

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0350

# 含 RDX 四组元 HTPB 固体推进剂的 冲击起爆特性研究\*

伍俊英, 李姚江, 杨利军, 刘嘉锡, 吴姣姣, 张晓舟, 陈 朗  
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究含 RDX 四组元 HTPB 固体推进剂的冲击起爆行为和低温条件下的适应性, 在常温和低温条件下, 对该固体推进剂进行了冲击加载拉氏分析实验。采用锰铜压力计测量了推进剂中不同位置处的压力变化历程, 采用电离探针测量了固体推进剂的爆速。分析了固体推进剂的爆轰成长规律, 获得了推进剂的临界起爆压力、爆速、爆压和爆轰成长距离等爆轰特征参量。通过对比不同条件下的特征参量发现, 低温对固体推进剂的冲击起爆特性影响较小。此外, 还对固体推进剂的冲击起爆过程进行了数值模拟, 标定了固体推进剂点火增长模型的反应速率方程参数和推进剂的未反应 JWL 状态方程参数。

**关键词:** HTPB 固体推进剂; 冲击起爆; 低温适应性; 点火增长模型

中图分类号: O381; V512

国标学科代码: 13035; 48099

文献标志码: A

## Shock initiation characteristics of four-component HTPB solid propellant containing RDX

WU Junying, LI Yaojiang, YANG Lijun, LIU Jiayi, WU Jiaojiao, ZHANG Xiaozhou, CHEN Lang

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to investigate the characters of the four-component HTPB solid propellant containing RDX initiated by shock waves and evaluate its adaptability to low temperature, Lagrange analytical experiments were carried out in normal and low temperature conditions. In the Lagrange analytical experiments, sensors were embedded in different locations of the material, and the dynamic mechanical behavior of the material was obtained by analyzing the variation of some mechanical parameters (such as stress or pressure, particle velocity, strain or specific volume and temperature) measured by the sensors. Since the thickness of gap affected the initiation pressure, the manganese-copper sensors were used to measure the pressure changes in different positions of the propellant with the gap thicknesses of 40, 45 and 50 mm, respectively. When the gap thickness was 40 mm, the propellant detonated. In contrast, the propellant burned for the gap thicknesses of 45 and 50 mm. The ionization probes were used to collect the detonation velocity of the propellant. In normal temperature conditions, the detonation velocities with the gap thicknesses of 10 and 40 mm were measured. In low temperature conditions, the detonation velocities with the gap thicknesses of 10, 30 and 40 mm were measured. The growth laws of the detonation were analyzed, and the parameters such as detonation pressure, detonation velocity and detonation distance of the solid propellant were obtained. Numerical simulation was carried out to calculate the shock initiation process of the propellant, and the parameters of the ignition and growth model and the JWL state equation of the nonreactive propellant were determined by fitting the experimental data. The results show that the detonation pressure of the solid propellant is about 12.5 GPa, the critical initiation pressure is 5.16–5.61 GPa, the detonation distance is about 13.3 mm, and the detonation velocity is 5.719–6.013 km/s. The research results indicate that the low temperature has little effect on the shock initiation characteristics of the solid propellant.

**Keywords:** HTPB solid propellant; shock initiation; adaptability to low temperature; ignition and growth model

\* 收稿日期: 2020-09-22; 修回日期: 2021-01-05

第一作者: 伍俊英(1977—), 女, 博士, 副教授, [wjy1312@bit.edu.cn](mailto:wjy1312@bit.edu.cn)

为了提高新型高能固体推进剂的燃烧速度和比冲量,在配方设计中,通常添加了大量的 RDX、HMX 或 CL-20 等高能炸药组分,这使得推进剂具有较高的机械感度和冲击波感度,极易在外界刺激作用下发生爆炸或爆轰,导致灾难性事故的发生<sup>[1-2]</sup>。另外,随着空间探测活动的不断深入,固体火箭发动机有时需要在低温环境下工作。这不仅要求固体推进剂满足在低温环境下的贮存、运输等过程的安全性要求,同时还要求固体推进剂在低温条件下具有良好点火和燃烧性能。然而,在低温条件下,高能固体推进剂有可能出现变脆、裂纹等问题,从而引起点火不可靠、燃烧不稳定或燃烧转爆轰等严重事故的发生<sup>[3]</sup>。因此,深入开展高能固体推进剂在常温和低温条件下的冲击起爆特性研究,具有重要理论意义和实际价值。

早期测量火炸药冲击起爆性能的经典方法是隔板实验,其原理是:由主发药柱产生的爆轰波经隔板衰减后传入待测火炸药,通过观察验证板的凹坑或冲孔来判断待测炸药是否被起爆。随着测量技术的发展,在隔板实验中,可以通过在火炸药内部的不同深度位置处理入压力计和电磁粒子速度传感器的方式来测量压力和粒子速度,从而深入认识炸药的爆轰成长规律,并获取炸药的爆轰性能特征参数<sup>[4-5]</sup>。此外,本文中采用拉氏分析实验方法(全称为拉格朗日分析方法)来研究固体推进剂的冲击起爆特性。该方法在材料内部不同拉格朗日位置处嵌入传感器,通过对传感器测得的某力学参量(如应力或压力、质点速度、应变或比容和温度)的变化进行分析来获得材料的动态力学行为。

Urtiew 等<sup>[6]</sup>采用锰铜压力计和电磁粒子速度计研究了 LX-17 炸药在 $-55$ 、 $25$  和  $88$  °C 等 3 种温度条件下的冲击起爆规律,发现在低温条件下炸药的冲击感度明显下降。Averin 等<sup>[7]</sup>以 HMX 基火炸药为研究对象,对炸药进行了  $25$  和  $-170$  °C 等 2 种温度条件下的冲击起爆实验,发现炸药在低温条件下更容易发展成稳定爆轰。池家春等<sup>[8]</sup>研究了 JB9014 炸药在温常和  $-54$  °C 低温条件下的冲击起爆规律,认为炸药在低温条件下的起爆机理为均质炸药起爆机理,在常温条件下为均质和非均质炸药的起爆机理。伍俊英等<sup>[9]</sup>对含铝高能固体推进剂进行了冲击起爆拉氏分析实验,采用锰铜压力计测量了推进剂中不同位置的应力历程,分析了推进剂临界起爆压力、爆轰成长距离、爆速及爆压等爆轰特性。廖林泉等<sup>[2]</sup>对三组元 HTPB 推进剂和含 RDX 四组元 HTPB 推进剂进行了冲击起爆隔板实验,发现只有四组元 HTPB 推进剂发生了爆轰反应。Gustavsen 等<sup>[10]</sup>对 PBX-9502 炸药在常温和  $-55$  °C 低温条件下进行了冲击起爆实验,采用粒子速度计和冲击波跟踪计获得了炸药冲击起爆过程中爆轰波的成长规律,发现炸药在低温条件下的冲击感度明显低于常温条件下的。Chen 等<sup>[11]</sup>使用粒子速度计研究了 CL-20 基炸药的冲击起爆特性,标定了该炸药的未反应 JWL 状态方程参数以及点火增长反应速率方程参数。刘丹阳等<sup>[12]</sup>采用有约束炸药驱动金属平板的爆轰驱动实验方法,测量了金属平板的运动速度,标定了 CL-20 基炸药的爆轰产物 JWL 参数。Pi 等<sup>[13]</sup>对  $20\sim 175$  °C 温度范围的 CL-20 基炸药进行了冲击起爆实验,采用锰铜压力计测量了炸药内部不同位置处的压力,获得了不同温度和不同冲击压力下炸药的爆轰波成长规律,计算标定了考虑温度变化的炸药点火增长反应速率模型参数,研究发现:CL-20 基炸药冲击波感度在  $20\sim 95$  °C 温度范围内随着温度上升而逐渐升高;到  $125$  °C 左右 CL-20 会发生  $\epsilon$  向  $\gamma$  的晶型转变,导致冲击感度有所降低;之后随着温度继续升高,冲击感度又大幅提高。裴红波等<sup>[14]</sup>对 5 种不同配方的含铝炸药进行了圆筒实验,研究铝粉含量对含铝炸药作功能力的影响规律,在 JWL 状态方程的基础上提出了一种考虑铝粉二次反应速率的含铝炸药爆轰产物状态方程拟合方法。黄韵等<sup>[15]</sup>对 HMX 基推进剂进行了冲击起爆实验,发现:推进剂中 HMX 含量越高,临界起爆压力越低;HMX 的粒径越大,临界起爆压力越高。

综合以上分析可知,对炸药的起爆及爆轰过程已进行了大量研究,而对固体推进剂的冲击起爆研究较少,且还未见到有关固体推进剂在低温条件下的冲击起爆特性的报道。因此,为了增强对新型高能固体推进剂在低温条件下适应能力的了解,拓宽新型高能固体推进剂的使用温度范围,需要对高能固体推进剂在低温条件下的冲击起爆特征和爆轰成长规律进行系统深入的研究,掌握高能固体推进剂在低温条件下的冲击起爆特征及影响规律,为该高能固体推进剂在低温条件下的应用提供实验支撑。

本文中,对含有 RDX 的四组元 HTPB 固体推进剂在常温和低温条件下进行冲击起爆实验,研究该固体推进剂的冲击起爆性能;获得该固体推进剂的爆压、爆速、爆轰成长距离等重要爆轰性能参数,给出该固体推进剂冲击起爆的临界压力;分析该固体推进剂在低温条件下的适应性能,建立固体推进剂的

冲击起爆数值模拟计算模型, 对四组元 HTPB 固体推进剂进行冲击起爆实验和冲击起爆过程的数值模拟计算, 并根据实验结果标定该固体推进剂的冲击起爆计算模型参数。

## 1 固体推进剂冲击起爆实验

固体推进剂的冲击起爆实验装置如图 1 所示, 该实验装置主要由雷管、炸药平面波透镜、加载药柱、隔板、固体推进剂、锰铜压力传感器、测速探针和见证板等部分组成。实验中, 首先由雷管起爆炸药平面波透镜, 炸药平面波透镜爆轰产生的平面爆轰波起爆加载药柱, 加载药柱爆轰产生的爆轰波作用铝隔板, 并在铝隔板中产生冲击波, 冲击波经铝隔板衰减后作用于待测固体推进剂药柱。通过改变隔板厚度来调节入射冲击波压力。在固体推进剂内不同深度处理入锰铜压力计, 测量距离起爆端面不同深度处的冲击波或爆轰波压力。在固体推进剂内不同深度位置处理入电离测速探针, 测量固体推进剂燃烧或爆轰速度。

实验中, 炸药平面波透镜直径为 50 mm; 加载药柱为 TNT 炸药, 直径为 50 mm, 厚度为 10 mm; 见证板为钢板, 厚度为 10 mm; 实验固体推进剂(见图 2)直径为 45 mm, 厚度约为 2、3、5、10 和 20 mm; 隔板为铝板, 厚度为 10~50 mm。在低温和常温的条件下进行一系列的固体推进剂冲击起爆实验。其中, 低温实验是将整个实验装置放入低温箱中, 在  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境下冷冻数小时后, 在 5 min 内连接好测试电路进行冲击起爆实验。在固体推进剂薄片之间嵌入  $\Pi$  形或 H 形锰铜压力传感器, 传感器的正反两个面粘帖厚度为 0.1~0.2 mm 的聚四氟乙烯膜, 对传感器进行保护, 防止传感器在稀疏波作用下直接被剪切破坏。

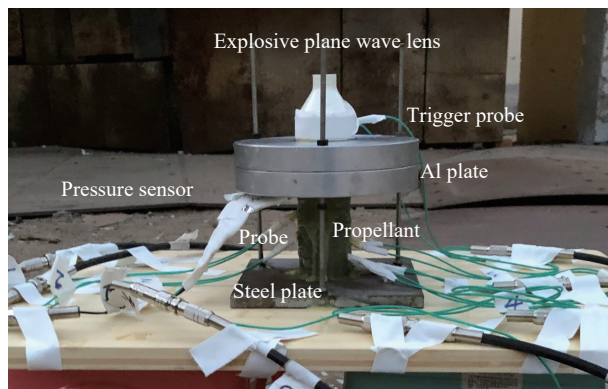


图 1 固体推进剂的冲击起爆实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for impact initiation of solid propellants

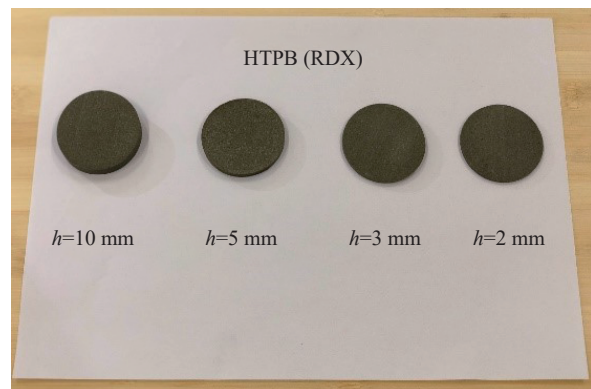


图 2 含 RDX 四组元 HTPB 固体推进剂药片

Fig. 2 Four-component HTPB solid propellant tablets containing RDX

## 2 固体推进剂冲击起爆理论爆速、爆压计算

实验中, 采用的推进剂为四组元 HTPB 复合推进剂, 其主要组分为 RDX(其质量分数为 25%)、Al(其质量分数为 6.0%)、AP 和 HTPB。固体推进剂的固体质量分数为 85%, 密度约为  $1.677\text{ g/cm}^3$ 。由于该固体推进剂中含有铝和高能炸药 RDX, 近似于含铝混合炸药, 因此可以通过混合含铝炸药的理论计算方法来获得该推进剂的爆轰性能参数<sup>[16]</sup>。由待测固体推进剂的组成, 可求得其理论爆速和理论爆压:

$$v_d = \varphi_1^{1/2} (A + B\rho_0) \quad (1)$$

$$p = 1.358\varphi_1\rho_0^2 \left( 1 - \omega_{\text{Al}} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{Al}}} \right) \quad (2)$$

式中:  $v_d$  为爆速;  $p$  为爆压;  $\varphi_1$  为含铝炸药组成及能量的示性数, 其表达式为  $\varphi_1 = 0.4889[NQ(1 - \omega_{\text{Al}_2\text{O}_3})]^{1/2}$ ;  $N$  为每克炸药所产生的气体爆轰产物的物质的量;  $Q$  为炸药的爆炸反应热;  $\omega_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  为炸药爆炸产物中



$\text{Al}_2\text{O}_3$  的质量分数;  $\rho_0$  为炸药的装填密度;  $\rho_{\text{Al}}$  为铝粉的密度;  $\omega_{\text{Al}}$  为含铝炸药中铝粉的质量分数;  $A$ 、 $B$  为常数, 本文的推进剂为浇注装药, 且含有较高的铝粉和高氯酸铵, 因此  $A$  取值为 1,  $B$  取值为 1.15。

通过理论计算, 该四组元 HTPB 固体推进剂的爆速约为 5.37 km/s, 爆压约为 12.36 GPa。

### 3 实验结果与讨论

在 HPTB 固体推进剂冲击起爆实验过程中, 通过改变铝隔板厚度来调节入射冲击波压力。不同的入射冲击波压力会导致固体推进剂发生不同的响应, 如未反应、燃烧、爆燃或爆轰。可以通过观察见证板的破坏情况, 定性地判断固体推进剂在冲击波作用下的燃烧或起爆反应情况。实验后, 如能发现固体推进剂的药物残渣, 则可以认为该固体推进剂未发生反应或燃烧不完全; 如实验中能观察到推进剂的燃烧火焰, 且装置底部的见证板无损伤或只是有轻微变形, 则可以认为该固体推进剂发生燃烧或部分爆燃; 如见证板上有明显的凹坑、裂缝, 甚至穿孔时, 则可以认为该固体推进剂发生了冲击起爆反应。图 3 是不同厚度隔板的冲击起爆实验装置和后效实物照片。由图 3 可知: 当隔板厚度  $L$  为 10 和 40 mm 时, 见证板出现了一个孔洞, 这表明该固体推进剂发生了冲击起爆反应; 而当隔板厚度  $L$  为 50 mm 时, 见证板的表面几乎无损伤, 这表明该固体推进剂没有发生冲击起爆。

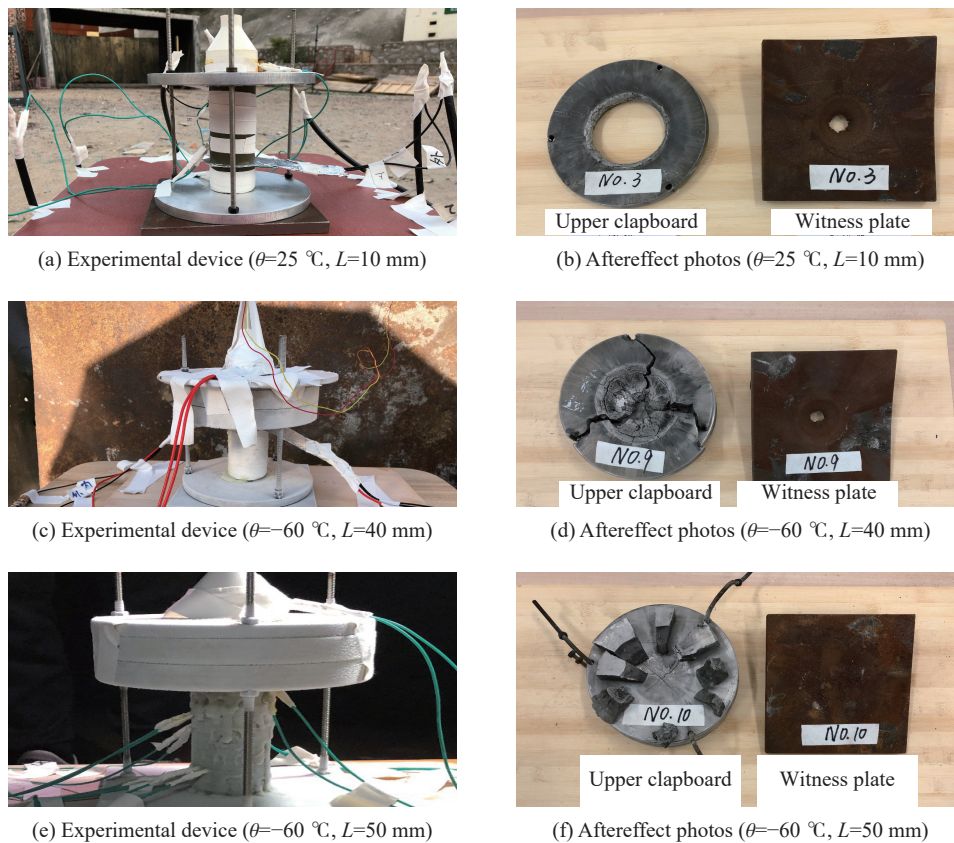


图 3 不同厚度隔板实验下的冲击起爆实验装置和后效实物照片

Fig. 3 Experimental devices and aftereffect pictures of experiments with different thickness clapboards

表 1 为不同实验条件下, 四组元 HPTB 固体推进剂冲击起爆实验的结果。在常温实验中, 隔板厚度分别为 10、40、45 和 50 mm。其中, 当隔板厚度为 10 和 40 mm 时, 钢见证板破坏严重, 出现了穿孔和严重凹坑, 这表明该固体推进剂发生了冲击起爆反应; 而当隔板厚度为 45 和 50 mm 时, 钢见证板只发生了轻微损伤或无损伤, 且部分实验下还发现有固体推进剂药物残渣, 这表明该固体推进剂发生了部分燃烧、充分燃烧或爆燃反应。在低温实验中, 当隔板厚度为 10、30 和 40 mm 时, 见证板被击穿, 这表明推



进剂发生了冲击起爆反应;而当隔板厚度为 45 和 50 mm 时,见证板几乎无损伤,这同样表明该固体推进剂只发生了燃烧反应。由此可知,该固体推进剂在常温和低温(-60 °C)下发生临界起爆的隔板厚度在 40~45 mm 之间,低温对该固体推进剂临界起爆压力的影响较小。这与一般炸药的冲击起爆规律不同,一般炸药在低温下感度会降低一些,由于炸药整体体积收缩,原有的空隙减小甚至消失,因此炸药的冲击感度下降,并且起爆机制趋向于均质炸药的起爆机理。然而,从本文的实验结果来看,该固体推进剂的这种差异不明显。一方面,可能是由于四组元 HTPB 推进剂的密度较低,材质较软且稀疏,在低温条件下,尽管体积会收缩,但相对炸药仍然较稀疏。另一方面,可能是本文实验还不够细致,还需要对隔板厚度在 40~50 mm 的冲击起爆实验进行对比分析。

表 1 不同实验条件下的冲击起爆实验结果

Table 1 Experimental results of shock initiation under different experimental conditions

实验序号	铝隔板厚度/mm	实验条件	见证板破坏情况	反应情况	药物残渣
1	10	常温	穿孔	起爆	无
2	10	常温	穿孔	起爆	无
3	10	常温	穿孔	起爆	无
4	10	-60 °C 冷冻 5 h	穿孔	起爆	无
5	30	-60 °C 冷冻 9 h 21 min	穿孔	起爆	无
6	50	-60 °C 冷冻 4 h 25 min	无损伤	燃烧不完全	有
7	40	-60 °C 冷冻 9 h 35 min	穿孔	起爆	无
8	40	常温	穿孔	起爆	无
9	40	-60 °C 冷冻 6 h 25 min	穿孔	起爆	无
10	50	常温	无损伤	燃烧	无
11	45	常温	有轻微损伤	燃烧	无
12	40	常温	凹坑	起爆	无
13	40	常温	穿孔	起爆	无
14	50	常温	有轻微损伤	燃烧不完全	有
15	45	-60 °C 冷冻 5 h	无损伤	燃烧不完全	有
16	40	常温	穿孔	起爆	无
17	40	常温	穿孔	起爆	无
18	50	常温	无损伤	燃烧不完全	有
19	40	-60 °C 冷冻 12 h	穿孔	起爆	无
20	40	常温	穿孔	起爆	无

图 4(a) 为隔板厚度为 50 mm 时,推进剂中距离起爆端面 0、3.1、5.0、8.0、10.0、11.1 和 13.0 mm 位置处的压力随时间变化曲线。其中,0、5.0 和 10.0 mm 处压力测量值来自实验 10;3.1、8.0 和 11.1 mm 处压力测量值来自实验 14;13.0 mm 处压力测量值来自实验 18。由图 4(a) 可知,这 7 个位置处的峰值压力分别为 4.93、4.10、3.57、3.19、2.90、2.85 和 2.71 GPa。在此情况下,入射的冲击波压力为 4.93 GPa,冲击波压力在固体推进剂中逐渐衰减,在该强度冲击波的作用下,固体推进剂没有发生冲击起爆。图 4(b) 是隔板厚度为 45 mm 时,推进剂中距离起爆端面 0、5.0 和 9.9 mm 位置处的压力随时间变化曲线,3 个位置处的峰值压力分别为 5.97、5.10 和 4.45 GPa。在此情况下,入射压力升高到了 5.97 GPa,但随着冲击波在固体推进剂中的传播,压力依然呈衰减趋势,固体推进剂同样没有发生冲击起爆。根据固体推进剂内不同位置处的冲击波压力变化规律,可以确定当隔板厚度为 45 和 50 mm 时,入射冲击波强度不足以引起该固体推进剂发生冲击起爆反应。

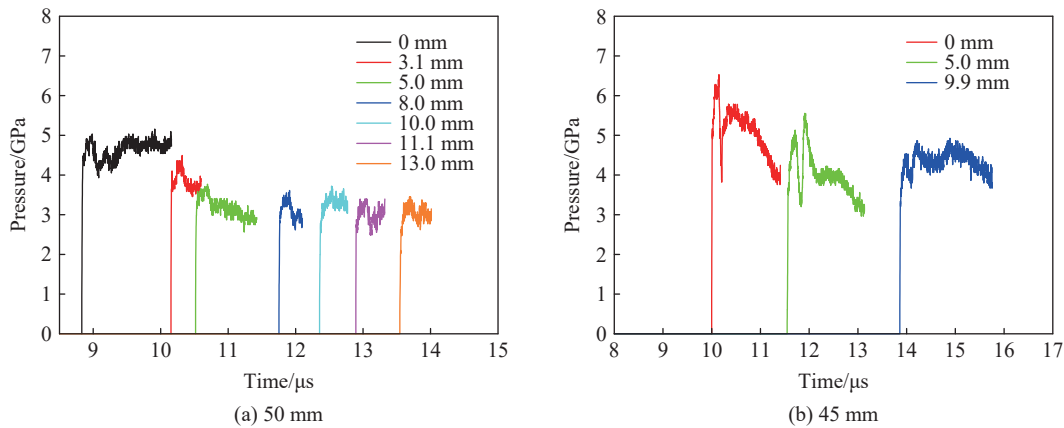


图 4 隔板厚度为 50 和 45 mm 时, 推进剂中距离起爆端面不同位置处的压力时间曲线

Fig. 4 Pressure-time curves of propellant at different positions measured from the surface of explosion initiation when the thickness of the clapboard is 50 and 45 mm

图 5(a) 是隔板厚度为 40 mm 时, 推进剂中距离起爆端面 0、2.0、3.4、4.9、8.3、9.4、13.3 和 18.3 mm 位置处的压力随时间变化曲线。其中, 0 mm 处的压力测量值来自实验 8; 2.0 mm 处的压力测量值来自实验 12; 3.4 和 9.4 mm 处的压力测量值来自实验 16; 4.9、8.3、13.3 和 18.3 mm 处的压力测量值来自实验 17。由图 5(a) 可知, 当铝隔板厚度为 40 mm 时, 这 8 个位置处的峰值压力分别为 6.35、7.76、8.32、9.79、10.96、11.49、11.84 和 12.07 GPa。推进剂受到的入射压力为 6.35 GPa; 9.99 μs 时, 波阵面达到 2.0 mm 深处, 峰值压力达到 7.76 GPa; 10.99 μs 时, 峰值压力升高为 8.32 GPa。这表明在该入射冲击波压力作用下, 固体推进剂发生了冲击起爆反应, 随着爆轰波不断成长, 波阵面压力呈现递增趋势。在距离起爆端面 4.9、8.3 和 9.4 mm 等 3 个位置处, 压力峰值分别为 9.79、10.96 和 11.49 GPa, 压力峰值仍然呈递增趋势, 这表明爆轰波仍然在成长阶段。在距离起爆端面 13.3 和 18.3 mm 等 2 个位置处, 压力峰值分别为 11.84 和 12.07 GPa, 此时压力基本保持稳定, 这表明推进剂爆轰反应基本达到稳定状态, 固体推进剂的爆轰成长距离约为 13.3 mm。

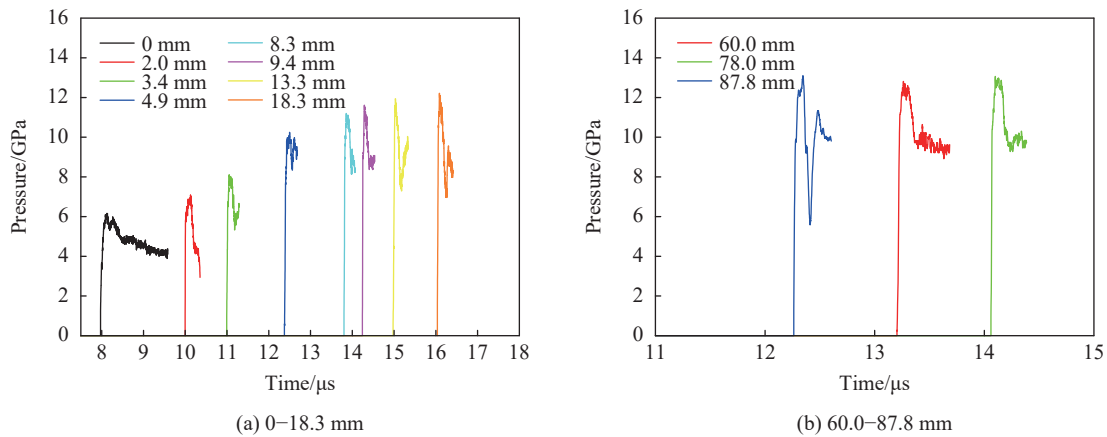


图 5 隔板厚度 40 mm 时, 推进剂中距离起爆端面不同位置处的压力时间曲线

Fig. 5 Pressure-time curves of propellant at different positions measured from the surface of explosion initiation when the thickness of the clapboard is 40 mm

图 5(b) 是隔板厚度为 40 mm 时, 推进剂中距离起爆端面 60.0、78.0 和 87.8 mm 位置处的压力随时间变化曲线。其中, 60.0 mm 处的压力测量值来自实验 1; 78.0 和 87.8 mm 处的压力测量值来自实验 13。由图 5(b) 可知, 这 3 个位置处的峰值压力分别为 13.0、12.6 和 12.8 GPa, 峰值压力与距离起爆端面 13.3 mm 处的压力值接近。由此可以确定该固体推进剂已经处于稳定爆轰状态, 此时压力值可以认为是稳定爆

压, 约为 12.5 GPa, 这一结果与理论计算结果基本一致。通过分析固体推进剂冲击实验过程、见证板破坏效应和固体推进剂中压力测量结果, 可以确定该固体推进剂的临界起爆压力为 5.97~6.35 GPa, 爆轰成长距离约为 13.3 mm, 爆轰压力约为 12.5 GPa。

表 2 为不同实验条件下, 固体推进剂的爆速测量结果。由表 2 可知, 固体推进剂在低温条件下的爆速为 5.769~6.013 km/s, 在常温条件下的爆速为 5.719~5.749 km/s。实验测量的爆轰速度与理论计算值比较接近。固体推进剂在低温条件下的爆速略高于在常温条件下的, 这可能是由在低温实验中, 将组装好的整个实验装置放置于冷冻箱中冷冻时间较长, 固体推进剂发生冷缩、密度升高所致。

表 2 不同实验条件下固体推进剂爆速的测量结果

Table 2 Experimental results of detonation velocity of the solid propellant under different conditions

实验编号	铝隔板厚度/mm	实验条件	爆速/(km·s <sup>-1</sup> )
3	10	常温	5.719
4	10	-60 °C 冷冻 5 h	5.854
5	30	-60 °C 冷冻 9 h 21 min	6.013
6	50	-60 °C 冷冻 4 h 25 min	
7	40	-60 °C 冷冻 9 h 35 min	5.769
8	40	常温	5.749

## 4 数值模拟

采用非线性有限元方法模拟计算该固体推进剂的冲击起爆过程。计算中, 加载药柱为 TNT 炸药, 直径为 50 mm, 厚度为 10 mm; 铝隔板直径为 160 mm, 厚度分别为 40 和 50 mm; 实验推进剂直径为 45 mm, 厚度为 100 mm; 网格尺寸为 0.5 mm×0.5 mm。由于冲击起爆实验装置呈现轴对称, 为了减少计算时间, 因此建立二维 1/2 轴对称计算模型, 如图 6 所示。在计算模型中忽略雷管和炸药透镜, 只考虑加载药柱、隔板和固体推进剂。炸药透镜的作用是在其被雷管起爆后, 产生一个平面爆轰波, 进而冲击起爆推进剂。计算中通过设置加载药柱的平面起爆来实现平面爆轰波加载。

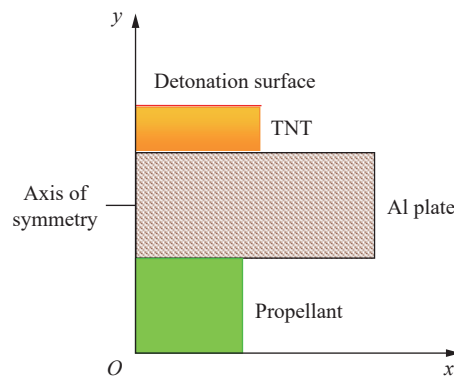


图 6 计算模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the calculation model

本文中, 采用弹塑性流体动力学材料模型和点火增长模型, 来计算该固体推进剂的冲击起爆和爆轰反应过程。点火增长模型的表达式为<sup>[17]</sup>:

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



式中:  $\lambda$  为推进剂反应度,  $t$  为时间,  $\rho$  为密度,  $\rho_0$  为初始密度,  $p$  为压力,  $I$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $x$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $y$ 、 $e$ 、 $g$  和  $z$  为常数。式(7)等号右边第 1 项表示部分推进剂在冲击压缩下被点火, 第 2 项表示推进剂快速反应产生爆轰气体产物的过程, 第 3 项表示在主要反应后相对缓慢的产物扩散控制及其反应。

图 7 为距离推进剂起爆端面 0.0、2.0、3.4、4.9、8.3、9.4、13.3、18.3、60.0、78.0 和 87.8 mm 位置处实验测量压力曲线与计算压力曲线的比较。由图 7 可知, 实验测量结果和计算结果基本一致。表 3 给出了计算得到的波阵面压力峰值与实验压力峰值。由表 3 可知, 实验值与计算值很接近, 表明这组点火增长模型反应速率方程参数能够用来描述该固体推进剂冲击起爆的爆轰成长反应过程。表 4 为拟合后的固体推进剂点火增长模型反应速率方程参数。

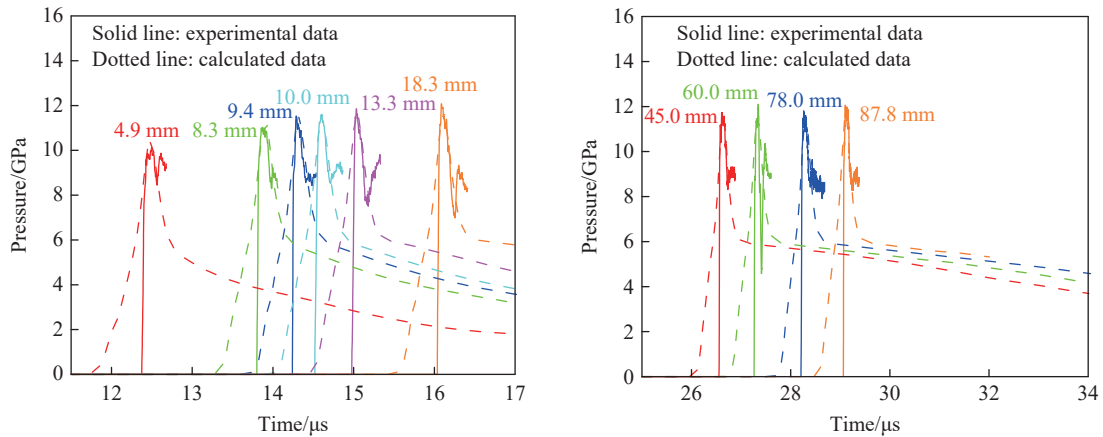


图 7 实验压力曲线与计算压力曲线的比较

Fig. 7 Comparison of experimental and calculated pressure curves

表 3 波阵面压力峰值的实验值与计算值的比较

Table 3 Comparison of experimental and calculated wave front pressure peaks

固体推进剂中位置/mm	波阵面压力值/GPa		误差/%
	实验	计算	
0.0	6.16	5.78	6.17
2.0	7.18	7.73	-7.67
3.4	8.11	8.94	-10.23
4.9	9.79	10.47	-6.95
8.3	10.13	9.95	1.78
9.4	11.03	11.55	-4.71
13.3	11.86	12.46	-5.06
18.3	12.08	12.79	-5.88
60.0	13.10	12.82	2.14
78.0	12.81	12.79	0.16
87.8	13.06	12.81	1.91

表 4 固体推进剂的点火增长反应速率方程参数

Table 4 Fitted parameters of reaction rate equation for ignition growth of solid propellant

$I/\mu s^{-1}$	$b$	$a$	$x$	$G_1/(GPa^{-2} \cdot \mu s^{-1})$	$c$	$d$	$y$	$G_2/(GPa^{-1.2} \cdot \mu s^{-1})$	$e$	$g$	$z$
100	0.667	0.0	3.0	80	0.667	1.0	2.0	883.3	0.75	0.27	1.2

图 8 给出了 40 mm 隔板厚度条件下, 不同时刻计算模型的压力分布。由图 8 可知, 在 1.59  $\mu\text{s}$  时, 加载药柱产生的平面爆轰波到达铝隔板上表面, 在铝隔板中透射平面冲击波; 约在 9.29  $\mu\text{s}$  时, 冲击波到达推进剂起爆端面, 进入推进剂的冲击波具有较好的平面性。推进剂在平面冲击波作用下发生冲击起爆反应, 约在 13.15  $\mu\text{s}$  后, 爆轰压力趋于稳定, 约为 11.47 GPa。

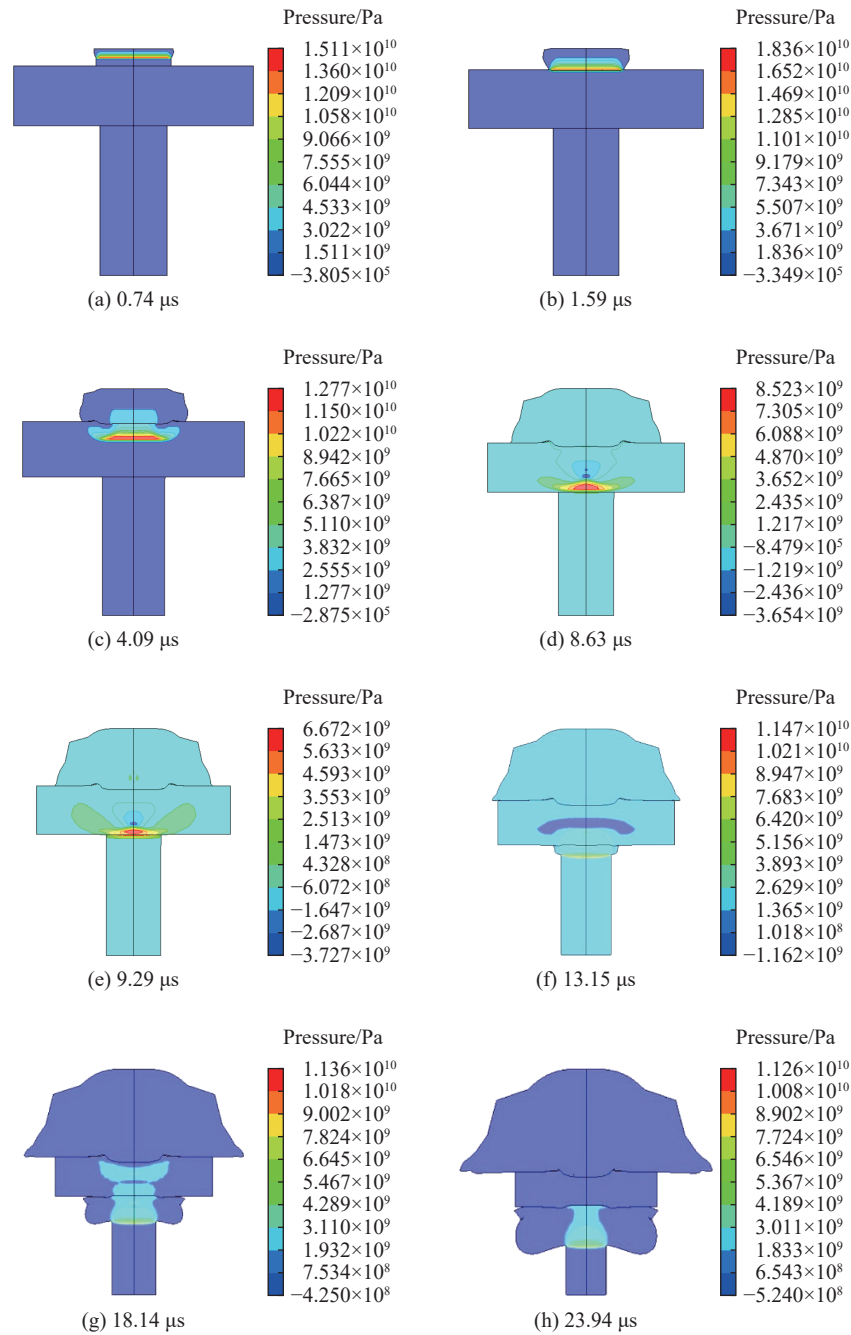


图 8 固体推进剂冲击起爆过程中不同时刻的压力云图(隔板厚度为 40 mm)

Fig. 8 Pressure contours in solid propellant at different times during the shock detonation when the thickness of the clapboard is 40 mm

在低强度冲击波作用下, 固体推进剂不会发生冲击起爆反应, 此时在靠近冲击波入射处的压力变化趋势可以用来验证推进剂的未反应 JWL 状态方程参数。固体推进剂的未反应 JWL 状态方程为<sup>[17]</sup>:

$$p_e = A e^{-R_1 V_e} + B e^{-R_2 V_e} + \omega_e c_V \frac{T_e}{V_e}$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega_e$  为未反应 JWL 状态方程常数,  $V_e$ 、 $T_e$  为未反应推进剂相对体积和温度,  $c_V$  为未反应推进剂比热容。

由实验可知, 在铝隔板厚度为 50 mm 时, 该固体推进剂不会起爆, 因此, 选择铝隔板厚度为 50 mm 的情况进行计算。计算中, 关闭点火增长计算模型中推进剂的所有反应项, 将推进剂作为惰性材料处理。图 9 为距离推进剂起爆端面 0.0、3.1、5.0 和 8.0 mm 等 4 个位置处实验压力曲线与计算压力曲线的比较。由图 9 可知, 实验测量结果与计算结果基本吻合, 推进剂中压力波形衰减趋势一致。通过对这 4 个不同位置处压力值的拟合, 得到推进剂的未反应 JWL 状态方程参数分别为:  $A=759$  TPa,  $B=750$  MPa,  $R_1=15.5$ ,  $R_2=1.41$ ,  $\omega_e=0.12$ ,  $c_V=2.78$  MPa/K。

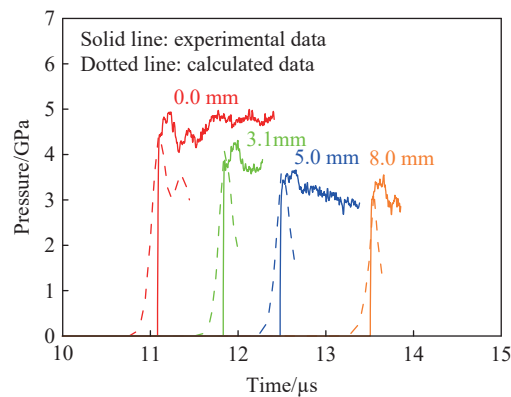


图 9 隔板厚度为 50 mm 时, 固体推进剂中不同位置处的压力时间曲线

Fig. 9 Experimental and calculated pressure-time curves at different positions in the solid propellant when the thickness of the clapboard is 50 mm

## 5 结 论

为了研究含 RDX 的四组元 HTPB 固体推进剂的冲击起爆特征和在低温条件下的适应性能, 在常温和低温条件下, 对该固体推进剂进行了冲击起爆实验。在常温和低温下隔板厚度分别为 40、45、50 mm 时对该推进剂进行了拉氏测压实验, 获得了该推进剂内部压力变化。由这些压力的数据, 可以发现在这 3 种隔板厚度条件下推进剂分别发生了爆轰、燃烧和燃烧。还采用了电离探针测量了常温和低温下固体推进剂的爆速, 分析了温度对爆速的影响。并且对推进剂的冲击起爆过程进行了数值模拟, 标定了固体推进剂的点火增长模型反应速率方程参数和未反应 JWL 状态方程参数。实验结果表明: 常温下该固体推进剂爆压约为 12.5 GPa, 临界起爆压力阈值范围为 5.16~5.61 GPa, 爆轰成长距离约为 13.3 mm, 爆轰速度在 5.719~5.749 km/s 之间; 低温下, 其爆轰速度在 5.769~6.013 km/s 之间。低温对该固体推进剂的冲击起爆特性影响较小。

## 参考文献:

- [1] 王晓峰, 王亲会, 王宁飞. 开展高能固体推进剂危险性分级研究的建议 [J]. *火炸药学报*, 2003, 26(1): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2003.01.018.  
WANG X F, WANG Q H, WANG N F. Suggestion on studying hazard classification of high energy solid propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2003, 26(1): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2003.01.018.
- [2] 廖林泉, 胥会祥, 李勇宏, 等. HTPB 推进剂危险性实验研究 [J]. *火炸药学报*, 2010, 33(4): 28-31, 43. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2010.04.007.  
LIAO L Q, XU H X, LI Y H, et al. Experimental study on hazard of HTPB propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives and*



- [Propellants](#), 2010, 33(4): 28–31, 43. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2010.04.007.
- [3] 常新龙, 龙兵, 胡宽, 等. HTPB 推进剂低温裂纹扩展特性试验研究 [J]. [固体火箭技术](#), 2015, 38(1): 86–89, 106. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2015.01.016.  
CHANG X L, LONG B, HU K, et al. Experimental study on low temperature crack growth behavior of HTPB propellant [J]. [Journal of Solid Rocket Technology](#), 2015, 38(1): 86–89, 106. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2015.01.016.
- [4] TARVER C M, FRIED L E, RUGGIERO A J, et al. Energy transfer in solid explosives: UCRL-JC-111343 [R]. Washington: USDOE, 1993.
- [5] VORTHMAN J E. Facilities for the study of shock induced decomposition of high explosives [J]. [AIP Conference Proceedings](#), 1982, 78(1): 680–684. DOI: 10.1063/1.33249.
- [6] URTIEW P A, ERICKSON L M, ALDIS D F, et al. Shock initiation of LX-17 as a function of its initial temperature [C]// Proceedings of the Ninth Symposium (International) on Detonation. Portland: OCNR, 1989.
- [7] AVERIN A N, ALEKSEEV A V, BATALOV S V, et al. Investigation into low-temperatures influence on high explosive compounds sensitivity to shock-wave impacts [J]. [AIP Conference Proceedings](#), 1996, 370(1): 847–850. DOI: 10.1063/1.50838.
- [8] 池家春, 刘雨生, 龚晏清, 等. JB9014 炸药在常温和 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温下冲击引爆压力场发展的实验研究 [J]. [高压物理学报](#), 2001, 15(1): 39–47. DOI: 10.11858/gywlb.2001.01.006.  
CHI J C, LIU Y S, GONG Y Q, et al. Investigation of shock pressure evolution of initiation in IHE's JB9014 at ambient and  $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$  [J]. [Chinese Journal of High Pressure Physics](#), 2001, 15(1): 39–47. DOI: 10.11858/gywlb.2001.01.006.
- [9] 伍俊英, 陈朗, 鲁建英, 等. 高能固体推进剂冲击起爆特征研究 [J]. [兵工学报](#), 2008, 29(11): 1315–1319. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2008.11.007.  
WU J Y, CHEN L, LU J Y, et al. Research on shock initiation of the high energy solid propellants [J]. [Acta Armamentarii](#), 2008, 29(11): 1315–1319. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2008.11.007.
- [10] 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  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  [J]. [Journal of Applied Physics](#), 2012, 112(7): 074909. DOI: 10.1063/1.4757599.
- [11] CHEN L, PI Z D, LIU D Y, et al. Shock initiation of the CL-20-based explosive C-1 measured with embedded electromagnetic particle velocity gauges [J]. [Propellants, Explosives, Pyrotechnics](#), 2016, 41(6): 1060–1069. DOI: 10.1002/prop.201600048.
- [12] 刘丹阳, 陈朗, 杨坤, 等. CL-20 基炸药爆轰产物 JWL 状态方程实验标定方法研究 [J]. [兵工学报](#), 2016, 37(S1): 141–145.  
LIU D Y, CHEN L, YANG K, et al. Calibration method of parameters in JWL equation of state for detonation products of CL-20-based explosives [J]. [Acta Armamentarii](#), 2016, 37(S1): 141–145.
- [13] PI Z D, CHEN L, WU J Y. Temperature-dependent shock initiation of CL-20-based high explosives [J]. [Central European Journal of Energetic Materials](#), 2017, 14(2): 361–374. DOI: 10.22211/cejem/68392.
- [14] 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. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2019.04.015.  
PEI H B, ZHONG B, LI X H, et al. Study on the cylinder tests and equation of state in RDX based aluminized explosives [J]. [Chinese Journal of Explosives and Propellants](#), 2019, 42(4): 403–409. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2019.04.015.
- [15] 黄韵, 王旭, 徐森, 等. HMX 基推进剂临界起爆压力的研究 [J]. [爆破器材](#), 2020, 49(1): 34–39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.007.  
HUANG Y, WANG X, XU S, et al. Study on critical initiation pressure of HMX-base propellant [J]. [Explosive Materials](#), 2020, 49(1): 34–39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.007.
- [16] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [17] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.

(责任编辑 张凌云)