

文章编号: 1000-8055(2010)12-2827-07

富氢/富氧燃气同轴剪切气-气喷嘴性能仿真分析

李 茂, 金 平, 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 采用正交试验设计方法对富氢/富氧燃气同轴剪切气-气喷嘴设计参数氧压降比、燃氧速度比、氧喷嘴出口壁厚进行组合, 数值模拟单喷嘴燃烧室燃烧流场, 研究喷嘴设计参数及参数之间的交互作用对燃烧性能和燃烧室热载性能的影响, 评价指标为燃烧长度、燃烧室壁面平均燃气温度和喷注面板平均燃气温度。仿真结果表明, 燃氧速度比对燃烧与热载有显著影响, 氧压降比与氢氧燃氧速度比的交互作用影响明显, 分析结果对气-气喷嘴试验设计有重要指导意义。

关 键 词: 喷嘴设计参数; 同轴剪切气-气喷嘴; 数值仿真; 正交试验设计; 燃烧长度; 平均燃气温度

中图分类号: V431⁺.13

文献标识码: A

Performance simulation analysis for a hydrogen-rich/oxygen-rich shear coaxial gas-gas injector

LI Mao, JIN Ping, CAI Guo-biao

(School of Astronautics,

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

Abstract: Based on orthogonal experiment design method, the design parameters of a hydrogen-rich/oxygen-rich shear coaxial gas-gas injector, including the ratio of the oxidizer pressure drop to the combustor pressure (D_p), the ratio of the fuel velocity to the oxidizer velocity (R_v), and the oxidizer post tip wall thickness (W_o), were combined. The flow field of the single injector combustor was simulated. The influences of the injector design parameters and the interaction of the parameters on the combustion performance and heat load performance were studied. Evaluation indexes include: combustion length (L_c), average gas temperature on combustion chamber wall (T_w) and average gas temperature on the injection faceplate (T_f). The results show that, the influence of R_v on the combustion performance and the heat load performance is remarkable. The influence of the interaction of D_p and R_v on the combustion performance and heat load is obvious. The results can provide reliable criterion for the gas-gas injector experiment design.

Key words: injector design parameters; shear coaxial gas-gas injector; numerical simulation; orthogonal experiment design; combustion length; average gas temperature

随着航天科学技术突飞猛进的发展, 可重复使用火箭发动机技术受到了人们的关注。具有性能好、可靠性高等优点的全流量补燃循环发动机

是可重复使用大型液体火箭发动机的候选方案之一。

在氢/氧全流量补燃循环发动机中, 所有流量

收稿日期: 2009-11-03; 修订日期: 2010-01-15

作者简介: 李茂(1983—), 男, 湖南长沙人, 博士生, 主要从事全流量补燃循环发动机富氧预燃室技术和富氢/富氧燃气气-气燃烧技术研究。

的推进剂均通过富氢/富氧两个预燃室燃烧,形成的富氢/富氧燃气驱动涡轮后进入推力室补燃,推力室喷嘴为气-气喷嘴,其关键技术之一为气-气燃烧.气-气喷嘴与常规的气-液、液-液喷嘴不同,推进剂喷注后没有雾化蒸发过程,直接掺混燃烧;推进剂的初始温度高,体积流量大,气-气喷嘴这些特征对发动机设计提出了新的挑战^[1].

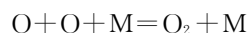
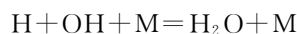
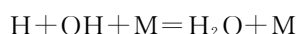
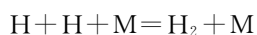
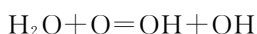
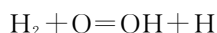
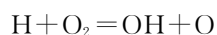
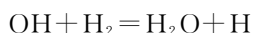
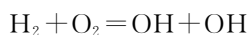
近年来,研究者对以全流量补燃循环发动机为技术背景的气-气喷嘴设计、试验及数值模拟方面进行了大量的研究工作^[2-6],获得了气-气燃烧的规律,但大部分工作是以常温氢气/氧气为推进剂开展的,以富氢/富氧燃气为推进剂的相关研究工作开展得很少.相比常温氢气/氧气推进剂,富氢/富氧燃气除温度更高、体积流量更大外,燃气组分也有明显变化,常温氢气/氧气气-气燃烧规律并不能直接应用到富氢/富氧燃气气-气喷嘴设计中.而实际工程应用的气-气喷嘴推进剂为富氢/富氧燃气,因此有必要开展富氢/富氧燃气气-气喷嘴研究.

影响富氢/富氧燃气气-气喷嘴性能的喷嘴设计参数种类多,取值范围广,如果对喷嘴的设计参数采取全面的仿真和试验研究,势必耗费大量的计算资源、试验资源,造成人力、物力和时间的浪费,并有可能难以达到预期效果.为保证以较少的试验次数、较短的试验周期、较低的试验费用获得较好的试验结果,本文采用正交试验设计方法^[6-8]对同轴剪切气-气喷嘴进行数值试验设计,利用仿真结果预示喷嘴设计参数对气-气燃烧性能和传热性能影响的主次.

1 正交数值试验设计

1.1 数值计算方法

本文使用 FLUENT 商业软件,通过求解使用 $k-\epsilon$ 湍流模型的 Navier-Stokes 方程组对富氢/富氧燃气同轴剪切气-气单喷嘴燃烧室燃烧流场进行数值模拟,采用双精度涡-耗散-概念模型.化学反应如下(M 为第三载体):



化学反应速率由阿累尼乌斯公式计算^[9-10].

单喷嘴燃烧室设计压力为 3 MPa,流量为 226 g/s,混合比为 6,富氢/富氧燃气由预燃室产生,不计从预燃室到燃烧室的能量损失,富氢/富氧燃气参数如表 1 所示.

表 1 推进剂参数

Table 1 Propellant parameters

类型	质量流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	预燃室 混合比	组分质量分数/%		
			氢气	氧气	水
富氧燃气	180	320	0	97.22	2.78
富氢燃气	46	0.45	65.08	0	34.92

计算区域见图 1,燃烧室直径 26 mm,圆柱段长度 250 mm(不包括喷管),总计算网格约 40 000 个,壁面附近网格加密.计算边界条件采用质量入口、压力出口、固壁绝热无滑移.



图 1 计算区域

Fig. 1 Simulation region

1.2 评价指标

喷嘴设计参数对气-气喷嘴性能的影响主要体现在燃烧和传热两方面,在发动机设计中,要求尽量提高燃烧性能,同时又要使发动机承受的热载尽可能的低.本文以数值计算获得的燃烧长度 L_c 评价燃烧性能,喷注面板处平均燃气温度 T_i 和燃烧室壁面处平均燃气温度 T_w 作为热载的参考评价参数. L_c 定义如下:从喷注面板至燃烧室内水组分质量达到热力计算水组分质量 90% 的燃烧室截面的距离;喷注面板指从同轴剪切喷嘴外径到燃烧室壁面之间的部分;燃烧室壁面指燃烧室圆柱段壁面,不包括喷管.图 2 为仿真的典型结果.图 2(a)为水组分沿燃烧室轴向分布,由于入口燃气中含一定量的水,因此燃烧室入口水组分不为零;图 2(b)和(c)分别为燃烧室壁面和喷注面板处燃气温度分布的典型结果,图 2(b)中半径 8 mm 以内为喷嘴结构,从图中可以看出沿燃烧室轴向水组分质量分数和燃烧室壁面燃气温度不断上升.

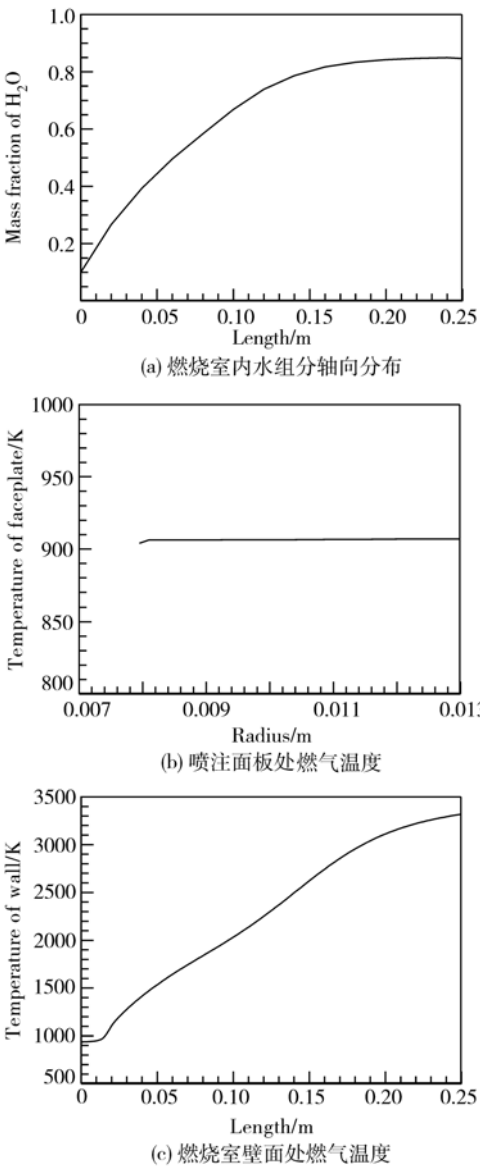


图 2 典型仿真结果

Fig. 2 Typical simulation results

1.3 喷嘴设计参数

本文数值仿真选择的喷嘴设计参数为:氧压降比 D_p (富氧燃气压降值/燃烧室压力)、燃氧速度比 R_v 、氧喷嘴出口壁面厚度 W_o 。氧压降比和燃氧速度比是影响燃烧的两个重要参数^[11-12],氧喷嘴出口壁厚会影响到燃烧火焰的稳定性^[13],对燃烧也有一定的影响。参数取值水平见表 2。

1.4 仿真试验安排

考虑到喷嘴设计参数(以下简称因素)之间联合搭配可能会对评价指标产生影响,本文采用 $L_{27}(3^3)$ 正交表对喷嘴设计参数和设计参数交互作用进行数值试验设计,分析单因素和因素之间的交互作用对燃烧和热载性能的影响。正交试验

表头设计如表 3 所示,因素水平安排和仿真结果如表 4 所示(交互作用列表中未给出,具体设置详见参考文献[14])。

表 2 喷嘴设计参数

Table 2 Injector design parameters

水平数	$D_p/\%$	R_v	W_o/mm
1	4	4	1
2	6	6	1.5
3	8	8	2.0

表 3 表头设计

Table 3 Form design

因素	列号	因素	列号
D_p	1	$(D_p \times W_o)_2$	7
R_v	2	$(R_v \times W_o)_1$	8
$(D_p \times R_v)_1$	3	空白	9,10
$(D_p \times R_v)_2$	4	$(R_v \times W_o)_2$	11
W_o	5	空白	12,13
$(D_p \times W_o)_1$	6		

表 4 参数安排及仿真结果

Table 4 Parameters design and simulation results

No.	$D_p/\%$	R_v	W_o/mm	L_c/mm	T_w/K	T_f/K
1	4	4	1.0	198.9	1507.9	759.2
2	4	4	1.5	197.0	1517.8	758.7
3	4	4	2.0	194.3	1544.5	762.3
4	4	6	1.0	163.9	1839.9	798.0
5	4	6	1.5	161.9	1851.9	794.6
6	4	6	2.0	161.1	1858.1	792.4
7	4	8	1.0	141.6	2064.9	864.5
8	4	8	1.5	139.8	2072.7	857.0
9	4	8	2.0	139.3	2075.5	850.2
10	6	4	1.0	225.3	1504.2	808.3
11	6	4	1.5	220.3	1523.2	806.7
12	6	4	2.0	218.2	1535.8	809.0
13	6	6	1.0	175.0	1897.7	925.7
14	6	6	1.5	172.4	1908.5	919.4
15	6	6	2.0	171.0	1917.1	919.0
16	6	8	1.0	145.1	2161.4	1032.9
17	6	8	1.5	141.6	2179.0	1030.3

续表 4

No.	$D_p/\%$	R_v	W_o/mm	L_c/mm	T_w/K	T_l/K
18	6	8	2.0	141.3	2173.3	1021.0
19	8	4	1.0	248.8	1527.9	868.4
20	8	4	1.5	248.8	1527.9	868.4
21	8	4	2.0	248.8	1527.9	868.5
22	8	6	1.0	187.7	1925.1	1023.1
23	8	6	1.5	187.3	1917.2	1011.7
24	8	6	2.0	183.8	1940.2	1016.6
25	8	8	1.0	149.4	2223.7	1162.1
26	8	8	1.5	150.6	2202.1	1139.0
27	8	8	2.0	146.3	2227.5	1141.9

2 仿真结果分析

根据正交试验设计的数据处理流程可以得到不同因素对各个评价指标的极差和方差,并通过方差的 F 值检验喷嘴设计参数对评价指标影响大小的显著性.极差、方差计算方法和 F 值检验方法详见参考文献[14-15].

2.1 燃烧长度分析

表 5 为不考虑因素交互作用的氧压降比、燃氧速度比和氧喷嘴厚度对燃烧长度的极差分析结果.表中 k_i 表示在相同因素水平下评价指标的平均值, i 为因素水平; R 值为极差,表示同一列中 k_i 中最大值与最小值的差值,极差大表明该因素变化对指标影响大,极差小说明因素变化对指标影响小.图 3 根据表 5 极差分析结果做出的因素影响趋势图.从趋势图上可以看出燃氧速度比对燃烧长度影响最明显.燃氧速度比增加会加强掺混燃烧,燃烧性能好,掺混燃烧长度短;氧压降比增加使中心氧喷射速度增加,掺混燃烧距离加

长;氧喷嘴出口壁厚增加有利于氢氧燃烧的火焰稳定,对燃烧性能的提升有一定的影响.

表 5 燃烧长度极差分析结果
Table 5 Results of the L_c range analysis

序号	D_p	R_v	W_o
k_1	166.4	223.3	182.5
k_2	178.9	173.8	180.3
k_3	195.6	143.9	178.2
R	29.2	79.4	4.3

表 6 为燃烧长度的方差分析结果, S 为方差, f 为自由度, V 为均方, e 为误差, F 为因素的均方与误差均方的比值,注释中括号内数值分别为因素和误差的自由度.均方大则影响大,反之则影响小.根据方差大小可以看出,氧压降比、燃氧速度比、氧喷嘴出口壁厚、氧压降比和燃氧速度比交互作用的 F 值均大于 $F_{0.01}$,对燃烧长度均有高度显著影响,速度比的均方值最大,影响最明显;氧压降比与氧喷嘴出口壁厚、燃氧速度比与氧喷嘴出口壁厚交互作用的 F 值大于 $F_{0.05}$,小于 $F_{0.01}$,对燃烧长度有显著影响.表 7 是氧压降比与速度比的搭配对燃烧长度的影响,从结果可以看到,在不同速度比条件下,氧压降对燃烧长度的影响是不相同的,速度比小时氧压降影响大,速度比大时影响小;在不同的氧压降比条件下,氧压降比小时速度比影响小,氧压降比大时速度比影响大,说明两者存在明显交互作用,并对燃烧长度产生显著影响.方差结果说明要获得较小的燃烧长度需要选择高速度比、低氧压降比、大氧喷嘴出口壁厚的组合.喷嘴设计参数对燃烧长度的影响是各自对燃烧长度的单独作用再加上各个设计参数之间的搭配作用决定的,在喷嘴参数优化设计时需要综合考虑喷嘴设计参数之间的相互影响作用.

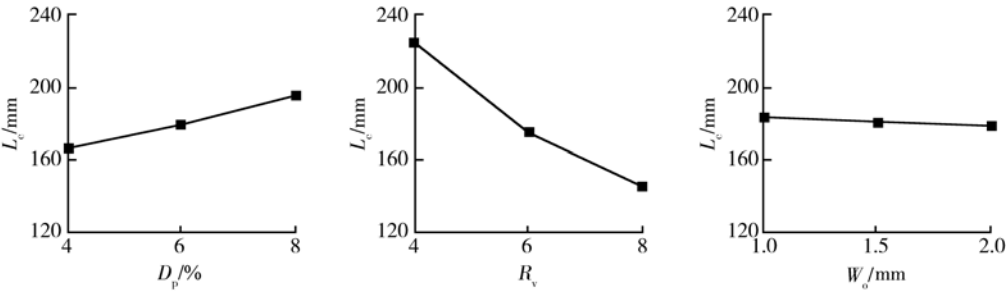


图 3 设计参数对燃烧长度的影响

Fig. 3 Influence of the design parameters on the L_c

表 6 燃烧长度方差分析结果
Table 6 Results of the L_c variance analysis

方差来源	S	f	V	F
D_p	3880.5	2	1940.3	5028.6
R_v	28993.0	2	14496.5	37570.7
W_o	79.9	2	40.0	103.6
$D_p \times R_v$	1703.9	4	426.0	1104.0
$D_p \times W_o$	9.9	4	2.5	6.4
$R_v \times W_o$	7.8	4	1.9	5.0
e	3.1	8	0.4	

注: $F_{0.05}(2,8)=4.46$, $F_{0.01}(2,8)=8.65$,
 $F_{0.05}(4,8)=3.84$, $F_{0.01}(4,8)=7.01$.

表 7 $D_p \times R_v$ 交互作用对燃烧长度的影响
Table 7 Influence of the interaction $D_p \times R_v$ on the L_c

R_v	D_p		
	4%	6%	8%
4	196.7	221.3	252.0
6	162.3	172.8	186.2
8	140.2	142.7	148.8

2.2 壁面燃气温度分析

图 4 是不考虑因素交互作用的喷嘴设计参数对燃烧室壁面处平均燃气温度影响的趋势图。从趋势图可以看出,燃氧速度比对壁面平均燃气温度影响最为明显,氧喷嘴厚度影响最小。从燃烧长度的分析结果可知,燃氧速度比增加燃烧性能提高,燃烧长度缩短,因此,同样也使壁面燃气温度升高较快,燃烧掺混使壁面燃气温度在较短的燃烧长度内达到较高值;氧压降比值增加会使燃烧长度增加,但氢氧燃气的绝对速度值增加,加强了

从喷嘴出口到壁面之间回流区域的燃气回流,整体壁面平均燃气温度上升;氧喷嘴厚度对燃烧性能影响相对较小,对壁面平均燃气温度的影响也相对较小。

表 8 是壁面平均燃气温度的方差分析结果。结果表明,氧压降比、燃氧速度比、氧喷嘴出口壁厚、氧压降比和燃氧速度比的交互作用对壁面平均燃气温度影响高度显著,速度比影响占主导作用,氧压降比和燃氧速度比交互作用对壁面平均燃气温度的影响是仅次于燃氧速度比和氧压降比的主要影响因素之一,而氧压降比和氧喷嘴出口壁厚、燃氧速度比和氧喷嘴出口壁厚交互作用的 F 值小于 $F_{0.05}$,对结果影响相对较小。表 9 是氧压降比和速度比搭配对壁面平均燃气温度的影响,在速度比为 4 时,氧压降比变化对壁面平均燃气温度影响很小,随速度比增加,氧压降比变化对燃气温度的影响增加;随氧压降增加,速度比对壁面平均燃气温度影响程度也在增加。如果仅考虑对壁面热载的影响,选择低速度比较好。

表 8 壁面平均燃气温度方差分析结果
Table 8 Results of the T_w variance analysis

方差来源	S	f	V	F
D_p	24904.2	2	12452.1	403.7
R_v	1825665.1	2	912832.5	29596.8
W_o	1664.6	2	832.3	26.7
$D_p \times R_v$	18673.2	4	4668.3	151.4
$D_p \times W_o$	453.3	4	113.3	3.7
$R_v \times W_o$	350.2	4	87.6	2.8
e	246.7	8	30.8	

注: $F_{0.05}(2,8)=4.46$, $F_{0.01}(2,8)=8.65$,
 $F_{0.05}(4,8)=3.84$, $F_{0.01}(4,8)=7.01$.

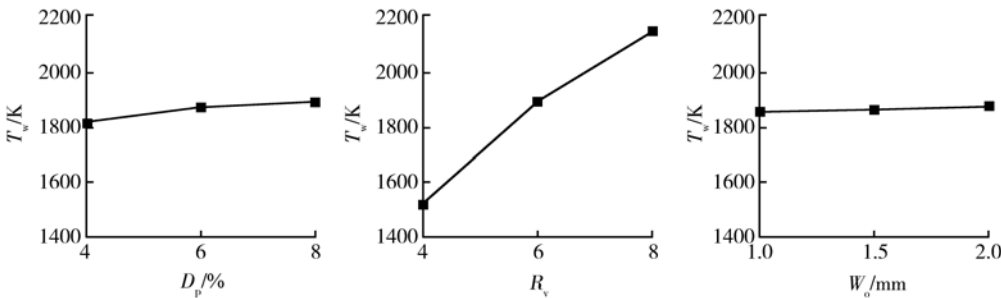


图 4 设计参数对壁面平均燃气温度的影响

Fig. 4 Influence of the design parameters on the T_w

表 9 $D_p \times R_v$ 交互作用对壁面平均燃气温度的影响
Table 9 Influence of the interaction $D_p \times R_v$ on the T_w

R_v	D_p		
	4%	6%	8%
4	1523.4	1521.1	1515.5
6	1850.0	1907.8	1927.5
8	2071.0	2171.2	2217.8

2.3 面板燃气温度

图 5 是不考虑因素交互作用下喷嘴设计参数对喷注面板处平均燃气温度的影响趋势图. 趋势图结果表明, 随氧压降比和燃氧速度比增加, 喷注面板处平均燃气温度增加趋势明显, 而随氧喷嘴

出口厚度增加, 喷注面板平均燃气温度呈下降趋势. 氧压降比和燃氧速度比的增加都会显著加强喷嘴出口至燃烧室壁面之间的燃气回流, 平均燃气温度随之增加; 氧喷嘴厚度增加使喷嘴出口至燃烧室壁面的回流区域略微减小, 因此平均燃气温度下降.

表 10 为喷注面板平均燃气温度方差分析结果. 从结果可以看出, 氧压降比、燃氧速度比、氧喷嘴厚度、氧压降比和燃氧速度比的交互作用对喷注面板燃气温度的影响是高度显著的, 燃氧速度比和氧喷嘴厚度的交互作用的影响相对较小, 而氧压降比和氧喷嘴厚度的交互作用影响最小. 相比氧压降比和速度比的均方值, 氧压降比与速度比交互作用的均方值小很多, 因此氧压降比和速度比的影响占主导地位.

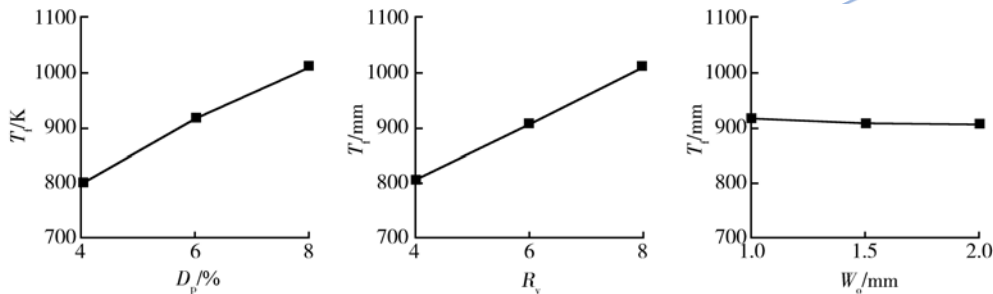


图 5 设计参数对喷注面板平均燃气温度的影响
Fig. 5 Influence of the design parameters on the T_i

表 10 喷注面板平均燃气温度方差分析结果
Table 10 Results of the T_i variance analysis

方差来源	S	f	V	F
D_p	193 620.1	2	96 810.1	12 432.7
R_v	17 7847.6	2	88 923.8	11 419.9
W_o	277.7	2	138.8	17.8
$D_p \times R_v$	26 418.2	4	6 604.6	848.2
$D_p \times W_o$	79.5	4	19.9	2.6
$R_v \times W_o$	202.3	4	50.6	6.5
e	62.3	8	7.8	

注: $F_{0.05}(2,8)=4.46$, $F_{0.01}(2,8)=8.65$,
 $F_{0.05}(4,8)=3.84$, $F_{0.01}(4,8)=7.01$.

3 结 论

喷嘴设计参数对富氢/富氧燃气同轴剪切气气喷嘴性能的正交数值仿真分析结果表明:

燃氧速度比增加加强了掺混燃烧, 燃烧长度

显著缩短, 燃烧性能提升, 但同时壁面的平均燃气温度和喷注面板的平均燃气温度也显著增加, 热载增加; 氧压降比增加不利于中心氧气掺混, 燃烧距离增加, 而喷注速度增加加强了喷注面板附近区域的高温燃气回流, 燃烧室壁面平均燃气温度呈上升趋势, 喷注面板平均燃气温度也显著增加, 增加喷注面板热防护难度; 相比燃氧速度比和氧压降比, 氧喷嘴出口壁厚影响小.

喷嘴设计参数的交互作用对喷嘴性能有影响, 其中燃氧速度比和氧压降比的交互作用对燃烧长度、壁面平均燃气温度和喷注面板平均燃气温度均有明显影响作用, 氧压降比和氧喷嘴出口壁厚、燃氧速度比和氧喷嘴出口壁厚对性能相对较弱. 在喷嘴设计中, 设计参数的交互作用值得注意.

参考文献:

[1] Archambault M, Talley D, Peroomian O. Computational analysis of a single-element, shear-coaxial, GH_2/GO_2 engine [R]. AIAA 2002-1088, 2002.

- [2] Tucker P K, Menon S, Merkle C L, et al. An approach to improved credibility of CFD simulations for rocket injector design[R]. AIAA 2007-5572, 2007.
- [3] Shyy W, Kevin T P, Vaidyanathan R. Response surface and neural network techniques for rocket engine injector optimization[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 7(2):391-401.
- [4] Vaidyanathan R, Kevin T P, Papila N, et al. Computational-fluid-dynamics-based design optimization for single-element rocket injector[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(4):705-717.
- [5] Marshall M W, Pal S. Benchmark wall heat flux data for a GO_2/GH_2 single element combustor [R]. AIAA 2005-3572, 2005.
- [6] 杜正刚, 高玉闪, 金平, 等. 基于正交设计的气-气喷嘴数值模拟[J]. 航空动力学报, 2009, 24(6):1396-1401.
DU Zhenggang, GAO Yushan, JIN Ping, et al. Numerical simulation of gas-gas injector based on orthogonal design [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6):1396-1401. (in Chinese)
- [7] 朱敏波, 钟杨帆, 段宝岩. 星载天线在轨热变形多因素影响仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(6):1376-1378.
ZHU Minbo, ZHONG Yangfan, DUAN Baoyan. Multiply factors simulation analysis for thermal deformation of space-borne antenna [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(6):1376-1378. (in Chinese)
- [8] 丁娣, 秦子增. 基于正交试验的大型降落伞开伞冲击载荷影响因素分析[J]. 国防科学技术大学学报, 2009, 31(3):11-15.
DING Di, QIN Zizeng. Analysis of parachute's deployment load and influent factors based on orthogonal experiment method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(3):11-15. (in Chinese)
- [9] Sozer E, Vaidyanathan A, Segal C, et al. Computational assessment of gaseous reacting flows in single element injector[R]. AIAA 2009-449, 2009.
- [10] Shang M, Chen Y, Paul L. Investigation of chemical kinetics integration algorithms for reacting flows[R]. AIAA 95-0806, 1995.
- [11] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [12] Knuth W, Crawford R. Oxygen-rich combustion process application and benefits[R]. AIAA 91-2042, 1991.
- [13] Mayer W, Schik A, Schweitzer C. Injection and mixing processes in high pressure LOX/GH_2 rocket [R]. AIAA 1996-2620, 1996.
- [14] 潘丽军, 陈锦权. 试验设计与数据处理[M]. 南京:东南大学出版社, 2008.
- [15] 成岳, 夏光华. 科学研究与工程试验设计方法[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2005.