

固体火箭发动机平衡压力 唯一性探讨

王宁飞 陆殿林 王新华

(西安近代化学研究所)

摘 要:提出了催化燃烧双基推进剂在固体火箭发动机中可能出现几个平衡压力的看法。实验证实了此观点的正确性,并讨论了产生非唯一平衡压力的内在条件及外在原因。

主题词:固体推进剂火箭发动机,固体推进剂,燃烧,压力,气动平衡

RESEARCH ON THE NON-UNIQUENESS OF EQUIVALENT PRESSURE IN A SOLID ROCKET MOTOR

Wang Ningfei Lu Dianling Wang Xinghua

(Xian Modern Chemistry Research Institute)

Abstract: A new concept that there could be more than one equivalent pressures in a solid rocket motor using double-base propellant has been put forward. This hypothesis has been confirmed by a few experiments. The authors have also discussed the conditions of existence of non-unique equivalent pressures.

Keywords: Solid propellant rocket engine, Solid Propellant, Combustion, Pressure, Aerodynamic balance

1 前 言

固体推进剂的典型燃速规律为 $\dot{r} = ap^n$ (图 1 中曲线 a)。调节双基系推进剂燃速的最常用方法之一就是在推进剂中加入催化剂。目前广泛使用的是铅铜碳催化系统,它通过改变推进剂的固相及气相反应历程^[1~3],使其在低压下超速燃烧;中高压下产生平台或麦撒效应;然后,

催化剂影响作用减小,与无催化推进剂燃速接近(图1中曲线b)

固体火箭发动机燃烧室内气体生成率为^[4]:

$$\dot{m}_p = s_p \rho_p \dot{r}$$

而喷管流出率为:

$$\dot{m}_n = \frac{\Gamma p_0 A_t}{\sqrt{\chi R T_g}}$$

式中: s_p ——燃烧面积

ρ_p ——推进剂密度

$\dot{r}$ ——燃速

p_0 ——燃烧室压强

A_t ——喷喉面积

R ——气体常数

T_g ——燃气温度

χ ——热损失系数

$$\Gamma = \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

k ——燃气比热比

当 $\dot{m}_n = \dot{m}_p$ 时, 发动机开始稳定工作。因燃速 $\dot{r}$ 是燃烧室压力 p_0 的函数, 对于给定的燃烧室结构及推进剂类型, 就有确定的平衡压力以满足稳定工作条件。对于一般推进剂(图2中曲线a), $\dot{m}_p(p)$ 与 $\dot{m}_n(p)$ 只有一个交点(即 $\dot{m}_n = \dot{m}_p$), 对应一个平衡压力。但对于催化推进剂(图2中曲线b), $\dot{m}_p(p)$ 与 $\dot{m}_n(p)$ 可能有多个交点, 就会出现多个平衡压力, 作者称这种现象为固体火箭发动机平衡压力的非唯一性。本文通过一些实验证实了非唯一性的存在, 并讨论了产生非唯一性的外在因素及内在条件。

2 实验

实验发动机结构如图3所示, 一种情况没有空腔 V , 另一种情况接上空腔 V 。喷喉直径 $d_t = 4.1\text{mm}$, 燃烧室内径 $\phi 60$, 无空腔 V 时燃烧室长度为 150, 空腔尺寸为 $\phi 60 \times 100$ 。装药为某具有催化燃烧特征的无烟推进剂, 尺寸为 $\phi 59.5 \times 143$, 一端及侧面包覆, 端面燃烧。推进剂参数: 密度 $\rho_p = 1580\text{kg/m}^3$, 燃气平均分子量 $M = 43.36$, 比热比 $k = 1.25$, 定压爆温 $T_g = 2153\text{K}$, 点火药均为 7g 黑火药。

图4为两种情况下试验的典型压力-时间曲线, (a) 为无空腔结果, (b) 为有空腔时的结果, 尽管两种实验的推进剂种类、发动机面喉比都相同, 却得到完全不同的平衡工作点: 未加空腔时, 平衡压力 $p = 7.37\text{MPa}$, 燃速 $\dot{r} = 23.59\text{mm/s}$, 而接上空腔后, $p = 1.66\text{MPa}$, $\dot{r} = 5.4\text{mm/s}$ 。将以上数据代

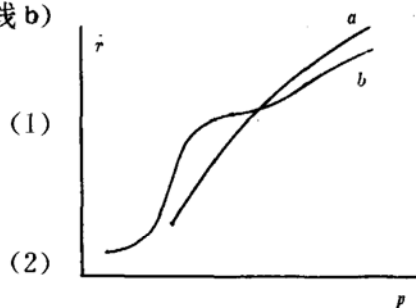


图1 双基推进剂的一般(a)及催化(b)燃速规律

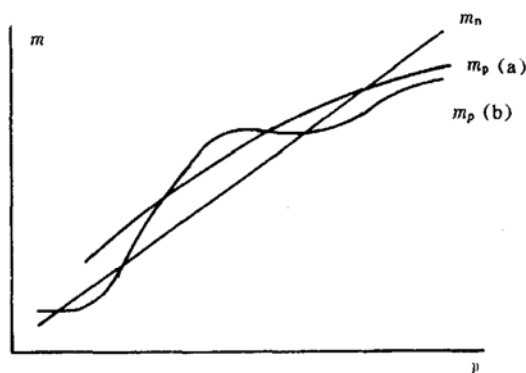


图2 一般双基推进剂(a)及催化推进剂(b) $\dot{m}_p(p)$ 与 $\dot{m}_n(p)$ 关系

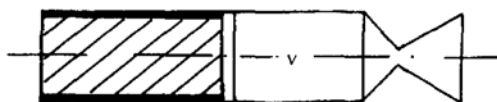


图3 实验发动机示意图

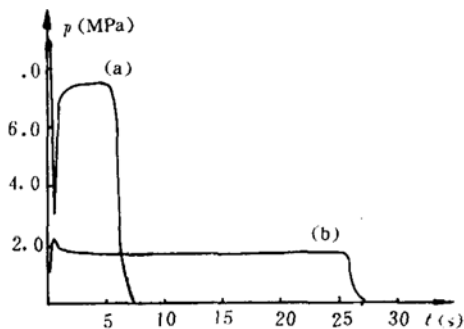


图4 实验发动机典型压力时间曲线
(a) 无空腔, (b) 有空腔

入式 (1)、(2), 并取热损失系数 $\chi=0.9$, 那么无空腔时: $\dot{m}_n=0.105\text{kg/s}$, $\dot{m}_p=0.1036\text{kg/s}$, 有 $\dot{m}_n=\dot{m}_p$; 而接上空腔 V 后, $\dot{m}_n=0.0236\text{kg/s}$, $\dot{m}_p=0.0237\text{kg/s}$, 也存在 $\dot{m}_n=\dot{m}_p$ 。

由此可见, 7.37MPa 及 1.66MPa 两者都可以是稳定的平衡压力。这里指出: 点火容积 (即点火压力) 是触发平衡压力的决定因素: 点火压力小, 触发较低的平衡压力; 点火压力大, 能触发较高的平衡压力。

3 产生非唯一燃烧室平衡压力的内在条件

如上所述, 燃烧室内压力一方面影响燃烧室内气体生成率, 另一方面影响喷管质量流率。而发动机稳定工作的条件是: 燃烧室内气体生成率等于喷管质量流率。一旦发动机结构及推进剂种类选定, 喷管质量流率与燃烧室压力就成线性关系, 那么燃烧室内气体生成率随压力的变化就决定了是否产生非唯一的平衡压力。正如图 2 所示, 对一般双基推进剂, 只能出现一个平衡压力, 这也是发动机设计的传统依据。但催化燃烧的发展使燃速规律呈多样性变化, 则对各种催化燃速规律的非唯一性分析对发动机设计是很重要的。

图 5 是一种典型的催化燃烧规律, 尽管 $\dot{m}_p$ 与 $\dot{m}_n$ 有两个交点, 似乎应存在两个平衡压力, 但实际上 a 点是不稳定平衡状态。燃烧室压力一旦大于 p_a , 气体生成率就大于质量流出率, 质量就在燃烧室内集聚, 压力增大, 平衡转向 b 点; 当燃烧室压力落入小于 p_a 的区间, 质量流出率就大于气体生成率, 压力下降, 导致熄火。这种情况产生唯一的平衡压力 p_b 。

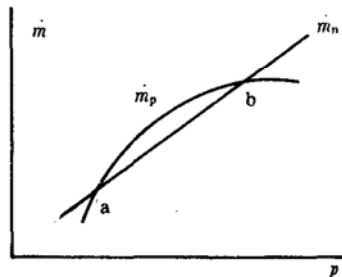


图 5 一种催化燃烧规律

图 6 是另外一种典型催化燃烧规律。按照上述分析方法可看出, b 点也不是稳定的平衡压力, 而 a 点及 c 点都是稳定的平衡压力。即对于给定的发动机结构及选定的装药, 随着外界条件的变化 (点火压力等), 可能出现两个不同的平衡压力。

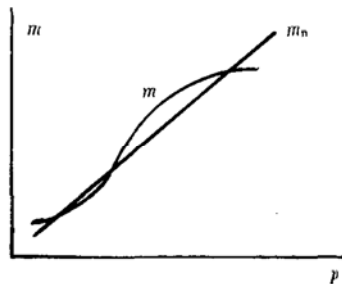


图 6 产生非唯一平衡压力的典型曲线

由上所述, 可以总结出产生非唯一平衡压力的燃速规律必要条件:

1. 必须存在 3 个 $\dot{m}_p=\dot{m}_n$ 的压力点, $p_a < p_b < p_c$ 。
2. 在 b 点, $\frac{d\dot{m}_p}{dp} > \frac{d\dot{m}_n}{dp}$, 而在 a 及 c 点, $\frac{d\dot{m}_p}{dp} < \frac{d\dot{m}_n}{dp}$, 那么, p_a 和 p_c 就是两个稳定的平衡压力。

随着催化燃烧的进一步发展, 可能会产生多个稳定的平衡压力。

4 产生非唯一燃烧室压力的外在原因

分析图 6 可以发现, 若燃烧室初始压力落在 $0 \sim p_b$, 平衡压力就会稳定在 p_a ; 若燃烧室初始压力大于 p_b , 平衡压力稳定在 p_c 。可见, 点火压力是产生何种平衡压力的外在条件。较低的点火压力触发较低的平衡压力, 较高的点火压力触发较高平衡压力。

影响点火压力的因素有点火药量和点火容腔等。若点火药量大, 点火容腔小, 点火压力就大, 可触发高平衡压力; 反之则点火压力就小, 可触发低平衡压力。

分析发动机实验结果可证实上述论点。其 $\dot{m}_p$ 及 $\dot{m}_n$ 曲线如图 7, 稳定的平衡压力正处于 p_a (1.66MPa) 和 p_c (7.37MPa)。当不接空腔时, 点火压力为 9.30MPa, 尽管又下降到 3.3MPa, 但也大于 p_b , 触发了较高平衡压力 7.37MPa; 接上空腔后, 点火空腔扩大了许多, 而点火药量又没变, 点火压力降为 2.16MPa, 小于 p_b , 触发了较低平衡压力 1.66MPa。

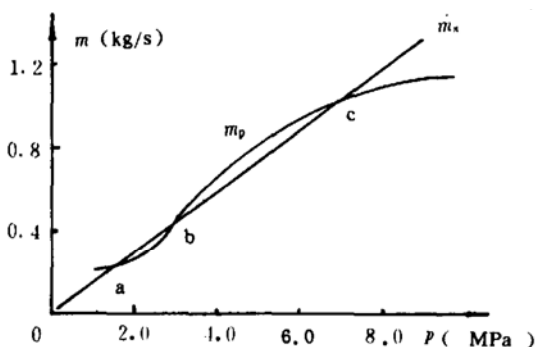


图 7 实验发动机的 $\dot{m}_n$ 和 $\dot{m}_p$ 曲线

5 结 论

理论分析和实验结果都证实了固体火箭发动机中可出现非唯一的稳定平衡压力。产生稳定平衡压力 p_a 、 p_c 的必要条件为:

- (1) 存在 a、b、c 三点 ($p_a < p_b < p_c$), 都有: $\dot{m}_n = \dot{m}_p$;
- (2) 在 a、c 点有 $\frac{d\dot{m}_p}{dp} < \frac{d\dot{m}_n}{dp}$; 而在 b 点, $\frac{d\dot{m}_p}{dp} > \frac{d\dot{m}_n}{dp}$ 。

点火压力是最终出现哪个平衡压力的触发条件, 高点火压力触发较高稳定平衡压力, 而较低点火压力触发较低稳定平衡压力。

从以上分析也可看出, 在发动机设计过程中, 仅分析给定压力区间的燃速特性还是不够的, 而应在全压力范围内分析燃烧室内质量生成与流出规律。研究 $\dot{m}_n$ 及 $\dot{m}_p$ 曲线将有助于发现非唯一平衡压力的可能性, 以便在研制过程中, 采取一些必要的手段, 避免不希望出现的压力, 缩短研制周期。

参 考 文 献

- [1] Kubota N. AD763768
- [2] 马燮圻. 平台双基推进剂燃烧机理的分析和评论. 西安近代化学研究所, 1979
- [3] 李上文, 赵风起. 铜化物作燃烧催化剂的固体推进剂的探索. 兵工学报. 火炸药专集, 1986 (1)
- [4] 孙维申等. 固体火箭发动机原理. 国防工业出版社