从4000小时到更长寿命：解密PEM电解槽多孔传输层的设计哲学与产业博弈

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42306.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

从4000小时到更长寿命：解密PEM电解槽多孔传输层的设计哲学与产业博弈。绿氢一直以来被视作实现双碳目标的关键能源载体，而质子交换膜水电解（PEMWE）是目前最具前景的绿氢制备技术之一。然而，效率偏低、成本高昂与寿命不足等问题，严重制约了其大规模商业化。近日，ENGINEERING Energy青年编委、上海交通大学沈水云教授团队在本刊发表题为Advances in high-performance porous transport layers for proton-exchange-membrane water electrolyzers: A review的综述论文，系统梳理了钛基多孔传输层（PTL）的构效关系、制备策略与失效机制，为该领域从经验试错迈向理性设计提供了系统性框架。

论文标题：质子交换膜电解水装置高性能多孔传输层研究进展综述

通讯作者：李慧媛，沈水云

作者单位：上海交通大学

发表时间：2026年6月

期刊名：ENGINEERING Energy

期刊影响因子：8.1

WOS期刊JCR分区：1区

01

钛基PTL的耐蚀与导电博弈

PEMWE之所以备受关注，在于其电流密度高、响应快、产氢纯度高，是实现风、光等间歇性可再生能源大规模消纳的关键技术路径。然而，PEMWE阳极处于强酸性（pH<2）且电位极高的氧化环境，几乎所有常用金属都难逃腐蚀命运。钛基PTL因其相对优异的耐蚀性成为主流选择，它在电池中并非被动支架，而是同时承担着供水、排气、导电、传热和支撑催化剂涂覆膜（CCM）五项核心任务。

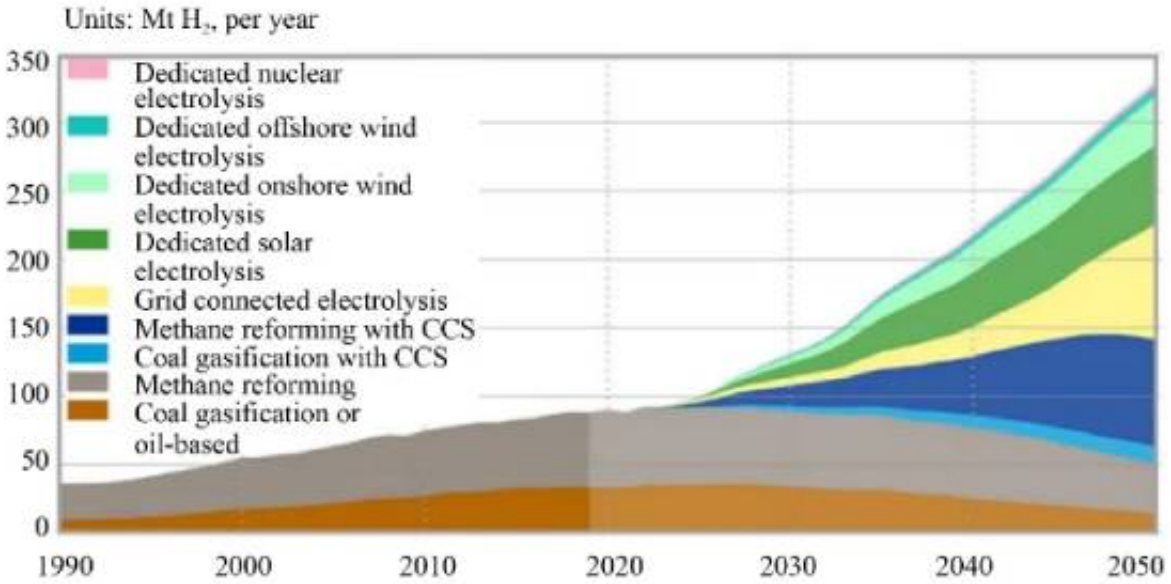


图1.1990—2050年全球不同技术路线的制氢量变化趋势。

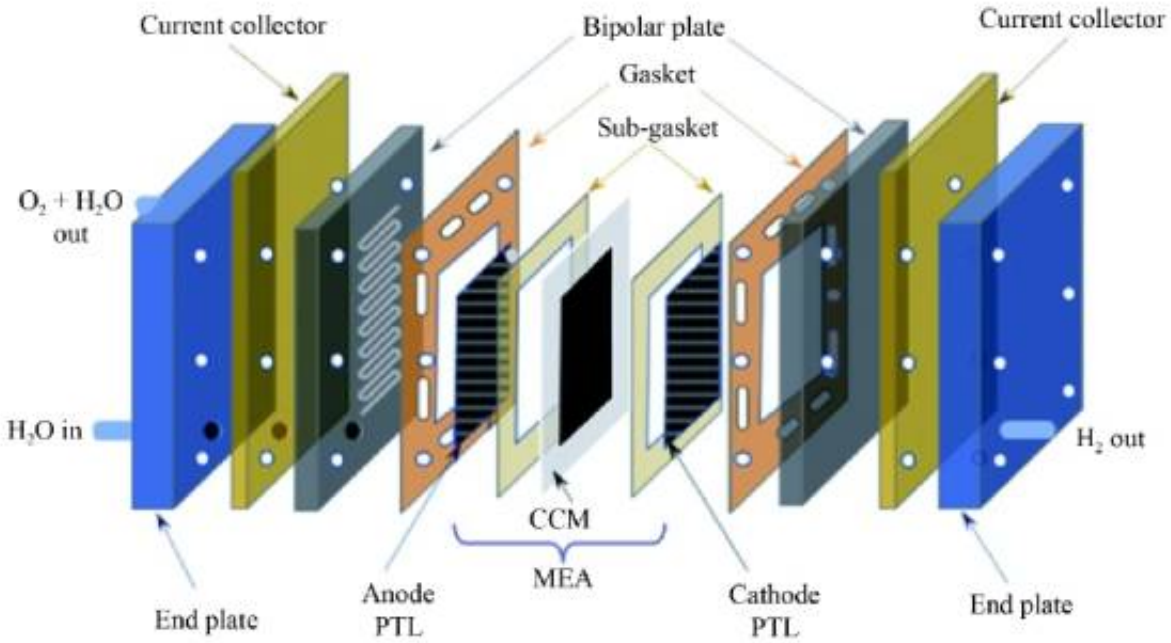


图2.典型PEMWE单电池的分解视图，突出显示PTL作为关键功能部件。

02

高电流密度下的生死时速

当电流密度攀升至数安培每平方厘米时，PTL内部会上演一场剧烈的气液两相流竞争：液态水需

向下渗透以供给催化层，而析出的氧气气泡则向上逸出。这种逆向流动极易引发气泡堵塞、水淹或局部干涸等传质恶化现象。文章指出，由气泡引起的传质过电位可分解为活化、欧姆和浓差三部分，三者共同构成高电流密度下的主要性能损失来源。

更棘手的是，钛在阳极高电位环境下会持续氧化，生成TiOx钝化膜，导致界面接触电阻（ICR）急剧攀升。据文献报道，这一腐蚀过程是PEMWE长期运行中电压升高的首要诱因。图3直观对比了铱涂层与未涂层钛毡在不同工况下的性能差距，证实了优异的界面接触不仅能降低接触电阻，更能优化热传导路径，从而保障电池在高负荷下的稳定输出。

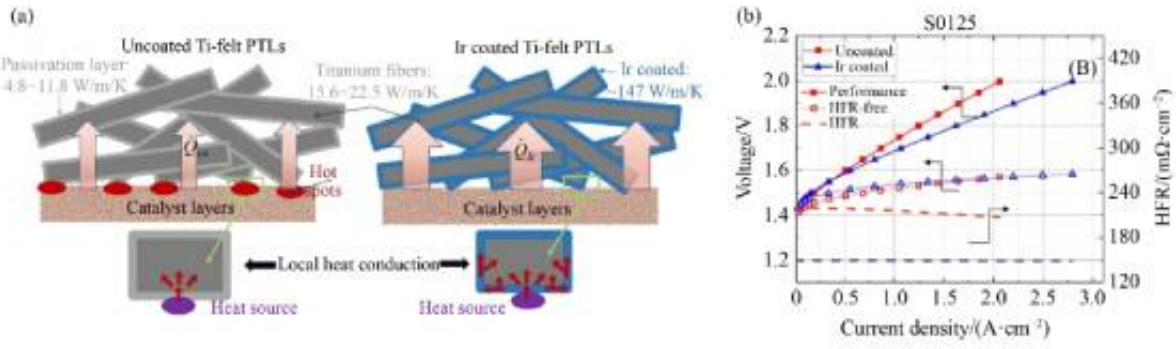


图3.PEMWE中PTL与催化层组件的界面接触效应与性能对比。（a）PTL与催化层之间界面接触及热传导示意图；（b）铱涂层与未涂层Ti-felt S0125 PTL在湿态和干态运行模式下的性能对比。

03

从无序粗放到精微调控：结构设计的范式转移

针对上述挑战，文章系统归纳了四大类高性能PTL结构设计策略，展现了从传统无序粗放向现代精微调控的演进：

1.集成流道与图案化通孔：该策略通过激光在PTL内部雕刻面内微通道或穿透型排气孔，为氧气开辟了专属高速出口。图4对比了三维结构化流场增强液/气扩散层（FELGDL）与传统二维结构的极化曲线与高频电阻（HFR），结果表明，三维结构化设计显著降低了传质阻力与欧姆损失，在高电流密度下电压降幅明显——这相当于为气体传输开辟了旁路，大幅缓解了传输瓶颈。

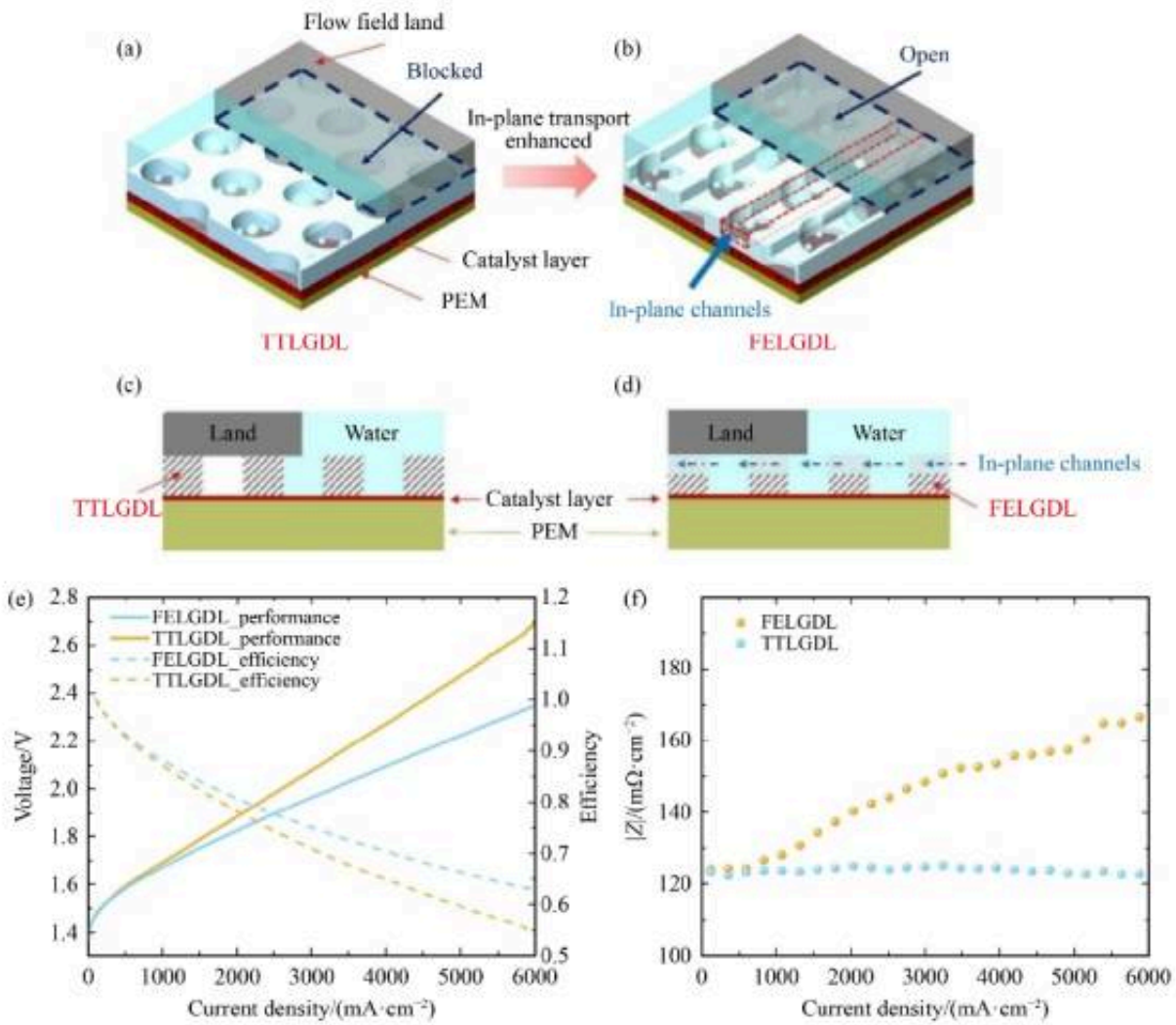


图4.二维与三维结构化PTL的设计示意图及PEM水电解中两相传输性能对比。

2.梯度孔隙率结构：该结构通过构建顺式梯度（即靠近催化层为小孔，靠近流场为大孔），利用孔径差异产生的毛细力梯度，在强化液态水向催化层渗透的同时，为大尺寸气泡的快速逸出提供了低阻力通道。图5展示了钛毡与钛网堆叠梯度结构的过电位分解，其质量传输过电位从0.478V骤降至0.206V，降幅高达57%。

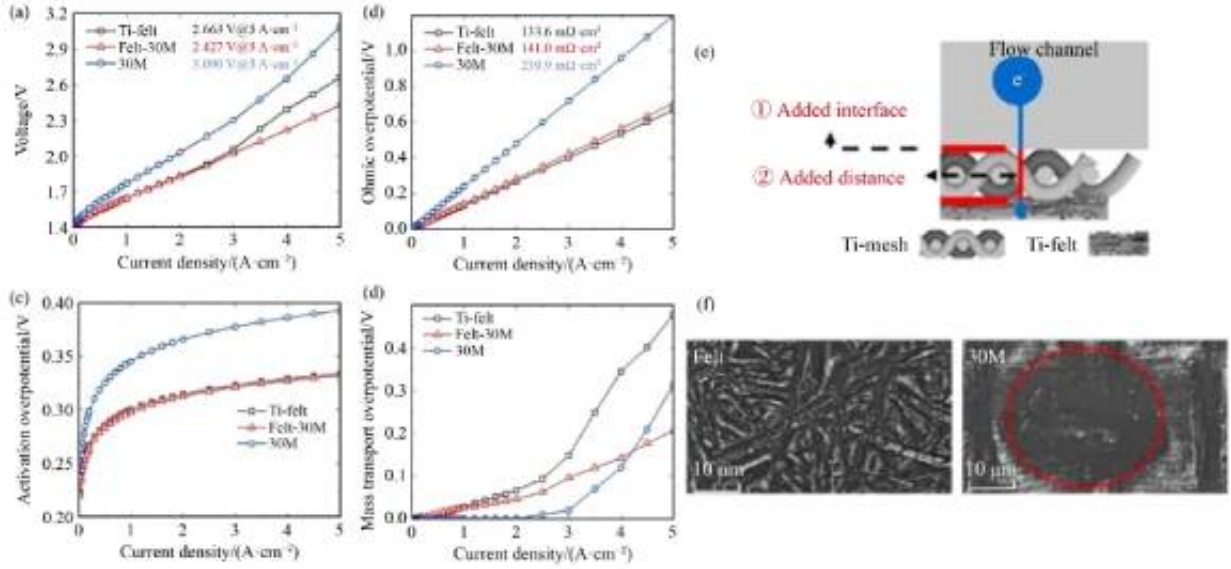


图5.PEM水电解中钛毡、钛网及堆叠梯度PTL的电化学性能对比与界面接触效应。

3. 润湿性图案化： 该设计通过在钛毡表面构建亲水/疏水交替条纹，实现了水沿亲水带供应、气泡沿疏水带脱离的定向传输。图6的极化损失分解显示，在5A/cm ^{2} 工况下，该设计使质量传输损失较商业PTL大幅降低，欧姆损失也同步显著下降。

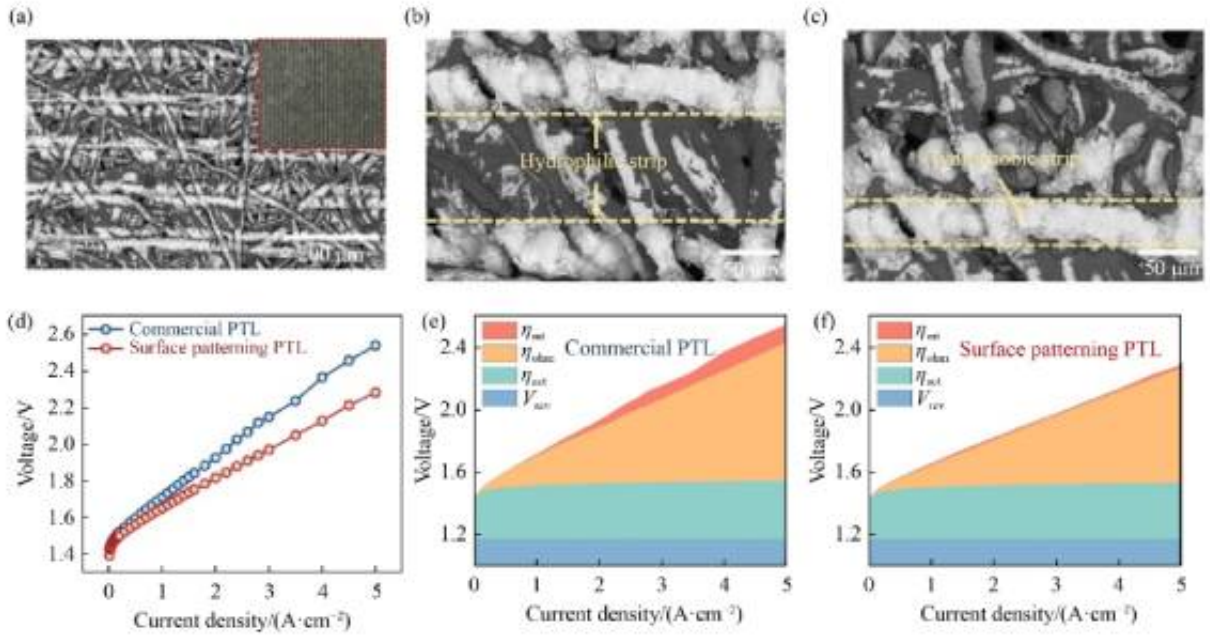


图6.PEM水电解中双亲图案化钛毡PTL的表面表征与电化学性能分析。

4.表面涂层工程：针对钛基体在阳极高电位下易生成高阻值TiOx钝化膜的问题，表面涂层工程通过引入导电且耐蚀的贵金属层，有效阻断了基体与强酸环境的直接接触。图7中的4000小时耐久性测试表明，超低载量的铱涂层（仅0.10 mg/cm ^{2} ）可有效抑制钛氧化层的持续增厚，而未涂层钛毡则在长期运行后出现了明显的涂层脱落与性能崩塌。

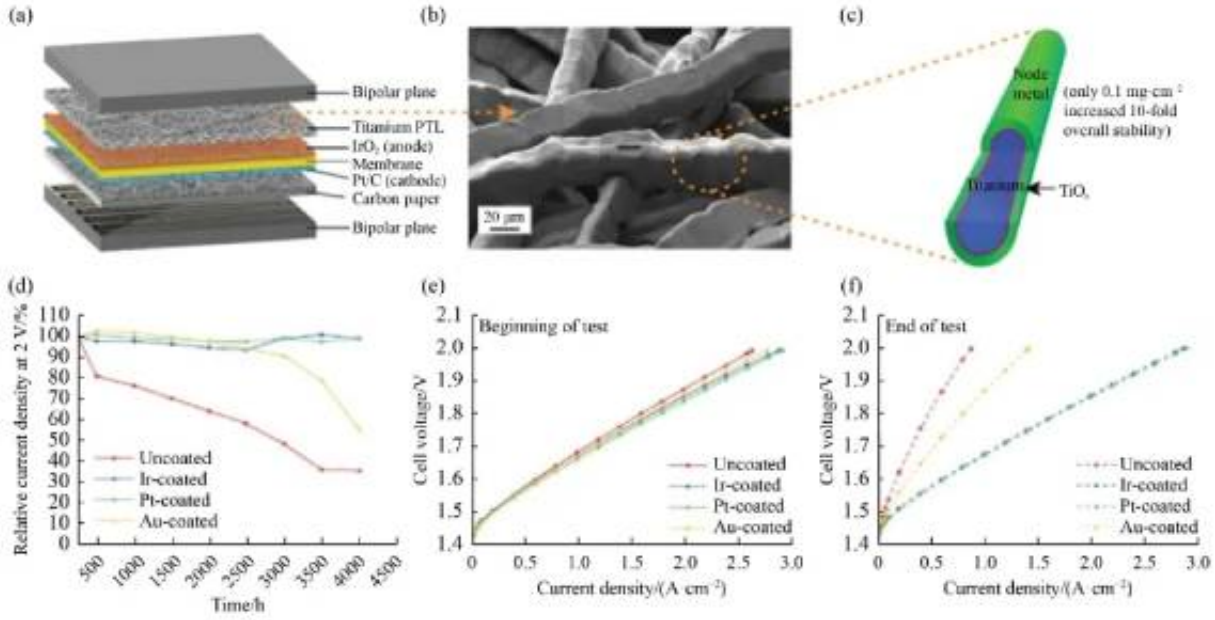


图7.超薄贵金属涂层钛纤维PTL的结构与电化学性能。

04

不止于材料：PTL如何重塑绿氢经济性？

该综述的价值，不仅在于梳理了一条清晰的技术路线图，更在于它精准回应了当前我国氢能产业的核心诉求。在降本方面，超低载量（0.1 mg/cm ^{2} 量级）的贵金属涂层技术，为打破铂族金属的成本桎梏提供了可行路径；在增效方面，精细化的结构设计大幅削减了高电流密度下的传输损耗，使电解槽能够更从容地应对风光发电的功率波动；而在稳寿方面，文章提出的涂层-基体-界面协同评价体系，将初始性能与长期退化深度绑定，为提升装备的长期可靠性指明了方向。

展望未来，随着激光加工、光刻等规模化制备工艺的成熟，以及标准化评估体系的完善，PTL的研发正逐步告别经验试错，迈向按需设计的新阶段。这不仅将为PEMWE全产业链的降本增效提供关键支撑，也为我国绿氢装备的自主创新筑牢了理论根基。

相关论文信息：https://journal.hep.com.cn/fie/EN/10.1007/s11708-026-1073-1

作者：沈水云等 来源：《工程·能源》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发