

# 燃料电池-真空热离子混合系统的性能特性和优化分析

杨智敏, 廖天军, 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: 2014-04-14; 接受日期: 2014-06-23

国家自然科学基金(批准号: 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(批准号: 09BS510)和华侨大学光学工程特色学科建设基金资助项目

**摘要** 基于固体氧化物燃料电池(SOFC)和真空热离子发电机(VTIG)的粒子流及电流模型, 建立考虑多种不可逆性的一类不可逆 SOFC-VTIG 混合功率系统的一般循环模型. 通过该混合模型得到了混合功率系统的效率与输出功率表达式, 应用数值模拟获得混合功率系统的效率和功率随系统一些重要参数变化的关系曲线, 从而揭示了混合功率系统的性能特征, 确定了系统一些重要性能参数的优化判据, 讨论了混合功率系统中的一些不可逆损失对系统优化性能的影响. 本文所得的结果可为实际 SOFC-VTIG 混合功率系统的优化设计和运行提供理论依据.

## 关键词

固体氧化物燃料电池  
真空热离子发电机  
混合功率系统  
性能优化分析

## 1 引言

面对日益严重的环境问题和能源危机, 人们正致力于寻找清洁、可再生的能源. 能源是人类发展和文明进步的推动力, 而人类社会文明程度的进展是与能源技术的进步息息相关的. 燃料电池发电技术作为新型高效的新能源技术之一, 在世界范围内引起了普遍的关注, 世界各国也都在竞相研究. 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地转化为电能电学能量转换装置, 它具有能量转换效率高、污染小、噪声低、积碳性强、可靠性高和适用能力强等优点, 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<sup>[1-6]</sup>. 因此, 燃料电池系统的研究对新能源的发展

和应用具有重要的意义.

采用全固体结构, 不存在液体电解质带来的腐蚀和流失等问题, 且具有燃料适应性广的高温固体氧化物燃料电池以其具有电流密度大、能量转换效率高、洁净、低噪声、结构简单和寿命长等优点近年来得到了各国研究人员的重视, 被国际能源界认为是新世纪最具有吸引力的发电方式之一<sup>[7,8]</sup>. 高温运行的燃料电池是一种战略性的新能源技术, 由于电池具有较高的运行温度, 碳基燃料可以在电池内部进行重整, 所以高温固体氧化物燃料电池对各种碳氢燃料具有广泛的适应性. 另一方面, 由于高温燃料电池的排气温度很高, 其高品质的废热有很大的利用价值. 因此, 可以将高温固体氧化物燃料电池和其它动力装置组成各种混合动力系统, 从而提高系统的

**引用格式:** 杨智敏, 廖天军, 林比宏. 燃料电池-真空热离子混合系统的性能特性和优化分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1173-1184  
Yang Z M, Liao T J, Lin B H. Performance characteristics and optimal analysis of a fuel cell-vacuum thermionic generator hybrid system (in Chinese).  
Sci Sin Tech, 2014, 44: 1173-1184, doi: 10.1360/N092014-00115

整体能量转化效率. 近年来, 高温燃料电池与各种热力学循环组成的新型混合动力系统的理论和实验的研究引起了理论和工程界研究者的极大兴趣<sup>[9-12]</sup>. Palsosn 等人<sup>[9]</sup>对固体氧化物燃料电池和燃气轮机的混合动力系统的性能进行了评估. Grillo 等人<sup>[10]</sup>分析和比较了多种高温燃料电池-燃气轮机(GT)混合动力系统的性能特性, 结果表明, 高温 SOFC-GT 混合动力系统的性能是最佳的. Zhao 和 Chen<sup>[11]</sup>建立了氢氧固体氧化物燃料电池-二热源热机循环混合动力系统模型, 系统的整体输出特性从热力学角度加以优化, 获得了系统一些重要性能参数的优化运行区间. Zhang 等人<sup>[12]</sup>研究了不可逆性对熔融碳酸盐燃料电池-Braysson 热机混合系统性能的影响, 给出了系统各重要工作参数的最佳工作区间. 鉴于以上燃料电池与各种类型的热机耦合而成的混合动力系统的成功事例, 则利用高温燃料电池与需要高温热源驱动的真空热离子发电机两者耦合而成的混合发电系统, 实现能源梯级利用的方案应该是可行和有意义的. 在实际应用中, 由于混合动力系统的各子系统存在各种不可逆性, 这些不可逆损失对混合动力系统的性能会产生显著的影响. 因此建立包含多种不可逆性的固体氧化物燃料电池混合动力系统模型, 分析它们的性能是重要的. 目前, 人们对高温燃料电池混合系统研究较多的是燃料电池与热机的混合系统, 而对高温燃料电池与其它功率系统组合而成的混合发电系统的研究却较少, 特别是对高温燃料电池与热离子发电机构成的混合发电系统性能的研究鲜有报道. 热离子发电机不同于传统的热机装置, 它具有无机械运动部件、输出功率密度大、装置体积小、重量轻、可靠性高、稳定性好等优点, 是一种不会对环境造成污染的绿色能量转换器件<sup>[13]</sup>. 近年来, 随着制造技术的发展和高效电极材料的问世, 实际真空热离子装置的性能有了突破性的发展<sup>[14]</sup>. 有些学者研究了纳米结构的热离子发电器件的热力学性能及器件的电子效率, 取得了一些有意义的结论<sup>[15]</sup>, 而有些学者研究了利用量子隧穿效应降低热离子发电机阴极板的功函数<sup>[16]</sup>, 从而提高其能量转换效率, 使得热离子发电机在集成电子、航空航天、国防等特殊领域以及以核能和燃料电池为电源的太空载荷领域具有广阔的应用前景. 因此, 对固体氧化物燃料电池与热离子发电机耦合的混合发电系统性能的研究是有益的.

本文基于非平衡态热力学理论和混合系统各子

系统间的能量平衡关系, 建立描述包含多种不可逆因素的 SOFC-VTIG 混合发电系统模型的热力学方程, 导出混合发电系统输出功率和效率的一般表达式, 通过数值模拟, 分析燃料电池的电流密度和热离子发电器的功函数两者之间的关系, 研究系统的不可逆因素对混合发电系统性能和优化性能的影响, 确定混合发电系统的最优运行条件和性能界限.

## 2 不可逆 SOFC-VTIG 混合发电系统模型

SOFC-VTIG 混合发电系统主要由 SOFC, 非理想回热器(Regenerator), VTIG 和散热器(Heat Sink)等组成, 其循环示意图如图 1 所示. 其中高温燃料电池作为 VTIG 的高温热源为其工作提供热量, 回热器用来使燃料电池排出的高温废气和进入燃料电池的燃料和空气进行热交换, 从而预热进入燃料电池的燃料和空气. 通过该混合系统, 高温燃料电池产生的高品位的废热可以被有效地利用. 因此, 可进一步提高燃料的能量转换效率. 图中  $T$  为 SOFC 的工作温度,  $T_1$  和  $T_2$  分别为 VTIG 发射极和集电极温度,  $T_0$  为环境温度,  $\dot{Q}_H$  为 SOFC 传至 VTIG 高温端的热流,  $\dot{Q}_L$  为 VTIG 的低温端传至周围环境中的热流,  $\dot{Q}_{loss}$  为 SOFC 的热漏损失,  $R_{L1}$  和  $R_{L2}$  分别为 SOFC 和 VTIG 的负载电阻. 系统各层温度满足:  $T > T_1 > T_2 > T_0$ .

### 2.1 不可逆 SOFC 的输出功率与效率

固体氧化物燃料电池在平衡态时的可逆电压由能斯特(Nernst)方程决定<sup>[2,3]</sup>, 它可表示为

$$E = -\frac{\Delta g^\circ}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right], \quad (1)$$

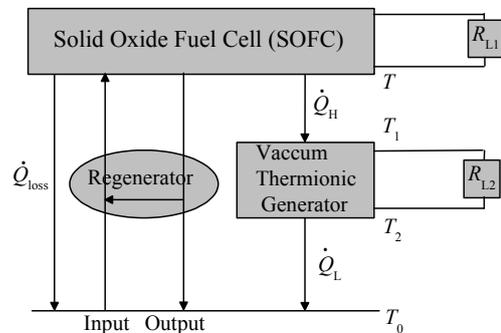


图 1 SOFC-VTIG 混合功率系统示意图

式中,  $\Delta g^\circ$  是标准状态下的摩尔吉布斯自由能,  $n_e$  是转移电荷数,  $F$  为法拉第常数,  $R$  为普适气体常数,  $P_{H_2}$ ,  $P_{O_2}$  和  $P_{H_2O}$  分别为反应物氢气、氧气和水的偏压.

固体氧化物燃料电池在工作时, 主要存在 3 种不可逆损失, 它们分别是燃料电池内部的活化过电势 ( $U_{act}$ ), 浓度过电势 ( $U_{con}$ ) 和欧姆过电势 ( $U_{ohm}$ ), 这 3 种过电势可分别表示为<sup>[17-19]</sup>

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

$$U_{con} = -\frac{RT}{n_e F} \left[ \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{L,a}} \right) + \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{L,c}} \right) \right], \quad (3)$$

$$U_{ohm} = \frac{iL_{el}T}{\sigma_0} \exp \left( \frac{E_{el}}{RT} \right), \quad (4)$$

式中,  $i_{0,a}$  和  $i_{0,c}$  分别是阳极和阴极的交换电流密度,  $i_{L,a}$  和  $i_{L,c}$  分别是阳极和阴极的极限电流密度,  $E_{el}$  是  $O^{2-}$  的活化能,  $\sigma_0$  是  $O^{2-}$  的活化因子. 考虑以上燃料电池内部的 3 种过电势, 则燃料电池的输出电压可表为

$$U = E - U_{int} = E - U_{act} - U_{con} - U_{ohm}. \quad (5)$$

当电子通过燃料电池内部及外部的电路时, 燃料电池的不可逆损失对电池性能的影响可由一个包含一个理想可逆电势(由(1)式给出), 一个由三种过电势所引起的内阻和一个与负载并联的漏电阻  $R_{leak}$  组成的简单等效电路来表征. 因此, 结合方程式(1)~(5), 存在 3 种不可逆损失的不可逆固体氧化物燃料电池的输出功率和效率可分别表示为

$$P_{FC} = -\Delta \dot{G} - iA_c U_{int} - (E - U_{int})^2 / R_{Leak} \\ = UiA_c [1 - \beta U / (U_{act} + U_{con} + U_{ohm})], \quad (6)$$

$$\eta_{FC} = \frac{P_{FC}}{-\Delta \dot{H}} = \frac{P_{FC}}{-(iA_c / n_e F) \Delta h} \\ = \frac{n_e F U}{-\Delta h} \left( 1 - \frac{\beta U}{U_{act} + U_{con} + U_{ohm}} \right), \quad (7)$$

式中,  $\Delta \dot{G}$  为电化学反应产生的自由能,  $i$  是 SOFC 的电流密度,  $A_c$  是 SOFC 的接触电极板的表面积,  $R_{leak}$  为 SOFC 的漏电阻,  $\beta$  为等效内阻与漏电阻的比值,  $\Delta \dot{H} = (iA_c / n_e F) \Delta h$  为电化学反应产生的最大可

能能量,  $n_e$  是转移电荷数,  $F$  法拉第常数,  $\Delta h$  是反应过程中总摩尔焓变.  $\Delta h$  可表示为<sup>[20]</sup>

$$(\Delta h)_T = h_{298}^0 + \int_{298}^{T_b} C_{P,H_2O(l)} dT + L_v + \int_{T_b}^T C_{P,H_2O(g)} dT \\ - \int_{298}^T C_{P,H_2} dT - \frac{1}{2} \int_{298}^T C_{P,O_2} dT, \quad (8)$$

式中,  $L_v$  为水的相变潜热,  $h_{298}^0$  为液体水的标准生成焓,  $T_b$  为水的沸点,  $C_{P,H_2O(l)}$ ,  $C_{P,H_2O(g)}$ ,  $C_{P,H_2}$  和  $C_{P,O_2}$  它们分别是液体水、水蒸气、氢气和氧气的定压摩尔热容<sup>[21]</sup>. 本文所采用的固体氧化物燃料电池的工作条件及相关性能参数如表 1 所示, 它们来自文献 [4,19,12~24] 中的现有数据.

## 2.2 不可逆 VTIG 的输出功率与效率

不可逆真空热离子发电器由发射极(Emitter)和集电极(Collector)两个基本部件组成, 两者分开一个很小的真空(Vacuum)空间, 如图 2 所示. 热源(Heat Source)加热热离子发电器的发射极后, 极板内的一部分电子得到大于逸出功的能量, 这部分电子将从

表 1 SOFC 相关参数和工作条件

参数	取值
SOFC 工作温度, $T$ (K)	1273
环境温度, $T_0$ (K)	300
氢气和水的分压, $P_{H_2}$ (atm); $P_{H_2O}$ (atm)	0.97; 0.03
氧气和氮气的分压, $P_{O_2}$ (atm); $P_{N_2}$ (atm)	0.21; 0.79
电子转移数, $n_e$	2
阳极交换电流密度, $i_{0,a}$ ( $A m^{-2}$ )	$1.3 \times 10^3$
阴极交换电流密度, $i_{0,c}$ ( $A m^{-2}$ )	$5.6 \times 10^3$
电解质厚度, $L_{el}$ ( $\mu m$ )	20
$O^{2-}$ 的活化能, $E_{el}$ ( $J mol^{-1}$ )	$8.0 \times 10^4$
$O^{2-}$ 的活化因子, $\sigma_0$ ( $Sm^{-1}$ )	$3.6 \times 10^7$
阳极极限电流密度, $i_{L,a}$ ( $A m^{-2}$ )	$2.99 \times 10^4$
阴极极限电流密度, $i_{L,c}$ ( $A m^{-2}$ )	$2.16 \times 10^4$
等效内阻和漏电阻的比值, $\beta$	0.01
法拉第常数, $F$ ( $C mol^{-1}$ )	96485
普适气体常数, $R$ ( $J mol^{-1} K^{-1}$ )	8.314
1273 K 下的摩尔焓变, $\Delta h$ ( $J mol^{-1}$ )	-249490
1273 K 下的摩尔吉布斯能变, $\Delta g^0$ ( $J mol^{-1}$ )	-177460

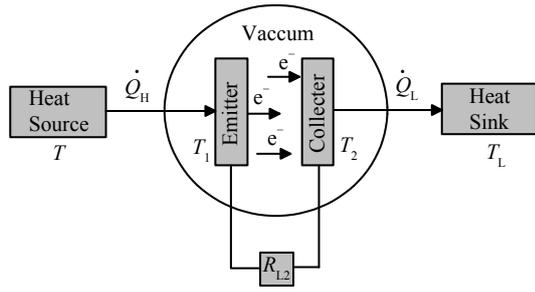


图2 VTIG 示意图

发射极表面逸出而形成热离子, 热离子经两极间的真空隙到达集电极, 再经外电路及负载形成电流. 同时, 由于辐射热传递和从发射级到达集电极的热离子, 将导致集电极的温度升高, 从而也有电子将从集电极表面逸出. 从导体表面逸出的电流密度可用如下方程给出<sup>[25]</sup>

$$J = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(p)g(p)qv_x dp_x dp_y dp_z, \quad (9)$$

其中,  $f(p)$  是动量空间的费米-狄拉克分布,  $g(p)$  是动量空间的态密度,  $q$  是电子电荷,  $v_x$  是在  $x$  方向的电子速度, 即电子传输方向.

考虑到由于两电极之间距离足够小, 电子在两极之间的发射可近似认为以弹道形式发射, 以致于两极板间空间电荷的影响可以忽略. 另一方面, 由于极板温度较高, 从两极表面逸出的这些电子的速度可视为服从麦克斯韦速度分布. 因此, 来自发射极和集电极的电流密度可近似由 Richardson 方程来描述, 它们可分别表示为<sup>[26,27]</sup>

$$J_1 = A_0 T_1^2 \exp\left(-\frac{e\phi_2 + eV}{kT_1}\right), \quad (10)$$

$$J_2 = A_0 T_2^2 \exp\left(-\frac{e\phi_2}{kT_2}\right), \quad (11)$$

式中,  $A_0$  为 Richardson 常数,  $e$  为电子电量,  $k$  为 Boltzmann 常数,  $\phi$  为集电极的功函数,  $V$  为热离子输出电压. 因此, 两电极间总的电流密度为

$$\begin{aligned} J &= J_1 - J_2 \\ &= A_0 \left[ T_1^2 \exp\left(-\frac{e\phi_2 + eV}{kT_1}\right) - T_2^2 \exp\left(-\frac{e\phi_2}{kT_2}\right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

由于固体氧化物燃料电池的排气温度属于高温 (800~1300 K), 经热交换器可作为热离子发电机的高温热源, 因此, 高温热源与发射极, 集电极与低温热源之间存在热传导和热辐射两种传热方式. 假设它们分别服从牛顿传热定律与辐射传热定律<sup>[28,29]</sup>, 则由高温端传到发射极的热流和由集电极传到低温端的热流可分别为

$$\dot{Q}_H = U_1 A_1 (T - T_1) + A_1 \varepsilon_1 \delta (T^4 - T_1^4), \quad (13)$$

$$\dot{Q}_L = U_2 A_2 (T_2 - T_L) + A_2 \varepsilon_2 \delta (T_2^4 - T_L^4), \quad (14)$$

式中  $U_1, U_2$  分别为高温端和低温端单位面积热传导系数,  $A_1$  和  $A_2$  为热交换面积,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别为换热面的热发射率,  $\delta$  为 Stefan-Boltzmann 常数.

根据能量守恒定律, 在平衡态下, 单位时间从高温热源传输到发射极的热量等于单位时间内离开该电极的能量. 在热离子装置内部, 存在两种热流: 一种为两电极之间由于电子的传输造成的热流; 另一种为电极间的辐射热流. 对于第一种热流, 即由于电子的传输造成的离开发射极的单位面积热流率 ( $\dot{q}_1$ ) 和集电极吸收的单位面积热流率 ( $\dot{q}_2$ ) 分别为<sup>[26,27,30]</sup>

$$\dot{q}_1 = \left( \phi_2 + V + \frac{2kT_1}{e} \right) J_1 - \left( \phi_2 + V + \frac{2kT_2}{e} \right) J_2, \quad (15)$$

$$\dot{q}_2 = \left( \phi_2 + \frac{2kT_1}{e} \right) J_1 - \left( \phi_2 + \frac{2kT_2}{e} \right) J_2. \quad (16)$$

对于第二种热流, 即从发射极到集电极单位面积辐射热流为

$$\dot{q}_R = \varepsilon_0 \delta (T_1^4 - T_2^4), \quad (17)$$

式中,  $\varepsilon_0$  为电极表面的热发射率.

因此, 离开发射极和进入集电极的单位面积总热流率为

$$\begin{aligned} \dot{q}_H &= \left( \phi_2 + V + \frac{2kT_1}{e} \right) A_0 T_1^2 \exp\left(-\frac{e\phi_2 + eV}{kT_1}\right) \\ &\quad - \left( \phi_2 + V + \frac{2kT_2}{e} \right) A_0 T_2^2 \exp\left(-\frac{e\phi_2}{kT_2}\right) \\ &\quad + \varepsilon_0 \delta (T_1^4 - T_2^4), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_L = & \left( \phi_2 + \frac{2kT_1}{e} \right) A_0 T_1^2 \exp\left( -\frac{e\phi_2 + eV}{kT_1} \right) \\ & - \left( \phi_2 + \frac{2kT_2}{e} \right) A_0 T_2^2 \exp\left( -\frac{e\phi_2}{kT_2} \right) \\ & + \varepsilon_0 \delta (T_1^2 - T_2^4). \end{aligned} \quad (19)$$

根据能量守恒定律, 由(13), (14), (18)和(19)式可得

$$\dot{Q}_H = U_1 A_1 (T - T_1) + A_1 \varepsilon_1 \delta (T^4 - T_1^4) = A_T \dot{q}_H, \quad (20)$$

$$\dot{Q}_L = U_2 A_2 (T_2 - T_L) + A_2 \varepsilon_2 \delta (T_2^4 - T_L^4) = A_T \dot{q}_L, \quad (21)$$

式中,  $A_T$  为两电极的有效面积, 即发射极发射面的面积和集电极接收面的面积.

根据方程式(18)~(21), 可得真空热离子的功率和效率可分别表示为

$$\begin{aligned} P_{VTIG} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = & VJ A_T = A_T A_0 V \\ & \times \left[ T_1^2 \exp\left( -\frac{e\phi_2 + eV}{kT_1} \right) - T_2^2 \exp\left( -\frac{e\phi_2}{kT_2} \right) \right], \end{aligned} \quad (22)$$

$$\eta_{VTIG} = \frac{P_{VTIG}}{\dot{Q}_H} = \frac{VJ A_T}{U_1 A_1 (T - T_1) + A_1 \varepsilon_1 \delta (T^4 - T_1^4)}. \quad (23)$$

本文所采用的热离子的工作条件及相关性能参数如表 2 所示, 它们来自文献[13,26,27,30]中的现有数据.

### 3 混合系统的效率和输出功率

根据方程(6), (7), (22)和(23), 混合发电系统的输

表 2 热离子的工作条件与相关参数

参数	取值
电子电量, $e$ (C)	$1.6 \times 10^{-19}$
高温热源温度, $T$ (K)	1273
低温热源温度, $T_L$ (K)	300
电极有效面积, $A_T$ (m <sup>2</sup> )	$2.5 \times 10^{-4}$
电极表面的热发射率, $\varepsilon_0$	0.18
换热面的热发射率, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$	0.6
Stefan-Boltzmann 常数, $\delta$ (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> )	$5.67 \times 10^{-8}$
Richardson 常数, $A_0$ (Am <sup>-2</sup> K <sup>-2</sup> )	$1.2 \times 10^6$
Boltzmann 常数, $k$ (J K <sup>-1</sup> )	$1.38 \times 10^{-23}$

出功率和效率可分别表示为

$$\begin{aligned} P = & P_{VTIG} + P_{FC} \\ = & VJ A_T + U_i A_c \left( 1 - \frac{\beta U}{U_{act} + U_{con} + U_{ohm}} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \eta = & \frac{P_{FC} + P_{VTIG}}{-\Delta H} \\ = & \frac{VJ A_T + U_i A_c \left( 1 - \frac{\beta U}{U_{act} + U_{con} + U_{ohm}} \right)}{-\frac{i A_c}{n_e F} \Delta h}. \end{aligned} \quad (25)$$

由(24)和(25)式可知, 混合系统的输出功率和效率由燃料电池和真空热离子的相关热力学和电化学参数所确定. 例如, 燃料电池的电流密度, 工作温度, 内阻等参量以及热离子发电器的功函数, 电压等参数都将影响混合发电系统的输出功率和效率.

图 1 所示的回热器是一个热交换器, 其作用是将进入燃料电池的反应物温度从环境温度升高到燃料电池的工作温度, 从而确保燃料电池在稳定状态下连续工作. 对于非理想回热器, 必然存在固有回热损失. 根据回热器热力学模型<sup>[31,32]</sup>, 每单位时间回热器所损失的热量可表示为

$$\dot{Q}_r = k_r (1 - \varepsilon) (T - T_0), \quad (26)$$

式中,  $k_r$  为回热器的介质热损系数,  $\varepsilon$  为回热器的回热效率. 对于理想回热器,  $\varepsilon = 1$ ,  $\dot{Q}_r = 0$ , 即无回热损失. 当  $\varepsilon < 1$  时, 回热器存在回热损失. 回热器损失的热量必须实时地从燃料电池转移到回热器的反应物中, 才能确保反应物经回热器后, 其出口温度达到燃料电池的工作温度, 以便燃料电池能稳定工作.

根据固体氧化物燃料电池的热损模型<sup>[11,32,33]</sup>, SOFC 产生的热量, 有一小部分会直接释放到周围环境. 在 SOFC 的热漏传热分析中, 辐射热传递可合理地忽略<sup>[33]</sup>. 因此, 由牛顿线性热传递律所描述的对流或传导被认为是当前热漏模型中占主导地位的传热机制. 这表明这部分热损失表示为

$$\dot{Q}_{loss} = \alpha_L A_L (T - T_0), \quad (27)$$

式中,  $\alpha_L$  为热漏系数,  $A_L$  为热漏有效表面积.

根据热力学第一定律, 利用(6), (7), (13), (26)和(27)式可得如下能量平衡方程

$$\dot{Q}_H = -\Delta\dot{H} - P_{FC} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_r \quad (28)$$

由上式可知, 热离子发电机能够正常工作, 需满足的条件为

$$\dot{Q}_H = -\Delta\dot{H} - P_{FC} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_r > 0. \quad (29)$$

若混合系统处于固体氧化物燃料电池单一工作模式时, 利用(1)~(8)式和表 1 中的数据, 应用数值计算, 可以获得 SOFC 的功率和效率随 SOFC 电流密度变化的关系曲线, 如图 3 所示. 图中,  $P_{FC,max}^*$  和  $\eta_{FC,max}$  为 SOFC 的最大输出功率和最大效率,  $i_{FC,p}$  和  $i_{FC,\eta}$  分别为最大输出功率和最大效率时所对应的电流密度. 可见,  $i_{FC,p}$  和  $i_{FC,\eta}$  分别确定了燃料电池电流密度的优化区间的上下限. 同理, 也可获得燃料电池的输出热量随电流密度的变化曲线, 如图 4 所示, 图中  $i_s$  为燃料电池开始输出热量时所对应的电流密度.

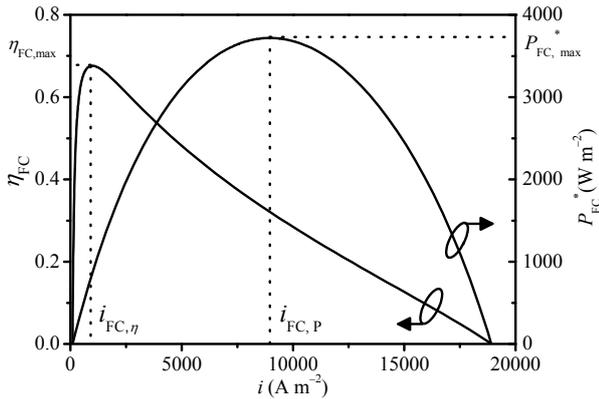


图 3 SOFC 效率与功率随电流密度的变化曲线

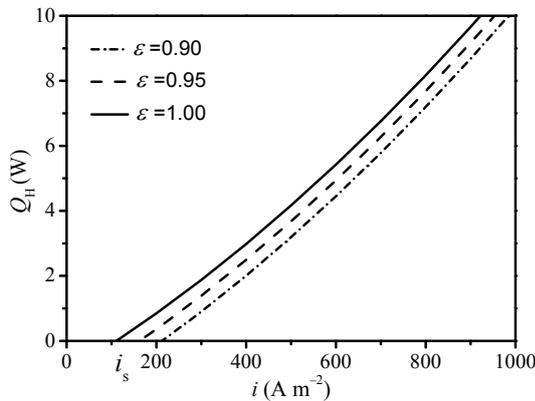


图 4 SOFC 输出能量随电流密度的变化曲线

从图中可以看出燃料电池的输出热量随燃料电池的电流密度的增加而增加. 综合图 3 和 4, 可知, 要使混合发电系统工作于双发电模式, 即能源利用率达到最合理的利用状态, 则燃料电池的电流密度合理取值应为

$$i > i_s. \quad (30)$$

基于已建立的混合发电系统的数学模型, 可以对混合系统的重要性能参数进行优化分析.

#### 4 混合系统的性能分析和优化判据

由(24)和(25)式可以看出, 混合系统的性能不仅依赖于 SOFC 的热力学和电化学参数, 如 SOFC 的电流密度、工作温度、等效内阻和漏电阻等, 还取决于诸如功函数和两极之间的电压等 VTIG 的相关参数. 根据已建立的混合发电系统数学模型, 应用数值计算, 可以分析和评估该混合系统的性能. 数值计算所需的 SOFC 和 VTIG 的基本参数来源于表 1 和 2 的数据. 同时, SOFC 的燃料由 97% $H_2$  + 3% $H_2O$  组成, 氧化剂为空气, 由 21% $O_2$  + 79% $N_2$  组成.

应用(24), (25)式, 表 1 和表 2 的参数数据及与(24)和(25)式的关联方程, 可绘制出混合发电系统的输出功率与效率随 SOFC 的电流密度与 VTIG 两极间的电压变化的关系曲面, 如图 5 和 6 所示, 其中, 其他参数的取值如下:  $U_1A_1 = 0.85 \text{ W K}^{-1}$ ,  $U_2A_2 = 1 \text{ W K}^{-1}$ ,  $k_r = 0.01 \text{ W K}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 0.9$  和  $\alpha_L A_L = 0.001 \text{ W K}^{-1}$ .

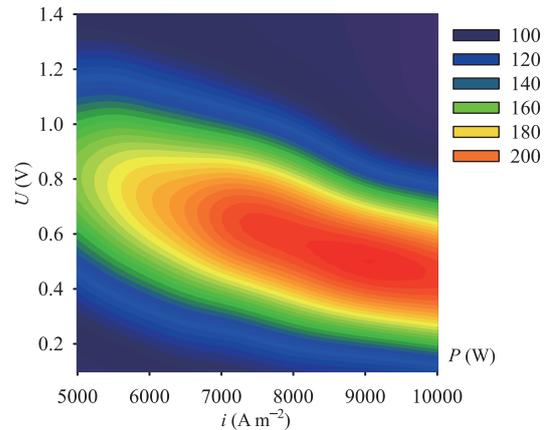


图 5 (网络版彩图)混合系统的输出功率随 VTIG 电压和 SOFC 电流密度的变化曲面

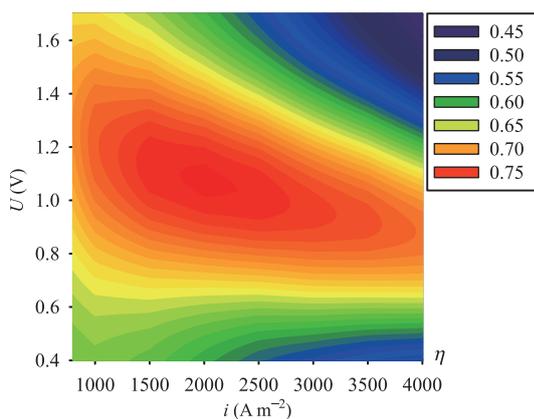


图6 (网络版彩图)混合系统的输出效率随VTIG电压和SOFC电流密度的变化曲面

图5清楚地显示了混合发电系统的输出功率随SOFC的电流密度和VTIG的输出电压均先增加而后减小,存在最佳电流密度和最佳输出电压使混合发电系统的输出功率达到最大值.从图6也可以看出对于混合发电系统的效率,也存最佳电流密度和最佳输出电压使混合发电系统的效率获得最大值.从图5和6可知,对于混合功率系统来说,给定VTIG电压,存在2个极值条件,即 $\partial\eta/\partial i=0$ 和 $\partial P/\partial i=0$ ,但 $\partial\eta/\partial i \neq \partial P/\partial i$ ,这表明在这种情况下,系统效率极大时的电流密度不等于系统输出功率最大时的电流密度.因此,混合系统的最大输出功率及在最大功率下所对应的燃料电池最佳电流密度、热离子发电机最佳输出电压和相应的混合系统效率与混合系统的最大效率及在最大效率下所对应的燃料电池最佳电流密度、热离子发电机最佳输出电压和混合系统相应的输出功率是混合发电系统的8个重要性能参数.另外,由于能量平衡的约束,还可获得混合系统最大输出功率下的最佳集电极功函数和混合系统最大效率下的最佳集电极功函数,这2个优化参数也是混合系统的重要性能参数.它们确定了VTIG集电极功函数的最优取值.应用(24),(25)式、能量平衡方程((21),(22)和(28)式),表1和2的参数数据以及极值条件

表3 回热效率对混合系统优化性能的影响

$\varepsilon$	$P_{\max}$ (W)	$i_p$ ( $\text{A m}^{-2}$ )	$V_p$ (V)	$\phi_p$ (V)	$\eta_p$	$\eta_{\max}$	$i_\eta$ ( $\text{A m}^{-2}$ )	$V_\eta$ (V)	$\phi_\eta$ (V)	$P_\eta$ (W)
0.91	249.544	9210	0.5001	0.3449	0.5804	0.7923	2475	1.2997	0.418421	91.5237
0.92	250.243	9222	0.5000	0.3435	0.5813	0.7929	2470	1.2999	0.418430	91.4040
0.93	251.071	9223	0.4980	0.3432	0.5833	0.7934	2465	1.3001	0.418444	91.2842

( $\partial P/\partial i=0$ ,  $\partial P/\partial V=0$  或  $\partial\eta/\partial i=0$ ,  $\partial\eta/\partial V=0$ ), 可得在不同回热效率下,混合系统的10个重要性能参数,如表3所示.

从图5,6和表3可以看出,当混合系统工作在混合发电工作模式时,燃料电池的输出功率和效率随电流密度的增加先增加而后减小,存在最佳电流密度 $i_p$ 和 $i_\eta$ 以及最佳VTIG电压 $V_p$ 和 $V_\eta$ ,使混合系统的输出功率和效率分别达到最大值,即 $P_{\max}$ 和 $\eta_{\max}$ ,但 $i_p \neq i_\eta$ ,  $V_p \neq V_\eta$ ,且 $i_p > i_\eta$ ,  $V_\eta > V_p$ .当 $i < i_\eta$ 和 $i > i_p$ 时,混合系统的输出功率和效率随燃料电池的电流密度的减少或增加而减小.显然, $i < i_\eta$ 和 $i > i_p$ ,不是混合系统的合理工作区域.因此,混合系统的电流密度、电压、输出功率和效率的优化区域应为

$$i_\eta < i < i_p, \tag{31}$$

$$V_p < V < V_\eta, \tag{32}$$

$$P_\eta < P < P_{\max}, \tag{33}$$

$$\eta_p < \eta < \eta_{\max}. \tag{34}$$

其中, $P_\eta$ 是混合系统效率最大时所对应的输出功率,而 $\eta_p$ 则是输出功率最大时所对应的效率.由表3可知,在上述优化运行区域内,VTIG集电极和发射极功函数的取值范围应分别为

$$\phi_p < \phi_2 < \phi_\eta, \tag{35}$$

$$\phi_p + V_p < \phi_1 < \phi_\eta + V_\eta. \tag{36}$$

从表3可见,要使混合发电系统工作在由(33)和(34)式所给出的优化区间内,则要求阳极功函数大约在0.3~0.4 eV,即VTIG阳极需选取低功函数的材料.假如VTIG阳极的选择不受限制,混合系统的理论效率可以达到80%左右.一般来说,材料的功函数取决于晶体取向而且趋向于对开放晶格的金属更小,对于原子紧密堆积的金属则更大,范围大概在1.5~6 eV.获得低功函数的传统方法是通过使用碱或碱土金属

尤其是铯膜料. 铯化钨的功函数可以达到近 0.9 eV 水平<sup>[34]</sup>. 近年来, 在 VTIG 阴极和阳极的间隙填充电介质纳米粒子或纳米线, 利用隧穿弹道效应可使阳级的等效功函数减小至 0.3~0.4 eV<sup>[35-37]</sup>. 可见, 混合发电系统的优化运行应该合理地选取 SOFC 的电流密度和 VTIG 的功函数以便使混合发电系统获得最佳的输出功率和效率.

从图 5 和 6 可见, 对于给定的 VTIG 输出电压, 应用(7), (23), (25)式和表 1 及 2 中的数据, 可以获得 SOFC, VTIG 和混合系统的输出功率, 效率随 SOFC 的电流密度变化的关系曲线, 如图 7 和 8 所示, 其中,  $P_m$  为混合发电系统给定电压下的极大输出功率,  $i_{pm}$  为系统输出功率极大时对应的电流密度,  $\eta_m$  为混合发电系统给定电压下的极大效率,  $i_{\eta m}$  为系统效率极大时对应的电流密度, 相关参数的取值与图 5 相同.

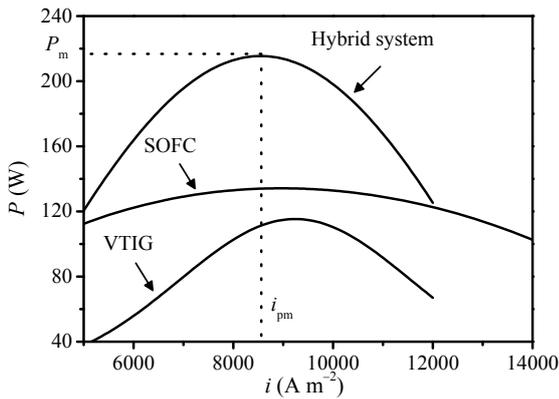


图 7 混合系统、SOFC 和 VTIG 的功率随 SOFC 电流密度的变化曲线  $v=0.5\text{ V}$

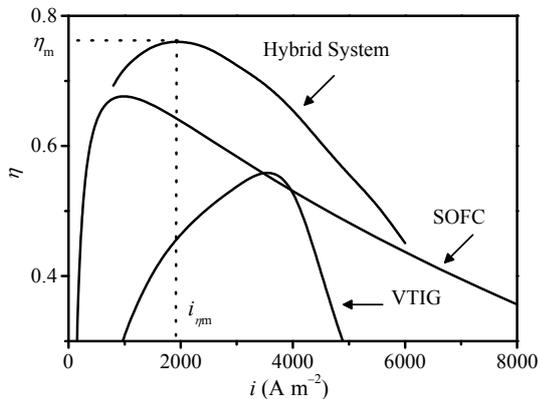


图 8 混合系统、SOFC 和 VTIG 的效率随 SOFC 电流密度的变化曲线  $v=1.1\text{ V}$

从图 7 和 8 可以看出混合系统功率高于 SOFC 和 VTIG 的功率, 混合系统在混合发电工作模式, 即在  $i > i_s$  的区域时, 混合系统的效率也高于 SOFC 的效率. 这表明, 采用真空热离子发电机与固体氧化物燃料电池组成的混合发电系统可以有效的利用燃料电池在大电流区工作产生的高品质废热, 从而提高能量的利用率. 混合系统的性能明显优于燃料电池和热离子发电机单一工作模式时的性能.

图 9 给出了混合发电系统的最大输出功率和效率随 VTIG 电极有效面积变化的关系曲线. 从图 9 可见, 混合系统的效率随电极有效面积单调递减, 而输出功率随电极有效面积先增后减, 存在最大值. 在最佳电极有效面积, 即  $(A_T)_m$  下, 混合发电系统的输出功率达到最大, 即  $(P_{max})_{max}$ . 因此, 综合输出功率和效率, VTIG 电极有效面积的最优取值范围为

$$A_T < (A_T)_m, \quad (37)$$

(37)式也是混合发电系统的优化判据之一, 它确定了混合系统的最优运行范围.

## 5 结论

本文在现有的 SOFC 和 VTIG 模型的基础上, 考虑了 SOFC 的电化学反应、等效内阻和热漏, 以及回热器的非理想回热和 VTIG 的有限速率传热产生的不可逆损失, 对 SOFC 和 VTIG 混合发电系统进行了合理的建模, 导出了混合系统的输出功率与效率的表达式. 通过数值模拟, 研究了 SOFC-VTIG 混合发电系统的性能特性及其优化性能, 并与单一 SOFC 性

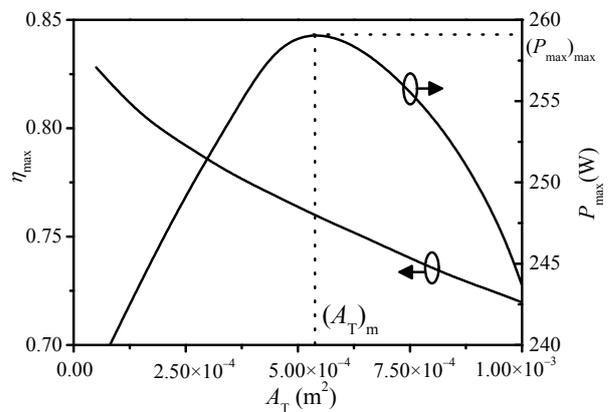


图 9 混合系统的最大功率和效率随 VTIG 面积的变化曲线

能进行了比较, 结果表明该混合发电系统的整体性能有了较大的改善, 实现了能源的梯次利用. 本文还获得了一些重要的参数, 如混合系统的输出功率, 效率, 燃料电池的电流密度、热离子发电器的电压、阴阳极功函数和电极有效面积的优化判据. 所得的结果有助于深入理解能量混合系统的优化性能与各子系统之间的内在联系, 可为一类真实的 SOFC-VTIG 混合发电系统的性能评估与改善提供一定的理论指导, 因此具有一定的现实意义.

### 符号说明

$A_0$ , Richardson 常数( $\text{A m}^{-2} \text{K}^{-2}$ )  
 $A_1$ , VTIG 的高温端热交换面积( $\text{m}^2$ )  
 $A_2$ , VTIG 的低温端热交换面积( $\text{m}^2$ )  
 $A_c$ , SOFC 的接触电极板的表面积( $\text{m}^2$ )  
 $A_T$ , VTIG 的接触电极板的表面积( $\text{m}^2$ )  
 $(A_T)_m$ , 混合发电系统的输出功率达到最大时 VTIG 对应的接触电极板的表面积( $\text{m}^2$ )  
 $A_L$ , SOFC 的热漏有效表面积( $\text{m}^2$ )  
 $C_{p,\text{H}_2\text{O}(l)}$ , 液体水的定压摩尔热容( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $C_{p,\text{H}_2\text{O}(g)}$ , 水蒸气的定压摩尔热容( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $C_{p,\text{H}_2}$ , 氢气的定压摩尔热容( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $C_{p,\text{O}_2}$ , 氧气的定压摩尔热容( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )  
 $e$ , 电子电量(C)  
 $f(p)$ , 动量空间的费米-狄拉克分布  
 $g(p)$ , 动量空间的态密度  
 $\varepsilon_0$ , VTIG 的电极表面的热发射率  
 $\varepsilon$ , SOFC 的回热器效率  
 $\varepsilon_1$ , VTIG 的换热面的热发射率  
 $\varepsilon_2$ , VTIG 的换热面的热发射率  
 $E$ , SOFC 理论上能达到的最大电动势(V)  
 $E_{el}$ , SOFC 中  $\text{O}^{2-}$  的活化能( $\text{J mol}^{-1}$ )  
 $F$ , 法拉第常数( $\text{C mol}^{-1}$ )  
 $U$ , SOFC 的输出电压(V)  
 $U_1$ , VTIG 的高温端单位面积热传导系数( $\text{W K}^{-1}$ )  
 $U_2$ , VTIG 的低温端单位面积热传导系数( $\text{W K}^{-1}$ )  
 $U_{act}$ , SOFC 的活化过电势(V)  
 $U_{con}$ , SOFC 的浓度过电势(V)

$U_{ohm}$ , SOFC 的欧姆过电势(V)  
 $L_v$ , 水的相变潜热( $\text{J mol}^{-1}$ )  
 $i$ , SOFC 的电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_p$ , 系统最大功率下对应的 SOFC 的电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_\eta$ , 系统最大效率下对应的 SOFC 的电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_{pm}$ , 系统输出功率极大时对应的电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_{\eta m}$ , 系统效率极大时对应的电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_{L,a}$ , SOFC 阳极极限电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_{L,c}$ , SOFC 阴极的极限电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_{o,a}$ , SOFC 阳极的交换电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_{o,c}$ , SOFC 阴极的交换电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $i_s$ , SOFC 开始输出热量时所对应的电流密度( $\text{A m}^{-2}$ )  
 $\alpha_L$ , SOFC 的回热器与环境之间热漏系数( $\text{W K}^{-1}$ )  
 $L_{el}$ , SOFC 电解质厚度( $\mu\text{m}$ )  
 $n_e$ , SOFC 电子转移数  
 $P_{\text{H}_2}$ , SOFC 氢气的分压(atm)  
 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ , SOFC 水的分压(atm)  
 $P_{\text{O}_2}$ , SOFC 氧气的分压(atm)  
 $P_{\text{N}_2}$ , SOFC 氮气的分压(atm)  
 $P_{FC}$ , SOFC 输出功率(W)  
 $P_{VTIG}$ , VTIG 的输出功率(W)  
 $P$ , 系统总输出功率(W)  
 $P_{max}$ , 系统极大输出功率(W)  
 $P_{FC,max}^*$ , SOFC 的最大输出功率密度( $\text{W m}^{-2}$ )  
 $P_\eta$ , 系统最大效率下对应的功率(W)  
 $P_m$ , 混合发电系统给定电压下的极大输出功率(W)  
 $(P_{max})_{max}$ , 系统极大输出功率的最大值(W)  
 $\dot{Q}_H$ , 高温端传到发射极的热流(W)  
 $\dot{Q}_L$ , 集电极传到低温端的热流(W)  
 $\dot{Q}_r$ , 单位时间回热器所损失的热量(W)  
 $\dot{Q}_{loss}$ , 单位时间 SOFC 的热漏(W)  
 $\dot{q}_1$ , 离开 VTIG 发射极的单位面积热流率( $\text{W m}^{-2}$ )  
 $\dot{q}_2$ , VTIG 集电极吸收的单位面积热流率( $\text{W m}^{-2}$ )  
 $\dot{q}_r$ , SOFC 回热器的单位面积回热损失( $\text{W m}^{-2}$ )  
 $\dot{q}_R$ , VTIG 发射极到集电极单位面积辐射热流( $\text{W m}^{-2}$ )  
 $\Delta g_0$ , 标准状态下 SOFC 的摩尔吉布斯能变( $\text{J mol}^{-1}$ )

$h_{298}^0$ , 液体水的标准生成焓(J mol <sup>-1</sup> )	$\varphi_p$ , 系统最大功率下对应的 VTIG 的集电极的功函数(V)
$\Delta h$ , SOFC 摩尔焓变(J mol <sup>-1</sup> )	$\varphi_\eta$ , 系统最大效率下对应的 VTIG 的集电极的功函数(V)
$\Delta \dot{H}$ , SOFC 电化学反应前后的总焓变(J mol <sup>-1</sup> )	$\beta$ , SOFC 的等效内阻与漏电阻的比值
$\Delta \dot{G}$ , SOFC 电化学反应前后的总自由能(J mol <sup>-1</sup> )	$k$ , Boltzmann 常数(J K <sup>-1</sup> )
$R_{Leak}$ , SOFC 的漏电阻( $\Omega$ )	$\delta$ , Stefan-Boltzmann 常数(W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> )
$\sigma_0$ , SOFC 中 O <sup>2-</sup> 的活化因子(S m <sup>-1</sup> )	$k_r$ , 回热器的介质热损系数
$R$ , 普适气体常数(J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$J_1$ , VTIG 的发射极电流密度(A m <sup>-2</sup> )
$\eta_{FC}$ , SOFC 的效率	$J_2$ , VTIG 的集电极电流密度(A m <sup>-2</sup> )
$\eta_{VTIG}$ , VTIG 的效率	$J$ , VTIG 的发射极电流两电极间总的电流密度密度(A m <sup>-2</sup> )
$\eta_{FC,max}$ , SOFC 的最大输出效率	$T_0$ , 环境温度(K)
$\eta_{max}$ , 系统最大优化效率	$T$ , SOFC 工作温度(K)
$\eta_p$ , 系统最大功率下对应的系统效率	$T_b$ , 水的沸点温度(K)
$\eta_m$ , 混合发电系统给定电压下的极大效率	$T_L$ , VTIG 低温热源温度(K)
$v_x$ , 在 $x$ 方向的电子速度, 即电子传输方向(m s <sup>-1</sup> )	$T_1$ , VTIG 发射极温度(K)
$V$ , VTIG 输出电压(V)	$T_2$ , VTIG 集电极温度(K)
$V_p$ , 系统最大功率下对应的 VTIG 输出电压(V)	
$V_\eta$ , 系统最大效率下对应的 VTIG 输出电压(V)	
$\varphi$ , VTIG 的集电极的功函数(V)	

## 参考文献

- Acres G J K. Recent advances in fuel cell technology and its applications. *J Power Sources*, 2001, 100: 60–66
- 衣宝廉. 燃料电池——高效、环境友好的发电方式. 北京: 化学工业出版社, 2000
- 毛宗强. 燃料电池. 北京: 化学工业出版社, 2005
- Wang C, Mao Z Q, Xu J M. Preparation of a self-humidifying membrane electrode assembly for fuel cell and its performance analysis. *Sci China Ser G*, 2003, 46: 501–508
- 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
- 方海燕, 王睿, 李明明, 等. 固体氧化物燃料电池 NiO/Y<sub>0.1</sub>Sm<sub>0.1</sub>Ce<sub>0.8</sub>O<sub>1.9</sub> 阳极材料制备与表征. *科学通报*, 2013, 58: 1444–1449
- Lu C, An S, Worrell W L, et al. Development of intermediate-temperature solid oxide fuel cells for direct utilization of hydrocarbon fuels. *Solid State Ionics*, 2004, 175: 47–50
- Singhal S C. Advances in solid oxide fuel cell technology. *Solid State Ionics*, 2000, 135: 305–313
- Palsosn J, Selimovic A, Sjunnesson L. Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation. *J Power Sources*, 2000, 86: 442–448
- Grillo O, Magistri L, Massardo A F. Hybrid systems for distributed power generation based on pressurization and heat recovering of an exiting 100 kW molten carbonate fuel cell. *J Power Sources*, 2003, 115: 252–267
- Zhao Y, Chen J. Modeling and optimization of a typical fuel cell-heat engine hybrid system and its parametric design criteria. *J Power Sources*, 2009, 186: 96–103
- Zhang H C, Su S H, Lin G X, et al. Performance analysis and multi-objective optimization of a molten carbonate fuel cell-Braysson heat engine hybrid system. *Int J Electrochem Sci*, 2012, 7: 3420–3435
- 廖天军, 杨智敏, 林比宏. 热离子-温差热点混合发电模块的优化性能研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 125–133
- Lee J I, Jeong Y H, No H C, et al. Size effect of nanometer vacuum gap thermionic power conversion device with CsI coated graphite electrodes. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 223107
- O'Dwyer M F, A Lewis R, Zhang C, et al. Electronic efficiency in nanostructured thermionic and thermoelectric devices. *Phys Rev B*, 2005,

72: 205330

- 16 Tavkhelidze A N. Nanostructured electrodes for thermionic and thermotunnel devices. *J Appl Phys*, 2010, 108: 044313
- 17 Zhang H, Su S, Chen X, et al. Configuration design and performance optimum analysis of a solar-driven high temperature steam electrolysis system for hydrogen production. *Int J Hydrogen Energ*, 2013, 38: 4298–4307
- 18 Zhao Y, Ou C, Chen J. A new analytical approach to model and evaluate the performance of a class of irreversible fuel cells. *Int J Hydrogen Energ*, 2008, 33: 4161–4170
- 19 Zhang X, Chen J. Performance analysis and parametric optimum criteria of a class of irreversible fuel cell/heat engine hybrid systems. *Int J Hydrogen Energ*, 2010, 35: 284–293
- 20 Larminie J, Dicks A. *Fuel Cell Systems Explained*. New York: Wiley, 2000
- 21 Shin Y, Park W, Chang J, et al. Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen. *Int J Hydrogen Energ*, 2007, 32: 1486–1491
- 22 Shin Y, Park W, Chang J, et al. Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen. *Int J Hydrogen Energ*, 2007, 32: 1486–1491
- 23 Motahar S, Alemrajabi A A. Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system. *Int J Hydrogen Energ*, 2009, 34: 2396–2407
- 24 Zhu H, Kee R J, Janardhanan V M, et al. Modeling elementary heterogeneous chemistry and electrochemistry in solid-oxide fuel cells. *J Electrochem Soc*, 2005, 152: A2427–A2440
- 25 Ashcroft N W, Mermin N D. *Solid State Physics*. Fort Worth, TX: Harcourt Brace College, 1976
- 26 Hatsopoulos G N, Gyftopoulos E P. *Thermionic Energy Conversion. Volume II. Theory, Technology, and Application*. Cambridge, MA: MIT Press, 1979
- 27 Wang Y, Su S, Lin B, et al. Parametric design criteria of an irreversible vacuum thermionic generator. *J Appl Phys*, 2013, 114: 053502
- 28 Islam M, Inal O T, Luke J R. Development of electron reflection suppression materials for improved thermionic energy converter performance using thin film deposition techniques. *J Appl Phys*, 2006, 100: 084903
- 29 Mahan G D, Sofo J O, Bartkowiak M. Multilayer thermionic refrigerator and generator. *J Appl Phys*, 1998, 83: 4683–4689
- 30 Chen L, Ding Z, Sun F. Performance analysis of a vacuum thermionic refrigerator with external heat transfer. *J Appl Phys*, 2010, 107: 104507
- 31 Chen J C, Yan Z J, Wu C. Maximum cooling rate of an irreversible magnetic Stirling refrigeration cycle for a given power input. *Int J Energy Environment Economics*, 1999, 8: 209–223
- 32 Zhang X Q, Su S H, Chen J C, et al. A new analytical approach to evaluate and optimize the performance of an irreversible solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system. *Int J Hydrogen Energ*, 2011, 36: 15304–15312
- 33 Sanchez D, Munoz A, Sanchez T. An assessment on convective and radiative heat transfer modeling in tubular solid oxide fuel cells. *J Power Sources*, 2007, 169: 25–34
- 34 Schwede J W, Bargatin L, Riley D C, et al. Photo-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems. *Nat Mater*, 2010, 9: 762–767
- 35 Zeng T. Thermionic-tunneling multilayer nanostructures for power generation. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 153104
- 36 Lee J, Jeong Y, No H, et al. Size effect of nanometer vacuum gap thermionic power conversion device with CsI coated graphite electrodes. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 223107
- 37 Hishinuma Y, Geballe T H, Moyzhes B Y. Refrigeration by combined tunneling and thermionic emission in vacuum: Use of nanometer scale design. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 2572–2574

## **Performance characteristics and optimal analysis of a fuel cell-vacuum thermionic generator hybrid system**

YANG ZhiMin, LIAO TianJun & LIN BiHong

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

Based on the current models of solid oxide fuel cell (SOFC) and vacuum thermionic generator (VTIG), a general model of a class of an irreversible SOFC-VITG hybrid power system, in which irreversibilities existing in real hybrid system are take into account, is established. Expressions for the efficiency and power output of hybrid power system are analytically derived by the model. By using numerical simulation, the relational curves of the efficiency and power output varying with some important performance parameters of the hybrid system are obtained. The performance characteristics of the hybrid system are presented. The optimum criteria of several important performance parameters are given. The effects of several irreversible loses of the hybrid power system on optimum performance are discussed. The results obtained in this paper can provide some theoretical guidance for the optimization design and operation of practical SOFC-VTIG hybrid power system.

**solid oxide fuel cell, vacuum thermionic generator, hybrid power system, performance optimization analysis**

doi: 10.1360/N092014-00115