

# 电化学极化对 YSZ 氧传感器中贵金属电极性能的影响\*

王光伟<sup>1,2</sup>, 李和平<sup>2</sup>, 徐愿坚<sup>1</sup>, 徐丽萍<sup>2</sup>, 张 磊<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 环境友好化学过程研究中心, 重庆 401122;

2. 中国科学院地球化学研究所 地球深部物质与流体作用实验室, 贵州 贵阳 550002;

3. 安徽省地质测绘技术院, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 采用两种极化方式研究了电化学极化对 YSZ 氧传感器中常用贵金属电极性能的影响, 提出了电极阳极和阴极大化模型。研究表明, 在 500℃ 和空气条件下, Ag 和 Pd 可通过体扩散和形成氧化物的方式实现高效的氧传质, 电极性能较好; 离子导体 YSZ 的引入, 可使 Pt 电极有效反应界面得以扩展, 电极性能得到增强; Ag-2%Pt 电极较 Ag 电极性能低, 较 Pt 电极阳极活性有所增强; Au 电极极化时主要通过吸脱附和扩散进行氧转移, 效率较低, 尤其是阴极活性较低。

**关键词:** 电化学极化; YSZ 氧传感器; 贵金属; 电极性能

**中图分类号:** TQ174

**文献标识码:** A

DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2013.22.031

## 1 引言

YSZ 固体电解质是近 50 年来研究和应用最为广泛的高温氧离子导体, 由其构成的电化学电池大量用作氧传感器、氧泵、燃料电池、电化学反应器等。电极体系作为 YSZ 器件的关键结构, 其性能主要受两类因素的影响, 其一为不可抗拒因素, 即体系工作的环境条件, 如温度、压力、非目标组分的干扰等; 其二为在某种程度上可以控制的因素, 包括电极结构材料的选择设计<sup>[1,2]</sup>、电极制备工艺条件<sup>[3,4]</sup>、电极热/电化学处理<sup>[5,9]</sup>等。在贵金属/YSZ 电极体系众多影响因素中, 电化学极化与电极表面及体相化学状态密切相关, 直接影响到电极的工作性能, 是深入认识电极响应机制和提升器件氧敏特性的关键。本文借助于控制电势阶跃极化方法, 详细研究了电化学极化后 YSZ 氧传感器中 Pt、Au、Ag、Ag-2%Pt、Ag-1%Pd、Pt-5%YSZ 电极行为的变化。

## 2 实验

### 2.1 电极制备

YSZ 固体电解质为实验室自制, 具体方法为将  $(\text{ZrO}_2)_{0.92}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.08}$  粉末 (TOSOH TZ 8Y) 制成浆料, 用注浆法成型后于 200MPa 进行等静压, 然后于 1773K 烧结 2h 成瓷, 其相对密度达到 97%。将制作好的 YSZ 圆柱体在金刚石切片机上切片, 即得直径 9mm, 厚度 2mm 的 YSZ 圆片。该圆片表面经金刚石研磨膏 (粒径 5 $\mu\text{m}$ ) 打磨后, 先后用稀盐酸、蒸馏水、丙酮超声清洗, 然后采用刷涂工艺在其表面涂覆各种电极浆料, 150℃ 烘干后进行烧制即得所需电极。

本文中, 所有三电极样品制作时, 先在 YSZ 圆片一侧制作参考电极和对电极, 两电极相隔 2mm, 面积分别为 14.1 和 26.3mm<sup>2</sup>, 均由铂浆制成。工作电极位于对电极和参考电极的反面, 且与对电极相互对称, 面积为 26.3mm<sup>2</sup>, 分别由相应的电极浆料烧制而成, 其中, Pt、Au、Ag、Ag-2%Pt、Ag-1%Pd 电极浆料由昆明贵金属研究所提供, Pt-5%YSZ 电极浆料自制 (YSZ 质量含量为 5%)。Pt 和 Pt-YSZ 电极烧制温度分别为 1000 和 1400℃, 其余电极于 650℃ 烧制而成。所有电极引线 (直径为 0.1mm 的铂丝) 均通过一小滴银浆与制作好的各电极相连接, 烧制温度为 600℃。

### 2.2 测试装置

样品电极通过与其连接的电极引线悬于屏蔽盒中, 并连同屏蔽盒一起被置于与空气连通的管状电阻炉中, 各电极引线通过 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷管引出后分别与 PAR2263 电化学综合测试系统相应电极连接, 屏蔽盒与特殊高导地线相连, 以避免测量系统受电磁干扰, 测量温度为 500℃, 由置于样品电极附近的 NiCr-NiAl 热电偶给出, 如图 1 所示。

\* 基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (41203047); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2010AA09Z207); 中科院重大科研装备研制资助项目 (YZ200720)

收到初稿日期: 2013-02-27

收到修改稿日期: 2013-06-05

通讯作者: 李和平

作者简介: 王光伟 (1979-), 男, 云南昭通人, 助理研究员, 博士, 主要从事电化学传感器研究。

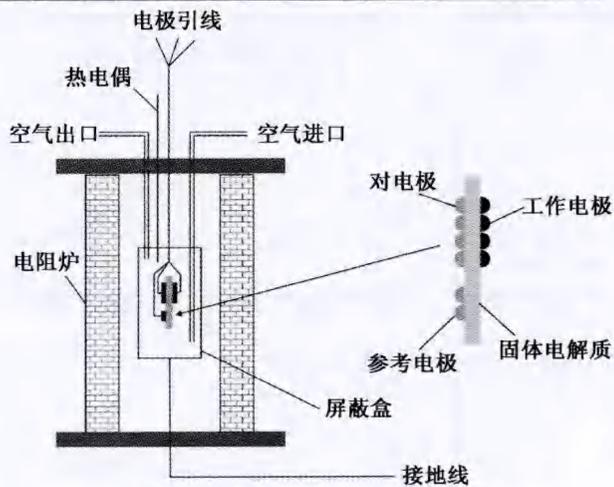


图1 电化学阶跃极化测试装置

Fig 1 Schematic draw of the electrochemical step polarization measurement system

### 2.3 电极极化实验

本文分别采取两种极化方式对电极在空气条件下进行实验:(1)电极于 $-0.6\text{V}$ 阴极极化处理 $1000\text{s}$ 后,阳极极化处理 $500\text{s}$ 。其中,阴极预极化处理的目

的在于将电极体系中可能存在的金属氧化物充分还原,使电极具有相同的初始状态和可重复性;(2)电极于 $0.6\text{V}$ 阳极极化处理 $1000\text{s}$ 后,阴极极化处理 $500\text{s}$ 。其中,阳极预极化处理的目的在于将电极体系中可能存在的还原态物质充分氧化,使电极具有相同的初始状态和可重复性。上述两类极化实验中预极化电位的选择依据为既可使电极体系中可能存在的金属氧化物或还原性物质充分还原或氧化,又不至于使电极微观结构发生较大的改变。

## 3 结果和讨论

### 3.1 电极微观形貌分析

采用JSM-6460LV型扫描电子显微镜,对极化前各样品电极进行了微观形貌观察,见图2。由图2可以看出,Pt、Pt-5%YSZ电极颗粒相当,均较小,孔隙率和疏松程度较高,孔径较小;Au、Ag电极颗粒均较Pt电极大,孔隙率和疏松程度较低;于Ag电极浆料中加入一定比例的Pd或Pt制成合金电极时,其孔隙率均增加,电极颗粒减小。

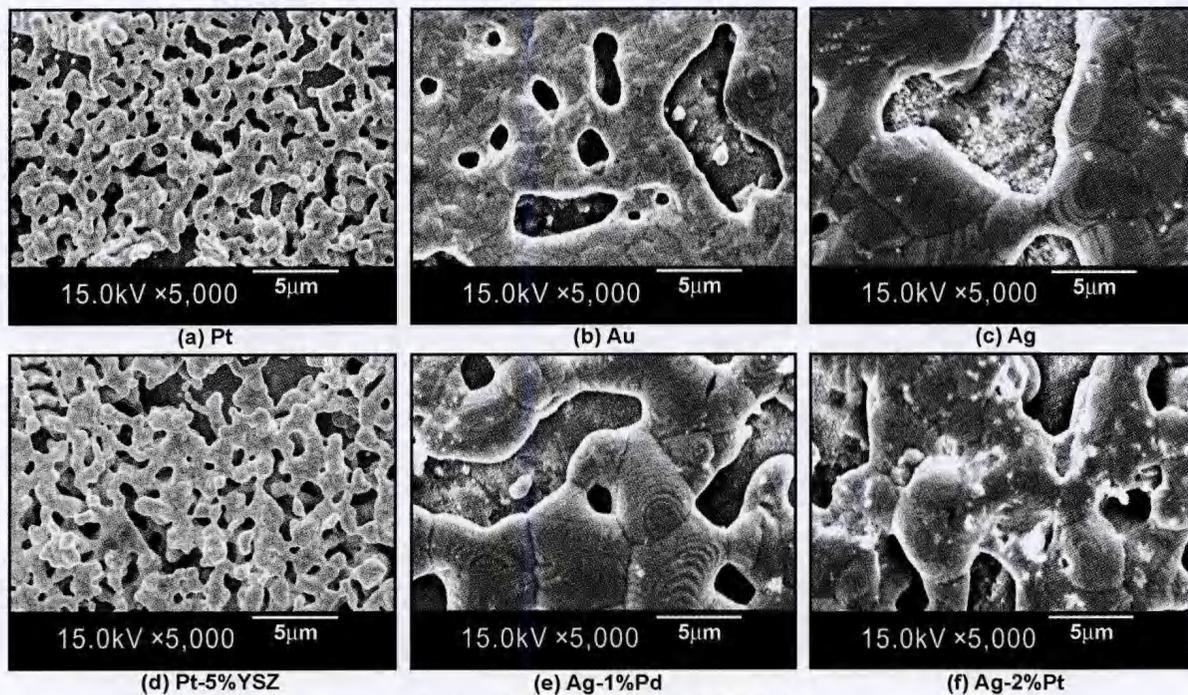


图2 样品电极的扫描电镜照片

Fig 2 SEM photographs of sample electrodes

### 3.2 电极极化实验

图3和4分别给出了各电极预极化处理后分别于绝对极化电位为 $0.3$ 和 $0.5\text{V}$ 时的计时电流曲线。

在YSZ氧传感器中,由于电极材料不同,电极两相界面和三相界面的结构和性质也不相同,而这些界面恰好是该电极系统进行电化学反应的主要位置。根据电化学理论,可将电极电化学阶跃极化模型示于图5。

结合图3、4和5,各电极通过极化方式(1)进行极

化时,在极化开始的瞬间, $\text{O}_{(\text{YSZ})}^{2-}$ 迅速在YSZ/空气、电子导体/YSZ和电子导体/YSZ/空气界面氧化析出,使得电流密度突然增大;随着极化时间的延长,虽然氧原子在电子导体/YSZ和电子导体/YSZ/空气界面的吸附变得困难,在电子导体/空气界面的扩散也受到影响,但由于 $\text{O}_{\text{atm}}$ 可通过位置交换的方式进行转移而进入电子导体内部,且在YSZ/空气、电子导体/空气和电子导体/YSZ/空气界面可以脱附而进入空气,所以电流密度能够保持平稳。

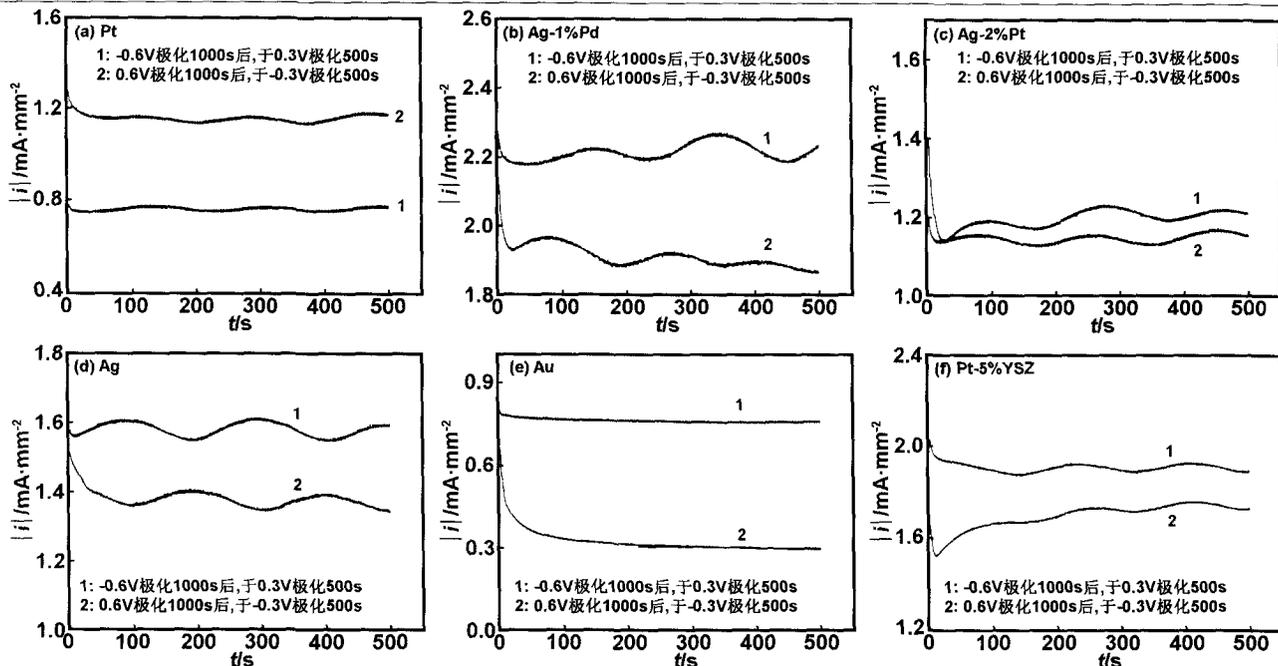


图3 绝对极化电位 0.3V 时的计时电流曲线

Fig 3 Chronoamperometric curves obtained at the absolute over-potential 0.3V

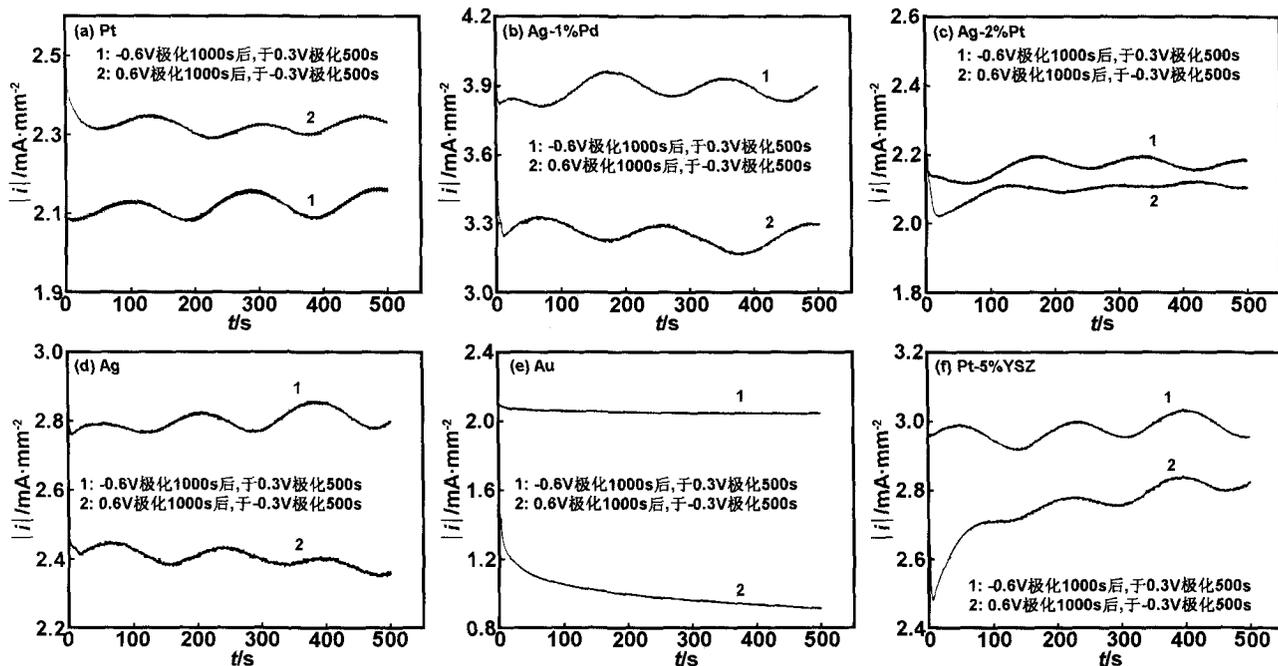


图4 绝对极化电位 0.5 V 时的计时电流曲线

Fig 4 Chronoamperometric curves obtained at the absolute over-potential 0.5V

采用极化方式(2)对各电极进行极化时,在YSZ/空气、电子导体/YSZ和电子导体/YSZ/空气界面发生电极还原的 $O_{\text{anm}}$ 有两个来源,其一是预氧化过程,其二是空气。极化开始的瞬间,预氧化过程中于上述3个界面处所形成的 $O_{\text{anm}}$ 以及以金属氧化物形式所储存的氧迅速还原而进入YSZ内部,使得电流密度值突然增大;随着极化时间的延长,预氧化过程中所储存的氧量不断减少,而空气中的氧分子尚来不及补充,使得电流密度值快速降低;继续增加极化时间,由于 $O_{2(\text{air})}$ 缓缓不断地解离吸附,并迅速扩散至相应还原界面进行补充,使得流过电极体系的电流密度值能够保持平

稳。表1给出了各电极阶跃极化后流过电极体系的平衡电流密度值。

由表1可以看出,除Pt电极外,其余电极进行方式(1)极化后的电流密度值均大于方式(2)极化后的电流密度值,尤其是Au电极,前者约为后者的两倍;无论是极化方式(1)还是(2),Ag-1%Pd电极平衡电流密度值均为最大,Au电极最小,其余电极介于两者之间;Pt-5%YSZ电极极化电流密度值较Pt电极大,在Ag电极中引入2%的Pt后,极化电流密度值减小,而引入1%的Pd后,电流密度值大幅增加。

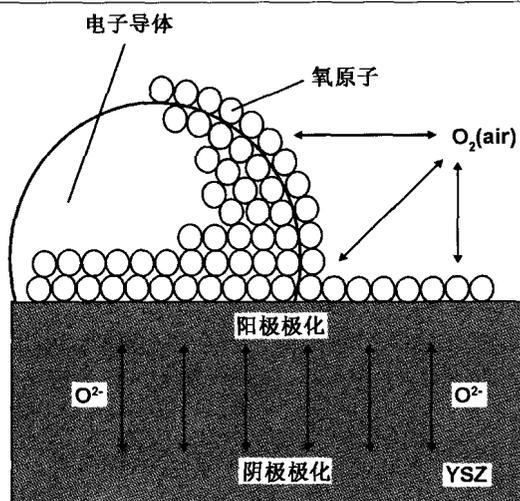


图5 电极阶跃极化反应机理示意图

Fig 5 Schematic diagram of the polarization mechanisms of electrodes

表1 阶跃极化后流过电极体系的平衡电流密度值

Table 1 Steady-state absolute current densities through the electrodes after step polarization

电极	$ i /\text{mA} \cdot \text{mm}^{-2}$			
	$E=0.3\text{V}$	$E=0.5\text{V}$	$E=-0.3\text{V}$	$E=-0.5\text{V}$
Pt	0.76	2.13	1.16	2.32
Pt-5%YSZ	1.91	2.99	1.74	2.81
Ag	1.6	2.81	1.4	2.38
Ag-2%Pt	1.2	2.18	1.15	2.11
Ag-1%Pd	2.23	3.89	1.89	3.23
Au	0.76	2.05	0.3	0.94

不难理解, Pt 电极在阴极极化前的预氧化过程中,  $\text{O}_{\text{YSZ}}^{2-}$  在 YSZ/空气、Pt/YSZ、Pt/YSZ/空气界面氧化析出并通过两种方式进行转移, 其一为脱附离开电极体系; 其二为以 Pt 氧化物的形式储存于 Pt 层内部<sup>[10-15]</sup>。在阴极极化开始后, 首先还原的是尚未离开体系的  $\text{O}_{\text{atm}}$ ; 紧接着, 储存于 Pt 层内部的氧源也被释放出来, 并开始在 Pt/YSZ 界面上还原, 同时,  $\text{O}_{2(\text{air})}$  解离吸附后开始源源不断地对体系所需氧量进行补充。所以使得更多的氧原子得以还原而进入 YSZ, 甚至超过了阳极极化时在各界面处发生氧化反应的氧量, 从而表现为实验中所观察到的极化方式(2)的电流密度值大于极化方式(1)。

在 Pt-5%YSZ 电极体系中, 由于离子导体 YSZ 的引入, 使得 Pt/空气、YSZ/空气、Pt/YSZ 两相界面和 Pt/YSZ/空气三相界面均得以扩展, 不仅有利于  $\text{O}_{\text{YSZ}}^{2-}$  的氧化析出, 而且还可促进  $\text{O}_{\text{atm}}$  的电极还原, 所以流过电极体系的平衡电流密度值均大于相应极化后的 Pt 电极, 表明离子导体的引入使 Pt 电极性能增强, 与文献资料<sup>[16,17]</sup>报道的结果吻合。但由于  $\text{O}_{\text{atm}}$  可在更为宽广的界面上脱附而进入空气, 使得预氧化阶段储存于电极体系中的氧量减少, 导致了极化方式(1)的电

流密度值高于极化方式(2)。值得注意的是在所研究的电极中, 只有 Pt-5%YSZ 电极随着阴极极化时间的继续延长, 流过电极体系的电流密度呈现出明显的增加趋势, 表明其催化活性有所增强, 这可能与 Vayenas 等<sup>[18,19]</sup>报道的非法拉第电化学修饰的催化活性效应(NEMCA)有关, 但其具体作用机理需要进一步研究。

由于 Ag 对氧具有较强的体扩散能力<sup>[20-22]</sup>, 不但可以促进 Ag/YSZ 界面上的  $\text{O}_{\text{atm}}$  通过 Ag 层进行转移, 加快了  $\text{O}_{\text{YSZ}}^{2-}$  在该界面上的氧化析出, 同时还有利于  $\text{O}_{2(\text{air})}$  在 Ag/空气界面解离吸附后通过体扩散到达 Ag/YSZ 界面, 并得到电子而转化为氧离子进入 YSZ, 所以出现了实验中所观察到的阳极/阴极极化后流过 Ag 电极体系的电流密度值大于相应极化后的 Pt 电极。Pd 由于具有与 Ag 类似的对氧的体扩散能力<sup>[23-25]</sup>, 使电极极化过程中氧原子的传质效率得以提高, 且电极孔隙率增加后引起的电子导体/YSZ/空气三相界面增大亦有助于电极反应, 而相比之下, 电子导体/YSZ 两相界面减小对电极过程的影响则较小, 所以出现了实验中所观察到的阳极/阴极极化后流过 Ag-1%Pd 电极体系的电流密度值大于相应极化后的 Ag 电极的现象。但由于该 3 种电极阳极氧化过程中所析出的氧原子可通过电子导体层快速扩散并脱附而离开电极体系, 所以在其阴极极化前的预氧化过程中储存于体系中的氧量减少, 使得电极通过极化方式(1)的电流密度值大于极化方式(2)的电流密度值。

在 Ag 电极中引入 2% 的 Pt 后, 电极孔隙率有所增加, 电子导体/YSZ/空气三相界面相应增大, 电极效率有所提高, 但由于电子导体/YSZ 两相界面减小, 且电子导体通过体扩散传递氧原子的能力较 Ag 电极低, 故电极活性较 Ag 电极低。由表 1 还可以看出, Ag-2%Pt 电极通过极化方式(1)进行极化后的电流密度值高于极化方式(2)的电流密度值, 尤其是极化电势为 0.3V 时, 电极电流密度值较 Pt 电极大幅增加, 表明电极预氧化过程中所产生并储存于体系中的氧量较 Pt 电极少, 使其阳极性能增强。

各电极中, Au 电极对氧原子的吸附能力最弱, 即氧原子在 Au 电极表面最容易脱附<sup>[26-28]</sup>。虽然就脱附转移方式来说 Au 电极优于其它电极, 然而由于氧原子极难通过体扩散或与 Au 原子形成氧化物的方式进行传质, 从而导致极化后的电流密度值小于其它电极。电极通过极化方式(2)进行极化时, 由于预氧化过程中所析出的氧在 YSZ/空气、Au/YSZ/空气、Au/空气界面上脱附而离开电极体系, 同时以金属氧化物形式储存于体系中的氧量非常少, 使得进行电极还原所需氧量主要通过  $\text{O}_{2(\text{air})}$  解离吸附、扩散供给, 效率较低, 从而导致电极极化后的电流密度值不但远低于通过极化方式(1)的电流密度值, 而且还低于其它电极。至于实验中所观察到的随着极化时间的延长, 除了 Au 电极外, 其余电极电流密度均呈波动规律变化的原因可能与极

化过程中氧的传输方式和动力学机制相关。

#### 4 结 论

(1) 实验条件下, Ag 和 Pd 可通过体扩散和形成氧化物的方式实现高效的氧传递, 不但加快了  $O_{2(\text{YSZ})}^-$  的氧化析出, 而且有利于  $O_{2(\text{air})}$  解离吸附后转移至反应界面进行还原, 使得电极极化损失小, 性能较好。

(2) 离子导体 YSZ 的引入, 可使 Pt 电极有效反应界面得以扩展, 电极性能得到增强; 在 Ag 电极中引入 2% 的 Pt 后, 电极体系氧传质能力介于 Pt 和 Ag 电极之间, 故电极性能较 Ag 电极低, 由于预氧化过程中所产生并储存于电极体系中的氧量较 Pt 电极少, 导致电极阳极活性增强。

(3) Au 电极与氧的结合力较差, 其极化时主要通过吸脱附和扩散进行氧的转移, 效率较低, 尤其是电极作为传感器阴极时, 氧分子在电极界面上解离吸附以及扩散能力较低, 导致电极活性较低。

#### 参考文献:

- [1] Sun C, Hui R, Roller J. Cathode materials for solid oxide fuel cells: a review[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2010, 14(7): 1125-1144.
- [2] Tsipis E V, Kharton V V. Electrode materials and reaction mechanisms in solid oxide fuel cells: a brief review, 3: recent trends and selected methodological aspects[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, 15(5): 1007-1040.
- [3] Thiemann S, Hartung R, Wulff H, et al. Modified Au/YSZ electrodes-preparation, characterization and electrode behaviour at higher temperatures[J]. *Solid State Ionics*, 1996, 86-88: 873-876.
- [4] Mutoro E, Luerßen B, Günther S, et al. The electrode model system Pt(O<sub>2</sub>)/YSZ: influence of impurities and electrode morphology on cyclic voltammograms[J]. *Solid State Ionics*, 2009, 180(17-19): 1019-1033.
- [5] Yoon S P, Nam S W, Kim S G, et al. Characteristics of cathodic polarization at Pt/YSZ interface without the effect of electrode microstructure[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 115(1): 27-34.
- [6] Mutoro E, Günther S, Luerßen B, et al. Electrode activation and degradation: morphology changes of platinum electrodes on YSZ during electrochemical polarisation[J]. *Solid State Ionics*, 2008, 179(33-34): 1835-1848.
- [7] Pöpke H, Mutoro E, Luerßen B, et al. The potential of in situ-scanning electron microscopy-morphology changes of electrically polarized thin film Pt(O<sub>2</sub>)/YSZ model electrodes[J]. *Solid State Ionics*, 2011, 189(1): 56-62.
- [8] Fischer S, Pohle R, Magori E, et al. Pulsed polarization of platinum electrodes on YSZ[J]. *Solid State Ionics*, 2012, 225: 371-375.
- [9] Hattori M, Takeda Y, Sakaki Y, et al. Effect of aging on conductivity of yttria stabilized zirconia[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 126(1-2): 23-27.
- [10] Sridhar S, Stancovski V, Pal U B. Effect of oxygen-containing species on the impedance of the Pt/YSZ interface[J]. *Solid State Ionics*, 1997, 100(1-2): 17-22.
- [11] Sum O S N, Djurado E, Pagnier T, et al. Raman investigation of the O<sub>2</sub>, Pt/YSZ electrode under polarization[J]. *Solid State Ionics*, 2005, 176(35-36): 2599-2607.
- [12] Jaccoud A, Falgairrette C, Föti G, et al. Charge storage in the O<sub>2</sub>(g), Pt/YSZ system[J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(28): 7927-7935.
- [13] Falgairrette C, Jaccoud A, Föti G, et al. The phenomenon of "permanent" electrochemical promotion of catalysis (P-EPOC)[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2008, 38(8): 1075-1082.
- [14] Falgairrette C, Föti G. Oxygen storage in O<sub>2</sub>/Pt/YSZ cell[J]. *Catalysis Today*, 2009, 146(3-4): 274-278.
- [15] Pöpke H, Mutoro E, Luerßen B, et al. Oxygen reduction and oxidation at epitaxial model-type Pt(O<sub>2</sub>)/YSZ electrodes on the role of PtO<sub>x</sub> formation on activation, passivation, and charge transfer[J]. *Catalysis Today*, 2013, 202: 12-19.
- [16] Xia C Y, Lu X C, Yan Y, et al. Preparation of nanostructured Pt-YSZ composite and its application in oxygen sensor[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(18): 7952-7958.
- [17] Barbucci A, Bozzo R, Cerisola G, et al. Characterisation of composite SOFC cathodes using electrochemical impedance spectroscopy. Analysis of Pt/YSZ and LSM/YSZ electrodes[J]. *Electrochimica Acta*, 2002, 47(13-14): 2183-2188.
- [18] Vayenas C G, Bebelis S, Neophytides S. Non-faradaic electrochemical modification of catalytic activity[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1988, 92(18): 5083-5085.
- [19] Vayenas C G, Bebelis S, Ladas S. Dependence of catalytic rates on catalyst work function[J]. *Nature*, 1990, 343: 625-627.
- [20] Moghadam F K, Stevenson D A. Oxygen diffusion and solubility studies in Ag and Pt using AC impedance spectroscopy[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1986, 133(7): 1329-1332.
- [21] Hong J K, Oh I H, Hong S A, et al. The effect of anodic polarization on a Ag electrode deposited on YSZ solid electrolyte[J]. *Applied Surface Science*, 1995, 89(3): 229-235.
- [22] Mosialek M, Bielańska E, Socha R P, et al. Changes in the morphology and the composition of the Ag/YSZ and Ag/LSM interfaces caused by polarization[J]. *Solid State Ionics*, 2012, 225: 755-759.
- [23] Athanasiou C, Karagiannakis G, Zisekas S, et al. Electrode polarization at the O<sub>2</sub>(g), Pd/YSZ interface[J]. *Solid State Ionics*, 2000, 136-137: 873-877.
- [24] Katsaounis A. Temperature programmed desorption of oxygen from Pd films interfaced with Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped ZrO<sub>2</sub>.

- [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2008, 38 (8):1097-1110.
- [25] Liang F, Chen J, Chi B, et al. Redox behavior of supported Pd particles and its effect on oxygen reduction reaction in intermediate temperature solid oxide fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 153.
- [26] Tsiplakides D, Neophytides S, Vayenas C G. Thermal desorption study of oxygen adsorption on Pt, Ag and Au films deposited on YSZ[J]. Ionics, 1997, 3(3-4): 201-208.
- [27] Tsiplakides D, Neophytides S, Vayenas C G. Investigation of the state of the electrochemically generated adsorbed O species on Au film interfaced with  $Y_2O_3$ -doped-ZrO<sub>2</sub>[J]. Ionics, 2001, 7(3): 203-209.
- [28] Neophytides S, Zafeirotos S, Kennou S. XPS characterization of the electrochemically generated O species on a Au electrode evaporated on  $Y_2O_3$ -stabilized ZrO<sub>2</sub> (100) [J]. Solid State Ionics, 2000, 136-137: 801-806.

## Effects of the electrochemical polarization on the characteristics of noble electrodes in YSZ oxygen sensor

WANG Guang-wei<sup>1,2</sup>, LI He-ping<sup>2</sup>, XU Yuan-jian<sup>1</sup>, XU Li-ping<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2,3</sup>

(1. Environmentally-Benign Chemical Process Research Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, China;

2. Laboratory for Study of the Earth's Interior and Geofluids, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

3. Institute of Geological Surveying and Mapping of Anhui Province, Hefei 230022, China)

**Abstract:** The effects of polarization on the common noble metal electrodes of YSZ oxygen sensor were studied through two electrochemical polarization modes, and the anodic and cathodic polarization model were proposed. The study indicates that with a controlled temperature of 500°C and ambient air condition, the Ag and Pd showed excellent electrochemical activity since the efficient transference of oxygen atoms by direct bulk diffusion and producing metal oxides; by the introduction of oxygen anion conductor YSZ, the effective reactive interfaces were greatly enlarged, so the activity of electrode was increased; the Ag-2%Pt electrode showed lower activity than the Ag electrode, but it present better anodic performance compared with the Pt electrode; while the Au electrode was polarized, the oxygen atoms were transferred only by adsorption, desorption and diffusion, that result in the low transferring efficiency, and especially the cathodic activity was very low.

**Key words:** electrochemical polarization; YSZ oxygen sensor; noble metal; electrode activity

(上接第 3347 页)

## Application of sol on material surface protection

ZHANG Ding-fei<sup>1,2</sup>, GUO Xing-xing<sup>1,2</sup>, GOU Yin-ning<sup>1,2,3</sup>, GENG Qing-mei<sup>1,2</sup>, PAN Fu-sheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** The sol-gel technology development in the nineteenth century was a new technical, and it occupied an important position with its unique advantages in the chemical industry, biological medicine, surface protection, material preparation and so on. In this paper, the single component and composite component sol in material surface protection are introduced, especially on the preparation of the sol, film formation and its role characteristics. Finally the development of the sol-gel film are previewed.

**Key words:** sol; coatings; surface protection