

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.04.004

# 典型单基发射药的冲击波感度特性\*

魏俊茹<sup>①</sup> 谢木阳<sup>②</sup> 吕春玲<sup>①</sup> 左霖玮<sup>①</sup>

<sup>①</sup>中北大学环境与安全工程学院(山西太原,030051)

<sup>②</sup>泸州北方化学工业有限公司(四川泸州,646003)

**[摘要]** 为研究发射药对冲击波的响应特性,设计了发射药冲击波感度的试验方法。在此基础上,开展了3/1Z、4/7S、DF-12和DF-14等4种单基药的冲击波感度试验。结果表明:随着装药约束强度的增加,发射药点火后的燃烧反应产物压力积聚,推进了由燃烧向爆轰反应区的过渡,导致冲击波感度呈明显增大趋势;装填密度增大时,单基发射药的冲击波感度有显著提高。装填空隙对入射冲击波能量传递的阻碍和损耗,降低了发射药本体实际接收的冲击波能量;同时,初始点火后的燃烧反应释放能量会因孔隙稀疏而无法积聚成长为爆轰反应。发射药药型对冲击波感度有显著影响,尤其是药粒的高比表面积对于冲击点火后的燃速起到了决定性的作用,促进了高速燃烧向爆轰化学反应区的过渡。

**[关键词]** 单基发射药;冲击波感度;约束强度;装填密度;药型

**[分类号]** TQ562;TJ55

## Shock Wave Sensitivity Characteristics of Typical Single Base Propellants

WEI Junru<sup>①</sup>, XIE Muyang<sup>②</sup>, LÜ Chunling<sup>①</sup>, ZUO Linwei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>School of Environmental and Safety Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

<sup>②</sup>Luzhou North Chemical Industry Co., Ltd. (Sichuan Luzhou, 646003)

**[ABSTRACT]** In order to study the response characteristics of propellants to shock waves, a test method for the shock wave sensitivity of propellants was designed. On this basis, shock wave sensitivity tests were conducted on four single base propellants, including 3/1Z, 4/7S, DF-12, and DF-14. The results show that with the increase of restraint strength of the charge, the pressure accumulation of combustion reaction products after ignition of the propellant promotes the transition from combustion to detonation reaction zone, resulting in a significant increase in shock wave sensitivity. When the loading density increases, the shock wave sensitivity of single base propellants is significantly improved. The obstruction and loss of energy transfer of incident shock waves caused by loading gaps reduce the actual shock wave energy received by the propellant body. Meanwhile, the released energy from the combustion reaction after initial ignition will be sparse by the gaps and cannot accumulate into a detonation reaction. The shape of propellant has a significant impact on shock wave sensitivity, especially the high specific surface area of the propellant particles plays a decisive role in the combustion rate after impact ignition, promoting the transition from high-speed combustion to the chemical reaction zone of detonation.

**[KEYWORDS]** single base propellant; shock wave sensitivity; restraint strength; loading density; propellant shape

## 0 引言

随着军事技术的不断进步,武器系统面临的战场环境越来越复杂多变,武器系统的性能要求也日益提高。其中,发射药的性能更是直接关系到武器

系统的整体效能。因此,对发射药的安全性和可靠性提出了更高要求<sup>[1]</sup>。作为武器推进系统的核心组成部分,发射药的主要功能是在点火后迅速释放能量,产生高温、高压气体以推动弹丸射出,还伴随着强烈的冲击波效应。这一效应对发射药及武器系统的安全性和稳定性提出了严峻挑战。

\* 收稿日期:2025-03-08

基金项目:国家重大专项(XX6)

第一作者:魏俊茹(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向为含能材料测试技术。E-mail: 1273939970@qq.com

通信作者:吕春玲(1970—),女,副教授,主要研究方向为含能材料测试和火炸药安全评价技术。E-mail: lcl71@126.com

常规情况下,发射药只会发生燃烧,不会发生爆炸或爆轰。但是在增加高能量组分或强约束的情况下,发射药也会被冲击波引发燃烧转爆轰。发射药出现燃烧转爆轰是先燃烧,产生超高压和冲击波,从而诱发其余药床发生爆轰,对冲击波感度有很大的影响<sup>[2]</sup>。因此,冲击波感度对评价发射药的爆轰特性具有十分重要的意义,是评价发射药危险性及易损性的重要参数,也是所有反映爆轰特性试验中唯一可以量化的指标。

研究表明,在验证分级试验的试验方法时,样品大都使用单质炸药<sup>[3]</sup>,很少使用火药。在国内外感度试验和分级研究中发现,只有少量关于炸药冲击波感度的试验分析<sup>[4-5]</sup>。对火药(发射药和推进剂)而言,冲击波感度试验通常集中在推进剂特性的研究上,对于发射药的危险性评估,单独的测试项目并不常见,只有少量关于危险性的单项试验<sup>[6]</sup>。目前,国内外对发射药的危险分级缺乏明确的研究与说明,在推进剂方面也只有笼统的危险分级说明,即推进剂通常属于第 1 类爆炸材料,通常为 1.1 类(大规模爆炸)或 1.3 类(大规模火灾、小规模爆炸或碎片)。1.1 类推进剂主要是由机械冲击和传播到相邻炮弹引起的爆炸,而 1.3 类推进剂主要是无意中点燃,火焰蔓延和燃烧,偶尔会引起爆炸<sup>[7]</sup>。单基药的燃烧危险等级属于 1.3 级,双基和三基发射药的爆轰危险等级属于 1.1 级,关于不同药型的发射药的危险性目前还没有系统的试验研究,这显然对不同药型发射药的安全操作缺乏指导意义。

深入研究发射药的冲击波感度,即对外部冲击或爆炸波的敏感程度,成为提高武器系统安全性、保障军事行动顺利进行的重要课题。通过对发射药冲击波感度的系统研究,可以深入了解发射药的物理化学性质、燃烧机理及冲击波传播特性,为发射药的配方优化、生产工艺改进及安全防护措施的制定提供科学依据,补充该领域认识的不足;同时,为发射药危险等级的确定提供依据。因此,对典型发射药的冲击波感度及影响因素进行了比较系统的试验研究,为发射药的配方设计及安全使用提供参考。

## 1 冲击波感度试验

### 1.1 试验方法

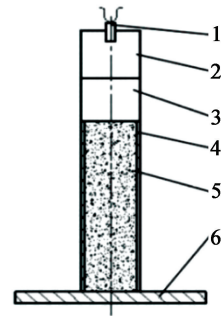
#### 1.1.1 试验原理

目前,关于发射药的冲击波感度试验无可依据的标准方法。因此,参考混合炸药和推进剂冲击波感度卡片式隔板法,初步设计了发射药的冲击波感

度试验方法。基本原理是:主发装药的冲击波能量经惰性隔板衰减后,作用于被发装药端面,通过改变惰性隔板的厚度,获得不同强度的入射冲击波;观察鉴证板,判定试样是否发生爆轰;采用敏感性测试统计方法,获得被发装药 50% 概率发生爆轰的临界隔板厚度,以此表征被发装药的冲击波感度。

#### 1.1.2 试验装置

发射药冲击波感度试验装置如图 1 所示。



1 - 雷管;2 - 主发药柱;3 - 惰性隔板;  
4 - 被发装药筒;5 - 发射药;6 - 鉴证板。

图 1 发射药冲击波感度试验装置

Fig. 1 Test device for shock wave sensitivity of propellants

#### 1.1.3 试验器件

常用的主发装药有特屈儿、彭托利特和钝化 RDX。考虑到在生产和使用特屈儿过程中的高毒性以及压制彭托利特药柱时存在太安这类高感度危险性物质的因素<sup>[8]</sup>,选用钝化 RDX 作为主发装药。

常用的惰性隔板材料有三醋酸纤维素酯片、聚甲基丙烯酸甲酯片(PMMA)和铝合金片。三醋酸纤维素酯片价格昂贵,规格单一。铝合金片的裁切平整性不好,会导致产生隔板间隙。因此,选择多规格的 PMMA 作为惰性隔板。

一般发射装药筒材质为 45# 钢,壁厚约 2 ~ 3 mm。因此,选择被发装药筒的材料为 45# 钢,内部尺寸为  $\phi 25 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ ,壁厚为 2 ~ 3 mm。

鉴证板材料硬度过高,会使鉴证板发生脆裂甚至碎裂;硬度过低,会导致鉴证板仅发生黏塑性变形而无法形成穿孔。故鉴证板材料选择硬度适中的 Q235A 级钢。

发射药种类繁多,能量输出差异性较大,必须保证低能量出发射药的冲击波感度试验判据合理且有效。因此,对鉴证板厚度的选定进行了试验研究。选取 3/1Z 和 4/7S 2 种典型的单基发射药作为受主装药,选取 1、3、4 mm 共 3 种不同厚度的鉴证板进行了冲击波感度“0”隔板摸底试验。3/1Z 发射药试验后鉴证板状态如图 2 所示。4/7S 发射药试验后

鉴证板状态如图3所示。

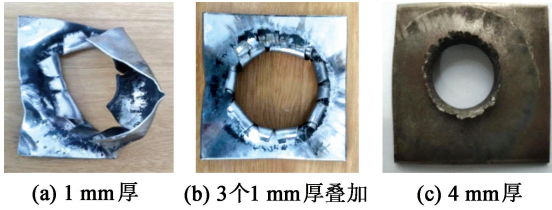


图2 3/1Z发射药试验后鉴证板的状态

Fig.2 Status of verification board with 3/1Z after test

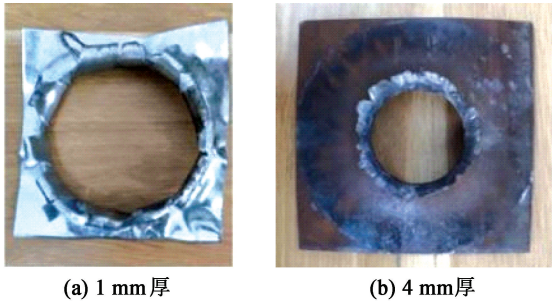


图3 4/7S发射药试验后鉴证板的状态

Fig.3 Status of verification board with 4/7S after test

试验结果表明:1 mm厚的鉴证板和3个1 mm厚的鉴证板试验后发生的形变大,鉴证效果差,并不适用于后续试验;4 mm厚的鉴证板试验后,被撕裂开的区域大小适中且完整。因此,厚度选择4 mm比较合适,鉴证板的尺寸确定为100 mm × 100 mm × 4 mm。

#### 1.1.4 敏感性测试统计方法

传统的冲击波感度卡片式隔板法所采用的敏感性测试统计方法为布鲁特升降法。该方法试验工作量大,成本高。而采用0.618黄金分割法可以用最少的试验样本量,快速缩小100%爆轰与不爆轰的隔板厚度范围,并确定该范围内50%爆轰隔板临界厚度,即单峰函数的峰值拐点。对于发射药而言,确定[0 mm,60 mm]作为50%爆轰隔板临界厚度原始峰值范围,[0 mm,1 mm]作为n次试验后50%爆轰隔板临界厚度的峰值拐点范围。

隔板试验0.618黄金分割法的试验精度

$$\delta_n = \frac{A}{B} \quad (1)$$

式中:A为n次测试后的峰值拐点范围;B为原始的峰值范围。

将已确定的2个范围代入式(1),计算出0.618黄金分割法的隔板试验精度 $\delta_n \approx 0.017$ 。

另外,0.618黄金分割法的试验精度与试验次数的关系为: $\delta_n = 0.618^{n-1}$ 。

将所需要的冲击波隔板试验精度代入式(2),

计算确定50%爆轰隔板临界厚度所需要有效试验次数

$$n \geq \frac{\lg 0.017}{\lg 0.618} + 1 \approx 9.5 \quad (2)$$

因此,为了满足试验精度要求,并考虑到试验的失误概率,将试样样本量增加为12个,则可以满足有效试验样本量达到10的要求。

## 1.2 试验样品

选取3/1Z、4/7S、DF-12和DF-14 4种单基发射药,药型、单发装药药量、单发装药孔隙率及药粒比表面积如表1所示。其中,单发试验药量为单个被发装药筒能装填的最大发射药量。单发装药孔隙率和药粒比表面积为理论计算数据。样品实物状态如图4所示。

表1 4种发射药的装药参数

Tab.1 Charge parameters of four propellants

发射药	药型	单发装药量/g	单发装药孔隙率/%	药粒比表面积/( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	单发装药总比表面积/( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )
3/1Z	3/1	36.8	24.1	15.1	1 353 335.1
4/7S	4/7	35.8	39.0	23.5	31 733.3
DF-12	4/1	27.6	40.4	35.9	91 205.0
DF-14	12/7	21.1	58.2	6.5	127.4



图4 4种发射药样品

Fig.4 Four propellant samples

## 1.3 试验结果及数据处理

按照1.1确定的冲击波感度试验方法,对4种发射药进行了冲击波感度试验,获得了50%爆轰临界隔板厚度。另外,选用4/7S发射药进行了约束强

度对冲击波感度的影响试验。其中,被发装药的套筒有 3 种壁厚规格,分别为 2.10、2.70 mm 和 3.15 mm。

冲击波在惰性有机玻璃隔板中的衰减规律为

$$p = 17.0e^{-0.0537x} \quad (3)$$

式中: $p$  为冲击波压力; $x$  为试验得到的 50% 爆轰临界隔板厚度。

依据式(3),将试验获得的 50% 爆轰临界隔板厚度转换为冲击波压力,结果如表 2 所示。

表 2 4 种发射药 50% 爆轰临界隔板厚度及等效冲击波压力

Tab.2 Critical partition thickness and equivalent shock wave pressure for 50% detonation of four types of propellants

发射药	被发装药 套筒壁厚/ mm	单发试验 药量/ g	$x$ /mm	$p$ (计算值)/ GPa
	2.10	35.8	6.92	11.72
4/7S	2.70	35.8	8.53	10.75
	3.15	35.8	9.84	10.02
3/1Z	2.70	36.8	17.23	6.74
DF-12	2.70	27.6	10.62	9.61
DF-14	2.70	21.1	1.69	15.53

## 2 分析与讨论

### 2.1 装药约束强度对冲击波感度的影响

从表 2 试验结果可看出:对于 4/7S 发射药,当装药套筒的壁厚由 2.10 mm 增加到 2.70 mm 和 3.15 mm 时,50% 爆轰临界隔板厚度从 6.92 mm 逐步增加到 8.53 mm 和 9.84 mm;相对应的 50% 爆轰临界冲击波压力则从 11.72 GPa 逐步降低到了 10.75 GPa 和 10.02 GPa。这说明,随着装药约束强度增强,冲击波感度有明显增大趋势。

目前,被普遍认可的冲击波起爆机理是热点点火和热点引起的化学反应成长为爆轰的二阶段理论。爆炸物的起爆过程不仅包含热点的形成,还包括了热点的发展过程,即形成稳定爆轰的过程<sup>[9]</sup>。对于发射药而言,当在无约束条件下受到强冲击波作用时,可能会被冲击点火,但由于燃烧化学反应区产生的燃气压力很快得以释放,所以无法使得点火燃烧成长为爆轰输出模式<sup>[10]</sup>。但是,当发射药被增加了强约束条件时,强冲击波作用下的点火会快速形成为爆轰成长过程;而且随着约束强度的增强,发射药点火后的燃烧转爆轰过程发生的概率更高<sup>[11]</sup>。

这是因为,在约束条件增强的情况下,钢管承受破坏所需的压力亦随之增大,这有利于药床燃烧时产生更为显著的燃气压力,这种增强的燃气压力进一步促进了药床燃速的提高,从而更容易诱发药床的爆轰反应。

### 2.2 装填密度对冲击波感度的影响

表 2 中,从成分组成上分类,3/1Z、4/7S 和 DF-14 3 种发射药均属于单基发射药,但药粒尺寸差异性较大,导致被发装药筒内发射药的实际装填密度有较大差异。从表 1 中的单发试验实际装药质量可以看出,3/1Z 药粒尺寸最小,装填质量为 36.8 g,装填孔隙率为 24.1%,装填密度最大。DF-14 药粒最大,装填质量为 21.1 g,装填孔隙率为 58.2%,装填密度最小。3/1Z 发射药的 50% 爆轰临界冲击波压力为 6.74 GPa,而 DF-14 发射药的 50% 爆轰临界冲击波压力为 15.53 GPa。显然,对于同一类型的单基发射药,药粒大小不同时,实际装填密度对冲击波感度有显著影响。且药粒越小,装填密度越大,冲击波感度越高。

发射装药内部存在较多孔隙时,孔隙影响和阻碍了入射冲击波能量的传递,同时,还会造成反应释放能量的较大损失<sup>[12]</sup>。当冲击波传播到孔隙处时,孔隙中的气体会消耗并分散能量,导致部分的能量被吸收或散射,阻止能量完全传递到未参与反应的区域,对爆轰的成长产生显著影响<sup>[13]</sup>。因此,较多的孔隙使得发射药本体实际所吸收到的能量远低于实际入射的冲击波能量,冲击点火和燃烧转爆轰的成长过程均会受到影响<sup>[14]</sup>。

另一方面,发射药受到冲击波作用后,从点火燃烧向爆轰状态的过渡过程本质上是一个能量快速积聚、促进反应成长的过程。当装药中有较多孔隙存在时,初始点火后的燃烧反应释放能量会因孔隙稀疏而无法积聚成长<sup>[15]</sup>。

显然,就 3/1Z 和 DF-14 发射药而言,3/1Z 的粒度很小,装药的总体比表面积较大,且药粒的燃烧层厚度较小,在冲击点火后的燃烧速度更高,更容易向爆轰反应区过渡。

另外,对比 4/7S 和 DF-12 的试验结果可知,4/7S 装填质量 35.8 g,装填孔隙率 39.0%,小于 DF-12 的 40.4%,装填密度高于 DF-12,但是 50% 爆轰临界冲击波压力为 10.75 GPa,又比 DF-12 的 9.61 GPa 略高。这 2 组数据的对比结果与其他装填密度对冲击波感度的影响规律有些不符。

从表 1 可以看出,除了装填密度的差异,DF-12 的单发装药总比表面积是 4/7S 的 2.8 倍,具有显著

差异。因此,当2种发射装药密度差异没有足够大时,比表面积显著差异可能会导致高比表面积的发射药在点火后的成长过程更快,燃速更高,更容易向爆轰反应区过渡<sup>[16]</sup>。

### 2.3 药型对冲击波感度的影响

从表2中的50%爆轰临界冲击波压力测试结果可以看出,在相同的约束条件下,3/1Z、4/7S、DF-12和DF-14 4种不同单基发射药的冲击波感度具有明显差异,且随着单发装药总比表面积的增大,冲击波感度呈现明显升高的趋势。

其中,DF-12发射药的药粒较小,装填密度比DF-14稍高一些,但是,50%爆轰临界冲击波压力为9.61 GPa,相比DF-14发射药的15.53 GPa临界起爆压力,感度的提高幅度远远超过了装填密度对冲击波感度的影响。结合表1中的比表面积计算数据可以看出,DF-12发射药药粒的比表面积大约是DF-14的5倍,单发装药的总比表面积大约是DF-14发射药的715倍。显然,DF-12发射药的高比表面积对发射药冲击波点火后燃速的快速成长起到了决定性的作用,并且与装填密度对冲击波的影响效应进行了充分的叠加。

综上所述,装填密度和装药比表面积均对发射药的冲击波感度有显著影响,但影响程度取决于这2个因素的差异性大小,差异性大的影响因素对冲击波感度起决定性作用。

## 3 结论

1)随着装药约束强度增强,发射药点火后的燃烧反应产物压力积聚,推进了燃烧向爆轰反应区的过渡,导致单基药的冲击波感度呈明显增大趋势。

2)装填密度增大时,单基发射药的冲击波感度有显著升高。装填孔隙在阻碍入射冲击波能量传递过程中增大了能量损耗,降低了发射药本体实际接收的冲击波能量;同时,有较多孔隙存在时,初始点火后的燃烧反应释放能量会因孔隙稀疏而无法积聚成长为爆轰反应。

3)发射药药型对冲击波感度有显著影响。尤其是药粒的高比表面积对于冲击点火后的燃速起到了决定性的作用,促进了高速燃烧向爆轰化学反应区的过渡。

4)装填密度和装药比表面积均对发射药的冲击波感度有显著影响,但影响程度取决于这2个因素的差异性大小。差异性大的影响因素对冲击波感度起决定性作用。

## 参考文献

- [1] 芮妮欣. 典型含能物质能量与安全性综合效应评定及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
GUO W C. Evaluation and application of energy and safety comprehensive effects of typical energetic materials [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [2] 陈晓明, 赵瑛, 宋长文, 等. 发射药燃烧转爆轰的试验研究[J]. 火炸药学报, 2012, 35(4): 69-72.  
CHEN X M, ZHAO Y, SONG C W, et al. Experimental study on deflagration to detonation transition of gun propellants [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35 (4): 69-72.
- [3] 王曙光, 朱建生, 陈栋, 等. 炸药爆炸理论基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.  
WANG S G, ZHU J S, CHEN D, et al. The theoretical basis of explosive detonation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020.
- [4] KOSTYUKOV E N, NIKIFOROVA M S, SPIRIN I A, et al. Dependence of acoustic emission parameters and shock-wave sensitivity of plastic-bonded HMX on filler particle size [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2023, 59: 362-366.
- [5] 花成, 黄明, 黄辉, 等. RDX/HMX 炸药晶体内部缺陷表征与冲击波感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 152-157.  
HUA C, HUANG M, HUNAG H, et al. Intragranular defects and shock sensitivity of RDX/HMX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(2): 152-157.
- [6] NEELAM S, NARANG R, NARANG P K, et al. New approach to hazard classification testing of propellants [C]//33th International Pyrotechnics Seminars. Fort Collins, CO, US, 2006.
- [7] YANG K, CHEN L, LIU D Y, et al. Quantitative prediction and ranking of the shock sensitivity of explosives via reactive molecular dynamics simulations [J]. Defence Technology, 2022, 18(5): 843-854.
- [8] 柳梦辉. 固含量对改性双基推进剂冲击波起爆特性影响研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.  
LIU M H. Effect of solid content on shock wave initiation of modified double propellant [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [9] 吕春玲, 狄建华, 刘玉存. 冲击波起爆热点点火阶段的影响因素[J]. 火工品, 2000(4): 10-15.  
LÜ C L, DI J H, LIU Y C. Influence factors of hot spot ignition period in shock wave initiation [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2000(4): 10-15.

[11] 张伟, 周霖, 张向荣, 等. 2,4-二硝基茴香醚基含铝熔铸炸药爆轰临界直径的实验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 690-694.  
ZHANG W, ZHOU L, ZHANG X R, et al. Experimental study of critical diameter of DNAN-based aluminized melt-cast explosives [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(4): 690-694.

[12] 苗飞超, 周霖, 张向荣, 等. 点火增长反应速率方程在 LS-DYNA 软件中嵌入及应用 [J]. 兵工学报, 2019, 40(7): 1411-1417.  
MIAO F C, ZHOU L, ZHANG X R, et al. Implantation and application of ignition and growth reaction rate equation in LS-DYNA software [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(7): 1411-1417.

[13] 周霖, 王昭元, 张向荣, 等. DNP 炸药冲击 Hugoniot 关系实验研究 [J]. 含能材料, 2021, 29(9): 833-839.  
ZHOU L, WANG Z Y, ZHANG X R, et al. Experimental measurement on Hugoniot relationship of DNP explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(9): 833-839.

[14] 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.

[15] GIBBS T R, POPOLATO A. LASL explosive property data [M]. Oakland, CA, US: University of California Press, 1980.

---

(上接第 27 页)

[10] 陈晓明, 金鹏刚, 张衡, 等. 发射药冲击波感度的试验研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 689-692.  
CHEN X M, JIN P G, ZHANG H, et al. Experimental study on the shock wave sensitivity response of gun propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(6): 689-692.

[11] 罗一鸣, 沈飞, 王辉, 等. 不同点火条件下 DNTF 与 B 炸药的燃烧转爆轰实验研究 [J]. 火炸药学报, 2022, 45(3): 332-338.  
LUO Y M, SHEN F, WANG H, et al. Experimental study on DDT of DNTF and Composition B explosives under different ignition conditions [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(3): 332-338.

[12] 马珊珊, 张跃跃, 张会锁, 等. 装药形状对冲击波超压峰值的影响 [C]//中国兵工学会, 重庆市科学技术协会. OSEC 首届兵器工程大会论文集. 重庆, 2017.

[13] 朱俊伍. 小尺寸装药燃烧转爆轰特性及其影响规律研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.  
ZHU J W. Study on the deflagration to detonation transition characteristics and its influence law of small size charge [D]. Taiyuan: North University of China, 2022.

[14] 张超, 马亮, 赵凤起, 等. 含能材料燃烧转爆轰研究进展 [J]. 含能材料, 2015, 23(10): 1028-1036.  
ZHANG C, MA L, ZHAO F Q, et al. Review on deflagration-to-detonation transition of energetic materials [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(10): 1028-1036.

[15] 文尚刚, 王胜强, 黄文斌, 等. 密度对压装 B 炸药燃烧转爆轰性能的影响 [J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 5-8.  
WEN S G, WANG S Q, HUANG W B, et al. The influence of density in Composition B on deflagration-to-detonation-transition behavior [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(5): 5-8.

[16] 冯晓军, 王晓峰. 装药孔隙率对炸药烤燃响应的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 109-112.  
FENG X J, WANG X F. Influences of charge porosity on cook-off response of explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 109-112.