

中高温 SOFC/MGT 联合发电技术研究进展

Progress in intermediate and high temperature SOFC/MGT combined power generation technology

胡小夫, 汪洋, 田立, 苏军划, 耿宣, 沈建永, 张南极

HU Xiaofu, WANG Yang, TIAN Li, SU Junhua, GENG Xuan, SHEN Jianyong, ZHANG Nanji

(中国华电科工集团有限公司, 北京 100070)

(China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China)

摘要:中高温固体氧化物燃料电池(SOFC)与微型燃气轮机(MGT)组成的联合发电系统是一种高效、环保、发电成本低新型发电系统,在分布式发电领域具有广阔的应用前景。介绍了SOFC/MGT联合发电系统的工作原理,着重阐述了基于天然气的SOFC/MGT联合发电系统,概述了SOFC/MGT联合发电系统的应用研究现状,展望了SOFC/MGT联合发电系统未来的发展趋势。

关键词:固体氧化物;燃料电池;燃气轮机;重整;联合发电

中图分类号:TM 611

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2019)08-0001-05

Abstract:New combined power generation systems including intermediate and high temperature solid oxide fuel cells (SOFC), and micro gas turbines (MGT) are high-efficient, environmental-protective, and low-cost, which is promising in distributed power generation. We introduced the working principle of SOFC/MGT combined power generation system, and focused on the SOFC/MGT combined power generation system driven by nature gas. We summarized the application of SOFC/MGT combined power generation system, and expected its development.

Keywords:solid oxide; fuel cell; gas turbine; reforming; combined power generation

0 引言

燃料电池是一种直接将化学能转化为电能的装置,其一次发电效率高达50.0%~60.0%。而传统的热机发电是将化学能转化为热能,再将热能转化为机械能,最后将机械能转化为电能,受“卡诺循环”限制,综合发电效率仅为35.0%~45.0%。因此,燃料电池相比于传统的热机发电具有发电效率高、燃料适应性强、无粉尘及残渣、CO₂排放少、噪音污染小等优点,现正以奋起直追的势头快步进入工业化规模应用阶段,成为继火电、水电、核电后的第四代发电方式^[1-2]。

根据电解质的不同将燃料电池分为磷酸型燃料电池(PAFC)、质子交换膜燃料电池(PEMFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)。与其他3类燃料电池相比,SOFC具有燃料种类多样化(如H₂、天然气、煤气、生物质气等)、发电效率高、全固态结构、无液态熔融盐腐蚀、成本

相对较低、易选址、燃料种类多、结构简单,以及能够实现热电联供或与蒸汽轮机混合进行二次发电等优点,是未来化石燃料发电技术的理想选择之一^[3-4]。

中高温SOFC的工作温度一般在600~1000℃,排气具有较高品味的余热,直接排放会造成大量的热量损失,SOFC与余热回收装置组成的各种联合发电系统可以具有更高的发电效率。研究发现,固体氧化物燃料电池/微型燃气轮机(SOFC/MGT)联合发电系统的能量利用率高达80.0%~95.0%,目前被认为是SOFC发电系统能量利用的最有效方式,也是未来分布式发电系统的主要装置^[5-8]。本文主要介绍SOFC/MGT联合发电系统的工作原理和基于CH₄的SOFC/MGT联合发电系统,阐述SOFC/MGT联合发电系统的应用研究现状并对其前景进行展望。

1 SOFC/MGT 联合发电系统简介

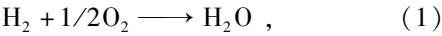
1.1 SOFC 结构及工作原理

SOFC电池组一般是将单电池串联或并联,再通过连接材料和密封材料组装成大功率电池堆。SOFC

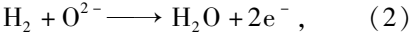
单电池由内到外分别是阴极、电解质、阳极、连接体和电池间集流体,SOFC 单电池的物理结构是电解质两侧贴附着阳极和阴极,催化剂附着在阳极和阴极材料上^[9-10]。阴极的作用是将注入的氧气均匀地分布在阴极材料表面,通过催化作用使氧原子得到电子变成氧离子;阳极的作用是将氢气均匀地分散在阳极材料表面并完成电子的传导,在外电路实现有效的功率输出。SOFC 单电池根据其物理结构设计结构不同分为管式和平板式,如图 1 所示^[11-12],图中:Air,空气;Cathode,阴极;Electrolyte,电解质;Anode,阳极;Flat plate solid oxide fuel cell,平板式固体氧化物燃料电池;Fuel,燃料;Cell repeat unit,电池的重复单元;Current flow,电流;Interconnect,连接体。

SOFC 的工作原理是在 SOFC 阴极侧 O₂ 得到电子变成氧离子,渗透过电解质到达阳极,在燃料气体、电极和电解质三相交界的三相界面(TPB)处,H₂ 和氧离子发生电化学反应生成 H₂O(如图 2 所示),氧离子失去的电子通过外电路流回阴极,再与 O₂ 结合产生氧离子,其反应式见式(1)~(3)^[13-14]。

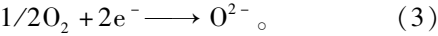
电化学反应



阳极反应



阴极反应



1.2 SOFC/MGT 联合发电系统

SOFC 排气温度和 MGT 涡轮进口温度具有相容性,将它们组成联合发电系统不仅可以提高整个系统的效率,还可以为未来分布式发电提供一种极具前景的解决方案。图 3 是 SOFC/MGT 联合发电系

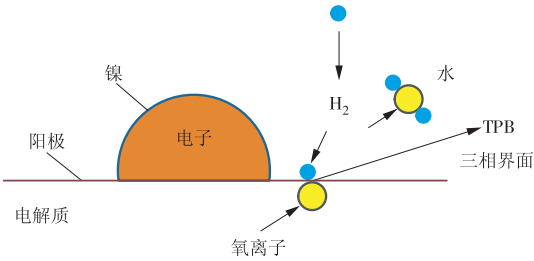


图 2 SOFC 电池在三相界面(TPB)上反应示意
Fig.2 SOFC battery reaction on the three-phase boundary (TPB)

统示意图。SOFC 电池堆作为一个燃烧器单元,压缩空气和燃料进入 SOFC 电池堆中产生电能,燃料化学能(约 50.0%)转化成电能,然后高温尾气经燃烧室燃烧后再给 MGT 供气,MGT 利用高温尾气产生附加电力提高系统效率(约 30.0%)^[15]。

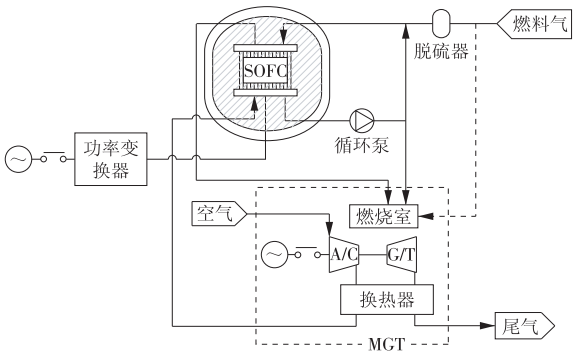


图 3 SOFC/MGT 联合发电系统示意^[16]
Fig.3 Schematic of SOFC/MGT combined power generation system^[16]

2 基于 CH₄ 的 SOFC/MGT 联合发电系统

在短期内直接将 H₂ 作为 SOFC 的燃料较难实现,而天然气(CH₄)储量大、分布广且较廉价易得,

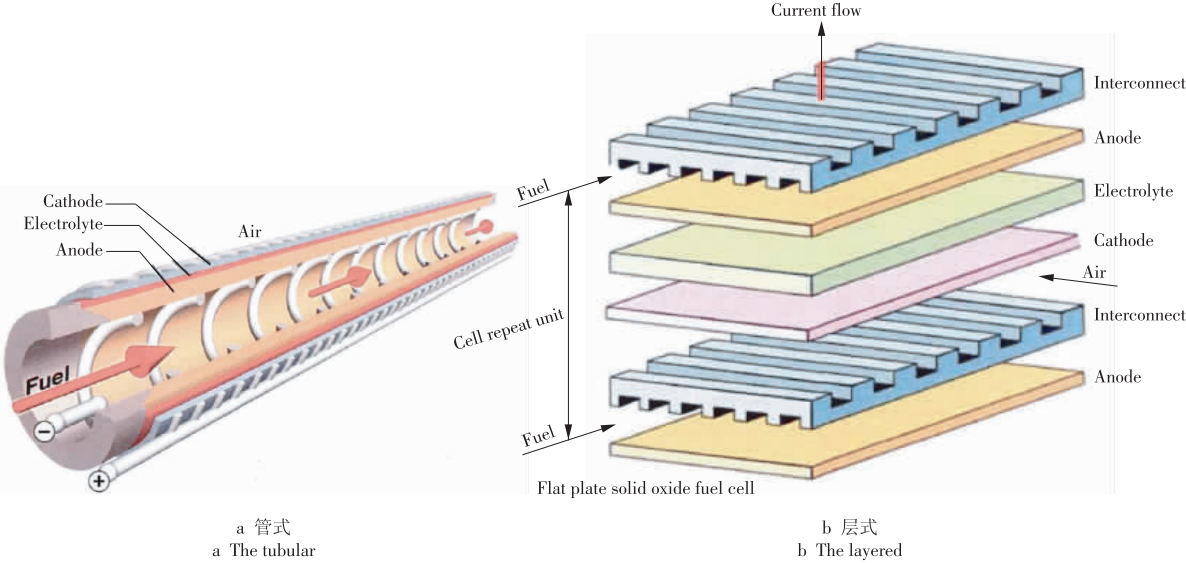


图 1 管式和层式 SOFC 结构示意^[13]
Fig.1 Schematic of tubular and layered SOFC structures^[13]

采用 CH₄ 重整制得 SOFC 的燃料是目前最易实现的操作方式。CH₄ 重整制氢主要包括外重整制氢和内重整制氢 2 种方式。

2.1 采用 CH₄ 外重整制氢的 SOFC/MGT 联合发电系统

基于 SOFC 的 CH₄ 外重整制氢技术主要包括水汽重整(SMR)制氢技术、部分氧化重整(POX)制氢技术和自热重整(ATR)制氢技术,其中水汽重整制氢是目前应用最广泛的热力学制氢技术^[17]。由于 SOFC 系统对燃料成分要求不严格,经过高温水汽反应的产物(甲烷、CO、CO₂ 等)可直接通入电堆,不需要水煤气转化过程,避免增加低温水汽变换反应和选择性氧化反应而带来复杂的系统设计^[18]。

基于 CH₄ 外重整制氢技术的 SOFC/MGT 联合发电系统如图 4 所示。经脱硫处理后的天然气与水混合,经过换热器预热后进入天然气重整制氢单元进行重整反应(见式(4)),得到的合成气进入合成气净化单元,发生置换反应(见式(5)),除去合成气中的 CO,得到富氢气体,进入 SOFC 发生电化学反应(见式(6)),SOFC 排出的高温尾气进入燃气透平膨胀做功,带动发电机发电,为用户供电和供热。

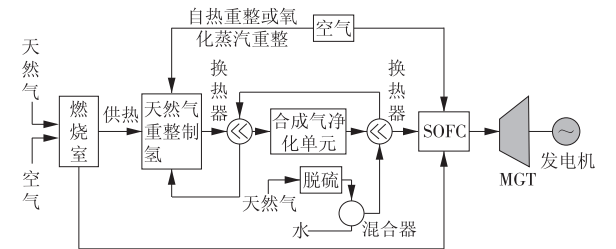
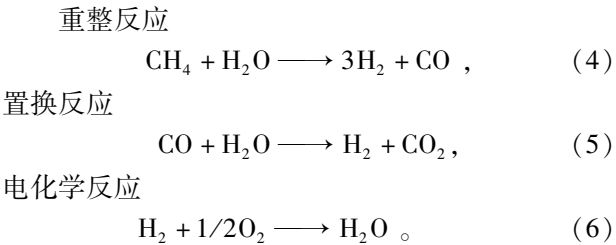


图 4 基于 CH₄ 外重整制氢技术的 SOFC/MGT 联合发电系统示意

Fig.4 External reforming technology of hydrogen production in SOFC/MGT combined power generation system based on methane

2.2 采用 CH₄ 内重整制氢的 SOFC/MGT 联合发电系统

中高温 SOFC 工作温度在 600 ~ 1 000 ℃,而 CH₄ 重整反应温度在 600 ~ 800 ℃,因此可以将 CH₄ 重整制氢过程安置在 SOFC 内部。采用内重整制氢过程可以大大降低系统成本及能耗,这是因为内重整制氢不需要单独的燃料重整器,电池电化学反应

产生的水可以为重整反应提供部分水蒸气;电化学反应连续地消耗 H₂ 也有利于重整反应的进行,增大燃料转换率;同时内重整制氢反应为强烈的吸热反应,而电化学反应为强放热反应,内重整制氢反应吸收电化学反应放出的热量,使得 SOFC 发生的内重整制氢反应和电化学反应相互促进^[4]。

CH₄ 内重整制氢反应发生在 SOFC 燃料入口处,在入口处由于水蒸气和甲烷浓度适宜,H₂ 浓度低,重整反应向正方向进行,直接生成 H₂ 和 CO,CO 再发生置换反应产生 H₂。随着内重整制氢反应的发生,H₂ 浓度增加,对重整反应起抑制作用,同时甲烷和水蒸气大量消耗,重整反应速度下降。在 SOFC 后半部分,产生的 H₂ 使电化学反应快速进行(如图 5 所示)。

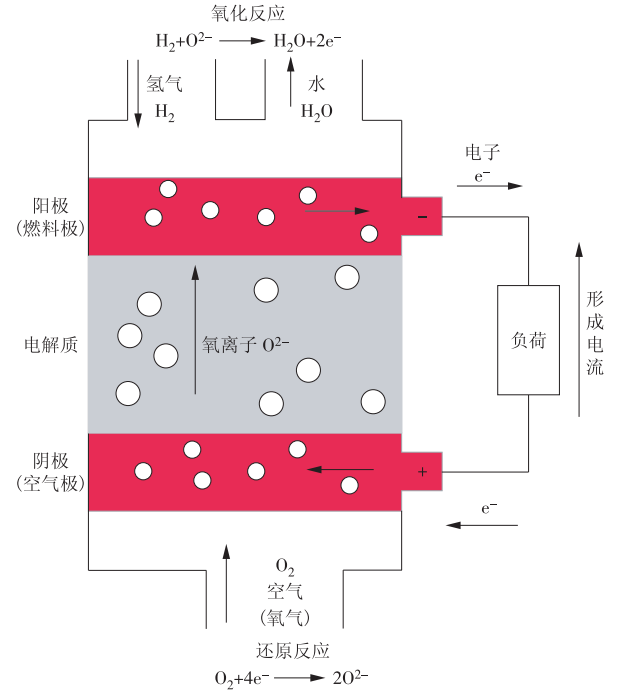


图 5 SOFC 工作原理示意

Fig.5 SOFC working principle

基于 CH₄ 内重整制氢技术的 SOFC/MGT 联合发电系统如图 6 所示。压缩机将燃料加压后经预热器预热,然后与预热水蒸气混合,再送入燃料电池的阳极,在阳极中发生重整反应、置换反应和电化学反应,阴极中的反应物为经过加压和预热后的空气;SOFC 阳极未完全反应的燃料气和阴极未完全反应的贫氧空气在后燃烧中发生燃烧反应。燃烧后的高温高压排气进入燃气透平膨胀做功,带动发电机发电,透平的排气则先后经过空气、燃料和水蒸气的预热器用来预热燃料和空气。在混合系统总体工况负荷特性下,混合系统效率的最大化可通过增加燃料电池的功率来实现^[19]。

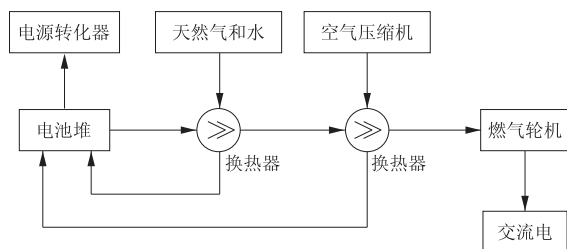


图 6 基于 CH_4 内重整制氢技术的 SOFC/MGT

联合发电系统示意^[19]

Fig. 6 Internal reforming technology of hydrogen production in SOFC/MGT combined power generation system based on methane^[19]

3 SOFC/GT 联合发电系统的应用研究

德国西门子公司、日本三菱公司最早开展 SOFC/MGT 联合发电技术的研究^[20]。2000 年德国西门子西屋公司将世界上第 1 台 SOFC/MGT 联合发电系统安装于美国加利福尼亚大学,该系统由 1 个增压 SOFC 模块和 1 个 MGT 组成,输出功率为 220 kW,其中 SOFC 占 200 kW, MGT 占 20 kW^[21]。2013 年日本三菱重工公司研发出 200 kW 管式 SOFC 与 MGT 混合发电系统,该系统以天然气为燃料,运行已超过 4 000 h;2017 年该公司又推出代号为 Hybrid-FC 的 250 kW SOFC/MGT 联合发电系统商业化产品,系统整体效率为 65.0%,目前已在日本 5 个城市进行了长期的示范运行(如图 7 所示)。

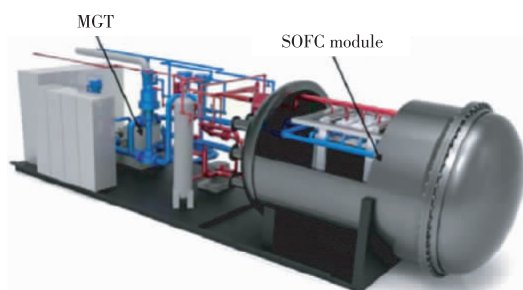


图 7 日本三菱重工 250 kW SOFC/MGT

联合系统^[16]

Fig. 7 Japan Mitsubishi Heavy Industries 250 kW SOFC/MGT combined system^[16]

SOFC/MGT 联合发电系统具有结构庞大、性能复杂等特性,单靠实验室常规试验研究存在成本较高、实施困难等问题,因此,近年来国内外科研机构开始以数值模拟和仿真分析研究联合发电系统。Y. Haseli 等^[22]通过热力学分析比较了 SOFC/MGT 联合循环发电系统和传统的 MGT 循环系统的发电效率,结果表明:在相同的条件下 SOFC/MGT 联合循环发电系统具有更高的热效率,比 MGT 循环系统高 27.8%。Marco Santin 等^[23]采用 WTEMP 软件对 SOFC/MGT 联合发电系统在甲醇、煤油等燃料情况

下燃料电池和燃气轮机的效率和经济性进行研究,研究表明:采用甲醇为燃料的低成本系统最具吸引力。Prapan Kuchonthar^[24]采用 Aspen Plus 对 SOFC 和 MGT 联合发电系统进行模拟,比较 SOFC/MGT 发电系统在热、蒸汽利用和单热回收利用方面的性能,发现使用蒸汽利用系统可以提高系统的发电效率。

我国许多研发机构和高校也通过数值模拟和仿真分析对 SOFC/MGT 联合发电系统进行研发。张安超等^[25]研究发现,在最佳操作温度和燃料利用率下 SOFC/MGT 联合发电系统的性能最佳,联合发电效率高达 80.0%。陈启梅等^[26]考察了高温燃料电池直接燃烧式混合发电系统和间接燃烧式混合发电系统,研究表明:直接燃烧式混合发电系统效率高,而间接燃烧式混合发电系统中燃料电池运行良好,易集成和启动,且使用寿命长。李贺等^[27]利用 Aspen Plus 软件建立 SOFC、MGT、吸收式制冷和热泵模型,研究采用变转速调节模式、空气调节阀模式等方式对混合发电系统性能的影响,并提出一种新的控制模式,可以使 SOFC/MGT 联合发电系统具有优越的变工况性能,使系统效率维持在 56.4% 以上。卢立宁^[28]研究 SOFC/MGT 联合循环系统,以提高发电效率和效率为目标对系统进行优化。吴小娟^[29]利用 Matlab/Simulink 仿真建立 SOFC/MGT 各部件动态模型,按拓扑结构连接各子模块并进行参数优化。岳秀艳等^[30]通过建立热力学模型提出 SOFC 冷热电联产系统,分析了运行参数变化对系统发电功率和制冷量的影响。王建国等^[31]利用 Aspen Plus 和 Fortran 程序分析 SOFC/GT/ST 系统的性能,结果表明:较高的压力、温度和燃料利用率有利于提高 SOFC 系统性能。杨倩^[32]利用 Aspen Plus 等计算程序对 SOFC/MGT/Kalina 联合发电系统进行模拟,考察了不同工况下 SOFC 操作压力、电流密度、空气流量、燃料利用率等运行参数对联合循环系统性能的影响,结果表明:在特定工况下发电效率高达 73.1%。

4 展望

SOFC/MGT 联合发电系统可实现能源的梯级利用,大大提高能源利用率,因此 SOFC/MGT 联合发电系统具有广阔的发展前景。由于天然气具有储量大、分布广并可直接在 SOFC 高温阳极室内重整等优点,使采用内重整制氢的基于 CH_4 的 SOFC/MGT 联合发电系统会成为未来能源路线转移的必然趋势。我国科研机构和高校应加强在 SOFC/MGT 联合发电技术方面的研发力度,使我国尽早掌握具有

自主知识产权的 SOFC/MGT 联合发电技术。

参考文献:

- [1] 汪焕心. 氢能是极为优越的新能源[J]. 广州化工, 2011, 39(23): 1-3.
- [2] 吴傲寒. 家用 SOFC 热电联供系统的动态建模与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [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[J]. 科学通报, 2013, 58(21): 2035-2045.
- [4] 曾洪瑜, 史翊翔, 蔡宁生. 燃料电池分布式供能技术发展现状与展望[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 165-170.
- [5] CHAN Siewhwa, HO Hiang Kwee, TIAN Y. Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1): 111-120.
- [6] CHAN Siewhwa, LOW CF, DING Ovi Lian. Energy and exergy analysis of simple solid-oxide fuel-cell power systems[J]. International of Power Sources, 2002, 103(2): 188-200.
- [7] YI Ji Hye, CHOI Joo Hwan, et al. Comparative evaluation of viable options for combining a gas turbine and a solid oxide fuel cell for high performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 840-848.
- [8] CHATRATTANAWET Narissara, SAEBEA Dang, AUTHAYANUN Suthida, et al. Performance and environmental study of a biogas-fuelled solid oxide fuel cell with different reforming approaches[J]. Energy, 2018, 146: 131-140.
- [9] 廖文俊, 倪蕾蕾, 季文姣, 等. 分布式能源用燃料电池的应用及发展前景[J]. 装备机械, 2017(3): 58-64.
- [10] SINGHAL S C. Science and technology of solid-oxide fuel cells[J]. MRS Bull, 2000, 25(3): 16-21.
- [11] 吴傲寒. 家用 SOFC 热电联供系统的动态建模与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [12] 刘晓. 具有碳捕集的 SOFC/GT 和压缩空气储能混合发电系统特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [13] LARMINIE J, DICKS A. Fuel cell systems explained[R]. 2nd. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [14] 整体煤气化固体氧化物燃料电池 (IG-SOFC) 发电系统[J]. 中国电力, 2009, 42(4): 88.
- [15] 安连锁, 张健, 刘树华, 等. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机混合发电系统[J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 62-64.
- [16] 王雅, 王傲. 中高温固体氧化物燃料电池发电系统发展现状及展望[J]. 船电技术, 2018, 38(7): 1-5.
- [17] 李晓嫣. 家用燃料电池热电联供系统的建模与仿真[M]. 西安: 西安交通大学, 2014.
- [18] 桂敏言. 国外燃料电池发电技术现状及前景[J]. 东北电力技术, 2001, 22(5): 40-45.
- [19] MUELLER Fabian, GAYNOR Robert, AULD Allie E, et al. Sergistic integration of a gas turbine and solid oxide fuel cell for improved transient capability[J]. Journal of Power Sources, 2008, 176(1): 229-239.
- [20] CHAN Siewhwa, HO HK, TIAN Y. Multi-level modeling of SOFC-gas turbine hybrid system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(8): 889-900.
- [21] 朱新坚. 中国燃料电池技术现状与展望[J]. 电池, 2004, 34(3): 202-203.
- [22] HASELI Y, DINCER I, NATERER G F. Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power system with a solid oxide fuel cell through exergy[J]. Thermochimica Acta, 2008, 480(1-2): 1-9.
- [23] MARCO Santin, ALBERTO Traverso, LOREDANA Magistri. Liquid fuel utilization in SOFC hybrid systems[J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 2204-2212.
- [24] KUCHONTHARA Prapan, BHATTACHARYA Sankar, TSUTSUMI Atsushi. 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.
- [25] 张安超. 固体氧化物燃料电池本体及联合发电系统性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [26] 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): 111-115.
- [27] 李贺. SOFC 与 MGT 混合发电系统变工况性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [28] 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.
- [29] 吴小娟. 固体氧化物燃料电池/微型燃气轮机混合发电系统的建模与控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [30] 岳秀艳, 韩吉田, 于泽庭, 等. 设置富氨蒸汽回热器的固体氧化物燃料电池/燃气轮机/卡琳娜联合循环系统的热力性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(26): 4483-4492.
- [31] 王建国, 许丽, 王玉璋, 等. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机混合发电的发展及甲烷蒸汽重整的研究[J]. 燃气轮机技术, 2010, 23(2): 1-4.
- [32] 杨倩. SOFC-GT-Kalina 联合循环系统性能研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2016.

(本文责编: 白银雷)

作者简介:

胡小夫 (1985—), 女, 山东乳山人, 高级工程师, 博士, 从事火电厂节能环保等方面的工作 (E-mail: huxf@chec.com.cn)。