文章编号：1001-1455(2014)05-0574-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)05-0574-06

爆炸驱动固/液介质爆炸抛撒的实验研究*

蒋海燕[1]，王树山[1]，魏继锋[1]，饶 彬[1]，张之暐[2]
(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
2. 中国兵器工业导航与控制技术研究所，北京 100089)

摘要：针对爆炸驱动固/液介质抛撒混合过程设计了透明双层抛撒装置。采用高速运动分析系统记录抛撒装置壳体破碎和固/液界面、固/液介质抛撒形态的演变过程，结果表明：壳体裂纹的产生和断裂首先出现在轴向方向；固/液界面在外层壳体破碎之前清晰可见，表明固/液介质的混合主要发生在壳体破碎之后；导爆索驱动下呈现滑移爆轰驱力特征，介质抛撒形状呈倒圆台形，不同截面处的介质运动速度随截面到起爆端轴向距离的增大而减小。

关键词：爆炸力学；爆炸抛撒；滑移爆轰；固体粉末；液体；界面
中图分类号：O389 **国标学科代码**：1303599 **文献标志码**：A

借助于爆炸驱动作用实现物质的抛撒分散，使被抛撒介质在特定区域空间内快速形成满足一定条件的气/液、气/固或气/固/液多相混合体，在军事(如燃料空气炸药、高密度惰性金属炸药)和民用(如爆破除尘、灭火抑爆)等领域中具有广泛的应用背景。国内外学者在爆炸抛撒方面开展了大量的研究[1-15]，包括针对爆炸抛撒的过程寻求合理的物理数学描述[3-7]；从抛撒整体效果(终点效应)出发，研究中心装药的装置参数和抛撒介质物化特性对云雾抛撒范围的影响规律[8-11]；通过研究爆炸抛撒过程中的壳体破碎、界面演变和射流，揭示了控制固/液及其混合物抛撒分散的关键机制[12-15]。本文中针对固/液复合材料在勤务处理和贮存过程中经常出现固/液分层现象[16]，提出固/液物理分置的双层抛撒装置。抛撒装药位于抛撒装置中心，周围被内外两层固/液介质包围，通过中心装药的爆炸驱动作用，使内层固体粉末与外层液体混合并抛撒到一定的区域空间。借助高速运动分析系统捕捉到固体粉末和液体介质爆炸抛撒特征的一系列图像，分析爆炸驱动作用下固/液界面的演变过程及初期的抛撒形态。

1 实验设计

实验在室外自由场进行，实验设备主要有抛撒装置、背景布、高速运动分析系统、中心装药、雷管和同步装置等，如图 1 所示。抛撒装置竖直悬挂于空中，其中心离地约 1.2 m；高速摄影的拍摄镜头正对抛撒装置的中轴，为了更清楚的观察介质的抛撒过程，选用蓝色背景布作为衬托。

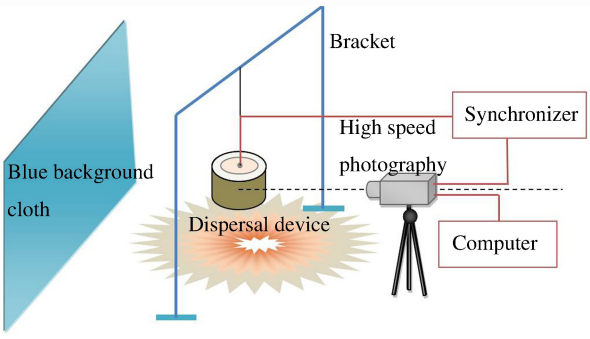


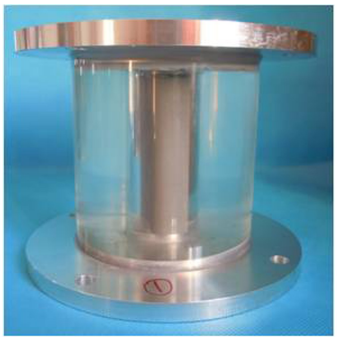
图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

* **收稿日期**：2013-03-25；**修回日期**：2013-07-08
作者简介：蒋海燕(1985—)，女，博士研究生。

1.1　抛撒装置设计

抛撒装置为同心圆式的内、外双层结构，如图 2 所示，该结构分为内、外 2 个腔体，内腔装填固体粉末，外腔装填液体。为便于观察爆炸驱动作用下固/液界面的演变过程，抛撒装置的壳体采用透明的有机玻璃，内层壳体壁厚 2 mm，直径为 35 mm，外层壳体壁厚为 3 mm，直径为 110 mm，上、下端盖厚为 10 mm 的铝板。



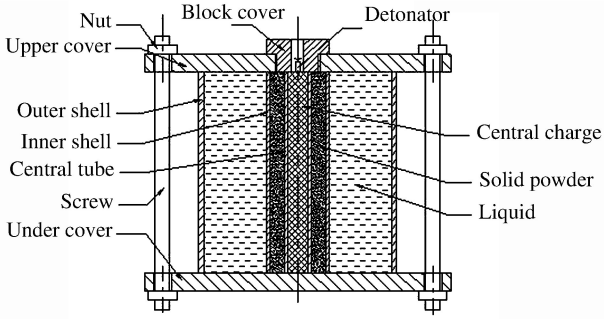


图 2　实验装置

Fig. 2　Experimental device

1.2　驱动设计

中心装药采用装填黑索金的导爆索，导爆索长度与抛撒装置高度相同，导爆索两端与抛撒装置上、下端部平齐，以尽可能保证界面运动的线性膨胀。为避免起爆药量过大对实验结果造成影响，采用∅2.5 mm的微型雷管起爆。

1.3　观测系统

采用 Photron 公司的 FASTCAM SA4 型高速摄像仪记录爆炸抛撒过程，拍摄频率为 10^4 s^{-1}，实验时，利用同步装置建立起爆和触发高速运动分析系统。

2　实验结果分析

2.1　静爆实验

抛撒装置高度 100 mm，导爆索线密度为 5 g/m，实验中所用固体粉末为 300 目的铁粉，装填液体为水基聚乙烯醇，装填比为 0.05%，为保证数据的可靠性，共进行 3 组实验，所有实验条件均相同。

采用 Phantom Camera Control (PCC) Application 软件，对记录的图像进行读取，可以清晰看到抛撒装置的破碎过程和固/液界面演变过程，以及固/液介质抛撒形态随时间的变化，图 3 所示为爆炸抛撒过程的高速录像分幅照片。

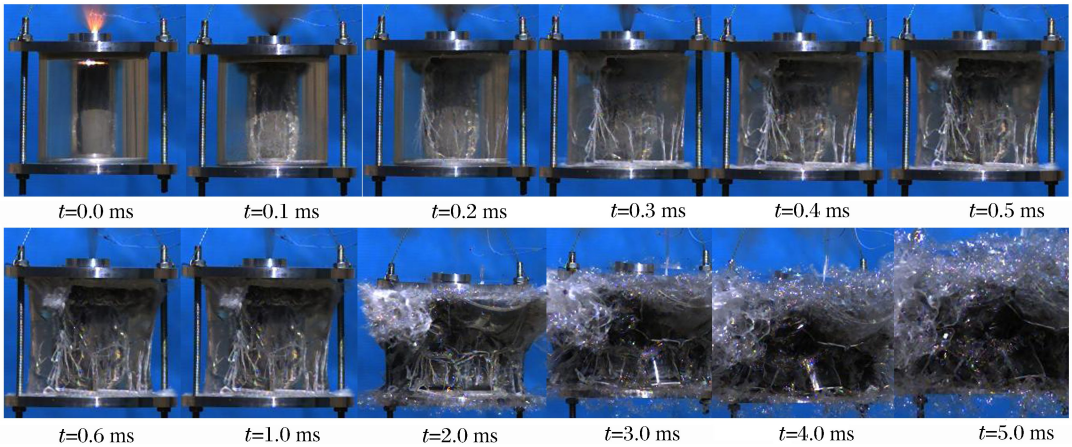


图 3　爆炸抛撒过程分幅照片

Fig. 3　Sequential photos of explosive dispersal process

2.2 壳体破碎

从图 3 中可以看出,中心装药爆炸后,内层壳体的上端部率先破碎,并向外膨胀,随着爆轰自上向下传播,在外层液体约束和壳体上部膨胀稀疏的共同作用下,内层壳体的中部向外隆起,同时抛撒介质整体向外不断地膨胀;紧接着外层壳体出现裂纹,随着时间的推移,裂纹宽度不断增大。此外,照片清楚地显示,壳体裂纹的产生和断裂首先出现在轴向方向,紧接着在上、下端部和壳体中部出现周向断裂,整个破碎过程呈现出轴向断裂为主导,周向断裂为辅的共同作用结果。出现这种情况的可能原因是:有机玻璃材料的脆性,局部缺陷等非均匀、非各向同性因素的影响,壳体在破碎前期,绝热剪切导致的裂纹在大趋势上轴向占主导,后期主要靠惯性驱动,局部开始出现周向断裂。

由于上、下端板较厚且连接强度较大,中心炸药爆炸作用下壳体出现裂缝后,可将外壁看作两端受约束力的一组板条,如图 4(a);板条受到内侧压力产生变形,壳体开始解体,在此过程中,由于有机玻璃是脆性材料,壳体膨胀半径较小,板条首先在上、下端板处产生剪切断裂,此时,壳体还未完全解体,于是在上下端板处出现了泄爆,导致板条两端压力大于中部,如图 4(b),此时壳体产生周向断裂。

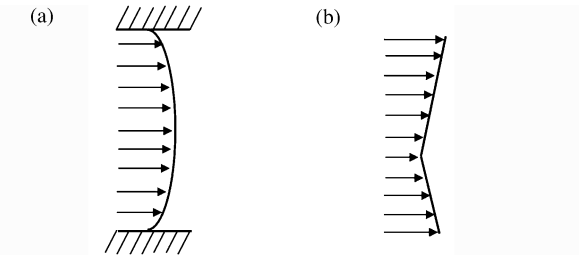


图 4 壳体变形示意图

Fig. 4 Distortion sketch of shell

2.3 运动特征

2.3.1 固/液界面演变与介质抛撒形态特征

从高速录像可知,爆炸抛撒初期,雷管起爆点火,中心装药开始沿抛撒装置轴向产生滑移爆轰,固体粉末在爆轰产物的高压作用下向外运动,固/液界面上端部(靠近起爆点)迅速向外弯折,中部出现鼓胀,如图 3 中 $t=0.1$ ms 时所示;$t=0.2\sim0.4$ ms 时,随着爆轰产物的膨胀,固/液界面进一步向外运动,液体层逐渐变窄,在这个过程中内层壳体还未完全解体,内层固体粉末与外层液体有部分接触,二者所形成的固/液界面光滑且清晰可见;$t=0.5$ ms 时,内层壳体完全解体,内层固体粉末与外层液体大面积接触,在爆轰产物作用下,固/液界面失稳,变得模糊,难以辨识,固体粉末和液体介质之间交界面的不稳定性是否主要为 Richtmyer-Meshkov(R-M)不稳定性,由于实验观测手段的限制,不能给出明确的判断,有待进一步研究。

当 $t=1.0$ ms 时,外层壳体上侧裂开,在冲击波和稀疏波的共同作用下,介质由外及里被加速,部分液体从壳体上侧喷出;到 $t=3.0$ ms 时,由于外层壳体完全解体,对抛撒介质的约束消失,固/液介质整体呈倒圆台形向外运动;当 $t=4.0$ ms 时,随着固/液介质进一步向外运动,由于前驱液体速度较大,液体层被拉宽,液体形态变得复杂,有的以液体块的形态存在,有的以液体丝的形态存在。在实验所观察的 5.0 ms 时间范围内,始终能清楚的看到固体粉末与液体介质存在分层,这说明固/液介质在抛撒初期未能完全混合,需要扩大高速摄影视场,以便对爆炸驱动固/液介质抛撒混合的全过程进行观察。

此外,从实验拍摄的录像来看,当 $t=0.4$ ms 时,抛撒装置的上下端部发生泄爆,有少量液体开始从上下端部喷出,这是由于有机玻璃壳体的脆性,壳体膨胀很小,导致壳体轴向裂缝还未完全发展,上、下端盖连接处就已达到断裂极限。

2.3.2 固/液介质抛撒半径和速度变化分析

沿抛撒装置轴线方向从上到下依次选取 5 个截面,至起爆端的轴向距离分别为 0、20、40、60 和 80 mm,滑移爆轰波依次通过这 5 个截面,根据实验测得的爆炸作用驱动固/液介质运动的分幅照片,采用图像处理软件进行判读,得到离起爆端不同距离处,介质运动的位移-时间曲线和速度-时间曲线,如图 5~6 所示。

由图 5~6 可知,在爆炸抛撒过程中,介质的运动都是先加速后减速。从图 6 可以看出,不同截面上抛撒介质的运动速度随截面到起爆端轴向距离的增大而减小,离起爆端距离越远,该截面上抛撒介质的运动速度越小;且离起爆端越远,该截面上抛撒介质初始加速越小,达到最大速度所需的加速时间越长。

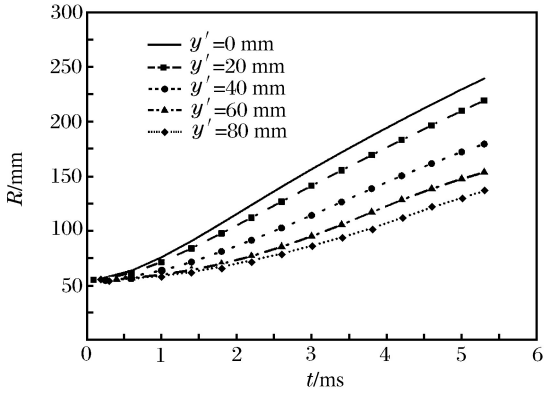


图 5　云团半径变化曲线

Fig. 5　Cloud radius varied with time

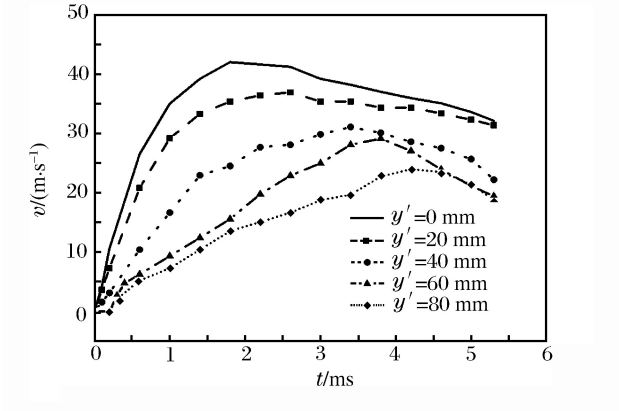


图 6　速度变化运动曲线

Fig. 6　Velocities varied with time

不同距离截面处，抛撒介质运动达到最大速度时所对应的相关参数如表 1 所示，其中 y' 表示截面到起爆端的轴向距离，v_{max} 表示相应截面上抛撒介质运动的最大速度，R_v 表示达到最大速度时抛撒介质的半径，t_v 表示达到最大速度所用时间。

在爆炸抛撒过程中，作用于抛撒介质上的力主要为爆炸驱动力和气动阻力，两者作用的大小将直接反映在介质的抛撒速度上。中心装药起爆后，在理想条件下，爆轰波将沿着中心管壁面滑移前进，呈现出滑移爆轰的形态。若忽略抛撒介质的轴向运动，该滑移爆轰可近似为二维爆轰。首先设想壳体没有膨胀和破碎，按一维爆轰计算出爆轰计算出爆轰波后面的流场中的压力和速度，然后利用赖埃脱黑尔(Lighthill)的“活塞理论”来描述抛撒介质向外运动对爆轰产物的稀疏作用，可以得到一个二维近似模型[17]。

表 1　不同截面上抛撒介质运动参数

Table 1　Parameters of motion on different sections

y'/mm	v_{max}/(m·s^{-1})	R_v/mm	t_v/ms
0	42.075	106.85	1.8
20	36.975	126.68	2.6
40	31.125	126.28	3.4
60	29.167	116.95	3.8
80	24.000	111.72	4.2

将坐标原点置于爆轰波阵面 o-o' 上，如图 7 所示。假设抛撒介质没有向外运动，得到爆轰产物的压力为：

$$p_1 = p_H \left[\left(1 - \frac{y}{y' + y} + \frac{1}{\gamma - 1} \right) \Big/ \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

式中：p_1 为不考虑抛撒介质向外运动时，爆轰产物中 y 截面处的压力，y' 为 y 截面到起爆端的轴向距离，γ 为质量热容比，p_H 为爆压。

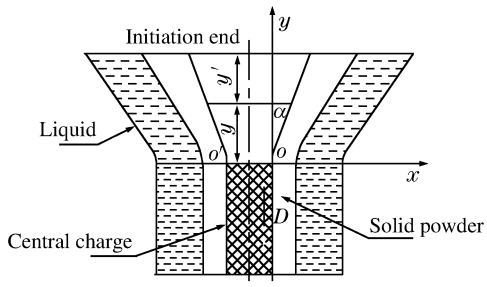


图 7　介质爆炸抛撒示意图

Fig. 7　Schematic diagram of medium explosive dispersal

随着抛撒介质向外运动，在 y 处，介质内壁相对于 y 轴倾斜了 α 角，使爆轰产物产生了稀疏，爆轰产物的压力变为

$$p_1 = p_H \left\{ \frac{\gamma - 1}{\gamma} \left[\frac{\gamma}{\gamma - 1} - \frac{\sin\alpha}{2} - \frac{y}{y' + y}(1 - \sin\alpha) \right] \right\}^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2)$$

式(2)中方括弧中最后一项代表引爆端稀疏的影响。随着滑移爆轰向前传播，端部稀疏对爆轰产物压力的影响远小于介质向外运动造成的稀疏影响，若忽略引爆端稀疏的影响，爆轰产物压力就成为：

$$p_1 = p_H \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \sin\alpha \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3)$$

由式(3)可知，由于壳体破裂产生稀疏波对爆轰压力产生的影响，随着爆轰波向前传播，偏折角 α 越来越大，爆轰产物的压力 p_1 会越来越小，因而随着离起爆端距离的增大，抛撒介质的速度逐渐减小；此

外,由于起爆端在抛撒装置的上侧,爆轰传播存在时间延迟,上侧介质先于下侧介质被加速向外运动,综合以上 2 个因素,使得固/液介质的抛撒形状呈现倒圆台形。

3 结 论

设计透明双层壳体结构,通过高速运动分析系统能够清楚的观测到爆炸驱动固/液界面初期失稳、壳体破碎以及抛撒介质运动的过程,为进一步研究爆炸驱动固、液介质抛撒混合机理奠定基础。

导爆索驱动下呈现滑移爆轰驱力特征,整个介质的抛撒形状呈倒圆台形,在实验所能观察到的时间范围内,不同截面上抛撒介质的运动速度随截面到起爆端轴向距离的增大而减小,而抛撒介质达到最大速度所用时间则随截面到起爆端轴向距离的增大而增大,即最上侧介质运动速度大,且达到最大速度所用时间短。

参考文献:

[1] Frost D L, Ornthanalai C, Zarei Z, et al. Particle momentum effects from the detonation of heterogeneous explosives[J]. Journal of Applied Physics, 2007,113529:1-14.

[2] 龙新平,韩勇,蒋治海,等.炸药驱动水的初期过程[J].爆炸与冲击,2010,30(1):12-16.
Long Xin-ping, Han Yong, Jiang Zhi-hai, et al. Measurement and numerical of initial stage about detonation products driving water[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(1):12-16.

[3] Donahue L, Ripley R C, Horie Y, et al. Cylindrical explosive dispersal of metal particles[C]// The 15th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. 2007.

[4] Yue Ling. Modeling and simulation of particle dispersal by shock and detonation waves[D]. University of Florida, 2010.

[5] 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-min, 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.

[6] 郭学永,惠君明,解立峰.燃料爆炸抛撒过程的实验研究[J].高压物理学报,2005,19(2):120-126.
Guo Xue-yong, Hui Jun-ming, Xie Li-feng. Experimental study on the process of fuel explosive dispersion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(2):120-126.

[7] 郑波,陈力,丁雁生,等.温压炸药爆炸抛撒的运动规律[J].爆炸与冲击,2008,28(5):433-437.
Zheng Bo, Chen Li, Ding Yan-sheng, et al. Dispersal process of explosion production of thermobaric explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(5):433-437.

[8] Zhang F, Frost D L, Thibault P A, et al. Explosive dispersal of solid particles[J]. Shock Waves, 2001,10(6):431-443.

[9] 任晓冰,李磊,严晓芳,等.液体的爆炸抛撒特征[J].爆炸与冲击,2010,30(5):487-492.
Ren Xiao-bing, Li Lei, Yan Xiao-fang, et al. Dispersion characters of liquid induced by explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(5):487-492.

[10] 张奇,覃彬,白春华,等.中心装药对 FAE 燃料成雾特性影响的试验分析[J].含能材料,2007,15(5):447-450.
Zhang Qi, Qin Bin, Bai Chun-hua, et al. Effect of total energy of center explosive charge on fuel dispersal characteristic feature[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007,15(5):447-450.

[11] 白春华,陈亚红,李建平,等.爆炸抛撒金属颗粒群的装药方式[J].爆炸与冲击,2010,30(6):652-657.
Bai Chun-hua, Chen Ya-hong, Li Jian-ping, et al. Charge forms for explosion dispersal of metal particles[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(6):652-657.

[12] Grégoire Y, Frost D L, Petel O. Development of instabilities in explosively dispersed particles[C]// The 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, 2011.

[13] David L F, Grégoire Y, Petel O, et al. Particle jet formation during explosive dispersal of solid particles[J]. Physics of Fluids 2012,24(9):091109.

[14] Milne A M, Parrish C, Worland I. Dynamic fragmentation of blast mitigants[J]. Shock Waves, 2010(20): 41-51.

[15] Ripley R C, Donahue L, Zhang F. Jetting Instabilities of Particles From Explosive Dispersal[C]// The 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. 2011.

[16] 张奇,闫华,白春华. 固液混合燃料物理稳定性分析[J]. 火炸药学报,2003,24(4):47-50.
Zhang Qi, Yan Hua, Bai Chun-hua. Analysis on the physical stability of the solid-liquid mixed fuel[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003,24(4):47-50.

[17] 邵丙璜,张凯. 爆炸焊接原理及其工程应用[M]. 大连:大连工学院出版社,1987:153-157.

Explosive dispersal of solid and liquid media: Experimental investigation*

Jiang Hai-yan[1], Wang Shu-shan[1], Wei Ji-feng[1], Rao Bin[1], Zhang Zhi-wei[2]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Navigation and Control Technology Institute of Norinco Group, Beijing* 100089, *China*)

Abstract: According to the dispersal mixing process of explosive-driven solid powder and liquid, a transparent double-layer dispersal device was designed. A high-speed photography system was used to record the shell crushing of the dispersal device and the evolution of the solid-liquid interface and dispersal cloud status. The crack in the shell appeared and the shell fractured first along the axial direction of the shell. Before the outer shell broke, the solid-liquid interface was clear, which indicated that the solid powder and liquid mixed mainly after the shell failure. The detonation waves driven by the detonating cord presented sliding-detonation characteristics, the dispersal cloud shape took on an inverted truncated cone, and the cloud movement velocities at the different sections were inversely proportional to the axial distance of the sections from the initiation location.

Key words: mechanics of explosion; explosive dispersal; sliding detonation; solid powder; liquid; interface

* Received 25 March 2013; Revised 8 July 2013
Corresponding author: Wei Ji-feng, weijifeng@bit.edu.cn

(责任编辑　王易难)