

文章编号: 1006-9941(2009)03-0317-04

## 炸药爆炸残留物颗粒飞散分布规律的简化模型分析

易建坤, 艾云平, 言克斌

(解放军炮兵学院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 由于边界效应, 装药爆炸时表层将产生残留物颗粒。为了对残留物颗粒的飞散运动及分布规律进行理论分析, 利用球形颗粒一维稀疏二相流动力学模型, 研究得到炸药残留物颗粒的速度衰减及水平飞散距离计算公式; 在此基础上, 建立了以某粒径残留物颗粒水平运动极限距离为半径的炸药残留物颗粒球面空间分布简化理论模型。利用此简化模型, 首次从理论上分析了近似自由空爆条件下炸药残留物在水平方向的分布规律。分析结果表明: 炸药爆炸残留物颗粒在水平方向的质量分布密度先随距离的增加而增大至某一峰值后再随距离的增加而降低。此结果与实验现象基本相符, 可作为对试验现象的一种理论解释。

**关键词:** 爆炸力学; 爆炸残留物; 飞散分布; 简化理论模型

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.03.016

### 1 引言

目前, 在公共安全领域内, 对炸药的爆炸残留物的研究大多集中在残留物分布现象及规律的试验研究上, 如文献[1]对多种无机炸药和有机炸药的爆炸残留物的采集、提取、检验问题进行了研究与总结, 其中获得炸药残留物分布规律均来自试验现象。更多的研究者则是针对某些具体的炸药(包括工业炸药<sup>[2-3]</sup>或军用炸药<sup>[4-7]</sup>)的爆炸残留物分布进行实爆试验研究, 从试验现象中总结出分布规律。这些试验结果对爆炸残留物的现场收集与提取具有重要的实践指导意义。但由于这些研究均较少涉及到对爆炸残留物颗粒飞散分布过程及分布规律的理论分析, 因此无法对这些试验现象给出合适的理论解释。为了加深对残留物颗粒分布过程的认识, 本文采用简化的力学模型对正常爆轰情况下来源于装药表层的炸药残留物颗粒的飞散过程进行初步理论分析。

### 2 炸药残留物颗粒飞散运动规律分析

#### 2.1 炸药残留物颗粒初始飞散速度的确定

基于爆轰物理学角度, 在正常爆轰情况下, 拐角效应和边界效应是匀相炸药爆炸产生炸药残留物的内在机制。其中, 因边界效应产生的残留物主要来源于装药表层<sup>[8]</sup>。

假定炸药残留物来源于炸药表层, 且爆炸瞬间表面薄层炸药被粉碎而以极细微的颗粒形态随爆轰产物飞散出去。因表面薄层炸药量少且炸药颗粒粒径也很小, 近似估计, 可认为表层未反应炸药颗粒是以爆轰波阵面相同的初始速度  $u_x$  抛散出去。显然此速度为残留物颗粒初始抛散速度的极大值  $u_{s,max}$ 。凝聚炸药爆轰产物向空气中飞散的初始速度  $u_x$  可依据爆轰产物等熵膨胀近似计算求得<sup>[9-10]</sup>。

#### 2.2 炸药残留物颗粒飞散运动过程分析

不考虑波后复杂流场对颗粒运动的影响, 也不考虑爆轰产物膨胀过程对颗粒运动的影响, 仅认为炸药残留物颗粒在获得与爆轰产物波阵面质点相同的初始速度后即进入空气作减速运动。下面近似用空气流场中的球形颗粒稀疏二相流动力学模型来描述这一减速过程。

假设:  $l$  为残留物颗粒的抛散方向,  $l$  的水平夹角为  $\theta$ ; 设球形残留物颗粒的粒径为  $d_s$ 、初始速度为  $u_s$ 、密度为  $\rho_s$ ; 空气密度为  $\rho_a$ 、运动速度为  $u_a$ ; 动力粘性系数为  $\mu$ , 运动粘性系数为  $\nu$ 。在空气中运动的炸药残留物颗粒主要受到以下三类力的作用<sup>[11]</sup>: (1) 与流体和颗粒的相对运动无关的力, 主要有惯性力  $F_1$ 、压差力  $F_2$  和重力  $G$  等; (2) 依赖于流体和颗粒间的相对运动、其方向沿着相对运动方向的力——纵向力, 主要有阻力  $F_3$ 、附加质量力  $F_4$ 、Basset 力  $F_5$ ; (3) 依赖于流体和颗粒间的相对运动、其方向垂直于相对运动方向的力——侧向力, 主要有升力  $F_6$ 、Magnus 力  $F_7$  和 Saffman 力  $F_8$ 。作用于颗粒上的力的平衡方程为:

$$\sum_{i=1}^8 F_i + G = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2008-08-26; 修回日期: 2009-02-26

作者简介: 易建坤(1978-), 男, 讲师, 从事爆炸作用及其应用技术方面的研究。e-mail: kjyjknanjing@126.com

若阻力  $F_3$  形式采用 Stokes 阻力,则 Basset 力与 Stokes 阻力相比较后认为是可以忽略的;假定颗粒在抛散过程中,旋转角速度不是很大,则 Magnus 力  $F_7$  可以忽略;另外残留物颗粒粒径很小,空气流场在颗粒粒径的尺度上不会产生速度梯度,则 Saffman 力  $F_8$  也可忽略。这样在二相流动过程中产生的侧向力:升力  $F_6$ 、Magnus 力  $F_7$  和 Saffman 力  $F_8$  都可忽略,。颗粒运动可简化为如图 1 所示的一维二相流动力学过程<sup>[10-11]</sup>。

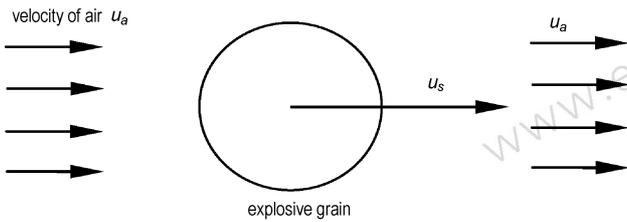


图 1 炸药残留物颗粒在空气中的一维二相流运动简化模型  
Fig. 1 Simplified model for motion of explosive residue in air

平衡方程(1)式可具体表示为:

$$\frac{du_s}{dt} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{dP}{dl} + g_l + \frac{1}{2} \frac{\rho_a}{\rho_s} \frac{d(u_a - u_s)}{dt} + \frac{(u_a - u_s)}{\rho_s d_s^2 / 18\mu} \quad (2)$$

式中,  $g_l$  为沿  $l$  方向的重力加速度;对空气流体而言,不考虑颗粒对其反作用,则有运动方程如下:

$$\frac{du_a}{dt} \approx -\frac{1}{\rho_a} \frac{dP}{dl} + g_l \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式后,设  $\tau_v = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu}$ , 因  $\frac{\rho_a}{\rho_s} \ll 1$ , 故颗粒运动方程最终形式为:

$$\frac{du_s}{dt} = -\frac{u_s}{\tau_v} + g_l \quad (4)$$

因为研究残留物分布现象实际上关心的只是残留物在水平方向的分布特点,故只需考虑水平方向的运动状态

$$\frac{du_{sx}}{dt} = -\frac{u_{sx}}{\tau_v} \quad (5)$$

将  $u_{smax}$  作为初始条件,且当时  $x=0, u_{sx}(0) = u_{smax} \cos\theta$ , 由方程(5)可得到:

$$u_{sx} = u_{smax} \cos\theta \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right) \quad (6)$$

$$x = u_{smax} \cos\theta \tau_v \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right)\right] \quad (7)$$

式中,  $\theta$  为颗粒运动方向的水平夹角;  $t$  为运动时间。

式(6)描述了残留物颗粒抛散速度在水平方向的衰减情况,式(7)为残留物颗粒水平抛散距离与时间的关系,很明显水平抛散距离存在一个极限值即:

$$x_{max} = u_{smax} \cos\theta \tau_v(d_s) = u_{smax} \cos\theta \cdot \rho_s d_s^2 / 18\mu \quad (8)$$

### 3 爆炸残留物空间分布规律分析

#### 3.1 炸药残留物质量水平分布密度模型

假定炸药炸高足够让残留物颗粒在水平方向速度衰减为零后才沉积到地面,则每一颗粒均在水平方向运动至极限距离。不考虑炸药形状等因素引起的残留物颗粒分布的方向性,颗粒向各个方向抛散机会相等。对粒径  $d_s$  的炸药残留物颗粒而言,在水平方向运动的极限距离据(8)式为:

$$x_{max}(d_s) = u_{smax} \cos\theta \tau_v(d_s) = R_{max}(d_s) \cos\theta \quad (9)$$

式中,  $R_{max}(d_s) = u_{smax} \tau_v(d_s)$ 。

式(9)可以理解为粒径  $d_s$  的颗粒先沿其初始运动方向达到半径为  $R_{max}(d_s)$  的球面后再垂直向下运动到地面的情形,如图 2 所示(只取半球面分析)。

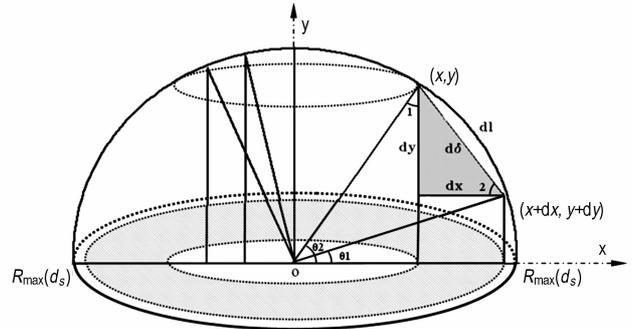


图 2 残留物飞散分布分析模型

Fig. 2 Analytical model for distribution of explosive residue

假定颗粒向各个方向抛散机会相等,故在半径为  $R_{max}(d_s)$  的球面上,粒径为  $d_s$  的颗粒是均匀分布的。在图 2 球面上点  $(x, y)$  与点  $(x+dx, y+dy)$  之间的弧微元  $dl$  所对应的球面上分布的残留物量  $dm$  为:

$$dm = \frac{2\pi x dl}{4\pi R_{max}^2(d_s)} m(d_s) = \frac{x dl}{2R_{max}^2(d_s)} m(d_s) \quad (10)$$

式中,  $m(d_s)$  为残留物中粒径为  $d_s$  的残留物质量。很显然  $dm$  竖直下落后分布在水平方向  $dx$  范围内,即如图 2 所示的水平面环状阴影区域内。当弧微元  $dl$  取很小时,  $\angle 1 \approx \angle 2, dl \approx d\delta$ 。  $d\delta$  为弧微元  $dl$  所对应的弦长。由此可得:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x}{[R_{max}^2(d_s) - x^2]^{1/2}} \quad (11)$$

且  $dx$  内分布的残留物量  $dm$  的表达式(10)可改写为:

$$dm = m(d_s) \frac{x}{2R_{max}(d_s) [R_{max}^2(d_s) - x^2]^{1/2}} dx \quad (12)$$

对(12)式积分后将  $x=0, m=0$  代入可得:

$$m = \frac{m(d_s)}{2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{x^2}{R_{\max}^2(d_s)} \right]^{1/2} \right\} \quad (13)$$

显然,(13)式所求得的是分布在水平距离  $x$  处的圆周(半径为  $x$ )上的粒径为  $d_s$  的残留物质量。故水平距离  $x$  处粒径为  $d_s$  的残留物所形成的分布密度  $C(d_s, x)$  为:

$$\begin{cases} C(d_s, x) = \frac{m}{2\pi x} \times 2 \\ = \frac{m(d_s)}{4\pi x} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{x^2}{R_{\max}^2(d_s)} \right]^{1/2} \right\} \times 2 \\ = \frac{m(d_s)}{2\pi x} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{x^2}{R_{\max}^2(d_s)} \right]^{1/2} \right\} \\ x \leq R_{\max}(d_s) \\ C(d_s, x) = 0 \quad x > R_{\max}(d_s) \end{cases} \quad (14)$$

由(14)式得出的空爆条件下的炸药残留物分布密度(质量/面积)水平径向的分布规律如图 3 所示。对于粒径  $d_s$  的残留物其密度分布是随着距爆心距离的增大而增大的,在  $R_{\max}(d_s)$  处达到最大值,在  $R_{\max}(d_s)$  以远分布水平为 0。

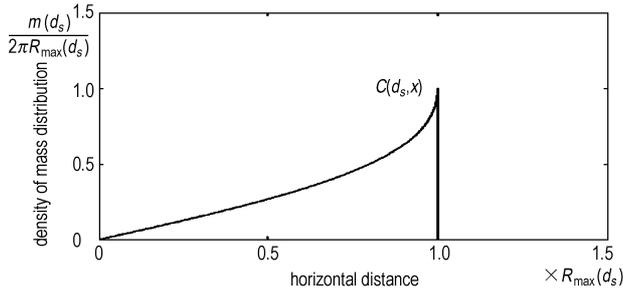


图 3 粒径为  $d_s$  的残留物水平方向分布密度的变化规律  
Fig. 3 Curve of density distribution of explosive residue grains with diameter  $d_s$  vs distance in horizontal

### 3.2 炸药残留物整体水平分布密度变化规律分析

全粒径区间内的残留物水平分布密度即为所有粒径的残留物水平分布密度的累加所得。

据(8)、(9)式,设  $R_{\max}(d) = kd^2, k$  为一常数。 $m(d_s)$  为粒径  $d_s$  的残留物的质量,显然也是  $d_s$  的函数,不过很难求得具体表达式,下面采用正态分布的情况对  $m(d)$  的表达形式进行理想化处理。

设所有残留物各粒径所占比重呈正态分布,且占比重 95% 的残留物的粒径分布在区间  $[(1-\eta)d_s, (1+\eta)d_s]$  内( $\eta$  为小于 1 的常数),如图 4 所示,则有:

$$\begin{aligned} m(d) &= m \int_{d-\Delta}^{d+\Delta} \frac{1}{\eta d_s \sqrt{\pi/2}} \exp \left[ -2 \left( \frac{d-d_s}{\eta d_s} \right)^2 \right] dd \\ &= m \frac{2\Delta}{\eta d_s \sqrt{\pi/2}} \exp \left[ -2 \left( \frac{d-d_s}{\eta d_s} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $m$  为残留物的总质量,  $\Delta$  为一极小量且对任何粒径均为一定值。将(15)式代入(14)式得:

$$C(d, x) = \frac{B\Delta}{x} \exp \left[ -2 \left( \frac{d-d_s}{\eta d_s} \right)^2 \right] \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{x^2}{(kd^2)^2} \right]^{1/2} \right\}, \quad x \leq kd^2 \quad (16)$$

$$C(d, x) = 0, \quad x > kd^2 \quad (17)$$

式中,  $B = \frac{m}{\eta d_s \sqrt{\pi^3/2}}$  为某一定值。当  $d$  在  $[(1-\eta)d_s, (1+\eta)d_s]$  内取不同值时,得到相应粒径的残留物颗粒水平方向质量分布密度曲线(所有作图均取  $\eta = 0.3$ ),如图 5 所示。

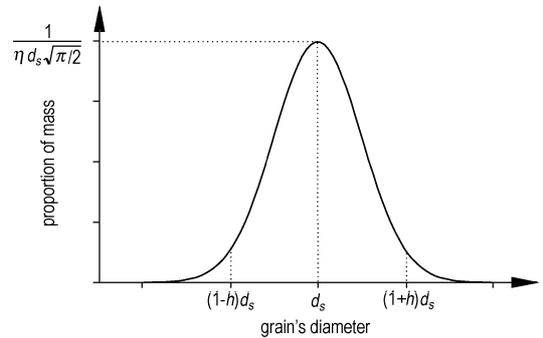


图 4 各粒径所占比重呈正态分布

Fig. 4 Normal distribution curve of explosive residue grain's proportion of mass vs diameter

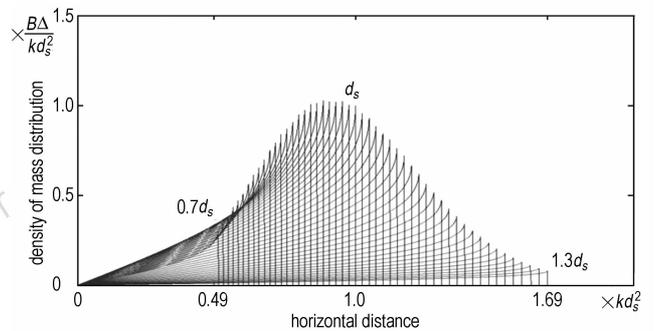


图 5 残留物各粒径所占比重呈正态分布时不同粒径残留物的水平质量分布密度曲线

Fig. 5 Curves of density of mass distribution of explosive residue grains with different diameters in horizontal

残留物的整体水平分布密度曲线  $C(x)$  即为上述  $C(d, x)$  曲线累加后得到,即:

$$C(x) = \sum_{(1-\eta)d_s}^{(1+\eta)d_s} C(d, x) = \int_{(1-\eta)d_s}^{(1+\eta)d_s} C(d, x) dd \quad (18)$$

上式很难获得解析解,故在  $[(1-\eta)d_s, (1+\eta)d_s]$  内,分别对区间内粒径间隔  $2\Delta$  取不同值,用数值计算方法计算不同数量  $C(d, x)$  曲线的累加结果。显然当粒径间距  $2\Delta$  取得越小时,累加的  $C(d, x)$  曲线越多,得

到的  $C(x)$  越准确。计算得到的结果  $C(x)$  残留物整体水平方向的质量分布密度如图 6 所示。

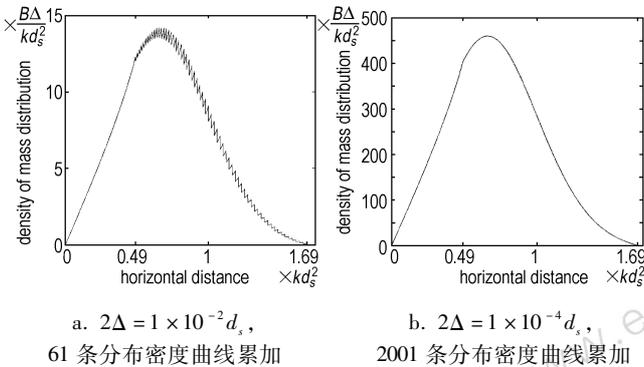


图 6 残留物累加计算得到的整体水平质量分布密度曲线  
Fig. 6 Curves of total density of mass distribution of explosive residue grains in horizontal

当极小量  $2\Delta = 3 \times 10^{-4} d_s$  时,即在粒径区间  $[(1-\eta)d_s, (1+\eta)d_s]$  内由 2001 条  $C(d, x)$  曲线累加而得到的整体水平方向质量分布密度曲线  $C(x)$  的精度已足够,如图 6b。

图 6 中的曲线变化规律也表明:对于残留物中各粒径所占比重呈正态分布的情况而言,残留物整体水平方向质量分布密度的变化规律也先是随着距爆心距离的增大而增大,在某一水平距离处(此处  $x > 0.49 kd_s^2$ ) 达到最大值后开始随着距爆心距离的增大而降低,最终降至为 0。同理,当残留物各粒径所占比重呈均匀分布时,也可得到类似的结论。

综上所述,可认为炸药爆炸残留物颗粒在飞散后其水平方向的质量分布密度呈现先随距离的增加而增大至某一峰值后再随距离的增加而降低的一般化规律。这与已有的“增大—峰值—降低”的炸药爆炸残留物试验现象<sup>[1,4-7]</sup>是相符的。当然实际试验中所得到的残留物分布规律是在诸多因素的影响下形成的,如本文分析中没考虑爆轰气态产物膨胀振荡及湍流等气动现象和地面反射冲击波等外部因素对残留物分布规律的影响等。故本文分析的结果可以作为对形成此试验现象内在机制的一种理论解释。

## 4 结 论

(1) 采用球形颗粒稀疏二相流动力学模型对具有初始飞散速度的炸药残留物颗粒受力情况及运动过程的分析表明:残留物颗粒水平飞散距离存在一个与粒径相关的极限值。

(2) 采用炸药残留物某一粒径颗粒在以其水平分布极限距离为半径的空间球面上均匀分布的残留物分布理论模型,获得了单一粒径的炸药残留物在水平方向的质量分布密度(质量/面积)曲线,和全粒径区间  $[(1-\eta)d_s, (1+\eta)d_s]$  内的炸药残留物整体水平方向质量分布密度变化规律。

## 参考文献:

- [1] 胡晔. 爆炸残留物的采集、提取与检验技术[J]. 消防技术与产品信息, 2002(04): 41-44.  
HU Ye. The technics of gathering, extracting & examining the residue after explosion[J]. *Fire Technique and Products Information*, 2002(04): 41-44.
- [2] Kolla P, Sprunkel A. Identification of dynamite explosives in post explosion residues[J]. *Journal of Forensic Sciences*, 1995, 40(3): 406-411.
- [3] 周红, 孙玉友, 徐建中. 膨化炸药及其残留物研究[J]. 分析测试学报, 2005, 24: 426-427.  
ZHOU Hong, SUN Yu-you, XU Jian-zhong. Study on expanding explosive and its explosive residue[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2005, 24: 426-427.
- [4] Thomas F Jenkins, Marianne E Walsh. Use of snow-covered ranges to estimate explosives residues from higher-order detonations of army munitions[J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 173-185.
- [5] Susan Taylor, Alan Hewitt. TNT particle size distributions from detonated 155 mm howitzer rounds[J]. *Chemosphere*, 2004, 55: 357-367.
- [6] Michael R Walsh, Marianne E Walsh. Energetic Residues from Live-Fire Detonations of 120mm Mortar Rounds[R]. US Army Corps of Engineers, ERDC/CRREL TR-05-15, December, 2005.
- [7] Philip G Thorne, Thomas F Jenkins. Continuous Treatment of Low Levels of TNT and RDX in Range Soils Using Surface Liming[R]. US Army Corps of Engineers, ERDC/CRREL TR-04-4, December, 2004.
- [8] 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 500-506.  
SUN Cheng-wei, WEI Yu-zhang, ZHOU Zhi-kui. Applied detonation physics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 500-506.
- [9] 惠君明, 陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 江苏科学技术出版社, 1995: 295-298.  
HUI Jun-ming, CHEN Tian-yun. Theory of explosive' explosion[M]. Phoenix Science Press, 1995: 295-298.
- [10] 罗艾民, 张奇, 李建平, 等. 爆炸驱动作用下固体燃料分散过程的计算分析[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(2): 103-107.  
LUO Ai-ming, ZHANG Qi, LI Jian-ping, et al. Computational analysis of dispersion process of explosively driven solid fuel[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(2): 103-107.
- [11] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 26-58.  
LIU Da-you. Fluid dynamics of two-phase systems [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 26-58.

(下转 325 页)

## Experimental Study on Damage to Explosive Charge by Impact Load in the Process of Penetration

CHEN Wen<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing-ming<sup>1</sup>, HU Xiao-dong<sup>2</sup>, BAI Run-qing<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Chongqing Hongyu Precision Industry Co. Ltd, Chongqing 402760, China)

**Abstract:** With respect to the explosive charge unsafety caused by high-speed earth penetrator, the penetration test was carried out with subscale projectiles, and the test projectiles were recovered to check the variations of appearance and density of explosive charges. Baffle test was also performed to test the thickness variations of critical baffle and the effects of the impact loads on the damaged to explosive charge in the process of penetration were studied further. Results show that the damages to the explosive charge at different positions are different (it is more serious in the front and rear section compared with that in the middle section), and the damages increase with the increasing of penetration velocity and the shock sensitivity is improved remarkably.

**Key words:** engineering mechanics; impact load; penetration test; damage to explosive charge; shock initiation

(上接 320 页)

## A Simplified Theoretical Model on Scattering and Distribution of Explosive Residue of Solid Condensed Explosive

YI Jian-kun, AI Yun-ping, YAN Ke-bin

(Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A simplified theoretical model was introduced for predicting distribution characteristic of explosive residue in horizontal originating from surface layer of charge because of border influence. With the theoretical model of spherical grain dynamics of sparse two-phase flow in single dimension, computing formulas of velocity's attenuation and scattering distance were built for explosive residue grains in horizontal. Then, a simplified theoretical model on distribution of explosive residue was put forward on the basis of a spherical space with radius equalling to maximum horizontal scattering distance of explosive residue grains with certain diameter. With this model, the distribution characteristics in horizontal of explosive residue grains were theoretically analyzed under condition of explosion in air. Results show that there exists a maximum value of scattering distance in horizontal for explosive residue grains with certain diameter, and the density of mass distribution of explosive residue firstly increases with increasing of distance to a maximum value and then decreases with increasing of distance. Theoretical result basically matches the phenomena of distribution of explosive residue in experiments.

**Key words:** explosion mechanics; explosive residue; scattering and distribution; simplified theoretical model