氢能行业资讯与研究

HYDROGEN ENERGY INDUSTRY NEWS AND RESEARCH

2026 年第 2 期(总刊第 26 期) 2026-2-1 出版

本期推荐>>>

■国家工信部等五部门：印发《关于开展零碳工厂建设工作的指导意见》的通知。

■内蒙古：印发《内蒙古自治区单一电力用户绿电直连项目开发建设实施方案（试行）》的通知。

■北京市：全国首个覆盖氢能全产业链一站式检测平台通过验收。

■云南日报：我国西南地区首条“氢走廊”在富源贯通

■工信部：聚焦柔性制氢等难点堵点，开发场景适配的关键节能环保装备和一体化解决方案

■中国石油大学：大电流制氢，电解槽能效提升 19.5 倍

一、政策要闻

1.内蒙古：1月14日，内蒙古自治区能源局关于印发《内蒙古自治区单一电力用户绿电直连项目开发建设实施方案(试行)》的通知。本实施方案适用于内蒙古自治区单一电力用户绿电直连项目开发建设。其中，包括氢基绿色燃料。氢基绿色燃料。新建氢基绿色燃料项目（绿氢、绿氢制绿氨、绿氢制绿色甲醇、绿氢制可持续航空燃料等）可开展绿电直连。项目原则上应为同一投资主体控股，作为一个市场主体运营，建设运行期内须按照同一法人统一经营管理，并落实应用场景、提供消纳协议。

来源：内蒙古自治区能源局

2.四川省：近日，四川省经济和信息化厅发布关于印发《四川省构建全周期全流程绿色制造体系行动方案》的通知。文件指出，促进清洁能源与产业布局适配发展。因地制宜推动“三州一市”清洁能源就地转化利用，探索水、风、光、氢等清洁能源多能互补模式。支持具备条件的地区有序承接发展符合要求的高载能产业，促进清洁能源就近消纳。在具备条件的区域开展“绿电＋算力”协同布局试点。持续抓好零碳工业园区试点建设。稳妥推进氢能产业化应用。探索推进绿色氢氨醇一体化、高炉富氢冶炼等技术，推动省内氢基竖炉直接还原全钒钛磁铁矿、富氢高炉冶炼、水泥氢焙烧等一批中试熟化项目建设。围绕高原地区电、

热、氧等需求，在具备条件的地区推进可再生能源与氢能耦合发展，实现水风光就地制氢制氧、供热发电。进一步扩大氢能在交通领域商业化应用，推动“成渝氢走廊”提质扩容。加强绿色低碳关键技术创新攻关。聚焦工业产品绿色设计、资源节约循环利用、低碳与零碳工业流程再造等重点领域，实施一批“双向揭榜挂帅”项目，在关键领域打造制造业创新中心。围绕氢冶金、近零碳排电炉、碳捕集利用与封存等核心技术，支持省内高校与行业龙头企业共建协同创新中试平台，促进产学研用协同创新和本地转化，推动关键技术装备从实验室走向产业化应用。围绕绿色低碳工艺优化大模型解决方案、绿色设计数字化解决方案、数字化能碳管理解决方案等重点方向，打造一批数字化绿色化协同应用场景，促进数字化绿色化深度融合。支持高校与产业链龙头企业联合开展氢能、生物质能、核能和碳捕集利用与封存关键核心技术验证，建设一批综合示范工程项目。支持高校和科研院所增设新型储能、氢能、碳捕集利用与封存、绿色制造等绿色低碳领域急需紧缺专业，鼓励企业与高校、科研院所联合开展人才“订单式”培养，服务制造业绿色低碳发展。

来源：四川省经济和信息化厅

3.工业和信息化部：1月19日，工业和信息化部 国家发展改革委 生态环境部 国务院国资委 国家能源局印发《关于开展

零碳工厂建设工作的指导意见》的通知。文件指出，2026 年起，遴选一批零碳工厂，做好标杆引领。到 2027 年，在汽车、锂电池、光伏、电子电器、轻工、机械、算力设施等行业领域，培育建设一批零碳工厂，初步构建涵盖能源供应、技术研发、标准制定、金融支持等的零碳工厂建设产业生态，有效适应国际贸易规则，增强产业低碳竞争优势。到 2030 年，将零碳工厂建设逐步拓展至钢铁、有色金属、石化化工、建材、纺织等行业领域，探索传统高载能产业脱碳新路径，推广零碳工厂设计、融资、改造、管理等综合服务模式和系统解决方案，大幅提升产品全生命周期和全产业链管理能力，实现工厂碳排放的稳步下降。同时，加快用能结构绿色低碳转型，实现源头减碳。在保障能源电力安全供应的前提下，鼓励工厂实现零碳电力、热力、氢能和燃料供应，因地制宜开发利用分布式光伏、分散式风电、生物质发电等，探索开展绿电直连，提高可再生能源使用比例。鼓励有条件的工厂建设工业绿色微电网，一体化应用光伏、风电、余热回收以及新型储能、高效热泵等，实现多能高效互补利用。积极发展绿色氢氨醇等一体化项目，推进工业副产氢、可再生能源制氢等清洁低碳氢应用。

来源：工业和信息化部

4.湖南省：1月19日，湖南省工业和信息化厅关于印发《湖南省零碳园区建设方案（暂行）》的通知。文件指出，到2027年，力争培育一批省级零碳园区。园区单位工业增加值二氧化碳排放下降幅度明显高于全社会下降幅度，在建设路径、发展模式、低碳转型、运营管理等方面形成一批可复制可推广的经验。到2030年，建成验收一批省级零碳园区。园区单位工业增加值二氧化碳排放进一步下降，能源结构日趋清洁化，节能降耗持续推进，产业降碳脱碳成效明显，零碳园区建设模式基本完善，优势产业绿色竞争力达到国内先进水平。文件还指出，推进新型能源体系建设。探索风电、光伏发电、生物质发电等新能源直接向园区或单一电力用户供电的“绿电直连”模式。因地制宜推进园区内部分布式光伏、地热、生物质能等绿色能源应用，鼓励发展氢电耦合等低碳、零碳技术。构建园区内部用户侧智慧微电网，推进“源网荷储”一体化，提升新能源就地就近消纳水平。推进虚拟电厂建设，完善需求响应机制，提升园区电网调节能力。科学配置新型储能系统，因地制宜应用锂电池、钠离子电池、液流电池、氢能等先进储能技术。推动园区供热供冷集中化改造，推广热电冷联产等集中供能方式。完善园区绿色交通体系，重点推进园区充电桩、换电站、加氢（醇）站等基础设施建设，加快运输工具低碳零碳替代。优化大宗货物运输结构，大力推广电动、氢

能重卡等新能源物流车辆应用，发展封闭式皮带廊道等新型集疏运系统，因地制宜推进多式联运发展。

来源：湖南省工业和信息化厅

5.湖南省：1月26日，湖南省发展和改革委员会发布关于《关于推动湖南省交通运输与能源融合发展的实施意见》的通知。文件指出，到2027年，持续优化完善公路水路充（换）电设施布局，初步具备符合交通运输装备用能标准的氢气供给能力，满足交通运输装备不断提高的补能需求。到2035年，公路充换电服务能力有效提升，LNG加气站布局建设全面完成，京广、沪昆、许广氢能示范走廊全线贯通。

来源：湖南省发展和改革委员会

6.重庆市：1月14日，重庆市发展和改革委员会征求《重庆市加快场景培育和开放推动新场景大规模应用实施方案（公开征求意见稿）》意见，其中提到：清洁能源领域。推动川渝清洁能源合作，加快构建“氢走廊”“电走廊”等应用场景。推进交通基础设施节能降碳改造提升，完善“轨道+公交+慢行”绿色出行场景，加快构建“零碳交通走廊”。强化煤电节能降碳、供热和灵活性改造，支持自备燃煤机组实施清洁能源替代。构建“市—区（县）—开发区”数字能源平台体系，积极推进虚拟电厂、源网荷储一体化、绿电直连等应用场景。

来源：重庆市发展和改革委员会

二、行业资讯

1.前沿技术

（1）国内首台 IV 型瓶氢气 MEGC 成功下线。中集安瑞科与 Hexagon Purus 的合资公司—中集合斯康氢能发展（河北）有限公司（以下简称“中集合斯康”），正式宣布国内首台 20 英尺 IV 型瓶氢气 MEGC（管束集装箱）成功下线。这一突破性成果填补了国产 IV 型瓶氢气 MEGC 的技术空白，标志着我国高压氢气储运装备国产化迈上新台阶，凭借海外认证背书与全场景适配能力，为国产氢能装备参与全球竞争奠定坚实基础。

来源：中集安瑞科

（2）全国首个覆盖氢能全产业链一站式检测平台通过验收。近日，国家氢燃料电池汽车质量检验检测中心（以下简称“中心”）顺利通过国家市场监督管理总局组织的验收评审。该中心覆盖氢能“制-储-运-加-用”全产业链的一站式检测能力，将为京津冀乃至全国氢燃料电池汽车产业高质量发展提供重要技术支撑。中心于 2023 年 9 月获国家市场监督管理总局批准筹建，历经 22 个月，高质量完成涵盖 5.8 万平方米基建工程在内的所有筹建任务。中心聚焦氢燃料电池汽车整车、燃料电池核心零部件、加氢

设施及智能化四方面能力建设，已通过CNAS（中国合格评定国家认可委员会）和CMA（国家认证认可监督管理委员会）现场评审，检测能力涵盖670项关键技术参数，并获得工业和信息化部及国家市场监督管理总局等核心强检资质授权，是国内首个覆盖氢能“制-储-运-加-用”全产业链的一站式检测平台，有效填补了华北地区国家级氢能检测机构的空白。

来源：北京市市场监督管理局

（3）国内首艘甲醇双燃料加注船成功投入使用。1月21日，由中石化中海燃供SINOBUNKER联合深圳沣洋海运有限公司共同打造的国内首艘甲醇双燃料加注船“大庆268”轮，为国际航行集装箱船“中远海运康乃馨”轮成功加注200吨绿色甲醇燃料。作为国内首艘甲醇双燃料动力油化两用加注船，其核心动力系统实现100%国产化，可灵活切换绿色甲醇与传统燃料模式。

来源：中石化中海燃供

（4）国内首个氢燃料电池离岸灯桩在浙投用。1月15日，由国氢科技宁波绿动联合合作伙伴开发的氢燃料电池供电系统，在浙江省舟山市六横台门码头外的元山岛南暗礁灯桩顺利完成安装调试并正式投用。该系统将全面替代灯桩原有的太阳能发电设备，标志着国氢科技在氢能应用场景拓展上实现关键突破——

成功将氢能技术延伸至海事离岸供能领域，为偏远海域基础设施清洁能源升级提供了可复制的技术方案

来源：国家电投氢能科技

2.市场概况

（1）HTWO 广州联合开沃集团批量交付 249 辆氢燃料电池客车。1 月 30 日，现代汽车氢燃料电池广州有限公司（以下简称“HTWO 广州”）与开沃新能源汽车集团股份有限公司（创维汽车）（以下简称“开沃集团”）联合主办的“氢”启未来，共赴蓝途——氢能源客车交付体验活动启动仪式，在广州市黄埔区光宝广州科技园区隆重举行。继去年 11、12 月相继中标相关项目后，本次 HTWO 广州联合开沃集团向广州巴士集团批量交付 249 辆氢燃料电池客车，这次交付不仅是中国氢能交通领域的一项重大突破，更是广州市积极布局“十五五”氢能战略、加速绿色低碳转型的里程碑事件。广州市、南京市政府部门相关领导，广州公交集团、巴士集团，开沃集团、现代汽车集团、恒运集团等合作单位及行业伙伴的代表领导出席活动，共同见证这一重要时刻。

来源：HTWO 广州

（2）明阳氢能 125 方电解槽正式交付梅塞尔集团。1 月 15 日，一台 125 方碱性电解槽在北京明阳氢能科技有限公司常熟基地完成全部优化调试与出厂检验，正式启程发往梅塞尔集团

（Messer Group）云南昆明的项目现场。此次交付，不仅是明阳氢能全生命周期服务能力的实证，更彰显了公司以快速响应和专业技术保障客户产线连续稳定运行的承诺，为西南地区客户的用氢安全与效率提供了坚实保障。

来源：明阳氢能

（3）我国西南地区首条“氢走廊”在富源贯通。1月16日，我国西南地区首条“氢走廊”在富源县贯通，氢通富源风光制加氢及运力平台一体化项目的首批300辆氢能重卡同步投入运营。氢通富源风光制加氢及运力平台一体化项目于2025年7月启动，由富源县与上海氢通能源集团合作建设，是沪滇协作深化“上海企业+云南资源”“上海研发+云南制造”模式的标杆项目。该项目总投资35亿元，建设制氢工厂与配套风电场，涵盖风电制氢、加氢设备、氢能源车等领域，预计投产后每年可替代柴油约9000吨，供应清洁电力5亿千瓦时，节约标煤16万吨，减排二氧化碳44万吨。

来源：云南日报

（4）深圳市盐田区发布四大低空氢动力示范应用场景。1月16日，深圳市盐田区正式发布海洋巡检、港口作业、应急保障和低空物流四大低空氢动力示范应用场景，从绿色“海港”延伸至绿色“空港”，进一步加强低空氢动力应用场景试验与协同

探索。相较于传统锂电动力系统，氢燃料电池动力系统具备长续航、大载重、耐低温、补能快等显著优势，正逐步成为工业级无人机的重要能源解决方案。绿色能源的布局以及低空产业发展，为盐田区打造低空氢动力示范应用场景奠定良好基础。盐田区落地了全市首个氢能产业园，坐拥全球最大单体集装箱港口，拥有绵长海岸线与多元化应用场景，为低空氢动力技术提供了最佳试验场。同时，盐田区近年来低空产业基础日渐完善，已建成 107 个低空起降点，集聚低空企业 114 家，涵盖研发制造、标准制定、测试验证、驾驶员培训、基础设施建设等上下游全产业链，可 24 小时常态化使用 600 米以下、36 平方公里的空域。氢能产业与低空产业链深度耦合，共同构成了低空氢动力技术的理想试验场。

来源：深圳新闻网

3.行业热点

（1）全球最大海上风电制氢项目落地广东阳江。1 月 23 日，总投资 110.9 亿元的宝武清能（阳江）绿氢产业园项目在广东阳江正式启动。项目将建设年产 8 万吨绿氢生产基地、绿氨产线、氢能先进装备基地、固态储氢材料产线及创新研发中心。建成后阳江将成为我国东部最大、全球规模领先的海上风电直接制氢产业基地，标志着广东省在绿氢战略布局上迈出关键一步。

来源：阳江广播电视台

（2）聚焦柔性制氢等难点堵点，开发场景适配的关键节能环保装备和一体化解决方案。1 月 21 日，国务院新闻办公室举行新闻发布会，介绍 2025 年工业和信息化发展成效。工业和信息化部党组成员、副部长张云明出席新闻发布会，会同工业和信息化部新闻发言人、运行监测协调局局长陶青，工业和信息化部新闻发言人、信息通信发展司司长谢存，介绍有关情况并答记者问。会上，工业和信息化部相关领导表示，2025 年工业和信息化发展主要目标任务已顺利完成。其中，运行监测协调局局长陶青介绍了氢能在推进工业绿色低碳发展成就的贡献：激发传统产业新活力。深入推进节能降碳改造，推动传统产业在降碳减污中实现扩绿增长。比如以氢为还原剂炼铁，能够从源头上降低污染物和二氧化碳排放。目前，河北、广东等地百万吨级氢冶金项目陆续投产，相比传统工艺，每年可减少 50%以上的碳排放，开创钢铁工业发展新局面。发展绿色能源新业态。积极主动适配新型电力系统，提升可再生能源就地消纳水平。协同推进工业绿色微电网、数字化能碳管理中心建设应用，发布典型应用场景与案例，引导风光储氢等一体化集成应用。陶青还介绍了未来将进一步着力培育绿色发展新动能的措施：技术驱动方面，面向产业发展需要，聚焦柔性制氢、微电网数智化运行等难点堵点，开发场景适

配的关键节能环保装备和一体化系统解决方案。标准引领方面，围绕工业绿色微电网、清洁低碳氢、节能环保装备等领域，制修订一批基础通用和技术规范标准。

来源：工业和信息化部

（3）1 月 23 日，国务院国资委发布《中央企业科技创新成果推荐目录成果手册》。手册收录 67 家中央企业的 208 项成果，涵盖电子元器件、零部件、新材料、仪器仪表、软件产品、高端装备、制造工艺等 7 个领域，通过发布成果简介、主要指标、联系方式等信息，促进企业优秀创新成果推广应用和迭代升级，助力科技成果加速转化为现实生产力。其中氢能共 5 项技术上榜，具体包括氢燃料电池用氢气流量控制阀组、兆瓦级 PEM 电解制氢装备用氧化铱催化剂、一体化移动式燃料电池用氢气质量分析仪、加氢站用 70MPa 氢气预冷器、生物质沼气一步法制绿氢工艺及装备。

来源：国务院国资委

（4）中国首批零碳园区试点在内蒙古自治区包头市启动。1 月 17 日中国首批零碳园区试点——包头稀土高新区国家级零碳园区建设 17 日在内蒙古自治区包头市正式启动。该园区建设采取“园中园”模式，包括稀土产业园、高端装备制造产业园，目前已形成稀土、光伏和储能等特色主导产业。包头市是新中国成

立后首批布局的八大工业城市之一，随着技术革命、能源革命和产业变革的加速演进，包头市打造全国最大的稀土新材料基地和全球领先的稀土应用基地(即“两个稀土基地”建设)提上日程。包头稀土高新区经济发展局能源发展科负责人李红旭说，园区将通过开展绿电直连通道建设、新能源项目开发、增量配电网项目建设、园区新型电力系统建设工程、氢能示范利用、多产业协同节能降碳等工作，力争在 2027 年底完成国家级零碳园区创建任务目标。包头市市长孟庆维表示，包头稀土高新区成功入选第一批国家级零碳园区建设名单，对于打造“两个稀土基地”建设、老工业基地绿色转型创新发展、探索“双碳”引领下高质量发展路径都将产生重大而深远的影响。内蒙古自治区发展和改革委员会主任龚明珠表示，包头作为国家碳达峰试点城市，在绿色发展上领跑内蒙古，其稀土高新区“源网荷储”协同发展，特色优势突出，这些都为零碳园区建设筑牢了坚实根基。

来源：中国新闻网

（5）国家能源局拟组建 4 个氢能技术标委会，引领产业安全规范化发展。11 月 27 日，国家能源局综合司发布《关于公开征求能源行业电力安全治理标准化技术委员会等 7 个标准化技术组织组建方案意见的通知》。《通知》显示，在氢能领域拟批准组建 4 个委员会，分别为能源行业氢能基础与通用标准化技术

委员会、能源行业氢能制取标准化技术委员会、能源行业氢能储存与运输标准化技术委员会、能源行业氢能应用标准化技术委员会。

来源：国家能源局

（6）《我国科学家成功开发新型制氢技术》成功入选2025中国十大科技进展新闻。1月26日，由中国科学院、中国工程院主办的“两院院士评选2025年中国/世界十大科技进展新闻”在北京揭晓，北京大学马丁教授团队成果《我国科学家成功开发新型制氢技术》成功入选2025年中国十大科技进展新闻。北京大学教授马丁团队及合作者在零碳制氢领域取得重大突破，分别于2025年2月13日和14日在《自然》《科学》发表研究成果。两项研究都旨在优化制氢反应，但侧重点和实现路径大不相同。《自然》发表的成果突破了催化科学中的稳定性瓶颈，创新性地引入稀土元素对催化剂进行改造，开发出一种全新且泛用的高活性产氢催化剂稳定策略。《科学》发表的成果聚焦于乙醇和水分子重整的零碳排放制氢路径，为零碳排放的工业制氢奠定了坚实的科学基础。此次成功开发的全新氢气生产方法，通过新型催化剂可从源头上消除二氧化碳排放，实现高产率氢气生产。

来源：中国氢能联盟

4.项目进展

（1）金风32套碱槽绿氢项目环评公示。1月15日，兴安盟金风科技风电制氢（二期）项目环境影响评价公众参与第一次公示。项目位于内蒙古兴安盟经济技术开发区，建设单位为金风绿能氢能科技（兴安盟）有限公司。项目拟投资50000万元，建设制氢装置、气液分离、氢气压缩、储氢及配套附属系统等，制氢站配套32套1000m³/h碱性电解水制氢设备，制氢规模3.2万Nm³/h。

来源：兴安盟经济技术开发区

（2）全国首批电子级绿色甲醇项目正式落地。1月22日，中煤龙化公司集贤风储氢醇一体化项目合资公司完成注册登记，标志着这一总投资61亿元的重大项目正式落地，从规划阶段迈入实质性建设阶段。该项目由中煤绿能公司牵头，中煤龙化公司实施，联合中船科技、双鸭山鸿展生物等多方合作，创新采用“绿电+生物质尾气”耦合模式，打造集风电、储能、制氢、绿色甲醇生产于一体的全产业链项目。该项目为全国首批电子级绿色甲醇，具有重大示范意义。

来源：中煤龙化

（3）内蒙古一重大绿氢项目获批。近日，巴彦淖尔利源合金材料有限公司甘其毛都口岸加工园区电解水制氢项目获备案。该项目建设地点在巴彦淖尔市--乌拉特中旗--甘其毛都口岸加

工园区丰安物流公司南，项目单位为巴彦淖尔利源合金材料有限公司，总投资 312500 万元。项目占地 762.74 亩，总建筑面积约为 14 万平方米。建有氢气制造区、氢气存储灌装区、生产配套及辅助设施区，建成后可年产 28 万吨氢气。

来源：内蒙古自治区投资项目在线审批办事大厅

（4）天合光能 50 万吨绿色甲醇项目获批。1 月 23 日，赤峰天基松山区风光制氢一体化项目（制氢醇部分）获备案。该项目位于赤峰市松山区，项目单位为赤峰市天基新能源有限公司，总投资 500000 万元。项目占地约 1150 亩，配置 100 台制氢能力 1000Nm³/h 规模的电解槽，40 台 2000m³储氢罐，年制氢能力 4.05 万吨，建设年产 50 万吨甲醇生产线及附属设施。项目计划 2026 年 5 月开工，2028 年 8 月竣工。据悉，赤峰市天基新能源有限公司是天合光能股份有限公司的旗下子公司。

来源：内蒙古自治区投资项目在线审批办事大厅

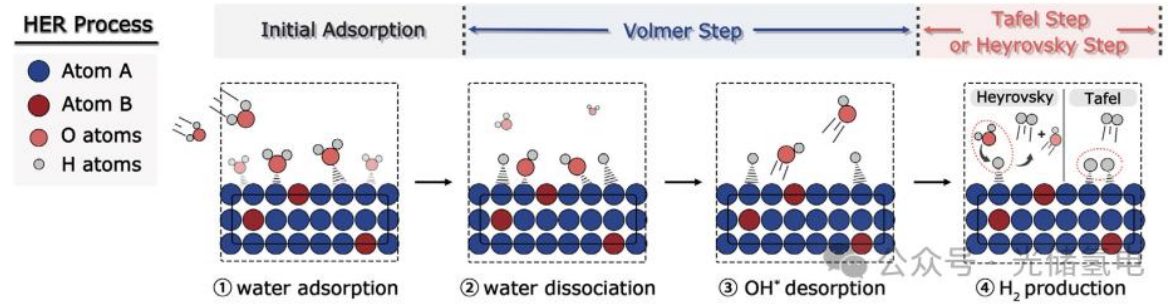
（5）内蒙古 20 万吨绿色甲醇一体化项目获备案。1 月 21 日，固阳县新能源绿电制氢与生物质耦合 20 万吨绿色甲醇一体化项目厂房建设项目获备案。该项目位于包头市--固阳县--包头金山经济开发区，项目单位为内蒙古固阳经开区新能源有限公司，总投资 3600 万元。建设规模及内容：项目建筑标准化厂房 1 栋，面积 18000 平方米。计划 2026 年 4 月开工，2027 年 4 月竣工。

来源：内蒙古自治区投资项目在线审批办事大厅

三、专题研究

大电流制氢，电解槽能效提升 19.5 倍

——中国石油大学

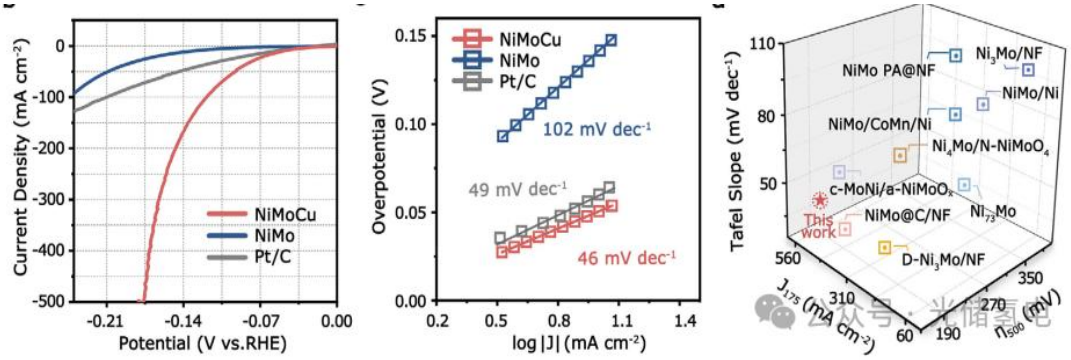


一. 研究背景与挑战

碱性水分解，特别是通过阴离子交换膜技术，为大规模制氢提供了一条有前途的途径。然而，这一过程受到能够在工业电流密度下有效运行的 HER 电催化剂稀缺的严重阻碍(≥500mAcm^{-2})。碱性 HER 涉及多个步骤，包括水吸附、解离（沃尔默步骤：$H_2O+e^- \rightarrow H^+ + OH^-$ ）和 H^+ 重组（Heyrovsky 或 Tafel 步骤）示例性 HER 催化剂必须稳健地增强水吸附和解离以确保 H^+ 的连续供应，同时保持适度的 H^+ 吸附以促进其利用。反应物和中间体的吸附和解吸之间的微妙平衡对于提高 H^+ 覆盖率和加速 HER 动力学是必不可少的。然而，由于比例关系，在单组分电催化剂内同时实现这些

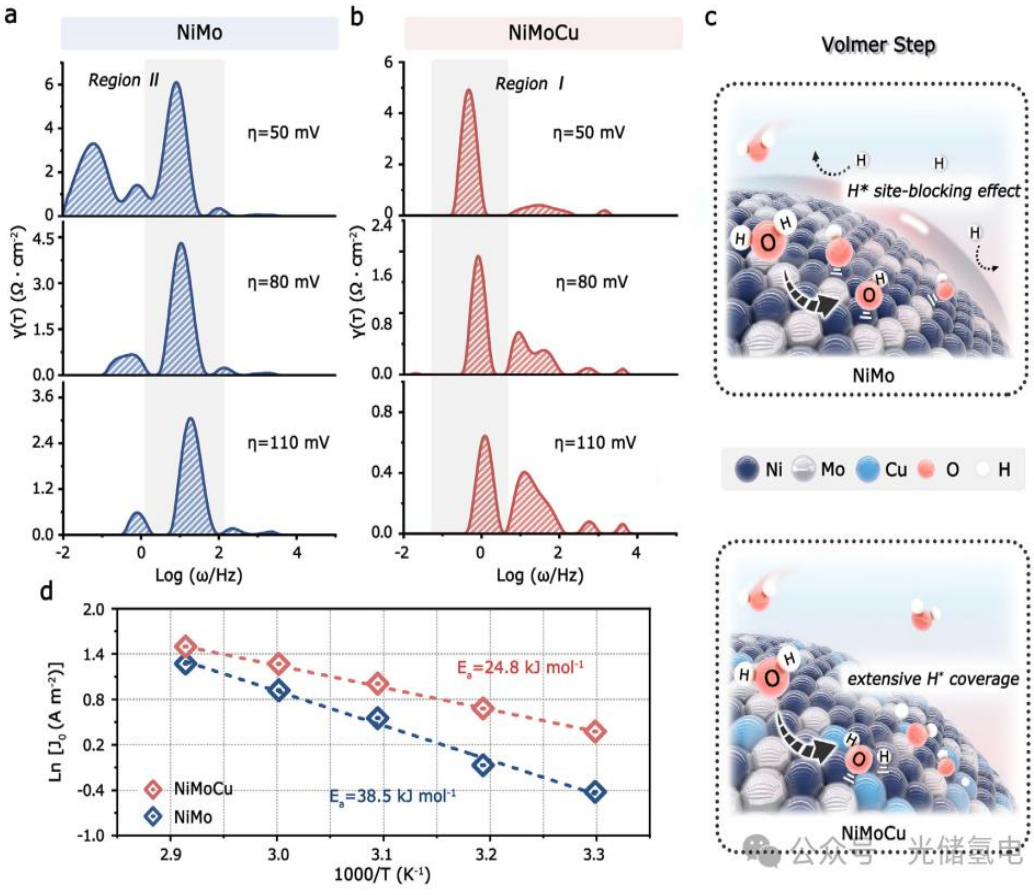
功能要求是具有挑战性的。因此，迫切需要开发具有定制化学计量比的多位点协同催化剂以平衡关键反应物质的吸附，能够在低过电位下实现大电流密度 HER。

二. 结果与讨论



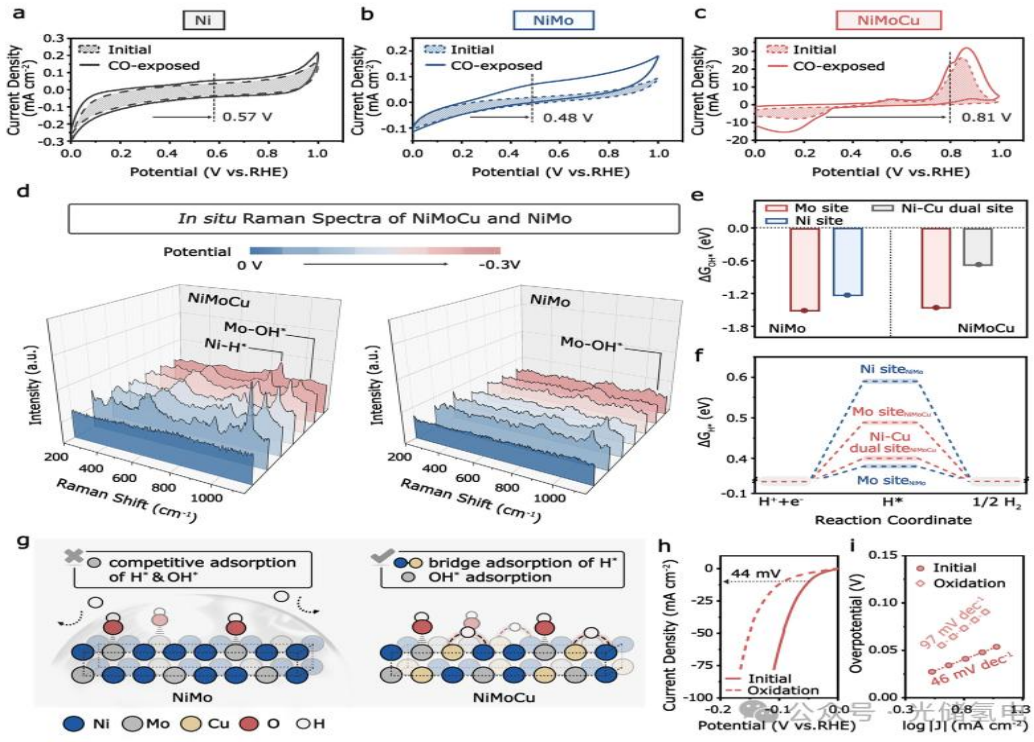
为了提高高 HER 电流密度下的传质效率，采用简单快速的电沉积方法在具有规则间距微米级通道的 SSM 上沉积 NiMo 合金最初使用三电极系统在 1 M KOH 中评价 NiMo 涂覆的 SSM 的 HER 性能。如线性扫描伏安法（LSV）曲线所示，NiMo 在 10 mA cm^{-2}（10）下的过电位η测定为 132 mV，这与报道的具有类似颗粒膜形态的 NiMo 催化剂相当。SSM 载体本身的电流密度在测试的电压范围内可以忽略不计，这表明沉积的 NiMo 催化剂是观察到的催化活性的唯一原因。然而，这种过电位明显高于商业 Pt/C 催化剂，后者η的过电位仅为 57 mV。采用塔菲尔斜率分析来阐明催化剂的反应动力学和速率决定步骤（RDS）。塔菲尔斜率的变化反映了催化剂在碱性 HER 中的不同反应途径和 RDS。[16] NiMo 催化剂

的塔菲尔斜率为 102 mV dec^{-1}，这意味着具有作为 RDS 的 Volmer 步骤的 Volmer–Heyrovsky 反应途径。与此形成鲜明对比的是，Pt/C 的塔菲尔斜率仅为 49 mV dec^{-1}，这表明其 Volmer 步骤是高效的，并且随后的 Heyrovsky 步骤构成 RDS。因此，为了获得可以与 Pt/C 催化剂竞争的碱性 HER 性能，必须加速 NiMo 合金的 Volmer 反应动力学以降低过电位。

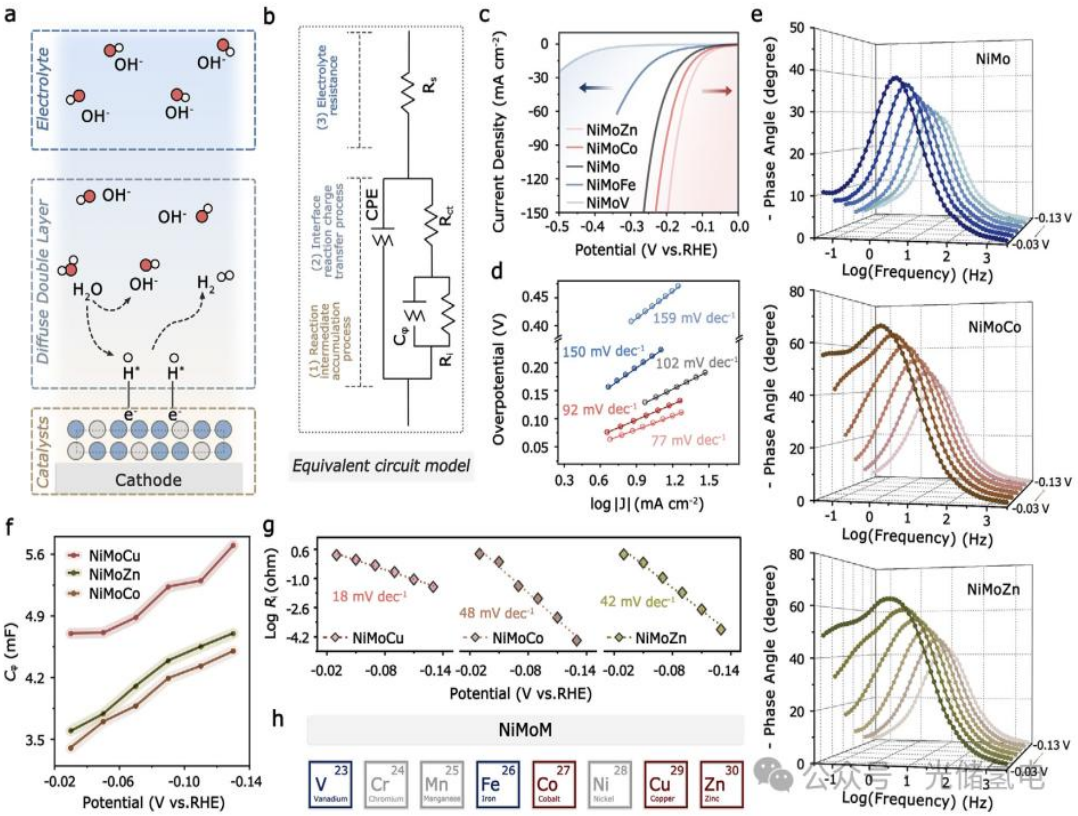


如 DRT 图所示，ASRCT 是 NiMo 的主要过程和 RDS。通过将这一发现与 Tafel 斜率分析相结合，最终确定竞争性 OH* 的脱附，与界面

电荷转移相结合，构成了 NiMo 合金 HER 过程中的元素 RDS。这意味着 NiMo 中的活性位点对 OH* 表现出很强的亲和力，形成阻碍有效中间体 H* 的吸附和覆盖的阻挡层。因此，这导致 HER 活性的降低。在 Cu 的引入下，观察到具有最大面积比电阻（ASR）的 DRT 峰向低频区域的显著偏移。这种变化表明 RDS 从竞争性 OH* 解吸到与 H^2 复合相关的后扩散过程的转变。因此，Cu 的掺入有效地减轻了 OH* 和 H* 在催化位点的竞争性吸附的问题。进而增强 H* 覆盖并加速 HER 过程的动力学 HER 过程的动力学进一步反映在催化剂的表观活化能(Ea)中。NiMoCu 的计算 Ea 值(24.8 kJ mol^{-1}) 显著低于 NiMo (38.5 kJ mol^{-1})，从而再次证实 NiMoCu 促进的 HER 过程更快。

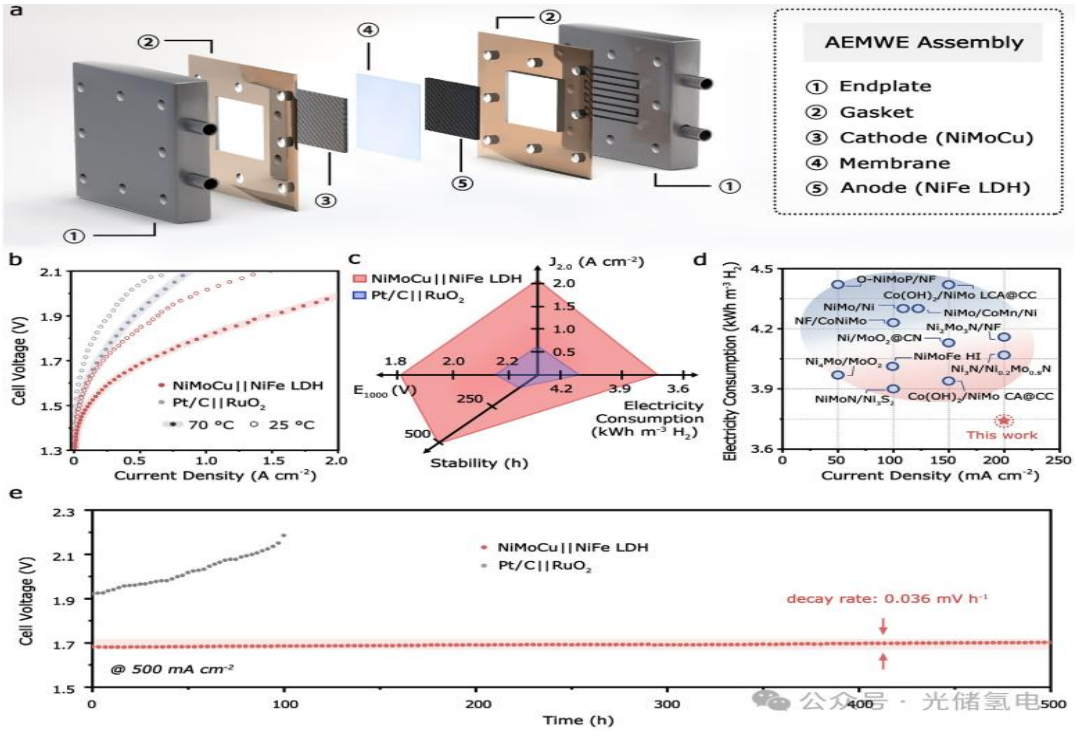


为了阐明 Cu 减轻 NiMo 合金中 OH*竞争吸附的机制，进行 CO 剥离实验以评估催化剂的 OH*结合能力，因为 OH*可以促进表面吸附的 CO*中间体的去除。NiMoCu 合金在 0.81V 处显示出 CO 剥离峰，与在 SSM 和 NiMo 合金上沉积的 Ni 相比，其分别正移了 240mV 和 330mV 该偏移表明 OH*吸附强度遵循以下顺序：NiMoCu 合金中 Cu 位<Ni 位<Mo 位，OH*优先吸附在 Mo 位上，通过 DFT 计算进一步验证了 NiMoCu 合金中 OH*的吸附结果，根据 NiMoCu 合金中 Ni，Mo，Cu 的原子比，建立了 Ni 2 MoCu 模型，计算了 OH*吸附自由能（ΔGOH*）。Mo 部位的ΔGOH*值（−1.49eV）比 Ni—Cu 双位的负能量更大（−0.69eV），再次确认 OH*倾向于吸附在 NiMoCu 合金的 Mo 位点上。此外，还计算了 Ni_2MoCu 模型的 H~*吸附自由能(ΔGH~*),Ni—Cu 双位的ΔGH~*值较小(0.40 eV)相比，钼网站（0.49eV），表明通过桥吸附与 H*中间体强键合的偏好；根据这些发现，推测在 NiMoCu 的 HER 过程中，H*和 OH*分别独立地吸附在 Ni−Cu 双位点和 Mo 位点。这种由 Cu 合金化实现的多位点协同催化有效地消除了 NiMo 合金 Mo 位点上 OH* 和 H*的竞争吸附，与 Ni 位点（−1.24 和 0.59 eV）相比，ΔGOH* 和 ΔGH*值（−1.52 和 0.38 eV）更低。



为了探索缓解OH*和H*在NiMo催化剂上竞争吸附策略的普适性，采用一系列过渡金属采用电沉积方法将（V，Fe，Co，Zn）与NiMo合金化，系统地研究了合金的电化学行为如LSV曲线和相应的塔菲尔斜率所示，与纯NiMo相比，只有NiMoZn和NiMoCo表现出降低的过电位和塔菲尔斜率。这种改进可能归因于加速的Volmer反应和催化剂表面上H*中间体的增强的吸附和覆盖。在不同的超电势下进行原位EIS，以分析反应动力学和H* 吸附行为。使用双并联等效电路模型拟合相应的Bode和Nyquist图，该模型由三个部分组成：1）反应中间体累积，由电阻Ri和伪电

容 C 表示φ，对应于低频下的 Volmer 阶跃;2）界面反应电荷转移，由电阻 Rct 和 CPE 表示，对应于中频处的 Heyrovsky 阶跃;对于以 Heyrovsky 反应为 RDS 的 HER 催化剂，在 Bode 图的低频和中频区域都发生了相弛豫，而对于以 Volmer 反应为 RDS 的 HER 催化剂，由于 H* 吸附能力不足，其等效电路中的 C 发生了φ短路，导致在波特图的中频区域仅出现一个相位弛豫峰。掺杂 NiMo 和纯 NiMo 的 Bode 图表明，与具有 Volmer RDS 的 NiMo 相比，NiMoZn 和 NiMoCo 的 HER 过程明显加快，RDS 向 Heyrovsky 反应方向移动，这些结果表明，除了 Cu 之外，Zn 或 Co 的合金化也减轻了 OH* 和 H*在 NiMo 催化剂上的竞争吸附，从而提高了 Volmer 步骤的反应速率。



公众号 · 光储氢电

受 NiMoCu 的上级 HER 催化性能的启发，我们组装了一个 AEM 电解槽，以评估其在水裂解中的实际应用潜力。在该配置中，NiMoCu 用作阴极，而基准 OER 催化剂 NiFe LDH 用作阳极。结构和可调的电子性质，是在碱性 OER 应用中替代 Ir/Ru 基催化剂的最有前途的纳米材料之一。为了比较，商业 Pt/C（阴极）和 RuO2（阳极）电解槽也在相同条件下进行了测试。在室温下，NiMoCu（－）||NiFe LDH（＋）电解槽在 100 mA cm−2 的电流密度下表现出非常低的电池电压 1.59 V。当温度升高到 70 ° C 时，AEM 内 OH−离子的迁移率增加，在相同电流密度下电池电压进一步降低到 1.49 V。该值明显优于 Pt/C（－）电解槽。||RuO_2（＋）电解槽，需要 1.61 V 在 70 ° C 下驱动 100 mA cm^{-2}。||NiFe LDH（＋）电解槽在 1.98 V 的槽电压下实现了 2 A cm^{-2} 的安培级电流密度，这是 Pt/C（－）电解槽电流密度的近 3.3 倍。||RuO_2（＋）电解槽（608.1 mA cm−2），表明碱性水分解的特殊催化活性。我们进一步比较了 NiMoCu（－）||NiFe LDH（＋）电解槽与文献报道的其它高性能电解槽进行了比较。

三.总结与展望

综上所述，我们的研究发现，在碱性 HER 过程中，OH*和 H*在 NiMo 合金催化剂的 Mo 位上存在严重的竞争吸附。这种竞争导致 H*位阻塞效应和覆盖不足，从而阻碍了 HER 的 Volmer 动力学。

为了解决这一挑战，我们采用了一种协同的 Cu 合金化策略，通过在 SSM 上电沉积 NiMoCu 催化剂。全面的原位研究，DRT 分析，和 DFT 模拟结果表明，Cu 的引入有效地将 Ni Mo 合金催化剂中游离水分子生成的中间产物分离到不同的催化位上，其中 Ni—Cu 位和 Mo 位分别负责 H*和 OH*的吸附，这种分离导致有效 H*的覆盖率显著增加。此外，SSM 的规则微米级结构和固有的高电导率支持较低的传质阻力和电荷转移阻力，结果，具有合理化学计量比的 NiMoCu 催化剂可以在 175 mV 的过电位下提供 500 mA cm^{-2} 的令人印象深刻的电流密度，分别是 NiMo（25.7 mA cm^{-2}）和 Pt/C（72.4 mA cm^{-2}）的近 19.5 和 6.9 倍。‖NiFe LDH（+）系统在 1.98 V 下实现了 2 A cm^{-2} 的安培级电流密度，优于传统的 Pt/C(－)‖RuO2（+）系统的 3.3 倍，在 500 mA cm^{-2} 的大电流密度下具有超过 500h 的持久稳定性。所提出的 H*位阻塞缓解策略也普遍适用于其他合金化 NiMo 催化剂，如 NiMoZn 和 NiMoCo，从而提高其 HER 催化性能。

主　　办：内蒙古自治区氢能产业发展促进会
承　　办：华电内蒙古能源有限公司规划发展部
内 容 编 辑：张　蕾　李特日根　郭　嘉
编 辑 指 导：赵毅峰　程树鑫
编 辑 审 核：焦　佳
联　系　人：张　蕾
邮　　箱：hdnmgqn2024@163.com