

文章编号: 1000-8055(2009)09-1937-08

燃气轮机双燃料燃烧室流场对比数值研究

穆 勇^{1,2}, 郑洪涛¹, 李智明¹, 杨家龙¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 马卡罗夫国立造船大学, 尼古拉耶夫市 54025, 乌克兰)

摘 要: 针对燃气轮机环管型双燃料燃烧室分别燃用庚烷和裂解气燃料的情况, 采用 CFD (computational fluid dynamics) 技术对其燃烧流场进行对比研究. 数值模拟采用了 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型、化学平衡条件下的快速化学反应系统和简单概率密度函数(PDF)燃烧模型、液体燃料的喷雾模型以及 SIMPLE 算法. 模拟对比分析了两种燃料燃烧下的温度分布、燃烧效率、流量分配、壁面冷却效果、空气过量系数等参数, 以及它们随工况变化的趋势. 所得结论如下: ①不同燃料燃烧时, 流场内的流量分配基本保持一致; ②裂解气燃料燃烧时, 其燃烧效率高出燃油状态约 1%, 但出口温度均匀性较差; ③在加入相同化学焓值的燃料进入燃烧室时, 裂解气燃料的头部空气过量系数 α 较大, 所得到的出口平均温度低于燃油状态约 20~40 K.

关 键 词: 燃气轮机; 双燃料燃烧室; 数值模拟; 裂解气

中图分类号: TK470.30

文献标识码: A

Comparative numerical simulation of combustion flows in a dual-fuel-combustor

MU Yong^{1,2}, ZHENG Hong-tao¹, LI Zhi-ming¹, YANG Jia-long¹

(1. College of Power and Energy Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev 54025, Ukraine)

Abstract: Combustion flows with different fuels as heptane and pyrolysis gas in a dual-fuel-combustor of gas turbine were simulated by a CFD (computational fluid dynamics) method. The RNG (renormalization group) $k-\varepsilon$ turbulence model, single chemistry reaction system, infinite-rate reaction velocity, discrete phase modeling for liquid fuel, upwind discretization scheme and the SIMPLE algorithm were applied. Some performances of combustor such as: combustion efficiency, temperature uniformity at outlet, temperature distribution of walls, distribution of air mass flow and the first air excess coefficient, were also analyzed. Some results show that: 1) the distribution of mass flow rate is consistent with different fuels, 2) there is a 1% higher combustion efficiency and lower temperature uniformity at outlet with pyrolysis gas than that of oil fuel, 3) the average temperature at outlet with pyrolysis gas is 20~40 K lower than that of oil fuel with the same chemical enthalpy injected in the combustor, and 4) the first air excess coefficient α of pyrolysis gas is higher than that of oil fuel.

Key words: gas turbine; double-fuel-combustor; numerical simulation; pyrolysis gas

随着全球石油资源的日渐匮乏, 新能源技术 的开发显得更为必要, 具有高热效率的各种先进

收稿日期: 2008-09-13; **修订日期:** 2009-03-28

作者简介: 穆勇(1979 -), 男, 重庆江津人, 讲师, 哈尔滨工程大学博士生, 主要研究方向: 动力机械内部过程及排放、数值模拟方法.

循环燃气轮机的应用日益兴起,提高余热利用率的化学回热先进循环燃气轮机动力系统成为新的研究课题.在该循环中,燃气轮机排气余热被蒸汽发生器和燃料裂解器所吸收,在催化剂的作用下,液态大分子燃料与水蒸气进行裂解反应而生成气态燃料(H_2 , CO)和 CO_2 等混合物,即裂解气燃料.同时将其注入燃烧室燃烧,形成循环.许多研究者已报道该循环的热效率可以达到 47% 以上^[1-2].为适应化学回热循环的要求,研制能够燃用液态和气态燃料的双燃料燃烧室成为必然.

论文针对初步设计的双燃料燃烧室,采用 CFD 技术,对其进行燃烧流场分析.主要考察燃烧室在不同工况下,燃用不同燃料时的温度分布、流量分配、空气过量系数、燃烧效率及壁面温度等重要参数,为双燃料燃烧室结构的优化设计提供理论支持.

1 几何模型及网格划分

双燃料燃烧室为环管型燃烧室,其结构如图 1 所示,为了实现双燃料燃烧的要求,根据文献[3-4]中气体燃料喷嘴设计原则,提出了如图 2 中的一体式喷嘴结构,其中 $\phi 2$ mm 的小孔处设计为液体燃料出口.火焰筒壁采用 6 排气膜冷却小孔进行冷却.由于燃烧室结构复杂,小孔数量众多,为了划分出计算机能接受的网格数量和提高计算精度,对气膜冷却孔部分进行无壁厚处理,同时加密封冷却孔的网格(如图 3).根据其几何周期,取其

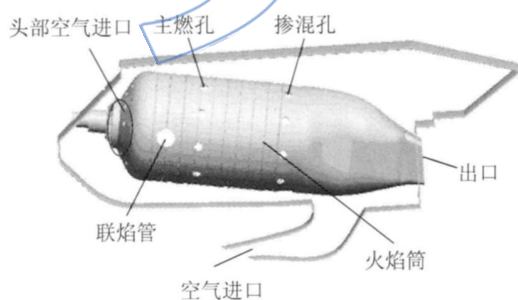


图 1 燃烧室几何模型

Fig. 1 Combustor geometry model

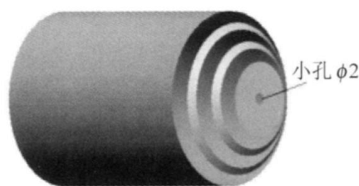


图 2 一体式喷嘴示意图

Fig. 2 Integrating fuel injector model

中包含一个火焰筒的空间作为计算域.从压气机出口延长段中部到燃烧室出口,总网格数量控制在 3×10^6 左右.

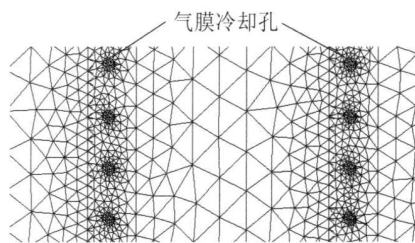


图 3 火焰筒壁面气膜冷却孔网格示意图

Fig. 3 Holes of cooling air film and grids on walls

2 数值模型及燃烧预处理

2.1 控制方程

燃烧室内的燃烧过程是一个复杂的物理化学过程,它涉及湍流、液体燃料的雾化蒸发、燃料的裂解燃烧、辐射换热以及燃料颗粒与气相场的相互耦合等.在保证计算精度的前提下,需要对这一复杂过程做相应的简化.湍流采用 RNG $k-\epsilon$ 模型 (renormalization group $k-\epsilon$ model),并选用 RNG 旋流修正,修正系数取 0.07.液体燃料的雾化蒸发采用随机颗粒轨道模型,并忽略热泳力、Saffman 升力和重力等.其控制方程可用柱坐标下的非线性偏微分守恒方程^[5-6]表示

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\beta_u \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \beta_r \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\beta_w \Phi) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \\ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + S_\Phi \end{aligned} \quad (1)$$

式中 Φ 为任意独立变量; Γ_Φ 为湍流交换系数; S_Φ 为源项.方程(1)中 $\Phi, \Gamma_\Phi, S_\Phi, \beta$ 等参数的不同形式可以演绎出连续方程、动量方程、能量方程、 k 和 ϵ 方程等.

2.2 湍流燃烧模型

实际湍流燃烧化学反应是个十分复杂的过程,它包含几十个至几百个复杂的中间反应.论文对燃烧室的模拟所考虑的重点主要是燃烧的热效应(如效率温度和热流分布等).针对这一特点,论文采用可以绕过化学反应详细机理,而又满足工程需要的化学平衡条件、“快速化学反应”假设和“简单化学反应系统”模型^[7-8].根据对湍流脉动的设想,燃烧过程采用 Beta 函数形式下的简化概率密度函数(PDF)模型进行描述.

双燃料燃烧室中,燃烧方式主要有三种:单独燃用液态燃料或气态燃料,抑或两种状态的燃料混合燃烧.在不涉及两种燃料的切换混合燃烧方式时,论文只考察单独燃用液态和单独燃用气态燃料的流场结构.液态燃料采用 C_7H_{16} 代替,其热值修正为 $43\,000\text{ kJ/kg}$,气态燃料采用化学回热循环中的裂解气.裂解气组成体积分数为: $CO \sim 20\%$, $H_2 \sim 49.63\%$, $H_2O \sim 26.91\%$, $CO_2 \sim 3.46\%$,采用反应前后物质标准焓分析得到其热值为 $13\,565\text{ kJ/kg}$,属中低热值燃料.以空气(不计微量成分)为氧化剂,燃烧产物主要选取 CH_4 , CO_2 , CO , $C(S)$, H , H_2 , H_2O , O_2 , O , OH , N 和 N_2 等.由图 4 和图 5 可知,当燃油和裂解气的混合分数分别为 0.062 和 0.213 时,得到其反应最高温分别为 $2\,600\text{ K}$ 和 $2\,500\text{ K}$.

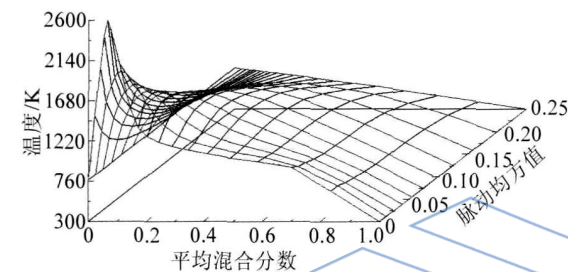


图 4 燃油预处理的温度关系

Fig. 4 Temperature vs. mean fraction of C_7H_{16}

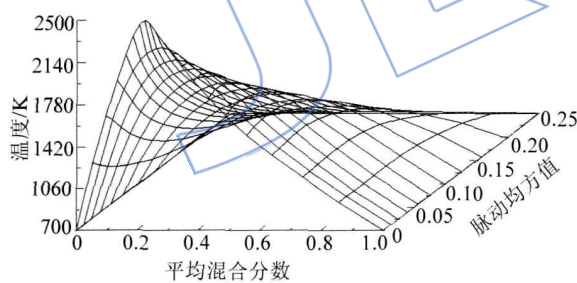


图 5 裂解气预处理的温度关系

Fig. 5 Temperature vs. mean fraction of pyrolysis gas

当燃烧室采用裂解气燃料时,相同工况的气态燃料流量必然大于燃油流量.在实验台上,为了考察含蒸汽的裂解气对燃烧室效率和温度的影响,采用燃料化学焓相同的条件,换算出裂解气的消耗量.因为裂解气温度高(773 K)、流量大、平均比热容约 10^3 kJ/kg ,所以该方法加入燃烧室的裂解气总能量约高于燃油总能量.

3 边界条件及计算方法

根据燃烧室工作条件(如表 1 所示),给出各

个计算边界条件,具体如下:

- 1) 空气进口采用流量进口,给定质量流量、温度、湍流度、水力直径及平均混合分数.
- 2) 燃料进口
 - (1) 对于燃油:燃油的质量流量、温度、喷射锥角、喷油压力等均由设定的压力-旋流雾化喷嘴模块给定,蒸发选项为 C_7H_{16} ;
 - (2) 对于裂解气:给定裂解气的质量流量、温度(定值 773 K)、湍流度、水力直径及平均混合分数.
- 3) 出口:给定出口压力、回流温度、湍流度和水力直径.
- 4) 壁面:绝热且无速度滑移壁面,在壁面处湍流参数为零、浓度和浓度脉动均方值的法向梯度也为零.对于壁面附近,由于运输系数的法向梯度很陡,采用壁面函数法^[9],避免在壁面附近采用过细的网格.
- 5) 周期性边界:在环形周期性边界上,任意独立变量 Φ 作如下处理: $\Phi = \Phi_{N-1}$ 和 $\Phi_N = \Phi_2$.

表 1 燃烧室工作条件

Table1 Conditions in combustor

燃烧室 负荷/ %	空气 流量/ (kg/ s)	空气 温度/ K	空气 压力/ MPa	燃油 流量/ (kg/ s)	裂解 气流量/ (kg/ s)
30	2. 6123	645. 4	1. 1320	0. 0425	0. 1348
50	3. 1701	693. 2	1. 4447	0. 0604	0. 1915
70	3. 6075	726. 8	1. 7029	0. 0768	0. 2436
80	3. 8060	742. 0	1. 8263	0. 0853	0. 2704
100	4. 1568	769. 9	2. 0534	0. 1016	0. 322

4 计算结果与分析

按上述数学物理模型和边界条件,采用上风差分格式离散控制方程,运用 SIMPL E 算法求解压力速度耦合,采用亚松驰因子加速收敛,得到燃烧室流场各参数分布情况,具体如下:

4.1 速度分布

图 6 和图 7 给出了 100% 工况下的燃烧室中心对称截面速度分布.从速度等值线分布情况可知,两种燃料燃烧时,流域内的速度流线分布趋势基本一致,由旋流器和主燃孔空气形成的主回流区(main back flow)大小也基本相同.但由于燃烧室从燃油改用裂解气为燃料,在保证进入燃烧室的燃料化学焓相同时,裂解气燃料的流量要比燃

油流量大,因此裂解气燃烧状态下,燃烧室出口速度高于燃油燃烧状态,且呈现线形变化的趋势,如图 8 所示.

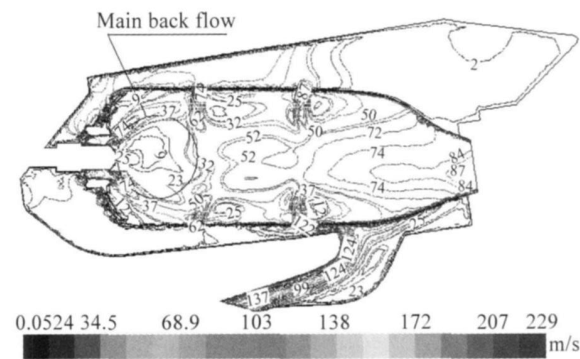


图 6 燃油燃烧中心面速度场
Fig. 6 Velocity with C_7H_{16} at symmetry plane

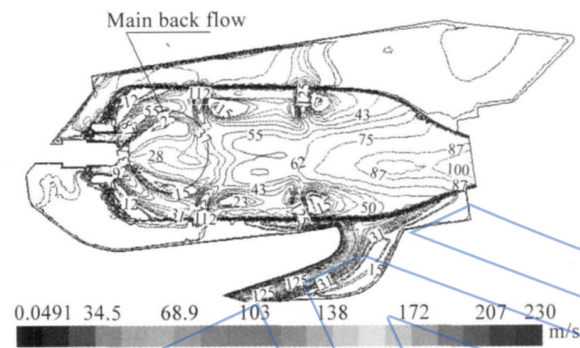


图 7 裂解气燃烧中心面速度场
Fig. 7 Velocity with pyrolysis gas at symmetry plane

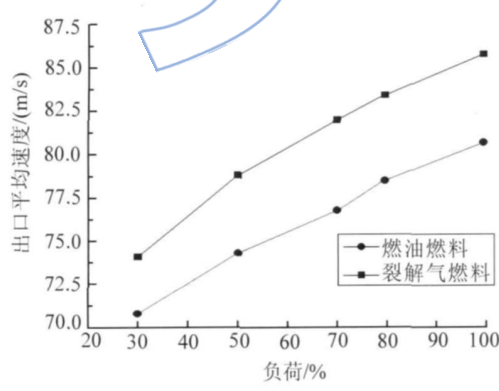


图 8 出口平均速度分布趋势的比较
Fig. 8 Average velocity vs. load at outlet

从出口方向观察燃烧室内流场,某两个掺混孔的空气流线如图 9 所示,流线特征为不均匀的旋转状态.其原因主要是:火焰筒头部旋流器的导向作用使得进入火焰筒的气体具有旋转力矩,并产生离心力.该离心力在火焰筒尾部几何形状改变(即燃气收集段,火焰筒截面由圆形过渡到扇形出口)时,受到壁面形状的制约,出现上下不对称分布,且壁面几何形状变化剧烈的区域,离心力矢量变化也更明显.因此,气流流线出现不对称分布.

形出口)时,受到壁面形状的制约,出现上下不对称分布,且壁面几何形状变化剧烈的区域,离心力矢量变化也更明显.因此,气流流线出现不对称分布.

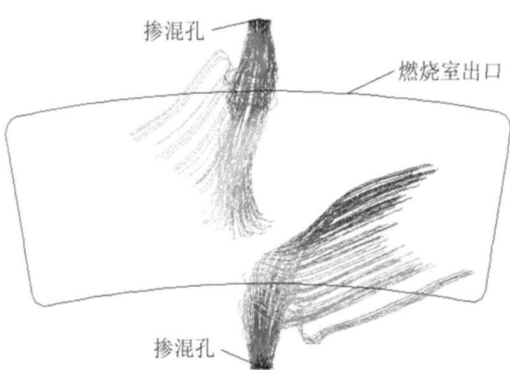


图 9 从某两个掺混孔进入火焰筒的空气流线图
Fig. 9 Pathlines from two diluent air holes

4.2 温度分布

4.2.1 燃烧区域和出口温度分布

图 10 和图 11 给出的是 100 %工况下的燃烧室中心对称截面和出口温度分布等值线图.高温区主要分布在主回流区的边缘及下方,回流区内温度集中在 1500 K 以上,有利于稳定火焰.主燃孔的补燃效果明显,主燃孔与掺混孔之间的区域成为主火焰区.从温度数值分布区域可知,燃油燃烧的最高温度接近 2530 K,而裂解气燃烧的最高温度接近 2510 K.二者火焰高温区在火焰筒中心区域的分布趋势一致.出口面的温度分布趋势也

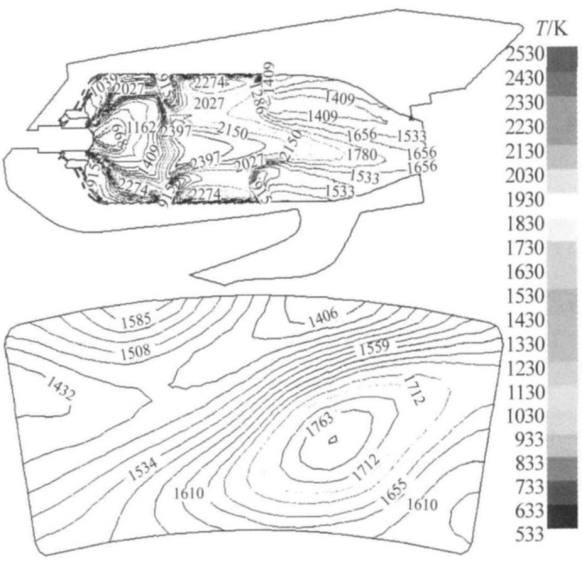


图 10 燃油燃烧中心面与出口面温度分布
Fig. 10 Temperature at symmetry plane and outlet with C_7H_{16}

一致,且出现偏心.此偏心现象与速度分布有直接联系.由于旋流器的作用,通过旋流器的气流都获得了一定的旋转速度,当掺混孔来流与其掺混时,速度矢量再次改变.该矢量在壁面非轴对称几何形状的限制作用下也产生非对称的变形.因此,出口温度呈现偏心状态.

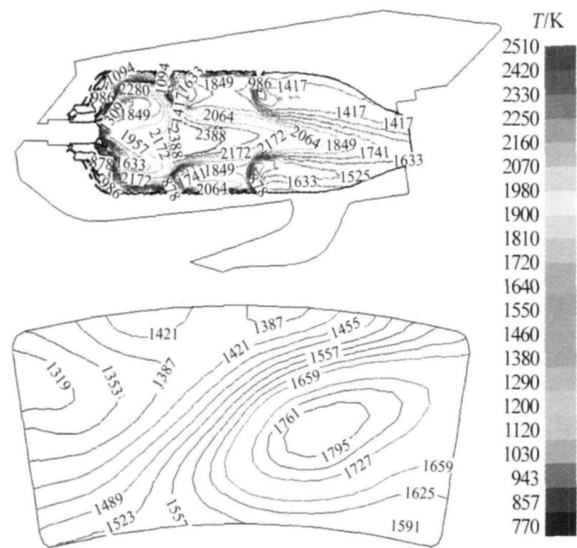


图 11 裂解气燃烧中心面与出口面温度分布
Fig. 11 Temperature at symmetry plane and outlet with pyrolysis gas

如图 12 所示,随着燃烧室工况增加,出口温度也呈上升趋势,且燃油燃烧时的出口平均温度要比裂解气燃烧时的平均温度高出 20~40 K. 该现象主要与两个因素有关:第一是燃烧效率,第二是裂解气燃料的组分,后者起着决定性的影响作用.裂解气燃料中含有 26.91 %体积分数的水蒸气,且具有很高的比热值,裂解气燃烧放热时,需要有更多的热量加热水蒸气使之达到平衡温度.因此在两种燃料所加入燃烧室的燃料化学焓都相

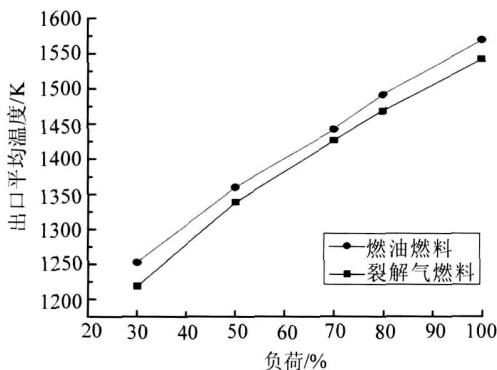


图 12 出口平均温度分布趋势的比较
Fig. 12 Average temperature vs. load at outlet

同的情况下,裂解气燃料燃烧的出口温度降低于燃油燃烧时的温度.

图 13 给出了两种燃料燃烧时的出口温度最大不均匀度分布趋势.出口温度最大不均匀度 θ 的定义如下:

$$\theta = \frac{\text{出口最高温度} - \text{出口平均温度}}{\text{出口平均温度} - \text{进口平均温度}}$$

如图 13 可知,当燃烧室采用裂解气燃料时,出口温度均匀性较差,不均匀度数值最大达到 0.37 (100 % 工况). 燃油燃烧时的最大不均匀度为 0.27,相对好于裂解气燃料.燃烧室出口温度的均匀性涉及多个方面因素,如一次空气的配比、燃料的喷射方式及位置、掺混空气的位置及配比等.而在影响燃料的喷射的参数中,燃料的旋流强度是影响流场的关键参数之一.文章在分析裂解气燃料时,没有考察燃料旋流强度的影响.

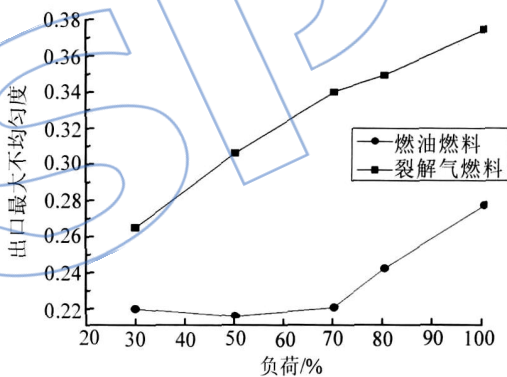


图 13 出口温度最大不均匀度分布趋势的比较
Fig. 13 Most asymmetrical limit of temperature vs. load at outlet

4. 2. 2 火焰筒壁面气体温度分布

燃烧室壁面温度分析是一个很复杂的问题,它涉及壁面边界层、壁面厚度及两侧气体热交换等.论文采用了壁面函数法,没有考虑边界层及壁面厚度等.因此,图 14 和图 15 给出的 100 % 工况时,火焰筒主燃区壁面温度分布等值线图反应的是火焰筒内壁燃气温度.由于壁面冷却小孔的作用,火焰集中区域的壁面附近燃气温度整体较低,局部高温在 1760 K.但在没有冷却孔的燃气收集段,壁面附近燃气温度分布是燃油状态高于裂解气状态,局部高温达到 1839 K,此温度是对火焰筒壁面的严峻考验.该温度是在绝热壁面条件下得到的,如果加入壁厚传热作用,壁面燃气温度将会降低.图 16 给出了火焰筒壁面燃气的平均温度.燃油燃料工作时,其壁面燃气平均温度都高于裂解气燃料约

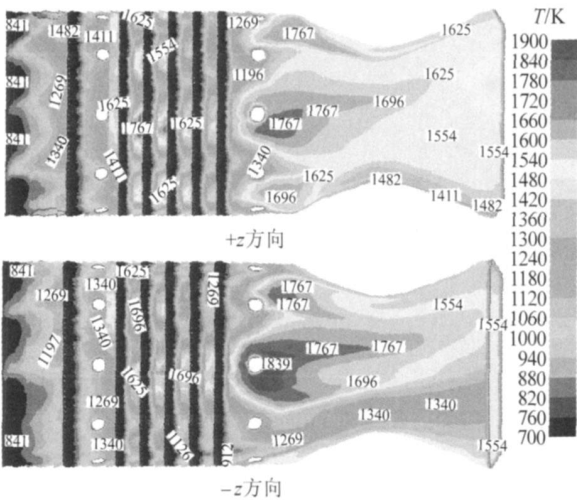


图 14 燃油壁面燃气温度
Fig. 14 Temperature of gas on walls with C_7H_{16}

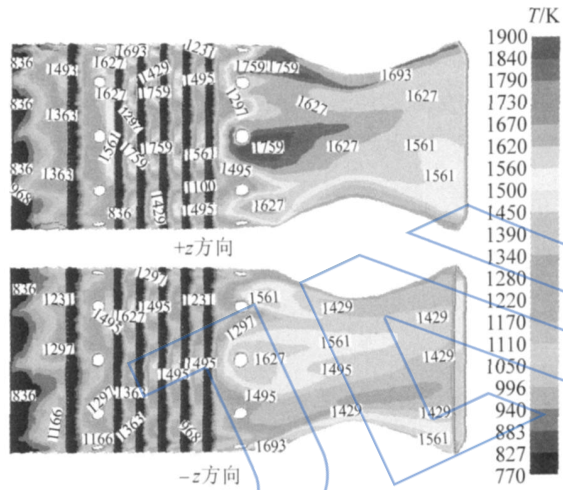


图 15 裂解气壁面燃气温度
Fig. 15 Temperature of gas on walls with pyrolysis gas

80~100 K. 因此可认为,在燃烧室中采用裂解气燃料,有利于降低火焰筒壁面热负荷,提高其使用寿命.

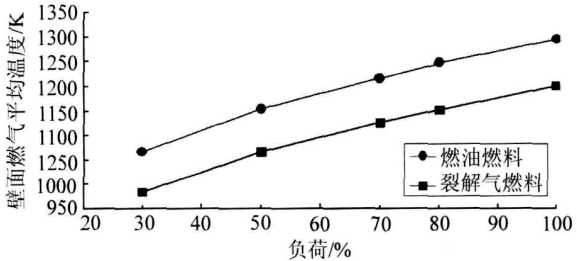


图 16 壁面燃气平均温度分布趋势的比较
Fig. 16 Average temperature of gas vs. load on walls

4. 2. 3 燃烧效率

图 17 给出了两种燃料燃烧时的燃烧效率变

化趋势对比情况. 燃烧效率定义为燃烧室进出口热焓差值与燃料焓值的比^[10],而热焓计算采用平均比热与温度的乘积,参考温度取 293 K. 从图中可知,裂解气燃料的燃烧效率高出燃油燃烧效率约 1%. 这说明裂解气燃料更有利于提高燃烧及整机的热效率. 随着燃烧室工况的增加,燃烧效率呈现缓慢上升趋势,裂解气燃料保持在 98% 以上,而燃油燃料在负荷达到 70% 以上时,其燃烧效率才保持 98% 以上.

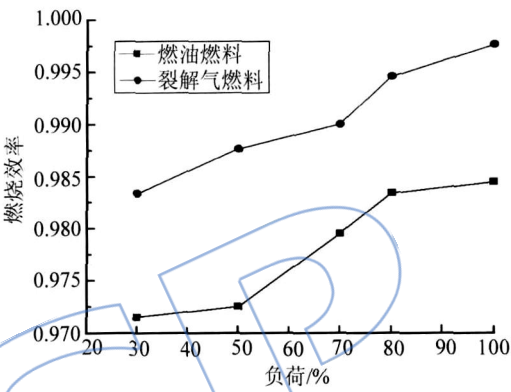


图 17 燃烧效率变化趋势的比较
Fig. 17 Combustion efficiency vs. load

4. 3 空气流量分配对比分析

图 18~图 21 给出了燃烧室在两种燃料工作时,相对空气流量(当地空气流量与燃烧室进口空气总流量之比)的内部分配关系和随工况变化的趋势. 其中头部空气流量(参与燃烧的一次空气)最大,占总流量的 51.3% 左右;主燃孔流量(起补燃作用的二次空气)约占 17.2% 左右;掺混孔空气流量(降低燃气温度的稀释空气)占总流量的 15.3% 左右;火焰筒壁面冷却空气占总流量的 16.2% 左右. 随着燃料的改变,其各部分的流量分配比例差别在 0.1%~0.4% 以内;而随着工况变化,其各部分的流量分配比例变化范围在 0.1% 左右,变化甚微.

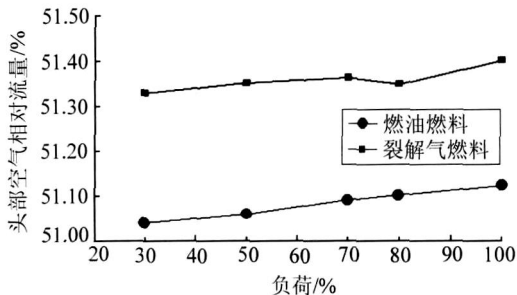


图 18 头部空气流量分配情况的比较
Fig. 18 First air mass flow rate vs. load

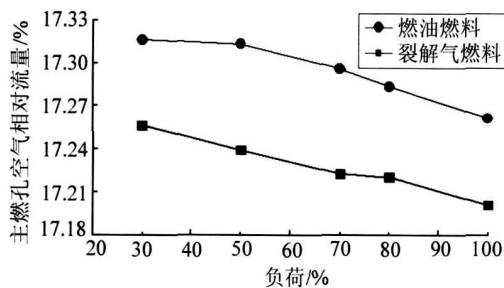


图 19 主燃孔流量分配情况的比较

Fig. 19 Second air mass flow rate vs. load

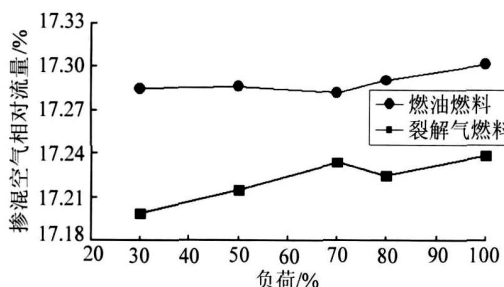


图 20 掺混空气分配情况的比较

Fig. 20 Diluent air mass flow rate vs. load

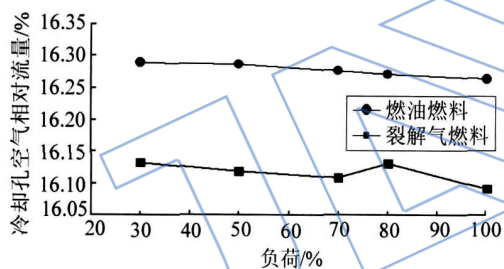
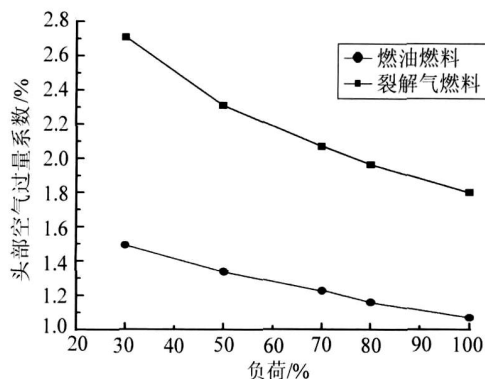


图 21 冷却空气分配情况的比较

Fig. 21 Cooling air mass flow rate vs. load

图 22 对比了头部空气过量系数 α 的变化情况。由于燃料性质不同,在保证化学焓值相同的情况下,裂解气燃料的质量流量虽然大于燃油燃料,但是其耗氧量却小于燃油燃料。在燃烧室计算工况范围内,裂解气燃料的头部空气过量系数在 1.80~2.71 范围内,燃油燃料的空气过量系数在 1.07~1.49 范围内,且都随工况的增加而减小。因此,裂解气燃料的头部空气过量系数 α 明显高于燃油燃料情况。

头部空气过量系数的大小直接影响点火启动和燃烧稳定性等,通常取值范围为 1.1~1.3^[10]。燃料浓度较低时,其点火启动需要更大的点火能量。因此,当燃烧室采用裂解气燃料时,需注意裂解气燃料的混合情况和点火设备的选择,保证其点火启动的可靠性。但另一方面,较高的头部空气过量系数有利于降低火焰区的温度,具有降低

图 22 头部空气过量系数 α 变化情况的比较Fig. 22 α of first air mass flow rate vs. load

NO_x 排放^[11]的作用。

5 结 论

1) 通过对双燃料燃烧室的一体化喷嘴概念设计和数值模拟,所得到的流场特征基本分布趋势是一致的,这有利于简化燃料喷嘴的设计过程和流场组织过程,以及从单一因素优化流场,提高燃烧室的设计效率。

2) 裂解气燃料的燃烧效率优于燃油燃烧,有利于提高循环热效率。但在加入燃烧室化学焓相同,且裂解气总能量高于燃油总能量时,裂解气燃烧所出口平均温度低于燃油状态。因此,需考虑燃料中水蒸气对燃料热值及循环效率的影响。

3) 壁面燃气温度分析体现了壁面温度分布趋势:当裂解气燃烧时,火焰筒壁面温度将低于燃油燃烧状态,有利于延长火焰筒的使用寿命。但此时燃烧室出口的温度均匀性较差,不利于涡轮的做功,还需进一步优化出口温度场。

4) 在该燃烧室中,改变燃料对火焰筒内部空气流量分配的影响很小。但是,裂解气燃料工作时,其头部空气过量系数加大且变化范围广,因此需设计较低燃料浓度下的点火条件,保证点火启动的可靠性。

5) 论文没有考虑辐射、边界层、壁面厚度及其传热的影响,因此仅能反应出壁面温度分布趋势。在下一步的工作中,将优化这些因素,同时需采用相应的实验进行验证。

参考文献:

- [1] Cocco D, Tola V. Performance evaluation of chemically recuperated gas turbine (CRGT) power plants fuelled by di-methyl-ether (DME) [J]. Energy, 2006, 31 (10-11): 1446-1458.
- [2] Abdallah H, Harvey S. Thermodynamic analysis of chem-

ically recuperated gas turbines [J]. Int. J. Therm. Sci. , 2001 ,40 :372-384.

[3] 李金英. 燃料裂解气燃烧技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.

LI Jinying. Research on combustion technology of pyrolysis gas [D]. Harbin: Harbin Engineering University , 2008. (in Chinese)

[4] 李孝堂, 侯凌云, 杨敏,等. 现代燃气轮机技术[M]. 北京:航空工业出版社,2006.

[5] Versteer H K, Malalasekera W. 计算流体动力学导论[M]. 北京:世界图书出版公司,2000.

Versteer H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics [M]. Beijing: World Library Press , 2000. (in Chinese)

[6] Anderson J D. Computational fluid dynamics[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

Anderson J D. Computational fluid dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press , 2002. (in Chinese)

[7] 周立行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟[M]. 北京:清华大学出版社,1991.

[8] 穆勇. 等离子点火器三维燃烧流场数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.

MU Yong. Simulation of three-dimensional combustion by finite-rate chemical reaction in plasma generator[D]. Harbin: Harbin Engineering University , 2005. (in Chinese)

[9] Zamuner B. Numerical simulation of the reactive two-phase flow in a kerosene/ air tubular combustor[J]. Aerospace Science and Technology , 2002 ,6 :521-529.

[10] 焦树建. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京:机械工业出版社,1981.

[11] Mogia H C. Gas turbine combustion design , technology and research: current status and future direction [C]// 33rd AIAA/ ASME/ SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Seattle , W A ,U. S. A. : AIAA Paper 97-3369 , 1997.

JAS