

文章编号: 1006-9941(2002)03-0121-04

# 几种典型燃料空气炸药威力性能研究

贵大勇<sup>1</sup>, 刘吉平<sup>1</sup>, 冯顺山<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学阻燃材料国家专业实验室, 北京 100081;

2. 北京理工大学爆炸灾害预防与控制国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 采用 VLW 状态方程及其程序对燃料空气炸药 (FAE) 爆压进行计算, 并引入云雾威力因子, 结合试验, 研究了典型液态燃料和固液混合燃料配方对 FAE 爆轰威力性能的影响规律。计算与实验结果相吻合。

**关键词:** 燃料空气炸药 (FAE); 爆轰性能; 燃料组成

**中图分类号:** O381

**文献标识码:** A

## 1 引言

提高威力性能是燃料空气炸药 (FAE) 设计的主要目标。采用液态燃料与固态燃料组成固液混合燃料能够有效提高 FAE 战斗部的威力。此前, 我们应用系统工程理论对高威力 FAE 燃料进行了较系统的优化选择, 选出了适用于 FAE 战斗部的典型液态燃料和固态燃料组分<sup>[1]</sup>。但需要进一步研究 FAE 燃料的配方、配比。

对于液态燃料, 有不少研究者进行过相应 FAE 爆轰参数的计算和比较<sup>[2]</sup>, 而关于固液混合燃料的组成对 FAE 爆轰威力性能的影响及其配方设计报导较少。

本课题将环氧丙烷、乙醚、硝酸异丙酯等典型液态组分和铝粉、镁粉或铝-镁合金粉等固态组分作为研究对象, 通过计算不同配方及不同配比条件下混合燃料的 FAE 爆轰参数和威力因子, 并结合自由场静爆试验结果和文献上的实验数据, 研究了典型 FAE 药剂配方对 FAE 威力性能的影响规律。

## 2 FAE 爆轰性能计算

### 2.1 计算方法

基于维里 (Virial) 理论和相似论建立起来的 VLW 状态方程, 已发展为从常压到几十万大气压力范围均适用的通用状态方程, 其炸药密度适用范围为 0.005 ~

3.5 g · cm<sup>-3</sup><sup>[2,3]</sup>。所以, 对于 FAE 爆轰参数, 本文采用 VLW 爆轰产物状态方程及其程序进行计算。

为比较不同配比条件下 FAE 的爆轰性能, 计算中取各 FAE 的氧平衡条件一致, 氧的量 (或空气的量) 按正好使 FAE 组成中的 H 全部氧化成 H<sub>2</sub>O, Al 全部氧化成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mg 全部氧化成 MgO, C 全部氧化成 CO 进行计算确定, 此时氧平衡 (OB) 为微负氧平衡。

云爆威力主要表现在其超压大小和作用范围的大小, 因此可用云雾区超压值与云雾区面积的乘积 ( $\Delta p \cdot S$ ) 来综合评价燃料能量性能。为此, 引入云雾区威力因子评价 FAE 的综合威力性能, 以比较不同燃料的作用效果。单位质量燃料云雾区威力因子定义为<sup>[1,4]</sup>:

$$F = \frac{\Delta p \cdot S}{W} \quad (1)$$

式中:  $W$  为燃料质量,  $S$  为云雾区面积,  $\Delta p$  为云雾区超压。

在计算中,  $\Delta p = p_{CJ} - p_0$ ,  $p_0$  为大气压力 (0.101 3 MPa),  $p_{CJ}$  值采用 VLW 程序计算所得: 假定云雾形状为圆柱形, 则云雾区面积:  $S = V/h$ 。  $V$  为 FAE 云雾的体积, 近似等于达到上述氧平衡反应条件的空气所占体积。根据实验研究, 云雾高度在 2 ~ 3 m 时, 已能满足对地面目标的毁伤, 因此云雾高度  $h$  取 2.5 m。

### 2.2 液态燃料爆轰性能的计算

根据文献[1], 醚类、环氧丙烷、烯烃、硝酸酯类和烷烃等五类燃料具有较优的综合效能, 适合作为高威力 FAE 液态组分。对于几种典型液态燃料, 爆压 ( $p_{CJ}$ )、爆轰超压 ( $\Delta p_{CJ}$ )、云雾体积 ( $V$ ) 及云雾威力因

收稿日期: 2001-12-24; 修回日期: 2002-04-04

基金项目: 九·五项目“YBZ-1 型高能燃料”资助 (D04BG01)

作者简介: 贵大勇 (1963 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向 (1) 烟火及云爆弹药技术研究 (2) 纳米复合材料研究。

子( $F$ )等参数的计算结果列于表 1。

表 1 典型液态燃料云雾区爆轰参数及威力因子

Table 1 Detonation parameters and power indexes of FAE for typical liquid fuels

燃料	$p_{CJ}/\text{MPa}$	$\Delta p_{CJ}/\text{MPa}$	$V/L$	$F/(\text{N/g} \times 10^{-3})$
正己烷	2.0319	1.9306	805.88	6.2233
1-戊烯	2.0588	1.9575	761.60	5.9633
环氧丙烷	2.3080	2.2067	458.97	4.0512
乙醚	2.1577	2.0564	576.35	4.7408
硝酸异丙酯	3.0357	2.9344	177.70	2.0858
甲基叔丁基醚	2.0540	1.9527	605.82	4.7319
甲醇	2.8254	2.7241	333.2	3.6307
环氧丁烷	2.1356	2.0343	518.31	4.2176
乙醇	2.3496	2.2483	463.58	4.1691
丙酮	2.1763	2.0750	459.59	3.8146
硝基甲烷	8.1890	8.0877	43.70	1.4137
2-硝基丙烷	2.6154	2.5141	269.56	2.7108

从表中计算数据可以看出:

(1)同其它碳氢化合物相比,硝基化合物尽管爆压值很高,但威力因子最小,说明从提高 FAE 综合威力性能来看,硝基甲烷不适宜作为高威力组分。

(2)除硝基甲烷外,其它液态燃料爆压值相差不大,但云雾威力因子却差别较大。因此,与爆压相比,采用云雾威力因子评定 FAE 威力性能更为方便和直观,而且全面。

(3)各典型液态燃料综合威力性能按以下顺序递减:

正己烷 > 1-戊烯 > 乙醚 > 甲基叔丁基醚 > 环氧丁烷 > 乙醇 > 环氧丙烷 > 丙酮 > 甲醇 > 2-硝基丙烷 > 硝酸异丙酯 > 硝基甲烷

### 2.3 固液混合燃料爆轰性能的计算

所研究的典型固液混合燃料中液态组分为环氧丙烷(PO)、乙醚(EE)和硝酸异丙酯(IPN),固态组分为铝粉(Al)、镁粉(Mg)和铝镁合金粉三种金属粉(以下统称金属粉)。对于铝粉(Al)与环氧丙烷(PO)的固液混合燃料,我们曾研究得到 PO/Al 混合燃料中铝粉配比范围 40% ~ 70%<sup>[5]</sup>。作为比较,本研究中参照 PO/Al 混合燃料配比,金属粉占总的燃料比例仍然为 40% ~ 70%。而金属粉中铝与镁的比例可调。不同配方 FAE 的爆压和威力因子计算值列于表 2。图 1 和图 2 为不同液体燃料时,FAE 爆压和威力因子与铝粉含量的关系曲线。

表 2 固液混合 FAE 爆压与威力因子计算结果

Table 2 Calculated results of detonation pressure and power index of solid-liquid mixed FAE

配比/(wt%)			$p_{CJ}/\text{MPa}$			$F/(\text{N/g} \times 10^{-3})$		
液体	Al	Mg	PO	EE	IPN	PO	EE	IPN
100	0	0	2.3080	2.1577	3.0357	4.0512	4.7408	2.0858
70	0	0	3.2364	3.0622	3.5652	4.3304	4.5033	3.6113
60	10	0	3.1042	2.9470	3.4124	4.0575	4.2438	3.3539
50	20	0	2.9738	2.8301	3.2633	3.7962	3.9886	3.1092
30	40	30	2.8445	2.7208	3.0939	3.5441	3.7512	2.8540
30	40	0	2.7154	2.6129	2.9328	3.2998	3.5223	2.6165
20	50	0	2.5881	2.4944	2.7694	3.0655	3.2853	2.3865
10	60	0	2.4556	2.3732	2.5980	2.8325	3.0516	2.1593
0	70	0	2.3194	2.2348	2.4275	2.6029	2.8025	1.9429
60	0	0	3.0764	2.8980	3.5340	4.3022	4.5670	3.4161
50	10	0	2.9591	2.7953	3.3686	4.0482	4.3194	3.1547
40	40	20	2.8429	2.6975	3.2029	3.8024	4.0858	2.9029
30	30	0	2.7255	2.5937	3.0368	3.5618	3.8541	2.6605
20	40	0	2.6098	2.4894	2.8766	3.3305	3.6168	2.4331
10	50	0	2.4790	2.3706	2.7038	3.0864	3.3697	2.2045
0	60	0	2.3304	2.2404	2.5254	2.8275	3.1130	1.9816
50	0	0	2.9501	2.7695	3.4740	4.3037	4.6561	3.1965
40	10	0	2.8404	2.6769	3.3141	4.0591	4.4183	2.9499
50	30	20	2.7322	2.5795	3.1423	3.8208	4.1778	2.7021
20	30	0	2.6226	2.4749	2.9831	3.5870	3.9311	2.4752
10	40	0	2.4926	2.3573	2.8156	3.3312	3.6695	2.2510
0	50	0	2.3525	2.2273	2.6276	3.0694	3.3951	2.0256
40	0	0	2.8418	2.6550	3.4212	4.3184	4.7425	2.9892
30	10	0	2.7351	2.5590	3.2631	4.0752	4.4914	2.7532
60	20	20	2.6205	2.4538	3.1006	3.8233	4.2295	2.5228
10	30	0	2.4955	2.3353	2.9317	3.5626	3.9503	2.2970
0	40	0	2.3500	2.2087	2.7280	3.2795	3.6640	2.0539

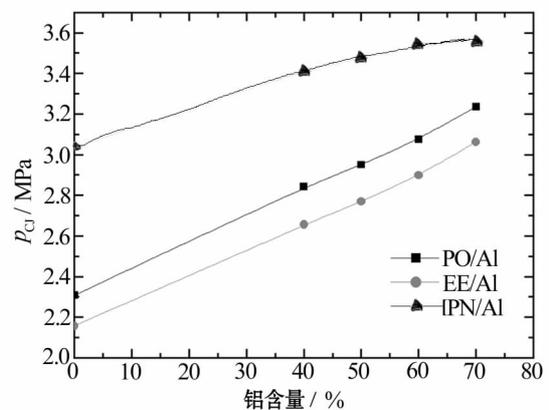


图 1 FAE 爆压与铝粉含量关系曲线

Fig. 1 Curves of detonation pressure of FAE vs. content of Al powder

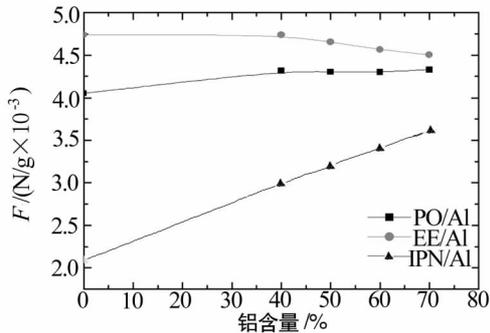


图 2 FAE 威力因子与铝粉含量关系曲线

Fig. 2 Curves of power index of FAE vs. content of Al powder

计算结果表明：

(1) 对于环氧丙烷基和乙醚基固液混合燃料，金属粉含量升高，爆压增加；相比而言，加铝粉对爆压升高作用更明显；在金属粉总含量一定时，随铝粉比例加大，爆压升高。

(2) 对于硝酸异丙酯基固液混合燃料，随铝粉含量的增加，其爆压升高，但不如环氧丙烷基和乙醚基固液混合燃料爆压升高显著；而且随镁粉含量增加，其爆压反而下降，表明在同样的分散条件下，镁粉对威力的贡献还不如液态燃料硝酸异丙酯。

(3) 镁粉的加入也不利于 FAE 威力因子的提高。但可以一定比例的铝镁合金粉作为 FAE 固体燃料部分，利用镁粉低的点火温度可解决铝粉点火问题，又可以达到提高燃料放热量的目的。

(4) 比较而言，铝粉对环氧丙烷基 FAE 威力因子有所提高，对硝酸异丙酯基 FAE 威力因子提高较大，而对乙醚基 FAE 威力因子影响不大，略有下降。

(5) 从爆压和威力因子综合来看，金属粉尤其是铝粉的加入能有效提高 FAE 的威力效应。对于环氧丙烷基和乙醚基 FAE，主要在于能提高其超压效应；对于硝酸异丙酯基 FAE，主要表现在对威力因子综合效应的提高明显。

(6) 爆压计算数据表明：在相同配比时，硝酸异丙酯/金属粉 > 环氧丙烷/金属粉 > 乙醚/金属粉；

威力因子顺序为：乙醚/金属粉 > 环氧丙烷/金属粉 > 硝酸异丙酯/金属粉。

### 3 威力性能试验

#### 3.1 硝酸异丙酯基混合燃料

对硝酸异丙酯基固液混合燃料进行一次引爆静爆试验，测试爆轰冲击波超压。超压测试仪器包括：扬

州无线电二厂生产的 CY-YD-205 型传感器，YE5860 型电荷放大器和四川实时信号研究所的 CS20186 型 12 通道瞬态记录仪。

试验燃料：IPN/Al-Mg；IPN/Mg。两种配方中，硝酸异丙酯与金属粉比例均为 1 : 1。试验装药量：2 kg。自由场静爆试验超压测试结果如表 3 所示。

表 3 不同金属粉的硝酸异丙酯基 FAE 超压测试结果

Table 3 Measured results of over-pressure of FAE for different fuels

配方	$\Delta p/\text{MPa}$		
	3 m	5 m	7 m
IPN/Mg	0.344	0.032	0.009
IPN/Al-Mg	0.379	0.042	0.020

试验表明：固液混合燃料 IPN/Al-Mg 与 IPN/Mg 相比，在 3 米处前者的超压比后者高 10.2%，在 5 米处前者的超压比后者高 31.3%。而根据表 2 计算结果，在固液组分比例相同，IPN/Al-Mg 中 Al/Mg 的比例在 3 : 2 和 2 : 3 的范围之内时，IPN/Al-Mg 的爆轰超压比 IPN/Mg 的相应值高 14.1% ~ 20.4%。试验结果与理论值基本吻合。

#### 3.2 环氧丙烷液态燃料

对环氧丙烷液态燃料的计算结果与文献实验数据进行比较，如表 4 所示。

表 4 计算数据与实验数据的比较

Table 4 Comparison of calculated data with experimental results

实验数据 <sup>[6]</sup>		计算数据	
$\Delta p_{\max}/\text{MPa}$	PO/wt%	$\Delta p_{\max}/\text{MPa}$	PO/wt%
2.109	9.62	2.2067	9.62

由表中数据可见，对于单一环氧丙烷燃料，本文爆轰超压计算值与试验测得超压峰值结果吻合较好。

### 4 结论

(1) 采用 VLW 状态方程及其程序计算了各典型液态燃料的爆轰压力，并引入相应的云雾威力因子，作为综合评价燃料能量性能的参数。与爆压相比，采用云雾威力因子评定 FAE 威力性能更为方便和直观，而且全面。

(2) 计算结果表明，各典型液态燃料的 FAE 威力性能按以下顺序递减：正己烷 > 1-戊烯 > 乙醚 > 甲基叔丁基醚 > 环氧丁烷 > 乙醇 > 环氧丙烷 > 丙酮 > 甲醇

>2-硝基丙烷 > 硝酸异丙酯 > 硝基甲烷。

(3) 对典型固液混合燃料进行了配方设计计算。三种金属粉尤其是铝粉的加入能有效提高 FAE 的威力效应。对于环氧丙烷基和乙醚基 FAE, 主要在于能提高其超压效应; 对于硝酸异丙酯基 FAE, 主要表现在对威力因子即综合威力效应的明显提高。

(4) 对于所研究的铝粉、镁粉和铝镁合金粉, 其爆压计算值大小顺序为: 硝酸异丙酯/金属粉 > 环氧丙烷/金属粉 > 乙醚/金属粉; 威力因子顺序为: 乙醚/金属粉 > 环氧丙烷/金属粉 > 硝酸异丙酯/金属粉。

(5) 典型燃料的 FAE 超压计算值与试验结果基本一致, 表明所用计算方法合理, 可供 FAE 战斗部燃料配方设计参考。

#### 参考文献:

- [1] 贵大勇. 固液燃料混合 FAE 战斗部设计研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2001.
- [2] HE Bi, LONG Xin-ping, JIANG Xiao-hua, et al. Calculation detonation properties of FAE with VLW EOS [A]. Proceedings of the Sixteenth Symposium on Explosives and Pyrotechnics [C], 1997: 8-1-8-5.
- [3] 吴雄. 应用 VLW 状态方程计算炸药的爆轰参数[J]. 兵工学报, 1985(3): 11-19.
- [4] 贵大勇, 冯顺山, 刘吉平, 等. FAE 爆轰参数计算与性能设计探讨[J]. 火箭与制导学报, 2000(1): 31-35.
- [5] GUI Da-yong, LIU Ji-ping, FENG Shun-shan. Study on formulation of solid-liquid mixed fuels for FAE [A]. Proceedings of the fourth International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics [C], Shaoxing, 2001: 347-351.
- [6] Sedgwick R T, Kratz H R. Fuel air explosives: a parametric investigation [A]. Proceedings of the 10th Symposium on Explosives and Pyrotechnics [C], San Francisco, 1979.

## Research of Power Performance of Several Typical Fuel-air Explosives

GUI Da-yong<sup>1</sup>, LIU Ji-ping<sup>1</sup>, FENG Shun-shan<sup>2</sup>

(1. National Laboratory of Flame Retardant Materials, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. National Key Laboratory of the Prevention and Control of Explosion Disasters, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The detonation pressures of several typical fuel-air explosive (FAE) were calculated with VLW EOS and its code, and cloud power indexes were introduced for typical liquid fuels and solid-liquid mixed fuels. The law of effect of fuel compositions on detonation performances of FAE is obtained. The results show that the calculated data are in good agreement with experimental results.

**Key words:** fuel-air explosive (FAE); detonation performance; fuel composition