

# 从气体存储到电化学储能： 加速 MOF 技术 在新能源领域的应用



## 泰克仪器的应用场景介绍

MOF 是金属有机骨架 (Metal-Organic Frameworks) 的简称，是一种由金属离子或金属簇和有机配体通过配位键连接而成的多孔晶体材料，包括原始 MOF，MOF 复合材料和 MOF 衍生物。MOF 具有多种优异的性质，如高比表面积、可调的孔径、多样的结构和功能、低密度、高稳定性等，因此在气体吸附、分离、催化、传感、药物输送等领域有着广泛的应用前景。

### MOF 的特点

- MOF 是一种自组装的纳米材料，可以通过改变金属离子或有机配体的种类和比例，实现对其结构和功能的精确设计和调控。
- MOF 是一种多孔材料，其孔径范围从纳米到微米，可以实现对不同大小和形状的分子的选择性吸附和分离。
- MOF 是一种功能材料，其金属中心和有机配体可以提供多种化学和物理的活性位点，实现对吸附分子的催化、传感、荧光、磁性等响应。

### MOF 的发展方向和应用

- MOF 可以用于气体吸附和存储，如氢气、甲烷、二氧化碳等，实现清洁能源的利用和温室气体的减排。—空气净化
- MOF 可以用于气体分离和纯化，如氮气、氧气、乙烯、乙烷等，实现工业和环境领域的高效分离。——控制测量调控
- MOF 可以用于催化和反应工程，如催化裂化、氧化还原、水煤气变换等，实现化学反应的加速和选择性的提高。—化学动力学
- MOF 可以用于传感和检测，如氨气、一氧化氮、挥发性有机物等，实现对有害气体的快速识别和定量分析。—控制测量调控，存储器
- MOF 可以用于药物输送和生物医学，如抗癌药物、基因、酶等，实现对生物分子的保护和定向释放。—靶向化疗

## 泰克助力 MOF 应用研究

MOF 作为一种新型的纳米多孔材料，由于其独特的结构和性能，在新能源领域有着广泛的应用前景。MOF 可以通过调节其化学组成和拓扑结构，实现对新能源材料的设计和优化，提升其在电化学储能和转换方面的表现。MOF 也可以与其他材料如碳材料、金属纳米粒子、导电聚合物等进行复合或修饰，形成具有协同效应的新型功能材料，进一步改善其电化学性能。此外，MOF 还可以利用其孔道结构，储存和释放氢气、甲烷等清洁能源，为新能源的运输和利用提供了一种有效的途径。

总之，开发新能源是当今世界面临的一个重大挑战和机遇，MOF 作为一种具有巨大潜力的新型纳米多孔材料，为新能源的研究和应用提供了一种创新的平台和方法，值得进一步的探索 and 开发。

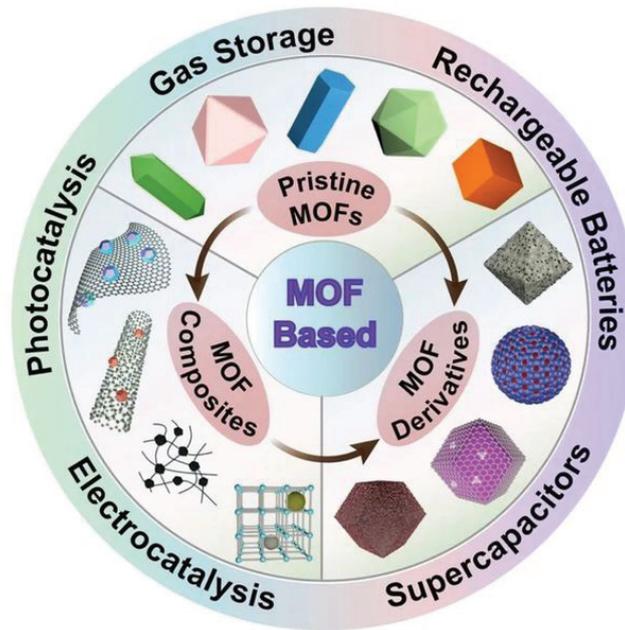
泰克 Keithley 的台表可以极大的帮助用户聚焦 MOF 在电学方向上的研究，如超级电容器、燃料电池、锂离子电池等，实现对储能和转换材料的设计和优化。

Keithley 设备可以对 MOF 材料进行精确的表征和分析。Keithley 设备具有以下优点：

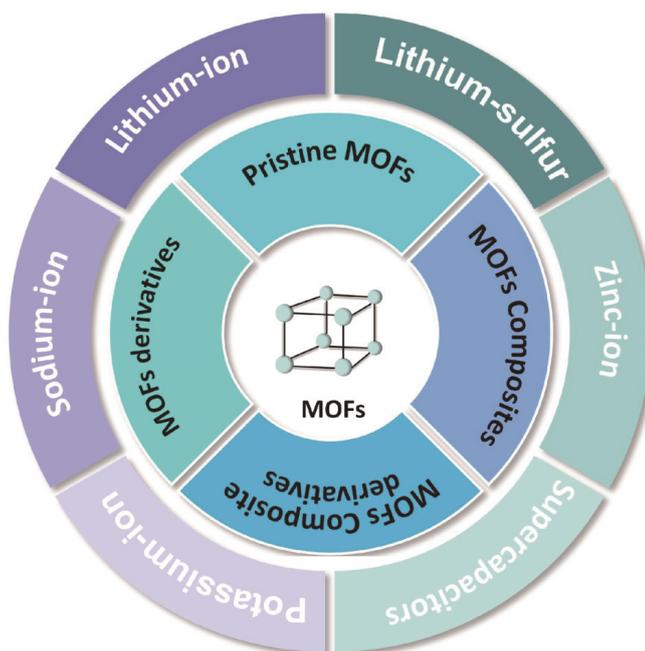


- 可以实现低噪声、高速度和高分辨率的电流-电压曲线测量，适用于评估 MOF 材料的导电性、光电性和热电性等。
- 可以进行多种电化学测试技术，例如循环伏安法、恒流充放电法、交流阻抗法等，适用于研究 MOF 材料的电容性、电化学稳定性和反应动力学等。
- 可以与其他仪器如显微镜、光谱仪等联用，实现对 MOF 材料的多维度和多模态的综合表征。
- 具有强大的软件平台和丰富的数据处理功能，可以方便地设置实验参数、控制仪器运行、读取和分析数据、生成和导出报告等。

南方科技大学徐强教授团队 Chem 综述：基于金属有机框架（MOF）材料的能源应用



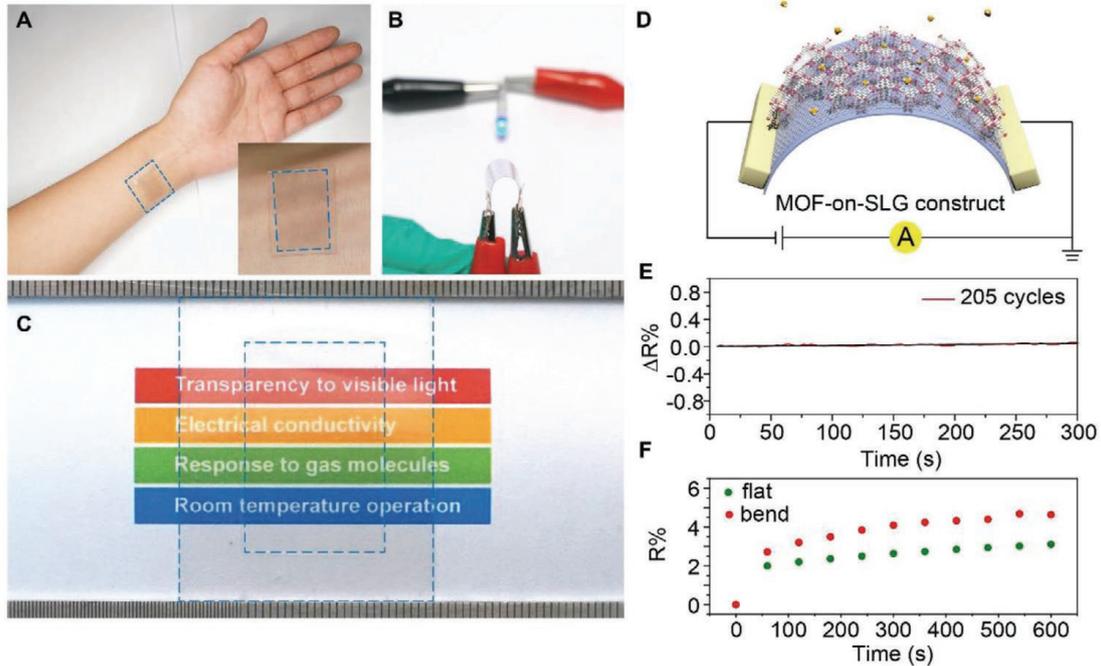
MOF 具有高比表面积、可调孔径、多样功能基团等特点，使其在电化学上具有很好的应用潜力。MOF 可以作为电极材料或者与其他材料复合，提高电化学性能和稳定性。例如，MOF 可以通过掺杂、负载、包裹等方法改善导电性和电荷传输效率，增强电容器的比电容和倍率性能；MOF 可以通过吸附、嵌入、交联等方法加载催化剂和氧化还原活性物种，提高燃料电池的催化效率和耐久性；MOF 可以通过配位、插层、封装等方法储存和释放锂离子，提高锂离子电池的比容量和循环寿命。



## 应用场景：

### 1. MOF 用于透明电子器件

如何利用 MOF 开发具有高导电性、高灵敏度和室温工作的透明电子器件



#### 使用 Keithley 2400，加压测流

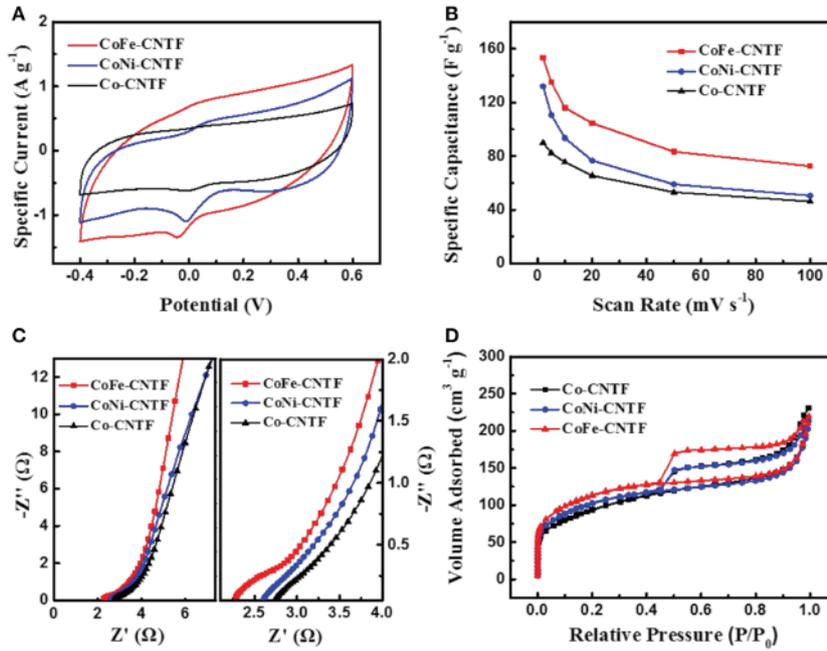
主要用于评估 Ni-CAT-1-on-SLG 构筑物作为透明电子传感器在室温下对气体分子的检测性能，包括检测限、线性响应范围、气体识别等。

- 电化学测试，评估 Ni-CAT-1-on-SLG 构筑物对气体分子（如  $\text{NH}_3$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_2$ ）的检测性能，包括检测限、线性响应范围等。
- 通过电子响应曲线拟合，提取气体分子吸附动力学参数  $k$ ，并与气体浓度呈现线性关系，反映了 MOF 与气体分子之间的特异性相互作用。
- 测量 Ni-CAT-1-on-SLG 构筑物在吸附 - 脱附平衡时的电子响应  $r_0$ ，与气体浓度  $c$  呈现 Langmuir-Freundlich 化学吸附模型的线性关系。
- 通过不同气体分子的特征  $k$  值和  $r_0$ ，实现对气体类型的无歧义识别

## 2. 双金属金属 - 有机骨架衍生碳纳米管骨架增强电容去离子和锌空气电池

提高了所得 CNTF 的性能，可用于制造柔性高性能锌 - 空气电池

使用 Keithley SMU-2400 源表仪测量电导率变化，以评估电极的离子吸附性能

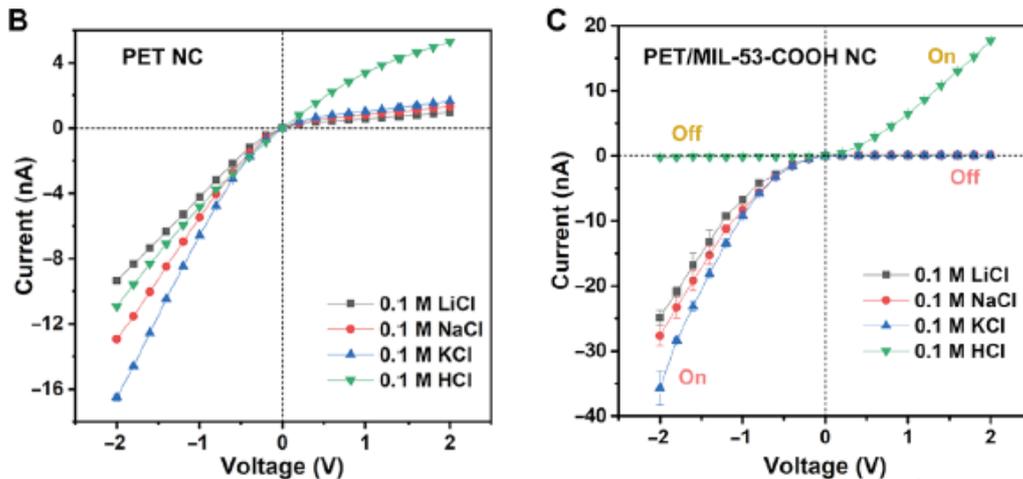


**FIGURE 2 | (A)** CV curves of CoFe-CNTF, CoNi-CNTF, and Co-CNTF electrodes at a scan rate of  $5 mV \cdot s^{-1}$ . **(B)** Specific capacitances of CoFe-CNTF, CoNi-CNTF, and Co-CNTF at different scan rates. **(C)** Nyquist plots and **(D)** Nitrogen adsorption-desorption isotherms of CoFe-CNTF, CoNi-CNTF, and Co-CNTF.

### 3. 将酸性金属有机框架 (MOF) MIL-53-COOH 组装到聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 单个纳米通道 (NC) 中来开发生物启发型人工离子通道的过程。作为概念验证, PET/MOF 纳米离子器件被证明可通过逆电渗析作为高效的纳米发电机。

使用 Keithley 6487 和 6517B 皮安表对 PET NC、PET@EDA NC 和 PET/MOF NC 的离子传输特性进行了测试。具体来说：

- 将单个纳米通道夹在两个装有相同浓度氯化物盐溶液 (KCl、NaCl 或 LiCl, pH 5.8) 或 HCl 溶液的腔室之间。
- 使用 Ag/AgCl 电极施加跨膜电位，其中阳极放置在面向纳米通道基面一侧的腔室中。
- 主要使用从 -2V 到 +2V 的扫描电压进行 I-V 测量，每个测量至少重复 3 次以获得特定电压偏置下的平均电流。



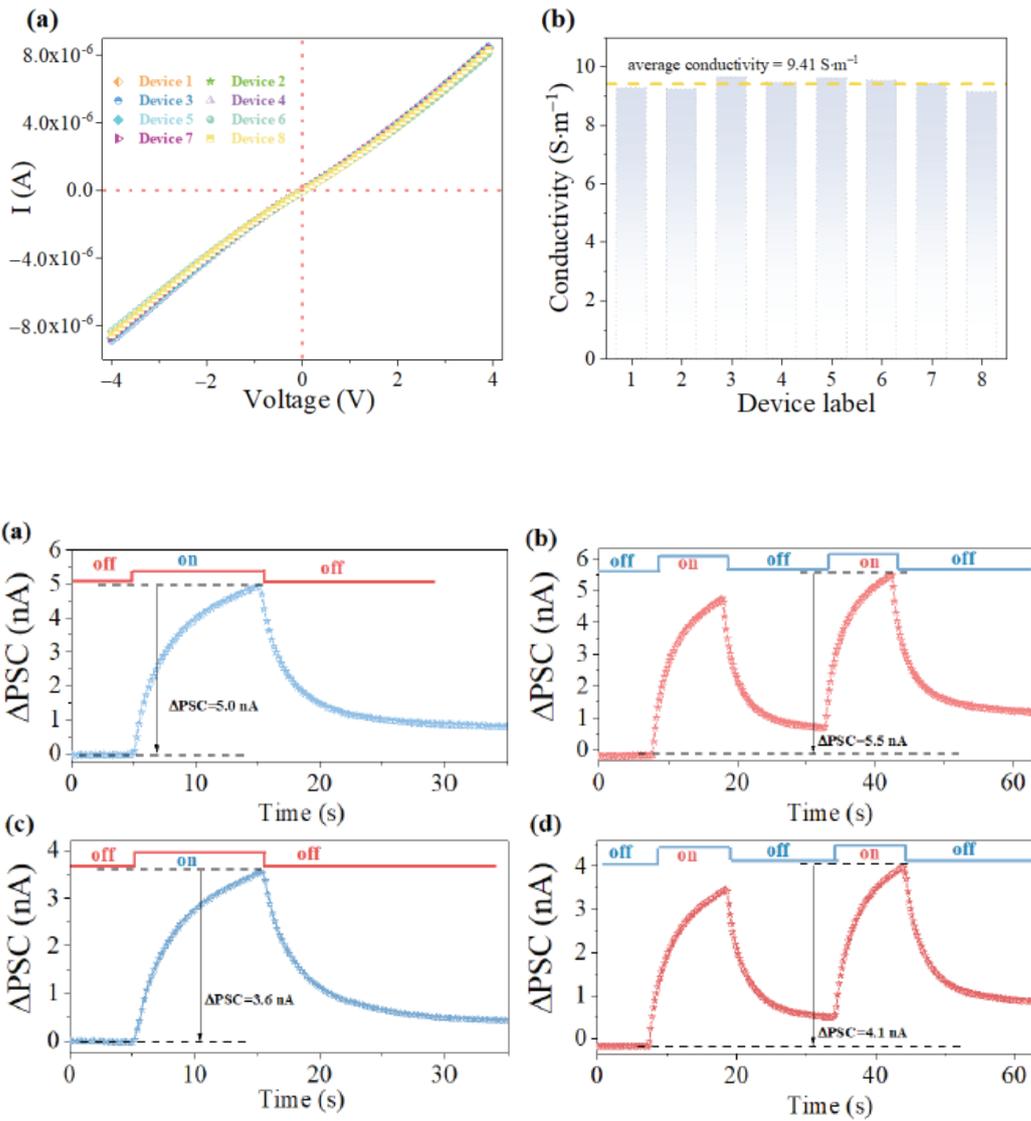
这些测试有助于研究 PET/MOF 纳米通道的离子整流特性。

#### 4. 一维 (1D) 导电金属有机框架 (MOF) DDA-Cu 的合成和表征

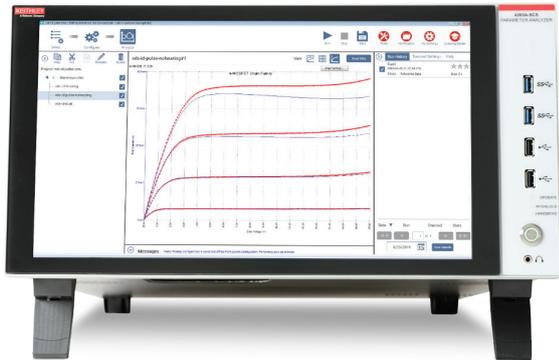
使用 Keithley 4200SC 半导体参数分析仪完成了以下测试：

- 电流 - 电压 (I-V) 曲线测量，在氮气环境下室温进行
- 电导率 (k) 评估

此外，所有性能测试都是在 Keithley 4200SC 半导体参数分析仪上进行的。



## 泰克相关方案对应测试设备



### 4200A-SCS 半导体参数分析仪

- **I-V 源测量单元 (SMU):** 支持  $\pm 210$  V/1 A, 最小测量分辨率达 10 aA, 提供 10 mHz - 10 Hz 频率的超低频电容测量, 支持四象限操作和 2 线或 4 线连接。
- **C-V 多频率电容单元 (CVU):** 频率范围 1 kHz - 10 MHz, 内置  $\pm 30$  V DC 偏置源 (可扩展到  $\pm 210$  V), 支持 AC 阻抗测量 (C-V, C-f, C-t) 和 I-V/C-V 简便切换。
- **脉冲式 I-V 单元 (PMU) 与高压脉冲发生器 (PGU):** 提供  $\pm 40$  V、 $\pm 800$  mA, 200 MSa/s 采样率, 支持任意波形 Segment ARB<sup>®</sup> 模式, 10 ns 分辨率, 适用于高速脉冲 I-V 测量。
- **多通道开关模块 (CVIV) 与远程前端放大器 (RPM):** 支持 I-V、C-V 和超快速脉冲 I-V 测量间自动切换, 扩展电流灵敏度至数十皮安, 减少电缆电容效应。



### 2400 数字源表系列

- **多合一功能:** 集成 I-V 源与测量, 支持 20W~100W 直流、1000W 脉冲, 覆盖 1100V 至 1 $\mu$ V 和 10A 至 10pA 范围, 具备四象限源和阱工作能力。
- **高精度与高效测量:** 提供 0.012% 基础测量精度 (6 位半分辨率), 支持 1700 读数 / 秒 (4 位半分辨率), 并具备通过 / 失效比较器功能。
- **灵活连接与控制:** 支持 2 线、4 线和 6 线远程电压源和测量感测, 具备可编程 DIO 端口, 适用于自动化控制和探针管理。
- **兼容性与接口:** 标配 SCPI GPIB、RS232 及吉时利触发链路, 支持高速感测线接触检查功能, 确保便捷的系统集成与控制。

## 小结

Keithley 源表在金属有机框架 (MOF) 研究上的测试应用。Keithley 源表是一种高性能的仪器，可以同时提供电压和电流的源和测量功能，并且具有高分辨率、高精度和高灵敏度的特点。Keithley 源表可以用于测量 MOF 的电化学性质，例如电导率、电容、阻抗等，以及对温度、湿度、气体等外界因素的响应。Keithley 源表还可以与其他仪器结合，如光谱仪、显微镜等，实现多维度的 MOF 表征。通过 Keithley 源表的测试，可以深入了解 MOF 的结构、功能和机理，为其在催化、传感、吸附、分离等领域的应用提供有效的指导。

## 引用

- Wang, W., Chen, D., Li, F., Xiao, X., & Xu, Q. (2023). Metal-organic-framework-based materials as platforms for energy applications. *Chem*, 9(10), 2331-2352.  
<https://doi.org/10.1016/j.chempr.2023.09.009>
- Zhang, Y., Li, X., Wang, H., Zhou, Z., & Liu, J. (2019). Advanced functional materials for flexible and wearable sensors. *Advanced Science*, 6(15), 1802050.  
<https://doi.org/10.1002/advs.201903003>
- Liu, S., Chen, Y., Wang, Z., & Li, Y. (2019). Recent advances in nanomaterials for electronics and energy applications. *Frontiers in Chemistry*, 7, 449.  
<https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00449>
- Lu, J., Xu, H., Yu, H., Hu, X., Xia, J., Zhu, Y., Wang, F., Wu, H.-A., Jiang, L., & Wang, H. (2022). Ultrafast rectifying counter-directional transport of proton and metal ions in metal-organic framework-based nanochannels. *Science Advances*, 8(14), eabl5070.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abl5070>
- Wang, X., Li, Q., Zhang, Z., & Chen, Y. (2022). Emerging applications of 2D materials in bioelectronics and biosensors. *Nature Communications*, 13, 35315.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-35315-0>

更多宝贵资源，敬请登录：[tek.com.cn](http://tek.com.cn)

