

与炼化项目集成的 IGCC 多联供产品可靠性研究

吴学智¹, 颜海宏², 牛苗任¹, 于剑甯², 聂会建¹, 孙永斌¹

(1. 中国电力工程顾问集团有限公司 华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120; 2. 上海漕泾联合能源有限公司, 上海 200010)

摘要:为了计算某与炼化项目集成的整体煤气化联合循环(IGCC)多联供示范项目现有装机方案下外供氢气、蒸汽、电力以及氧、氮等工业气体的可用率,依托某 IGCC 多联供示范项目,基于气化、空分、变换及净化、联合循环等装置可靠性指标的调研结果,运用可靠性理论对 IGCC 多联供系统主体装机方案的可靠性进行了研究。结果表明:IGCC 多联供系统可以每年外供炼化项目 25 万 m³/h 氢气 8000 h 以上,满足炼化项目对外供氢气的可靠性要求;IGCC 多联供系统加上蒸汽备用措施后可以外供炼化项目蒸汽 8000 h 以上;炼化项目在任何工况下都需要外购部分电力。需要设置 2×100% 容量的备用电源,以确保炼化项目所需电力的可靠性。

关键词:整体煤气化联合循环;多联供;可靠性;炼化;可用率

中图分类号:TK123;TD849 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2015)01-0090-05

Reliability of IGCC poly-generation system integrated with oil refining project

WU Xuezh¹, YAN Haihong², NIU Miaoren¹, YU Jianke², NIE Huijian¹, SUN Yongbin¹

(1. North China Power Engineering Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100120, China;

2. Shanghai Caojing Integrated Energy Co., Ltd., Shanghai 200010, China)

Abstract: Relying on one IGCC poly-generation demonstration project, a reliability study of main equipments installation plan of IGCC poly-generation system integrated with oil refining project was made. According to the reliability data survey of main equipment and reliability theory, the reliability of hydrogen, steam, power and other industry gas supply under typical working conditions were analysed and calculated. The results showed that, with reasonable equipment standby, the system could provide hydrogen 2.5×10⁵ m³/h and steam for refining project lasting more than 8000 hours. In order to ensure the normal operation of the refining project, it needed to be equipped two emergency power supply whose capacity were 100%.

Key words: integrated gasification combined cycle; poly-generation; reliability; oil refining; availability

0 引言

在碳减排和治理 PM2.5 的背景下,将洁净的煤气化和高效的联合循环相结合的整体煤气化联合循环(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)技术越来越受到关注。IGCC 多联供系统是指以煤或石油焦、沥青、重质渣油等化石燃料气化为源头,将发电、供热、化工产品生产联合起来的能源转换利用系统^[1]。其不仅保留了 IGCC 清洁、高效的优

点^[2-3],而且通过与生产化工产品相结合提高了经济效益^[4-5]。目前,IGCC 的产业化主要受造价过高、可靠性相对较低的制约^[6-7]。国内外有些研究机构很早以前就已经对 IGCC 的可靠性进行了相关研究,得出的结论为指导 IGCC 系统的可靠性设计与优化提供了借鉴^[8-10]。但是,这些研究绝大多数仅针对纯发电 IGCC 系统,不能直接应用于 IGCC 多联供系统的设计。随着气化、空分、净化等重要单元技术在近年来不断取得重大进步,原来的某些结论

收稿日期:2014-07-18; **责任编辑:**孙淑君 **DOI:**10.13226/j.issn.1006-6772.2015.01.021

作者简介:吴学智(1984—),男,甘肃庆阳人,工程师,博士,现从事 IGCC 及多联产设计、节能环保等工作。E-mail: wuxz@ncpe.com.cn

引用格式:吴学智,颜海宏,牛苗任,等.与炼化项目集成的 IGCC 多联供产品可靠性研究[J].洁净煤技术,2015,21(1):90-94,116.

WU Xuezh¹, YAN Haihong², NIU Miaoren¹, et al. Reliability of IGCC poly-generation system integrated with oil refining project[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1): 90-94, 116.

已不能完全适用于现今的 IGCC 系统。因此,笔者在 IGCC 单元装置可靠性数据的基础上,应用可靠性理论,对某一与炼化项目集成的 IGCC 多联供系统外供产品的可靠性进行计算分析。

1 装机方案和外供产品

本 IGCC 多联供示范项目作为炼化一体化项目的动力中心,IGCC 系统以煤为燃料,通过气化炉将煤转变为煤气,经过除尘、脱硫等净化工艺,使之成为洁净的煤气供给燃气轮机燃烧做功,燃气轮机排气余热通过加热余热锅炉给水产生过热蒸汽与气化岛显热回收产生的蒸汽,经过余热锅炉过热后共同带动蒸汽轮机发电,带基本负荷。IGCC 系统除了发电外,还优先外供氢气 25 万 m³/h(每年不小于 8000 h),以及化学工业区其他项目所需蒸汽(表 1),同时外供 2.6 万 m³/h 的氧气和 1.56 万 m³/h 的氮气。

表 1 化学工业区蒸汽需求参数

管网	压力/MPa	温度/℃	供应量/(t·h ⁻¹)
超高压蒸汽	12	530	102
高压蒸汽	4.5	410	597
中压蒸汽	1.9	300	231

项目一次建成 4 台 3200 t/d(入炉煤)Shell 干法全热回收气化炉,配套建设 4 套(公称能力)75000 m³/h 等级的独立、全电驱、低压型空分,1 套耐硫变换,1 套低温甲醇洗(用于发电合成气脱硫和制氢气、合成气脱硫脱碳),2 台 9F 级燃气轮机,2 台燃气轮机发电机,2 台余热锅炉,都考虑安装选择性催化还原法烟气脱硝技术(Selective Catalytic Reduction,SCR)装置,2 台蒸汽轮机和 2 台蒸汽轮机发电机。燃气轮机和蒸汽轮机双轴布置。

2 IGCC 主要单元装置的可靠性

2.1 气化装置可靠性

气化炉作为整个 IGCC 多联产系统的龙头,其装置的可靠性占据非常重要的地位。在西班牙 EL-COGAS IGCC 电站统计的故障率中,气化装置占 48.4%,空分装置占 5.8%,联合循环装置占 41.4%,其他原因为 4.4%^[11]。可见气化炉装置对 IGCC 系统的可靠性有着至关重要的作用。

本项目设计煤种为提质褐煤,成浆性差,主流的气化技术中只有干煤粉气化可使用该煤质^[12]。本

着高效节能、成熟可靠的原则,考虑到相比同类同规模气化装置,Shell 气化炉技术先进成熟,可用率高,在国内已经基本实现长期稳定运行。本项目选择带废锅流程的 Shell 气化炉。

根据壳牌(中国)有限公司的有关资料,Shell 气化装置单系列的可用率达到 90%~95%。

对于本项目来说,IGCC 动力站有充足的天然气作为备用燃料,当气化炉停运时,可以用天然气来维持联合循环系统的继续运行。鉴于 Shell 气化炉初期投资大的特点,加上本项目氢气、合成气、氧气和氮气、蒸汽、电力都设置了相应的备用措施,因此在 4 台 Shell 气化炉之外,未设置备用气化炉。

2.2 空分装置可靠性

空分装置是 IGCC 系统重要的生产装置,其可靠性、开车周期等对全系统的影响很大。空分装置提供的氧气、氮气、仪表空气以及工厂空气等是整个装置安全、稳定运行的重要前提。

世界上较著名的大型空分设备制造厂有德国林德公司(Linde)、美国空气产品和化学品公司(APCI)、法国空气液化公司(Air Liquid)等。以上 3 家空分公司都有不小于 75000 m³/h(O₂)空分装置的业绩。根据液化空气公司的有关资料,该公司空分装置在不包括后备系统的情况下,对于大型空分装置而言,可用率可达 99%。同时,通过配置储槽和后备系统,对保证 100%体积流量起到决定性作用。可见,空分装置的可用率高,可不设置备用,但必须配置储槽和后备系统。

2.3 联合循环系统可靠性

中低热值燃机是联合循环系统中的核心装置^[13]。目前美国 GE 公司、德国 Siemens 公司、日本三菱公司(MHI)掌握中低热值燃机的关键技术并且运行业绩较多^[14]。

GE 公司的低热值燃气轮机在 IGCC 电厂应用数量最多,合成气燃气轮机产品出力范围从 45 MW 到超过 305 MW 均有典型系列,适用于各种气化技术。目前,GE 公司为世界范围内的煤基 IGCC 电厂和炼化厂提供的燃气轮机的总出力已经超过 3 GW;GE 的合成气燃气轮机已经累积了超过 100 万 h 的使用低热值燃料的运行经验。面向 50 Hz 市场 GE 的低热值机型有 6B(46 MW)、9E(140 MW)、6FA(92 MW)和 9F(286 MW)。其中 9E 低热值燃机已在意大利 Sarlux 电厂稳定运行了超过 10 a,在国内上海宝钢和福建炼化项目均已成功投运。

Siemens 公司同样有丰富的低热值燃机设计和制造业绩,如荷兰 Buggenum 电厂安装了 V94.2 型燃气轮机,于 1994 年投运。目前,合成气运行累计超过 65000 h,2009 年该电厂年商业运行接近 7000 h, Siemens 公司低热值燃机在 IGCC 项目上得到了许多宝贵经验和教训,新型燃烧器的燃烧性能、环保性能以及变负荷运行能力均有提升。天津绿色煤电 IGCC 项目采用 SGT5-2000E(LC)型燃气轮机,目前处于试生产发电上网阶段。

MHI 公司早在 1995 年就开始将燃机应用于低热值高炉煤气燃料,已运行的低热值电厂约 25 个,装机容量达 2855 MW。三菱重工低热值燃机典型产品有 M701D 和 M701F。2008 年,在日本建设 Nakoso IGCC 示范电厂,该电厂采用空气气化炉生产合成气,燃机为 M701D,正常出力为 130 MW。

可见,中低热值燃机的技术已经比较成熟,中低热值燃机联合循环机组可靠性指标可参考常规燃机联合循环机组。表 2 为 2005—2009 年中电联统计的我国燃机联合循环机组可靠性数据^[15]。

表 2 我国联合循环机组的可靠性数据

项目	年份				
	2005	2006	2007	2008	2009
数量/台	11	19	30	43	65
等效可用率/%	86.36	95.25	91.80	94.06	92.83

2013 年国家能源局监管部门对国内 600 多台燃气联合循环机组进行了统计,2012 年全国燃气联合循环机组等效可用率为 91.18%,并有逐步上升的趋势^[16]。

2.4 净化及变换装置可靠性

本项目的净化系统采用改进型低温甲醇洗工艺;变换采用耐硫变换技术。这 2 种技术都有多年的工业使用业绩,技术成熟可靠,基本不存在风险。

3 IGCC 多联供系统可靠性分析

整个 IGCC 系统非常复杂,如果细分可以划分为成百上千个子系统或单元,模型非常繁杂。本研究突出主要矛盾,将系统分为气化、空分、变换、净化、联合循环五大部分,根据文献调研得到的可靠性数据,分析计算各个工况下的可靠性指标。

为了便于分析,简化计算,本文的可靠性模型基于以下假定^[9]:①设备单元只有 2 种状态:要么工作

正常(出力为 100%),要么停机(出力为 0);②各设备可靠性是相互独立的;③备用天然气燃料的可用率为 100%。

气化、空分、变换、净化、联合循环等各单元的可靠性指标见表 3。

表 3 IGCC 系统主要单元装置的可用率

单元装置	可用率 AF/%	数据来源
气化装置	92/90	见 2.1 节
空分装置	99	见 2.2 节
低温甲醇洗	99.5	根据调研结果估计
耐硫变换	99.5	根据调研结果估计
变压吸附(PSA)制氢	99.5	根据调研结果估计
联合循环	93/91	文献[15-16]

注:“/”前的数据为可信值,“/”后的数据为保守值

IGCC 系统的可靠性如图 1 所示。由图 1 所示,空分系统包含 4 台空分装置,4 台空分采用母管制,为并联关系;气化系统包含 4 台气化炉,4 台气化炉采用母管制,为并联关系;耐硫变换装置和低温甲醇洗装置,两者为串联关系;联合循环系统包含 2 台联合循环机组,两者为并联关系。从总体上来看,IGCC 系统的空分、气化、变换、净化、联合循环为串联关系。

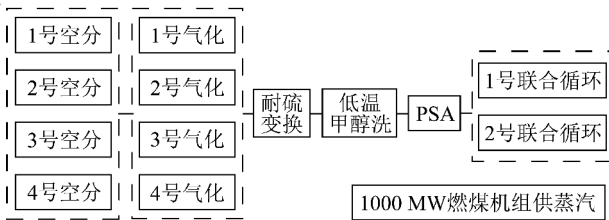


图 1 IGCC 系统的可靠性

IGCC 多联供系统外供产品的可靠性不仅与装机方案有关,而且与运行方式(工况)有关。气化装置、中低热值燃机为影响系统可靠性最为重要的因素。以气化装置和中低热值燃机的故障与否为划分标准,系统可能出现的典型运行工况如下:①工况 1。4 套气化装置、4 套空分装置、2 台燃机都正常运行;②工况 2。1 套气化装置故障;③工况 3。2 套气化装置故障;④工况 4。1 台燃机故障。

在上述 4 种典型工况之外的工况下,可以认为 IGCC 多联供系统已经发生故障,无法满足外供化学品和发电的要求。要保证 IGCC 外供产品的可靠性,必须对这 4 种典型工况重点分析,提出典型工况下外供产品的保证措施。

4 IGCC 外供产品的可靠性分析

4.1 IGCC 系统的运行方式

4.1.1 工况 1

正常运行工况时,4 套空分装置 97% 负荷运行,4 套气化装置 100% 负荷运行,2 台燃机 100% 负荷出力,可保证外供氢气 25 万 m^3/h ,炼油用合成气 2.12 万 m^3/h ,氧气 2.6 万 m^3/h ;不同压力等级的氮气可通过氮气内压缩泵或压缩机保证;仪表风可从空分增压机部分供出等。从主蒸汽管道抽取高压蒸汽,减温减压送出 12 MPa、530 $^{\circ}\text{C}$ 、102.4 t/h 蒸汽;从气化装置直接外供 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、112 t/h 蒸汽,其余 485.1 t/h 蒸汽从汽机和余热锅炉中压过热器供出;从汽机抽出 1.9 MPa、300 $^{\circ}\text{C}$ 、231.4 t/h 蒸汽。2 套燃气蒸汽联合循环机组共发电 715 MW,扣除自用电 303 MW,可外供电 412 MW,不足部分需从网上购买。

4.1.2 工况 2

1 套气化装置故障时,3 套空分装置 100% 负荷运行,停掉另 1 套空分装置,3 套气化装置 100% 负荷运行,需要 2 台燃机混燃天然气 44.8 t/h,可保证燃机 100% 负荷出力。IGCC 系统可外供氢气 25 万 m^3/h ,炼油用合成气 2.12 万 m^3/h ,氧气 2.6 万 m^3/h ;不同压力等级的氮气可通过氮气内压缩泵或者压缩机来保证;仪表风可从空分增压机部分供出。从主蒸汽管道抽取高压蒸汽,减温减压送出 12 MPa、530 $^{\circ}\text{C}$ 、102.4 t/h 蒸汽;从气化装置直接外供 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、84 t/h 蒸汽,另有 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、366.1 t/h 蒸汽从汽机和余热锅炉中压过热器供出,不足的 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、147 t/h 蒸汽由外部电厂提供;从两台汽机共抽出 1.9 MPa、300 $^{\circ}\text{C}$ 、231.4 t/h 蒸汽。2 套燃气蒸汽联合循环机组共发电 690 MW,扣除自用电 243 MW,可外供电 446 MW,不足部分需从网上购买。

4.1.3 工况 3

2 套气化装置故障,3 套空分装置 71% 负荷运行,停掉另一套空分装置,2 套气化装置 100% 负荷运行,需要停掉 1 台燃机,另 1 台燃机混燃天然气 38 t/h,可保证燃机 100% 负荷出力。IGCC 系统可外供氢气 25 万 m^3/h ,炼油用合成气 2.12 m^3/h ,外供氧气 2.6 万 m^3/h ;不同压力等级的氮气可通过氮气内压缩泵或者压缩机来保证;仪表风可从空分增压机部分供出等。关闭汽机,主蒸汽全部减温减压

外供蒸汽,其中,送出 12 MPa、530 $^{\circ}\text{C}$ 、102.4 t/h 蒸汽,送出 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、375.1 t/h 蒸汽;从气化装置直接外供 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、56 t/h 蒸汽;另外还需要从外部电厂供 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、166 t/h 蒸汽,1.9 MPa、300 $^{\circ}\text{C}$ 的蒸汽 231 t/h;1 台燃气发电 277 MW,扣除自用电 176 MW,可外供电 102 MW,不足部分需从网上购买。

4.1.4 工况 4

1 台燃机故障时,3 套空分装置 95% 负荷运行,停掉另 1 套空分装置,3 套气化装置 94.1% 负荷运行,停掉另 1 套气化装置,这时 1 台燃机出力 100% 负荷。IGCC 系统可外供氢气 25 万 m^3/h ,炼油用合成气 2.12 万 m^3/h ,氧气 2.6 万 m^3/h ;不同压力等级的氮气可通过氮气内压缩泵或者压缩机来保证;仪表风可从空分增压机部分供出等。关闭汽机,主蒸汽全部减温减压外供蒸汽,其中,送出 12 MPa、530 $^{\circ}\text{C}$ 、102.4 t/h 蒸汽,送出 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、275.1 t/h 蒸汽,送出 1.9 MPa、300 $^{\circ}\text{C}$ 、231.4 t/h 蒸汽;从气化装置直接外供 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、79 t/h 蒸汽;另外还需要从外部的电厂供 4.5 MPa、410 $^{\circ}\text{C}$ 、243 t/h 蒸汽。1 台燃气机组发电 286 MW,扣除自用电 217 MW,可外供电 69 MW,不足部分需从网上购买。

4.2 IGCC 外供产品的可靠性分析

4.2.1 IGCC 外供氢气可靠性

根据以上 4 种典型工况的分析,IGCC 系统外供氢气满足炼化项目需求的条件是:①可用气化炉 ≥ 2 台;②可用空分 ≥ 2 套;③变换装置、脱硫装置、PSA 制氢装置可用。

IGCC 外供氢气的优先级最高,因此只要且只有 IGCC 系统满足以上 3 条,外供氢气即可保证。图 2 为 IGCC 系统供氢的可靠性框图。

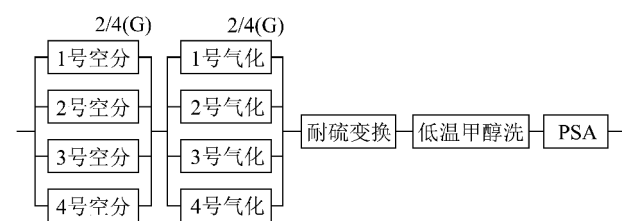


图 2 IGCC 系统供氢的可靠性框图

由图 2 以及可靠性理论^[9],IGCC 系统外供氢气的可用率计算如下:

$$AF_{H_2} = \left[\sum_{i=2}^4 C_4^i AF_{ASU}^i (1 - AF_{ASU})^{4-i} \right] \cdot$$

$$\left[\sum_{j=2}^4 C_4^j AF_{\text{gas}}^j (1 - AF_{\text{gas}})^{4-j} \right] \cdot$$

$$AF_{\text{shift}} \cdot AF_{\text{Rectisol}} \cdot AF_{\text{PSA}} = 0.983/0.981$$

式中: AF 为可用率; 下标 ASU、gas、shift、Rectisol、PSA 分别表示空分、气化、耐硫变换、低温甲醇洗和变压吸附装置; “/”之前的数据为可信值, “/”之后的数据为保守值, 下同。

由以上计算结果, 按每年 8760 h 计算, 可知每年 IGCC 可至少外供氢气 $8760 \text{ h} \times 0.981 = 8594 \text{ h} > 8000 \text{ h}$, 满足炼化项目对外供氢气的可靠性要求。

4.2.2 IGCC 外供蒸汽的可靠性

IGCC 外供蒸汽的优先级小于外供氢气的优先级。IGCC 外供蒸汽的可用率实际上为同时满足外供氢气、蒸汽要求的可用率。

情景 1: 外部电厂的备用蒸汽不可用, 炼化项目所需蒸汽全由 IGCC 系统供应。这时, IGCC 系统必

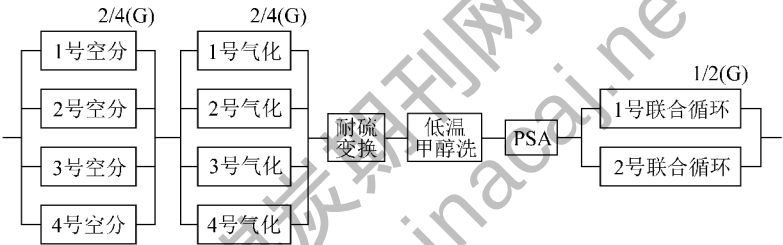


图 4 IGCC 同时外供氢气、蒸汽的可靠性框图(情景 2)

根据图 4 以及可靠性理论^[9], 情景 2 下 IGCC 系统同时外供氢气和蒸汽可用率为

$$AF_{\text{steam}} | PC = \left[\sum_{i=2}^4 C_4^i AF_{\text{ASU}}^i (1 - AF_{\text{ASU}})^{4-i} \right] \cdot \left[\sum_{j=2}^4 C_4^j AF_{\text{gas}}^j (1 - AF_{\text{gas}})^{4-j} \right] \cdot AF_{\text{shift}} \cdot AF_{\text{Rectisol}} \cdot AF_{\text{PSA}} \cdot \left[\sum_{k=1}^2 C_2^k AF_{\text{CC}}^k (1 - AF_{\text{CC}})^{2-k} \right] = 0.978/0.973$$

式中: PC 表示外部燃煤电厂; NA 表示不可用; 下标 CC 表示联合循环装置。

外部电厂采用成熟的 1000 MW 等级燃煤锅炉发电技术, 根据文献^[15], 1000 MW 燃煤发电机组的等效可用率约为 92%。在本设计阶段, 可以暂定外部电厂的备用蒸汽可用率 AF_{PC} 为 92%。

IGCC 同时外供氢气和蒸汽的可用率为

$$AF_{\text{steam}} = (AF_{\text{steam}} | PCNA) \cdot (1 - AF_{\text{PC}}) + (AF_{\text{steam}} | PC) \cdot AF_{\text{PC}} = 0.947/0.937$$

按每年 8760 h 计算, 可知每年 IGCC 至少同时外供氢气和蒸汽 $8760 \text{ h} \times 0.937 = 8208 \text{ h} > 8000 \text{ h}$, 满足炼化项目的对蒸汽的可靠性要求。

须处于设计工况(即 4.1 节工况 1)。情景 1 的可靠性框图如图 3 所示。

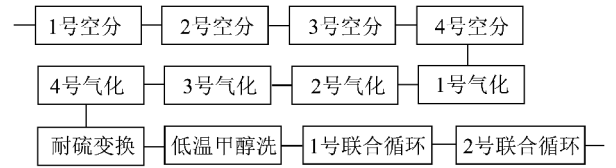


图 3 IGCC 同时外供氢气、蒸汽的可靠性框图(情景 1)

根据图 3 以及可靠性理论^[9], 情景 1 下 IGCC 系统同时外供氢气和蒸汽可用率为

$$AF_{\text{steam}} | PCNA = AF_{\text{gas}}^4 \cdot AF_{\text{ASU}}^4 \cdot AF_{\text{shift}} \cdot AF_{\text{Rectisol}} \cdot AF_{\text{PSA}} \cdot AF_{\text{CC}}^2 = 0.586/0.514$$

情景 2: 炼化项目所需蒸汽由 IGCC 系统和外部电厂的备用蒸汽联合供应。这时, IGCC 系统除了要求 4.2.1 节所述的 3 个条件外, 还需至少 1 台联合循环机组可用。情景 2 的可靠性框图如图 4 所示。

从以上可以看出, IGCC 系统自身同时外供氢气、蒸汽的可用率不高(即情景 1), 但是加上外部电厂的备用蒸汽后, 外供蒸汽的可用率大大提高。因此, 在项目前期, 应尽可能调查、落实外部电厂的备用蒸汽, 尽可能提高备用蒸汽的可用率。

4.2.3 IGCC 外供电力的可靠性

从 4.1 节可见, 在工况 1~工况 4 的工况下, IGCC 系统都无法满足炼化项目的所有电力负荷要求。炼化项目需设置 $2 \times 100\%$ 的备用电源。

4.2.4 IGCC 外供氧气、氮气的可靠性

从 4.1 节可见, 要能保证 1 台空分装置正常运行, 就能满足外供氧气、氮气的需求。因此, 在 IGCC 系统保证了氢气和蒸汽的外供后, 就必然能满足外供氮气和氧气的需求。

5 结 论

1) IGCC 多联供系统可以每年外供炼化项目 $25 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ 氢气 8000 h 以上, 满足炼化项目对外供氢 (下转第 116 页)

35.40%、29.50%、27.30%和33.20%,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率可分别达到11.50%、10.70%、9.30%和11.50%。综合考虑污染物去除效能及经济成本,选择全粒级提质褐煤作为反应器滤料。

3)采用全粒级提质褐煤作为滤料填充的两级UBAF联用工艺对褐煤提质冷凝水进行处理,褐煤提质冷凝水中浊度、 BOD_5 、 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和Mn的去除率分别达到89.40%、96.20%、87.60%、62.30%和72.50%,且处理后的褐煤提质冷凝水的出水水质满足电厂循环冷却水的回用水质要求,可进行再生回用,实现了污废水的资源化处理。

参考文献:

- [1] 尹立群.我国褐煤资源及其利用前景[J].煤炭科学技术,2004,32(8):12-14,23.
- [2] Bergins C. Kinetics and mechanisms during mechanical/thermal dewatering of lignite[J]. Fuel, 2003, 82(4): 355-364.
- [3] 王永周.褐煤热压脱水工艺及机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2012:6-8.
- [4] Richard G Luthy. Treatment of coal coking and coal gasification wastewaters[J]. Water Pollution Control Federation, 2014, 53(3): 325-339.
- [5] 兴虹,林国军,田亚赛.焦化废水深度处理技术的进展[J].辽宁科技学院学报,2006,8(4):39-40,42.
- [6] 毕翀宇.煤矿矿井水处理及其资源化研究[D].太原:山西大

学,2008.

- [7] 王娟.阜新矿区矿井水净化处理厂址选择及工艺参数的实验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2005.
- [8] 陈康.曝气生物滤池在城市污水处理工程中的应用[D].广州:华南理工大学,2013.
- [9] 吕德华.两级曝气生物滤池处理生活污水的试验研究[D].天津:天津大学,2006:3-9.
- [10] 王海东,彭永臻,王淑莹.二段上流式曝气生物滤池去除高标准景观补给水中氮磷营养物[J].水处理技术,2006,32(10):39-43.
- [11] 张显龙,薛军,吴志坚,等.上流式两段曝气生物滤池工艺的试验研究[J].辽宁化工,2004,33(9):500-506.
- [12] 岳三琳,刘秀红,施春红,等.生物滤池工艺污水与再生水处理应用与研究进展[J].水处理技术,2013,39(1):1-6.
- [13] 卢佳,刘翔.两级曝气生物滤池在城市生活污水回用中的应用[J].应用能源技术,2007(6):39-42.
- [14] 雷国元,齐兵强,王占生.二级曝气生物滤池处理城市污水的研究[J].武汉科技大学学报:自然科学版,2000,23(4):373-376.
- [15] 付丹,刘柳.填料对曝气生物滤池影响的概述[J].环境科学与管理,2008,33(3):101-103.
- [16] 唐少宇,周如金,钟华文,等.曝气生物滤池技术的研究进展[J].现代化工,2013,33(2):24-27.
- [17] Polat H, Molva M, Polat M. Capacity and mechanism of phenol adsorption on lignite[J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 79(4): 264-273.
- [18] 李晓梅,陆少鸣,张菊萍,等.升流式曝气生物滤池除锰的影响因素的研究[J].水处理技术,2014,40(4):67-69.

(上接第94页)

气的可靠性要求。

2)IGCC多联供系统加上蒸汽备用措施后可以外供炼化项目蒸汽8000h以上。

3)炼化项目在任何工况下都需要外购部分电力。需要设置 $2\times 100\%$ 容量的备用电源,以确保炼化项目所需电力的可靠性。

4)IGCC系统外供氧、氮等工业气体稳定可靠。

参考文献:

- [1] 邓世敏,林汝谋,金红光,等.IGCC多联产总能系统[J].燃气轮机技术,2002,15(3):10-15.
- [2] 郭新生,王璋.IGCC电站优良的环保特性和环保效益[J].燃气轮机技术,2005,18(3):8-12.
- [3] 闫顺林,王俊有,王晋权,等.IGCC环保特性的研究[J].洁净煤技术,2007,13(3):87-90.
- [4] 白慧峰,徐越,危师让,等.IGCC及多联产系统的发展和关键技术[J].燃气轮机技术,2009,22(4):1-3.
- [5] 麻林巍,倪维斗,李政,等.用多联产概念改善IGCC经济性的分析[J].燃气轮机技术,2004,17(1):15-19.
- [6] 焦树建.IGCC的某些关键技术的发展与展望[J].动力工程,

2006,26(2):153-165.

- [7] 王宇,黄小平,庄剑.IGCC系统原理及其可靠性分析[J].石油化工设计,2010,27(3):51-54.
- [8] Breton D L, Amick P. Comparative IGCC cost and performance for domestic coals[C]//2002 gasification technology conference. US: San Francisco, 2002.
- [9] 李政,曹江,何芬,等.整体煤气化联合循环系统的可靠性分析与设计[J].动力工程,2008,28(2):314-320.
- [10] 孙浩,宋振龙.IGCC发电技术可靠性与经济性分析[J].新疆电力技术,2011(1):84-86.
- [11] 李晓黎,亢万忠.大型空分装置在煤化工中的应用与发展[J].化肥工业,2011,38(5):8-15.
- [12] 齐景丽,孔繁荣.几种煤气化技术的先进性与适用性分析[J].化工设计通讯,2012,38(5):15-19.
- [13] 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.
- [14] 杨天海,黄素华,祝建飞.IGCC及多联产系统设备特点及其运行技术研究[J].燃气轮机技术,2012,25(1):7-10.
- [15] 程学庆,周宏.2009年全国发电可靠性统计分析[J].中国电力,2010,43(9):29-36.
- [16] 国家能源局.燃气发电安全监管报告[R].北京:国家能源局,2013.