

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.02.008

乳化炸药线型切割器对薄壳弹药销毁效果的数值模拟研究^{*}

王 敏 龙 源 钟明寿 谢兴博
解放军陆军工程大学(江苏南京,210007)

[摘 要] 针对目前的弹药销毁状况,为了减轻直接爆破的环境压力,利用理论分析及数值模拟的方法,首先对设计的简易乳化炸药线型切割器的药型罩材料进行确定,数值模拟表明:铝质药型罩所形成的射流侵彻能力要比紫铜材质的提高 28%,而后利用 ANSYS 数值模拟得出该切割器最佳炸高为 15 mm。最后对乳化炸药线型切割器切割薄壳弹药的过程进行数值模拟,证明该切割器可以达到切去弹药外壳而不产生剧烈爆轰及高速破片的效果。

[关键词] 聚能射流;切割器设计;冲击起爆;数值模拟

[分类号] TJ510.89

Numerical Simulation of Destruction Efficiency of Linear Shaped Charge Cutter with Emulsion Explosive on Thin Shell Ammunition

WANG Min, LONG Yuan, ZHONG Mingshou, XIE Xingbo
Army Engineering University of PLA (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] In order to minimize the environmental pressure caused by direct blasting resulting from existing ammunition destruction conditions, theoretical analysis and numerical simulation were used to determine material of linear shaped charge cutter of emulsion explosive. Simulation results show that penetration ability of the jets formed by the aluminum coating is 28% higher than that of the copper. Then ANSYS software assesses to obtain the optimum blast height as 15 mm. Finally, the cutting process of thin shell ammunition by the linear cutter of emulsion explosive was simulated. It has been proved that the designed cutter can ensure the effect of getting rid of the shell of ammunition without generating violent detonation and high-speed fragment.

[KEYWORDS] shaped jet; design of cutter; shock initiation; numerical simulation

引言

废弹药是指不合格产品或因超期、变质、事故等造成的不能使用的火药、炸药、弹药、引信及火工品的统称^[1]。由于我国在上世纪的军事政策以及为防御外来侵略所做的斗争准备,我国目前有数量巨大的废旧弹药需要销毁,目前废旧弹药通常采用爆破法进行销毁^[2]。但爆破销毁法对场地要求较高,而且会产生大量烟尘、噪声以及较大的振动,对环境影响大。

目前,越来越多的人采用聚能效应来进行销

毁^[3-4],既可以利用聚能射流直接引爆弹药达到销毁目的,也可以采用小药量切割壳体而不引爆炸药,达到弹药去壳销毁的目的。

由于工程实践中使用乳化炸药较多,且乳化炸药具有易加工变形、抗水性能好、起爆敏感度低等特点^[5],可以考虑在弹药销毁中使用乳化炸药作为主装药;此外由于乳化炸药的爆速以及威力相对 TNT 等炸药较小,故而考虑采用乳化炸药作为聚能装药,以期达到切割壳体而不引爆弹药的目的。

本文中,针对自行设计的简易乳化炸药聚能切割器的切割效果进行数值模拟研究,从而为之后的实验及弹药爆破销毁提供参考。

^{*} 收稿日期:2017-05-11
基金项目:国家自然科学基金(51304218,51508569);江苏省自然科学基金面上项目(BK20151449)
作者简介:王敏(1994-),男,硕士,主要从事炸药毁伤技术研究。E-mail:1257950377@qq.com
通信作者:钟明寿(1983-),男,博士,讲师,主要从事爆破理论及爆破器材应用技术研究。E-mail:zhongms7@126.com

1 乳化炸药线型聚能切割器设计

1.1 线性聚能切割器设计原则

聚能射流侵彻钢板并引爆被发装药是一个极其复杂的过程,其中要涉及到爆炸动力学、射流形成与侵彻、冲击波的传播以及凝固态炸药的起爆等复杂过程。通过研究,射流的起爆形式主要分为以下 3 种^[6-7]:一是射流直接冲击引爆;二是射流侵彻盖板 and 炸药形成的冲击波引爆;三是燃烧到爆轰的转变^[8]。因此,影响射流引爆被发装药的主要因素包括:射流的直径和速度、被发装药的性能和尺寸、壳体的材料与厚度、被发装药的密封程度。

根据以上分析,为确保去除壳体而不引爆弹药,结合工程实际,确定线性聚能切割器的设计及起爆原则为:1) 体积小,药量少。虽然使用的是威力较小的乳化炸药,但为了确保聚能射流不会起爆被发装药,切割器尺寸要小,从而达到控制射流能量的目的。2) 结构简单,易于加工。由于采用去壳销毁手段,一次销毁所需的切割器数量较多,因此切割器一定要简单且易于加工,从而节约成本。3) 有炸高,非接触。被发装药可被较强冲击波起爆,所以弹药销毁时要确保一定的炸高,这样既可以防止冲击波起爆被发装药,也有利于射流的形成以及侵彻。

1.2 切割器的尺寸及壳体、药型罩材料

1.2.1 切割器尺寸及壳体材料

考虑到切割器选用的炸药为工业常用的矿用乳化炸药,其爆速在 4 000 ~ 5 400 m/s 之间,同时为了方便加工,切割器的尺寸选定为目前常见的 2 号线型聚能切割器,具体尺寸如图 1 所示。药型罩为变壁厚,罩顶厚度 0.80 mm,药型罩母线长度 14.10 mm,外壁开口角度 110°,内壁开口角度 95°,装药固定炸高 3.05 mm,底部开口直径 22.50 mm。

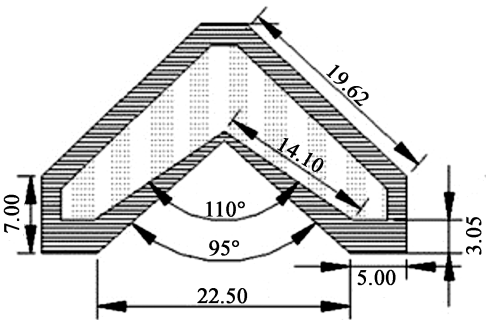


图 1 线型切割器尺寸 (单位:mm)

Fig. 1 Size of the linear shaped charge cutter (unit:mm)

针对外壳材料,为了减少爆破时的破片以及降低射流形成的速度和能量,外壳材料选用易于加工制作的塑料壳体,塑料壳体同时还有利于阻止被销毁弹药的磁引信作用。

1.2.2 药型罩材料的数值模拟

在药型罩材料的选择上,由于起爆装药爆速及威力较低,考虑到紫铜的密度较大,可能会导致射流不易形成且速度较小,故而考虑使用密度较小的铝材可能会更好。为了确保射流的有效拉伸及侵彻,针对这两种材料分别进行了侵彻钢板的数值模拟。

由于切割器的壳体为塑料结构,炸药爆轰下会立即燃烧破坏,因此在射流形成过程中可以不考虑壳体对炸药能量的汇聚作用。为减小计算量并提高计算效率,在进行 ANSYS 建模时就去除了切割器的壳体部分,只建立了炸药、药型罩、空气以及钢板这 4 种材料的数值计算模型(图 2)。模型中,乳化炸药、药型罩和空气采用欧拉网格,钢板采用拉格朗日网格,射流冲击钢板采用流固耦合的算法,避免了复杂的接触设置,提高了计算精度。乳化炸药参数见表 1,药型罩以及钢板均采用 Johnson-Cook 模型。

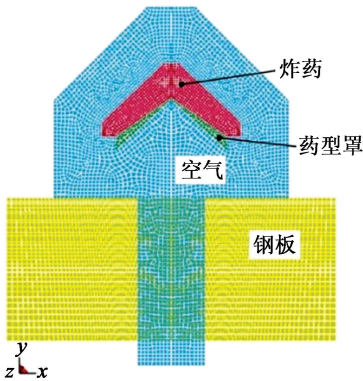


图 2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical model

在 18 mm 炸高情况下,研究铝材和紫铜两种药型罩在切割钢板过程中的射流速度以及钢板的侵彻深度(图 3),通过综合比较来确定药型罩的材料。

首先从射流形成及侵彻过程来看,可以发现射流在形成过程中,中心杆状不能够有效拉伸,这主要是因为乳化炸药爆速低,爆轰波阵面峰值压力也在 10 GPa 以内,导致无法充分地压缩药型罩,使其向中心轴线汇聚,从而导致射流在形成 4 ~ 6 mm 的长度后便没有足够能量继续拉伸。由于射流杆长度较短,这一方面会使射流的侵彻能力大大减弱,另一方面由于两侧翼部面积较大,增大了空气阻力,也会使得射流速度较低,减小了侵彻深度。

表 1 乳化炸药 JWL 参数

Tab.1 JWL parameters of the emulsion explosive

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	C-J 爆轰速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	C-J 压力/ GPa
1.21	326	5.8	5.8	1.56	0.57	4 900	27.0

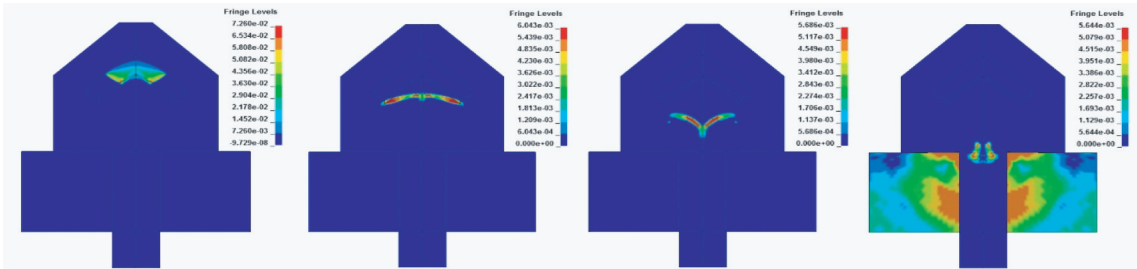


图 3 射流形成及侵彻过程
Fig.3 Jet formation and penetration process

由于紫铜与铝材的密度不同,故而导致两种药型罩所形成的射流速度也相差较大。图 4 中看出,在其他条件相同的情况下,铝质药型罩所形成的射流头部速度要比紫铜药型罩的射流速度大 50% 左右,因此,虽然铝质射流密度要比紫铜的小,但铝质药型罩射流的侵彻动能还是远大于紫铜药型罩。

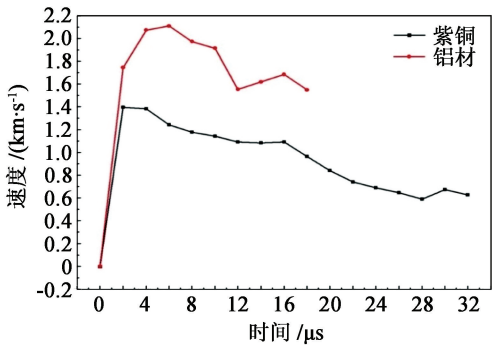
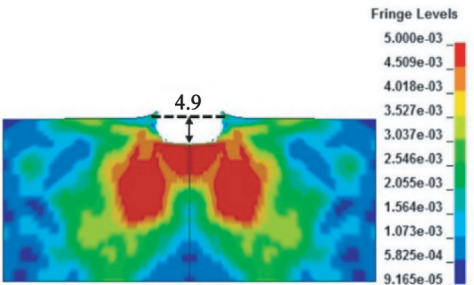


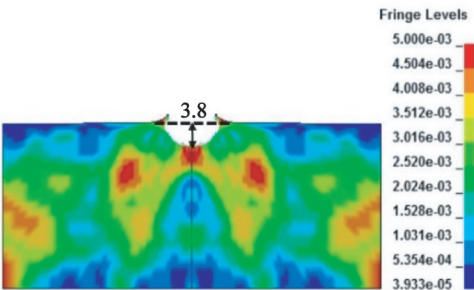
图 4 两种药型罩射流头部速度比较
Fig.4 Comparison of jet head velocity
of two kinds of linear

从图 5 中也可以很直观地看出两种材质的药型罩所形成的金属射流侵彻能力的大小。其中,铝质药型罩射流由于动能较大,在 18 mm 炸高下对 X90 钢的侵彻深度达到了 4.9 mm,而同等条件下紫铜药型罩射流的侵彻深度仅有 3.8 mm。

通过数值模拟的分析,综合比较射流头部速度以及钢板侵彻深度,得到铝质药型罩切割器的侵彻能力要强于紫铜药型罩的切割器,采用铝质药型罩的切割器在 18 mm 炸高情况下要比紫铜药型罩切割器的切割能力提高 28% 左右,而且铝材易于加工且成本较低,所以选用铝材制作切割器的药型罩。



(a) 铝质



(b) 紫铜

图 5 两种药型罩切割器侵彻钢板深度对比(单位:mm)
Fig.5 Comparison of penetration depth of steel
plate by two linear shaped charge cutters (unit:mm)

1.3 线型聚能切割器布设炸高

切割器在销毁弹药时要设置炸高,之前的数值模拟是在 18 mm 炸高情况下进行的,为了找到最佳炸高,使得切割器具有最佳侵彻能力,又补做了 10、15、20 mm 炸高下切割器切割钢板的数值模拟,通过对比 4 组模拟的钢板侵彻深度,来得到最佳炸高。通过比较 4 种炸高情况下的钢板侵彻深度(表 2),得到炸高在 15 mm 情况下,切割器具有最好

表 2 不同炸高下钢板侵彻深度对比

Tab.2 Comparison of penetration depth of steel plate with different burst heights

炸高/mm	10	15	18	20
侵彻深度/mm	3.2	5.0	4.9	4.5

的侵彻效果,切割深度可达 5.0 mm,故而在使用该切割器进行切割作业时最佳炸高为 15 mm。

2 聚能射流切割薄壳弹药的数值模拟

2.1 模型建立

为了进一步研究乳化炸药聚能切割器销毁薄壳弹药时,是否会引爆弹药内部装药,针对之前的数值模型做了调整(图 6),将之前模型中的金属板换成铁壳内装 B 炸药的薄壳弹药模型,其中金属薄壳厚 2 mm,材料模型采用 Johnson-Cook 模型,B 炸药采用 Lee-Tarver 点火增长模型,具体参数见表 3。

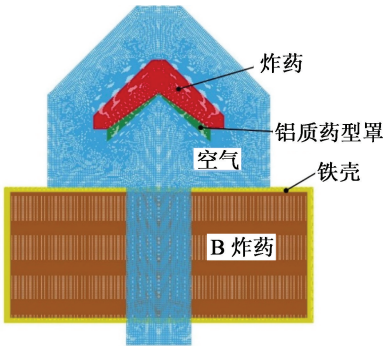


图 6 切割器切割薄壳弹药数值模型

Fig.6 Numerical model of thin shell ammunition cut by the cutter

此外,为了使研究结果更加可信,聚能切割器的装药除了使用乳化炸药外,还补做了 TNT 作为切割器装药的数值模拟。通过对两者所形成的射流速度、侵彻压力以及被发装药是否起爆进行对比,探究乳化炸药切割器对弹药进行去壳销毁的可行性。

表 3 B 炸药点火增长模型参数

Tab.3 Ignition growth model parameters of B Explosive

参数	A/GPa		B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3})$	
反应物	5.242		0.076 8	4.2	1.1	0.667	3.400×10^{-6}	
未反应物	778.000		-0.050 3	11.3	1.3	0.894	2.487×10^{-5}	
参数	x	y	z	F_{igmax}	$F_{G_1\text{max}}$	$F_{G_2\text{min}}$	G_1	G_2
数值	7	2	3	0.022	0.7	0	140	1 000
参数	a		b	c	d	e	g	I
数值	0.036 7		0.667	0.667	0.333	0.222	1	4.4×10^6

2.2 模拟结果及分析

从射流侵彻薄壳弹药的压力云图(图 7)中可以看出很直观地看出乳化炸药切割器与 TNT 切割器切割效果的不同。第一,乳化炸药由于爆速较小,猛度低,射流不能有效拉伸,而 TNT 作为切割器炸药时,其射流可以充分有效拉伸;第二,两者射流虽然都可以轻易切割掉金属薄壳,但后效却有很大不同,乳化炸药这组模拟射流仅仅是对弹药进行了切割,射流能量不足以起爆内装的 B 炸药,而 TNT 所形成的射流在刚接触 B 炸药时就对其进行了引爆,可以从压力云图中清楚地看出弹药内部爆轰波的传播。第三,两者对弹药销毁的结果完全不同,乳化炸药切割器仅对弹药进行了去壳,不考虑铝射流与钢壳作用产生热效应或有水降温的情况下,可以认为不会起爆被发装药,而 TNT 做主装药的切割器不仅切割了壳体,更起爆了被发装药。

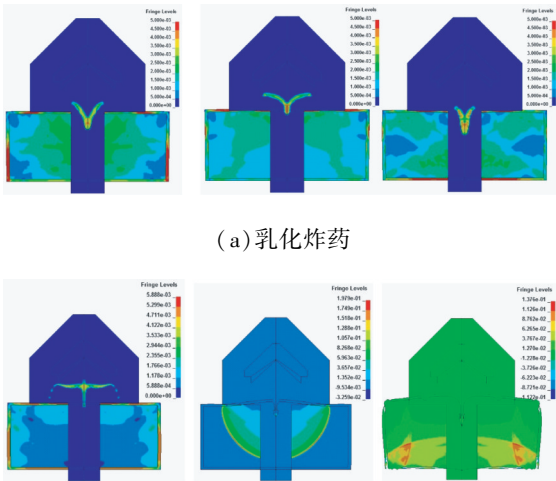
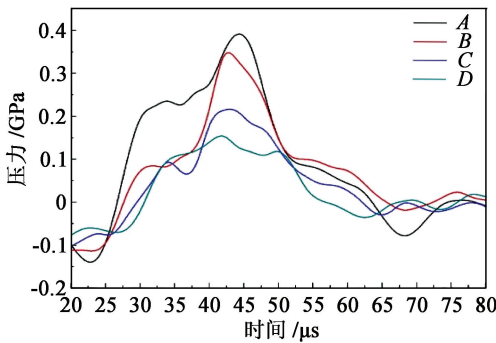


图 7 切割器切割薄壳弹药过程

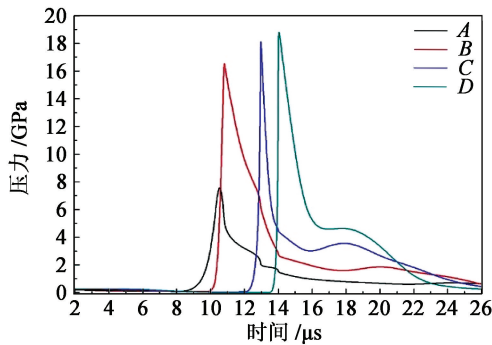
Fig.7 Thin shell ammunition cut by the cutter

为了探究薄壳弹药是否被起爆,在两组薄壳弹药模型中距离中轴线 5、10、15、20 mm 处分别设置 A、B、C、D 4 个观察点,最终画出压力-时间曲线

(图8)。通过对比可以发现,乳化炸药切割器所形成的射流切割弹药时的冲击波压力最大值也就只有0.39 GPa,且随着距轴线距离的增加,观测点峰值压力减小。



(a) 乳化炸药



(b) TNT 炸药

图8 B炸药中观察点的压力曲线

Fig. 8 Pressure history of observation points in B Explosive

TNT 作为炸药的切割器射流侵彻弹药时,观测点压力最大为 19.5 GPa,且随着距轴线距离的增加,观测点峰值压力变大,说明装药被完全起爆。文献[8]中,B炸药的临界冲击起爆压力为 5.63 GPa,故从侧面验证乳化炸药切割器所形成的射流能量不足以起爆内装的 B 炸药。

3 结论

- 1)设计了一种简易的以乳化炸药作为起爆药的线性切割器,利用已经成熟的切割器参数,将切割器的外壳换成塑料,降低了成本且易于加工。
- 2)通过数值模拟的方法确定切割器的药型罩材料,通过比较,得出铝质药型罩所形成的射流速度要比紫铜药型罩的射流大 50%,而且钢板的侵彻深度也提升了 28%,故而选择铝材作为药型罩材料。
- 3)为了确定切割器的布设高度,通过调整炸高建立多组数值模型,得出在 15 mm 炸高下,射流侵

彻钢板深度达到 5 mm,满足切割薄壳弹药的要求。

4)最后,分别建立了 TNT 和乳化炸药作为切割器装药的模型,通过切割薄壳弹药的数值模拟,得到乳化炸药做主装药时其射流是不会起爆待销毁弹药的,可以达到去壳销毁的目的。

参 考 文 献

[1] 孟德军,何爱忠,朱昊,等. 煤矿坚硬岩石巷道中深孔爆破技术应用研究[J]. 工程爆破,2008,14(3):31-33.
MENG D J, HE A Z, ZHU H, et al. Application & research on medium-deep-hole blasting technology in coal mine solid rock tunnel[J]. Engineering Blasting, 2008, 14(3):31-33.

[2] 娄建武,龙源,谢兴博. 废弃火炸药和常规弹药的处置与销毁技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007:142-210.

[3] 宋桂飞,李成国,夏福君,等. 危险弹药销毁用聚能引器设计[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(4):99-100,130.
SONG G F, LI C G, XIA F J, et al. Design of cumulative detonator for dangerous ammunition disposal[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010,30(4):99-100,130.

[4] 李金明,丁玉奎,可勇. 利用聚能原理销毁危险弹药的试验方法[J]. 爆破器材,2008,37(3):37-39.
LI J M, DING Y K, KE Y. The test method of disposing danger ammunition by using gather energy theory[J]. Explosive Materials, 2008,37(3):37-39.

[5] 李志峰,迟淑萍,宋仁峰. 国内乳化炸药现状及技术发展建议[J]. 矿业工程,2011,9(5):42-44.
LI Z F, CHI S P, SONG R F. Recent status and development trend of home and abroad emulsive explosive[J]. Mining Engineer,2011,9(5):42-44.

[6] 冯民贤. 射流引爆炸药的判据与机理[J]. 爆轰波与冲击波,1997,9(3):23-30.

[7] 姜春兰,张宝铨. 射流引爆炸药的机制及临界判据[J]. 含能材料,1993,1(2):23-27.
JIANG C L, ZHANG B P. Mechanism and critical criterion of jet initiation explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 1993,1(2):23-27.

[8] 姜颖资,王伟力,黄雪峰,等. 带壳炸药在高速运动炸药作用下殉爆效应研究[J]. 工程爆破,2014,20(3):1-4.
JIANG Y Z, WANG W L, HUANG X F, et al. Research on the sympathetic detonation effect of shelled explosive by high-speed movement explosive[J]. Engineering Blasting, 2014,20(3):1-4.