

TA2钛金属双极板表面C-PPS复合涂层 抗腐蚀性能研究

陈青华¹, 陈璐², 高平平^{1,2}

¹兰溪致德新能源材料股份有限公司, 浙江 金华

²湖南工程学院机械工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年4月16日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年6月8日

摘要

本文针对TA2表面存在钝化膜, 涂层结合弱且钛金属双极板在PEMFC工作环境下易腐蚀的缺点, 使用聚苯硫醚(PPS)树脂和平均粒径30 nm的导电炭黑为耐蚀涂料, 经甲苯二异氰酸酯(TDI)固化剂固化, 在钛板表面制备出致密的C-PPS复合涂层, 并通过轧制和调控耐蚀涂料比例优化其耐腐蚀性能。当PPS含量为导电炭黑的70%时, 涂层性能最佳, 轧制前腐蚀电流密度为 $0.63 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 电阻率为 $45 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$; 轧制后, 涂层的附着力达到ISO 0级标准, 腐蚀电流密度仅为 $0.079 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 电阻率降至 $10 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 。

关键词

质子交换膜燃料电池, 钛金属双极板, 微纳米孔, C-PPS复合涂层

Study on Corrosion Resistance of C-PPS Composite Coatings on TA2 Titanium Bipolar Plates

Qinghua Chen¹, Lu Chen², Pingping Gao^{1,2}

¹Lanxi Zhide New Energy Materials Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

²School of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan Hunan

Received: April 16, 2026; accepted: May 22, 2026; published: June 8, 2026

Abstract

In this paper, targeting the disadvantages of a passive film formed on TA2 titanium alloy, which leads to poor coating adhesion, and the tendency of titanium bipolar plates to corrode in PEMFC

文章引用: 陈青华, 陈璐, 高平平. TA2 钛金属双极板表面 C-PPS 复合涂层抗腐蚀性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 1-12. DOI: 10.12677/ms.2026.166132

operating environments, C-PPS composite coatings were prepared on titanium substrates using polyphenylene sulfide (PPS) resin and 30 nm carbon powder with isocyanate as a curing agent, then, the corrosion resistance of titanium bipolar plates has been improved via rolling treatment and adjusting PPS content. The optimal performance was achieved when the PPS content was 70% of the nano-carbon powder. Before rolling, the corrosion current density was $0.63 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, the resistivity was $45 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$. After rolling, the coating adhesion reached ISO Grade 0, the corrosion current density was only $0.079 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, and the resistivity decreased to $10 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$.

Keywords

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), Titanium Bipolar Plate, Micro-Nano Pores, C-PPS Composite Coating

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 质子交换膜燃料电池(PEMFC)大规模商业化面临的主要困难是耐久性不足与成本过高, 而双极板作为 PEMFC 电堆的核心组件, 约占电堆总质量的 70%、总价格的 30% [1]。因此, 开发耐腐蚀、低成本的双极板, 是推动 PEMFC 实现大规模商业化应用的关键路径。

PEMFC 用金属双极板涂层的研究已较为广泛, 从早期的贵金属涂覆, 逐步发展到成本更低的钛(Ti)、铬(Cr)、锆(Zr)的碳、氮、硅化合物等涂层。然而, 针对不锈钢和钛涂层改性的单一涂层体系, 难以满足 PEMFC 的实际应用要求, 因此构筑低成本的复合涂层体系, 已成为该领域的研究热点与重点探索方向。

其中, CrN/Cr 多层涂层展现出优异的抗腐蚀性能与导电性能, PVD 技术的涂层与基体界面达到冶金结合等级。但含 Cr 涂层易产生 Cr^{3+} 离子, 导致催化剂中毒, 为此有研究开发出非晶碳涂层(a-C/Cr), 用于屏蔽 Cr 涂层与腐蚀液的接触, 避免上述问题发生[2]-[7]。此外, 研究发现非晶碳膜(a-C)是一种石墨化程度低、含少量碳氧化化合物的混合体系, 具备良好的导电性、导热性和抗腐蚀性, 这使得碳膜改性成为金属双极板改性的主流研究方向之一[8]-[14]。碳涂层因具有不污染膜电极、对环境影响小、易融入生态环境等优势, 且相较于贵金属涂层, 在成本控制和疏水性方面更具竞争力, 受到国内外学者的广泛关注。近年来, 学者们围绕碳涂层的制备方法与结构设计等方面开展了大量积极研究。

Wang 等[15]采用膨胀石墨、树脂及导电填料制备耐腐蚀碳膜涂层, 但由于树脂含量较高, 导致涂层的界面接触电阻(ICR)达到 $150 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ ($200 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$), 无法满足实际使用要求, 仍需进一步调整涂层组分与制备工艺。Larijani 等[16]通过磁控溅射法制备的碳涂层, 具备优异的抗腐蚀性能与导电性能, 其界面接触电阻可达 $3 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ ($200 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$); Shao 等与 Lee 等[17]-[18]进一步研究了金属物理气相沉积(PVD)工艺中, 真空度、加速电压等参数对碳及改性碳涂层性能的影响, 研究表明, 真空度越高, 制备的膜层致密度越好, 综合性能也越优异。Bi 等[19]通过磁控溅射法制备了 a-C/Zr-C/SS 梯度涂层, 基体经恒电位测试后, 涂层未出现明显腐蚀与性能劣化现象; Lin 等[20]则采用 Ti 作为中间层, 以提升不锈钢双极板涂层(a-C/Ti/SS)的综合性能。但上述研究采用的 PVD 方法存在明显局限性, 该方法仅适用于小型零件, 且设备成本高昂、工艺参数要求严苛, 必然导致双极板制备成本上升, 不利于 PEMFC 的规模化推广应用。当下, 涂层涂布法因其低成本、低工艺难度的优势, 被认为是替代磁控溅射法的理想商业化应用方案, 且在锂离子电池等行业大规模应用。本文旨在解决涂布法制备碳复合涂层过程中可能产生的附着力等问

题, 实现低成本、耐腐蚀双极板的制备与应用。

2. 试验方案

如图 1 所示, 本文首先将钛板(0.15 mm, 湘投金天钛金属)浸泡在 NaOH 溶液(国药股份)中 8 h 以获得粗化的表面。然后, 将 PPS (苏州纳馨新材料科技)溶于无水乙醇, 配成浓度为 0.1 g/mL 的溶液, 按配比加入纳米导电炭黑(平均粒径 30 nm, 东莞瑞泰)机械搅拌 60 min, 混合均匀, 加入甲苯二异氰酸酯(TDI)固化剂机械搅拌 20 min, 得到复合涂料, 静置 15 min 脱除气泡, 用线棒涂布器将复合涂料均匀涂布于钛板表面, 室温固化 48 h 后, 300°C 下热轧成型, 轧制工艺为: 采用高精度轧辊(表面粗糙度 $Ra \leq 0.1 \mu\text{m}$, 锂离子电池极片轧制, 科晶 MSK-2150), 工艺参数: 轧制力 $500 \cdot 3000 \text{ kN}$, 材料加热到 300°C (热辊压), 轧辊温度 120°C, 涂层厚度 120 μm , 下压量 20% 单次; 厚度偏差 $\leq \pm 2\%$, 电化学测试采用电化学工作站 (CHI660e, 上海辰华仪器有限公司, 中国)进行电化学测试。使用三电极玻璃电解池体系开展电化学阻抗谱(EIS)、动电位极化测试(塔菲尔曲线, Tafel)以及恒电位极化测试。以所制备的复合双极板作为工作电极, 其有效工作面积为 1 cm^2 。铂片为对电极, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。电解液为 0.5 M H_2SO_4 + 2 ppm HF 混合溶液, 温度保持在 70°C。

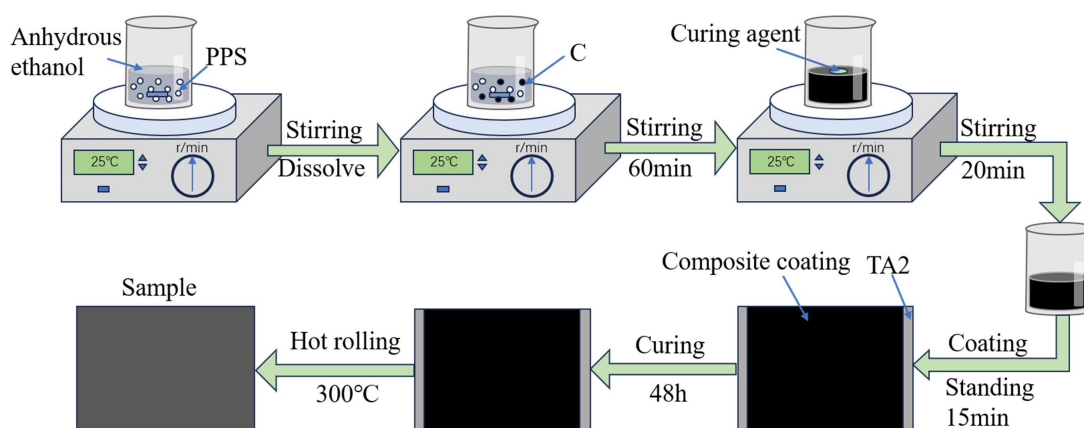


Figure 1. Preparation process of C-PPS composite coating

图 1. C-PPS 复合涂层的制备流程

本文实验制备了不同配比的复合涂料, 根据 PPS 的添加量, 对应样品记为 S1、S2、S3、S4、S5、S6。具体配比详见表 1。

Table 1. Composition ratio of composite coatings

表 1. 复合涂层的比例

Sample	C/g	PPS/g	PPS/C
S1	1	0.5	50%
S2	1	0.6	60%
S3	1	0.7	70%
S4	1	0.8	80%
S5	1	0.9	90%
S6	1	1	100%

3. 结果与分析

3.1. 轧制前 SEM 分析

图 2 为轧制前不同含量 PPS 所制成的样品的扫描电镜图, 从图 2(a)~(f)分别对应样品 S1 到样品 S6。

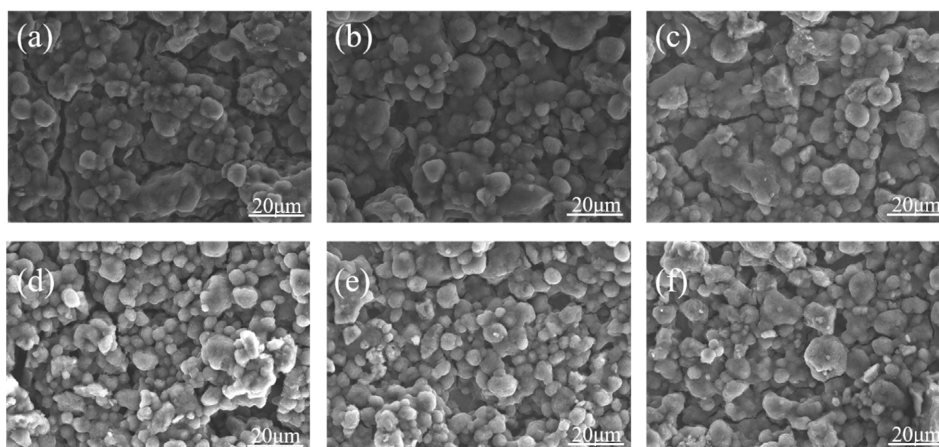


Figure 2. SEM images of sample surface morphology before rolling: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e) S5; (f) S6

图 2. 轧制前样品表面形貌扫描电镜图: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e) S5; (f) S6

从图 2 可以观察到, 实验第一步在钛板表面所制备的纳米化孔洞已经全部被复合涂料所覆盖, 复合涂料和钛板的结合情况良好, 但涂布后涂层表面存在高低不平的情况, 这是由复合浆料搅拌或者涂布时原料颗粒团聚导致的。此外, 在图 2(a)~(f)中均观测到少量散乱分布的 PPS 颗粒, 且随着 PPS 的含量逐渐的上升, 表面散乱的 PPS 颗粒越多, 表明纳米导电炭黑和 PPS 粒子之间的分散和结合存在局部不均匀现象, 且随着 PPS 含量上升, 不均匀性会随之增大。聚苯硫醚(PPS)树脂的成型温度为 $300^{\circ}\text{C}\sim 330^{\circ}\text{C}$, 样品在经过后续 300°C 热轧后, 这种情况会得到极大的改善。

3.2. 轧制后 SEM 分析

图 3 为 300°C 轧制后不同含量 PPS 所制成的样品的扫描电镜图, 从图 3(a)~(f)分别为样品 S1 到样品 S6。

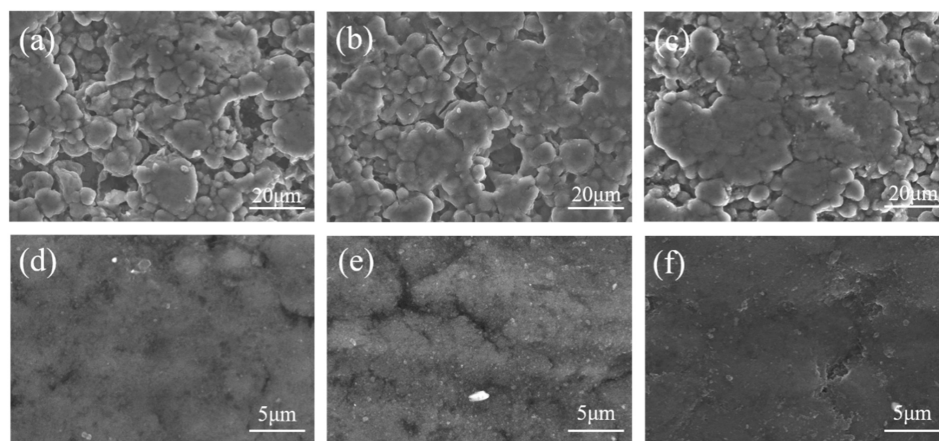


Figure 3. SEM images of sample surface morphology after rolling: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e) S5; (f) S6

图 3. 轧制后样品表面形貌扫描电镜图: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e) S5; (f) S6

从图中可以看出,相较于轧制前,轧制后涂层表面平整度得到了显著提升,且随着 PPS 含量的上升,轧制的整平效果也逐渐增强。分析可知,平整度提升的内在机制如下: PPS 的成型温度为 $300^{\circ}\text{C}\sim 330^{\circ}\text{C}$,轧制前样品在 300°C 下保温半小时的预处理工艺能提高 PPS 颗粒的塑性,降低变形抗力,使得导电炭黑和 PPS 在轧制时能够更充分的结合,同时辊压使 PPS 发生塑性形变,二者共同作用下,使样品表面更加平整。同时, PPS 发生塑性形变时,涂料能更好地填满钛板表面所制备的纳米化孔洞,进一步提高复合浆料和钛板之间的结合强度,避免涂层翘曲导致的不平整现象。对比图 3(a)~(f)还可发现,随着 PPS 含量的提升,PPS 和纳米碳粉的结合逐渐紧凑,钛板表面致密膜层面积逐步增大,当 PPS/C $\geq 80\%$ 时,钛板表面附着的为完整的平整薄膜。此外,轧制后,虽然表面还是存在一定裸露的 PPS 颗粒,但是相较于轧制前,该现象得到了明显的改善,PPS 和纳米碳粉结合更加紧凑。

3.3. 耐蚀性能分析

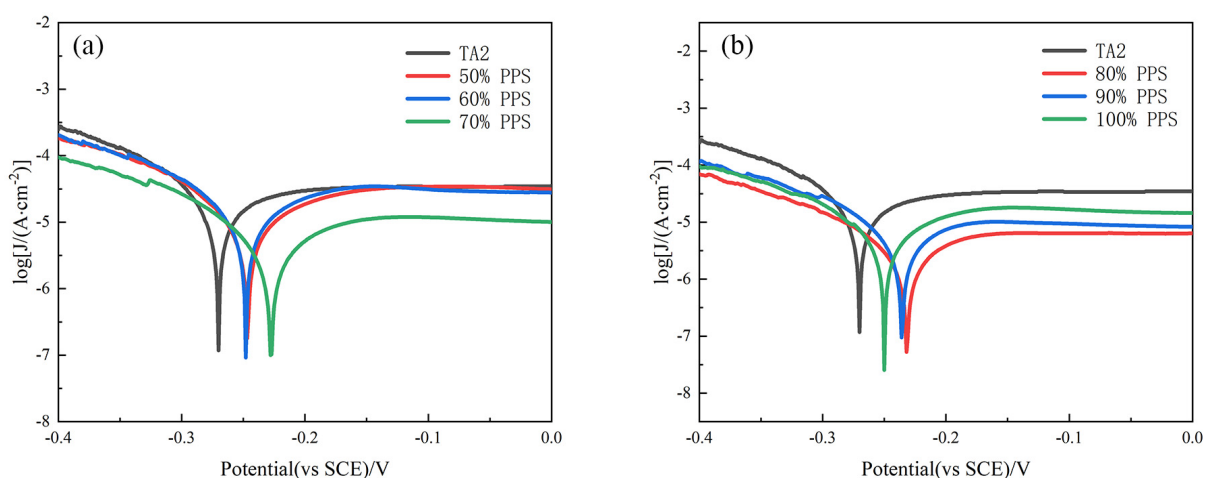


Figure 4. Tafel curves of unrolled samples: (a) 50%~70% PPS, (b) 80%~100% PPS

图 4. 未轧制 Tafel: (a) 50%~70% PPS, (b) 80%~100% PPS

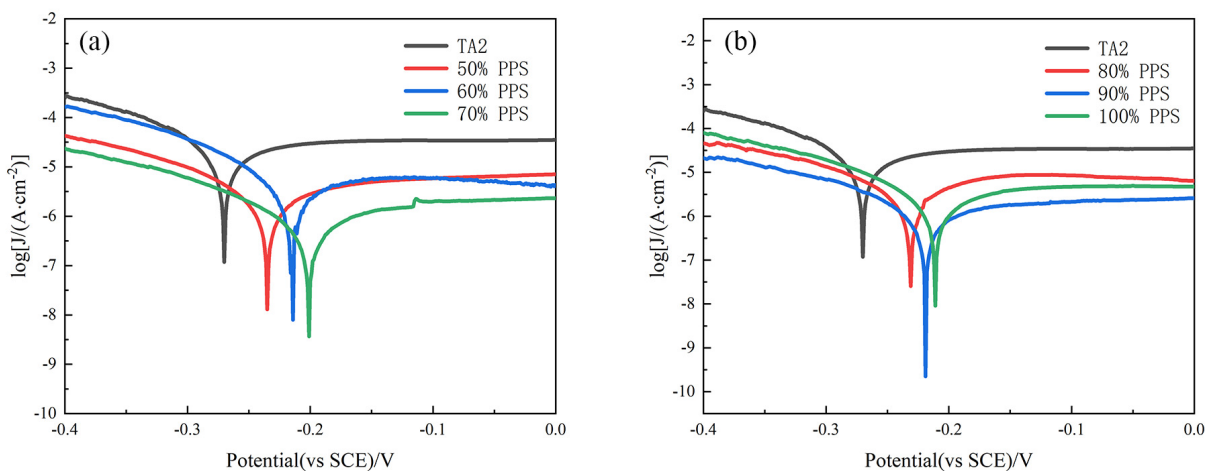


Figure 5. Tafel curves of rolled samples: (a) 50%~70% PPS, (b) 80%~100% PPS

图 5. 轧制 Tafel: (a) 50%~70% PPS, (b) 80%~100% PPS

耐腐蚀性能是评价涂层性能的重要标准之一。本文应用电化学工作站,在 70°C 下,含 $0.5\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$

和 5 ppm HF 的模拟溶液中进行 Tafel 性能测试, 以此来表征耐腐蚀性能。测试结果如图 4 所示, 图 4(a) 和图 4(b) 为复合涂料涂敷于钛板上轧制前的 Tafel 曲线, 图 5(a) 和图 5(b) 为复合涂料涂敷于钛板上轧制后的 Tafel 曲线。在 Tafel 测试获得的曲线是总电流曲线(阳极电流和阴极电流之和)。曲线中的尖锐点是阴极极化转变为阳极极化的临界点, 此时的电位为平衡电位(E_{eq})。阴极分支和阳极分支的两个线性段通常在($E_{eq} \pm 50$ mV 附近)外推到交叉点, 对应的电流密度即为腐蚀电流密度, 电压即为腐蚀电位。本小结对图 4 与图 5 中 Tafel 曲线进行线性外推与分析, 并将所得腐蚀电流密度与腐蚀电位汇总于表 2 与表 3 中。

Table 2. Corrosion current density and corrosion potential of samples before rolling

表 2. 轧制前样品的腐蚀电流密度和腐蚀电位

Sample	$J_{corr}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	φ_{corr} (vs SCE)/V
TA4	6.3	-0.28
50% (S1)	1.78	-0.26
60% (S2)	2.51	-0.25
70% (S3)	0.63	-0.23
80% (S4)	0.89	-0.22
90% (S5)	0.79	-0.24
100% (S6)	3.16	-0.25

Table 3. Corrosion current density and corrosion potential of samples after rolling

表 3. 轧制后样品的腐蚀电流密度和腐蚀电位

Sample	$J_{corr}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	φ_{corr} (vs SCE)/V
TA4	6.3	-0.28
50% (S1)	0.22	-0.23
60% (S2)	0.26	-0.21
70% (S3)	0.079	-0.19
80% (S4)	0.28	-0.24
90% (S5)	0.15	-0.22
100% (S6)	0.26	-0.20

从图 4~5 与表 2~3 中可以看出, 轧制前后, 涂覆后钛板的腐蚀电流密度均小于裸钛板, 腐蚀电位也正于裸钛板, 表明其耐腐蚀性能得到了改善。分析轧制前 Tafel 测试结果(图 4 与表 2)可知, 随着 PPS 含量的提升, 样品的耐腐蚀电流密度呈现先下降后上升的趋势, 当 PPS/C = 70% 时, 样品的腐蚀电流密度最低为, 符合美国能源部(DOE)技术标准(腐蚀电流密度 $\leq 1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)。对比表 2 与表 3 可知, 轧制后, 各组样品的腐蚀电位进一步正向移动, 腐蚀电流密度也进一步减小, 表明轧制后, 样品的耐腐蚀性能均得到了显著提升。轧制后的每个样品腐蚀电流密度都小于 $1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 达到美国能源部(DOE)的技术标准, 其中在 PPS 添加量为 70% 时腐蚀电流密度达到最小 $0.079 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 腐蚀电位进一步正向移动。结合 PPS 分子结构、热稳定性等特性, 可推测复合涂层耐腐蚀性能优于纯钛板的根源, 即 PPS 分子中丰富的醚键和芳香环结构赋予了复合涂层对水、酸、碱等化学介质的良好稳定性, 同时 PPS 优异的耐高温性能, 使复合涂层在较高温度下仍能保持稳定的化学结构, 因此, 复合涂层能够在高温腐蚀环境中表现出良好的

耐腐蚀性能。显然,加入聚苯硫醚(PPS)树脂与纳米碳粉形成复合涂料,涂敷于钛板表面,有助于提高钛金属双极板的耐腐蚀性能。

对涂层进行 EIS 进一步表征分析,在 $0.5 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 和 5 ppm HF 溶液中在 70°C 下进行测试,结果如图 6 至图 8 所示。图 6(a)和图 6(b)为轧制前的 Nyquist 图和放大的 Nyquist 图,图 7(a)和图 7(b)为轧制后的 Nyquist 图和放大的 Nyquist 图。图 8(a)是轧制前的 Bode 图,图 8(b)是轧制后的 Bode 图。

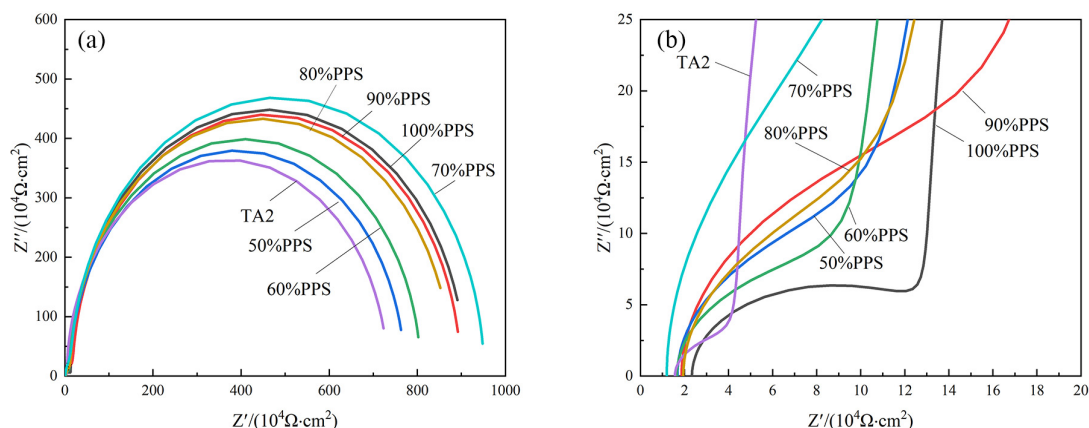


Figure 6. Unrolled samples: (a) EIS plots; (b) Locally magnified EIS plots

图 6. 未轧制: (a) EIS 图; (b) 局部放大的 EIS 图

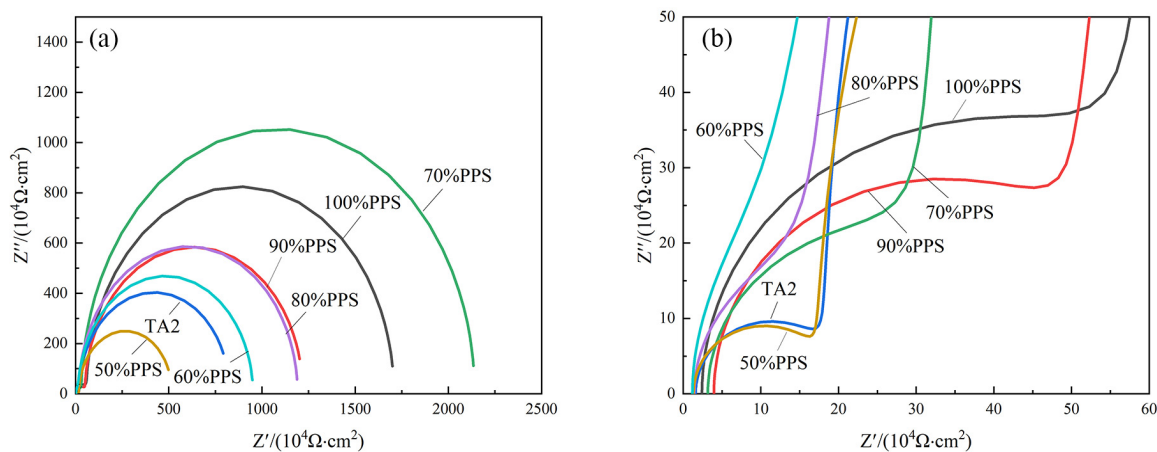


Figure 7. Rolled samples: (a) EIS plots; (b) Locally magnified EIS plots

图 7. 轧制: (a) EIS 图; (b) 局部放大的 EIS 图

从图 6 与图 7 中可以看出,所有样品的 Nyquist 谱线均能区分出高频和低频区域的两个半圆,图 8 中的 Bode 图也验证了这一点。据此,本文根据 EIS 测试结果构建了等效电路(如图 8(c)所示),其中 R_{ct} 是涂层膜/溶液界面上的电荷转移电阻, R_s 表示溶液的电阻, R_{coat} 是涂层膜的电阻,然后根据等效电路对 EIS 图谱进行拟合计算,所得拟合结果汇总在表 4 与表 5 中。

从图 6 与图 7 中可以看出,样品的电阻值随着 PPS 含量的增加而增加,这主要是因为 PPS 是一种很好的绝缘材料,涂层表面的 PPS 含量越高,涂层的电阻就越高。一般来说, R_{ct} 越大,溶液与涂层表面之间的电荷转移越困难,腐蚀速率就会随之降低。如表 4 所示,与轧制前的其它涂层样品相比,纯 Ti 的 R_{ct} 最低,为 $710.3 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$,而当样品 PPS 的含量为 70% 时,样品 R_{ct} 值最高,为 $894.9 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。因

此,当轧制前样品 PPS 的含量为 70%时,样品具有最好的耐腐蚀性,与 Tafel 测试结果一致。对比表 4 与表 5 数据可以发现,轧制后,裸钛板 R_{ct} 未发生显著变化,涂覆后样品的 R_{ct} 均显著增大,样品 PPS 含量为 70%时 R_{ct} 值最高,为 $2094 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。因此,当轧制后样品 PPS 的含量为 70%时,样品具有最好的耐腐蚀性,与 Tafel 测试结果一致。因此,聚苯硫醚复合碳涂层对钛具有明显的保护效果。

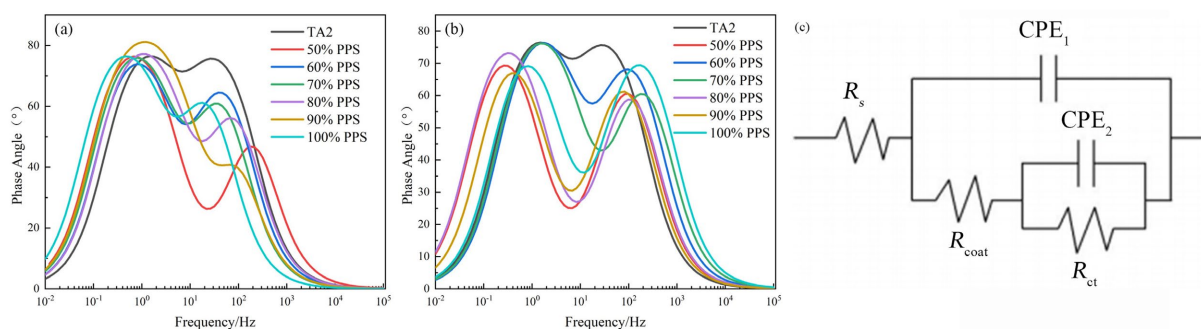


Figure 8. Bode plots: (a) before rolling; (b) after rolling; (c) equivalent circuit diagram

图 8. Bode 图: (a) 轧制前; (b) 轧制后; (c) 等效电路图

综上所述,PPS 的使用能有效地提升纳米碳粉与钛板的结合力,并在热轧过程中通过塑性形变填充碳膜中凹坑,从而形成了致密的复合膜,有效地隔绝钛基底与外界腐蚀环境。结合其自身高电荷转移电阻的特性,赋予了复合涂层涂敷的双极板优异的耐腐蚀性能。

Table 4. Electrochemical parameters of EIS before rolling

表 4. 轧制前 EIS 电化学参数

Sample	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
TA4	1.567	710.3×10^4
50% PPS	1.652	724.5×10^4
60% PPS	1.677	790×10^4
70% PPS	1.196	894.9×10^4
80% PPS	1.869	823.4×10^4
90% PPS	1.948	849.7×10^4
100% PPS	2.34	862×10^4

Table 5. Electrochemical parameters of EIS after rolling

表 5. 轧制后 EIS 电化学参数

Sample	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
TA4	1.196	710.3×10^4
50% PPS	1.609	498.3×10^4
60% PPS	1.329	878.1×10^4
70% PPS	3.178	2094×10^4
80% PPS	1.437	1153×10^4
90% PPS	3.961	1159×10^4
100% PPS	2.425	1633×10^4

进一步研究复合轧制后的涂层的耐久性问题,对涂层进行了恒电位测试,如图 9 所示,所有的样品从开始阶段时电流密度急剧下降,大约 60 min 后慢慢趋于稳定,所有样品的腐蚀电流密度均有下降,当 PPS 含量为 70% 时达到最低,8 h 后,腐蚀电流密度维持在 $0.07 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。在模拟阴极环境中获得的电流密度都是正的,这表明钛金属双极板和表面 C-PPS 复合涂层改性钛金属双极板在施加电位为 0.6 V 的模拟 PEMFC 阴极环境下易于阳极溶解,但所有涂敷后的钛金属双极板的腐蚀电流密度均相当低。这主要是 PPS 与碳膜间紧密结合,当腐蚀液进入碳膜中的小孔时,由于复合涂层的存在,使得腐蚀液不能继续进入,从而更有效地保护基体,从而展现出较好的耐腐蚀性能。

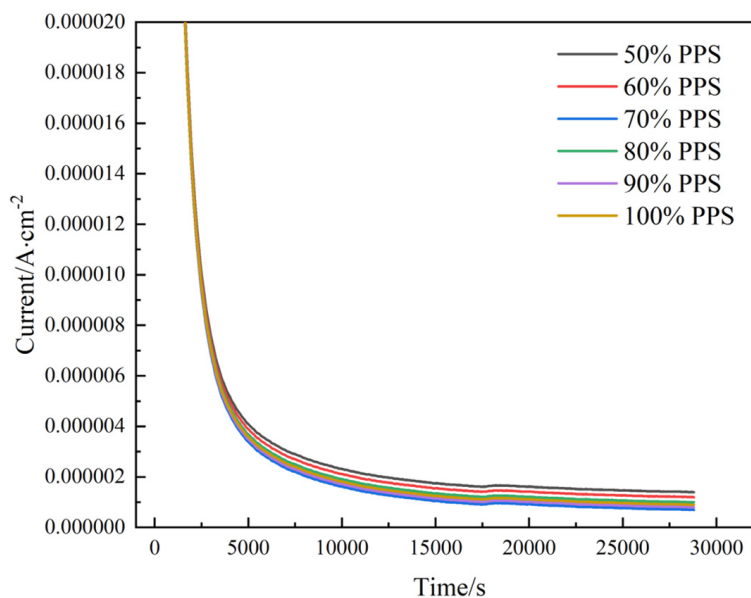


Figure 9. Potentiostatic polarization curves of samples after rolling
图 9. 轧制后样品恒电位极化曲线

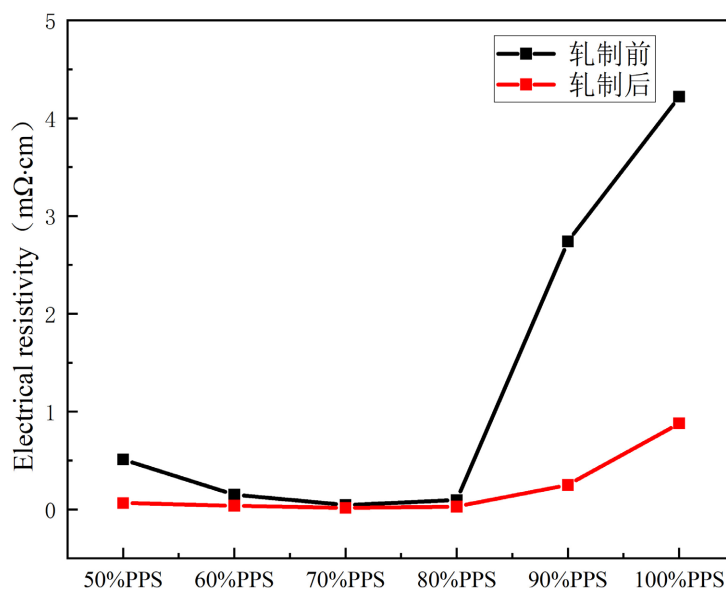


Figure 10. Coating resistivity before and after rolling
图 10. 轧制前后涂层电阻率

采用 HPS2662 型四探针电阻率测试仪, 对制备好的样品的平面电阻率进行测量。图 10 是轧制前后的 C-PPS 复合涂层不同 PPS 含量样品的电阻率测试数据, 如图所示, 轧制前随着 PPS 含量的提升, 电阻率先是有下降的, 但是变化不大, 在 70% PPS 时为 $0.045 \Omega \cdot \text{cm}$, 继续提升 PPS 的含量的话, 电阻率显著上升, 在 100% PPS 时达到 $4.22 \Omega \cdot \text{cm}$, 轧制后涂层的界面电阻下降, 在 70% PPS 时为 $0.010 \Omega \cdot \text{cm}$ ($10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$), 相对于轧制前有一定的提升。同样, 接着继续提升 PPS 的含量的话, 电阻率显著上升, 在 100% PPS 时达到 $0.88 \Omega \cdot \text{cm}$, 因此轧制后的涂层界面电阻改善明显。

3.4. 附着力测试与分析

图 11 是附着力测试图, 图 11(a)~(f) 分别代表轧制后不同 PPS 含量的样品。在进行附着力测试时, 首先将试片放置于硬度达标的平板上。然后使用附着力测试仪器, 手持划格器手柄, 使多刃切割刀垂直于试片平面, 以均匀的压力、平衡的手法和 $20 \sim 50 \text{ mm/s}$ 的切割速度割划试片。割划试片时, 应使切割刀穿透涂层并略微切入底材, 但不宜切入过深。为了形成格阵图形, 可以在切口上重复以上操作。将度片旋转 90° , 然后再次割划试片。割划完成后, 用软毛刷轻轻地向后刷试片 5 次, 再向前刷试片 5 次, 以去除试片上杂质。

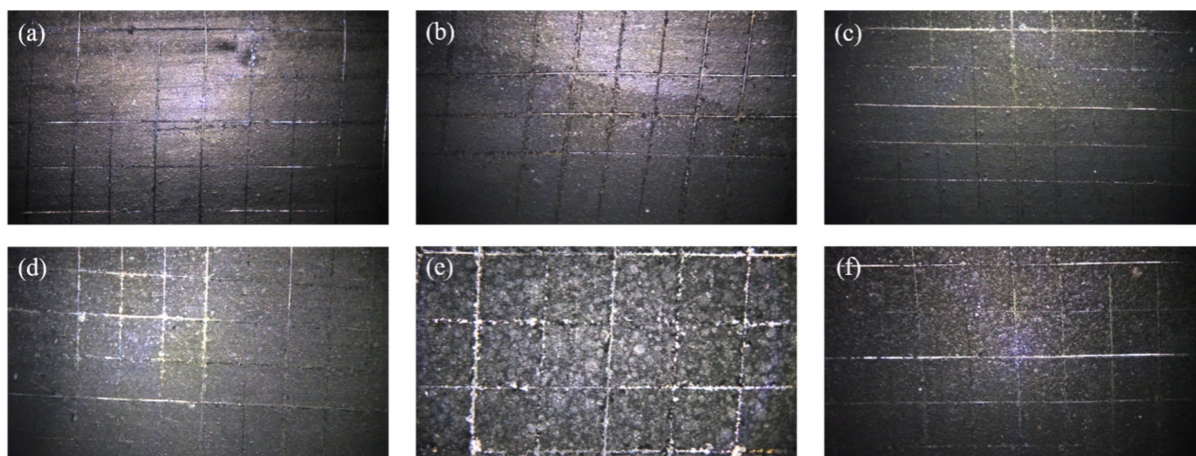


Figure 11. Adhesion test analysis: (a) 50% PPS; (b) 60% PPS; (c) 70% PPS; (d) 80% PPS; (e) 90% PPS; (f) 100% PPS
图 11. 附着力测试图: (a) 50% PPS; (b) 60% PPS; (c) 70% PPS; (d) 80% PPS; (e) 90% PPS; (f) 100% PPS

试验至少在试片的三个不同位置上完成, 如果三个位置的试验结果不同, 应在多于三个位置上重复试验, 同时记录全部结果。然后用放大镜观察脱落情况, 从图中可以看出, 各个样品在割划之后均没有明显的脱落情况, 根据 ISO 2409 标准, C-PPS 复合涂层粘附强度达到零级, 这说明复合涂层具有良好的附着力。

4. 结论

本文通过对照实验, 研究了聚苯硫醚(PPS)含量与轧制工艺对钛金属双极板耐腐蚀性能、导电性能等的影响, 得出以下结论:

(1) 在 Tafel 测试当中, 当 $\text{PPS/C} = 70\%$ 时, 复合涂层的耐腐蚀性能最好, 腐蚀电流密度仅为 $0.63 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 在进行轧制工艺后, 其腐蚀电流密度进一步降低为 $0.079 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

(2) 在 EIS 阻抗测试当中, 当 $\text{PPS/C} = 70\%$ 时, 复合涂层的 R_{ct} 数值最大, 轧制后, 其 R_{ct} 值进一步增大, 表明 $\text{PPS/C} = 70\%$ 时涂层的耐腐蚀性能最佳, 且轧制后性能进一步提升, 同时恒电位测试腐蚀电流密

度稳定在 $0.07 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 这些均与 Tafel 测试结果吻合。

(3) 对轧制前后的涂层进行界面电阻测试, 当 PPS/C = 70%时, 轧制后的界面电阻达到 $10 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 。

(4) 在附着力测试当中, 经过轧制的各个样品均达到 ISO 2409 的 0 级标准, 表面均没有明显的脱落情况。

致 谢

感谢兰溪致德新能源材料股份有限公司提供经费支持。

基金项目

本项目获得湖南省自然科学基金——TA2 钛双极板新型碳涂层改性机理及调控研究(编号 2020JJ51100)项目支持。

参考文献

- [1] Wilberforce, T., El Hassan, Z., Ogungbemi, E., Ijaodola, O., Khatib, F.N., Durrant, A., *et al.* (2019) A Comprehensive Study of the Effect of Bipolar Plate (BP) Geometry Design on the Performance of Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **111**, 236-260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.081>
- [2] Lafont, A.M., Ghali, E. and Morales, A.T. (2007) Corrosion Behavior of Two Bipolar Plate Materials in Simulated PEMFC Environment by Electrochemical Noise Technique. *Electrochimica Acta*, **52**, 5076-5085. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.01.080>
- [3] Wang, H., Hou, K., Lu, C. and Ger, M. (2014) The Study of Electroplating Trivalent CrC Alloy Coatings with Different Current Densities on Stainless Steel 304 as Bipolar Plate of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Thin Solid Films*, **570**, 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.03.034>
- [4] Wang, L., Northwood, D.O., Nie, X., Housden, J., Spain, E., Leyland, A., *et al.* (2010) Corrosion Properties and Contact Resistance of TiN, TiAlN and CrN Coatings in Simulated Proton Exchange Membrane Fuel Cell Environments. *Journal of Power Sources*, **195**, 3814-3821. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.127>
- [5] Chen, Z., Zhang, G., Yang, W., Xu, B., Chen, Y., Yin, X., *et al.* (2020) Superior Conducting Polypyrrole Anti-Corrosion Coating Containing Functionalized Carbon Powders for 304 Stainless Steel Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Chemical Engineering Journal*, **393**, Article ID: 124675. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124675>
- [6] Peng, S., Xu, J., Li, Z., Jiang, S., Munroe, P., Xie, Z., *et al.* (2020) A Reactive-Sputter-Deposited TiSiN Nanocomposite Coating for the Protection of Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Ceramics International*, **46**, 2743-2757. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.263>
- [7] Zhang, H., Lin, G., Hou, M., Hu, L., Han, Z., Fu, Y., *et al.* (2012) CrN/Cr Multilayer Coating on 316L Stainless Steel as Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, **198**, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.09.091>
- [8] Yi, P., Peng, L., Zhou, T., Wu, H. and Lai, X. (2013) Development and Characterization of Multilayered Cr-C/aC:Cr Film on 316L Stainless Steel as Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, **230**, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.063>
- [9] Yi, P., Zhang, D., Qiu, D., Peng, L. and Lai, X. (2019) Carbon-Based Coatings for Metallic Bipolar Plates Used in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 6813-6843. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.176>
- [10] Falco, C., Baccile, N. and Titirici, M. (2011) Morphological and Structural Differences between Glucose, Cellulose and Lignocellulosic Biomass Derived Hydrothermal Carbons. *Green Chemistry*, **13**, 3273-3281. <https://doi.org/10.1039/c1gc15742f>
- [11] Khan, T.A., Saud, A.S., Jamari, S.S., Rahim, M.H.A., Park, J. and Kim, H. (2019) Hydrothermal Carbonization of Lignocellulosic Biomass for Carbon Rich Material Preparation: A Review. *Biomass and Bioenergy*, **130**, Article ID: 105384. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105384>
- [12] Wu, Q., Li, W., Tan, J. and Liu, S. (2014) Flexible Cage-Like Carbon Spheres with Ordered Mesoporous Structures Prepared via a Soft-Template/Hydrothermal Process from Carboxymethylcellulose. *RSC Adv.*, **4**, 61518-61524. <https://doi.org/10.1039/c4ra12134a>
- [13] Zheng, M., Liu, Y., Xiao, Y., Zhu, Y., Guan, Q., Yuan, D., *et al.* (2009) An Easy Catalyst-Free Hydrothermal Method

- to Prepare Monodisperse Carbon Microspheres on a Large Scale. *The Journal of Physical Chemistry C*, **113**, 8455-8459. <https://doi.org/10.1021/jp811356a>
- [14] Zhang, J., Liu, T. and Liu, M. (2018) Hydrothermal Synthesis of Halloysite Nanotubes@carbon Nanocomposites with Good Biocompatibility. *Microporous and Mesoporous Materials*, **266**, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.027>
- [15] Wang, W., He, S. and Lan, C. (2012) Protective Graphite Coating on Metallic Bipolar Plates for PEMFC Applications. *Electrochimica Acta*, **62**, 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.11.026>
- [16] Larijani, M.M., Yari, M., Afshar, A., Jafarian, M. and Eshghabadi, M. (2011) A Comparison of Carbon Coated and Uncoated 316L Stainless Steel for Using as Bipolar Plates in PEMFCs. *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 7400-7404. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.04.044>
- [17] Shao, W., Jiang, B., Ma, J. and Yan, F. (2020) Mechanism for Vacuum Thermal Stabilization of Silver in Graphite-Like Carbon Coating and Performance of Electrical Conductivity and Corrosion Resistance. *Thin Solid Films*, **693**, Article ID: 137658. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137658>
- [18] Lee, S.H., Pukha, V.E., Vinogradov, V.E., Kakati, N., Jee, S.H., Cho, S.B., *et al.* (2013) Nanocomposite-Carbon Coated at Low-Temperature: A New Coating Material for Metallic Bipolar Plates of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 14284-14294. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.013>
- [19] Bi, F., Peng, L., Yi, P. and Lai, X. (2016) Multilayered Zr-C/aC Film on Stainless Steel 316L as Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, **314**, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.02.078>
- [20] Lin, M., Wan, C. and Wu, W. (2013) Comparison of Corrosion Behaviors between SS304 and Ti Substrate Coated with (Ti,Zr)N Thin Films as Metal Bipolar Plate for Unitized Regenerative Fuel Cell. *Thin Solid Films*, **544**, 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.03.130>