

大型煤制烯烃工程蒸汽动力系统研究

巴黎明,张峰,黄峰,李初福,姚金松
(北京低碳清洁能源研究所,北京 102211)

摘要:为了解决煤制烯烃工程蒸汽动力系统存在的参数低、煤耗高、备用量大、管网不平衡等影响系统大型化的关键性问题,对运行中系统的数据进行了分析,通过引入超临界燃煤机组和总管制蒸汽管路等方法,提出了一种适应于更大规模煤制烯烃工程的蒸汽动力系统设计形式。在120万t/a煤制系统工程蒸汽动力系统设计中,配置2台350 MW超临界燃煤机组,结合8~9级回热和1级再热系统,可以将系统供电煤耗降低从450 g/kWh降低到320 g/kWh。利用机组间总管制的蒸汽管道可以实现蒸汽管网的灵活切换,在“零备用”条件下满足年运行8 000 h以上的高可靠性要求。系统发电出力不仅可以满足煤制烯烃工程自用要求,还可以向周围电网输出255 MW。该系统具有良好的扩展性,可以随煤制烯烃工程规模的变化灵活配置,满足未来更大规模工程的需求。

关键词:煤制烯烃;蒸汽动力系统;超临界;零备用

中图分类号:TQ522.64 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)01-0075-05

Research on steam power system in larger scale coal to olefin plant

BA Liming, ZHANG Feng, HUANG Feng, LI Chufu, YAO Jinsong

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

Abstract: In order to solve the problems of steam power system in coal to olefins (CTO) project, like low steam parameters, high coal consumption and standby capacity, network imbalance, the characteristics of steam power system were analyzed. By introducing supercritical coal power units and a manifold steam pipe system, a new design concept in large-scale CTO project was presented. In a 1.2 Mt/a CTO steam power system, a combination of two 350 MW supercritical coal power units with 8-9 regenerative and 1 reheat system, reduced coal consumption rate from 450 g/kWh to 320 g/kWh. A manifold steam pipe system helped to achieve flexible switching between units, to meet a 8 000 h/a high reliability standard with zero standby. System power output met the requirements of CTO project, and it could serve 255 MW to power grid. The system had good expansibility to meet different scale of the CTO project in the future.

Key words: coal to olefin; steam power system; supercritical; non-backup

0 引 言

煤制烯烃技术的工业化应用为煤炭从燃料应用转向原材料应用开辟了一条道路^[1],由于其低成本特点,是替代石油裂解制烯烃,降低对外原油依存度的重要方向^[2-3]。煤制烯烃工艺流程长,对蒸汽动力系统运行水平的要求也较高,在全厂能量平衡中有重要影响^[4]。煤制烯烃工程的动力系统相对一般石油化工复杂,耦合度高,其中既存在空分压缩

机、烯烃分离压缩机等耗电耗汽大户^[5],也有气化炉^[6-9]、变换系统^[10-11]、合成气制甲醇^[12-13]等余热回收蒸汽源和自备电厂等高压蒸汽和电力生产源。不同用户和生产源之间通过分等级的管网和线路连接,相互影响,管网平衡成为一个重要的能效优化方向^[14-15]。目前的煤制烯烃工程由于规模等因素,多采用燃煤高压(10 MPa左右)机组作为主要的蒸汽和电力来源,其技术水平相对一般燃煤发电所采用的超临界参数机组较为落后。煤耗高、效率低、备用

收稿日期:2016-10-08;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.01.014

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:巴黎明(1982—),男,山东枣庄人,工程师,硕士,从事煤化工工程能效分析和改进科研工作。E-mail:baliming@nicenergy.com

引用格式:巴黎明,张峰,黄峰,等.大型煤制烯烃工程蒸汽动力系统研究[J].洁净煤技术,2017,23(1):75-79,85.

BA Liming, ZHANG Feng, HUANG Feng, et al. Research on steam power system in larger scale coal to olefin plant[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(1): 75-79, 85.

数量多等已经成为制约煤制烯烃工程规模进一步扩大的关键限制性因素。本文根据对煤制烯烃工程蒸汽动力系统运行工况的实地调研,对其运行状况进行了分析,提出了一种将高效的超临界机组引入百万吨级规模煤制烯烃工程的技术路线。

1 煤制烯烃工程中的蒸汽动力系统

1.1 煤制烯烃工程的蒸汽动力需求

煤制烯烃可以分为煤气化和净化、CO变换、甲醇合成、甲醇制烯烃(MTO)、烯烃分离和聚烯烃等几个主要工艺过程。煤在高温高压下与氧气进行气化反应,生成CO和H₂为主的原料气,经CO变换和净化后脱除杂质和H₂S等有害气体,然后送入甲醇合成反应器生成甲醇。甲醇在MTO反应器内在催化剂作用下生成乙烯、丙烯和其他烃类气体的混合物,经烯烃分离后分别送入聚乙烯PE和聚丙烯PP单元形成产品。某煤制烯烃工程的工艺流程如图1所示^[1]。

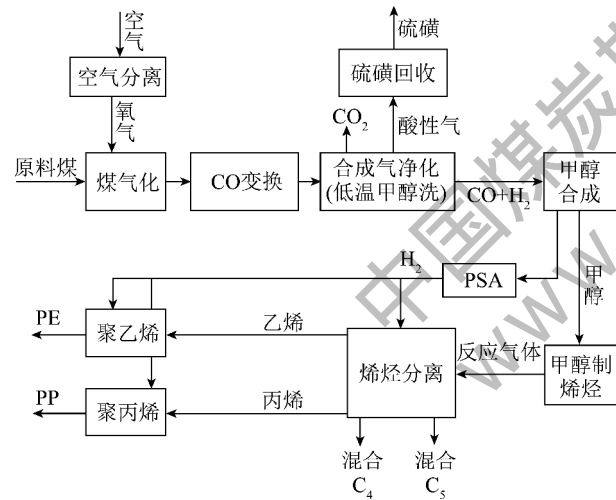


图1 某煤制烯烃示范工程工艺流程

Fig. 1 Process flow of a coal to olefins demonstration project

煤制烯烃相对石油制烯烃具有路线长、设备多、工艺复杂等特点,但其产品种类相对较少,分离程序较为简单^[2]。在煤制烯烃工程中,蒸汽动力系统是重要的组成部分。蒸汽动力具有驱动透平压缩机、带走系统热量、工艺使用、伴热等功能,是煤制烯烃工程能量管理的主要途径。煤制烯烃工程中的蒸汽动力系统具有不同于一般石油化工的几个显著特点:①煤制烯烃首先要经过煤气化过程,生成CO和H₂混合的工艺气体,需要的空分规模大,动力消耗大;②煤是低H/C比原料,在0.2~1.0,远低于烯

烃的2.0^[16],工艺气体的净化、CO变换、甲醇合成和MTO等过程产生大量的中低压蒸汽;③工艺系统主要蒸汽生产设施在烯烃分离之前,主要用户遍布全厂,蒸汽系统是单元之间热量传递的主要形式;④蒸汽动力系统和酸性气脱除所释放的CO₂占全厂排放的90%左右^[17]。

1.2 蒸汽动力系统的构成

现有的煤制烯烃工程蒸汽动力系统设计一般按照传统石油化工蒸汽动力系统设计原则开展,以热电站为核心,提供自备电力和高压蒸汽,用于驱动大型的电动和汽动设备。同时,设置多个等级的中、低压蒸汽系统,一方面回收工艺产生的热量,提高系统热效率;另一方面提供工艺、伴热等需求。冷凝水经过回收精制以后进入蒸汽动力系统循环使用。由于煤制烯烃工程多设置在西北干旱地区,常采用直接或间接空冷完成凝汽冷却过程。某煤制烯烃工程的蒸汽动力系统如图2所示。

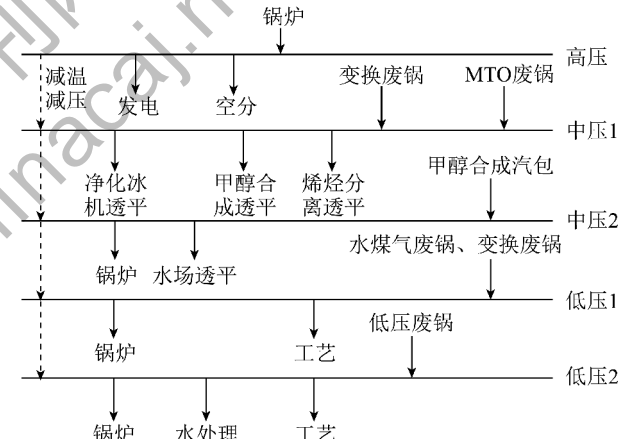


图2 蒸汽动力系统工艺流程

Fig. 2 Process flow of steam power system

烯烃工程的关键是保证长时间的高负荷可靠运转,在蒸汽动力系统的设计上也体现了这一要求。一般煤制烯烃的蒸汽动力系统均为母管系统,设置多台高压锅炉作为动力源,防止部分设备失效或检修造成全厂停车。高压蒸汽除了满足自发电需要外,还要驱动空分透平压缩机运转,流量比例为5:5~6:4。大量外供蒸汽的特点使蒸汽动力系统在同样发电规模下的循环量远大于一般电站系统,造成辅机规模和用电量水平比较高。

煤气化和后续气体反应中产生的热量要及时移出系统,造成煤制烯烃工程中中低压蒸汽源要多于石油化工系统。水煤浆气化炉温度高达1300℃左右,进入低温甲醇洗之前的温度仅为40℃,其间的

热量可以产生大量的中低压蒸汽。中压蒸汽用于驱动低温甲醇洗制冷机、甲醇循环压缩机、产品气压缩机和烯烃制冷压缩机等透平,实现能量的梯级利用。低压蒸汽多用于工艺、汽提、伴热等环节。由于蒸汽产量较大,仅靠工艺系统自身消耗难以完全平衡,部分过量的中低压蒸汽可以输送进入热电站的回热系统,降低蒸汽动力系统煤耗,如图3所示。

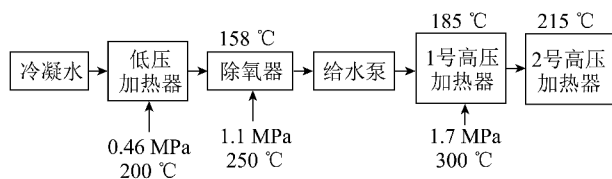


图3 工艺富余蒸汽的利用

Fig. 3 Utilization of process surplus steam

1.3 蒸汽动力系统存在的问题

煤制烯烃工程蒸汽动力系统的设计原则是“以热定电”,首先满足工艺的蒸汽要求,其次才是提供自发电,因此对蒸汽供给的可靠性有着苛刻的要求,造成现有工程存在诸多问题:

1) 参数低,煤耗高。现有煤制烯烃工程规模为50万~60万t/a,全厂动力需求为250 MW,40%~50%为多台空分透平使用。发电或空分透平的单机规模不超过50 MW。总体来看,全厂动力规模很可观,但由于单机规模小,无法使用高参数机组,热电站新蒸汽仅为10.0 MPa,540 °C左右,而且回热级数少、没有再热系统,供电煤耗超过450 g/kWh,无法被电网接纳。

2) 负荷高、运行时间长。煤制烯烃工程的年运行时间超过8 000 h,蒸汽动力系统负荷始终处于90%以上的高水平,形成了低效系统长时间高负荷运行的局面。

3) 难以大型化。提高煤制烯烃工程效益水平的主要途径是扩大规模,降低单位产能造价和运行费用,降低产品成本。公用工程在产品成本中占有显著的比例,从运行数据来看,可以达到总成本的20%~30%。随着规模的扩大,公用工程的单位造价和运行费用下降。但现有的蒸汽动力系统设计已经接近极限,存在以下矛盾:① 参数和效率之间的矛盾。提高蒸汽参数、采用超临界系统是提高蒸汽动力系统效率的常用办法,但在煤质烯烃工程中,其发电和空分透平分散布置,单机规模小,单纯提高参数反而不利于透平效率的提高。② 备用数量和装机容量之间的矛盾。在现有的蒸汽动力系统中,一

般电站机组配置为三用一备或四用一备,备用容量为额定容量的1/3~1/4。随着全厂规模的扩大,参数的提高,蒸汽动力系统的单机规模也要增加,配置数量要减少,如果仍保留一台备份机组,则备份容量可能达到额定容量的1:2~1:1,在技术经济上是不划算的。③ 蒸汽产量和发电量之间的矛盾。由于“以热定电”的原则,蒸汽优先用于满足工艺应用,造成蒸汽系统高压段参数差,发电效率低。而且各等级蒸汽产量不平衡,经常超过工艺生产用量,造成蒸汽无法利用而排放。

2 煤制烯烃工程蒸汽动力系统大型化

2.1 蒸汽动力系统大型化思路

1) 提高机组参数,采用超临界等技术降低发电煤耗,提高机组效率,保证发电机组多余电量可以上网外送。

2) 减少备用机组数量和容量,保证可靠性下的“零备用”。为了保证可靠性,应该设置2台机组,在单台故障或检修时,另外一台可以保证蒸汽动力系统的正常运行。同时,为了减少备用机组数量和容量,实现“零备用”,需要在正常工况下,2台机组均投入满负荷生产。

3) 实现蒸气系统能量的梯级利用,根据机组容量配置合适的蒸汽参数等级,提高机组技术经济性。针对空分透平和工艺透平规模小、数量多、配置分散的特点,可以采取大机组抽汽或再热蒸汽供热的方法,使其在低参数下工作,并减少对大机组工作状况的影响。

4) 尽量回收蒸汽动力系统多余热量,实现工艺和蒸汽系统之间更紧密的集成。蒸汽动力系统的设计应该能够保证全厂各级蒸汽管网的平衡,在开、停车等阶段保证蒸汽供应,在正常运行时可以通过给水加热系统回收管网多余蒸汽。对于蒸汽产量和发电量之间的矛盾,优先保证蒸汽平衡,多余或缺少的电力由公用电网解决输送问题。

2.2 蒸汽动力系统大型化方案

假设新建煤制烯烃工程规模是现有项目的2倍,烯烃产能达到120万t/a,估计其总体动力需求为500 MW左右,其中发电动力需求为200 MW,空分动力需求为200 MW,工艺透平动力需求为100 MW。对于空分和工艺透平的动力需求,工艺系统提供的5 MPa中压蒸汽可提供55 MW左右的出力,仍有245 MW需要热电站提供。根据目前的电

站技术水平,配置超临界机组,采用 24 MPa、560 °C 左右的蒸汽,可以达到 320 g/kWh 左右的供电煤耗水平。大型化系统采用 2 台 350 MW 规模超临界机组,配置 2 台超临界锅炉和汽动给水等辅机系统。汽轮机组由 2 台出力 105 MW 的高压段、1 台出力 245 MW 的中、低压段组成。机组间采用总管制相互联接,配置有新蒸汽总管、低温再热蒸汽总管、高温再热蒸汽总管、凝结水总管等。高、中、低压缸设计出力按照 3 : 3 : 4 左右配置。

2 台锅炉提供的 24 MPa、560 °C 蒸汽约 2 100 t/h,经过新蒸汽母管后分别送入 2 台机组的高压段,每段出力 105 MW,排出的 5 MPa 左右乏汽进入低温再热总管。蒸汽通过锅炉再热后经高温再热总管分配,一部分流量为 1 050 t/h 的再热蒸汽进入中低压段持续做功,出力 245 MW,最终排入凝汽器;另一部分 1 050 t/h 的再热蒸汽进入厂区中压管网,在空分和工艺透平处做功 245 MW,凝结水返回蒸汽动力系统凝结水系统。工艺系统提供的中低压蒸汽可以用于给水加热系统回热,减小机组抽汽量。在开、停车阶段的蒸汽需求由机组的再热蒸汽和中、低压缸抽汽提供。正常工作下,全厂发电规模为 $105 \times 2 + 245 = 455$ MW,自用 200 MW,上网外送 255 MW。轴系布置可以采用 1 号机组和 2 号机组分别配置的双轴系统,2 号机组仅有高压缸,所有再热蒸汽均排入工艺蒸汽管网驱动工艺透平使用。系统构成如图 4 所示。

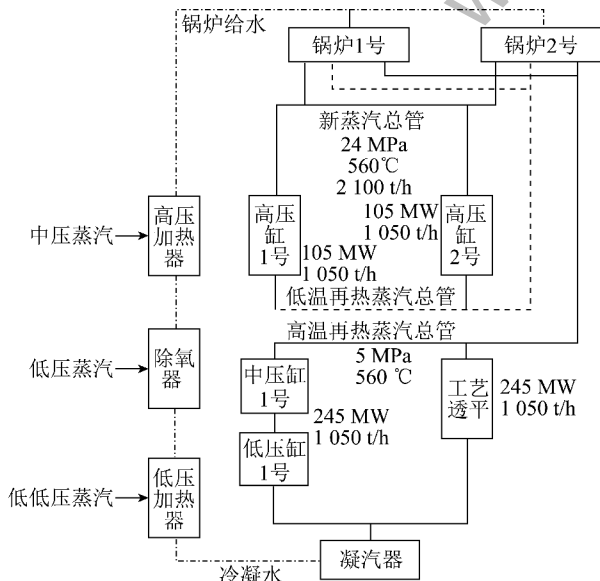


图4 改进后的蒸汽动力系统结构

Fig. 4 Improved steam power system structure

在单台机组故障或检修的情况下,锅炉系统出力减小到 1 050 t/h。关闭一台高压段,所有新蒸汽仅经过一台高压段做功,出力 105 MW,再热后蒸汽全部进入中压管网,驱动工艺透平出力 245 MW,可以保证生产的正常运行。单机运行下发电规模为 105 MW,电力缺口 95 MW,需从电网输入解决。通过降低蒸汽管网回热流量、调节锅炉负荷、汽机高压缸抽汽减温减压或降低 5% ~ 10% 的工艺系统负荷来保证蒸汽管网平衡。单台故障下的蒸汽动力系统结构如图 5 所示。

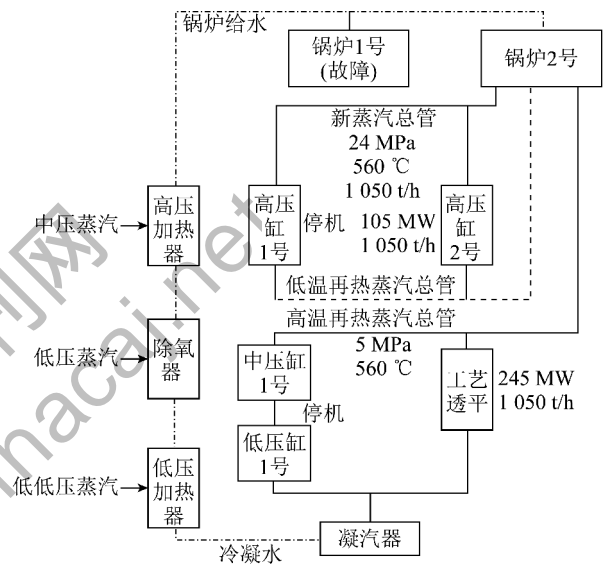


图5 单台故障下的蒸汽动力系统

Fig. 5 Steam power system structure under a single fault

改进前后蒸汽动力系统参数对比见表 1。相接近的蒸发量下,改进方案由于机组温度、压力高,回热和再热级数多等技术优势获得了更高的蒸汽动力系统效率,使全厂动力需求折算后的煤耗低至 320 g/kWh 左右,达到空冷 350 MW 超临界机组水平。改进蒸汽动力系统的思路可以略加修改后适应煤制油、煤制天然气等不同工艺的需求。

2.3 蒸汽动力系统大型化方案的优点

改进后的蒸汽动力系统解决了煤化工工程中常遇到的蒸汽动力系统规模和效率之间的矛盾,具有以下优点:

1) 解决了参数和效率之间的矛盾。发电系统使用超临界参数的新蒸汽,空分和工艺透平使用再热后的低压蒸汽,使不同容量透平都能保证较高的运行效率。

2) 在保证可靠性的情况下,实现了“零备用”。

表1 改进前后蒸汽动力系统方案对比

Table 1 Comparison of steam power system before and after improvement

参数	现有方案	改进方案
锅炉蒸发量/(t·h ⁻¹)	400	1 050
锅炉数量/台	6+2	2
总蒸发量/(t·h ⁻¹)	2 400	2 100
新蒸汽压力/MPa	10	24
新蒸汽温度/℃	540	560
发电容量/MW	200	455
外供电容量/MW	0	255
折算供电煤耗/(g·kWh ⁻¹)	450	320
回热级数	6	9
再热级数	无	1

注:折算供电煤耗为将全厂动力需求折算为电需求情况下的煤耗。

3) 解决了蒸汽和电力产量之间的矛盾。改进后的系统放开了电力侧的产量,避免了蒸汽和电力产量之间紧密耦合带来的参数选择困难。

4) 从工艺蒸汽管网向蒸汽动力系统的回热降低了煤耗。

5) 多余电力可以上网销售,形成新的利润。

3 结 论

1) 对百万吨级煤制烯烃项目,采用2台300 MW 规模超临界机组,引入8~9级回热和1级再热,将煤耗降低到320 g/kWh 以内;还可以增加燃煤机组数量,在单台故障下仍可以保障厂区供电,形成煤-化-电一体化的煤转化工程。

2) 超临界机组的新蒸汽管道和再热蒸汽管道采用总管制,2台锅炉生产的同时互为备用,不再设置单独的备用锅炉。汽轮机采用2台高压缸并行运行,中低压一部分进入发电汽轮机,另一部分进入厂区工艺汽轮机驱动压缩机等设备。在单台锅炉或汽轮机故障情况下,可以保证工艺汽轮机的平稳运行,发电出力仍可满足厂区一半以上的需求。

3) 超临界机组的汽、水管道与煤制烯烃厂区管网紧密耦合,不仅可以提供高压蒸汽,还可以吸收煤气化、变换和甲醇化等环节产生的余热蒸汽用于锅炉给水加热,进一步降低煤耗。

参考文献 (References):

[1] 张玉卓. 神华现代煤制油化工工程建设与运营实践[J]. 煤炭学报,2011,36(2):179-184.

Zhang Yuzhuo. Construction and operation of Shenhua's modern

coal-to liquid-and-chemicals demonstration projects[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(2):179-184.

[2] 吴秀章. 煤制低碳烯烃工艺与工程[M]. 北京:化学工业出版社,2015:6.

[3] 项东,彭丽娟,杨思宇,等. 石油与煤路线制烯烃过程技术评述[J]. 化工进展,2013,32(5):959-970.

Xiang Dong, Peng Lijuan, Yang Siyu, et al. A review of oil-based and coal-based processes for olefins production[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2013,32(5):959-970.

[4] 张湘江,张成吉,张新风. 运用焓概念和层次分析法对煤化工系统蒸汽平衡方案的优化设计[J]. 煤化工,2010,38(2):8-13.

Zhang Xiangjiang, Zhang Chengji, Zhang Xinfeng. Optimized design of the steam balance program for coal chemical plants by introducing the exergy concept and AHP[J]. Coal Chemical Industry,2010,38(2):8-13.

[5] 孙晓红,刘文娟. 中压饱和蒸汽透平在煤化工企业的应用[J]. 化肥设计,2013(1):12-14.

Sun Xiaohong, Liu Wenjuan. Application of medium pressure saturation steam turbine in coal and chemical enterprises[J]. Chemical Fertilizer Design,2013(1):12-14.

[6] 高聚忠. 煤气化技术的应用与发展[J]. 洁净煤技术,2013,19(1):65-71.

Gao Juzhong. Application and development of coal gasification technologies[J]. Clean Coal Technology,2013,19(1):65-71.

[7] 汪宝林. 煤气化化学与技术进展[J]. 洁净煤技术,2014,20(3):69-74.

Wang Baolin. Chemistry and technology progress of coal gasification[J]. Clean Coal Technology,2014,20(3):69-74.

[8] 刘永健,何畅,冯霄,等. 煤制合成天然气装置能耗分析与节能途径探讨[J]. 化工进展,2013,32(1):48-53,103.

Liu Yongjian, He Chang, Feng Xiao, et al. Analysis of energy consumption and energy saving approach in a coal to SNG plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2013,32(1):48-53,103.

[9] 高健,倪维斗,李政,等. IGCC 系统关键部件的选择及其对电厂整体性能的影响—(II):余热锅炉篇[J]. 动力工程,2007,27(6):985-989.

Gao Jian, Ni Weidou, Li Zheng, et al. Option of IGCC system's key components and their influence on the power plant's overall performance (II): the HRSG[J]. Power Engineering,2007,27(6):985-989.

[10] 张建宇,吕待清. 一氧化碳变换工艺分析[J]. 化肥工业,2000,27(5):26-32.

Zhang Jianyu, Lyu Daiqing. Analysis of carbon monoxide shift conversion process[J]. Journal of the Chemical Fertilizer Industry,2000,27(5):26-32.

[11] 余建良. 1 800 kt/a 煤制甲醇装置净化系统优化设计及应用[J]. 化肥工业,2014(2):50-53.

Yu Jianliang. Optimized design and use of purification system for 1 800 kt/a coal-based methanol plant[J]. Journal of the Chemical Fertilizer Industry,2014(2):50-53. (下转第85页)

率的前提下,通过调整锅炉主要运行参数的办法,建议采用“预混+防磨+燃烧调整”的燃用兰炭原则以保证燃烧经济性和机组运行稳定。

参考文献 (References):

- [1] 榆林市兰炭产业发展调研组. 榆林市兰炭产业发展调研报告[J]. 中国经贸导刊, 2010(18): 20-23.
- [2] 杜刚, 杨双平. 高炉喷吹用煤的配煤及使用兰炭的试验[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(1): 64-68.
Du Gang, Yang Shuangping. An investigation into coal blending and the addition of semi-coke[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(1): 64-68.
- [3] 李硕, 朱子宗, 徐军, 等. 兰炭改性剂配煤炼焦优化[J]. 钢铁, 2012, 47(8): 17-21.
Li Shuo, Zhu Zizong, Xu Jun, et al. Optimization and modification of semi-coke blending for convention coke-making[J]. Iron and Steel, 2012, 47(8): 17-21.
- [4] 董洁吉, 李华, 尹传举, 等. 烧结矿/兰炭混装还原试验研究[J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(1): 5-9.
Dong Jieji, Li Hua, Yin Chuanju, et al. Experimental study on semi-coke charging with sinter in blast furnace condition[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(1): 5-9.
- [5] 辛收良. 兰炭掺烧技术的研究与应用[J]. 化肥设计, 2013, 51(1): 53-55.
Xin Shouliang. Research and application for combustion technology mixing with blue carbon[J]. Chemical Fertilizer Design, 2013, 51(1): 53-55.
- [6] 张鑫. 兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究[J]. 洁净煤技

术, 2015, 21(3): 103-106.

Zhang Xin. Feasibility on semi-coke substitute for anthracite in energy conservation and emissions reduction[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 103-106.

- [7] 牛芳. 煤粉工业锅炉燃烧兰炭试验研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 106-108.
Niu Fang. Feasibility of semi-coke combustion in industrial pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 106-108.
- [8] 刘家利, 杨忠灿, 王志超, 等. 兰炭作为动力用煤的燃烧性能研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(2): 84-88.
Liu Jiali, Yang Zhongcan, Wang Zhichao, et al. Combustion characteristics of blur-coke as fuel for pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 84-88.
- [9] 李晓伟, 赵红伟, 王志超, 等. 兰炭与典型煤种掺烧特性试验研究[J]. 煤质技术, 2015(6): 56-59.
Li Xiaowei, Zhao Hongwei, Wang Zhichao, et al. Experimental research on co-combustion of blur-coke and typical coal[J]. Coal Quality Technology, 2015(6): 56-59.
- [10] 杨忠灿, 刘家利, 王志超, 等. 半焦磨损特性及在电站锅炉上的防磨措施[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(3): 74-83.
Yang Zhongcan, Liu Jiali, Wang Zhichao, et al. Abrasion characteristics and anti-abrasion measures of semi-coke used for power station boiler[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3): 74-83.
- [11] 刘家利, 姚伟, 王桂芳, 等. 660 MW 机组半焦煤粉锅炉制粉系统选型[J]. 热力发电, 2016, 15(11): 75-81.
Liu Jiali, Yao Wei, Wang Guifang, et al. Type selection of coal pulverizing system for 660 MW coal-fired boiler burning semi-coke[J]. Thermal Power Generation, 2016, 15(11): 75-81.

(上接第 79 页)

- [12] 郭平利. 煤制甲醇项目蒸汽系统管网的设计[J]. 化工设计, 2012(4): 22-23, 45.
Guo Pingli. steam system piping design of coal-to-methanol project[J]. Chemical Engineering Design, 2012(4): 22-23, 45.
- [13] 王建辉. 煤制甲醇装置蒸汽系统的优化与改进[J]. 大氮肥, 2015, 38(5): 161-164.
Wang Jianhui. Optimization and improvement of coal to methanol plant steam system[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2015, 38(5): 161-164.
- [14] 杨国锋, 陈峰. 煤化工项目全厂蒸汽平衡的经验总结[J]. 广州化工, 2013, 41(1): 153-155.
Yang Guofeng, Chen Feng. Experience summary of entire plant

steam balance in coal chemical project[J]. Guangzhou Chemical Industry and Technology, 2013, 41(1): 153-155.

- [15] 杨银仁. 大型煤化工装置全厂蒸汽系统和凝结水系统的优化[J]. 大氮肥, 2015, 38(3): 161-164.
Yang Yinren. Plantwide steam system and condensate system optimization in large scale coal chemical industry plant[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2015, 38(3): 161-164.
- [16] 舒歌平. 煤炭液化技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003: 89.
- [17] 林泉. 发展煤化工所面临的 CO₂ 排放问题及其对策[J]. 化学工业, 2007, 25(7): 17-20, 28.
Lin Quan. CO₂ Emission Issue in developing coal chemical industry and preliminary discussion on the emission reduction methods[J]. Chemical Industry, 2007, 25(7): 17-20, 28.