

doi: 10.7690/bgzd.2017.07.001

## 不同粘结体系对 PBX 炸药能量输出特性的影响

李瑶瑶, 崔庆忠

(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:** 粘结剂作为 PBX 炸药中重要的添加剂, 对炸药的力学性能、能量特性等都有很大的影响。为研究不同粘结体系对 PBX 炸药水下爆炸能量特性的影响, 首先对不同粘结体系炸药配方进行优化设计, 然后进行不同粘结体系 PBX 炸药的水下爆炸试验。试验结果表明: 与 HTPB 惰性粘结体系炸药相比, 含能粘结体系应用于 PBX 炸药后, 比冲击波能提高了 12%~23%; 但是由于含能粘结体系力学和工艺性能的限制, 使得炸药固含量降低, 降低了炸药的气泡能。总的来看, TEGDN、GAP、HTPB 粘结体系的 PBX 炸药总能量分别达到了 2.01、1.99、2.15 倍 TNT 当量。

**关键词:** 配方设计; 含能粘结体系; 水下爆炸; 能量输出结构

**中图分类号:** TJ510.6 **文献标志码:** A

## Different Binder System Influence on Energy Output Characteristics of PBX

Li Yaoyao, Cui Qingzhong

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

**Abstract:** As the important part of polymer bonded explosive, binders has great effect on the mechanical property and energy characteristics. In order to research the influence of different binders on energy characteristics of PBX underwater explosion, the formula of each binders was carried out optimal design, then the underwater explosion experiment of different binders PBX were conducted. The test result showed that, compared with HTPB inactive binder system explosive, the shockwave of PBX with energetic binder system increases by 12%~23%. Meanwhile the bubble performance of explosive with energetic binders is decreased because the mechanical property and processing performance of energetic binders were poor which lead the decrease of solid-content. In summary, the TNT equivalent of explosive with TEGDN binder, GAP binder and HTPB binder arrived 2.01, 1.99 and 2.15 respectively.

**Keywords:** formulation design; energetic binders system; underwater explosion; energy output structure

### 0 引言

粘结剂作为 PBX 炸药中重要的添加剂, 在其中占有 8%~23% 的比例, 是 PBX 炸药的关键, 对炸药的能量、感度及力学性能都有很大影响。目前国外水中兵器用 PBX 炸药常用粘结剂有惰性和含能粘结剂。例如美国 PBXW-115 炸药、德国 KS57 炸药和法国 B2211 炸药都使用端羟基聚丁二烯 (HTPB) 惰性粘结体系, 含量在 12% 左右<sup>[1]</sup>; PBXN-103 中使用了硝酸酯含能增塑剂和硝化棉 (NC) 粘结体系, 粘结体系含量为 31.5%; PBXN-105 炸药中使用了含能粘结体系, 含量在 16% 左右<sup>[2]</sup>。

惰性粘结剂中常用 HTPB, 因其具有较好的工艺性能和力学性能, 是低易损 PBX 炸药的较为理想的粘结剂<sup>[3]</sup>。但是 HTPB 不含能的缺点也直接影响了 PBX 炸药水下爆炸能量性能及能量输出结构。在保证工艺和力学性能的前提下, 用含能粘结剂替代惰性粘结剂, 能弥补惰性粘结剂部分的能量不足的缺点, 提高炸药体系的能量密度, 调节炸药的能量输出结构, 进而提高炸药的毁伤效率。

含能粘结剂中研究较为广泛的粘结体系为 NC 和硝酸酯含能增塑剂——硝化三乙二醇 (TEGDN) 粘结体系, 该种粘结体系常作为发射药或固体推进剂的粘结剂体系, 其固化机理与上述不同, 在推进剂或炸药中占的比例较多。美国在水雷、鱼雷装药中普遍使用 TEGDN 和 NC 粘结体系, 因其含有较高能量而使得鱼雷具有更高的水下威力, 且该类炸药的不敏感特性也备受各国青睐<sup>[4]</sup>。但由于 TEGDN 和 NC 的机械感度比较高, 对炸药的安全性影响较大, 所以亟待研究一种感度更低的含能粘结体系。

近年来, 国内外关于含能粘结剂的研究主要集中在聚叠氮缩水甘油醚 (GAP)、含能热塑性弹性体 (ETPB) 等<sup>[5]</sup>, 其中 GAP 具有生成热较大、感度低及低特征信号的优点被应用在发射药和固体推进剂中<sup>[6]</sup>。关于 GAP 在 PBX 炸药中的应用, 国内外研究文献相对较少, GAP 含能粘结体系炸药的水下爆炸能量输出结构更是少有研究。为此, 笔者旨在对不同粘结体系 PBX 炸药的能量结构进行研究, 对比分析粘结体系对 PBX 炸药的能量输出特性的影响。

收稿日期: 2017-04-03; 修回日期: 2017-05-04

基金项目: 国防重点预研基金项目 (4010303)

作者简介: 李瑶瑶 (1990—), 男, 湖北人, 硕士, 从事炸药应用理论研究。

### 1 样品配方设计

从力学性能和工艺性能角度研究发现，HTPB 的黏度较低，炸药的固含量较高，进而提高炸药的能量。HTPB 粘结体系很早就已经被用于水中兵器装药上，美国 PBXN 和 PBXW 系列炸药中，许多都是采用 HTPB 粘结剂，粘结体系的含量在 10%~13%。而 GAP 粘结剂的黏度较大，力学性能和工艺性能较差，如果按照 HTPB 粘结体系在炸药中的比例，GAP 粘结体系 PBX 炸药在工艺上难以实现，力学性能无法达到要求，使炸药安全性能也降低。故在满足能量需求的前提下，适当增加 GAP 粘结体系的配比或加入增塑剂以提高该炸药的固含量，故该炸药中粘结体系配比在 14%~16%之间。

TEGDN 粘结体系在工艺上与以上 2 种不同，该粘结体系作为发射药和推进剂常用粘结体系，利用硝化棉溶胀塑化，以 TEGDN 作为溶剂，其他固体组分通过扩散、渗透运动到 NC 的网状结构中，达到塑化成型的目的。所以硝酸酯粘结体系在炸药中占有的比例较大，该粘结体系配比在 28%~32%。

对于水中兵器用炸药，为保证该类炸药的远场毁伤能力，爆速和爆压不应过高，在此前提下尽量提高炸药作功能力。根据特性乘积法经验计算公式计算炸药的作功能力<sup>[7-8]</sup>，不同粘结体系炸药的固含量配比与炸药作功能力关系如图 1 所示。

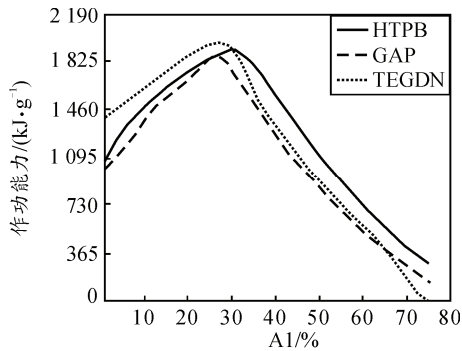


图 1 不同粘结体系的炸药作功能力与 Al 含量的关系

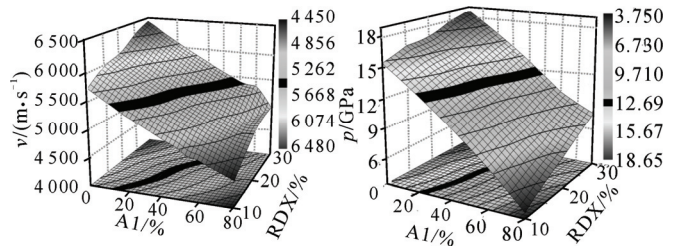
图 1 中数据为粘结体系含量一定、RDX 含量在 15%时，炸药作功能力随铝粉含量的变化而变化，当铝粉含量在一定范围内时，炸药的威力达到最大值。不同粘结体系炸药作功能力最大值对应铝粉含量如表 1 所示。

表 1 炸药作功能力最大值及对应铝粉含量

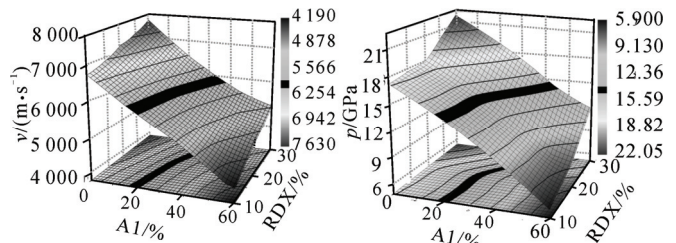
粘结体系	Al 含量/%	作功能力/(kJ·g <sup>-1</sup> )
HTPB	27~30	1 931~1 949
GAP	23~26	1 827~1 859
TEGDN	25~28	1 977~1 983

对于非理想炸药而言，爆速过高，对炸药的二

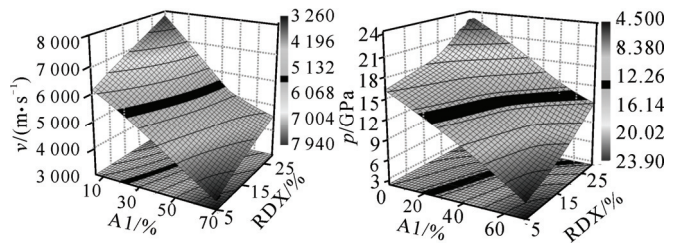
次反应影响较大，降低了炸药远场能量输出；爆速过低，炸药则不能产生稳定的爆轰。炸药中爆速和爆压的来源主要是由高能炸药产生，故可以根据合适的爆速和爆压来确定炸药中 RDX 的含量。根据爆速与爆压的经验计算公式<sup>[9]</sup>，对 3 种不同粘结体系炸药进行爆速和爆压计算，得到高能炸药组分与爆速、爆压关系如图 2 所示。



(a) HTPB 粘结体系炸药爆速及爆压与 RDX 含量关系



(b) GAP 粘结体系炸药爆速及爆压与 RDX 含量关系



(c) TEGDN 粘结体系炸药爆速及爆压与 RDX 含量关系

图 2 不同粘结体系的炸药爆速及爆压与 RDX 含量的关系

根据表 1 中数据确定铝粉含量，对不同粘结体系炸药的爆速和爆压进行计算，得到如图 2 所示数据。对数据进行分析，当炸药爆速及爆压在 5 300~6 000 m/s、12~14 GPa 之间时，可满足水中炸药的使用特性，如图 2 中黑色阴影区域所示。不同粘结体系炸药爆速和爆压参数及对应 RDX 含量如表 2。

表 2 炸药及对应铝粉含量

粘结体系	RDX 含量/%	爆速/(m·s <sup>-1</sup> )	爆压/GPa
HTPB	15~20	5 373~5 487	12.4~12.9
GAP	17~22	5 864~6 004	13.8~14.4
TEGDN	8~11	5 420~5 590	12.9~13.4

表 3 不同粘结体系的炸药装药参数

样品	炸药组成				装药质量 m/kg	装药密度 ρ/(g/cm <sup>3</sup> )
	RDX	Al	AP	粘结体系		
HTPB	17	30	43	10	1.00	1.82
GAP	20	24	42	14	1.02	1.80
TEGDN	10	27	35	28	1.06	1.81

根据上述热力学及爆轰参数计算，确定固体组分中 Al 和 RDX 的含量，进而确定 AP 的含量。不同粘结体系炸药配方及装药参数如表 3 所示。

## 2 水下爆炸测试

本试验在模拟无限水域的水库进行，试验药柱置于水深  $H=8\text{ m}$  处，对 3 种不同粘结体系炸药进行水下爆炸试验，测试并记录炸药爆炸时的压力时程曲线，药柱同一水深处依次固定 5 个压力传感器，试验样品及传感器水中布置如图 3 所示。

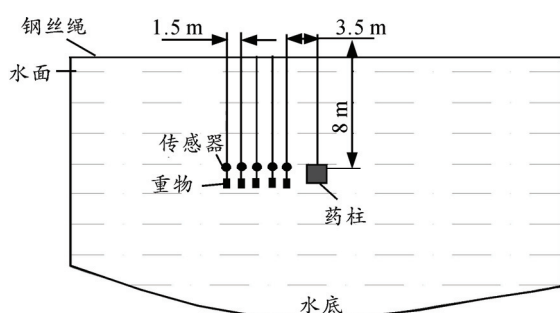


图 3 试验现场布置

试验仪器：美国 PCB 公司 W138A 系列压力传感器，型号 W138A05；美国 LDS 公司 (HBM) 数据采集与处理系统，型号 Genesis IDH490。

试验样品：3 种粘结体系的 PBX 炸药样品为 1 kg 药柱；试验前用等质量的 TNT 药柱对试验现场标定；试验药柱均采用 8# 电雷管在药柱端面起爆。

## 3 试验结果

本次试验 3 种粘结体系炸药样品的都分别进行了水下爆炸试验，并用 TNT 炸药作为对比试验，试验采集了 4 种炸药水下爆炸的压力时程曲线。不同粘结体系炸药水下爆炸在距爆炸中心  $R=3.5\text{ m}$  处的压力时程曲线如图 4 所示。

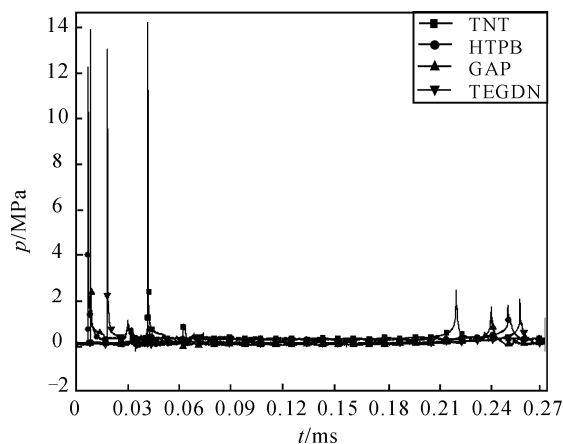


图 4 不同样品水下爆炸压力时程曲线

从图 4 中不同炸药压力时程曲线可以看出：TNT 药柱样品的气泡脉动周期在 179 ms 左右，而不同粘结体系炸药的气泡脉动周期均达到了 230 ms 以上。TNT 药柱在 3.5 m 处的峰值压力达到了 13.94 MPa，另外 3 组不同粘结体系样品在  $R=3.5\text{ m}$  处的峰值压力分别为 12.02、13.64、12.79 MPa。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 相似律计算

根据上述试验所得的数据，对试验测试结果进行相似律分析。根据爆炸相似律理论<sup>[10]</sup>，水下爆炸峰值压力有如下经验公式：

$$p_m = k \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中： $k$ 、 $\alpha$  为相似律系数，可通过爆炸测试结果计算得出； $W$  为装药质量； $R$  是距离爆炸中心的距离。对上述公式两边取对数，则有

$$\ln p_m = \ln k - \alpha (\ln R - \ln W^{1/3}) \quad (2)$$

从上述等式可以看出：等式两边取对数后， $\ln p_m$  与  $\ln R$  呈线性关系。将试验测试结果按照上述公式进行处理，并进行数据拟合得到曲线如图 5。

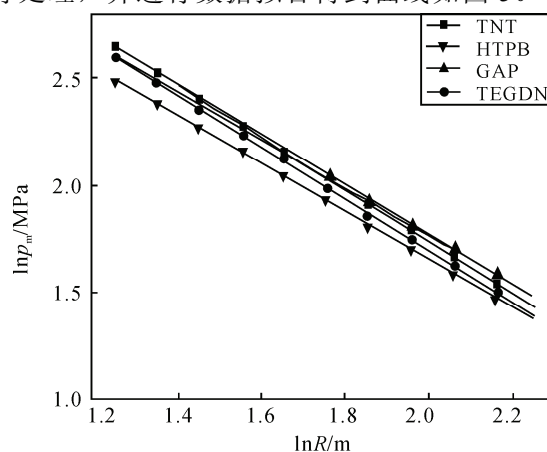


图 5  $\ln p_m$  与  $\ln R$  的相似律曲线

从上图数据拟合结果可知，4 种炸药试验测试的数据拟合结果线性相关度比较高，说明本次试验的试验数据与水下爆炸经典理论及经验公式契合度较好，具有较高的可信度。各拟合曲线的相关系数如表 4 所示。

表 4 炸药各组数据相似律参数

样品	相关系数 $r$
TNT	0.979 34
HTPB	0.985 08
GAP	0.996 52
TEGDN	0.982 68

## 4.2 能量特性分析

### 4.2.1 不同粘结体系 PBX 炸药的比冲击波能对比

根据水下爆炸能量计算公式<sup>[11]</sup>，对样品比冲击波能进行计算。对比 3 种不同粘结体系的试验数据，不同粘结体系炸药样品的水下爆炸各点处的比冲击波能随距离的变化如图 6 所示。

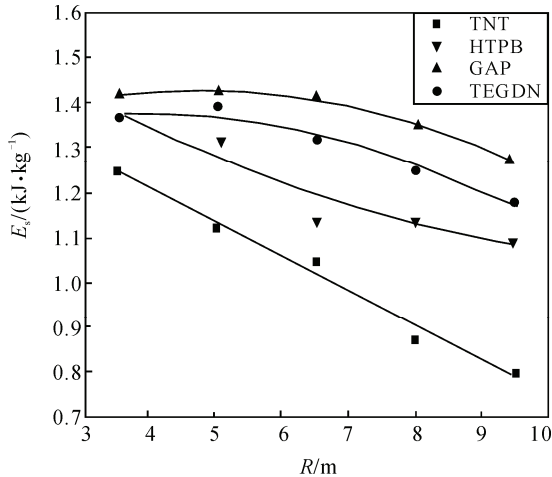


图 6 各样品水下爆炸各点的比冲击波能

从图中可见，含能粘结体系炸药的比冲击波能比惰性粘结体系高了 12%~23%。且同样为含能粘结体系的 GAP 样品比冲击波能比 TEGDN 样品也高了 8%。根据比冲击波能经验公式，冲击波能的大小与炸药爆炸峰值压力、时间常数等有关。

PBX 炸药中高能炸药主成分是炸药能量的主要来源，由炸药配方及图 4 可见，GAP 样品中 RDX 的含量最高，其水下爆炸冲击波峰值压力比 HTPB 样品和 TEGDN 样品分别高了 16%和 6.7%；且同为含能粘结体系 TEGDN 样品的峰值压力也比 HTPB 样品高了 6.4%。虽然 TEGDN 样品中高能炸药 RDX 的含量较 HTPB 样品少，但是 TEGDN 样品中的含能粘结体系含量达到 28%，该部分能量输出弥补了该炸药体系中 RDX 较少的影响，故 TEGDN 样品的峰值压力较 HTPB 粘结体系的样品高。

另外，从不同粘结体系样品水下爆炸的时间常数角度分析，不同样品的水下爆炸距爆炸中心不同距离处的时间常数如表 5 所示。

表 5 不同粘结体系炸药样品各点处的时间常数

R/m	样品			
	TNT	HTPB	GAP	TEGDN
3.5	0.119	0.164	0.143	0.161
5.0	0.114	0.194	0.183	0.165
6.5	0.131	0.145	0.171	0.204
8.0	0.103	0.187	0.183	0.195
9.5	0.111	0.194	0.189	0.192

根据上表数据看，3 种样品的时间常数相差不

大，对不同粘结体系炸药之间的冲击波能差值影响不大，故不同粘结体系样品比冲击波能主要与峰值压力有关，峰值压力越大，比冲击波能越高。

### 4.2.2 不同粘结体系 PBX 炸药的比气泡能对比

TNT 药柱及 3 种不同粘结体系炸药样品水下爆炸的脉动周期及比气泡能参数如表 6 所示。

表 6 不同粘结体系炸药水下爆炸脉动周期及比气泡能

样品	脉动周期/ms	比气泡能 $E_b$ /(MJ/kg)
TNT	179	1.99
HTPB	244	5.17
GAP	233	4.44
TEGDN	239	4.60

从表中数据可以看出，TEGDN 样品的比气泡能和气泡脉动周期含能粘结体系样品都高。其中 HTPB 样品的比气泡能比 GAP 样品高出了 16.4%，比 TEGDN 样品高了 12.4%。脉动周期也比含能粘结体系样品高出了 2.1%和 44.7%。

气泡脉动周期主要跟铝粉含量有关，炸药爆炸瞬间，气泡脉动的大小主要依靠炸药爆炸后铝粉的反应剧烈程度。

从配方组成上看，炸药的气泡能在一定范围内随着铝粉含量增加而增大。惰性粘结体系的炸药样品中，由于 HTPB 的力学性能较好，工艺性能优良使得炸药中粘结体系含量较少、铝粉含量较多，则气泡能较其他粘结体系炸药高。而含能粘结体系的力学性能和工艺性能较差，黏度较大，在炸药中的含量就更多，导致炸药固含量下降，降低了铝粉等的含量，进而降低了炸药整体的气泡能。

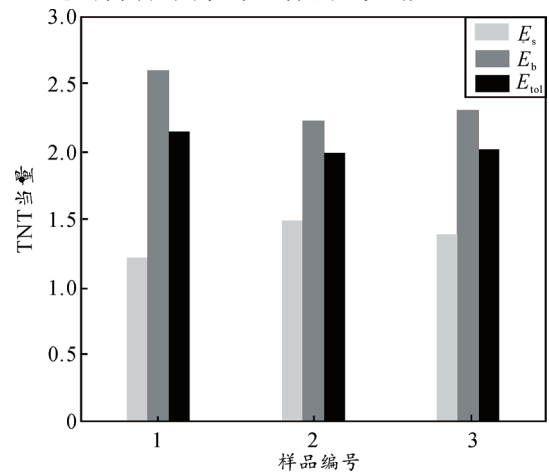


图 7 各样品水下爆炸能量输出结构

总的来说，含能粘结体系在 PBX 炸药增加了炸药的冲击波能，但是由于含能粘结体系力学性能和工艺性能的限制，使炸药固含量降低，降低了炸药的气泡能，导致总能量比惰性粘结体系炸药低。