文章编号：1001-1455(2014)01-0099-07

退役单基药的冲击起爆特性*

姜夕博，饶国宁，徐 森，姚 淼，马安鹏，彭金华
（南京理工大学化工学院，江苏 南京 210094）

摘要：为了研究退役单基药的冲击起爆特性，参照 GJB772A-97 中卡片式隔板法实验方法，分别开展了退役单基药的连续爆速实验、冲击波感度实验及锰铜压力计实验，观测了其冲击起爆的爆轰建立过程，得到了临界隔板值以及临界起爆压力。在连续爆速实验中，隔板厚度为 50 mm 时，观察到了退役单基药反应冲击波不断增长的过程，并在 90 mm 处转变为爆轰；在冲击波感度以及锰铜压力计实验中，测得其临界隔板厚度为 50～52 mm，临界起爆压力为 1.35～1.49 GPa。对退役单基药的冲击起爆过程进行了数值模拟，结合三种实验的实验结果，标定了其点火增长模型反应速率方程参数。

关键词：爆炸力学；冲击起爆；连续爆速；退役单基药；冲击波感度；反应速率方程
中图分类号：O381 **国标学科代码**：1303510 **文献标志码**：A

退役单基药是指过期失效的或被淘汰的用于枪炮发射能源的火药，对它再利用不仅可以减少储存和处理费用，还能够带来一定的经济效益。对退役单基药的再利用方面，起初是将它粉碎后，制成粉状乳化炸药、粉状炸药和浆状炸药[1-4]，部分已经投入生产。近年来，粉碎后用于制备烟花用无烟发射药，也取得了巨大的研究成果[5-7]。然而，由于退役单基药经长期储存后，安定剂含量降低，发生自燃甚至爆炸的可能性增加，随着再利用的不断开展，其安全性也成为急需解决的问题。如 2000 年日本爱知县的爆炸事故（79 人伤亡、888 间房屋损坏），原因是部分退役发射药发生反应、产生冲击波，最终导致了整体的殉爆。退役单基药的冲击起爆问题是使用安全性研究的重要方面，也是退役单基药实际的引爆、传爆序列等相关技术方面研究的基础。然而，目前对其安全性方面的研究还处于初级阶段，而冲击起爆特性方面的研究尚未开展。

冲击起爆过程的研究主要包括临界起爆阈值及相应判据、爆轰建立过程和化学反应速率方程[8]。为了系统研究退役单基药的冲击起爆特性，本文中，分别在这 3 个方面进行研究：利用连续爆速的方法对退役单基药的爆轰建立过程进行探索性研究，通过测量爆速的连续变化过程，观察其反应冲击波的成长过程；在临界起爆阈值方面，通过冲击波感度实验以及锰铜压力传感器测定退役单基药的临界隔板值及临界起爆压力；最后，结合连续爆速及临界起爆压力的实验结果，利用数值模拟方法标定退役单基药的点火增长模型反应速率方程参数。拟通过对退役单基药的冲击起爆过程的研究，了解其起爆性能和安全性能，为合理利用退役单基药提供参考。

1 冲击起爆实验

隔板实验是测定炸药冲击起爆特性的典型方法，广泛应用于炸药冲击起爆的研究中[9-11]。本文中参照 GJB 772A-97《炸药试验方法》中的卡片式隔板法的实验装置，分别开展了连续爆速实验、冲击波感度实验及锰铜压力计实验，研究退役单基药冲击起爆过程。除连续爆速实验由于探针长度的需要，将钢管长度加长至 600 mm，其余实验材料及尺寸完全相同。

粉碎后退役单基药为黄色粉状纤维，粒度范围 106～180 μm，其中：w（硝化纤维素）=95%～97%，w（二苯胺）=1%～2%，w（挥发性成分）=2.3%～4.1%，而在硝化纤维素中 w（氮）=12.75%～12.97%。

* **收稿日期**：2012-08-20；**修回日期**：2012-12-05
作者简介：姜夕博（1985— ），女，博士研究生。

1.1 连续爆速实验

研究爆轰建立过程的基本手段为楔形炸药实验，但楔形炸药试样加工困难，实验数据较难捕捉，而且实验费用昂贵。因此，本文中利用连续爆速方法，通过测量爆速的连续变化过程，得到反应冲击波在退役单基药中的运动迹线，其中转折点即为转变为爆轰之处。连续爆速测试系统的测试原理[12]为：随着爆轰波阵面向前推进，连续速度探针长度逐渐缩短，利用瞬态数据记录仪采集探针的电压随时间变化曲线 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$，经过数据处理系统的处理，转化为探针长度随时间的变化曲线 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}t$，通过 L-t 曲线的斜率变化直接读取爆速连续变化的情况。

连续爆速实验装置如图 1 所示。实验前，在试样的试件壳体中纵向插入连续速度探针，通过导向装置保证探针与炸药轴向平行。退役单基药人工散状装填于长 600 mm 的钢管中，平均装药密度为 0.76 g/cm^3，试样间的密度极差为 0.03 g/cm^3。通过改变有机玻璃隔板的厚度，控制加载到退役单基药的冲击波强度，直至明显观察到爆轰建立过程为止。连续爆速测试系统的数据采集设备为加拿大 MREL 公司的 HANDITRAP Ⅱ型。连续速度探针由镀绝缘层的电阻丝和细铜管组成，速度探针的电阻丝长度 900 mm、电阻 360.9 Ω/m，细铜管直径 1.5 mm，爆轰波阵面上的等离子现象能够保证探针的电阻丝与细铜管间的导通，保障电压随时间变化的数据信号的记录。

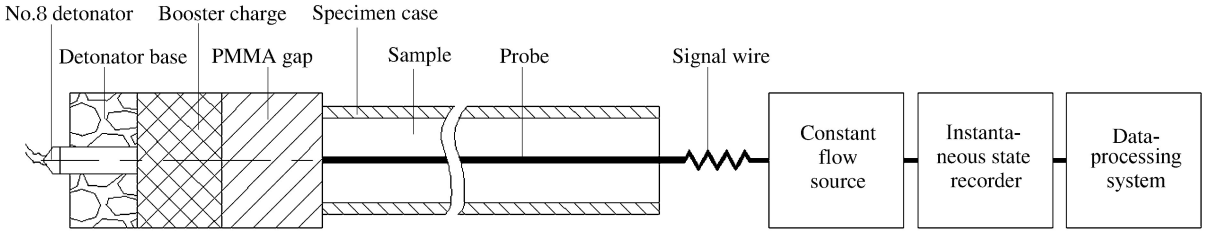


图 1 连续爆速实验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental device for continuous detonation velocity

1.2 冲击波感度实验

为了确定退役单基药的临界隔板厚度，参照 GJB 772A 97 中卡片式隔板法进行冲击波感度实验，实验装置如图 2 所示。

采用 8 号工业电雷管起爆，主发药柱为直径 40 mm、密度 1.60 g/cm^3 的钝化黑索今(RDX)；隔板为直径 40 mm 的有机玻璃；被发药柱为退役单基药，散状装填于 45 钢管中，装药方式及装药密度与连续爆速实验相同，钢管外径 32 mm、内径 25 mm、长 76 mm；见证板为 Q235 钢板，尺寸为 100 mm×100 mm×6 mm。实验后，通过观察见证板上的变形或破坏情况，判断退役单基药的反应情况。

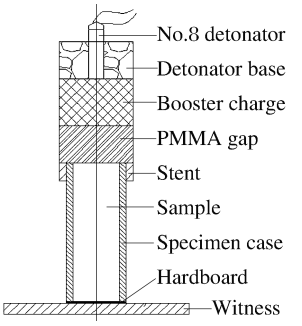


图 2 冲击波感度实验装置示意图

Fig. 2 Sketch map of experimental device for shock wave sensitivity

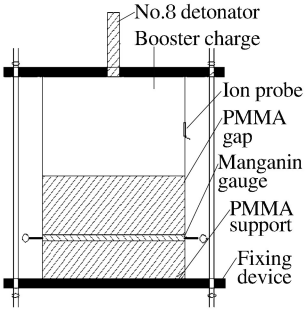


图 3 临界起爆压力实验装置示意图

Fig. 3 Sketch map of experimental device for critical initiation pressure

1.3 临界起爆压力实验

临界隔板值对应主发药柱产生的冲击波经隔板衰减后的输入冲击波压力，即为冲击波临界起爆压力。因此，只需要测出钝化黑索今药柱产生的冲击波在有机玻璃隔板中的衰减规律，就可将冲击波感度实验测得的临界隔板厚度转化为相应的压力[13]，即可得到退役单基药的临界起爆压力。采用这种方法，同时可以避免退役单基药发生反应对测量结果产生的影响[14-15]。

采用锰铜压力传感器测定冲击波经不同厚度有机玻璃隔板衰减后的压力，实验装置如图 3 所示。实验各部件的材料、尺寸，完全按照 GJB 772A-97 要求制作。

测试采用的 H 型锰铜压力传感器，在高压作用下电阻的温度系数可以忽略，受压后电阻的变化反应为电压的变化[16]。根据锰铜压力计的标定公式，就可以将电压的变化转化为相应的冲击波压力。

2　实验结果及分析

2.1　连续爆速实验

图 4 为有机玻璃隔板厚度为 30 和 50 mm 时连续爆速探针的连续爆速曲线，从图中可以清晰观察到，不同强度冲击加载下退役单基药的爆轰建立过程。

图 4(a)的曲线比较平滑，而图 4(b)的在前半部分有较多的干扰波形。这是由于隔板较薄时，入射冲击载荷较高，退役单基药的爆轰较完全，爆轰波阵面上的等离子体浓度较高，电阻丝与细铜管的导通性好。而隔板较厚时，入射冲击载荷较低，前半部分退役单基药爆轰不完全，爆轰波阵面上的等离子体浓度较低，电阻丝与细铜管导通性较差，导致探针上的电压降突然增大，这在连续爆速测量中不可避免。

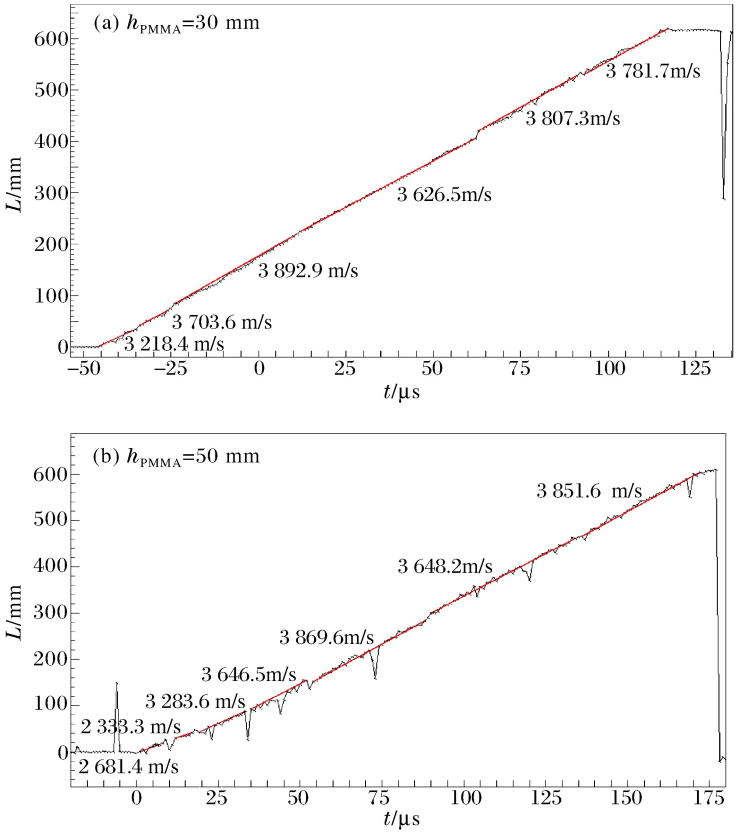


图 4　退役单基药的连续爆速曲线

Fig. 4　Curves of continuous detonation velocity for expired single-base propellant

由图 4(a)可以看出，退役单基药的爆速在 9 μs(28 mm)之前为 3218.4 m/s，之后爆速虽然有一定的变化，但基本稳定在 3 600～3 800 m/s。由锰铜压力计的实验结果可知，30 mm 厚有机玻璃隔板对应的入射冲击波压力为 4.03 GPa。这说明，当较强的冲击波进入试样后，瞬时引发了大部分试样的化学反应，并且在随后的传播过程中持续增长，在 28 mm 处反应冲击波最终成长为爆轰波，即此种情况下退役单基药的爆轰成长距离为约 28 mm。

由图 4(b)可以看出，退役单基药的爆速呈现逐渐增大的趋势，也即随着冲击波的传播，化学反应逐渐增强：初始阶段 8 μs 前，爆速 2 681.4 m/s 为入射冲击波速度；之后的 5 μs，速度略降至 2 333.3 m/s，这是冲击波在试样中衰减的结果，表明退役单基药发生了化学反应，只是参与反应的试样量较少，反应释放的能量不足以提供冲击波衰减所需的能量，导致反应冲击波速度有一定的下降；13 μs 后，爆速迅速上升至 3 283.6 m/s，证明随着反应冲击波的传播，激起越来越多的反应核，它们的释能直接推动了反应冲击波的增长，使爆速增加；35 μs(90 mm)后，4 段爆速基本稳定在 3 650～3 850 m/s，证明反应冲击波不断增长，并在 35 μs 时转变为爆轰。35 μs 之前的阶段为反应冲击波的增长阶段，之后的阶段为稳定爆轰阶段，退役单基药的爆轰成长距离为约 90 mm。实验结束后，现场没有发现实验的残留物，证明 600 mm 长的钢管已经被撕裂成碎片，由此也可以判断出此时退役单基药已经达到稳定爆轰。

2.2　冲击波感度实验

共进行了 4 发退役单基药的冲击波感度实验，通过观察见证板的破裂情况，判断试样是否发生爆轰。实际上，试样与见证板相互作用的过程中，相当一部分能量转换为见证板变形与破坏所需的能量。所以，观察见证板的破裂情况，对认识退役单基药与见证板的相互作用情况及判断实验结果非常重要。回收的见证板照片如图 5 所示，实验结果见表 1。

由图 5 可知，隔板厚度为 48 mm 时，隔板中心被穿出直径约 35 mm 的孔，从孔背面的局部放大图可以看出，穿孔的边缘部分呈不规则形状向后翻起，其间的裂口是由爆轰波直接作用的强大冲击力撕裂

所致。隔板厚度为 50 mm 时,穿孔边缘的形状与前者基本相同,但是穿孔直径略小,而且回收到很多长度 20～50 mm 不等的条形钢片,这可能是钢管变形破坏后留下的。通过这些现象可以定性判断,50 mm隔板厚度时试样与见证板和钢管的作用程度,小于隔板厚度为 48 mm 时的。隔板厚度为 52 mm 时,隔板中心呈锅底状向下凹陷约 30 mm,但是未被撕裂,可见此时试样与见证板作用的能量小于前两种情况。而隔板厚度 54 mm 时,见证板完好无损,且现场没有回收到残药,证明退役单基药在隔板厚度 52 mm 时发生了向爆轰的转变,在 54 mm 时只发生了燃烧反应。虽然冲击波感度的实验数量有限,但由于实验前对隔板厚度进行了理论预估,使不同的反应情况都有实验验证。因此,通过这些实验,能够近似判断退役单基药的临界隔板厚度在 50～52 mm。

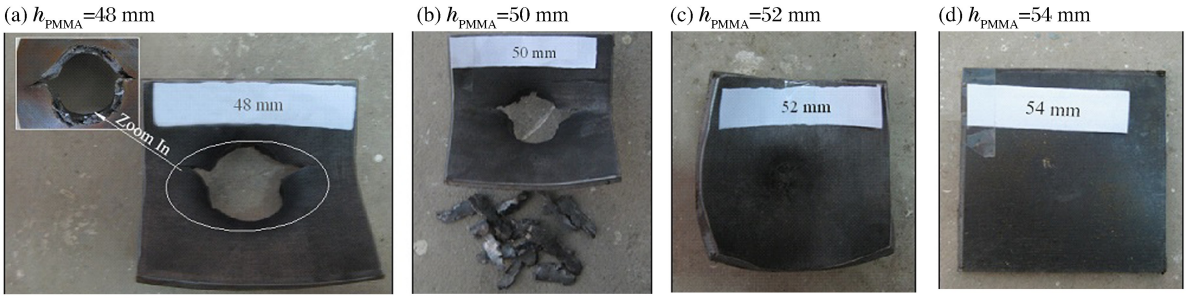


图 5 见证板破裂情况

Fig. 5 Rupture condition of witness board

表 1 冲击波感度实验结果

Table 1 Experimental results of shock wave sensitivity

No.	h_{PMMA}/mm	见证板破裂情况	判断结果
1	48	穿孔直径约 35 mm,穿孔的外环对称的两处被撕裂	发生正常爆轰
2	50	穿孔直径约 32 mm,穿孔的外环对称的两处被撕裂	发生正常爆轰
3	52	未被撕裂,仍为完整钢板,但是呈现锅底状向下凹陷约 30 mm	退役单基药反应成长即将向爆轰的转变过程
4	54	未被撕裂,仍为完整钢板,且没有发生任何变形,但是没有回收到退役单基药残药	只发生燃烧反应

2.3 临界压力阈值实验

有机玻璃隔板厚度从 0 ～ 40 mm,每隔 5 mm 测试一次,示波器采集到的典型波形见图 6。隔板厚为 0、5、10、15、20、25、30、35 和 40 mm,对应的冲击波压力分别为 17.97、12.67、8.39、7.00、5.66、5.28、4.03、3.20 和 2.61 GPa。

冲击波压力在密实介质中的衰减符合指数形衰减规律[17]:

$$p = k\mathrm{e}^{-\alpha x} \tag{1}$$

由上述冲击波压力数据,可得:k=18.20 GPa,α=0.05 mm^{-1}。

将退役单基药的临界隔板厚度代入式(1)中,可以得到其临界起爆压力在 1.35～1.49 GPa。

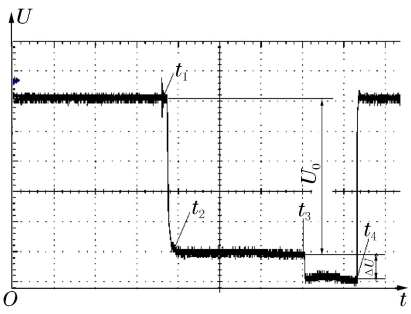


图 6 典型波形示意图

Fig. 6 Typical waveform

3 数值模拟

对含能材料冲击起爆过程的研究,重点之一是确定其反应速率方程参数,它决定了含能材料起爆过程的行为和特征[18-19]。但是由于炸药反应过程复杂,难于用严格的化学化学动力学描述,反应速率方程的有关系数基本上依靠拟合实验数据得出。所以,运用显示动力学有限元程序 AUTODYN 软件,对退役单基药的冲击起爆过程进行数值模拟研究。按照连续爆速实验模型,建立了二维轴对称计算模型,采用中心点起爆方式起爆主发药柱,网格尺寸为 1 mm×1 mm。

目前，用于描述炸药爆轰过程的反应速率方程形式较多，应用较广泛的是点火增长模型。本文中结合爆轰建立过程及临界起爆压力实验结果，利用数值模拟方法近似标定退役单基药点火增长模型的反应速率方程参数。

点火增长模型的反应速率方程为[20]：

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t}=I(1-\lambda)^b\left(\frac{\rho}{\rho_0-1-a}\right)^x+G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y+G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z \tag{2}$$

式中：λ 为炸药的反应度；t 为反应时间，μs；ρ 为密度，ρ_0 为初始密度，g/cm^3；p 为压力，100 GPa；I、G_1、G_2、a、b、c、d、e、g、x、y、z 为 12 个可调系数。上式为三项式点火增长模型，第一项描述热点的形成及点火阶段，在此阶段部分炸药在冲击压缩下点火；第二项描述热点反应成长的燃烧阶段，与爆燃过程类似；第三项描述热点的开始连结，未反应炸药的快速分解引起向爆轰的快速转变。

数值模拟计算中，先输入一组待拟合的点火增长模型参数进行计算，将计算所得的爆轰建立过程与实验结果进行对比。如果计算结果与实验结果不相符，则重新调整模型参数，直到计算结果与实验结果一致。再利用此时的点火增长模型参数计算临界起爆阈值，直到计算得到的爆轰建立过程和临界起爆阈值均与实验结果基本吻合。认为此时的点火增长模型反应速率方程参数能够近似描述退役单基药的冲击起爆过程。

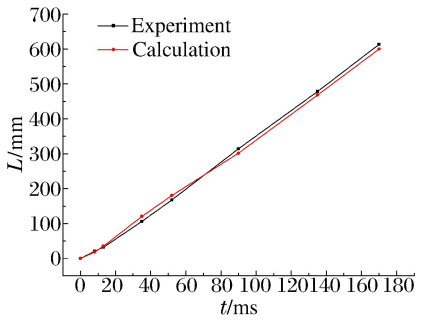


图 7　连续爆速曲线的实验和数值模拟结果

Fig. 7　Experimental and calculated results of continuous detonation velocity

图 7 为有机玻璃隔板厚度为 50 mm 时，模拟得到的 L-t 曲线与实验测量结果的对比。由图可见，计算得到的 L-t 曲线与实验测得的曲线基本吻合。

退役单基药的临界起爆压力在 1.35～1.49 GPa，即 1.49 GPa 压力起爆时，能够成长为爆轰，而 1.35 GPa 压力时，不能成长为爆轰。图 8 为入射冲击波压力为 1.49 和 1.35 GPa 时，退役单基药中不同位置处的压力曲线。在试样中心轴向每隔 10 mm 设置 6 个测试点，h 为测试点距隔板距离。

由图 8 可以看出，入射冲击波压力为 1.49 GPa 时，压力逐渐增大，而入射冲击波压力为 1.35 GPa 时，冲击波压力逐渐衰减，也与实验结果相符。这说明，拟合得到的点火增长反应速率方程参数能够较好地描述退役单基药冲击起爆过程，相应标定的点火增长模型反应速率方程参数分别为：$I=100$，$b=0.667$，$a=0$，$x=4$，$G_1=50$，$c=0.667$，$d=0.9$，$y=1$，$G_2=40$，$e=0.3$，$g=1$，$z=2$，$\lambda_{\mathrm{ig,max}}=0$，$\lambda_{G1,\mathrm{max}}=0.5$，$\lambda_{G2,\mathrm{min}}=0.5$。

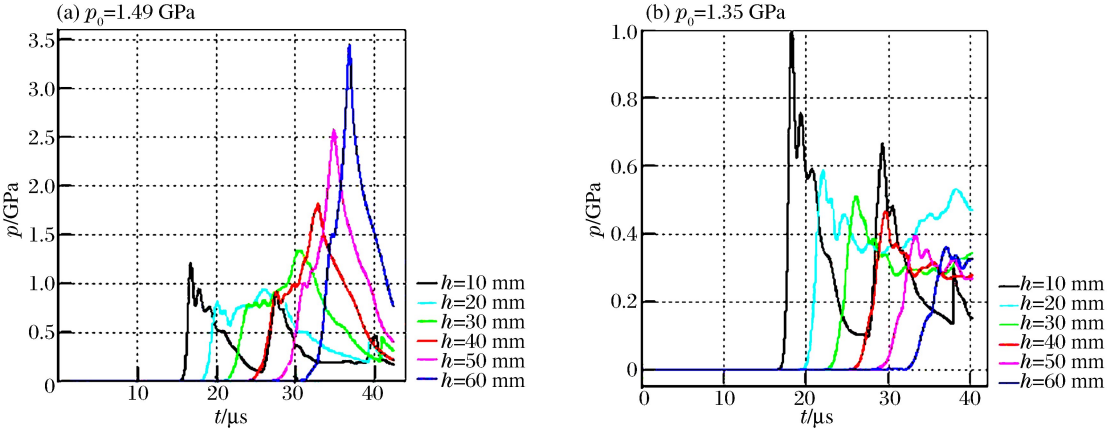


图 8　退役单基药的压力曲线

Fig. 8　Pressure curves of expired single-base propellant

4 结 论

采用连续爆速实验、冲击波感度实验、锰铜压力计实验及数值模拟方法,系统研究了退役单基药的冲击起爆特性,并得到了以下结论:

(1)利用连续爆速方法对退役单基药的爆轰建立过程进行了探索性研究,在隔板厚度为 50 mm 时,能够清晰地观察到爆速的增长过程,且此时退役单基药的爆轰成长距离为 90 mm;

(2)冲击波感度实验中,分析见证板的破裂情况,在隔板厚度为 48 和 50 mm 时,退役单基药爆轰完全,在隔板厚度为 52 mm 时,发生向爆轰的转变过程,在隔板厚度 54 mm 时,只发生了燃烧反应,证明退役单基药临界隔板厚度为 50～52 mm;

(3)利用锰铜压力计实验确定了退役单基药的临界起爆压力为 1.35～1.49 GPa;

(4)利用数值模拟方法,结合以上实验结果,标定了退役单基药点火增长模型反映速率方程参数。

对退役单基药冲击起爆过程的研究,可为可靠起爆和避免在意外冲击作用下发生爆炸提供参考,同时可为起爆、传爆序列设计及数值模拟研究提供参考。

参考文献:

[1] 孙金华,王泽山,朱立明,等.利用过期发射药制备浆状炸药[J].火炸药,1989(3):1-6.

[2] 王泽山,竹奇俊,俞明熊,等.一种粉状炸药及其制造方法:中国,CN95111083.7[P].1995-06-23.

[3] 潘仁明,王泽山,刘玉海,等.废发射药资源化新途径:制备粉状炸药研究[J].南京理工大学学报,1996,20(3):205-208.
Pan Ren-ming, Wang Ze-shan, Liu Yu-hai, et al. A study of the new method of waste gun propellants: Manufacturing powdery explosives by use of them[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1996,20(3):205-208.

[4] 顾建良,王泽山.利用废旧双基药制备工业浆状炸药的研究[J].火炸药学报,1999(1):42-44.
Gu Jian-liang, Wang Ze-shan. A study of slurry explosives containing obsolete double-base propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999(1):42-44.

[5] 刘玉海,刘士林.用退役推进剂制备火箭烟花用发射药[J].火工品,2003(3):54-56.
Liu Yu-hai, Liu Shi-lin. Technical analysis on the making of rocket-firework powder from expired propellants[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2003(3):54-56.

[6] 潘仁明,蔺向阳,殷继刚,等.一种无烟烟花的发射装药结构及其装药方法:中国,CN201010178407.5[P].2010-05-21.

[7] 蔺向阳,潘仁明,李生有.一种模块化无烟烟花发射药及其制备方法:中国,CN201110073834.1[P].2011-03-25.

[8] 孙承纬,卫玉章,周志奎.应用爆轰物理[M].北京:国防工业出版社,2000.

[9] Felts J E, Sandusky H W, Granholm R H. Development of the small-scale shock sensitivity test (SSST)[C]// AIP Conference Proceeding. 2009:233-236.

[10] Kimura E, Oyumi Y. Sensitivity of solid rocket propellants for card gap test[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1999,24(2):90-94.

[11] Verbeek R, Bouma R H B. Evaluation of the energy fluence in the small scale gap test[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2011,36(1):16-21.

[12] 徐森,唐双凌,刘大斌.用连续爆速法测定工业炸药爆速[J].含能材料,2009,17(4):467-470.
Xu Sen, Tang Shuang-ling, Liu Da-bin. Measurement of detonation velocity of industrial explosive using continuous detonation velocity method[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009,17(4):467-470.

[13] 王作山,张景林,刘玉存.纳米 Al2O3 对 HMX 临界起爆压力的影响[J].测试技术学报,2005,19(2):152-156.
Wang Zuo-shan, Zhang Jing-lin, Liu Yu-cun. The effect of nano-Al_2O_3 on critical initiation pressure of HMX[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2005,19(2):152-156.

[14] 刘德润,何得昌,周霖.梯恩梯密度对冲击波感度的影响[J].北京理工大学学报,1990,10(3):107-110.
Liu De-run, He De-chang, Zhou Lin. Effects of charge density on shock sensitivity of TNT[J]. Journal of Nan-

jing University of Science and Technology, 1990,10(3):107-110.

[15] 曾代朋,谭多望,李尚斌,等. 含铝炸药冲击波感度的实验和数值计算研究[J]. 含能材料,2010,18(2):148-151.
Zeng Dai-peng, Tan Duo-wang, Li Shan-bin, et al. Experimental and numerical calculation study on shock sensitivity of aluminum explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010,18(2):148-151.

[16] 徐森,刘大斌,彭金华,等. 药柱冲击波在有机玻璃中的衰减特性研究[J]. 高压物理学报,2010,24(6):431-436.
Xu Sen, Liu Da-bin, Peng Jin-hua, et al. Study on the shock wave attenuation of the booster charge in the PMMA gap[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010,24(6):431-436.

[17] 曹雄,焦清介,程松,等. PMMA 约束下小尺寸装药爆压衰减规律[J]. 测试技术学报,2009,23(3):210-212.
Cao Xiong, Jiao Qing-jie, Cheng Song, et al. Attenuation rule of small diameter charge detonation pressure with the bound of PMMA[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2009,23(3):210-212.

[18] 梁增友,黄风雷,张震宇. PBX-9404 的化学反应速率方程及起爆特性[J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):38-43.
Liang Zeng-you, Huang Feng-lei, Zhang Zhen-yu. Study on new reaction rate function model of PBX-9404 for damaged explosive initiation behaviour[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(1):38-43.

[19] 伍俊英,陈朗,鲁建英,等. 高能固体推进剂冲击起爆特征研究[J]. 兵工学报,2008,29(11):1315-1319.
Wu Jun-ying, Chen Lang, Lu Jian-ying, et al. Research on shock initiation of the high energy solid propellants [J]. Acta Armamentarii, 2008,29(11):1315-1319.

[20] 张宝坪,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社,1997.

Shock initiation characteristics of expired single-base propellants*

Jiang Xi-bo, Rao Guo-ning, Xu Sen, Yao Miao, Ma An-peng, Peng Jin-hua
(*School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: The continuous detonation velocity test, the shock wave sensitivity test and the critical initiation pressure test were developed, respectively, with reference to the GJB772A-97 card gap test. Based on the above tests, the detonation establishment process in the expired single-base propellant was investigated, and the critical gap thickness and the critical initiation pressure were obtained. In the continuous detonation velocity test, the building-up process of the reactive shock wave was observed at the PMMA gap thickness of 50 mm and it developed into a normal detonation at the PMMA gap thickness of 90 mm. The critical gap thickness was 50－52 mm obtained from the shock wave sensitivity test. And the critical initiation pressure was 1.35－1.49 GPa obtained from the critical initiation pressure test. According to the above tests, the numerical simulations were conducted to calibrate the parameters of the reactive rate equation in the ignition-and-growth model for the expired single-base propellant.

Key words: mechanics of explosion; shock initiation; continuous detonation velocity; expired single-base propellant; shock wave sensitivity; reaction rate equation

* Received 20 August 2012; Revised 5 December 2012
Corresponding author: Rao Guo-ning, raoguoning@foxmail.com

(责任编辑　丁　峰)