

贫油直喷三喷嘴模型燃烧室燃烧性能

曾青华, 孔文俊, 艾育华, 王宝瑞

(中国科学院工程热物理研究所 轻型动力重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 构建了反向双旋文氏管预混(CDV)三喷嘴矩形模型燃烧室, 研究了其燃烧特征及性能. 结果表明: 火焰近乎全蓝色, 类似气体的贫预混燃烧, 且在此工况下, CO 和 NO_x 换算成 15% 含氧量(体积分数)下排放的体积分数分别低于 10×10^{-6} 和 50×10^{-6} . 此外, 研究了进气温度变化对 CDV 三喷嘴污染物排放的影响, 发现 CO 排放相对 NO_x 更易受到进气温度变化的影响, 并分析揭示了产生该现象的原因. 另外雾化器的性能极易影响贫油直喷火焰特征; 需要改进雾化器的加工工艺以确保在预热工况下它能够保持持续稳定的良好雾化性能.

关 键 词: 贫油直喷; 燃烧室; 燃烧性能; 蓝色火焰; 低排放

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Combustion performances of lean direct injection model combustor with three injectors

ZENG Qing-hua, KONG Wen-jun, AI Yu-hua, WANG Bao-rui

(Key Laboratory of Light-duty Gas-turbine, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A rectangular model combustor with three counter dual-swirl Venturi-premix (CDV) injectors was designed and its combustion characteristics and performances were also investigated. The results showed that, the combustion flames were blue, which were very similar to those of lean premixed gaseous combustion. And in the above-mentioned working condition, CO and NO_x emission volume fraction converted to 15 percent oxygen were less than 10×10^{-6} and 50×10^{-6} respectively. In addition, the effect of inlet air temperature change on pollutant emissions of these three CDV injectors was also investigated. It was found that the CO emission concentration was more affected by the change of inlet air temperatures than that of NO_x. And the reason about above-specified phenomenon was analyzed and revealed. Moreover, the study showed that, atomizer's performances greatly influenced the characteristics of lean direct injection combustion flames. Processing technology of the fuel atomizers should be improved to ensure long-term stability of their atomization performances.

Key words: lean direct injection; combustor; combustion performance; blue flame; low emissions

贫油直喷(lean direct injection, LDI)燃烧在理论上可无限接近贫预混气燃烧的低排放极限, 且可避免贫预混气燃烧易出现的回火、自燃、不稳定等不足^[1-3], 被认为是最有发展前景的下一代超

低污染燃烧室技术^[4].

迄今, 围绕 LDI 燃烧的研究已有 30 余年, 获得了流场^[5-7]、污染物排放^[8-9]等特性, 为 LDI 燃烧室的设计和使用提供了基础. 但关于 LDI 燃烧

收稿日期: 2013-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(50936005); 国家高技术研究发展计划(2007AA050501)

作者简介: 曾青华(1982—), 男, 湖南常宁人, 助理研究员, 博士, 主要从事发动机燃烧学研究.

的研究还不够全面也不够深入,像燃烧火焰特征、燃烧室性能等,以及它们的影响机理均很少被研究。

以前研究的 LDI 燃烧喷嘴大多是单旋文氏管预混结构^[10-11];模型燃烧室为基于此单旋喷嘴的阵列模型^[12-18]。单旋喷嘴及阵列模型燃烧室的流动和燃烧性能特征均已文献进行过研究^[19-21],但 CDV 喷嘴以及由此喷嘴构建的燃烧室很少被研究。

本文将以耦合优化成的 CDV 喷嘴为对象,在前期受限特性^[22]研究基础上,构建矩形模型燃烧室,实验研究其燃烧性能特征,为 LDI 燃烧室的优化设计提供参考。

1 模型燃烧室构建及实验系统

1.1 模型燃烧室构建

CDV 喷嘴由反向双旋流器、文氏管预混器、雾化器等组成,具体结构参考文献^[22]。CDV 喷嘴燃烧的受限特性研究给出了最佳受限比值,为多喷嘴的优化布置提供了参考。由于实验获得的这个最佳受限比值包含了壁面对燃烧的影响,而实际 LDI 燃烧室除邻近壁面的喷嘴外,其他喷嘴出口流场及燃烧场受壁面影响均较少,主要受控于相邻喷嘴相互作用,因此设计多喷嘴燃烧模型的燃烧室时需要调整受限比参数。受限比的调整是通过在单喷嘴最佳受限比基础上进行多次实验完成的。本文选择 CDV 三喷嘴矩形模型(下文简称三喷嘴模型),原因是结构相对简单,既考虑了壁面的影响,又包含了相邻喷嘴相互作用的因素。

为便于光学摄像,三喷嘴模型燃烧室设计成矩形,结构如图 1 所示。模型燃烧室的火焰筒头部安装 3 个 CDV 喷嘴,径向等距分布,纵向中间喷嘴与相邻喷嘴错开一定距离。筒身正面和上侧面安装石英玻璃视窗,留作光学测量用;筒身其他侧面开有若干排直径为 1 mm 的小孔,用作进气冷却。点火电嘴安装在中间 CDV 喷嘴的出口附近。模型燃烧室的机匣下侧面设计一个泄油孔,用作排泄机匣的内部积油。

模型燃烧室前面的进气段和后部的排气段如图 2 所示。进气段长度由计算确定,确定原则是 CDV 喷嘴进口处空气流速沿径向要分布均匀,以保证 3 个喷嘴的进气量相同。进气段起到整流和稳流的作用。进气段上设计了 2 个基座,用于测量燃烧室进口处的压力和温度。模型燃烧室后部的

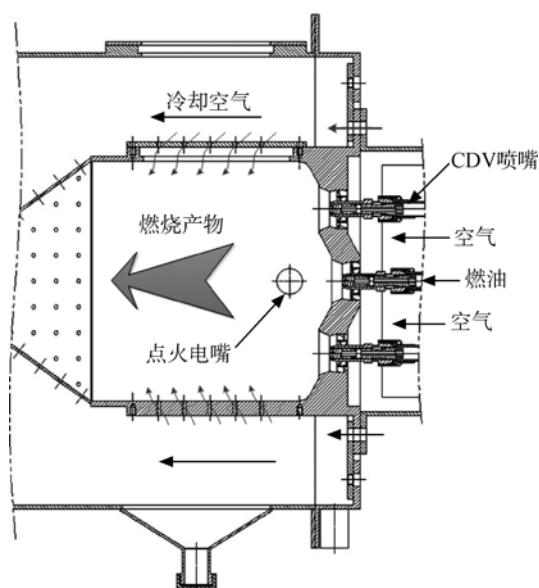


图 1 三喷嘴模型燃烧室结构图

Fig. 1 Configuration of model combustor with three injectors

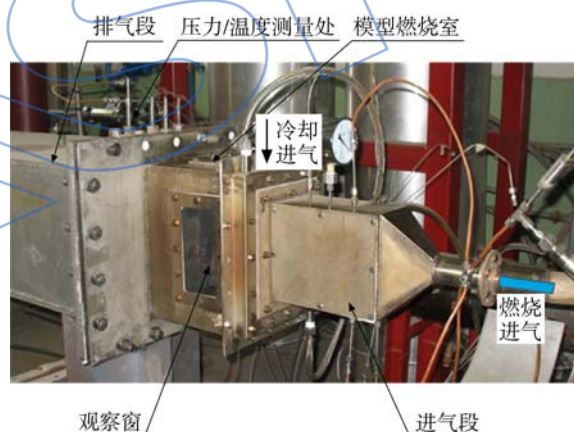


图 2 模型燃烧室实验台

Fig. 2 Experiment rig of model combustor

排气段设置 6 个基座,其中 3 个用于安装温度靶子,另外 3 个用于安装压力靶子。压力靶子和温度靶子相间布置。每支压力靶子按等间距布置 3 个测点;每支温度靶子按等间距布置 5 个测点。出口测量断面上共布置了 15 个测温点,断面处尺寸为 35 mm × 226 mm,温度测点密度约为 0.19 点/mm²,大于通常要求值 0.17^[23],表明实验结果中包含了热点数据。

1.2 实验系统

实验系统由供气系统、供油系统、测量系统以及数据采集系统等组成,如图 3 所示。供气系统主要包括螺杆压缩机、储气罐、精密过滤器、空气电

加热器等设备,空气电加热器总加热功率为 300 kW,配置一套调控装置后,满足实验时燃烧室不同进气温度的要求。供油系统由油箱、油滤、油泵、电动机等组成,为方便使用,所有设备均集成到一个实验台上。油路设置了回油管路,用于稳定调节供油流量。测量系统主要包括压力、温度、流量以及烟气组分体积分数的测量。燃烧室出口压力和温度测量采用耙子式构造,便于获得出口压力和温度的分布状况。空气流量由七星华创(SEVEN-STAR)流量控制器控制,燃油流量使用澳大利亚 TRIMECIND 椭圆齿轮流量计测量,雾化器雾化特性由马尔文激光粒度仪测量得到,排气体积分数采用德国 Testo-350 型烟气分析仪进行连续在线检测。测量信号转换成数字信号后由计算机完成实验数据的采集和处理。

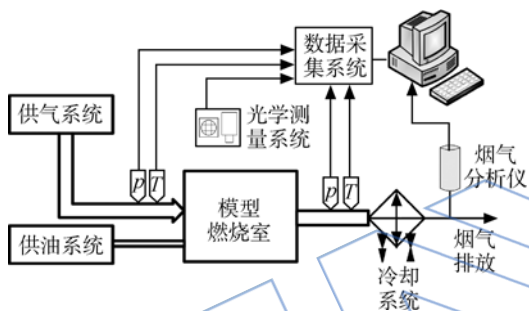


图3 实验系统示意图

Fig. 3 Sketch of experiment system

1.3 实验参数

实验在常压下进行,燃料为0号轻柴油,进气温度在 294~603 K 间,温度变化通过空气电加热器调节实现;油气比 ϵ 在 0.017~0.072 间,其变化通过保持进气流量不变而仅改变燃油流量获得。

2 实验结果与分析

2.1 单喷嘴实验

单喷嘴实验用于检验并调试三喷嘴实验前单个喷嘴的燃烧性能。实验装置参考文献[22],受限比采用 10.6。调试实验工况中进气温度为 (294 ± 1) K,油气比保持 0.0607 不变。实验方法是拍摄火焰照片,并测量出口的污染物排放体积分数。实验方案是首先选择基准喷嘴,获得实验工况下的火焰图片和污染物排放体积分数,然后调节另外两个喷嘴的燃烧性能,调节目标是保持与基准喷嘴相当的火焰特征和污染物排放体积分数(排放体积分数与基准喷嘴的差异小于 3%),调节方法

是在保持燃油流量不变的前提下调整雾化器的雾化性能。

在实验工况下,基准喷嘴的火焰特征如图 4 所示,其中,图 4(a)为火焰的瞬时照片,图 4(b)为录像。图中照片和录像均由卡片机拍摄。拍摄图 4(a)照片的相机设置为:快门为 1/160 s,光圈为 F8.0。从图中看出,燃烧火焰近乎全蓝色,类似气体的贫预混燃烧,该现象表明:①燃烧产物中烟黑很低,燃烧非常干净;②由于蓝色火焰为 CH 基发光产生,火焰近乎全蓝色说明在燃烧过程中 CH 基在火焰面上分布非常均匀,因此反映出油雾在反应前应该与空气有了非常均匀的混合。

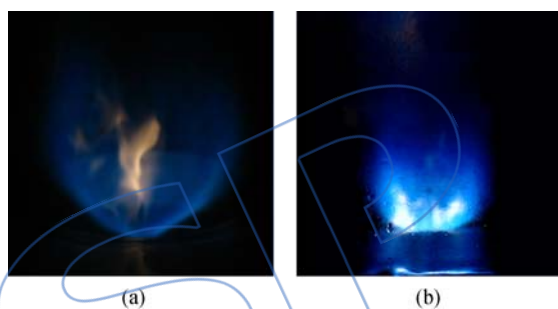


图4 基准喷嘴火焰特征

Fig. 4 Flame characteristics of the benchmark injector

图 5 为基准喷嘴的排放特性。纵坐标 f 为换算到干基 15% 含氧量(体积分数)下的排放体积分数;横坐标 ϵ 为油气比。图中结果显示,在调试实验工况下,CO 排放体积分数低于 5×10^{-6} , NO_x 排放体积分数低于 15×10^{-6} ,它们的排放体积分数均远低于当前污染物排放标准。

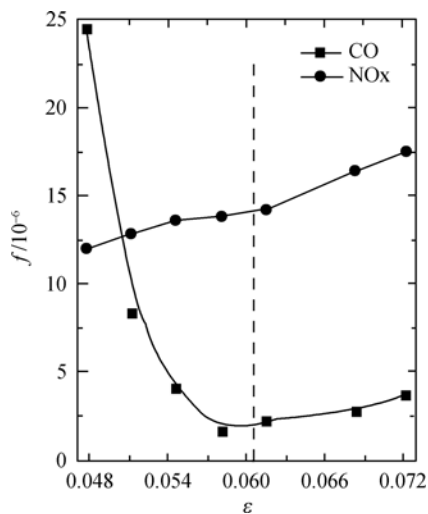


图5 基准喷嘴排放特性

Fig. 5 Emission characteristics of the benchmark injector

2.2 三喷嘴实验

实验用喷嘴为在常温进气工况下经过调试后达到要求的喷嘴. 首先试验常温进气工况下三喷嘴的火焰特征. 图 6(a)给出了燃烧火焰状态图, 工况为: 进气温度为 (294 ± 1) K, 总油气比保持 0.0184 不变, 单个喷嘴的油气比计算值为 0.0607, 计算过程中流经单喷嘴的空气流量按照面积法分配原则进行确定. 图中看出, 每个喷嘴均保持了在单喷嘴燃烧实验时所呈现出的蓝色火焰, 但火焰形状出现了一些不同: 一是火焰面有所扩大, 原因是不存在单喷嘴燃烧时壁面约束的影响; 另外是相邻喷嘴间火焰在下游出现了叠加, 即相互作用. 火焰相互作用使得贫油气比状态下燃烧也能够保持持续稳定, 但是, 如果火焰叠加面较大, 此时可能出现喷雾重叠, 从而影响燃烧的完全性, 造成污染物增加.

其次, 进行了三喷嘴预热进气实验, 考察预热温度变化对燃烧的影响. 实验工况为: 进气温度在 $400 \sim 603$ K 间, 总油气比 ε 在 0.017~0.021 间. 图 6(b)给出了进气温度为 (603 ± 1) K, 总油气比为 0.0184 下的燃烧火焰, 图中显示火焰仍呈现蓝色, 但亮度增大. 火焰变亮的缘故应是进气温度升高, 引起燃烧室内温度增大所造成. 另外, 火焰出现了异常情况, 3 个喷嘴出口火焰形状差异明显, 原因应该是雾化器喷雾特征在高温下发生了改变. 事后联系加工方检验确认, 喷嘴零件间的间隙确实发生了变化, 给出原因是这种极小流量喷嘴(工作流量为 1.15 kg/h)流道及零件间隙都非常小, 因此精度很高, 另外喷嘴加工过程中未经淬火等工艺处理, 硬度也不够, 因而高温下热应力的不均匀, 极易导致喷嘴零件间装配间隙发生改变,

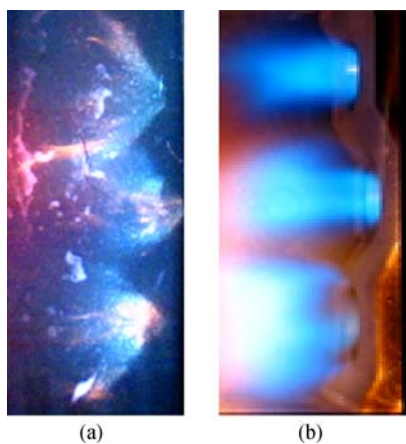


图 6 三喷嘴火焰特征

Fig. 6 Flame characteristics of three injectors

从而影响喷嘴的燃油雾化性能. 在燃烧实验后进行喷嘴喷雾性能测试, 实验结果也验证了这一推测, 不同喷嘴的喷雾特征尤其是喷雾锥角出现显著差异, 上面两个喷嘴的喷雾锥角明显变小, 最下面的喷嘴的喷雾锥角明显变大. 将来雾化器的加工工艺有待改进.

图 7 给出进气温度为 (603 ± 1) K 下的三喷嘴排放特性. 图中看出, 相对图 5 单喷嘴实验, 三喷嘴燃烧总的 CO 排放和 NO_x 排放体积分数均分别增加 1 倍左右. NO_x 排放体积分数增大, 主要原因是进气温度升高所致; 而 CO 的增加是由于雾化器喷雾特征改变导致的燃烧不完全性增大所致. 不过, 总地来说, 此时污染物排放体积分数仍低于中国现行燃气轮机污染物排放标准所规定的限值.

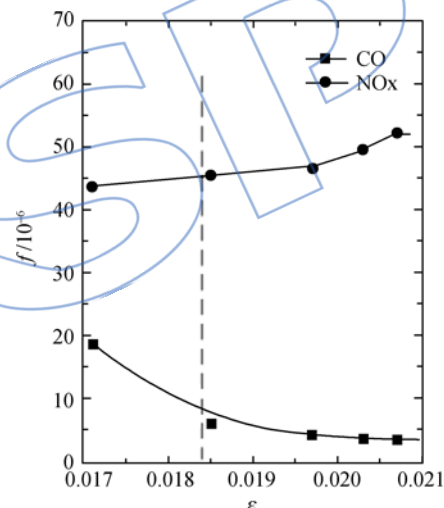


图 7 三喷嘴排放特性

Fig. 7 Emission characteristics of three injectors

图 8 给出的是进气温度变化对三喷嘴排放的影响, 其中横坐标 T_3 表示进气温度(K). 实验在总油气比为 0.0184 工况下进行. 从图中看出, 进气温度均影响 CO 和 NO_x 的排放体积分数, 但影响的程度存在差别, 相对 NO_x, CO 排放体积分数受进气温度影响的敏感度更高, 其原因与此时燃烧状态和方式有关. 此时为贫油气比燃烧, 燃烧温度低, 虽然进气温度增加将使燃烧温度升高, 但若此时燃烧室温度仍在热力型 NO_x 慢速生成区的温度范围内, 则 NO_x 的生成率将仍然比较低, 因此呈现出如图所示的进气温度的改变对 NO_x 排放的影响程度较小. CO 的生成主要与燃烧不完全度有关, 而燃烧不完全度与油雾的混合蒸发密不可分. 在本文的 LDI 燃烧方式下, 油雾燃烧前

是一个雾滴蒸发及与空气均匀混合的过程,其中混合程度主要取决于CDV喷嘴的性能,蒸发快慢主要受进气温度高低的影响。常温进气实验已验证CDV喷嘴具有很好的混合油雾与空气的性能,且本实验中使用的是同一喷嘴,因此图8系列实验过程中CO的变化与混合因素无关,而主要取决于进气温度改变这一因素了。进气温度较低时,燃烧前雾滴尚未完全蒸发,极易产生燃烧不完全,故CO排放会偏高;进气温度升高,雾滴蒸发率增大,燃烧完全度提高,故CO排放下降。因此,进气温度改变引起CO排放体积分数的快速变化。

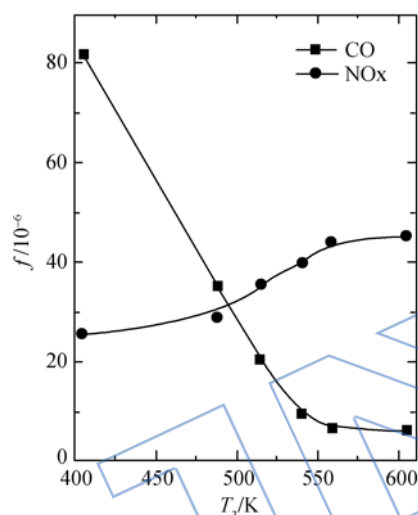


图8 进气温度变化对三喷嘴排放的影响

Fig. 8 Emission change with inlet temperature for three injectors

3 结论

本文构建了三喷嘴矩形模型燃烧室,研究了其燃烧特征及性能。结果表明,火焰近乎全蓝色,类似气体的贫预混燃烧,且此工况下,CO和NOx的排放体积分数分别低于 10×10^{-6} 和 50×10^{-6} 。另外研究了进气温度变化对三喷嘴污染物排放的影响,发现CO排放相对NOx更易受到进气温度变化的影响,并分析揭示了产生该现象的原因。此外,结论认为雾化器的性能极易影响LDI火焰特征;需要改进雾化器的加工工艺以确保在预热工况下它能够保持持续稳定的良好雾化性能。

参考文献:

[1] Tacina R R. Low NOx potential of gas turbine engines [R]. AIAA 90-0550, 1990.

[2] Tacina R, Wey C, Laing P, et al. A low NOx lean-direct injection, multipoint integrated module combustor concept for advanced aircraft gas turbines[R]. NASA/TM-2002-211347, 2002.

[3] Patel N, Menon S. Simulation of spray-turbulence-flame interactions in a lean direct injection combustor[J]. Combustion and Flame, 2008, 153(1/2): 228-257.

[4] 林宇震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 232-234.

[5] Yang S L, Siow Y K, Peschke B D, et al. Numerical study of nonreacting gas turbine combustor swirl flow using Reynolds stress model[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(3): 804-811.

[6] Dewanji D, Rao A G, Pourquie M, et al. Investigation of flow characteristics in lean direct injection combustors[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(1): 181-196.

[7] Fu Y, Jeng S M, Tacina R. Confinement effects on the swirling flow generated by a helical axial swirler [J]. AIAA-2006-545, 2006.

[8] Tacina R, Mansour A, Partelow L, et al. Experimental sector and flame-tube evaluations of a multipoint integrated module concept for low emission combustors[R]. ASME Paper GT2004-53263, 2004.

[9] Tacina K M, Lee C M, Wey C. NASA Glenn high pressure low NOx emissions research [R]. NASA/TM-2008-214974, 2008.

[10] Patel N, Kirtas M, Sankaran V, et al. Simulation of spray combustion in a lean-direct injection combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2327-2334.

[11] Iannetti A C, Liu N S. The effect of spray initial conditions on heat release and emissions in LDI CFD calculations[J]. AIAA-2008-1150, 2008.

[12] Fu Y, Jeng S M, Tacina R. Characteristics of the swirling flow in a multipoint LDI combustor[J]. AIAA-2007-846, 2007.

[13] Yang S L, Siow Y K, Teo C Y, et al. Numerical study of lean-direct injection combustor with discrete-jet swirlers using Reynolds stress model[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(4): 1059-1065.

[14] 邓甜, 王方, 黄勇. 多点喷射燃烧室冷态流场特性研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(5): 876-880.

DENG Tian, WANG Fang, HUANG Yong. Investigation of the cold flow field of a multi-injection combustor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(5): 876-880. (in Chinese)

[15] 张群, 徐华胜, 钟华贵, 等. 多旋流器阵列贫油直喷燃烧室流场的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 483-487.

ZHANG Qun, XU Huasheng, ZHONG Huagui, et al. Numerical simulation of flow field in a multi-swirler array lean direct injection combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3): 483-487. (in Chinese)

- [16] 张群,徐华胜,钟华贵,等.反旋向多旋流器阵列燃烧室流场的数值研究[J].西北工业大学学报,2009,27(3):305-309.
ZHANG Qun, XU Huasheng, ZHONG Huagui, et al. A numerical study of the flow field of a combustor with a counter-rotating multi-swirler array[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27(3): 305-309. (in Chinese)
- [17] 吴焱程,黄勇,王方,等.不同结构多点喷射燃烧室冷态流场研究[J].航空动力学报,2010,25(7):1536-1544.
WU Yaozeng, HUANG Yong, WANG Fang, et al. Investigation of cold flow field of a multi-injection combustor with different geometries[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1536-1544. (in Chinese)
- [18] 张振奎,钟华贵.多点喷射模型燃烧室性能CFD分析[J].航空发动机,2010,36(4):16-21.
ZHANG Zhenkui, ZHONG Huagui. CFD analysis of performance for the model multipoint injection combustor[J]. Aeroengine, 2010, 36(4): 16-21. (in Chinese)
- [19] Archer S, Gupta A K. Effect of swirl and combustion on flow dynamics in lean direct injection gas turbine combustion[J]. AIAA-2003-1343, 2003.
- [20] Archer S, Gupta A K. Confinement effects on flow dynamics in swirling flames [R]. ASME Power, PWR2005-50167, 2005.
- [21] Archer S, Gupta A K. Flow dynamics of under confined and unconfined combustion conditions[R]. ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC2004-57732, 2004.
- [22] Zeng Q, Kong W, Sui C. Effect of confinement on combustion characteristics in lean direct injection combustion system[R]. ASME Paper GT2013-95413, 2013.
- [23] 胡正义.航空发动机设计手册:第9册 主燃烧室[M].北京:航空工业出版社,2000.