第17卷 第3期 高 压 物 理 学 报 Vol.17, No.3
2003年9月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Sept., 2003

文章编号：1000-5773(2003)03-0193-06

钝感炸药JB9014的多点起爆实验研究*

文尚刚[1,2]，赵 锋[1]，孙承纬[1]

(1.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；
2.北京应用物理与计算数学研究所计算物理实验室，北京 100088)

摘要：同时使用光子学弹道靶场相机(SVR)和转镜式高速扫描相机，对钝感炸药JB9014进行了一点、两点和四点起爆实验研究，获得了爆轰波出炸药底面的波形发展情况，并对实验结果进行了分析。

关键词：钝感炸药；多点起爆；扫描相机；SVR相机

中图分类号：TQ564 **文献标识码**：A

1 引 言

和其它炸药相比，TATB炸药具有若干独特的性质：良好的热安定性，直到310 ℃以上，才会出现化学反应性温升现象；极低的冲击感度和撞击感度；在用火焰点火时，甚至于在重约束条件下，直到250 ℃也不会发生爆燃－爆轰转变[1]。虽然它的能量大约比HMX炸药低30%，但出于安全目的，以TATB为基的钝感炸药已越来越受到人们的重视。钝感炸药的安全性能与它在爆轰行为上的特殊性质有着不可分割的联系，为爆轰物理提出了许多新的研究方向和问题。自20世纪70年代后期以来，以TATB为代表的钝感高能炸药(IHE)已构成国内外爆轰应用和基础研究发展的主要方向之一。

本研究使用SVR电子相机和高速扫描相机，对塑料粘结钝感炸药JB9014进行了几种多点起爆实验，获得爆轰波出JB9014炸药底端面波形的发展情况及爆轰波的相互作用结果。为了使两种相机所得到的实验结果有可比性，采用了两台相机同时观测同一事件的方法。由于转镜式高速扫描相机在爆轰测试中应用非常广泛，而SVR相机的使用相对较少，下面首先对SVR相机作一个简单的介绍。

哈德兰德光子学弹道靶场相机(SVR)[2,3]的主要工作原理是，将不同时刻飞行物(或界面)的运动图像叠加到同一个画面上，通过对这一画面上飞行物(或界面)的不同位置与它被记录时间的关系，推算出该物体的飞行速度(或界面的传播速度)。这一原理同传统的高速分幅相机的工作原理基本相同，其主要不同点是，传统的高速分幅相机所得到的图像是一系列独立的图像(对应不同时刻)；而SVR相机可以记录曝光时间短至200 ns的事件，时间分辨率可达到20～30 ns。它可以独立选择曝光次数(最多可达16次)、每次曝光时间和不同记录时刻的曝光时间间隔。在最小曝光时间为200 ns的情况下，SVR相机能以400 ns的间隔速度对事件进行取样，并将各次曝光的结果叠加在一个画面上。因此SVR相机可以用于某些特定爆轰现象的研究，如记录爆轰波出炸药底面或侧面的波形等，它可以在同一幅图像上获得几个不同时刻的爆轰波阵面形状及位置图像，利用它特有的分析软件，可以方便地对图像进行数据处理，从而得到爆轰波传播速度等参数。此外，SVR相机还可以用于拐角效应和径向非反应区等爆轰问题的研究[4,5]。

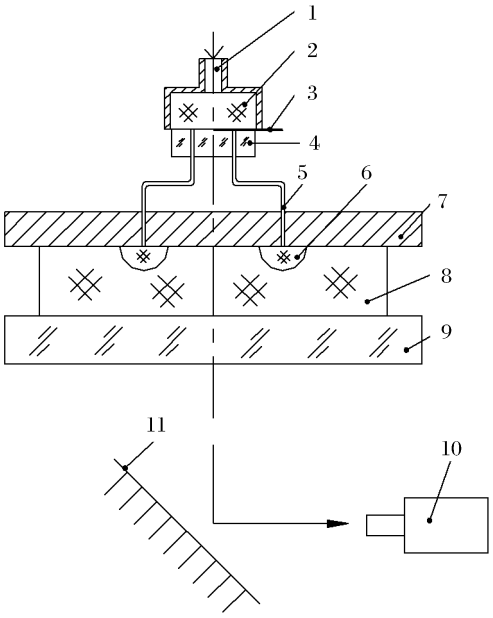
* **收稿日期**：2002-04-27；**修回日期**：2002-11-27
基金项目：国防科技重点实验室基金(99JS75.1.2ZS7501；99JS76.4.1ZW0102)
作者简介：文尚刚(1968—)，男，博士，助理研究员，从事爆轰物理研究.

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。在∅32 mm×11 mm 传爆药柱下安置一对电离式铜箔电探针，该探针用于触发 SVR 相机，当传爆药柱被起爆后导通电探针，启动 SVR 相机开始工作。通过与传爆药柱底部接触的几根长度相同的柔爆索，将主炸药在上端面几点同时起爆。在主炸药的下端面采用一定厚度的有机玻璃光快门来截止后续光，SVR 相机和 GSJ 扫描相机通过反光镜拍摄药柱下端面的爆轰波阵面发展情况。

由于实验场地的限制，两台相机的光轴不能同时通过反光镜与炸药样品底面的中心线正对。在实验时，使 SVR 相机的光轴与样品的中心线正对，而使 GSJ 扫描相机的光轴与样品的中心线成约 21.6° 的夹角。GSJ 相机使用的狭缝的最大宽度为 0.035 mm，它相当于扫描相机正对炸药样品底面刻线时的狭缝最大宽度为 0.038 mm，故所得的扫描图像仍然有较高的精度。

由于主炸药 JB9014 是钝感炸药，不能直接用柔爆索起爆，需在柔爆索和 JB9014 之间通过传爆药来进行爆轰传递，因此，我们在 JB9014 炸药起爆点处加工出一个半径为 15 mm 的球窝，嵌入较敏感的半球形传爆药，这样通过半球形传爆药后，柔爆索就可以可靠地起爆 JB9014 炸药了。



1. Detonator; 2. Booster; 3. Probe pins; 4. Plexiglas 5. MDF; 6. Semispherical booster; 7. Aluminum plate; 8. JB9014 explosive; 9. Plexiglas optical plate; 10. Camera; 11. Mirror

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental set-up

3 实验结果及分析

3.1 爆轰波在炸药底面传播时间的计算方法

在炸药中，球面发散爆轰波的爆速随波阵面曲率半径变化有如下的关系

$$D = D_J(1 - A/r) \tag{1}$$

式中：D_J 为平面一维理想爆速，r 为波阵面的曲率半径，A 是与炸药有关的参数。对于塑料粘结炸药 JB9014 有 $A=0.875$ mm，$D_J=7.7$ km/s。将传爆药产生的爆轰波近似看成一个球面发散爆轰波，设传爆药的半径为 r_0、爆速为 D_B，柔爆索的长度和爆速分别为 l_{MDF} 和 D_{MDF}。炸药底面某点 P 到炸药上端面起爆点的距离为 l，则爆轰波到达 P 点的时间 t 为

$$t = \frac{1}{D_J}(l - r_0) + \frac{A}{D_J}\ln\frac{l - A}{r_0 - A} + \frac{l_{MDF}}{D_{MDF}} + \frac{r_0}{D_B} \tag{2}$$

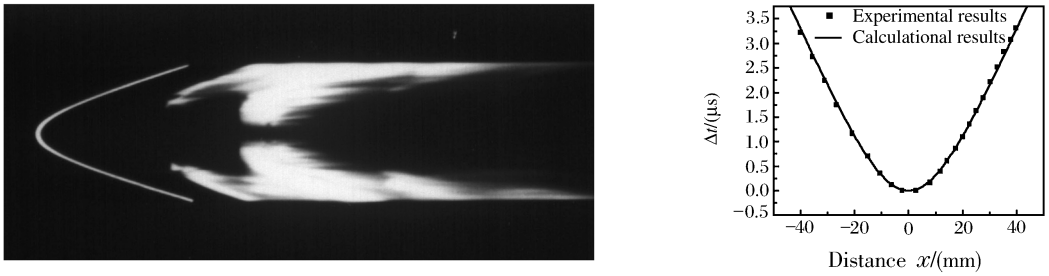
3.2 实验结果

由于使用这两种高速摄影技术进行的多点起爆实验有 3 种：一点起爆、二点起爆和四点起爆，每发的实验条件都不一样，下面就对这些实验分别进行叙述。

3.2.1 一点起爆实验

实验的主炸药为∅80 mm×20 mm 的 JB9014，HMX 柔爆索为∅2.0 mm×10 mm，有机玻璃光探板厚度为 10 mm，GSJ 相机的转速为 6×10^4 r/min（对应底片上图像为 3 km/s），狭缝宽度为

0.035 mm。实验所得的扫描图像如图 2(a)所示。图 2(b)给出了实验结果和用公式(2)计算出的结果的比较。可以看出,计算结果与实验结果符合得相当好。这说明,使用公式(2)计算爆轰波在炸药底面的传播时间是非常适用的,对于两点和四点起爆情形,在爆轰波相互作用之前这个公式同样也是适用的。



(a) GSJ streak camera　　(b)

图 2　JB9014 炸药一点起爆实验结果及与计算结果的比较

Fig. 2　The one point-initiation experimental result of JB9014

3.2.2　两点起爆实验

实验条件:主炸药为⌀200 mm×25 mm 塑料粘结炸药 JB9014,两个轴对称的起爆点到主炸药上端面中心的距离都为 50 mm,两根柔爆索长度都为 95 mm,有机玻璃厚度为 15 mm,SVR 相机的触发延迟时间为 14 μs,曝光次数为 5,每次曝光时间都为 200 ns,相邻曝光时间间隔为 500 ns。GSJ 相机的转速为 6×10^4 r/min,狭缝宽度为 0.035 mm。

SVR 相机所得到的实验图像如图 3(a) 所示,图像上有两个对称的同心光带族,这两个光带族就是两个散心爆轰波分别从两个轴对称的起爆点开始在炸药内传播,到达炸药底端面后,在底端面传播时所对应的图像。从该图可以看出在同一个光带族中,里面的光带比外面几个光带要宽一些,最外边的光带宽度最小。这主要是当爆轰波刚出炸药底面时,波阵面的径向传播速度非常大(远大于正常爆速),随着波阵面向外发展,波阵面的径向传播速度逐渐减小,直至接近于正常爆速,这就导致在相同的曝光时间内,所得到的不同时刻波阵面的光带宽度不一样。另外,同一条光带各处的宽度也并非完全相同,这是由于有机玻璃和炸药底端面之间的空气间隙厚度不完全相同,从而导致光带外侧边缘线到中心距离不同。由于光带内侧边缘线是由爆轰波发光形成的[4],因此在测量不同时刻爆轰波阵面的位置时,选取内侧边缘线比较合理。由于光带外侧边缘线的相对位置是与空气隙密切相关的,所以通过对光带外侧边缘线的研究,也可以得到不同的空气隙对实验结果的影响。

实验设计时本来还想观测两个爆轰波相互作用的情况,但由于两个起爆点分别离炸药外缘比较近(只有50mm),爆轰波出炸药外缘后,飞散的爆轰产物发出的强光可能会影响记录图像的效果(强光



(a) SVR camera　　(b) GSJ streak camera

图 3　JB9014 炸药两点起爆实验结果

Fig. 3　The two point-initiation experimental result of JB9014

有可能覆盖整个视场,从而将前面记录的图像覆盖掉,有一发预备实验和一发正式实验就出现这种情况),所以在实验中设置 SVR 相机的记录时间略短了些,因而这发实验没有得到两个爆轰波相互作用的过程。

GSJ 扫描相机所得的实验图像如图 3(b) 所示,仍然得到了比较好的实验结果,但没有观测到马赫反射现象。

从 SVR 相机所得到的图像中,我们可以得到两个爆轰波在不同时刻所对应的不同位置。取 TATB 炸药的爆速为 7.7 km/s,柔爆索的爆速为 8.44 km/s,传爆药的爆速为 8.0 km/s。设 r_1 和 r_2 分别为左边和右边光环内侧边缘线上的点到该光环中心的平均距离,SVR 相机和 GSJ 相机的记录时间分别用 t_{SVR} 和 t_{GSJ} 表示(注:t_{GSJ} 的第一个时间用 SVR 相机记录的时间进行修正,故两者完全相同),用公式(2)计算的爆轰波到达这两条边缘线时间分别为 t_1 和 t_2。所得的实验结果和计算结果见表 1,可以看出,两种相机记录的时间符合得相当好。此外,实验结果和计算结果符合得也比较好,两者最大相差不到 20 ns,且最大误差是第一个时间(主要是计算所用的柔爆索和传爆药的爆速不够精确引起的),如果将第一个时间修正为相机的记录时间(即 14.7 μs),则计算结果和实验结果的最大差为 8 ns。由此可见,利用公式(2)计算此类问题的爆轰波到达时间还是相当精确的。

表 1 爆轰波到达不同位置的时间

Table 1 The time of detonation front getting to different positions

r_1/(mm)	r_2/(mm)	t_{SVR}/(μs)	t_{GSJ}/(μs)	t_1/(μs)	t_2/(μs)
11.97	12.39	14.70	14.70	14.86	14.88
21.47	21.39	15.40	15.41	15.56	15.55
28.92	28.78	16.10	16.13	16.26	16.24
35.19	35.05	16.80	16.81	16.91	16.90
41.25	41.37	17.50	17.53	17.59	17.60

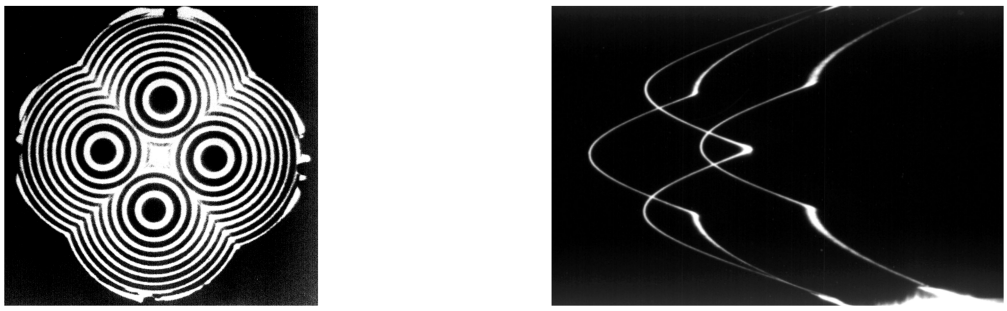
3.2.3 四点起爆实验

实验条件:主炸药为⌀200 mm×25 mm 塑料粘结炸药 JB9014,4 个轴对称的起爆点到炸药上端面中心的距离为 40 mm,4 根柔爆索的长度都为 80 mm,有机玻璃厚 15 mm,SVR 相机的触发延迟时间为 12.80 μs,曝光次数为 9,每次曝光时间都为 200 ns,相邻曝光时间间隔为 500 ns。GSJ 相机的转速为 6×10^4 r/min,采用三条扫描线,每条狭缝宽度为 0.025 mm,中间一条扫描线与炸药底面中心线相重合(有两个起爆点正对中心线),另两条扫描线与中间扫描线平行,并且各自与一个起爆点相对。

SVR 相机所得到的实验图像如图 4(a) 所示,可以看出,这发实验得到了比较好的实验结果:4 个起爆点爆轰波的发展过程十分清晰,而且也得到了爆轰波的相互作用过程的一些重要信息。这发实验四个起爆点发出的爆轰波相互作用有两种情况,一种是向炸药中心发展的爆轰波内聚相互作用,由于该相互作用区域较小及内聚效应十分显著,导致在图像中心只能看到一团发亮的东西,不易得到内聚过程的一些细节信息;另外一种是两个爆轰波在向外发展过程中相遇而相互作用,可以看出两条光带的交汇处内侧(从每个光带族的第四个光带开始)并非像两个圆弧交汇那样形成尖点,而是形成了一个小凸包。这说明两个相互作用的爆轰波已经发生了马赫反射,在发生马赫反射的地方,其爆轰波的传播速度明显提高,从而导致了这些小凸包的形成。因此这发实验结果对于研究爆轰波的相互作用和爆轰波的马赫反射等问题有一定的参考意义。

GSJ 扫描相机所得到的实验图像如图 4(b) 所示,图像还是比较清晰。可以看出,爆轰波发生相互作用的地方发生了明显的变化,波形变粗变亮,也可以看出发生了马赫反射,但不是很明显。

从 SVR 相机所得到的图像中,我们可以得到 4 个爆轰波在不同时刻所对应的不同位置。设 r_1、r_2、r_3 和 r_4 分别为上、左、下和右边光环内侧边缘线上的点到该光环中心的平均距离,SVR 相机的记录时间为 t_{SVR},用公式(2)计算的爆轰波到达这 4 条边缘线的时间分别为 t_1、t_2、t_3 和 t_4。所得的实验结果和计算结果见表 2,可以看出,实验结果和计算结果符合得也比较好。



(a) SVR camera　　(b) GSJ streak camera

图 4　JB9014 炸药四点起爆实验结果

Fig. 4　The four point-initiation experimental result of JB9014

表 2　爆轰波到达不同位置的时间

Table 2　The time of detonation front getting to different positions

r_1/(mm)	r_2/(mm)	r_3/(mm)	r_4/(mm)	t_{SVR}/(μs)	t_1/(μs)	t_2/(μs)	t_3/(μs)	t_4/(μs)
10.55	9.35	9.73	9.60	12.80	13.00	12.94	12.96	12.95
20.38	19.66	20.41	20.00	13.50	13.69	13.63	13.69	13.65
27.98	27.33	27.81	27.76	14.20	14.39	14.32	14.37	14.37
34.46	34.03	34.10	33.83	14.90	15.06	15.01	15.02	14.99
40.66	39.77	40.69	40.65	15.60	15.74	15.64	15.74	15.74
46.49	46.53	46.15	46.63	16.30	16.41	16.41	16.37	16.43
52.52	52.28	52.27	52.74	17.00	17.12	17.09	17.09	17.14
59.28	58.22	59.10	58.36	17.70	17.93	17.80	17.91	17.82
64.54	63.93	63.57	63.89	18.40	18.57	18.50	18.46	18.49

4　结　论

使用两种高速摄影技术(SVR 电子相机和转镜式高速扫描相机)分别对塑料粘结钝感炸药 JB9014 进行了一点、两点和四点起爆实验。获得了在几种多点起爆情况下,爆轰波出 JB9014 炸药底端面后波形的发展情况及爆轰波的相互作用结果。这些实验结果对研究钝感炸药 JB9014 的爆轰行为有一定的参考意义。

实验工作得到了张光升、赫建中、张克明、蒲正美、林俊和高宁等同志的协助,在此表示感谢。

References:

[1] Asay B W, McAfee J M. Temperature Effects on Failure Thickness and the Deflagration-to -Detonation Transition in PBX-9502 and JB9014 [A]. Proc of 10th Symp (Int) on Detonation [C]. Boston: MA, 1993, 485－489.

[2] Speyer B, Bowley D. A New Single Shot High-Resolution Video System Capable of Explosure Times Less Than 250 ns [A]. 18th Int Conference on High Speed Photography and Photonics [C]. SPIE, 1988, 1032: 315－318.

[3] Speyer B. High Speed Still Video Photography For Ballistic Range Applications [A]. 19th Int Conference on High Speed Photography and Photonics [C]. SPIE, 1990, 1358: 1215－1221.

[4] Held M. Detonation Phenomena Observed with a CCD Camera [A]. 21th Int Conference on High Speed Photography and Photonics [C]. SPIE, 1994, 2513: 1028.

[5] Held M. Detonation Studies with a Ballistic Range Camera [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1995, 20: 327－334.

Experimental Studies on the Multi-Point Initiation of the Insensitive Explosive JB9014

WEN Shang-Gang[1,2], ZHAO Feng[1], SUN Cheng-Wei[1]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Laboratory for Computational Physics Institute of Applied Physics & Computational Mathematics, Beijing* 100088, *China*)

Abstract: By means of SVR electrical camera and streak camera, the waveform of detonation wave front on the bottom of insensitive explosive JB9014 are recorded in multi-point initiation experiments, and the experimental results are analyzed.

Key words: insensitive explosive; multi-point initiation; streak camera; SVR camera