

文章编号: 1006-9941(2010)03-0290-05

消焰剂对硝酸推进剂性能的影响

李军强, 李笑江, 刘鹏, 齐晓飞, 刘芳莉

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 采用外加方式在造粒浇铸工艺推进剂中添加了四种传统消焰剂(LiF、KA、 $C_4O_6H_4K_2$ 和KD),研究了消焰剂对推进剂燃烧性能和特征信号的影响。通过发动机实验研究发现,消焰剂KA和KD可以有效抑制推进剂的二次燃烧,发动机喷焰面积减少80%以上,推进剂的燃速随其含量的增加而增加;测试特征信号结果发现粒铸推进剂的红外和可见光透过率稍有降低、激光透过率增加。

关键词: 应用化学; 固体推进剂; 消焰剂; 特征信号; 二次燃烧; 抑制

中图分类号: TJ55; V512; O69

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.03.012

1 引言

20世纪是科学技术飞速发展的时期,尤其是电子技术领域的高速发展使传统导弹武器的生存能力和突防能力受到了极大威胁,现代战争对导弹隐身技术和精确制导技术的要求越来越高,而固体火箭推进剂在发动机中燃烧时,排出的气体中含有大量CO、 H_2 等可燃性气体,这些气体在喷管排出面下游可以与空气中的氧混合重新燃烧,羽流发射出明亮的可见光辐射和强烈的红外及紫外光辐射,此现象就是所谓的“二次燃烧”,亦称之为羽流的“后燃”^[1-4]。二次燃烧的产生对火箭的发动机的推力毫无作用,反而使导弹的发射位置和运行轨迹很容易暴露在敌方的探测器上,影响了战略导弹的突防能力和战术导弹的生存能力;同时二次燃烧羽焰可以形成高温、高速的等离子非均匀流场,能对通过其中的红外线、激光、电磁波等产生严重地衰减,影响由红外线、激光、电磁波制导的导弹的命中精度;对于机载的火箭或导弹,二次燃烧产生的强烈明亮的可见光,很容易造成驾驶员短暂的视力障碍^[5-7]。因此,抑制二次燃烧对实现推进剂排气羽流的低特征信号有着重要意义。

美国、英国、俄罗斯、法国、德国和日本等国家都相继开展了低特征信号推进剂的研究。如美国在海湾战争中使用的“哈姆”导弹、“响尾蛇”导弹已经消除了70%的烟雾,英国声称已经解决无烟、无焰推进剂的

技术问题,可使固体火箭发动机的红外、紫外、可见光辐射减少90%以上,激光透过率提高27%,微波衰减降至0,海标枪舰舰导弹助推器使用了改性浇铸双基推进剂,提高了能量,抑制了二次燃烧,有效降低了红外信号;我国也开展了改性双基推进剂燃气二次燃烧抑制方法和抑制机理的研究,找到了几种二次燃烧抑制剂,这些抑制剂大多是不含能的无机或有机钾盐,通过 K^+ 的介入达到中断二次燃烧的链式反应,但国内所研究的含消焰剂推进剂都是采用配浆浇铸工艺或螺压工艺制备的,其消焰效果并不是十分理想,没有运用到型号武器中^[8-10]。本课题则主要通过粒铸工艺研究消焰剂对推进剂燃烧性能和特征信号的影响。

2 实验

2.1 配方的选择

选用工艺成熟的粒铸硝酸改性双基推进剂配方作为基础配方,配方组成:双基粘合剂(NC+NG)(60%),黑索今(30%),燃烧催化剂(5%),安定剂(3%),弹道改良剂(2%)等。

2.2 实验方法

消焰剂的筛选及加入方式:选用消焰剂LiF、无机钾盐KA、有机钾盐 $C_4O_6H_4K_2$ 以及有机钾盐KD,采用外加法加入到推进剂配方中。

样品制备:药粒准备→模具装配→药粒填装→浇铸→固化→脱模→后处理。

燃速测定:将样品制备成 $\Phi 5\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 的药条,采用靶线法在充氮调压式燃速仪中进行,测试前

收稿日期:2009-09-08;修回日期:2009-12-17

作者简介:李军强(1979-),男,工程师,硕士,从事固体火箭推进剂配方研究。e-mail:lljq@sohu.com

用聚乙烯醇对燃速药条进行六次包覆。

发动机试验：将样品制备成标准 $\Phi 50$ mm 发动机装药用药柱,用标准 $\Phi 50$ mm 发动机在常温常压下进行发动机实验并对发动机羽流录像。

发动机羽焰流场测试：在发动机试验现场对烟雾进行直接测试,研究推进剂烟雾对不同波段信号的衰减特性。所建立的烟雾测试系统见图 1 所示。测试系统包括四个主要部分：实验发动机部分,包括发动机、推进剂装药、压力测试系统；烟雾收集通道；衰减测试,包括测试光源、测试传感器等；计算机数据采集系统。

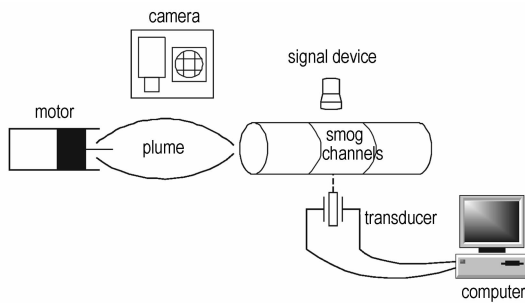


图 1 烟雾测试装置示意图

Fig. 1 Sketch map of the smog-testing device

3 实验结果及分析

3.1 消焰剂对燃速的影响

在基础配方中加入 LiF、KA、 $C_4O_6H_4K_2$ 和 KD,加入量为 1.5% 和 2.0%,采用外加法,用粒铸工艺制备推进剂样品,进行燃烧性能的测试。测试结果见表 1 和表 2。

表 1 1.5% 消焰剂对基础配方燃烧性能的影响

Table 1 Effect of 1.5% eliminated-flame additive on combustion performance for basic propellant

serial number	additive	content / %	n_{2-10}	burning rate / $mm \cdot s^{-1}$, 20 °C					
				2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa	10 MPa
basic propellant	-	-	0.17	10.60	11.80	12.27	12.83	13.10	13.89
LJQ-1	LiF	1.5	0.26	8.83	9.51	10.34	11.07	11.60	13.50
LJQ-2	KA	1.5	0.31	8.86	10.32	11.21	11.99	12.54	14.61
LJQ-3	$C_4O_6H_4K_2$	1.5	0.29	9.08	10.66	11.56	12.28	12.82	14.44
LJQ-4	KD	1.5	0.36	7.88	9.21	10.05	10.81	11.42	14.08

表 2 2.0% 消焰剂对基础配方燃烧性能的影响

Table 2 Effect of 2.0% eliminated-flame additive on combustion performance for basic propellant

serial number	additive	content / %	n_{2-10}	burning rate / $mm \cdot s^{-1}$, 20 °C					
				2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa	10 MPa
basic propellant	-	-	0.17	10.60	11.80	12.27	12.83	13.10	13.89
YZ-1	LiF	2.0	0.31	10.11	11.89	13.04	13.83	14.60	16.69
YZ-2	KA	2.0	0.24	10.76	12.29	13.39	14.00	14.46	15.77
YZ-3	$C_4O_6H_4K_2$	2.0	0.26	9.38	10.66	11.57	12.20	12.76	14.27
YZ-4	KD	2.0	0.29	9.57	11.06	12.21	13.05	13.81	15.38

表 1 表明, LiF、KA、 $C_4O_6H_4K_2$ 、KD 加入后,推进剂样品的燃速有所降低,燃速压力指数均增大。四种添加剂的加入都破坏了基础配方的平台效应。文献 [11] 分析了破坏平台燃烧的原因,根据近年来建立的推进剂催化燃烧模型及其理论,双基系平台推进剂燃烧时,铅盐、铜盐和炭黑复合催化剂的分解产物在燃烧表面的附近区域存在相互作用。其中,炭黑在燃烧表面形成炭骨架,铅盐的最终产物在燃烧表面形成催化中心。而消焰剂使作为催化中心载体的炭骨架消失从而使复合催化剂的作用完全被破坏,平台被破坏^[11]。

由表 2 可以看出,随着 LiF、KA 的加入,推进剂的燃速与基础配方相比有所增加;而 KD 的加入,推进剂的燃速在 5 ~ 10 MPa 时有所增加,2 ~ 4 MPa 时有所下降; $C_4O_6H_4K_2$ 的加入,只有在 10 MPa 时推进剂的燃速增加,2 ~ 6 MPa 时的燃速均下降。四种添加剂的加入,推进剂的燃速压力指数均增加,分别为 0.31、0.24、0.26 和 0.29,燃烧时基本没有了平台效应。由表 1 和表 2 还可以看出,随着添加剂含量的增加,推进剂的燃速也有不同程度的增加,压力指数有不同程度的下降。经分析认为,这种现象可能是由于消焰剂的颗粒较大,随着含量的增加,推进剂燃烧时的燃面增加,导致推进剂燃速增加。

3.2 消焰剂对喷焰二次燃烧的影响

将上述四种消焰剂分别加入基础配方中并制成 $\Phi 50$ 标准发动机装药柱,进行发动机实验,并对发动机喷焰进行录像,观察消焰剂的效果,见图 2 ~ 图 4。

图2是无消焰剂的粒铸推进剂基础配方羽流结构,是典型的改性双基推进剂羽流结构,其火焰长度达到1.91 m,宽度0.174 m。图3是粒铸工艺下含1.5%消焰剂推进剂的发动机喷焰图,图4是含2%消焰剂的粒铸推进剂的发动机喷焰图。由图可以看出,消焰剂LiF(图3a、图4a)、 $C_4O_6H_4K_2$ (图3c、图4c)的加入使推进剂的二次燃烧火焰的直径明显的减小,火焰的长度变短,火焰强度变弱,在发动机喷口处有效的抑制了二次燃烧,但仍然有二次燃烧火焰;含消焰剂KA、KD推进剂的发动机火焰(图3b、图4b和图3d、图4d)呈间断性圆柱形燃烧状,其二次燃烧火焰基本消失,含2.0%KA(图4b)的火焰长度变为1.17 m,宽

度0.069 m,含2.0%KD(图4d)的火焰长度变为0.84 m,宽度0.066 m,KD的消焰效果最好,其发动机喷焰面积减少80%以上。文献[10]研究了钾盐消焰剂消焰机理,主要是通过 K^+ 与自由基 $H\cdot$ 或 $HO\cdot$ 结合中断二次燃烧的链式反应,达到消除二次燃烧的目的。



图2 基础配方推进剂的发动机喷焰图

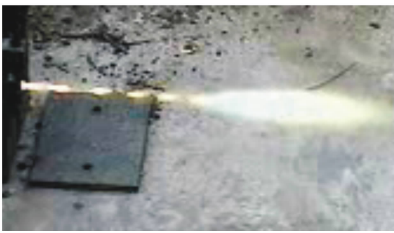
Fig.2 Flame picture of the basic propellant



a. LQ-1



b. LQ-2



c. LQ-3



d. LQ-4

图3 含1.5%消焰剂推进剂的发动机喷焰图

Fig.3 Flame pictures of motor containing 1.5% eliminated-flame additive for basic propellant



a. YZ-1



b. YZ-2



c. YZ-3



d. YZ-4

图4 含2%消焰剂推进剂的发动机喷焰图

Fig.4 Flame pictures of motor containing 2% eliminated-flame additive for basic propellant

3.3 消焰剂对基础配方特征信号的影响

测试添加 1.5% 和 2.0% 消焰剂的粒铸推进剂的红外透过率、可见光透过率和激光透过率,结果见表 3。

表 3 1.5% 和 2.0% 消焰剂对基础配方特征信号的影响
Table 3 Effects of 1.5% and 2.0% eliminated-flame additive on characteristic signal for basic propellant

item	IR permeation rate/%	visible light permeation rate/%	laser permeation rate/%
basic propellant	97.4	96.6	77.4
LJQ-1	97.3	96.0	90.4
LJQ-2	97.7	96.1	85.9
LJQ-3	97.5	96.6	84.3
LJQ-4	97.0	95.4	88.9
YZ-1	96.6	95.7	87.7
YZ-2	96.4	95.0	86.9
YZ-3	97.2	95.7	89.1
YZ-4	96.6	95.0	87.8

由表 3 可见,添加 1.5% 消焰剂后,对粒铸推进剂羽流的红外透过率、可见光透过率的影响均不大;激光透过率增加,增加最大的是配方 LJQ-1 (含 1.0% LiF),由基础配方的 77.4% 增加为 90.4%,其它配方的激光透过率增加后也几乎达到了 85% 以上。添加 2.0% 消焰剂后,推进剂的红外和可见光透过率均下降,下降幅度不大;激光透过率增加,由基础配方的 77.4% 增加到了 83.6% 以上,增加最大的是配方 YZ-3,为 89.1%。由表 3 还可以看出,随着消焰剂含量的增加,推进剂的红外和可见光透过率均呈下降趋势。

由推进剂的羽流结构和特征信号测试结果可知,消焰剂 KA 和 KD 的加入不但可以有效消除发动机的二次燃烧,也可以使推进剂的激光透过率大幅度提高。

4 结 论

(1) 传统消焰剂 LiF、KA、 $C_4O_6H_4K_2$ 和 KD 可以抑制硝酸改性双基推进剂的发动机喷焰的二次燃烧。其中消焰剂 KA 和 KD 的加入对推进剂的二次燃烧有明显的抑制作用,发动机喷焰面积减少 80% 以上,KD 的消焰效果最好。

(2) 四种消焰剂的加入,对推进剂的燃烧性能有一定的影响,推进剂样品的燃速降低,燃速压力指数增加。

(3) 四种消焰剂的加入使推进剂的红外和可见光都有小幅下降,但使推进剂的激光透过率提高到 84% 以上。

(4) 除一些传统的消焰剂以外,寻找新型消焰剂以及消除消焰剂对燃烧性能不利影响的方法,是低特

征信号推进剂研制的重要课题。

参考文献:

- [1] 李军强. 硝酸改性双基推进剂消烟消焰技术研究[D]. 西安: 西安近代化学研究所,2005.
LI Jun-qiang. Technology studies of eliminate smoke and flame on CMDB propellants [D]. Xi'an: Xi'an Modern Chemistry Research Institute,2005.
- [2] 李军强,李笑江,覃光明,等. 用添加剂抑制固体火箭发动机喷焰二次燃烧的研究[J]. 含能材料,2004(增刊): 422-425.
LI Jun-qiang, LI Xiao-jiang, QIN Guang-ming, et al. Studies on suppression of afterburning of solid rocket motor exhaust with additives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004 (Supplement): 422-425.
- [3] 李军强,李笑江,覃光明,等. 降低固体火箭发动机喷焰微波衰减的技术简述[J]. 飞航导弹,2004(5): 40-44.
LI Jun-qiang, LI Xiao-jiang, QIN Guang-ming, et al. Technology simple relate of reduced microwave attenuation on solid rocket motor exhaust[J]. *Winged Missiles Journal*, 2004(5): 40-44.
- [4] 杨栋,李上文. 固体火箭推进剂发动机排气二次燃烧的抑制技术[J]. 固体火箭技术,1992(2): 6-13.
YANG Dong, LI Shang-wen. The suppression technology of afterburning on solid rocket motor exhaust[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1992(2): 6-13.
- [5] 杨栋,李上文,袁宗汉. 用添加剂减少固体火箭推进剂发动机排气二次燃烧的研究[J]. 固体火箭技术,1994(1): 8-15.
YANG Dong, LI Shang-wen, YUAN Zong-han. Studies on suppression of afterburning on solid rocket motor exhaust with additives[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1994(1): 8-15.
- [6] 张海燕. 改性双基低特征信号推进剂研究进展[J]. 固体火箭技术,2000,23(2): 36-38.
ZHANG Hai-yan. Advances in low signature signal CMDB propellants[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2000, 23(2): 36-38.
- [7] 庞爱民,吴京汉. 先进的低特征信号推进剂研制[J]. 现代防御技术,2000,28(5): 24-28,50.
PANG Ai-min, WU Jing-han. Development of advanced low signature propellants[J]. *Modern Defence Technology*, 2000, 28(5): 24-28,50.
- [8] 徐明海. 新型消焰剂[J]. 火炸药,1986(4): 18-21.
XU Ming-hai. New eliminateing flame [J]. *Huozhayao*, 1986(4): 18-21.
- [9] 张端庆. 固体火箭推进剂[M]. 北京: 兵器工业出版社,1991,8.
ZHANG Duan-qing. Solid Rocket Propellant [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1991, 8.
- [10] 杨栋. 用添加剂减少固体火箭推进剂发动机排气二次燃烧的研究[D]. 西安: 西安近代化学研究所,1992.
YANG Dong. Studies on suppression of afterburning on solid rocket motor exhaust with additives [D]. Xi'an: Xi'an Modern Chemistry Research Institute, 1992.
- [11] 杨栋,赵凤起,李上文,等. 含消焰剂硝酸推进剂燃烧性能的调节[J]. 推进技术,2004(2): 68-71.
YANG Dong, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, et al. Burning rate optimization of nitram inemodified double base propellants with secondary flame inhibitors[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004(2): 68-71.

