

文章编号: 1006-9941(2007)03-0253-04

## 半穿甲弹丸在复合靶中爆炸破坏效应的实验研究

周 宁<sup>1,2</sup>, 任辉启<sup>2</sup>, 沈兆武<sup>1</sup>, 刘瑞朝<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 实验测试了半穿甲弹丸在混凝土面层和沥青混凝土面层的多层复合靶中的爆炸深度及爆炸后形成的弹坑面积和体积; 对多层复合靶中弹坑的形成机理和复合介质的爆炸破坏机理进行了探讨。结果表明, 弹丸在混凝土面层的多层复合靶中爆炸后, 其混凝土面层上先出现径向裂纹, 后出现环向裂纹, 环向裂纹与径向裂纹贯穿形成破碎区, 并且径向裂纹的范围更大; 混凝土面层靶的炸深比沥青混凝土面层靶的炸深浅, 在药量相同情况下, 沥青混凝土面层复合靶中爆炸形成最大弹坑体积和弹坑截面积均比混凝土面层复合靶中的大。

**关键词:** 爆炸力学; 多层复合靶; 弹坑; 爆炸破坏分区; 最佳炸深

**中图分类号:** O38

**文献标识码:** A

### 1 引 言

由于装药在结构内部爆炸产生的破坏是在结构表面爆炸产生的破坏的 20 倍左右<sup>[1]</sup>, 因此研究半穿甲弹侵彻到目标一定深度后, 在其内部爆炸产生的破坏效果, 尤其是在机场跑道、高速公路等多层复合介质中的侵爆效果已成为兵器设计者关注的焦点。文献[2~4]对岩土介质中的单个药包爆炸破坏作用机理和效应进行了研究。文献[5,6]对单层介质中爆破漏斗形成机理进行了研究。王清洁、顾文彬等<sup>[7]</sup>开展了多层介质中爆炸破坏效应的实验研究, 周宁、任辉启等<sup>[8]</sup>对弹丸在多层复合介质中的爆炸破坏效应进行了研究。

为校核半穿甲弹的引信设计, 本文对半穿甲弹丸在两种面层材料的多层复合靶标中不同深度爆炸时靶标的破坏效应进行实验研究, 得到两种面层材料的多层复合靶中的最佳爆炸深度。

### 2 实验方案

前期试验已经确定了半穿甲弹爆炸破坏效果较好的炸深范围, 为了进一步确定最佳炸深, 更好地校核弹丸引信设计和研究目标靶的破坏形态, 对两种结构的靶标进行了多发侵彻爆炸实验。靶标结构如图 1、图 2 所示, 除面层不同外其余各层都相同, 由上到下依次为水泥稳定粒料层、粘土层、砂土层, 两类靶标均修筑在自然土层地基上。沥青混凝土面层靶标的沥青混凝土层由

三层结构组成: 上层为细粒式 AC-16 沥青混凝土, 中层为中粒式 AC-25 沥青混凝土, 下层为粗粒式 AM-30 沥青碎石。实验是在 60 m 高炮塔上用 100 mm 反坦克滑膛炮将半穿甲弹丸按设计速度、角度向多层复合靶标发射, 弹丸侵彻进入靶标一定深度后引信自动点火引爆, 弹丸的爆炸深度由弹丸发射初速控制, 弹丸装药为高能军用炸药, 采用圆柱形装药, 装药长径比为 3, 均为 1.5 kg。

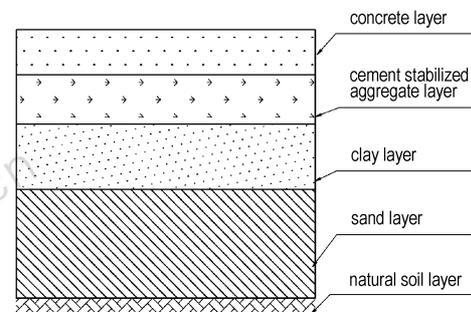


图 1 混凝土面层靶结构示意图

Fig. 1 Sketch map of concrete covered target

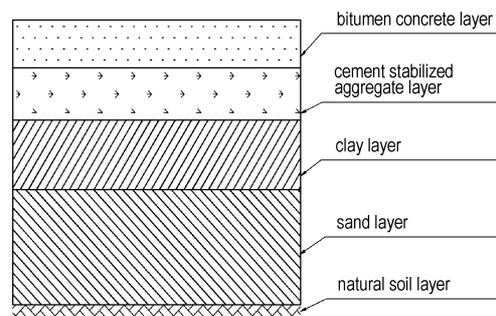


图 2 沥青混凝土面层靶结构示意图

Fig. 2 Sketch map of bitumen concrete covered target

收稿日期: 2006-06-23; 修回日期: 2006-08-25

基金项目: 973 项“深层工事目标易损性分析与毁伤机理研究”(51309-1-6)资助

作者简介: 周宁(1977-), 男, 博士, 研究方向为爆炸力学。

e-mail: zhouning@mail.ustc.edu.cn

实验中采用滑膛炮炮口的炮口线和靶标上放置的金属网靶形成通断电路测量弹丸侵彻初速度,原理是实验前先测量炮口到靶标的距离,实验时分别记录下炮口线和金属网靶断开的时间,将炮口到靶标的距离除以金属网靶与炮口线断开的时间差即可得到弹丸初速。实验结束后测量爆破漏斗的最小半径和最大半径,计算平均半径;计算爆破漏斗面积。

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 结果分析

表1为弹丸在多层介质中不同深度爆炸后的测试结果。着靶速度为弹丸侵彻初速度,用炮口线和金属网

靶测量;着靶角度即为弹丸入射角,实验时采用固定入射角;实验后用残余的弹丸头部所在深度减去装药中心到弹丸尖端的距离得到弹丸炸深;实验结束后清除靶体内的爆渣并测量靶标表面弹坑的半径、深度,并计算弹坑截面积和弹坑体积。数据显示相同药量、炸深不同最终形成的爆破漏斗面积和弹坑体积均有较大差别。

理论上,炸深由弹丸初速控制,弹丸初速大则炸深大,但由于引信点火时间有一定的误差,有的引信点火时间比预设时间长,造成虽然弹丸初速小,炸深反而大,如表中沥青混凝土面层靶的第2发;而有的比预设时间短,造成弹丸初速大,炸深反而小,如表中沥青混凝土面层靶第5发。

表1 弹丸在多层介质不同深度的爆炸结果

Table 1 Experimental results of projectile blasting in multi-layer targets

items	concrete covered targets						bitumen concrete covered targets				
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
initial velocity/ $m \cdot s^{-1}$	707	705	699	700	655	644	637	652	675	690	737
ring angle / ( $^{\circ}$ )	57	57	57	57	57	57	55	57	57	56	55
blasting depth / m	1.00	1.04	1.02	1.06	0.99	0.97	1.01	1.07	1.04	1.05	1.06
average dent radius / m	1.48	1.08	1.32	1.02	1.53	1.49	1.36	1.46	1.61	1.61	1.87
dent sectional area / $m^2$	6.88	3.66	5.47	3.27	7.35	6.97	5.81	6.69	8.14	8.16	10.98
dent volume / $m^3$	1.97	1.93	1.95	1.99	2.07	1.49	1.79	2.42	2.18	2.54	2.98

图3和图4是由表1数据得到的炸深与弹坑面积、弹坑体积的关系曲线。由图可以看出,对混凝土面层和沥青混凝土面层的多层靶,弹坑面积和体积随炸深变化的规律是一致的,即弹坑面积和体积均随炸深的增加先增加后减小。对于混凝土面层靶,炸深在0.99 m附近弹坑截面积和体积达到最大值,即该位置为最佳炸深,而对于沥青混凝土面层靶,炸深在1.06 m附近弹坑截面积和体积才达到最大值,并且沥青混凝土面层靶的弹坑截面积和体积均比混凝土面层靶的大,这是因为混凝土的强度比沥青混凝土强度大,破坏相同体积的混凝土消耗的能量要大很多,因此相同药量情况下弹坑体积要小一些,并且要达到最佳的破坏效果,炸深也必须减小。

#### 3.2 爆炸破坏效应分析

炸药在多层介质中爆炸,由于介质的不均匀性和内部界面增多,其爆炸破坏机理非常复杂。炸药爆轰后炸药周围的介质受到强烈压缩,结构完全破坏,并向周围挤压形成一个空腔,此过程初期多层介质中的爆炸作用与单层介质中的爆炸作用区别不大;当应力波传播到两层介质界面时,应力波在界面处发生反射和投射,对本实验采用的上层介质的波阻抗比下层介质的波阻抗大,在界面处反射和透射的都是压缩波。界面处反射和透射的应力波与爆生气体共同作用使得界

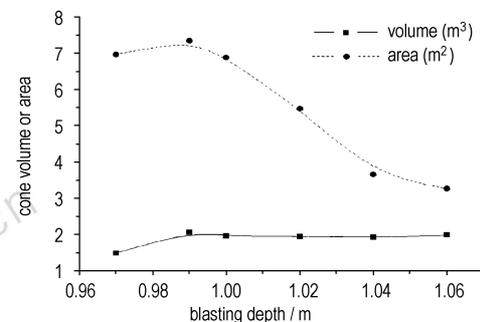


图3 混凝土面层靶爆炸深度与漏斗面积、体积的关系曲线

Fig. 3 Curves of blasting depth vs dent area and volume for concrete targets

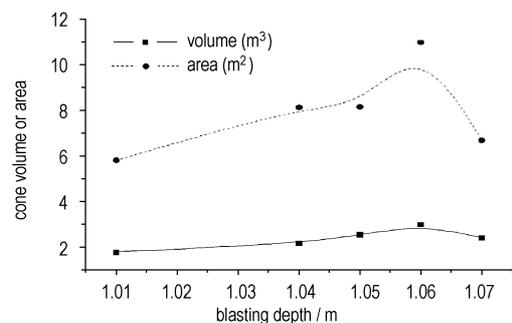


图4 沥青混凝土面层靶爆炸深度与面积、体积的关系曲线

Fig. 4 Curves of blasting depth vs dent area and volume for bitumen targets

面处的破坏极为复杂,实验结果显示各层介质内部的破碎区均大于界面处的破碎区,在界面处留下一圈突出的未破碎介质。由于面层介质强度比下层介质强度大很多,尤其是面层为混凝土层的多层复合靶,在水泥稳定粒料层与混凝土层界面上的反射应压缩波能将很大范围内的水泥稳定粒料压垮,而透射进入混凝土层的压缩波,其超压低于混凝土的动态抗压强度不能将混凝土压碎,压缩波仅能使混凝土层内的质点获得一定的速度向自由面方向运动,引起混凝土环向拉伸,由于混凝土的抗拉强度仅为抗压强度的十分之一左右,在环向拉应力的作用下混凝土内将产生径向裂纹,后续爆生气体楔入裂纹,使径向裂纹进一步发展,当裂纹贯穿混凝土面层后爆轰气体急剧释放,爆炸空腔内的爆生气体出现过度膨胀,将产生向爆心运动的稀疏波,使介质受到向爆心的径向拉伸,形成环向裂纹并与径向裂纹相互贯穿形成破碎区。

图 5 为高速摄像拍摄的半穿甲弹侵入混凝土面层靶中爆炸后混凝土面层几个典型破坏特征出现时刻的照片,第一幅为弹丸完全进入靶体瞬间的照片,飞溅物质为弹丸撞击破坏的混凝土;第二幅为 2 ms 时,弹丸爆炸后混凝土面层刚开始出现鼓包运动时的照片;第三幅为 10 ms 时,混凝土面层出现较明显的径向裂纹时的照片;第四幅是 18ms 时,混凝土面层出现较明显环向裂纹时

的照片;第五幅是 60 ms 时,鼓包上升运动基本结束时的照片,之后抛掷爆渣开始回落到地面形成靶体最终的破坏形态。高速摄像结果表明,混凝土面层上先出现径向裂纹,后出现环向裂纹,且径向裂纹范围比环向裂纹大。

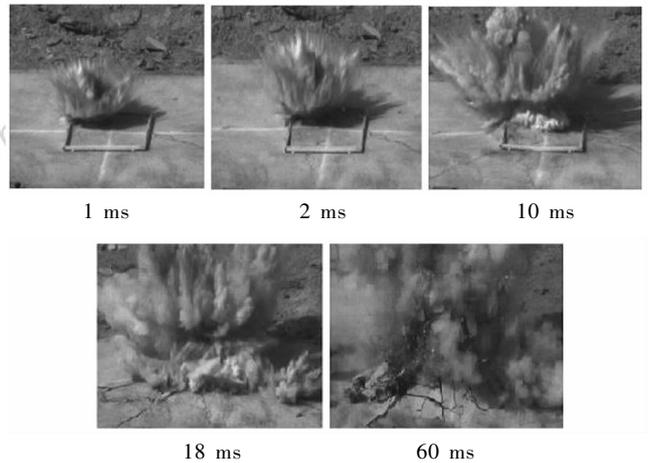


图 5 半穿甲弹爆炸过程的高速摄像照片  
Fig. 5 High-speed photographs of semi-armour-piercing projectile blasting process

图 6 和图 7 分别为一发半穿甲弹丸在混凝土面层靶和沥青混凝土面层靶爆炸破坏效果照片,可以看到混凝土面层有很明显的径向和环向裂纹,沥青混凝土面层几乎没有裂纹。图 6 a 和 7 a 是爆炸后的原始破坏

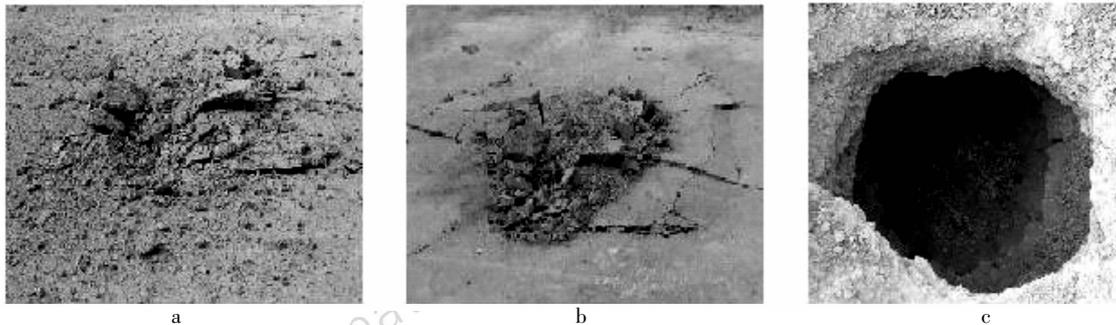


图 6 混凝土面层靶破坏效果图

Fig. 6 The damage effect photograph of concrete covered targets

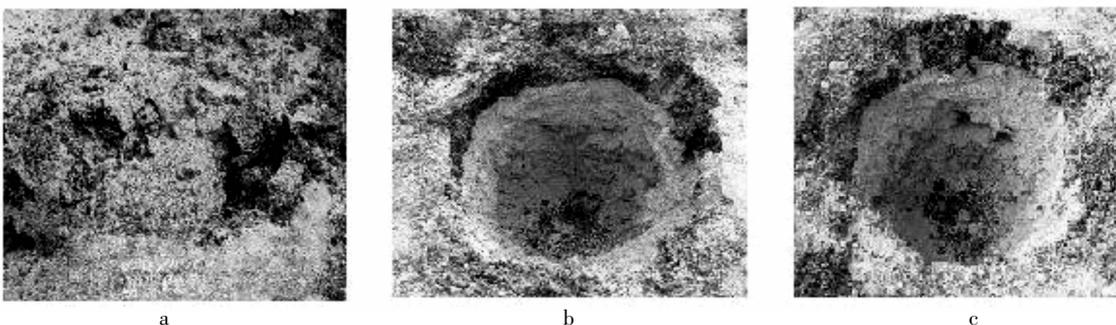


图 7 沥青混凝土面层靶破坏效果图

Fig. 7 The damage effect photograph of bitumen concrete covered targets

效果照片,图 6b 和 7b 是实验结束后清除靶面爆渣后的效果照片,图 6c 和 7c 是实验结束后掏出靶体内爆炸破坏了介质后的效果照片。从图中可以看出,在两种面层靶的靶体的爆炸破坏规律基本相同,爆破作用区均可分为爆破空腔区、破碎区、裂隙区和震动区。但对于两种面层的复合靶,面层的破坏形态有很大区别,沥青混凝土面层中有破碎区,环形隆起破坏圈和震动区三个破坏区,而混凝土面层中对应为破碎区、裂隙区和震动区三个破坏区。沥青混凝土面层之所以出现一个隆起破坏圈而不是混凝土面层中的裂隙区,笔者认为这主要是由于沥青混凝土虽然其抗压强度、抗拉强度和抗剪强度都较低,但它具有较强的塑性,能够发生较大的变形而不破坏,因此紧邻破碎区处的沥青混凝土虽然发生较大的不能恢复的塑性变形,但并不出现裂纹,而最终在破碎区外形成环形隆起破坏圈。

#### 4 结 论

(1) 弹丸在混凝土面层多层复合靶爆炸后,混凝土面层靶上先产生径向裂纹,后出现环向裂纹,环向裂纹与径向裂纹贯穿形成破碎区,并且径向裂纹的范围比环向裂纹的范围大。

(2) 面层强度不同,最佳炸深也不同,混凝土面层靶中的最佳炸深比沥青混凝土面层靶的最佳炸深浅,相同条件下,沥青混凝土面层复合靶中爆炸形成最大弹坑的体积和面积均比混凝土面层复合靶中的大。

(3) 沥青混凝土具有较强的塑性,发生较大的塑性变形而不破坏,因而在破碎区外形成环形隆起破坏圈,而不是混凝土的裂隙区。

#### 参考文献:

- [1] 贾浩. 美国钻地武器的研究与发展[R]. 国外科技资料, No. 1, 1993.  
JIA Hao. America earth penetration weapon study and development [R]. Information of Science & Technology Abroad. No.1,1993.
- [2] 王年桥. 防护结构计算原理与设计[M]. 南京: 解放军理工大学出版社, 2002.
- [3] 亨利奇. 爆炸动力学及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [4] 许连坡, 金辉, 章培德. 土中爆炸空腔的发展过程[J]. 力学学报, 1982, 7(5): 500-504.  
XU Lian-po, JIN Hui, ZHANG Pei-de. The development process of explosive cavity in soil [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1982, 7(5): 500-504.
- [5] 李守巨, 刘迎曦, 吴玉良. 爆破漏斗形成过程的拉伸和剪切理论[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊): 525-528.  
LI Shou-ju, LIU Ying-xi, WU Yu-liang. Tensile and shear theory of deforming process of blasting crater [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(Supplement): 525-528.
- [6] 杨兰和. 爆破漏斗实验及动力学作用分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 4(2): 148-151.  
YANG Lan-he. Experiments of blasting funnel and analysis for dynamic action [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001, 4(2): 148-151.
- [7] 王清洁, 顾文彬, 夏为国, 等. 多层介质中爆炸破坏效应的实验研究[J]. 工程爆破, 2003, (6): 7-11.  
WANG Qing-jie, GU Wen-bin, XIA Wei-guo, et al. An experimental study on damage effect caused by an explosion in multilayer medium [J]. Engineering Blasting, 2003, (6): 7-11.
- [8] 周宁, 任辉启, 沈兆武, 等. 弹丸在多层复合介质中的爆炸破坏效应研究[J]. 中国工程科学, 2006, 8(8): 55-60.  
ZHOU Ning, REN Hui-qi, SHEN Zhao-wu, et al. Experimental study on the damage effect of semi-armour-piercing projectile in multi-layer targets [J]. Engineering Science, 2006, 8(8): 55-60.

### Experimental Study on the Damage Effect of Semi-armour-piercing Projectile Blasting in Multi-layer Targets

ZHOU Ning<sup>1,2</sup>, REN Hui-qi<sup>2</sup>, SHEN Zhao-wu<sup>1</sup>, LIU Rui-zhao<sup>2</sup>

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. The 3rd Engineering Institute of General Staff, PLA, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** The area and volume of dent in concrete covered and bitumen concrete covered multi-layer targets that created by semi-armour-piercing projectile blasting were tested. The deforming process of blasting funnel and the damage effect of multi-layer targets were discussed. Theory analysis and high-speed photograph indicate that, after blasting, radial cracks appear firstly, then circular cracks appear, and the radial cracks impenetrate with circular crack forming fracture zone. The range of radial crack is larger than that of circular crack. Experimental results indicate that the optimal blasting depth of semi-armour-piercing projectile in concrete covered multi-layer targets is less than in the other targets, which can be helpful to optimize the fusee in projectile. The largest dent volume and dent sectional area in bitumen concrete covered multi-layer targets created by semi-armour-piercing projectile blasting are larger than that in concrete covered multi-layer targets.

**Key words:** explosion mechanics; multi-layer target; blasting funnel; damage zoning; optimal blasting depth