

涂层在固体氧化物燃料电池金属连接体中的应用

卞刘振¹, 王丽君^{1,2}, 陈志远³, 常希望¹, 王亚娴¹, 李福燊³, 周国治^{1,2}

(1. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

(2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

(3. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 固体氧化物燃料电池工作温度的降低, 使铁素体不锈钢用作连接体成为了可能。这类连接体具有热导率高、导电性能好、热膨胀性匹配等优点, 但也存在一些问题, 如高价 Cr 的挥发以及抗氧化性弱等。涂层可以改善铁素体不锈钢的相关性能。本文综述了稀土氧化物涂层、钙钛矿涂层以及尖晶石涂层的涂层类型和涂覆方法, 比较了在金属连接体中的应用效果。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 金属连接体; 稀土元素氧化物涂层; 钙钛矿涂层; 尖晶石涂层

中图分类号: TQ174

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)11-3030-07

固体氧化物燃料电池 (SOFC) 是一种将燃料的化学能直接转化成电能的装置。因其转化效率高、燃料选择性强, 污染小而得到了广泛的研究与应用^[1-4]。固体氧化物燃料电池单体由电解质、多孔阳极和多孔阴极组成, 但是由于单电池的发电功率低 (一般输出电压在 0.7~0.8 V), 达不到工作要求, 故而通过连接体将单电池连接起来组成电池堆。因此, 连接体也成为电池堆的重要组成部分, 肩负着电连接和导通气流的作用。常用的 SOFC 连接体主要有陶瓷连接体和金属连接体^[2,4-6]。陶瓷连接体是传统的高温连接体, 但是其致密性差, 难以加工成形, 对氧分压极其敏感^[2]等, 限制了其应用。随着阳极支撑固体氧化物燃料电池的出现, 电池的工作温度可以降低到 800 °C 以下, 使得金属连接体的应用成为可能。然而金属连接体自身也存在一些问题, 如抗氧化性弱, 高价 Cr 的挥发等^[5,7,8]。为此, 人们提出在表面涂覆各种涂层和掺杂活性元素来解决上述问题^[9,10]。

本文综述了金属连接体在使用中存在的实际问题, 比较了常用的涂层材料和方法及其综合效果, 以期对燃料电池连接体涂层的选择和设计提供参考。

1 金属连接体

金属连接体具有导热率高、导电性好以及热膨胀性与电池其他组件匹配等优点, 而且生产成本低, 易于加工成型等受到广泛的关注。常用的金属连接体主要有 Cr 基合金、Fe 基合金和 Ni 基合金^[2]。SOFC 的工作温

度一般在 600~800 °C, 连接体在高温下必定会发生氧化形成氧化膜。从抗氧化性方面考虑, 含 Al 和 Si 合金在表面能形成致密的氧化膜, 阻止合金进一步氧化, 但 Al₂O₃ 和 SiO₂ 是绝缘体, 电阻比电池其他组件大几个数量级, 一般认为合金中 Al 和 Si 的含量不能高于 1% (质量分数)。Ni 基合金具有很高的抗氧化性但形成的氧化物 NiO 的热膨胀系数为 $14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 远远高于电池组件的热膨胀系数 (通常 YSZ 为 $10.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), 这会造成电池的破裂。含 Cr 合金既具有抗氧化性又能满足导电性的要求。虽然 Cr 基合金能满足电池的工作要求, 但高含量的 Cr 又会毒化阴极, 降低电池的工作性能。所以最常用的是 Fe 基合金的铁素体不锈钢。

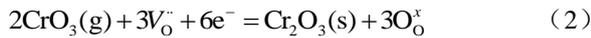
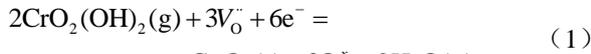
根据瓦格纳理论, 金属连接体的氧化服从抛物线规律。低的抗氧化性会增加氧化膜的厚度, 进一步增加连接体的电阻而降低电池的性能。S. Fontana^[10] 对 Crofer22APU、AL453 和 Haynes230 合金做氧化实验。对得到的面比电阻 (ASR) 与时间的关系推算, 若氧化 4000 h (SOFC 服役时间), ASR 分别为: 900、1000 和 1100 mΩ·cm²。均超过了电池在服役时间内所需的最低值 (100 mΩ·cm²)。此外, 连接体在氧化时, 由于存在选择性氧化表层会形成一层致密的 Cr₂O₃, 然而一般合金中还存在 Mn, 也会形成 Mn-Cr 尖晶石相, 使氧化产物分为内层 Cr₂O₃ 和外层 Mn-Cr 尖晶石。由于 Mn-Cr 尖晶石并不致密, 合金中的 Cr 会通过氧化膜继续扩散至表面被氧化, 致使氧化膜的厚度继续增加。含 Cr 铁

收稿日期: 2015-11-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (2012CB215405)

作者简介: 卞刘振, 男, 1990 年生, 硕士, 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083, E-mail: liuzhenbian@126.com

素体不锈钢中最重要的问题是高价 Cr 的挥发，尤其在阴极含水条件下，会形成 CrO₃ 和 CrO₂(OH)₂。而 CrO₃ 和 CrO₂(OH)₂ 会通过反应(1)和(2)^[10]沉积在阴极表面，从而降低阴极的催化活性。图 1^[11]给出了 Cr₂O₃ 沉积在阴极表面对电池电压的影响。可以看出，Cr₂O₃ 沉积在阴极表面会极大的降低电池的电压。



2 涂层的种类、常用方法及效果

研究表明涂覆涂层后的金属连接体性能得到改善^[12,13]。用作金属连接体的涂层自身应该具有抗氧化性和导电性外还应该能增加合金的抗氧化性、降低面比电阻 (ASR)、改善基体的粘附性、满足热膨胀性和化学稳定性与电池各组件匹配等条件。基于以上要求，常用的涂层有活性元素氧化物涂层、钙钛矿涂层和尖晶石涂层。而常用的涂层方法有溶胶凝胶法 (sol-gel)、电化学气相沉积法、浆料法、丝网印刷法、金属有机化学气相沉积法 (MOCVD)、等离子喷涂法、射频磁控溅射法等。

2.1 活性元素氧化物涂层

常用的活性元素一般是稀土元素 (La、Ce、Y、Nd 等) 和过渡金属元素 (Co、Co-Cu 等) ^[7-10,14-20]。活性元素氧化物可以改变氧化机理，使 Cr 向外扩散占主导改变为 O²⁻向内扩散占主导。大量实验证明活性元素氧化物涂层能增强合金的抗氧化性，降低氧化膜的厚度进而降低合金的 ASR，抑制合金基体中高价 Cr 的挥发同时改善氧化膜与基体间的粘附性，活性元素氧化物改变氧化机理，使 Cr 向外扩散占主导改变为 O²⁻向内扩散占主导。

常用的活性元素氧化物涂层方法为金属有机化学

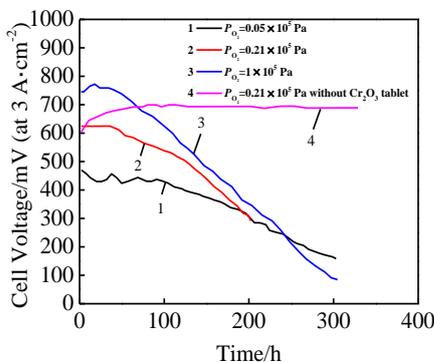


图 1 不同氧分压下 Cr₂O₃ 沉积在阴极表面对电池电压的影响

Fig.1 Cell voltage for given partial pressures of cathode oxygen and with Cr₂O₃ tablets on the cathode^[11]

气相沉积法^[7,8,14,15,21]和溶胶凝胶法^[9]。这些方法得到的涂层比较薄 (<1 μm 左右)，与基体之间的粘附性好，形成的氧化膜较薄。MOCVD 法是用挥发的活性元素螯合物来做前驱体，前驱体被加热至气化，然后在载流气体 (N₂ 等) 作用下沉积到加热的基体表面形成一层活性氧化物，反应产物随载流气体流出。

P. Piccardo^[22] 等考察了利用 MOCVD 法在 Crofer22APU、AL453、Fe30Cr 和 Haynes230 表面涂覆 La₂O₃、Nd₂O₃ 和 Y₂O₃ 涂层，与未涂层的试样在 800 °C 空气条件下氧化 100 h 后的抗氧化性和 ASR，如图 2 和图 3 所示。由图 2 表明，3 种涂层都降低了合金的氧化速率 K_p，但降低程度跟涂层及合金的种类有关。由图 3 表明，涂层的种类对 ASR 的影响较大，且于不同基体表现出不同的 ASR，具有很强的选择性。

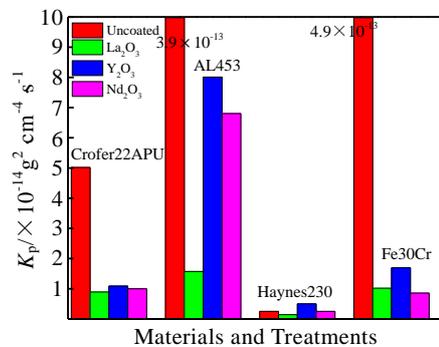


图 2 各种涂层在 800 °C 空气中 1 × 10⁵ Pa 下氧化 100 h 得到的速率常数

Fig.2 Values of the parabolic rate constants for coated and uncoated samples of Crofer22APU, Al453, Haynes 230 and Fe30Cr after 100 h at 800 °C in air under 1 × 10⁵ Pa^[22]

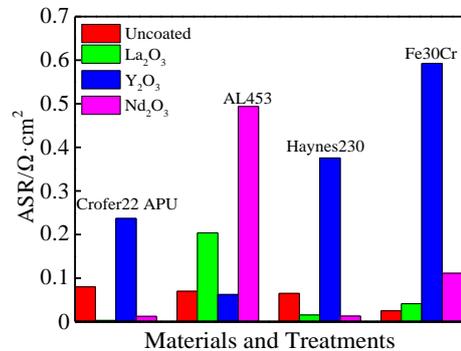


图 3 各种涂层在 800 °C 空气中 1 × 10⁵ Pa 下氧化 100 h 得到的 ASR

Fig.3 Values of ASR parameter for coated and uncoated samples of Crofer22APU, Al453, Haynes 230 and Fe30Cr after 100 h at 800 °C in air under 1 × 10⁵ Pa^[22]

一般稀土氧化物涂层在氧化后主要形成钙钛矿结构,但钙钛矿的形成跟涂层种类和基体有关,S. Fontana^[8]在合金 AL453 和 Fe30Cr 表面均检测到 YCrO₃ 相。而在 Crofer22APU 表面涂覆 Y₂O₃,却没有检测到 YCrO₃^[7],在 Crofer22APU 也没有检测到 YCrO₃,在合金表面只有 Y₂O₃。不同的研究得到的结果不同,对于 Y₂O₃ 涂层的机理目前还不清楚。

W. Qu^[9]等人采用溶胶凝胶法在铁素体不锈钢(16%~18% Cr,质量分数)表面涂覆 Y/Co、Ce/Co 来降低氧化增重速率。无涂层时,生成的氧化物为内层连续的 Cr₂O₃ 和外层大晶粒的 Mn-Cr 尖晶石。在 Ce/Co 涂层的样品表面氧化层为 200 nm,比无涂层时要薄。氧化层与无涂层时类似,只是在 Mn-Cr 尖晶石和 Cr₂O₃ 之间有一层 CeO₂。氧化层中没有检测到 Co 和 Co 的氧化物,说明 Co 溶解在表层的尖晶石相内。在 Y/Co 涂层中,Y 富集在 Cr₂O₃ 晶粒边界,Y 在 Cr₂O₃ 边界抑制了 Cr 的向外扩散,从而使 O²⁻ 向内扩散占主导地位,提高了抗氧化性。

活性元素氧化物涂层可以明显改善合金的性能,但是其作用机理现在还不是很清楚,涂层效果跟涂层种类,涂层技术和合金成分都有关。此外涂层形成的氧化层疏松多孔,不能特别有效的抑制 Cr 的向外扩散。

2.2 钙钛矿涂层

传统的连接体由于 SOFC 工作温度高而使用钙钛矿陶瓷连接体,但是陶瓷连接体加工困难,对氧分压极其敏感而且离子电导率大,电子电导率低,掺杂的钙钛矿电子电导率会有很大的改善。人们开始考虑用钙钛矿作为金属连接体涂层,常用的钙钛矿涂层一般是 LSCr (La_xSr_{1-x}CrO₃)^[23-26]、LSCo (La_xSr_{1-x}CoO₃)^[26-28]、LSF (La_xSr_{1-x}FeO₃)^[28-30]、LSM (La_xSr_{1-x}MnO₃)^[28,31-35] 和 LSCF^[28-30]。常用的钙钛矿涂层技术主要有 RF-磁控溅射^[24,27,29,30]、DC 磁控溅射^[32]、等离子喷涂^[36]、溶胶凝胶法^[23,31]和丝网印刷法^[26,28]。

溶胶凝胶法是经常用到的涂层技术,该方法操作简单不需要精密仪器。E. A. Lee^[23]用 La(NO₃)₃·6H₂O、Sr(NO₃)₂ 和 Cr(NO₃)₃·9H₂O 制成前驱体溶液,涂敷在 SUS444 合金上,然后经过热处理形成 LSCr 涂层。K. Przybylski 等人^[26]采用丝网印刷法在 Fe-25Cr 合金界面涂覆(La,Sr)CrO₃ (LSCr) 和(La,Sr)CoO₃ (LSCo),得到的钙钛矿层比较致密。无涂层时,不锈钢氧化膜的厚度为 3 μm,但是由于 Cr 的向外挥发,在氧化层和基体之间存在缝隙。当涂覆 LSCr 和 LSCo 时,氧化膜和基体接触紧密,形成的氧化层厚度<3 μm,涂层和基体之间有复杂的多层结构,这可以释放涂层与基体之间的热应力,进而增加他们之间的粘附性。

对面比电阻(ASR)进行测量发现 LSCo 和 LSCr 涂层样品的 ASR 都很低,LSCo 涂层样品氧化 70 h 后 ASR 为 5 mΩ·cm²,远小于连接体在服役寿命(>40 000 h)内所要求的 ASR (<100 mΩ·cm²)。而 LSCr 涂层的 ASR 为 90 mΩ·cm²。说明 LSCo 涂层效果比 LSCr 要好,对其进行 Cr 的气化实验发现 2 种涂层都能极大的抑制 Cr 的气化挥发。

Seong-soo Pyo 等人^[34]在 Crofer22APU 合金表面涂覆(La_{0.8}Sr_{0.2})_{0.98}MnO₃ (LSM)涂层,在 800 °C 空气下氧化来研究氧化动力学、面比电阻(ASR)和界面的微观结构。氧化 8000 h 后,ASR 为 23 mΩ·cm²,氧化层的厚度为 10~20 μm。SEM 显示涂层与氧化层之间有很好的粘附性。LSM 涂层有效的抑制了 Cr₂O₃ 和 (Mn,Cr)₃O₄ 的形成和生长。

等离子喷涂也是常用的涂层薄膜技术。工作气体被加热电离成高温等离子体,并使粉体融化喷射到基体材料上形成薄膜。付长璟^[37]等人使用等离子喷涂法在 Fe-16Cr 合金上喷射了高致密的 LSM 涂层材料,并对喷涂工艺参数进行了优化。LSM 涂层明显提高了 Fe-16Cr 合金的高温抗氧化性,合金的氧化速率降低了 76%。

钙钛矿涂层是一种有效的涂层方法,可以降低合金的氧化速率,改善合金的面比电阻和抑制 Cr 的挥发,但涂层种类和合金成分也影响总体效果。此外钙钛矿中含有大量的 O²⁻,这样 O²⁻ 就会从涂层由外向内扩散。

2.3 尖晶石涂层

尖晶石的结构为 AB₂O₄,其中 A 位和 B 位一般都是过渡金属元素。因尖晶石结构具有良好的导电性,与电池各组件的 CTE 匹配且与基体的粘附性好,能抑制合金基体中 Cr 的挥发而受到关注。常用的尖晶石涂层为 Mn-Co 涂层^[13,21,38-43]和 NiMn₂O₄ 涂层^[44]。而 Mn-Co 尖晶石涂层方法主要有浆料涂层法、丝网印刷法^[13]、电沉积法^[39]等。浆料涂层以及丝网印刷是将涂层前驱体涂覆或刷在合金表面,然后在适当的条件下进行预处理,使其形成稳定致密的尖晶石涂层。

不同的形成条件得到的尖晶石的作用不同。W. Wei^[41]在 AISI430 合金表面采用电沉积方法在不锈钢表面得到连续均匀厚度为 6 μm 的 Mn-Co 尖晶石涂层,将试样分别在 800 °C 空气和 5% H₂~95% N₂ 气氛下预处理 10 h 后开始氧化。空气下氧化时得到的氧化层为 3 层,最外层是稀疏的大晶粒,中间是致密的 (Mn,Cr,Co)₃O₄ 尖晶石,最内层是 Cr₂O₃。(Mn,Cr,Co)₃O₄ 层表明 Cr 挥发到 Mn-Co 尖晶石层内,原因可能是开始 MnO 和 CoO 层反应生成(Mn,Co)₃O₄ 释放出部分

O₂，涂层中的氧分压提高使得 Cr 由内向外扩散至 (Mn,Co)₃O₄ 层内。这种预处理方法不能抑制基体中 Cr 的挥发。而在 5% H₂-95% N₂ 气氛下预处理时，得到的涂层比空气下具有更好的粘附性。而且涂层中没有检测到 Cr 的存在，说明还原性气氛下处理得到的涂层能抑制 Cr 的挥发，同时改善基体与涂层的粘附性。此外测量 2 种不同预处理后的涂层试样在 800 °C 空气下氧化 500 h 的 ASR 显示，还原性预处理下涂层试样的 ASR 为空气下的 1/3。

Mn-Co 尖晶石涂层的作用还与基体合金的成分组成有关。Z. G. Yang 等人^[38]用浆料涂层法在合金 Crofer22APU、E-brite 和 AISI 表面涂覆 Mn-Co 涂层，涂层在还原性气氛下进行预处理得到 Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ 涂层。极大的抑制了基体中 Cr 的挥发，同时改善了合金的 ASR。图 4 和图 5 分别为涂覆 Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ 涂层的 E-brite 和 AISI 样品在 800 °C 空气下氧化 400 h 后的 SEM 照片及 EDS 分析。从图中可以看出在涂层与基体之间生成一层厚度 <3 μm 的 Cr₂O₃ 膜。E-brite 生成的薄膜厚度 1 μm，比 AISI (2.0~2.5 μm) 的要薄。在 AISI 氧化层表面和基体之间有一层 SiO₂，原因是 AISI 中 Si 含量高并被氧化，SiO₂ 导电性极差，会增加合金的 ASR。图 6 为 E-brite 和 AISI 的 ASR 与时间的关系。从图中也可以看出 AISI 的 ASR 极高，这可能与表面

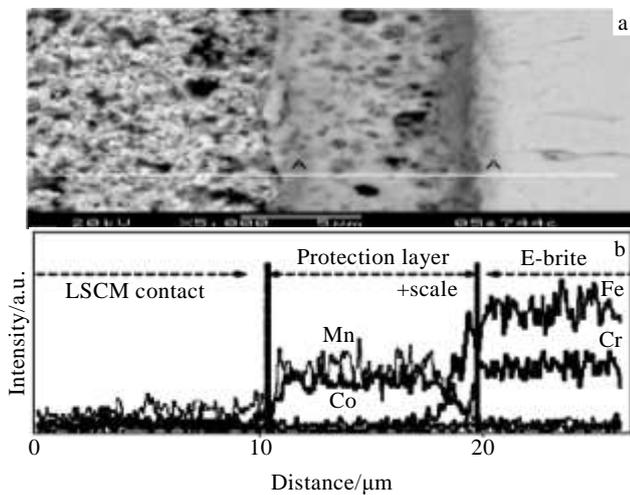


图 4 E-brite 合金表面涂覆 Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ 涂层在 800 °C 空气下氧化 400 h 的 SEM 照片及 EDS 元素分析

Fig.4 SEM image and EDS element analysis on E-brite with Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ protection layer after the contact ASR measurement at 800 °C in air for about 400 h: (a) SEM cross-section and (b) EDS line scan along line A-A in Fig.4a (The E-brite coupon spray-coated with spinel precursor was heat-treated in Ar+2.75% H₂+3% H₂O for 4 h prior to the measurement)^[41]

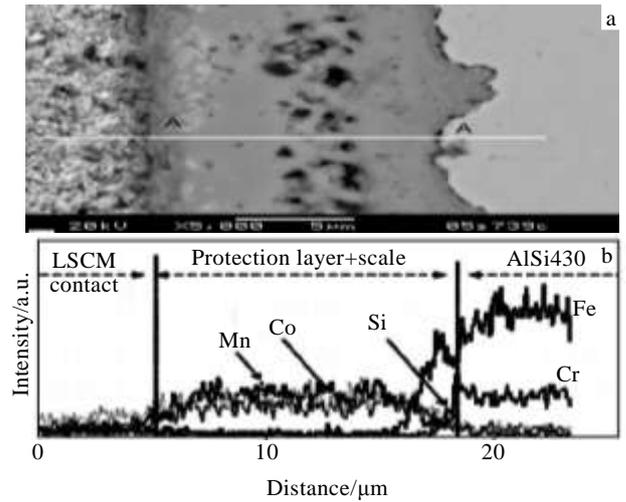


图 5 AISI430 合金表面涂覆 Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ 涂层在 800 °C 空气下氧化 400 h 的照片及 EDS 元素分析^[41]

Fig.5 SEM image and EDS elements analysis on AISI430 with Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ protection layer after the contact ASR measurement at 800 °C in air for about 400 h: (a) SEM cross-section and (b) EDS line scan along line A-A in Fig.5a (The AISI430 coupon spray-coated with spinel precursor was heat-treated in Ar+2.75% H₂+3% H₂O for 4 h prior to the measurement)^[41]

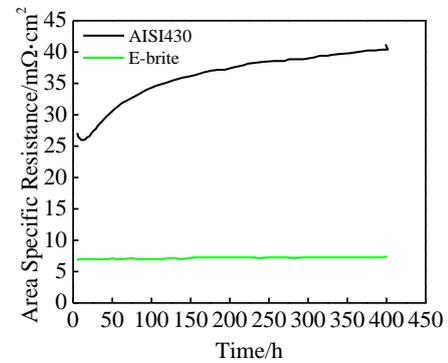


图 6 AISI430 和 E-brite 的面比电阻(ASR)与时间的关系

Fig.6 Contact ASR between a LSF cathode and AISI 430 or

E-brite current collector with Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ spinel protection layer

(The current collectors spray-coated with Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ spinel precursor were heat-treated in Ar +2.75% H₂+3% H₂O at 800 °C for 4 h before the ASR measurements in air at 800 °C^[41])

SiO₂ 的生成有关，而 E-brite 在氧化 400 h 过程中保持稳定为 7 mΩ·cm²。

Y. Xu 等人^[45]用浆料提拉法在铁素体不锈钢表面涂覆 Cu-Mn-Co 尖晶石涂层。Cu 的掺杂加入可以改变

Mn-Co 尖晶石涂层的热膨胀性能使之与金属基体匹配，同时也降低制备涂层的烧结温度。研究表明 Cu-Mn-Co 涂层最佳的组成为 $Cu_{0.3}Mn_{1.35}Co_{1.35}O_4$ 。涂有 $Cu_{0.3}Mn_{1.35}Co_{1.35}O_4$ 涂层的试样在 750 °C 空气下等温氧化 553 h 后的 ASR 仅为 $16\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。此外该涂层能有效的抑制 Cr 的挥发。

Mn-Co 尖晶石涂层能有效的增加合金的抗氧化性，降低 ASR，主要抑制基体中 Cr 的挥发而减少高价 Cr 对阴极的毒化，是目前比较有前景的一种涂层。

3 对各种涂层及技术的评价

通过不同涂层可以不同程度的改善金属连接体的抗氧化性，降低合金的面比电阻，抑制合金中 Cr 的挥发。涂层作用还与合金的成分组成有关。不同涂层技术得到不同的涂层效果，但涂层还要考虑经济成本等因素。表 1 和表 2 给出了不同涂层的作用和不同涂层技术的特点。

从表 1 中可以看出尖晶石涂层是唯一能有效抑制 Cr 的挥发的涂层，同时也能改善合金的抗氧化性。从表 2 中可以看出电沉积法制备 Mn-Co 尖晶石涂层时

Mn 沉积困难，这是因为 Mn 的电负性更大。金属有机化学气相沉积法、RF 磁控溅射法、等离子喷涂法因成本高要求精密的仪器装置而不适合工业化的应用，但得到的涂层比较致密而且涂层较薄。溶胶凝胶法、浆料涂层法、丝网印刷法操作简单，不需精密仪器，适用于工业化生产。电沉积法适用于复杂结构的连接体涂层。

表 1 不同涂层材料的性能比较

Table 1 Comparison of different coating materials in terms of capability of improving electronic conductivity, Cr migration inhibition and oxidation rate reduction as well as simplicity of the coating process^[12]

Coating material	Electronic conductivity	Cr migration inhibition	Oxidation rate reduction	Simplicity of deposition
REOs	Fair	Poor	Good	Good
Perovskites	Good	Fair	Good	Fair
Spinel	Good	Good	Fair	Good
Composite spinels	Good	Good	Good	Good

表 2 不同涂层技术的特点

Table 2 Advantages and disadvantages of different coating techniques^[12]

Coating method	Advantage	Disadvantage
Sol-gel	Simple Applicable to ceramic coatings	Thin, non-uniform coatings
MOCVD	Applicable to ceramic coatings	Thin, non-uniform coatings
RF magnetron sputtering	Applicable to ceramic coatings	High cost Dependent on line-of-sight Cracked, porous coatings
Slurry	Simple	Non-uniform, porous coatings
Screen printing	Simple	Non-uniform, porous coatings
Plasma spraying	Thick ceramic coatings possible	Non-uniform, porous coatings
Electrodeposition	Simple Applicable to complex shapes	Difficulty for Mn deposition Interdiffusion with substrate during oxidation leading to breakaway oxidation

4 结 语

铁素体不锈钢具有低的 ASR，同时与固体氧化物燃料电池各组件的热膨胀系数 (CTE) 匹配，可以用作低温固体氧化物燃料电池连接体，但不锈钢的抗氧化性与陶瓷连接体相比较差，尤其是不锈钢基体中高价 Cr 的挥发会毒化阴极材料进而降低电池的工作性能。在不锈钢连接体表面涂覆涂层能很好的改善合金的抗氧化性，抑制 Cr 的挥发等。活性元素氧化物涂层能改善氧化层与基体的粘附性，钙钛矿涂层和尖晶石涂层能有效抑制基体中高价 Cr 的挥发。尤其是 Mn-Co 尖晶石涂层，是一种性能优异、涂覆经济的涂

层选择，是一种未来研究的主要涂层。此外，还要探索新的性能更加优越的涂层材料。

参考文献 References

[1] Singhal S. *MRS Bulletin*[J], 2000, 25(3): 16
 [2] Zhu W Z, Deevi S C. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*[J], 2003, 348(1-2): 227
 [3] Fergus J W. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*[J], 2005, 397(1-2): 271
 [4] Li Y, Jiang Y, Wu J et al. *International Journal of Applied*

- Ceramic Technology*[J], 2010, 7(1): 41
- [5] Quadackers W J, Piron-Abellan J, Shemet V *et al. Materials at High Temperatures*[J], 2003, 20(2): 115
- [6] Ralph J, Schoeler A, Krumpelt M. *Journal of Materials Science*[J], 2001, 36(5): 1161
- [7] Fontana S, Chevalier S, Caboche G. *Journal of Power Sources* [J], 2009, 193(1): 136
- [8] Fontana S, Amendola R, Chevalier S *et al. Journal of Power Sources*[J], 2007, 171(2): 652
- [9] Qu W, Li H, Ivey D G. *Journal of Power Sources*[J], 2004, 138(1-2): 162
- [10] Qu W, Jian L, Ivey D G *et al. Journal of Power Sources*[J], 2006, 157(1): 335
- [11] Taniguchi S, Kadowaki M, Kawamura H *et al. Journal of Power Sources*[J], 1995, 55(1): 73
- [12] Shaigan N, Qu W, Ivey D G *et al. Journal of Power Sources* [J], 2010, 195(6): 1529
- [13] Yang Z G, Xia G G, Simner S P *et al. Journal of the Electrochemical Society*[J], 2005, 152(9): A1896
- [14] Cabouro G, Caboche G, Chevalier S *et al. Journal of Power Sources*[J], 2006, 156(1): 39
- [15] Piccardo P, Gannon P, Chevalier S *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2007, 202(4-7): 1221
- [16] Montero X, Jordan N, Piron-Abellan J *et al. Journal of the Electrochemical Society*[J], 2009, 156(1): B188
- [17] Piccardo P, Chevalier S, Molins R *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2006, 201(7): 4471
- [18] Belogolovsky I, Hou P Y, Jacobson C P *et al. Journal of Power Sources*[J], 2008, 182(1): 259
- [19] Molin S, Kusz B, Gazda M *et al. Journal of Solid State Electrochemistry*[J], 2009, 13(11): 1695
- [20] Fontana S, Chevalier S, Caboche G. *Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion*[J], 2011, 62(7): 650
- [21] Balland A, Gannon P, Deibert M *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2009, 203(20-21): 3291
- [22] Piccardo P, Amendola R, Fontana S *et al. Journal of Applied Electrochemistry*[J], 2009, 39(4): 545
- [23] Lee E A, Lee S, Hwang H J *et al. Journal of Power Sources* [J], 2006, 157(2): 709
- [24] Johnson C, Orlovskaya N, Coratolo A *et al. International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2009, 34(5): 2408
- [25] Brylewski T, Dabek J, Przybylski K *et al. Journal of Power Sources*[J], 2012, 208: 86
- [26] Przybylski K, Brylewski T. *Materials Transactions*[J], 2011, 52(3): 345
- [27] Lee C, Bae J. *Thin Solid Films*[J], 2008, 516(18): 6432
- [28] Lee S, Chu C L, Tsai M J *et al. Applied Surface Science*[J], 2010, 256(6): 1817
- [29] Yang Z, Xia G G, Maupin G D *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2006, 201(7): 4476
- [30] Yang Z, Xia G G, Maupin G D *et al. Journal of the Electrochemical Society*[J], 2006, 153(10): A1852
- [31] Kim J H, Song R H, Hyun S H. *Solid State Ionics*[J], 2004, 174(1-4): 185
- [32] Chu C L, Wang J Y, Lee S. *International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2008, 33(10): 2536
- [33] Chu C L, Lee J, Lee T H *et al. International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2009, 34(1): 422
- [34] Pyo S S, Lee S B, Lim T H *et al. International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2011, 36(2): 1868
- [35] Jan D J, Lin C T, Ai C F. *Thin Solid Films*[J], 2008, 516(18): 6300
- [36] Lim D P, Lim D S, Oh J S *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2005, 200(5-6): 1248
- [37] Fu Changjing(付长璟), Sun Kening (孙克宁), Zhang Naiqing (张乃庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(7): 1117
- [38] Yang Z G, Xia G G, Singh P *et al. Journal of Power Sources*[J], 2006, 155(2): 246
- [39] Wu J W, Johnson C D, Gemmen R S *et al. Journal of Power Sources*[J], 2009, 189(2): 1106
- [40] Montero X, Tietz F, Sebold D *et al. Journal of Power Sources*[J], 2008, 184(1): 172
- [41] Wei W, Chen W, Ivey D G. *Journal of Power Sources*[J], 2009, 186(2): 428
- [42] Wang K, Liu Y, Fergus J W. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2011, 94(12): 4490
- [43] Choi J J, Ryu J, Hahn B D *et al. Journal of Materials Science*[J], 2009, 44(3): 843
- [44] Zhang W, Pu J, Chi B *et al. Journal of Power Sources*[J], 2011, 196(13): 5591
- [45] Xu Y, Wen Z, Wang S *et al. Solid State Ionics*[J], 2011, 192(1): 561

Oxide Coatings for Solid Oxide Fuel Cell Metallic Interconnects

Bian Liuzhen¹, Wang Lijun^{1,2}, Chen Zhiyuan³, Chang Xiwang¹, Wang Yaxian¹, Li Fushen³, Zhou Guozhi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. School of Metallurgical and Ecological Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Ferritic Stainless Steels (FSS) can be applied as interconnects of solid oxide fuel cells at reduced operating temperatures due to their high thermo conductivities, suitable coefficients of thermal expansion and low price. However, practical application is still facing various challenges, such as low oxidation resistances and high volatility of chromium oxides. These issues could be minimized by coating technique. In this review, the application and effects of rare element oxide coatings (REOs), perovskite coatings and spinel coatings were compared and discussed.

Key words: SOFC; metallic interconnect; RE oxide coatings; perovskite coatings; spinel coatings

Corresponding author: Wang Lijun, Ph. D., Associate Professor, Department of Physical Chemistry, School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62333622, E-mail: lijunwang@ustb.edu.cn