

文章编号: 1001-2486 (2000) 04-0019-04

固体火箭冲压发动机的工作特性分析*

张炜¹, 方 酉¹, 夏智勋¹, 朱慧¹, 王虎干², 蔡选义²

(1 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2 空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 通过数值计算, 分析了燃气流量固定的壅塞式固体火箭冲压发动机、等空燃比工作的固体火箭冲压发动机和非壅塞固体火箭冲压发动机的高度特性和速度特性。结果表明, 当导弹的飞行高度和速度变化时, 燃气流量固定的壅塞式固体火箭冲压发动机性能变化最大, 燃速压强指数为 1.0 的非壅塞固体火箭冲压发动机的性能基本实现了等空燃比调节。贫氧推进剂的燃速压强指数越高, 非壅塞固体火箭冲压发动机燃气流量的自适应调节能力越强。

关键词: 固体火箭冲压发动机; 壅塞; 非壅塞; 工作特性

中图分类号: V235.211 **文献标识码:** A

Operating Characteristics of Solid Ducted Rocket

ZHANG Wei¹, FANG Ding-you¹, XIA Zhi-xun¹, ZHU Hui¹, WANG Hu-gan², CAI Xuan-yi²

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Institute of Air-to-Air Missile, Luoyang 471009, China)

Abstract: The altitude characteristics and velocity characteristics of three types of solid ducted rocket, which are choked solid ramrocket with fixed mass flow rate of fuel-rich gas generator, unchoked one and the one working under fixed mass ratio of air to fuel, were numerically studied. The results show that the performance of the unchoked ducted rocket is superior to that of the choked one. When the gas generator is loaded by fuel-rich propellant with high exponent, the unchoked ducted rocket can almost be worked under fixed mass flow ratio of air to fuel.

Key words: solid ducted rocket; choked; unchoked; operating characteristics

新一代导弹普遍采用先进的隐身技术、低信号特征的动力装置和超音速或高超音速飞行等措施提高导弹的生存能力和突防能力。目前飞航式导弹正在向超音速、中高空和中远程方向发展, 这正是冲压发动机的最佳工作区域。

冲压发动机导弹具有比冲高、可实现全程有动力飞行等优点, 有利于提高导弹的射程、机动性、突防能力和生存能力。

与火箭发动机不同, 冲压发动机的工况与进入补燃室的燃气流量和空气流量密切相关。由于进入补燃室的冲压空气流量随着飞行高度、马赫数及攻角等飞行条件变化, 冲压补燃室的工作条件也随之而变。为保证固体火箭冲压发动机具有良好而且稳定的性能, 应尽可能保证其在设计空燃比附近工作。然而, 导弹飞行状态的变化或者外界扰动影响都可能使冲压发动机偏离设计工况, 因此研究固体火箭冲压发动机工作特性具有重要意义^[1~5]。

1 固体火箭冲压发动机的性能参数

固体火箭冲压发动机的推力由下式计算

$$F = q_f [V_e + \alpha(V_e - V)] + (P_e - P_a)A_e$$

式中 q_f 为燃气发生器的富燃燃气流量($q_f = \alpha \rho_p A_b P_g^n$), α 、 n 和 ρ_p 分别为贫氧推进剂的燃速系数、燃速压强指数和密度, P_g 和 A_b 分别为燃气发生器压强和燃烧表面积, V_e 为冲压发动机喷管的出口速度, V 为飞行器飞行速度, P_e 和 P_a 分别为冲压发动机喷管出口处和环境大气压强, A_e 为喷管出口面积, α 是空燃

* 收稿日期: 1999-12-29
作者简介: 张炜 (1962), 男, 副教授, 博士。

比,即空气流量与燃气发生器流量之比(q_{air}/q_f)。

冲压发动机的推力系数定义为^[1]:

$$C_F = \frac{F}{QS_M}$$

式中 Q 为来流空气的速度头($Q = \rho_a V^2/2$), S_M 为飞行器特征横截面积。

$$I_s = \frac{F}{q_f} = V_e + \alpha(V_e - V) + \frac{(P_e - P_a)A_e}{q_f}$$

本文研究的三类固体火箭冲压发动机为: (1) 燃气流量固定的壅塞式固体火箭冲压发动机; (2) 燃气流量完全可调的、以等空燃比工作固体火箭冲压发动机; (3) 燃气流量可自适应调节的非壅塞固体火箭冲压发动机。

通过数值计算, 分别计算了上述三类固体火箭冲压发动机的高度特性和速度特性, 同时考察了燃气发生器中不同燃速压强指数的贫氧推进剂装药对非壅塞固体火箭冲压发动机工作特性的影响。

本研究采用固体火箭冲压发动机系统的基本参数如表 1 所示。

表 1 固体火箭冲压发动机的设计参数

Tab. 1 Parameter envelopes of solid ducted rocket

设计高度	飞行马赫数	空燃比	燃气流量	进气道类型	贫氧推进剂
10km	2.8	10	0.1kg/s	二元进气道	AP/Al/Mg/HTPB

2 固体火箭冲压发动机的高度特性

图 1~ 图 3 示出了三类固体火箭冲压发动机的空燃比、比冲和推力系数随飞行高度的变化。从图中可以看出, 当导弹的飞行高度偏离设计高度时, 燃气流量固定的壅塞式冲压发动机的特性参数与设计值偏差最大, 非壅塞固体火箭冲压发动机居中, 而燃气流量完全调节的冲压发动机特性参数的变化最小。对于非壅塞固体火箭冲压发动机, 贫氧推进剂的燃速压强指数越大, 发动机特性参数随飞行高度变化越小。图中示出, 贫氧推进剂燃速压强指数为 1.0 的非壅塞固体火箭冲压发动机特性参数与燃气流量完全调节的冲压发动机特性参数的变化规律基本相同, 说明此时非壅塞固体火箭冲压发动机特性参数的调节能力基本达到了等空燃比调节, 同时也说明贫氧推进剂的燃速压强指数对空燃比的调节能力影响很大。

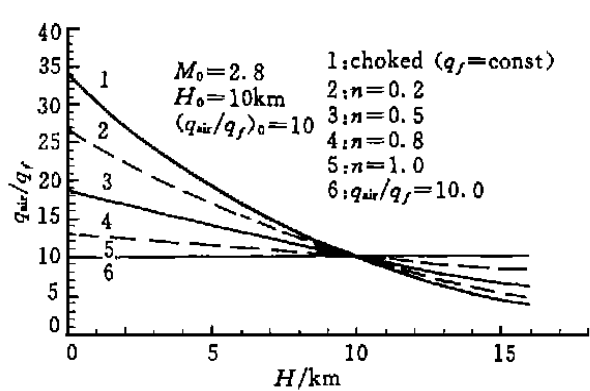


图 1 固体火箭冲压发动机空燃比的高度特性
Fig. 1 Altitude characteristics of mass ratio of air to fuel

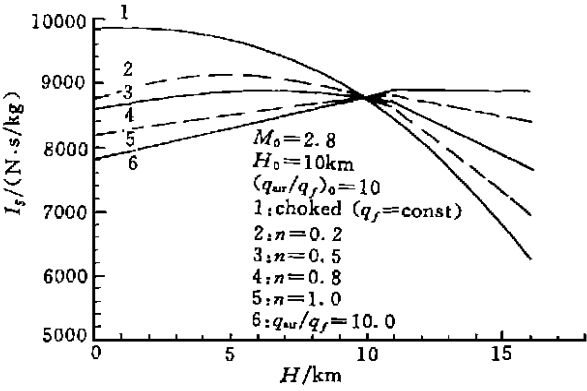


图 2 固体火箭冲压发动机比冲的高度特性
Fig. 2 Altitude characteristics of specific impulse

从三类固体火箭冲压发动机比冲的高度特性可以看出, 燃气流量固定的壅塞式火箭冲压发动机不适用于工作空域大、要求多弹道飞行的任务。燃气流量完全调节的冲压发动机则是最佳的。对非壅塞固体火箭冲压发动机, 当燃速压强指数在 0.8~ 1.0 时, 冲压发动机比冲的高度特性基本上与等空燃

比调节的冲压发动机相同。

3 固体火箭冲压发动机的速度特性

三类固体火箭冲压发动机的特性参数随飞行马赫数的变化规律如图 4~ 图 6 所示。

数值计算结果表明，燃气流量固定的壅塞式固体火箭冲压发动机的特性参数随飞行马赫数变化最大。等空燃比工作的固体火箭冲压发动机的速度特性最佳。对于非壅塞固体火箭冲压发动机，空燃比的变化规律随贫氧推进剂的燃速压强指数不同而有显著的差异，当贫氧推进剂的燃速压强指数为 1.0 时，非壅塞固体火箭冲压发动机的特性参数随马赫数变化的规律与等空燃比工作的固体火箭冲压发动机的速度特性基本相同，即接近于等空燃比工作状态。

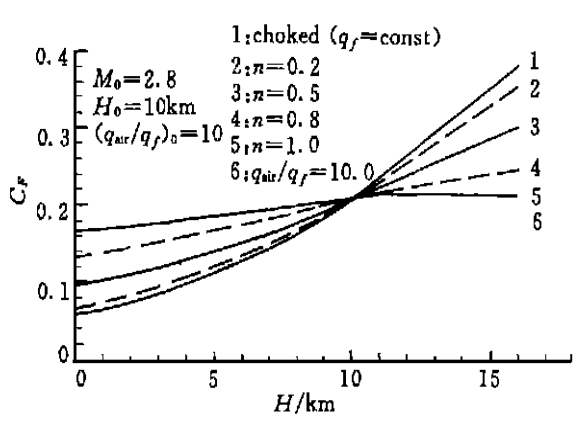


图 3 固体火箭冲压发动机推力系数的高度特性
Fig. 3 Altitude characteristics of thrust coefficient

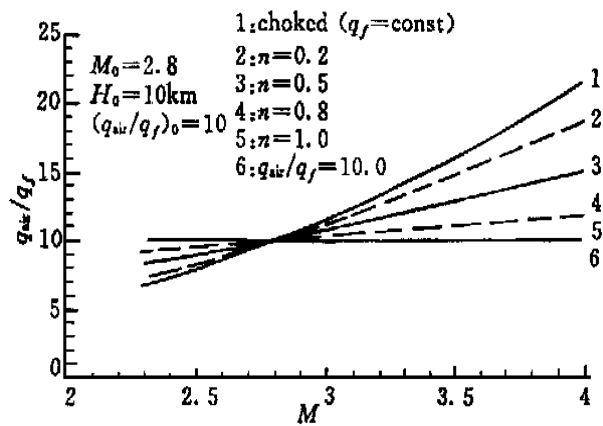


图 4 固体火箭冲压发动机空燃比的速度特性
Fig. 4 Velocity characteristics of mass ratio of air to fuel

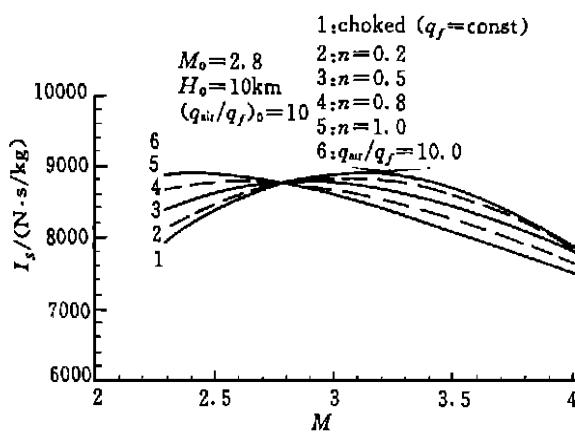


图 5 固体火箭冲压发动机比冲的速度特性
Fig. 5 Velocity characteristics of specific impulse

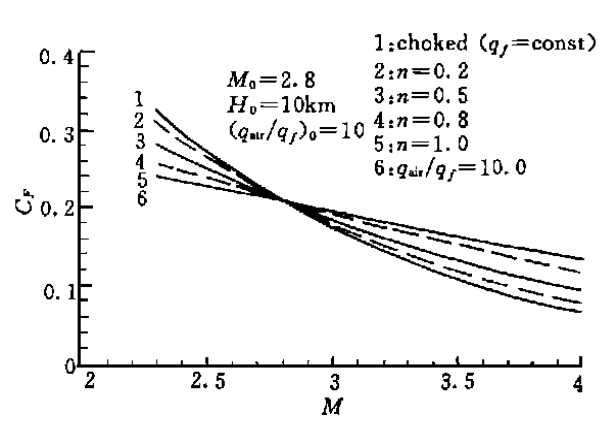


图 6 固体火箭冲压发动机推力系数的速度特性
Fig. 6 Velocity characteristics of thrust coefficient

4 三类固体火箭冲压发动机的性能分析

综上所述，等空燃比工作的固体火箭冲压发动机的性能最佳。但由于燃气流量调节系统复杂，且燃气发生器喉部调节装置需长时间工作在高温、高速燃气冲刷的恶劣环境中，技术难度很大，故工程上目前仍很难实现固体火箭冲压发动机的等空燃比工作。

当冲压发动机导弹的高度和速度发生变化时,燃气流量固定的壅塞式固体火箭冲压发动机的燃气流量不变,导致非设计工况下冲压发动机性能变差。燃气流量固定的壅塞式固体火箭冲压发动机采用低燃速压强指数的贫氧推进剂。燃气流量固定的壅塞式固体火箭冲压发动机的优点是:冲压发动机在高空低速情况下工作时,尽管其工作特性变差,但不存在燃气发生器熄火的可能。

非壅塞固体火箭冲压发动机结构简单,却能实现燃气流量自适应调节。当贫氧推进剂燃速压强指数为1.0左右时,基本上可达到燃气流量的完全调节。对于非壅塞固体火箭冲压发动机,贫氧推进剂的燃速压强指数越大,燃气流量的自适应调节能力越强,越能够发挥其优势。但该类冲压发动机在高空低速情况下工作时,有燃气发生器熄火的可能,因此对贫氧推进剂有低压燃烧稳定性的要求。

从国外固体火箭冲压发动机导弹的应用情况看,只有燃气发生器燃气流量可调的冲压发动机才能得到实际应用,这充分说明燃气流量调节的重要性。实现燃气流量调节的途径有燃气发生器喉部调节和非壅塞燃气发生器的再适应调节。显然,燃气流量调节的冲压发动机应采用高燃速压强指数的贫氧推进剂。

5 结论

固体火箭冲压发动机的高度特性和速度特性的计算结果表明:

燃气流量固定的壅塞式冲压发动机工作特性随飞行高度和速度的变化幅度最大,故不适用于工作空域大、要求多弹道飞行的任务。但该类的优点是,冲压发动机在高空低速情况下工作时,尽管其工作特性变差,却不存在燃气发生器熄火的可能。

等空燃比工作的冲压发动机性能最佳,但在工程上难以实现。

非壅塞固体火箭冲压发动机可以实现燃气流量的完全调节。当燃速压强指数为1.0时,非壅塞固体火箭冲压发动机基本可实现燃气流量完全调节。贫氧推进剂的燃速压强指数越高,非壅塞固体火箭冲压发动机的性能调节能力越强。但该类固体火箭冲压发动机在高空低速情况下可能出现熄火。

参考文献:

- [1] 刘兴洲等. 飞航导弹动力装置 [M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [2] 方丁酉等. 固体火箭发动机内弹道学 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.
- [3] 戴耀松. 固体火箭-冲压发动机的研究进展 [J]. 推进技术, 1987, 5: 40.
- [4] [前苏] 阿列玛索夫 B E 等. 火箭发动机原理 [M]. 张中钦, 庄逢辰等译. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [5] [前苏] 朱也夫 B C, 马卡伦 B C. 冲压和火箭-冲压发动机原理 [M]. 刘兴洲等译. 北京: 国防工业出版社, 1975.