

燃料电池 燃气轮机混合动力系统中 催化燃烧室特性分析

刘爱斌, 翁 一武

(上海交通大学 动力与机械工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 对熔融碳酸盐燃料电池 / 微型燃气轮机 (MCFC/ MGT) 混合动力系统中的催化燃烧室进行了实验和理论分析, 确定了燃烧室入口温度、燃料浓度对燃料转化率的影响, 在非设计工况下运行时催化燃烧室入口条件会发生变化, 应用数学模型分析了各主要因素对催化燃烧室运行特性的影响。结果表明, 计算结果与实验结果的最大误差在 4% 以内。在混合动力系统的运行范围内催化燃烧室入口温度高于 770 K 时燃料转化率达 99% 以上, 而入口流速和燃料浓度的变化对转化率的影响不明显。

关 键 词: 燃料电池 燃气轮机; 催化燃烧室; 催化燃烧; 整体式蜂窝载体; 混合动力系统

中图分类号: TK473 文献标识码: A

引 言

催化燃烧是典型的气—固相催化反应, 与传统的火焰燃烧相比, 催化燃烧有着很大的优势。首先, 起燃温度低、燃烧易达稳定; 其次, 净化效率高, 不完全燃烧产物排放量低; 第三, 适应氧浓度范围大, 燃烧稳定。由于催化燃烧的特点, 这种技术已经在很多领域得到了广泛的应用^[1~5]。

对于催化燃烧的研究, 很多学者在反应机理、催化剂特性和运行参数对催化燃烧反应性能的影响等方面都做了大量的工作^[6~11]。而对将催化燃烧应用在燃料电池 燃气轮机混合动力系统中的研究, 目前只有少数研究者提出了基本概念并进行了简单的理论分析^[12~14]。

燃料电池 燃气轮机 (MCFC/GT) 混合动力系统, 由于其高效低排放引起了人们的注意。为了对混合动力系统的机理及特性进行更深入的研究, 上海交通大学对由熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC) 和微型燃气轮机 (MGT) 组成的混合动力系统开始进行

了实验研究, 整个系统的结构示意图如图 1 所示。在该混合动力系统中, 燃料电池工作在高温高压状态。经过预热后的燃料和氧化剂进入燃料电池发生电化学反应, 含有可燃成分的高温尾气在催化燃烧室内温度进一步升高, 进入透平膨胀做功发电, 透平尾气再通过换热器对燃料和氧化剂进行预热。

由于燃料电池尾气中可燃成分浓度低, 如果采用传统的燃烧室会带来点火困难、燃烧不稳定以及不完全燃烧和污染物排放高等问题。根据催化燃烧的特点, 这里采用了催化燃烧室来处理电池尾气。由于催化燃烧室是处于系统之中, 系统运行特性的变化会引起燃烧室工作条件的变化。在本研究中首先通过实验分析了入口条件的变化对燃料转化率的影响, 同时用实验数据验证了数学模型的准确性; 其次, 应用数学模型模拟系统运行特性变化时对燃烧室的影响。

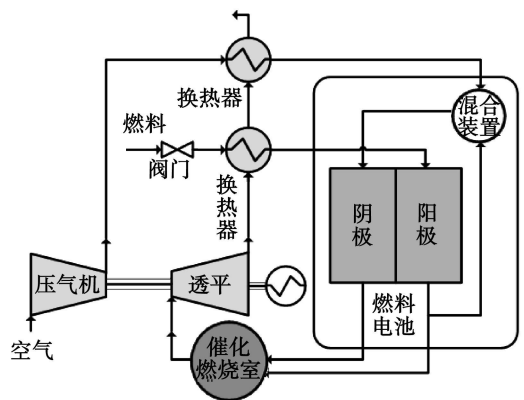


图 1 MCFC/MGT 混合动力系统结构示意图

收稿日期: 2009-02-14 修订日期: 2009-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90610019), 上海市重点科研基金资助项目 (07DZ12025 06DZ7006)

作者简介: 刘爱斌 (1979-), 男, 辽宁义县人, 上海交通大学博士研究生。

1 催化燃烧室模型的建立

1.1 物理模型

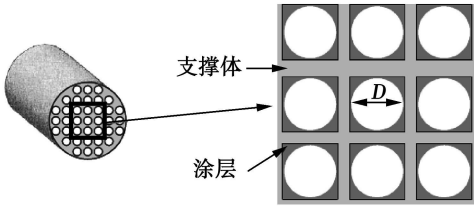


图 2 整体式蜂窝状催化燃烧室内部结构

图 2 为整体式蜂窝状催化燃烧室的内部结构, 其特点是结构稳定、压力损失小。催化反应在单个孔通道中的壁面上进行, 孔道的壁面上涂有催化剂 Pt 和辅助催化剂 Al_2O_3 , 支撑体为堇青石。

1.2 数学模型

催化燃烧数值计算中所使用的数学模型主要有 3 种^[15]: 基于 $N-S$ 方程模型、基于边界层方程模型及塞子流模型, 本研究采用的数学模型是相对简单的塞子流模型。

连续性方程:

$$\rho u \frac{dA}{dx} + \rho A \frac{du}{dx} + uA \frac{d\rho}{dx} = \sum_{m=1}^M a_{i,m} \sum_{k=1}^{K_g} \xi_{k,m} W_k \quad (1)$$

动量方程:

$$A \frac{dP}{dx} + \rho uA \frac{du}{dx} + \frac{dF}{dx} + u \sum_{m=1}^M a_{i,m} \sum_{k=1}^{K_g} \xi_{k,m} W_k = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho uA \left(\sum_{k=1}^{K_g} k \frac{dY_k}{dx} + C_p \frac{dT}{dx} + u \frac{du}{dx} \right) + \left(\sum_{k=1}^{K_g} h_k Y_k + \frac{1}{2} u \right) \sum_{m=1}^M a_{i,m} \sum_{k=1}^{K_g} \xi_{k,m} W_k = a_e Q - \sum_{k=K_f}^{K_b} a_{i,m} \sum_{k=K_f}^{K_b} \xi_{k,m} W_k h_k \quad (3)$$

$Q=0$ 为绝热时的情况, 表面反应产生的能量处理为源项放在方程的右边。

气相组分方程:

$$\rho uA \frac{dY_k}{dx} + Y_k \sum_{m=1}^M a_{i,m} \sum_{k=1}^{K_g} \xi_{k,m} W_k = W_k \sum_{m=1}^M \xi_{k,m} a_{i,m} + \omega_k A \quad (4)$$

气相组分改变不影响气体的总质量, 但是能够改变气体的组成分数。对于每一种表面组分守恒。

表面相组分质量守恒方程:

$$\xi_k = 0 \quad k = K_f^1, \dots, K_f^1 \quad (5)$$

式中: ρ —混合气体密度, u —轴向速度; W_k —组分 k 的分子质量; ξ_k —组分 k 的摩尔生成速率; A —横截

面的总通流面积; $a_{i,m}$ —物质 m 单位长度内部有效表面积; Y_k —组分 k 的质量分数; ω_k —组分 k 的摩尔生成速率; h_k —组分 k 的比焓, C_p —每单位体积的平均热容; T —气体温度; Q —系统中气体的散热量; P —绝对压力; F —通道壁面施加给气体的作用力。

催化燃烧从整体上看是一个物理化学过程, 但实际上化学反应动力学行为才是催化燃烧的核心。在计算中应用了详细的气体动力学反应, 甲烷在铂催化剂表面的详细反应机理可参考文献 [16]。

2 实验分析

为验证所使用数学模型的准确性, 建立了催化燃烧实验台架对催化燃烧进行分析。实验系统图如图 3 所示, 包括燃料供应装置、加热器、催化燃烧室、冷却器, 以及燃料和尾气采样系统。燃料供应装置是将燃料与空气混合稀释为实验中所需的低热值燃料混合气, 它主要包括空气供应装置、燃料储罐、减压阀、流量计、控制阀和混合装置。在混合装置中将燃料和空气充分混合形成预混燃料后通过加热器, 将预混燃料加热到一定的温度后再进入催化燃烧室进行反应。

在反应器内放置直径为 $\phi 92 \text{ mm}$ 长为 127 mm 的蜂窝载体 3 个。其中第一个蜂窝载体上没有催化剂, 作用是使进入后面反应体的气流稳定。在催化燃烧室前后分别安装两个水冷探针来采样, 再利用气相色谱仪来测量采样气中的 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 O_2 和 H_2 的含量。此外, 必须在采样气进入气相色谱仪之前放置两个干燥器, 以防水汽进入气相色谱仪影响实验结果。催化燃烧室出口气体经过冷凝器后可直接排入大气, 不会造成污染。

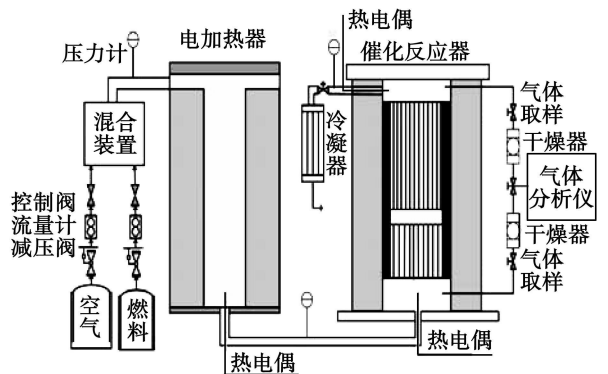


图 3 催化燃烧室实验系统图

在实验分析中所使用的催化剂为 Pt/Al_2O_3 , 催

化剂的负载量为 1 765. 7 g/m³。

3 结果与分析

3.1 结果的比较

实验分析了燃料中甲烷的浓度及燃烧室入口温度对甲烷转化率的影响。在入口浓度对燃料转化影响的实验分析中, 燃烧室的入口温度为 773 K 压力 0.6 MPa 流速 0.5 m/s 实验与计算结果的对比如图 4 所示, 随甲烷浓度的升高燃料的转化率也在升高, 在 CH₄ 浓度为 0.15 % 时其转化率为 37.7 %。而当 CH₄ 浓度为 0.66 % 时转化率达到 99.6 %, 升高了 61.9 %。这是由于进入燃烧室的燃料浓度的增加会增加燃料密度, 同时会提高反应器的温度。

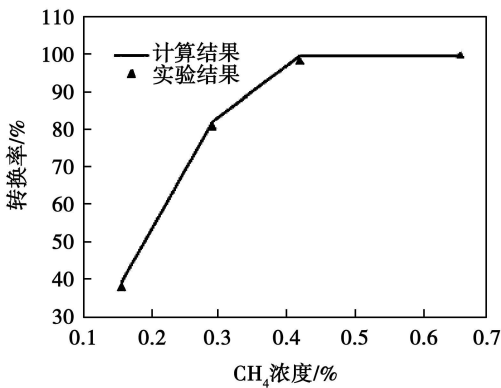


图 4 浓度对转化率的影响

图 5 显示了入口气体温度对 CH₄ 转化率的影响, 此时燃烧室的入口条件为压力 0.6 MPa 流速 0.5 m/s CH₄ 浓度为 0.423 %。由图可以看出, 随着入口温度的增加, 反应物的转化率先是明显的升高, 然后增加的速率变慢。导致这种现象的主要原因是热力学和动力学共同作用的结果。

从实验结果与计算结果的对比可以看出, 在不同的燃料浓度和入口温度下, 甲烷转化率的数值模拟结果与实验数据基本吻合, 最大的误差不超过 4 %。因此, 本研究所采用的表面反应详细机理能很好地反映甲烷在催化剂 P 表面的反应动力学特征, 同时也证明了所采用的数学模型是合适的。

3.2 燃烧室特性分析

混合动力系统通常是在非设计工况下运行的, 当系统在非设计工况下运行时催化燃烧室的入口条件和工作特性都会发生改变。在研究过程中, 首先根据对混合动力系统的分析确定了在系统所能实现的部分负荷内催化燃烧室入口各参数的变化范围,

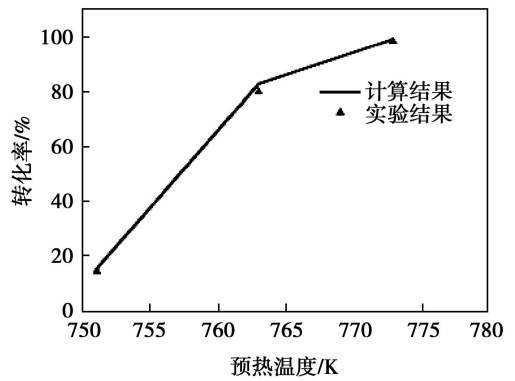


图 5 入口温度对转化率的影响

然后分析各种不同参数变化时对催化燃烧室的影响。在分析一种参数时保持其它参数不变, 改变的参数包括入口温度、流速及甲烷浓度。

3.2.1 入口温度改变

混合动力系统部分负荷运行时进入系统的燃料量降低, 燃料电池的工作温度降低导致燃烧室入口温度降低。随着燃烧室入口温度的降低, 燃烧室出口燃料的转化率如图 6 所示。

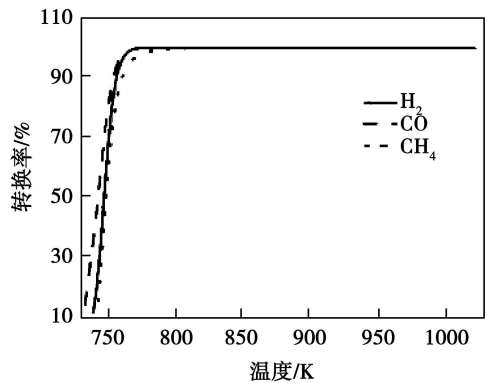


图 6 入口气体温度对燃料转化率的影响

随着入口温度的增加, 反应物的转化率先增大后基本保持恒定, 在较大的温度范围内各种可燃成分都能保持高的转化率。这种现象可以被解释为热力学和动力学两方面因素影响的结果。从平衡常数和温度间的热力学关系来看, 平衡转化率随温度的升高而降低, 从反应速率常数与温度间的关系来看, 反应速率随温度的升高而增大。通常在温度较低时, 温度对反应速率常数的影响起主要作用, 对平衡常数的影响是次要的。因而反应物的转化率随温度的上升而加快, 但升高到一定的温度后, 再提高温度, 其平衡转化率将下降很快, 从而导致反应物的转化率最终达到一个稳定值。

3.2.2 流速的改变

随着混合气入口流速的增大, 混合气与催化剂壁面的接触时间将减少, 混合气将达不到充分的吸附及解吸所需时间, 从而会降低反应物的转化率。但从本研究计算结果可以看出, 当入口流速在较大的范围内变化时混合气中各种可燃成分的转化率始终保持较高的值, 如图 7 所示。这是由于混合燃料中可燃成分浓度较低、入口温度高及含有较高反应活性的 H_2 , 所以入口流速的改变对燃料的转化率几乎没有影响。

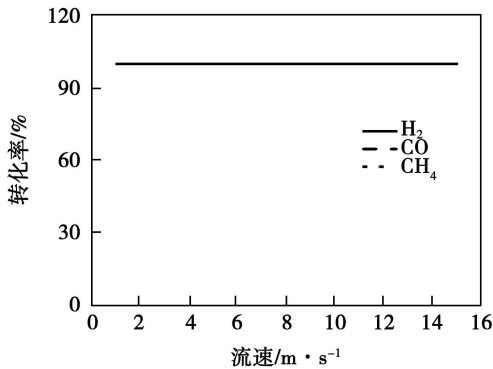


图 7 不同流速下燃料的转化率

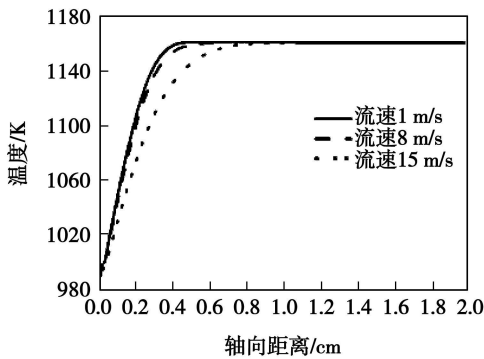


图 8 不同流速时轴向温度分布

图 8 为入口流速变化时燃烧室内温度的轴向变化曲线。当入口气体流速较低时, 仅在微元管入口段形成较大的温度梯度, 同时在此段气体温度急剧上升, 在离入口大约 0.3 m 处气体温度已经接近所能达到的最大值。当气体流速较高时, 轴向的温度梯度变缓, 点火界面逐渐向远离催化燃烧室的入口移动, 在离入口大约 1 m 处管内气体温度达到最大值。

3.2.3 CH_4 浓度改变

系统在非设计工况下运行时进入系统的燃料会发生明显的变化, 这就导致燃烧室入口可燃成分的浓度发生变化, 成分的变化会导致燃烧室内表面反应的变化。燃料浓度变化时影响最大的是甲烷, 因此主要分析了甲烷浓度变化对燃烧室反应特性的影响。

在不同的燃料浓度时, 燃料的转化率都能保持较高的值, 燃料浓度的变化对燃料的转化率几乎没有影响。不同浓度时温度的轴向变化如图 9 所示, 在入口条件不变的情况下, 随着燃料浓度升高, 轴向的温度梯度变得更加陡峭, 点火界面逐渐向催化燃烧室的入口移动。这种现象主要与表面反应有关, 在下面各种主要成分的表面覆盖率分析中将作介绍。

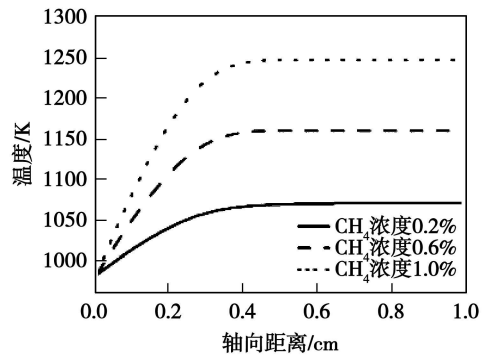


图 9 CH_4 浓度变化时温度轴向分布

甲烷浓度变化时主要成分的表面覆盖率的轴向变化如图 10 所示。催化反应是一个在催化剂表面进行“吸附—表面反应—解吸”过程, 在燃烧室的入口阶段燃料中的甲烷、氢气和一氧化碳会吸附在催化剂表面发生表面反应后再从表面解吸。在催化剂表面氢气和一氧化碳的吸附活性要强于甲烷, 因此 H_2 和 CO 先与 O 发生反应生成 H_2O 和 CO_2 消耗 O 并产生热量。甲烷吸附在催化剂表面后会分离出 C 和 H , 这两种元素再与 O 发生反应。随着反应的进行, 生成的 CO_2 和 H_2O 将从催化剂表面解吸, O 逐渐成为催化剂表面的主要吸附元素, 燃料完全反应后各种成分的表面覆盖率达到稳定。随着甲烷浓度的升高, 在催化燃烧室入口处甲烷分离出的 C 和 H 浓度也增大。从图中也可以看出, 甲烷浓度对各成分表面反应速率的影响不是很明显。

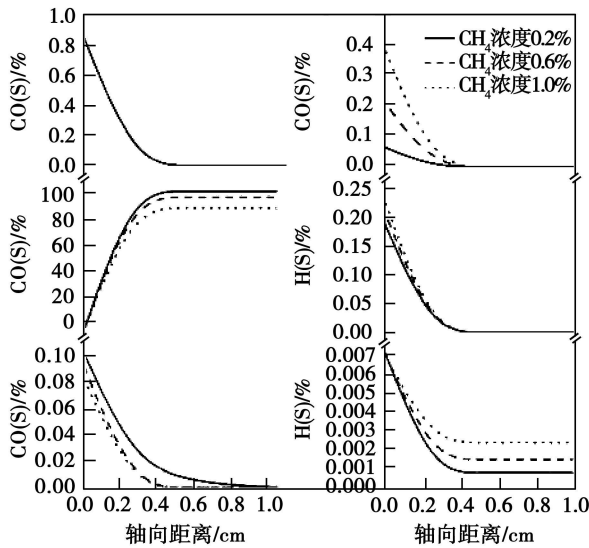


图 10 甲烷浓度变化时主要成分覆盖率的轴向分布

4 结论

应用实验分析确定了催化燃烧室入口燃料浓度和入口温度对燃烧室运行特性的影响,结果表明,随着燃料浓度的提高,燃料的转化率会明显提高,燃料浓度为 0.66% 时燃料的转化率可以达到 99.6%。随着入口温度的升高,反应物的转化率先是明显地升高然后增加的速率变慢。

应用所建立的数学模型,对混合动力系统在非设计工况下运行时催化燃烧室的运行特性进行了分析。计算结果表明,由于系统运行特性的改变而导致催化燃烧室入口温度、流速和燃料浓度变化时催化燃烧室仍能保持高的燃料转化率。当入口温度高于 770 K 时燃料的转化率都能达到 99% 以上,而在所考虑的流速和燃料浓度的变化对转化率的影响不明显。

参考文献:

[1] NORTON D G WETZEL E D VLACHOS D G Thermal management in catalytic microreactors [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research 2006 45 (1): 76—84
 [2] NORTON D G VLACHOS D G Hydrogen assisted self-ignition of propane/air mixtures in catalytic microburners [J]. Proceedings

of the Combustion Institute 2005 30 (2): 2473—2480
 [3] FEMANDEZ PELLIO A C Micro-power generation using combustion issues and approaches [J]. Proceedings of the Combustion Institute 2002 29 883—899
 [4] VOLCHKO S J SUNG C J HUANG Y M et al Catalytic combustion of rich methane/oxygen mixtures for micropropulsion applications [J]. Journal of Propulsion and Power 2006 22 (3): 684—693
 [5] SRIDHAR R IACOMINI C S FINN J E Combined H₂O/CO₂ solid oxide electrolysis for mass in situ resource utilization [J]. Journal of Propulsion and Power 2004 20 (5): 892—901
 [6] WARNATZ J ALLENDORF M D KEE R J et al A model of elementary chemistry and fluid-mechanics in the combustion of hydrogen on platinum surfaces [J]. Combustion and Flame 1994 96 (4): 393—406
 [7] MHADESHWAR A B VLACHOS D G A thermodynamically consistent surface reaction mechanism for CO oxidation on Pt [J]. Combustion and Flame 2005 142 (3): 289—298
 [8] 尹 娟,翁一武. 燃用低浓度煤矿通风瓦斯的燃气轮机系统及性能分析 [J]. 现代电力, 2007 24 (5): 68—71
 [9] 曾 文. 催化燃烧的数值模拟及其在均质压燃 (HCCI) 发动机中应用的基础研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006
 [10] 王 亮,何 洪,戴洪兴,等. 天然气预混催化燃烧的特性 [J]. 燃烧科学与技术, 2007 13 (5): 474—477
 [11] 刘 敏,陈艳芬,韩立中,等. 燃气轮机催化燃烧室的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2000 15 (4): 376—378 381
 [12] 陈启梅. MCFC—GT 混合动力系统非线性特征及其协调控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007
 [13] ROBERTS RORY ANDREW. A dynamic fuel cell gas turbine hybrid simulation methodology to establish control strategies and an improved balance of plant [D]. Irvine University of California 2005
 [14] BYOUNG SAM KANG, JOON HO KOH, HEE CHUN LIM. Effects of system configuration and operating condition on MCFC system efficiency [J]. Journal of Power Sources 2002 108 232—238
 [15] RAJAL L, KEE R J, DEUTSCHMANN Q et al A critical evaluation of Navier-Stokes boundary layer and plug-flow models of the flow and chemistry in a catalytic combustion monolith [J]. Catalysis Today 2000 59 47—60
 [16] CHAO YEI CHIN, CHEN GUAN BANG, HSU HUNG WEI et al Catalytic combustion of gasified biomass in a platinum monolith honeycomb reactor [J]. Applied Catalysis A General 2004 261 99—107

(本文责任编辑 刘 伟)

Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 141 ~ 144

A boundary element calculation method was used in a program for solving a three-dimensional N-S equation. The finite difference method was adopted in the fluid portion of the coupled calculation program to solve the N-S equation, and the boundary element method to solve the heat conduction equation for the solid zone. A newly-developed gas thermal coupled calculation program was employed to conduct a gas thermal coupled analysis of the thermal environment in NASA-Mark II HP air cooled turbine cascades. By utilizing the advantages (features combining a decrease in dimension with analysis and discreteness) specific to the boundary element method, the authors have avoided the grid generation in the solid area and the solution seeking of interior nodes, thus enhancing the calculation precision. The calculation results show that the coupled calculation program can effectively and accurately solve the gas thermal coupled problems in multiple fields. The results of calculation correspond relatively well with those of the test ones, and their average error is assessed at 3%. Key words: gas thermal coupling; boundary element method; finite difference method; gas turbine; air cooling; coupled calculation

弹性环刚度强度的分析方法与力学特性研究 = Study of the Methods for Analyzing the Rigidity and Strength of an Elastic Ring and Its Mechanics Characteristics [刊, 汉] / LONG Xiangyang, HONG Jie, ZHANG Da-yi, LN Haiying (College of Energy Source and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100191) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 145 ~ 149

The rigidity parameter of an elastic ring represents an important constant for analyzing the kinetic characteristics of a rotor system and designing its critical speed. Proceeding from the requirements for various analyses, the authors have studied a finite element method for analyzing the structural rigidity of the elastic ring. Through experimental tests and measurements, the feasibility and accuracy of the finite element method for calculating the supporting rigidity of the elastic ring have been verified. From the requirements for structural design, the authors have also studied the strength characteristics, summarizing the key parameters for structural design of the rigidity and strength of the elastic ring and their influencing laws, thereby providing a basis for the kinetic design of the elastic ring. The main parameters being considered in a rigidity design should include the number of bosses, wall thickness and width, while those in a strength design mainly involve the number of bosses, wall thickness and transition fillets. Key words: elastic ring; rigidity; strength; finite element; rotor system

燃料电池/燃气轮机混合动力系统中催化燃烧室特性分析 = Characteristic Analysis of a Catalytic Combustor in a Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Power System [刊, 汉] / LIU Aiguo, WENG Yi-wu (Education Ministry Key Laboratory on Power and Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 150 ~ 154

An experimental and theoretical analysis was conducted of a catalytic combustor in a metal carbonated fuel cell/micro gas turbine (MCFC/MGT) hybrid power system. Through an experimental analysis, determined was the influence of the inlet temperature and fuel concentration of the combustor on the fuel conversion rate and in the meantime, the correctness of the mathematical model being used was also verified. When the hybrid power system is operating at off-design conditions, the inlet condition of its catalytic combustor may undergo a change. A mathematical model was used to analyze the influence of various main factors on the operation characteristics of the catalytic combustor. The research results show that the maximal error between the calculated results and the test ones is within a

range of 4%. In the operation range of the hybrid power system, the catalytic combustor can always maintain a high fuel conversion rate, being invariably over 99% when the inlet temperature is higher than 770 K. The change of the inlet flow speed and fuel concentration has no conspicuous influence on the fuel conversion rate. It is feasible to use the catalytic combustor for the hybrid power systems. Key words: catalytic combustor; catalytic combustion; integral honeycomb carrier; hybrid power system; combustion conversion rate

PEVGT 循环参数优化及热力性能分析 = Parameter Optimization and Thermodynamic Performance Analysis of a Part Flow Evaporative Gas Turbine (PEVGT) Cycle [刊, 汉] / WANG Jing, ZHANG Shi-je, XIAO Yun-han (Key Laboratory on Advanced Energy and Power Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 155 ~ 160

Part flow evaporative gas turbine (PEVGT) cycle is the combination of a humid air turbine (HAT) cycle and a steam-injected gas turbine (STIG) one. It not only enjoys a relatively high power generation efficiency, but also can provide steam to outside users. In the meantime, it can accomplish a flexible regulation of the heating/power ratio and possess latent potentialities for application in the domain needing a supply of both heat and power. In addition to conducting a parameter optimization of two types of PEVGT cycle in different configurations, the authors have also analyzed their thermodynamic performance and combined heat and power supply cogeneration characteristics. It has been found that during a pure power generation operation, the humidified air ratios corresponding to the maximal efficiency points of the two types of cycle are between 0% and 20%. When the non-humidified air is mixed with the humidified air and steam before the recuperator (PEVGT₂ cycle), the optimum pressure ratio of both PEVGT₂ cycle and HAT one is around 10. The maximal efficiency of the PEVGT₂ cycle (51.4%) is 0.8 and 3 percentage points higher than that of the HAT cycle and the STIG one respectively. Following a mixing of the humidified air with the steam before the recuperator, when the mixture of the humidified air and steam is blended with the non-humidified air after the recuperator (PEVGT₁ cycle), the optimum pressure ratio of the PEVGT₁ cycle is comparatively high and its maximal efficiency corresponds with that of the STIG cycle. During a heat and power cogeneration operation, two types of PEVGT cycle enjoy a heat and power load flexibility similar to that of the STIG cycle and when the steam output proportions of both PEVGT₁ and PEVGT₂ cycle are kept identical, their power generation efficiencies will be 0.7% ~ 1.5% and 3.4 ~ 12 percentage points respectively higher than that of the STIG cycle. Key words: part flow evaporative gas turbine (PEVGT) cycle; humid air turbine (HAT) cycle; steam-injected gas turbine (STIG) cycle; parameter optimization; heat and power cogeneration

燃气轮机化学回热循环热力学过程分析 = An Analysis of the Thermodynamic Process of a Gas Turbine-based Chemical Recuperative Cycle [刊, 汉] / TAN Zhi-yong, ZHENG Hong-tao (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), HAN Qiang, LI Qi (CSC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 161 ~ 165

The chemical recuperative cycle represents an advanced gas turbine-based one. To systematically study its thermodynamic performance, established was an entropy-temperature diagram for the above cycle based on a thermodynamic analysis of the cyclic process, and defined was a relative growth rate of the heating value of the fuel. Moreover, a mathematical expression for the thermal efficiency of the cycle was derived along with an analysis and calculation of the cyclic performance. It has been found that the chemical recuperative cycle features a relatively high efficiency and its maximal value can be over 55%. The optimum pressure ratio of the cycle in question depends on