

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.04.013

# 带偏角环形聚能装药射流汇聚性能研究<sup>\*</sup>

薛 震 陈智刚 侯秀成 付建平

中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室(山西太原,030051)

[摘 要] 利用 LS-DYNA 软件对带偏角环形聚能装药射流的二次汇聚进行了数值模拟,研究了汇聚射流的质量和环形药型罩的锥角对射流汇聚性能的影响,并进行了试验验证。结果表明:带偏角环形聚能装药可提高药型罩材料转化为射流的转化率,增大射流的连续拉伸长度和头部速度,增强射流的稳定性;二次汇聚射流头部速度随着药型罩锥角的增大而减小,头部直径随着锥角的增大而增大;对于偏角为  $15^\circ$  的药型罩,当锥角为  $40^\circ$  时产生的汇聚射流头部空腔较小,破甲能力较好。研究结果可为环形聚能装药的工程设计提供参考。

[关键词] 聚能装药;环形药型罩;偏角;射流;锥角

[分类号] TJ410

## 引言

破甲聚能装药作为一种用途广泛的装药结构,常用于反舰、反坦克等威力导弹战斗部的设计。与常规装药结构相比,环形聚能装药结构具有药型罩转化为射流的转化率高、侵彻能力强等优点,成为破甲聚能装药研究的热点。Chick 等<sup>[1]</sup>将线形药型罩弯折为环形,期望形成环形射流,但试验发现环形射流不稳定,很难对靶板侵彻出有效圆孔。王成等<sup>[2]</sup>采用药型罩内外罩微元等冲量的设计方法,提出了中空环形聚能装药结构,该结构能够形成大直径的环形射流,在目标上切开一个所需尺寸的孔洞。吴成等<sup>[3]</sup>采取药型罩内外壁在压垮碰撞点处保持等动量的原则,设计了内外壁厚不同的环形药型罩,使得环形聚能装药产生不偏斜的环状射流。董永香等<sup>[4]</sup>通过分析射流的形成机理,提出了一种可以使爆轰波压垮环形药型罩所形成的锥罩状一次金属射流在药型罩轴线上进行二次汇聚的聚能装药结构,此结构可以增加射流的质量和长度,获得较好的侵彻效果。梁增友等<sup>[5]</sup>通过改变环形药型罩偏角的方式,分析了偏角对环形聚能装药结构射流二次汇聚的影响,并且给出了该装药结构射流汇聚时的最佳偏角范围,但未考虑环形药型罩锥角对射流汇聚的影响。

本文以 LS-DYNA 有限元软件为研究工具,对带偏角环形聚能装药结构在环形起爆后侵彻体的形成过程及射流运动方向进行了数值模拟,分析了此装

药结构所形成的二次汇聚射流的质量大小以及锥角对汇聚射流性能的影响,并进行了试验验证,获得了在给定药型罩偏角下的较优锥角大小,为环形聚能装药的工程设计提供参考。

## 1 计算模型及物理参数

### 1.1 基本假设

在本文研究的带偏角环形聚能装药结构的计算模型中,不考虑起爆系统,均以一系列坐标点的形式在聚能装药顶端形成一个理想化的起爆环,同时也不考虑温度对射流的形成、汇聚以及侵彻过程等的影响。

### 1.2 计算模型

聚能装药技术涉及到材料的大变形运动和流固结构耦合,因此本文采用多物质 ALE (arbitrary lagrangian-eulerian) 方法和运动网格法进行模拟<sup>[6]</sup>。计算中所用带偏角环形聚能装药结构如图 1 所示。环形药形罩的偏角为  $15^\circ$ ,锥角为  $40^\circ$ ,壁厚为 1.6 mm,外罩大端外径为 48 mm,内罩小端内径为 20 mm,内、外壳体的壁厚分别为 2 mm 和 3 mm,装药高度为 20 mm。

### 1.3 材料模型和状态方程

在数值计算中,药型罩材料选用紫铜,采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程<sup>[6]</sup>,具体参数见表 1。其中, $\rho$  为药型罩材料密度; $G$  为剪切模量; $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $c$ 、 $m$  均为材料常数; $T_m$  为材料的融化温度。

\* 收稿日期:2015-01-19

基金项目:2014 年山西省研究生优秀创新项目

作者简介:薛震(1980~),男,博士研究生,主要从事武器系统毁伤技术的研究。E-mail:xuezhenn@nuc.edu.cn

通信作者:陈智刚(1963~),男,教授,主要从事弹药毁伤与爆炸技术的研究。E-mail:cyg@nuc.edu.cn

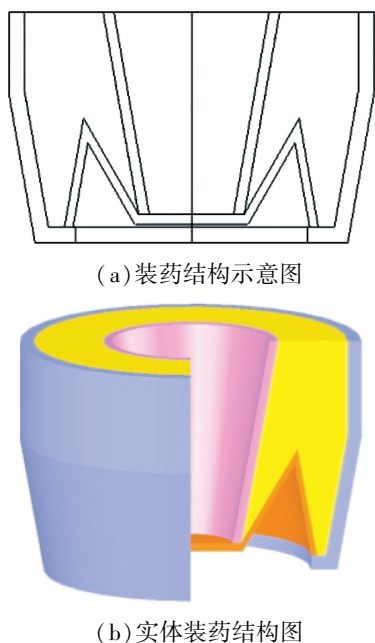


图 1 带偏角环形聚能装药结构

Fig. 1 Structure of annular shaped charge with offset angle

表 1 药型罩材料参数

Tab. 1 Material parameters of liners

$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$G/$ GPa	$A/$ GPa	$B/$ GPa	$n$	$c$	$m$	$T_m/$ K
8.93	47.7	0.09	0.292	0.31	0.02	1.09	1 356

计算中选用 B 炸药,其主要材料参数为: $\rho = 1.717 \text{ g/cm}^3$ ,  $p_{\text{CJ}} = 29.5 \text{ GPa}$ ,  $D = 7\,980 \text{ m/s}$ 。状态方程采用 JWL 方程<sup>[7-8]</sup>,其参数见表 2。

表 2 B 炸药 JWL 方程参数

Tab. 2 JWL parameters of Composition B

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$
524.23	7.678	4.2	1.1	0.34	8.5

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 二次汇聚射流形成过程

带偏角环形聚能装药结构在环形起爆后首先形成锥罩状的一次射流,该射流沿锥面母线方向运动、拉伸,在轴线的某一点处汇聚形成二次射流,射流的径向流动消除了其内部缺陷,射流的速度梯度增加了连续射流的长度,汇聚区施加的爆轰压力可持续保持射流的稳定性<sup>[4-5,9]</sup>。图 2 给出了带偏角环形聚能装药结构从药型罩压垮形成一次射流到汇聚形成二次射流的内部作用过程。

由图2可以看出,一次射流在8~12 μs时间段内形成并趋于稳定,在13~16 μs时间段内一次射流发生了二次汇聚,20 μs左右二次汇聚射流基本

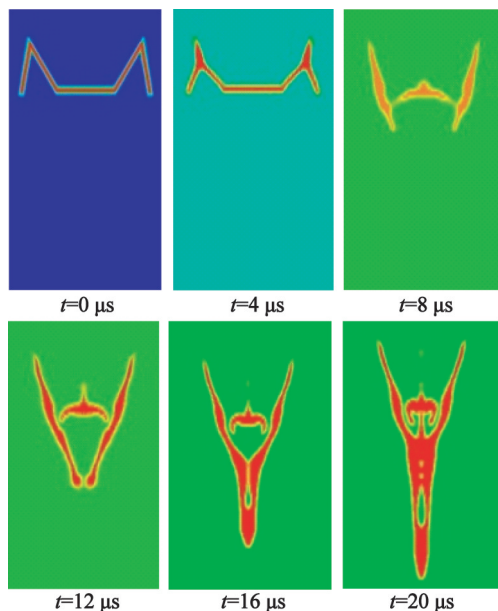


图 2 射流形成及二次汇聚过程

Fig. 2 Formation and secondary aggregation process of jet

形成并趋于稳定,随后汇聚射流在速度梯度的作用下逐渐被拉长。

### 2.2 二次汇聚射流质量分析

应用示踪点处理技术<sup>[10-11]</sup>分析可得,图 3(a)所示的矩形框内铜材料的速度小于 2 000 m/s,矩形框外铜材料的速度大于 2 000 m/s。根据常规成型装药理论,矩形框外的铜材料为射流部分,可以用来侵彻靶板,矩形框内的铜材料因速度较小,可以看作杵体,形状大致为一个锥形环。

将射流轮廓线上的点用图像处理技术捕捉下来,可还原为三维实体形状,如图 3(b)所示。由此可计算出它的体积,再乘以紫铜的密度就可估算出二次汇聚射流的质量。数值计算中带偏角环形药型罩的质量为 68 g,稳定后的二次汇聚射流的质量为 24 g,射流转化率可达 35.3%。

由此可见,与常规聚能装药结构相比,带偏角环

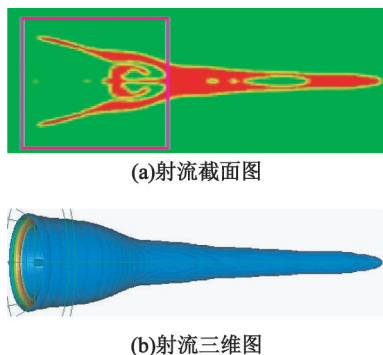


图 3 二次汇聚射流( $t = 22 \mu\text{s}$ )质量分析图

Fig. 3 Quality analysis of secondary aggregation jet ( $t = 22 \mu\text{s}$ )

形聚能装药结构二次汇聚后的射流质量转化率有所提高<sup>[11-12]</sup>,在一定的速度梯度下可形成较长的连续射流。二次碰撞使得有断裂趋势的射流重新接连,增强了连续射流的稳定性,使聚能装药的破甲深度得到提高,能够产生良好的后效作用。

### 2.3 药型罩锥角对二次汇聚射流性能的影响

在对二次汇聚射流形成过程数值模拟的基础上,只改变药型罩锥角的大小,分别对锥角  $\alpha$  为  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$  和  $60^\circ$  的装药结构进行了数值模拟。图 4 给出了射流汇聚前后头部速度(射流运动矢量方向)与药型罩锥角的关系曲线。

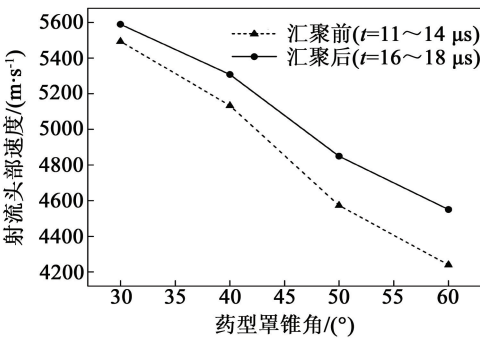


图 4 射流头部速度与药型罩锥角的关系

Fig. 4 Relationship between velocity of jet tip and cone angle of liners

图 4 中,带偏角环形聚能装药结构所形成的射流头部速度在汇聚前后随药型罩锥角的变化均成线性关系,且速度随着锥角的增大而减小,这和常规聚能装药结构的射流速度与药型罩锥角之间的关系是一致的<sup>[13]</sup>。同时,汇聚后的射流头部速度较汇聚前有一定程度的增大,这是由于射流在高速碰撞时速度矢量方向发生改变,头部速度有一个急增,随后汇聚射流受速度梯度的影响对能量进行再分配,头部速度随着时间的推移以较为平缓的趋势下降。

图 5 为起爆后  $t = 24\ \mu\text{s}$  时不同锥角下所形成的

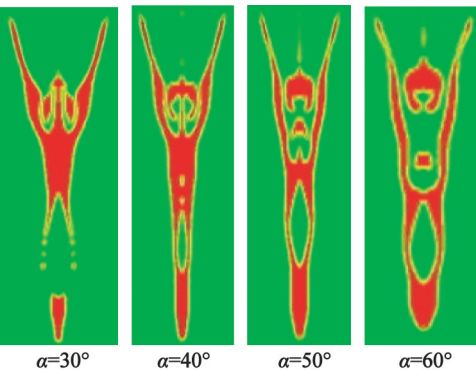


图 5 药型罩锥角对二次汇聚射流形状的影响

Fig. 5 Effect of the cone angle of liners on the shape of secondary aggregation jet

二次汇聚射流的截面图。

由图 5 可以看出,二次汇聚射流头部直径随着药型罩锥角的增大而增大,这是由于药型罩锥角较大时,会产生短而粗的一次金属射流,从而使得二次汇聚后的射流头部直径也较大。另外,由于药型罩锥角会影响一次射流的形状和速度,射流结构在二次碰撞中也会发生变化,从而锥角对二次汇聚射流的头部空腔有较大影响。锥角为  $30^\circ$ 、 $50^\circ$  和  $60^\circ$  的药型罩所形成的汇聚射流的头部空腔较大,造成了射流的不稳定,甚至由于空腔的膨胀而使射流过早发生断裂( $\alpha = 30^\circ$ ),而锥角为  $40^\circ$  时的汇聚射流的头部空腔较小,破甲威力较高。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验方案

为进一步验证药型罩锥角对二次汇聚射流的影响,开展了静破甲试验。分别设计了锥角为  $40^\circ$  和  $50^\circ$  的带偏角( $15^\circ$ )的环形药型罩,采用 B 炸药电雷管环形起爆。图 6 为试验现场布置,靶板为直径 200 mm、厚度 150 mm 的 45# 钢板。



图 6 试验现场布置

Fig. 6 Test field arrangement

#### 3.2 试验结果及分析

图 7 给出了不同药型罩锥角下环形聚能装药结构所产生的射流侵彻靶板的效果图。表 3 给出了试验结果与模拟结果的对比。

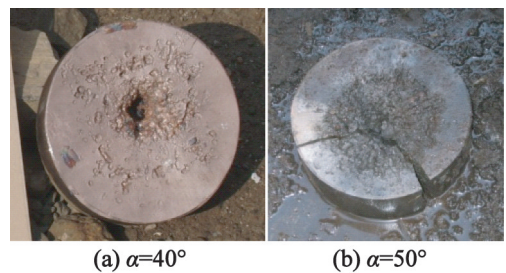


图 7 不同锥角下射流侵彻靶板的效果图

Fig. 7 Penetration effect of jet with different cone angles on target



表 3 不同锥角下试验结果  
与模拟结果的对比

Tab.3 Comparison of experimental and simulated  
results at different cone angles

$\alpha/(^{\circ})$	入口尺寸/(mm×mm)		侵彻孔深/mm	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
40	40.0×45.0	44.5×44.5	45	120
50	60.0×65.0	63.0×63.0	40	98

从侵彻后的靶板可以看出,在 5 倍装药直径炸高条件下,小锥角( $\alpha=40^{\circ}$ )所形成的射流发生了二次汇聚,产生头部直径较小的射流,其侵彻孔入口尺寸较小;而大锥角( $\alpha=50^{\circ}$ )产生的射流头部直径较大,其侵彻孔入口尺寸也较大,这与数值模拟的结果基本一致。

从侵彻深度来看,锥角较小( $\alpha=40^{\circ}$ )的装药结构所产生的射流侵彻靶板较深,且两种锥角下的试验结果相比模拟结果均要低,主要原因在于内壳体与药型罩内罩连接处的闭气延时在工艺上难以保证,爆轰产物过早地从内壳体与药型罩内罩间的缝隙处泄出,致使一次射流没有完全汇聚,这可以从靶板表面的喷涂铜层看出。

4 结论

分析了带偏角环形聚能装药结构射流的形成机理,研究了二次汇聚射流的质量大小以及药型罩锥角对汇聚射流性能的影响,最后根据模拟结果进行了相应的静破甲试验,得到以下结论:

1)带偏角环形聚能装药结构能够形成稳定、高效的二次汇聚射流,可以提高药型罩材料转化为射流的转化率,且二次碰撞可重新接连有断裂趋势的射流,增加连续射流的长度,从而使聚能装药结构的破甲深度得到提高;

2)药型罩锥角会影响二次汇聚射流的形状和速度,汇聚射流头部直径随着锥角的增大而增大,头部速度随着锥角的增大而减小,且汇聚后的射流头部速度高于汇聚前的射流头部速度,能够产生良好的后效作用;

3)锥角对汇聚射流的头部空腔有较大影响,对于偏角为  $15^{\circ}$  的药型罩,当锥角小于  $30^{\circ}$  或大于  $60^{\circ}$  时,二次汇聚射流头部空腔有增大的趋势,锥角为  $40^{\circ}$  时的射流头部空腔较小,侵彻能力较强。

参 考 文 献

[1] Chick M C, Bussell T J, Lam C P, et al. Development of a cookie-cutter explosively formed projectile [C]//17th International Symposium on Ballistics. Midrand, South Africa, 1998: 167-174.

[2] 王成,宁建国,刘建国.中空环形聚能装药结构的优化设计和数值模拟[C]//第七届全国爆轰学术会议论文集.贵阳,2006:135-141.

[3] 吴成,曾艳春,张向荣,等.环型聚能药型罩的设计新方法 与实验[J].北京理工大学学报,2007,27(4):291-294.

Wu Cheng, Zeng Yanchun, Zhang Xiangrong, et al. Investigation and design on the penetration effect of annular-linear shaped charge [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(4): 291-294.

[4] 董永香,陈国光,辛长范,等.一种新型装药结构的探讨[J].华北工学院学报,1999,20(3):233-235.

Dong Yongxiang, Chen Guoguang, Xin Changfan, et al. Analysis on the structure of a new type of shaped charge [J]. Journal of North China Institute of Technology, 1999, 20(3): 233-235.

[5] 梁增友,马林,陈智刚,等.偏角对环形聚能装药射流汇聚影响的数值模拟[J].兵工学报,2012,33(增刊 2):100-103.

Liang Zengyou, Ma Lin, Chen Zhigang, et al. Numerical simulation of the effect of offset angle on the circular shaped charge jet aggregation [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(suppl. 2): 100-103.

[6] 时党勇,李裕春.基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2005.

[7] 二零四研究所.火炸药手册[M].西安:第五机械工业部二零四研究所,1981.

[8] Ma G W, Hao H, Zhou Y X. Modeling of wave propagation induced by underground explosion [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(3-4): 283-303.

[9] 恽寿榕,赵衡阳.爆炸力学[M].北京:国防工业出版社,2005.

Yun Shourong, Zhao Hengyang. Explosion mechanics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.

[10] Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA keyword user's manual [M]. Version 971. Livermore: LSTC, 2007.

[11] 侯秀成,蒋建伟,陈智刚.某成型装药射流的数值模拟与射流转化率[J].火炸药学报,2012,35(2):53-57.

Hou Xiucheng, Jiang Jianwei, Chen Zhigang. Numerical simulation and conversion rate of jet from a shaped charge [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(2): 53-57.

[12] 威廉·普·沃尔特斯,乔纳斯·埃·朱卡斯.成型装药原理及其应用[M].王树魁,贝静芬,等,译.北京:兵器工业出版社,1992.

Walters W P, Zukas J A. Fundamentals of shaped charges [M]. Wang Shukui, Bei Jingfen, et al, translate.

Beijing: Weapon Industry Press, 1992.

- [13] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

Sui Shuyuan, Wang Shushan. Terminal effects [M].

Beijing: National Defense Industry Press, 2000.

## Aggregation Performance of the Jet of Annular Shaped Charge with Offset Angle

XUE Zhen, CHEN Zhigang, HOU Xiucheng, FU Jianping

National Defense Key Laboratory of Underground Target Damage Technology,  
North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] The secondary aggregation process of the jet of annular shaped charge with offset angles was simulated by the finite element software LS-DYNA. Effects of the quality size of the aggregation jet and the cone angle of liners on the jet aggregation performance were analyzed and verified by experiment. Results are as follows. The annular shaped charge with offset angles can improve the conversion of liner material into jet, increase the continuous stretch length of jet and the velocity of jet tip, and improve the jet stability. As the cone angle increases, the velocity of secondary aggregation jet tip decreases and the diameter of jet tip increases. For the  $15^\circ$  offset angle shaped charge, smaller cavity of aggregation jet tip and better penetration effect can be generated when the cone angle is  $40^\circ$ . The results can provide a reference for the practical engineering design of annular shaped charge.

[KEY WORDS] shaped charge; annular liners; offset angle; jet; cone angle

(上接第 54 页)

- Qi Shifu, Liu Haoquan, Li Binli, et al. Blasting study on the lengthwise collapse of a tall building with a frame shear wall structure [J]. Explosive Materials, 2014, 43 (3): 41-47.
- [6] 韩文红,田永良,齐世福,等. 复杂环境下八角高楼的爆破拆除[J]. 工程爆破, 2011, 17(2): 45-48.
- Han Wenhong, Tian Yongliang, Qi Shifu, et al. Blasting demolition of an eight-angle high building under complex environments [J]. Engineering Blasting, 2011, 17(2): 45-48.
- [7] 杨国梁,杨军,姜琳琳. 框-筒结构建筑物的折叠爆破拆除[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(4): 380-384.
- Yang Guoliang, Yang Jun, Jiang Linlin. Numerical simulations on fold blasting demolition of frame-tube structures

[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(4): 380-384.

- [8] GB 6722—2003 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- GB 6722—2003 Blasting safety regulations [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [9] 罗海萍,谢义林. 昌荣大酒店爆破拆除[J]. 爆破, 2009, 26(2): 71-73.
- Luo Haiping, Xie Yilin. Blasting demolition of Chang-rong Hotel [J]. Blasting, 2009, 26(2): 71-73.
- [10] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破, 2009, 15(1): 1-4, 40.
- Zhou Jiahuan. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(1): 1-4, 40.

## Blasting Demolition of a Asymmetrical Building with a Reinforced Concreted Structure

YANG Jianjun, HUANG Lei, CAI Wei

Nanjing Tongda Blasting Co., Ltd. (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] An asymmetrical building with a reinforced concreted structure, which was in a complicated environment, was demolished by a directional controlled blasting scheme. The blasting demolition of an eleventh-storey building named Mengcheng Yongqing Building was taken as an example. Parameters including blasting scheme, pretreatment, design of blasting cuts, selection of reasonable blasting parameters, security checking of blasting and so on were introduced. Results indicate that the blasting scheme ensured the accuracy of the directional collapse of asymmetric structures and the full disintegration and thus anticipated demolition results are achieved. It could provide a reference for similar blasting projects.

[KEY WORDS] asymmetrical; reinforced concrete structure; complex environment; pretreatment; blasting demolition