

文章编号:1006-9941(2025)01-0065-08

HNS-IV基PBX的冲击起爆点火增长模型参数

赵雅琦^{1,2}, 杨沙^{1,2}, 曹威^{1,2}, 郭伟^{1,2}, 宋清官^{1,2}, 段英良^{1,2}, 黄兵¹, 韩勇^{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究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了获得HNS-IV(IV型六硝基芪)基高聚物粘结炸药的冲击起爆点火增长模型参数,采用炸药平面波加载冲击波的方法,冲击波经隔板衰减后作用到被测炸药上,使用光学多普勒测速技术获得被测炸药与LiF窗口的界面粒子速度曲线。一发试验的隔板上可同时放置多发不同厚度药片,通过调整隔板厚度改变输入压力,可以获得界面粒子速度的增长过程。同时,基于反向撞击法获得了被测炸药的未反应冲击绝热线,基于直径10 mm圆筒试验获得了圆筒膨胀速度时间曲线,采用遗传算法拟合试验结果分别获得了未反应炸药和爆轰产物JWL状态方程参数。最后,采用点火增长模型对不同厚度炸药与LiF窗口的界面粒子速度曲线进行了拟合。结果表明,未反应炸药和爆轰产物状态方程参数曲线拟合相关性较高,获得的点火增长模型参数很好地模拟了冲击起爆试验结果,可以满足起爆传爆序列设计需要。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX);冲击起爆;点火增长;HNS-IV;状态方程

中图分类号: TJ55;O389

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024052

0 引言

对炸药在冲击作用下的起爆现象进行研究可获得炸药的起爆机理,建立炸药冲击起爆的定量判据,对炸药的生产、储存和使用安全,以及武器弹药的作用可靠性和使用安全性具有重要意义。为了研究炸药的冲击起爆试验现象,在实验中通常使用平面波透镜、弹丸、杆、飞片等冲击加载手段^[1]。在冲击起爆的参数研究中,通常使用的测试方法包括高速转镜相机获得楔实验炸药出射光、电磁粒子速度计获得炸药中间的粒子速度、锰铜压力计获得炸药中间的压力等。近年来,多普勒测速技术在爆轰和冲击波测量领域广泛应用,使用的测试波段通常包括微波、激光和太赫兹等^[2]。在描述非均质炸药冲击起爆和爆轰反应的化学反应速率模型方面,国内外提出了多种模型,如压力相关的

Forest Fire 反应速率模型,基于热点概念建立的Lee-Tarver点火增长(Ignition and Growth, I&G)反应速率模型,考虑中间态变量的多过程热点反应速率的JTF(Johnson-Tang-Forest)模型,与炸药初始微观结构相关的Kim反应速率模型,熵相关的CREST模型等^[3-4]。其中比较常用的Lee-Tarver点火增长反应速率模型,该模型由炸药未反应和反应产物JWL状态方程和反应速率方程构成^[5]。

六硝基均二苯基乙烯(六硝基芪,HNS)是一种耐热炸药,广泛用于航天、井下工程的起爆药和传爆药配方。HNS根据不同的粒径和纯度有多种产品形式(I~V),HNS-IV通过HNS-II破碎沉淀提纯得到,HNS-II通过使用HNS-I重结晶得到^[6-7]。HNS的晶体密度为 $1.74\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,而其通常的使用密度在 $1.60\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右(孔隙率约为8%)。为了改善HNS的成型性能,通常加入粘结剂形成高聚物粘结炸药(PBX),如LX-15炸药(95% HNS I和5% Kel F-800)^[8]。

本研究以HNS-IV基PBX为待测炸药,采用平面波透镜加载冲击波方法,一发透镜可同时加载多发不同厚度的待测炸药,获得了不同厚度待测炸药与窗口的界面粒子速度成长过程,同时基于实验获得了待测炸药未反应炸药状态方程和反应产物状态方程参数,最

收稿日期:2024-02-06;修回日期:2024-04-16

网络出版日期:2024-05-14

基金项目:国家自然科学基金(12272359)

作者简介:赵雅琦(1991-),女,助理研究员,主要从事炸药爆炸反应动力学研究。e-mail:zhaoyq09@yeah.net

通信联系人:曹威(1988-),男,副研究员,硕士,主要从事含能材料爆炸反应特性研究。e-mail:weicao@caep.cn

引用本文:赵雅琦,杨沙,曹威,等. HNS-IV基PBX的冲击起爆点火增长模型参数[J]. 含能材料,2025,33(1):65-72.

ZHAO Ya-qi, YANG Sha, CAO Wei, et al. Parameters of the Ignition and Growth Model for HNS-IV based PBX under Shock Initiation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2025, 33(1):65-72.

终拟合得到了待测炸药的冲击起爆点火增长模型参数,为起爆传爆序列设计提供基础参数。

1 实验部分

1.1 实验样品

待测炸药为 HNS-IV 基 PBX 由中国工程物理研究院化工材料研究所提供,组成为 HNS IV 和氟橡胶粘结剂,采用水悬浮法造粒,模压成型,压装密度 ρ 为 $(1.58 \pm 0.01) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 实验方法

待测炸药的未反应炸药状态方程参数由未反应炸药的冲击绝热线计算得到。冲击绝热线参数采用反撞法获得^[9],实验中使用 $\Phi 57 \text{ mm}$ 口径火炮加载,样品尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。

待测炸药的反应产物状态方程参数由 $\Phi 10 \text{ mm}$ 圆筒实验的圆筒膨胀曲线拟合获得,如图 1 所示,样品尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,圆筒壁厚 2.5 mm,长度为 120 mm,使用 PDV 测试距圆筒起爆端 80 mm 处的圆筒膨胀曲线(此位置的选取可保证炸药稳定爆轰且减少稀疏波的影响),示波器采样率为 $40 \text{ GSample} \cdot \text{s}^{-1}$,同时参照文献[10]的方法,使用电探针获得炸药的爆速。

在冲击起爆实验中,为获得不同厚度待测炸药与窗口的界面粒子速度成长过程,使用 8 号雷管起爆直径 $\Phi 100 \text{ mm}$ 平面波透镜和 $\Phi 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的 HMX 基传爆药(95% HMX, $\rho = (1.859 \pm 0.005) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 加载冲击波,冲击波经 $\Phi 100 \text{ mm}$ 钨板(W95NiFe)和 $\Phi 100 \text{ mm}$ 铝板(2A12)衰减后进入待测炸药。待测炸药药柱直径为 10 mm,高度分别为 1, 3, 5, 7 mm(高度误差均控制在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以内)。待测药柱中心布放在铝隔板上直径为 30 mm 的同心圆周上,圆周上设六个均匀分布的位置用来定位待测样品。LiF 窗口尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,窗体的透光方向应垂直于 LiF 晶体解

理面(100),窗口与待测炸药接触面镀一层厚度为 $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 的铝膜用作测试激光反射面。使用光子多普勒测速技术(PDV)获得待测炸药与窗口的界面粒子速度曲线,示波器采样率为 $40 \text{ GSample} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 2 给出了冲击起爆实验的布置示意图。由于 LiF 窗口受压后折射率会发生变化,故需对获得的界面粒子速度进行修正^[11]。

2 实验结果与模型参数的研究

2.1 未反应炸药 JWL 状态方程参数

利用反撞法测量样品击靶的速度 W 和波后粒子速度 u_p ,由冲击波阵面的质量、动量守恒方程和界面连续性条件^[9],获得炸药样品中波后粒子速度 u_s 和冲击波速度 D_s 。对于反撞法的相对测量不确定度约为 3%^[12]。如图 3 所示,将 u_s 和 D_s 按照线性关系拟合:

$$D_s = C_0 + S u_s \quad (1)$$

式中, C_0 和 S 是常数。对本研究样品,拟合获得 $C_0 = 1.396 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $S = 2.215$ ^[13]。

由冲击波阵面的质量、动量守恒方程和冲击绝热线关系式(1),设炸药初始压力 p_0 和初始速度 u_0 为 0,可以得到未反应炸药的冲击绝热线在 (p, V) 平面上的表达形式为:

$$p_H = \frac{C_0^2 (V_0 - V)}{[V_0 - S(V_0 - V)]^2} \quad (2)$$

式中, V 为炸药受冲击后的体积; V_0 为炸药初始体积。

未反应炸药的 JWL 状态方程通常采用温度 T 相关方程描述^[14]:

$$p = A e^{-R_1 v} + B e^{-R_2 v} + \omega c_{ve} T / v \quad (3)$$

$$E = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 v} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 v} + c_{ve} T \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial E}{\partial T} \right) \Big|_v = c_{ve} \quad (5)$$

式中, v 是相对比体积, $v = \frac{V}{V_0}$; A, B, R_1, R_2, ω 和 c_{ve} 是

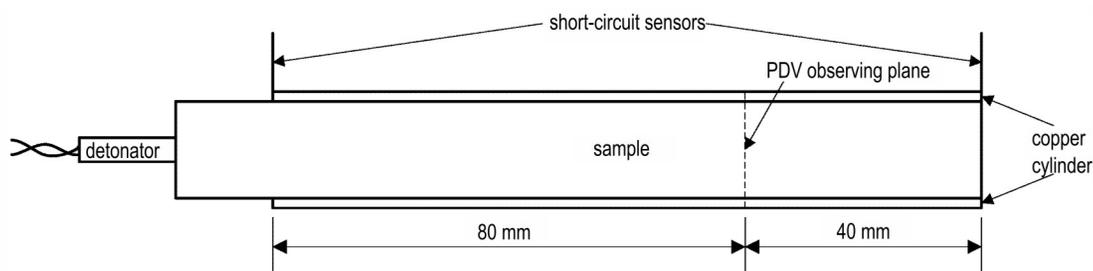


图 1 $\Phi 10 \text{ mm}$ 圆筒实验布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of $\Phi 10 \text{ mm}$ cylinder expansion test

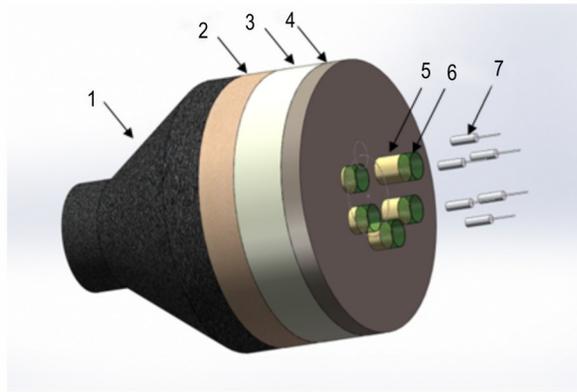


图2 冲击起爆实验布置示意图

1—平面波透镜, 2—传爆药, 3—钨板, 4—铝板, 5—样品, 6—窗口, 7—PDV 探头

Fig.2 Schematic diagram of shock initiation experiment

1—plane wave lens, 2—booster, 3—tungsten plate, 4—aluminum plate, 5—sample, 6—window, 7—PDV probe

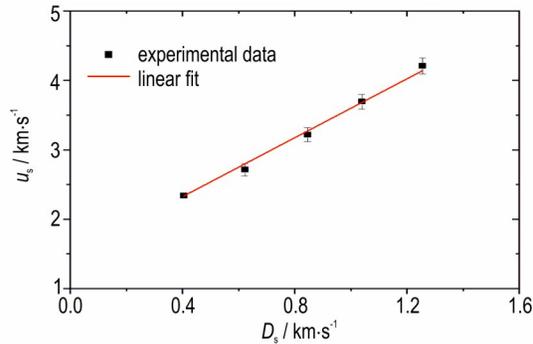


图3 样品的冲击雨贡纽关系曲线

Fig.3 Shock Hugoniot relationship curve of sample

炸药常数, 其中 B 通常为负值, 以使凝聚态炸药能够承受拉伸作用, ω 是 Grüneisen 系数, c_{ve} 是炸药比热, 但不是炸药真实比热, 通常需要调整以匹配其他参数; E 是内能。消去方程 (3) 和 (4) 中的温度 T , 并将其代入 Grüneisen 方程 (6), 可得未反应炸药 JWL 一般 (力学) 状态方程 (7):

$$p = p_H + \frac{\omega}{v}(E - E_H) \quad (6)$$

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right)e^{-R_1 v} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right)e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (7)$$

将 JWL 状态方程一般形式 (7) 用于 Hugoniot 曲线, 得到:

$$\begin{cases} p_H = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right)e^{-R_1 v} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right)e^{-R_2 v} + \frac{\omega E_H}{v} \\ E_H = E_0 + \frac{1}{2} p_H (1 - v) \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) 取炸药初始内能 (化学能除外) $E_0=0$, 便可整理得到 (p, v) 平面上用 JWL 方程形式描述的未反应

炸药的冲击绝热线关系:

$$p_H = \frac{A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right)e^{-R_1 v} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right)e^{-R_2 v}}{1 + \frac{\omega}{2} - \frac{\omega}{2v}} \quad (9)$$

因此, 将式 (2) 描述的曲线拟合成式 (9) 的形式, 便可以确定出未反应炸药 JWL 状态方程的 6 个参数 A, B, R_1, R_2, ω 和 c_{ve} 的值。这 6 个参数并不是相互独立的, 还需满足 3 个约束条件^[15]:

(I) 初始状态: $v=1, T_0=298\text{ K}, p=0$, 由式 (3) 得

$$Ae^{-R_1} + Be^{-R_2} + \omega c_{ve} T_0 = 0 \quad (10)$$

(II) 在初始状态点处, Hugoniot 曲线与等熵线相切:

$$-\rho_0 C_0^2 \left(\frac{\partial p_H}{\partial v}\right)_{v=1} = A\left(\frac{2\omega + R_1 \omega + \omega^2 - 2R_1^2}{2R_1}\right)e^{-R_1} + B\left(\frac{2\omega + R_2 \omega + \omega^2 - 2R_2^2}{2R_2}\right)e^{-R_2} \quad (11)$$

(III) 当冲击波速度到达爆速时, $p_H = p_N$, 即

$$p_H = \frac{A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 v_N}\right)e^{-(R_1 v_N)} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 v_N}\right)e^{-(R_2 v_N)}}{1 + \frac{\omega}{2} - \frac{\omega}{2v_N}} = p_N \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} p_N = \rho_0 D_{Cl} u_N = \rho_0 D_{Cl} \frac{D_{Cl} - C_0}{S} \\ v_N = \frac{V_N}{V_0} = \frac{\rho_0}{\rho_N} = 1 - \frac{u_N}{D_{Cl}} = 1 - \frac{D_{Cl} - C_0}{S \cdot D_{Cl}} \end{cases} \quad (13)$$

式 (10)、(11)、(12) 即为未反应状态方程的六个参数应满足的相容关系, 对于本研究样品, 爆速 D_{Cl} 由圆筒实验给出。

研究标定未反应炸药 JWL 状态方程的具体方法为: 在给定范围内, 任选 $R_1, R_2=R_1/10$ 和 ω 代入式 (10)、(11) 和 (12), 解出 A, B 和 c_{ve} 值。然后, 再将解出的 A, B 值和 R_1, R_2, ω 代入式 (9), 在 $v \in [1, v_N]$ 区间内与冲击绝热线 (2) 式比较, 用遗传算法优化拟合这些参数^[15]。在获得最优解的过程中, 在 (p, v) 平面上, 用式 (9) 在 Hugoniot 曲线的 n 个特征点的计算结果 $p_H(v)$ 与式 (2) 的实验结果 $p'_H(v)$ 构造目标函数:

$$Z = \sum_{i=1}^n (p_H(v) - p'_H(v))^2 \quad (14)$$

取目标函数最小值,从而确定最佳参数值。

表 1 为据此获得的未反应炸药 JWL 状态方程参数。

拟合与实验结果对比见图 4,两条曲线相关性系

数 R^2 达到 0.99,可见采用遗传算法拟合状态方程参数结果较好,遗传算法作为应用较为普遍的智能优化算法,为解决复杂优化问题提供了有效的思路,具有良好的全局搜索能力和健壮性^[16]。

表 1 HNS-IV 基 PBX 的点火增长模型参数值

Table 1 Ignition & growth model parameters for HNS-IV based PBX

unreacted JWL EOS	product JWL EOS	reaction rate parameters	
$A=7.92e+6$ GPa	$A=385.6$ GPa	$I = 1.4e+6 \mu s^{-1}$	$G_2 = 2500 \text{ Mbar}^{-3} \cdot \mu s^{-1}$
$B=-25.33$ GPa	$B=3.2$ GPa	$a = 0.267$	$e = g = 0.667$
$R_1=21.6$	$R_1=4.298$	$b = 0.667$	$z = 3.0$
$R_2=2.16$	$R_2=1.053$	$x = 4.0$	$F_{igmax} = 0.08$
$\omega=2.188$	$\omega=0.282$	$G_1 = 200 \text{ Mbar}^{-2} \cdot \mu s^{-1}$	$F_{G1max} = 0.5$
$c_{ve}=4.4858e-3$ GPa·K ⁻¹	$c_{ve}=1.0e-3$ GPa·K ⁻¹	$c = d = 0.667$	$F_{G2min} = 0.0$
$T_0=298$ K	$E_0=6.6$ GPa	$y = 2.0$	

Note: 1 Mbar=100 GPa.

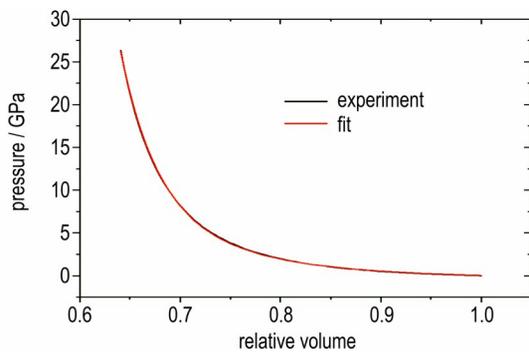


图 4 试验和拟合获得的冲击绝热线对比

Fig. 4 Comparison of shock adiabat curves from experiment and fit

2.2 爆轰产物 JWL 状态方程参数

使用 PDV 获得圆筒膨胀速度-时间曲线,将膨胀速度对时间积分,即可获得圆筒膨胀位移-时间曲线。对于圆筒实验,不确定度主要来自实验测试和数据处理,对于采用 PDV 测速的圆筒实验,装配带来的相对不确定度较小(约为 0.5%),影响速度曲线不确定度的来源主要为 PDV 系统的测量不确定度,其相对不确定度约为 1%^[17]。图 5 给出了典型的圆筒膨胀速度-时间曲线和积分后的位移-时间曲线,位移-时间曲线取两发实验获得的平均值。

爆轰产物 JWL 状态方程仍采用式(7)一般形式,在较大的压力范围内,其等熵形式为^[18]:

$$p_s = Ae^{-R_1 v} + Be^{-R_2 v} + Cv^{-(1+\omega)} \quad (15)$$

$$E_s = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 v} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 v} + \frac{C}{\omega} v^{-\omega} \quad (16)$$

此外,拟合爆轰产物 JWL 状态方程参数还需满足以下三个约束条件^[18]:

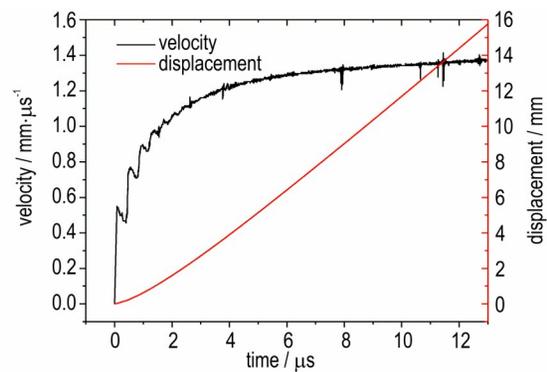


图 5 圆筒膨胀速度-时间和位移-时间曲线

Fig. 5 Cylinder expansion velocity-time and displacement-time curves

$$AR_1 e^{-R_1 v_{Cl}} + BR_2 e^{-R_2 v_{Cl}} + C(\omega + 1)v_{Cl}^{-(\omega+2)} = \rho_0 D_{Cl}^2 \quad (17)$$

$$\frac{A}{R_1} e^{-R_1 v_{Cl}} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 v_{Cl}} + \frac{C}{\omega} v_{Cl}^{-\omega} = E_0 + \frac{1}{2} \rho_{Cl} (1 - v_{Cl}) \quad (18)$$

$$Ae^{-R_1 v_{Cl}} + Be^{-R_2 v_{Cl}} + Cv_{Cl}^{-(\omega+1)} = p_{Cl} \quad (19)$$

式中, $v_{Cl} = k/(k+1)$, $k = \rho_0 D_{Cl}^2 / \rho_{Cl} - 1$; 对于研究样品,圆筒实验获得 $D_{Cl} = 6.80 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 实测爆压 $p_{Cl} = 19.1 \text{ GPa}$; 若取常态下爆轰产物的内能为能量零点, E_0 就是常态下单位初始体积的炸药转变为常态下爆轰产物时释放的能量(爆热), 研究取 $E_0 = 6.6 \text{ GPa}$ (爆热实测值 $4.2 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与密度的乘积)。因此, 还需要确定爆轰产物 JWL 状态方程的 6 个未知参数: A, B, C, R_1, R_2 和 ω 。

研究标定爆轰产物 JWL 状态方程的具体方法为: 在给定的范围内, 任选 R_1, R_2 和 ω 代入式(17)、(18)和(19), 解出 A, B 和 C 值。然后, 再将解出的 A, B 值和 R_1, R_2, ω 代入爆轰产物 JWL 状态方程式(7), 采用嵌入该状态方程的二维流体动力学程序对圆筒实验作数值

模拟计算,将模拟获得的圆筒膨胀速度-时间曲线与实验曲线进行比较,用遗传算法优化拟合这些参数^[19-20]。在获得最优解的过程中,在(速度 u , 时间 t) 平面上,用 n 个特征时间点的数值模拟的结果 $u(t)$ 与实验结果 $u'(t)$ 构造目标函数:

$$Z = \sum_{i=1}^n (u(t) - u'(t))^2 \quad (20)$$

取目标函数最小值,从而确定最佳系数值。表 1 给出了据此获得的爆轰产物 JWL 状态方程参数。拟合结果见图 6,两条曲线相关性系数 R^2 达到 0.97,可见拟合方法的有效性。

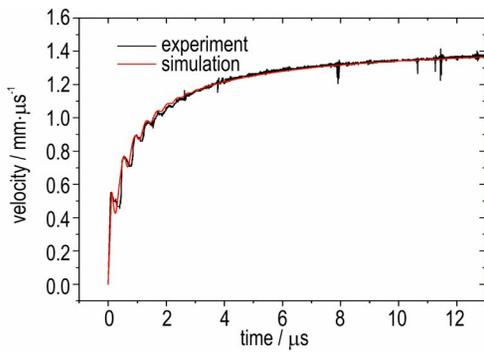


图 6 试验和数值模拟获得的圆筒膨胀速度-时间曲线对比
Fig. 6 Comparison of cylinder expansion velocity-time curves from experiment and numerical simulation

2.3 冲击起爆点火增长模型参数

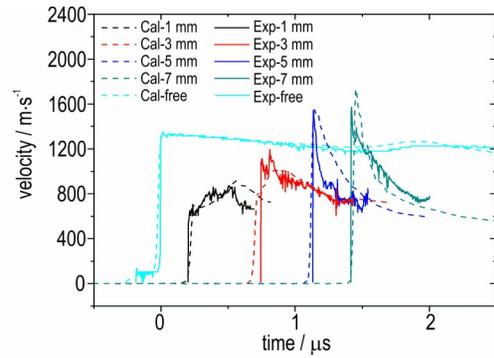
为了获得样品在不同强度冲击波加载下的冲击起爆过程,本研究通过改变隔板厚度,开展了平面波冲击起爆实验,获得了不同的加载压力下样品与窗口的界面粒子速度曲线,衰减板厚度的选取要确保实现样品的冲击起爆点火增长过程。对于冲击起爆实验,不确定度主要来自实验测试和数据处理,对于采用 PDV 测速的冲击起爆实验,装配带来的相对不确定度约为 1.5%,影响速度曲线不确定度的来源主要为 PDV 系统的测量不确定度,其相对不确定度约为 1%,合成相对不确定度约为 1.8%。实验条件如表 2 所示,通过实验获得了样品冲击起爆阶段的界面粒子速度演化历程。

图 7 给出 4 种条件下的实验结果,Exp-1mm、

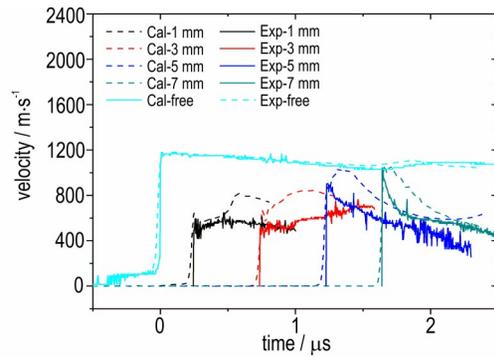
表 2 冲击起爆实验隔板厚度

Table 2 Thicknesses of attenuators in shock initiation tests

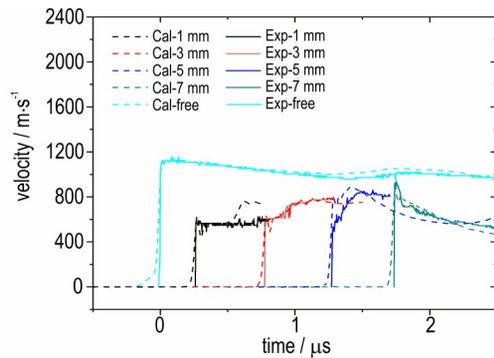
case No.	tungsten attenuator / mm	aluminum attenuator / mm
1	33	8
2	35	8
3	37	8
4	38	5



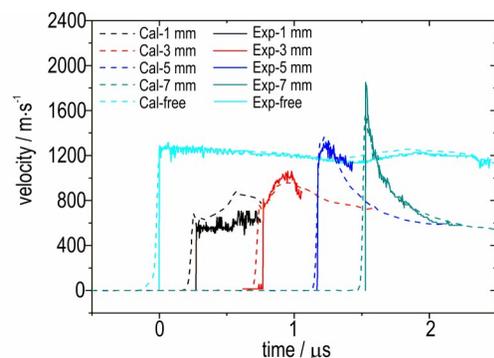
a. case No. 1



b. case No. 2



c. case No. 3



d. case No. 4

图 7 实验和数值计算获得的冲击起爆界面粒子速度时程曲线对比

Fig.7 Comparison of shock initiation interface particle velocity histories from experiment and numerical calculation

Exp-3 mm、Exp-5 mm、Exp-7 mm 和 Exp-free 分别代表样品厚度为 1, 3, 5, 7 mm 的界面粒子速度和自由面粒子速度曲线, 横坐标的时间绝对零点定义为自由面粒子速度的初始峰值点。从图 7 中可以看出, 4 种不同厚度的药片与窗口间的界面粒子速度时程曲线很好地

$$dF/dt = I(1 - F)^b(\rho/\rho_0 - 1 - a)^x + G_1(1 - F)^c F^d p^y + G_2(1 - F)^e F^z p^z \quad (21)$$

$$0 < F < F_{igmax} \quad 0 < F < F_{G1max} \quad F_{G2min} < F < 1$$

式中, F 是反应度; $I, G_1, G_2, a, b, c, d, e, g, x, y$ 和 z 是 12 个可调系数; F_{igmax}, F_{G1max} 和 F_{G2min} 是三个开关常数。模型中右边三项依次描述点火、燃烧和快反应 3 个阶段, 通过设定每一阶段反应度 F 的最大值和最小值, 使 3 项中的每一项在合适的 F 值时开始或截断。三项点火增长模型中共有 15 个参数需要确定, 拟合的工作量较大, 其中一些参数有常用值, 可以减少一定的工作量^[21]。

使用三项点火增长模型对样品的冲击起爆试验结果进行数值计算, 计算采用二维模型, 为了提高计算效率, 计算模型简化为铝衰减板、样品和窗口三种材料, 如图 8 所示, 铝衰减板厚度为 8 mm, 样品厚度取实际测量值, 沿着冲击波传播方向的网格加密, 网格大小为 0.025 mm×0.1 mm。计算时, 利用试验获得的铝隔板自由面速度时程曲线反推验证获得铝隔板迎波面的粒子速度时程曲线, 并以此为加载条件开展冲击起爆条件下样品与窗口的界面粒子速度模拟。铝衰减板采用 Grüneisen 状态方程和 Johnson Cook 材料模型, 窗口材料采用 Grüneisen 状态方程和 elastic-plastic hydrodynamic 材料模型, 炸药样品采用 elastic-plastic hydrodynamic 材料模型^[22]。状态方程和材料模型参数见表 3 和表 4^[22-23]。

通过对 4 组实验数据进行反复迭代计算, 即可获得样品的点火增长模型参数, 相关参数如表 1 所示。图 7 给出了 4 种条件下计算结果(图中虚线, Cal-系列)与实验结果的对比, 通过比较粒子速度波形和到达时间, 两者符合性较好。图 7 中对比结果表明, 采用此种

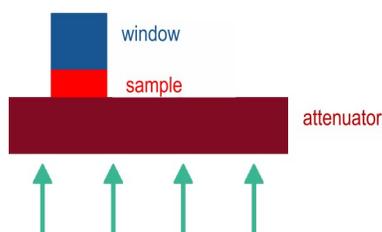


图 8 冲击起爆二维计算模型示意图

Fig.8 Schematic diagram of the two-dimensional calculation model of shock initiation

反映出了冲击起爆的点火增长过程, 自由面速度测试结果则给出了铝衰减板的自由面粒子速度时程曲线, 这将作为下文开展数值拟合时加载至隔板的粒子速度时程曲线的验证波形。

Lee-Tarver 的三项点火增长反应速率模型如下:

表 3 铝和 LiF 的 Grüneisen 状态方程参数

material	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$C_0 / \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	S	Γ
aluminum	2.785	5.37	1.29	2.0
LiF	2.638	5.15	1.35	2.0

Note: ρ is density, C_0, S and Γ are material constants of Grüneisen EOS.

表 4 铝、LiF 和样品的材料模型参数

material	G / GPa	A / MPa	B / MPa	n	C	m	σ_y / GPa
aluminum	25	289.6	203.4	0.35	0.011	1.34	—
LiF	49	—	—	—	—	—	0.36
sample	3.54	—	—	—	—	—	0.20

Note: G is shear modulus, A is yield strength, B is parameter of strain hardening, n is sensitivity exponent of strain rate, C is sensitivity coefficient of strain rate, m is hardening exponent of temperature, σ_y is yield strength.

试验和计算拟合方法, 可以很好地获得样品的点火增长模型参数。

3 结论

(1) 基于反向撞击法获得了 HNS-IV 基炸药的未反应冲击绝热线, 并使用遗传算法拟合得到了未反应炸药的 JWL 状态方程参数;

(2) 基于直径 10 mm 圆筒实验获得了 HNS-IV 基炸药的圆筒膨胀速度时间历程曲线, 并使用遗传算法拟合获得了爆轰产物的 JWL 状态方程参数;

(3) 使用炸药平面波加载冲击波衰减后同时作用到不同厚度药片, 获得了被测炸药与 LiF 窗口的界面粒子速度, 采用三项式点火增长反应速率模型对不同厚度炸药与 LiF 窗口的界面粒子速度曲线进行了拟合。结果表明, 获得的点火增长模型参数很好地拟合了试验结果, 可以满足工程可靠性设计需要。

致谢: 感谢中国工程物理研究院流体物理研究所未反应炸药冲击雨贡组参数测试方面给予的大力协同。

参考文献:

- [1] CAMPBELL A W, DAVIS W C, RAMSAY J B, et al. Shock initiation of solid explosives [J]. *Physics of Fluids*, 1961, 4: 511-521.
- [2] ZHAI Z, SUN C, LIU Q, et al. Design of terahertz-wave Doppler interferometric velocimetry for detonation physics [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(16): 161102.
- [3] HANDLEY C A, LAMBOURN B D, WHITWORTH N J, et al. Understanding the shock and detonation response of high explosives at the continuum and meso scales [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5: 011303.
- [4] 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, 40(3): 237-253.
DUAN Zhuo-ping, BAI Zhi-ling, HUANG Feng-lei. Advances in shock initiation and detonation of heterogeneous solid explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 40(3): 237-253.
- [5] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23: 2362-2372.
- [6] VISWANATH D S, GHOSH T K, BODDU V M. Emerging energetic materials: Synthesis, physicochemical, and detonation properties [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2018.
- [7] HE S, ZHANG H, LI G, et al. Solid-phase ripening of hexanitrostilbene (HNS) nanoparticles: Effects of temperature and solvent vapour [J]. *Energetic Materials Frontiers*, 2022, 3(4): 240-247.
- [8] STULL T W. Formulation of custom sized LX-15 granules [R]. US: MHSMP-80-19, 1980.
- [9] 裴红波, 刘俊明, 张旭, 等. 基于反向撞击法的 JB-9014 炸药 Hugoniot 关系测量 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 052301.
PEI Hong-bo, ZHANG Jun-ming, ZHANG Xu, et al. Measurement of Hugoniot relation for unreacted JB-9014 explosive with reverse-impact method [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 052301.
- [10] 中国人民解放军总装备部. GJB 8351-2015: 炸药圆筒试验光学扫描和激光干涉联合测试方法 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2015.
General Armament Department of PLA. GJB 8351-2015: Combined method of streak photography and laser interferometry for cylinder test of explosives [S]. Beijing: Military Standard Publishing Bureau of General Armament Department, 2015.
- [11] LIU Q, ZHOU X, ZENG X, et al. Sound velocity, equation of state, temperature and melting of LiF single crystals under shock compression [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(4): 045901.
- [12] 裴红波, 李淑睿, 郭文灿, 等. 基于反向撞击法的 RDX 基含铝炸药冲击起爆实验研究 [J]. *含能材料*, 2023, 31(5): 425-430.
PEI Hong-bo, LI Shu-rui, GUO Wen-can, et al. Shock initiation measurement of RDX-based aluminized explosives with reverse-impact method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(5): 425-430.
- [13] 王万军, 祝明水, 郭菲, 等. 高压短脉冲作用下 HNS-IV 型炸药的全发火冲击起爆判据 [J]. *含能材料*, 2020, 28(6): 569-575.
WANG Wan-jun, ZHU Ming-shui, GUO Fei, et al. Parameters of the all-fire shock initiation criterion for HNS-IV explosive under the impact of a short-duration high pressure pulse [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(6): 569-575.
- [14] 赵雅琦. 短脉冲加载下小尺寸装药二维冲击起爆与爆轰特性 [D]. 北京: 北京理工大学, 2022.
ZHAO Ya-qi. Two-dimensional shock initiation characteristics of small-size charges under short-pulse loading [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2022.
- [15] 李淑睿, 段卓平, 白志玲, 等. 2,4-二硝基苯甲醚基熔铸含铝炸药的冲击起爆特性 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(6): 1288-1294.
LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, BAI Zhi-ling, et al. Shock initiation characteristic of DNAN-based aluminized melt-cast explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(6): 1288-1294.
- [16] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
CHEN Guo-liang, WANG Xu-fa, ZHUANG Zhen-quan, et al. Genetic algorithms and their applications [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1996.
- [17] 舒俊翔, 裴洪波, 黄文斌, 等. 几种常用炸药的爆压与爆轰反应区精密测量 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(5): 052301.
SHU Jun-xiang, PEI Hong-bo, HUANG Wen-bin, et al. Accurate measurements of detonation pressure and detonation reaction zones of several commonly-used explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 052301.
- [18] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
SUN Cheng-wei, WEI Yu-zhang, ZHOU Zhi-kui. Applied detonation physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [19] 崔浩, 郭锐, 宋浦, 等. BP-GA 算法确定未反应炸药的 JWL 状态方程参数 [J]. *含能材料*, 2022, 30(1): 43-49.
CUI Hao, GUO Rui, SONG Pu, et al. Determination of parameters of JWL equation of state for unreacted explosives based on BP-GA algorithm [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(1): 43-49.
- [20] LI X, CHEN K, HUANG H, et al. Automatic optimization of JWL-miller parameters of HMX-based aluminized explosive based on genetic algorithm [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2024, 10.1002/prop.202300195.
- [21] 张震宇, 田占东, 陈军, 等. 爆轰物理 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2021.
ZHANG Zhen-yu, TIAN Zhan-dong, CHEN Jun, et al. Detonation physics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2021.
- [22] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
XIN Chun-liang, XUE Zai-qing, TU Jian, et al. Parameters handbook of commonly used materials in finite element analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [23] 谭华. 实验冲击波物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
TAN Hua. Experimental shock wave physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2018.

Parameters of the Ignition and Growth Model for HNS-IV based PBX under Shock Initiation

ZHAO Ya-qi^{1,2}, YANG Sha^{1,2}, CAO Wei^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, SONG Qing-guan^{1,2}, DUAN Ying-liang^{1,2}, HUANG Bing¹, HAN Yong^{1,2}

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. Robust Munition Center, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: To obtain the ignition and growth model parameters of HNS-IV based polymer bonded explosive (PBX) under shock initiation, the shock wave loading method from explosive plane wave lens was used. The shock waves were attenuated by attenuators and impacted with tested explosives, and the interface particle velocity profiles between tested explosives and LiF (lithium fluoride) windows were measured by photonic Doppler velocimetry. Several explosive pellets with varying thicknesses could be mounted to the attenuator in one shot, by adjusting the thickness of attenuator to change the input pressure, the growth process of interface particle velocity was obtained. Meanwhile, the unreacted shock adiabetic curve of tested explosive was measured by the reverse-impact method, and the cylinder expansion velocity history was acquired by 10 mm diameter cylinder test. Then, the JWL (Jones-Wilkins-Lee) equation of state (EOS) parameters of unreacted explosives and detonation products were fitted with experimental results by genetic algorithm. Finally, the interface particle velocity histories between explosives with varying thicknesses and LiF windows were fitted with the ignition and growth model. The results show that the fitting correlation coefficients of EOS parameter curves for unreacted explosives and detonation products are high enough, and the obtained ignition and growth model parameters well simulate shock initiation experimental results, which can meet the requirement of initiation train design.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); shock initiation; ignition and growth; HNS-IV; equation of state

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024052

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No.12272359)

(责编: 姜梅)