

两种煤气化工艺下 Ni 基载氧体链式燃烧 联合循环性能模拟

向文国¹, 牟建茂¹, 狄藤藤²

- (1. 东南大学洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏省 南京市 210096;
2. 四川电力职业技术学院动力工程系, 四川省 成都市 610072)

Performance Simulation of Ni-Based Chemical Looping Combustion Combined Cycle With Different Gasification Processes

XIANG Wen-guo¹, MOU Jian-mao¹, Di Teng-teng²

- (1. Education Ministry Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China; 2. Department of Power Engineering, Sichun Electric Vocational and technical College, Chengdu 610072, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Chemical looping combustion (CLC) is a combustion technology with inherent separation of the greenhouse gas CO₂. An integrate gasification combined cycle with CLC using Ni/NiO/NiAl₂O₄ as the oxygen carrier is proposed and simulated. Two gasification processes, i.e. pipe-typed gasification and Texaco gasification, are included. The effects of the two gasification processes on the combined cycle system performance are compared and analyzed. Assuming the air reactor temperature at 1200 °C, the turbine inlet temperature (TIT) after supplementary firing at 1350 °C, the system efficiencies of pipe-typed gasification and Texaco gasification are 44.36% and 41.81% respectively. When the temperature of air reactor increases from 1000 °C to 1200 °C, the CO₂ emission decreases from 174 g/(kW·h) to 75 g/(kW·h) with pipe-typed gasification and from 260 g/(kW·h) to 133g/(kW·h) with Texaco gasification. When the TIT increases from 1300 °C to 1500°C, the system efficiency increases from 43.96% to 45.53% with pipe-typed gasification and from 41.14% to 42.9% with Texaco gasification. There is an optimal compression ratio under different supplementary firing temperature.

KEY WORDS: chemical looping combustion; gasification; CO₂ separation; combined cycle

摘要: 化学链燃烧能在能量释放的同时有效分离CO₂。该文

基金项目: 国家自然科学基金项目(50176010, 90410009); 国家重点基础研究发展规划基金项目(2007CB210101)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50176010, 90410009); Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2007CB210101).

用ASPEN PLUS软件对Ni/NiO/NiAl₂O₄作载氧体的整体煤气化链式燃烧联合循环系统进行了模拟,研究了管式气化方式和德士古(Texaco)气化方式对联合循环系统性能的影响,并对2种气化系统进行了比较。模拟结果表明,空气反应器温度1200°C,补燃后透平进口温度1350°C,管式气化系统效率为44.36%,德士古气化系统效率为41.81%;空气反应器温度从1000°C升高到1200°C,管式气化系统CO₂减排量从174 g/(kW·h)减少到75 g/(kW·h),德士古气化系统CO₂减排量从260 g/(kW·h)减少到133 g/(kW·h);补燃后透平进口温度从1300°C升高到1500°C,管式气化系统效率从43.96%提高到45.53%,德士古气化系统效率从41.14%提高到42.9%;在一定的透平进口温度下,存在最佳压气机压缩比。

关键词: 化学链式燃烧; 气化; CO₂分离; 联合循环

0 引言

二氧化碳是最大的温室气体,减少燃烧过程中CO₂的排放已成为研究热点。常规火电技术中,空气与煤直接燃烧,烟气中CO₂只占10%~20%,CO₂的后续处理成本太高。燃烧过程中生成高浓度的CO₂或便于CO₂分离的气相混合物(如H₂O+CO₂),同时消除其他污染物的生成排放(如NO_x、SO_x及Hg等),是一条有效的途径。纯氧燃烧得到普遍认可,但制取纯氧需消耗大量的功耗,对于发电厂来说,其消耗的电力占厂用电的10%以上,限制了此技术的应用。在燃料燃烧之前,进行脱碳处理,可以消除CO₂的排放,如对燃料进行气化、重整,分离出清洁的氢能,燃用氢能可以实现零排放,但

是需要开发出高效低成本的 CO_2 、 H_2 分离膜等相关技术。

化学链燃烧(chemical looping combustion, CLC)技术,如图 1 所示,燃料不直接与空气接触,以金属氧化物(如NiO)为载氧体,在一定的温度下,载氧体在空气中进行氧化反应,结合氧;然后与燃料气进行还原反应,释放氧。气相反应产物只有 CO_2 和 H_2O (汽),凝结出水,得到高纯 CO_2 。化学链燃烧过程中 CO_2 不会被空气中的 N_2 稀释,没有能量损失,实现 CO_2 分离。此外,CLC还能够避免 NO_x 的生成:一方面,空气与燃料不直接接触避免了燃料型 NO_x 的产生;另一方面,在空气反应器里,由于载氧体颗粒热容较高且分布均匀,使得反应器温度比较均匀,当反应器温度不高于 1200°C 时,不会产生温度型 NO_x 。两个反应器的总反应是燃料与氧气之间的燃烧反应。

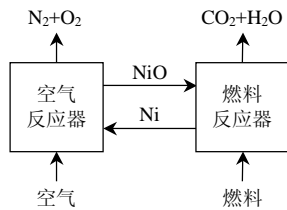


图 1 化学链燃烧示意图

Fig. 1 Scheme of chemical looping combustion

国外, Lyngfelt^[1-3]等以 CH_4 为燃料,以 Fe_2O_3 和NiO作载氧体,对CLC燃烧锅炉进行概念设计,研究了该金属氧化物的反应特性;Anheden^[4]对以煤气化合成为燃料的CLC进行了初步研究;Johansson^[5]等人搭建了功率为100 W的CLC实验装置,对CLC系统进行了研究;Corblla^[6]等对以氧化钛附载氧化铁为氧载体的CLC进行了研究;Diego^[7]等在功率10 kW·h,以 $\text{CuO-Al}_2\text{O}_3$ 为氧载体的CLC反应器上进行了200h的燃烧实验。国内,金红光^[8-9]等研究了多种气体燃料的CLC燃烧机理,分析研究了相关联合循环的热力性能;郑瑛^[10]等研究了以 CaSO_4 为载氧体的CLC技术;向文国^[11-13]等对CLC相关的燃烧性能进行了仿真计算并对铁法链式反应器煤基氢电联产系统性能进行模拟;段立强^[14-15]、邓世敏^[16]等对整体煤气化联合循环系统特性进行了研究。但CLC技术与煤气化联合循环技术结合的系统研究报道较少,本文基于能量的梯级利用与CLC技术,用Ni/NiO/ NiAl_2O_4 (YSZ)作载氧体,构建煤气化链式燃烧联合循环,研究该系统的技术性能和 CO_2 排放性能。

1 2 种气化工艺下的链式燃烧联合循环

图 2 所示为埋管式煤气化链式燃烧联合循环系统流程图。系统主要由以下 5 部分组成:水煤浆增压管式气化、CLC装置、燃气轮机、余热回收和 CO_2 压缩分离。煤粉与适当比例的水和 CaCO_3 混合制成水煤浆,经升压进入埋在空气反应器(AR)里的管式气化反应器,产生的粗煤气经高温除尘,净化后的煤气进入燃料反应器(FR),载氧体被还原,FR出口高温烟气(主要成分 CO_2 和 H_2O)进入烟气透平做功,再通过烟气余热锅炉回收余热产生蒸汽。从烟气余热锅炉出来的烟气经过冷却、压缩、冷凝、分离水后,得到液态二氧化碳。空气压缩后进入AR,载氧体再生,失去部分氧气的高温欠氧空气,经补燃进一步升温,进入燃气透平做功,再通过燃气余热锅炉回收余热,最后排入大气;2 台余热锅炉产生的蒸汽进入汽轮机做功。

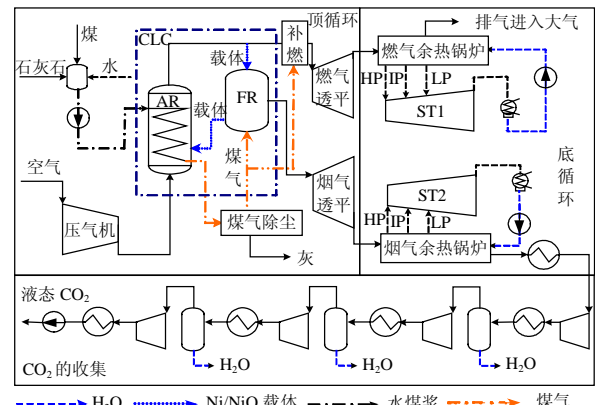


图 2 埋管式煤气化链式燃烧联合循环系统

Fig. 2 Chemical looping combustion combined cycle based on pipe-typed gasification

图 2 所示的煤气化链式燃烧联合循环系统中,采用了管式煤气化、高温除尘等工艺,就目前的技术水平,实现尚有困难,但不影响本文探讨该系统的技术性能。为便于实现以及进行技术参数的对比,选择成熟的德士古(Texaco)煤气化工艺。基于德士古煤气化的链式燃烧联合循环如图 3 所示,气化炉产生的煤气经过冷却、除尘、脱硫等净化后,作为CLC和补燃燃料。透平布置、余热回收以及 CO_2 压缩分离与图 2 所示联合循环系统相同。补燃是为了提高燃气透平的做功能力和系统效率。

本文将研究 2 种煤气化方式下的链式燃烧联合循环的性能,并比较 2 系统的性能特性。利用 ASPEN 软件对系统进行模拟计算,其中主要的反应装置:管式气化器、德士古煤气炉、空气反应器和燃料反应器等用 RGibbs 模块模拟,基于最小吉

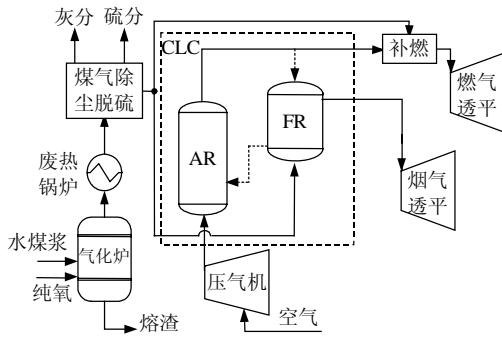


图3 德士古气化链式燃烧系统

Fig. 3 Chemical looping combustion combined cycle system based on Texaco gasification

布斯自由能确定反应器各化学反应进行的程度。德士古气化所需要的氧气由空气分离系统供给。为简化, 本文未模拟空分系统, 制氧功耗按经验数据 $0.4(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{kg}^{[17]}$ 折算, 作为系统耗电的一部分。

2 主要参数的选取原则

2.1 水煤浆气化参数选取

本文煤样选用国际研究中使用较多的伊利诺斯6#煤(Illinois 6#), 其成分如表1所示, 低位热值为 24.83 MJ/kg 。

表1 伊利诺斯6#烟煤分析数据

Tab. 1 Proximate and ultimate analyses of Illinois 6# coal

元素分析(干燥基)/%					工业分析(空干基)/%			
C	H	N	S	O	M	FC	V	A
61.2	4.7	1.1	3.4	8.8	12	42.85	36.35	8.8

德士古气化采用湿法进料系统, 煤粉与水制成浆后送入气化炉。碳转化率选取 98%, 生产废水中不含焦油、酚等污染物; 煤气质量好, 有效气($\text{CO}+\text{H}_2$) 高达 80%, 采用液态排渣。系统模拟基本参数选择参考文献^[18], 通过空气反应器热量平衡计算系统煤耗量, 气化温度 $1315 \text{ }^\circ\text{C}$, 气化压力 4.14 MPa , 氧/煤比为 0.774, 选用选择性脱硫溶剂N-甲基二乙醇胺(MDEA)法脱硫。当空气反应器温度为 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 德士古气化参数及气体成分如表2所示。

管式气化是利用空气反应器产生的热量进行煤气化的工艺。图4是选定压力下气化温度与水煤比对气化效率的影响, 根据气化效率最高的原则和空气反应器实际温度, 气化温度选取 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (当空气反应器温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 气化温度取为 $950 \text{ }^\circ\text{C}$),

表2 管式和德士古气化参数与气体成分

Tab. 2 Gasification parameters and gas components of pipe-typed and Texaco gasification

气化方式	煤耗/ (kg/s)	氧耗/ (kg/s)	出口 温度/ $^\circ\text{C}$	气化主要气体体积/%			
				H_2	CO	H_2O	CO_2
德士古	37.1	28.7	900	29.7	42.7	19.4	7.1
管式	35.1	0	870	48	35.8	7.73	3.96

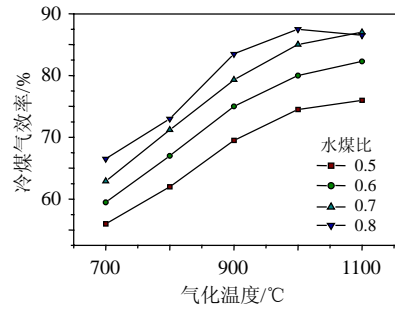


图4 温度与水煤比对气化效率的影响

Fig. 4 Influence of temperature and water/coal ratio on cold gas efficiency

水煤质量比选取 0.8。此时冷煤气效率达到 80.75%。系统煤耗量由空气反应器热量平衡计算。采用增压气化, 燃气轮机压缩比为 17, 气化压力选择 2.5 MPa 。管式气化采用在水煤浆中直接掺入石灰石, 在气化过程中以 CaS 的形式固硫, 如图5所示, 随着钙硫摩尔比增加, 固硫效率先快速提高后基本保持不变; 硫化氢被石灰石大量吸收导致冷煤气效率逐渐降低。据固硫效率和冷煤气效率均较高的原则, 取钙硫摩尔比为 1.0。当空气反应器温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 管式气化参数及气体成分如表2所示。

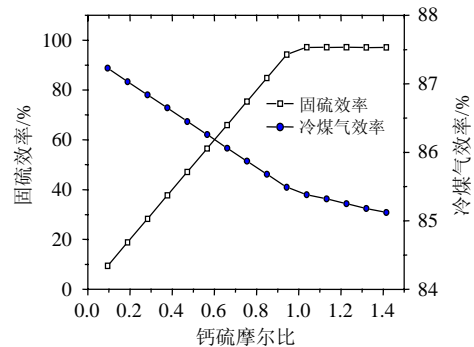


图5 钙硫摩尔比对脱硫及气化效率的影响

Fig. 5 Influence of Ca/S mole ratio on desulfurization and cold gas efficiency

2.2 CLC 反应器参数选取

气化参数选取后, 可以确定满足煤气氧化反应平衡所需最小载氧体的循环质量 $M_{\min}(\text{kg/kg煤})$ 。根据AR内化学反应平衡可以计算将 M_{\min} 完全氧化所需最小空气量 $M_{\text{air}}(\text{kg/kg煤})$ 。经计算, 取载氧体的循环质量流率为 15 kg/kg煤 , 约为 M_{\min} 的 1.25 倍, 即FR中过氧系数 1.25。此时AR过量空气系数为 2.4, 完全可以满足燃烧的氧气需求。空气反应器可设计为循环流化床形式, 考虑保持载氧体的机械稳定性、避免结焦, 空气反应器温度的选择不高于 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, 可避免高温氮氧化物的生成。

2.3 燃气轮机

燃气透平是系统主要做功设备。模拟中, 压气

机绝热效率取 88%，燃气透平绝热效率取 90%。另外，烟气透平绝热效率取 88%。由于载氧体的特性，空气反应器出口烟气温度较低，燃气透平进口温度较低，为提高系统效率，在欠氧空气进入透平前加以补燃。为衡量补燃的程度，定义补燃率：

$$\eta_b = M_{gb} / M_{gT} \quad (1)$$

式中： η_b 为补燃率； M_{gb} 为用于补燃的煤气流量； M_{gT} 为总的煤气流量。

燃气轮机的效率和输出比功随 TIT 的升高而升高。TIT 温度越高，燃气透平所需冷却空气越多。由于燃料反应器出口烟气流相对较小，烟气进入烟气透平前不补燃。定义冷却空气率

$$\eta_c = M_c / M_A \quad (2)$$

式中： η_c 为冷却空气率； M_c 为透平冷却抽取的压缩空气流量； M_A 为压气机入口空气流量。

2.4 余热锅炉

燃气透平和烟气透平的排气温度都较高，选择三压再热余热锅炉，充分利用排气余热。余热锅炉高、中压蒸发器的节点温差为 15℃，低压蒸发器节点温差为 8℃。余热锅炉高压蒸汽参数 12.5 MPa/566℃、中压蒸汽参数 2.62 MPa/566℃、低压蒸汽参数 0.72 MPa/232℃。汽水系统流程如下：给水经泵升压进入低压省煤器，然后分成三股，一股进入低压蒸发器；一股经中压泵进入中压省煤器，经中压蒸发器至中压过热器；一股经高压泵升压后，进入高压省煤器，经高压蒸发器至高压过热器。

2.5 CO₂的分离和压缩

对 CO₂ 的压缩分 4 级进行，每一级都经过压缩、冷却、气液分离 3 个过程，直至 CO₂ 变为液体，可由泵输送。CO₂ 压缩、冷却，循环冷却水入口温度 20℃，最大级压比为 3.5。定义 CO₂ 回收率：

$$\eta_{CO_2} = M_{CS} / M_{CT} \quad (3)$$

式中： η_{CO_2} 为 CO₂ 回收率； M_{CS} 为经压缩分离得到的液态 CO₂ 量； M_{CT} 为系统总的 CO₂ 生成量。

3 结果及讨论

用 ASPEN PLUS 软件对 2 系统进行模拟，比较不同气化方式对联合循环系统性能和 CO₂ 排放特性的影响，同时研究空气反应器温度、燃气透平前补燃温度、载氧体循环质量、压气机压比对系统性能的影响。当空气反应器温度 1000℃，燃气透平前补燃温度 1350℃ 时，管式气化系统效率为 44.71%，CO₂ 排放量为 174 g/(kW·h)；德士古气化系统效率为 42.6%，CO₂ 排放量为 260 g/(kW·h)。

(1) 空气反应器出口温度对系统性能的影响。

图 6、图 7 给出了空气反应器温度对系统性能的影响。维持燃气透平入口温度 1350℃，冷却空气率 12%，空气反应器温度由 1000℃ 升高到 1200℃。由图 6 可知，空气反应器温度升高，出口气体补燃到 1350℃ 所消耗燃料量减少，2 系统补燃率都降低。由于烟气透平入口不补燃，其入口温度低于燃气透平入口温度，补燃率降低，燃气透平流量减少，烟气透平流量增加，进入透平(烟气透平与燃气透平总量)的平均温度降低，做功减少，系统效率降低。温度每升高 50℃，管式气化和德士古气化系统效率分别降低 0.1% 和 0.2%。管式气化利用空气反应器反应热，而德士古气化部分氧化供热，空分制氧将消耗大量额外功，故管式气化系统效率比德士古气化系统的效率高。相同空气反应器温度下，管式气化 CO₂ 比德士古气化系统效率平均高 2.3%。

由图 7 可知，由于补燃率降低，燃气透平流量减少，排入环境的烟气流减少，CO₂ 排放量随着空气反应器温度的升高而减少。对于管式气化，排放量由 1000℃ 的 174 g/(kW·h) 减少到 75 g/(kW·h)，减排效果明显。CO₂ 排放量减少使回收率增加。Texaco 气化比管式气化系统效率低，其单位功率煤耗多，

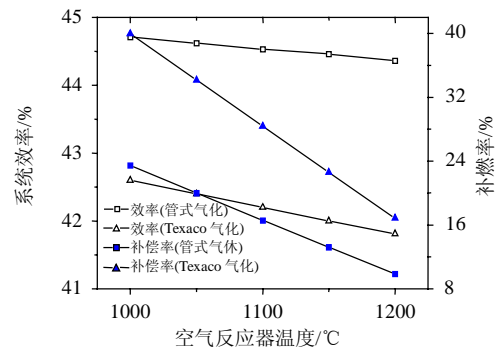


图 6 空气反应器温度对补燃率和系统效率的影响

Fig. 6 Influence of AR temperature on the supplementary firing rate and system efficiency

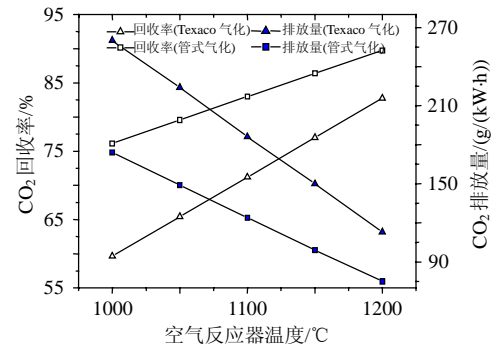


图 7 空气反应器温度对 CO₂ 排放性能的影响

Fig. 7 Influence of AR temperature on the performance of CO₂ emission

故在相同空气反应器温度下，德士古气化系统CO₂排放量比管式气化系统多。

(2) 透平进口前补燃温度对系统性能的影响。

图 8、图 9 给出了透平进口前补燃温度对系统的影响。维持空气反应器温度 1 200 °C。透平进口前补燃温度为 1 300 °C 时，冷却空气率为 10%，温度由 1 300 °C 升高到 1 500 °C，每升高 50 °C，冷却空气率提高 2%。由图 8 可知，透平进口前补燃温度提高，补燃率升高，燃气透平做功显著增加，系统效率提高。由于德士古气化额外热量消耗和空分制氧耗功，因此在相同补燃温度下，管式气化的系统效率较高。由图 9 可知，补燃率升高，燃气透平流量增加，排入环境的烟气增加，CO₂排放量随着透平进口前补燃温度升高而增加，提高透平前补燃率对系统CO₂减排不利。

(3) 载氧体循环质量的影响。

系统其它参数不变，在满足载氧要求的前提下，取循环质量为反应所需最小质量的 1.2~3 倍时模拟对系统性能的影响。管式气化和德士古气化系统净效率变化量约为 0.04 %，氧体循环质量对系统的影响较小。载氧体循环质量的变化只是改变了空气反应器与燃料反应器之间的热量分配，载氧体循

环质量越大，由空气反应器带入燃料反应器的热量越多，燃料反应器出口温度越高，而空气反应器加热空气的能力降低。故载氧体因物理显热变化而传递的热量数量并不多，对系统影响不大。

(4) 压比的影响。

上述模拟结论都是在相同压气机压比(压比 17)条件下进行的，而压比是一个重要参数，对系统的性能影响明显。空气反应器温度 1 200 °C，设定透平进口前补燃温度分别为 1 300 °C(冷却空气率为 10%)、1350 °C(冷却空气率为 12%)和 1 500 °C(冷却空气率为 18%)。图 10、图 11 给出了管式气化和 Texaco 气化时压气机压比对系统效率的影响。在一定透平进口补燃温度下，2 系统效率都随着压比的增加先增加后减少，存在最佳压比，随着温度的升高，最佳压比有提高的趋势。透平进口补燃温度为 1300、1350 和 1500 °C 时，管式气化最佳压比分别为 17、19 和 21，Texaco 气化最佳压比分别为 15、17 和 21。

(5) 与 CLC 蒸汽循环性能的比较。

循环流化床锅炉技术趋于成熟，将 CLC 反应器设计成循环流化床锅炉，通过德士古煤气化和链式燃烧来产生蒸汽，技术上更容易实现。以常规火

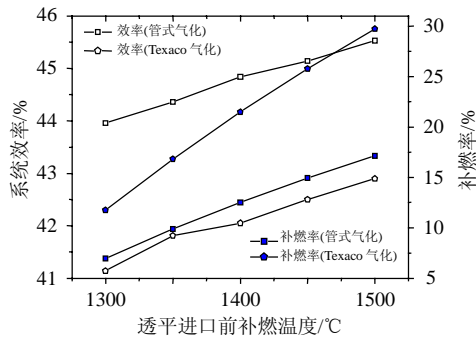


图 8 补燃温度对补燃率和系统效率的影响
Fig. 8 Influence of the supplementary firing temperature on the supplementary firing rate and system efficiency

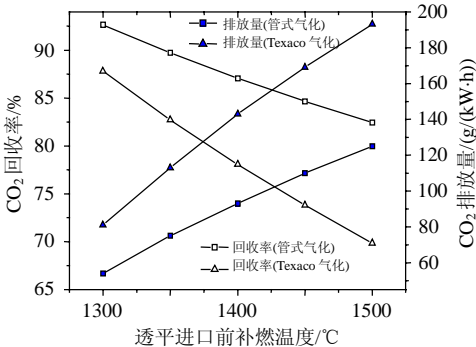


图 9 补燃温度对CO₂排放性能的影响
Fig. 9 Influence of the supplementary firing temperature on the performance of CO₂ emission

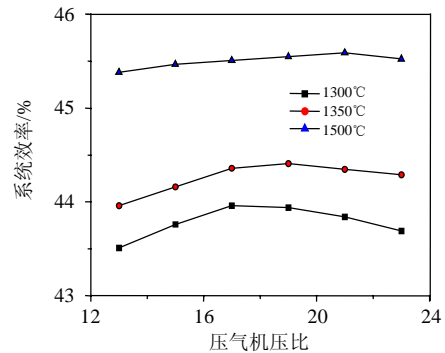


图 10 管式气化压气机压比对系统效率的影响
Fig. 10 Influence of the compressor pressure rate on pipe-typed gasification system efficiency

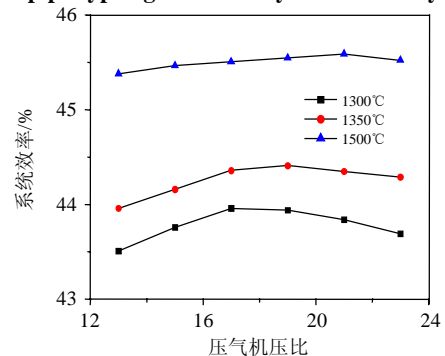


图 11 德士古气化压气机压比对系统效率的影响
Fig. 11 Influence of the compressor pressure rate on Texaco gasification system efficiency

电厂运行参数作参考, 空气反应器出口温度 950 °C, 选择蒸汽参数为 17.24 MPa /541 °C、3.32 MPa /541 °C、0.72 MPa/232 °C, 汽轮机背压 4.9 kPa, 高压缸效率 88%、中压缸效率 94 %、低压缸效率 92%, 空气反应器出口燃气最终排气温度 70 °C, 燃料反应器出口最终排烟气温度 82 °C。模拟结果表明, 煤气化链式燃烧蒸汽循环系统净效率仅为 31.1%, 明显低于管式气化系统效率的 44.5%和Texaco气化系统效率的 42%。CO₂回收率达到 99%, 高于管式气化和Texaco气化CO₂回收率, 系统CO₂的排放近零。

4 结论

将煤气化技术、CLC技术与联合循环技术结合, 可实现煤的高效洁净发电, 经系统模拟计算和分析, 可得到如下结论: 在相同空气反应器温度和透平进口前补燃温度下, 管式气化系统效率高于德士古气化系统效率; 空气反应器温度升高有利于CO₂减排, 其排放量远低于煤粉电厂(超超临界煤粉电厂的排放量为 733 g/(kW·h); 在相同条件下, 管式气化系统CO₂排放量比德士古气化系统低; 透平进口前补燃温度升高, 系统效率提高, 但CO₂排放量随补燃温度的升高而增加, CO₂回收率降低; 载氧体循环质量对系统性能影响较小; 在一定的透平进口温度下, 管式气化系统和德士古气化系统都存在使系统效率最高的最佳压气机压缩比; 常规CLC蒸汽循环发电技术上更可行, 但系统效率与管式气化和德士古气化系统效率比较处于劣势。

参考文献

- [1] Mattisson T, Lyngfelt A. Applications of chemical-looping combustion with capture of CO₂[C]. Second Nordic Mini symposium on Carbon Dioxide Capture and Storage, Göteborg, 2001.
- [2] Mattisson T, Lyngfelt A, Cho P. The use of iron oxide as an oxygen carrier in chemical-looping combustion of methane with inherent separation of CO₂[J]. Fuel, 2001, 80(1-2): 1953-1962.
- [3] Lyngfelt A, Leckner B, Mattisson T. A fluidized-bed combustion process with inherent CO₂ separation: application of chemical-looping combustion[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(11): 3101-3113.
- [4] Anheden M, Svedberg G. Exergy analysis of chemical-looping combustion systems[J]. Energy Convers Mgmt, 1998, 39(16-18): 1967-1980.
- [5] Johansson E, Mattisson T, Lyngfelt A, et al. A 300W laboratory reactor system for chemical-looping combustion with particle circulation[J]. Fuel, 2006, 85 (10-11): 1428-1438.
- [6] Corbella B M, Palacios J M. Titania-supported iron oxide as oxygen carrier for chemical-looping combustion of methane [J]. Fuel, 2007, 86(1-2): 113-122.
- [7] de Diego L F, Labiano F G, Gayón P, et al. Operation of a 10kW chemical-looping combustor during 200h with a CuO-Al₂O₃ oxygen carrier[J]. Fuel, 2007, 86(7-8): 1036-1045.
- [8] Jin H, Okamoto T, Ishida M. Development of a novel chemical-looping combustion: synthesis of a solid looping material of NiO/NiAl₂O₄[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1999, 38(1): 126-132.
- [9] Jin H, Okamoto T, Ishida M. Development of a novel chemical-looping combustion: synthesis of a looping material with a double metal oxide of CoO-NiO[J]. Energy & Fuel, 1998, 12(6): 1272-1277.
- [10] 郑瑛, 王保文, 宋侃, 等. 化学链燃烧技术中新型氧载体 CaSO₄的特性研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(3): 531-533. Zheng Ying, Wang Baowen, Song Kan, et al. The performance research on new oxygen carrier CaSO₄ used in chemical-looping combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(3): 531-533(in Chinese).
- [11] 向文国, 狄藤藤, 肖军, 等. 新型煤气化间接燃烧联合循环[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 170-174. Xiang Wenguo, Di Tengfeng, Xiao Jun, et al. Investigation of a novel gasification chemical looping combustion combined cycle [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 170-174(in Chinese).
- [12] 向文国, 狄藤藤, 肖军, 等. 具有CO₂分离的煤气化化学链置换燃烧初步研究[J]. 东南大学学报, 2005, 35(1): 20-23. Xiang Wenguo, Di Tengfeng, Xiao Jun, et al. Simulation of gasification chemical looping combustion[J]. Journal of Southeast University, 2005, 35(1): 20-23(in Chinese).
- [13] 向文国, 陈盈盈. 铁法链式反应器煤基氢电联产系统性能模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 45-49. Xiang Wenguo, Chen Yingying. Carbon-free co-production of hydrogen and electricity from coal using chemical looping reactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(23): 45-49(in Chinese).
- [14] 段立强, 林汝谋, 蔡睿贤, 等. 整体煤气化联合循环(IGCC)底循环系统变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 26-30. Duan Liqiang, Lin Rumou, Cai Ruixian, et al. Off-design characteristic of bottom cycle system in IGCC[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 26-30(in Chinese).
- [15] 段立强, 徐钢, 林汝谋, 等. IGCC系统热力与环境性能结合的评价准则[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 263-267. Duan Liqiang, Xu Gang, Lin Rumou, et al. New evaluation criterion of IGCC system performance integrating thermodynamics with environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 263-267(in Chinese).
- [16] 邓世敏, 危师让, 林万超. IGCC系统专用单元模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 34-36. Deng Shimin, Wei Shirang, Lin Wanchao. Study on modeling typical parts of IGCC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 34-36(in Chinese).
- [17] 李化治. 制氧技术[M]. 北京: 冶金工业出版社. 2001.
- [18] Zheng L, Furinsky E. Comparison of Shell, BGL and KRW gasifiers as part of IGCC plant computer simulations[J]. Energy Conversion & Management, 2005, 46 (11-12): 1767-1779.

收稿日期: 2007-06-27.

作者简介:

向文国(1964—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事洁净煤燃烧、热力系统优化和控制方面的研究, wxiang@seu.edu.cn;

牟建茂(1982—), 男, 硕士研究生, 从事热力系统模拟和洁净煤燃烧研究;

狄藤藤(1981—), 女, 硕士, 讲师, 从事热力系统模拟和洁净煤燃烧研究。

(编辑 车德竞)