

文章编号: 1006-9941(2006)04-0244-04

## 复合分散药的性能及对 FAE 燃料分散的影响

肖绍清

(厦门爆破工程公司, 福建 厦门 361012)

**摘要:** 设计了一种新型结构的复合分散药,用以取代常规燃料空气炸药(FAE)分散药,对复合分散药爆轰波传播模型、装药结构尺寸、芯药和外层炸药爆速、复合分散药占燃料质量分数对 FAE 爆轰云雾的形成和传播进行了分析研究。在此基础上,进行了以压装密度为  $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、爆速为  $8400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的 8701 炸药为芯药,以低密度硝基胍(NQ)为外层炸药,以环氧丙烷(PO)和宏观固态燃料为 FAE 燃料分散与引爆实验。结果表明,采用复合分散药,分散药燃料比超过 1.3%,云雾未发生窜火,云雾形状基本为类草帽形,并可靠爆轰,这说明采取复合装药结构是完全可行的。

**关键词:** 爆炸力学; 燃料空气炸药(FAE); 复合分散药; 爆轰波; 传播方向; 燃料分散; 控制

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

### 1 引言

燃料空气炸药(FAE)云雾形成过程受中心分散药、燃料性质、弹体结构尺寸及强度等因素的影响和制约。在中心分散药方面,Gardner<sup>[1]</sup>、Zabelka<sup>[2]</sup>等人对分散药占燃料质量分数(以下简称“分散药燃料比”)进行了研究,采用的分散药燃料比均不小于 1%;在分散药装药结构方面,Sedgwick<sup>[3]</sup>、Aley<sup>[4]</sup>等人对中心分散药两端的填充惰性材料(如木塞、橡胶及钢片等)进行了研究,目的是限制分散药爆炸能量及其产物的轴向分布,以利于燃料的径向分散,避免在二次引信作用前云雾发生燃烧或爆燃——云雾窜火。但是,在以适应顶端起爆云雾而设计的新型弹体结构<sup>[5]</sup>中,采用这些方法仍不能形成理想的类草帽状云雾,也不能完全抑制燃料分散过程中的云雾窜火问题。

为此,设计出的 T 型分散药<sup>[6]</sup>在该新型弹体结构中进行了研究,结果表明对抑制 FAE 云雾窜火有很好的效果。但是,T 型分散药中加入的惰性材料对分散药爆炸硝烟的同时,也削弱了爆轰冲击波的能量,为了有效分散 FAE 的燃料,需增大分散药的重量,相应需增大中心爆管的体积而减少 FAE 弹体有效载荷的容积;同时,由于惰性材料混入到 FAE 云雾中,对起爆 FAE 云雾不利。为了克服 T 型分散药的不足,本工作基于将分散药爆轰波由轴向传播改变为径向传播的构想,设计了一种新型的以径向传播为主的锥面爆轰波

发生器——复合分散药。结果表明,这种分散药结构有益于燃料分散的控制,特别是对遏制云雾窜火有很好的效果,云雾也能可靠爆轰。

### 2 复合分散药的设计

#### 2.1 复合分散药结构图

复合分散药的设计原则是使中心分散药的爆轰波由轴向传播转向径向传播,以实现理想云雾形状,并确保云雾不发生窜火。设计的复合分散药如图 1 所示,其外层为低爆速高能炸药,内心装药(以下简称芯药)为高爆速的高能炸药。

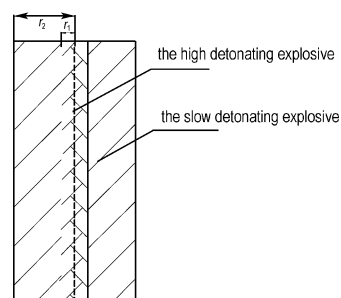


图 1 复合分散药药柱结构简图

Fig. 1 The sketch of the combination burster

#### 2.2 复合分散药的爆轰波波迹方程

假设:

(1) 设  $r_1$ 、 $r_2$  分别是外层炸药的内外半径, $r_1$  也为芯药的半径;

(2)  $D_1$ 、 $D_2$  分别表示芯药和外层炸药各自装填密度下的 C-J 爆速, $D_1 > D_2$ ;

(3) 芯药和外层炸药被引爆后,立刻达到它们各

收稿日期: 2005-11-09; 修回日期: 2006-05-22

作者简介: 肖绍清(1964-),男,博士,高级工程师,从事工程爆破技术研究。e-mail: xiao\_sq@tom.com

自的 C-J 爆速;

(4) 在下端面, 芯药以面起爆方式被引爆。

基于这些假设, 则芯药以面积  $\pi r_1^2$  的平面波、以  $D_1$  的爆速向上传播, 在外层炸药中形成一个锥面波为主的爆轰波, 如图 2 所示的 1/2 轴截面药柱的爆轰波。由于外层炸药的稳态爆速为  $D_2$ , 因此它与芯药药柱轴线的夹角为:

$$\alpha = \arcsin(D_2/D_1) \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为外层炸药爆轰波的径向偏转角。

外层炸药的爆轰波行至不同的阶段, 其爆轰波结构有所差异。为了描述方便, 建立如图 2 所示的 O-xyz 直角坐标系, 芯药的轴心线为 z 轴, x、y 轴建在药柱的下端面即起爆。设 1/2 轴截面药柱在 xOz 坐标系中, 下面分三个阶段对外层炸药爆轰波进行描述。

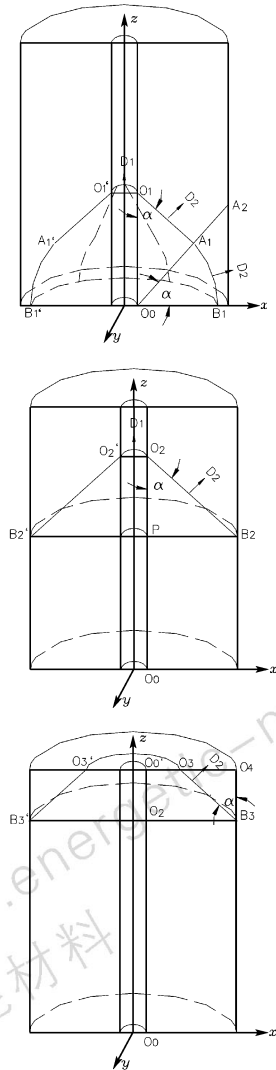


图 2 复合分散药的爆轰波传播过程示意图

Fig. 2 The propagation processes of the detonation wave of the combination burster

第一阶段爆轰波的波迹方程: 设从  $O_0$  点出发的爆轰波  $O_0A_1$  行至外层炸药的母线且与之相交于  $A_2$ , 则  $O_0A_2 = (r_2 - r_1)/\cos\alpha$ 。因此, 当  $0 \leq t \leq (r_2 - r_1)/(D_2 \cos\alpha)$  时, 外层炸药的爆轰波由球面波  $A_1B_1$  和锥面波  $O_1A_1$  所构成, 其方程为:

$$\begin{cases} A_1B_1: (r_1 - \sqrt{x^2 + y^2})^2 + z^2 = (D_2t)^2 \\ O_1A_1: (r_1 - \sqrt{x^2 + y^2})^2 = \text{tg}^2\alpha(z - D_1t)^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$(0 \leq t \leq \frac{r_2 - r_1}{D_2 \cos\alpha})$$

第二阶段爆轰波的波迹方程: 当爆轰波  $O_2B_2$  超过  $A_2$  点以后, 但行至  $O_0'$  点之前, 外层炸药的爆轰波为单一的锥面波  $O_2B_2$ 。由于  $O_2(r_1, D_1t)$ , 则锥面波  $O_2B_2$  的波迹方程形式与  $O_1A_1$  相同, 但时间域不同, 即:

$$(r_1 - \sqrt{x^2 + y^2})^2 = \text{tg}^2\alpha(z - D_1t)^2 \quad (3)$$

$$\left( \frac{r_2 - r_1}{D_2 \cos\alpha} \leq t \leq t_2 \right)$$

式中,  $t_2$  是爆轰波行至  $O_0'$  点的时间, 则将点  $O_0'(r_1, 0, h)$  代入式(3)得:  $t_2 = h/D_1$ 。

第三阶段爆轰波的波迹方程: 当爆轰波  $O_2B_2$  经过  $O_0'$  点之后, 外层炸药的爆轰波为单一的锥面波  $O_3B_3$ 。经过推导得出坐标  $O_3(D_2(t - h/D_1)\cos\alpha, 0, h)$ 。因此, 锥面波  $O_3B_3$  的波迹方程为:

$$x^2 + y^2 = \left[ (z - h)\text{tg}\alpha - D_2\left(t - \frac{h}{D_1}\right)\cos\alpha - r_1 \right]^2 \quad \left( \frac{h}{D_1} \leq t \leq t_3 \right) \quad (4)$$

式中,  $t_3$  为外层炸药爆轰波运行总时间, 将顶点  $O_4(r_2, 0, h)$  代入上式可得出  $t_3 = h/D_1 + (r_2 - r_1)/(D_2 \cos\alpha)$ 。

### 2.3 锥面波上的爆轰参数

从以上可知, 爆轰波传播方向发生  $\alpha$  角度的径向偏转, 但是外层炸药的 C-J 爆速并没有改变, 因此外层炸药的其它爆轰参数不会变化。

如果分散药没有芯药, 而是由外层炸药组成的常规结构的药柱, 那么整个药柱完成爆轰所需时间为  $h/D_2$ ; 如果存在芯药, 那么因为芯药的快速引爆, 使得外层炸药完成爆轰所需时间为  $h/D_1 + (r_2 - r_1)\cos\alpha/D_2$ 。因此, 芯药使整个药柱爆轰完成的时间将缩短  $\Delta t$ , 其计算式为:

$$\Delta t = h/D_2 - [h/D_1 + (r_2 - r_1)/(D_2 \cos\alpha)] \quad (5)$$

因此芯药强化了主体炸药的爆轰瞬时性。

### 2.4 分散药的性能及其设计要求

由于爆轰波传播方向控制爆轰产物质量及能量分

布,这样因复合分散药的爆轰瞬时性及产生径向传播的爆轰波,有利于主体燃料侧向均匀分散;上部燃料所得到的分散药爆炸能相对降低,向上扩散的爆轰产物也相对减少。这些均有利于形成类草帽状云雾,并抑制云雾窜火。

复合分散药的芯药及外层炸药的合理几何尺寸与性能参数的设计和选择要求如下:

#### a. 芯药及外层炸药的半径设计

由于外层炸药是燃料分散的主要能量来源,高能芯药用来引爆外层炸药,因此,外层炸药的内外半径之差应大于芯药的半径,即:  $r_2 - r_1 > r_1$ ,但  $r_1$  不得小于在芯药密度下,芯药能够稳定爆轰的临界半径。

#### b. 芯药及外层炸药爆速的选择

由式(1)可以看出,当  $D_2/D_1 \rightarrow 0$ ,也就是  $D_1 \rightarrow \infty$  或  $D_2 \rightarrow 0$  时,偏转角  $\alpha = 0$ 。

即锥面波几乎转换成完全径向传播的柱面波,这也正是实现复合分散药功能的最理想爆轰波。因此,在复合分散药结构设计中,应选择爆速尽可能高的芯药和爆速尽可能低的外层炸药。但实际应用中,外层炸药爆速的选择不应过低。因为爆速低则单位体积的能量也低,燃料分散所获得的初速也低;外层炸药爆速过低,不利于燃料的有效分散。但从抑制云雾窜火的角度上讲,应选择低爆速、低爆热的外层炸药。

#### c. 芯药及外层炸药几何尺寸的设计要求

为了增强复合分散药的爆轰瞬时性,应使式(5)成立,也就是使  $\Delta t > 0$ ,由此得出芯药半径及外层炸药的外半径、高度,其与芯药和外层炸药爆速之间的关系是:

$$\frac{r_2 - r_1}{h} < \frac{(D_1 - D_2) \cos \alpha}{D_1} = \frac{(D_1 - D_2) \sqrt{D_1^2 - D_2^2}}{D_1^2} \quad (6)$$

#### d. 分散药燃料比

分散药燃料比( $\eta$ )不得小于1%,以使燃料充分分散而形成可爆轰云雾。假设分散药药柱总高度为  $h$ ,芯药及外层炸药的密度分别为  $\rho_1, \rho_2$ ,则  $\eta$  为:

$$\eta = \frac{\pi h [r_1^2 \rho_1 + (r_2^2 - r_1^2) \rho_2]}{m_f} \times 100\% \geq 1\% \quad (7)$$

## 3 实验

### 3.1 复合分散药弹体结构及实验参数

实验中采用  $\Phi 330 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$  的铝合金弹体<sup>[5,6]</sup>,其特点是上端板强度较弱,悬臂式中心爆管,目的是形成类草帽状云雾,以适应二次引信在云雾顶端起爆。

燃料为环氧丙烷(PO)和宏观固态燃料(GT)<sup>[7]</sup>,采用“组合”装填结构,分散药燃料比值范围为:1.37% ~ 1.60%,详细实验参数见表1。

复合分散药的芯药为直径10 mm、密度  $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的压装8701,实测稳态爆速约为  $8400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;外层炸药是低密度的硝基胍(NQ),其爆速与密度的经验关系式为<sup>[8]</sup>:

$$D_{\text{NQ}} = 1.44 + 4.015 \rho_{\text{NQ}} \quad (8)$$

表1 复合分散药及其相关参数

Table 1 The test parameters for burster

No.	fuel composition	loading frame	the explosive of slow detonation velocity (NQ)				combination burster $\eta$			
			$h$	$r_2$	$m_{\text{eo}}$	$\rho_{\text{out}}$	$D_2$	$m_{\text{e ignition}} / \%$	place	
1	PO	common	270	20	305	0.96	5294	350	top	1.37
2	PO	common	270	20	325	1.02	5535	370	end	1.47
3	PO + GT combination		370	28	520	0.59	3809	550	end	1.60
4	PO + GT combination		380	20	470	1.05	5656	500	end	1.44

Note:  $D_2$  is the computation value on the basis of formula (9).  $m_{\text{eo}}$  is the weight of the slow detonation velocity explosive.  $m_{\text{e}}$  is the weight of the combination burster. GT is the macroscopical solid fuel.

### 3.2 复合分散药结构尺寸及性能参数的验算

将芯药8701密度  $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  所对应的爆速  $8400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、表1中NQ密度所对应的爆速代入式(1)求出外层炸药径向爆轰波理论偏转角,然后再将芯药和外层炸药的尺寸数据代入式(6)进行验算,结果见表2。由此可看出,复合分散药所采用的尺寸及参数,符合复合分散药的设计要求。另从表1看出,分散药燃料比均大于1%,符合式(7)的要求。

表2 分散药结构尺寸及性能参数的验算结果

Table 2 The results of the size and parameters of the combination burster

No.	$\alpha$ /(°)	$f(r, h) =$	$f(D_1, D_2) =$	$f(r, h) <$
		$(r_2 - r_1)/h$	$(D_1 - D_2) \cos \alpha / D_1$	$f(D_1, D_2) ?$
1	39.1	0.056	0.287	yes
2	41.2	0.056	0.257	yes
3	27.0	0.062	0.487	yes
4	42.3	0.039	0.242	yes

### 3.3 实验结果

本实验为静爆实验,共进行13发,未发生云雾窜火现象,并且云雾形状、体积满足云雾爆轰要求。下面仅列举其中四发实验结果。图3记录了FAE试验中云雾形成及运动至150 ms的图片。

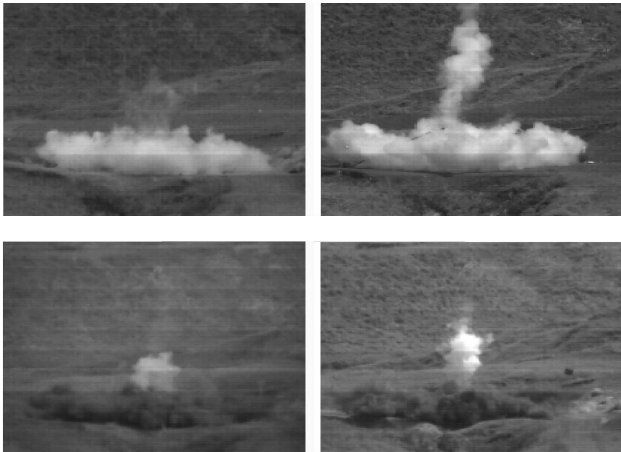


图 3 复合分散药条件下的云雾图片

Fig. 3 The FAE clouds made by the combination burster

由图 3 可以看出,在复合分散药装药结构条件下,虽然燃料及其装填结构有所不同,并且分散药燃料比超过 1.3%,起爆分散药方式也有差异,云雾形状有所不同,但是云雾均未发生窜火,而且形成了较为理想的类草帽状云雾。

对图 3 记录的云雾图片经过 MAW 软件处理,得到云雾的高度和直径,结果见表 3。

表 3 云雾的高度及直径

Table 3 The height and the diameter of the FAE clouds

No.	top FAE cloud		main FAE cloud	
	$R_t/m$	$H_t/m$	$R_z/m$	$H_z/m$
1	3.17	3.04	15.1	2.46
2	2.20	5.50	15.0	2.58
3	3.50	2.95	17.1	2.40
4	2.20	7.80	14.7	2.40

Note:  $R_t$  and  $H_t$  are the diameter and the height of the top FAE cloud,  $R_z$  and  $H_z$  are the diameter and the height of the main FAE cloud, respectively.

由表 1、表 3 可以看出,第一发实验的分散药燃料比小于第二发,但前者的顶端云雾直径反而较大。这表明上端起爆分散药方式可形成较大直径的顶端云雾;然而主云雾的直径和高度几乎不受分散药起爆方式的影响。

对比第三、四发实验,可以发现,第三发实验的分散药主装药(外层炸药)的爆速较低,可是其装药直径和分散药燃料比值均较大,因此其顶端云雾和主云雾的直径与高度均优于第四发实验的云雾。因此,在分散药复合装药结构条件下,云雾尺寸主要受制于外层炸药的装药直径和分散药燃料比。因此较大的分散药燃料比和较高爆速的外层炸药,均有利于燃料的充分分散。

当采用常规结构分散药时,在新型 FAE 弹体条件下,经过 12 发的实验表明,当分散药燃料比值超过

1% 时,有两发发生窜火,而分散药燃料比值不超过 1% 的 10 发云雾窜火率高达 50%。因此,从抑制云雾窜火角度来看,复合分散药具有很好的效果。

尽管云雾形状不尽一致,但二次引信置于云雾顶端起爆时,云雾爆轰理想(见图 4)。

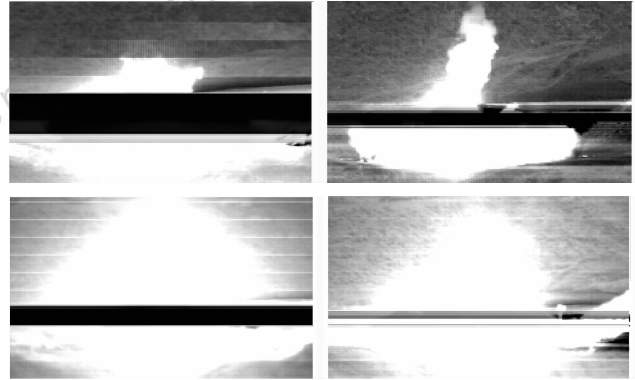


图 4 云雾爆炸情况

Fig. 4 The FAE clouds explosion

## 4 结 论

在  $\Phi 330 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$  的铝合金新型弹体结构条件下,无论燃料采用常规装填结构,还是采用“组合”装填结构,当复合分散药燃料比超过 1.3% 时,云雾不仅没有发生窜火现象,而且形状也能保证云雾正常爆轰。从遏制云雾窜火角度上讲,复合分散药,对于新型 FAE 弹体结构而言使分散药燃料比值突破了 1%,为燃料的充分分散以形成可爆轰云雾奠定了坚实的基础。实验的成功同时也验证了复合分散药的可行性。

### 参考文献:

- [1] Gardner D R. Near-field dispersal modeling for fuel-air-explosives [R]. 0686(1990)SAND 90.
- [2] Richard J Zabelka, Lloyd H Smith. Explosively dispersed liquids [R]. AD-863268.
- [3] Sedgwick R T. Fuel air explosives: A parametric investigation [R]. AD-A159177. 1979.
- [4] Aley M H. Surface-launched FAE mine field clearance round [P]. USP4, 273, 048. 1981.
- [5] 白春华, 蒲加顺. 燃料空气炸药武器燃料装填壳体 [P]. CN, 94112356. 1. 1994.
- [6] 肖绍清. 分散药 T 型装药控制二次引爆型 FAE 云雾研究 [J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 10 - 14.  
XIAO Shao-qing. Study on control cloud of twice-detonating FAE by T-type charge of burster [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(2): 10 - 14.
- [7] 白春华. 固态燃料空气炸药及其装填方法 [P]. CN, 96119346. 8. 1997.
- [8] 九零三所情报室译. LASL 炸药性能数据手册. 1982.

(下转 256 页)

- [18] Baleizao C, Gigante B, Garcia H, et al. Chiral vanadyl Schiff base complex anchored on silicas as solid enantioselective catalysts for formation of cyanohydrins; Optimization of the asymmetric induction by support modification[J]. *Journal of Catalysis*, 2003, 215(2): 199–207.

## Regioselective Synthesis of Mononitrochlorobenzene with Nanosolid Acid Catalyst

XI Li-min<sup>1,2</sup>, YANG Yi-wen<sup>2</sup>

(1. Department of Biological and Chemical Engineering, Taizhou Technical College, Taizhou 318000, China;  
2. National Laboratory of Secondary Resources Chemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The new nanosolid superacid  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_4^{2-}$  was prepared by using nanometer chemical technology. Samples were characterized by XRD and TEM. The results show that  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_4^{2-}$  is superfine solid belonging to nanocrystal and its average size is 40 nm with good distribution. The regioselection and activity of chlorobenzene nitration was raised, when the nanosolid superacid  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SO}_4^{2-}$  was taken as the catalyst. The optimum reaction conditions were found out. Thus activated temperature of catalyst was 600 °C, the reaction was carried out at 50 °C for 6 h with  $n$  (nitric acid)/ $n$  (chlorobenzene) equalling to 3.5 and  $m$  (chlorobenzene)/ $m$  (catalyst) equalling to 20 to get the yield of 78.7%, the ratio between para- and ortho-mononitrochlorobenzene (P/O) reaching up to 4.8.

**Key words:** physical chemistry; catalysis; nanosolid superacid; mononitrochlorobenzene; regioselective nitration

(上接 247 页)

## Controlling Fuel Dispersion of FAE by Combination Burster

XIAO Shao-qing

(Xiamen Blasting Engineering Company, Xiamen 361012, China)

**Abstract:** To substitute the general burster used in FAE bomb, the new combination burster is designed. The fuel dispersion of the FAE bomb is analyzed on the detonation wave and the charge dimension and the detonation velocity and the burster-fuel weight ratio of the combination burster. Moreover, the fuel dispersion and the FAE cloud ignition were experimented under the condition of the PO fuel or the macroscopical solid fuel and the combination burster made of the high detonation velocity explosive 8701 and the slow detonation velocity explosive NQ. The experimental results show that the combination burster can efficiently control the FAE fuel dispersion and restrain the premature-combustion of the clouds, and the FAE clouds are basically strawhat shape and are reliably ignited. Thus it is feasible that the combination burster is used in the FAE bomb.

**Key words:** explosion mechanics; FAE; combination burster; detonation wave; propagation direction; fuel dispersion; control