

固体氧化物燃料电池—燃气轮机混合动力系统的热力学分析

李 杨, 翁 一武, 赵振可

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 以底层固体氧化物燃料电池—燃气轮机混合动力系统 (SOFC-GT) 为研究对象, 建立了模块化的仿真模型, 并利用试验数据对仿真模型进行了验证。利用仿真模型研究了不同煤气化及生物质气为燃料时系统及主要部件的热力学性能, 分析了燃料成分对系统性能的影响。结果表明, 燃料中 CH_4 及 CO 的含量对系统性能的影响较大。虽然 SOFC 的效率远高于常规热机, 但其仍是系统中烟损最大的部件。

关 键 词: 固体氧化物燃料电池; 生物质气; 燃料电池—燃气轮机混合动力循环; 合成气

中图分类号: TM911.4 文献标识码: A

引 言

高温固体氧化物燃料电池 (SOFC) 是一种能直接将燃料的化学能通过电化学反应转化为电能的最有效的装置, 近年来在清洁能源、高效分布式发电领域中越来越受到人们的重视^[1]。SOFC 高品位的废热可以使其与燃气轮机组成混合动力系统 (SOFC-GT), 从而进一步提高系统的发电效率。与常规发电系统或其它燃料电池相比, SOFC-GT 的一个突出的优点就是燃料选择的灵活性。一些研究机构的实验结果表明, SOFC 对燃料中的杂质和燃料组分的波动表现出很好的忍耐性, 这就为 SOFC-GT 系统使用诸如生物质气, 焦炉煤气, 高炉尾气, 瓦斯及煤气等各种燃料提供了可能性, 而这些气体在其它类型燃料电池中是不可以直接利用的^[2]。

本研究建立了模块化高温燃料电池—燃气轮机混合动力系统主要部件的数学模型, 利用热力学第一定律和第二定律讨论了不同燃料 SOFC-GT 混合动力系统 (底层循环) 的性能, 并分析了系统中主要

部件的烟损失, 讨论了燃料成分对系统及主要部件效率的影响。

1 SOFC-GT 系统

SOFC-GT 混合动力系统主要有两种组合形式:

(1) 利用加压燃料电池替代常规燃气轮机中燃烧室的顶层混合动力循环; (2) 常压燃料电池通过换热器间接加热燃气轮机燃气的底层混合动力循环。相对顶层混合动力系统, 底层混合动力系统的结构相对简单, 便于控制, 容易启动, 是目前比较可靠的联合循环方式^[3]。

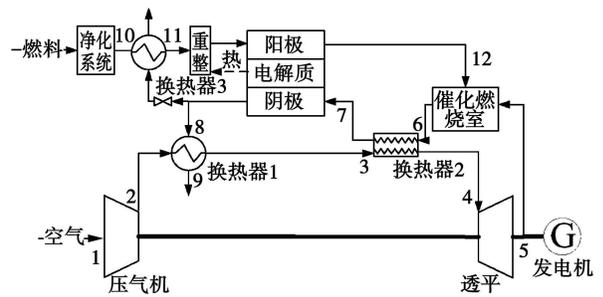


图 1 SOFC-GT 底层混合动力系统

图 1 为所研究的底层 SOFC-GT 混合动力系统 (相关数字为节点号)。燃料经过净化后通过换热器 3 与燃料电池阴极部分排气换热, 经重整器进行燃料重整后进入燃料电池阳极; 重整器所需的热量由燃料电池提供; 燃料电池阳极排气和燃气轮机的高温排气共同进入催化燃烧室催化燃烧, 燃烧室高温排气通过换热器 2 加热燃气轮机的燃气后进入燃料电池的阴极, 阴极排气经过换热器 1 换热后排入大气。空气经

收稿日期: 2009-12-04 修订日期: 2010-04-09

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划基金资助项目 (2010CB227301)

作者简介: 李 杨 (1982-), 男, 安徽淮北市人, 上海交通大学博士研究生。

过压气机压缩和换热器 1、2 加热后成为高温高压燃气进入涡轮膨胀做功, 部分膨胀功用于驱动压气机, 剩余膨胀功驱动发电机输出电能。

2 系统模型

2.1 重整器及 SOFC 电堆模型

燃料经过重整和 SOFC 电堆发生反应, 所产生的总热量和电功率由多个反应决定:



SOFC 的电化学反应模型为:

$$V(i) = E_{\text{eq}} - \eta_{\text{Act}} - \eta_{\text{Ohm}} - \eta_{\text{Conc}} \quad (5)$$

其中:

$$E_{\text{eq}} = E^\ominus + \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{\text{O}_2} \cdot p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{ohm}} = (\rho_e l + \rho_c l + \rho_a l + R_{\text{cons}}) i \quad (7)$$

$$\eta_{\text{Conc}}^{\text{a}} = -\frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_s} \right) + \frac{RT}{2F} \left(1 + \frac{p_{\text{H}_2}^{\text{a}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{a}}} \frac{i}{i_s} \right) \quad (8)$$

$$\eta_{\text{Conc}}^{\text{c}} = -\frac{RT}{4F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_s} \right) \quad (9)$$

$$P = V(i) i \quad (10)$$

式中: $V(i)$ —输出电压; E_{eq} —平衡电压; η_{Act} —活化极化; η_{Ohm} —欧姆极化; η_{Conc} —浓差极化; E^\ominus —标准电池电势; P —输出功率密度; i —电流密度; ρ_e 、 ρ_c 、 ρ_a —电解质、阴极和阳极的电阻率; l 、 l_c 、 l_a —电解质、阴极和阳极的厚度; R_{cons} —接触电阻。

2.2 燃气轮机模型

压气机的耗功:

$$N_c = 4.18 C_{\text{R}} G_c T_q (\epsilon^{\frac{K-1}{K}} - 1) / \eta_c \quad (11)$$

式中: T_q —压气机进口温度; ϵ —压气机的压比, $\frac{K-1}{K} = 0.286$ 。

涡轮的膨胀功:

$$N_T = 4.18 C_{\text{R}} G_T T_3 \left[1 - \frac{1}{\delta^{\frac{K-1}{K}}} \right] \eta_T \quad (12)$$

式中: T_3 —涡轮进口温度; δ —涡轮的膨胀比, $\frac{K_R-1}{K_R} = 0.254$ 。

设传动轴的传动效率为 η_m , 燃气轮机输出功率为:

$$N_e = (N_T - N_c) \eta_m \quad (13)$$

2.3 催化燃烧室模型

在标准状态下, 催化燃烧室入口焓值 Δh 为:

$$\Delta h = \sum_i n_i \int_{T_0}^{T_{\text{std}}} c_{p,i} dT + \sum_j n_j \int_{T_0}^{T_{\text{std}}} c_{p,j} dT \quad (14)$$

式中: T_{std} —标准温度; T_0 —催化燃烧室入口气体温度; c_p —气体的比热容; n —气体各组分的体积百分比; i 、 j —SOFC 阳极和阴极排气的成分。

燃烧室气体温度 T_{ou} 可计算为:

$$(\Delta h + Q_{\text{L}_2}) \cdot \epsilon = \sum_m n_m \int_{T_{\text{std}}}^{T_{\text{ou}}} c_{p,m} dT \quad (15)$$

式中: ϵ —燃烧室的绝热效率; m —燃烧室出口的各种气体成分。

2.4 换热器模型

考虑换热器的质量、动量和能量平衡, 以热气流出口温度 T_1 , 流量 h_2 , 冷气流出口温度 T_2 和流量 h_4 为状态量, 建立数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{dh_2}{dt} = \frac{(m_2 h_2 - m_1 h_1 - q_h)}{V_{h1}(1 - \phi_2 R_2)} \\ \frac{dh_4}{dt} = \frac{(m_1 h_1 - m_2 h_2 + q_h) + (m_2 - m_1)(h_2 - h_4 R_2 / \phi_2)}{V_{h1}(\rho_2 - R_2 \rho_2 / \phi_2)} \\ \frac{dq_h}{dt} = \frac{(m_4 h_4 - m_3 h_3 - q_c)}{V_{c1}(1 - \phi_4 / R_4)} \\ \frac{dq_c}{dt} = \frac{(m_3 h_3 - m_4 h_4 + q_c) + (m_4 - m_3)(h_4 - h_3 R_4 / \phi_4)}{V_{c1}(\rho_4 - R_4 \rho_4 / \phi_4)} \end{cases} \quad (16)$$

式中: m_1 、 m_2 —热气流的入口和出口流量; m_3 、 m_4 —冷气流的入口和出口流量; q_h 、 q_c —流体与换热器换热版之间的换热量; V_{h1} 、 V_{c1} —换热器热侧和冷测的容积。

$$\begin{cases} q_h = \alpha_h A_h \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_m \right) \\ q_c = \alpha_c A_c \left(T_m - \frac{T_3 + T_4}{2} \right) \\ \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{C_{\text{pm}} M_m} (q_h - q_c) \end{cases} \quad (17)$$

式中: T_1 、 T_2 —热气流的入口和出口温度; T_3 、 T_4 —冷气流的入口和出口温度; α_h 、 α_c —热、冷气流的对热交换系数; A_h 、 A_c —热侧和冷侧的有效换热面积; T_m —换热器的平均换热温度; C_{pm} 、 M_m —换热器换热板的比热和质量。

2.5 系统效率

进入系统的能量除一部分损失之外, 其余转化为 SOFC 的燃气轮机的发电量, 还有一部分余热可以进一步回收利用^[4]。系统的发电效率定义为:

$$\eta_e = \frac{\text{SOFC输出电功率} + \text{GT输出电功率}}{\text{输入燃料低位热值 (LHV)}}$$

系统总能量利用率定义为:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\text{SOFC输出电功率} + \text{GT输出电功率} + \text{余热回收量}}{\text{输入燃料低位热值 (LHV)}}$$

2.6 火用平衡方程及火用效率

对于热力系统内出现不可逆因素时的火用方程为:

(流入设备的物质火用 + 热量火用 + 输入功) - (流出设备的物质火用 + 与输出功量相当的机械功) = 做功能力的损失

在进行系统热力学第二定律分析时以火用效率

η_{ex} 来评定设备的热力学完善程度:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{获得的效果}}{\text{供给能量的最大做功能力}}$$

针对系统中不同类型的部件和设备,评价火用效率

的具体表达方式为:

(1) 功输出设备, 如涡轮和燃料电池:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{实际输出功量} + \text{实际输出热量}}{\text{设备进出口的火用值差}}$$

(2) 升压或耗功设备:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{流出设备的工质火用}}{\text{流入设备的工质火用} + \text{所消耗设备的机械功}}$$

(3) 无功量输入或输出的设备, 如换热器, 重整器等:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{流出设备的工质火用}}{\text{流入设备的工质火用} + \text{热量火用}}$$

3 模型验证

由于燃气轮机、换热器及燃烧室均为常规设备, 数学模型成熟, 可信度较高。文中所描述系统中主要的不确定对象为燃料电池数学模型。将 SOFC 模型仿真计算结果分别与上海交通大学燃料电池研究所研制的高温固体氧化物性能测试数据及 2000 年西门子在荷兰 100 kW 常压 SOFC 示范项目的部分实验数据进行了对比, 如图 2 和图 3 所示。其中, 西门子示范项目电堆工作温度为 950 °C。从实验结果和仿真数据的比较分析可以看出: 在电池工作温度较高 (高于 800 °C) 的时候, 仿真结果和实验结果误

差较小; 800 °C 时最大误差为 1.12%; 900 °C 时最大误差为 0.64%; 当电池工作温度为 650 °C 时, 实验结果与仿真结果误差较大, 最大误差高于 60%。在与西门子示范工程项目的部分实验数据对比时, 实验结果与仿真结果吻合, 验证了计算模型的可信性。

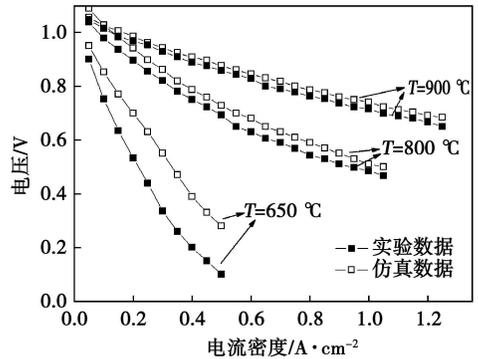


图 2 仿真结果与上海交大测试数据的对比

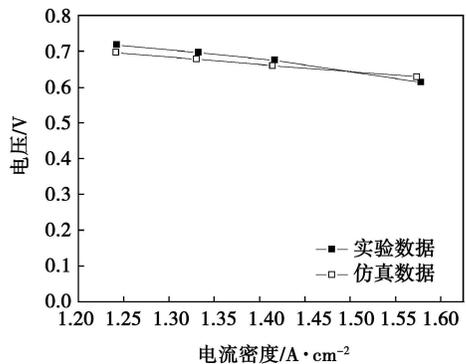


图 3 仿真结果与西门子实验数据的对比

4 仿真结果及分析

应用所描述的数学模型, 在 Matlab/Simu link 的平台下进行编写程序, 设定 SOFC 工作温度为 950 °C, 燃料利用率为 80%, 燃料经重整器重整后预热至 700 °C, 通过对节点 4 温度的迭代进行系统的计算如表 3 所示。本研究以生物质气, 焦炉煤气, 高炉尾气和瓦斯为燃料对 SOFC-GT 混合动力系统进行热力分析, 燃料成分的体积百分比如表 1 所示。

表 1 燃料成分及热值

	H ₂ 含量 / %	CO 含量 / %	CH ₄ 含量 / %	CO ₂ 含量 / %	N ₂ 含量 / %	其它成分 / %	LHV/MJ·m ⁻³
焦炉煤气	63.1	8.6	19.2	2.6	3.9	2.6	16.658
高炉尾气	1	30.2	0.8	7.8	59.2	1	5.46
秸秆生物质气	8.5	17.6	1.36	14	56.84	1.7	3.66
瓦斯	—	—	90.03	2.34	5.54	2.09	30.443

系统主要部件输入参数以美国加利福尼亚大学国立燃料电池研究中心 220 kW SOFC—GT 混合动力系统示范项目部件参数为基础, 如表 2 所示^[9]。

表 3 为 SOFC-GT 发电系统各节点的计算结果, 节点标号如图 1 所示。表 4 为以不同气体为燃料时, 混合动力系统的总体性能分析。从表 3 和表 4 计算结果可以看出, 合成气及生物质气等热值较低的燃料可以作为 SOFC-GT 混合动力系统的燃料, 在稳定工况及燃料电池燃料利用率确定的情况下, 燃料流量随不同燃料的热值成正比。由于燃料中 CH₄ 及 CO 重整反应需要的热量由 SOFC 提供, 所以不同燃料中燃料成分的不同影响着燃料电池排气温度, 进一步会对系统的性能造成影响。在本研究算例中, 由于燃料中 CH₄ 及 CO 含量的不同, 以高炉尾气和秸秆生物质气为燃料时, 系统中燃料电池排气的温度相近, 高于以焦炉煤气和瓦斯为燃料时系统中 SOFC 的排气温度。同样的原因, 以高炉尾气和秸

秆生物质气为燃料时透平入口温度 T₄ 也高于以焦炉煤气和瓦斯为燃料时的透平入口温度, 其燃气轮机输出功占系统总输出功的比例也高于以焦炉煤气和瓦斯为燃料的混合动力系统。

表 2 SOFC-GT 混合动力系统主要部件参数

部件名称		额定参数
燃气轮机	额定流量 / kg·s ⁻¹	0.495
	压比	3
	压气机效率 / %	79
	透平效率 / %	85
燃料电池	电池个数 / 个	1152
	燃料利用率 / %	82
	额定工作温度 / °C	950
换热器效率 / %		90
电流转换器效率 / %		95

表 3 混合动力系统各节点工质工况

系统节点	温度 / K				总焓 / kJ·s ⁻¹			
	焦炉煤气	高炉尾气	秸秆生物质气	瓦斯	焦炉煤气	高炉尾气	秸秆生物质气	瓦斯
1	298	298	298	298	146.9	146.9	146.9	146.9
2	437.3	437.3	437.3	437.3	218.4	218.4	218.4	218.4
3	988.1	1027	1032	888.9	518.5	540.8	543.6	462.4
4	1221	1255	1256	1113	653.8	674	674.6	590.4
5	929.4	955.5	956.8	847.8	485.2	500	500.7	439.4
6	1244	1272	1271	1137	701.2	697.9	698.7	605.7
7	1014	1052	1056	913.7	560.2	566.3	569.8	477.3
8	1044	1072	1071	937.4	578.3	578.1	578.7	490.7
9	498	500.7	500.6	487.3	262.7	256.6	257	245
10	298	298	298	298	7.42	2.968	3.265	0.2968
11	1023	1023	1023	1023	27.2	10.88	11.97	1.088
12	1044	1072	1071	937.4	27.8	11.45	12.58	0.9893

表 4 稳态性能分析比较

	焦炉 煤气	高炉 尾气	秸秆生 物质气	瓦斯
燃料流量 / kg·s ⁻¹	0.025	0.01	0.013	0.001
低热值流量 / kJ·s ⁻¹	485.26	420.17	441.6	372.2
SOFC 输出功率 / kW	180.2	167.1	168.3	174.9
燃气轮机输出功率 / kW	41.08	43.41	43.65	33.83
系统输出功率 / kW	221.28	210.51	211.95	208.73
排气温度 / K	498	500.7	500.6	487.3
系统发电效率 / %	45.6	50.1	48	56
系统能量利用率 / %	69.2	74.8	70.68	80.6

5 热力系统焓分析

应用热力学第二定律对 SOFC-GT 混合动力系统进行焓分析, 考虑到有关示范项目中 SOFC 电堆均采用内部重整的方式, 因此在分析中, 将重整器与 SOFC 视作一个整体。图 4 为不同燃料混合动力系统中个主要部件的焓损。从仿真结果可以看出系统的焓损主要来自于燃料电池, 原因:

(1) 大部分的燃料 (82%) 均在燃料电池反应

产生电流导致了绝大部分的燃料化学焓的损失发生在 SOFC电堆;

(2) 由于燃料重整需要大量的热量, 燃料电池和燃料重整器之间的热量传递及燃料重整反应损失了部分工质的热量焓和化学焓;

(3) 燃料电池是系统中除催化燃烧室外工作温度最高的部件, 所以其辐射热量焓的损失较大。

温度较低, 排气热量焓损失较少; 当系统使用以焦炉煤气等以 H_2 为主要成分的燃料时, 系统排气温度较高, 排气热量焓损失较多。与燃料电池电堆焓损不同的是, 系统排气的焓损可以通过热电联供等方式加以利用, 从而使系统的能量利用率得到进一步的提高^[9]。

6 结 论

以 220 kW 燃料电池—燃气轮机混合动力系统为研究对象, 在 Matlab/Simulink 平台下建立了仿真模型, 研究了不同燃料成分对混合动力系统性能的影响, 分析了系统主要部件的焓损, 得出结论:

(1) 建立的燃料电池模型的仿真结果与上海交通大学燃料电池研究所研制的高温固体氧化物性能测试数据以及 2000 年西门子在荷兰 100 kW 常压 SOFC 示范项目的部分实验数据吻合度较高, 系统模型可信。

(2) 各种合成气或者低热值生物质气可以作为 SOFC-GT 混合动力系统的燃料。

(3) 燃料中甲烷及 CO 的含量对于混合动力系统的热效率及焓效率均有较大的影响, 甲烷含量越高, 系统中燃气轮机的输出功占系统总输出功的比例越小, 系统的热效率也越高。

(4) 在 SOFC-GT 系统中, SOFC 电堆及系统排气的焓损最大。

参考文献:

- [1] 陈启梅, 翁一武, 翁史烈, 等. 高温燃料电池与燃气轮机相结合的混合发电系统 [J]. 热能动力工程, 2005 20(2): 111—115
- [2] SINGHAI SUBHASH C H. High temperature solid oxide fuel cells fundamentals design and applications [M]. New York: Elsevier Advanced Technology, 2003.
- [3] SUWANWARANGKUL R, CROISET E, ENTICHEV E. Experimental and modeling study of solid oxide fuel cell operating with syngas fuel [J]. Journal of Power Sources, 2006 161: 308—322
- [4] 张会生, 刘永文, 苏 明, 等. 高温燃料电池—燃气轮机混合发电系统性能分析 [J]. 热能动力工程, 2002 17(2): 118—121
- [5] FABIS T R, SHOCKING L A. Operating manual for ARPA/SCE 27 kW e A SE SOFC generator system [R]. Pennsylvania Westinghouse SIC, 1995
- [6] 张会生, 苏 明, 翁史烈. 燃气轮机与混合装置的焓性能比较 [J]. 动力工程, 2005 25(4): 599—602

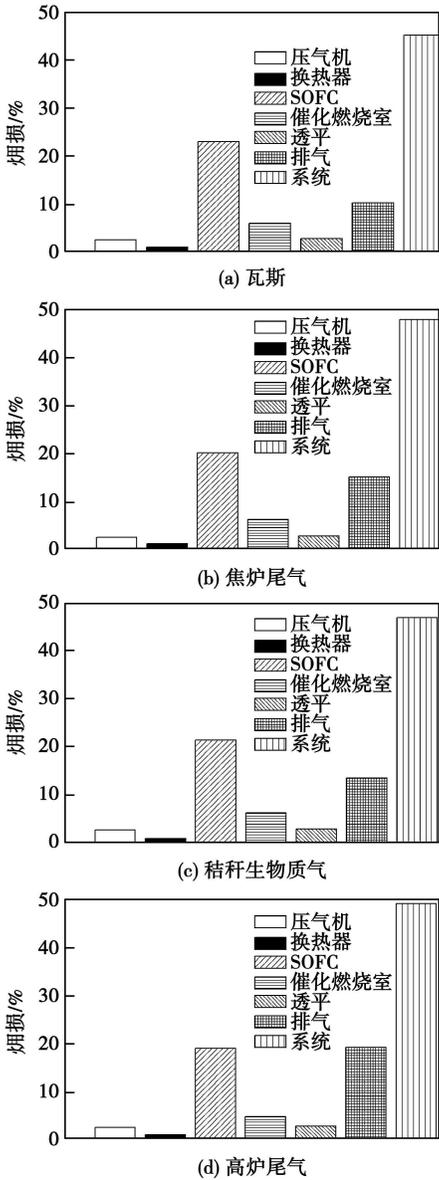


图 4 系统主要部件焓损

除 SOFC 电堆之外, 混合动力系统的最大焓损是系统的排气带走的热量焓, 系统排气的焓损与燃料成分相关。当系统以瓦斯等富含甲烷的气体为燃料时, 由于部分热量需要用于燃料的重整, 系统排气

udes and number of waves placed in parallel with the amplitude of the wall surface waves serving as the small value and established was an approximate analytic model. On this basis a velocity distribution expression was obtained and the relationship between the flow rate and the drag force coefficient as well as between the amplitude and number of the wall surface waves was investigated. It has been found that the flow rate will increase with an increase of the amplitude and wave number while the drag force of the wall surface will change differently with the magnitude of the relative wave number of the two plates and their amplitude as well as wave number. Key words: corrugated passage; laminar flow; flow rate; resistance coefficient

固体氧化物燃料电池—燃气轮机混合动力系统的热力学分析 = Thermodynamic Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Hybrid Power System [刊, 汉] / LI Yang, WENG Yiwu, ZHAO Zhenke (Education Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 672 ~ 676

With a bottom layer solid oxide fuel cell gas turbine hybrid power system (SOFC-GT) serving as the object of study, established was a modularization simulation model and verified was the model in question by utilizing the test data. By making use of the model, the thermodynamic performance of the system and its major components was studied with various coal gases and biomass gas serving as the fuel and the influence of fuel constituents on the system performance was analyzed. The research results show that the CH_4 and CO content of the fuel exercise a relatively big influence on the system performance. Although the efficiency of the solid oxide fuel cells is far higher than that of conventional heat engines, they are still the components in the system having a maximum exergy loss. Key words: solid oxide fuel cell; biomass gas; fuel cell gas turbine hybrid power cycle; syngas

城市污水污泥热解特性及动力学研究 = Pyrolysis Characteristics and Kinetic Study of Urban Sewage Water and Sludge [刊, 汉] / LIU Xiulu (Postgraduate College, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190), LIU Qinggang, ZHAO Ke (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 677 ~ 680

An experiment was made of the urban sewage water and sludge by using a thermogravimetric analyzer and a Fourier infrared spectrum device, and its reaction process and gas products released were observed. In this connection, the solutions to the pyrolysis apparent kinetic parameters were sought. It has been found that the pyrolysis gasification and combustion reactions occurring to the sludge sample in the N_2 , CO_2 and $\text{N}_2 + \text{O}_2$ atmosphere have different characteristic parameters in the reaction processes. The main pyrolysis temperatures in the N_2 atmosphere range from 200 to 560 °C and the reaction process basically comes to an end at 600 °C. With an increase of the temperature rise speed, the maximum pyrolysis weight loss speed will increase. The pyrolysis process of the sludge sample in the N_2 atmosphere will separate out H_2O , CO_2 , CH_4 and CO in turn. Different reaction phases in the pyrolysis process of the sludge sample have different reaction mechanisms and kinetic parameters and the apparent activation energy is within a range from 60 to 100 kJ/mol. Key words: sludge; pyrolysis; thermogravimetric analysis; atmosphere; temperature rise rate; apparent kinetics