

文章编号:1000-8055(2009)03-0488-06

先进旋涡燃烧室流动与燃烧特性分析

邓洋波, 刘世青, 钟兢军
(大连海事大学 轮机工程学院, 大连 116026)

摘 要: 应用三维数值模拟方法,研究了应用先进旋涡燃烧室(AVC)概念设计的燃烧室流动和燃烧特性. 研究表明:AVC 的总压损失系数、燃烧效率、旋涡结构和燃烧稳定性以及污染物排放,受前后钝体形成的凹腔结构内的气流喷射位置、喷射角度和主气流当量比的影响,其中受凹腔结构内的气流喷射位置影响最大.

关 键 词: 先进旋涡燃烧室(AVC); 数值模拟; 预混合燃烧; 污染物排放

中图分类号: V235.21

文献标识码: A

Analysis of the combustion and flow field characteristics of advanced vortex combustor

DENG Yang-bo, LIU Shi-qing, ZHONG Jing-jun

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In this paper, numerical simulation was carried out to study the mechanism of stabilizing flame and reduce the pollutant exhaust and the influences of the major parameters on combustion stability, combustion efficiency and emissions of advanced vortex combustor (AVC). The flow resistance, trapped vortex configuration and stability, combustion efficiency of AVC were influenced by the position, angle and equivalence ratio of airflow jet in the cavity between fore-body and after-body. The position of airflow jet in the cavity had most effect on that.

Key words: advanced vortex combustor (AVC); numerical simulation; pre-mix combustion; pollution

涡流器火焰稳定方式,经过不断地改进和发展,被广泛应用于燃气轮机中.采用涡流器燃气轮机,在近贫可燃极限条件下,受主气流脉动影响,很容易导致火焰熄灭.为了进一步提高燃气轮机燃烧室燃烧稳定性和抑制污染物生成,美国 Ramgen 公司开发了一种新概念燃气轮机燃烧室,利用前后两个钝体形成的凹腔捕捉旋涡,构成稳定的值班火焰区域,因此被称作先进旋涡燃烧室^[1-2] (Advanced vortex combustor,简称 AVC).

AVC 一方面,前后两个钝体形成的凹腔结构

能够产生稳定不脱落的旋涡,影响区域构成稳定的值班火焰;另一方面,旋涡区域燃烧产物能够很好地与其平行的主气流掺混,横向引燃主气流. AVC 在近贫可燃极限条件下,仍然可以实现稳定燃烧,进而控制了 NO_x 和 CO 污染物的排放.所以,AVC 具有燃烧稳定性好,抗气流脉动干扰能力强, NO_x 和 CO 污染物排放水平低等优点. Ramgen 公司^[3-4] 在 AVC 实验中,AVC 工作在贫燃料预混合燃烧条件下, NO_x 排放含量达到 3×10^{-6} , CO 排放量达到 9×10^{-6} .

收稿日期: 2008-03-10; **修订日期:** 2008-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(50676013)

作者简介: 邓洋波(1970-),男,辽宁沈阳人,副教授,博士,主要从事清洁高效燃烧技术方面的研究.

E-mail: dengyb1970@163.com

本文应用三维数值模拟方法,研究了依据 AVC 概念设计的燃烧室,工作在高压情况,前、后钝体间凹腔内预混合在气体不同喷射位置、不同喷射角度和不同主气流当量比条件下,总压损失系数、燃烧稳定性、燃烧效率和污染物排放的变化规律。

1 AVC 模型和数值模拟方法

AVC 模型如图 1 所示,燃烧室为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的方形通道,沿通道轴线方向设置前、后两个钝体;前钝体为前部半圆柱形的长方体,长为 181.5 mm ,宽 $B = 63\text{ mm}$,高为 100 mm ;后钝体是立方体,厚 20 mm ,高 100 mm ;后钝体宽度 S 和前、后钝体间距离 L_s 按燃烧流体稳定驻涡条件下的 TVC 结构关系式确定。

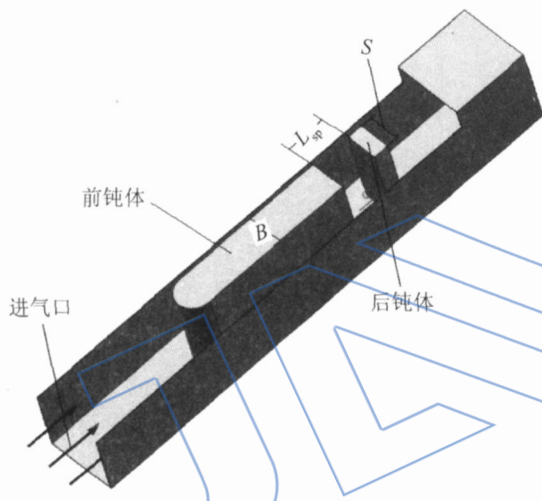


图1 AVC 结构简图

Fig.1 Structure of AVC

在 AVC 前、后两个钝体间凹腔内,距离后钝体外壁面边界 L_{φ} 为 8.335 mm 、 3.335 mm 和 8.335 mm 位置,布置对称喷气管排,喷射甲烷和空气预混合气体;在前钝体向后阶面上,距外边界 5 mm 位置,布置对称两排值班燃料喷管。

本文应用 Fluent 商业软件数值模拟三维 AVC 燃烧、流动和污染物生成特性^[5]。应用专业网格生成软件 Gambit 生成 AVC 三维立体几何模型网格,采用非结构适体网格。整体网格由多区域拼接而成,网格品质较好,网格节点单元数在 $1600\,000 \sim 1608\,000$ 个之间。在 AVC 气流流动计算模型的控制方程中,湍流模型采用可实现 (Realizable) $k-\varepsilon$ 模型,近壁面处采用标准壁面函数法。控制方程离散采用基于控制体中心的有限体积方法,选用隐式格式,采用一阶迎风格式。组分

模型采用部分预混合燃烧模型,通过分别求解混合份额方程和反应发展变量来确定组分浓度和火焰前缘位置,求解器选用分离式求解器。求解残差 $< 1 \times 10^{-4}$ 。

边界条件:主气流甲烷和空气预混合气体质量流量为 1.04 kg/s ,静温为 678 K ,总温为 727.8 K ;前、后钝体间凹腔引入燃气和预混合气体质量流量为 0.04 kg/s ,凹腔内燃气和空气局部当量比为 0.75 ;出口表压为 1965.705 kPa 。AVC 倾泻平面前壁面平均温度为 678 K ,倾泻平面后壁面平均温度为 978 K 。

2 计算结果分析

2.1 喷射管排位置的影响

图 2 和图 3 是喷射管排布置在距离后钝体外壁 L_{φ} 为 18.335 mm 位置,主气流当量比为 0.58582 时,平行 AVC 主轴两个截面上二维温度分布、压力分布和空间气流流线图。由图可以看出,平行 AVC 主轴不同截面上,在一定高度 (Z 坐标值) 范围内,温度分布和静压分布云图基本相同。所以,本文分析温度分布、静压分布和气流流线特征时,均取 AVC 模型 $Z = 50\text{ mm}$ (图 1) 对应条件下的剖面上分布情况进行分析。

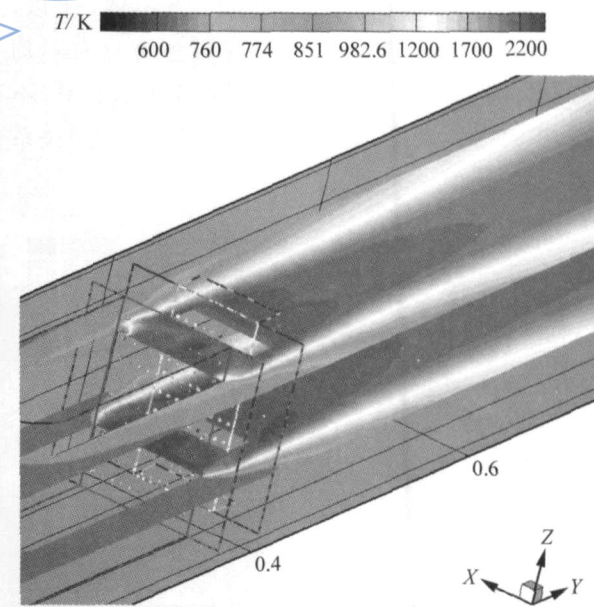


图2 不同截面温度分布图

Fig.2 Temperature distributing of various sections

图 4~图 7 分别为喷射管排布置在距离后钝体外壁 L_{φ} 为 18.335 mm 、 8.335 mm 和 13.335 mm 位置,主气流当量比为 0.58582 时,平行 AVC 主轴截面上二维温度分布、压力分布和流线

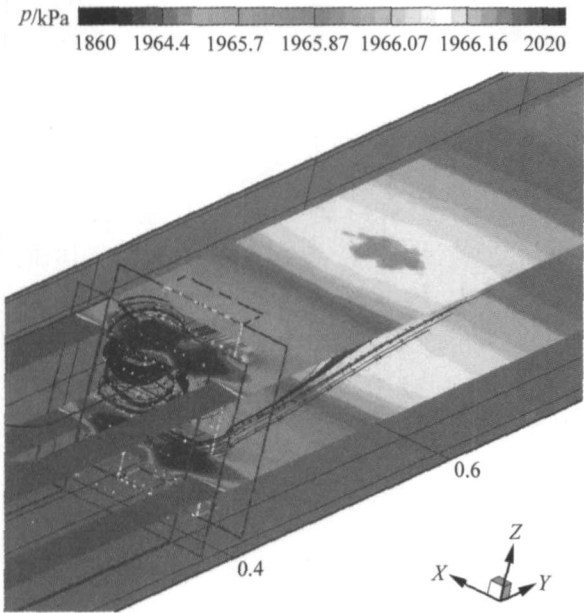


图 3 不同截面空间流线和静压分布图
Fig. 3 Streamline and pressure distributing and of various sections

图.图 8 是 AVC 燃烧效率和压力损失系数随喷射管排位置变化曲线图.

由图 4 可以看出,喷射管排在 L_{sp} 为 18.335 mm 位置,在凹腔内形成对称完整的旋涡,旋涡核心有低压槽.在旋涡的卷吸作用下,使得凹腔内高温混合气流不能很好的同主气流惨混,所以,AVC 内燃烧稳定性好,燃烧区域温度分布不均匀,燃烧效率(燃烧效率按文献[6]关系式计算)不高.压力损失系数(压力损失系数按文献[7]关系式计算)较小.

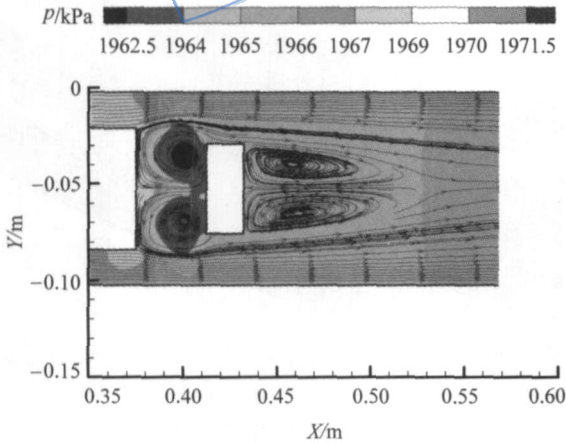


图 4 $L_{sp} = 18.335$ mm 喷射位置时流线和静压分布图
Fig. 4 Streamline and static pressure of $L_{sp} = 18.335$ mm

由图 5 和图 6 可以看出,喷射管排 L_{sp} 为 13.335 mm 位置,气流在凹腔内形成的对称完整的旋涡,相对喷射管排 L_{sp} 为 18.335 mm 位置的

凹腔内形成的旋涡,向凹腔外和后钝体方向靠近,并在凹腔中部靠近后钝体附近出现一个流线奇点. AVC 内的流动状态,使得凹腔内高温混合气流很好地与主气流惨混,而且,旋涡核心有低压槽,

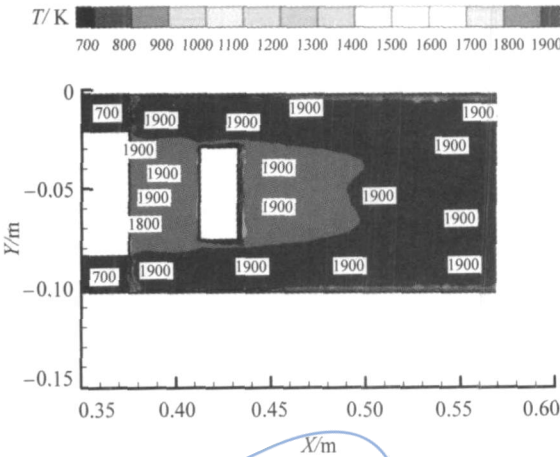


图 5 $L_{sp} = 13.335$ mm 时温度分布图
Fig. 5 Temperature of $L_{sp} = 13.335$ mm

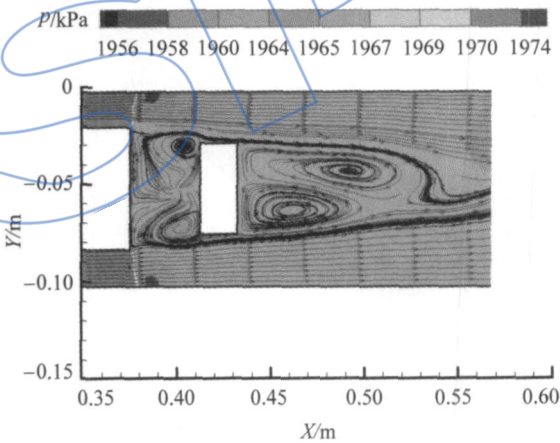


图 6 $L_{sp} = 13.335$ mm 时流线和静压分布图
Fig. 6 Streamline and static pressure of $L_{sp} = 13.335$ mm

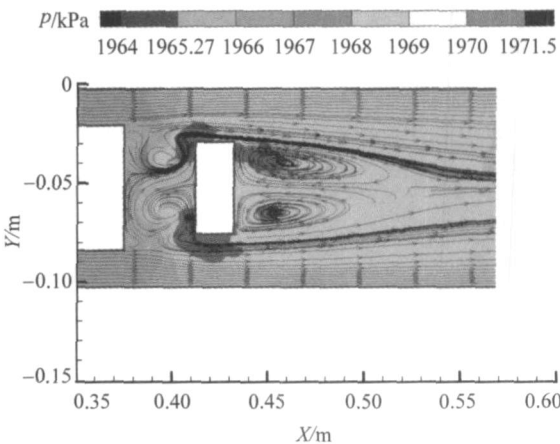


图 7 $L_{sp} = 8.335$ mm 时流线和静压分布图
Fig. 7 Streamline and static pressure of $L_{sp} = 8.335$ mm

稳定性好,所以,AVC 内燃烧比较稳定,燃烧区域温度分布均匀,燃烧效率高,但压力损失较大。

由图 7 可以看出,喷射管排 L_{sp} 为 8.335 mm 位置时,靠近后钝体外壁,在凹腔内形成不完整且不对称一对旋涡,而静压槽位于靠近后钝体凹腔外侧,所以,AVC 内燃烧区域温度分布均匀,燃烧效率较低,但压力损失较小。

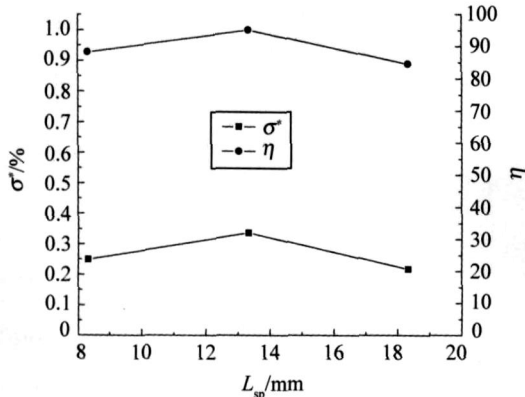


图 8 σ 和 η 随喷射位置变化情况
Fig. 8 σ and η versus injection position L_{sp}

2.2 当量比的影响

图 9 和图 10 为喷射管排 L_{sp} 为 13.335 mm 位置,主气流当量比 ϕ 为 0.4 时,平行 AVC 主轴截面上二维温度分布、压力分布和流线图。AVC 内如果结构布局合理,预混合气体在其内燃烧,在前、后钝体间凹腔内形成的旋涡受前钝体遮蔽,非常结构稳定,使得燃烧稳定性不受主气流脉动的影响。所以,AVC 可以工作在贫燃料预混合状态下。由图 9 和图 10 可以看出,主气流当量比 ϕ 为 0.4 时,AVC 也可以实现稳定燃烧。

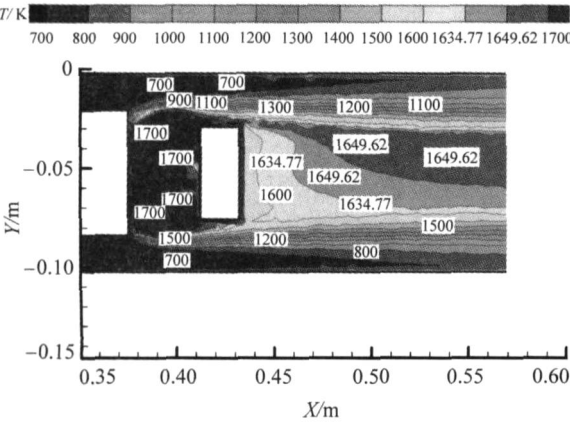


图 9 $\phi = 0.4$ 时温度分布图
Fig. 9 Temperature of $\phi = 0.4$

图 11 是 AVC 燃烧效率和压力损失系数随主气流当量比变化曲线图。图 12 是 AVC 的

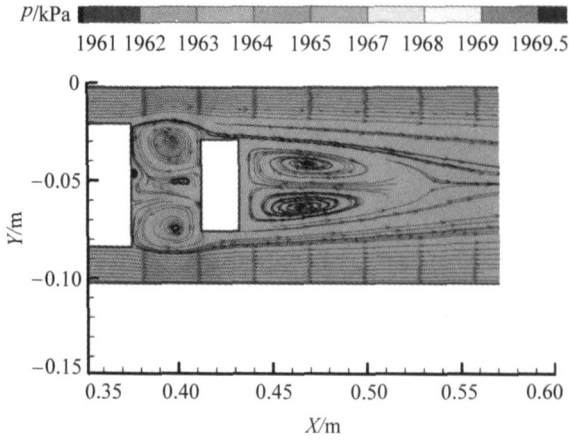


图 10 $\phi = 0.4$ 流线和静压分布图
Fig. 10 Streamline and static pressure of $\phi = 0.4$

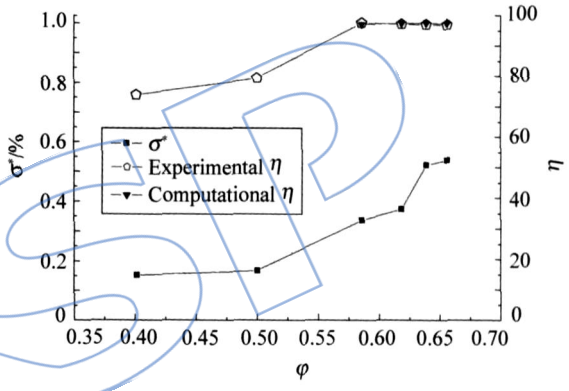


图 11 σ 和 η 随主气流 ϕ 变化情况
Fig. 11 σ and η versus ϕ of main flow

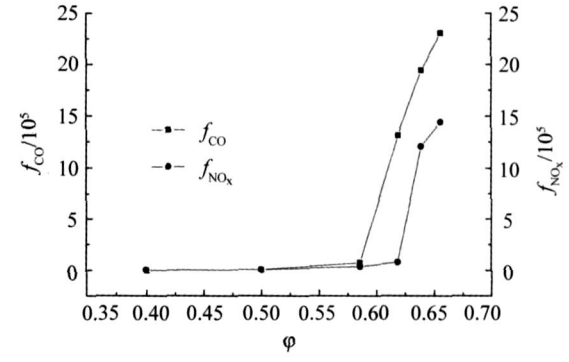


图 12 NO_x 和 CO 排放随主气流 ϕ 变化情况
Fig. 12 NO_x and CO versus ϕ of main flow

NO_x 和 CO 排放质量分数随主气流当量比变化的曲线图。由图可以看出,随主气流当量比逐渐增大,凹腔内旋涡

结构基本没有变化,AVC 内温度分布趋于更均匀。燃烧效率随主气流当量比增大,开始增大,增大一定数值后,略有降低。如图 11 所示燃烧效率计算结果与 Kendrick D W 和 Chenevert B C 实验结果相对比,相应的变化曲线吻合的较好。随

主气流当量比增大压力损失系数增大, NO_x 和 CO 排放均升高.

2.3 喷射角度的影响

图 13~图 15, 为喷射管排布置在距离后钝体外壁距离为 8.335 mm, 主气流当量比为 0.58582, 喷射管排喷射角度 α 分别为 5° , 15° 和 45° 时, 平行 AVC 主轴截面上二维压力分布和流线图. 由图可以看出, 喷射管排喷射角 α 为 5° 时, 凹腔内生成一对不对称的旋涡. 喷射角 α 为 15° 时, 凹腔内生成一对不对称的旋涡之外, 在靠近前钝体向后阶面的外侧, 出现一对小旋涡, 两对旋涡共存在凹腔内. 随着喷射角度的增大, 靠近前钝体向后阶面两对小旋涡逐渐增大, 而原靠近后钝体的旋涡逐渐退化、到 α 为 45° 时消失了.

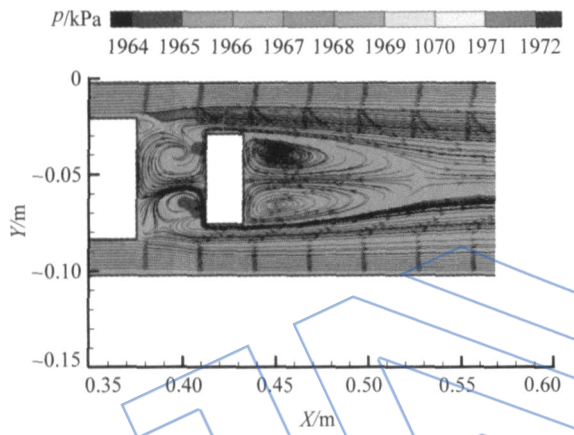


图 13 $\alpha=5^\circ$ 时流线和静压分布图

Fig. 13 Streamline and static pressure of $\alpha=5^\circ$

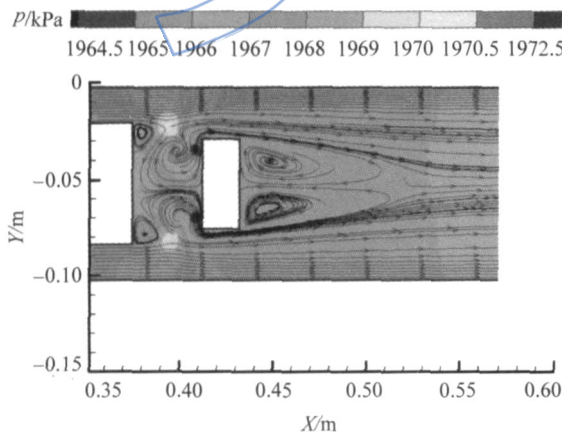


图 14 $\alpha=15^\circ$ 时流线和静压分布图

Fig. 14 Streamline and static pressure of $\alpha=15^\circ$

图 16 是 AVC 燃烧效率和压力损失系数随喷射角度变化曲线图. 图 17 是 AVC 的 NO_x 和 CO 排放质量分数随喷射角度变化的曲线图. 由

图 16 和图 17 可以看出, 随着喷射角度的增大, 燃烧效率增大, 压力损失系数增大, NO_x 和 CO 排放下降. 对比喷射位置对 AVC 燃烧、流动和污染物的生成的影响, 喷射角度对燃烧特性影响小于喷射管排位置对燃烧特性的影响.

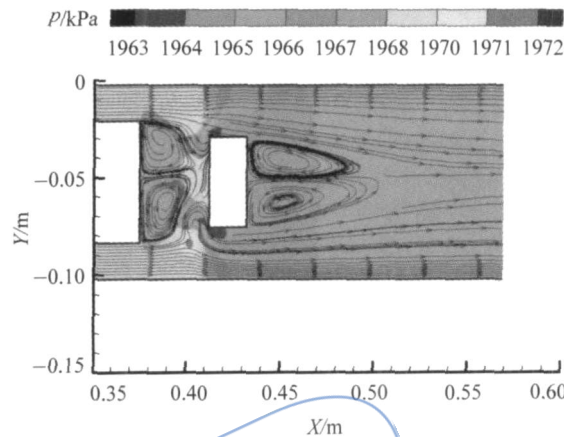


图 15 $\alpha=45^\circ$ 时流线和静压分布图

Fig. 15 Streamline and static pressure of $\alpha=45^\circ$

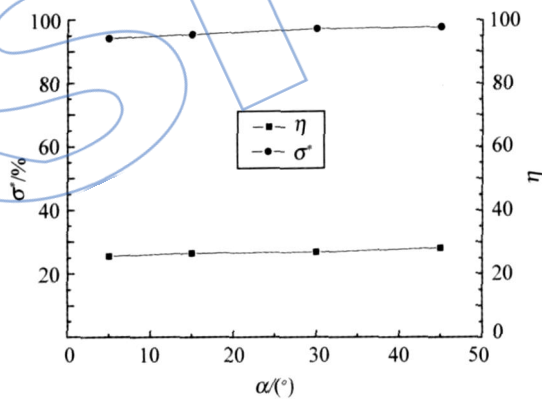


图 16 σ 和 η 随 α 变化情况

Fig. 16 σ and η versus α

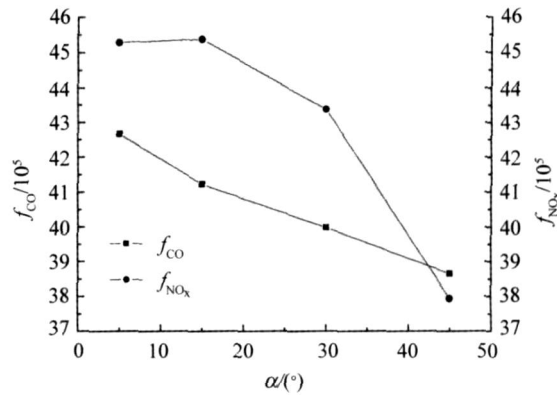


图 17 NO_x 和 CO 排放随 α 变化情况

Fig. 17 NO_x and CO versus α

3 结 论

本文应用三维数值模拟方法,对 AVC 流动、燃烧和污染物生成特性受前、后钝体形成的凹腔结构内的气流喷射位置、喷射角度和主气流当量比的影响进行了数值模拟研究,结果表明:利用 TVC 形成燃烧流体稳定驻涡条件几何结构关系式确定钝体布置的 AVC,在保证前、后钝体间凹腔局部当量比为 0.75 时,AVC 的燃烧稳定性好、燃烧效率高、 NO_x 和 CO 污染物排放水平低。AVC 的总压损失系数、燃烧效率、旋涡结构和燃烧稳定性以及污染物排放,受前后钝体形成的凹腔结构内的气流喷射位置、喷射角度和主气流当量比的影响,其中受凹腔结构内的气流喷射位置影响最大。

参考文献:

- [1] Edmonds R G, Steele R C, Williams J T, et al. Ultra-low NO_x advanced vortex combustor[C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006 - Power for Land, Sea, and Air. Barcelona, Spain: ASME, 2006:255-262.
- [2] Chenevert B, Kendrick D, Trueblood B, et al. The development of the ramgen engine combustion system[C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2002; Aircraft Engine, Coal, Biomass and Alternative Fuels, Combustion and Fuels, Education, Electric Power, Vehicular and Small Turbomachines. Amsterdam, Netherlands: AIAA, 2002,1:491-500.
- [3] Bucher J, Edmonds R G, Steele R C, et al. The development of a lean premixed trapped vortex combustor[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2003. Volume 2: Combustion and Fuels, Industrial and Cogeneration. Atlanta, GA, United States: ASME, 2003:207-213.
- [4] Kendrick D W, Chenevert B C, Trueblood B, et al. Combustion system development for the ramgen engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003,125(4):885-894.
- [5] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- WANG Fujun. Analysis of computational fluid dynamics -- application and theory of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [6] Roquemore W M, Shouse D, Burrus D, et al. Vortex combustor concept for gas turbine engines[C]// 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV: AIAA, 2001.
- [7] 何小民,王家华. 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)