

文章编号:1006-9941(2025)02-0165-13

冲击载荷下 NEPE 高能固体推进剂响应特性分析及点火增长模型参数标定

郭宗韬¹,许进升¹,陈雄¹,曹欣宇¹,庞嵩林¹,王金东²

(1.南京理工大学机械工程学院,特种动力技术教育部重点实验室,江苏南京 210094;2.晋西工业集团有限责任公司,山西太原 030027)

摘要:为保障固体火箭发动机在复杂战场环境下的安全应用,开展了冲击载荷作用下硝酸酯增塑的聚醚聚氨酯(NEPE)高能固体推进剂的响应特性研究,建立了一维拉格朗日锰铜压阻试验测试系统,使用锰铜传感器记录了冲击起爆过程中 NEPE 推进剂内部不同拉格朗日位置处前导冲击波的压力变化历史。通过冲击波波阵面前后动量守恒关系,获得了被测推进剂的未反应冲击绝热线,利用遗传算法得到了未反应 NEPE 推进剂状态方程参数。同时,设计并搭建了 $\Phi 50$ mm 的 NEPE 推进剂探针式圆筒试验测试平台,采用 12 根具有径向位移差的金属探针记录金属圆筒膨胀到不同位置的时间,获得了圆筒膨胀速度时间曲线。在此基础上提出了一种结合 Gurney 能量模型和遗传算法的考虑铝粉反应的爆轰产物 JWL-Miller 状态方程参数计算方法,得到了 NEPE 推进剂爆轰产物状态方程参数。最后,采用点火增长模型对不同拉格朗日位置处的压力曲线进行拟合。结果表明,未反应推进剂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 NEPE 推进剂冲击起爆试验结果,所获得的参数可以为冲击载荷作用下 NEPE 推进剂装药的固体火箭发动机安全性评价提供参考依据。

关键词: NEPE 高能固体推进剂;冲击起爆;拉式试验;圆筒试验;点火增长模型

中图分类号: TJ55;V435

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024246

0 引言

固体推进剂作为固体火箭发动机的能量来源,是影响发动机安全性的主要因素。近年来,随着固体火箭发动机技战术指标的提高,大量如奥克托今(HMX)、黑索金(RDX)、高氯酸铵(AP)和铝粉(Al)等含能颗粒被加入到推进剂中以提高其能量特性。但由于炸药颗粒、金属颗粒的加入,固体推进剂的敏感度也随之提高^[1-4]。固体火箭发动机在战场环境中极易受到如冲击波、破片以及聚能射流等作用,导致发动机内部推进剂装药发生非受控的化学反应和能

量释放,出现燃烧甚至爆轰的现象^[5]。在美军标 MIL-STD-2105D 标准^[6]中也明确将殉爆、弹丸或破片冲击、子弹撞击以及聚能射流冲击等作为弹药安全性的考核项目。因此,研究固体推进剂冲击起爆特性,标定固体推进剂反应动力学模型参数是了解固体火箭发动机安全性能的关键,也是其安全性设计和评估的基础和前提。

近年来,国内外学者对炸药的冲击起爆特性开展了广泛和深入的研究,取得了大量的进展^[7-9],而对于以 NEPE 为代表的高能固体推进剂冲击起爆特性研究较少,缺乏用来支撑固体火箭发动机安全性评估的反应动力学参数。因此,标定能够准确描述 NEPE 推进剂冲击起爆过程的反应动力学模型参数的研究亟待开展。

一维拉格朗日试验是研究含能材料冲击起爆特性的主要方法之一,主要目的是获取含能材料在爆轰成长过程中不同拉格朗日位置的应力、粒子速度随时间的变化关系等含能材料反应流场的详细信息,从而为

收稿日期:2024-09-12;修回日期:2024-10-19

网络出版日期:2025-01-23

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(30924010503)

作者简介:郭宗韬(1997-),男,博士研究生,主要从事固体推进剂冲击响应特性研究。e-mail:guozongtao@njust.edu.cn

通信联系人:许进升(1985-),男,教授,主要从事固体火箭发动机技术理论研究。e-mail:xujinsheng@njust.edu.cn

引用本文:郭宗韬,许进升,陈雄,等.冲击载荷下 NEPE 高能固体推进剂响应特性分析及点火增长模型参数标定[J].含能材料,2025,33(2):165-177.

GUO Zong-tao, XU Jin-sheng, CHEN Xiong, et al. Response Characteristics Analysis and Parameters Calibration of Ignition and Growth Model of NEPE Propellants under Impact Load[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(2):165-177.

含能材料反应动力学模型构建提供试验依据。随着测试技术的发展,多种测试技术如锰铜式压阻传感器^[10-12]、组合式电磁粒子速度计^[13-15]以及多普勒测速技术^[16-17]等在含能材料冲击起爆一维拉格朗日试验中被广泛应用。金属圆筒试验于1965年被提出^[18],被广泛应用于描述含能材料爆轰产物膨胀特性及做功能力。试验过程中,通过记录圆筒壁某个特征位置在爆轰产物驱动下的径向位移-时间曲线,用以计算含能材料爆轰产物状态方程参数。标准圆筒试验^[19-21]采用高速扫描相机和氦气弹设备记录圆筒膨胀位移随时间的变化,但由于底片上可能出现圆筒壁拐点和边界模糊的现象,存在底片判读方法而造成的人为误差。近年来,随着测试技术的快速发展,出现了采用多普勒速度(PDV)测试技术对圆筒壁膨胀速度直接测量的试验方法^[22-25],以及采用电探针测量到达膨胀位移历程的测试方法^[26-28],新的测试方法具有响应速度快、测试精度高等优点,克服了高速扫描相机方法的不足,并逐渐应用到含能材料的圆筒试验中。

本研究以NEPE推进剂为研究对象,建立了一维拉格朗日锰铜压阻试验测试系统,测试并获得了NEPE推进剂冲击起爆爆轰成长过程不同拉格朗日位置处的压力-时间曲线,通过多项式函数拟合试验中冲击波到达不同拉格朗日位置的时间,确定了冲击波传播的时间-位移关系,结合冲击波的动量守恒关系得到了NEPE推进剂的冲击Hugoniot系数,并通过遗传算法得到了未反应推进剂状态方程参数。搭建了 $\Phi 50\text{ mm}$

的NEPE推进剂探针式圆筒试验测试平台,利用通靶原理,记录圆筒试验过程中筒壁膨胀至不同位置处探针与筒壁所构成的电路导通时间,获得了圆筒壁膨胀位移-时间关系,通过提出的基于Gurney模型、遗传算法和数值仿真结合的爆轰产物状态方程参数计算方法,得到NEPE推进剂爆轰产物JWL-Miller状态方程参数。最后通过数值仿真标定了NEPE推进剂反应速率方程,为冲击载荷作用下固体火箭发动机安全性评价提供基础参数。

1 试验部分

1.1 试验样品

用于拉格朗日冲击起爆试验以及圆筒试验的推进剂试样由硝酸酯塑化聚醚(NEPE)为黏结剂,环四亚甲基四硝胺(HMX)和高氯酸铵(AP)为氧化剂颗粒,外加一些添加剂(包括铝粉作为燃烧催化剂等)组成,主要成分的质量分数为:HMX,20%;AP,25%;铝粉等添加剂及黏合剂55%。试验用NEPE推进剂的密度为 $1.77\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.2 推进剂拉格朗日冲击起爆试验设计

待测推进剂的未反应状态方程参数由未反应推进剂的冲击Hugoniot计算得到。推进剂的冲击Hugoniot参数和反应速率方程参数均由一维拉格朗日锰铜压阻试验方法获得。NEPE推进剂冲击起爆一维拉格朗日试验分析测试系统如图1所示,该试验装置主要由雷管、筒易平面波发生器、铝隔板、NEPE推进剂、锰铜传感器和钢见证板等部分组成。

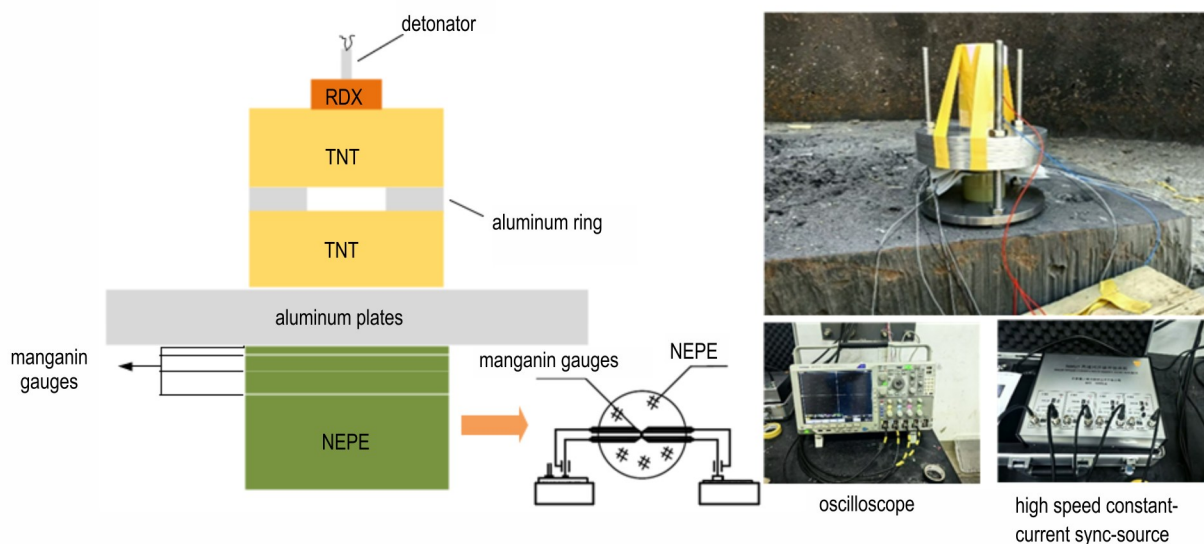


图1 NEPE推进剂冲击起爆一维拉格朗日试验测试系统

Fig.1 One-dimensional Lagrange measuring system of NEPE propellant

一维拉格朗日试验原理是雷管引爆起爆药,进而引爆简易平面波发生器产生冲击波,经过铝隔板衰减后作用到待测推进剂,实现一维平面冲击加载。试验过程中通过示波器记录在推进剂内部不同位置埋入的锰铜压阻传感器的电压信号,获得推进剂冲击起爆成长过程的压力时程曲线。一组 NEPE 推进剂试样由 4 种厚度不同的圆片组成,且 NEPE 推进剂试样的直径为 50 mm。每发试验采用 4 个锰铜压阻传感器记录推进剂内部不同位置压力历史曲线,在每个锰铜传感器的受压面包覆 0.2 mm 厚的聚四氟乙烯薄膜,在其背面包覆 0.1 mm 厚的聚四氟乙烯薄膜对锰铜传感器进行保护,并使用真空硅脂包装以延长传感器测量时间。H 型锰铜传感器压阻关系如式(1)所示:

$$p = (0.76356 \pm 0.1811) + (34.62796 \pm 0.96071) \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right) + (6.00762 \pm 0.97841) \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \quad (1)$$

式中, p 为压强, GPa; ΔR 为压力锰铜传感器变化阻值, Ω ; R_0 为锰铜传感器固有阻值, Ω 。

利用所建立的冲击起爆一维拉格朗日试验分析测试系统,对 NEPE 推进剂进行了两发试验,获得了平面波发生器产生的冲击波经 45 mm 铝隔板衰减后作用到 NEPE 推进剂的冲击起爆过程。两发试验的拉格朗日测量位置分别为 0, 2.05, 4.11, 12.61 mm 以及 0, 3.10, 7.53, 14.50 mm。

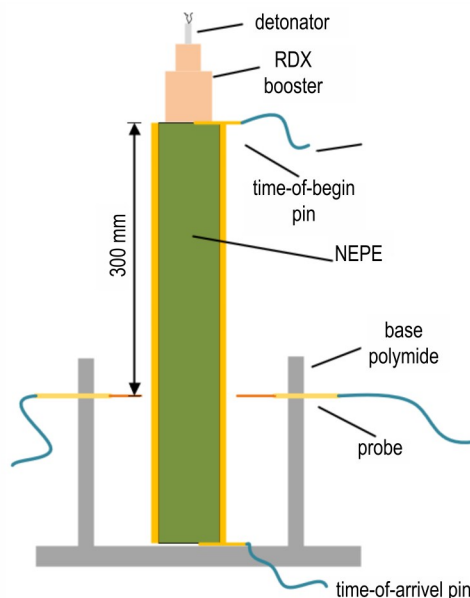


图2 NEPE 推进剂圆筒试验测试图

Fig.2 Cylinder test of NEPE propellant

1.3 推进剂圆筒试验设计

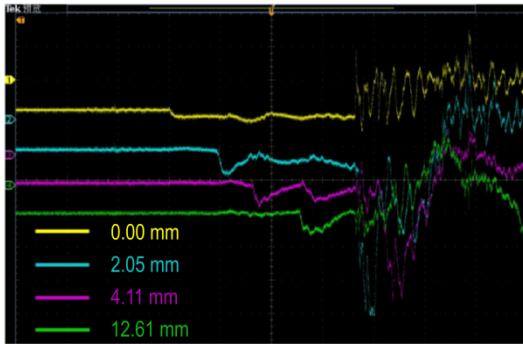
本研究根据 $\Phi 50$ mm 的标准圆筒试验要求,设计了 NEPE 推进剂金属圆筒试验。圆筒试验装置示意图 2 所示,试验装置由 8# 电雷管、雷管座、传爆药、试验药柱(被测样品为 NEPE 推进剂)、金属圆筒(TU1 无氧铜)、支撑架、底座、端盖等组成。其中,金属圆筒长 495 mm,壁厚为 5 mm。传爆药采用钝化 RDX,并压制成 $\Phi 50$ mm \times 50 mm 密度 1.65 ± 0.02 g \cdot cm $^{-3}$ 的药柱。试验开始前,将浇注 NEPE 推进剂的金属圆筒垂直固定于底座中心,一组以圆筒轴线为中心且由精密限位块确定的电探针安装在距离圆筒头部 300 mm 的同一水平面。该水平面由圆筒试验支撑座中的探针径向孔确定。镀金探针与铜管外壁距离分别为 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 17, 19, 20, 25, 30 mm。在金属铜管安装完后,在圆筒上端加装端盖,以保证铜管和支撑架的同轴度。在试验前及试验过程中爆轰波未到达探针安装水平面前各个探针与的圆筒组成的电路为“断路”,当爆轰波阵面通过镀金探针平面时,推进剂内部化学能得到释放,未反应推进剂转换成高压爆轰产物,圆筒壁在爆轰产物的驱动下向外膨胀,当筒壁膨胀至各个探针头部时,电路接通,通过脉冲计时器记录下不同位置处探针电路导通的时间。与此同时,推进剂爆速通过双丝电探极法进行测试。在推进剂药柱的上端及下端布置双丝电探极,通过脉冲计时器记录由 NEPE 推进剂爆轰产生的电离场将上下端导线导通的时间,从而确定推进剂的爆速。探针式金属圆筒试验示意图如图 2 所示。



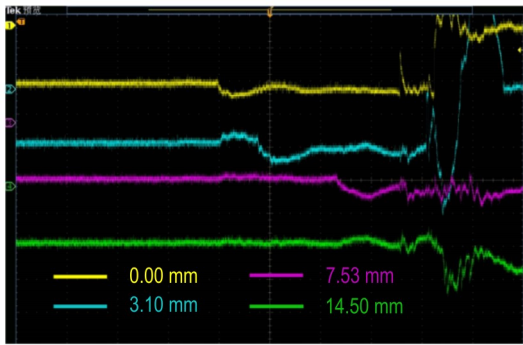
2 试验结果与分析

2.1 NEPE 推进剂一维拉格朗日冲击起爆试验结果分析

图 3a 和图 3b 为示波器记录到的典型试验信号, 每条曲线代表推进剂内部一个拉格朗日位置的压力随时间变化过程。从图 3b 中可以看出, 在进行第二发试验时, 在 14.50 mm 位置处锰铜传感器被剪切破坏, 未记录到有效压力数据。根据式(1)即可将示波器记录到的电压信号转化为压力信号, 如图 4 所示。



a. test 1: 0, 2.05, 4.11 mm and 12.61 mm



b. test 2: 0, 3.10, 7.53 mm and 14.5 mm

图 3 试验中示波器记录到的典型信号

Fig.3 Typical signal recorded by oscilloscope in the test

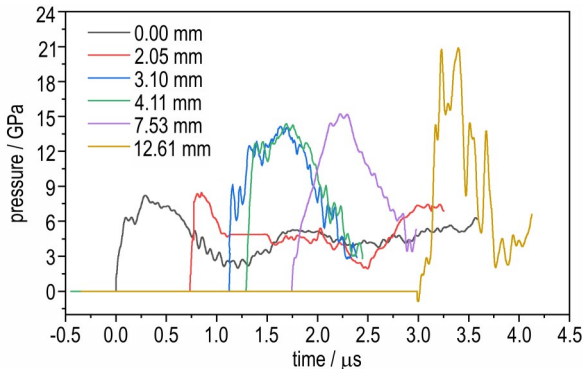


图 4 经计算得到的 6 个测量位置的压力历史

Fig.4 Calculated pressure history for 6 Lagrange positions

由图 4 可以看出, 经 45 mm 铝隔板衰减后作用到 NEPE 推进剂的冲击波为 6.30 GPa。冲击波在 0.73 μs 时到达 NEPE 推进剂中 2.05 mm 位置, 前导冲击波阵面压力有明显升高, 达到 7.67 GPa。随着冲击波阵面后推进剂的反应所释放的能量不断增强前导冲击波, 前导冲击波在 1.12 μs 时刻到达推进剂内部 3.10 mm 位置处, 压强达到 9.15 GPa。前导冲击波在 1.29 μs 时到达 4.11 mm 位置处, 压强达到 12.62 GPa, 前导冲击波在 2.11 μs 时到达 7.53 mm 位置处, 压强达到 14.42 GPa, 最终在 12.61 mm 处推进剂形成爆轰, 其爆轰压力值 20.72 GPa。显然, 随着拉格朗日位置的深入, 前导冲击波强度和推进剂内部的压力峰值均逐渐增大, 可观察到较为明显的点火增长过程, NEPE 推进剂的到爆轰距离约为 12 mm。

由于包裹锰铜传感器的聚四氟乙烯有一定的厚度, 因此在计算 NEPE 推进剂冲击 Hugoniot 关系时需要用记录到的时间减去冲击波在聚四氟乙烯薄膜中传递的时间。聚四氟乙烯初始密度 ρ_{t_0} 为 2.147 g·cm⁻³, 聚四氟乙烯的冲击 Hugoniot 关系^[29]见式(2):

$$D_t = 1.76 + 1.74u_t \quad (2)$$

式中, D_t 是冲击波波速, mm·μs⁻¹; u_t 是粒子速度, mm·μs⁻¹。

根据动量守恒关系, 前导冲击波在聚四氟乙烯中传播速度有如式(3)所示:

$$p_t = \rho_{t_0} D_t (D_t - 1.76) / 1.74 \quad (3)$$

式中, p_t 为前导冲击波压力, GPa。

根据试验中聚四氟乙烯薄膜具体的位置和厚度, 容易得到前导冲击波到达推进剂内部各个拉格朗日位置的实际时间见式(4):

$$\begin{aligned} t_{t_1} &= t_1 - 0.1/D_{t_1} - 0.2/D_{t_2} \\ t_{t_2} &= t_2 - 0.1/D_{t_1} - 0.3/D_{t_2} - 0.2/D_{t_3} \\ t_{t_3} &= t_3 - 0.1/D_{t_1} - 0.2/D_{t_3} \\ t_{t_4} &= t_4 - 0.1/D_{t_1} - 0.3/D_{t_2} - 0.2/D_{t_4} \\ t_{t_5} &= t_5 - 0.1/D_{t_1} - 0.3/D_{t_2} - 0.3/D_{t_4} - 0.2/D_{t_5} \end{aligned} \quad (4)$$

通过式(4)可以得到前导冲击波到达推进剂内部每个拉格朗日位置的实际时间。在一维拉格朗日冲击起爆试验中, 假设前导冲击波阵面后方的推进剂未发生化学反应^[30], 则根据冲击波波阵面的动量守恒关系可计算得到 NEPE 推进剂的粒子速度-冲击波速度 (u_p-u_t) 关系。采用多项式函数拟合冲击波到达各个拉格朗日位置的时间, 并对函数微分可得冲击波阵面速度与时间关系, 而冲击波阵面的压力前沿幅值可通过

锰铜压阻传感器记录的压力历史曲线直接读取。采用上述方法计算得到了前导冲击波到达 NEPE 推进剂内部每个拉格朗日位置的实际时间和推进剂的 u_p - u_s 数据,具体如表 1 所示:

表 1 冲击波到达不同拉格朗日位置的实际时间和 u_p - u_s 数据
Table 1 Actual time for shock wave to arrive at different Lagrange locations and u_p - u_s data

lagrange location / mm	0	2.05	3.1	4.11	7.53	12.61
arrival time / μs	0	0.61	0.89	1.18	1.91	2.90
$u_p / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	0.85	0.98	1.15	1.39	1.47	—
$u_s / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	4.18	4.43	4.48	4.72	5.56	—

Note: u_p is particle velocity, u_s is shock wave velocity.

将表 1 中 u_p - u_s 数据按 Hugoniot 关系^[29]进行线性拟合,可得 NEPE 推进剂冲击 Hugoniot 关系如式(5)所示:

$$u_s = 2.45 + 1.93 * u_p \quad (5)$$

图 5 为未反应 NEPE 推进剂的 u_p - u_s 数据及相应的拟合曲线,由拟合结果可以看出,试验数据和拟合曲线吻合较好,表明拟合得到的 Hugoniot 参数适用于 NEPE 推进剂。

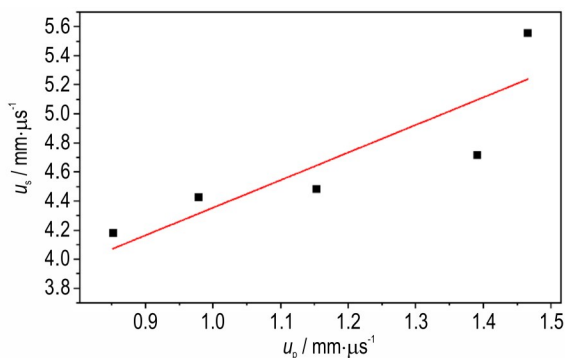


图 5 NEPE 推进剂冲击 Hugoniot 关系拟合效果图

Fig.5 NEPE propellant and impact Hugoniot relationship fitting renderings

2.2 圆筒试验结果分析

圆筒试验中测得的 NEPE 推进剂平均爆速为 $6832 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在圆筒试验中,以圆筒壁膨胀到 2 mm 位置处探针的时间为记录起始时刻,通过脉冲计时仪依次记录各个探针导通时间为 t_i ,两发圆筒试验的结果如图 6a 所示。从图 6a 中可以看出,每发试验中各探针导通时间相近,获得的试验数据一致性较好。在对圆筒试验数据处理时,将第一个探针导通时间记为 t_0 ,那么圆筒膨胀到各个探针的实际时间为 $t=t_i+t_0$ 。在建立推进剂爆轰产物驱动圆筒壁膨胀距离-时间的解

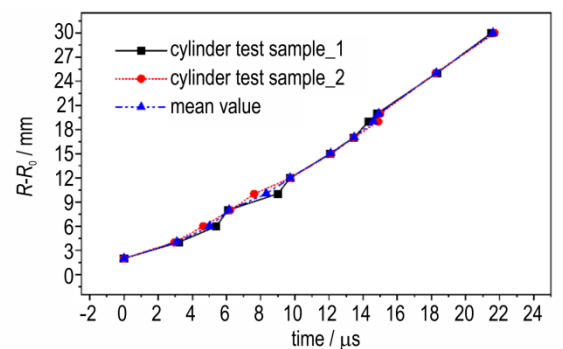
析表达式时,假设爆轰波阵面后推进剂爆轰产物压力和圆筒壁径向加速度以指数函数形式降低,对圆筒试验数据按式(6)进行拟合^[31]。

$$L = \sum_{i=1}^2 a_i [b_i (t_i + t_0) - (1 - \exp(-b_i (t_i + t_0)))] \quad (6)$$

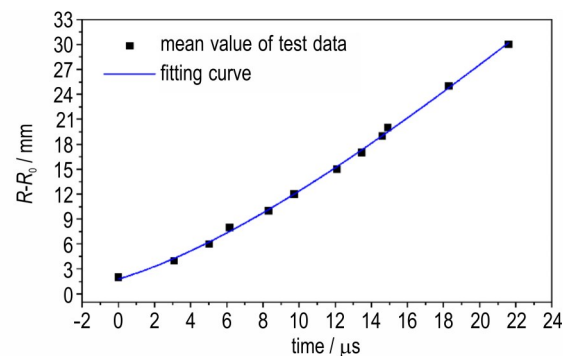
式中, L 为 $r-r_0$, mm; r 为圆筒质量中心面半径, mm; r_0 为圆筒质量中心面初始半径, mm。 $a_i, b_i (i=1, 2)$ 为待定常数与 t_0 的值均通过函数拟合得到。通过对位移-时间关系式进行微分可得圆筒外壁膨胀移动速度 v 如式(7)所示:

$$v = \frac{dL}{dt} = \sum_{i=1}^2 a_i b_i [1 - \exp(-b_i t)] \quad (7)$$

膨胀位移-时间关系拟合结果如图 6b 所示,可以发现所拟合的位移函数和试验数据相吻合,表明位移函数可较好地表征圆筒的膨胀过程。



a. distance-time curve of cylinder wall expansion



b. fitting curve of displacement-time

图 6 圆筒试验测试结果

Fig.6 The results of cylinder tests

NEPE 推进剂圆筒外壁膨胀速度-时间曲线如图 7 所示。由图 7 可知,在 NEPE 推进剂爆轰产物驱动下可使金属膨胀速度达到 $1.83 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$,远大于典型 TNT (压装密度 $1.58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 炸药 $1.416 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ^[32]。显然, NEPE 推进剂驱动金属圆筒膨胀做功能力更强。

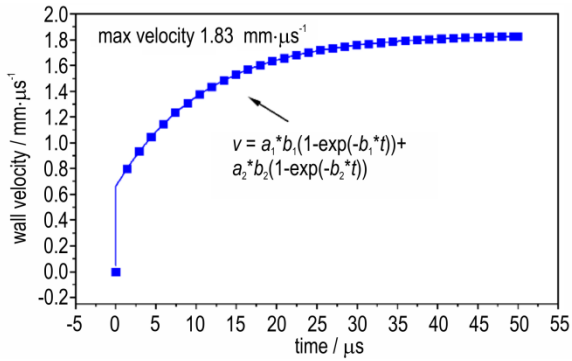


图7 圆筒壁膨胀速度曲线

Fig.7 The velocity-time curve of cylinder wall

3 推进剂反应动力学模型参数标定方法研究

3.1 未反应 NEPE 推进剂的 JWL 状态方程参数获取方法

未反应推进剂状态方程可采用与爆轰产物状态方程相同的形式^[9,13],如爆轰流体动力学计算中最常用的JWL状态方程,该方程包含6个参数,采用温度相关的JWL状态方程描述未反应推进剂,如式(8)所示:

$$p = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + \omega C_v T/V \quad (8)$$

式中, $A, B, R_1, R_2, \omega, C_v$ 为待定常数,且常数 B 通常为负值,以使推进剂可以承受拉伸作用; T 为温度; V 为相对比容。

未反应推进剂JWL状态方程参数需通过拟合推进剂的冲击 Hugoniot 关系确定。将上述计算得到的推进剂冲击 Hugoniot 关系代入冲击波质量和动量守恒关系中,可得推进剂内部压力与相对比容的关系,如式(9)所示:

$$p_H = \frac{\rho_0 C_0^2 (1 - V)}{[1 - (1 - V)S]^2} \quad (9)$$

式中, ρ_0 为推进剂密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; C_0 和 S 为推进剂 Hugoniot 参数。

为了获得JWL形式 Hugoniot 曲线表达式,需将 Hugoniot 曲线上的点写成JWL状态方程形式,结合波阵面前后能量守恒关系,如式(10)所示:

$$E_H = E_0 + \frac{p(v_0 - v)}{2} \quad (10)$$

式中, E_H 为波阵面后方的比内能, GPa ; E_0 为初始比内能, GPa ; v_0 为初始比容; v 为波阵面后方比容。

取 NEPE 推进剂的初始内能(化学能除外) $E_0=0$,即可得到的JWL形式的 Hugoniot 曲线表达式如式(11)所示:

$$p_{\text{JWL}} = \frac{A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}}{1 + \frac{\omega}{2} - \frac{\omega}{2V}} \quad (11)$$

与此同时, JWL 状态方程参数应满足以下3个关系^[9]:

(1) 在推进剂初始状态满足: $V=1, T_0=298\text{ K}, p=0$, 得公式(12):

$$Ae^{-R_1} + Be^{-R_2} + \omega C_{ve} T_0 = 0 \quad (12)$$

(2) 当推进剂到达稳定爆轰,推进剂受压缩的终态为冯诺依曼点 $VNS(p_N, V_N)$, 可得:

$$p_N = \frac{A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V_N}\right)e^{-R_1V_N} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V_N}\right)e^{-R_2V_N}}{1 + \frac{\omega}{2} - \frac{\omega}{2V_N}} \quad (13)$$

其中 p_N 和 V_N 是将推进剂冲击 Hugoniot 关系代入波阵面上的运动方程和连续方程中,并将冲击波速度外推到推进剂的爆速 D , 可得 NEPE 推进剂 VNS 处的压力和比容分别如式(14)及(15)所示:

$$p_N = \rho_0 D \left(\frac{D - C_0}{S} \right) \quad (14)$$

$$V_N = \frac{DS - (D - C_0)}{\rho_0 DS} \quad (15)$$

(3) 在初始状态点处 (p_0, V_0) , Hugoniot 曲线与等熵线相切:

$$-\rho_0 C_0^2 = \left(\frac{\partial p_H}{\partial v} \right)_{v=1} = A \left(\frac{2\omega + R_1\omega + \omega^2 - 2R_1^2}{2R_1} \right) e^{-R_1} + B \left(\frac{2\omega + R_2\omega + \omega^2 - 2R_2^2}{2R_2} \right) e^{-R_2} \quad (16)$$

上述3个约束方程使得未反应JWL状态方程中的6个参数只有3个是独立的,因此,只需确定其中3个参数即可获取推进剂未反应JWL状态方程参数。国内外众多研究表明大多数含能材料的 R_1, ω 和 C_v 的取值范围分别集中在 $6.2\sim 14.1, 0.8\sim 1.251$ 和 $1.68\times 10^{-3}\sim 2.78\times 10^{-3}\text{ GPa}\cdot\text{K}^{-1}$ ^[33]。为了寻求未反应推进剂JWL状态方程参数组合的多样性和最优解,将 R_1, ω 和 C_v 的取值范围分别放大为 $3\sim 21, 0.6\sim 3.6$ 和 $1\times 10^{-3}\sim 3\times 10^{-3}\text{ GPa}\cdot\text{K}^{-1}$ 。为了评估两者在任意相对比容的误差,定义误差函数如式(17)所示:

$$f_H(V) = p_H(V) - p_{\text{JWL}}(V) \quad (17)$$

在 $V\in[1, V_N]$ 区间内取五个点代入式(17),若式(17)接近于0,则两者曲线相吻合。利用遗传算法的全局寻优特性,在参数选取范围内进行优化迭代,最

终获得最优的未反应推进剂JWL状态方程参数。

根据遗传算法计算得到的NEPE推进剂未反应状态方程参数对比曲线如图8所示,从图8中可以看出两条曲线基本重合。与此同时,根据试验结果密度为 $1.77 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的NEPE推进剂CJ压力 $p_{CJ}=20.72 \text{ GPa}$,爆速 $D_{CJ}=6.832 \text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$,将冲击Hugoniot关系式外推到爆速 $D=D_{CJ}$,即可求得NEPE推进剂达到稳定爆轰时,冯诺依曼峰值压力 $p_N=30.75 \text{ GPa}$,进而求得 p_N/p_{CJ} 值为1.46。该值与研究人员^[34]用亚纳秒级时间分辨率的Fabry-Perot干涉仪研究炸药爆轰波阵面纵向结构得到的结果(PBX9502、压装TNT和压装CP炸药的 p_N/p_{CJ} 值分别为1.32、1.25和1.45)较接近,可见本试验获得的NEPE推进剂冲击Hugoniot关系是在合理范

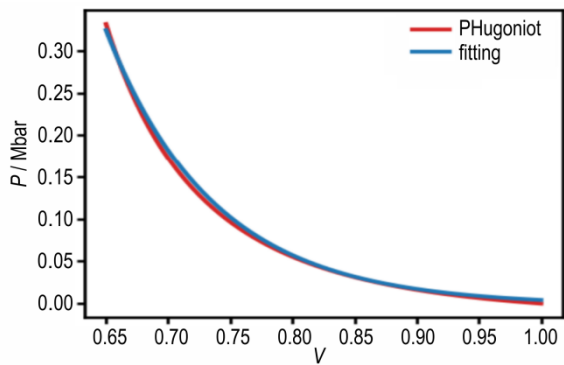


图8 试验和拟合获得的冲击绝热线对比
Fig.8 Comparison of shock adiabat curves from experiment and fit

围内的。最终得到了NEPE推进剂未反应JWL状态方程参数,如表2所示:

表2 NEPE推进剂未反应JWL状态方程参数
Table 2 Parameters of NEPE propellant unreacted JWL EOS

A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	$C_V / \text{GPa}\cdot\text{K}^{-1}$
3.6×10^4	-1.34	10.89	1.089	0.74	1.0×10^{-3}

Note: A, B, R_1 , R_2 , ω , C_V are parameters of unreacted NEPE propellant.

3.2 推进剂爆轰产物JWL状态方程参数获取方法

由于NEPE推进剂配方中含有大量的铝粉,因此其爆轰产物状态方程参数计算分为两个阶段,即铝粉末反应的等熵膨胀阶段以及铝粉与爆轰产物发生放热反应的非等熵膨胀阶段^[23]。本研究在NEPE推进剂金属圆筒试验数据的基础上提出一种基于圆筒能量模型、遗传算法和数值仿真方法的考虑铝粉二次反应的推进剂爆轰产物JWL-Miller状态方程拟合方法。推进剂爆轰产物状态方程拟合流程如图9所示。

3.2.1 铝粉末反应阶段推进剂爆轰产物JWL状态方程参数确定

对于铝粉末未反应阶段,推进剂爆轰产物膨胀过程是等熵过程,在等熵条件下,JWL爆轰产物状态方程形式为^[31]:

$$p_s = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + CV^{-(\omega + 1)} \quad (18)$$

式中, p_s 为等熵形式下爆轰产物压力,GPa; $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ 为常数,即为方程的待求参数。根据Hugoniot关

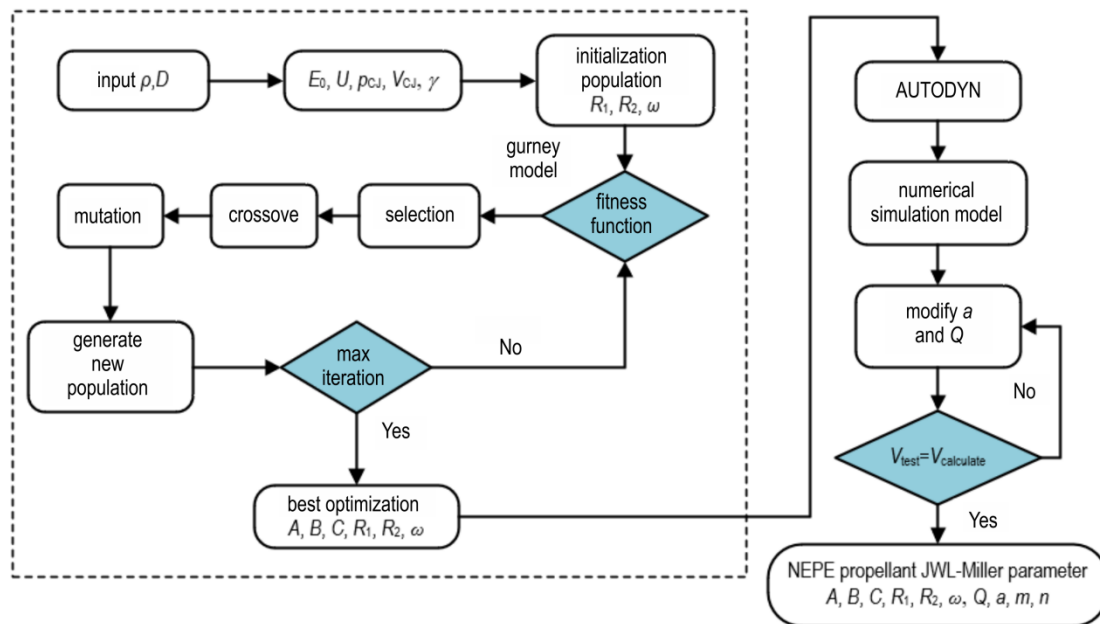


图9 NEPE推进剂JWL-Miller爆轰产物状态方程拟合方法示意图
Fig.9 Schematic diagram of JWL-Miller EOS fitting method for NEPE propellant detonation products

系和CJ条件,可以得到上述爆轰产物JWL状态方程中六个系数之间满足的三个基本关系式。

(1)由爆轰产物状态的Hugoniot关系可得:

$$\frac{A}{R_1} e^{-R_1 V_{CJ}} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V_{CJ}} + \frac{C}{\omega} V_{CJ}^{-\omega} = E_0 + \frac{1}{2} \rho_{CJ} (1 - V_{CJ}) \quad (19)$$

式中, ρ_{CJ} 为C-J面上的压力, GPa; V_{CJ} 为C-J条件下爆轰产物的相对比容。

(2)由于C-J等熵线通过C-J点,可得:

$$p_{CJ} = A e^{-R_1 V_{CJ}} + B e^{-R_2 V_{CJ}} + C V_{CJ}^{-(\omega+1)} \quad (20)$$

(3)根据C-J条件 $(-\partial p_s / \partial V)_{V_{CJ}} = \rho_0 D^2$, 可得:

$$A R_1 e^{-R_1 V_{CJ}} + B R_2 e^{-R_2 V_{CJ}} + C(\omega+1) V_{CJ}^{-(\omega+2)} = \rho_0 D^2 \quad (21)$$

式中, D 为推进剂爆速。推进剂爆轰产物内能如式(22)所示:

$$E_s = \int_V^{\infty} p dV = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega} V^{-\omega} \quad (22)$$

其中,推进剂初始能量 E_0 可由式(23)确定。

$$E_0 = (0.204 - 0.0734\rho_0) D^2 \quad (23)$$

爆轰参数 V_{CJ} 和 ρ_{CJ} 的值可由式(24), (25)确定。

$$V_{CJ} = \gamma / (\gamma + 1) \quad (24)$$

$$\rho_{CJ} = \rho_0 D^2 / (\gamma + 1) \quad (25)$$

γ 为推进剂的多方指数,其值可由式(26)确定。

$$\gamma = \rho_0 / (0.14 + 0.26\rho_0) \quad (26)$$

推进剂放置在等壁厚的铜质圆筒中,从圆筒一端将传爆药引爆进而引爆圆筒内的推进剂,圆筒壁在推进剂爆轰产物的驱动下发生径向膨胀,在此过程中推进剂的内能转化为爆轰产物的内能、动能以及金属圆筒壁的动能。可以得到圆筒能量守恒关系,如式(27)所示:

$$E_d = E_0 - E_s \quad (27)$$

式中, E_d 为单位体积推进剂产生的圆筒壁和爆轰产物的动能, GPa; E_0 单位体积推进剂的初始能量, GPa; E_s 为单位体积爆轰产物内能, GPa。

因此,根据圆筒能量守恒关系可以得到,在爆轰产物膨胀至 $f(2.4)$ 和 $f(7.0)$ 时判断式(25)是否接近0便可判断该组状态方程参数是否适用于推进剂,遗传算法的适应度函数如式(28)所示:

$$f(V) = E_s + E_d - E_0 = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega} V^{-\omega} + \frac{1}{2} u^2 \left[\rho_m \left(\frac{r_{e0}^2}{r_{i0}^2} - 1 \right) + \frac{1}{2} \rho_0 \right] - E_0 \quad (28)$$

式中, r_{e0} 为圆筒壁外径, mm; r_{i0} 为圆筒壁内径, mm。

对于相对比容为2.4和7.0的特征点圆筒膨胀速度采用式(29), (30)进行计算。

$$u_{V=2.4} = \frac{0.3594\rho_0^{0.9} D}{1 + 1.3\rho_0} \quad (29)$$

$$u_{V=7.0} = \frac{0.4263\rho_0^{0.8} D}{1 + 1.3\rho_0} \quad (30)$$

由试验获得推进剂爆速 D , 密度 ρ 进而得到推进剂爆压 p 和初始内能 E_0 , 由于该高能推进剂含有大量的奥克托今、硝酸酯和铝粉等高能组分, 与炸药组分相近, 根据经验 NEPE 推进剂参数的取值范围是, $R_1=4\sim5$, $R_2=1\sim2$, $\omega=0.2\sim0.4$ 。通过遗传算法的全局寻优特性, 在给定的 R_1, R_2, ω 参数范围内随机取值形成初代种群。将种群中的每一组值均代入式(19), (20), (21)求解, 即可获得相应的 A, B 和 C 值。将给定的 R_1, R_2, ω 以及求解得到的 A, B, C 参数值代入适应度函数中进行评估, 当两处的能量差绝对值之和越小时, 适应度函数值越小, 表明染色体的适应性越好, 染色体所携带的遗传信息越符合推进剂真实的JWL状态方程。通过种群的不断选择、交叉、变异等操作最终可获得满足条件的不考虑铝粉反应的推进剂爆轰产物JWL状态方程参数。由于自变量取值范围较大, 在遗传算法参数设置为种群数200, 与此同时, 为了得到全局最优解, 设置种群进化100代, 染色体交叉概率为0.9, 染色体变异概率为0.05^[35], 遗传算法优化历程如图10所示。

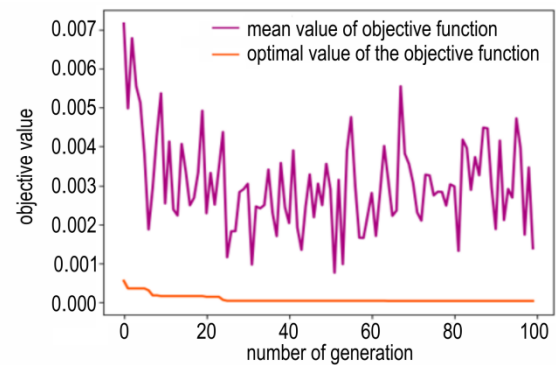


图10 推进剂爆轰产物状态方程参数优化历程

Fig.10 Optimization process of JWL EOS parameters of propellant detonation products

在进化到23代时,算法收敛,适应度函数值为 4.84×10^{-5} , 此时系统能量差较小接近于0, 表明此组爆轰产物状态方程参数适用于NEPE推进剂。表3给出了据此获得的铝粉末反应阶段的NEPE推进剂爆轰产物JWL状态方程参数。

表 3 铝粉末反应阶段推进剂 JWL 爆轰产物状态方程参数

Table 3 JWL EOS parameters of propellant detonation products in the non-reaction stage of aluminum powder

A / GPa	B / GPa	C / GPa	R_1	R_2	ω
497.0	8.5	1.3	4.65	1.0	0.39

Note: A, B, C, R_1 , R_2 , ω are JWL EOS parameters of NEPE propellant.

3.2.2 铝粉反应阶段推进剂爆轰产物状态方程确定方法

对于 NEPE 推进剂典型的含铝含能材料,铝粉在 CJ 面后发生反应。因此,其爆轰产物不再以等熵形式膨胀,故其爆轰产物状态方程应采用 JWL-Miller 形式^[36]进行计算。该状态方程增加了铝粉的唯一象反应速率模型,其形式如式(31)所示:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 v} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 v} + \frac{\omega(E + \lambda Q)}{V} \quad (31)$$

与 JWL 状态方程相比, JWL-Miller 状态方程在保持 JWL 状态方程参数不变的基础上,额外增加了铝粉的附加比能 Q 和反应度 λ , 唯象地描述含铝炸药中铝粉反应对冲击波能量的补充。铝粉反应的反应速率方程如式(32)所示:

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(1 - \lambda)^m p^n \quad (32)$$

式中, a 为能量释放常数; m 为浓度指数; n 为压力

指数。

对于铝粉反应阶段,借鉴已有的含铝炸药状态方程参数,假设 Miller 扩展项中的能量释放指数 $m=1/2$, 压强指数 $n=1/6$, 这样即使引入 Miller 扩展项后含铝推进剂的状态方程参数也仅增加两项。在上述假设的情况下,铝粉的反应速率主要取决于铝粉附加比能 Q 和能量释放常数 a 。通过结合显示动力学数值模拟软件 AUTODYN, 根据试验圆筒结构,建立模型。通过对比试验和数值模拟获得测点的速度-时间,位移-时间历程对含铝项进行确定。

在圆筒试验仿真模型中忽略了雷管和传爆药,直接考虑了推进剂的完全爆轰。在经过起爆药的传导后爆轰波已逐渐成为平面波,因此在仿真过程中含能材料的起爆方式设置为线起爆。计算过程中,在与试验探针的同一平面处设置高斯点,以记录圆筒壁的径向位移和膨胀速度。高斯点设置如图 11 所示。通过仿真计算后读取高斯点的位移特性,即可与金属探针相同位置的位移特性进行对比分析。通过多次的参数调整,反复迭代计算,当仿真结果与试验结果较为一致时,即可认为该状态下的 JWL-Miller 模型参数能较真实地反映实际推进剂的爆轰特性。

高斯点的 Y 方向膨胀速度-时间曲线图如图 12a 所示,由图 12a 可以看出,该组模型参数下仿真得到的膨胀速度-时间曲线与试验得到的曲线基本一致,通过

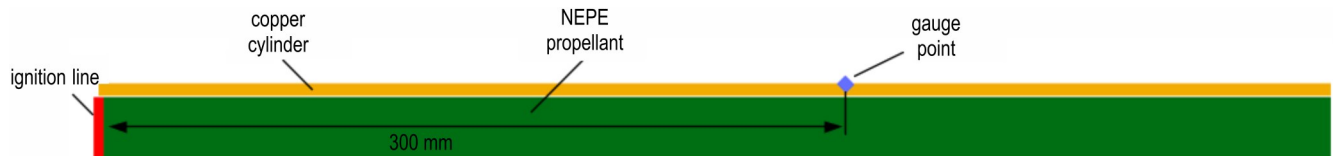
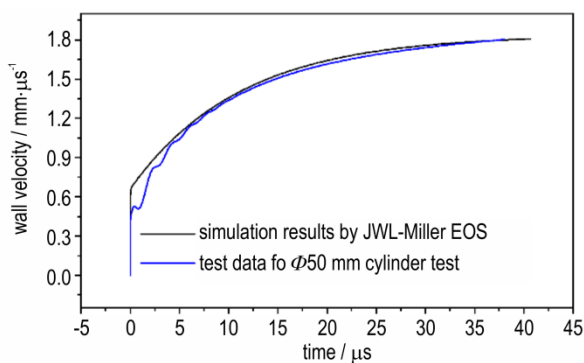
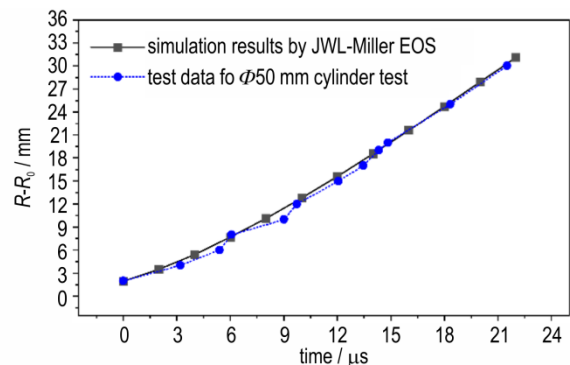


图 11 圆筒试验仿真模型

Fig.11 Simulation model of cylinder experiment



a. curve of cylinder expansion velocity-time



b. curve of cylinder expansion displacement-time

图 12 圆筒试验高斯点 Y 方向位移/速度-时间曲线

Fig.12 The comparison between the experimental data and simulation results

对速度曲线进行积分,得到如图 12b 膨胀位移-时间曲线。NEPE 推进剂的 JWL-Miller 状态方程参数如表 4 所示。

表 4 NEPE 推进剂 JWL-Miller 状态方程参数

Table 4 JWL-Miller EOS parameters of NEPE propellant

Q / GPa	a	m	n
3.6	0.11	0.5	0.1667

Note: Q is additional specific energy of Al, a is the energy release constant, m is the energy release index, n is the pressure index.

3.3 NEPE 推进剂点火增长模型参数求解方法

目前广泛使用的 Lee-Tarver 三项式点火增长模型定义含能材料的反应速率如下式^[9,12]:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - \alpha \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d \rho^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^g \rho^z \quad (33)$$

式中, λ 为 NEPE 推进剂反应度; t 为 NEPE 推进剂反应时间; $I, b, a, x, G_1, c, d, y, G_2, e, g$ 和 z 为常数。其中, a 为临界压缩度, 当冲击波足够强并且 NEPE 推进剂压缩度 $\rho_m/\rho_0 > (1+a)$ 时 NEPE 推进剂内部发生点火。

为了确定 NEPE 推进剂 Lee-Tarver 三项式点火增长模型参数, 采用 AUTODYN 有限元软件对一维拉格朗日冲击起爆试验过程进行数值仿真计算。根据冲击起爆试验的轴对称性, 建立了二维轴对称仿真模型, 如图 13 所示。为了减少网格数量和缩短计算时间, 模型中忽略了平面波发生器和铝隔板等部分, 直接将试验中第一个锰铜传感器记录信号作为入射压力曲线, 通过边界条件施加到冲击波加载端(试样左端)。在 NEPE 推进剂内部设置 5 个高斯点记录 NEPE 推进剂内部在冲击载荷下的压力时程曲线, 仿真模型中高斯点的位置和试验中锰铜压阻传感器的位置相同。

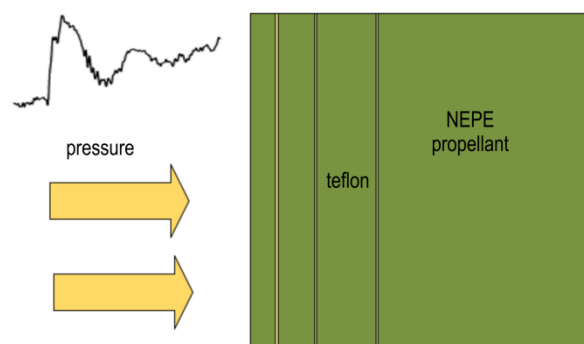


图 13 一维拉格朗日冲击起爆试验有限元模型

Fig. 13 One-dimensional finite element model of Lagrange impact initiation test

聚四氟乙烯薄膜采用 Grüneisen 状态方程^[37]表征其在高压下的状态

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a\mu) e \quad (34)$$

式中, p 为压力; e 为比内能; γ_0 为 Grüneisen 系数; μ 为压缩系数; C_0, S_1, S_2, S_3 为常数。Grüneisen 状态方程参数如表 5 所示。

通过对一维拉格朗日试验数据反复迭代计算, 即可获得 NEPE 推进剂点火增长模型参数如表 6 所示。计算得到在 45 mm 铝隔板衰减后冲击波加载下 NEPE 推进剂内部高斯点压力-时间曲线和试验数据对比如图 14 所示。与试验结果相比, 通过比较冲击波波阵面

表 5 聚四氟乙烯 Grüneisen 状态方程参数^[38]

Table 5 Parameters of teflon Grüneisen EOS

materials	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$C / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	S_1	γ_0
teflon	2.147	1.76	1.74	0.9

Note: ρ is density, C, S_1 and γ_0 are material constants of Grüneisen EOS.

表 6 NEPE 推进剂点火增长模型参数

Table 6 Parameters of NEPE propellant ignition growth model

parameters	value	parameters	value
$I / \mu\text{s}$	2×10^4	$G_2 / \text{Mbar}^{-2} \mu\text{s}^{-1}$	3.53
x	8	e	0.333
a	0.01	g	1.0
b	0.667	z	2.0
$G_1 / \text{Mbar}^{-y} \mu\text{s}^{-1}$	235.0	F_{igmax}	0.3
c	0.667	$F_{G1\text{max}}$	1.0
d	0.667	$F_{G2\text{min}}$	0
y	2.0		

Note: $I, b, a, x, G_1, c, d, y, G_2, e, g, F_{\text{igmax}}, F_{G1\text{max}}, F_{G2\text{min}}$ are ignition and growth model parameters of NEPE propellant.

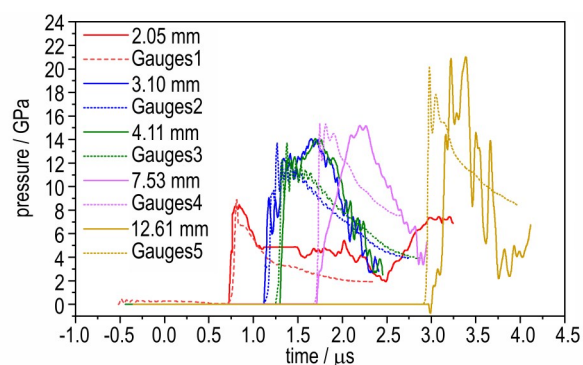


图 14 拉式试验数据和仿真结果对比

Fig. 14 Comparison of Lagrange test data and simulation results

幅值以及到达不同测试位置的时间,两者符合性较好,表明采用此种试验和计算拟合方法得到的参数,可以很好地重现 NEPE 推进剂冲击起爆过程。

4 结论

(1) 本研究设计并开展了 NEPE 推进剂的一维拉格朗日试验,通过锰铜传感器记录了 NEPE 推进剂冲击起爆过程的压力时程关系。试验结果表明:经过 45 mm 铝隔板衰减后,推进剂受到的入射压力为 6.30 GPa,随着测试深度的增加,冲击波波阵面不断增强,最终形成爆轰波。NEPE 推进剂爆压约为 20.72 GPa,爆轰成长距离约为 12 mm。通过冲击波波阵面的动量守恒关系得到了 NEPE 推进剂的冲击 Hugoniot 关系,并在此基础上通过遗传算法计算得到了未反应推进剂状态方程参数;

(2) 设计并开展了 NEPE 推进剂 $\Phi 50$ mm 圆筒试验,通过金属探针记录了金属筒壁膨胀的位移-时间历程。提出了一种基于遗传算法、Gurney 能量模型以及数值仿真的考虑推进剂铝粉反应的爆轰产物状态方程参数获取方法,通过该方法计算获得推进剂爆轰产物状态方程参数与试验结果对比表明 JWL 状态方程参数适用于 NEPE 推进剂;

(3) 建立了一维拉格朗日试验数值仿真模型,以 0 mm 位置处锰铜传感器记录到的压力作为输入,标定了 NEPE 推进剂点火增长模型参数。结果表明,未反应推进剂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,所获得的参数可以为本研究所使用的 NEPE 推进剂装药的固体火箭发动机安全性评价提供参考依据。

参考文献:

- [1] GUO Zong-tao, XU Jin-sheng, CHEN Xiong, et al. Effects of dynamic loading and temperature on NEPE propellant: damage and ignition analysis [J]. *Mech Time-Depend Mater*, 2024, 28(3): 1927-1045.
- [2] PANG Song-lin, CHEN Xiong, XU Jin-sheng, et al. Analysis on damage characteristics and detonation performance of solid rocket engine charge subjected to jet[J]. *Defence Technology*, 2022, 18 (9): 1552-1562.
- [3] DUAN Hong-zheng, WU Yan-qing, HOU Xiao, et al. Damage-ignition mechanism studies on modified propellant with different crosslinking density under dynamic loading[J]. *Defence Technology*, 2023, 28: 155-164.
- [4] DUAN Hong-zheng, WU Yan-qing, YANG Kun, et al. An experimental study on dynamic deformation and ignition response of a novel propellant under impact loading[J]. *Polymer Testing*, 2022, 107: 107472.
- [5] 李军,焦清介,庞爱民,等.固体发动机低易损性评估研究进展[J]. *固体火箭技术*, 2019, 42(1): 1-6,15.
LI Jun, JIAO Qing-jie, Pang Ai-min, et al. Recent progress on evaluation of low-vulnerability properties for solid rocket motor[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(1): 1-6, 15.
- [6] Mil-Std-2105D. Hazard assessment tests for non-nuclear munitions. NPFC; 2011.
- [7] 皮铮迪,陈朗,刘丹阳,等. CL-20 基混合炸药的冲击起爆特征[J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 915-923.
PI Zheng-di, CHEN Lang, LIU Dan-yang, et al. Shock initiation of CL-20 based explosives [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2017, 37(6): 915-923.
- [8] 张琨,赵长啸,韩彪,等.多弹丸协同冲击下柱壳装药响应特性数值模拟及试验[J]. *兵工学报*, 2024, 45(S1): 70-80.
ZHANG Kun, ZHAO Chang-xiao, HAN Biao, et al. Numerical simulation and experimental study on the response characteristics of cylindrical shell charge under collaborative impact of multiple projectiles[J]. *Acta Armamentarii*. 2024, 45(S1): 70-80.
- [9] 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*, DOI:10.11943/CJEM2024052.
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)*, DOI:10.11943/CJEM2024052.
- [10] BAI Zhi-lin, DUAN Zhuo-ping, WEN Li-jing, et al. Shock initiation of multi-component insensitive PBX explosives: Experiments and MC-DZK mesoscopic reaction rate model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 369(5): 62-69.
- [11] 陈朗,刘群,伍俊英.受热炸药的冲击起爆特征[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(1): 21-28.
CHEN Lang, LIU Qun, WU Jun-ying. On shock initiation of heated explosives[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2013, 33 (1): 21-28.
- [12] LI Xiao, SUN Yi, ZHAO Hong-da, et al. A Systematic method to determine and test the ignition and growth reactive flow model parameters of a newly designed polymer-bonded explosive[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2018, 43(9): 948-954.
- [13] 李淑睿,段卓平,高天雨,等. 2,4-二硝基苯甲醚基钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性[J]. *含能材料*, 2021, 29(2): 88-95.
LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, GAO Tian-yu, et al. Shock initiation characteristic of insensitive DNAN-based aluminized melt-cast explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(2): 88-95.
- [14] GUSTAVSEN R L, GEHR R J, BUCHOLTZ S M, et al. Shock initiation of the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502 cooled to -55 °C [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 074909.
- [15] GIBSON L. L, DATTELBAUM D, BARTRAM B, et al. Shock initiation sensitivity and Hugoniot-based equation of state of composition-B obtained using in situ electromagnetic gauging

- [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(19): 192004.
- [16] 张涛,赵继波,伍星,等. 未反应JBO-9021炸药冲击雨贡纽曲线的研究[J]. 高压物理学报, 2016, 30(6): 457-462.
ZHANG Tao, ZHAO Ji-bo, WU Xing, et al. Hugoniot curve of unreacted JBO-9021 explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(6): 457-462.
- [17] 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): 48-56.
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): 48-56.
- [18] KURY J W. Metal acceleration by chemical explosives [C]// Proceeding of 4th symposium on detonation. Berlin: Springer, 1966: 3-13.
- [19] HILL L G. Detonation product equation of state directly from the cylinder test, Report LA-UR-97-2213, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA 1997
- [20] 裴红波,焦清介,覃剑峰. 基于圆筒试验的RDX/Al炸药反应进程[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(5): 636-640.
PEI Hong-bo, JIAO Qing-jie, QIN Jian-feng. Reaction process of aluminized RDX-based explosives based on cylinder test[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2014, 34(5): 636-640.
- [21] 王辉,沈飞. 活性铝粉对RDX基含铝炸药驱动能力的影响[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(3):123-126.
WANG Hui, SHEN Fei. Effect of active aluminum powder on the driving ability of RDX-based aluminized explosive[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(3): 123-126.
- [22] LI, Xing-han, PEI, Hong-bo, ZHANG Xu, et al. Effect of aluminum particle size on the performance of aluminized explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(5): 807-813.
- [23] 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 Shu-ruì, DUAN Zhuo-ping, ZHENG Bao-hui, et al. Cylinder test and equation of state for DNAN-based aluminized melt cast- explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(7): 1424-1430.
- [24] YANG Yang, DUAN Zhuo-ping, LI Shu-ruì, et al. Evaluation of the detonation characteristics of aluminized dnan-based melt-cast explosive by the detonation cylinder test[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(4): e202100344.
- [25] 裴红波,钟斌,李星瀚,等. RDX基含铝炸药圆筒试验及状态方程研究[J]. 火炸药学报, 2019, 42(4): 403-409.
PEI Hong-Bo, ZHONG Bin, LI Xing-han, et al. Study on the cylinder tests and equation of state in RDX based aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2019, 42(4): 403-409.
- [26] SANCHIDRIÁN J A, CASTEDO R, LÓPEZ L M, et al. Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2015, 12(2): 177-194.
- [27] CASTEDO R, NATALE M, LÓPEZ L M, et al. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 290-301.
- [28] 崔浩,武军安,周昊,等. 探针式圆筒试验方法及TNT炸药爆轰产物JWL状态方程参数标定[J]. 含能材料, 2023, 31(7): 707-713.
CUI Hao, WU Jun-an, ZHOU Hao, et al. Probe cylinder test method and calibration of JWL equation of state of detonation products for TNT explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(7): 707-713.
- [29] MARSH S P. LASL Shock Hugoniot Data[M]. Berkeley: University of California Press, 1980.
- [30] WACKERLE J, STACY H L, SEIZ W L. Velocimetry studies on the prompt initiation of PBX9502 [C]//Proceedings of the 10th Symposium (International) on Detonation. 1993: 468-475.
- [31] LAN I F, HUNG S C, CHEN C Y, et al. An improved simple method of deducing JWL parameters from cylinder expansion test[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993: 18-24.
- [32] 宋浦,杨凯,梁安定,等. 国内外TNT炸药的JWL状态方程及其能量释放差异分析[J]. 火炸药学报, 2013, 36(2): 42-45.
SONG Pu, YANG Kai, LIANG An-ding, et al. Difference analysis on JWL-EOS and energy release of different TNT charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(2): 42-45.
- [33] 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.
- [34] SHEFFIELD S A, BLOOMQUIST D D, TARVER C M. Subnanosecond measurements of detonation fronts in solid high explosives [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1984, 80(8): 3831-3844.
- [35] CUI Hao, SONG Pu, GU Xiao-hui, et al. Determination of the JWL parameters of detonation products using adaptive genetic algorithm [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(12): 1920-1930.
- [36] MILLER P J, GUIRGUIS R H. Experimental study and model calculations of metal combustion in Al/AP underwater 15 explosives[J]. *Symposium Y-Structure and Properties of Energetic Materials*, 1992, 296: 299-304.
- [37] 傅华,谭多望,李金河,等. 未反应JOB-9003炸药冲击Hugoniot关系测试[J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 427-432.
FU Hua, TAN Duo-wang, LI Jin-he, et al. Hugoniot relation of unreacted JOB-9003 explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(6): 427-432.
- [38] MEYERS M A. Dynamic behavior of materials[M]. John Wiley & Sons, New York, 1994:126-140.

Response Characteristics Analysis and Parameters Calibration of Ignition and Growth Model of NEPE Propellants under Impact Load

GUO Zong-tao¹, XU Jin-sheng¹, CHEN Xiong¹, CAO Xin-yu¹, PANG Song-lin¹, WANG Jin-dong²

(1. School of Mechanical Engineering, Key Laboratory of Special Engine Technology, Ministry of Education, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Jinxi Industries Group Co., Ltd, Taiyuan 030027, China)

Abstract: In order to ensure the safe application of solid rocket motors in complex battlefield environments, it is necessary to conduct in-depth research on the response characteristics of NEPE high-energy solid propellants under impact loads. A one-dimensional Lagrange test system was established to measure the pressure wave at different Lagrange location. The unreacted shock adiabatic curve of the measured propellant was obtained through the momentum conservation relationship before and after the shock wavefront, and the JWL EOS of the unreacted NEPE propellant were obtained by using a genetic algorithm. A $\Phi 50$ mm NEPE propellant probe-type cylinder test platform was constructed and a 12-channel probe with radial displacement difference was used to record the time of copper cylinder expansion to different probe positions and the time curve of cylinder expansion velocity was obtained. Based on the results of the $\Phi 50$ mm cylinder test, the JWL-Miller EOS parameters of the detonation product of NEPE propellant was calibrated by Gurney model and genetic algorithm. Finally, the pressure curves at different Lagrange position were fitted with the ignition and growth model. The results show that the fitting correlation coefficients of JWL EOS parameter curves for unreacted propellant and detonation products are high enough and the obtained ignition and growth model parameters well simulate shock initiation experimental results and the obtained parameters can provide reference for the safety evaluation of solid rocket motors.

Key words: NEPE solid propellant; shock ignition; Lagrange experiment; cylinder test; ignition and growth model

CLC number: TJ55; V435

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024246

Grant support: Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 30924010503)

(责编:王馨逸)