

文章编号: 1006-9941(2026)01-0016-10

## 含推进剂复合凝胶炸药的能量输出特性

刘玺辰, 王一鸣, 刘大斌, 王泽山

(南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为推进退役HTPB推进剂的资源化利用, 研究将其与含能凝胶复合制备了复合凝胶炸药: 含三组元推进剂的复合炸药1-PxDyφz、含9%RDX四组元推进剂的复合凝胶炸药2-PxDyφz、含15%RDX推进剂的复合炸药3-PxDyφz以及含20%HMX推进剂复合炸药4-PxDyφz(x为推进剂P的含量, x=30%, 40%, 50%, y为粒径D的大小, y=5, 10, 15 mm, z装药尺寸φ的大小, z=40, 50, 65 mm), 并对该复合凝胶炸药开展爆速、验证板毁伤及水下爆炸能量的研究, 研究含不同推进剂的含量和粒度以及装药直径条件下的复合凝胶炸药能量特性。结果表明, 1-PxDyφz和2-PxDyφz复合炸药中推进剂的含量增加会降低复合炸药的爆速和猛度, 3-PxDyφz和4-PxDyφz随推进剂含量增加会使爆速和猛度提高。1-PxDyφz~4-PxDyφz随推进剂粒度的减小均有助于复合炸药爆速和猛度的提升, 并且装药直径增大显著增加毁伤能力。水下爆炸实验结果表明, 1-PxDyφz和2-PxDyφz中推进剂的含量增加会降低水下总能量输出, 3-PxDyφz随推进剂含量增加总能量基本不变, 4-PxDyφz随推进剂含量增加会使水下总能量提高。此外, 1-PxDyφz~4-PxDyφz随推进剂粒度的减小水下总能量呈现上升趋势。

**关键词:** 退役推进剂; 含能凝胶; 复合炸药; 爆轰性能

**中图分类号:** TJ55; O64

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025184

### 0 引言

废弃火炸药(含退役发射药、推进剂及混合炸药)作为特殊危险废物, 采用传统的销毁方式如露天焚烧、海洋倾倒或深井注入等方法销毁, 不仅浪费大量资源, 还可能会造成环境污染甚至引发爆炸事故。为此, 各国长期致力于将废弃火药转化为可用资源, 以确保处置过程的安全性、降低污染排放、压缩成本, 同时发挥其潜在能量<sup>[1]</sup>。对此, 王泽山院士提出了“回收—资源化—再利用”(R3)概念, 通过提取废火药中的主要有效成分或整体转化为民用工业炸药等产品, 不仅实现了环境保护, 还带来了显著的社会和经济效益<sup>[2]</sup>。

我国年均工业炸药消耗量约为300~400万吨。以废弃火药作为主要成分, 配合氧化剂及其它助剂按

一定配比制备工业炸药<sup>[3]</sup>, 既能发挥其高能易燃爆的特性, 又能实现大规模资源化利用。目前我国已开发了多种以废弃火药为基料的工业炸药, 包括含废火药的水胶炸药和乳化炸药等, 部分产品自1992年起已在相关企业投入生产和应用<sup>[4]</sup>。

复合凝胶炸药作为一种典型的多相非均质炸药体系, 是实现废弃火药资源化利用的理想载体之一。其基本概念是在连续的凝胶基质中, 均匀分散固相或液相的含能组分、氧化剂及敏化剂等<sup>[5]</sup>。与理想炸药不同, 复合凝胶炸药的能量输出表现出显著的非理想爆轰特性, 反应区较宽, 爆轰过程为多个阶段, 能量释放速率相对较慢<sup>[6]</sup>。因此, 其爆炸威力受到多种物理和化学因素的共同影响, 包括: 含能颗粒的粒度、含量、混合均匀性, 以及炸药自身的装药直径等<sup>[7]</sup>。国内外研究者在提升体系的能量输出、储存稳定性及安全性方面<sup>[8]</sup>开展了相关研究。国际上多关注其在钝感弹药(IM)和特殊工程爆破中的应用<sup>[9]</sup>, 国内研究侧重于利用其技术平台实现工业炸药的低成本化和废弃含能物资的资源化利用<sup>[10]</sup>, 并已在水胶、乳化等领域取得相关成果<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2025-08-18; 修回日期: 2025-09-24

网络出版日期: 2025-12-31

作者简介: 刘玺辰(1996-), 男, 博士研究生, 主要从事退役处置资源化相关研究。e-mail: xichen0131@163.com

通信联系人: 刘大斌(1963-), 男, 研究员, 主要从事含能材料相关研究。e-mail: dabin63@vip.sina.com

引用本文: 刘玺辰, 王一鸣, 刘大斌, 等. 含推进剂复合凝胶炸药的能量输出特性[J]. 含能材料, 2026, 34(1):16-25.

LIU Xi-chen, WANG Yi-ming, LIU Da-bin, et al. Energy Output Characteristics of Composite Gel Explosives Containing Propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2026, 34(1):16-25.

由于推进剂具有较高的力学强度,相比于发射药难以进行预处理操作,因此以废弃火药为基料的工业炸药大都是以发射药作为敏化剂进行复合制样,对于废弃推进剂的研究鲜有报道。以往报道的灌注凝胶体系多采用传统化学交联剂,存在凝胶强度低、耐水性差、储存稳定性不足等问题,严重制约了该技术的工业化应用<sup>[12]</sup>,而本研究的灌注体系解决了这一技术问题。针对废弃推进剂资源化的技术瓶颈,本研究开发了一种兼具力学性能<sup>[13]</sup>和爆轰性能的含能凝胶。凝胶在固化前具有极好的流动性,可对粗破碎后的推进剂进行灌注操作,即“粗碎—灌注”。

本研究聚焦于含推进剂复合凝胶炸药的能量输出特性研究,为具体表征其能量输出特性,研究采用电测法测定其爆速,通过钢板验证板试验定性表征其猛度,利用水下爆炸试验测量了其比冲击波能和比气泡能。旨在系统分析不同推进剂品种、推进剂含量、推进剂粒度以及装药直径对以上关键性能指标的影响,为不同能量水平的含推进剂复合凝胶炸药的应用提供实验依据。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂:由中国航天科工集团(CASIC)提供的工业级推进剂;国药集团化学试剂有限公司生产的分析纯硝酸铵(AR,99.5%);上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产的工业级硝酸单甲胺(98%);以及天津市大茂化学试剂厂生产的分析纯硝酸钠(AR,99.0%)。

仪器:上海一恒科学仪器有限公司的DHG-9140A型干燥箱;金坛市荣华仪器制造有限公司的HH-S4型水浴锅;美国PCB Piezotronics, Inc.生产的138A10型水下冲击波传感器;北京测控技术研究所提供的规格为 $\Phi 100\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的2毫米钢靶板以及CZ-1型铜芯线探针。

### 1.2 样品制备

(1) 含推进剂复合凝胶炸药的制备:为研究含不同种类推进剂的复合凝胶炸药能量输出特性,研究选取了4种不同组分的推进剂,将推进剂切割成5~15 mm的颗粒状,然后将推进剂颗粒放入直径为40、50 mm以及65 mm的装药模具中,使用60℃水浴加热下将硝酸铵、硝酸一甲胺以及硝酸钠混合并溶解,而后按文献[14-15]方法加入交联剂、引发剂、催化剂和缓凝剂等制得灌注液,最后将灌注液倒入装有推进剂颗粒的模具中,放入烘箱中进行交联固化,制得含推进剂的复

合凝胶炸药<sup>[12]</sup>样品1-PxDy $\phi$ z~4-PxDy $\phi$ z,样品组份如表1所示。对推进剂进行灌注的含能凝胶为自研制炸药,固化前具有流动性,便于灌注操作。

表1 含推进剂复合炸药的主要组分含量

Table 1 Main Component Contents of composite explosives containing propellants

sample	weight percentage of main components / %			
	AP	Al	RDX	HMX
1-PxDy $\phi$ z	68.4	18	0	0
2-PxDy $\phi$ z	61.0	18	9	0
3-PxDy $\phi$ z	65.0	0	15	0
4-PxDy $\phi$ z	63.0	5	0	20

(2) 推进剂药柱的制备:为对比分析推进剂复合前后的爆轰,采用推进剂药柱样品5(AP/Al的质量比为68.4/18),以及推进剂与RDX的混合物药柱样品6(AP/Al/RDX的质量比为68.4/18/9),药柱 $\phi 8\text{ cm}$ ,高20 cm。

## 1.3 实验

### 1.3.1 爆速验证板测试

为研究不同种类推进剂、不同推进剂含量、不同推进剂粒度以及装药直径对复合炸药的爆速和毁伤能力的影响,依据标准(GJB 772A-1997,方法401.1)对复合凝胶炸药样品1-PxDy $\phi$ z~4-PxDy $\phi$ z的进行了爆速和验证板毁伤测试。试验所用采用铜芯线探针(直径0.12~0.15 mm)作为线型传感元件,采用断接触方式连接。试验共使用三个探针,间距20 mm,信号由爆速测试仪记录,时间分辨率为0.01  $\mu\text{s}$ ,用于计算平均爆速<sup>[16]</sup>。此外,为表征爆炸威力,在每个样品下方放置了一块厚度10 mm、尺寸为300 mm $\times$ 300 mm的钢板作为验证板。钢板的变形及破坏特征用于评估含能凝胶的爆炸效应,并与爆速测试结果进行交叉验证。

为对比分析三组元与四组元推进剂的冲击起爆特性,研究对推进剂炸药柱进行了起爆测试,以研究推进剂在强冲击作用下的反应程度,通过验证板状态和爆速数据判定其反应形式属于爆轰还是爆燃。推进剂药柱下方放置2 mm铁质验证板验证其是否传爆,同时测其爆速。使用联合国橘黄书标准160 g药柱(50%RDX+50%太安制成)轰击推进剂。

### 1.3.2 水下爆炸试验

为研究不同种类推进剂、不同推进剂含量、不同推进剂粒度对复合炸药的做功性能的影响,使用水下爆炸试验(GJB 772A-1997,方法705.1)对复合凝胶炸

药样品进行测试,计算其冲击波能和气泡能。

试验在直径 8.0 m,深度 8.0 m 的圆柱形水池中进行水下爆炸能量测试,采用的传感器为 PCB138A10 水下激波传感器(美国 PCB 公司灵敏度( $\pm 15\%$ ):  $0.073 \text{ mV}\cdot\text{kPa}^{-1}$ ),其中样品和传感器入水深度 4.0 m,传感器距离爆心的水平距离 2 m 和 2.5 m,试样直径 65 mm,质量为 300 g,采用 8 号电雷管引爆一发质量为 10 g、尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm}\times 20 \text{ mm}$  的 RDX 传爆药,进而起爆主炸药样品。实验的测试示意图如图 1 所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 含推进剂复合凝胶炸药爆速验证板试验

#### 2.1.1 推进剂种类对爆轰性能的影响

为对比分析推进剂复合前后的爆轰性能,研究对

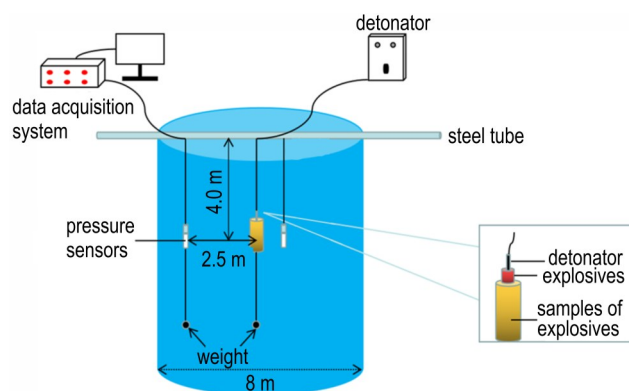


图 1 水下爆炸试验示意图

Fig.1 Schematic of the underwater explosion test

复合凝胶炸药 1-P40D10 $\phi$ 50~4-P40D10 $\phi$ 50 和推进剂药柱样品 5 及推进剂与 RDX 混合物药柱 6 进行爆轰性能试验,结果如图 2 所示。

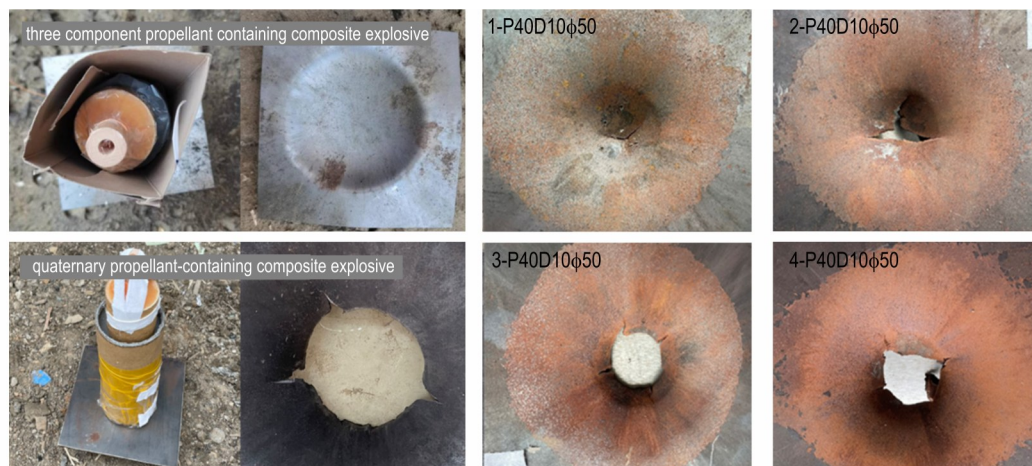


图 2 推进剂药柱的爆轰特性与复合凝胶炸药验证板测试

Fig.2 Detonation performance and witness plate damage of the propellant charge and composite gel explosive

由图 2 可以看出,推进剂药柱样品与复合凝胶炸药展现出了不同的爆轰特性。对于推进剂药柱,样品 5 未发生爆轰,测试所得反应波传播速度仅为  $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,2 mm 验证板未被击穿,判定为发生了爆燃<sup>[16-17]</sup>;而含 9% RDX 的样品 6 成功发生爆轰,爆速达到  $3333.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,并将下方验证板完全击穿,这表明加入 9% 的 RDX 即可实现废弃推进剂向复合炸药的有效转化,具有较高的资源化利用价值。

在此基础上,将推进剂制备成复合凝胶炸药(样品 1-P40D10 $\phi$ 50~4-P40D10 $\phi$ 50)后,其爆轰性能随单质炸药 RDX 或 HMX 含量的增加而显著提高。含 9% RDX 的 2-P40D10 $\phi$ 50 爆速已达  $4651 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,明显高于同含量的药柱样品;当 RDX 含量增至 15% 时(3-P40D10 $\phi$ 50),爆速进一步提升至  $5586 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。验证板的破坏程度与

爆速趋势一致,其中含 15% RDX 的 3-P40D10 $\phi$ 50 与含 20% HMX 的 4-P40D10 $\phi$ 50 破坏程度最大,验证了高能组分对废弃推进剂基炸药威力的显著增益作用。

#### 2.1.2 推进剂含量对爆轰性能的影响

研究推进剂含量对复合凝胶炸药的输出性能有何影响,因此,固定推进剂粒度为 10 mm,装药直径为 50 mm,研究推进剂含量分别在 30%,40% 和 50% 下复合凝胶炸药 1-PxD10 $\phi$ 50~4-PxD10 $\phi$ 50 的爆轰性能,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,随着推进剂含量由 30% 增加至 50%,复合凝胶炸药 1-PxD10 $\phi$ 50 和 2-PxD10 $\phi$ 50 的爆轰性能呈现下降趋势,验证板裂纹逐渐消失,凹陷深度从 23.84 mm 下降到 15.14 mm,同时爆速下降到  $3510 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;而复合凝胶炸药 3-PxD10 $\phi$ 50 的爆轰性

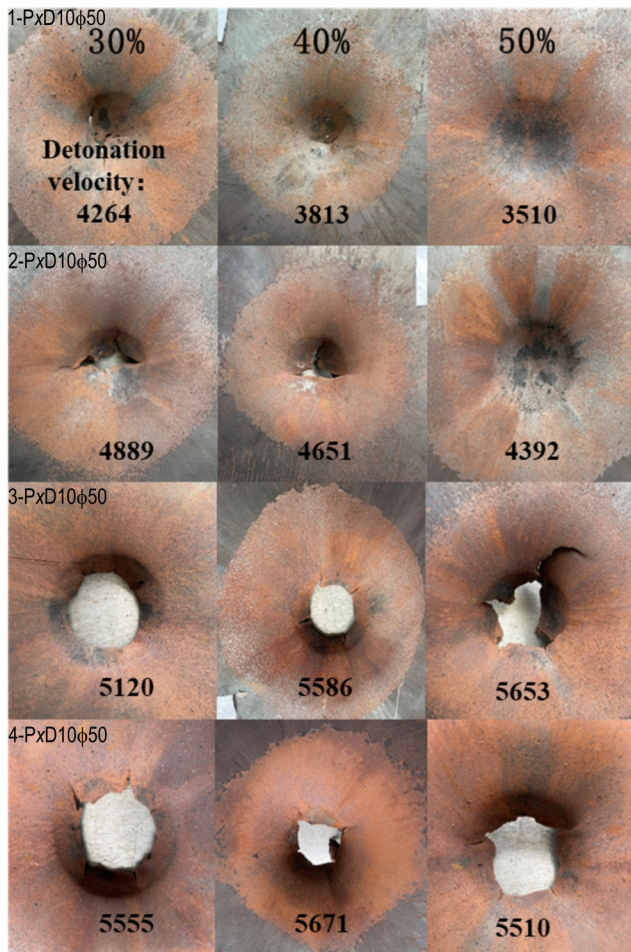


图3 含不同含量推进剂的复合凝胶炸药验证板破坏程度  
Fig.3 Damage degree of witness plates for composite gel explosives with different contents of propellants

能却呈现上升趋势,推进剂含量为50%时达到最大值  $5653 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且验证板均穿孔且孔径大于装药直径的  $2/3$ ,推进剂含量在40%和50%时爆速和验证板的毁伤效果相差不大;随着推进剂含量的增加,4-PxD10φ50在推进剂含量为40%时即表现出爆速的最大值  $5671 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,且验证板的毁伤效果未发生明显变化。

分析认为,造成这种现象的原因是1-PxD10φ50和2-PxD10φ50中,推进剂的HTPB等惰性组分和较大颗粒阻碍了能量释放效率。因此,增加其用量反而对整个体系的能量起到了稀释作用<sup>[19-20]</sup>。对于3-PxD10φ50和4-PxD10φ50,虽然爆轰性能显著提升,但当推进剂的含量过高(如达到50%)时,会增大炸药整体的不均匀性,可能导致临界直径和稳定爆轰距离增大,从而影响爆轰的稳定性和能量的完全释放,使得性能提升不再显著<sup>[21]</sup>。可见,复合凝胶炸药中,推进剂的含量存在一个最佳值,含量都不宜过高。综

合考虑爆轰性能与稳定性,将推进剂含量控制在40%左右。

### 2.1.3 推进剂粒度对爆轰性能的影响

研究推进剂粒度对复合凝胶炸药的输出性能有何影响,因此固定推进剂含量为40%,装药直径为50 mm,对不同粒度(15, 10, 5 mm)复合凝胶炸药1-P40Dyφ50和2-P40Dyφ50下的爆轰性能实验。试验旨在研究粒度对复合体系能量输出性能的影响规律,因此为减小小试验量仅选取两种样品进行测试,结果如图4所示。

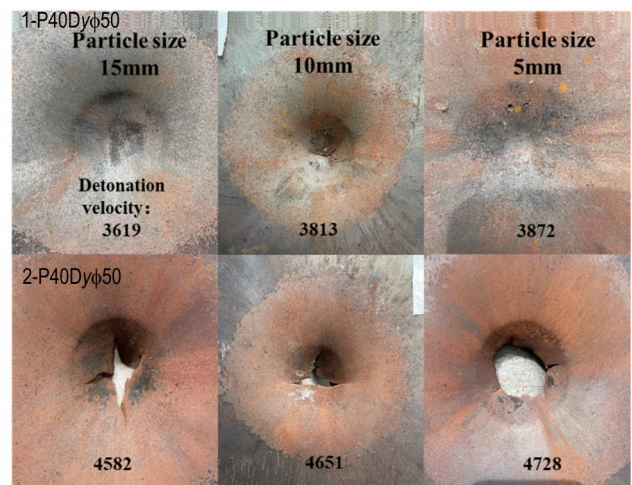


图4 不同推进剂尺寸复合凝胶炸药对验证板破坏程度  
Fig.4 Damage degree of witness plates for composite gel explosives with different propellant sizes

由图4可以看出,1-P40Dyφ50中随着推进剂粒度减小爆速呈现较小的上升幅度,由  $3619 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  提高到  $3872 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,验证板的破坏程度与爆速没表现出良好的一致性,验证板均未穿孔且凹陷深度相差在1 mm左右。2-P40Dyφ50中爆速随推进剂粒度的减小同样呈现较小的上升幅度,验证板的破坏程度从推进剂粒度15 mm时的裂缝成长到穿孔。

分析认为这是由于推进剂颗粒越细,其在凝胶基质中的分散就越均匀,使得整个爆炸体系的微观结构更趋于一致。这种均一性有助于促进整体能量的有效利用,从而增强爆轰性能<sup>[22]</sup>。2-P40Dyφ50因其自身性能较好,粒度减小带来的积极效应更为显著。可见,减小推进剂粒度对提升复合炸药的爆轰性能有积极影响。但考虑到粒度过小会增加预处理的难度和功耗,因此在实际应用中,推进剂的粒度不宜低于5 mm。

### 2.1.4 装药直径对爆轰性能的影响

为分析装药直径对复合炸药爆轰性能的影响,固定推进剂含量为40%,粒度为10 mm,对1-P40D10φz

和 2-P40D10 $\phi$ z 进行不同装药直径下的爆轰性能试验。结果如图 5 所示。

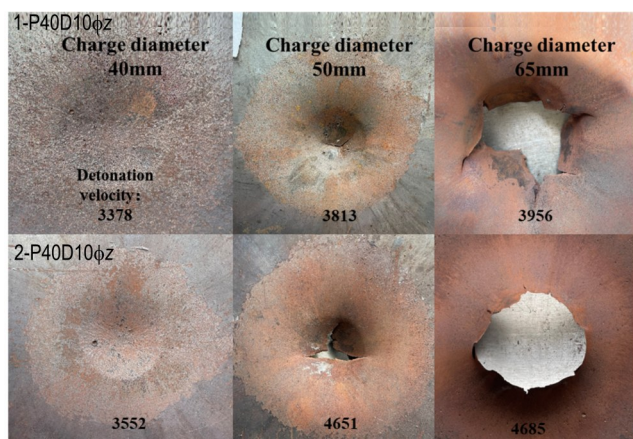


图 5 不同装药直径复合凝胶炸药对验证板破坏情况

Fig.5 Damage degree of witness plates for composite gel explosives with different charge diameters

由图 5 可以看出, 1-P40D10 $\phi$ z 和 2-P40D10 $\phi$ z 对验证板的做功能力均随装药直径的增大而增强; 其爆速在装药直径从 40 mm 提升至 50 mm 时增幅明显, 但从 50 mm 继续增大到 65 mm 时, 爆速的增长速率有所放缓, 这表明炸药受边界效应的影响减小, 反应趋向于稳定高效的爆轰。然而, 正如验证板的破坏结果清晰所示, 当直径增加至 65 mm 时, 炸药的整体爆炸威力及做功能力仍有相当大的提升。分析认为, 尽管 50 mm 是接近理想爆速的有效直径, 但若追求最大的毁伤能力, 可能需要采用更大的装药直径。

## 2.2 水下爆炸研究复合凝胶炸药的能量输出特性

### 2.2.1 水下爆炸试验原理

为评价含推进剂复合凝胶炸药的做功能力, 本研究采用标准水下爆炸试验方法<sup>[23]</sup>, 对 1-Px Dy $\phi$ z~4-Px Dy $\phi$ z 样品开展系统测试。该方法通过高精度压力传感器捕获爆炸产生的信号并转化为压力-时间曲线, 结合试验实测参数与已建立的能量计算模型, 可分别解算冲击波能与气泡能, 进而获得炸药水下爆炸总

能量。本研究旨在通过该测试体系, 系统探究推进剂的种类、含量及粒径对复合凝胶炸药水下爆炸能量输出规律的影响机制。

### 2.2.2 推进剂种类对水下爆炸能量输出特性的影响

为研究推进剂种类对复合凝胶炸药的能量输出特性, 对 1-P30D10 $\phi$ 50~4-P30D10 $\phi$ 50 进行了水下爆炸实验, 结果如图 6 所示。由试验结果可知, 含推进剂复合凝胶炸药均爆轰, 不同推进剂种类的配方之间能量的输出明显不同, 4-P30D10 $\phi$ 50 的超压以及脉动周期表现出最高值, 从曲线上结果可直观看到 3-P30D10 $\phi$ 50 与 4-P30D10 $\phi$ 50 的脉动周期相差不大。

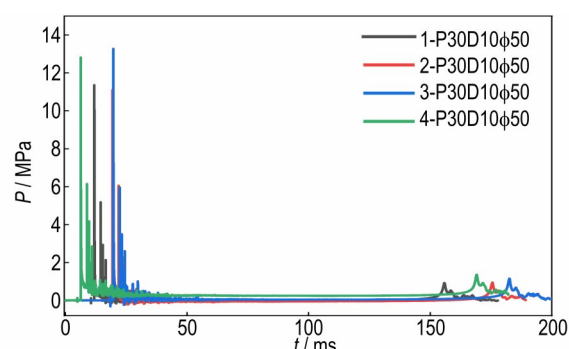


图 6 不同推进剂复合凝胶炸药的水下爆炸能量输出特性

Fig.6 Underwater explosion energy output characteristics of composite gel explosives containing different propellants

基于 TranAX 测试软件及水下爆炸理论计算模型, 对试验所得曲线进行分析, 获得水下爆炸能量输出特性参数, 如表 2 所示。研究结果表明, 1-P30D10 $\phi$ 50~4-P30D10 $\phi$ 50 的脉动周期呈逐步增长趋势, 其比冲击波能随推进剂中 RDX 和 HMX 含量的增加而增大。其中, 3-P30D10 $\phi$ 50 的比气泡能与 4-P30D10 $\phi$ 50 相近, 而 4-P30D10 $\phi$ 50 的水下爆炸总能量最高, 达到 2.944 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>; 相较之下, 1-P30D10 $\phi$ 50 的水下爆炸总能量最低, 仅为 2.368 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>。分析认为含推进剂复合凝胶炸药的能量输出特性与推进剂的配方组分密切相关。推进剂在含能凝胶体系中兼具氧化剂和敏化

表 2 复合炸药水下爆炸输出特性参数

Table 2 Underwater explosion output characteristic parameters of composite gel explosives

sample	shock wave overpressure / MPa	pulsating period / ms	specific shock wave energy / MJ $\cdot$ kg <sup>-1</sup>	specific bubble energy / MJ $\cdot$ kg <sup>-1</sup>	specific total energy / MJ $\cdot$ kg <sup>-1</sup>
1-P30D10 $\phi$ 50	11.569	155	0.521	1.880	2.368
2-P30D10 $\phi$ 50	10.774	160	0.582	2.106	2.673
3-P30D10 $\phi$ 50	11.154	163	0.593	2.289	2.881
4-P30D10 $\phi$ 50	13.469	164	0.676	2.265	2.944
pure energetic gel	11.655	160	0.604	2.166	2.760

剂的作用。尽管推进剂中含有胶凝剂等低能组分,但其较高的热值使其在混合体系中若能实现快速、完全反应,将对复合炸药体系的能量提升起到积极作用,反之则可能导致整体能量下降<sup>[25]</sup>。当推进剂与含能凝胶复合后,其爆轰过程并非在炸药的化学反应区内均匀进行,而主要起始于组分界面处。因此,推进剂的反应难易程度直接影响含推进剂复合凝胶炸药的能量输出特性<sup>[26]</sup>。

综合 1-P30D10 $\phi$ 50~4-P30D10 $\phi$ 50 样品的推进剂配方体系及 RDX、HMX 含量可知,1-P30D10 $\phi$ 50 所含的三组元 HTPB 推进剂是一种能量水平相对较低的组分。相比之下,4-P30D10 $\phi$ 50 的推进剂中添加了 20% 的高性能单质炸药 HMX, HMX 自身具有极高的爆轰能量。因此, HMX 的加入显著提升了 4-P30D10 $\phi$ 50 混合体系的整体能量水平,这与我们观测到的其水下爆炸总能量最高的结果完全吻合。

### 2.2.3 推进剂含量对能量输出特性的影响

为研究复合凝胶炸药中推进剂含量对能量输出特性的影响,对 1-PxD10 $\phi$ 50~4-PxD10 $\phi$ 50 样品进行了不同含量推进剂下的水下爆炸实验,试验结果如表 3 所示。由图表可以看出,1-PxD10 $\phi$ 50 中推进剂含量增多,比冲击波能和比气泡能显著下降,比冲击波能由 0.536 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,下降到 0.459 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,比气泡能由 1.972 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,下降到 1.585 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,同时总能量由推进剂含量为 20% 时的 2.434 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,下降到 40% 时的 1.983 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>。2-PxD10 $\phi$ 50 与 1-PxD10 $\phi$ 50 能

量输出特性表现出的趋势相同,比冲击波能由 0.629 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,下降到 0.555 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,比气泡能由 2.162 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,下降到 2.004 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,总能量由 2.783 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,下降到 2.535 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,2-PxD10 $\phi$ 50 的总能量高于 1-PxD10 $\phi$ 50,随推进剂含量的增多,总能量下降的幅度也要小于 2-PxD10 $\phi$ 50。3-PxD10 $\phi$ 50 中随着推进剂含量增多,比冲击波能小幅度上升,比气泡能基本不变,总能量基本不变。说明 3-PxD10 $\phi$ 50 中的推进剂的水下爆炸能量输出与含能凝胶相差不大。4-PxD10 $\phi$ 50 中随着推进剂含量增多,比冲击波能明显升高,由推进剂含量为 20% 时的 0.645 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,上升到 40% 时的 0.784 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,比气泡能基本不变由 2.227 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,到 2.278 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,总能量由 2.870 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>,提高到 3.074 MJ $\cdot$ kg<sup>-1</sup>。

分析认为这是由于所添加的推进剂与含能凝胶基质自身的能量水平不同所致。当推进剂的能量低于凝胶基质时(如 1-PxD10 $\phi$ 50 和 2-PxD10 $\phi$ 50),增加其含量相当于稀释了整个体系的能量。当两者能量相当时(如 3-PxD10 $\phi$ 50),改变含量对总能量影响不大。而当推进剂的能量显著高于凝胶基质时(如 4-PxD10 $\phi$ 50),增加其含量则能有效提升复合炸药的总能量。可见,推进剂含量对复合凝胶炸药能量输出的影响并非单向的,而是取决于推进剂自身能量与含能凝胶的相对水平。只有当选用高能推进剂时,增加其含量才是提升总能量输出的有效手段。

表 3 不同推进剂含量的复合炸药水下能量输出特性参数

Table 3 Underwater energy output characteristic parameters of composite gel explosives with different propellant contents

sample	x / %	shock wave overpressure / MPa	pulsating period / ms	specific shock wave energy / MJ $\cdot$ kg <sup>-1</sup>	specific bubble energy / MJ $\cdot$ kg <sup>-1</sup>	specific total energy / MJ $\cdot$ kg <sup>-1</sup>
1-PxD10 $\phi$ 50	20	11.206	0.156	0.536	1.927	2.434
	30	11.569	0.155	0.521	1.880	2.368
	40	11.396	0.144	0.459	1.585	1.983
2-PxD10 $\phi$ 50	20	13.003	0.159	0.629	2.162	2.783
	30	10.774	0.16	0.582	2.106	2.673
	40	11.275	0.156	0.555	2.004	2.535
3-PxD10 $\phi$ 50	20	12.139	0.163	0.604	2.260	2.862
	30	11.154	0.163	0.593	2.289	2.881
	40	13.279	0.163	0.662	2.230	2.891
4-PxD10 $\phi$ 50	20	13.521	0.163	0.645	2.227	2.870
	30	13.469	0.164	0.676	2.265	2.944
	40	13.408	0.163	0.784	2.278	3.074

Note: x presents the propellant content.

### 2.2.4 推进剂粒度对能量输出特性的影响

为研究复合凝胶炸药中推进剂尺寸对能量输出特性的影响,对1-P30Dy $\phi$ 50和3-P30Dy $\phi$ 50进行了不同尺寸下的水下爆炸实验,结果如表4所示。1-P30Dy $\phi$ 50中随着推进剂尺寸的减小,比冲击波能从0.482 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ 提升至0.512 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ ,比气泡能从1.679 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ 提升至1.885 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ ,总能量从2.109 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ 提升至2.362 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ 。3-P30Dy $\phi$ 50中随推进剂尺寸的减小,比冲击波能从0.598 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ 提升至0.655 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ ,比

气泡能从2.247 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ 提升至2.294 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ ,总能量从2.841 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ 提升至2.953 MJ $\cdot$ kg $^{-1}$ 。

分析认为这是由于推进剂尺寸减小极大地增加了其总比表面积,这使得反应界面增多,热量和物质的传递距离缩短。因此,推进剂与其他组分的接触更充分,爆轰反应更迅速、更均匀,从而提高了能量释放的效率和总量。可见,减小推进剂颗粒尺寸是增强复合凝胶炸药能量输出特性的一个直接且有效的方法。

表4 不同推进剂粒度的复合炸药水下能量输出特性参数

Table 4 Underwater energy output characteristic parameters of composite gel explosives with different propellant particle sizes

sample	propellant size / mm	shock wave overpressure / MPa	pulsating period / ms	specific shock wave energy / MJ $\cdot$ kg $^{-1}$	specific bubble energy / MJ $\cdot$ kg $^{-1}$	specific total energy / MJ $\cdot$ kg $^{-1}$
1-P30Dy $\phi$ 50	15	10.687	0.147	0.482	1.679	2.109
	10	11.569	0.155	0.521	1.880	2.368
	5	11.828	0.153	0.512	1.885	2.362
3-P30Dy $\phi$ 50	15	12.64	0.162	0.598	2.247	2.841
	10	11.154	0.163	0.593	2.289	2.881
	5	13.037	0.164	0.655	2.294	2.953

### 2.3 含推进剂复合凝胶炸药爆轰反应机理

表面反应机理(又称不均匀灼烧机理)指的是结构不均的炸药在冲击波强烈压缩下,并非整体均匀升温,而是在局部形成温度显著升高的“起爆中心”或“热点”<sup>[27]</sup>,由此引发局部化学反应,再迅速向炸药内部扩展。适用对象包括松散多孔的固体粉末炸药、晶体炸药及其压制成型的药柱,甚至是含大量气泡或杂质的液体、胶质炸药。反应沿颗粒表面或气泡周围首先启动,其引发和扩展速率主要受药粒表面积或微小气泡数量的制约。对于爆速约4000 m $\cdot$ s $^{-1}$ 的中速炸药以及爆速2000 m $\cdot$ s $^{-1}$ 或更低的炸药,其爆轰反应均体现了这种机理<sup>[28]</sup>。“热点”的形成已通过实验验证,主要途径有:炸药中微小气泡(气体或蒸汽)在冲击波作用下发生绝热压缩;冲击波经过时,各质点或薄层因运动速度差异而产生摩擦或变形;爆炸产物渗入炸药颗粒间的空隙,对颗粒表面加热<sup>[29]</sup>。

混合反应机理主要适用于物性不均的混合炸药,尤其是固体混合炸药,其反应常局限于组分交界面,而非整个反应区域<sup>[30]</sup>。根据组成,可分为两类:第一类是由几种单质炸药混合而成的炸药。在爆轰时,各组分先自行反应释放大量热能,随后各反应产物混合并进一步反应生成最终产物。此情况下,爆轰特性主要取决于各单质炸药自身的反应规律,其传播速度约为

各组分单质爆速的平均值,此时混合反应机理并不十分明显<sup>[31]</sup>。第二类是反应能力差异悬殊的混合炸药,如氧化剂与可燃剂的混合物或炸药与非均质组分的组合。这类炸药在爆轰时通常先由反应能力较强的组分(如氧化剂或炸药)分解,生成的气体产物扩散到其他组分表面或与其它分解产物反应<sup>[32]</sup>。例如,在硝酸铵炸药中,硝酸铵作为主要的氧化剂,在爆轰条件下快速分解并提供氧,与可燃剂发生剧烈的氧化还原反应,从而释放出巨大能量。由于某些组分难以直接固态反应,通常先由易分解组分生成气体,再通过渗透或扩散引发尚未反应的组分反应。整体过程受到组分粒度、混合均匀性及装药密度等因素的影响:粒度越细、混合越均匀,有利于反应;而粒度大、混合不均或装药密度过大(减小空隙)则会降低反应速率,甚至导致中途熄灭<sup>[33]</sup>。

工业炸药作为一种物理和化学多相体系,表现出明显的非理想性。与均相单质炸药相比,其爆轰过程呈多段性,且爆轰参数和扩散极限明显依赖于组分的粒度和混合均匀性<sup>[34]</sup>。实验表明,不仅单个颗粒的分解和燃烧速率起作用,其分解产物在扩散、混合条件下进行二次反应的速度也至关重要<sup>[35]</sup>。颗粒越小、混合越均匀,燃烧及产物间的相互作用越迅速。在含推进剂的灌注型炸药中,由于推进剂颗粒在形状和尺寸上

存在差异,其质量分数通常在45%至65%之间。推进剂颗粒间存在空隙,通常由固化灌注液填充,从而形成结构上明显的非均质性。如果灌注液含有胶凝剂和复合氧化剂,则体系中不仅含有如硝酸铵、硝酸钠等活性较低但重要的氧化剂,还包含在爆炸中不参与反应但能发生相转移的水和惰性无机盐<sup>[36]</sup>。推进剂自身具备在无外部供氧条件下迅速稳定燃烧的能力,常含高能组分(如硝化纤维素、硝化甘油或高含量高氯酸铵),易于热分解并释放大氧化热。因各组分氧化或热分解能力差异明显,其爆轰反应主要依赖混合反应机理,呈分阶段进行<sup>[37]</sup>:首先,推进剂作为敏化剂和能量来源率先热分解,生成的气体产物扩散至其他组分表面引发反应,从而引发整个炸药的爆轰。

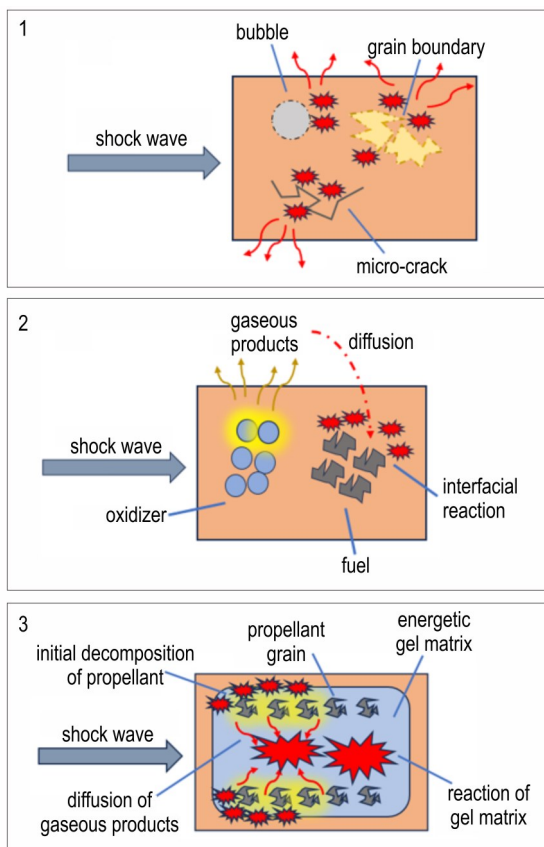


图7 含推进剂复合炸药的混合反应机理示意图

Fig.7 Schematic diagram of the mixed reaction mechanism for propellant-based composite explosives

### 3 结论

研究围绕含推进剂复合凝胶炸药的能量输出特性展开研究,取得了以下主要结论:

(1)1-PxDyφz 仅能发生爆燃,而添加9% RDX后

的2-PxDyφz 则可实现稳定爆轰。复合装药具有爆轰性,含能凝胶灌注能够使原本仅发生爆燃的1-PxDyφz 参与爆轰过程。

(2)1-PxDyφz、2-PxDyφz 含量增加会降低体系爆速与毁伤能力;3-PxDyφz、4-PxDyφz 含量提升则有利于性能增强,且当推进剂总体含量达到40%以上时,性能趋于稳定。粒度减小可在空气与水下环境中均显著提升爆速、毁伤程度与水下能量输出,说明颗粒细化是提升综合性能的有效途径。验证板试验显示,随着装药直径增大,毁伤能力不断增强;达到6.5 cm时,体系效能基本饱和,设计时可将此作为最大直径参考。

(3)水下爆炸试验表明,体系中增加1-PxDyφz 和2-PxDyφz 含量会降低复合炸药的水下总能量输出,增加3-PxDyφz 含量总能量基本不变,增加4-PxDyφz 含量会使水下总能量提高。1-PxDyφz~4-PxDyφz 粒度的减小有助于复合炸药水下总能量的提升。

综上所述,本研究通过将退役推进剂与含能凝胶复合,验证了其资源化利用的一条可行路径。通过系统地研究推进剂特性对复合炸药能量输出的影响,为该复合凝胶炸药的配方设计、性能调控及工程应用奠定了重要的实验基础。

### 参考文献:

- [1] 沈飞, 李凌峰, 王辉, 等. DNTF 基层状复合温压装药爆炸过程及能量释放特性[J]. 含能材料, 2023, 31(10): 1041-1048. SHEN Fei, LI Ling-feng, WANG Hui, et al. Explosion process and energy release characteristics of DNTF-based layered composite thermobaric charge[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(10): 1041-1048.
- [2] 常文平, 杜仕国, 江劲勇, 等. 国外废弃火炸药资源化利用研究现状[J]. 火炸药学报, 2024, 47(3): 25-32. CHANG Wen-ping, DU Shi-guo, JIANG Jin-yong, et al. Research status of resource utilization of waste pyroexplosives abroad[J]. *Journal of Pyroexplosives*, 2024, 47(3): 25-32.
- [3] 陈厚和, 裴艳敏, 马慧华, 等. 由废弃火药和乳化炸药制备工业混合炸药[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 25-28. CHEN Hou-he, PEI Yan-min, MA Hui-hua, et al. Preparation of industrial mixed explosives from waste gunpowder and emulsion explosives [J]. *Journal of Pyrodynamite*, 2003, 26(3): 25-28.
- [4] 王鹏, 魏晓安, 徐汉涛. 废弃火药在工业炸药中的再利用研究进展[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 155-159. WANG Peng, WEI Xiao-an, XU Han-tao. Research progress on the reuse of waste gunpowder in industrial explosives [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(4): 155-159.
- [5] COOK M A. The Science of Industrial Explosives [M]. Salt Lake City: IRECO Chemicals, 1974: 15-44.
- [6] MADER C L. Numerical Modeling of Detonation [M]. Berkeley: University of California Press, 1979: 175-251.
- [7] COOPER P W. Explosives Engineering [M]. Weinheim:

- Wiley-VCH, 1996: 27–65.
- [8] KESHAVARZ M H, POURMORTAZAVI S M. A review on the research and development of industrial explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 31(5): 346–351.
- [9] OSTDIEK F R, HOWARD S L. A new generation of insensitive munitions [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2000, 21(3): 427–434.
- [10] WANG Z, ZHAO F, LI Y, et al. Reutilization of waste and obsolete energetic materials [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 83(1–2): 1–13.
- [11] PRADHAN M, DHEKNE P Y. Emulsion explosives: A state of the art review [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2014, 32(2): 79–98.
- [12] 魏晓安, 何卫东, 王泽山. 功能助剂对聚醚聚氨酯网络性能的影响[J]. *火炸药学报*, 2007, 30(4): 33–37.  
WEI Xiao-an, HE Wei-dong, WANG Ze-shan. The influence of functional additives on the network performance of polyether polyurethane [J]. *Journal of Explosives*, 2007, 30(4): 33–37.
- [13] LIU X C, LUO Y M, XU F Y, et al. Design and characterization of high-performance energetic hydrogels with enhanced mechanical and explosive properties [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 30104.
- [14] 徐梦达. 功能化聚丙烯酰胺水凝胶的制备及其应用研究[J]. *现代化工*, 2020, 40(11): 88–91.  
XU Meng-da. Preparation and application research of functionalized polyacrylamide hydrogel [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(11): 88–91.
- [15] ODIAN G. Principles of Polymerization [M]. 4th ed. New York: Wiley-Interscience, 2004: 209–212.
- [16] 全国军工产品定型工作委员会. GJB 772A-1997 炸药试验方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1997. 263–268.  
National Committee for the Finalization of Military Products. GJB 772A-1997 Test methods for explosives [M]. Beijing: China Standard Press, 1997. 263–268.
- [17] 毛致远, 段超伟, 胡宏伟, 等. 水下爆炸威力试验与评价方法综述[J]. *兵工学报*, 2020, 41(10): 74–87.  
MAO Zhi-yuan, DUAN Chao-wei, HU Hong-wei, et al. Review of underwater explosive power test and evaluation methods [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(10): 74–87.
- [18] ZHANG F. Explosion and Detonations: Science and Technology [M]. Berlin: Springer, 2013: 175–251.
- [19] COOPER P W, KUROWSKI S R. Explosives Engineering [M]. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2018: 37–56.
- [20] JAMES K L, WANG, et al. Effect of aluminum content on detonation velocity and density of emulsion explosives [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2024, 32(2): 150–158.
- [21] GIBBS T R, POPOLATO A, eds. LASL Explosive Property Data [M]. Berkeley: University of California Press, 1980: 345–350.
- [22] CAMPBELL A W. Diameter effect and failure diameter of a TATB-based explosive [R]. Los Alamos Scientific Lab., NM (USA), 1981.
- [23] BJARNHOLT G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1980, 5(2–3): 67–74.
- [24] COLE R H. Underwater explosions [M]. New York: Dover Publications, 1965: 271–332.
- [25] WANG P, HE W, WANG Z, et al. Applications and technologies of reusing waste gun propellants [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2024, 42(2): 150–158.
- [26] 张涛, 黄风雷, 王建灵, 等. TATB基PBX界面热阻研究及导热系数预测[J]. *含能材料*, 2023, 31(8): 789–797.  
ZHANG Tao, HUANG Feng-lei, WANG Jian-ling, et al. Research on interface thermal resistance and thermal conductivity prediction of TatB-based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(8): 789–797.
- [27] BOWDEN F P, YOFFE A D. Initiation and Growth of Explosion in Liquids and Solids [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1952: 21–68.
- [28] 孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 75–92.  
SUN Jin-shan, ZHU Jian-shi. Theoretical Detonation Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 75–92.
- [29] MEYER R, KÖHLER J, HOMBURG A. Explosives (6th ed.) [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2007: 165–167.
- [30] FICKETT W, DAVIS W C. Detonation: Theory and Experiment [M]. New York: Dover Publications, 2000: 104–142.
- [31] 汪旭光. 乳化炸药 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 58–65.  
WANG Xu-guang. Emulsion Explosives [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 58–65.
- [32] 王鹏, 魏晓安, 何卫东, 等. 废旧HTPB固体推进剂转化制备乳化炸药的配方设计 [J]. *火炸药学报*, 2024, 47(3): 110–115.  
WANG Peng, WEI Xiao-an, HE Wei-dong, et al. Formula design for the preparation of emulsion explosives from waste HTPB solid propellant [J]. *Journal of Pyrotechnics and Explosives*, 24, 47(3): 110–115.
- [33] JOHANSSON C H, PERSSON P A. Detonics of High Explosives [M]. London: Academic Press, 1970: 51–98.
- [34] 赵继波, 谭多望, 李庆忠, 等. 带壳钝感炸药非理想爆轰实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 289–294.  
ZHAO Ji-bo, TAN Duo-wang, LI Qing-zhong, et al. Experimental study on non-ideal detonation of shell blunt sensitivity explosives [J]. *Explosion and Shock*, 2005, 25(4): 289–294.
- [35] 王彩玲, 张树海, 刘文祥, 等. 含AP非理想炸药爆轰产物分析与计算 [J]. *火炸药学报*, 2014, 37(4): 150–155.  
WANG Cai-ling, ZHANG Shu-hai, LIU Wen-xiang, et al. Analysis and calculation of detonation products of non-ideal explosives containing AP [J]. *Journal of Pyrotechnics and Explosives*, 2014, 37(4): 150–155.
- [36] 徐梦达. 功能化聚丙烯酰胺水凝胶的制备及其应用研究 [J]. *现代化工*, 2020, 40(11): 88–91.  
XU Meng-da. Preparation and application research of functionalized polyacrylamide hydrogel [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(11): 88–91.
- [37] 金朋刚, 姜夕博, 李鸿斌, 等. 非理想炸药爆轰输出特性探讨 [J]. *火工品*, 2018, (4): 32–35.  
JIN Peng-gang, JIANG Xi-bo, LI Hong-bin, et al. Discussion on the explosion output characteristics of non-ideal explosives [J]. *Pyrotechnics*, 2018, (4): 32–35.

## Energy Output Characteristics of Composite Gel Explosives Containing Propellant

LIU Xi-chen, WANG Yi-ming, LIU Da-bin, WANG Ze-shan

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To promote the resource utilization of retired HTPB propellants, composite gel explosives were prepared by compounding them with energetic gels: the three-component propellant-containing composite explosive 1-PxDy $\phi$ z, the quaternary propellant-containing composite explosive 2-PxDy $\phi$ z that contains 9% RDX, the propellant-containing composite explosive 3-PxDy $\phi$ z that contains 15% RDX, and the propellant-containing composite explosive 4-PxDy $\phi$ z that contains 20% HMX. ( $x$  represents the content of propellant P,  $x=30\%$ ,  $40\%$ ,  $50\%$ ,  $y$  is particle size,  $y=5, 10, 15$  mm;  $z$  denotes the charge size,  $z=40, 50, 65$  mm). Tests on detonation velocity, witness plate damage, and underwater explosion energy were conducted to investigate the energy characteristics of these composite gel explosives with varying propellant content, particle size, and charge diameter. The results indicate that an increase in the propellant content in 1-PxDy $\phi$ z and 2-PxDy $\phi$ z composite explosives reduces the detonation velocity and brisance of the composite explosives, whereas increasing the propellant content in 3-PxDy $\phi$ z and 4-PxDy $\phi$ z increases both detonation velocity and brisance. The decrease in propellant particle size from 1-PxDy $\phi$ z to 4-PxDy $\phi$ z contributes to the increase of detonation velocity and brisance, and the increase in charge diameter significantly increases the damage capability. Results of underwater explosion tests show that an increase of propellant content in 1-PxDy $\phi$ z and 2-PxDy $\phi$ z reduces the total underwater energy output, while 3-PxDy $\phi$ z has a relatively constant total energy with an increase in propellant content, and 4-PxDy $\phi$ z has an increasing total underwater energy with an increased of propellant content. Additionally, the total underwater energy from 1-PxDy $\phi$ z to 4-PxDy $\phi$ z increases with the decrease of propellant particle size.

**Key words:** decommissioned propellant; energetic gel; composite explosive; detonation performance

**CLC number:** TJ55;O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2025184

(责编:姜梅)