

# F 级改进型联合循环主蒸汽系统压损研究及优化

郑贇

(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:** 为了给燃气轮机联合循环工程提高蒸汽循环效率提供借鉴经验和优化方法, 依托已投产 F 级改进型燃气轮机联合循环工程, 采用 GTpro 软件平台, 分析了该机组高压主蒸汽进汽压力对联合循环热力性能的影响, 并计算得到此系统压损使机组出力的降幅随着高压主蒸汽进汽压力的提高而减小。通过深入研究高压主蒸汽流量测量作用和方法, 借鉴常规燃煤火电超超临界汽轮机主蒸汽流量的间接测量技术, 优化主蒸汽系统并取消流量计, 从而提高机组效率, 增加收益。

**关键词:** 联合循环; 热力性能; 高压主蒸汽; 流量计; 设计优化

**中图分类号:** TK472

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2015)01-0046-05

## Pressure Drop Research and Design Optimization of Main Steam System in Advanced F Class Gas-steam Combined Cycle Power Plants

ZHENG Yun

(Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** To provide reference experiences and optimization methods for steam cycle performance of F advanced class combined cycle, impacts of high pressure main steam pressure drop are investigated by GTpro software. The calculation results show that the loss of power output becomes smaller caused by pressure drop when steam turbine inlet steam pressure grows higher. By the analysis of main steam flow measuring methods, flow meter along main steam piping could be cancelled, which makes steam turbine higher efficiency and produces more profits. The research and analysis could provide a optimized design method of main steam system for other gas-steam combined cycle projects.

**Key words:** combined cycle; thermal performance; high pressure main steam; flow meter; design optimization

在我国, 随着“西气东输”、“川气东送”等天然气工程的逐步实施和完善, 在一些天然气供应充足的城市正在兴建越来越多的燃气-蒸汽联合循环电站。由于联合循环电站不仅可以作紧急备用电源和尖峰负荷机组, 而且还能携带基本负荷和中间负荷。燃气轮机具有效率高、造价低、环境友好、占地少、调控灵活等优点, 联合循环已经成为世界各国为实现节能减排而积极发展的发电技术<sup>[1-2]</sup>。

联合循环包括燃气循环和蒸汽循环两部分。燃气轮机是燃气循环中的关键部件, 其性能对联合循

环效率起决定作用。余热锅炉和蒸汽轮机所组成的蒸汽系统, 其参数主要取决于燃气轮机的排气参数。由于燃气轮机性能受环境影响较大, 结合电站厂址的环境条件, 对蒸汽流程配置和参数进行设计优化将直接决定联合循环机组的效率和出力。蒸汽循环系统作为联合循环系统中重要的能量转换系统, 它的流程和参数的选择优化对于整个联合循环系统的性能至关重要, 因此蒸汽循环系统的设计优化就成为一个重要的研究课题。

蒸汽轮机的各级进汽参数决定着蒸汽循环的性能, 大量研究表明, 高压主蒸汽的压力和温度对汽轮机的效率提升尤为重要<sup>[3-5]</sup>。高压主蒸汽的温度取决于余热锅炉高压过热器中燃气轮机排气温度与蒸汽的最小换热端差, 取值一般较固定, 而高压主蒸汽进汽压力等于余热锅炉过热器出口压力与主管

收稿日期: 2014-11-15

作者简介: 郑贇(1982), 男, 广东韶关人, 高级工程师, 硕士, 主要从事火力发电厂及核电工程设计工作(e-mail) zhengyun@gedi.com.cn。

道阻力之差, 因此主管道阻力也将影响着蒸汽循环的效率。本文以广东某 390 MW 等级 F 级改进型燃气轮机联合循环工程作为依托展开计算分析, 该工程主要配置为三菱 M701F4 改进型燃气轮机, 三压再热无补燃余热锅炉和三缸蒸汽轮机。

### 1 高压主蒸汽压力及管道压降对蒸汽循环性能的影响

本文采用 GTpro 软件平台, 对三压再热联合循环系统进行计算, 其系统流程如图 1 所示。为了研究高压主蒸汽压力对蒸汽循环的影响, 需做以下边界条件和假定:

- 1) 环境工况取 ISO 工况。
- 2) 凝汽器背压取 4.75 kPa。
- 3) 余热锅炉各压力系统的节点温差取 10 °C, 接近点温差取 5 °C。
- 4) 排烟温度比酸露点温度高 10 °C。
- 5) 低压缸排汽干度不小于 0.88。
- 6) 各级蒸汽初始参数和燃料特性参考本工程 ISO 工况热平衡数据。

在以上边界条件设定后, 保持除高压主汽压力外其它参数不变, 逐渐改变高压主蒸汽进汽压力, 以 0.5 MPa 为步长, 计算高压主汽在 9.5 MPa ~ 20 MPa 范围内变化时蒸汽循环效率和蒸汽轮机出力, 最终得到的锅炉排烟温度及锅炉效率随高压主蒸汽进汽压力变化趋势详见图 2 所示, 汽轮机效率随高压主蒸汽进汽压力变化趋势详见图 3 所示, 蒸汽循环效率及汽轮机出力随高压主蒸汽进汽压力变化趋势详见图 4 所示。给定高压主蒸汽过热器出口压力

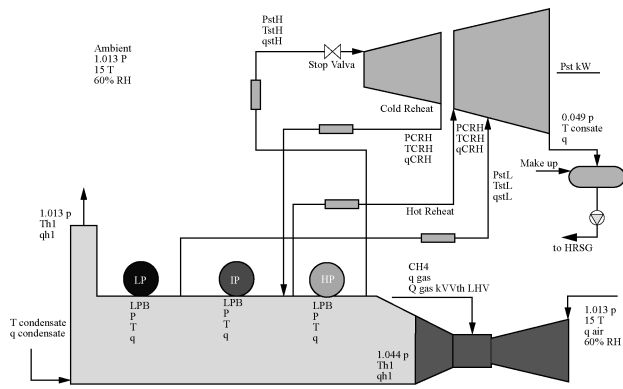


图 1 三压再热联合循环模型系统流程图  
Fig. 1 System Diagram and Calculation Model of Tri-pressure Reheat GSCC

后, 若系统管道阻力每增加 0.1 MPa, 则汽轮机效率和出力将比系统压降增加前降低, 其降幅随着不同的高压主蒸汽进汽压力而不同, 其变化趋势详见图 5 所示。

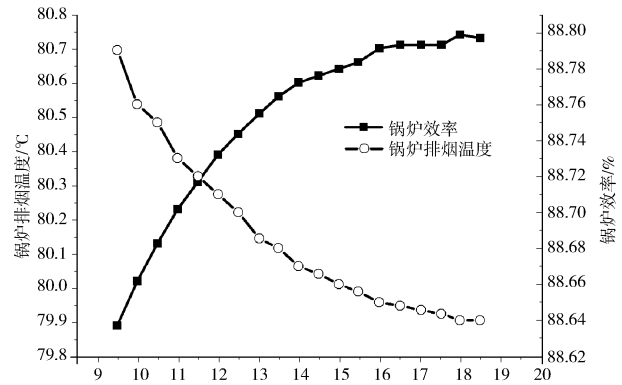


图 2 锅炉效率和锅炉排烟温度与高压主蒸汽进汽压力关系  
Fig. 2 HRSG Efficiency vs Exhaust Temperature and HP Main Steam Pressure

从图 2 和图 3 中的变化曲线可以看出, 锅炉效率和汽轮机效率均随着高压主蒸汽进汽压力的增加而提高。根据朗肯循环效率公式及联合循环热力焓焓图<sup>[3,6]</sup>, 随着高压主蒸汽压力的提高, 在蒸汽透平中蒸汽的焓降是增大的, 但是从图 4 可知当压力增大到 11.5 MPa 左右时, 焓降的增大程度就会逐渐平缓起来, 蒸汽循环效率和蒸汽轮机出力提高的增幅逐渐变小。由图 5 可以看出, 当高压主汽进汽压力小于 15 MPa 时, 余热锅炉高压过热器出口至蒸汽轮机进口之间的管道压降将明显影响蒸汽循环的效率, 即影响汽轮机的出力和效率, 这种影响直至蒸汽轮机进汽压力大于 15 MPa 后逐渐降低。以 10.5 MPa、13.5 MPa 以及 17 MPa 为三组 F 级联合

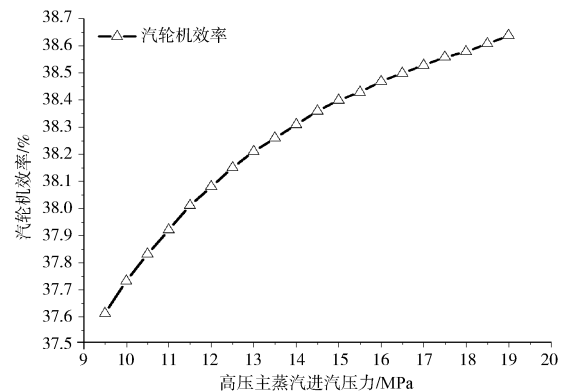


图 3 汽轮机效率与高压主蒸汽进汽压力关系  
Fig. 3 Steam Turbine Efficiency vs HP Main Steam Pressure

循环高压主汽进汽压力为典型代表,若管道压降每增加 0.1 MPa 时,汽轮机效率和出力的降幅如表 1 所示。

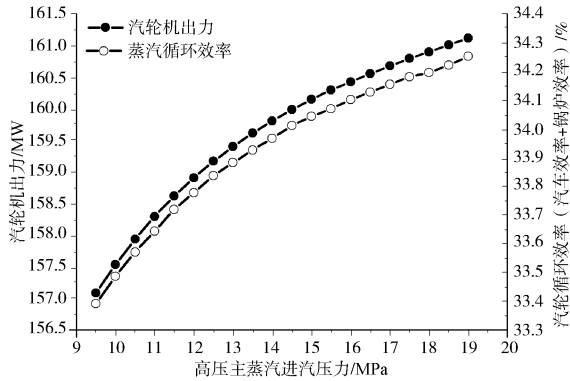


图4 蒸汽循环效率和汽轮机出力与高压主蒸汽进汽压力关系  
Fig. 4 Steam Cycle Efficiency vs HP Main Steam Pressure

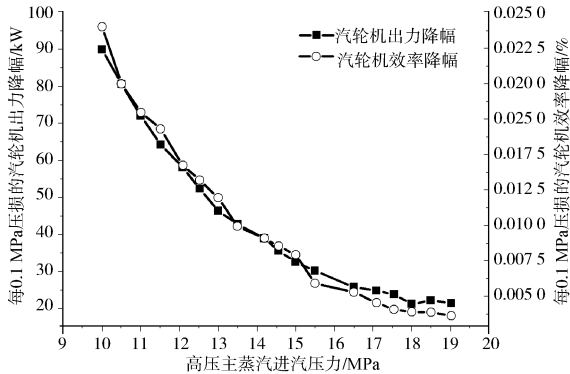


图5 每 0.1 MPa 压损导致的汽轮机出力和效率降幅与高压主蒸汽进汽压力关系

Fig. 5 Steam Turbine Efficiency Drop and Output Drop vs HP Main Steam Pressure in Each 0.1 MPa Pressure Drop

表 1 各种典型高压主蒸汽进汽压力在 0.1 MPa 管道压降时的汽轮机性能

Table 1 Steam Turbine Efficiency and Output Drop in Every 0.1 MPa HP Steam Pressure Drop

高压主蒸汽进汽压力/MPa	管道压降增加/MPa	汽轮机效率降低/%	汽轮机出力降低/kW
10.5	0.1	0.02	80.6
13.5	0.1	0.01	42.6
17.0	0.1	0.004	24.6

当前大部分 F 级改进型联合循环的高压主蒸汽进汽参数在 10 ~ 13 MPa 之间,可见高压主蒸汽管道压降对机组性能的影响尤为明显,因此为了降低管道压降,提高蒸汽循环乃至联合循环的效率,应对高压主蒸汽系统进行优化。

## 2 联合循环主蒸汽流量测量的作用

目前所有 E 级和 F 级联合循环电站高压主蒸汽系统一般配有流量测量装置。联合循环主蒸汽流量测量主要是为了对锅炉汽包水位的控制。当机组 20% 负荷到全负荷运行时,汽包液位转入三冲量控制方式,其中一个控制变量为主蒸汽流量。当机组负荷急剧变化时,使得锅炉汽包水位呈现类似逆响应特性。由于联合循环机组负荷变化较快,当负荷突然增大,汽包压力突然降低,水就会急剧汽化产生大量汽泡,因此比常规火电更容易出现虚假水位。蒸汽流量是前馈信号,其作用是防止“虚假水位”引起的调节器的误动作,改善蒸汽流量扰动时的调节质量<sup>[7,8]</sup>。

此外,监视机组的主蒸汽流量,便于运行人员进行事故分析。

## 3 高压主蒸汽流量计的阻力损失及经济分析

根据上述边界条件,通过 GTpro 软件平台计算本工程在额定性能保证工况和最大出力工况下的高压主蒸汽流量计阻力对汽轮机性能参数的影响,其结果如表 2 所示。

表 2 高压主蒸汽流量计阻力对汽轮机性能的影响

Table 2 HP Steam Flow Meter Pressure Drop Affection on Steam Turbine Performance

工况	蒸汽轮机设计进汽压力/MPa	蒸汽轮机效率/%	蒸汽轮机设计出力/kW	流量计阻力/kPa	蒸汽轮机实际效率/%	蒸汽轮机实际出力/kW
最大出力工况	11.35	37.983	158 533.7	86.942	37.967	158 477.9
额定出力工况	11.17	37.951	158 418.1	55.816	37.940	158 382.3

注:(1)本表中蒸汽轮机设计进汽压力为本工程汽轮机厂的设计值;  
(2)最大出力工况是指冬季纯凝满负荷工况;  
(3)额定出力工况指年平均温度性能保证纯凝满负荷工况;  
(4)设计效率和出力均没有考虑流量计压损的理想状态。

由表 2 可知,由于流量计阻力的影响,本工程汽轮机实际进汽压力在最大出力工况和额定出力工况均比汽轮机设计值降低,分别降至 11.26 MPa 和 11.11 MPa,使汽轮机效率降低了 0.01% ~ 0.02%,汽轮机出力降低了 36 ~ 56 kW。按照本工程发电设备利用小时数为 5 000 h 计算,由于流量计阻力的

影响使单台机组全年少发电约  $1.8 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h}$  电量, 依据 2013 年近海天然气电厂上网电价为 0.67 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$  计算, 每年损失收益约 12 万元。

通过以上计算分析, 取消主蒸汽系统流量计可以提高机组效率, 增加机组出力。

#### 4 主蒸汽流量测量的方法分析

主蒸汽流量测量包括直接和间接方法。

直接测量法一般采用标准节流元件如流量喷嘴或流量孔板测量, 目前的联合循环机组均采用此方法。在实际测量中, 当机组负荷变化时, 由于介质的膨胀系数、流体密度、通流截面以及流量系数的影响, 使得流量数值变化较大, 变工况流量测量精度大大降低, 只有在接近额定工况下流量计得到的流量较为准确<sup>[9]</sup>, 在变工况时则误差较大。因此, 目前的大型火电机组主蒸汽流量测量不采用直接测量法。

间接测量方式已经成为常规火电主蒸汽流量测量的发展趋势, 即通过调节级前后压力温度与流量成比例的关系计算, 或通过其它优化计算方式来简介计算, 例如 BP 神经网络或向量回归等计算模型。对于无调节级的蒸汽轮机, 例如上海汽轮机厂引进的西门子蒸汽轮机和北重引进的阿尔斯通蒸汽轮机, 可以通过主蒸汽与某级叶片后的压力与热平衡数据比值计算得到的流量值作为主蒸汽流量<sup>[10-11]</sup>。广西钦州电厂和广东平海电厂等工程中由上海汽轮机厂供货的蒸汽轮机均为全周进汽, 没有调节级, 主蒸汽流量调节控制方式是通过主蒸汽调节汽门和补汽阀共同实现, 由于在补汽阀打开时会对调节阀后的压力信号有干扰, 因此用于流量计算的测点取自补汽阀后高压缸第五级叶片后。因联合循环汽轮机高压缸没有设置补汽阀, 也就不存在与主调阀后压力信号干涉问题, 则在主蒸汽调节汽门后或压力和主蒸汽流量成正比(关系曲线成直线)的某级叶片后设置测点进行测量即可, 经过修正后的数据能满足机组运行精度要求。现在的机组普遍采用分散控制系统(DCS), 因此无调节级无补汽阀的主蒸汽流量在蒸汽轮机本体上间接测量较易实现。

联合循环的蒸汽轮机一般采用滑压运行方式, 对于滑压运行的联合循环蒸汽轮机, 一般不装调节级, 因此联合循环蒸汽轮机可以参考常规超超临界

机组无调节级汽轮机的蒸汽流量间接测量技术, 对现有的汽轮机进行改进, 从而取消主蒸汽管路上的流量测量装置。

#### 5 结语

本文基于 F 级改进型联合循环实例工程主机设备模型, 利用 GTpro 计算平台, 分析高压主蒸汽压力对蒸汽循环性能的影响, 并深入计算系统阻力, 特别是高压主蒸汽流量计阻力对汽轮机效率和汽轮机出力的影响, 分析结果可知其压损使机组出力的降幅随着高压主蒸汽进汽压力的提高而减小, 对于 F 级联合循环典型的高压进汽压力 10.5 MPa 时, 每增加 0.1 MPa 的系统压损则使单台机组每小时少发电约 80.6 kW, 而主蒸汽管道上的流量计阻力造成单台机组每年减少发电量约  $1.8 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

通过对主蒸汽系统流量计的技术分析, 并借鉴常规燃煤火电汽轮机成熟的蒸汽流量间接测量技术, 分析取消主蒸汽系统流量计的可行性, 减少高压主蒸汽系统阻力可以增加机组运行效益, 研究成果可为单机容量越来越大的重型燃气轮机联合循环机组降低运行成本, 增加电厂收益提供设计优化的思路。

#### 参考文献:

- [1] 赵春, 王培红. 燃气蒸汽联合循环热经济学分析评价指标研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 44-50.  
ZHAO Chun, WANG Peihong. Investigation on the Evaluation Indices for Thermoeconomic Analysis of Combined Cycle Power Plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23): 44-50.
- [2] 乐园园, 葛国贤. 燃气蒸汽联合循环发电厂的几个环保问题 [J]. 电力科技与环保, 2013, 29(5): 1-3.  
LE Yuanyuan, GE Guoxian. Some Environmental Problems of Gas Turbine Combined Cycle Power Plant [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2013, 29(5): 1-3.
- [3] 焦树建. 燃气-蒸汽联合循环的理论基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
JIAO Shujian. Theoretical Principle of Gas and Steam Combined Cycle [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [4] 徐强, 孙博, 计京津, 等. 提高燃气轮机联合循环电站性能的优化方法 [J]. 热力透平, 2013, 42(4): 229-235.  
XU Qiang, SUN Bo, JI Jingjin, et al. An Optimization Method of Enhancing Performance of Gas Turbine Combined Cycle Power Plant [J]. Thermal Turbine, 2013, 42(4): 229-235.

- [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 Online 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)