

## 少烟推进剂配方优化设计<sup>\*\*\*</sup>

彭培根 张仁 刘德辉  
王振芳 彭网大

(材料科学与应用化学系)

**摘要** 本文报道了关于降低固体火箭发动机喷气羽烟对微波、激光制导信号的干扰和衰减的研究成果——一种少烟 HTPB 推进剂。它具有低压点火性能良好,燃烧稳定,能提高排气羽烟对微波和激光透过率三倍以上。

**关键词** 少烟推进剂, 优化设计, 喷气羽烟, 微波衰减

**分类号** V512

火箭发动机羽烟对微波、激光和红外制导信号产生干扰和衰减,使信号失真甚至中断,严重地影响导弹命中精度。例如美国早期的北极星导弹在发射时曾使微波信号中断数十秒钟,若微波能量衰减达到6分贝,则所需雷达天线的面积需增大一倍才能保证信号强度如初<sup>[1]</sup>。在战术导弹方面如空-空导弹,由于火箭发动机喷出的高温燃气烟雾,严重地影响射手观察视线和导弹跟踪方向。为此,火箭喷气羽烟问题受到各国火箭推进技术人员的关注<sup>[2,3]</sup>。少烟固体推进剂是八十年代以来重要的研制课题。

### 1 少烟推进剂配方优化设计

目的是从理论上确定出一个少烟丁羟(HTPB)推进剂的最佳配方。为此,我们应用复杂体系平衡组成最小自由能计算法,精确计算出一系列 AP(高氯酸铵)/NA(硝胺)/Al(铝粉)/HTPB(端羟基聚丁二烯)推进剂的能量参数和燃烧产物组成。得出 AP、NA、Al 含量变化对能量(指比冲和平均分子量)、HCl 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 产物的变化趋势,进而进行正交设计得出最佳组成<sup>[4]</sup>。

#### 1.1 理论预估

从大量的计算看出:在一定范围内,用 NA 代替 AP 能获得比冲值  $I_s$  的提高。但当 NA 含量超过 20% 以后,能量呈下降趋势。燃温  $T_c$  随 NA 含量增加而下降,但当 NA 含量超过 20% 时,下降更陡峭。燃气平均分子量  $\bar{M}_c$ , 在 NA 含量为 26—30% 间有最小值,而 NA 含量在 20% 以前下降很陡峭。正是由于 NA 百分比含量小于 20 时  $T_c$  下降速度较缓慢,而  $\bar{M}_c$  下降较快,故导致  $I_s$  的增大。但是,继续增大 NA 含量和减少 AP 含量,由于推进剂的氧平衡下降很多,燃烧不完全,  $T_c$  下降很多,故推进剂的比冲值降低。

我们认为,在兼顾能量的情况下,重点是要少烟。即所求少烟配方的理论比冲值不要低于 2453N·S/kg, 否则能量过低失去实用价值。配方中 Al 粉含量太低,势必导致比冲降低。但从另一方面看, Al

• 部委级科技进步二等奖  
•• 1992年4月17日收稿

粉含量减少可使  $T_c$  和  $\bar{M}_c$  降低, 这样就减少了对燃烧室和喷管的烧蚀作用, 同时也减少了两相流损失, 使实际能量效率有所提高。

上述预估结果的分析, 可归纳出以下结论:

(1) 推进剂中 HCl 生成量是氧化剂高氯酸铵造成的。用 NA 代替一部分高氯酸铵可以显著降低 HCl 的生成量, 适当地增加 NA 含量 (小于 20%) 还可以提高比冲值。但含量过高时, 推进剂的比冲值降低。要保证少烟推进剂理论比冲值大于  $2453 \text{N} \cdot \text{S}/\text{kg}$ , NA 的含量应控制在 30~45% 之间。

(2) 燃烧产物中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的生成量取决于 Al 粉的含量。要减少产物中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Al 粉量必须少加。但是, Al 粉含量过低又会导致比冲值下降过多, 太少的 Al 粉含量又会使燃烧不稳定加剧。所以, 少烟推进剂中, Al 粉含量应控制在 10% 以下, 但不要低于 5%。

(3) 同一类配方中, HCl 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的生成量的变化趋势是相反的, 很难找到同时满足 HCl 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  生成量最低的要求。

### 1.2 正交设计最佳配方

在理论预估分析的基础上, 用正交设计来求得一个 HCl、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  生成量最少, 而比冲值较高的最佳配方。

正交设计表及计算结果如表 1 和图 1 所示。

表 1 因素的水平表

因素	A (NA)	B (Al)
1	20%	16%
2	35%	8%
3	40%	6%

如果考虑重点是少烟, 而比冲属次要地位, 则有: 对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的生成量  $N_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ , 已知 Al 粉含量是其最主要最强烈的因素, 因此取  $B_3$  水平最合适。NA 含量是影响  $N_{\text{HCl}}$  的主要因素, 但对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的生成量影响很小。如果选择  $A_3$  水平, 能使  $N_{\text{HCl}}$ 、 $N_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  最小, 但也使  $I_s$  值最小。比冲值

下降的相对幅度远小于  $N_{\text{HCl}}$  下降的幅度, 即比冲值  $I_s$  的稍稍降低换来的是  $N_{\text{HCl}}$  的大幅度减少。事实上, 即使取  $A_3$  水平, 比冲值  $I_s$  仍然稍大于  $2453 \text{N} \cdot \text{S}/\text{kg}$ 。因此, 选取  $A_3$  水平最能满足少烟配方的要求。

正交设计得出的最佳组成应为:  $A_3$ 、 $B_3$  即含 NA40%、AP40% 和 Al6% 的 HTPB 推进剂。

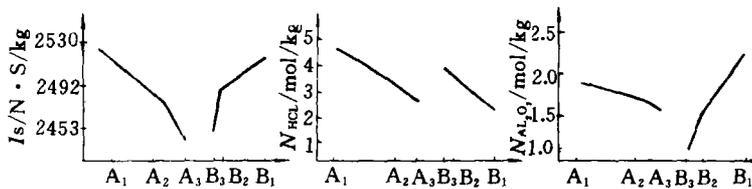


图 1 二因素三水平分析图

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 实验推进剂的组成

优化设计获得的最佳配方中只含有推进剂的一些基本物质。要改善其它性能, 还需要加入少量添加剂。本实验设计 5 组添加剂, 其配方如表 2 所示。表中: TDI—甲苯二异氰酸酯, MAPO—氮丙啶, KZ—癸二酸二辛酯,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ —指燃烧稳定剂、降压力指数剂、燃速催化剂。

表 2 各实验推进剂的配方

配方	基础配方 (%)							添加剂 (%)				
	AP	NA	Al	HTPB	TDI	MAPO	KZ	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>
1 <sup>#</sup>	39.5	39	6	14	14	14	14	1.5	1	/	/	/
2 <sup>#</sup>	39.5	39	6	14	14	14	14	1.5	1	1.5	/	/
3 <sup>#</sup>	39.5	39	6	14	14	14	14	1.5	/	/	1.5	/
4 <sup>#</sup>	38.5	38	8	14	14	14	14	1.5	1	1.5	/	/
5 <sup>#</sup>	39.5	39	6	14	14	14	14	1.5	/	1.5	/	1.5
6 <sup>#</sup>	70	0	16	14	14	14	14	/	/	/	/	/

## 2.2 实验结果

实验结果如表 3 所示。

表 3 实验测定的燃速  $\gamma$ (cm/s)、压力指数和对激光、微波的少烟分数

配方号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>
压力 8.82MPa(90kg/cm <sup>2</sup> )	0.620	0.863	0.662	0.881		
压力 6.86MPa(70kg/cm <sup>2</sup> )	0.570	0.811	0.585	0.787	0.917	0.649
压力 5.88MPa(60kg/cm <sup>2</sup> )	0.509	0.759	0.536	0.747	0.835	0.600
压力 4.908MPa(50kg/cm <sup>2</sup> )	0.478	0.701	0.501	0.670		0.545
压力 3.923MPa(40kg/cm <sup>2</sup> )	0.458	0.619	0.449	0.602	0.692	0.505
压力 2.452MPa(25kg/cm <sup>2</sup> )					0.503	
压力指数 $n$	0.385	0.413	0.476	0.471	0.478	0.494
对激光少烟分数 $\beta$		60.2%				0.0%
对微波少烟分数 $A$		70.4%				0.0%

## 2.3 实验结果分析

### (1) 燃速与压力指数

1、2、4 号配方中加入了 R<sub>1</sub> 和 R<sub>2</sub>，以增加低压下燃烧稳定性和降低压力指数；2、4 号配方中加入 R<sub>3</sub>，3 号配方中加入 R<sub>4</sub>，以提高燃速，改善添加 NA 后燃速下降的影响。比较 6.86MPa 下的燃速可知，1 号配方最低，2、4 号配方的燃速都有较大的提高。加入 R<sub>4</sub> 的 3 号配方燃速提高较少。1、2 号配方比 3 号配方的燃速压力指数分别低 0.09 和 0.06，说明 R<sub>2</sub> 起到了降低压力指数的作用，从 2、4 号配方的压力指数可以看出，加入 R<sub>3</sub> 提高燃速的同时也会使压力指数有所升高。

从燃速和压力指数角度来看，2 号配方最令人满意，其燃速较高而压力指数却较低。

### (2) 燃烧稳定性

Al 粉含量减少，当 Al 粉含量少到一定程度时，就会出现燃烧的不稳定性。实验表明，在不含 Al 粉或含 Al 粉较少的推进剂中，加入 R<sub>1</sub> 之类的耐熔添加剂可以增加声振系统中的微粒阻尼，克服燃烧的不稳定性。加入少量的 R<sub>1</sub> 对不稳定燃烧的抑制效果比加入等量的 Al 粉好，烟雾也少。为此，在 5 个实验配方中都加入了 R<sub>1</sub>。另外，R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub> 也是改善燃烧稳定性的物质。

实验记录了每个配方的药条，在 6.86 和 3.92MPa 压力下的燃烧波形图。从波形图上看，在 3.92MPa 压力下，2、5 号配方的燃烧稳定性强于 1 号配方；5 个配方在 6.86MPa 压力下燃烧都很稳定。

5 号配方中使用了点火性能较好的 R<sub>5</sub> 和燃速催化效果最好的 R<sub>3</sub>，从而低压点火性能好，且提高燃速。

### (3) 实验配方的喷气羽烟对微波衰减的测量

所建立的测量装置，在被测衰减量不超过 20 分贝(dB)的情况下，系统误差不大于 0.05 分贝。测得的衰减量一般为几个分贝。可见系统误差与被测量相比是比较小的，结果是可信的。

图 2 是实验测得的 AP/NA/Al/HTPB 推进剂喷气羽烟的微波衰减量随时间的变化曲线。

由图 2 看出,推进剂点火一段时间后,微波衰减达到一最大值,其后基本保持不变。这一结果符合理论分析,因为推进剂点火以后就进入稳定燃烧阶段,形成羽烟的各种参数基本上不变化,因而对微波的衰减自然会稳定于某一值。

便于对比,对于相同基础配方的推进剂(添加剂不同),一律在同一高度下测量。对于不同基础配方的推进剂,改变测试高度(距离),以保证衰减值接近于峰值。

要获得测量数据的良好平行性,要求发动机每次喷出的羽烟大小、形状和方向相同。实际情况很难保证一致,为此需进行多次重复性实验(5—8次),减少偶然误差的影响。

实验结果表明:含有添加剂的实验误差值  $S$  ( $S = \sigma / \sqrt{n}$ ,  $\sigma$  为标准偏差,  $n$  代表重复测量次数) 差别比较大;中等 Al 含量配方的  $S$  值比较小,即数据平行性好。

5 组少烟 HTPB 推进剂的组成和测得的喷气羽烟对微波的衰减值如表 4、5 所示。

由表 5 可知,4 号配方喷气羽烟对微波的衰减值最小,与 1 号配方(一般 HTPB 推进剂)相比衰减值减少了 73.5%;与 3 号少烟配方相比又减小 41.1%。这是电子捕获剂的效应。5 号配方能量高且低衰减。

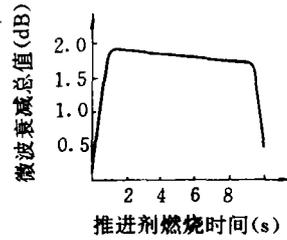


图 2 微波衰减与时间关系

表 4 少烟丁羟推进剂配方的组成

组 成	配方中各组分的重量百分含量					
	AP	Al	NA	HTPB+MAPO+TDI	增塑剂	添加剂(外加)
1#	70	16		11.5	2.5	
2#	41	6	39	11.5	2.5	
3#	40	7	39	11.5	2.5	R,1 1
4#	40	7	39	11.5	2.5	PG9 2.5
5#	53	9	23	11.5	2.5	PG9 2.5

注: PG9—为某电子捕获剂。

表 5 喷气羽烟微波衰减的测量结果(dB)

配方号	1#	2#	3#	4#	5#
衰减值 $\bar{A}$	2.34	0.740	1.12	0.620	0.975
测量误差 $S$	0.101	0.028	0.082	0.040	0.033
以 1# 为基的少烟分数	0.0%	68.4%	52.1%	73.5%	58.3%
以 3# 为基的少烟分数			0.0%	41.1%	11.9%

#### (4) 少烟 HTPB 推进剂燃气烟雾对激光的透过率

推进剂样品配方如表 4 所示,其燃气对激光衰减的实测结果示于表 6 中。

表 6 中,  $\beta$  为衰减系数,即

$$\beta = \frac{J_0 - J}{J_0}, \quad J_0 = J_s + J_0$$

其中:  $J_s$  ——被吸收的光强度,  $J$  ——透射光强度。

表 6 少烟推进剂燃气对激光的衰减

衰减测试	测量次数	每次衰减值 $\beta_i$	平均值 $\bar{\beta}$	标准偏差	少烟分数
1 <sup>#</sup>	1, 2, 3	0.92, 0.90, 0.93	0.92	0.021	0%
2 <sup>#</sup>	1, 2, 3	0.42, 0.38, 0.40	0.40	0.025	56.6%
3 <sup>#</sup>	1, 2, 3	0.48, 0.49, 0.42	0.46	0.031	50.0%
4 <sup>#</sup>	1, 2, 3	0.41, 0.44, 0.40	0.42	0.027	54.6%
5 <sup>#</sup>	1, 2, 3	0.60, 0.60, 0.64	0.61	0.019	33.2%

从表 6 看出, 少烟 HTPB 推进剂的燃气烟雾对激光的透过率明显高于一般 HTPB 推进剂, 如 2、4 号配方比 1 号配方的燃气烟雾减少 55% 以上。

### 3 结 论

研制出的少烟丁羟推进剂的最佳配方, 其理论比冲值高于 2462N · S/kg, 主要性能优越, 尤其低压点火性能良好。该推进剂的喷气羽烟对微波和激光的衰减比一般丁羟推进剂分别降低 70% 和 60% 以上, 喷口燃温下降 40%。研制出的添加剂使推进剂低压点火容易且燃烧稳定。该推进剂的原材料易得, 成本低, 可利用现有丁羟推进剂的生产设备批量生产。

### 参 考 文 献

- 1 Smoot LD, Seliga T. J. Rocket Exhaust Plume Radar Attenuation and Amplitude/phase Noise. J. Spacecraft and Rockets, 1967, 4(6): 774~780
- 2 Erans GI. Minimum Smoke Solid Propellant Rocket Motors. AIAA paper, 72~1192
- 3 US 4, 1981, 318, 270
- 4 彭培根. 高氯酸铵/硝酸系复合推进剂燃烧特性研究. 推进技术, 1988, (5): 52~56

## Optimization on Composition of Reduced Smoke Propellant

Peng Peigen Zhang Ren Liu Dehui

Wang Zhenfang Peng Wangda

(Department of Material Science and Applied Chemistry)

### Abstract

In this paper, the research results of reducing interferences and attenuations of solid rocker motor exhaust plume to microwave and laser guidance signal have been reported. The results include: reduced smoke HTPB propellants with good ignition properties at low pressure and good steadiness of combustions, which make the transmissivities of both microwave and laser to exhaust plumes increase by a factor of 3.

**Key words** optimization, microwave attenuation, reduced smoke propellant, exhaust plume.