文章编号:1000-5773(2010)06-0431-07

药柱冲击波在有机玻璃中的衰减特性研究*

徐 森[1,2],刘大斌[1,2],彭金华[1],王建灵[3],郭 伟[3],金朋刚[3],贾宪政[3]

(1.南京理工大学化工学院,江苏南京 210094;
2.国家民用爆破器材质量监督检验中心,江苏南京 210094;
3.西安近代化学研究所,陕西西安 710065)

摘要:用作图法得到了药柱与有机玻璃隔板界面处的冲击波压力,利用 AUTODYN 6.1 软件模拟了药柱冲击波在有机玻璃隔板中的衰减过程,并用锰铜压力计法测量了药柱冲击波在不同厚度有机玻璃隔板中的压力,并根据理论公式计算了有机玻璃中相应的冲击波速度、波后质点速度和密度。结果表明,理论计算结果、数值模拟结果与试验测量结果一致,并根据试验结果得到了冲击波压力在有机玻璃中的衰减规律;AUTODYN 6.1 软件能够准确地预测冲击波在有机玻璃隔板中的衰减特性。

关键词:爆炸力学;冲击波;有机玻璃隔板;锰铜压力计;AUTODYN
中图分类号:O389 **文献标识码**:A

1 引 言

冲击波感度是炸药的重要安全性能指标之一,通常用隔板试验的临界隔板厚度来表征炸药的冲击波感度。然而一旦装药尺寸等条件发生变化,临界隔板值就会改变。为了能定量表征炸药在不同条件下的冲击波感度,有必要研究隔板试验中不同隔板厚度所对应的冲击波输出压力值。对此,刘玉存等人[1]研究了冲击波在厚度为 8.42~15.00 mm 的有机玻璃中的衰减规律;陈熙蓉等人[2]通过测量冲击波在有机玻璃中的传播速度,计算出冲击波压力在隔板中的衰减规律;王作山等人[3]研究了冲击波在有机玻璃中衰减模型;王海福等人[4]研究了冲击波在密实介质中衰减特性的计算;韩秀凤等人[5]研究了雷管输出冲击波在有机玻璃中的衰减特性。

联合国《关于危险货物运输的建议书 试验和标准手册》[6-7]是被国际上广为认可的爆炸品测试标准,该手册中有两组隔板试验,分别是联合国隔板试验(UN)和 EIDS 隔板试验,其中 UN 隔板试验在爆炸品安全性评估试验中被广泛使用,该手册给出了 EIDS 隔板试验的起爆药柱在不同厚度有机玻璃隔板下对应的压力,但 UN 隔板试验的起爆药柱在不同厚度有机玻璃隔板下对应的压力并没有给出。而且对于药柱与隔板界面处的冲击波压力测试,目前也未查到相关文献。本研究利用锰铜压力计研究 UN 隔板试验替代药柱产生的冲击波压力在有机玻璃隔板中的衰减规律,并计算了药柱与隔板界面处的冲击波压力,根据压力测试结果计算了冲击波速度在有机玻璃中的衰减规律和有机玻璃隔板状态参数的变化,并用 AUTODYN 6.1 软件对本研究的试验部分进行了数值模拟。

2 试验装置与原理

2.1 试验药柱的规格

UN 隔板试验标准中采用的起爆药柱是 PETN/TNT(质量比 50∶50),药柱长度为 50 mm,直径为

* **收稿日期**:2009-10-30;**修回日期**:2010-01-08
作者简介:徐 森(1981—),男,博士研究生,主要从事火炸药危险性分级研究. E-mail:xusen_345@sohu.com
通讯作者:刘大斌(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事含能材料研究. E-mail:dabin63@vip.sina.com

50 mm,密度为 1.60 g/cm^3。目前,有许多研究机构提出了各自的 UN 隔板试验起爆药柱的替代规格,本研究选用的起爆药柱规格是 PETN/TNT(质量比 50∶50),药柱长度为 50 mm,直径为 45 mm,密度为 1.57 g/cm^3。UN 隔板试验的标准起爆药柱与本研究中的起爆药柱性能指标见表 1。

表 1 UN 隔板试验药柱和本研究选用药柱的性能指标

Table 1 The performance indexes of the stardard booster charge and the sample

Material	Length/(mm)	Diameter/(mm)	Mass/(g)	Area/(mm^2)	SG/(g/cm^3)	VOD/(km/s)
UN	50	50	160	1962	1.60	7.41
Sample	50	45	125	1590	1.57	7.35

2.2 测试原理

爆炸装置和冲击波压力测试系统示意图分别见图 1 和图 2。测试系统的工作原理:用雷管引爆药柱,离子探针被激发后,发出信号使脉冲恒流源给锰铜压力计供恒流,同时使示波器开始采集数据,药柱爆炸产生的冲击波在有机玻璃隔板中进行传播,当冲击波传播至锰铜压力计处,压力计受压后电阻会发生变化,在示波器中就表现为电压变化。

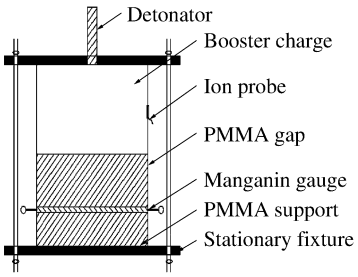


图 1 爆炸装置示意图

Fig. 1 Sketch of explosion facility

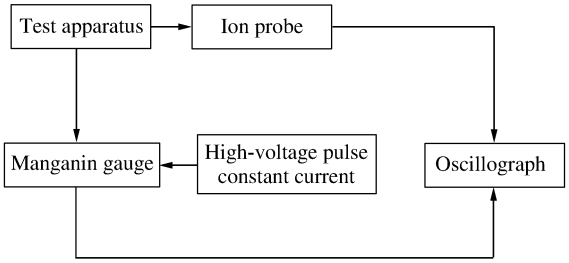


图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Sketch of testing system

在爆炸装置中,使锰铜压力计与有机玻璃隔板紧密贴合,然后将锰铜压力计与有机玻璃隔板固定好,为了减小侧向稀疏波的影响,应确保锰铜压力计的敏感中心位于有机玻璃隔板的中心,为了减小界面反射对冲击波压力测试结果的影响,在锰铜压力计下面放置一块与有机玻璃隔板完全相同材质的有机玻璃垫板,厚度为 20 mm,并用夹具将整个爆炸测试装置夹紧,每个厚度条件进行两次有效测试。试验中所用的有机玻璃隔板直径为 45 mm,厚度分别为 0、5、10、15、20、25、30、35、40、45 和 50 mm。

测试系统中采用高速同步脉冲恒流源;示波器是 Tektronix DPO 7254,带宽为 2.5 GHz,采样频率 40 GS/s。测试采用的 H 型锰铜压力计结构示意图见图 3。传感器的标定公式为

$$p = 0.7636 + 34.628(\Delta R/R) + 6.0076(\Delta R/R)^2 \qquad (1.5 \sim 40\ \text{GPa}) \tag{1}$$

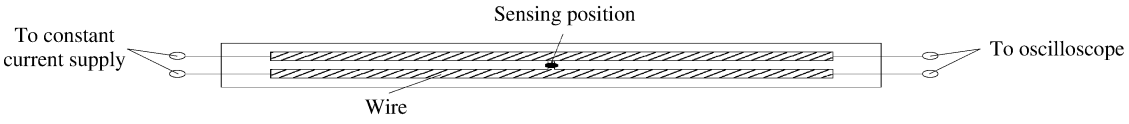


图 3 锰铜压力计结构示意图

Fig. 3 Sketch of manganin gauge

3　药柱爆轰参数及界面冲击波参数计算

3.1　药柱爆轰参数的计算

用 ω-K 法[8-9]计算试验用 PETN/TNT 药柱的爆轰参数,结果为:爆速 $v_D=7.351$km/s,爆压 $p_J=22.24$ GPa。

3.2　药柱与有机玻璃隔板分界面处冲击波初始压力的计算

试验中,药柱爆炸产生的冲击波垂直入射到有机玻璃上,由于有机玻璃的冲击阻抗小于药柱的冲击阻抗,所以在爆轰产物中反射的是稀疏波。根据分界面处冲击波压力计算公式,将药柱的爆轰参数代入波后质点速度公式,化简得

$$u_x=\frac{v_D}{\gamma+1}\left\{1+\frac{2\gamma}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{p_x}{p_J}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}\right]\right\}=7.35\left[1.46-1.10\left(\frac{p_x}{22.24}\right)^{\frac{1}{3.10}}\right] \tag{2}$$

式中:v_D 是药柱爆速,km/s;p_J 是药柱爆压,GPa;γ 是多方指数,取 $\gamma=2.81$;u_x 是波后质点速度,km/s;p_x 是介质中冲击波压力,GPa。

在凝聚介质中冲击波速度 D 与其波后质点速度 u 之间,在相当宽的速度范围(或压力范围 1.7～200 GPa)内存在着线性关系,在有机玻璃中冲击波速度与质点速度的关系式[9]为

$$D=c_0+\lambda u_x=2.74+1.35u_x \tag{3}$$

式中:D 为冲击波速度,km/s;c_0 及 λ 为常数;u_x 为波后质点速度,km/s。

将(3)式代入冲击波动量守恒方程可得波后质点中压力方程[10-11]

$$\begin{aligned}p_x&=\rho_{0m}Du_x=\rho_{0m}(c_0+\lambda u_x)u_x\\&=1.18(2.74+1.35u_x)u_x\end{aligned} \tag{4}$$

式中:p_x 为波后压力,GPa;D 为冲击波速度,km/s;ρ_{0m}为介质初始密度,g/cm^3。

根据波后质点速度方程(2)和波后压力方程(4),利用作图法求药柱与有机玻璃界面处冲击波压力和波后质点速度(见图 4)。

由图 4 可知,药柱与有机玻璃界面处冲击波初始压力和波后质点速度分别为

$$p_x=17.1\text{ GPa},u_x=2.41\text{ km/s}$$

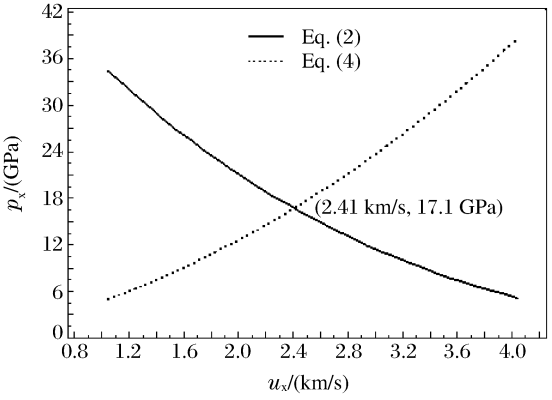


图 4　界面处冲击波初始参数

Fig. 4　Initial parameter of shock wave at the interface

4　结果与分析

4.1　隔板试验的数值模拟结果

为了能准确预测药柱冲击波在不同厚度隔板中的冲击波参数,利用 AUTODYN 6.1 软件模拟了药柱冲击波在有机玻璃隔板中的衰减过程,有机玻璃隔板材料的雨贡纽参数见表 2。图 5 是模拟得到在不同位置的冲击波压力分布,模拟得到的冲击波和波后质点的状态参数见表 3。

根据作图法得到的药柱与有机玻璃隔板界面处的冲击波压力 p_0 为 17.1 GPa,从表 3 可知,通过模拟得到的 p_0 为 15.95 GPa,两者基本一致。

表 2　有机玻璃隔板的雨贡纽参数

Table 2　Hugoniot parameters for PMMA

Material	ρ_0/(g/cm^3)	c/(km/s)	S_1	Γ
PMMA	1.18	25.61	1.595	1.0

表 3 数值模拟得到的冲击波和波后质点的状态参数

Table 3 State parameters of shock wave and particle velocity derived from simulation

PMMA thickness/(mm)	Shock wave peak pressure/(GPa)	Shock wave velocity/(km/s)	Particle velocity after shock wave/(km/s)	Density after shock wave/(g/cm^3)
0	15.95	5.86	2.30	1.96
5	13.86	5.63	1.96	1.82
10	10.77	5.11	1.72	1.75
15	9.26	4.75	1.56	1.71
20	8.21	4.59	1.43	1.68
25	7.39	4.39	1.34	1.65
30	6.45	4.27	1.23	1.62
35	5.30	4.12	1.01	1.57
40	4.23	3.87	0.92	1.52
45	3.36	3.73	0.75	1.48
50	2.73	3.58	0.63	1.44

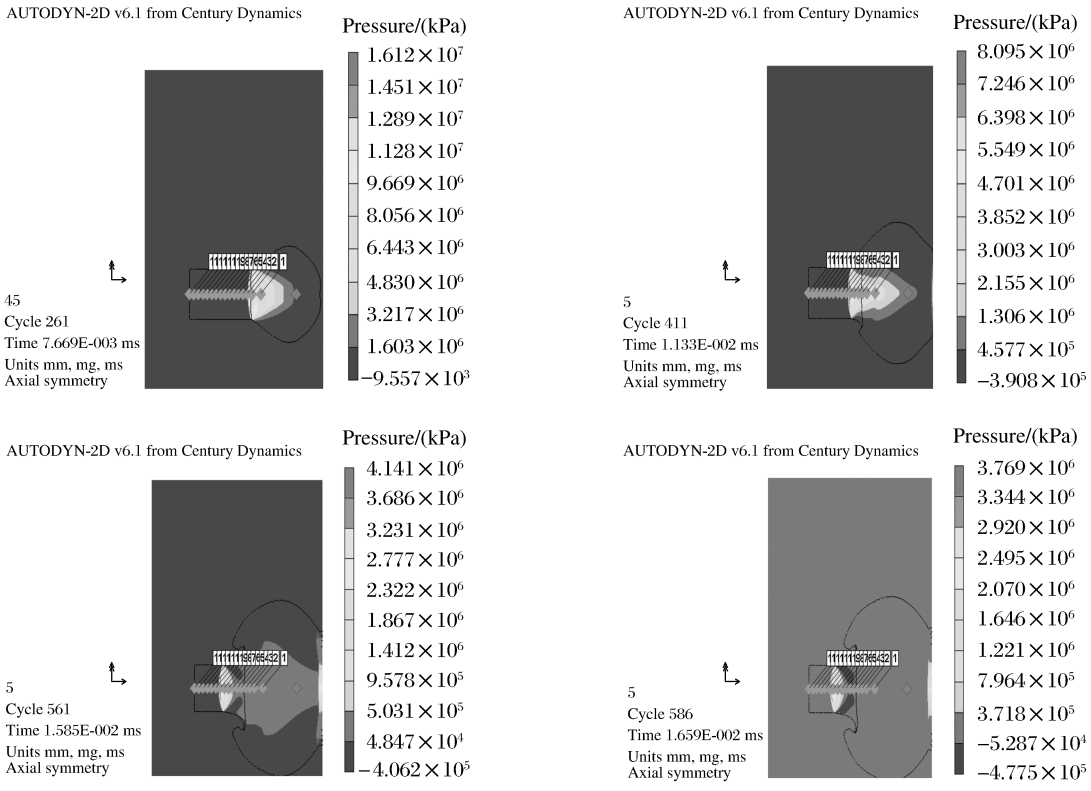


图 5 有机玻璃隔板中不同位置的压力分布

Fig. 5 Configuration of pressure in the PMMA gap

4.2 冲击波压力试验测试结果及分析

试验中示波器采集到的典型波形见图 6,采集基线在 t_1 处出现较大的干扰信号,这是脉冲恒流源收到离子探针的触发信号后、开始工作时在锰铜压力计上产生的干扰信号;示波器在 $t_2 \sim t_3$ 间采集的是锰铜压力计的初始电压,此电压与基线之间的电压差为 V_0,在 $t_3 \sim t_4$ 间采集的是锰铜压力计受冲击波作用时的电压值,此电压与初始电压的差值为 ΔV,由此根据(1)式就可以得到对应的冲击波压力值。

试验测得不同厚度隔板对应的冲击波压力见表 4 的第 2 列,冲击波压力数据均为两次有效测量的平均值。表 4 中药柱与有机玻璃隔板界面处的冲击波压力 p_0 的试验测定值为 15.62 GPa,比较作图法、数值模拟和试验测定的药柱与有机玻璃隔板界面处冲击波压力可知,3 组数据基本一致,表明本研究采用的锰铜压力计法能够比较准确地测量药柱冲击波在有机玻璃隔板界面处的压力峰值。

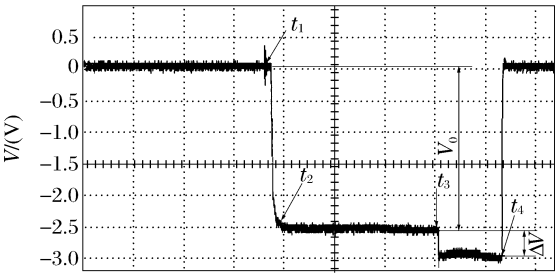


图 6　示波器采集到的典型波形

Fig. 6　Typical waveform gathered by the oscillograph

比较分析表 3 和表 4 中的数据发现,两表的数据比较接近,说明用 AUTODYN 6.1 软件对该试验进行模拟预测是合适的。随着隔板厚度的增加,表 4 中的冲击波参数衰减速度要比表 3 中的快。这是因为在本研究试验装置中,药柱与隔板、隔板与锰铜压力及垫片之间都必然存在一定的间隙,冲击波在有机玻璃隔板中传播时,侧向稀疏波和各分界面上空气稀疏波都会加速冲击波的衰减,导致表 4 中数据衰减较快;而采用 AUTODYN 6.1 软件进行数值模拟时,各界面处都默认为理想状态,导致冲击波在有机玻璃隔板中衰减较慢。

表 4　试验测得的冲击波压力和波后质点的状态参数

Table 4　State parameters of shock wave and the particle velocity after shock wave measured by experiments

PMMA thickness/(mm)	Shock wave peak pressure/(GPa)	Shock wave velocity/(km/s)	Particle velocity after shock wave/(km/s)	Density after shock wave/(g/cm^3)
0	15.62	5.81	2.28	1.83
5	11.54	5.25	1.86	1.73
10	9.40	4.92	1.62	1.67
15	8.15	4.72	1.46	1.63
20	6.98	4.51	1.31	1.58
25	6.35	4.39	1.23	1.56
30	5.17	4.16	1.05	1.51
35	3.35	3.76	0.76	1.42
40	3.04	3.68	0.70	1.40
45	2.39	3.52	0.58	1.36
50	1.76	3.34	0.45	1.32

文献[4]指出,冲击波在密实介质中传播时,压力峰值随传播距离呈指数衰减,衰减模型为

$$p = p_0 \mathrm{e}^{-\alpha x} \tag{5}$$

式中:p 为冲击波在有机玻璃隔板中传播了 x 时的压力, GPa;p_0 为药柱与有机玻璃隔板分界面处的初始冲击波峰值压力,GPa;α 为冲击波在有机玻璃隔板中的衰减系数;x 为冲击波在有机玻璃中的传播距离,mm。

对(5)式取对数,得

$$\ln p = \ln p_0 - \alpha x \tag{6}$$

由(6)式可知,$\ln p$ 与 x 呈线性关系。由表 4 中的数据得出的 $\ln p$ 与 x 的拟合曲线见图 7。图 7 中的拟合直线方程为

$$\ln p = 2.73 - 0.041x \quad (0 \leqslant x \leqslant 50\ \mathrm{mm}) \tag{7}$$

其线性相关系数为 0.992 2，即 $\ln p$ 与 x 具有良好的线性相关性，表明冲击波压力在有机玻璃隔板中符合指数衰减规律。由方程(7)知，冲击波压力的衰减系数 α 为 0.041，文献[5]中雷管输出冲击波在有机玻璃板中衰减系数 α 为 0.358 7，表明药柱产生的冲击波在有机玻璃中衰减比雷管要慢，这是因为雷管的装药直径和装药高度与本研究的药柱相比都要小得多，侧向稀疏波的衰减作用明显，即炸药的装药直径和装药高度对冲击波的衰减系数影响很大。

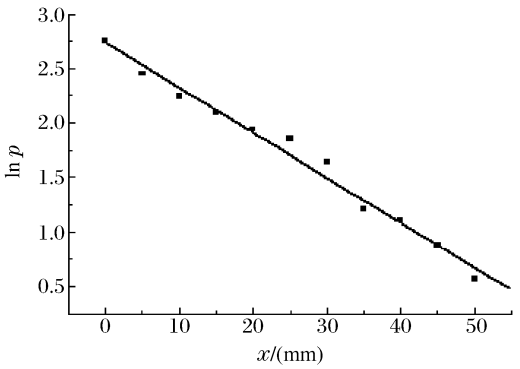


图 7 $\ln p$ 与 x 的拟合曲线图

Fig. 7 Fitting curve for the relationship between $\ln p$ and x

对(7)式变换形式，可得冲击波压力在有机玻璃隔板中的指数衰减公式

$$p = 15.4\mathrm{e}^{-0.041x} \quad (0 \leqslant x \leqslant 50\ \mathrm{mm}) \tag{8}$$

4.3 冲击波速度和波后质点参数的衰减规律

冲击波的质量、动量守恒关系式[8-9]分别为

$$\rho_0 D = \rho(D-u) \tag{9}$$

$$p - p_0 = \rho_0(u-u_0)(D-u_0) \tag{10}$$

由于 p_0 与 p 相比可忽略不计，且 $u_0=0$，可得

$$p = \rho_0 Du \tag{11}$$

根据(3)式、(9)式和(11)式，结合试验测得的不同厚度处的冲击波压力值，计算得到在相应位置的冲击波速度、波后质点速度和密度，结果见表 4 的第 3～第 5 列。对冲击波速度、波后质点的速度和密度数据也分别按照指数衰减模型($Y=A\mathrm{e}^{-\alpha x}$，$\alpha$ 为衰减系数)进行数据处理，结果分别为：冲击波速度衰减模型为 $D=5.81\mathrm{e}^{-0.020x}$ ($0\leqslant x\leqslant 50$ mm)，衰减系数 0.020；波后质点速度的衰减模型为 $u=2.28\mathrm{e}^{-0.020x}$ ($0\leqslant x\leqslant 50$ mm)，衰减系数为 0.020；波后质点的密度衰减模型为 $\rho=1.83\mathrm{e}^{-0.010x}$ ($0\leqslant x\leqslant 50$ mm)，衰减系数为 0.010。比较冲击波压力、速度、波后质点的速度和密度的衰减指数可知，冲击波压力的衰减系数最大，波后质点密度的衰减系数最小，表明随着冲击波在有机玻璃中的传播距离的增加，冲击波压力衰减最快，而波后质点密度衰减最慢。

5 结 论

(1) 比较分析冲击波压力的试验结果、药柱与有机玻璃隔板界面处冲击波压力的计算结果和数值模拟结果可知，本研究提出的锰铜压力计法能够比较准确地测量冲击波在不同厚度有机玻璃隔板中的压力，试验得到的冲击波压力在有机玻璃隔板中衰减规律为 $p=15.4\mathrm{e}^{-0.041x}$，衰减系数为 0.041。

(2) 利用 AUTODYN 6.1 软件可以比较准确地预测出有机玻璃隔板中冲击波的衰减特性，可以利用该软件预测不同直径条件下的药柱冲击波在有机玻璃隔板中的衰减规律，结合样品隔板试验得到的隔板临界厚度，可以预估样品的临界起爆压力。

References:

[1] Liu Y C. The Studying of the Explosive Particle Size and Particle Gradation Affection on the Shock Wave Sensitivity and Output [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2000. (in Chinese)
刘玉存. 炸药粒度及级配对冲击波感度和输出的影响研究 [D]. 北京：北京理工大学，2000.

[2] Chen X R, Wang K, Liu D R, et al. The Attenuation Characters of Shock Wave in Different Baffles [J]. Acta Armamentarii, 1991, (2): 77-79. (in Chinese)

陈熙蓉,王　可,刘德润,等. 冲击波在不同材料隔板中的衰减特征 [J]. 兵工学报,1991,(2):77-79.

[3] Wang Z S,Liu Y C,Zheng M,et al. Study on the Attenuating Model of Detonation Shock Wave in the PMMA Gap [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2001,9(4):316-319. (in Chinese)
王作山,刘玉存,郑　敏,等. 爆轰冲击波在有机隔板中衰减模型的研究 [J]. 应用基础与工程科学学报,2001,9(4):316-319.

[4] Wang H F,Feng S S. Approximate Calculation of the Shock Wave Attenuation in Densified Medium [J]. Acta Armamentarii,1996,17(1):77-82. (in Chinese)
王海福,冯顺山. 密实介质中冲击波衰减特性的近似计算 [J]. 兵工学报,1996,17(1):79-82.

[5] Han X F,Cai R J,Yan N. Study on Attenuation of Detonation Shock wave in PMMA [J]. Energetic Materials,2004,12(6),329-332. (in Chinese)
韩秀凤,蔡瑞娇,严　楠. 雷管输出冲击波在有机玻璃中传播衰减的实验研究 [J]. 含能材料,2004,12(6),329-332.

[6] ST/SG/AC 10/1/Rev 15. Recommendation on the Transport of Dangerous Goods:Model Regulations Fifteenth Revised Edition [S]. New York and Geneva:United Nations Publication,2007.

[7] ST/SG/AC 10/11/Rev 4. Recommendation on the Transport of Dangerous Goods:Manual of Tests and Criteria Fourth Revised Edition [S]. New York and Geneva:United Nations Publication,2003.

[8] Sun Y B,Hui J M,Cao X M. Military Composite Explosive [M]. Beijing:Weapon Industry Press,1995. (in Chinese)
孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药 [M]. 北京:兵器工业出版社,1995.

[9] Zhang J X,Liu G L. Explosion and Its Applied Technology [M]. Beijing:Weapon Industry Press,1998. (in Chinese)
张俊秀,刘光烈. 爆炸及其应用技术 [M]. 北京:兵器工业出版社,1998.

[10] Li W X. Unidimensional Unsteady Flow and Shock Wave [M]. Beijing:National Defence Industry Press,2003. (in Chinese)
李维新. 一维不定常流与冲击波 [M]. 北京:国防工业出版社,2003.

[11] The Eighth Department of Beijing Institute of Engineering. Explosion and Its Function(Ⅰ) [M]. Beijing:National Defence Industry Press,1979. (in Chinese)
北京工业学院八系. 爆炸及其作用(上) [M]. 北京:国防工业出版社,1979.

Study on the Shock Wave Attenuation of the Booster Charge in the PMMA Gap

XU Sen[1,2],LIU Da-Bin[1,2],PENG Jin-Hua[1],WANG Jian-Ling[3],
GUO Wei[3],JIN Peng-Gang[3],JIA Xian-Zheng[3]

(1. *School of Chemical Engineering of Nanjing University of Science and Technology,Nanjing* 210094,*China*;
2. *National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials,Nanjing* 210094,*China*;
3. *Xi'an Modern Chemistry Research Institute,Xi'an* 710065,*China*)

Abstract: The shock pressure at the interface between booster charge and PMMA gap was calculated by graphing method. The AUTODYN was used to simulate the attenuation process of the shock wave in the PMMA gap. The output shock pressures, which were produced by the substituted booster charge of the UN gap test, were measured in the PMMA gap at different positions by manganin gauges. The shock velocity, particle velocity and density after the shock front were calculated. The results showed that the measured data, theoretical arithmetic and numerical simulation are consistent, and the attenuation regularity of shock pressure in PMMA is extracted from the test results. AUTODYN 6.1 software is capable of predicting the attenuation characteristic of shock wave in PMMA gap.

Key words: explosion mechanics; shock wave; PMMA gap; manganin gauge; AUTODYN