

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.06.008

线型聚能切割器结构参数优化设计及应用\*

龚文涛<sup>①</sup> 刘健峰<sup>①</sup> 龚先乐<sup>①</sup> 王志阳<sup>①</sup> 朱忠亚<sup>①</sup> 詹新进<sup>②</sup>

①中国人民解放军陆军工程大学野战工程学院(江苏南京,210007)

②湖北卫东化工股份有限公司(湖北襄阳,441108)

[摘 要] 针对钢结构目标,优化设计了一种组合式的爆炸切割装置,此装置可以实现对钢结构目标的快速高效切割。以线型聚能装药为研究对象,采用正交优化设计方法,对线型聚能切割器的药型罩壁厚、顶角、口径、炸高等主要结构参数进行优化设计,并确定了最优线型聚能装药结构。采用该结构参数的线型聚能切割器,能够对典型钢结构目标进行有效切割。

[关键词] 线型聚能装药;正交优化;爆炸切割;数值模拟

[分类号] TK421;TD235

Structural Parameter Optimization and Application of the Linear Shaped Charge Cutter

GONG Wentao<sup>①</sup>, LIU Jianfeng<sup>①</sup>, GONG Xianle<sup>①</sup>, WANG Zhiyang<sup>①</sup>, ZHU Zhongya<sup>①</sup>, ZHAN Xinjin<sup>②</sup>

①College of Feild Engineering,PLA Army Engineering University (Jiangsu Nanjing, 210007)

②Hubei Weidong Chemistry Industries Co., Ltd. (Hubei Xiangyang, 441108)

[ABSTRACT] A combination type explosion cutting device, which can achieve the goal of rapid and efficient cutting of steel structure, was optimally designed. Orthogonal design method was used to optimize the main structure parameters of the linear charge cutter such as liner thickness, liner angle, calibers and burst height, and the optimal linear charge structure was determined. The linear charge cutter with this structure could cut steel structure effectively.

[KEYWORDS] linear shaped charge; orthogonal analysis; explosive cutting; numerical simulation

引言

线型聚能装药(linear shaped charge, LSC)按照药型罩的不同形状可以分为楔形、弧形、矩形等形式。楔形罩相对于其他结构形式,具有结构相对简单、易于制造、聚能效果好等特点<sup>[1]</sup>。线型聚能爆炸切割相对于机械切割、氧气乙炔切割等传统切割方法,具有效率高、速度快、成本低、适应性强、受环境制约影响小等优点,广泛应用于各类工程爆破以及抢险救援等领域<sup>[2-4]</sup>。线型聚能切割器成型效果主要受装药、金属药型罩以及起爆方式的影响。药型罩应选用密度大、塑性好且在射流形成的过程中不易产生气化的材料,常用的药型罩材料有紫铜、铅、铁、软铁等<sup>[5]</sup>。起爆方式可以改变爆轰波在药

柱中的传播方式,从而对成型侵彻体的外形产生影响。线型聚能切割器起爆方式一般分为3种,即线起爆、端部面起爆和端部点起爆。

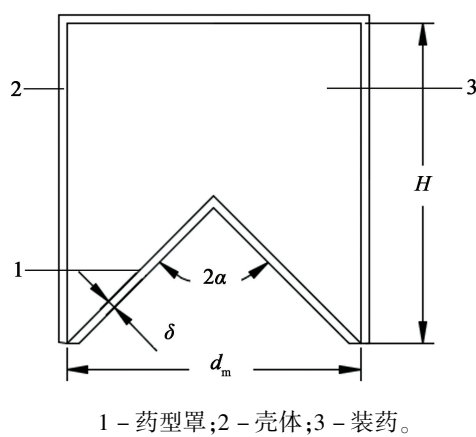
数值模拟软件利用计算机强大的计算能力,可以对射流成型和侵彻靶板等复杂过程进行仿真运算,而这些过程的数据显然难以通过实验获得。因此,笔者采用三维数值模拟和正交优化设计相结合的方法,对LSC结构参数进行优化设计,从而得到线型聚能切割器结构参数的最佳组合方式,并进行相应的实验验证。

1 数值计算模型及结构参数

1.1 线型聚能切割器结构参数

聚能装药结构如图1所示,LSC药型罩呈楔形,

\* 收稿日期:2017-05-03  
基金项目:解放军理工大学预先研究基金项目(201417);解放军理工大学野战工程学院青年基金项目(2015-7)  
作者简介:龚文涛(1993-),男,本科,主要从事爆炸技术与弹药工程研究。E-mail:875326534@qq.com  
通信作者:刘健峰(1988-),男,博士研究生,主要从事战斗部高效毁伤研究。E-mail:ljlccc@163.com



1 - 药型罩;2 - 壳体;3 - 装药。

图 1 装药结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the charge structure

药型罩口径  $d_m$ , 顶角  $2\alpha$ , 壁厚  $\delta$ , 装药高度  $H$ 。

1.2 有限元模型及网格划分

根据药型罩结构特点, 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立了线型聚能装药侵彻 45# 钢靶的三维有限元计算模型。线型聚能装药三维有限元计算模型如图 2 所示。为了能清楚地描述药型罩的压垮成型过程, 采用 ALE 数值计算方法。因为聚能装药具有对称性, 建立了 1/2 三维有限元实体模型。该聚能装药为 C4 炸药, 采用高能炸药材料模型用于计算, 其爆轰产物压力利用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程描述, 紫铜药型罩和 45# 钢靶动力响应过程选取 Johnson-Cook 材料模型和 Grunerisen 状态方程联合描述, 具体材料参数参考文献[6-8]。炸药起爆采用端部单点起爆方式。

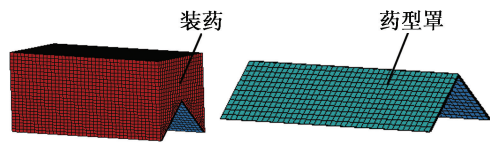


图 2 线型聚能切割器三维有限元计算模型

Fig. 2 3D finite element model of the linear shaped charge cutter

2 正交优化设计及结构参数选择

2.1 方案设计

根据目前研究现状<sup>[9-14]</sup>, 主要针对药型罩结构参数及炸高进行优化筛选, 其取值范围如下:

- 1) 壁厚。实验选用的药型罩壁厚 3 个水平值分别为 1.0、1.5 mm 和 2.0 mm。
- 2) 顶角。为了对比该参数的变化对形成射流及侵彻靶板深度的影响, 数值模拟选取 70°、90° 和 110° 3 个水平值。

3) 口径。根据现有的实验资料和理论公式, 采用的口径为 35、40 mm 和 45 mm。

4) 炸高。为了对比明显和分析方便, 采用的炸高为 0、10 mm 和 20 mm。

选取药型罩壁厚  $A$ 、顶角  $B$ 、口径  $C$  和炸高  $D$  4 个参数作为正交优化的 4 个因素。为了更好地分析射流聚能效果, 在这里引入侵彻深度  $Y_i$  (mm) 作为衡量指标, 来评价正交设计优化参数组的优劣。聚能切割器结构的各因素及对应的水平如表 1 所示。

表 1 切割器选取的因素水平

Tab. 1 Factors and levels selected for the cutter

水平号	壁厚 $A/\text{mm}$	顶角 $B/(\text{°})$	口径 $C/\text{mm}$	炸高 $D/\text{mm}$
1	1.0	70	35	0
2	1.5	90	40	10
3	2.0	110	45	20

线型聚能切割器考虑交互作用的 4 因素 3 水平正交实验设计如表 2 所示<sup>[15]</sup>。

由表 3 中的计算结果结合综合平衡法, 将每一交互列也看做一个因素, 可计算出各因素的单指标极差值及极差平均值, 然后通过对同一因素不同水平极差平均值大小的对比, 找出每个因素的最佳水平, 进而对指标进行综合衡量, 找出最优方案。其中各因素的单指标极差分析结果见表 4。

选取聚能射流侵彻钢板最大深度  $Y_i$  (mm) 作为参数组优劣的评判标准, 通过数值仿真技术对 27 组不同因素水平的组合进行模拟计算, 得到各个切割器模型中射流侵彻钢板板的最大深度。然后依据这 27 组不同侵彻深度值, 结合正交实验表进行对比分析, 最后得出一组优化的聚能切割器参数组合。

分析表 4 和图 3 中的极差值可以得出, 对于射流侵彻最大深度  $Y_i$  这一指标来说, 影响最大的是因素  $A$ , 第 2 水平最优; 影响第二大的是因素  $C$ , 第 3 水平最优; 影响第三大的是因素  $B$ , 第 1 水平最优。

综上所述, 得到的优化参数组合如下:

- 顶角最优水平为第 1 水平 70°;
- 口径最优水平为第 3 水平 45 mm;
- 壁厚最优水平为第 2 水平 1.5 mm;
- 炸高最优水平为第 2 水平 10 mm。

2.2 结构优化后的聚能切割器射流形成过程数值模拟

运用正交实验法筛选出最佳的实验方案, 按照其所对应的药型罩结构参数, 运用数值模拟软件 ANSYS/LS-DYNA 对其进行数值模拟计算, 得到线

表 2 4 因素 3 水平正交表  $L_{27}(3^{13})$

Tab.2 Orthogonal table  $L_{27}(3^{13})$  of four factors and three levels

实验号	A	B	$\begin{matrix} A \times B \\ (C \times D) \end{matrix}$	$A \times B$	C	$\begin{matrix} A \times C \\ (B \times D) \end{matrix}$	$A \times C$	$\begin{matrix} B \times C \\ (A \times D) \end{matrix}$	D	$A \times D$	$B \times C$	$B \times D$	$C \times D$
1 <sup>#</sup>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2 <sup>#</sup>	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3 <sup>#</sup>	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4 <sup>#</sup>	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5 <sup>#</sup>	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6 <sup>#</sup>	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7 <sup>#</sup>	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8 <sup>#</sup>	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9 <sup>#</sup>	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10 <sup>#</sup>	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11 <sup>#</sup>	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12 <sup>#</sup>	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13 <sup>#</sup>	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14 <sup>#</sup>	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15 <sup>#</sup>	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16 <sup>#</sup>	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17 <sup>#</sup>	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18 <sup>#</sup>	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19 <sup>#</sup>	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20 <sup>#</sup>	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21 <sup>#</sup>	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22 <sup>#</sup>	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23 <sup>#</sup>	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24 <sup>#</sup>	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25 <sup>#</sup>	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26 <sup>#</sup>	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27 <sup>#</sup>	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

注:表中 1、2、3 表示各因素所对应的水平; $A \times B$  表示因素 A 与因素 B 的交互作用列。

表 3 模拟计算结果

Tab.3 Simulation results

mm

实验号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
侵彻深度	25.06	29.56	28.91	27.80	21.78	26.42	20.48	36.22	25.77
实验号	10 <sup>#</sup>	11 <sup>#</sup>	12 <sup>#</sup>	13 <sup>#</sup>	14 <sup>#</sup>	15 <sup>#</sup>	16 <sup>#</sup>	17 <sup>#</sup>	18 <sup>#</sup>
侵彻深度	30.64	43.97	36.50	27.56	25.17	32.50	33.09	29.25	28.26
实验号	19 <sup>#</sup>	20 <sup>#</sup>	21 <sup>#</sup>	22 <sup>#</sup>	23 <sup>#</sup>	24 <sup>#</sup>	25 <sup>#</sup>	26 <sup>#</sup>	27 <sup>#</sup>
侵彻深度	32.80	29.05	36.75	22.25	35.73	42.37	25.51	27.19	27.62

表 4 射流侵彻钢板最大深度  $Y_i$  单指标极差分析

Tab.4 Single index range analysis of  $Y_i$

mm

因素	指标							优方案
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	极差	
$A$	238.38	286.94	279.27	26.49	31.88	31.03	5.39	$A_2$
$B$	293.24	261.56	253.39	32.58	29.06	28.15	4.43	$B_1$
$C$	245.19	277.90	285.10	27.24	30.88	31.68	4.44	$C_3$
$D$	261.38	273.51	273.30	29.04	30.39	30.37	1.35	$D_2$

注: $K_i(i=1,2,3)$  指的是实验中的各个因素在第  $i$  水平所对应的指标值累加之和; $k_i$  为其平均值。

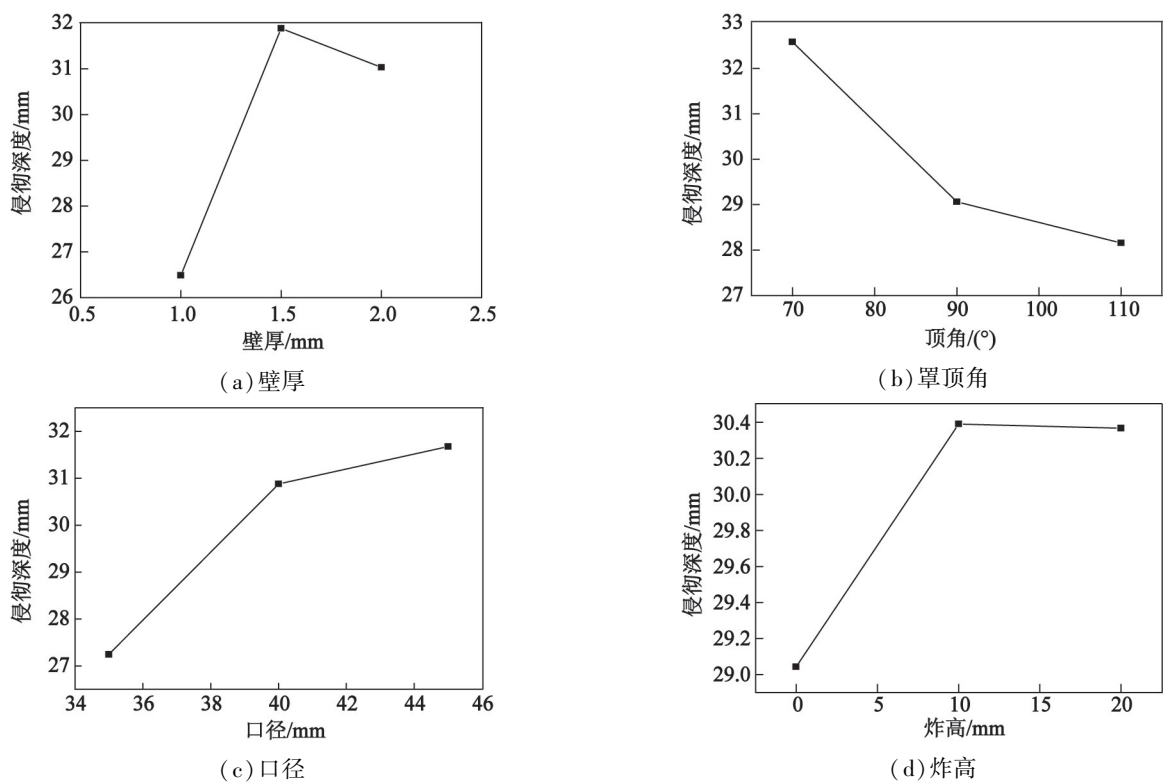


图 3 正交设计各指标的极差对比

Fig. 3 Comparison of orthogonal range

型切割器射流在不同典型时刻下的成型效果。

如图4所示是线型切割器射流成型的4个典型时刻所对应的图像。图4(a)为 $t = 0\ \mu\text{s}$ 时的图像；图4(b)为 $t = 12\ \mu\text{s}$ 时的图像，此时射流已基本成

型，射流头部速度最大，为 $3\ 986\ \text{m/s}$ ；图4(c)为 $t = 18\ \mu\text{s}$ 时的图像，此时射流从头部到尾部其速度依次递减，头部速度最大，为 $3\ 006\ \text{m/s}$ ，尾部速度最小，为 $389\ \text{m/s}$ ，形成断流；图4(d)为 $t = 72\ \mu\text{s}$ 时的图像，此时射流虽未停止，但是头部的动能已经很小，失去了对靶板的侵彻能力，相应的侵彻深度达到最大值。

3 实验结果及分析

3.1 聚能切割器设计方案

利用以上正交法优化出的各项参数，并通过数值模拟验证其可靠性后，设计如图5所示的切割器。切割器主要由装药、壳体、药型罩、雷管（导爆索）、连接栓以及磁性支脚组成。其中，装药选择C4炸药，壳体选择铸铁，药型罩选用2.1优化后的一组参数。同时，为了完成数个切割器之间的组合，在切割器下设计了一种连接栓，在底部支脚处安装数个小磁铁，使切割器可以很好地附着在切割目标上，达到快速高效切割目标的目的。

3.2 实验设置

如图6所示，将12个长、宽、高分别为10.0、4.5、5.0 cm的切割器用固体胶连成一根长切割器，采用紫铜药型罩，铁质外壳，将其放在钢靶板上方，

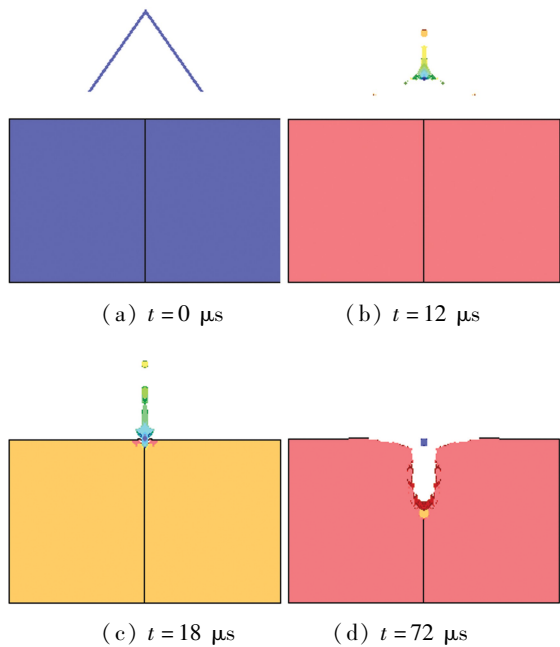


图 4 不同时刻的射流形成并侵彻钢板的模拟图像

Fig. 4 Simulated images of jet formation and penetration into steel plate at different times



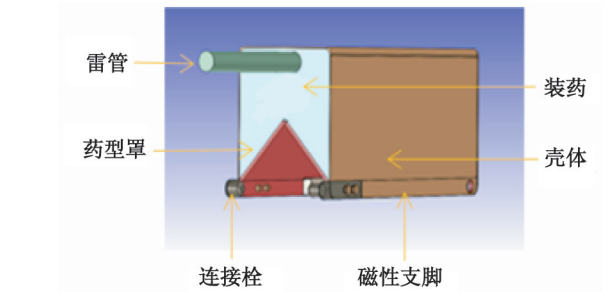


图 5 切割器设计示意图

Fig. 5 Schematic design of the cutter

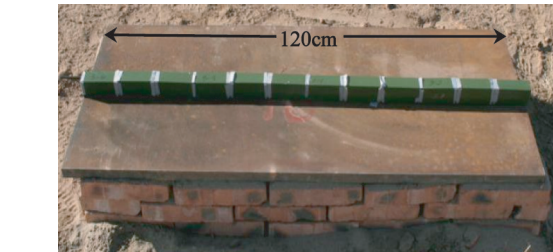


图 6 实验设置

Fig. 6 Experimental settings

用一根导爆索贯穿于装药顶部,为了减少土壤对侵彻效果的影响,将靶板置于宽 20 cm、深 20 cm 的壕沟上,使线型切割器正处于壕沟之上,具体试验设置参数见表 5。

表 5 侵彻钢板实验设置参数

Tab. 5 Parameters of steel plate penetration test							
装药种类	药型罩顶角/ (°)	药型罩壁厚/ mm	炸高/ mm	钢板厚度/ cm	钢板强度/ MPa	钢板宽/ cm	钢板长/ cm
C4	70	1.5	10	2.5	100	50	120

3.3 实验结果及分析

从图 7 可以明显地观察到,钢板在优化参数做成的线型切割器下完全被切割成两块,效果明显。通过仔细观察图 7 中的切割面,可以看出,由多个线型切割器单元拼接形成的线型切割器达到的线型切割效果,几乎可以相当于一整根长条状的切割器切割形成的切割效果,形成的切口平整,完全满足精确



图 7 实验结果

Fig. 7 Experimental results

爆炸切割的要求。

从图 8 的层裂与撕裂面可以看出,其上面部分的钢板靶切割面上附着有一层比较均匀的紫铜,此阶段钢板靶切割面是由线型聚能射流高温高速侵彻而形成的;当射流继续侵彻,因为受到钢板靶的持续阻碍,且一部分射流附着在侵彻口两侧的靶板上,所以射流的能量逐渐削弱,线型射流头部速度逐渐减小;当头部速度等于或小于射流尾部速度时,射流虽然速度很大,但已经不足以侵彻钢板靶,但是由于之前侵彻阶段靶板受到高速侵彻的撞击,使得靶板后面产生层裂与撕裂的现象,此时,由于射流尾部速度开始大于头部速度,射流的量开始叠加,当遇到层裂或者撕裂的钢板靶时,射流开始堆积,所以在图 8 中可以明显看出,层裂或撕裂处附着着不均匀的紫铜,且出现明显的层次结构。说明一半厚度的钢板靶是被侵彻断裂的,另一半是由于射流侵彻时高速碰撞出现的层裂及撕裂现象造成的。

通过此次实验分析表明,此线型切割器侵彻切割一般规格钢板靶目标所形成的切割面平整有序。因此,对于大多数钢板靶目标,此切割器完全可以达到切断的目的。

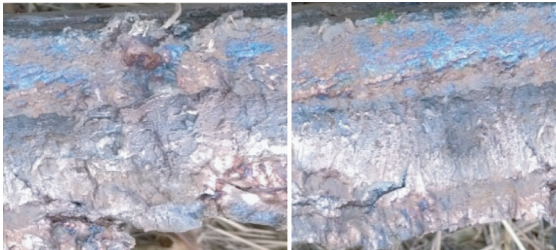


图 8 线型聚能射流侵彻局部图

Fig. 8 Linear shaped charge jet penetration

4 结论

1)随着药型罩顶角的增大,射流头部速度减小,头部宽度变大,有效长度变小;射流质量的积累与药型罩母线长度有关,药型罩口径长度越长,质量积累就越大,从而切割深度就越大。

2)炸高过小的情况下,射流来不及成型就已接触到靶板,不能达到聚能效果;炸高过大时,射流断裂严重,侵彻能力减弱,因此存在一个最佳炸高。

3)通过正交优化设计及实验研究结果验证,得出药型罩材料采用紫铜,药型罩壁厚 1.5 mm、顶角 70°、口径 45 mm、炸高为 10 mm 时,切割器的切割性能达到最优。

## 参 考 文 献

- [1] 焦丽娟,刘天生. 关于楔形罩的初步研究[J]. 华北工学院学报,2001,22(1):70-73.  
JIAO L J, LIU T S. Preliminary study on the cuneiform charge liner [J]. Journal of North China Institute of technology, 2001,22 (1): 70-73.
- [2] 纪冲,龙源,杨旭,等. 线型聚能切割器在工程爆破中的应用研究[J]. 爆破器材,2004,33(1):32-35.  
JI C, LONG Y, YANG X, et al. Study on application of linear shaped charge cutters in engineering blasting[J]. Explosive Materials, 2004,33(1): 32-35.
- [3] 陈维炎,舒大强,黄玉锋,等. 线性聚能装药爆破在水下工程的应用[J]. 爆破,2006,23(1):88-91.  
CHEN W Y, SHU D Q, HUANG Y F, et al. The penetration mechanism of linear shaped charge and its application in underwater engineering [J]. Blasting, 2006, 23 (1): 88-91.
- [4] 李立伟,李翔宇. 聚能装药圆形切割器的数值模拟和分析设计[J]. 试验技术与试验机,2006(3):12-14.  
LI L W, LI X Y. An analytic design and numerical simulation of annular cutting[J]. Test Technology and Testing Machine, 2006 (3): 12-14.
- [5] 周欢,李伟兵,沈晓军,等. 基于带隔板装药实现双模转换机理研究[J]. 工程力学,2016,33(1):217-222.  
ZHOU H, LI W B, SHEN X J, et al. Study on the transformation mechanism of dual-mode about the shaped charge with a wave shaper [J]. Engineering Mechanics, 2016,33(1):217-222.
- [6] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperature[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands, 1983:541-581.
- [7] 吕愿宏. 粉末药型罩聚能射流性能的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2015.  
LÜ Y H. The numerical simulation on performance of shaped charge jet from powered liner[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [8] 王飞,王连来,刘广初. 线性切割器正交优化设计与数值模拟研究[J]. 爆破器材,2006, 35(2):23-26.  
WANG F, WANG L L, LIU G C. Orthogonal optimization designation and numerical simulation of linear shaped charge [J]. Explosive Materials, 2006, 35 (2): 23-26.
- [9] 纪冲,龙源,余道强,等. 切割式双模战斗部毁伤元成型及侵彻钢靶特性研究[J]. 高压物理学报,2012,26(5):508-516.  
JI C, LONG Y, YU D Q, et al. Experimental and numerical study on the formation and penetration properties of dual-mode warhead[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26 (5): 508-516.
- [10] 夏卫国,李裕春,顾文彬,等. 线型聚能射流形成过程的数值模拟[J]. 火工品,2003(4):24-27.  
XIA W G, LI Y C, GU W B, et al. Numerical simulation of linear shaped charge jet formation process [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003(4): 24-27.
- [11] 张凯,李晓杰. 聚能线型切割器最佳张开角的理论分析[J]. 爆炸与冲击,1988,8(4):316-322.  
ZHANG K, LI X J. Theoretical analysis of the optimal opening angle of an explosive cutter [J]. Explosion and Shock Waves, 1988,8 (4):316-322.
- [12] 石一丁. 小型线型聚能切割器参数研究与设计[D]. 南京:南京理工大学,2006.
- [13] 马海洋,龙源,何洋扬. 炸高对线型聚能切割器切割深度影响的数值分析[J]. 火工品,2008(4):28-33.  
MA H Y, LONG Y, HE Y Y. Numerical analysis on effects of burst heights on penetration depth of LSCC [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(4):28-33.
- [14] 顾文彬,李旭峰,徐小壮,等. 线型药型罩材料及其结构参数对成形性能影响的数值研究[J]. 火工品,2013(3):17-21.  
GU W B, LI X F, XU X Z, et al. Numerical study on the effect of liner materials and structural parameters on the forming properties of linear shaped charge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(3):17-21.
- [15] 徐景林,顾文彬,武双章,等. 带隔板线型聚能装药侵彻能力的正交优化[J]. 工程爆破,2016,22(1):77-81.  
XU J L, GU W B, WU S Z, et al. Orthogonal optimization of penetration ability of linear shaped charge with wave-shaper[J]. Engineering Blasting, 2016,22(1):77-81.