

# 湿法气流床气化单废锅流程与双废锅流程比较

郑亚兰<sup>1,2</sup>, 林益安<sup>1,2</sup>, 李春红<sup>1,2</sup>, 韦孙昌<sup>1,2</sup>, 贺根良<sup>1,2</sup>

(1. 西安元创化工科技股份有限公司, 陕西 西安 710061; 2. 西北化工研究院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**为了高效回收湿法气流床煤气化反应室出口的高温粗煤气的大量显热,提高系统的能量利用效率,采用废热锅炉间接换热回收显热。介绍了单废锅流程及双废锅流程 2 种湿法气流床废锅技术,从工艺过程、技术指标、热回收效率、综合能耗、投资及运行成本、运行情况等方面对流程进行对比。结果表明:单废锅流程及双废锅流程各有优缺点,当单纯用于 IGCC 发电时,优先采用双废锅流程,使能量利用效率最大化,当用于化工合成联合 IGCC 发电时,应优先采用单废锅流程。

**关键词:**湿法气流床气化;激冷流程;单废锅流程;双废锅流程

中图分类号:TM611 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)03-0108-04

## Comparison of single waste heat boiler process with double waste heat boiler process for wet entrained flow gasification technology

ZHENG Yalan<sup>1,2</sup>, LIN Yian<sup>1,2</sup>, LI Chunhong<sup>1,2</sup>, WEI Sunchang<sup>1,2</sup>, HE Genliang<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Origin Chemical Technologies Co., Ltd., Xi'an 710061, China; 2. Northwest Research Institute of Chemical Industry, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to recycle abundant sensible heat of high temperature raw gas from outlet of reaction chamber for wet entrained flow coal gasification efficiently, and improve energy utilization efficiency of system, a waste heat boiler was adopted for indirect heat exchange to recycle the sensible heat. Two types of wet entrained flow gasification technologies including single waste heat boiler process and double waste heat boiler process were described. The two technologies were compared from the aspects of technological process, technical index, heat recovery efficiency, comprehensive energy consumption, investment and operating cost, operating condition and others. The results showed that, when used alone for IGCC power generation, the double waste heat boiler process was preferred to maximize the efficiency of the energy use, when used in chemical synthesis combined with IGCC power generation, the single waste heat boiler process was a better choice.

**Key words:** wet entrained flow gasification; quenching process; single waste heat boiler process; double waste heat boiler process

## 0 引言

气流床煤气化反应室出口的高温粗煤气有直接激冷和间接换热 2 种降温方式。直接激冷流程是出反应室的高温粗煤气直接与激冷水接触冷却,并使煤气达到饱和状态;间接换热流程则是利用废热锅炉最大限度地回收粗煤气中的显热,以生产高压蒸汽或预热其他工艺介质为目的。直接激冷与间接换热 2 种流程各有利弊,直接激冷流程具有粗煤气水气比高,粉尘含量低,装置流程简单,设备投资费用少,运行稳定,检修方便等优点,但是高温粗煤气高

位显热被冷却水吸收,将高位热转换成了中低位热,热量损失大,降低了能量利用效率,与间接换热流程相比热煤气效率下降 5% ~ 8%<sup>[1]</sup>。间接换热流程回收粗煤气大量显热,副产高压蒸汽用途广泛,适合热电联产装置,据计算所回收的热量相当于原料煤低位发热量中 15% ~ 18% 的能量,使得热煤气效率可达到 90% ~ 95%<sup>[2]</sup>,提高能量利用效率、降低操作成本,但该流程设备投资费用较高,运行业绩较少。间接换热流程虽然投资高,但从技术指标、运行成本、经济效益上来说,间接换热流程比激冷流程更具优势。高效节能是煤化工未来发展的一个重要方

收稿日期:2016-03-02;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.03.023

作者简介:郑亚兰(1983—),女,陕西武功人,工程师,从事煤化工新技术开发及工业化推广工作。E-mail:lanlan0523@163.com

引用格式:郑亚兰,林益安,李春红,等.湿法气流床气化单废锅流程与双废锅流程比较[J].洁净煤技术,2016,22(3):108-111,115.

ZHENG Yalan, LIN Yian, LI Chunhong, et al. Comparison of single waste heat boiler process with double waste heat boiler process for wet entrained flow gasification technology[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3): 108-111, 115.

向,特别是国家对煤化工能源转化效率,减少污染物排放的要求越来越高的情况下,能够提高煤炭转化的能量利用效率的间接换热流程将会发挥更大的作用。间接换热流程按照热量回收方式不同,可分为单废锅流程及双废锅流程。通过对湿法气流床气化单废锅流程与双废锅流程进行对比,分析两者的优缺点,为2种流程工业化应用提供选择依据。

## 1 湿法双废锅流程工艺技术

湿法双废锅流程采用一级辐射废锅和二级对流废锅回收 $1\ 370\ ^\circ\text{C}$ 左右的高温粗煤气中的显热,换热后的粗煤气温度降至 $400\ ^\circ\text{C}$ 左右<sup>[3]</sup>,并获得大量的高压饱和蒸汽,双废锅流程如图1所示。

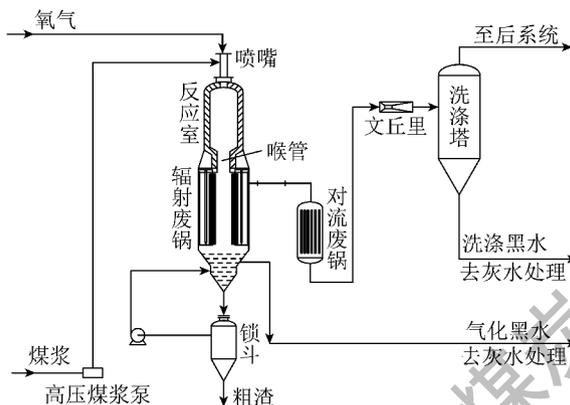


图1 湿法双废锅工艺流程

Fig. 1 Process of wet double waste heat boiler

制备合格的煤浆经高压煤浆泵加压后与高压氧气进入气化喷嘴雾化后喷入气化反应室内,煤浆与氧气进行剧烈的部分氧化气化反应,生成 $1\ 370\ ^\circ\text{C}$ 左右的高温粗煤气及液态熔渣,高温粗煤气及熔渣并流向下,从反应室喉管流出,进入第一级辐射废锅,通过辐射传热将热量传递给辐射管内锅炉水,产生高压蒸汽,固化后的灰渣进入辐射锅炉底部被灰水冷却排出气化炉,定期经锁斗排放到渣池内外运。粗煤气通过辐射废锅被冷却至 $700\ ^\circ\text{C}$ 左右<sup>[4]</sup>,进入二级对流废锅继续换热,温度降至 $400\ ^\circ\text{C}$ 左右的粗煤气经过文丘里增湿后进入洗涤塔降温除尘,洗涤后的粗煤气送至后系统作为原料气,洗涤后的含细灰黑水送入灰水处理系统。

辐射废锅通常为双通道的膜壁设计,经过预冷并且不含煤渣的合成气通过内管和外管之间的环形通道沿着膜壁朝上流动,返回到辐射冷却器的顶部<sup>[5]</sup>,缩短了换热管的敷设长度。对流废锅通常设置为一种多管束的曲流管型,采用水管换热器设计,

能够在各种高度上吹灰并且检修<sup>[6]</sup>。

目前,湿法双废锅气化装置应用业绩主要在国外,国内主要以GE公司在我国神华宁煤双废锅气化装置为代表<sup>[7-8]</sup>。该套装置自2007年6月建成投产后,经过多次技改基本实现稳定运行,也取得了月产 $18\ 000\ \text{t}$ 甲醇的好成绩<sup>[9]</sup>,但装置在运行过程中暴露出的死区温度高、对流废锅带灰严重、系统压差升高等问题仍在不断改造解决<sup>[10]</sup>。

## 2 湿法单废锅流程工艺技术

单废锅流程相对双废锅流程取消了对流废锅,增加了激冷室,通过合理布置辐射废锅段与激冷段,可调节气化炉的水气比,提高装置在线率。其流程如图2所示。

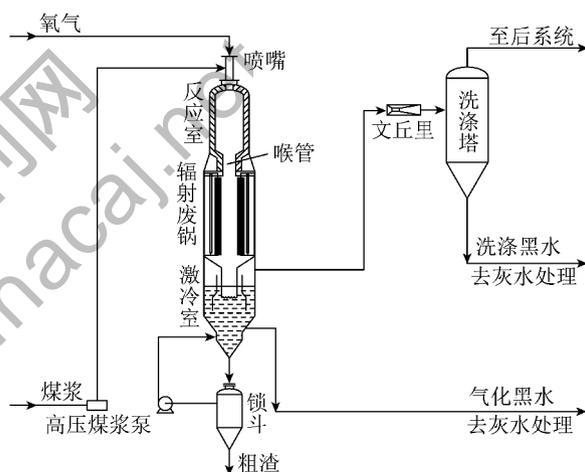


图2 湿法单废锅工艺流程

Fig. 2 Process of wet single waste heat boiler

制备合格的煤浆由高压料浆泵加压后与高压氧气通过气化喷嘴雾化后喷入气化反应室内,煤浆与氧气发生部分氧化反应,生成高温粗煤气及液态熔渣, $1\ 300\sim 1\ 400\ ^\circ\text{C}$ 的高温粗煤气及熔渣从反应器并流向下,经反应室下部的喉管进入辐射废锅,在辐射锅炉中高温煤气通过辐射传热将热量传递给辐射管内锅炉水,产生高压蒸汽,换热后的液态熔渣固化,粗煤气温度降至 $500\sim 650\ ^\circ\text{C}$ ,降温的粗煤气和固态灰渣并流进入下部激冷室,在激冷室中粗煤气与激冷水充分接触,使煤气降温并饱和,熔渣进入激冷室下部锁斗定期排出。粗煤气在激冷室中降温的同时还进行了第一级的洗涤除尘,从激冷室出来的粗煤气温度降至 $200\sim 300\ ^\circ\text{C}$ ,粗煤气经过文丘里增湿后进入洗涤塔,在塔中与水逆流接触进行二级除尘洗涤,经洗涤脱除煤气中的细灰后气体送至后系

统作为原料气,洗涤后的含细灰黑水送入灰水处理系统。

目前,湿法单废锅气化工工艺工业化装置仅在美国 DUKE 电厂有应用<sup>[11]</sup>,国内尚无工业化应用业绩,国内单废锅流程仅在中试示范装置及单废锅工业化应用模拟研究阶段<sup>[12-14]</sup>,单废锅流程相对双废锅流程要简单,国内神华宁煤双废锅流程的逐步稳定运行,促进国内废锅流程的自主开发。

### 3 两种废锅流程对比

湿法气流床单废锅流程与双废锅流程二者因粗煤气热回收方式的不同,在工艺过程、技术指标、热回收效率、综合能耗、投资及运行成本、运行情况等方面都有所不同。

#### 3.1 工艺过程对比

湿法气流床气化工工艺分为制浆工序、气化工序及灰水处理工序三部分,湿法单废锅与双废锅流程的制浆和灰水处理工序基本相同,不同的是气化工序。工艺流程对比见表1。

表1 单废锅与双废锅工艺过程比较

Table 1 Comparison of technological process of single and double waste heat boiler

项目	单废锅流程	双废锅流程
反应室	湿法进料,反应室内衬耐火材料热壁炉	湿法进料,反应室内衬耐火材料热壁炉
热回收设备	辐射废锅	辐射废锅+对流废锅
粗煤气冷却方式	先辐射废锅单级冷却,后激冷水冷却	辐射废锅及对流废锅两级冷却
粗煤气除灰方式	水浴降温除尘,洗涤塔洗涤除尘	单级洗涤塔洗涤除尘
辐射废锅换热方式	单层换热	内层、外层双层换热

从装置配置上看双废锅流程虽然仅比单废锅流程多一个对流废锅,但二者工艺过程却有很大区别。首先从粗煤气冷却方式来说,粗煤气进入洗涤塔前,经过辐射、对流两级换热,回收了大量的热;而单废锅流程经过一级辐射废锅换热后进入水浴室直接激冷粗煤气,损失掉了部分粗煤气的显热。从粗煤气除灰方式来说,粗煤气出对流废锅后温度在 350 ~ 400 °C,且含有大量的细灰,为了获得合格的粗煤气对后续洗涤塔洗涤除尘效果要求较高,单废锅流程粗煤气入洗涤塔前,在水浴室经过一次降温除尘,与双废锅相比,粗煤气温度较低且更加干净,对洗涤塔的要求较低。从辐射废锅换热方式来看,双废锅流

程辐射反应器内部采用双层换热,粗煤气在辐射废锅内部走向为 U 字型,即先在内层进行换热后经水封折返进入外层换热器换热后出反应器<sup>[15]</sup>。单废锅流程粗煤气在辐射废锅进行单向流动进入辐射废锅下部的水浴室,由水浴室出反应器。

#### 3.2 技术指标对比

以气化压力为 4.0 MPa,干基投煤量 1 200 t/d 的热壁炉为例,对单废锅及双废锅流程进行技术指标比较,结果见表2。

表2 单废锅与双废锅流程技术指标比较

Table 2 Comparison of technical specifications of single and double waste heat boiler process

项目	单废锅流程	双废锅流程
副产蒸汽/t	~75	~100
副产蒸汽发电量/kWh	17 500	23 300
合成气水气比	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8
能耗/(GJ·t <sup>-1</sup> )(以甲醇计)	41.5	42
热煤气效率/%	~91	~93

热煤气效率=(粗煤气热值+反应器系统产生蒸汽的焓值增量)/原料煤热值。

#### 3.3 热回收效率对比

单废锅流程与双废锅流程均可有效回收高温粗煤气的显热,但两者的热回收效率不同,双废锅流程采用的双级废锅回收粗煤气的显热,其热煤气效率为 93%;单废锅流程采用的一级辐射废锅与水激冷回收粗煤气的显热,其热煤气效率为 91%。单纯从热回收效率看双废锅流程更具优势,回收的蒸汽更多,能产生更多电能;单废锅流程中设置有水浴室对粗煤气进行激冷洗涤,粗煤气含尘量低,水气比较高,与双废锅流程粗煤气相比适合用于 IGCC 发电联合生产化工合成原料气。

#### 3.4 综合能耗对比

采用单废锅气化工工艺生产甲醇的综合能耗稍低于双废锅气化工工艺,吨甲醇能耗差值仅为 0.5 GJ/t。综合能耗差别不大的原因是双废锅流程回收的蒸汽较多,在入变换工序前生产每千标方有效气的能耗较单废锅流程低,进入变换工序后由于双废锅流程粗煤气水气比较低,需要补充较多的蒸汽,综合来看,单废锅流程与双废锅流程生产吨甲醇能耗差别不大。

#### 3.5 装置投资及运行成本比较

双废锅流程采用的是双级废锅换热,且出气化炉的粗煤气温度较高,后续管道设备选材等级较高,

需要设立水夹套保护高温管线,装置建设费用较高,运行成本高;单废锅流程采用辐射换热,然后水洗冷却至需要的温度,气化炉后续的设备及管道选材等级较低,且不需要另设水夹套保护管线,因此,单废锅流程装置投资费用低,运行成本也低。以气化压力为4.0 MPa,干基投煤量1 200 t/d的热壁炉为例,采用单废锅流程气化投资约2.92亿元,采用双废锅流程气化投资约3.36亿元,单废锅流程比双废锅流程节约投资约15%。

### 3.6 装置运行情况比较

双废锅流程经过多年的发展,已有多家的工业化装置运行业绩,技术成熟度比较高,但对流废锅容易存在结渣堵塞问题;单废锅流程运行装置较少,因单废锅流程是双废锅流程和激冷流程的优点结合,虽然相关的工业化应用经验较少,但是双废锅流程的应用能为辐射废锅积累丰富的工业运行经验。2013年,湿法气流床气化单废锅流程在DUKE电厂实现了成功应用,装置在线率提高,说明单废锅流程的工业化应用已不是难题。

双废锅工艺流程较长,设备结构复杂,存在辐射废锅死区温度高、对流废锅带灰严重、系统压差升高等问题,装置操作复杂,运行周期较激冷流程短,检修、维护难度较大,频率高;单废锅流程与激冷流程基本相似,操作简便,运行周期较长,出气化炉的粗煤气经激冷洗涤含灰量较低,装置检修及维护方便且频率较低。

## 4 结 语

单废锅流程与双废锅流程各有特色,双废锅流程在热量回收和应用业绩方面有优势;单废锅流程工艺流程短、操作简便、运行周期较长,值得大力推广;在2种流程综合能耗基本相同情况下,单废锅流程的装置投资及运行成本更低。在应用过程中应根据需要选择相应的工艺技术,当单纯用于IGCC发电时,优先采用双废锅流程,使能量利用效率最大化,当用于化工合成联合IGCC发电时,应优先采用单废锅流程。

### 参考文献(References):

[1] 倪建军,乌晓江,马 胜,等.新型复合式高温粗煤气冷却洗涤设备:201120559911. X[P]. 2012-11-14.  
[2] 于广锁,刘海峰,王辅臣,等.一种带有调节手段的双筒体水冷壁型辐射废锅及其工业应用:201110083967. X[P]. 2011-10-12.

[3] 马 媛.德士古废锅流程气化炉的应用[J].科技信息,2012(11):137.  
Ma Yuan. Application of Texaco gasifier waste heat boiler process [J]. Science & Technology Information, 2012(11):137.  
[4] 许世森,张东亮,任永强.大规模煤气化技术[M].北京:化学工业出版社,2008:213.  
[5] 井云环,杨 磊,刘洪刚,等.德士古全废锅流程辐射废锅结渣原因及改进[J].洁净煤技术,2013,19(2):106-109.  
Jing Yunhuan, Yang Lei, Liu Honggang, et al. Preventive measures against coking on radiation heat exchanger of Texaco gasifier [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(2):106-109.  
[6] 杨国华.简述德士古废锅流程的特点[J].中国化工贸易,2012(8):242.  
Yang Guohua. The characteristics of Texaco waste boiler process [J]. China Chemical Trade, 2012(8):242.  
[7] 白 颐,王 钰,于殿名,等.通用电气公司废热锅炉流程气化、液体零排放及煤气化联合循环发电技术评论[J].化学工业,2013,31(8):45-50.  
Bai Yi, Wang Yu, Yu Dianming, et al. The technology review of general electric (GE) waste heat boiler gasification process, liquid zero emissions and coal gasification combined cycle power generation [J]. Chemical Industry, 2013, 31(8):45-50.  
[8] 杜 峰,范浩杰,刘建斌.IGCC发电显热回收技术分析与探讨[J].锅炉技术,2014,45(3):15-18.  
Du Feng, Fan Haojie, Liu Jianbin. Analysis and discussion of sensible heat recovery technology in integrated gasification combined cycle [J]. Boiler Technology, 2014, 45(3):15-18.  
[9] 陈红杰,朱国强,景寿堂.德士古气化炉废锅段结焦分析[J].石油化工应用,2009(9):89-90.  
Chen Hongjie, Zhu Guoqiang, Jing Shoutang. Analysis of coking waste heat boiler of Texaco gasifier [J]. Petrochemical Industry Application, 2009(9):89-90.  
[10] 王志敏.德士古全废锅流程水系统优化改造[J].小氮肥,2014,42(12):1-3.  
Wang Zhimin. Reformation for water system of Texaco waste heat boiler process [J]. Small Nitrogenous Fertilizer Plant, 2014, 42(12):1-3.  
[11] 方 斌,胡 凯. GE大型化气化工艺产业化历程及其发展[J].化学工业,2014,32(8):44-47.  
Fang Bin, Hu Kai. Commercialization and development on GE large-scale gasification process [J]. Chemical Industry, 2014, 32(8):44-47.  
[12] 倪建军,梁钦锋,于广锁,等.气化炉与辐射废锅接口的数值模拟[J].化学工程,2010,38(1):89-93.  
Ni Jianjun, Liang Qinfeng, Yu Guangsu, et al. Numerical simulation of connection of entrained flow gasifier to radiant syngas cooler [J]. Chemical Engineering, 2010, 38(1):89-93.  
[13] 王 剑,梁钦锋,沈中杰,等.气化炉辐射废锅上部空间熔渣的流动特征[J].化学工程,2013,41(10):58-62.

除了本文提及的人为失误可能导致的反渗透膜氧化外,在其他水处理工艺预处理段中,有时也会涉及 NaClO 杀菌、臭氧氧化等工艺<sup>[11]</sup>,由于是长期运行,如若在运行操作时稍有偏差,则有可能导致残留氧化剂进入到反渗透系统,造成不可逆的氧化损伤。这主要是因为反渗透膜材质以聚酰胺为主,受材质的化学特性所限,反渗透系统对进水中痕量的氧化剂都很敏感。基于此,研究机构都在积极研发抗氧化反渗透膜<sup>[9-10,12]</sup>。市场上也有较为成熟的产品,有的反渗透膜即可长期耐受 0.1 mg/L 的余氯<sup>[13]</sup>。

### 3 结 语

以蒙古国第四电厂在实际运行中遇到的反渗透运行故障为例,在诊断研究已损坏的反渗透膜元件过程中,通过一系列定性、定量检测手段分析,确定了氯氧化是造成膜元件损坏的原因。为进一步提高反渗透系统的运行稳定性,今后应以研发可替代聚酰胺的新型抗氧化膜材料或对聚酰胺进行抗氧化改性为研究方向,并同时兼顾通量和压力损失等因素。

#### 参考文献 (References) :

[1] Gupta V K, Ali I, Saleh T A, *et al.* Chemical treatment technologies for waste water recycling - an overview[J]. *Rsc Advances*, 2012, 2 (16) :6380-6388.

[2] Tang C Y, Fu Q S, Robertson A P, *et al.* Use of reverse osmosis membranes to remove perfluorooctane sulfonate (PFOS) from semiconductor wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(23) :7343-7349.

[3] 苏艳敏,郑化安,付东升,等. 煤化工反渗透浓水浓缩的研究现状[J]. *洁净煤技术*, 2014, 20(1) :104-109.

Su Yanmin, Zheng Huanan, Fu Dongsheng, *et al.* Research progress of desalination-concentration of reverse osmosis drained waste water from coal chemical industry[J]. *Clean Coal Technology*, 2014, 20(1) :104-109.

[4] Williams A R. Effective industrial membrane processes; benefits and opportunities [M]. Essex: Elsevier Publication Ltd., 1991: 102-110.

[5] 谢春生,张小平,黄瑞敏. 反渗透技术及其在我国电厂的应用和发展趋势[J]. *热力发电*, 2006, 35(7) :7-10.

Xie Chunsheng, Zhang Xiaoping, Huang Ruimin. Application of reverse osmosis technology in power plants of China and developing tendency[J]. *Thermal Power Generation*, 2006, 35(7) :7-10.

[6] 周仲康,陈 鸽,郑敏聪,等. 电厂反渗透及离子交换除盐系统去除水中有机物的试验[J]. *净水技术*, 2015(2) :37-41.

Zhou Zhongkang, Chen Ge, Zheng Mincong, *et al.* Experiment of RO and IE water treatment system for organic matter removal in power plant[J]. *Water Purification Technology*, 2015(2) :37-41.

[7] 霍随立. 反渗透膜元件胶体污染的预防[J]. *洁净煤技术*, 2004, 10(2) :67-68.

Huo Suili. Colloid pollution prevented of reverse osmosis membrane parts[J]. *Clean Coal Technology*, 2004, 10(2) :67-68.

[8] 刘立军,何政伟,高润生. 某电厂反渗透膜系统的化学清洗[J]. *清洗世界*, 2014, 30(6) :6-9.

Liu Lijun, He Zhengwei, Gao Runsheng. Chemical cleaning of reverse osmosis membrane system for a power plant [J]. *Cleaning World*, 2014, 30(6) :6-9.

[9] 蔡志奇,梁松苗. 抗氧化复合反渗透膜的制备及其在强氧化环境下的结构与性能研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(1) :20-24.

Cai Zhiqi, Liang Songmiao. Preparation of antioxidative composite reverse osmosis membranes and characterization of their structures and performance with strong oxidants [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(1) :20-24.

[10] 陶 杰,何 平,夏敏玲,等. 芳香聚酰胺反渗透复合膜的抗氧化性能研究[J]. *水处理技术*, 2010, 36(3) :42-45.

Tao Jie, He Ping, Xia Minling, *et al.* Study on the oxidation resistance of thin-film composite aromatic polyamide reverse osmosis membrane[J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(3) :42-45.

[11] 郭 军. 臭氧催化氧化-超滤-反渗透深度处理焦化废水的工程实例[J]. *工业用水与废水*, 2015(4) :60-62.

Guo Jun. Project example of coking wastewater advanced treatment by ozone catalytic oxidation-ultrafiltration-reverse osmosis [J]. *Industrial Water & Waste Water*, 2015(4) :60-62.

[12] 高从塔,杨尚保. 反渗透复合膜技术进展和展望[J]. *膜科学与技术*, 2011(3) :1-4.

Gao Congjie, Yang Shangbao. Progress and prospect on reverse osmosis composite membrane technology[J]. *Membrane science and technology*, 2011(3) :1-4.

[13] 周寒萍. 蓝星东丽推出高脱盐率反渗透膜-拓夫™[J]. *水处理技术*, 2011, 37(10) :20.

Zhou Hanping. TBMC produce high salt rejection RO membrane-TOUGH™[J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 37(10) :20.

(上接第 111 页)

Wang Jian, Liang Qinfeng, Shen Zhongjie, *et al.* Characteristic of slag flow in upper space of gasification radiant syngas cooler[J]. *Chemical Engineering*, 2013, 41(10) :58-62.

[14] 莫日根,王燕芳. 气化炉辐射废热锅炉优化计算[J]. *煤质技术*, 2015(3) :58-62.

Mo Rigen, Wang Yanfang. Optimization calculation on gasifier radiant syngas cooler[J]. *Coal Quality Technology*, 2015(3) :58-62.

[15] 黄 斌,杨建荣. 德士古气化炉废锅结渣原因分析与探讨[J]. *大氮肥*, 2009, 32(4) :228-230.

Huang Bin, Yang Jianrong. Reasons for slagging of WHB of Texaco gasifier [J]. *Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry*, 2009, 32(4) :228-230.