

文章编号: 1006-9941(2002)03-0125-03

铝镁贫氧推进剂低压燃烧性能表征方法研究

张炜, 朱慧

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 系统研究了铝镁贫氧推进剂低压燃烧特性的表征方法。研究发现, 低压下采用表压和绝对压强所得到的燃速压强指数不同, 用 Summerfield 燃速公式回归燃速与压强的关系比 Vieille 燃速公式更好一些。

关键词: 铝镁贫氧推进剂; 低压; 燃烧性能表征

中图分类号: V512

文献标识码: A

1 引言

非壅塞固体火箭冲压发动机具有结构简单、燃气发生器燃气流量可随冲压补燃室压强变化进行自适应调节等优点, 可以保证当导弹的飞行速度、高度、攻角和转弯角发生变化时, 冲压补燃室始终在一定的空燃比范围内工作, 使冲压发动机性能最佳^[1,2]。

在非壅塞固体火箭冲压发动机中, 贫氧推进剂的氧化剂含量很低, 而且通常在低压下燃烧^[3-7]。鉴于贫氧推进剂低压燃烧的特殊性, 本文研究了其低压燃烧性能规律的表征方法。

2 实验

铝镁贫氧推进剂的制造工艺与常规复合固体推进剂制造工艺相同。装药采用 2 立升卧式混合机混合。药浆浇铸采用真空浇铸法。推进剂固化温度为 70 °C, 固化期为三天。

推进剂静态燃速测试采用靶线法。药条的尺寸为 5 mm × 5 mm × 150 mm。药条经包覆后在燃烧室内测定推进剂的静态燃速。燃烧室气氛为氮气, 测试压强取 0.49, 0.98, 1.96, 3.92 MPa。贫氧推进剂静态燃速的处理方法采用航天工业部标准 QJ915-851。

3 实验结果与讨论

3.1 压强的取值对燃速压强指数的影响

在处理常规火箭推进剂的燃速及燃速压强指数

时, 对燃烧室压强的记录、燃速和燃速压强指数的数据回归常采用表压。但火箭发动机设计和性能计算中使用的是绝对压强。在火箭发动机的工作压强范围内(一般在 6 MPa 以上), 表压与绝对压强之间差 0.1 MPa, 对数据处理结果的影响很小。对于固体火箭冲压发动机, 尤其是非壅塞固体火箭冲压发动机而言, 燃气发生器工作压强很低(一般在 0.5 MPa 以下), 这时表压与绝对压强之间差 0.1 MPa 对数据处理结果影响很大(在 0.5 MPa 下相差 20%, 在 0.1 MPa 时相差达到 100%)。

用 Vieille 燃速公式回归时, 表压与绝对压强对压强的影响是非线性的, 因此在低压下用表压回归的燃速压强指数与用绝对压强回归值有显著差别, 如表 1 和表 2 所示。一般而言, 采用绝对压强回归得到的燃速压强指数比采用表压得到的数据高。

考虑到与发动机设计和性能计算中数据的一致性, 建议采用由绝对压强回归的燃速压强指数。

3.2 贫氧推进剂低压燃速规律

在火箭发动机的工作压强范围内, 推进剂燃速与压强的关系通常用 Vieille 燃速经验公式^[8]表示:

$$r = a_v \cdot p^{n_v}$$

式中, a_v 和 n_v 分别为用 Vieille 公式回归得到的燃速系数和燃速压强指数。Vieille 公式说明, 压强的对数与燃速的对数成正比。

另一方面, Summerfield 根据他提出的粒状扩散火焰模型, 也导出了固体推进剂燃速与压强的半经验公式^[8]:

$$p/r = a + b \cdot p^{2/3}$$

该公式说明 p/r 与 $p^{2/3}$ 呈线性关系。

根据燃速压强指数的定义, 采用 Summerfield 公式可以通过下式计算出各压强下推进剂的压强指数:

收稿日期: 2002-02-20; 修回日期: 2002-04-09

基金项目: 国防预研基金资助项目(99J12.6.8.KG0128)

作者简介: 张炜(1962-), 男, 教授, 从事推进剂与发动机研究。

$$n_s = 1 - \frac{2}{3}b \cdot r \cdot p^{-\frac{1}{3}}$$

式中, n_s 为用 Summerfield 公式计算得到的燃速压强指数。上式表明, 采用 Summerfield 公式计算出的推进剂燃速压强指数与压强和燃速密切相关。

许多研究表明, 复合固体推进剂燃速与压强的关系也满足 Summerfield 公式, 而且在低压下该公式

比 Viellie 公式能更好地模拟推进剂燃速与压强的关系。

为了深入研究铝镁贫氧推进剂在低压下的燃速与压强的变化规律, 对不同压强下的燃速数据分别用 Viellie 公式和 Summerfield 公式进行线性回归, 所得到的结果见表 1 和表 2。

表 1 铝镁贫氧推进剂的低压燃烧特性 (I)

Table 1 Combustion properties of aluminum-magnesium fuel-rich propellant at low pressure (I)

配方	A-01	A-02	A-03	A-04	A-05
p/MPa			$r/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$		
3.92	4.39 ± 0.45	5.04 ± 0.35	4.74 ± 0.28	5.47 ± 0.76	5.05 ± 0.47
1.96	2.74 ± 0.43	4.46 ± 0.26	4.25 ± 0.25	4.55 ± 0.57	3.74 ± 0.24
0.98	—	3.63 ± 0.31	3.82 ± 0.18	3.76 ± 0.83	2.92 ± 0.12
0.49	—	2.82 ± 0.10	3.64 ± 0.25	3.24 ± 0.12	2.64 ± 0.15
$n_{v,i}$	0.68	0.28	0.13	0.26	0.32
$A_{v,i}$	1.729	3.550	3.917	3.839	3.133
$R_{v,i}$	1.0	0.989	0.987	0.999	0.979
$n_{v,j}$	0.71	0.30	0.14	0.28	0.33
$a_{v,j}$	1.641	3.430	3.854	3.719	3.010
$R_{v,j}$	1.0	0.985	0.990	0.999	0.984
a_s	0.435	-0.0455	-0.107	-0.0381	0.0127
b_s	0.187	0.326	0.372	0.304	0.313
R_s	1.0	0.997	0.999	0.9999	0.997
n_s (3.92 MPa)	0.654	0.305	0.254	0.297	0.332
n_s (1.96 MPa)	0.728	0.225	0.157	0.264	0.376
n_s (0.98 MPa)	—	0.206	0.046	0.235	0.386
n_s (0.49 MPa)	—	0.223	-0.145	0.167	0.301

注: 下标 v 表示用 Vieille 公式回归的参数; 下标 i 和 j 分别表示用表压和绝对压强回归的系数, R 为回归系数; 下标 s 表示用 Summerfield 公式回归的参数。

表 2 铝镁贫氧推进剂的燃烧特性 (II)

Table 2 Combustion properties of aluminum-magnesium fuel-rich propellant at low pressure (II)

配方	B-01	B-02	B-03	B-04	B-05
p/MPa			$r/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$		
3.92	4.91 ± 0.78	4.83 ± 0.18	4.33 ± 0.18	3.78 ± 0.40	6.03 ± 0.72
1.96	4.08 ± 0.09	3.80 ± 0.14	3.61 ± 0.30	2.63 ± 0.03	4.37 ± 0.24
0.98	3.07 ± 0.08	2.77 ± 0.10	2.68 ± 0.10	2.35 ± 0.09	3.41 ± 0.23
0.49	2.15 ± 0.03	2.20 ± 0.05	2.61 ± 0.05	2.08 ± 0.09	2.86 ± 0.13
$n_{v,i}$	0.40	0.39	0.25	0.27	0.36
$a_{v,i}$	2.980	2.867	2.920	2.416	3.563
$R_{v,i}$	0.991	0.998	0.953	0.955	0.991
$n_{v,j}$	0.43	0.42	0.27	0.30	0.39
$a_{v,j}$	2.838	2.733	2.830	2.334	3.407
$R_{v,j}$	0.987	0.998	0.960	0.961	0.994
a_s	0.0192	0.0342	-0.0256	-0.0055	0.0289
b_s	0.310	0.312	0.382	0.434	0.255
R_s	0.997	0.9995	0.997	0.991	0.997
n_s (3.92 MPa)	0.357	0.362	0.302	0.307	0.349
n_s (1.96 MPa)	0.327	0.368	0.331	0.391	0.406
n_s (0.98 MPa)	0.362	0.418	0.309	0.314	0.416
n_s (0.49 MPa)	0.437	0.420	0.158	0.256	0.383

从数据处理的方法来看,燃速压强指数应分为表压燃速压强指数(n_i)和绝对压强燃速压强指数(n_a)。在推进剂性能测试中通常用表压燃速压强指数,但发动机中应用的是绝对压强燃速压强指数。在低压下,两者有较大差别。

另外,从燃速规律的表征方法看,Vieille 燃速公式和 Summerfield 燃速公式均可以较好地表示贫氧推进剂的燃速规律。但是,从回归系数看,采用 Summerfield 燃速公式更好一些。

上述数据说明,在低压范围内(0.5 ~ 4.0 MPa),用 Summerfield 燃速公式回归燃速与压强的关系比 Vieille 燃速公式更好一些,但用 Summerfield 燃速公式得到的不同压强下燃速压强指数值是变化的。因此,在处理低压下燃速与压强的关系时,要注意选用合适的燃速与压强的关系。

4 结 论

在低压下用表压和绝对压强回归得到的燃速压强指数有较大的差异,建议在低压下使用由绝对压强回

归得到的燃速压强指数。在低压下铝镁贫氧推进剂的燃速与压强的关系用 Summerfield 燃速公式更佳。

参考文献:

- [1] 刘兴洲主编. 飞航导弹动力装置[M]. 导弹与航天丛书,北京:宇航出版社,1992.
- [2] 张炜,朱慧,方丁酉,等. 冲压发动机发展现状及其关键技术[J]. 固体火箭技术,1998,21(3): 2.
- [3] 张炜,朱慧,方丁酉,等. 用于燃气流量可调固冲发动机的贫氧推进剂[J]. 推进技术,1999,20(5): 9.
- [4] 崔永春译. 冲压-火箭的固体推进剂燃速控制实验研究[J]. 飞航导弹,1986,(9): 41.
- [5] 王永寿译. 无阻流式固体燃料冲压发动机燃料的燃速特性[J]. 飞航导弹,1995,(12): 34.
- [6] 徐再荣. 特低燃速固体推进剂低压下的燃速测试[J]. 推进技术,1998,19(3): 94.
- [7] 陈协坤. 贫氧复合固体推进剂燃速测定的研究[J]. 推进技术,1984,(4): 22.
- [8] 张炜,朱慧. 固体推进剂性能计算压力[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1996.

Characterization Methods of Combustion Properties of Aluminum-magnesium Fuel-rich Propellant at Low Pressure

ZHANG Wei, ZHU Hui

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The characterization of the combustion properties of the aluminum-magnesium fuel-rich propellant for unchoked ducted rocket was studied. The pressure exponents calculated by the burning rates at different pressure from the pressure gauge and from the absolute pressure are different. The author suggested using the exponents calculated from the absolute pressure. The experimental results show that the correlation between the burning rate and the pressure is better suited by the Summerfield formula than the Vieille Law.

Key words: aluminum-magnesium fuel-rich propellant; low pressure; characterization of combustion property