

聚光太阳能气化含碳物料驱动联合循环发电系统研究

宋 杨^{1,2}, 曾 阔^{1,2}, 杨海平¹, 邵敬爱¹, 何 肖¹, 陈汉平¹

(1. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院, 武汉 430074)

摘 要: 使用 HSC Chemistry 软件计算不同温度和水蒸气质量比下气化产物的分布规律, 通过对反应条件进行优化, 得出最佳气化温度为 1050 K。在优化反应条件下制备的气化产物驱动的新型发电系统发电效率可达 53.73%~54.73%, 电能增益系数能达到 1.98~2.48, 优于物料直燃发电(效率约为 35%, 电能增益系数为 1)。新型发电系统的 CO₂ 单位排放量只有 0.47~0.48 kg/kWh, 相比直燃发电 CO₂ 排放量减少 51%~61%, 具有巨大的 CO₂ 减排效益。

关键词: 太阳能; 生物质; 气化; 合成气; Brayton-Rankine 联合循环

中图分类号: TK6; TW619

文献标志码: A

0 引 言

2006~2015 年中国能源生产总量增长了 47.9%; 能源消耗量增长了 50.10%; 能源缺口扩大了 63.05%, 对进口化石能源的依赖进一步增强^[1]。在当前情况下大力开发和利用可再生能源逐步替代化石能源成为世界各国所认可的共同选择。含碳物料种类繁多且不乏可再生能源, 然而在利用其发电的过程中存在许多问题。例如在生物质的直燃发电系统中, 较高的碱金属元素含量会使相关设备的积灰和结渣情况严重; Cl 元素含量较高使燃烧过程中产生氯化污染物; 水分和氧含量较高导致燃烧稳定性差, 烟量大等^[2]。

为实现含碳物料的清洁高效利用, 通常需将其气化制取气体产物, 然后将气体产物加以利用。传统气化技术是利用含碳物料在缺氧条件下的不完全燃烧为反应提供能量, 通常使用空气作为气化剂, 其不足之处在于空气中含有大量 N₂, 稀释了气化产物中的可燃成分, 导致产生的气体产物热值较低^[3]。不完全燃烧还需消耗含碳物料, Hebecker 等^[4]估算出以含水量为 50% 的木屑为原料的气化反应, 在 873~1073 K 条件下, 为了维持反应的进行, 需消耗 31.1% 的生物质原料。通过太阳能集热系统产生的高温为气化反应提供热量可避免上述缺陷, 同时还具有以下优势: 1) 避免污染物的排放; 2) 气化

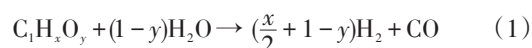
产物不含燃烧副产物; 3) 气化产物热值提高^[5]。Zedtwitz 等^[5]发现通过太阳能煤气化驱动的发电系统电能输出可达到传统 Rankine 循环的 1.69~1.93 倍, 而 CO₂ 排放只有后者的一半。白章等^[6]则提出利用太阳能驱动生物质气化发电系统, 该系统中生物质的气化产物不仅可用于发电, 还可直接作为优质合成气用于生产甲醇和二甲醚等清洁液体燃料。

本文利用 HSC Chemistry 软件对聚焦太阳能气化生物质的气体组分分布进行化学平衡计算, 分析反应条件对其影响。在优化的反应条件下, 利用热力学定律对气化产物驱动的发电系统效率及 CO₂ 排放进行分析。

1 反应平衡分析

1.1 太阳能气化的理论平衡方程

含碳物料的水蒸气气化过程十分复杂, 包含数量众多的反应, 但总体的化学反应可用式(1)所示的简化反应方程式表示^[5]:



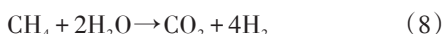
实际气化过程中, 反应(2)~反应(8)^[5-9]的进行情况会对气化产物的组分产生较大影响, 因此也需考虑其可能对最终结果所产生的影响。其中反应(4)和反应(6)为放热反应, 其余都是吸热反应。升高反应温度可促

收稿日期: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51706083)

通信作者: 曾 阔(1987—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事太阳能光热发电、聚光太阳能热化学制备清洁燃料方面的研究。
zengkuo666@hust.edu.cn

进气化反应的进行,提高含碳物料的碳转化率。综合反应(2)~反应(8)来看,气化反应属于体积增大的反应,压强过高不利于反应的正向进行。综上,选择高温低压条件进行气化反应较为合理。



1.2 气化产物分布

由反应(1)可知,气化产物的平衡组成取决于含碳物料的 H/C 和 O/C。表 1^[5,10]所示为 4 种不同的含碳物料的元素组成、低位热值、H/C 和 O/C。

表 1 4 种含碳物料的元素组成、低位热值/H、C 和 O/C

Table 1 Elementary composition, LHV, H/C and O/C of four types of carbonaceous materials

项目	褐煤	无烟煤	棉花秸秆	小麦秸秆
[C]/%	71.40	92.20	45.01	41.56
[H]/%	4.79	3.30	6.09	5.80
[O]/%	21.87	3.37	40.04	40.53
[N]/%	1.34	0.15	0.60	1.01
[S]/%	0.60	0.98	0.043	0.16
低位热值/kJ·kg ⁻¹	28500	35700	17565	14665
(H/C)/mol·mol ⁻¹	0.81	0.43	1.62	1.68
(O/C)/mol·mol ⁻¹	0.23	0.03	0.67	0.73

以褐煤为例,根据吉布斯自由能最小原理,使用 HSC Chemistry 软件计算在参与反应的水蒸气的量为 0.84,即满足方程(1)且反应压力为 0.1 MPa 情况下,气化产物平衡组分受温度的影响情况,结果如图 1 所示。在反应温度低于 1000 K 时,H₂、CO、CH₄、C、CO₂ 和 H₂O 在平衡组分中共存,随着反应温度的升高,CH₄、C、CO₂ 和 H₂O 的比例大幅下降,而 H₂ 和 CO 的比例大幅上升;当反应温度超过 1250 K 之后,C、CH₄、CO₂ 和 H₂O 在平衡组分中的比例之和不足 1%,可认为在气化温度超过 1250 K 的条件下,褐煤的平衡组分中只有 H₂ 和 CO。其他含碳物料也有相似规律。

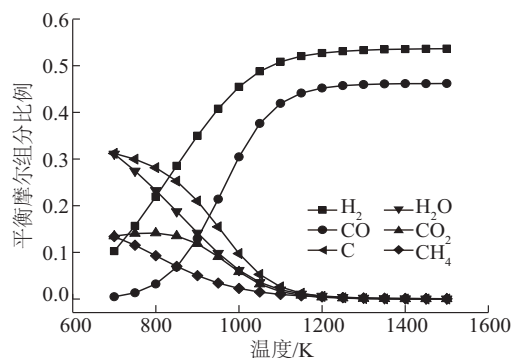


图 1 褐煤平衡组分

Fig. 1 Equilibrium compositions of lignite

1.3 温度对气化产物的影响

反应(7)和反应(8)正向进行时属于体积增大的反应,即生成物的体积之和大于反应物的体积之和,反应系统整体在定压条件下表现为体积增大。根据 1.2 节中计算得到的数据,绘制图 2 和图 3。结合图 2 可知,在气化温度小于 1200 K 时,随着气化温度的升高,反应(7)和反应(8)的正向进行程度增加,反应使气化产物的量增加,即气化产物的产量增加。而在反应温度超过 1200 K 后,反应(7)和反应(8)基本完全进行,气化产物的产量也基本保持不变,这 2 个均为吸热反应,其正向进行程度随温度的升高逐渐增强,使热值较高的 CH₄ (35.8 MJ/Nm³) 向热值较低的 H₂ (10.8 MJ/Nm³) 和 CO (12.6 MJ/Nm³) 转化,导致气化产物中 CH₄ 比例减少而 H₂ 和 CO 比例上升,气化产物热值下降。固相的 C 随气化反应温度的升高而逐渐转化为气相(主要为 CO 和 CO₂),使气体产物的热值升高。结合图 1 和图 2 可知,以上两者在不同温度下对气体产物热值的影响程度不同,使得气体产物的热值随反应温度的升高出现先减小

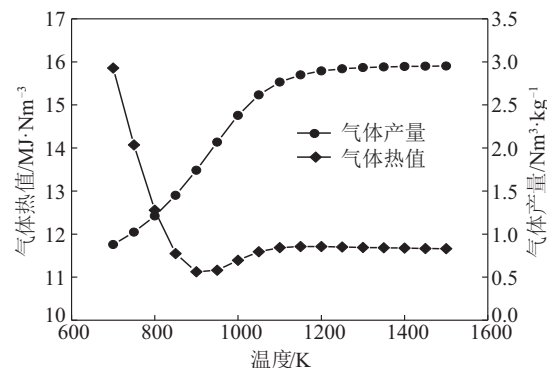


图 2 褐煤气化产物的产量及热值

Fig. 2 Yield and heat value of lignite gasification productions

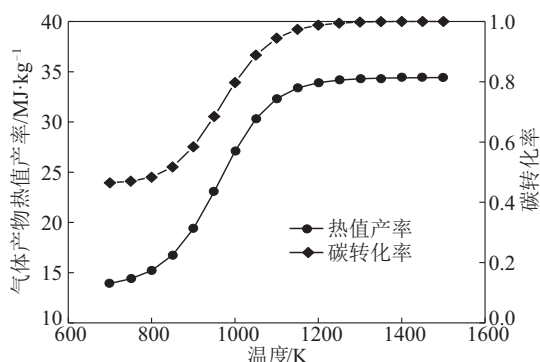


图3 褐煤的热值产率和碳转化率

Fig. 3 Heat value yield and carbon conversion rate of lignite

再增大的现象。反应温度超过 1250 K 后, 气化产物的组分基本不变, 此时热值也基本保持不变。

气化产物的产量和热值均无法综合评价气化产物的优劣。定义单位质量含碳物料产生的气化产物的总热值为气化产物的热值产率, 以热值产率作为气化产物的评价标准。根据图 3 可得出结论, 含碳物料中的固定碳在气化过程中逐渐转化为气体, 气化产物的热值产率随之提高。当碳转化率达到 100% 时, 热值产率也基本保持不变。反应温度越高, 所需太阳能的聚焦倍数越高, 经济性越差。通过改变其他反应条件使得达到较高热值产率的反应温度降低, 综合考虑调整水蒸气与含碳物料的比例最为简单易行。

1.4 水蒸气质量比对气化产物的影响

仍以褐煤为例, 调整水蒸气与含碳物料的质量之比 (S/C), 分别计算 S/C 为 0.50、0.84 (满足方程(1))、1.00、1.50 时, 在不同气化反应温度下, 气化产物的热值产率。如图 4 所示, 随着水蒸气比例的增加, 气化产物的热值产率基本不变的反应温度呈下降趋势。热值产率峰

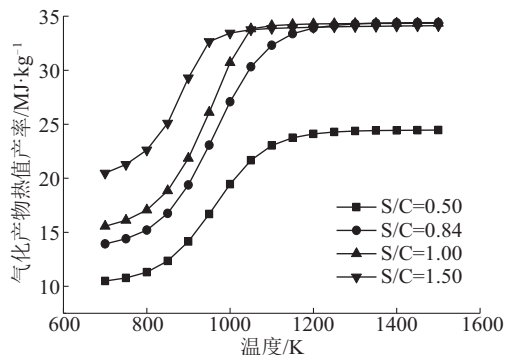


图4 热值产率与S/C关系

Fig. 4 Relationship between heat value yield and S/C

值的增幅随水蒸气比例的增加逐渐减小, 超过一定比例后, 过量的水蒸气使 CO 通过反应(6)转化为 H_2 , 反而使热值产率的峰值略微下降。对其他含碳物料而言, 也存在相似规律。为了实现含碳物料的充分利用, 气化反应中水蒸气与含碳物料的比例必须大小合适。过大会导致气化产物的热值产率下降, 过小则需要更高的反应温度。

2 效率分析

2.1 气化条件及合成气组分

根据前文分析结论, 对气化反应的反应温度及水蒸气质量比进行调整后, 最终选定气化温度为 1050 K, 褐煤、无烟煤、棉花秸秆和小麦秸秆的 S/C 分别为 1.0、1.7、0.4 和 0.4。在该条件下, 利用聚光太阳能气化含碳物料得到的气化产物组成如表 2 所示。

表2 4种含碳物料的气化产物(%)

Table 2 Gasification productions of four types of carbonaceous materials(%)

气化产物	褐煤	无烟煤	棉花秸秆	小麦秸秆
[H_2]	51.32	52.03	50.80	50.91
[CO]	39.35	36.35	37.72	35.72
[CO_2]	3.73	4.76	4.85	5.64
[H_2O]	4.22	5.91	5.67	6.98
[CH_4]	1.39	0.96	0.96	0.75

2.2 发电系统流程及效率分析

为了减少对聚焦太阳能的需求, 水蒸气需先在换热器中预热, 吸收气体产物的显热由 T_1 升温到 T_2 。如图 5 所示, 温度为 T_1 的含碳物料和温度为 T_2 的水蒸气一起进入反应器, 在 T_1 条件下发生气化反应生成气化产物。温度为 T_3 的气化产物离开反应器后进入换热器, 将水蒸气预热, 自身降温到 T_4 , 此时气化产物仍具有较高温度, 考虑到对能量的充分利用, 将此时的气化产物直接送入联合循环发电。

2.2.1 太阳能反应器

假定太阳能反应器的运行温度为 T_r , 其吸收输入的聚焦太阳能的能力使用吸收率 η_a 表示, 即反应所需的能量 Q_r 与输入的聚焦太阳能 Q_s 之比。太阳能反应器可视为理想黑体, 以简化计算^[5]。对于理想黑体而言, 其计算式为:

$$\eta_a = \frac{Q_r}{Q_s} = 1 - \frac{\sigma T_r^4}{IC} \quad (9)$$

式中, σ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数; I ——标准日照量; C ——通过太阳能反应器开口的平均通量聚光比。

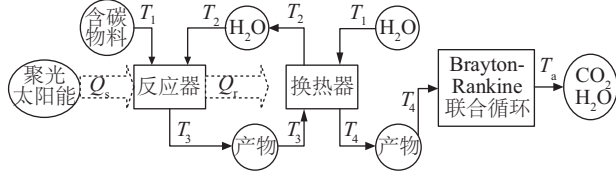


图5 发电系统流程

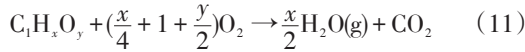
Fig. 5 Power generation system process

温度为 T_2 的水蒸气和温度为 T_1 的含碳物料进入反应器进行气化反应, 并达到平衡状态, 反应吸收的热量为:

$$Q_r = \sum \dot{n}_{i,in} h_{i,T_1} - \sum \dot{n}_{j,out} h_{j,T_3} \quad (10)$$

式中, $\dot{n}_{i,in}$ ——反应物的物质的量流量; $\dot{n}_{j,out}$ ——产物的物质的量流量, 代表 H_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 ; h_{i,T_1} ——物质 i 在 T_1 时的焓值, i 代表 H_2O 或含碳物料; h_{j,T_3} ——物质 j 在 T_3 时的焓值。

每千克含碳物料的焓值根据式(11)、式(12)计算:



$$\bar{h}_m = n_{H_2O} h_{H_2O,T_a} + n_{CO_2} h_{CO_2,T_a} - n_{O_2} h_{O_2,T_a} + LHV_m \quad (12)$$

式中, \bar{h}_m ——每千克含碳物料的焓值; n ——物质的量; h_{i,T_a} ——物质 i 在 T_a 时的焓值; T_a ——环境温度; LHV_m ——含碳物料的低热值。

反应器再反射损失的能量为:

$$Q_r = (1 - \eta_a) Q_s \quad (13)$$

2.2.2 换热器

水蒸气进入换热器时温度为 T_1 , 经过换热器内预热, 温度达到 T_2 时离开; 反应产物进入换热器时的温度为 T_3 , 经过换热器后温度降低到 T_4 并离开换热器。假定反应产物在换热器内成分不发生改变, 则在换热器内交换的热量为:

$$Q_{h-e} = \dot{n}_{H_2O,in} (h_{H_2O,T_2} - h_{H_2O,T_1}) = \sum \dot{n}_{j,out} (h_{j,T_3} - h_{j,T_4}) \quad (14)$$

2.3 燃烧发电

气体产物的发电方式可采用效率较高的 Brayton-Rankine 联合循环(C.C.), 其输出功和放热量分别为:

$$W_{C.C.} = \eta_{C.C.} \left(\sum \dot{n}_{j,out} h_{j,T_1} - \dot{n}_{H_2O,out} h_{H_2O,T_1} - \dot{n}_{CO_2,out} h_{CO_2,T_1} \right) \quad (15)$$

$$Q_{C.C.} = (1 - \eta_{C.C.}) \left(\sum \dot{n}_{j,out} h_{j,T_1} - \dot{n}_{H_2O,out} h_{H_2O,T_1} - \dot{n}_{CO_2,out} h_{CO_2,T_1} \right) \quad (16)$$

式中, $\eta_{C.C.}$ ——Brayton-Rankine 联合循环的效率, 假定为 55%^[5]。

含碳物料的直燃发电则采用 Rankine 循环(R.C.), 其输出功和放热量分别为:

$$W_{R.C.} = \eta_{R.C.} LHV_m \quad (17)$$

$$Q_{R.C.} = (1 - \eta_{R.C.}) LHV_m \quad (18)$$

式中, $\eta_{R.C.}$ ——Rankine 循环的效率, 假定为 35%^[5]。

使用 Brayton-Rankine 联合循环和 Rankine 循环这 2 种利用方式的总效率分别为:

$$\eta_{e.c.} = \frac{W_{C.C.}}{Q_{soQs} + LHV_m} \quad (19)$$

$$\eta_{eR.C.} = \eta_{R.C.} \quad (20)$$

每千克含碳物料所能输出的电能(EO , electricity output)按式(21)计算:

$$EO_k = \frac{W_k}{3.6} \quad (21)$$

式中, k ——C.C.或 R.C.。

将以含碳物料为燃料的 Rankine 循环发电作为评价标准, 即设定 Rankine 循环的电能增益系数为 1, 则以含碳物料的气化产物为燃料的联合循环发电的电能增益系数(electricity gain factor)计算方式为:

$$EGF_{C.C.} = \frac{W_{C.C.}}{W_{R.C.}} \quad (22)$$

CO_2 排放量(E_{CO_2})计算公式为:

$$E = \frac{M_{CO_2} (\dot{n}_{CO_2,out} + \dot{n}_{CO_2,out})}{EO} \quad (23)$$

式中, M_{CO_2} —— CO_2 的摩尔质量。

表 3 所示为太阳能输入、电能输出、 CO_2 排放的等完整数据。所有数据均在假定原料的质量流量为 1 g/s 条件下进行计算。计算所使用的基本参数有: $T_1 = T_a = 300$ K, $T_r = T_3 = 1050$ K, $p = 0.1$ MPa, $\eta_{C.C.} = 55\%$, $\eta_{R.C.} = 35\%$, $I = 1$ kW/m², $C = 2000$ 。根据表 3 可得: 1) 使用 Brayton-Rankine 联合循环的发电系统的效率可达 53.73%~54.73%, 明显高于效率仅为 35% 的 Rankine 循环发电系统, 电能增益系数则能达到 1.98~2.48; 2) 使用 Brayton-Rankine 联合循环的发电系统的 CO_2 排放量只有 0.47~0.48 kg/kWh, 相比后者而言减少了 51%~61%, 具有巨大的 CO_2 减排效益。

表3 发电系统效率及碳排放分析

Table3 Analysis of efficiency and carbon emission of power generation system

项目	褐煤	无烟煤	棉花秸秆	小麦秸秆
Q_d/kW	7.57	10.76	7.13	9.03
Q_{re}/kW	0.26	0.37	0.25	0.31
Q_{he}/kW	7.31	10.39	6.89	8.72
Q_{he}/kW	1.50	2.54	0.60	0.60
T_d/K	723	641	861	858
$W_{c.c.}/\text{kW}$	19.74	25.36	13.31	12.73
$Q_{c.c.}/\text{kW}$	16.15	20.75	10.89	10.42
$W_{r.c.}/\text{kW}$	9.98	12.50	6.15	5.13
$Q_{r.c.}/\text{kW}$	18.53	23.21	11.42	9.53
η_e	0.97	0.97	0.97	0.97
$\eta_{e.c.c.}/\%$	54.73	54.60	53.91	53.73
$\eta_{e.r.c.}/\%$	35.00	35.00	35.00	35.00
$EO_{c.c.}/\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$	5.48	7.05	3.70	3.54
$EO_{r.c.}/\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.77	3.47	1.71	1.43
$EGF_{c.c.}$	1.98	2.03	2.17	2.48
$E_{\text{CO}_2, c.c.}/\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$	0.47	0.48	0.48	0.48
$E_{\text{CO}_2, r.c.}/\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$	0.96	0.99	1.06	1.22

3 结 论

本文利用 HSC Chemistry 软件对聚焦太阳能气化含碳物料的气体组分进行化学平衡计算,在此基础上利用热力学第一及第二定律对发电系统的效率进行分析,主要结论如下:

1)含碳物料的碳转化率随反应温度的升高而逐渐提升直至达到 100%,但经济性反而降低。

2)增加水蒸气的质量比可降低达到碳转化率 100%的反应温度,但水质量比过大会导致气化产物的热值产率下降。

3)使用 Brayton-Rankine 联合循环的发电系统效率可达 53.73%~54.73%,电能增益系数能达到 1.98~2.48,明显优于效率仅为 35%的以含碳物料为燃料的 Rankine 循环发电。

4)使用 Brayton-Rankine 联合循环的发电系统的 CO_2 排放量只有 0.51~0.53 kg/kWh ,相比含碳物料的直燃发电系统减少了 51%~61%。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [2] 童家麟, 吕洪坤, 齐晓娟, 等. 国内生物质发电现状及应用前景[J]. 浙江电力, 2017, 36(3): 62-66.
TONG J L, LYU H K, QI X J, et al. Status quo and application prospect of domestic biomass power generation [J]. Zhejiang electric power, 2017, 36(3): 62-66.
- [3] 汤颖, 曹辉. 生物质气化技术研究进展[J]. 生物加工过程, 2017, 15(1): 57-62.
TANG Y, CAO H. Progress of biomass gasification technology [J]. Chinese journal of bioprocess engineering, 2017, 15(1): 57-62.
- [4] HEBECKER D, BITTRICH P, RIEDL K. Hierarchically structured exergetic and exergoeconomic analysis and evaluation of energy conversion processes [J]. Energy conversion and management, 2005, 46: 1247-1266.
- [5] ZEDTWITZ P V, STEINFELD A. The solar thermal gasification of coal- energy conversion efficiency and CO_2 mitigation potential [J]. Energy, 2003, 28(5): 441-456.
- [6] 白章, 刘启斌, 李洪强, 等. 太阳能驱动的生物质气化发电系统研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(12): 2537-2542.
BAI Z, LIU Q B, LI H Q, et al. Investigation of a power generation system integration with solar-driven biomass gasification [J]. Journal of engineering thermophysics, 2015, 36(12): 2537-2542.
- [7] 裘啸, 阎维平, 孙俊威, 等. 基于 Gibbs 自由能最小化原理模拟生物质流化床气化[J]. 可再生能源, 2011(4): 32-39.
QIU X, YAN W P, SUN J W, et al. Simulation of fluidized bed Gasification of biomass based on minimization of gibbs free energy [J]. Renewable energy resources, 2011(4): 32-39.
- [8] 吴治国. 煤气化原理及其技术发展方向[J]. 石油炼制与化工, 2015(4): 22-28.
WU Z G. Coal gasification principle and its technology development direction [J]. Petroleum processing and petrochemicals, 2015(4): 22-28.

- [9] 李琳娜. 生物质高温水蒸气气化制备富氢燃气的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- LI L. N. Researches on high temperature steam gasification of biomass to produce hydrogen-rich gas [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [10] 白章. 太阳能与生物质能热化学互补高效利用系统集成

成与方法[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016.

BAI Z. Integration mechanism for thermochemical hybrid utilization of solar thermal energy and biomass [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2016.

INVESTIGATION OF COMBINED CYCLE ELECTRICITY GENERATION SYSTEM DRIVEN BY CARBONACEOUS FEEDSTOCK GASIFIED BY CONCENTRATING SOLAR

Song Yang^{1,2}, Zeng Kuo^{1,2}, Yang Haiping¹, Shao Jing'ai¹, He Xiao¹, Chen Hanping¹

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy at Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The distribution of gasification products at different temperature and water vapor mass ratio is calculated with HSC Chemistry software, and the optimal gasification temperature of 1050 K is determined. The efficiency of electricity generation system driven by gasification product obtained from optimal condition is determined between 53.73% and 54.73%. At the same time, the electricity gain factor ranges from 1.98 to 2.48. It is better than the direct burning system driven by carbonaceous materials with efficiency of 35% and electricity gain factor of 1. The CO₂ emission of novel system is 0.47-0.48 kg/kWh and 51%-61% less than that of the direct burning system, which results significant reduction benefits of CO₂ emission.

Keywords: solar energy; biomass; gasification; syngas; Brayton-Rankine combined cycle