

文章编号:1000-8055(2013)02-0324-07

数值研究低热值燃料环管燃烧室燃烧流场

何 敏^{1,2}, 蔡文祥³, 赵坚行¹, 吉洪湖¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703;

3. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要: 在任意曲线坐标系下对采用两种不同组分(天然气掺混氮气、一氧化碳)的低热值燃料环管燃烧室燃烧流场进行计算,结果表明低热值燃料的化学反应速率与其组分直接有关,燃料一氧化碳的燃烧效率高于天然气与氮气掺混物燃料,燃料组分变化对燃烧室燃烧效率与出口温度影响很大,因此选用合适的燃料十分重要.计算所得的燃烧室的燃烧效率和出口温度分布与试验数据符合较好,表明所用的数学模型与计算方法合理,计算程序可靠,可为低热值气体燃料燃烧室研制和优化设计提供有用的数据.

关 键 词: 低热值燃料; 环管燃烧室; 燃烧流场; 数值模拟; 燃烧效率

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Numerical investigation of combustion flow fields in low heating value fuel cannular combustor

HE Min^{1,2}, CAI Wen-xiang³, ZHAO Jian-xing¹, JI Hong-hu¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. China Gas Turbine Establishment, Aviation Industry Corporation of China,
Jiangyou Sichuan 621703, China;3. College of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Combustion flow fields of a cannular combustor were calculated using arbitrary curvilinear coordinates for two low heating gas fuels with different chemical species. One fuel was natural gas mixed into nitrogen, and the other fuel was carbon monoxide. Predictions indicate that the chemical reaction rates of low heating gas fuels are directly related to chemical species. The combustion efficiency of the gas fuel carbon monoxide is higher than that of nature gas mixed into nitrogen. The effects of different chemical species of low heating gas fuels on combustion efficiency and outlet temperature are considerable. Therefore, it is very important to choose appropriate low heating gas fuels. The calculated combustion efficiency and outlet temperature distributions are in reasonable agreement with the measurements. These comparisons show that the mathematical models and numerical method are reasonable, and the numerical procedure is reliable and may be applied to the optimization

收稿日期: 2012-01-16

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130131.0829.201302.324_012.html

基金项目: 南京理工大学自主科研专项计划(2011YBXM48, 2011YBXM44)

作者简介: 何敏(1976—),男,陕西山阳人,博士生,主要从事航空发动机燃烧试验与数值模拟研究.

通讯作者: 赵坚行(1939—),女,浙江余姚人,教授,主要从事航空发动机燃烧的研究.

design of the low heating value fuel cannular combustor.

Key words: low heating value fuel; cannular combustor; combustion flow field; numerical simulation; combustion efficiency

目前,我国在冶金、化工、煤炭等工业的生产过程中会产生一些低热值或超低热值的气体燃料,这些气体燃料除了少部分被作为燃料使用外,大部分被直接排入大气中,这不仅对当地的环境造成极大的污染,也对能源造成巨大浪费^[1-3].因此,合理回收利用这些气体燃料是提高我国能源利用效率的重要技术途径之一.但随着燃料热值的降低,点燃及燃烧控制较为困难,容易出现回火或吹熄等现象.因此,低热值燃料在组织稳定的燃烧、拓展可燃极限以及提高燃烧效率等方面均面临较大的难题,这些困难阻碍了低热值气体燃料的高效利用,直接影响能源利用效率的提高.此外,由于超低热值气体燃料种类繁多、热值过低,在通常情况下很难点火燃烧,从而限制了对其使用,绝大部分都被丢弃,造成惊人的能源浪费和环境污染.随着环保要求的不断提高和能源供应紧张的加剧,对这类超低热值燃料能源的利用越来越受到各国高度重视,国内外针对超低热值燃料能源利用的研究也逐渐成为热点^[4].为了扩大可利用能源资源范围,GE公司的MS9001FB型燃气轮机发电机组采用高炉煤气,GE新底隆公司推出的MS9001型燃气轮机采用高炉煤气与天然气混烧,PGT10B型燃气轮机采用合成气^[5-9].

燃烧室数值模拟能够使工程设计人员预估和分析燃烧室气动与燃烧性能,为燃烧室的设计与研制提供了依据,提高燃烧室设计水平与质量,减少试验验证过程,加快了研制速度.因此,为了满足低热值气体燃料燃烧室研制的需要,大力开展低热值气体燃料燃烧室的计算机模拟技术,开发以数值模拟技术为基础且经过试验验证的低热值燃料燃烧室设计软件很有必要.

本文在任意曲线坐标系下,采用偏微分方程与型线定点法相结合的方法生成环管燃烧室的三维贴体结构化网格,分别采用 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 紊流模型考虑紊流黏性,EDM (eddy dissipation model) 紊流燃烧模型来估算化学反应速率,6 通量辐射模型考虑燃烧室中的辐射传热过程以及辐射对燃烧室壁温的影响,任意曲壁上用壁面函数法处理壁面附近的流动.使用混合差分格式及求解压力耦合方程的半隐式方法 (SIMPLE) 对控制方程进行离散并求解,从而对

低热值燃料燃烧流场进行数值求解与分析.

1 研究对象及网格生成

本文研究对象为某典型环管燃烧室火焰筒.火焰筒头部装有一个旋流器,其内部中心处有一个燃气烧嘴,出口接有一个由圆形过渡到扇形的燃气导管.在火焰筒壁面上分别开有大小不一的主燃孔、掺混孔及冷却孔等.考虑到燃烧室形状复杂,故采用椭圆型偏微分方程网格生成法 (TTM) 与型线定点法相结合的方式^[10],通过求解方程 (1) 生成三维贴体网格.

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 g^{ij} r_{\xi^i} r_{\xi^j} + \sum_{k=1}^3 g^{kk} P_k r_{\xi^k} = 0 \quad (1)$$

式中 $\xi^i (i=1,2,3)$ 为任意曲线坐标系的坐标, $g^{ij} (i,j=1,2,3)$ 为逆变张量, r 为位置矢量, $P_k (k=1,2,3)$ 称为控制函数,用来控制网格的分布.所得的燃烧室网格如图 1 所示.在火焰筒内外环壁上分别开有多排主燃孔、补燃孔、掺混孔及隙缝气膜孔,分别向火焰筒提供燃烧、掺混及冷却壁面所需的空气.考虑到环管燃烧室结构特征,本文仅对含一个火焰筒的区域进行数值模拟.对于图 1 所示的在任意曲线坐标系下的结构化网格,其 x, r, θ 方向的网格编号分别用 I, J, K 来表示,其网格数目为 $333 \times 69 \times 67$.其中, $I=21$ 横截面为燃气烧嘴出口, $I=333$ 横截面为火焰筒出口, $K=35$ 纵截面通过旋流器中心,火焰筒轴心线位于 $J=35$ 和 $K=35$ 处.

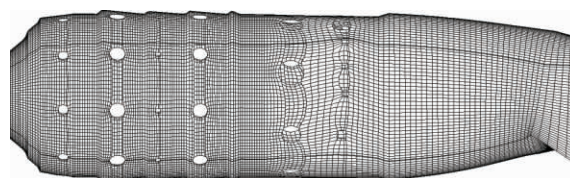


图1 带燃气导管火焰筒

Fig. 1 Flame tube with gas duct

2 数学模型与方法

2.1 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型

Yakhot 和 Orszag^[11]根据紊流流动现象与相变理论之间的相似性,将量子理论中 RNG 理论

应用于紊流问题中. 利用该法将非稳态 N-S 方程对平衡过程进行 Gauss 统计展开, 通过频谱分析消去其中高频小尺度涡团, 并将其影响归并到涡旋黏性中, 从而改善了对涡团耗散的模拟. 根据 RNG 理论导出了 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型, 具有一定的通用性. 该模型在形式上与标准 $k-\epsilon$ 方程相同, 仅在以下 5 个模型系数取值上有所区别.

$$C_\mu = 0.085 \quad C_1 = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$$

$$C_2 = 1.68 \quad \sigma_k = 0.7179 \quad \sigma_\epsilon = 0.7179$$

其中 $\eta = Sk/\epsilon$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.015$. 时均应变率 $S = (G_k/\mu_t)^{1/2}$, G_k 为紊流动能 k 方程产生项^[12],

涡旋黏性系数 $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$.

2.2 紊流燃烧模型

1976 年 Magnussen^[13] 提出 EDM, 其基本特点是意义比较明确, 反应速率取决于紊流脉动衰减速率, 并能自动选择成分来控制反应速率, 既能用于预混火焰, 也能用于扩散火焰, 在工程问题上应用极为广泛. 但 EDM 并没有考虑温度对化学反应速率的影响. 为了弥补此不足, 可将 EDM 与 Arrhenius 模型相结合^[14], 化学反应速率可以写成

$$R_{fu} = \min(R_{fu, \text{edm}}, R_{fu, \text{Arrhenius}})$$

其中 $R_{fu, \text{edm}} = \rho(\epsilon/k) \min[Am_{fu}, Am_{ox}/S, Bm_{pr}(1+S)]$, $R_{fu, \text{Arrhenius}} = -A_0 \rho^2 m_{fu} m_{ox} \exp(-E/RT)$, $A=4$, $B=0.5$, S 为化学恰当比, E 为活化能, R 为通用气体常数, T 为当地温度.

2.3 6 通量辐射模型

本文采用 6 通量辐射模型考虑低热值气体燃料火焰筒内的辐射传热^[15]. 在该方法中, 3 个方向的辐射通量 (R_x , R_r 和 R_θ) 可通过求解下列方程得到:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} \left(\Gamma^x \frac{dR_x}{dx} \right) = \\ k_a(R_x - E) + \frac{k_s}{3}(2R_x - R_r - R_\theta) \\ \frac{d}{dr} \left(r\Gamma^r \frac{dR_r}{dr} \right) = \\ k_a(R_r - E) + \frac{k_s}{3}(2R_r - R_x - R_\theta) \\ \frac{d}{d\theta} \left(\frac{\Gamma^\theta}{r} \frac{dR_\theta}{d\theta} \right) = \\ k_a(R_\theta - E) + \frac{k_s}{3}(2R_\theta - R_r - R_x) \end{array} \right.$$

式中 $\Gamma^x = \Gamma^\theta = \frac{1}{k_a + k_s}$, $\Gamma^r = \frac{1}{k_a + k_s + 1/r}$; k_a 为灰体辐射吸收系数; k_s 为灰体辐射散射系数.

3 计算结果与分析

本文利用自编的计算程序对某环管燃烧室燃烧流场进行数值计算. 在进口工况相同情况下, 研究不同组分低热值气体燃料对紊流燃烧流场的影响. 其中, 工况 I 所用燃料为甲烷掺混氮气 ($\text{CH}_4 + \text{N}_2$, 质量流量为 0.121 kg/s), 甲烷与氮气的质量掺混比例为 1:3, 工况 II 所用燃料为一氧化碳 (质量流量为 0.121 kg/s).

3.1 工况 I

图 2~图 7 为工况 I 所得的部分计算结果. 其中, 图 2 为通过火焰筒中心纵截面 ($K=35$) 的轴向速度等值线图, 图 3 为通过掺混孔中心 ($K=19$) 与火焰筒中心 ($K=35$) 截面的轴向速度 ($u=0$ m/s) 等值线比较图. 由图可知, 空气经旋流器进入火焰筒头部, 产生一股三维高速旋转气流, 在空气黏性作用下, 把火焰筒头部中心附近气体带走, 使该区成为低压区. 在逆向压差作用下, 下游有一部分气流逆流补充, 在火焰筒头部形成较大的中心回流区, 维持火焰稳定. 又因掺混孔截面离火焰筒中心截面有一定距离, 故该截面所示的回流区宽度比主燃孔中心截面要窄些, 回流区长度也稍短些.

Level 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
u/(m/s) -100 -80 -60 -40 -20 0 20 40 60 80 100



图 2 $K=35$ 截面轴向速度等值线 (工况 I)

Fig. 2 Axial velocity contours at section $K=35$ (case 1)

图 4 和图 5 分别为通过掺混孔中心 ($K=19$) 截面的温度及燃料质量分数等值云图. 由图可知, 气体燃料从喷嘴出口以较大射流速度喷出, 形成锥形燃料射流, 此燃料流与空气流相互作用, 形成油气比较高的可燃混气. 在主燃区内, 大部分燃料在此消耗掉, 因此该区气流温度较高, 形成高温区. 但因本工况采用燃料为 CH_4 掺混 N_2 , 惰性气体 N_2 掺入, 使燃料化学反应速度降低, 主燃区内

气体燃料来不及烧完,因此其高温燃烧区较长.随着轴向距离增加,掺混孔进气与主气流掺混,使高温区逐渐缩小,燃气温度也相应降低.

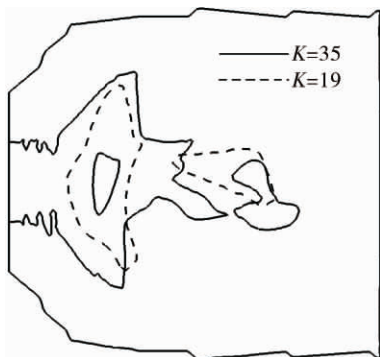


图3 $K=19$ 及 $K=35$ 截面轴向速度($u=0$ m/s)等值线(工况 I)

Fig. 3 Axial velocity ($u=0$ m/s) contours at sections $K=19$ and $K=35$ (case I)

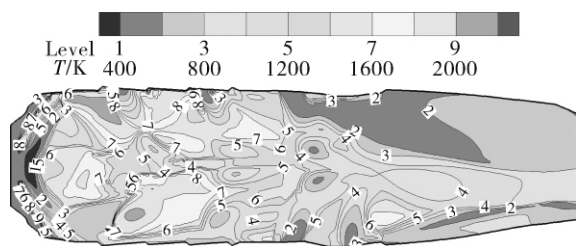


图4 $K=19$ 截面温度等值云图(工况 I)

Fig. 4 Temperature contours at section $K=19$ (case I)

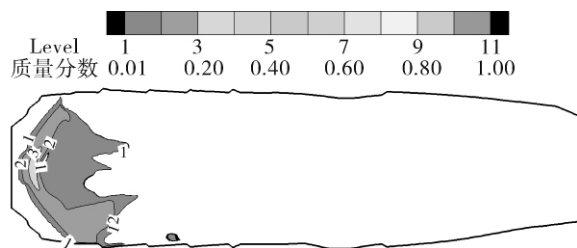


图5 $K=19$ 截面燃料质量分数等值云图(工况 I)

Fig. 5 Fuel mass fraction contours at section $K=19$ (case I)

另外,在火焰筒头部气流停留时间较短,部分燃料来不及与主气流混合,故在旋流器出口附近有个燃料质量分数较高区域.又因回流的作用,少量未燃燃料残留在回流区内,使其燃料质量分数较高.但随着轴向距离增加,燃烧时间加长,燃烧愈加完全,燃料质量分数逐渐下降.

图6和图7分别为通过主燃孔中心($I=43$)横截面上的温度和燃料质量分数等值云图.由于离喷嘴出口较近,气流停留时间较短,在燃料锥面附近,较多的燃料尚未燃烧,故燃料质量分数高,而在燃料锥面两侧,燃料质量分数较低,但其周向分布较均匀.在截面中心区域靠近火焰筒头部高温区,气流温度较高,在燃料锥面附近区域因受未燃燃料影响,气流温度相对要低些.

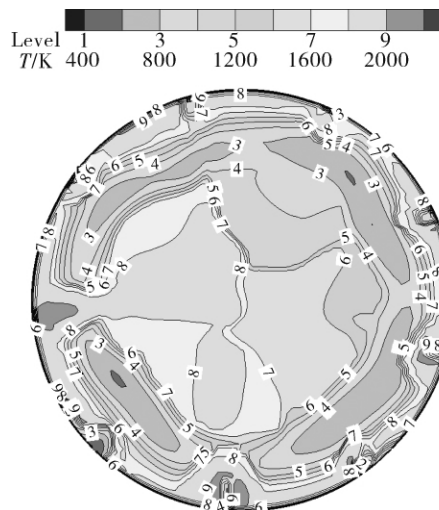


图6 $I=43$ 截面温度等值云图(工况 I)

Fig. 6 Temperature contours at section $I=43$ (case I)

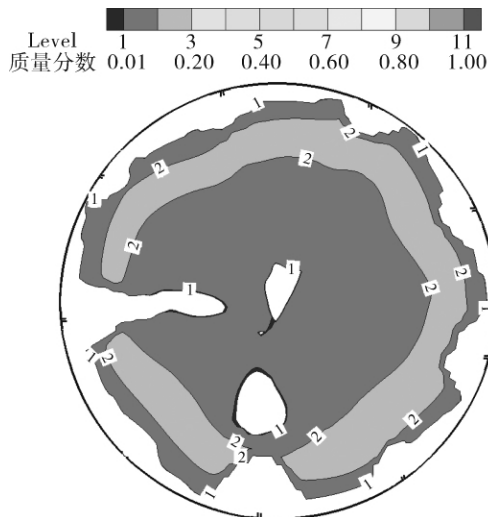


图7 $I=43$ 截面燃料质量分数等值云图(工况 I)

Fig. 7 Fuel mass fraction contours at section $I=43$ (case I)

表1给出计算所得的燃烧室出口气流平均温度 T_{av} 、出口温度分布系数(OTDF)与径向温度分布系数(RTDF)等参数与试验数据的比较.由表可知,计算结果与试验数据的误差较小.此外,由表可知,工况 I 的燃烧效率较低,这是因为低热值

燃料的燃烧速率主要与燃料的组分有关,而本工况燃料为掺混 N_2 的 CH_4 , N_2 加入引起燃烧效率大幅度下降. 为了提高燃烧效率可适当增加火焰筒主燃区长度, 增加掺混气体在主燃区停留时间, 使燃料得到充分燃烧.

表1 试验数据与数值模拟结果比较(工况 I)

Table 1 Comparison of simulation results and experimental data (case I)

	T_{av}/K	燃烧效率	OTDF	RTDF
试验	690	0.45	0.44	0.154
计算	719	0.46	0.447	0.15
误差	0.042	0.01	0.007	0.004

3.2 工况 II

图8~图13为工况 II 所得的部分计算结果, 其中, 图8为通过掺混孔中心($K=19$)及火焰筒中心($K=35$)截面的轴向速度($u=0\text{ m/s}$)等值线比较. 与图3相比, 两种工况下所得的速度场基本类同, 但由于燃料不同, 燃烧情况有所差别, 故工况 II 的回流区小于工况 I.

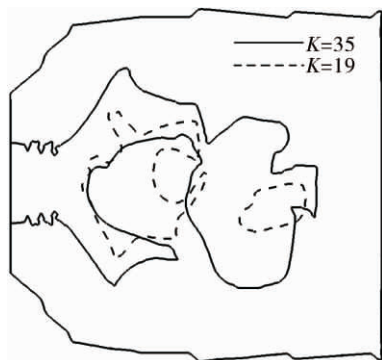


图8 $K=19$ 及 $K=35$ 截面轴向速度 ($u=0\text{ m/s}$) 等值线(工况 II)

Fig. 8 Axial velocity ($u=0\text{ m/s}$) contours at sections $K=19$ and $K=35$ (case II)

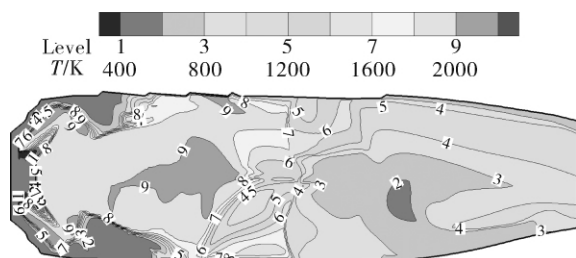


图9 $K=35$ 截面温度等值云图(工况 II)

Fig. 9 Temperature contours at section $K=35$ (case II)

图9和图10分别为通过火焰筒中心($K=35$)截面的温度和燃料质量分数等值云图. 由于两种工况所用的气体燃料的化学反应速率不同, 工况 II 的燃烧状况好于工况 I, 所得头部高温区比工况 I 大, 且温度分布也更加均匀.

图11为通过第1排掺混孔中心($I=228$)横截面的速度矢量分布, 图12为该截面温度等值云图. 由于掺混孔孔径及其气流量较大, 故掺混孔射流穿透深度与强度也比较大, 大量冷空气从掺混孔进入火焰筒内与主气流混合, 使燃气温度降低, 但温度周向分布较均匀. 图13为燃气导管出口($I=333$)横截面上的温度等值线云图. 由图可知, 该工况下出口温度分布较为均匀, 但出口温度最高区域并非在中心, 而是略偏左侧, 这主要是受火焰筒掺混孔等结构周向分布不均匀及其所导致的气流不均匀的影响.

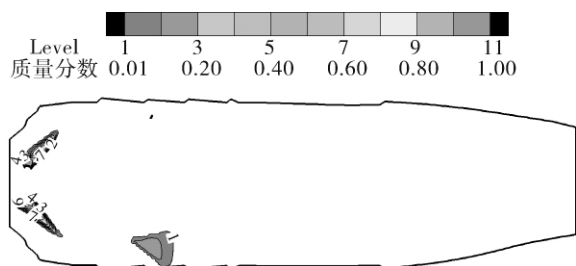


图10 $K=35$ 截面燃料质量分数等值云图(工况 II)

Fig. 10 Fuel mass fraction contours at section $K=35$ (case II)

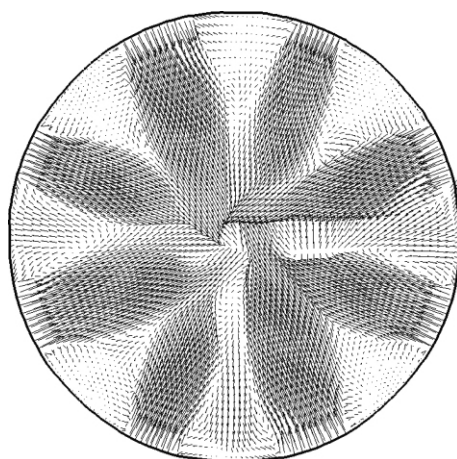


图11 $I=228$ 截面速度矢量分布图(工况 II)

Fig. 11 Profiles of velocity vectors at section $I=228$ (case II)

表2给出工况 II 时计算所得的燃烧室出口气流平均温度、OTDF 与 RTDF 等部分燃烧性能与

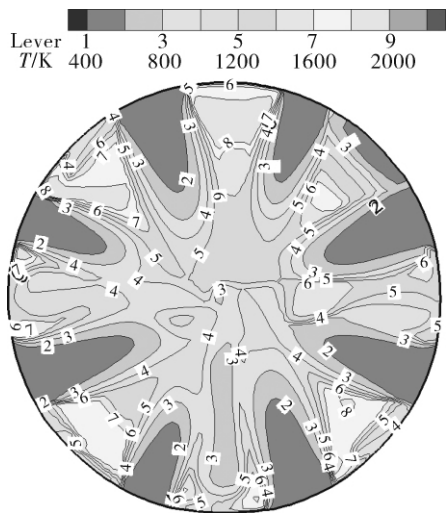


图 12 $I=228$ 截面温度等值云图(工况 II)
Fig. 12 Temperature contours at section $I=228$
(case II)

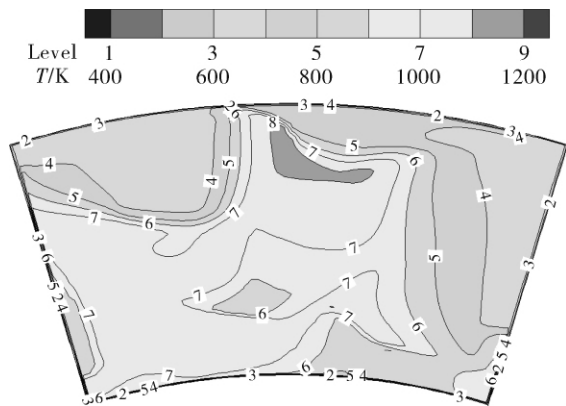


图 13 出口截面($I=333$)温度等值线图(工况 II)
Fig. 13 Temperature contours at outlet
of section $I=333$ (case II)

试验数据比较. 由表可知, 计算结果与试验数据较为接近, 计算误差较小, 计算结果可信. 与工况 I 相比, 由于工况 II 所用的燃料为 CO, 燃料中没有 N_2 掺入, 故其所得的燃烧效率比较高.

表 2 试验数据与数值模拟结果(工况 II)
Table 2 Comparison of simulation results and
experimental data (case II)

	T_{av}/K	燃烧效率	OTDF	RTDF
试验	935	0.95	0.57	0.119
计算	953	0.965	0.564	0.129
误差	0.019	0.015	0.006	0.01

4 结 论

本文数值分析两种不同组分的低热值气体燃料对环管燃烧室燃烧流场的影响. 研究表明燃烧室的燃烧速率与燃料的组分直接有关, 这是因不同组分燃料中含氧量不同, 其化学反应速率也各不相同, 因此在低热值燃料燃烧室设计与研制时需要选择合适的低热值燃料. 对于特定的低热值燃料, 必须对燃烧室进行改进设计使其与所用的燃料相适应.

本文计算所得结果与试验符合较好, 表明本文所采用的数学模型及方法适用于低热值气体燃料火焰筒整体流场的计算, 具有较强的通用性和实用价值.

参考文献:

- [1] Hung W S Y, Meier J G. Gaseous fuels capability of industrial gas turbines[R]. ASME Paper 85-IGT-129, 1985.
- [2] Meier J G, Hung W S Y, Sood V M. Development and application of industrial gas turbines for medium-Btu gaseous fuels[R]. ASME Paper 85-GT-28, 1985.
- [3] Larson E D, Marrison C I. Economic scales for first-generation biomass-gasifier/gas turbine combined cycles fueled from energy plantations[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1997, 119(2): 285-290.
- [4] 王艳杰. 超低热值燃料催化燃烧燃气轮机系统特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
WANG Yanjie. Characteristics study on super-low value fuel catalytic combustion gas turbine system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [5] 朱世澜. 国外中、低热值气体燃料开发及应用于燃气轮机的概况[J]. 燃气轮机技术, 1991, 4(2): 16-22.
ZHU Shilan. Overview of abroad low calorific value gas fuel developed and applied to the gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 1991, 4(2): 16-22. (in Chinese)
- [6] 刘文和, 杨若仪. 低热值煤气燃气轮机联合循环发电在钢铁厂的应用[J]. 冶金动力, 2004(1): 21-25.
LIU Wenhe, YANG Ruoyi. Application of the combined cycle power plant technology of gas turbine using low calorific value gas in iron and steel plants[J]. Metallurgical Power, 2004(1): 21-25. (in Chinese)
- [7] 王乃井, 李茉莉. 三菱重工业公司 M701F 型燃气轮机资料[R]. 深圳: 2004 年燃气轮机发电技术会议, 2004.
WANG Naijing, LI Moli. Information of Mitsubishi Heavy Industries M701F type gas turbine information[R]. Shenzhen: 2004 Conference of Gas Turbine Power Generation Technology, 2004. (in Chinese)
- [8] 徐强, 张樵, 崔耀欣. 西门子 V94. 3A 燃气轮机的技术特点[J]. 上海电力, 2006, 19(1): 3-8.
XU Qiang, ZHANG Ying, CUI Yaixin. Technical features

- of Siemens V94. 3A gas turbine[J]. Shanghai Electric Power, 2006, 19(1): 3-8. (in Chinese)
- [9] 林公舒. ALSTOM 公司 GT26 型燃气轮机资料[R]. 深圳: 燃气轮机发电技术会议, 2004.
- LIN Gongshu. Information of ALSTOM GT26 type gas turbine information[R]. Shenzhen: 2004 Conference of Gas Turbine Power Generation Technology, 2004. (in Chinese)
- [10] 赵坚行, 伍艳玲. 先进燃烧室涡流杯流场计算[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(1): 110-115.
- ZHAO Jianxing, WU Yanling. Numerical computation of turbulent flow-field characteristics inside an advanced combustor swirl cup[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(1): 110-115. (in Chinese)
- [11] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. J Scientific Computing, 1986, 1(3): 39-51.
- [12] 郭尚群, 赵坚行. RNG $k-\epsilon$ 模型数值模拟油雾燃烧流场[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 807-811.
- GUO Shangqun, ZHAO Jianxing. Numerical simulation of three-dimensional spray combustion flow field by RNG $k-\epsilon$ turbulent model[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 807-811. (in Chinese)
- [13] Magnussen B F. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion[R]. Pittsburgh: 16th Symposium (International) on Combustion, 1977.
- [14] 胡好生, 蔡文祥, 赵坚行, 等. 回流燃烧室燃烧过程的三维数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 444-449.
- HU Haosheng, CAI Wenxiang, ZHAO Jianxing, et al. Numerical simulation of three-dimensional combustion flows in annular reversed combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 444-449. (in Chinese)
- [15] 蔡文祥. 环形燃烧室两相燃烧流场与燃烧性能数值研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- CAI Wenxiang. Research on numerical simulation of two-phase reacting flow field and combustion performance of annular combustors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)