

两种空气/煤油燃气发生器富油 燃烧组织方案对比

康忠涛^{1,2}, 李清廉^{1,2}, 张新桥^{1,2}, 成 鹏^{1,2}

(1. 国防科学技术大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073;

2. 国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 根据空气/煤油富油燃烧的特点,提出了两种空气/煤油燃气发生器富油燃烧组织方案,设计了采用钝体稳定火焰和旋流空气、二次喷注空气稳定火焰的两种燃气发生器. 为了对比两种方案的点火和燃烧特性,对两种燃气发生器进行了一系列热试,结果表明余氧系数是燃气发生器最重要的工况参数. 随着余氧系数的增加,燃气发生器的状态逐渐从启动失败变为中途熄火,最终呈正常启动状态. 采用钝体稳定火焰的燃气发生器稳定工作的余氧系数边界为 0.518,采用旋流空气和二次喷注空气稳定火焰可将该边界延伸到 0.237,极大地扩大了燃气发生器的工作范围. 与钝体稳定火焰的燃气发生器相比,旋流空气和二次喷注空气稳定火焰的燃气发生器的富油燃烧的燃烧效率提高了 20%. 两种方案结构复杂性相当,旋流空气和二次喷注空气稳定火焰的燃气发生器不需要冷却火焰稳定器,可提高燃气发生器的工作时间.

关 键 词: 空气/煤油燃气发生器; 富油燃烧; 火焰稳定; 方案对比; 燃烧效率

中图分类号: V231.2; TK223.2

文献标志码: A

Comparison of two fuel-rich combustion schemes in air/kerosene gas generator

KANG Zhong-tao^{1,2}, LI Qing-lian^{1,2},

ZHANG Xin-qiao^{1,2}, CHENG Peng^{1,2}

(1. Science and Technology on Scramjet Laboratory,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Two fuel-rich combustion schemes in air/kerosene gas generator were provided, and two gas generators with flame stabilized by bluff-body, swirling air and second air injection respectively were designed based on the fuel-rich combustion characteristics of air/kerosene. A series of hot fire experiments were conducted with two gas generators to compare the ignition and combustion characteristics of the two schemes. The results show that excess oxidizer coefficient is the most important working parameter in gas generator. With the increase of excess oxidizer coefficient, the states of gas generators vary from start failure to abnormal shut up, and finally to normal start. The range of stable working excess oxidizer coefficient in bluff-body stabilized gas generator is 0.518, and can be expanded to 0.237 by stabilizing flame through swirling air and second air injection, which greatly increases the working range of gas generator. The fuel-rich combustion efficiency of swirling air and second air injection stabilized gas generator is 20% higher than that of bluff-body stabilized gas

generator. As the complexity of the two schemes is comparable, swirling air and second air injection stabilized gas generator could have a longer working time without cooling the flame holder.

Key words: air/kerosene gas generator; fuel-rich combustion; flame stabilization; scheme comparison; combustion efficiency

在小型无人机弹射领域,随着无人机机载设备的增加,对弹射系统提出的要求越来越高,采用高能燃气作为弹射介质是无人机弹射领域的一个发展方向.满足一定压力、温度、流量和速度参数要求的高能燃气主要通过燃气发生器获取^[1].目前主要有基于航空发动机、固体火箭发动机以及液体火箭发动机技术的3种类型燃气发生器^[2].与基于固体火箭发动机技术的燃气发生器相比,基于航空发动机和液体火箭发动机技术的燃气发生器具有可多次使用、准备时间短、燃烧过程可控性强、燃烧组织方案多等特点.因此在各类航空航天发动机系统^[3]、地面试验系统、化学激光器系统^[4]、燃气轮机中得到了广泛的应用.

基于航空发动机和液体火箭发动机技术的燃气发生器不论是结构特征还是燃烧组织均存在显著的区别^[5].在航空发动机及基于航空发动机技术的燃气轮机研究方面,主要关注其内部的燃烧动力学和发动机排放特性. Huang 等^[6]对燃烧室内旋流稳定燃烧的动力学和稳定性进行了综述,重点介绍不稳定燃烧的产生机理与抑制措施. Mohammad^[7]分析了燃烧室结构对流场特征的影响,研究了燃烧室喷水对排放特性的影响. Al-Shudeifat 等^[8]分析了发电厂燃气轮机燃烧柴油和废弃润滑油的燃烧和排放特性.国内学者在基于液体火箭发动机技术的燃气发生器燃烧组织上开展了大量的研究.钟战^[1]对空气/低体积分数酒精燃气发生器的试验发现该燃气发生器点火困难的主要原因是燃烧室内气流速度过大,火焰不能稳定.李庆等^[9]试验发现增加燃烧室长度可以显著提高燃烧效率,喷嘴尺寸参数对燃烧性能的影响不大.李清廉等^[10]认为氧化剂与燃料进入燃烧室的时间间隔存在一个最优值.

根据无人机弹射系统的特点,燃气发生器采用煤油这种不易挥发燃料和空气这种易获取、易贮存的氧化剂具有更高的安全性和经济性.同时由于受到高压气瓶温度的限制和空气供应能力的限制,宜采用富油燃烧组织方案.基于航空发动机技术的燃气发生器目前的研究还主要集中在贫油燃烧部分,富油燃烧的燃烧性能、燃烧稳定性和排放特性还需要进一步分析.基于液体火箭发动机

技术的燃气发生器由于空气中氧体积分数低造成燃烧室流场速度较高,火焰稳定困难,燃气发生器易出现启动困难和吹熄.因此,在组织空气/煤油富油燃烧时需要综合考虑雾化、火焰稳定、结构复杂性、经济性,对燃烧组织方案进行优化分析,提高燃气发生器的设计水平.

1 燃气发生器燃烧组织方案

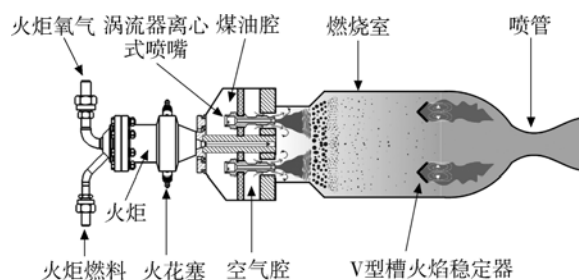
空气/煤油燃气发生器的设计参数如表1所示,根据设计参数设计了两种燃气发生器,分别记为GGA(gas generator A)(图1)和GGB(gas generator B)(图2),2种燃气发生器的燃烧室和喷管结构参数相同,但是它们的燃烧组织方案却有明显区别.

表1 空气/煤油燃气发生器设计参数

Table 1 Design parameters of air/kerosene gas generator

设计参数	数值
余氧系数	0.5
煤油流量/(kg/s)	0.152
空气流量/(kg/s)	1.120
燃烧室压力/MPa	3
燃气总温/K	1620

GGA基于液体火箭发动机技术.煤油喷嘴为涡流器离心式喷嘴,共6个,呈单圈分布.空气喷嘴为煤油喷嘴外的直流式环缝,共6个.点火源采用点火能量较高的火炬,火炬生成的高温燃气从喷注面板中心的喷注孔进入燃烧室启动GGA.考虑到空气中氧体积分数较低,必然造成燃烧室内



(a) 工作原理图

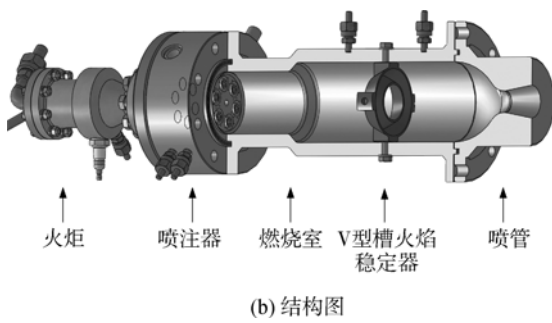


图 1 GGA 工作原理与结构图
Fig. 1 Scheme and geometry of GGA

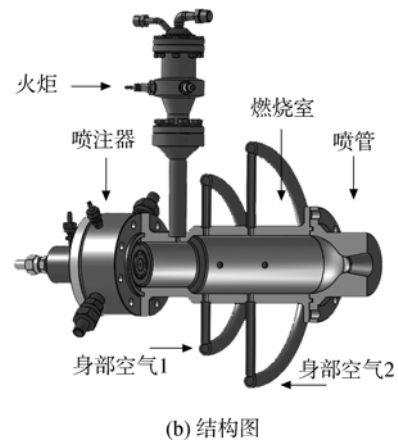
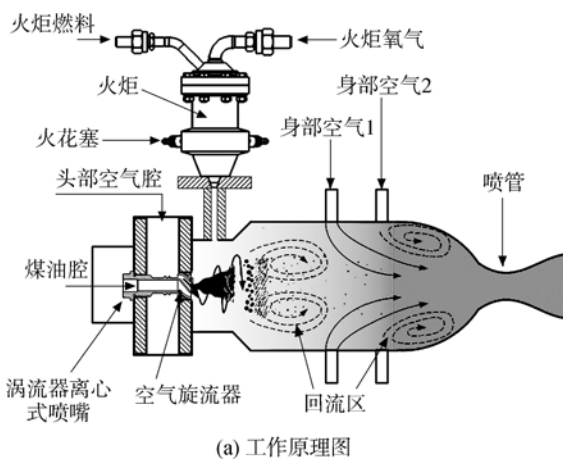


图 2 GGB 工作原理与结构图
Fig. 2 Scheme and geometry of GGB

气流速度较高,火焰稳定困难,采用钝体火焰稳定技术,在燃烧室内安装 V 型槽火焰稳定器。根据文献[2,11],采用阻塞比为 0.593 的火焰稳定器安装于 0.70L 位置进行试验,其中 L 为燃烧室长度。当 GGA 稳定工作时,V 型槽后的回流区内的高温燃气形成点火源,持续点燃来流,从而保证 GGA 的稳定燃烧。李庆等^[12]对 V 型槽和凹腔火焰稳定器性能进行了分析,指出像燃气发生器这种采用中心喷注的燃烧装置更适合采用 V 型槽

这种中心组织燃烧的火焰稳定器。

GGB 结合了航空发动机和液体火箭发动机的特点。煤油喷嘴同样是涡流器离心式喷嘴,共一个,分布在喷注面板正中。空气喷嘴为空气旋流器,共一个,安装于涡流器离心式喷嘴。空气旋流的方向与煤油锥形液膜的旋转方向相反。同样采用点火能量大的火炬点火器,考虑到喷注面板中心被喷嘴占据,火炬布置与燃烧室头部附近。此外还在燃烧室上布置了两圈共 8 个空气喷注孔,一方面其后形成的回流区可以起到火焰稳定的作用;另一方面可以增强掺混燃烧效率,提高燃气发生器的性能。

整体上看,两种燃烧组织方案最大的不同在于火焰稳定方法上。GGA 采用钝体火焰稳定技术,GGB 采用气动火焰稳定技术。GGA 中火焰稳定器位于燃烧室内的高温燃气中,没有采用冷却措施,从而限制了燃气发生器的工作时间。其结构较液体火箭发动机略复杂。GGB 主要借鉴了航空发动机的头部旋流空气和身部空气二次喷注。在燃烧室内的高温燃气中没有任何结构,可以满足燃气发生器的长时间工作。其结构相比航空发动机而言简单许多,相比液体火箭发动机略复杂。

2 试验系统

燃气发生器试验系统由供应系统、测控系统组成,如图 3 所示。采用氮气对煤油贮箱增压。测控系统测量并记录试验过程中各测点的压力和流

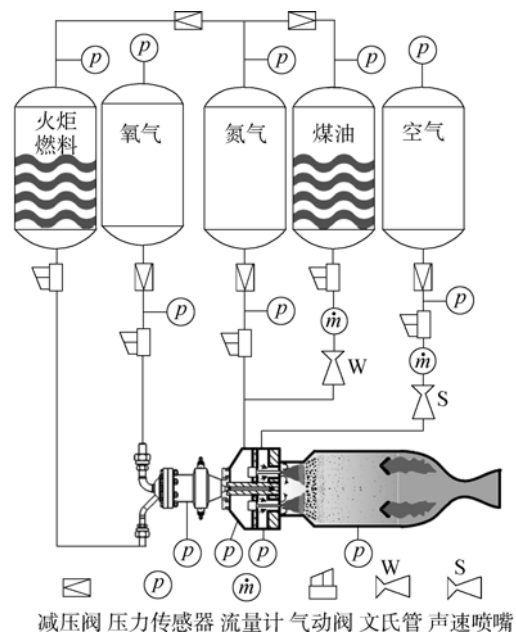


图 3 燃气发生器试验系统
Fig. 3 Test system of gas generator

量数据. 压力传感器采用麦克传感器公司的压阻式压力变送器, 最大响应频率为 30 kHz, 测量精度为 0.5%FS(full scale). 流量测量采用开封仪表有限公司的 LWGY 及 LWGQ 型涡轮流量计, 精度为 0.5%FS.

3 结果与讨论

3.1 点火特性

针对空气/煤油燃气发生器的两种富油燃烧组织方案进行了一系列的点火试验, 发现两种燃气发生器均存在着 3 种工作状态如图 4 和图 5 所示.

对于 GGA, 当余氧系数较低时, GGA 启动失败. 试验过程中燃烧室压力在火炬工作结束后出现一小段振荡, 这与 GGA 采用的钝体火焰稳定技术有关, 是由钝体稳定的火焰出现“熄火-再点火”现象造成的^[11]. 由于气流速度较大, 钝体稳定的火焰会出现吹熄现象, Shanbhogue 等^[13]对钝体稳定火焰的贫油吹熄动力学进行了总结, 指出当火焰面上局部熄火达到一定程度之后火焰就会被最终吹熄. Chaudhuri 等^[14-15]采用 PIV (particle

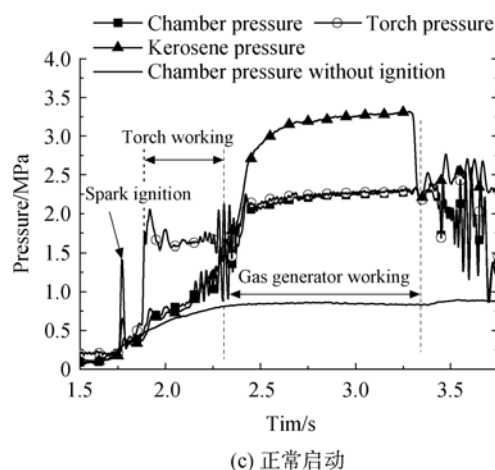
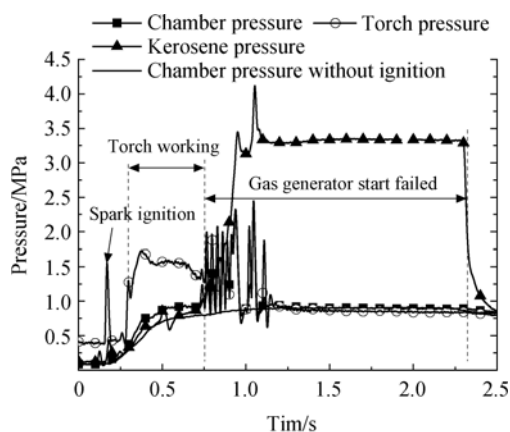


图4 不同余氧系数下 GGA 的工作状态

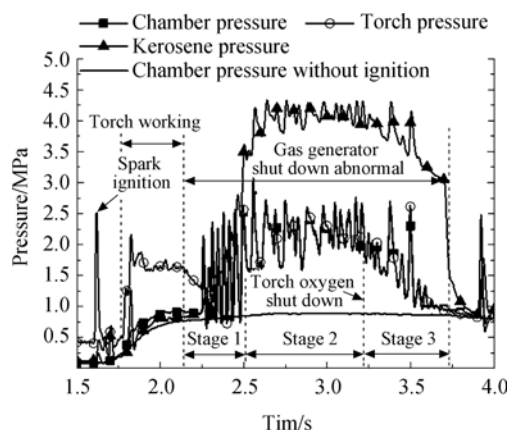
Fig. 4 Work status of GGA with different excess oxidizer coefficients

image velocimetry) 和 OH-PLIF (planar laser induced fluorescence) 分析钝体稳定火焰的吹熄过程发现了贫油预混火焰的这种“熄火-再点火”现象, “熄火-再点火”的时间间隔为 100 ms.

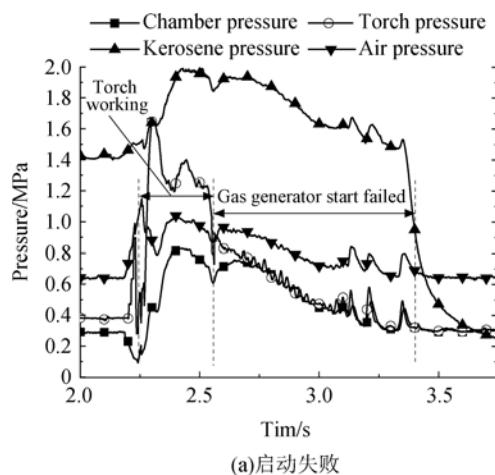
提高余氧系数之后, 在保持火炬氧气时出现



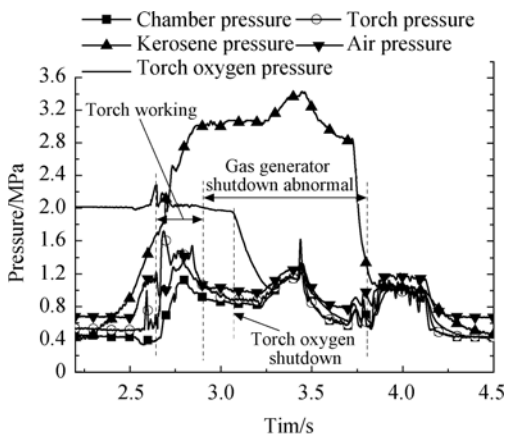
(a) 启动失败



(b) 中途熄火



(a) 启动失败



(b) 中途熄火

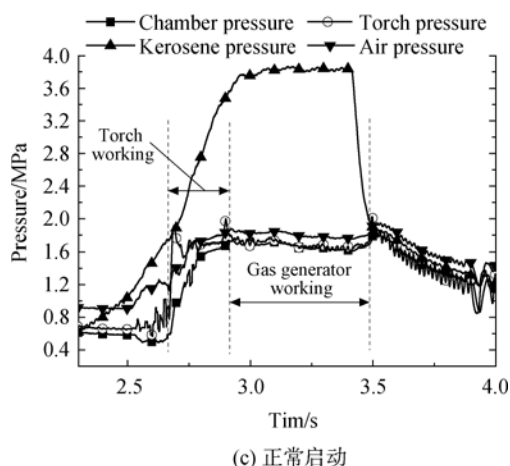


图 5 不同余氧系数下 GGB 的工作状态

Fig. 5 Work status of GGB with different excess oxidizer coefficients

振荡燃烧,当火炬氧气关闭后钝体稳定的火焰逐渐熄灭,GGA 出现中途熄火.此时的余氧系数为临界余氧系数,低于这个值时 GGA 不能工作.进一步提高余氧系数,在火炬结束工作后 GGA 迅速进入稳定工作.对 GGA 进行了 8 次试验,结果

如表 2 所示.从表中可以发现当余氧系数小于 0.31 时 GGA 启动失败;当余氧系数介于 0.31~0.51 之间时,GGA 能够启动,但是工作状态不稳定,容易中途熄火;当余氧系数大于 0.52 时 GGA 能够迅速启动并稳定工作.张新桥等^[16]在分析加水对 GGA 点火特性的影响之前,对其进行的点火试验也发现 GGA 稳定工作的余氧系数边界为 0.51,与本文的结果相当.

对于 GGB,当余氧系数较低时,GGB 启动失败,燃烧室压力的变化主要由火炬热射流使煤油蒸发和空气膨胀造成.在临界余氧系数下,保持火炬氧气时,GGB 能稳定工作,当火炬氧气关闭后,火焰在燃烧室压力振荡一下熄灭,GGB 中途熄火.当余氧系数较高时,GGB 在火炬结束工作后迅速进入稳定工作状态.对 GGB 进行了 6 次热试,结果如表 3 所示.从表中可以看出当 GGB 只采用头部进气时,在余氧系数为 0.477 时依然可以迅速稳定地启动,进一步采用头部和身部进气之后,稳定工作的余氧系数边界延伸到了 0.237.表明在空气/煤油燃气发生器内,采用头部旋流空气

表 2 GGA 点火试验结果

Table 2 Ignition test results of GGA

编号	煤油流量/(kg/s)	空气流量/(kg/s)	余氧系数	结果	燃烧效率/%
A-1	0.225	0.947	0.287	启动失败	
A-2	0.209	0.978	0.319	中途熄火	
A-3	0.188	0.992	0.361	中途熄火	
A-4	0.181	0.997	0.376	中途熄火	
A-5	0.180	1.078	0.407	中途熄火	
A-6	0.135	1.029	0.518	正常启动	68.47
A-7	0.094	1.011	0.736	正常启动	74.6
A-8	0.093	1.019	0.747	正常启动	75.4

表 3 GGB 点火试验结果

Table 3 Ignition test results of GGB

编号	煤油流量/(kg/s)	头部空气/(kg/s)	身部空气 2/(kg/s)	余氧系数	结果	燃烧效率/%
B-1	0.075	0.717		0.655	正常启动	99.1
B-2	0.066	0.465		0.477	正常启动	98.8
B-3	0.062	0.286		0.313	启动失败	
B-4	0.181	0.358	0.272	0.237	正常启动	95.6
B-5	0.181	0.193	0.147	0.129	中途熄火	
B-6	0.182	0.272	0.207	0.180	中途熄火	

稳定火焰的火焰稳定性能要优于钝体稳定火焰,燃烧室身部进行空气二次喷注可以进一步提高燃气发生器的火焰稳定性能,拓展燃气发生器稳定工作的工况范围.身部进气对火焰稳定的作用主要是通过形成截断回流区来增强掺混和稳定火焰.

对比图4(b)和图5(b)可知两种燃烧组织方案的燃气发生器中途熄火特点显著不同.GGA稳定工作时V型槽火焰稳定器回流区内的高温燃气在稳定器边缘的剪切层内持续点燃来流从而持续稳定地燃烧.此时火焰为部分预混火焰,Tuttle等^[17]的试验表明对于V型槽稳定的稳态预混火焰,火焰面包裹着剪切层.随着余氧系数的减小,预混火焰的火焰传播速度减小,造成火焰面沿燃烧室径向收缩,火焰面与剪切层的相互作用增强,当火焰面拉伸率大于熄火拉伸率时出现局部熄火的区域,具体表现为燃烧室压力的振荡.当火炬氧气关闭之后,余氧系数进一步减小,火焰面与剪切层的相互作用进一步增强,火焰面上局部熄火的区域逐渐增加,V型槽稳定的火焰最终被吹熄.GGB稳定工作时,空气与煤油蒸气在燃烧室头部形成扩散火焰,火焰通过旋流空气形成的回流区来稳定.由于扩散火焰驻定在喷注面板上,此时煤油的蒸发量还不大,燃气发生器头部附近的燃烧是贫油燃烧.此时火炬氧气的关闭使得燃烧更接近于化学当量比燃烧,燃烧效率立即提高,表现为燃烧室压力的突然增加.但是随着燃烧效率的增加,煤油的蒸发量也显著增加,头部火焰转向富油状态,火焰逐渐熄灭.

综上,空气/煤油燃气发生器采用GGB方案来组织富油燃烧具有更好的火焰稳定性能,从而提高燃气发生器的点火性能.

3.2 燃烧性能

燃烧效率 η 通过特征速度的实际值与理论值计算得到^[18].计算公式为

$$\eta = \frac{C_{\text{exp}}^*}{C_{\text{th}}^*} \quad (1)$$

其中 $C_{\text{exp}}^* = p_c A_t / \dot{m}_t$ 为特征速度实际值; p_c 为试验的实际燃烧室压力; A_t 为喷管喉部面积; $\dot{m}_t$ 为推进剂总流量; C_{th}^* 为特征速度理论值,通过热力计算得到.

两种燃烧组织方案的燃烧效率如图6所示.无论是GGA还是GGB,燃烧效率均随余氧系数的增加而增加.对比两种燃烧组织方案发现,

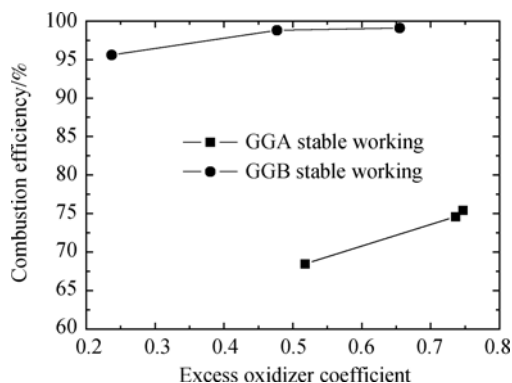


图6 不同燃烧组织方案的燃烧效率

Fig. 6 Combustion efficiency with different combustion schemes

GGB的燃烧效率要显著高于GGA,在余氧系数为0.237的极度富油条件下燃烧效率依然可以达到95.6%.这是因为身部空气喷注不仅增强了火焰稳定性能,还增强了空气与富油燃气的掺混,从而进行二次燃烧,提高燃气发生器的燃烧效率.因此,从燃烧效率来看,空气/煤油燃气发生器宜采用GGB的燃烧组织方案.

4 结 论

针对空气/煤油富油燃烧时,由于空气中氧体积分数低造成的燃烧室气流速度大、火焰稳定困难的特点,设计了采用钝体稳定火焰和旋流空气、二次喷注空气稳定火焰的两种燃烧组织方案,两种方案具体体现为两种燃气发生器.对两种燃气发生器进行了一系列热试,得到主要结论如下:

1) 余氧系数是燃气发生器最重要的工况参数,随着余氧系数的增加,两种方案的燃气发生器均存在着启动失败、中途熄火和正常启动3种状态.

2) 采用钝体稳定火焰的燃气发生器稳定工作的余氧系数边界为0.518,而采用旋流空气和二次喷注空气稳定火焰的燃气发生器可将该边界延伸到0.237,极大地扩大了燃气发生器的工作范围.

3) 采用头部旋流加身部二次喷注组织燃烧的方案可以显著提高富油燃烧的燃烧效率,相比传统燃气发生器组织燃烧的燃烧效率提高了20%.

4) 在燃气发生器的结构复杂性上,两种燃气发生器相当,但是旋流空气稳定火焰的燃气发生器由于燃烧流场内部没有固定结构,因此不需要考虑特别的冷却措施,可提高燃气发生器的工作时间.

参考文献:

- [1] 钟战. 燃气发生器点火与燃烧性能研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
ZHONG Zhan. Research on the ignition and combustion performance of gas generator[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [2] 康忠涛, 李清廉, 张新桥. 基于 V 型槽的空气/煤油燃气发生器火焰稳定方法研究[J]. 推进技术, 2013, 34(9): 1231-1239.
KANG Zhongtao, LI Qinglian, ZHANG Xinqiao. Flame stabilization of air/kerosene gas generator based on V-gutter[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(9): 1231-1239. (in Chinese)
- [3] 席文雄. 冲压发动机凹腔燃烧室试验研究与数值模拟[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
XI Wenxiong. Numerical and experimental research on the ramjet combustor based on cavity[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [4] Niinucci M A S, Oliva J L S. On the development of a gas generator for CO₂-N₂ gas dynamic lasers utilizing liquid fuel and liquid oxidizer[R]. AIAA 93-3187, 1993.
- [5] 黄勇. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.
- [6] Huang Y, Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(4): 293-364.
- [7] Mohammad B S. Single annular combustor: experimental investigations of aerodynamics, dynamics and emissions [D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2010.
- [8] Al-Shudeifat M A, Donaldson A B. Combustion of waste trap grease oil in gas turbine generator[J]. Fuel, 2010, 89(3): 549-553.
- [9] 李庆, 李清廉, 王振国. 燃气发生器结构对燃烧性能的影响[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2062-2067.
LI Qing, LI Qinglian, WANG Zhenguo. Effect of structure of gas generator on combustion performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 2062-2067. (in Chinese)
- [10] 李清廉, 李庆, 王振国. 氧气/醇类燃气发生器启动过程试验研究[J]. 火箭推进, 2010, 36(1): 13-18.
LI Qinglian, LI Qing, WANG Zhenguo. Experimental research of the start-up process of gaseous oxygen/ethanol gas generator[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 36(1): 13-18. (in Chinese)
- [11] 康忠涛, 李清廉, 张新桥. V 槽稳定的空气/煤油部分预混火焰吹熄特性分析[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(9): 1783-1786.
KANG Zhongtao, LI Qinglian, ZHANG Xinqiao. Blowoff characteristic of V-gutter stabilized air/kerosene partial premix flames[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(9): 1783-1786. (in Chinese)
- [12] 李庆, 潘余, 谭建国. 亚燃冲压发动机中凹腔与 V 槽火焰稳定器性能对比分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(1): 35-40.
LI Qing, PAN Yu, TAN Jianguo, et al. Comparison of characteristics of ramjet with cavity-based flameholder and V-gutter flameholder [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): 35-40. (in Chinese)
- [13] Shanbhogue S J, Husain S, Lieuwen T. Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(1): 98-120.
- [14] Chaudhuri S, Kostka S, Tuttle S G, et al. Blowoff mechanism of two dimensional bluff-body stabilized turbulent premixed flames in a prototypical combustor[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(7): 1358-1371.
- [15] Chaudhuri S, Kostka S, Renfro M W, et al. Blowoff dynamics of bluff body stabilized turbulent premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(4): 790-802.
- [16] 张新桥, 李清廉, 康忠涛. 空气/煤油/水燃气发生器点火特性试验[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(4): 35-40.
ZHANG Xinqiao, LI Qinglian, KANG Zhongtao, et al. Experimental researches on ignition characteristic of air/kerosene/water gas generator[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(4): 35-40. (in Chinese)
- [17] Tuttle S G, Chaudhuri S, Kostka S, Jr, et al. Time-resolved blowoff transition measurements for two-dimensional bluff body-stabilized flames in vitiated flow[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(1): 291-305.
- [18] 李清廉. 同轴式三组元喷嘴性能分析、工程应用及设计评定[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2003.
LI Qinglian. Performance analysis, engineering application, design and evaluation of coaxial tripropellant injector [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)

(编辑:陈越)