

# 添加聚乙烯的煤部分气化电-气联产系统分析

龚志军<sup>1,2</sup>, 华宇瑞<sup>1,2</sup>, 于戈文<sup>1</sup>, 武文斐<sup>1,2\*</sup>, 张智羽<sup>2,3</sup>

(1. 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用省部共建国家重点实验室培养基地, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010; 3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

**摘要:**设计并模拟了以循环流化床技术为龙头的煤部分气化电-气并联型联产系统,研究了不同聚乙烯添加比例、不同分流比的系统特性。结果表明,随着聚乙烯占比的增大,煤炭相对节省率相应提高,而整体多联产系统的热效率则在聚乙烯占比约为25%时达到最大值59.5%;随着气电分流比的增大,系统的热效率也增大,在聚乙烯占比为25%的系统中,气电分流比为0:1时,系统热效率高出传统的IGCC系统2%。

**关键词:**部分气化;电气联产;聚乙烯;添加比例

中图分类号:TQ541

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)09-0165-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.09.040

## Analysis of electric-syngas cogeneration system with partial gasification of coal by adding polyethylene

GONG Zhi-jun<sup>1,2</sup>, HUA Yu-rui<sup>1,2</sup>, YU Ge-wen<sup>1</sup>, WU Wen-fei<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Zhi-yu<sup>2,3</sup>

(1. Inner Mongolia Key Laboratory for Utilization of Bayan Obo Multi-metallic Resources Elected State Key Laboratory, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. College of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Parallel polygeneration system of power-syngas based on circulating fluidized bed partial gasification are designed and simulated by adding different proportion of polyethylene and changing splitting flow rate of syngas and power. The results show that the increase of the portion of polyethylene leads to the increase of the relative saving rate of coal. The thermal efficiency of polygeneration system reaches the maximum value of 59.5% when the portion of polyethylene is about 25%. By increasing the splitting flow rate, the thermal efficiency of polygeneration system is also increased. The thermal efficiency of the new system with 25% of polyethylene and 0:1 of the syngas-power splitting flow rate is 2% higher than the traditional IGCC system.

**Key words:** partial gasification; power-syngas generation; polyethylene; adding ratio

随着城市化进程的加快,城市废弃物的堆放处理成为城市的生活问题,其中废塑料是最常见的废弃物之一,由于体积大、重量小、难清洗等特点,造成了回收成本高,利用效率低,其有效利用问题亟待解决<sup>[1]</sup>。除了传统的垃圾焚烧热回收利用外,目前对塑料利用的研究逐步从直接作为锅炉燃烧的燃料向热解或气化的原料发展,对于塑料的热解已有大量研究<sup>[2-3]</sup>。塑料参与气化反应可以生成更加优质的气体燃料<sup>[4]</sup>,虽然可以实现能源的回收利用,但存在能量密度偏低,供给源不稳定,单独气化规模受限<sup>[5]</sup>等缺点。

煤完全气化技术通常用于IGCC或煤化工生

产,设备初投资高;而煤部分气化技术通常在气化参数较低的流化床中进行,可降低气化难度以及初投资<sup>[6]</sup>。煤部分气化产物有合成气和半焦,因此部分气化多联产涉及合成气的转化利用和半焦的利用。臧桂研<sup>[7]</sup>提出了煤部分气化氢电联产系统,揭示了系统的热力特性;Li等<sup>[8]</sup>进行了煤部分气化不同技术路线下甲醇电力联产系统的可行性研究;Zhang等<sup>[9]</sup>研究了氧吹条件下煤部分气化的燃气-蒸汽联合循环系统。

本文建立以煤部分气化为基础,联供废塑料多能源互补利用的多联产系统,揭示添加废塑料对系统热力特性影响与能量在子系统的转移规律。研究

收稿日期:2016-02-29;修回日期:2016-06-29

基金项目:内蒙古应用技术与开发资金计划(20130310);内蒙古自然科学基金项目(2014MS0531,2014MS0210);内蒙古高校创新团队研究计划(NMGIRT1406);国家自然科学基金项目(21466029)

作者简介:龚志军(1977-),男,副教授,研究方向为煤基多联产系统集成,hyrss01@163.com;武文斐(1964-),男,教授,研究方向为高效洁净燃烧,通讯联系人,www.fll23@163.com。

基于 Aspen Plus 对子系统建模计算并进行物料和能量衡算。

### 1 系统设计

相比于完全气化,部分气化后合成气产量较低,因此将废塑料添加于煤部分共气化中不仅产生优质气体燃料,也弥补自身能量密度低,供给源不稳定的缺点。本文中用聚乙烯塑料与枣庄高灰分煤作为原料,物性参数见表 1。系统分为部分气化子系统、半焦燃烧子系统和联合循环子系统,系统流程如图 1。原料经氧气、水蒸汽联合气化后由废锅回收合成气显热,粗合成气冷凝后在净化单元除尘并由低温甲醇洗工艺脱除酸性气体。洁净合成气经分流,一部分作为产品,一部分进入联合循环子系统。气化所产半焦则进入增压流化床锅炉燃烧,利用其热能。系统中主要设备的操作参数见表 2。

本文中设计了不同聚乙烯占比(PE%)入料(分别为 0%、25%、50%、75%),入料总质量流量为 10 000 kg/h。系统采用并联型生产形式,通过调节分流比可实现系统的变工况特性,设计计算过程中拟定分流比为 1:1。

表 1 聚乙烯及煤的工业分析和元素分析

原料	工业分析/%				低位热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )
	水分	灰分	挥发分	固定碳	
聚乙烯	0.32	2.76	97.01	0.00	46.20
原煤	2.04	22.87	28.52	46.57	24.40
半焦	1.42	69.31	2.17	27.10	9.11

原料	元素分析/%					低位热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )
	C	H	O	S	N	
聚乙烯	84.66	8.00	0.00	0.56	6.58	46.20
原煤	59.97	3.94	9.65	0.74	0.76	24.40
半焦	27.30	0.05	1.21	0.18	0.53	9.11

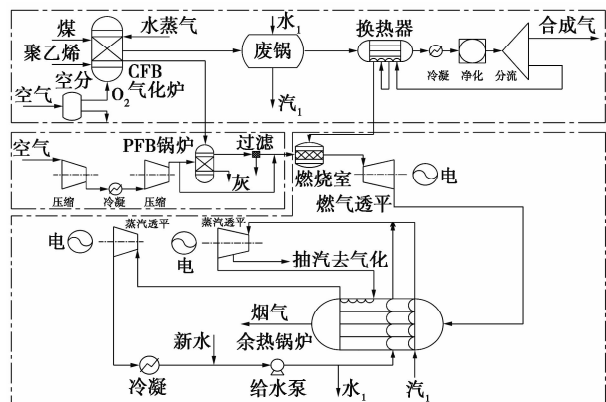


图 1 多联产系统流程图

表 2 主要设备的运行参数

项目	参数
气化温度/°C	975
气化压力/MPa	2.50
半焦燃烧锅炉(PFB)温度/°C	850
半焦燃烧锅炉(PFB)压力/MPa	1.5
燃气初温/°C	1300
燃气终温/°C	588
压缩机压比	14.8
等熵效率/%	87.5
压缩机机械效率/%	98
燃气轮机等熵效率/%	89.5
主蒸汽温度/°C	540
再热蒸汽温度/°C	540
主蒸汽压力/MPa	12
再热蒸汽压力/MPa	2.26
排气压力/kPa	6
冷凝温度/°C	36.20
燃气透平绝热效率/%	87
燃气透平机械效率/%	98
蒸汽透平绝热效率/%	87
蒸汽透平机械效率/%	98

#### 1.1 部分气化子系统

部分气化采用循环流化床气化技术,原料和气化剂并流进入气化炉内,在短时间内完成干燥、挥发分脱出、裂解、燃烧等物理化学过程,通过调整循环倍率来控制部分气化的碳转化率,将半焦从气化炉内分离,具体模型如图 2 所示,通过“限制平衡反应法”修正后的气化模型可以较好地反映部分气化特性。模拟参数与模拟结果如表 3 所示。

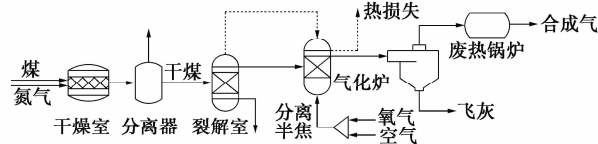


图 2 煤部分气化模拟流程

#### 1.2 半焦燃烧子系统

半焦燃烧采用增压流化床锅炉,一方面克服半焦因挥发分含量少而不易燃的缺点<sup>[10]</sup>,另一方面空气仅需 1 次压缩即可满足流化床锅炉和燃气燃烧室的压增。鼓入的压缩空气分为 2 股,一股满足半焦的充分燃烧并通过混合方式预热,另一股进入燃气轮机燃烧室的空气,最后和合成气混合于燃气-蒸汽联合循环系统进行燃烧发电。半焦燃烧过剩空气系数为 1.25,混合后燃气轮机的入口温度为 625°C。

表3 模拟结果和模拟参数

PE/%	组分摩尔分数/%							总气量/ (kmol·h <sup>-1</sup> )	冷煤气 效率/%	
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S + COS			
0	36.10	30.40	11.90	18.90	2.10	0.30	0.20	877.85	68.89	
25	38.40	34.20	8.90	13.50	4.00	0.80	0.20	937.49	69.99	
50	38.90	37.10	6.70	9.40	6.30	1.30	0.20	982.32	70.21	
75	37.90	39.50	4.80	6.20	9.60	1.80	0.20	1012.48	70.13	
气化炉入料量/(kg·h <sup>-1</sup> )				10000			气化温度/℃		972	
入炉氧气量/(kg·h <sup>-1</sup> )				3190			气化压力/MPa		2.5	
入炉蒸汽量/(kg·h <sup>-1</sup> )				5158			碳转化率/%		85	

### 1.3 联合循环子系统

联合循环子系统由燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机、冷凝器和给水泵组成,合成气与压缩空气在燃烧室内燃烧,推动燃气透平做功,高温烟气进入余热锅炉,将来自气化废锅处的饱和蒸汽以及部分冷凝水加热为12 MPa、540℃的过热蒸汽,蒸汽推动蒸汽透平发电,烟气排放温度为135℃。联合循环过程选用Siemens V级燃气轮机(具体参数见表2),适合所产生的中热值煤气<sup>[11]</sup>。

## 2 评价准则

使用热力学第一定律分析方法对多联产系统进行合理评价和定量分析,选取以下评价指标。

系统总热效率:

$$E_{if} = \frac{\sum \varphi_{\text{useful products}}}{(\sum \varphi_{\text{feed stocks}} + \sum \varphi_{\text{utilities}})}$$

式中,  $\sum \varphi_{\text{useful products}}$  为系统净输出能;  $\sum \varphi_{\text{feed stocks}}$  为系统的总输入能;  $\sum \varphi_{\text{utilities}}$  为公用工程(水、电、汽)的总消耗能。系统的热效率是基于低热值(LHV)。

煤炭相对节省率:

$$\delta_c = (m_{\text{cal}} - m_{\text{ref}}) / m_{\text{cal}}$$

式中,  $m_{\text{cal}}$  为全煤部分气化系统所消耗的煤炭量;  $m_{\text{ref}}$  为添加聚乙烯后,通过调节入料总量达到与全煤有相同的生产能力时的煤炭消耗量。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 系统的物料与能量衡算

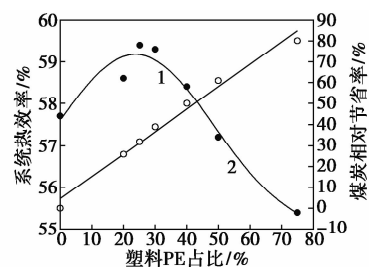
充分考虑系统公用工程的消耗,结果如表4、表5所示。随着PE%增大,煤炭相对节省率提高。这是由于随着PE%的增大,考虑到它有更好的气化特性,所以在达到全煤部分气化相同的生产能力时,总入料量呈下降趋势,即可以减少煤炭的消耗。而随着PE%增大,合成气产量、电产量明显提高,但系统热效率却呈先增高后降低的趋势(见图3)。从系统的输入原料与输出产品联合分析得知,聚乙烯的

表4 系统的物料衡算

PE质量 分数/%	输入/(kg·h <sup>-1</sup> )					
	煤	PE	O <sub>2</sub>	空气量	循环水	新水
0	10000	0	3910	60008	12242	5158
25	7500	2500	3910	69241	14442	5158
50	5000	5000	3910	76454	16242	5158
75	2500	7500	3910	79338	17242	5158
PE质量 分数/%	输出/(kg·h <sup>-1</sup> )					
	合成气	燃气发电/MW	蒸汽发电/MW			
0	4210	14.01	6.63			
25	5279	16.26	7.54			
50	6002	18.07	8.29			
75	6762	18.87	8.71			

表5 系统的能量衡算

PE质量 分数/%	输入/MJ					
	煤	PE	O <sub>2</sub>	空气	循环水	新水
0	244010	0	17189	0	51.29	36.72
25	183008	115000	17189	0	60.51	36.72
50	122005	230000	17189	0	68.05	36.72
75	61003	345000	17189	0	72.24	36.72
PE质量 分数/%	输出/MJ					
	合成气	燃气发电/MW	蒸汽发电/MW			
0	83501.47	50444.73	23858.99			
25	108394.70	58553.39	27155.74			
50	123207.94	65051.81	29853.08			
75	141860.60	67942.11	31351.61			



1—系统热效率;2—煤炭相对节省率

图3 PE占比对热效率和煤炭节省率的影响

热值约为所用煤炭热值的 2 倍,在添加 PE% 小于 25% 时,随着 PE% 的增加,产品热值的增加速率大于原料低位总热的增加速率,即 23.07% > 22.13%; 而当 PE% 大于 25% 时,随着 PE% 的增加,产品热值的增加速率小于原料低位总热的增加速率,即 12.36% < 18.12%。在 PE% 约为 25% 时达到最大值 59.5%,此时相比全煤部分气化系统热效率提高了 2%。

### 3.2 能量在主要子系统系统中的转移与分布

为考察能量在系统中的损失情况,指定原料的低位热值 100 作为计算基准,分析能量在气化、净化、半焦燃烧以及联合循环等过程中的转移与分布,结果如图 4 及表 6 所示。

表 6 能量在各子系统系统中的转化效率

系统	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
PE 0%	68.89	10.92	0.45	34.22	9.28	34.22	20.67	9.77
PE 25%	70.00	7.68	0.36	34.82	6.68	34.82	19.65	9.11
PE 50%	70.21	5.43	0.29	34.98	4.83	34.98	18.48	8.48
PE 75%	70.12	3.77	0.24	34.94	3.39	34.94	16.73	7.72

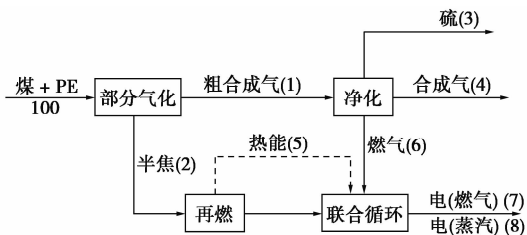


图 4 能量分布图

由表 6 可见,增加聚乙烯可以增加部分气化的冷煤气效率,随 PE% 的增大,部分气化的冷煤气效率维持在 70% 左右,半焦的热值减少,导致热损失增加,PE% 每增加 25%,部分气化热损失增加 2% 左右。上述内容只考虑了原料能量在子系统的转移规律,并非真实的热效率。针对本文中的计算实例,需要 3 190 kg/h 的纯氧,约为 8 396 m<sup>3</sup>/h。根据现有的空分规模至少需要 10 000 m<sup>3</sup> 的空分规格,以耗电为例,计算可知空分耗能约为 4 590 MJ,占原料能量的 1.2% ~ 2.0%。

### 3.3 变工况特性

多联产系统的特征之一是具有灵活的可调性,以 PE% 为 25% 计算,气电分流比为 0、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3 6 种工况,系统热效率如图 5 所示,当气电比为 0:1 时,系统的热效率为 46.8%,随气电分流比增大,系统热效率增高,这是由于随分流比的增大,合成气的化学能向电能转化的份额减小,热损失相应减少。

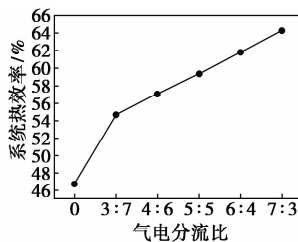


图 5 系统变工况特性

## 4 结论

(1) 煤部分气化联产系统添加聚乙烯后,随占比 (PE%) 增大,煤炭相对节省率提高,整体热效率先增后减;添加聚乙烯比为 25% 时,热效率达最大值 59.5%,相比全煤部分气化系统,热效率提高 2%。

(2) 煤部分气化添加聚乙烯后,气化冷煤气效率明显提高,约提高 2%,随着 PE% 增大,冷煤气效率变化不大,维持在 70% 左右。

(3) 通过调节分流比适应不同的生产需求,随着气电分流比增大,系统热效率也增大。添加 25% 聚乙烯塑料的煤部分气化多联产系统,当合成气全部用来发电时,系统热效率高于传统的 IGCC 系统 2%。

## 参考文献

- [1] 李军旗. 高炉喷吹煤与废塑料混合燃料的应用基础研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2007.
- [2] Wikstrom H. Combustion of an artificial solid waste in a laboratory fluidized bed reactor[J]. Waste Manage Res, 1998, 16(4): 342 - 350.
- [3] Motegi M, Tago Y, Hagiya M, et al. Pyrolysis gasification and melting system for MSW-1st report summary of demonstration plant[J]. Ishika-Wajima-Harima, 1998, 38(2): 78 - 82.
- [4] 白章, 刘启斌, 李洪强, 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): 113 - 117.
- [5] 车德勇. 基于物化结构特征的生物质与煤共气化特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- [6] 骆仲浚, 王勤辉, 方梦祥, 等. 煤的热电气多联产技术及工程实例书[M]. 北京:化学工业出版社,2006:9 - 10.
- [7] 臧桂研. 捕获 CO<sub>2</sub> 的部分煤气化氢电联产系统[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2013.
- [8] Li Y Y, Zhang G Q, Yang Y P, et al. Thermodynamic analysis of a coal-based polygeneration system with partial gasification[J]. Energy, 2014, 72: 201 - 214.
- [9] Zhang G Q, Yang Y P, Jin H G, et al. Proposed combined-cycle power system based on oxygen-blown coal partial gasification[J]. Applied Energy, 2012, 102: 735 - 745.
- [10] 李社锋, 方梦祥, 李永旺, 等. 多联产半焦的加压着火及燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(1): 28 - 31.
- [11] 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): 965 - 969. ■