

# PEM 电解槽钛基多孔传输层表面铂涂层改性及性能研究

王正<sup>1</sup>, 刘景田<sup>1</sup>, 韩坤炎<sup>1</sup>, 任鹏<sup>1</sup>, 杨瑞锋<sup>1</sup>, 贾波<sup>1</sup>, 冯庆<sup>1</sup>, 王新磊<sup>2</sup>

(1. 西安泰金新能源科技股份有限公司, 陕西 西安 710021)

(2. 安徽枞水新能源科技有限公司, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 阳极钛基多孔传输层(PTL)表面铂涂层脱落与腐蚀是质子交换膜(PEM)电解槽制氢性能衰减机制之一。针对此问题, 对镀铂钛基 PTL 进行不同温度的退火处理, 然后将其组装成 PEM 水电解池, 并进行 1100 h 的耐久性测试。结果显示, 镀铂钛基 PTL 在 400 °C 热处理后电解水的衰减速率为 3.9  $\mu\text{V}/\text{h}$ , 而 200 °C 和 600 °C 的衰减速率分别为 10.7  $\mu\text{V}/\text{h}$  和 41.6  $\mu\text{V}/\text{h}$ , 说明适宜温度的热处理有利于提升铂涂层的结合力, 降低钛基 PTL 与铂涂层之间的肖特基效应, 避免阳极钛基 PTL 在强酸性、高电位环境下的腐蚀与钝化, 从而提升电解池的稳定性。

**关键词:** PEM 水电解; 钛基多孔传输层; 铂涂层; 稳定性

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)02-036-08

## Study on Modification and Performance of Platinum Coating on Titanium-based Porous Transport Layer of PEM Electrolyzer

Wang Zheng<sup>1</sup>, Liu Jingtian<sup>1</sup>, Han Kunyan<sup>1</sup>, Ren Peng<sup>1</sup>, Yang Ruifeng<sup>1</sup>, Jia Bo<sup>1</sup>, Feng Qing<sup>1</sup>, Wang Xinlei<sup>2</sup>

(1. Xi'an Taijin New Energy & Materials Sci-Tech Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

(2. Anhui Shengshui New Energy Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

**Abstract:** The exfoliation and corrosion of platinum coating on the surface of titanium-based porous transport layer (PTL) is one of the mechanisms of hydrogen production performance degradation in proton exchange membrane (PEM) electrolyzers. In order to solve this problem, the platinum-plated titanium-based PTLs (Ti-PTLs) were annealed at different temperatures, and then assembled into a PEM water electrolysis cell, and the durability test was carried out for 1100 h. The results show that the attenuation rate of Pt-plated Ti-PTL after heat treatment at 400 °C is 3.9  $\mu\text{V}/\text{h}$ , while the attenuation rates at 200 °C and 600 °C are 10.7  $\mu\text{V}/\text{h}$  and 41.6  $\mu\text{V}/\text{h}$ , respectively. Heat treatment at a suitable temperature is beneficial to improve the adhesion of the platinum coating, reduce the Schottky effect between the Ti-PTL and the platinum coating, avoid the corrosion and passivation of the anode Ti-PTL in a strong acidic and high potential environment, thereby improving the stability of the electrolytic cell.

**Keywords:** PEM water electrolysis; titanium-based porous transport layer; Pt coating; durability

在碳中和目标的驱动下, 质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)水电解因其能将波动的可再生能源转化为绿色氢气而备受关注<sup>[1-2]</sup>。为了使该技术得到广泛应用, 电解槽必须实现较长的使用寿命, 同时, 为了追求成本效益, 研究人员正在推动 PEM 水电解达到更高的运行电流密度(超过 2  $\text{A}/\text{cm}^2$ ), 然而高运行电流密度会带来诸如电解槽产氢效率降低、寿命

加速衰减等问题。因此, PEM 水电解制氢在运行电流密度  $\geq 2 \text{ A}/\text{cm}^2$  下的耐久性对于拓展其潜在应用尤为重要<sup>[3-5]</sup>。

PEM 电解槽的装配和运行工况对其长期稳定性起着至关重要的作用, 特别是阳极多孔传输层(porous transport layer, PTL)。PTL 作为 PEM 电解槽的核心组件之一, 承担着传输反应物(水)、产物(氧气)、电子以及支撑膜电极(MEA)的多重功能, 其性能直接影响电解槽的效率、寿命与综合成本<sup>[6-7]</sup>。目前, 钛及钛合金因优异的机械强度、导电性和耐腐蚀性, 成为 PTL 的

收稿日期: 2025-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4002100)

通信作者: 贾波(1984—), 男, 正高级工程师。

首选材料,通常以烧结钛粉或钛毡形式使用。然而,在 PEM 电解槽的实际运行环境(强酸性、高温、高阳极电位)中,钛基 PTL(Ti-PTL)表面极易形成高电阻的钝化层(主要为  $\text{TiO}_x$ ),导致界面接触电阻(ICR)急剧升高,阻碍电子传导,引起欧姆电位损失增大和电解效率下降,从而降低 PEM 水电解槽的使用寿命<sup>[8-13]</sup>。同时,持续的阳极析氧反应(OER)环境会加剧钛基体的腐蚀风险,威胁 PTL 的结构完整性与长期稳定性<sup>[14-15]</sup>。因此,开发兼具高导电性、优异耐腐蚀性和结构稳定性的 PTL 是提升 PEM 电解槽性能和寿命的关键挑战。近年来,贵金属铂(Pt)被广泛用作 PTL 的保护涂层,有报道显示,与无涂层的 PTL 相比,用铂涂层 PTL 组装的电解槽的性能衰减速率大幅降低<sup>[16-19]</sup>。例如,Rakousky 等<sup>[19]</sup>将使用的 PTL 涂覆 Pt 涂层后,电解槽衰减速率从 194  $\mu\text{V}/\text{h}$  降至 12  $\mu\text{V}/\text{h}$ 。Liu 等<sup>[20]</sup>通过镀铂来保护 Ti-PTL,有效降低了接触电阻并显著提高了电解水性能。但通过电镀技术在 Ti-PTL 表面沉积 Pt 涂层,在高电流密度( $\geq 2 \text{ A}/\text{cm}^2$ )高电位下运行超过 1100 h 会出现 Pt 涂层脱落现象,PEM 电解槽长期耐久性得不到保障。同时有研究<sup>[19,21]</sup>表明,PTL 表面涂敷不良 Pt 涂层也会引发催化层的严重降解,继而导致电解槽性能快速衰减。因此,表面涂层改性处理后的 PTL 在实际工况下的运行至关重要,特别是长周期大功率运行的稳定性。

为此,本研究利用电镀技术在商用 Ti-PTL 表面涂覆一层铂层后,再进行不同温度的热处理,并系统评价镀铂 Ti-PTL 装槽后的关键电化学性能指标,深入剖析各种镀铂 Ti-PTL 在长期运行过程中的性能衰减机制,以期 Ti-PTL 铂涂层工程化应用提供坚实的理论基础。

## 1 实验

### 1.1 Ti-PTL 制备

本研究使用的钛毡购自贝卡尔特新材料(苏州)有限公司,型号为 2GDL10-0.25,厚度为 250  $\mu\text{m}$ ,孔隙率为 56%。首先对钛毡基材进行前处理:基材除油(碱性除油剂 50~80  $^\circ\text{C}$ , 10 min)→酸洗(5% HCl, 5 min)→水洗 3 次。采用电镀法在 Ti-PTL 纤维上镀铂的具体过程如下:① 将钛毡置于预热至 70  $^\circ\text{C}$  的镀液中,以 2.0  $\text{A}/\text{dm}^2$  电流密度直流电镀 30 min;② 将镀铂钛毡水洗并烘干(80  $^\circ\text{C}$ , 20 min)。将涂覆 Pt 涂层的钛毡切割成 52 mm×52 mm 的钛毡片,分别在 200、400、600  $^\circ\text{C}$  的氩气(纯度 99.99%)气氛中热处理 4 h,得到具有不同表面颗粒形态的铂涂层钛毡样品,依次记为 PTL-200、PTL-400 和 PTL-600。未经镀铂处理的钛毡样品记为

PTL-pristine,用于比较。

### 1.2 PEM 电解池装配

测试夹具(活性面积 25  $\text{cm}^2$ ,上海升水新能源科技有限公司)的流场板采用双侧带多个蛇形流场的钛金属板,并均匀涂覆铂镀层。夹具两侧端板采用 316L 不锈钢,M8 螺栓作为紧固件。采用制备工艺更加一致的商用催化剂涂覆膜(CCM,N115 质子膜,厚 127  $\mu\text{m}$ ,上海升水新能源科技有限公司)作为膜电极测试组件。阳极催化层含  $\text{IrO}_2$ (SS-3001)催化剂,Ir 负载量为 1.0  $\text{mg}/\text{cm}^2$ 。40%Pt/C(SS-4001)作为阴极催化剂,Pt 负载量为 0.4  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ,Chemours<sup>®</sup> N115 膜作为聚合物电解质。所有 CCM 均使用 40  $\mu\text{m}$  厚聚苯二甲酸乙二醇酯(PEN)薄膜作为边框材料,活性区域面积控制在 25  $\text{cm}^2$ ,真空密封在铝箔袋中备用。

在干燥条件下组装 CCM。所有样品的阴极 PTL 均采用厚度为 315  $\mu\text{m}$  的 SGL Sigracet 39 BB 碳纸,阳极为经不同温度处理的 Ti-PTL。电解池阴极和阳极分别使用厚度为 0.25、0.2 mm 的聚四氟乙烯(PTFE)薄膜垫片作为密封材料,分步拧紧电解池上 8 个螺栓,拧紧力矩依次为 2、4、6、8  $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

### 1.3 性能表征

为了进一步评估 Ti-PTL 表面涂层性质对其性能的影响,特别是对催化剂层利用率和整体电解池性能与稳定性的影响,将制备的系列 Ti-PTL 样品组装成电解池进行电化学性能测试分析。所有电解测试均采用多通道实验台。首先以 100  $\text{mL}/\text{min}$  的流速分别给阴极和阳极侧提供超纯水(18.2  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ),使其循环排除杂质。所有测试通道都配备含有离子交换树脂的功能区,以保持较高的水纯度。使用直流电源(ITECH,型号 IT-M3100)给电解池提供额定输入,并记录电流和电压,采用基于 PLC 的软件对所有设备进行控制并记录数据。所有电解池都通入预热至 80  $^\circ\text{C}$  的水,电解池端板设有加热棒(额定功率为 300 W),以便更精确地控制反应温度,并在耐久性测试过程中保持稳定。

为进一步分析不同 Ti-PTL 样品组装电解池衰减的差异性,对恒流 1100 h 测试后的样品进行极化曲线和电化学阻抗谱(EIS)测试。所有耐久性实验前后的极化曲线测试均在同一设备上进行。电解测试采用恒流模式,首先将电流密度以 0.01  $\text{A}/\text{cm}^2$  为步长递增至 0.04  $\text{A}/\text{cm}^2$ ,然后以 0.02  $\text{A}/\text{cm}^2$  为步长递增至 0.2  $\text{A}/\text{cm}^2$ ,再以 0.1  $\text{A}/\text{cm}^2$  为步长递增至 4  $\text{A}/\text{cm}^2$ 。每步保持 2 min,并在耐久性测试前后进行 EIS 分析。在这些实验中,交流偏置随后被施加到电解池上,电流扰动为电解池工作电流的 $\pm 10\%$ ,频率范围为 0.1 Hz~10 kHz。在频率为 1 kHz 下测量高频电阻(HFR),获得电流密度为

0.1~4 A/cm<sup>2</sup> 范围内的 HFR。

采用 SEM-2100 型钨灯丝扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织观察。采用 DH7007 型阻抗仪进行阻抗测试。采用 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构形貌

图 1 为不同温度热处理样品的 SEM 照片。从图 1a、1b 可以观察到, 未镀铂 Ti-PTL 的三维多孔钛纤

维骨架相互交织, 为阳极水气提供了多维畅通的运输通道。由图 1c~1h 可以观察到, 铂颗粒均匀附着在钛纤维表面。图 2 为不同温度热处理样品表面铂颗粒尺寸分布图。由图 2 可以看出, PTL-200 与 PTL-400 样品表面铂颗粒平均尺寸接近, 分别为 450、470 nm, 但 PTL-600 样品表面铂颗粒尺寸明显增大, 平均尺寸为 500 nm。铂颗粒尺寸增大是由于高温热处理过程中发生了 Ostwald 熟化<sup>[22-23]</sup>。此外, 经 600 °C 热处理后, 表层铂颗粒出现大范围团聚, 钛纤维表面平整度降低, 会影响 PEM 槽运行过程中的电子传输和稳定性。

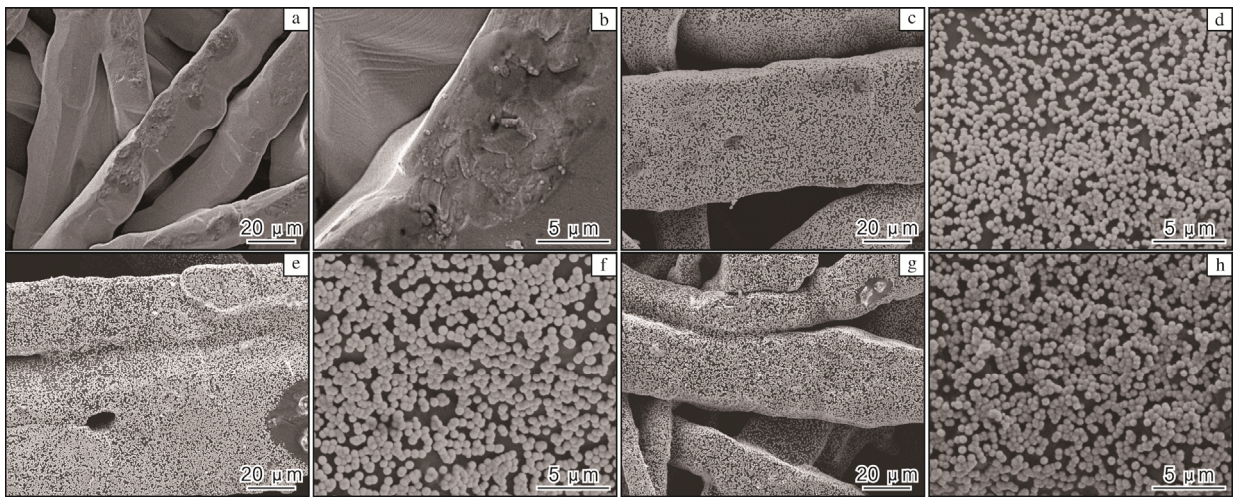


图 1 不同温度热处理样品的 SEM 照片

Fig.1 SEM images of samples heat treated at different temperatures: (a, b) PTL-pristine; (c, d) PTL-200; (e, f) PTL-400; (g, h) PTL-600

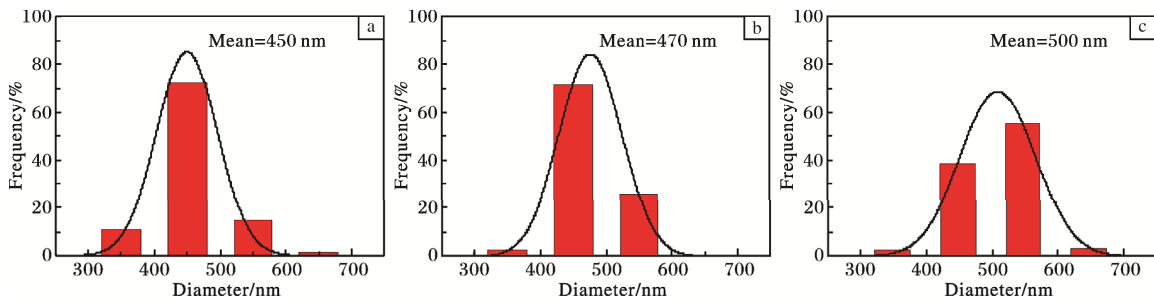


图 2 不同温度热处理样品表面铂颗粒尺寸分布图

Fig.2 Pt particle size distribution of samples heat treated at different temperatures: (a) PTL-200; (b) PTL-400; (c) PTL-600

图 3 为不同温度热处理样品的 XRD 谱图。由图 3 可以看出, 在  $2\theta=39.8^\circ$ 、 $46.2^\circ$  和  $67.5^\circ$  处存在三个强衍射峰, 分别对应于铂金属(JCPDS No.04-0802)的(111)、(200)和(220)晶面, 其他衍射峰位于  $2\theta=35.1^\circ$ 、 $38.4^\circ$ 、 $40.2^\circ$ 、 $53.0^\circ$ 、 $62.9^\circ$  处, 分别归属于钛金属(JCPDS No.44-1294)的(100)、(002)、(101)、(102)、(110)晶面。此外, 随着热处理温度升高, 虽然衍射峰位置基本不变, 但铂金属主衍射峰峰型更为尖锐, 表明铂颗粒尺

寸变大, 这与图 2 中铂涂层的颗粒尺寸规律一致。相比于未镀铂样品, 热处理镀铂 Ti-PTL 样品主峰稍稍向高角度偏移, 主要归因于铂镀层的引入和热处理引发的钛晶格收缩效应<sup>[24]</sup>。

### 2.2 电化学性能

图 4 为不同温度热处理样品的极化曲线和 Tafel 图, 图 5 为通过电化学阻抗谱所获取的相对应高频阻抗值。从图 4a 可以看出, 当电流密度为  $4 \text{ A/cm}^2$  时,

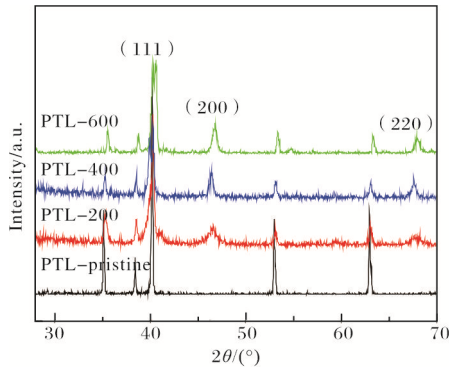


图 3 不同温度热处理样品的 XRD 谱图

Fig.3 XRD patterns of samples heat treated at different temperatures

使用 PTL-400 样品作为阳极 PTL 的电解池性能表现最佳,电压相比参照样品(PTL-pristine)降低了约 0.05 V。对比图 5 中两者的 HFR 值发现,PTL-400 样品比 PTL-pristine 样品小  $9 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ,表明铂涂层能显著降低催化层与 Ti-PTL 之间的接触电阻,从而提升电解水性能。PTL-400 样品的性能最优,归因于经  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 热

处理后,降低了铂颗粒和钛表面的氧化态<sup>[25-26]</sup>,从而提升了金属的电导率。从极化曲线与 HFR 测量结果均可得到相同的结论。PTL-600 样品与 PTL-pristine 样品的性能相近( $2.03 \text{ V}@4 \text{ A}/\text{cm}^2$ ),但其欧姆内阻较高,达到  $107 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ,这是由于 Ti-PTL 经过  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 热处理后,脆性增加,在电解池装配(装配后活性区域压力达到  $2.5 \text{ MPa}$ )及运行过程中,多孔结构因无法承受应力而发生坍塌,导致欧姆内阻增大<sup>[26]</sup>。

图 4b 为通过拟合极化曲线绘制的 Tafel 图。从图 4b 可知,在质子交换膜水电解池(PEMWE)中,PTL-400 样品的 Tafel 斜率( $40 \text{ mV}/\text{dec}$ )最小,且明显低于对照样品 PTL-pristine(Tafel 斜率为  $46 \text{ mV}/\text{dec}$ ),说明 PTL-400 样品所具有的良好导电特性有利于提升催化层中催化剂的利用效率,从而进一步提升反应动力学。PTL-pristine 样品的 Tafel 斜率高于 PTL-200 样品 ( $42 \text{ mV}/\text{dec}$ ),低于 PTL-600 样品( $47 \text{ mV}/\text{dec}$ ),表明无铂镀层的 Ti-PTL 和镀铂 Ti-PTL 经  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 热处理会导致各组件接触电阻过高,也会影响催化层的反应动力学。

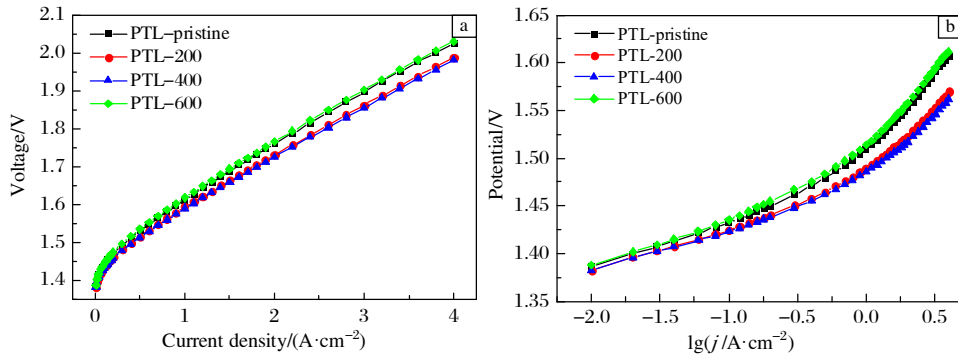


图 4 不同温度热处理样品的极化曲线和 Tafel 图

Fig.4 Polarization curves (a) and Tafel plots (b) of samples heat treated at different temperatures

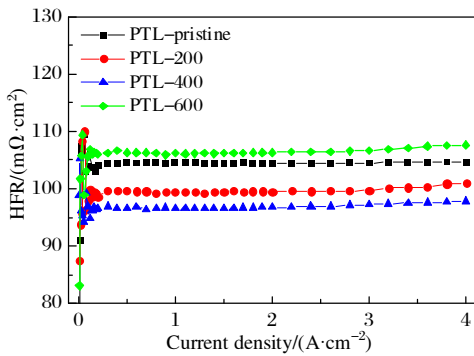


图 5 不同温度热处理样品的高频阻抗值

Fig.5 HFR-values of samples heat treated at different temperatures

电化学稳定性是评判铂涂层质量是否合格及衡量其实际应用的重要指标,通过电解池在高电流密度下恒流运行对比评估 Ti-PTL 样品的稳定性。图 6 为不同温度热处理样品在电流密度为  $3 \text{ A}/\text{cm}^2$  时的电压-时间曲线。从图 6 可以看出,在测试运行  $1100 \text{ h}$  内,PTL-400 样品的电压衰减速率最低,为  $3.9 \mu\text{V}/\text{h}$ ,而 PTL-pristine、PTL-200 和 PTL-600 样品的电压衰减速率分别为  $26.1$ 、 $10.7$ 、 $41.6 \mu\text{V}/\text{h}$ ,表明 PTL-400 样品在电解水测试中具有良好的电化学稳定性。这主要是因为经  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 热处理后,铂涂层与钛纤维表面结合更牢固,降低了 Ti-PTL 与铂涂层之间的肖特基效应,同时降低了电解池的内阻,提高了催化层利用率,从而有效提升了电解池的耐久性<sup>[20]</sup>。

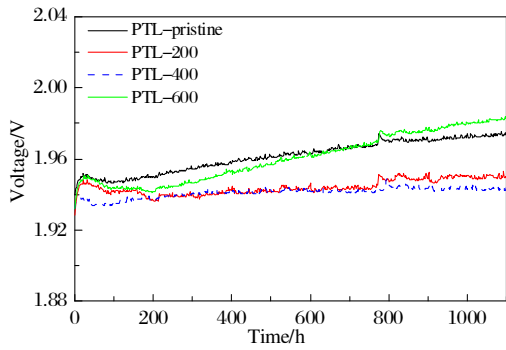


图 6 不同温度热处理样品的电压-时间曲线

Fig.6 Voltage-time curves of samples heat treated at different temperatures

图 7 为在电流密度  $3 \text{ A/cm}^2$  下，不同温度热处理样品 1100 h 耐久性测试前后的极化曲线。从图 7 可以看出，PTL-400 耐久性测试前后的极化曲线几乎重合，可见在 1100 h 内该 PTL 组装的电解池性能始终保持稳定，说明  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  热处理后 Ti-PTL 样品在  $3 \text{ A/cm}^2$  高电流密度运行中具有良好的电化学稳定性，这也与恒流稳定性测试结果一致。对 1100 h 恒流稳定性测试前后的样品在  $3 \text{ A/cm}^2$  恒流下测试 EIS，结果如图 8 所示。

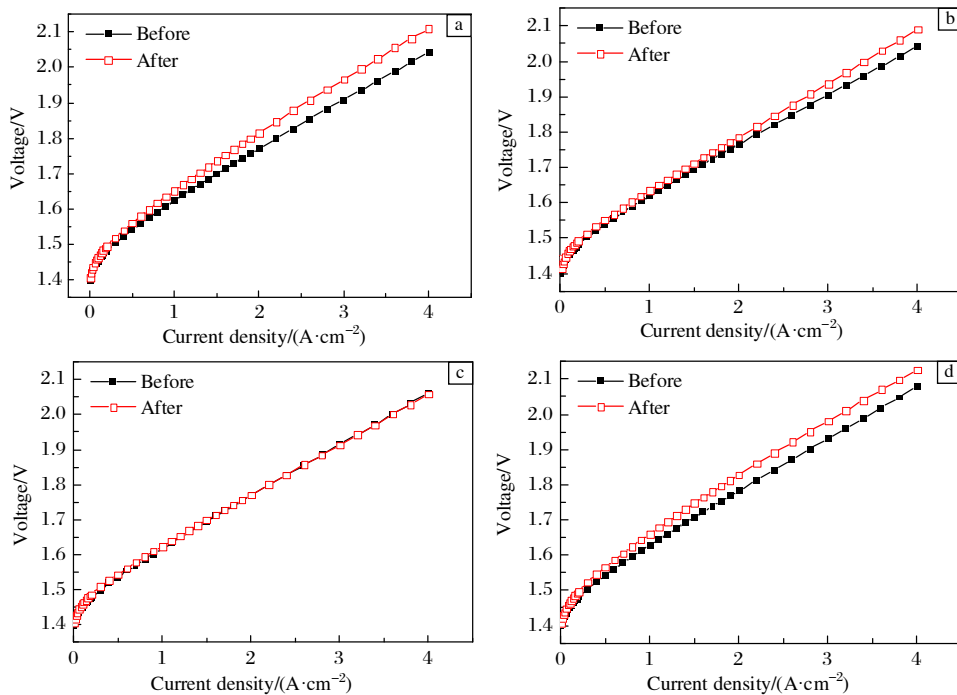


图 7 不同温度热处理样品 1100 h 耐久性测试前后的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of samples heat treated at different temperatures before and after 1100 h durability test:

(a) PTL-pristine; (b) PTL-200; (c) PTL-400; (d) PTL-600

图 9 为不同温度热处理样品 1100 h 耐久性测试后的 SEM 照片。从图 9 可见，PTL-200 样品的铂涂层出

所有 Nyquist 图谱均由一个半圆构成，在低频时未出现额外的半圆，所以不存在物质传输限制的迹象。此外，为了获取电解池性能衰减来源，对 Nyquist 图谱拟合获取欧姆电阻  $R_\Omega$  和电荷转移电阻  $R_{ct}$ ，见图 8a 嵌入图。测试前 PTL-400 样品的  $R_\Omega$  为  $98 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，测试后为  $96 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，出现略微降低现象，可能是由于 CCM 在经过 1100 h 测试后因持续溶胀，各组件接触更为紧密，降低了接触电阻。从图 7a、7b、7d 可以看出，PTL-pristine、PTL-200 和 PTL-600 样品组装的电解池性能均出现不可逆衰减，其中，PTL-pristine 衰减值最高，在  $3 \text{ A/cm}^2$  电流密度下衰减了  $57 \text{ mV}$ ，PTL-200 和 PTL-600 样品分别衰减了  $31 \text{ mV}$  和  $48 \text{ mV}$ 。结合图 8 阻抗测试结果可以看出，无铂涂层的 Ti-PTL 样品在运行过程中的氧化钝化导致阻抗升高，继而产生更高的欧姆损失，同时由于催化层与 Ti-PTL 界面处电子迁移阻力更大，也会使催化剂的利用率降低。PTL-200 样品性能衰减可能是因为铂涂层脱落继而引起钛氧化钝化而导致的，但其  $R_\Omega$  没有明显变化，可能是由于接触电阻降低，弥补了因铂涂层脱落带来的阻抗变化。由于结合力较差的铂涂层在耐久性测试中不断发生界面分离现象，引起较大不可逆衰减。

现大部分脱落，因而性能大幅度衰减，而 PTL-400 样品的铂涂层未见脱落，说明其结构稳定，镀层结合力强。

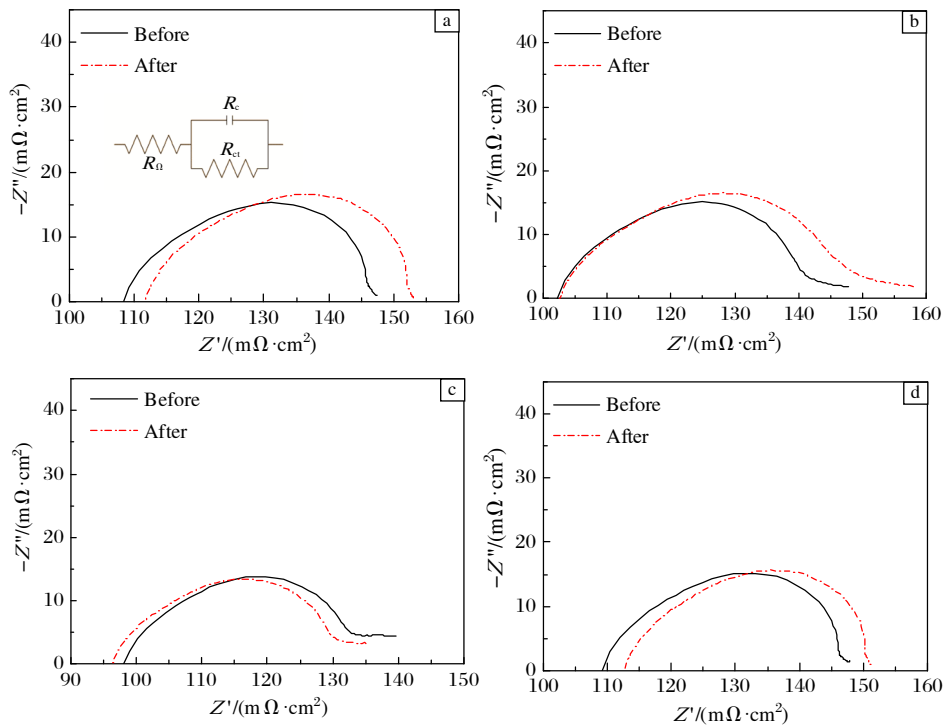


图 8 不同温度热处理样品 1100 h 耐久性测试前后的 Nyquist 图

Fig.8 Nyquist plots of samples heat treated at different temperatures before and after 1100 h durability test: (a) PTL-pristine; (b) PTL-200; (c) PTL-400; (d) PTL-600

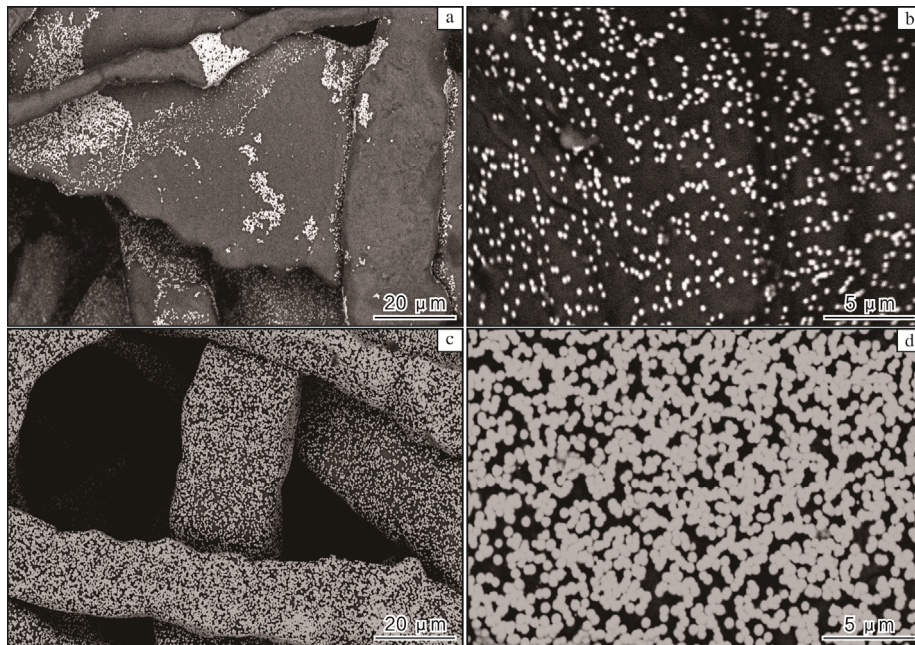


图 9 不同温度热处理样品 1100 h 耐久性测试后的 SEM 照片

Fig.9 SEM images of samples heat treated at different temperatures after 1100 h durability test: (a, b) PTL-200; (c, d) PTL-400

拆卸电解池后得到不同温度热处理样品 1100 h 耐久性测试前后的实物图, 如图 10 所示。从图 10 可以

看出, PTL-600 样品  $R_{\Omega}$  值升高是因为 Ti-PTL 结构坍塌导致内部接触异常。

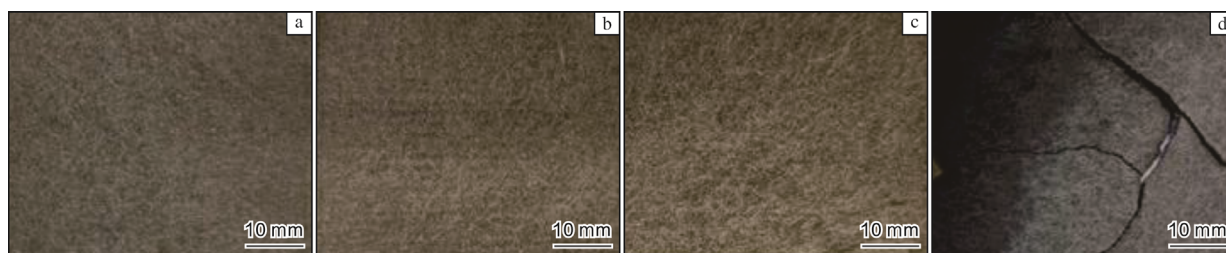


图 10 不同温度热处理样品 1100 h 耐久性测试后的实物图

Fig.10 Photographs of samples heat treated at different temperatures after 1100 h durability test: (a) PTL-pristine; (b) PTL-200; (c) PTL-400; (d) PTL-600

综上分析可知, PTL-400 样品能保持良好的结构稳定性, 从而确保电解池在高电流密度下运行的稳定性。通过热处理即可增强 Ti-PTL 在强酸性、高电位环境下的耐腐蚀能力, 提升电解池的使用寿命, 此项研究成果在大功率 PEM 电解槽的降本增效与稳定性优化方面前景可期。

### 3 结论

(1) 铂涂层 Ti-PTL 样品经 400 °C 热处理, 在电解池中运行 1100 h 后未有明显脱落且电压衰减速率仅为 3.9  $\mu\text{V/h}$ , 200、600 °C 热处理后的铂涂层 Ti-PTL 样品电压衰减速率分别为 10.7、41.6  $\mu\text{V/h}$ 。

(2) 热处理能够使铂涂层与钛纤维表面结合更牢固, 降低 Ti-PTL 与铂涂层之间的肖特基效应, 增强阳极 Ti-PTL 在强酸性、高电位环境下耐腐蚀能力, 从而提升电解池的稳定性。

#### 参考文献 References

- [1] Paul B, Andrews J. Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolyzers in solar-hydrogen systems for remote area power supply[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(2): 490-498.
- [2] Clarke R E, Giddey S, Ciacchi F T, et al. Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for generating hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(6): 2531-2542.
- [3] Lee B S, Park H Y, Choi I, et al. Polarization characteristics of a low catalyst loading PEM water electrolyzer operating at elevated temperature[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 309: 127-134.
- [4] Ayers K E, Renner J N, Danilovic N, et al. Pathways to ultra-low platinum group metal catalyst loading in proton exchange membrane electrolyzers[J]. *Catalysis Today*, 2016, 262: 121-132.
- [5] Ito H, Maeda T, Nakano A, et al. Influence of pore structural properties of current collectors on the performance of proton exchange membrane electrolyzer[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 100: 242-248.
- [6] 高建平, 王锡奎, 王星, 等. 质子交换膜电解槽钛毡扩散层表面微孔层结构对电解水特性的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2025, 54(10): 2533-2540.
- [7] Lettenmeier P, Kolb S, Burggraf F, et al. Towards developing a backing layer for proton exchange membrane electrolyzers[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 311: 153-158.
- [8] Schuler T, Schmidt T J, Büchi F N. Polymer electrolyte water electrolysis: correlating performance and porous transport layer structure: part II. electrochemical performance analysis[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2019, 166: F555.
- [9] Jung H Y, Huang S Y, Popov B N. High-durability titanium bipolar plate modified by electrochemical deposition of platinum for unitized regenerative fuel cell (URFC)[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(7): 1950-1956.
- [10] Gago A S, Ansar S A, Saruhan B, et al. Protective coatings on stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane (PEM) electrolyzers[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 307: 815-825.
- [11] 王建忠, 敖庆波, 荆鹏, 等. 多孔钛的制备方法及其力学性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(5): 1907-1918.
- [12] Sul Y T, Johansson C B, Jeong Y, et al. The electrochemical oxide growth behaviour on titanium in acid and alkaline electrolytes[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2001, 23(5): 329-346.
- [13] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(2): 146-152.
- [14] Grigoriev S A, Millet P, Korobtsev S V, et al. Hydrogen safety aspects related to high-pressure polymer electrolyte membrane water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(14): 5986-5991.

- [15] Rasten E, Hagen G, Tunold R. Electrocatalysis in water electrolysis with solid polymer electrolyte[J]. *Electrochimica Acta*, 2003, 48(25-26): 3945-3952.
- [16] Ma L R, Sui S, Zhai Y C. Investigations on high performance proton exchange membrane water electrolyzer[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(2): 678-684.
- [17] Kondoh M, Yokoyama N, Inazumi C, et al. Development of solid polymer-electrolyte water electrolyser[J]. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 2000, 3: 61.
- [18] Gao J P, Lv Y J, Li Y J, et al. Influence of N<sub>2</sub> flow rate on microstructure and corrosion resistance of TaN coatings on bipolar plates of PEM electrolyser[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2025, 54(5): 1127-1133.
- [19] Rakousky C, Reimer U, Wippermann K, et al. An analysis of degradation phenomena in polymer electrolyte membrane water electrolysis[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 326: 120-128.
- [20] Liu C, Shviro M, Gago A S, et al. Exploring the interface of skin-layered titanium fibers for electrochemical water splitting[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(8): 2002926.
- [21] 谢道原, 董猛, 郑志强, 等. 质子交换膜电解水制氢双极板涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2025, 54(11): 17-31.
- [22] Parthasarathy P, Virkar A V. Electrochemical ostwald ripening of Pt and Ag catalysts supported on carbon[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 234: 82-90.
- [23] Bouzek K, Prokop M, Domin V, et al. Performance and stability of Pt-based alloy catalysts for high-temperature PEM fuel cell application[C]//ECS Meeting Abstracts, 2024: 2115.
- [24] Kim Y M, Xu S C, Park J, et al. Improving intrinsic oxygen reduction activity and stability: atomic layer deposition preparation of platinum-titanium alloy catalysts[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2022, 300: 120741.
- [25] Salanov A N, Kochurova N M, Serkova A N, et al. Oxidation and recrystallization of platinum group metals (Pt, Pd, Rh) in oxygen. Surface and subsurface reconstruction of polycrystalline platinum during annealing in the O<sub>2</sub> atmosphere over the temperature range of 600-1400 K[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 490: 188-203.
- [26] Huo J Z, Wei M Z, Ma Y J, et al. The enhanced strength and electrical conductivity in Ag/Cu multilayers by annealing process[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 772: 138818.

## 行业动态

## 2025年1—3月日本海绵钛产销数据统计

时间	海绵钛产量/t	国内出货量/t	国外出货量/t	出货量合计/t
2025年1月	4987	1435	3373	4808
2025年2月	4495	1349	2264	3613
2025年3月	4788	838	3839	4677
合计	14 270	3622	9476	13 098

## 2025年4—6月日本钛材产销数据统计

时间	国内钛材出货量/t	国外钛材出货量/t	钛材出货量合计/t
2025年4月	377	790	1167
2025年5月	264	503	767
2025年6月	363	582	945
合计	1004	1875	2879

王运锋摘自《チタン》