

文章编号:0254-0096(2020)06-0143-07

# 基于生态学准则对MCFC/AR混合系统的优化分析

缪承壮, 黄跃武

(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 基于生态学准则对稳定状态下运行的熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)与吸收式制冷机(AR)组成的混合系统进行优化,考虑系统存在的电化学和热力学不可逆性,导出混合系统等效输出功率、效率以及生态学性能系数(ECOP)的表达式。应用数值模拟分析混合系统性能,得到功率密度、效率以及ECOP分别与电流密度的基本关系,从而确定工作参数的优化区间。结果表明:混合系统运行时的输出功率和效率相比于燃料电池单独运行时有所提升,并且通过生态学优化能得到更为精确的优化工作区间。最后分析燃料电池的工作温度、工作压力以及制冷机内部不可逆性对混合系统生态学性能的影响。

**关键词:** 熔融碳酸盐燃料电池(MCFC); 吸收式制冷; 混合系统; 生态学优化

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

## 0 引言

燃料电池是利用电化学反应将燃料的化学能直接转换为电能的装置,具有绿色、环保、高效等优点,其中熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cell, MCFC)凭借其相对较高的工作温度(约650℃)、更多的燃料选择性,以及可用非贵金属作为催化剂的优势而极具发展潜力和应用前景<sup>[1]</sup>。目前为了提高燃料电池的总体性能,大量研究<sup>[2-11]</sup>集中在如何利用电化学反应的余热方面,通过建立联合系统模型,基于所建模型研究不同工作参数对系统整体性能的影响,进而确定系统工作参数的优化区间。

对于生态学优化设计的研究,文献[12-13]所应用的生态学准则函数为 $E = R_e - \mu T_a \sigma$ (其中 $R_e$ 为功率,  $\mu$ 为制冷率的耗散系数,其物理意义为若热力循环是可逆的,  $T_a$ 为环境温度,  $\sigma$ 为熵产率,  $T_a \sigma$ 的功率将产生 $\mu T_a \sigma$ 的制冷率),然而由于目标函数值 $E$ 可能小于零<sup>[14]</sup>,分析系统性能时需运用热力学理论。对此Ust等<sup>[14]</sup>提出生态学性能系数(ecological coefficient of performance, ECOP)的概念,将ECOP定义为每单位可用能损失率的输出功率,代表系统输出功率与因熵产导致的损失功率的折中,并且ECOP是一个恒大于零的无量纲数。基于

该准则,Wouagfack等<sup>[15]</sup>和Ahmadi等<sup>[16]</sup>对三热源吸收式热泵进行了性能优化,文献[17-19]对四热源吸收式制冷机进行了优化,其研究方法及结论可为实际系统的优化设计提供一定的理论依据。

本文首先建立一个熔融碳酸盐燃料电池和三热源吸收式制冷机(three-heat-source absorption refrigerator, AR)组成的混合系统模型,燃料电池在产生电能的同时,将反应余热用于驱动吸收式制冷机,从而提高能量综合利用率,提升系统整体性能。之后应用生态学准则对混合系统进行生态学优化,得到系统的生态学性能系数、电流密度、功率密度以及效率的优化工作区间。最后研究MCFC的工作温度、工作压力和AR的内部不可逆性对混合系统生态学性能的影响。

## 1 MCFC/AR混合系统

图1所示为MCFC/AR混合系统模型。MCFC输出电功率的同时,产生的热量一部分进入发生器驱动制冷机运行,其余部分因导热和对流漏失到环境中。吸收式制冷机由发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器、节流阀和溶液泵组成,制冷剂吸收MCFC的余热,利用工质相变过程的吸、放热特性获取低温。3个恒定热源,燃料电池、制冷空间以及环境的温度分别为 $T_g$ 、 $T_c$ 、 $T_a$ 。

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51078068)

通信作者: 黄跃武(1972—),男,博士、教授,主要从事热力系统优化及非平衡态热力学方面的研究。2161412@mail.dhu.edu.cn

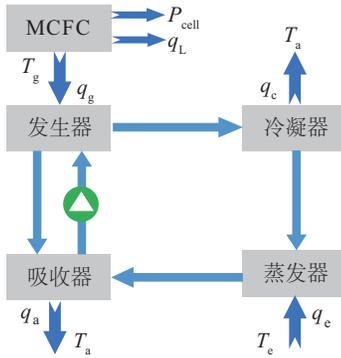


图1 MCFC/AR混合系统示意图

Fig. 1 Schematic of MCFC/AR hybrid system

为简化系统复杂性,本文作以下假设:1)混合系统在稳态条件下运行,热传递遵循牛顿定律<sup>[3-5]</sup>;2)燃料电池运行时的温度和压力保持不变,理论提供足够的  $H_2$  和  $O_2$ ,电化学反应进行完全,并且无内部电流产生;3)生成物水的废热足以将外部反应物加热至反应温度,不考虑回热损失;4)3个外部热源互不干扰,并且制冷机与外部热源持续不断地交换热量;5)吸收器和冷凝器的传热系数及其中的工质流体温度相同<sup>[20]</sup>;6)忽略溶液泵以及压缩燃料和空气所消耗的功率<sup>[21]</sup>。

根据热力学第一定律可得:

$$q_g + q_c - q_a - q_c = 0 \quad (1)$$

$$P_{\text{cell}} + q_L + q_g = -\Delta H \quad (2)$$

式中,  $q_g$  ——从 MCFC 到发生器的传热率;  $q_c$  ——AR 的制冷率;  $q_a$ 、 $q_c$  ——吸收器和冷凝器向周围环境的传热率;  $P_{\text{cell}}$  ——MCFC 实际输出功率;  $q_L$  ——电池热漏失率,  $q_L = A_{c1}(T_g - T_a)$ , 其中  $c_1$  是与热传递的不可逆性以及燃料电池的几何结构相关的综合参数,  $A$  为 MCFC 的反应极板有效面积;  $-\Delta H$  ——反应焓变,表示化学反应单位时间的总能释放量,  $-\Delta H = -jA \cdot \Delta h / (n_e \cdot F)$ , 其中  $j$  为电流密度,  $\Delta h$  为反应摩尔焓变,  $n_e$  为电子数,  $F$  为法拉第常数。

此类三热源制冷系统的最优性能系数  $\varepsilon$  可由不可逆热力学理论得到<sup>[22]</sup>,如式(3)所示。

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \left[ D^2 - 4T_c \left( \frac{1}{(1+B)^2 T_g} - \frac{1 - I_r T_a / T_g}{C q_g} \right) \right]^{0.5} - D \right\} \quad (3)$$

$$B = (\sqrt{b_2} - 1) / (\sqrt{I_r \cdot b_1} + 1) \quad (4)$$

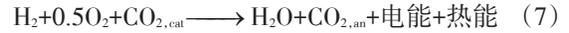
$$C = (1+B)^2 \cdot (1 + \sqrt{I_r \cdot b_1})^2 / (A_R K_g) \quad (5)$$

$$D = 1 + \frac{T_c - I_r B^2 T_a}{(1+B)^2 T_g} + \frac{I_r T_a - T_c}{C \cdot q_g} \quad (6)$$

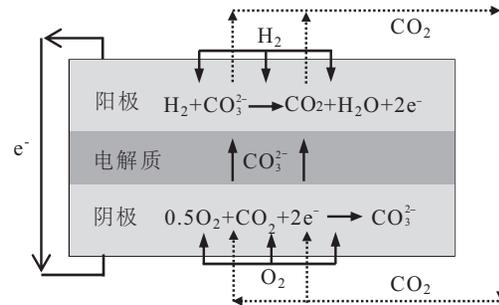
式中,  $I_r$  ——吸收式制冷机的内部不可逆系数;  $b_1$  ——发生器与冷凝器传热系数之比;  $b_2$  ——发生器与蒸发器传热系数之比;  $A_R$  ——制冷机整体传热面积;  $K_g$  ——发生器传热系数。

## 2 MCFC模型

熔融碳酸盐燃料电池的电解质是一种固定在  $LiO-AlO_2$  基体中的碱性碳酸盐,  $Li_2CO_3$  和  $K_2CO_3$  的熔融混合物,  $CO_3^{2-}$  在其中作为电荷载体。阳极通常由镍/铬合金构成,阴极由经锂化的镍氧化物组成<sup>[1]</sup>。图2为一种  $H_2-O_2$  MCFC 的示意图。电化学反应式为:



式中, cat ——阴极; an ——阳极。

图2  $H_2-O_2$  MCFC的示意图Fig. 2 Schematic of  $H_2-O_2$  MCFC

燃料电池在实际运行过程中,由于电化学反应的不可逆性,其实际输出电压 ( $V_{\text{cell}}$ ) 总比理想可逆电压 ( $U$ ) 小。MCFC 主要有三大不可逆损失<sup>[2,21,23]</sup>: 阳极过电势 ( $V_{\text{an}}$ )、阴极过电势 ( $V_{\text{cat}}$ )、欧姆过电势 ( $V_{\text{ohm}}$ ), 分别如式(8)~式(10)所示。

$$V_{\text{an}} = 2.27 \times 10^{-9} j \cdot \exp\left(\frac{6434.93}{T_g}\right) p_{H_2, \text{an}}^{-0.42} p_{O_2, \text{an}}^{-0.17} p_{H_2O, \text{an}}^{-1.0} \quad (8)$$

$$V_{\text{cat}} = 7.505 \times 10^{-10} j \cdot \exp\left(\frac{9297.57}{T_g}\right) p_{O_2, \text{cat}}^{-0.43} p_{CO_2, \text{cat}}^{-0.09} \quad (9)$$

$$V_{\text{ohm}} = 0.5 \times 10^{-4} j \cdot \exp\left[3016 \left(\frac{1}{T_g} - \frac{1}{923}\right)\right] \quad (10)$$

MCFC 理想可逆电动势用 Nernst 方程表示<sup>[23]</sup>:

$$U = \frac{-\Delta g^0}{n_e \cdot F} + \frac{RT_g}{n_e \cdot F} \ln \left[ \frac{p_{H_2, \text{an}} \cdot p_{O_2, \text{cat}}^{0.5} \cdot p_{CO_2, \text{cat}}}{p_{H_2O, \text{an}} \cdot p_{CO_2, \text{an}}} \right] \quad (11)$$

式中,  $\Delta g^0$  ——标准摩尔吉布斯自由能变化量, 本文计算所需的热力学数据均通过美国国家标准与技术研究院的标准参考数据库 69 (NIST Chemistry WebBook, SDR 69) 查得<sup>[24]</sup>;  $R$  ——理想气体常数;  $p_i$  ——反应气体在阴极或阳极的分压力,  $i$  为  $H_2$ 、 $O_2$  或  $H_2O$ 。

由式(8)~式(11)可得, MCFC 实际输出电压为:

$$V_{\text{cell}} = U - V_{\text{an}} - V_{\text{cat}} - V_{\text{ohm}} \quad (12)$$

则 MCFC 的输出功率和效率为：

$$P_{\text{cell}} = j \cdot A \cdot V_{\text{cell}} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{cell}} = \frac{P_{\text{cell}}}{-\Delta H} = \frac{n_e \cdot F \cdot V_{\text{cell}}}{-\Delta h} \quad (14)$$

### 3 混合系统功率、效率和 ECOP

根据式(2)、式(14)可得 MCFC 提供给吸收式制冷系统的热量  $q_g$  为：

$$q_g = -\frac{j \cdot A \cdot \Delta h}{n_e \cdot F} (1 - \eta_{\text{cell}}) - A c l (T_g - T_a) \quad (15)$$

由式(3)以及性能系数与制冷率的关系 ( $\varepsilon = q_c / q_g$ )，并结合文献[4]给出的此类系统等效输出功率与制冷率的关系 ( $P_{\text{ar}} = q_c [1 - T_a / T_c]$ )，可得到在给定热量为  $q_g$  时吸收式制冷系统的等效输出功率  $P_{\text{ar}}$  和效率  $\eta_{\text{ar}}$  分别如式(16)、式(17)所示。

$$P_{\text{ar}} = q_g (T_a / T_c - 1) \cdot \varepsilon \quad (16)$$

$$\eta_{\text{ar}} = (T_a / T_c - 1) \cdot \varepsilon \quad (17)$$

所建立的 MCFC/AR 混合系统输出功率以及效率分别为：

$$P = P_{\text{cell}} + P_{\text{ar}} \quad (18)$$

$$\eta = (P_{\text{cell}} + P_{\text{ar}}) / (-\Delta H) \quad (19)$$

查阅相关文献资料通常有 2 种生态学准则，一是文献[12-13]所应用的  $E$  准则，在引言中已作详细介绍，对本文的 MCFC/AR 混合系统应用  $E$  准则其表达式如式(20)所示；二是文献[14-19]所应用的  $ECOP$  准则，生态学性能系数 ( $ECOP$ ) 由 Ust 等<sup>[14]</sup>提出，定义为每单位可用能损失率的输出功率，也就是输出功率与熵产率的比值，如式(21)所示。

$$E = P_{\text{cell}} + P_{\text{ar}} - (\sigma_{\text{cell}} + \sigma_{\text{ar}}) \cdot T_a \quad (20)$$

$$ECOP = \frac{P_{\text{cell}} + P_{\text{ar}}}{T_a (\sigma_{\text{cell}} + \sigma_{\text{ar}})} \quad (21)$$

$$\sigma_{\text{cell}} = \left( -\frac{\Delta h}{n_e \cdot F} - V_{\text{cell}} \right) \frac{j \cdot A}{T_a} - \frac{q_g}{T_a} + \frac{q_g}{T_g} \quad (22)$$

$$\sigma_{\text{ar}} = \frac{q_a + q_c}{T_a} - \frac{q_g}{T_g} - \frac{q_e}{T_c} \quad (23)$$

式中， $\sigma_{\text{cell}}$ 、 $\sigma_{\text{ar}}$ ——燃料电池与吸收式制冷机的熵产率。

### 4 数值模拟与分析

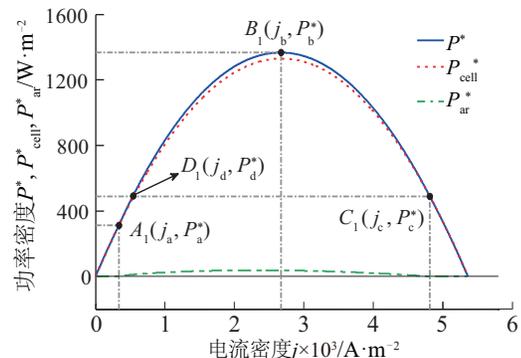
根据所建模型，对 MCFC/AR 混合系统进行数值模拟与分析，所需参数<sup>[18,21,23-24]</sup>见表 1。

表 1 数值模拟所需参数

Table 1 Parameters used in numerical simulation

参数	数值
法拉第常数 $F/C \cdot \text{mol}^{-1}$	96485
电子数 $n_e$	2
理想气体常数 $R/J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	8.314
MCFC 工作温度 $T_g/K$	883
MCFC 工作压力 $p/\text{atm}$	1
阳极气体摩尔分数	0.6 H <sub>2</sub> /0.15 CO <sub>2</sub> /0.25 H <sub>2</sub> O
阴极气体摩尔分数	0.08 O <sub>2</sub> /0.08 CO <sub>2</sub> /0.25 H <sub>2</sub> O
MCFC 极板面积 $A/\text{m}^2$	0.005
制冷温度 $T_c/K$	285
环境温度 $T_a/K$	298
AR 内部不可逆系数 $I_i$	1.1
AR 整体传热面积 $A_R/\text{m}^2$	0.0001
发生器/蒸发器/冷凝器/吸收器传热系数 $/W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$	1163/2326/4650/4650
常数 $c_1/W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$	0.2
$\Delta_g^0, \Delta h / kJ \cdot \text{mol}^{-1}$	-199.013, -247.067

图 3 为混合系统运行时，或燃料电池、制冷机分别单独运行时，其功率密度(图 3a)、效率(图 3b)随电流密度的变化曲线图。 $P^*$ 、 $P_{\text{cell}}^*$ 、 $P_{\text{ar}}^*$ 、 $\eta$ 、 $\eta_{\text{cell}}$ 、 $\eta_{\text{ar}}$  分别表示混合系统、燃料电池以及制冷机的运行时的功率密度和效率，其中功率密度为输出功率与电池极板有效面积的比值。图 3 中  $A_1$  是制冷机开始制冷时的状态点， $B_1$  是混合系统功率密度达到最大时的状态点， $C_1$  是制冷机停止运行时的状态点， $D_1$  是生态学性能系数 ( $ECOP$ ) 达到最大时所对应的功率点。 $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$ 、 $D_2$  分别为功率点  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$  各自对应的效率点。



a. 功率密度

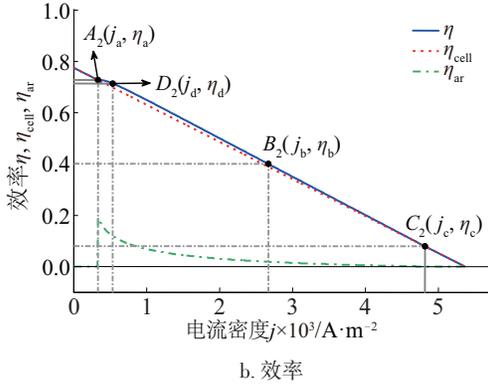


图3 MCFC、AR以及MCFC/AR混合系统的功率密度、效率随电流密度变化曲线  
Fig. 3 Curves of power density and efficiency of MCFC, AR and MCFC/AR hybrid system varying with operating current density

由图3可知,当  $j_a < j < j_c$ , 混合系统的效率和功率密度曲线都位于MCFC单独运行时曲线的上方。数值计算得出MCFC单独运行时最大功率密度为  $1331.0 \text{ W/m}^2$ , 此时电流密度为  $2682 \text{ A/m}^2$ , 效率为  $0.3876$ , 而混合系统运行时最大功率密度  $P_b^* = 1367.5 \text{ W/m}^2$ , 此时  $j_b = 2670 \text{ A/m}^2$ ,  $\eta_b = 0.40$ , 其最大功率密度和相应的效率相较于MCFC单独运行时分别增加  $2.74\%$  和  $3.20\%$ 。当  $j < j_a$  以及  $j > j_c$  时, AR的效率与功率为零, 在图3中表现为在该区域混合系统的效率、功率密度曲线与MCFC单独运行时重合。功率密度在  $j_a < j < j_c$  时先单调递增至最大值  $P_b^*$ , 之后单调递减, 而效率在  $j_a$  后先增加很小一段, 几乎可忽略不计, 之后单调递减。遵循功率相等时效率越大越好的原则, 可得MCFC/AR混合系统的优化区间为:  $j_a < j < j_b$ 、 $P_a^* < P^* < P_b^*$ 、 $\eta_b < \eta < \eta_a$ 。

图4为混合系统正常运行时, 2种生态准则数分别随电流密度的变化曲线。由图4可知, 在运行区间内准则数  $E$  有正有负。数值计算得出, 当  $j > 2648 \text{ A/m}^2$  时,  $E < 0$ , 此时优化分析还需从热力学的角度来解释这种情况。而  $ECOP$  在运行区间内恒大于零, 没有  $E$  准则存在的问题, 所以本文应用生态学准则数  $ECOP$  对混合系统进行优化分析。图中  $D$  点为  $ECOP$  达到最大时的状态点, 随着电流密度的增加,  $ECOP$  先递增至最大值  $E_d$ , 之后单调递减。图5为混合系统运行时的  $ECOP$  与功率密度的关系曲线图。  $A_3$  是AR开始制冷时的状态点,  $D_3$  是  $ECOP$  达到最大时的状态点,  $B_3$  是功率密度达到最大时的状态点。当  $P_a^* < P^* < P_b^*$  时,  $ECOP$  先随

功率密度的增加而增大, 达到最大值  $E_d = 2.95$  (此时  $j_d = 539 \text{ A/m}^2$ ,  $P_d^* = 492.2 \text{ W/m}^2$ ), 之后开始单调递减至  $E_b$ , 在该区间内,  $ECOP$  相等时, 功率应越大越好; 功率相等时,  $ECOP$  应越大越好。所以应用生态学准则, 并结合图3, 对混合系统进一步优化, 可得到生态学优化后的工作区间为:  $E_b < ECOP < E_d$ 、 $j_d < j < j_b$ 、 $P_d^* < P < P_b^*$ 、 $\eta_b < \eta < \eta_d$ 。

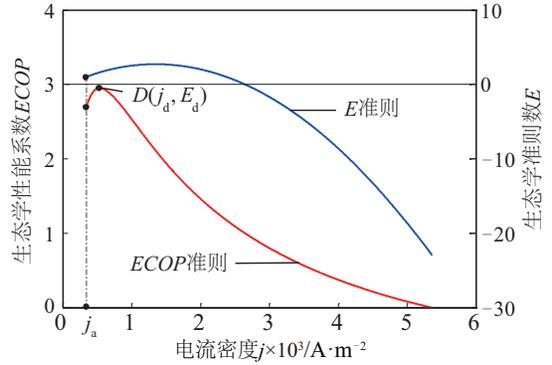


图4 准则数  $ECOP$  和  $E$  随电流密度变化曲线  
Fig. 4 Curves of criterion numbers  $ECOP$  and  $E$  varying with operating current density

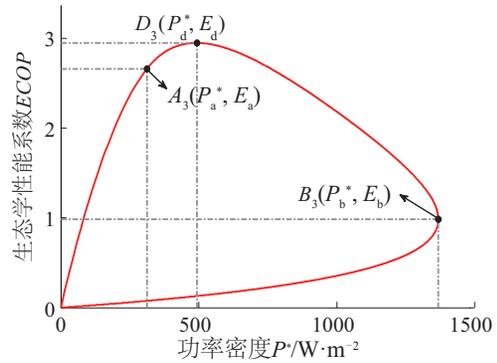


图5 混合系统  $ECOP$  随功率密度变化曲线  
Fig. 5 Curve of  $ECOP$  varying with power density of hybrid system

由图6可知, 燃料电池的工作温度  $T_g$ 、工作压力  $p$  以及制冷机内部不可逆系数  $I_r$  都会对  $ECOP$  造成影响。图6a为  $p = 1 \text{ atm}$ 、 $I_r = 1.1$  时,  $T_g$  的变化对混合系统  $ECOP$  的影响曲线图。由图6a可知, 在优化区间内  $ECOP$  随工作温度的升高而增大, 并且功率密度越大, 工作温度对  $ECOP$  的影响越显著。图6b为  $T_g = 883 \text{ K}$ 、 $I_r = 1.1$  时, 电池工作压力的变化对  $ECOP$  的影响情况。在优化区间内的相同功率密度下, 工作压力越大,  $ECOP$  越大, 并且  $ECOP$  的上限(最大值  $E_d$ ) 随压力的增大而显著增加。图6c为  $T_g = 883 \text{ K}$ 、 $p = 1 \text{ atm}$

时,  $I_r$  的变化对  $ECOP$  的影响情况图。 $I_r$  是考虑到系统运行时工作流体内部存在的摩擦、涡流等不可逆损失而引入的,  $I_r$  越大说明不可逆损失越大, 对系统运行越不利。由图 6c 可知,  $I_r$  越小,  $ECOP$  的上限越大, 在优化区间内  $ECOP$  随  $I_r$  的减小而增大, 并且功率密度越小,  $I_r$  对  $ECOP$  的影响越显著。

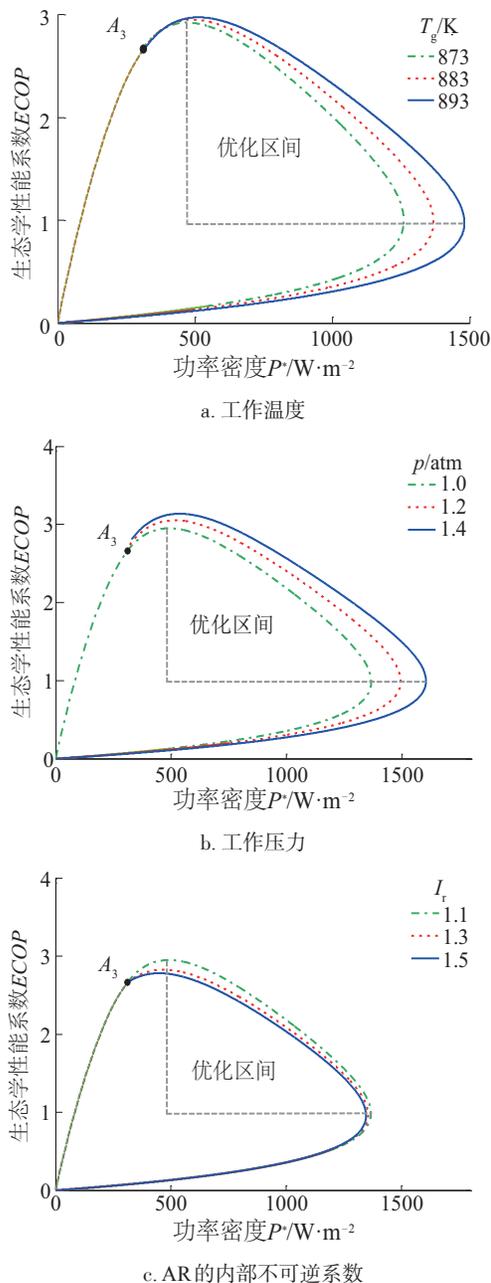


图6 MCFC工作温度、工作压力和AR的内部不可逆系数对混合系统  $ECOP$  的影响

Fig. 6 Effect of operating temperature, operating pressure of MCFC and internal irreversibility parameter of AR on  $ECOP$  of hybrid system

## 5 结论

1) 利用熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)产生的余热驱动吸收式制冷机(AR)能提升系统整体性能, 数值计算得出 MCFC/AR 的混合系统正常运行时的最大输出功率和相应的效率相较于燃料电池单独运行时分别提升了 2.74% 和 3.20%。优化分析得到系统运行的优化工作区间为:  $j_a < j < j_b$ 、 $P_a^* < P^* < P_b^*$ 、 $\eta_b < \eta < \eta_a$ 。

2) 本文应用的生态学准则定义是每单位可用能损失率的输出功率, 基于该准则得到的生态学性能系数 ( $ECOP$ ) 是一个恒大于零的无量纲数。通过对混合系统进行生态学优化, 得到优化的工作区间为  $E_b < ECOP < E_d$ 、 $j_a < j < j_b$ 、 $P_a^* < P < P_b^*$ 、 $\eta_b < \eta < \eta_d$ , 系统在该区间运行时, 系统的输出功率与耗散损失率可实现相对更好的折中。

3) 研究了 MCFC 工作温度、压力和 AR 的内部不可逆性对系统生态学性能的影响。在优化区间内,  $ECOP$  随电池工作温度和压力的升高而增大, 随制冷机内部不可逆性的增大而减小, 并且 MCFC 的工作温度和工作压力越大、AR 的内部不可逆系数越小,  $ECOP$  最大值  $E_d$  越大。

## [参考文献]

- [1] O' HAYRE R, CHA S W, COLELLA W, et al. Fuel cell fundamentals [M]. Third Edition, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016: 280-282.
- [2] AÇIKKALP E. Performance analysis of irreversible molten carbonate fuel cell-braysson heat engine with ecological objective approach [J]. Energy conversion & management, 2017, 132: 432-437.
- [3] YANG P Q, ZHANG H C. Parametric analysis of an irreversible proton exchange membrane fuel cell/absorption refrigerator hybrid system [J]. Energy, 2015, 85: 458-467.
- [4] CHEN X H, WANG Y, ZHOU Y H. Equivalent power output and parametric optimum design of a PEM fuel cell-based hybrid system [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2014, 63(12): 429-433.
- [5] ZHAO P, WANG J F, GAO L, et al. Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell [J]. International journal of hydrogen

- energy, 2012, 37(4): 3382-3391.
- [6] FRAZZICA A, BRIGUGLIO N, SAPIENZA A, et al. Analysis of different heat pumping technologies integrating small scale solid oxide fuel cell system for more efficient building heating systems[J]. International journal of hydrogen energy, 2015, 40(42): 14746-14756.
- [7] MEHRPOOYA M, SAYYAD S, ZONOOUZ M J. Energy, exergy and sensitivity analyses of a hybrid combined cooling, heating and power (CCHP) plant with molten carbonate fuel cell (MCFC) and Stirling engine [J]. Journal of cleaner production, 2017, 148: 283-294.
- [8] ANGELINO G, PALIANO P C D. Organic Rankine cycles (ORCs) for energy recovery from molten carbonate fuel cells[C]//Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, IEEE, 2000: 1400-1409.
- [9] SILVEIRA J L, LEAL E M, RAGONHA L F, Jr. Analysis of a molten carbonate fuel cell: cogeneration to produce electricity and cold water[J]. Energy, 2001, 26(10): 891-904.
- [10] KUCHONTHARA P, BHATTACHARYA S, TSUTSUMI A. Energy recuperation in solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) combined system [J]. Journal of power sources, 2003, 117(1-2): 7-13.
- [11] YAN Z J, LIN G X. Ecological optimization criterion for an irreversible three-heat-source refrigerator [J]. Applied energy, 2000, 66(3): 213-224.
- [12] CHEN J C, CHEN X L, WU C H. Ecological optimization of a multi-stage irreversible combined refrigeration system [J]. Energy conversion & management, 2002, 43(17): 2379-2393.
- [13] MAMAGHANI A H, NAJAFI B, SHIRAZI A, et al. 4E analysis and multi-objective optimization of an integrated MCFC (molten carbonate fuel cell) and ORC (organic Rankine cycle) system [J]. Energy, 2015, 82: 650-663.
- [14] UST Y, SAHIN B, SOGUT O S. Performance analysis and optimization of an irreversible dual-cycle based on an ecological coefficient of performance criterion [J]. Applied energy, 2005, 82(1): 23-39.
- [15] WOUAGFACK P A N, TCHINDA R. The new thermo-ecological performance optimization of an irreversible three-heat-source absorption heat pump [J]. International journal of refrigeration, 2012, 35(1): 79-87.
- [16] AHMADI M H, AHMADI M A, MEHRPOOYA M, et al. Thermo-ecological analysis and optimization performance of an irreversible three-heat-source absorption heat pump [J]. Energy conversion & management, 2015, 90: 175-183.
- [17] UST Y, SAHIN B. Performance optimization of irreversible refrigerators based on a new thermo-ecological criterion [J]. International journal of refrigeration, 2007, 30(3): 527-534.
- [18] WOUAGFACK P A N, TCHINDA R. Performance optimization of three-heat-source irreversible refrigerators based on a new thermo-ecological criterion [J]. International journal of refrigeration, 2011, 34(4): 1008-1015.
- [19] WOUAGFACK P A N, TCHINDA R. Optimal performance of an absorption refrigerator based on maximum *ECOP* [J]. International journal of refrigeration, 2014, 40(4): 404-415.
- [20] CHEN J, Schouten J A. Optimum performance characteristics of an irreversible absorption refrigeration system [J]. Energy conversion & management, 1998, 39(10): 999-007.
- [21] ZHANG H C, LIN G X, CHEN J C. Performance analysis and multi-objective optimization of a new molten carbonate fuel cell system [J]. International journal of hydrogen energy, 2011, 36(6): 4015-4021.
- [22] LIN G X, YAN Z J. The optimal operating temperature of the collector of an irreversible solar-driven refrigerator [J]. Journal of physics D: applied physics, 1999, 32(2): 94-98.
- [23] BROUWER J, JABBARI F, LEAL E M, et al. Analysis of a molten carbonate fuel cell: numerical modeling and experimental validation [J]. Journal of power sources, 2006, 158(1): 213-224.
- [24] National Institute of Standards and Technology. NIST Standard Reference Database Number 69 [DB/OL]. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>, 2017-06-21/2018-04-30.

## OPTIMIZATION ANALYSIS OF MCFC/AR HYBRID SYSTEM BASED ON ECOLOGICAL CRITERION

Miao Chengzhuang, Huang Yuewu

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The optimization of the molten carbonate fuel cell (MCFC) and the absorption refrigerator (AR) hybrid system running in a stable state is carried out based on the ecological criterion. By considering the electrochemical and thermodynamic irreversibility of the system, the numerical expressions for the equivalent power output, the efficiency and the performance coefficient (*ECOP*) of the hybrid system are respectively derived. The performance of the hybrid system is analyzed by numerical simulation, and the basic relationship between the current density and the power density, the efficiency and the *ECOP* are obtained respectively. Then the optimization intervals of the working parameters are determined. The results show that the power output and efficiency of the hybrid system are increased compared to that of the stand-alone MCFC, and that the optimized working intervals is more accurate by ecological optimization. Finally, the influences of the operating temperature, operating pressure of the MCFC and the internal irreversibility of the AR on the ecological performance of the hybrid system are studied.

**Keywords:** molten carbonate fuel cell (MCFC); absorption refrigeration; hybrid system; ecological optimization