

部分煤气化结合流化床燃烧技术的联合循环 (PGFBC-CC)发电系统参数分析

余廷芳, 林中达, 蔡宁生

(东南大学 动力工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 作者对典型 PGFBC-CC 发电系统进行了较全面的参数分析, 找出了影响系统性能的主要参数, 并为提高这类发电系统性能提出了一些有益的措施及建议。

关键词: PGFBC-CC 系统; 发电系统; 参数分析

中图分类号: TM611.3 文献标识码: A

1 引言

因能源需求和环保的双重压力, 洁净煤燃烧发电技术正成为当前燃煤发电技术的热门课题, 其中部分煤气化结合流化床燃烧技术的联合循环 (PGFBC-CC) 燃煤发电系统在技术、经济、环保的综合性能上具有较大的优势^[1], 本文作者对一典型 PGFBC-CC 发电系统进行了较全面的参数分析, 找出了影

响系统性能的主要参数, 并为提高这类发电系统性能提出了一些有益的措施及建议。

2 系统介绍

如图 1, 煤与脱硫剂及空气、蒸汽一起喷入部分气化炉, 发生部分气化反应, 从气化炉出来的煤气经净化后进入顶置燃烧室燃烧。考虑目前的净化技术水平^[2], 把粗煤气经煤气冷却器冷却至 600 °C 后再经净化除尘后进入顶置燃烧室, 由于粗煤气温度较高, 煤气冷却器用于产生部分过热或再热蒸汽。而气化炉出来的固体 (其中包括焦炭、灰和未反应完全的脱硫剂) 则导入 PFBC (增压流化床) 与压气机来的空气反应燃烧, 半焦燃烧产生的热量用于加热产生

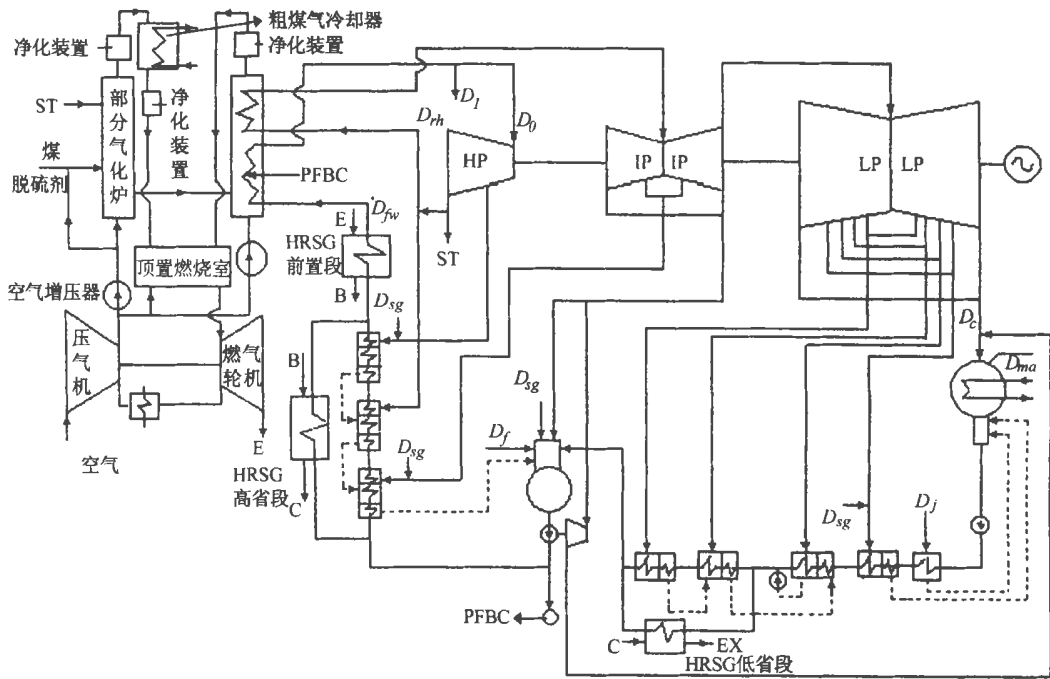


图 1 PGFBC-CC 原则性系统图

蒸汽, PFBC 出口的高温高压富氧烟气(866 °C)进入顶置燃烧室作为煤气燃烧的氧化剂, 另外的煤气燃烧所需补充的氧化剂由压气机供给, 煤气燃烧所需空气由顶置燃烧室设计的出口烟气温度 T_3 确定, 而 PFBC 中的半焦燃烧所需的空气则严格按照余气系数提供。燃烧室出口的高温烟气(约 1 000 °C ~ 1 300 °C)在燃气透平中膨胀做功后进入余热锅炉(HRSG), 余热用于给水的加热和产生部分蒸汽。HRSG 和 PFBC 内产生的蒸汽进入蒸汽透平做功。蒸汽侧采用国产 30 万千瓦机组型式, 参数均取自山东黄台电厂六期工程国产 30 万千瓦机组 N300-16.7(170)/537/537 型的汽轮机额定工况参数, 余热锅炉分成三段按图 1 连接入回热系统。

3 系统参数分析

为对系统进行分析, 我们在表 1 的基础上, 取部分炉能量转化系数^[1] (表征部分气化炉内煤气化程度的参数) $Q_n=0.6$ 计算了系统供电效率与压气机压比及透平前温的变化关系, 并在能量转化系数 $Q_n=0.6$ 燃气透平前温 $T_3=1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 压比 $\beta=16$ 下, 计算了系统的供电效率与气化炉操作温度 $T_G>(\ ^\circ\text{C})$, 气化炉操作压力 P_G , 注入气化炉的蒸汽量 STM , 流化床的床温 T_b , 及余热锅炉 HRSG 排气温度 T_{ex} 的变化关系。

3.1 系统供电效率随透平前温 T_3 和压比 β 的变化关系

由图 2 可见, PGFBC-CC 发电系统供电效率 η_{CC}^N 随燃气轮机入口温度 T_3 的增大有明显的增加, T_3 每

上升 100 °C, η_{CC}^N 将增加 0.7~1.0 个百分点, 且在 T_3 较小时, 提高 T_3 对提高系统供电效率效果更加明显, 当然 T_3 的提高受到燃气轮机工艺及技术的限制, 目前国外商业化的燃气轮机入口温度 T_3 能达到 1 300 °C (1 573.15 K) 左右^[3-4]。且对一定的 T_3 , 存在一个最佳压比 β_{opt} , 对应着最大供电效率, 随 T_3 的提高, 最佳压比 β_{opt} 也相应变大, 一般 β_{opt} 在 12~18 之间。

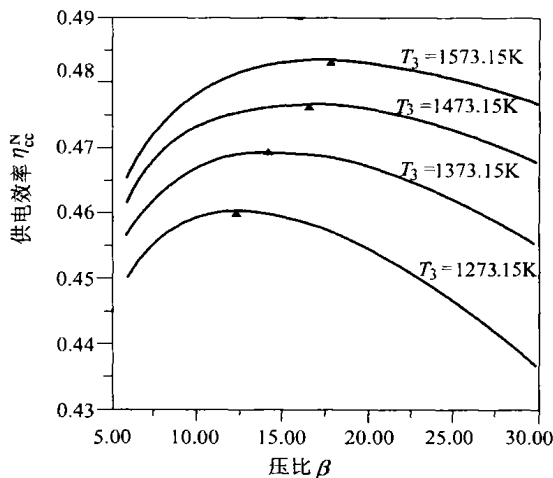


图 2 PGFBC-CC 系统供电效率与压比及透平前温的关系

3.2 部分气化炉注入蒸汽量的影响

如图 3 所示, 随气化剂蒸汽/空气质量比 STM 的增大, 系统供电效率 η_{CC}^N 有较大幅度的上升, 当 STM 从 0 增大到 0.4 时, η_{CC}^N 增加了近 1.6 个百分点。这是因为部分气化炉所用的蒸汽是从蒸汽轮机的第二级抽汽取出, 相当于把低能级蒸汽热能转移到高能级燃

表 1 计算基准与假设

部分气化炉:

- (1) 运行参数: 操作温度 $T_G = 871\ ^\circ\text{C}$, 操作压力 $P_G = 2\ 215\ \text{kPa}$, 气化剂蒸汽/空气比 $STM = 0.2$
- (2) 压损: 常压 10%, 增压 6%, 散热损失 1%, 煤气冷却器出口煤气温度 $T_{out} = 600\ ^\circ\text{C}$, 煤气冷却器换热效率 = 98.5%。

流化床燃烧炉:

床温 $T_b = 866\ ^\circ\text{C}$, 压损 6%, 热效率 99%

压气机:

- (1) 进口压损 1%, 压比 $\beta = 16$, 等熵效率 $\eta_y = 0.88$
- (2) 由压气机出口至部分气化炉的增压器压比 $\beta_C = 1.381$, 等熵效率 $\eta_{kC} = 0.8$
- (3) 由压气机出口至流化床燃烧炉的增压器压比 $\beta_{kP} = 1.085$ 等熵效率 $\eta_{kP} = 0.8$

顶置燃烧室:

压损 3%, 燃烧效率 $\eta_{TC} = 99\%$

燃气透平:

等熵效率 $\eta_{CT} = 0.90$ 透平前温度 $T_3 = 1\ 200\ ^\circ\text{C}$

余热锅炉:

节点温度 $T_b = 290\ ^\circ\text{C}$, $T_C = 170\ ^\circ\text{C}$ 换热效率 $\eta_{EC} = 98.5\%$, 出口烟气温度 $T_{ex} = 135\ ^\circ\text{C}$

蒸汽侧系统:

各点参数取自国产 30 万千瓦机组蒸汽轮机, 回热系统换热效率 $\eta_H = 98\%$

厂用电率: $\eta_E = 4\%$

气侧去作功, 因而效率增加。从理论上讲, 增加注入气化炉的蒸汽量, 相当于增加了程氏循环的蒸汽含量^[5], 有利于提高燃气轮机的做功量。从部分气化炉看, 气化蒸汽量的增加, 减小了气化空气量, 因而压气机功耗减小。所以总的来说, 虽然由于蒸汽量的增加, HRSG 的排气损失稍有增加, 但系统的热效率增加还是非常明显。

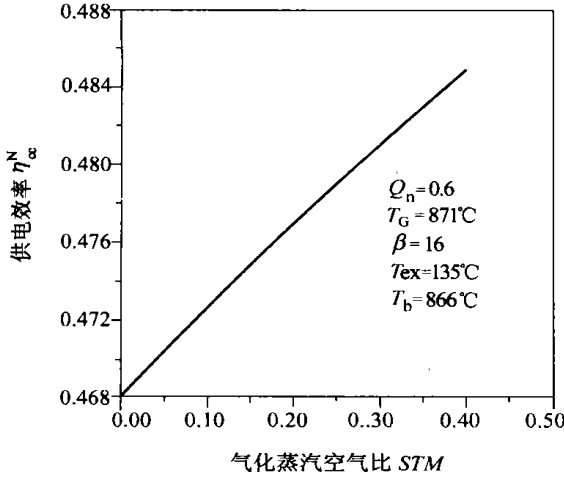


图 3 系统的供电效率与气化蒸汽量的关系

但气化炉用蒸汽量受气化工工艺和发电系统燃烧的制约, 不能随意升高, 否则蒸汽用量过大, 煤气的热值过小^[1], 顶置燃烧室的稳定燃烧不能保证, 另一方面燃烧室和燃气透平也得进行改进。同时由于煤气热值的减小, 同一能量转化系数下煤气体积增大, 使得粗煤气净化系统体积增大, 这些都是增加气化蒸汽量的不利因素。

3.3 部分气化炉操作温度 T_G 的变化

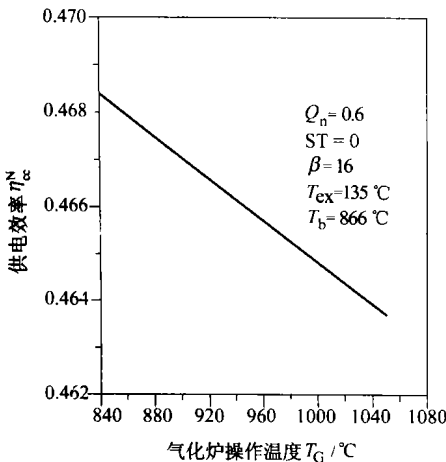


图 4 供电效率与气化炉操作温度 T_G 的关系

如图 4 所示, 固定气化炉的气化蒸汽量, 随部分气化炉操作温度 T_G 的增加, 系统的供电效率下降, 当操作温度 T_G 从 841 °C 增加到 1 051 °C 时, 系统的供电效率下降了约 0.5 个百

分点。原因: 一方面由于气化炉温度升高, 气化空气量增加, 因而增加了压气机功耗; 另一方面部分气化炉操作温度 T_G 的增大, 使得冷煤气效率减小, 出口煤气的显热增加, 经粗煤气净化系统后有一定的显热损失排渣热损增加, 因而在较低的操作温度下进行气化对系统的性能是有利的。

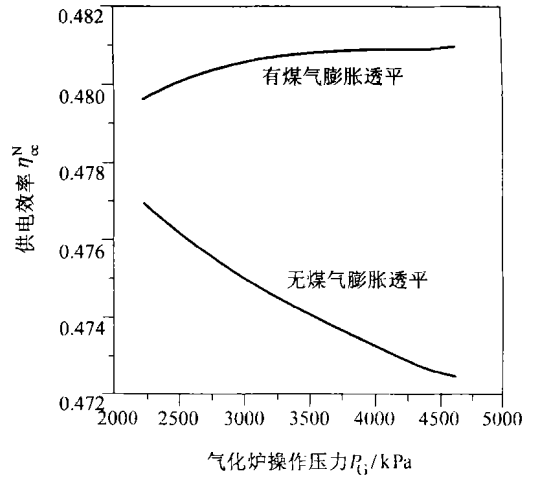


图 5 供电效率与气化炉操作压力的关系

3.4 部分气化炉操作压力 P_G 的变化

如图 5 所示, 随气化炉操作压力 P_G 的升高, 一方面进入气化炉的气化用空气的压缩功增大, 如果没有引入煤气膨胀机, 系统效率下降, 当 P_G 从 2 100 kPa 升高至 4 600 kPa 时, 供电效率下降了约 0.4 个百分点。如加入煤气膨胀机, 随气化炉操作压力 P_G 升高, 气化炉出口煤气热值升高, 气化炉冷煤气效率增大, 因而系统的供电效率升高, 但升高的量很小, 当 P_G 从 2 100 kPa 增至 4 600 kPa 时, 供电效率仅增长不到 0.2 个百分点, 而加入的煤气透平使得系统复杂、安全性降低。因而没有必要把气化炉操作压力提得过高, 具体的操作压力应视气化炉单炉出力和系统经济性而定。

如为提高单炉出力和减小煤气化子系统体积而升高气化炉操作压力 P_G , 当气化炉操作压力提高至 4 000 kPa 以上时, 不加煤气膨胀透平与加煤气膨胀透平的供电效率差值超出了 0.7 个百分点, 则应考虑引入煤气膨胀透平。

3.5 PFBC 燃烧炉出口的烟气温度 T_b 的变化

如图 6 所示, 随 PFBC 燃烧炉出口的烟气温度 T_b 的升高, 系统供电效率 η_{CC}^N 升高。这是因为随 PFBC 炉出口烟气温度 T_b 的提高, 烟气带入燃气轮机作功的能量增加了, 而蒸汽埋管的吸热减小, 即旁路

热减小^[6], 有利于提高系统的效率。从图中可以看出, T_b 的升高对系统的供电效率的提高量很小, 当 T_b 从 800 °C 增加到 900 °C 时, η_{CC}^N 增加只有 0.3 个百分点。且从防止 PFBC 燃烧炉结焦和脱硫考虑, PFBC 床温不宜超过 900 °C, 因而提高床温来提高供电效率的潜力不大。

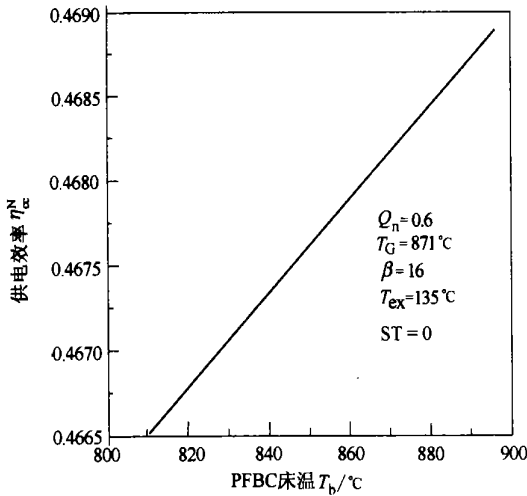


图 6 供电效率与 PFBC 床温的变化

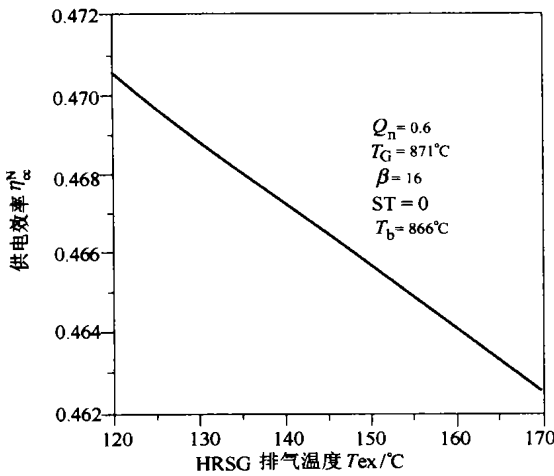


图 7 供电效率与 HRSG 排气温度的关系

3.6 余热锅炉(HRSG)出口排气温度 T_{ex} 的变化

如图 7 所示, 随余热锅炉(HRSG)出口排气温度 T_{ex} 的增加, 供电效率 η_{CC}^N 呈线性下降, 当 T_{ex} 从 120 °C 增大到 170 °C, 供电效率减小了约 0.8 个百分点, 因而降低 HRSG 排气温度对系统的供电效率有较大的影响; 应尽量减小 HRSG 的排气温度 T_{ex} , 但为避免 HRSG 的金属腐蚀, 一般 $T_{ex} > 130$ °C。

3.7 部分气化炉能量转化系数 Q_n 对系统性能的

影响

保持 $T_3 = 1\ 200$ °C 和压比 $\beta = 16$ 下, 不同能量转化系数 Q_n 下的供电效率如表 2。可见 Q_n 增加系统供电效率有明显增加, Q_n 每增加 0.1, 系统供电效率将增加约 0.9 个百分点。对图 1 所示系统, 如 Q_n 过大(本系统 0.78), 将出现除氧器汽化、给水沸腾、PFBC 炉燃烧不稳等问题, 一般 Q_n 取 0.6~0.7。

表 2 PGFBC-CC 系统在不同 Q_n 下的供电效率

气化炉能量转化系数 Q_n	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
系统供电效率 (LHV %)	45.9	46.82	47.7	48.5	49.5

4 结论

(1) PGFBC-CC 系统供电效率比常规的燃煤发电系统高 7~10 个百分点, 体现了 PGFBC-CC 发电系统的开发、应用对我国节能和环保具有重要意义。

(2) 对 PGFBC-CC 系统供电效率影响较大的参数依次是: 部分气化炉能量转化系统 Q_n 、燃气轮机入口温度 T_3 、气化剂蒸汽含量、HRSG 排气温度 T_{ex} , 在设计及运行中应加以重视; 其次是压气机压比 β 、部分气化炉操作温度 T_G 、炉操作压力 P_G ; PFBC 燃烧炉床温 T_b 影响最小, 可挖掘潜力不大。

(3) 提高 PGFBC-CC 系统供电效率的途径有: ①提高燃气轮机入口温度 T_3 ; ②在安全运行和系统能够实现的前提下选择合理的部分气化炉能量转化系数 Q_n (一般在 0.6~0.7 左右) 和气化剂蒸汽含量, 设计压比应在最佳压比附近, 在较低的温度下气化原煤, 降低 HRSG 出口排气温度 T_{ex} 等。

参考文献:

- [1] 余廷芳. 对应用煤气化技术的先进燃煤发电系统的性能计算与系统方案分析[D]. 南京: 东南大学, 1998.
- [2] NEWBY R A. Advanced hot gas cleaning system for coal gasification processes[J]. J of Engineering for Gas Turbines and Power, Transaction of ASME, 1994, 116(4): 338-345.
- [3] 雕吉义. 大功率重型燃气轮机技术的新发展[J]. 燃气轮机技术 1996, 9(3): 6-10.
- [4] 焦树建. 我国的燃气轮机工业该何时启动[J]. 燃气轮机技术, 1997, 10(1): 1-8.
- [5] 焦树建. 烧煤的燃气-蒸汽联合循环装置[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

(渠 源 编 辑)

煤燃烧过程中汞释放的研究现状 = **Recent Advances in the Study of Mercury Release in a Coal Combustion Process** [刊, 汉] / WANG Quan-hai, QIU Jian-rong, WU Hao (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 547 ~ 550

The average content of mercury in Chinese coals is higher than that found in coals of the United States and other countries, resulting in a relatively serious mercury-related pollution. The authors have summed up some study results concerning such pollution, focusing on the following aspects: distribution features of mercury found in coal, migration/transformation and emission characteristics as well as their control. **Key words:** mercury, coal, distribution law, migration/transformation, emission of pollutants

IGCC 电站中气化炉控制系统研究 = **A Study of the Control System of a Gasifier in a IGCC Power Plant** [刊, 汉] / NI Wei-dou WEI Si-liang, LIU Shang-ming (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 551 ~ 554

By way of analyzing the operating characteristics of a gasifier in an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant the basic configuration of a control system of the gasifier has been determined. On the basis of the gasifier dynamic characteristics a control system was designed. The results of its simulation indicate that the coupling factor between the two major links of the gasifier, namely, its temperature and syngas heating value, is relatively low. By using the control system designed by the authors it is possible to fulfill the main control aim of the gasifier. **Key words:** integrated gasification combined cycle (IGCC), gasifier, control system

部分煤气化结合流化床燃烧技术的联合循环(PGFBC-CC)发电系统参数分析 = **Parametric Analysis of a Partial Gasification and Fluidized Bed Combustion-based Combined Cycle (PGFBC - CC) Power Generating System** [刊, 汉] / YU Yan-fang, LIN Zhong-da, CAI Ning-sheng (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China. Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 555 ~ 558

A relatively comprehensive parametric analysis was performed with respect to a typical partial gasification and fluidized bed combustion-based combined cycle (PGFBC-CC) power generating system and the main parameters influencing the system performance were identified. Furthermore, some beneficial measures and proposals have been put forward with a view to enhancing the performance of this type of power generating systems. **Key words:** partial gasification and fluidized bed combustion-based combined cycle system, power generating system, parametric analysis

超声波检测汽轮机中水蒸气湿度方法的探讨 = **Exploratory Study of an Ultrasonic Method for Detecting Steam Wetness in a Steam Turbine** [刊, 汉] / LI Kai, SHANG De-min (Department of Thermal Energy and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 559 ~ 560, 564

The use of an ultrasonic method for detecting the two-phase flow wetness of wet steam is theoretically explored with an accurate analytical expression being obtained. The determination of sonic speed in a two-phase flow by the use of a pulse time-difference method features simplicity, rapidity and precision. The composition and operating principles of a wetness-detection ultrasonic device are predicted from an theoretical perspective. **Key words:** ultrasonic method, water steam, wetness, sonic speed, detection

热力学分析与经济理论结合的新探讨——从热力学定律中揭示其内含的经济理论 = **A New Exploratory Study on the Combination of Thermodynamic Analysis with Economic Theory - an Economic Theory Aimed at**