

# 第19章 PEM 电解水实验

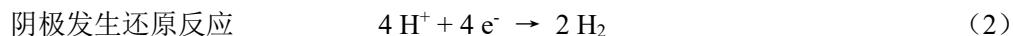
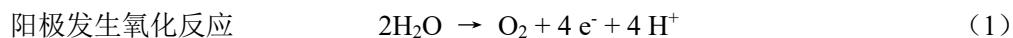
## 一、实验目的

1. 了解 PEM 电解池的基本结构与工作原理
2. 掌握 PEM 电解池的装配与电化学性能测试分析方法

## 二、实验原理

### 1. PEM 电解池工作原理与结构介绍

随着碳中和政策的推进实施，可再生能源成为代替化石燃料的重要选项。电解池作为一种将电能转化为化学能的装置，在氢能领域中起着至关重要的作用。其中质子交换膜（PEM）电解水作为一种适应波动性电源以及大电流密度的绿氢生产技术，得到了国家的大力支持，具有广泛的应用前景。PEM 电解池的工作原理及结构如图 1 所示，电解池工作时将水通入电解池的阳极，水被电解生成氢气氧气。在电解池的阴阳极反应如式（1）和（2）所示：



电解池的基本组件主要包括：(1) 分别在阴阳极用于水和气体传输的流场板 (Flow field); (2) 分别在阴阳极用于水和气体扩散的多孔传输层 (Porous transport layer); (3) 分别在阴阳极用于氢气和氧气产生的催化剂层 (Catalyst layer) 以及 (4) 允许氢离子从阳极传输到阴极，同时阻止电子透过的质子交换膜 (PEM)，其中电子通过外电路到达阴极。

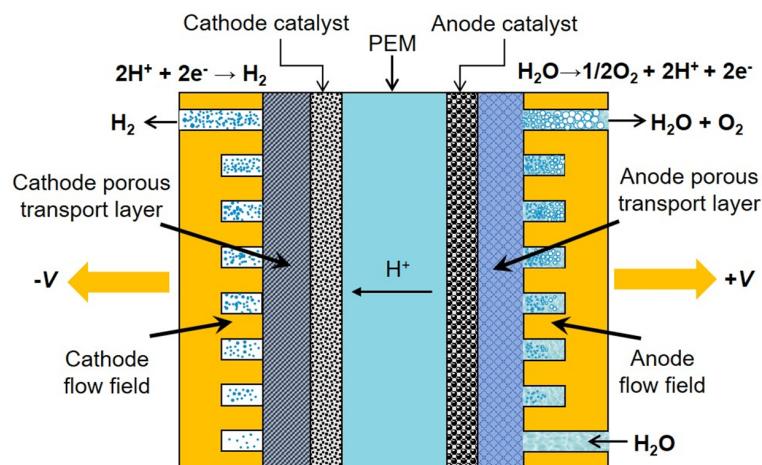


图 1 PEM 电解池的基本结构与工作原理

## 2. PEM 电解池的电化学性能分析方法

电解水反应涉及到质子、电子、水及气体的传输，这些过程均会产生阻抗，导致电解池的性能下降。电解池的各个阻抗及标准的性能曲线如图 2 所示，通过对电解池过程的分解，可以将性能大概分为三个区域。第一个是活化主导区，这主要与催化剂的活性相关。电解池中常用 Pt 基催化剂和 Ir 基催化剂作为析氢反应和析氧反应的场所，他们分别会带来阴极的活化阻抗 ( $R_{act,c}$ ) 和阳极的活化阻抗 ( $R_{act,a}$ )，值得注意的是，由于析氢反应的活化阻抗远小于析氧反应的活化阻抗，因此我们常常忽略阴极的活化损失而只考虑阳极的活化阻抗。第二个是欧姆阻抗主导区 ( $R_{ohm}$ )，这部分包括有两种阻抗组成，一是氢离子通过质子交换膜从阳极传输到阴极导致的阻抗，二是由于电子在催化层本体，多孔传输层本体以及催化剂层与多孔传输层界面处的传输导致的阻抗。第三个是传质阻抗主导区 ( $R_{mt}$ )，这主要与水和气体在催化剂层，多孔传输层以及流道中的传输阻力相关。通过对电解池的损失分离，可以进一步揭示影响电解池的主要因素。

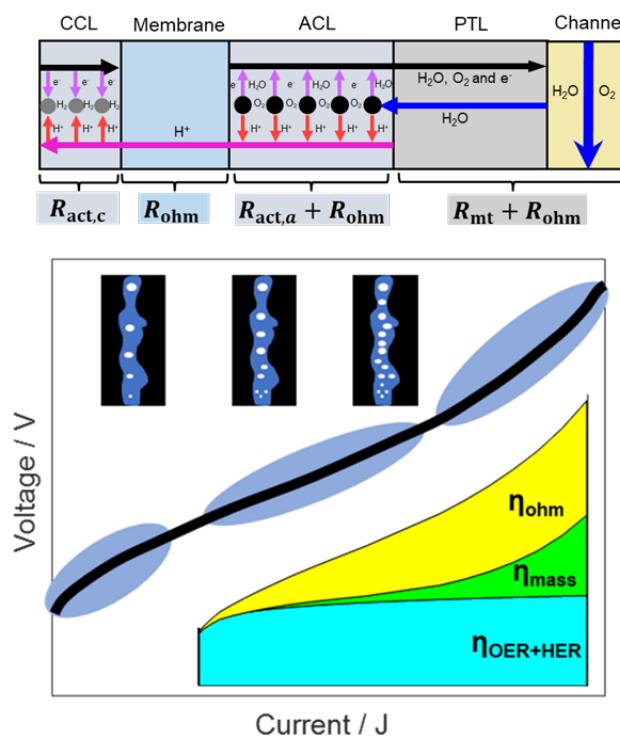


图 1 PEM 电解池的损失分离

### 三、测试仪器及电解池组件

#### 1. 测试仪器

如图 3 所示，电解水实验主要在四通道 PEM 电解水测试系统上完成（鹭岛氢能科技有限公司），该系统可以同时满足四个电解池同时工作。



图 3 四通道 PEM 电解水测试系统

#### 2. 电解池组件

膜电极（包含 Nafion 115 膜，阳极催化剂层和阴极催化剂层），钛毡，钛网，碳纸，流场板，端板，密封垫片，电动扳手，扭矩扳手以及尖嘴镊子。

### 四、实验步骤

#### 1、材料准备

- (1) 清洗垫片，除去表面粘上的之前装配时留下的催化剂，可用酒精擦拭干净。
- (2) 用砂纸打磨双极板上的流道，尤其是流道内部缝隙内，必要时用酸浸泡超声。
- (3) 钛毡和钛网使用前最好用酸浸泡半小时除去表面杂质。
- (4) 检查多通道测试台基本状况，确保补水罐水量充足，通道上水进出口处垫圈不掉落、离子交换柱以及储水罐不漏水，电极夹上干燥无水。

## 2、PEM 电解池组装

将四个定位螺栓装入绝缘端板内，绝缘端板凹陷部分正好放金属垫圈，端板上面放阴极板，放上 0.15mm 垫片，垫片中间空隙内放碳纸，确保碳纸放在垫片中心，不会压在垫片下面或者架在垫片上面。上面接着放膜电极，优秀的膜电极大小应该能覆盖扩散层，又不至于大于底部定位螺丝中间的空间。膜电极上面放上一层 1.8mm 垫片，垫片中间空隙处先放钛毡再放钛网，上面放上薄垫片，薄垫片中间可以裁的更大一些，确保中间不会覆盖在钛网上面，导致钛网被过度压缩。最后放上阳极板即可。装配过程如图 4 所示：

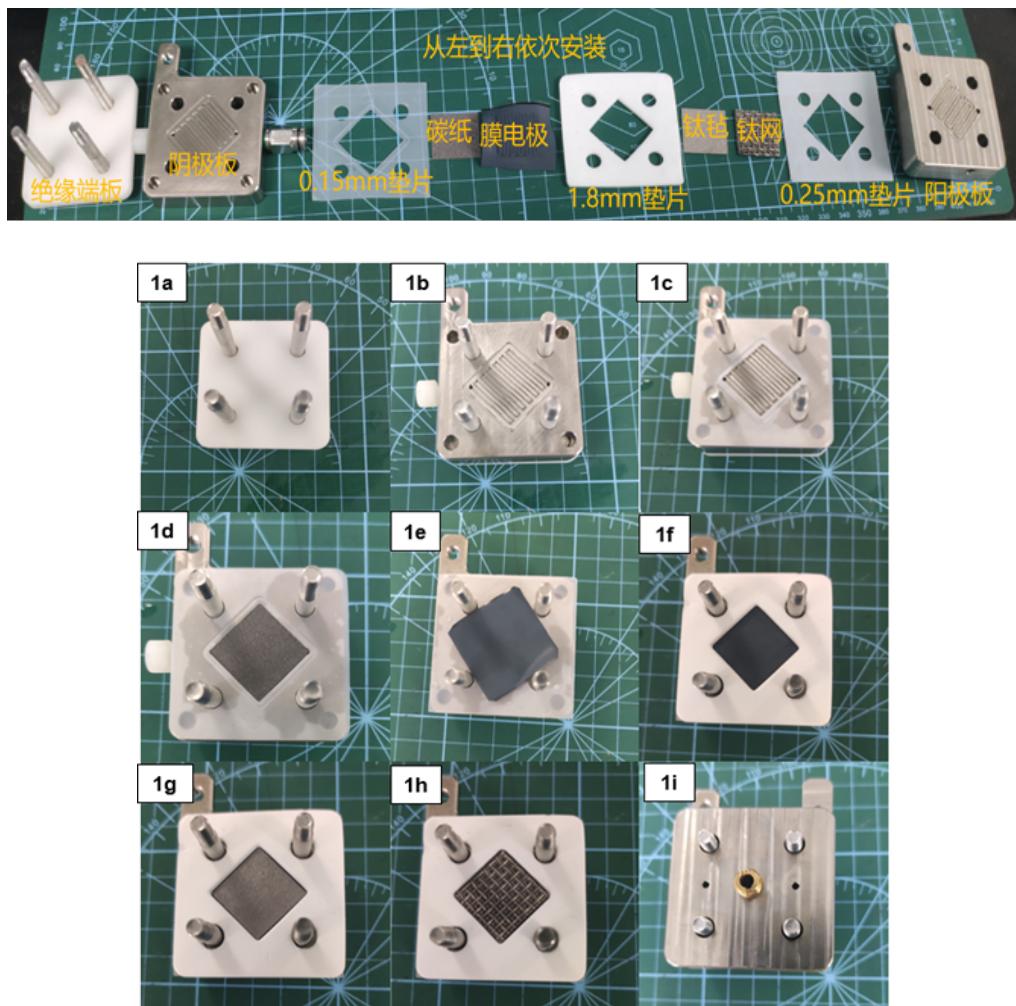


图 4 电解装配过程详解

## 3. PEM 电解池安装及测试

把安装好的电解池固定在测试台的空通道上。安装时注意夹紧电解池以免里面的碳纸松动导致改变位置。安装时双手左右夹紧电解池，根据传感器和四个定位螺丝的位置把电解池固定在通道上，用电动扳手把定位螺丝旋紧，选择对角旋，旋的时候不要太紧，确保不会

松动就好。再用扭矩扳手（3N·m）把电解池对角锁紧，这么做的目的是确保电解池内部受压均匀。安装好后记得把电极夹夹上（红色蓝头的是阳极对应靠里面的阳极板），最后把阴极回流管接上整个安装过程就完成了。安装过程如图 5 所示：

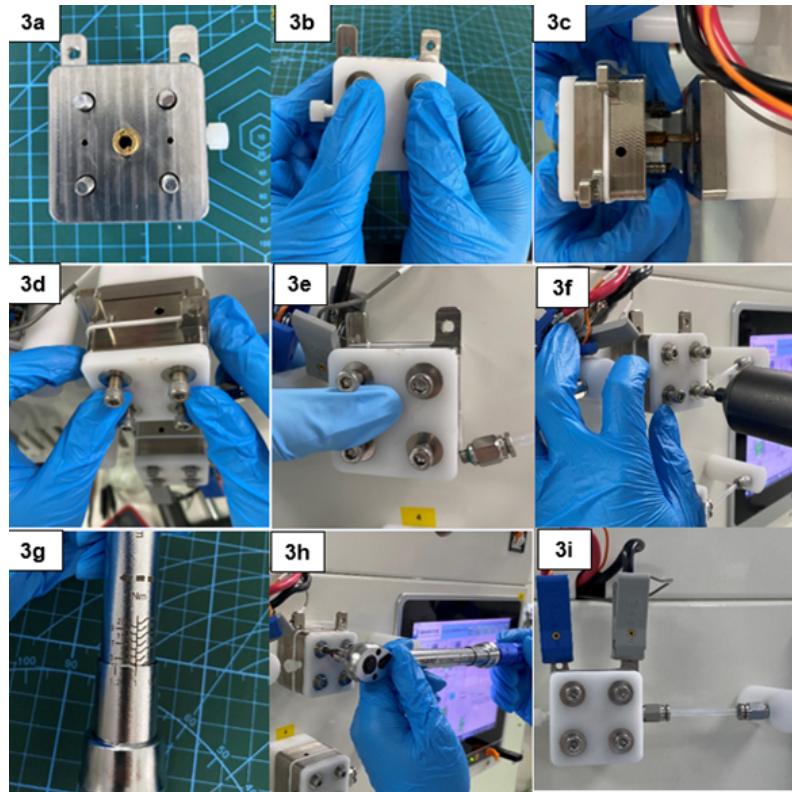


图 5 电解安装过程详解

#### 4. PEM 电解池测试程序设置

通道安装好后，先右击以管理员身份运行桌面上的“四通道电解池-运行工程”，进入后需等待 10 秒左右（等待 PLC 与工控机连接），待页面上显示的“PLC 与工控机通信中断，请检查”字样消失后即表示连接成功，设定好温度后即可点击“启动”按钮开始通水加热。

双击打开桌面上的 BTS8.0.0 软件，点击左上角的“用户”进行账号密码登录（账号：admin，密码：neware）。登陆成功后右键单击安装器件对应的通道，点击“单点启动”，设置好工步名称、工步时间、电流或者电压以及记录时间，设置好后点击右下角启动即可（设置时在左上角可以保存设置好的程序，也可以打开之前设置的程序，详细的设置步骤可以咨询工况表征小组成员）。器件测试完毕后，右键点击通道，点击“单点停止”，再打开“四通道电解池-运行工程”点击“停止”把水和加热关闭即可。测试过程如图 6 所示：

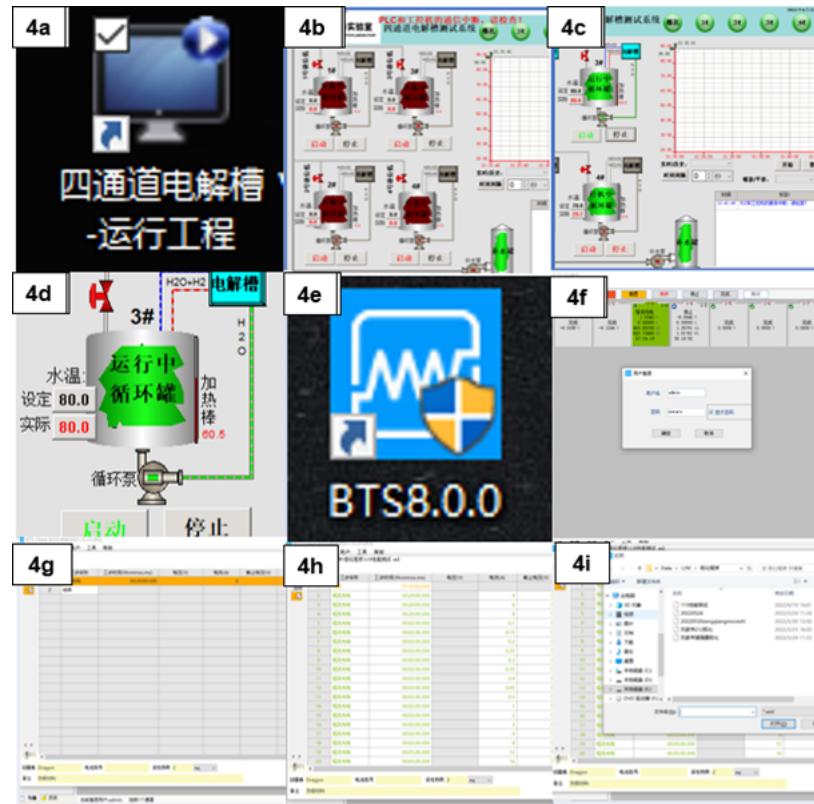


图 6 程序设置示意图

## 5. 注意事项

- (1) 在装配 MEA 过程中千万不能把阴阳极装反，PEM 电解槽阴极是铂碳催化剂，颜色为黑色，阳极催化剂为  $TiO_2$  负载的  $IrO_2$  颜色为深蓝色，装配时请注意膜电极颜色。
- (2) PEM 电解槽在上紧螺丝时，应先预紧，然后再拧到对应扭矩。避免一次拧到底，造成碳纸或者膜电极被破坏。
- (3) 注意储水罐中的水位和电解槽温度变化，若遇测试系统报警，请联系助教解决。

## 五、实验数据处理

- (1) 绘制 PEM 电解槽的电压-电流曲线，记录其的欧姆阻抗，并判断是否存在欧姆阻抗过大的现象，并分析其原因。
- (2) 计算电流密度为  $2 A/cm^2$  时的功率和电压效率。
- (3) 观察不同电流区域的电压随电流变化的趋势，通过相关的理论计算，分析活化损失，欧姆损失以及物质传输损失随电流变化的趋势。

## 六、思考题

- (1) PEM 电解槽的性能与温度的关系？解释活化损失，欧姆损失以及物质传输损失与温度的关系？
- (2) 总结导致 PEM 电解槽活化损失、欧姆损失和物质传输损失变大的原因。
- (3) 提升 PEM 电解槽性能的措施有哪些？

## 参考文献

- [1] Marian Chatenet et al. Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chem. Soc. Rev.*, 2022, 51, 4583-4762.
- [2] Han Liu, Hua Bing Tao, Bin Liu. Kinetic Insights of Proton Exchange Membrane Water Electrolyzer Obtained by Operando Characterization Methods. *J. Phys. Chem. Lett.* 2022, 13, 6520–6531.