

# 中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 77 次

学部工作局学术与文化处 编报  
《中国科学》杂志社

2019 年 2 月 18 日

## “电化学”科学与技术前沿论坛综述

### 一、国内外研究现状

电化学是化学中涉及界面电荷转移及反应的学科分支，在能源、新材料、环境保护和生物医学技术等方面具有独到的优势。特别是在化石能源日趋减少、环境污染日益严重的今天，电化学能源（电化学能量转换和储存）以其高效率、无污染的特点，在化石能源优化清洁利用、可再生能源（太阳能、风能等）开发和电动交通、节能减排、环境保护等涉及人类社会可持续发展的重大领域中发挥着越来越重要的作用，比如锂离子电池的商品化带动了移动电子设备的快速普及、燃料电池的研发促进了未来汽车工业的发展、太阳能电池的成熟提高了人类对于自然界能源的利用效率等等。

我国电化学在近 20 年来得到快速发展。一方面，电化学人才的不断引入和培养以及科研经费的持续投入加快了电化学队伍的建设；另一方面，基础科学设施的建设力度提升直接推动了电化学科学研究的深入。科研硬件方面，以上海光源为代表的大型科学仪器装置的建成，标志着我国科研平台的建设直追英美等发达国家，达到世界一流

的水平；基础研究方面，我国电化学领域的部分工作已经达到世界领先水平，如光电催化效率、表界面的 Raman 光谱表征技术、大容量正负极锂离子电池材料、燃料电池碱性膜研发、透射电子显微镜原位池芯片的设计与加工等；工业应用方面，我国新能源汽车总体发展指数排名全球第一，已布局世界上最完整的锂离子电池产业链，是世界上氯碱年产量最高的国家。但整体而言，中国电化学的发展与国际先进水平仍然存在较大差距，缺乏大量原创且具有划时代意义的工作。

为了更进一步推动中国电化学的发展，本次论坛邀请了电化学和相关学科一线工作的专家学者，聚焦电化学科学和技术研究现状、关键科学问题及核心技术等议题展开深度研讨。希望通过这次论坛能对电化学基础理论创新发展形成一些共性认识，找出电化学在相关重要应用和工业领域中需要克服的工程技术瓶颈，寻求解决方案，以此推动我国电化学前沿科学理论和技术探索；同时希望能够加强国内相关研究单位密切合作，规划我国电化学科学和技术发展战略，促进国家层面上的项目组织和实施。

## 二、论坛简介

2018年6月22~23日，由中国科学院学部主办，中国科学院化学部和学部学术与出版工作委员会承办，厦门大学、《中国科学》杂志社、能源材料化学协同创新中心和宁德时代新能源科技股份有限公司共同协办的，以“电化学”为主题的第77次科学与技术前沿论坛在中国科学院学术会堂（北京）举行。

本次论坛由厦门大学孙世刚院士牵头，朱道本、李灿、衣宝廉、欧阳明高、陈军、李永舫、万立骏、杨裕生、陈洪渊、田中群、刘忠范、陈建峰、汪尔康、杨秀荣、董绍俊等15位电化学和相关领域的中国科学院和中国工程院院士，国家“千人计划”专家、国家杰出青年科学基金获得者、“长江学者”特聘教授等知名科学家和中青年学者140余人，以及中国科学院化学研究所、北京大学、北京化工大学等

单位的师生代表齐聚一堂，针对当前电化化学学科发展面临的挑战、科学问题和国际科学前沿发展方向，并结合正在实施的中国科学院学部“电化化学学科发展战略研究”项目，开展了热烈和深入的研讨。

### 三、论坛的目的、意义和重点关注的问题

中国电化化学学科最近 10 年得到了快速发展，在高活性电极材料合成、电化化学反应机理探究等多个方向都做出了具有国际影响力的工作。但随着科学技术的进步和应用领域的拓宽和深入，仍面临着一系列新的挑战，比如电化化学的基础理论、电化化学界面的结构和性能、电化化学和其他学科的交叉等。本次论坛的目的就是希望通过与会学者专家分享对电化化学发展的认识，找出电化化学在相关重要应用和工业领域中需要克服的关键科学技术瓶颈，并展望未来研究的发展趋势和前景，推动我国电化化学前沿科学理论和技术探索；提高学术界、科研管理部门及社会公众对电化化学科学和技术研究发展重要性的认识，加强国内相关研究单位密切合作，规划我国电化化学科学和技术发展战略，促进国家层面上的项目组织和实施。本次论坛重点关注电催化、电化化学能源、电化化学研究方法和工业电化化学等方向。

### 四、论坛报告与研讨

#### (一) 议题一：电催化前沿

#### 1. 中国科学院大连化学物理研究所李灿院士：光电催化在太阳能转化中的应用

能源和环境问题已经成为我国可持续发展的瓶颈，而发展洁净能源是解决我国未来能源和生态问题的根本出路，同时也符合政府所倡导的生态文明建设方针。报告主要围绕如何利用催化材料将太阳能高效转化为清洁可再生能源，如通过人工光合作用将自然界中广泛存在的水和二氧化碳转化为人类生产生活所需要的甲烷、甲醇、甲酸等燃料，减缓能源危机。另外，在合适的催化剂下，太阳能可以分解水制

氢，为其他设备如燃料电池提供足够的氢气来源。这些产业的发展前景主要依托于材料的光电催化转化效率，报告指出，光电催化转化效率主要由吸光效率、电荷分离效率及电荷利用效率三者组成，其中分离后的电荷在界面上的传输效率是主要的限制因素。以  $\text{Ta}_3\text{N}_5$  这种良好的捕光材料为例，李灿院士课题组发现可以利用水合氧化铁的赝电容充放电特性来提升  $\text{Ta}_3\text{N}_5$  的稳定性，从而提升光电催化过程中的电荷传输效率。同时，报告也提到，可以通过引入  $\text{TiO}_x$  这种界面层来消除硅基光电材料的界面缺陷，从而明显提高电荷分离效率。

## 2. 武汉大学庄林教授：电催化

电催化是人类能源革命中不可或缺的一部分，它能够帮助我们实现物质转化和能量转化，如通过电催化将二氧化碳转化为甲醇等可再生能源，通过燃料电池等设备将氢能转化为较为便利使用的电能。

电催化反应主要发生在电极/电解质界面上，界面中的电极表面，溶剂和电场都是决定电催化反应的重要因素，如何调控这些因素来促进电催化反应的进行是重点研究方向之一。电极表面主要指的是电极材料本身，其特殊的电子和原子结构能够改变分子的吸附和脱附等性能，从而影响反应路径和活性。电化学环境的溶液不仅仅是离子传导和物质运输的场所，其溶剂和溶质从某种程度也是反应物或者是能够稳定中间体的物种，然而这一因素的重要性在一定程度上被大家所低估。界面电场或者说电极电势是电化学区分于表面科学的明显特征，其重要性不言而喻，通过改变电极电势可以使得很多无法在热催化领域实现的反应得以发生。当然，由于电催化过程中包含了电极电势的改变、金属表面的改变和溶液环境的改变，这使得电催化体系变得非常复杂，给实验测量和理论模拟带来了困难。最后，报告指出，我们不仅要单独考虑电化学三个因素各自对于电催化的影响，同时也要重点审视这三个因素之间相互联动的关系。

## 3. 华南理工大学刘美林教授：中等温度下电催化反应的最新进展

电催化是一个很重要的过程，直接影响能量转换的效率和稳定性等。很多电催化反应需求温度较高，但结合实际，如何在降低温度的情况下解决电催化效率的问题是当下的一个重点。美国能源部计划提出使用天然气为燃料的中温燃料电池，但温度必须低于 500°C，这样就可直接用于驱动电动车。这个温度范围对于电解质、阳极和阴极均会产生一系列新的要求，使用固体氧化电池是解决问题的其中一个方式，其主要优点是耐高温且效率非常高，可以使用各种各样的燃料包括固体废料等，此外其高效率也不受电池大小的影响。固态氧化电池面临的主要挑战是电催化剂在高温下表面结构会不断变化，影响反应过程，故需要对表面进行原位测试，如 Raman 光谱、同步辐射及 STM 等，将实验数据和理论计算结合揭示反应机理以及构建构效关系。报告指出，下一代燃料电池应该是温度在 300~500°C 的中温燃料电池，它可以解决很多现在燃料电池所面临的问题。

#### 4. 电催化研讨问题与建议

针对议题一，与会嘉宾研讨提出的主要问题与建议汇总如下：

(1) 太阳能光电催化是发展清洁能源的主要路径之一，但成本高和效率低是制约其大规模应用的主要问题，因此需要继续发展高效的光电催化剂，如水氧化催化剂、质子还原催化剂等。

(2) 光电催化材料的设计中，不仅需要考虑简单的界面调控，还需建立一个界面储存层将空穴储存起来，从而有利于后续化学反应的进行。

(3) 随着纳米材料等新兴复杂体系的出现，电催化包含的三个要素（电极电势、电极材料和电解质环境）均发生了显著不同于传统电化学理论的变化，如何发展电催化新理论，提出电催化新概念，建立电化学研究新范式，是电催化基础研究面临的问题与挑战。

(4) 关注中高温电化学反应过程：提高电化学反应温度可以降低反应物的分解电压，从而有效提高能量转化效率并降低成本，但前

提是需要通过原位表征技术和理论计算等手段深入研究中高温时的电化学反应过程。

## **(二) 议题二：电化学能源前沿**

### **1. 清华大学欧阳明高院士：新能源汽车**

报告从研发历程、技术进展、发展前景三部分对中国新能源电动汽车进行了相关介绍。我国对电动汽车的规模研发始于“十五”电动汽车重大科技专项。2003年欧阳明高就提出我国节能与新能源汽车过渡与转型双重战略，此后我国新能源汽车的研究聚焦点从整车技术转移到动力系统技术平台。“十五”奠定了我国新能源汽车的发展基础，随后，在“十一五”新能源汽车进入示范考核阶段。“十二五”以来，我国以锂离子动力电池为代表的电动汽车核心技术取得重大突破，动力电池系统比能量不断攀升，动力电池系统成本也持续下降，产业化步伐也在不断推进。欧阳明高院士的研发团队主要针对动力电池系统热失控导致的安全问题、燃料电池系统性能衰减导致的寿命问题、多能源混合动力系统燃烧导致的排放问题进行科研攻关，近些年取得了许多重大研究成果。随着动力电池的比能量不断提高，安全问题的挑战越来越大。报告介绍了在动力电池热失控与安全防控方面的研究进展，就单体热失控、系统热蔓延和内短路诱因三个方面的成果作了具体阐述。

### **2. 中国科学院大连化学物理研究所衣宝廉院士：车用燃料电池技术的现状**

车用燃料电池包括供氢系统、供氧系统、电力管理系统，它具有内燃机与燃料电池的优点，但是也有缺点，例如复杂的系统、过高超电势等。报告指出，国际燃料电池汽车（FCV）的现状：（1）FCV已经度过技术开发阶段，进入市场导入阶段；（2）燃料电池发动机功率密度大幅提升，达到传统内燃机的水平；（3）基于70 MPa储氢技术，续驶里程达到传统车水平但要降低氢瓶的成本；（4）燃料电池寿命满

足商用要求；(5) 低温环境适应性提高，可适应 $-30^{\circ}\text{C}$ ，车辆适用范围达到传统车水平；(6) 通过技术进步降低成本，批量制造特别是电堆批量生产线的开发应用成为下一步研发重点；(7) 铂用量的降低，特别是采用非铂催化剂是长期而艰巨的任务。

我国燃料电池技术的现状则是：(1) 已掌握车用燃料电池核心技术，并经过大量示范运行，积累了丰富经验，具备进行大规模示范运行的条件；(2) 需尽快实现电池关键材料，如电催化剂、质子交换膜、双极板等批量生产，为降低电堆成本和提高电堆一致性奠定基础；(3) 需提高单电池的比功率，具体内容包括使用铂基催化剂降低电化学极化，采用薄的增强复合膜降低欧姆极化，采用新型流场板降低传质极化。提高燃料电池堆的比功率，包括保持电堆一致性、双极板制备一致性，另外还要控制膜的溶胀；(4) 提高电堆和电池系统的可靠性和耐久性，包括避免高速加载导致的供气不足、防止铂与碳的氧化以及减少氢电极表面的液态水滴。

### 3. 复旦大学夏永姚教授：锂离子电池前沿技术与挑战

理想的锂离子电池具有放热高、功率大、价格低、使用寿命长、安全、温度可控等优点。锂离子电池的发展趋势：(1) 高比能量化，包括正、负极电极材料的大容量化，正极材料及电解质溶液的高电压化等；(2) 发展以金属锂为负极的下一代锂电池体系，如锂硫、锂空电池；(3) 为提升锂离子电池的安全性，从有机电解质溶液发展到水系电解质溶液及固态电解质，主要方法是发展功能性添加剂，包括成膜添加剂、导电添加剂、阻燃添加剂、过充保护剂、控制电解液中  $\text{H}_2\text{O}$  相  $\text{HF}$  含量的添加剂、优化低温性能的添加剂、多功能添加剂等；(4) 从元素战略出发，从锂离子电池、发展钠离子电池及多价态金属离子 ( $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 等) 及其有机电极材料；(5) 特殊领域的电池体系需求日益增加，如高温、高压环境下的使用，以及低温、大功率充电体系的开发。在国际空间站，温度可能低至 $-157^{\circ}\text{C}$ ，然而传统锂离子

子电池在 $-40^{\circ}\text{C}$ 时仅能保持 $\sim 12\%$ 的容量。此种环境可采用低温 $-70^{\circ}\text{C}$ 下高离子电导率( $0.2\text{ mS/cm}$ )的乙酸乙酯基电解液与基于嵌入-脱出机制的有机电极材料, 电池可在 $-70^{\circ}\text{C}$ 下工作, 但由于较低的工作电压, 能量密度低, 因此实现低温下锂离子脱溶剂化过程是关键。

#### 4. 电化学能源研讨问题与建议

针对议题二, 与会嘉宾研讨提出的主要问题与建议汇总如下:

(1) 中国新能源汽车产业现状: 我国新能源汽车保有量和总体发展指数处于全球领先的地位, 但是在燃料电池轿车方面与世界领先的日本丰田公司相比还有较大差距。新能源汽车的发展将继续动力电动化、整车智能化与车身轻量化的趋势。2025年将是我国新能源汽车发展的关键转折点, 全社会将在电动化、新能源、智能化技术方面取得重大突破, 新能源智能化电动汽车时代真正到来, 我国需继续深化新能源汽车技术升级战略。

(2) 解决动力电池安全性问题需要将科学与工程有效结合。单体电池的热失控问题的解决最终需依靠材料和化学, 最核心的是电化学反应机理, 需要与电化学方面的专家合作; 电堆的安全性问题还涉及到工程问题, 需要科学地建模确定方向。

(3) 燃料电池轿车的技术成熟度较低, 需要尽快健全产业链。燃料电池车的安全问题主要源于存储燃料的高压气瓶, 如果大规模使用的时候可以考虑用一些储氢材料。而固体氧化物燃料电池的应用主要受限于开车起步阶段, 需要开展水蒸气的高温电解的研究工作。

#### (三) 议题三: 电化学研究方法前沿

##### 1. 华东理工大学胡培君教授: 密度泛函计算在电催化中的应用

随着新能源和环境科学的发展, 电催化越来越受到人们的广泛关注。在过去的20多年里, 密度泛函计算在非均相催化领域得到了巨大的发展, 许多以前无法从实验中解决的基础和应用问题都通过密度泛函计算迎刃而解。相比之下, 电催化体系更为复杂, 既包括电极表面



材料、电势的作用，又有溶液、溶质的影响，给计算带来了不少困难。目前，密度泛函计算在电催化中的应用仍然处于摸索阶段，大量可行性的方法亟待发展。报告介绍了课题组近几年在光催化方面的研究，指出光催化计算中存在的两个主要挑战，一个是如何准确计算发生在固液界面上的反应，另一个是自由基的计算问题。报告介绍了可以用多点平均的方法克服固液界面中动态结构的问题，同时通过用 DFT+U 这种成本较为廉价的方法计算得到自由基中间体的结构，从而帮助我们以一种合理的方式去洞察界面反应中的微观结构。

## **2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所刘志研究员(由刘啸嵩研究员代为报告): 同步辐射技术在电化学表征中的应用**

电化学体系本身是一个在非平衡态下的动态系统，其核心是发生在电极与电解质界面的电化学反应，如何直接探测电化学界面，从而解析各类反应与机理，是对表征方法的一大挑战。同步辐射中心的建成和发展，使得利用 X 射线等各种表征技术进行原位测量成为可能。报告指出，当前基于 X 射线的电化学表征的研究重点方向是通过先进的 X 射线原位表征方法与相关理论的结合，在界面上探测电化学反应，理解相关电极的电介质材料在非平衡条件下的动态变化及构效关系，从而提高我们在原子尺度下对电化学体系反应机理的认识。电化学表征研究的关键是探测动态过程和界面，当电化学反应发生时，原子、离子或者分子在外电场的作用下进行迁移，电极材料的结构与化学性质将随之改变。捕捉并表征这一变化的发生，决定了我们能否理解和认识电极材料在不同的时间尺度和空间分布上的性能变化规律。过去的几十年，软 X 射线和中能 X 射线谱学及成像技术取得了显著的进步，将样品电化学界面的表征，包括组分浓度、化学环境以及电子结构等信息的获取，从单纯的超高真空条件扩展到实际工作状态。近常压光电电子能谱系统，即配备 X 射线窗口、真空差分系统电子能量分析器以及同步辐射光源的试验站，使原位探测固体/气体、固体/液体、固体/

固体界面成为当前研究的热点。

### **3. 厦门大学廖洪钢教授：材料储能电化学过程的原位透射电子显微镜研究**

材料储能过程中伴随电化学沉积或者离子嵌入脱出，材料的生长和形态转变对其性能有巨大的影响。了解材料在电化学过程中如何变化有利于提高电池的循环寿命和充放电性能。然而，观察材料沉积或溶解等生长机制之间转换的关键阶段所需的时间和空间分辨率要求非常高，在该方面原位液体透射电子显微镜技术能够起到至关重要的作用。透射电子显微镜已成为物理、化学、材料、生物科学研究中的重要工具，是目前高分辨率表征最重要的手段之一，但缺点是需要高真空的环境。纳米微加工技术的发展，原位液体池的出现使得原位研究液体中纳米材料的生长成为可能。原位透射电子显微镜的难点在于原位池芯片的设计及其加工，报告指出，可以设计不同芯片对不同体系进行研究，目前自主研发的原位电池已经实现加热、加光电、气液循环等功能化，以实现单原子层至 10 nm 级别超薄窗口液体池，应用于超高分辨率观察。开发窗口膜厚度 15~25 nm，窗口预对准的电化学原位池，应用于电化学体系。报告提到，通过将外部电化学工作站与内部的液体池接通，在通入电信号的同时，利用电子显微镜原位观察电化学过程，目前已经实现了电化学和液体透射电子显微镜技术联用，在高分辨的条件下观察锌的电化学沉积生长以及溶解过程。

### **4. 厦门大学王朝晖教授：自由电子激光技术在电化学研究中的应用——FELiChEM 项目表面光检测实验站简介**

振动光谱技术是研究电化学体系的一种重要光谱手段。同步辐射、自由电子激光等宽调谐范围、高强度光源技术的快速发展，为基于红外吸收的各种谱学技术提供了更多的发展空间和可能性。报告介绍了国家重大科研仪器设备研制专项“基于可调谐红外激光的能源化学研究大型实验装置”（FELiChEM）项目的总体情况和研究进展，其中重

点介绍了光检测实验站的三种方法：气/固、液/固界面原位反射吸收光谱（IRFEL-IRAS）、空间分辨光谱（IRFEL-AFM）和非线性时间分辨光谱（IRFEL-SFG）。报告指出，通过该项目可以帮助解决一些关键科学问题，如探明表界面反应机理、揭示催化活性位的本质、选择性控制化学反应途径等。该项目拟研制的大型实验装置包含一套红外自由电子激光光源，三个能源化学研究实验站：光检测研究实验站（气/固、液/固界面原位反射吸收光谱、空间分辨光谱、非线性时间分辨光谱）、光解离研究实验站和光激发研究实验站。通过对不同装置的研制，可以将振动光谱研究原位电化学体系的光谱范围拓展到远红外波段，实现对金属-氧、金属-碳以及晶格氧等低频振动的光谱检测和实验研究，利用高能量、高空间和高时间分辨的多种技术手段，提供电极表面物种的吸附方式、空间分布、基团取向等互补的结构信息，从而更好地研究电极表面过程，深入探索其机理。

## 5. 电化学研究方法研讨问题与建议

针对议题三，与会嘉宾研讨提出的主要问题与建议汇总如下：

（1）新的电化学理论方法和实验方法的建立迫切需要与实际应用电化学，包括锂离子电池、新一代锂电池、燃料电池相结合，充分利用最好的方法和最好的工具，有针对性地解决最关键的科学问题。

（2）密度泛函等理论计算方法在电催化、光催化及光电催化领域已经有了很好的进展，但是更多的是模拟方面的进展。而从理论角度来说，对模拟方法的发展，在实际电化学体系中的应用，以及超越实验结果进行预测方面还有很大的发展空间。

（3）同步辐射光源是把利器，为科学研究打开了一扇窗口，可以看到许多过去看不到的过程信息，需要充分利用其这一优势，更深入地开展电化学反应动态过程的研究，比如燃料电池界面、膜电极的物质与传递的信息等。

（4）原位透射电子显微镜的表征方法可以探索其在化工领域的

应用，探索化工边界池中流体与界面之间相互作用，了解流体流动过程中浓度、温度等状态的变化。

(5) 红外自由电子激光光谱的优势是可以用于直接观察低频区金属与分子之间直接成键的本征信息，其实际应用体系还需电化学同行共同努力。

#### (四) 议题四：工业电化学前沿

##### 1. 宁德时代新能源科技股份有限公司研发副总裁梁成都博士：锂离子电池设计及制造工艺中的电化学

报告首先简要介绍了动力电池设计的基本原理，并且强调不同类型的电芯设计最重要的原则是平衡原则，之后详细讲述动力电池化学体系设计的注意要点。在电芯化学体系的设计中，阳极和阴极主要考虑的是电极活性材料的克容量、涂布重量和压实密度以及电极极片的各个工序反弹情况，这些都将影响到电芯入壳的难易程度。隔离膜的选择主要考虑隔离膜的厚度、基体表面是否需要处理或者需要做怎样的处理（CCS/PCCS）、隔离膜的孔隙率（对功率有影响）。对电解液的要求较高，首先要考虑电解液溶剂和添加剂与阳极石墨的匹配性；其次，添加剂的选择要考虑电极成膜的稳定性和致密性，也要考虑到安全设计的要求（比如解决过充问题，需要使用一些产气添加剂）；再次，电解液的注液量也非常重要，在使用寿命周期内，若电解液不足，则会出现电芯跳水的现象。在动力电池制造工艺方面，梁成都博士强调了电极材料的搅拌、浆料的涂布、化成等工艺对电芯的电化学性能起到至关重要的影响。

##### 2. 大连新源动力股份有限公司总工程师侯中军博士：质子交换膜燃料电池产业化研究发展

报告主要阐述了质子交换燃料电池（PEMFC）的工业应用，以及新源动力 PEMFC 的产业化技术实践和对此技术的展望。PEMFC 工业目前的应用状态是汽车公司和能源公司结盟，通过燃料电池汽车的应用

用来推进能源解决方案的低碳化，燃料电池汽车产业由导入过渡到发展期，基础技术趋于成熟。报告从电堆功率密度、电堆耐久性、成本等方面介绍了电堆开发过程中已经实现的技术突破。PEMFC 在汽车中的应用引导了其工业应用，技术上已经达到应用要求，进入市场化推广进程。新源动力已初步突破 PEMFC 的耐久性，并在功率密度提升方面接近国外先进水平。未来的持续技术进步，需要通过电化学工程、电化学催化及材料等学科的交叉融合，并通过产学研的有机协作不断推进。

### **3. 蓝星（北京）化工机械有限公司总工程师张良虎教授级高工： 传统电化学工业——氯碱电解**

报告从传统电化学工业的行业背景、氯碱工业中的电解原理、电解槽的发展历程、电解技术的发展方向、工业化需要解决的问题、工程化等 6 个方面进行了阐述。氯碱工业是化学工业的重要基础和支柱产业之一，主要产品被广泛应用于国民经济的多个领域。从全球烧碱产能分布看，中国占据重要的比重。氯碱工业的电解原理十分简单，对饱和食盐水通电并在不同电极区域获得产物。电解槽的发展始终围绕着节约电能这一点。目前最先进的电解槽采用离子交换膜，节电能力较前几代产品有很大提升。20 世纪 70 年代以前，中国和世界氯碱工业的主要装备是水银法石墨电解槽，1975 年，国内成功试制首台隔膜法金属阳极电解槽，1984 年从日本引进复极式离子膜电解槽，吨碱能耗不断降低。90 年代之后国内陆续研发出具有自主知识产权的复极式/单极式离子膜电解槽，并成功开车。2002 年制造出高电流密度的自然循环复极式离子膜电解槽。2008 年我国自主研发膜极距复极式电解槽。工业化需要解决的问题主要围绕工艺的选择是强制循环还是自然循环、电解槽槽型是单极式还是复极式、电极涂层配方的催化性能、漏电的抑制、反向电流的控制、电化学腐蚀的控制等 6 个方面展开。最后，报告对氯碱项目的工程化做了简单说明。

#### 4. 美国 Case Western Reserve 大学 Uziel Landau 教授：先进电镀技术成就现代微电子器件的制造

Uziel Landau 教授的研究方向涵盖了能源、材料、生物分子以及电化学工程等四个领域。他在报告中提到，电化学技术具有极大的经济效益，但同时在电镀的厚度分布、纯度控制、新型复合材料、材料和溶剂的范围、属性和黏附、环境问题、扩展原子层等方面仍存在一些巨大的挑战。目前所有的商用电镀液都含有浓度在 ppm 级别且具有表面活性的添加剂，以此来控制电镀的厚度分布、粗糙度以及力学性质。在过去，对添加剂的作用机理研究相对缺乏，导致添加剂的选择往往只能依靠经验。目前一种能够快速扫描有效添加剂的注射实验已经开发出来，并且正在世界范围内使用，利用添加剂注射实验来确定搅拌和运输对工艺的影响。报告还介绍了可以成功电镀的最小特征尺寸，以及一些可选的处理方法。当代的电镀技术前沿集中在大规模集成电路的制造，硅单晶片上晶体管数量的不断增多伴随着连接线宽度不断缩减，现代集成电路芯片上的连接线宽度在 10~15 nm，预计到 2025 年，尺寸会小于 5 nm，这预示着未来的大规模集成电路制造需要原子尺度连接线的电沉积技术。

#### 5. 工业电化学研讨问题与建议

针对议题四，与会嘉宾研讨提出的主要问题与建议汇总如下：

(1) 储能电池工业中需要关注电池的安全性问题，电池容量的提高不应牺牲安全性。而产品的设计在安全性上花费的成本取决于电池的大小、应用等。

(2) 电解槽离子膜技术是我国氯碱工业中最容易卡脖子的技术，这方面需要加强与高分子领域专家的合作。

(3) 氯碱工业废气中的氢气循环再利用，一部分用于下游加氢，另一部分作为燃料用于燃氢锅炉，还有一部分可以结合我们国家未来的燃料电池汽车需求，关键在于产业的布局。

(4) 电化学工业在有色金属冶金方面占了很重要的地位，但是仍然需要在电极材料和电极过程方面多做一些基础性的研究，通过降低分解电压从而降低能耗。

(5) 电化学工业与电化学科学紧密结合，凝练出电化学可以解决的有价值的工业技术，支持实验室技术向电化学工业应用的推广。

## 五、研讨意见

与会人员就四个议题的前沿问题进行了热烈的探讨。

李灿院士表示利用光电催化高效转化和利用太阳能将是人类社会的未来趋势，尽管该方向目前依然受限于转化效率不高、成本远高于化石能源等问题，但其在原理上是成熟的，而且已经有了许多示范性实例，如何降低成本并推向市场等问题将是我们中的一个机遇。

衣宝廉院士提到，从电池的安全性和能量转化效率来说，我国应该继续发展燃料电池车以及搭配完善的生产线。对于科学家而言，我们关注的是如何高效廉价地制备燃料电池车中所用到的氢气，目前可行的方法有如水蒸气高温制氢等。当然我们也应当从工程上考虑氢气的储存以及可能存在的泄漏等问题。欧阳明高院士谈到了新能源汽车的安全问题是需要从科学和工程上共同解决，科学上着眼于反应的发生机理，从根源上杜绝燃烧反应的进行，而工程上则应当保证即使燃烧发生也仅存在于局部，并不能蔓延到其他电堆而导致大面积的爆炸。

在电化学研究方法方面，田中群院士表示目前中国在大型仪器发展上投入了大量的资金，如上海光源的建成，这有利于我们推动电化学的前沿发展，但与此同时，应当充分利用这些昂贵仪器，并做出与之相匹配的高质量的研究工作。此外，胡培君教授和大家交流了电化学界面的模拟，恒电位方法虽然一直是电化学模拟的一个瓶颈，但近些年的发展已经能够让该领域工作者看到一丝曙光。同时，胡培君教授在和孙世刚院士的交流中提到计算模拟结合人工智能在未来有可能在某些方面超越实验给出精准的预测。

## 六、共识和建议

与会人员纷纷表示中国电化学领域目前正处于一个高速发展的年代，同时也符合国家战略规划，在未来解决领域内存在的瓶颈问题是帮助中国电化学赶超和领先世界的一个重要途径。大家认为目前中国并不缺乏核心电化学研究的技术手段，比如国内自主建成或者搭建的同步辐射光源、原位透射电子显微镜、自由电子激光等，但更重要的是我们如何进一步发展这些技术，如发展更高分辨率的原位透射电子显微镜，以及利用这些高端仪器从更加微观的角度去研究电化学过程，为开发更高性能的电化学应用设备打好基础。

同时，与会人员认为电化学研究应该形成范式，归纳多年来电化学领域内的经验成果，以能够在未来帮助快速解决实际问题，如锂电池中普遍存在的 SEI 膜的问题。近年来理论模拟方面对于电化学研究的贡献也得到了大家的认可，在未来理论模拟和实验学的紧密结合是一个必然趋势。不过目前而言，理论模拟依然处于解释已知实验数据的地步，这主要受限于目前电化学界面模拟方法的匮乏。因此，理论模拟方法的发展依然是一个重点研究方向，以及如何结合近些年较为热门的人工智能也是一个值得做的课题。

在基础研究之上，未来我们应当加强电化学工业界和学术界的联系，毕竟电化学基础研究最终要服务于人类生活和生产，如解决能源危机问题、环境保护问题、燃料电池车等高新科技产品的发展。因此，学术界应当更加明确地认识到各类电化学相关技术的核心问题所在，从而更好地导向科学基础研究，另一方面，工业界应当关注基础研究，帮助研究成果转化为直接经济效益。

同时，电化学的发展离不开人才的培养，与会人员达成共识，我们应该制定电化学战略定位、发展模式和研究范式，推进产学研联盟，组织跨学科研讨会，推动非热点电化学方向的均衡发展和人才培养等。

“工欲善其事，必先利其器”，与会人员表示，除大力引进和培养人才



外，也需要加大在新仪器开发上的投入，我们在未来应当更加重视承担起新仪器开发的重担，只有这样才能保证走在世界科研前端。

（作者：程俊，厦门大学化学系教授；黄蕊，博士，厦门大学化学系工程师；孙世刚，中国科学院院士，厦门大学化学系教授）