

探讨电化学发展轨迹和未来 ——从表面到界面到系统电化学

田中群

厦门大学表界面化学全国重点实验室，化学化工学院
福建省能源材料科学与技术创新实验室（嘉庚实验室）



2025-07-07

厦门大学与南安普顿大学联合举办首期电化学暑期学校 (2009)



2009 年全国研究生暑期学校

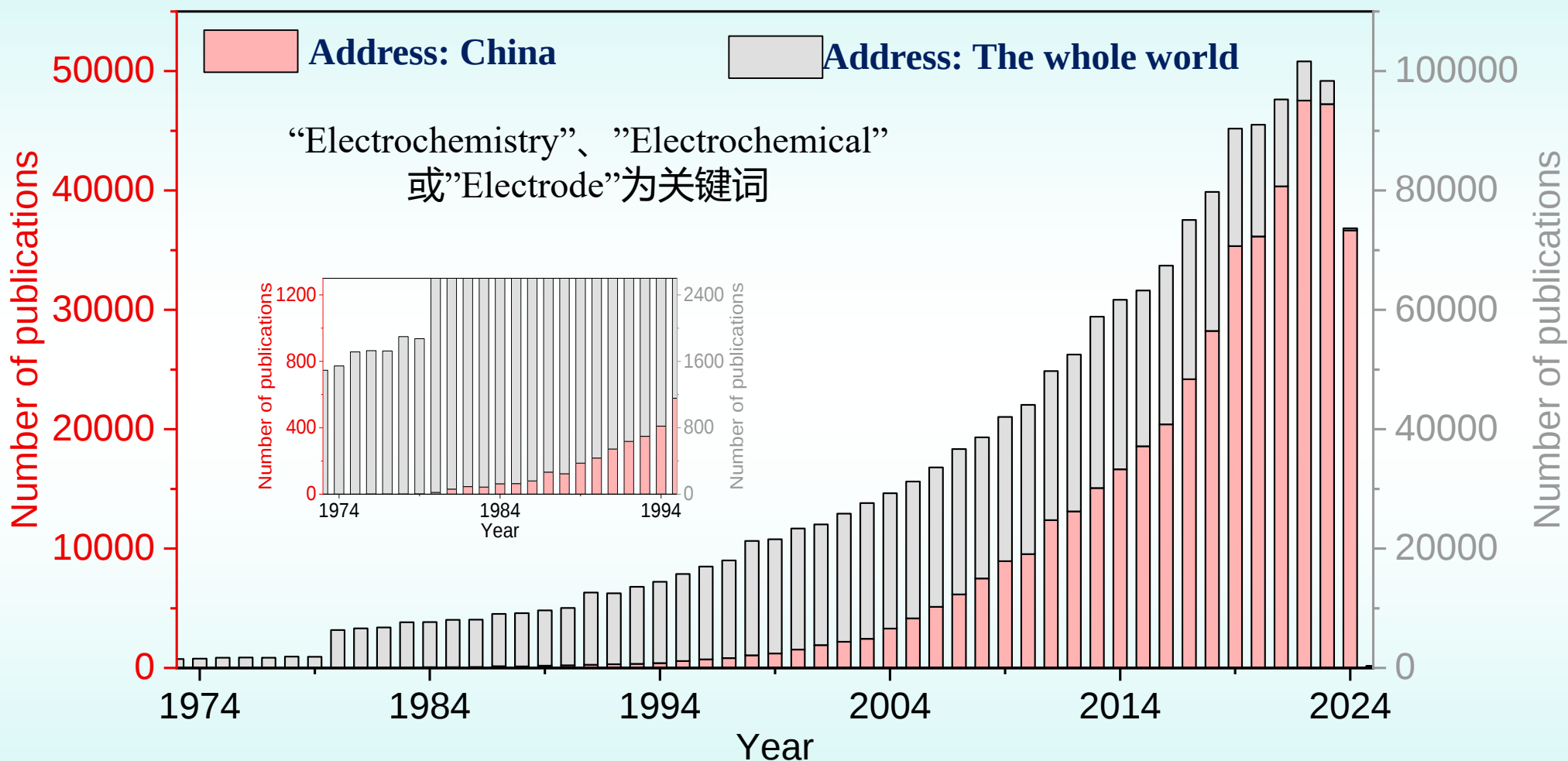
南安普顿大学 - 厦门大学联合电化学暑期学校

University of Southampton - Xiamen University Joint Summer School on Electrochemistry

Aug. 27 - Sept. 10, 2009 Xiamen, China



半个世纪来我国与全球的电化学相关英文论文数发展轨迹

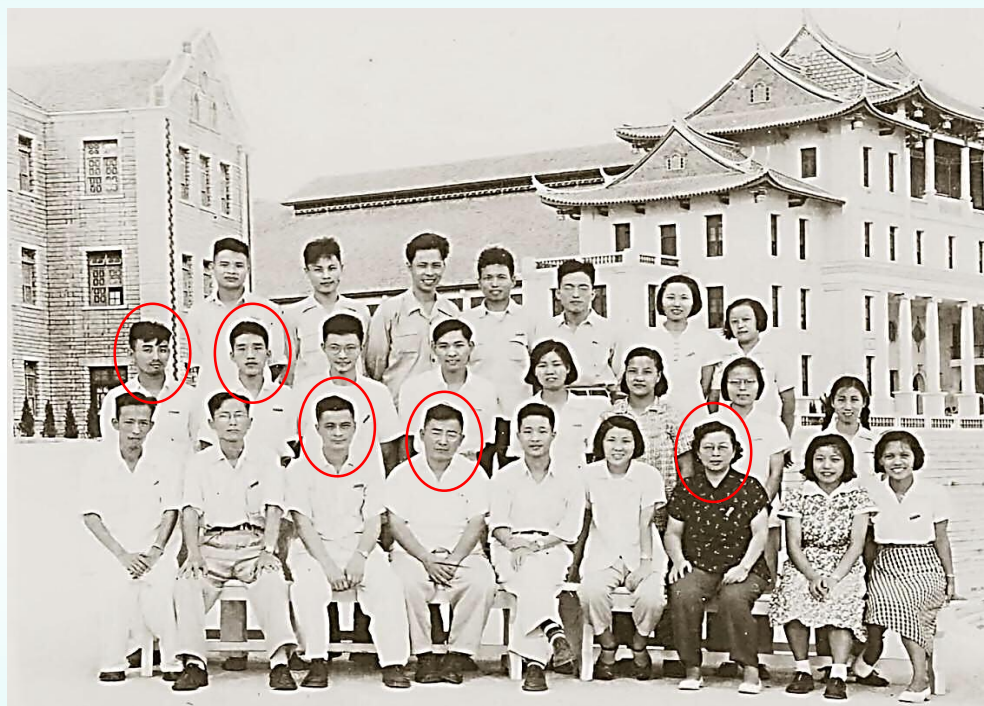


1954年170篇， 1974年1500/0, 1984年6200/50 (120/1), 2024年70000/35000(2/1)

鹰有时飞得比鸡低，但鸡永远飞不了鹰那么高——是俄国文学巨匠高尔基对诗人马雅可夫斯基的经典评价，它不仅是文学领域的智慧结晶，更蕴含着深刻的科学哲学与人生启示

需要培养下一代战略科学家（如钱学森）和战略企业家（如任正非），即兼具“思之深”与“见之远”（Great Thinkers and Viewers）的战略型人才，可穿越时空、识势而动，建立科学与技术之间的战略桥梁。

厦门大学化学系（1955）和电化学专门化（1959）的师生合影



电化学学科：刘树杞（1924，第一任化学系系主任），田昭武，周绍民，林祖庚，陈体衍，林仲华，姚士彬，吴辉煌，林昌建，孙世刚，田中群，毛秉伟，杨勇，赵金保，任斌，詹东平，李剑锋，程俊 等

探讨电化学发展轨迹 ——从表面到界面到系统电化学

何谓全面，深入，**系统思考和研究**？

为什么？凭什么？

如何提升全局关联、分级分类和**协同**能力？

主要科学基础：热力学，动力学，电子学

统计力学，协同学，系统论

(系统性) 如何提升全局关联、分级分类和协同能力

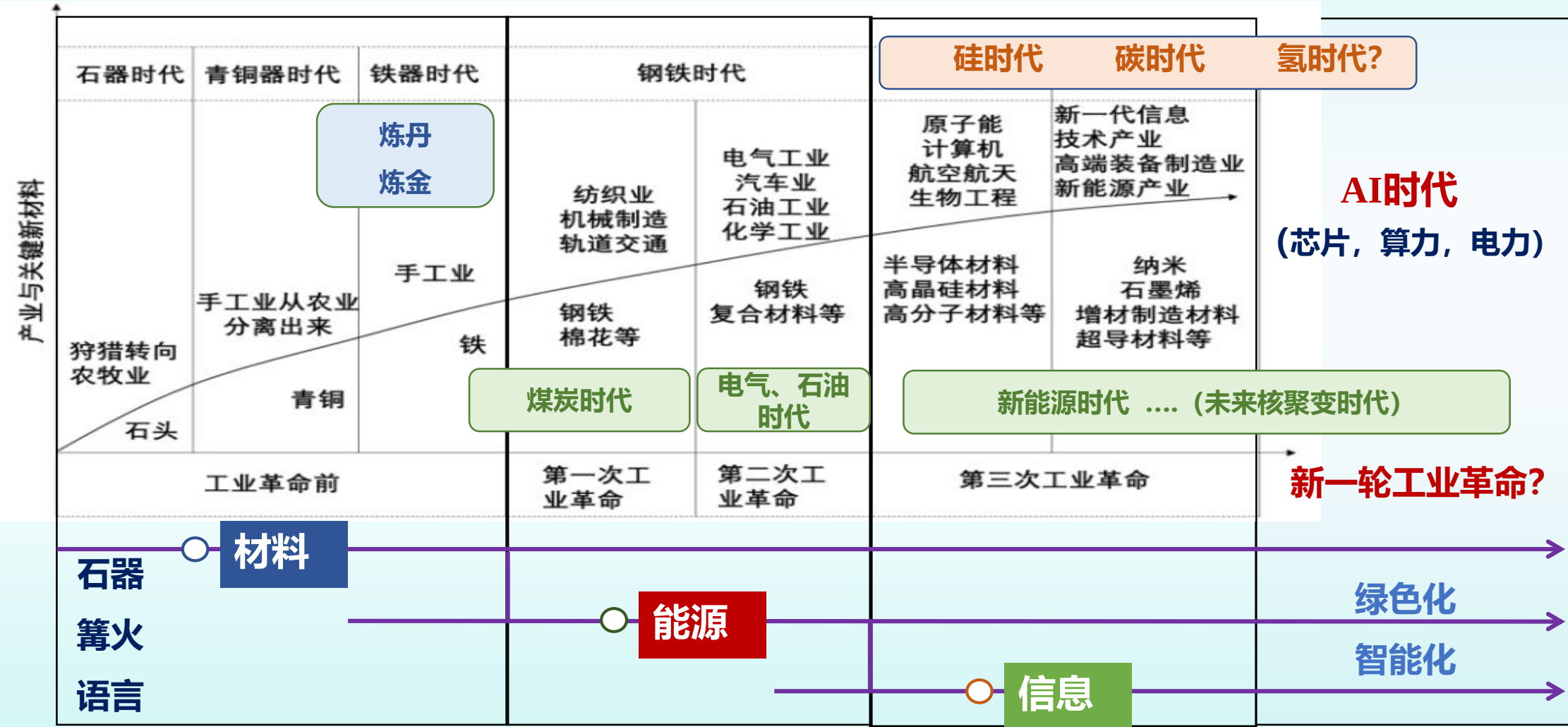
1. 多学科 (化学, 物理, 材料, 工程, 经济, 管理等)
2. 多角度 (能量/质量/数量, 能量/功率密度, 规模)
3. 多因素 (能量/空间/时间分辨, 电子/空穴/离子)
4. 全系统 (热/电/光, 正极/膜/负极, 界面/器件)
5. 全链条 (上/中/下游, 矿产原料到废品回收再生)
6. 算总账 (效率, 污染, 经济, 安全, 国情等矩阵关系)

(培养战略科学家和企业家素质: 为什么? 凭什么?)

材料、能源、信息是人类和社会发展的三大支柱



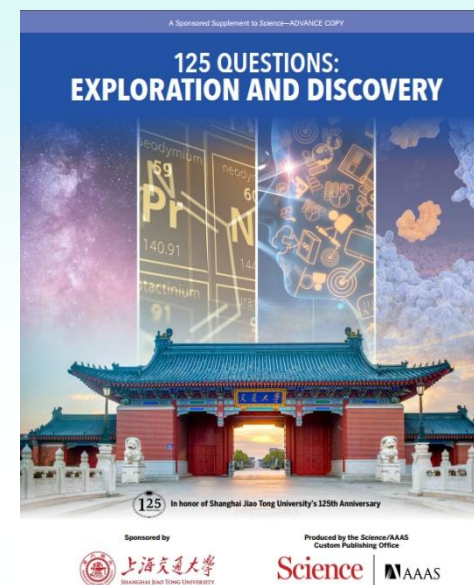
材料、能源、信息在不同历史阶段，梯次发展进入科技产业新赛道，且越来越需要系统和协同发展



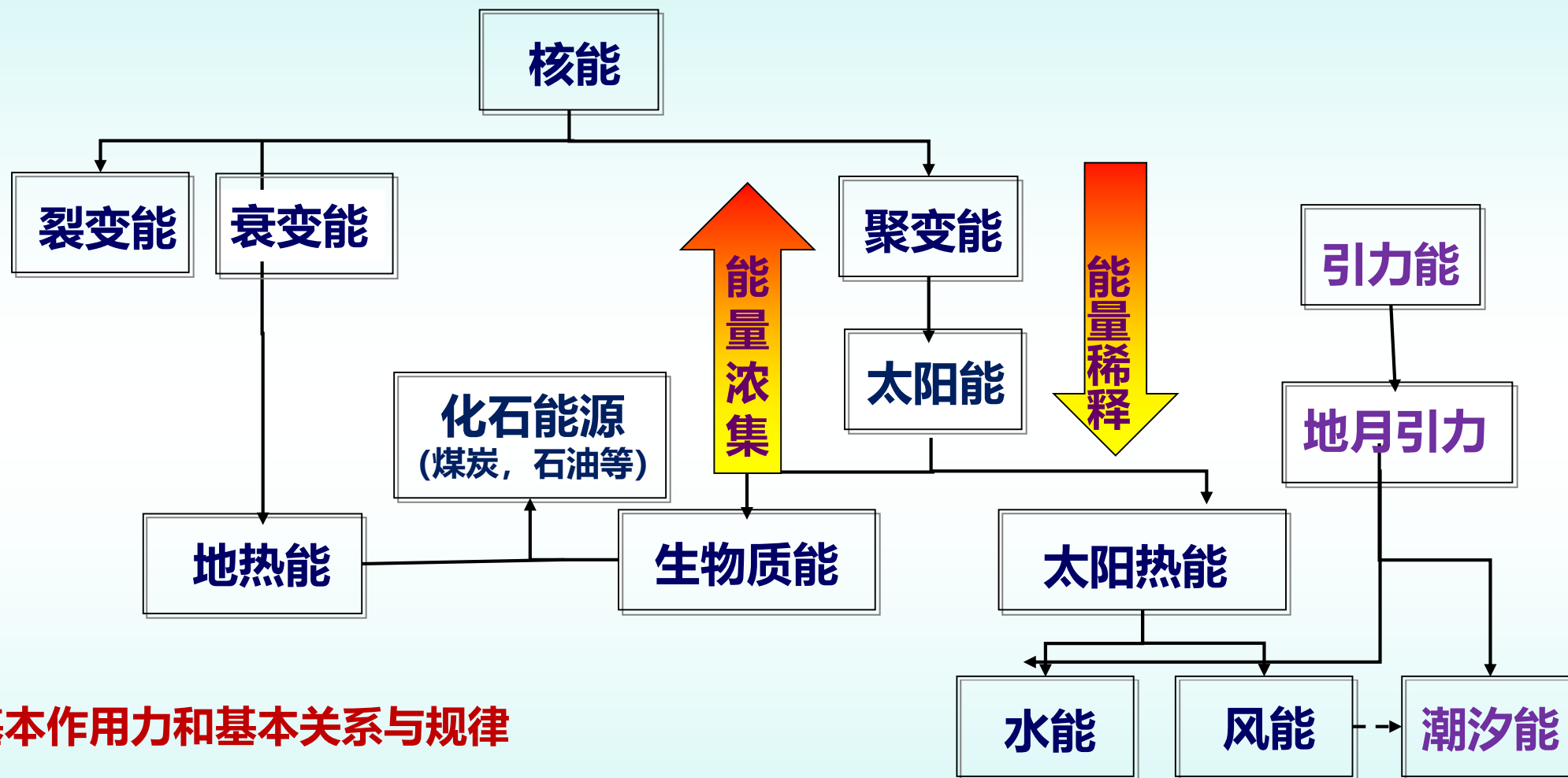
Science (2021年4月10日)

《125个科学问题-探索与发现》

1. **能量存储的未来**是怎样的？
2. 我们**如何突破当前的能量转换效率极限**？
3. **氢能的未来**是怎样的？
4. 我们可以生活在一个**去化石燃料**的世界中吗？



从一次能源的分级分类和品质高低看各类能源的特点和关联

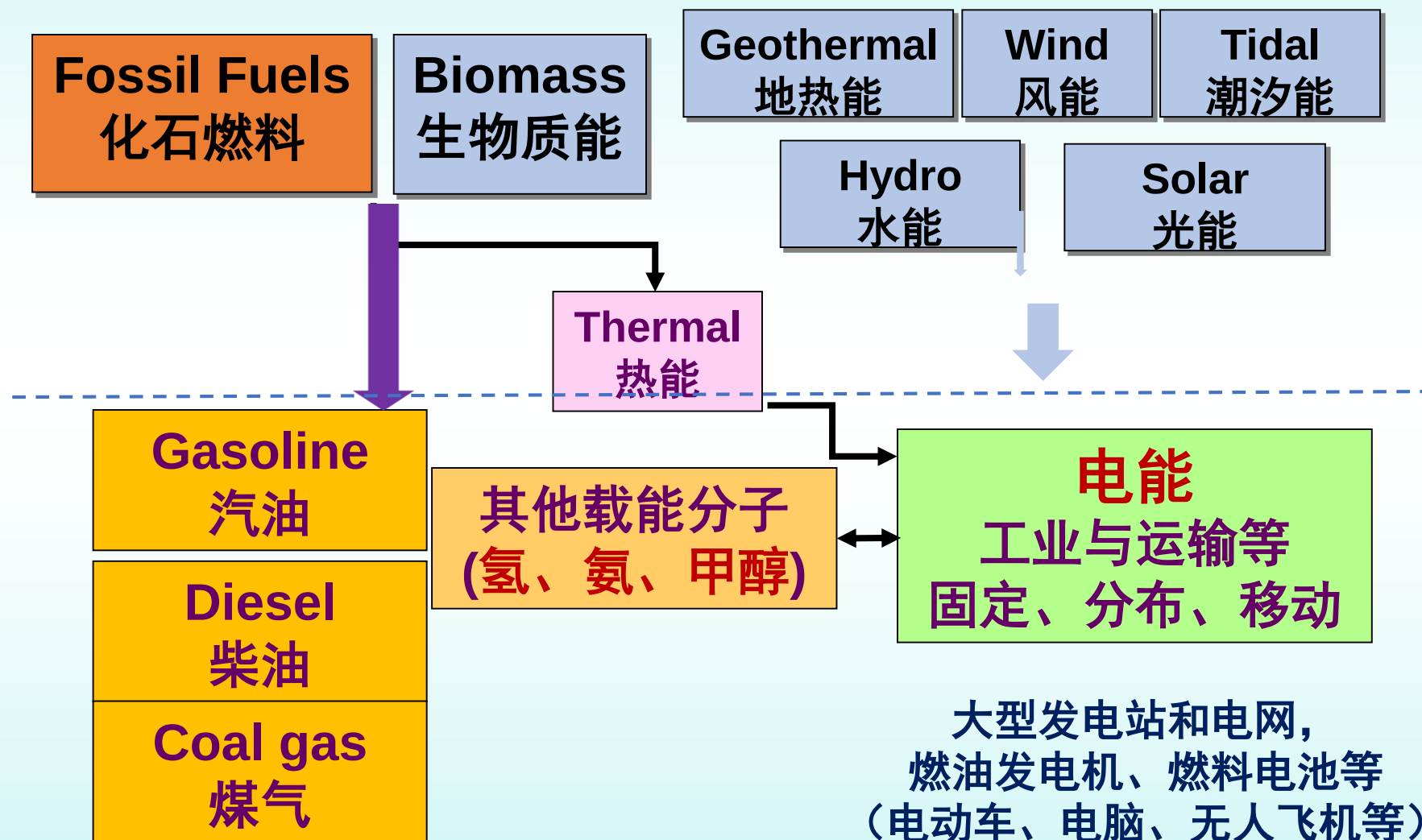


物理基本作用力和基本关系与规律

强力, 弱力, 电磁力, 引力

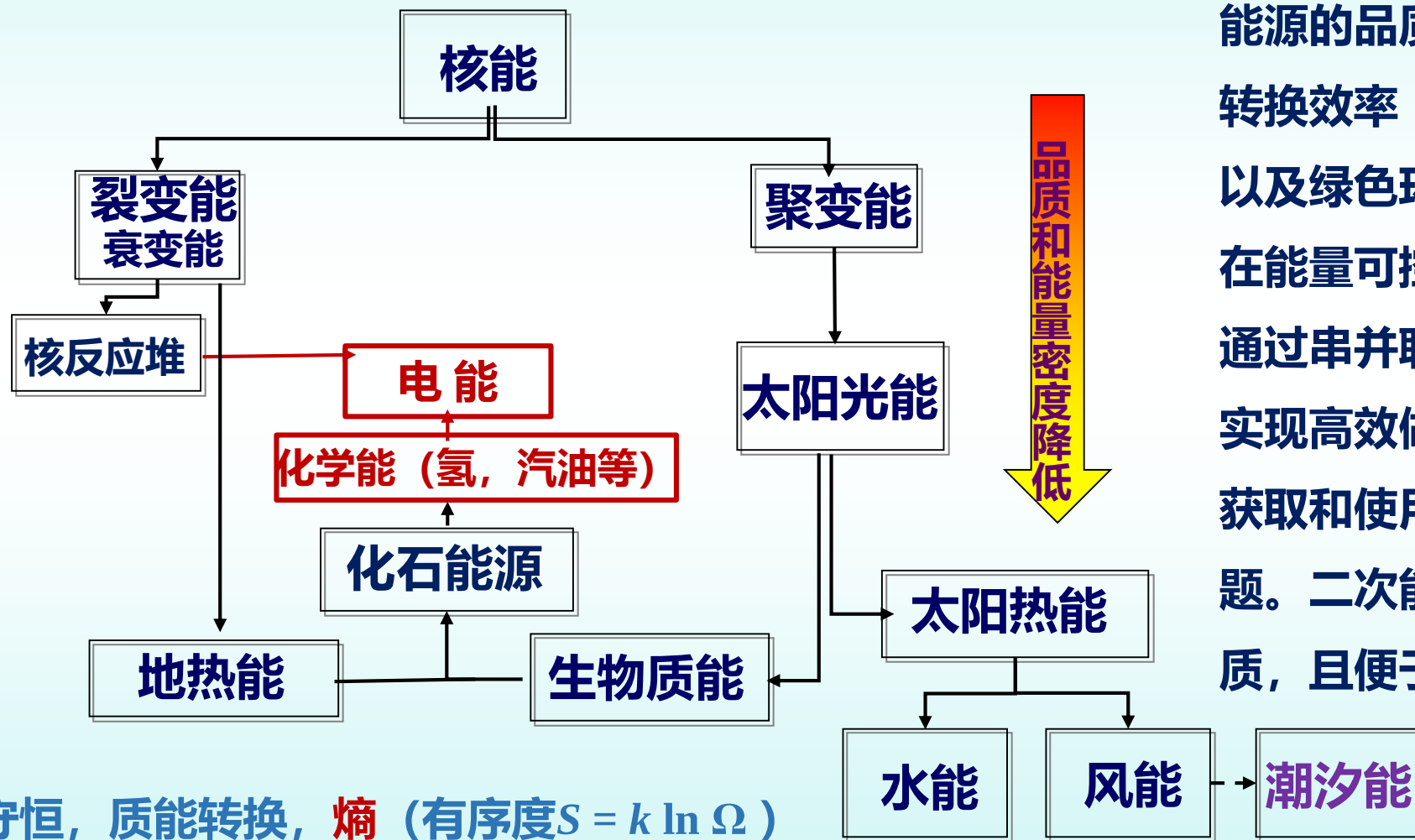
能量守恒, 质能转换, 熵 (有序度, 可逆性)

一次能源转化为高品质、高效方便的二次能源



从能源的全框架、关联性和品质看电能与化学能的优势

一次能源和二次能源的品质和能量密度的分级分类



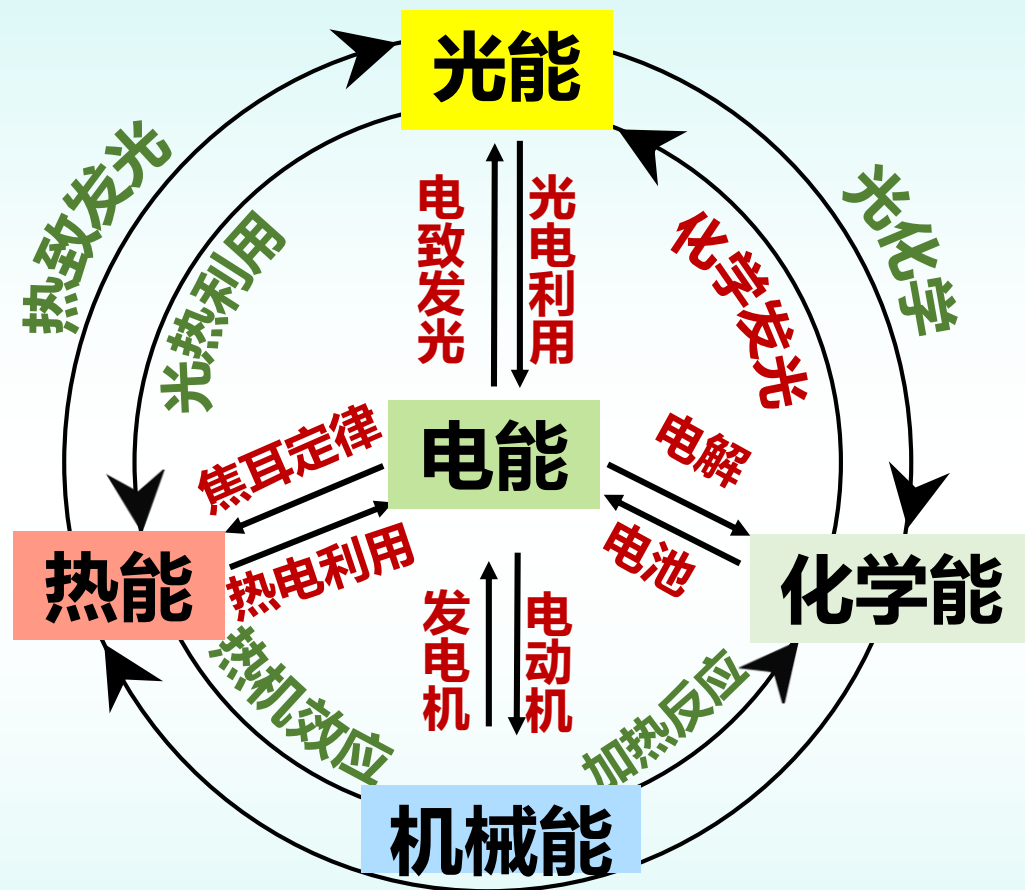
能源的品质主要体现在做功能力、转换效率（适配度）、使用便利性以及绿色环保。电能的高品质体现在能量可控易调（电子伏特eV，可通过串并联和变压器调变），具有实现高效做功、转换和输运效率、获取和使用便利性，但储存是大问题。二次能源的化学能也具有高品质，且便于储存。

能量守恒，质能转换，熵（有序度 $S = k \ln \Omega$ ）
强力，弱力，电磁力，引力

能源品质会在每一次能量转换或传递中单调下降。熵增是能量品质退化的根本原因，制约着能量转换效率的理论上限与实际性能。能量数量虽守恒，但“有用性”却不断被熵增所侵蚀。衡量能源利用优劣不仅要看一阶段输入输出的能量多少（一阶效率），更要看有用能有多少被保存下来（二阶效率）。

信息论与控制视角下的能源适配度是决定能源品质有效发挥的另一大因素，即能源供给与需求在时间、空间、形式等方面的适配程度，以及系统对供需差异的控制能力。高适配度意味着能源以正确的时间、地点和恰当的形式提供给负载，减少浪费和波动；低匹配度则会导致能量闲置或短缺，降低整体效用。

最常用的几类能源的相互转换—中心是电能



电能的高品质主要体现在能量可控易调而实现高效的做功、转换和输运以及使用便利性。

其科学本因是主导物质世界相互作用

（能量转换）的电磁力的最基本和最简便的表现形式是电子、电磁场、电势。

电能（电子伏特eV）的使用能量密度高，其做功和输运过程的熵变很小。化学能种类繁多，高品质的化学能具有高能量密度和存储便利等优势。

能源包括获取(转换)、输运、做功三大环节，其品质取决于此过程的可逆性和适配度

为何光能、电能和声能极难自身存储 -- 与波性质关联？



能量形式	波动载体	本质	传输	存储性
电能	电磁波、电场振荡	场能（电子、电场变化）	真空可传播	难（需转为化学能/动能）
光能	电磁波（光子）	电场和磁场的横波	真空可传播	难（需转为其他形式）
声能	机械纵波	粒子振动导致的压力波动	需靠介质	难（迅速衰减）
风能	质点位移	质点的动能	动力	难（动能）
水能	质点位移	质点的势能	重力	易（势能）

电能-光能-热能的能量定量转换

能量 E (焦耳) $\longrightarrow$ eV (电子伏特)

κ (单位转换常数) $\text{---} 1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}$

h (普朗克常数) $\text{---} 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ (焦耳·秒)

E (光子能量) $= h$ (普朗克常数) $\times \nu$ (频率)

$E = h/\kappa \times c/\lambda$

$E = [6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}] / [1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}]$
 $\times [3 \times 10^{17} \text{ nm/s}] / \lambda \text{ nm}$

$E = 1240/\lambda$ (电子伏特)

$532 \text{ nm} = 2.3 \text{ eV}$, $10,000 \text{ nm} = 0.12 \text{ eV}$

k_B (玻尔兹曼常数) $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$T = 273 \text{ K}$ 时, $k_B T / \kappa = 0.02 \text{ eV}$;

$T = 2000 \text{ K}$, 0.17 eV

电能

0.1 - 10.0 eV

光能

0.1 - 10.0 eV

热能

0.02 - 0.2 eV

电化学学科发展脉络和学科交叉（能源电化学至关重要）



跨学科融合和产业巨大需求驱动电化学方法发展乃至范式新突破！

从电极到电双层研究，从表界面电化学到系统电化学研究



VI. *Experimental Researches in Electricity.—Seventh Series.* By MICHAEL FARADAY, D.C.L. F.R.S. Fullerian Prof. Chem. Royal Institution, Corr. Memb. Royal and Imp. Acadd. of Sciences, Paris, Petersburg, Florence, Copenhagen, Berlin, &c. &c.

Received January 9,—Read January 23, February 6 and 13, 1834.

§. 11. *On Electro-chemical Decomposition, continued.* ¶ iv. *On some general conditions of Electro-decomposition.* ¶ v. *On a new Measurer of Volta-electricity.* ¶ vi. *On the primitive or secondary character of bodies evolved in Electro-decomposition.* ¶ vii. *On the definite nature and extent of Electro-chemical Decompositions.* §. 13. *On the absolute quantity of Electricity associated with the particles or atoms of Matter.*

The surfaces at which, according to the common phraseology, the electric current enters and leaves a decomposing body, are most important places of action, and require to be distinguished apart from the poles, with which they are mostly, and the electrodes, with which they are always, in contact. Wishing for a natural standard

法拉第在1834建立了阴极、阳电极等概念，并指出电极表面至关重要。

Faraday, Michael. *On electro-chemical decomposition, continued.* Royal Society, 1834.

20世纪著名科学家指出研究表面的重要性和困难性，推动表面科学的诞生和成长



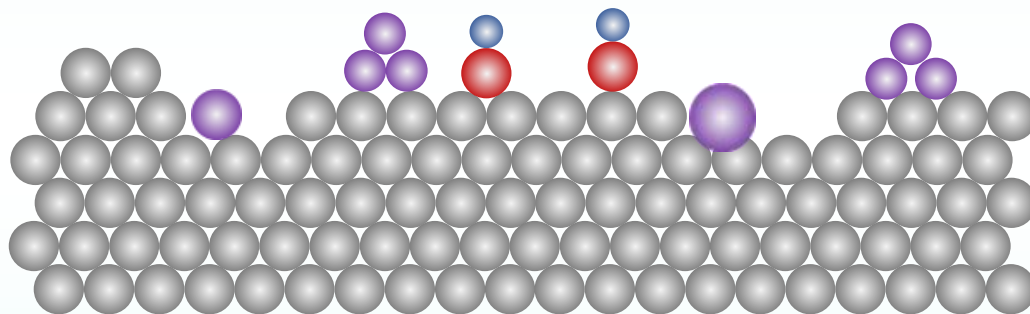
“The *surfaces* of bodies are the field of very powerful forces of whose action we know but little.”

“God made the bulk;
surfaces were invented by the devil.”



Lord Rayleigh

1904年诺贝尔物理学奖



复杂的表面结构：

缺陷、台阶、不同晶面、重
构、杂质、各类分子吸附...



Wolfgang Pauli

1945年诺贝尔物理学奖

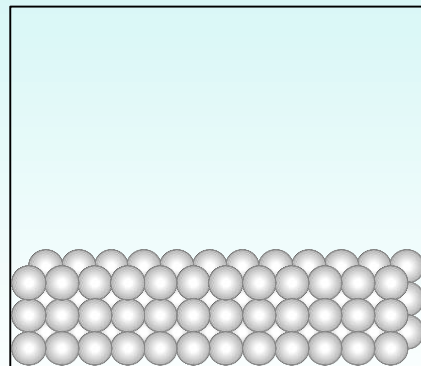
从无确定结构粉末到基于单晶表面的表面化学和复杂界面化学



无确定结构

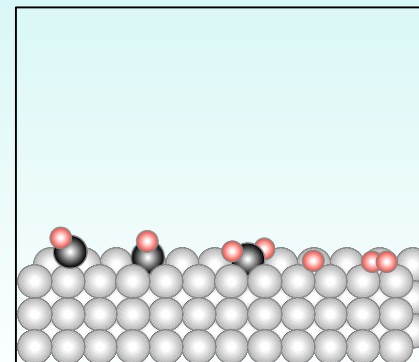


单晶表面



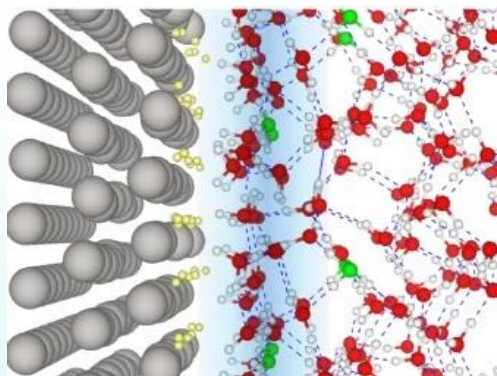
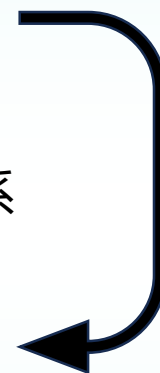
表面物理

UHV、结构确定单晶表面



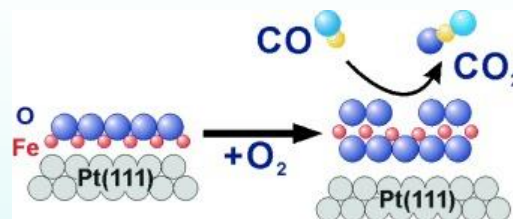
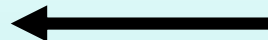
表面化学（吸附、反应）

引入分子、确定的构效关系



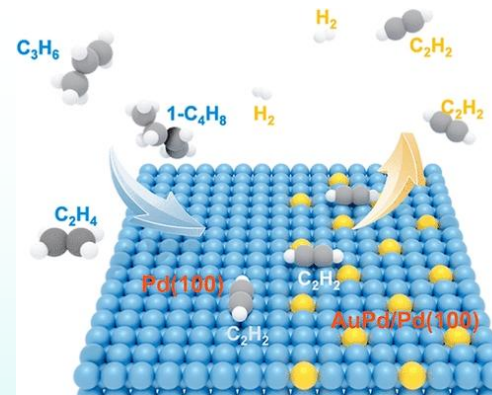
Nat. Catal. 2022, 5, 900

界面化学（吸附、反应）



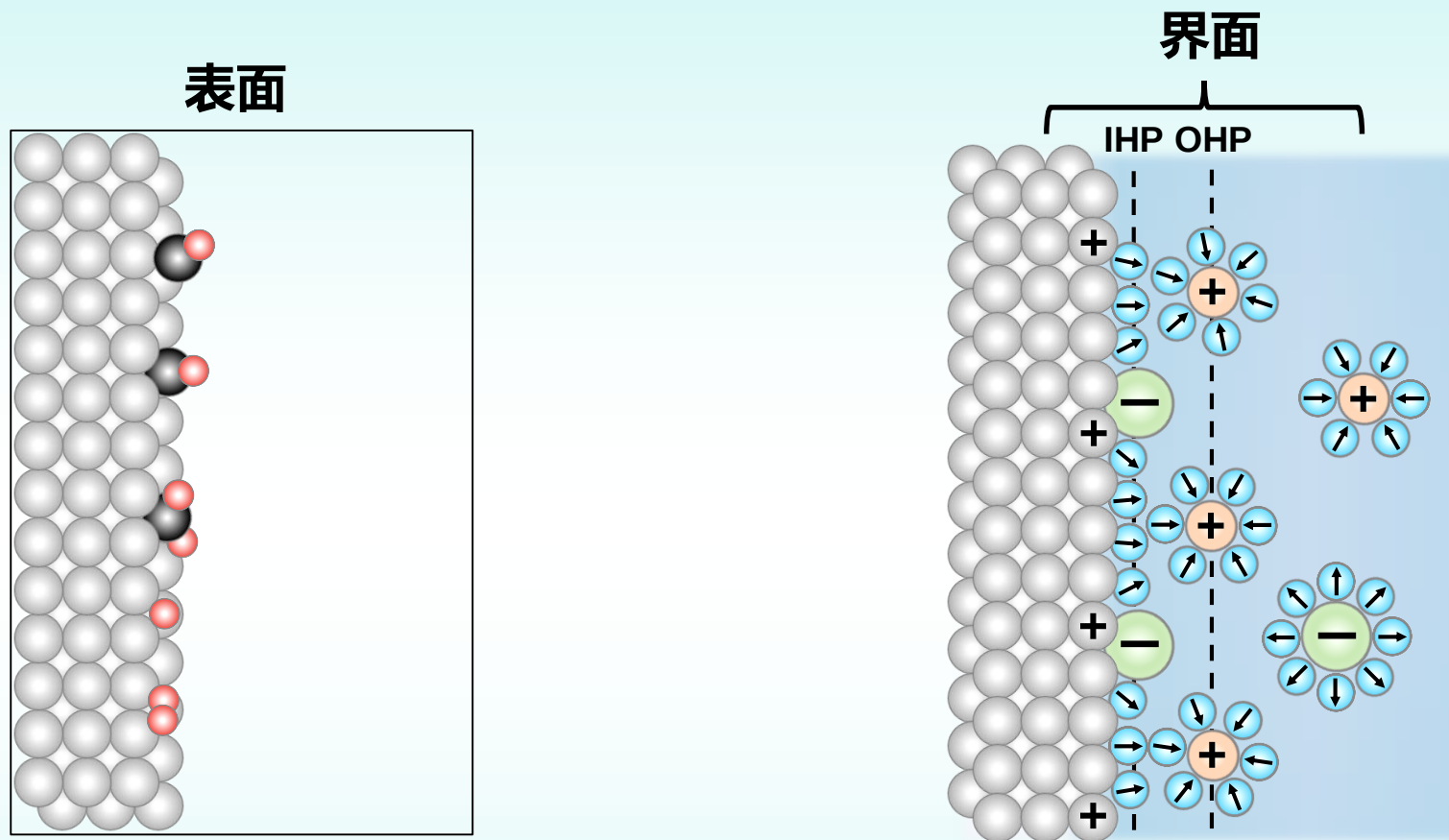
ACIE, 2010, 49, 4418

表面化学（复杂活性位：晶面、台阶、缺陷、助剂等，以及金属-氧化物和金属-配体界面等）



J. Am. Chem. Soc. 2024, 146, 18, 12850

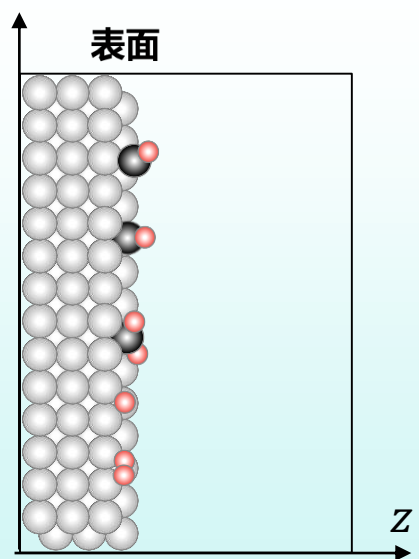
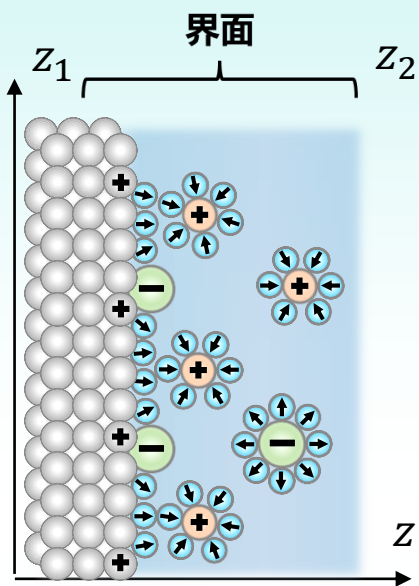
通常的表面和界面的科学内涵与联系？



表面：单一凝聚相（固相或液相）最外层的原子/分子，是一个准2D区域

界面：多相之间**密切影响**的过渡区域，可延伸至纳/微米范围的准3D区域

表面和界面的科学内涵与联系?



界面科学：关注**多相交界处**形成的准平衡区域。

其中多相交界区域的物化性质呈现**空间梯度**分布，物质，能量，电荷的传输及化学反应具有明显的空间依赖性和长程作用。

简单体系的泛函描述：

组分浓度分布

电势，温度等

$$F_{Interface}(\{c_i(z)\}, \{\phi_j(z)\}, z) = \int_{z_1}^{z_2} f(\{c_i(z)\}, \{\nabla c_i(z)\}, \{\phi_j(z)\}, \{\nabla \phi_j(z)\}, z) dz$$

例如，通常的电化学固液界面：

$$F_{EC} = \int_{z_1}^{z_2} \left[\sum_i \mu_i^0 c_i + k_B T \sum_i c_i \ln c_i - \sum_i z_i e c_i \phi - \frac{\epsilon}{2} \left| \frac{d\psi}{dz} \right|^2 \right] dz$$

当仅存在单一相，过渡区厚度趋于0，组分性质/化学势表现为从连续过渡转变为跃变

$$F_{int \rightarrow surf} \approx F_s(\{c_A\}, \{\phi_A\}) + F_s(\{c_B\}, \{\phi_B\}) + F_{coupling}(\{c_i\}, \{\phi_i\})$$

$$F_{surface}(c_i^s, \phi_j^s) = \sigma(\{c_i^s\}, \{\phi_j^s\})$$

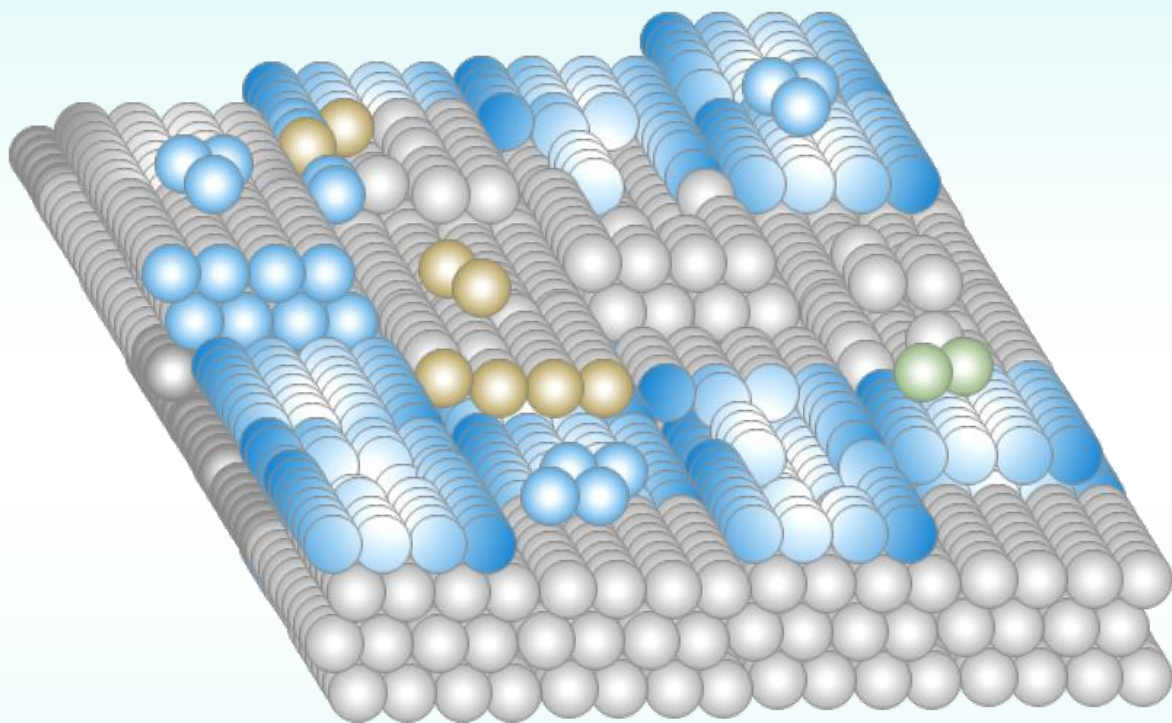
逐渐消失

表面科学：单相表层原子/分子的结构、性质及吸附、催化等现象。

界面的物质-能量-空间-时间的多维度复杂性?

界面结构和过程的复杂性:

缺陷、台阶、不同晶面、重构,
杂质、吸附、反应,
金属-载体相互作用、金属-载体
界面活性位、表面配体影响催化、
单原子配位环境影响,
局域电荷、势能、力、偶极矩和
极化率, 等等...



复杂活性位: 晶面、台阶、缺陷、助剂等,
以及金属-氧化物和金属-配体界面等

任何一个学科和科学的发展都经过三阶段

数据： 混乱——可靠——准确

实验： 定性——定量——规范

理论： 猜想——模型——理论

成果： 论文——综述——专著

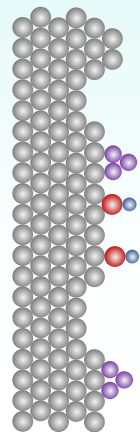
—————→
起始 —— 发展 —— 成熟

界面科学还处于发展阶段

表面科学处于基本成熟阶段

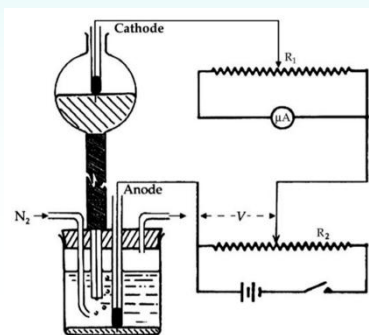
电化学发展的必然历程：从表面电化学到界面电化学

早期电化学研究



粗糙被污染表面

滴汞电极

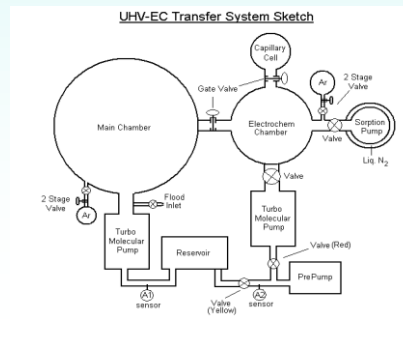


清洁表面

1. 传统电化学，采用粗糙电极，受杂质干扰大，难以建立准确的构效关系。
2. 滴汞电极，可形成新鲜表面，克服溶液里和表面杂质影响。

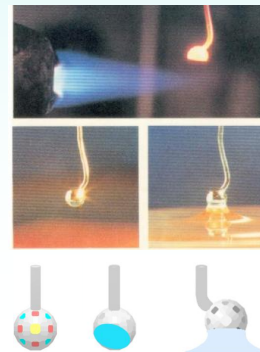
表面电化学

UHV转移



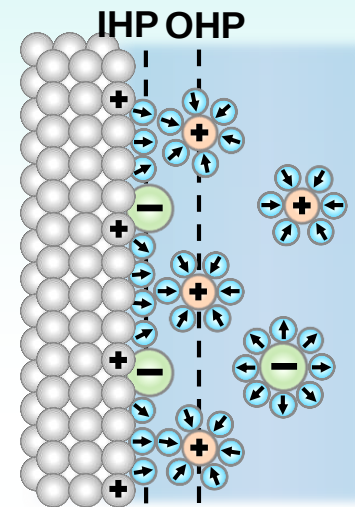
结构确定表面

单晶电极

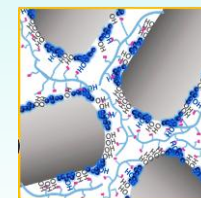


1. 采用结构明确的单晶电极，UHV或退火处理排除杂质。
2. 实现表面结构的精确控制，系统研究构效关系，是电化学研究迈向科学化的过渡。

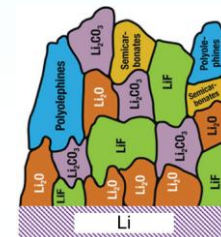
界面电化学



复杂界面



多孔电极



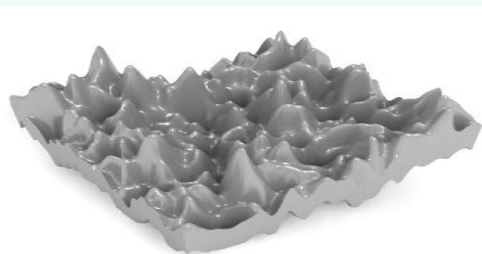
界面相

1. 电极与电解质间存在复杂界面结构，包括电双层、电场分布、离子和水分子的定向排列等。
2. 推动电化学从“表面电化学”迈向“界面电化学”科学。

原子级精准的电极表面/界面对于电化学科学发展至关重要

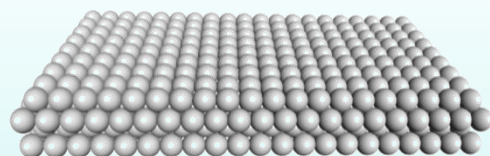
Random

早期电极形貌



无污染

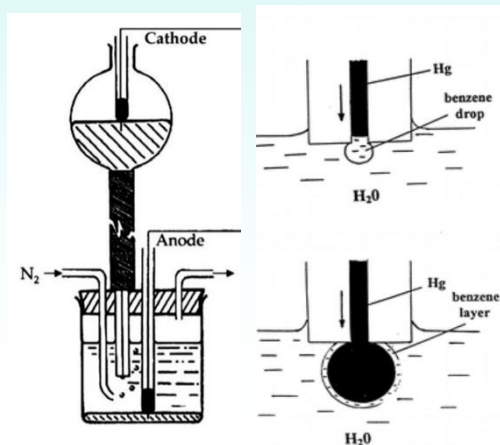
结构确定



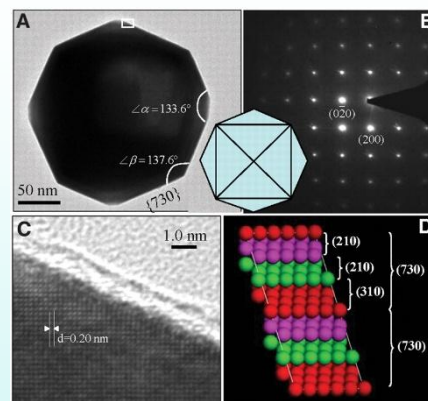
理想电极表面

Well-defined

新鲜形成的滴汞电极



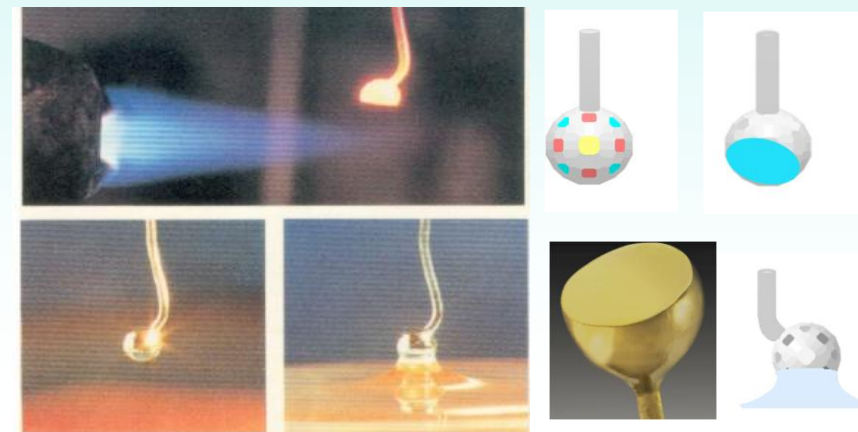
(J. Heyrovsk, Nobel奖)



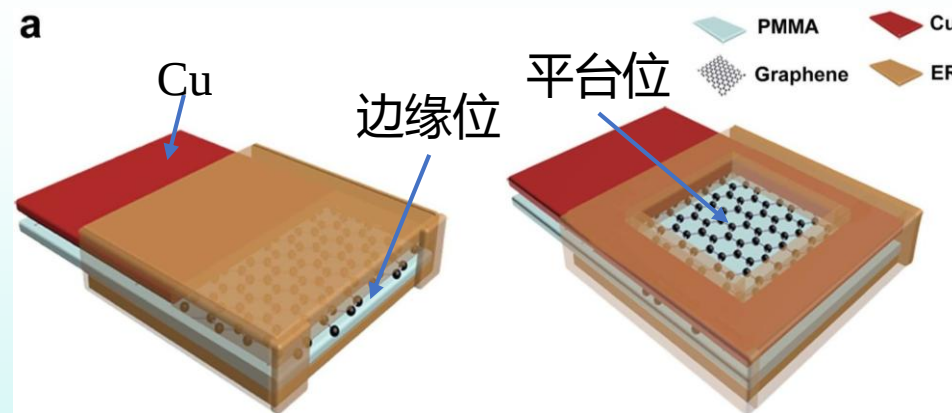
Science, 2007, 316, 732.

厦门大学化学暑期学校讲座2025——田中群

Flame-annealing制备金属单晶



(J. Clavilier)

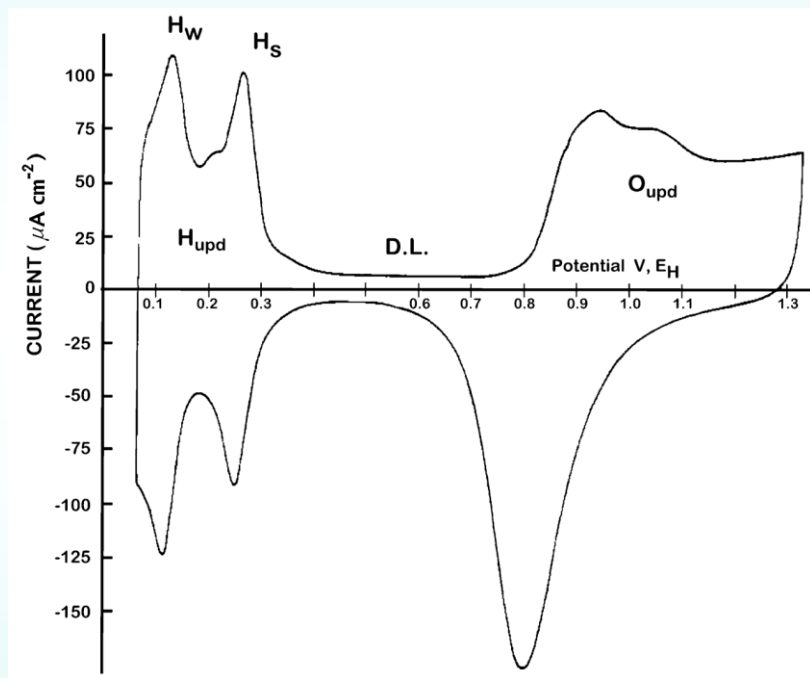


Sci. Rep., 2013, 3, 2248.

石墨烯 (左: 边缘; 右: 面上)

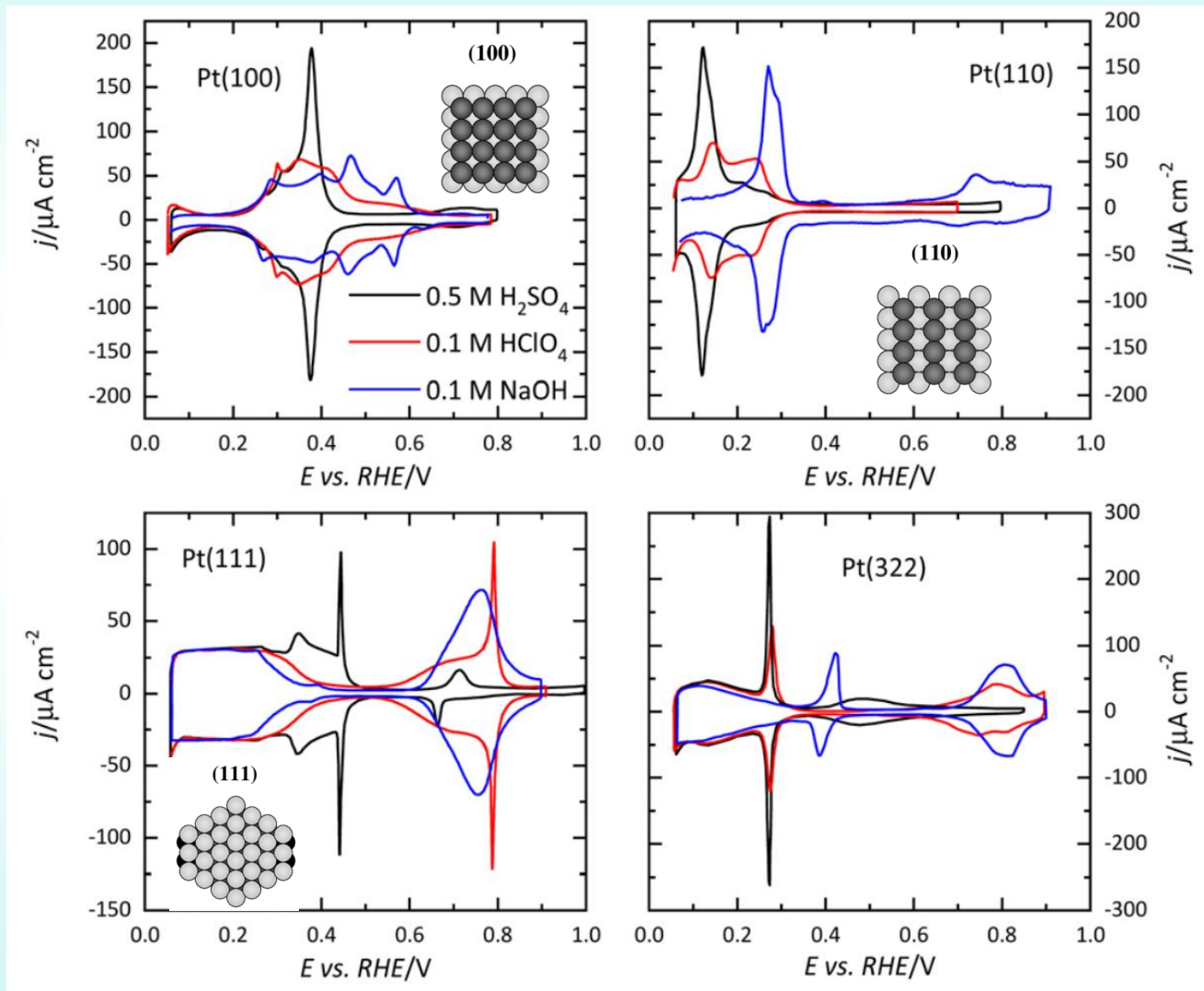
电极表面原子级精细结构和溶液对于电化学活性的显著影响

多晶Pt电极 (0.5 H₂SO₄, 50 mV/s)



B. E. Conway et al., Anal. Chem. 1973, 45, 1331.

单晶Pt电极 (50 mV/s)



为系统认知界面电化学，必须发展四大类表征技术和建立新方法



电化学丛书

谱学电化学



化学工业出版社

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

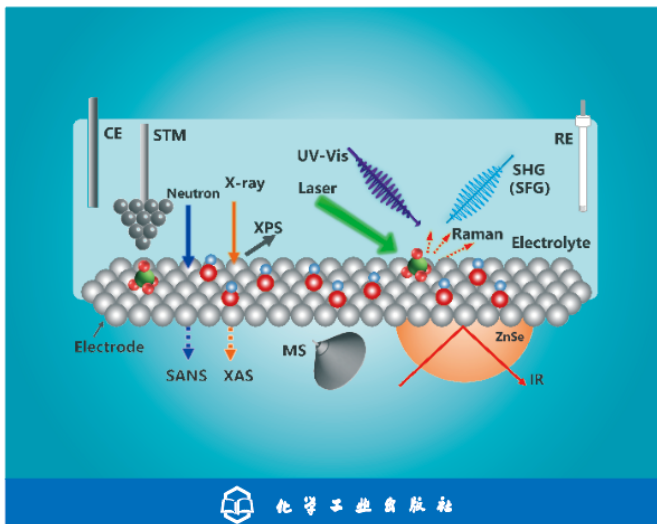
电 / 化 / 学 / 丛 / 书



谱学电化学

Spectro-electrochemistry

■ 田中群 等编著



《谱学电化学》化学工业出版社 2021

京东直营店。 <https://item.jd.com/10031052288884.html>

Microwave, THz



NMR, ESR

IR



Vis-UV



(UV-vis, Raman, Ellipsometry, Luminescence, SPR)

X-ray



(EXAFS, XANE)

Gamma ray



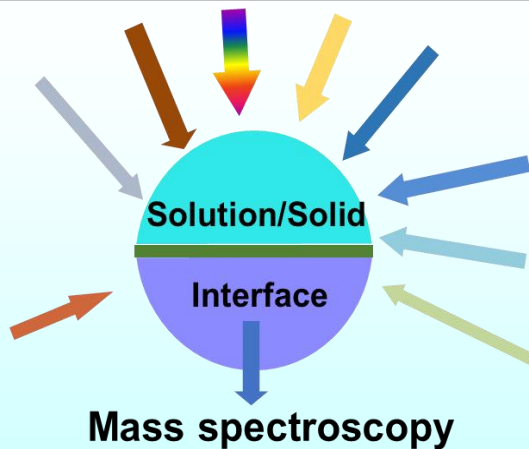
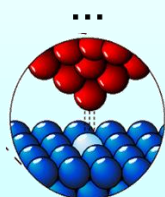
(Mössbauer)

Electromagnetic Field

Increasing Frequency

SPM

AFM, SNOM
SECM, STM



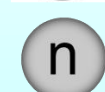
Particles



Electron
(TEM, SEM, XPS, EELS, ...)



Ions
(SIMS...)



Neutron
(Scattering, ...)

化学的重大发展方向？ 界面化学的新方法，新工具，新体系？

化学

Chemistry

还有更多色彩元素可发现吗？

Are there more color pigments to discover?

元素周期表会完整吗？

Will the periodic table ever be complete?

如何在微观层面测量界面现象？

How can we measure interface phenomena on the microscopic level?

能量存储的未来是怎样的？

What is the future for energy storage?

为什么生命需要手性？

Why does life require chirality?

我们如何更好地管理世界上的塑料废物？

How can we better manage the world's plastic waste?

AI 会重新定义化学的未来吗？

Will AI redefine the future of chemistry?

物质如何被编码而成为生命材料？

How can matter be programmed into living materials?

是什么驱动生命系统的复制？

What drives reproduction in living systems?

Chemistry

Why does life require chirality?

Molecules in DNA and RNA have the interesting feature of "handedness," also called chirality. While these molecules naturally appear in both left- and right-handed forms, only the right-handed molecules are found in living organisms. "Handedness serves an essential function in living beings," writes Emily Singer in *Quantia*. "Many of the chemical reactions that drive our cells only work with molecules of the correct handedness." Many scientists believe that chirality is an essential component of biochemistry, given that it affects how cellular elements interact with each other. Molecular locks require a molecule of the correct handedness to open them. But it is still unclear whether chirality is a defining requirement for life, especially if mankind formulates different definitions of "life" in the future.

How can we better manage the world's plastic waste?

One of the challenges of managing plastic waste is a lack of reliable data: The complicated global streams that produce and distribute waste from petroleum-based products are not always clear. Recently, experts in management and sustainability collaborated to address this issue by focusing on material flow analysis in Trinidad and Tobago, an island nation of 1.2 million people. Correlating publicly available data, researchers investigated the origins of waste and surmised that recycling plastic bottles and banning plastic bags would be economically feasible and environmentally advantageous, and also that plastics could be used as fuel in cement plants. They concluded that material flow analysis is useful for such efforts.

Will AI redefine the future of chemistry?

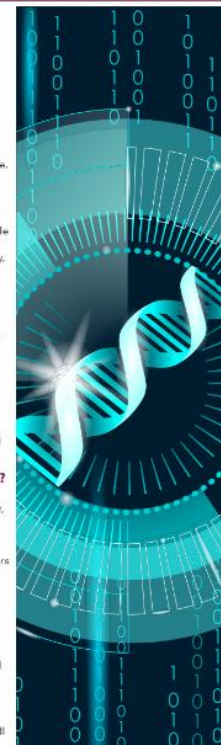
AI and machine learning have the potential to greatly benefit organic chemistry, leading to more rapid synthesis of molecules. These computational technologies can greatly optimize and accelerate drug development by, for example, predicting successful pathways to synthesize target molecules.

How can matter be programmed into living materials?

Synthetic biology is an interdisciplinary field at the nexus of biochemistry, materials science and engineering, biology, chemistry, and other disciplines. Synthetic biologists aim to redesign or synthesize cells, life science systems, and even whole organisms to address grand challenges across sectors such as medicine and manufacturing. To engineer a new biological component, researchers combine DNA synthesis and genomics to assemble novel genomes. Self-assembly of nonliving and living components is another route being investigated, through both bottom-up and top-down processes. Wil Strüder, a materials scientist and architectural engineer, has been researching ways to embed cells with new abilities, "demonstrating the power and potential of engineered living materials at many scales, including electrically conductive biofilms, single-cell living catalysts for polymerization reactions, and living photovoltaics," he writes.

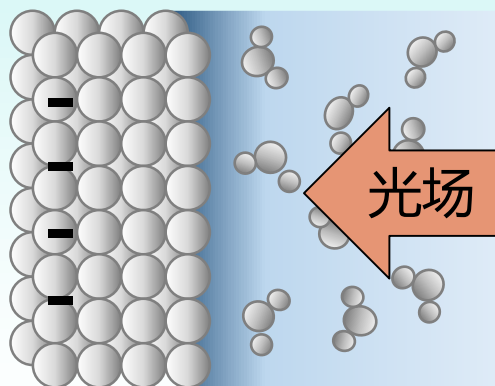
What drives reproduction in living systems?

Reproduction is the manner in which organisms ensure their survival. Individuals with genetic traits that give them advantages will reproduce more often through natural selection.

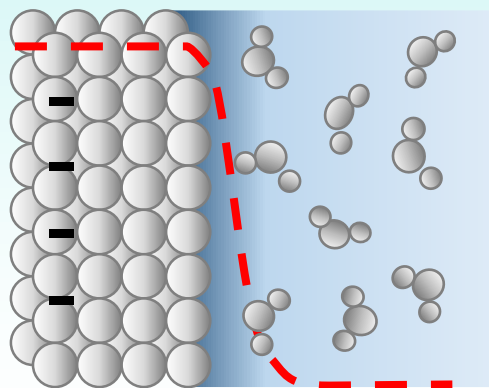


2021年Science公布：125个科学问题之一 “如何在微观层面测量界面现象？” 引申问题：“如何发展界面科学？”

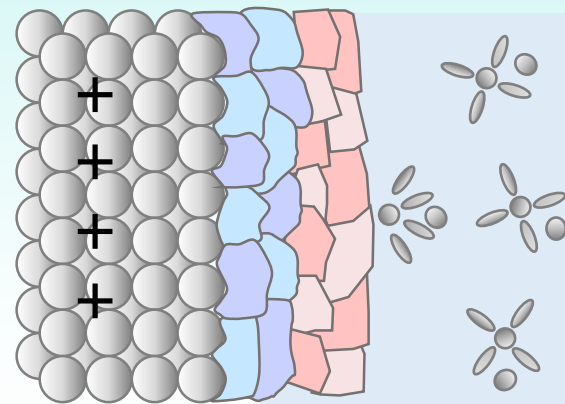
界面电化学前沿——从简单界面拓展到各类复杂界面乃至界面相？



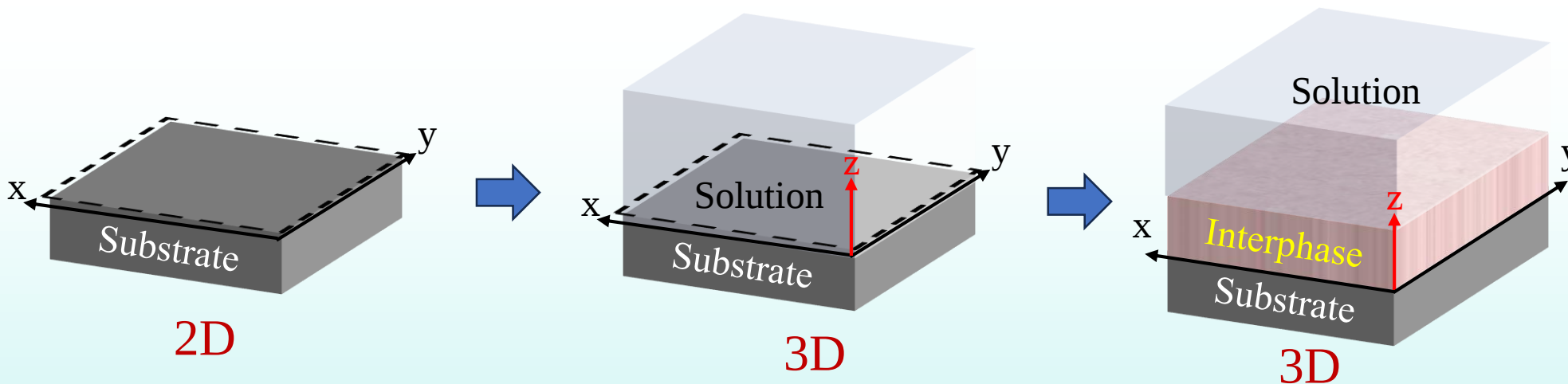
多物理场耦合



电子溢出

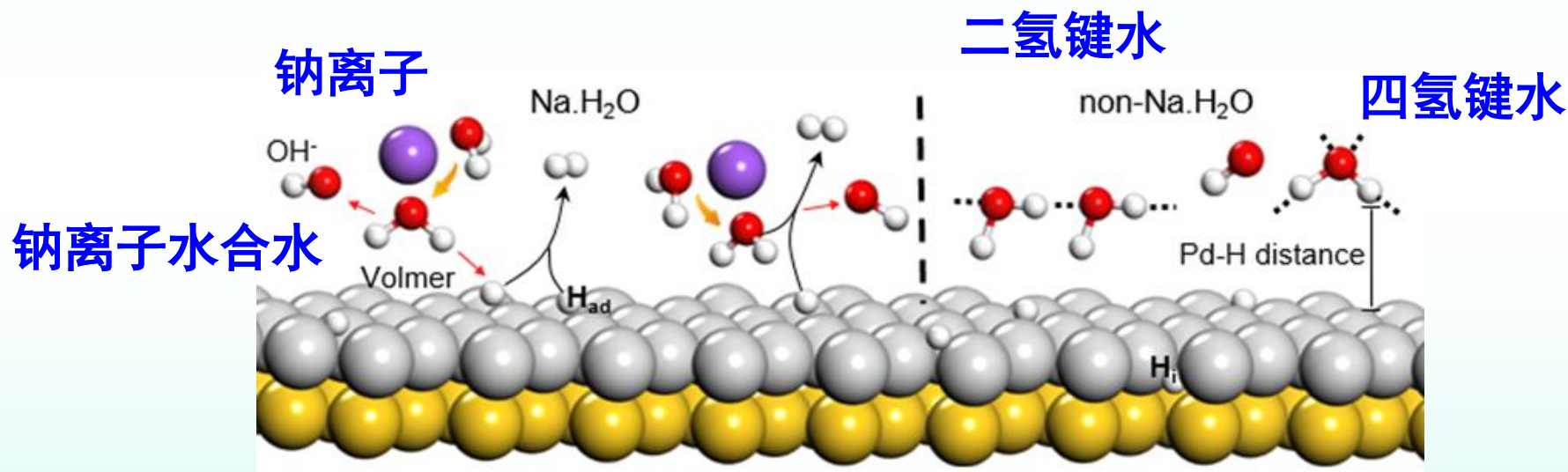


界面相



界面水、离子、氢键网络、多物理场、垂直方向的多层协同和长程作用？

- ✓ 缩短水与电极间距，加速电荷转移
- ✓ “助催化剂”，保持有序界面水结构，实现高效能量转换
- ✓ 转移反应物和产物



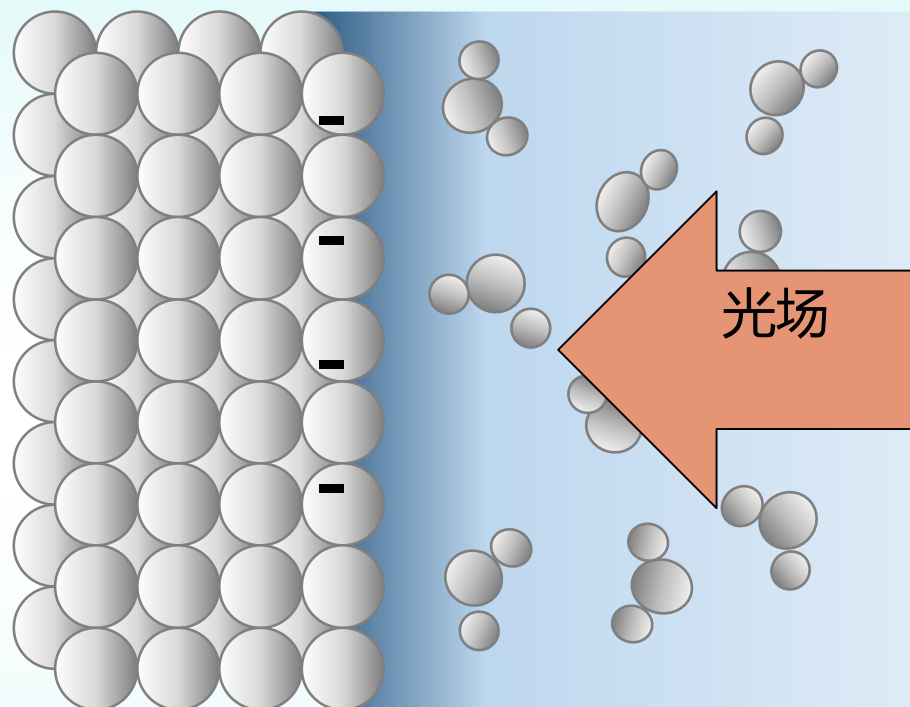
揭示了钯单晶表面界面水结构及其与电催化反应的作用机制

多场耦合：等离激元介导的电化学界面过程（限域、梯度）

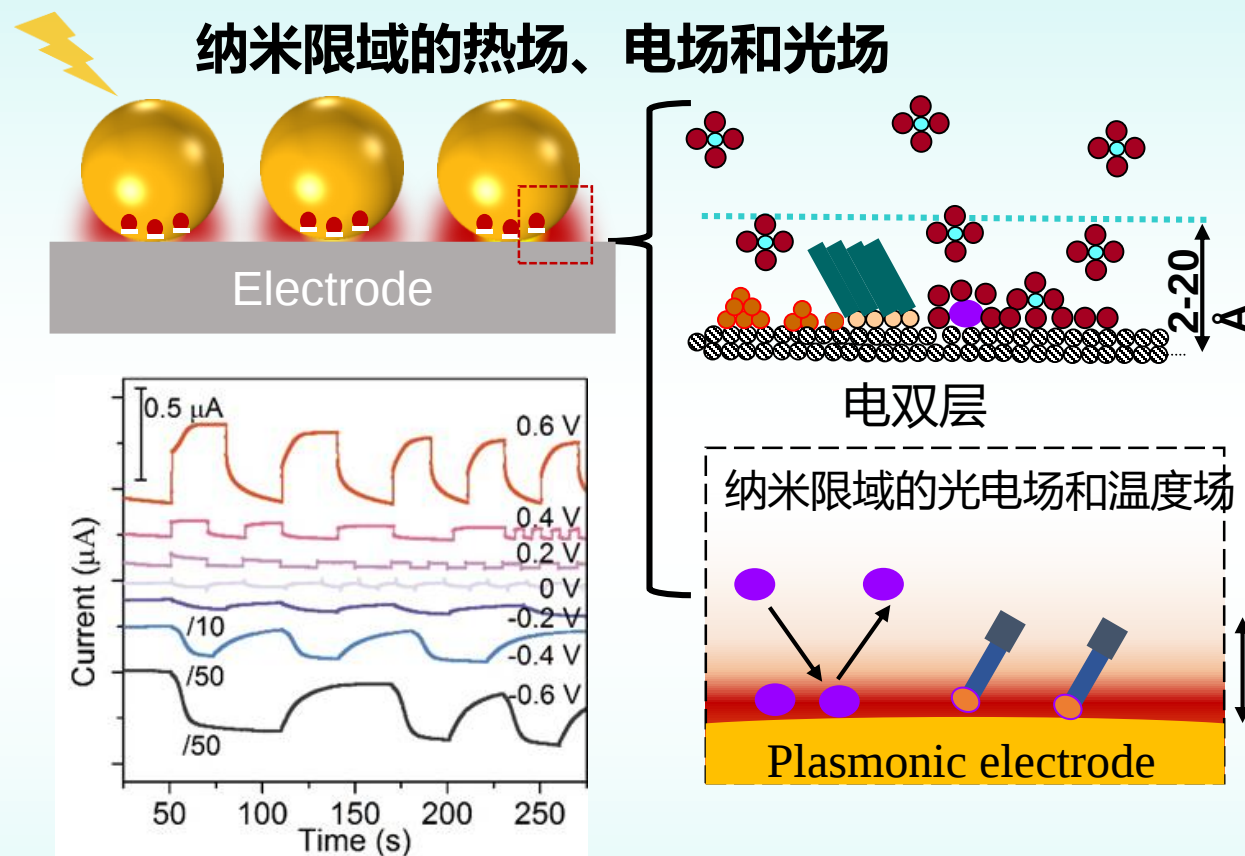


战超

当光场与电化学界面耦合



纳米限域的热场、电场和光场



1. 纳米限域的热场、电场和光场在电化学界面处以显著的梯度变化进行耦合；
2. 界面存在两种不同类型的电子：与电化学偏压相关的基态电子，局域表面等离激元激发的极化电子

- 电化学界面在光场下是否存在金属分子界面的直接电荷转移？
- 电势调控的界面电子溢出效应及其在光照下的激发响应？

等离激元介导光电外场下的独特电化学界面行为

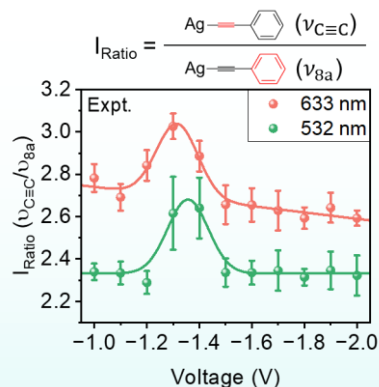
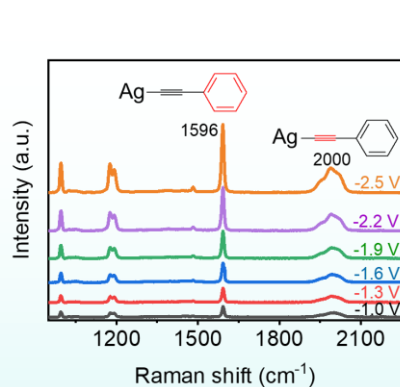
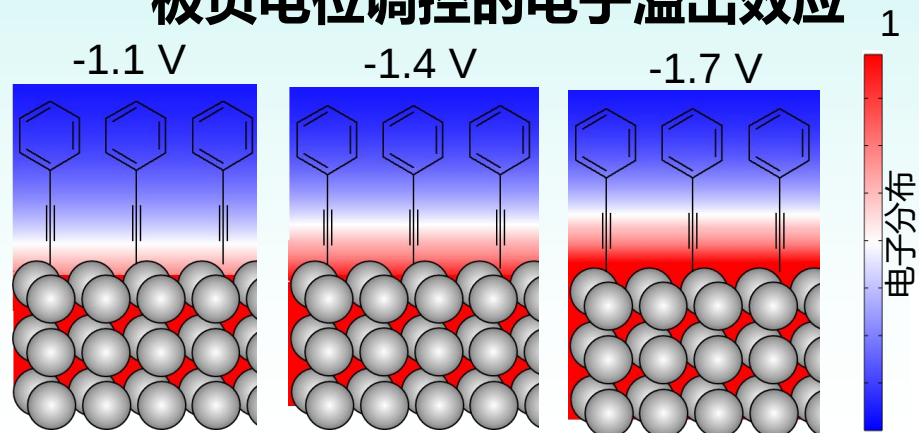


易骏



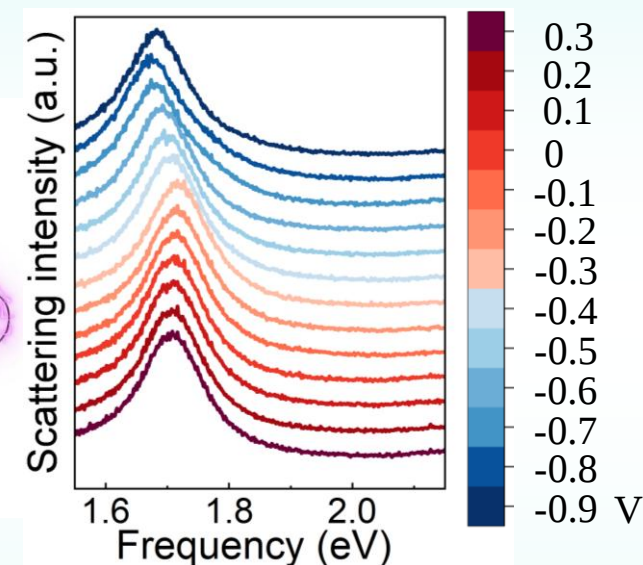
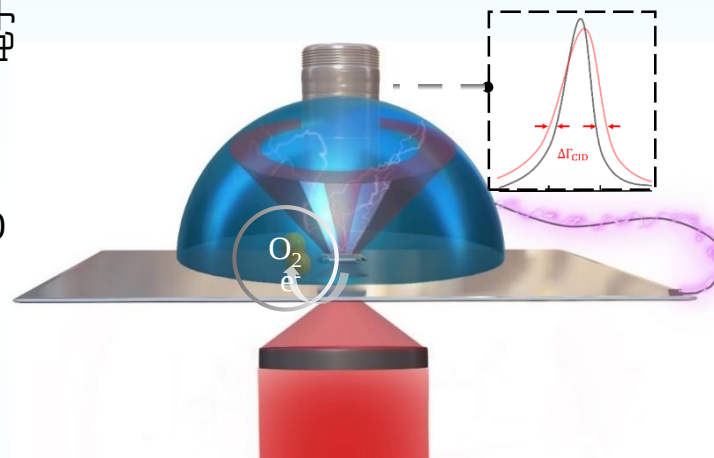
黄逸凡

极负电位调控的电子溢出效应



电位负移时，溢出电子逐渐向外延申并漫过C≡C键，使得SERS相对峰强发生改变

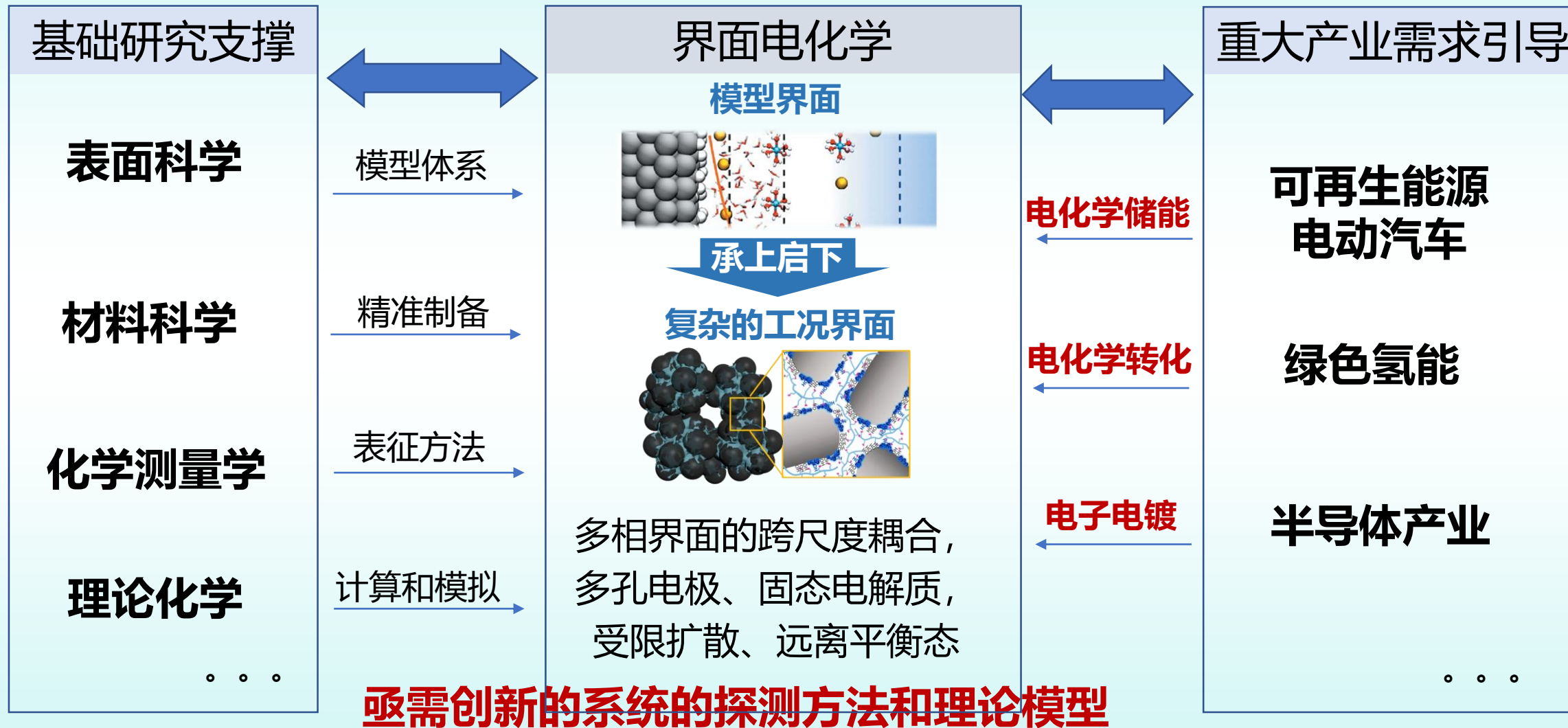
金属分子间的界面电荷转移



化学界面阻尼带来的直接电荷转移导致等离激元峰红移并展宽

易骏、张月皎，黄逸凡*，李剑锋*，田中群* 等., TBP

张霞光*、战超* 等., *J. Am. Chem. Soc.* 2025, 147, 8101

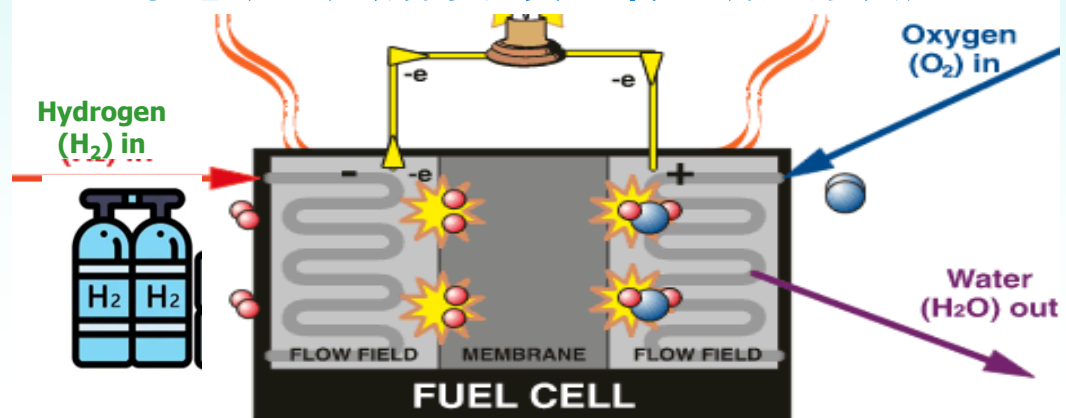


常用电化学能源转化与存储系统的科学本因和技术特点

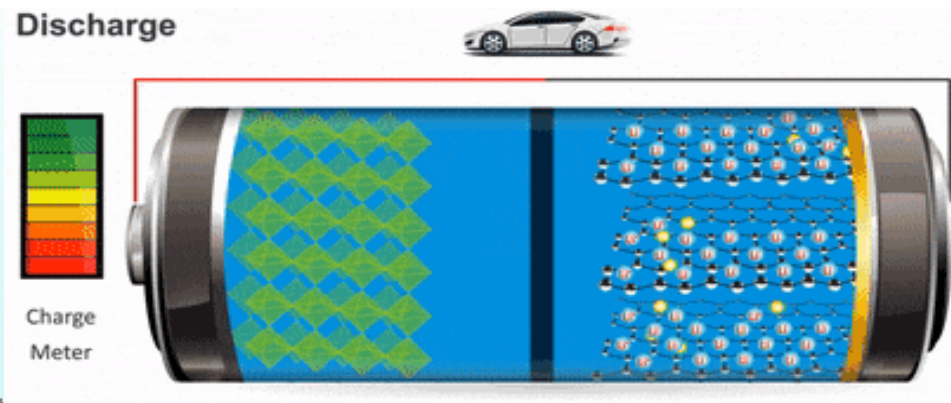
Electrochemical Energy Conversion and Storage

- Fuel Cell
燃料电池
- Secondary Battery
二次电池
- Supercapacitor
超级电容器
- Liquid-Flow Cell
液流电池
- Primary Battery
一次电池

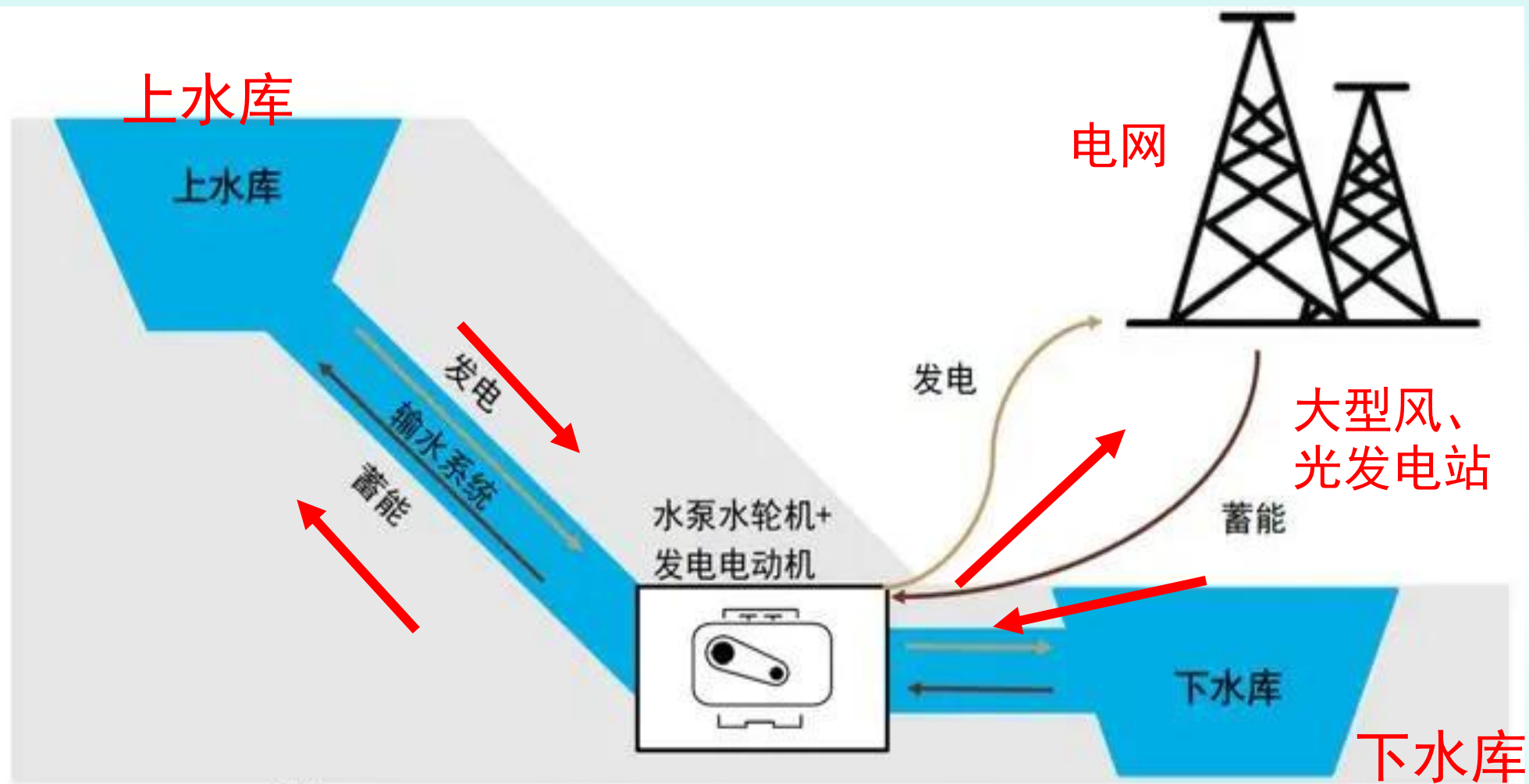
化学分子（燃料）进入燃料电池发电
(二个电极上分别持续发生氧化或还原反应)



锂离子电池里分子/离子进行充放电循环
(同一电极上发生氧化或还原反应或离子嵌脱过程)

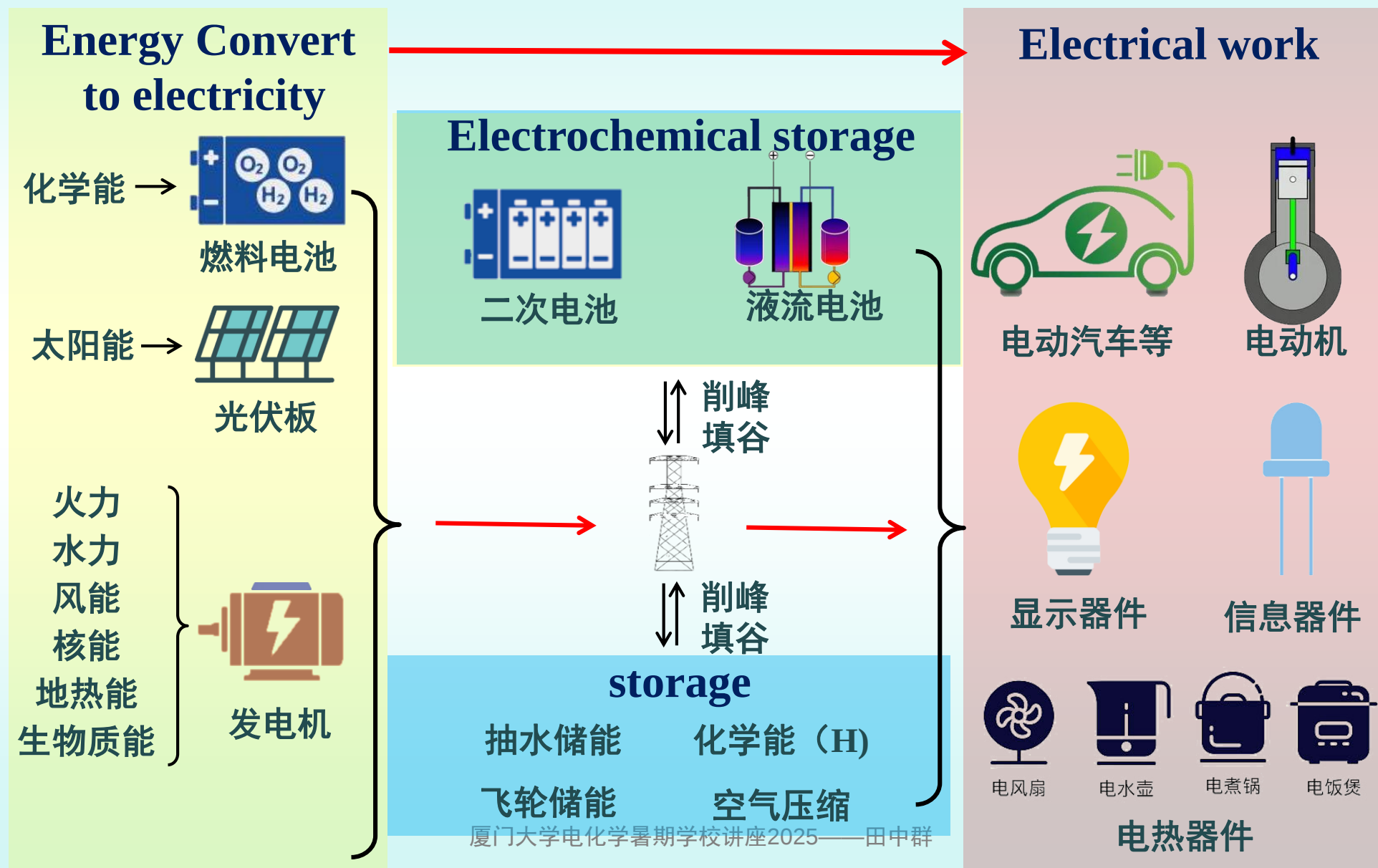


蓄水储能（既发电又蓄能）的循环系统

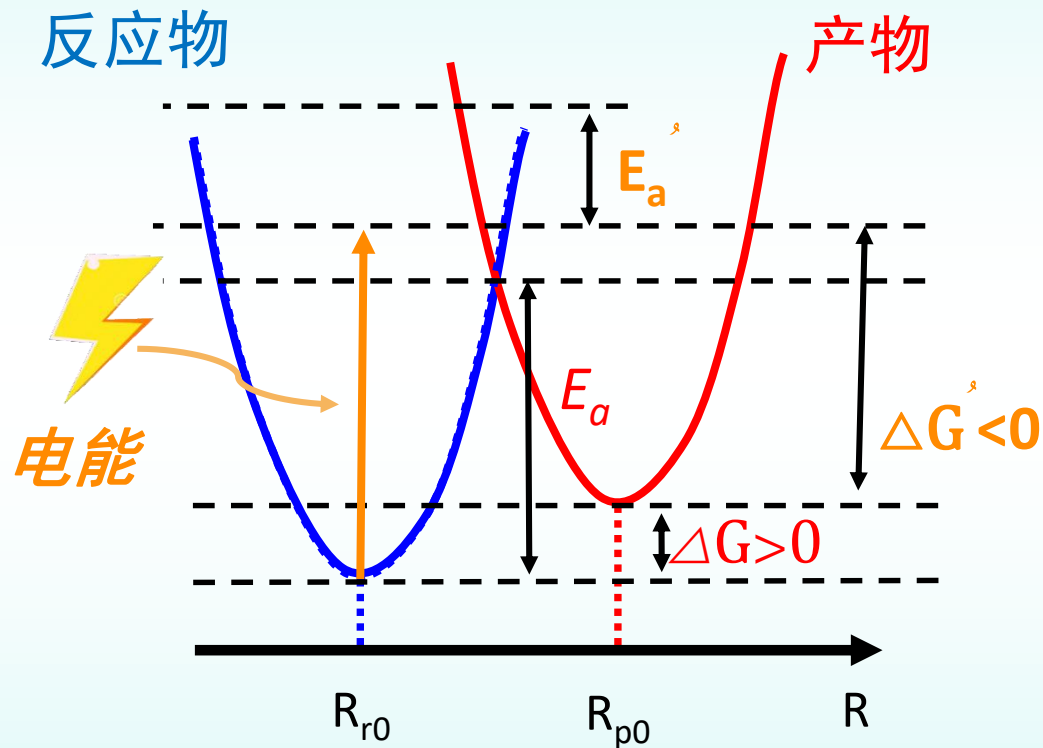


与江河奔流一去不返的水电站
所仅有发电功能有本质区别!

如何区别能源转化与存储 (Energy Conversion & Storage)



施加电能可方便改变热力学反应方向而实现储能



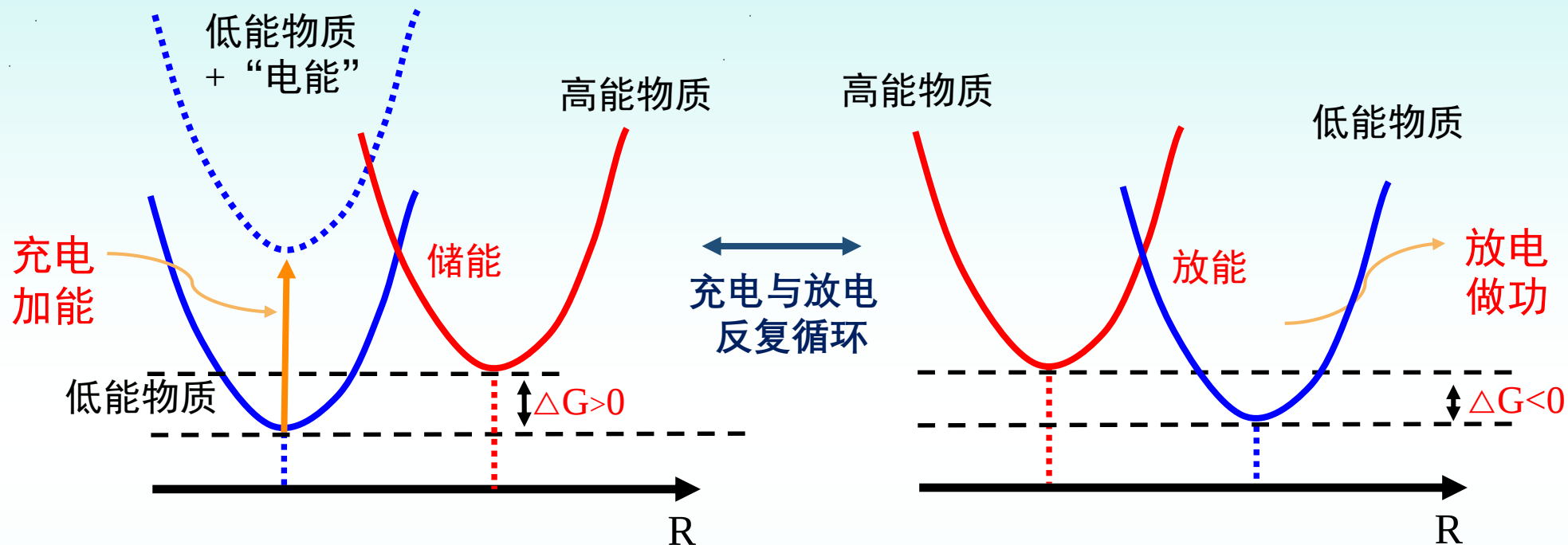
电能的品质远高于热能，
便利性和强度远高于光能

0.1 – 10 eV

(能量方便使用且可调幅度大)

对于热力学“爬坡($\Delta G > 0$)”的化学
反应，施加电压输入电能，可显著改
变反应物能量，甚至改变热力学反应

方向，使反应易于发生($\Delta G < 0$)，产生
储能分子，由此将电能转化为化学能。



电化学能源存储过程：外接电源充电

爬坡反应，用电能将低能物质转化为高能物质，完成储能（电能→化学能）

如：电池充电过程，基于钴酸锂脱锂和石墨嵌锂的锂离子电池——二次电池；水电解转化为氢能，CO₂电化还原转化为甲醇或乙醇

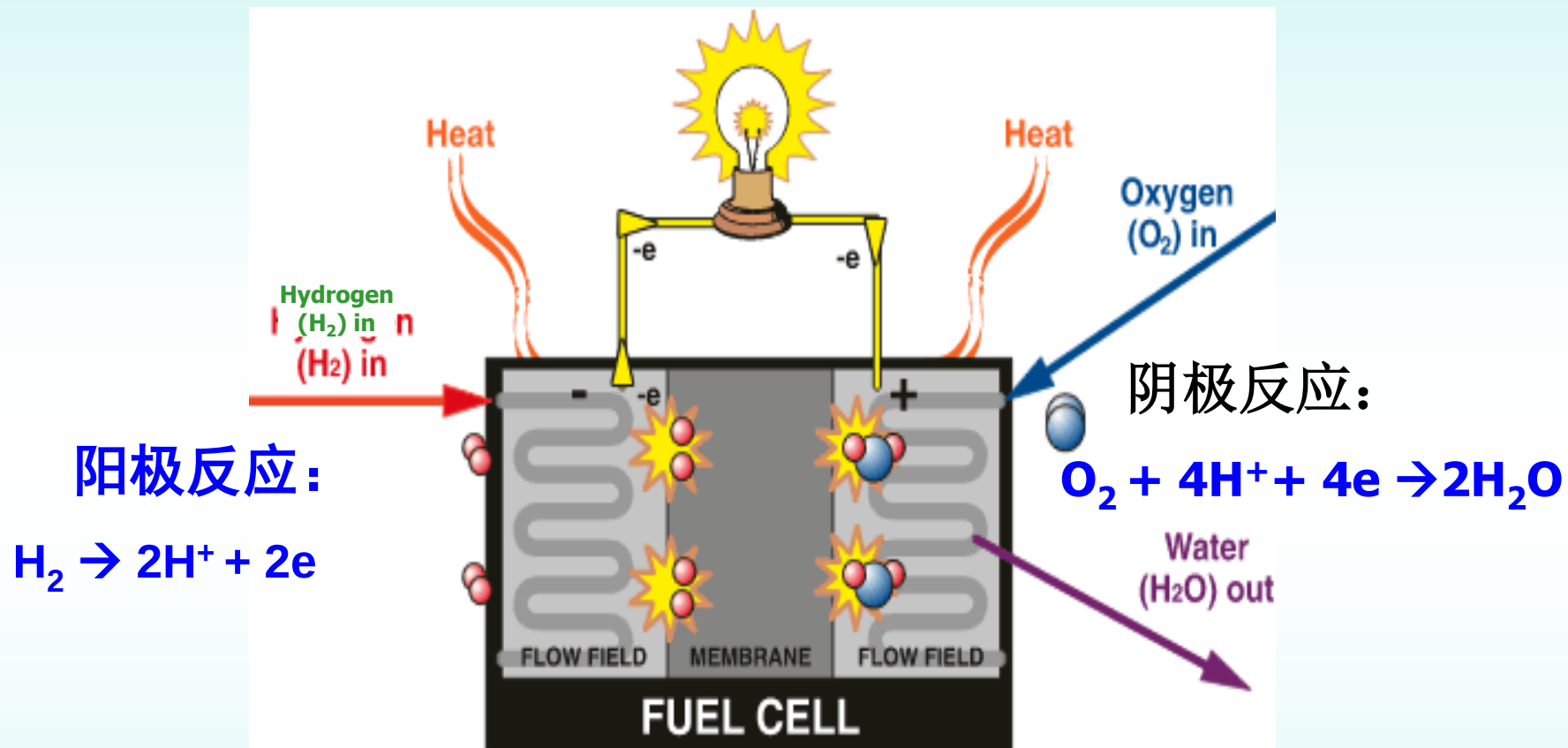
电化学能源转化过程：外接负载放电

下坡反应，高能物质自发转化为低能物质，完成放电（化学能→电能）

如：基于基于氢气氧化和氧气还原反应的氢氧燃料电池

燃料电池 (Fuel Cell) ---化学能转电能

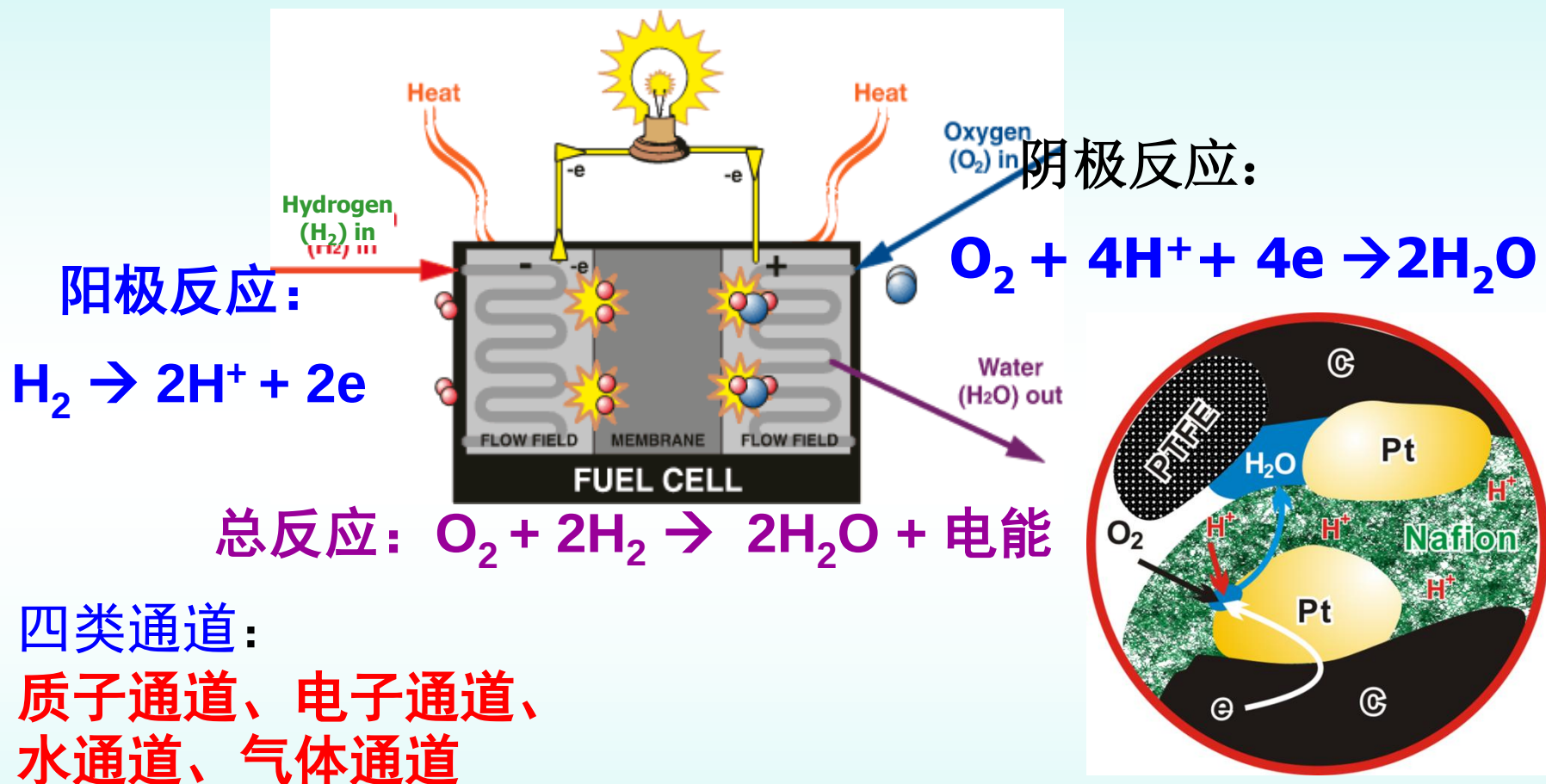
电化学的本征优势明显，但劣势也突出（串联系统瓶颈问题,4百米接力掉棒）



1839年英国法官和科学家W.E. Grove发明了燃料电池，
1952年剑桥大学F.T. Bacon研制出5 kW的碱性燃料电池组

实际燃料电池的电化学过程比想象的复杂得多！

简单问题复杂化 或 复杂问题简单化？



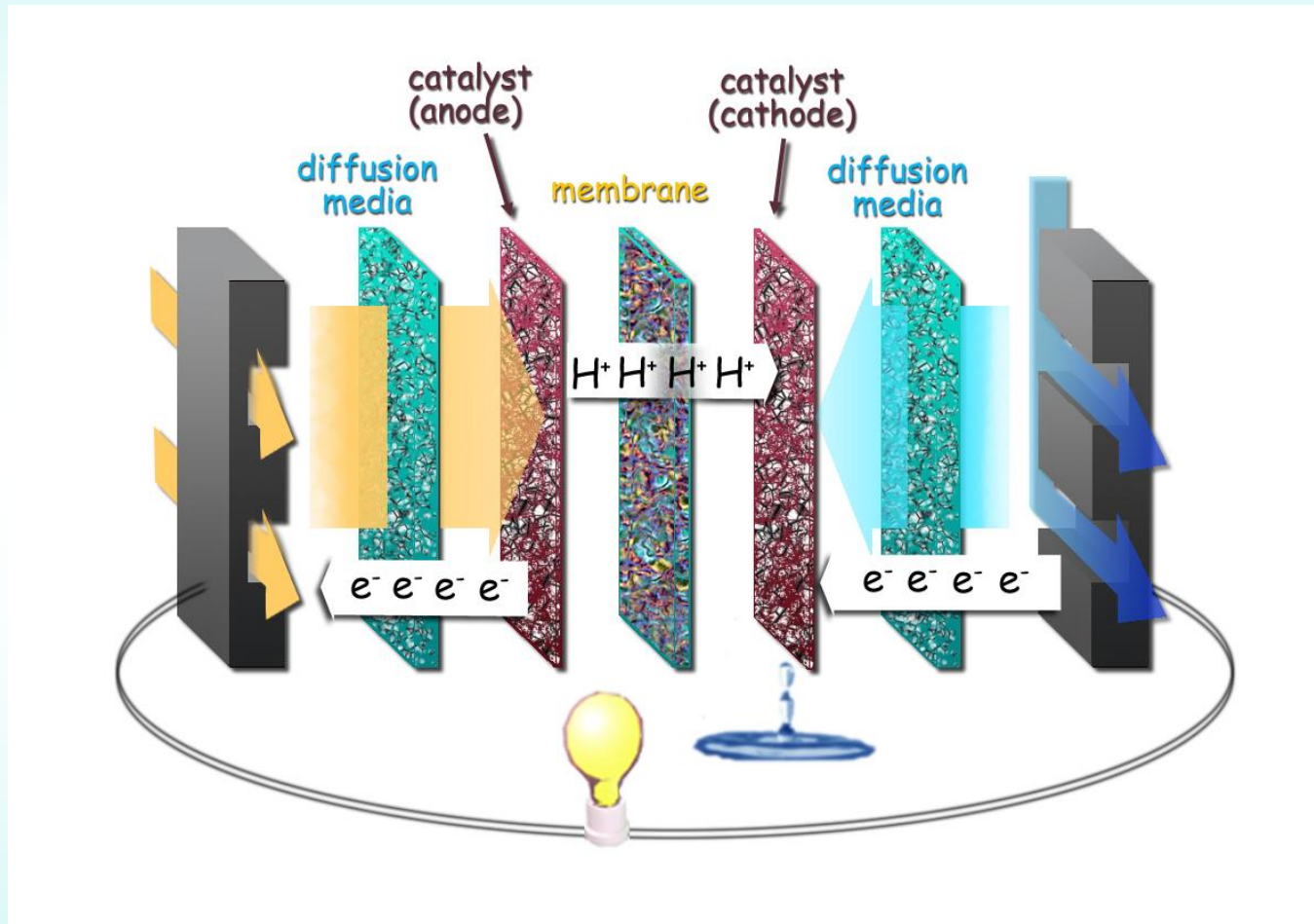
固体：Pt催化剂 + Nafion聚电解质 + 碳

气体：反应性气体 (O_2 或 H_2)

液体：水（产物，必须及时排走）

三相界面（线）

氢氧燃料电池结构的技术和工程适配性是全系统问题

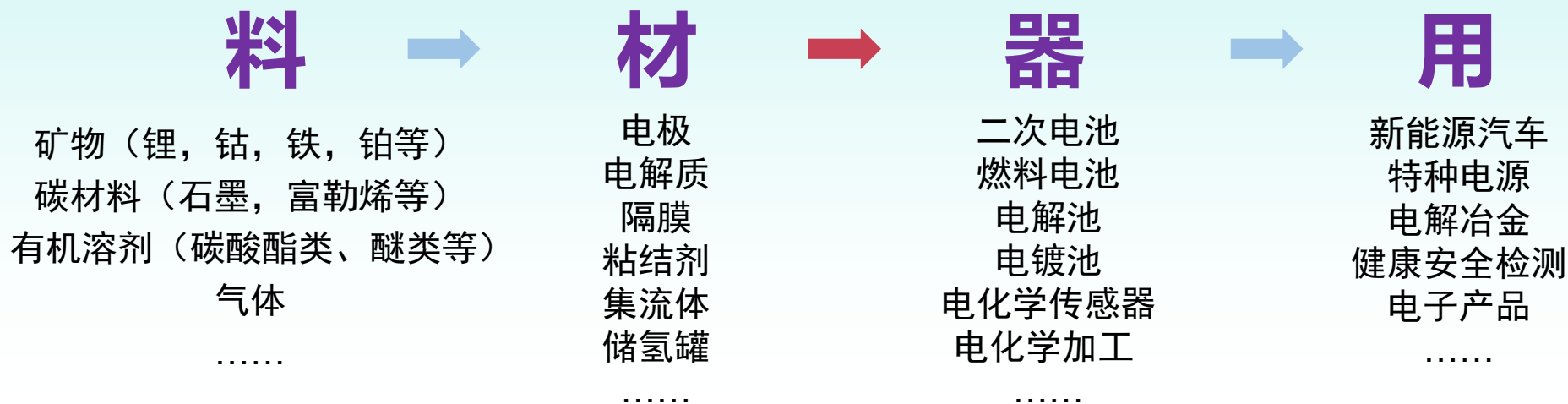


燃料电池内部的串联结构要求各部分的电荷传输与活性（内外部电流）达到很好匹配和长期稳定性，**各类界面都重要，一个都不能差。**

实际燃料电池电堆



从原料、材料、界面、器件到应用的全局观和关联性



需上下游串并联和适配，统筹解决各方面问题，特别需要全局观和**倒逼法**！

性质优良？

纯度 缺陷
熔点 沸点
挥发性 毒性
稳定性 成本
.....

性能达标？

热学性能 力学性能
电学性能 磁学性能
光学性能 化学性能
功能物性 合成方法
.....

全器件性能？

SEI界面问题
匹配兼容问题
副反应问题
电解质易燃泄露问题
催化剂界面稳定问题
.....

应用和市场？

高比能 高功率
高安全性 长寿命
高低温性能 高效率
高稳定性 高回收率
.....

福建能源材料科学与技术实验室（嘉庚实验室，2019年-）



- 在省市校大力支持下，布局核心研发基地**能源材料大楼**和**产业化空间逾7万平米**。其中，能源材料大楼共五栋，建筑面积7万平米，2019年11月完成基建综合验收。

1号楼	2号楼	3号楼	4号楼	5号楼
公共支撑平台	智能研发与产业化空间	展厅及办公会议	项目实验室小试线	项目实验室及工况平台
- 无噪声实验室 - 微纳加工实验室 - 未来显示技术研究院	智算中心和仪器分析中心 碱性电解水制氢装备组装线 石墨烯产业化实验室	- 展厅、会议室 - 综合行政办公 - 顶尖人才办公	氢能、低碳项目群 电堆组装测试室 PEM电解水制氢装备	储能项目群 超级干燥室等平台



支撑打造国际先进的氢能与储能产业研发基地

围绕“制氢-储运-用氢”布局全链条研发，打造在国内外有重要影响力的氢能产业研发基地

基础研究

催化剂、双极板、
膜电极等关键材料

电化学氢泵、
氢氨技术

燃料电池、绿色
船舶等关键技术

上游

中游

下游

绿氢制备技术

氢储运技术

用氢技术

电解槽
制氢装备及系统

撬装式加氢站

燃料电池无人机、
碱性燃料电池储能系统



氢能“制储输用”一体化产业体系构建及关键材料研制

国家自然科学基金委员会《“双碳”基础研究指导纲要》——“能源结构重塑”优先方向

厦门大学电化暑期学校讲座2025——田中群

氢能示范项目: 打造“智慧
光风-充储-用检-安控综合
研究与测试平台

产业示范应用



智慧储能大型科研基础设施

能源安全

外部安全：国家安全

石油危机/战争期间等极端条件下的能源供应；
武器的电源和推动力（火箭、鱼雷、无人机等）

内部安全：企业与百姓安全

能源生产企业的增加、能源器件能量密度的提升，
在能源制造、使用、存储方面的安全隐患增大

表征技术

保障国家能源安全和促进能源发展

- 危机阶段信息调控保障能源调动与供给
- 信息技术控制海陆空武器的电源和推动力保障
- 基于大数据的能源战略情报与趋势分析

保障分布式能源使用安全与高效

（大电网→分布式的能源使用与存储安全）

- 储能系统全环节工艺改进及安全监控
- 能源器件的安全高效生产与管理
- 大规模能源使用的安全监控和保障

效率
(市场价值)

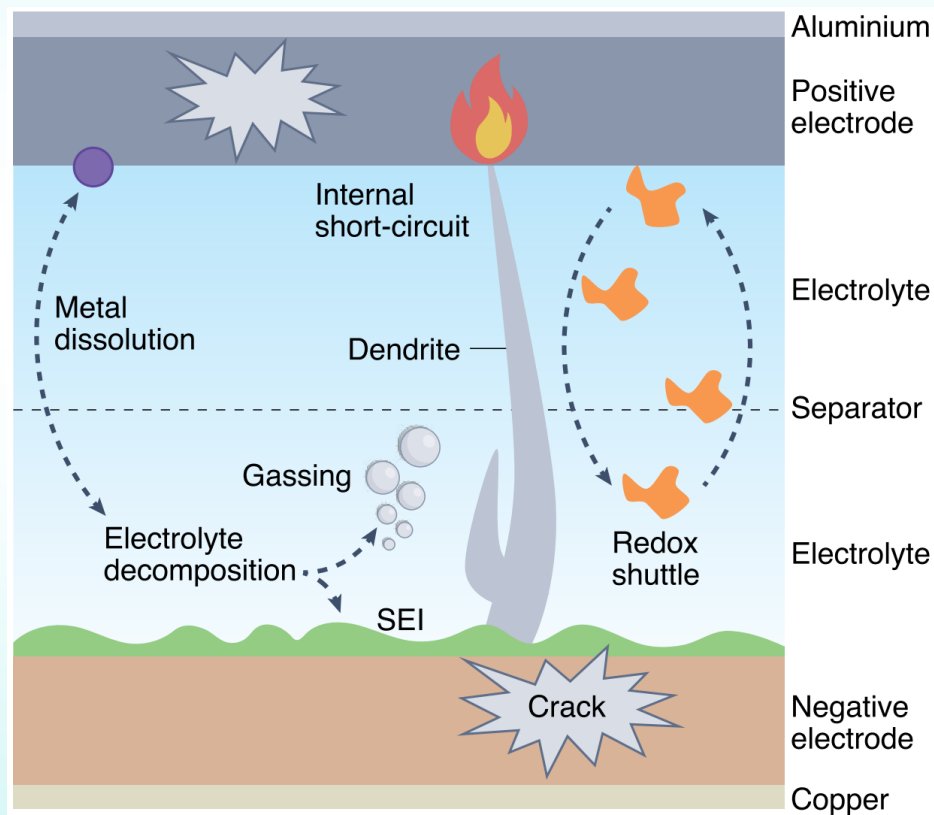
安全
(人民底线)

亟需推进和发展与能源安全相关的**实时工况条件下的系统表征和监控技术**

锂金属电池内部存在复杂的界面相及其物理化学过程

储能重要性

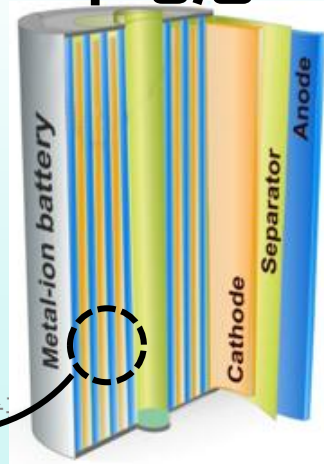
多种界面串并联；组成和结构动态变化；多种效应相互牵涉
如何解决本学科和相关产业的瓶颈问题？



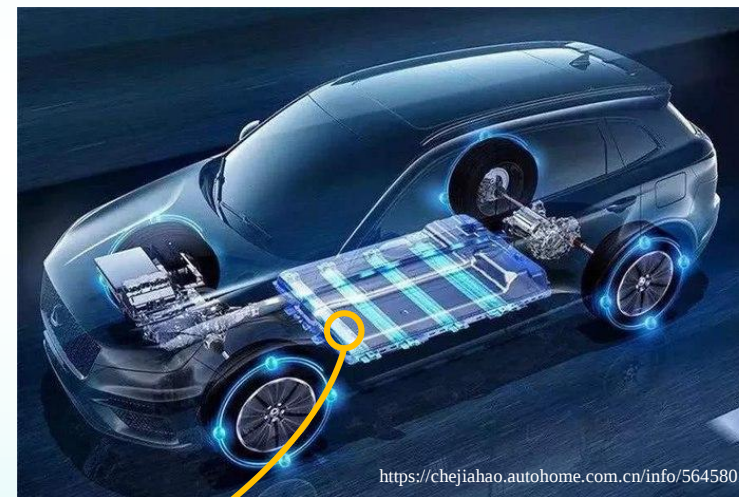
Tarascon*, et al., *Nat. Sustain.*, 2022, 5, 194.

决定性能

单电池

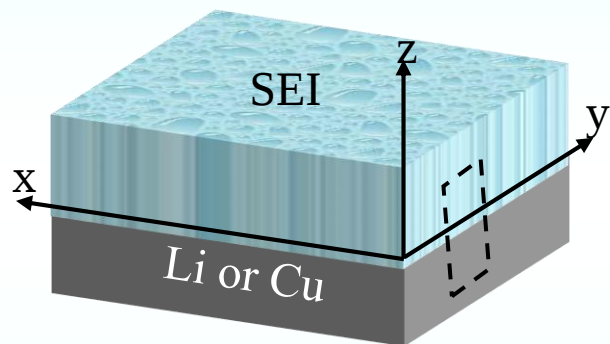


动力电池系统

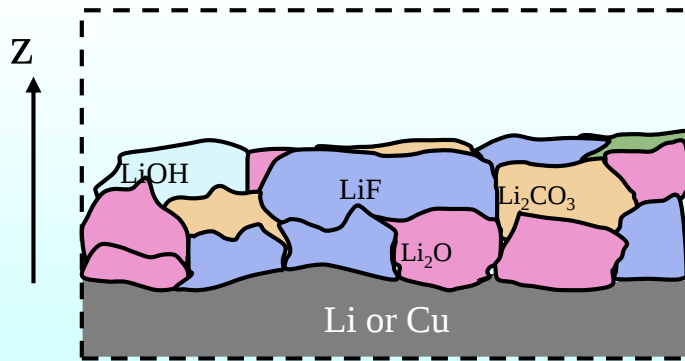


➤ Solid-electrolyte interphase (SEI)

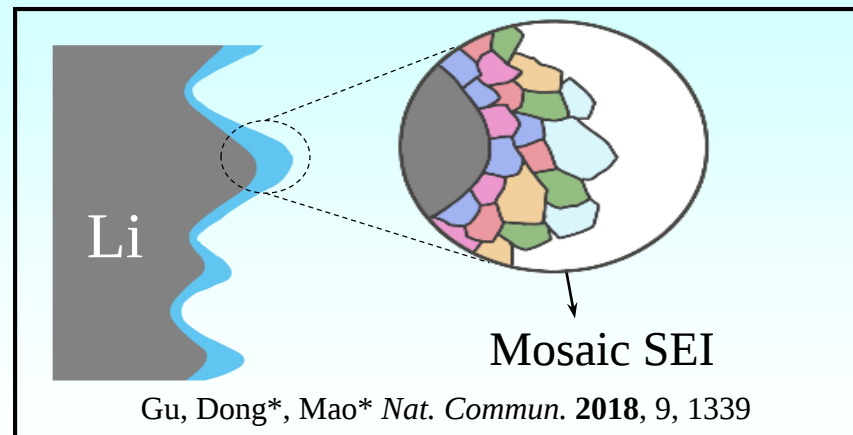
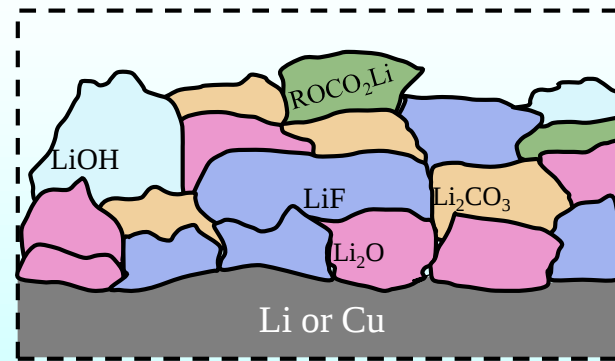
- 电子绝缘、锂离子可导
- 纳米级厚度，组成复杂
- 双刃剑：保证电池正常运行；劣质SEI诱导枝晶



几至几十纳米级厚度的
3D界面结构和电池充放电
过程变化



动态
变化

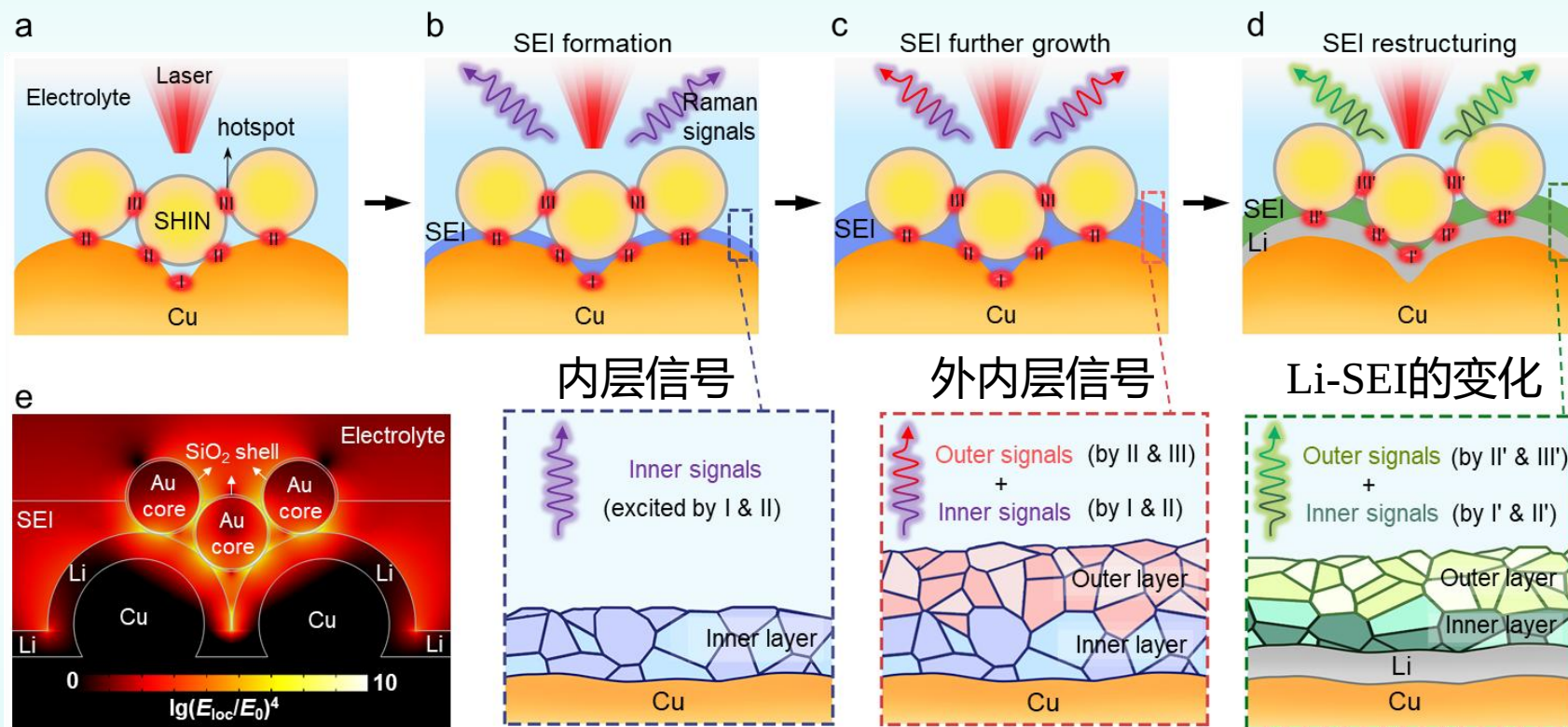


- ❑ 组分分布不均；
- ❑ 三维方向上有多层结构
- ❑ 生长或充放电时结构动态变化

仍缺乏对 SEI 组成和结构的精确认知，以及对充放电循环过程中 SEI 动态变化的全面理解

提出和建立具有深度敏感的PERS方法(DS-PERS)

- 建立 SERS-SHINERS 耦合增强模式 ("SEI-sandwiched" mode)
- 首次实现对金属锂负极界面过程的原位、无损、实时探测



- ✓ 多热点 (Cu/Li-Cu/Li, Cu/Li-SHIN, SHIN-SHIN), z 方向上深度敏感
- ✓ 自下而上逐层探测 SEI 的内、外侧组成和结构



谷宇

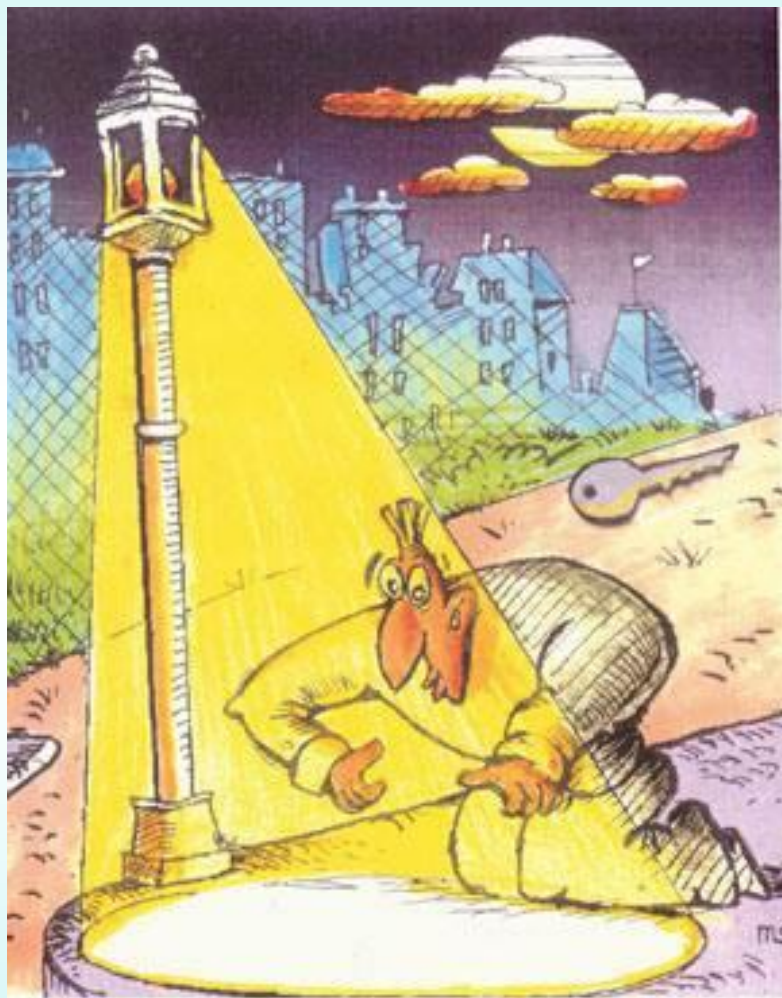


尤恩铭



毛秉伟

目前大部分研究人员落入“路灯下找钥匙”模式



有人晚上在路灯下不停地转来转去找钥匙。
路人问他：为什么只在路灯下找呢？
回答：因为只有这里有光，我才看得到啊！

面临新的复杂问题时，思维和处理方式被
局限于熟知的技术和领域，而难以大胆寻
求新的方法以破解新的难题。

手电筒，打火机，火柴？他人帮忙？

根据被表征的对象的状态分为三大类谱学表征技术

Ex situ
非原位



Dead fish

In situ
原位



Sick fish

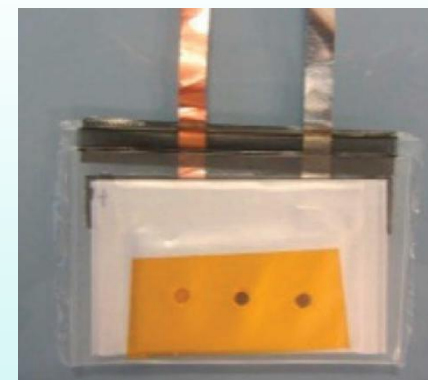
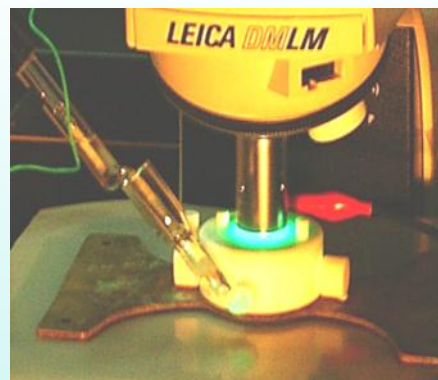
Operando
工况

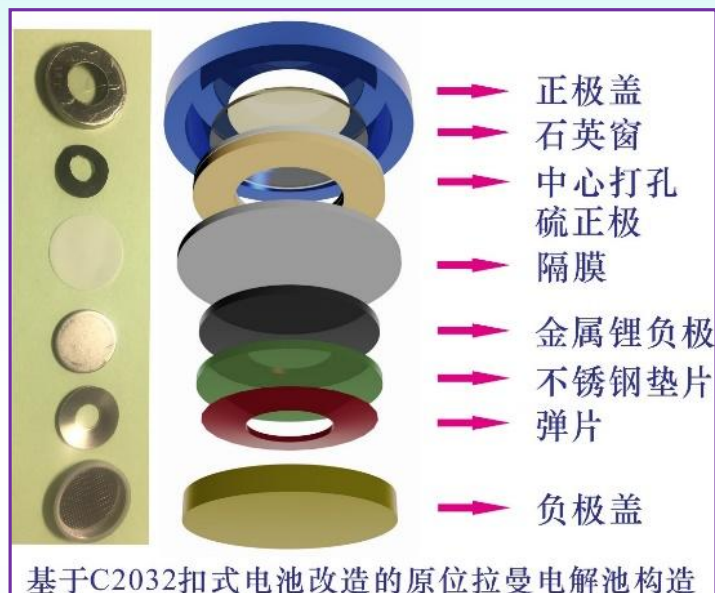


Happy fish



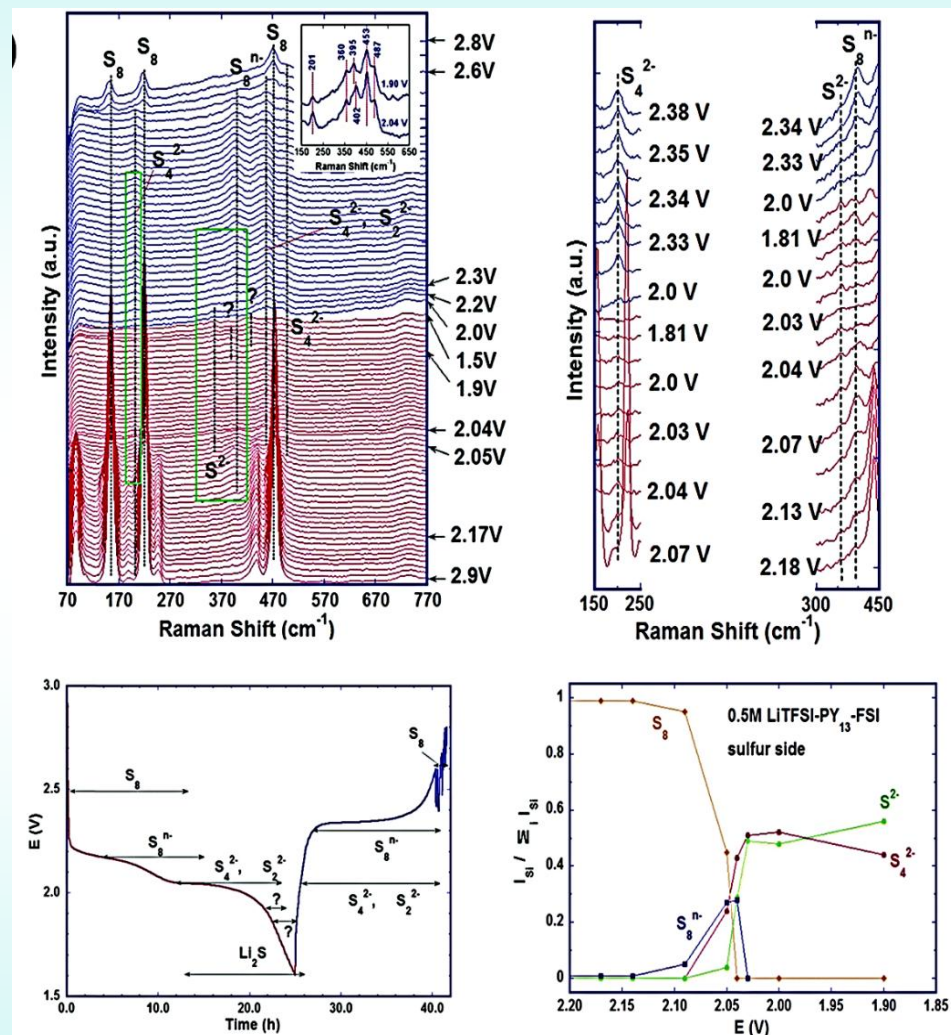
电极或电池反应到
某一阶段时，终止
后对电极进行表征





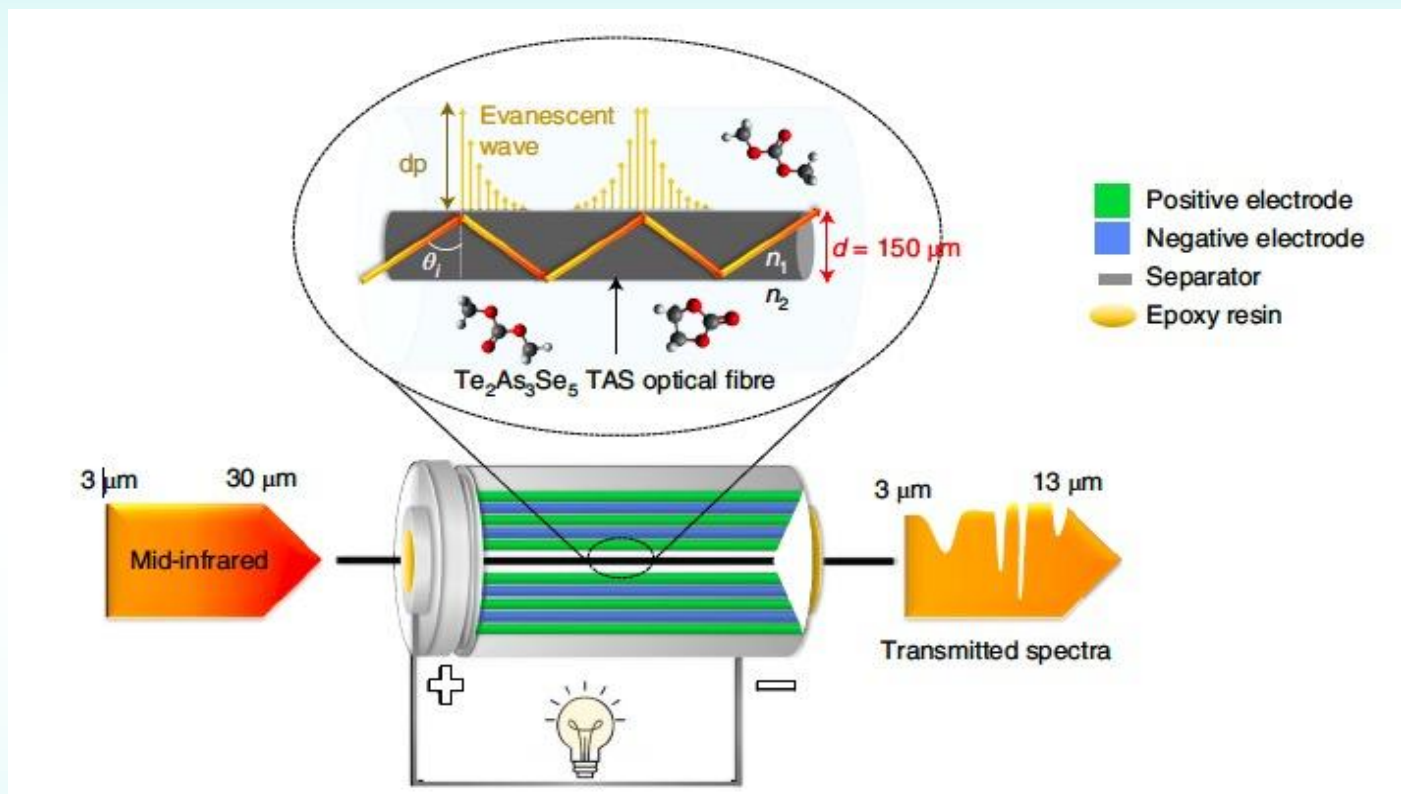
例：Li-S电池正极体系中，硫元素不同氧化还原状态随电位/容量的变化趋势

基于扣式电池的Operando Raman电解池构建，可**基本反映**电极在**真实工况**下反应历程变化的实时行为

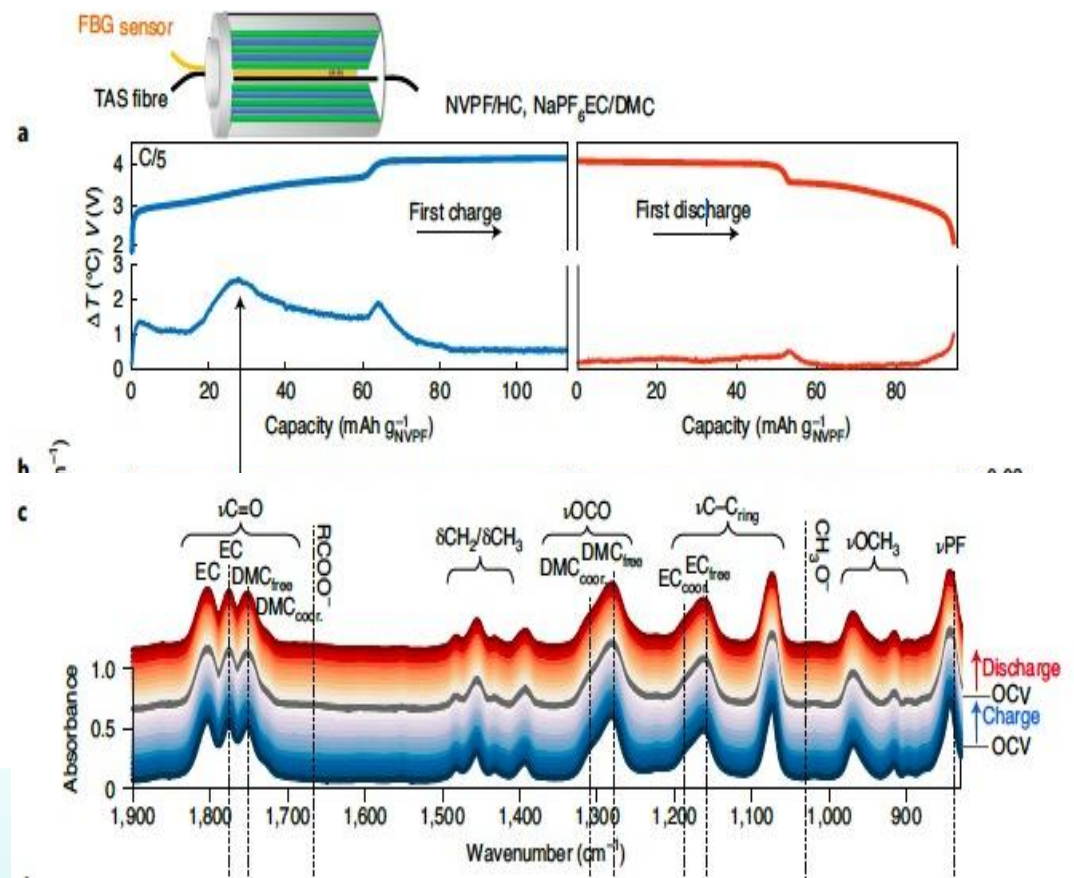


Li Zhang, et al., *Adv. Funct. Mater.*, 2018, **28**, 1705015.
Zaghib et al., *Sustainable Energy Fuels*, 2017, **1**, 737.

锂离子电池（18650）的光纤红外光谱工况研究



Te₂As₃Se₅ (TAS) 红外光纤, 倏逝波穿透深度1 微米



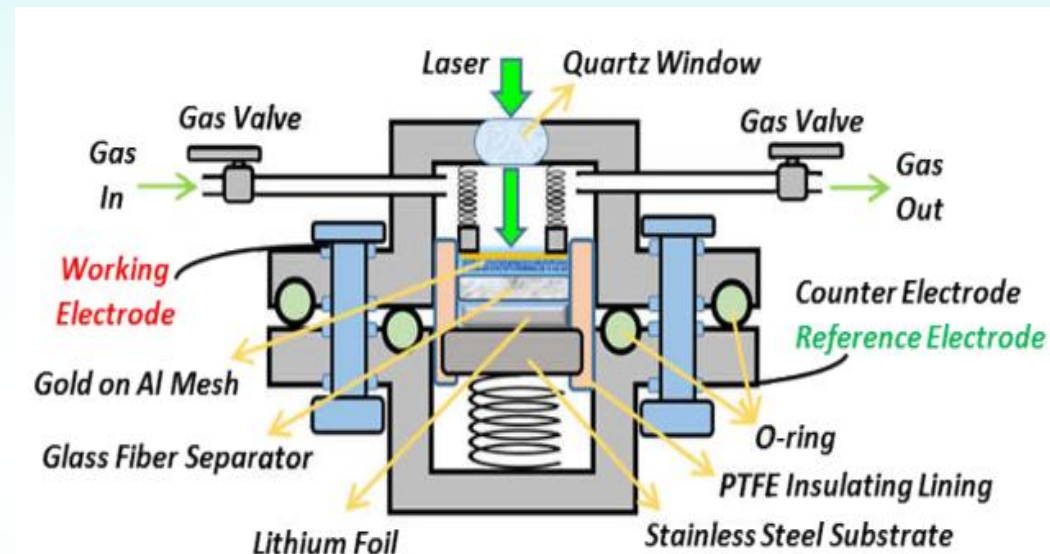
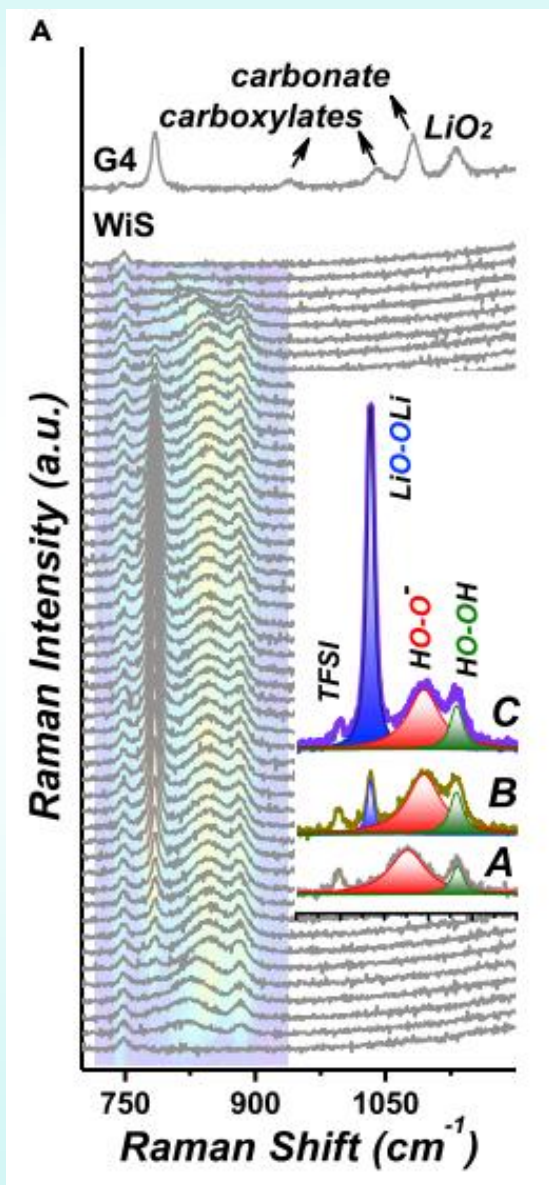
Tarascon, et.al., Nature Energy, 2022, 7, 1157–1169

Nature Sustainability, 2022, 5, 194–204.t

18650电池，充放电同时监测温度变化和电解液分解情况

厦门大学电化学校暑期学校讲座2025——田中群

针对锂空电池的operando表征



Raman-气相质谱联用 (Raman-DEMS) :

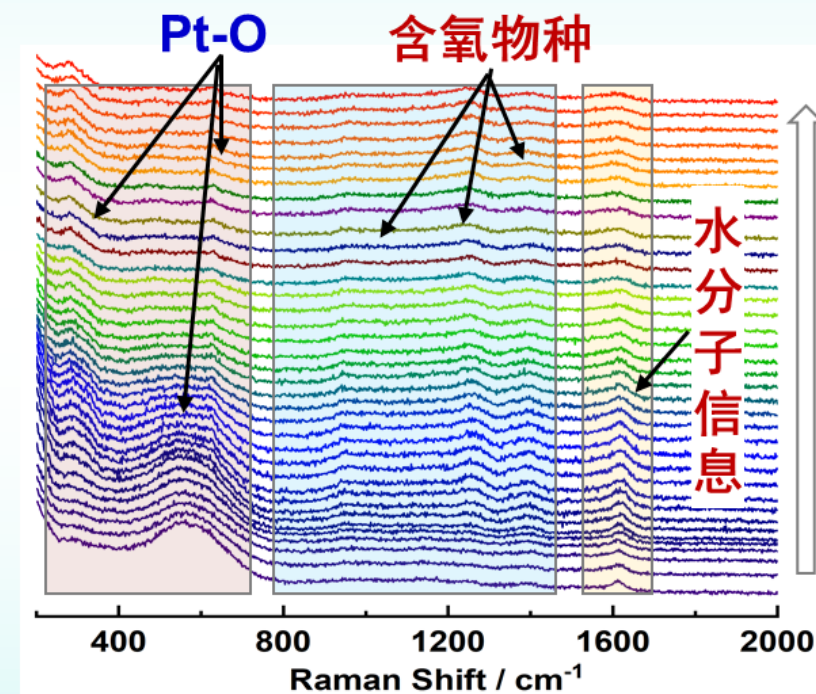
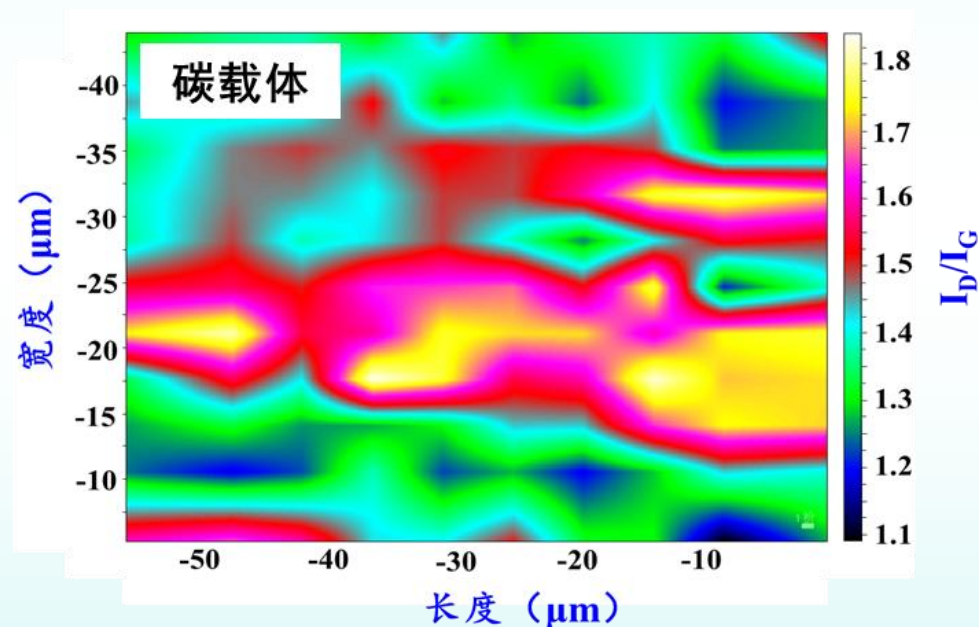
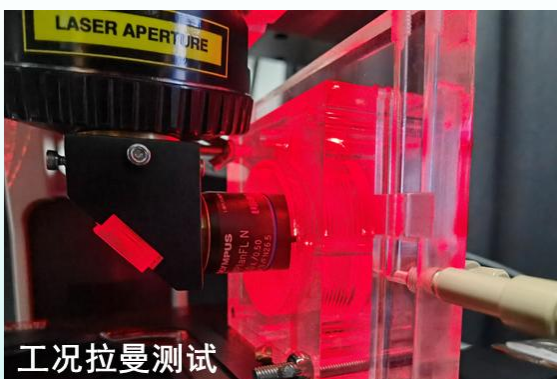
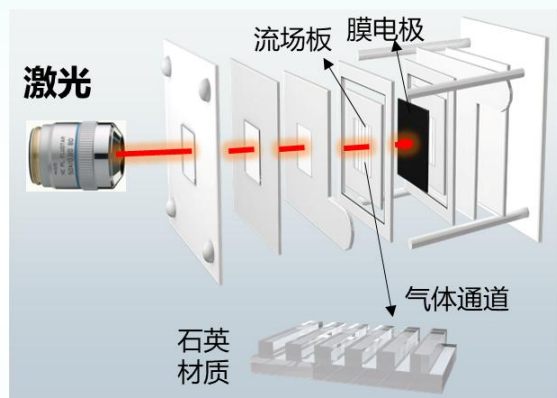
Operando Raman/SERS: 工况情况下, 采集重要表面吸附反应中间产物演变趋势

Operando DEMS: 工况情况下, 确定ORR、OER反应路径可逆性

针对燃料电池的 *operando* 表征

针对燃料电池器件结构和复杂的气固液三相界面、通过构筑激光通路、设计燃料电池工况表征电解池，发展燃料电池工况拉曼表征技术

构筑激光通路



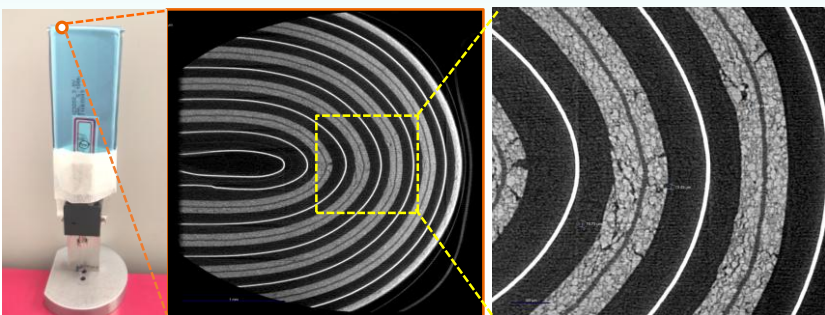
- ✓ 获得膜电极界面不同区域碳载体缺陷分布及动态演变
- ✓ Pt基催化剂上ORR界面物种动态变化的工况光谱证据

李剑锋，董金超等

开发用于实际器件研究的 *operando* 技术

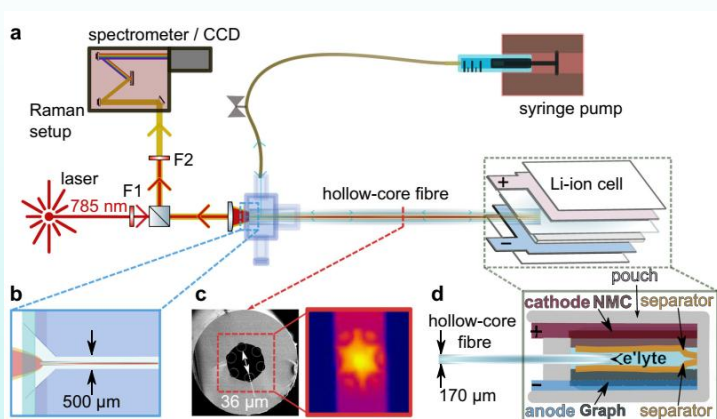
一种或几种技术远远不能满足整个系统的需求，往往需要多种技术联用

计算机断层扫描 (X-射线, 中子)



Co, et al. Angew. Chem. Inter. Ed. 2014

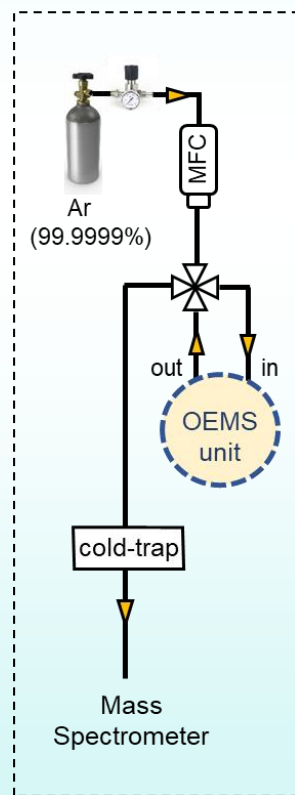
光纤 (先驱: Tarascon, Euser, etc.)



Euser, et al. Nat. Commun. 2022

质谱、电化学技术、联用技术等

电池产气表征设计图



不同的电池设计工艺

实验室级别，模具电池和“模拟环境”



产业化级别，软包电池和“工况环境”



不同电池环境带来的差异：

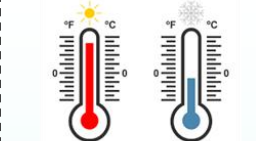
- E/C比、N/P比
- 电极载量、电解液过剩程度
- 电池工艺 (多层卷绕 vs. 单层叠片)

工况工作环境、条件

□ 过充、过放等冲击



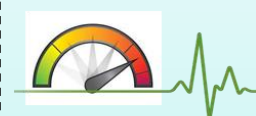
□ 温度浮动冲击



□ 日历存储掉电冲击

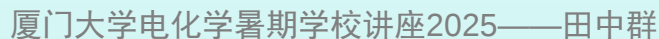


□ 非常规充放电模式





软物质（物质-能量-信息）反馈耦合作用？

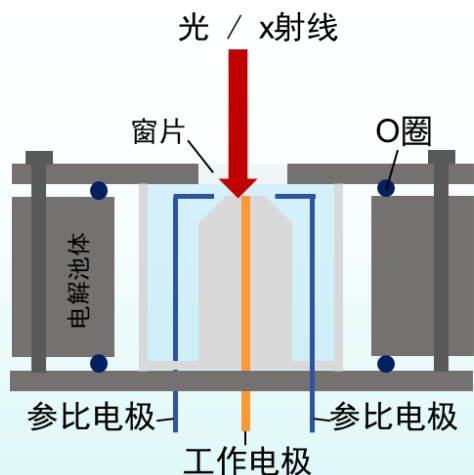


电化学原位和二类工况表征的对象具有不同特征和本质

原位和工况是两种不相同的模式，二者在研究尺度、广度和复杂度等方面均有很大差异，**不可将电化学控制条件下的表征笼统表述为“工况”**

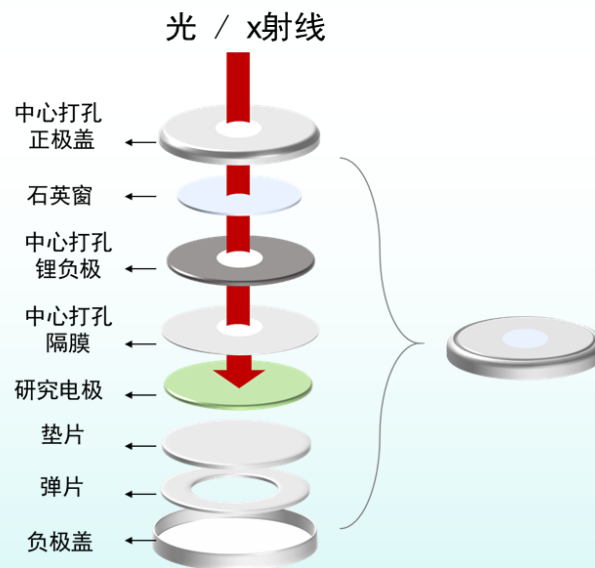
工况分为二个层次：“小工况”—模拟工况条件；“大工况”—实际工况条件，**极具挑战！**

三电极电解池原位研究



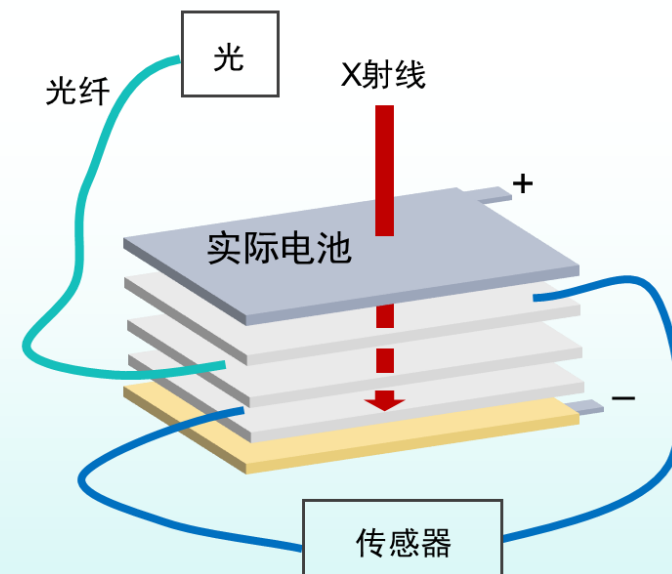
mm²~cm²/相对单一/相对简单

扣式电池原位/工况研究



尺度/广度/复杂性

实际电池工况研究



cm²~m²/综合体系/极为复杂

如何发展AI赋能的工况检测技术，形成具有颠覆性的研究新范式？

使用单一或几种谱学/传感检测方法来研究一种或几种简单界面，忽略了其他界面或它们之间的耦合和串扰乃至整个体系，导致学术界与产业界存在巨大差距。

Dead fish



Sick fish



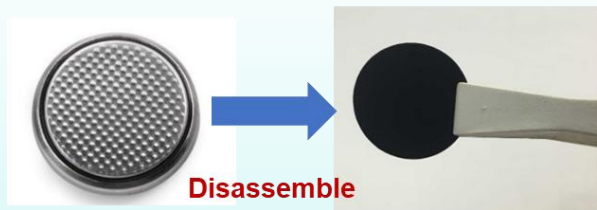
Happy fish



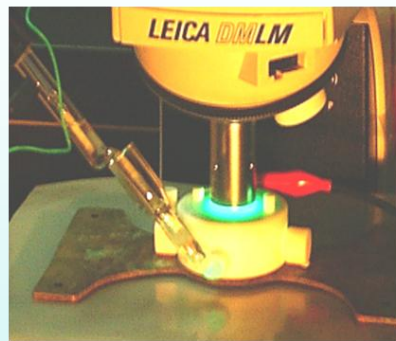
Happy fish and robots



Ex situ



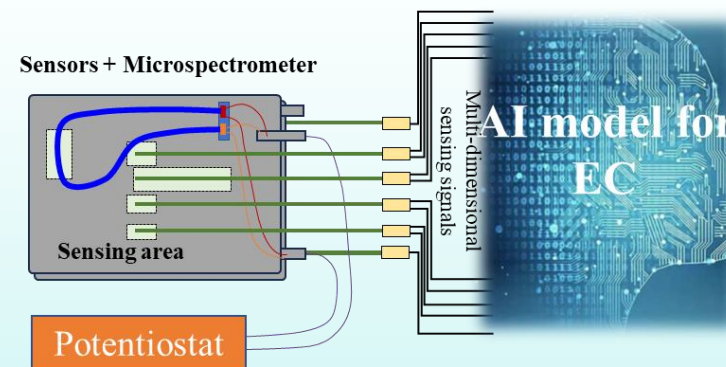
In situ



Operando



Operando + AI



125 个重大科学问题之三 (*Science* 2021)

如何在微观层面测量界面现象？

能源存储的未来是怎样的？

AI会重新定义化学的未来吗？

延伸问题

AI如何重新定义化学的未来？

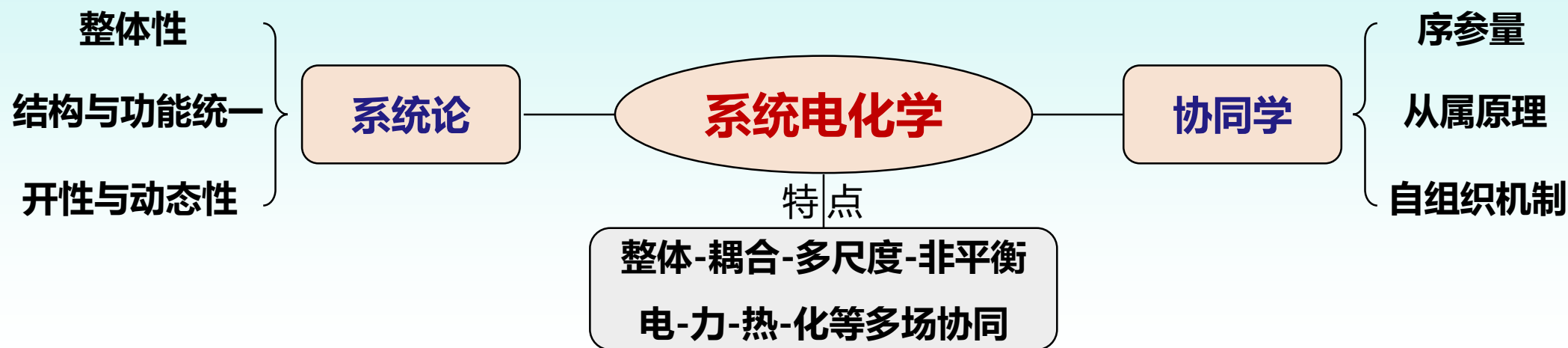
电化学领域最重要的挑战是什么？

“AI会重新定义界面化学和电化学的未来吗，系统电化学？”

基本判断：AI最擅长于解决错综复杂和多维关联的问题，可发挥不可替代作用



系统电化学 (Systems Electrochemistry) 与系统论和协同学的关系



为什么要从系统论与协同学角度重新审视电化学？

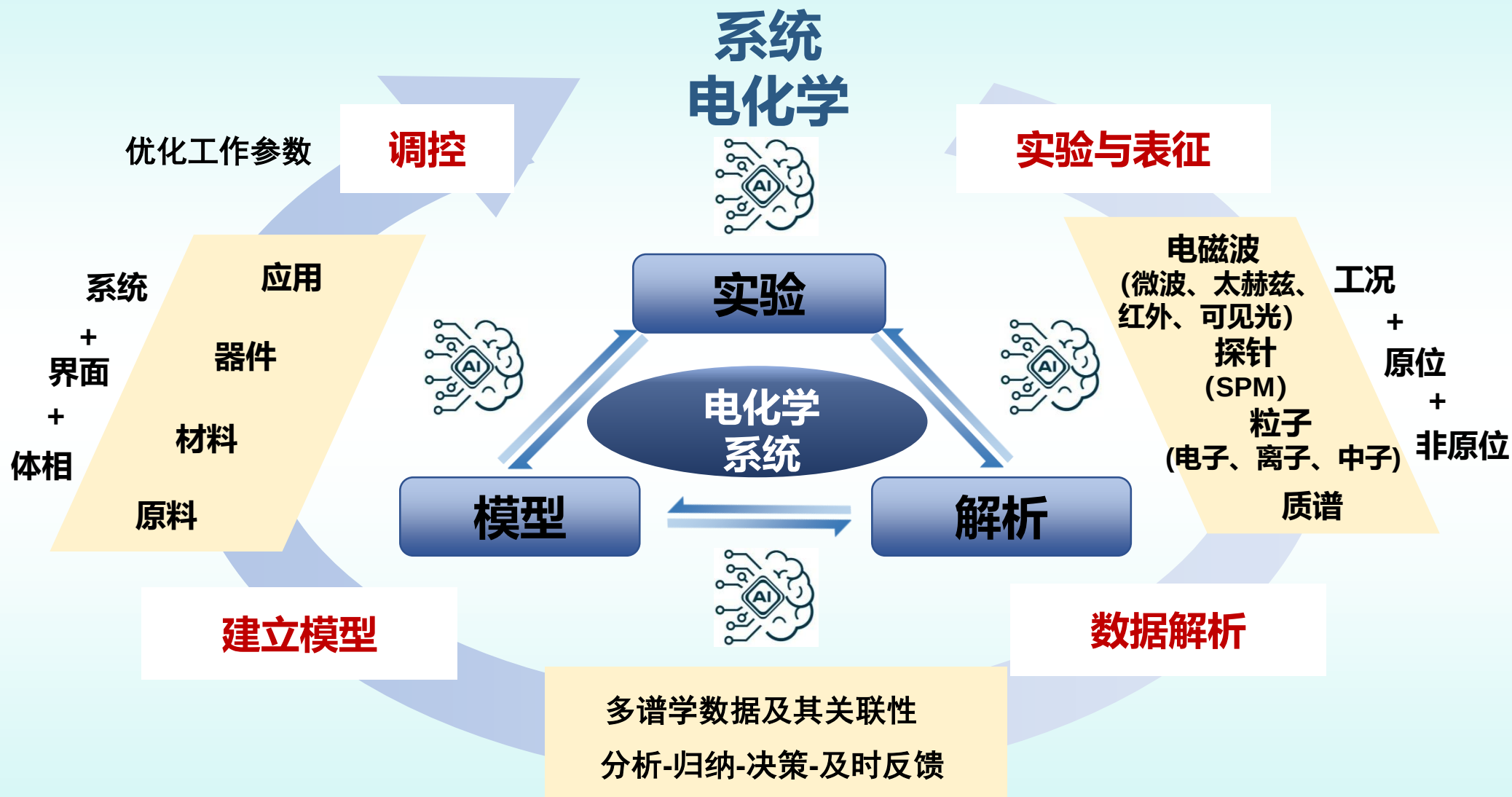
- 电化学系统的多变量、高耦合特性；
- 传统“单反应/单电极/单（表）界面”研究模式的局限性；
- 实际工作条件（工况下）电化学系统高度复杂性；
- 系统论和协同学为深入理解和调控复杂电化学过程提供新路径？！

系统电化学与系统论和协同学的关系



内容	系统论	协同学	系统电化学
核心目标	研究整体结构与功能的协调性	研究系统有序结构的生成机制	构建-解析-调控复杂电化学系统的耦合行为
基本变量	状态变量、控制变量	序参量、从属变量	电极电位、电流密度、反应速率、场梯度、耦合度、
动力学描述	非线性微分方程组	非线性耦合动力学方程、反应扩散方程	Nernst-Planck-Poisson-Boltzmann、Butler-Volmer方程组，等等
系统行为	稳态、多稳态、突变、涌现	相变、模式形成、振荡、混沌	充放电平台、催化位点选择性、电化学振荡、活性区域分布，正负反馈网络

系统电化学研究模式



多模态机器学习 + 理论计算

AI将推动系统电化学的实验和理论框架和模型的建立和发展

“AI + 系统电化学” 是极具发展潜力的交叉研究新方向

融合AI数据驱动能力与系统电化学的多变量耦合、非线性行为和复杂动态过程控制

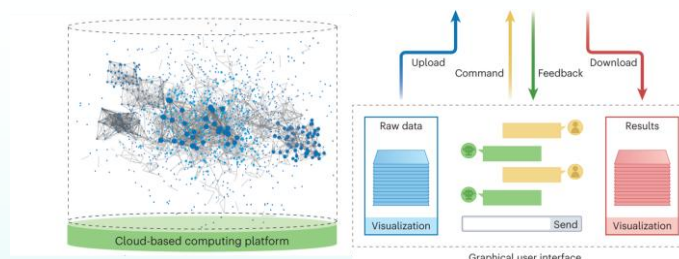
**AI 赋能的
系统电化学**

**提升系统检测
能力**



提升微弱信号的准确捕捉能力
提高检测的能量和时空分辨率
提高多检测技术高效协同能力

**提升系统解
析能力**



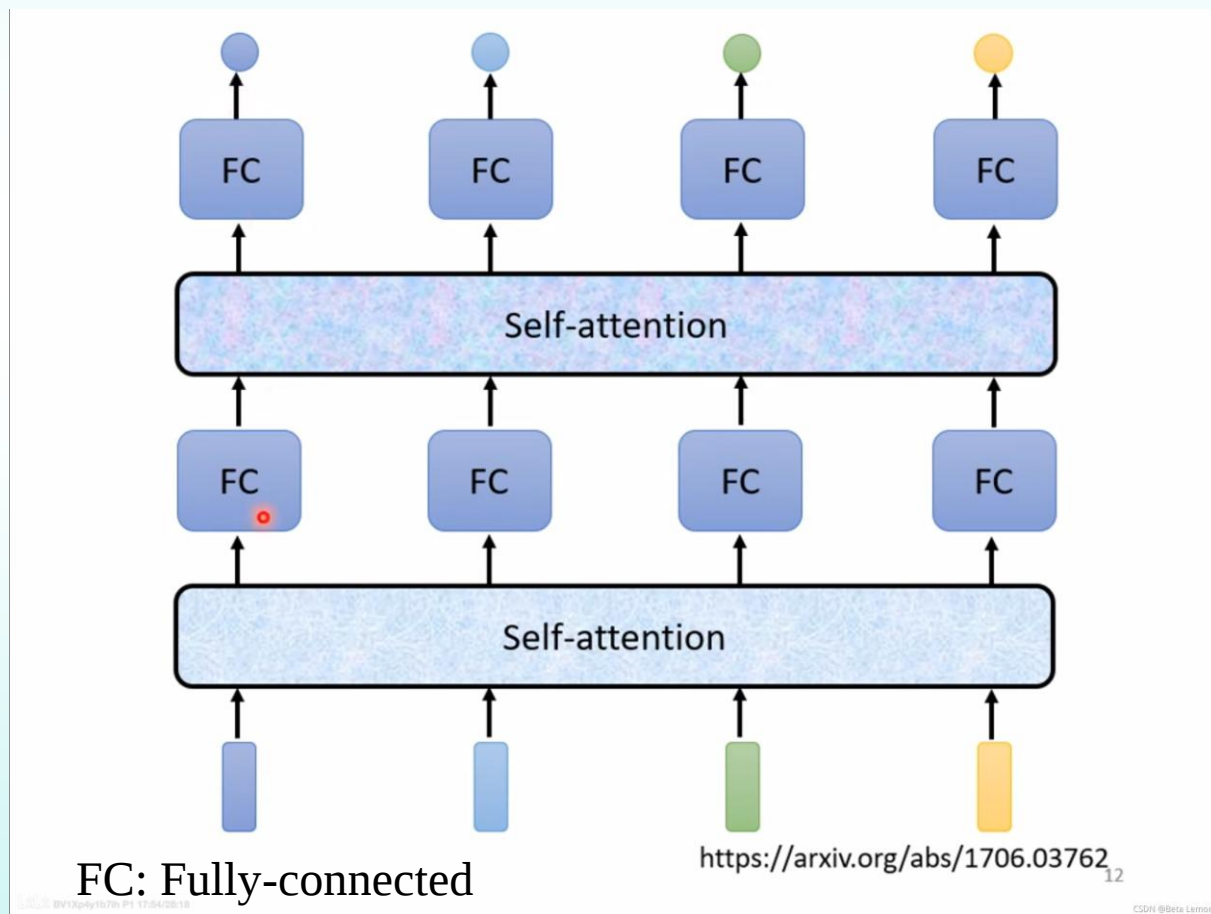
加速复杂环境下的物质识别和
耦合要素
结合计算预测谱学表征结果

**实时表征-解析-反馈-控
制全闭环**



→ **工况条件下表征与调控实时结合**

自注意力机制让 AI 具备了从全局视角动态捕捉关键关系的能力，它是连接感知、推理、预测与控制的关键桥梁。



- **自注意力的基本思想：**

在处理一个序列中的每个元素时，不只是看它自身，还要看它与其他所有元素的关联程度。

- **自注意力的优势及重要性：**

全局依赖建模能力；并行化计算；可解释性强；动态权重；多模态输入；广泛适配能力

- **自注意力的技术贡献：**

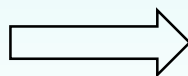
- 1) Transformer 架构的核心
- 2) 打通多领域 AI 模型架构

自注意力机制在系统电化学建模中的应用价值

应用场景

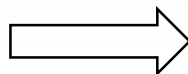
自注意力的价值

电化学多变量数据建模
(如电流-时间、电压-循环等)



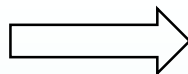
自动捕捉多变量之间的长期耦合关系，
识别系统突变前兆

多变量时空耦合建模
(如电化学系统中的传质过程)



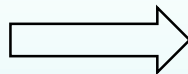
将浓度梯度、电场等参数为序列，识
别变量间协同机制

模拟替代



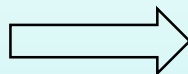
**用Transformer替代传统偏微分方程求解器，
在复杂系统（多物理/化学场）中实现高速预测**

实验策略优化



用自注意力建模实验参数与产物之间的高
维映射关系，用于闭环控制和参数推荐

解释性分析

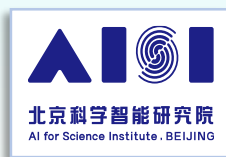


自注意力可显示模型在决策时“关注”的关
键变量或时间段，为科学发现提供线索

人工智能应用电化学实验室 (AI4EC) 2022-



人工智能能否变革电化学科学和工程?



田中群教授
中科院院士



鄂维南教授
中科院院士



程俊教授
国家杰青



张林峰博士
深势科技创始人

人工智能加速
材料与器件设计

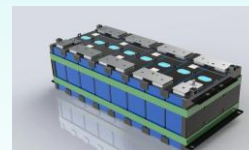
人工智能赋能
工况谱学表征

软硬件一体化
智算方案

支撑
方向



氢能



储能电池



芯片化学



智慧储能
大科学装置

数据
模型

计算数据

文献数据

实验数据

科研
底座

特色算法
和软件

数据库
和知识库

异构化
算力平台

原位工况
表征方法

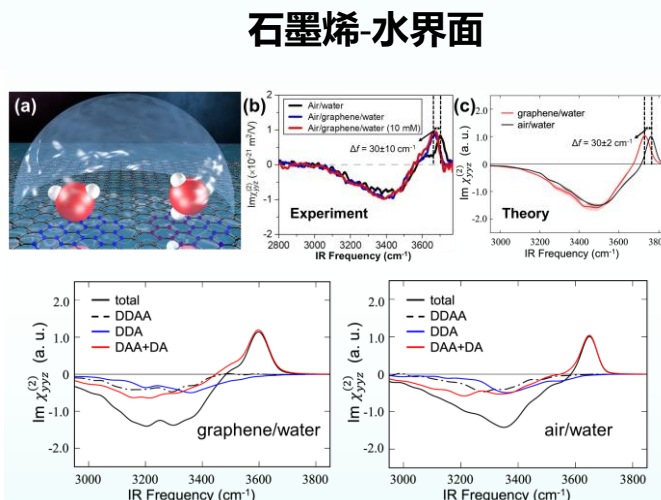
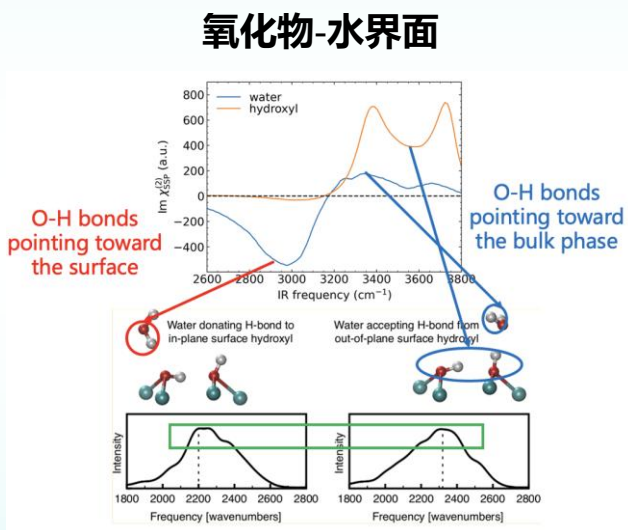
人工智能模型

AI+电化学领域的“四梁N柱”框架

界面谱学多模态模型工作将对系统电化学建立和发展做出贡献

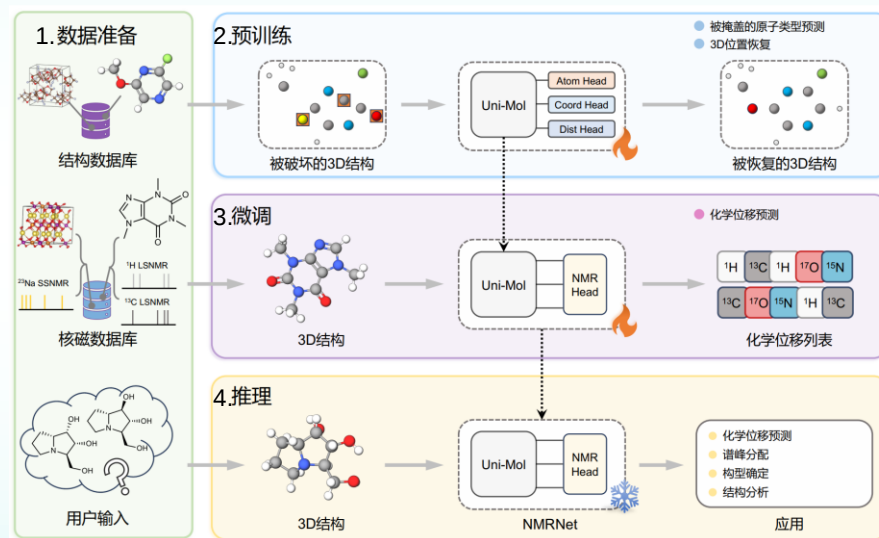
基于第一性原理方法，构建谱学智能算法 workflows，结合软硬件一体加速方式，获取大量精确计算谱学数据，**构建谱学数据库以及多模态谱学模型**

界面敏感光谱学模拟



理解界面微观结构

构造统一框架的NMR预测机器学习模型



实现对不同体系（固态、液态、不同分子量）化学位移的准确预测

程俊, 汤富杰, *J. Chem. Phys.* 2024, 161, 124702. (编辑精选)

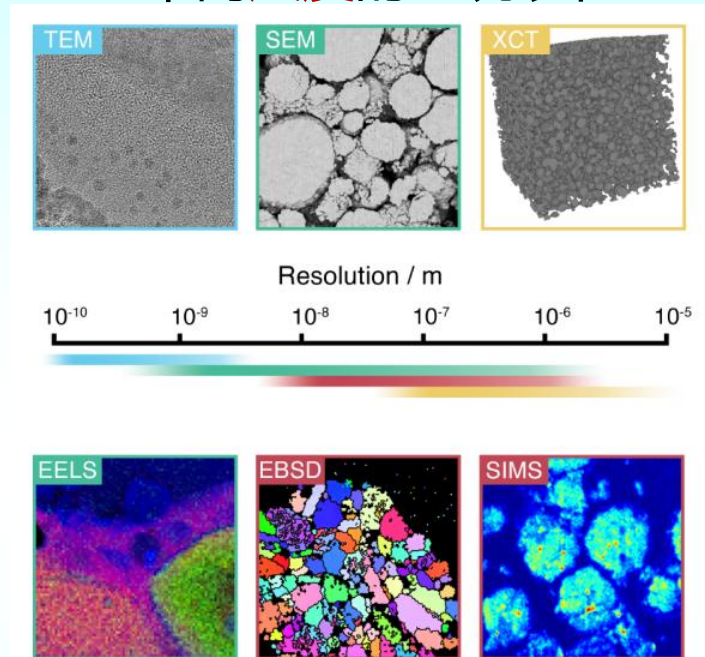
汤富杰, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2024, 63, e202319503

汤富杰, 高志峰, 鄂维南、田中群、程俊, *Nat. Comput. Sci.* 2025

汤富杰, *Phys. Rev. X* 2025; 程俊, 汤富杰, *JACS* 2025

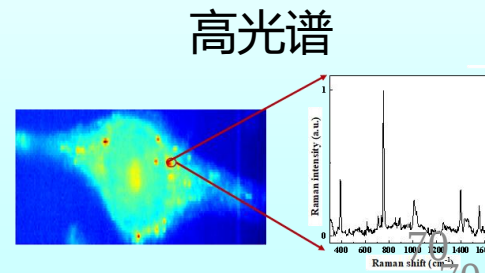
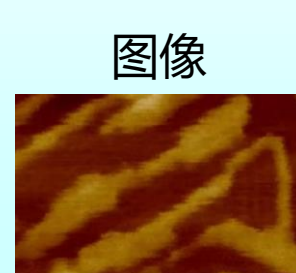
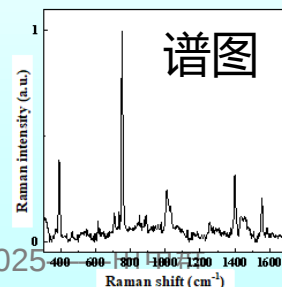
基于AI的多视角融合下的工况谱学分析的充分联用

不同尺度的工况表征



Cooper, S. J. et al., ACS Energy Letters 2022

不同数据类型的工况表征



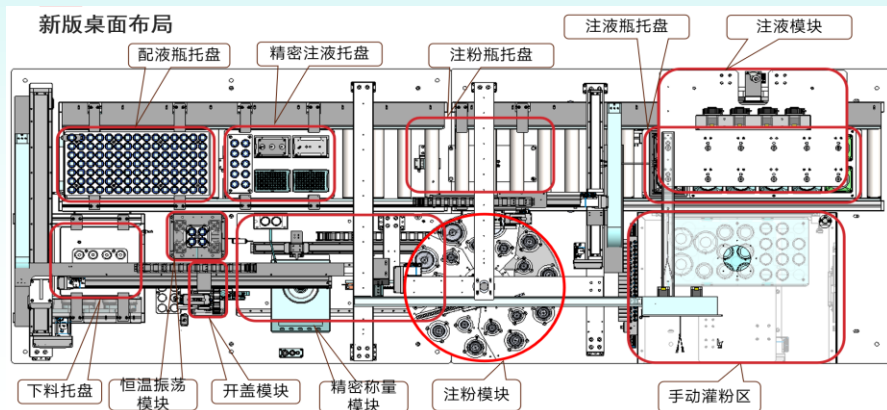
利用不同类型的数据建立了功能丰富的识别模型

Caicedo, J. C. et al., Nat. Commun. 2023

建立能够同时利用不同尺度、不同类型谱学信息的集成式工况决策分析AI模型

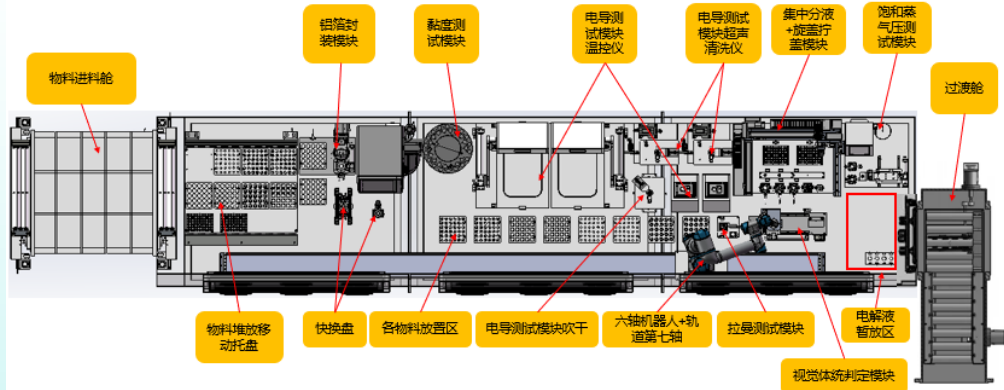
首次实现锂电池电解液“干湿闭环” 研发范式——电解液的智能研发

电解液自动化配置模块



实现**精确称量**和**添加配置**，完成**实验过程数据**的**信息化**

电解液自动化测试模块



实现电解液的四**种关键指标测试**，完成**表征信息****标准化**

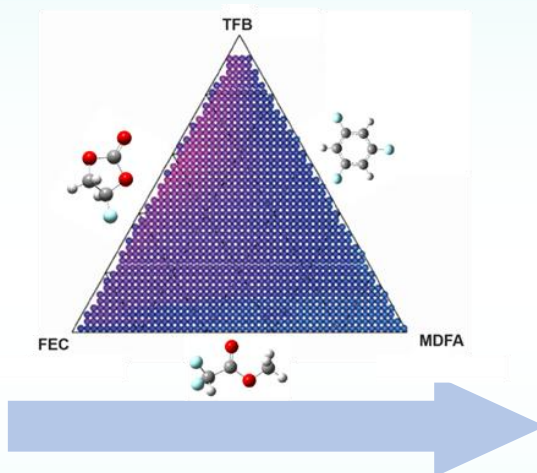
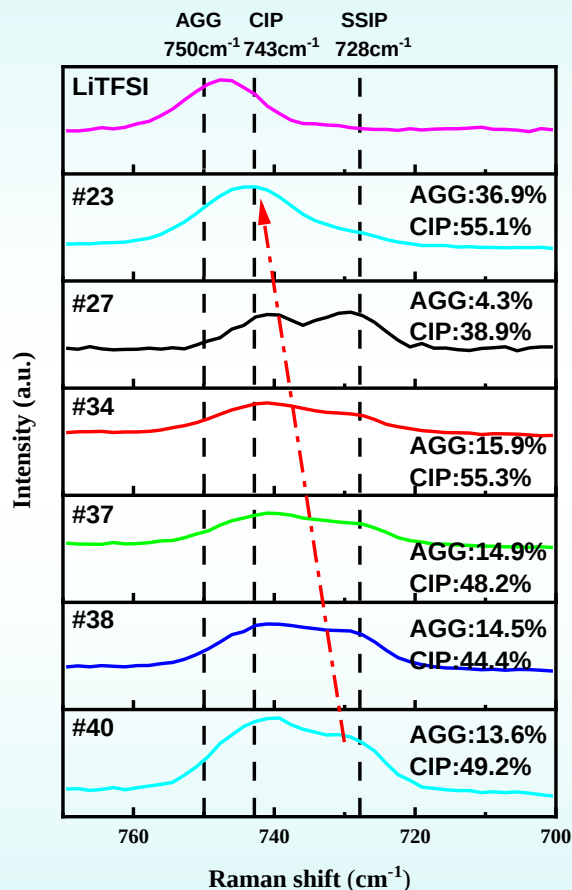


自动化实验平台**搭建完成**，进入设备调试阶段

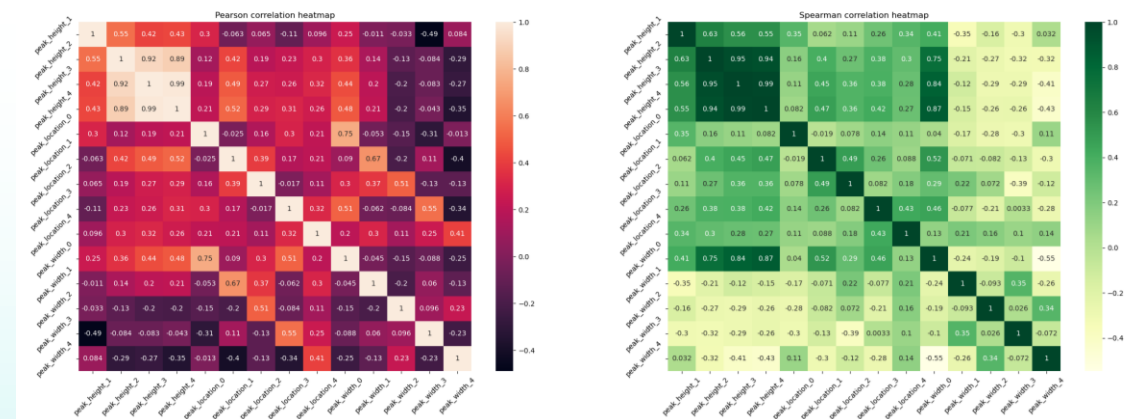
与电池龙头企业**宁德时代**密切合作，建立基于AI算法的电解液智能筛选系统，实现电解液的**自动配置、自动化表征、配方的智能筛选和迭代**

Research progress of AI-driven closed-loop at material level

AI-Driven R&D Paradigm for LIBs Electrolytes: A "Dry-Wet" Closed-Loop for Low-Temperature Electrolytes



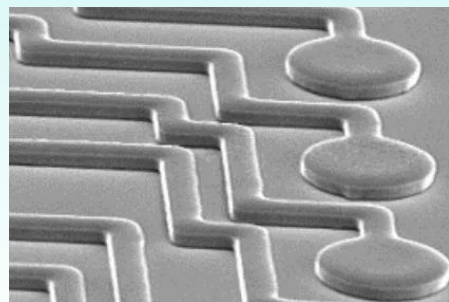
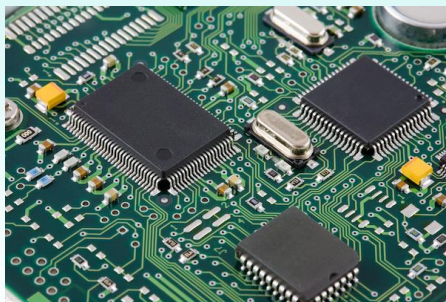
Significant Raman peak shift observed for TFSI⁻ anion



AI-Driven Elucidation of Solvation Structure – Electrochemical Performance Relationships

洪文晶等

AI赋能电子电镀产业的新进展



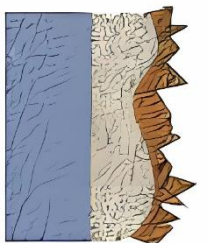
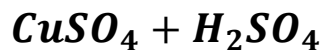
先进封装 印刷电路/晶圆电路

电子电镀是
唯一能够实现纳米级电子
逻辑互联和微纳结构制造
加工成形的关键技术

电镀液需要添加多种添加剂

添加剂组成和浓度是保密的
添加剂需实时定量，每日补加

基础酸性电镀液 VMS

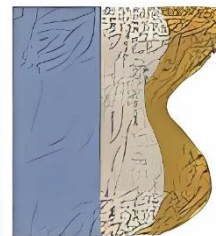


铜沉积:

- 表面粗糙
- 无光泽

光亮剂

- VMS
- Brightener

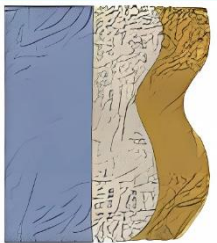


铜沉积:

- 表面光滑
- 厚度不均匀

光亮剂+抑制剂

- VMS
- Brightener
- Suppressor



铜沉积:

- 表面光滑
- 厚度均匀
- 不平整

光亮剂+抑制剂+整平剂

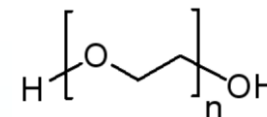
- VMS
- Brightener
- Suppressor
- Leveler



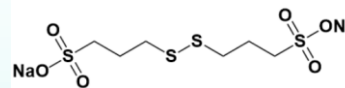
铜沉积:

- 表面光滑
- 厚度均匀
- 镀层平整

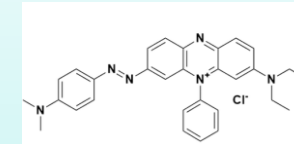
PEG8000



SPS



JGB

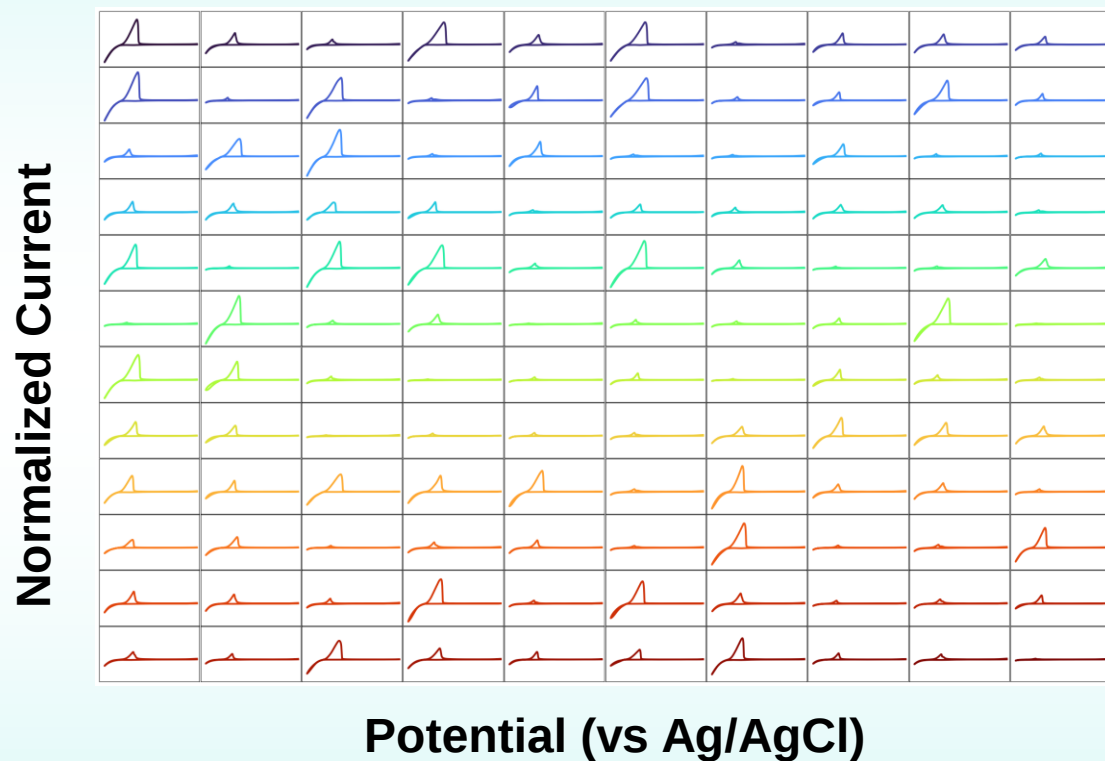


汪骋等

电镀液表征装置：数据驱动的特征法

模型构建

CVS数据



训练



模型

浓度

VMS各组分

Suppressor

Brightener

Leveler

各组分浓度

实战



第一代产品：AI+自动化高通量数据收集装置

溶液混匀/电化学测试

电化学控制 / 数据收集系统



溶液配制系统

合作企业

宏正化学
云天半导体

实现不同浓度组合下，
800~1200 条/24h 电
化学数据的采集与处理。

将实战中测试时间从4
小时压缩至2分钟。

测试铜电镀体系中相对
误差小于5%。

对比产品

常见应用场景：



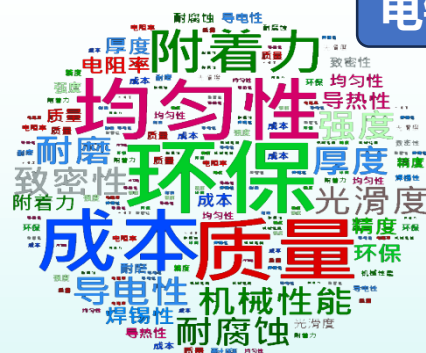
电镀液维护

电镀液添加剂定量分析



电镀液研发/维护

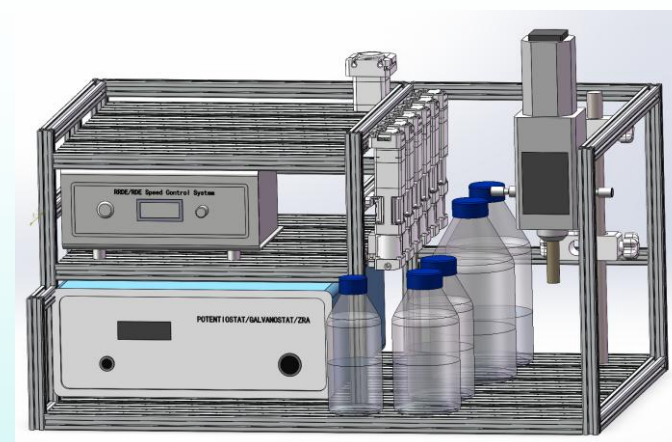
电镀工艺性能需求



瑞士万通

测试一次要4小时
对企业是黑箱

价格较高(30-100万人民币)，通过约40个实验
建立复杂标准曲线定量

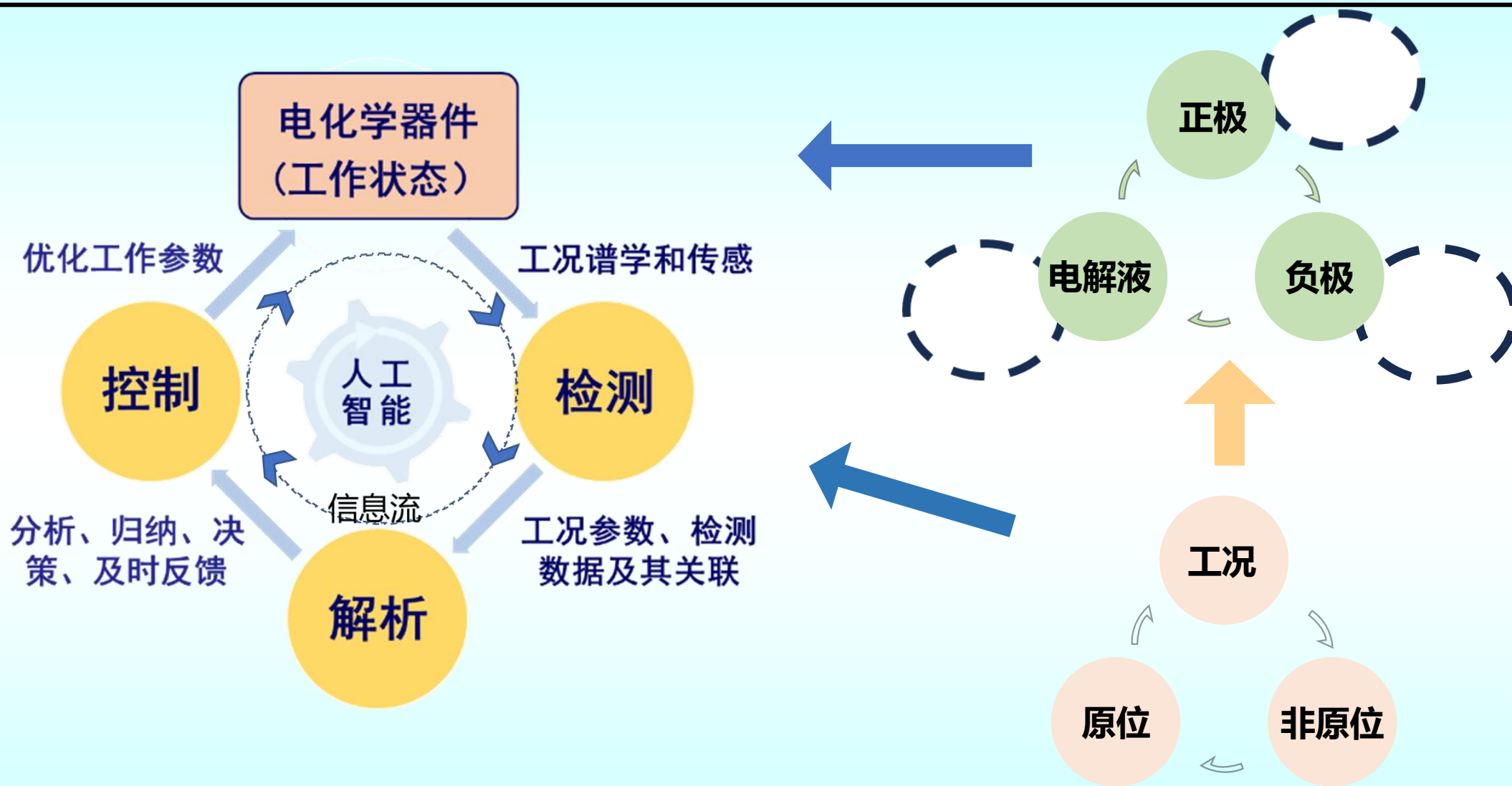


我们的产品

测试时间仅需
2分钟

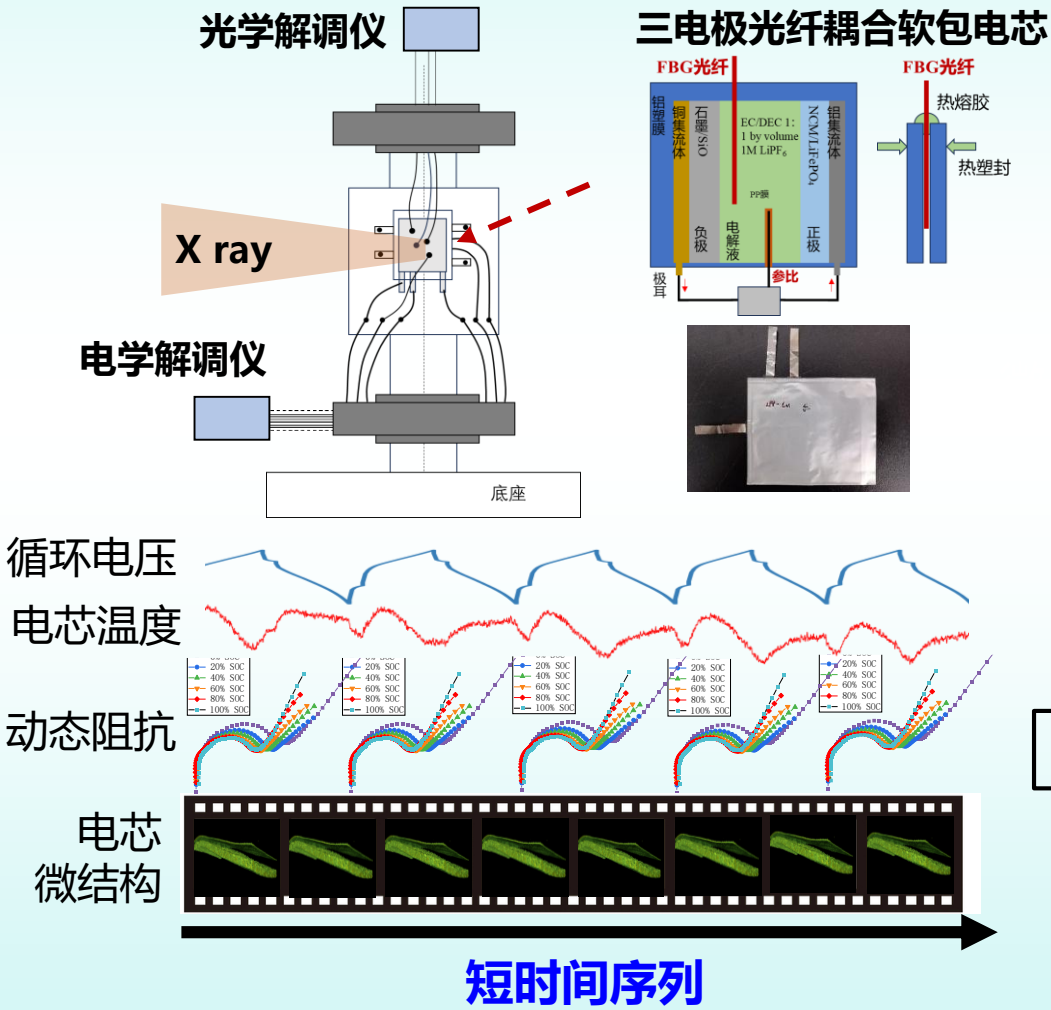
具备瑞士万通仪器的功能+数据驱动的高速测试方法，国产自研解决卡脖子问题

AI-LOMC: AI辅助-工况检测--解析--控制闭环” 研究新范式



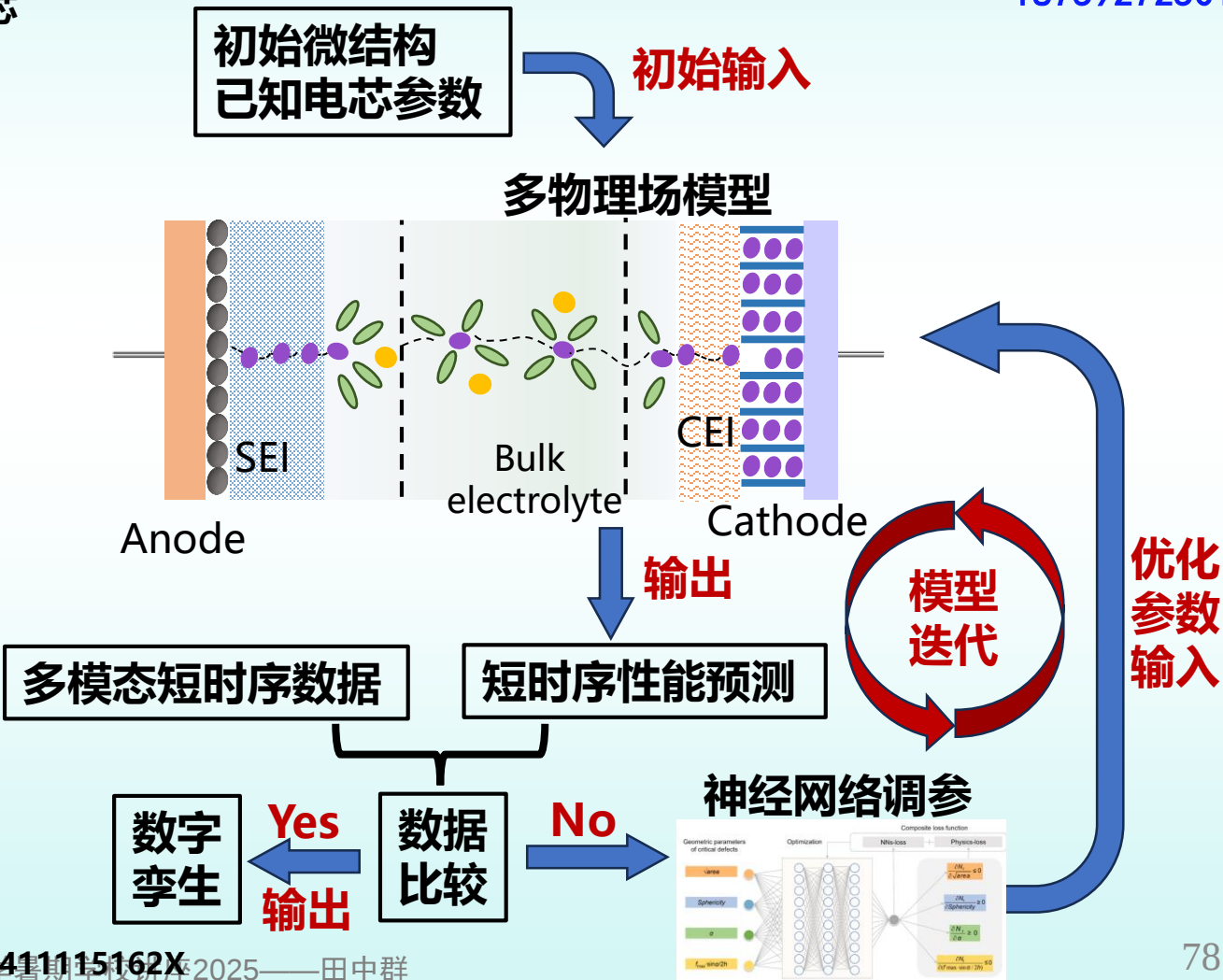
实时工况检测，实时解析，及时调控。由3类不同大小的闭环有机组成

同步多模态XCT测试技术

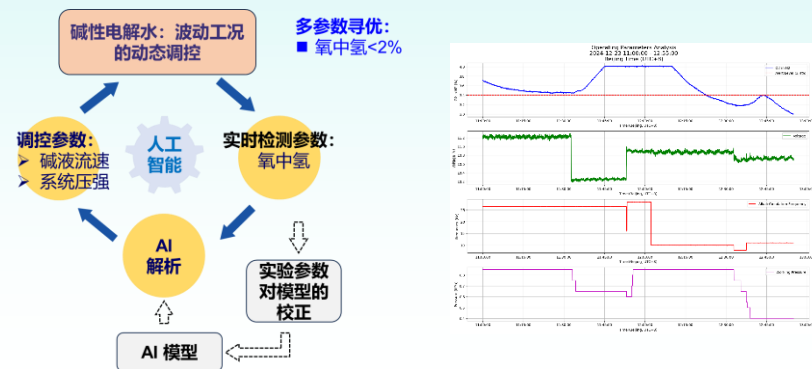


电芯数字模型及性能预测

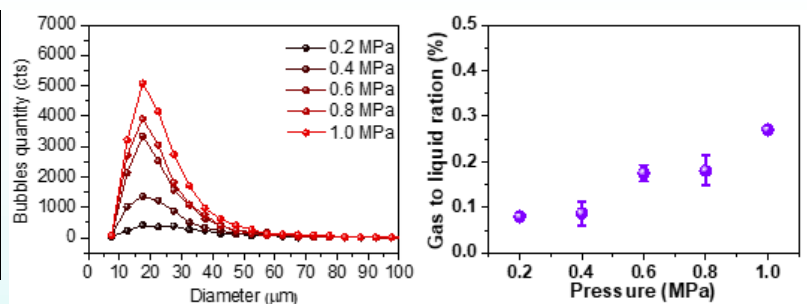
王海龙
18759272501



LOOP1: 波动工况下碱槽的多参数寻优调控

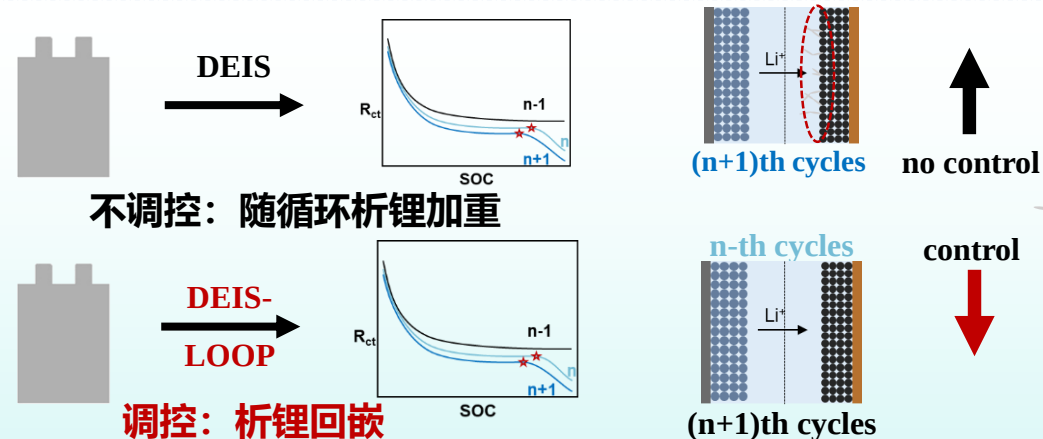
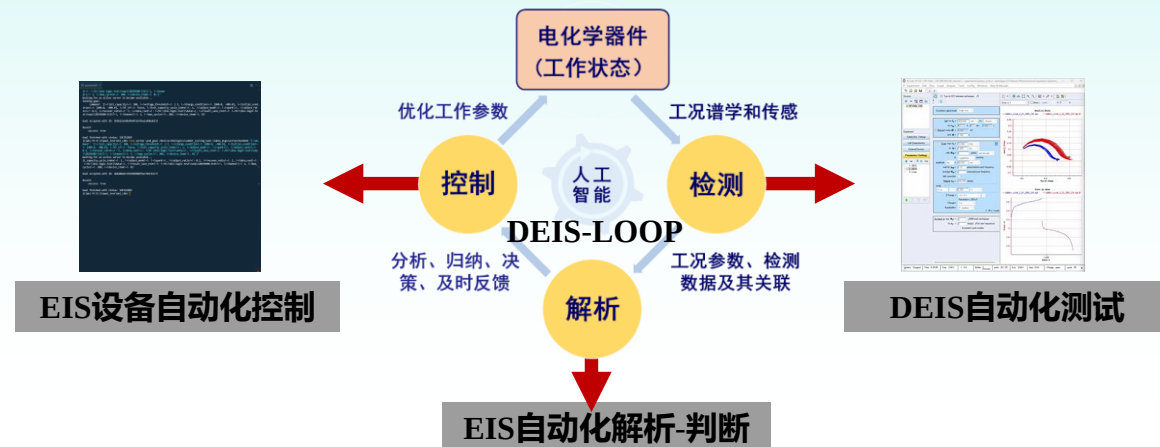


模拟方波电流工况，AI全自动控制氧中氢



基于高速摄像和深度学习图像处理的气液两相在线监测

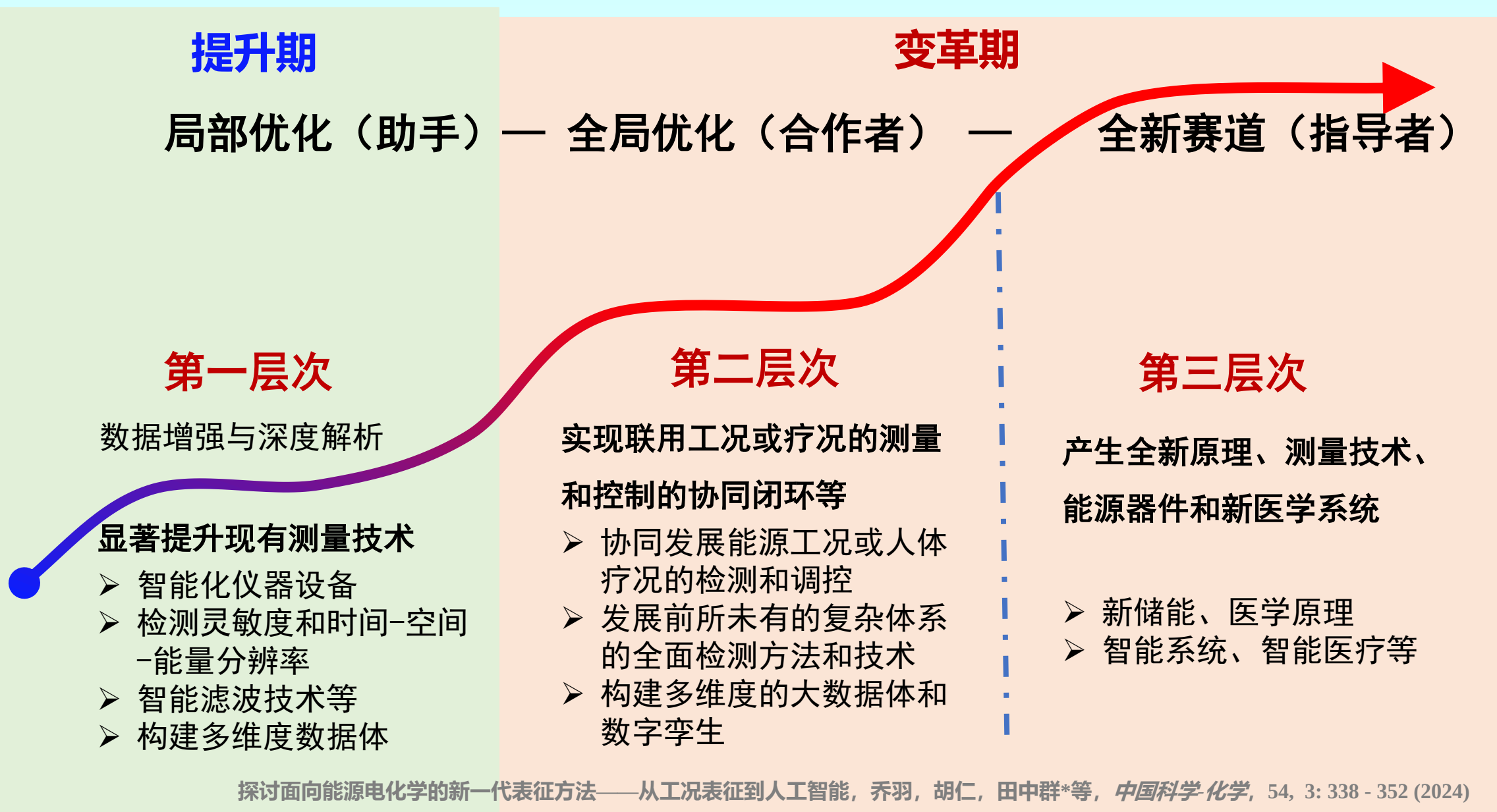
LOOP2: 磷酸铁锂储能电池极早期安全预警和调控



➢ 初步完成工况闭环，实现波动工况下碱性电解水系统的全自动动态调控。

➢ 初步打通自动化测试-解析-判断-调控闭环（基于动态阻抗技术/DEIS-LOOP）

当下特别要分级分类理清AI赋能科学和产业的三个层次的显著差异



正在建设的厦门市智慧储能大型科研基础设施



原料

材料

器件

应用

解决真问题

真解决问题

科学-技术-工程

三支队伍

储能材料智能制备

无人智能高通量制备实验室

以人工智能赋能储能
材料、器件和系统研究



表征

提供储能材料和器件

提供储能器件

验证

加工

储能器件
表征集群

共用表征
集群

储能原料
表征集群

储能材料
表征集群

储能器件极致加工

传感器件加工，研发，定制

储能工况表征调控

原位/工况表征方法集群
人工智能超算中心

储能系统智能管理

软硬件验证平台

正在建设集成能源-材料-信息一体化的智慧能源大科学装置



针对能源安全国家战略需求与储能相关产业发展需要，厦门大学、嘉庚创新实验室与火炬集团共建**智慧储能大型科研基础设施**，支撑能源领域的“料-材-器-用”全链条创新。

- **建设目标：**福建省首个大科学装置；为筹建**国家能源实验室和国家材料实验室的福建基地**奠定基础。
- **项目总投资：**6.75亿元（用地0.24亿元，设备2.61亿元，基建及二三类费用3.9亿元）。
- **建设周期：**2024年12月-**2027年5月**（2026年底前完成土建主体施工）。



廈門大學
XIAMEN UNIVERSITY



嘉庚创新实验室
TAN KAH KEE INNOVATION LABORATORY



廈門火炬集團
XIAMEN TORCH GROUP

如何系统提升全局关联、分级分类和协同能力？

1. 多学科（化学，物理，材料，工程，经济，管理等）
2. 多角度（能量/质量/数量，能量/功率密度，规模）
3. 多因素（能量/空间/时间分辨，电子/空穴/离子）
4. **全系统**（热/电/光，正极/膜/负极，界面/器件）
5. **全链条**（上/中/下游，矿产原料到废品回收再生）
6. **算总账**（效率，污染，经济，安全，国情等矩阵关系）

主要科学基础：热力学，动力学，电子学

统计力学，协同学，系统论

（培养战略科学家和企业家素质：为什么？凭什么？）

探讨电化学发展轨迹和未来——从表面到界面到系统电化学

1. 解决大问题是学科交叉动力（将不可能变为可能）
2. 拥抱新技术是大发展的必需（解决发展瓶颈问题）
3. 抛弃路灯下找钥匙的模式，用新赛道需求倒逼方法
4. AI是解决复杂系统的金钥匙（工况表征控制闭环）
5. 在百年大机遇中实现大跃升（自我批判实现变革）
6. 厘清战略和战术问题，全方位协同实现“合为贵”

致 谢

谷宇、易骏、胡仁，田景华，王海龙，战超，湛孝，李剑锋，程俊，汪骋，洪文晶，.....

Chat GPT, Deep Seek,.....

近四十年来参与科研和教学的学生、博后、同事和合作者,.....

敬请指正，欢迎合作与加盟，谢谢！

(<https://zqtian.xmu.edu.cn/>, zqtian@xmu.edu.cn)



面临更加复杂的能源体系的需求和挑战，电化学绝不是已没有科学只有技术问题的学科！学科自身还迫切需发展，有很多基础科学问题。电化学是否需要调整战略定位、发展模式和研究范式？

是否需要提升学科主体和引领发展的意识和行为，（但主体绝不代表单干，只有多学科交叉解决复杂电化学相关的关键重大问题）。

解决卡脖子的核心技术和原创新方向的开拓皆同时需要科学深度与技术细节（新理论和新方法和挖掘硬骨头体系），以破解长期受制于他国的关键技术。

从电流到阻抗检测以提取更多信息，

从单一的暂态至稳态行为到多外界因素影响的多次强弱不一的暂-稳态行为，

从远离平衡态到远离稳态过程，从单一稳定电极/界面到多变界面再到有能量和物质输入的全体系。

很有必要建立和发展在工况下的高能量分辨、空间分辨、时间分辨的电化学谱学技术，依托各类大科学装置将显著提升检测灵敏度和分辨率。但也不可简单地抛弃非原位技术，例如冷冻电镜技术有望为揭示电化学界面结构做出重要贡献。

电化学实验与谱学、理论模拟的联用与紧密结合势在必行。⁸⁷

面临更加复杂的电化学能源体系的需求和挑战，有必要从固体-液体界面为主的研究拓展至固体-固体界面和固体-液体-气体界线体系。传统的研究范式在解释复杂的能源体系机理等问题（例如电动汽车动力电池启动，贮备型热电池激活，空间和深海电源）往往难以奏效甚至束手无策，故可能需要提出相适应的新方法和新范式（新描述符）。

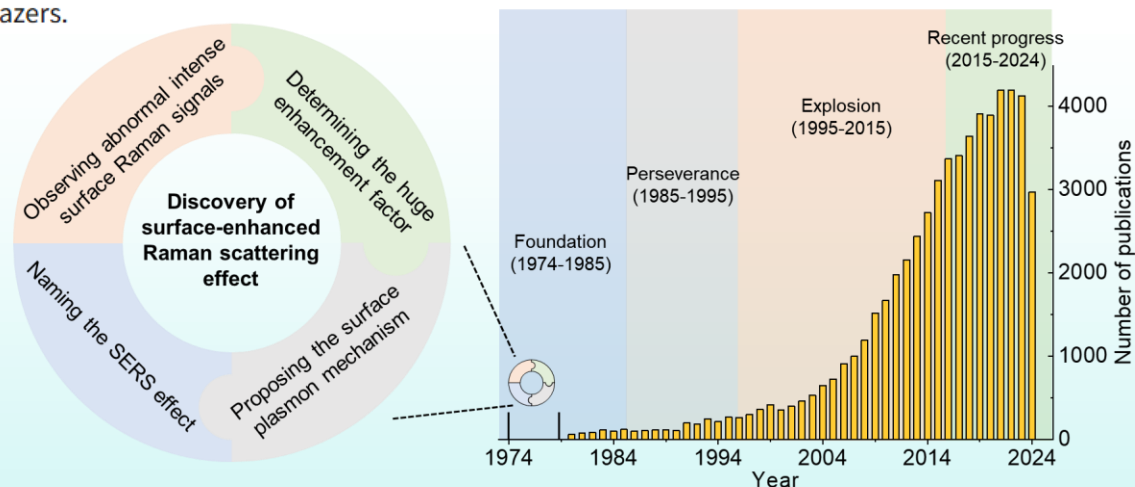
(1) 制备—测量—分析—反馈控制（智能）

(2) 人工智能—制备—分析—循环反馈？

Surface-enhanced Raman spectroscopy: a half-century historical perspective

Jun Yi, En-Ming You, Ren Hu, De-Yin Wu, Guo-Kun Liu, Zhi-Lin Yang, Hua Zhang, Yu Gu, Yao-Hui Wang, Xiang Wang, Hao Ma, Yang Yang, Jun-Yang Liu, Feng Ru Fan, Chao Zhan, Jing-Hua Tian, Yu Qiao, Hailong Wang, Si-Heng Luo, Zhao-Dong Meng, Bing-Wei Mao, Jian-Feng Li, Bin Ren, Javier Aizpurua, Vartkess Ara Apkarian, Philip N. Bartlett, Jeremy Baumberg, Steven E. J. Bell, Alexandre G. Brolo, Louis E. Brus, Jaebum Choo, Li Cui, Volker Deckert, Katrin F. Domke, Zhen-Chao Dong, Sai Duan, Karen Faulds, Renee Frontiera, Naomi Halas, Christy Haynes, Tamitake Itoh, Janina Kneipp, Katrin Kneipp, Eric C. Le Ru, Zhi-Peng Li, Xing Yi Ling, Jacek Lipkowski, Luis M. Liz-Marzán, Jwa-Min Nam, Shuming Nie, Peter Nordlander, Yukihiko Ozaki, Rajapandiyam Panneerselvam, Jürgen Popp, Andrea E. Russell, Sebastian Schlücker, Yang Tian, Lianming Tong, Hongxing Xu, Yikai Xu, Liangbao Yang, Jianlin Yao, Jin Zhang, Yang Zhang, Yao Zhang, Bing Zhao, Renato Zenobi, George C. Schatz, Duncan Graham and Zhong-Qun Tian

This review comprehensively presents the fifty-year journey of surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS), covering its discovery, pivotal phases, innovative methods, and key inspirations from the pioneers and trailblazers.



敢为先，重细节，合为贵

作者：70位

单位：47家

篇幅：99页

上线时间：2024年12月23日

出版时间：2025年02月07日

引用：45次 (2005-7-6)

Yi[#], You[#], Hu[#], Tian^{*}, et al., *Chem. Soc. Rev.*, 2025, **54**, 1453-1551.

厦门大学电化学暑期学校讲座2025——田中群

诺贝尔获奖者Brus的来信



Louis E. Brus
路易斯·布鲁斯
2023年诺贝尔化学奖

ZQ,
Thanks for your excellent systematic work
on SERS, and for your leadership over
the decades.
Best wishes,
Louis
Columbia University

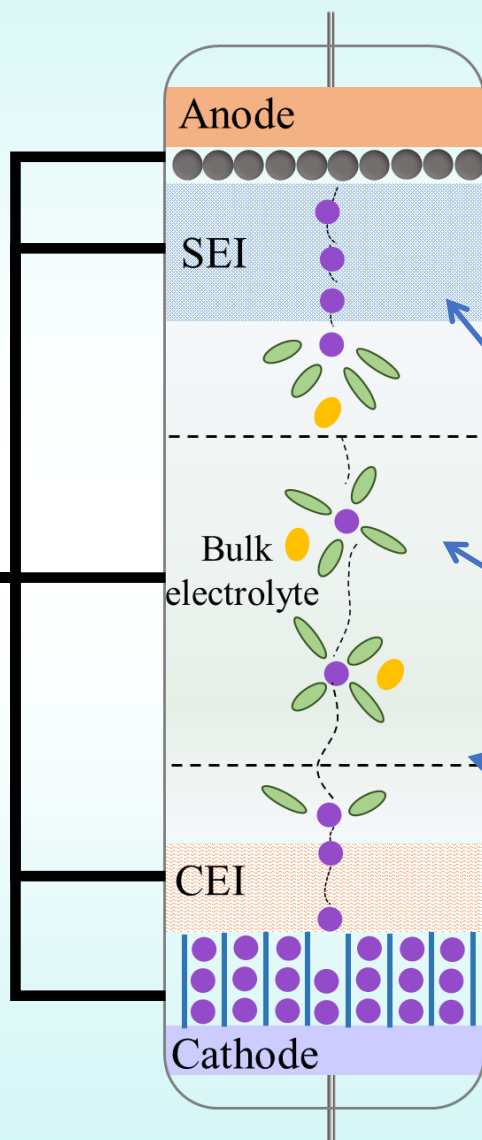
中群,
感谢您在SERS领域所做的出色的
系统性工作和您几十年来的领导。
路易斯
哥伦比亚大学

面向电化学能源器件和系统的AI基础模型?



电化学
基础模型

关联
训练



“黑箱” ×

可解释和可溯源 ✓

界面/系统

检测

不同界面检测

谱学

X-Ray

Neutron

Raman

IR

NMR

...

传感

Electrochem

Temperature

Pressure

Humidity

电化学系统
多模态学习

