低温固体氧化物燃料电池发展及应用

刘琨*, 黄辉, 陈曦, 马军, 都金光, 曹阳

(郑州轻工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:随着世界人口急剧膨胀以及对地球资源的大量消耗,能源利用问题已经引起了世界各国的高度重视。低温固体氧化物燃料电池(Low Temperature-Solid Oxide Fuel Cell, LT-SOFC)由于其绿色、高效的独特优势得到了诸多研究与发展,为了进一步提高 LT-SOFC 的性能,加快其产业化,有许多问题仍待解决。本文从如何提高 LT-SOFC 的整体性能入手对固体氧化物燃料电池的阳极、阴极及电解质面临的难题及可能的解决方案进行综述,并介绍了低温 SOFC 目前的发展及应用情况。以上工作可为 LT-SOFC 的研究提供参考依据,推进 LT-SOFC 的发展及应用。

关键词:固体氧化物燃料电池(SOFC);低温 SOFC;性能;发展及应用

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0277(2024)03-0135-08

由于全球人口的急剧增长和科学技术的飞速发展,能源需求正在迅速增长。考虑到地球上有限的碳氢化合物自然资源(石油、煤炭、天然气等)及其消耗对气候变化的影响,需要尽可能有效地利用这些资源维持全球可持续性发展^[1,2]。然而,目前从上述燃料中转化能源的效率约为 36%,其余的能源则都以热能的形式被浪费。相比而言,燃料电池直接将燃料的化学能转化为电能,转化效率显著提高^[3,4]。在不同类型的燃料电池中,质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFCs)一直是研究最为广泛的燃料电池,因为其较低的工作温度(约为 80 °C),能够从室温迅速启动,更适合携带和运输^[5,6]。然而,

PEMFCs 需使用纯氢气(H₂)作为燃料,需要配套的 H₂ 燃料基础设施,但目前这种基础设施较少。H₂ 的主要来源是通过天然气分解得到,考虑到天然气生产 H₂ 的能量损失,PEMFCs 的总能量转化效率不到 50%^[7]。

固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)使用氧离子进行传导,而不是质子传导,将氧从阴极(空气电极)输送到阳极(燃料电极)并与多种碳氢化合物燃料发生氧化反应,具有很高的燃料电转化效率(电转化效率大于 50%,加上利用余热热电联产其效率超过 85%),有其他能源转换技术无法比拟的优势^[8,9]。典型的 SOFC 由阳极、电解质、阴极、连接器组成,单个电池串联在一起,形成

收稿日期:2022-03-15

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U2004169);河南省科技攻关项目(192102210017)

作者简介:刘琨(1983-),男,湖北孝感人,博士,副教授,主要从事增材制造及金属表面防护技术的研究,E-mail:2016023@zzuli.edu.cn

DOI:10.3724/S1004-0277.202403015

SOFC 堆栈^[10,11]。燃料电池发展初期,氧化钇部分稳定的二氧化锆(YSZ)一直是 SOFC 电解质的首选材料,具有高温稳定性好、高温电导率较好、原料易生产且成本低等优点^[12]。但是,由于 YSZ 低温电导率较差,早期的 SOFC 的工作温度高达 1000 °C,这也间接导致电池成本高、启动和关闭周期长、以及组件材料和电极烧结导致电池性能退化等缺点产生^[13]。研究发现使用化学性能更活跃的阳极和阴极材料如薄膜电解质,可降低 SOFC 的工作温度^[14~17]。此时,SOFC 的工作温度能够降低到 800 °C 左右,工作温度处于 800 °C 的燃料电池也被称为中温固体氧化物燃料电池。然而,为了获得寿命更长、启动时间更短、启动能量更低的 SOFC,还需进一步降低燃料电池的工作温度。这就需要导电能力更强的电解质材料,沉积更薄的具有纳米微观结构的电解质,减少欧姆损耗和极化损耗。经过全球科研人员的努力,现已成功制备了低温 SOFC,其工作温度低于 650 °C^[18]。本文从电池材料到电池设计总结了低温 SOFC 近几年的发展现状及面临的机遇与挑战,并对未来低温燃料电池的发展做了展望。

1 提高阳极材料的耐受性和热循环能力

阳极是燃料电池内燃料的氧化反应场所,需具有较高的电子电导率和较好的氧化反应催化活性;同时还要求具备足够高的氧离子电导率和较大的用于发生电化学氧化反应的三相边界长度^[19]。对于以碳氢化合物为燃料的 SOFC 而言还需要催化碳氢化合物进行重整反应,避免结焦积碳。镍(Ni)是使用最为广泛的 SOFC 催化剂,通常以 Ni-YSZ 金属陶瓷阳极的形式存在^[20~29]。随着燃料电池工作温度降低,镍的氧化表面活性、抗结焦和耐硫性能变得严重不足^[20~23]。为此,需要在镍基陶瓷阳极中加入增强镍活性的添加剂来弥补镍在低温下的活性。有报道称,少量的铁加入到镍中可以增强阳极反应的活性,铁元素的加入可以稳定镍的细粒度,避免

电催化剂的粗化和相应的表面积减少^[30]。但是铁元素的加入不能改善镍基阳极材料的抗高温性能。在 650 °C 左右的还原氛围下,金属镍也会被缓慢氧化形成 NiO。新氧化物的形成将导致 Ni、NiO 的热膨胀系数不匹配,在热循环过程中将产生极大的内应力并导致材料开裂。由于掺杂的 CeO₂ 本身在阳极反应中具有相当独特的高活性,所以将 CeO₂ 与镍混合也可以得到非常活跃的阳极。因此,Ni-GDC 陶瓷阳极能在较低的温度下获得较低的阳极过电位,也是目前研究较多的低温 SOFC 阳极材料^[31~33]。近几年来研究人员发现很多镍基金属陶瓷阳极材料: Ni-SDC、Ni-LSGM、Ni-BZCY、Ni_{1-x}Cu_x/SDC、Ni_{1-x}Fe_x/SDC 皆具有很好的性能,但是目前还没有找到比镍基金属陶瓷具有更小阳极过电位的阳极材料,这也是制约低温 SOFC 应用的难题之一^[20~30]。

2 降低电解质电阻

为了提高低温 SOFC 的功率密度,必须降低电解质的欧姆损耗。目前常用的方法有两个:降低电解质层的厚度和寻找新型的电解质材料。随着先进薄膜制备技术的发展,电解质的厚度已经从几百微米减薄到十个微米左右。制备方法也非常多样,化学气相沉积、热喷涂、热解、溶胶-凝胶、丝网印刷和带铸/压延方法等都可以用于制备厚度较小的电解质层^[34]。在传统的 SOFC 中,通常采用多孔金属陶瓷作为阳极支撑层。典型的阳极材料是由体积比为 1:1 的 NiO 和 YSZ 烧结而成的金属陶瓷。在随后高温暴露于阳极气体时,NiO 被还原为镍,形成金属导电相和催化相,NiO 还原为镍的过程中使得阳极形成多孔结构,便于燃料气体输送。然后使用上述方法在阳极支撑上沉积一层致密电解质膜。对于某些材料,还需要一个缓冲层来抑制电极和电解质之间的高温化学反应^[35,36]。

降低电解质电阻的方法是提高本征电解质的导电性,这是材料科学研究的一个基本领域,目前主要关注的是具有萤石和钙钛矿结构的材料^[37]。

二氧化锆(ZrO_2)和二氧化铈(CeO_2)都具有典型的立方萤石结构。这类材料在室温下均是绝缘体,电阻率较大(大于 $800 \Omega \cdot cm$),但高温导电性良好,具有负的电阻温度系数^[12,37,38]。在高温环境下,由于电荷补偿和空间构架效应形成了大量带两个正电荷的氧空位,带正电荷的氧空位与附近的氧离子发生易位,造成空位的定向迁移而导电^[39]。 Bi_2O_3 也属于立方萤石结构,由于铋为正三价,25%的阴离子位点本质上是空位。增加 Bi_2O_3 导电性的关键是增加氧空位的同时不对阴离子亚晶格重新排序。这可以通过添加具有接近主阳离子半径的高极化掺杂和多阳离子掺杂随机化位点实现。 Er_2O_3 、 Dy_2O_3 是提高 Bi_2O_3 导电性理想的添加剂^[34,40,41]。二十世纪末,部分学者发现了 Sr^{2+} 、 Mg^{2+} 掺杂的镱酸镧($LaGaO_3$, 钙钛矿结构氧化物),化学式为 $La_{1-x}Sr_xGa_{1-y}Mg_yO_3$, 简称为 LSGM, 在氧分压下表现为纯氧离子导电,600 °C 时离子导电率很高,约为 $10^{-2} S/cm$ ^[42,43]。虽然这些材料已经达到了极高的导电率,但也存在与毗邻的电极材料高温化学相容性问题。电池在高温工作过程中,电解质与相邻阳极、阴极之间存在严重的界面扩散和化学反应,易在界面处生成导电性差的新相,或者引入电子导电性(尤其是厚度约为 $10 \mu m$ 的薄膜电解质层),最终影响电池的寿命和电池的功率^[44]。采用脉冲激光制备 LSGM/SDC 双层电解质,能够阻止镍从阳极扩散到 LSGM 电解质中,也能预防镧从电解质中迁出,此双层电解质能够有效提高电池的功率密度。而新开发的 ESB/GDC 双层电解质中的 Bi_2O_3 可以阻碍 CeO_2 中的电子传导,使得电池具有很高的功率密度(约为 $2 W \cdot cm^{-2}$)和接近理论开路电势的特性。

3 增加阴极活性和电导率

燃料电池工作时,阴极和阳极电催化反应被热激活,阴极将外部供给的 O_2 解离为氧原子,氧原子与电子在三相界面反应成为 O^{2-} ,或者 O_2 在电极表面反应成为 O^{2-} ^[34]。反应速率随着操作温度的升高

而增大,导致低温 SOFC 操作的电极过电位较大。由于氧分子的解离活化能较燃料氧化能大,所有阴极对温度的依赖性也较阳极大。因此,对于低温 SOFC 而言,阴极的催化活性决定电池的整体性能。为此,目前国内外的研究重点是以提高燃料电池功率性能为目的的高性能阴极研究。钙钛矿结构的 $Ln_{1-x}Sr_xMO_3$ (Ln 为稀土元素, $M=Fe, Co, Mn$) 具有良好的电子传导性,较好的氧自扩散系数,常用作低温 SOFC 的阴极^[44]。 $La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_3$ (LSCF) 化学相容性好,不与铈基电解质材料反应,在 600 °C 时,自扩散系数较高,且其热膨胀系数与常用电解质较匹配^[34,45,46]。LSCF 阴极的三相界面长度有限,氧的催化活性受到限制。为此,可将具有氧离子传导特性的第二相掺杂到 LSCF 中形成复合阴极结构,提高三相界面长度,提高氧的催化活性,减小电极/电解质之间的界面极化电阻。其中 LSCF/GDC、LSCF/SDC 复合阴极都具有比 LSCF 更优异的性能^[34,47-51]。对于低温 SOFC 而言,较低的工作温度使得纳米特征电极结构变得更加稳定,组件之间的烧结和反应活性降低,因其具有更高的比表面积,已成为目前燃料电池材料研究的热点之一。

4 降低 SOFC 工作温度的关键

降低固体氧化物燃料电池的工作温度具有诸多优点。低温固体氧化物燃料电池材料较高温固体氧化物燃料电池更加廉价,且由于工作温度较低,电池稳定性及电池寿命也会较高温固体氧化物燃料电池高,其启动速度也比高温燃料电池快^[18,34]。此外,600 °C 左右也是液体醇类燃料的重整温度,便于该类型燃料的重整反应。发展低温 SOFC 技术的关键是在较低的操作温度下减少电解质的电阻。目前解决这个问题的方法有三个。一是使用先进的薄膜制备技术,制备气密性好、厚度更薄的电解质膜;二是开发新型的低温高离子电导率材料;三是开发更加成熟的纳米材料制备技术。纳米材料具有表面效应、体积效应、量子尺寸效应等,因此与传统非纳米材料相比具有不同的催化性

能和热物理性能。研究发现纳米尺度的 YSZ 具有较高的离子导电率和机械强度。采用纳米材料制备的阳极不仅可增加颗粒间的孔隙,而且本身具有内孔,一方面有效提高了气体的扩散速率,另一方面增加了三相界面的长度,改善了镍与 YSZ 的接触界面^[52]。

5 低温 SOFC 在国内外的应用及发展展望

5.1 国内外应用

低温固体氧化物燃料电池由于其较低的工作温度,尾气温度相对较低,更加适合区域式、中小型发电、便携式电源灯场合。相比欧美、日本等国家的快速发展,中国低温燃料电池技术水平和产业化进程还是相对滞后的。中国大多数企业仍处于研发和示范工程阶段,主要企业有潮州三环、苏州华清、宁波索福人等公司,目前潍柴动力、中广核集团、晋煤集团也开始发展 SOFC 行业。潮州三环是中国电子陶瓷领域的龙头企业,从 2004 年开始开展 SOFC 相关技术的开发和量产工作,2012 年开始量产氧化物燃料电池单电池,2017 年开始向国内市场推出固体氧化物燃料电池电堆,目前正在进行 30 kW 固体氧化物燃料电池系统研发,已经成为全球最大的 SOFC 电解质隔膜供应商和欧洲市场上最大的 SOFC 单电池供应商。2010 年苏州华清京昆新能源科技有限公司开始单电池、电堆以及发电系统等产品的研发,2019 年 8 月,固体氧化物燃料电池项目首批 20 万片单电池生产线投产。宁波索福人能源技术有限公司创立于 2014 年,目前建立了固体氧化物燃料电池单电池、电堆以及发电系统的生产线,一直对外公开销售单电池、电堆以及发电系统等产品,2022 年 1 月,研制的 25 kW 固体氧化物燃料电池发电系统顺利运行。欧美发达国家有很多公司已经开发出不同规模的低温 SOFC 电池堆^[18]。英国 Ceres Power 公司是一个以制备金属支撑型低温固体氧化物燃料电池为主的企业。该公司制备的低温 SOFC 工作温度在 500 °C ~ 600 °C,以

增湿氢气为燃料时,功率密度最高可达 0.31 W/cm²,即使以重整气为燃料,其最高功率密度也能达到 0.25 W/cm²。该公司生产的低温 SOFC 堆栈运行 10000 h,其降解率小于 0.5,其性能损失小于 4%。此外,美国的 Bloom Energy 公司、Delphi Automotive System 公司、德国 Julich 研究中心都在大力开发低温 SOFC 系统,许多产品在发电、交通运输、热电共联、家用等领域已经开始应用。日本在 2005 年开始大力推广家用燃料电池系统,2012 年推出了家用型 ENE-FARM Types 低温固体氧化物燃料电池热电联供系统。该系统的发电效率约为 47%,加上热效率,其总效率大于等于 90%,远高于其他电池系统的效率^[53]。

5.2 展望

低温固体氧化物燃料电池具有极高的效率、优异的热电联供特性,并且启动时间短、携带和运输方便、燃料利用率高、污染小。但是由于技术上有一定的难题,成本较高,离大规模应用还有较大差距。目前看来,阻止低温固体氧化物燃料电池应用面临的三大问题分别是材料性价比、产业化制备方法和电池的使用寿命。目前采用纳米复合材料制备的固体氧化物燃料电池已经具有较优异的电性能,但是由于原材料价格昂贵、电池制备过程复杂、且设备不适合产业化已经成为阻碍低温固体氧化物燃料电池应用的主要问题之一。另外,如何更有效克服燃料电池在使用过程中的性能衰减,改善其启停过程中由于热膨胀系数不匹配导致的寿命降低等是低温固体氧化物燃料电池应用需要解决的另一个问题。

参考文献:

- [1] Beckinghausen A, Odlare M, Thorin E, Schwede S. From removal to recovery: An evaluation of nitrogen recovery techniques from wastewater[J]. Applied Energy, 2020, 263: 114616.
- [2] Ganiyu S O, Martínez-Huitle C A, Rodrigo M A. Renewable energies driven electrochemical wastewater/soil de-

- contamination technologies: A critical review of fundamental concepts and applications[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 270: 118857.
- [3] Mehran M T, Khan M Z, Song R H, Lim T H, Naqvi M, Raza R, Zhu B, Hanif M B. A comprehensive review on durability improvement of solid oxide fuel cells for commercial stationary power generation systems[J]. *Applied Energy*, 2023, 352: 121864.
- [4] Yu D M, Wan X M, Gu B. Bi-objective optimization of biomass solid waste energy system with a solid oxide fuel cell[J]. *Chemosphere*, 2023, 323: 138182.
- [5] 叶可, 颜永文, 李君, 曲大为, 于锋. 基于不同流道的 PEMFC 传质与水热平衡数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(10): 349-354.
- Ye K, Yan Y W, Li J, Qu D W, Yu F. Numerical simulation of mass transfer and hydrothermal balance in PEMFC based on different flow channels[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(10): 349-354.
- [6] 李国超, 简弃非, 孙绍云. 质子交换膜燃料电池在军事中的应用前景[J]. *兵工学报*, 2007, 28(4): 487-490.
- Li G C, Jian Q F, Sun S Y. Application prospects of proton exchange membrane fuel cells to military affairs[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(4): 487-490.
- [7] 伍赛特. 氢燃料电池船舶应用可行性分析及前景展望[J]. *节能*, 2023, 42(7): 89-93.
- Wu S T. Application feasibility analysis and future prospect of ship used hydrogen fuel cell[J]. *Energy Conservation*, 2023, 42(7): 89-93.
- [8] Zhang T H, Zhao H B, Du H C, Wang H. Thermodynamic performance study of a novel cogeneration system combining solid oxide fuel cell, gas turbine, organic Rankine cycle with compressed air energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 249: 114837.
- [9] Nguyen H Q, Shabani B. Proton exchange membrane fuel cells heat recovery opportunities for combined heating/cooling and power applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 204: 112328.
- [10] Radenahmad N, Azad A T, Saghir M, Taweekun J, Abu Bakar M S, Reza M S, Azad A K. A review on biomass derived syngas for SOFC based combined heat and power application[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 119: 109560.
- [11] 张秀成, 陈德强. 固体氧化物燃料电池电流收集端子的结构设计[J]. *上海电气技术*, 2020, 13(3): 25-27, 36.
- Zhang X C, Chen D Q. Design of structure of current collection terminal of solid oxide fuel cell[J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2020, 13(3): 25-27, 36.
- [12] 林剑春, 李伟章, 王文广, 熊春美, 郭福建. 中低温固体氧化物燃料电池电解质的研究进展[J]. *中国陶瓷*, 2023, 59(11): 1-10.
- Lin J C, Li W Z, Wang W G, Xiong C M, Guo F J. Research progress of electrolyte for medium and low temperature solid oxide fuel cells[J]. *China Ceramics*, 2023, 59(11): 1-10.
- [13] 赵秉国, 刘亚迪, 胡浩然, 张扬军, 曾泽智. 制备固体氧化物燃料电池中电解质薄膜的电泳沉积法[J]. *化学进展*, 2023, 35(5): 794-806.
- Zhao B G, Liu Y D, Hu H R, Zhang Y J, Zeng Z Z. Electrophoretic deposition in the preparation of electrolyte thin films for solid oxide fuel cells[J]. *Progress in Chemistry*, 2023, 35(5): 794-806.
- [14] Chasta G, Himanshu, Dhaka M S. A review on materials, advantages, and challenges in thin film based solid oxide fuel cells[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(11): 14627-14658.
- [15] 杜柯, 宋琛, 余敏, 刘太楷, 杨成浩, 刘敏. 等离子喷涂制备固体氧化物燃料电池电解质涂层研究进展[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(1): 25-33.
- Du K, Song C, Yu M, Liu T K, Yang C H, Liu M. Research status of preparation of solid oxide fuel cell electrolyte by plasma spray[J]. *China Surface Engineering*, 2022, 35(1): 25-33.
- [16] 郭土. 固体氧化物燃料电池电解质材料的研究进展[J]. *当代化工*, 2023, 52(10): 2445-2448, 2480.
- Guo T. Research progress in electrolytes of solid oxide fuel cells[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2023,

- 52(10): 2445-2448,2480.
- [17] 代宁宁, 单提伟, 王刚, 杨志宇. 稀土基固体氧化物燃料电池阴极材料的制备及应用研究进展[J]. 稀土, 2023, 44(4): 58-70.
Dai N N, Shan T W, Wang G, Yang Z Y. Progress in preparation and application of rare earth based solid oxide fuel cell cathode materials [J]. Chinese Rare Earths, 2023, 44(4): 58-70.
- [18] 孟君玲, 田川, 徐娜, 赵丽娜, 钟海霞, 徐占林. 固体氧化物燃料电池电极表面原位析出的研究进展[J]. 应用化学, 2023, 40(10): 1335-1346.
Meng J L, Tian C, Xu N, Zhao L N, Zhong H X, Xu Z L. Research progress of *in situ* exsolution of electrode surface of solid oxide fuel cells[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2023, 40(10): 1335-1346.
- [19] Xu Q D, Guo Z J, Xia L C, He Q J, Li Z, Temitope Bello I, Zheng K Q, Ni M. A comprehensive review of solid oxide fuel cells operating on various promising alternative fuels [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 253: 115175.
- [20] Ideris A, Croiset E, Pritzker M, Amin A. Direct-methane solid oxide fuel cell (SOFC) with Ni-SDC anode-supported cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(36): 23118-23129.
- [21] Fan D J, Gao Y, Liu F S, Wei T, Ye Z M, Ling Y H, Chen B, Zhang Y, Ni M, Dong D H. Autothermal reforming of methane over an integrated solid oxide fuel cell reactor for power and syngas co-generation [J]. Journal of Power Sources, 2021, 513: 230536.
- [22] Al-Khori K, Bicer Y, Koç M. Integration of solid oxide fuel cells into oil and gas operations: Needs, opportunities, and challenges[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 118924. [.
- [23] Fallah Vostakola M, Amini Horri B. Progress in material development for low-temperature solid oxide fuel cells: A review[J]. Energies, 2021, 14(5): 1280.
- [24] Abd Aziz A J, Baharuddin N A, Somalu M R, Muchtar A. Review of composite cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cell applications[J]. Ceramics International, 2020, 46(15): 23314-23325.
- [25] Lee M S, Lee S, Jeong W, Ryu S, Yu W, Lee Y H, Cho G Y, Cha S W. Nanoporous nickel thin film anode optimization for low-temperature solid oxide fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(73): 36445-36453.
- [26] Xu M G, Yu J, Song Y F, Ran R, Wang W, Shao Z P. Advances in ceramic thin films fabricated by pulsed laser deposition for intermediate-temperature solid oxide fuel cells[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(9): 10568-10582.
- [27] Qiu P, Sun S C, Yang X, Chen F L, Xiong C Y, Jia L C, Li J. A review on anode on-cell catalyst reforming layer for direct methane solid oxide fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(49): 25208-25224.
- [28] Wang Y, Cui C S, Tong Y C, Wang S W, Peng R R, Chen C S, Zhan Z L. Dopant-induced surface activation of ceria nanorods for electro-oxidation of hydrogen and propane in solid oxide fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(34): 17922-17931.
- [29] Yang L, Li Y Z, Sun Y D, Wang W, Shao Z P. Perovskite oxides in catalytic combustion of volatile organic compounds: Recent advances and future prospects[J]. Energy & Environmental Materials, 2022, 5(3): 751-776.
- [30] Maiti T K, Majhi J, Maiti S K, Singh J, Dixit P, Rohilla T, Ghosh S, Bhushan S, Chattopadhyay S. Zirconia- and ceria-based electrolytes for fuel cell applications: Critical advancements toward sustainable and clean energy production[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(43): 64489-64512.
- [31] Su H R, Hu Y H. Progress in low-temperature solid oxide fuel cells with hydrocarbon fuels[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 402: 126235.
- [32] Ishihara A, Tominaka S, Mitsushima S, Imai H, Sugino O, Ota K I. Challenge of advanced low temperature fuel cells based on high degree of freedom of group 4 and 5 metal oxides [J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2020, 21: 234-241.
- [33] Ishaq M, Ishaq H. Performance assessment of biogas-

- fed solid oxide fuel cell system for municipal solid waste treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 354: 131702.
- [34] 杨莹, 张雁祥, 闫牧夫. 中低温固体氧化物燃料电池电解质制备方法研究进展[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(8): 50-57.
Yang Y, Zhang Y X, Yan M F. Research progress on preparation methods of medium and low temperature SOFC electrolytes [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(8): 50-57.
- [35] Gunnar S, Evgenii A. Nonstoichiometric strontium ferromolybdate as an electrode material for solid oxide fuel cells[J]. *Inorganics*, 2022, 10(12): 230.
- [36] Mohebbi H, Mirkazemi S M. Controlling Yttria-stabilized zirconia/gadolinia-doped ceria interdiffusion layer in the solid oxide fuel cell electrolyte via flash sintering method[J]. *Ionics*, 2021, 27(12): 5219-5227.
- [37] 孙杨, 陈海峰, 杨杰, 杨肖肖, 贾均红. 固体氧化物燃料电池电解质发展现状[J]. *中国材料进展*, 2023, 42(5): 421-430.
Sun Y, Chen H F, Yang J, Yang X X, Jia J H. The development status of solid oxide fuel cell electrolyte [J]. *Materials China*, 2023, 42(5): 421-430.
- [38] 李静, 刘阿鹏. 固体氧化物燃料电池电解质材料的研究[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(5): 56-59.
Li J, Liu A P. Research on electrolyte material for solid oxide fuel cells[J]. *New chemical materials*, 2021, 49(5): 56-59.
- [39] 郑全生, 王玉, 白宇. 固体氧化物燃料电池电解质及导电机理综述[J]. *中国陶瓷*, 2022, 58(10): 1-7.
Zheng Q S, Wang Y, Bai Y. Review on electrolyte materials and conductive mechanisms of solid oxide fuel cells[J]. *China Ceramics*, 2022, 58(10): 1-7.
- [40] 尚凤杰, 李沁兰, 石永敬, 刘海定, Shigeng Song. 固体氧化物燃料电池电解质材料的研究进展[J]. *功能材料*, 2021, 52(6): 6076-6083, 6089.
Shang F J, Li Q L, Shi Y J, Liu H D, Shigeng S. Research progress of electrolyte materials in solid oxide fuel cells[J]. *Journal of Functional Materials*, 2021, 52(6): 6076-6083, 6089.
- [41] 李舒婷, 彭军, 刘媛媛, 蔡长焜, 安胜利. CeO₂ 基电解质固体氧化物燃料电池 Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃-Na₂O 系玻璃密封材料性能研究[J]. *陶瓷学报*, 2022, 43(5): 934-942.
Li S T, Peng J, Liu Y Y, Cai C K, An S L. CeO₂ based electrolyte solid oxide fuel cell Al₂O₃-SiO₂-B₂O₃-Na₂O[J]. *Journal of Ceramics*, 2022, 43(5): 934-942.
- [42] Sun C W, Alonso J A, Bian J J. Recent advances in perovskite-type oxides for energy conversion and storage applications[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(2): 2000459.
- [43] Cheng J H, Liang H, Zhu X H, Chen Y T, Tian C G. An investigation on novel electrolyte materials with scheelite structure for solid oxide fuel cells[J]. *Chemical Physics Letters*, 2023, 826: 140684.
- [44] 李舒婷, 刘媛媛, 康嘉龙, 薛优, 彭军, 安胜利. SrCoO_{3,δ} 基阴极材料掺杂改性的研究进展[J]. *内蒙古科技大学学报*, 2019, 38(2): 189-193.
Li S T, Liu Y Y, Kang J L, Xue Y, Peng J, An S L. Research progress on doped modification of cathode materials based on SrCoO_{3,δ}[J]. *Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology*, 2019, 38(2): 189-193.
- [45] Zhang L L, Chen G, Dai R X, Lv X H, Yang D, Geng S J. A review of the chemical compatibility between oxide electrodes and electrolytes in solid oxide fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 492: 229630.
- [46] Han N, Shen Z F, Zhao X L, Chen R F, Thakur V K. Perovskite oxides for oxygen transport: Chemistry and material horizons [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 151213.
- [47] Bello I T, Zhai S, Zhao S Y, Li Z, Yu N, Ni M. Scientometric review of proton-conducting solid oxide fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(75): 37406-37428.
- [48] Koohfar S, Ghasemi M, Hafen T, Dimitrakopoulos G, Kim D, Pike J, Elangovan S, Gomez E D, Yildiz B. Improvement of oxygen reduction activity and stability on

- a perovskite oxide surface by electrochemical potential [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7203.
- [49] Pidburtnyi M, Zanca B, Coppex C, Jimenez-Villegas S, Thangadurai V. A review on perovskite-type LaFeO_3 based electrodes for CO_2 reduction in solid oxide electrolysis cells: Current understanding of structure-functional property relationships [J]. *Chemistry of Materials*, 2021, 33(12): 4249-4268.
- [50] Hu T, He F, Liu M L, Chen Y. *In situ/operando* regulation of the reaction activities on hetero-structured electrodes for solid oxide cells [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 133: 101050.
- [51] Yang D, Chen G, Zhang L L, Chen Z, Zhang R, Asghar M I, Geng S J, Lund P D. Low temperature ceramic fuel cells employing lithium compounds: A review [J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 503: 230070.
- [52] 刘张波, 刘蓓蓓, 夏长荣. 固体氧化物燃料电池的纳米阳极[J]. *化学进展*, 2013, 25(11): 1821-1829.
- Liu Z B, Liu B B, Xia C R. Nano-structured anodes of solid oxide fuel cells [J]. *Progress in Chemistry*, 2013, 25(11): 1821-1829.
- [53] 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]. *发电与空调*, 2018, 39(2): 165-170.
- Zeng H Y, Shi Y X, Cai N S. Development and prospect of fuel cell technology for distributed power system [J]. *Power Generation Technology*, 2018, 39(2): 165-170.

Development and Application of Low Temperature Solid Oxide Fuel Cell

LIU Kun^{*}, HUANG Hui, CHEN Xi, MA Jun, DU Jin-guang, CAO Yang

(Mechanical and Electrical Engineering Institute of Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: With the rapid expansion of the world's population and the massive consumption of the earth's resources, the problem of energy utilization has attracted the attention of all countries in the world. Low temperature solid oxide fuel cell (LT-SOFC) has been researched and developed for its unique advantages of green and high efficiency. However, in order to further improve the performance of LT-SOFC and accelerate its industrialization, there are still many problems to be solved. In this paper, the problems and possible solutions for the anode, cathode and electrolyte of solid oxide fuel are reviewed from the point of how to improve the overall performance of LT-SOFC, and the development and application of low-temperature SOFC are introduced. The above work can provide reference for the research of LT-SOFC and promote the application and research development of LT-SOFC.

Key words: solid oxide fuel cell (SOFC); low temperature SOFC; performance; development and application