

# Ti掺杂量对碳基镀层沉积行为及导电耐蚀性的影响

王 岚, 杨 超, 蒋百灵, 孙添钰, 李嘉桐, 董 丹, 郝 娟

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 本研究通过向非晶碳基镀层中适量掺杂金属Ti纳米晶, 以达到提升镀层导电性和耐蚀性的目的。实验采用磁控溅射系统和自研的高频振荡脉冲电场制备多组含有不同Ti掺杂量的碳基镀层, 研究Ti纳米晶的添加对非晶碳基镀层导电性与耐蚀性的影响规律。实验结果表明: 随着Ti靶电流由0.35 A增加至0.7 A时, 镀层中Ti的掺杂量随之提高, Ti原子分数可达8.20%, 碳基镀层由非晶结构转变为Ti纳米晶/非晶碳基复合结构。另一方面, 实验结果证实Ti的适量掺杂有利于镀层致密性、导电性、疏水性及耐腐蚀性的提升。当Ti靶电流为0.7 A时, 镀层方阻值最低, 为 $4.5 \Omega/\square$ , Ti靶电流为0.9 A时, 镀层的水接触角最大为 $97.75^\circ$ , 腐蚀电流密度最小为 $1.408 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

**关键词:** 磁控溅射; 碳镀层; Ti纳米晶; 导电性; 耐蚀性

中图法分类号: TG174.444; TM911.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)09-2377-07

## 1 引言

随着科学技术的发展, 可再生能源逐渐成为人们广泛使用的清洁能源, 并且对可再生能源技术的研究也从未间断<sup>[1-4]</sup>。但在可再生能源中, 太阳能与风能等能源形式却具有明显的间歇性和随机性, 导致该能源的使用受到明显的地域限制<sup>[5]</sup>。氢作为一种洁净的二次能源载体, 不但可以方便高效地将其自身能量转换成电与热形式, 而且来源丰富, 可通过其他可再生能源制取, 完美避开了多数可再生能源受地域限制的缺憾, 是未来能源中最为重要的一个主力能源<sup>[6-8]</sup>。

质子交换膜燃料电池是一种将氢能转化为电能的高效、无污染装置, 在航空航天、汽车交通等领域有着巨大的应用潜力<sup>[9]</sup>。近年来, 随着我国对新能源高质量发展的重视, 质子交换膜燃料电池的技术开发与装备升级得到了极高的关注。其中, 石墨双极板是质子交换膜燃料电池最重要的组件之一。受脆性和渗透性等因素影响, 石墨双极板厚度通常为2~3 mm, 其体积大、质量重, 占据电池总体积与总质量的60%~80%。此外, 石墨双极板结构复杂、流道加工难度大、制造成本高, 成本占到电池制造总成本的30%~45%<sup>[10]</sup>。由此, 轻量化双极板的制备与性能研究, 是解决质子交换膜燃料电池缩尺减重问题的关键。不锈钢金属材料相较石墨具有更高的导电、导热性与阻气性, 同时更易加工, 能够实现厚度为0.1~0.3 mm双极板的制备, 以此大幅缩减双极板与电池组的体积和质量。但不锈钢双极板的耐腐蚀性较石墨略差, 且腐蚀

产生的金属离子会对电解液造成污染、毒化铂催化剂和降低导电率, 影响电池的使用性能及循环寿命<sup>[11-15]</sup>。由此, 在不锈钢金属双极板表面制备碳基的导电耐蚀涂层是实现质子交换膜燃料电池缩尺减重最为有效的解决方案。

磁控溅射技术制备的非晶碳基镀层具有良好的耐蚀性和耐久性, 但受非晶结构中存在大量缺陷影响, 其导电性不如石墨。因此, 本实验采用磁控溅射系统和自研的高频振荡脉冲电场制备多组含有不同Ti掺杂量的碳基镀层, 利用金属的适量掺杂提升碳基镀层的导电性, 并研究了Ti纳米晶的掺杂对非晶碳基镀层微观结构、导电性与耐蚀性的影响。

## 2 实验

实验采用磁控溅射系统和自研的高频振荡脉冲电场<sup>[16]</sup>制备含有不同Ti掺杂量的碳基镀层。其中, 高频振荡脉冲电场可在相同功率下获得较高的电流密度, 即可提升等离子体数量与镀层沉积速率。实验选用一块高纯C靶和一块高纯Ti靶(纯度均为99.99%)作为溅射源。实验基体选用P型(100)单晶Si片(20 mm×20 mm)和304号不锈钢薄片(40 mm×40 mm×3 mm)2种材料。

实验前对304不锈钢基体进行打磨抛光处理, 随后利用乙醇溶液对基体进行20 min的超声波清洗, 待干燥后放置于真空腔内距靶材230 mm处, 基体表面与靶面平行。在镀层沉积前, 利用真空系统将腔体内真空度抽

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(52001251); 陕西省自然科学基金青年基金(2022JQ-556)

作者简介: 王 岚, 女, 1999年生, 博士, 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048, E-mail: 18371919878@163.com

至  $9.0 \times 10^{-4}$  Pa 以下,随后向腔内通入高纯 Ar 气使工作气压稳定在 0.8 Pa。在镀层沉积时,高频振荡脉冲电场施加于阴极 Ti 靶与阳极腔体间,直流电场则施加于阴极碳靶与阳极腔体间。镀层的沉积过程主要分为等离子体刻蚀、纯 Ti 打底层沉积和 Ti/C 镀层沉积 3 个阶段。等离子体刻蚀阶段基体偏压为 -400 V,刻蚀时间为 20 min。纯 Ti 打底层沉积阶段基体偏压为 -60 V,Ti 靶电流为 0.5 A,占空比为 80%,电压振荡频率为 100 kHz,振荡幅值为 50 V,沉积时间 5 min。Ti/C 镀层沉积阶段,C 靶电流为 3 A,Ti 靶电流分别选取 0.35、0.5、0.7 和 0.9 A,通过改变 Ti 靶电流实现碳基镀层中 Ti 掺杂量的调控,其他实验参数如表 1 所示。

实验采用 Raman 光谱仪(Renishaw InVia Relfex)对碳基镀层价键状态与结构有序度进行测试;采用扫描电子显微镜(SEM,JSM-6700F 型)和原子力显微镜(AFM,Dimension Icon)表征镀层的表面与截面形貌;采用高分辨透射电子显微镜(HRTEM,JEM-3010 型)观察碳基镀层中 Ti 纳米晶的晶粒尺寸与晶粒间距;采用双电测四探针测试仪(RTS-9)对镀层的方阻进行测试;采用电化学工作站(上海辰华 CHI670 型)进行动电位极化曲线测试

表 1 Ti 掺杂碳基镀层的沉积参数

Table 1 Deposition parameters of Ti-doped carbon-based coatings

Sample	$I_C/A$	$P_C/kW$	$I_{Ti}/A$	$P_{Ti}/kW$	$d/mm$	$t/min$
1	3	1.58	0.35	0.12	230	60
2	3	1.65	0.5	0.18	230	55
3	3	1.66	0.7	0.25	230	50
4	3	1.64	0.9	0.33	230	50

Note:  $I_C$ -C target current,  $P_C$ -C target power,  $I_{Ti}$ -Ti target current,  $P_{Ti}$ -Ti target power,  $d$ -target substrate distance,  $t$ -coating time

以表征镀层耐腐蚀性,模拟腐蚀溶液为: pH=3, 0.001 mol/L  $H_2SO_4$ , 0.1 mg/L HF,测试温度为 70 °C。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 镀层的微观结构

##### 3.1.1 扫描电子显微镜分析

图 1 为不同 Ti 靶电流下制备的 4 组 Ti 掺杂碳基镀层的表面形貌 SEM 图。镀层表面呈现出尺寸不等的团簇状颗粒形貌,团簇颗粒间有较清晰的边界,说明镀层以岛状方式生长。当 Ti 靶电流由 0.35 A 增大至 0.9 A 时,团簇颗粒尺寸有所减小,但仍残留个别大尺寸团簇颗粒,团簇颗粒边界变窄,说明镀层致密性变好。当 Ti 靶电流增大至 0.9 A 时,除部分大尺寸团簇颗粒外,镀层表面开始出现小尺寸白色金属颗粒,金属颗粒的分布较为均匀。

图 2 为 4 组 Ti 掺杂碳基镀层的截面形貌。图中左侧均为单晶 Si 基体,中间为 Ti 掺杂碳基镀层,右侧为真空环境。从图中可以看出 4 组 Ti 掺杂碳基镀层与基体结合处均无明显空隙,说明 4 组镀层具有良好的膜基结合力。4 组镀层的截面形貌均表现出致密的结构。Ti 靶电流为 0.9 A 时,镀层截面具有明显的小颗粒凸起,与镀层表面形貌结果一致。

通过镀层厚度与沉积时间的比值计算出镀层的沉积速率。由 EDS 检测出不同 Ti 靶电流下所制备镀层的 Ti 掺杂原子分数,结果如表 2 所示。可以看出,随 Ti 靶电流的增加,镀层厚度与沉积速率均呈明显的上升趋势。在 Ti 靶电流为 0.9 A 时,镀层沉积速率达到最大值 30 nm/min。在 Ti 靶电流较小时,镀层沉积速率较低,而在低沉积速率下,原子在基片上迁移时间较长,形成团簇颗粒尺寸较大,镀层结构致密性略差。随着沉积速率的

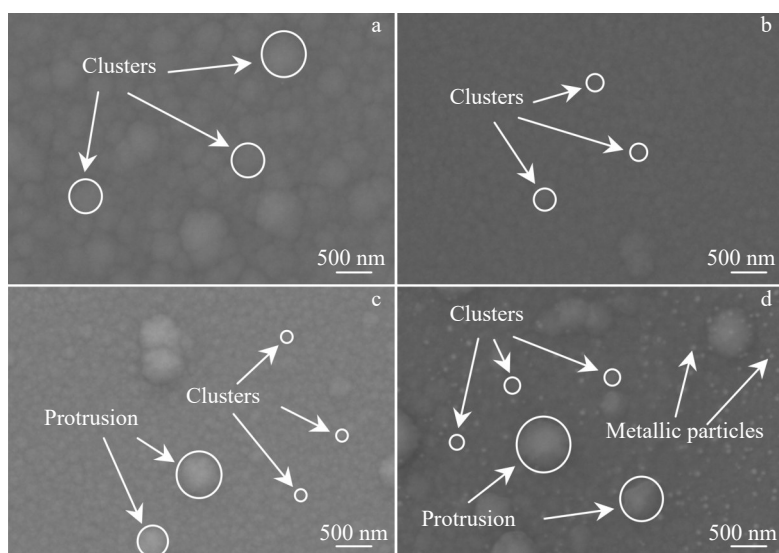


图 1 不同 Ti 靶电流下 Ti 掺杂碳基镀层的表面 SEM 照片

Fig.1 Surface SEM images of Ti-doped carbon-based coatings deposited under different Ti target currents: (a) 0.35 A, (b) 0.5 A, (c) 0.7 A, and (d) 0.9 A

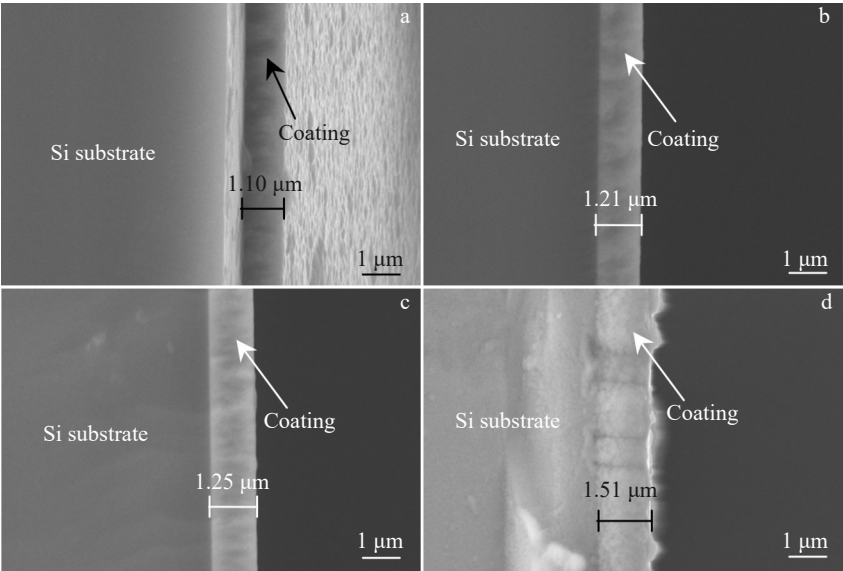


图2 不同Ti靶电流下Ti掺杂碳基镀层的截面SEM照片

Fig.2 Cross-sectional SEM images of Ti-doped carbon-based coatings deposited under different Ti target currents: (a) 0.35 A, (b) 0.5 A, (c) 0.7 A, and (d) 0.9 A

表2 Ti掺杂碳基镀层的结构与性能检测结果

Table 2 Testing results of structure and properties of Ti-doped carbon-based coatings

Sample	Thickness/ $\mu\text{m}$	Deposition rate/ $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$	Ti content/at%	$R_a/\text{nm}$	Corrosion current density/ $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Corrosion potential/V
1	1.10	18	1.16	12.0	$1.661\times10^{-4}$	-0.22
2	1.21	22	2.32	3.8	$7.505\times10^{-5}$	-0.30
3	1.25	25	8.20	4.5	$3.279\times10^{-5}$	-0.28
4	1.51	30	5.57	4.5	$1.408\times10^{-5}$	-0.18

增加,增大了镀层的形核数量,使镀层的团簇颗粒尺寸变小,结构致密性提升<sup>[17]</sup>。另一方面,随着Ti靶电流的增大,镀层中Ti原子分数出现先增大后减小的变化趋势,在Ti靶电流为0.7 A时出现最大值,为8.20%。Ti靶电流为0.9 A时,Ti原子分数出现降低的原因是随着镀层中Ti原子含量的不断增加,Ti原子出现了聚集和形核长大的过程,逐渐在镀层中形成小尺寸纯Ti金属颗粒,降低了碳基镀层中的Ti掺杂量。

3.1.2 原子力显微镜分析

图3为4组Ti掺杂碳基镀层表面三维形貌的AFM图及镀层截面轮廓线图。可以看出镀层表面呈山峰状形貌,说明镀层以岛状方式生长。当Ti靶电流由0.35 A增大至0.7 A时,镀层表面由粗大的山峰状形貌逐渐转变为细针状形貌,且镀层表面逐渐平整。这是由于随着Ti靶电流的增大,金属Ti原子的沉积数量与动能均有所增加,促进了镀层形核,使其易形成小尺寸团簇颗粒。而当Ti靶电流增大至0.9 A时,镀层表面出现了明显的大尺寸凸起。这是由于碳基镀层中Ti原子数量不断增加后形成金属颗粒所引起,该形貌特征与SEM检测结果一致。此外,4组Ti掺杂碳基镀层的表面粗糙度 $R_a$ 如表2所示。

随着Ti靶电流的增大,镀层的表面粗糙度呈现先减小后略微上升的趋势。而且从图3的镀层截面轮廓线图也可直观地看出,在Ti靶电流为0.5 A时,镀层表面平整度最好。

3.1.3 Raman 光谱分析

图4为4组Ti掺杂碳基镀层的Raman光谱图及对应的双峰拟合结果。在Raman光谱中,碳镀层的散射峰主要由位于1350  $\text{cm}^{-1}$ 附近的D峰和1560  $\text{cm}^{-1}$ 附近的G峰组成。纵坐标为峰强,随着Ti靶电流的增加,可以看出特征峰D峰和G峰的强度逐渐增加。C元素有较强的光吸收性,Raman光谱主要检测分析C元素的吸收结果<sup>[18-19]</sup>,D峰的增强表明样品中存在更多的缺陷或杂质,G峰的增强表明样品中存在更多的石墨结构或石墨晶粒尺寸较大。随着Ti靶电流增加和Ti掺杂量的提升,镀层中C元素被Ti纳米晶诱发晶化,使得镀层中石墨结构增多,但Ti含量的增加也使得镀层中的缺陷增多,因此峰强出现了增强现象。

通过对Raman光谱进行分峰拟合,利用D峰和G峰的强度比( $I_D/I_G$ )反映 $\text{sp}^2$ 环状结构的多少,G峰半高宽(FWHM(G))和G峰位置(Disp(G))反映镀层的无序度。



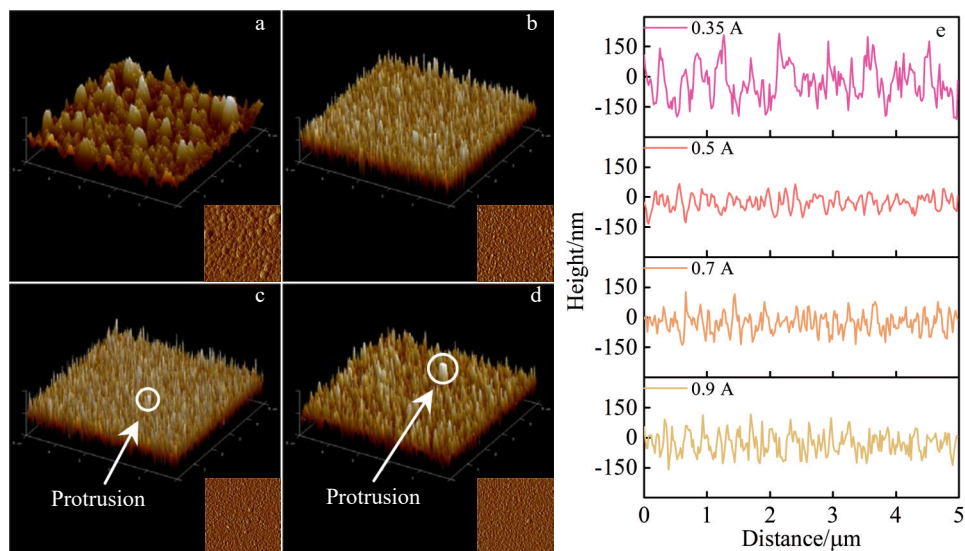


图3 不同Ti靶电流下Ti掺杂碳基镀层的AFM图及镀层截面轮廓线图

Fig.3 AFM images (a–d) and cross-sectional profile diagrams (e) of Ti-doped carbon-based coatings deposited under different Ti target currents: (a) 0.35 A, (b) 0.5 A, (c) 0.7 A, and (d) 0.9 A

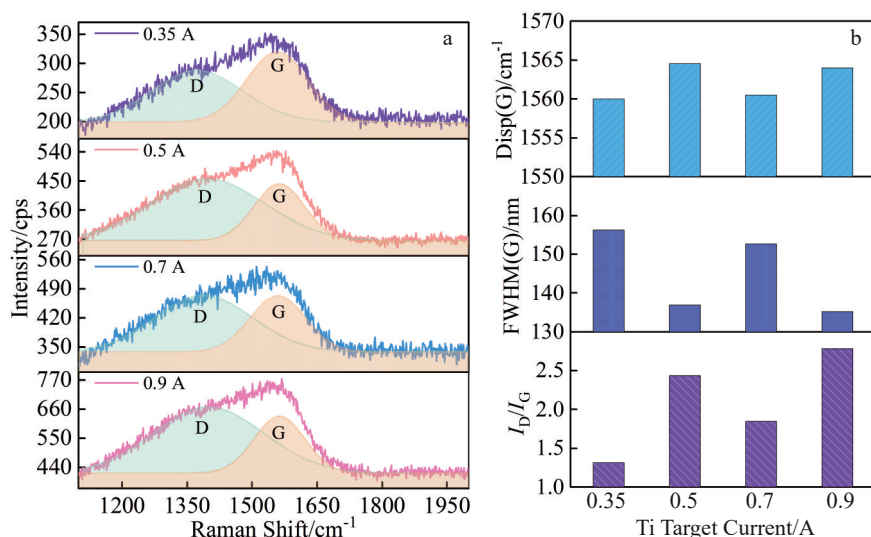


图4 不同Ti靶电流下Ti掺杂碳基镀层的Raman光谱及其双峰拟合结果

Fig.4 Raman spectra (a) and bimodal fitting results (b) of Ti-doped carbon-based coatings under different Ti target currents

其中,FWHM(G)主要测量镀层结构上的无序,而Disp(G)主要测量镀层中 $sp^2$ 团簇尺寸和形状引起的拓扑无序<sup>[20–22]</sup>。4组Ti掺杂碳基镀层的G峰位置与半高宽及 $I_D/I_G$ 结果如图4所示。随着Ti靶电流的增加, $I_D/I_G$ 值呈现先升高后降低再升高的趋势, $I_D/I_G$ 值越大说明镀层中以离域形式存在的 $\pi$ 键含量越少,即C-C键主要以 $sp^2$ 杂化键存在;随着Ti靶电流的增加,FWHM(G)先降低后升高再降低,Disp(G)先升高后降低再升高,说明镀层中 $sp^2$ 团簇的有序度先升高后降低再升高,即Ti靶电流为0.9 A时镀层的有序度较好。

#### 3.1.4 透射电子显微镜分析

为了明确镀层中Ti的存在形态与分布状态,实验对

Ti靶电流为0.7 A时制备的Ti掺杂碳基镀层进行HRTEM分析,结果如图5所示。图5a为硅基体附近的镀层HRTEM图,可以明显看出单晶硅基体、Ti打底层和Ti/C工作层3个明显区域,其中Ti打底层可观察到Ti的晶体结构,由于此阶段Ti靶电流小且沉积时间短,Ti打底层的厚度仅为10~15 nm。图5b选区为Ti/C工作层,可以看出碳基镀层整体呈现出非晶无序结构,但在非晶基体中弥散分布着Ti纳米晶,而纳米晶的尺寸为2~3 nm,纳米晶的间距为5~8 nm。结果证实了随着Ti掺杂量的增加,碳基镀层由非晶结构转变为Ti纳米晶与非晶碳基的复合结构。Ti掺杂量的不同可以改变Ti纳米晶的数量、尺寸与间距,从而实现镀层结构的调控。

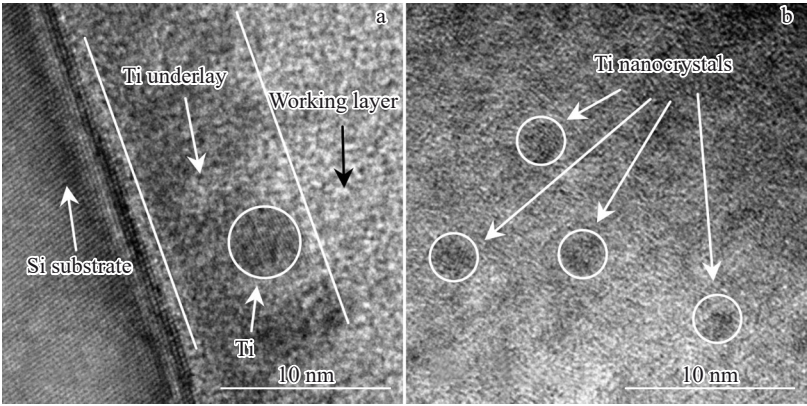


图5 Ti 掺杂碳基镀层的HRTEM 像

Fig.5 HRTEM images of Ti-doped carbon-based coating: (a) near the Si substrate and (b) working layer

3.2 镀层的导电性能

实验通过对镀层方阻值的测量表征镀层的导电性能,检测结果如图6所示。当Ti靶电流为0.35与0.5 A时,镀层中Ti掺杂量较少导致方阻值较大,分别为26.3和27.3  $\Omega/\square$ 。当Ti靶电流增大至0.7与0.9 A时,镀层的方阻值出现大幅下降,降低至4.5和7.8  $\Omega/\square$ 。镀层的方阻值随着Ti掺杂量的增多出现了明显降低,可见Ti的掺入可有效降低镀层的方阻值。本实验中4组Ti掺杂浓度中,当Ti靶电流为0.7 A时,Ti掺杂量达到最大,而方阻值最低,为4.5  $\Omega/\square$ ,镀层的导电性能最好。

镀层的导电性主要受元素组成、形貌及晶粒尺寸等因素影响,如镀层中导电成分增加、致密性变好及纳米晶尺寸增大都会使镀层的导电性增加<sup>[23]</sup>。实验中Ti掺杂量在Ti靶电流为0.7 A时达到最大,为8.20%,Ti纳米晶具有良好的导电性且均匀分散于碳基镀层中,在镀层导电时可作为高速通道利于电子传输,以此提升镀层导电性。另一方面,镀层的致密性随着Ti靶电流增加逐渐提

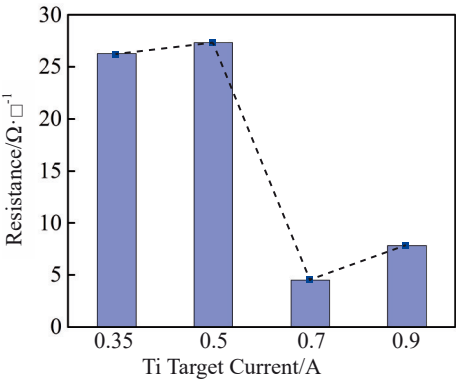


图6 不同Ti靶电流下Ti掺杂碳基镀层的方阻值

Fig.6 Square resistance values of Ti-doped carbon coatings under different Ti target currents

升,可进一步提升镀层的导电性。图7为Ti掺杂碳基镀层结构与导电机理示意图。由于碳基镀层为非晶的无序结构,结构中存在大量的空位、悬键和弱键等结构缺陷,这些缺陷均会使电子逸散,降低镀层导电性。而少量Ti

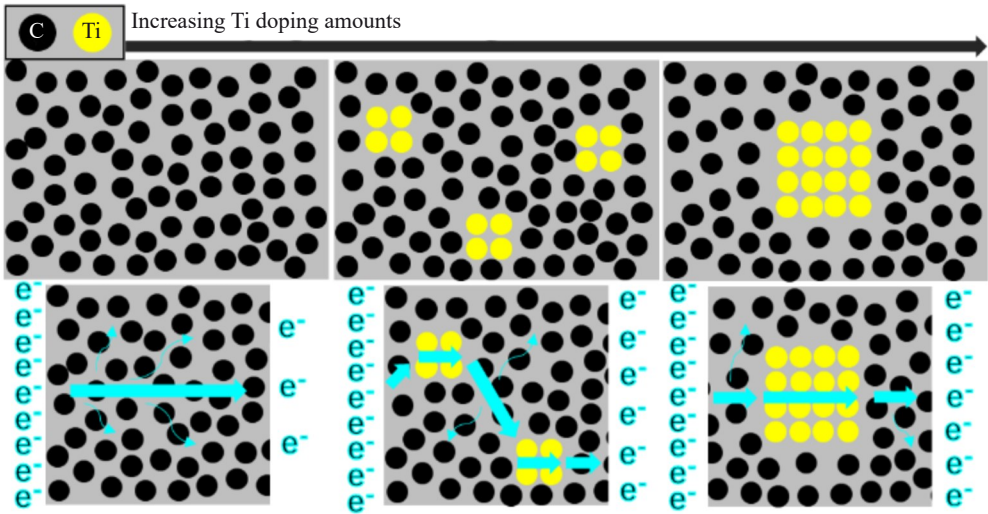


图7 不同Ti掺杂量碳基镀层的结构与导电机理示意图

Fig.7 Schematic diagram of carbon-based coating structure and conduction mechanism with different Ti doping amounts

掺杂不仅增加了导电成分,还使镀层结构转变为Ti纳米晶与非晶碳基的复合结构,电子在Ti纳米晶中可快速通过,逸散减少,利于电子传输,从而增加导电性。但Ti的大量掺杂会使其在碳基镀层中形成大颗粒团聚凸起,虽增加了导电性,但降低了镀层表面平整度。

### 3.3 镀层的疏水性能

图8比较了4组镀层的水接触角。镀层的水接触角越大,表明其表面疏水性越强<sup>[24]</sup>,有利于提升镀层的耐腐蚀性。在Ti靶电流为0.35 A时,镀层的水接触角最小为93.44°,Ti靶电流为0.9 A时,镀层的水接触角最大为97.75°,疏水性最好。实验结果表明,随着Ti靶电流的增大,镀层的水接触角整体呈现了增长趋势。这是由于随着Ti靶电流的增大,镀层表面粗糙度明显降低,随着表面平整度的增加,液滴的表面张力增大,因此疏水性整体呈现增长趋势。在Ti靶电流为0.9 A时,镀层表面存在很多小颗粒凸起,导致液滴较难浸润镀层,增大了水接触角。

### 3.4 镀层的耐蚀性能

图9为4组镀层在pH为3的硫酸腐蚀性水介质中的动电位极化曲线,以模拟燃料电池质子酸的服役环境。从极化曲线中得出腐蚀电位与腐蚀电流密度,如表2所示。腐蚀电流密度通常被用来表征镀层的耐腐蚀性,腐蚀电流密度越小,表明单位面积内转移的电子数越少,这意味着镀层的腐蚀速率越慢,其耐腐蚀性越好<sup>[25-26]</sup>。随着Ti靶电流从0.35 A增大到0.9 A,镀层的腐蚀电流密度下降了1个数量级,耐腐蚀性显著提升。当Ti靶电流为0.9 A时,腐蚀电流密度最小,为 $1.408 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,镀层的耐腐蚀性表现最好。

镀层的耐腐蚀性取决于镀层的成分、疏水性以及微观结构,当镀层具有较多的耐腐蚀性成分、较好的疏水性以及致密的微观结构都会提升镀层耐蚀性<sup>[27-28]</sup>。随着Ti靶电流的增加,镀层中Ti掺杂量逐渐提高,由于Ti具有较非晶碳镀层更好的耐酸性腐蚀能力,因此Ti掺杂碳基

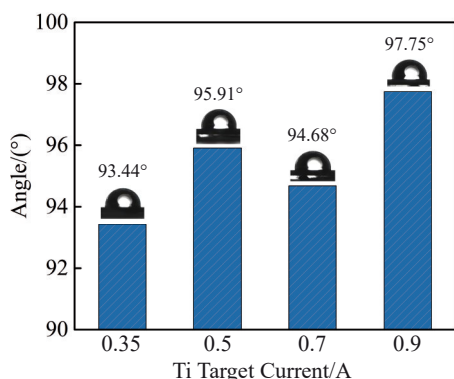


图8 不同Ti靶电流下Ti掺杂碳基镀层的水接触角

Fig.8 Water contact angles of Ti-doped carbon-based coatings under different Ti target currents

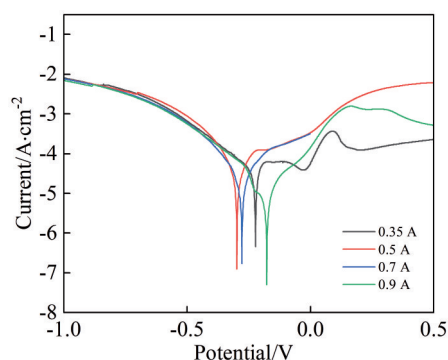


图9 不同Ti靶电流下Ti掺杂碳基镀层的动电位极化曲线

Fig.9 Potentiodynamic polarization curves of Ti-doped carbon-based coatings under different Ti target currents

镀层具有更好的耐蚀性。同时根据AFM和SEM实验结果,随着Ti靶电流的增大,镀层具有平整的表面和致密的结构,也有利于镀层耐蚀性的提升。此外,当Ti靶电流为0.9 A时,镀层具有最大的接触角,综合影响下此镀层具有最好的耐蚀性。

## 4 结论

1)4组Ti掺杂碳基镀层表面均呈现出团簇颗粒状形貌,随着Ti掺杂量的增加,镀层表面开始出现Ti的金属颗粒凸起。镀层具有良好的致密性、膜基结合力和表面平整度。

2)镀层的方阻值随着Ti靶电流的增大整体呈现降低趋势,Ti的掺入有效降低了镀层的方阻值,提升了镀层的导电性。

3)Ti的掺杂增大了碳基镀层的疏水性,随着Ti靶电流的增大,镀层的水接触角整体呈现增大趋势。在Ti靶电流为0.9 A时,镀层的水接触角最大,为97.75°。

4)Ti的掺杂有利于增加碳基镀层的耐腐蚀性。随着Ti靶电流的逐渐增大,镀层的腐蚀电流密度逐渐降低,当Ti靶电流为0.9 A时,腐蚀电流密度最小,为 $1.408 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,镀层的耐腐蚀性表现最好。

### 参考文献

### References

- [1] Sharma V P, Somwanshi D K, Jain K *et al.* *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*[J], 2022, 1084(1): 012002
- [2] Kabel T S, Bassim M. *International Journal of Energy Economics and Policy*[J], 2020, 10(2): 89
- [3] Fang Yuan(方 圆), Zhang Wanyi(张万益), Cao Jiawen(曹佳文) *et al.* *Conservation and Utilization of Mineral Resources(矿产保护与利用)*[J], 2018(4): 34
- [4] Jahanger A, Ogwu S O, Onwe J C *et al.* *Gondwana Research*[J], 2024, 129: 381
- [5] Wang Jiyang(汪集阳), Pang Zhonghe(庞忠和), Cheng Yuanzhi(程



- 远志) *et al. Science & Technology Review*(科技导报)[J], 2023, 41(12): 5
- [6] Yan X R, Zheng W G, Wei Y J *et al. Processes*[J], 2024, 12(2): 315
- [7] Tarasov B P, Lototsky M V. *High Energy Chemistry*[J], 2023, 57: 355
- [8] Kaheel S, Ibrahim K A, Fallatah G *et al. Energies*[J], 2023, 16(24): 7975
- [9] Li Huimin(李慧敏), Tu Shuping(涂淑平). *Modern Chemical Industry*(现代化工)[J], 2023, 43(11): 5
- [10] Li Wenkai, Xie Zhiyong, Zeng Haodong. *RSC Advances*[J], 2024, 14(10): 7172
- [11] Chang Xuesong(常雪嵩), Zhang Xingfa(张兴法), Yang Chunling(杨春玲) *et al. Automotive Technology & Materials*(汽车工艺与材料)[J], 2024(3): 32
- [12] Gao Xin, Chen Jiayi, Xu Runjing *et al. International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2024, 50: 711
- [13] Wang Jiangang(王建刚), Shen Wenjing(沈文晶), Zhang Xin(张欣). *Hebei Metallurgy*(河北冶金)[J], 2023(9): 6
- [14] Leng Yu, Yang Daijun, Ming Pingwen *et al. eTransportation*[J], 2021, 10: 100139
- [15] Xiong Kangning, Wu Wei, Wang Shuangfeng *et al. Applied Energy*[J], 2021, 301: 117443
- [16] Wang Rong(王戎). *Effect of Target Current on Deposited Particles Escape-Target Method and Film Growth Behavior Under Oscillating Pulse Electric Field*(振荡脉冲电场靶电流对镀料脱靶机制及薄膜生长行为的影响)[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020
- [17] Dai Dahuang(戴达煌), Zhou Kesong(周克崧), Yuan Zhenhai(袁镇海). *Modern Science and Technology of Material Surface*(现代材料表面技术科学)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004
- [18] Saha Sucharita, Das Debajyoti. *Applied Surface Science*[J], 2022, 596: 15368
- [19] Saleemi A S, Hafeez M, Saeed M *et al. Materials*[J], 2021, 14(13): 3649
- [20] Assembayeva A, Ryaguzov A, Nemkayeva R *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2020, 25: 58
- [21] Milenov T, Dikovska A, Avdeev G *et al. Applied Surface Science*[J], 2019, 480: 323
- [22] Dong Dan(董丹), Jiang Bailing(蒋百灵), Guo Meng(郭萌) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2017, 53(7): 879
- [23] Farhadizadeh A, Ghasemi S, Nurpour P *et al. Surfaces and Interfaces*[J], 2022, 30: 101926
- [24] Xia Xianchao(夏先朝), Nie Jingjing(聂敬敬), Li Yi(李逸) *et al. Surface Technology*(表面技术)[J], 2024, 53(16): 116
- [25] Xu X, Li W F, Wan B B *et al. Corrosion Science*[J], 2024, 230: 111952
- [26] Soltanalipour M, Khalil-Allafi J, Mehrvarz A *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 29: 3279
- [27] Liu Fan(刘凡), Lin Shixiang(林诗翔), Zhang Mingquan(张明权) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2024, 53(10): 16
- [28] Yi P, Zhu L J, Dong C F *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 363: 198

## Effect of Ti Doping Amount on Deposition Behavior, Electrical Conductivity and Corrosion Resistance of Carbon-Based Coatings

Wang Lan, Yang Chao, Jiang Bailing, Sun Tianyu, Li Jiatong, Dong Dan, Hao Juan  
(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The electrical conductivity and corrosion resistance of the amorphous carbon-based coating were improved by doping an appropriate amount of Ti nanocrystals. The magnetron sputtering system and the self-developed high-frequency oscillating pulsed electric field were used to prepare several groups of carbon-based coatings with different Ti doping amounts. The effect of Ti nanocrystal addition on the electrical conductivity and corrosion resistance of amorphous carbon-based coatings was studied. The results show that with increasing the Ti target current from 0.35 A to 0.7 A, the Ti doping amount in the coating is increased with the Ti content reaching 8.20at%, and the carbon-based coating changes from amorphous structure to Ti nanocrystalline/amorphous carbon composite structure. In addition, appropriate doping of Ti is beneficial to improve the density, electrical conductivity, hydrophobicity and corrosion resistance of the coating. When the Ti target current is set as 0.7 A, the sheet resistance of the coating reaches its minimum value of 4.5  $\Omega/\square$ . When the Ti target current is increased to 0.9 A, the water contact angle of the coating achieves its maximum value of 97.75°, while the corrosion current density decreases to its minimum value of  $1.408 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

**Key words:** magnetron sputtering; carbon coating; Ti nanocrystals; conductivity; corrosion resistance

Corresponding author: Yang Chao, Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China, E-mail: yangchao0107@sina.com