

有气膜孔燃气轮机燃烧室燃烧流场的数值模拟

宋少雷¹, 李铜桥¹, 李金英²

(1. 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046

2 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 对有气膜孔的某型燃气轮机燃烧室燃烧状况用 FLUENT 软件进行了数值模拟。在模拟中采用了标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、“简单化学反应系统”模型和“快速化学反应”假设, 用 SIMPLE 算法进行压力-速度耦合求解。通过对模拟结果的分析, 得到了过量空气系数、火焰长度及火焰筒壁面平均温度等参数随负荷的变化趋势, 并与无气膜冷却的相应情况进行了比较, 主要在燃烧掺混和火焰筒壁面温度方面有了较大改善, 所得结论对燃烧室的结构改进及优化有一定参考价值。

关 键 词: 燃气轮机燃烧室; 气膜孔; 数值模拟

中图分类号: TK473.2 文献标识码: A

引 言

燃烧室是燃气轮机的重要组成部分, 燃烧室内的燃烧流动情况直接影响到燃气轮机的性能^[1]。由于燃气轮机燃烧室内复杂的物理化学变化, 利用计算流体动力学 (CFD) 的数值方法来研究, 对减小燃烧室研制费用, 缩短研制周期具有重要意义^[2]。

燃烧室内部燃烧流场的数值模拟在国内起步比较晚, 目前相关数值模拟所做的工作主要特点是: 在模型处理上, 采用模型燃烧室 (即对几何外形进行了简单处理); 在模拟条件设置上, 将流动简化为稳态流动; 只考虑火焰筒内部流动, 火焰筒一般无气膜冷却结构, 各排掺混孔的进气量及方向是给定的。

对某型燃气轮机燃烧室的燃烧场进行了变工况数值计算, 且考虑了气膜孔的影响, 得到了流场中一些参数随负荷的变化趋势, 并与无气膜冷却的相应情况进行了比较, 对于燃烧室的结构改进及优化有一定参考价值。

1 计算模型及边界条件

1.1 计算模型

该型燃气轮机燃烧室为环管燃烧室, 其周向变

化具有周期性, 故可以取其中一个火焰筒进行数值模拟, 以减少计算量。该燃烧室的结构比较复杂, 为了便于网格划分, 对其进行一定的简化: 忽略壁厚度的影响, 将火焰筒和燃气收集器的壁面都处理为无厚度壁面。采用混合网格, 对火焰筒头部、气膜孔及近壁面处进行较密的网格划分, 对其它部分进行较粗的网格划分, 最后生成网格总数约为 303 万。几何模型和网格划分如图 1 和图 2 所示。

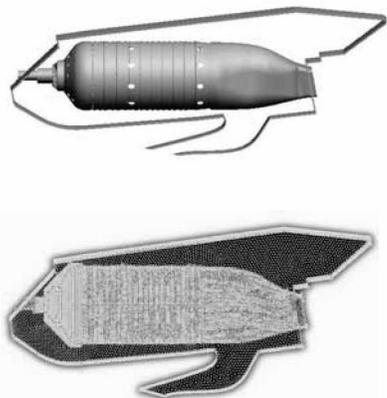


图 1 燃烧室几何模型与网格划分

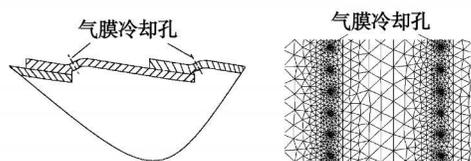


图 2 气膜孔示意图及其网格划分情况

1.2 边界条件

对于空气和裂解气进口均给定其质量流量、温度、湍流密度、水力直径及平均混合分数; 出口处给定出口压力、回流温度、湍流密度和水力直径; 认为壁面是绝热的, 速度无滑移, 壁面采用标准的壁面函

收稿日期: 2008-09-23 修订日期: 2009-05-12

作者简介: 宋少雷 (1982-), 男, 河南通许人, 海装沈阳局助理工程师。

数法处理,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。

裂解气为理想情况下柴油裂解产物,各组分体积分数(CO~20%、H₂~49.63%、H₂O~26.91%、CO₂~3.46%)在预处理程序PrePDF中设定。

2 数学模型

对燃烧室模拟时,重点考虑燃烧的热效应(如效率、温度和热流分布等等)化学反应对流动过程的影响也主要是由它的热效应引起的。针对这个特点,本研究采用了可以绕过化学反应详细机理,而又基本满足实际需要的“简单化学反应系统”模型和“快速化学反应”的假设^[3]。

根据简单化学反应系统假设,在燃烧区内 m_{fu}、m_{ox}、m_p及 T等瞬时值都是混合分数的线性函数。当燃料与空气流分别供入时,可定义为:

$$f = \frac{(m_{fu} - m_{bx})/S_M + m_{fxA}/S}{1 + m_{fxA}/S}$$

式中: m_{fu}、m_{ox}、m_p—燃料、氧气和燃气的质量; S—燃烧 1 k燃料所需的氧气的质量;下标 A—空气; M—混合物^[4]。

在湍流中混合分数 f是脉动的,且是一个随机量,可运用概率密度函数 P(f)来描述的脉动性质,本研究根据对湍流脉动的设想,选用 Beta函数形式的概率密度函数^[4-5]:

$$P(f) = \frac{f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1}}{\int_0^1 f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1} df} \quad (0 \leq f \leq 1)$$

式中,正指数 α、β可由时均值 \bar{f} 和脉动分量均方值 $\overline{(f-\bar{f})^2} = \sigma^2$ 求出:

$$\alpha = \frac{\bar{f}^2}{\sigma^2} \left[\frac{\bar{f}}{1-\bar{f}} - 1 \right]$$
$$\beta = \frac{\bar{f}}{\sigma^2} \left[\frac{\bar{f}}{1-\bar{f}} - 1 \right]$$

\bar{f} 和 σ^2 可以由以下微分方程求出:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j f) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_f} \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j g) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_g} \frac{\partial g}{\partial x_j} \right) + C_{g1} \mu_e \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 - C_{g2} \rho g \frac{\epsilon}{k}$$

现在 P(f)已知,假设任一标量瞬时值 φ是守恒标量瞬时值 f的单值函数:

$$\varphi = \varphi(f)$$

则任意标量的时均值和脉动均方值,可由下列定义求出:

$$\bar{\varphi} = \int_0^1 \varphi(f) P(f) df$$

$$\overline{\varphi^2} = \int_0^1 \varphi^2(f) P(f) df$$

3 计算结果与分析

本研究分别计算了 5个不同负荷情况(100%、80%、70%、50%和 30%)下的燃烧场,下面以满负荷工况下的流场特性参数分布为例进行分析。

3.1 速度分布

有气膜孔时燃烧室对称面上的速度分布如图 3所示。从图上可以看到,燃烧室头部流速由中心的 17 m/s向两侧逐渐增至约 50 m/s,在火焰筒壁面处又有所降低,燃烧室头部有一定的回流强度,它会增强气流的紊流扰动,改善燃料与一次空气的混合。同时,能将高温燃气带回火焰筒头部,点燃未燃混合物,有利于火焰的稳定。

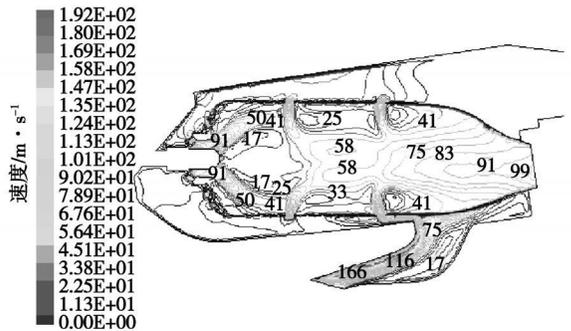


图 3 有气膜孔时对称面上的速度分布

3.2 对称面上的温度分布

燃烧室对称面上的温度分布情况如图 4所示。从图上可以看到,火焰筒头部最高温度约为 2 249 K,而火焰筒中部最高温度约为 2 446 K,高温区并不是在火焰筒头部,而是位于燃烧室中部。这主要是由于气膜孔占据了相当一部分的进气量,这就使得燃烧室头部的进气量减少,回流强度减弱,进而影响了空气与裂解气的掺混及可燃混合物的形成,火

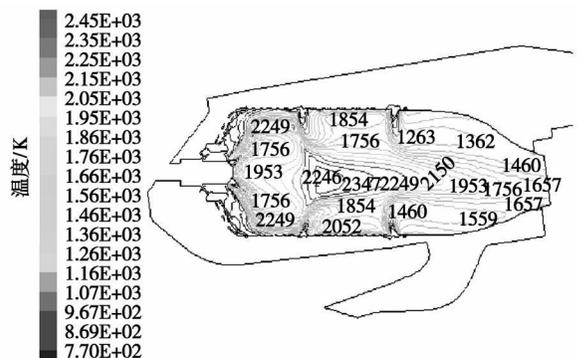


图 4 有气膜孔时对称面上的温度分布

焰长度就会变长。

3.3 对称面上火焰筒壁面温度分布

有、无气膜孔时火焰筒壁面温度的对比情况如图 5 所示。从图上可以清楚地看到, 有气膜孔的火焰筒壁面温度有了很大程度的降低, 尤其是火焰筒的中间部分壁面温度降低了约 500 K。这是因为气膜孔都分布在火焰筒的中部, 因而这一部分的温度较低。

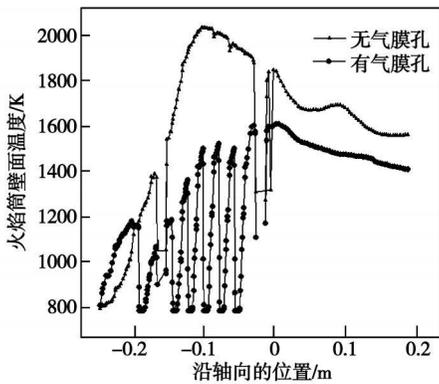


图 5 有、无气膜孔时火焰筒壁面温度分布

3.4 一些参数随负荷变化的趋势

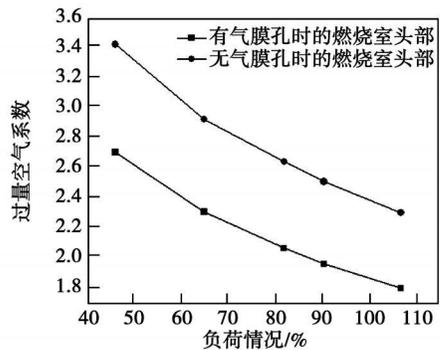
通过数值计算及结果整理得到了过量空气系数、火焰长度和火焰筒壁面平均温度等参数随负荷变化而变化的趋势, 并与没有气膜孔时的相应情况进行了对比。

3.4.1 过量空气系数随负荷的变化趋势

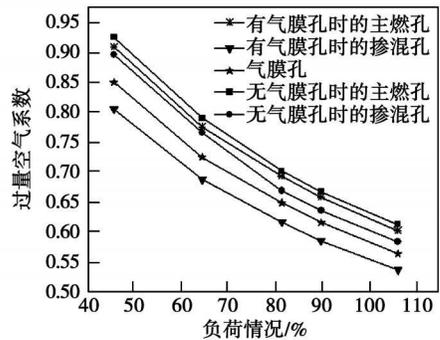
在有、无气膜孔两种情况下, 燃烧室各部位的过量空气系数随负荷变化的趋势如图 6 所示。从图上可以看到, 随负荷的降低, 过量空气系数均是增大的。在相同的负荷下, 有气膜孔时燃烧室各部位的过量空气系数均小于没有气膜孔的, 这是因为气膜孔占据了一定的进气量, 如图 6(b) 所示, 因而燃烧室头部、主燃孔和掺混孔的进气量就会减少, 过量空气系数也自然随之减小。从图 6 中还可以看到, 有气膜孔时燃烧室头部过量空气系数减小的幅度要比主燃孔和掺混孔处的大很多。

3.4.2 火焰长度随负荷的变化趋势

有、无气膜孔冷却孔时火焰长度随负荷的变化趋势如图 7 所示。随负荷的降低, 火焰长度是变短的, 且有气膜孔时的火焰长度要比没有气膜孔的长。因为在相应的负荷下, 有气膜孔时火焰筒头部过量空气系数比没有气膜孔时的有较大幅度的减小, 如图 6(a) 所示, 即头部的进气量减少, 影响了可燃混合物的形成, 因而火焰就会变长。



(a) 燃烧室头部过量空气系数



(b) 各进气孔处的过量空气系数

图 6 过量空气系数随负荷变化情况

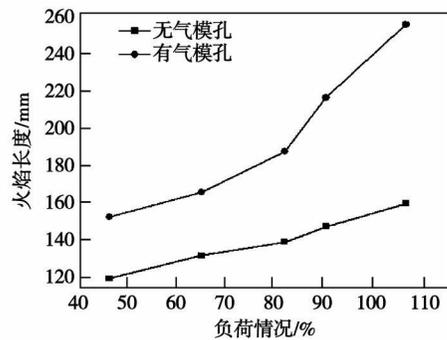


图 7 火焰长度随负荷变化情况

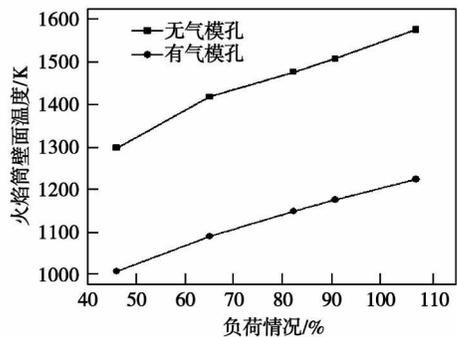


图 8 火焰筒壁面平均温度随负荷变化情况

3.4.3 火焰筒壁面平均温度随负荷的变化趋势

有、无气膜冷却孔时火焰筒壁面温度随负荷的变化趋势如图 8 所示。从图中可以看到,这两种情况的火焰筒壁面的平均温度随负荷变化而变化的趋势是一致的,并且有气膜孔时的壁面温度要比没有气膜孔时的低很多,大约 300 K。这是因为从气膜孔进入的冷却空气可以在壁面附近形成一薄层气膜,减弱了高温燃气对壁面的热辐射,壁面温度自然就比较低。

4 结 论

(1) 通过计算得到了有气膜冷却燃烧室内速度场和温度场分布情况,为更合理地组织燃烧流场提供了一定的依据。

(2) 通过计算得到了有气膜冷却燃烧室头部、主燃孔和掺混孔处的过量空气系数及火焰长度随负

荷变化规律,并与无气膜冷却燃烧室进行了对比,对燃烧室的流场组织及结构优化有较好的参考价值。

(3) 考虑了气膜冷却孔的影响,数值模拟结果更真实的反映了燃烧室内的燃烧流动情况,为进一步的研究工作打下了基础。

参考文献:

- [1] 焦树建. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [2] 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
- [3] 孟 岚, 刘立波. 模型燃气轮机燃烧室三维反应流数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(2): 35—40
- [4] 赵坚行. 燃烧的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] LU F GUO H. A robust and accurate algorithm of the β -pdf integration and its application to turbulent methane-air diffusion combustion in a gas turbine combustor simulator[J]. International Journal of Thermal Sciences 2002, 41: 763—772

新技术、新工艺

多层结构热障涂层的高温辐射性能

据《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2009年1月号报道,为了满足对燃气轮机逐渐提高运行温度的要求,需同时开发冷却技术、新一代超耐热合金和具有增加隔热能力的热障涂层。

典型的热障涂层系统是由陶瓷顶层、在陶瓷层和超耐热衬底之间的金属粘结涂层、超耐热衬底,以及在陶瓷/粘结涂层界面处形成的很薄的氧化层组成。

在开发热障涂层中,大量的研究继续集中在新涂层材料的组成成分、经氧化钇稳定处理的二氧化锆陶瓷的合金化以及先进涂层显微结构的改善。

电子束物理蒸气沉积涂敷工艺的出现使得能够考虑形成多层涂层结构,以便满足特定的性能要求。

根据它们在阻止热传导(通过声子)和热辐射(通过光子)方面的功能,评价了多层结构的优点和基于多层堆积的新的多层涂层结构的设计和性能。

设计的主要目标是减少热辐射通过热障涂层系统的传递。多层结构由几个高反射的多层堆积组成,每个堆积被用于反射一定波长范围的辐射。

与同样厚度的单层涂层结构比较,使用多层涂层结构,其金属表面的温度可以减少 90 °C。

(吉桂明 摘译)

very well adjust the working point of the compressor thereby playing an important regulation role in modifying the gas turbine. To change the geometry of the power turbine can even better improve the off-design performance of the unit. Key words: gas turbine, small deviation equation, variable geometry turbine

汽轮机性能试验中湿蒸气区焓值的计算方法 = A Method for Calculating an Enthalpy Value in the Wet Steam Zone During the Performance Test of a Steam Turbine [刊, 汉] / ZHOU Liukun, SHEN Faorong, YAN Zhengbo (Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Test Academy (Group) Co., Ltd., Kunming, China, Post Code: 650217) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3), —265 ~ 268

In the light of the shortcomings of the models currently available for calculating the extracted steam enthalpy of a steam turbine in the wet steam zone, a concept of the stage efficiency at the steam extraction port was adopted to establish a model for calculating the above extracted steam enthalpy and the original data from the three largest domestic turbine works were used to verify the model in question. The calculation results from the extracted steam enthalpy value in the wet steam zone were used to effect a fitting of the thermodynamic process and to obtain the exhaust steam enthalpy value. By adopting an energy balancing method, the exhaust steam enthalpy was rechecked. The method features a small amount of iterative calculations, which can be completed in three times. When the last stage enters into the wet steam zone, no iterative calculation will be needed. It has been found that the calculation model is simple and its program enjoys a good program transplantation, requiring fewer measuring points and featuring a small accumulative error of the measuring points assessed at less than 0.25% and a high calculation precision. Key words: steam turbine, stage efficiency at the steam extraction port, wet steam zone, enthalpy calculation, thermodynamic process curve

有气膜孔燃气轮机燃烧室燃烧流场的数值模拟 = Numerical Calculation of the Combustion Flow Field in a Gas Turbine Combustor With Air-film Holes [刊, 汉] / SONG Shaolei, LI Tongqiao (Harbin Steam Turbine Works Co., Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046), LI Jinying (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3), —269 ~ 272

By using software Fluent, numerically simulated was the combustion condition of a gas turbine combustor with air film holes. During the simulation, the standard $k-\epsilon$ turbulent flow model, a "simple chemical reaction system" model and "quick chemical reaction" assumptions were adopted and the SIMPLE algorithm was employed to seek solutions based on a pressure-speed coupling. Through an analysis of the simulation results, the variation tendency of such parameters as excess air ratio, flame length and average wall surface temperature of the flame tube etc. with load changes was obtained and compared with the corresponding condition without air film cooling. A relatively big improvement has been mainly realized in the combustion mixing and dilution, as well as flame tube wall surface temperature. The conclusion thus obtained has a certain reference value for structural improvement and optimization of the combustors. Key words: gas turbine, combustor, air film hole, numerical simulation

纯环路型和混合型行波热声发动机的对比实验 = Contrast Experiment of Travelling-wave Thermoacoustic Engines of Pure Loop and Hybrid Type [刊, 汉] / WANG Hongli, WANG Shuangfeng (Education Ministry Key Laboratory on Heat Transfer Intensification and Process Energy Conservation, South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3), —273 ~ 277

A travelling-wave thermoacoustic engine test rig was developed with ceramic material serving as a plate stack. A contrast experiment of the thermodynamic performance of thermoacoustic engines of pure loop and hybrid type was