵彻深度的增加不出现内偏现象,而是周向扩宽,切割出更大的孔径。

1 结构设计

如图1所示为该结构的二维剖面图,发散角 δ 指壳体与中垂线之间夹角。环形切割器头部直径为 $D=120\text{ mm}$ 。

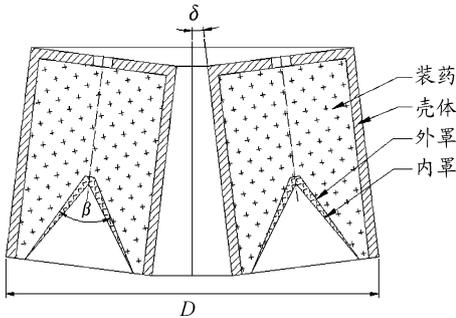


图1 发散形环形切割装置剖面图

药型罩的设计如图2所示,采用锥角为 $\beta=60^\circ$ 环锥形罩,药型罩底部开口为 34 mm ,由罩顶到罩底药型罩厚度线性变窄。

装药结构的设计如图2,装药直径为 40 mm ,药型罩直径为 34 mm ,装药长径比为 1.5 。采用次口装药结构,可以使药型罩压垮速度加快。与装药直径和药型罩直径相等的装药结构相比,这种装药结构形成的侵彻体直径更大,更加稳定,侵彻效果更好^[5]。

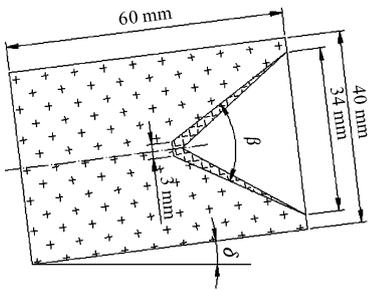


图2 药型罩及装药结构的设计

起爆方式采用底部端面环形起爆,这样设计的目地是因为环形起爆所产生的爆轰波阵面与罩壁的夹角减小,增大炸药对罩体的作用效果使聚能罩获得较大的压垮速度和较小的压垮角,在轴线上发生相互作用后产生了更高的压力,使形成的杆式射流具有更大的轴向速度^[6]。

2 计算模型及材料参数

2.1 计算模型

对这种发散环形装药结构使用AUTODYN软件建立有限元模型。为简化计算,计算模型中不考虑壳体对射流成型

的影响,仅考虑药型罩、主装药和空气3个因素,并且均采用Euler单元算法。为消除边界效应,在空气边界上添加“FLOW-OUT”边界条件,其有限元模型如图3所示。数值模拟中采用的单位制为 $\text{mm-g-}\mu\text{s}$ 。

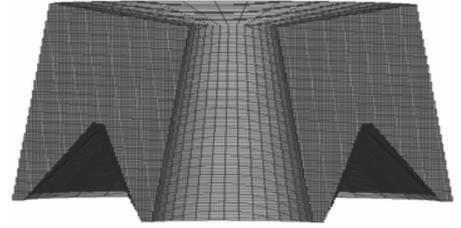


图3 有限元模型图

2.2 材料模型及参数的选择

数值模型中的空气状态方程采用Ideal Gas描述;炸药为B炸药,采用JWL状态方程描述;药型罩材料为紫铜,靶板材料为45#钢,状态方程用Shock模型描述,强度方程用Johnson Cook模型描述,各模型的具体表达式如下:

deal Gas 状态方程

$$p = (V - 1)d \cdot e + p_{\text{shift}} \quad (1)$$

式中: V 为理想气体常数; d 为密度; e 为比内能; p_{shift} 为初始压强。其中 $V=1.4$; $d=0.001\ 225\text{ g/cm}^3$; $p_{\text{shift}}=0$; $e=0$;

JWL 状态方程

$$p = A\left(1 - \frac{k}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left[1 - \frac{k}{R_2 V}\right]e^{-R_2 V} + \frac{kE}{V} \quad (2)$$

式中: A, B, R_1, R_2, k 为试验拟合参数; V 为比容; E 为炸药单位体积内的内能。其中 $A=1.68\text{ GPa}$; $B=4.2\text{ GPa}$; $R_1=1.1$; $R_2=0.34$;

Johnson Cook 模型定义屈服强度为

$$Y = (A + BX_p^n)(1 + C \ln X_p)(1 - T_H^m) \quad (5)$$

$$T_H^m = (T - T_{\text{room}})/(T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}) \quad (6)$$

式中: T_H^m 为通过修正的无量纲温度; T_{melt} 为金属熔化的温度; T_{room} 为室温; X_p^n 为有效塑性应变; X_p 为有效塑性应变速率; A, B, C 为常数。

紫铜的材料参数:密度 $\rho=8.968\text{ g/cm}^3$, $A=0.000\ 9$; $B=0.002\ 92$; $C=0.025$; 4340 钢的材料参数:密度 $\rho=7.83\text{ g/cm}^3$, $A=0.007\ 92$; $B=0.005\ 1$; $C=0.014$ 。

3 计算结果及分析

使用AUTODYN软件对上述结构在不同发散角下的环形射流成型以及对靶板的侵彻效果进行数值模拟仿真。

3.1 环形射流成型

发散角 δ 分别选取 $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 15^\circ$,进行仿真模拟对比,药型罩和装药的结构参数如图2中标注。分别选取时间为 $0\ \mu\text{s}, 5\ \mu\text{s}, 9\ \mu\text{s}, 13\ \mu\text{s}, 17\ \mu\text{s}, 21\ \mu\text{s}, 25\ \mu\text{s}$ 进行计算,将不同发散角成型的效果图进行了对比,由于篇幅有限,仅对

单侧的二维图形进行截图对比,如图4所示。

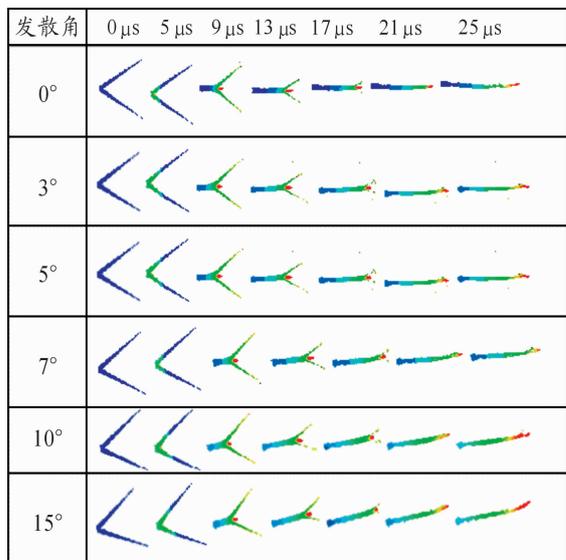


图4 相同时间不同发散角下侵彻体成型效果对比

由图4可以看到,在 $5\ \mu\text{s}$ 时爆轰波传到了罩顶,使药型罩内外壁同时沿着药型罩的角分线压垮。最后在 $21\ \mu\text{s}$ 的时候形成基本稳定的侵彻体。不同发散角的环形切割装置形成的环形侵彻体的头部直径和尾部直径都不相同,在装药直径相同的情况下,形成的环形侵彻体直径逐渐增大。

下面通过对比不同发散角的环形切割装置在 $21\ \mu\text{s}$ 时形成侵彻体的特性参数分析发散角对环形侵彻体的影响效果,如表1所示,长度单位为mm,速度单位为m/s。

表1 $21\ \mu\text{s}$ 时不同发散角形成的侵彻体的特性参数

发散角	头部速度	尾部速度	速度差	长度	头部直径	尾部直径
0°	5 344	660	4 684	36.40	80.40	84.30
3°	4 740	948	3 792	35.46	84.34	74.32
5°	4 374	1 021	3 353	35.62	86.01	77.77
7°	5 397	1 080	4 317	36.26	87.60	81.34
10°	4 173	1 354	3 819	34.27	92.15	82.93
15°	4 013	844	3 169	34.89	84.73	70.61

从表1可以得到,当发散角为 0° 时,侵彻体头部直径小于尾部直径,说明侵彻体出现了内偏现象。从图5可以明显看到当发散角从 0° 增大到 7° 时,环形侵彻体的头部速度先减小后增大,当发散角继续增大时,头部速度逐渐减小。头部和尾部的速度差随发散角的变化没有明显的规律。侵彻体头部直径和尾部直径也随着发散角的增大而增大,但是发散角由 10° 增大到 15° 时,头部直径和尾部直径反而又减小。说明 15° 时射流稳定性相对较差。

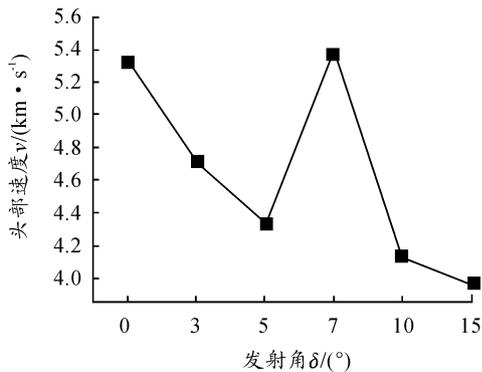


图5 $21\ \mu\text{s}$ 射流头部速度

3.2 环形射流侵彻靶板

环形切割装置侵彻靶板三维有限元模型如图6所示。

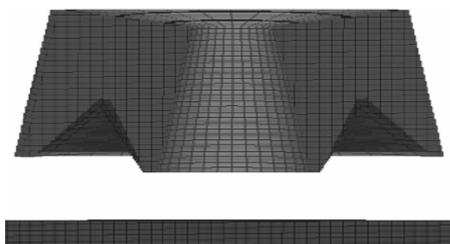


图6 环形切割装置侵彻靶板有限元模型

本研究选用10 mm的钢板进行数值模拟仿真。炸高定为30 mm。由于篇幅有限本文仅对发散角为 7° 时环形射流侵彻靶板过程和侵彻完成后靶板图进行展示。图7为发散角为 7° 时环形射流侵彻靶板剖面图,图8为侵彻完成后靶板结果图。

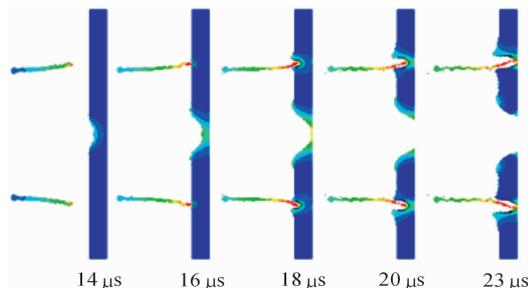


图7 环形射流侵彻靶板剖面图

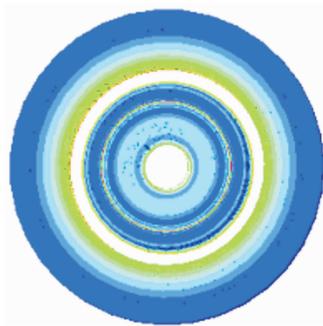


图8 侵彻完成靶板模型

表2记录了发散角为 $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 下的穿靶用时以及穿孔直径 D_1 和穿孔直径与环形切割器装置的头部直径的比值,时间单位为 μs ,长度单位为 mm 。

表2 不同发散角侵彻靶板的参数

发散角	穿靶用时	穿孔直径 D_1	D_1/D
0°	7.50	94.28	0.78
3°	8.21	105.40	0.87
5°	10.20	107.75	0.89
7°	7.71	108.06	0.90
10°	8.21	110.30	0.92
15°	11.10	108.20	0.90

从图9可以明显看到,随着发散角度的增大穿孔直径 D_1 逐渐增大, 10° 时达到了最大穿孔直径,可见发散角在一定范围内增大,形成的环形射流对靶板的切割孔径也会逐渐增大。由图7可以明显看出穿孔直径 D_1 与环形装置头部直径 D 的比值也是逐渐增大, 10° 时最大比值达到了0.92。而 0° 时比值仅有0.78。可见带有发散角的环形切割装置比普通环形切割装置侵彻出更大的孔径。

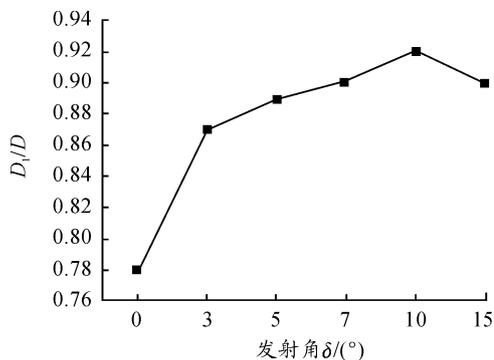


图9 开孔直径 D_1 和装置头部直径 D 比值曲线

由图7也可看到射流侵彻靶板时不会随着侵彻深度的增加而内偏斜,而是向外扩张,侵彻孔径变大。

4 结论

当发散角为 7° 时,形成的射流头部速度最大,达到 $5\ 397\ \text{m/s}$ 。穿孔直径达到 $108.06\ \text{mm}$,穿孔直径与环形切割装置的头部直径的比值达到0.9。与发散角为 0° 的现有环形切割装置相比,这种带有发散形的环形切割装置具有以下优点:①环形射流速度梯度小,不容易被拉断;②侵彻靶板时环形射流不存在内偏现象;③开孔效果比普通环形射流开孔效果好很多,且发散角为 7° 时开孔效果最佳。

参考文献:

- [1] 李鹏飞,肖川,王利侠. 环形 EFP 的形成和侵彻效应[J]. 火炸药学报,2008,31(3):6-9.
- [2] 王成,恽寿榕,黄风雷. W型聚能装药射流形成及侵彻的实验和数值仿真研究[J]. 兵工学报,2003,24(4):451-454.
- [3] 段嘉庆,王志军,贾耀鲁,等. 环形射流成型的设计改进及数值模拟[J]. 火箭与制导学报,2013,33(1):103-106.
- [4] 荀扬,晏麓晖,曾首义. 聚能装药技术研究进展综述[J]. 科学技术与工程,2008,18(15):50-56.
- [5] 李成兵,裴明敬,沈兆武,等. 起爆方式对杆式弹丸成型和穿甲的影响[J]. 火炸药学报,2006,29(3):47-51.
- [6] 吴晗玲. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):17-21.

(责任编辑 唐定国)