

# 固体氧化物燃料电池-斯特林热机混合动力系统的性能优化

廖天军, 杨智敏, 林比宏\*

华侨大学信息科学与工程学院, 厦门 361021

\* E-mail: bhlin@hqu.edu.cn

收稿日期: 2014-03-13; 接受日期: 2014-05-09

国家自然科学基金(编号: 11175148)、福建省自然科学基金(批准号: 2011J01012)、华侨大学引进人才科研启动资金(编号: 09BS510)和华侨大学光学工程特色学科建设基金资助项目

**摘要** 应用电化学、非平衡态热力学和有限时间热力学等理论, 建立包含多种不可逆损失的固体氧化物燃料电池与斯特林热机组合而成的混合动力循环系统理论模型, 导出混合系统的输出功率和效率的表达式, 确定混合系统的最大输出功率和最大效率及其工作在最大输出功率或工作在最大效率时的运行条件, 给出系统的优化工作区域, 详细讨论了热力学循环过程的不可逆性对混合系统优化性能的影响, 探讨了固体氧化物燃料电池与斯特林热机之间的最佳匹配关系. 所得结果可为实际混合动力系统的设计和优化运行提供理论依据.

**关键词**

固体氧化物燃料电池  
斯特林热机  
性能优化  
混合动力系统  
最优运行区域

## 1 引言

随着社会的飞速发展及人类对能源需求的大幅增加, 化石能源等不可再生能源正日益枯竭, 由其所造成的环境污染也日趋严重. 环境问题不仅严重威胁人类和生物的生存空间, 而且也将给子孙后代留下无穷的隐患. 因此包括燃料电池等清洁能源的研发得到了越来越多的关注<sup>[1-7]</sup>. 燃料电池是一种将持续供给的燃料和氧化剂中的化学能连续不断转化为电能的发电装置, 它能产生满足生态环境要求的清洁、高效的电力, 是一种理想的能量转换装置. 虽然燃料电池的发电效率已高于传统的发电方式, 但由于高品质余热的存在, 还有提高发电效率, 增加燃料电池能量利用率的潜力. 因此燃料电池混合动力系

统对新能源的发展和利用具有重要的意义. 近年来, 针对这一问题, 国内外学者做了相关的研究工作<sup>[8-18]</sup>, Chen 等人<sup>[8]</sup>提出了固体氧化物燃料电池(SOFC)-温差热电混合发电系统的理论模型, 并对理想可逆条件下混合系统的性能特性进行了分析和优化, 获得了混合发电系统的最优运行条件; 一些学者构建了 SOFC 与蒸汽涡轮机的耦合系统模型<sup>[10-12]</sup>, 先后从能量角度出发对混合系统的性能进行了相关研究, 发现该耦合系统能够达到相对较高的效率; Rizzoni 等人<sup>[13]</sup>提出了可以在机动车上使用包含 SOFC 和内燃机的混合动力系统实现方案; 而有些学者则提出 SOFC 与吸收式制冷机或者热泵组合的混合系统模型<sup>[14,15]</sup>和 SOFC 与热力学循环(卡诺循环、斯特林循环、朗肯循环、布雷顿循环)组合混合动力系统的理

**引用格式:** 廖天军, 杨智敏, 林比宏. 固体氧化物燃料电池-斯特林热机混合动力系统的性能优化. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 822-832  
Liao T J, Yang Z M, Lin B H. Performance optimization of a solid oxide fuel cell-stirling heat engine hybrid system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 822-832, doi: 10.1360/N092014-00020

论模型<sup>[19-22]</sup>, 以参数分析的方式来了解不同操作条件对指定系统性能的影响。

斯特林循环是热力学重要的循环之一, 它与卡诺循环一样在理论上具有最高的热效率. 因此, 斯特林热机(Stirling Heat Engine, SHE)是完成热功转换的高效装置, 并且它对热源品位要求较低, 使得它适合于用包括太阳能在内的各种品位废热发电<sup>[23-29]</sup>的最理想装置之一. Sanchez 等人<sup>[20]</sup>设计了利用熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)释放的高品质废热驱动 SHE 循环的 MCFC-SHE 混合动力系统, 并利用相关文献所获得的 SHE 的性能参数, 分析了该混合系统的性能. 结果表明动力系统的动态特性对优化系统性能, 确定系统控制方案等都具有重要的意义. 以 SOFC 作为分布式电源供电的小型发电厂, 若同时采用 SHE 回收其高温排气, 能量利用率在理论上可以达到 70%~80%, 这充分体现高温燃料电池高效的特点, 是其他中低温燃料电池不可比拟的. 目前对燃料电池与热力学循环组合的混合动力系统的性能评估与分析, 有些作者以参数分析的方式来了解不同操作条件对指定系统性能的影响<sup>[20]</sup>, 而另一些作者则围绕混合系统的理论循环分析及其结构可行性的模拟研究展开<sup>[19,21]</sup>, 主要应用给定输入热流下的热机效率和输出功率表达式和燃料电池的效率和输出功率表达式, 讨论混合系统的性能, 分析燃料电池的电化学参数对系统性能的影响. 然而, 迄今为止对包含多种不可逆损失的 SOFC-SHE 混合动力系统性能特性的热力学分析以及 SOFC 与 SHE 之间的最佳匹配等问题鲜有报道. 在实际混合动力系统中, 各子系统之间存在有限速率热传递, SOFC 与 SHE 之间的耦合存在能量平衡约束等问题. 在能量平衡约束下, 对混合动力系统的性能分析是重要的. 因此继续开展这些问题的研究, 对新型混合能量转换系统技术发展的非常有益的.

本文将建立一类包含多种不可逆损失的 SOFC-SHE 混合动力系统的热力学循环模型, 应用非平衡态热力学和优化分析等理论, 导出混合系统的重要性能参数的表达式, 以 SOFC 与 SHE 之间的能量平衡条件为约束, 引入拉格朗日函数作为目标函数, 分析混合系统的一般性能特性和优化性能, 确定混合系统工作在混合工作模式时的最大输出功率和最大效率状态下的运行条件, 给出系统的优化工作区域和性能界限, 研究热力学循环过程的不可逆性对

混合动力系统优化性能和性能界限的影响。

## 2 理论模型

SOFC-SHE 混合动力系统主要由 SOFC, 非理想回热器(Regenerator)和 SHE 组成, 其混合系统模型示意图如图 1 所示, 其中,  $T$  为 SOFC 的工作温度;  $T_H$  和  $T_L$  分别为 SHE 高低温热源的温度;  $T_0$  为环境温度. 由于各子系统之间的有限速率热传递, 混合系统各层的温度应满足的关系为:  $T > T_H > T_L > T_0$ . 在 SOFC 子系统中常引入回热器, 利用 SOFC 的高温废气来对进口处的燃料和空气进行预加热, 使反应物的温度从环境温度升高到 SOFC 的工作温度, 从而保证 SOFC 在稳定状态下连续工作. SOFC 的高品质废热经高温端热交换器吸收, 该热交换器作为 SHE 的高温热源, 驱动热机工作, 热机在低温端产生的废热经散热器释放到环境中. 由于 SOFC 的高温废气的温度高, 使用理想热交换器, 当它稳定工作时, 其温度  $T_H$  可视为与 SOFC 的工作温度  $T$  相同, 即  $T_H = T$ . 若热交换器存在热损失, 则  $T_H < T$ .

### 2.1 固体氧化物燃料电池SOFC的输出功率和效率

SOFC 工作时, 在阴极一侧, 氧气被传入的电子所氧化从而产生氧离子, 即  $1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ , 氧离子通过电解质运动到阳极, 并在阳极与氢气进行电化学反应结合生成水、电子和热量, 即阳极反应式为  $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ , 同时向外部电路释放出电子, 其内部电化学反应总反应式为<sup>[8]</sup>

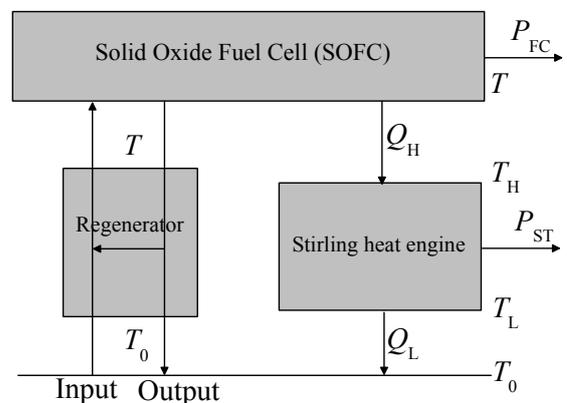
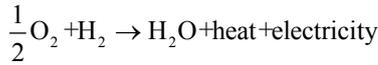


图1 SOFC-SHE 混合动力系统的示意图



根据 SOFC 的热力学模型, SOFC 的效率和输出功率可分别表示为<sup>[8-15]</sup>

$$\eta_{\text{FC}} = \frac{P_{\text{FC}}}{-\Delta\dot{H}} = \frac{P_{\text{FC}}}{-(iA/n_e F)\Delta h} = \frac{n_e U F}{-\Delta h}, \quad (1)$$

$$P_{\text{FC}} = U i A, \quad (2)$$

式中,  $\Delta\dot{H}$  为电化学反应前后的总焓变, 是 SOFC 中总的能量输入,  $F$  为法拉第常数,  $n_e$  为转移电荷数,  $\Delta h$  是反应过程中总摩尔焓变,  $i$  为 SOFC 的电流密度,  $A$  为 SOFC 的接触电极板的表面积,  $U$  为 SOFC 的输出电压。

SOFC 输出电压可通过计算活化、浓差和欧姆过电势这三种主要不可逆损失来计算, 并且可表示为<sup>[8]</sup>

$$U = E - U_{\text{act}} - U_{\text{con}} - U_{\text{ohm}}, \quad (3)$$

式中,  $E$  是 SOFC 理论上能达到的最大电动势,  $U_{\text{act}}$  为活化过电势,  $U_{\text{con}}$  为浓度过电势,  $U_{\text{ohm}}$  为欧姆过电势, 它们分别表示为<sup>[8]</sup>

$$E = -\frac{\Delta g^0(T)}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \ln \left[ \frac{P_{\text{H}_2} \sqrt{P_{\text{O}_2}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right], \quad (4)$$

$$U_{\text{act}} = \frac{2RT}{F} \left[ \sin h^{-1} \left( \frac{i}{2i_{0,a}} \right) + \sin h^{-1} \left( \frac{i}{2i_{0,c}} \right) \right], \quad (5)$$

$$U_{\text{con}} = -\frac{RT}{n_e F} \left[ \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{L,a}} \right) + \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{L,c}} \right) \right], \quad (6)$$

$$U_{\text{ohm}} = \frac{iL_{\text{el}}T}{\sigma_0} \exp \left( \frac{E_{\text{el}}}{RT} \right), \quad (7)$$

式中,  $\Delta g^0(T)$  是在一个标准大气压下的摩尔吉布斯能变,  $R$  为普适气体常数,  $P_{\text{H}_2}$ ,  $P_{\text{O}_2}$  和  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为反应物氢气、氧气、和水各组分分压,  $i_{0,a}$  和  $i_{0,c}$  分别为阳极和阴极的交换电流密度,  $i_{L,a}$  和  $i_{L,c}$  分别为阳极和阴极的极限电流密度,  $L_{\text{el}}$  为电解质厚度,  $E_{\text{el}}$  为离子传输的活化能,  $\sigma_0$  为标准离子电导率。本文所用到的 SOFC 的主要参数来自文献[8], 如表 1 所示。

表 1 SOFC 相关参数<sup>[8]</sup>

参数	数值
SOFC 工作温度, $T$ (K)	873
环境温度, $T_0$ (K)	298.15
氢气和水的分压, $P_{\text{H}_2}$ (atm); $P_{\text{H}_2\text{O}}$ (atm)	0.97; 0.03
氧气和氮气的分压, $P_{\text{O}_2}$ (atm); $P_{\text{N}_2}$ (atm)	0.21; 0.79
电子转移数, $n_e$	2
交换电流密度, $i_{0,a}$ ; $i_{0,c}$ ( $\text{A m}^{-2}$ )	$1.0 \times 10^3$
电解质厚度, $L_{\text{el}}$ ( $\mu\text{m}$ )	20
$\text{O}^{2-}$ 的活化能, $E_{\text{el}}$ ( $\text{J mol}^{-1}$ )	$6.35 \times 10^4$
$\text{O}^{2-}$ 的活化因子, $\sigma_0$ ( $\text{S m}^{-1}$ )	$3.6 \times 10^7$
极限电流密度, $i_{L,a}$ ; $i_{L,c}$ ( $\text{A m}^{-2}$ )	$1.85 \times 10^4$
法拉第常数, $F$ ( $\text{C mol}^{-1}$ )	$9.65 \times 10^4$
普适气体常数, $R$ ( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	8.314
873 K 下的摩尔焓变, $\Delta h$ ( $\text{J mol}^{-1}$ )	-247172
标准状态下的摩尔吉布斯能变, $\Delta g^0$ ( $\text{J mol}^{-1}$ )	-199762
SOFC 电极板表面积, $A$ ( $\text{m}^2$ )	0.7

回热器本身存在一定的固有回热损失以及回热器与环境之间不可避免的存在热漏, 它的这些不可逆热损可表示为<sup>[30]</sup>

$$\dot{q}_r = k_r (1 - \varepsilon) (T - T_0), \quad (8)$$

式中,  $k_r$  为反映热损失的比例系数,  $\varepsilon$  为回热器的效率。当  $\varepsilon = 1$  时为理想回热器。

## 2.2 SHE 的输出功率和效率

SHE 循环由 2 个等温和 2 个等容过程构成, 其温度与熵循环示意图, 如图 2 所示。根据能量守恒定律, 高温端热交换器(高温热源)释放的热量和低温端散热器(低温热源)吸收的热量可分别表示为<sup>[29]</sup>

$$Q_{\text{H}} = Q_1 + Q_0, \quad (9)$$

$$Q_{\text{L}} = Q_2 + Q_0, \quad (10)$$

其中,  $Q_1$  和  $Q_2$  分别是循环工质从高温热源吸收的热量和释放到低温热源的热量,  $Q_0$  是高温热源与低温热源之间的热漏, 它可表示为<sup>[29]</sup>

$$Q_0 = k_0 (T_{\text{H}} - T_{\text{L}}) \tau, \quad (11)$$

其中,  $k_0$  为热漏系数,  $\tau$  为循环周期。

工质每循环从高温热源吸收的热量  $Q_1$  和释放到低温热源的热量  $Q_2$  可分别表示为<sup>[25,29]</sup>

$$Q_1 = nRT_1 \ln \omega + \Delta Q_R, \quad (12)$$

$$Q_2 = nRT_2 \ln \omega + \Delta Q_R, \quad (13)$$

其中,  $\omega = V_1/V_2$ ,  $V_1$  和  $V_2$  分别是等容升温和冷却过程中工质的体积,  $T_1$  和  $T_2$  分别是 2 个等温过程中工质的温度,  $n$  是工质的摩尔数,  $R$  是气体的普适常数,  $\Delta Q_R$  是两个回热过程的固有非理想回热损失, 它可以表示为<sup>[18]</sup>

$$\Delta Q_R = ync_v (T_1 - T_2), \quad (14)$$

其中,  $c_v$  为工质的等容摩尔热容量,  $y$  为非理想回热因子, 当  $y=0$  时, 为理想回热情况, 这时  $\Delta Q_R = 0$ .

假设两等容回热过程的时间与两等温过程的温差成正比, 则回热过程的时间可表示为<sup>[23]</sup>

$$t_{re} = \beta(T_1 - T_2), \quad (15)$$

其中,  $\beta$  是比例系数.

由于 SOFC 废热温度较高, 则工质与高温热源之间存在热传导和热辐射两种热传递方式, 而在放热过程, 由于在放热过程中工质的温度较低, 所以工质

与低温热源的传热一般只有热传导一种传热方式. 假设工质与高温热源之间的两种传热分别服从牛顿线性传热定律和辐射定律, 而与低温热源之间的传热服从牛顿线性传热定律时, 则工质从高温热源吸收的热量  $Q_1$  和释放到低温热源的热量  $Q_2$  可分别表示为<sup>[29]</sup>

$$Q_1 = [h_{HC}(T_H - T_1) + h_{HR}(T_H^4 - T_1^4)]t_1, \quad (16)$$

$$Q_2 = h_{LC}(T_2 - T_L)t_2, \quad (17)$$

其中,  $h_{HC}$  和  $h_{HR}$  分别为工质与高温端热源之间的热传导系数和辐射热导系数,  $h_{LC}$  为工质与低温热源之间的热传导系数,  $t_1$  和  $t_2$  分别为相应的传热时间.

利用(9)~(17)式, 循环周期  $\tau$  可表示为<sup>[29]</sup>

$$\begin{aligned} \tau &= t_1 + t_2 + t_{re} \\ &= \frac{nRT_1 \ln \omega + ync_v (T_1 - T_2)}{h_{HC}(T_H - T_1) + h_{HR}(T_H^4 - T_1^4)} \\ &\quad + \frac{nRT_2 \ln \omega + ync_v (T_1 - T_2)}{h_{LC}(T_2 - T_L)} \\ &\quad + \beta(T_1 - T_2). \end{aligned} \quad (18)$$

根据能量守恒定律, 对于每一个循环, 满足以下能量平衡方程:

$$(-\Delta \dot{H} - P_{FC} - \dot{q}_r)\tau = Q_H. \quad (19)$$

联立(1), (8)~(12), (14), (18)和(19)式可得如下约束方程:

$$\begin{aligned} &[-(iA/n_e F)\Delta h - UiA - k_0(T_H - T_L) - k_r(1 - \varepsilon)(T - T_0)]\tau \\ &- nRT_1 \ln \omega - ync_v (T_1 - T_2) = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

根据以上循环模型, SHE 的功率和效率可分别表示为

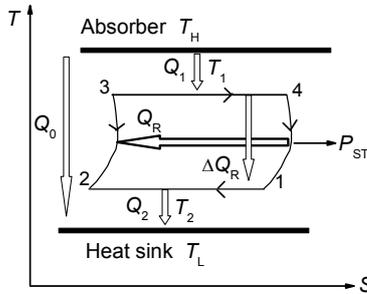


图2 SHE 温度与熵循环示意图

$$P_{ST} = \frac{W}{\tau} = \frac{Q_H - Q_L}{\tau} = \frac{(T_1 - xT_1)}{\frac{T_1 + a(T_1 - xT_1)}{h_{HC}(T_H - T_1) + h_{HR}(T_H^4 - T_1^4)} + \frac{xT_1 + a(T_1 - xT_1)}{h_{LC}(xT_1 - T_L)} + b(T_1 - xT_1)}, \quad (21)$$

$$\eta_{ST} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{(T_1 - xT_1)}{T_1 + a(T_1 - xT_1) + [k_0(T_H - T_L)] \left[ \frac{T_1 + a(T_1 - xT_1)}{h_{HC}(T_H - T_1) + h_{HR}(T_H^4 - T_1^4)} + \frac{xT_1 + a(T_1 - xT_1)}{h_{LC}(xT_1 - T_L)} + b(T_1 - xT_1) \right]}, \quad (22)$$

其中

$$a = \frac{yC_v}{R \ln \omega}, \quad b = \frac{\beta}{nR \ln \omega}, \quad x = \frac{T_2}{T_1}.$$

根据 SOFC 和 SHE 的热力学模型及能量平衡约束方程, 可以分析混合系统的性能特性及其优化性. 在混合系统的性能分析中, SHE 相关参数的取值如下<sup>[29]</sup>:  $h_{HR} = 4 \times 10^{-8} \text{ W K}^{-4}$ ,  $h_{HC} = h_{LC} = 200 \text{ W K}^{-1}$ ,

$$\omega = 2, \quad c_v = 15 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}, \quad n = 1 \text{ mol}, \quad T_L = 320 \text{ K}, \quad \beta = 2.0 \times 10^{-5} \text{ s K}^{-1}.$$

### 3 混合动力系统的性能特性和优化判据

利用(1)和(21)式, 混合动力系统的功率和效率可分别表示为

$$P = P_{FC} + P_{ST} = UiA + \frac{(1-x)}{\frac{1+a(1-x)}{h_{HC}(T_H - T_1) + h_{HR}(T_H^4 - T_1^4)} + \frac{x+a(1-x)}{h_{LC}(xT_1 - T_L)} + b(1-x)}, \quad (23)$$

$$\eta = \frac{P_{FC} + P_{ST}}{-\Delta \dot{H}} = \frac{1}{-(iA/n_e F) \Delta h} \left[ UiA + \frac{(1-x)}{\frac{1+a(1-x)}{h_{HC}(T_H - T_1) + h_{HR}(T_H^4 - T_1^4)} + \frac{x+a(1-x)}{h_{LC}(xT_1 - T_L)} + b(1-x)} \right]. \quad (24)$$

为了对混合系统的性能进行优化, 引入如下拉格朗日函数作为目标函数:

$$L(T_1, x, \lambda) = P - \lambda \varphi(T_1, x), \quad (25)$$

其中,  $\lambda$  为拉格朗日乘子,  $\varphi(T_1, x)$  是由约束方程(20)表征的一个函数:

$$\varphi(T_1, x) = \left[ (iA/n_e F) \Delta h - (E - U_{act} - U_{con} - U_{ohm}) iA - k_0 (T_H - T_L) \right] \tau - nRT_1 \ln \omega - nyc_v (T_1 - xT_1). \quad (26)$$

基于方程(25)和(26), 利用拉格朗日乘子法对满足能量平衡约束方程的混合系统的性能进行优化分析, 对  $T_1$  和  $x$  分别对拉格朗日函数求偏导数并令偏导数为零, 可得以下 2 个偏微分方程:

$$\partial L / \partial T_1 = 0, \quad (27)$$

$$\partial L / \partial x = 0. \quad (28)$$

对于不同的 SOFC 电流密度  $i$  值和给定的其它参数值, 联立(20), (27)和(28)并利用数值求解, 可求出不同的  $T_{1opt}$  和  $x_{opt}$ , 将求得的  $T_{1opt}$  和  $x_{opt}$  带入(23)和(24)式可求出混合系统的极大输出功率  $P_{max}$  和相应的优化效率  $\eta_{opt}$ . 例如选取  $T = T_H = 873 \text{ K}$ ,  $k_r = 5 \text{ W K}^{-1}$ ,  $k_0 = 2.5 \text{ W K}^{-1}$ ,  $y = 0.1$  和  $\varepsilon = 1$ , 利用式(2), (3)~(7), (20), (22), (24), (27)和(28)及表 1 数据可绘制出混合系

统的优化效率、SOFC 和 SHE 的效率随 SOFC 电流密度变化的关系曲线, 如图 3 所示, 其中,  $\eta_{opt,max}$  是混合系统的最大优化效率,  $i_y$  和  $i_c$  分别是系统处于最大优化效率时的电流密度和 SHE 开始工作时的最小电流密度. 从图 3 可以看出, 当 SOFC 的电流密度  $i$  在  $0 \sim i_c$  之间时, SHE 的效率等于零, 即没有功输出, 混合动力系统没有工作在混合工作模式, 而处于 SOFC 单一模块工作状态. 在这种工作模式, 虽然效率较高, 但电流密度和输出功率都较小, 这表明该发电模式的带负载能力弱, 电流区间  $0 \sim i_c$  不是 SOFC 的理想工作区间, 它在实际工作时其电流密度要尽可能大于  $i_c$  以获得较大输出功率; 从图 3 还可以看出, 当 SOFC 的电流密度  $i$  大于  $i_c$  时, 混合动力系统工作在混合工作模式, SOFC 的效率随 SOFC 电流密度的增加而单调递减, 同时 SHE 的效率则随 SOFC 电流密度的增加而先增加后减小, 这导致混合动力系统工作于混合工作模式时的优化效率  $\eta_{opt}$  随 SOFC 电流密度的变化不是单调的关系, 而是存在最大值  $\eta_{opt,max}$ . 这表明存在某一最佳的电流密度  $i_y$  值, 使得混合动力系统混合工作模式的效率达到最大. 虽然混合工作模式的最大效率  $\eta_{opt,max}$  低于单一燃料电池工作模式时低电流密度下的效率, 但混合动力系统的输出功率比单一燃料电池工作模式提高了 50%左右, 同时

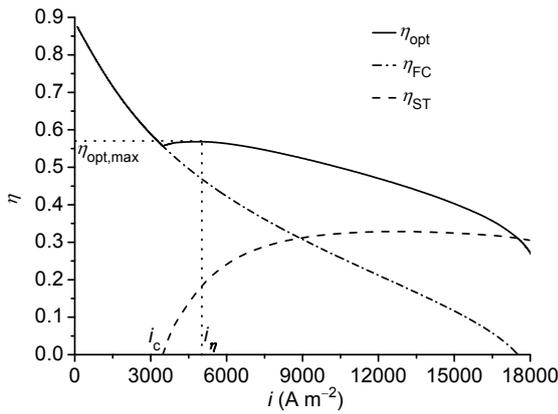


图3 混合系统的优化效率、SOFC 和 SHE 的效率随 SOFC 电流密度变化的关系曲线

其带负载能力比单一燃料电池工作模式时强。

同样地, 利用(1), (3)~(7), (20), (21), (24), (27)和(28)式及表1数据和SHE相关参数, 可以绘制出混合系统的极大输出功率、SOFC和SHE的功率随SOFC电流密度变化的关系曲线, 如图4所示, 其中, 相关参数取值与图3相同,  $(P_{\max})_{\max}$  是混合系统的最大输出功率, 而  $i_p$  是混合系统在最大输出功率  $(P_{\max})_{\max}$  时所对应的SOFC的最佳电流密度. 从图4可以看出, SHE的功率随SOFC电流密度的增加而单调增加, SOFC的输出功率则随SOFC电流密度的增加而先增加后减小, 存在最大输出功率. 这一点与效率的关系正好相反. 同样, 混合系统的极大输出功率随SOFC电流密度变化先增后减, 在某一给定电流密度下, 混合系统极大输出功率达最大值  $(P_{\max})_{\max}$ . 这表明  $i_\eta$ ,  $i_p$ ,  $\eta_{\text{opt,max}}$  和  $(P_{\max})_{\max}$  是混合功率系统4个重要性能参数, 通过有效控制SOFC的电流密度, 可使混合功率系统处于最佳运行状态. 从图4还可以看出, 混合系统的性能明显优于单一SOFC工作模式时的性能, 这表明SOFC的燃料得到了更有效地利用, 并且可输出更大的电流密度和功率. 此外, 图4也显示混合系统工作于最大输出功率时的电流密度大于SOFC的工作于最大输出功率时的电流密度. 这表明工作于最优运行状态的混合系统带负载能力明显优于单一SOFC工作模式.

此外, 需要指出的是, 当SOFC在  $i < i_c$  区域工作时, 混合系统仅工作于SOFC单一工作模式. 从图3和4可以看出, 虽然在此区域SOFC可获得较高的效

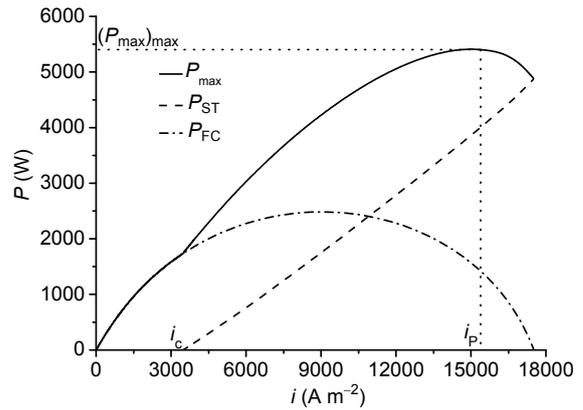


图4 混合系统的最大输出功率、SOFC 和 SHE 的功率随 SOFC 电流密度变化的关系曲线

率, 但SOFC的输出功率和电流都较小, 其带负载能力较差, 可见该区域不是SOFC的合理工作区域; 而当SOFC在  $i > i_c$  区域工作时, 混合功率系统工作于混合工作模式, 此时混合系统的功率和效率都比单一SOFC的功率和效率大, 而且SOFC的带负载能力强, 因此,  $i > i_c$  是混合动力系统的合理运行区域. 从图3和4还可以看出系统功率和效率两者随SOFC电流密度变化趋势不一致, 这是因为受SOFC和SHE之间耦合的能量平衡约束, 造成SHE的功率和效率随SOFC电流密度变化趋势与SOFC不相一致所致. 在混合系统效率大时, 其输出功率较小, 而混合系统输出功率大时, 其效率则较小. 因此, 混合动力系统运行于混合工作模式时应该合理地选取SOFC电流密度值以兼顾输出功率和效率.

图5~7给出了不同参数  $k_0$ ,  $y$  和  $\varepsilon$  下, 混合动力系统的优化效率随极大输出功率变化的关系曲线, 曲线的相关参数取值与图3相同. 从图5可以看出, 优化效率随最大输出功率变化的关系曲线的负斜率区域是混合系统的合理工作区域, 因为在该区域, 效率随输出功率的增大而减小, 而在曲线的正斜率区域, 效率随输出功率的减小而减小. 因此, 结合图3和4中的曲线, 我们可以获得混合动力系统在混合工作模式时的电流密度、极大输出功率和优化效率的最佳工作区间分别为

$$i_\eta \leq i \leq i_p, \tag{29}$$

$$P_{\max,\eta} \leq P_{\max} \leq (P_{\max})_{\max}, \tag{30}$$

$$\eta_{opt,P} \leq \eta_{opt} \leq \eta_{opt,max} \quad (31)$$

可见, 系统最大效率下的输出功率  $P_{max,\eta}$  和最大输出功率下的效率  $\eta_{opt,P}$  也是混合动力系统重要的优化性能参数。

从图 5~7 中的曲线可清楚看出, SHE 高温热源与环境之间的热漏、非理想回热因子和 SOFC 子系统中的回热器的回热效率对混合动力系统性能特性及优化性能的影响是明显的. 由图 5 可见, 热漏系数  $k_0$  越大, 混合动力系统的最大输出功率和最大效率越小, 因此, 在混合系统的设计时, 要尽可能地减小 SHE 的高温热源与环境之间的热漏, 以提高系统的性能. 而从图 6 可以看出, SHE 的非理想回热因子  $y$  对混合动力系统优化性能的影响也较大, 混合系统的最大

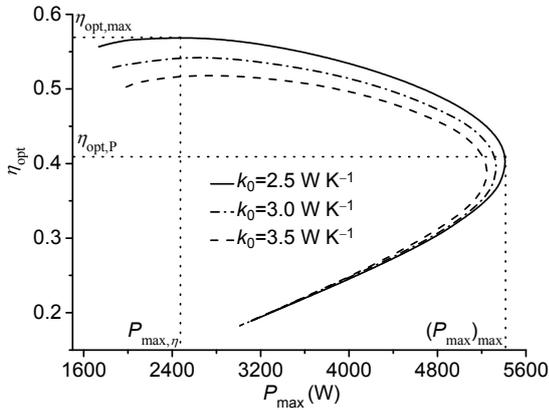


图 5 不同  $k_0$  下, 混合系统的优化效率随最大输出功率变化的关系曲线

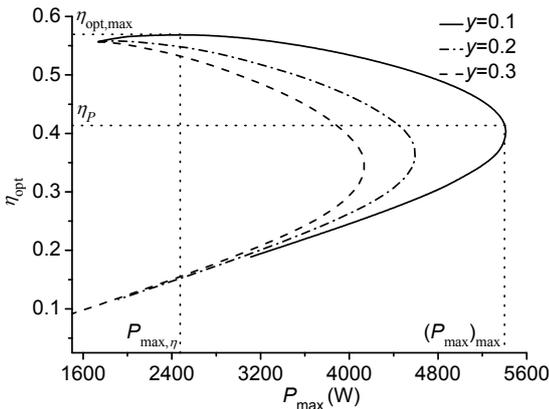


图 6 不同  $y$  下, 混合系统的优化效率随最大输出功率变化的关系曲线

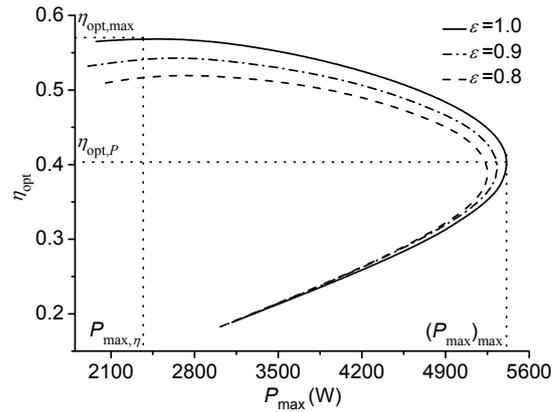


图 7 不同  $\epsilon$  下, 混合系统的优化效率随最大输出功率变化的关系曲线

输出功率和最大功率下的效率随  $y$  的增大迅速减小. 所以, 在实际混合动力系统运行中, 要尽可能选择高效的回热器. 图 7 的曲线表明, SOFC 电池子系统中, 回热器的回热效率越高, 则混合动力系统的性能越好, 最大输出功率和最大效率越大. 若使用理想回热器, 则系统性能可达到最佳状态.

利用(3)~(7)式, (20), (27)和(28)及表 1 数据和 SHE 相关参数, 可绘制出不同  $k_0$ ,  $y$  和  $\epsilon$  下, 斯特林循环的工质在两等温过程温度之比的优化值  $x_{opt}$  随 SOFC 的电流密度变化的关系曲线, 如图 8~10 所示, 其中, 曲线的相关参数取值与图 3 相同. 从图 8~10 可以看出  $x_{opt}$  随 SOFC 电流密度的增加而单调增加,  $k_0$  和  $y$  越小,  $x_{opt}$  越大, 而  $\epsilon$  越大,  $x_{opt}$  越大. 因此, 由(29)式可以确定  $x_{opt}$  的优化区间为

$$x_{opt,\eta} \leq x \leq x_{opt,P} \quad (32)$$

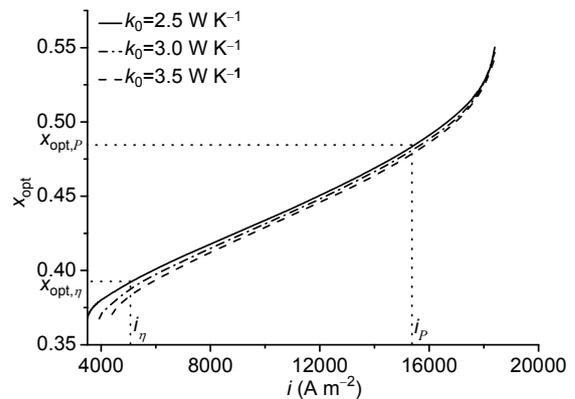


图 8 不同  $k_0$  下,  $x_{opt}$  随 SOFC 电流密度变化的关系曲线

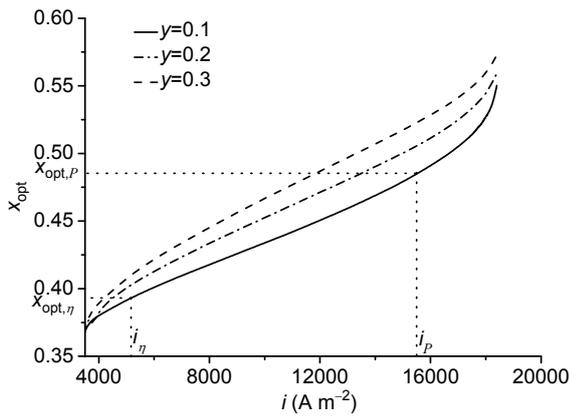


图9 不同  $y$  下,  $x_{opt}$  随 SOFC 电流密度变化的关系曲线

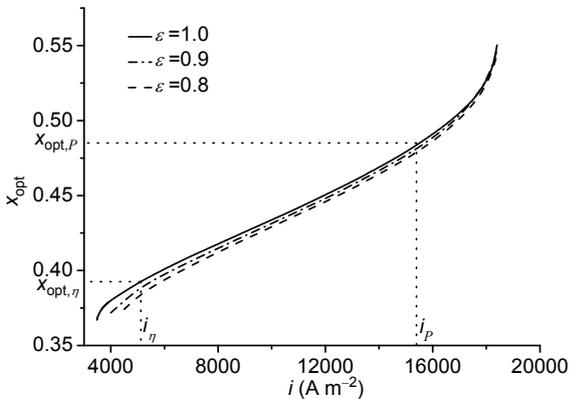


图10 不同  $\epsilon$  下,  $x_{opt}$  随 SOFC 电流密度变化的关系曲线

值得注意的是,对于不同的 SOFC 工作温度,混合系统最大输出功率和最大优化效率值将是不同的.利用图 3 和 4 的数据,可以绘制出混合系统最大输出功率和最大优化效率的值随 SOFC 工作温度变化的关系曲线,如图 11 所示,其中  $P_M$  是系统在给定条件下最大输出功率的最高值,  $\eta_{opt,max,P}$  是混合系统最高输出功率所对应的效率.从图 7 可以看出混合系统的最大输出功率不是 SOFC 工作温度的单调函数,对于 SOFC 的某一优化工作温度  $T_P$ ,混合系统的最大输出功率达到最高值  $P_M$ .从图 7 中还可以看出混合系统的最大优化效率的  $\eta_{opt,max}$  随 SOFC 温度的增加而单调递减.显然,SOFC 的优化工作温度  $T$  应满足

$$T \leq T_P. \quad (33)$$

因此, (29)~(33)式可以作为固体氧化物燃料电池

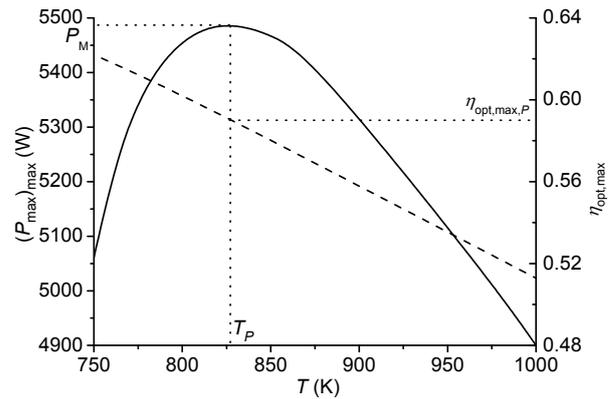


图11 混合系统输出最大功率的最大值和优化效率的最大值随 SOFC 温度变化的关系曲线

SOFC-SHE 混合动力系统优化运行的重要判据.

#### 4 结论

本文建立了一类包含多种不可逆损失的 SOFC-SHE 的混合动力系统循环模型,基于电化学、非平衡态热力学理论和有限时间热力学等理论,导出了混合动力系统的输出功率和效率的表达式.应用 SOFC 与 SHE 之间的能量平衡方程,获得了混合动力系统工作于混合模式所需的燃料电池的最小电流密度,当燃料电池的电流密度小于最小电流密度时,只有燃料电池在工作而 SHE 不工作,虽然在这一工作模式下,燃料电池的效率比燃料电池与 SHE 混合工作模式时的最大效率高,但其输出功率和电流密度都较低,在实用应用中不太理想.本文以 SOFC 与 SHE 之间的能量平衡方程为约束,应用拉格朗日乘数法,通过数值计算,研究了混合系统的性能特性并从热力学的角度对其性能进行了优化,详细分析了混合系统循环中的一些不可因素、电流密度和工作温度对混合动力系统性能及其优化性能的影响,从而确定了一些诸如输出功率、效率、SOFC 的工作温度和电流密度、SHE 两等温过程温度优化比值的优化区域.结果表明,应用该混合系统,可提高能量转换效率,实现能源的梯级利用.本文的方法可以很容易地扩展到其它燃料电池的混合发电系统当中,并以此来发展便于在合理的电流密度及温度范围内优化选取燃料电池参数以及符合燃料电池混合发电系统最佳能源管理战略的不可逆混合动力模型.

## 符号说明

$A$ , SOFC 的接触电极板的表面积( $\text{m}^2$ )	$P_{\text{FC}}$ , SOFC 输出功率(W)
$c_v$ , SHE 工质的等容摩尔热容量( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$P_{\text{ST}}$ , SHE 输出功率(W)
$\varepsilon$ , SOFC 的回热器效率	$P$ , 系统总输出功率(W)
$E$ , SOFC 理论上能达到的最大电动势(V)	$P_{\text{max}}$ , 系统极大输出功率(W)
$E_{\text{el}}$ , $\text{O}^{2-}$ 的活化能( $\text{J mol}^{-1}$ )	$(P_{\text{max}})_{\text{max}}$ , 系统极大输出功率的最大值(W)
$F$ , 法拉第常数( $\text{C mol}^{-1}$ )	$P_{\text{max},\eta}$ , 系统最大优化效率下的输出功率(W)
$U$ , SOFC 的输出电压(V)	$P_{\text{M}}$ , 混合系统的最大输出功率达到的最高值(W)
$U_{\text{act}}$ , SOFC 的活化过电势(V)	$Q_{\text{H}}$ , SHE 高温热源释放的热量(J)
$U_{\text{con}}$ , SOFC 的浓度过电势(V)	$Q_{\text{L}}$ , SHE 低温热源吸收的热量(J)
$U_{\text{ohm}}$ , SOFC 的欧姆过电势(V)	$Q_1$ , SHE 循环工质从高温热源吸收的热量(J)
$h_{\text{HC}}$ , SHE 工质与高温端热源之间的热传导系数 ( $\text{W K}^{-1}$ )	$Q_2$ , SHE 循环工质释放到低温热源的热量(J)
$h_{\text{HR}}$ , SHE 工质与高温端热源之间的辐射热导系数 ( $\text{W K}^{-4}$ )	$Q_0$ , SHE 高温热源与低温热源之间的热漏损失(J)
$h_{\text{LC}}$ , SHE 工质与低温热源之间的热传导系数 ( $\text{W K}^{-1}$ )	$\Delta Q_{\text{R}}$ , SHE 两个回热过程的固有非理想回热损失(J)
$i$ , SOFC 的电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )	$\dot{q}_{\text{r}}$ , SOFC 回热器的回热损失(W)
$i_{\text{L,a}}$ , SOFC 阳极极限电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )	$\Delta g^0$ , 标准状态下 SOFC 的摩尔吉布斯能变( $\text{J mol}^{-1}$ )
$i_{\text{L,c}}$ , SOFC 阴极的极限电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )	$\Delta h$ , SOFC 摩尔焓变( $\text{J mol}^{-1}$ )
$i_{\text{o,a}}$ , SOFC 阳极的交换电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )	$\Delta \dot{H}$ , SOFC 电化学反应前后的总焓变(W)
$i_{\text{o,c}}$ , SOFC 阴极的交换电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )	$\sigma_0$ , SOFC $\text{O}^{2-}$ 的活化因子( $\text{S m}^{-1}$ )
$i_p$ , 系统获得极大输出功率的最大值时的 SOFC 电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )	$R$ , 普适气体常数( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$i_q$ , 系统获得优化效率最大值时的 SOFC 电流密度 ( $\text{A m}^{-2}$ )	$\eta_{\text{FC}}$ , SOFC 的效率
$i_c$ , SHE 启动工作时的 SOFC 电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )	$\eta_{\text{ST}}$ , SHE 的效率
$k_r$ , SOFC 的回热器与环境之间热漏系数( $\text{W K}^{-1}$ )	$\eta_{\text{opt}}$ , 系统优化效率
$k_0$ , SHE 高温端热源与低温热源之间的热漏系数 ( $\text{W K}^{-1}$ )	$\eta_{\text{opt,max}}$ , 系统最大优化效率
$L_{\text{el}}$ , SOFC 电解质厚度( $\mu\text{m}$ )	$\eta_{\text{opt},P}$ , 系统最大输出功率下的效率
$n_e$ , SOFC 电子转移数	$\tau$ , SHE 循环时间(s)
$n$ , SHE 工质摩尔数	$t_1$ , SHE 工质与高温端热源之间传热所需时间(s)
$P_{\text{H}_2}$ , SOFC 氢气的分压(atm)	$t_2$ , SHE 工质与低温端热源之间传热所需时间(s)
$P_{\text{H}_2\text{O}}$ , SOFC 水的分压(atm)	$t_{\text{re}}$ , SHE 两等容回热过程的总时间(s)
$P_{\text{O}_2}$ , SOFC 氧气的分压(atm)	$V_1$ , SHE 等容升温过程中工质的体积( $\text{m}^3$ )
$P_{\text{N}_2}$ , SOFC 氮气的分压(atm)	$V_2$ , SHE 等容冷却过程中工质的体积( $\text{m}^3$ )
	$\omega$ , SHE 等容升温和冷却过程中工质的体积之比
	$x$ , SHE 两等温过程温度之比
	$x_{\text{opt}}$ , SHE 两等温过程温度之比的优化值
	$x_{\text{opt},P}$ , 系统获得极大输出功率的最大值时 SHE 两 等温过程温度之比的优化值

$x_{opt,\eta}$ , 系统获得最大效率的最大值时 SHE	$T_L$ , SHE 低温热源温度(K)
两等温过程温度之比的优化值	$T_1$ , SHE 工质高温端温度(K)
$y$ , SHE 非理想回热因子	$T_{1,opt}$ , SHE 工质高温端优化温度(K)
$T$ , SOFC 工作温度(K)	$T_2$ , SHE 工质低温端温度(K)
$T_H$ , SHE 高温热源温度(K)	$T_p$ , 系统获得最大输出功率的最高值时 SOFC 温度(K)

## 参考文献

- 1 杨理理, 宣益民, 韩玉阁. 光伏电池微结构表面吸收率的温度依变性. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 1514–1520
- 2 栾伟玲, 涂善东. 温差电技术的研究进展. 科学通报, 2004, 49: 1011–1019
- 3 宋世栋, 韩敏芳, 孙再洪. 管式固体氧化物燃料电池堆的研究进展. 科学通报, 2013, 58: 2035–2045
- 4 陈黎明, 林昭佳, 马紫峰. 燃料电池汽车动力系统过程模拟. 科学通报, 2008, 53: 3051–3055
- 5 纪伟伟, 蔡宁, 赵颖, 等. 一种染料敏化太阳能电池用新型对电极的研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39: 1419–1423
- 6 俞红梅, 衣宝廉. 车用燃料电池现状与电催化. 中国科学: 化学, 2012, 42: 480–494
- 7 刘杨, 刘楠, 谭小耀. 基于高度非对称结构电解质中空纤维的微管式固体氧化物燃料电池制备. 中国科学: 化学, 2011, 41: 531–536
- 8 Chen X H, Pan Y Z, Chen J C. Performance and evaluation of a fuel cell-thermoelectric generator hybrid system. Fuel Cell, 2010, 10: 1164–1170
- 9 Kuo J K, Hwang J J, Lin C H. Performance analysis of a stationary fuel cell thermoelectric cogeneration system. Fuel Cell, 2012, 10: 1104–1114
- 10 Chan S, Ho H, Tian Y. Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant. J Power Sources, 2002, 109: 111–120
- 11 Li Y, Weng Y. Performance study of a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system designed for methane operating with non-designed fuels. J Power Sources, 2011, 196: 3824–3835
- 12 Wu X, Huang Q, Zhu X. Thermal modeling of a solid oxide fuel cell and micro gas turbine power system based on modified LS-SVM. Int J Hydrogen Energy, 2011, 36: 885–892
- 13 Rizzoni G, Guzzella L, Baumann B M. Unified modeling of hybrid electric vehicle drivetrains. IEEE-ASME T Mech, 1999, 4: 246–257
- 14 Burer M, Tanaka K, Favrat D, et al. Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers. Energy, 2003, 28: 497–518
- 15 Cheddie D. Thermo-economic optimization of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant. Int J Hydrogen Energy, 2011, 36: 1702–1709
- 16 Wu X, Huang Q, Zhu X. Multi-loop control strategy of a solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system. J Power Sources, 2011, 196: 8444–8849
- 17 Zhang X W, Chan S H, Li G J, et al. A review of integration strategies for solid oxide fuel cells. J Power Sources, 2010, 195: 685–702
- 18 Baniasadi E, Alemrajabi A. Fuel cell energy generation and recovery cycle system. J Power Sources, 2000, 86: 501–506
- 19 Zhang X Q, Chen J C. Performance analysis and parametric optimum criteria of a class of irreversible fuel cell/heat engine hybrid system. Int J Hydrogen Energy, 2010, 35: 284–293
- 20 Sanchez D, Chartegui R, Torres M, et al. Stirling based fuel cell hybrid systems: An alternative for molten carbonate fuel cells. J Power Sources, 2009, 192: 84–93
- 21 Qin J, Zhou W, Bao W, et al. Thermodynamic analysis and parametric study of a closed Brayton cycle thermal management system for scramjet. Int J Hydrogen Energy, 2010, 35: 356–364
- 22 Al-Sulaiman F A, Dincer I, Hamdullahpour F. Exergy analysis of an integrated solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle for cooling, heating and power production. J Power Sources, 2010, 195: 2346–2354
- 23 Wu F, Chen L G, Sun F R. Optimum performance of irreversible Stirling engine with imperfect regeneration. Energ Convers Manage, 1998, 39: 727–732
- 24 Costea M, Feidt M. The effect of the overall heat transfer coefficient variation on the optimal distribution of the heat transfer surface conductance or area in a Stirling engine. Energ Convers Manage, 1998, 39: 1753–1761
- 25 Chen J C, Yan Z J, Chen L X, et al. Efficiency bound of a solar-driven Stirling heat engine system. Int J Energy Res, 1998, 22: 805–812
- 26 Durmayaz A, Sogut O S, Sahin B, et al. Optimization of thermal systems based on finite-time thermodynamics and thermoeconomics. Prog

- Energy Combust Sci, 2004, 30: 175–217
- 27 Kongtragool B, Wongwises S. Optimum absorber temperature of a once-reflecting full conical concentrator of a low-temperature differential Stirling engines. *Renew Energy*, 2005, 30: 1671–1687
- 28 Yilmaz T, Ust Y, Erdil A. Optimum operation conditions of irreversible solar driven heat engines. *Renew Energy*, 2006, 31: 1333–1342
- 29 Li Y Q, He Y L, Wang W W. Optimization of solar-powered Stirling heat engine with finite-time thermodynamics. *Renew Energy*, 2011, 36: 421–427
- 30 Zhang X Q, Su S H, Chen J C. Influence of multiple irreversible losses on the performance of a molten carbonate fuel cell-gas turbine hybrid system. *Int J Hydrogen Energy*, 2011, 36: 15304–15312

## **Performance optimization of a solid oxide fuel cell-stirling heat engine hybrid power system**

LIAO TianJun, YANG ZhiMin & LIN BiHong

*College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China*

Based on the theory of the electrochemistry, non-equilibrium thermodynamics and finite-time thermodynamics, a new theoretical model of the hybrid power system consisting of an existing solid oxide fuel cell and a Stirling heat engine is established, in which some main irreversible losses existing real hybrid systems are taken into account. Expressions for the power output and efficiency of the hybrid system are derived from this model. The maximum power output and maximum efficiency of the hybrid system and the operating conditions of the maximum power output and maximum efficiency are determined. The optimally working regions of the hybrid system are given. The influences of some cyclic irreversibilities on the optimal performance of the system are discussed in detail. The best matching relationship between an existing solid oxide fuel cell and a Stirling heat engine is discussed. All the results obtained in this paper will provide some theoretical basis for the design and optimal operation of practical fuel cell-Stirling heat engine hybrid system.

**solid oxide fuel cell, Stirling heat engine, performance optimization, hybrid power system, optimally operating regions**

doi: 10.1360/N092014-00020