

SOFC/MGT 顶层循环混合发电系统改进

段立强, 和彬彬, 杨勇平

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 提出了典型顶层循环固体氧化物燃料电池/微型燃气轮机(SOFC/MGT)混合发电系统的改进措施: 采用陶瓷质子膜对电池堆阳极反应产物进行分离, 分离出来的氢气经过冷却、加压、预热后引入第二级电池堆的阳极继续进行电化学反应, 并使第二级电池堆的反应产物与分离氢气后的剩余气体进入后燃烧室进行燃烧反应。结合具体的算例对这种 SOFC 两级串联/MGT 混合发电新系统进行了模拟分析, 结果表明: 由于提高了发生电化学反应的氢气量, 减少了发生燃烧反应的氢气量, 使整个系统的烟损失显著降低, 从而使改进后的系统在相同的电池堆燃料利用率与相同的透平进口温度下比基准系统的发电效率提高 2.92 个百分点。该改进措施是提高 SOFC/MGT 混合发电系统的有效方法。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 微型燃气轮机; 混合发电系统; 顶层循环; 陶瓷质子膜

中图分类号: TM911 文献标识码: A

引 言

固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机结合组成的混合发电系统由于具有较高的发电效率, 引起了国内外的广泛关注^[1-5]。顶层循环 SOFC/MGT 混合发电系统, 在获得高的发电效率方面得到了较为一致的认可^[6-7], 成为 SOFC/MGT 混合发电系统典型的流程结构。如何进一步提高顶层循环混合系统的发电效率, 成为当前的研究热点。研究表明: 提高电池堆燃料利用率可以提高混合发电系统的发电效率, 但燃料利用率的提高要受到当前技术水平的限制, 不可能达到很高^[8-9]; 另外, 提高电池堆的工作温度与增加燃料电池单体个数可以提高混合发电系统的效率, 但是两者都受到微燃气轮机透平允许的最高进口烟气温度的限制。本研究针对典型的顶层循环 SOFC/MGT 混合发电系统的特点与问题进行了改进, 引入陶瓷质子膜分离技术, 把燃料电池堆阳

极反应产物中未反应的氢气分离出来引入第二级电池堆继续发生电化学反应, 提出了 SOFC 两级串联/MGT 混合发电新系统。该改进方法可在相同的电池堆燃料利用率及相同的透平进口温度下, 使混合发电系统发电效率得到显著的提高。

1 顶层循环混合发电系统改进方案

1.1 改进方案

为了便于研究问题, 选取了具体的算例进行计算分析。以典型的顶层循环 SOFC/MGT 混合发电系统作为基准系统, 如图 1 所示; 对基准系统改进后的新系统如图 2 所示。

基准系统: 系统选用以甲烷与空气为原料的管式固体氧化物燃料电池。采用内部重整使甲烷反应生成所需的氢气, 空气由压气机压缩、经换热器加热后进入 SOFC 阴极。甲烷气体由压缩机压缩后与余热锅炉产生的水蒸气混合, 经换热器加热后进入 SOFC 阳极。在阳极室甲烷与水蒸气发生重整与置换反应, 产生氢气。空气中的氧在空气极/电解质界面被还原, 氧离子通过电解质向阳极移动。在燃料极, 氧离子与氢气发生电化学反应, 生成水, 放出电子。电子通过外电路返回空气极, 形成回路, 电流通过 DC/AC 换流器转换为交流电。阳极与阴极的产物进入后燃室, 其中可燃成分完成燃烧, 燃气进入透平做功, 排气分为两部分, 一部分进入换热器 1 (HR1) 预热空气后再进入余热锅炉生产水蒸气。另一部分进入换热器 2 (HR2) 预热燃料混合物。

改进后系统: 改进后的混合发电系统如图 2 所示。采用陶瓷质子膜对第一级电池堆阳极反应产物进行分离, 分离出来的氢气先由燃料及水蒸气混合物冷却, 然后进入压气机 3 升压, 压缩后的氢气进入

收稿日期: 2009-07-03 修订日期: 2009-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50660610 50476069); 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2009CB219801); 教育部创新团队支持基金资助项目(R10720)

作者简介: 段立强(1973-), 男, 山西平遥人, 华北电力大学副教授。

换热器 4 (HR4) 被透平出口准备预热燃料混合物的烟气加热, 最后被引入第二级电池堆的阳极; 同时, 第一级电池堆的阴极产物被引入在第二级电池堆中阴极。在第二级电池堆中氢气继续发生电化学反应。第二级电池堆的反应产物与分离膜分离氢气后的其它气体均进入后燃烧室混合燃烧, 后燃室出口燃气进入透平膨胀做功。

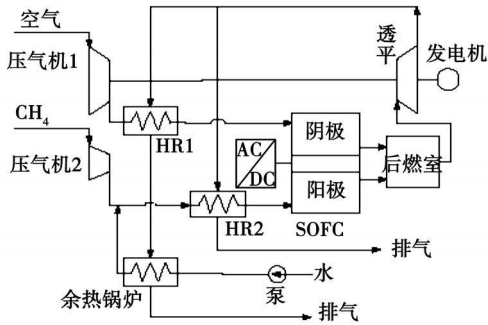


图 1 改进前混合发电系统示意图

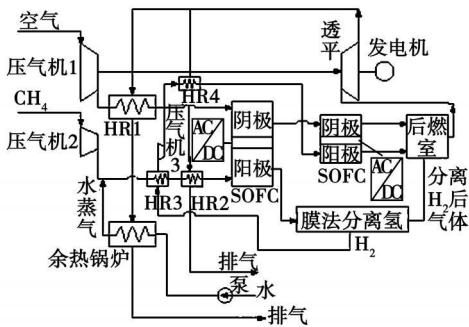


图 2 改进后混合发电系统示意图

1.2 陶瓷质子膜

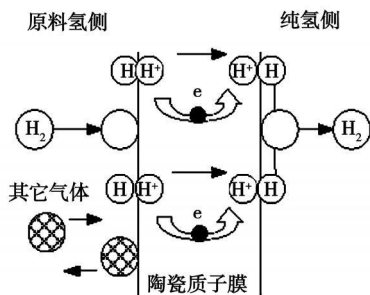


图 3 氢在陶瓷质子膜中分离原理示意图

改进系统中氢气分离采用了陶瓷质子膜技术, 陶瓷质子膜分离混合气体中的氢气的原理如图 3 所示。该分离技术有以下优点^[10~13]: 陶瓷膜材料不贵, 系统简单经济; 陶瓷耐高温, 可以在高温下运行; 陶瓷质子膜为非多孔致密膜, 只有氢气能穿过, 氢气

纯度高, 纯度可达 99.99%; 氢质子与电子跨越膜的驱动力主要是分压梯度与浓度差, 分离氢气的能耗低。

2 数学模型与参数

2.1 混合发电系统数学模型

2.1.1 SOFC 物质平衡

在 SOFC 阳极发生重整与置换反应。

重整反应:



置换反应:



假设反应处于平衡状态, 平衡常数有:

$$K_{pr} = \frac{P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2}^3}{P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CH}_4} P_0^2} \quad (3)$$

$$K_{ps} = \frac{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}}{P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (4)$$

式中: K_{pr} —重整反应平衡常数; K_{ps} —为置换反应平衡常数; P_0 —标准压力。

平衡常数计算式为:

$$\log K_p = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (5)$$

式中, T —SOFC 的工作温度; $A B C D E$ —计算平衡常数需要用到的系数^[14]。

根据反应平衡常数及燃料利用率 U_f 的定义列方程组即可解得反应物的成分。

2.1.2 SOFC 电流密度

$$i = z_e F / N_d A \quad (6)$$

式中: i —电流密度; z —发生电化学反应的 H_2 量; z_e —反应中转移的电子数; F —法拉第常数; N_d —单电池个数; A —单电池的面积。

2.1.3 SOFC 电压

电池的输出电压等于理想可逆电压减去各种极化损失:

$$V = V_{re} - \eta_a - \eta_c - \eta_R \quad (7)$$

式中: V —燃料电池实际输出电压; V_{re} —燃料电池的理想可逆电压; η_a —阳极过电压; η_c —阴极过电压, η_R —欧姆过电压。由于浓差极化很小, 所建模型不考虑浓差极化。

理想可逆电压可由能斯特方程得出:

$$V_{re} = \frac{\Delta G^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^2}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (8)$$

式中: ΔG^0 —标准氢氧反应吉布斯自由能; R —通用气体常数。

阳极过电位可近似认为与电流密度无关,当SOFC工作温度为1073 K时,其值约为150 mV;工作温度为1273 K时其值为50 mV。

求得欧姆过电位为:

$$\eta_c = 0.077 i - 0.077 i^2 + 0.04 i - 0.0003 \quad (9)$$

欧姆过电位计算式为:

$$\eta_R = \delta_e d_c + i \left[\sigma_{ic} \frac{d_c}{\omega_{ic}} + \frac{\pm \lambda}{8} \left(\frac{\sigma_c}{d_c} + \frac{\sigma_a}{d_a} \right) \right] \quad (10)$$

式中: σ_e —电解质阻抗; d_c —电解质厚度; σ_{ic} —联接器阻抗; d_c —联接器厚度; ω_{ic} —联接器宽度; σ_c —阴极阻抗; d_a —阳极厚度; σ_a —阳极阻抗; d_a —阳极厚度; \pm —电池直径。

2.1.4 SOFC发电量 W_{SOFC}

$$W_{SOFC} = n_e F V \eta_{DA} \quad (11)$$

式中: η_{DA} —变流器效率。

2.1.5 SOFC能量平衡

电池堆能量平衡的关系式为:

$$\sum_i \varphi_i q_{out} T_{out,i} + W_{SOFC} = \sum_i \varphi_i q_{in,i} T_{in,a} + \sum_i \varphi_i q_{in,c} T_{in,c} + \sum_k r_k (-\Delta H_k) \quad (12)$$

式中: φ —各组分气体的定压比热容; q_{in} 、 q_{out} —电池堆进口与出口气体组分的质量流率; r_k 、 ΔH_k —电池堆内化学反应的反应速率与焓变; 下标 a 、 c 分别代表阳极、阴极。通过迭代可求出该温度。

2.2 数学模型验证

采用本研究的计算方法对文献[15]中的SOFC/GT混合发电系统进行计算,并将计算结果与文献[15]给出的结果进行对比。对比情况如表1所示,计算结果的误差在合理范围内。

表1 计算结果对比

	文献值	计算值	误差/%
$i/A \cdot cm^{-2}$	215.025	219.675	2.16
V/V	0.731	0.705	-3.56
W_{SOFC}/kW	2.00343	1.97440	-1.45
W_{GT}/kW	1.13499	1.12867	-0.56
$\eta_{FCC}/\%$	68.077	67.310	-1.13

2.3 系统参数

基准系统主要参数:空气压气机(压气机1)的压比3.8效率为78%,空气流量为31.89 mol/s,透平效率为80%;透平排气管压损2%;微燃气轮机轴系机械损失为1%;微燃气轮机电流逆变器效率为98%;换热器压力损失均取3%;燃料压气机(压气机2)压比为3.85效率为78%;电池单体面积260 cm^2 ,联接器厚度0.015 mm ,电解质厚度0.015 mm ,

联接器宽度0.3 mm ,阳极厚度0.01 mm ,阴极厚度0.15 mm ,电池直径1.9 mm ,电池堆压损为5%;SOFC的DC/AC电流变换器的效率为98.5%;后燃室压力损失6%;空气换热器的端差为50 $^{\circ}C$;燃料预热器的传热端差为200 $^{\circ}C$;忽略泵的耗电损失;燃料为 CH_4 。

改进后系统主要参数:选定第二级电池堆的压力损失为5%;燃料利用率为0.85;电池单体的参数与第一级电池堆中相同;膜分离后的氢气压力取为1标准大气压,分离膜出口的氢气在压缩前先被冷却到200 $^{\circ}C$;氢气压气机(压气机3)的压比为3.4效率为70%;混合燃料在换热器3与换热器2中的压力损失分别为1%与2%,烟气在换热器4与换热器2中的压力损失分别为1%与2%,其它换热器的压力损失均为3%;分离氢气后的其它气体在分离膜中压力损失为5%。改进后系统的空气流量、燃料流量保持不变。

研究中,采用G表示燃料的摩尔流量, ξ 表示蒸汽碳比, T_{SOFC} 表示电池堆工作温度, η_{FCC} 表示混合发电系统的发电效率,TII表示透平进口燃气温度。

3 系统改进效果分析

3.1 基准系统效率提高受限情况分析

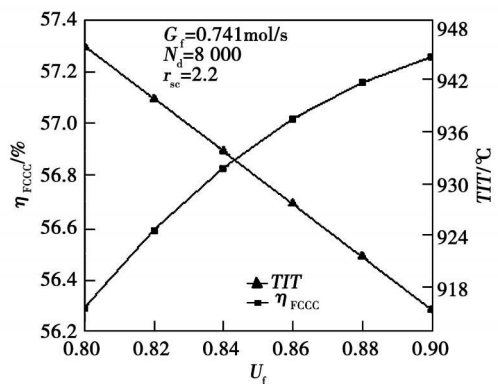


图4 η_{FCC} 与TII随 U_f 的变化

图4给出了基准混合系统的发电效率随燃料电池燃料利用率变化的情况。电池堆电池个体数为8000个,燃料流量为0.741 mol/s,蒸汽碳比为2.2。由图可见,当燃料利用率提高时,混合系统的发电效率是提高了,但提高的速率逐渐减缓。当燃料利用率提高时,燃料电池的功率增大,而微燃气轮机透平功率减小(因为进口温度降低)。由于电池做

功幅度增加更大, 所以整个系统的效率是提高了。整个混合系统效率随燃料利用率提高而提高的特性规律的主要原因是: 当燃料利用率提高时, 有更多的氢气发生了电化学反应; 相反, 燃料利用率降低时, 则有更多的氢气参与低温燃烧反应。研究表明: 电化学反应能量转化效率要比热力循环效率(微燃气轮机透平初温较低)更高。但是燃料利用率是由燃料流速, 阳极结构和温度等诸多因素决定, 受当前技术水平的限制, 不可能达到很高。

当电池堆电池单体个数为 8 000 个, 燃料利用率为 0.85 蒸汽碳比为 2.2 时, 改变电池堆的工作温度, 混合系统发电效率的变化如图 5 所示。发电效率随工作温度的提高而提高, 但是当电池堆工作温度增加时, 透平的进口燃气温度也随之提高。目前, 商业化的微型燃气轮机的透平进口温度一般在 900 °C 左右, 当烟气达到透平进口允许的最高温度时, 相应的电池堆的工作温度就不允许再提高。

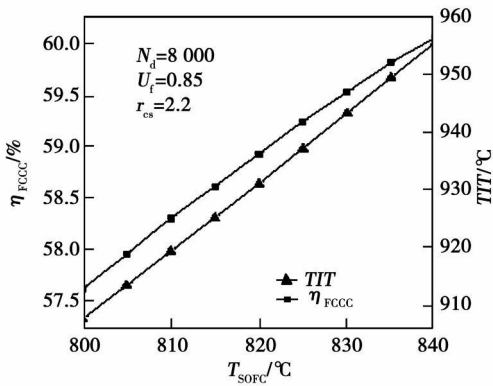


图 5 η_{FCC} 与 T_{II} 随 T_{SORC} 的变化

当保持电池的工作温度为 820 °C, 燃料利用率为 0.85 蒸汽碳比为 2.2 时, 增加电池堆的电池单体个数时, 混合系统的发电效率的变化如图 6 所示。发电效率随单体个数的增加而提高。但是发电效率提高的同时, 透平进口烟气的温度也会随之提高。所以, 当采用增加电池单体个数的办法提高混合系统的发电效率时, 同样要考虑透平进口允许的烟气最高温度的限制。

综上所述, 提高电池堆的燃料利用率、提高电池堆工作温度及增加电池单体个数可以提高混合系统发电效率, 但是燃料利用率受到技术水平的限制, 而后两者受到透平允许的最高烟气进口温度的限制。所以, 混合系统发电效率的进一步提高需要对原系统的流程结构进行改进才能实现。

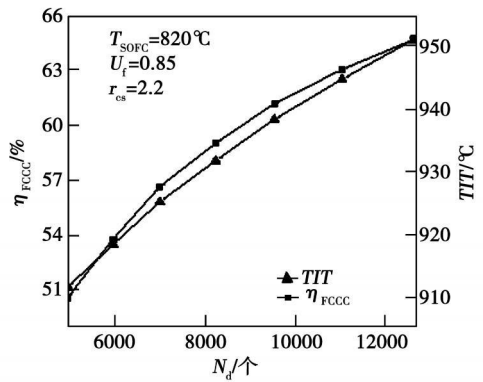


图 6 η_{FCC} 与 T_{II} 随 N_d 的变化

3.2 改进方案的改进效果分析

改进前后系统的主要参数对比如表 2 所示。改进后的新系统: 第二级电池堆发电量为 25.53 kW; 第一级电池堆发电量略有提高; 改进后由于第二级电池堆的压力损失, 透平功率略有减少。此时, 透平出口温度增加, 在保持一定的传热温差时, 进入第一级电池堆的空气与燃料的温度略有提高; 压气机耗功与燃料压缩耗功不变; 氢气压缩的耗功为 3.63 kW。改进后系统发电效率为 61.72%, 比改进前提高了 2.81 个百分点, 增幅为 4.77%。

表 2 混合发电系统改进前后的参数对比

	改进前	改进后
空气流量 / $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$	31.89	31.89
燃料流量 / $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$	0.741	0.741
压气机 1 耗功 / kW	160.07	160.07
压气机 2 耗功 / kW	3.65	3.65
压气机 3 耗功 / kW	—	3.63
透平入口温度 / °C	930	930
透平功率 / kW	270.52	258.32
第一级 FC 单体个数 / 个	8 000	8 000
第一级 FC 工作温度 / °C	820	831.1
第一级 FC 发电功率 / kW	247.02	253.67
第一级 FC 燃料利用率	0.85	0.85
第二级 FC 单体个数 / 个	—	700
第二级 FC 工作温度 / °C	—	893.6
第二级 FC 发电功率 / kW	—	25.53
第二级 FC 燃料利用率	—	0.85
总发电功率 / kW	350.52	367.24
总发电效率 / %	58.91	61.72

此外需要特别说明的是: 改进后的新系统两级电池堆的燃料利用率均为 0.85 与原系统相同, 以

目前的技术水平可以达到;另外,新系统的透平进口烟气温与原系统相同,均为 930 °C。

4 系统改进前后的火用分析对比

4.1 火用分析方法

火用分析方法建立在热力学第一、第二定律两个基本定律基础上,考虑了能量的品质对实际利用的影响,兼顾了能量“量”与“质”,采用火用分析能对实际系统的实际不完善程度提供准确的量度并指明部位。稳定流动工质火用的一般表达式为:

$$E = E_K + E_S + E_P + E_C \tag{13}$$

式中: E_K 、 E_S 、 E_P 、 E_C —动能火用、势能火用、物理火用、化学火用。由于动能火用、势能火用数值较小,所以一般可忽略不计^[16],本研究中忽略动能火用、势能火用,仅考虑工质流物理火用、化学火用的变化,其考虑物理火用与化学火用的总火用计算式为:

$$E_m = [(H - H_0)_m - T_0(S - S_0)_m] + RT_0 \sum y_i \log y_i + \sum y_i E_{ch,i} \tag{14}$$

式中: $(H - H_0)$ 、 $(S - S_0)$ —混合气体摩尔焓和摩尔熵的变化; y_i —各组元气体在混合气体中的摩尔成分; $E_{ch,i}$ —各组元气体 P_0 、 T_0 下的化学火用。

4.2 计算结果及分析

系统改进前后的各环节的火用损失的变化如表 3 所示。由燃料火用与发电功率计算得到:基准系统总火用损失为 266.51 kW,改进后系统的总火用损失为 249.79 kW。分项计算得到总火用损失的误差分别为 1.07% 与 1.24%,在合理范围内,计算结果可用。由表 3 可见,改进后的新系统中后燃室的火用损失大幅减少,这是因为采用陶瓷质子膜使电池堆反应产物中的氢气成分分离出来,进入第二级电池堆发生了电化学反应,这样在后燃室参加燃烧反应的氢气量减少。显然,燃烧温度较低的燃烧反应与电化学反应相比,火用损失变化幅度更大,所以对于整个发电系统而言,发电效率能得到显著提高;改进后的系统中,增加了第二级电池堆、压气机 3、换热器 3、换热器 4 与分离膜等设备,为了便于比较,把新增加的设备与第一级电池堆归为新系统的电池堆系统。图 7 给出了系统改进前后各环节火用损失的柱状对比,能更直观地给出改进前后各环节火用损失的变化情况。由图可看出,新系统中后燃室火用损失降低,而电池堆系统的火用损失增加(新系统中的电池堆系统包括压气机 3、换热器 3、换热器 4 与分离膜、第一级电池堆与第二级电池堆),但是后燃室火用损失降幅明显大于

电池堆系统火用损失的增幅,这是整个系统效率提高的根本原因。

表 3 系统改进前后的火用损失对比 (kW)

火用损失项目	改进前	改进后
压气机 1	22.61	22.61
换热器 1	24.85	25.04
压气机 2	0.57	0.57
燃料混合器	3.36	3.36
换热器 2	3.94	3.23
余热锅炉	15.96	15.90
SOFC 电池堆 1	37.48	28.60
压气机 3	—	0.42
换热器 3	—	2.31
换热器 4	—	0.47
SOFC 电池堆 2	—	2.52
分离膜	—	33.80
后燃室	71.60	21.36
透平	15.38	18.55
轴系机械损失	1.10	0.94
MGT 电流逆变器	2.19	1.85
SOFC 电流转换器	3.76	4.06
余热锅炉排烟	60.10	58.16
燃料预热器排烟	6.46	9.13
总火用损失	269.36	252.88

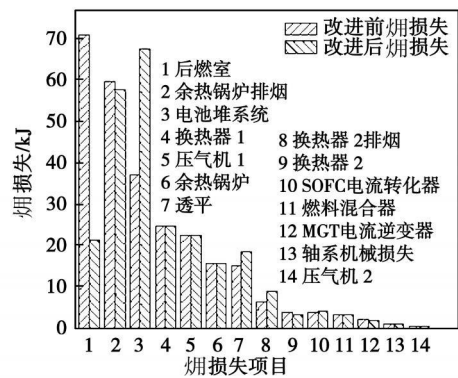


图 7 改进前后系统的火用损失对比

采用陶瓷质子膜分离后,第二级电池堆阳极中燃料为纯氢气,且反应温度高,可以顺利的继续进行电化学反应。改进后新系统中第一级电池堆与第二级电池堆采用的电池堆燃料利用率以目前的技术是可以实现的。本质上讲,改进系统是通过有效反应气体(氢气)的分离技术实现了总的电池堆燃料利用率的提高。并且,改进后系统的后燃室出口烟气

温度保持了原系统的 930 °C, 满足了透平最高进口温度的要求。

5 结 论

对基于典型顶层布置的 SOFC/MGT 混合发电系统的分析研究, 提出了 SOFC 两级串联 /MGT 混合发电新系统, 并结合具体算例进行了计算分析, 主要得出以下结论:

采用陶瓷质子膜对电池堆阳极反应产物进行分离, 使分离出来的氢气经过冷却、加压、预热后引入第二级电池堆的阳极继续进行电化学反应。再使第二级电池堆的反应产物与分离氢气后的剩余气体进入后燃烧室进行燃烧反应, 后燃室燃气进入透平膨胀做功。得到的 SOFC 两级串联 /MGT 混合发电新系统, 在相同的电池堆燃料利用率与相同的透平进口温度下可比基准系统的发电效率提高提高 2.92 个百分点, 增幅达 4.77%。该改进措施是进一步提高 SOFC/MGT 顶层循环混合发电系统的有效方法。

参考文献:

- [1] 翁一武, 苏明, 翁史烈. 先进微型燃气轮机的特点与应用前景[J]. 热能动力工程, 2003, 18(2): 111—115
- [2] 张会生, 刘永文, 苏明, 等. 高温燃料电池—燃气轮机混合发电系统性能分析[J]. 热能动力工程, 2002, 17(2): 118—121
- [3] 陈启梅, 翁一武, 翁史烈, 等. 高温燃料电池与燃气轮机相结合的混合发电系统[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 111—114
- [4] FABIAN MUELLER, ROBERT GAYNOR, ALLIE E AULD, et al. Synergistic integration of a gas turbine and solid oxide fuel cell for improved transient capability[J]. Journal of Power Sources, 2008, 176(1): 229—239.
- [5] JIN SIK YANG, JEONG L SOHN, SUNG TACK RO. Performance characteristics of a solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system with various part load control modes[J]. Journal of Power Sources, 2007, 166(1): 155—164
- [6] 郝洪亮, 张会生, 翁史烈. 底层与顶层 MCFC-MGT 联合循环系统性能分析[J]. 动力工程, 2007, 27(3): 451—457.
- [7] 骆仲决, 张小丹, 方梦祥, 等. 高温燃料电池技术分析及前景展望[J]. 热力发电, 2003(1): 6—9.
- [8] 张健. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机联合循环特性分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
- [9] 王刚, 朱承飞, 薛金花, 等. 固体氧化物燃料电池的效率分析[J]. 电源技术, 2008, 32(6): 365—367.
- [10] 林汝谋, 段立强, 金红光. CO₂ 准零排放的 GCC 系统探索研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(6): 661—664.
- [11] 段立强, 林汝谋, 蔡睿贤, 等. CO₂ 零排放的整体煤气化联合循环系统研究进展[J]. 燃气轮机技术, 2002, 15(3): 31—35.
- [12] 段立强, 杨勇平, 林汝谋. 与 SOFC 整合的 CO₂ 准零排放 GCC 新系统研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 725—728
- [13] DUAN LIQIANG, LIN RUMOU, DENG SHIMIN, et al. A novel GCC system with steam injected H₂/O₂ cycle and CO₂ recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(6): 797—809
- [14] 徐泽亚, 杨晨. 管式 SOFC 数学模型及系统性能分析[J]. 计算机仿真, 2006, 23(6): 224—228
- [15] 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.
- [16] 郝洪亮, 张会生, 翁史烈. SOFC/MGT 联合发电系统的 exergy 分析[J]. 计算机仿真, 2006, 23(11): 221—227

(编辑 辉)

新技术、新工艺

用于天然气供应站的自备涡轮膨胀器

据《Тяжелое машиностроение》2009 年 4 月号报道, МЭИ (莫斯科动力学院) 技术科学博士、教授 Эаринкин АЕ 等人对具有压气机涡轮膨胀器驱动装置的余热利用式燃气轮机进行了计算研究, 结果表明, 与直接和发电机连接的涡轮膨胀器比较, 利用被压缩的天然气生产的附加功率可以增加 2~2.5 倍并且约为主涡轮功率的 3%。

与基本的发电用燃气轮机装置比较, 所研究余热利用式燃气轮机装置的燃料消耗率和热耗率明显的更低, 分别为 120 g/(kW·h) 和 3 750 kJ/(kW·h)。

该余热利用式燃气轮机装置实际上可用于所有的天然气供应站, 并且是自备的和经济的发电装置。

给出了该余热利用式燃气轮机装置的热力系统图、对于利用涡轮膨胀器的两种不同的方案, 功率增量多少取决于天然气在该余热利用式燃气轮机装置内的热耗率, 还取决于随空气压缩机内的压比不同而变化的关系曲线。

(吉桂明 摘译)

test system with the influence of the main controllable parameters during the design and operation of the system on the furnace temperature and fuel combustion efficiency being measured. It has been found that the furnace temperature will rise with an increase of the primary air rate and dilution/mixing mass percentage content and decrease with an increase of the excess air ratio. The fuel combustion efficiency will increase with the primary air rate and dilution/mixing mass percentage content. It will increase first and then decrease with an increase of excess air ratio. When the excess air ratio is set at 1.7, dilution/mixing mass percentage content is 15% and the primary air rate is 75%, the furnace temperature will reach 880 °C with the fuel combustion efficiency being assessed at 97.4%.

Key words: waste incineration; biomass; furnace temperature; combustion efficiency

SOFc/MGT顶层循环混合发电系统改进 = Improvement of a SOFC/MGT (Solid Oxide Fuel Cell/Micro Gas Turbine) Top-level Cycle Hybrid Power Generation System [刊, 汉] / DUAN Li-qiang HE Bin-bin YANG Yong-ping (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3), — 344 ~ 349

The measures for improving the hybrid power generation system of a typical top-level cycle SOFC/MGT (solid oxide fuel cell/micro gas turbine) were proposed and ceramic mesotom membrane was used to separate the reaction product at the positive pole of the cell pile in the first stage. The hydrogen thus separated was introduced on to the positive pole of the cell pile in the second stage to continue the electrochemical reaction after having been cooled, pressurized and preheated. The reaction product from the cell pile in the second stage and the gas remaining after the hydrogen separation were fed into the rear combustor to conduct a combustion reaction. In combination with a specific calculation case, a simulation analysis was performed of the above two-stage tandem power generation system. The research results show that because of an increase of the hydrogen quantity for electrochemical reactions, the hydrogen quantity for the combustion reaction will decrease, making it possible to remarkably lower the energy loss of the whole system and thereby raising the power generation efficiency of the improved system by 2.92 percentage points, which is higher than the reference system at an identical utilization rate of the fuel cell piles and at a same turbine inlet temperature. The foregoing measure is regarded as an effective method for improving the SOFC/MGT hybrid power generation system. Key words: solid oxide fuel cell; micro gas turbine; hybrid power generation system; top-level cycle; ceramic mesotom membrane

乳化燃烧技术中涡流共振乳化器的开发与应用 = Development and Application of an Eddy-current Resonance Emulsifier in Emulsification Combustion Techniques [刊, 汉] / DENG Sheng-xiang LI Xin-hui ZHOU Jie-min (College of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3), — 350 ~ 352

The emulsification combustion process is required to uniformly blend the mutually indissoluble oil and water to prepare a emulsification solution. To solve such problems in the oil/water mixer as discrete and nonuniform mixing, short service life, frequent jamming, high operation cost and heavy maintenance work load etc., the angle and number of the inlet eddy current guiding plates and outlet resonant reeds to be installed were taken into consideration by designing an eddy current resonance agitation mixing device suitable for mutually indissoluble fluids. The device can force the liquids to produce a compulsory compression through an eddy mixing and high frequency resonance and to form fine liquid droplets, thus realizing a uniform mixing of multiple liquids mutually indissoluble. The emulsified oil can be stabilized and kept for more than 3 months. As a mixing device for fuel oil emulsification combustion, the agitator was used for denatured coal tar emulsification combustion. The oil saving rate can be increased from the original 5.25% to 6.75%, effecting an enhancement of more than 22%. The mixing device has a continuous service life of more than 8 years. Key words: eddy resonance; emulsifier; homogeneous mixing; coal tar emulsification combustion