沭

# CeO2 阻挡层在 SSZ 基 SOFC 中的研究进展

朱晓东<sup>12</sup>, 孙克宁<sup>2</sup>, 乐士儒<sup>2</sup>, 袁一星<sup>1</sup>
(1. 哈尔滨工业大学 土木工程博士后流动站,黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 科学技术研究院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:回顾了 Sm 和 Gd 掺杂的 CeO<sub>2</sub> 阻挡层(SDC 和 GDC) 在 Sc 稳定的 ZrO<sub>2</sub>(SSZ) 基固体氧化物燃料电池 (SOFC)中的发展历史以及目前发展状况,分析了粉体的制备方法、阻挡层的沉积工艺、陶瓷烧结工艺对 CeO<sub>2</sub> 阻挡 层性能的影响。从材料的化学相容性和热膨胀匹配等方面阐述了制备 CeO<sub>2</sub> 阻挡层的目的,对 CeO<sub>2</sub> 阻挡层大大提高 电极性能进行了详尽的机理分析。指明了 CeO<sub>2</sub> 阻挡层的重要作用和发展前景。 关键词:SOFC; SSZ; SDC; GDC; 阻挡层 中图分类号: TM 911.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-087 X(2008)02-0124-04

# Research progress of CeO<sub>2</sub> interlayer in SSZ-based SOFC

ZHU Xiao-dong<sup>1,2</sup>, SUN Ke-ning<sup>2</sup>, LE Shi-ru<sup>2</sup>, YUAN Yi-xing<sup>1</sup>

Center for Post-doctoral Studies of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China
 Research Academy of Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The history and present developments of Sm- and Gd-doped  $CeO_2$  (SDC and GDC) interlayer in SSZ-based SOFCs were reviewed and the effect of technologies of preparing powder, deposition interlayer and ceramic sintering on the performance of the  $CeO_2$  interlayer was analyzed. Moreover, the purpose of insertion of  $CeO_2$  interlayer was interpreted from chemical compatibility and thermal expansion match, and the mechanism about improving properties by inserting  $CeO_2$  interlayer was revealed. The importance and foreground of utilization as the  $CeO_2$  interlayer were indicated.

Key words: SOFC; SSZ; SDC; GDC; interlayer

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种将化学能直接转化 为电能的新型、洁净的发电装置,具有高效、便捷、对环境友好 和燃料实用性强等优点,成为国际上的研究热点<sup>[1-2]</sup>。但是 SOFC 的工作温度一般在 700~1 000 之间,如此高的工作 温度给 SOFC 带来一系列材料、密封和结构上的问题<sup>[35]</sup>。因 此 SOFC 的中温化成为国际上的研究热点<sup>[6-10]</sup>。降低工作温度 可以带来如下优点:(1) 可使用便宜的金属材料作为连接体 材料;(2) 启动速度快;(3) 抑制电池元件间的反应。

为了使 SOFC 能在中低温下工作,人们提出了几种不同 的电解质替代材料,比如:氧化钪稳定的氧化锆(SSZ),氧化钆 或氧化钐掺杂的氧化铈(GDC 或 SDC)和锶、镁双掺杂的镓酸 镧(LSGM)。这些材料都拥有比氧化钇稳定的氧化锆(YSZ)更 高的离子电导率。虽然 GDC 和 SDC 的离子电导率很高,但是 在还原气氛下会产生电子电导,降低电池的开路电势,另外在 还原气氛下还会产生晶格膨胀导致变脆<sup>[11-13]</sup>。LSGM 也拥有较 高的离子电导率,但是高温烧结时它会跟镍阳极反应生成绝 缘相,并且脆性较大<sup>[14-16]</sup>。而 SSZ 材料的离子电导率很高,不

作者简介:朱晓东(1979—),男,山东省人,讲师,主要研究方向 为固体氧化物燃料电池。

Biography: ZHU Xiao- dong(1979-), male, lecturer .

会带来上述类似问题,并且拥有足够强的机械强度,是近年来 国际上公认的另一种最有前途的中低温 SOFC 电解质之一。 但是作为 ZrO<sub>2</sub> 电解质同 YSZ 类似,存在同 La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>Co<sub>1-y</sub>Fe<sub>y</sub>-O<sub>3</sub> (LSCF) 阴极反应生成高阻抗相 Sr<sub>2</sub>ZrO<sub>4</sub> 或 La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 的问 题<sup>[17]</sup>。为了避免这一反应,可以引入在制备温度和操作温度下 都不会同 LSCF 和 SSC 反应的 CeO<sub>2</sub> 基阻挡层<sup>[18]</sup>。

CeO<sub>2</sub> 与 YSZ 一样是具有萤石型结构的氧化物,纯 CeO<sub>2</sub> 离 子电导率低,用碱土金属氧化物或稀土金属氧化物(ZrO<sub>2</sub>, CaO, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等)以适当的浓度掺杂引入氧离子空 位后,CeO<sub>2</sub> 离子电导率显著提高,成为氧离子的良导 体<sup>[11,19]</sup>。其中 Gd、Sm 因为离子结合能小,与 Ce<sup>4+</sup> 的离子半径接 近,所以用 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂 CeO<sub>2</sub> 得到的 GDC<sup>[12]</sup>和 SDC<sup>[13]</sup>,其离子电导率较高。以 GDC 和 SDC 作为电极 / 电解 质间的阻挡层,不仅能抑制电极 / 电解质界面反应和元素扩 散,阻止高阻抗反应产物的生成,而且因为 GDC 和 SDC 的膨 胀系数介于电极和电解质之间时,还可以改善两者之间的热 膨胀匹配<sup>[20,21]</sup>。

在当前对 SOFC 电极材料和电解质材料的性能研究较为 成熟的条件下,开展电极和电解质间阻挡层材料GDC 和 SDC 的研究,为高性能电极材料的应用扫清障碍,对于 SOFC 的高 性能化和商品化至关重要。但是至今未见在 SSZ 电解质上

收稿日期: 2007- 07- 11

基金项目:国家自然科学基金资助(90510006)

CeO<sub>2</sub>基阻挡层的研究总结。本文从粉体的制备方法、阻挡层 的沉积工艺、陶瓷烧结工艺等方面,对于GDC 和 SDC阻挡层 在 SSZ 基 SOFC 中的研究进展进行了综述。

# 1 GDC 阻挡层在 SSZ 基 SOFC 中的 研究进展

Nguyen T.L.等人采用电泳沉积法在 SSZ 电解质与 La<sub>0.6</sub>-Sr<sub>04</sub>CoO<sub>3</sub> (LSC) 阴极间制备了厚约 2 mm 的 GDC 阻挡层<sup>[2021]</sup> 来解决此问题。制备过程如下:使电解质粉末悬浮在 10 g/L 的 乙酰基 - 丙酮溶液中, 其中 I<sub>2</sub>0.6 g/L。基片距离电极 10 mm, 在 电压 10~50 V 下电泳 5~50 min。然后在 1 400 H<sub>2</sub>/Ar 气氛 中烧结5h。虽然嵌入2mmGDC层后,使各部分阻抗LSC/SSZ 系统降低了两倍左右,在 800 达 1.4 W·cm<sup>2</sup>,但是仍不能令 人满意,仍然大于Pt-SSZ/SSZ系统各部分的阻抗。通过电化学 阻抗谱研究,他们证明了内阻和第二个圆弧的增大跟 LSC 阴 极有关。认为内阻的增大是由 SSZ 和 GDC 或者 LSC 间反应 生成的绝缘层引起的。通过 SEM 观察,发现 2 mm 厚的 GDC 薄膜呈多孔结构,且LSC和SSZ在某些部分接触,阴极的孔 隙分布不太均匀。由此认为是 GDC 层对 LSC 的保护不充分 造成了第二个圆弧的增大。更厚的 GDC 可能有利于抑制 SSZ 与 LSC 间的反应, 但是采用电泳沉积法将 GDC 阻挡层增厚到 5、10、20 mm 时,在共烧结过程中会出现裂纹。

为了解决电泳沉积法难以制备较厚的 GDC 阻挡层以完 全抑制 LSC 与 GDC 间的界面反应, Shiono M.和Nguyen T. L. 等人通过浸渍沉积法在 SSZ 电解质和 LSC 阴极间制备了较 厚的 GDC 阻挡层<sup>[22:23]</sup>。浆料组成为 GDC 粉、异丙醇、甲苯和 MALIALIM。研究了烧结温度(1000~1320))对 GDC 阻挡 层形貌和 SSZ/GDC/LSC 的总阻抗(R<sub>ASR</sub>)的影响。发现随着烧 结温度的提高, GDC 晶粒逐渐长大, 晶粒间连接更好。GDC 层 的烧结温度对R<sub>ASR</sub> 的影响如下: R<sub>ASR</sub>(1000)> R<sub>ASR</sub>(1100) > R<sub>ASR</sub> (1200)= R<sub>ASR</sub>(1320), 也就是 R<sub>ASR</sub> 随着 GDC 阻挡层的烧结温 度的升高而降低。其中在 1200 烧结的 GDC 阻挡层,使R<sub>ASR</sub> 降低到 0.05 W·cm<sup>2</sup>。这是因为虽然其厚度在 3~6 nm 之间的 阻挡层都呈现多孔状, 但截面的能谱分析表明, 没有 SSZ 和 LSC 间的反应产物 Sr<sub>2</sub>ZrO<sub>4</sub> 生成, GDC 成功地避免了固相反应 的发生。

Nguyen T. L.等人进一步研究了 GDC 阻挡层的烧结温度 对 SSZ/GDC 界面的性能的影响<sup>[24]</sup>, 如图 1 所示,发现在 1 200

时烧结 GDC 时,在界面基本没有(Zr, Ce)O<sub>2</sub>基固溶体生成, 界面阻抗最小,认为1 200 是 GDC 层的最佳烧结温度。GDC 阻挡层成功地抑制了 SSZ 电解质和 LSC 阴极间的固相反应。 并通过与电解质在 1 200 共烧结的方法制备 GDC 阻挡层 薄膜,发现共烧结方法制备的 GDC 阻挡层比在致密的 SSZ 电解质上单独烧结的 GDC 层要更为致密,电池在较低的温度 下获得了高性能。但是与 SSZ 间的结合较差,电池的性能受 SSZ/GDC 界面的接触阻抗的影响很大。为了获得较好的 SSZ/GDC 界面,需要进一步研究共烧结工艺。

Kikuchi R.等人则通过丝网印刷法制备 GDC 阻挡层用于 抑制 SSZ 电解质和 LSCF 之间的固相反应<sup>[25]</sup>。浆料组成为聚



综

述 包涵技术

图 1 不同温度制备在 SSZ 表面的 GDC 薄膜的 表面和截面的 SEM 图像

Fig. 1 Typical surface and cross-section SEM images of GDC films deposited on ScSZ disks at different sintering temperatures 乙二醇和GDC 粉体。在1350 烧结5h。结果显示 GDC 阻 挡层不仅能有效抑制电极 / 电解质界面的不良固相反应, 而 且能大大提高电池的比功率。但是 Ni-SSZ/SSZ/GDC/LSCF-SDC 电池在大电流放电时的长期稳定性较差, Kikuchi R 认为 是 GDC/LSCF-SDC 的界面反应导致的, 但并没有提出证据。 这与Tsoga A.和 Nguyen T. L.等人的研究不太一致。

最近, Nguyen T. L.等人从 GDC 粉体的粒径、浆料的组 成、烧结温度和阻挡层的微观结构等方面深入地研究了 GDC 阻挡层的制备工艺<sup>[26]</sup>。发现因为烧结和晶粒成长行为不同,用 纳米级原料制备的阻挡层的晶粒粒径反而比用微米级原料制 备的阻挡层的晶粒粒径更大。浆料的组成调整为 2- 丙醛(溶 剂)、甲苯(溶剂)、聚乙烯醇缩丁醛(粘结剂)、鱼油(分散 剂)、正 - 邻苯二乙酸酯和聚氧乙烯辛基酚基醚 Triton-X(除 泡剂)。在 1 100 以下烧结时没有(Zr,Ce)O<sub>2</sub>基固溶体生成。 引入 GDC 阻挡层后,可以将 800 Sm<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>CoO<sub>3</sub>(SSC)阴极的 面积比电阻从 2.33 W·cm<sup>2</sup>降低到 0.034 W·cm<sup>2</sup>。研究还发现 GDC 阻挡层的微观结构对 SSC 阴极的性能有着十分重要的 影响。认为 GDC 阻挡层高度均衡、无缺陷的微观结构是 SSC 阴极获得高性能的关键;利用湿陶瓷工艺制备 GDC 阻挡层, 厚度在 1~2 mm 致密度在 80%左右为宜。

# 2 SDC 阻挡层在 SSZ 基 SOFC 中的 应用

Shiono M 等人通过浸渍沉积法, 在 La<sub>t. x</sub>Sr<sub>x</sub>CoO<sub>3</sub> (LSC) 和 SSZ 之间分别制备了 GDC、SDC 阻挡层来抑制电极电解质 之间的界面反应<sup>[25]</sup>。厚度约为 3~6 mm的多孔状 GDC 阻挡 层, 可以将 R<sub>ASR</sub> 降低到原来的 1/2 000, 抑制了同 SSZ 电解质

### 包涵技术 综

之间的反应。但是 GDC 层是多孔的,为了抑制界面反应,要求 厚度至少为几个微米。如果阻挡层是致密的,即使膜层很薄也 可抑制不期望发生的反应。因此又研究了 SDC 作为致密的阻 挡层材料。在 1 200 烧结后,得到了比 GDC 孔隙较少的厚 度小于 1 mm的 SDC 阻挡层,如图 2 所示。阴极的面积比电阻 显示出了同 LSC/GDC/SSZ 大约相同的值。说明虽然 SDC 层 比 GDC 阻挡层更薄,但是取得了相同的效果,认为 SDC 薄阻 挡层有效地抑制了 LSC 阴极同 SSZ 电解质之间的反应。

沭





 (a)SSZ 基体:(b)SDC 表面;(c)LSC/SDC/SSZ 的截面 图 2 LSC/SDC/SSZ 的截面和表面 SEM 图像
 Fig.2 Cross-section and surface SEM photographs of LSC/SDC/SSZ

Kikuchi R 等人也比较研究了 GDC 和 SDC 阻挡层对 LSCF-SDC/SSZ 的影响<sup>[25]</sup>。结果显示 GDC 阻挡层不仅能有效 抑制电极 / 电解质界面不受欢迎的固相反应,而且能大大提 高电池的比功率。然而以 SDC 代替 GDC 作为阻挡层,能进一 步提高电池的比功率。电化学阻抗谱研究显示 SDC 阻挡层电 池的内阻约为 GDC 阻挡层电池的 1/5,是无阻挡层电池的 1/15。

Kibayshi K 等人在 La<sub>1-x</sub> Sr<sub>x</sub> CoO<sub>3</sub>. (LSC)和 SSZ 之间利 用浆料浸渍涂敷法(浆料成分除 SDC 外同上述相同)制备了 1~2 mm 厚的 SDC 阻挡层<sup>[28]</sup>。发现 1 mm厚的 SDC 可以将 R<sub>ASR</sub> 降低到 0.09 W·cm<sup>2</sup>。厚度增加到2 mm 后,将 R<sub>ASR</sub> 进一步 降低到 0.06 W·cm<sup>2</sup>。通过绘制 Arrhenius 曲线,得到 SSC/SSZ、 SSC/SDC-1 mm/SSZ、SSC/SDC-2 mm/SSZ 和 SSC/GDC/SSZ 的 表观活化能分别为 1.82、1.33、1.30、1.35 eV。对阴极性能的改 进显示引入阻挡层后,抑制了电解质/阴极界面固相反应的发 生,可能跟阻挡层相对电解质更高的表面粗糙度扩大了 SSC 阴极的有效面积有关。而 SDC 相对 GDC 更低的表观活化能 揭示,进一步优化 SDC 的微观结构,可以获得更低的阴极的 面积比电阻。

### 3 前景与展望

GDC 和 SDC 阻挡层材料广泛应用在以 SSZ 为电解质的 SOFC 中,有效改善了电极 / 电解质界面问题,其主要作用和 机理体现在:

(1)抑制电极/电解质界面反应和元素扩散,阻止高阻抗

反应产物的生成。

(2)阻挡层相对电解质更高的表面粗糙度扩大了阴极的 有效面积,提高了阴极的性能。

(3) GDC 和 SDC膨胀系数介于电极和电解质之间时,可 以改善两者之间的热膨胀匹配。

国外对于GDC 和 SDC阻挡层材料的研究已经比较广泛, 但是国内对此开展的研究仍然较少。用于制备GDC 和 SDC的 原料 Gd、Sm 和 Ce 都属稀土元素,而我国稀土资源储量占到 世界的 80%,具有极强的资源优势。加大 SOFC 阻挡层材料的 研究力度必将对形成我国 SOFC 的自主知识产权有重大的促 进作用。

#### 参考文献:

- MATSUZAKI Y,YASUDA I.Electrochemical properties of reduced-temperature SOFCs with mixed ionic – electronic conductors in electrodes and-or interlayers[J]. Solid State Ionics,2002, 152-153: 463-468.
- [2] YAN J W, HIROSHIGE M, ENOKI M, et al. High-power SOFC using La<sub>0.9</sub>Sr<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.8</sub>Mg<sub>0.2</sub>O<sub>3-d</sub>/Ce<sub>0.8</sub>Sm0.2O<sub>2-d</sub>composite film[J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2005, 8(8): A 389-A 391.
- [3] ZHU X D, SUN K N, ZHANG N Q, et al. Improved of electrochemical performance of SrCo<sub>0.0</sub>Fe<sub>0.2</sub>O<sub>3-d</sub>La<sub>0.45</sub>Ce<sub>0.55</sub>O<sub>2-d</sub> composite cathode for IT-SOFC[J]. Electrochemistry Communications, 2007(9): 431-435.
- [4] HUANG K Q, WAN J H, GOODENOUGH J B. Increasing power density of LSGM-Based solid oxide fuel cells using new anode materials[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(7): A 788-A 794.
- [5] 朱晓东,孙克宁,张乃庆. SOFC 阳极阻挡层 La<sub>0.3</sub>Ce<sub>0.7</sub>O<sub>2</sub>. 薄膜的 制备[J].人工晶体学报, 2006, 35(6): 1242-1246.
- [6] KUNDRACIK F, HARTMANOVA M. Ohimic resistance of thin yttria stabilized ziriconia film and electrode-electrolyte contact area [J]. Material Science and Engineer, 2001, B 84: 167-175.
- [7] PENG R R, XIA C R, LIU X Q, et al. Interm- ediate-temperature SOFCs intermediate-temperature SOFCs with thin Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>1.9</sub> films prepared by screen-printing[J]. Solid State Ionics, 2002, 152-153: 561-565.
- [8] XIA C R, LIU M L. Microstructures, conductivities, and electrochemical properties of Ce<sub>19</sub>Gd<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> and GDC-Ni anodes for low-temperature SOFCs[J]. Solid State Ionics, 2002, 152-153: 423-430.
- [9] 蒋凯,张秀英,郭崇峰. 固体氧化物燃料电池中的电解质[J]. 稀有 金属, 2001, 25(2): 121-125.
- [10] KATO H, KUDO T, NAITO H, et al. Electrical conductivity of Aldoped La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>ScO<sub>3</sub> perovskite-type oxide as electrolyte materials for low-temperature SOFC[J].Solid State lonics,2003,159: 217-222.
- [11] ZHANG T S, MA J, KONG L B, et al. Aging behavior and ionic conductivity of ceria-based ceramics: a comparative study[J]. Solid State Ionics, 2004, 170: 209-217.
- [12] HORMES J, PANTELOURIS M, BALAZS G B, et al. X-ray absorption near edge structure (XANES)measurements of ceria-based solid electrolytes[J]. Solid State Ionics, 2000, 136-137: 945-954.
- [13] 梁广川, 刘文西, 陈玉如. Sm,Gd 共同掺杂的 CeO<sub>2</sub> 基电解质性 能研究[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(1): 44-46.
- [14] HUANG K Q, WAN J H, GOODENOUGH J B. Oxide-ion conducting ceramics for solid oxide fuel cells[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36: 1093-1098.
- [15] WAN J H, YAN J Q, GOODENOUFH J B. LSGM-based solid

#### 2008.2 Vol.32 No.2

#### 126

<sup>© 1994-2009</sup> China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

state oxide cell with 1.4 W/cm<sup>2</sup> power density and 30 day long term stability[J]. Journal of Power Sources, 1996, 63: 47-51.

- [16] 朱晓东,孙克宁,张乃庆.中温 SOFC 阳极阻挡层 La<sub>0.45</sub>Ce<sub>0.55</sub>O<sub>2</sub>. 薄膜的制备[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(11): 2016-2019.
- [17] XIA C, LIU M. Preparation and characterization of fast ionic solids in new ternary system Cul-Ag<sub>2</sub>O-PbO<sub>2</sub>[J]. Solid State Ionics, 2001. 144:149.
- [18] GODICHEMEIER M, GAUCKLER L. Engineering of solid oxide fuel cells with ceria-based electrolytes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1998, 145: 414.
- [19] 王航娟,揭雷飞,董新法.CeO2在氢化催化反应中的作用[J].电 源技术, 2002, 26(1): 43-46.
- [20] KOBAYASHI K, TAKAHASHI I, SHIONO M, et al. Supported Zr-(Sc)O2 SOFCs for reduced temperature prepared by electrophoretic deposition[J]. Solid State Ionics, 2002, 152-153: 591-596.
- [21] NGUYEN T L, KOBAYASHI K, CAI Z, et al. Supported electrolyte membrane SOFCs for reduced temperature using Zr (Sc)O<sub>2</sub>, Ce(Gd)O<sub>2</sub>, and (La, Sr)(Ga, Mg)O<sub>3</sub>[C]//Solid Oxide Fuel Cells VII. Pennington, NJ: The Electrochemical Society Proceedings Series. 2001: 1042-1050.

[22] SHIONO M, KOBAYASHI K, NGUYEN T L. Effect of CeO2 interlayer on ZrO<sub>2</sub> electrolyte La (Sr)CoO<sub>3</sub> cathode for lowtemperature SOFCs[J]. Solid State Ionics, 2004, 170: 1-7.

综

述 夕汝坊土

- [23] NGUYEN T L, HONDA T, KATO T, et al. Fabrication and characterization of anode-supported tubular SOFCs with zirconia-based electrolyte for reduced temperature operation [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2004, 151(8): A 1230-A 1235.
- [24] NGUYEN T L, KOBAYASHI K, HONDA T, et al. Preparation and evaluation of doped ceria interlayer on supported stabilized zirconia electrolyte SOFCs by wet ceramic processes[J]. Solid State Ionics, 2004, 174: 163-174.
- [25] KIKUCHI R, FUTAMURA M, MATSUI T, et al. Electrochemical performance of (La, Sr)(Co, Fe)O<sub>3</sub> -(Ce, Sm)O<sub>3</sub> composite cathodes for low temperature Solid Oxide Fuel Cells[C]//Solid Oxide Fuel Cells . Pennington, NJ: The Electrochemical Society Proceedings Series, 2005: 1674-1683.
- [26] NGUYEN T L, KATO T, NOZAKI K, et al. Application of  $(Sm_{0.5}Sr_{0.5})CoO_3$  as a cathode material to  $(Zr, Sc)O_2$  electrolyte with ceria-based interlayers for reduced-temperature operation SOFCs [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(7): A 1310-



127