

文章编号: 1006-9941(2013)01-0092-05

含双芳-3 发射药的灌注炸药爆轰性能

王 鹏, 魏晓安, 何卫东

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 采用灌注成型工艺, 将含敏化剂的含能灌注液填充于废弃的双芳-3 发射药颗粒的空隙中, 制备出灌注炸药。通过见证板试验、高速摄影、空中爆炸及水下爆炸试验分别研究了其爆轰性能、冲击波超压及能量输出特性。结果表明, 采用灌注工艺, 可制备性能优良的灌注炸药; 随着敏化剂含量的增加, 炸药的爆轰感度显著提高, 但其爆速、冲击波超压及水下爆炸能量输出变化较小; 该炸药的密度可达 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 爆速 $6600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\phi 60 \text{ mm}$), 比例距离为 $1.65 \sim 4.50 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时 TNT 当量系数略大于 1, 比冲击波能及总能量分别为 $1.57, 4.16 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于常用的工业炸药, 略低于 TNT。

关键词: 爆炸力学; 灌注炸药; 双芳-3 发射药; 空中爆炸; 水下爆炸

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.020

1 引 言

火药是枪、炮等武器的能源, 具有一定的使用期限, 在和平时期每年有大量火药因到期退役成为废弃火药。废弃火药传统的处理方法露天燃烧、燃烧炉焚毁等会造成环境污染, 采用生物降解、超临界水氧化分解等销毁技术^[1], 不易获得良好的经济效益。充分利用废弃火药的组分及含能特性用于制备民用产品, 是一种回收利用的有效途径。利用火药的组分可将其转化为化工产品^[2], 如漆布料、硝基漆、烟花防潮剂等; 或将其进行改性, 如将双迫药改性制成射钉枪药^[3], 或在双芳-3 发射药中加入适量增能物质, 改制成射钉枪用小粒药^[4]; 也可将火药粉碎后作为敏化剂加入到现有工业炸药配方中, 如浆状炸药、铵油炸药、乳化炸药、粉状炸药等^[5-8]。废弃火药的大批量处理与再利用最适宜的方法是将其改制成工业炸药使用。

由于粉碎火药具有一定的危险性, 为提高处理与再利用废弃火药的安全性、简化工艺, 魏晓安等^[9]提出了含单基药颗粒的灌注炸药成型工艺。与单基药相比, 双芳-3 发射药的组分中较钝感的二硝基甲苯含量

高, 其能量及冲击波感度较低, 采用含硝酸铵等氧化剂溶液的凝胶灌注技术, 不能将双芳-3 发射药有效再利用。本研究将含敏化剂的新型含能灌注液填充于双芳-3 发射药颗粒的空隙中, 制备出新型灌注炸药。通过见证板试验、高速摄影仪、空中爆炸及水下爆炸能量测试等研究该灌注炸药的爆轰性能、冲击波超压及能量输出特性等, 为废弃火药的再利用提供参考。

2 实验部分

2.1 样品的制备

(1) 将废弃双芳-3 发射药切割成长度约为 1 cm 的颗粒并分别装填在直径 60, 90 mm 的塑料药卷中 (长度为 1 cm 的火药易于装填, 其爆轰性能稳定)。

(2) 将高能炸药 R 加入到配制的含能灌注液中作为敏化剂, 以提高其爆轰感度, 其中敏化剂 R 的质量分数分别为 0%, 10%, 20%, 30%。该含能灌注液的爆速及理论爆热与 TNT 相当。

(3) 将不同配比的含能灌注液分别填充于双芳-3 发射药颗粒的空隙中, 放置约 30 min 后, 灌注液常温固化, 使火药颗粒固定成型, 即得到灌注炸药样品, 依次分别命名为试样 A、B、C、D, 其中敏化剂 R 在整个炸药中的质量分数 $\omega(R)$ 分别为 0%, 4.2%, 8.8%, 12.7%。

2.2 见证板试验及爆速的测定

将灌注炸药试样垂直放在厚度为 12 mm 的 A3 见证钢板上, 在炸药的上端垂直放上一定质量的钝化 RDX 传爆药柱及 8# 电雷管, 然后起爆电雷管。通过测

收稿日期: 2012-01-09; 修回日期: 2012-02-19

基金项目: 国防基础产品创新计划火炸药专项

作者简介: 王鹏(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事含能材料应用技术研究。e-mail: wangpeng0541@163.com

通讯联系人: 何卫东(1962-), 男, 副研究员, 主要从事新型含能材料研究。e-mail: hewedong@mail.njust.edu.cn

量炸药起爆后见证板上的凹痕深度及破坏情况,可对炸药的爆轰情况进行比较。按照 GB/T13228-1991 采用测时仪法,以电离探针测定炸药的爆速。

2.3 高速摄影

采用美国 COOK 公司的 pco. dimax 超高分辨率高速摄像机。拍摄速度 30000 帧/s,试样的测试点距离爆源为 50 m。

2.4 空中冲击波超压测定

压力传感器型号为 PCB113B 系列,信号调理仪选用 PCB 482A20 型号,数据采集仪为成都微测公司 VXI-1115 型。爆源地高度为 40 cm,测试点至爆心的距离分别为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.75, 4.5 m。试样 C、D 的质量约为 800 g,直径为 90 mm。每种试样平行测试三次。

2.5 水下爆炸测试

测试的水池几何尺寸为 $\Phi 8.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$,压力传感器型号为 PCB138M,电压灵敏度 6.9 V/MPa;信号调理器型号为 PCB 482A16,数据采集器为成都纵横公司的 JOVIAN5200。试样的入水深度为 4.25 m,测试点距爆源 2.5 m。试样 C、D 的质量约为 400 g,直径为 60 mm。每种试样平行测试三次。

表 1 敏化剂的含量对炸药爆轰性能的影响

Table 1 Effect of the content of sensitizer on detonation performance of explosive

$\omega(\text{R})/\%$	explosive	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	booster mass/g	dent of witness plate/mm	detonation velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
					theoretical value	actual value
0	A	1.50	40	0	6900	-
			60	9		
4.2	B	1.51	40	0	6950	-
			60	ruptured		
8.8	C	1.52	40	breakdown	6980	6600
12.7	D	1.51	40	breakdown	7000	6700

3.2 高速摄影结果

灌注炸药在传爆药柱及雷管起爆作用下典型反应过程的高速摄影结果如图 1 所示。试验采用的炸药为试样 C。由图 1 可知,0 μs 时传爆药柱被起爆,出现球形火光;33 μs 时主装药开始发生明显的化学反应。随着时间的增加,反应进一步加剧,爆轰波持续成长,球形火光的直径及火光强度逐渐增加。整个爆轰反应持续时间较短,只有约 0.3 ms。从试验开始至 0.3 ms 该过程能明显观察到冲击波对周围介质及地面的作用,对照表 1 中试样 C 的见证板试验结果,均证明装药发生了爆轰。0.3 ms 后化学反应逐渐减弱,并由爆轰开始转为

3 结果与讨论

3.1 敏化剂含量的影响

不同质量分数敏化剂 R 的含双芳-3 发射药的灌注炸药的见证板试验及理论计算爆速、实测爆速的结果见表 1。由表 1 可知,当灌注炸药中敏化剂 R 的质量分数 $\omega(\text{R})$ 分别为 0%、4.2% 时,40 g 传爆药柱均未能使装药发生爆轰;当传爆药柱增加至 60 g 时,见证板分别出现较浅压痕及破裂。随着敏化剂 R 质量分数的增加,装药的爆轰感度逐渐增加,装药对钢板的破坏作用逐渐增强。当敏化剂质量分数增加至 8.8%、12.7% 时,见证钢板被击穿,表明装药发生爆轰。但装药的爆速受敏化剂含量的影响较小,原因可能是该灌注炸药为非均质的混合体系,其爆轰反应机理主要为混合反应机理。与其它组分相比,敏化剂 R 的爆轰感度高而首先发生氧化分解,其分解产生的气体产物渗透或扩散到其它组分质点的表面并与之反应,进而引发整个装药体系发生爆轰;由于敏化剂 R 在整个炸药中的质量分数较低,对炸药爆轰波的成长及传播影响较小,因此,其含量对炸药的爆速几乎无影响。

燃烧,至 6.5 ms 持续燃烧。结果表明,炸药爆炸发光存在爆轰发光和爆轰产物燃烧发光两个阶段,与文献[10]的研究结果一致。凝聚炸药的爆炸产物向四周扩散与空气混合时,爆轰产物中的可燃成分与周围空气中的氧接触后会发生二次燃烧。由于炸药的种类和质量不同,所以二次燃烧发光现象持续时间为 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}$ 。

3.3 空中爆炸试验

灌注炸药 C、D 进行空中爆炸试验后,在不同距离测试的平均冲击波超压见表 2。

根据炸药在空中爆炸相似律,将两种炸药的压力试验数据分别按式(1)进行拟合。

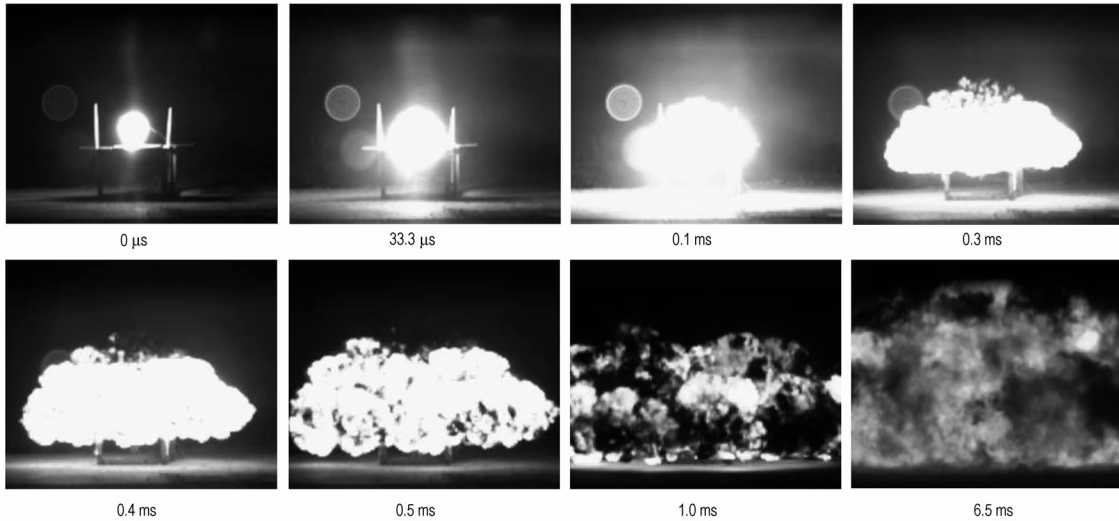


图 1 爆炸过程的高速摄影照片

Fig. 1 High-speed photos of explosion process

表 2 炸药在不同距离处冲击波超压峰值

Table 2 The shock wave overpressure of explosives at different measurement points

explosive	m/g	shock wave overpressure/kPa					
		1.5 m	2 m	2.5 m	3 m	3.75 m	4.5 m
explosive C	835	652.69	352.79	183.66	113.04	65.75	45.28
explosive D	825	728.27	413.74	218.52	116.47	67.04	47.11

$$\Delta p = \frac{A_1}{\bar{r}} + \frac{A_2}{\bar{r}^2} + \frac{A_3}{\bar{r}^3} \quad (1)$$

式中, $\bar{r} = r/\sqrt[3]{m}$, r 为到爆心的距离, m ; m 为装药质量, kg; Δp 为冲击波超压峰值, MPa; A_1, A_2, A_3 为待定系数。

按最小二乘法原理, 对两种炸药进行拟合的超压公式分别如下:

灌注炸药 C:

$$\Delta p = \frac{-0.283}{\bar{r}} + \frac{2.258}{\bar{r}^2} - \frac{0.045}{\bar{r}^3} \quad (2)$$

灌注炸药 D:

$$\Delta p = \frac{-0.572}{\bar{r}} + \frac{3.852}{\bar{r}^2} - \frac{1.500}{\bar{r}^3} \quad (3)$$

文献[11]试验拟合 TNT 炸药的超压公式为:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{-0.152}{\bar{r}} + \frac{0.938}{\bar{r}^2} + \frac{2.019}{\bar{r}^3} & (\bar{r} \leq 2.5) \\ \frac{0.172}{\bar{r}} - \frac{0.122}{\bar{r}^2} + \frac{2.414}{\bar{r}^3} & (2.5 < \bar{r} \leq 20) \end{cases} \quad (4)$$

图 2 为两种灌注炸药的试验数据及拟合曲线。由图 2 可知, 灌注炸药的试验数据与拟合曲线吻合较好。随着灌注液中敏化剂含量的增加, 炸药在相同比例距离的冲击波超压略有增加。

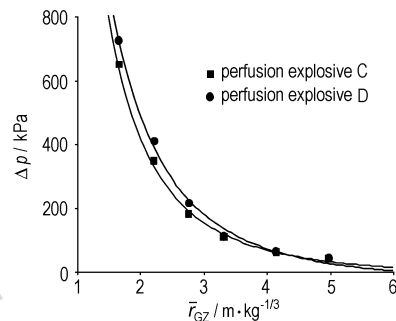


图 2 灌注炸药超压与比例距离曲线

Fig. 2 Peak pressure-scaling distance curves of perfusion explosive

炸药的等压力 TNT 当量系数可表示为

$$E_q = \frac{W_{TNT}}{W_{GZ}} = \left(\frac{\bar{r}_{GZ}}{\bar{r}_{TNT}} \right)^3 \quad (5)$$

式中, W_{TNT}, W_{GZ} 分别为 TNT 及双芳-3 灌注炸药的质量, kg; $\bar{r}_{GZ}, \bar{r}_{TNT}$ 分别为双芳-3 灌注炸药及 TNT 的比例距离, $m \cdot kg^{-1/3}$ 。

根据公式(2)、(3)及(4), 分别计算出同一压力时的 \bar{r}_{GZ} 和 \bar{r}_{TNT} , 代入式(5), 即可求出两种不同含双芳-3 灌注炸药的等压力 TNT 当量, 结果见表 3。

由表 3 可知, 在比例距离为 1.65 ~ 4.5 $m \cdot kg^{-1/3}$ 时, 灌注炸药 C、D 的等压 TNT 当量分别为 1.005, 1.149, 比岩石乳化炸药的 TNT 当量^[12] 分别高 40%, 60%。

表 3 不同炸药的 TNT 当量

Table 3 TNT equivalence of different explosives

explosive	\bar{T}_{GZ} /m · kg ^{-1/3}	overpressure /kPa	TNT equivalence
explosive C	1.65 ~ 4.5	50 ~ 650	1.005
explosive D	1.65 ~ 4.5	50 ~ 700	1.149
rock emulsion explosive ^[12]	2.0 ~ 7.5	10 ~ 1000	0.708

3.4 水下爆炸能量输出特性

在距离爆心为 R 的测点处,炸药的比冲击波能 e_s 按式(6)计算

$$e_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w m} \int_0^\tau p^2(t) dt \quad (6)$$

式中, R 为测点距装药中心的距离, m ; ρ_w 为水的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 取 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_w 为水中声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; m 为炸药的质量, kg ; $p(t)$ 为冲击波传到测点处时的压力, Pa ; τ 为积分上限, 一般取 6.7θ , θ 为冲击波衰减时间常数, 取冲击波压力由峰值 p_m 下降至 p_m/e 所需的时间。

在有限水域边界效应存在的情况下,炸药的比气泡能 e_b 为:

$$e_b = \frac{1}{8C^3 K_1 m} (\sqrt{1 + 4CT_b} - 1)^3 \quad (7)$$

式中, e_b 为单位质量炸药的气泡能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; C 为水池条件的常数; K_1 为由试验确定的常数; T_b 为将实测气泡周期 t_b 修正到同一大气压下的总流体静压下的气泡脉动周期。

炸药的总比能量计算公式为:

$$e_t = K_f(\mu e_s + e_b) \quad (8)$$

式中, e_t 为单位质量炸药的总能量, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; K_f 为炸药形状系数; μ 为冲击波衰减系数, 仅与炸药的爆轰压 p_{C-J} (10^8 Pa) 有关, 计算公式如下:

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-2} p_{C-J} - 6.5775 \times 10^{-5} p_{C-J}^2 + 1.2594 \times 10^{-7} p_{C-J}^3 \quad (9)$$

按照以上公式进行计算,灌注炸药 C、D 的水下爆炸能量测试结果如表 4 所示,并与文献[13-14]中的工业炸药水下爆炸能量进行比较。结果可知,由于灌注炸药 C、D 中敏化剂的质量分数仅相差约 4%,敏化剂的含量对灌注炸药 C、D 的比冲击波能 e_s 、比气泡能 e_b 及总能 e_t 影响较小,灌注炸药 C 的能量略高于灌注炸药 D。灌注炸药 C、D 修正后的比冲击波能 μe_s 和 $\mu e_s/e_t$ 均高于铵油、铵梯及乳化炸药,但其值低于 TNT。灌注炸药 C、D 的理论爆热与铵梯炸药相当,高于铵油及乳化炸药,略低于 TNT。综合灌注炸药的爆轰性能、能量特性及成本考虑,选择试样 C 的配方较为适宜。

在爆破工程中根据爆破介质特性选择工业炸药应遵循:对较硬的介质爆破应选用冲击作用较强的炸药,对于较软的介质爆破应选用爆炸气体膨胀作用较强的炸药,而对于中等硬度的介质爆破应选用冲击作用与爆炸气体膨胀作用较均衡炸药的基本原则。灌注炸药 C、D 的比冲击波能 μe_s 及 $\mu e_s/e_t$ 值都较高,表明具有较强的冲击作用,在较硬岩石介质的爆破工程中更为理想。由于该灌注炸药的密度可达 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,且爆速高 ($D=6600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),也可用作高能起爆具及地质勘探用高分辨率震源药柱。

表 4 不同炸药的水下爆炸能量输出特性

Table 4 Characteristics of underwater energy of different explosives

explosive	explosive C	explosive D	casting TNT ^[13]	ANFO ^[13]	2 [#] water-resistant rock ammonite ^[14]	low power emulsion explosive ^[14]
$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.52	1.51	1.52	0.78	0.94	1.05
μ	1.975	1.981	1.983	1.241	1.340	1.288
$e_s / \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.795	0.805	1.100	0.976	1.038	0.762
$e_b / \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.506	2.509	2.155	2.478	2.594	2.421
$e_t / \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	4.159	4.188	4.336	3.689	3.985	3.402
$\mu e_s / \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.571	1.595	2.181	1.211	1.391	0.981
$(\mu e_s / e_t) / \%$	37.8	38.1	50.3	32.8	34.9	28.8
$Q_v / \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	4.007	4.039	4.229	3.705	4.015	3.408
$(e_t / Q_v) / \%$	103.8	103.7	102.5	99.6	99.3	99.8

4 结论

(1) 采用含能灌注液对双芳-3 发射药颗粒空隙进行填充,可得到性能优良的灌注炸药。随着灌注液中敏化剂含量的增加,炸药的爆轰感度显著提高,但其爆速、冲击波超压及水下爆炸能量输出变化较小。

(2) 该灌注炸药密度可达 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,爆速 $6600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\Phi 60 \text{ mm}$),理论爆热与铵梯炸药相当,高于铵油及乳化炸药,略低于 TNT。

(3) 比例距离为 $1.65 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,灌注炸药的 TNT 当量系数略高于 1; 其水下爆炸能量 μe_s 、

e_i 及 $\mu e_s/e_i$ 均高于铵油、铵梯及乳化炸药, 略低于 TNT, 具有较高的能量及较强的冲击作用。

(4) 根据灌注炸药的爆轰性能及能量输出特性, 该炸药适用于较硬的岩石爆破或用作高能起爆具及地质勘探用高分辨率震源药柱。

致谢: 感谢南京理工大学陈网桦教授、何中其老师及研究生曹威、周健美等对本实验的帮助。

参考文献:

- [1] 王泽山, 张丽华, 曹新茂. 废弃火炸药的处理与再利用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [2] 刘吉平, 韩颂青, 朱荣丽, 等. 废双基药的再利用[J]. 含能材料, 1999, 7(1): 25-27.
LIU Ji-ping, HAN Song-qing, ZHU Rong-li, et al. Recycle of ex-service double base propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1999, 7(1): 25-27.
- [3] 徐建华, 王泽山. 改性双基球形药的制备工艺研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(2): 9-11.
XU Jian-hua, WANG Ze-shan. Study on the property modification of double-base propellants to ball propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(2): 9-11.
- [4] 蔡昇, 王泽山. 双芳型发射药改性制备小粒药[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 38-40.
CAI Sheng, WANG Ze-shan. Small size globular propellants prepared through modified SF propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(2): 38-40.
- [5] 顾建良, 王泽山. 利用废旧双基药制备工业浆状炸药的研究[J]. 火炸药学报, 1999, 22(1): 42-44.
GU Jian-liang, WANG Ze-shan. A study of slurry explosives containing obsolete double-base propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1999, 22(1): 42-44.
- [6] Lipińska K, Lipiński M, Maranda A. Demilitarized double base propellants as Ingredients of commercial explosives[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2005, 2(1): 69-78.
- [7] Maranda A, Lipińska K, Lipiński M. Analysis of double base propellant influence on detonation process of ammonals[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2010, 7(2): 145-159.
- [8] Machacek O, Eck G, Tallent K. Development of new high energy blasting products using demilitarized and excess propellant grains from conventional ammunition rounds[C]. // Theory and Practice of Energetic Materials Vol. II. Shenzhen, China: Science Press, 1997: 302-308.
- [9] 魏晓安, 王泽山. 灌注式废发射药凝胶炸药的研制[J]. 爆破器材, 2001, 30(3): 6-10.
WEI Xiao-an, WANG Ze-shan. Manufacture of explosive from perfusion gel containing waste propellant[J]. *Explosive Materials*, 2001, 30(3): 6-10.
- [10] 易建坤, 杨智旭, 吴腾芳, 等. 凝聚相炸药爆炸火光现象的初步研究[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 12-16.
YI Jian-kun, YANG Zhi-xu, WU Teng-fang, et al. Primary study on phenomena of firelight radiating from explosion of condensed explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(5): 12-16.
- [11] 仲倩, 王伯良, 黄菊, 等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 32-35.
ZHONG Qian, WANG Bo-liang, HUANG Ju, et al. Study on the similarity law of TNT explosion overpressure in air[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(4): 32-35.
- [12] 乔小玲, 胡毅亭, 彭金华, 等. 岩石型乳化炸药的 TNT 当量[J]. 爆破器材, 1998, 27(6): 5-8.
QIAO Xiao-ling, HU Yi-ting, PENG Jin-hua, et al. TNT equivalence of a rock emulsion explosive[J]. *Explosive Materials*, 1998, 27(6): 5-8.
- [13] 张立, 陆守香, 汪大立. 有限水域中煤矿工业炸药爆炸能量的测试研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 274-278.
ZHANG Li, LU Shou-xiang, WANG Da-li. Test research of exploded energy of coal mineral industrial explosive under limited water field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(3): 274-278.
- [14] 刘永明, 董春海, 郑福良. 水下爆炸能量测试法评析工业炸药威力[J]. 煤矿爆破, 2000, 50(3): 20-24.
LIU Yong-ming, DONG Chun-hai, ZHENG Fu-liang. Evaluation industrial explosive power by underwater burst energy test[J]. *Coal Mine Blasting*, 2000, 50(3): 20-24.

Detonation Performance of Perfusion Explosive Containing SF-3 Double-based Propellants Energetic Materials

WANG Peng, WEI Xiao-an, HE Wei-dong

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

Abstract: A type of new perfusion explosive was prepared through the perfusion molding process, in which expired SF-3 double-based propellants were used as ingredients and the charge of propellant particles were filled with energetic fluid. The detonation performance of the perfusion explosive was studied through the witness plate test. Explosion reaction was recorded by high-speed camera. The shock wave overpressure and release energy were measured by the air explosion and underwater blast respectively. The results show that through the perfusion molding process, expired SF-3 double-based propellants can be reused to manufacture industrial explosive with excellent performance. With the sensitizer content increasing, the detonation sensitivity increases, but the detonation velocity, overpressure and the release energy almost keep the same. The density of this perfusion explosive can be $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, and the detonation velocity is $6600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ when the diameter is 60 mm. TNT equivalence of the explosive is over 1 when the proportion distance range is $1.65 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$. The shock wave energy is $1.57 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ and total energy is $4.16 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, both more than the common industrial explosives, but slightly lower than TNT.

Key words: explosion mechanics; perfusion explosive; SF-3 double-based propellant; air explosion; underwater blast

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.020