文章编号:1674-2869(2025)01-0037-07

沉积温度对MOCVD法在铁素体不锈钢表面制备$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层性能的影响

李 华[1],马 超[2],汤加杰[1],熊春艳[2],赵 培[*1]
1. 武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205;
2. 武汉工程大学化工与制药学院,湖北 武汉 430205

摘 要:为了研究在固体氧化物燃料电池阴极条件下$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层对连接体的保护效果,以三(2,2,6,6-四甲基-3,5-庚二酮)锰和双(2,2,6,6-四甲基-3,5-庚二酮)钴为前驱体,通过金属有机化学气相沉积法在SUS430铁素体不锈钢上成功制备了$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层。在1 023 K空气气氛下对其进行抗氧化测试,使用X射线衍射、扫描电子显微镜对氧化前后的样品进行了物相和微观形貌分析。结果表明:$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层合金氧化后单位面积增加的质量相较于SUS430合金减少了60%以上,其中923 K沉积温度下制备的涂层合金样品抗氧化性能最优,合金涂层相较于空白合金氧化速率常数从5.08×10^{-14} g^2/(cm^4·s)降为1.68×10^{-15} g^2/(cm^4·s)。使用金属有机化学气相沉积法制备的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层能有效降低SUS430连接体的氧化速率,显著提高其抗氧化性能。

关键词:固体氧化物燃料电池;$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层;高温抗氧化性;金属有机化学气相沉积
中图分类号:TG174 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202409018

Influence of deposition temperature on properties of $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating prepared by MOCVD method on surface of ferritic stainless steel

LI Hua[1], *MA Chao*[2], *TANG Jiajie*[1], *XIONG Chunyan*[2], *ZHAO Pei*[*1]
1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: To investigate the protective effect of $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating on the connector under the cathode conditions of solid oxide fuel cells, $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating was successfully prepared on SUS430 ferritic stainless steel by metal-organic chemical vapor deposition using tris(2,2,6,6-tetramethyl-3,5-heptanedione) manganese and bis(2,2,6,6-tetramethyl-3,5-heptanedione)cobalt as precursors. The samples were subjected to oxidation resistance tests at 1 023 K in an air atmosphere, and the phase composition and microscopic morphology of samples before and after oxidation were analyzed using X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results show that the mass gain per unit area of the oxidized $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating was reduced by more than 60% compared to that of the oxidized SUS430 alloy, and the antioxidant performance of the coated alloy samples prepared at deposition temperature of 923 K was optimal, with an oxidation rate constant of 1.68×10^{-15} g^2/(cm^4·s), in contrast to 5.08×10^{-14} g^2/(cm^4·s) for the blank alloys. The $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating prepared by metal-organic chemical vapor deposition effectively reduced the oxidation

收稿日期:2024-09-23
基金项目:湖北省教育厅科技计划指导项目(B2023041);湖北省重点研发项目(2024BCB074)
作者简介:李 华,硕士研究生。Email:15135346973@139.com
***通信作者**:赵 培,博士,教授。Email:zhaopei@wit.edu.cn
引文格式:李华,马超,汤加杰,等.沉积温度对MOCVD法在铁素体不锈钢表面制备$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层性能的影响[J].武汉工程大学学报,2025,47(1):37-43.

rate constant of the SUS430 connector, thus significantly improving its high-temperature oxidation resitance.
Keywords: solid oxide fuel cell; $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating; high-temperature oxidation resitance; metal-organic chemical vapor deposition

为了推动社会可持续发展,实现碳达峰、碳中和目标,发展清洁能源迫在眉睫[1]。固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell,SOFC)可以将储存在燃料中的化学能转换成电能,不仅能量转化效率高,还兼具环境友好、燃料多样化、可靠性高、可再生等优点[2-3],被认为是一种理想的清洁能源。由于单个SOFC产生的电压有限,需要将单个SOFC按照实际使用需求连接组成电池组。SOFC电池组由阳极、电解质、阴极、连接体等构成的重复单元组成,将单个SOFC连接起来使用的关键部件是连接体,它具有导电、导热、隔离阴极与阳极气体和充当支撑体的作用[4]。

近年来,随着传统电解质材料钇稳定氧化锆薄膜化[5-6]和中温下具有良好氧离子传导性能的新型电解质材料[7-9]的不断开发,SOFC的工作温度从1 273 K左右降低到873~1 073 K,这一变化使得金属连接体能够取代钙钛矿陶瓷连接体在SOFC中得到应用。铁素体不锈钢(ferritic stainless steel,FSS)具有较高的导电性能、导热性能,低成本、易加工和高机械强度等优点[10-11],使之成为一种极具潜力的新型金属连接体材料。但在SOFC复杂工作环境与温度下,FSS缺乏良好的长期抗氧化性能,表面氧化膜会随使用时间的延长而过度增长,从而影响连接体的稳定性和导电性。此外,FSS氧化膜中的Cr离子会在电池工作过程中不断挥发并引起阴极“铬中毒”现象,影响SOFC的高效安全运行[12-14],制约其商业化进程。目前,一般通过优化FSS体系和表面涂层改性来解决上述问题[15],相较于优化FSS体系,表面涂层改性工艺更简单,生产成本更低。

用于FSS的涂层材料应具备以下条件[16]:阻止Cr离子和O离子的迁移,提高FSS的抗氧化性能并防止阴极材料“铬中毒”;与FSS相匹配的热膨胀系数,避免长时间工作因热应力而导致涂层破裂甚至剥落;在SOFC工作环境下保持良好的化学及物理稳定性;涂层材料本身应该结构致密,并与金属基体结合牢固。目前用于FSS涂层的材料主要有活性稀土元素及其氧化物、稀土钙钛矿以及尖晶石[17]。活性稀土元素及其氧化物涂层可以改善金属连接体与氧化膜的黏附性,降低氧化速率,但涂层通常较薄,且为多孔结构,阻碍Cr扩散和Cr挥发的能力较差;稀土钙钛矿涂层可以改善基体与氧化膜的黏附性,有效提高FSS的抗氧化能力,但其具有较高的O离子传导率,导致氧化膜的增长速率过高。因此,具有良好的化学及物理稳定性和优良热膨胀匹配性的尖晶石涂层如Mn-Co[18]、Cu-Mn[19]和Ni-Fe[20]等成为目前的研究热点之一。其中,Mn-Co尖晶石涂层因具有良好的热稳定性以及与FSS良好的热膨胀匹配性而被重点研究。

制备Mn-Co尖晶石涂层的方法有溶胶凝胶法、等离子喷涂法、磁控溅射、丝网印刷、金属有机化学气相沉积(metal organic chemical vapor deposition,MOCVD)法等。如Bednarz等[21]采用溶胶凝胶法和电泳沉积在Crofer22H基体上制备了$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层,有效提高了Crofer22H的抗氧化性能。Hu等[22]采用等离子喷涂法在T441基体上制备了具有高温稳定性的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层,有效提高了T441的抗氧化性。上述制备方法中,MOCVD法拥有涂层与基体结合牢固、薄膜致密、纯度高且结晶度好、可获得梯度沉积物或多组分混合薄膜、可对大尺寸结构复杂的工件镀膜等优点[23],因此使用MOCVD在SOFC连接体上制备$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层,对其提供保护作用,有较优的工业应用前景。

本文采用三(2, 2, 6, 6-四甲基-3, 5-庚二酮)锰[tris(2, 2, 6, 6-tetramethyl-3, 5-heptanedione) manganese, $Mn(DPM)_3$]、双(2, 2, 6, 6-四甲基-3, 5-庚二酮)钴[bis(2, 2, 6, 6-tetramethyl-3, 5-heptanedione)cobalt, $Co(DPM)_2$]作为有机金属源前驱体,使用课题组自制智能化学气相沉积设备在SUS430型FSS基板上制备出了纯度较高、微观形貌良好且致密的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$尖晶石涂层。研究了沉积温度(T_{dep})对涂层物相组成、微观形貌和涂层合金抗氧化能力的影响,从而获得$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$尖晶石保护涂层的最佳制备工艺参数。

1 实验部分

1.1 基体预处理

选用SUS430型FSS作为基体材料,使用线切割将1 mm厚的基体切割成边长为25 mm的正方形试样,使用400#、600#、800#、1000#、1500#、

2000#碳化硅砂纸依次对其打磨，然后对表面进行机械抛光，充分除去试样表面的氧化物，提高实验的准确性。抛光后，试样分别在丙酮和无水乙醇中超声清洗，以除去多余的油脂和杂质，干燥后用于涂层制备。

1.2　涂层制备

将 $Mn(DPM)_3$ 和 $Co(DPM)_2$ 按照摩尔比 1∶1 加入四氢呋喃溶液中，搅拌使其充分溶解，得到前驱体溶液。使用 99.999% 纯度的氩气作为载流气体，99.999% 纯度氧气作为反应气体，使用课题组自制智能化学气相沉积设备[23]制备 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 尖晶石涂层。如图 1 所示，原料罐中的前驱体溶液通过供液系统送到喷液雾化系统中，通过送液单元控制前驱体溶液流速为 1.6 g/min；使用载流气将喷液雾化系统中的原料气送到反应腔体，反应腔体中通入 500 cm^3/min 流量的氧气，与雾化的前驱体发生化学反应生成 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层。将 FSS 基板放置在加热台上，当沉积温度分别为 723、773、823、873、923 和 973 K 时开始沉积，沉积时间为 60 min，通过蝶阀和真空泵共同调节反应腔体的压力，使其保持在 3 000 Pa。实验过程中一系列参数由数据采集器收集，传输到计算机保存。

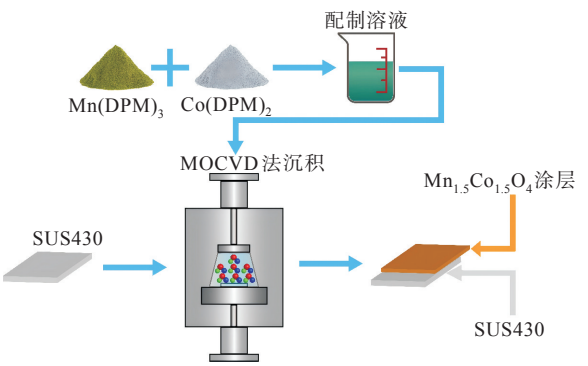

图 1　MOCVD 法制备 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层示意图

Fig. 1　Illustation of $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating prepared by MOCVD method

1.3　表征方法与性能测试

为了探究涂层合金样品在 SOFC 阴极气氛下的抗氧化能力，将涂层合金样品放置于电阻炉中，在静态空气条件下进行恒温氧化增重实验。样品以 5 K/min 的升温速率升温至 1 023 K，保温 20 h，降温至室温取出试样，用电子天平称量冷却后样品的质量，循环 10 次。

采用 X 射线衍射仪（X-ray diffraction，XRD）（Bruker D8 Advance）分析氧化前后的涂层合金样品的物相组成，使用扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）（ZEISS GEMINI SEM 300）观察氧化前后涂层合金样品的微观形貌。

2　结果与讨论

2.1　$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层氧化前后的物相分析

图 2 为不同沉积温度下制备的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层的 XRD 图。通过与 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 的标准卡片（#04-006-6594）对比，可以看出沉积温度为 723、773、823、873、923 和 973 K 时，其 XRD 图谱均出现了 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 晶面（111）、（220）、（311）、（511）的特征峰。沉积温度升高到 973 K 时，其 XRD 图谱中除晶面（111）、（220）、（311）、（511）的特征峰外，还在 $2\theta = 37.22°$ 处出现了（222）取向的特征峰，说明在 SUS430 连接体表面上成功制备出了 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层。

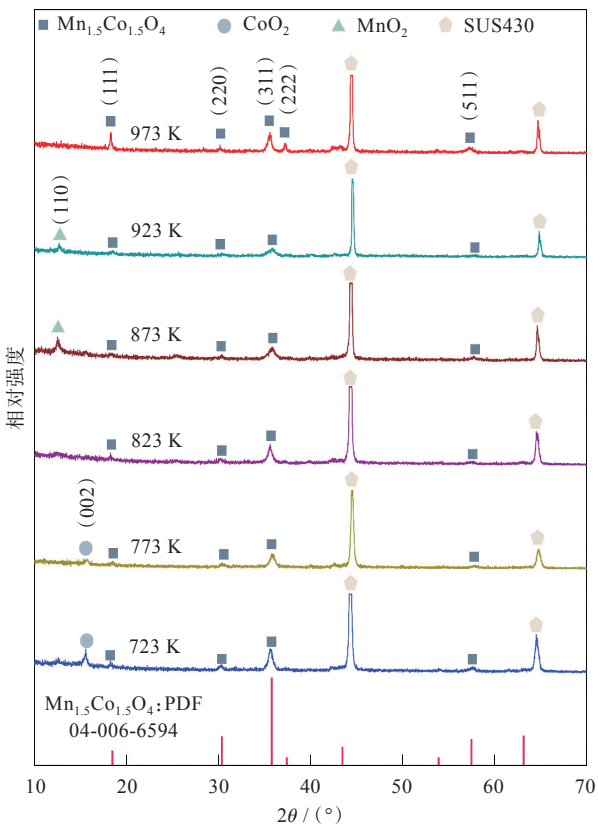

图 2　不同沉积温度下制备的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层的 XRD 图

Fig. 2　XRD patterns of $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating prepared at different deposition temperatures

为了考察 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层的高温抗氧化性，对 1 023 K 高温氧化后的试样进行了物相分析。图 3 为 SUS430 和不同沉积温度制备的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层在 1 023 K 氧化 200 h 后的 XRD 图。与 Cr_2O_3（#01-073-4336）和 $MnCr_2O_4$（#01-075-1614）的标准卡片对比可知，SUS430 裸钢在氧化后，其 XRD 图谱中存在 Cr_2O_3 和 $MnCr_2O_4$ 的特征峰，这是由于 SUS430 处在高温含氧环境中，SUS430 中的 Cr 元

素会优先与氧气结合，在SUS430表面生成Cr_2O_3氧化物。随着氧化时间的延长，当SUS430/氧化物界面处Cr元素含量不足时，SUS430中的Mn元素将会向外扩散，与氧气结合在Cr_2O_3层外生成$MnCr_2O_4$氧化物，在SUS430表面上形成双层氧化物结构，即内部为Cr_2O_3层和外部为$MnCr_2O_4$层[24]。XRD分析结果证明了未进行表面改性的SUS430不适合直接用作固态电池的连接体。

从图3中可以看出，$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层在长期氧化后的XRD图谱除了SUS430的基板峰，其余衍射峰可以与$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$的衍射峰相匹配，均未形成Cr_2O_3和$MnCr_2O_4$的衍射峰，说明$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层可以减缓氧气向SUS430内部扩散和SUS430内部的Cr元素与Mn元素向外扩散，提高了SUS430合金的抗氧化性能。对比图2和图3，923和973 K沉积温度下制备的样品在氧化前后$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$的晶面无明显变化，说明通过MOCVD法在923和973 K沉积温度下制备的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$具有良好的抗氧化性能和高温稳定性。

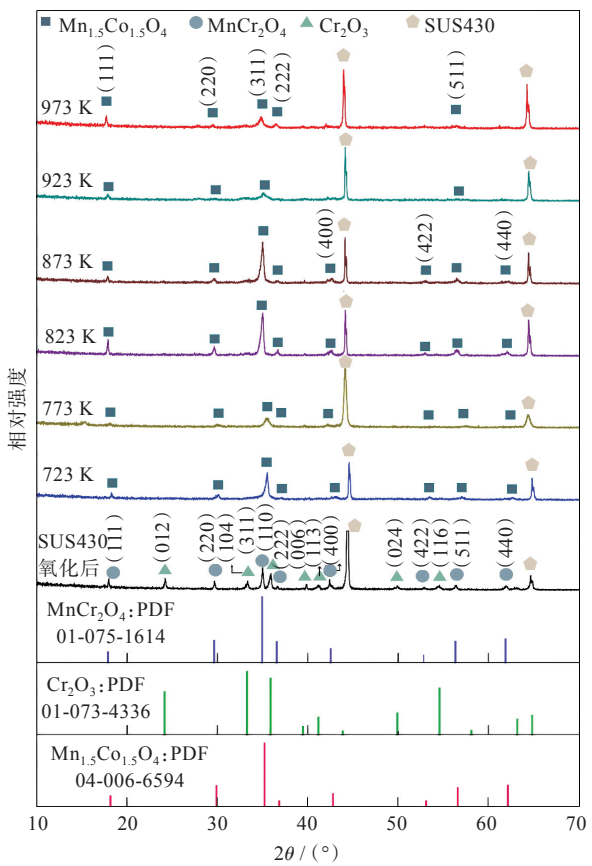

图3 SUS430和不同沉积温度下制备的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层在1 023 K氧化200 h后的XRD图

Fig. 3 XRD patterns of SUS430 and $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating prepared at different deposition temperatures after oxidation at 1 023 K for 200 h

2.2 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层氧化前后的形貌分析

图4为不同沉积温度制备的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层氧化前后的SEM图。图5是使用Nano Measurer软件表征的不同沉积温度制备的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层氧化前后的平均颗粒粒径。沉积温度为723 K时，涂层表面随机分布着大小各异的不规则氧化物颗粒，这是由于低温条件下，前驱体分子得不到充足的能量，分子热运动较慢使得涂层表面扩散受到限制，从而生长出大小各异的氧化物颗粒。随着沉积温度的升高，氧化物颗粒粒径增大，大颗粒之间夹杂着小颗粒，直到沉积温度为873 K时，颗粒的生长使得部分颗粒之间的边缘粘连在一起（A处），这说明随着沉积温度的升高，分子热运动

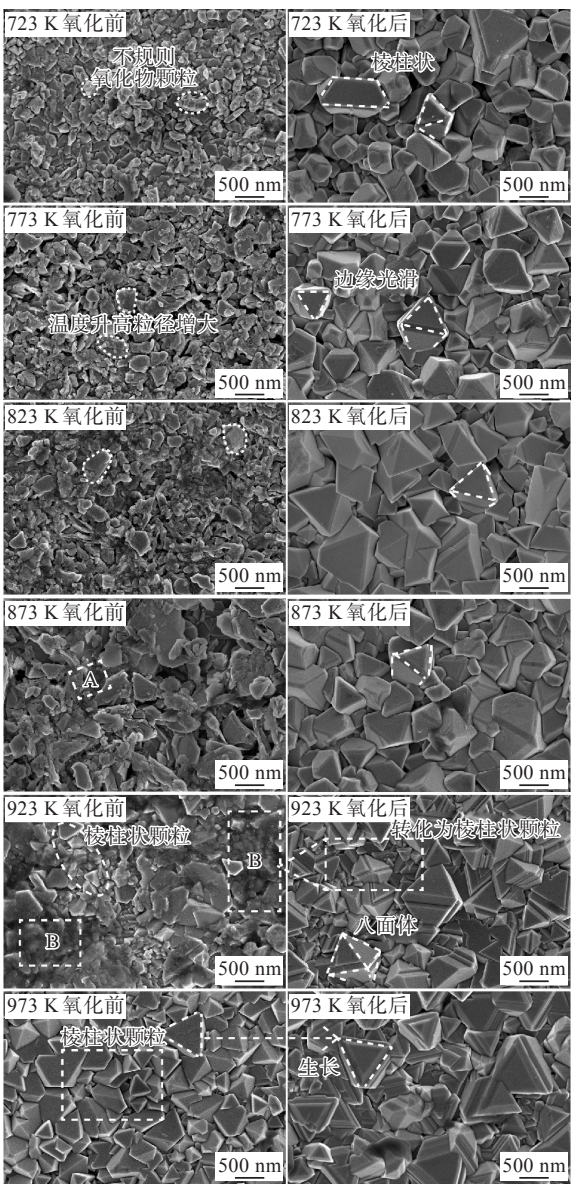

图4 不同沉积温度制备的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层氧化前后的SEM图

Fig. 4 SEM images of $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating prepared at different deposition temperatures before and after oxidation

得到足够的能量，运动加快，从而促进表面扩散。沉积温度为 923 K 时，涂层表面出现棱柱状颗粒，由于温度低没有足够的能量使形状各异的氧化物颗粒完全转化为棱粒状颗粒，存在颗粒之间的边缘粘连在一起（B 处）的现象，因此不表征其平均颗粒粒径，涂层表面光滑致密。沉积温度为 973 K 时，不规则的氧化物颗粒得到充足的能量全部转化为棱柱状颗粒，颗粒之间边缘清晰。

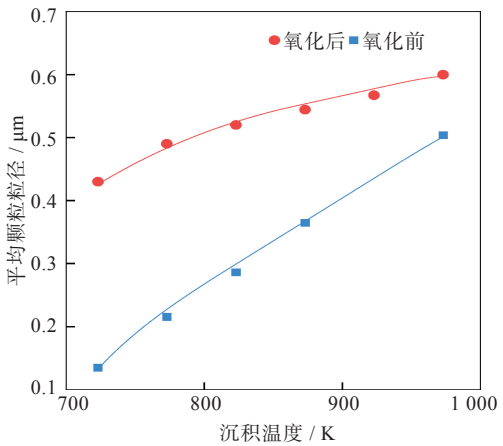

图 5　不同沉积温度制备的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层氧化前后的平均颗粒粒径

Fig. 5　Average particle size of $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating prepared at different deposition temperatures before and after oxidation

由氧化后的涂层微观形貌可知，723~873 K 沉积温度下制备的涂层在长期高温氧化下，得到足够能量使不规则的氧化物颗粒转变为棱柱状颗粒，颗粒之间边缘清晰、较为光滑。沉积温度为 923 K 时制备的涂层氧化后表面为棱柱状颗粒，棱柱状颗粒更加规则、棱角分明，可以观察到八面体形状的颗粒。沉积温度为 973 K 时制备的涂层氧化后的颗粒形状并无明显变化，但与氧化前形貌相比，颗粒平均粒径有所增大，说明在 1 023 K 长时间氧化后，SUS430 表面的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层出现一定程度的生长。$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层在经历长时间高温氧化后，并未出现局部微观剥落和细小裂纹，说明 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层有着优异的黏附力，涂层与 SUS430 之间结合强度高。因此，使用 MOCVD 法制备 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层用于固态电池的连接体有着一定的技术优势。

2.3　$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层的抗氧化性能

为了进一步考察 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层的高温抗氧化性，在 1 023 K 的空气气氛下对涂层进行氧化。图 6(a) 为 SUS430 和不同沉积温度制备的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层氧化后单位面积质量增加曲线。从图 6(a) 中看出，随着氧化时间的增加，SUS430 裸钢和不同沉积温度下制备的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层样品的质量持续增加，$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层改性的 SUS430 在 200 h 氧化过程中单位面积增加的质量始终低于 SUS430 裸钢，SUS430 裸钢、723 K 涂层、773 K 涂层、823 K 涂层、873 K 涂层、923 K 涂层、973 K 涂层氧化 200 h 单位面积增加的质量依次为 0.192 70、0.057 42、0.048 54、0.078 01、0.044 32、0.036 47 和 0.046 03 mg/cm^2。经计算，$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层使 SUS430 单位面积增加的质量降低了 60% 以上，说明 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层可以使 SUS430 合金的高温抗氧化能力有效提高，其中沉积温度为 923 K 制备的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层高温抗氧化能力最优。

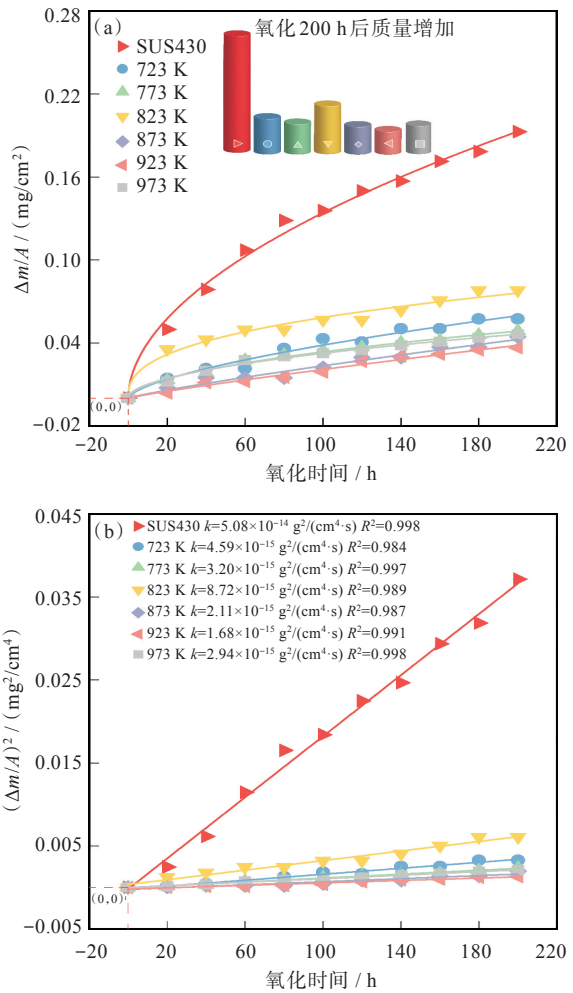

图 6　SUS430 和不同沉积温度制备的 $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ 涂层在 1 023 K 下 200 h 氧化行为曲线图：(a) 单位面积质量增加曲线，(b) 氧化动力学曲线

Fig. 6　Oxidation behavior curves of SUS430 and $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coating prepared at different deposition temperatures at 1 023 K for 200 h: (a) curves of mass gain per uint area, (b) oxidation kinetics curves

图6(b)为对应的氧化动力学曲线。从图6(b)中可以看出,单位面积增加质量的平方[$(\Delta m/A)^2$]与氧化时间(t)呈正比,说明SUS430和$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层改性的SUS430样品的氧化行为符合抛物线规律,可用式(1)表示:

$$\left(\frac{\Delta m}{A}\right)^2 = k \cdot t \tag{1}$$

式(1)中:Δm为样品氧化增加的质量,A为样品的表面积,k为氧化速率常数,t为氧化时间。对图6(b)中的曲线拟合得到各个样品的氧化速率常数k,SUS430裸钢、723 K涂层、773 K涂层、823 K涂层、873 K涂层、923 K涂层、973 K涂层的氧化速率常数分别为5.08×10^{-14}、4.59×10^{-15}、3.2×10^{-15}、8.72×10^{-15}、2.11×10^{-15}、1.68×10^{-15}和2.94×10^{-15} $g^2/(cm^4\cdot s)$。在SUS430表面沉积$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层后的氧化速率常数较空白SUS430样品低了约1个数量级,表明$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层可以有效减缓Cr元素和Mn元素向外迁移和O元素向内迁移,从而抑制Cr_2O_3和$MnCr_2O_4$的形成,进而降低了合金涂层样品的氧化速率,提高了SUS430的高温抗氧化性。其中,在SOFC阴极条件下(1 023 K的空气),923 K沉积温度下制备的$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层合金样品具有最佳的抗氧化性。

3 结 论

为了研究在SOFC阴极条件下$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层对连接体的保护效果,采用MOCVD法,以$Mn(DPM)_3$和$Co(DPM)_2$为前驱体原料,于沉积温度为723、773、823、873、923和973 K下,在SUS430表面上制备了$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$保护涂层。

(1)在沉积温度为723~973 K时,均成功制备出$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层。涂层在1 023 K空气中氧化200 h后,结构晶面无明显变化,表明涂层具有良好的抗氧化性能和高温稳定性。

(2)$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层改性的SUS430氧化后,其XRD图谱中均没有出现Cr_2O_3和$MnCr_2O_4$的衍射峰,表明$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层有效减缓了SUS430表面氧化物的生成。

(3)$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层显著提高了SUS430的抗氧化性能,在1 023 K空气中氧化200 h后,$Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$涂层使SUS430单位面积增加的质量降低了60%以上,其中923 K沉积的涂层保护效果最优。

参考文献

[1] 张涛.《2030年前碳达峰行动方案》解读[J].生态经济,2022,38(1):9-12.

[2] RAMADHANI F, HUSSAIN M A, MOKHLIS H, et al. Optimization strategies for solid oxide fuel cell (SOFC) application: a literature survey [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 460-484.

[3] ZHANG X B, JIN Y M, LI D, et al. A review on recent advances in micro-tubular solid oxide fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2021, 506: 230135.

[4] FONTANA S, AMENDOLA R, CHEVALIER S, et al. Metallic interconnects for SOFC: characterisation of corrosion resistance and conductivity evaluation at operating temperature of differently coated alloys [J]. Journal of Power Sources, 2007, 171(2): 652-662.

[5] 汪维,苑莉莉,丘倩媛,等.流延法制备单片式直接碳固体氧化物燃料电池组及其性能研究[J].无机材料学报,2019,34(5):509-514.

[6] CODDET P, LIAO H L, CODDET C. A review on high power SOFC electrolyte layer manufacturing using thermal spray and physical vapour deposition technologies [J]. Advances in Manufacturing, 2014, 2(3): 212-221.

[7] LOUREIRO F J A, NASANI N, REDDY G S, et al. A review on sintering technology of proton conducting $BaCeO_3$-$BaZrO_3$ perovskite oxide materials for protonic ceramic fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2019, 438: 226991.

[8] EXNER J, NAZARENUS T, KITA J, et al. Dense Y-doped ion conducting perovskite films of $BaZrO_3$, $BaSnO_3$, and $BaCeO_3$ for SOFC applications produced by powder aerosol deposition at room temperature [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(16): 10000-10016.

[9] 姜媛,黄志良,陈常连,等.铝掺杂磷灰石型硅酸镧电解质的电导机理[J].武汉工程大学学报,2022,44(1):48-54.

[10] ZHANG W Y, LI J, YANG J, et al. Characterization of a new Fe-based alloy as metallic interconnect in SOFC anode environment [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(47): 22246-22253.

[11] BI Z H, ZHU J H, DU S W, et al. Effect of alloy composition on the oxide scale formation and electrical conductivity behavior of Co-plated ferritic alloys [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228: 124-131.

[12] FU Q X, SEBOLD D, TIETZ F, et al. Electrodeposited cobalt coating on Crofer22APU steels for interconnect applications in solid oxide fuel cells [J]. Solid State Ionics, 2011, 192(1): 376-382.

[13] SHONG W J, LIU C K, YANG P. Effects of

electroless nickel plating on 441 stainless steel as SOFC interconnect [J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 134(2/3): 670-676.

[14] KO Y S, KIM S, PARK S, et al. Effect of the simultaneous addition of lanthanum and nickel on the oxidation behavior and related area-specific resistance of ferritic stainless steels for solid oxide fuel cell interconnects [J]. Corrosion Science, 2024, 233: 112098.

[15] GENG S J, QI S J, XIANG D, et al. Oxidation and electrical behavior of ferritic stainless steel interconnect with Fe-Co-Ni coating by electroplating [J]. Journal of Power Sources, 2012, 215: 274-278.

[16] 韩敏芳，李震，杜晓佳，等. 固体氧化物燃料电池合金连接体涂层材料研究进展[J]. 稀有金属材料与工程，2009，38(增刊2)：708-711.

[17] MAO J W, WANG E H, WANG H W, et al. Progress in metal corrosion mechanism and protective coating technology for interconnect and metal support of solid oxide cells [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 185: 113597.

[18] FARNOUSH H, FARAK M, ABDOLI H. A fluid-flow approach in oxidation evaluation of SUS 430 steels coated by Fe/Mn-modified $MnCo_2O_4$ for solid oxide fuel cell application [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52(Part D): 905-915.

[19] RANJBAR-NOURI Z, SOLTANIEH M, RASTEGARI S. Applying the protective $CuMn_2O_4$ spinel coating on AISI-430 ferritic stainless steel used as solid oxide fuel cell interconnects [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 334: 365-372.

[20] ZHAO Q Q, GENG S J, CHEN G, et al. Influence of preoxidation on high temperature behavior of $NiFe_2$ coated SOFC interconnect steel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(26): 13744-13756.

[21] BEDNARZ M, MOLIN S, BOBRUK M, et al. High-temperature oxidation of the Crofer 22 H ferritic steel with $Mn_{1.45}Co_{1.45}Fe_{0.1}O_4$ and $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ spinel coatings under thermal cycling conditions and its properties [J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 225: 227-238.

[22] HU Y Z, SU Y T, LI C X, et al. Dense $Mn_{1.5}Co_{1.5}O_4$ coatings with excellent long-term stability and electrical performance under the SOFC cathode environment [J]. Applied Surface Science, 2020, 499: 143726.

[23] 李紫琪，赵培，刘莎，等. 化学气相沉积法制备碳化铬薄膜的研究[J]. 武汉工程大学学报，2021，43(2)：181-186，191.

[24] 王碧辉，肖博，潘佩媛，等. 固体氧化物燃料电池金属连接体腐蚀研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报，2023，43(1)：6-12.

本文编辑：苗　变