

文章编号: 1006-9941(2022)03-0204-10

叠层复合装药殉爆安全性试验及数值模拟

李兴隆^{1,2}, 吴奎先^{1,2}, 路中华^{1,2}, 高大元^{1,2}, 黄亨建^{1,2}, 陈科全^{1,2}, 陈红霞^{1,2}, 寇剑锋^{1,2}, 王杰^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院安全弹药研发中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 叠层复合装药是由两种或两种以上装药通过叠加的方式复合而成, 可以通过装药结构设计调控其安全性和能量输出特性。为研究叠层复合装药的殉爆安全性, 选取典型高能炸药与钝感炸药组合的叠层复合装药为研究对象, 通过数值模拟和殉爆试验研究装药结构对临界殉爆距离的影响规律。结果表明, 相比于单一高能炸药 PBX-1, 复合装药临界殉爆距离可减小 53.3% (由 7.5 mm 减小至 3.5 mm), 能量降低 22.9%; 复合装药中钝感炸药厚度必须要达到特定阈值 (3 mm) 以上才能明显降低复合装药临界殉爆距离; 随着钝感炸药占比增大, 复合装药临界殉爆距离趋近于单一钝感炸药 PBX-2 的临界殉爆距离。

关键词: 复合装药; 殉爆试验; 冲击波感度; 数值模拟

中图分类号: TJ410.2

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2021014

1 引言

战斗部装药采用外层钝感炸药内层高能炸药的复合装药结构, 可以提升战斗部的安全性能, 而不会导致能量输出的大幅度下降。多年来国内外学者开展了大量复合装药能量输出和安全性等方面的研究。

在安全性方面, 黄璠等^[1]通过 3D 打印成型技术设计了 3 种新型复合装药结构, 并对比研究了复合装药结构的撞击感度, 结果表明, 复合装药的特性落高比同质量 CL-20 装药提高了 3.14 倍; 向梅等^[2-3]对高能炸药和钝感炸药的复合结构进行隔板试验和数值模拟, 得到复合装药结构的隔板值介于高能炸药和钝感炸药之间, 复合装药冲击波感度与药柱厚度比呈一阶指数衰减关系。韩勇等^[4]采用隔板试验研究了 JO-9159/ECX 复合装药的冲击波感度, 结果表明复合装药的冲击波感度在两种炸药之间。

在能量输出方面, 法国、美国等已在多种现役战斗

部中利用复合装药提高武器的抗冲击能力、破片加速能力及爆破作用等。Spencer A F 等^[5]对内外复合装药的爆轰性能和破片成型性能进行了研究, 外层理想炸药反应后形成的高温高压环境加速了内层非理想炸药的反应, 结果增强了整体装药的爆炸作用和破片成型性能; 丁刚等^[6]分析了外层高爆速, 内层低爆速炸药的复合装药偏心起爆爆轰会聚波的速度分布、形成机理及传播规律, 提出会聚波可以提高内层装药爆轰波的传播速度; 吴成等^[7]通过理论和数值模拟研究表明, 采用复合装药结构, 可明显增加定向区内破片的分布密度; 王辉等^[8]对复合装药在偏心起爆条件下爆轰波形进行分析, 爆轰波在传播过程中呈弧形状收敛, 最终形成喇叭形波形, 沿中心线的爆速提高了约 $1.67 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; 凌琦等^[9]对不同起爆方式和复合装药参数的扇形装药结构破片驱动特性进行了计算分析, 结果表明, 复合装药能使破片飞散更为集中, 且破片的总动能提高了 12% 以上。

上述研究的复合装药均为内外复合型结构, 目前关于叠层复合的装药结构研究尚未见相关报道。由钝感炸药和高能炸药交替叠加而成的叠层复合装药, 利用两种炸药冲击波感度不同, 优化装药结构可降低其冲击波感度; 同时, 利用炸药临界尺寸效应, 调控装药厚度可控制爆轰波在复合装药中的传爆特性, 抑制爆轰波成长, 从而提高装药殉爆安全性。

收稿日期: 2021-01-10; 修回日期: 2021-05-05

网络出版日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11572359) 资助

作者简介: 李兴隆 (1988-), 男, 副研究员, 从事安全弹药设计与评估研究。e-mail: lixinglong@caep.cn

通信联系人: 路中华 (1977-), 男, 研究员, 从事安全弹药设计与评估研究。e-mail: luzhonghua@163.com

引用本文: 李兴隆, 吴奎先, 路中华, 等. 叠层复合装药殉爆安全性试验及数值模拟[J]. 含能材料, 2022, 30(3):204-213.

LI Xing-long, WU Kui-xian, LU Zhong-hua, et al. Sympathetic Detonation Test and Simulation of Laminated Composite Charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(3):204-213.

本研究提出了叠层复合装药抗殉爆设计方法,利用 LS_DYNA 有限元软件建立了殉爆数值模型,通过仿真和试验研究了不同装药结构的临界殉爆距离,获得了叠层复合装药中钝感炸药和高能炸药厚度对殉爆安全性的影响规律,获得了叠层复合装药设计的基本准则,以期为复合装药安全性提升设计提供参考和依据。

2 叠层复合装药抗殉爆设计

2.1 叠层复合装药设计原则

殉爆是指当装药爆炸后,能够引起与其相距一定距离的另一装药爆炸,先发生爆炸的装药称为主发装药,被引发殉爆的装药称为被发装药^[10]。典型的叠层复合装药的殉爆安全性试验布局见图 1,主发装药为单一高能炸药 PBX-1,由雷管和传爆药起爆,被发装药由高能炸药 PBX-1 和钝感炸药 PBX-2 叠加而成,主发装药与被发装药下方布置见证板。主发弹爆炸后,冲击波、爆轰产物作用于被发装药表面,被发装药不发生爆炸及以上反应的情况有两种:

(1) 冲击波和爆轰产物作用达不到高能炸药 PBX-1 和钝感炸药 PBX-2 的起爆阈值;

(2) 冲击波和爆轰产物作用下,高能炸药 PBX-1 点火起爆,但由于临界尺寸效应导致爆轰波快速熄灭,并且钝感炸药 PBX-2 在被 PBX-1 引爆后,也由于临界尺寸效应导致熄爆。

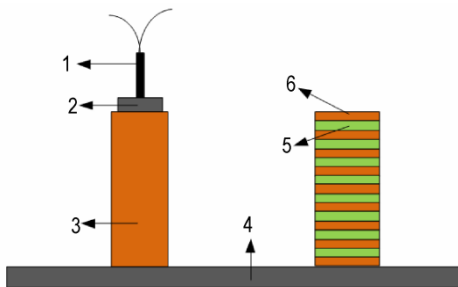


图 1 殉爆试验布局示意图

1—雷管, 2—传爆药, 3—主发装药 PBX-1, 4—见证板, 5—被发装药 PBX-2, 6—被发装药 PBX-1

Fig.1 Sketch of sympathetic detonation test

1—detonator, 2—booster, 3—donor charge PBX-1, 4—witness board, 5—acceptor charge PBX-2, 6—acceptor charge PBX-1

临界尺寸效应是由于爆轰波在传播过程中的侧向稀疏波产生的,爆轰波在叠层装药中 PBX-1 炸药中传播,如图 2 所示,其中,区域 1 为未受到侧向稀疏波影响的区域,这个区域内的化学反应能是支持爆轰波的

有效部分;区域 4 受侧向稀疏波影响,能量受到损失;靠近边缘处能量损失最大,靠近炸药片中心位置能量损失最小;区域 2 为稀疏波波阵面;区域 3 为 CJ 面。

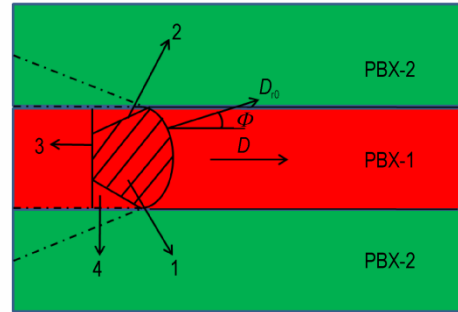


图 2 爆轰波阵面在叠层复合装药中传播示意图

1—未受稀疏波影响的反应区, 2—稀疏波波阵面, 3—CJ 面, 4—受稀疏波影响的反应区

Fig.2 Propagation of detonation wave in laminated composite charge

1—reaction zone not affected by sparse wave, 2—sparse wave surface, 3—CJ surface, 4—reaction zone affected by sparse wave

对于圆柱装药,波阵面平移速度与圆柱装药直径的关系为:

$$D/D_j = 1 - \beta \cdot l/d \quad (1)$$

式中, D 为波阵面平移速度, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; D_j 为理想爆速, $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$; d 为圆柱装药直径, mm ; l 为反应区厚度, mm ; β 是由边界条件决定的常数。波阵面上任意一点的法向爆速为 D_{r_0} , $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 与波阵面平移速度的关系为:

$$D_{r_0} = D \cos \Phi \quad (2)$$

式中, r_0 为曲率半径, mm ; Φ 为爆轰波阵面法向与爆轰波平移方向之间的夹角, $(^\circ)$ 。波阵面曲率越大, 则 Φ 越大, 从而 D_{r_0} 越小, 波阵面从两侧流动的能量越多, 损耗的能量越多, 相关研究^[11-12]也证明了法向爆速与曲率、药柱直径的关系。因此, 当药柱直径小于临界直径时, 波阵面损耗的能量过多, 不足以维持爆轰波继续传播而导致熄爆。同理, 对于叠层装药, 当药片厚度小于临界厚度时, 爆轰波也无法维持传播。因此, 设计的叠层复合装药应满足以下原则:

1) 高能炸药厚度应小于其临界厚度, 即使高能炸药被起爆, 也无法成长为爆轰波, 最终会发生熄爆;

2) 钝感炸药厚度应小于其临界厚度, 即使钝感炸药被主发装药直接起爆或被高能炸药引爆, 若钝感炸药厚度小于临界厚度, 则爆轰波也无法继续传播, 从而

整个装药无法发生高烈度反应,达到提高复合装药殉爆安全性的目的。

影响炸药临界厚度的因素有很多,如炸药的化学性质、粒径、装药密度、约束条件、粘结剂的含量和温度等,本研究选定典型HMX基炸药PBX-1,具有爆速高、驱动金属能力强和输出能量高等特点,选定典型TATB基炸药PBX-2,具有感度低和安全性好等特点。叠层复合装药中含有高能炸药PBX-1和钝感炸药PBX-2,通过合理的装药结构设计和优化,可能提高其殉爆安全性且能量下降较少。

2.2 殉爆试验

为了验证叠层复合装药抗殉爆设计方法,以PBX-1、PBX-2以及二者组合的叠层复合装药作为研究对象,开展殉爆安全性试验研究。

殉爆试验布局见图1,试验装置由雷管、传爆药、主发装药、被发装药以及见证板组成。主发装药规格为 $\Phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,被发装药由两种混合炸药叠加而成,规格为 $\Phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,主、被发装药间隔一定距离竖直放置于见证板上,见证板规格为:200 mm \times 300 mm \times 5 mm。

试验中,由雷管起爆传爆药,从而引爆主发药柱,主发药柱爆轰波向下传播,直至爆轰反应完成,同时,爆轰波离开主发药柱形成冲击波,经过一定距离衰减后冲击波作用于被发装药,被发装药对于不同强度冲击波会有相应的响应特性,根据被发装药响应情况,当被发装药殉爆概率为50%时,主发装药与被发装药之间的距离称为50%殉爆距离,又称临界殉爆距离。通过兰利法^[13]调节主、被发装药距离开展殉爆试验,获得被发装药的临界殉爆距离。

首先,选取预估的临界殉爆距离,按照图1开展试验,如果见证板上发生穿孔或出现明显凹痕,则认为装药发生爆轰反应,以此距离作为下限 x_0 ;如果见证板上未发生穿孔或未出现明显的凹痕,则认为装药未发生爆轰反应,以此距离作为上限 x_n ;其次,选取距离上限和距离下限的平均值 $x_c=(x_0+x_n)/2$ 进行殉爆试验,观测被发装药的反应情况。若被发装药发生爆轰,则以此距离作为新的距离下限,若被发装药未爆轰,则以此距离作为新的距离上限,重复以上方法进行试验,可获得被发装药的临界殉爆距离。

另外,装药安全性和能量是装药设计需要同时考虑的两个重要因素,高能炸药PBX-1与钝感炸药PBX-2的质量比对复合装药的临界殉爆距离和总能量均有影响,根据两种炸药的爆热值计算复合装药的总

能量,其中,PBX-1的爆热值为 $7868\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$,PBX-2的爆热值为 $4860\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

3 数值模拟

由于通过殉爆试验难以得到炸药内部的反应情况,因此采用数值模拟的方法进行深入研究,数值模拟是研究炸药殉爆安全性的重要方法之一,叠层复合装药的殉爆安全性数值模拟能对不同结构组合的复合装药进行计算,获得影响殉爆安全性的关键因素和规律。本研究首先参考文献[14-15]中的试验和仿真数据对建立的数值模拟方法进行验证,然后根据验证的仿真方法建立叠层复合装药殉爆数值模型。

3.1 殉爆数值模拟方法验证

本研究利用有限元软件LS_DYNA建立殉爆数值仿真模型,影响模型计算精度的主要因素包括材料参数、网格大小、边界条件和算法等,为保证建立的仿真模型的准确性,根据文献[14-15]中的典型炸药殉爆试验对本文仿真模型的计算精度进行验证。

以Lu等^[14-15]殉爆试验结果为依据进行模型精度校核。试验中主、被发装药均为PBXN-109,成分为64%RDX、20%铝粉和16%粘结剂,规格为 $\Phi 101.6\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。试验起爆方式为主发装药上端面点起爆,当被发装药距离为40 mm时,被发装药反应等级为爆轰;当被发装药距离为60 mm时,被发装药发生熄爆,判断反应等级为爆燃。

根据模型的对称性,建立1/2有限元模型,分别设立对称边界条件、非反射边界条件和求解时间等,利用有限元软件LS_DYNA建立的殉爆数值仿真模型见图3。

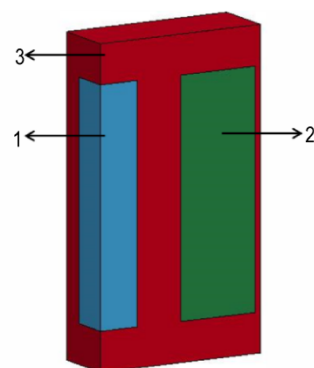


图3 PBXN-109殉爆试验仿真模型图
1—主发装药,2—被发装药,3—空气

Fig.3 Simulation model of sympathetic detonation test for PBXN-109

1—donor charge, 2—acceptor charge, 3—air

模型由主发装药、被发装药和空气组成,单元网格尺寸约为 1 mm×1 mm×1 mm,主发装药采用高能炸药模型和 JWL 状态方程,其参数见表 1,其中 A、B、R₁、R₂和 ω 为待定参数,C_v为平均热容,GPa·K⁻¹;被发装药采用流体弹塑性材料模型和 Lee-Tarver 三项点火增长反应速率状态方程,该方程可以很好地描述非均质炸药的冲击起爆特性。点火-燃烧-快反应三项式的反应速率方程如下:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left(\rho_1/\rho_0 - 1 - a \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z \quad (3)$$

式中,λ 为炸药反应度;t 为时间,μs;ρ 为密度,kg·m⁻³;ρ₀为初始密度,kg·m⁻³;p 为压力,GPa;I、G₁、G₂、a、b、c、d、e、g、x、y、z、F_{igmax}、F_{G1max}和 F_{G2min}为反应速率参数,可以通过拉氏分析进行参数拟合求出。该方程中第一

项 I(1-λ)^b(ρ₁/ρ₀-1-a)^x 用于描述热点形成及加热区的点火过程,即点火项;第二项 G₁(1-λ)^cλ^dp^y为增长项,用来描述孤立热点向外的低速增长过程;第三项 G₂(1-λ)^eλ^gp^z为快速反应项,用来描述冲击起爆反应的快速完成过程,PBXN-109 反应速率方程参数见表 2。

仿真模型中空气采用 MAT_NULL 材料模型和多项式状态方程 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 来描述,其表达式为:ρ=(γ-1)·ρ₀·E/ρ₀;其中,ρ 为空气当前密度^[16],g·cm⁻³;ρ₀为空气初始密度,ρ₀=1.29×10⁻³ g·cm⁻³;γ 为绝热指数,γ=1.4;E 为初始能量密度,E=0.25 MPa。

针对文献[14-15]中两种试验工况(主、被发装药距离分别为 R=40 mm 和 R=60 mm)分别进行了数值模拟,观测被发装药内部最大压力,本研究仿真值与文献[14-15]对比见表 3。

表 1 PBXN-109 状态方程参数^[14-15]

Table 1 The EOS of JWL for PBXN-109^[14-15]

Explosive	EOS	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	w	C _v /GPa·K ⁻¹
PBXN-109	unreacted	8.82×10 ⁵	-3.55	15.00	1.41	0.89	2.19×10 ⁻³
	product JWL	1341.30	32.70	6.00	2.00	0.20	1.00×10 ⁻³

Note: A and B are parameters to be determined; R₁, R₂ and ω are parameters to be determined; C_v is the average heat capacity.

表 2 PBXN-109 反应速率方程参数^[14-15]

Table 2 Ignition and growth reactive models parameters for PBXN-109^[14-15]

I/μs	b	a	x	G ₁ /GPa ⁻² ·μs ⁻¹	c	d	y	G ₂ /GPa ⁻³ ·μs ⁻¹	e	f	z	F _{igmax}	F _{G1max}	F _{G2min}
45500.00	0.67	0.02	8.00	0.045	0.22	0.67	2.00	4.00×10 ⁻⁴	0.33	1.00	3.00	0.22	0.50	0.00

Note: I is the parameter of reaction rate equation, G₁ is the parameter of reaction rate equation, G₂ is the parameter of reaction rate equation, a, b, c, d, e, g, x, y, z, F_{igmax}, F_{G1max} and F_{G2min} are parameters of reaction rate equation.

表 3 PBXN-109 殉爆试验结果

Table 3 Results of sympathetic detonation test for PBXN-109

No.	size/mm	R/mm	reaction degree	ρ _a /GPa		ε/%
				reference value	simulated value	
1	φ101.6×300	40	detonation	27.75 ^[14]	25.68	7.5
2	φ101.6×300	60	deflagration	1.58 ^[15]	1.43	9.5

Note: R is the distance between donor charge and acceptor charge, ρ_a is the pressure of acceptor charge, ε is the relative error between the simulated value and the literature value [14-15].

由表 3 得知,当主、被发装药距离为 40 mm 时被发装药完全爆轰,本研究仿真结果被发装药最大压力值(25.68 GPa)与文献[14-15]值(27.75 GPa)相对误差为 7.5%;当主、被发装药距离为 60 mm 时被发装药压力值逐渐降低,最终熄爆,本研究仿真结果被发装药最大压力值(1.43 GPa)与文献[14-15]值(1.58 GPa)相对误差为 9.5%。因此,对比结果表明建

立的殉爆数值模型具有一定的精度,模型网格大小、边界条件和算法等合理。

3.2 叠层复合装药殉爆数值模型

为研究叠层复合装药结构的殉爆安全性,选取典型的 HMX 基炸药 PBX-1、TATB 基炸药 PBX-2、以及二者组合的叠层复合装药作为对象开展殉爆数值模拟研究,根据上述数值模型的单元网格尺寸、边界条件和算

法等建立叠层复合装药殉爆数值模型, 分别研究 PBX-1 药柱、PBX-2 药柱和叠层复合装药的临界殉爆距离。

建立的数值模型见图 4, 其中, 主、被发装药规格均为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$; 主发装药为 PBX-1, 被发装药分别为 PBX-1、PBX-2 或者二者组成的叠层复合装药。主发装药 PBX-1 采用高能炸药模型和 JWL 状态方程, PBX-1 状态方程参数见表 4; 被发装药 PBX-1、PBX-2 采用流体弹塑性材料模型和点火增长反应速率状态方程, 其反应速率方程参数见表 5; 空气模型参数和网格尺寸与 3.1 一致。

主发装药起爆后爆轰波在药柱中传播, 爆轰波离开装药后转化为冲击波在空气中传播, 随后作用到被

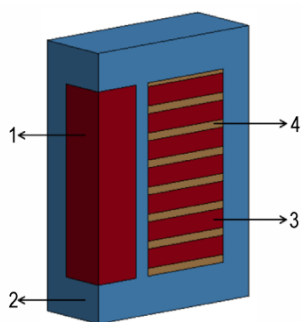


图 4 叠层复合装药殉爆数值模型

1—主发装药, 2—空气, 3—被发装药 PBX-1, 4—被发装药 PBX-2

Fig. 4 Simulation model of sympathetic detonation test for laminated composite charge

1—donor charge, 2—air, 3—acceptor charge PBX-1, 4—acceptor charge PBX-2

表 4 PBX-1 与 PBX-2 状态方程参数^[17-19]

Table 4 The EOS of JWL for PBX-1 and PBX-2^[17-19]

EOS	explosive	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$C_v/\text{GPa} \cdot \text{K}^{-1}$
unreacted JWL	PBX-1	1.48×10^5	-5.26	12.00	1.20	0.91	2.49×10^{-3}
	PBX-2	778.10	-5.03	11.30	1.13	0.89	2.49×10^{-3}
product JWL	PBX-1	1025.45	22.57	4.91	1.37	0.29	1.00×10^{-3}
	PBX-2	654.67	7.12	4.45	1.20	0.35	1.00×10^{-3}

Note: C_v is the average heat capacity.

表 5 PBX-1 与 PBX-2 反应速率方程参数^[17-19]

Table 5 Ignition and growth reactive models parameters for PBX-1 and PBX-2^[17-19]

explosive	$I/\mu\text{s}$	b	a	x	$G_1/\text{GPa}^{-1} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	c	d	y
PBX-1	10.00	0.22	0.00	6.00	0.27	1.00	0.67	1.00
PBX-2	50.00	0.22	0.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00
explosive	$G_2/\text{GPa}^{-3} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	e	f	z	F_{igmax}	F_{G1max}	F_{G2min}	
PBX-1	3.60	0.67	0.10	3.00	0.10	1.00	0.00	
PBX-2	5.00	0.22	0.67	3.00	0.30	0.00	0.00	

发装药, 若作用压力或者能量达到被发装药的起爆阈值, 则被发装药开始点火, 成长至爆炸甚至爆轰反应等级; 若作用压力或者能量未达到被发装药的起爆阈值, 则被发装药不发生反应, 或者反应等级很低, 无法成长为爆轰。根据建立的数值模拟, 设计了不同结构的叠层复合装药并开展了殉爆安全性数值模拟研究。

4 结果与讨论

4.1 仿真结果

4.1.1 PBX-1 殉爆仿真结果

根据 3.2 建立的模型开展殉爆数值模拟, 主发装药与被发装药均为 PBX-1, 起爆方式为主发装药上端面中心点起爆。

选取被发装药轴线上等间距的 6 个单元作为观测点, 观测其压力随时间变化曲线, 以此判断被发装药反应等级, 随后根据兰利法调整主、被发装药距离 R , 研究被发装药在不同距离处的响应特性, 获得被发装药临界殉爆距离。

统计仿真结果表明, 当主、被发装药距离为 9 mm 时, 被发装药观测点峰值压力逐渐增大, 最大达到 14.9 GPa, 并且压力呈增大的趋势, 其压力时程曲线见图 5, 判断被发装药的反应等级为爆轰; 当主、被发装药距离为 10 mm 时, 被发装药最大峰值压力为 0.323 GPa, 并且峰值压力逐渐下降, 其压力时程曲线见图 6, 判断被发装药未发生爆轰反应, 因此, 仿真得到 PBX-1 临界殉爆距离约为 9.5 mm。

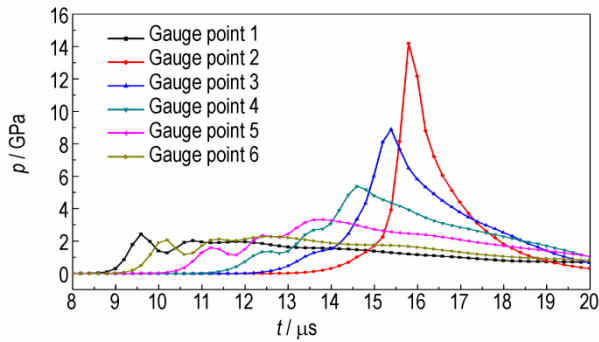


图5 被发装药内部压力曲线($R=9\text{ mm}$)
Fig.5 Pressure of acceptor charge($R=9\text{ mm}$)

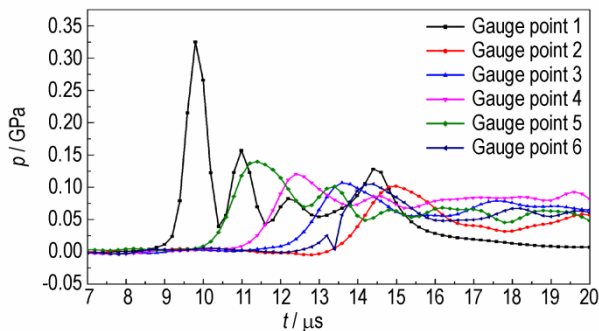


图6 被发装药内部压力曲线($R=10\text{ mm}$)
Fig.6 Pressure of acceptor charge($R=10\text{ mm}$)

4.1.2 PBX-2 殉爆仿真结果

开展 PBX-2 的殉爆数值模拟研究,主发装药为 PBX-1,被发装药为 PBX-2,起爆方式为主发装药上端面中心点起爆。

当主、被发装药距离为 2 mm 时,观测点压力峰值逐渐增大,最大峰值压力为 29.5 GPa,其压力曲线见图 7,判断该工况下被发装药响应等级为爆轰;当主、被发装药距离为 3 mm 时,被发装药观测点最大峰值压力为 7.8 GPa,随后峰值压力逐渐下降,其压力曲线见图 8,判断被发装药被起爆后发生熄爆,因此,仿真得到 PBX-2 临界殉爆距离为 2.5 mm。

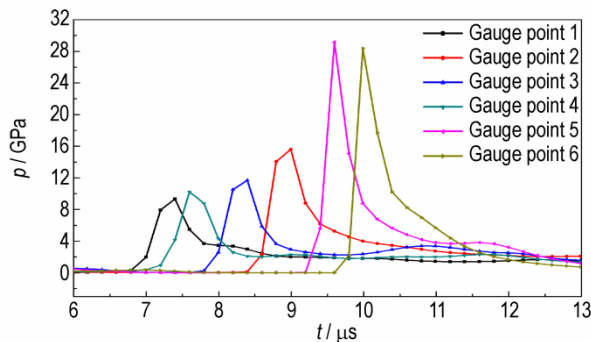


图7 被发装药压力曲线($R=2\text{ mm}$)
Fig.7 Pressure of acceptor charge($R=2\text{ mm}$)

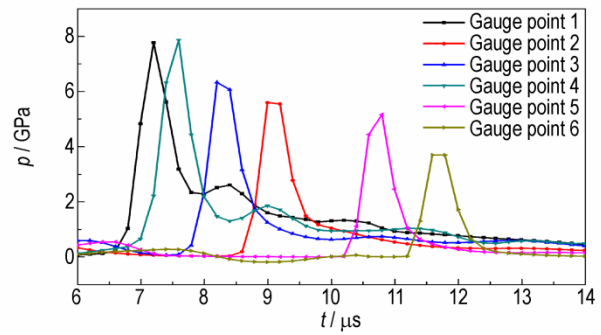


图8 被发装药压力曲线($R=3\text{ mm}$)
Fig.8 Pressure of acceptor charge($R=3\text{ mm}$)

4.1.3 叠层复合装药殉爆仿真结果

本研究设计了 15 种结构的装药作为被发装药开展殉爆数值模拟研究,见表 6。PBX-1 为主发装药,对 15 种工况的装药在不同距离处的响应进行了仿真计算,分别获得了临界殉爆距离 R_s ,并统计临界殉爆距离减小百分数 σ_{rs} 和能量降低百分数 σ_{es} (相比单一高能炸药),结果表明:(1)当 PBX-2 厚度为 2 mm 时,复合装药临界殉爆距离(8.5, 9.5, 9.5 mm)与 PBX-2 临界殉爆距离(9.5 mm)基本一致,说明当钝感装药厚度小于

表 6 不同结构叠层复合装药临界殉爆距离

Table 6 Critical sympathetic detonation distances for laminated composite charge with different structures

No.	d_{PBX-1}/mm	d_{PBX-2}/mm	η	R_s/mm	$\sigma_{rs}/\%$	$\sigma_{es}/\%$
1 [#]	0	50	$+\infty$	2.5	73.7	38.2
2 [#]	50	0	0	9.5	0	0
3 [#]		2	1	8.5	10.5	19.1
4 [#]		3	1.5	5.5	42.1	22.9
5 [#]	2	4	2	4.5	52.6	25.5
6 [#]		5	2.5	4.5	52.6	27.3
7 [#]		2	0.67	9.5	0	15.3
8 [#]		3	1	7.5	21.0	19.1
9 [#]	3	4	1.33	6.5	31.6	21.9
10 [#]		5	1.67	5.5	42.1	23.8
11 [#]		2	0.5	9.5	0	12.7
12 [#]		3	0.75	7.5	21.0	16.4
13 [#]	4	4	1	6.5	31.6	19.12
14 [#]		5	1.25	5.5	42.1	21.24
15 [#]	5	5	1	5.5	42.1	21.24

Note: d_{PBX-1} is the thickness of high energy charge PBX-1, d_{PBX-2} is the thickness of insensitive charge, η is the mass ratio of PBX-1 and PBX-2; R_s is the critical sympathetic detonation distance obtained by simulation, σ_{rs} is the reduction percentage of critical sympathetic detonation distance compared to simple high energy charge obtained by simulation, σ_{es} is the reduction percentage of energy compared to simple high energy charge obtained by simulation.

或等于 2 mm 时,对复合装药的殉爆安全性并没有显著提升;(2)钝感装药 PBX-2 厚度越大,则复合装药临界殉爆距离越小,即临界殉爆距离越趋近于单一钝感炸药的临界殉爆距离;(3)工况 5 与 6、工况 9 与 10、工况 13 与 14 的临界殉爆距离对比表明,当钝感装药厚度达到一定厚度后,对临界殉爆距离的影响不大;(4)当叠层复合装药中高能炸药与钝感炸药的厚度比小于或等于 1/2 时,如工况 5 和工况 6,则复合装药能量要损失 25.5% 以上。

统计得到复合装药能量与临界殉爆距离关系曲线,见图 9。其中, E 为复合装药能量与单一高能炸药能量的比值,%; $d_{\text{PBX-1}}$ 为高能炸药 PBX-1 的厚度,mm。由图 9 得知,随着高能炸药与钝感炸药质量比增大(即复合装药总能量增加),复合装药临界殉爆距离趋向于高能炸药的临界殉爆距离;高能炸药厚度越小,则越有利于复合装药反应等级的控制。综合考虑能量与殉爆安全性,得到最优的方案:PBX-1 (2 mm)/PBX-2(4 mm),临界殉爆距离 4.5 mm,相比于单一 PBX-1 炸药,复合装药殉爆距离减小了 52.6%,但能量减小 25.5%。

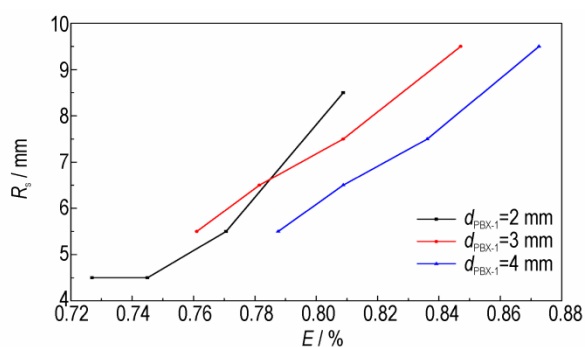


图 9 叠层复合装药能量与临界殉爆距离的关系

Fig.9 Relationship between energy and critical sympathetic detonation distance for laminated composite charge

4.2 试验结果

4.2.1 PBX-1 殉爆试验结果

以 PBX-1 作为主装药,以 PBX-1 作为被发装药,其他试验条件与殉爆试验一致,调整主、被发装药距离分别开展殉爆试验,观测被发装药响应情况。当主、被发装药距离为 7 mm 时,被发装药下方见证板有明显穿孔,见图 10,判断被发装药发生爆轰反应。当主、被发装药距离为 8 mm 时,被发装药下方见证板无明显穿孔,见图 11,判断被发装药未发生爆轰反应;因此,试验结果表明该规格 PBX-2 炸药临界殉爆距离为 7.5 mm。

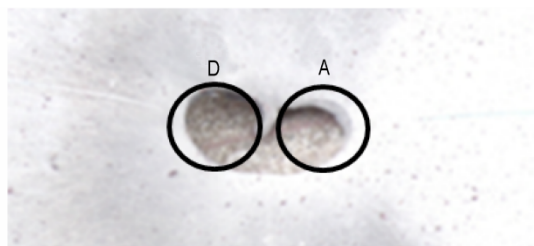


图 10 殉爆试验结果 ($R=7$ mm)

Fig.10 Results of sympathetic detonation test ($R=7$ mm)

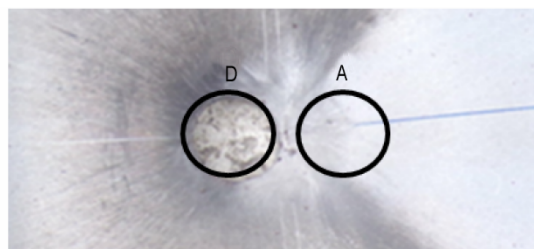
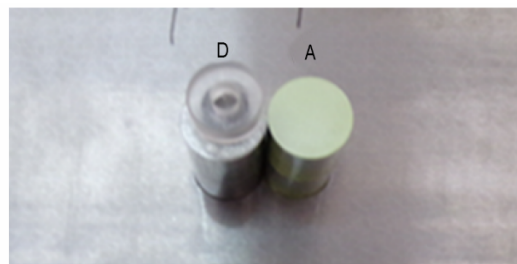


图 11 殉爆试验结果 ($R=8$ mm)

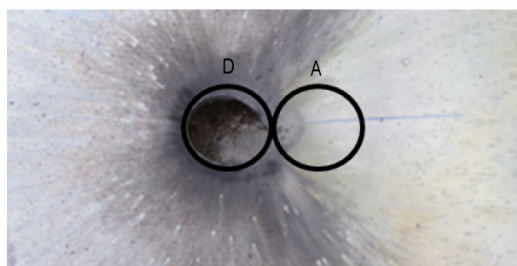
Fig.11 Results of sympathetic detonation test ($R=8$ mm)

4.2.2 PBX-2 殉爆试验结果

以高能炸药 PBX-1 作为主装药,以钝感炸药 PBX-2 作为被发装药,通过殉爆试验研究钝感炸药 PBX-2 的临界殉爆距离,试验布局见图 12a,其中 D 为主发装药;A 为被发装药。调整主、被发装药距离分别开展殉爆试验,试验结束后,通过观测见证板穿孔情况,判断被发装药反应等级,试验结果见图 12b,主、被发装药距离为 0 mm 时,被发装药未爆轰,判断该规格



a. Sketch of sympathetic detonation test for PBX-2 ($R=0$ mm)



b. Results of sympathetic detonation test for PBX-2 ($R=0$ mm)

图 12 PBX-2 装药殉爆试验布局与试验结果

Fig.12 Sketch and results of sympathetic detonation test for PBX-2 ($R=0$ mm)

药柱 PBX-2 无法被殉爆。

4.2.3 叠层复合装药殉爆试验结果

为了验证本研究提出的叠层复合装药抗殉爆设计方法的有效性和数值模拟的准确性,开展了叠层复合装药殉爆试验研究。为了与殉爆仿真结果进行对比,同时考虑到叠层复合装药的能量相比单一高能炸药不能降低太多,因此,设计了4种不同组合结构的叠层复合装药:PBX-1(2 mm)/PBX-2(2 mm)、PBX-1(2 mm)/PBX-2(3 mm)、PBX-1(3 mm)/PBX-2(3 mm)、PBX-1(5 mm)/PBX-2(5 mm),每种复合装药均由两种炸药交替叠加而成,见图13。

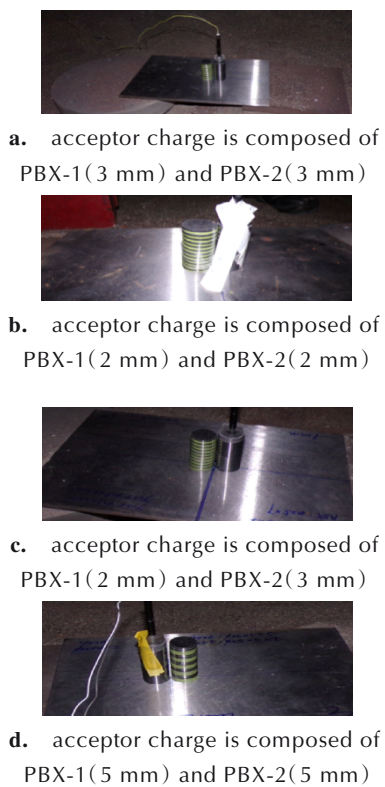


图13 叠层复合装药殉爆试验布局

Fig.13 Sketch of sympathetic detonation test for laminated composite charge

殉爆试验中,主发装药均为PBX-1,被发装药为叠层复合装药,分别获得了临界殉爆距离 R_t ,并统计临界殉爆距离减小百分数 σ_{rt} 、能量降低百分数 σ_{et} (相比单一高能炸药),见表7。结果表明:(1)PBX-1(2 mm)/PBX-2(3 mm)组合的复合装药临界殉爆距离最小,为3.5 mm,相比于单一高能炸药PBX-1,复合装药临界殉爆距离减小了53.3%,能量降低22.9%,说明叠层复合装药中钝感炸药占比越大,则殉爆安全性越好;(2)PBX-1(2 mm)/PBX-2(2 mm)组合的复合装药临界殉

爆距离与单一高能炸药PBX-1临界殉爆距离一致,说明该复合装药殉爆安全性没有得到改善,分析原认为,叠层复合装药中钝感炸药PBX-2厚度太小,对高能炸药PBX-1起爆后产生的爆轰波的隔爆效果不明显,PBX-1产生的爆轰波相互之间会发生协同作用,促进爆轰波传播,导致整体被发装药殉爆,PBX-2厚度必须达到3 mm及以上才会提高复合装药的殉爆安全性;(3)殉爆试验获得的临界殉爆距离均比仿真值小1~2 mm,说明建立的殉爆数值模型具有一定精度。

表7 叠层复合装药殉爆试验结果

Table 7 Results of sympathetic detonation tests for laminated composite charge

No.	d_{PBX-1}/mm	d_{PBX-2}/mm	R_t/mm	$\sigma_{rt}/\%$	$\sigma_{et}/\%$
1 [#]	0	50	no detonation	100	38.2
2 [#]	50	0	7.5	0	0
3 [#]	3	3	5.5	26.7	19.1
4 [#]	2	2	7.5	0	19.1
5 [#]	2	3	3.5	53.3	22.9
6 [#]	5	5	5.5	26.7	19.1

Note: d_{PBX-1} is the thickness of high energy charge PBX-1, d_{PBX-2} is the thickness of insensitive charge, R_t is the critical sympathetic detonation distance obtained by test, σ_{rt} is the reduction percentage of critical sympathetic detonation distance compared to simple high energy charge obtained by tests, σ_{et} is the reduction percentage of energy compared to simple high energy charge obtained by tests.

对比临界殉爆距离试验值与仿真值,见图14。仿真结果与试验结果趋势一致,总体上仿真获得的临界殉爆距离比试验值大,平均误差为1.6 mm,证明仿真结果具有一定精度。试验结果表明,最优的叠层复合装药结构为方案5,即PBX-1(2 mm)/PBX-2(3 mm)组合。

总结得到叠层复合装药设计规律:(1)不同厚度组合的叠层复合装药,其冲击波感度不同,因此其临界殉爆距离不同;(2)高能炸药的厚度应该尽量小于该炸药的临界传爆厚度,即使高能炸药被起爆,但是由于其厚度小于临界传爆厚度,稀疏效应耗散的能量大于爆轰反应产生的能量,爆轰反应无法成长为稳定爆轰,从而提高装药的殉爆安全性;(3)钝感炸药厚度值需达到一定阈值(3 mm),否则邻近的两个高能炸药反应产生的爆轰波会发生协同效应,促进爆轰反应的进行,可能导致整体装药发生爆轰反应;(4)高能炸药与钝感炸药的厚度比不能太小,否则装药能量过低,降低复合装药的应用价值(本研究中高能炸药/钝感炸药的比例小于1/2时,叠层复合装药能量要损失25.5%以上)。

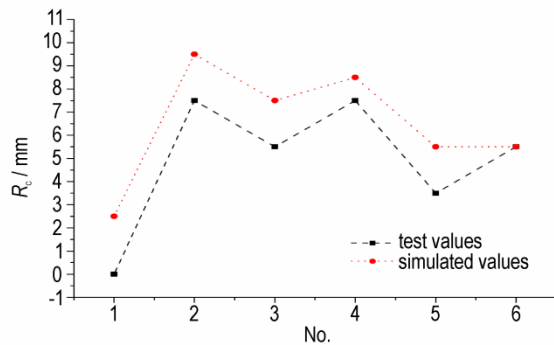


图14 临界殉爆距离试验值与仿真值对比

Fig. 14 Comparison of critical sympathetic detonation distance between test values and simulated values

5 结论

(1) 通过叠层复合装药结构设计可以调控其殉爆安全性, 殉爆试验结果表明, 通过结构优化后的叠层复合装药 PBX-1(2 mm)/PBX-2(3 mm), 临界殉爆距离相比于单一高能炸药可减小 53.3%, 能量降低 22.9%, 仿真获得的临界殉爆距离比试验值大, 平均误差为 1.6 mm, 建立的殉爆数值模型具有一定精度。

(2) 叠层复合装药中钝感炸药厚度需达到一定阈值(3 mm)才能明显降低叠层复合装药临界殉爆距离, 否则其中的高能炸药反应产生的爆轰波会发生协同效应, 促进整个药柱发生爆轰反应; 高能炸药厚度越小, 则越有利于复合装药殉爆安全性的控制;

(3) 钝感炸药厚度增加会延缓整体装药至爆轰时间; 随着高能炸药与钝感炸药厚度比减小, 复合装药临界殉爆距离趋近于钝感炸药的临界殉爆距离, 但高能炸药与钝感炸药的厚度比不能太小, 否则复合装药能量过低。

参考文献:

- [1] 黄璠, 王军, 毛耀峰, 等. TATB/CL-20 复合装药结构的 3D 打印成型技术[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 931-935.
HUANG Jin, WANG Jun, MAO Yao-feng, et al. Preparation of CL-20/TATB composite charge structure by 3D printing technology [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(11): 931-935.
- [2] 向梅, 饶国宁, 彭金华. 高能-钝感复合装药结构冲击波敏感度数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 78-81.
XIANG Mei, RAO Guo-ning, PENG Jin-hua. Numerical simulation on shockwave sensitivity of HE/IE composite charge structure [J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(11): 78-81.
- [3] 向梅, 黄毅民, 饶国宁, 等. 复合装药结构隔板实验与数值模拟[J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 246-250.
XIANG Mei, HUANG Yi-min, RAO Guo-ning, et al. Experimental and numerical simulation study of the shockwave sensitivity of composite charge explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(2): 246-250.
- [4] 韩勇, 鲁斌, 蒋志海, 等. JO-9159/ECX 复合装药的冲击波敏感度研究[J]. 含能材料, 2008, 16(2): 164-166.
HAN Yong, LU Bin, JIANG Zhi-hai, et al. Shock sensitivity of JO-9159/ECX composite charge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 164-166.
- [5] Spencer A F, Corley J D. Blast and fragmentation enhancing explosive: US, US5996501 A[P]. 1999.
- [6] 丁刚, 袁宝慧. 复合装药偏心起爆的爆轰波特性[J]. 火炸药学报, 2009, 32(1): 79-82.
DING Gang, YUAN Bao-hui. Detonation wave characteristics of dual explosive under asymmetrical initiation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(1): 79-82.
- [7] 吴成, 赵士津, 李申, 等. 定向战斗部复合装药爆轰的超压区域及破片增益特性的机理分析[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(8): 777-781.
WU Cheng, ZHAO Shi-jin, LI Shen, et al. Study on the features of fragments gains and the super-pressure field in a directed warhead with double charge lamination [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(8): 777-781.
- [8] 王辉, 沈飞, 田清政, 等. 复合装药偏心起爆条件下波形扫描实验研究[J]. 含能材料, 2015, 23(11): 1041-1045.
WANG Hui, SHEN Fei, TIAN Qing-zheng, et al. Wave scanning experiment of composite charge under eccentric initiation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11): 1041-1045.
- [9] 凌琦, 何勇, 何源, 等. 扇形复合装药驱动破片定向飞散的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2017, 31(5): 558-565.
LING Qi, HE Yong, HE Yuan, et al. Numerical simulation of directed scattering of fragments driven by sector-shaped double-layer charge [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(5): 558-565.
- [10] Bohoon Kim, Minsung Kim, Taeboo Sun, et al. Simulating sympathetic detonation using the hydrodynamic models and constitutive equations [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(12): 5491-5502.
- [11] 郭刘伟, 刘宇思, 汪斌, 等. 高温下 TATB 基钝感炸药爆轰波波阵面曲率效应实验研究[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 138-143.
GUO Liu-wei, LIU Yu-si, WANG Bin, et al. Front curvature rate stick experiment of TATB based insensitive high explosives at high temperature [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017 25(2): 138-143.
- [12] 谭多望, 方青. 常温下钝感炸药爆轰波传播的曲率效应研究[J]. 含能材料, 2005, 13(1): 13-16.
TAN Duo-wang, FANG Qing. Curvature effect for insensitive explosive at normal atmospheric temperature [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(1): 13-16.
- [13] 王翔, 卢校军, 黄毅民, 等. 殉爆试验研究[C]//第九届全国爆炸与安全学术学术会议, 沈阳, 中国兵工学会, 2006.
WANG Xiang, LU Xiao-jun, HUANG Yi-ming, et al. Research on sympathetic test [C]//Proceedings of national symposium on explosion and safety technology, Shenyang, China ordnance society, 2006.
- [14] Lu J P. Experimental and Modelling of PBXN-109 Sympathetic detonation initiated by fragmented donor case [C]//15th Sym-

- posium (International) on Detonation, San Francisco, CA, USA, 2014.
- [15] Lu J P, Lochert L J, Daniel M A, et al. Shock sensitivity studies for PBXN-109[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41: 562-571.
- [16] 连赟猛, 方道红, 顾晓辉, 等. 典型密闭装置内爆炸尺寸效应研究[J]. *爆破器材*, 2012, 41(5): 1-4.
- LIAN Yun-meng, FANG Dao-hong, GU Xiao-hui, et al. Effect of scales on typical closed structure due to internal explosion[J]. *Explosive Materials*, 2012, 41(5): 1-4.
- [17] Hussain T, Liu Y, Huang F, et al. Ignition and growth modeling of shock initiation of different particle size formulations of PBXC03 explosive[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2016, 34(1): 38-48.
- [18] Tarver C M, Hallquist J O. Modeling Two Dimensional Shock Initiation and Detonation Wave Phenomena in PBX9404 and LX-17[C]//7th Symposium (International) on Detonation, Naval Surface Weapons Center NSWC MP, 1981.
- [19] Tarver C M, Parker N L, Palmer H G, et al. Reactive flow modeling of recent embedded gauge and metal acceleration experiments on detonating PBX-9404 and LX-17[J]. *Journal of Energetic Materials*, 1983, 1(3): 213-250.

Sympathetic Detonation Test and Simulation of Laminated Composite Charge

LI Xing-long^{1,2}, WU Kui-xian^{1,2}, LU Zhong-hua^{1,2*}, GAO Da-yuan^{1,2}, HUANG Heng-jian^{1,2}, CHEN Ke-quan^{1,2},
CHEN Hong-xia^{1,2}, KOU Jian-feng^{1,2}, WANG Jie^{1,2}

(1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. Robust Munitions Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: Laminated composite charge is composed of two or more different charges by way of superposition, in which the safety and power performance can be regulated through the design of charge structure. To study the sympathetic detonation safety of laminated composite charge, typical composite charges which contain both the high energy charge and insensitive charge were selected as research objects. The effect of different charges structure on critical sympathetic detonation distance was explored through numerical simulation and sympathetic detonation tests. Results showed that, compared to simple high energy charge, the sympathetic detonation of composite charge decreases 53.3% (from 7.5 mm decreases to 3.5 mm), while energy decreases 22.9%. The thickness of insensitive charge must reach a certain threshold (3 mm) in order to reduce the critical sympathetic detonation distance obviously. As the content of insensitive charge increases, the critical sympathetic detonation distance is closer to insensitive charge.

Key words: composite charge; sympathetic detonation test; chock wave sensitivity; simulation

CLC number: TJ410.+2

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021014

(责编: 高毅)