钙钛矿太阳能电池：期待与硅“联姻”

■本报记者 崔雪芹

钙钛矿太阳能电池因成本低、转换效率高，成为光伏领域的研究热点。但是，其稳定性、大面积制造、效率转换等诸多挑战也是国内科研人员必须直面的问题。

目前处于防控新冠肺炎的关键阶段，同大部分人一样，居家办公成为中国科学院半导体研究所研究员游经碧的日常工作方式。“之前没有时间静下心来好好看看学生的实验、进展、报告，如今正好可以集中挖掘里面的新东西，打开一些新的思路。”

两年前，游经碧课题组成功实现中国在钙钛矿电池转换效率方面世界纪录的突破。

不久前，南京工业大学先进材料研究院教授陈永华与中国科学院院士、西北工业大学教授黄维等多位合作者，研究出高效稳定的二维层状钙钛矿太阳能电池，相关论文发表于《自然—光子学》，成为离子液体应用在钙钛矿领域的又一突破。

而北京大学物理学院研究员朱瑞与中国科学院院士龚旗煌、黄维等合作，在国内率先开展了混合阳离子型钙钛矿太阳能电池在临近空间的稳定性研究，该研究作为封面文章刊登于《中国科学：物理学 力学 天文学》英文版。

游经碧迫切希望，他们也能尽早开展一些更有意义的工作。

▲实验人员在实验室测试钙钛矿太阳能电池样品

◀实验室钙钛矿太阳能电池样品

挑战一：没有稳定性就没有应用

“没有稳定性就没有应用，能否应用的主要瓶颈是稳定性问题。”游经碧告诉《中国科学报》，目前钙钛矿太阳能电池稳定性虽然有了很大提高，但想要完全满足产业化要求还需一段过程。

“若想产业化，使用寿命是最重要的。硅电池的寿命要求是25年，钙钛矿电池还差得很远，我们的发展方向也是朝着稳定性去做。”对于稳定性的重要性，陈永华表示赞同。

硅是从自然界中沙子、石头里提取出来的元素，因为在地球上已经存在几亿年，因此硅电池性能非常稳定。但其在制备过程中能耗高，对环境污染严重，成本比较高。

钙钛矿电池的优点是可用溶液法制备，如喷墨打印、卷对卷印刷、丝网印刷等，极大降低成本。如果硅电池被钙钛矿电池取代的话，电费就相当便宜了。

陈永华说，稳定性的研究目前主要集中在钙钛矿薄膜的钝化上，创新性的突破仍没有实现。他认为，除了钙钛矿活性层本身，其余功能层的设计及器件的封装技术，还需要全链条一体化设计，这就需要整合资源和团队，集中力量办大事。

“2016年前后，大家还认为稳定性是很严重的问题，但随着近几年的不懈努力和探索，很多成果涌现出来，器件的稳定性也有了显著的改善。”朱瑞相信，只要有足够的时间和投入，稳定性就不再是一个难以解决的问题。

挑战二：大面积制造、光电转换效率

作为光伏领域的新星，钙钛矿太阳能电池的商业化进程不断推进。朱瑞介绍，苏州协鑫纳米、湖北万度光能、杭州纤纳等国内公司，都专注于面向产品的研发探索，尤其是在大面积工艺、稳定性、效率等方面。

“大面积主要是工艺问题，结合基础研究取得的创新性成果，由光伏企业来主导，可以显著加快大面积化进程。”游经碧说。但他同时指出，由于目前实验室做的都是小面积，而产业化必须向大面积模块发展，大面积制造就成为另一个制约钙钛矿电池产业化的瓶颈。

游经碧表示，除了电池稳定性和大面积制备等关键问题外，还需进一步提高电池效率。但基于目前钙钛矿材料体系，电池效率的进一步提升存在诸多阻碍。

对于光电转换效率与大面积制备之间存在的问题，陈永华说，他们实验室做的也就是一平方厘米。如果面积放大，就会出现薄膜工艺改变和很多缺陷，效益和稳定性也会下降。

“由于钙钛矿具有弱光下优异的光电转换效率，室内供能应用也是钙钛矿光伏区别于传统硅基电池的一大优势，可以将室内照明和弱的太阳光利用起来。”陈永华认为，由于钙钛矿光伏材料具有轻、薄、柔、透等特点，未来在柔性电子供能上具有不可替代的优势。

他告诉《中国科学报》，与传统硅电池形成叠层电池有望大幅提高电池效率，目前国际上基于钙钛矿/硅的叠层电池效率已达到29.1%。业内认为，随着新的薄膜沉积技术的开发，更高转换效率的大面积钙钛矿电池模块指日可待。

与硅电池结合是方向

提及钙钛矿太阳能电池未来的发展方向，朱瑞表示，目前主流的观点认为有两条路可以走。一是硅电池，但该市场已经很大，这条路可能并不好走。二是与硅电池结合，这可能是未来的一个重要发展方向。

利用钙钛矿电池可以将硅电池26%的转换效率提高到30%以上，这对庞大的民用光伏市场来说极具诱惑力。因此，我国一些硅基光伏企业也开始在钙钛矿光伏方向上提前布局。

钙钛矿太阳能电池分为正式和反式两种器件结构。朱瑞所在团队一直致力于反式结构的研究，并在两年前取得突破性进展，成果发表于《科学》。他们创下了该类太阳能电池器件效率的最高纪录，器件的光电效率高达20.9%。

朱瑞表示，反式器件的一个主要优势是可以更好地与硅电池结合，可以做在硅的表面上，最终使整个器件实现超过30%的光电转换效率。

朱瑞还为记者描绘了一幅探索中的发展图景——钙钛矿太阳能电池具有低成本、可柔性制备、高能质比、优异的抗辐射性能等优势，在临近空间（距地面20~100公里的空域）发挥它的优势，为临近空间飞行器提供能源供给。这也许可以成为未来的一条重要出路。

而游经碧更关注器件性能的改善，特别是器件的光电转换效率的提高。游经碧表示，他们团队要继续保持光电转换效率的优势。目前25.2%的转换效率世界纪录为韩国所创造。他们将争取开拓一些新的制备技术，让电池效率达到国际最好水平。另外，还会开展器件稳定性和大面积电池制备的研究工作。

“我们团队通过最近开发出的离子液体钙钛矿光伏技术，摒弃了传统高毒性、不稳定的极性非质子溶剂，在稳定性上取得了较大的进展，效率也逐渐与最高水平持平。另外，我们也在做一些大面积工艺方面的工作，希望能够给产业界提供一些想法和思路。”陈永华说。

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41566-019-0572-6
https://doi.org/10.1038/s41566-019-0398-2

给复杂能源系统安装『智慧大脑』

■本报见习记者 池涵

与常规能源系统各类能源独立运行相比，综合多能源系统中气、电、冷、热、蓄、新能源等协调互济，梯级应用，其复杂性远高于常规能源系统。多能协同系统的负荷预测与优化调度也是目前公认的难题。

近日，湘潭大学信息工程学院教授段斌、谭貌和苏永新的团队在攻克上述难题时取得多项研究进展，主要成果已发表于《IEEE电力系统汇刊》和《应用能源》期刊。

深度学习提高负荷预测精度

在我国，大型电力用户一旦用电负荷超过一定阈值，结算周期内就需要按峰值功率承担常规电度电费以外的一笔高额需量电费。大型钢铁企业华菱湘钢为此犯了难。

“他们希望能够把用电负荷平滑下来。”谭貌告诉《中国科学报》，华菱湘钢能源系统是一个典型的区域性综合能源系统，能耗巨大，每年外购电力超十亿元。“这就需要对负荷进行预测，其精度对企业用能成本有重要影响。”

据谭貌介绍，之前企业的预测工作主要通过外购系统实现。然而，外购系统仅提供黑盒服务，通过企业数据自我学习的功能并不完善，企业也不能自己调整软件的模型。而钢铁市场和生产模式都在不断变化，长此以往，模型对负荷预测的准确度就会降低。

“这也给我们自己设计一套负荷预测和控制系统提供了契机。”谭貌说。目前电力系统负荷预测主流方法通常存在特征提取困难和数据重建过程复杂、网络模型复杂度高等问题。而基于深度学习的负荷预测表现出很大潜力，其预测精度和稳定性更高，并能处理复杂问题。

“我们在企业现有需量负荷预测系统的基础上，研发了超短期需量负荷预测与控制系统。”谭貌介绍，以前的一些负荷预测评估只使用模拟数据集，而没有真实数据，结果不可靠。而他们的工作和应用广泛结合，提出的模型经大批工业实测数据验证，最大可能地避免了样本选择性误差。

“最终结果表明，我们所提出的方法精度和稳定性均超当前主流先进的时序预测方法，特别是在解决工厂场景问题中具有明显的优势。”谭貌说，“2019年5月启动试点应用，3台钢包炉参与调控，峰值负荷预测误差均小于3%，试用期每个月可节省需量电费约130万元。”

需求响应策略促进家庭节支

在此次发表的另一项工作中，该团队还尝试将需求响应策略作为分布式家庭能源调度的一种解决方案。

苏永新告诉记者，分布式能源系统数量庞大，不确定性是其显著特征之一，即用户的耗能习惯、气温、水温、家庭新能源发电不同。而他们的工作主要就是应对不确定性。

此前，系统调度优化策略主要是两类，一是鲁棒优化，即为了安全性，按最坏的外部条件调度系统，但最坏的情况总是很少发生，系统总按最坏的情况运行，导致运行成本过高；二是随机优化，即把系统的不确定性分成几种典型情况，优化每种典型情况下系统的运行方案。该方法最大的挑战是，若事先没有预计、没有处理的坏工况来临，就可能拉升能源支出。

“而需求响应策略可以解决上述两种策略的不足。”苏永新说。结合物联网和5G技术，电力系统可以广泛、高效地采集需求信号，利用预测信息和真实的电力价格信号形成用能方案。这种需求响应策略简单、容易实现、生命力强，能够在不损失系统安全性的条件下，降低系统运行成本。

针对需求响应优化策略，苏永新向记者描绘出一幅颇具未来感的绿色节能生活场景——先用手机App查一下现在各项能源的价格，调度程序结合用户舒适度和价格因素，自动决定洗衣、做饭的时间及空调在每个时刻的功率。

应用仍面临挑战

当前，我国能源消费结构性问题突出。随着能源转型的提速和电力体制改革的不断深入，能源、网络、用户三者之间的关系变得越来越紧密。

苏永新说，综合能源服务将打破不同能源品种单独规划、单独设计、单独运行的传统模式，实现横向“电热冷气水”能源多品种之间、纵向“源网荷储用”能源多供应环节之间的协同以及生产侧和消费侧的互动，从而提高能源效率并缓解能源环境问题。

目前，综合能源系统已成为当前国际能源领域重要战略研究方向和国家能源战略重大发展需求。但谭貌坦言，其在应用中还面临一些挑战，如内部、外部各种因素的变化导致不同周期数据特征有所差异，单一固定模型的性能随着时间推移容易退化，复合预测模型的在线学习和动态集成问题变得迫切。

谭貌认为，精准的预测是能源系统智能运行的重要基础，但考虑多种能源种类后，能源网络更加复杂，用户更加庞大，涉及的不确定因素进一步增加，对预测形成很大挑战。

而对于系统优化调度而言，苏永新说，现实环境下的多能源系统网络结构、运行策略相对固定，对真实系统的改造和调整涉及现实成本问题，所以有些新颖的、前沿的构想只能通过仿真优化的手段实现，如何融合或者打通仿真与现实之间的界限还有较大的挑战。

苏永新说，他们下一步工作将围绕分布式综合能源系统自治管理与优化展开。研究即插即用、自动趋优的智能优化策略，对需求响应政策落地、社会节能减排具有重要意义。

相关论文信息：https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2963109
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114144

建言能源“十四五”系列谈③

中国科学院院士邹才能：非常规油气需要“非常规”人才

■本报记者 崔雪芹

近年来，世界石油工业正在进行一场从常规油气到非常规油气的“黑色页岩革命”，占油气资源总量80%的非常规油气成为关注的焦点。

日前，中国科学院院士、国家能源页岩气研发（实验）中心主任、中国石油勘探开发研究院副院长邹才能在接受《中国科学报》专访时指出，我国已实现从常规向非常规油气的跨越式发展，并取得了革命性突破，但在理论技术研究、实验室建设、人才培养等方面仍需进一步加强。

邹才能强调，“十四五”需要依靠“非常规”人才不断探索新理论、新方法、新技术、新管理，支撑非常规油气快速发展。

“十三五”取得“革命性”突破

《中国科学报》：“十三五”期间，我国非常规油气发展取得哪些重大突破和进展？

邹才能：从定位上说，我国已经实现从常规油气向非常规油气的跨越式发展，非常规油气勘探开发取得“革命性”突破，在“十三五”期间实现了工业化发展。

产量上，非常规油气在我国油气总产量中占比超过22%，特别是页岩气储量和产量取得大幅增加。2019年，全国页岩气探明储量达1.8万亿立方米，产量达154亿立方米。致密气产量近400亿立方米，煤层气产量近60亿立方米，致密油产量近200万吨。

理论上，打破了常规渗透性储层、经典圈闭油气成藏的概念，突破了直井达西渗流开发的技术路线，提出了连续性“甜点区”非常规油气理论，为非常规油气地质新学科的建立奠定基础。

技术上，创新了水平井工厂化技术，颠覆了传统圈闭型“油气藏”生产模式，提出了非常规油气水平井平台式体积压裂，制造“人造渗透率”形成“人工油气藏”，突破了依靠达西渗流开发的传统理论和技术。

《中国科学报》：当前，我国发展非常规油气还需解决哪些问题？

邹才能：我国在非常规油气的资源类型、理论技术认识上还需更大突破，在提高采收率上也需进一步提升。目前，我国海相页岩气埋深3500~4500米资源有重大突破，但尚未实现大规模开发，陆相页岩气未取得重大进展，致密油、煤层气的产量也需要进一步提升。此外，相关技术研究、实验室建设、人才培养等方面仍然欠缺，需要培养更多的非常规人才投入到重要理论创新与重大生产需求中去。

两场“非常规油气革命”值得期待

《中国科学报》：在非常规油气勘探开发技术上，我国还需要做什么？

邹才能：我们需要对各类非常规资源全面布局，对所有资源类型加大科技攻关及理论创新的力度，加大投入来提升总体非常规油气的产量。

非常规油中，中高成熟度页岩油在我国起步较早，已开展相关工业试验。另一类低熟页岩油采用“地下炼厂”原位改质技术，利用电加热等方法使页岩油轻质化。目前该技术正在进行先导试验研究，仍需加大技术攻关。致密油在未来发展中需提高采收率技术，实现规模效益开采。油砂油或重油，利用蒸汽辅助重力泄油或加热的办法，使产量再提升。

页岩气要全面实现工业化和规模化发展，天然气水合物等资源仍需加强理论和科技攻关，持续推进工业化试验。非常规油气技术需要进行全面科技攻关和部署，进一步梳理政策支持措施，加大财政补贴力度。

非常规油气工业化进程中，还有两场“革命”可能形成产业突破。一是煤炭“地下原位气化”革命，有望成为我国“天然气革命”；二是页岩“地下原位改质”革命，有望成为中国陆相“页岩油革命”。工业试验的最核心“卡脖子”技术，是地下水平井耐高温、耐腐蚀等加热系统和技术。

《中国科学报》：据了解，2030年全球页岩气万亿方级产量主角是美国，你认为中国在加大页岩气开发上应做好哪些准备？

邹才能：2018年，美国页岩气产量是6072亿方，达到历史最高峰，占全国天然气总产量的73%，2019年页岩气超过7000亿方。致密油（页岩油）产量为3.1亿吨，占全国原油总产量6.7亿吨的近一半。美国油气对外依存度为5%左右，油气缺口非常小，有望通过“非常规油气革命”在2022年左右实现“能源独立”。

目前，我国页岩气工业化实践发展很快，预计在未来天然气产量增长中占重要地位。但我们仍面临一系列理论技术问题：其一，陆相和海陆过渡相页岩气是新领域，基础地质理论和技术仍处于探索试验阶段；其二，我国页岩气虽然在3500米浅海相地层实现了工业化生产，但3500~5000米深层海相页岩气是产量增长的主要方向，其核心关键技术尚未取得突破。

我国非常规油气革命虽然实现了工业化，但整体发展仍不均衡。未来，我国非常规油气潜力很大，相关理论突破、技术研发仍需国家政策和财政支持，同时需加大科技投入、创新力度和人才团队建设，实现“非常规”资源“常规”开采。

为常规转型贡献“非常规”力量

《中国科学报》：你曾提出，中国“新能源革命”是必然趋势和必然选择。那么，“十四五”时期，有哪些能源产业需要转型升级？

邹才能：2018年我国能源综合对外依存度为19%，主要进口能源类型是原油和天然气。保障我国能源供给安全须关注“四大领域”：依靠“洁煤稳油增气”，保障能源“供应安全”；实施“大力发展新能源”战略，“新能源革命”是必然趋势和选择；实施“氢能生产革命”，加快与油气基础建设融合，建立我国氢气工业；突破储能和新材料技术低廉化、大众化，打通多种能源融合，实现生产、消费智能调配，大幅提高能源利用率、降低能耗，构建“智能源”管理体系。

《中国科学报》：“十四五”期间，如何为中国能源结构转型贡献“非常规”力量？

邹才能：加快中国能源结构转型要做好产业结构顶层设计，以“问题需求”为导向开展前瞻性研究，加大实施新能源人才技术储备。要发展绿色能源，实现绿色能源战略替代，要坚持清洁生产，实施节能减排。

人才、技术和平台是科技创新的三大支点，要激发人才创新意识和创造能力，培养新能源、新材料储能等领军人才；要持续攻关、潜心研究，掌握核心技术，突破“卡脖子”壁垒；要打造超前尖端、世界一流新能源实验室，解决战略性、前瞻性重大科学问题，为保障能源安全，寻找更多的“新能源”，贡献更大的“非常规”力量。

邹才能

“我国已实现从常规向非常规油气的跨越式发展，但在理论技术研究、实验室建设、人才队伍培养等方面仍需进一步加强。

资讯

发改委、能源局部署应对疫情能源供应保障工作

本报讯 国家发展改革委、国家能源局日前召开电视电话会议，就应对疫情能源供应保障工作进行部署。会议要求，在保障民生取暖用能的同时，着力保障湖北省武汉市等疫情严重地区以及其他中心城市疫情诊治定点医疗机构、重点物资生产企业和集中隔离的酒店、社区等重点单位的煤电油气供应。

在电力供应上，加强各地医院、疾控中心、防疫指挥部、疫苗研发机构、医疗用品生产企业的电力设施建设和保障，加强民生领域用电保障，加强电网安全稳定运行，加强应急值班值守；在煤炭供应上，统筹疫情防控和煤矿生产，加快组织煤矿复工复产；在油气供应上，科学组织生产，强化产运销衔接，有序投放市场资源，保持合理库存水平，畅通油气运输通道，科学合理安排加油站、加气站运行。（李惠钰）

疫情防控期间企业用电成本有望降低

本报讯 国家发展改革委日前发布《关于疫情防控期间采取支持性两部制电价政策降低企业用电成本的通知》，明确在疫情防控期间降低企业用电成本，支持企业共渡难关。

《通知》表示，对疫情防控期间暂不能正常开工、复工的企业，放宽容（需）量电价计费方式变更周期和减容（暂停）期限，电力用户即日可申请减容、暂停、减容恢复、暂停恢复。申请变更的用户不受“暂停用电不得少于15天”等条件限制，减免收取容（需）量电费。

《通知》明确，对因满足疫情防控需要扩大产能的企业，原选择按合同最大需量方式缴纳容（需）量电费的，实际最大用量不受合同最大需量限制，超过部分按实计算。《通知》还要求，全力保障为疫情防控直接服务的新建、扩建医疗等场所用电需求，采取免收高可靠性供电费等措施，降低运行成本。（李惠钰）