

2023

Innovation China
Micro-Conference

创新中国微型论坛

Jiangsu & Hunan, China | 13-14 Nov 2023

www.cmventure.net

SEIF
INNOVATION

Shanghai Emerging
Industries Foundation
上海战略新兴
产业发展基金会



趣同

CM Venture Capital

M o m e n t u m

‘Materials in Hydrogen Economy’ 氢能材料论坛

13 Nov 2023

PEM 制氢催化剂及膜电极的降“铱”之路

Reducing Iridium in Catalyst & Membrane Electrode Assemblies for PEM Water Electrolyzers

吕帆, 上海动氢/北京大学

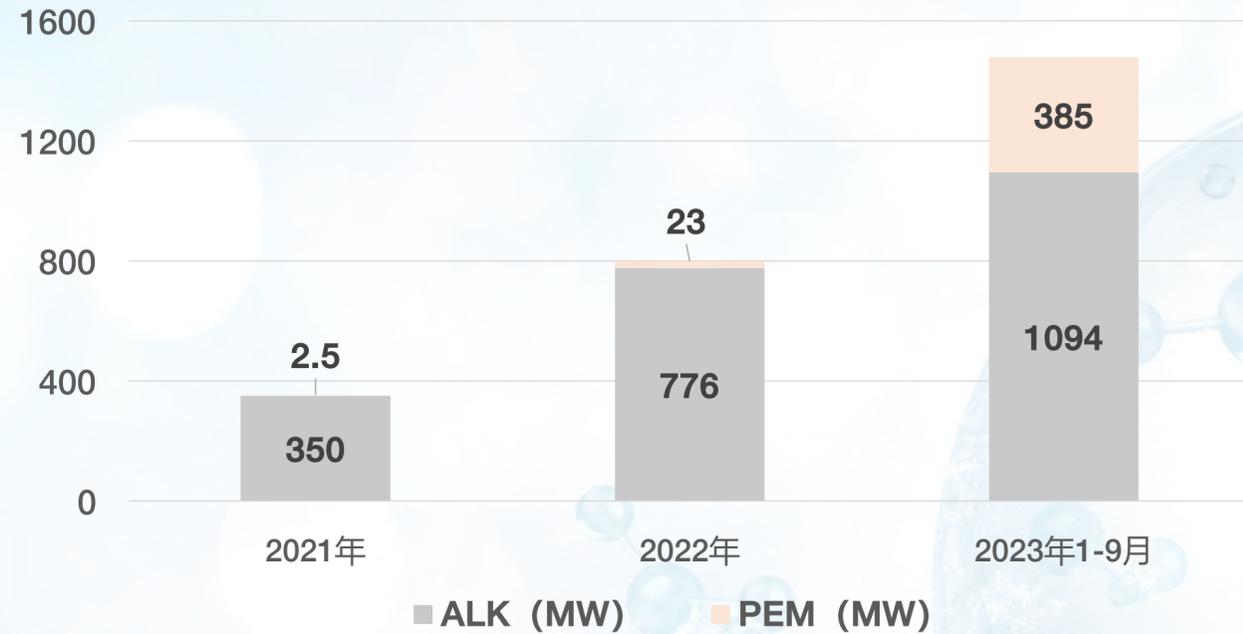
Dr Lv Fan, Shanghai Dynamic Hydrogen/Beijing University

电解槽技术发展趋势——ALK+PEM 组合，提升风光电利用率

Trends in Electrolyzer Technology Development——ALK+PEM

The "ALK+PEM" combination maximizes the use of renewable energy generation

近三年ALK和PEM出货量及中标量



项目	ALK	占比	PEM	占比
国电投大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目	180MW	78%	50MW	22%
内蒙古华电达茂旗20万千瓦绿氢示范项目	55MW	92%	5MW	8%
中能建松原氢能产业园(绿色氢氨醇一体化)项目	314MW	97%	10MW	3%

中国能建2023年制氢设备集中采购招标公告
(招标编号: SHCT-HW-CEECSBJC-GYLGLB-2023-005)

预估总量为125套

招标内容与范围: 本招标项目划分为2个标段, 本次招标为其中的:

- 001 ALK 电解槽1000Nm²/h;
- 002 PEM电解槽200Nm³/h.

“ALK+PEM” 4:1组合

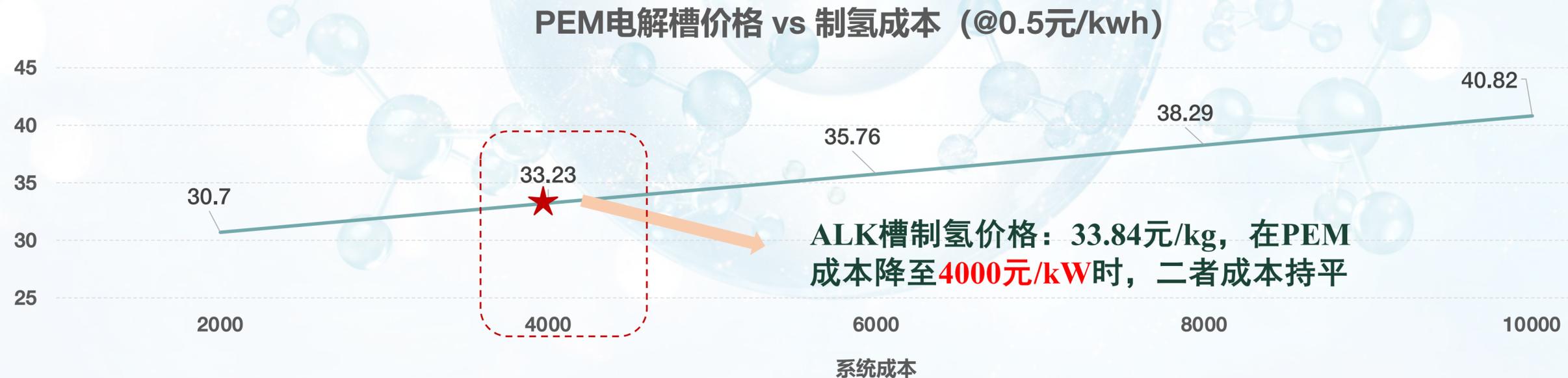
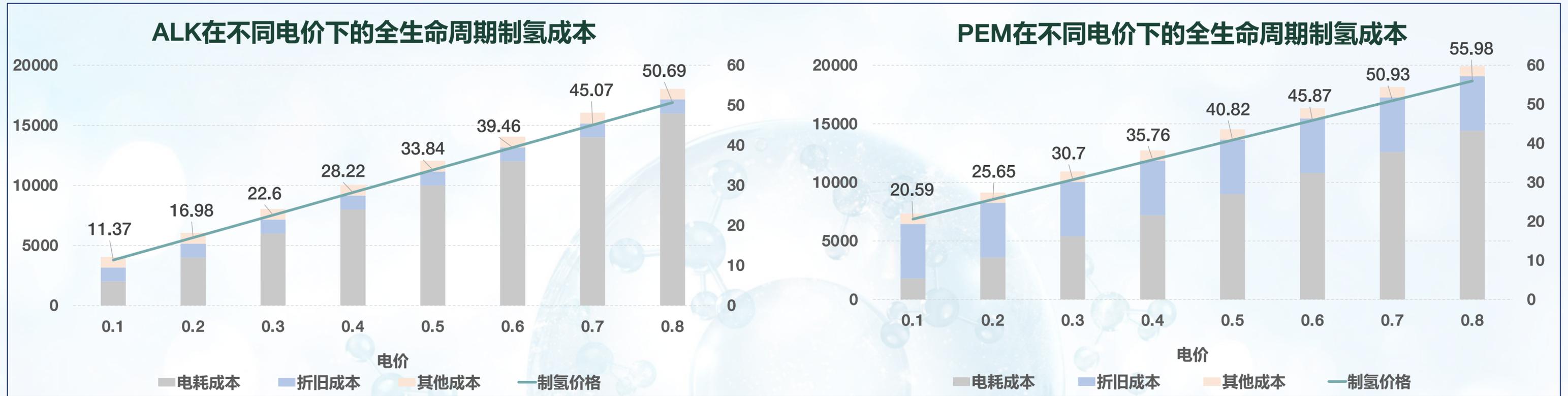
中国能建发布全国最大125套电解槽招标



ALK与PEM电解槽制氢成本分析

Cost Analysis of ALK and PEM Electrolyzer for Hydrogen Production

电价 (electricity price) + 系统价格 (Electrolyzer system price)



膜电极（MEA）决定PEM 电解槽性能与成本的核心

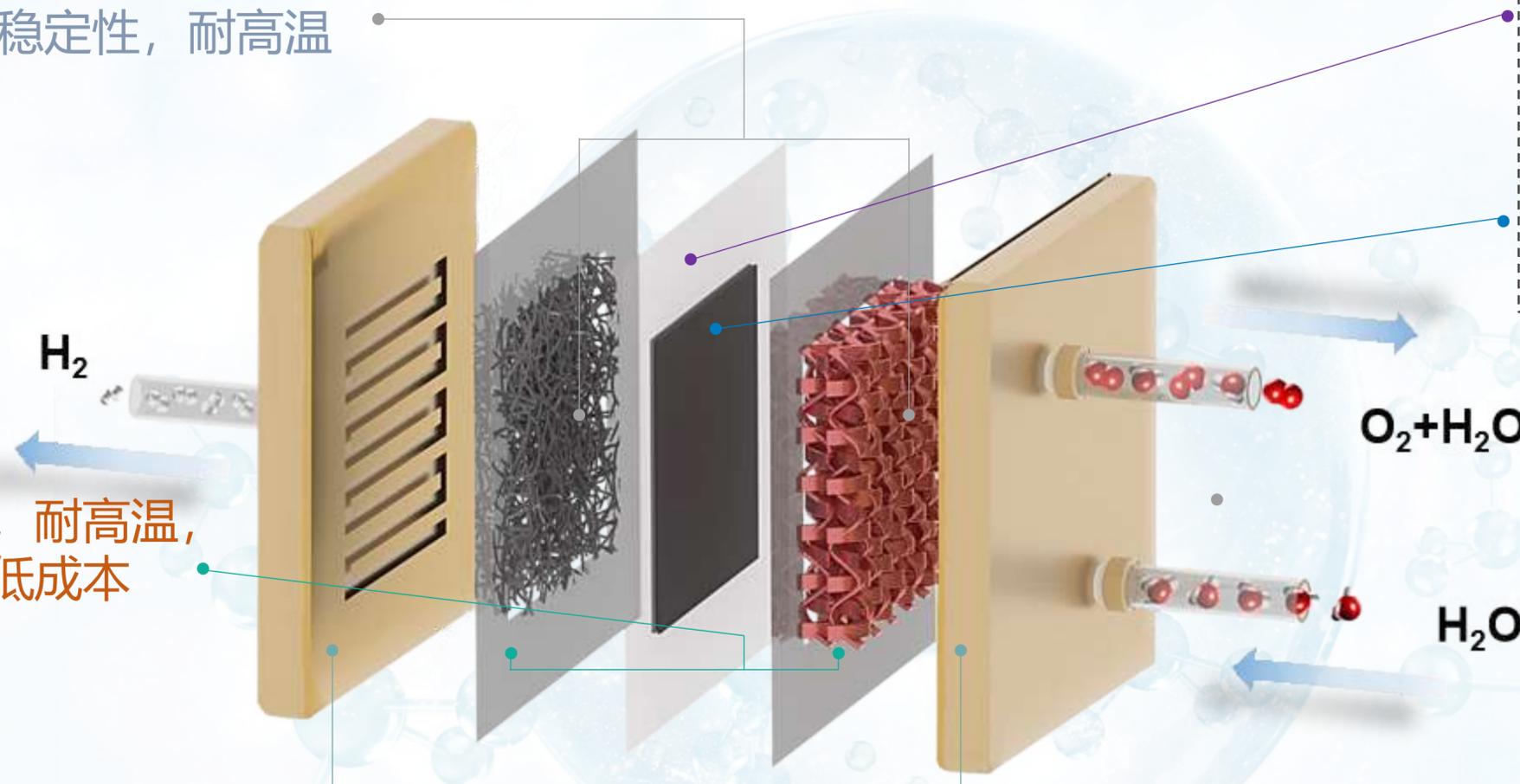
气体扩散层：高气体透过性，低接触阻抗，化学稳定性，耐高温

密封件：低杂质，耐高温，快速成型技术，低成本

极板：低阻抗，高抗腐蚀性，耐高温，高排水性流场

膜材料：高质子传导性，低气体扩散性，高机械强度，高化学稳定性及热性能

催化剂：依赖贵金属Ir/Pt。酸性、强氧化环境下的高活性、耐久性



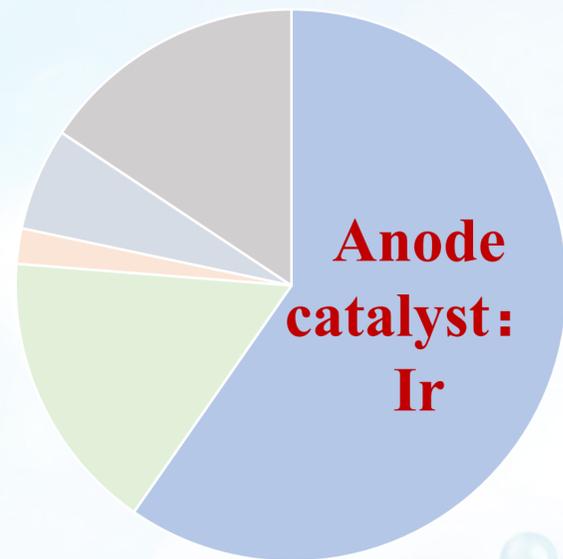
膜电极（MEA）

电解槽“核心”

PEM 膜电极制造成本分析及降本路径

Analysis of the manufacturing cost of membrane electrode assembly (MEA) in PEM electrolyzer and its cost reduction paths

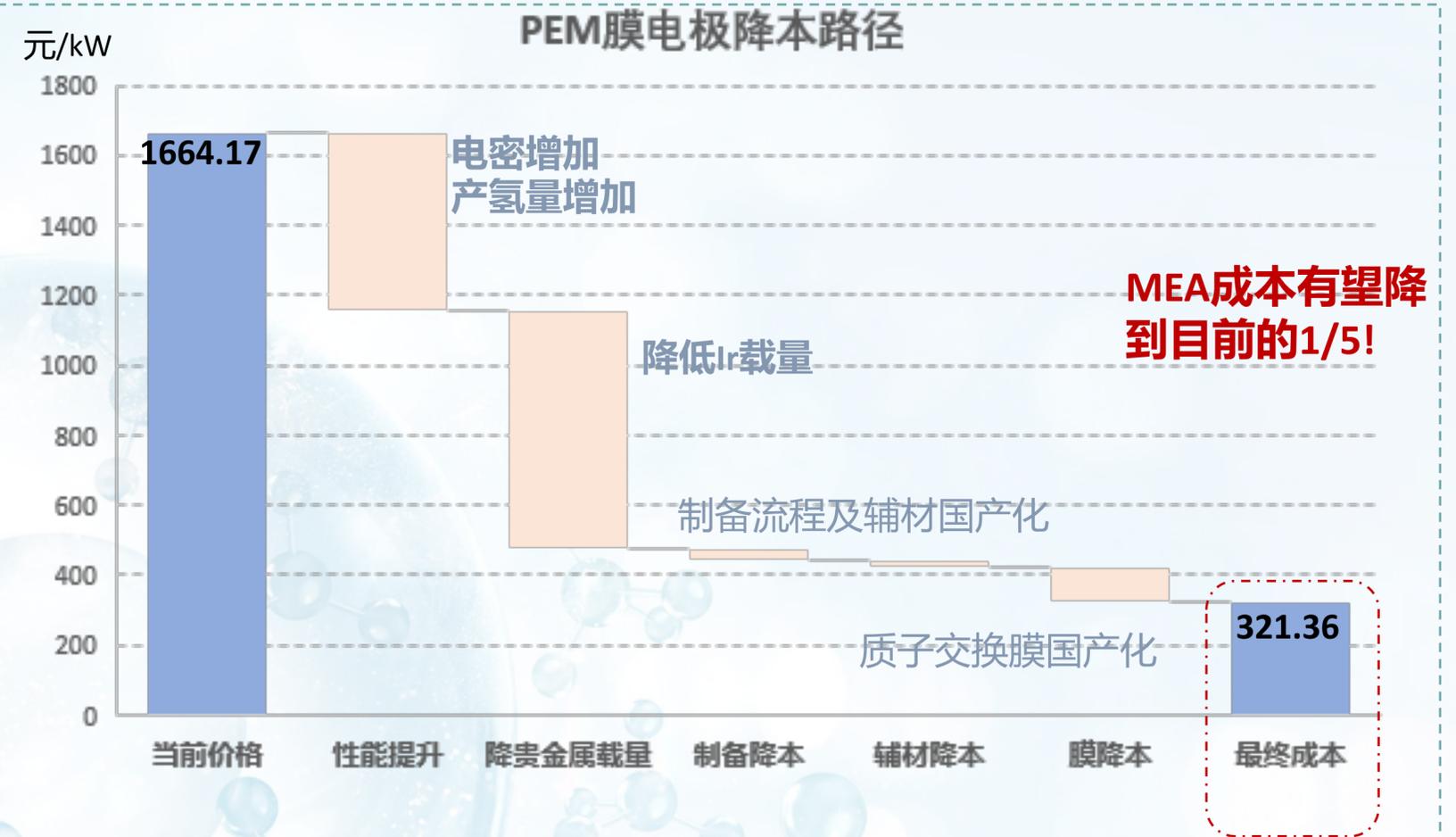
目前膜电极性能下的组件成本测算 (200Nm³)



Ir usage: 0.55-0.83 g/kW (当前)

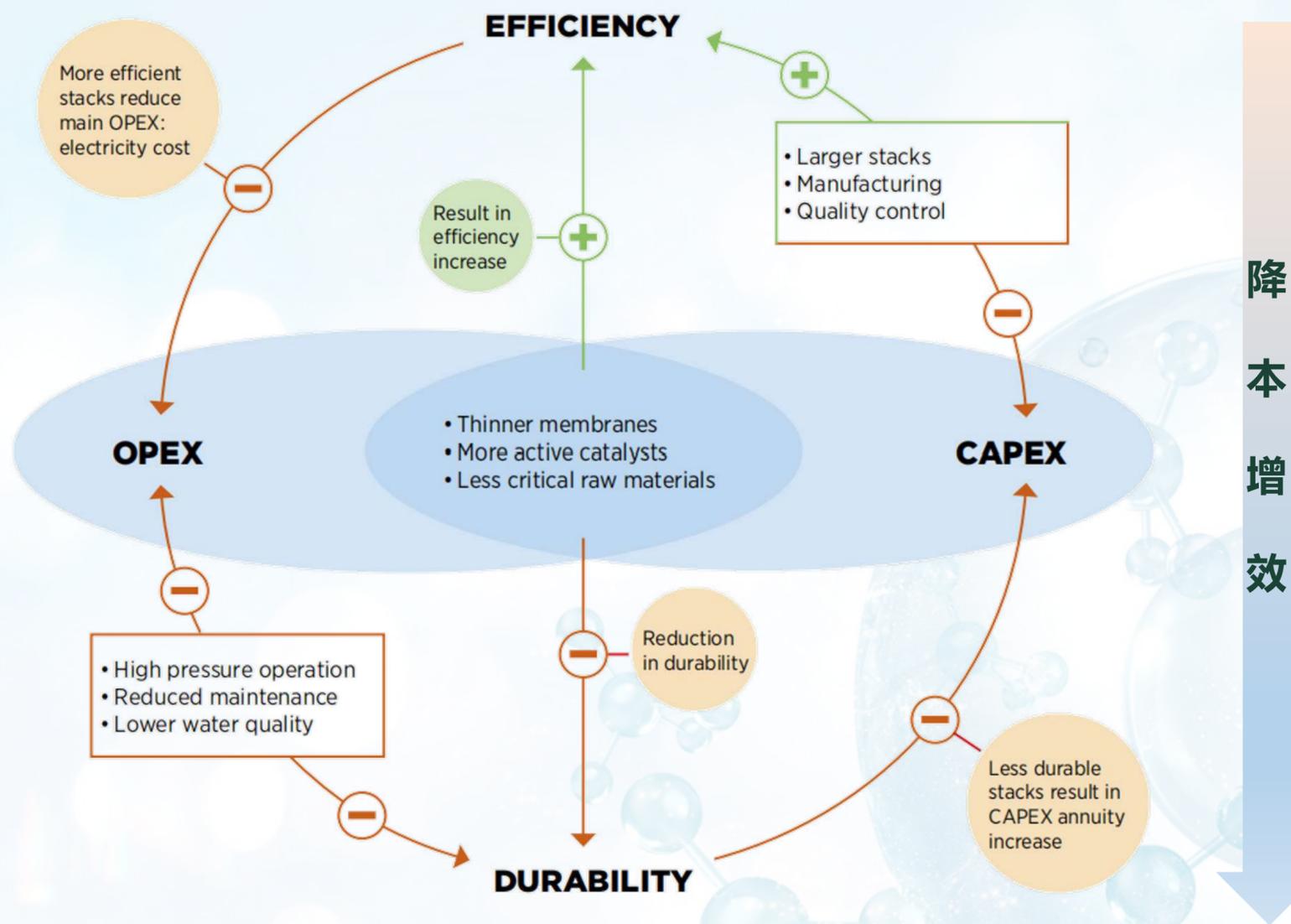
MEA cost: 6.03 RMB/cm²

MEA Total cost: **1664.17 RMB/kW** (占系统成本16.64%)



- 目前膜电极成本约1600元/kW，其中**阳极催化剂 (anode catalyst : Ir)** 成本占到一半以上
- 基于团队测算，通过**提升制氢电密 (improving current density)**、**降低贵金属载量 (reducing Iridium loading)**、**制备级辅材国产化和规模化**等方式，膜电极成本有望在2025年左右降到**300元/kW**(现有价格的1/5)

如何做？



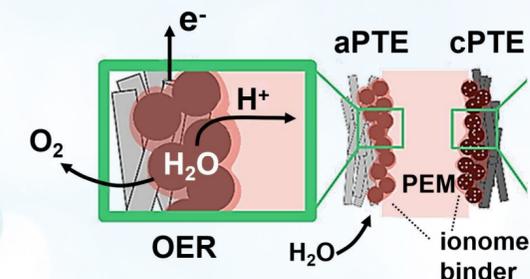
• 催化剂组分、结构设计

尺寸结构、形貌、合金化、载体



• 催化层结构优化设计

电子、质子、水/气物质传输通道，增加反应三相界面



• 结合膜电极贵金属回收

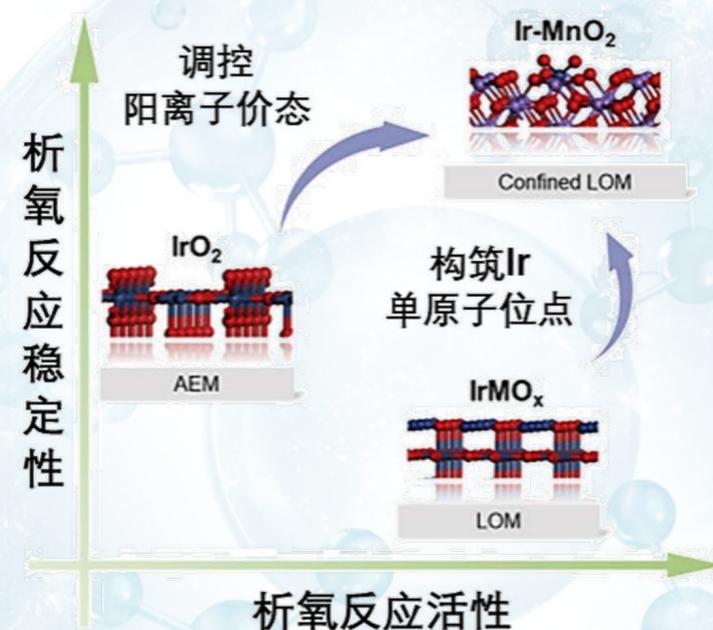
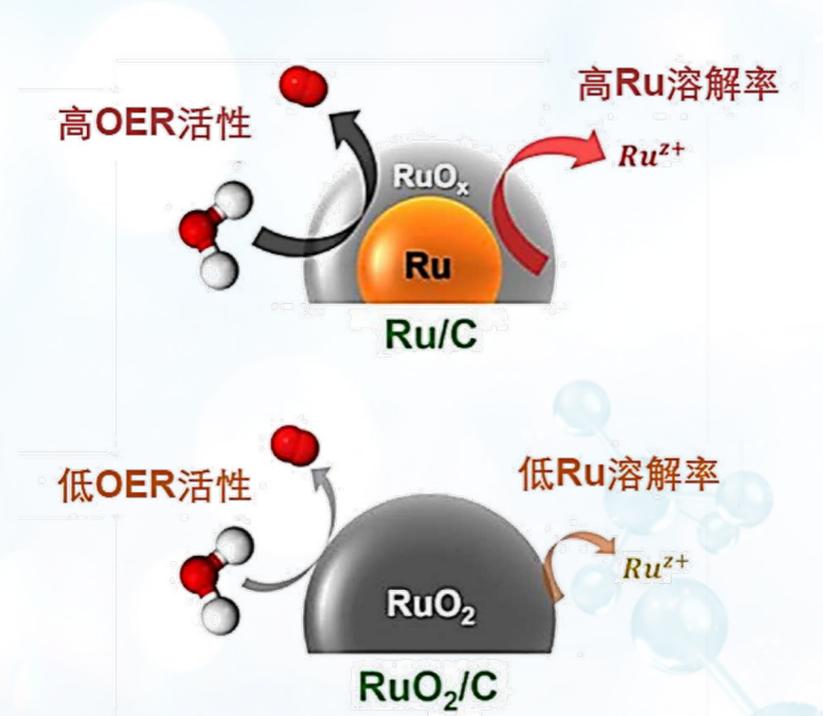
➤ 国际能源署将**催化剂/膜电极**作为解决PEM电解水瓶颈的核心零部件

➤ 发展下一代高电密、长持久的催化剂及膜电极体系是实现PEM电解槽降本的核心

低铱PEM电解槽催化剂及膜电极发展面临的难点

Challenges faced by the development of low-iridium catalysts and membrane electrodes assembly for PEM electrolyzer

难点1/Challenge 1: 现有Ir (Ru) 基贵金属基析氧电催化剂活性与稳定性不可兼得 (trade-off between catalyst activity and stability)

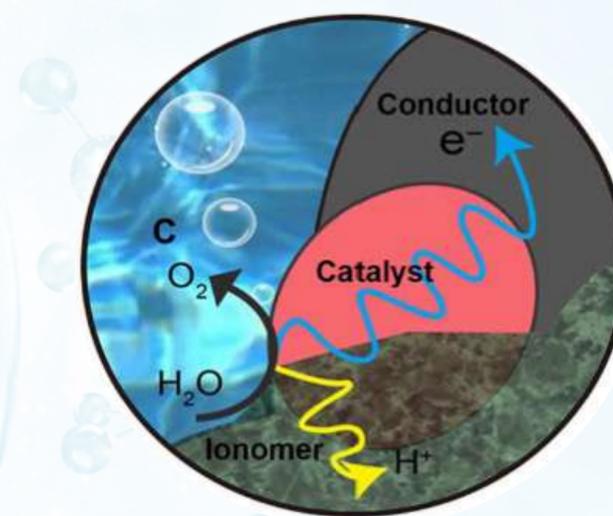
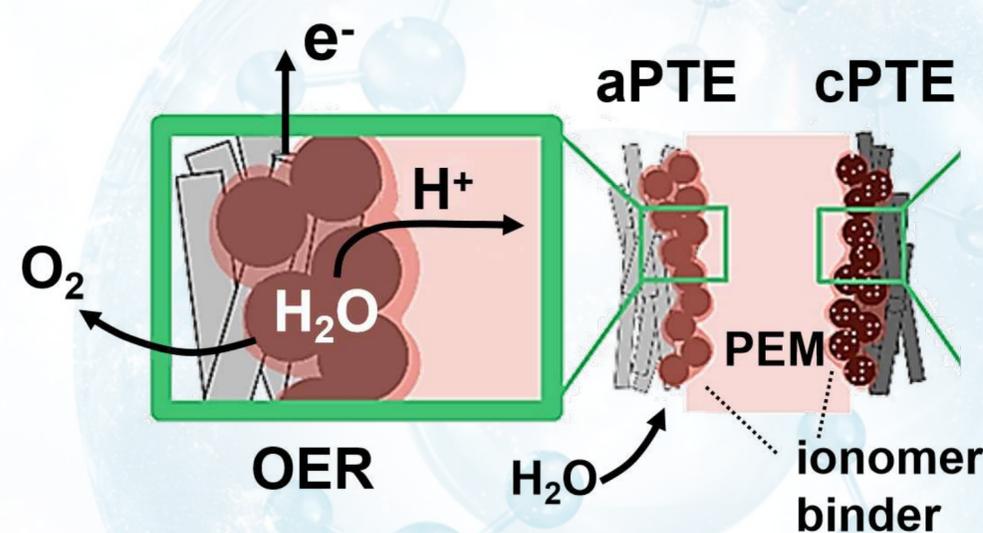
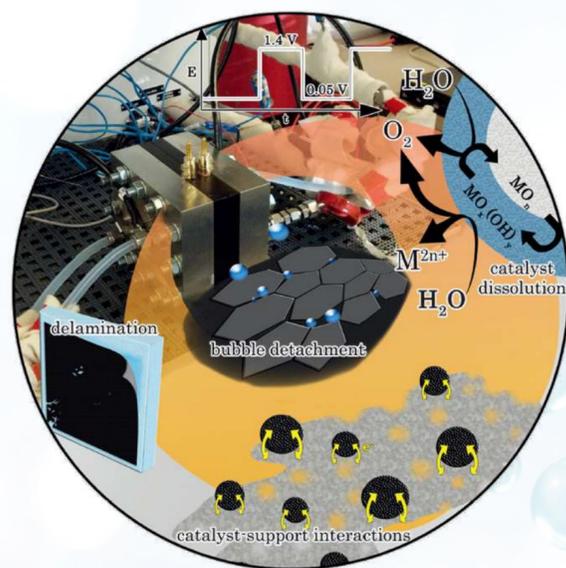


- 析氧反应 (OER) 机制—高催化活性通常带来高金属溶解率 也即低催化稳定性 (Trade-off)
- 提升活性手段: 调控电子结构 (Electronic structure)、纳米化原子利用率 (Atomic utilization)
- 提升稳定性手段: 增强与载体相互作用 (Metal-support interaction)、惰性元素掺杂 (Inert elements doping)

低铱PEM电解槽催化剂及膜电极发展面临的难点

Challenges faced by the development of low-iridium catalysts and membrane electrodes assembly for PEM electrolyzer

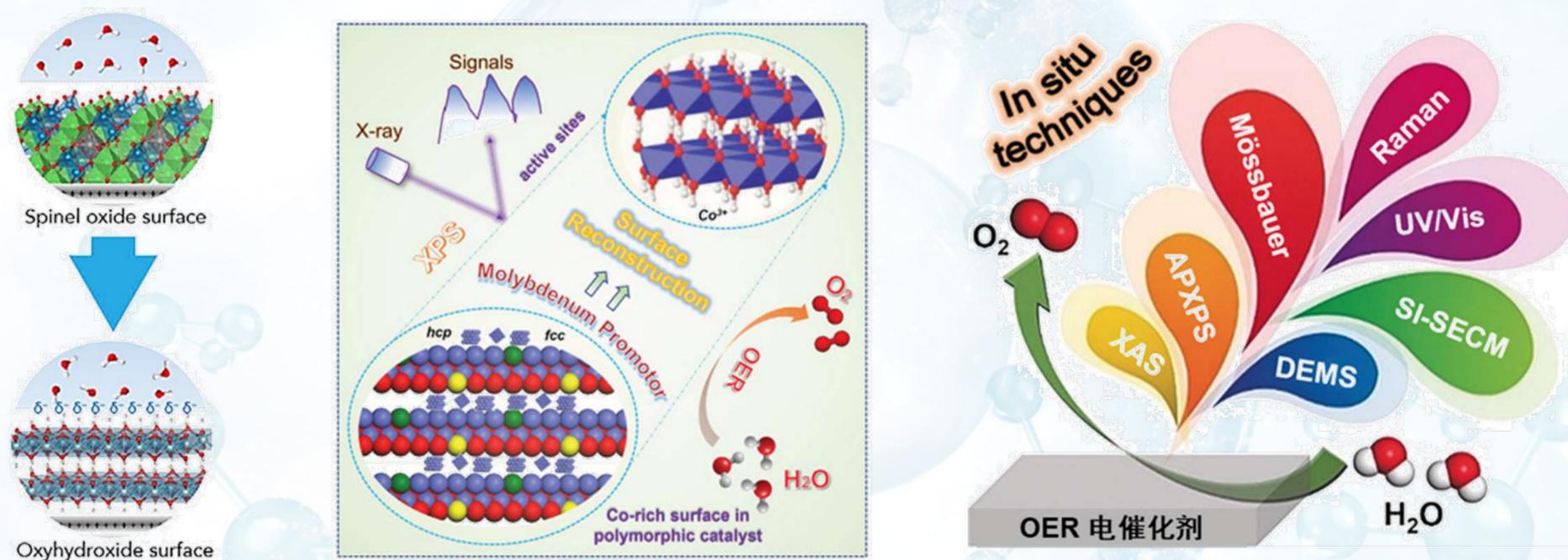
难点2/Challenge 2: 大电流密度工况下，膜电极催化层电子传导与气液传质受阻，催化性能高效表达难
(Electron conduction and gas-liquid mass transfer are blocked, hard to express the catalytic performance efficiently)



- 小尺寸纳米晶易形成多个氧化物界面，**阻抗升高** (Oxide interface impedance)
- 高电流密度下，**气液传质阻抗升高** (Mass transfer resistance under high current density)
- **催化层结构不稳定导致电解槽寿命衰减快** (Unstable catalyst layer leads to fast decay)

难点3/Challenge 3: 目前对工况下氧析出反应机理与结构裂化机制认识有限

(Limited understanding of the oxygen evolution reaction and structural cracking mechanism under operating conditions)



- Ir、Ru基析氧催化剂在高电位下易发生表面重构 (Surface reconstruction)
- 目前缺乏 (准) 原位表征技术 (Lack of in-situ characterization), 从分子/原子/电子层面表征工况下催化材料结构演变、氧析出催化构效关系及溶解导致的催化失效机制仍是领域难点

PEM阳极催化剂——降低贵金属组分、结构有序化

Anode catalysts - Lowering loading of noble metal, structure ordering

低铱/无铱催化剂设计理念和迭代路径

Design concept and iterative path of low-iridium or iridium-free catalyst

组分
Composition



当前

下一代

未来

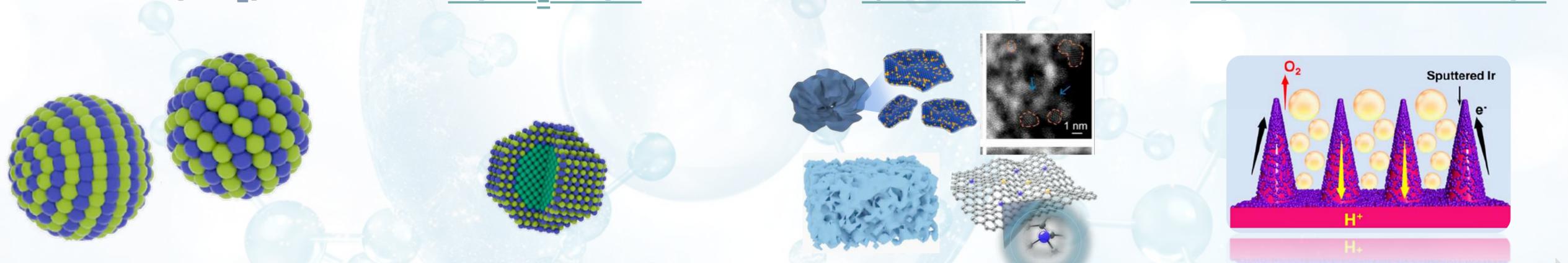
铱黑 (Ir)
氧化铱 (IrO₂)

载体型
(IrO₂@S)

铱合金、铱钌基
(Ir-based)

钌基、钴锰基
(Ru/Co/Mn-based)

结构
structure



当前

下一代

未来

纳米粒子
(nanoparticles)

核-壳结构
(core-shell)

多尺度低维结构
(multiscale low-
dimensional)

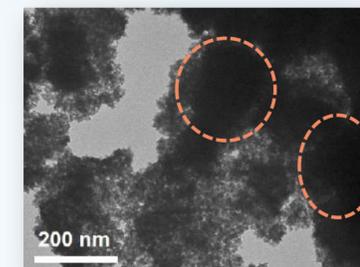
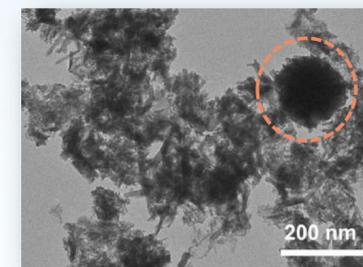
有序化
(Ordering)

PEM电解槽阳极催化剂的设计策略及作用机制

Design strategy and mechanism of anode catalysts

传统铱黑、氧化铱催化剂局限性 Limitations

- 纳米颗粒状，尺寸大易团聚，
- 催化本征活性提升有限、界面阻抗高

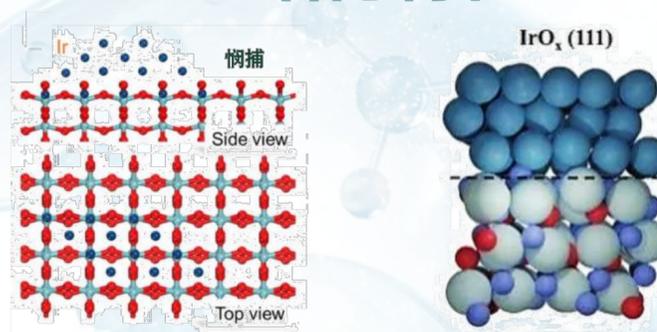


不均一
易聚集

载体型-有效降低载量的合理方案 Supported Type

- #### 特点
- 高导电性
 - 合适的表面积
 - 高耐久性

结构特征

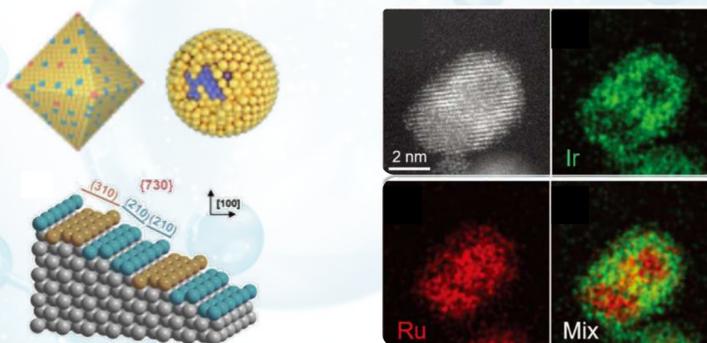


作用机制

- 强化对Ir的锚定作用
- 优化动态界面氧物种迁移机制
- 提升结构灵活性

合金型-有效提升活性的合理方案 Alloyed Type

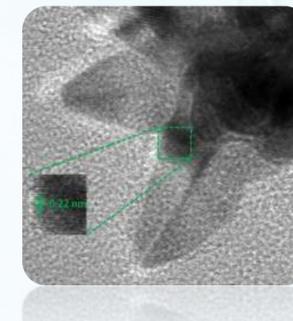
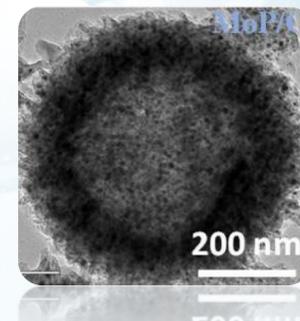
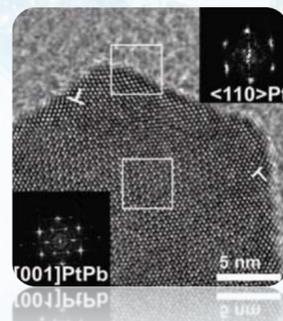
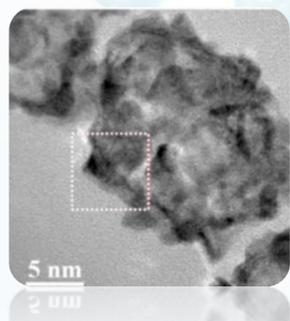
- 降Ir含量-去Ir化
- 催化活性位的本征活性改性



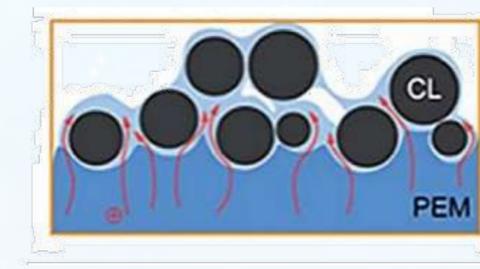
- 增强电子相互作用
- 配体元素强耦合作用
- 调控反应中间体路径

多尺度微纳有序结构设计

Multi-scale micro/nano ordered structure design



微纳结构传质

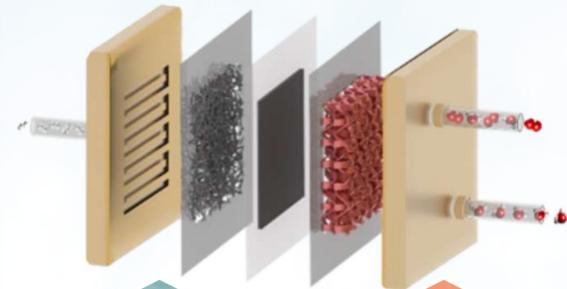
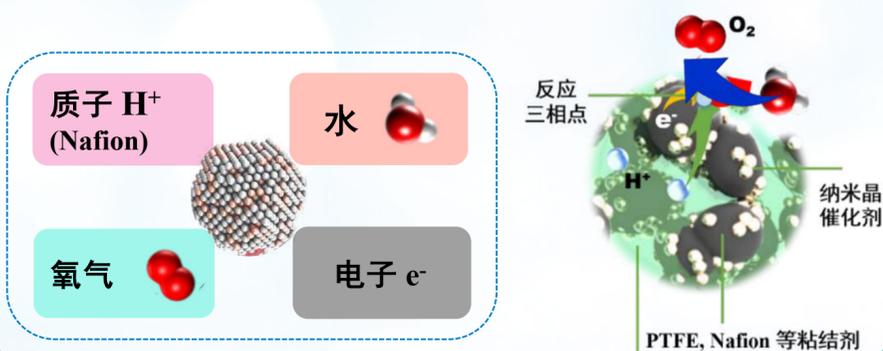


PEM电解槽膜电极——三相界面调控

Three-phase interface Regulation

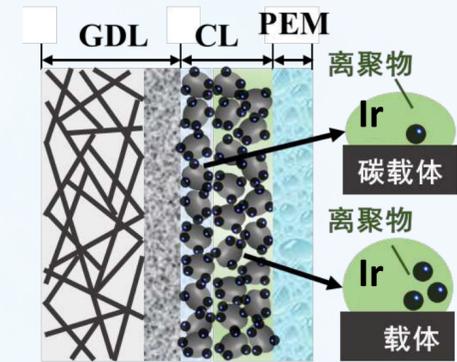
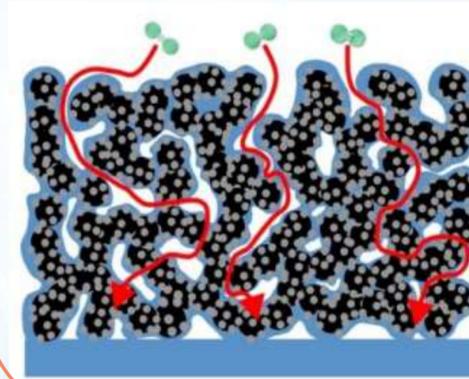
催化剂浆液均质性

- 浆料中溶剂、离聚物预处理
- 溶剂极性优化、粘度优化



涂覆工艺及设备改进

- 阳极离聚物界面/分布可控调节
- 据催化剂性质调整喷涂参数



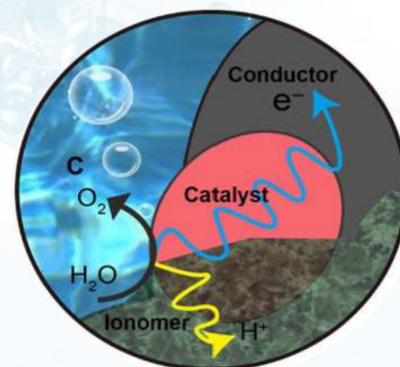
膜电极后处理

电场、恒温中去除溶剂化



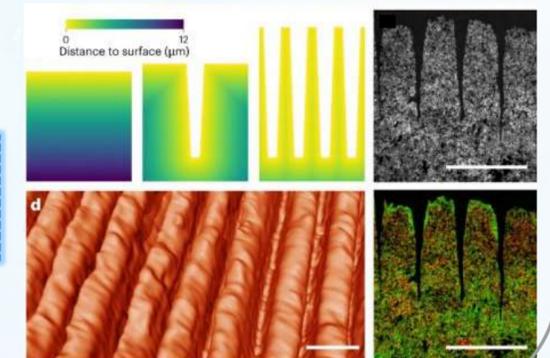
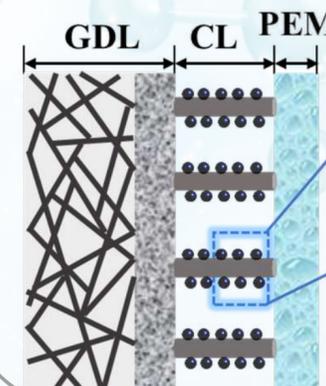
新工艺开发

- 直涂、辊压...
- 无管路损耗、造价成本低...



有序化/分级催化层膜电极构筑

- 三维膜/催化界面增强界面结合强度
- 提供气、液传输快速通道



原位电化学谱学技术监测催化材料表面金属重构、溶解规律，氧物种动态变化 (To monitor surface reconstruction, dissolution process and dynamic evolution of oxygen species)



- 电化学原位同步辐射精细结构谱
活性位的电子结构及其演化规律
- 电化学原位红外/拉曼光谱
分子尺度下氧物种吸脱附行为
- 同位素标定联合电化学原位质谱
示踪氧物种的转化 (AEM、LOM机制)

- 电化学流动池联合电感等离子质谱技术
活性金属稳态/暂态溶解机制
- 等同位置-电镜技术
高电位下催化剂材料表面原子重构过程
- 原位激光共聚焦高速荧光显微镜技术
不同电流密度下气液传质

复杂体系

- 气液固三相反应环境
- 多电子/多质子耦合传输

材料电子结构优化 Electronic

- 氧中间体吸附能优化
- 金属位点高催化活性

材料原子结构优化 Atomic

- 活性位点配位结构
- 重构后的原子结构

低铱化催化剂结构设计策略

材料亚纳米结构优化 Sub-nanometer

- 高原子利用率
- 应变/量子效应

材料微纳结构优化 Micro-nano

- 气-液-固三相界面传质
- 结构稳定性

设计思路

对催化材料和反应机制的深入理解

先进合成方法学和催化机制

金属掺杂 Doping

载体设计 Support

原子/电子结构优化

新型低铱高效催化剂

梯度化制备工艺

优质催化层

各部件组装工艺优化

低成本高效PEM膜电极

催化剂活性提升

贵金属流失减少

**使命和愿景：
通过绿氢核心技术迭代，推动高性能、
低成本的氢能可持续发展**

**Mission and Vision:
To promote the sustainable development of high-
performance and low-cost hydrogen energy through the
iteration of green hydrogen core technology**



动氢催化剂与膜电极性能——实现极低贵金属载量

Dynamic Hydrogen have achieved super-low Ir loading

			小室电压 @2A/cm ² (V)	阳极Ir载量 (mg/cm ²)	阴极Pt载量 (mg/cm ²)	质子膜 (um)	工作温度 (°C)
动氢新能(合金型一代)			1.88	0.35	0.3	115	60
动氢新能(合金型二代)			1.72	0.2	0.5	115	70
动氢新能(无Ir化一代)			1.64	0	0.5	115	70
动氢新能(AEM一代)			1.78	0	0	AEM	80
下游厂商	A	欧洲	1.9	3	1.2	117	50
	B	欧洲	1.95	2	0.3	117	60
	C	欧洲	1.89	1.27	0.35	90	55
	D	北美	1.87	2.9	0.3	115	70
	E	国产	2.02	4.2	0.5	117	50
中游厂商	A	北美	1.88	2	0.3	115	80
	B	国产	1.91	4	4	117	60
	C	国产	1.85	3	0.5	115	80

动氢膜电极优势 Advantages of DM

通过微观结构的优化，动氢新能催化剂在保证膜电极性能达到 **<1.88V@2A cm⁻²**前提下：

- 阴极Pt载量小于0.3mg/cm²
- 阳极Ir载量小于0.5 mg/cm²

“未来还将在催化剂负载量上实现一个数量级的下降。此外，还将配合建立催化剂回收流程，系统性地降低PEM电解槽成本。”

核心产品——催化剂和膜电极发展路线

DM Core product - catalyst and MEA development route

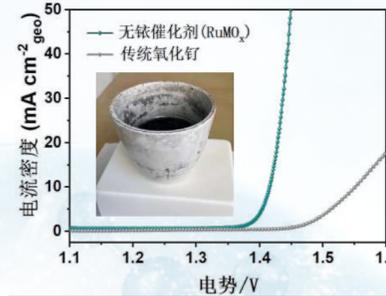
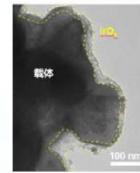
研发路线图

小试

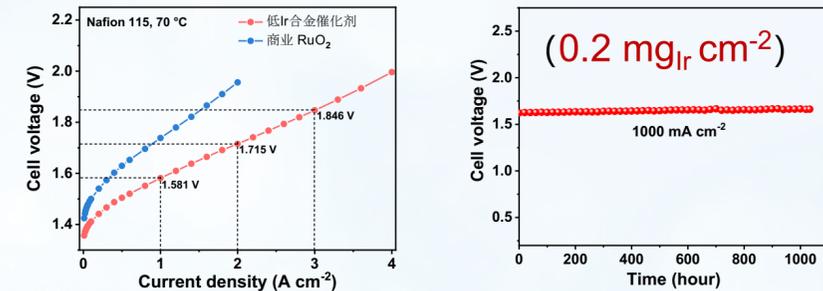
中试

量产

生产方	国家	催化剂种类	质量活性(A mg ⁻¹ @1.55V)
JM	英国	纳米尺度铱	372 ^a
TKK	日本	纳米尺度铱	689 ^a
国内厂商1	中国	纳米氧化铱	480
国内厂商2	中国	纳米氧化铱	550
本团队	中国	原子尺度铱基合金材料	7500

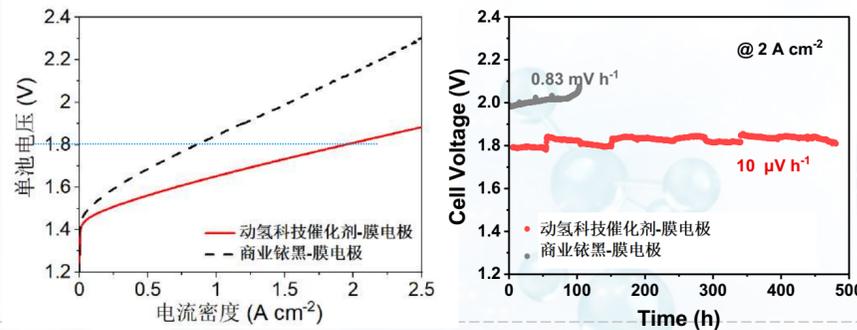


低成本AEM催化剂-001 DQ合金型催化剂-002



高性能PEM: 1.846 V@3 A cm⁻²
高稳定性PEM: 1A cm⁻²@1000 h

膜电极每千瓦铱金属用量为 0.12 g_{Ir}/kW
(国内目前水平: 0.5~0.75 g_{Ir}/kW)



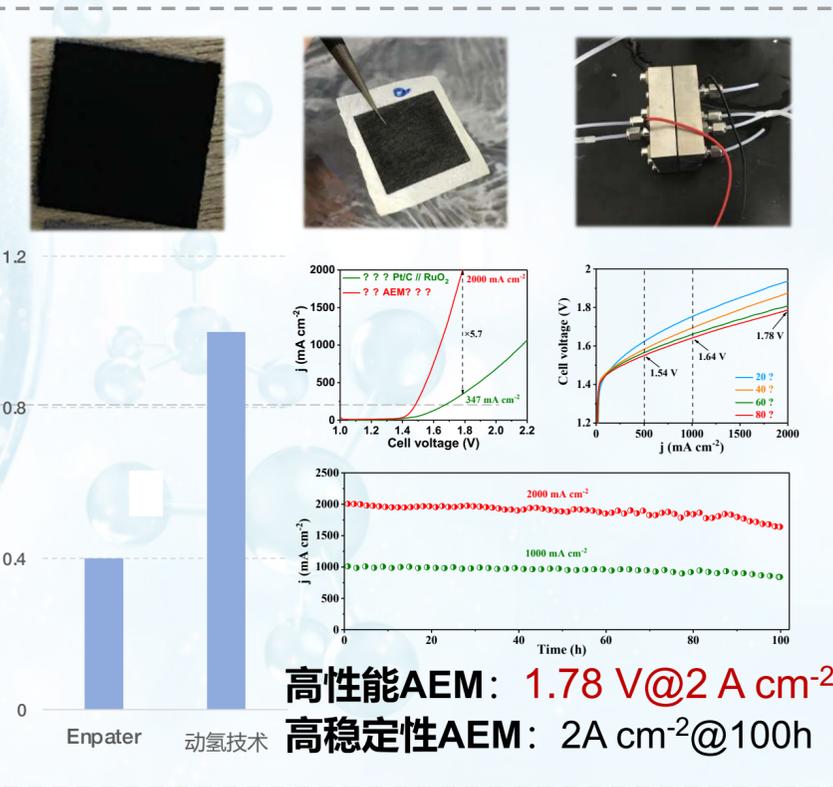
DQ合金型催化剂-001

低铱膜电极 (0.35 mg_{Ir} cm⁻²) 在高电流密度下 (2 A cm⁻²) 的电压衰减率 10 μV/h

DQ载体型催化剂S-001 DQ无铱化催化剂Ru-001



快速批量化制备 (反应过程 < 1 min 克量级)
反应过电势<200 mV, 质量活性提升40倍



高性能AEM: 1.78 V@2 A cm⁻²
高稳定性AEM: 2A cm⁻²@100h

第一代

第二代

第三代

产品规划

PEM电解水催化剂水平与目标（Current level and target）：

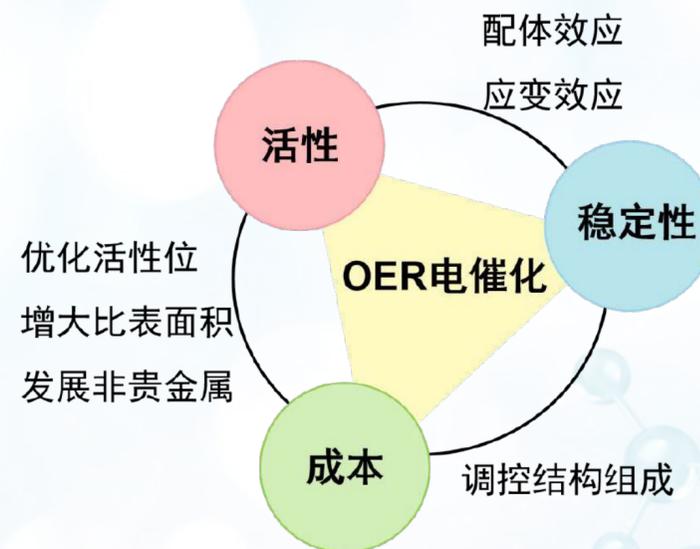


催化剂中铂、铱贵金属用量

	目前水平	DOE 2026目标	动氢技术	DOE 最终目标
催化剂载量 (mg _{metal} /cm ²)	3.000 (Ir, Pt)	0.5 (Ir, Pt)	0.5 (Ir, Pt)	0.125 (Ir, Pt)
额定电流密度(A/cm ²)	2.0 @1.9 V	3.0 @1.8 V	2.0 @1.72 V 3.0 @1.84 V	3.0 @1.6 V
材料用量(g/kW)	0.8 (Ir, Pt)	0.1 (Ir, Pt)	0.12 (Ir)	0.03 (Ir, Pt)

催化剂开发 Catalyst research & development

- ✓ 丰富的催化剂研发经验和先进理论支撑

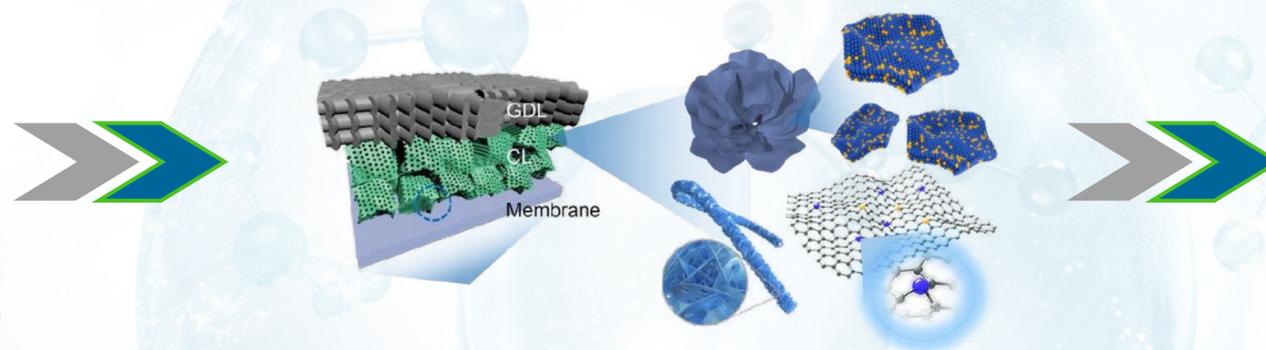


核心催化剂创制

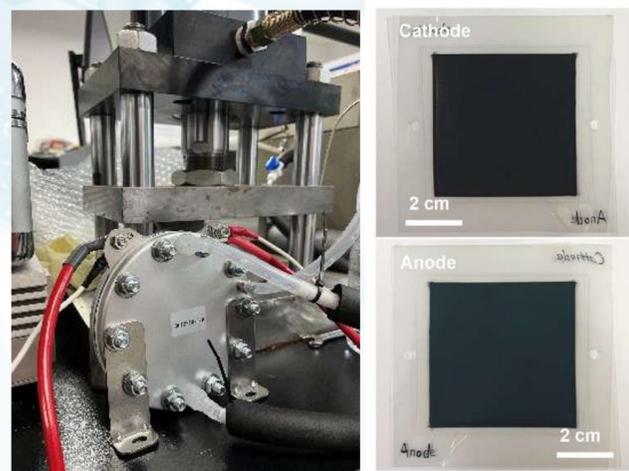
- 低铈合金催化剂
- 负载型低铈催化剂
- 原子尺度铈基合金催化剂
- 无铈化钨基催化剂
- 低成本AEM制氢催化剂

膜电极调控 MEA Control technology

- ✓ 催化剂和离子聚合物树脂界面结构/分布梯度调控
- ✓ 针对不同类型催化剂的浆料配制与成膜工艺参数



大面积、高电密稳定运行

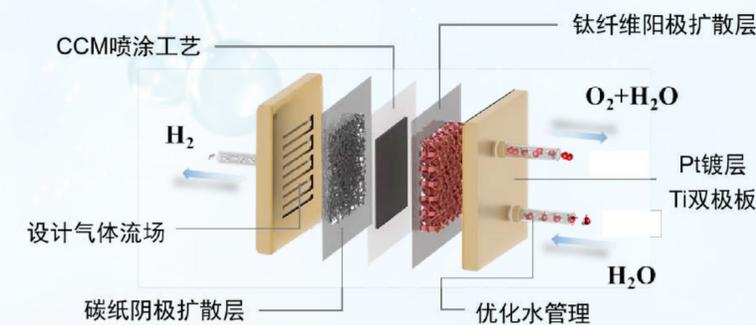


量产工艺 Volume production

- ✓ 开发高效催化剂宏量制备工艺, 一致性优异
- ✓ 膜电极制备工艺参数控制, 涂布改造设计



定制化设计与材料匹配的量产技术和解决方案



感谢观赏!
Thank you!

