

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.01.007

# 碳纤维壳体壁厚对陶瓷球初速及性能的影响<sup>\*</sup>

霍奕宇<sup>①</sup> 王坚茹<sup>①</sup> 陈智刚<sup>①</sup> 印立魁<sup>①</sup> 芮 亮<sup>①</sup> 肖辉朗<sup>②</sup>

①中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

②北京理工大学机电学院(北京,100081)

[摘 要] 为控制低附带毁伤战斗部中杀伤元的杀伤范围及杀伤威力,研究战斗部壳体厚度对初速及性能的影响。将炸药与陶瓷球混合构成新型复合装药结构,采用 LS-DYNA 软件对不同壁厚的战斗部进行数值模拟,从中筛选出壁厚为 2、4、6 mm 的壳体,进行静爆试验。对比分析得出,仿真与试验结果规律吻合较好,陶瓷球的初速与壳体厚度线性相关。相同装药结构中,随着壳体厚度的变化,爆轰瞬间,陶瓷球的初速、强度、毁伤效能等均有相应变化。可适当调节壳体壁厚来控制陶瓷球的初速。

[关键词] 碳纤维壳体;陶瓷球初速;战斗部;低附带毁伤

[分类号] TJ41

## 引言

现代战争越来越趋向于城区作战,如何减少对无辜人员的伤害已成为国际社会关注的重要课题。低附带毁伤弹药是一种专门用于反恐或城市作战的新型弹药。普通杀爆弹主要依靠冲击波超压和金属破片进行毁伤<sup>[1]</sup>,低附带毁伤弹药的特点就是在一定区域内能够高效毁伤目标,而在规定区域外附带杀伤很小,甚至是零杀伤。

目前,国外主要应用是小直径炸弹,国内对低附带毁伤弹药的研究起步较晚,主要采用重金属钨粉作为杀伤元。重金属作为杀伤元虽然能获得低附带效果,但会对土壤造成严重的重金属污染,且这种污染是难以消除的。作者研究的低附带毁伤战斗部采用陶瓷球作为杀伤元,碳纤维材料作壳体,能很好地起到低附带毁伤效果,而且能够避免重金属所造成的污染。

对前期的试验及结果进行对比分析<sup>[2-4]</sup>,破片材料、壳体材料等都会对低附带效果产生影响。本次研究是炸药与陶瓷球在一定配比度、相同装药结构及装药量的情况下,壳体厚度对陶瓷球初速及性能的影响特性。

## 1 结构设计

### 1.1 装药结构

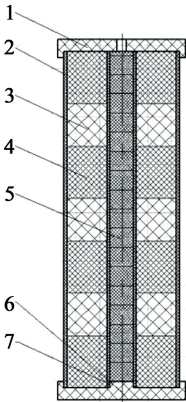
采取复合装药模式,将陶瓷球(图 1)与高爆炸药混合形成新型复合装药结构,按照图 2 所示方式

装配于碳纤维壳体内,碳纤维壳体壁厚分别为 2、4、6 mm。中心药柱的装药直径为 20 mm。



图 1 试验用陶瓷球

Fig.1 Ceramic balls for experiment



1 - 上端盖;2 - 壳体;3 - 陶瓷球;4 - 炸药;  
5 - 中心药柱;6 - 下端盖;7 - 药筒

图 2 复合装药结构

Fig.2 Composite charge structure

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-04-09

作者简介:霍奕宇(1988~),男,硕士研究生,主要从事战斗部结构与高效毁伤。E-mail:836784743@qq.com

通信作者:王坚茹(1957~),女,硕士,高级工程师,主要从事战斗部结构优化与高效毁伤。E-mail:135136wang@163.com

1.2 理论分析

陶瓷低附带毁伤弹药主要由非金属壳体、炸药、陶瓷球构成。试验弹装填的炸药为钝化黑索今,该炸药具有密度大、爆速高、爆轰压力大、所形成的能量密度高等特点,因而爆炸的破坏性强、威力大。炸药爆炸后,特定材料的壳体破碎,陶瓷球在爆轰波及爆轰产物的驱动下高速飞向目标,形成陶瓷球与爆轰产物混合的高温高压场。在近场范围内,陶瓷球的密集杀伤面密度很大,故该弹药在近场密集杀伤区威力远远高于普通杀伤榴弹;同时,由于陶瓷球密度小、质量轻,非金属壳体材料密度低,在高温的爆轰作用下有一部分燃烧掉,破碎后尺寸很小,在空气阻力的作用下飞行速度衰减很快,飞行距离很短,在很小的过渡杀伤区域内杀伤能力迅速降低,所以,对限定距离外的其他无辜目标造成误伤的概率极低。

由爆炸力学知,壳体对装药的临界直径有影响<sup>[5]</sup>,进而影响炸药爆轰波对陶瓷球的驱动效果,即会影响陶瓷球初速。

碳纤维材料的抗拉强度是钢材抗拉强度的 10 倍,韧性强,具有良好的延展性,可抑制和减小裂纹的产生和扩散。中心药柱引爆后,爆轰波及爆轰产物迅速作用于壳体,随着壳体壁厚的增加,壳体质量也在不断增加,破壳需要消耗的能量逐渐增加,由于战斗部装药量小,再加上碳纤维壳体有很高抗拉强度,雷管引爆瞬间炸药可以完全被引爆。

2 数值模拟

2.1 有限元模型

采用 True Grid 有限元网格生成软件,建立不同壳体壁厚的结构模型。弹体选择理想的圆柱形。在不改变炸药与陶瓷球配比度以及装配结构的情况下,通过改变壳体壁厚,来计算壁厚对陶瓷球初速的影响特性。模型分为 4 个单元:炸药、外壳、空气和陶瓷球,采用顶端中心点起爆的方式。在建模时,中

心药柱采用钝化黑索今,药柱高度 80 mm,直径 20 mm,周围采用复合装药结构。将炸药与陶瓷球按质量比为 1 : 1 混合,陶瓷球直径为 2 mm,壳体为碳纤维材料,壁厚分别为 1 ~ 8 mm。图 3 为装药结构有限元模型。

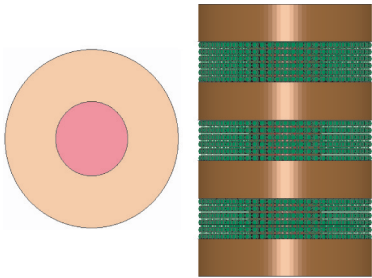


图 3 有限元模型  
Fig. 3 A finite element model

2.2 计算及结果分析

模型建立过程中,空气采用 MAT\_NULL 材料模型和 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 模型;壳体采用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 材料模型(参数见表 1);陶瓷球采用 MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CERAMICS 材料模型(参数见表 2);炸药采用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型以及 EOS\_JWL 模型<sup>[6-8]</sup>。

图 4 给出了仿真结果中破片初速随壳体壁厚的变化曲线。

从图 4 可以看出,随着壁厚的增加,破片初速是一个先减小后增大的过程。由于战斗部装药量比较小,炸药可在瞬间全部被引爆。壁厚在 1 ~ 6 mm 之间时,随着壳体壁厚的增加,陶瓷球的初速在逐渐下降。这是因为随着非金属壳体厚度的增加,破壳需要消耗的能量在逐渐增加,尤其是在非金属壳体壁厚较薄时,这种影响表现得尤为突出。壁厚在 6 ~ 8 mm 之间时,随着壁厚的增加,陶瓷球的初速又出现了上升。这是因为非金属壳体较厚时破壳消耗的能

表 1 碳纤维壳体参数

Tab. 1 Parameters of carbon fiber shell

$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$E_1/$ GPa	$E_2/$ GPa	$G_{12}/$ GPa	$X_T/$ MPa	$X_C/$ MPa	$Y_T/$ MPa	$Y_C/$ MPa	$\gamma_{12}$	$S_{12}/$ MPa
1.383	109	5.6	3.4	1 835	1 356	57	179	0.258	85

表 2 陶瓷球参数

Tab. 2 Parameters of the ceramic material

剪切模量 $G/\text{GPa}$	体积模量 $K_1/\text{GPa}$	$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$A$	$B$	$m$	$n$	弹性极限/ GPa	$p_{\text{HEL}}/$ GPa	$T$	$D_1$	$D_2$
152	1.46	3.6	0.93	0.72	0.38	0.64	6.57	130.5	0.003	0.005	0.7

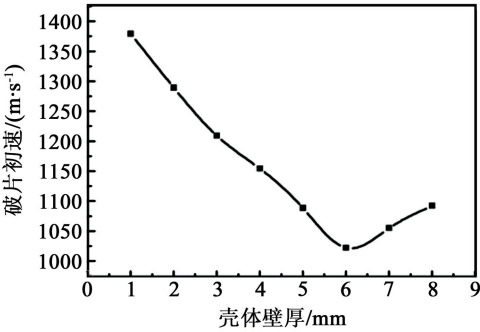


图 4 陶瓷球初速随壳体壁厚的变化

Fig. 4 Initial velocity changes of ceramic ball with different shell thickness

量已经不是主导因素,壳体较厚时,复合装药中爆轰产物能够充分作用于陶瓷球,所以陶瓷球的初速出现了上升的趋势。但这种趋势不会一直延续下去,因为战斗部的装药直径是固定的,壳体过厚一方面会导致装填量减少过多,达不到装填要求;另一方面壳体过厚会导致破壳难,陶瓷球的初速过小,不能满足杀伤标准。

不同壁厚条件下,战斗部中陶瓷球的飞散状态基本相同,图 5 为 50 μs 时壁厚为 8 mm 的战斗部中陶瓷球的应力分布云图。由于 50 μs 时爆轰驱动过程已经结束,陶瓷球基本无破碎,陶瓷材料作为杀伤元能够满足发射强度要求。

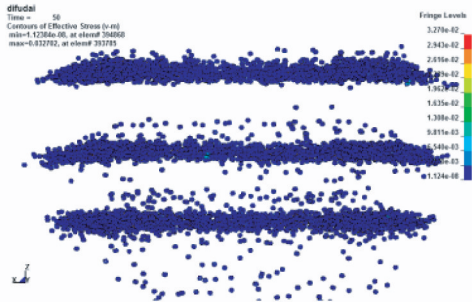


图 5 陶瓷球的运动分布

Fig. 5 Movement pattern of ceramic ball

3 试验及结果分析

3.1 试验准备

试验要验证低附带毁伤弹药壳体壁厚对陶瓷球初速的影响。

根据仿真结果中的壳体壁厚对陶瓷球初速的影响,选取下降范围内的壁厚分别为 2、4、6 mm 进行试验,每种壁厚装配 2 发。为了减小变量对结果的影响,装药配比度及结构保持不变,装药结构实物如图 6 所示。试验布置及细节参见文献[4]。

3.2 试验结果及分析

表 3 给出了试验数据,由表 3 中数据知:随着壳

体壁厚的增加,陶瓷球的初始速度呈下降趋势,这与仿真结果的 1~6 mm 内的变化趋势一致。



图 6 装药实物

Fig. 6 Real charges

表 3 陶瓷球平均速度及初速的试验数据

Tab. 3 Average velocity and initial velocity of ceramic balls from experiment

壁厚/mm	平均速度/(m·s <sup>-1</sup> )	初速/(m·s <sup>-1</sup> )
2	896	1 230
4	807	1 108
6	745	1 023

图 7 给出了 3 种不同壁厚情况下陶瓷球对松木靶板穿深的试验照片,从左到右依次为 2、4、6 mm 壁厚的穿深。随着壳体壁厚的增大,毁伤元陶瓷球对松木靶的穿深降低。将仿真结果与试验结果对比可以发现:陶瓷球的衰减规律是一致的。



图 7 陶瓷球对松木靶板的穿深

Fig. 7 Deep penetration of pine board by ceramic balls

试验是在仿真数据的参照下进行的,采用了非金属材料作为战斗部的壳体,为了获得低附带毁伤的效果,需要通过壳体壁厚来控制陶瓷球的初速,所以,只考虑了陶瓷球初速随壳体壁厚增加而减小的一段。

此次试验采取复合装药结构装配于碳纤维壳体内,因为复合装药结构能够使陶瓷球在更短的时间和距离内发挥强大威力,符合低附带毁伤弹药第一要素:在近距离处毁伤威力优于传统弹药<sup>[9]</sup>。采用



非金属的陶瓷材料破片作为杀伤元,它与传统战斗部作用机理不同,碳纤维壳体的抗拉强度极高,约为钢材的10倍,在爆轰波和爆轰产物的高温高压作用下,壳体大部分被燃烧掉,非金属陶瓷破片在复合装药结构中,炸药爆轰过程中已经有较高的动能,外加爆轰产物的驱动作用,壳体会迅速破裂。当炸药起爆后,壳体在爆轰波的高温高压作用下高速膨胀,发生塑性变形,壳体不发生破裂。当达到膨胀极限条件时,壳体破裂。此后,炸药对破片的驱动作用非常微弱,破片按既得速度飞向四周。而传统金属壳体战斗部中,战斗部外壳速度、加速时间、加速度与壳体厚度相关,壳体越厚,壳体飞散速度最大值越小,加速时间越长,加速度越小<sup>[8]</sup>。

如图8拟合了3种壁厚情况下陶瓷球的比动能衰减<sup>[9-10]</sup>曲线。因此,要改善低附带毁伤弹药中陶瓷球杀伤比动能,可以适当调节壳体壁厚,控制陶瓷球的初速。

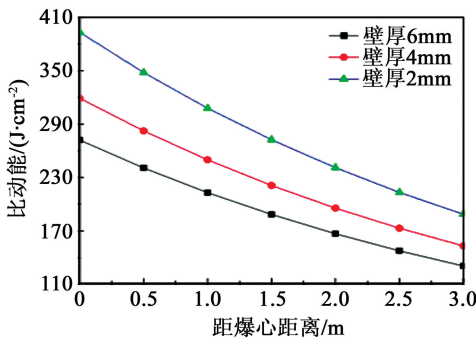


图8 比动能随爆心距离的衰减

Fig. 8 Decay curve of specific kinetic energy changing with the burst distances

4 结论

在一定范围内,陶瓷球初速随壳体壁厚的增加而降低,陶瓷复合装药结构与壳体壁厚有一定的关系。因此,在满足发射强度的前提下,可以通过适当调节壳体壁厚来控制陶瓷球的初速。

参 考 文 献

[1] 张奇,覃彬,孙庆云,等. 战斗部壳体厚度对爆炸空气冲击波的影响[J]. 弹道学报,2008,20(2):17-19,23.  
ZHANG Q, QIN B, SUN Q Y, et al. Influence of thickness of warhead shell upon explosive shock wave [J]. Journal of Ballistics,2008,20(2):17-19,23.

[2] 黄德雨,王坚茹,陈智刚,等. 炸药配比对陶瓷低附带毁伤战斗部能量输出的影响[J]. 弹箭与制导学报,

2012,32(1):108-110,130.

HUANG D Y,WANG J R,CHEN Z G,et al. Influence of explosive radio on energy output of ceramic low collateral damage warhead [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2012,32(1):108-110,130.

[3] 沈鑫,王坚茹,陈智刚,等. 陶瓷球形破片威力性能及毁伤效应数值模拟分析[J]. 机械,2011,38(9):73-76.  
SHEN X,WANG J R,CHEN Z G,et al. Numerical simulation and analysis of ceramic ball fragments prowess performance and damage effect [J]. Machinery, 2011, 38 (9):73-76.

[4] 张明,王坚茹,张俊,等. 装药结构对破片初速影响特性[J]. 火力与指挥控制,2014,39(8):117-120.  
ZHANG M,WANG J R,ZHANG J,et al. Research of charge structure on initial velocity impact characteristics of particles[J]. Fire Control & Command Control,2014, 39(8):117-120.

[5] CHEN Z G,ZHAO T Y,HOU X C,et al. Explosion and the end effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2004:170-172.

[6] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual (version 970)-nonlinear dynamic analysis of structures in three dimension [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation (LSTC),2003.

[7] SHI D Y, LI Y C. Explicit dynamic analysis based on ANSYS/LS-DYNA8.1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2005:8-11.

[8] 王瑶. 预制破片毁伤效能数值仿真研究[D]. 太原:中北大学,2012:41-52.

WANG Y. The numerical simulation research of the efficiency of the prefabricated damage [D]. Taiyuan:North University of China,2012:41-52.

[9] 马永忠,李其祥,杨光. 对弹丸破片速度衰减规律的探讨[J]. 弹箭与制导学报,2000,20(3):59-64.

MA Y Z,LI Q X,YANG G. The discussion of the velocity attenuate regularity of projectile fragments [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2000, 20 (3):59-64.

[10] 谭多望,王广军,龚晏青,等. 球形钨合金破片空气阻力系数实验研究[J]. 高压物理学报,2007,21(3):231-236.

TAN D W,WANG G J,GONG Y Q,et al. Experimental studies on air drag coefficient of spherical tungsten fragments [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2007,21(3):231-236.

- nese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(4): 47-50.
- [9] 段云, 张奇, 向聪, 等. 固液混合装药热传导特性对其安全性影响的计算研究[J]. 高压物理学报, 2010, 24(3): 181-186.
- DUAN Y, ZHANG Q, XIANG C, et al. A calculation study on the effect of the heat conduction on the safety of the solid-liquid mixed charge [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(3): 181-186.
- [10] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [11] 胡庆贤, 吕子剑. TATB、石蜡、石墨钝感作用的讨论[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 26-29.
- HU Q X, LU Z J. Study on desensitizing effect of TATB, wax and graphite[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(1): 26-29.
- [12] 汤崱, 杨利, 乔小晶, 等. HMX 热分解动力学与热安全性研究[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 396-400.
- TANG Z, YANG L, QIAO X J, et al. On thermal decomposition kinetics and thermal safety of HMX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 396-400.
- [13] 郑亚峰, 南海, 席鹏, 等. 不同比例 Al-RDX 混合炸药的热分解活化能研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(5): 13-17.
- ZHENG Y F, NAN H, XI P, et al. Research of thermal decomposition activation energy on Al-RDX hybrid explosives with different components ratio [J]. Explosive Materials, 2015, 44(5): 13-17.

### Aging Properties of Solid-liquid Mixed Fuels Containing Aluminum

YANG Rui<sup>①</sup>, WANG Zhenghong<sup>②</sup>, WANG Boliang<sup>①</sup>, TIAN Shaokang<sup>①</sup>, CHENG Yuteng<sup>①</sup>, LI Shiwei<sup>①</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Qingyang Chemical Industry Corporation (Liaoling Liaoyang, 111002)

[ABSTRACT] The accelerated aging tests at 71℃ were carried out in order to investigate the aging performance of a kind of solid-liquid mixed fuel containing aluminum. Heat of combustion, mechanical sensitivity, micro structure and thermal stability were measured before and after aging. Results show that after 28-day aging test at 71℃, the heat of combustion decreases by 0.86%, the friction sensitivity decays from 8% to 5%, while the impact sensitivity does not change. The gaps of the fuel become slightly smaller, but the overall bonding structure is not damaged. When the heating rate tends to zero the decomposition initial temperature and peak temperature shift by 7.1℃ and 1.6℃ downwards, respectively. The apparent activation energy reduces by 10.4 kJ/mol. In comparison with the fuel before aging, the performance of the aged fuel has little change and remains a good storage performance, still meeting the requirement.

[KEY WORDS] solid-liquid mixed fuels; aging properties; accelerated aging test

(上接第 33 页)

### Influence of Thickness of Carbon Fiber Shell on Initial Velocity and Capability of Ceramic Ball

HUO Yiyu<sup>①</sup>, WANG Jianru<sup>①</sup>, CHEN Zhigang<sup>①</sup>, YIN Likui<sup>①</sup>, RUI Liang<sup>①</sup>, XIAO Huilang<sup>②</sup>

①College of Mechatronics Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②School of Mechatronics, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] To control destruction lethal range and lethality of the low collateral damage warhead, the influence of warhead shell thickness on the initial velocity and performance was studied. Explosives were mixed with ceramic balls to constitute a new composite charging structure. LS-DYNA software was used for numerical simulation of warhead with different wall thicknesses. Shells with the thickness of 2, 4, 6 mm were chosen in the static explosion test. Simulation and experimental results agree well, and the initial velocity of ceramic ball correlates with the shell thickness linear. In the same charge structure, initial velocity, strength, and damage of ceramic balls change accordingly with different shell thickness during the instantaneous detonation. The initial velocity of ceramic balls could be controlled by appropriately adjusting the shell thickness.

[KEY WORDS] carbon fiber shell; initial velocity of ceramic ball; warhead; low collateral damage warhead