

# 大型煤气化技术在 IGCC 电站中的应用现状

韩龙<sup>1,2,3</sup>, 邓广义<sup>3</sup>, 李政<sup>2</sup>, 范永春<sup>3</sup>, 李伟科<sup>3</sup>

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 杭州 310014; 2. 清华大学 电气工程学院, 北京 100084;  
3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 介绍了国内外已投运燃煤 IGCC 电站所采用的气化技术的基本情况及气化炉在 IGCC 电站运行中获得的主要经验, 总结了世界上处于建设或规划中的主要燃煤 IGCC 电站的基本情况和采用的气化技术。对燃煤 IGCC 电站气化技术应用现状的综述可为将来 IGCC 电站项目选择煤气化技术提供参考和借鉴。

**关键词:** IGCC 电站; 煤气化; 气化炉运行

中图分类号: TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)01-0042-04

## Status of Large-scale Coal Gasification Technologies in IGCC Power Plants

HAN Long<sup>1,2,3</sup>, DENG Guangyi<sup>3</sup>, LI Zheng<sup>2</sup>, FAN Yongchun<sup>3</sup>, LI Weike<sup>3</sup>

(1. College of Engineering, Zhejiang University of Technology, Hanzhou 310014, China;  
2. College of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
3. Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** This paper firstly introduces the basic situation for the gasification technologies used in coal fired IGCC power plants that have been in operation and the running experiences gained by various types of gasifier. Then the paper continues to show the general information of gasifiers that would be adopted by several coal fired IGCC plants which are still under construction or being planned. The work of this present paper could be a beneficial reference for the determination of coal gasification methods in future IGCC power plants projects.

**Key words:** IGCC power plants; coal gasification; gasifier operation

整体煤气化联合循环 (Integrated Gasification Combined Cycle, 简称 IGCC) 是一种新型的煤炭高效清洁发电技术。与常规的燃煤电站相比, IGCC 电站具有供电效率高、污染物排放低、适合进行燃烧前捕集 CO<sub>2</sub> 等优势<sup>[1]</sup>, 具备广阔的应用前景。图 1 以水煤浆气化技术为例给出了 IGCC 电站的系统流程示意图。在 IGCC 电站中, 煤炭在气化炉中与蒸汽、空分装置提供的氧气或者空气首先发生气化反应生成粗合成气, 粗合成气再经过显热回收、除尘脱硫等净化处理, 最后进入燃气-蒸汽联合循环装置发电。煤炭气化是 IGCC 电站的基础和核心技术, 气化技术的选择对 IGCC 电站的比投资、可

用率以及电站效率具有关键的影响<sup>[2]</sup>。

为了提高供电效率、降低比投资, IGCC 电站适合采用大型气流床气化技术。大型煤气化技术可分为多种类型: (1) 按照进料方式不同, 可分为水煤浆气化和干粉煤气化; (2) 按照气化介质不同, 可分为氧气气化和空气气化; (3) 根据煤炭原料进入气化炉的比例分配不同, 可分为一段式气化和两段式气化。目前 GE-Texaco、Shell、E-Gas、Prenflo、MHI、TPRI、TRIG、Siemens 等煤气化技术都有 IGCC 电站的应用业绩。本文主要总结以上气流床气化技术在 IGCC 电站中的运行经验或应用情况, 为将来 IGCC 电站的气化炉选型和实际运行提供参考。

### 1 已投运 IGCC 电站气化炉的应用现状

表 1 给出了国内外已投运的主要燃煤 IGCC 电站的简况。Tampa、Wabash River、Buggenum、Pu-

收稿日期: 2014-12-15

基金项目: 国家留学基金资助项目(201308440124)

作者简介: 韩龙(1983), 男, 山东淄博人, 讲师, 博士, 主要从事 IGCC 等先进气能源利用系统的优化研究(e-mail)puxian@zju.edu.cn。

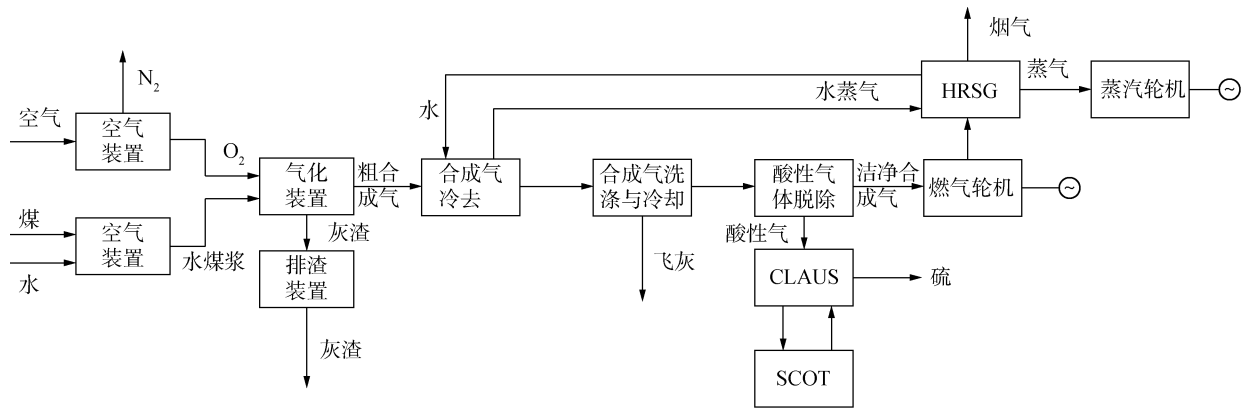


图 1 IGCC 电站系统流程示意图

Fig 1 A Diagram of IGCC Power Plant System

ertollano 是 20 世纪 90 年代中期世界上投运的 4 座典型电站, Nakoso、华能绿色煤电、Edwardsport 是 21 世纪新投入运行的 3 座 IGCC 电站。以上 7 座 IGCC 电站分别采用了 GE-Texaco、E-Gas、Shell、Prenflo、MHI(空气气化)、TPRI 六种气流床气化技术。本节分别介绍以上 IGCC 电站气化技术的应用情况。

表 1 国内外投运的典型 IGCC 电站及其气化技术

Table 1 Typical IGCC Power Plants and Gasification Technologies over the World

IGCC 电站	国家	投运年份	电站容量	气化技术
Tampa	美国	1996	250 MW	GE-Texaco
Wabash River	美国	1995	262 MW	E-Gas
Buggenum	荷兰	1994	253 MW	Shell
Puertollano	西班牙	1997	330 MW	Prenflo
Nakoso	日本	2007	220 MW	MHI(空气)
Greengen	中国	2012	250 MW	TPRI
Edwardsport	美国	2013	618 MW	GE-Texaco

### 1.1 GE-Texaco 气化技术

Tampa 电站和 Edwardsport 电站都采用 GE-Texaco 水煤浆气化技术。以 Tampa 电站为例, 气化炉的基本情况和参数如下: 采用 1 台气化炉, 耗煤量为 2 250 t/d; 气化压力 2.8 ~ 3.0 MPa, 水煤浆浓度为 66.5%, 气化剂中 O<sub>2</sub> 纯度为 95%, O<sub>2</sub> 喷射压力为 4.0 MPa, 气化炉冷煤气效率约为 74.34% (HHV); 气化炉为全热回收型, 利用辐射废锅和对流废锅回收高温粗合成气的显热, 辐射废锅产生压力约 10.4 MPa 的饱和蒸汽, 对流废锅产生压力约 3.2 MPa 的饱和蒸汽。在辐射废锅中粗煤气的温

度从 1 371 °C 降为 704 °C, 在对流废锅中粗煤气的温度进一步降到 482 °C<sup>[3]</sup>。Edwardsport 电站则采用两台气化炉, 单台耗煤量约 2 328 ~ 2 600 t/d, 两台气化炉生成的合成气分别送往两台容量为 232 MW 的 GE 7FB 燃气轮机发电<sup>[4]</sup>。

GE-Texaco 气化炉出现的主要问题及解决办法<sup>[5]</sup>: (1) 排渣锁斗堵塞。煤种变化是造成排渣锁斗堵塞的重要原因。保持煤种灰熔点稳定、严格控制气化操作温度等运行参数、适当改造排渣设备等措施可以防止排渣堵塞的发生; (2) 辐射废锅和对流废锅因高温腐蚀发生泄漏、对流废锅出现管积灰堵塞。可通过改善气化炉运行状况、加强检查和吹灰等措施来解决以上问题; (3) 水煤浆喷嘴、气化炉耐火砖寿命短, 更换喷嘴和耐火砖降低了电站的可用率。一般水煤浆气化炉燃烧喷嘴的使用寿命仅 2 ~ 3 个月, 每次更换喷嘴时至少要切换烧柴油 3 个小时, 每一年左右要全部更换一次价格昂贵的耐火砖, 更换时需改烧柴油 2 个月左右。气化炉可用率较低是 GE-Texaco 气化炉的固有不足。

### 1.2 E-Gas 气化技术

Wabash River 电站采用两段式水煤浆进料的 E-Gas 气化炉, 气化炉的可靠性分别达到 99.4%、98.8% (2012—2013 年)。E-Gas 气化炉的基本参数如下<sup>[6]</sup>: 采用两台气化炉, 单台耗煤量 2 500 t/d, 一用一备; 水煤浆浓度 60% ~ 63%, 气化炉压力 2.8 MPa, 气化剂中 O<sub>2</sub> 纯度为 95%, 燃用烟煤时冷煤气效率可提高到 80% ~ 81%。气化炉出口粗合成气的温度降低到 900 °C, 不需要采用价格昂贵的辐射废锅, 在火管式对流废锅中产生压力为 11.13

MPa 的饱和蒸汽。

Wabash River 电站 E-Gas 气化炉出现的主要问题及解决办法<sup>[5]</sup>：(1) 曾出现连续排渣口堵塞的现象。通过严格执行运行操作规程、控制水煤浆质量可保证气化炉稳定运行；(2) 合成气冷却器入口管道出现灰渣沉积，限制了机组运行时间。主要对策是改进对流冷却器前煤气管道的尺寸、形状，使煤气流速提高，减轻管道中大块沉积物的形成，或者在煤气冷却器入口管道上装设滤网，避免大块沉积物随气流进入煤气冷却器；(3) E-Gas 气化炉同样属于水煤浆气化技术，气化喷嘴和炉膛耐火砖寿命短、需要频繁更换，气化炉的黑水处理系统需要进行改进，这些问题与 GE-Texaco 气化技术相似。

### 1.3 Shell 气化技术

Buggenum 电站采用 1 台 Shell 干粉煤气化炉，煤耗量 2 000 t/d，O<sub>2</sub> 纯度为 99%，碳转化率 99%，冷煤气效率大于 80%，气化温度 1 500 ℃，气化压力 2.6~2.8 MPa。气化炉内采用低温无灰煤气与热煤气掺混使热煤气降温至 900 ℃，以保证气化炉出口煤气中的灰尘为固态。由于 Shell 气化炉良好的可靠性，Buggenum 电站的整体可用率达到 80%，电站连续稳定运行时间超过 2 500 个小时。此外，Buggenum 电站的 Shell 气化炉同时成功实现煤/生物质混合燃料的气化，混合燃料中生物质的比重达到 30%<sup>[7]</sup>。

Buggenum 电站 Shell 气化炉及其辅助系统的运行基本正常，可用率较高。在气化炉运行初期，电站没有重视气化用煤的采购，而是从邻近的燃煤电厂直接引进。气化煤种和燃料品质的变化导致 Shell 气化炉排渣锁斗堵塞和黑水处理系统的故障，并成为气化炉和电站关停的主要因素。在采取严格的煤种采购策略后，气化炉排渣锁斗堵塞和黑水处理系统的故障得到很好的解决<sup>[7]</sup>。

### 1.4 Prenflo 气化技术

Puertollano 电站采用 Prenflo 干粉煤气化炉，气化压力为 2.4~2.6 MPa，O<sub>2</sub> 喷射压力为 3.3 MPa，气化炉日耗煤量为 2 640 t/d，碳转化率为 99.3%，冷煤气效率 78%。与 Shell 炉不同，Prenflo 气化炉气化剂 O<sub>2</sub> 纯度为 85%，可使空分系统能耗节省 20%，厂用电耗率仅 10.45%，干法除尘后的飞灰再循环至气化炉；利用气化炉产生的中压蒸汽和余热锅炉产生的低压蒸汽对煤进行干燥加热；增设粗

煤气低温冷却器，充分利用煤气的显热，使气化系统的热煤气效率提高到 95%<sup>[8]</sup>。

Puertollano 电站的运行实践证明，Prenflo 气化技术具有良好的燃料适应性，适合气化高灰分的硬质煤和石油焦，并可以气化生物质燃料，并且气化合成气的热值几乎可以保持稳定。更重要的，该 IGCC 电站运行出现的关停几乎与气化系统无关<sup>[8]</sup>。气化系统出现过的主要问题是压力供料锁斗下粉不畅，主要是因为两级锁斗间有一根回流 N<sub>2</sub> 的管子，由于管径设计太小，使 N<sub>2</sub> 排气不畅而导致煤粉下落不连续。通过在回流管上增加一个文丘里抽气器、提高 N<sub>2</sub> 回流的速度，可以成功使煤粉锁斗排气畅通、煤粉连续而均匀地下落。

### 1.5 MHI 空气气化技术

日本 Nakoso 电站采用 MHI 两段式干粉煤空气气化炉，单炉耗煤量 1 700 t/d。2007 年 9 月气化炉点火启动并于 2010 年 3 月完成示范运行。该气化技术两级气化结构，下部是燃烧室(第一段)，上部是还原室(第二段)。气化过程熔化的炉渣可以顺畅地排出，并获得较高的碳转化率。气化炉产生的合成煤气含有一定数量的焦，这些焦由旋风分离器和多孔过滤器捕获，再送回气化炉，然后转化为合成煤气和炉渣。气化过程碳转化率高于 99.8%，气化炉的炉渣中没有发现碳和微量元素的沥滤。气化合成煤气中尽管含有大量的氮气，但其热值还是足够的高，可以实现燃气轮机的稳定燃烧<sup>[4,9]</sup>。总体来说，MHI 气化炉在 Nakoso 电站获得了成功，该电站的供电效率达 42.9%，比设计值高 0.9 个百分点。

### 1.6 TPRI 气化技术

我国华能 Greengen IGCC 电站采用西安热工研究院有限公司(TPRI)的两段式干粉煤气化炉，气化炉耗煤量达到 2 000 t/d，气化压力 3.0 MPa，气化温度 1 300~1 500 ℃，气化碳转化率 98%~99%，冷煤气效率 80%~83%。该气化炉的特点是在气化炉下端的第一反应区煤粉与 O<sub>2</sub>、水蒸汽发生反应，在气化炉上部的第二反应区煤粉与水蒸汽、来自第一反应区的湿煤气发生反应；经循环冷却煤气冷却后，二段反应区出口合成气温度大约降低到 900 ℃，气化炉废热锅炉产生中压蒸汽，废热锅炉出口合成气的温度降为 380 ℃。Greengen IGCC 电站的 TPRI 气化炉是我国首台 2 000 t/d 规模的干粉煤气化炉，目前该电站及气化炉仍处于调试阶段<sup>[4]</sup>。

## 2 规划或建设中 IGCC 电站气化炉的应用现状

表 2 给出了世界上正处于建设或规划中的主要燃煤 IGCC 电站的简况。表中 3 座 IGCC 电站分别采用了 TRIG、Siemens、MHI(氧气气化)气化技术。本节分别介绍以上三种气化技术在 IGCC 电站中的应用情况。

### 2.1 TRIG 气化技术

美国 Mississippi 州在建的 Kemper County IGCC 电站采用两台 TRIG 干粉煤气化炉, 气化装置由美国 Southern Company 和 KBR 公司联合开发, 为加压循环流化床(输运床)气化技术。气化温度 900 ~ 1 100 °C, 气化压力 2MPa; Kemper County IGCC 电站气化炉采用空气作为气化剂, 可避免使用造价昂贵的空分装置; 采用当地矿口褐煤为燃料, 褐煤的水分含量为 42% ~ 50%, 灰分含量 8.6% ~ 17%, 硫含量 0.35% ~ 1.7%, 低位热值为 2 317 ~ 2 854 kcal/kg。电站煤炭总消耗量达 12 500t/d, 电站峰值发电容量达 582 MW, 并且将对气化合成气进行 CO<sub>2</sub> 的燃烧前捕获(捕集量 65%)。该电站 2013 年 8 月实现第一次辅助锅炉点火, 8 月 28 日和 9 月 4 日分别完成第一套、第二套燃气轮机的首次点火试验, 2013 年 10 月, 蒸汽透平同步到电网。该电站计划 2014 年开始商业化试运行, 目前正处于工程建设当中<sup>[10]</sup>。

TRIG 输运床气化的显著特点是高循环比率、高车速和高固气比, 其优点是生产强度高、床内气固混合均匀、气固传热好<sup>[11]</sup>。TRIG 气化炉适合利用低成本的低阶煤(高水分、高挥发分、低热值), 采用非液态排渣, 气化炉装置没有内件(内壁为耐火砖)、可靠性高(无需备用炉), 气化合成气不含焦油, 既可以采用空气气化, 又可以采用氧气气化, 气化炉单炉处理煤量最高可达 5 000 t/d。

### 2.2 Siemens 气化技术

Texas Clean Energy Project 为典型的 IGCC 多联产工程项目, 采用两台 Siemens SFG-500 干粉煤气化炉。Siemens 气化技术是单喷嘴下喷式干煤粉加压气流床气化技术, 气化炉燃料喷嘴位于气化炉的顶部, 喷嘴为组合式。由于采用干煤粉进料、盘管式水冷壁, Siemens 气化技术既扩大了气化煤种的范围, 又避免了使用水煤浆气化炉耐火砖更换带来的麻烦。在 Texas Clean Energy Project 中, Siemens

气化炉产生的合成气除了向电网输送 200 MW 的电力, 合成气变换产生的约  $3 \times 10^6$  t/a 的 CO<sub>2</sub> 气体(90% 捕集量)将用于油田石油回收和生产尿素。该电站多联产项目脱硫率可达 99%、脱汞率达 95%、CO<sub>2</sub> 排放量只相当于天然气联合循环电厂(不进行碳捕获)排放量的 20% ~ 30%<sup>[12]</sup>。

表 2 国内外建设或规划中 IGCC 电站及其气化技术

Table 2 Planned IGCC Power Plants and the Gasification Technologies over the World

IGCC 电站	国家	规划年份	电站容量	气化技术
Kemper County Energy	美国	2008	582 MW	TRIG
Texas Clean Energy	美国	2010	400 MW	Siemens
Hydrogen Energy California	美国	2009	400 MW	MHI(氧气)

### 2.3 MHI 氧气气化技术

Hydrogen Energy California IGCC 项目采用单台 MHI 干粉煤氧气气化炉<sup>[12]</sup>, MHI 气化炉的特点和优势包括: (1) 采用干煤粉供料有利于提高气化温度、增大碳的转化率、冷煤气效率, 并可以改善合成气可燃成分的组成。(2) 气化炉内敷设膜式水冷壁, 从中产生供给联合循环系统的蒸汽, 有利于提高气化炉的可用率并减少维修费用。Hydrogen Energy California IGCC 项目气化炉燃料为当地煤和炼油焦的混合物, 消耗量达 5 720 t/d。气化合成气一部分用于制氢和发电, 另一部分用于生产合成肥料尿素。气化合成气进行燃烧前 CO<sub>2</sub> 捕集(90%), 年捕集量达  $2.6 \times 10^6$  t, 所捕集的 CO<sub>2</sub> 部分用于油田石油回收, 部分用作尿素生产的原料。Hydrogen Energy California IGCC 项目的发电容量最高可达 300 MW, 尿素的总产量可达 2 208 t/d。该项目计划于 2015 年开始建设, 2019 年完工。

## 3 结论

目前 GE-Texaco、E-Gas、Shell、Prenflo、MHI、TPRI 等气化技术都有大型 IGCC 电站的应用经验, 气化炉煤耗量都可以达到 2 000 t/d 及以上, IGCC 电站容量达到 250 MW 及以上。经过长期的运行调试, 这些气化技术在 IGCC 电站中基本实现成功运行。TRIG、Siemens 以及 MHI 氧气气化技术近期有望在进行燃烧前捕集 CO<sub>2</sub> 的 IGCC 工程中实现商业化试运行, 具有发展潜力。

(下转第 50 页 Continued on Page 50)

- [5] 何宏, 于兰兰, 张栋芳. 联合循环热力系统优化研究 [J]. 热力透平, 2013, 42(4): 236-239.  
HE Hong, YU Lanlan, ZHANG Dongfang. Research on Optimization of Combined Cycle Thermal Performance [J]. Thermal Turbine, 2013, 42(4): 236-239.
- [6] 焦树建. 燃气-蒸汽联合循环 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
JIAO Shujian. Gas and Steam Combined Cycle [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [7] 张子才, 龚争理, 黄良沛, 等. 锅炉汽包水位串级三冲量控制系统设计与应用 [J]. 国外电子测量技术, 2011, 3(4): 43-46.  
ZHANG Zicai, GONG Zhengli, HUANG Liangpei, et al. Design and Application of Boiler Steam Level Control System Based on Cascade Three-impulse [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2011, 3(4): 43-46.
- [8] 张振宇, 曲圣, 李阳, 等. 锅炉汽包液位的三冲量调节 [J]. 电站系统工程, 2011, 27(1): 27-29.  
ZHANG Zhenyu, QU Sheng, LI Yang, et al. Three-element Adjustment of Boiler Drum Water Level [J]. Power System Engineering, 2011, 27(1): 27-29.
- [9] 李勇, 王建君, 曹丽华, 等. 汽轮机主蒸汽流量在线监测方法研究 [J]. 热力发电, 2011, 40(4): 33-36.  
LI Yong, WANG Jianjun, CAO Lihua, et al. Study on the On-line Monitoring Method of Main Steam Flow Rate for Steam Turbines [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(4): 33-36.
- [10] 张渡, 楚岩. 应用弗留格尔公式分析速度级汽压代替主蒸汽流量测量问题 [J]. 河南电力, 2009(2): 28-29.  
ZHANG Du, CHU Yan. The Analysis Pressure of Speed Stage Replace the Main Steam Flow Measurement by Using Friuli Greig Formula [J]. Henan Electric Power, 2009(2): 28-29.
- [11] 赵晶晴, 林中达. 电厂主蒸汽流量测量与计算方法分析比较 [J]. 燃气轮机技术, 2007, 20(4): 39-42.  
ZHAO Jingqing, LIN Zhongda. The Analysis and Comparison of Different Methods of Measuring and Calculating Main Steam Flow in Power Plants [J]. Gas Turbine Technology, 2007, 20(4): 39-42.

(责任编辑 张春文)

(上接第45页 Continued from Page 45)

#### 参考文献:

- [1] 焦树建, 整体煤气化燃气-蒸汽联合循环(IGCC) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 焦树建, IGCC 技术发展的回顾与展望 [J]. 电力建设, 2000, 13(1): 1-7.  
JIAO Shujian. Review and Prospect on Development of IGCC Technology [J]. Electric Power Construction, 2000, 13(1): 1-7.
- [3] US DOE National Energy Technology Labrotory, Integrated Gasification Combined Cycle Project [DB/OL]. 2014 [2014-10-01]. <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/tampa>
- [4] US DOE National Energy Technology Labrotory, Integrated Gasification Combined Cycle Project [DB/OL]. 2014 [2014-10-05]. <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/tampa>.
- [5] 许世森, 危师让, 国外4座大型IGCC电站的煤气化工艺 [J]. 中国电力, 1999, 8(32): 60-65.  
XU Shisen, WEI Shirang. Coal Gasification Technology in Four Large IGCC Power Plants Abroad [J]. Electric Power, 1999, 8(32): 60-65.
- [6] US DOE National Energy Technology Labrotory, Integrated gasification combined cycle project [DB/OL]. 2008. [2014-08-01]. <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/wabash>.
- [7] US DOE National Energy Technology Labrotory, Integrated Gasification Combined Cycle Project [DB/OL]. 2014 [2014-07-30]. <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/nuon>.
- [8] US DOE National Energy Technology Labrotory, Integrated Gasification Combined Cycle Project [DB/OL]. 2014 [2014-09-01]. <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/elcogas>.
- [9] 焦树建, 日本的IGCC示范工程与研发工作—兼论我国IGCC的发展途径 [J]. 燃气轮机技术, 2006, 19(1): 15-20.  
JIAO Shujian. IGCC Power Plant Projects and Development in Japan-A Discussion on the Development Pathway of IGCC in China [J]. Gas Turbine Technology, 2006, 19(1): 15-20.
- [10] Affordable Clean Energy, Kemper County Plant Passes Importnt Milestones [DB/OL]. 2013 [2014-08-14]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Kemper\\_Project](http://en.wikipedia.org/wiki/Kemper_Project).
- [11] 王辅臣, 于广锁, 龚欣, 等. 大型煤气化技术的研究与发展 [J]. 化工进展, 2009, 28(2): 173-179.  
WANG Fuchen, YU Guangsuo, GONG Xin, et al. Research and Development of Large-scale Coal Gasification Technology. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(2): 173-179.
- [12] U. S. Department of Energy. Clean Coal Technology: Major Demonstration Programs: Program Update 2013 [R]. Washington 2013.

(责任编辑 林希平)