

文章编号:1000-8055(2013)06-1380-07

富氢/富氧燃气同轴双剪切气-气喷嘴 性能仿真分析

姜金朋¹, 金 平¹, 蔡国飙¹, 王 珏^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 中国运载火箭技术研究院 总体设计部, 北京 100076)

摘 要: 为研究富氢/富氧燃气同轴双剪切气-气喷嘴设计参数对燃烧性能和燃烧室热载的影响, 采用正交试验设计方法对这些参数进行组合, 数值模拟单喷嘴燃烧室流场, 并以燃烧长度、燃烧室壁面和喷注面板处平均燃气温度为指标评价燃烧性能和热载。结果表明: 燃氧速度比对燃烧性能和燃烧室热载影响最显著, 中心氢流量比例对燃烧室热载影响非常显著, 氧压降比对喷注面板处燃气平均温度的影响也很显著, 而喷嘴出口壁厚对喷嘴性能影响不明显。燃氧速度比和氧压降比的交互作用对喷嘴性能有一定影响, 而其他设计参数之间的交互作用对喷嘴性能影响非常小。最短燃烧室长度为 117.9 mm, 最低壁面燃气温度及面板燃气温度分别为 1637.7 K 和 806.6 K。

关 键 词: 同轴双剪切气-气喷嘴; 喷嘴设计参数; 数值仿真; 正交试验设计; 燃烧性能; 燃烧室热载

中图分类号: V434⁺. 13

文献标志码: A

Orthogonal optimization design for a hydrogen-rich/oxygen-rich shear tricoaxial gas-gas injector

JIANG Jin-peng¹, JIN Ping¹, CAI Guo-biao¹, WANG Jue^{1,2}

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Systems Engineering Division,

China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: To study the influence of the design parameters of a hydrogen-rich/oxygen-rich shear tricoaxial gas-gas injector on the combustion performance and the heat load performance, the parameters were fitted combination through the orthogonal experiment design method. The flow field of the single injector combustor was simulated. Evaluation indexes were the combustion length, the average gas temperature on combustion chamber wall and the average gas temperature on the injection faceplate. The results show that the fuel velocity to the oxidizer velocity has the most remarkable influence on the combustion performance and the heat load performance, the percentage of the central fuel mass flow rate has very obvious impact on the heat load performance, and the ratio of the oxidizer pressure drop to the combustor pressure has notable influence on the faceplate temperature, while the oxidizer post tip wall thickness has insignificant influence on the performance of the injector. To some extent, the interaction between the velocity ratio and oxidizer pressure drop affects the

收稿日期: 2012-06-20

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1380_022.html

基金项目: 国家高技术研究发展计划

作者简介: 姜金朋(1988—), 女, 山东莱阳人, 博士生, 主要从事可重复火箭发动机研究。

performance of the injector, while other interactions of the design parameters have little influence. The shortest combustion length is 117.9 mm. The lowest wall temperature is 1637.7 K, and faceplate temperature is 806.6 K.

Key words: shear tricoaxial gas-gas injector; injector design parameters; numerical simulation; orthogonal experiment; combustion performance; combustion chamber heat load

人类航天活动日益频繁,在保证安全性、可靠性的前提下,有效降低进入空间的成本成为各国追求的重要目标,因此,可重复使用运载器受到越来越多的关注.而全流量补燃循环发动机性能好、可靠性高、寿命长、维修性良好,是有极好发展前景的动力系统方案^[1].

气-气喷嘴技术是全流量补燃循环发动机的关键技术之一^[2-4],近年来,研究者针对以常温氢气/氧气作推进剂的气气燃烧开展了大量研究工作,取得了丰富的成果^[5-9],但以富氢/富氧燃气作推进剂的研究工作很少.相比常温氢气/氧气推进剂,富氢/富氧燃气温度更高,燃烧性能和热载情况都将有所不同^[10];而且工程实际中,燃烧室入口喷注的是经过预燃室燃烧生成的富氢/富氧燃气.因此,以富氢/富氧燃气为推进剂的气-气喷嘴研究具有重要意义.

在喷嘴结构形式上,单喷嘴大流量喷嘴可减少喷嘴数目,有利于降低加工难度和成本,因此受到了火箭发动机设计者的关注^[11-13].同轴双剪切喷嘴有两个剪切燃烧面,燃料和氧化剂接触面积大,混合效果好,适合作大流量喷嘴^[14-15].本文以同轴双剪切喷嘴为研究对象,采用正交试验设计方法对其设计参数进行组合,并进行数值仿真,研究喷嘴设计参数以及参数间的交互作用对燃烧性能和燃烧室热载的影响.

1 正交数值试验设计

1.1 喷嘴几何模型

同轴双剪切喷嘴如图 1 所示.氢气从中心和边区进入,之间为氧气,二维轴对称面剪切掺混模式为 H-O-H-O-H.相比常规同轴剪切掺混燃烧模式,同轴双剪切模式增加了推进剂的剪切掺混面积,更有利于掺混燃烧.虽然同轴双剪切喷嘴结构比较复杂,但是气体推进剂体积流量大,喷嘴结构尺寸大,一定程度上降低了加工的难度.

1.2 燃烧室及喷嘴设计参数

单喷嘴设计流量为 678 g/s,设计压力为 3 MPa,

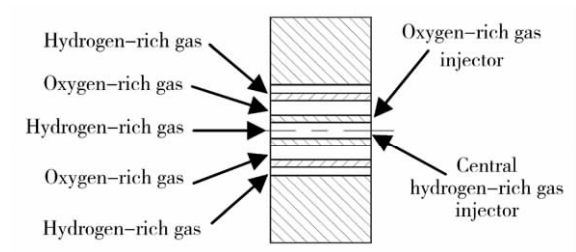


图 1 喷嘴结构模型
Fig. 1 Injector structure model

混合比为 6.喷嘴入口推进剂为富氢/富氧燃气,富氢燃气流量为 138 g/s,氢气质量分数为 65.08%,其余为水,对应的富氢预燃室混合比为 0.45;富氧燃气流量为 540 g/s,氧气质量分数为 97.22%,其余为水,对应的富氧预燃室混合比为 320.本文数值仿真研究的喷嘴设计参数:氧压降比 D_p (富氧燃气喷注压降/燃烧室压力)、燃氧速度比 R_v 、氧喷嘴出口壁厚 W_o 、中心喷嘴燃料流量比例 R_m (中心喷嘴燃料流量/燃料总流量).参数取值水平如表 1 所示.

表 1 喷嘴设计参数
Table 1 Injector design parameters

水平数	$D_p/\%$	R_v	W_o/mm	R_m
1	4	4	1	0.3
2	6	6	1.5	0.4
3	8	8	2.0	0.5

1.3 仿真模型

本文采用 RANS (Reynolds average Navier-Stokes) 方法对富氢/富氧燃气同轴双剪切单喷嘴燃烧室燃烧流场进行数值模拟,根据 Tucker、汪小卫、李茂等人的研究,RANS 方法在一定范围条件下与试验结果符合较好,可以对燃烧流场进行定性分析.湍流模型使用标准 $k-\epsilon$ 模型,化学反应与湍流之间的相互作用采用涡耗散概念模型,化学动力学模型采用 6 组分、9 步反应的氢氧燃烧模型,化学反应见文献^[16].燃烧室模型及边界条件设置如图 2 所示.

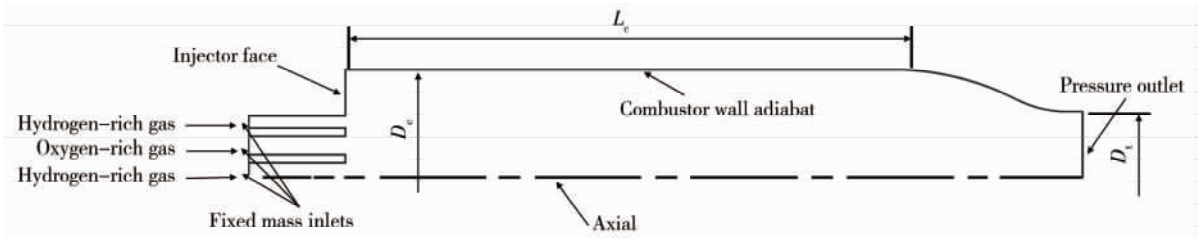


图 2 燃烧室结构模型及边界条件

Fig. 2 Chamber model and boundary conditions

具体设置参考文献[10].

1.4 评价指标

喷嘴设计参数对燃烧室的影响主要体现在燃烧性能和燃烧室热载两方面,本文以燃烧长度 L_c 评价燃烧性能,以喷注面板处燃气平均温度 T_f 和燃烧室壁面处燃气平均温度 T_w 评价热载. 参数具体定义见文献[16].

1.5 仿真试验设计

本文采用 $L_{27}(3^{13})$ 正交表对喷嘴设计参数和设计参数之间的联合搭配进行正交试验设计,利用数值模拟,分析单因素和因素之间的交互作用对燃烧性能和燃烧室热载的影响. 正交试验表表头设计如表 2 所示,因素水平安排和仿真结果如表 3 所示.

表 2 表头设计

Table 2 Form design

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

表 3 参数安排及仿真结果

Table 3 Parameters design and simulation results

No.	$D_p / \%$	R_v	W_O / mm	R_m	L_c / mm	T_w / K	T_f / K
1	4	4	0.5	0.3	189.4	1637.7	806.6
2	4	4	1.0	0.4	180.7	1837.3	833.1
3	4	4	1.5	0.5	181.8	2053.3	875.7
4	4	6	0.5	0.4	147.9	2158.1	985.9
5	4	6	1.0	0.5	147.7	2367.7	1043.7
6	4	6	1.5	0.3	146.8	2040.3	908.6
7	4	8	0.5	0.5	129.7	2557.0	1212.7
8	4	8	1.0	0.3	129.0	2240.2	1017.6
9	4	8	1.5	0.4	123.9	2413.2	1068.5
10	6	4	0.5	0.4	184.2	1814.6	928.1
11	6	4	1.0	0.5	183.3	2009.1	976.0
12	6	4	1.5	0.3	184.0	1709.2	864.4
13	6	6	0.5	0.5	146.2	2386.8	1217.2
14	6	6	1.0	0.3	147.4	2062.3	1021.8
15	6	6	1.5	0.4	139.5	2238.7	1079.6
16	6	8	0.5	0.3	127.0	2289.7	1177.6
17	6	8	1.0	0.4	127.7	2484.0	1186.3
18	6	8	1.5	0.5	120.9	2623.4	1296.4
19	8	4	0.5	0.5	183.6	2036.0	1082.0
20	8	4	1.0	0.3	190.0	1709.8	931.0
21	8	4	1.5	0.4	177.6	1874.5	980.2
22	8	6	0.5	0.3	148.6	2080.1	1125.8
23	8	6	1.0	0.4	139.2	2252.0	1180.1
24	8	6	1.5	0.5	138.2	2436.1	1258.6
25	8	8	0.5	0.4	119.0	2495.4	1378.9
26	8	8	1.0	0.5	117.9	2694.9	1476.1
27	8	8	1.5	0.3	119.5	2371.9	1239.7

2 仿真结果分析

图 3 为同轴剪切喷嘴和同轴双剪切喷嘴在流量为 226 g/s 时的温度分布云图。可以看到,采用同轴双剪切喷嘴的燃烧室内有两个燃烧面,燃烧高温区域明显比采用同轴剪切喷嘴的燃烧室靠前,说明混合燃烧较好,能够有效减小燃烧反应需要的燃烧室长度。可见,同轴双剪切喷嘴形式对提高燃烧性能很有利。

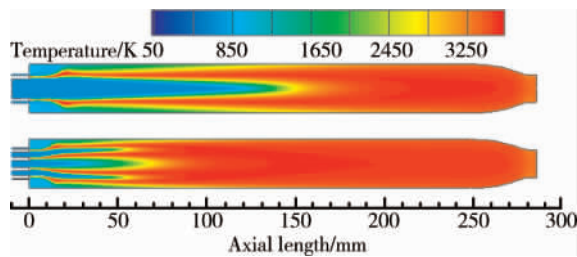


图 3 同轴剪切喷嘴和同轴双剪切喷嘴燃烧室内温度分布
Fig. 3 Temperature distribution in chambers of shear coaxial injector and tricoaxial injector

2.1 燃烧长度分析

图 4 为各设计参数对燃烧长度影响的趋势图。从图中可以看出,燃氧速度比对燃烧长度影响最显著,速度比增加会加强掺混,提高燃烧性能,缩短燃烧长度。氧压降比增加使氧喷注速度增大,一方面趋于增大喷注长度;另一方面,又加强两个剪切燃烧面内的掺混燃烧,趋于使燃烧长度缩短,从仿真结果来看,燃烧长度略有减小,但变化不明显。氧喷嘴出口壁厚增加有利于燃烧火焰稳定,提

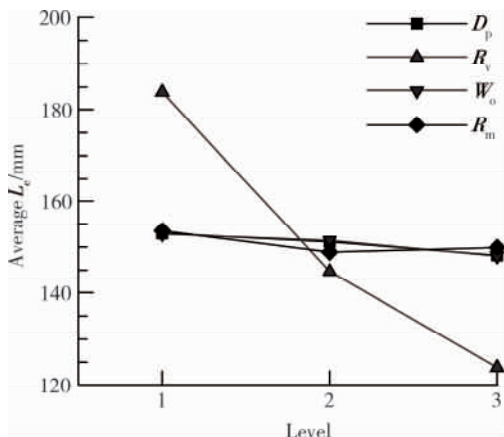


图 4 设计参数对燃烧长度的影响
Fig. 4 Influence of parameters on L_c

高燃烧性能,使燃烧长度减小,但影响微弱。中心流量分配比例在水平数为 2 时燃烧长度最小,但影响程度非常低。

表 4 为各设计参数对燃烧长度影响的方差分析结果,注释中括号内数值为因素和误差的自由度。均方大则影响大,均方小则影响小。除氧压降比和燃氧速度比的交互作用外,其余因素之间交互作用的方差值都很小,作为误差处理。从方差分析结果可以看出,氧压降比、燃氧速度比、氧喷嘴出口壁厚、中心氢流量比例的 F 值均大于 $F_{0.01}$,对燃烧长度均有显著影响,速度比的均方值最大,影响最显著;氧压降比与燃氧速度比的交互作用对燃烧长度有影响,但不显著,如图 5 所示,不同速度比条件下,氧压降对平均燃烧长度的影响趋势基本一致,但影响程度不同,高速度比条件下影响相对较大,随着氧压降比增加燃烧长度略有减小。方差分析结果说明,在富氢/富氧燃气同轴双

表 4 燃烧长度方差分析结果
Table 4 Results of the L_c variance analysis

方差来源	方差 S	自由度 f	均方 V	F
D_p	105.76	2	52.88	8.65
R_v	16722.96	2	8361.48	1368.48
W_o	110.67	2	55.33	9.06
R_m	107.73	2	53.86	8.82
$D_p \times R_v$	62.60	4	15.65	2.56
e	85.54	14	6.11	

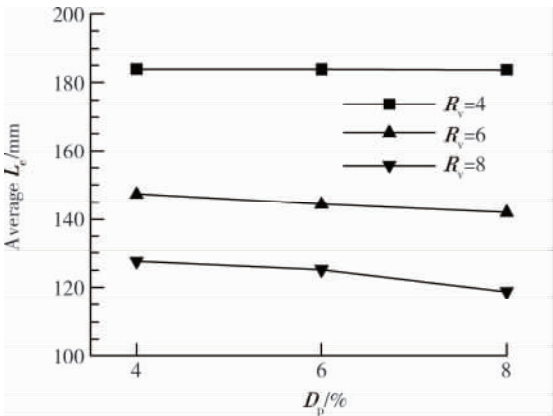


图 5 氧压降比与燃氧速度比交互作用对燃烧长度的影响
Fig. 5 Influence of interaction of D_p and R_v on L_c

剪切喷嘴中,各设计参数交互作用的影响小,各因素对燃烧长度的影响由大到小依次为:燃氧速度比、氧喷嘴出口壁厚、中心氢流量比例、氧压降比。要获得较小的燃烧长度需要选择高燃氧速度比、合适的中心氢流量比例、大的氧喷嘴出口壁厚及高氧压降比。算例中的最佳组合为 $R_v=8, R_m=0.5, W_o=1.0\text{ mm}, D_p=8\%$, 最小燃烧室长度为 117.9 mm 。

表 4 中, $F_{0.01}(2, 14)=6.51, F_{0.05}(2, 14)=3.74, F_{0.01}(4, 14)=5.04, F_{0.05}(4, 14)=3.11$; 误差 e 的方差为 $D_p \times W_o, D_p \times R_m, R_v \times W_o, R_v \times R_m, W_o \times R_m$ 的方差之和, 其中 $S(D_p \times W_o)=11.69; S(D_p \times R_m)=26.53; S(R_v \times W_o)=5.79; S(R_v \times R_m)=23.28; S(W_o \times R_m)=18.25$ 。

2.2 壁面燃气温度分析

图 6 是各设计参数对燃烧室壁面处燃气平均温度影响的趋势图。可以看出,燃氧速度比对壁面处燃气平均温度影响最明显,其次是中心氢流量比例,而氧压降比和氧喷嘴出口壁厚对壁面处燃气平均温度影响相对较小。从燃烧长度的分析结果可知,燃氧速度比增加提高了掺混燃烧性能,缩短了燃烧长度,因此也使壁面燃气温度升高快,在较短燃烧室长度内达到较大值。中心氢流量比例增大,使外围氢流量减小,同时,喷嘴尺寸增加,主要燃烧区域靠近壁面,导致壁面处燃气平均温度上升。氧压降比增大加强了两个剪切燃烧面的掺混燃烧,一定程度上提高了燃烧性能,使壁面温度升高,但影响不明显。氧喷嘴出口壁厚增加对稳定燃烧火焰和提高燃烧性能有利,但影响不大,因此壁面处燃气平均温度升高不明显。

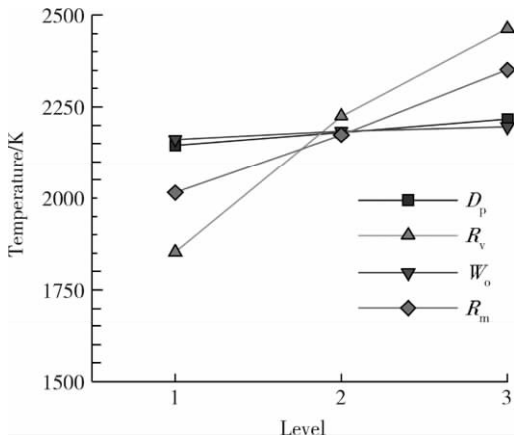


图 6 设计参数对燃烧室壁面处燃气平均温度的影响

Fig. 6 Influence of parameters on T_w

表 5 是各设计参数对燃烧室壁面处燃气平均温度影响的方差分析结果。除氧压降比和燃氧速度比的交互作用外,其余因素之间交互作用的方差值均很小,作为误差处理。方差分析结果表明,氧压降比、燃氧速度比、中心氢流量比例对壁面处燃气平均温度影响显著,其中燃氧速度比的影响最为显著,氧喷嘴出口壁厚、氧压降比与燃氧速度比的交互作用对壁面处燃气平均温度影响相对较小。图 7 为氧压降比与燃氧速度比交互作用对壁面处燃气平均温度的影响,可以看到:在低速度比时,氧压降比变化对壁面处燃气平均温度影响不明显;而在高速度比时,随着氧压降比增加,壁面处燃气平均温度增加较为明显。各因素对壁面处燃气平均温度的影响由大到小依次为:燃氧速度比、中心氢流量比例、氧压降比、氧喷嘴出口壁厚。要获得较低的燃烧室壁面温度需要选择低速度比、小的中心氢流量比例、低氧压降比和小的氧喷

表 5 壁面处燃气平均温度方差分析结果

Table 5 Results of the T_w variance analysis

方差来源	方差 S	自由度 f	均方 V	F
D_p	23 186.48	2	11 593.24	27.99
R_v	1 699 665.33	2	849 832.67	2 052.07
W_o	5 361.49	2	2 680.75	6.47
R_m	508 220.37	2	254 110.19	613.59
$D_p \times R_v$	6 165.54	4	1 541.38	3.72
e	5 797.87	14	414.13	

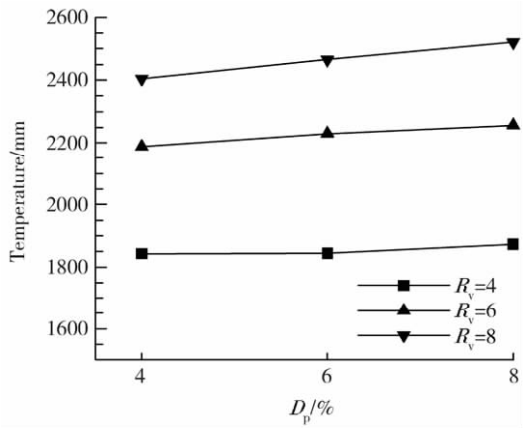


图 7 氧压降比与燃氧速度比交互作用对燃烧室壁面处燃气平均温度的影响

Fig. 7 Influence of interaction of D_p and R_v on T_w

嘴出口壁厚. 算例中的最佳组合为 $R_v=4, R_m=0.3, D_p=4\%, W_o=0.5\text{ mm}$, 最小燃烧室壁面处燃气平均温度为 1637.7 K .

表 5 中, $F_{0.01}(2, 14)=6.51, F_{0.05}(2, 14)=3.74, F_{0.01}(4, 14)=5.04, F_{0.05}(4, 14)=3.11$; 误差 e 的方差为 $D_p \times W_o, D_p \times R_m, R_v \times W_o, R_v \times R_m, W_o \times R_m$ 的方差之和, 其中 $S(D_p \times W_o)=715.64; S(D_p \times R_m)=1082.11; S(R_v \times W_o)=888.23; S(R_v \times R_m)=757.69; S(W_o \times R_m)=2354.20$.

2.3 面板燃气温度分析

图 8 是各设计参数对喷注面板处燃气平均温度的影响趋势. 从图中可以看出: 氧压降比、燃氧速度比、中心氢流量比例对喷注面板平均燃气温度的影响均是正影响, 随着这些参数设计值增加, 喷注面板处燃气平均温度增加; 而氧喷嘴出口壁厚是负影响, 随着氧喷嘴出口壁厚增加, 喷注面板处燃气平均温度降低. 氧压降比、燃氧速度比和中心氢流量比例增加, 都会显著加强喷嘴出口至燃烧室壁面之间的燃气回流, 提高回流燃气温度, 导致喷注面板处燃气平均温度增加; 氧喷嘴出口壁厚增加使喷嘴出口至燃烧室壁面的回流区域略微减小, 因此喷注面板处燃气平均温度下降.

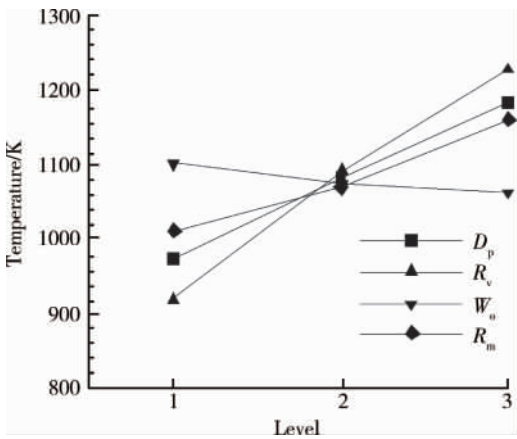


图 8 设计参数对喷注面板处燃气平均温度的影响
Fig. 8 Influence of parameters on T_f

表 6 是各设计参数对喷注面板处燃气平均温度影响的方差分析结果. 除氧压降比和燃氧速度比的交互作用外, 其余因素之间交互作用的方差值均很小, 作为误差处理. 方差分析结果表明, 氧压降比、燃氧速度比、中心氢流量比例对喷注面板处燃气平均温度影响非常显著, 氧喷嘴出口壁厚对喷注面板处燃气平均温度影响显著. 氧压降比与燃氧速度比的交互作用对喷注面板处燃气平均

温度有影响, 但不显著, 如图 9 所示, 在不同速度比条件下, 氧压降比对喷注面板处燃气平均温度的影响程度略有不同, 高速度比条件下影响相对明显. 各因素对喷注面板处燃气平均温度的影响由大到小依次为: 燃氧速度比、氧压降比、中心氢流量比例、氧喷嘴出口壁厚. 要获得较小的喷注面板处燃气平均温度需要选择低速度比、低氧压降比、小的中心氢流量分配比例和大的氧喷嘴出口壁厚. 算例中的最佳组合为 $D_p=4\%, R_v=4, W_o=0.5\text{ mm}, R_m=0.3$, 最小喷注面板处燃气平均温度为 806.6 K .

表 6 喷注面板处燃气平均温度方差分析结果
Table 6 Results of the T_f variance analysis

方差来源	方差 S	自由度 f	均方 V	F
D_p	200684.68	2	100342.34	115.63
R_v	430052.84	2	215026.42	247.78
W_o	6986.85	2	3493.42	4.03
R_m	102133.87	2	51066.93	58.85
$D_p \times R_v$	9638.16	4	2409.54	2.78
e	12149.46	14	867.82	

表 6 中, $F_{0.01}(2, 14)=6.51, F_{0.05}(2, 14)=3.74, F_{0.01}(4, 14)=5.04, F_{0.05}(4, 14)=3.11$; 误差 e 的方差为 $D_p \times W_o, D_p \times R_m, R_v \times W_o, R_v \times R_m, W_o \times R_m$ 的方差之和, 其中 $S(D_p \times W_o)=715.64; S(D_p \times R_m)=1082.11; S(R_v \times W_o)=888.23; S(R_v \times R_m)=757.69; S(W_o \times R_m)=2354.20$.

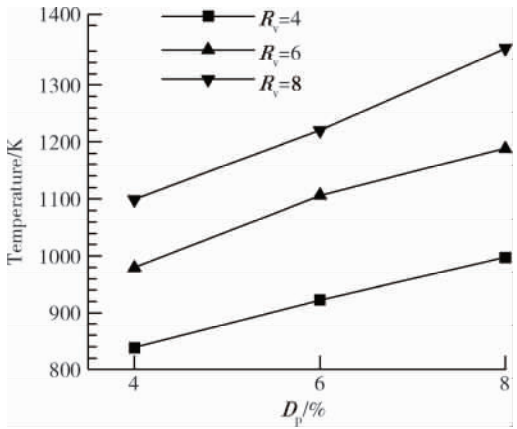


图 9 氧压降比与燃氧速度比交互作用对喷注面板处燃气平均温度的影响
Fig. 9 Influence of interaction of D_p and R_v on T_f

3 结 论

通过对富氢/富氧燃气同轴双剪切气-气喷嘴设计参数的正交试验设计和对燃烧室流场的数值模拟,结果表明:

燃氧速度比对燃烧性能和热载的影响最显著,其增大使燃烧长度缩短,燃烧性能提高,同时也使燃烧室壁面处燃气平均温度和喷注面板处燃气平均温度增加,热载增大。相比燃氧速度比,氧压降比和中心氢流量比例变化对燃烧长度的影响很小,但是中心氢流量比例对燃烧室壁面处燃气平均温度和喷注面板处燃气平均温度的影响都非常显著,氧压降比对喷注面板处燃气平均温度的影响也很显著,因此,设计时可以考虑选择较小的值,在不明显影响燃烧性能的前提下大幅降低燃烧室热防护的难度。喷嘴出口壁厚对燃烧性能影响不明显,对燃烧室热载的影响也相对较小。

对于同轴双剪切气-气喷嘴,在本文设计条件下,喷嘴设计参数的交互作用对喷嘴性能的影响,除了燃氧速度比和氧压降比的交互作用对燃烧长度、壁面处燃气平均温度和喷注面板处燃气平均温度有一定影响(不显著)外,其他的参数交互作用影响非常小。

参考文献:

- [1] 金平,杜正刚,杨立军,等. 气-气喷注器混合场流动显示[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 210-216.
JIN Ping, DU Zhenggang, YANG Lijun, et al. Flow visualization of gas-gas injector mixing flowfield[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 210-216. (in Chinese)
- [2] Davis J A, Campbell R L. Advantages of a full-flow staged combustion cycle engine system[R]. AIAA 97-3318, 1997.
- [3] Tucker P K, Klem M D, Smith T D, et al. Design of efficient GO_2/GH_2 injectors; a NASA, industry and university cooperative effort[R]. AIAA 97-3350, 1997.
- [4] Farhangi S, Yu T, Rojas L, et al. Gas-gas injector technology for full flow stage combustion cycle application[R]. AIAA 99-2757, 1999.
- [5] Vaidyanathan A, Gustavsson J, Segal C. One- and three-dimensional wall heat flux calculations in a O_2/H_2 system[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(1): 186-189.
- [6] Vaidyanathan A, Gustavsson J, Segal C. Oxygen/hydrogen-planar-laser-induced fluorescence measurements and accuracy investigation in high-pressure combustion[J]. Journal of Propulsion and Power, 2009, 25(4): 864-874.
- [7] Shyy W, Tucker P K, Vaidyanathan R. Response surface and neural network techniques for rocket engine injector optimization[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(2): 391-401.
- [8] Vaidyanathan R, Tucker P K, 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.
- [9] Conley A, Vaidyanathan A, Segal C. Heat flux measurements for a GO_2/GH_2 single-element, shear injector[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2007, 44(3): 633-639.
- [10] 李茂,高玉闪,金平,等. 气-气喷嘴推进剂入口温度对燃烧和壁温的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(9): 1091-1094.
LI Mao, GAO Yushan, JIN Ping, et al. Effects of propellants temperature in gas-gas injector inlet on combustion performance and wall temperature[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(9): 1091-1094. (in Chinese)
- [11] Berque J, Sion M, Thomas J L. Tricoaxial injector technology development[J]. AIAA-99-2492, 1999.
- [12] Fournet A, Lonchard J M, Thomas J L. Technological demonstration for low cost gas generator[J]. AIAA 2004-4006, 2004.
- [13] Cai G, Wang X, Jin P, et al. Experimental and numerical investigation of large mass flow rate gas-gas injectors[R]. AIAA 2008-4652, 2008.
- [14] Du Z, Gao Y, Li M, et al. Numerical simulation of dual shear coaxial gas-gas injector[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(6): 683-686.
- [15] Du Z, Li M, Jin P, et al. Large mass flow rate gas-gas injector optimization design with response surface methodology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(4): 395-398.
- [16] 李茂,金平,蔡国飙. 富氢/富氧燃气同轴剪切气-气喷嘴性能仿真分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(12): 2827-2833.
LI Mao, JIN Ping, CAI Guobiao. Performance simulation analysis for a hydrogen-rich/oxygen-rich shear coaxial gas-gas injector[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12): 2827-2833. (in Chinese).