

文章编号: 1006-9941(2008)04-0432-04

枪击试验中不同尺寸 PBX-2 炸药响应规律研究

代晓淦, 申春迎, 吕子剑, 向永

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:采用改进的枪击试验(12.7 mm 机枪)对 $\Phi 100$ mm \times 45 mm (1[#])、 $\Phi 50$ mm \times 100 mm (2[#])、 $\Phi 75$ mm \times 150 mm (3[#])和 $\Phi 100$ mm \times 200 mm (4[#])四种不同尺寸 PBX-2 炸药柱进行试验,测试了子弹在样品中的穿行时间和子弹撞击样品后的速度,测量了炸药的反应超压,分析了枪击试验中 PBX-2 炸药的响应规律。结果初步表明,枪击试验中随着 PBX-2 炸药长度的增加,其反应程度也随之增强。采用 ANSYS/LS-DYNA 程序对 1[#]、2[#]和 4[#]样品的枪击试验进行了数值模拟,计算结果与试验测试结果基本一致。

关键词:爆炸力学; 炸药安全性; 枪击试验; 数值模拟

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引言

枪击试验是用来模拟炸药对子弹或金属破片撞击敏感性的有效方法。20世纪七、八十年代国内外均建立了炸药枪击试验标准,众多研究者已采用标准的枪击试验研究了炸药、推进剂等的枪击安全性能,如 Kimura 以及 Lee 等人^[1-2]采用枪击试验等方法研究了推进剂的安全性能;唐桂芳以及王凯民等^[3-4]采用标准的枪击试验研究了浇注 PBX 炸药以及引信爆炸序列的安全性能;李小柱等人^[5]描述了固体火箭发动机在枪击作用下的试验情况,分析了枪击引起的损坏与壳体材料和推进剂性能的关系,认为发动机在枪击作用下的安全性能不仅与子弹材料、速度有关,也与药柱尺寸、药量相关。但枪击感度与药柱尺寸的具体关系方面研究尚少。

因此,为了深入研究不同尺寸试验样品在枪击试验中的响应特性,本工作利用改进后的试验装置测试了不同尺寸 PBX-2 炸药在枪击试验中的响应规律,并进行了数值模拟计算。

2 枪击试验装置及测试

目前,枪击试验方法一般沿用 GJB772A-1997 方法 603.2,枪击试验样品尺寸为 $\Phi 50$ mm \times 76 mm,试验中测试手段单一,只采用超压传感器测量空气冲击波超压,对子弹速度变化等其它信息参量未做要求。为了能更深入研究枪击试验中炸药的响应规律,获得

更多的试验信息,本工作对枪击试验装置进行了改进:在试验时将样品牢固地固定在支撑架上,增加了对子弹穿行时间、子弹撞击样品后速度测量,改进的枪击试验装置示意图如图 1 所示。采用 12.7 mm 机枪分别对 $\Phi 100$ mm \times 45 mm (1[#])、 $\Phi 50$ mm \times 100 mm (2[#])、 $\Phi 75$ mm \times 150 mm (3[#])和 $\Phi 100$ mm \times 200 mm (4[#])的 PBX-2 炸药柱进行试验,枪击试验弹壳体厚度均为 3.5 mm,材料为 Q235 钢,子弹重量约为 46 g,子弹速度约为 (855 ± 10.5) m \cdot s⁻¹。

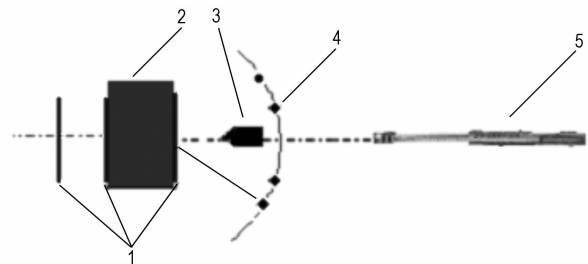


图 1 枪击试验示意图

1—测速靶网, 2—被测样品, 3—子弹,
4—超压传感器, 5—12.7 mm 机枪

Fig. 1 Diagram of bullet impact test

1—net for measuring velocity, 2—sample, 3—bullet,
4—overpressure sensor, 5—12.7 mm scatter-gun

枪击试验中采用空气冲击波超压传感器测量冲击波超压。在壳体前后表面分别粘贴测速靶网,以便分别记录子弹开始撞击样品壳和出样品壳时的时间,从而得到子弹在枪击试验样品内部的穿行时间;在离壳体后表面测速靶网一定距离(40~50 cm)再设置测速靶网,记录子弹离开壳体后运动一段距离的时间,获得子弹穿出样品后的速度。

收稿日期: 2007-11-19; 修回日期: 2008-02-27

作者简介: 代晓淦(1978-),男,硕士,助理研究员,主要从事炸药安全性研究。e-mail: zhangy2005767@sina.com

$\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ PBX-2 炸药超压波形、测速靶网时间波形如图 2 所示。图 2 中 A 曲线为第一道测速靶网输出的时间波形,零点为子弹开始撞击样品壳时间,表示此时子弹作用于样品;图中 B 曲线为第二道测速靶网输出的时间波形,约 0.24 ms 达到最大电压,表示此时子弹穿透样品,其在样品中的穿行时间约为 0.24 ms;图中 C 曲线为第三道测速靶网输出的时间波形,约 0.937 ms 达到最大电压,表示子弹穿透样品后在第二道靶网和第三道靶网间飞行的时间约为 0.697 ms; D、E 曲线为测试的冲击波超压曲线,在约 4.5 ms 处冲击波超压传感器信号发生突变,根据传感器放置距离可以得出此时冲击波速度大于 $450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

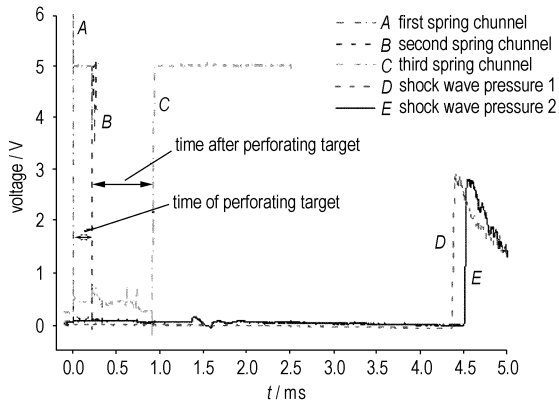


图 2 PBX-2 炸药超压波形、测速靶网时间波形

Fig. 2 Wave form of overpressure and perforating target time for PBX-2 explosive

3 试验结果及分析

3.1 速度测试

对 $\Phi 100 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ (1[#]) 和 $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ (4[#]) 的 PBX-2 炸药柱进行了子弹穿行时间以及穿透样品后的速度测量,结果见表 1。1[#] 炸药样品,12.7 mm 子弹的穿行时间约为 $(89 \pm 20) \mu\text{s}$,子弹穿透样品后的速度约为 $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,根据能量守恒原理,可算出子弹能量损失约为 2100 J;对于 4[#] 炸药样品,子弹的穿行时间约为 $(240 \pm 20) \mu\text{s}$,子弹穿透样品后的速度约为 $602 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,子弹能量损失约为 8500 J。

子弹损失的能量一部分被样品壳体吸收,另一部分由于子弹在穿过炸药时与炸药摩擦,以摩擦功的形式作用于炸药。因此,随着药柱长度的增加,子弹穿透样品后的速度降低,损失的能量增加,炸药相应获得的能量增加,根据速度测量结果可以初步推测:炸药柱长度的增加会使反应更剧烈。

表 1 不同尺寸 PBX-2 炸药柱枪击试验子弹速度

Table 1 Bullet velocities for different size PBX-2 in bullet impact test

sample	time of perforating target / μs	probe distance /cm	time interval / μs	velocity after perforating target / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	measurement uncertainty ($k=2$) / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1 [#]	89 ± 20	41	512	800.8	9.3
4 [#]	240 ± 20	42	697 ± 20	602.6	3.9

3.2 试验照片分析

四种尺寸 PBX-2 炸药柱枪击试验部分结果见图 3。从图 3 可以看出,对 1[#] 样品,子弹穿透样品后,试验弹壳体变黑,炸药只发生燃烧;对 2[#] 样品,试验弹壳体被撕开;而对 3[#] 和 4[#] 样品,子弹均穿透样品,炸药发生剧烈反应,并形成了大破片。由此可见,炸药尺寸增加后其破坏效果明显增强。

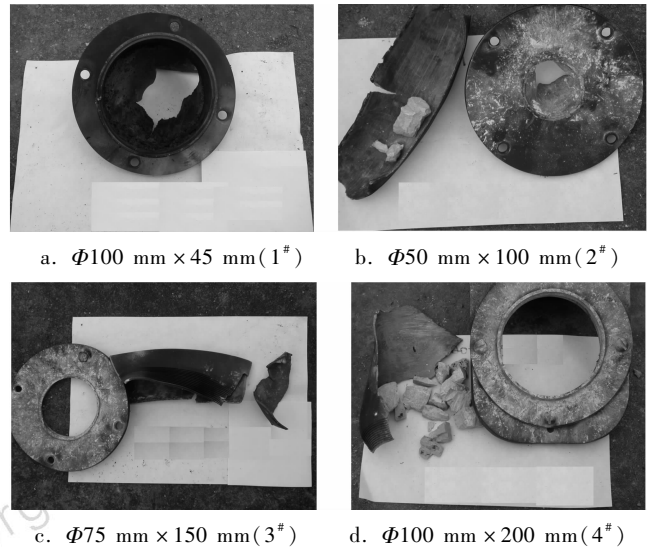


图 3 不同尺寸 PBX-2 炸药枪击试验结果

Fig. 3 Photographs of recover sample for different size PBX-2 in bullet impact test

3.3 冲击波超压测试

四种尺寸 PBX-2 炸药柱枪击试验冲击波超压见表 2。由表 2 可知,1[#], 2[#], 3[#] 和 4[#] PBX-2 炸药柱反应 TNT 当量分别约为 1.3, 15.2, 54.5, 86.5 g, 可见随着 PBX-2 炸药柱长度的增加,炸药反应程度增强。

结合图 3 和表 2 综合判定,在改进的枪击试验中, $\Phi 100 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ (1[#]) 和 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (2[#]) 的 PBX-2 炸药柱反应等级为爆燃, $\Phi 75 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ (3[#]) 和 $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ (4[#]) 的 PBX-2 炸药柱反应等级为爆炸。

表 2 四种尺寸 PBX-2 炸药柱枪击试验超压
Table 2 Overpressure data for different size PBX-2 in bullet impact test

sample size	overpressure/kPa	distance/m	TNT quantum/g
1#	5.0	2.2	1.3
2#	13.6	2.2	15.2
3#	30.5	2.0	54.5
4#	39.4	2.0	86.5

4 数值模拟

为了分析枪击试验中子弹的作用方式,研究子弹穿行过程中产生的应力波传播过程,再现子弹穿透样品的作用过程,获得子弹撞击不同尺寸样品后的速度变化和能量损失,为今后半定量/定量分析炸药在枪击作用下的安全性能提供基础,采用 ANSYS/LS-DYNA 程序对 1#、2# 和 4# PBX-2 炸药枪击试验进行二维计算。计算过程中暂不考虑炸药的化学反应,子弹采用刚性体模型,其余则采用弹塑性模型,PBX-2 炸药枪击试验计算模型见图 4,计算网格采用 1 mm × 1 mm,计算材料的主要力学性能参数见表 3。

计算子弹穿靶过程速度变化的曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出:模拟计算的 1# 和 4# 两种尺寸 PBX-2 炸药中子弹撞击后的速度分别约为 785 m · s⁻¹ 和 611 m · s⁻¹,与表 1 的实验结果基本相符;计算的 2# PBX-2 炸药中子弹撞击后的速度约为 732 m · s⁻¹,子弹能量损失约为 4490 J。

图 6 为计算的 4# PBX-2 炸药枪击试验过程中不同时刻的等压分布图。从图 6 的计算可知,枪击试验中样品受到的主要作用方式除了子弹撞击样品过程中摩擦产生的热量作用于试验样品外,还有子弹在撞击样品时会在样品内部形成应力波,如计算的 4# 样品受到的约为 60 MPa 的应力均值。

5 结 论

改进的枪击试验装置能较好地测试子弹穿行时间、子弹前后速度变化,丰富了枪击试验的测试手段。

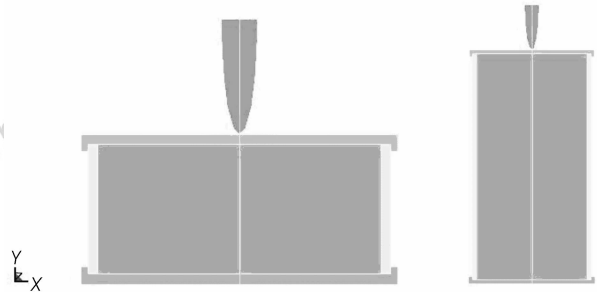


图 4 炸药枪击试验计算模型

Fig. 4 Simulation model for PBX-2 in bullet impact test

表 3 计算采用的材料参数

Table 3 Materials parameters for calculation

materials	density /g · cm ⁻³	yield stress /MPa	Young's modulus /GPa	Poisson ratio
Q235	7.85	235	212.0	0.26
PBX-2 ^[6]	1.85	45	10.0	0.3

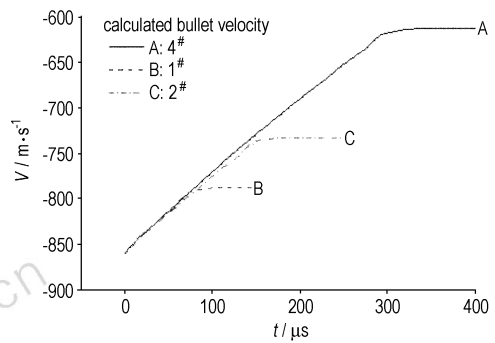


图 5 计算的枪击试验中子弹穿靶过程速度变化曲线

Fig. 5 Calculated velocity changing process of bullet in bullet impact test

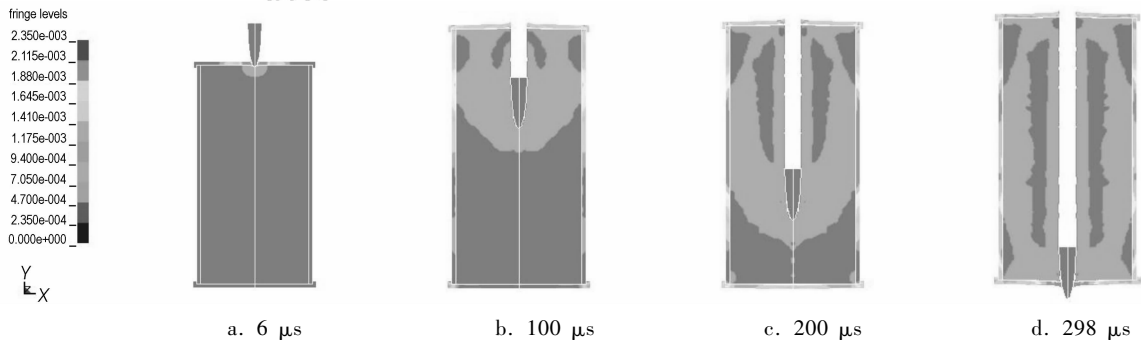


图 6 计算的枪击试验过程中不同时刻的等压分布图(Φ100 mm × 200 mm)

Fig. 6 Calculated pressure distribution at different time in bullet impact test

PBX-2 炸药件的枪击试验结果初步表明,随着 PBX-2 炸药长度的增加,枪击试验中炸药反应程度也随之增强。模拟结果与试验结果基本相符,模拟能较好地再现子弹撞击过程。

参考文献:

- [1] Eishu Kimura, Yoshio Oyumi. Sensitivity of azide polymer propellants in fast cook-off, card GAP and bullet impact tests [J]. *Journal of Energetic Materials*, 1997, 15: 163 - 178.
- [2] Jeong Hwan Lee, Jong Cheol Lee. Interior ballistic properties of RDX-based solid propellant [C] // 36th International Annual Conference of ICT & 32nd International Pyrotechnics Seminar, 2005: 104 - 112.
- [3] 唐桂芳, 王晓峰, 李巍. 浇注 PBX 的低易损性能研究 [J]. 含能材料, 2003, 11(3): 163 - 165.
TANG Gui-fang, WANG Xiao-feng, LI Wei. Study on low vulnerability of cast PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(3): 163 - 165.
- [4] 王凯民, 符绿化. 引信爆炸序列钝感化发展研究. 现代引信 [J]. 1995(3): 42 - 49.
WANG Kai-min, FU Lü-hua. Study on the development of declining sensitivity for fuse detonating series [J]. *Modern Fuses*, 1995(3): 42 - 49.
- [5] 李小柱, 裴养卫. 固体火箭发动机枪击低易损性试验研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2000(2): 39 - 42.
LI Xiao-zhu, PEI Yang-wei. Low vulnerability experimental study of solid rocket engine under popping condition [J]. *Control and Guide of Missilery*, 2000(2): 39 - 42.
- [6] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.

Reaction Properties for Different Size PBX-2 Explosives in Bullet Impact Test

DAI Xiao-gan, SHEN Chun-ying, Lü Zi-jian, XIANG Yong

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Bullet impact tests for four different sizes ($\Phi 100$ mm \times 45 mm ($1^\#$), $\Phi 50$ mm \times 100 mm ($2^\#$), $\Phi 75$ mm \times 150 mm ($3^\#$) and $\Phi 100$ mm \times 200 mm ($4^\#$)) PBX-2 explosives were carried out by improving test method. The time of bullet perforating target and velocity after perforating target were obtained. The reaction overpressure for different size explosives were measured. The reaction properties for different size PBX-2 explosives were analyzed in bullet impact test. Results show that the reaction of PBX-2 explosive is more violent with longer size. The numerical simulation of bullet impact test for $1^\#$, $2^\#$ and $4^\#$ samples was completed by ANSYS/LS-DYNA, and the calculated results are in accord with test results.

Key words: explosion mechanics; explosive safety; bullet impact test; numerical simulation



推荐一本新书——《高能量密度材料的理论设计》

《高能量密度材料的理论设计》一书由我国炸药量子化学开创者肖鹤鸣教授及他的学生许晓娟和邱玲两位博士编著,由科学出版社 2008 年 3 月出版。全书共三篇 20 章,共 42.2 万字。

高能量密度材料由高能量密度化合物(核心)与其他多种组分所构成,是全世界能源和材料科学家密切关注的焦点。无论是 CL-20, 还是 N_5^+ , 还是 ONC, 每一个高能量密度化合物的问世都受到全世界的关注。要在高能量密度材料研制上取得突破,关键是进行分子设计,合成出综合性能优良的高能量密度化合物;其次是进行配方设计,通过实验研制出实用的高能量密度材料。

本书总结了作者在高能量密度化合物分子设计和高能量密度材料配方设计前沿领域所取得的最新研究成果,涉及从分子、晶体到复合材料的构效关系。在第一篇中,在结构-性能关系研究的基础上,作者建设性地提出了高能量密度化合物的能量和稳定性定量标准及其计算方法;在后两篇中,作者详细阐述了有机笼状和氮杂环硝胺两类重要多系列高能物质的研究结果,包括他们的分子、晶体和特别是 PBX 复合材料的性质。该书的出版对我国高能量密度材料的进步无疑起到重要的推动作用。

该书既有重要的学术价值,又有重要的实用价值,特向读者推荐。

(中国工程物理研究院化工材料研究所 李金山 供稿)