

生物质-燃料电池/燃气轮机发电系统特性研究*

刘爱骥¹ 王冰¹ 翁一武² 曾文¹ 陈保东¹

(1. 沈阳航空航天大学航空航天工程学院, 沈阳 110136; 2. 上海交通大学机械与动力工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 对生物质气化-固体氧化物燃料电池/燃气轮机发电系统的特性及不同运行参数对系统性能的影响进行了分析。生物质气化为以水蒸气为气化介质的基于 UNIQUE 概念的流化床气化、高温净化系统, 建模中采用了化学动力学模型, 并以萘作为焦油成分。基于所建立的系统模型, 分析了生物质含水率和燃料利用率等参数对系统性能的影响。结果表明, 与其他生物质应用技术相比该系统具有较高的能量转化效率, 在 200 kW 规模, 生物质含水率为 20% 时, 电效率可以达到 47%。生物质含水率增加会降低系统的输出功率, 系统效率下降明显; SOFC 燃料利用率提高时系统输出功率变化不明显, 但系统效率会明显提高。

关键词: 生物质 固体氧化物 燃料电池 燃气轮机 混合动力系统

中图分类号: TM911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0178-06

引言

生物质能具有可再生性、环境友好性等特点, 目前已成为仅次于煤、石油和天然气的第四大能源^[1]。固体氧化物燃料电池(SOFC)属于高温燃料电池, 具有能量转换效率高、燃料适应范围广的特点, 而且基于其高温特性可以与燃气轮机(GT)组成混合动力系统, 提高能量转化效率^[2]。生物质气化-SOFC/GT 发电系统已成为一种新兴的高效能量转化系统。

气化床、气化介质和净化方式决定气化产品气的品质, 使 SOFC 的运行特性发生变化, 对生物质气化-SOFC/GT 发电系统的研究大多是针对这些方面开展的^[3]。

对不同气化方式的比较表明, 流化床气化室可以处理不同种类的生物质并获得满足用户要求的气化产品气^[4]。对不同气化介质的分析表明, 应用水作为气化介质时可产生更多的可燃成分(其中产氢率可高达 45%), 使 SOFC 的电压和功率密度提高, 系统的电效率达到 40%^[5]。根据净化后气化产品气的温度, 净化方式可分为常温净化和高温净化, 分析结果表明常温净化与中高温净化相比系统电效率和总效率会下降 4%~5%^[6-7]。欧洲 UNIQUE 项目提出了将生物质流化床气化过程和高温净化集成在一起的生物质气化处理技术, 应用这种气化技术

可以产生没有焦油和硫化物的气化产品气, 并且其运行温度与 SOFC 的温度相匹配, 是生物质高效气化发电技术的发展方向^[8]。生物质气化-SOFC/GT 发电系统是一个复杂的能量转换过程, 建立系统模型分析运行参数对系统的影响, 对于全面认识复杂动力系统中的能量转化过程具有重要意义。

本文采用模块化建模的方法建立生物质气化-SOFC/GT 发电系统数学模型, 其中气化设备为基于 UNIQUE 概念的包括生物质气化和净化过程的生物质处理设备, SOFC 为工作温度在 800℃ 左右的中温燃料电池。基于所建立数学模型首先分析系统的设计点特性参数, 然后分析运行参数的变化对整个系统运行特性的影响。

1 系统数学模型

1.1 气化室模型

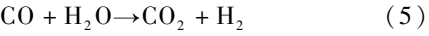
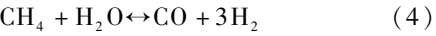
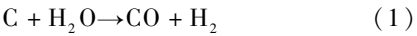
生物质进入气化室后首先进行高温热解, 热解产物再与气化介质进行一系列的化学反应, 产生生物质气化产品气。由于热解过程进行的速度快, 在气化室的热力学模型中可只考虑气化介质与热解产物的反应。本文参考前人的实验结果, 采用木屑高温热解气, 其气体成分 H₂、H₂O、CO₂、CO、CH₄ 的摩尔百分含量分别为 28.5%、3.5%、11%、38%、19%, 以萘(C₁₀H₈)作为焦油成分。每千克生物质气化后可产生 0.763 m³ 的生物质气化产品

收稿日期: 2013-10-28 修回日期: 2014-01-22

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2010CB227301)、辽宁省教育厅资助项目(L2012049)和辽宁省科技厅博士启动基金资助项目(20131088)

作者简介: 刘爱骥, 讲师, 主要从事先进动力系统及低排放燃烧技术研究, E-mail: liuaiguol19@gmail.com

气,0.05 kg 的焦油和 0.187 kg 焦炭。涉及的气化反应如下



对气化室的计算中采用了化学动力学模型^[9]。采用的模型为 Kunii 等提出的包括乳化区和泡相区的两相鼓泡床模型^[10],乳化区和泡相区之间通过气体交换系数 k_{be} 进行交换传质过程,同时气体以塞子流形式进行轴向扩散。气体交换系数为

$$k_{be}(z) = \frac{u_{mf}}{4} + \sqrt{\frac{4\xi_{mf}D_r u_b(z)}{\pi d_B(z)}} \tag{7}$$

其中
$$u_{mf} = [(27.2^2 + 0.0408Ar)^{0.5} - 27.2] \frac{\mu}{d_p \rho_{gas}} \tag{8}$$

$$u_b(z) = 0.71 \sqrt{gd_b} - (Q(z)/A_b - u_{mf}) \tag{9}$$

$$d_B(z) = 0.54 \frac{(Q(z)/A_b - u_{mf})^{0.4}}{g^{0.2}} \left(z + 4 \sqrt{\frac{A_b}{N_{or}}} \right)^{0.8} \tag{10}$$

式中 Ar ——阿基米德数
 A_b ——气化床横截面积
 $Q(z)$ ——气体体积流量
 ξ_{mf} ——气体最小流化体积分数
 D_r ——反应器直径 μ ——气体粘度
 d_p ——微粒直径 ρ_{gas} ——气相密度
 u_{mf} ——乳化相气体上升速度
 $u_b(z)$ ——鼓泡相气体上升速度
 $d_B(z)$ ——鼓泡直径

反应器内鼓泡相的体积百分含量为

$$\delta(z) = \frac{Q(z)/A_b - u_{mf}}{u_b(z)} \tag{11}$$

基于以上定义,反应器内稳态下的输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial z} (Q(z) C_{tot}) = \sum_i (R_{bi} + R_{ei}^s + R_{ei}^g) \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [(Q(z) - u_{mf} A_b) C_{bi}] =$$

$$k_{be} A_b (C_{bi} - C_{ei}) \frac{6}{d_b} \delta + \xi_{mf} A_b \delta \sum_{j,b} \gamma_{ij} R_{bj}^g \tag{13}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (u_{mf} A_b C_{ei}) = \frac{\dot{m}_c^{in}}{\rho_c} \left(\frac{\dot{m}_c^{in}}{\rho_c} + \frac{\dot{m}_B^{in}}{\rho_B} \right)^{-1} \tag{14}$$

式中 C_{bi} ——泡相中成分 i 的浓度
 C_{ei} ——乳化相中成分 i 的浓度
 j ——式(1)~(6)所示的反应

i ——包括焦油在内的热解气体成分
 γ_{ij} ——成分 i 在反应 j 中的反应系数,反应物为负、产物为正

$\dot{m}_c^{in}$ ——焦油进口质量流量

$\dot{m}_B^{in}$ ——生物质进口质量流量

ρ_c ——焦油密度 ρ_B ——生物质密度

式(1)~(6)的反应速率可参照文献[11]。

在基于 UNIQUE 概念的气化室中,流化床的气化产品气通过气化室的自由边界进入陶瓷烛式过滤器对高温产品气进行净化,同时可通过在过滤器的中空段内加入催化剂对产品气中的焦油进行重整。实验结果表明,在 800℃ 时,焦油可以完全被转化^[12]。在本文的模型中假设产品气中所有的微粒可在过滤器内被清除,焦油都被转化,忽略压力降。

1.2 SOFC 模型

SOFC 模型主要包括热力学模型和电化学模型。在热力学模型中忽略了电池内的压力变化,假设在设计和非设计工况下电池的压损率都是 1%,再基于质量守恒和能量守恒建立热力学模型。

质量守恒考虑了阳极通道和阴极通道。质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial \rho u}{\partial x} - vRM \frac{1}{h} \tag{15}$$

式中 ρ ——气体密度,kg/m³
 u ——气体速度,m/s
 v ——反应化学当量系数
 R ——反应率,mol/(s·m²)
 M ——气体的摩尔质量,kg/mol
 h ——通道高度,m

能量守恒考虑了阳极通道、阴极通道、电极-电解质和隔板。各个部分详细的能量守恒方程如下:
阳极通道

$$\frac{\partial \rho_{anod} e_{anod}}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho_{anod} u_{anod} C_{p,anod} T_{anod})}{\partial x} + \left[\sum_{i=H_2,H_2O} v_{i,III} R_{III} H_i + k_{anod,PEN} (T_{PEN} - T_{anod}) + k_{anod,INTC} (T_{INTC} - T_{anod}) + (-\Delta H)_I R_I \right] \frac{1}{h_{anod}} \tag{16}$$

阴极通道

$$\frac{\partial \rho_{cath} e_{cath}}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho_{cath} u_{cath} C_{p,cath} T_{cath})}{\partial x} + \left[\sum_{i=O_2} v_{i,III} R_{III} h_i + k_{cath,PEN} (T_{PEN} - T_{cath}) + k_{cath,INTC} (T_{INTC} - T_{cath}) \right] \frac{1}{h_{cath}} \tag{17}$$

电极-电解质

$$\frac{\partial T_{PEN}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{PEN} c_{p,PEN} \tau_{PEN}} \left[\lambda_{PEN} \tau_{PEN} \frac{\partial^2 T_{PEN}}{\partial x^2} - k_{anod,PEN} (T_{PEN} - T_{anod}) - k_{cath,PEN} (T_{PEN} - T_{cath}) - \sum_{i=H_2, H_2O} v_{i,III} R_{III} h_i - \sum_{i=O_2} v_{i,III} R_{III} h_i - IU + \frac{\sigma (T_{INTC}^4 - T_{PEN}^4)}{1/\xi_{INTC} + 1/\xi_{PEN} - 1} \right] \quad (18)$$

隔板

$$\frac{\partial T_{INTC}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{INTC} c_{p,INTC} \tau_{INTC}} \left[\lambda_{INTC} \tau_{INTC} \frac{\partial^2 T_{INTC}}{\partial x^2} - k_{anod,INTC} (T_{INTC} - T_{anod}) - k_{cath,INTC} (T_{INTC} - T_{cath}) - \frac{\sigma (T_{INTC}^4 - T_{PEN}^4)}{1/\varepsilon_{INTC} + 1/\varepsilon_{PEN} - 1} \right] \quad (19)$$

式中 e ——内能, kJ
 c_p ——气体的比热容, kJ/(kg·K)
 T ——温度, K
 H ——生成焓, kJ/kmol
 k ——通道传热系数, kJ/(m²·s·K)
 ΔH ——反应焓变, kJ
 τ ——板厚, m
 λ ——导热系数, kW/(m·K)
 I ——当地电流密度, A/m²
 U ——工作电压, V
 σ ——Stefan - Boltzmann 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)
 ξ ——辐射黑度

下标 PEN、INTC、I、III 分别为电极-电解质、隔板、shift 反应和电化学反应。

燃料电池的电化学模型描述的是电池的工作电压、电流密度与电阻之间的函数关系。电流密度与电压之间的关系可以表示为

$$i' = \frac{E - V}{R_{anod} + R_{cath} + R_{ir}} \quad (20)$$

式中 E ——可逆电动势

将模型计算结果与实验测试结果进行了对比, 在 SOFC 工作温度为 1 100 K 时误差最小, 可满足对系统特性分析的要求^[13]。

燃料电池的输出功和效率为

$$W_{FC} = V I A_{FC} \quad (21)$$

$$\eta_{FC} = \frac{W_{FC}}{m_f Q_{LHV}} \quad (22)$$

式中 A_{FC} ——电池的有效面积, m²
 m_f ——进入燃料电池的燃料流量, kg/s
 Q_{LHV} ——燃料的低热值, J/kg

1.3 其他设备模型

燃气轮机的建模是以 Capstone 公司的 C30 微

型燃气轮机为基础的。设计工况下在空气流量 0.31 kg/s, 增压比 3.2, 透平入口温度 1 173 K 时可输出功率 30 kW, 效率为 26%。燃气轮机的建模以厂家提供的压气机和透平的通用特性曲线为基础, 非设计工况下燃气轮机的运行特性是沿着稳态特性曲线逐渐变化的。

在换热器模型中将动量方程简化, 假设设计工况下空气侧和燃气侧的压损率分别为 3% 和 6%, 在部分负荷下压损为流量和密度的函数。由能量和质量守恒原理, 应用集总参数法, 以热气流出口压力和出口焓、冷气流出口压力和出口焓为状态量进行计算。关于换热器的求解计算过程可参照文献[14]。

在燃烧室中, 可以将电池尾气中的可燃成分和气化室的焦炭氧化提高燃气温度, 假设反应过程是绝热的, 燃烧室的出口温度根据能量守恒来求解。

2 结果和讨论

2.1 设计点特性

生物质气化- SOFC/MGT 发电系统的流程图如图 1 所示, 整个系统由生物质气化产品气发生子系统、发电子系统和热回收子系统组成。在生物质气化产品气发生子系统中, 生物质与经过加热的水蒸汽以及在燃烧反应器内蓄热后的床料颗粒剧烈混合, 在流化床内发生强烈的热量和质量交换, 生物质进行热解产生气态热解产物和半焦, 热解气体产物和半焦与水蒸汽发生反应生成 H₂、CO 等气体, 未完全反应的半焦以及放热后的床料颗粒回到燃烧室和空气进行反应, 产生系统中所需的热量。含有污染物的气化产品气进入烛式催化过滤器, 在过滤器内焦油可以被转化为低分子量碳氢化合物、微粒可以被过滤, 产生可满足 SOFC 要求的生物质气化产品气。清洁后的气化产品气进入 SOFC 产生电功, 含有可燃成分的阳极尾气进入燃烧室进行燃烧反应, 燃烧室产生的高温工质通过换热器对燃气轮机压气

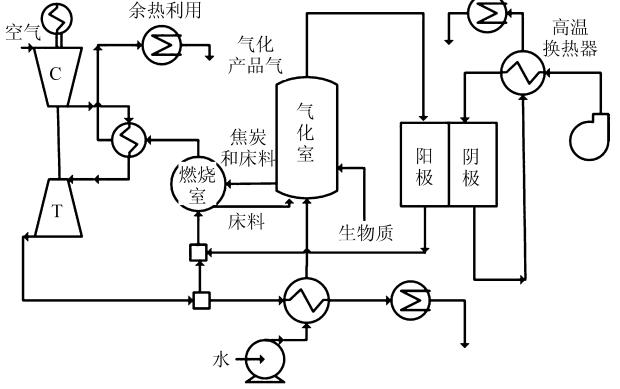


图 1 系统流程图

Fig. 1 Flow sheet of hybrid system

机出口空气进行加热,利用燃气轮机对系统热进行进一步的利用。燃气轮机的尾气一部分在燃烧室内参加燃烧,另一部分用于对气化介质水的加热。SOFC 阴极尾气通过换热器对进入阴极的空气进行加热,以满足 SOFC 对入口温度的要求。

气化室的工作特性及气化产品气的成分与进入气化室的生物质的含水率、气化过程中水碳比有关,气化室的工作特性直接影响 SOFC 和 MGT 的工作特性,本文以生物质含水率 20% 为气化室设计点,与其他工况下的运行特性与设计点特性进行比较。系统的性能通过输出功率和能量转化效率来体现,系统的输出功率为 SOFC 和 MGT 输出功率的和,能量转化效率为系统输出功率与生物质提供能量的比值,定义式为

$$W = W_{FC} + W_{MGT} - W_{com} \tag{23}$$

$$\eta = \frac{W}{m_{bio} Q_{L,bio}} \tag{24}$$

式中 W_{MGT} ——MGT 输出功率,kW
 W_{com} ——空压机耗功率,kW
 m_{bio} ——输入生物质的流率,kg/s
 $Q_{L,bio}$ ——生物质的低位热值,kJ/kg

根据以上的定义,生物质气化-SOFC/MGT 发电系统设计点参数如表 1 所示。

表 1 发电系统设计点参数		
Tab.1 Design point parameters of system		
	参数	数值
气化室	工作温度/K	1 100
	工作压力/MPa	0.1
	气体体积分数/%	44(H ₂),18(CO),6(CH ₄) 17(H ₂ O),15(CO ₂)
	产品气流率/(mol·s ⁻¹)	2.92
SOFC	电流密度/(A·m ⁻²)	2 620
	工作电压/V	0.64
	燃料利用率	0.75
	输出功率/kW	170
MGT	工作温度/K	1 100
	透平入口温度/K	1 173
	空气流率/(mol·s ⁻¹)	9.45
	增压比	3.2
发电系统	输出功率/kW	30
	输出功率/kW	200
	效率/%	47.1

2.2 影响因素分析

2.2.1 生物质含水率的影响

生物质的含水率会影响到气化室的运行,含水率越高需要越多的生物质用于气化室的加热,同时

气化产品气的成分也会发生变化,影响整个系统的运行性能。对生物质含水率在 0% ~ 40% 内变化时系统性能的变化进行了计算分析,在计算中保持气化室的工作温度不变、通过调节进入阴极的空气流量保持 SOFC 的工作温度及燃料利用率不变。

生物质含水率变化时经过高温净化的气化产品气的成分变化如图 2 所示。随着生物质中含水率的增加,气化产品气中可燃成分的体积分数降低,气体热值下降。将热解气体成分与经过高温净化后的气体成分相比较后还可以发现,产品气中 H₂的体积分数由 29.5% 增加到了 44%,这是由于热解后的焦炭发生式(1)所示的气化反应,式(4)所示的水汽转化反应和式(5)、(6)所示的水蒸气重整反应所导致的。

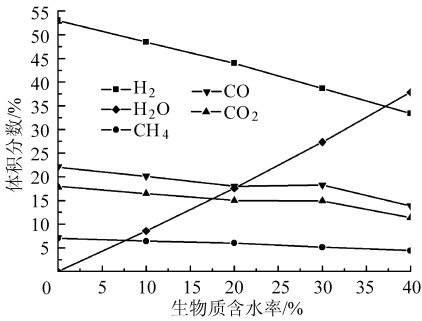


图 2 不同含水率时气体成分

Fig.2 Syngas composition with different steam content

SOFC 输出功率和 MGT 输出功率的变化如图 3 所示。随着生物质中含水率的增加 SOFC 的输出功率下降,这是由于随着含水率的增加,气化产品气中 CO、H₂和 CH₄降低而 CO₂的含量增加导致产品气的热值降低而使电流下降,同时由于 CO₂等惰性气体的增加导致电池极化损失增加使 SOFC 的输出电压降低,最终导致 SOFC 的输出功率下降。由于 SOFC 中燃料利用率及气化炉运行温度保持不变,燃烧室温度变化不大导致 MGT 输出功率变化不大。

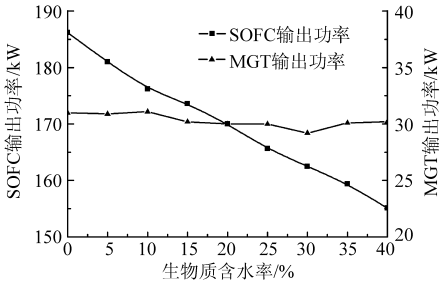


图 3 不同含水率时输出功率

Fig.3 Output power with different steam content

SOFC 和系统的效率变化如图 4 所示。含水率从 0% 增加到 40% 的过程中,SOFC 的效率从 38% 降低到 36.7%,整个系统的效率从 50.8% 降低到 44%。随着生物质中含水率的增加,气化产品气的热值下降,导致 SOFC 的输出功下降,但为维持

SOFC 的工作温度需增加进入 SOFC 的燃料流量,因此 SOFC 的效率变化不大。系统效率下降明显,是由于生物质中含水率增加用于气化炉加热用的生物质质量增加,及生物质气化产品气热值下降所导致的。

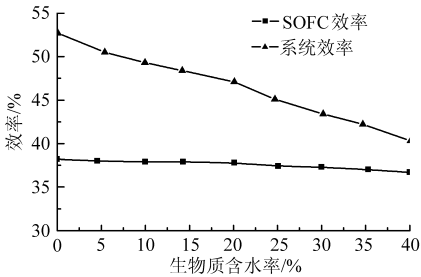


图 4 不同含水率时效率变化

Fig.4 Efficiency with different steam content

2.2.2 SOFC 燃料利用率的影响

在燃料电池内考虑到燃料电池的工作特性和安全性,燃料不能被全部利用,电池内反应掉的燃料量与进入燃料量的比被称为燃料利用率。燃料利用率会影响到 SOFC 的输出功及工作温度,同时由于 SOFC 尾气进入催化燃烧室,产生用于燃气轮机的高温工质和加热气化室的床料,而燃气轮机的尾气用于加热气化室的用水,因此燃料利用率不仅影响 SOFC 和 MGT 的输出功还会对气化室的运行产生影响。对 SOFC 燃料利用率在 0.6~0.85 内变化时系统性能的变化进行了分析,在计算中保持气化室的运行特性不变。进入 SOFC 的空气在作为氧化剂的同时也对 SOFC 进行冷却,燃料利用率变化时需要对 SOFC 阴极入口空气量进行调节保证 SOFC 工作温度不变。

SOFC 输出功率和系统输出功率随燃料利用率的变化如图 5 所示。随着燃料利用率的增加 SOFC 的电流密度增加,温度升高。为维持 SOFC 的工作温度需要加入更多的空气作为冷却剂,随着空气流量的增加 SOFC 工作电压提高,最终导致 SOFC 的输出功率随着燃料利用率的增加而增加。SOFC 阳极尾气中可燃成分的浓度会随着燃料利用率的增加而降低,导致燃烧室温度降低,最终使 MGT 涡轮入口温度和气化室床料温度下降,导致 MGT 输出功率减少。随

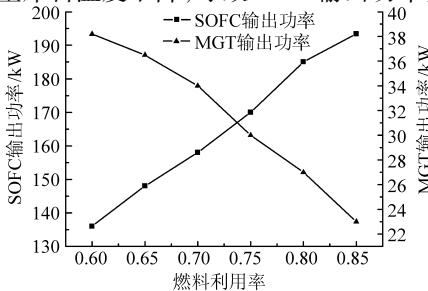


图 5 不同燃料利用率时输出功率

Fig.5 Output power with different fuel utilization

着 SOFC 阴极进口空气流量的增加,空气压缩机耗功量增加。综合以上结果,整个发电系统的输出功率随燃料利用率的增加而增加,但增加的幅度不明显。

图 6 所示为 SOFC 和系统效率随燃料利用率的变化。随燃料利用率的增加,SOFC 的效率会明显增加。燃料利用率从 0.6 增加到 0.85 时 SOFC 的效率从 30.24% 增加到 42.8%,增加了近 12%,但由于 MGT 输出功率的减少、气化室燃料消耗量及空压机耗功量的增加导致系统效率变化没有 SOFC 那样明显。从图 6 的计算结果还可以看出,由于 SOFC 的能量转化效率高,为提高系统的能量转化效率应将更多的燃料在 SOFC 内转化。

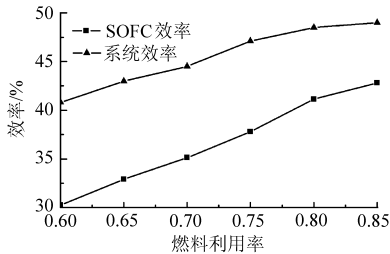


图 6 不同燃料利用率时效率

Fig.6 Efficiency with different fuel utilization

SOFC 为发电系统中主要的能量转化部件,同时也是重要的热部件,SOFC 的工作温度对系统的性能有重要影响,但由于所研究系统结构的特点 SOFC 的工作温度与阴极入口温度形成了耦合,导致对温度的控制变得复杂。为改善系统的可控性,应对系统结构进行进一步的改进。

3 结束语

建立了一种包括生物质流化床气化、高温净化、SOFC 和 MGT 的发电系统,并分析在不同工况下的系统特性。基于 UNIQUE 概念建立了生物质气化-净化化学动力学模型,考虑热力学特性和电化学特性建立了 SOFC 模型。对系统性能的计算结果表明,与传统的生物质应用方式相比该发电系统具有较高的能量转化效率,在 200 kW 规模生物质含水率 20% 时电效率可达到 47%。生物质中含水率增加时气化产品气的成分会发生变化,导致 SOFC 的输出功率和效率明显的下降。同时,随着含水率的增加为维持流化床的反应温度需加入更多的燃料,导致整个系统的效率下降。SOFC 燃料利用率增加时,SOFC 的输出功率增加,MGT 输出功率下降,系统效率增加。在生物质气化-SOFC/MGT 发电系统中,在满足 SOFC 工作条件的前提下应将更多的燃料在 SOFC 中转化以提高系统效率。对系统应进行深入的能量应用分析,提高能量利用率,减少系统内的温度耦合,改善系统的可控性。

参 考 文 献

- 1 International Energy Agency. Renewable in global energy supply: an IEA fact sheet[R]. OECD, 2007.
- 2 Song T W, Sohn J L, Kim J H, et al. Performance analysis of a tubular solid oxide fuel cell/micro gas turbine hybrid power system based on a quasi-two dimensional model[J]. Journal of Power Sources, 2005, 142(1): 30–42.
- 3 Hofmann P, Panopoulos K D, Fryda L E, et al. Integrating biomass gasification with solid oxide fuel cells: effect of real product gas tars, fluctuations and particulates on Ni-GDC anode[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(11): 2834–2844.
- 4 Abuadala A, Dincer I. A review on biomass-based hydrogen production and potential applications[J]. International Journal of Energy Research, 2012, 36(4): 415–455.
- 5 Colpan C O, Hamdullahpur F, Dincer I, et al. Effect of gasification agent on the performance of solid oxide fuel cell and biomass gasification systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35: 5001–5009.
- 6 Aravind P V, Woudstra T, Woudstra N, et al. Thermodynamic evaluation of small-scale systems with biomass gasifiers, solid oxide fuel cells with Ni/GDC anodes and gas turbines[J]. Journal of Power Sources, 2009, 190(2): 461–475.
- 7 Omosun O, Bauen A, Brandon N P, et al. Modelling system efficiencies and costs of two biomass-fuelled SOFC systems[J]. Journal of Power Sources, 2004, 131(1–2): 96–106.
- 8 Stemmler M, Tamburro A, Müller M. Laboratory investigations on chemical hot gas cleaning of inorganic trace elements for the “UNIQUE” process[J]. Fuel, 2013, 108: 31–36.
- 9 郭飞强, 董玉平, 景元琢, 等. 生物质流化床气化反应过程数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 127–130.
Guo Feiqiang, Dong Yuping, Jing Yuanzhuo, et al. Numerical simulation of biomass gasification in fluidized bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 127–130. (in Chinese)
- 10 Kunii D, Levenspiel O. Fluidized reactor models. 1. For bubbling beds of fine, intermediate, and large particles. 2. For the lean phase: freeboard and fast fluidization[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1990, 29(7): 1226–1234.
- 11 Di Carlo A, Borello D, Bocci E. Process simulation of a hybrid SOFC/mGT and enriched air/steam fluidized bed gasifier power plant[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(14): 5857–5874.
- 12 Rapagnà S, Gallucci K, Di Marcello M, et al. First Al_2O_3 based catalytic filter candles operating in the fluidized bed gasifier freeboard[J]. Fuel, 2012, 97: 718–724.
- 13 李杨. 高温燃料电池-燃气轮机混合动力系统变工况性能分析与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
Li Yang. Off-design performance analysis and experimental study of high temperature fuel cells/gas turbine hybrid system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- 14 Zhang H S, Weng S L, Su M. Dynamic modeling and simulation of distributed parameter heat exchanger[C] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air (GT2005), 2005, 3: 327–333.

Performance of Biomass – Fuel Cell/Gas Turbine Power Plant

Liu Aiguo¹ Wang Bing¹ Weng Yiwu² Zeng Wen¹ Chen Baodong¹

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2. Key Laboratory of Machinery and Power Engineering, Ministry of Education,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The aim of this work is to numerically analyze the performance of a integrated power plant, which is composed of a biomass gasifier, a fuel cell and a gas turbine. The biomass gasifier is a steam fluidized bed system based on the UNIQUE concept. The chemical kinetics model is applied for the analysis of gas composition production, and the naphthalene is chosen as the tar composition. Effects of different moisture contents in the biomass and fuel utilization on the system performance are studied. The results show that, the biomass gasification – SOFC/MGT power plant can obtain an efficiency above 47% at the 200 kW with the 20% of biomass steam content, which is higher than other biomass power plant. The increase of steam content in the biomass can decrease the system power and efficiency. The system power changes insignificantly with the increase of fuel utilization, while the system efficiency can increase significantly.

Key words: Biomass Solid oxide Fuel cell Gas turbine Hybrid system