

文章编号:1000-8055(2011)05-1031-06

富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧(RQL)工作模式下驻涡燃烧室排放性能试验

金 义, 何小民, 蒋 波

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对使用液态燃料(航空煤油)的富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧(RQL)工作模式驻涡燃烧室排放性能开展了系统的试验研究,分析总结了驻涡区余气系数、进口空气流量和进口空气温度等参数影响 RQL 工作模式驻涡燃烧室排放性能的变化规律. 结果表明:随着驻涡区余气系数增大($\alpha=0.61\sim 1.53$),CO 和 UHC(未燃碳氢化合物)体积分数升高, NO_x 体积分数降低;随着进口空气流量增大($W_a=0.4\sim 0.6\text{ kg/s}$),CO,UHC, NO_x 体积分数均升高;随着进口空气温度升高(283~473K),CO 和 UHC 体积分数降低, NO_x 体积分数升高.

关 键 词: 富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧(RQL); 驻涡燃烧室; 液态燃料; 排放性能; 余气系数
中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Experimental study on emission performance of rich-burn quick-quench lean-burn (RQL) trapped-vortex combustor

JIN Yi, HE Xiao-min, JIANG Bo

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An experimental study focused on emission performance of trapped-vortex combustor (TVC) with liquid fuel under rich-burn quick-quench lean-burn (RQL) mode was performed. The effect of a variety of parameters on emission performance was obtained, such as excess air coefficient of cavity, airflow rate and inlet temperature. The results show that: CO and UHC (unburned hydrocarbon) volume fractions increase as the excess air coefficient of cavity increases ($\alpha=0.61\sim 1.53$) while NO_x volume fraction decreases; the emission performance of the combustor gets worse as airflow rate ($W_a=0.4\sim 0.6\text{ kg/s}$) increases, CO, UHC and NO_x volume fractions increase; CO and UHC volume fractions decline and NO_x volume fraction rises with the increase of inlet temperature (283~473 K).

Key words: rich-burn quick-quench lean-burn (RQL); trapped-vortex combustor; liquid-fuel; emission performance; excess air coefficient

随着对环境保护的呼声越来越高,国内外制定了日益严格的环境保护法规,对各种动力装

置的排放标准作了明确规定,比如针对航空动力,国际民航组织(ICAO)陆续制定了 CAEP1,

收稿日期:2010-04-21; 修订日期:2010-09-21

基金项目:航空科学基金(2008ZB52013)

作者简介:金义(1984—),男,湖北恩施人,博士生,主要从事航空发动机燃烧室和燃烧理论的研究.

CAEP2, CAEP4, CAEP6 等 4 个条例^[1]. 为适应不断严格的环保规范要求, 许多国家发起了各种研究计划, 开展高性能低排放航空动力的研制, 例如美国的实验清洁燃烧室项目 (ECCP)、高效节能发动机计划 (E³) 等. 20 世纪 90 年代 NASA (美国国家航空航天局) 与多家发动机公司联合实施了 AST (Advanced Subsonic Technology) 计划和 HSCT (High-Speed Civil Transport), 用于降低 NO 的主要技术包括富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧 (rich-burn quick-quench lean-burn, 简称 RQL) 和贫油预混预蒸发 (lean pre-mixed pre-vaporized, 简称 LPP)^[2-3]. 在过去的 30 年中, 传统的旋流稳定燃烧室的设计得到了不断改进, 这些改进减少了污染物排放并且有许多已成功用于实际应用之中. 与此同时, 各种新概念燃烧系统层出不穷, 驻涡燃烧室 (trapped-vortex combustor, 简称 TVC) 就是其中之一. 驻涡燃烧室是上世纪 90 年代美国空军研究实验室 (AFRL) 和通用电气 (GE) 公司共同开发的, 它利用凹腔产生的旋涡来稳定火焰, 研究表明: 与传统的旋流稳定燃烧室相比, 驻涡燃烧室具有结构简单、贫富油极限宽、高空点火性能优越、可以有效降低污染物排放 (特别是 NO_x) 等优点^[4-7]. 美国能源部主持开发了 RQL 工作模式下的驻涡燃烧室, 得到了较好的低排放结果^[8]. 国内北京航空航天大学的研究者们采用大涡模拟等数值方法以及 PIV (particle image velocimetry) 等试验测试手段对 TVC 凹腔内驻涡的形成、发展和演化进行了卓有成效的研究, 以液化石油气为燃料对类 RQL 模式驻涡燃烧室的排放开展了研究, 获得了有参考价值的结果^[9-10]. 南京航空航天大学何小民等开展了 TVC 冷态流动特性的研究, 并在此基础上加工了不同的模型燃烧室, 获得了结构参数、油气比、进口空气温度和进口空气流量等参数对 TVC 燃烧性能的影响规律^[11-13].

研究团队前期的工作主要着眼于 TVC 冷态流动特性 (压力损失、涡的结构等) 和燃烧特性 (点火性能、熄火特性、火焰稳定、燃烧效率等), 还未对 TVC 排放性能开展研究. 本文在团队前期研究成果的基础上, 结合使用液态燃料模型驻涡燃烧室的特点, 针对 RQL 工作模式建立相关的试验系统, 开展驻涡区余气系数、进口空气流量和进口空气温度等参数影响驻涡燃烧室污染物 (CO, UHC (未燃碳氢化合物) 以及 NO_x) 排放的试验研究.

1 研究方案、试验系统和研究内容

1.1 研究方案

在 RQL 工作模式下, 主流不供油, 只在驻涡区供油, 油气混合气先在驻涡区富油燃烧, 然后流入主流, 在高速主流的作用下淬熄并混合成贫油混合气后继续氧化. 由于驻涡区处于富油燃烧状态, 因此火焰温度比较低, NO_x 生成量降低, 在掺混段, 大量空气使火焰淬熄, 油气比下降, 处于贫油燃烧状态, 火焰温度低, NO_x 生成量也降低.

驻涡燃烧室模型示意图如图 1 所示, 该模型为一个包含 3 个头部的矩形燃烧室, 主要包括驻涡区油/气进口、主流区空气进口、驻涡区、快速掺混区和贫油燃烧区等. 空气进口包括 5 个: 主流区 1 个, 驻涡区 4 个 (前后各 2 个). 该驻涡燃烧室主要具有以下特点: 在主流通道末端设置了中心钝体, 该钝体将主流分为两路气流; RQL 的淬熄发生位置与贫油区位置基本处于同一轴向位置; 设置了冷却气导流环用于将主流小部分气流引入驻涡区, 起到保护驻涡区前壁面的作用; 燃油通过离心喷嘴 (雾化锥角 30°) 喷入驻涡区, 燃油雾化效果好, 离心喷嘴紧贴驻涡区前端进气口, 上下各 3 个; 点火电嘴位于上驻涡区中间位置, 点火器为陕西航空电气有限责任公司生产的 DHQ-12 型高能点火器.

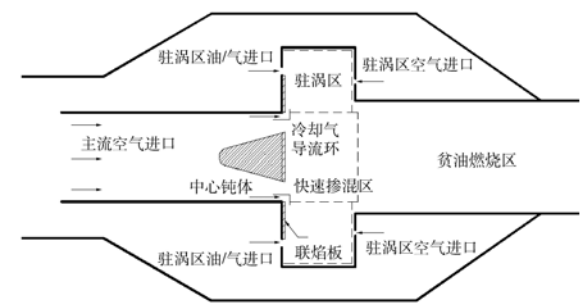


图 1 驻涡燃烧室模型示意图

Fig. 1 Sketch of the trapped-vortex combustor

1.2 试验系统

试验系统 (图 2) 主要包括 TVC 试验模型、电加热器、供气系统、供油系统、点火系统以及取样测试系统等. 供气系统主要包括 3 台压气机 (最大压力为 0.8 MPa, 最大流量为 1.2 kg/s), 流量为 0.8 kg/s 时, 空气经电加热器加热温度可升至 300 °C 左右. 供油系统由油泵、输油管路、阀门和离心喷嘴组成, 负责向驻涡区供油. 点火系统含高能点火器、电缆和电嘴.

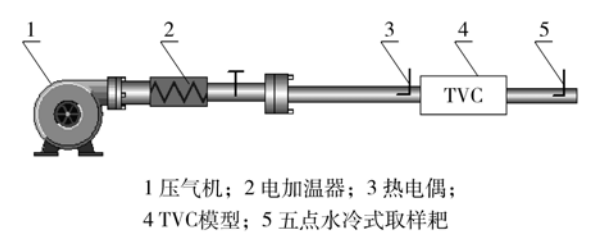


图 2 驻涡燃烧室试验系统
Fig. 2 Experimental system of TVC

污染物排放的测量是本研究的重点内容,测量系统由烟气分析仪和自行设计的取样耙(图 3)构成.样品能够代表采样点处流体的真实成分是烟气取样必须解决的基本问题,理想的采样应该是能保证在采样点将气体取出后气体成分之间不会发生进一步的化学反应.针对上述问题,本文参考 Kissel 等人的试验研究结果,设计了强迫对流冷却(水冷)的烟气取样耙,气体进入取样耙后骤冷,化学反应被冻结,这就减少了采样过程中产生的误差.试验中采用的烟气分析仪可直接测量烟气中 CO , UHC , CO_2 , O_2 , NO 等组分的体积分数,各组分的测量方法以及分辨率、测量精度等见表 1,试验开始前采用标准样气对各组分测量通道进行校准,提高了测量结果的准确性.

1.3 研究内容

试验主要开展不同驻涡区余气系数、进口空气流量和进口空气温度影响驻涡燃烧室排放性能的工作.主要研究参数如下:进口空气绝对压力保持在 0.11 MPa 左右;驻涡区余气系数为 $0.61\sim$

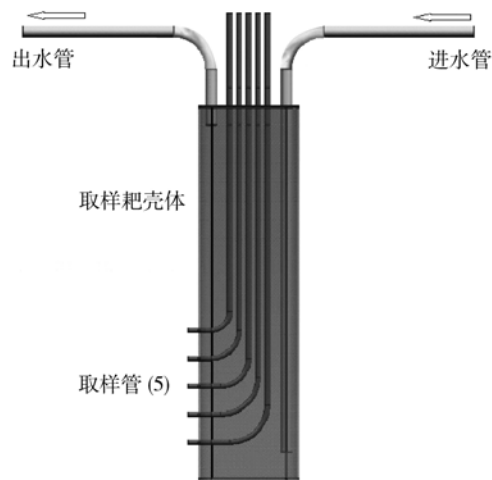


图 3 五点水冷式取样耙示意图
Fig. 3 Sketch of the water-cooling sampling system

表 1 烟气分析仪相关参数
Table 1 Parameters for gas analyzer specifications

测量组分	测量方法	分辨率	测量精度/%
CO	红外吸收	0.01%	±5
HC	红外吸收	10^{-6}	±5
CO ₂	红外吸收	0.1%	±5
O ₂	电化学	0.01%	±5
NO	电化学	10^{-6}	±4

1.53,进口空气流量为 $0.4\sim0.6\text{ kg/s}$,进口空气温度为 $283\sim473\text{ K}$.试验状态参数如表 2 所示.

表 2 试验状态参数
Table 2 Parameters for experimental conditions

空气温度 T/K	空气流量 $W_a/(\text{kg/s})$	特征速度 $V/(\text{m/s})$	驻涡区余气系数 α	总余气系数 α_t
283	0.4	11.1	0.61~1.53	2.00~5.00
	0.5	13.9		
	0.6	16.7		
373	0.4	14.7		
	0.5	18.4		
	0.6	22.0		
473	0.4	18.6		
	0.5	23.3		
	0.6	27.9		

注:对应每种进口空气参数,驻涡区余气系数均包含 0.61,0.76,0.92,1.22,1.53 五个数值,对应总余气系数分别为 2.00,2.50,3.00,4.00,5.00.

2 试验结果及分析

2.1 驻涡区余气系数 α 对污染物排放的影响

在 RQL 工作模式下,保持空气一定的空气流量,改变驻涡区供油就可以改变驻涡区余气系数.图4、图5、图6分别示出了不同进口空气流量下 CO, UHC 和 NO 体积分数(折合为 15% 氧含量)随驻涡区余气系数的变化情况.

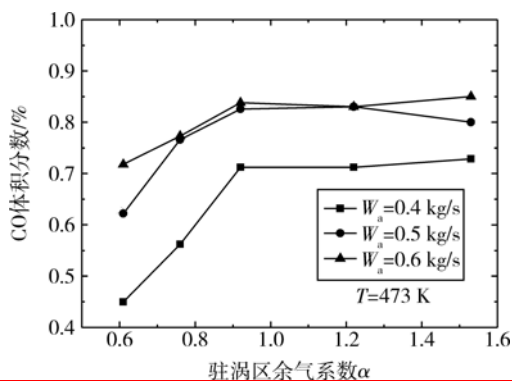


图4 CO 体积分数随驻涡区余气系数的变化

Fig. 4 Variation of CO volume fraction versus α

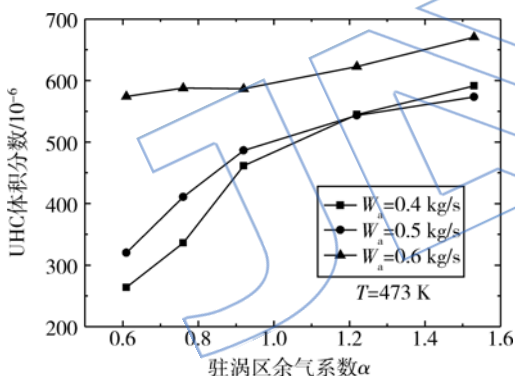


图5 UHC 体积分数随驻涡区余气系数的变化

Fig. 5 Variation of UHC volume fraction versus α

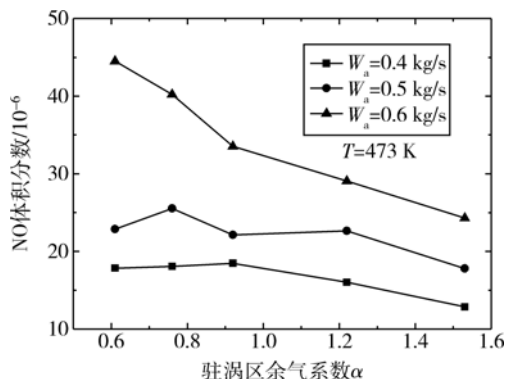


图6 NO 体积分数随驻涡区余气系数的变化

Fig. 6 Variation of NO volume fraction versus α

由图4~图6分析,可得如下结论.

1) 对于不同的空气流量,CO 和 UHC 体积分数随驻涡区余气系数 α 呈现相同的变化规律,即 α 增大(0.61~1.53),CO 和 UHC 体积分数均升高.主要原因是:一方面,试验中采用了固定空气流量,通过改变燃油流量来改变驻涡区余气系数的方法,驻涡区余气系数增大意味着燃油量减小,对离心喷嘴而言燃油量减小意味着供油压力降低,这就造成离心喷嘴雾化效果变差,燃油颗粒变大,所以燃烧完全程度降低,CO, UHC 体积分数升高;另一方面,驻涡区余气系数增大,燃油量减小,这也导致驻涡区、快速掺混区和贫油燃烧区的温度都降低,这也会在一定程度上降低燃油颗粒的蒸发度,降低燃烧化学反应的速率,进而使 CO, UHC 体积分数升高.

2) 对于不同的空气流量,NO 体积分数随驻涡区余气系数 α 呈现相同的变化规律,即 α 增大(0.61~1.53),NO 体积分数降低.可能的原因是: α 增大,供入驻涡区内的燃油减少,局部富油高温区减少,火焰温度降低,而 NO 主要生成在高温环境下,因而 NO 体积分数随火焰温度的降低而降低.

2.2 进口空气流量对污染物排放的影响

图7、图8、图9分别示出了不同驻涡区余气系数下 CO, UHC 和 NO 体积分数(折合为 15% 氧含量)随进口空气流量的变化情况.

由图7~图9分析,可得如下结论.

1) α 在 0.61~0.76 范围内, W_a 越大,CO 和 UHC 体积分数越高, α 在 0.76~1.53 范围内,CO 和 UHC 体积分数随 W_a 增大略有升高,变化幅度不大. α 较小时,驻涡区内富油程度高,所需燃烧时间长,未燃尽的燃油随燃气一起流入快速掺混区,进而在快速掺混区和贫油燃烧区继续燃烧,空气流量增大意味着空气流动速度增大,燃油颗粒在驻涡区内和主流区内的滞留时间都减小,燃烧不完全程度增大,从而导致 CO 和 UHC 体积分数增大.但在 α 较大(约 0.76~1.53)时,供入驻涡区的燃油减少,驻涡区内富油程度降低,燃油主要在驻涡区内燃烧,加上驻涡区双涡模式的流动特点,燃油颗粒在驻涡区内的滞留时间受空气流量的影响低于主流区中滞留时间受空气流量的影响,所以 α 较大(约 0.76~1.53)时,进口空气流量对 CO 和 UHC 体积分数的影响会相对减小.

2) W_a 增大, NO 体积分数增大. 可能的原因是:一方面, W_a 增大, 为保证驻涡区内相同的余气系数, 燃油量增大, 驻涡区内火焰温度高, 局部富油区增多, NO 体积分数会增大; 另一方面, W_a 增大, 空气流动速度增大, 燃油颗粒在驻涡区内的驻留时间减小, NO 体积分数会减小, 但考虑到驻

涡区内特有的双涡流动模式特点, 空气流速对燃油颗粒滞留时间的影响会受到一定程度的削弱, 总的来说, 前者对 NO 生成的影响更大, 所以 W_a 增大, NO 体积分数增大.

2.3 进口空气温度对污染物排放的影响

图 10、图 11、图 12 分别示出了不同驻涡区余

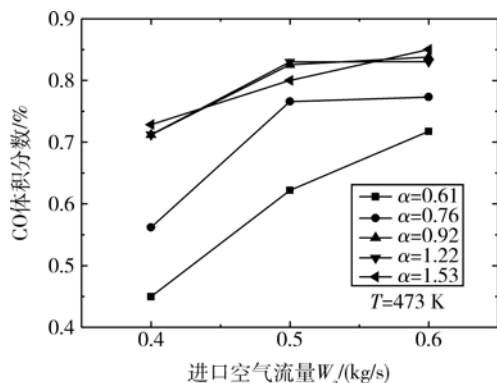


图 7 CO 体积分数随进口空气流量的变化

Fig. 7 Variation of CO volume fraction versus airflow rate

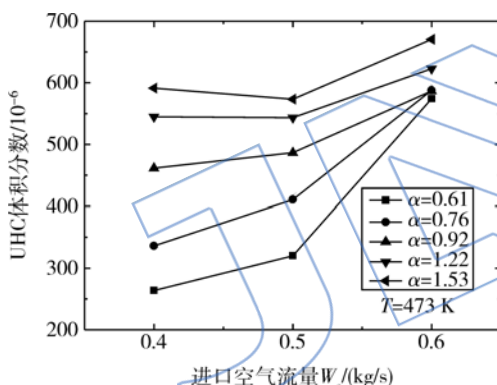


图 8 UHC 体积分数随进口空气流量的变化

Fig. 8 Variation of UHC volume fraction versus airflow rate

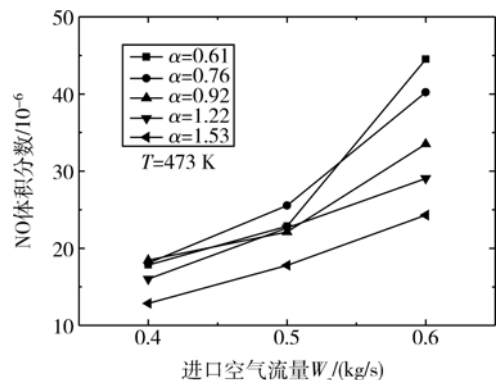


图 9 NO 体积分数随进口空气流量的变化

Fig. 9 Variation of NO volume fraction versus airflow rate

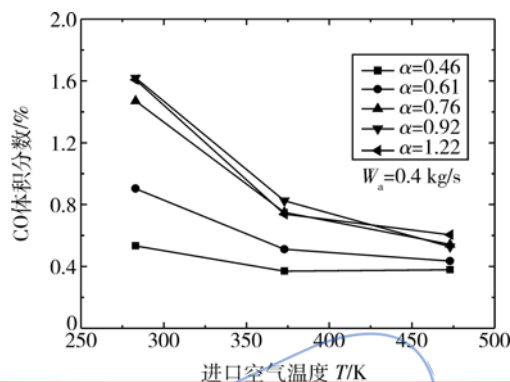


图 10 CO 体积分数随进口空气温度的变化

Fig. 10 Variation of CO volume fraction versus inlet temperature

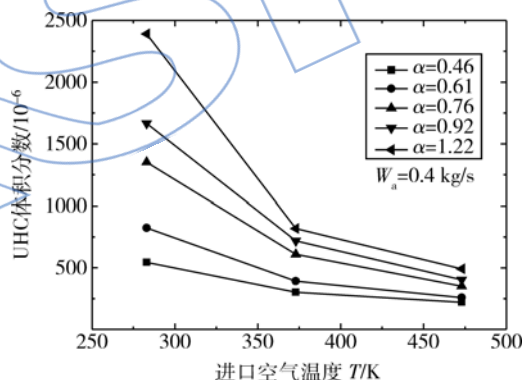


图 11 UHC 体积分数随进口空气温度的变化

Fig. 11 Variation of UHC volume fraction versus inlet temperature

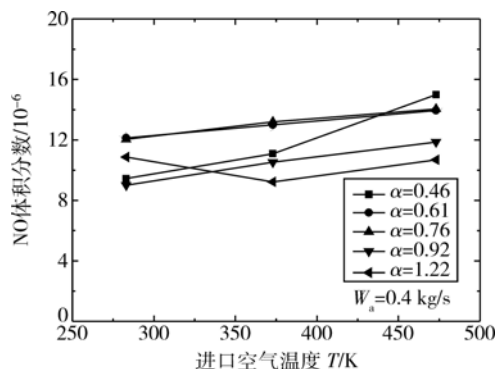


图 12 NO 体积分数随进口空气温度的变化

Fig. 12 Variation of NO volume fraction versus inlet temperature

气系数下 CO, UHC 和 NO 体积分数(折合为 15%氧含量)随进口空气温度的变化情况.

由图 10~图 12 分析,可得如下结论.

1) CO 和 UHC 体积分数均随进口空气温度的升高而减小.这主要是由于进口空气温度升高有利于燃油蒸发、雾化,提高燃烧化学反应速率,进而提高燃烧效率,燃烧不完全程度降低.然而,对于本文的试验模型和试验方案,在提高进口温度的同时保证一定的流量会使流动速度增大,降低反应物在燃烧室中的驻留时间,这对燃烧反应是不利的.从试验结果来看,提高温度对燃烧的促进作用占主导地位.

2) NO 体积分数随着进口空气温度的升高而略有升高.可能的原因是:一方面,进口温度升高,燃烧火焰温度升高,由于 NO 主要产生在高温区,因此 NO 体积分数会升高;另一方面,在保证一定流量的情况下进口温度升高会使流动速度升高,这会降低燃气在燃烧区的驻留时间,降低 NO 体积分数.试验结果取决于这两方面影响的综合效果.

3 结 论

针对使用液态燃料的 RQL 工作模式驻涡燃烧室,开展了驻涡区余气系数、进口空气流量和进口空气温度等参数影响污染物排放的试验研究,获得了如下研究结果:

1) 驻涡区余气系数增大(0.61~1.53),CO 和 UHC 体积分数升高,NO 体积分数降低;

2) 随着进口空气流量增大($W_a = 0.4 \sim 0.6$ kg/s),CO, UHC, NO 体积分数均升高;

3) 随着进口空气温度升高(283~473 K),CO 和 UHC 体积分数降低,NO 体积分数升高.

参考文献:

- [1] 赵坚行.民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J].航空动力学报,2008,23(6):986-996.
ZHAO Jianxing. Pollutant emission and development of low-emission combustion technology for civil aero engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 986-996. (in Chinese)
- [2] Smith R. Advanced low emissions subsonic combustor study[R]. NASA No. 19990024925, 1998.
- [3] Plencner R M. Engine technology challenges for the high-speed civil transport plane[R]. AIAA-98-25025, 1998.
- [4] Burrus D L, Johnson A W, Roquemore W M, et al. Performance assessment of a prototype trapped vortex combustor concept for gas turbine application[R]. ASME Paper 2001-GT-0087, 2001.
- [5] Hsu K Y, Gross L P. Characteristics of a trapped vortex combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1): 57-65.
- [6] Hendricks R C, Shouse D T, Roquemore W M, et al. Experimental and computational study of trapped vortex combustor sector rig with tri-pass diffuser[R]. NASA/TM-2004-212507, 2004.
- [7] Straub D L, Casleton K H, Lewis R E, et al. Assessment of rich-burn, quick-mix, lean-burn trapped vortex combustor for stationary gas turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2005, 127(1): 36-41.
- [8] Hendricks R C, Shouse D T, Roquemore W M. Water injector turbomachinery[R]. NASA/TM-2005-212632, 2005.
- [9] 樊未军, 易琪, 严明, 等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 66-71.
FAN Weijun, YI Qi, YAN Ming, et al. A study of double vortex structure in the trapped vortex combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 66-71. (in Chinese)
- [10] 樊未军, 严明, 易琪, 等. 富油/快速淬熄/贫油驻涡燃烧室低 NO_x 排放[J]. 推进技术, 2006, 27(1): 88-91.
FAN Weijun, YAN Ming, YI Qi, et al. Low NO_x emission of rich-burn, quick-mix, lean-burn trapped vortex combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(1): 88-91. (in Chinese)
- [11] 何小民, 王家骅. 驻涡火焰稳定器冷态流场特性的初步研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 567-571.
HE Xiaomin, WANG Jiahua. An investigation on the fluid characteristics of trapped-vortex combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 567-571. (in Chinese)
- [12] 何小民, 姚锋. 流动和油气参数对驻涡燃烧室燃烧性能的影响[J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 810-813.
HE Xiaomin, YAO Feng. Effect of flow parameters and equivalence ratio on the trapped-vortex combustor performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 810-813. (in Chinese)
- [13] 何小民, 许金生, 苏俊卿. 驻涡区进口结构参数影响 TVC 燃烧性能的试验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1798-1802.
HE Xiaomin, XU Jinsheng, SU Junqing. Effect of air and fuel injection patterns in pilot zone on trapped-vortex combustor performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1798-1802. (in Chinese)