

文章编号: 1006-9941(2015)10-0994-05

PBX 炸药药片的摩擦感度响应特性

代晓淦^{1,2}, 钟敏¹, 邓川¹, 郑雪¹, 文玉史¹, 黄风雷²

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要: 为研究高聚物粘结炸药(PBX)在摩擦作用下的响应特性, 采用药片摩擦感度试验装置分别对 PBX-923 和 PBX-2 炸药进行了试验, 采用冲击波超压传感器测量了样品的反应超压, 根据回收样品分析了两种炸药的响应特性, 计算了摩擦作用下 PBX 发生点火的摩擦功阈值和摩擦功率, 分析了药片摩擦感度试验中炸药的点火机制。结果表明, 炸药与光滑的钢板摩擦时 PBX-923 炸药和 PBX-2 炸药的摩擦功阈值分别大于 515.9 J 和 583.2 J, 摩擦功率分别大于 10.12 kW 和 11.44 kW, 而 PBX-923 炸药与砂靶摩擦时对应的摩擦功阈值为 294.7 ~ 368.3 J, 摩擦功率为 7.80 ~ 9.75 kW, PBX-2 炸药与砂靶摩擦时摩擦功阈值为 147.3 ~ 191.5 J, 摩擦功率为 3.90 ~ 5.07 kW, 表明摩擦作用难以整体均匀加热 PBX 发生点火, 炸药与砂靶摩擦的点火主导机制是摩擦引发的剪切作用点火。

关键词: 摩擦作用; 高聚物粘结炸药(PBX); 点火机制**中图分类号:** TJ55; TQ560**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.014

1 引言

炸药在运输、贮存、使用等过程中可能会发生燃烧、爆炸等重大事故, 造成不可挽回的损失, 为此针对撞击、摩擦、静电、热等作用方式, 建立了相应试验方法进行研究^[1]。

摩擦是引发炸药反应的一个重要刺激源, 现已建立了摩擦系数测试^[2]、摩擦感度实验^[3]、滑道试验^[4]等方法。摩擦感度的实验对象为 30 mg 粉状炸药, 主要用于研究炸药原材料的摩擦感度; 滑道试验用药量约 1 kg, 主要用于研究大型炸药试件的斜撞击与摩擦共同作用时的安全性。为了研究克量级成型炸药的摩擦安全性, 近来化工材料研究所参考美国 IHE 标准^[5]摩擦感度鉴定试验方法, 对 HMX 与 TATB 基炸药开展了摩擦感度测试研究, 建立了一种小型炸药试件(药量约 3g)的摩擦安全性试验方法——药片摩擦感度试验方法^[6]。

为了评价炸药在摩擦作用下的安全性, Chidester 等^[7]研究获得了 LX-04 炸药点火摩擦功约为 $1.55 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$, 并

利用摩擦功计算预测了该炸药在机械刺激下的响应阈值; 国内孙宝平^[8]、林文洲^[9]等开展了相关的理论与计算研究, 采用摩擦生热的方式数值计算分析了炸药的摩擦点火。目前, 由于缺乏诸如摩擦功/功率等的量化数据支撑, 且滑道试验、摩擦感度试验等标准方法中炸药的点火机制有待进一步明确, 无法校验现行的摩擦生热引发炸药点火的计算模型^[10], 因此需要在克量级炸药摩擦感度试验方法基础上, 深入研究成型炸药的摩擦点火机制, 掌握不同 PBX 的摩擦响应规律。

为此, 本研究采用药片摩擦感度试验方法, 进行了 PBX 在摩擦作用下的安全性研究, 估算了两种炸药摩擦作用下发生反应的摩擦功阈值, 分析了不同炸药的反应程度, 对比了不同摩擦条件下 PBX 的点火机制。

2 实验

2.1 材料

对 PBX-923 和 PBX-2 两种炸药开展摩擦作用下的响应特性研究, 炸药尺寸均为 $\phi 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。其中, PBX-923 炸药^[11]主要由 RDX、粘结剂等组成, 密度约 $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 样品质量约为 2.4 g; PBX-2 炸药^[11]主要由 HMX、TATB、粘结剂等组成, 密度约 $1.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 样品质量约为 2.7 g, 两种炸药均由中国工程物理研究院化工材料研究所提供。

试验过程主要在距离摩擦点约 55 cm 处用冲击

收稿日期: 2014-04-06; 修回日期: 2015-01-21

基金项目: 国防基础科研(B1520132004)

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

通信联系人: 邓川(1985-), 男, 博士生, 助理研究员, 主要从事炸药安全性研究。e-mail: seathel@163.com

波超压测试系统测量炸药反应超压,其中,冲击波超压测试系统包括 CY-YD-202 型压电式压力传感器、YE5852 型电荷放大器以及 PIC4712 多通道数据采集仪;采用 MEMRECAM GX-1 高速录像机拍摄摩擦过程,测量摩擦速度。

2.2 摩擦试验装置

药片摩擦感度试验原理与实物装置^[6]如图 1 所示。锤体在预定高度释放,下落撞击滑板,滑板运动带动摩擦板摩擦刺激炸药样品,样品受到摩擦作用,可能发生燃烧、爆炸等不同程度的反应。根据空气冲击波超压、试验回收样品等综合评价炸药的摩擦感度。

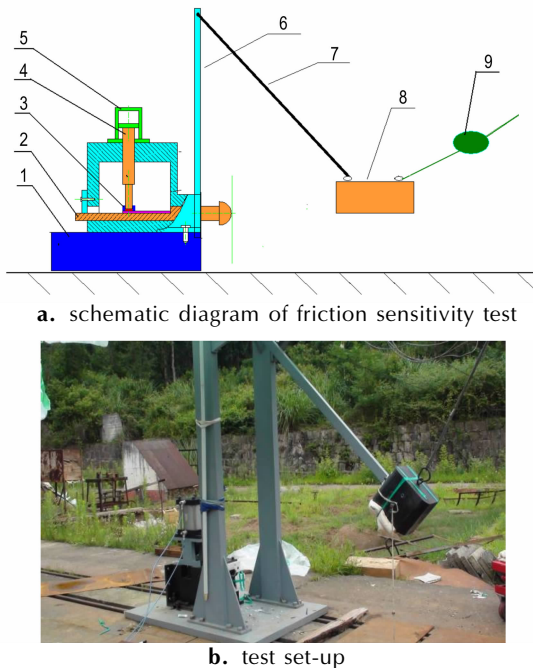


图 1 药片摩擦感度试验原理示意图与实物装置

1—水泥基础, 2—滑板, 3—压头, 4—活塞杆, 5—气缸, 6—支架悬臂, 7—摆绳, 8—锤体, 9—释放装置

Fig.1 Schematic diagram of friction sensitivity test for explosive tablet and its set-up

1—cement, 2—slider plank, 3—press assembly, 4—piston pole, 5—cylinder, 6—bracket cantilever, 7—cord, 8—drop hammer, 9—release assembly

试验用摩擦组件示意图如图 2 所示。为了研究不同摩擦条件下炸药的点火机制,本研究采用了两种摩擦板:光滑的钢板和带喷砂的钢板(见图 3)。其中,带喷砂的钢板是由 250~380 μm 石英砂用环氧树脂粘接于钢板上制成,简称砂靶。

采用缸径为 $\Phi 200$ mm 的气缸通过压头对药片进行压力加载,通过气缸压力调节药片加载力。试验中,

将气缸压力控制在 0.05~0.70 MPa,使加载在药片上的加载力在 1.57~21.99 kN 间可调节。摆锤下落撞击滑板,带动滑板及摩擦板以一定速度滑动,实现对药片的摩擦作用。

参照 GB 10006-1988 塑料薄膜和薄片摩擦系数测定方法,测试得到砂靶与炸药的摩擦系数约 0.46,光滑钢板与 PBX-2 和 PBX-923 炸药的摩擦系数分别为 0.26、0.23。

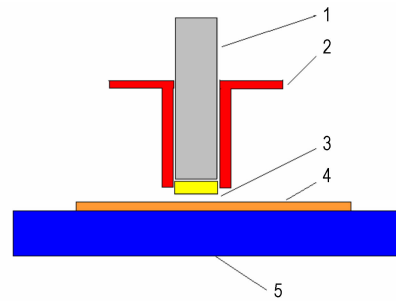
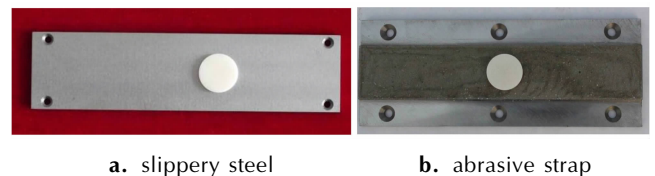


图 2 摩擦组件示意图

1—压头, 2—套筒, 3—炸药, 4—摩擦板, 5—滑板

Fig.2 Schematic diagram of friction assembly

1—press assembly, 2—sleeve, 3—explosive, 4—friction board, 5—slider plank



a. slippery steel

b. abrasive strap

图 3 摩擦板与试验样品照片

Fig.3 Photograph of friction board and sample

3 结果与分析

3.1 PBX 摩擦作用结果

气缸压力 0.70 MPa、作用于样品上的加载力为 21.99 kN 下两种 PBX 与光滑的钢板摩擦作用后的回收样品如图 4 所示。从图 4 可以看出, PBX-923 剩余药片完整, PBX-2 剩余药片出现轻微开裂,两种炸药受摩擦作用后,钢靶上均有明显摩擦痕迹,无反应痕迹,没有测到冲击波超压,表明两种炸药均未发生反应。

图 5 和图 6 为不同气缸压力加载下两种 PBX 与砂靶摩擦作用后的回收样品。从图 5 和图 6 可以看出,对于 PBX-2 药片,在 0.10 MPa 和 0.13 MPa 气缸压力下,摩擦作用过程后炸药均匀涂在砂靶上,尾端有大量药粉残留,表明炸药未有反应;在气缸压力 0.20、

0.50 MPa 下,砂靶上有明显反应痕迹。对于 PBX-923 药片,在 0.10 MPa 和 0.20 MPa 气缸压力加载下,炸药均匀涂在砂靶上,仍有剩余药片;在 0.25 MPa 和 0.40 MPa 气缸压力加载下,砂靶表面有烧蚀痕迹,表明 PBX-923 炸药发生了轻微反应。

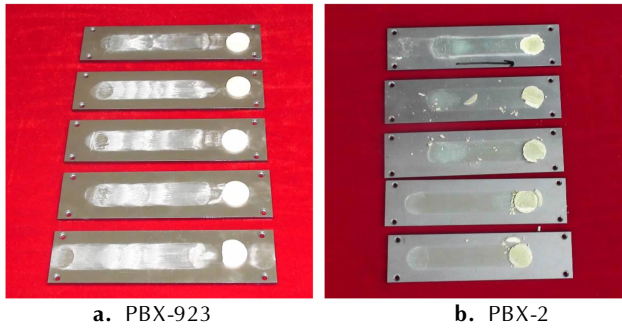


图 4 气缸压力 0.70 MPa 时两种 PBX 与光滑钢板摩擦作用后的回收样品

Fig. 4 Recover samples of PBX after friction with slippery steel at chamber pressure of 0.70 MPa

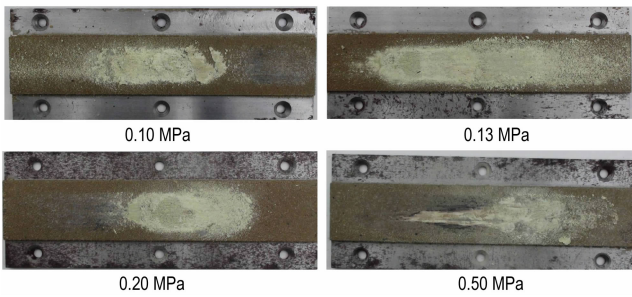


图 5 PBX-2 炸药与砂靶摩擦作用后的回收样品

Fig. 5 Recovery samples for PBX-2 after friction with the abrasive strap

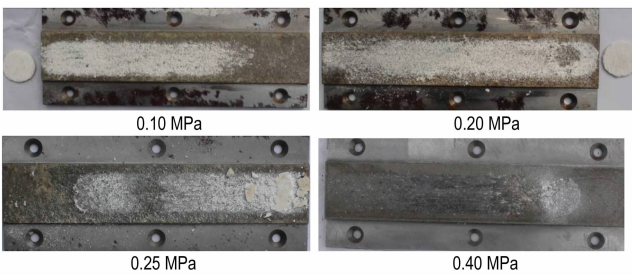


图 6 PBX-923 炸药与砂靶摩擦作用后的回收样品

Fig. 6 Recovery samples for PBX-923 after friction with the abrasive strap

表 1 为炸药与砂靶摩擦作用的试验结果。从表 1 可以看出,同一种样品在相同的加载力加载下摩擦刺激的响应一致,具有很好的重复性。依据表 1 结果,结合图 5 和图 6 可知,PBX-2 炸药所受加载力大于

3.14 kN 时均发生了反应,其中,4.08 ~ 9.42 kN 时,发生了燃烧反应,15.70 ~ 21.99 kN 时,发生了爆燃反应;当 PBX-2 炸药所受加载力小于 3.14 kN 时未反应,表明该装置条件下 PBX-2 炸药摩擦反应压力阈值为 3.14 ~ 4.08 kN。PBX-923 所受加载力大于 7.85 kN 时都发生了燃烧反应,当压力小于 6.28 kN 时未反应,表明在该装置条件下 PBX-923 炸药的摩擦反应压力阈值为 6.28 ~ 7.85 kN。

表 1 两种 PBX 与砂靶摩擦作用的试验结果

Table 1 Results of the friction test between explosive and abrasive strap

sample	cylinder pressure/MPa	press on sample/kN	over pressure /kPa	reaction degree
PBX-2	0.70	21.99	9	deflagration
	0.50	15.70	7	deflagration
	0.30	9.42		combustion
	0.20	6.28		combustion
	0.15	4.71	no over pressure	combustion
	0.13	4.08		combustion
	0.10	3.14		No reaction
	0.05	1.57		No reaction
PBX-923	0.70	21.99		combustion
	0.40	12.57		combustion
	0.40	12.57		combustion
	0.30	9.42	no over pressure	combustion
	0.30	9.42		combustion
	0.25	7.85		combustion
	0.20	6.28		no reaction
	0.10	3.14		no reaction

3.2 摩擦功阈值估算与机制分析

由于摩擦作用下炸药的点火,可假设主要是由于摩擦功转化为热量,即摩擦加热引发炸药升温,使炸药发生反应。因此,为分析不同摩擦条件下 PBX 的点火机制,可通过估算摩擦作用下的摩擦功和摩擦功率,对比不同边界条件下摩擦功和摩擦功率的变化,分析其对点火的影响。

对任意两个给定表面,摩擦力 $f^{[12]}$ 可近似为:

$$f = \mu F \tag{1}$$

式中, f 为摩擦力, N; μ 为滑动摩擦系数; F 为加载力, N。根据作用功的经典计算公式,摩擦功可近似为:

$$W = \mu F \cdot S \tag{2}$$

式中, W 为摩擦功, J; S 为位移, m。

摩擦功率可表示为:

$$P = dW/dt = \mu F \cdot v \tag{3}$$

式中, P 为摩擦功率, W; W 为摩擦功, J; v 为摩擦速

度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由于目前尚无法测试炸药具体的反应位置,因此,采用全行程(摩擦距离)来代替位移 S (取值 102 mm),通过式(2)估算得到炸药发生反应的摩擦功阈值。由于试验装置设计时保证摩擦运动过程速度较为均匀,可简单以摩擦全行程平均速度计算平均摩擦功率。表 2 为两种 PBX 摩擦功和摩擦功率计算结果。炸

表 2 两种药片摩擦功和摩擦功率计算结果

Table 2 Friction work and friction power calculated for two PBX in friction test

sample	testcondition	press on sample/kN	friction velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	friction work/J	friction power/ kW	reaction degree
PBX-923	slippery steel	21.99	2	515.9	10.12	no reaction
PBX-2		21.99	2	583.2	11.44	no reaction
PBX-923	abrasive strap	6.28 ~ 7.85	2.7	294.7 ~ 368.3	7.80 ~ 9.75	combustion
PBX-2		3.14 ~ 4.08	2.7	147.3 ~ 191.5	3.90 ~ 5.07	combustion

从表 2 可看出,两种炸药与钢板摩擦时的摩擦功和摩擦功率均显著高于与砂靶摩擦时的对应值。从摩擦试验条件可知,炸药与钢板摩擦时,炸药受力主要为摩擦力作用,而不用考虑砂靶摩擦试验中砂粒剪切作用,可近似为单纯的摩擦作用,表现为摩擦功/功率引发炸药点火。对比图 4、图 5 与图 6 中炸药与钢板、砂靶的试验结果,发现炸药与砂靶摩擦时,炸药受力不仅有摩擦力,还有较强的剪切力,因此,表 2 中估算的反应摩擦功阈值明显低于炸药与钢板摩擦的摩擦功阈值。

PBX-923、PBX-2 炸药与砂靶摩擦时,发生反应的摩擦功阈值分别约为与光滑的钢板摩擦时的一半和 1/3,摩擦功率也远低于与光滑的钢板摩擦时对应值,对比分析 PBX-923、PBX-2 两种炸药在砂靶、光滑钢板等不同摩擦条件下的试验结果,可以发现,仅以摩擦功/功率难以解释这一现象,需要从引发炸药点火的机制上进行分析。从试验后回收的样品来看,钢板摩擦条件下未发生反应的样品基本完整,仅有少量药粉散落在靶面上,而砂靶摩擦条件下未发生反应的样品则大量散落在砂靶上,表明砂靶摩擦时石英砂对炸药有强剪切作用,致使炸药从药片表面脱落。因此,炸药与钢板摩擦时光滑表面的摩擦热(摩擦功及摩擦功率)难以使 PBX 发生点火,而炸药与砂靶摩擦时炸药的点火机制应为剪切与摩擦共同作用,其中剪切占主导因素。对此,我们下一步的工作重点将是结合具体的点火机制,研究开发摩擦引发的剪切效应计算模型,实现摩擦作用下 PBX 响应过程的模拟,为评价不同边界条件下装药的摩擦点火奠定基础。

药与光滑的钢板摩擦时,PBX-923 炸药发生反应的摩擦功阈值大于 515.9 J、摩擦功率大于 10.12 kW,PBX-2 炸药发生反应的摩擦功阈值大于 583.2 J、摩擦功率大于 11.44 kW;炸药与砂靶摩擦时,PBX-923 炸药发生反应的摩擦功阈值为 294.7 ~ 368.3 J、摩擦功率为 7.80 ~ 9.75 kW,PBX-2 炸药发生反应的摩擦功阈值为 147.3 ~ 191.5 J、摩擦功率为 3.90 ~ 5.07 kW。

4 小 结

(1) 在药片摩擦感度试验中,PBX-2 炸药反应程度高于 PBX-923 炸药,在炸药与光滑的钢板摩擦时,PBX-923 炸药发生反应的摩擦功阈值大于 515.9 J、摩擦功率大于 10.12 kW,PBX-2 炸药发生反应的摩擦功阈值大于 583.2 J、摩擦功率大于 11.44 kW;炸药与砂靶摩擦时,PBX-923 炸药发生反应的摩擦功阈值为 294.7 ~ 368.3 J、摩擦功率为 7.80 ~ 9.75 kW,PBX-2 炸药发生反应的摩擦功阈值为 147.3 ~ 191.5 J、摩擦功率为 3.90 ~ 5.07 kW。

(2) 摩擦试验中摩擦作用难以加热 PBX 发生点火,炸药与砂靶摩擦的点火机制是剪切与摩擦共同作用,其中剪切占主导因素。

参考文献:

- [1] 张宝钲,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社,2001:416.
ZHANG Bao-ping, ZHANG Qing-ming, HUANG Feng-lei. Detonation physics knowledge [M]. Beijing: Enginery Industry Press, 2001: 416.
- [2] 温茂萍,蓝林钢,庞海燕. 高聚物粘结炸药及其涂层的摩擦性能[J]. 含能材料,2010,18(1):83-87.
WEN Mao-ping, LAN Lin-gang, PANG Hai-yan. Friction properties of polymer bonded explosives and coatings[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2010, 18(1): 83-87.
- [3] 胡庆贤. 炸药摩擦感度测试方法的讨论[J]. 含能材料,1998,6(2):92-96.
HU Qing-xian. Discussion on the experimental method of explosive friction sensitivity[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 1998, 6(2): 92-96.

- [4] GJB 772A-1997. 炸药试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会.
- [5] Battelle Memorial Institute. DOE explosive safety manual; pantex version[M]. Battelle Pantex, 1999;207, www.directives.doe.gov. [2012]
- [6] 邓川, 申春迎, 樊星, 等. PBX 药片摩擦感度测试[J]. 火炸药学报, 2012, 35(5): 22-24
DENG Chuan, SHEN Chun-ying, FAN Xing, et al. Test on the friction sensitivity of PBX tablet[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(5): 22-24.
- [7] Chidester S K, Green L G. A frictional work predictive method for the initiation of solid high explosives from low-pressure impacts[C] // 10th International Detonation Symposium, Boston, 1993: 786-792.
- [8] 孙宝平, 段卓平, 马兆芳, 等. 侵彻过程中装药摩擦点火数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(8): 771-775.
SUN Bao-ping, DUAN Zhuo-ping, MA Zhao-fang, et al. Numerical simulation on friction ignition of charge during projectile penetration[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(8): 771-775.
- [9] 林文洲, 洪滔. 高能炸药摩擦感度理论初步研究[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 12-15.
LIN Wen-zhou, HONG Tao. Theoretical analysis on friction sensitivity of high explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 12-15.
- [10] 孙宝平, 段卓平, 黄风雷. 炸药摩擦点火评价实验数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(6): 638-642.
SUN Bao-ping, DUAN Zhuo-ping, HUNG Feng-lei. Numerical simulation for assessmental test of friction ignition in solid explosive[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(6): 638-642.
- [11] 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: 357, 301.
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Handbook of properties of explosive and simulates[M]. Beijing: Science Press, 1989: 357, 301.
- [12] Blaine W Asay. Non-shock initiation of explosives[M]. Springer, 2010: 538-539.

Reaction Characteristics of PBX Tablet in Friction Sensitivity Test

DAI Xiao-gan^{1,2}, ZHONG Min¹, DENG Chuan¹, ZHENG Xue¹, WEN Yu-shi¹, HUANG Feng-lei²

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Friction sensitivity tests were conducted on the PBX-923 and PBX-2 tablets to study their reaction characteristics under compressed friction. The reaction overpressures of the explosive were obtained by blast pressure gauges to evaluate the reaction degree. Based on the data of overpressures and the recovered samples, reaction characteristics of these two explosives were analyzed. The ignition thresholds of friction work and corresponding friction powers were calculated and the ignition mechanism under compressed friction was analyzed. Results initially show that the ignition thresholds of friction work of PBX-923 and PBX-2 using smooth steel strip were more than 515.9 J and 583.2 J, respectively. And the corresponding friction powers were more than 10115 W and 11435 W, respectively. They were much higher than the ignition thresholds of friction work and the corresponding friction powers using sandy abrasive strip, which were between 294.7-368.3 J and 7.80-9.75 kW for PBX-923, and between 147.3-191.5 J and 3.90-5.07 kW for PBX-2, respectively. It confirms that the ignition of PBX is not directly caused by overall uniformly temperature rise during friction. Instead, shear induced ignition is probably the main ignition mechanism under compressed friction using sandy abrasive strap.

Key words: compressed friction; polymer bonded explosive; ignition mechanism

CLC number: TJ55; TQ560

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.014