DOI: 10.11883/bzycj-2017-0055 文章编号: 1001-1455(2018)05-1039-06

# 靶板在爆炸成型弹丸垂直侵彻下的层裂*

李 睿,黄正祥,祖旭东,肖强强,贾 鑫
(南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了准确掌握靶板层裂过程和规律,基于波动力学和基本假设,建立了爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP)垂直侵彻有限厚靶板时层裂的力学模型,得到了层裂点的表达式。研究结果表明:EFP 速度为 1 800 m/s、靶板厚度从 35 mm 增大到 60 mm 时,靶板背面弯月形层裂区厚度不断增大,弯月形层裂区长度不断减小;靶板厚度保持 40 mm 不变、EFP 速度从 1 600 m/s 增大到 1 900 m/s 时,靶板背面层裂区厚度不断减小,弯月形层裂区长度不断增大。开展了 EFP 侵彻 40 mm 厚装甲钢靶板的实验,将实验结果和理论计算结果进行对比分析,两者吻合较好。

**关键词:** 爆炸成型弹丸;垂直侵彻;层裂;冲击载荷
**中图分类号:** O383;O385 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

层裂是靶板在弹丸冲击载荷作用下的一种重要破坏形式,也是靶后破片形成的组成部分。研究靶板在弹丸冲击载荷作用下的层裂效应对新型装甲设计和靶后破片等领域具有很强的指导意义。因此,准确掌握层裂的形成机理是十分必要的。对层裂效应已展开了大量的研究。Rinehart 等[1]系统分析了材料的层裂现象,提出了最大拉应力层裂破坏准则。Rinehart[2]全面介绍了应力波在靶板材料内的传播、相互作用并产生层裂的过程。Ren 等[3]提出了无网格数值模拟模型,并对钛铝合金在冲击载荷下的层裂情况进行了数值模拟,发现非弹性脉冲波之间的相互作用在层裂破坏机制中起重要作用。Yu 等[4]利用数值模拟和实验相结合的方法研究了金属材料在冲击载荷下的多层层裂情况。杜忠华[5]研究了陶瓷靶板在冲击载荷下层裂的形成机理,并分析了不同的弹丸速度对靶板层裂的影响。陈大年等[6]在 NAG 模型基础上提出了一种基于空穴聚集的层裂模型。刘飞等[7]采用数值模拟和实验相结合的方法研究了钢板在接触爆炸载荷作用下的层裂效应,认为装药高度、钢板厚度和材质是影响钢板层裂的主要因素。魏波[8]采用 SPH 方法,开展数值模拟研究了不同飞片速度、不同靶板厚度对钢板和玻璃产生层裂的影响。目前对层裂效应已做了广泛的研究,但是对爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP)侵彻靶板产生层裂效应的研究主要集中在数值模拟和实验方面。本文中,基于波动力学和基本假设,从理论上对在 EFP 冲击载荷作用下靶板发生层裂的过程进行分析,在不考虑 EFP 强度的基础上建立相应的力学模型,研究靶板厚度和 EFP 速度对靶板层裂的影响,并通过实验验证理论模型的可靠性。

## 1 理论模型

### 1.1 应力波的形成和传播

在 EFP 垂直侵彻靶板的过程中,由于应力波的相互作用,在靶板背面产生层裂。由于 EFP 侵彻入孔情况与靶后效应无关,因此本文中暂不考虑,主要研究靶板背面层裂区域的形状和范围。为了便于公式推导和简化计算,作如下几点假设:(1)在侵彻靶板过程中将 EFP 当作圆柱杆;(2)应力波在靶板内以球面波的形式传播;(3)不考虑应力波的衰减;(4)靶板材料均匀无缺陷。根据适用于高速撞击的 A-T 模型,EFP 侵彻靶板时的侵彻速度为:

* **收稿日期:** 2017-02-22; **修回日期:** 2017-06-07
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(11402122)
**第一作者:** 李 睿(1993— ),男,硕士研究生; **通信作者:** 黄正祥,huangyu@mail.njust.edu.cn。

$$u=\frac{v_{\mathrm{j}}-\sqrt{\dfrac{\rho_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{j}}}v_{\mathrm{j}}^{2}+\left(1-\dfrac{\rho_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{j}}}\right)\dfrac{2R_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{j}}}}}{1-\rho_{\mathrm{t}}/\rho_{\mathrm{j}}} \tag{1}$$

式中：$v_{\mathrm{j}}$为 EFP 着靶速度，$\rho_{\mathrm{j}}$为构成 EFP 材料的密度，$\rho_{\mathrm{t}}$为靶板材料密度，$R_{\mathrm{t}}$为靶板材料侵彻阻抗。

EFP 在侵彻靶板时，在靶板惯性作用下，孔径开始增长，同时产生的应力波在靶板中以球面波的形式传播。孔径增长开始时孔壁的初始压力等于轴向压力，因此可以得到：

$$p_0=\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{j}}(v_{\mathrm{j}}-u)^{2} \tag{2}$$

式中：$p_0$为初始孔径增长压力。

径向压力 $p_{\mathrm{c}}$ 与初始孔径增长压力的关系为：

$$p_{\mathrm{c}}=\frac{r_0^{2}}{r_{\mathrm{c}}^{2}}p_0 \tag{3}$$

式中：$r_0$ 为 EFP 的初始半径，$r_{\mathrm{c}}$ 为侵彻孔半径。

由文献[9]可知，在 EFP 侵彻靶板过程中，随着孔径的增长，应力波以球形波在靶板中传播，不同半径 $r$ 处的应力波强度为：

$$\sigma_{\mathrm{t}}(r)=p_{\mathrm{c}}-2Y\ln\frac{r}{r_{\mathrm{c}}}+\rho_{\mathrm{t}}r_{\mathrm{c}}\left(1-\frac{r_{\mathrm{c}}}{r}\right)\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中：$Y$ 为靶板的屈服强度，$u_{\mathrm{c}}$为孔径增长速度。

由文献[10]可知，不同孔径处的孔径增长速度为：

$$u_{\mathrm{c}}=\sqrt{\frac{a}{r_{\mathrm{c}}^{2}}-b},\qquad a=\frac{\rho_{\mathrm{j}}(v_{\mathrm{j}}-u)^{2}}{\rho_{\mathrm{t}}}r_0^{2},\qquad b=\frac{2R_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{t}}} \tag{5}$$

对式(5)对时间求导，则可得到：

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t}=-\frac{a}{r_{\mathrm{c}}^{3}} \tag{6}$$

由 Szendrei-Held 方程[11]可知侵彻孔径 $r_{\mathrm{c}}$随时间 $t$ 的变化为：

$$r_{\mathrm{c}}=\sqrt{\frac{a}{b}-\left(\sqrt{\frac{a}{b}-r_0^{2}}-t\sqrt{b}\right)^{2}} \tag{7}$$

## 1.2 应力波的反射和层裂的形成

当应力波传播到靶板背面时发生斜反射，则反射波为：

$$\sigma_{\mathrm{f}}=R\sigma_{\mathrm{t}}(r) \tag{8}$$

式中：$R$ 为反射系数[2]，且：

$$R=\frac{\tan\beta\tan^{2}(2\beta)-\tan\alpha}{\tan\beta\tan^{2}(2\beta)+\tan\alpha} \tag{9}$$

式中：$\alpha$ 为入射角，$\beta$ 为反射横波的反射角。

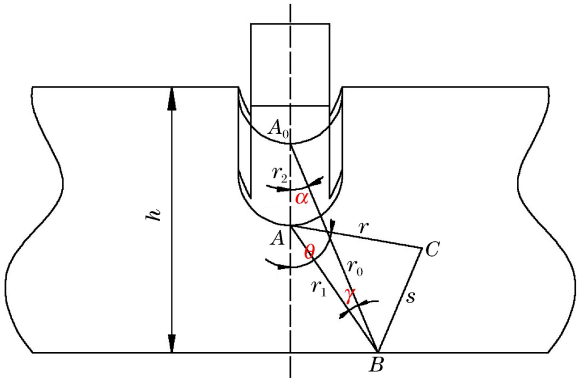



图 1 入射波和反射波相互作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interaction between incident and reflected waves

EFP 侵彻靶板过程中形成的应力波在靶板自由端反射后形成反射拉伸波，在反射波的传播过程中，入射波和反射波在靶内相互作用形成合应力波。应力波和反射拉伸波相互作用的几何关系如图 1 所示，$t_0$时刻 EFP 侵彻到 $A_0$点，假设此时产生的应力波以入射角 $\alpha$ 传播到 $B$ 点，在 $B$ 点形成反射波并向前传播到某一点 $C$，与 $t$ 时间后侵彻界面 $A$ 点产生的应力波在 $C$ 点相互作用，形成拉伸应力波。按临界应力断裂准则，若拉伸应力波强度达到临界断裂应力 $\sigma_{\mathrm{ct}}$时，即：

$$\sigma_{\mathrm{t}}\geqslant\sigma_{\mathrm{ct}} \tag{10}$$

则靶板背面出现层裂，在靶板内形成裂纹。

由文献[2]可知，两应力波斜交下的合应力强度为：

$$\sigma_t=\frac{(\sigma_a+\sigma_f)+(1-2\nu)\ [\sigma_a^2+\sigma_f^2+2\sigma_a\sigma_f\cos(4\alpha)]^{\frac{1}{2}}}{2(1-\nu)} \tag{11}$$

式中：$\sigma_a$为由 $A$ 点产生的与反射拉伸波 $\sigma_f$ 相互作用的应力波强度，$\nu$ 为靶板材料泊松比。

由临界断裂准则可知，当该合应力波强度 $\sigma_t$ 达到临界断裂应力 $\sigma_{ct}$ 时，发生层裂。由式(4)、式(10)和式(11)组成方程组，可确定该层裂点距初始入射波阵面的距离 $r$。

### 1.3　层裂点位置计算

根据图 1，在 $t_0$ 时刻 EFP 侵彻到 $A$ 点，在入射波从 $A_0$ 点传播到 $B$ 点再反射传播到某一点 $C$ 的这段时间里，侵彻界面由 $A_0$ 点侵彻到 $A$ 点，前进的距离为：

$$r_2=u\Delta t \tag{12}$$

侵彻界面产生的应力波在自由端反射，$A_0$ 点距反射点 $B$ 的距离为：

$$r_0=(h-ut)/\cos\alpha \tag{13}$$

$A$ 点距反射点 $B$ 的距离为：

$$r_1=\sqrt{r_0^2+r_2^2-2r_0r_2\cos\alpha} \tag{14}$$

由几何关系可知：

$$\cos\gamma=\frac{r_0^2+r_1^2-r_2^2}{2r_0r_1},\qquad (r_0+s)\sin\alpha=r\sin\theta \tag{15}$$

侵彻界面到达 $A$ 点的时间为：

$$t=t_0+(r_0+s)/v_t \tag{16}$$

式中：$v_t$为 RHA 材料中纵波的体积波速。

由式(12)～(16)可知，层裂点 $C$ 距 $t$ 时刻侵彻界面 $A$ 点的相对位置为：

$$r=\sqrt{s^2+r_1^2-2sr_1\cos(\gamma+2\alpha)},\qquad \theta=\arcsin\left(\frac{r_0+s}{\sin\alpha}\right) \tag{17}$$

以靶板背面所在平面为横轴、靶板厚度方向为纵轴建立坐标系，坐标原点为侵彻孔径轴线与靶板背面的交点，则层裂点 $C$ 的坐标可以表示为：

$$x=r\sin\theta,\qquad y=h-ut-r\cos\theta \tag{18}$$

### 1.4　理论结果分析

基于建立的理论模型和 Matlab 软件，对 EFP 侵彻有限厚靶板的过程进行计算，EFP 材料为高导无氧铜，密度 $\rho_j=8.96\ \mathrm{g/cm^3}$；轧制均质装甲[12](rolled homogeneous armor，RHA)密度 $\rho_t=7.86\ \mathrm{g/cm^3}$，屈服强度 $Y=1.5$ GPa，泊松比为 $\nu=0.28$。计算过程中 EFP 半径为 21.5 mm，垂直侵彻 RHA 靶板。

#### 1.4.1　不同速度对靶板层裂的影响

根据理论分析，EFP 侵彻靶板过程中产生的应力波的强度与 EFP 着靶速度密切相关，而靶板能否发生层裂取决于应力波和反射应力波相互作用后的拉应力波强度的大小，因此 EFP 的着靶速度是影响层裂的主要因素之一。在靶板厚度 $h=40$ mm 的情况下，EFP 分别以 1 550、1 600、1 700、1 750、1 800、1 850、1 900、1 950 和 2 000 m/s 的着靶速度侵彻靶板，靶板背面发生层裂的区域见图 2。

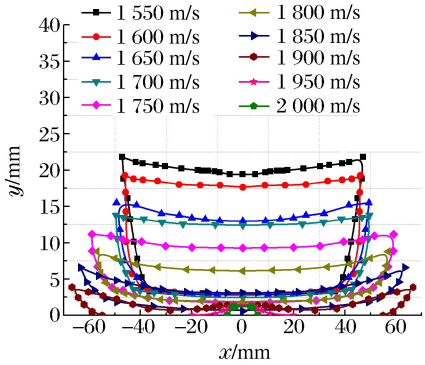



图 2　不同 EFP 速度下靶板背面发生层裂的区域

Fig. 2　Spallation zones at target backs at different EFP velocities

应力波以球面波的形式传入靶板，随着入射角的增大，到达自由表面的路程不断增加，反射拉应力波

的强度随入射角的增大而减小。因此层裂的厚度随入射角的增大而增大。综合效果,使靶板背面出现弯月形的层裂区域,如图 2 所示。在计算条件下,当 EFP 的着靶速度不同时,弯月形层裂区域的形状不同。随着 EFP 着靶速度的增大,弯月形层裂区域的厚度不断减小,层裂区域的长度不断增大。EFP 速度从 1 550 m/s增大到 1 900 m/s 时,靶板背面层裂区厚度从 21.8 mm 减小到 3.9 mm,弯月形层裂区长度从 86.4 mm 增大到 133.4 mm。这是因为增大 EFP 着靶速度,而入射波到自由表面的衰减量不变,因此反射波强度增大,于是层裂时刻提前,靶板背面的层裂厚度减小。当速度大于 1 900 m/s 时,层裂区域的面积急剧衰减,并且层裂区域形状也不再是弯月形。当速度达到 2 000 m/s 时,层裂长度为 12 mm,厚度为2 mm,此时对靶后效应影响甚微。

### 1.4.2 不同厚度对靶板层裂的影响

根据理论分析,在给定 EFP 参数的基础上,靶板厚度直接影响反射应力波的强度,因此靶板厚度是靶板发生层裂的重要影响因素。在 EFP 着靶速度为 1 800 m/s 情况下,分别侵彻 30、35、40、45、50、55 和 60 mm 厚的靶板,靶板背面发生层裂的区域如图 3 所示。

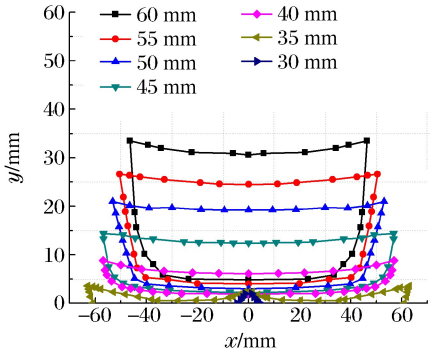



图 3 不同厚度靶板背面发生层裂的区域

Fig. 3 Spallation zones at target backs with different thicknesses

在计算条件下,靶板背面均形成弯月形层裂区域,当靶板厚度不同时,弯月形层裂区域的厚度和长度不同,计算结果如图 3 所示。分析计算结果可知,随着靶板厚度的不断增大,层裂区域的厚度不断增大,层裂区域的长度不断减小。靶板厚度从 35 mm 增大到 60 mm 时,靶板背面弯月形层裂区厚度从 3.6 mm 增大到 33.5 mm,弯月形层裂区长度从 126.2 mm 减小到 92.7 mm。这是因为增大靶板厚度,入射自由表面的应力波强度衰减量增大,其相应的反射波强度降低,于是层裂时刻延后,靶板背面层裂厚度增大。当靶板厚度小于 35 mm 时,层裂区域急剧减小。当靶板厚度为 30 mm 时,层裂长度为 9 mm,层裂厚度为 2 mm,此时对靶后效应影响甚微。

## 2 实验验证

### 2.1 实验布置

采用∅140 mm 的无壳体成型装药。针对 EFP 在 7 倍炸高下穿透 40 mm 厚 RHA 靶板进行实验。聚能装药如图 4 所示,装药直径为 140 mm,装药长度为 102 mm,炸药为 JH-2。药型罩材料为紫铜,变壁厚,采用 8# 电雷管起爆。EFP 药型罩如图 5 所示,经数值计算,EFP 半径为 21.5 mm,长度为 83.5 mm,速度为 1 800 m/s。为了完整地回收靶后崩落的碎片,采用注满水的水箱来回收靶后破片;成型装药以垂直方式布设,以保证 EFP 垂直入射 RHA 靶板;靶板距水面 1 000 mm,实验现场布置见图 6。在上述实验情况下,共进行 2 发验证实验。

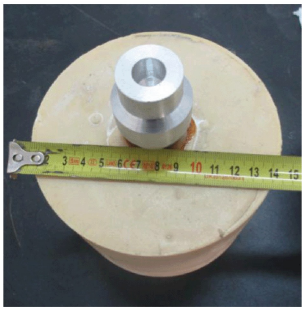


图 4 成型装药

Fig. 4 Photograph of shaped charge

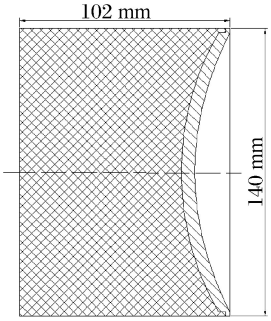



图 5 EFP 药型罩

Fig. 5 Diagram of EFP liner



图 6 侵彻实验现场布置

Fig. 6 Layout of penetration experiment

### 2.2　实验结果分析

由于 EFP 侵彻靶板过程中在靶板背面形成弯月形的层裂区域，因此层裂的厚度不均匀，理论结果和实验结果如图 7 所示。分别测量图 7 中实验所得的层裂参数，层裂厚度取层裂区域最外侧处裂纹消失处的厚度，理论计算和实验结果见表 1。

利用∅140 mm 成型装药形成 EFP 对 40 mm 厚装甲钢靶板进行侵彻，实验后靶板发生层裂。由表中结果可知，理论计算结果与实验结果吻合较好，层裂的厚度和长度与实验 1 的误差分别为 4.76%和 2.89%；与实验 2 的误差分别为 3.30%和 1.81%。验证了 EFP 侵彻有限厚靶板形成层裂理论分析模型是正确的。

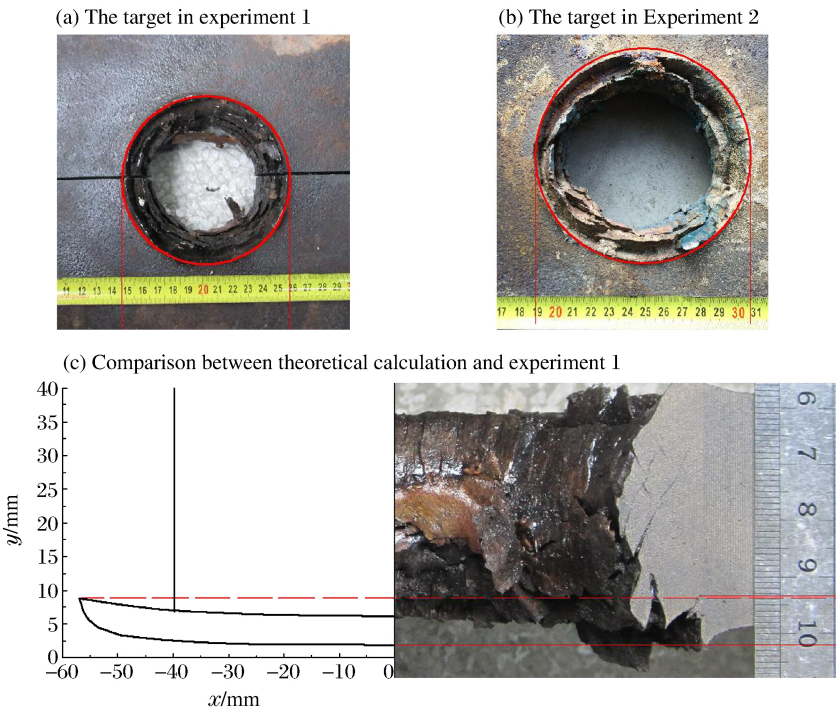



图 7　实验与理论计算结果

Fig. 7　Experimental and theoretical results

**表 1　层裂参数的实验结果和理论计算结果**

**Table 1　Experimental and theorical results of spallation parameters**

| 层裂厚度/mm | | | 层裂长度/mm | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 理论计算 | 实验 1 | 实验 2 | 理论计算 | 实验 1 | 实验 2 |
| 8.8 | 8.4 | 9.1 | 114.0 | 110.8 | 116.1 |

## 3　结　论

(1)利用应力波传播特性，理论分析了 EFP 侵彻有限厚靶板形成层裂的过程，得到了计算层裂点位置的表达式。

(2)编程计算了在靶板厚度 $h=40$ mm 不变的情况下，不同的 EFP 着靶速度 $v_j$ 对层裂的影响，计算结果表明，速度在 1 500～1 900 m/s 范围内，随着 EFP 着靶速度的增大，弯月形层裂区厚度不断减小，长度不断增大。EFP 着靶速度大于 1 900 m/s 时，层裂区域形状不再呈弯月形，层裂区域急剧缩小。

(3)利用 Matlab 软件编程计算了在 $v_j=1\ 800$ m/s 不变的情况下，不同靶板厚度对层裂的影响，计算结果表明，靶板厚度在 35～60 mm 范围内，随着靶板厚度的增大，弯月形层裂区厚度不断增大，长度不断减小。当靶板厚度小于 35 mm 时，层裂区域形状不再呈弯月形，层裂区域急剧缩小。

(4)根据 EFP 侵彻实验，得到在 $v_j=1\ 800$ m/s 且 $h=40$ mm 情况下，靶板发生层裂时的参数。同时利用 EFP 垂直侵彻有限厚装甲钢靶板形成层裂理论对在相同条件下靶板层裂情况进行计算，两者结果吻合较好。

## 参考文献：

[1]　RINEHART J S, PEARSON J. Conical surfaces of fracture produced by asymmetrical impulsive loading[J]. Journal of Applied Physics, 1952,23(6):685-687.

[2] RINEHART J S. Stress transients in solids[M]. Santa Fe, New Mexico: HyperDynamics, 1975:212-215.
[3] REN Bo, LI Shaofan, QIAN Jing, et al. Meshfree simulations of spall fracture[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011,200(5/6/7/8):797-811.
[4] YU V B, SAVELEVA N V, NAIMARK O B. Numerical simulation of dynamic failure and multi spall fracture in metals[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016,774(1):012063.
[5] 杜忠华.动能弹侵彻陶瓷复合装甲机理[D].南京:南京理工大学,2002:61-64.
[6] 陈大年,谭华,俞宇颖,等.一种基于空穴聚集的层裂模型[J].爆炸与冲击,2006,26(2):97-104.
CHEN Danian, TAN Hua, YU Yuying, et al. A spallation model based on hole coalescence[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(2):97-104.
[7] 刘飞,唐献述,任新见.接触爆炸作用下钢板层裂效应数值分析[J].工程爆破,2011,17(2):15-18.
LIU Fei, TANG Xianshu, REN Xinjian. Numerical analysis of spall effect of steel plate under contact explosion [J]. Engineering Blasting, 2011,17(2):15-18.
[8] 魏波.冲击载荷下材料层裂的数值模拟[D].南京:南京理工大学,2013:20-51.
[9] 王礼立.应力波基础[M].北京:国防工业出版社,2005:238-239.
[10] ZU X, HUANG Z, XIAO Q, et al. Theoretical study on equivalent target of ceramic composite armor[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015,40(4):576-582.
[11] HELD M. Verification of the equation for radial crater growth by shaped charge jet penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995,17(1/2/3):387- 398.
[12] NEUBERGER A, PELES S, RITTEL D. Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Air-blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(5):859-873.

# Spallation of targets subjected to vertical penetraion of explosively-formed projectiles

LI Rui, HUANG Zhengxiang, ZU Xudong, XIAO Qiangqiang, JIA Xin
(*School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

**Abstract**: In order to understand the spallation of a target subjected to the impact load of an explosively formed projectile (EFP), on the basis of wave mechanics and basic assumptions, a mechanical model was developed to describe the spallation of the finite-thickness target vertically penetrated by an EFP. By the developed model, the spallation process of the target plate was obtained, and its formula was derived. The result shows as following. When the impact velocity of the EFP is 1 800 m/s and the thickness of the target increases from 35 mm to 60 mm, the thickness of the falcate spallation zone at the back of the target increases and its length decreases. When the thickness of the target is 40 mm and the impact velocity increases from 1 600 m/s to 1 900 m/s, the thickness of the falcate spallation zone at the back of the target decreases and its length increases. Dynamic tests were carried out on the EFPs penetration into the rolled homogeneous armor targets with the thickness of 40 mm. The experimental result is in good agreement with the theoretical prediction.

**Keywords**: explosively-formed projectile; vertical penetraion; spallation; impact load

(责任编辑 张凌云)