

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.02.004

# 含 5/7 单基药灌注炸药的制备及性能研究\*

张 迪<sup>①</sup> 魏晓安<sup>①</sup> 俞永华<sup>②</sup> 王泽山<sup>①</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②山东银光科技有限公司(山东临沂,273400)

[摘 要] 针对 5/7 单基药,采用了  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  3 种不同的填充材料制备抗水型灌注炸药。利用改进的工艺解决了 5/7 单基药小孔隙的填充问题;该炸药的水下测试结果显示,含  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  的灌注炸药 TNT 当量为 0.97、1.11 和 1.34,能量呈明显递增关系,结果与灌注液和发射药颗粒能量匹配相对应;对  $R_2$  和  $R_3$  灌注炸药以及 5/7 单基药颗粒的爆炸过程进行高速摄影,发现它们在相同时间段火球明显不同, $R_3$  灌注炸药火球亮度、大小及持续时间明显超过  $R_2$  体系,这与水下爆炸结果相一致,而未灌注的 5/7 单基药颗粒在冲击作用下还存在燃烧现象。这些结果为配方设计提供了依据。

[关键词] 5/7 单基火药;灌注炸药;水下爆炸;高速摄影

[分类号] TJ51

## 引言

发射药有一定的使用寿命,一旦过了使用寿命,便不能在武器中正常使用。目前,世界上每年都需处理大量的各类退役发射药。我国现阶段有大量的单颗粒单基药退役待处理。以前常用的处理方法是深海填埋、堆肥和露天焚烧等方法,这些方法存在较大安全隐患,易造成安全事故和环境污染<sup>[1]</sup>。

将退役的发射药制成工业用炸药是非常好的处理方法,这样不仅可以充分利用退役发射药中的能量,节约能源,还减小了对人类和环境的威胁。退役发射药可制成的工业炸药现阶段主要有乳化炸药、浆状炸药和灌注炸药。其中含退役发射药的乳化炸药和浆状炸药制备过程中需要搅拌,加上废火药撞击感度较高,故制备工艺上存在一定的安全问题,其中乳化炸药还存在能量较低的问题,不能满足实际需求。而含退役发射药灌注炸药制备流程中无搅拌过程,提高了工艺的安全性;原药无需过多的粉碎等预处理过程,简化了工艺且提高了安全性;体系本身含水,因此有极佳的抗水性能和抗静电性能;胶凝剂和发射药粒相对稳固的结构有利于吸收外界振动、消除发射药粒间摩擦,提高运输安全性。

因此在其资源化利用中,直接通过灌注成型制备含废火药的灌注炸药是相对较好的方法<sup>[1]</sup>。张丽华、魏晓安等<sup>[2-3]</sup> 针对粗颗粒单基药(长度 > 5

mm,直径 > 4 mm)装药,在复合氧化剂溶液中加入改性纤维素作为胶凝剂,制成灌注型炸药,其性能可与露天型含火药浆状炸药相当。蔡昇<sup>[4]</sup> 以  $CR^{3+}$ 、 $Al^{3+}$  复合金属离子交联聚丙烯酰胺为胶凝剂,研究了该类灌注液的配方及成型工艺,对粗颗粒单基药(长度 > 5 mm,直径 > 4 mm)的灌注炸药进行了研究。在后续的研究中<sup>[4]</sup>,采用了一种新型的灌注工艺,在氧化剂溶液中加入 RSN 胶作为胶凝剂,并在 60 °C 下进行热固化,制备出含粗颗粒单基药的刚性灌注炸药,这 2 种灌注炸药性能也与岩石型乳化炸药性能相近。Machacek 等<sup>[5-6]</sup> 研究了在复合氧化剂溶液中加入一种改性古尔胶的延迟胶凝剂,并分别灌注到 M30 三基药、M1/M6 单基药、M26 双基药的颗粒中,制备了 Slurran 400 系列灌注炸药,该炸药密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup> 左右,爆速为 6.0 ~ 6.5 km/s,该方法对于颗粒状的单基药、三基药较为适宜,对于其他类型的火药并非都适用,较低能量的双基药可与单基药或三基药混合,该类炸药性能也只与岩石型乳化炸药性能相近。

近年来,Wang 等<sup>[7]</sup> 以丙烯酸酰胺为胶凝剂对含单基药凝胶炸药进行了研究,并仅对含 5/7 单基药的凝胶炸药进行了初步探索研究。但是,由于小颗粒单基药尺寸细小,填充材料在细小的空隙中传质非常困难,工艺上难以对空隙进行完全有效的填充,

\* 收稿日期:2015-11-18

基金项目:国家部委专项

作者简介:张迪(1993 ~),男,硕士,主要从事新型黏结剂合成及退役火药的利用的研究。E-mail:zdicanplay@163.com

通信作者:魏晓安(1968 ~),男,讲师,主要从事废弃火炸药资源化利用研究。E-mail:weixiaoan@126.com

同时也极易出现成型质量不稳定的现象,这对制备该类灌注炸药造成很大的难度,致使进一步的研究很少。而对于除 5/7 单基药之外的其他的退役发射药,有些还存在因发射药感度过低导致制成的灌注炸药感度低而不发生爆轰等一系列问题。因此,以退役发射药制备工业用炸药还处于探索阶段,有很多的问题有待解决,离大量应用还有一段路要走。

本文针对 5/7 单基药小空隙传质困难的问题,同时选用  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  3 种填充材料,使用安全的通道预热控制装置改进灌注制备工艺,制备出含 5/7 单基药的灌注炸药,解决小空隙传质填充问题;研究 3 种不同的填充材料制备的灌注炸药性能,通过见证板、水下性能测试和高速摄影来研究该类炸药的 能量特性。结果显示,改进工艺制备的灌注炸药空隙填充较为完全,有一定的威力,能量也高于乳化炸药。摩擦感度低于 5/7 单基药;安全性能经测试符合 WJ9045—2004 标准。

1 试验部分

1.1 试验方法

火药选用 5/7 单基药(含 95% 硝化棉)进行试验,填充材料  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  是 3 种含能材料,自制  $R_1$  为含氧化剂的聚丙烯酰胺凝胶,能量相当于乳化炸药能量 70%;自制  $R_2$  为含氧化剂和含能敏化剂的聚丙烯酰胺凝胶,能量略高于 TNT;自制  $R_3$  为含氧化剂、含能敏化剂和铝粉的聚丙烯酰胺凝胶,能量比  $R_2$  高 20%。

1.2 试验过程

1.2.1 灌注炸药的制备

5/7 单基药先装填在  $\varnothing 60$  mm 的药卷中,药卷竖立放置,开口向上;配置填充材料  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ ;采用通道预热技术(自行研制的通道预热控制装置),将制备好的填充材料灌注于火药颗粒间空隙中,待固化成型后,即制备出含 5/7 单基药的灌注炸药。

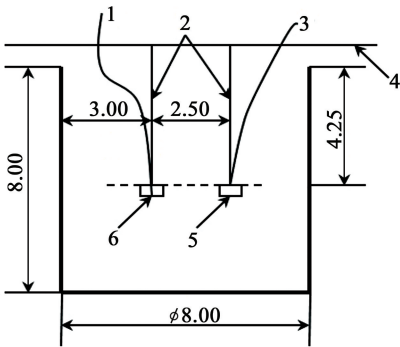
1.2.2 爆速、密度和见证板测试

将制备的含 5/7 单基药灌注炸药进行爆速、密

度和见证板性能测试,其中见证钢板选用 10 ~ 20 mm 厚的 A3 钢。

1.2.3 水下爆炸测试

水下爆炸能量输出测试的水池几何尺寸为  $\varnothing 8.0$  m  $\times$  8.0 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。试验药量为 200 g,参比炸药为 40 g 钝化黑索今,试验装药位于水面下 4.25 m 处,药包离传感器的距离 ( $L$ ) 为 2.5 m。采用压力传感器记录炸药爆炸激发能量,如图 1 所示。能量分析参考相应文献<sup>[8-10]</sup>。



1 - 起爆电缆, 2 - 承重绳索, 3 - 传输电缆,  
4 - 试验支架, 5 - 传感器, 6 - 试验装置,

图 1 测量后燃效应的试验布置示意图(单位:m)

Fig. 1 Experimental disposal for measurement  
of afterburning effect( unit:m)

1.2.4 灌注炸药爆炸过程高速摄影

测试条件:8#工业雷管、传爆药(40 g 钝化黑索今,密度 1.6 g/cm<sup>3</sup>,直径 40 mm)和 5/7 灌注炸药(200 g);炸药放置在间距 1 m 标志杆中间,高速摄影机距炸药 30 m。

2 结果与讨论

2.1 爆速、密度和见证板测试结果

表1是5/7单基药制备灌注炸药的基本性能。从表1可以看出,制备成灌注炸药后密度从0.99 g/cm<sup>3</sup>提高到1.46 g/cm<sup>3</sup>以上;炸药爆速超过6 500

表 1 灌注炸药性能

Tab. 1 Performances of the perfusion explosive

编号	火药类型	填充材料	主要成分/%		密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	爆速/ (m · s <sup>-1</sup> )	击穿钢板厚度 /mm
			w(5/7 单基药)	w(填充材料)			
0 <sup>#</sup>	5/7 单基药	无	100.0	0	0.99	0	10 □ *
1 <sup>#</sup>	5/7 单基药	$R_1$	68.0	32.0	1.46	6 580	10 ▣ *
2 <sup>#</sup>	5/7 单基药	$R_2$	62.5	37.5	1.58	7 180	14 ▣ *
3 <sup>#</sup>	5/7 单基药	$R_3$	60.0	40.0	1.63	7 250	20 ▣ *

\* □,表示钢板只有压痕;▣,表示钢板被击穿。

m/s;没填充时,钢板只有压痕,并有大量残药,而填充  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  后,无残药,击穿钢板厚度从 10、14 mm 到 20 mm 依次提高,显示炸药冲击波能依次增强。加入灌注液后,体系中氧含量得到提高,增加了体系的能量释放效率,减少了残渣。

2.2 灌注炸药水下爆炸性能

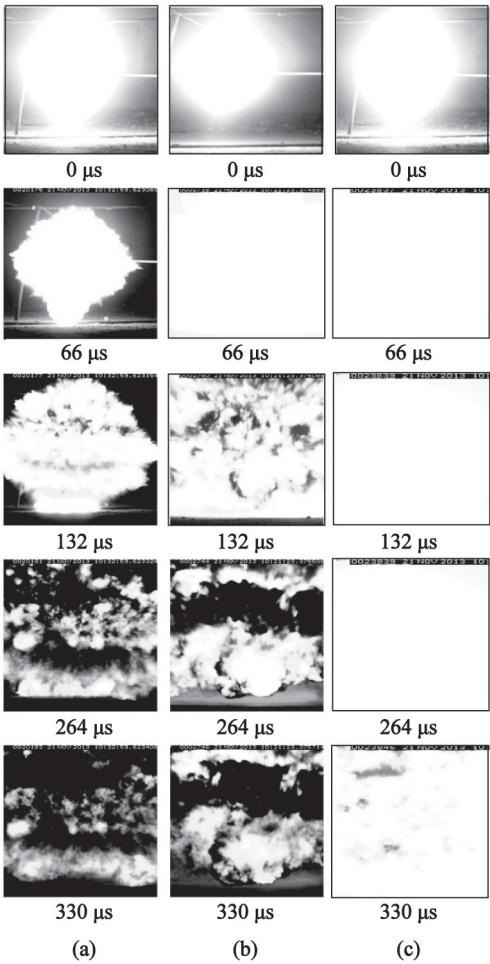
将灌注炸药进行水下爆炸对比试验,对比炸药 ( $4^\#$ ) 为钝化黑索今,  $\rho = 1.60\text{ g/cm}^3$ 。表 2 列出了 5/7 灌注  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  体系冲击波  $e_s$ 、气泡能  $e_b$  及总能量  $e_t$  变化,考虑未填充的 5/7 单基药爆炸过程不完全,难以在水中收集残渣,故序号  $0^\#$  的水下试验未做。

从表 2 可以看出:灌注  $R_2$ 、 $R_3$  炸药的冲击波能比  $R_1$  体系高 24%、32%;灌注  $R_2$ 、 $R_3$  炸药的气泡能比  $R_1$  体系高 8%、41%;灌注  $R_2$ 、 $R_3$  炸药的总能量比  $R_1$  体系高 15%、38%。钝化黑索今的 TNT 当量约为 1.2 倍,依此为参照,含  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  灌注炸药 TNT 当量为 0.97、1.11 和 1.34,整体性能比较, $R_1$  灌注炸药最差, $R_2$  次之, $R_3$  最好。

2.3 灌注炸药爆炸过程高速摄影

对表 1 得到的炸药通过高速摄影进行对比试验 ( $R_1$  体系爆炸结果在今后其他文章中列出),在此只列出 5/7 颗粒以及 5/7 颗粒灌注  $R_2$  体系和 5/7 颗粒灌注  $R_3$  体系的爆炸过程图像。爆炸条件:炸药为 200 g,传爆药为 40 g 钝化黑索今,  $8^\#$  雷管激发。结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,5/7 颗粒单基药在传爆药激发下发生不完全的燃烧转爆轰现象(在试验现场发现 10 g 5/7 单基药,即 5% 左右的残药);5/7 颗粒单基药填充  $R_2$  和  $R_3$  的灌注炸药在激发后完全爆轰(试验现场无残药),填充  $R_2$  和  $R_3$  体系都比不填充的 5/7 体系火球大,光亮强以及持续时间长,其中,  $R_2$  在 66  $\mu\text{s}$ 、 $R_3$  在 264  $\mu\text{s}$  仍处于强光区中,同时也表明,  $R_3$  体系爆炸效果优于  $R_2$  体系。整体性能比较,仍然是  $R_1$  灌注炸药最差,  $R_2$  次之,  $R_3$  最好。



(a)5/7 单基药;(b)5/7 单基药灌注  $R_2$  体系  
(c)5/7 单基药灌注  $R_3$  体系

图 2 灌注炸药爆炸过程高速摄影

Fig. 2 High-speed photographs of perfusion explosive detonation

2.4 灌注炸药爆炸过程特征分析

2.4.1 灌注炸药性能差异分析

两颗 5/7 单基药颗粒可以假设成如图 3 所示竖立放置的圆柱体。

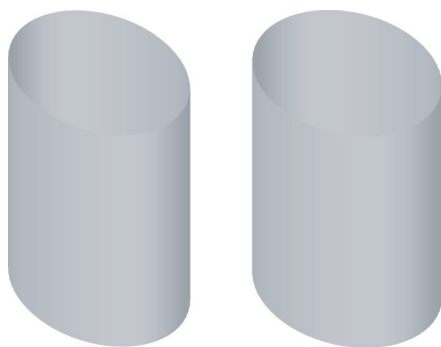
1) 设颗粒直径为  $2R$ , 长度为  $4R$ , 另一颗粒与其平行放置,最短距离为  $2R$ 。

表 2 灌注炸药水下爆炸性能测试

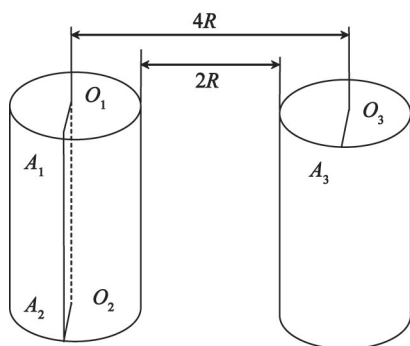
Tab. 2 Performance test of the perfusion explosive in underwater explosion

序号	炸药类型	$p_m/\text{MPa}$	$\mu$	$e_s/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$e_b/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$e_t/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
1 <sup>#</sup>	5/7 单基药( $R_1$ )	12.97	1.969	0.673	2.117	3.525
2 <sup>#</sup>	5/7 单基药( $R_2$ )	12.78	2.006	0.837	2.288	4.055
3 <sup>#</sup>	5/7 单基药( $R_3$ )	13.35	1.989	0.890	2.988	4.878
4 <sup>#</sup>	钝化 RDX( $\rho = 1.60\text{ g/cm}^3$ )	5.73	2.009	0.943	2.395	4.346





(a) 5/7 单基药颗粒



(b) 5/7 单基药颗粒位置关系

图 3 发射药颗粒间距关系

Fig. 3 Relationships of shape and structure between 5/7 single-base propellants

2) 设颗粒爆速为  $D_1$ , 灌注液的爆速为  $D_2$ 。

则炸药体系中, 从颗粒上表面  $A_1$  垂直传到下表面  $A_2$  所需时间为:

$$t_1 = \frac{4R}{D_1} \quad (1)$$

从左边颗粒中心  $O_1$  传到右边颗粒中心  $O_3$  (通过颗粒和灌注液传播) 所需时间为:

$$t_2 = \frac{2R}{D_1} + \frac{2R}{D_2} \quad (2)$$

炸药体系中, 从左边颗粒中心  $O_1$  传到右边颗粒中心  $O_3$  (直接通过灌注液传播) 所需时间为:

$$t_3 = \frac{4R}{D_2} \quad (3)$$

从而有

$$t_2 - t_1 = \frac{2R(D_1 - D_2)}{D_1 D_2}; \quad (4)$$

$$t_3 - t_1 = \frac{4R(D_1 - D_2)}{D_1 D_2} \quad (5)$$

要使炸药爆轰结构不发生异化, 需要爆速相近或者颗粒间隙  $2R$  变小。对于各种制式发射药颗粒, 装填的间隙距离为定值 (要改变距离大小可以通过加入细小颗粒发射药进行复配, 需要调整装药

工艺, 这里只讨论颗粒间隙为定值情况), 因此要改变灌注炸药的性能, 只有调节填充材料的能量特性, 如果与单基药能量相匹配, 就能改善爆炸能量输出结构的异化。

#### 2.4.2 改进灌注炸药爆炸能量输出结构的方法

单基药的爆炸能量与 TNT 相当, 它的密度约为  $1.6 \text{ g/cm}^3$ 、爆速约为  $7000 \text{ m/s}$ 、撞击感度为 TNT 的 80%, 而研究中采用的  $R_1$  由于能量只相当于乳化炸药能量的 70%, 它的爆速及密度与单基药差别较大, 容易出现能量输出结构的异化; 对于  $R_2$ , 它的能量略高于 TNT, 它的爆速及密度与单基药也相近, 能改善能量输出结构的异化; 对于  $R_3$ , 它的能量比  $R_2$  高 20%, 它的爆速也与单基药接近, 而密度比单基药高, 在提高能量的基础上又明显改善能量输出结构, 基本消除了异化现象。同时, 在试验中发现, 填充  $R_3$  的冲击波能和气泡能都高于  $R_2$  体系, 可能与单基药和  $R_3$  在波阵面以及二次反应中相互作用有关, 这有待今后试验证实。

### 3 结论

1) 针对颗粒细小的 5/7 单基药, 首次采用  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  3 种灌注液, 成功制备出 3 种 5/7 单基药灌注炸药。试验证实, 这种通道预热控制技术十分有利于小空隙的填充。

2) 对不同性能的灌注液制备的灌注炸药进行的见证板试验和 underwater 爆炸试验均显示, 灌注液的能量对性能的影响很大。其中,  $R_3$  灌注液制备的灌注炸药击穿了 20 mm 的钢板, 其冲击波能和气泡能也明显高于其他 2 类灌注炸药, 这表明  $R_3$  填充材料中的为提高能量而加入的铝粉能量得到了充分释放。灌注炸药爆炸过程高速摄影表明: 灌注液的能量高低也会直接影响到火球爆炸的亮度、大小和持续时间, 它们都和灌注液的能量相关。

3) 5/7 单基药灌注炸药的爆速和颗粒间距对爆炸过程有较大影响, 要使灌注炸药的性能有效释放, 调节填充材料的爆速, 使与单基药相匹配的爆速相一致, 能改善爆炸能量输出结构的异化。

#### 参 考 文 献

- [1] 王泽山, 张丽华, 曹欣茂. 废弃火炸药的处理与再利用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [2] 张丽华. 用废弃发射药制造民用炸药的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 1998.
- [3] 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 X A, WANG Z S. Manufacture of explosive from perfusion gel containing waste propellant [J]. Explosive Materials, 2001, 30 (3): 6-10.

- [4] 蔡昇. 废弃火炸药制造小粒药和民用特种炸药的研究 [D]. 南京:南京理工大学,2003.
- [5] MACHACEK O, ECK G R. Waste propellants and smokeless powders as ingredients in commercial explosives [C]//Proc. 23rd International Annual Conference of ICT Karl-sruhe. 1992(23): 1-14.
- [6] MACHACEK O, ECK G R, TALLENT K. Development of new high energy blasting products using demilitarized and excess propellant grains from conventional ammunition rounds, 2th int [C]//2nd International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Shenzhen: People's Republic of China, Publishing House of Ordance Industry, 1997:302-308.
- [7] WANG P, WEI X A, HE W D. Thermal stability and underwater energy of water gel explosive using expired single-base propellants as ingredients [J]. Journal of Energetic Materials, 2014, 32(Supp. 1): 51-59.
- [8] 王鹏, 魏晓安, 何卫东. 含双芳-3 发射药的灌注炸药爆轰性能 [J]. 含能材料, 2013, 21(1): 92-96.
- WANG P, WEI X A, HE W D. Detonation performance of perfusion explosive containing SF-3 double-based propellants energetic materials [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(1): 92-96.
- [9] 林谋金, 马宏昊, 沈兆武, 等. RDX 基铝纤维炸药水下爆炸的能量分析 [J]. 火炸药学报, 2013, 36(1): 17-20, 25.
- LIN M J, MA H H, SHEN Z W, et al. Analysis on explosion energy of aluminum fiber explosive on under water detonation [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellant, 2013, 36(1): 17-20, 25.
- [10] BJARNHOLT G, HOLMBERG R. Explosives expansion works in underwater detonations [C]//Proceedings 6th Symposium (international) on Detonation. San Diego, 1976: 540-550.

## Research on Preparation and Properties of Perfusion Explosive Containing 5/7 Single Base Propellant

ZHANG Di<sup>①</sup>, WEI Xiaolan<sup>①</sup>, YU Yonghua<sup>②</sup>, WANG Zeshan<sup>①</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Shandong Yinguang Technology Co., Ltd. (Shandong Linyi, 273400)

[ABSTRACT] Water-resistance perfusion explosives containing 5/7 single base propellant were manufactured by three kinds of fillers ( $R_1$ ,  $R_2$  and  $R_3$ ). Filling problems in small pores was resolved by the improved technology. In underwater explosion, the TNT equivalent of perfusion explosive with  $R_1$ ,  $R_2$  and  $R_3$  were 0.97, 1.11 and 1.34 respectively, and energies of perfusion explosives obviously increase. Furthermore, energies of perfusion explosives were especially related with the characters of  $R_1$ ,  $R_2$  and  $R_3$ . Detonations of perfusion explosives with the fillers of white,  $R_2$  and  $R_3$  were tested through high speed photography. Results show that fire balls are also different among high energy and low energy fillers, and the brilliance and shape of fire ball from  $R_3$  is more than those from  $R_2$ . Meanwhile, the perfusion explosive with the filler of white still shows inflammation. This result is also according with the effect from the underwater explosions.

[KEY WORDS] 5/7 single base propellant; perfusion explosive; underwater explosion; high-speed photography