

文章编号: 1000-5773(2002)02-0111-08

# 用光电法研究钝感炸药 JB-9014 反应区结构

赵同虎, 张新彦, 李 斌, 王贵朝

(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)\*

**摘要:** 报道了用光电法研究炸药反应区结构的原理、实验方法和钝感炸药 JB-9014 的反应区结构。研究表明, 密度为  $1.894\text{g/cm}^3$  的 JB-9014 炸药在平面一维定常爆轰时, 其 Neumann 峰压力为  $36.5\text{GPa}$ , 反应区宽度为  $1.75\text{mm}$ , 反应过程时间为  $0.31\mu\text{s}$ ; 装药密度减少时, Neumann 峰压力、反应区宽度和反应过程时间均减小。

**关键词:** 钝感炸药; 反应区结构; 光电法

**中图分类号:** TQ 564 **文献标识码:** A

## 1 引言

按照 ZND 模型, 爆轰波的前峰为无化学反应的先导冲击波, 冲击波后是连续的反应区, 化学反应在反应区内进行并完成。先导冲击波后的高压为 Neumann 峰或化学峰。反应区终点为爆轰的 CJ 状态(也叫做声速点), 压力为 CJ 状态的压力  $p_j$ 。

TATB 和以 TATB 为主要成分的炸药, 因其钝感、安全, 他们的爆轰性能, 特别是反应区结构引起广大研究者的重视, Sheffield<sup>[1]</sup>、Seitz<sup>[2]</sup>、Lubytsky<sup>[3]</sup> 研究了这些炸药的反应区结构。从这些研究得出, TATB 和以 TATB 为主要成分的钝感炸药其反应区宽, 反应过程时间长。但由于实验装置和测试方法不同, 得出的反应区宽度相差很大, 特别是至今没有人从实验上得到平面一维定常爆轰时 TATB 和以 TATB 为主要成分的钝感炸药的反应区结构, 不清楚装药密度对钝感炸药反应区结构的影响。

JB-9014(TATB/F=95/5)是国内研制的以 TATB 为主要成分的钝感炸药, 我们用光电法研究了 JB-9014 炸药的反应区结构, 得出了平面一维定常爆轰时的反应区结构及装药密度对 JB-9014 反应区结构的影响。

## 2 用光电法研究炸药反应区结构的原理

用光电法研究炸药反应区结构基于下列两种现象。

### 2.1 一些透明有机液体在冲击波作用下产生的光辐射为灰体辐射

研究者发现, 一些透明有机液体, 如  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CHCl}_3$ 、 $\text{CHBr}_3$  等, 在冲击波作用时其冲击波阵面产生光辐射, 冲击波阵面后不发光, 而且冲击波阵面的光辐射为灰体辐射, 可用光电法测量其温度。如 Гогуля<sup>[4]</sup> 用光电法测量了  $\text{CHCl}_3$  在不同冲击压力下的温度, 得出了  $\text{CHCl}_3$  的温度和压力关系曲线。我们用最小二乘法拟合 Гогуля 的实验数据, 得出在冲击作用下的温度和压力关系为

$$p_{\text{CH}} = -300.0833 + 0.6134T_{\text{CH}} - 4.7409 \times 10^{-4}T_{\text{CH}}^2 + 1.7789 \times 10^{-7}T_{\text{CH}}^3 - 3.2019 \times 10^{-11}T_{\text{CH}}^4 + 2.2210 \times 10^{-15}T_{\text{CH}}^5 \quad (1520\text{K} \leq T_{\text{CH}} \leq 4200\text{K}) \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2001-04-29; 修回日期: 2001-07-05

基金项目: 中国工程物理研究院基金(970102); 国防科技重点实验室基金(ZS7501)

作者简介: 赵同虎(1939—), 男, 研究员。

式中:  $p_{\text{CH}}$  为  $\text{CHCl}_3$  中的压力, GPa;  $T_{\text{CH}}$  为  $\text{CHCl}_3$  中的温度, K。

当  $\text{CHCl}_3$  前端连接炸药时, 若知道  $\text{CHCl}_3$  和炸药的冲击雨贡纽关系、炸药爆轰产物的雨贡纽关系, 用光电法测出  $\text{CHCl}_3$  的温度后不仅可计算出  $\text{CHCl}_3$  的其它状态参数, 还可根据界面连续条件计算出炸药和爆轰产物的状态参数及炸药和  $\text{CHCl}_3$  的界面速度。

## 2.2 炸药和连接介质在界面附近的镜像反演现象

根据 ZND 模型, 炸药爆轰波阵面为 Neumann 峰压力, 压力逐渐下降到 CJ 压力, CJ 状态之后爆轰产物的压力随离开 CJ 状态的距离逐渐下降。在界面附近和炸药连接的介质中, 入射的冲击波也有类似的结构, 即镜像反演现象。因此用光电法测出  $\text{CHCl}_3$  的温度并根据上述方法计算出有关参数后, 可以根据镜像反演现象计算出炸药的爆轰波反应区结构。计算原理如图 1 所示。

从图 1 可以推出

$$\tau_{\text{CH}} = \frac{(u_{\text{J}})_{\text{CH}} + (c_{\text{J}})_{\text{CH}} - \bar{D}_{\text{CH}}}{(u_{\text{J}})_{\text{CH}} + (c_{\text{J}})_{\text{CH}} - \bar{u}_{\text{p}}} t_{\text{CH}} \quad (2)$$

式中:  $(u_{\text{J}})_{\text{CH}}$ 、 $(c_{\text{J}})_{\text{CH}}$  分别为  $\text{CHCl}_3$  中对应炸药 CJ 状态的粒子速度和声速, km/s;  $D_{\text{CH}}$  为  $\text{CHCl}_3$  中的冲击波速度, km/s;  $u_{\text{p}}$  为炸药和  $\text{CHCl}_3$  的界面速度, km/s;  $t_{\text{CH}}$  为  $\text{CHCl}_3$  中  $(u_{\text{J}})_{\text{CH}}$ 、 $(c_{\text{J}})_{\text{CH}}$  状态赶上冲击波阵面的时间,  $\mu\text{s}$ ;  $\tau_{\text{CH}}$  为炸药 CJ 状态到达界面的时间,  $\mu\text{s}$ ;  $\bar{D}_{\text{CH}}$  为在  $t_{\text{CH}}$  时间内  $D_{\text{CH}}$  的平均值, km/s;  $\bar{u}_{\text{p}}$  为在  $\tau_{\text{CH}}$  时间内  $u_{\text{p}}$  的平均值, km/s。

Lubytsky<sup>[10]</sup> 根据实验和计算结果, 对  $\text{CHCl}_3$  近似得到

$$\tau_{\text{CH}} = 0.52 t_{\text{CH}} \quad (3)$$

在实验研究中若用光电法测出  $\text{CHCl}_3$  的温度  $T_{\text{CH}}$  和时间  $t'$  曲线, 计算出  $\text{CHCl}_3$  的粒子速度  $u$  和时间  $t'$  的曲线  $u-t'$  后, 取  $t = 0.42 t'$ ,  $u_{\text{p}}(t) = u(t')$ , 即可得出炸药、 $\text{CHCl}_3$  的界面速度曲线  $u_{\text{p}}-t$ 。用(3)式后简化了计算步骤。

从图 1 还可解出

$$\tau_{\text{p}} = \frac{(D_{\text{J}} - \bar{u}_{\text{p}}) \tau_{\text{CH}}}{D_{\text{J}} - u_{\text{B}}} \quad (4)$$

$$a = (D_{\text{J}} - \bar{u}_{\text{B}}) \tau_{\text{p}} \quad (5)$$

式中:  $\tau_{\text{p}}$  为炸药反应过程的时间,  $\mu\text{s}$ ;  $a$  为炸药反应区宽度, mm;  $D_{\text{J}}$  为炸药的 CJ 爆速, km/s;  $\bar{u}_{\text{B}}$  为在  $\tau_{\text{p}}$  时间内炸药反应产物的粒子速度平均值, km/s。

若知炸药的爆速  $D_{\text{J}}$ , 从炸药、 $\text{CHCl}_3$  的界面速度曲线  $u_{\text{p}}-t$  中找出  $\tau_{\text{CH}}$  及  $\bar{u}_{\text{p}}$ , 由界面连续条件解出  $\bar{u}_{\text{B}}$ , 就可由(4)式、(5)式得出炸药的反应区参数  $a$  和  $\tau_{\text{p}}$ 。

## 3 实验装置和测试方法

### 3.1 实验装置

用光电法研究 JB-9014 炸药反应区结构采用的实验装置如图 2 所示。用真空油脂将铝箔贴在 JB-9014 炸药样品表面, 为防止  $\text{CHCl}_3$  泄露, 在大铝环和 JB-9014 炸药样品间用真空泥密封。在小铝环中心  $\phi 2\text{mm}$  的孔中插入初始长度为 50m、数值孔径为 0.10 的 6 根石英光导索组件。

采用雷管、传爆药柱、 $\phi 100\text{mm}$  平面波透镜和  $\phi 100\text{mm} \times 10\text{mm}$  JO-9159 药柱(HMX/粘结剂/钝感

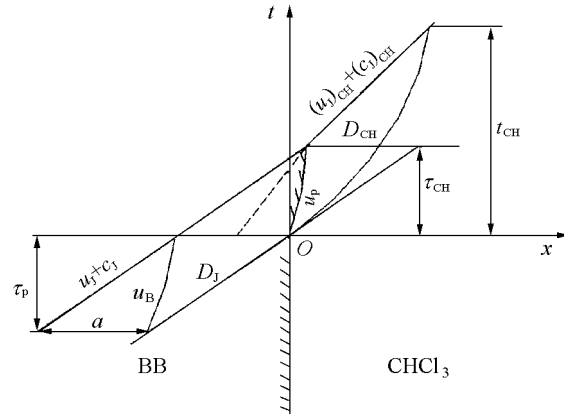


图 1 计算炸药反应区结构的原理示意图  
Fig. 1 A sketch of the mode for calculating detonation reaction-zone structure

剂=95/4.3/0.7)系统起爆 JB-9014 炸药样品。在 JB-9014 炸药样品内产生压力为 33GPa 的超压爆轰,按过去的实验结果<sup>[5]</sup>估计,JB-9014 炸药在 10~20mm 内达到正常爆轰,可研究 JB-9014 炸药在平面一维定常爆轰时的反应区结构。采用平均密度为 1.894g/cm<sup>3</sup> 的  $\phi 100\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、 $\phi 100\text{mm} \times 35\text{mm}$ 、 $\phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$  的 JB-9014 药柱,研究 JB-9014 炸药平面一维定常爆轰时的反应区结构。用平均密度分别为 1.894、1.865、1.842g/cm<sup>3</sup> 的  $\phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$  JB-9014 药柱研究装药密度对 JB-9014 炸药反应区结构的影响。

### 3.2 测试方法

为了提高温度测量精度,采用六通道瞬态光学高温计测量 CHCl<sub>3</sub> 的温度,高温计的两个通道使用 GDB-240 光电倍增管,响应波长范围为 380~1150nm,选用的工作波长为 780.5、916.0nm;另四个通道使用 GDB-55 光电倍增管,响应波长范围为 380~850nm,选用的工作波长为 463.5、517.5、630.0、705.0nm。

采用黑体炉标定高温计和光导索组件系统。考虑到在爆轰实验中光导索逐渐变短,每次实验前用钨灯进行标定。根据钨灯标定时信号幅度的变化,对标定常数进行修正。六通道光学瞬态高温计测量温度的方法详见文献<sup>[6,7]</sup>。

## 4 分析与讨论

### 4.1 实验结果

用六通道瞬态光学高温计按图 2 装置测量的一发实验的 6 个波长的典型信号曲线如图 3 所示,按测试原理计算的两种情况下 JB-9014 炸药-CHCl<sub>3</sub> 的界面速度如图 4 所示。

### 4.2 实验结果的分析与讨论

#### 4.2.1 测试结果的可信性

从图 3 看出,高温计的两个通道测到形状类似的信号,符合普朗克公式,信号前沿上升快,信号曲线虽有振荡,但不影响对信号曲线的测量,说明所用实验装置和测试系统较好地记录了 CHCl<sub>3</sub> 中的光辐射。从图 4(a)看到,两发  $\phi 100\text{mm} \times 35\text{mm}$  JB-9014 药柱实验得到的界面速度曲线形状一致,两条曲线间的纵向最大差为 0.1km/s,相对差为 3.8%,说明实验结果重复。

#### 4.2.2 JB-9014 炸药反应区结构

##### 4.2.2.1 Neumann 峰

按爆轰理论计算,密度为 1.894g/cm<sup>3</sup> 的 JB-9014 炸药的爆压  $p_j$  为 28GPa。按图 4 中的界面速度峰值计算的 JB-9014 中的压力列于表 1,均大于 28GPa,说明 JB-9014 炸药爆轰时存在高于 CJ 爆压的 Neumann 峰,取表 1 中列出的压力为各种条件下的 Neumann 峰压力  $p_N$ 。

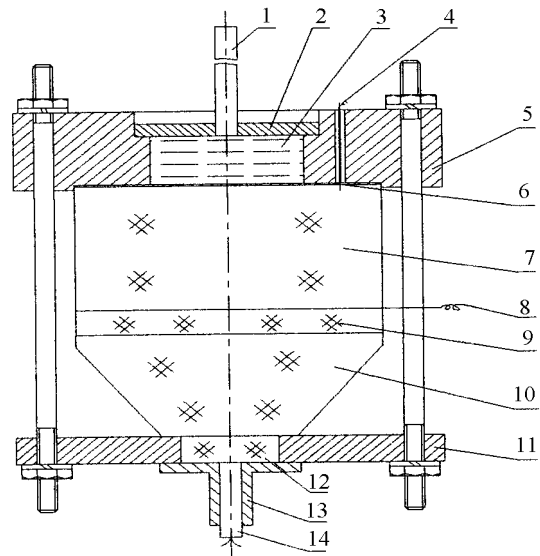


图 2 实验装置示意图

1. 光导索; 2. 小铝环; 3. CHCl<sub>3</sub>; 4. 电探针 2;
5. 铝固定环; 6. 0.02mm 厚铝箔; 7. JB-9014 药柱;
8. 电探针 1; 9.  $\phi 100\text{mm} \times 10\text{mm}$  (JO-9159) 药柱;
10.  $\phi 100\text{mm}$  平面波透镜; 11. 底板;
12.  $\phi 32\text{mm} \times 11\text{mm}$  传爆药柱; 13. 雷管套; 14. 雷管

Fig. 2 Experimental set-up

1. Optic fiber; 2. Small aluminum ring; 3. CHCl<sub>3</sub>;
4. Electric probe 2; 5. Aluminum fixation ring;
6. 0.02mm thick aluminum foil; 7. JB-9014;
8. Electric probe 1; 9.  $\phi 100\text{mm} \times 10\text{mm}$  (JO-9159);
10.  $\phi 100\text{mm}$  plane wave lens; 11. Base plate;
12.  $\phi 32\text{mm} \times 11\text{mm}$  booster;
13. Detonator cover; 14. Detonator

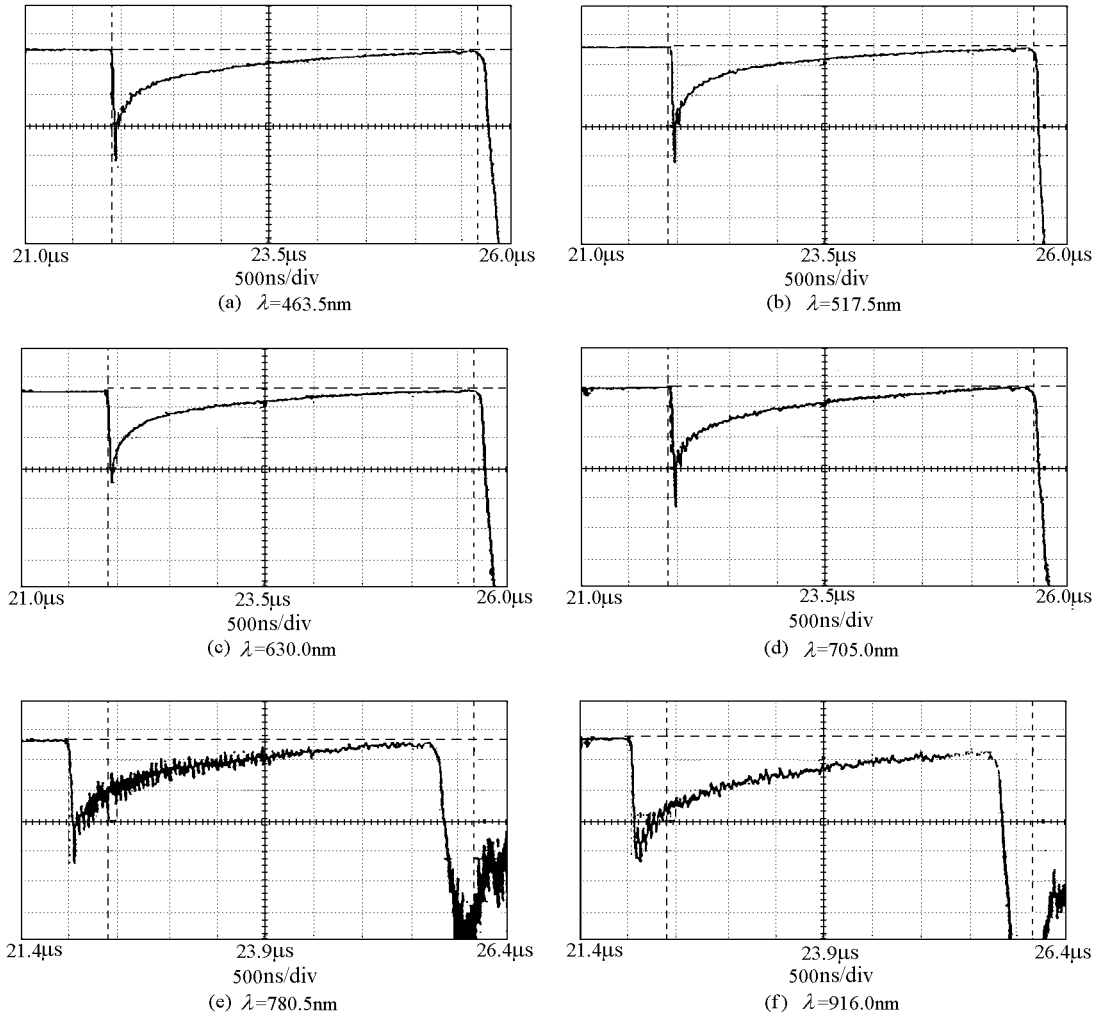


图 3 用六通道光学高温计测量的典型信号曲线

Fig. 3 Typical records of six-channel optical pyrometer

#### 4. 2. 2. 2 JB-9014 炸药的反应区宽度

从图 4 的界面速度曲线中看不到明显的对应 ZND 模型的反应区终点的界限。为了验证我们的实验结果是否反映 JB-9014 炸药的特征,查阅了其它以 TATB 为主要成分的钝感炸药反应区结构的实验结果。Seitz 等人<sup>[2]</sup>用激光速度干涉仪测量的 PBX-9502(TATB/Kel-F800=95/5)和 LiF、PMMA 的界面速度曲线如图 5 所示,Sheffield 等人<sup>[1]</sup>用 ORVIS 测量的 PBX-9502-铜箔-水系统装置在铜箔、水间的界面速度曲线如图 6 所示,均看不到明显的反应区终点界限,说明以 TATB 为主要成分的钝感炸药没有明显的反应区终点。

我们对图 4 所示的界面速度曲线求出对时间的导数  $du_p/dt$ ,得到的典型曲线如图 7 所示。曲线虽不光滑、有振荡,但消除振荡后由斜率不同的几段折线组成,而且折线斜率逐渐减小,其中 DE 段接近水平。按 DE 段对应 JB-9014 爆轰时 CJ 点后流场分布,ABCD 段对应反应区粒子速度变化,取 D 点的时间为  $\tau_{CH}$ ,此时的界面速度为反应区终点到达界面时的界面速度  $u_p$ ,由(4)式、(5)式计算的不同条件下 JB-9014 反应过程时间  $\tau_p$  和反应区宽度  $a$  列于表 1。

由反应区的界面速度的导数由几段斜率不同的线段组成,而且斜率逐渐减小,说明在反应区内反应

速率大小不一,致使在先导冲击波附近粒子速度衰减快,CJ 点附近粒子速度衰减慢。

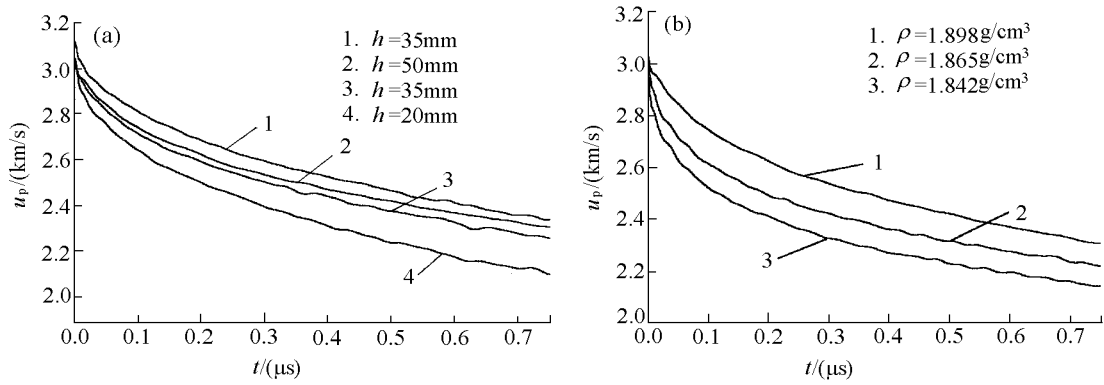


图 4 计算的界面速度曲线

Fig. 4 Interface velocity curves obtained from JB-9014 explosive

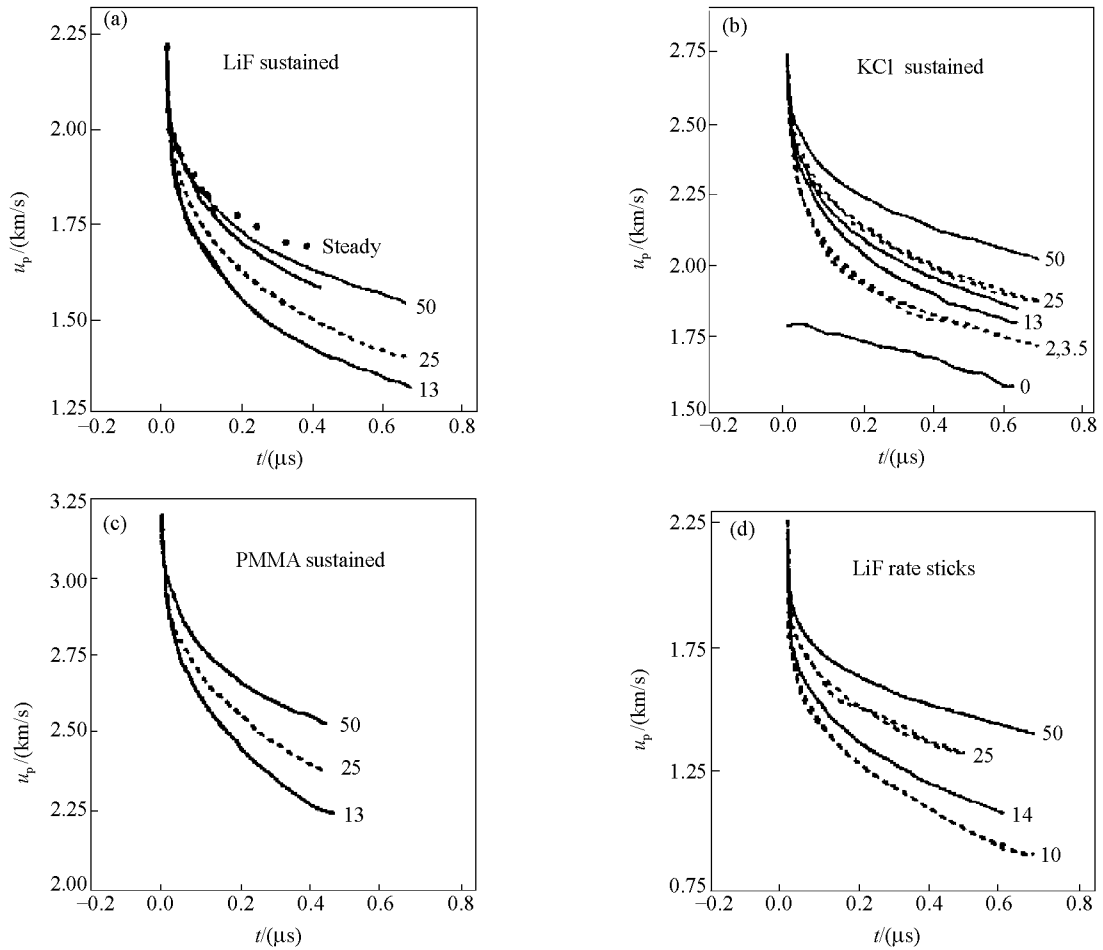


图 5 Seitz 测量的界面速度曲线<sup>[2]</sup>

Fig. 5 Interface velocity curves measured by Seitz with F-P from PBX-9502 experiments<sup>[2]</sup>

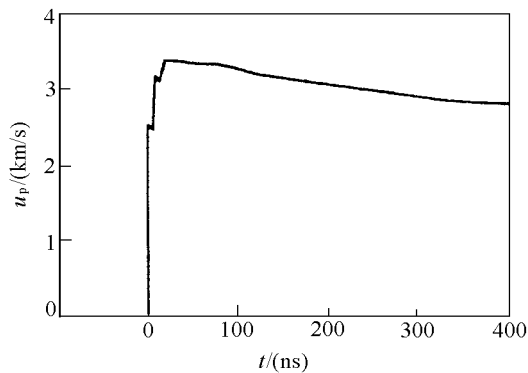


图6 Sheffield用ORVIS测量的界面速度曲线<sup>[1]</sup>  
Fig. 6 Interface velocity curves measured by Sheffield with ORVIS from the  $\phi 25\text{mm} \times 25\text{mm}$  PBX-9502 experiment<sup>[1]</sup>

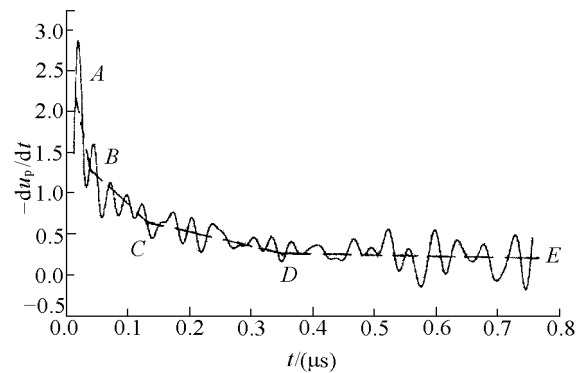


图7 典型的界面速度导数曲线  
Fig. 7 Typical derivative curve of interface velocity

表1 计算的不同条件下JB-9014炸药反应区参数

Table 1 Parameters of reaction zone calculated for various charger of JB-9014

Feature of the charger	$p_N$ /(GPa)	$a$ /(mm)	$\tau_p$ /( $\mu\text{s}$ )
Thick change	20	36.0	0.26
$h$ /(cm)	35	37.0	0.31
	50	36.0	0.31
Density change	1.894	36.0	0.31
$\rho_B^0$ /(g/cm <sup>3</sup> )	1.865	35.2	0.20
	1.842	33.6	0.17

#### 4.2.3 JB-9014平面一维定常爆轰时的反应区结构

从图4(a)看出,厚度为20mm的界面速度曲线衰减快,由表1可知, $\phi 100\text{mm} \times 20\text{mm}$  JB-9014药柱的反应区宽度小,反应过程的时间短,说明由于实验中采用JO-9159炸药起爆,JB-9014药柱厚度为20mm时仍未达到定常爆轰。厚度为50mm的界面速度曲线在厚度为35mm的两条界面速度曲线之间,而且三条曲线的形状一致,同一时间处界面速度的最大相对差很小(3.8%),在测试误差范围之内(六通道高温计测量温度的均方根相对误差为3%<sup>[6]</sup>),我们认为厚度为35mm和厚度为50mm的界面速度曲线一致。从表1看出,厚度为35mm和50mm的反应过程时间、反应区宽度、Neumann峰压力基本一致。说明JB-9014药柱厚度为35mm和50mm处的爆轰波为平面一维定常爆轰波,表1中所列的药柱厚度为35mm和50mm时的反应区参数为JB-9014平面一维定常爆轰的反应区参数。即从实验得出密度为1.894g/cm<sup>3</sup>的JB-9014平面一维定常爆轰时的Neumann压力为36.5GPa,反应区宽度为1.75mm,反应过程的时间为0.31 $\mu\text{s}$ 。

Sheffield<sup>[1]</sup>等人用雨贡纽曲线相交的方法得到PBX-9502的反应区宽度为2.1mm,反应过程时间为0.28 $\mu\text{s}$ 。Tarver<sup>[8]</sup>测量的密度为1.90g/cm<sup>3</sup>的LX-9(TATB/Kel-F=92.5/7.5)炸药的反应区宽度为2mm。Seitz<sup>[2]</sup>用实验和数值模拟相结合的方法推出PBX-9502平面一维定常爆轰时的反应区宽度为2mm,反应过程时间为0.30 $\mu\text{s}$ 。虽然这些数据都不是从实验上得到的平面一维定常爆轰时的反应区参数,但可作为参考。他们得到的以TATB为主要成分的炸药反应区结构和我们的实验结果基本一致,说明我们得到的JB-9014平面一维定常爆轰时的反应区结构是可信的。

#### 4.2.4 装药密度对反应区结构的影响

从图 4(b)所示装药密度分别为 1.894、1.865、1.842g/cm<sup>3</sup> 时的界面速度曲线看出,装药密度越小初始阶段界面速度下降越快。从表 1 看出装药密度为 1.865、1.842g/cm<sup>3</sup> 时的 Neumann 峰压力分别为 35.2、33.6GPa,反应区宽度分别为 1.07、0.92mm,反应过程时间分别为 0.20、0.17μs,和上述密度为 1.894g/cm<sup>3</sup> 的反应区结构对比可以看出,JB-9014 装药密度降低时 Neumann 峰压力、反应区宽度和反应过程的时间均减小。为鉴别我们结果的正确性,查阅了有关资料。Tarver<sup>[8]</sup>提供的密度为 1.90 g/cm<sup>3</sup>的 LX-7 反应区宽度为 2mm,密度为 1.80g/cm<sup>3</sup> 的纯 TATB 反应区宽度为 0.5mm。Lubyatinsky<sup>[3]</sup>测量的密度为 1.849g/cm<sup>3</sup> 的 TATB 反应区宽度为 0.95mm。张振宇<sup>[9]</sup>用电磁法得到 JO-9159 炸药密度降低时,反应过程时间减小。这些数据虽不系统,但可以说明炸药密度降低时反应区宽度和反应过程时间减小。分析认为由于密度小时装药具有较大的孔隙度,在先导冲击波的作用下形成的热点多,反应速率大,反应完成快,因而反应宽度和反应过程时间减小。又从爆轰理论知  $p_N = 2p_J$ ;对同种炸药,密度越低爆压  $p_J$  越小,可得出同种炸药密度越低, $p_N$  越小。说明我们的结果正确地表达了装药密度对反应区结构的影响。

## 5 结 论

(1) 实验结果说明,光电法是研究炸药反应区结构较好的方法,方法简便,炸药不用剖开,信号前沿上升快。缺点是测试精度依赖于多通道光学瞬态高温计的精度和工作介质有关参数的精度。

(2) 实验结果说明,JB-9014 炸药有化学反应区存在,ZND 模型可以用来描述 JB-9014 炸药的反应过程。但反应区的终点界限不明显,说明 ZND 模型需要改进。

(3) 从实验得出密度  $\rho = 1.894\text{g/cm}^3$  的 JB-9014 炸药平面一维定常爆轰时 Neumann 峰压力为 36.5GPa,反应区宽度为 1.75mm,反应过程时间为 0.31μs。

(4) JB-9014 炸药的密度减小,Neumann 峰压力、反应区宽度和反应过程时间均减小。

## 参考文献:

- [1] Sheffield S A, Bloomquist D D. Subnanosecond Measurements of Detonation Fronts in Solid High Explosives [J]. J Chem Phys, 1984, 80(8): 3831.
- [2] Seitz W L, Stacy H L, Engelke Ray, et al. Detonation Reaction-Zone Structure of PBX-9502 [A]. Ninth Symposium (Int.) on Detonation [C]. Portland, Orgegen: OCNR 113291-7, 1989. 675.
- [3] Lubyatinsky S N, Loboiko B G. Study of Chemical Reaction Zone Structure in Detonating High Explosive Using a Photoelectric Technique [A]. Russian-American Symposium on Energetic Materials [C]. Pleasanton, California, Livermore, 1994.
- [4] Гоголя М Ф, Воскобойников И М, Буланов И В. Температуры Ударного Сжатия Хлорпрозводных Метана [J]. Химическая Физика, 1986, 5(10): 1426.
- [5] 李大红. 凝聚炸药中超压爆轰的实验研究 [A]. 爆轰研究论文集(第一卷) [C]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1993. 331.
- [6] Wang Guichao, Yu Quanyou, Lü Xiusheng, et al. An Instantaneous Optical Pyrometer with Six Channels for the Shock Temperature Measurement in Materials [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1988, 2(3): 277-284. (in Chinese)  
王贵朝, 余泉有, 吕秀生, 等. 测量冲击温度的六通道瞬态光学高温计 [J]. 高压物理学报, 1988, 2(3): 277-284.
- [7] Tan Hua. Shock Temperature Measurements for Metals( I )—Calibration of Pyrometers and Data Reduction for the

- Temperature at the Interface [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1994, 8(4): 254-263. (in Chinese)
- 谭 华. 金属的冲击波温度测量(I)——高温计的标定和界面温度的确定 [J]. 高压物理学报, 1994, 8(4): 254-263.
- [8] Tarver C M, Breithaupt R D, Kury J W. Current Experimental and Theoretical Understanding of Detonation Waves in Heterogeneous Solid Explosives [A]. Eighth Symposium(Int.) on Detonation [C]. Albuquerque, NM, Albuquerque Convention Center, 1985. 692.
- [9] ZHANG Zhen-yu, WANG Zhi-bing, LU Fang-yun. Experimental Study of the Effect of Initial Density on Width of Detonation Reaction Zone of JO-9159 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(4): 268-271. (in Chinese)
- 张振宇, 王志兵, 卢芳云. 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 [J]. 高压物理学报, 1999, 13(4): 268-271.

## DETONATION REACTION-ZONE STRUCTURE OF JB-9014

ZHAO Tong-hu, ZHANG Xin-yan, LI Bin, WANG Gui-chao  
(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,  
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The structure of reaction-zone of JB-9014 explosive was investigated using photoelectric technique. For one dimensional steady detonation wave of JB-9014 ( $1.894\text{g}/\text{cm}^3$ ), the Neumann spike pressure is 36.5 GPa, the width of reaction-zone is 1.75 mm, and the period of reaction is 0.31  $\mu\text{s}$ . It was found that the width of reaction-zone and the period of reaction decrease with explosive density.

**Key words:** insensitive explosive; reaction-zone structure; photoelectric technique