

IGCC 常规岛系统优化设计研究

谢 浩¹ 张忠孝¹ 李振中² 王 阳² 陈 雷¹ 戚利利¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

2. 国家电网燃烧工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:建立 200 MW 级整体煤气化联合循环(IGCC)发电系统模型,以整体性为原则,基于各设备单元的物质平衡、能量平衡以及化学反应平衡对 IGCC 系统进行计算,探讨不同汽水循环形式、不同余热锅炉与废热锅炉汽水配置方式对 IGCC 发电系统性能的影响。结果表明:在本研究系统中,选择三压再热汽水循环形式,可进一步回收燃气轮机的排气余热,同时提高了汽轮机的初参数,有利于提高系统性能;余热锅炉高压省煤器的汽水配置遵循“温度对口、能量梯级利用”的原则,以获得较高的整体性能。研究结果为同级别 IGCC 系统中常规岛的优化设计提供参考。

关键词:整体煤气化联合循环;常规岛;余热锅炉;效率

中图分类号:TM62

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2011)06-0030-06

整体煤气化联合循环(IGCC)汽水系统主要包括余热锅炉、蒸汽轮机及相关的辅助设备,它几乎贯穿于整个 IGCC 系统中,对系统整体优化和各主要子系统匹配起着重要的作用。

IGCC 中汽水系统的传热传质比常规联合循环要复杂许多。除了需要考虑燃机的排气余热外,在带有废热锅炉的 IGCC 系统中,还需要考虑气化工工艺中废热锅炉流程的显热利用和净化工艺中合成气冷却时显热和潜热的利用;采用整体化空分或部分整体化空分系统时,还需要考虑空气冷却器的热量利用。总之,IGCC 中余热锅炉需要回收来自气化岛和燃机岛两部分的热量,且各部分热量的数量和品位也有差别,会对系统中的余热锅炉产生影响。因此,只有结合 IGCC 整体性原则,考虑汽水系统本身的热量平衡关系以及与其它子系统的相互关系,去分析 IGCC 汽水系统配置方式对整体性能的影响才具有一定的意义。

国内外对常规联合循环汽水系统的优化配置

已经做了大量的研究^[1-7],主要分为 2 个方面:一是系统热力参数优化,二是汽水系统设备的技术经济优化。

在此基础上,对于 IGCC 汽水系统优化配置的研究也越来越受到人们的重视。文献[8-9]以双压再热和三压再热汽水系统组成的整体空分 IGCC 系统为研究对象,分析了燃气轮机不同调节规律和汽轮机不同运行方式对系统变工况性能的影响,并提出了 IGCC 蒸汽系统的合理运行方式。段立强等^[10-13]采用温区模型的概念,建立 IGCC 汽水循环系统的变工况特性模型,并开发程序软件;通过实例研究了装置负荷变化并采用 3 种不同调节手段以及大气温度变化时的汽水循环系统变工况特性,揭示了一些主要变量典型变化规律及其对系统性能影响关系。高健等^[14-15]采用分别限定排烟温度和节点温差的方法,研究了 IGCC 设计工况下合成气冷却器与余热锅炉的匹配以及采用不同循环形式对电厂整体技术、经济性的影响。

收稿日期:2011-10-17 责任编辑:孙淑君

基金项目:江苏省高校自然科学基金(2010112TSJ0105)

作者简介:谢浩(1976—),男,安徽六安人,博士研究生,从事洁净煤发电技术方面的研究。通讯作者:张忠孝。

在前面的研究基础上,本文以 200 MW 级 IGCC 整体系统为研究对象,结合国外 IGCC 机组实际运行特点,研究汽水系统配置方式对整体性能的影响情况。为国内 IGCC 示范机组汽水系统的合理配置

和优化运行提供参考。

1 IGCC 汽水系统的建立

本 IGCC 汽水系统流程如图 1 所示。

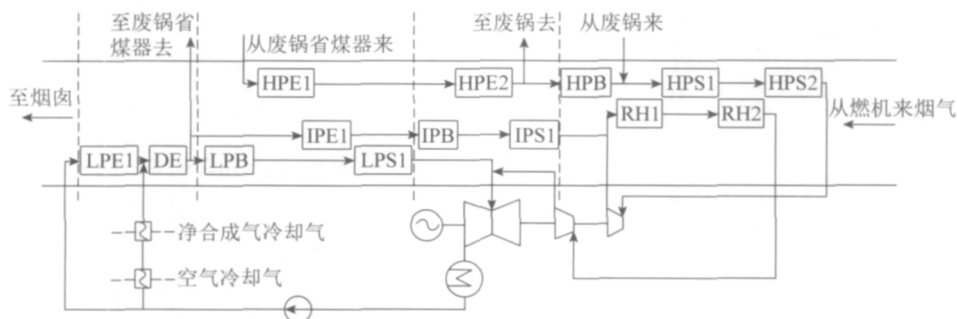


图 1 IGCC 汽水系统流程示意

LP、IP 和 HP—低压、中压和高压; E、B 和 S—省煤器、蒸发器和过热器; RH—再热器

从凝汽器出来的凝结水一部分经空气冷却器和净合成气冷却器预热,另一部分直接进入余热锅炉低压省煤器,然后汇集进入除氧器。从除氧器出来凝结水分 3 路:一路进入废热锅炉省煤器,一路进入中压省煤器,还有一部分进入低压蒸发器。低压蒸发器产生的低压饱和蒸汽,部分作为除氧器工作蒸汽,剩余进入低压过热器进一步加热,产生的低压过热蒸汽与中压缸排汽一起进入蒸汽轮机的低压缸;中压省煤器的凝结水经中压蒸发器、中压过热器产生中压过热蒸汽,与汽轮机高压缸排汽混合后进入高温再热器继续加热,产生的再热蒸汽进入汽轮机的中压缸;高压省煤器的凝结水经高压蒸发器、高压过热器产生高压过热蒸汽,进入汽轮机的高压缸。

在基准算例的系统流程中,为了将气化岛的高温合成气热量有效转移至常规岛的汽水系统中,辐射废热锅炉和对流废热锅炉同时从余热锅炉高压省煤器处引入部分凝结水,在废热锅炉中吸热蒸发后,产生的蒸汽再次引入余锅的高压蒸发器,与余热锅炉汽水系统汇合。

2 研究方法

采用序贯模块法对系统进行模拟计算,各单元操作模块按照相应的单元操作正常运行的情况而设计,将输入物流的变量和为进行计算所需的各项设备参数,作为已知数据供给模块,模块根据这些信息计算,得出输出物流数据及其他各项计算结果。在进行逐个模块的计算时,前一模块的出口

物流信息,作为后一模块的入口物流数据,直至完成整个热力系统的模拟^[16]。

余热锅炉系统由于工质侧和烟气侧的流动方向相反,不同于传统的单向流动,因而在调用各个模块时,采用回路切断法,即在适当的地方切断回路,将切断处的变量作为迭代变量赋一假定值,然后依次调用单元模块进行序贯计算,得到其计算值,反复进行迭代,直到迭代变量的 2 次计算值一致。

本文研究的 IGCC 系统中,空分系统的整体化系数为 30%,气化方式采用带辐射废热锅炉和对流废热锅炉的水煤浆气化,燃气轮机选择 E 级改烧合成气燃气轮机联合循环。在基准算例中,余热锅炉选用三压、再热、无补燃、卧式余热锅炉,蒸汽轮机为三压再热蒸汽轮机。设计工况下,保证燃机 100% 负荷运行,高、中、低压段节点温差都设为 10 °C,高、中压段接近点温差设为 5 °C,低压段接近点温差设为 16 °C。

参照国外同级别 IGCC 发电机组的实际运行数据,输入合理的初始参数,以满足系统的质量和能量平衡以及各单元之间的耦合。设计工况的主要参数见表 1。

3 结果与分析

3.1 循环形式

本研究的 IGCC 发电系统中,燃气轮机的排气流量大于 120 kg/s,排气温度高于 510 °C,适宜采用双压或三压的汽水流程系统。为此,设计了 3 种汽

水循环形式,分别为三压再热(基准算例)、三压无再热和双压再热。

表1 设计工况的主要参数

项目	指标
设计煤种	内蒙满世煤
气化炉容量/(t·d ⁻¹)	2000
气化压力/MPa	3.6
气化温度/℃	1311.7
水煤浆浓度/%	60.5
水煤比/(t·t ⁻¹)	0.3669
氧煤比/(t·t ⁻¹)	0.7390
空分整体化率/%	30
燃气轮机型号	GE9171E 改造
高压蒸汽压力/MPa	92.51
中压蒸汽压力/MPa	24.52
低压蒸汽压力/MPa	3.61
高/中/低压节点温差/℃	10/10/10
高/中/低压节点温差/℃	16/5/5

常规的联合循环机组燃机与汽机的功率比约为2:1,而在本IGCC工程中,由于气化岛高温合成气的热量被常规岛汽水系统有效利用,汽轮机的进汽量增加,汽轮机出力有了较大的提高,使得燃机与汽机的功率达到(1~1.2):1。图2为循环形式对功率分配的影响,从图2可以看出,由于3种方案燃机负荷率都以100%进行计算,因此燃机的发电功率基本不变,而汽机的发电功率有较大变化,从而影响到总的发电功率。系统总功率以及汽机功率占总功率比从大到小的顺序均为:三压再热、双压再热、三压无再热。

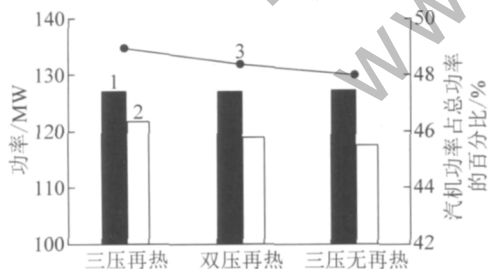


图2 循环形式对功率分配的影响

1—燃机功率; 2—汽机功率; 3—汽机功率/总功率

造成系统性能变化的深层原因是在不同汽水循环形式中,对高、中、低压段的汽水流量进行了重新分配,从而使得余热锅炉和蒸汽轮机的热量转换有所不同。图3为汽水循环形式对汽水流量的影响,从图3可以看出,废热锅炉产生的高压蒸汽量占总高压蒸汽流量的55%~70%,其中,辐射废热锅炉产生的高压蒸汽量约为对流废热锅炉的2倍。中压蒸汽与低压蒸汽量相当,均只有高压蒸汽量的10%

左右。

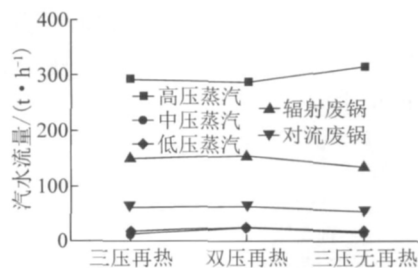


图3 汽水循环形式对汽水流量的影响

双压再热和三压再热相比,高压蒸汽流量有所降低,由于减少了中压级,低压蒸汽流量增加7.13 t/h,同时由于引至废热锅炉的蒸汽焓有所降低,使得辐射废热锅炉和对流废热锅炉的蒸汽流量略有增加;三压无再热高压蒸汽流量有较大提高,主要是因为取消再热后,高压汽包蒸发量大幅提高,中压和低压蒸汽流量变化不大。

表2列出了200 MW级IGCC系统额定工况下,3种汽水循环形式的燃气轮机效率 η_{gt} 、余热锅炉效率 η_h 、汽轮机效率 η_{st} 以及系统净效率 η_{cc}^N 的变化情况。

表2 汽水循环形式对效率的影响 %

循环形式	燃机效率	余锅效率	汽机效率	系统净效率
三压再热	32.9	87.8	37.8	40.6
双压再热	33.0	87.4	37.0	40.1
三压无再热	33.0	88.3	36.7	39.8

以O₂为气化剂的IGCC系统各效率可由以下公式求得^[17]:

$$\eta_{gt} = P_{gt} / Q_{gt}^c$$

$$\eta_{st} = P_{st} / (Q_{st1} + Q_{st2} + Q_{st3} + VQ_{rh} - Q_w)$$

$$\eta_h = (Q_{c1} - Q_{A2}) / (1 - P_{gt}^0 / Q_{gt}^c)$$

$$\eta_{cc}^N = \frac{\eta_B \{ \eta_{gt} + [Q_{st}^c / Q_{gt}^c + (1 - P_{gt}^0 / Q_{gt}^c) \eta_h] \eta_{st} \} (1 - \eta_e)}{(1 + Q_{st}^c / Q_{gt}^c)}$$

式中 Q_{gt}^c ——分配到燃气轮机中参与做功的热能, kJ/h;

Q_{st}^c ——分配到蒸汽轮机中参与做功的热能, kJ/h;

Q_{c1} ——进入余热锅炉高温烟气所携带的热能 kJ/h;

Q_{A2} ——余热锅炉排出烟气所携带的热能, kJ/h;

P_{gt}^0 ——燃机轴端发电功率的热当量 kJ/h;

η_e ——厂用电率, %;

η_B ——气化炉效率, %。

由表 2 可知 3 种方案中, 燃机效率基本不变; 系统净效率与汽机效率的高低顺序一致, 均为: 三压再热 > 双压再热 > 三压无再热, 三压再热形式的系统净效率为 40.6%, 比双压再热高 0.5%, 而双压再热比三压无再热仅高 0.3% 左右, 也印证了三压再热循环形式由于增加了余热锅炉的受热面积, 充分回收了燃气轮机的排气余热, 电厂的总体性能有所提高。

而余热锅炉当量效率反映了余热锅炉中高温烟气与汽水系统的换热情况。虽然三压无再热循环形式比三压再热形式少了一级再热器, 但在相同气化岛和燃机岛运行特性的前提下, 利用 ED 模式对不同汽水循环形式余热锅炉的各换热设备特性指标(如管排数、管径及换热面积等)进行了重新计算和评估, 得出三压无再热循环形式的总换热面积反而比三压再热形式的大, 因此排烟温度也最低, 对应的余热锅炉当量效率最高。

总之, 由于三压无再热汽轮机低压末级叶片蒸汽干度没法保证, 同时也是 3 种循环形式中系统净

效率最低的一种, 故三压无再热循环方式在本级别 IGCC 系统的设计方案中可不作考虑, 而三压再热虽然比双压再热系统净效率高 0.7%, 但由于三压余热锅炉的汽水系统比双压要复杂, 增加了系统投资, 需要通过经济技术比较进行确定。

3.2 余热锅炉与废热锅炉的汽水匹配方式

余热锅炉与废热锅炉的汽水匹配是指从余热锅炉不同省煤器出口位置抽取工质, 在废热锅炉中与气化炉产生的高温合成气换热后, 被送回到余热锅炉不同蒸发器出口位置, 以回收利用气化岛的热量。

理论上可选择抽取和回送的位置有很多种, 首先根据“温度对口、能源梯级利用”的原则, 诸如辐射废热锅炉引入位置比对流废热锅炉引入位置还靠近低压段的匹配方式不予考虑; 其次, 由于系统效率下降过快, 辐射废热锅炉和对流废热锅炉都与中压段或低压段匹配方式也不予考虑。在选用三压再热循环形式的基础上, 按照抽取和回送位置从高压段向低压段变化的顺序, 代表性地选择了 3 种汽水匹配方案, 如图 4 所示。

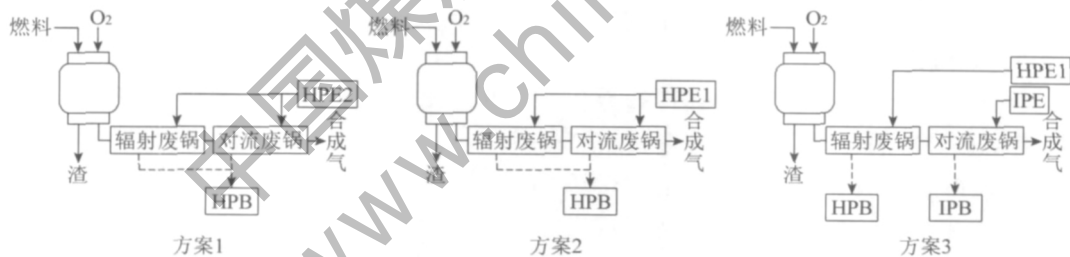


图 4 余热锅炉与废热锅炉汽水匹配方案

图 5 给出余热锅炉与废热锅炉配置方式对汽水流量的影响。

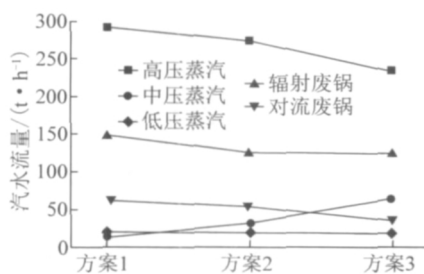


图 5 配置方式对汽水流量的影响

随着废热锅炉抽取工质位置从高温、高压段向低温、低压段方向变化, 高压蒸发器的汽水流量呈逐渐减少趋势, 而中压蒸发器的汽水流量有所增加, 对低压蒸发器汽水流量影响不大。主要是因

为随着匹配换热的给水温度下降, 相同吸热量所需要的汽水流量会逐渐减小。如方案 3, 此时废热锅炉产生的高压蒸汽量已占总高压蒸汽流量的 70% 左右, 中压蒸汽量约占高压蒸汽量的 25%, 不利于系统的经济运行。

由于计算工况均选择燃机 100% 负荷率运行, 决定了气化炉至燃机段合成气的状态参数基本保持不变, 因此汽水在废热锅炉中的吸热量也基本不受汽水配置方式的影响。计算得出: 辐射废热锅炉吸热量约为 57.0 MW, 对流废热锅炉吸热量约为 23.5 MW, 对流废热锅炉省煤器吸热量约为 6.7 MW, 设置在燃机与空分之间的空气冷却器回收热量为 6.9 MW, 其中有 3.2 MW 被净合成气过热器利用, 其余全部进入汽水系统。

表3 汽水配置方式对效率的影响 %

废热锅炉抽取方式	燃机效率	余热效率	汽机效率	系统净效率
方案1	32.9	87.8	37.8	40.6
方案2	32.9	87.8	37.5	40.5
方案3	32.9	87.7	37.2	39.5

由表3可以看出,随着废热锅炉抽取工质位置从高温、高压段向低温、低压段方向变化时,对燃机效率和余热锅炉效率影响不大,而汽机效率和系统净效率是逐渐降低的,其根本原因是只有当使用“温度对口、梯级利用”的传热匹配方案时,才能获得更高的系统效率。由此可见,在相当级别IGCC系统中,为了有效地利用气化岛中高温合成气的热量,应该使余热锅炉高压省煤器中的高温给水与废热锅炉进行匹配换热,以获得较大的发电功率和较高的系统净效率。

4 结 论

(1) 在采用水煤浆气化并带有辐射废热锅炉和对流废热锅炉的200 MW级IGCC系统中,不宜选择三压无再热余热锅炉,而三压再热的系统净效率虽然高于双压再热,但由于其初投资增加,还应通过经济技术评价进行确定。

(2) 汽水配置方式所造成IGCC整体性能变化的深层原因是对高、中、低压段的汽水流量进行了重新分配,从而使得余热锅炉和蒸汽轮机的热量转换有所不同,一般来说,废热锅炉产生的高压蒸汽量占总高压蒸汽流量的55%~70%,中压蒸汽与低压蒸汽量相当,约占高压蒸汽量的10%。

(3) 通过三压再热IGCC系统的热力计算表明,在相同的压力层次中,尽可能利用余热锅炉中温度较高段的工质与废热锅炉中的高温合成气进行传热匹配,可获得较高的系统供电效率。

(4) 在IGCC系统中,汽水配置方式不会影响废热锅炉产生的总热量,但由于对进入废热锅炉、余热锅炉各段的汽水流量分配产生较大影响,故对各段热量分配产生影响,从引起了系统整体性能的变化。可以看出,高温合成气与余热锅炉中温度较高的部分进行传热匹配才能够获得较高的系统效率。

在IGCC汽水系统配置优化时,不应完全沿用常规联合循环余热锅炉的参数,应当充分考虑常规岛本身的热量平衡关系以及和岛、燃机岛汽水耦合的相互影响关系。

参考文献:

- [1] 陈雷,张忠孝,李振中,等. 200MW级IGCC系统变工况特性研究[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(5): 59-63.
- [2] 周国锋,张忠孝,李振中,等. IGCC系统燃气轮机变工况对气化岛性能的影响[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(6): 40-44.
- [3] 焦树建. 燃气-蒸汽联合循环[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 杨承,杨泽亮,蔡睿贤. 单压过热蒸汽余热锅炉抽汽运行的解析特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 1-6.
- [5] 刘向杰,殷冲,候国莲,等. 联合循环电厂余热锅炉的监督预测控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 52-58.
- [6] Christoph Koch, Frank Cziesla, George Tsatsaronis. Optimization of combined cycle power plants using evolutionary algorithms[J]. Chemical Engineering and Processing, 2007, 46(3): 1151-1159.
- [7] 黄伙基. 余热锅炉蒸汽系统的优化配置及其变工况运行特点[J]. 中国科技信息, 2006(4): 110-111, 116.
- [8] 吕泽华,赵士杭,尚学伟,等. 三压再热汽水系统IGCC的设计工况和变工况性能[J]. 热能动力工程, 2000, 15(4): 373-375.
- [9] 赵士杭,吕泽华,孙华祥. 双压再热蒸汽循环的IGCC变工况性能[J]. 动力工程, 2001, 21(2): 1156-1160.
- [10] 段立强,林汝谋,蔡睿贤,等. 整体煤气化联合循环(IGCC)底循环系统变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 26-30.
- [11] 徐钢,林汝谋,邵艳军,等. 燃气轮机建模的通用性和精细性研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 106-111.
- [12] 段立强,林汝谋,金红光,等. 整体煤气化联合循环(IGCC)系统变工况特性[J]. 热能动力工程, 2001, 16(6): 582-590.
- [13] L. Jiang, R. Lin, H. Jin, et al. Study on thermodynamic characteristic and optimization of steam cycle system in IGCC[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9-12): 1339-1348.
- [14] 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——(3) 气化炉合成气冷却器与余热锅炉的匹配[J]. 动力工程, 2007, 28(3): 471-474.
- [15] 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——(2) 余热锅炉篇[J]. 动力工程, 2007, 27(6): 985-989.

[16] 杨友麒, 项曙光. 化工过程模拟与优化 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[17] 焦树建. 燃气-蒸汽联合循环的理论基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

Study on optimization design of conventional island system in IGCC

XIE Hao¹, ZHANG Zhong-xiao¹, LI Zhen-zhong², WANG Yang², CHEN Lei¹, QI Li-li¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. National Plant Combustion Centre, Shenyang 110034, China)

Abstract: The 200 MW integrated gasification combined cycle (IGCC) system model was established and calculated. Complied with principle of integrity, influences of different steam-water cycle modes and different matching schemes of HRSG with waste heat cooler on overall performance, local thermal characteristics in IGCC were discussed according to mass balance, energy balance and reaction equilibrium of each unit. The results show that three-pressure reheat steam-water cycle mode is beneficial to recycle waste heat of exhaust from gas turbine, to increase main steam parameters of steam turbine, and to boost overall performance in IGCC. Reasonable matching scheme of HRSG with waste heat cooler is designed according to principle of "temperature matching and step utilization of energy". The research results can provide references for optimization design of conventional island in equivalent level IGCC system.

Key words: IGCC; conventional island system; HRSG; efficiency

(上接第 22 页)

参考文献:

[1] 姚向征. 新集煤电二厂选煤工艺的对比 [J]. 洁净煤技术, 2011, 17(5): 10-11, 39.

[2] 郝天峰, 孙友森, 何光太, 等. 采用博弈方式确定重介、跳汰二系统的精煤质量指标 [J]. 洁净煤技术, 2007, 13(5): 13-16.

[3] 谢广元. 选矿学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.

Adjustment of operating parameters of jigger under higher concentration circulating water

WANG Min, JIN Ji-yuan, LIU Xin-guo

(Jining No. 3 Coal Preparation Plant, Yanzhou Coal Mining Co., Ltd., Jining 272069, China)

Abstract: Raw coal screening experiments and coal water slurry screening experiments in Jining NO. 3 coal preparation plant show that the raw coal is extremely sliming and the efficient of processing system is lower, there are also large amount of fine particles in circulating water, higher concentration of circulating water is the main cause of lower separation efficiency. The operating parameters have been adjusted by adjusting gas inlet and outlet butterfly valves, resetting wind pressure frequency, regulating flow of circulating water and so on. Adjustment effect have been tested by three products distribution rate curve. The results show that the the slope of curve is larger, the possible deviation E_{P1} , E_{P2} , imperfection I_1 , I_2 are above 0.1, the jiggering effect is better. After adjustment, the quality of products have been improved, also have saved the plant the trouble of bulk flotating for blending coal, cleans ash has reached 100%, the clean coal productive has been improved by 3%, processing capability is up 120 t/h. The productive task has been overfulfilled.

Key words: circulating water; jigger; screening experiment; distribution rate; gas valve opening