两级 UBAF 法处理褐煤热压提质冷凝水试验研究

张春晖[1],彭 忱[1],刘丽娟[2],刘 新[3]
(1.中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院,北京 100083;2.中铁工程设计院有限公司,北京 100070;
3.北京市平谷区环保局,北京 101200)

摘 要: 针对内蒙古宝日希勒煤业公司褐煤热压提质冷凝水浊度、化学需氧量(COD_{Cr})、生化需氧量(BOD_5)、氨氮(NH_3-N)和 Mn 元素等指标均高于电厂循环冷却水回用标准的问题,将两级升流式曝气生物滤池(UBAF)反应器串联处理冷凝水,研究提质褐煤粒级对滤料效能及两级 UBAF 反应器对褐煤提质冷凝水处理效果的影响。结果表明,粒级 0.5~1.25 mm 提质褐煤滤料对废水的处理效果最好,其次为全粒级提质褐煤,二者处理效果差别较小,综合考虑滤料处理效果和工艺成本等因素,最终选用全粒级提质褐煤作为 UBAF 反应器的滤料,其 COD_{Cr} 及 NH_3-N 的去除率分别达到 33.2%和 11.5%。采用两级 UBAF 反应器对褐煤热压提质冷凝水进行处理,其出水水质各项指标低于电厂循环冷却水回用标准,浊度、BOD_5、COD_{cr}、NH_3-N、Mn 的最终去除率分别达到 89.40%、96.20%、87.60%、62.30%和 72.50%。处理后的褐煤提质冷凝水符合回用标准,可用于循环冷却水的回用。

关键词: 褐煤提质冷凝水;资源化回用;循环冷却水;两级升流式曝气生物滤池法
中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2015)01-0112-05

Treatment of lignite upgrading condensate water using two-stage UBAF

ZHANG Chunhui[1],PENG Chen[1],LIU Lijuan[2],LIU Xin[3]
(1.*School of Chemical and Environmental Engineering,China University of Mining and Technology(Beijing),Beijing* 100083,*China*;
2.*China Railway Engineering Design Institute Co.,Ltd.,Beijing* 100070,*China*;
3.*Beijing Pinggu District Environmental Protection Agency,Beijing* 101200,*China*)

Abstract: In order to decrease the turbidity,COD_{cr},BOD_5,NH_3-N and Mn content in lignite upgrading condensate water which was collected from Baorixile coal mine in Inner Mongolia,the two-stage up-flow biological aerated filter(UBAF) was connected in series.The treatment effects of UBAF and lignite size was also investigated.The results showed that,0.5~1.25 mm lignite had the best treatment effects,followed by the whole size fraction upgrading lignite.The treatment effects of the two was similar.Considering the treatment effects and cost,the whole size fraction upgrading lignite was adopted as the filter material of UBAF.The removal rate of COD_{cr} and NH_3-N was 33.2% and 11.5%.The removal rate of turbidity,BOD_5,COD_{cr},NH_3-N and Mn element in condensate water reached 89.40%,96.20%,87.60%,62.30% and 72.50%.The treated condensate water could be used as circulating cooling water.

Key words: lignite upgrading condensate water;recycling utilization;circulating cooling water;two-stage up-flow biological aerated filter

0 引 言

我国煤炭资源分布广泛、储量丰富,伴随着工业的快速发展,优质煤储量逐年减少,低阶煤的可利用化必将引起人们重视。低阶煤主要包括褐煤和低变质烟煤(长焰煤、不黏煤、弱黏煤)。其中,褐煤储量较为丰富,是煤化程度较低的煤种。我国是仅次于美国和俄罗斯的第三大褐煤储量国,保有褐煤储量为 1300 亿 t 以上,约占我国煤炭总储量的 13%[1],是我国煤炭资源的重要组成部分。由于褐煤水分

收稿日期: 2014-06-24;**责任编辑:** 白娅娜 **DOI:** 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.01.026
基金项目: 中国工程院重点项目(2015-06-XZ-01)
作者简介: 张春晖(1973—),男,河北衡水人,副教授,博士,从事废水处理与资源化方面的研究。E-mail:truemanjung@163.com
引用格式: 张春晖,彭 忱,刘丽娟,等.两级 UBAF 法处理褐煤热压提质冷凝水试验研究[J].洁净煤技术,2015,21(1):112-116.
ZHANG Chunhui,PENG Chen,LIU Lijuan,*et al*.Treatment of lignite upgrading condensate water using two-stage UBAF[J].Clean Coal Technology,2015,21(1):112-116.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高、挥发分高、氧含量高、单位热值低,具有内部孔隙发达、化学活性强、热稳定性较差、易自燃等特性,造成其煤块加热易破碎,存放易风化(泥化)变质等,成为其储存、运输和燃烧过程中的巨大阻碍,严重限制了褐煤的利用与发展。因此,必须对褐煤进行脱水提质,提高褐煤利用效率[2]。实现褐煤合理、经济、高效利用的关键在于降低褐煤水分,提高能量密度,防止自燃。褐煤脱水后成型是国内外常用提质方法之一。褐煤水分较高,可达 20%~50%,其水分可根据存在形态分为游离水和化合水[3]。褐煤热压提质过程中,除去因过热蒸发等原因损失的水分,其产水率为 15%~20%。因褐煤提质工艺处理量极大,将产生大量褐煤热压提质冷凝水。该冷凝水具有高色度、高浊度、高矿化度等特点,其化学需氧量(COD_{Cr})、生化需氧量(BOD_5)、氨氮(NH_3-N)含量均偏高,且含有锰(Mn)等重金属成分,直接排入水体会对自然水体造成污染,直接弃置又是对水资源的极大浪费,因此,有必要对褐煤提质工艺中产生的大量冷凝水进行有效处理并回收利用。目前,处理褐煤热压提质冷凝水的工艺方法主要有物理化学方法、生物处理工艺以及一些深度处理或强化处理工艺。其中,物理化学方法一般包括混凝法、吸附法、吹脱法、化学中和法、离子交换法、折点氯化法等; 生物处理工艺包括传统活性污泥法、升流式厌氧污泥床(UASB)法、升流式厌氧滤池(UAF)法、曝气生物滤池(BAF)法、厌氧-缺氧-好氧生物(A^2/O)法、序批式活性污泥(SBR)法、氧化沟法及生物膜法等; 深度处理或强化处理工艺包括化学氧化法、活性炭吸附法、膜分离技术、催化湿式氧化技术、芬顿试剂氧化技术、生物强化技术、超临界水氧化法、同步硝化反硝化(SND)技术等[4-5]。毕翀宇[6]选用混凝法处理潞安矿区五阳煤矿的高浊度、高色度矿井涌水,经聚合氯化铝(PAC)处理后水的浊度、色度和 COD_{Cr} 质量浓度大幅降低,达到排放标准,实现了矿井涌水的资源化处理。王娟[7]以气浮法和反渗透膜过滤方法将阜新矿区矿井水处理至饮用水标准,实现了污废水的资源化回用,缓解了北方地区水资源短缺的问题。褐煤提质冷凝水因其高浊度、高色度及高氨氮浓度等性质,兼具矿井水及城市生活污水的部分特点,陈康[8]采用曝气生物滤池(Biological Aerated Filter,BAF)方法处理城市生活污水后,各项指标均达到《城市污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准,通过试验优化 BAF 同步硝化反硝化脱氮工艺运行参数,可用以指导工程设计与污水处理厂升级改造运行等。吕德华[9]在对生活污水处理试验中,提出的两级曝气生物滤池(上向流—下向流)处理方案具有良好的净化性能。曝气生物滤池工艺是 20 世纪 50 年代末在欧美兴起的,抗冲击能力强、占地面积少、投资运行成本低、自动化程度高、出水水质好且应用广泛的新型高效生物处理技术[9-10]。笔者根据褐煤热压提质冷凝水的水质特点,选择升流式曝气生物滤池(UBAF)法进行处理。将两级 UBAF 反应器串联运行,结合同步硝化反硝化、短程硝化反硝化等过程[11],使不同功能微生物的作用在两滤柱中较为适宜的环境中得以加强[12]。通过调控运行参数研究提质褐煤粒径对滤料效能的影响及两级 UBAF 反应器对褐煤提质冷凝水处理效果的影响,以期实现污废水的高效、全面、深度净化,为水处理厂工艺选择提供参考。

1　试验条件

1.1　试验原料及试剂

试验用原水取自内蒙古宝日希勒煤业公司褐煤热压提质工艺中产生的冷凝水。试验药剂见表 1。

表 1　试验药剂

药剂	级别	药剂	级别
盐酸	AR	重铬酸钾	GR
氢氧化钠	AR	硫酸银	AR
亚硫酸钠	AR	邻苯二甲酸氢钾	GR
碘化钾	AR	硫酸汞	AR
淀粉	AR	甲醛肟	AR
轻质氧化镁	AR	乙二胺四乙酸二钠	AR
碘化汞	AR	氨水	AR
硫代硫酸钠	AR	盐酸羟胺	AR
硫酸锌	AR	过硫酸钾	AR
氯化铵	AR	硝酸	GR
溴百里酚蓝	AR	硫酸锰	AR

注: AR 为分析纯试剂,GR 为优级纯试剂

1.2　试验装置

主要试验装置为串联设置的两级 UBAF 反应器。其中,一级柱进水的有机物质量浓度相对较高,异养菌生长旺盛,对溶解氧的需求较大,会在酸碱度等条件适宜的环境中摄取、消耗大量污染物用以自身新陈代谢,促进本体生长繁殖,迅速成长为优势菌种,与滤料的截留过滤和生物絮凝沉淀等作用协同降低有机物质量浓度[13]。该滤柱的主要作用是碳化作用,因此又称其为碳化柱。在二级柱中,因有机

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

物质量浓度降低，异养菌生长受到底物浓度的限制，导致数量减少，耗氧量下降，故液相主体中的溶解氧浓度随之上升，且自养型硝化菌数量上升成为优势菌种，生物同化硝化作用强烈，氨氮的氧化转化速率加快[14]。该滤柱中主要产生硝化作用，故称其为硝化柱。装置工艺处理设计参数见表 2。

表 2　工艺处理单元主要设计参数

项目	尺寸/(mm×mm)	水力停留时间(*HRT*)/h	污泥停留时间(*SRT*)/h	pH	溶解氧(DO)/(mg·L^{-1})	C、N、P 质量比	气水流量比
一级柱	ø300×800	1.4	1.8	7~8	2~3	100∶5∶1	2∶1
二级柱	ø300×800	1.5	2.0	6~7	1~2	70∶5∶1	1.5∶1

两级 UBAF 装置示意如图 1 所示。其中，进水箱和滤柱均为有机玻璃材质。UBAF 反应器的填料应具有机械强度大，比表面积大，生物、化学稳定性好等特点。形状规则的填料有助于减小水头损失，使布水布气均匀，具有一定孔隙率、表面粗糙的填料有助于微生物及膜的附着生长[15]。因此，常选用陶粒、沸石、火山岩及一些特定结构的聚乙烯制品作为滤料[16]。褐煤通常可用来制作磺化煤和活性炭，其本身具有一定微孔结构，且提质过程中煤料中大部分水分被快速蒸发抽提，微孔结构数量和比表面积增加，使褐煤具有一定吸附性，同时褐煤较粗糙的外面表也有利于微生物生长、附着，并减小滤料之间碰撞摩擦造成的固着微生物的损失[17]。因此，考虑就地取材的便捷，提质褐煤较其他滤料的低成本性以及提质褐煤自身作为滤料的优越性，试验选用提质褐煤作为 UBAF 反应器的填料。

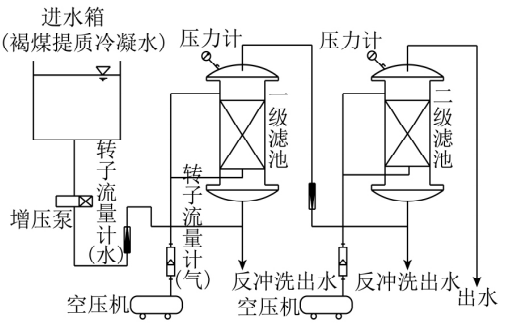

图 1　两级 UBAF 装置示意

1.3　试验方法

为了解褐煤提质冷凝水水质，对原水经两级 UBAF 反应器处理后的出水进行取样测试，分别测定其浊度、BOD_5、COD_{Cr}、NH_3-N 及 Mn 浓度等指标。浊度使用 WGZ-1 数字浊度仪测定；BOD_5 按照 HJ 505—2009《水质 五日生化需氧量(BOD_5)的测定 稀释与接种法》测定；COD_{Cr} 按照 HJ/T 399—2007《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》测定；NH_3-N 按照 HJ 535—2009《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》测定；Mn 元素按照 HJ/T 344—2007《水质 锰的测定 甲醛肟分光光度法》测定。

2　结果与讨论

2.1　褐煤提质冷凝水水质

依据《水与废水监测分析方法》(第 4 版)中相关规定，按照 GB/T 50335—2002《污水再生利用工程设计规范》对宝日希勒煤业公司褐煤热压提质所产生的冷凝水水质进行分析检测，结果见表 3。

表 3　褐煤热压提质冷凝水水质

水质指标	实测值(平均)	电厂循环冷却水回用标准
pH	6.65~6.85	6.50~9.00
浊度/NTU	17.20	≤5
ρ(BOD_5)/(mg·L^{-1})	195	≤10
ρ(COD_{Cr})/(mg·L^{-1})	232	≤60
ρ(NH_3-N)/(mg·L^{-1})	21.35	≤10
ρ(Fe)/(mg·L^{-1})	0.24	≤0.30
ρ(Mn)/(mg·L^{-1})	0.69	≤0.20
ρ(Cl^-)/(mg·L^{-1})	0.60	≤250
ρ(总磷)/(mg·L^{-1})	0.80	≤1
ρ(总溶解物质)/(mg·L^{-1})	175.10	≤1000
总硬度(以 $CaCO_3$ 计)/(mg·L^{-1})	37.83	≤450
总碱度(以 $CaCO_3$ 计)/(mg·L^{-1})	22.57	≤350
粪大肠菌群/(MPN·L^{-1})	1000	≤2000

褐煤产地及提质工艺的不同会对提质冷凝水水质产生影响。由表 1 可知，内蒙古宝日希勒煤业公司的褐煤提质冷凝水中 BOD_5 与 COD 的比值为 0.84，高于生化比的经验界定值 0.3，表明冷凝水的可生化性非常强，可利用生化方法处理；pH 接近中性，偏弱酸性，符合水处理工艺对酸碱度的要求，有益于后期生化处理的顺利进行。参照 GB/T 50335—2002《污水再生利用工程设计规范》中电厂

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

循环冷却水回用标准发现,褐煤提质冷凝水的浊度、BOD_5、COD_{Cr}、NH_3-N 和 Mn 等指标均高于标准限值,故不能直接回用于电厂冷却水,需处理后方能施行坑口电厂冷却水回用方案[18]。

2.2　不同粒级填料对冷凝水的处理效果

试验采用提质后的褐煤作为 UBAF 反应器的填料。将提质褐煤分别加工至 0.5~1.25、1.25~2、2~3 mm 和全粒级 4 种粒级,并以此填充单个 UBAF 反应器。UBAF 反应器进水 COD_{Cr} 和 NH_3-N 的质量浓度分别为 257.5 和 26.3 mg/L。调整反应条件,测试各滤料处理褐煤提质冷凝水整体工艺出水的 COD_{Cr} 和 NH_3-N 质量浓度。不同粒级褐煤滤料对褐煤提质冷凝水处理效果的影响如图 2 所示。

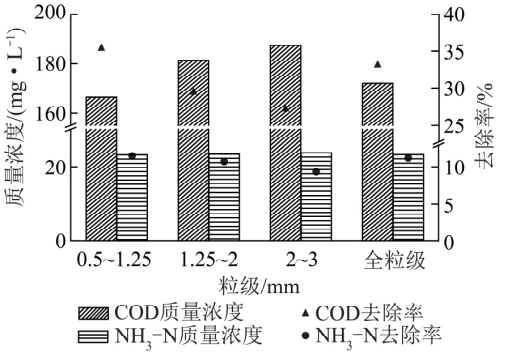

图 2　不同粒级褐煤滤料对褐煤提质冷凝水处理效果的影响

由图 2 可知,水样经相同体积的 0.5~1.25、1.25~2,2~3 mm 和全粒级 4 种粒级褐煤滤料处理后,出水水样中 COD_{Cr} 质量浓度分别为 166.35、181.38、187.20 和 172.01 mg/L,去除率分别为 35.40%、29.50%、27.30%和33.20%;而出水相应的 NH_3-N 质量浓度分别降至 23.28、23.49、23.85 和 23.33 mg/L,去除率分别达到 11.50%、10.70%、9.30%和 11.50%。对比出水水质测量结果,0.5~1.25 mm 提质褐煤滤料对废水的处理效果最好,主要原因为小粒级滤料具有较小的颗粒间隙和较大的比表面积,具有更强的充氧能力和更高的氧传递速率及氧利用率,使滤料上附着微生物量较多,且生长状况良好,对水中有机污染物及氨氮有较好的去除及降解效果。处理效果次之的是全粒级提质褐煤,且二者处理效果差别较小。综合考虑滤料处理效果和工艺成本等因素,最终选用全粒级提质褐煤作为 UBAF 反应器的滤料进行后期试验研究。

2.3　两级 UBAF 反应器对冷凝水的处理效果

采用全粒级提质褐煤作滤料填充 UBAF 反应器,褐煤热压提质冷凝水为进水。确定 UBAF 反应器的试验条件为: 进水水力负荷 0.2 $m^3/(m^2 \cdot h)$,一、二级滤柱气水流量比分别为 2∶1 和 1.5∶1。在此条件下测试两级 UBAF 反应器联用工艺的进水及两级滤柱出水的浊度、BOD_5、COD_{Cr}、NH_3-N 和 Mn 等指标,结果见表 4。由表 4 可知,一、二级柱对褐煤热压提质冷凝水的处理效果以及最终出水水质(即二级出水水质),均低于 GB/T 50335—2002《污水再生利用工程设计规范》中电厂循环冷却水回用标准。浊度、BOD_5、COD_{cr}、NH_3-N、Mn 的最终去除率分别达到 89.40%、96.20%、87.60%、62.30%和 72.50%。因此,处理后的褐煤提质冷凝水符合回用标准,可用于循环冷却水的回用,即两级 UBAF 反应器联用工艺可以满足褐煤提质冷凝水回用电厂循环冷却水的要求。

表 4　两级 UBAF 反应器联用工艺对褐煤热压提质冷凝水的处理效果

水质指标	进水质量浓度(平均值) /(mg·L⁻¹)	出水质量浓度(平均值) /(mg·L⁻¹)		去除率/%	
		一级	二级	一级	二级
浊度/NTU	17.30	2.79	1.83	83.90	89.40
$\rho(BOD_5)$ /(mg·L⁻¹)	208.20	31.02	7.91	85.10	96.20
$\rho(COD_{Cr})$ /(mg·L⁻¹)	246.50	111.67	30.57	54.70	87.60
$\rho(NH_3-N)$ /(mg·L⁻¹)	23.10	13.91	8.71	39.80	62.30
ρ(Mn) /(mg·L⁻¹)	0.69	0.30	0.19	57.30	72.50

3　结　　论

1) 内蒙古宝日希勒煤业公司褐煤提质冷凝水的浊度、BOD_5、COD_{Cr}、NH_3-N 和 Mn 等指标均高于标准限值,无法直接排放或回用作水资源,需处理后施行坑口电厂冷却水回用方案。

2) 根据褐煤提质冷凝水水质特点,采用两级 UBAF 联用工艺对其进行处理,选择提质褐煤作为反应器滤料,0.5~1.25、1.25~2,2~3 mm 和全粒级 4 种粒级褐煤滤料对水样中 COD_{cr} 的去除率分别为

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

35.40%、29.50%、27.30%和 33.20%，对 NH_3-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}、NH_3-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] 万永周.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 8000 h 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 2×100%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].燃机轮机技术，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.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net