

文章编号:1006-9941(2008)06-0721-03

## 铝粉含量及粒径对 CMDB 推进剂性能的影响

陈雪莉, 王 瑛, 王 宏, 孙 美

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**研究了 Al 粉的含量以及纳米级 Al 粉(粒径 < 100 nm)和普通 Al 粉(粒径 12 ~ 15  $\mu\text{m}$ )对浇铸复合改性双基(CMDB)推进剂能量性能、燃烧性能的影响,并探讨了该类推进剂的燃烧机理。结果表明,随着 Al 粉含量的增大,CMDB 推进剂的能量提高,Al 粉的最佳添加量为 8%;当普通粒径 Al 粉与纳米 Al 粉以 1:1 级配时,CMDB 推进剂低压段燃速大幅提高,7 ~ 15 MPa 压强范围内的压力指数降至 0.45 以下。

**关键词:**物理化学; CMDB 推进剂; 纳米 Al 粉; 燃烧性能

**中图分类号:**TJ55; O64; V512

**文献标识码:**A

### 1 引言

Al 粉是固体推进剂中常用的金属燃料,可大幅提高固体推进剂的能量水平,改善或调节固体推进剂的燃烧性能及其他性能<sup>[1]</sup>。目前国内外的研究表明,Al 粉的粒度是决定其作用效果的关键因素之一,它影响着推进剂的燃烧性能。

Al 粉的含量与粒径对 HTPB 复合体系推进剂性能的影响研究国内外已有许多报道,O. G. glotov 和 M. W. beckstead 等<sup>[2]</sup>的研究结果表明,在固体推进剂中用纳米 Al 粉取代部分普通 Al 粉,可以非常有效地提高燃速,减少粒子凝聚,促使铝粉完全燃烧。M. M. Mench<sup>[3]</sup>认为,以纳米 Al 粉取代丁羟推进剂中常规 Al 粉后,不仅能提高推进剂的能量,而且能明显提高含铝固体推进剂的燃速和降低燃速压强指数。夏强<sup>[4]</sup>等人研究了超细铝粉在 AP/HTPB 推进剂中的燃烧特性,发现小于 1  $\mu\text{m}$  的超细铝粉在低压下(2.94 ~ 8.83 MPa)可显著提高推进剂燃速,并且降低压强指数。

Al 粉的含量与粒径对浇铸改性双基推进剂性能的影响研究相对报道较少,且由于配方体系的不同,作用效果也不同。因此,本实验就纳米级 Al 粉(粒径 < 100 nm)及普通 Al 粉(粒径 12 ~ 15  $\mu\text{m}$ )在淤浆浇铸 CMDB 推进剂中的应用进行了研究,以供配方设计工作者参考。

### 2 实验

#### 2.1 配方组成及制备工艺

基础配方(质量分数): NC + NG: (47% ~ 57%);

RDX(20% ~ 35%); Al(0 ~ 15%); 燃烧催化剂(3.5% ~ 4.5%); 其它助剂(4.5% ~ 6.5%)。采用淤浆浇铸工艺。

#### 2.2 实验方法

##### 2.2.1 燃速测定

将  $\Phi 5 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  药条包覆后,用靶线法恒压燃速仪在氮气氛围中测燃速,每点测三发,有异常者补测一至二发。

##### 2.2.2 燃烧火焰结构单幅照相实验

该方法是用来拍摄推进剂在不同压力下稳态燃烧时的火焰结构照片。把没有包覆的 1.5 mm  $\times$  5 mm  $\times$  15 mm 样品垂直安装在点火架上,然后放入四视窗透明燃烧室,充氮气达预定压力,并形成自下而上的流动氮气气氛,以保证样品燃烧室火焰的清晰度,同时用镍铬丝从上端点燃试样,在适当的时候启动照相机拍照,即可得到推进剂稳态燃烧时的火焰照片。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 Al 粉含量对推进剂能量及燃烧性能的影响

添加高能氧化剂及高能金属燃料是提高固体推进剂能量最常用的手段。要使中能(2465.4  $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ )改性双基推进剂高能化(2616  $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上),单纯依靠添加高能氧化剂是难以现实的。因此,本研究在推进剂中加入 Al 粉以提高推进剂的能量特性。为此我们考察了普通 Al 粉(粒径 12 ~ 12  $\mu\text{m}$ )添加量对推进剂能量及燃烧性能影响,实验结果见表 1。

表 1 数据表明,当 Al 粉含量从 0 增加到 8% 时,推进剂能量显著提高,而压强指数变化不大。当 Al 粉由 8% 增加到 15% 时,推进剂能量提高不显著,压强指数反而有增大的趋势。因此综合考虑能量性能和燃烧性能,本研究推进剂配方中适宜的 Al 粉添加量应为 8% 左右。

收稿日期:2008-04-16;修回日期:2008-08-25

作者简介:陈雪莉(1971-),女,工程师,从事固体推进剂配方及燃烧特性研究。e-mail: dahai99 - 2005@163.com

### 3.2 Al粉粒径对推进剂燃烧性能的影响

目前国内外<sup>[2-4]</sup>的研究表明,金属粉的粒径是决定其作用效果的关键因素之一,它影响着推进剂的燃烧性能。而铝粉粒径对推进剂燃速的影响因推进剂体系的不同而不同,在HTPB复合推进剂体系与双基体系有时表现出相反的规律。而且,相同体系也会因配方组成的差别,表现出不一样的影响幅度。下面讨论Al粉粒径对CMDB推进剂燃烧性能的影响规律,为了便于比较实验结果,将推进剂燃速增长率 $C$ 定义为Al粉对该推进剂燃速增长率,故有:

$$C = \frac{r - r_0}{r_0} \times 100\%$$

式中, $r$ 为含Al粉的推进剂燃速; $r_0$ 为不含Al粉的推进剂燃速。

纳米级Al粉(粒径<100 nm)与普通Al粉的粒径(粒径12~15  $\mu\text{m}$ )级配对推进剂燃烧性能影响实验见表2。

由表2看出,Al粉的加入,使推进剂的燃烧性能发生了较大的变化。当普通Al粉与纳米级Al粉单独作用时,推进剂燃速波动大,压力指数均大于0.60。加入普通Al粉后,燃速增长率 $C$ 出现了负增长,这种负增长随着压力的升高逐渐变小(由-14.2%增加到-0.04%)。加入纳米级Al粉后低压段仍为负增长,但当压力增到13 MPa以上时,燃速增长率 $C$ 则迅速增加(由8.1%增加到16.6%)。而当普通Al粉与纳米铝

粉以1:1级配时,推进剂低压段燃速大幅度的提高,高压段燃速则变化不大,因而降低了压力指数。后两个配方也不同程度地提高了推进剂的燃速,但相比之下本研究中普通Al粉与纳米铝粉的合理配比应为1:1。

由此可见,在推进剂中Al粉的粒径并非越细越好,其粒径应该有一个合理的分布范围,只有确定其最佳粒径配比才能在提高能量的同时改善推进剂的燃烧性能。

### 3.3 Al-CMDB推进剂的燃烧机理

利用单幅照相实验来拍摄推进剂在不同压力下稳态燃烧时的火焰结构照片(见图1)。

CMDB推进剂燃烧火焰照片(见图1a)显示推进剂燃烧时均有厚度不同的暗区,且随压力的增高暗区的厚度变薄甚至消失,气相区向表面的热反馈增加,促进了凝聚相的快速升温及分解反应。当配方中加入8%的Al粉后,推进剂燃烧时具有非常特殊的烟花状火焰(见图1b),这主要是由于配方中Al粉的燃烧造成的。Al粉首先在燃烧表面融化形成发光的熔融态颗粒,而后从表面向气相区喷射并燃烧形成亮球,在表面上方自下而上(气流方向)形成直线轨迹。

笔者认为,燃烧表面温度主要受气相反应热释放及热辐射的影响,压力较低时由于Al粉熔融吸收了大量的热,从而使燃面温度降低导致燃速降低。普通Al粉与纳米级Al粉相比,根据纳米材料的特点,低压段由于纳米级Al粉熔点较低,比普通Al粉更容易形成

表1 不同含量的Al粉对推进剂能量及燃烧性能的影响

Table 1 Effect of content of Al on the combustion characteristics and energy properties of the propellant

$\omega_{\text{Al}}$ /%	$r/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$								$n_{3-22}$	$I_{\text{sp}}$ / $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$
	3 MPa	7 MPa	10 MPa	13 MPa	15 MPa	18 MPa	20.5 MPa	22 MPa		
0	8.03	15.38	19.58	21.49	22.49	25.17	27.65	29.24	0.62	2473.52
5	8.24	14.92	17.43	21.01	22.40	25.93	29.24	30.77	0.65	2578.38
8	7.03	13.12	16.77	20.60	22.46	26.32	29.30	32.05	0.69	2613.66
10	7.11	12.77	17.02	20.49	22.57	26.74	30.40	32.26	0.76	2633.26
15	8.26	14.14	18.76	24.04	26.60	32.05	35.97	38.02	0.78	2673.44

表2 铝粉的粒径对推进剂燃烧性能的影响

Table 2 Effect of particle size of Al on the combustion characteristics of the propellant

1 MPa		3 MPa		7 MPa		10 MPa		13 MPa		15 MPa		$n$
$\omega_{\text{common Al}}$ /%	$\omega_{\text{nano Al}}$ /%	$r$ / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$C$ /%	$r$ / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$C$ /%	$r$ / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$C$ /%	$r$ / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$C$ /%	$r$ / $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$C$ /%	
0	0	8.03	/	15.38	/	19.58	/	21.49	/	22.47	/	0.49
1	0	7.03	14.2	13.98	9.1	16.77	14.4	20.60	4.1	22.46	-0.04	0.63
0	1	6.54	18.6	14.28	7.2	19.28	1.5	23.23	8.1	26.20	16.6	0.78
1	1	11.12	38.4	19.00	23.5	22.51	15.0	23.94	11.4	26.46	17.8	0.41
1	1.5	10.34	28.8	18.52	20.4	21.96	12.2	23.85	10.9	26.37	17.3	0.46
1.5	1	9.85	22.7	17.27	12.3	21.08	7.6	23.76	10.5	26.04	15.8	0.53

Note: The content of Al powder is 8%.

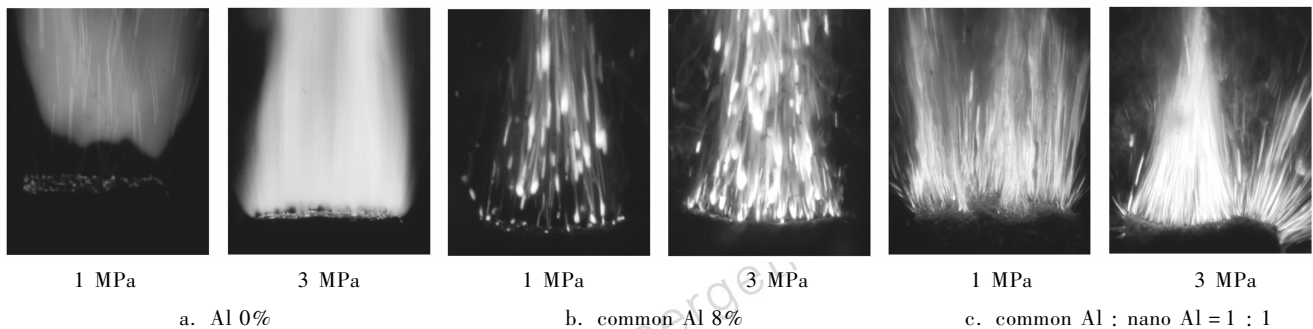


图1 含铝粉与不含铝粉的CMDB推进剂不同压强下的火焰结构

Fig. 1 Flame structures of the CMDB propellants with and without Al powder at different pressures

熔融物,覆盖在燃烧表面,因而燃速降低比添加普通Al粉更加严重,随着压力的升高气相反应的热反馈增大使固相反应加快,火焰均匀细密。在高压段,由于纳米级Al粉的低熔点,高反应活性,气相反应的热释放促使固相反应更为剧烈,从而使其迅速被喷射燃烧,减少了粒子的凝聚,燃烧更为完全,因而比含普通Al粉推进剂燃速高。而当二者以1:1的比例加入后(见图1c),粗细粒径则可能存在着某种协同作用(有待进一步研究),使推进剂低压段燃速大幅度提高,高压段燃速变化不大,从而压力指数降低。

#### 4 结论

(1) 添加Al粉能提高CMDB推进剂的能量,当Al粉含量小于8%时,固体推进剂的能量随铝粉含量的增加而增加,当含量大于8%时,能量增加缓慢甚至不增加,却使推进剂压力指数增大。

(2) 加入普通粒径的Al粉,在本研究压力范围内,降低了低压的燃速,高压时燃速基本不变。纳米级Al粉的加入,降低了低压段燃速,提高了高压段燃速。两种粒径Al粉以1:1的比例级配时,能够大幅度提高低

压段燃速,高压段燃速变化不大,从而降低压力指数。

#### 参考文献:

- [1] 王长喜. 固体推进剂中铝粉的燃烧行为[J]. 飞航导弹, 1992(4): 47-50.
- [2] Glotov O G, Beckstead M W. Agglomerate and oxide particles generated in combustion of Alex containing solid propellants[C] // 31th Int. Annu. Conf. ICT. 2000, 130: 1-15.
- [3] Mench M M. Propellant burning rate enhancement and thermal behavior of ultra-fine aluminium powders (Alex) [C] // 29th Int. Annu. Conf. ICT. 1998, 30: 1-15.
- [4] 夏强, 李疏芬, 王桂兰, 等. 超细铝粉在AP/HTPB推进剂中的燃烧研究[J]. 固体火箭技术, 1994(4): 35-42.  
XIA Qiang, LI Shu-fen, WANG Gui-lan, et al. Combustion research on superfine aluminium powder in AP/HTPB propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1994(4): 35-42.
- [5] Risha Grant A, Boyer Eric, Evans Brain, et al. Characterization of nano-sized particles for propulsion applications[J]. CA Vol. 140 No. 17 273110s.
- [6] 庞维强, 张教强, 朱峰. 新型纳米材料在固体推进剂中的应用[J]. 纤维复合材料, 2005(1): 12-15.  
PANG Wei-qiang, ZHANG Jiao-qiang, ZHU Feng. Research and application of a new-type of nanometer materials in solid propellants [J]. *Fibre Composites*, 2005(1): 12-15.

### Effects of Aluminum Powder Content and Granularity on Characteristics of CMDB Propellant

CHEN Xue-li, WANG Ying, WANG Hong, SUN Mei

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Effect of content and granularity of aluminum powder (Al) on the combustion characteristics and energy properties of cased CMDB propellants were studied, and the combustion mechanism was also investigated. Results show that energy of the CMDB propellant increases with the increasing of Al content, and optimal Al content is 8%. The burning rates of the CMDB propellant at lower pressures increase in a great extent when the proportion of common Al and nano Al is 1:1, and the burning rate exponents of the propellant under 7-15 MPa decrease to lower than 0.45.

**Key words:** physical chemistry; CMDB propellant; nano aluminum powder; combustion characteristic