

甲醇/电联产系统能耗特性

李 政, 刘广建, 倪维斗

(清华大学热能工程系, 北京市 海淀区 100084)

Energy Consumption Performance of Methanol/Electricity Cogeneration Systems

LI Zheng, LIU Guang-jian, NI Wei-dou

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The primary energy conservation of a methanol/IGCC cogeneration system was compared with separate production of methanol and power. Different mathematical models were developed to describe relative energy saving, relative energy saving ratio and energy saving criterion relation for the cogeneration system. Based on chemical product and power ratio and system efficiency, the energy saving zone diagram were developed, which can clearly show the energy performance of results from related literatures. Based on different energy utilization ways of the syngas, the definition of cogeneration syngas and non-cogeneration syngas was made, this leads to a rational allocation of primary energy to the coupled energy forms for cogeneration. The parallel polygeneration system based on once-through liquid-phase synthesis was used as case study, the result shows the heat integration of whole system is the main factor to the energy saving.

KEY WORDS: cogeneration system; coal gasification; relative energy saving ratio; cogeneration syngas

摘要: 以一次能源消耗为统一基准推导了联产系统相对分产系统的相对收益、相对节能率和节能判据关系式。得到以化电比和联产系统效率表达的节能分区图, 可以清楚地展示和比较国内外文献中多联产系统的节能效果。根据联产系统中合成气的不同利用途径, 定义了联产气和非联产气, 并据此建立了联产系统化电分摊的理论模型。以并联液相富 CO 一次通过多联产系统为例, 对联产系统的节能原因进行了分析。结果表明: 全系统的热量耦合是联产系统节能的主要原因。

关键词: 联产系统; 煤气化; 相对节能率; 联产气

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90210032); 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB221207)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (90210032); Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China (2005CB221207).

0 引言

煤气化动力-化工联产系统是未来清洁煤利用技术的重要选择之一^[1]。其基本出发点是: 通过对热工过程和化工过程的有机耦合和集成优化, 使得联产系统相对单独生产系统, 具有简化工艺流程、提高燃料利用效率以及改善经济性能等特点^[2-5]。由于联产系统同时输出 2 种主要产品——电力和化工产品, 因此常规的热一定律效率等能量评价指标并不能客观、充分地反映联产系统的节能效果。建立正确表征和评价联产系统能耗特性的指标及方法是值得研究的命题。

目前, 关于多联产系统能耗特性的研究并不多见。文献[6-7]针对不同的甲醇/电力多联产方案, 采用系统热效率作为能量利用效率评判的标准; 文献[8-9]对甲醇-电串联型多联产系统进行了焓分析, 研究了系统各子过程的能量利用情况; 文献[10-12]针对特定的甲醇/电联产系统, 通过比较联产系统和单产系统在各子过程的焓损大小, 揭示了联产系统能量转换的基本规律。由于采用的流程形式、模拟参数及评价基准不同, 各文献的结果也不完全一致。

尽管化工/动力多联产系统的耦合方式要比热电联产复杂得多, 但就多产品而言, 两者存在相似性, 热电联产中关于多产品输出的能量分析方法和评价指标^[13-15]可以借鉴。因此针对一般化的多联产系统, 本文借鉴热电联产能量分析方法, 建立了联产系统的节能模型, 并推导了系统节能判据, 旨在为联产系统集成提供理论依据, 同时依据联产系统中合成气的不同能量利用方式(即是否参与联产), 提出了一种化电分摊理论模型, 从而能够定量描述联产系统各个过程的能耗特性。

1 联产系统节能模型分析

1.1 能耗模型建立

假如市场需求的电量和化工产品(以甲醇为例)的能量分别为 P_0 、 Q_0 。考虑一般情况,联产系统所提供的化工产品、电力输出为 P_c 、 Q_c ,不足发电量 $P_0 - P_c$ 及化工产品产量 $Q_0 - Q_c$ 由分产的IGCC系统(效率 η_{SEP}^P)和基于Lurgi气相甲醇合成技术的甲醇分产系统(效率 η_{SEP}^{ME})满足。如图1所示。

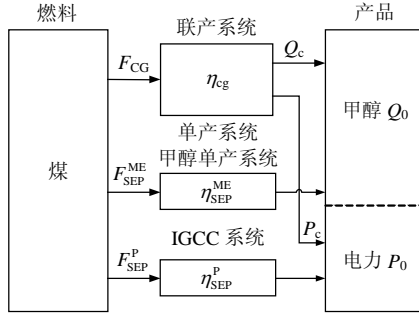


图1 考虑市场需求的组合系统示意图
Fig. 1 Scheme of combined systems with requirement of market demand

为了简化起见,以外界化工产品和电的需求为基准将以下参数量化为无因次量:

$$K_P = P_c / P_0 \quad (1)$$

$$K_{ME} = Q_c / Q_0 \quad (2)$$

定义联产机组的化电比 K 为

$$K = Q_c / P_c \quad (3)$$

为了考察组合系统的能耗特性,定义组合系统能耗的相对收益率 $\Phi^{[13]}$ 为

$$\Phi = 1 - \frac{E_c}{E_s} = \frac{\frac{K}{K_{ME}} + \frac{1}{\eta_{SEP}^{ME}} - \frac{K+1}{\eta_{SEP}^P} - \eta_{cg}}{\frac{K}{K_{ME}} + \frac{1}{\eta_{SEP}^{ME}} + \frac{1}{K_P} + \frac{1}{\eta_{SEP}^P}} \quad (4)$$

式中 E_c 、 E_s 分别为组合系统和分产系统的一次能耗。式(4)的物理意义为:在满足市场需求的化工产品和电量的条件下,采用图1所示的组合系统相对于化工/动力分产系统的一次能耗的相对减少量。显然, Φ 越大意味着组合系统的节能优势越明显。从式(4)中可以看出:

$$\Phi = f(\eta_{cg}, \eta_{SEP}^{ME}, \eta_{SEP}^P, K, K_{ME}, K_P) \quad (5)$$

若联产机组给定,如: $K=0.56$, $\eta_{cg}=47.6\%$, $\eta_{SEP}^P=40\%$, $\eta_{SEP}^{ME}=51.8\%$ 条件下,考察外界负荷 K_P 、 K_{ME} 对组合系统相对收益率的影响,其中 $K_P=100\%$, 70% , 50% , 40% , 30% ,如图2所示。从图中可以看出:

(1) 当 K_P 、 K_{ME} 增大时, Φ 增大。表明随着

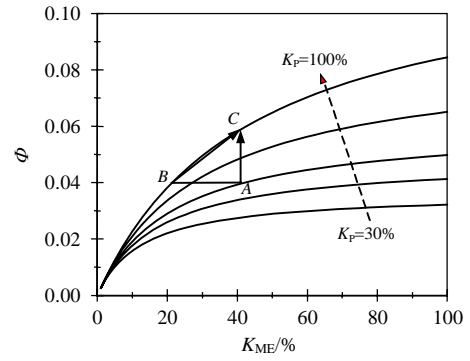


图2 组合系统的相对收益率分析

Fig. 2 Relative energy saving for combined system

联产机组输出产品占市场需求的份额越来越大,则组合系统的相对收益率也越来越大。

(2) 当 K_{ME} 较小时,比如 $K_{ME} \leq 20\%$ 时,随着 K_P 的增大, Φ 值变化比较平缓。这表明当联产系统产出的化工品远远不能满足市场需求时,组合系统与分产系统相比优势并不明显。

(3) 当联产机组给定且 K_{ME} 较大时(比如 $K_{ME} \geq 20\%$ 时), K_P 和 K_{ME} 对 Φ 的影响程度不同。例如:对于图中点A,其 Φ 值约为0.04。可以通过途径BC(保持 K_P 不变,增加 K_{ME})或者AC(保持 K_{ME} 不变,增加 K_P)使得 Φ 值增加到0.06。从图中可以粗略估算到:由B→C, K_{ME} 由21%上升到42%;而由A→C, K_P 由50%上升到100%。可见为了达到较高的相对收益率,联产系统应当承担市场电力需求的主体。

(4) 在 $K_P=1$, $K_{ME}=1$ 时,组合系统具有最大的 Φ 值。即当联产系统恰好满足市场化工、动力需求时,组合系统具有最大的相对收益率。

1.2 节能条件

当用户侧化工品、电力完全由联产系统机组生产时,组合系统具有最大的节能潜力。引入无因次量:联产系统相对节能率 i_{FESR} ,计算公式如下:

$$i_{FESR} = \frac{E_s - E_c}{E_s} = 1 - \frac{(K+1)/\eta_{cg}}{\frac{K}{\eta_{SEP}^{ME}} + \frac{1}{\eta_{SEP}^P}} \quad (6)$$

由式(6)可知联产系统的节煤条件:

$$\eta_{cg} \geq \frac{K+1}{\frac{K}{\eta_{SEP}^{ME}} + \frac{1}{\eta_{SEP}^P}} = [\eta_{cg}] \quad (7)$$

式中 $[\eta_{cg}]$ 称为联产系统的临界能量效率。式(7)表明,只有当联产系统的能量效率高于临界热效率 $[\eta_{cg}]$ 时,联产系统才能达到节能的目的。

式(7)为多联产系统能否节能提供了理论判据。比如:如果假定联产系统的总热效率不低于45%,在 $\eta_{SEP}^P=40\%$, $\eta_{SEP}^{ME}=51.8\%$ 假设条件下,可以计算

得到联产系统的化电比 $K \geq 0.952$ 。如果假定发电功率为 300 MW, 则对应的临界甲醇产量为 1 088.96 t/d (甲醇高位热值取 22.66 MJ/kg), 如果按照年运行时间 7 446 h, 则临界甲醇产量为 33.8 万 t/a。

一般来说 $\eta_{SEP}^{ME} \geq \eta_{SEP}^P$, 因此多联产系统的总热效率的下限为 $\eta_{cg} = \eta_{SEP}^P$, 即多联产机组的热效率应该至少大于参考 IGCC 电站的效率。

由于多联产系统在中国没有示范工程, 大多数研究结果来自文献。因此本文收集、整理了关于甲醇/电联产系统流程模拟的相关文献, 对联产系统的节能判据进行了验证, 见表 1, 其中燃料甲醇的热值取高位发热量。文献[8-10]中的数据是以 1 kg煤为基准计算的。

图 3 为联产系统的节能约束曲线, 从图 3 可以看出:

表 1 不同的多联产系统性能表

Tab. 1 Energy performance of different polygeneration systems

案例	给煤/MW	甲醇输出/MW	电力输出/MW	化电比	系统热效率/%	技术特征	数据来源
1	1 320.6	357.6	263.0	1.36	46.99	并联+气相法(4.5:1)	文献[6]
2	1 320.6	81.8	462.0	0.18	41.18	并联+液相富 CO 一次通过	文献[6]
3	1 320.6	143.3	422.0	0.34	42.80	并联+液相富 CO 循环(1:1)	文献[6]
4	1 320.6	106.0	408.0	0.26	38.92	并联+液相法富氢一次通过	文献[6]
5	1 320.6	347.0	267.0	1.30	46.50	并联+液相法富氢循环(3:1)	文献[6]
6	1 320.6	187.5	400.0	0.47	44.48	串联+富 CO 气体一次通过	文献[6]
7	1 320.6	177.7	297.0	0.60	35.94	串联+富 H ₂ 气体一次通过	文献[6]
8	1 085.0	281.7	247.0	1.14	48.73	串联+全变换+一次通过	文献[7]
9	25.2	10.0	3.2	3.10	52.61	串联+全变换+一次通过	文献[8]
10	23.5	4.9	6.0	0.82	46.66	串联+全变换+一次通过	文献[9]
11	27.3	4.7	8.3	0.56	47.62	并联型多联产系统	文献[10]
12	27.3	9.0	5.8	1.54	54.17	串联+无变换+适度循环	文献[10]
13	27.3	6.7	6.4	1.04	47.92	串联+全变换+一次通过	文献[10]
14	27.3	4.7	8.6	0.55	48.51	串联+无变换+一次通过	文献[10]

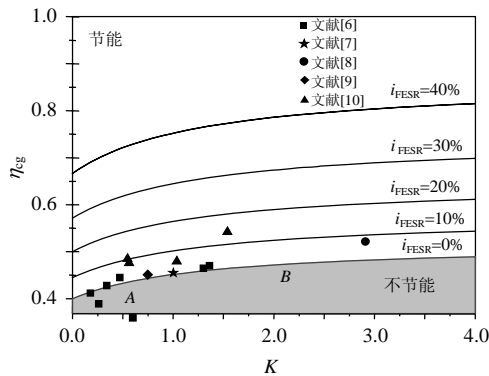


图 3 联产系统节能约束曲线

Fig. 3 Boundary condition of energy saving

(1) 相对节能率等于 0 的曲线下方为不节能区域, 上方为节能区域。

(2) 随着化电比的增加, 联产系统节能的要求越来越苛刻, 体现在对联产系统的总热效率要求的提高。举例: 考察图 3 中分别对应 $K=0.5$ 和 $K=2$ 的 A、B 2 点。对于 A 点, 当联产系统热效率高于 43.3% 时, 联产系统即可以节能; 而对于 B 点, 联产系统的节能条件为热效率不低于 47.16%。

(3) 理论上讲, 联产系统的热效率最高为 100%, 对应的最大相对节能率在 40% 以上。然而在选定的参比分产系统效率的条件下, 联产系统的

相对节能率仅在 10% 左右。从各文献模拟结果来看, 尽管采用的模拟方法及关键参数选取有所不同, 但是总的效率和化电比符合本文的推理。

(4) 显然, 图 3 曲线的具体形状和数据与绘图选取的分产系统的效率有关, 但不影响定性结论。

2 联产系统化电分摊理论模型

公式(7)给出了联产系统的节能条件, 然而其效率定义是系统输出产品的总能量占输入燃料能量的比值, 无法反映联产系统中的总能耗在化工和电力生产过程的分配情况, 从而也无法定量描述联产系统节能效益的原因和分布。为此, 借鉴热电联产系统中总能耗分配方法(热量法)的分析思路, 建立了联产系统化电分摊的理论模型。

图 4 为串并联多联产系统示意图。根据合成气在系统内部的不同能量利用方式, 进入动力岛的燃料可以分为 2 种: 一种来自气化岛出口的气化煤气, 本文定义其为非联产气; 另一种来自甲醇合成后的驰放气, 定义为联产气。如果不考虑气化炉的压力等参数的影响, 可以认为非联产气在动力岛中做功能力等同于 IGCC 系统中的气化煤气, 没有节能效果。因此, 多联产系统的节能主要体现在联产气在

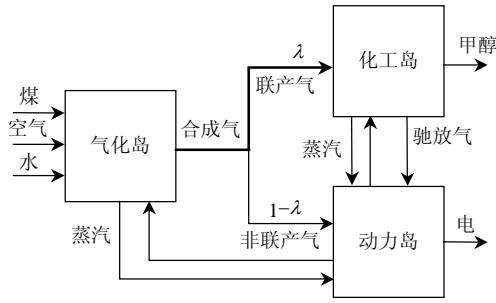


图4 串并联多联产系统示意图

Fig. 4 Simplified schematic diagram of serial and parallel polygeneration system

甲醇合成和发电部分的节能。

图5为多联产系统与分产系统的能量框图。首先应化为可比条件,即按照能量供应相等的原则,假设系统化、电产量分别为 $E_m(\text{MW})$ 、 $E_p(\text{MW})$ 。联产系统总煤耗(E_c)可以表示为化工合成用煤(E_{c1})和发电用煤(E_{c2})之和。 E_1 、 $E_{1'}$ 、 $E_{1''}$ 分别表示联产系统、甲醇单产系统、IGCC系统的气化岛出口合成气的能量; E_u 表示甲醇合成弛放气的能量; λ 表示联产气占总合成气的比例; Q_1 、 $Q_{1'}$ 分别表示联产系统、IGCC系统的气化岛回收热量; Q_2 表示联产系统化工岛回收的热量。

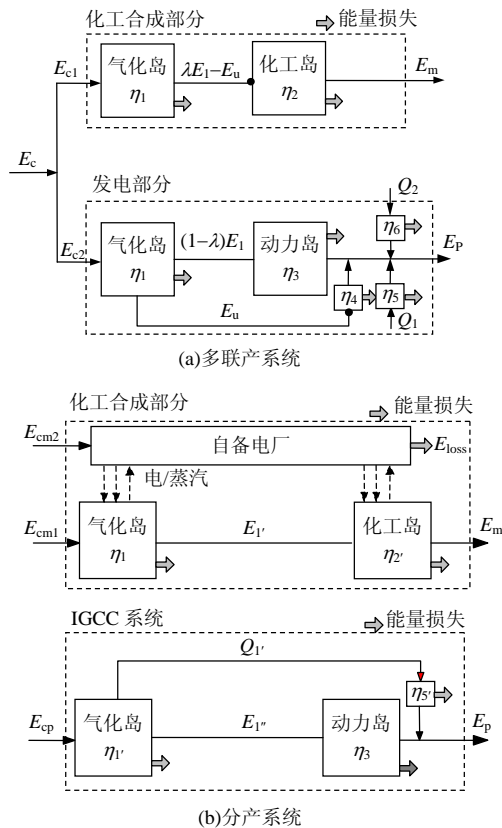


图5 计算多联产系统较分产系统节能的示意图

Fig. 5 Simplified diagram used to calculate energy saving between polygeneration system and separated systems

(1) 甲醇合成过程。

对于多联产系统,定义气化岛的气化效率 η_1 、折合的甲醇合成效率 η_2 如下:

$$\eta_1 = \frac{\lambda E_1 - E_u}{E_{c1}} = \frac{E_1}{E_c} \quad (8)$$

$$\eta_2 = \frac{E_m}{\lambda E_1 - E_u} \quad (9)$$

则生产甲醇 E_m ,所消耗的燃料为

$$E_{c1} = E_m / (\eta_1 \eta_2) \quad (10)$$

对于甲醇单产系统,其燃料消耗 E_{cm} 包括化工合成的原料煤消耗 E_{cm1} 以及为了满足系统内部电力、蒸汽等公用工程需求的动力煤消耗 E_{cm2} 。不妨假定甲醇单产系统的气化效率与多联产系统相同,则

$$E_{cm} = E_{cm1} + E_{cm2} = \frac{E_m}{\eta_1 \eta_2} + E_{cm2} \quad (11)$$

甲醇合成过程中,联产系统相对分产系统的一次能耗节省:

$$\Delta E_c^m = E_{cm1} + E_{cm2} - E_{c1} = \frac{E_m}{\eta_1} \left(\frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_2} \right) + E_{cm2} \quad (12)$$

(2) 发电过程。

对于联产系统,为了表示不同的能量形式在动力岛的做功能力,假定非联产气、联产气、化工岛热量回收、气化岛热量回收在动力岛的效率分别为 η_3 、 η_4 、 η_5 、 η_6 ,则

$$E_p = (1-\lambda)E_1\eta_3 + E_u\eta_4 + Q_1\eta_5 + Q_2\eta_6 \quad (13)$$

$$E_{c2} = \frac{(1-\lambda)E_1 + E_u}{\eta_1} \quad (14)$$

综合式(13)、(14)可得联产系统发电过程所消耗的燃料为

$$E_{c2} = \frac{E_p - [E_u(\eta_4 - \eta_3) + Q_1\eta_5 + Q_2\eta_6]}{\eta_1\eta_3} \quad (15)$$

对于IGCC系统,进入动力岛的能量主要有合成气 $E_{1'}$ 和气化岛回收热量 $Q_{1'}$ 。燃料消耗 E_{cp} 为

$$E_{cp} = (E_p - Q_{1'}\eta_5) / (\eta_{1'}\eta_3) \quad (16)$$

不妨假定 $\eta_{1'} \approx \eta_1$,则发电过程中,联产系统相对分产系统的一次能耗节省:

$$\Delta E_c^p = E_{cp} - E_{c2} = \frac{E_u(\eta_4 - \eta_3) + Q_1\eta_5 + Q_2\eta_6 - Q_{1'}\eta_5}{\eta_1\eta_3} \quad (17)$$

从式(17)可以看出联产系统相对分产系统在发电部分的节能优势主要体现在2个方面:① $E_u(\eta_4 - \eta_3) / (\eta_1\eta_3)$,当燃气轮机型号选定时,由于弛放气和气化煤气的能量密度(热值)不同,单位能量输入的弛放气和气化煤气在燃气轮机系统中做功

能力会有所不同^[16]，从而引起了燃料节省(或额外消耗)；② $(Q_1\eta_5 + Q_2\eta_6 - \eta_1\eta_5)/(\eta_1\eta_3)$ ，联产系统全局热量集成对联产系统发电带来的额外好处引起的燃料节省。

综合式(12)、(17)可知在相同产品输出条件下，联产系统的能耗分摊模型为

$$\Delta E_c = \Delta E_c^p + \Delta E_c^m = [(E_u(\eta_4 - \eta_3) + Q_1\eta_5 + Q_2\eta_6 - Q_1\eta_5)/(\eta_1\eta_3)] + \frac{E_m}{\eta_1} \left(\frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_2} \right) + E_{cm2} \quad (18)$$

3 案例分析

通过多联产系统的化电分摊模型，能够较深入地研究多联产系统各部分的能耗特点和系统的节能性，从而为多联产系统设计和优化提供参考。以并联液相法富 CO 一次通过多联产系统(EI-PCOOTM)为例，对联产系统的节能特性进行进一步的研究。

选用兖州煤作为多联产系统的燃料，煤种特性及系统关键单元参数选择详见文献[7]。在计算相对节能率过程中，忽略系统规模对效率的影响。采用 Aspen plus 流程模拟软件对联产系统和分产系统进行流程模拟，得到了基本的物质和能量平衡关系。结果见表 2。

从表 2 可以看出，联产系统的相对节能率为 9.15%，其中甲醇合成过程燃料节省占总燃料节省的 5.06%。发电过程燃料节省主要来自全系统的热量回

表 2 联产系统能耗分摊计算结果

Tab. 2 Result of energy saving allocation of polygeneration system

项目	IGCC	气相甲醇单产系统	EI-PCOOTM
输入 质量流量/(kg/s)	35.41	21.8 ^① /3.77 ^②	34.2
煤 E_{coal}/MW	1010.1	621.87/107.54	975.6
输出 质量流量/(kg/s)	—	16.82	8.324
甲醇 E_m/MW	—	377.845	187.57
输出电力/MW	400	—	281.84
系统热效率	0.4	0.518	0.481
化电比	—	—	0.67
相对节能率/%	—	—	9.15
总燃料节省/(kg/s)	—	—	3.44
联产气占总合成气比例	—	—	0.757
甲醇合成过程燃料节省	—	—	0.174
甲醇合成单耗/(GJ/t)	—	37.32	42.77
总甲醇单耗/(GJ/t)	—	43.37	—
发电过程燃料节省	—	—	3.27
来自驰放气差异	—	—	1.03
来自热量集成	—	—	2.236
总燃料节省	—	—	3.44

注：①甲醇合成中原料煤消耗；②甲醇合成中动力煤消耗。

收，占总燃料节省的 65%。因此，化工动力系统的

全系统热量耦合是多联产系统节能的主要原因。

4 结论

(1) 基于联产系统一次能源消耗建立了以化电比、热效率及参考分产系统的热力性能参数表示的联产系统节能判据，为联产系统的节能判断提供了量化指标。根据相关文献的统计结果表明：多联产系统的相对节能率在 10% 左右。

(2) 通过定义联产气和非联产气，建立了多联产系统的化电分摊理论模型，从而为多联产系统各个过程的能耗特性分析提供了依据。

(3) 以并联液相法富 CO 一次通过多联产系统(EI-PCOOTM)为例，计算了联产系统的化电分摊。结果表明，联产系统的全系统热量耦合是多联产系统节能的主要原因。

参考文献

- 王逊, 肖云汉. 串并联与并联形式的联产系统效率比较[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 144-149.
Wang Xun, Xiao Yunhan. Efficiency comparison of series-parallel co-production system and parallel co-production system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 144-149(in Chinese).
- 倪维斗, 李政. 煤的超清洁利用-多联产系统[J]. 节能与环保, 2001, (5): 16-21.
Ni Weidou, Li Zheng. The ultra-clean utilization of coal-polygeneration system[J]. Energy Conservation and Environment Protection, 2001, (5): 16-21(in Chinese).
- 林汝谋, 金红光, 高林. 化工动力多联产系统及其集成优化机理[J]. 热能动力工程, 2006, 21(4): 331-337.
Lin Rumou, Jin Hongguang, Gao Lin. The integration and optimization mechanism of polygeneration system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(4): 331-337(in Chinese).
- 唐宏青. 发展中的现代煤化工多联产[J]. 煤化工, 2006, (4): 1-6.
Tang Hongqing. Polygeneration projects in progress[J]. Coal Chemical Industry, 2006, (4): 1-6(in Chinese).
- 刘洁, 段远源, 文盖雄. 二甲醚多联产系统的能量分析[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(2): 8-12.
Liu Jie, Duan Yuanyuan, Wen Gaixiong. Energy analysis of polygeneration system coproducing dimethyl ether[J]. Gas turbine technology, 2005, 18(2): 8-12(in Chinese).
- 麻林巍, 倪维斗, 李政, 等. 以煤气化为核心的甲醇、电的多联产系统分析(上)[J]. 动力工程, 2004, 24(3): 451-456.
Ma Linwei, Ni Weidou, Li Zheng, et al. Analysis of the polygeneration system of methanol and electricity based on coal gasification (1)[J]. Power Engineering, 2004, 24(3): 451-456(in Chinese).
- Larson E D, Ren Tingjin. Synthetic fuel production by indirect coal liquefaction[J]. Energy for Sustainable Development, 2003, VII (4): 79-102.
- Duan Yuanyuan, Zhang Jin, Shi Lin, et al. Exergy analysis of

- methanol-IGCC polygeneration technology based on coal gasification [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2002, 7(2): 190-193.
- [9] 周齐宏, 胡山鹰, 陈定江, 等. 基于合成气的联供联产系统的3E分析[J]. *计算机与应用化学*, 2006, 23(3): 193-197.
Zhou Qihong, Hu Shanying, Chen Dingjiang, et al. 3E analysis of co-feed and co-generation system based on the syngas[J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2006, 23(3): 193-197(in Chinese).
- [10] 高林. 煤基化工-动力多联产系统开拓研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2005.
Gao Lin. Investigation of coal-based polygeneration systems for production of power and liquid fuel[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2005(in Chinese).
- [11] Gao Lin, Jin Hongguang, Liu Zelong, et al. Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production [J]. *Energy*, 2004, 29(12-15): 2359-2371.
- [12] 金红光, 高林, 郑丹星, 等. 煤基化工与动力多联产系统开拓研究[J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(4): 397-400.
Jin Hongguang, Gao Lin, Zheng Danxing, et al. Investigation of coal-based polygeneration system for power and chemical production [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(4): 397-400(in Chinese).
- [13] 张晓晖, 陈钟颀. 热电冷联产系统的能耗特性[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(5): 93-98.
Zhang Xiaohui, Chen Zhongqi. Energy consumption performance of combined heat cooling and power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(5): 93-98(in Chinese).
- [14] Nesheim S J, Ertesvag I S. Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 48(3): 1004-1015.
- [15] Hui Li, Lin Fu, Kecheng Geng, et al. Energy utilization evaluation of CCHP systems[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(3): 253-257.
- [16] 张学镭, 王松岭, 陈海平, 等. 燃烧中低热值燃料时燃气轮机系统的应对方案及其性能分析[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(19): 110-116.
Zhang Xuelei, Wang Songling, Chen Haiping, et al. Adjustment strategy and performance analysis of gas turbine system when burning medium and low heating value fuel[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(19): 110-116(in Chinese).

收稿日期: 2007-09-14。

作者简介:

李政(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为循环流化床技术、煤气化多联产能源系统、中国能源战略等, lz-dte@tsinghua.edu.cn;

刘广建(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事多联产系统建模、仿真及评价研究;

倪维斗(1932—), 男, 中国工程院院士, 主要研究方向为热力涡轮机系统、热动力系统动态学、洁净煤技术、中国能源战略等。

(责任编辑 车德竞)