

文章编号: 1006-9941(2012)05-0534-07

## 热塑性弹性体改性 B 炸药的性能研究

高大元, 文雯, 舒远杰, 黄谦, 蔡忠展, 温茂萍, 蓝林钢, 罗观

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 添加 2% 热塑性弹性体 401 和 501 对 B 炸药改性, 得到改性后炸药 MB-1 和 MB-2, 测试了二者的力学性能和落锤撞击感度, 分别用经验法和 VLWR 程序计算了二者的爆轰性能。结果表明, MB-1 和 MB-2 的弹性和韧性均好于 B 炸药; 在低速 ( $100 \sim 1500 \text{ s}^{-1}$ ) 冲击下, MB-2 的韧性比 MB-1 好。大药片落锤撞击感度试验中, MB-1 和 MB-2 的爆炸反应阈值高度分别为  $3.5 \sim 4 \text{ m}$  和  $6 \sim 6.5 \text{ m}$ , MB-1 的撞击感度比 MB-2 高。与 B 炸药相比, MB-1 和 MB-2 的爆速分别降低了  $0.104 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$  和  $0.099 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ , 爆压分别降低了  $1.3 \text{ GPa}$  和  $1.2 \text{ GPa}$ 。

**关键词:** 物理化学; B 炸药; 热塑性弹性体; 力学性能; 撞击感度; 爆轰性能

**中图分类号:** TJ55; Q64

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.05.004

### 1 引言

熔铸炸药是以熔融状态进行铸装成型的混合炸药。由梯恩梯 (TNT) 作载体, 以高能炸药如黑索今 (RDX)、奥克托今 (HMX)、硝基胍 (NQ)、Al 等作固体填料, 通过调节各组分的相对含量可制成能量和用途不同的熔铸炸药<sup>[1-2]</sup>。B 炸药由 TNT、RDX 和少量添加剂组成, 是弹药装药中最重要的一类炸药<sup>[3]</sup>, 具有容易装填各种复杂形状的药室, 工艺简单、工装设备相对便宜、生产能力大、效率高等优点, 但安全性未满足钝感弹药 (IM) 指标要求, 限制了在高性能武器系统中的应用。在 B 炸药中加入橡胶纳米微球、聚合物纤维和热塑性弹性体等改性剂, 能增强 TNT 与 RDX 晶体间的界面作用, 改善熔铸炸药的韧性和弹性, 提高力学性能和安全性能<sup>[4-5]</sup>, 而爆轰性能的降低也在允许范围内。本研究用热塑性弹性体 401 和 501 改性 B 炸药, 并测试了改性 B 炸药在准静态和低速动态加载下的力学性能和药片撞击感度, 计算了爆轰性能, 为确定较佳的改性 B 炸药配方提供理论和试验数据支撑。

收稿日期: 2012-05-15; 修回日期: 2012-06-06

基金项目: 国家自然科学基金—中国工程物理研究院联合基金资助 (NSAF 11076002)

作者简介: 高大元 (1962-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为含能材料的热分析、爆轰和安全性能。e-mail: gaody466@163.com

通讯联系人: 舒远杰 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事含能材料合成与理论研究工作。

### 2 试验部分

#### 2.1 试样制备

热塑性弹性体: 401 和 501 样品由北京化工研究院提供。401 样品由丙烯腈与丁二烯共聚形成网状化合物, 外观为黄色粉状颗粒, 密度  $0.90 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 501 样品由丙烯腈与丁二烯和丙烯酸酯共聚形成网状化合物, 外观为黄色粘弹性体, 密度  $0.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。改性 B 炸药: 将热塑性弹性体 401 和 501 分别用于改性 B 炸药, 相对减少 TNT 的含量, 按配方 RDX/TNT/401 = 60/38/2 (MB-1) 和 RDX/TNT/501 = 60/38/2 (MB-2) 浇注成型为炸药柱。试验样品: 将浇注成型的改性 B 炸药 MB-1 和 MB-2 分别加工成  $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 、 $\Phi 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 、 $\Phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、 $\Phi 16 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  药柱或药片, 用于单轴压缩试验、间接拉伸试验 (巴西试验)、大药片撞击感度试验、霍布金森压杆试验。

#### 2.2 仪器设备和试验条件

德国 NETZSCH STA 449C DSC-TG 热分析仪, 温度范围为室温  $\sim 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 升温速率分别为 5, 10, 15,  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。Instron 8862 型电子万能材料试验机, 加载速率  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。Hopkinson 实验使用直径 20 mm 的 7505 铝杆, 测速采用国防科大研制的 KD205 红外测速仪, 应变测试采用国防科大研制的 KD205-1A 动态应变仪, 数据采集采用 Tektronix3014C 示波器。大药片撞击感度试验使用中物院化材所设计的试验设备和装置。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 改性 B 炸药的力学性能

##### 3.1.1 静态压缩试验

改性 B 炸药的静态压缩试验使用  $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  标准试样,加载速率  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,获得的典型应力-应变曲线见图 1,从应力-应变曲线上获得表征改性 B 炸药弹性和韧性的各种参量见表 1。

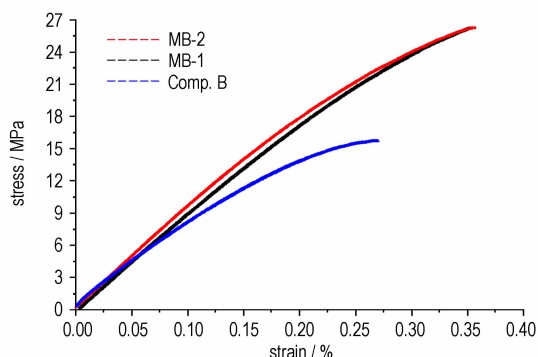


图 1 改性 B 炸药的压缩应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of compress for modified Comp. B

弹性模量、应变 0.01% 时的作用强度 ( $\sigma_{0.01\%}$ ) 可用于表征改性 B 炸药的弹性,其值越大,则弹性越好。断裂时的抗压强度、压缩应变和断裂能量可用于表征改性 B 炸药的韧性,其值越大,则韧性越好。从图 1 和表 1 可知,MB-1 和 MB-2 的应力-应变曲线形状相似,因此,二者的弹性模量、 $\sigma_{0.01\%}$ 、抗压强度、压缩应变和断裂能量也相当。但是,与 B 炸药的应力-应变曲线相比,弹性模量稍微增加,抗压强度增加较大,表明 MB-1 和 MB-2 的弹性和韧性均好于 B 炸药。

表 1 改性 B 炸药的压缩试验结果

Table 1 Results of compress test for modified Comp. B

explosive	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	pressure strength/MPa	pressure strain/%	rupture energy/J	pressure modulus/GPa	$\sigma_{0.01\%}$ strength/MPa
MB-1	1.651	26.93	0.370	0.2649	9.16	1.070
MB-2	1.652	26.53	0.360	0.2617	9.95	1.240
Comp. B	1.716	9.80-11.77	-	-	8.20	-

表 2 改性 B 炸药的巴西试验结果

Table 2 Results of Brazilian test for modified Comp. B

explosive	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	tensile strength/MPa	tensile strain/%	rupture energy/mJ	tensile modulus/GPa	$\sigma_{0.01\%}$ strength/MPa	note
MB-1	1.651	2.078	0.0328	0.70	7.767	0.735	Brazilian
MB-2	1.652	2.016	0.0333	0.70	7.187	0.691	Brazilian
Comp. B	1.716	1.04	-	-	10.89	-	tension

##### 3.1.2 间接拉伸试验

巴西试验也称间接拉伸试验,是国际上主要用于测量脆性材料拉伸强度的通行方法。B 炸药适用于巴西试验研究其拉伸性能。试样尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,通过夹具对直径 20 mm 的药片样品进行径向压缩,因受压直径产生拉应力。当试样圆心的拉应力达到材料的拉伸破坏强度时发生破坏,获得间接拉伸的应力-应变曲线,通过数据处理进而获得表征熔铸炸药弹性和韧性的各种参量见表 2。

同样,在巴西试验中,应变 0.01% 时的作用强度和模量表征弹性,其值越大,则弹性越好。拉伸强度、拉伸应变和断裂能量表征韧性,其值越大,则韧性越好。从表 2 可知,从巴西试验获得表征改性 B 炸药弹性和韧性的参量值相当,表明 MB-1 和 MB-2 的改性效果也相当。

##### 3.1.3 动态压缩试验

分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) 实验技术作为材料动态力学性能测试的有效手段,广泛地应用于含能材料的动态力学性能研究<sup>[6-7]</sup>。对 MB-1 和 MB-2 (试样尺寸为  $\Phi 16 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ),在弹速  $5 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、应变率  $100 \sim 1500 \text{ s}^{-1}$  的低速冲击下开展 SHPB 实验。当枪膛中的打击杆(子弹)以一定的速度撞击弹性输入杆时,在输入杆中产生一个入射脉冲  $\varepsilon_i$ ,应力波通过弹性输入杆到达样品,样品在应力脉冲的作用下产生高速变形,应力波通过较短的试件同时产生反射脉冲  $\varepsilon_r$  进入弹性输入杆和透射脉冲  $\varepsilon_t$  进入输出杆。利用粘贴在弹性杆上的应变片,通过仪器记录的应变脉冲和公式组(1)计算材料的动态应力、应变和应变率<sup>[8]</sup>。

$$\begin{cases} \sigma = \frac{p_1 + p_2}{2A_0} = \frac{EA}{2A_0} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \\ \varepsilon = \frac{u_1 - u_2}{l_0} = \frac{C_0}{l_0} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \\ \dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{l_0} = \frac{C_0}{l_0} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为应力, Pa;  $\varepsilon$  为应变;  $\dot{\varepsilon}$  为应变率,  $s^{-1}$ ;  $p$  为压力, N;  $u$  为位移, m;  $v$  为速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $l_0$  为样品的初始厚度, m;  $A_0$  为样品的截面积,  $m^2$ ;  $A$  为杆的截面积,  $m^2$ ;  $E$  为杆的杨氏模量, Pa;  $C_0$  为杆的声速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $t$  为时间, s; 下标 1、2 分别代表试样与入射杆和透射杆接触的端面;  $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 、 $\varepsilon_t(t)$  分别代表入射波、反射波、透射波的相应纵向应变值, 可以通过应变片直接测量。实验中典型的波形见图 2, 低速冲击实验获得不同应变率下的应力-应变曲线见图 3, 应变率为  $300 s^{-1}$  和  $1300 s^{-1}$  时 MB-1 和 MB-2 的对比应力-应变曲线见图 4, 样品受低速冲击后残余断口形貌见图 5。

从图 3 和图 4 可知, MB-1 和 MB-2 在不同应变率下的应力-应变曲线趋势大致一致, 动态应力一开始都比准静态应力高, 断裂时 MB-2 的动态抗压强度比 MB-1 大。应变率为  $300 s^{-1}$  时, MB-1 的动态抗压强度为 25.55 MPa, 而 MB-2 的动态抗压强度为 29.57 MPa, 比 MB-1 大 4.02 MPa; 应变率为  $1300 s^{-1}$  时, MB-1 的动态抗压强度为 45.97 MPa, 而 MB-2 的动态抗压强度为 47.87 MPa, 比 MB-1 大 1.90 MPa。对比分析表明, 低速冲击下, MB-2 的韧性比 MB-1 好。从图 5 观察 MB-1 和 MB-2 样品断口形貌照片, 其断裂模式为晶界脆性断裂。

### 3.2 改性 B 炸药的撞击感度

炸药安全性能的传统试验方法, 粉末炸药样品的摩擦感度、撞击感度和 50% 爆炸特性落高对于评价熔铸炸药的感度和安全性存在局限性。苏珊试验<sup>[9]</sup> 主要是模拟固体炸药在高速碰撞时的安全性能, 试样尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  药柱, 样品量较大, 在改性 B 炸药配方筛选和调整过程中不适宜开展。综合考虑各种因素, 使用  $\phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  大药片落锤撞击感度试验测试改性 B 炸药的感度<sup>[10]</sup>, 模拟炸药落地撞击和受到其它物体的低速撞击时的安全性能。试验中使用重约 20 kg 的落锤, 落高可达到 12 m, 大药片落锤撞击试验示意图见图 6。

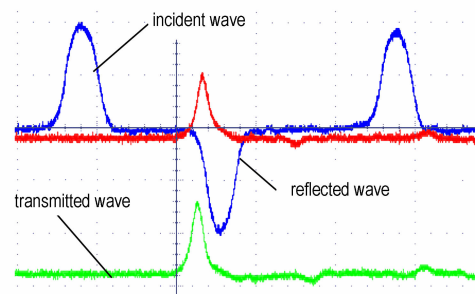
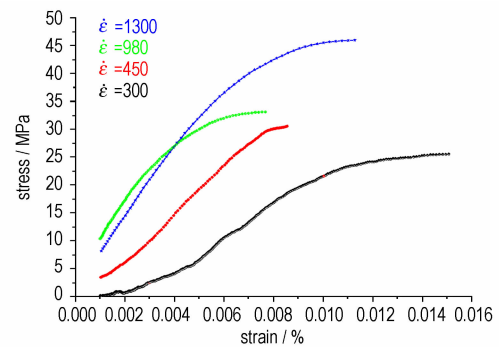
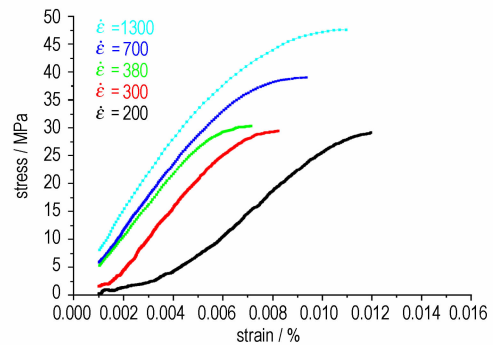


图 2 冲击实验的典型波形

Fig. 2 Typical waveform of impact experiment



a. MB-1



b. MB-2

图 3 改性 B 炸药低速冲击实验的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of impact experiment at low speed for modified Comp. B

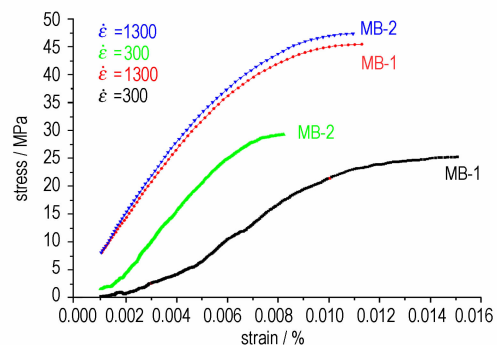


图 4 应变率  $300 s^{-1}$  和  $1300 s^{-1}$  时对比应力-应变曲线

Fig. 4 Comparative stress-strain curves of strain rate  $300 s^{-1}$  and  $1300 s^{-1}$



a. MB-1



b. MB-2

图 5 样品断口形貌照片

Fig. 5 Morphology photograph of sample break

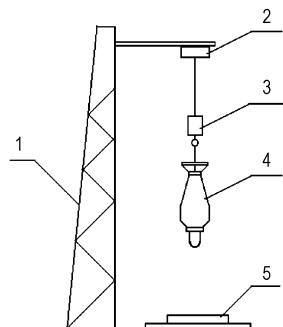


图 6 大药片落锤撞击试验示意图

1—支架, 2—电动葫芦, 3—释放装置, 4—落锤, 5—钢靶

Fig. 6 Configuration of drop hammer impact test

1—bracket, 2—electrical gourd, 3—release set, 4—drop hammer, 5—target

试验时,落锤用挂钩吊装在释放装置上,用提升装置将落锤及释放装置一同提升到预定高度,然后释放落锤,锤体下落与地面钢靶相撞,炸药因受到撞击和挤压可能发生爆炸反应,通过高速录像和测量爆炸超压判断炸药是否发生爆炸反应,用上下法调整跌落高度,检测炸药发生爆炸反应的区间和概率,从而测量炸药的感度和安全性,试验结果见表 3。

表 3 大药片落锤撞击试验结果

Table 3 Results of drop hammer impact test

explosive	h/m							
	8	7	6.5	6	4	3.5	3.0	2.0
MB-1	reaction	-	-	reaction (19.9)	reaction	no	no	no
MB-2	reaction (24.1)	reaction	reaction (22.9)	no	no	-	-	-

Note: the data in the brackets are the overtake pressure of shock wave, kPa.

从表 3 可知,MB-1 和 MB-2 的爆炸反应阈值高度分别为 3.5 ~ 4 m 和 6 ~ 6.5 m,表明 MB-1 的落锤撞击感度高于 MB-2。大药片落锤撞击试验中,炸药没有发生爆炸时没有超压,发生爆炸时均有明显超压,用高速相机能观察到落锤撞靶至出现爆炸火光的炸药点火反应过程。因此,用超压和高速照相结果综合判断炸药是否发生反应非常有效。跌落高度 6 m 时,测得距撞靶点 1 m 位置的 MB-1 爆炸空气冲击波超压为 19.9 kPa。跌落高度 8 m 时,测得距撞靶点 1 m 位置的 MB-2 爆炸空气冲击波超压为 24.1 kPa,而跌落高度 6.5 m 时,测得相同位置的 MB-2 爆炸空气冲击波超压为 22.9 kPa,表明对相同配方,跌落高度大于阈值时,跌落高度越高,冲击波超压越大,爆炸反应程度越大。

### 3.3 爆轰性能参数计算

B 炸药中添加 2% 的 401 和 501 热塑性弹性体改性剂后会引爆炸轰性能的变化,可分别用经验法和 VLWR 程序进行计算<sup>[11-12]</sup>。经验算法中,混合炸药的爆速估算为由各组分(炸药、聚合物、增塑剂和无机添加剂)的体积份额加权重的特征爆速  $D_i$  的总和<sup>[13]</sup>,进而估算爆压,计算公式组为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \frac{\sum m_i}{\sum \left( \frac{m_i}{\rho_i} \right)} \quad V_i = \frac{\frac{m_i}{\rho_i}}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \times 100\% \\ D = \sum (V_i D_i) \quad \rho = \frac{1}{\gamma + 1} \rho D^2 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中,  $\rho$  是混合炸药的密度,  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $m_i$  是各组分的质量,  $g$ ;  $\rho_i$  是各组分的密度,  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $D$  是混合炸药的爆速,  $mm \cdot \mu s^{-1}$ ;  $V_i$  是各组分的体积分数, %;  $D_i$  是各组分的特征爆速,  $mm \cdot \mu s^{-1}$ ;  $\gamma$  是多方指数;  $\rho$  是混合炸药的爆压, GPa。采用公式组 (2) 计算了 MB-1 和 MB-2 的爆轰性能参数,结果见表 4。同时,用 VLWR 程序计算了 TNT、RDX、B 炸药以及 MB-1 和 MB-2 的爆轰性能参数,结果见表 5。

经验法计算结果(表4)表明,加入2%的401和501改性剂后,与B炸药文献<sup>[1]</sup>值相比,爆速分别降低了 $0.113 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 和 $0.107 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,爆压分别降低了1.2 GPa和1.1 GPa。VLWR程序计算结果(表5)表明,MB-1和MB-2与B炸药文献<sup>[1]</sup>值相比,爆速分别降低了 $0.094 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 和 $0.090 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,爆压分别降低了1.4 GPa和1.3 GPa,两种方法计算的MB-1和MB-2炸药配方的爆速和爆压值非常接近,充分说明计算方法的正确性。

对上述两种方法的计算结果取平均值,则MB-1和MB-2的爆速分别比B炸药降低了 $0.104 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 和 $0.099 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,爆压分别比B炸药降低了1.3 GPa和1.2 GPa,表明分别添加2%的401和501热塑性

弹性体对B炸药爆轰性能的影响较小。

表4 用经验法计算改性B炸药的爆轰性能参数

Table 4 Detonation performance parameters of modified Comp. B calculated by experiential method

explosive	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$p/\text{GPa}$	$\gamma$	note
TNT	1.634	6.928	19.1	3.11	Ref. [1]
RDX	1.710	8.494	30.39	3.06	Ref. [1]
401	0.90	5.55	-	-	Ref. [13]
501	0.92	5.55	-	-	Ref. [13]
Comp. B	1.684	7.870	25.5	3.08	calculate
		7.786	25.0	3.08	Ref. [1]
MB-1	1.651	7.673	23.8	3.08	calculate
MB-2	1.652	7.679	23.9	3.08	calculate

表5 用VLWR程序计算改性B炸药爆轰性能参数

Table 5 Detonation performance parameters of modified Comp. B calculated by VLWR code

explosive	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	composition	$\Delta H_f^\circ/\text{kJ}$	$p/\text{GPa}$	$D/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$T/\text{K}$	$\gamma$	note
TNT	1.634	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	-67.03	18.5	6.901	4083	3.21	calculate
				19.1	6.928		3.11	Ref. [1]
RDX	1.710	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	61.50	30.6	8.474	4933	3.02	calculate
				30.4	8.494		3.06	Ref. [1]
Comp. B	1.684	$\text{C}_{2.04}\text{H}_{2.50}\text{N}_{2.15}\text{O}_{2.68}$	4.81	25.3	7.869	4582	3.12	calculate
				25.0	7.786		3.08	Ref. [1]
MB-1	1.651	$\text{C}_{2.11346}\text{H}_{2.62685}\text{N}_{2.14252}\text{O}_{2.62603}$	7.50	23.6	7.692	4487	3.13	calculate
MB-2	1.652	$\text{C}_{2.11254}\text{H}_{2.62578}\text{N}_{2.14231}\text{O}_{2.62696}$	7.26	23.7	7.696	4488	3.13	calculate

### 3.4 热塑性弹性体改性B炸药的机理分析

为了分析改性剂实现熔铸炸药增韧增弹的原理,对热塑性弹性体401和501样品进行DSC-TG分析。结果表明,不同升温速率时的DSC-TG曲线基本趋势一致,只是热失重的温度范围以及吸热熔化的温度范围和分解热量稍有差别。其中,升温速率为 $15 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,401和501样品的热分析谱图分别见图7a和图7b。

从图7a可知,升温速率为 $15 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,401样品在DSC曲线上 $383.2 \sim 455.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围有吸热熔化小峰,在TG曲线上 $271 \sim 518 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围热失重为94.36%,说明401样品在 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下热稳定性很好,吸热熔化热分解发生在 $380 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。从图7b可知,升温速率为 $15 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,501样品在DSC曲线上 $411.8 \sim 450.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围有吸热熔化小峰,在TG曲线上 $261 \sim 524 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围热失重为91.54%,说明501样品在 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下热稳定性很好,吸热熔化热分解发

生在 $410 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。401和501热塑性弹性体是以网状非晶态形式存在,熔化温度较高,大于TNT的熔融温度 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>,在改性B炸药的浇注成型过程中,不能与TNT互溶,只能作为固相填料均匀分散到B炸药体系中。

增韧增弹改性剂包括橡胶纳米微球、聚合物纤维和热塑性弹性体,对材料的增韧可以是“互溶”增韧,也可以“填料”增韧<sup>[14]</sup>,401和501热塑性弹性体对B炸药的增韧应属于后者。TNT炸药分子间作用力主要为范德华力,晶体间为层状结构并存在层状缝隙,因此,B炸药的强度低、容易脆,延伸性差。在B炸药中加入401和501热塑性弹性体改性剂后,增加韧性相,改善了界面作用,可增强其力学性能。401为黄色粉状颗粒,501为黄色粘弹性体,由于固相填料粒度影响撞击感度,在 $\Phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 大药片撞击感度试验中,添加401的MB-1配方比添加501的MB-2配方的撞击感度高。

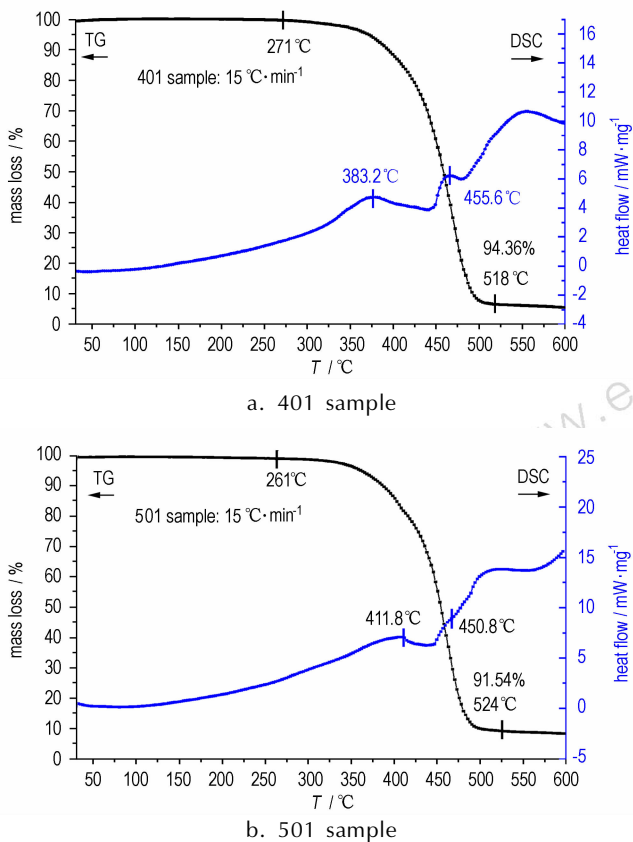


图7 401和501样品的DSC-TG曲线

Fig.7 DSC-TG curves of 401 and 501 sample

理想的热塑性弹性体能降粘、增塑,聚合物分子量可控,熔点大约在 $80 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 或与炸药流动相互溶或部分互溶,与主体炸药组分相容。将热塑性弹性体添加到B炸药中,均匀分散于TNT/RDX体系,能改善熔铸炸药的力学性能和安全性能。401和501热塑性弹性体是以网状非晶态形式存在,熔化温度较高,在TNT的熔化温度 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,只能作为固相填料均匀分散到B炸药体系中,能减少TNT和RDX晶体颗粒之间相互接触的机率,起到一定的增韧增弹作用,并改善炸药的撞击感度,因此,用热塑性弹性体改性B炸药的相关研究有待深入开展。

#### 4 结论

(1) 热塑性弹性体401和501为网状化合物,熔化温度较高,在改性B炸药成型过程中只能作为固相填料均匀分散到B炸药体系中,起到一定的增韧增弹作用。

(2) 改性B炸药MB-1和MB-2的压缩弹性模量稍微增加,压缩破坏强度增加较多,其弹性和韧性均好

于B炸药。SHPB实验结果表明,在低速冲击下,MB-2的韧性比MB-1好。

(3) MB-1和MB-2的 $\phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 药片爆炸反应的阈值高度分别为 $3.5 \sim 4 \text{ m}$ 和 $6 \sim 6.5 \text{ m}$ ,表明MB-1的落锤撞击感度高于MB-2。

(4) 与B炸药相比,MB-1和MB-2的爆速分别降低了 $0.104 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 和 $0.099 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,爆压分别降低了 $1.3 \text{ GPa}$ 和 $1.2 \text{ GPa}$ ,两种热塑性弹性体的影响效果相当。

#### 参考文献:

- [1] 董海山,周芬芬. 高能炸药及其相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989.  
DONG Hais-han, ZHOU Fen-fen. Performance of high explosives and correlates[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [2] 黄亨建,董海山,张明,等. 高聚物改性B炸药(II)[J]. 含能材料, 2005, 13(1): 7-9.  
HUANG Heng-jian, DONG Hai-shan, ZHANG Ming. Research on modification of composition B with polymers (II)[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2005, 13(1): 7-9.
- [3] 孙国祥,陈鲁祥. B炸药的品种、组成和性能[J]. 火炸药, 1989, 12(1): 15-21.  
SUN Guo-xiang, CHEN Lu-xiang. Variety, constitutor and performance of composition B[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1989, 12(1): 15-21.
- [4] William Voigt H, Stanhope N J, Lawrence W Pell, et al. TNT composition containing a cellulosic resin which is free from oily exudation upon storage. USP 3706609[P]: 1972.
- [5] 徐瑞娟,罗宏,王新锋. 改性B炸药中添加剂的作用机理[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 5-7.  
XU Rui-juan, LUO Hong, WANG Xin-feng. Effect of additives on the modified composition B[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(2): 5-7.
- [6] 胡时胜. Hopkinson压杆实验技术的应用进展[J]. 实验力学, 2005, 20(4): 589-594.  
HU Shi-sheng. The Application development of experimental technique of Hopkinson Pressure Bar[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4): 589-594.
- [7] Shan Renliang, Jiang Yusheng, Li Baoqiang. Obtaining dynamic complete stress-strain curves for rock using the Split Hopkinson Pressure Bar technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37: 983-992.
- [8] 李英雷,李大红,胡时胜. TATB钝感炸药本构关系的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 353-359.  
LI Ying-lei, LI Da-hong, HU Shi-sheng. An experimental study on constitutive relation of TATB explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 353-359.
- [9] 阮庆云,陈启珍. 评价炸药安全性能的苏珊试验[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(1): 68-72.  
RUAN Qing-yun, CHEN Qi-zhen. The safety of explosives evaluated by Susan test[J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(1): 68-72.
- [10] 代晓霞,向永,申春迎. 大药片落锤撞击感度研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 381-384.

- DAI Xiao-gan, XIANG Yong, SHEN Chun-ying. Study of drop hammer impact sensitivity for big-bill explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 381–384.
- [11] 吴雄, 龙新平. VLW 状态方程的回顾与展望 [J]. *高压物理学报*, 1999, 13(1): 55–58.
- WU Xiong, LONG Xin-ping. Review and look forward to the progress of VLW equation of state [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1999, 13(1): 55–58.
- [12] GAO Dayuan, ZHANG Xuemei, SUN Jie, et al. Study on work capacity of novel high energy low sensitivity eutectic materials [C]//IASPEP, Theory and Practice of Energetic Materials (Vol. VIII), 2011.
- [13] Dobratz P M, Crawford P C. Properties of chemical explosives and explosive simulants [M]. LLNL Explosives Handbook, 1997.
- [14] William Voigt H, Stanhope N J. Process to enhance safety of cast explosive composite. USP 5477769 [P]: 1995.

## Performance of Modified Composition B with Thermoplastic Elastomer

GAO Da-yuan, WEN Wen, SHU Yuan-jie, HUANG Qian, CAI Zhong-zhan, WEN Mao-ping, LAN Lin-gang, LUO Guan

(Institute of chemical materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Comp. B was modified by adding 2% thermoplastic elastomer 401 and 501. For the MB-1 and MB-2 of modified Comp. B, mechanical properties and drop hammer impact sensitivity were tested, detonation performance was calculated by using experience method and VLWR code. Results show that the elasticity and toughness of the MB-1 and MB-2 were better than that of Comp. B, the toughness of MB-2 were better than that of MB-1 in low speed impact experiment. In drop hammer impact test of big-bill explosives, the threshold heights of ignition for the MB-1 was 3.5 m to 4 m, for MB-2 it was 6 m to 6.5 m. The impact sensitivity of MB-1 was higher than that of MB-2. Compared with Comp. B, the CJ velocities of the MB-1 and MB-2 decrease by about  $0.104 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$  and  $0.099 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ , respectively; the CJ pressures of the MB-1 and MB-2 decrease by about 1.3 GPa and 1.2 GPa, respectively.

**Key words:** physical chemistry; Comp. B; thermoplastic elastomer; mechanical properties; impact sensitivity; detonation performance

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.05.004