

文章编号: 1001-1455(2001)03-0233-04

用 SVR 相机进行多点起爆实验研究

文尚刚, 赵 锋, 孙承纬, 李发伯, 郝建中

(中物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: 利用 SVR 电子相机记录多点起爆实验爆轰波出炸药端面的波形, 得到了一些有意义的实验结果, 并对所得到的实验结果进行了初步处理和分析。

关键词: SVR 相机; 多点起爆; 爆轰波; 炸药

* 中图分类号: O384 文献标识码: A

1 引 言

哈德兰德光子学弹道靶场相机(SVR)最初是为了记录弹丸飞行^[1], 带尾翼弹药的底板分离^[2], 以及爆炸产生的射弹^[3]等, 主要用于测量上述飞行物的速度。它的主要工作原理是将不同时刻飞行物的运动图象叠加到同一个画面上, 通过对这一画面上飞行物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。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象是一系列独立的图象(对应不同时刻), 要在这些独立的图象中得到飞行物体在不同时刻的空间位置处理起来比较麻烦, 而且精度也不高。而 SVR 相机具有较高的时间和空间分辨率, 利用它特有的分析软件可以很方便地得到飞行物体在不同时刻的一些重要物理信息, 此外它还可以方便地对图象进行各种处理, 这些特有的功能是高速分幅相机及其它一些高速相机所无法比拟的。

后来 M. Held 等将 SVR 相机应用于爆轰研究^[4,5], 获得了成功。大量实验表明, SVR 相机可以用于记录曝光时间短至 200ns 的爆轰实验, 它可以使测试结果的时间分辨率达到 20~30ns。它可以独立选择曝光次数(最多可达 16 次), 及每次的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 200ns 的情况下, SVR 相机能以 400ns 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。因此它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, 在同一幅图象上获得几个不同时刻的爆轰波阵面形状及位置图象, 图象上记录了不同时刻的爆轰波阵面形状信息和几何位置信息, 通过对图象进行数据处理可以确定爆轰波传播速度等参数。因此 SVR 相机可以用于研究爆轰波传播速度、拐角效应、爆轰波的相互作用和径向非反应区等问题的研究。

我们用 SVR 相机对炸药的多点起爆实验进行了初步研究, 给出了几种不同实验的结果以及对这些结果的分析。实验所用的 SVR 相机(图 1)是 1996 年从哈德兰德公司引进的, 其主要性能参数^[6]如表 1 所示。



图 1 SVR 相机

Fig.1 The SVR camera

* 收稿日期: 2000-11-23; 修回日期: 2001-01-03

基金项目: 冲击波物理与爆轰波物理国防科技重点实验室基金项目(99JS75.1.2ZS7501)

作者简介: 文尚刚(1968—), 男, 博士。

表 1 SVR 相机的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of SVR camera

单次曝光 时间/s	重复曝光 次数/次	相邻两次曝光 时间间隔/s	记录时间 范围/s	相机触发方式	CCD 像素	触发延迟 时间/s
$2 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-3}$	1~16 可调	$2 \times 10^{-7} \sim 0.02$	$2 \times 10^{-7} \sim 0.02$	内触发; 外触发; 小于 15V 的正负电信号	1134×486	$2 \times 10^{-7} \sim 0.1$

2 实 验

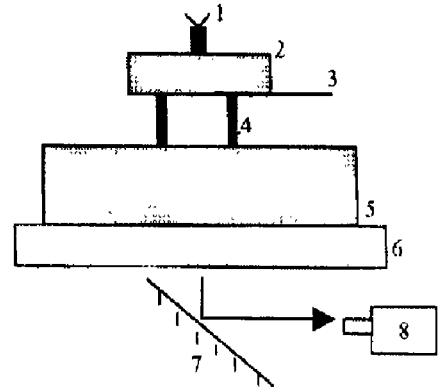
我们进行的多点起爆实验有三种: 一点起爆、二点起爆和四点起爆, 实验装置如图 2 所示, 在 $\phi 32\text{mm} \times 11\text{mm}$ 传爆药柱下安置一对电离式铜箔电探针, 传爆药柱被起爆后导通电探针从而启动 SVR 相机开始工作。通过与传爆药柱底部接触的几根长度相同的柔爆索将主炸药在上端面几点同时起爆(一点起爆实验中主炸药是直接传爆药柱起爆), 在主药柱的下端面采用一定厚度的有机玻璃快门来截止后续光, 相机通过反光镜拍摄药柱下端面的爆轰波阵面的发展情况。实验设计时应保证触发信号的可靠性, 有机玻璃和炸药端面应紧密结合尽量减少空气隙。由于炸药爆轰所引起视场内杂散光较强而 SVR 相机对光的敏感性较高, 故实验时采用滤光片和使用相机镜头最小光圈等光衰减措施。

下面对这几个实验分别进行说明。

2.1 一点起爆实验

实验的主炸药为 $\phi 200\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的 T/R 炸药 (TNT/RDX=40/60), 有机玻璃光探板厚度为 10mm, SVR 相机的触发延迟时间为 $5\mu\text{s}$, 曝光次数为 5, 每次曝光时间都为 200ns, 相邻曝光之间的时间间隔为 $2\mu\text{s}$ 。实验所得的爆轰波阵面图象如图 3 所示。在爆轰过程中, SVR 相机 5 次曝光在同一幅图象上应该可获得 5 个不同时刻的爆轰波阵面形状和位置图象, 但由于第一次曝光时爆轰波阵面刚好到达药柱下端面, 因此从图象上只看出 4 个不同时刻爆轰波阵面形状。从该图可以看出靠近药柱底面中心的光环宽度要比后面几个时刻的光环宽度要宽一些, 最外边的光环宽度最小。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光环宽度不一样。另外, 同一条光环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, 从而导致光环外侧边缘线到中心距离不同。由于光环内侧边缘线是由爆轰波发光形成的^[5], 因此在测量不同时刻爆轰波波阵面的位置时选取内侧边缘线比较合理。如果将光环外侧边缘线也作为参考位置进行数据测量, 所带来的测量误差就要大一些。由于光环外侧边缘线是由炸药和有机玻璃之间的空气受到爆轰产物高温高压强烈压缩发光所形成的, 所以光环外侧边缘线的相对位置是与空气隙密切相关的, 通过对光环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。

设炸药的厚度为 h , 炸药底面某点 A 到中心点的距离为 r , 该点到炸药上端面起爆点的距离为 l , t_0



1. Detonator; 2. Booster; 3. Probe pins;
4. MDF; 5. Main charge; 6. Plexiglas;
7. Mirror; 8. SVR camera

图 2 多点起爆实验示意图

Fig.2 Schematic diagram of multi-points
initiation experiment

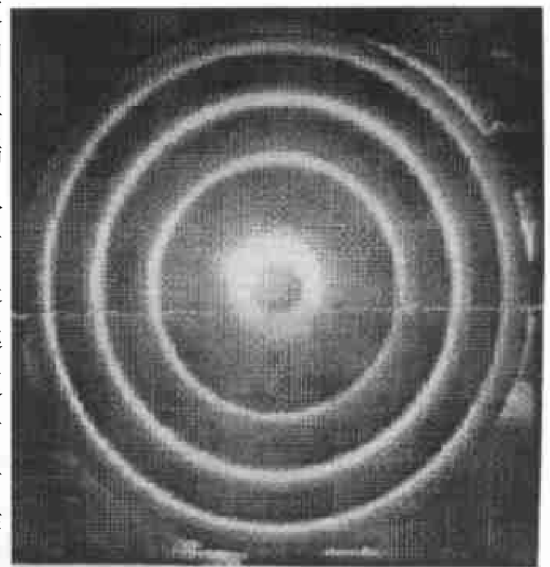


图 3 一点起爆实验的图象

Fig.3 The result of one point initiation

为爆轰波到达炸药底面中心点的时间。假设爆轰波以爆速 D 在炸药中稳定地传播, 则爆轰波到达 A 点时间 t 为

$$t = t_0 + (l - h)/D = t_0 + (\sqrt{r^2 + h^2} - h)/D \quad (1)$$

表 2 给出了爆轰波到达炸药底端面不同位置的时间的实验测量结果和理论计算结果(取 T/R 炸药的爆速 $D = 7.98\text{km/s}$), 可以看出实验结果与计算结果符合得比较好, 表中 t_E 表示实验测量时间, t_c 表示理想计算时间。

2.2 二点起爆

实验条件: 主炸药为 $\phi 200\text{mm} \times 25\text{mm}$ 塑料粘结炸药 TATB, 两个轴对称的起爆点之间的距离为 100mm, 两根柔爆索长度都为 95mm, 有机玻璃厚度

为 15mm, SVR 相机的触发延迟时间为 $14\mu\text{s}$, 曝光次数为 5, 每次曝光时间都为 200ns, 相邻曝光之间的时间间隔为 500ns。实验所得到的图象如图 4 所示, 图象上有两个对称的同心光环族, 这两个光环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象。可以看出这幅图象还是相当清晰, 每条光环宽度基本均匀, 说明这发实验安装得还比较成功。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), 担心爆轰波出了炸药外缘后飞散的爆轰产物发出的强光影响记录图象的效果(强光有可能覆盖整个视场从而将前面记录的图象覆盖掉, 有一发预备实验和一发正式实验就出现这种情况), 因此 SVR 相机的记录时间不能过长。另外, 由于爆轰波在炸药底面传播的时间十分有限(大约只有 $4\mu\text{s}$), 而整个爆轰过程却大约有 $20\mu\text{s}$, 要精确地计算出爆轰波在炸药底面传播的时间段比较困难。所以这发实验没有得到两个爆轰波相互作用的过程, 这是这发实验美中不足的地方。

表 2 波阵面到达不同位置的时间

Table 2 The time of detonation front getting to different position

r/mm	$t_E/\mu\text{s}$	$t_c/\mu\text{s}$
9.36	7.20	7.04
46.55	9.40	9.58
68.94	11.60	11.88
89.67	13.80	14.19

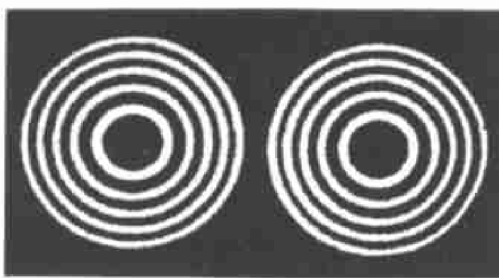


图 4 二点起爆实验图象

Fig.4 The result of two points initiation

从所得到的图象中, 我们可以看到两个爆轰波在不同时刻所对应的不同位置。仍以(1)式的计算方法, 取 TATB 炸药的爆速为 7.7km/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, 爆轰波到达这两条边缘线时间分别为 t_1 和 t_2 。所得到的实验结果和计算结果如表 3 所示, 可以看出两种结果符合得也比较好。

2.3 四点起爆实验

实验条件: 主炸药为 $\phi 200\text{mm} \times 25\text{mm}$ 塑料粘

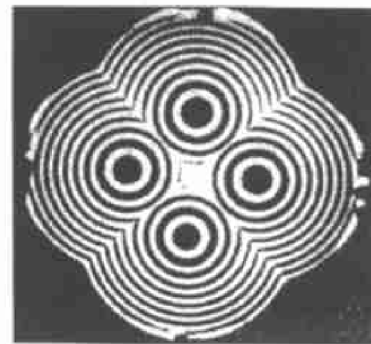


图 5 四点起爆实验图象

Fig.5 The result of four points initiation

表 3 波阵面到达不同位置的时间

Table 3 The time of detonation front getting to different position

r_1/mm	r_2/mm	$t_E/\mu\text{s}$	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$
12.39	11.97	14.70	14.85	14.87
21.47	21.39	15.40	15.53	15.53
28.92	28.78	16.10	16.22	16.20
35.19	35.05	16.80	16.86	16.84
41.37	41.25	17.50	17.53	17.52

结炸药 TATB, 四个轴对称的起爆点到炸药中心的距离为 40mm, 四根柔爆索长度都为 80mm, 有机玻璃厚度为 15mm, SVR 相机的触发延迟时间为 12.80 μ s, 曝光次数为 9, 每次曝光时间都为 200ns, 相邻曝光之间的时间间隔为 500ns。实验所得到的图象如图 5 所示, 可以看出这发实验得到了比较好的实验结果: 四个起爆点的爆轰波发展过程十分清晰, 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象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; 另外一种相互作用情况是两个爆轰波在向外发展过程中相遇而相互作用, 可以看出两条光环的交汇处内侧(从每个光环族的第四个光环开始)并非象两个圆弧交汇那样形成尖点, 而是形成了一个小凸包。这就说明了两个相互作用的爆轰波已经发生了马赫反射, 发生马赫反射地方的爆轰波传播速度明显提高, 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、爆轰波的马赫反射等问题有一定的参考意义。由于本文主要侧重于介绍实验方法, 对实验结果只作初步分析, 进一步的处理和分析就不作详细介绍。

3 结 论

用 SVR 相机对三种不同的多点起爆实验进行了测量, 得到了一些有意义的实验结果, 并对这些结果作了一些初步分析。结果表明, 用 SVR 电子相机可以作为一种比较有效的实验手段对多点起爆实验进行测量。为了取得较好的实验结果, 应根据该相机的特点和实验要求作出合理的实验设计。

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

参考文献:

- [1] SPEYER B, BOWLEY D. A New Single Shot High Resolution Video System Capable of Exposure Times less than 250ns [A]. 18th Int Conference on High Speed Photography and Photonics, Proc SPIE [C]. 1988, 1033: 315—318.
- [2] SPEYER B. High Speed Still Video Photography for Ballistic Range Applications [A]. 19th Int Conference on High Speed Photography and Photonics, Proc SPIE [C]. 1990, 1358: 1215—1221.
- [3] SV 533 BR Ballistic Range Camera [Z]. Handland Photonics Internal Publication
- [4] HELD M. Detonation Phenomena Observed with a CCD Camera [A]. 曼·赫尔德博士著作译文集(2) [M]. 中国工程物理研究院, 1999. 200—205.
- [5] HELD M. Detonation Studies with a Ballistic Range Camera [A]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics [M]. 1995, 20: 327—334.
- [6] 李发伯, 等. SVR 型数字式高速相机自检验收报告 [R]. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1997. 1—2.

Multi-points Initiation Experiment Studies with a SVR Camera

WEN Shang-gang, ZHAO Feng, SUN Cheng-wei, LI Fa-bai, HAO Jian-zhong

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Using the SVR electrical camera, the waveform of detonation wave front on the bottom of main explosive is recorded in multi-points initiation experiments. Some useful experimental results are obtained and analyzed preliminarily.

Key words: SVR camera; multi-points initiation; detonation wave; explosive