

文章编号: 1000-8055(2010)02-0477-06

结构参数对环簇式塞式喷管性能的影响

任军学, 刘 宇, 谢 侃
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 为研究环簇式塞式喷管设计中人为选择的结构参数对性能的影响, 在单元间距与内喷管出口直径比、单元喷管数目、内喷管面积比分别相同的前提下, 计算并比较了三种塞式喷管的推力效率。结果表明, 高空下内喷管面积比 30.2 的 8 单元接触式的效率最高, 而低空下内喷管面积比 20.7 的 8 单元间隔式的效率最高。因此在总面积比一定的情况下, 若塞式喷管在中低空高度下工作, 则单元内喷管面积比可取得小些, 以保证中低空下的效率; 反之, 则单元内喷管面积比尽量取得大些。

关 键 词: 火箭发动机; 塞式喷管; 结构参数; 数值模拟; 性能分析

中图分类号: V430

文献标识码: A

Effect of configurative parameter on the performance of clustered plug nozzles

REN Jun-xue, LIU Yu, XIE Kan

(School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to investigate the effect of uncertain design parameters on the performance of cluster plug nozzles in design method, two types of 8-module and one type of 16-module clustered plug nozzles were designed with the same total area ratio and shape size. Their thrust efficiencies were calculated numerically, and also compared respectively under the condition of same module gap and diameter ratio, module number and module area ratio. The 8-touched-module clustered plug nozzle with module area ratio of 30.2 had the highest efficiency in high attitude and the 8-separated-module clustered plug nozzle with module area ratio of 20.7 had the highest efficiency in low attitude. In the design procedure, a bigger module area ratio can be selected to enhance its performance when the clustered nozzle works in medium and low attitude, otherwise a smaller one can be selected.

Key words: rocket engine; plug nozzle; configurative parameter;
numerical simulation; performance analysis

目前应用在轴对称火箭或导弹的塞式喷管, 其结构型式主要包括: 环喉式^[1]、环簇式^[2-5]和环簇瓦状式^[6]。国内外对这三种结构型式的塞式喷管都进行过研究。环簇式塞式喷管在热防护和结构的实现上比另外两种构型更具优势。

环簇式塞式喷管结构参数主要包括: 喷管总

面积比 ε_a , 单元喷管面积比 ε_m , 单元喷管数目 N , 单元倾斜角 θ , 相邻单元的间距 δ , 塞锥截短率 T_r , 单元喷管形状等(见图 1)。在环簇式塞式喷管的设计中, 通常喷管总面积比 ε_a 是已知的, T_r 为独立的参数, ε_m , N 和 δ 这三个参数是相互关联的, 已知两个便可得到另外一个参数和 θ 。因此,

收稿日期: 2009-02-17; 修订日期: 2009-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(50476002)

作者简介: 任军学(1980-), 男, 湖北随州人, 博士后, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

存在这样的问题: ε_d 限定的情况下, ε_m , N 和 δ 这三个参数如何选取比较合适? 它们对塞式喷管性能有何影响? 因此有必要进行研究, 以确定设计时选定这些参数的一些原则.

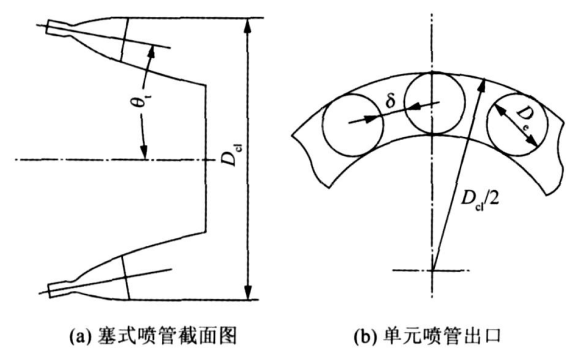


图 1 环簇式塞式喷管几何构型
Fig. 1 Geometry configuration of the clustered plug nozzle

在结构参数对塞式喷管的性能影响方面, 已有一些相关的研究. 文献[6]研究了内喷管单元间距对多单元线性塞式喷管性能的影响. 文献[7]研究了内喷管面积比对多单元线性塞式喷管性能的影响. 但由于塞锥构型和前提条件不同, 其外形尺寸也未加限制, 因此上述研究的结论不能直接用于环簇式塞式喷管.

实际设计中环簇式塞式喷管的径向尺寸和长度会被限制, 因此在外形尺寸相同的情况下, 考虑三种情况进行分析: ①总面积比和单元间距相同, 单元个数和内喷管面积比不同; ②总面积比和单元面积比相同, 单元个数和间距不同; ③总面积比和单元数相同, 内喷管面积比不同. 通过在不同的前提条件下, 研究结构参数变化对环簇式塞式喷管性能的影响, 从而得到选定这些参数的原则, 为环簇式塞式喷管的设计提供指导.

1 研究对象和方法

1.1 塞式喷管的结构参数

模拟计算对象为美国 Rockdyne 公司冷流实

表 1 三种塞式喷管的几何参数

Table 1 Geometry parameters of three clustered plug nozzles

单元数	单元间距	内喷管喉部直径/mm	内喷管面积比 ε_m	倾角 $\theta/(^\circ)$	$L_{\text{nozzle}}/\text{mm}$	$L_{\text{plug}}/\text{mm}$
8	0	9.5	30.2	5.4	91.25	24.32
16	0	6.7	20.7	9.5	91.25	54.72
8	$1/3 D_e$	9.5	20.7	5.4	91.25	43.54

验中采用的两种 8 单元和一种 16 单元环簇式塞式喷管^[2]. 三种喷管喉部总面积相同, 总面积比 ε_d 都为 50, 总长度为标准锥形喷管长度的 30%. 在上述条件下进行设计, 则图 2(a), (b) 为相同的单元间距与内喷管出口直径之比 (δ/D_e) 下 (此处内喷管出口处间隙都为零) 的 8 单元 (环簇) 和 16 单元环簇式塞式喷管. 图 2(c) 为与 16 单元相同内喷管面积比下设计的 8 单元塞式喷管 (间隔). 此时单元内喷管的面积比减小到 20.7 时, 内喷管之间会有间隙, 间隙的大小为 $1/3$ 出口直径. 表 1 给出了三种塞式喷管的几何参数.

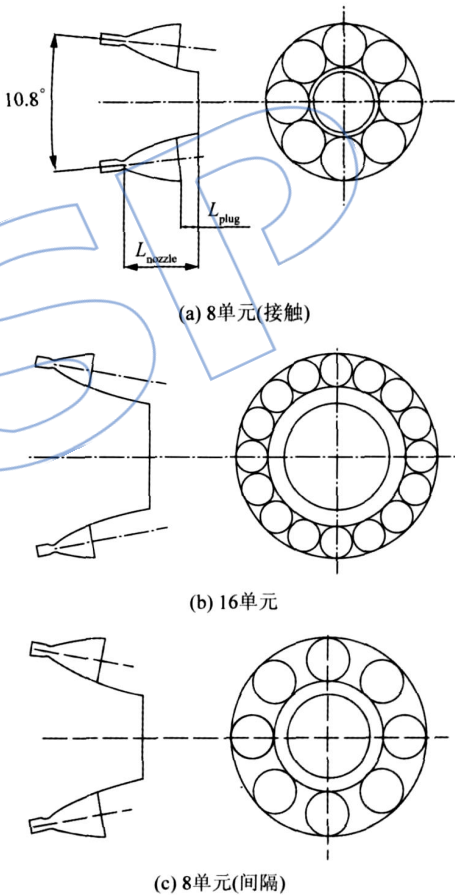


图 2 三种环簇塞式喷管的示意图
Fig. 2 Sketch map of three clustered plug nozzles

在采用空气作为工质时,按照一维喷管理论计算,三种塞式喷管的压比都为 1 445,其中 16 单元和 8 单元(间隔)内喷管完全膨胀时的时压比为 401,8 单元(接触)内喷管完全膨胀时的压比为 697。

1.2 数值方法

在对塞式喷管流场进行数值模拟时,在计算中作如下假设:①外流与主流取相同的物性参数;②忽略外流可能产生的流动,认为外流静止。这两个假设对计算塞式喷管性能影响不大^[3]。计算采用有限体积法。其中对流项采用二阶迎风格式离散,黏性项采用中心差分格式离散,湍流模型采用 Spalart-Allmaras 一方程模型。采用 Fluent 6.0 软件求解。

模拟工作参数如下:燃烧室总压 7 MPa,总温 300 K。工作介质为空气。在计算时,将内喷管和塞锥流场进行统一计算。根据塞式喷管的对称性,内喷管单元只计算单元的 1/2,对塞锥只计算 1/2 内喷管单元对应的部分,两侧平面按对称面处理。塞式喷管的计算模型、网格划分和边界条件的处理可参见文献^[3]。推力效率定义为实际推力与理论推力之比,理论推力为外界环境压强等于理想喷管出口压强时的推力值。

2 计算结果验证及流场分析

2.1 计算结果验证

为考察计算结果的准确性,图 3 给出了 8 单

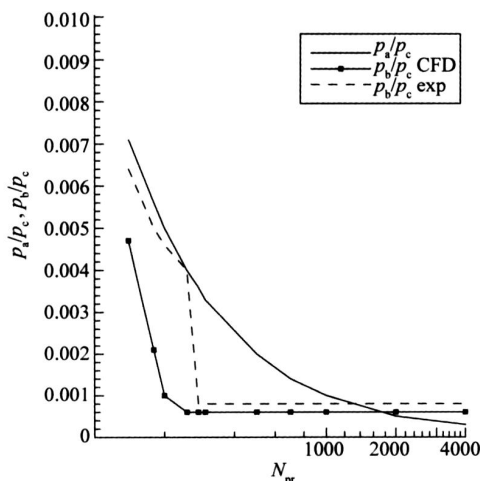


图 3 8 单元(接触)塞式喷管底部压强

Fig. 3 Base pressure of 8-touched module clustered plug nozzle

元(接触)塞式喷管底部压强的 CFD(计算流体力学)数值模拟结果和实验结果^[2]的对比,从图中可以看出,在高空情况下底部流场封闭后压强的计算结果是比较准确的,在低空底部流场开放时计算结果精度稍差些。为此,后面的推力效率的计算中,底部压强将使用实验值。

图 4 给出了 8 单元(接触)喷管推力效率 η 随喷管压比 N_{pr} (喷管压比 N_{pr} 为燃烧室压强与环境压强之比)变化时计算结果与实验结果^[2]的对比,可以看出,计算结果和实验结果趋势吻合,表明计算结果可信。

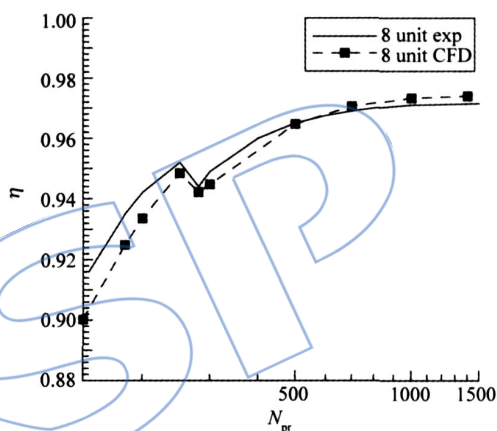


图 4 8 单元(接触)塞式喷管推力效率

Fig. 4 Thrust efficiency of 8-touched module clustered plug nozzle

2.2 流场分析

图 5、图 6 为三种塞式喷管在低空和高空环境下塞锥压强的分布情况。图 5 中低空情况下喷管压比 $N_{pr} = 100$ 时, N_{pr} 低于内喷管完全膨胀时的压比,三种塞式喷管的内喷管气流都处于过膨胀状态。由于外界反压的作用,气流在塞锥上没有完全膨胀,塞锥的上游存在低压的区域。对于 8 单元(接触)塞式喷管,由于塞锥上间隔较大,内喷管中流出的燃气流在塞锥上相互作用不强,而 16 单元塞式喷管,燃气流间的作用稍强些。

图 6 为高空 $N_{pr} = 1000$ 时的情况,三种塞式喷管的内喷管气流处于欠膨胀状态,并在内喷管出口处的燃气剧烈膨胀,在塞锥上相互作用,形成了明显的斜激波簇。由于 8 单元(接触)塞式喷管间距较大,斜激波的强度也较 16 单元的要明显些。

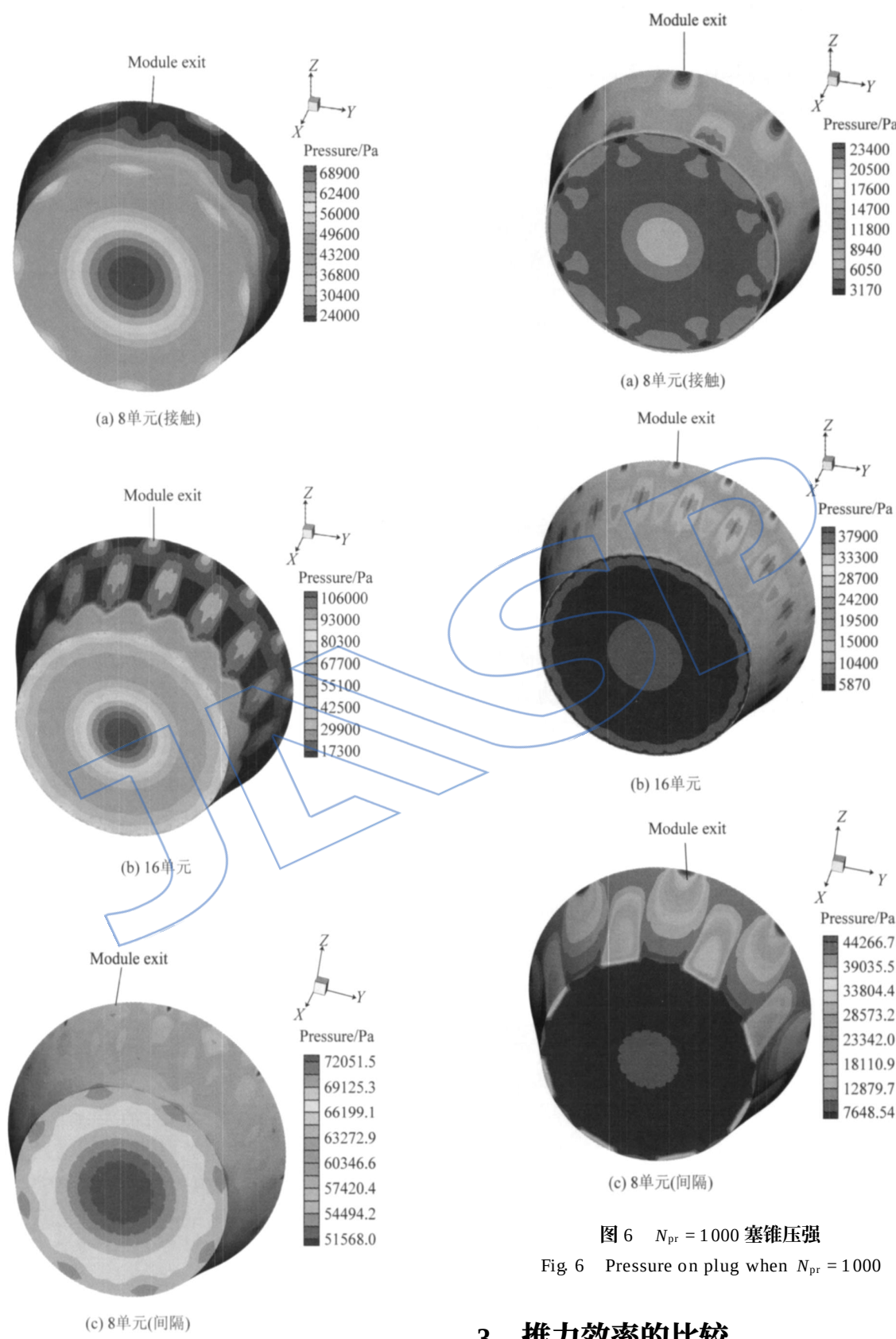


图 5 $N_{pr} = 100$ 塞锥压强
Fig 5 Pressure on plug when $N_{pr} = 100$

图 6 $N_{pr} = 1000$ 塞锥压强
Fig 6 Pressure on plug when $N_{pr} = 1000$

3 推力效率的比较

3.1 δD_e 相同,单元数不同

图 7 给出了这两种塞式喷管推力效率的对比.可以看出,低空下 ($N_{pr} < 400$) 16 单元塞式喷

管的效率稍高于 8 单元(接触)塞式喷管.而在高空情况下 16 单元塞式喷管的效率低 8 单元塞式喷管 1%左右.这是因为在低空两者的内喷管都处于过膨胀情况下,16 单元的内喷管面积比小,效率要高些,也使得 16 单元塞式喷管总体上性能高些.而在高空情况下,虽然 16 单元的单元间压强损失和激波损失比 8 单元(接触)的更小,但整体上不足以超越 8 单元(接触)更高单元面积比所带来的性能优势.

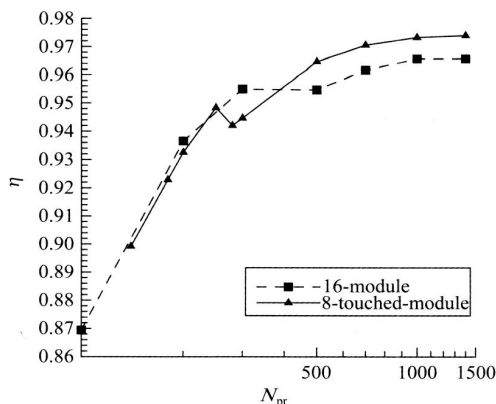


图 7 8 单元(接触)与 16 单元塞式喷管推力效率
Fig. 7 Thrust efficiencies of 8-touched-module and 16-module clustered nozzles

3.2 单元喷管数相同,内喷管面积比不同

图 8 给出了 8 单元(间隔)和 8 单元(接触)塞式喷管的性能对比.可以看出,外界环境压强不同,两者性能情况也有所变化.低空情况下,8 单元(间隔)塞式喷管的性能要高于 8 单元(接触)塞式喷管;高空($N_{pr} > 400$)情况下情况相反.

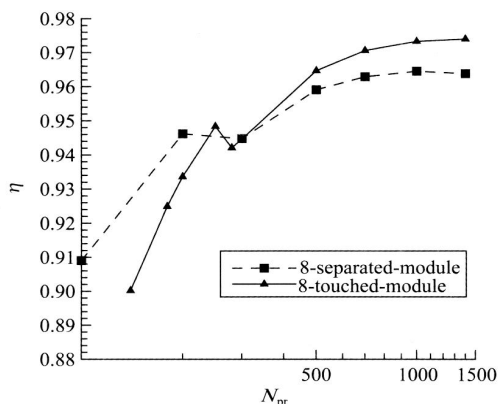


图 8 8 单元(间隔)与 8 单元(接触)塞式喷管推力效率
Fig. 8 Thrust efficiencies of 8-separated-module and 8-touched-module clustered nozzles

8 单元(间隔)塞式喷管内喷管面积比小,在低空情况下性能占优;但高空情况下,由于间隙大,由激波系引起的性能损失也更大,所以高空性能差.同时可以看出,相对于 8 单元(接触)塞式喷管,尽管 8 单元(间隔)塞式喷管的内喷管间距大,但在低空中带来的性能损失不大,而在高空中带来较大的性能损失.

3.3 内喷管面积比相同,单元数不同

图 9 给出了 8 单元(间隔)和 16 单元塞式喷管的性能对比.低压比情况下(图中为 $N_{pr} < 140$),8 单元(间隔)塞式喷管的性能比 16 单元塞式喷管要高,高压比的情况下(图中为 $N_{pr} > 900$),情况相反.上述结论在高压比下和文献[5]中的结论一致,但在低压比下不一致.原因在于文献[5]中的压比范围在低压比情况下取得不够低,没有考虑到内喷管过膨胀的情况,从而未能包括上述现象.

低压比情况下,8 单元(间隔)塞式喷管的性能高的原因是:尽管有间隙存在,但由于单元间燃气流相互干涉的作用较弱,因而由间隙带来的损失不大.从图 5 中两喷管的塞锥压强分布可以看出,虽然两者的内喷管面积比相同,但塞锥流场分布相差较大,8 单元(间隔)塞式喷管由于单元间间隙大而使得塞锥表面压强更接近于环境压强,塞锥上压强高的面积更大些.在高压比情况下,8 单元(间隔)塞式喷管性能稍低的原因是单元间间距造成的主流中的激波损失更大些.

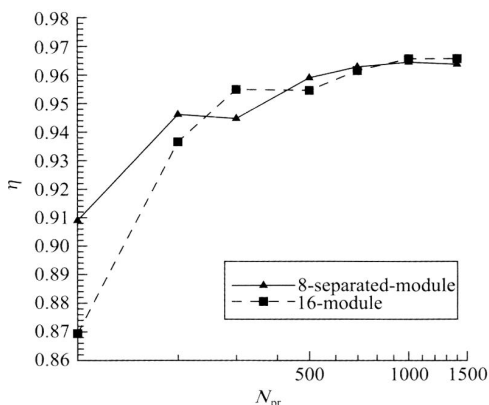


图 9 8 单元(间隔)与 16 单元塞式喷管推力效率
Fig. 9 Thrust efficiencies of 8-separated-module and 16-module clustered nozzles

3.4 综合比较

三种环簇式塞式喷管中,高空中 8 单元接触

式(内喷管面积比 30.2)的效率最高,而低空中 8 单元间隔式(内喷管面积比 20.7)的最高。因此,在实际设计中,在总面积比一定的情况下,若塞式喷管在中低空高度下工作,则单元内喷管面积比可取得小些,以保证中低空下的效率;反之,则单元内喷管面积比尽量取得大些。

文献[7]认为,多单元塞式喷管在设计时应保证内喷管在地面附近不发生膨胀的前提下选择内喷管面积比。但本文的算例表明,内喷管设计面积比选取较大使得环簇式塞式喷管在低空情况下由于过膨胀损失造成性能下降,但在高空可以达到较高的性能。所以在高空应用的场合,内喷管的面积比可以设计得大些,而不受地面避免过膨胀的限制。

4 结 论

由于环簇式塞式喷管在设计方法中,结构参数不能完全确定,本文研究了结构参数对环簇式塞式喷管性能的影响,总结出规律如下:

1) 低空和高空情况下,内喷管的间隙对环簇式塞式喷管性能的影响是不同的。低空下,内喷管的间隙对塞式喷管性能影响较小,高空下内喷管的间隙会造成较大的损失。

2) 在外形尺寸和总面积比相同的情况下,结构参数对环簇式塞式喷管性能的影响为:单元间隙与内喷管出口直径比相同的情况下,低空下单元数多的塞式喷管性能高,高空情况相反;单元内喷管数目相同情况下,低空下有间距塞式喷管的性能要高于接触式塞式喷管,高空情况相反;内喷管面积比相同的情况下,低空下单元数少的塞式喷管性能高些,高空情况相反。

3) 在总面积比一定的情况下,单元内喷管面积比的选取需考虑塞式喷管的工作高度范围。若塞式喷管在中低空高度范围内工作,则单元内喷管面积比可取得小些,以保证中低空下的效率;反之,则单元内喷管面积比可尽量取得大些,并不受避免其地面过膨胀的限制。

参考文献:

- [1] Angelino G. Approximate method for plug nozzle design[J]. AIAA Journal, 1964, 2(10): 1934-1835.
- [2] Silver R. Advanced aerodynamic spike configurations: Volume 1 - Analytical and cold flow studies[R]. Rockwell International Corporation, Rocketdyne Division, Report AFRPL-TR-67-246-Vol I, 1967.
- [3] 任军学. 固体火箭发动机塞式喷管的设计和实验研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2007.
REN Junxue. Design and experimental study of aerospike nozzles in solid rocket motor[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [4] Vuilamy D, Duthoit V, Berry W. European investigation of clustered plug nozzles[R]. AIAA Paper 99-2350.
- [5] Ito T, Fujii K. Effect of module clustering on the aerospike nozzle performance[R]. AIAA Paper 2002-3119.
- [6] 李军伟, 覃粒子, 刘宇. 内喷管间隙宽度对线性塞式喷管性能的影响[J]. 宇航学报, 2004, 25(4): 423-428.
LI Junwei, QIN Lizi, LIU Yu. Effects of gap width between nozzles on linear plug nozzles performance[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(4): 423-428. (in Chinese)
- [7] 王长辉, 刘宇. 主要结构参数对直排塞式喷管性能的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(5): 439-443.
WANG Changhui, LIU Yu. Effects of primary configurative parameters on the performance of linear aerospike nozzles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(5): 439-443. (in Chinese)