

新型近零排放煤气化燃烧利用系统的优化及性能预测

关 键, 王勤辉, 骆仲泐, 岑可法

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江省 杭州市 310027)

Optimization and Performance Prediction of a New Near Zero Emissions Coal Utilization System with Combined Gasification and Combustion

GUAN Jian, WANG Qin-hui, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: According to our new near zero emissions coal utilization system with combined gasification and combustion, which is based on the CO₂ acceptor gasification process, the product gas composition of the gasifier and the combustor were calculated by means of thermodynamic equilibrium calculation software FactSage 5.2. Based on these calculations, the whole system efficiency calculation method that complies with the mass and energy conversion principle was established. Aimed at enhancing the system efficiency, the system pressure and the gasifier carbon conversion ratio were optimized. The results indicate that the system efficiency increases with increasing of the pressure and the gasifier carbon conversion ratio. After the influences of the pressure and the carbon conversion ratio on the performance of the system, gasifier and the combustor were synthetically studied, the optimum pressure and the carbon conversion ratio were obtained respectively as 2.5MPa and 0.7. The system efficiency could achieve around 62.1% when the system operated in these two optimum parameters. If the advanced ITM air separation technology is used, the calculation system efficiency will be increased 1.3%.

KEY WORDS: thermal power engineering; near zero emissions; CO₂ acceptor gasification; equilibrium model; system optimization

摘要: 针对所构建的以 CO₂ 接受体法气化为基础的新型近零排放煤气化燃烧利用系统, 以热力学平衡计算软件包 FactSage 5.2 来预测气化炉及燃烧炉的产物组成。在此基础上建立了基于物质平衡、能量平衡的系统效率计算方法。以提高系统效率为目标, 对系统压力和气化炉碳转化率这两个重要参数进行了优化。结果表明, 系统效率随操作压力和气

化炉碳转化率增加而呈上升趋势。在综合考察压力和碳转化率对系统效率、气化炉和燃烧炉性能的影响规律后, 比较合适的系统压力和气化炉碳转化率分别为 2.5 MPa 和 0.7。在该运行参数下, 系统发电效率达到了 62.1%。若采用先进的氧离子输送膜(ITM)制氧方法, 系统效率可提高 1.3%。

关键词: 热能动力工程; 近零排放; CO₂ 接受体法气化; 平衡模型; 系统优化

0 引言

开发能源转化效率更高、包括 CO₂ 在内的多种污染物排放极低, 甚至几乎为零的煤炭利用系统, 是世界各国煤炭资源利用所追求的目标。目前, 世界已有多家研究机构提出了零排放煤利用系统方案。其中, 由于 CO₂ 接受体法气化技术具有可以制得高浓度的 H₂, 同时接受体再生过程中释放的是高浓度 CO₂ 这一特点^[1], 使基于 CO₂ 接受体法气化技术的几种零排放系统成为这一方向的主流。代表性的如美国零排放煤利用联盟(ZECA)提出的无氧煤气化零排放系统^[2-3]、美国 GE 能源与环境研究公司(GE-EER)提出的 AGC(advanced gasification combustion)系统^[4]、日本新能源综合开发机构(NEDO)提出的 HyPr-Ring(Hydrogen Production by Reaction Integrated Novel Gasification)系统^[5-6]等。这几种系统由于采用了不同的反应器形式和工艺路线, 因此具有各自不同的特点。目前有关的理论及试验研究工作都在积极进行之中。ZECA 针对无氧煤气化零排放系统已经进行了整个系统的理论计

基金项目: 国家自然科学基金项目(50306022)。

Project supported by National Nature Science Foundation of China (50306022).

算, 预测了系统效率和经济性。同时采用一种高温高压的热重分析仪研究了多个煤种在 7 MPa 下, 900 °C 左右的加氢气化特性。GE-EER 针对 AGC 系统, 借助 NASA 热力学软件建立了系统计算模型, 预测了反应平衡组成并计算了整个系统的效率。目前设计制造了一个内径 10 cm、反应管可承受 2 MPa、1000 °C 的流化床反应器准备进行煤的 CO₂ 接受体气化制氢试验。日本 NEDO 针对 HyPr-Ring 系统, 由 LIN S.Y 等进行了整个系统的理论计算, 在一个内径 20 mm 的连续给料装置上研究了压力、温度等条件对煤 / CaO 混合物气化制氢的影响规律。国内除浙江大学以外, 另有中科院工程热物理研究所提出的含碳能源直接制氢零排放系统^[7]目前也在积极进行有关的理论研究。

依据 CO₂ 接受体法气化技术思路, 结合循环流化床燃烧及气化技术的优势及特点, 笔者构建了一套新型近零排放煤气化燃烧集成利用系统^[8-9]。其中, 系统操作压力, 即气化炉、燃烧炉运行压力和气化炉碳转化率是该新型近零排放系统的两个重要参数。压力不同将直接影响气化产物的生成情况, 进而影响进入下游各模块的物质流和能量流并最终对系统整体性能产生影响。合适的气化炉碳转化率是系统进行煤炭合理分级转化原则的体现, 它既要使得气化炉产生更多的 H₂, 又要保证气化炉中未转化的半焦能够满足燃烧炉中 CaCO₃ 煅烧吸热的需要。因此本文针对这两个重要参数对系统相关设备、整体性能的影响规律进行了研究。以提高系统效率为目标, 保证系统内相关设备的技术可行性为原则对这两项重要参数进行优化。在此基础上, 得出了系统在此优化条件下各部分的发(耗)电量情况及总体效率。本文是对该新型近零排放系统在理论上的一个初步证明, 同时加深对这两个重要参数对系统设备运行和整体性能影响规律的认识, 并且为下一步合理安排试验验证工作提供指导。

1 新型近零排放煤气化燃烧利用系统介绍

笔者构建的新型近零排放煤气化燃烧集成利用系统如图 1 所示。煤或其它燃料(如生物质)在掺入一定比例的 CO₂ 接受体(CaO)后, 送入有一定压力的无氧循环流化床气化炉, 以水蒸气作为气化剂进行部分气化反应。其中煤中的碳发生水煤气反应

(1), 生成 CO 和 H₂。气相中的 CO 进一步通过水煤气变换反应(2)转化为 CO₂, 同时生成 H₂。CaO 作为 CO₂ 接受体发生碳酸化反应(3), 将气相中的

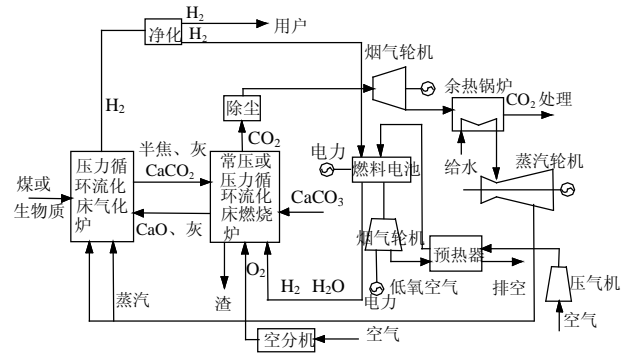
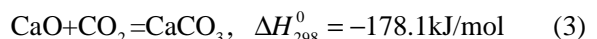
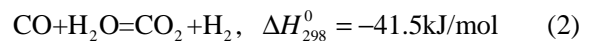
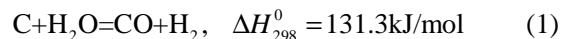
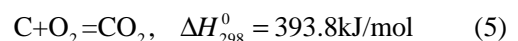


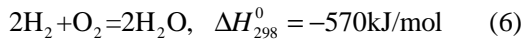
图 1 新型近零排放煤气化燃烧利用系统
Fig. 1 Block diagram of new near zero emissions coal utilization system

CO₂ 不断吸收固化。该反应一方面通过不断减少气相中 CO₂ 的来促进反应(2)的平衡向右进行, 进而也促进反应(1)的平衡向右进行, 从而促进了 H₂ 的生产。另一方面, 反应(3)放出的大量热量可供其它反应利用。除上述主要反应外, 气相中另有少量热解或气化所产生的 CH₄ 发生重整反应(4)也转化为 CO 和 H₂。气化炉产生的高浓度 H₂ 用于固体氧化物燃料电池(SOFC)发电或供其它氢能用户使用。含有未被利用的 H₂ 的燃料电池排出的尾气被送入燃烧炉以利用其高温显热和其中的 H₂。燃料电池所排出的低氧浓度的高温空气, 分离出其中的氧气后用于预热进入燃料电池的空气。



煤中较难气化的半焦和吸收 CO₂ 生成的 CaCO₃ 被送入加压或常压循环流化床燃烧炉。半焦和来自燃料电池尾气的氢气在纯氧环境中燃烧, 释放出的热量供给 CaCO₃ 煅烧分解, 生成的 CaO 被作为 CO₂ 接受体重新送回到气化炉。燃烧炉中发生的主要化学反应如式(5)~(7)所示。燃烧炉内燃料燃烧和 CaCO₃ 煅烧所产生的水蒸气和 CO₂ 高温混合气体经高温除尘后首先进入烟气轮机发电, 然后作为余热锅炉的热源进行蒸汽循环发电。低温尾气经冷凝分离出其中的水分, 剩下的高纯度 CO₂ 气体可以比较容易地进行处理, 如利用或填埋。





在所构建的系统中，煤在气化过程中产生的 H_2S 直接与 CaO 反应生成 CaS ，然后在燃烧炉中被转化为 CaSO_4 固化脱除^[10]。煤中的氮在气化过程中大部分转化为氮气，少量转化为 NH_3 也比较容易脱除，因此不需要专门的脱除氮氧化物的设备。气化燃烧过程所产生的灰颗粒则可以通过除尘设备脱除。燃烧炉各过程产生的少量气体污染物包括重金属蒸气^[11-12]等可以与所产生的高纯度 CO_2 一起处理。由此实现煤炭利用过程中的污染物近零排放。所构建的煤利用系统有如下特点：①充分考虑煤在各种转化过程中表现出的特点，先在循环流化床气化炉中把煤的“高活性组分”进行无氧化气化，然后把“低活性组分”送入循环流化床燃烧炉燃烧，实现煤的分级转化，降低对气化过程的要求；②利用较为成熟的循环流化床技术完成系统的核心部分，系统相对比较简单；③不追求产品气中很低的 CO_2 含量，选用适当的系统压力，降低了对系统的要求。

2 系统优化及性能预测

2.1 系统效率计算方法

在所构建的系统中，气化炉中的 CO_2 接受体法无氧化制氢、燃烧炉中的 CaCO_3 煅烧分解和半焦燃烧是整个系统物质流和能量流的基础。因此对气化炉和燃烧炉产物数量的预测成为整个系统效率计算的基础。这里利用热力学平衡计算软件包FactSage 5.2来进行气化炉和燃烧炉产物预测。该软件是一种基于系统吉布斯自由能最小化原理的热力学平衡计算程序^[13]，最小吉布斯自由能是求解热力学平衡态的常用方法之一。在本文的平衡计算中，气化炉中考虑了 C 、 CaO 、 H_2O 、 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 CaCO_3 共8种成分， C 、 Ca 、 O 、 H 共4种元素，因此应该只有4个(成分数目减去元素数目)独立反应，如式(1)~(4)所列。燃烧炉中考虑 C 、 CaCO_3 、 H_2 、 O_2 、 CaO 、 CO_2 、 H_2O 共7种组份，也是 C 、 Ca 、 O 、 H 共4种元素，因此应该只有3个独立反应，如式(5)~(7)所列。在计算开始前，除需要给出反应系统的压力 P 之外，还需给出所考察的平衡系统温度 T 。这里需要先假定一个系统温度 T_0 ，由平衡模型计算出产物组成。基于此结果，再由系统能量守恒计算出一个温度来，记为 T 。若 T 与 T_0 不同，则重新假定 T_0 进行计算，直至得出与 T_0 相同的温度值 T 。该

温度才是既符合元素守恒，又符合能量守恒的系统平衡态下的温度值。而这时的产物情况才是所希望得到的反应炉平衡产物。。

在对气化炉和燃烧炉产物进行预测的基础上，依据系统流程即可序贯计算出进入各设备的物质和能量情况。在此基础上，由发电单元和耗电单元的发电量和耗电量，即可算出整个系统的热功转化效率 h ，其定义由式(8)给出。此效率即作为我们系统优化的目标。

$$h = \frac{(P_{\text{燃气}} + P_{\text{SOFC}} + P_{\text{蒸汽}} - P_{\text{辅机}})}{q_1 D} \quad (8)$$

其中： $P_{\text{燃气}}$ 、 P_{SOFC} 、 $P_{\text{蒸汽}}$ 分别为燃气轮机、燃料电池、蒸汽轮机的发电量，kW； $P_{\text{辅机}}$ 为辅机能耗，kW； q_1 为煤的收到基低位发热量，kJ/kg； D 为投煤量，kg/s。

在对整个系统进行量化计算的过程中，为了简化计算，突出主要规律，这里还采用了以下基本假设和主要计算条件，其中有关参数主要是根据目前设备可行的性能来取值^[14-16]：

- (1) 气化炉：热损失占整个气化炉输入热量的0.5%；
- (2) 燃烧炉：采用与气化炉相同的压力以便于两者之间物料的非机械传输；热损失占整个燃烧炉输入热量的0.5%；再生的接受体中约有5%随排渣过程损失；
- (3) SOFC：以空气为氧化剂，发电效率为50%，燃料利用率为85%；
- (4) 烟气轮机：绝热膨胀效率为0.89，机械效率为0.98，发电机发电效率为0.95；
- (5) 管道：系统管道热损失忽略不计；
- (6) 系统计算以一典型烟煤为燃料。表1给出了该烟煤煤样分析数据。系统给煤量固定为18.35kg/s，进料 $\text{C}/\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}$ 摩尔比为1:1:3.5。

表1 煤样分析数据

Tab. 1 Analysis data of coal

工业分析/(w%, ar)			元素分析/(w%, ar)					发热量/(MJ/kg, ar)
M	V	A	C	H	O	N	S	Q_{net}
2.7	25.17	21.62	63.39	3.88	6.51	0.78	1.13	24.535

2.2 压力对系统性能的影响及优化

压力对系统的性能有很大的影响。经计算，碳转化率 X 分别为0.6、0.7、0.8时的系统压力改变对系统效率的影响如图2所示。从图中可以看出，系统效率整体上是随着压力的增大而提高。这是因为压力的提高，有利于气化炉中 CO_2 接受体反应(3)

向正方向进行,由此也促进了水煤气反应(2)向正方向进行,最终促进了 H_2 的生成,燃料电池的发电量有所增加。同时提高压力也会提高整个烟气轮机的效率,从而促进整个系统的效率的提高。但随压力的进一步提高,系统效率增大的幅度随着压力的增加逐渐减少。甚至在碳转化率为 0.8 的情况下,系统压力从 2.5 MPa 增加到 3 MPa 时,系统效率均为 65.3%,并没有继续提高。可见,总体上提高操作压力有利于提高系统效率,但当压力超过 2.5 MPa 后,系统效率提高就很微弱了。

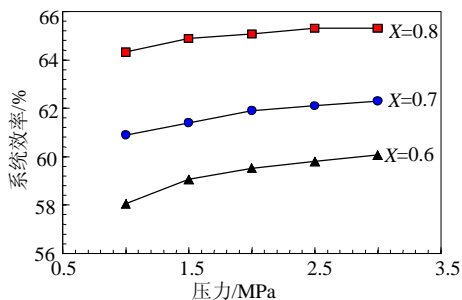


图2 不同碳转化率下系统效率随压力的变化

Fig. 2 System efficiency versus pressure with different carbon conversion ratio

压力对系统整体性能的影响在很大程度上是基于压力对气化产物的直接影响。图3给出了气化温度为 850°C 下,气化产物随压力的变化情况。从图中可看出,在较低压力下(小于约 0.6 MPa)由于 CaO 的碳酸化反应(3)并未进行, CaO 量保持不变,生成的 CaCO_3 量为零,因此 CaO 促进 H_2 生成的作用并未发挥。此后随着压力的提高,碳酸化反应(3)进行的程度加深,越来越多的 CaO 吸收 CO_2 转化为 CaCO_3 , 因此生成的 H_2 量开始增加。但压力大于 2.5 MPa 后, H_2 产量的增加很微弱,甚至出现了下降的趋势。这是因为,随着压力增加,反应(4)平衡向左进行,生成的部分 H_2 被转化为了 CH_4 , 这与图中 CH_4 产量的变化趋势相一致。气化产物中 H_2 生成量随压力的变化趋势与系统效率的变化趋

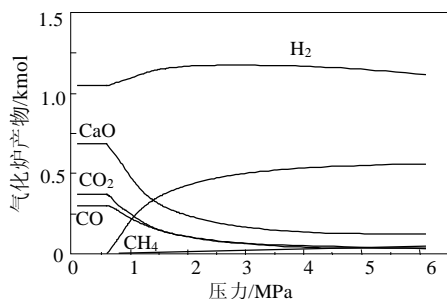


图3 气化产物随压力的变化

Fig. 3 The relationship between product composition of the gasifier and pressure

势吻合,反映出以 H_2 为燃料的 SOFC 的发电量对系统性能决定性的影响。另外考虑到压力增加,将会导致整个系统制造要求提高、成本上升,运行安全性下降;同时,在假设燃烧炉采用与气化炉相同压力的情况下,压力越高,燃烧炉内石灰石的煅烧就越困难。因此综合考虑以上因素,较优的系压力取为 2.5 MPa 左右比较合适。

2.3 气化炉碳转化率对系统性能的影响及优化

气化炉碳转化率是煤中的碳在气化炉中参与反应的百分比,气化炉中未反应的半焦将进入燃烧炉利用。因此,碳转化率的改变直接影响着气化炉和燃烧炉的运行参数,进而影响进入下游燃料电池和烟气轮机的物质和能量,从而对整个系统的性能产生重要影响。这里取优化的系统压力值 2.5 MPa, 计算碳转化率分别为 0.6、0.7、0.8 时反应炉的温度、系统主要设备的发电、耗功情况及系统效率,如表 2 所列。由表中可看出,随着碳转化率的提高,系统效率明显提高。其中燃料电池发电量所占的百分比逐渐上升,烟气轮机和蒸汽轮机发电量所占的百分比都有所下降。这是由于随着碳转化率的增大,气化炉中产生的 H_2 量增加,也即进入 SOFC 的燃料增加,SOFC 发电量所占的份额也随之增加。同理,随着碳转化率的提高,进入燃烧炉的份额就减少,烟气轮机发电量所占的份额也减少。而蒸汽轮机是利用烟气轮机余热的,所以它所占的份额也相应有所下降。可见,碳转化率的提高正好符合尽可能使能量在具有较高效率的单元中(这里是 SOFC)转化的基本原则,因此随碳转化率增大,系统效率随之增大。

表2 不同碳转化率下的系统主要参数

Tab. 2 The main parameters under the different carbon conversion ratio

主要参数	碳转化率 0.6	碳转化率 0.7	碳转化率 0.8
气化炉温度/ $^\circ\text{C}$	958	861	773
燃烧炉温度/ $^\circ\text{C}$	1185	963	705
燃料电池发电量/kW	213557.46	242072.1	268340.16
燃料电池发电量所占比例/%	56.14	60.93	64.76
烟气轮机总发电量/kW	160118.7	152375.1	145708.3
烟气轮机发电量所占比例/%	42.09	38.35	35.16
蒸汽轮机发电量/kW	6712.56	2875.5	316.7
蒸汽轮机发电量所占比例/%	1.76	0.72	0.08
压气机总耗功/kW	79839.30	91708.2	99826.12
空分机总耗功/kW	31146	25957.1	20764
系统效率/%	59.8	62.1	65.3

但是,碳转化率的变化范围是受到气化炉和燃烧炉的运行条件限制的,并不是可以随意选取的。

图 4 给出了系统压力在 2.5 MPa 下碳转化率与气化炉、燃烧炉温度的关系。碳转化率的提高说明煤气化反应进行得更加深入，因此气化反应所需的热量大幅度增加。虽然也会相应增加 CO₂ 接受体(CaO)的用量，由此 CO₂ 与 CaO 反应的放热量也会相应增加，但这并不足以弥补气化反应强化后所需热量的大幅度提高，因此气化炉的运行温度有所下降。随着碳转化率的提高，进入燃烧炉的半焦随之减少，半焦带入的显热和化学热也大大减少，而煅烧石灰石所需要的热量却随着碳转化率的提高而增加，因此燃烧炉的运行温度随着碳转化率的提高下降幅度明显大于气化炉。当碳转化率达到 0.8 时，燃烧炉的运行温度降至 705℃，远低于流化床的最佳运行温度，并且 CaCO₃ 的煅烧分解已不能进行。因此选择合适的碳转化率应在 0.7 左右，此时对应的气化炉温度为 861℃，燃烧炉温度为 963℃，由下面的计算可看出此工况适合气化炉内反应的要求，并且可以实现燃烧炉再生 CaO 的作用。

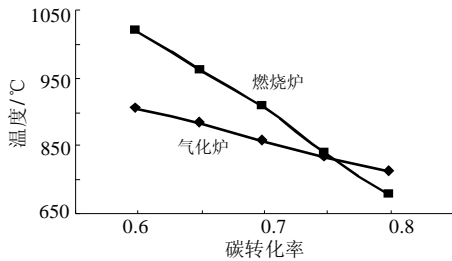


图 4 温度随碳转化率的变化

Fig. 4 The relationship between temperature and carbon conversion ratio

2.4 优化后的系统性能及分析

采用优化后的系统操作压力(2.5 MPa)和碳转化率(0.7)，基于热力学平衡模型预测的气化炉气体产物组成如表 3 所列。在气化产物中 H₂ 含量达到了 83.4%，另有少量的 CO 和 CO₂ 及极少量的 CH₄ 也并不影响 SOFC 的正常运行^[17]。燃烧炉内，平衡模型指出此工况下的压力和温度可使 CaCO₃ 几乎全部再生为 CaO。由此计算得到系统主要设备的性能数据、整体效率及计算中所用到的重要参数列于表 4 所示，其中系统整体发电效率为 62.1%。从表中可见，在各发电设备中燃料电池发电量最大，达到了 60.93%。其发电效率如前面假设中所述，暂取为 50%。但抛开目前技术条件限制而言，实际燃料电池的单循环发电效率可以高于 60%，甚至有潜力达到更高值。因此可以说，尽量使能量在燃料电池内转化为电力是保证系统具有较高效率和经济性的

基本原则。在前面压力对系统性能影响的分析中，压力的提高实际上主要就是通过促进气化炉中 H₂ 的产量，进而增加 SOFC 的发电量来提升系统效率的。

表 3 气化炉气体产物组成

Tab. 3 Product gas composition of the gasifier

入口物料/(kg/s)			气相产物组成/(kmol/s)			
给煤	CaO	蒸汽	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
18.35	39.55	42.6	1.16	0.11	0.10	0.02
体积浓度(干基)/%			83.4	7.9	7.2	1.4

为保证系统燃烧炉排出的是高浓度的 CO₂，燃烧炉必须采用纯氧燃烧。在目前的系统设计中，燃烧炉所需的纯氧由深冷法制得。由表 4 可见，制氧用空分机耗电占到了总发电量的 6.5%。因此，如何实现低能耗的制氧成为该系统进一步提高性能的重要途径。在各种制氧方法中，氧离子传送膜(ITM)制氧法被认为是整合到各种先进能源转化系统(如 IGCC)的比较有前景的制氧技术。该方法采用无孔、混和陶瓷薄膜制成，以高压差作为驱动力从高压空气中分离出大流量、高纯度的氧气。其工作温度在 800~900℃ 范围内，所需工作压力为 100~300psia(约 0.689~2.068 MPa)。产生的氧气压力约为大气压力，浓度可达 99.9%^[18]。可见，一旦技术、经济可行，本系统完全可以采用 ITM 制氧法。同样采用优化的系统操作条件，经计算若采用 ITM 制氧法时，空分系统耗电从深冷法耗电 25957.1kW 下降到了 9275 kW，系统效率达到了 63.4%，比采用深冷法制氧效率提高了近 1.3%。若考虑燃烧炉下游 CO₂ 的处理，势必增加新的系统功耗。有关 CO₂ 处理的方案较多，其中矿石吸收埋存是一个重要途径，也是美国能源部零排放项目研究的一个方案^[19]。

表 4 主要参数及结果

Tab. 4 The main parameters and results of the system

项目	数值	项目	数值
系统给煤量(kg/s)	18.35	1 号、2 号烟机发电效率%	56.54
气化炉压力(MPa)	2.5	烟机发电总电量kW	152375.1
气化炉温度/°C	861	烟机发电电量所占份额%	38.35
气化炉碳转化率	0.7	蒸汽轮机发电效率%	28
气化炉氢气产量(kmol/s)	1.16	蒸汽轮机发电量kW	2875.5
燃烧炉压力/MPa	2.5	蒸汽轮机发电量所占份额%	0.72
燃烧炉温度/°C	963	空分机耗电kW	25957.1
燃料电池燃料利用率%	85	空分机耗电占总发电量份额%	6.5
燃料电池氧气利用率%	51	压气机耗电kW	91708.2
燃料电池发电效率%	50	压气机耗电占总发电量份额%	23.1
燃料电池发电量kW	242072.1	总发电量kW	397322.7
燃料电池发电量所占份额%	60.93	系统效率%	62.1

注：1 号、2 号烟机分别为燃烧炉和 SOFC 下游的烟机。

经计算,在上述计算条件不变的情况下,采用此 CO₂ 处理方法,系统效率将降低 2.3%。

3 结论

(1) 该新型近零排放煤气化燃烧利用系统的热功转换效率随系统压力的升高而升高,但压力大于 2.5 MPa 后,系统效率的增长幅度逐渐减小。这主要是由于气化炉内压力大于 2.5 MPa 后, H₂ 产量的增加就很微弱,甚至出现了下降的趋势。考虑到过高的压力使得燃烧炉中石灰石的煅烧分解难度增加,整个系统制造要求提高、成本上升,运行安全性下降。因此综合考虑,合适的系统运行压力为 2.5 MPa 左右。

(2) 气化炉碳转化率对系统效率的影响很大。随着碳转化率的提高,系统效率升高。在系统压力为 2.5 MPa 时,碳转化率从 0.6 上升到 0.8,系统效率从 59.8% 提高到 65.3%。但高的碳转化率的选取受到燃烧炉温度的限制。当碳转化率达到 0.8 时,燃烧炉的运行温度降至 705℃,实际上已不能进行 CaCO₃ 的煅烧。经计算,较优可行的碳转化率取为 0.7 左右。

(3) 系统运行压力为 2.5 MPa, 气化炉碳转化率为 0.7 时,一个以烟煤为原料的发电容量约 400MW 的系统其发电效率可以达到 62.1%。若采用先进的 ITM 制氧法时,系统效率可进一步提高近 1.3%。若考虑燃烧炉下游 CO₂ 的处理,采用矿石吸收埋存方法时,系统效率将降低 2.3%。

(4) 本文的工作是对该新型近零排放系统在理论上的一个初步证明,同时加深了对系统压力和气化炉碳转化率这两个重要参数对系统相关设备运行和整体性能影响规律的认识,并且为下一步合理安排试验验证工作提供了指导。

参考文献

[1] Lobachyov K, Richter H J. Combined cycle gas turbine power plant with coal gasification and solid oxide fuel cell[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1996, 118(4): 285-292.

[2] Nawaz M, Ruby J. Zero emission coal alliance project a new conceptual design and economics[EB]. Los Alamos Report. <http://www.zeca.org/>.

[3] Ziock H J, Anthony E J, Brosha E L, et al. Technical progress in the development of zero emission coal technologies[EB]. Los Alamos

Report. LA-UR-02-5969, 2002, <http://www.zeca.org/>.

[4] Rizeq R G, Lyon R K, Zamansky V M. Fuel-flexible AGC technology for H₂, power, and sequestration-ready CO₂[C]. In: The proceedings of the 26th international technical conference on coal utilization & fuel systems, Ed. B. A. Sakkestad. Clearwater, USA, 2001: 359-368.

[5] Lin S Y, Suzuki Y, Hatano H, et al. Developing an innovative method, HyPr-RING, to produce hydrogen from hydrocarbons [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9-12): 1283-1290.

[6] Lin S Y, Harada M, Suzuki Y, et al. Continuous experiment regarding hydrogen production by coal/CaO reaction with steam(I): Gas products[J]. Fuel, 2004, 83 (7-8): 869-874.

[7] 肖云汉. 煤制氢零排放系统[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(1): 13-15.

Xiao Yunhan. Hydrogen from coal with zero emission[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(1): 13-15(in Chinese).

[8] 王勤辉, 沈洵, 骆仲泱, 等. 新型近零排放煤气化燃烧利用系统[J]. 动力工程, 2003, 23(5): 2711-2715.

Wang Qinhui, Shen Xun, Luo Zhongyang, et al. New near zero emissions coal utilization technology with combined gasification and combustion[J]. Power Engineering, 2003, 23(5): 2711-2715(in Chinese).

[9] 王智化, 王勤辉, 骆仲泱, 等. 新型煤气化燃烧集成制氢系统的热力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 91-97.

Wang Zhihua, Wang Qinhui, Luo Zhongyang, et al. Thermodynamic analysis of hydrogen production by new coal utilization technology with combined gasification and combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 91-97(in Chinese).

[10] 李定凯, 吕子安. 煤焦中的硫化钙在循环流化床燃烧室中的反应模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 196-200.

Li Dingkai, Lü Zian. A model for the reactions of CaS in coal gasifier char in circulating fluidized bed combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 196-200(in Chinese).

[11] 黄亚继, 金保升, 仲兆平, 等. 痕量元素在煤粉炉中排放特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 205-210.

Huang Yaji, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Emission features of trace elements in a pulverized coal boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 205-210(in Chinese).

[12] 徐明厚, 郑楚光, 冯荣, 等. 煤燃烧过程中痕量元素排放的研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 33-38.

Xu Minghou, Zheng Chuguang, Feng Rong, et al. Overview of trace elements research in coal combustion process[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 33-38(in Chinese).

[13] Bale C W, Chartrand P, Degterov S A, et al. Fact sage thermochemical software and databases[EB]. CALPHAD 2002, 189-228, <http://www.crct.polymtl.ca>.

[14] 张斌, 倪维斗, 李政. IGCC 及煤气化固体氧化物燃料电池混合循环的技术经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 141-146.

Zhang Bin, Ni Weidou, Li Zheng. Technology economic analysis of IGCC and hybrid systems of coal gasification and SOFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 141-146(in Chinese).

[15] 朱行健, 王雪瑜. 燃气轮机工作原理及性能[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

[16] 卢立宁, 李素芬, 沈胜强, 等. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机联合发电系统模拟研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 358-362.

Lu Lining, Li Sufen, Shen Shengqiang, et al. Simulation study of a

combined power generation system incorporating a solid-oxide fuel cell and a gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(4): 358-362(in Chinese).

[17] 鲁德宏. 石油天然气利用的新途径—燃料电池[J]. 石油与天然气化工, 2003, 32(1): 10-13.

Lu Dehong. New utilization of petroleum and natural gas by way of fuel cell[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2003, 32(1): 10-13(in Chinese).

[18] Stein V E, Juwono E, Demetri E P, et al. The impact of ITM Oxygen on economics for coal-based IGCC[C]. Proceedings of the International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Sweden, 2002, 27 (1): 345-356.

[19] Nawaz M, Ruby J. Zero emission coal alliance project conceptual design and economics[EB]. Los Alamos Report , http :

//www. zeca. org/.

收稿日期: 2005-12-26。

作者简介:

关 键(1978—), 男, 博士研究生, 目前从事新型近零排放煤气化燃烧利用系统的有关研究, xiaoguan02@zju.edu.cn;

王勤辉(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事循环流化床燃烧技术、热电气多联产技术、煤气化技术等方面的研究;

骆仲泐(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, “长江学者奖励计划”特聘教授, 主要从事洁净煤燃烧技术及重物质利用等研究;

岑可法(1935—), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 工程热物理专业。

(编辑 贾瑞君)

《中国电机工程学报》参考文献要求

《中国电机工程学报》(半月刊)是学术性刊物, 主要报道电机工程领域的新理论、新方法、新技术和新成果。参考文献要求如下:

参考文献应选择最近 5 年的论文且按文中出现的先后次序排列, 在引用文句后的右上角标明参考文献序号, 参考文献以 15 篇以上为宜。勿引用尚未公开出版的资料。参考文献为书和期刊的著录格式如下:

序号 作者姓名.书名[文献类别].出版地: 出版者, 出版年份, 页次.

序号 作者姓名.论文篇名[文献类别].刊物名称, 年份, 卷号(期号): 起页-止页.

参考文献类型	专著	论文集	报纸文章	期刊文章	学位论文	报告	标准	专利	其他
文献类型标识	M	C	N	J	D	R	S	P	Z

若为中文参考文献, 请您将各著录项目均翻译成英文。例如:

[1] 王东, 马伟明, 李玉梅, 等. 带有静止励磁调节器的双绕组感应发电机研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 145-150.

Wang Dong, Ma Weiming, Li Yumei ,et al. Reaeasher on dual stator winding induction generator with static excitation regulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 145-150(in Chinese).