

文章编号:1006-9941(2021)05-0406-08

# 基于 Mushroom 试验的炸药爆轰反应速率方程参数校验

段英良,韩勇,冉剑龙,谭凯元,咎继超,贾路川

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621999)

**摘要:** 为了更准确的校验炸药爆轰反应速率方程参数,以 HMX/TATB 混合炸药 PBX-1 为研究对象,采用 Mushroom 试验方法,研究了炸药在不同传爆直径下的拐角传爆特性,并采用 LS-DYNA 程序利用拉式试验标定的三项式点火增长模型参数对 Mushroom 试验进行了数值模拟,通过观察爆轰波的成长和传播历程以及拐角参量的对比,校验已标定反应速率模型参数的准确性。对比试验结果和数值模拟结果发现,Mushroom 试验可以反映出爆轰波沿不同方向上爆轰成长过程的差异,进而证明了通过 Mushroom 试验校验炸药的反应速率模型参数是可行的。

**关键词:** 爆炸力学;化学反应速率;蘑菇试验;拐角性能;点火增长模型

**中图分类号:** O382

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021009

## 1 引言

炸药的爆轰过程十分复杂,CJ理论和ZND模型可以解释很多的爆轰现象而得到广泛应用,但是其在描述非定常爆轰现象存在较大的差异<sup>[1]</sup>,如炸药受到冲击刺激下起爆过程,需要几微秒到十几微秒的时间和几毫米的距离,才能逐渐形成稳定的CJ爆轰波,该过程涉及反应动力学和流体动力学的耦合,需要考虑化学反应的释能速率,建立准确的唯象化学反应速率模型,有效描述爆轰建立过程一直是爆轰领域研究的热点<sup>[2-3]</sup>。国内外也相应形成了多种反应速率模型,有与压力相关的模型,如三项式点火增长模型<sup>[4]</sup>、DZK模型<sup>[5]</sup>等,有与冲击波强度相关的模型,如SURF模型<sup>[6]</sup>等,也有与熵相关的模型,如CREST模型<sup>[7]</sup>。然而这些模型的反应速率参数十分众多,参数的标定一般是根据基于一维平面假设的冲击起爆Lagrange试验数据进行确定,是唯象的和带有经验性的,如国内外学者通

过气炮或者化爆加载的方式采用嵌入式锰铜压力计<sup>[8]</sup>或者电磁粒子速度计<sup>[9]</sup>获得了RDX<sup>[10]</sup>、HMX<sup>[11-12]</sup>、CL-20<sup>[13]</sup>、TATB<sup>[14-15]</sup>等系列炸药的三项式点火增长反应速率参数。但是在这些参数的准确性校验方面还是停留在判断其是否能再现及预测炸药的冲击起爆过程中宏观压力或者粒子速度的成长历程。通过冲击起爆试验标定一组系数,然后再再现这类实验的结果并不困难,但是其是否具有更大的适用性值得深入探讨,而对反应速率进行较全面的实验检验和比较评价工作也越来越受到重视。Taver等通过冰壶试验中拐角死区的范围<sup>[16]</sup>、斜起爆试验中临界失效直径<sup>[17]</sup>等,对已标定的三项式点火增长模型参数进行验证,Whitworth<sup>[18]</sup>通过横向起爆试验中PBX9501与PBX9502传爆波形界面模拟验证CREST模型参数。

Mushroom试验最早由Hill设计<sup>[19]</sup>,用于研究钝感炸药爆轰波的拐角传播特性,韩勇<sup>[20]</sup>等开展了PBX-9404和PBX-9502炸药的Mushroom实验和数值计算研究,认为炸药拐角能力或者爆轰死区范围与代表炸药冲击起爆过程的化学反应速率有较大关系。Francois<sup>[21]</sup>等通过Onionskin试验(类似于Mushroom试验)研究了PBX9501药球表面爆轰波的出射历程,认为波形差除了与尺寸有关外,还与不同方向上到稳态爆轰的建立过程的差异密切相关。由于Mushroom试验或者Onionskin试验中爆轰波的传播是发散的,

收稿日期:2021-01-06;修回日期:2021-02-28

网络出版日期:2021-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助(11902298)

作者简介:段英良(1987-),男,助理研究员,主要从事含能材料爆轰性能研究。e-mail:duanyingliang@caep.cn

通信联系人:韩勇(1976-),男,研究员,主要从事凝聚态爆轰物理研究。e-mail:y\_han76@126.com

引用本文:段英良,韩勇,冉剑龙,等.基于Mushroom试验的炸药爆轰反应速率方程参数校验[J].含能材料,2021,29(5):406-413.

DUAN Ying-liang, HAN Yong, RAN Jian-long, et al. Parameter Validation of the Detonation Reaction Rate Model of Explosives Based on Mushroom Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(5):406-413.

各角度传播方向上炸药所受的压力和传播速度各不相同,与准一维 Lagrange 试验相比其反映炸药反应速率的信息也更为丰富。

因此,本研究设计了不同的传爆尺寸的 Mushroom 试验,通过爆轰波的成长和拐角传播过程对 Lagrange 试验标定的三项式点火模型参数的准确性进行校验。

## 2 试验与数值模拟

### 2.1 试验装置与原理

Mushroom 的试验原理如图 1 所示。半球形被测试验炸药在小直径传爆药的作用下起爆,当爆轰波到达半球形炸药的外表面时,利用高速转镜式扫描相机,记录爆轰波的出射轨迹。由于越往半球的两侧,波形叠加越严重,通过反射镜,两侧 20°左右的测试输出波形被有效放大到 DEF 段(图 1b),波形叠加现象大大降低。通过对底片波形(图 1c)进行数据处理,可以获得表征爆轰波成长 and 拐角传播历程的三个特征参量(图 1d):爆轰波最先出射角( $\theta_m$ )、熄爆角( $\theta_b$ )及延迟时间(爆轰波到达半球形炸药外表面各位置的最大时间差)。

借助大型工具显微镜对图 1c 的试验底片进行数

据处理,并通过游标卡尺测量炸药半球的半径  $r$  及半球边缘距离反光镜的水平距离  $c$ ,以半球顶点位置处的角度为  $0^\circ$ ,位置坐标为  $(X_0, Y_0)$ ,底片中间主波形上任一点的坐标为  $(X_1, Y_1)$ ,该位置处对应炸药半球的角度如公式(1)所示。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{X_1 - X_0}{r}\right) \quad (1)$$

底片反射镜中副波形上任一点的读数为  $(X_2, Y_2)$ ,利用光学反射原理,利用角度参量将其与主波形信息统一,该位置处对应的炸药半球的角度如公式(2)和公式(3)所示。

$$\theta = \arccos\left(\frac{X_2 - c - r}{r}\right) \quad X_2 > 0 \quad (2)$$

$$\theta = -\arccos\left(\frac{|X_2| - c - r}{r}\right) \quad X_2 < 0 \quad (3)$$

### 2.2 试验条件

本研究对象采用 HMX/TATB 混合炸药 PBX-1 (HMX/TATB/binder=87/7/6),尺寸为 SR25 mm,为保证传爆界面的阻抗匹配,传爆药也采用 PBX-1 炸药,直径分别是  $\Phi 10$  mm 和  $\Phi 15$  mm。为保证底片波形具有

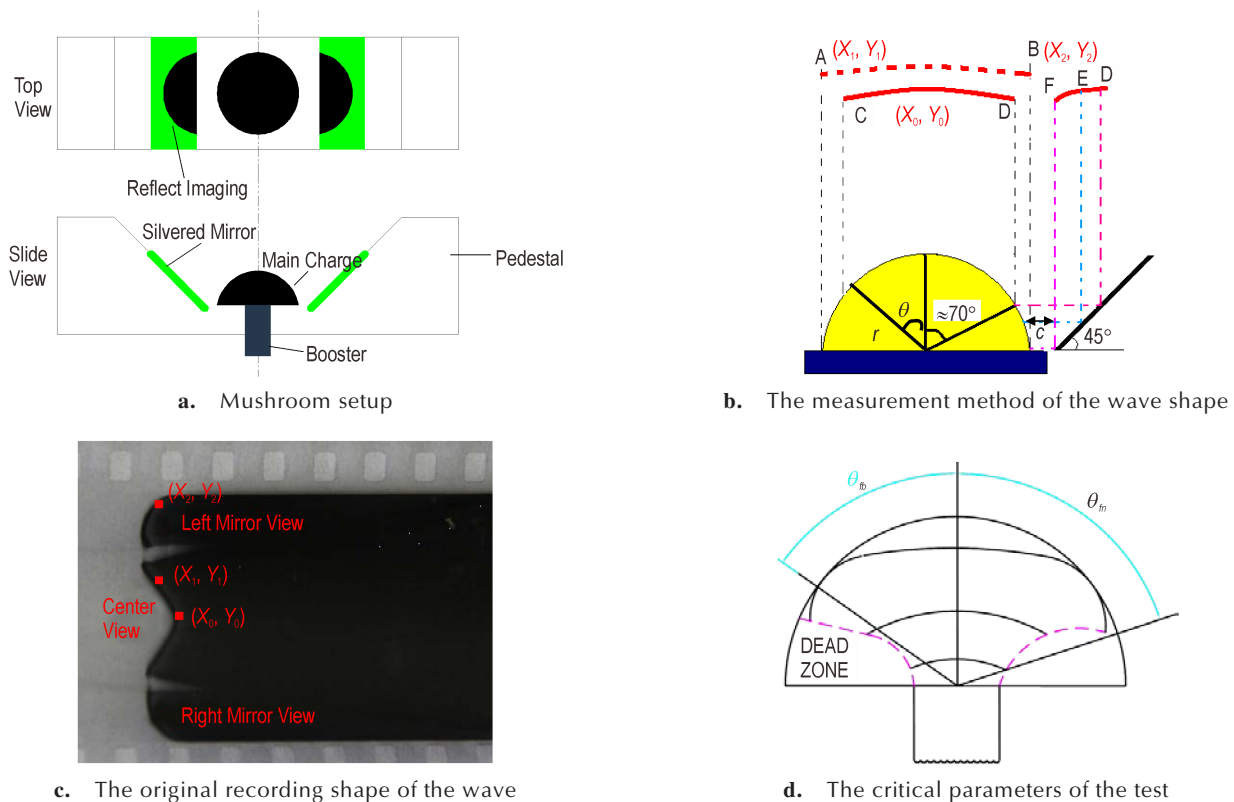


图 1 Mushroom 试验原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of mushroom test

较好的分辨率, 相机转速采用  $150000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 相应的试验条件如表 1 所示。

表 1 Mushroom 试验条件

No.	Booster explosive		Primary explosive	
	Materials	Dimension/mm	Materials	Dimension/mm
1#	PBX-1	$\Phi 15 \times 50$	PBX-1	SR25
2#	PBX-1	$\Phi 10 \times 50$	PBX-1	SR25

### 2.3 数值模拟

本研究通过爆轰波的成长和传播历程来校验已标定炸药的化学反应速率参数的准确性, 采用 LS-DYNA 程序对 Mushroom 试验进行了数值模拟。PBX-1 炸药的未反应炸药和反应产物的状态方程均采用 JWL 形式表述, 如公式 (4) 所示。

$$P = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \frac{\omega C_V T}{V} \quad (4)$$

式中,  $p$  代表反应体系压力, GPa;  $v$  代表反应体系的相对体积,  $C_V T$  代表体系能量,  $A, B, R_1, R_2, \omega$  为待定的状

态方程参数, 具体值如表 2 所示。

表 2 PBX-1 炸药的状态方程参数

EOS	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$C_V/\text{GPa}\cdot\text{k}^{-1}$
Unreacted JWL	$9.32 \times 10^4$	-5.35	14.10	1.40	0.88	$2.78 \times 10^{-3}$
Product JWL	$8.52 \times 10^2$	18.02	4.60	1.30	0.38	$1.00 \times 10^{-3}$

传爆药采用高能炸药燃烧模型, 采用 JWL 状态方程描述, 炸药半球采用带化学反应速率的 Lee-Taver 的三项式点火增长模型<sup>[22]</sup>, 反应速率模型如公式 5 所示。

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d P^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g P^z \quad (5)$$

$$0 < \lambda < F_{ig\max} \quad 0 < \lambda < F_{G1\max} \quad F_{G2\min} < \lambda < 1$$

式中,  $\lambda$  代表化学反应程度,  $\rho$  代表密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $I, a, b, x, G_1, c, d, y, G_2, e, g, z, F_{ig\max}, F_{G1\max}, F_{G2\min}$  为反应速率参数, 本研究所需校验的参数已通过冲击起爆的拉式试验进行了标定<sup>[23]</sup>, 具体参数如表 3 所示。

表 3 PBX-1 炸药的反应速率方程参数

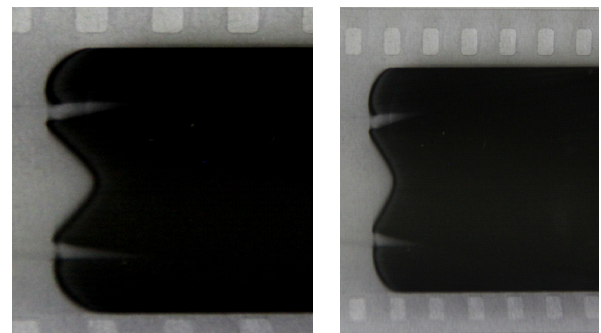
$I/\mu\text{s}$	$a$	$b$	$x$	$G_1/\text{GPa}^{-2}\cdot\mu\text{s}^{-1}$	$c$	$d$	$y$
$7.40 \times 10^{13}$	0.00	0.667	20.0	0.0048	0.667	0.27	2.0
$G_2/\text{GPa}^{-2}\cdot\mu\text{s}^{-1}$	$e$	$g$	$z$	$F_{ig\max}$	$F_{G1\max}$	$F_{G2\min}$	
0.040	0.333	1.00	2.0	0.3	0.5	0.5	

## 3 结果与讨论

### 3.1 试验结果

在不同直径的传爆药的起爆作用下, PBX-1 炸药半球中爆轰波到达表面的历程被高速扫描相机实时记录, 如图 2 所示, 从中可以初步看出爆轰波最先到达位置靠近炸药半球的底部, 而球顶位置是爆轰波最后到达的位置, 传爆药柱直径为  $\Phi 15 \text{ mm}$  和  $\Phi 10 \text{ mm}$  两种情况下, 爆轰波从炸药半球出射的形状基本相似, 但相比之下,  $\Phi 10 \text{ mm}$  直径的传爆药柱起爆下炸药半球中爆轰波的延迟时间缩短较大。

采用大型工具显微镜 (放大倍率 30), 对图 2 中的底片数据进行更为详细的判读, 采用公式 (1)~公式 (3), 对数据进行处理, 获得了两发试验中炸药半球不同位置处 (角度) 爆轰波形的出射 (到达) 历程图, 具体如图 3 所示。



a.  $\Phi 15 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$       b.  $\Phi 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$

图 2 不同传爆直径下炸药半球表面的波形出射底片

Fig. 2 Negative films of the detonation breakout from hemispheres with different detonation propagation diameters

从图 3 中可以看出两种传爆尺寸下该 PBX-1 炸药的熄爆角均为  $90^\circ$ , 表明该炸药爆轰波具有较好的拐角传播和绕射能力。当传爆药柱采用  $\Phi 15 \text{ mm}$  药柱时, 其出射角为  $78.4^\circ$ , 延迟时间为  $0.672 \mu\text{s}$ , 而当传爆

药柱的直径为  $\Phi 10$  mm 时,其出射角为  $75.5^\circ$ ,延迟时间为  $0.393 \mu\text{s}$ ,可以看出传爆药尺寸对炸药的爆轰波的拐角传播过程具有一定的影响,在较大的传爆尺寸下,爆轰波更容易发生拐角传爆,爆轰波以更快的时间到达半球表面,从而表现为与到达半球顶部爆轰波的时间差变大。

在相同的传爆尺寸下,与 HMX 基炸药<sup>[24]</sup>相比,少量 TATB 炸药的加入,使得 PBX-1 炸药的拐角能力变弱,而文献[24]中 HMX 基炸药的出射角可以达到  $90^\circ$ ,这可能与钝感 TATB 的加入改变了炸药的化学反应速率有关。

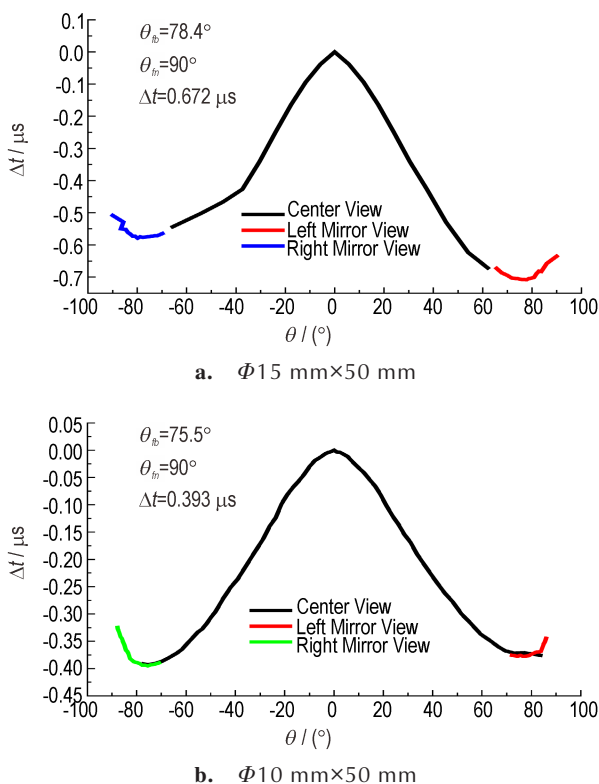


图3 不同传爆直径下炸药半球表面的波形出射轨迹图  
Fig.3 the detonation wave breakout from the surface of hemispheres with different detonation propagation diameters

### 3.2 化学反应速率参数校验

通过 LS-DYNA 对 Mushroom 试验进行了数值模拟,获得了  $\Phi 15$  mm 和  $\Phi 10$  mm 传爆直径下 PBX-1 炸药的 Mushroom 试验中爆轰波传播过程,如图 4 所示,通过爆轰波的传播历程、爆轰波的出射状态以及侧向爆轰波的成长过程对 PBX-1 炸药参数的准确性进行校验。

从图 4 给出的不同时刻爆轰波的传播轨迹可以看出,当爆轰波从传爆药柱传入炸药半球中时,爆轰波除

沿轴向向前传播外,还沿着侧向进行扩展,具有典型的二维传播效应。相比  $\Phi 10$  mm 直径的传爆直径,  $\Phi 15$  mm 直径的传爆药起爆下,炸药半球中爆轰波沿侧向成长的更快,爆轰波阵面为椭球形,在  $8.12 \mu\text{s}$  爆轰波即传播至半球侧面的表面,而相同情况下在  $\Phi 10$  mm 直径的传爆药起爆下,爆轰波阵面为类球形,在  $8.34 \mu\text{s}$  爆轰波才传播至半球表面,爆轰波沿侧向传播过程慢了长达  $0.20 \mu\text{s}$ ,与试验结果中的延迟时间显著减小相吻合。从图 4 中还可以看出,传爆药柱直径无论是  $\Phi 15$  mm 还是  $\Phi 10$  mm,炸药半球的底部靠近传爆药柱的部位存在小范围的局部爆轰死区,这是爆轰波在拐角绕射的过程中所造成的局部不爆轰现象,但是试验中只能观察到半球表面位置的爆轰过程,无法实测该区域发生的局部不爆轰现象。

由于炸药半球中爆轰是散心的,不同方向上压力不同,导致与压力相关的化学反应速率也不尽相同,因此,爆轰波的侧向的发展过程与化学反应速率息息相关。在炸药半球中沿着轴向和侧向选取不同的节点单元,获得了 PBX-1 半球沿不同方向上的爆轰成长过程,如图 5 所示。从图 5 中可以看出在爆轰波从传爆药柱进入炸药半球中的初始阶段,在半球中心处的入射压力接近 15 GPa,根据 PBX-1 炸药的 Pop 关系,在此压力下,其到爆轰距离较短<sup>[25]</sup>,图 5b 也直观的反映出沿轴向方向,约 2.5 mm 位置处炸药已处于稳态爆轰,爆压已达到 CJ 压力;而沿着底面的位置点(侧向方向,图 5c 所示),由于受到侧向稀疏波的影响,初始压力非常低,约为 2~3 GPa,相应的爆轰化学反应速率低,表现为爆轰成长过程慢,在 2.5 mm 位置处压力仅为 10 GPa,爆轰成长至 12.5 mm 位置处才趋于稳态爆轰(此时受稀疏波的叠加影响,爆压仍低于 CJ 爆轰压力)。因此可以看出, Mushroom 试验可以展现爆轰波从准一维传播进入二维传播时拐角绕射过程,而与压力相关的爆轰化学反应速率模型可以细致的表现出不同位置处爆轰成长过程的差异,并且这种爆轰成长过程的差异是爆轰波拐角传播过程中波阵面变化的主要因素。相比  $\Phi 15$  mm 的传爆药柱直径,在  $\Phi 10$  mm 直径的传爆药柱起爆下,爆轰波沿侧向传播至半球表面的距离更长,并且受侧向稀疏波影响的程度更大,侧向爆轰波成长过程更慢,表现为出射半球表面的时间滞后,与图 4 结果吻合。

对药球表面密集选取单元,获得了不同位置处波形的出射过程的模拟结果,与试验结果的对比如图 6

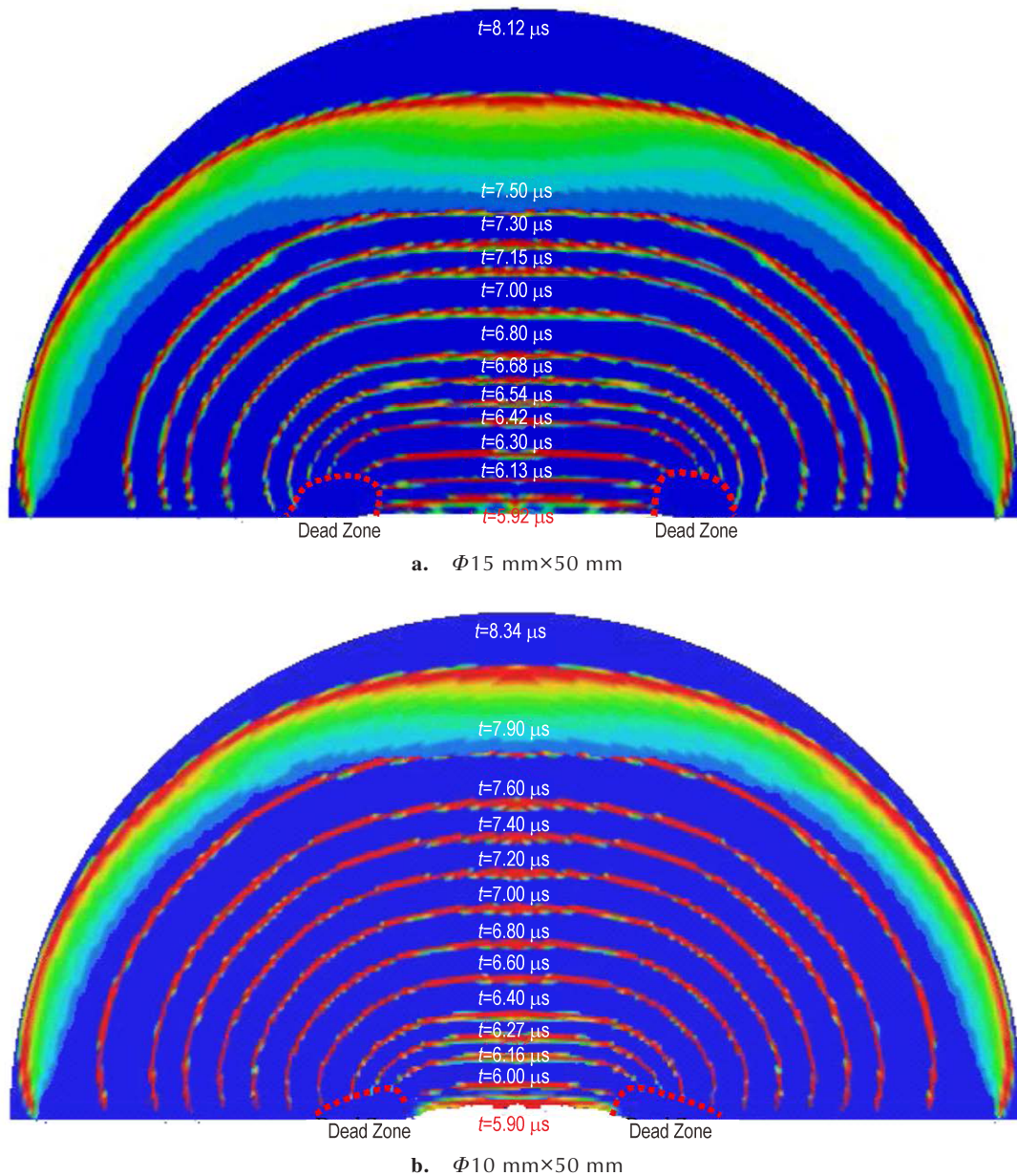
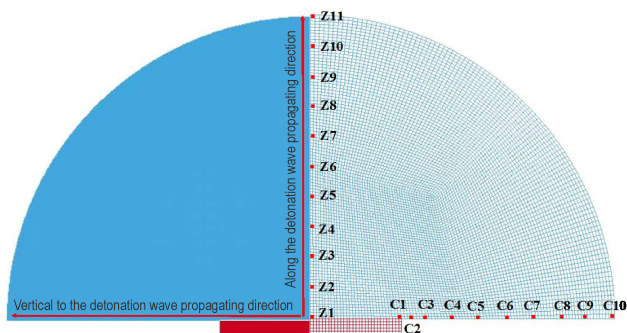


图4 Mushroom 试验爆轰波的传播历程

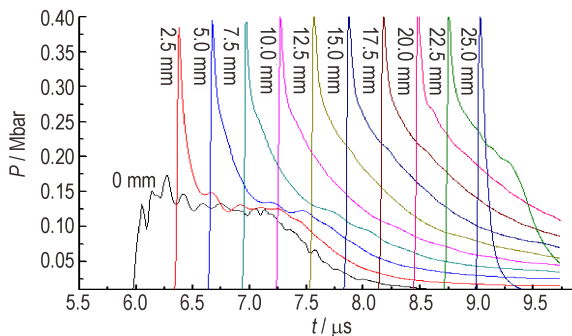
Fig.4 the history of the detonation propagation in mushroom test

所示。从中可以更直观的看出采用该套化学反应速率参数进行2组Mushroom试验的数值结果与试验值较为吻合。首先是最先出射位置点的对比,当传爆药柱尺寸为 $\Phi 15\text{ mm}$ 时,爆轰波最先出射角为 $74.7^\circ$ (试验值为 $78.6^\circ$ ),传爆药柱尺寸为 $\Phi 10\text{ mm}$ 时,最先出射角为 $75.6^\circ$ (试验值为 $76.6^\circ$ ),最先出射位置的数值模拟结果与试验结果偏差最大为4.9%;其次是爆轰波从半球外表面的出射历程对比,在 $\Phi 15\text{ mm}$ 和 $\Phi 10\text{ mm}$ 两种传爆药柱尺寸情况下,在靠近半球顶点附近位置爆轰波到达时刻与试验值非常吻合,表明爆轰波从传爆药柱进入炸药半球时,在 $0^\circ \pm 20^\circ$ 范围内爆轰波传播

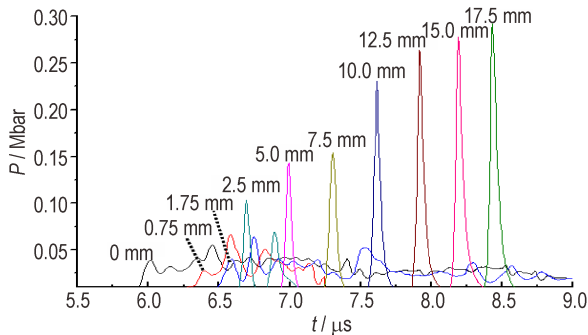
的二维效应并不明显,基于一维试验标定的爆轰反应速率方程参数在此区间范围内具有较好的有效性,模拟的爆轰波出射历程与试验结果最大偏差仅为20 ns。在逐渐远离半球顶点的位置,爆轰波到达时刻与试验值的偏差逐渐增大,也进一步说明随着角度范围的增大,爆轰波传播的二维效应越明显,基于一维试验标定的爆轰反应速率方程参数在此区间范围内的有效性受到的影响也越大,模拟的爆轰波出射历程与试验结果最大偏差为63 ns,在没有考虑试验误差以及人为读数误差的情况下,爆轰波出射历程与试验结果最大偏差为9.4%。



a. the schematic diagram of element selection at different directions



b. along the detonation wave propagating direction

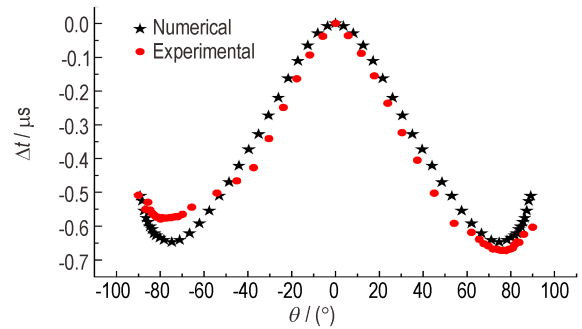


c. vertical to the detonation wave propagating direction

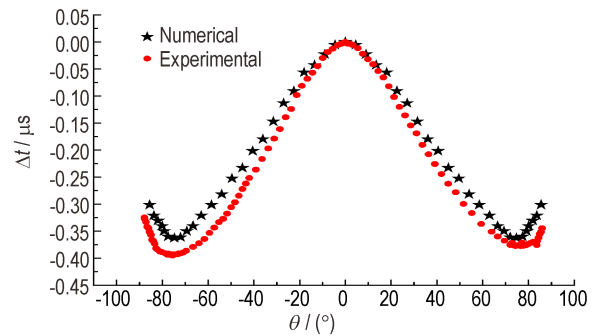
图5 不同方向上的压力成长历程

Fig.5 the pressure history of the shock growth in different directions

综合爆轰波在半球中的传播过程模拟(图4)、不同传爆方向上爆轰成长过程模拟(图5)以及爆轰波出射历程模拟(图6),在一定的误差范围内可以认为准一维状态下标定的爆轰反应速率方程参数可以有效描述 HMX 基 PBX-1 炸药的具有二维效应的 Mushroom 试验,说明已标定的反应速率方程参数能准确的描述爆轰波从小尺寸传爆药进入较大尺寸炸药半球中的冲击成长与拐角传爆特性,也进一步证明了通过 Mushroom 试验可以有效的对炸药的爆轰反应速率模型参数进行有效校验。



a. Φ15 mm×50 mm



b. Φ10 mm×50 mm

图6 不同传爆直径下爆轰波出射药球表面过程的数值模拟与试验结果的对比如

Fig.6 Comparison of detonation breakout from the surface of spheres with varying detonation diameters between experiments and simulations.

#### 4 结论

(1)通过 Mushroom 试验可以直观的评价炸药的拐角传爆能力,其拐角传爆能力的本质为化学反应速率的差异;

(2)与一维冲击起爆过程不同的是,由于侧向稀疏波影响程度不同,Mushroom 试验炸药半球中爆轰波的成长具有显著的二维效应,其在不同的方向上与压力相关的化学反应速率不同,沿轴向的爆轰成长距离远大于垂直爆轰波传播方向,丰富的爆轰成长过程信息可以为化学反应速率模型参数的校验提供支撑;

(3)数值模拟结果展现的爆轰波的传播轨迹、出射角、熄爆角等参量信息与试验结果较为吻合,表明准一维状态下标定的化学反应速率参数可以有效描述 PBX-1 炸药的具有二维效应的 Mushroom 试验,进一步说明通过 Mushroom 可以用于炸药化学反应速率参数的校验,而数值模拟结果显示的主炸药半球的底面

存在小区域的局部爆轰死区的现象在现有的 Mushroom 试验中无法有效观测,可以进一步优化试验设计进行验证。

#### 参考文献:

- [1] 孙锦山,朱建士.理论爆轰物理[M].北京:国防工业出版社,1995:260-328.  
SUN Jin-shan, ZHU Jian-shi. Theoretic detonation physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 260-328.
- [2] Wescott B L, Stewart D S, Davis W C. Equation of state and reaction rate for condensed-phase explosives[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98: 053514.
- [3] Smirnov E B, Kostitsin O V, Koval A V, et al. Model of non-ideal detonation of condensed high explosives[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 774(1): 012076.
- [4] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [5] 白志玲,段卓平,温丽晶,等. PBX炸药冲击起爆的改进细观反应速率模型[J]. 含能材料, 2019, 27(8): 629-635.  
BAI Zhi-ling, DUAN Zhuo-ping, WEN Li-jing, et al. A modified mesoscopic reaction rate model for shock initiation of PBXs[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(8): 629-635.
- [6] Menikoff R, Shaw M S. The SURF model and the curvature effect for PBX9502 [J]. *Combustion Theory and Modeling*, 2012, 16(6): 1140-1169.
- [7] Whitworth N, Handley C. A CREST model for the RDX/TNT explosive composition B [C]//AIP Conference Proceedings, 2020, 2272(1): 030034.
- [8] Garcia F, Vandersall K S, Tarver C M. Shock Initiation Experiments with Ignition and Growth Modeling on Low Density HMX[C]//Journal of Physics. Conference Series, 2014, 500: 052048.
- [9] Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R, et al. Shock Initiation of NEW and Aged PBX9501 MEASURED with Electromagnetic Particle Velocity Gauges [R]. Los Alamos Report LA-UR-00-5196, 2000.
- [10] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Shock Initiation of Composition B and C-4 Explosives: Experiments and Modeling[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, 2(2): 162-171.
- [11] Jones J D, Ma X, Clements B E, et al. Measurement and Reactive Burn Modeling of the Shock to Detonation Transition for the HMX Based Explosive LX-14[C]//AIP Conference Proceedings, 2018, 1979(1): 100022.
- [12] Gambino J R, Tarver C M, Springer H K. Numerical parameter optimizations of the ignition and growth model for HMX plastic bonded explosive [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124: 195901.
- [13] CHEN Lang, PI Zheng-di, LIU Dan-yang, et al. Shock initiation of the CL-20 Based Explosive C-1 Measured with Embedded Electromagnetic Particle Velocity Gauges[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41: 1060-1069.
- [14] Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R, et al. Embedded Electromagnetic Gauge Measurements and Modeling of Shock Initiation in the TATB Based Explosives LX-17 and PBX9502 [C]// AIP Conference Proceedings, 2002, 620: 1019-1022.
- [15] 杨舒祺,张旭,彭文杨,等.钝感炸药冲击起爆反应过程的PDV技术[J].高压物理学报,2020,34(2):023402.  
YANG Shu-qi, ZHANG Xu, PENG Wen-yang, et al. PDV technology of shock initiation reaction process of insensitive explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(2): 023402.
- [16] Taver C M. Ignition and growth reactive flow modeling of recent HMX/TATB detonation experiments [C]//AIP Conference Proceedings, 2018, 1793(1): 030004.
- [17] Garcia M L, Tarver C M. Three-dimensional ignition and growth reactive flow modeling of prism failure tests on PBX9502[R]. UCRL-CONF-222376, 2006.
- [18] Whitworth N J. CREST modeling of experiments to study the transverse initiation behaviour of the insensitive high explosive PBX 9502 [A]//11th international conference: new models and hydrocodes for shock wave physics, 2016.
- [19] Hill L G, Seitz W L, Forest C A, et al. High explosive corner turning performance and the LANL mushroom test [R]. LA-UR-97-2509, 1998.
- [20] 韩勇,蒋治海,黄毅民,等. PBX-9404和PBX-9502炸药拐角性能的数值模拟[J].火炸药学报,2011,34(6):30-33.  
HAN Yong, JIANG Zhi-hai, HUANG Yi-min, et al. Numerical simulation of corner turning of PBX-9404 and PBX-9502 [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2011, 34(6): 30-33.
- [21] Francois E G, Morris J S, Lieber M. Three dimensional hemispherical test development to evaluate detonation wave breakout[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(14): 142015.
- [22] Lee E L, Taver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogenous explosives[J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23: 2362-2372.
- [23] 谭凯元,文尚刚,韩勇.常温附近温度变化对炸药冲击起爆特征的影响[J].含能材料,2016,24(9):905-910.  
TAN Kai-yuan, WEN Shang-gang, HAN Yong. Shock initiation characteristics of explosives at near-ambient temperatures [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(9): 905-910.
- [24] 郭向利,韩勇,卢校军,等. HMX基和TATB基PBX爆轰波的拐角性能[J].含能材料,2015,23(6):522-526.  
GUO Xiang-li, HAN Yong, LU Xiao-jun, et al. Corner performance of detonation waves in HMX-based and TATB-based PBX explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(6): 522-526.
- [25] 刘杰.与炸药阻抗匹配的铝基组式电磁粒子速度计研究[D].绵阳:中国工程物理研究院,2015:29-34.  
LIU Jie. Study on the multiple electromagnetic particle velocity gauges package matched with the impedance of explosives [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2015: 29-34.

## Parameter Validation of the Detonation Reaction Rate Model of Explosives Based on Mushroom Test

DUAN Ying-liang, HAN Yong, RAN Jian-long, TAN Kai-yuan, ZAN Ji-chao, JIA Lu-chuan

(*Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China*)

**Abstract:** In order to precisely validate the parameters of detonation reaction rate model of explosives, a HMX/TATB based explosive PBX-1 was the research subject, and the mushroom test was conducted to study the corner-turning performance of explosives with various detonation propagation diameters. Then the mushroom test was simulated by LS-DYNA program with the three-term ignition and growth model calibrated by Lagrangian gauges measurements. The accuracy in calibrated parameters of the reaction rate model was validated by observing the growth and propagation of detonation waves and by comparing the corner-turning parameters. The comparison between experiments and numerical simulations shows that, the mushroom test can reflect the discrepancy of detonation growths of detonation waves in different directions. Finally, it was proved that the parameter validation of the reaction rate model of explosives is feasible by Mushroom test..

**Key words:** explosion mechanics; chemical reaction rate; mushroom test; corner-turning performance, ignition and growth model

**CLC number:** O382

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021009

(责编:高毅)