氢能行业资讯与研究

HYDROGEN ENERGY INDUSTRY NEWS AND RESEARCH

2026 年第 8 期(总刊第 32 期)　2026-5-16 出版

本期推荐>>>

■工信部等五部门：印发《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动方案》

■浙江省：《浙江省加快新场景建设应用推动科技和产业高质量发展行动方案（2026-2027 年）》

■全球氢能网：全球首套内河船舶“氢内燃机+有机液态储氢”动力系统顺利完成第一阶段联调联试

■中车株洲所：中车成功交付全球首个“液态阳光”项目核心制氢装备

■吉林省：吉林“十五五”打造绿色液体燃料供应基地

■北京航空航天大学：铜离子交联薄膜助力高温聚合物电解质膜燃料电池

一、政策要闻

1.工信部等五部门：5月8日，国家发展改革委 国家能源局 工业和信息化部 国家数据局印发《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动方案》的通知。文件指出，提高算力设施多元电力供给能力。根据算力设施接入系统规模、电网电压等级、电网新能源渗透率、电能质量要求、算力设施业务类型等实际情况，建立健全算力设施能源供给规划建设标准。探索核电、氢能等能源以直连方式为算力设施供能。鼓励算力设施配置构网型储能，增强供电稳定性和对电力系统的主动支撑能力。能源新业态多元融合创新。算电协同智能优化运营决策；充电网络与车网互动智能运营优化；新型储能系统运行优化与安全风险预警；虚拟电厂与分布式资源协同优化调度决策；绿氢生产工艺智能寻优与能效优化控制；二氧化碳封存一体化智能决策。

来源：国家能源局

2.内蒙古自治区：4月29日，内蒙古自治区科技厅发布关于2026年内蒙古自治区科技重大专项人工智能+和氢能（第二批）、储能和新型电力系统项目申报指南的通知。文件指出，项目申报单位应具有较强科研能力、人才团队和科研基础条件，有稳定的研发经费投入，应具有完善的科技计划项目和经费管理制度，运行管理规范；牵头单位原则上应是项目任务主要完成单位。

牵头单位需与区内高校、科研院所联合申报项目,开展产学研用实质化合作，推进一体化创新，推动先进技术、科研成果在内蒙古自治区落地转化。申报单位应设立科研助理岗位，鼓励吸纳应届高校毕业生。政府机关（含参公事业单位）不得参与项目申报。申报项目重点聚焦解决制约地区和产业发展的技术瓶颈问题，开展前沿性、引领性和关键共性技术攻关；聚焦适用性好、创新性强、成熟度高、技术水平处于行业领先的科技成果，推动经济社会效益显著、产品附加值高、产业带动能力强的科研成果应用研发。

来源：内蒙古自治区科技厅

3.厦门市：4月30日，厦门市工业和信息化局、厦门市自然资源和规划局印发《厦门市新型产业用地试点实施办法》。其中提到，“新型产业用地支持人工智能、氢能、生物制造、深海空天开发、未来网络、脑机接口以及其他符合厦门市未来产业布局的相关行业”“适用于在存量国有建设用地中的工业用地，按规定申请按照新型产业用地项目提升改造的情形”。

来源：厦门市工业和信息化局

4.河南省：5月1日，河南省人民政府办公厅关于印发《河南省场景培育开放和大规模应用行动方案（2026—2028年）》的通知。文件指出，清洁能源领域。创新数字化智能化能源生产

运行管理等应用场景，开展微电网、源网荷储一体化等智能电网场景建设。打造清洁能源全产业链协同发展应用场景，推进再生能源发电与绿色制氢、新一代风电光伏、先进储能技术场景建设。探索开展氢能综合应用，打造郑汴洛濮氢走廊应用场景。

来源：河南省人民政府

5.浙江省：5月7日，浙江省发改委发布《浙江省加快新场景建设应用 推动科技和产业高质量发展行动方案（2026-2027年）》，其中提到：氢能。建设长三角氢能高速公路和氢走廊，推广港口重卡、冷链物流、公交客运等燃料电池汽车，发展船舶、叉车、两轮车、无人机等氢能交通应用场景。一体化建设可再生能源制氢项目，规模化制取绿色合成氨和绿色甲醇，推进氢基化工原料替代和氢冶金应用。在工业和民用领域，在保证安全的前提下，探索天然气掺氢燃烧应用场景。到2027年，终端用氢平均价格降至25元/千克以下，燃料电池汽车保有量达到2000辆，可再生能源制氢进入工业应用，构建经济高效的氢能综合应用体系。**节能降碳。**推进绿色工厂、零碳（近零碳）工厂培育建设，试点打造低碳园区、零碳园区。鼓励企业打造氢能应用、光储充系统应用、智能微电网建设等创新场景。建设智能电网，重点推进海岛柔性直流联网等场景。推进“量子+电力”，在特高压电缆、变电站等场景开展智能监测系统示范应用。推进深远海清洁

能源建设、消纳，规模化开发深远海风电。支持车网互动，建设大功率交流充放电应用。加快港口绿色可再生能源替代，实现码头岸电覆盖并提升利用效率，推广新能源集卡、纯电动船舶、船用绿色甲醇等清洁装备和燃料，加快推进义乌－宁波新能源重卡示范线二期工程建设。到 2027 年，清洁能源装机占比超 50%，新增充电桩 4 万个。

来源：浙江省发展和改革委员会

6.武汉市：5 月 8 日，武汉市人民政府印发武汉市国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要。文件提出，培育壮大新兴产业。围绕国家新兴产业发展领域和方向，发展壮大人工智能、低碳和氢能、航空航天和空天信息、低空经济、数据和网络安全、高附加值生产性服务业等新兴产业。低碳和氢能。重点发展高效节能、先进环保、资源循环利用、“双碳”服务等领域，打造全国碳市场中心、全国碳金融中心。构建氢能研发、制备、储运、试验测试、应用等完整产业链条，重点布局燃料电池和氢能装备，加快国家氢能示范基地建设。到 2030 年，低碳和氢能产业营收达到 5700 亿元。培育壮大网络安全及人工智能、电子信息等新兴产业，超前布局氢能、具身智能等未来产业。推动湖北武汉都市圈氢能区域试点，建设国家级氢能产业创新中心、装备制造中心和重要氢能枢纽中心。规划建设加氢设施，加快布局“油气电

氢”综合能源补给站。到2030年，新能源装机总容量达到350万千瓦以上，燃气普及率达到95%以上。打造国内氢能产业创新研发、生产制造、示范应用引领区。加大新能源汽车、绿色船舶等推广力度，持续推进电化、气化、氢化、醇化长江建设。推进生产领域节能降碳。创新绿色低碳科技，开展低成本碳捕集利用与封存、氢能等技术攻关和应用示范。深入推进节能降碳改造和绿色低碳技术创新，加强工业制造、建筑、交通、能源等重点领域绿色低碳转型。

来源：武汉市人民政府

7.江苏省：近日，江苏省自然资源厅发布关于公开征求《江苏省“十五五”海洋经济发展规划（征求意见稿）》意见的公告。文件指出，推动海洋船舶工业向智能化、绿色化方向全面转型，重点突破清洁燃料动力技术，拓展高附加值船舶领域。推进散货船、集装箱船、油轮等主力船型智能化、绿色化升级，打造新一代低碳智能船舶产品。突破LNG、甲醇、氨、氢新燃料船舶、电动船舶、清洁能源混合动力船舶等绿色船舶制造技术，加快氨、氢等清洁能源高效燃烧技术研发，实施新一代双燃料环保船、液氢运输船和电动船舶研制与示范应用。

来源：江苏省自然资源厅

二、行业资讯

1.前沿技术

（1）兆瓦级 AEM 产品正式进入工业应用阶段。近日，全球首套 5MW 阴离子交换膜（AEM）电解水制氢系统完成设备安装并启动调试，标志着兆瓦级 AEM 产品正式进入工业应用阶段。该项目构建了“光伏—AEM 制氢—高炉富氢冶炼”集成体系，制取的绿氢将用于某钢铁集团高炉富氢喷吹，以实现煤炭减量和碳排放降低的目标。在该套 5MW AEM 制氢系统中，整流设备由湖北英特利电气有限公司提供。项目配置了 5 套 IGBT 整流电源，具有功率因数高、谐波低、响应快等优势，可适配大功率 AEM 电解槽，保障制氢系统在调试及后续运行中获得稳定的电力供应。

来源：湖北英特利电气有限公司

（2）全球首套内河船舶“氢内燃机+有机液态储氢”动力系统顺利完成第一阶段联调联试。近日，由华灿科船舶（上海）有限公司首创的 800 吨级内河氢内燃机船舶关键技术系统方案取得全面突破。目前，整套氢“内燃机+液态氢油”动力系统联调联试已完成陆上联调联试，并通过中国船级社专家现场验证，全球首艘示范船计划 2026 年 12 月下水。不久的将来，长江、黄浦江及内河航道上，有望出现一批不烧柴油、只载“氢油”、行驶零排放的绿色轮船。

来源：全球氢能网

（3）中国造“氢能心脏”有望解决无人机“航程焦虑”。5月10日，由中国科学院大连化学物理研究所研发的“高比功率阴极闭合式风冷电堆”技术，通过了中国石油和化学工业联合会组织的科技成果鉴定。这款新型电堆是专为工业级无人机打造的“氢能心脏”，集轻量化、高功率、风冷散热等特点于一身。搭载该系统的工业无人机续航时间较传统电池提升了两倍以上，“航程焦虑”问题有望破解。

来源：中国科技网

（4）溯驭技术“极氢1号”氢动力无人机助力极地科考取得突破。近日，中国第42次南极科学考察队乘坐“雪龙号”顺利停靠上海中国极地考察国内基地码头。由溯驭技术联合研发的跨域一体式氢动力无人机“极氢1号”圆满完成内陆科考任务：依托氢动力无人机搭载多传感器设备，开展低空冰雪表面状态采集，获取冰裂隙分布、极地表层几何形态及行进冰雪道路状态等关键数据，为科考安全与无人系统技术研究提供核心支撑，为极地无人观监测站建设夯实基础。

来源：溯驭技术

2.市场概况

（1）中车成功交付全球首个“液态阳光”项目核心制氢装备。近日，由中国中车旗下中车株洲所完全自主研制的12台套1200 Nm³/h碱性电解槽成功发运，将应用于全球首个液态阳光工业化示范项目——中煤鄂能化10万吨/年液态阳光项目。这标志着中车大标方绿氢装备的规模化应用迈出关键一步，将以“中车方案”助力合作伙伴加速绿色转型，推动绿电、绿氢到绿色甲醇的全产业链贯通。

来源：中车株洲所

（2）国富氢能全套液氢装备助荣程全链条示范落地。近日，荣程天津液氢全链条示范项目正式启动，配套液氢加氢站建成投运，液氢重卡同步就位，实现车辆测试与场站运营联动落地。国富氢能作为联合示范单位，提供了全套自主研发的液氢装备，其中涵盖液氢储罐、液氢潜液泵撬、液氢加氢机以及1200L重卡用液氢瓶，完成了从场站储氢到车辆载氢的关键装备交付。

来源：国富氢能

（3）荣程新能液氢全链条示范项目在津启动。近日，由荣程新能集团牵头、联合产业链头部企业协同打造的液氢制储运加用全链条应用场景示范项目正式启动。该项目以天津为核心示范基地，完成4辆液氢重卡样车交付，配套液氢加氢站同步建成投运，实现车辆测试与场站运营联动落地，旨在验证液氢全产业链

商业化运营可行性，形成可复制的闭环运营模式，助力我国氢能产业迈向液氢规模化应用新阶段。

来源：荣程新能

（4）铧德氢能源百千瓦 PEM 制氢系统启程西班牙。近日，铧德氢能源顺利完成一套百千瓦 PEM 电解水制氢系统的整机生产与调试工作，设备现已正式启程发往西班牙客户现场。该系统后续将应用于当地绿色能源项目，为客户提供稳定、安全、高纯度的绿色氢气，进一步助力欧洲氢能基础设施建设与能源转型发展。本次交付的产品采用 PEM（质子交换膜）电解水制氢技术，并根据客户实际应用需求，创新性采用多电解槽串并联结合的定制化设计方案，在保障系统稳定运行的同时，实现了更高的产氢效率与更灵活的系统调节能力。相比传统制氢方式，PEM 电解水制氢具备启动速度快、动态响应能力强、氢气纯度高以及适配可再生能源波动输入等特点，特别适用于欧洲当前快速发展的绿氢应用场景。

来源：铧德氢能

3.行业热点

（1）德国批准交通氢能强制令。德国即将正式在交通领域实施绿色氢能强制配额政策。根据该法案，到 2040 年，绿色氢能将被强制要求占交通能源消费的 10%。法案还规定，未能完成

义务的燃料供应商将面临每吉焦耳 120 欧元的罚款。该法案旨在落实欧盟《可再生能源指令 III》（RED III）中的相关目标。该指令要求，到 2030 年，氢能需占交通能源消费的 1%。依据德国法律，包括绿色氢能和电制燃料（e-fuels）在内的“非生物来源可再生燃料”（RFNBOs）需：在交通能源中占比达到 0.1%，到 2030 年提高至 1.2%，到 2040 年提高至 10%。目前，该法案实际上已完成政治审批流程，仅剩正式宪法与行政程序，之后即可正式生效。

来源：全球氢能网

（2）吉林“十五五”打造绿色液体燃料供应基地。5 月 7 日，“开局起步‘十五五’”吉林省专题新闻发布会在长春举行。发布会以“开局起步‘十五五’推动吉林全面振兴和高质量发展”为主题，解读省“十五五”规划《纲要》，介绍经济社会发展目标和重点任务。吉林省省委副书记、省长胡玉亭表示，吉林风光资源富集，可开发容量达 4 亿千瓦，拥有充足的风光电厂建设场地、丰富的地表水资源、优质的生物质绿碳，交通便利，产业链完整，应用场景广阔，开发条件独具优势，“绿氢+”产业是振兴发展的最大增长极、未来产业的重要突破口。我们在《纲要》中进行了专章安排，全力打造国家绿色能源产业高地。**一是大力推动“绿电”跨越发展。**把“绿电”作为产业发展的“战略

源头”，以电促产、以绿制绿。“十四五”期间，我们率先推行“绿电直连＋就地消纳”模式，风光电新增装机是过去多年装机总和的 2 倍。“十五五”期间，我们将一体推进“源网荷储”建设，拓展多元化场景应用，强化绿电直连、绿电交易、绿色认证、要素保障等政策支持，每年新增绿电装机 1000 万千瓦左右，到 2030 年达到 7000 万千瓦规模。**二是大力推动“绿氢＋”产业跃升。**“绿色氢氨醇”作为“战略能源”和“新石油”，是“绿电”就地消纳转化的重要场景。去年，国电投大安、上海电气洮南、中能建松原等标志性项目建成投产，绿氢和绿色氢氨醇产能约占全国一半，走在全国前列。“十五五”期间，我们将大力推动绿氢“制储输用”全产业链协同发展，探索统购统销模式，降低制氢用氢成本，布局固态储氢加氢站，拓展氢能汽车、调峰电站、氢能冶金等应用场景，建设氢能综合应用试点。到 2030 年，绿氢产能有望达到 100 万吨，绿氨绿醇产能达到 600 万吨，打造全球最大的“绿色液体燃料供应基地”。**三是高标准建设“零碳园区”。**把零碳园区作为绿色能源产业的“战略支点”，打造“集大成者”。我省松原、辽源、四平 3 个国家级零碳园区和白城等一批省级零碳园区，“十五五”时期将全部建成。我们大力推动“绿电直连、以绿制绿、算电协同”，以企业为主体，一体推进园区建设、管理、运营，优化能源供给结构和能源消费结构，构

建吉林特色的绿色能源产业体系。他还表示，“十五五”期间，我们将推动汽车产业进一步向智能网联新能源转型，大力发展氢能燃料汽车，一汽集团已有先发优势，氢能重卡市场占比较高。加快向全固态电池整车转型，一汽集团全固态电池整车已经面市，能够有效解决低温条件下电池放电效率下降问题。

来源：吉林省人民政府

（3）中国氢燃料电池堆首次搭载韩国汽车。近日，中国氢燃料电池企业重塑能源宣布，将向韩国一家客车制造企业供应120千瓦级氢燃料电池堆，搭载于下一代11米级大型氢能公交车。这也意味着中国制造的氢燃料电池堆首次进入韩国整车供应体系。

来源：全球氢能网

（4）财政部关于下达2026年节能减排补助资金预算（第一批）的通知。文件指出，第四年度燃料电池汽车示范应用奖励资金总额25.703亿元，覆盖15个省级、39个市（区），北京奖励资金总额17858万元；天津奖励资金总额1842万元；河北奖励资金总额21454万元；山西奖励资金总额21961万元；内蒙古奖励资金总额2529万元；辽宁奖励资金总额707万元；上海奖励资金总额18796万元；江苏奖励资金总额416万元；浙江奖励资金总额3769万元；安徽奖励资金总额1021万元；山东奖励资金

总额 2007 万元；河南奖励资金总额 43898 万元；广东奖励资金总额 104934 万元；宁夏奖励资金总额 211 万元；新疆奖励资金总额 15627 万元。其中，广东省奖励资金最多，其次是河南、山西、河北，奖励资金均超过 2 亿元。

来源：财政部

4.项目进展

（1）15 万吨绿氢制 SAF 项目获批。4 月 29 日，明拓（内蒙古）资源综合利用有限公司电制可持续航空燃料（e-SAF）项目获备案。该项目建设地点在包头市--九原区--内蒙古包头市九原工业园区，明拓铬业厂区北侧，恒泰路以西的园区工业规划地块。项目单位为明拓（内蒙古）资源综合利用有限公司，总投资 180000 万元。建设规模及内容：建设年产 15 万吨电制可持续航空燃料（e-SAF）项目。配套建设气体预处理、合成、加氢精制、分馏、罐区、泵房及公辅配套设施。

来源：内蒙古自治区投资项目在线审批办事大厅

（2）内蒙古年产 20 万吨绿色甲醇项目开工。4 月 29 日，昕岛氢能源科技（包头）有限公司固阳县年产 20 万吨氢基绿色燃料离网型绿电直连项目开工。该项目是昕岛能源在氢基绿色燃料领域首个示范性项目，总投资 51 亿元，占地 600 亩，分三期在 2028 年全面建成投产。能源侧采用 390 兆瓦离网风电、100

兆瓦离网光伏发电，耦合生物质余热发电机组与飞轮储能辅助装置，构建“电—氢—碳—醇”一体化系统，破解离网绿电波动与化工装置稳定运行难题，实现绿色甲醇高效合成。据了解，固阳项目自与固阳县政府签订投资协议以来，整体工作快速推进。于2025年11月与韩国知名船运企业的燃料供应公司达成长期采购协议；于2025年12月完成相关前置手续跑办及初步设计、总平规划设计等关键性节点成果，满足开工的基础条件，启动施工建设。项目针对纯离网风光电制氢有效功率不足、新能源发电波动制约化工合成装置稳定运行、生物质兼容性弱、气化焦油等行业技术瓶颈，实现“电-氢-碳-醇”的一体化高效平衡协同生产设计，为离网型波动绿电在化工领域的平稳高效节能应用、能量梯级循环利用提供可复制、可推广的技术范式。

来源：昕岛能源

（3）中氢新能10万套氢能源装备高压储氢瓶智能制造项目获批。近日，氢能源装备高压储氢瓶智能制造项目获备案。该项目建设地点在包头市--昆都仑区--包头昆都仑区卜尔汉图镇新光五村，项目单位为中氢新能（包头）装备有限公司，总投资51000万元。建设规模及内容：项目规划建设年产10万套氢能源装备高压储氢瓶智能制造生产线，配套建设生产车间、公用工程

配套及研发检测中心，打造集研发、生产、检测于一体的储氢装备智能制造基地。

来源：内蒙古自治区投资项目在线审批办事大厅

（4）兴安盟金风200万千瓦风电制绿氢示范项目一期实现首批并网发电。近日，兴安盟金风200万千瓦风电制绿氢示范项目一期工程正式实现全容量并网发电。项目一期25万千瓦风电工程自2025年9月正式开工建设，共计建设33台风机及284座集电线路塔，预计年发电量可达7.62亿度，项目通过新建的220kV升压站，以1回220kV线路接入“金风氢醇1#220kV变电站”，将绿色电力直接输送至兴安盟经济技术开发区，主要用于碱性水电解制氢和绿色甲醇生产。

来源：扎赉特微讯

三、专题研究

铜离子交联薄膜助力高温聚合物电解质膜燃料电池

——北京航空航天大学

高温聚合物电解质膜燃料电池具有固有的杂质耐受性和简化的热/水管理能力。然而，传统磷酸掺杂膜必须相对较厚（通常>50μm）以抵消磷酸诱导的机械降解，这会导致欧姆损耗，从而限制燃料电池性能。

2026 年 05 月 01 日，北京航空航天大学卢善富、相艳、张劲团队在 Nature Energy 期刊发表题为“Thin membranes with Cu-ion crosslinking for high temperature polymer electrolyt membrane fuel cells”的研究论文，团队成员张振国为论文第一作者，卢善富、相艳、张劲为论文共同通讯作者。

该研究报道了一种 20μm 厚、机械性能优异的磷酸掺杂膜，该膜引入了动态 Cu 离子交联，用于高功率密度的高温聚合物电解质膜燃料电池。动态 Cu-聚合物配位作用形成了动态交联网络，提供了卓越的韧性和延展性，同时具有自发自修复能力。同时，Cu 离子通过静电相互作用以及磷酸分子中 O-H 键的极化作用，改善了磷酸的保持能力和质子解离能力。所制得的薄膜具有极低欧姆电阻（$0.06\Omega cm^2$），同时保持了较低的氢气交叉电流密度（$0.95mAcm^{-2}$）。采用该膜的燃料电池在 200℃（H_2/O_2）下实现了 $3.08Wcm^{-2}$ 的峰值功率密度，并在 160℃、$1.0Acm^{-2}$ 条件下运行 503h，降解可忽略不计。

高温聚合物电解质膜燃料电池在氢经济中可发挥重要作用，尤其适用于重型车辆、船舶应用和航空航天设备，在这些领域中，其对燃料杂质的耐受性以及简化的热管理能力相比低温系统具有优势。磷酸掺杂聚合物电解质膜，尤其是商业化的聚苯并咪唑（PA/PBI）膜，为高温下的无水质子传导树立了标准。然而，采

用 PA/PEMs 的 HT-PEMFCs 的功率密度远低于采用全氟磺酸（PFSA）膜的低温 PEMFCs。这一差距主要源于欧姆损耗，PA/PEMs 表现出约 0.1-0.2Ωcm^2的高欧姆电阻，比 PFSA 膜高出一个数量级。

大量研究致力于提升 PA/PEMs 的性能，重点集中在增强聚合物-酸相互作用、设计微相分离或本征微孔膜结构以及开发替代质子导体。这些策略已将功率密度逐步提升至瓦每平方厘米水平，同时扩展了操作范围（-20 至 250℃）。值得关注的突破包括：基于本征超微孔膜的 HT-PEMFCs 展示了可靠的零下启动能力，以及自组装 CeHP/PBI 复合膜系统在 250℃下实现了 2.35Wcm^{-2}的功率密度。然而，进一步提升 HT-PEMFCs 功率密度仍然受到材料基本限制的制约。

在低温 PEMFCs、电解液系统和水处理领域中，薄型 PEMs（5-20μm）的成功应用表明，降低厚度可显著降低离子电阻。然而，类似方法在 PA/PEMs 中面临严重限制。对导电性至关重要的磷酸掺杂本质上会削弱机械完整性。这种材料限制要求传统的 PA/PBI 膜具有较高的厚度（>50μm），从而保持相对较高的欧姆电阻。尽管降低厚度会按比例降低电阻，但更薄的 PA/PEMs 会遭受过度的氢气交叉、酸流失和快速机械失效。共价交联虽然增强了主链刚性，但会增加薄膜的脆性，在电池组装过程中引发微裂纹并限制质子载体迁移率。因此，制备能够同时实现高质子电导

率、机械稳定性和低气体渗透性的薄型 PA/PEMs 仍然是高功率密度 HT-PEMFCs 面临的一项挑战。

在此，该研究报道了一种动态 Cu 离子交联策略，以克服薄型 PA/PEMs 中的这一瓶颈。此前已有研究表明，富含苯并咪唑的 PBI 可作为多齿配体用于多齿配位，表现出介于弱氢键和刚性共价交联之间的中等结合能。在本研究体系中，Cu 离子与聚苯并咪唑链中的苯并咪唑位点配位，形成了动态可重构交联网络（Cu-PBI）。在该网络中，强而可逆的 Cu-N 键解离实现了快速动态键交换，同时增强了膜的机械强度和延展性，并赋予了自修复能力。Cu 离子进一步通过强静电相互作用锚定磷酸，并通过增强质子解离，有助于提高质子电导率。因此，所获得的 20μm PA/Cu-PBI 膜不仅实现了极低的欧姆电阻（0.06Ωcm²），还实现了低氢气交叉电流密度（0.95mAcm⁻²）和出色的拉伸强度（21.7MPa）。基于该膜的单电池在 200℃下输出了 3.08Wcm⁻²的高功率密度，并在多种操作条件下表现出优异的耐久性。

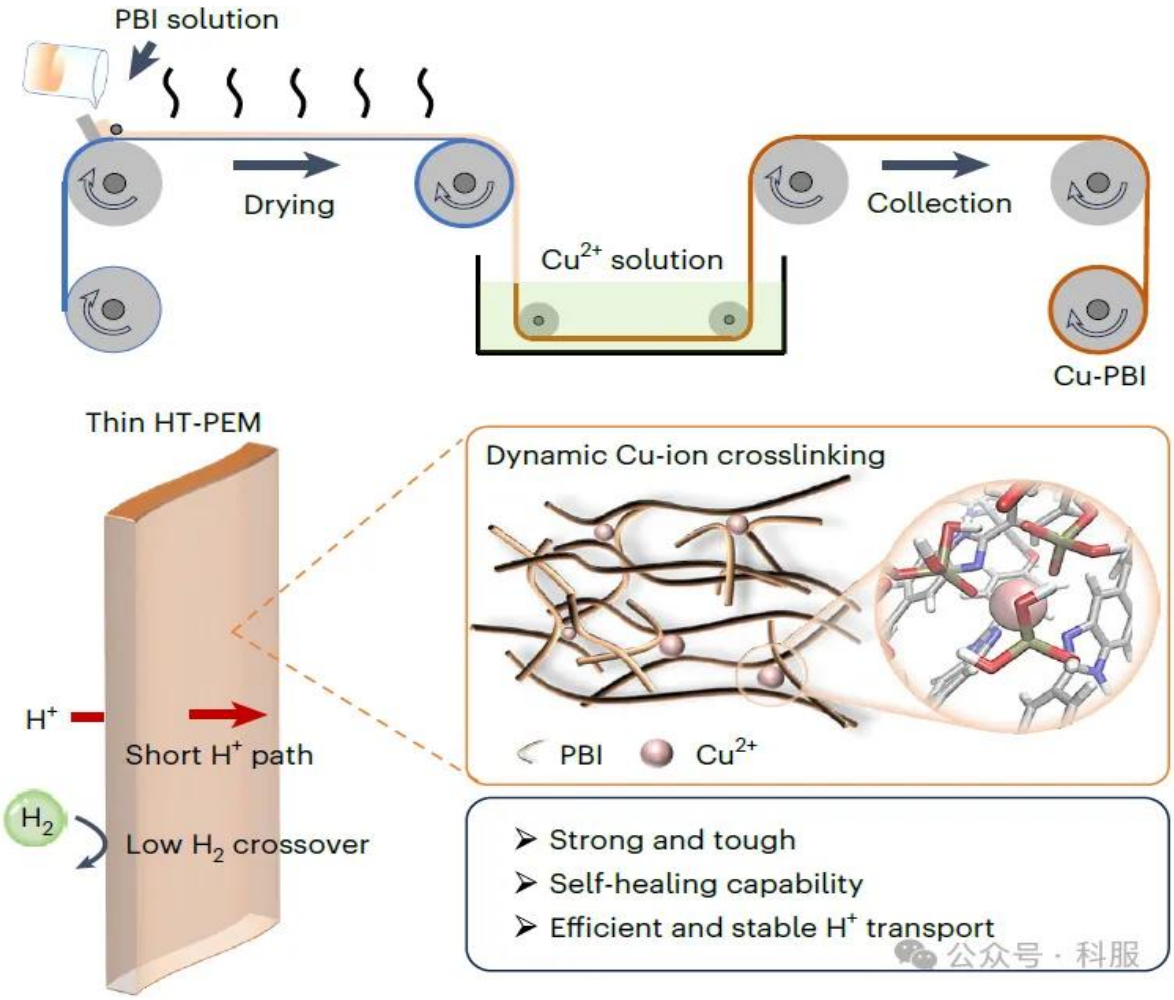


图 1 用于 HT-PEMFCs 的薄型动态交联 PEMs 的设计。Cu 离子交联的 PBI 膜（Cu-PBI）通过将 PBI 膜浸入 Cu 离子溶液中制备，形成动态交联网络。该策略得到了既薄又稳定的 PEMs，兼具高强度、韧性和内在自修复能力。Cu 离子具有双重作用：增强 H_3PO_4 保持能力，同时促进质子解离，从而实现稳定的无水传导。通过抑制氢气交叉和降低欧姆电阻，这些膜实现了高功率、耐用 HT-PEMFCs。

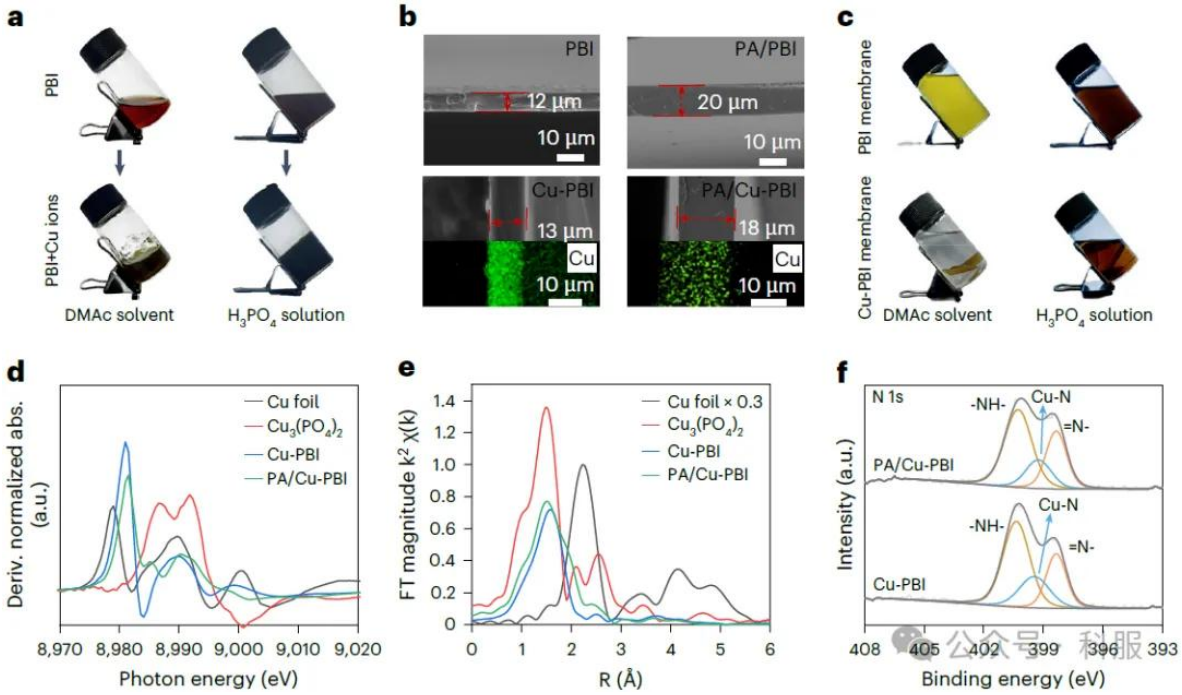


图 2 Cu 离子交联膜的形成与结构。a，PBI 溶液以及分别在 DMAc 和 H_3PO_4 溶液中由 PBI 和 Cu 离子形成的交联凝胶网络。b，PBI、Cu-PBI 及其各自 H_3PO_4 掺杂膜的截面 SEM 图像。图中包含了 Cu-PBI 和 PA/Cu-PBI 膜的 Cu 元素 EDX mapping。c，Cu-PBI 膜分别在 80℃的 DMAc 溶液中和 200℃的 H_3PO_4 溶液中的凝胶含量。d，e，铜箔、磷酸铜（$Cu_3(PO_4)_2$）、Cu-PBI 膜和 PA/Cu-PBI 膜在 CuK-edge 的 XANES 谱图归一化吸收（abs.）的一阶导数（Deriv.）（d）以及 k^2 加权 EXAFS 谱图（e）。R 表示径向距离。f，Cu-PBI 和 PA/Cu-PBI 膜的 XPS 谱图及拟合的 N1s 曲线。

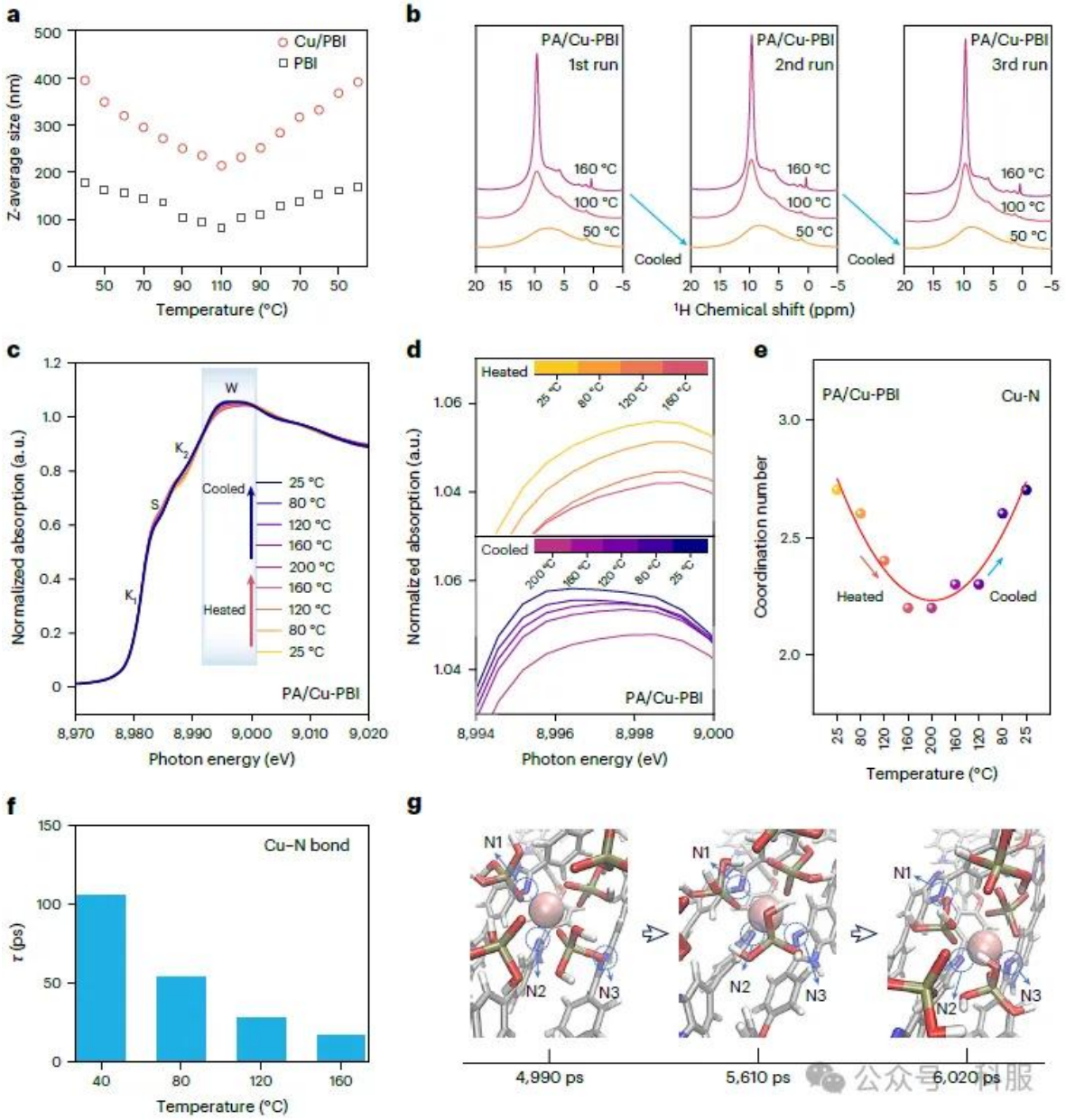


图 3 动态 Cu–N 配位的表征。a，通过动态光散射测量的不同温度下 PBI 和 Cu/PBI 在 DMAc 中的 Z 平均粒径。b，PA/Cu–PBI 膜的变温固态 ^{1}H NMR 谱图。c，d，在从室温到 200℃的加热和冷却循环过程中记录的 PA/Cu–PBI 膜的归一化 CuK–edge XANES 谱图（c）及相应的白线强度（W）（d）。e，通过对不同温度下 PA/

Cu–PBI 膜的 k^2 加权 CuK–edge EXAFS 谱图进行拟合得到的 Cu–N 配位数。f，不同温度下 Cu–N 配位的寿命。g，在 160℃下不同模拟时间点的相应 Cu 配位结构的快照。元素的颜色代码如下：N（蓝色）、O（红色）、Cu（橙色）、H（白色）、C（银色）和 P（棕褐色）。

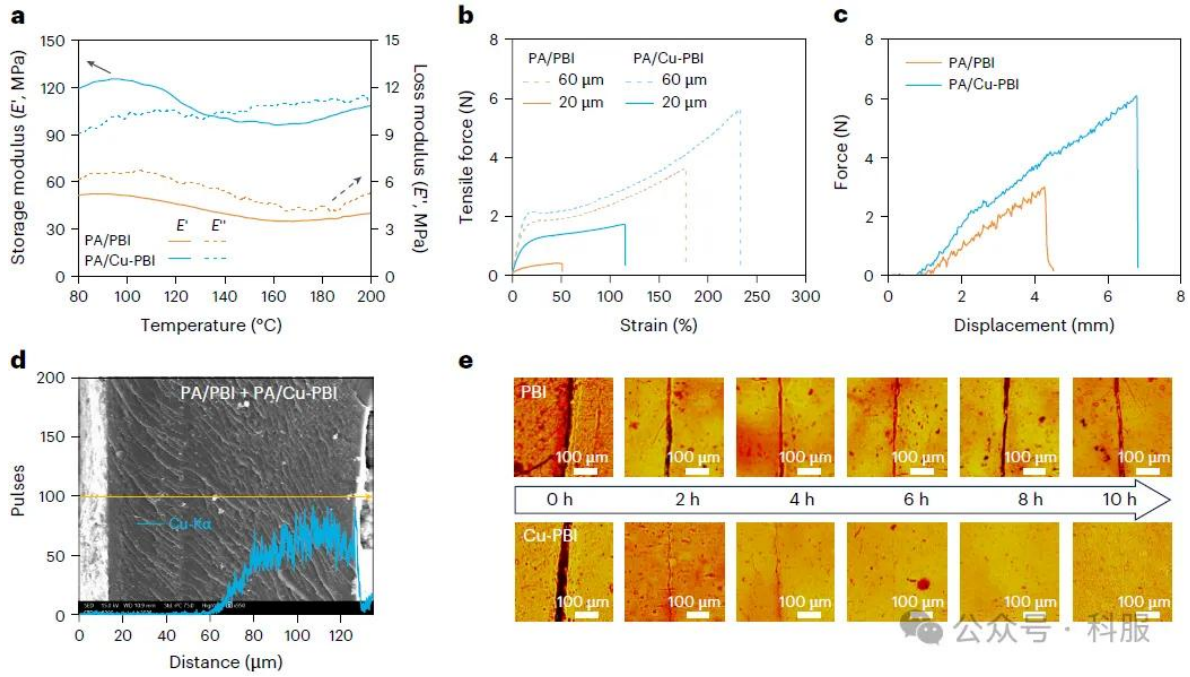


图 4 动态 Cu 离子交联膜的综合力学、质子传导与稳定性。a，PA/PBI 和 PA/Cu–PBI 膜的动态热机械分析。b，PA/PBI 和 PA/Cu–PBI 膜的拉伸性能（使用狗骨形试样测量，标距长度 20mm，窄段宽度 4mm）。c，20μm 厚 PA/PBI 和 PA/Cu–PBI 膜的穿刺性能。d，融合后的 PA/PBI 与 PA/Cu–PBI 膜界面处的截面 SEM 图像及相应的 Cu 元素分布。e，PA/PBI 和 PA/Cu–PBI 膜在自修复前后的显微镜图像。

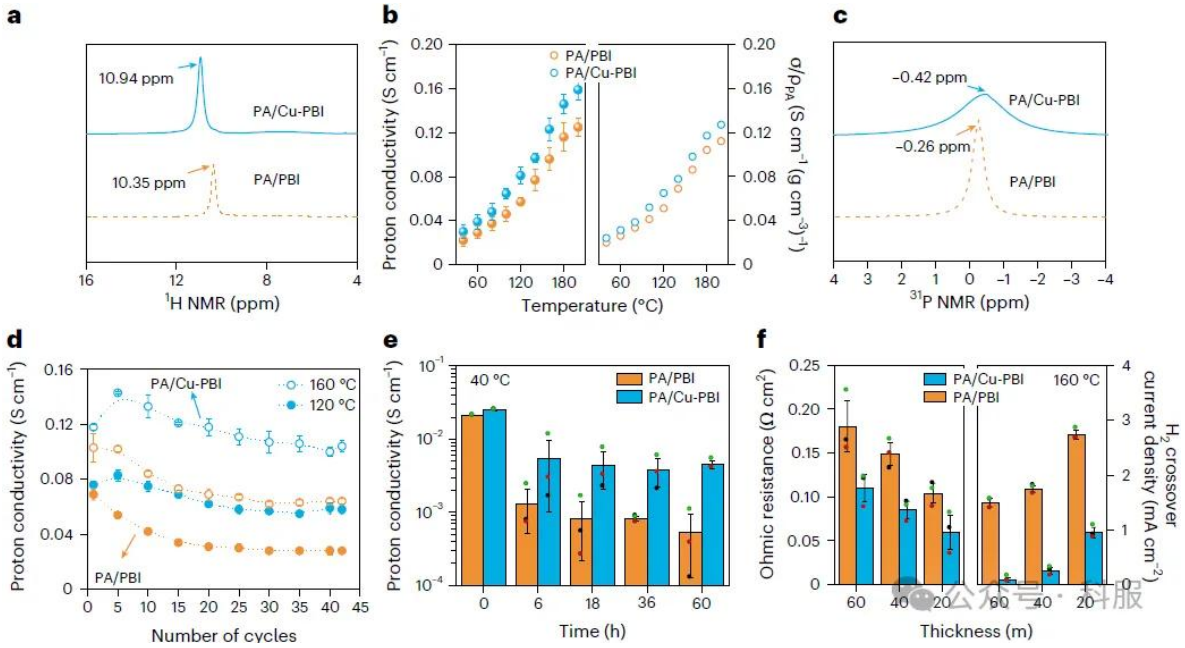


图 5 动态 Cu 离子交联膜的综合力学、质子传导与稳定性。a，PA/PBI 和 PA/Cu–PBI 膜的固态^{1}H NMR 谱图。b，PA/PBI 和 PA/Cu–PBI 膜的质子电导率（实心符号）以及质子电导率与单位体积 H_3PO_4 密度的比值（空心符号）随温度的变化。c，PA/PBI 和 PA/Cu–PBI 膜的固态^{31}P NMR 谱（外标为$(NH_4)_2PO_4$）。d，在 120℃和 160℃之间温度循环下的质子电导率稳定性。e，在 40℃和 100%相对湿度（RH）下的质子电导率稳定性。注：每次阻抗测试前，将膜在 110℃下平衡 2h 以去除残留水。f，不同厚度膜在 160℃下的欧姆电阻和 H_2 交叉极限电流密度。图 b、d、e 和 f 中的数据表示为平均值 ± SD。每个数据点代表来自不同膜样品的独立测量值（每组 n=3）。比较组：PA/PBI（对照组）和 PA/Cu–PBI（实验组）

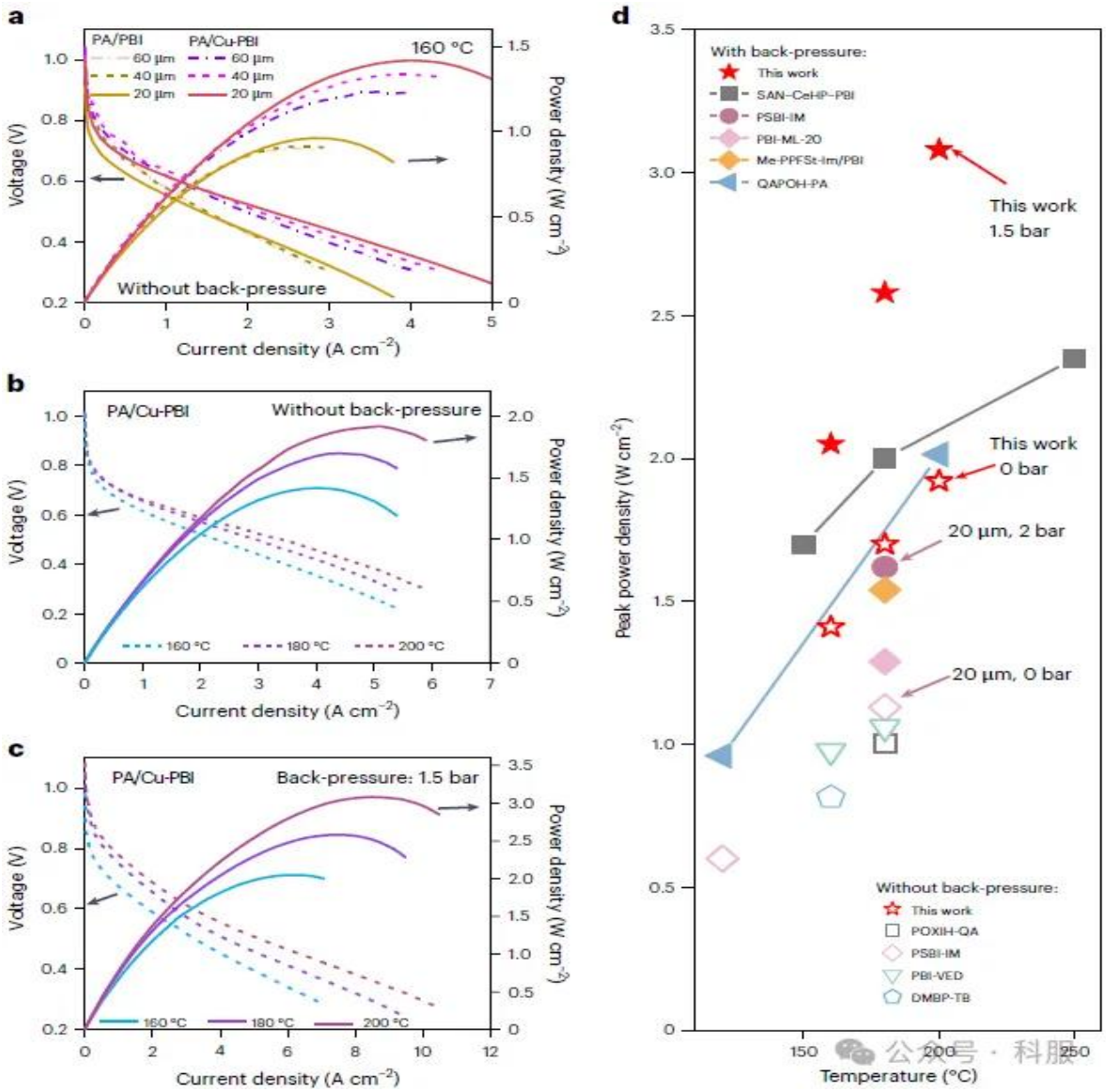


图 6 | 于 H_2 –O_2 进料条件下单电池的性能。a，不同膜厚度的 PA/PBI 和 PA/Cu–PBI 燃料电池在 160℃、无背压条件下的极化曲线和功率密度。b，c，采用 20μm 厚 PA/Cu–PBI 膜的单电池在不同温度下无背压（b）和 1.5bar 背压（c）条件下的极化曲线和功率密度。d，基于 PA/Cu–PBI 膜的单电池功率输出与不同温度和背压条件下最先进高温 PEMs 的比较。

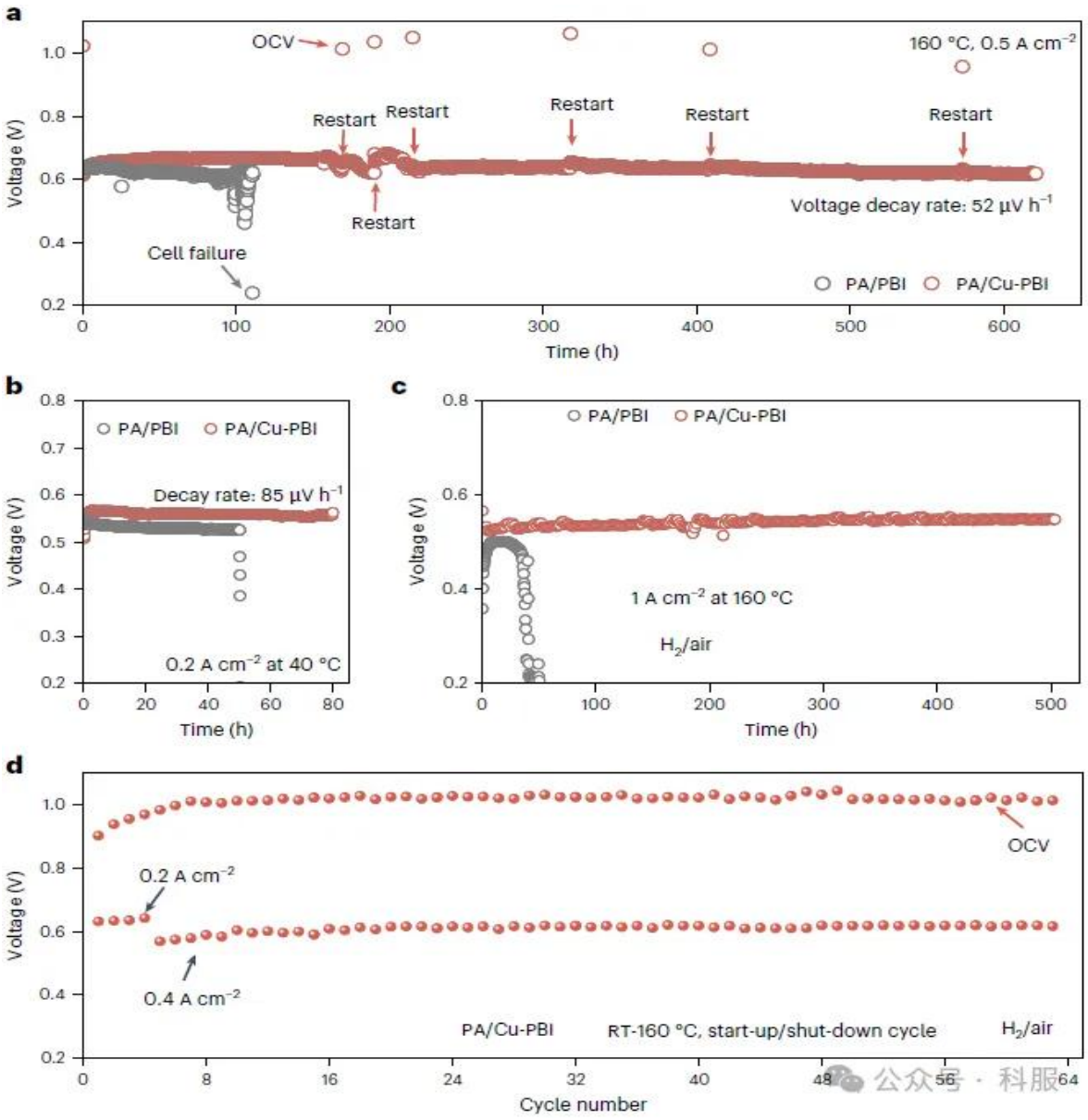


图 7 | 基于 20μm 膜的单电池耐久性。a，基于 PA/PBI 和 PA/Cu-PBI 膜的电池在高温（160℃、0.5Acm^{-2}、H_2O_2）下的长期稳定性。b，基于 PA/PBI 和 PA/Cu-PBI 膜的电池在低温（40℃、0.2Acm^{-2}、H_2O_2）下的短期稳定性。c，大面积 MEA（25cm^2）在 1.0Acm^{-2}高电流密度（160℃、H_2/空气）下的长期稳定性。长期稳定性测试中所有 HT-PEMs 的厚度约为 20μm。燃料电池耐久性测试在无

背压条件下进行。d，基于 PA/Cu-PBI 膜的 45cm^{2}MEA 在无背压条件下使用干 H_2/空气进行启动/停机循环测试。

动态 Cu 离子交联赋予超薄 PA/Cu-PBI 膜优异的机械强度和韧性，克服了传统共价网络的局限性，并为高功率密度 HT-PEMFCs 实现了可靠的 20μm 厚 PA/PEMs。动态 Cu-N 键进一步赋予其本征自修复能力，能够密封会损害耐久性的微裂纹。同时，Cu 离子中心增强了磷酸保持能力和质子解离。这些综合优势使得在高温操作下实现了高功率密度和卓越稳定性。因此，该研究为薄型、高性能 HT-PEMFCs 展示了一种可行的材料平台。未来的研究可通过探索多种过渡金属配位剂和定制配位结构来进一步优化质子传导、机械弹性和长期耐久性，从而扩展这一研究范式。

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