

# 界面优化对固体氧化物燃料电池性能的影响

由宏新\*, 王 强

(大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 电极与电解质界面对固体氧化物燃料电池电性能有一定影响。通过干压刻印法构造了具有网格界面的电解质基片, 在此基片上构造具有网格状阳极-电解质界面的单电池片 NiO-YSZ||YSZ||LSM-YSZ, 并进行电化学测试和微观结构分析。结果表明, 网格单电池最大功率密度优于传统平单电池, 刻痕处的微观结构也更加丰富, 具有层次。表明界面优化可以增加阳极与电解质的接触面积, 增加三相界面密度, 进而提高单电池的电化学性能。

**关键词:** 固体氧化物燃料电池; 三相界面; 非平整界面; SOFC 阳极; YSZ

中图分类号: TM911

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)S-0265-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.S.053

## Interface optimization for improving performance of solid oxides fuel cell

YOU Hong-xin\*, WANG Qiang

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The interface between electrode and electrolyte has a certain influence on the electrical performance of solid oxide fuel cells. Yttria stabilized zirconia (YSZ) electrolyte substrate with a grid surface is constructed by the dry-pressing and imprinting method in order to analyze the influence of interface optimization on the cell performance. NiO-YSZ anode is coated onto the grid surface of YSZ electrolyte substrate, and  $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_{3\pm\delta}$  (LSM)-YSZ cathode is coated on the other side. The prepared single cell sheet with a mesh anode-electrolyte interface is tested for the electrochemical performance and microstructure analysis by mean of SEM. By comparison with traditional cells, the prepared single cell shows higher maximum power densities under the test temperature, and has richer microstructure in the indentation. It is indicated that the optimization of the anode-electrolyte interface at hundreds of micrometers scale can improve the electrochemical performance of single cell.

**Key words:** solid oxides fuel cell; three-phase interfaces; uneven interface; anode; yttria stabilized zirconia

固体氧化物燃料电池 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 具有高效环保、全固态结构的特点, 得到众多研究者的青睐<sup>[1-4]</sup>。许多研究表明, 通过掺杂手段能获得效果更好的电池材料<sup>[5-6]</sup>, 与此同时还发现许多新材料也能满足 SOFC 的应用<sup>[7-9]</sup>, 进一步扩大了电极及电解质材料的选择范围<sup>[10]</sup>。从多孔电极理论 (Porous-Electrode Theory)<sup>[11-12]</sup> 的提出到三相界面理论<sup>[13-14]</sup> (Three-phase Boundary, TPB) 的发展, 均表明 SOFC 的电化学反应仅发生在电极与电解质之间的 TPB 区域, 而多孔电极微观结构会影响这一关键区域。对于电极与电解质界面的研究也是通过增加 TPB 密度来优化电池电性能<sup>[15]</sup>, 但是目前国内研究还比较少。

日本研究机构早期采用同位素标定探究阴极和电解质直接运输氧离子的原理<sup>[16]</sup>, 实验发现网状结构更加有利于氧吸附及氧交换, 对促进阴极反应有很大积极作用。密歇根州立大学和京都大学的学者分别对阴极-电解质界面的微结构进行了拓扑分

析<sup>[17-18]</sup>, 从数值模拟的角度进一步验证了介观尺度 (0.01~1 mm) 的非平整界面设计可以提高电池性能, 在 0.6 V 端电压下电流密度增加超过 40%。Xu 等<sup>[19-20]</sup> 采用软模板法结合纳米粉末微印法制备了带有方柱状阵列、锥孔阵列阳极-电解质界面的电池, 其电化学性能明显提高。日本九州大学将印刷与冶金结合起来, 探索出一种多层微米级印刷工艺, 制备了电极与电解质之间接触面积增加明显的单电池<sup>[21-22]</sup>。这些工作都表明, 非平整电极-电解质界面增加了单位面积上电极与电解质的接触面积, 增加了 TPB 密度, 提高了活性反应面积, 增强了反应效率, 进而实现对电池电性能的优化。

现有研究中对非平整界面的制备多采用微米级软刻印<sup>[20]</sup>、激光雕刻<sup>[23]</sup>甚至直流磁控溅射<sup>[24]</sup>来实现, 工艺较为复杂。本研究采用更加简便易于实现的干压刻印法来制备非平整阳极-电解质界面, 预压定型后再多次加压保压将网格图案刻印到电解质表面。该方法能实现在介观尺度 (0.01~1 mm) 上

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-06-15

作者简介: 由宏新 (1967-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为燃料电池及氢能存储, 通讯联系人, youhx@dlut.edu.cn。

增加 TPB 面积,增加活性反应面积,将反应活性区域从界面向两侧延伸,并通过减少氧离子运动阻力来减小极化电阻,增大电流密度;后经涂覆阳极浆料、阴极浆料,形成具有网格状阳极-电解质界面的 NiO-YSZ||YSZ||LSM-YSZ 单电池片。以氢气和干甲烷为燃料对该改进电池进行发电性能测试,采用扫描电镜(SEM)对阳极表面及阳极-电解质界面微观形貌进行表征和分析。

## 1 实验方法

### 1.1 电解质基片制备

用电子天平称量适量 8YSZ 粉末(摩尔分数为 8% 的  $Y_2O_3$  稳定的  $ZrO_2$ , 日本 TOSOH 株式会社)与 PVB, 质量比为 1:0.03, 放入玛瑙研钵中并加入适量无水乙醇, 充分研磨 2 h 至无水乙醇完全挥发。随后将该混合物置于干燥箱在  $80^\circ C$  下干燥 1 h, 得到的块状固体再次研碎并过 120 目筛网, 得到电解质粉末。

电解质基片采用干压刻印法制备。称量 1.2 g 电解质粉末置于压片模具中, 先在 10 MPa 下预压, 使电解质成片不易分散; 然后轻轻取出模具一侧, 将 30 目方孔网放入电解质一侧后缓缓将模具合上, 然后分 4 次单向轴向加压, 最终在 80 MPa 保压 20 min, 得到电解质胚片; 最后将电解质胚片放入电炉, 在空气氛围中以  $1\ 400^\circ C$  煅烧 4 h, 去除孔网、烧结致密, 最终得到带有网格特征面的 YSZ 电解质基片, 直径约 20 mm、厚度约 0.6 mm。

为作对比, 采用相同方法制备平整电解质基片, 区别在于不需加孔网流程, 仍然以相同质量电解质粉末在相同模具、相同步骤得到 YSZ 电解质基片。

### 1.2 单电池制备

按照质量比 6:4:0.5:4, 依次称量 NiO 粉末(日本 TOSOH 株式会社)、8YSZ 粉末、石墨粉与自制粘结剂(由乙基纤维素和  $\alpha$ -松油醇以质量比 1:4 制备所得), 再加入适量乙醇, 充分研磨混合均匀, 最终呈黏稠膏状阳极浆料。阳极采用浆料涂覆法在电解质基片上制备。超声清洗电解质具有网格一侧后, 涂覆制备的阳极浆料, 后置于  $1\ 200^\circ C$  烧结 2 h, 得到阳极半电池片。

仅将阳极 NiO 粉末换作阴极 LSM 粉末( $La_{0.85}Sr_{0.15}MnO_{3\pm\delta}$ , 日本 Kojundo 公司), 采用相同比例、相同方法得到膏状阴极浆料。后将阴极浆料涂覆在电解质另一侧, 高温  $1\ 100^\circ C$  烧结 1 h, 得到阳极、阴极有效面积均为  $0.785\ cm^2$  的单电池片 NiO-YSZ||

YSZ||LSM-YSZ。

同理将阳极浆料、阴极浆料涂覆于平整电解质基片, 得到传统单电池。为作区分, 将网格单电池和平整单电池分别命名为 A、B。

### 1.3 单电池的测试及表征

将制备的电池片分别在反应器上进行封装, 如图 1 所示, 采用 Pt 网作为集流器、玻璃环作为密封材料, 在  $900$ 、 $850$ 、 $800$  和  $750^\circ C$  下分别测试单电池的发电性能。实验中当氢气为燃料时流量是  $80\ mL/min$ , 氧气流量  $40\ mL/min$ ; 甲烷作为燃料气时流量是  $20\ mL/min$ , 氧气流量  $60\ mL/min$ 。实验开始前阳极侧以  $40\ mL/min$  通入氢气 30 min, 保证阳极完全还原。采用 QUANTA 450 型钨灯丝扫描电子显微镜(美国 FEI 公司)观察自制单电池阳极的形貌以及阳极与电解质界面微观结构。

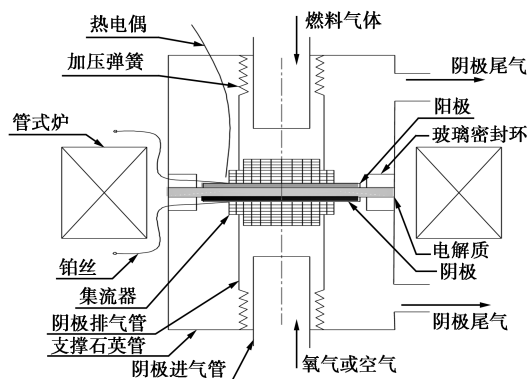


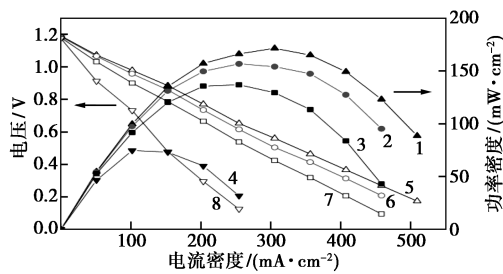
图 1 单电池反应器示意图

## 2 结果与讨论

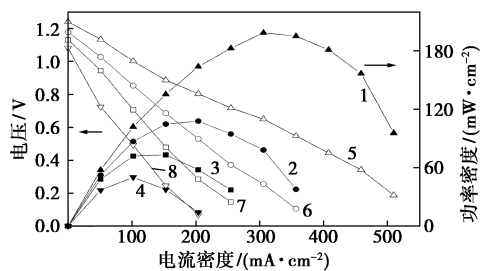
### 2.1 单电池性能测试

图 2(a)、(c) 所示分别为网格电池片 A、平整电池片 B 在不同测试温度下以  $H_2$  为燃料的发电性能测试曲线。由图 2(a)、(c) 可见, 在  $900$ 、 $850$ 、 $800$  和  $750^\circ C$  下 A 单电池的开路电压(OCV, Open-circuit Voltage)分别为 1.19、1.19、1.18 和 1.18 V; B 单电池的开路电压分别为 1.19、1.18、1.17 和 1.16 V。两电池片各温度下开路电压均超过 1.1 V, 与理论电压值<sup>[25]</sup>相近。由图中相应功率密度曲线可知, 由高到低温度下 A 的最大功率密度(Maximum power density)分别为 172、157、137 和  $75\ mW/cm^2$ , B 单电池该数值分别是 128、113、99 和  $66\ mW/cm^2$ 。这表明, 由干压刻印法制备网格状阳极-电解质界面的单电池 A 电性能比同等条件下的传统平整单电池片 B 更加优秀, 分别增加了 34%、39%、38% 和 14%。

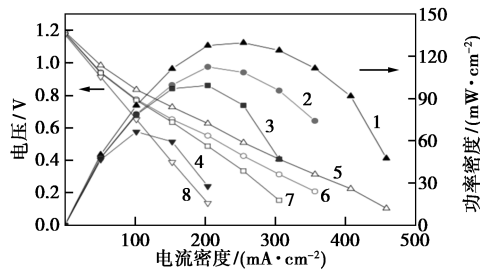
图 2(b)、(d)为 NiO-YSZ||YSZ||LSM 电池片在 900、850、800 和 750℃ 时以干甲烷为燃料的发电性能测试曲线。由  $I-V$  曲线可见,温度由高到低时,A 电池片的开路电压分别为 1.21、1.18、1.13 和 1.06 V,B 电池片该值分别为 1.17、1.16、1.14 和 1.07 V,二电池片均具有较高的开路电压。由  $I-P$  曲线可见,相应温度下 A 单电池最大功率密度分别为 199、108、73 和 50  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ,B 单电池最大功率分别为 163、90、62 和 41  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 。同样地,A 单电池获得更好的输出性能,增长率在 18%~22% 之间。



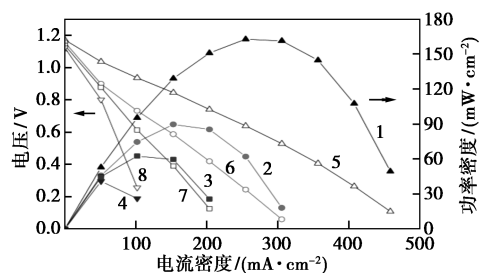
(a) 燃料为  $\text{H}_2$  时 A 单电池电性能



(b) 燃料为  $\text{CH}_4$  时 A 单电池电性能



(c) 燃料为  $\text{H}_2$  时 B 单电池电性能



(d) 燃料为  $\text{CH}_4$  时 B 单电池电性能

功率密度:5—900℃;6—850℃;7—800℃;8—750℃;  
开路电压:1—900℃;2—850℃;3—800℃;4—750℃

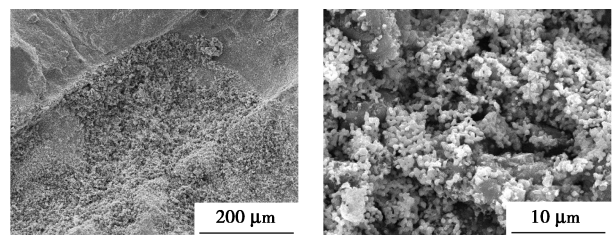
图 2 在不同的燃料气体中不同单电池的发电性能

较高开路电压表明制得的中间电解质层致密,保证了性能测试过程中燃料气与氧气的隔离;同时,也反应出单电池安装密封良好,满足 SOFC 的测试要求;也说明阳极中的 NiO 已经被完全还原为 Ni,具有催化活性。经过电化学测试发现,由于以 YSZ 作为电解质材料,而且电解质整体较厚,导致功率密度略显偏小。但 A 单电池性能仍然明显优于 B 单电池,说明采用干压刻印法优化阳极与电解质之间的界面,能一定程度改善单电池在干甲烷下的电化性能。

## 2.2 单电池的 SEM 分析

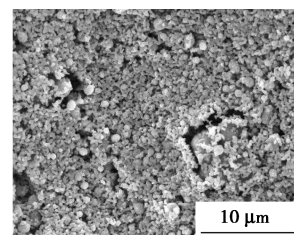
### 2.2.1 阳极微观结构分析

单电池阳极表面 SEM 图见图 3。图 3(a)、(b)和 (c)分别为单电池经过性能测试后的阳极表面 SEM 图。如图 3(a)所示,A 阳极涂覆在干压刻印法制备电解质上,阳极浆料附着在电解质表面,在干燥、煅烧后形成了宽度约  $230\ \mu\text{m}$  的刻痕。这是由于刻痕处的阳极浆料比平整处的含量多,溶剂挥发、煅烧去除一些物质的占比也较大,因此形成了明显的印迹。进一步放大到 10 000 倍,如图 3(b)所示,与图 3(c)B 阳极相对平整的表面比较,A 刻痕处的阳极表面更加疏松多孔,在增大与电解质、燃料气接触面积的同时,丰富了孔隙结构,有利于燃料气体的扩散与产生的水蒸气的逸散;同时,在阳极处可以清晰地看到,催化金属 Ni 呈细小颗粒,密集地附着在较大的电解质颗粒上,颗粒彼此联结形成导电网络路径,构成具有混合导电能力的阳极,扩展了电化学反应的区域。此外,经过电性能测试后发现,阳极表面没有明显团聚颗粒或堵塞孔隙的现象。



(a) A 阳极表面印痕处

(b) A 阳极 ( $\times 10\ 000$ )



(c) B 阳极 ( $\times 10\ 000$ )

图 3 单电池阳极表面 SEM 图

### 2.2.2 单电池断面 SEM 分析

单电池截面 SEM 图见图 4, 其中图 4(a)、(c) 是单电池 A、B 断面的 SEM 图, 图 4(b)、(d) 是其阳极层与电解质层间的接触界面 SEM 图。由图 4(a)、(c) 可知, 实验所制备的 B 单电池中间电解质层厚度约为  $600\ \mu\text{m}$ , 阳极、阴极层厚均约  $50\ \mu\text{m}$ ; A 刻痕中心间距约为  $620\ \mu\text{m}$ , 阳极在刻痕处向内凹陷约  $50\ \mu\text{m}$ , 相比于 B 的平整阳极, 反应区域向电解质一侧内部延伸。二者电解质层质地较为均匀致密, 没有多余空洞和杂质, 阳极、阴极呈疏松多孔状, 均满足单电池的制备要求。由图 4(b)、(d) 可知, A、B 单电池阳极呈疏松多孔的立体结构, 有利于形成丰富的气体进出通道。相较于 B, A 的阳极刻痕处呈圆弧状, 宏观上增大了 TPB、增加了 TPB 的密度、减小了刻痕处的电解质厚度, 总体上扩展了反应区域, 能够加速燃料的动力学氧化速率; 另外, 两种单电池阳极与电解质之间结合紧密, 交界面清晰, 层与层之间没有缝隙, 热相容性良好, 经过电化学测试后阳极仍然没有脱落, 结构稳定。

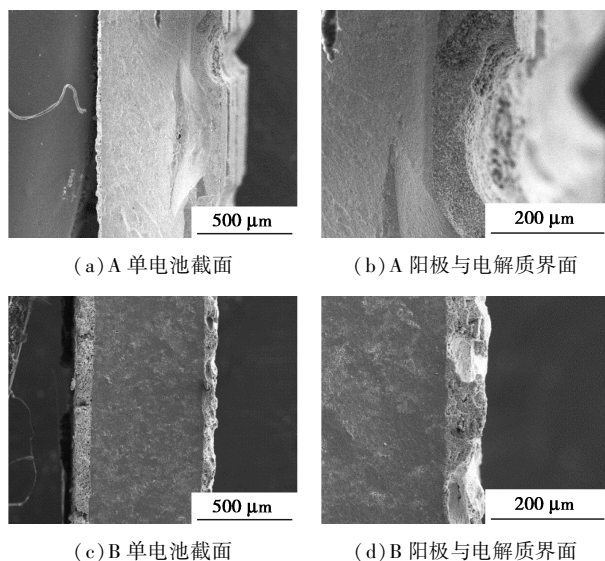


图 4 单电池截面 SEM 图

### 3 结论

通过干压刻印法制备了网格单电池, 电化学测试表明, 其性能明显优于传统平整单电池, 最大功率密度在以氢气为燃料时增加近 40%, 以干甲烷为燃料时增加 20% 左右; 分析单电池 SEM 图发现, 阳极-电解质界面形成宽约  $230\ \mu\text{m}$ 、间距约  $620\ \mu\text{m}$ 、向电解质内一侧凹陷约  $50\ \mu\text{m}$  的刻痕网格, 而且刻痕处阳极结构微观层次更加丰富, 提供了更多的气体通道, 这表明通过界面优化, 增加了阳极与电解质之间

的接触面积, 增加了更多的反应位点, 扩展了反应区域, 形成了更多的 TPB, 提高了阳极的催化活性, 这也解释了网格单电池电化学性能提高的原因。

### 参考文献

- [1] Feduska W, Isenberg A O. High-temperature solid oxide fuel cell—Technical status[J]. *Journal of Power Sources*, 1983, 10(1): 89–102.
- [2] Minh N Q. Ceramic fuel-cells[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, 76(3): 563–588.
- [3] 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状[J]. *电源技术*, 2008, (10): 649–654.
- [4] 韩敏芳. 固体氧化物燃料电池(SOFC)技术进展和产业前景[J]. *民主与科学*, 2017, (5): 25–26.
- [5] 刘旭刚, 马峻峰, 刘文化, 等. 固体氧化物燃料电池材料的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2001, (1): 24–29.
- [6] 韩建华, 张瑞雪, 吴冰, 等.  $\text{CeO}_2$  基体掺杂材料及其在 SOFC 中的应用[J]. *电源技术*, 2014, 38(11): 2196–2198.
- [7] 王小连, 丁岩芝, 林彬, 等. 中温固体氧化物燃料电池  $\text{SmBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ - $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$  复合阴极材料的电化学性能[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(10): 1524–1529.
- [8] 苏莎, 陈海清, 谭令. 氧化铈基固体氧化物燃料电池电解质研究进展[J]. *湖南有色金属*, 2014, 30(4): 45–48.
- [9] 张文锐, 张智慧, 高立国, 等. 双钙钛矿型电极材料在中低温固体氧化物燃料电池中的应用[J]. *化学进展*, 2016, 28(6): 961–974.
- [10] Mahato N, Banerjee A, Gupta A, *et al.* Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 72: 141–337.
- [11] Newman J, Tiedemann W. Porous-electrode theory with battery applications[J]. *AIChE Journal*, 1975, 21(1): 25–41.
- [12] Raymond B S, Martin Z B. Multiphase porous electrode theory[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(11): 3291–3310.
- [13] McIntosh S, Gorte R J. Direct hydrocarbon solid oxide fuel cells[J]. *Chemical Reviews*, 2004, 104(10): 4845–4866.
- [14] Abbaspour A, Nandakumar K, Luo J, *et al.* A novel approach to study the structure versus performance relationship of SOFC electrodes[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(2): 965–970.
- [15] Irvine J T S, Neagu D, Verbraeken M C, *et al.* Evolution of the electrochemical interface in high-temperature fuel cells and electrolyzers[J]. *Nature Energy*, 2016, 1(1): 15014.
- [16] Horita T, Yamaji K, Sakai N, *et al.* Imaging of oxygen transport at SOFC cathode/electrolyte interfaces by a novel technique[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 106(1): 224–230.
- [17] Song X, Diaz A R, Benard A, *et al.* A 2D model for shape optimization of solid oxide fuel cell cathodes[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, 47(3): 453–464.
- [18] Iwai H, Kuroyanagi A, Saito M, *et al.* Power generation enhancement of solid oxide fuel cell by cathode-electrolyte interface modification in mesoscale assisted by level set-based optimization calculation[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(7): 3485–3495.

(下转第 273 页)

(磷钨酸、硅钨酸、磷钨酸铬、磷钼酸)和氧化铈催化剂、催化剂用量、溶剂种类、反应温度、反应时间对5-HMF收率的影响。并通过X射线衍射、红外光谱对催化剂结构进行了表征。结果表明,果糖脱水合成5-HMF的最佳反应条件:果糖用量0.5500 g、催化剂磷钨酸0.0500 g、溶剂DMSO 5 mL、反应温度110℃、反应时间3 h,5-HMF的收率可达95.31%。

### 参考文献

- [1] 王永贵,任淑芝,耿庆保,等.响应面法优化麦芽糖水解制备5-羟甲基糠醛[J].生物质化学工程,2018,52(6):57-61.
- [2] 邱果,王新承,黄崇品,等.磷钨酸盐催化蔗糖制备5-羟甲基糠醛[J].有机化学,2018,38(4):940-948.
- [3] Peng K H, Li X C, Liu X H, *et al.* Hydrothermally stable Nb-SBA-15 catalysts applied in carbohydrate conversion to 5-hydroxymethyl furfural[J]. Molecular Catalysis, 2017, 441: 72-80.
- [4] Nie G X, Tong X L, Zhang Y Y, *et al.* Selective transformation of carbohydrates to hydroxymethyl furfural with polyaniline-based catalysts[J]. Research on Chemical Intermediates, 2016, 42: 8305-8319.
- [5] Yu I K M, Tsang D C W. Conversion of biomass to 5-hydroxymethylfurfural: A review of catalytic systems and underlying mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 716-732.
- [6] Yan L L, Liu N. Production of 5-hydroxymethylfurfural from corn stalk catalyzed by corn stalk-derived carbonaceous solid acid catalyst[J]. Bioresource Technology, 2014, 173: 462-466.
- [7] Wagh A S, Ukarde T M, Pandey P H, *et al.* Self-catalyzed deconstruction of acid modified k-carrageenan for production of 5-hydroxymethyl furfural[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 16(7): 13932-13940.
- [8] Fan G Z, Wang Y X. Synthesis of 5-hydroxymethyl furfural from cellulose via a two-step process in polar aprotic solvent [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 200: 529-535.
- [9] Lü H S, Li X K, Zhang M H. Decomposition of cellulose to produce 5-hydroxymethyl furfuraldehyde in subcritical water [J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(3): 198-201.
- [10] Shen Y, Sun J K. InCl<sub>3</sub>-catalyzed conversion of carbohydrates into 5-hydroxy methylfurfural in biphasic system [J]. Bioresource Technology, 2014, 172: 457-460.
- [11] 罗应,李彦青,柏文俊,等.葡萄糖制备5-羟甲基糠醛工艺研究[J].应用化工,2018,47(9):1884-1891.
- [12] Ramli N A S, Amin N A S. A new functionalized ionic liquid for efficient glucose conversion to 5-hydroxymethyl furfural and levulinic acid [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2015, 407: 113-121.
- [13] Chung N H, Oanh V T, Thoa L K, *et al.* Catalytic conversion of glucose into 5-hydroxymethyl furfural over Cu-Cr/ZSM-5 zeolite [J]. Catalysis Letters, 2020, 150: 170-177.
- [14] Wang Y X, Hu Z X, Fan G Z, *et al.* Catalytic conversion of glucose to 5-(hydroxymethyl) furfural over phosphotungstic acid supported on SiO<sub>2</sub>-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> [J]. Waste and Biomass Valorization, 2019, 10(8): 2263-2271.
- [15] 程月红,姜恒,宫红,等.钨酸的合成与表征[J].工业催化,2011,19(1):50-52.
- [16] Zhou J X, Tang Z, Jiang X P, *et al.* Catalytic conversion of glucose into 5-hydroxymethyl furfural over chromium-exchanged bentonite in ionic liquid-dimethyl sulfoxide mixtures [J]. Waste and Biomass Valorization, 2016, 7(6): 1357-1368.
- [17] 高赛男,刘中海,秦冬玲,等.SAPO-34分子筛的合成及催化果糖制5-羟甲基糠醛的应用[J].现代化工,2018,38(7):136-140.
- [18] Lucas N, Kokate G, Nagpure A. Dehydration of fructose to 5-hydroxymethyl furfural over ordered Al-SBA-15 catalysts [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2013, 181: 38-46.
- [19] Pande A, Niphadkar P, Pandare K, *et al.* Acid modified H-USY zeolite for efficient catalytic transformation of fructose to 5-hydroxymethyl furfural (Biofuel Precursor) in methylisobutyl ketone-water biphasic system [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(3): 3783-3791.
- [20] 李黎峰,沈忠权,厉岑怡,等.新型磺化碳基材料催化果糖制备5-羟甲基糠醛[J].高校化学工程学报,2016,30(6):1341-1347.
- [21] 刘思乐,何鑫,尚东梅,等.磷钨酸负载分子筛催化果糖制5-羟甲基糠醛的研究[J].现代化工,2020,40(9):159-162. ■
- [22] Tokumaru K, Tsumori F, Kudo K, *et al.* Development of multilayer imprint process for solid oxide fuel cells [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(6S1): 6.
- [23] Cebollero J A, Lahoz R, Laguna-Bercero M A, *et al.* Tailoring the electrode-electrolyte interface of solid oxide fuel cells (SOFC) by laser micro-patterning to improve their electrochemical performance [J]. Journal of Power Sources, 2017, 360: 336-344.
- [24] Ryu S, Yu W, Chang I, *et al.* Three dimensional YSZ interface engineering layer for enhancement of oxygen reduction reactions of low temperature solid oxide fuel cells [J]. Ceramics International, 2020, 46(8): 12648-12655.
- [25] 毛宗强,等.燃料电池[M].北京:化学工业出版社,2005. ■

(上接第268页)

- [19] Xu Y, Tsumori F, Hashimoto S, *et al.* Improvement of solid oxide fuel cell by imprinted patterns on electrolyte [C]. The 8th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2013: 887-890.
- [20] Xu Y, Tsumori F, Osada T, *et al.* Improvement of solid oxide fuel cell by imprinted micropatterns on electrolyte [J]. Micro & Nano Letters, 2013, 8(10): 571-574.
- [21] Tsumori F, Xu Y, Tanaka Y, *et al.* Micrometer-scale imprinting process for ceramic sheet from powder compound material [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 1433-1438.