

煤制清洁燃料过程通用能效评价系统研究

陈 微,李初福,郜丽娟,姚金松,张 峰,黄 峰,李国涛,巴黎明,张朝环
(北京低碳清洁能源研究所,北京 102211)

摘要:为了提高煤化工企业节能减排效果,构建和开发了一套煤制清洁燃料过程通用能效评价系统。通过对煤制油工厂实际数据进行采集、归纳和整理,将实际数据录入系统,按照煤化工通用能效计算公式进行能效、能耗计算,并可将其中任意数据作为变量进行优化。结果表明,该系统具有流程自由组态、能效计算与评价、专家知识库及诊断等功能。该系统可通过流程组态模拟不同工艺过程,结合各单元模块工艺参数和能效消耗数据,自动完成物料平衡、能效、能耗、碳排放等计算,并通过专家系统进行诊断和分析,给出节能参考建议。该系统可以应用于煤制烯烃、煤直接液化、煤间接液化和煤分级炼制等过程能效分析和评价等。

关键词:煤基清洁燃料;图形化建模;能效评价;煤化工

中图分类号:TQ52;F407.21

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)01-122-05

General energy efficiency evaluation system for coal to clean fuel process

CHEN Wei, LI Chufu, GAO Lijuan, YAO Jinsong, ZHANG Feng, HUANG Feng,

LI Guotao, BA Liming, ZHANG Zhaohuan

(National Institute of Clean and Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: In order to improve energy saving and emission reduction effects of coal chemical enterprises, a general energy efficiency evaluation system was designed and developed, including the functions such as process free configuration, energy efficiency calculation and evaluation, expert knowledge base and diagnosis, etc. In the system, different processes could be modeled through the process configuration, and each module parameters and energy consumption data could be input. The mass balance, energy efficiency, energy consumption and carbon emissions were calculated automatically by the system. Some energy-saving suggestions were provided by the expert system. The system could be applied in efficiency analysis and evaluation for coal chemical processes such as coal to olefins, coal direct liquefaction and indirect liquefaction and coal refining, etc.

Key words: coal-based clean fuel; graphical modeling; energy efficiency evaluation; coal chemical industry

0 引 言

我国能源结构的特征为“富煤、贫油、少气”,发展煤制清洁燃料产业对于保障我国能源战略安全具有重要意义^[1]。与石油化工和天然气化工相比,煤化工能耗高,同时传统煤化工普遍存在装置老化和技术落后等问题,具有很大的节能潜力^[2]。要使现代煤化工得到长足发展,需要提高能效水平并减少污染物的排放^[3]。针对我国石油资源短缺、煤炭相

对富足的现状,发展煤制油以及煤制甲醇、二甲醚等石油替代品技术,将极大改变我国能源结构的困境,不仅可以减小油品能源的对外依存度,还可以减轻对环境的污染和对石油资源的依赖。未来我国煤化工发展的核心是新型煤化工,其中,煤基清洁能源将是新型煤化工产业中最具潜力和发展空间的新型洁净煤技术^[4]。煤直接液化^[5]、煤制烯烃^[6]以及煤分级炼制等煤制清洁燃料技术的用能分析^[7]、评价、诊断和优化对企业节能减排起到了关键作用,对于

收稿日期:2016-08-24;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.01.023

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA05A202)

作者简介:陈 微(1982—),女,北京人,工程师,从事煤洁净转化及设备研发方面的科研工作。E-mail:chenwei@nicenergy.com

引用格式:陈 微,李初福,郜丽娟,等.煤制清洁燃料过程通用能效评价系统研究[J].洁净煤技术,2017,23(1):122-126.

CHEN Wei, LI Chufu, GAO Lijuan, et al. General energy efficiency evaluation system for coal to clean fuel process[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 122-126.

提升企业核心竞争力具有重要的指导作用^[8]。目前,能效评价方法主要有以下几类:一是能量平衡法,该应用步骤可参照 GB/T 2588—2000《设备热效率计算通则》,能量分析法未考虑到反应设备内发生不可逆反应时的能量内部损失;二是焓分析法,该方法以能量衡算和物料衡算为基础,主要是对装置或设备进行焓平衡的计算,没有考虑经济环境,故不能对产品定价,也无法从系统全局的水平上进行焓能的分析与优化;三是将经济分析与焓分析法相结合的热经济学,该方法可从全局角度分析效益产生的原因,并合理分摊成本,但无法对换热网络进行分析优化;四是夹点技术,该技术主要应用于换热网络,但不能对产品定价,无法计算设备的内部焓损。

因此,需要建立一个基于能效评价方法的将煤化工系统仿真模拟软件及不同能效评价工具整合为一体的软件平台^[9]。笔者构建和开发了一套煤制清洁燃料过程通用能效评价系统,适用于煤制烯烃、煤直接液化和煤分级炼制等不同工艺过程,可为节能减排工作提供指导。

1 通用能效评价系统设计

1.1 通用能效评价系统结构

通用能效评价系统结构如图1所示。该系统包括3部分:一是流程自由组态子系统,该系统的作用是搭建工艺流程;二是通用能效计算与评价子系统;三是专家知识库子系统。

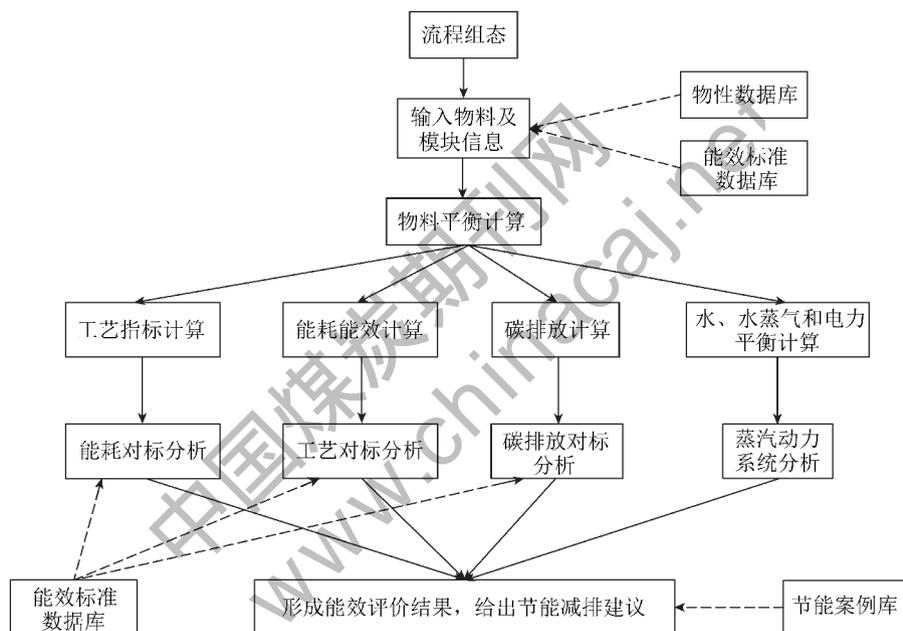


图1 通用能效评价系统结构

Fig. 1 Structure of the general energy efficiency evaluation system

1.2 流程自由组态

通用能效评价系统具有图形化、可视化建模功能,可以任意组合单元模块得到不同过程模型。不同单元之间可通过流线进行连接表示物理过程,形成完整工艺流程^[10-11],单元和流线可以任意增加、编辑、移动和删除等。图形建模的模块库分为:通用能耗计算模块、物流混合模块、物流分流模块、原料边界、产品边界、断点模块、气体压缩模块。

该系统可以单独输入每股物料和模块(耗能工质等)相关参数,如流量、温度、压力、比热、密度、低位热值、折标系数、含碳系数、碳排放因子、收率、单耗、价格、组成、工业分析、元素分析、进料状态、油品蒸馏数据。双击图形模型上任意流线,可以弹出对

话框进行物料参数输入或修改。

1.3 通用能效计算与评价

该系统具有通用单元模型库^[12],也可以自定义单元模块,单元模型包含工艺参数及能源消耗参数等(图2)。单元模块计算类型包括物料平衡计算、收率计算、单耗计算、能耗计算、能效计算、热流计算和碳流计算。

单元模块物料平衡计算公式

$$\sum_{j=1}^n M_j = \sum_{i=1}^m M_i \quad (1)$$

式中, M_j 为第 n 种输出原料的流量; M_i 为第 m 种输入原料的流量; n 为输出能源种类数量; m 为输入能源种类数量。

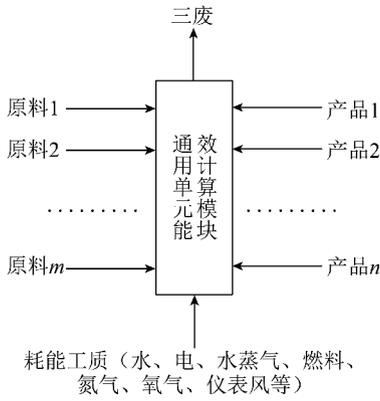


图2 通用单元模块

Fig.2 General unit module

收率计算公式

$$M_j = \phi_j \sum_{i=1}^n M_i \quad (2)$$

式中, ϕ_j 为输出物流 j 的收率。

单耗为某单元生产单位质量产品或中间产品 j 需要消耗原料或中间原料 i 的数量。单耗计算公式

$$M_j = \gamma_j M_i \quad (3)$$

式中, γ_j 为输出物流 j 的单耗。

单元能耗计算公式

$$E = \sum_{i=1}^m M_i k_i + \sum_{l=1}^r M_l k_l - \sum_{j=1}^n M_j k_j \quad (4)$$

式中, E 为单元能耗; k_i 为输入的第 m 种物流的折标系数; k_l 为第 r 种耗能工质的折标系数; M_l 为第 r 种耗能工质流量; r 为耗能工质种类数量; k_j 为输出的第 n 种物流的折标系数。

单元能效计算公式

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^n M_j k_j + \sum_{s=1}^r M_s k_s}{\sum_{i=1}^m M_i k_i + \sum_{l=1}^r M_l k_l} \times 100\% \quad (5)$$

式中, η 为单元能效; M_s 为该单元第 r 种产出耗能工质流量(正数); M_l 为该单元第 r 种使用耗能工质流量(正数); k_s 为该单元第 r 种产出耗能工质的折标系数; k_l 为该单元第 r 种使用耗能工质的折标系数。

物流热流量计算公式

$$Q = Mk \quad (6)$$

式中, Q 为物流的热流量; M 为物流的流量; k 为折标系数。

物流碳流量计算公式

$$C = Mc \quad (7)$$

式中, C 为物流碳流量; c 为含碳系数。

根据建立的全厂模型和输入的参数,通过全厂计算模块自动进行全厂物料平衡计算、碳足迹计算、水足迹计算、蒸汽平衡计算和电力平衡计算等。在物料平衡计算结果基础上,自动计算各单元能效和能耗,以及全厂能效和能耗。全场计算运行时间判断标准为:不含循环物料时所有模块逐个运行即可;含循环物料时,通过断点模块,判断进出口的物料是否一致,在允许的误差范围内(默认误差 1/1 000,使用变量设定误差,用户可编辑)一致时,则停止计算。根据模块的连线情况,平台自动生成拓扑关系,根据拓扑关系确定模块的运行顺序。

全厂单位产品能耗计算公式

$$e = \frac{\sum_{a=1}^b E_a}{P} \quad (8)$$

式中, e 为单位产品能耗; P 为主产品产量; E_a 为第 b 种单元能耗; b 为单元能耗的种类数量。

全厂能效计算公式

$$\eta_a = \frac{\sum_{c=1}^n M_c k_c + \sum_{d=1}^r M_d k_d}{\sum_{e=1}^m M_e k_e + \sum_{f=1}^r M_f \times k_f} \times 100\% \quad (9)$$

式中, η_a 为全厂能效; M_c 为第 n 种输出产品流量; k_c 为第 n 种输出产品折标系数; M_d 为第 r 种耗能工质输出流量; k_d 为第 r 种输出耗能工质折标系数; M_e 为第 m 种输入原料流量; k_e 为第 m 种输入原料折标系数; M_f 为第 r 种外购耗能工质流量; k_f 为第 r 种外购耗能工质折标系数。

全厂碳排放计算公式

$$C_a = C_f + C_p - C_r + T_b c_i \quad (10)$$

$$C_p = \left(\sum_{i=1}^m M_i c_i - \sum_{j=1}^n M_j c_j \right) \times 44/12 \quad (11)$$

式中, C_a 为全厂碳排放量; C_f 为燃料燃烧碳排放量; C_p 为工艺过程碳排放量; C_r 为碳回收量; T_b 为外购电力; c_i 为碳排放因子; c_i 为第 i 种输入原料的含碳系数; c_j 为第 j 种输出原料的含碳系数。

根据物料平衡结果,可以自定义 20 种以上工艺指标计算,定义方式如下

$$B = M_x / M_y \quad (12)$$

式中, B 为某一工艺性能指标; M_x 为第 x 种指定物流流量; M_y 为第 y 种指定物流流量。

1.4 专家系统知识库

专家系统知识库包括物性数据库^[13]、物料折标

系数库、产品能耗指标库、工艺性能指标库、产品碳排放指标库、节能案例库等。全厂计算完成自动进行产品能耗及工艺性能对标分析,可根据对标分析值,由专家诊断功能自动进行逻辑判断,从专家库中调入对应专家建议,为全厂节能分析提供指导。可通过图表直观展示能效能耗计算和分析结果,将计算和分析结果输出指定格式报表(如 Excel),结合人工筛选,给出节能参考途径。

2 煤制烯烃案例分析

2.1 流程组态及数据录入

以煤制烯烃工艺路线能效分析方向为例,其中包含热电单元、空分单元、气化单元、净化单元、甲醇合成单元、硫磺单元、甲醇制烯烃(MTO)单元、烯烃分离单元、碳四单元。热电单元生产的热按工艺过程需要生产,因没有外购和外售情况,电力生产不能满足需要,不足部分从电网外购。首先进行流程自由组态建模,将各单元按序进行连接。根据工厂实际数据将原料、能源消耗和主、副产品等录入各单元。物料类型分为燃料、原料、中间物料、主副产品、废气、废液和废固,物料状态分为固体、油品、气体、非油品和浆液。按步骤依次输入所需数据,参数中输入温度、压力、折标系数(kgce/kg)(气体折标系数可通过输入气体组分,自动完成比热、密度、低位热值的计算,从而自动计算折标系数,气体组分分为体积分数和重量分数)、流量等。耗能工质录入各单元模块,输入折标系数、流量和碳排放因子即可(折标系数可在平台数据库中直接调用)。

2.2 能效计算

结束流程组态及数据录入后,进行全厂及各模块能效计算。根据全厂计算的评判标准,由于此算例不包含循环物料,则所有模块逐个运行即可。可以设定全厂能耗、能效的扣除量,默认值0。软件自动实现数据完整性检测、平台连接、平台运行、变量初始化、项目编译(如果项目编译失败则提示)、数据入库(整个项目的变量)、模型运行(模块内部自动进行数据的归一化处理等数值计算)、模型停止后展示每个模块(能效、能耗、碳排放)、流线(流量、碳流、热流)的数据(使用不同方式区分)。

运行次数为3,时间步长为1000,各流线及模块结果数据、能效、能耗结果如图3所示,能耗单位为kgce/kg,能效为百分比。在单元模块计算的基础上,自动进行全厂能耗能效计算、碳排放计算、水平

衡计算、水蒸气平衡计算、电力平衡计算、工艺性能指标计算等,进行排序,导出Excel。

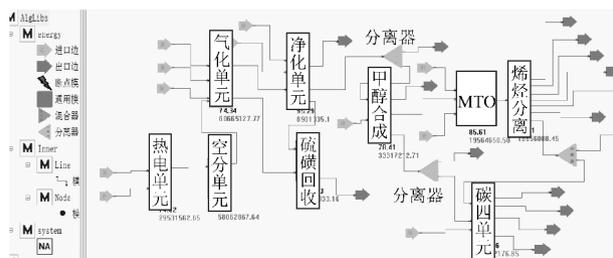


图3 流程组态及能效、能耗结果

Fig. 3 Results of process configuration, energy efficiency and energy consumption

2.3 专家诊断系统

专家系统可进行能源排序占比、水蒸气平衡图、全厂及单元产品能耗对标分析、工艺性能对标分析及专家诊断功能。在能源排序中将输入物料和耗能工质按照升序或降序排列。全厂能耗对标分析中,分析全场吨烯烃的指标^[14],从专家系统数据库中选择乙烯和丙烯的标准数据进行比较。工艺性能对标分析,以粉煤气化比氧耗指标为例^[14],选择气化单元产出粗煤气与输入氧气进行比值计算,自动计算比氧耗。进入专家诊断功能,选择专家诊断系统数据库中的粉煤气化比氧耗,根据得出比氧耗值,自动进行逻辑判断,得到专家建议。

3 结 语

本文设计和开发了一套煤制清洁燃料通用能效评价系统,具有流程自由组态、能效计算与评价、专家知识库及诊断等功能。该系统通过流程组态模拟不同工艺过程,结合各单元模块工艺参数和能效消耗数据,自动完成物料平衡、能效、能耗、碳排放等计算,并通过专家系统进行诊断和分析,给出节能参考建议。该系统界面友好,操作简便,可以应用于煤制烯烃、煤直接液化、煤间接液化和煤分级炼制等过程能效分析和评价等,可为煤化工过程节能减排提供指导。

参考文献 (References):

- [1] 杨 西,刘宝勇.我国煤化工现状与发展策略分析[J].上海化工,2014,39(9):27-30.
Yang Xi,Liu Baoyong. Analysis on present situation and development strategy of coal chemical industry in China [J]. Shanghai Chemical Industry,2014,39(9):27-30.
- [2] 张有国.煤化工产品能耗分析与思考[J].上海节能,2009(9):

- 20-25.
- Zhang Youguo. Energy consumption analysis and thinking of coal chemical products [J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2009 (9): 20-25.
- [3] 房庆圆. 对现代煤化工意义及发展分析[J]. *中国化工贸易*, 2013, 5(7): 399-400.
- Fang Qingyuan. Analysis on the significance and development of modern coal chemical industry [J]. *China Chemical Trade*, 2013, 5(7): 399-400.
- [4] 周忠科, 王立杰. 我国煤基清洁能源发展潜力及趋势[J]. *中国煤炭*, 2011, 37(5): 24-27.
- Zhou Zhongke, Wang Lijie. Development potential and trend of coal based clean energy in China [J]. *China Coal*, 2011, 37(5): 24-27.
- [5] 苗强. 煤直接液化残渣萃取技术现状及发展趋势[J]. *洁净煤技术*, 2015, 21(1): 56-60.
- Miao Qiang. Present situation and development trend of extraction technology of coal direct liquefaction residue [J]. *Clean Coal Technology*, 2015, 21(1): 56-60.
- [6] 刘弓, 张亚秦, 王邓军. 甲醇制烯烃技术产业化发展[J]. *洁净煤技术*, 2016, 22(5): 100-102, 107.
- Liu Gong, Zhang Yaqin, Wang Dengjun. Methanol to olefins technology industrialization development [J]. *Clean Coal Technology*, 2016, 22(5): 100-102, 107.
- [7] 梁龙虎. 煤化工产业高效节能之路[J]. *中国煤炭*, 2009, 35(5): 5-9.
- Liang Longhu. High efficiency and energy saving of coal chemical industry [J]. *China Coal*, 2009, 35(5): 5-9.
- [8] 王雷石, 段书武. 现代煤化工产业能耗状况与节能对策研究[J]. *洁净煤技术*, 2012, 18(4): 1-3.
- Wang Leishi, Duan Shuwu. Research on energy consumption status and energy saving strategy of modern coal chemical industry [J]. *Clean Coal Technology*, 2012, 18(4): 1-3.
- [9] 孙凯蒂, 解强, 霍卫东. 煤化工系统能效评价方法的进展研究[J]. *中国煤炭*, 2013, 39(8): 124-129.
- Sun Kaidi, Xie Qiang, Huo Weidong. Research on the development of energy efficiency evaluation method in coal chemical industry [J]. *China Coal*, 2013, 39(8): 124-129.
- [10] 何小荣, 李初福, 陈丙珍, 等. 石化企业生产计划图形建模优化系统[J]. *计算机与应用化学*, 2006, 23(1): 1-8.
- He Xiaorong, Li Chufu, Chen Bingzhen, et al. Graphical modeling optimization system for petrochemical enterprise production planning [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2006, 23(1): 1-8.
- [11] 李初福, 何小荣, 张秋怡, 等. 石化企业图形化生产计划优化系统的开发及其应用[J]. *石油炼制与化工*, 2005, 36(10): 45-48.
- Li Chufu, He Xiaorong, Zhang Qiuyi, et al. Development and application of graphical production planning optimization system for petrochemical enterprises [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2005, 36(10): 45-48.
- [12] 李德芳, 蒋白桦, 索寒生, 等. 石化企业能源优化系统设计与应用[J]. *化工学报*, 2016, 67(1): 285-293.
- Li Defang, Jiang Baihua, Suo Hansheng, et al. Design and application of energy optimization system in petrochemical enterprises [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2016, 67(1): 285-293.
- [13] 朱沛沛, 李嘉乐, 赵红珠, 等. 计算机模拟在化工设计中的应用研究进展[J]. *精细与专用化学品*, 2012, 20(9): 45-48.
- Zhu Peipei, Li Jiale, Zhao Hongzhu, et al. Research progress on application of computer simulation in chemical engineering design [J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2012, 20(9): 45-48.
- [14] 金泽华, 胡瑞生, 龚雪, 等. 现代煤化工能源消耗限额标准体系分析[J]. *洁净煤技术*, 2016, 22(2): 114-118.
- Jin Zehua, Hu Ruisheng, Gong Xue, et al. Analysis on standard system of energy consumption quota for modern coal chemical industry [J]. *Clean Coal Technology*, 2016, 22(2): 114-118.

(上接第121页)

- [7] 杨昆, 王永胜, 刘翠玲, 等. 基于因子分析法的动力煤品质评价和配煤方案[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2015(11): 61-64.
- Yang Kun, Wang Yongsheng, Liu Cuiling, et al. The coal quality evaluation and the clean coal blending scheme based on the method of factor analysis [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2015(11): 61-64.
- [8] 胡社荣. 煤造石油与煤成油理论关系研究进展综述[J]. *地质科技情报*, 1999(4): 71-73.
- Hu Sherong. Over view of some advances in research on relationship between coal liquefaction and theory of oil from coal [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1999(4): 71-73.
- [9] 李昱, 胡建飞. 以林产品废料代煤作为锅炉燃料初探[J]. *中国人造板*, 2006, 13(9): 18-20.
- Li Yu, Hu Jianfei. The preliminary study on using forest products wastes as fuel instead of coal for boiler [J]. *China Wood-based Panels*, 2006, 13(9): 18-20.
- [10] 关卫龙. 基于煤化工企业尿素生产过程的节能和降耗研究[J]. *山东工业技术*, 2015(14): 56.
- Guan Weilong. Research on energy saving and consumption reduction based on urea production process of coal chemical industry [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2015(14): 56.
- [11] 卫智毅, 陈宇红, 蒋亮, 等. 高碳粉煤灰微波还原原渣实验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016(4): 1062-1066.
- Wei Zhiyi, Chen Yuhong, Jiang Liang, et al. Experimental research on microwave reduction of slag by high-carbon fly-ash [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016(4): 1062-1066.
- [12] 万朴. 非金属矿物材料在低碳经济进程中的定位与持续发展[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2010(2): 117-122.
- [13] 虞和洵. 铸造生产的节能问题[J]. *铸造*, 1981(4): 44-47, 10.
- [14] 高兆益. 变频调速节能技术在煤化工企业中的应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2012(2): 55, 73.