



封面故事

太阳能热发电路在何方？

—专访“2017 年度中国太阳能热利用科学技术杰出贡献奖”获得者马重芳教授

本刊记者 ■ 李鹏 陈一言

在我国太阳能热利用领域，太阳能低温热利用产业已率先实现了规模化、市场化应用；太阳能光伏产业在国家的大力扶持下，亦实现了产量与市场规模双世界第一，虽然离摆脱补贴、实现完全市场化尚有一段距离，但已为期不远。太阳能热发电全球商业运行的装机量超过 500 万 kW，已初具规模，其在我国也开始了多种技术方案的项目示范。虽然国家规划了先进的目标，积极推进，但目前产业发展仍处于示范起步阶段，似乎还存在一定困难。我国太阳能热发电路在何方？为此，记者近日采访了北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室马重芳教授。

马重芳荣获了国家太阳能光热联盟颁发的“2017 年度中国太阳能热利用科学技术杰出贡献奖”。他创建了北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室和传热与能源利用北京市重点实验室。重点实验室经过了近 20 年的发展，在强化传热的理论和应用、高温传热蓄热与节能技术、分布式能源系统及其应用、可再生能源的研究与应用、压缩机与热泵系统、膨胀机和 ORC 系统、燃料电池及氢能利用等诸多领域获得了丰硕的成果，并且正在产学研合作方向的指引下不断推进。2016 年，马重芳作为第二申请人以气控钠热管的研究及应用获得了“国家科学技术进步奖”二等奖。



太阳能热发电：中国和世界都不会放弃

我国太阳能热发电路在何方？马重芳认为，尽管当前我国太阳能热发电产业的发展确实不尽如人意，但是中国和世界都不会放弃这个潜力无穷的绿色新能源事业。2017 年 1 月，美国能源部发布了编号为 DE-AC-36-08GO28308 的《第三代太阳能热发电 CSP 示范工程路线图》技术报告，该报告提出了应用超临界二氧化碳热力循环达到 700℃ 以上的工作温度，以进一步改善热功转换效率，推动这一新兴产业的发展。这一创新性的技术方向，受到了国内外科技产业界的高度关注。在国内，浙江中控、首航光热、中广核等先进企业均实现了太阳能热发电技术的并网发电，标志着我国太阳能发电产业取得了长足进展。上海电气集团最近中标了迪拜总投资为 253 亿元、装机



达量 700 MW(包含 1 个 100 MW 塔式、3 个 200 MW 槽式) 的这一世界最大的太阳能热发电站的工程总承包, 该项目的上网电价仅为 7.3 美分 / kWh。上海电气集团的中标证明了中国太阳能热发电产业具有雄厚的实力。

马重芳认为, 太阳能热发电的技术复杂程度和难度往往比想象的要大得多。他说道: “为了说明这个问题, 我们不妨从能量转换的角度, 将太阳能热发电同风力发电和光伏发电进行比较。这两种可再生能源发电技术分别只涉及两种能源形态(前者是机械能, 即空气流动的动能和电能; 后者是太阳光能和电能), 以及各自能源形态之间的一个能源转换过程。但是太阳能热发电却包含了 4 种能源形态(太阳光能、热能、机械能和电能) 和 3 个能量转换过程(光能到热能, 热能到机械能, 机械能到电能)。显然, 太阳能热发电的生产过程要比其他两种可再生能源复杂得多。除此之外, 太阳能热发电的复杂性还体现在能流密度的巨大提升方面。太阳光照射到地球表面的能流密度通常低于 $8 \times 10^2 \text{ W/m}^2$, 为了获得 400°C 以上的工作温度, 我们必须通过镜场的聚光集热将太阳能的能流密度提高 2~3 个数量级, 这个聚能过程大幅增加了太阳能热发电的复杂性和建造成本。从以上两个方面的分析, 我们不难理解太阳能热发电成本往往成倍高于目前风力发电和光伏发电的现有成本的原因。尽管太阳能热发电的建造成本大幅高于光伏发电, 但其可使用熔融盐高温蓄热技术储存能量, 且储能成本远低于化学蓄能, 可实现大容量、长寿命、低成本的能量储存, 解决了我们在能量储存方面所遇到的巨大难题。因此, 若将 “太阳能热发电 + 高温熔融盐蓄能” 同 “光伏发电 + 化学蓄能” 相比, 前者在建造成本、使用成本、技术成熟度和环境保护特性等方面都具有一定的优势, 具有广阔的发展前景。对于这样先进的可再生能源技术, 尽管我们还需积累更多的工程经验, 但其拥有巨大的潜力和优势, 无论是中国还是世界其他国家, 都

不可能放弃这个重大的技术方向。”

熔融盐传热蓄热大有可为

太阳能热发电的能源利用率随工作温度的升高而增加。目前, 先进太阳能热发电系统的传热和蓄热温度已经超过了 500°C 以上, 并且还在不断增长。在如此高的工作温度之下, 传热蓄热工质的选择对于系统的可靠性、安全性、建造和使用成本, 以及能源利用率具有重大的意义。对于高温蓄热, 以熔融盐作为蓄热介质已成为学术界和产业界的共识, 以硝酸盐为主要成分的混合熔融盐已经得到普遍的应用。为了适应更高的工作温度, 在超过 600°C 的情况下, 碳酸盐和氯化盐等高温熔融盐正在研发和使用。除此之外, 高温固体蓄热也得到了相当的重视。

马重芳谈到, 在太阳能热发电系统中, 高温传热过程的工作介质可能有多种不同的选择, 这取决于集热器的结构和设计, 水、空气、氦气、气固两相流、导热油、硅油和熔盐都是可能选择的传热介质。正确选择合理的传热介质对于太阳能热发电系统的可靠性、寿命、效率和成本往往有决定性的影响。对于塔式太阳能热发电系统而言, 国内外都曾经普遍采用水作为传热介质。在美国和西班牙, 以水传热的塔式太阳能热发电系统都得到比较广泛的示范和应用; 我国第一批投入工程应用的塔式太阳能热发电系统也普遍采用了水作为传热介质。国内外这些水工质塔式太阳能热发电系统虽然也都获得了一定的成功, 但其可靠性、成本和工作效率都不能完全尽如人意, 因此, 国内外的塔式热发电系统都无一例外的转向以熔融盐替代水作为传热介质的发展趋势。熔融盐塔式太阳能热发电技术似乎已成为太阳能热发电的主流技术, 这种传热介质和传热技术的转换、替代和发展, 为太阳能热发电产业带来了发展的动力和期望, 也推动了熔融盐传热技术和熔融盐应用基础研究的发展, 这可能是近年来太阳能热发电领域最引人瞩目的技术进步。



在太阳能热发电领域，槽式系统仍然是市场占有率最高的主流技术，其所使用的传热介质是导热油，而导热油在工作温度、使用寿命和生产成本等方面都有很大的局限性，这也大幅限制了槽式系统的发展和应用。马重芳表示，为了替代导热油的应用，水和硅油传热介质的应用也在研究和探索，而人们对熔融盐替代导热油则抱有更大的期望，低凝固点与低成本先进熔融盐的研发和应用有可能为槽式系统的发展带来新的前景。虽然线性菲涅尔式和碟式系统目前还不是太阳能热发电的主流技术，但是也受到了人们的很大关注，在这两种技术系统中使用熔融盐作为传热介质，也有可能带来崭新的发展前景，或可能成为技术创新的重要方向。

守得云开见月明

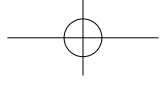
马重芳出示给笔者两篇美国能源部爱达荷国家实验室 (Idaho National Laboratory) 于 2010 年发布的科技报告，题目分别是《液态熔融盐热物理和热化学性质的工程数据库》和《熔融盐受迫对流传热实验回路的概念设计》。他接着说道：“这两篇科技报告都论述了液态熔融盐在管路中受迫对流传热的计算方法和计算公式，因为这是熔融盐传热蓄热工程计算和设计的基础科学问题。”马重芳指出，这两篇报告对不同流态下的熔融盐传热给出了 6 个计算公式，而这 6 个公式全都来自北京工业大学马重芳团队在国际杂志上发表的两篇英文科技论文；爱达荷国家实验室的这两篇科技报告还大量引用了马重芳团队发表的两篇英文论文中的实验数据及拟合曲线。2017 年美国能源部发布的《第三代太阳能热发电示范工程路线图》的科技报告也引用了北京工业大学重点实验室关于混合碳酸熔融盐配制的两篇英文论文，认为北京工业大学配制的混合碳酸熔融盐配方的锂盐含量低、成本低，具有可接受的热物性。

北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室现有在读硕士生 116 名，博士及博士后

36 名；实验室拥有价值逾 5000 万元的科学仪器设备，其中用于熔融盐研究的仪器价值在千万元以上，重点实验室仅在熔融盐基础研究方面就获得了国家逾 3000 万元的科研经费支持；在国家的大力支持下，重点实验室对上百种混合熔融盐的传热蓄热性能和热物理热化学性质进行了深入系统的研究，发表了 50 余篇英文论文，为工程运用提供了强有力的技术支撑。低成本、大容量、长寿命的能量储存和高温高热流的热能传递是能源科学中两个引人关注的重大科技问题，熔融盐的蓄热和传热有可能为这两大科技问题的解决提供较为合理的方案。重点实验室在吴玉庭主任的领导下坚持和深化熔融盐传热蓄热的研究方向，努力工作、虚心学习，不断取得新的研究成果。科学研究是国际性的现象，国际合作必不可少，重点实验室在国家自然科学基金委员会和国家科技部的支持下，分别与英国伯明翰大学及格拉斯哥大学进行了科技合作，并且取得了良好的科研成果。

协同创新，合力攻关

太阳能热发电涵盖了光、热、功、电 4 种能量形态之间复杂的多重转换过程，这种能量转换特性导致了电力生产成本的提升，降低了太阳能热发电同其他可再生能源发电技术的竞争优势。但也正是因为这种多重复杂的能量转换特性，使太阳能热发电具备了热电联供和低成本蓄能的双重优势。为了解决雾霾问题，我国面临使用清洁能源为建筑物供暖和为工业生产供热的巨大挑战，同时也面临由于缺乏大容量、低成本的蓄能技术而不得不放弃风力发电和光伏发电的不合理现象，一方面造成了清洁能源的浪费，另一方面又不得不接受缺失清洁能源供热的巨大压力。而具备低成本蓄能和热电联供能力的太阳能热发电技术有可能正是应对这一挑战的合理解决方案，且该技术对于我国经济发达和人口密集的地区可能更有实用价值。若实现了这个创新性的技术目



标,我们不但可降低太阳能热发电的成本,提高竞争能力,还可推动雾霾问题的解决。

北京工业大学马重芳团队同河北冀中能源井陉矿业集团开展了产学研合作。2018年9月5日,河北冀中能源井陉矿业集团一期投资3.6亿元的塞北管理区“农光互补+智慧能源”特色小镇项目顺利开工。该项目技术支持单位为北京工业大学,将采用北京工业大学低熔点熔融盐传热储热技术、线性菲涅尔太阳能集热与谷电互补的清洁能源供能技术。据悉,本项目供暖建筑面积达30万m²,镜场面积为16.8万m²,熔融盐用量为3900t,蓄热容量为300MWh,覆盖现代农业1400亩,蒸汽供应能力为23t/h。项目二期将扩大二次聚焦线性菲涅尔镜场,建成太阳能热电联供系统,当然这是有难度的。项目采用“农光互补”模式,上面布置集热镜场,下面进行农业经营,以期实现清洁能源与现代农业的融合,充分契合了当地可再生能源示范区与现代农业示范区的发展理念,在兼顾经济效益的同时,可解决当地居民工业供热等民生问题。

另外,北京工业大学还在同企业及兄弟院校合作,倡导将熔融盐的蓄热与火力发电相结合,使火力发电站变成蓄能电站,有助于实现火力发电削峰填谷,这是除抽水蓄能以外的另一种蓄能解决方案。

总之,无论哪种方案,都要立足因地制宜、

多能互补的原则。无论是科研院所还是高等院校,无论是国有企业还是民营企业,都要协同创新,合力攻关。

不忘初心, 坚守梦想

在两个多小时的采访中,虽然年近八旬,但马重芳谈起他诸多研究的领域如数家珍,趣味盎然,足见其对科学研究热爱有加。访谈中,他给笔者留下深刻印象的是,在大家迷茫于“太阳能热发电路在何方”之际,他表现出“继续攻关、坚守梦想、不言放弃”的坚定决心。正如“2017年度中国太阳能热利用科学技术杰出贡献奖”颁奖词中所说的那样:

“几千年来红轮之火,带给大千世界的万物之源和眼睛。不管云遮雾掩,不论雨骤风狂,即便夕阳西下,仍奉献给黑夜以光亮,寒冷以温暖,产业以动力。人们对这光明和能量的来源,敬仰、追逐,从未停息。人,拥有一个梦想不难,难的是能一生坚守对梦想的实践。他在生活中低调,在科研中严谨,在实践中活力无限!他建立一个实验室,引领一支队伍,研发熔融盐蓄热技术以解决能量连续的难题。他的成就代表着‘大容量、低成本、长寿命、无污染’的熔融盐蓄热技术走向民生,开启了绿色‘储能春天’!”

我们祝愿他更多的研究成果能够惠及全球太阳能热利用事业,也祝愿他的科学精神广为传承。

太阳能

(接第78页)

省(区、市)	新增并网容量 / 万 kW	累计并网容量 / 万 kW	发电量 / 亿 kWh	弃风电量 / 亿 kWh	弃风率 / %	利用小时数 / h	各省承诺的全年弃风率控制目标
陕 西	46	405	53.1	1.2	2.3	1508	弃电比下降 1.8%, 控制在 2.2%
甘 肃	0	1282	176.1	43.3	19.7	1366	23%
青 海	110	267	28.8	0.4	1.3	1200	0%
宁 夏	64	1001	144.9	2.3	1.6	1475	—
新 疆	0	1806	276.5	90.3	24.6	1531	26%

备注: 1) 并网容量、发电量、利用小时数来源于中电联; 2) 弃风电量、弃风率来源于国家可再生能源中心、相关电网企业; 3) 各省承诺的全年弃风率控制目标为各省(区、市)在落实《解决弃水弃风弃光问题实施方案》工作方案中承诺的2018年全年弃风率控制目标,“—”表示工作方案中未提出弃风控制目标 太阳能