

# PEM水电解用梯度多孔钛扩散层的制备及电化学性能研究

杨一涵, 张宝光, 沈 垒, 刘晓青

(西北有色金属研究院 金属多孔材料全国重点实验室, 陕西 西安 710016)

**摘 要:** 通过粉末轧制技术制备多孔钛生坯, 随后采用湿法喷涂-烧结法获得梯度多孔钛扩散层。利用扫描电子显微镜、孔径分析仪、分析天平及质子交换膜(PEM)电解槽测试系统等设备, 对梯度多孔钛扩散层的孔结构和电化学性能进行表征。结果表明: 随着烧结温度升高, 梯度多孔钛扩散层的孔隙率、最大孔径和平均孔径逐渐减小; 随着电流密度增加, PEM电解槽槽压逐渐升高; 烧结温度为1100 °C时, 梯度多孔钛扩散层具有最佳电化学性能, 当电流密度分别为0.5、1、2、3 A/cm<sup>2</sup>时, 对应的槽压分别为1.542、1.640、1.798、1.939 V。梯度多孔钛扩散层在PEM水电解中具有广阔的应用前景。

**关键词:** PEM水电解; 湿法喷涂-烧结; 梯度多孔钛扩散层; 孔结构; 电化学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)03-031-08

## Preparation and Electrochemical Performance of Gradient Porous Titanium Diffusion Layer for PEM Water Electrolysis

Yang Yihan, Zhang Baoguang, Shen Lei, Liu Xiaoqing

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, National Key Laboratory of Porous Metal Materials, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The porous titanium green compact was prepared by powder rolling technology, and then a gradient porous titanium diffusion layer was obtained by wet spraying and sintering. The pore structure and electrochemical performance of the gradient porous titanium diffusion layer were characterized and analyzed by scanning electron microscope, pore size analyzer, analytical balance, and proton exchange membrane (PEM) electrolyzer test system. The results show that the porosity, maximum pore size, and average pore size of the gradient porous titanium diffusion layer gradually decrease with the increase of sintering temperature. As the current density increases, the cell voltage of PEM electrolyzer test system gradually increases. When the sintering temperature is 1100 °C, the gradient porous titanium diffusion layer has the best electrochemical properties, with corresponding cell voltages of 1.542 V, 1.640 V, 1.798 V, and 1.939 V at current densities of 0.5 A/cm<sup>2</sup>, 1 A/cm<sup>2</sup>, 2 A/cm<sup>2</sup>, and 3 A/cm<sup>2</sup>, respectively. The gradient porous titanium diffusion layer has great application potential in PEM water electrolysis.

**Keywords:** proton exchange membrane water electrolysis; wet spraying and sintering; gradient porous titanium diffusion layers; pore structure; electrochemical performance

随着全球能源需求的不断增长, 化石燃料枯竭和碳排放等问题日益凸显。在碳中和背景下, 风能、水能、太阳能等可再生能源逐渐得到广泛应用。然而, 受地理和时间因素的限制, 其利用率仍显不足<sup>[1-3]</sup>。可再生能源的主要载体是电能和氢能, 相比于电能, 氢能作为一种大规模储能介质, 具有高能量密度和高效

性等优势, 有望在未来能源领域中发挥重要作用<sup>[4-6]</sup>。

近年来, 电解水制氢被视为一种极具应用前景的绿氢制备策略<sup>[7]</sup>。根据电解质种类的不同, 现有的电解水技术主要划分为四大类, 分别为碱性(Alkaline, ALK)电解水、阴离子交换膜(Anion exchange membrane, AEM)电解水、固体氧化物(Solid oxide, SO)电解水和质子交换膜(Proton exchange membrane, PEM)电解水<sup>[8]</sup>。与其他制氢技术相比, PEM水电解技术具有转化效率高、响应速度快、产物纯度高及兼容性强等优

收稿日期: 2026-01-12

基金项目: 陕西省财政厅功能材料专项资助项目(0601YC2304)

通信作者: 张宝光(1990—), 男, 高级工程师。

势,已成为当前的主要研究方向<sup>[9-11]</sup>。

PEM 电解池主要由膜电极、双极板和集电器等组成<sup>[12]</sup>。其中,气体扩散层(Gas diffusion layer, GDL)作为膜电极的关键部件之一,在供应反应物、排出产物、传导电子和提供机械支撑方面起着关键作用<sup>[13-15]</sup>。多孔钛扩散层具有成本低、重量轻、耐腐蚀性强等特点,是 PEM 水电解气体扩散层的理想材料<sup>[16-17]</sup>。然而,多孔钛扩散层最初均作为过滤元件,应用于过滤分离等领域,其孔结构单一,无法有效引导水向催化剂层扩散,导致电池性能下降<sup>[18-20]</sup>。具体来说,气体扩散层的孔隙率、孔径等孔结构参数,影响着 PEM 电解池的气液传输效率<sup>[21]</sup>。孔径较大时( $>20\ \mu\text{m}$ ),靠近催化剂层的孔隙会使水以较快速度接近反应位点,导致催化剂活性位点被水分子占据,阻碍反应物分子与活性位点接触,产生“中毒反应”,从而抑制催化剂的活性<sup>[22-23]</sup>。孔径较小时( $<5\ \mu\text{m}$ ),远离催化剂层的孔隙不利于水的快速补充,导致该区域的反应活性降低,大量反应物分子聚集在催化剂表面,影响反应的动态平衡,从而降低传输效率<sup>[24-25]</sup>。因此,优化 GDL 结构对于提高 PEM 电解池的性能和效率至关重要,不仅可

以突破现有孔结构的性能瓶颈,而且对于研究综合性能优异的多孔钛扩散层具有重要意义。

本研究以钛粉末为原料,采用粉末轧制技术与湿法喷涂-烧结工艺制备了梯度多孔钛扩散层。该扩散层靠近阳极催化剂层的微孔层表面具有小孔径,旨在最大限度提高催化剂利用率;而远离阳极催化剂层的基材层表面则具有大孔径,以便快速补充水分,从而提升反应效率。此外,详细研究了烧结温度对梯度多孔钛扩散层孔结构及其电化学性能的影响,并将其与已报道的多孔钛扩散层进行了比较,旨在为梯度多孔钛扩散层的开发提供理论依据和工艺参考,并推动其在 PEM 水电解中的应用。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验材料为两种不同粒度的氢化脱氢不规则钛粉。其中,1<sup>#</sup>钛粉粒径为  $75\sim<96\ \mu\text{m}$ (-160~+200 目),氧含量 $\leq 0.21\%$ ,纯度为 99.5%;2<sup>#</sup>钛粉粒径 $<25\ \mu\text{m}$ (-500 目),氧含量 $\leq 0.20\%$ ,纯度为 99.5%。图 1 为两种粒度钛粉末的形貌。

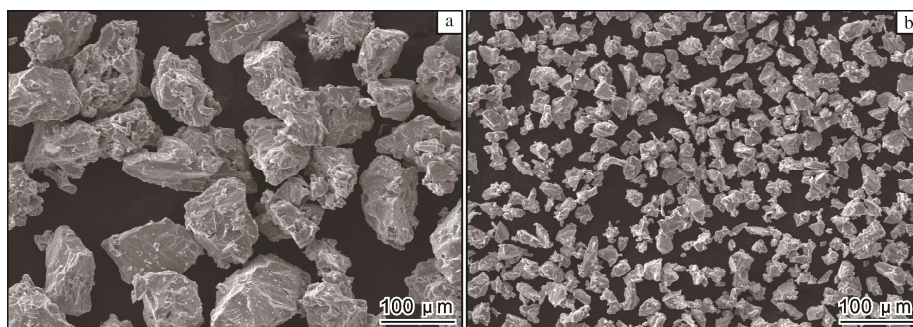


图 1 钛粉末的形貌

Fig.1 Morphologies of titanium powders: (a) 1<sup>#</sup> powder; (b) 2<sup>#</sup> powder

### 1.2 梯度多孔钛扩散层制备

采用粉末轧制技术制备多孔钛生坯:选用工作辊直径为 50 mm 的四辊卧式粉末轧机,将 1<sup>#</sup>钛粉末轧制成厚度为 0.2 mm 的多孔钛生坯。

采用湿法喷涂-烧结技术制备梯度多孔钛扩散层:

① 将聚乙烯醇缩丁醛(PVB)溶解于 200 mL 无水乙醇中,得到质量分数为 6%的均匀溶液;② 称取 200 g 2<sup>#</sup>钛粉末,加入上述溶液中,充分分散并搅拌均匀,得到质量分数为 50%的钛粉浆料;③ 采用湿法喷涂技术在多孔钛生坯表面喷涂钛粉浆料;④ 将喷涂后的生坯放入真空烧结炉中,以  $2\ \text{°C}/\text{min}$  的升温速率加热至  $350\ \text{°C}$  并保温 4 h 进行脱脂处理;⑤ 接着以  $5\ \text{°C}/\text{min}$  升温速率加热至指定温度进行样品烧结,真空度

$<1\times 10^{-3}\ \text{Pa}$ ,保温 60 min;⑥ 以  $10\ \text{°C}/\text{min}$  冷却速率降温至  $700\ \text{°C}$ ,再炉冷至室温,最终获得烧结样品。烧结温度分别设置为 900、1000、1100  $\text{°C}$ ,对应烧结样品名称为 Ti91、Ti101、Ti111。图 2 为不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的宏观形貌。图 3 为钛粉末烧结过程中的温度-时间曲线。

### 1.3 性能表征

#### 1.3.1 孔结构

采用 JEOL JSM-IT510 型扫描电子显微镜(SEM)观察梯度多孔钛扩散层的组织形貌。基于阿基米德排水法原理,使用 XS205 分析天平测定烧结样品的相对密度并计算孔隙率。采用 Topas PSM165 型孔径分析仪测定烧结样品的最大孔径和平均孔径。



图2 不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的宏观形貌

Fig.2 Macro-morphologies of gradient porous titanium diffusion layers sintered at different temperatures: (a) 900 °C; (b) 1000 °C; (c) 1100 °C

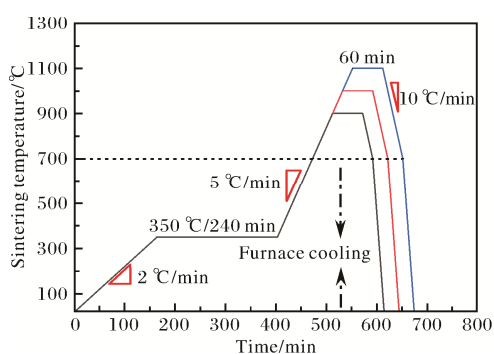


图3 钛粉末烧结过程的温度-时间曲线

Fig.3 Temperature-time curves of titanium powder sintering process

### 1.3.2 电化学性能

阳极催化剂油墨制备过程:将  $\text{IrO}_2$  催化剂、5% (质量分数,下同) Nafion D520 离聚物、去离子水和异丙醇按质量比 1 : 5 : 15 : 15 混合,形成均质墨水。阴极催化剂油墨制备过程:将 60% (质量分数,下同) Pt/C 催化剂、5% Nafion D520 离聚物、去离子水和异丁醇按质量比 1 : 5 : 20 : 60 混合,形成均质墨水。使用喷枪将催化剂油墨喷涂至聚四氟乙烯(PTFE)片材上,形成催化剂层。随后,利用热转移印花技术将 PTFE 片材上的催化剂层转移到 Nafion 117 质子交换膜的两侧,制成催化剂涂层膜(CCM)。具体实验参数如下:热压温度为 120 °C,压力为 20 MPa,热压时间为 15 min。阳极  $\text{IrO}_2$  催化剂负载量为  $1 \text{ mg/cm}^2$ ,阴极 Pt/C 催化剂负载量为  $0.4 \text{ mg/cm}^2$ 。

在阳极侧,使用实验制备的梯度多孔钛扩散层作为气体扩散层。在阴极侧,使用碳纸作为气体扩散层,其厚度为 0.4 mm,电阻率为  $2.8 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ ,表面粗糙度为  $6 \mu\text{m}$ ,密度为  $0.46 \text{ g/cm}^3$ 。利用聚四氟乙烯垫片密封 PEM 电解槽,并且严格筛选垫片厚度,以确保在梯度多孔钛扩散层中实现 20%的压缩率。PEM 电解槽的

有效面积为  $5 \text{ cm}^2$ ,组装时紧固扭矩为  $4 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。测试过程中水温为 80 °C,阳极侧持续以  $30 \text{ mL/min}$  的流速供给去离子水。

使用 PEM 电解槽测试系统(YK-DJP-5L)进行电化学测试,测试过程中的扫描速率为  $100 \text{ mA/s}$ 。通过记录电流和电压的数据,获得电流-电压极化曲线。通过电化学阻抗谱(EIS)测定梯度多孔钛扩散层的阻抗谱,频率范围为 0.1~10000 Hz,振幅为 10 mV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织及孔结构

图 4 为不同温度烧结梯度多孔钛扩散层表面和横截面的 SEM 照片。从图 4 可知,不同烧结温度下,梯度多孔钛扩散层的微孔层厚度约为  $140 \mu\text{m}$ ,同时,其与基材层结合紧密、结构连续(图 4a<sub>3</sub>~4c<sub>3</sub>中方框区域),无明显孔隙或缺陷,可减少电解液的渗透和腐蚀介质的侵入,提升材料的电化学性能。钛粉末在 900 °C 烧结后,粉末体系处于能量较低状态,粉体结合力较弱,原子移动距离较短,烧结体基本不发生收缩<sup>[26]</sup>,因此仍存在大量开孔孔隙(图 4a<sub>2</sub>中黄色箭头所示)。在 1000 °C 烧结温度下,原子扩散速率加快,颗粒之间距离逐渐减小。这是由于表面扩散形成了粉末颗粒间的烧结键,导致其表面积被消耗,使颗粒之间能够紧密结合。同时,由于表面扩散作用,原子会在粉末颗粒之间的接触面上扩散,从而形成烧结颈。随着表面积的减小,表面扩散作用逐渐减弱<sup>[27]</sup>。当烧结温度升至 1100 °C 时,原子扩散作用进一步增强,分子热运动更加剧烈,分子获得了更多的能量,从而更有效地克服分子间相互作用力进行扩散,使得在较高温度下,原子扩散速率明显加快<sup>[28]</sup>。此外,初期形成的烧结颈继续增长,导致粉末颗粒之间原本相互连通的孔隙逐渐缩小并球化,最终形成闭合孔隙(图 4c<sub>2</sub>中蓝色箭头所示)。

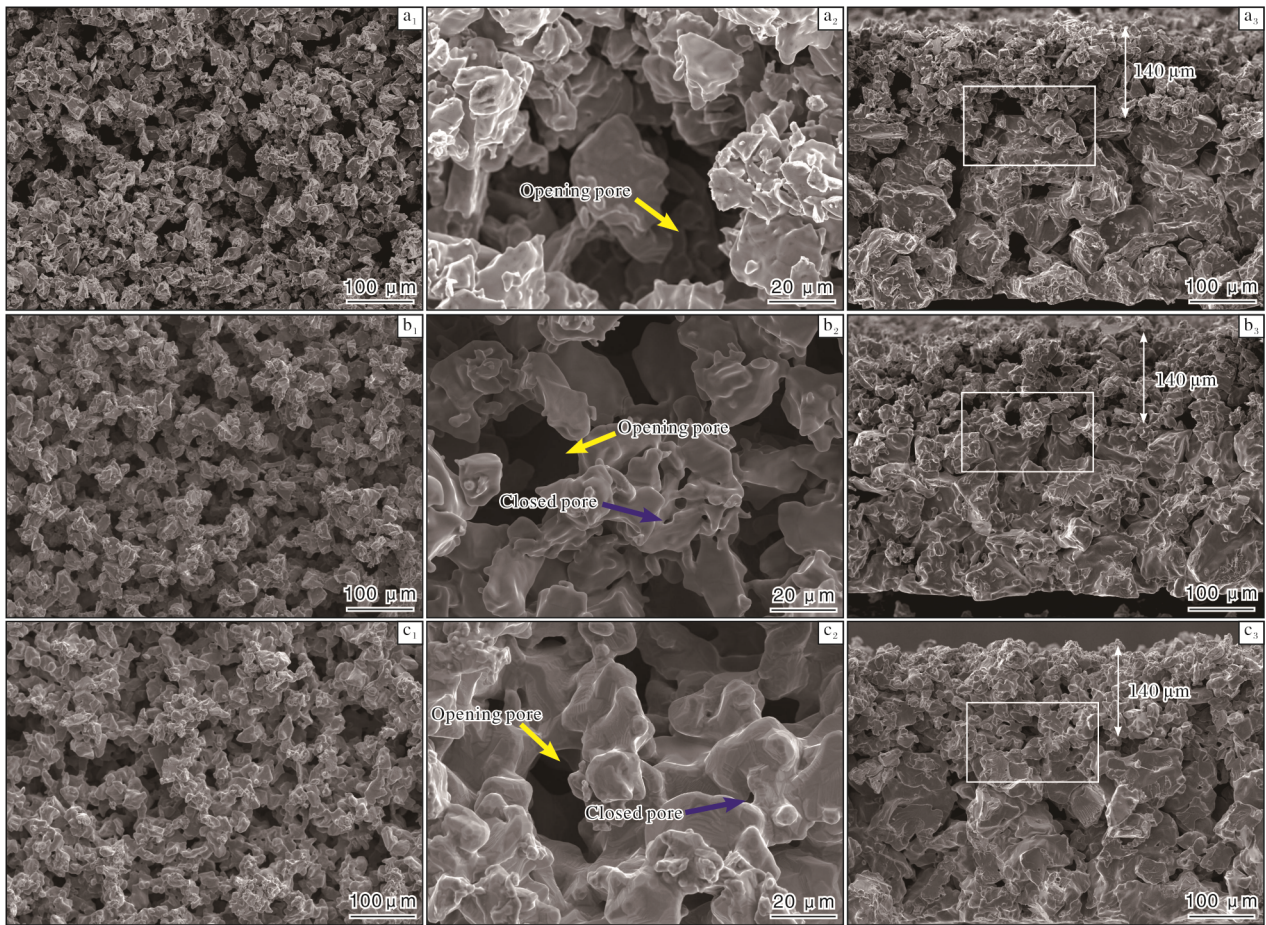


图 4 不同温度烧结梯度多孔钛扩散层表面和横截面的 SEM 照片

Fig.4 SEM images of surface (a<sub>1</sub>-c<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>-c<sub>2</sub>) and cross-section (a<sub>3</sub>-c<sub>3</sub>) of gradient porous titanium diffusion layers sintered at different temperatures: (a) 900 °C; (b) 1000 °C; (c) 1100 °C

图 5 为不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的孔隙率。从图 5 可以看出，随着烧结温度的升高，烧结样品孔隙率呈现逐渐减小的趋势。分析认为，烧结温度为 900 °C 时，粉末体系处于能量较低的状态，样品中粉体结合力较弱，原子移动距离较短，整个烧结体基

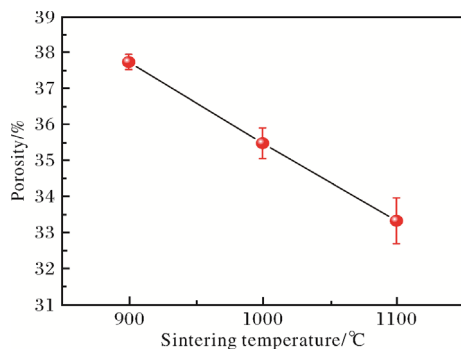


图 5 不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的孔隙率

Fig.5 Porosity of gradient porous titanium diffusion layers sintered at different temperatures

本不发生收缩；由于低温下粉末颗粒间的扩散和粘结较为困难，故孔隙率较高。烧结温度升高至 1000 °C 时，粉末颗粒的塑性增强，孔隙开始通过扩散和流动重新分布，从而导致原有孔隙数量减小<sup>[29-30]</sup>。随着烧结温度进一步升高至 1100 °C，原子向粘结面大量迁移使得烧结颈扩大，粉体颗粒间距离缩小并结合得越来越紧密，孔隙大量消失。此外，随着烧结温度的升高，烧结过程逐渐转变为体积收缩起主导作用，孔隙率也随之减小<sup>[31]</sup>。

图 6 为不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的最大孔径和平均孔径。从图 6 可以看出，随着烧结温度的升高，其最大孔径和平均孔径总体上呈现减小的趋势。其主要原因是在高温下，原子振动幅度加大，金属原子运动加剧，碰撞频率增加且能量较高，从而加快了原子扩散速率。这使得颗粒间的原子更容易移动，促进了颗粒间的粘结和孔隙的减少。孔隙周围的原子可能更容易移动到其他位置，使孔隙变得更加不稳定，容易发生形变或合并，进而导致孔径减小<sup>[32-33]</sup>。但同时

也发现, 烧结温度从 900 °C 升高至 1000 °C 时, 其平均孔径没有发生明显变化, 这可能是因为长时间烧结导致孔隙闭合, 但高温下孔隙迁移能力增强, 一定程度上抑制了孔径减小<sup>[34-35]</sup>。

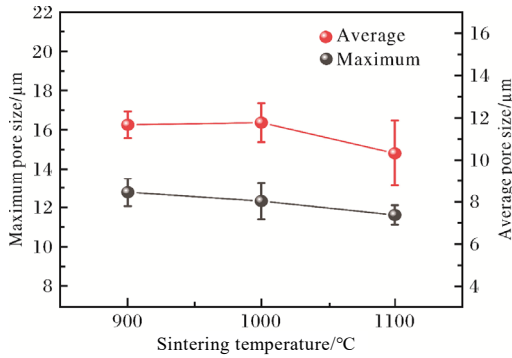


图6 不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的最大孔径和平均孔径

Fig.6 Maximum and average pore size of gradient porous titanium diffusion layers sintered at different temperatures

## 2.2 电化学性能

为了研究梯度多孔钛扩散层的电化学性能, 在 PEM 电解槽装置中进行极化曲线和电化学阻抗测试。图 7 为梯度多孔钛扩散层的极化曲线。从图 7 可以看出, 随着烧结温度的升高, 梯度多孔钛扩散层的槽压逐步下降, 且电流密度越大, 下降作用越明显。此外, 所有膜电极的极化曲线均显示出槽压随电流增加而增大的趋势。

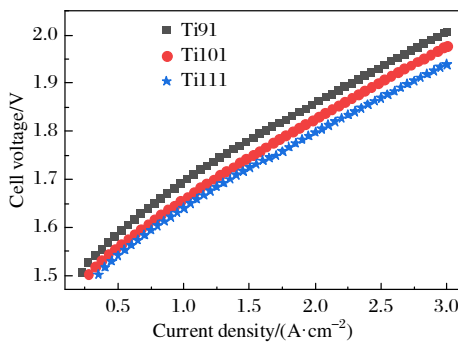


图7 梯度多孔钛扩散层的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of gradient porous titanium diffusion layers

图 8 为不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的槽压。从图 8 可以看出, 在相同电流密度下, 随着烧结温度的升高, 烧结样品的槽压呈降低趋势。烧结温度为 1100 °C 时, Ti111 烧结样品的电化学性能优异, 当电流密度为 0.5、1、2、3 A/cm<sup>2</sup> 时, 其槽压均最低, 分

别为 1.542、1.640、1.798、1.939 V。实际测试过程中, 靠近催化剂层一侧孔径越小, 催化剂活性位点越多, 有利于提高催化剂利用率, 从而进一步提升电化学性能<sup>[36]</sup>; 就孔隙率而言, 较低的孔隙率可以降低欧姆电阻, 从而提高电流密度<sup>[37]</sup>。此外, 低孔隙率和小孔径还可以增强催化剂层和多孔传输层的界面接触, 提升气液传输效率<sup>[38]</sup>。

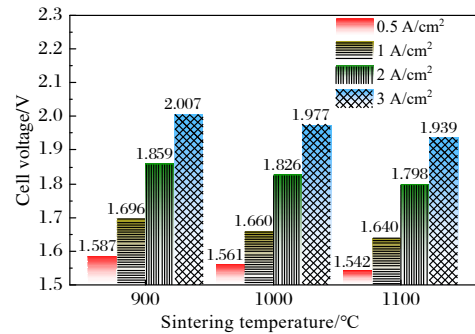


图8 不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的槽压

Fig.8 Cell voltage of gradient porous titanium diffusion layers sintered at different temperatures

图 9 为不同温度烧结梯度多孔钛扩散层的奈奎斯特图和伯德图。分析图 9a 可以发现, 极化电阻随着烧结温度的升高而降低, 当烧结温度为 1100 °C 时, 烧结样品的阻抗最低, 这主要归因于较低的孔隙率、较小的孔径以及催化剂层和气体扩散层(CL/GDL)之间界面接触性能的改善<sup>[39]</sup>。

在分析 PEM 水电解系统的频率响应时, 伯德图通常包括幅频特性曲线和相频特性曲线(图 9b、9c)。幅频特性曲线的幅值反映了系统在不同频率下的幅度响应。具体来说, 如果幅频特性曲线在高频段幅值较小, 意味着系统对高频信号的增益较小, 通常表明系统具有较好的抗干扰能力; 如果幅频特性曲线在低频段幅值较大, 则意味着系统稳态精度变差。相频特性曲线的相位角反映了系统在不同频率下的相位响应。具体而言, 相位裕量越大, 系统越稳定; 截止频率越高, 系统的响应速度越快<sup>[40]</sup>。总之, 通过 PEM 水电解系统测试数据绘制的伯德图综合反映了系统的响应速度、稳定性和抗干扰能力等重要特性。通过分析这些特性, 可以优化系统的设计与性能<sup>[41]</sup>。

为了对比梯度多孔钛扩散层与其他钛基扩散层的电化学性能, 详细绘制了不同电流密度下 PEM 电解槽的槽压, 如图 10 所示。从图 10 可以发现, 本工作制备的梯度多孔钛扩散层在不同电流密度下均表现出优异的电化学性能。例如, Ti111 样品在电流密度为 2 A/cm<sup>2</sup> 时, 槽压仅为 1.798 V, 这与通过流延成型制备的三层

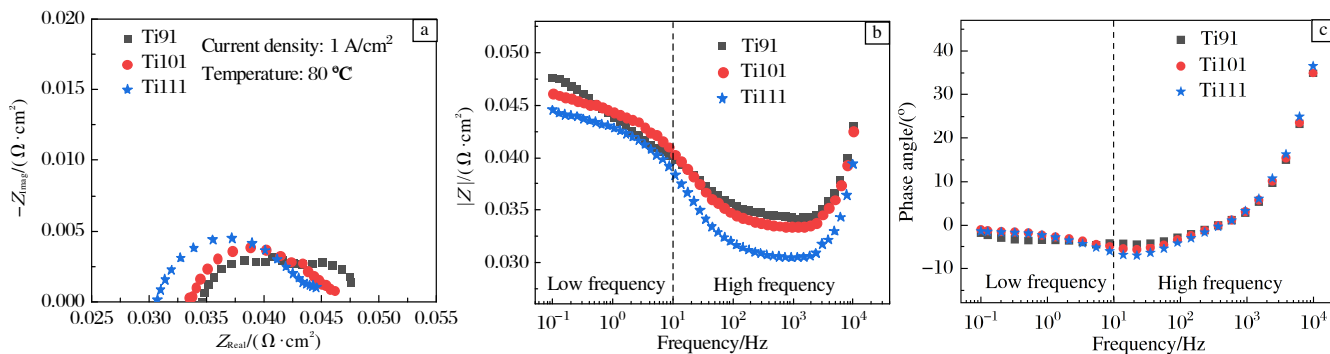


图9 梯度多孔钛扩散层的奈奎斯特图和伯德图

Fig.9 Electrochemical performance of gradient porous titanium diffusion layers: (a) Nyquist plots; (b, c) Bode plots

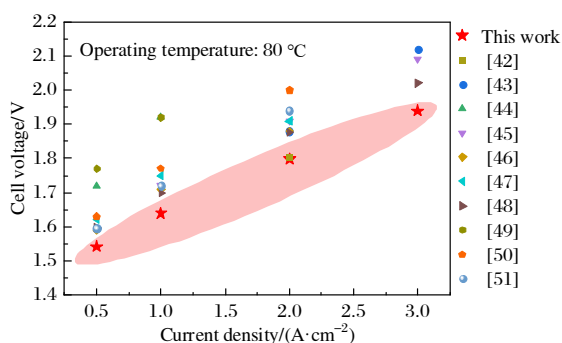
图10 梯度多孔钛扩散层与其他钛基扩散层的槽压对比<sup>[42-51]</sup>

Fig.10 Comparison of cell voltage between the gradient porous titanium diffusion layer and other titanium-based diffusion layers

多孔钛传输层的槽压基本相当<sup>[42]</sup>；电流密度为  $3 \text{ A/cm}^2$  时，Ti111 样品的槽压为  $1.939 \text{ V}$ ，其电化学性能明显优于厚度为  $200 \mu\text{m}$  的单层多孔钛扩散层<sup>[43]</sup>。此外，电流密度为  $0.5 \text{ A/cm}^2$  时，Ti111 样品的槽压较相同厚度的多孔钛扩散层降低了  $10\%$ <sup>[44]</sup>。这表明通过粉末轧制技术与湿法喷涂-烧结技术制备的梯度多孔钛扩散层在气液传输方面具有显著的结构与性能优势，为其在 PEM 水电解领域的进一步应用提供了重要的理论依据和现实意义<sup>[45]</sup>。

### 3 结论

(1) 随着烧结温度的升高，梯度多孔钛扩散层的孔隙率和最大孔径总体呈降低趋势。当烧结温度从  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  升高至  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  时，平均孔径变化不明显，这可能是因为高温下孔隙迁移能力增强，在一定程度上抑制了孔径减小；当烧结温度提升至  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ，平均孔径明显减小。

(2) PEM 水电解槽的槽压随烧结温度的升高而降低，随电流密度的增大而升高。当电流密度为  $1 \text{ A/cm}^2$

时，烧结温度与电化学阻抗呈现相反的变化趋势，即烧结温度越高，电化学阻抗越低。这主要归因于较低的孔隙率、较小的孔径以及催化剂层与气体扩散层 (CL/GDL) 之间界面接触性能的改善。

(3) 烧结温度为  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  时，Ti111 烧结样品的电化学性能优异。当电流密度为  $0.5$ 、 $1$ 、 $2$ 、 $3 \text{ A/cm}^2$  时，对应的槽压分别为  $1.542$ 、 $1.640$ 、 $1.798$ 、 $1.939 \text{ V}$ 。

### 参考文献 References

- [1] Kang J H, Fang Y P, Yang J, et al. Recent development of Ir- and Ru-based electrocatalysts for acidic oxygen evolution reaction[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(14): 20519-20559.
- [2] Arun M, Giddey S, Joseph P, et al. Challenges and mitigation strategies for general failure and degradation in polymer electrolyte membrane-based fuel cells and electrolyzers[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(16): 11236-11263.
- [3] Liu Y, Chen M D, Mo J K, et al. Visual experimental research of two-phase flow in long straight anode channels with different widths in a polymer electrolyte membrane water electrolysis cell[J]. Journal of Power Sources, 2025, 646: 237258.
- [4] Bernt M, Schramm C, Schroeter J, et al. Effect of the  $\text{IrO}_x$  conductivity on the anode electrode/porous transport layer interfacial resistance in PEM water electrolyzers[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(8): 084513.
- [5] Rodríguez-Martínez Y, Domínguez-Meister S, Minudri D, et al. Protective Ti sub-oxide coatings on proton exchange water electrolysis prepared by HiPIMS technology[J]. Surface & Coatings Technology, 2025, 508: 132155.
- [6] Xu Y, Ye D D, Yang C, et al. Role of patterned wettability of anode porous transport layer in enhancing two-phase transport for proton exchange membrane electrolyzers[J]. ACS Applied

- Materials & Interfaces, 2025, 17(23): 34073-34085.
- [7] Wang Y H, Shen K N, Zhou Y, et al. Stable RuZnO<sub>x</sub> catalyst for enhanced oxygen evolution reaction in proton exchange membrane water electrolysis[J]. ACS Applied Energy Materials, 2025, 8(8): 5468-5473.
- [8] Huang J H, Zheng Y L, Wu H, et al. Hydrophilic polyphenylene sulfide/cellulose/polyphenylene sulfide composite membrane with high bubble point pressure and high oxygen purity for alkaline water electrolysis[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7(7): 4322-4328.
- [9] Fang Y S, Wu X B, Liao Y X, et al. Customized structural reconstruction for an IrO<sub>x</sub> catalyst using Ni-Co dual coordination towards enhanced water electrolysis in PEM electrolyzers[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(18): 13482-13494.
- [10] Yan B F, Liu W, Sun Y C, et al. Novel stable Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SnO<sub>2</sub> heterojunction electrocatalysts with low oxygen evolution potential[J]. Materials, 2025, 18(8): 1869.
- [11] Yang Y, Chen D F, Hu S, et al. Advanced Ir-based alloy electrocatalysts for proton exchange membrane water electrolyzers[J]. Small, 2025, 21(8): 2410372.
- [12] Barbir F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources[J]. Solar Energy, 2005, 78(5): 661-669.
- [13] Yang Y, Ou Y T, Tao D C, et al. Improving mass transfer with surface patterning of the porous transport layer for PEM water electrolysis[J]. Cell Reports Physical Science, 2025, 6(2): 102433.
- [14] Razmjooei F, Morawietz T, Taghizadeh E, et al. Increasing the performance of an anion-exchange membrane electrolyzer operating in pure water with a nickel-based microporous layer[J]. Joule, 2021, 5(7): 1776-1799.
- [15] Lagadec M F, Grimaud A. Water electrolyzers with closed and open electrochemical systems[J]. Nature Materials, 2020, 19(11): 1140-1150.
- [16] Park S H, Koo J, Park Y-J, et al. Uniformly scalable and stackable porous transport layer manufactured by tape casting and calendaring for efficient water electrolysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148276.
- [17] 肖健, 邱贵宝. 泡沫或多孔钛的制备进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(6): 1734-1748.
- [18] Ernst M F, Meier V, Kornherr M, et al. Preparation and performance evaluation of microporous transport layers for proton exchange membrane (PEM) water electrolyzer anodes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2024, 171(7): 074511.
- [19] Zhu L J, Tugirumubano A, Bazylak A. Revealing localized compression induced degradation mechanisms in polymer electrolyte membrane water electrolyzers[J]. Energy Conversion and Management, 2025, 340: 119947.
- [20] 王建忠, 敖庆波, 荆鹏, 等. 多孔钛的制备及应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(5): 1907-1918.
- [21] 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(10): F555-F565.
- [22] Hwang C M, Ishida M, Ito H, et al. Influence of properties of gas diffusion layers on the performance of polymer electrolyte-based unitized reversible fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(2): 1740-1753.
- [23] Wang S, Wang Z H, Wang Z J, et al. Facile and green sculptured engineering of 3D hierarchical porous metals via gaseous oxidation-reduction and their use in efficient oxygen evolution reactions[J]. Nano Energy, 2024, 120: 109161.
- [24] Pham C V, Escalera-Lopez D, Mayrhofer K, et al. Essentials of high performance water electrolyzers-from catalyst layer materials to electrode engineering[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(44): 2101998.
- [25] Yuan S, Zhao C F, Cai X Y, et al. Bubble evolution and transport in PEM water electrolysis: mechanism, impact, and management[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2023, 96: 101075.
- [26] 康新婷, 谈萍, 李纲, 等. Ni16Cr9Al 多孔材料的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(S2): 589-592.
- [27] German R M. Titanium sintering science: a review of atomic events during densification[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2020, 89: 105214.
- [28] 赵博, 张晓敏, 赵志鹏, 等. 电流辅助烧结 Cu 原子扩散激活能影响机理第一性原理计算与实验研究[J]. 粉末冶金技术, 2024, 42(6): 563-572.
- [29] 张美丽, 代卫丽, 刘彦峰, 等. 烧结温度对多孔 Ti-15Al 合金微观结构与性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(4): 55-61.
- [30] 康新婷, 迟煜頔, 刘海彦, 等. 烧结温度对 Ni16Cr9Al 多孔材料性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(11): 2380-2383.
- [31] 朱成武. 多孔 NiTi 合金的制备及性能表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.

- [32] Wang H, Jing P, Li G Z. Effect of sintering temperature on properties of porous Inconel 625 alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(10): 3693-3697.
- [33] 洪春福, 贾正发, 赵凯乐, 等. 烧结温度对 SPS 制备  $ZrW_2O_8/Al$  复合材料组织与性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2025, 54(12): 3156-3163.
- [34] Jiang W T, Zhao H Z, Yu J, et al. Effects of sintering temperature on the properties and the pore evolution of microporous  $MgAl_2O_4$  aggregates[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(9): 14302-14309.
- [35] 康新婷, 李亚宁, 李广忠, 等. 烧结温度对多孔钽性能影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(4): 1092-1096.
- [36] Schuler T, Weber C C, Wrubel J A, et al. Ultrathin microporous transport layers: implications for low catalyst loadings, thin membranes, and high current density operation for proton exchange membrane electrolysis[J]. *Advanced Energy Materials*, 2024, 14(7): 2302786.
- [37] Grigoriev S A, Millet P, Volobuev S A, et al. Optimization of porous current collectors for PEM water electrolyzers[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(11): 4968-4973.
- [38] Lee J K, Lee C, Bazylak A. Pore network modelling to enhance liquid water transport through porous transport layers for polymer electrolyte membrane electrolyzers[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 437: 226910.
- [39] Li J M, Xu Y F, Kuang Y H, et al. Porous transport layers for proton exchange membrane water electrolyzers[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1041: 183754.
- [40] Yu T X, Li J, Qin Q D, et al. High-valent metal oxide-induced exceptional HTHP corrosion resistance in  $TiVNbTa$  refractory high-entropy alloy[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 48: 113678.
- [41] Xu G Z, Du X Z, Song J, et al. Effect of temperature and hydrogen on corrosion resistance of TA1 bipolar plate in PEM water electrolysis environment[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 42: 111256.
- [42] Park S H, Park Y J, Jang S, et al. Triple-layer porous transport layers with ultra-high porosity for enhanced oxygen transport and catalyst utilization in water electrolysis[J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(1): 316.
- [43] Zhang B G, Shen L, Duan X Y, et al. Large-scale ultra-thin titanium porous transport layers fabricated by powder rolling for polymer electrolyte membrane water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 116: 64-72.
- [44] Wang Q, Zhou Z, Ye K Q, et al. The effect of pretreatment and surface modification of porous transport layer (PTL) on the performance of proton exchange membrane water electrolyzer[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 53: 163-172.
- [45] Lee J K, Lau G Y, Sabharwal M, et al. Titanium porous-transport layers for PEM water electrolysis prepared by tape casting[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 559: 232606.
- [46] Mo J K, Kang Z Y, Yang G Q, et al. Thin liquid/gas diffusion layers for high-efficiency hydrogen production from water splitting[J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 817-822.
- [47] Wang W T, Yu S L, Li K, et al. Insights into the rapid two-phase transport dynamics in different structured porous transport layers of water electrolyzers through high-speed visualization[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 516: 230641.
- [48] Deng T, Huang H H, Fan L, et al. Porous transport layers with  $TiC$ -coated microporous layers for proton exchange membrane water electrolysis[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(48): 17075-17085.
- [49] Lettenmeier P, Kolb S, Sata N, et al. Comprehensive investigation of novel pore-graded gas diffusion layers for high-performance and cost-effective proton exchange membrane electrolyzers[J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(12): 2521-2533.
- [50] Bautkinova T, Utsch N, Bystron T, et al. Introducing titanium hydride on porous transport layer for more energy efficient water electrolysis with proton exchange membrane[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 565: 232913.
- [51] Liu C, Carmo M, Bender G, et al. Performance enhancement of PEM electrolyzers through iridium-coated titanium porous transport layers[J]. *Electrochemistry Communications*, 2018, 97: 96-99.