第 13 卷 第 4 期 高 压 物 理 学 报 Vol.13,No.4
1999 年 12 月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Dec.,1999

文章编号：1000-5773(1999)04-0268-04

JO-9159 炸药的初始密度对爆轰波反应区宽度影响的实验研究

张振宇[1,2]，王志兵[1,2]，卢芳云[1,2]

(1.中物院流体物理所冲击波物理与爆轰物理实验室，绵阳 621900)

(2.国防科技大学应用物理系，长沙 410073)

摘要：利用电磁法对两种具有不同初始密度的 JO-9159 炸药的爆轰反应区宽度进行了测量。结果表明，对于 JO-9159 这种爆轰反应区非常窄的炸药，既使爆轰达到了定常状态，化学反应仍然与炸药的初始物理状态有关。

关键词：电磁测速法；JO-9159 炸药；爆轰反应区宽度

中图分类号：O381 **文献标识码**：A

1 引 言

非均质炸药在低幅值冲击波作用下的热点形成和发展，与炸药样品的颗粒尺寸和初始密度等物理上的不均匀性密切相关。然而，非均质炸药(特别是化学反应区宽度较窄的炸药)在较高幅值冲击波作用下的化学分解反应是否还是以热点机理为主，至今没有确切定论。

为探讨非均质炸药在高幅值冲击波作用下的化学反应机理，我们用电磁法测量了两种具有不同初始密度的 JO-9159 炸药的爆轰反应区宽度，并对可能影响测量结果的各种因素做了分析。

2 实验装置及测试结果

用 ϕ50mm 的平面波透镜直接起爆被测 JO-9159 炸药样品，起爆压力约 14GPa。在距起爆端约 9～13mm 处的同一拉格朗日位置上埋入两个计长约 9mm 的 U 型粒子速度计，它们分别用厚度为 0.015mm 的铜箔和 0.01mm 的铝箔制成。安装量计时，在量计与炸药样品块以及炸药样品块相互之间用真空油脂粘合，并尽量保证间隙中无气隙存在。将传感器放置于亥姆霍兹线圈系统中心，并保证量计的长度方向与磁场方向和爆轰波运动方向垂直。当量计在爆轰波作用下以速度 $u(t)$运动时，根据法拉第电磁感应定律，在计臂两端将产生感应电动势 $V(t)$

$$V(t) = B \cdot L \cdot u(t) \times 10^{-4}(\mathrm{V})$$

其中 B 为磁场强度(Gs)，L 为量计长度(mm)，$u(t)$为量计运动速度(km/s)。磁场强度的计算根据电磁学中毕奥-萨伐尔定律求解。

收稿日期：1999-02-09；**修订日期**：1999-04-19

基金项目：国防科技重点实验室基金资助(97JS75.1.1KG0101)

作者简介：张振宇(1959—)，男，硕士，副教授.

测量原理的细节及测试线路参见文献[1]。

实验所用信号记录仪器为带宽 500MHz 的 HP-5411D 型数字示波器，它的采样频率为 1Gs/s。这基本上可以满足测量 JO-9159 炸药爆轰反应区粒子速度史的时间精度要求。

我们对两种不同初始密度的 JO-9159 炸药进行了测量，所得结果列于表 1 之中。图 1 给出的是表 1 中第 1 号实验的信号测量波形。

表 1　电磁法实验结果

Tab.1　Results from EMV experiment

Exp.No.	Density /(g/cm³)	Location of gauges /(mm)	Rise time of signals/(ns)		With of reaction zone/(ns)	
			Al gauges	Cu gauges	Al gauges	Cu gauges
1	1.69	9.91	16	20	29	36
2	1.67	13.22	16	22	30	36
3	1.67	10.0		19		37
4	1.86	9.77		22		46
5	1.86	9.90	18	19	45	46
6	1.86	12.0	20	22	45	48

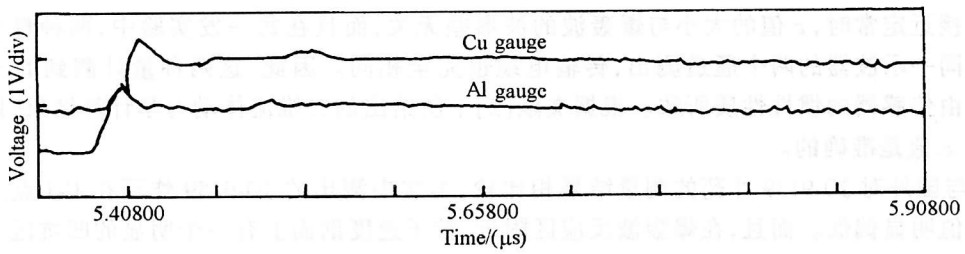

图 1　No.1 实验的测量波形

Fig.1　The induction signal of experimental No.1

3　实验结果的分析和讨论

(1) 如表 1 和图 1 所示，由铝计和铜计测得的爆轰波阵面信号上升时间分别为 16ns 和 20ns 左右。影响该信号上升时间的因素有多种，其中主要有：

1) 流体力学上升时间，即量计的惯性上升时间 T_1。这是把量计加速到与周围介质有相同粒子速度所需要的时间。根据我们用二维有限元流体动力学程序 DYNA2D，对金属量计在爆轰波反应区中的惯性效应所做的二维数值模拟结果，计厚为 0.015mm 的铜计的流体力学上升时间为：$T_1 = 10 \sim 14$ns。计厚为 0.01mm 的铝计的流体力学上升时间为 $T_2 = 2$ns。

2) 爆轰波阵面弯曲及倾斜引起的上升时间 T_2。这个时间主要是由平面波透镜的波形差、样品块的厚度差和爆轰波传播的二维效应造成的。虽然，我们在样品块加工时，严格控制了样品厚度差，在量计安装时将量计位置置于样品的中部以减小二维效应的影响，并用平面波透镜起爆。但是，从图 1 中可以发现，在同一发实验中，两个计的信号起跳时间有近 10ns 的差别，这个时间差只能由波阵面的弯曲和倾斜引起。由于两个计之间的间距与计长基本相同，可以

将这个时间差作为 T_2 的估计值，即 $T_2 = 10\text{ns}$。

3) 传输和记录系统的响应时间 T_3。按照陈沛琪等人的结果，本文实验中所用的 10m 长 SYV-75-9 传输电缆的响应时间为 10ns。另外，对于单次带宽为 500MHz、采样频率为 1Gs/s 的 HP-5411D 型数字示波器，按照带宽与所测波形上升时间的基本法则：上升时间 = 0.35/带宽。它能测量具有 0.7ns 上升时间的波形，但是受 1Gs/s 的采样频率的限制，HP-5411D 型数字示波器的时间分辨率为 1ns，而要给出一个完整的波阵面上升波形，至少需要在波阵面的上升时间内有 3～4 个记录点。因此，记录仪器的上升时间为 3～4ns。即 $T_3 = 11\text{ns}$。

综合上述分析，整个测量系统的总响应时间约为

铜计：$T_0 = (\sum T_i^2)^{1/2} \approx 20\text{ns}$；

铝计：$T_0 = (\sum T_i^2)^{1/2} \approx 15\text{ns}$。

(2) 由于测试系统对波阵面上升的响应时间约 20ns，而 JO-9159 炸药的爆轰反应区宽度大于 30ns，而且，从反应区末端到爆轰产物等熵线之间的过渡，即 C-J 拐点的粒子速度变化率较冲击波阵面的粒子速度上升频率低得多。因此，系统对波后粒子速度的变化是能够响应的。如图 1 所示，在我们的实验记录上得到了清晰的 C-J 拐点。表 1 中所列出的爆轰反应区时宽 τ 值为信号起跳点到 C-J 拐点的时间间隔。从表 1 中所列出的 τ 值结果来看，用不同材料的量计得到的 τ 值不同，这个不同与反应区的宽度成反比，即反应区越窄，τ 值的差别越大。因为当爆轰波接近定常时，τ 值的大小与爆轰波的波形差无关，而且在每一发实验中，两种量计的信号是用同一示波器的两个通道测出，传输电缆也完全相同。因此，这两种量计测到的 τ 值之差只能由传感器的惯性性质所致。根据文献[2]中所给出的二维流体动力学计算结果，用铝计测出的 τ 值是准确的。

(3) 与国外对 JO-9159 炸药的测量结果相比较，本文中测出的 JO-9159 炸药在 C-J 点上的粒子速度值明显偏低。而且，在爆轰波反应区附近，粒子速度剖面上有一个明显的凹坑区。这种 C-J 质速偏低，以及爆轰波反应区附近存在质速凹坑的原因是，没有对金属传感器进行绝缘处理。因为，在爆轰波阵面附近的爆轰产物具有导电性，但不是所有的爆轰产物都能导电，只有那些正在反应、离子还未充分俘获的产物才是导电的。这就是说，爆轰产物中存在一个导电层，其时间宽度为 $\tau_c(\tau_c > \tau)$。当爆轰波阵面到达传感器时，传感器开始运动并产生感应电流，一旦爆轰波阵面后的化学反应开始进行，整个传感器的敏感元件部分都处在爆轰产物的导电层中，这时传感器表面与导电产物之间的接触面积最大，产物的导电层对传感器的敏感元件中的感应电流起了不可忽视的分流作用，从而降低了传感器两端引线上的感应电压，使示波器记录偏低。随着爆轰波向前推进，一旦爆轰产物中的导电层通过并离开传感器的敏感元件部分后，它只与传感器的引线接触，接触面积立刻减小，接触电阻增加，从而对感应电流的分流作用可以忽略，使示波器恢复到正常值附近。因此，未绝缘金属传感器测得的爆轰反应区粒子速度剖面的感应电压信号会有一个明显的幅值偏低区。

在爆轰波反应区内，已测到的粒子速度剖面上的凹坑区以前未见报道，这与整个测试系统的灵敏度有关。在实验中我们发现，若降低数字示波器的灵敏度，此凹坑区会消失，成为信号噪声。

4 结 论

文中通过实验，测出了两种不同初始密度的 JO-9159 炸药样品的爆轰反应区宽度。按照

上面的分析，这个结果是可信的。根据实验结果，高密度炸药样品的爆轰反应区宽度比低密度样品的反应区宽度约宽 10ns。即，对于 JO-9159 这种爆轰反应区非常窄的炸药，既使爆轰达到了定常状态，化学反应仍然与炸药的初始物理状态有关。初始非均质性越强，化学反应就越迅速。

参考文献：

[1] Hayes B. Review of Scientific Instruments, 1981, 52(4): 594.

[2] 张振宇，王忠兵，黄铁军，等. 高压物理学报，1999，13(3)：187.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF INITIAL DENSITY ON WIDTH OF DETONATION REACTION ZONE OF JO-9159

ZHANG Zhen-yu[1,2], WANG Zhi-bing[1,2], LU Fang-yun[1,2]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

(2. *National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: The width of detonation reaction zone of JO-9159 with two different initial densities is measured by embeded electric-magnetic velocity (EMV) gauges. The experimental results show that, for heterogeneous explosives with narrow detonation reaction zone such as JO-9159, the rate of reaction is related to their initial physical properties, even though the detonation wave has reached a steady state.

Key words: EMV gauge; JO-9159 explosive; the width of detonation reaction zone