

# 弹丸在多层复合介质中的爆炸破坏效应研究

周宁<sup>1</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, 合肥 230026; 2. 总参工程兵科研三所, 河南洛阳 471023)

**[摘要]** 根据实验得到的运动弹丸在多层复合介质中不同深度爆炸时产生的弹坑形状、体积及破坏面积, 对破坏效应进行了理论分析, 建立了弹丸在多层复合介质中的爆炸破坏分区; 考虑主要影响破坏效果因素条件下应用量纲分析方法, 并结合实验数据得到了破坏参数与比炸深的无量纲关系式和关系曲线, 由这些曲线能够方便地查找所需最佳破坏效果对应的比炸深, 在相同条件下, 该结果可推广到类似目标的爆炸破坏效应分析。

**[关键词]** 爆炸力学; 多层介质; 量纲分析; 爆炸破坏分区

**[中图分类号]** O38 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)08-0056-05

## 1 引言

随着现代战争的变革, 动能弹侵入一定深度的工事或建筑物后, 在其内部的爆炸破坏和对机场跑道、高速公路等多层复合介质目标的侵彻爆炸破坏效果成为兵器设计者关注的焦点。很多学者研究了均匀介质中的爆炸破坏效应, 如 G. W. Ma, Wu Chengqing 研究了爆炸应力波传播及破坏作用<sup>[1,2]</sup>; 叶序双、龙源、王海亮、李世海等分别研究了条形药包土中爆炸空腔发展和鼓包运动规律<sup>[3-6]</sup>, 得到了一些有意义的结论; 许连坡等研究了集团药包岩土中爆炸的鼓包运动规律, 指出岩土中爆炸的鼓包运动主要是高压气体膨胀和介质惯性运动的结果<sup>[7]</sup>; 文献 [8] 比较系统地研究了土中和岩石中的爆炸破坏效应; 王清洁, 顾文彬等开展了多层介质中爆炸破坏效应的实验研究<sup>[9]</sup>。由于多层复合材料的复杂性, 对多层复合介质的侵彻、爆炸破坏效应的研究还很不完善, 尚需做大量的工作。

## 2 实验方案及实验

前期试验已经确定了侵彻弹爆炸破坏效果较好

的炸深范围, 本次打靶是为了进一步确定最佳炸深和研究目标靶的破坏形态。对两种结构形式的靶进行了多发侵彻爆炸试验。靶结构如图 1、图 2 所示, 两种靶均修筑在自然土层地基上。沥青混凝土面层靶由三层结构组成: 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。

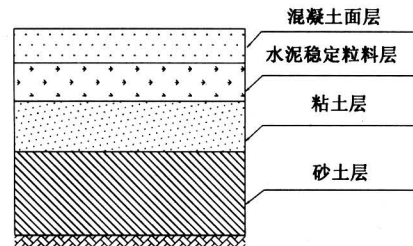


图 1 混凝土面层靶结构示意图

Fig.1 Sketch map of concrete covered target

## 3 实验结果

### 3.1 爆炸破坏效应

图 3 为两发侵彻弹丸在混凝土面层靶中爆炸破坏效果图, 图 4 为两发侵彻弹丸在沥青混凝土面层

[收稿日期] 2005-10-09; 修回日期 2005-12-08

[基金项目] “九七三”计划资助项目(51309-1-6)

[作者简介] 周宁(1977-), 男, 四川乐山市人, 中国科学技术大学博士研究生

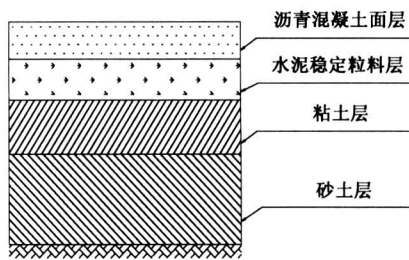


图 2 沥青混凝土面层靶结构示意图

Fig.2 Sketch map of bitumen concrete covered target

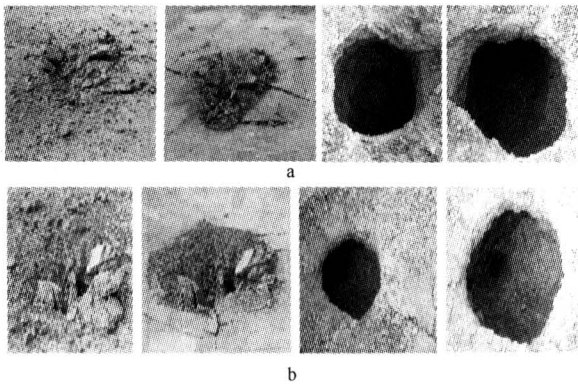


图 3 混凝土面层靶破坏效果图

Fig.3 The damage effect photo of concrete covered target

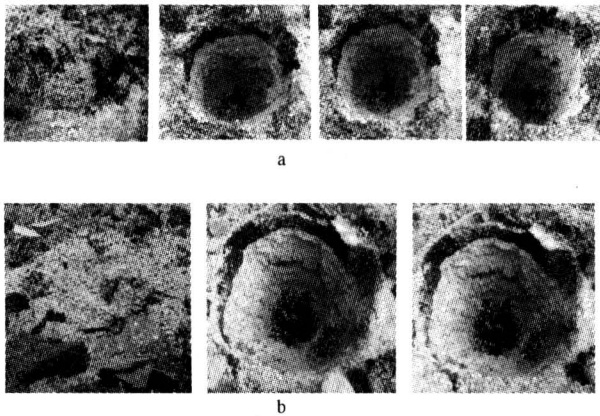


图 4 沥青混凝土面层靶破坏效果图

Fig.4 The damage effect photo of bitumen concrete covered target

靶中爆炸破坏效果照片。每幅图的第 1 张图片是侵入爆炸后的初始破坏效果照片，第 2 张是将表面的破碎碎屑清除后的效果照片，第 3、第 4 张是将爆炸破坏了的介质掏出后的效果照片。从图中可以清

晰地看到在混凝土面层靶中爆炸造成 4 个破坏区，即爆破空腔区、破碎区、裂隙区和震动区；而在沥青混凝土面层靶中则形成 5 个破坏区，即空腔区、破碎区、裂隙区、隆起破坏圈和震动区。

为了研究爆炸破坏的实质，选择球形装药。当弹丸内装药点火起爆后，爆轰波以  $> 6\,000\text{ m/s}$  (大于土中应力波的传播速度) 的相同速度向各个方向传播，于是可以认为在应力波到达离药包表面稍远的土介质以前，爆轰已蔓延到整个药包。由此可以假定，爆轰气体的超压与冲击波压力是同时作用在与药包接触的所有介质上的，爆轰后的瞬间，爆轰气体的压力高达几十万兆帕，而土基层的抗压强度不到  $1\text{ MPa}$ ，因此药包附近的土将被压碎，甚至进入流体状态，产生一个变形很大的区域，在该区域内，土被强烈压缩，并朝着离开药包的方向运动。爆轰气体膨胀时向爆心传出的球面稀疏波对介质破坏不大，不予考虑。爆轰结束瞬间产生的向周围传播的冲击波随着冲击波向外传播，当波阵面遇到两层介质的分界面时，将在界面处发生透射和反射，透射波进入上一层介质，由于上一层介质的波阻抗比应力波所在层介质的波阻抗大，在界面处反射回来的压缩波与冲击波、爆轰气体在界面处相互作用，使交界面附近介质的压缩破碎圈比相邻两层内的压缩破碎圈小，最终形成葫芦状的爆炸空腔；冲击波到达水泥稳定粒料层时已经不能压缩破碎该层内的介质，但仍能压垮该层内的结构，形成破碎区；当应力波到达混凝土面层时，其超压低于混凝土的动态抗压强度，压缩作用将使混凝土层内的质点向自由面方向运动，导致混凝土向外扩张，引起环向拉伸。抗拉强度仅为抗压强度  $1/8$  的混凝土，在环向拉应力的作用下将产生径向裂纹，后继高温高压的爆生气体渗入裂纹，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，使得爆炸空腔内的爆生气体过度膨胀，介质中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；混凝土面层除压应力、拉应力引起破坏外，还存在剪应力引起的剪切破坏。应力波到达自由面后，压缩波反射成拉伸波从自由面向爆炸中心传播，当反射的拉伸应力波强度大于混凝土的抗拉强度时，混凝土表面将出现层裂现象，在最小抵抗线方向最先出现层裂破坏，当偏离最小抵抗线一定距离处的反射拉应力等于混凝土的抗拉强度，该处出

现最后一圈环向裂纹。弹体中装药爆炸后产生的拉伸、压缩、剪切应力和爆生气体的共同作用,使混凝土面层最终形成了圆锥台形状的破坏坑。

沥青混凝土面层靶破坏与混凝土面层靶破坏的不同是由于沥青混凝土的抗压强度、抗拉强度和抗剪强度都较低,且沥青混凝土具有一定的粘弹性造成的。当应力波进入沥青混凝土面层后,在最小抵抗线方向产生径向裂纹,裂纹不断发展直至延伸到自由面;沥青混凝土在爆生气体的推动下继续向上运动,由于最小抵抗线方向与偏离最小抵抗线方向的沥青混凝土的运动存在速度势,因此在偏离最小抵抗线方向一定距离处发生剪切破坏,出现一个比较整齐的破坏面,造成沥青混凝土面层靶破坏后形成一个圆饼状坑而不像混凝土面层靶的圆锥台状坑。在不能剪切断裂的地方,由于沥青混凝土的塑性变形,将出现环形隆起破坏带,见图4。

### 3.2 试验结果分析

用量纲分析将数据无量纲化,得到各种无量纲的破坏参数与比炸深的关系曲线。装药对靶体破坏效果的主要参量包括  $H$ ,  $r$ ,  $V$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ;  $H$  为弹坑深度,  $r$  为弹坑半径,  $V$  为弹坑体积,  $A_1$  为实际漏斗坑面积,  $A_2$  为漏斗坑和隆起破坏总面积。对于同种装药,炸药参数为装药量  $Q$ , 装药密度  $\rho$ , 炸药爆速  $v$ 。分析时将混凝土以下各层等效为土层,则影响爆破效果的参数主要有混凝土抗压强度  $\sigma_1$ , 混凝土波阻抗  $\rho_1 c_1$ , 混凝土层厚度  $h_1$ , 等效土层强度  $\sigma_2$ , 等效土层波阻抗  $\rho_2 c_2$ , 等效土层厚度  $h_2$ , 炸药中心到自由面的距离即炸深  $H$ 。

将爆破参数写成影响因素的函数为:

$$r = f(Q, v, \rho, H, \sigma_1, \rho_1 c_1, h_1, \sigma_2, \rho_2 c_2, h_2) \quad (1)$$

选取  $Q$ ,  $v$ ,  $\rho$  作为基本量,按  $\pi$  定理及量纲分析的因次分析法将式(1)整理为无量纲关系:

$$\frac{r\rho^{1/3}}{Q^{1/3}} = f\left(\frac{H\rho^{1/3}}{Q^{1/3}}, \frac{\sigma_1}{\rho v^2}, \frac{\rho_1 c_1}{\rho v}, \frac{h_1 \rho^{1/3}}{Q^{1/3}}, \frac{\sigma_2}{\rho v^2}, \frac{\rho_2 c_2}{\rho v}, \frac{h_2 \rho^{1/3}}{Q^{1/3}}\right) \quad (2)$$

在相同装药条件下,密度  $\rho$ , 炸药爆速  $v$  为常数,对于结构不变的靶,  $\sigma_1$ ,  $\rho_1 c_1$ ,  $h_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\rho_2 c_2$  为常数,  $h_2$  能用  $H$  和  $h_1$  表示,上式可简化为:

$$\frac{r}{Q^{1/3}} = f\left(\frac{H}{Q^{1/3}}, \frac{h_1}{Q^{1/3}}\right) \quad (3)$$

由于试验中未考虑混凝土层厚度的影响,  $h_1$  为常数,式(3)可简化为:

$$\frac{r}{Q^{1/3}} = f\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) \quad (4)$$

分析知函数形式应为:

$$\frac{r}{Q^{1/3}} = A\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^3 + B\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^2 + C\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) + D \quad (5)$$

对于混凝土面层靶,将试验数据代入该式得:

$$\begin{aligned} \frac{r}{Q^{1/3}} = & 6\,593\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^3 - 19\,270\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^2 + \\ & 18\,598\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) - 5\,931 \end{aligned} \quad (6)$$

对于沥青混凝土面层靶,将试验数据代入式(5)解得:

$$\begin{aligned} \frac{r}{Q^{1/3}} = & 4\,639\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^3 - 18\,973\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^2 + \\ & 23\,255\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) - 8\,944 \end{aligned} \quad (7)$$

同理推出:

$$\frac{V}{Q} = f\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) \quad (8)$$

对于混凝土面层靶:

$$\begin{aligned} \frac{V}{Q} = & 1\,512\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^3 - 4\,279\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^2 + \\ & 4\,025\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) - 1\,258 \end{aligned} \quad (9)$$

对于沥青混凝土面层靶:

$$\begin{aligned} \frac{V}{Q} = & -9\,487\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^3 + 24\,147\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^2 - \\ & 20\,348\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) + 5\,673 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{A_1}{Q^{2/3}} = f\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) \quad (11)$$

对于混凝土面层靶:

$$\begin{aligned} \frac{A_1}{Q^{2/3}} = & -400\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^3 + 1\,373\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^2 - \\ & 1\,511\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) + 541 \end{aligned} \quad (12)$$

对于沥青混凝土面层靶:

$$\begin{aligned} \frac{A_1}{Q^{2/3}} = & 352\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^3 - 2\,331\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^2 + \\ & 3\,424\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) - 1\,450 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{A_2}{Q^{2/3}} = f\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) \quad (14)$$

对于沥青混凝土面层靶:

$$\frac{A_1}{Q^{2/3}} = 4\,271\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^3 - 24\,427\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right)^2 +$$

$$34\ 371\left(\frac{H}{Q^{1/3}}\right) - 14\ 265 \quad (15)$$

由以上的推导得到爆破漏斗半径  $r$ ，靶体破坏体积  $V$ ，爆破漏斗面积  $A_1$ ，破坏和隆起总面积  $A_2$  与比炸深  $H/Q^{1/3}$  的关系。根据实验数据得出无量纲量关系如图 5 至图 8 所示。

由图 5 可以得出对混凝土面层靶和沥青混凝土面层靶的比爆破漏斗面积随比炸深的变化都是随比炸深的增加先增大，增大到一定值后即迅速减小，这与半无限均匀介质中的爆破漏斗理论是一致的<sup>[10]</sup>。笔者研究的混凝土面层靶，比炸深在 0.86 ~ 0.88 范围破坏面积最大；沥青混凝土面层靶，比炸深在 0.93 ~ 0.945 范围破坏面积最大。图 6、图 7 分别说明对于混凝土面层靶和沥青混凝土面层

靶，其比爆炸破坏的体积、比半径随比炸深变化规律。对于药量一定的爆炸，从图中也能方便地找到爆炸破坏体积和半径最大时的比炸深，并且可以看出混凝土面层靶取得最佳破坏效果的比炸深比沥青混凝土面层靶的比炸深要小。图 8 是沥青混凝土面层靶的比爆破漏斗和隆起总面积与比炸深的关系曲线。由于沥青混凝土抗压强度、抗拉强度和抗剪强度都较低，且具有一定的粘弹性，在其面层靶的爆破漏斗区外还有一个环状鼓包圈，即隆起，这种破坏会影响道路或机场路面的使用，故应加以考虑。从图中可以看出比爆破漏斗和隆起总面积也是随比炸深的增大呈先增大在减小的趋势。试验得到的爆炸破坏参数与比炸深的关系对于同种装药在材料和结构都相同的目标的爆炸破坏效应是普遍适用的。

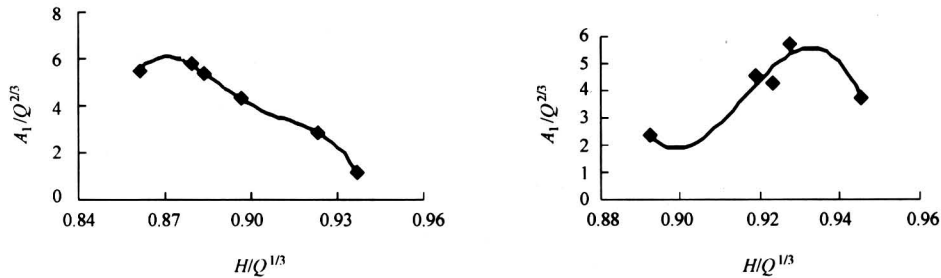


图 5 混凝土面层靶和沥青混凝土面层靶的比爆破漏斗面积与比炸深的关系曲线

Fig.5 Relationship between dimensionless explosion funnel's area and explosion depth in different target

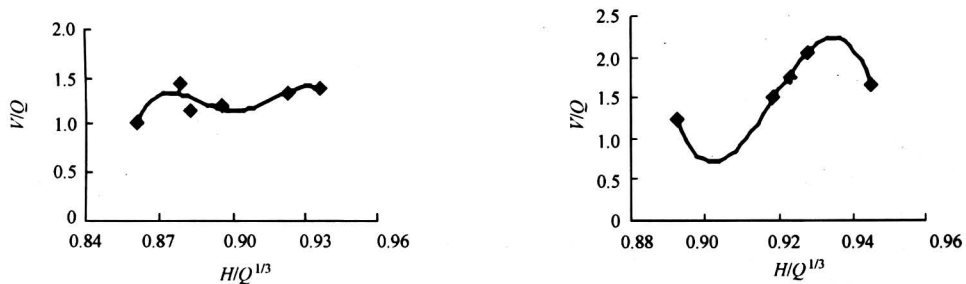


图 6 混凝土面层靶和沥青混凝土面层靶的比爆炸破坏体积与比炸深的关系曲线

Fig.6 Relationship between dimensionless damage volume and explosion depth in different target

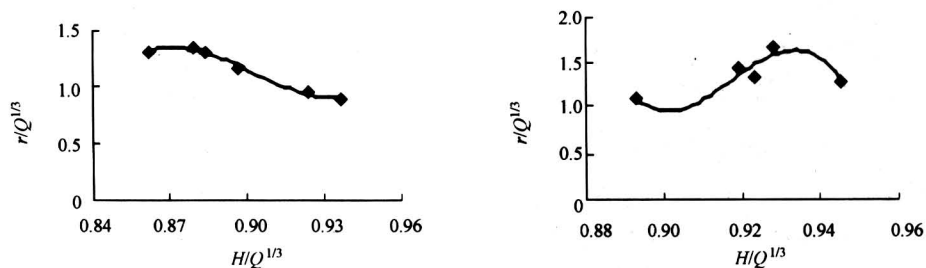


图 7 混凝土面层靶和沥青混凝土面层靶的比爆破漏斗半径与比炸深的关系曲线

Fig.7 Relationship between dimensionless explosion funnel's radius and explosion depth in different target

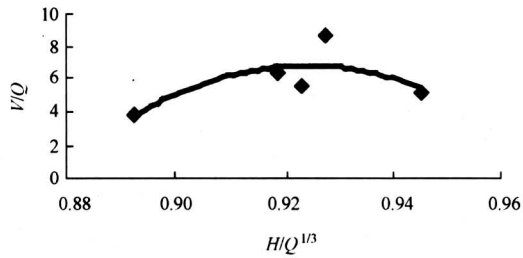


图8 沥青混凝土面层靶的比爆破漏斗和隆起破坏总面积与比炸深的关系曲线

Fig.8 Relationship between dimensionless explosion funnel's and apophysis' area and explosion depth in different target

#### 4 结论

1) 通过对靶中破坏现象的分析得出混凝土面层靶中的破坏分区结构为:在弹丸周围的粘土和模拟盐渍土层中产生流塑性变形的爆炸空腔区,在空腔区以外的土、水泥稳定粒料层和混凝土中产生破碎为主的破碎区,在破碎区以外是裂纹破坏区,之外为弹性震动区。沥青混凝土面层靶除产生上述4个区域外,在爆破破坏漏斗外出现隆起破坏圈。

2) 通过量纲分析得到各个爆破漏斗参数与比炸深的无量纲关系式,以及各种破坏参数的最佳比炸深和各个爆炸破坏参数与比炸深的关系曲线,从这些关系曲线中可以方便地找到最佳破坏效果对应的比炸深,这些曲线对同种装药在同类目标中的爆炸破坏是普遍适用的,并可根据实际目的选取不同的比炸深以获得预期的破坏效果。

3) 面层强度不同,取得最佳破坏效果的比炸深也不同,混凝土面层靶取得最佳破坏效果的比炸深比沥青混凝土面层靶的比炸深要小。

#### 参考文献

- [1] Ma G W, Hao H, Zhou Y X. Modeling of wave propagation induced by underground explosion [J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(3/4): 283 ~ 303
- [2] Wu Chengqing, Hao Hong. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31: 699 ~ 717
- [3] 叶序双, 曹国栋, 毛志远. 条形药包土中鼓包及土质点运动的试验研究[A]. 工程爆破文集(第三辑)[C]. 1992
- [4] 龙源, 林学圣, 许连坡. 条形药包土中爆炸空腔发展过程的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1988, 8(3): 227 ~ 232
- [5] 王海亮, 冯长根, 王丽琼. 土中爆炸成腔的现场试验研究[J]. 火炸药学报, 1989, 2(2): 12 ~ 15
- [6] 李世海, 许连坡, 徐小鸿. 淤泥、岩土中爆炸鼓包运动规律的研究[J]. 爆破, 1997, 3(4): 12 ~ 17
- [7] 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
- [8] J·亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 等译, 北京: 科学出版社, 1987
- [9] 王清洁, 顾文彬, 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
- [10] 钮强. 岩石爆破机理[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1990. 94 ~ 111

## Experimental Study on the Damage Effect of Projectile Explosive in Multi-layer Medium

Zhou Ning<sup>1</sup>, Ren Huiqi<sup>2</sup>, Shen Zhaowu<sup>1</sup>, Liu Ruizhao<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, Henan 471023, China)

[Abstract] Based on the shape, volume and area of dent in multi-layered target created by kinetic projectile explosive, the damage effect was analyzed. The damage zoning was founded in multi-layered target. The experimental data were analyzed, then relation curves of diversified damage parameter with blasting depth worked out by using the dimensionless method. Through those relation curves, the blasting depth corresponding to the optimal damage effect can be found easily. This method can generalize to other blasting damage effect analysis.

[Key words] mechanics of explosion; multi-layer medium; dimensional analysis; damage zoning