文章编号：1000-5773(2012)05-0583-07

炸药安全性的火箭橇实验研究*

赵继波，谭多望，李　涛，张远平

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳　621900）

摘要：采用双轨火箭橇加载装置，对PBX-1炸药结构件进行了“靶打弹”撞击实验，采用PVDF计和压电石英计，测量炸药中入射压力和反应压力的变化情况；通过高速摄影和大画幅照相，观察了炸药件受撞击后发生反应的直观图像和靶、弹撞击的细节过程；利用冲击波超压传感器，测量了炸药反应后的超压曲线，并估算了其相对能量释放率。初步实验结果表明，当入射压力为0.48 GPa时，炸药发生部分爆炸，相对能量释放率约为51.8%。

关键词：炸药安全性；火箭橇实验；压力测试

中图分类号：O382.3；TJ55　　**文献标识码**：A

1　引　言

炸药安全性研究中的撞击实验，耦合了炸药在事故中经历的各种刺激因素，如冲击波、力学失效、摩擦、快速挤压等，能比较真实地反映包含同类炸药及火工品的武器型号在事故条件下的安全性能，可有效模拟事故条件下炸药的响应特征。Berghout等[1]对PBX9501炸药裂纹中快反应波的传播现象进行了研究，其研究结果表明，高能炸药的撞击或热点火会导致破裂变形的产生，伴随有高压的破裂极大地提高了可供燃烧的表面积，并改变燃烧模式。Taylor等[2]研究了给定厚度(22.5 mm)、背衬高阻抗不锈钢飞层的HMX基塑粘炸药EDC37，在受到2～4 GPa冲击应力作用下的安全性问题，测量了反应压力历史和驱动能力，发现反应虽未发展至爆轰，但有相当份额的能量释放。Sutherland等[3]针对以HMX为基的塑粘炸药IRX-4进行了类似的实验研究，在2 GPa平面冲击波作用下，观察到中等烈度反应，在传播过程中压力只大致维持在入射时的压力幅值水平。Vandersall等[4]采用两种口径的气炮进行Stenven试验，通过碳阻计测量炸药不同位置处的压力，通过高速相机和超压传感器观测炸药反应以及相对反应烈度，从高速摄影结果来看，炸药从开始反应到一定产物排出的时间间隔约400 μs，反应烈度低于爆轰水平。Chidester等[5]采用155 mm口径榴弹炮加速Steven弹体撞击LX-04炸药，速度范围为170～300 m/s，但没有观察到爆炸反应。Dobratz等[6]利用火箭发动机加速两级HSM弹头，以极高速度撞击目标靶，完成9发HSM的全尺寸撞击实验，在火箭橇发射撞击过程中，TATB炸药并未发生反应。

相对于国外进行的大量实验和取得的规律性认识，我国的炸药安全性研究正处于起步阶段，对持续化学反应的发展机制和参数水平没有进行系统的研究。本研究从大型安全性撞击实验入手，对以HMX为基的PBX类高能炸药撞击后的压力变化情况、高速摄影图像和能量释放情况进行分析，得到初步的物理过程。

2　实验装置和测试方法

2.1　实验装置

采用双轨火箭橇加载靶板撞击炸药结构件，撞击速度设定为100 m/s，实现“靶打弹”的目的。双轨

*　**收稿日期**：2011-02-17；**修回日期**：2011-05-13

作者简介：赵继波(1977—)，男，博士研究生，副研究员，主要从事爆炸力学研究. E-mail：abcdef_z@163.com

火箭橇由钢管焊接成桁架结构，车架总重约为 200 kg，总长约为 1.56 m，总高约为 320 mm，通过 4 个半包结构的滑靴和两个平滑靴与轨道连接。钢靶板尺寸为 600 mm×600 mm×30 mm，焊接在双轨火箭橇的前端载荷框架中。双轨火箭橇的结构示意图和安装好的火箭橇实验装置见图 1 和图 2。

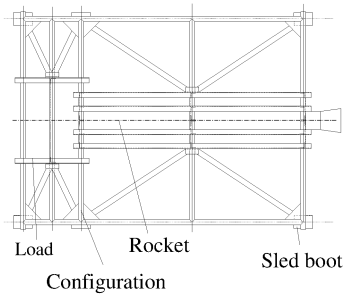


图 1 双轨火箭橇结构示意图

Fig. 1 Sketch of bi-railway sled



图 2 安装好的火箭橇照片

Fig. 2 Photo of assembled sled

炸药结构件为带壳半球，由 PBX 高能炸药和钢外壳组成。PBX 炸药是以 HMX 为主、添加少量 TATB 和粘接剂的塑料粘接炸药，钢外壳的厚度为 8 mm。炸药结构件选为半球形有如下目的：(1) 对接近武器中常用的球形构件进行安全性撞击实验研究，进一步理解该结构下炸药受撞击作用时的变形特征，为安全性撞击实验结果提供参考依据；(2) 便于物理参数的动态测试，该结构可为各种动态测试技术提供半球形和平面两种测试表面，有利于各种传感器的布置。

2.2 测试方法

测试项目分为 4 部分：(1) 在炸药半球形表面和后平面布置压力传感器，得到火箭橇撞击下的入射压力和炸药的动态响应变化；(2) 在撞击点附近布置冲击波超压传感器，反推炸药反应的 TNT 当量，为评估炸药的反应情况和能量释放情况作参考；(3) 在炸药撞击点布置高速分幅照相，观察炸药受撞击后壳体的变形情况和炸药的变化情况；(4) 动态拍摄撞击过程，直接观察爆炸或反应的效应。测试布局如图 3 所示。

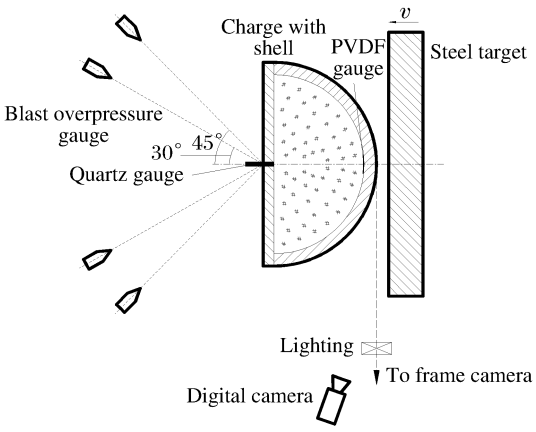


图 3 测试布局示意图

Fig. 3 Sketch of experimental layout

压电式压力传感器分为 PVDF 计和石英计。其中 PVDF 计选用 Dynasen 公司的产品，具有如下特点：在测量压力低于 20 GPa 时，受温度效应的影响较小，测试精度为 2%～3%；响应快，信号前沿为 100～101 ns；高频响应等。石英计为国产型号，响应较 PVDF 更快，但灵敏度低于其 1/60，测压范围仅为 3～4 GPa。冲击波超压传感器采用 PCB 公司的 137 系列笔杆式传感器，量程为 0.345 MPa。测试系统的其它设备包括：适调仪、示波器及电缆；适调仪的带宽范围为 0.225 Hz～100 kHz，测试误差约为 1%；示波器的模拟带宽为 500 MHz，测试误差约为 1%；采用 STYV-2 低噪声电缆。

2.3 传感器参数的标定和设置

测量炸药件受到撞击后其压力响应的 PVDF 计和石英计的参数设置见表 1。

采用 TNT 药球对冲击波超压传感器的灵敏度进行标定[7]，根据现场大气压(p_a)、环境温度 T_a、测点距离 R 和药球质量 W，计算传感器经受的超压 p

$$p = 808p_a\left[1+\left(\frac{z}{4.5}\right)^2\right]\Big/\left\{\left[1+\left(\frac{z}{0.048}\right)^2\right]\left[1+\left(\frac{z}{0.32}\right)^2\right]\left[1+\left(\frac{z}{1.35}\right)^2\right]\right\}^{1/2} \tag{1}$$

式中:$z=(R/W^{1/3})f_d$,为比例距离;$f_d=(p_a/p_0)^{1/3}(T_0/T_a)^{1/3}$,为大气状态校正因子;$p_0=101\,325$ Pa;$T_0=288$ K。各测点处的电压信号幅度 $U_{\max,i}$ 除以对应点的冲击波超压 p_i,即为各传感器的动态灵敏度 $S_{V,i}$

$$S_{V,i}=U_{\max,i}/p_i \tag{2}$$

超压传感器的参数设置见表 2。

表 1 炸药压力响应传感器参数设置

Table 1 Parameters of pressure gauges of explosive response

Gauge No.	Gauge type	Coefficient of static (μC/cm^2)	Capacitance of charge integrator/(μF)	Effective area of gauge/(cm^2)	Coefficient of sensitive/(GV/C)	Multiple of charge /(aC/Pa)
1#	PVDF	0.011 2	0.010 3	0.1		
2#	PVDF	0.011 9	0.010 3	0.1		
3#	Quartz				4.06	1

表 2 超压传感器参数设置

Table 2 Parameters of blast overpressure gauges

Gauge No.	Coefficient of sensitive/(μV/Pa)	Distance to impact point/(m)	Angle with charge axis/(°)
1#	14.06	3.013	45
2#	13.33	2.990	45
3#	12.81	2.980	30
4#	13.90	3.013	30

3 实验结果及分析

3.1 靶板变形情况

利用布置在壳体表面的电探针测得的撞击速度约为 96.7 m/s,与设计的撞击速度的相对误差约为 3%,说明加载技术是成熟的。实验结果表明,炸药结构件在速度为 97 m/s 靶板的撞击下发生了较强烈的化学反应。对比相同条件下惰性结构件的结果,靶板产生严重变形,呈“锅底”状。如将靶板当作隔板实验中的验证板看待时,可知炸药结构件发生了强烈反应。靶板变形情况如图 4 所示。



(a) Experiment with explosive (b) Experiment without explosive

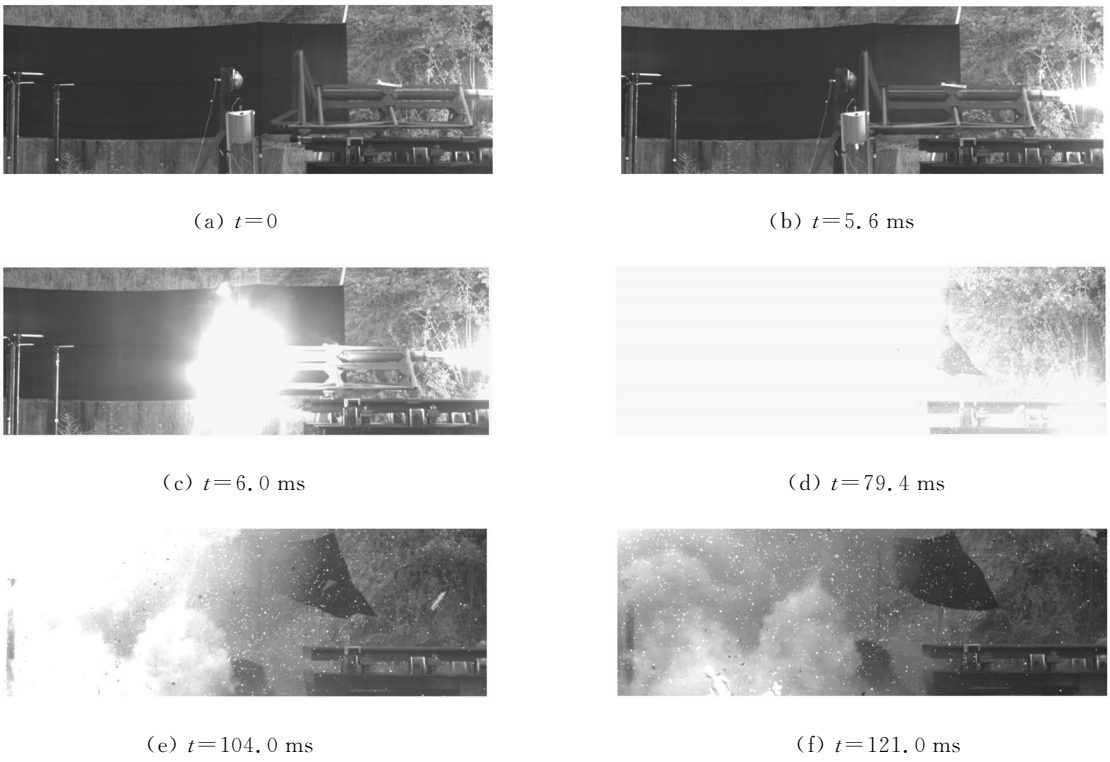
图 4 靶板变形情况

Fig. 4 Distortion of target plates

3.2 高速摄影

图 5 是火箭橇撞击炸药结构件的高速摄影图像,高速相机的幅频设置为5 000 s^{-1},其中以图 5(a)的时刻作为零时刻。撞击前火箭橇在轨道上平稳运行,在接触炸药结构件上铜箔探针的瞬间接通氙灯,进而触发等待式分幅相机。高速相机记录到一段较长时间的空白,持续约 57.8 ms,其原因可能是视场范

围较小，氙灯和爆炸光覆盖了全视场；之后看见爆轰产物飞散，说明炸药发生了反应。图 5(c)表明氙灯动作正常。



(a) $t=0$ (b) $t=5.6$ ms

(c) $t=6.0$ ms (d) $t=79.4$ ms

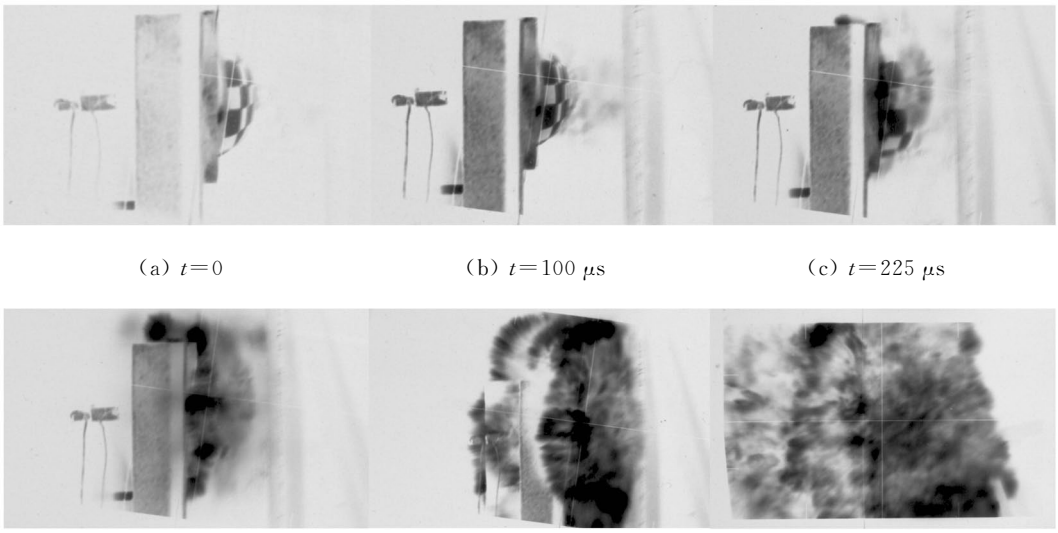
(e) $t=104.0$ ms (f) $t=121.0$ ms

图 5 “靶打弹”实验的高速摄影图像

Fig. 5 Rapid shoot photos of experiment on “target hitting ball”

3.3 分幅照相

图 6 显示的是等待式分幅相机记录到的炸药结构件从受到撞击到炸药发生反应的过程，在一定程度上显示了过程的细节。



(a) $t=0$ (b) $t=100\ \mu$s (c) $t=225\ \mu$s

(d) $t=300\ \mu$s (e) $t=375\ \mu$s (f) $t=650\ \mu$s

图 6 “靶打弹”实验分幅照相

Fig. 6 Frame photos of experiment on “target hitting ball”

以触发相机和氙灯的时刻作为零时,结合分幅相机的摄影频率可知,在 225 μs 以前,炸药在靶板的撞击下发生挤压和变形,半球形试件表面有物体逸出,初步推断可能是试件的金属外壳受挤压后破裂、变形所产生的惰性喷射物。在 225～300 μs 之间,壳体和炸药继续变形,其间发生复杂的挤压、剪切、摩擦、塑性流动等力学过程,形成"热点"的条件已具备。在 300 μs 以后,炸药发生反应并进一步形成爆炸,在图像上反映为爆轰产物的飞散。需要指出的是,为了尽量弥补氙灯光对实验装置的照度问题(避免撞击带来的干涉,氙灯与炸药半球之间的距离大于 50 cm),相机的幅频设置偏低,没有记录到更详细的过程。

3.4　炸药压力响应结果

根据 PVDF 计记录到的电压波形,通过记录电路条件和 PVDF 输出的归一化程序,得到归一化的标准 PVDF 计的输出电荷$(Q/A)^*$

$$(Q/A)^* = 0.018UC_c/A_gC_s \tag{3}$$

式中:C_c 为电荷积分器的电容(μF),C_s 为准静态标定系数(μC/cm^2),A_g 为压力计的有效面积(cm^2)。按照标准 PVDF 计的标定方程[8]

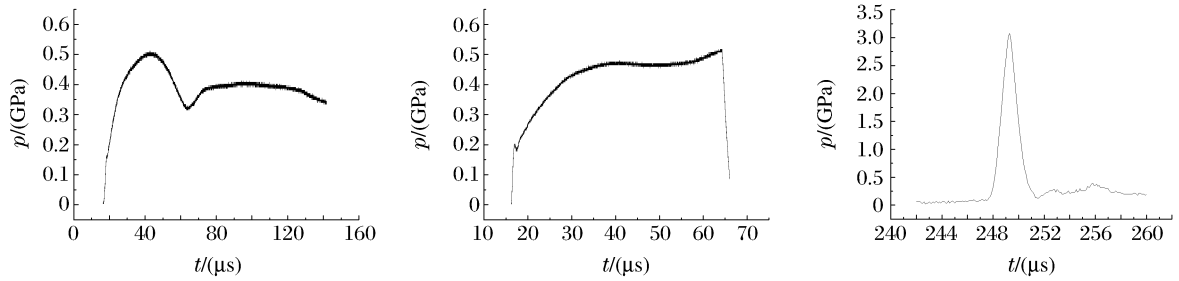
$$p = 0.58(Q/A)^* + 0.38(Q/A)^{*1.6} + 0.055(Q/A)^{*3.5} \tag{4}$$

得到压力随时间的变化历程如图 7(a)和图 7(b)所示。1# PVDF 计测得的峰值入射压力约为 0.50 GPa,2# PVDF 计测得的峰值入射压力约为 0.47 GPa,2 枚压力计测试的同一点入射压力基本一致,说明测量是准确的。

由石英计得到压力与电压的关系[9]

$$p = U/\eta\beta \tag{5}$$

式中:U 为电压信号(V),η 为压力计的灵敏度(GV/C),β 为电荷放大倍数(aC/Pa)。测得的峰值压力约为 3.01 GPa,(5)式能基本反映炸药的变化规律。压力随时间的变化曲线如图 7(c)所示。



(a) 1# PVDF gauge　　(b) 2# PVDF gauge　　(c) Quartz gauge

图 7　压力测试结果

Fig. 7　Curves of pressure

3.5　冲击波超压测试结果

由冲击波超压传感器得到的压力历程如图 8 所示。从图 8 中可看出,1#、3#、4# 传感器得到的冲击波上升沿非常理想,但在卸载波阶段都得到不同程度的反射波叠加。2# 传感器在上升沿阶段已受到干扰,测试结果不理想,在下面对炸药反应当量、能量相对释放率的数据处理中没有计入。

在相同的边界反射条件下,炸药结构模拟件撞击反应产生的 TNT 当量平均值与其静爆时产生的 TNT 当量平均值之比值,即为能量相对释放率。其估算方法如下:首先在标定传感器的基础上,采用 TNT 标准炸药得到冲击波超压的分布规律;其次,测量结构模拟件静爆时所产生的冲击波超压,将其换算出的平均 TNT 当量作为比较基准;最后,测量结构模拟件撞击反应后产生的冲击波超压,换算出平均反应 TNT 当量,将其与静爆时的 TNT 当量进行比较,得到能量相对释放率。实验结果表明,在 97 m/s的撞击速度下,估算的能量相对释放率约为 51.8%(见表 3),与国外文献中类似的撞击实验在测试结果和反应量级上是相符的[9-10]。

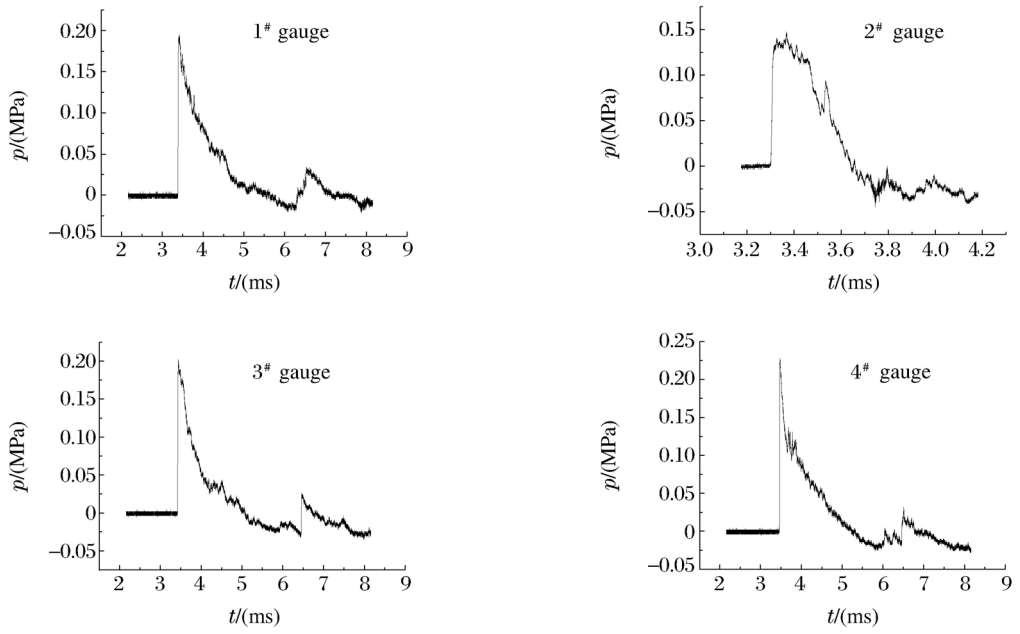


图 8 冲击波超压测试曲线

Fig. 8 Curves of blast overpressure

表 3 超压测试结果

Table 3 Blast overpressure results

Gauge No.	Measured value of blast overpressure/(MPa)	Converted equivalent TNT /(kg)	Relative release rate of energy/(%)	Average release rate of energy/(%)
1#	0.195	3.16	46.1	51.8
2#*	0.140	2.02	—	51.8
3#	0.202	3.25	50.6	51.8
4#	0.227	3.77	58.7	51.8

Note: * The data with asterisk is not included in calculation.

4 结 论

由集成测试技术的火箭橇实验,可以初步推断质量为 3.9 kg 的 PBX-1 炸药半球受撞击后的物理过程,即在质量为 255 kg、速度为 100 m/s 物体的撞击下,入射到炸药半球中的压力约为 0.48 GPa,得到半球底部的反应压力约为 3 GPa,产生反应的时间在 250～300 μs 之间,炸药发生部分爆炸,相对能量释放率约为 52%,测试结果和反应量级与国外文献中类似的撞击实验结果相符合。但以上过程只是根据实验结果做出的推断,其真实性和可靠性需要结合理论分析和数值计算研究进一步进行验证,这些工作将在今后逐步开展。

References:

[1] Berghout H L, Steven F S, Asay B W. Measurement of convective burn rates in gaps of PBX 9501 [A]//Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter 1999 [C]. New York: Elsevier Science, 2000: 759-762.

[2] Taylor P, Salisbury D A, Markland L S, et al. Reaction of shocked but undetonated HMX-based explosive [A]//

Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter 2001 [C]. Atlanta, Georgia, 2001: 841-844.

[3] Sutherland G T. Stress growth measurements for the explosive IRX-4 [A]// Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter 2001 [C]. Atlanta, Georgia, 2001: 1055-1058.

[4] Vandersall K S, Chidester S K, Forbes J W, et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the Steven impact test [A]//12th International Detonation Symposium [C]. San Diego, USA, 2002: 680-689.

[5] Chidester S K, Vandersall K S, Switzer L L, et al. LX-04 violence measurements-Steven tests impacted by projectiles shot from a howitzer gun [A]// Furnish M D, Elert M, Russell T P. Shock Compression of Condensed Matter 2005 [C]. Baltimore, Maryland, 2006: 1049-1052.

[6] Dobratz B M, Finger M, Green L, et al. The sensitivity of triaminot-rinitrobenzene (TATB) and TATB formulations, UCID-17808 [R]. California, USA: Lawrence Livermore National Laboyatory, 1978.

[7] Dynasen Inc. Piezofilm stress gauge [EB/OL]. (1997-07-21) http://www.dynasen.com/html/piezopinpage.html.

[8] Zeng G Y, Yang H, Li B, et al. Technical Foundation and Application of Modern Sensors [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
曾光宇, 杨　湖, 李　博, 等. 现代传感器技术与应用基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.

[9] Chidester S K, Tarver C M, Garza R G, et al. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives [A]//11th International Detonation Symposium [C]. Colorado, USA, 1998: 93-100.

[10] Jones A G, Dale A J, Hughes C T, et al. Low velocity impacts on explosive assemblies [A]//13th International Detonation Symposium [C]. Virginia, USA, 2006: 76-83.

Experimental Study on Safety of Explosive with Rocket Sled

ZHAO Ji-Bo, TAN Duo-Wang, LI Tao, ZHANG Yuan-Ping

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Explosive configuration of PBX-1 was impacted by dual rail sled loading target, PVDF and quartz gauges were used to test the incident and reacted pressure in explosive. Intuitionistic image and detail of impact between target and configuration were recorded by digital and frame cameras. The curves of overpressure produced by explosive reaction are tested by blast overpressure gauges, and relative release rate of energy is estimated. The results indicate primarily that explosive occurs partial blast and the relative release rate of energy is about 51.8% when the incident pressure is 0.48 GPa.

Key words: explosive safety; rocket sled experiment; pressure test