

# 煤与生物质共气化并联型 液体燃料-动力多联产系统能量利用特性分析

张岁鹏, 于戈文, 王延铭

(内蒙古科技大学化学与化工学院, 内蒙古 包头 014010)

**[摘 要]** 为了研究煤与生物质共气化条件下多联产系统能量利用特性与煤炭节省率, 建立了煤与生物质共气化并联型 FT 合成油-IGCC 多联产系统。进料量为 3 000 t/d, FT 合成侧合成气分流比设为 0.2、0.4、0.6、0.8。结果显示: 当生物质掺混质量分数为 0.2 时, 在每一个设定的分流比下系统均能获得最大热效率, 分别为 46.39%、46.51%、46.59%、47.49%。生物质质量分数小于 0.2 时, 在每个设定分流比下具有较优的煤炭节省率; 生物质质量分数超过 0.2 时, FT 合成侧合成气分流比对煤炭节省率影响更为明显。因此, 在特定生物质质量分数下可通过增加 FT 合成侧合成气分流比来提高多联产系统煤炭节省率。

**[关 键 词]** 共气化; 多联产; FT 合成; 分流比; 煤炭节省率

**[中图分类号]** TQ021.8 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rifd.201909222

**[引用本文格式]** 张岁鹏, 于戈文, 王延铭. 煤与生物质共气化并联型液体燃料-动力多联产系统能量利用特性分析[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 23-30. ZHANG Suipeng, YU Gewen, WANG Yanming. Energy utilization characteristics of parallel type polygeneration system of liquid fuel and power based on co-gasification of coal and biomass[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 23-30.

## Energy utilization characteristics of parallel type polygeneration system of liquid fuel and power based on co-gasification of coal and biomass

ZHANG Suipeng, YU Gewen, WANG Yanming

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science, Baotou 014010, China)

**Abstract:** To study the energy utilization characteristics and coal saving ratio of multi-generation system under co-gasification of coal and biomass, a coal-biomass co-gasification parallel FT synthetic oil-IGCC co-production system was established. The feedstock is 3 000 t/d and the syngas shunting ratio at the FTS side is assumed as 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, respectively. The results show that, when the biomass mass ratio of the feedstock is 0.2, the polygeneration system can obtain the highest thermal efficiency (46.39%, 46.51%, 46.59%, 47.49%) at each assumed shunting ratio. When the biomass mass ratio is smaller than 0.2, the coal saving ratio is higher at each assumed FTS shunting ratio. When the biomass mass ratio is larger than 0.2, the syngas shunting ratio at the FTS side has an obvious effect on the coal saving ratio. Therefore, at specific biomass mass ratio, the coal saving ratio of the polygeneration system can be improved by increasing the syngas shunting ratio at the FTS side.

**Key words:** co-gasification, polygeneration, FT synthetic, shunting ratio, coal saving ratio

随着工业化发展, 世界各国对能源的需求量日趋上升, 我国尤为如此<sup>[1-2]</sup>。煤炭作为我国能源的重要组成部分, 在社会和经济发展方面发挥着难以替代的作用, 并且在今后相当长的时期作为我国能源供应的龙头地位仍难以动摇<sup>[3]</sup>。但从长远考虑, 非

可再生性和温室气体排放等环境污染问题仍制约其发展<sup>[4]</sup>。当前, 新能源(太阳能、风能、核能等)产业不断兴起, 但由于受到一些条件(例如时间、天气、地貌等)的限制, 这些新能源仍无法取代化石能源。因此, 提高化石能源的使用效率可有效节

收稿日期: 2019-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(21466029); 内蒙古自然科学基金项目(2019MS02019)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (21466029); Inner Mongolia Natural Science Foundation (2019MS02019)

第一作者简介: 张岁鹏(1992), 男, 硕士, 主要研究方向为化工系统工程、多联产技术, 2195525653@qq.com。

通信作者简介: 于戈文(1971), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为煤化工、化工系统工程, yugw0214@163.com。

约化石燃料的使用量,从而为新能源大力发展和普及赢取更多时间<sup>[5]</sup>。生物质具有分布广泛、可再生、资源丰富的特点<sup>[6]</sup>。我国生物质资源尤为丰富,仅农作物秸秆就可达每年 7 亿 t 的产量,然而生物质能源的消耗比例只有总生物质能源的 5% 左右,这表明我国有大力发展生物质能源的潜力和优势<sup>[7]</sup>。

煤与生物质共气化多联产与传统煤基多联产和生物质基多联产比较,共气化将 2 种气化原料的各自优势有效结合,这使得多联产系统不仅能获得较高的热效率,还可有效节约煤炭的使用量,完全符合我国可持续绿色友好发展要求。目前,对多联产系统研究多集中在气化原料输入与产品输出方式、气化方式、系统集成方式与热力性能等方面。Jana 等人<sup>[8]</sup>提出了单一原料输入、多种产品输出(电力、制冷、供热、乙醇)的多联产系统,该系统具有较高的原料利用效率及转化率。陈国艳等<sup>[9]</sup>在 850~950 °C 气化温度下通过煤与美国红柳共气化发现,增加生物质的比例,合成气中 H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 含量先减少后增加;Sonal 与 Liu 等人<sup>[10-11]</sup>通过对高灰分生物质和高灰分煤的共气化及生物质加入对烧结燃料反应性能影响研究表明,煤的存在在一定程度上提高了气化温度进而增加了气化反应速率,而生物质加入能改善混合燃料的反应性能且生物质质量分数较高时可增加碳转化率并降低焦油的转化率。夏光壁等<sup>[12]</sup>通过生物质的掺入对煤气化效率的影响研究表明,一定量生物质的掺入对烟煤气

化效率的影响并不大,其可部分替代优质煤种。Jana 与 Ray 等人<sup>[13]</sup>提出一种发电和利用捕集到的 CO<sub>2</sub> 生产尿素的并联型多联产系统,该系统具有较好的能量利用效率与环保性。Huang 等人<sup>[14]</sup>通过对煤制甲醇-电多联产系统分析得到,相比于单产系统,联产系统能耗更低,节能效果更为突出。

目前,对于煤与生物质共气化的研究均是在较低气化温度(600~1 150 °C)下进行,且生物质掺混比例较小(0~0.4),这就难以反映更多混合比例下煤与生物质的气化特性及热力性能<sup>[15]</sup>。众所周知,并联型多联产系统具有良好的变工况特性,能够通过调整化工侧和动力侧的分流比满足实际需求<sup>[16]</sup>。本研究以煤与生物质混合共气化为核心建立了并联型 FT 合成油-IGCC 多联产系统,在较宽的生物质掺混比例(0~1.0)下对多联产系统热力特征进行研究。

## 1 多联产系统模型建立

### 1.1 多联产系统整体设计

本文利用 Aspen plus 软件建立煤与生物质共气化并联型 FT 合成油-IGCC 多联产系统,其流程如图 1 所示。整个联产系统包括煤与生物质共气化单元、合成气一次净化单元、水煤气变换单元、二次净化单元、FT 合成单元、油品精制单元及 IGCC 动力发电单元。

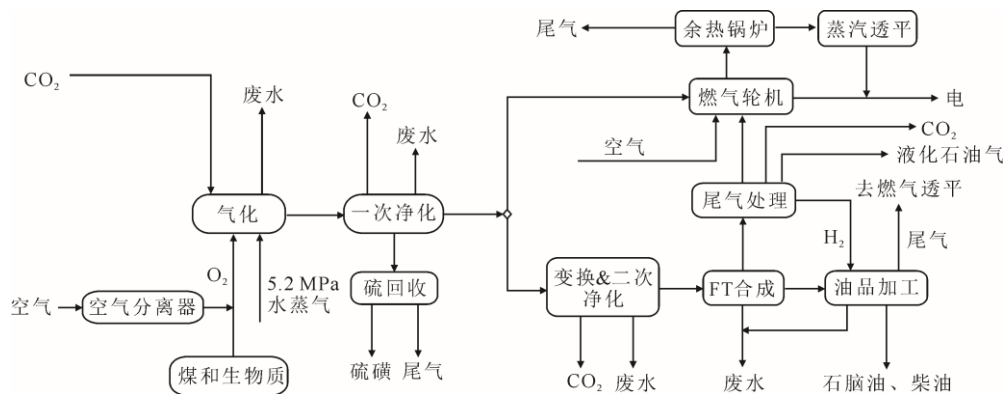


图 1 煤与生物质共气化并联型 FT 合成油-IGCC 多联产系统流程

Fig.1 Flow chart of the parallel type FT syngas-IGCC polygeneration system based on coal and biomass co-gasification

多联产系统整体投料量为 3 000 t/d, 生物质质量分数分别为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0, 其详细进料量见表 1。经过一次净化后的合成气分成两股, 一股去往 FT 合成侧生产油品, 另一股去往 IGCC 侧发电。设定 FT 合成侧分流比分别为 0.2、0.4、0.6、0.8, 在每个设定分流比

下研究不同生物质比例对多联产系统热效率和煤炭节省率的影响。

气化单元所选用的煤种为内蒙古东胜 yt-1 号煤, 掺混的生物质选用干燥后的棉花秸秆, 两者的工业分析和元素分析见表 2。棉花秸秆的工业分析与元素分析参照文献[17]。

表 1 煤与生物质不同配比进料量  
Tab.1 The feedstock with different proportions of coal and biomass

项目	数值											
生物质质量分数	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
煤质量流量/(t d <sup>-1</sup> )	3 000	2 700	2 400	2 100	1 800	1 500	1 200	900	600	300	0	
生物质质量流量/(t d <sup>-1</sup> )	0	300	600	900	1 200	1 500	1 800	2 100	2 400	2 700	3 000	

表 2 煤与生物质工业分析和元素分析  
Tab.2 The proximate and ultimate analysis of coal and biomass

物料	工业分析 w <sub>ad</sub> /%				元素分析 w <sub>ad</sub> /%					低位发热量/(MJ kg <sup>-1</sup> )
	挥发分	水分	固定碳	灰分	C	H	O	N	S	
煤	29.25	7.93	57.50	5.32	73.31	4.38	12.56	0.84	0.13	28.873
生物质	68.54	6.78	20.71	3.97	42.60	5.59	39.58	1.28	0.20	15.999

1.2 多联产系统主要子系统单元

1.2.1 合成气制备单元

粉煤加压气化技术具有原料适应性强、热效率高、碳转化率高、连续生产能力强等诸多优点<sup>[18]</sup>。选用粉煤加压气化技术进行煤与生物质共气化合成气的制备。考虑到干粉煤加压气流床气化的实际温度一般为 1 400~1 700 °C，模拟计算时气化温度设定为 1 550 °C。这一温度也满足气流床对液态排渣的要求<sup>[19]</sup>。采用摩尔分数为 95% 的纯氧作为气化剂，气化压力为 4.2 MPa。气化的比氧耗和比煤

(煤+生物质)耗随生物质质量分数变化见表 3。产生的粗煤气流量及合成气中主要组分的摩尔分数随生物质质量分数变化如图 2 所示。图 2 显示，随着气化单元生物质质量分数的增加，粗合成气的流量逐渐减少，其中的 CO、H<sub>2</sub> 的摩尔分数也在逐渐降低，CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 的摩尔分数逐渐增加。这是因为生物质本身挥发分高，固定碳含量低，含氧量高，能量密度小，这就使得生物质气化时会产生较多热解气，热解气和焦炭之间相互作用可能对共气化产生负面影响<sup>[17]</sup>。

表 3 气化过程的比氧耗和比煤耗  
Tab.3 The specific oxygen consumption and specific coal consumption of the gasification process

项目	数值											
生物质质量分数	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
比氧耗 (标准状态)/(m <sup>3</sup> km <sup>-3</sup> )	373	405	428	452	472	494	515	534	558	590	616	
比煤耗 (标准状态)/(kg km <sup>-3</sup> )	751	790	816	863	926	1 000	1 098	1 182	1 290	1 410	1 618	

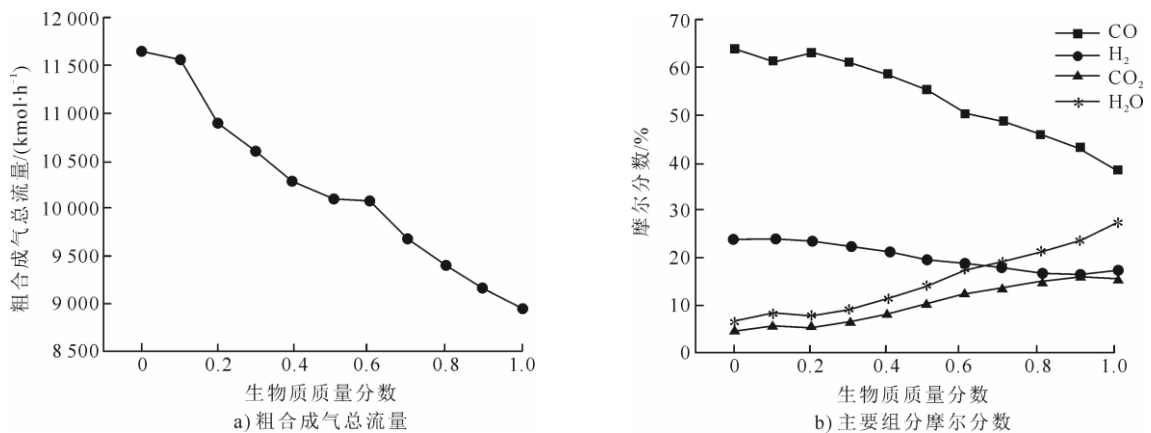


图 2 粗合成气流量及组分摩尔分数随生物质质量分数变化  
Fig. 2 Change curves of crude syngas flow rate and mole fraction of components with biomass mass fraction

气化过程的冷煤气效率如图 3 所示。由图 3 可见，随着生物质质量分数增加，冷煤气效率先升高后降低，在生物质质量分数为 0.2 时，冷煤气效率取得最大值 84.23%。其中生物质质量分数在 0~0.2 时冷煤气效率逐步升高的原因是共气化过程中煤与生物质的协同效应逐步增强；生物质质量分数在 0.2 时协同效应达到最佳，此时系统冷煤气效率达到最大值<sup>[15]</sup>。研究表明<sup>[20-21]</sup>，煤与生物质共气化产生协同效应的原因可能是生物质灰中的碱金属对气化反应有一定的催化作用，不仅对生物质中的碳，也对煤中的碳产生催化作用。所以生物质在恰当的配比范围内与煤共气化对气化过程极为有利，但生物质和煤的最佳配比会因生物质的种类以及煤种的不同而有所差异。

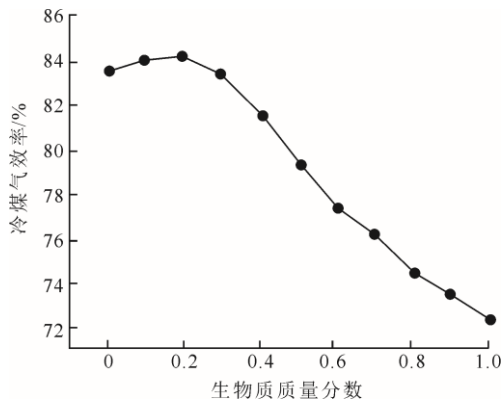


图 3 冷煤气效率随生物质质量分数变化曲线

Fig.3 The change curve of cold gas efficiency with biomass mass fraction

1.2.2 FT 合成及油品精制单元

本文 FT 合成采用低温 (200~250 °C) 浆态床反应器，反应器内部压力为 2.5 MPa，采用 Fe 基催化剂。设计了 4 组不同分流比，即 FT 合成侧分流比分别为 0.2、0.4、0.6、0.8。油品分布计算采用烃分布经验数据，结果见表 4。

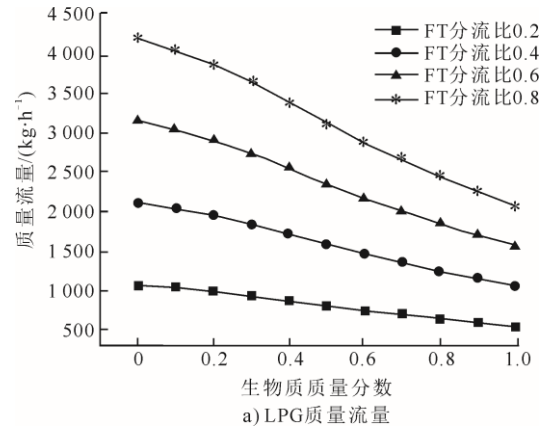
表 4 FT 合成烃分布

Tab.4 The hydrocarbon distribution of FT synthesis

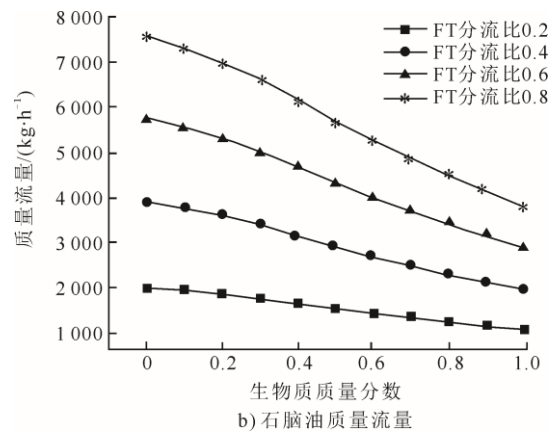
组分	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	LPG	轻馏分油	重馏分油	蜡
分布比率 w/%	4.41	1.76	2.74	11.18	30.47	16.77	32.67

图 4 为在不同分流比下随着生物质质量分数的变化 FT 合成油品分布的变化。由图 4 可见：在设定分流比下，液化石油气 (LPG)、石脑油和柴油的产出均随着生物质质量分数的增加而减少；其中，以纯煤输入的油品产出量最大，纯生物质最小。这

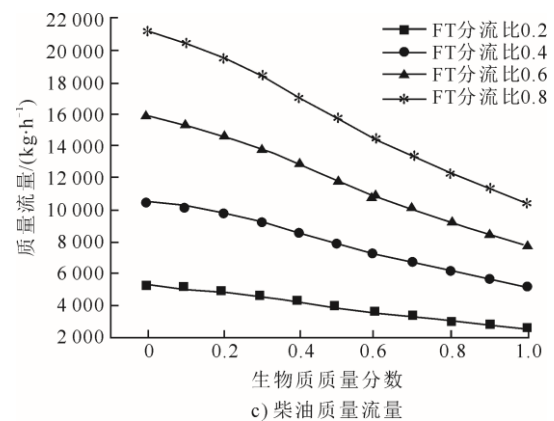
是因为生物质能量密度要远远低于煤，且生物质中挥发分高，固定碳含量少，在煤与生物质共气化过程中随着生物质质量分数的增加合成气流量及有效合成气的含量均减少，最终导致油品产量的减少。



a) LPG 质量流量



b) 石脑油质量流量



c) 柴油质量流量

图 4 不同分流比下油品分布随生物质质量分数变化曲线  
Fig.4 Change curves of synfuel product distribution with biomass mass fraction at different shunting ratios

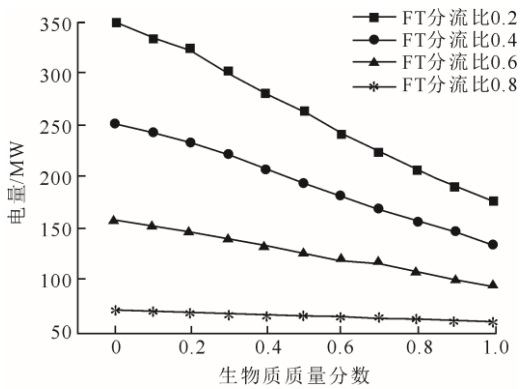
1.2.3 IGCC 发电单元

IGCC 是目前最为高效、洁净的煤发电技术之一<sup>[22-24]</sup>。本文所建多联产系统 IGCC 发电单元用气主要来源于合成气一次净化单元、FT 合成单元的尾

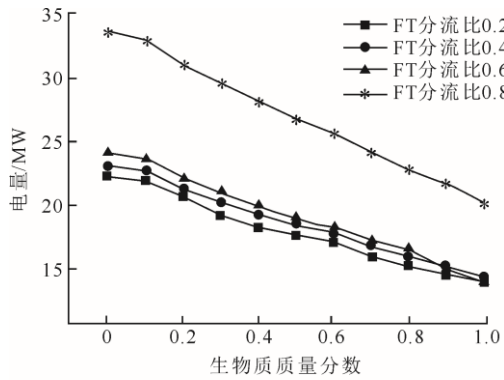
气以及油品精制后产生的干气。燃气轮机与蒸汽轮机参数见表5<sup>[25]</sup>。随着合成气分流比的调整以及生物质质量分数的变化，产生的电力如图5所示。

表5 燃气轮机、蒸汽循环参数  
Tab.5 Parameters of the gas turbine and the steam turbine

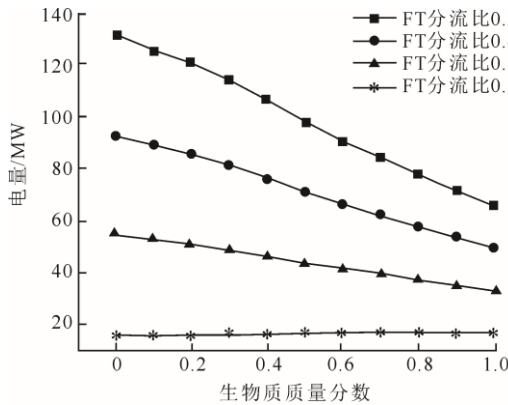
项目	数值	项目	数值
燃气轮机进口温度/℃	1400	燃气轮机等熵效率/%	89.5
燃气轮机出口温度/℃	706	发电机效率/%	99.0
空气温度/℃	15	余热锅炉效率/%	98.0
空气压缩比/%	15.4	蒸汽轮机机械效率/%	98.5
空气压缩机等熵效率/%	87.5		



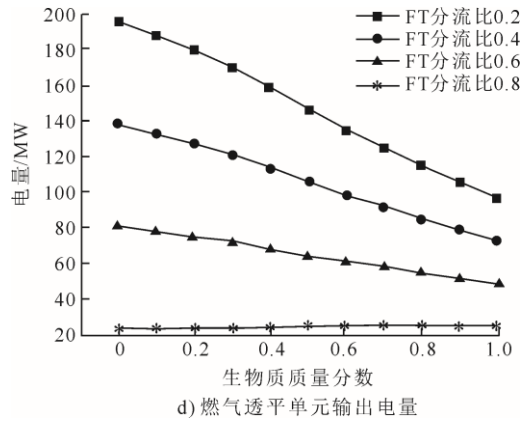
a) 多联产系统产生的总电量



b) 公用工程蒸汽输出电量



c) 余热锅炉输出电量



d) 燃气透平单元输出电量

图5 不同分流比下电力输出随生物质质量分数变化曲线  
Fig.5 The distribution curves of power output with biomass mass fraction at different shunting ratios

## 2 多联产系统评价指标

当前，以煤为系统输入的多联产系统评估主要集中在热力分析、经济分析、环境等方面<sup>[26-28]</sup>。本文从能量利用角度出发，选取系统热效率与煤炭节省率作为系统的评价指标。

1) 系统热效率 计算公式为

$$\eta = \frac{Q_O + W_P + Q_E}{m_C \cdot Q_{LC} + m_B \cdot Q_{LB} + Q_P} \quad (1)$$

式中： $\eta$ 为多联产系统热效率； $Q_O$ 为油品热值，MJ/s； $W_P$ 输出的电力，MW； $Q_E$ 为其他产品（硫、LPG）的热值，MJ/s； $m_C$ 为系统输入煤炭的流量，kg/s； $Q_{LC}$ 为系统输入煤炭的低位热值，MJ/kg； $m_B$ 系统输入生物质的流量，kg/s； $Q_{LB}$ 为系统输入生物质的低位热值，MJ/kg； $Q_P$ 为系统公用工程消耗，MJ/s。

2) 煤炭节省率 由于生物质的掺入使整个系统煤炭用量节省，为了计算掺入生物质替代煤炭用量的程度，在研究过程中提出了煤炭节省率函数。煤炭节省率是指在特定生物质掺混比例输出产品能量总和与纯煤为原料输出相同产品能量相比煤炭的节省比率。本文设定原料总量不变，改变生物质掺混比，虽然输出产品能量不同，但单位产品能量下的原料消耗能够体现煤炭的节省程度。煤炭节省率主要从系统产品输出（油品和电力）能量角度出发，分析生物质的加入比例对能量利用的影响。在每个特定分流比下，以纯煤输入时的油品和电力的输出为计算基准，其计算公式为

$$\delta = \frac{E_S - E_C(1-x)}{E_C} \quad (2)$$

式中： $\delta$ 表示煤炭节省率； $E_C$ 为特定分流比下以纯煤作为系统输入所产生的油品、电力及LPG的总和，MJ/s； $E_S$ 为在与 $E_C$ 相同分流比下煤与生物质混

合输入时系统所产出的油品、电力及 LPG 的总和, MJ/s;  $x$  为煤与生物质混合气化过程中生物质所占质量分数。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 生物质质量分数对公用工程消耗的影响

系统公用工程的消耗主要包括电力、冷量、循环水、锅炉给水 (BFW)、蒸汽冷凝、凝结水、脱盐水的消耗。不同生物质质量分数条件下公用工程消耗计算结果如图 6 所示。图 6 表明: 在相同 FT 合成分流比下随着生物质质量分数的增加, 公用工程消耗量也在逐步减少; 随着 FT 合成侧分流比的加大, 公用工程的消耗量呈增加趋势。

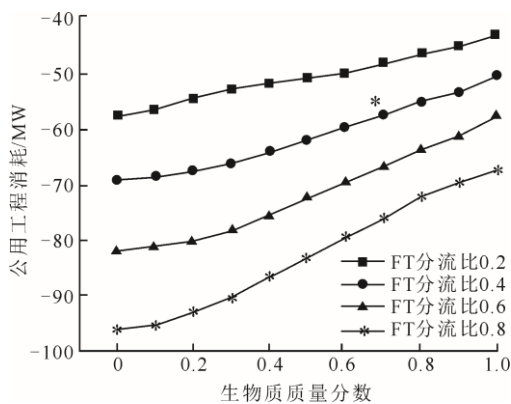


图 6 不同分流比下系统公用工程消耗量随生物质质量分数变化

Fig. 6 Change curves of the system utility consumption with biomass mass fraction at different shunting ratios

#### 3.2 不同分流比下生物质质量分数对系统热效率影响

在不同 FT 合成分流比条件下, 分析系统热效率随生物质质量分数的变化规律, 结果如图 7 所示。

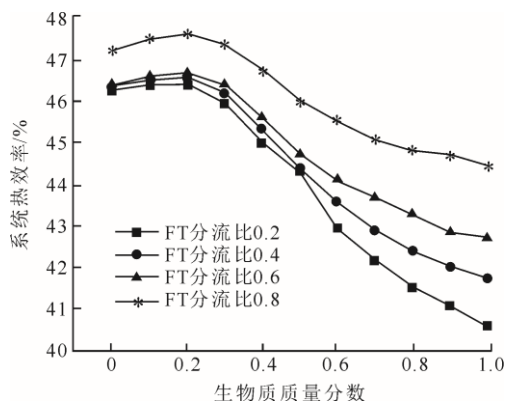


图 7 不同分流比下系统热效率随生物质质量分数变化

Fig. 7 Change curves of the system thermal efficiency with biomass mass fraction at different shunting ratios

由图 7 分析可得: 在生物质质量分数小于 0.2 时, 随着生物质质量分数的增加, 4 组不同 FT 合成

分流比下系统热效率均有略微的升高; 在生物质质量分数为 0.2 处, FT 合成分流比为 0.2、0.4、0.6、0.8 时均获得最大热效率, 分别为 46.39%、46.51%、46.59%、47.49%, 这也是由于生物质混合比例为 0.2 时协同效应达到最佳引起的; 在生物质质量分数超过 0.2 时, 由于生物质本身挥发分高, 固定碳含量低, 使得合成气流量减少, 合成气有效成分 (CO、H<sub>2</sub>) 及合成气的热值降低, 两者共气化的协同效应减弱, 系统热效率整体呈下降趋势, 但在生物质质量分数高于 0.3 之前系统仍然具有较高的热效率; 在相同的生物质质量分数前提下, 随着 FT 合成分流比的增加, 系统热效率也在升高, 在生物质质量分数超过 0.5 时, FT 合成侧分流比的变化对系统热效率有较大影响, 此时可通过增加 FT 合成侧的分流比来增加系统热效率。

#### 3.3 不同分流比下生物质质量分数对煤炭节省率影响

在不同分流比条件下, 不同生物质质量分数时煤炭节省率的变化如图 8 所示。

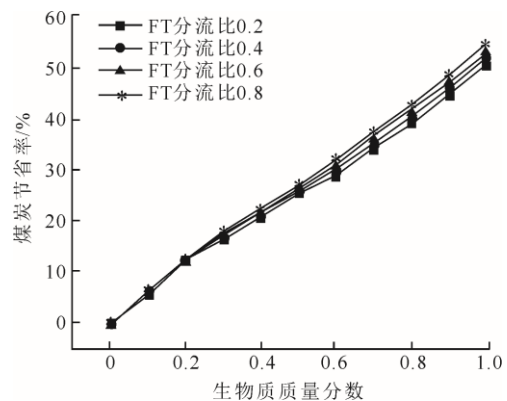


图 8 不同分流比下系统煤炭节省率随生物质质量分数变化

Fig. 8 Change curves of the system coal saving rate with biomass mass fraction at different shunting ratios

从图 8 可以看出, 不同 FT 合成分流比下, 系统煤炭节省率均随着生物质质量分数的增加而升高。在生物质质量分数小于 0.2 时, 4 组曲线均具有较大斜率且都较为接近, 说明随着生物质质量分数的增加, 煤炭节省率增加幅度较大, 此时生物质的加入使得系统煤炭节省程度增加幅度较大。在生物质质量分数为 0.2 时, FT 合成分流比 0.2、0.4、0.6、0.8 所对应的煤炭节省率分别是 12.40%、12.27%、12.41%、12.57%。当生物质质量分数超过 0.2 时, 4 组曲线的斜率均有所减小, 此时 FT 合成侧合成气分流比的变化对煤炭节省率的影响更为明显。因此在特定生物质质量分数下可通过增加 FT 合成侧合成气分流比来提高多联产系统煤炭节省率。

然而,生物质本身含水量较高(40%~65%),为了增加其能量密度,干燥及压缩过程需要消耗较多的能量,这在生物质掺混比例较高时会对整个多联产系统的热力特性具有显著影响<sup>[29-30]</sup>。

## 4 结 论

本文通过煤与生物质掺混设计了煤与生物质共气化并联型 FT 合成油-IGCC 多联产系统,并且从多联产系统产品输出能量角度提出了煤炭节省率函数,通过调整生物质的混合比例以及化工侧和动力侧的合成气分流比得出以下结论。

1) 生物质掺混质量分数为 0.2 时,针对不同的 FT 合成分流比,系统均能获得最大热效率,分别是 46.39%、46.51%、46.59%、47.49%。

2) 生物质质量分数超过 0.5 时,可通过增加 FT 合成侧合成气分流比来提高系统热效率。

3) 生物质质量分数为 0~0.2 时,煤炭节省率随着生物质质量分数增加而具有较快的增长速度,超过此范围时,可通过增加 FT 合成侧合成气分流比来提高煤炭节省率。

### [参 考 文 献]

- [1] 周庆凡. 2015 年中国能源生产与消费现状[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 454.  
ZHOU Qingfan. Energy sources production and consumption current situation of China in 2015[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 454.
- [2] HAN Z H, TAN H S, WANG R, et al. Energy-efficient dynamic virtual machine management in data centers[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2019, 27(1): 344-360.
- [3] LIU J X. China's renewable energy law and policy: a critical review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 99: 212-219.
- [4] 王斌. 我国煤炭能源困境分析及建议[J]. 中国矿业, 2014, 23(5): 6-8.  
WANG Bin. Problems analysis and suggestions of coal energy development in China[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(5): 6-8.
- [5] MATHEWS J A, BARONI P. The industrial logistic surface: displaying the impact of energy policy on uptake of new technologies[J]. Energy, 2019, 57: 733-740.
- [6] 张希良, 陈荣, 何建坤. 中国生物质气化发电技术的商业化分析[J]. 太阳能学报, 2004(4): 557-560.  
ZHANG Xiliang, CHEN Rong, HE Jiankun, et al. Commercialization analysis of power generation technology based on biomass gasification in China[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2004(4): 557-560.
- [7] 马国杰, 常春, 陈俊武. 生物质原料供应链技术经济研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(2): 720-725.  
MA Guojie, CHANG Chun, CHEN Junwu, et al. Advance on technical and economic analysis of the biomass supply chain[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(2): 720-725.
- [8] JANA K, DE S. Polygeneration using agricultural waste: thermodynamic and economic feasibility study[J]. Renewable Energy, 2015, 74: 648-60.
- [9] 陈国艳, 李伟莉, 张保森, 等. 煤与生物质共气化及炭黑的生成特性[J]. 煤炭转化, 2016, 39(1): 35-39.  
CHEN Guoyan, LI Weli, ZHANG Baosen, et al. Co-gasification of coal and biomass and generation characteristics of carbon black[J]. Coal Conversion, 2016, 39(1): 35-39.
- [10] SONAL K, THENGANE, ANKITA G, et al. Co-gasification of high ash biomass and high ash coal in downdraft gasifier[J]. Bioresource Technology, 2019, 273: 159-168.
- [11] LIU C, ZHANG Y Z, ZHAO K, et al. Effect of biomass on reaction performance of sintering fuel[J]. Journal of Material Science, 2019, 54: 3262-3272.
- [12] 夏光璧, 朴桂林, 张居兵, 等. 掺混生物质炭对煤气化反应特性的影响[J]. 动力工程学报, 2015, 35(8): 681-686.  
XIA Guangbi, PIAO Guilin, ZHANG Jubing, et al. Research on co-gasification characteristics of biomass char and coal[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(8): 681-686.
- [13] JANA K, RAY A, MAJOURM M M, et al. Polygeneration as a future sustainable energy solution: a comprehensive review[J]. Applied Energy, 2017, 202: 88-111.
- [14] HUANG H, YANG S Y, CUI P Z. Design concept for coal-based polygeneration preprocess of chemicals and power with the lowest energy consumption for CO<sub>2</sub> capture[J]. Energy Conversion and Management, 157: 186-194.
- [15] 李振珠, 李凤海, 马名杰, 等. 生物质与煤流化床共气化特性研究进展[J]. 现代化工, 2014, 34(7): 12-15.  
LI Zhenzhu, LI Fenghai, MA Mingjie, et al. Review on co-gasification of biomass and coal in fluidized-bed[J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(7): 12-15.
- [16] 冯静, 倪维斗, 李政. 并联型化工动力多联产系统主导因素与变工况特性[J]. 热能动力工程, 2008(5): 485-489.  
FENG Jing, NI Weidou, LI Zheng. Leading factors and Part-load performance of parallel connection chemical power polygeneration system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008(5): 485-489.
- [17] 白章, 刘启斌, 金红光, 等. 基于生物质-太阳能气化的多联产系统模拟及分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 112-118.  
BAI Zhang, LIU Qibin, JIN Hongguang, et al. Performance simulation and analysis of a polygeneration system with solar-biomass gasification[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 112-118.
- [18] 于戈文, 李永旺, 徐元源, 等. 不同工艺路线 FT 合成油-电多联产模拟计算[J]. 过程工程学报, 2010, 10(5): 964-970.  
YU Gewen, LI Yongwang, XU Yuanyuan, et al. Simulation on polygeneration systems of FT synfuels-power based on different process routes[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(5): 964-970.
- [19] 张进春, 侯锦秀. 基于 ChemCAD 的气流床粉煤加压气化工工艺参数仿真优化[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1189-1194.  
ZHANG Jinchun, HOU Jinxiu. Entrained-flow pressurized coal gasification simulation and parameters optimization based on ChemCAD[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1189-1194.
- [20] 李克忠, 张荣, 毕继诚. 煤和生物质共气化协同效应的初步研究[J]. 化学反应工程与工艺, 2008, 24(4): 312-317.  
LI Kezhong, ZHANG Rong, BI Jicheng. Study on

- synergistic effect in co-gasification of coal and biomass[J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2008, 24(4): 312-317.
- [21] BROWN R C, LIU Q, NORTON G. Catalytic effects observed during the co-gasification of coal and switchgrass[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 18(6): 499-506.
- [22] 赵明, 陈星, 梁俊宇, 等. 基于液态空气储能技术的新整体煤气化联合循环系统分析[J]. *化工进展*, 2015, 34(增刊 1): 75-79.
- ZHAO Ming, CHEN Xing, LIANG Junyu, et al. Thermodynamic analysis of a novel IGCC system based on LAES technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(Suppl.1): 75-79.
- [23] PARK S, SHIN J, MORISHITA M, et al. Validation of measured data on F/A ratio and turbine inlet temperature with optimal estimation to enhance the reliability on a full-scale gas turbine combustion test for IGCC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(26): 13999-14011.
- [24] AHMED U, ZAHID U, LEE Y. Process simulation and integration of IGCC systems for H<sub>2</sub>/syngas/electricity generation with control on CO<sub>2</sub> emissions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(14): 7137-7148.
- [25] YU G W, XU Y Y, HAO X, et al. Process analysis for polygeneration of Fischer-Tropsch liquids and power with CO<sub>2</sub> capture based on coal gasification[J]. *Fuel*, 2010, 89(5): 1070-1076.
- [26] 林湖, 金红光, 高林, 等. 煤基多联产系统热力与经济性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(8): 1-5.
- LIN Hu, JIN Hongguang, GAO Lin, et al. Thermo-economic analysis of coal-based polygeneration system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(8): 1-5.
- [27] 于扬洋, 林伟荣, 肖平, 等. 煤热解分级转化热电油天然气多联产系统技术经济性分析[J]. *热力发电*, 2017, 46(9): 8-16.
- YU Yangyang, LIN Weirong, XIAO Ping, et al. Thermo-economic evaluation for coal-based polygeneration systems of heat, power, oil and synthetic natural gas[J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(9): 8-16.
- [28] KLER A M, TRURINA E A, MEDNIKOV A S. A plant for methanol and electricity production: technical-economic analysis[J]. *Energy*, 2018, 165: 890-899.
- [29] 李伟振, 姜洋, 刘贵锋, 等. 生物质干燥及成型过程挥发性有机化合物(VOC)释放特性的研究[J]. *可再生能源*, 2013, 31(12): 89-92.
- LI Weizhen, JIANG Yang, LIU Guifeng, et al. Study on releasing characteristics of volatile organic compounds (VOC) in biomass drying and molding process[J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(12): 89-92.
- [30] 张小桃, 黄明华, 王爱军, 等. 生物质气化特性研究及焓分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 282-286.
- ZHANG Xiaotao, HUANG Minghua, WANG Aijun, et al. Characteristics of biomass gasification and exergy analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 282-286.

(责任编辑 刘永强)