

文章编号: 1673-3193(2024)03-0317-09

三项式点火增长模型及各参量调控机理研究

马沛冉¹, 蔡宣明¹, 侯阳², 潘成龙¹

(1. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 半导体与物理学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了探明Lee-Tarver三项式点火增长模型各参量的调控机理, 根据三项式反应速率方程, 分析预测了Lee-Tarver三项式点火增长模型各参量对冲击起爆特性的影响。建立以HMX为施主炸药、H6JJ1为受主炸药的小隔板试验有限元模型, 确定了该模型起爆成功时小隔板的临界厚度区间为1.2~1.3 mm。调节受主炸药的各三项式点火增长模型参量, 得到了该模型起爆成功时小隔板的临界厚度区间变化, 明确了Lee-Tarver三项式点火增长模型各项系数对冲击起爆特性的影响。内向的球形颗粒燃烧 b 和 c 取值为0.667; $a, d, e, g, \lambda_{G_2, \min}$ 与冲击起爆所需压力为正相关关系; $I, x, G_1, G_2, \lambda_{ig, \max}, \lambda_{G_1, \max}$ 与冲击起爆所需压力为负相关关系; y 和 z 为压强指数, 当 $0 < p < 1$ 时, 冲击起爆所需压力为负相关关系, 当 $p \geq 1$ 时, 冲击起爆所需压力为正相关关系。本文研究揭示了三项式点火增长模型各参量的调控机理。

关键词: 爆炸力学; 点火增长模型; 冲击起爆; 小隔板试验

中图分类号: TJ55

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.03.009

引用格式: 马沛冉, 蔡宣明, 侯阳, 等. 三项式点火增长模型及各参量调控机理研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 317-325.

MA Peiran, CAI Xuanming, HOU Yang, et al. Study on trinomial ignition growth model and regulation mechanism of various parameters[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(3): 317-325.

Study on Trinomial Ignition Growth Model and Regulation Mechanism of Various Parameters

MA Peiran¹, CAI Xuanming¹, HOU Yang², PAN Chenglong¹

(1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Semiconductor and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to explore the regulation mechanism of the parameters of Lee-Tarver trinomial ignition growth model, the effects of the parameters of Lee-Tarver trinomial ignition growth model on the impact initiation characteristics were analyzed and predicted based on the trinomial reaction rate equation. A finite element model of a small separator test with HMX as the donor explosive and H6JJ1 as the recipient explosive was established, and the critical thickness interval of the small separator was determined to be 1.2–1.3 mm when the model was successfully detonated. By adjusting the parameters of the trinomial ignition growth model of the main explosive, the variation of the critical thickness interval of the small separator was obtained when the model was successfully detonated, the influence of the coefficients of the Lee-Tarver trinomial ignition

收稿日期: 2023-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272356); 山西省研究生创新项目(2022Y634)

作者简介: 马沛冉(1998-), 男, 硕士生, 主要从事火炮发射、爆炸毁伤及防护技术。

通信作者: 蔡宣明(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事含能材料力学行为及动态参数测试、毁伤效应及防护技术。E-mail: caixm@nuc.edu.cn。

growth model on the impact initiation characteristics was clarified. Where b and c represent inward spherical particle combustion, and the value is 0.667; a , d , e , g and $\lambda_{G_2 \min}$ are positively correlated with the pressure required for impact initiation. I , x , G_1 , G_2 , $\lambda_{ig \max}$, $\lambda_{G_1 \max}$ are negatively correlated with the pressure required for impact initiation. y and z are the pressure index, when $0 < p < 1$, the pressure required for impact initiation is negatively correlated, and when $p \geq 1$, the pressure required for impact initiation is positively correlated. The regulation mechanism of the parameters of the trinomial ignition growth model is revealed.

Key words: explosion mechanics; ignition growth model; impact initiation; small baffle test

0 引言

在现代战争中,冲击起爆模型的应用越来越广泛。一方面,在钝感炸药运输的过程中,为防止碰撞等因素引起提前起爆,需要预先进行试验以提高安全性;另一方面,在弹药用于毁伤来袭弹药目标时,需评估其冲击起爆效果。利用冲击起爆模型进行以两方面的仿真模拟可以极大地降低试验成本,其中,冲击起爆模型各参量调控方法的研究十分必要。

目前,应用最为广泛的非均质高能炸药反应速率模型是 Lee 等^[1]提出的 Lee-Tarver 模型点火增长模型。段卓平等^[2-3]深入研究了非均质固体炸药的冲击起爆热点机制,建立了高聚物粘结炸药(PBX)冲击起爆统计热点反应速率模型,描述了热点形成、形核或消亡、点火后燃烧反应演化直至快速转为爆轰的全过程。梁增友等^[4]对炸药化学反应速率方程进行了分析并对比验证了所建模型的合理性,实现了损伤炸药的冲击起爆数值模拟。陈清畴等^[5]根据圆筒实验,通过测量炸药/窗口界面粒子速度历程并结合数值仿真,得到了 HNS-IV 炸药的点火增长模型的各项参数。黎坤海等^[6]进行了 PBX-9404 炸药枪击的数值仿真研究,研究表明,随着药柱壳体厚度的增加,撞击起爆阈值速度逐渐增加,弹丸速度大于起爆阈值速度时,起爆时间提前且内部压力升高。丁良政等^[7]探究了颗粒炸药在低速撞击作用下的微观受力过程和主要点火机制,并运用 AUTODYN 软件进行了基于点火增长模型的颗粒炸药低速撞击特性的数值仿真研究。李硕等^[8]进行了 JH-14C 的小隔板试验,并通过数值模拟研究得到了 JH-14C 炸药的点火增长模型的各项参数。对于一般冲击起爆模型,国内外已经可以根据实验结果进行较好的数值仿真,但是对于三项式点火增长模型各项系数的调控形式却没有系统的说明,这对于一个新的模型要进行仿真就会非常不便。

本研究以 HMX 为施主炸药、H6JJ1 为受主炸药建立小隔板试验有限元模型,确定该模型起爆成功时小隔板的临界厚度区间。调节受主炸药的各项三项式点火增长模型参数,通过该模型起爆成功时小隔板的临界厚度区间变化,分析 Lee-Tarver 三项式点火增长模型各参量对冲击起爆特性的影响,探究了三项式点火增长模型各参量的调控机理。

1 反应速率方程分析

1.1 Lee-Tarver 三项式点火增长模型

Lee-Tarver 三项式点火增长模型以多热点点火假设与圆筒试验获得数据^[9-11],较好地描述了炸药冲击起爆反应过程中的物理化学过程,是现在应用较为广泛的反应速率模型^[12-14]。

Lee-Tarver 三项式点火增长模型主要包括反应物的状态方程和反应速率方程,对于爆炸反应物,一般用 JWL 状态方程来描述其膨胀压力

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega c T}{V}, \quad (1)$$

式中: p 为炸药反应产生的压力; V 为相对体积; c 为反应物比热容; T 为平均温度; A_1 , B_1 , R_1 , R_2 和 ω 都是与炸药相关的材料常数。

炸药受到冲击后的起爆反应主要包括三个阶段:第一阶段是热点的形成及点火阶段;第二阶段是热点的慢速反应增长阶段;第三阶段是反应热点汇合阶段,在此阶段时,高温高压下大范围的反应快速完成,一般用三项式反应速率方程来描述,即

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1 - \lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a\right)^x + G_1(1 - \lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1 - \lambda)^e \lambda^g p^z, \quad (2)$$

式中:第一项为点火项,对应三项式反应速率方程的第一阶段;第二项为增长项,对应三项式反应速率方程的第二阶段;第三项为完成项,对应

三项式反应速率方程的第三阶段。 λ 为炸药反应度； t 为反应时间； $\lambda_{ig\max}$, $\lambda_{G_1\max}$, $\lambda_{G_2\min}$ 是反应度的最大值和最小值；当 $\lambda > \lambda_{ig\max}$ 时，点火项为零；当 $\lambda > \lambda_{G_1\max}$ 时，增长项为零；当 $\lambda > \lambda_{G_2\min}$ 时，完成项为零。

第一项中， I 和 x 控制点火热点的数量，它是关于冲击波强度与作用时间的函数； ρ 为炸药当前密度； ρ_0 为炸药初始密度； a 为临界压缩度，即足够强的冲击波作用于炸药使得炸药压缩度大于等于 a 时，炸药发生点火； b 取0.667，表示内向的球形颗粒燃烧。第二项中， G_1 和 d 控制点火后热点早期的反应增长； c 取0.667，表示内向的球形颗粒燃烧； y 为压强指数； p 为反应压强。第三项中， G_2 , e , g , z 决定高压下的反应速率； p 为反应压强。

1.2 模型各参量的定义及调控机理分析

根据模型状态方程，在三项式点火增长模型中，其爆炸反应物JWL方程只与炸药的种类有关，因此其参数一般不进行调整，所以，共有 $\lambda_{ig\max}$, $\lambda_{G_1\max}$, $\lambda_{G_2\min}$, I , b , a , x , G_1 , c , d , y , G_2 , e , g , z 等15个参数可以进行调控。

由于炸药受到冲击后的起爆反应三个阶段各自的性质，以上15个参数应遵循一定的规律，使得三项式点火增长模型满足这三个阶段客观存在的特殊性。

第三阶段是反应热点汇合阶段，在此阶段，高温高压下大范围的反应快速完成。而第二阶段是热点的慢速反应增长阶段，因此在调节参数时，一般要保证第三项大于第二项。

炸药的冲击起爆过程中，需要炸药所受冲击压力达到阈值时，才能成功起爆^[8]。根据三项式点火增长模型，炸药反应速率与炸药所受冲击压力为正相关关系，由此推断，冲击起爆成功与否与炸药受冲击时的起始反应速率有关，反应速率达到阈值，炸药起爆成功。因此，在调变参数后，可通过该参数对反应速率的影响来判断该参数对冲击起爆结果的影响。若参数调变后使得同压力下反应速率变小，则反应速率到达阈值所需压力变大，炸药更难起爆；若参数调变后使得同压力下反应速率变大，则反应速率到达阈值所需压力变小，炸药更易起爆。 b 、 c 表示内向的球形颗粒燃烧，一般取固定值0.667^[7]。

I 控制点火热点的数量，在三项式反应速率方程中， I 值越大，则第一项反应进行的速度越大，炸药冲击起爆所需的压力就越小，炸药更易起爆。

在三项式反应速率方程中，临界压缩度 a 越大，则第一项反应进行的速度越小，炸药冲击起爆所需的压力就越大，炸药更难起爆。

x 控制点火热点的数量，在不同材料中， $\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a$ 的范围有一定差异。在本研究的冲击起爆过程中，受主炸药承受的压力约为0.2 Mbar，而其杨氏模量约为0.002 Mbar，因此在接触面上 ρ 远大于 ρ_0 ，且受主炸药 a 的取值为0。因此，在本研究中， $\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a > 1$ ， x 越大，则第一项反应进行的速度越大，炸药冲击起爆所需的压力就越小，炸药更易起爆。

G_1 控制点火后热点早期的反应增长，在三项式反应速率方程中， G_1 越大，则第二项反应进行的速度越大，炸药冲击起爆所需的压力就越小，炸药更易起爆。

d 控制点火后热点早期的反应增长，在三项式反应速率方程中，由于 $0 < \lambda < 1$ ，所以 d 越大，则第二项反应进行的速度越小，炸药冲击起爆所需的压力就越大，炸药更难起爆。

y 为压强指数，它对模型的影响与所受压力有关。当 $0 < p < 1$ 时， y 越大，则第二项反应进行的速度越小，炸药冲击起爆所需的压力就越大，炸药更难起爆；当 $p \geq 1$ 时， y 越大，则第二项反应进行的速度越大，炸药冲击起爆所需的压力就越小，炸药更易起爆； $p=0$ 的情况几乎不会存在，因此不做考虑。

G_2 决定高压下的反应速率，在三项式反应速率方程中， G_2 越大，则第三项反应进行的速度越大，炸药冲击起爆所需的压力就越小，炸药更易起爆。

e 决定高压下的反应速率，在三项式反应速率方程中，由于 $0 < \lambda < 1$ ，所以 e 越大，则第三项反应进行的速度越小，炸药冲击起爆所需的压力就越大，炸药更难起爆。

g 决定高压下的反应速率，在三项式反应速率方程中，由于 $0 < \lambda < 1$ ，所以 g 越大，则第三项反应进行的速度越小，炸药冲击起爆所需的压力就越大，炸药更难起爆。

压强指数 z 对模型的影响与所受压力有关。当 $0 < p < 1$ 时， z 越大，则第三项反应进行的速度越小，炸药冲击起爆所需的压力就越大，炸药更难起爆；当 $p \geq 1$ 时， z 越大，则第三项反应进行的速度越大，炸药冲击起爆所需的压力就越小，炸药更易起爆；

$p=0$ 的情况几乎不会存在,因此不做考虑。

λ_{igmax} 控制第一项反应进行与否,当 $0 < \lambda < \lambda_{igmax}$ 时,第一阶段反应发生, $\lambda_{igmax} \leq \lambda$ 时,第一阶段反应停止,第一项取值为零。因此,可以判断该参数越大,第一项反应进行的速度越大,炸药冲击起爆所需的压力就越小,炸药更易起爆。

λ_{G_1max} 控制第二项反应进行与否,当 $0 < \lambda < \lambda_{G_1max}$ 时,第二阶段反应发生, $\lambda_{G_1max} \leq \lambda$ 时,第二阶段反应停止,第二项取值为零。因此,可以判断该参数越大,第二项反应进行的速度越大,炸药冲击起爆所需的压力就越小,炸药更易起爆。

λ_{G_2min} 控制第三项反应进行与否,当 $\lambda_{G_2min} < \lambda$ 时,第三阶段反应发生, $0 < \lambda \leq \lambda_{G_2min}$ 时,第三阶段反应停止,第三项取值为零。因此,可以判断该参数越大,第三项反应进行的速度越小,炸药冲击起爆所需的压力就越大,炸药更难起爆。

2 数值仿真

2.1 有限元模型

小隔板实验装置为轴对称立体结构,因此为减少运算时间,建模可采用2D轴对称模型,单位制采用cm-g- μ s。小隔板实验模型包括施主炸药、受主炸药、小隔板、底座、上套筒与下套筒。受主炸药材料选择H6JJ1,施主炸药材料选择HMX,小隔板材料选择有机玻璃(PMMA),上、下套筒材料都选择45#钢,底座材料选择A3钢,小隔板、上下套筒、底座材料均采用AUTODYN中的Shock本构模型。进行小隔板实验时,装置内空气的含量极低,对模型的影响可以忽略不计,因此,进行数值仿真时,各个部分均使用拉格朗日网格建模。其中,套筒与底座的网格尺寸为0.5 mm,施主炸药、受主炸药、小隔板的网格尺寸均为0.2 mm。

为避免AUTODYN在计算中出现单元网格的畸变而导致计算无法进行,对施主炸药HMX、受主炸药H6JJ1、有机玻璃隔板添加侵蚀模型,侵蚀模型选择为Geometric Strain(几何应变),类型选择Instantaneous(瞬时),施主炸药HMX的侵蚀应变为8,受主炸药H6JJ1的侵蚀应变为10,有机玻璃隔板的侵蚀应变为15。

上套筒是内径为5.1 mm,外径为31.1 mm,高为30 mm的空心圆柱;施主炸药是直径为5 mm,高为30 mm的圆柱体;小隔板是直径为31.1 mm,高度待定的圆柱体;下套筒是内径为

5.1 mm,外径为31.1 mm,高为40 mm的空心圆柱;受主炸药是直径为5 mm,高为40 mm的圆柱体;底座是直径为60 mm,高度为20 mm的圆柱体。

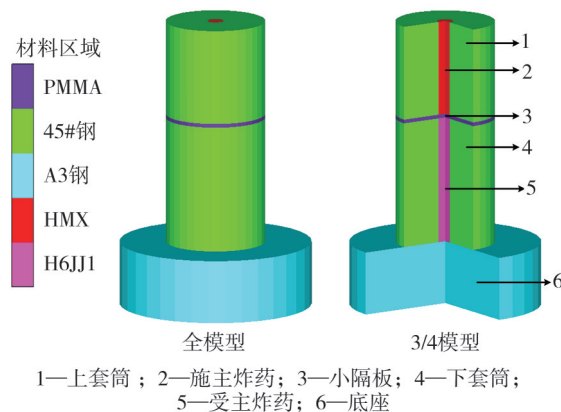


图1 冲击起爆有限元模型

Fig. 1 Finite element model of impact initiation

2.2 材料参数

模型内各材料的参数见表1~表6,其中,H6JJ1及HMX参数均来自AUTODYN材料库,PMMA、45#钢及A3钢材料参数均取自文献[8]。

表1 H6JJ1的JWL状态参数

Tab. 1 The JWL status parameter of H6JJ1

未反应产物参数	数值	反应产物参数	数值
A/Mbar	152.700 00	A/Mbar	7.580 70
B	-0.051 75	B	0.085 13
R_1	9.500 00	R_1	4.900 00
R_2	0.950 00	R_2	1.000 00
ω	0.976 00	ω	0.200 00
VVNS	0.660 00	$u_D/(\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	0.747 00
$E_{0,u}$	-0.011 10	$E_{0,g}/\text{Mbar}$	0.103 00
Shear Modulus/Mbar	0.040 00	P_{CJ}/Mbar	0.240 00
Yield Modulus/Mbar	0.002 00		
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.760 00		

注:如无特别标注,各个参数的单位都是在AUTODYN的cm-g- μ s单位制下的默认单位。

表2 H6JJ1的反应速率常数

Tab. 2 Reaction rate constant of H6JJ1

参数	数值	参数	数值
$I/\mu\text{s}$	4×10^8	$G_2/(\text{Mbar}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	5.5×10^3
b	0.667	e	0.333
a	0.000	g	1.000
x	7.000	z	3.000
$G_1/(\text{Mbar}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	6.000	λ_{igmax}	0.020
c	0.667	λ_{G_1max}	0.500
d	0.667	λ_{G_2min}	0.000
y	1.000		

表 3 HMX 的JWL 方程参数

Tab. 3 The JWL equation parameter of HMX

参数	数值	参数	数值
A/Mbar	7.782 800	$D/(cm \cdot \mu s^{-1})$	0.911
B	0.070 714	$E_0/Mbar$	0.105
R_1	4.200 000	$P_{CJ}/Mbar$	0.420
R_2	1.000 000	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.891
ω	0.300 000		

表 4 有机玻璃隔板(PMMA)的模型参数

Tab. 4 Model parameters of PMMA

参数	数值	参数	数值
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1.181	$C_1/(cm \cdot \mu s^{-1})$	0.256 1
Gruneisen 系数	1.000	S_1	1.595 0

表 5 套筒(45#钢)的模型参数

Tab. 5 Model parameters of sleeve(45#steel)

参数	数值	参数	数值
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	7.842	S_1	1.49
Gruneisen 系数	2.170	T_0/K	300
$C_1/(cm \cdot \mu s^{-1})$	0.439	$C/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	477

表 6 底座(A3钢)的模型参数

Tab. 6 Model parameters of the base(A3 steel)

参数	数值	参数	数值
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	7.830 0	S_1	1.49
Gruneisen 系数	2.170 0	T_0/K	300
$C_1/(cm \cdot \mu s^{-1})$	0.456 9	$C/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	477

2.3 压力云图与监测点

为更清晰地观察模型内部压力情况,选择模型压力云图的剖面图作为仿真结果图,如图 2 所示。

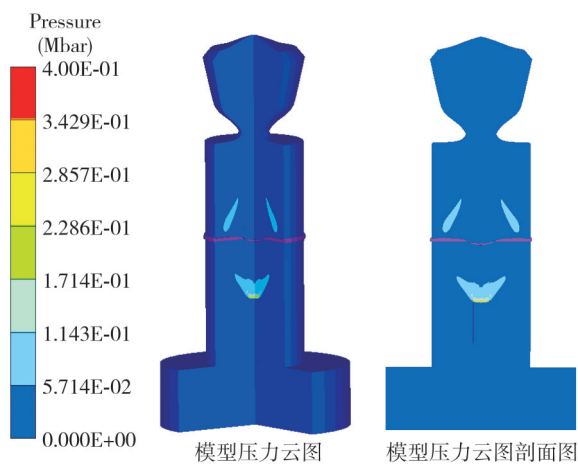


图 2 冲击起爆压力云图

Fig. 2 Impact initiation pressure cloud map

为监测仿真模型是否正常运行且获得受主炸药的反应压力趋势,在模型中轴线上建立 8 个监

测点,如图 3 所示。其中,监测点 1、监测点 2、监测点 3 在玻璃隔板上等距排列,且监测点 1、监测点 3 位于玻璃隔板上下表面;监测点 4、监测点 5、监测点 6、监测点 7、监测点 8 位于受主炸药上,且监测点 3 到监测点 8 以 4 mm 的距离间隔等距排列。在 cm-g- μs 单位制下,应力单位默认为 Mbar, 1 Mbar=10⁵ MPa。

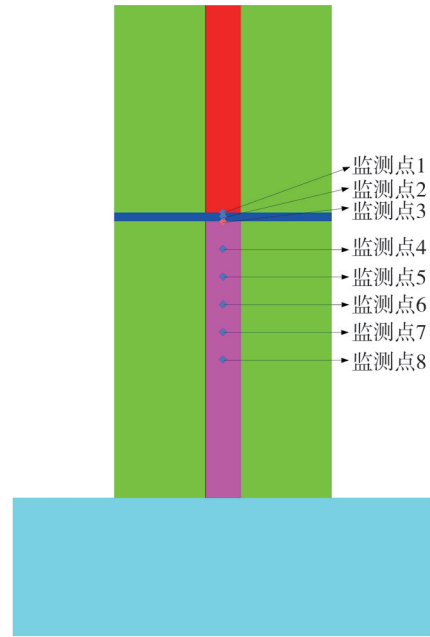


图 3 冲击起爆模型监测点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of impact initiation model monitoring site

3 仿真结果与讨论

3.1 仿真模型机理分析

本研究采用了以小隔板试验为原型的仿真模型。小隔板试验模型是一种可用于探明炸药 Lee-Tarver 参数的方法^[8],施主炸药爆炸后,冲击波经过小隔板产生衰减,最终作用在受主炸药上,如果冲击压力达到阈值,受主炸药就会起爆成功。小隔板厚度越大,冲击波衰减程度越大。因此,在施主炸药未改变的情况下,可通过控制小隔板的厚度来控制受主炸药受到的冲击压力。受主炸药成功起爆时小隔板厚度范围的变化可以反映出受主炸药成功起爆时所需的压力范围变化。

3.2 初始参数的仿真结果

当受主炸药距离小隔板越远,反应压力峰值越小时,即爆炸反应逐渐衰减时,则认为受主炸药起爆不成功;当受主炸药距离小隔板越远,反

应压力峰值越大,或压力峰值基本不变时,即爆炸反应稳定发生时,则认为受主炸药起爆成功。由图4和图5可知,在小隔板厚度为1.2 mm时,受主炸药压力峰值基本不变。因此,可认为小隔板厚度为1.2 mm时,受主炸药能够起爆成功。

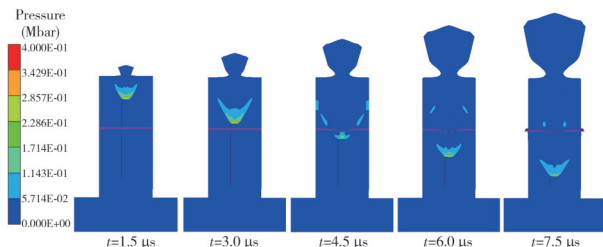


图4 小隔板为1.2 mm时的冲击起爆应力状态云图

Fig. 4 Cloud diagram of impact initiation stress state when the small partition is 1.2 mm

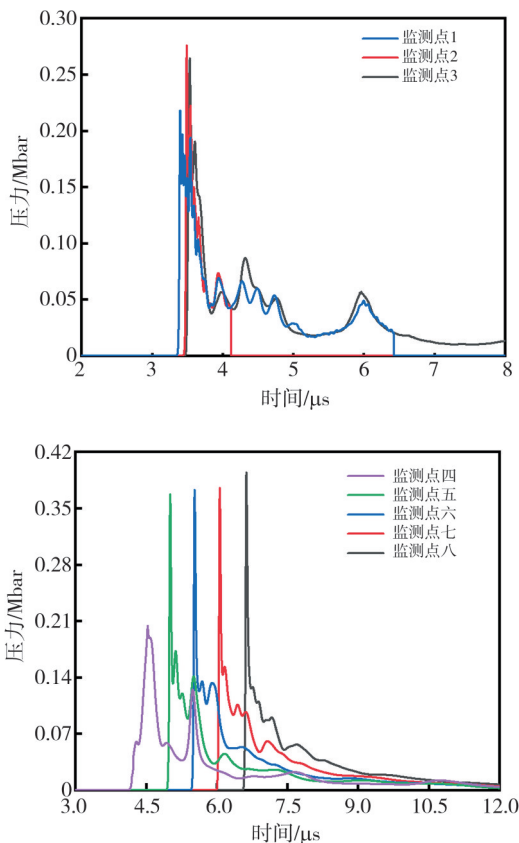


图5 小隔板为1.2 mm时的冲击起爆压力-时间曲线图

Fig. 5 Impact detonation pressure-time curve for a small partition of 1.2 mm

由图6和图7可知,在小隔板厚度为1.3 mm时,受主炸药压力峰值越来越小。因此,可认为小隔板厚度为1.3 mm时,受主炸药不能起爆成功。综上,模型起爆成功时小隔板的临界厚度区间为1.2~1.3 mm。

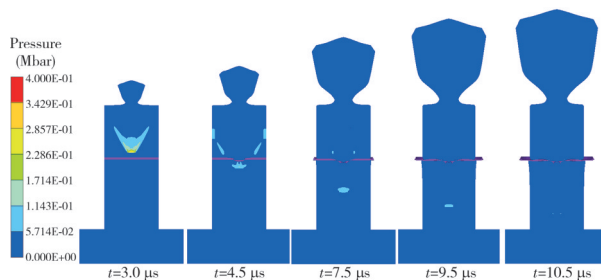


图6 小隔板为1.3 mm时的冲击起爆应力状态云图

Fig. 6 Cloud diagram of impact initiation stress state when the small partition is 1.3 mm

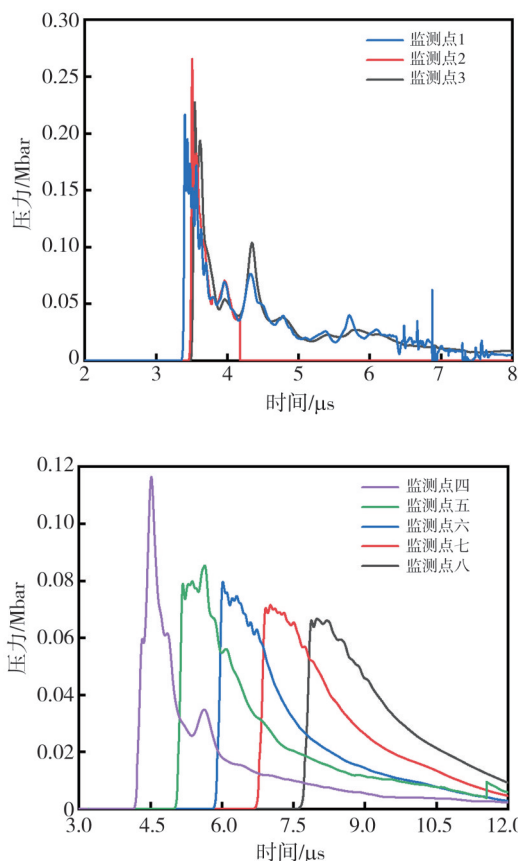


图7 小隔板为1.3 mm时冲击起爆压力-时间曲线图

Fig. 7 Impact detonation pressure-time curve for a small partition of 1.3 mm

3.3 参数调变后的仿真结果

验证各个参数对受主炸药成功起爆临界压力对应的小隔板厚度范围区间的影响,从而判断出Lee-Tarver三项式点火增长模型各项系数对冲击起爆的影响。由实验结果发现各参数与冲击起爆的关系可以分为4类。 b 、 c 表示内向的球形颗粒燃烧,一般取0.667,不做调整。

图8和图9是 I 由 4×10^8 调节为 4×10^9 后得到的仿真结果。在小隔板厚度为1.3 mm时,压力

峰值基本稳定,受主炸药起爆成功,由此可见,受主炸药成功起爆的临界压力降低,受主炸药更易起爆,与预测结果相吻合。仿真结果与之类似的有 $a, x, G_1, G_2, \lambda_{igmax}, \lambda_{G_1max}$, 这些参数调大后,受主炸药更易起爆,与预测结果相吻合。

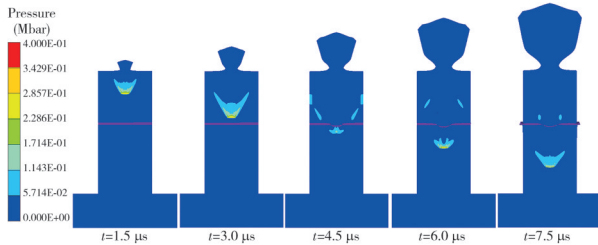


图 8 $I=4 \times 10^9$ 时的冲击起爆应力状态云图

Fig. 8 Nephogram of impact initiation stress state at $I=4 \times 10^9$

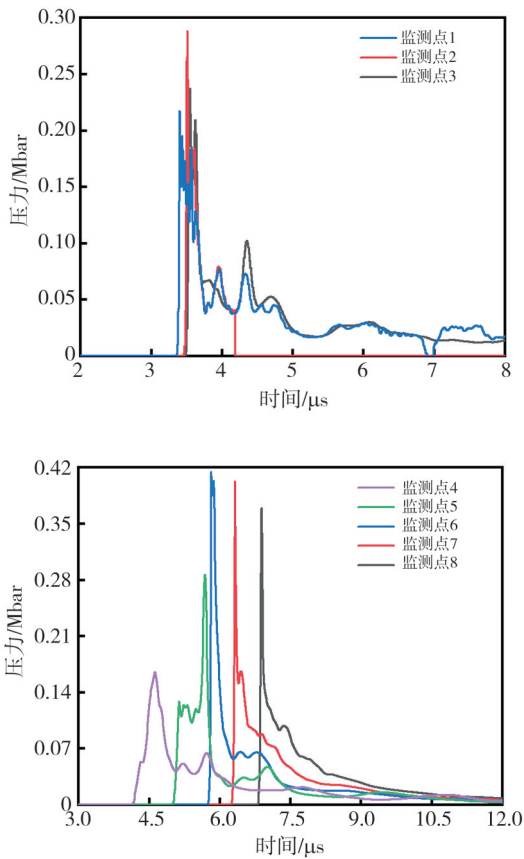


图 9 $I=4 \times 10^9$ 时的冲击起爆压力-时间曲线图

Fig. 9 Impact detonation pressure-time curve at $I=4 \times 10^9$

图 10 和图 11 是 a 由 0 调节为 1 后得到的仿真结果。在小隔板厚度为 1.2 mm 时,反应压力峰值逐渐衰减,受主炸药起爆失败,由此可见,受主炸药成功起爆的临界压力升高,受主炸药更难起爆,与预测结果相吻合。仿真结果与之类似的有 $d, e, g, \lambda_{G_2min}$, 这些参数调大后,受主炸药更难起

爆,与预测结果相吻合。

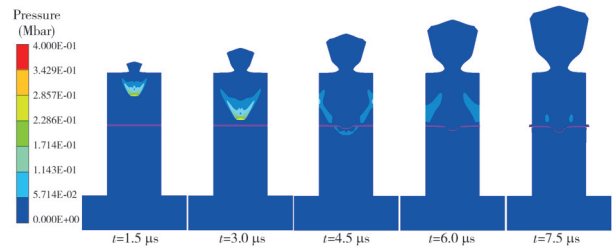


图 10 $a=1$ 时的冲击起爆压力云图

Fig. 10 Nephogram of impact initiation stress state at $a=1$

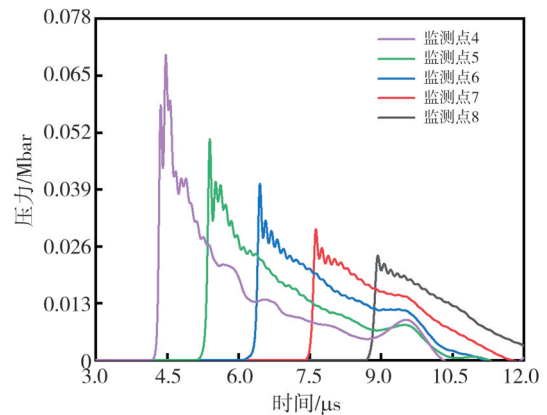
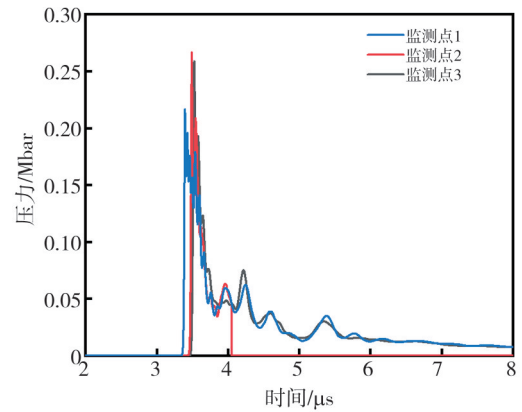
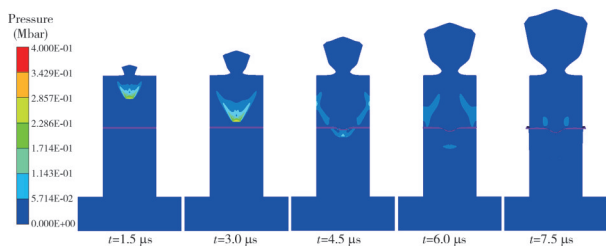
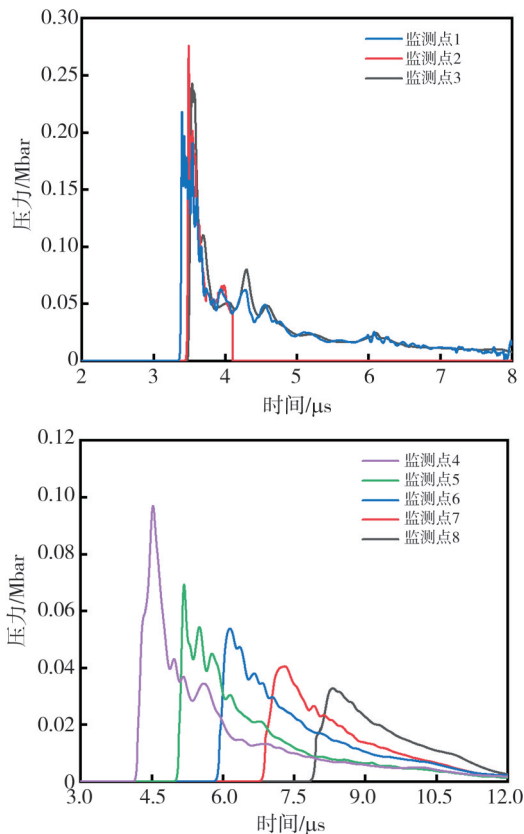


图 11 $a=1$ 时冲击起爆压力-时间曲线图

Fig. 11 Impact detonation pressure-time curve at $a=1$

图 12 和图 13 是 y 由 1 调节为 5 得到的仿真结果。本模型中,冲击压力的数值 $0 < p < 1$, 在 y 由 1 调节为 5 后,在小隔板厚度为 1.2 mm 时,反应压力峰值逐渐衰减,受主炸药起爆失败,由此可见, $0 < p < 1$ 时,受主炸药成功起爆的临界压力升高,受主炸药更难起爆,与预测结果相吻合。

仿真结果与之类似的是 z , 参数 z 调大后,在该模型中,受主炸药更难起爆,与预测结果相吻合。

图 12 $y=5$ 时的冲击起爆应力状态云图Fig. 12 Nephogram of impact initiation stress state at $y=5$ 图 13 $y=5$ 时的冲击起爆压力-时间曲线图Fig. 13 Impact detonation pressure-time curve at $y=5$

4 结论

1) 分析 Lee-Tarver 模型, 预测各参量与冲击起爆所需压力的相关性, 所需压力越大, 冲击起爆越难。其中, b, c 表示内向的球形颗粒燃烧, 取值为 0.667; $a, d, e, g, \lambda_{G_2 \min}$ 与冲击起爆所需压力为正相关关系; $I, x, G_1, G_2, \lambda_{igmax}, \lambda_{G_1 \max}$ 与冲击起爆所需压力为负相关关系; y, z 为压强指数, 当 $0 < p < 1$ 时, 冲击起爆所需压力为负相关关系, 当 $p \geq 1$ 时, 冲击起爆所需压力为正相关关系。

2) 建立以 HMX 为施主炸药、H6JJ1 为受主炸药的小隔板试验有限元模型, 在初始条件下, 小隔板模型起爆成功时小隔板的临界厚度区间为 1.2~1.3mm。

3) 调节各参量大小, 得到冲击起爆临界区间的变化, 确定项参量与冲击起爆临界区间的关系。明确了 $d, e, g, \lambda_{G_2 \min}$ 与冲击起爆所需压力为正相关关系; $I, a, x, G_1, G_2, \lambda_{igmax}, \lambda_{G_1 \max}$ 与冲击起爆所需压力为负相关关系; 由于 $0 < p < 1$, y, z 与冲击起爆所需压力为负相关关系, 与预测结果相吻合。

参考文献:

- [1] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. The Physics of Fluids, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [2] 段卓平, 白志玲, 黄风雷. 非均质固体炸药冲击起爆与爆轰研究进展[J]. 火炸药学报, 2020, 43(3): 237-253.
DUAN Zhuoping, BAI Zhiling, HUANG Fenglei. Advances in shock initiation and detonation of heterogeneous solid explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(3): 237-253. (in Chinese)
- [3] 白志玲, 段卓平, 黄风雷. 高聚物粘结炸药冲击起爆统计热点反应速率模型[J]. 兵工学报, 2021, 42(11): 2379-2387.
BAI Zhiling, DUAN Zhuoping, HUANG Fenglei. A statistical hot spot reaction rate model for shock initiation of PBX [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(11): 2379-2387. (in Chinese)
- [4] 梁增友, 黄风雷, 张振宇. 损伤炸药的冲击起爆数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(12): 1047-1051.
LIANG Zengyou, HUANG Fenglei, ZHANG Zhenyu. Numerical simulation of damaged explosive in shock detonation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(12): 1047-1051. (in Chinese)
- [5] 陈清畴, 蒋小华, 李敏, 等. HNS-IV 炸药的点火增长模型[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(3): 328-332.
CHEN Qingchou, JIANG Xiaohua, LI Min, et al. Ignition and growth reactive flow model for HNS-IV explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(3): 328-332. (in Chinese)
- [6] 黎坤海, 强新伟, 赵铮. PBX-9404 炸药枪击数值仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 13-18.
LI Kunhai, QIANG Xinwei, ZHAO Zheng. Numerical simulation research on PBX-9404 explosive gun shot [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(4): 13-18. (in Chinese)
- [7] 丁良政, 张邹邹, 卜雄洙, 等. 基于点火增长模型的颗粒炸药低速撞击特性研究[J]. 火工品, 2022(3):

- 38-43.
DING Liangzheng, ZHANG Zouzhou, BU Xiongzhu, et al. Research on low velocity impact characteristics of particle explosives based on ignition growth model [J]. *Initiators&Pyrotechnics*, 2022 (3) : 38-43. (in Chinese)
- [8] 李硕, 袁俊明, 刘玉存, 等. 聚黑-14C 的传爆装置冲击起爆实验及数值模拟[J]. *火炸药学报*, 2016, 39 (6): 63-68.
LI Shuo, YUAN Junming, LIU Yucun, et al. Experiment and numerical simulation of shock initiation of JH-14C detonation device [J]. *Chinese Journal of Explosives&Propellants*, 2016, 39 (6) : 63-68. (in Chinese)
- [9] 李淑睿, 段卓平, 郑保辉, 等. 2, 4-二硝基苯甲醚基熔铸含铝炸药圆筒试验及爆轰产物状态方程[J]. *兵工学报*, 2021, 42(7): 1424-1430.
LI Shurui, DUAN Zhuoping, ZHENG Baohui, et al. Cylinder test and equation of state for DNAN-based aluminized melt-cast explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(7): 1424-1430. (in Chinese)
- [10] LEE P W, CLEMENTS B, MA X. Relating microstructure, temperature, and chemistry to explosive ignition and shock sensitivity [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 190: 171-176.
- [11] 王虹富, 白帆, 刘彦, 等. 爆炸冲击波作用下黑索今基含铝炸药的冲击点火反应速率模型[J]. *兵工学报*, 2021, 42(2): 327-339.
WANG Hongfu, BAI Fan, LIU Yan, et al. Ignition reaction rate model of RDX-based aluminized explosives under shock waves [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(2): 327-339. (in Chinese)
- [12] 刘海, 李毅, 李俊玲, 等. CL-20/HMX 共晶冲击起爆模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(3): 24-31.
LIU Hai, LI Yi, LI Junling, et al. Simulations of shock initiation of CL-20/HMX co-crystal [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32 (3) : 24-31. (in Chinese)
- [13] 张涛, 赵继波, 伍星, 等. JBO-9021 炸药的冲击起爆 Pop 关系[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 743-748.
ZHANG Tao, ZHAO Jibo, WU Xing, et al. Pop relationship of JBO-9021 explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 743-748. (in Chinese)
- [14] 钱石川, 甘强, 任志伟, 等. HNS-IV 炸药一维冲击起爆判据的研究 [J]. *含能材料*, 2018, 26 (6) : 495-501.
QIAN Shichuan, GAN Qiang, REN Zhiwei, et al. Study on one-dimensional shock initiation criterion of HNS-IV explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(6): 495-501. (in Chinese)