

Research on Mathematical Model for Integrated Biomass Gasification and Fuel Cell System

Hao Xie¹, Guilin Piao¹, Yanliang Li², Jie Cai¹

1. Department of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China

1. xiehao@njnu.edu.cn, 2. piaoguilin@njnu.edu.cn

Abstract: A concept of biomass gasification and fuel cell combined cycle power generation system was presented, and the mathematical modeling of this system was described by element balance method. Overall performance and energy flow of generation system were calculated and analyzed. The result shows that energy efficiency of biomass gasification and fuel cell combined cycle system is much higher than that of traditional biomass gasification generation system. Furthermore, the parameters has been scaled up and evaluated, the result provide a reference for decentralization, miniaturization and modularization application of fuel cell in china.

Keywords: biomass gasification; fuel cell; gas reforming; mathematical modeling.

生物质气化燃料电池系统模型研究

谢 浩¹, 朴桂林¹, 李延亮², 蔡杰¹

1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏, 南京 210042

2. 东南大学能源与环境学院, 江苏, 南京 210096

1. xiehao@njnu.edu.cn, 2. piaoguilin@njnu.edu.cn

摘 要: 提出一种生物质气化结合燃料电池发电装置的热电联供系统概念, 并采用元素平衡法对该工艺系统进行数学建模, 计算分析该系统的整体性能以及各环节的状态参数与能流分配。结果表明: 采用生物质气化-燃料电池发电工艺路线, 能量利用效率明显高于传统的生物质气化工艺, 进一步对该系统参数进行放大预测, 为燃料电池在我国分散化、小型化以及模块化应用模式提供了参考。

关键词: 生物质气化; 燃料电池; 重整; 数学模型

1 引言

随着能源问题在世界范围内的日益凸显, 生物质能源以及氢能源逐渐受到社会各界的重视。在已知的可再生能源中, 生物质能源以其分布范围广、可再生、潜在能量大, 价格便宜等优点, 已成为一种重要的替代能源。目前, 生物质能占世界总能源供应的 12% 左右, 而就生物质能能量当量而言, 在我国它仅次于煤、石油、天然气处于第四位^[1, 2]。生物质的利用主要有直燃和气化两种方式, 其中气化的方式能量利用效率较高^[3]。但是, 由于生物质能资源分散, 能量密度较低, 收集和运输困难, 因而适合建立分布式电站对其加以利用, 而由于生物质, 尤其是木制生物质需要在 1600K 的反应温度下才能达到较高的气化效率^[4], 而若考虑到经济性, 在小规模气化时温度希望尽量设置在较低

的范围内, 经研究发现气化温度在 1472K 左右会有一个短暂的高峰值^[5], 相对而言这个温度更加适合产业化利用。从另一方面讲, 由于汽轮机系统本身在小规模的时候发电效率比较低, 采用生物质气化-气体内燃机发电技术路线的发电系统(400~3000kW)的效率偏低, 只有 16%~20%, 联合循环系统的发电效率最高只有 28%^[6], 相对而言竞争优势并不强。

然而, 燃料电池发电技术, 由于它是以电化学的方式运行的, 因此能量转换效率不受“卡诺循环”的限制, 效率比普通热机高很多。其中效率最高的固体氧化物高温燃料电池可与燃气轮机组成联合发电循环, 理想情况下, 能量利用效率可达到 70%~80%^[7, 8]。一般而言, 即使燃料电池系统的负载在有一定程度的变化, 燃料电池系统的发电效率依然可以保持在较高的

水平上。这个特性给燃料电池发电的分散化、小型化以及模块化提供了理论基础。因此，本文以数学建模的方式研究了生物质气化燃料电池发电的系统效率，为燃料电池在我国的推广提供参考。

2 系统建模

2.1 系统流程

由于（MCFC）具有内部重整的特性，属于高温燃料电池，然而，就化学反应原理而言，内部重整时

在燃料电池电极处同样是 CO 的水合反应，和外部重整并无原理上的区别，仅仅是反应条件有部分区别。因此，为了便于计算，可以将燃料电池的内部重整外部化加以计算。另外，就摩尔热值而言，CO 的摩尔热值（275MJ/kmol）和 H₂ 的摩尔热值(286MJ/kmol)差别较小，因此，在燃料电池的燃料输入中，将同摩尔数的 CO 替换为 H₂ 来进行计算，具有合理性。以此为基础，本文设计了生物质气化燃料电池发电系统，如图 1 所示。

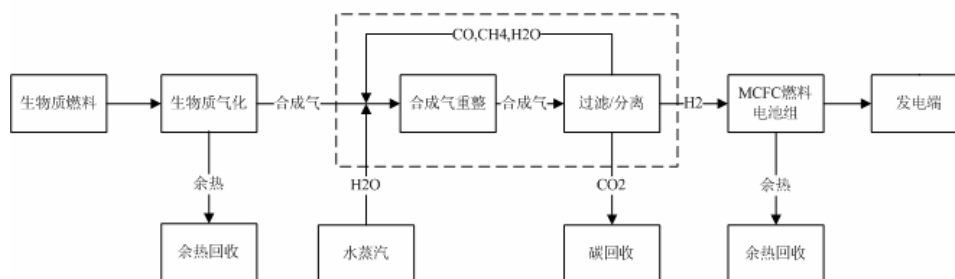


Figure 1. Biomass gasification and fuel cell combined cycle power generation system

图 1. 生物质气化燃料电池发电系统

在此系统中，输入端为生物质燃料，输出端为电能、高温余热以及 CO₂。整个流程如下：生物质原料经过气化炉制得合成气，合成气成分包括：H₂、CO、CO₂ 和 CH₄，除此之外还有少量 N₂ 以及其它气体成分。考虑到燃料电池的特性以及 CH₄ 和 CO 在高温下的积碳效应，需要首先将合成气中的 CH₄ 和 CO 成分重整为 H₂，因此需要使用重整炉对合成气进行重整。重整所得合成气经过滤分离，CO₂ 被送入碳回收装置或排空，剩余的 CO、CH₄、水蒸汽返回重整炉中继续重整，H₂ 通入到 MCFC 燃料电池系统中发电，发电端生产的电能经过逆变器、变压器等器件后送入输电端，最后送入负载。

而对于余热利用部分，MCFC 燃料电池属于高温燃料电池，从其出口处废气中携带的余热属于品质较高的高温余热，可以进行回收利用。为了达到系统消耗能量的自给性，燃料电池排气余热引回重整系统，为其中的重整反应以及水蒸气升温提供热量。而除了燃料电池的燃气余热之外，在燃料电池发电时，以及高温气化炉系统同样会产生携带余热的冷却液，这部分余热经过余热锅炉通过换热的方式对外输送热水。

由于 CH₄ 以及碳氧化物等在电极内部的毒化现象

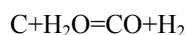
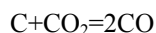
以及析碳现象的存在，因此为了保证燃料电池的长久有效地运行，需要尽可能地降低碳元素在输入电池的燃气中的份额，因此，燃气重整便是转移上述气体中的化学能，通过过滤装置将燃气中的碳元素以 CO₂ 的方式过滤出来，从而降低碳元素份额的有效方式。

2.2 数学模型

2.2.1 生物质气化

生物质气化涉及的变化参数非常的多，气化时除了受燃料本身特性如颗粒粒径、成分的影响外，另外运行时的温度、压力以及容量等参数的变化都会对气化炉出口的合成气气体成分造成影响。

在气化炉中，反应体系较为复杂，反应速度相差也很大，而下列两个反应被认为是主要的气化反应^[9]：



气化子系统的效率可表示为冷煤气效率：

$$\eta_{\text{气化}} = \frac{q_{\text{合成气}} \times (\sum Q_i X_i)}{Q_{\text{生物质}} \times q_{\text{生物质}}}$$

其中， $\eta_{\text{气化}}$ 为气化子系统效率，单位为%；

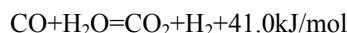
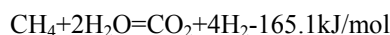
$q_{\text{生物质}}$ 、 $q_{\text{合成气}}$ 分别为生物质和合成气的质量流量, 单位为 kg/h;

Q_i 为合成气中相应气体的热值, 单位为 kJ/kg;

X_i 为合成气中相应气体的质量分数, 单位为 %。

2.2.2 合成气重整

合成气重整是一个复杂反应体系, 其主要反应为:



合成气重整部分采用元素平衡法对其建立模型, 重整反应炉的输入气体为 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、杂质以及 H_2O , 而输出气体为 H_2 、 CO_2 和杂质, 这也就是说, 所有的碳元素都转化成了 CO_2 , 而所有的氢元素, 包括重整时输入的水蒸汽中的氢元素, 都转化成了 H_2 输出。另外, 就反应热而言, 每摩尔的 CH_4 经重整反应需要吸热 165.1 kJ, 而每摩尔的 CO 重整则放热 41 kJ, 因此, 重整反应所需要的反应热为:

$$Q_{\text{Rec}} = n_{\text{CO}} \times 41 \text{ kJ/mol} - n_{\text{CH}_4} \times 165.1 \text{ kJ/mol}$$

$$n_{\text{CO}} = \frac{x_{\text{CO}} q_{\text{合成气}}}{\sum M_i x_i}$$

$$n_{\text{CH}_4} = \frac{x_{\text{CH}_4} q_{\text{合成气}}}{\sum M_i x_i}$$

其中, n 代表合成气的摩尔流量, 单位为 mol/h, x_i 是 i 气体占合成气的摩尔分数, M_i 是 i 气体的摩尔质量。

由于杂质所占的质量比例非常微量, 对反应平衡的影响微弱, 而其对于反应系统的主要影响在于其腐蚀性, 本文假设反应器为理想容器, 因此这里忽略气体杂质的影响。

由于反应器的容量是一定的, 在系统进入稳定阶段后, 遵循质量平衡, 即

$$m_{\text{H}_2\text{in}} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CO}} + m_{\text{CO}_2\text{in}} + \sum m_{\text{C}_p\text{H}_q} = m_{\text{H}_2\text{out}} + m_{\text{CO}_2\text{out}}$$

其中, $m_{\text{H}_2\text{in}}$ 为合成气中 H_2 成分的质量流量, 单位为 kg/h; $m_{\text{H}_2\text{out}}$ 为经过滤分离后输出的 H_2 质量流量; 其余类推。

以及元素平衡:

$$n_{\text{H}_2\text{in}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + \sum \frac{q}{2} \times n_{\text{C}_p\text{H}_q} = n_{\text{H}_2\text{out}}$$

$$n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2\text{in}} + \sum p \times n_{\text{C}_p\text{H}_q} = n_{\text{CO}_2\text{out}}$$

$$n_{\text{CO}} + n_{\text{H}_2\text{O}} + 2 \times n_{\text{CO}_2\text{in}} = n_{\text{CO}_2\text{out}}$$

$n_{\text{H}_2\text{out}}$ 为经过滤分离后重整系统输出的 H_2 摩尔流量, 单位为 mol/h; 其余类推。

上式中有三个未知数, 分别为 $n_{\text{CO}_2\text{out}}$ 、 $n_{\text{H}_2\text{out}}$ 以及 $n_{\text{H}_2\text{O}}$ 。联立以上元素平衡方程, 可得

$$n_{\text{H}_2\text{out}} = n_{\text{H}_2\text{in}} + n_{\text{CO}} + \sum \left(2p + \frac{q}{2} \right) \times n_{\text{C}_p\text{H}_q}$$

$$n_{\text{CO}_2\text{out}} = n_{\text{CO}_2\text{in}} + n_{\text{CO}} + \sum p \times n_{\text{C}_p\text{H}_q}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = -n_{\text{CO}} - \sum 2p \times n_{\text{C}_p\text{H}_q}$$

$n_{\text{H}_2\text{O}}$ 为负值, 说明了重整反应需要加入一定量的水蒸汽, 而将摩尔单位转换为质量流量单位后, 每小时需要输入水蒸汽质量如下:

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = \left(x_{\text{CO}} + \sum 2p \times x_{\text{C}_p\text{H}_q} \right) \times \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} q_{\text{合成气}}}{\sum M_i x_i}$$

由于水是自外界而来, 其来源温度可视为环境温度, 所以在其进入反应炉的过程中, 需要吸收一部分热量进行蒸发以及升温, 这部分热的值为:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = q_{\text{H}_2\text{O}} \times c_{\text{H}_2\text{O}} \times (T_{\text{H}} - T_0) + q_{\text{H}_2\text{O}} \times L_{\text{H}_2\text{O}}$$

其中, $c_{\text{H}_2\text{O}}$ 是水常压下的比热容, 值为 4.2 kJ/kg.K; T_{H} 是重整炉温度, T_0 是环境温度, $L_{\text{H}_2\text{O}}$ 是水在常压下汽化潜热, 值为 2.26 MJ/kg。

同样, H_2 的输出质量流量:

$$q_{\text{H}_2} = \left(x_{\text{H}_2\text{in}} + x_{\text{CO}} + \sum \left(2p + \frac{q}{2} \right) \times x_{\text{C}_p\text{H}_q} \right) \times \frac{M_{\text{H}_2} q_{\text{合成气}}}{\sum M_i x_i}$$

重整反应属于吸热反应, 需要从外部输入热量, 另外, 由于气化炉中生产的合成气是在高温条件下直接送入重整炉进行重整的, 因此其由于物理显热变化所带来的内能变化忽略不计。因而, 其需要的总热量为:

$$Q_{\text{in}} = C_{p\text{H}_2\text{O}} \times m_{\text{H}_2\text{O}} \times Q_{\text{H}_2} \times q_{\text{H}_2\text{out}} \times (T_{\text{出口温度}} - T_{\text{入口水温}}) - q_{\text{合成气}} \times (\sum Q_i X_i)$$

重整子系统的效率为:

$$\eta_{重整} = \frac{(Q_{H_2} \times q_{H_2})}{q_{合成气} \times (\sum Q_i x_i) + Q_{in}}$$

其中, $\eta_{重整}$ 是重整子系统效率;

Q_{H_2} 是 H_2 热值, 其值取 $1.43 \times 10^8 \text{ J/kg}$;

q_{H_2out} 是重整系统出口处的 H_2 质量流量, kg/s ;

$q_{合成气}$ 是合成气质量流量, kg/s ;

2.2.3 燃料电池发电

本模型采用 IHI 燃料电池, 系统发电功率为:

$$P_{FC} = \frac{E_{FC}}{3600} = \frac{Q_{H_2} \times q_{H_2} \times \eta_{FC}}{3600}$$

其中, P_{FC} 为燃料电池发电功率, 单位为 W ;

E_{FC} 为发电端发电量, 单位为 J/h

η_{FC} 是燃料电池效率, 已包括未完全燃尽损失。

2.2.4 余热回收以及其它能量消耗

燃料电池所产生余热由下式计算:

$$Q_{余热} = Q_{H_2} \times q_{H_2} \times (\eta_{热回收} + 1 - \alpha)$$

其中, $Q_{余热}$ 为燃料电池所生产的所有有效余热,

单位 J/h ; $\eta_{热回收}$ 为燃料电池的余热回收效率, 其值设定为 20.7%。另外, 由于燃料电池排气中含有 $(1 - \alpha)$ 的未燃尽燃气, 这部分燃气掺混在高温排气中, 可以通过补燃的方式对其进行热回收。

因此, 系统进行余热回收后, 系统提供的总能量为:

$$E_{联产} = E_{FC} + Q_{余热}$$

而对于发电系统内物质与能量流动过程中的热、电耗散等, 耗散因子取 $\varphi = 0.95$ 。

2.2.5 系统总效率计算

综上所述, 燃料电池发电功率可如下计算

$$P_{FC} = \frac{Q_{H_2} \times q_{H_2} \times \eta_{FC}}{3600} \times \varphi$$

因此, 生物质气化燃料电池发电系统的总发电效率为

$$\eta_{系统} = \frac{3600 \times P_{FC}}{Q_{生物质} \times q_{生物质}}$$

系统的热电联产效率为

$$\eta_{联产} = \frac{3600 \times (P_{FC} + P_{余热})}{Q_{生物质} \times q_{生物质}}$$

3 原始数据与计算条件

3.1 基本假设

- (1) 本系统入口处环境温度 T_0 为 300K;
- (2) 重整炉重整温度 T_H 为 900K, 常压;
- (3) 燃气在经过气化、重整出口时均为干燥状态。

3.2 生物质燃料输入参数

本系统模型所用原料为木质生物质, 其成分特性与入口参数如表 1^[10, 11]所示

Table 1. Parameters of wood biomass fuel

表 1. 木质生物质燃料参数

元素分析[%]	工业分析[%]	入口参数
C 48.70	水分 4.60	热值[MJ/kg] 18.1
H 6.30	挥发分 82.77	质量流量[kg/h] 28.0
O 44.0	固定碳 16.60	
N 0.12	灰分 0.63	
其他 0.88		

3.3 气化子系统和合成气参数

本系统模型采用气化炉运行参数如表 2^[10, 11]所示, 由于该气化炉容量较小, 因此整个系统中并没有加入燃气轮机的联合循环, 仅仅采用了供热的回收循环。在生物质气化中, 碳转化率普遍偏低, 冷煤气效率也相对煤气化冷煤气效率低, 这是由于生物质氧含量偏高, 纤维质较多的缘故。

Table 2. Operation parameters of gasifier

表 2. 气化炉运行参数

项 目	参 数
气化炉中心温度[K]	1479.8
容量[kg/h]	28
碳转化率[%]	76.8
冷煤气效率[%]	60.4
气化炉热回收效率[%]	17.7
合成气/生物质质量比[%]	97.6

3.4 燃料电池

表3给出了燃料电池的设计运行参数, 其中热回收效率为燃料电池通过内部换热而回收的余热效率, 这部分余热在一定程度上提供了重整反应所消耗的热量。

Table 3. Parameters of IHI fuel cell power generation system

表 3. IHI 燃料电池发电系统参数

项 目	参 数
运行温度 T_{FC} [K]	900
发电效率 η_{FC} [%]	52.3
热回收效率 $\eta_{热回收}$ [%]	20.7
燃气利用率 α [%]	75

4 计算结果与分析

4.1 整体性能

表 4 给出了 28kg/h 生物质气化燃料电池发电系统运行参数。从数值上看, 系统发电效率和人们心中的燃料电池具有“超高效率”的印象并不相同, 只有 35.7%。这个问题需要从两个方面来看, 首先, 生物质气化的冷煤气效率非常低, 本文数据中冷煤气效率经计算只有 60.4%, 生物质中有将近 40%的能量在这个环节被损耗掉, 这被认为是整个系统效率偏低的主要原因之一。其次, 燃料电池对燃气的利用率也仅为 75%, 这也制约了整个系统的发电效率。

Table 4. Operation parameters of biomass gasification and fuel cell system

表 4. 生物质气化燃料电池发电系统运行参数

项 目	数 值
生物质燃料总能量[MJ/h]	506.8
气化系统输出能量[MJ/h]	306.3
气化系统输出热量[MJ/h]	89.8
重整需要补充水蒸汽[kg/h]	13.6
加热水蒸汽需热[MJ/h]	97.9
重整反应吸热[MJ/h]	0.0
重整设备总需热[MJ/h]	97.9
重整系统输出能量[MJ/h]	346.4
燃料电池生产电能[MJ/h]	181.2
燃料电池输出热水热量[MJ/h]	71.7
燃料电池排气能量(未燃尽) [MJ/h]	86.6
燃料电池发电功率[kW]	50.3
燃料电池系统生产热量[MJ/h]	161.5
系统发电效率[%]	35.7
燃料电池系统热回收效率[%]	31.9
燃料电池系统热电联产效率[%]	67.6

另外, 重整反应吸热一项, 经计算为 0.33kJ/h, 这个热流量非常微量, 因此重整反应系统可视为一自热反应, 仅需要输入加热水蒸汽所需要的热量。

考虑到高温燃料电池会产生大量的余热, 此余热可由两种途径加以利用, 首先是将高温的燃气以及冷却水通过热交换器对重整炉中的水蒸气进行加热, 这种途径在水蒸汽的低温区可通过换热器传热, 而在高温区则通过未燃尽燃气的再燃烧来加热。其次, 由于系统产生的余热远大于加热水蒸汽所需要的热量, 因此多余的热量则被转换为 88℃的中温热水, 被家庭用户以热电联供的方式加以利用, 通过此种方式, 热利用效率得到了大幅度的提高。

4.2 燃气成分

由于 MCFC 电池本身对燃气杂质具有较高的耐受程度, 因此, 本系统模型可忽略掉燃气净化分离后的杂质成分, 并假设进入重整系统的合成气, 在燃气分离装置中, H_2 被理想的过滤分离。而电池排气包含未燃尽的燃气, 因此还含有 14.5%残余 H_2 , 如表 5 所示。

Table 5. Changes of syngas component

表 5. 燃气的成分变化

组 分	气化排气 [vol%]	重整排气 [vol%]	电池排气 [vol%]
H_2	22.11	58.0	14.5
CO	8.4	0	0
CO_2	43.12	42.0	42.0
CH_4	23.93	0	0
C_2H_2	0.49	0	0
C_2H_4	1.82	0	0
H_2O	0	0	43.5
N_2	0	0	0

图 2 表示了 28kg/h 处理量的生物质燃料电池系统的能量流向及各个环节的效率。其中的电池余热包含了燃气中未燃尽 H_2 (燃气余热) 以及冷却系统的余热 (冷却余热)。气化余热和电池余热在进入余热锅炉后, 经过锅炉中的换热器设备加热燃气重整所需要的水蒸汽, 并且同时生产中温水。

燃料电池系统输出功率随生物质处理量的变化如图 3 所示, 根据规模的不同, 生物质气化燃料电池系统可以分为: 家庭用的微型发电系统, 公司使用的中小

型发电系统，工厂、社区以及并网发电使用的大型燃料电池发电系统。

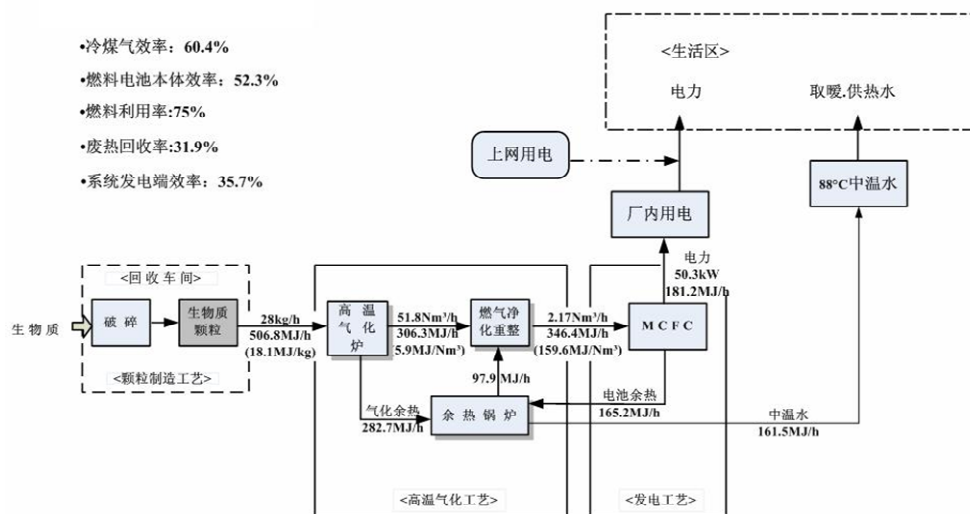


Figure 2. Curve: Energy flow of biomass gasification and fuel cell system

图 2. 生物质气化燃料电池系统能流

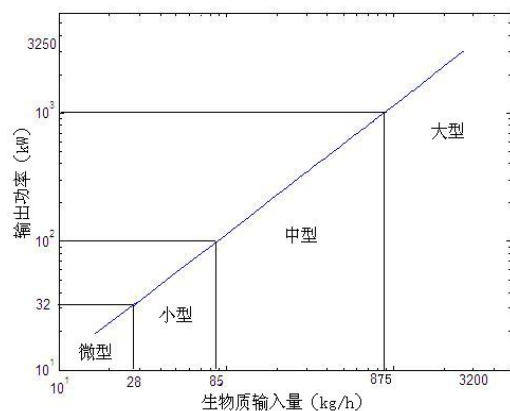


Figure 3. Output power according to treatment capacity of biomass

图 3. 输出功率随生物质处理量的变化

4 结论

结合某公司的特定型号燃料电池，提出一种生物质气化燃料电池发电系统，利用元素平衡法对系统进行数学建模，并以 28kg/h 生物质气化燃料电池发电系统为例，计算分析了发电系统中每个环节的燃气成分、能流分配及系统整体性能。燃料电池本体发电效率为 52.3%，系统发电效率为 35.7%，热回收效率 31.9%。

目前制约生物质气化技术发展的最大问题除了焦油问题外，还有就是相对偏低的气化效率，因此发

展这种发电技术的关键是要进一步改进生物质的气化工艺，提高生物质气化的气化效率。然而计算结果表明，即使是采用了较低的气化效率模型，生物质气化燃料电池发电技术路线的发电效率仍然远高于采用传统的汽轮机发电技术路线，有着广阔的需求和良好的发展前景。

References (参考文献)

- [1] Meng Ni Dennis Y c Leung, Michael K H Leung, Sumathy K. An overview of hydrogen production from biomass[J], *Fuel Processing Technology*, 2006, (87):461-472.
- [2] Xie jun, Wu chuangzhi, Yin Xiuli, et al. Technology and prospect of biomass gasification power generation[J], *Shanghai electric power*, 2005, (1): 54-57.
谢军, 吴创之, 阴秀丽. 生物质气化发电技术及应用前景[J], 上海电力, 2005, (1): 54-57.
- [3] D.Trommer, F.Noembrini, M.Fasciana, D.Rodriguez, A.Morales, M.Romero, A.Steinfeld. Hydrogen production by steam gasification of petroleum coke using concentrated solar power-I. Thermodynamic and kinetic analyses[J], *International Journal of Hydrogen Energy*. 2005, (30): 605-618.
- [4] Wu Xiaojiang, Zhang Zhongxiao, Piao Guilin. Experimental study on biomass gasification characteristics in high-temperature pressurized entrained flow gasifiers[J], *Journal of Power Engineering*, 2007, 27(4):629-634.
乌晓江, 张忠孝, 朴桂林. 高温加压气流床内生物质气化特性的实验研究[J], 动力工程, 2007, 27(4): 629-634.
- [5] A.Z'Graggen, P.Haueter, G.maag, et al. Hydrogen production by steam gasification of carbonaceous materials using concentrated solar energy-IV. Reactor experimentation with vacuum residue[J], *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008, (33):

- 679-684.
- [6] Huang Yanqin, Yin Xiuli, Wu Chuangzhi. Status of integrated biomass gasification and fuel cell power generation system[J], *Renewable Energy*, 2006, 130(6): 44-47.
黄艳琴, 阴秀丽, 吴创之. 生物质气化高温燃料电池一体化发电技术研究[J]. 可再生能源, 2006, 130(6): 44-47.
- [7] Devinder Singh, Eduardo Hernandez-Pacheco, Phillip N.Hutton, Nikhil Patel, Michael D.Mann. Carbon deposition in an SOFC fueled by tar-laden biomass gas: a thermo dynamic analysis[J], *Journal of Power Sources*, 2005(142): 194-199.
- [8] Gao Yang, Xiao jun, Sheng Laihong, et al. Performance investigation of biomass gasification-molten carbonate fuel cell combined cycle power generation system[J], *Proceeding of the CSEE*, 2009, 29(20): 112-118.
高杨, 肖军, 沈来宏. 生物质气化-熔融碳酸盐燃料电池联合循环发电系统性能研究[J], 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 112-118.
- [9] Raymond C, Everson, Hein W.J.P. Neomagus, Henry Kasaini, Delani Njapha. Reaction kinetics of pulverized coal-chars derived from inertinite-rich coal discards: Gasification with carbon dioxide and steam[J], *Fuel*, 2006(85): 1076-1082.
- [10] Guilin PIAO, Agung Sri Hendarsa, Yasuo ADACHI. Research and Development on High-Temperature Gasification Technology of Woody Biomass for Fuel Cell Power Generation Process[C], *Proceeding of Chemical Engineering, Japan(KAGAKU KONGAKU RONBUNSHU)*, 2004, 30(4): 385-389.
朴桂林, Agung Sri Hendarsa, 安達康夫. 木質バイオマス高温ガス変換燃料電池発電プロセスの研究開発[C], 化学工学論文集, 2004, 30(4): 385-389.
- [11] Nobusuke Kobayashi, Miku Tanaka, Guilin PIAO. Characteristics of Gasification Residue In a High Temperature Gasification Process of Woody Biomass[J], *Journal of the Japan Institute of Energy*, 2009, 88(1): 50-56.