

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.03.008

药型罩与炸药间距对聚能装药能量输出的影响*

徐 风^{①②} 陈智刚^② 付建平^② 李小军^③

①中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

②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)

③军事科学院防化研究院(北京,102205)

[摘要] 为了满足反恐行动中破门破障类爆破器材威力可调节的要求,解决现有设计及方案无法根据目标快速调整的问题,提出通过调节药型罩与炸药间空气距离的方式对聚能装药威力进行快速调节的方案。利用数值仿真及理论验证的方法,对两种锥角结构且不同药、罩间距状态下的聚能装药能量输出进行了计算及理论分析。结果表明,随着聚能装药结构中药型罩与炸药间距的增加,射流的侵彻深度明显降低。当间距高度大于 $0.5D$ (D 为装药直径)时,侵彻深度降低至原始侵彻深度的20%以下。该方案可以稳定地调节聚能装药的威力,为工程设计人员提供方案支持。

[关键词] 聚能装药;爆破器材;侵彻能力;快速调节

[分类号] TJ410.3+33

Influence of Distance between Liner and Explosive on Energy Output of Shaped Charge

XU Feng^{①②}, CHEN Zhigang^②, FU Jianping^②, LI Xiaojun^③

① School of Mechanical & Electrical Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

② National Defense Key Laboratory of Underground Damage Technology, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

③ Institute of Defense Research, Academy of Military Science (Beijing, 102205)

[ABSTRACT] In order to meet with the requirement of adjustable power of explosive materials for door or barrier breaking in anti-terrorism operations and to deal with the quick adjustment against the target which cannot be realized by current available design and method, a new scheme of fast power adjusting of shaped charge was proposed by alternating the air height between liner and explosive. By numerical simulation and theoretical verification, energy output of two conical angle structures with different spacing between charge and liner were analyzed, calculated and theoretically decomposed. The results show that penetration depth of the jet decreases with the increase of the distance between liner and explosive. When space height is more than $0.5D$, penetration depth would reduce to lower than 20% of the original value. The scheme can stably adjust the power of shaped charge and provide scheme support for engineers.

[KEYWORDS] shaped charge; explosive materials; penetration power; rapid adjustment

引言

当前形势下,一般要求反恐行动中破门破障类的聚能型爆破器材具有低附带伤害、威力可调节的特点。为了尽可能达到控制威力的设计目的,技术人员在原有聚能装药设计原理的基础上,又相继发展了玻璃射流^[1]、水射流等非金属射流^[2]技术结构

体系,同时也对部分爆破装置结构进行了柔性切割等技术设计^[3-4]。然而,此类设计虽然在一定程度上降低了传统聚能爆破装置的总体威力,但却无法根据实际目标快速调整聚能射流的侵彻、切割能力。

对于聚能射流的侵彻能力调整,目前已有较为完善的理论及试验支持。乔茹斐^[5]、肖勇^[6]、张万君^[7]等研究了炸药配方及结构对聚能射流威力的影响,而对于药型罩结构的研究则更是成熟。但是,

* 收稿日期:2019-05-10

第一作者:徐风(1991-),男,硕士研究生,主要从事高效毁伤战斗部的研究。E-mail:1262137122@qq.com

通信作者:陈智刚(1963-),男,博士,教授,主要从事高效毁伤战斗部的研究。E-mail:cyc@nuc.edu.cn

以上研究很难在实战中根据目标情况快速做出调整。便于短时间调整的聚能结构参数有炸高、倾斜角等。目前的研究^[8]证明,炸高对于射流威力调整的能力有限;倾斜角则与聚能爆破实际使用要求不符,且相关曲线线性度不够,以至于设计使用困难^[9]。因此,现有研究均无法有效地解决实战问题。

本文中,利用数值模拟及理论分析对药型罩与装药间距对聚能结构侵彻能力的影响进行了研究,以期通过分析此种结构原理,对实战中如何根据目标情况快速调整聚能装药威力的问题提出更好的解决方案。

1 物理模型

以聚能装药侵彻破坏半无限 45° 钢靶为主要物理模型。装药采用 8701 炸药,药型罩材料为紫铜,壳体为 2024 铝。物理模型如图 1 所示。

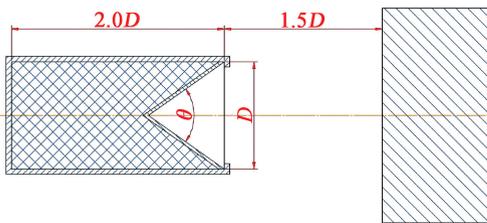


图 1 物理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical model

聚能装药结构模型分为 a、b、c、d 4 种。装药直径 D 分别为 40、80、120 mm 和 40 mm;药型罩锥角 θ 分别取 70° 、 70° 、 70° 及 126° ;计算装药高度 $2.0D$,炸高 $1.5D$ ^[10],壳体厚度 2 mm,靶板为半无限靶。所述药型罩与装药间距调整如图 2 所示,调整范围为 $0 \sim 0.5 D$ 。

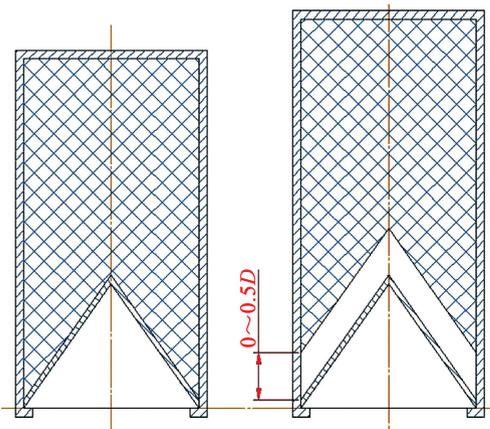


图 2 药型罩与装药间距调整示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spacing adjustment between liner and explosive

2 仿真计算

2.1 计算参数及网格划分

利用 LS-DYNA 数值仿真软件进行计算,采用 1/4 模型。为表述清楚,具体截图根据内容要求进行了部分对称显示处理,采用 ALE 算法,基本模型网格划分如图 3 所示。

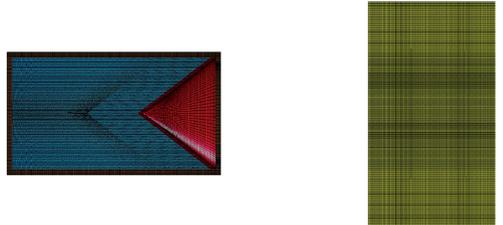


图 3 基本模型网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of basic model meshing

主要材料参数^[11]见表 1、表 2。其中,8701 炸药采用高能炸药材料模型 * Mat_High_Explosive_Burn 和 JWL 状态方程。精确描述了在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积和能量特性。

表 1 8701 炸药主要参数

Tab. 1 Main parameters of explosive 8701

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A / GPa	B / GPa	R_1
1.72	581.7	6.815	4.1
$v_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	E_0	ω	R_2
8 000	0.09	0.35	1.0

表 2 药型罩主要参数

Tab. 2 Main parameters of the liner

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A / GPa	B / GPa	n
8.96	0.090	0.292	0.31
G	c	m	T_R
0.5	0.025	1.09	268

药型罩材料的计算模型则使用 * Mat_Johnson_Cook,是在考虑了金属材料承受大应力、高应变率以及高温的情况下用来描述材料动态响应过程和材料变形问题,状态方程为 Gruneisen 形式。

2.2 射流成型过程速度、压力云图

为了便于分析射流形成过程中引起能量输出变化的因素,对口径一致、但药型罩锥角不同的两种模型 a 和 d 的结构进行对比,记录射流成型过程中药型罩单个微元速度的最大时刻 t_m ,并比较此时药型罩上微元的最大速度 v_m 、最大压力 p_m 和整体药型

罩速度云图及其所受压力分布云图。 v_m 与传统意义射流头部速度不同,仅取药型罩压垮过程内的射流微元速度最大值,以便后续分析成型过程中的爆轰波波形、爆轰产物及空气间隙等因素对金属射流形成的影响和改变。因此,备注了截取时间 t_m ,以便其他研究人员进行对比。记录及整理结果如表3、表4所示。

2.3 靶板侵彻深度与药、罩间距的关系

观察靶板侵彻效果发现,少数模型由于射流断裂,使得靶板出现如图4所示侵彻结果。故为了使结果更加清晰,以最大侵彻深度为纵坐标,以药、罩

间距与装药直径 D 的比值作为横坐标,结果如图5所示。

为更加直观地分析药、罩间距对侵彻深度单方面的影响,避免模型 a、b、c 装药直径不同而带来的整体侵彻能力的变化,将各模型药、罩间距为 0 mm 状态下的侵彻能力标定为单位 1,间接反映各模型方案下侵彻深度的变化,如图6所示。

考虑到网格测量可能带来的影响,随着聚能装药结构中药、罩间距的增加,各模型射流的侵彻深度降低。药、罩间距的不同确实带来了整个成型装药能量输出的变化。

表3 模型 a 的仿真结果

Tab.3 Simulation results of Model a

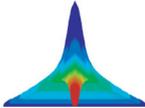
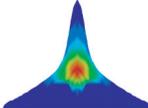
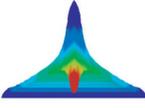
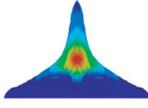
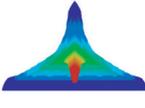
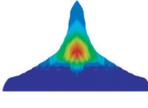
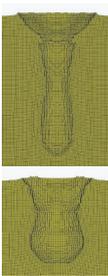
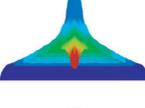
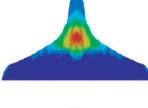
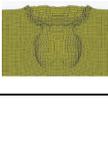
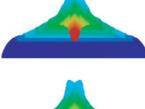
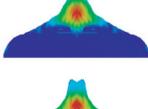
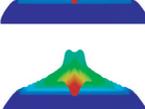
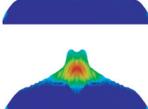
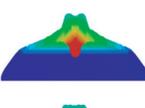
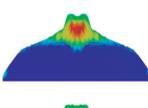
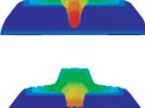
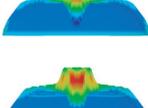
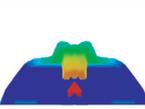
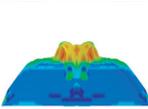
药、罩间距 与 D 的比值	$t_m / \mu\text{s}$	典型成型 速度云图	$v_m / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	典型成型 压力云图	p_m / GPa	典型侵彻 结果	中心侵彻 深度/mm
0	13		6 007		20.630		119.8
0.05	13		5 674		17.010		115.7
0.10	13		5 550		15.730		112.9
0.15	13		5 415		13.550		109.8
0.20	13		5 107		12.820		90.8
0.25	13		4 889		10.450		81.5
0.30	13		4 619		8.869		63.2
0.35	13		4 254		7.350		59.3
0.40	14		4 527		4.786		42.8
0.45	14		4 691		3.705		24.2
0.50	15		4 904		2.940		14.4

表 4 模型 d 的仿真结果
Tab.4 Simulation results of Model d

药、罩间距与 D 的比值	$t_m/\mu s$	典型成型速度云图	$v_m/(m \cdot s^{-1})$	典型成型压力云图	p_m/GPa	典型侵彻结果	中心侵彻深度/mm
0	13		3 848		7.485		54.1
0.05	15		3 641		3.100		52.7
0.10	15		3 371		3.733		42.5
0.15	15		3 187		3.186		33.5
0.20	16		3 133		1.731		26.2
0.25	16		3 373		1.627		18.1
0.30	16		3 516		1.505		9.4
0.35	16		3 617		1.729		6.0
0.40	17		3 709		1.083		7.1
0.45	17		3 734		1.075		5.1
0.50	18		4 098		1.520		4.3

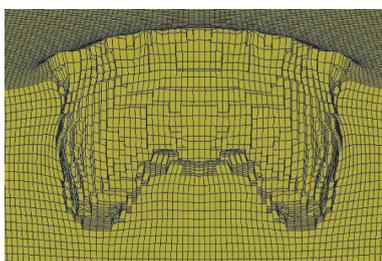


图 4 中心多层孔洞示意
Fig.4 Schematic diagram of central multi-layer hole

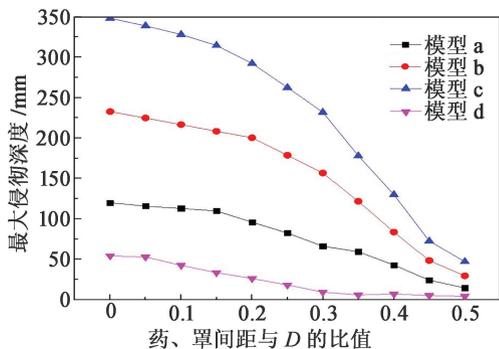


图 5 各模型的最大侵彻深度
Fig.5 Maximum Penetration depth of each model

3 结果与分析

仿真结果表明,射流成型过程中的微元最大速度 v_m 先随着药、罩间距的增加而减小,某个临界点

之后开始增加。并且此部分微元参与射流头部的组成,对整个金属射流侵彻能力影响很大。为此,需要从结构上探究射流成型微元速度减小后又增加的原因及相关临界点。

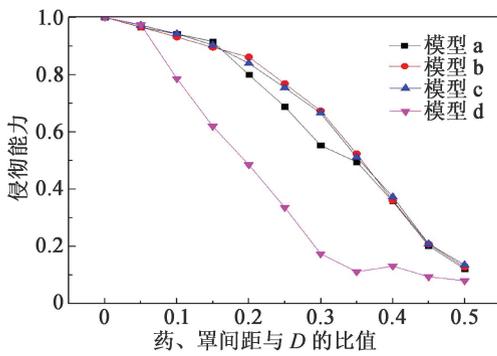


图6 各模型的侵彻能力

Fig.6 Relative penetration ability of each model

首先,炸药爆炸后,爆轰产物对药型罩的作用与其离爆炸中心的距离相关。空气是较稀疏的介质,爆炸产物膨胀转变为空气中冲击波面的过程是不等熵的。因此,根据近似方法确定药、罩间距里空气中爆炸冲击波的初始参量,由式(1)得到。

$$u_x = \frac{d}{\gamma + 1} \left\{ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_H} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \right\} + \frac{2C_k}{K-1} \left[1 - \left(\frac{p_x}{p_k} \right)^{\frac{K-1}{2}} \right]. \quad (1)$$

式中: u_x 为空气冲击波波速; d 为炸药爆速; p_H 为炸药的 C-J 压力; p_k 为空气初始压力; p_x 为炸药在空气中爆炸所形成的初始冲击波阵面压力; γ 为爆轰过程中的绝热指数;其余为常量。

其次,对于空气介质中的冲击波峰值超压,已有相关理论研究可以表明,爆炸产物膨胀的最初压力下降极快^[12]。如算例:无限空气介质中爆炸产物的半径增大一半时,其压力量级从 10^{10} Pa 快速降低至 10^8 Pa。本文中,由于密闭壳体限制,冲击波压力下降速度没有无限空气介质中快,形成上文所列射流成型微元最大速度降低的情况。

最后,当爆轰波形成并接近空气界面时,空气界面会改变其传播方向,并进一步影响到爆轰产物的传播及其对药型罩形成压力的分布。爆轰波传递到空气界面时刻的仿真数据如图7所示。

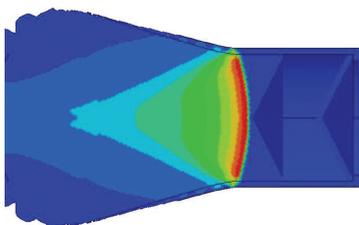


图7 爆轰波临近空气边界仿真结果

Fig.7 Simulation results of detonation wave near air boundary

可以看到,两倍装药高度的情况下,爆轰波在接近空气边界时可以按照平面波处理。在装药-空气界面,冲击波以一定角度通过时,波速方向及大小发生改变,如图8所示。

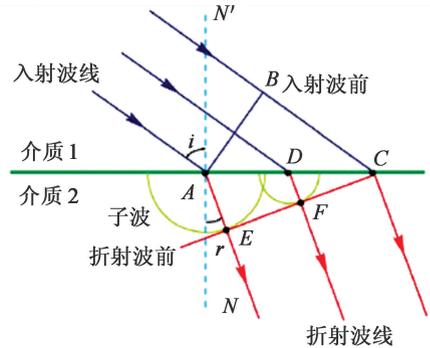


图8 爆轰波折射示意图

Fig.8 Refraction diagram of detonation wave

根据斯奈尔定律,有

$$\frac{\sin i}{v_1} = \frac{\sin i'}{v_1} = \frac{\sin r}{v_2}. \quad (2)$$

因此,当爆轰波进入空气介质后,由于折射发生角度偏移,造成了整体波形向成型装药轴线方向的汇聚作用,当药、罩间空气距离大于汇聚点距离时,汇聚作用直接作用于药型罩。并且,波的方向会使空气间隙内爆轰产物的传播方向受到影响,改变了整个药型罩受力面的压力变化,进而造成药型罩压垮过程中头部微元速度单方面增加,甚至引起局部极大的速度梯度,致使射流断裂。仿真计算结果也验证了这一点,当药型罩锥角发生变化时,该汇聚临界点位置随着斯奈尔定律发生变化,70°锥角结构较126°锥角结构其汇聚临界点距离装药更近、汇聚作用更为明显,这是造成70°锥角药型罩在成型刚开始就提前断裂的主要因素之一。

综上所述,药、罩间空气距离的变化会对整个药型罩受力大小、方向、各部位能量密度分配产生影响,因此,引起了聚能射流侵彻靶板过程中侵彻深度、孔径、形态的变化。

4 结论

1) 随着聚能装药结构中药型罩与炸药间距的增加,射流的侵彻深度明显降低。当间距高度大于 $0.5D$ 时,聚能装药形成射流发散,侵彻深度降低至原始侵彻深度的20%以下,聚能效果微弱。

2) 加入空气介质后,爆轰波折射作用使得药型罩表面受力发生变化,整体受力降低,但中部相对汇聚集中,造成药型罩顶部在成型过程中出现空腔甚

至提前断裂,进而形成了随着间距增加,药型罩头部速度先降后升的结果。

3)不同锥角的药型罩结构,侵彻深度随药、罩间距增加而降低的规律曲线是有区别的。部分原因是锥角大小会影响装药与空气界面的折射波方向,进而改变爆轰产物传播及药型罩的受力压垮过程。在这种汇聚效应下,小锥角药型罩将更容易出现射流断裂现象。当然,在正常成型装药研究中,小锥角药型罩成型也较大锥角罩更容易出现射流断裂的现象,这种射流的断裂同样是局部速度梯度过大引起的,但显然其根本原因及产生时间与本文中所研究的不同。

4)调整药、罩间距对聚能装药能量输出的影响是非线性、但曲线平滑的,可以考虑将药、罩间距作为威力可调节聚能爆破装置的设计要点。

参 考 文 献

- [1] 张斐,周春桂,韩阳阳,等. 玻璃射流对带壳装药冲击起爆的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(12):86-89.
ZHANG F, ZHOU C G, HAN Y Y, et al. Numerical simulation on glass jet initiating explosive with shell[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(12):86-89.
- [2] 邵先锋. 基于低附带损伤破拆防盗门技术研究[D]. 太原:中北大学,2018.
SHAO X F. Research on the destruction of security door technology with low additional damage [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [3] 王宝兴,高强,张双计,等. 大巴车玻璃柔性聚能切割技术的应用研究[J]. 工程爆破,2014,20(6):54-57.
WANG B X, GAO Q, ZHANG S J, et al. Application research of flexible shaped cutting technology in bus glass [J]. Engineering Blasting, 2014, 20(6):54-57.
- [4] 张少华. 警用破窗器设计及切割夹层玻璃的应用[D]. 太原:中北大学,2016.
ZHANG S H. Design of police broken window device and application of cutting laminated glass [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [5] 乔茹斐,田晓丽,乔金超,等. 不同炸药及装药高度对聚能射流侵彻性能的影响[J]. 兵工自动化,2018,37(6):88-92.
QIAO R F, TIAN X L, QIAO J C, et al. Effects of different explosives and charge height on penetration performance of jets [J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(6):88-92.
- [6] 肖勇,彭加斌,李哲雨,等. 一种低毁伤玻璃切割器的实验研究[J]. 火工品,2016(5):6-9.
XIAO Y, PENG J B, LI Z Y, et al. Experimental study on a low damage glass cutter [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(5):6-9.
- [7] 张万君,李国辉,王凯琳,等. 装药长径比对半球形聚能装药射流成型的数值模拟[J]. 火炸药学报,2017,40(5):98-101.
ZHANG W J, LI G H, WANG K L, et al. Numerical simulation on the jet formed by hemispherical shaped charge with length-to-diameter ratio of charge [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(5):98-101.
- [8] 吴建宇,龙源,纪冲,等. 炸高对环形聚能射流侵彻特性的研究[J]. 兵器材料科学与工程,2015,38(4):68-72.
WU J Y, LONG Y, JI C, et al. Effect of burst height on penetration properties of annular shaped charge jet [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(4):68-72.
- [9] 赵庚,郭光全,李树强,等. 掠飞攻顶反坦克破甲战斗部的动态特性研究[J]. 火炮发射与控制学报,2019,40(1):34-38.
ZHAO G, GUO G Q, LI S Q, et al. Study of the dynamic characteristics of the top flying attack antitank armor warhead [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2019, 40(1):34-38.
- [10] 朱铭颀,顾文彬,唐勇,等. 炸高对侵彻效应影响试验和数值模拟研究[J]. 爆破器材,2010,39(2):31-34.
ZHU M J, GU W B, TANG Y, et al. The experimental & numerical simulation of the stand off effect to penetration properties [J]. Explosive Materials, 2010, 39(2):31-34.
- [11] 李喜锋,陈智刚,谢凌清,等. 两种典型双层 EFP 战斗部数值模拟及试验研究[J]. 机械,2011,38(8):19-22.
LI X F, CHEN Z G, XIE L Q, et al. Numerical simulation and experimental study of two typical double-layer EFP warhead [J]. Machinery, 2011, 38(8):19-22.
- [12] GUPTA Y M. Shock waves in condensed matter [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, 1985:3-10.