

· 专题一:双清论坛“分布式能源中的基础科学问题” ·

## 多能互补的分布式能源系统理论和技术的 研究进展总结及发展趋势探讨\*

金红光<sup>1, 2\*\*</sup> 刘启斌<sup>1, 2</sup> 隋 军<sup>1, 2</sup>

1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**[摘要]** 基于第233期双清论坛的学术研讨, 本文围绕能源动力系统高效清洁低碳和环境能效相容发展等内容, 梳理了我国当前能源利用所存在的主要问题, 指出分布式能源系统和大规模集中供能的有机结合是未来能源系统发展的方向。探讨了多能互补的分布式能源系统发展的原理与方法, 进一步凝练了发展多能互补分布式能源系统亟待解决的关键科学问题和重要研究方向, 为国家自然科学基金委员会在未来5~10年对该方向的研究资助提供了政策建议。

**[关键词]** 多能互补; 分布式能源; 能的梯级利用; 可再生能源

能源高效利用与环境协调相容是实现经济社会可持续发展的关键, 分布式能源系统作为能源技术创新发展的热点方向, 具有高效、环保、经济、可靠等优势, 也是推动能源利用技术变革和能源转型发展的重点研究领域, 对于我国实施节能减排战略, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系具有非常重要的意义<sup>[1, 2]</sup>。

分布式能源系统作为集中式供能体系的重要补充, 通过科学合理的系统集成可以直接面向用户需求独立完成冷热电等多元化能源产品输出, 将借助吸收式制冷等联产技术实现余热高效回收及热能梯级利用<sup>[3, 4]</sup>。然而, 在传统分布式能源系统中通常应用直接燃烧等方式利用化石燃料(例如天然气)的化学能, 这导致大量的可用能损失和各类污染物排放, 成为制约进一步提升能源利用效率及清洁化利用的瓶颈。对此, 需要创新化学能释放与利用理论, 通过发展基于多能互补的分布式能源系统, 有机结合多层次不同品位化学过程与动力循环, 实现燃料化学能与物理能的综合梯级利用; 另外, 借助燃料重整和化学链燃烧等新利用形式也将完成燃料化学能的有序释放与污染物排放控制, 实现CO<sub>2</sub>产物富集



**金红光** 中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士, 中国工程热物理学会理事长。长期从事热力学和能源动力系统的理论与方法研究。建立了燃料化学能梯级利用和多能源互补的能质理论, 提出了分布式冷热电联产系统、煤基化工动力多联产系统等。在温室气体控制方面, 提出了捕集CO<sub>2</sub>的化学链燃烧动力系统。在燃料化学能有序释放、聚光太阳能热化学发电、无火焰燃烧方面, 为燃料源头节能和控制温室气体都做出了重要创新贡献。发表主要学术论文400余篇, 获国际和国家授权发明专利60余项。曾获国家自然科学奖二等奖、何梁何利科技进步奖等多项奖项。

与无能耗分离回收<sup>[5-7]</sup>。通过化石能源之间(或与可再生能源)的品位耦合和优势互补, 将克服燃料燃烧过程的不可逆损失以及传统能源“链式串联”发展模式的弊端, 同时也助力于太阳能、风能和生物质等可再生能源利用的“源—网—荷”柔性连接, 实现其就地生产、就近消纳, 提升能源生产及供应的安全性和可靠性<sup>[8, 9]</sup>。为此, 发展多能互补的分布式能源系统, 深入探究多种能源的互补理论与方法, 将为走出一条能源、资源与环境协调发展的新模式提供科学支撑。

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-05-08

\* 本文根据第233期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者, Email: hgjin@mail.etp.ac.cn

在此背景下,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、化学科学部和政策局联合举办了主题为“分布式能源中的基础科学问题”的第233期双清论坛,邀请了来自国内外高校及科研院所的能源领域专家学者,梳理了当前分布式能源发展的现状和趋势,深入研讨了发展多能互补分布式能源系统所涉及的能的综合梯级利用理论和多能互补新方法,分析和凝练了关键科学问题,为我国未来5~10年国家自然科学基金支持分布式能源系统领域研究提出了具体建议。

## 1 当前能源利用和发展现状

回顾近百年的能源行业发展历程,能源利用效率不断提升,但我国社会经济发展仍然长期面临着能源资源简单粗放利用等重大瓶颈问题,面对可再生能源等新兴战略产业的快速兴起,多能互补的能源动力系统理论与方法亟待发展,但相关基础理论尚显不足,急需原创性技术。

### 1.1 化石能源的简单粗放式利用

常规的能源动力系统存在诸多弊端:燃烧过程中的燃料品位损失大、中温段热能的转换利用断层、低温段大量热能排放损失以及对生态环境造成的污染严重。当前,我国每年近一半的煤炭产量都用于燃烧发电,主要使用高效的超临界燃煤发电机组,虽然实现了发电煤耗和污染物排放量的双下降,但“超临界”指的是进入汽轮机的蒸汽参数高于临界参数值(即22.13 MPa和374.15℃),其压力和温度通常分别可达到24.2 MPa和565℃或更高<sup>[10]</sup>。根据热力学卡诺循环效率,发电系统的热功转化效率主要决定于汽轮机入口蒸汽温度(循环初温),即便煤炭在锅炉内的燃烧温度能达到1800℃(受限于燃料灰融熔点,炉膛内燃烧温度通常控制在1200℃以下),但所生产的蒸汽温度却往往不超过650℃,在1800℃和650℃之间存在巨大的能量品位差,该区间高品质能量的作功能力没有得到充分利用,未真正实现能量的“温度对口,梯级利用”。

另外,现有的集中式能源供应体系依然存在简单粗放等问题,例如在夏季南方地区,工业园区和建筑中主要采用电驱动的中央空调来制冷,而在冬季北方地区,则采用燃料直接燃烧等方式来提供采暖热源,这种单一高品位能源输入和单一低品位能源输出的简单粗放式利用严重制约了能源转化效率的提升。为此,需要发展新型能源利用方式,以实现高品位能源发电、中等品位能源制冷和低品位能源制

热,并在靠近用户侧构建冷热电联供体系<sup>[11, 12]</sup>,如图1所示。

### 1.2 传统能源转化利用的链式发展模式

传统的能源利用方式严重依赖煤炭、石油和天然气等化石燃料,长期以来都是借助简单的燃烧等方式先以热能形式释放出来,再通过热力循环实现热功转换,最后输出机械功。对能源利用过程所排放的污染物,先是放任自流、然后在流程尾部进行处理,总体上都采用“先污染后治理”的做法,这种能源利用模式已造成了巨大的资源浪费、较低的能源利用效率和严重的环境污染<sup>[13, 14]</sup>。在化石燃料燃烧释能方面的研究工作也相应地分为三个阶段:最初是保证燃料燃烧的彻底性,然后解决燃料化学能高强度和高效率释放问题,最后才重视环境保护。采取单项降污的办法,方才推动燃料清洁燃烧和其他能源洁净利用技术的发展。当前的降污焦点再一次转移至控制CO<sub>2</sub>等温室气体的排放,然而CO<sub>2</sub>的化学性质稳定,且系统燃烧排烟中的CO<sub>2</sub>浓度很低,使得当前的CO<sub>2</sub>分离耗功与经济成本惊人,难以承受<sup>[15, 16]</sup>。

这种“先高效、后清洁、再低碳”的能源链式发展模式是在经济社会、环保政策等多重外部形势压力下倒逼式推进的,在能效、清洁与低碳之间相互独立。面对未来高质量经济和低碳式社会发展需求,这种传统链式发展模式的矛盾日益凸显,应当探寻能源资源环境、高效清洁低碳一体化协同的发展新道路,如图2所示。

### 1.3 可再生能源发展的“源—网—荷”不匹配难题

大力开发利用可再生能源,是实现能源转型的关键。近年来,我国可再生能源发电事业发展迅猛,发电装机容量和发电量均居世界首位,截止到2018年底,分别达到711.15 GW和17764亿千瓦时<sup>[17]</sup>。与传统能源的发展道路相似,可再生能源也实行“大规模—超高压—高集中—远距离跨区输送”的能源

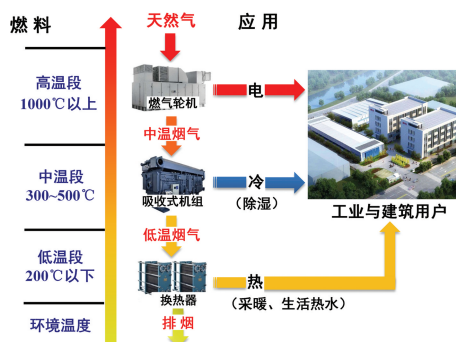


图1 能的梯级利用及分布式冷热电联产体系

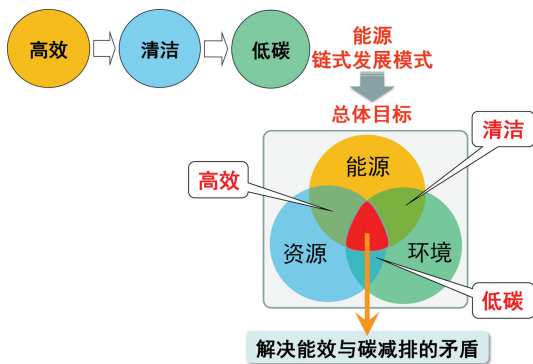


图 2 构建高效、清洁、低碳三位一体的能源发展新模式

输配与利用模式,以风力和光伏发电为例,由于这类能源的不稳定性以及电力输出通道建设的相对滞后,导致弃风弃光问题非常突出<sup>[18]</sup>。未来随着可再生能源的并网比例不断攀升,这种在源(电源)网(电网)荷(负荷)三者之间的不匹配性也将逐渐扩大,“源—网—荷”上下游之间各环节强关联在线(On-Line)链接关系的弊端愈发突出,调节难度亦越大,应实现源网荷解耦运行,构建“源—网—荷”离线(Off-Line)柔性链接模式。

#### 1.4 分布式能源系统发展现状

分布式能源系统作为集中式供能体系的有机补充,靠近用户侧,通常实现冷热电联供,也为实现“源—网—荷”的解耦运行和提高能源供应可靠性发挥了重要作用。对现有的分布式能源系统进行调研表明,其一次能源利用率基本达到了国家能源局所要求的 70%,然而这些分布式能源系统的燃料节省一般在 5~10%,与 20~40% 的国际先进目标还存在较大差距,如何实现能源的高效转化仍然是发展分布式能源技术所需面对的重要挑战。

分布式能源系统的容量虽小,但涉及发电和余热回收等多个单元,主要设备还依赖进口;另外,微小型动力设备的效率偏低,在中低温余热利用方面还存在技术断层;同时,因用户侧冷热电负荷需求的动态波动性,系统面临变工况性能大幅下降等难题,复杂性和非线性突出,需要完善全工况主动调控策略;在发展多能互补分布式能源系统的同时,太阳能、风能和地热能等可再生能源的能量密度偏低且不稳定,如何实现高效互补等问题亟待解决<sup>[19-22]</sup>。

常规以化石能源为主导集中式供能的能源发展模式已不能适应高效、清洁、低碳的经济社会发展,能源动力系统的发展越趋向于多领域渗透和多目标综合,能源科学也与环境、化工等其他相关学科相互

交叉。对此,探索建立能够突破物理能梯级利用范畴的能量转化利用新原理,实现能源利用与环境协调相容迫在眉睫。

## 2 多能互补分布式能源系统理论与方法

20 世纪 80 年代初,我国著名科学家吴仲华先生就倡导了总能系统的概念,提出各种不同品质能源要合理分配、对口供应,提倡按照“温度对口、梯级利用”的能源利用原则,做到各得其所<sup>[23]</sup>。物理能的梯级利用还可以进一步扩展到化学能与物理能的综合梯级利用,实现多层次不同品位化学过程与热力循环的有机结合,为实现资源、能源与环境协调发展提供科学支撑。

### 2.1 燃料化学能释放新方法

热力循环中可用能损失最大的部分来源于燃料燃烧过程,化学能通过火焰燃烧进行释放不仅造成了巨大的可用能损失,而且也是有害排放物的主要产生源,原有的“链式串联”发展模式难以支撑未来的可持续发展。打破传统的火焰燃烧方式,寻求新的燃料能量释放机理,探讨和开拓一种既能提高能源利用率又同时能解决环境生态问题的新型能源利用形式更富创新意义。

实现燃料化学能的有效利用是发展先进能源动力系统所面临的重要难题之一,也是提升当前能源利用效率的重要突破口。通过化学和环境学的交叉,积极探索研究新型能量释放机理,并同步关注污染物控制,包括燃料重整等实现化学能可控转化、燃料分级转化等化学能梯级释放、化学链燃烧等新型无火焰燃烧,将减少燃烧过程能的品位损失和有害物排放量,实现燃料源头节能,也将成为同时解决能源效率和环境污染两大问题的关键技术。

能量的品位是能量在某种状态下经过可逆过程变化到环境基态时的变化量  $dE$  与能量变化量  $dH$  的比值,如式(1),能的品位  $A$  由能量的状态所确定<sup>[24]</sup>。

$$A = \frac{dE}{dH} \quad (1)$$

燃料重整过程将含碳燃料的直接燃烧过程分解为与不同品位热能相整合的非产功吸热反应和高温放热反应,例如甲烷等的干重整和湿重整反应,如式(2)和式(3)所示。在燃料高品位的化学能区域内,通过吸热反应使其转换成含  $H_2$  和  $CO$  的合成气,完成燃料品位由  $A_{ch1} \rightarrow A_{ch2}$  的转化,如图 3 所示。一方面后续的合成气燃烧降低了化学反应作功能力品位

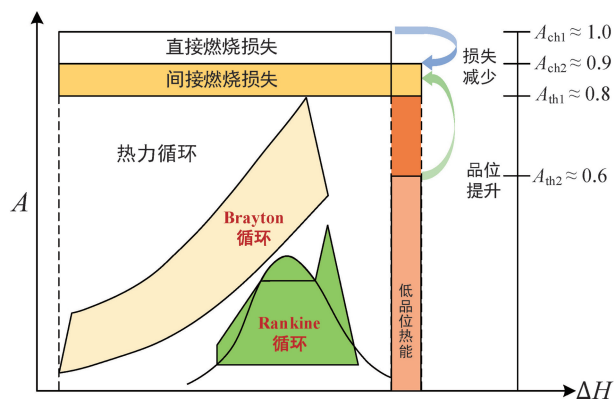
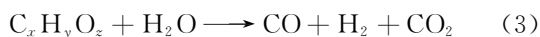


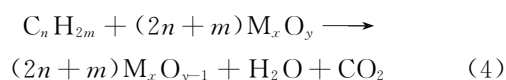
图3 燃料化学能梯级利用原理示意图

与物理能的品位差,品位差由直接燃烧时的  $A_{ch1} - A_{th1}$  降低至  $A_{ch2} - A_{th1}$ ;另一方面,充分利用燃烧反应较高的作功能力来提升中低品位反应热的作功能力(品位)  $A_{th2} \rightarrow A_{ch1}$ ,并在合成气燃烧中能够以高品位热能形式予以释放,有效提高了中低温热能的作功能力。通过此类反应途径,也实现了燃料化学能间接释放,改变了传统燃料化学能直接通过燃烧转化的利用形式,有效降低了燃料的化学能释放品位,达到减少燃烧过程不可逆损失的目的,并实现燃料燃烧反应作功能力品位的有效利用与中低温热能品位提升的有机结合。

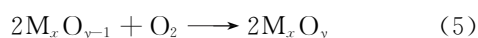


另外,在化学链等无火焰燃烧反应中,通过相互关联气体燃料与含氧固体氧化剂的还原与再生化学反应,将有序释放燃料化学能,如式(4)和式(5)所示<sup>[6]</sup>。空气中的氧气组分通过含氧固体氧化剂进行传递,避免了燃料与空气的直接接触,在采用天然气、合成煤气等含碳燃料时,也将实现  $CO_2$  产物的富集与无能耗分离回收,协同了能源转换利用与污染物控制过程,也从根本上改变传统的污染物分离理念。为此,通过进一步揭示能源转换系统中  $CO_2$  的形成、反应、迁移、转化机理,将实现清洁能源生产和  $CO_2$  分离一体化以及燃烧过程革新等。

燃料侧:



空气侧:



## 2.2 能的综合梯级利用原理

长期以来,热力循环的研究主要关注于卡诺循环效率曲线的下方,即物理能的综合利用部分,然而

热力系统中损失最大之处并非发生在物理能的传递与转化过程,而是发生在化学能转化为物理能的燃料燃烧过程,同时也是污染物和  $CO_2$  生成的源头。通过高温加热的布雷顿循环与低温排热的朗肯循环相结合,实现了物理能梯级利用,如图4所示,其联合循环热效率能达到60%以上,然而在高温区卡诺循环效率随温度的上升空间变窄,即便进一步提高循环初温,对于提高物理能利用效率和减少燃烧过程损失的效果将越来越微弱。

随着能源科学的不断发展,起始于经典热力学理论,能量在“量”、“质”和“势”等多个层面的理解逐渐深入,对能量其本质的认识也更加深刻,由此进一步发展了能量转化利用新理论,也将为实现能源的高效综合梯级利用奠定了理论基础<sup>[25]</sup>。

能的最大作功能力的有效转化涉及与吉布斯自由能变化紧密联系的化学反应和与热利用相关的热力循环,如式(6)所示。

$$dE = dG + TdS\eta_c \quad (6)$$

通过控制燃料品位的热化学反应逐级利用了燃料化学能,改变了燃料化学能通过直接燃烧方式单纯转化为物理能的传统利用模式,例如燃料重整和化学链无火焰燃烧等,将降低化学能与最终要转化的能量之间的品位损失,也成为提升循环性能潜力的关键所在。在能源转化源头实现燃料化学能的梯级利用,燃料化学能品位与卡诺循环效率之间的品位差是可利用的,改变了通过提高循环初温来提高物理能接收品位的单一思路。在提升燃料化学释能过程高效性的同时,可继续结合不同能量转换环节的品位差异,集成化工动力和吸收式制冷等,实现化学能与物理能的综合梯级利用。目前,在能的综合梯级利用领域有望获得突破的技术途径包括:

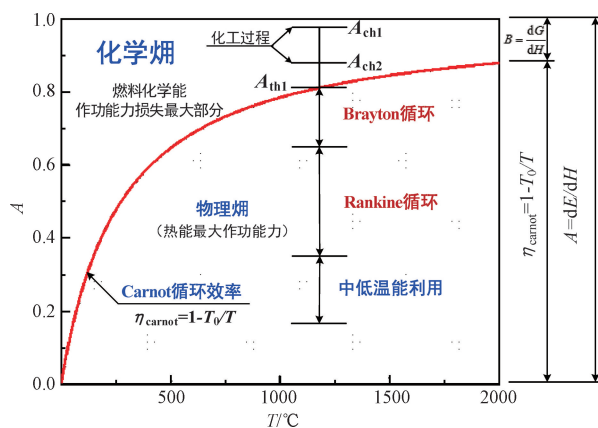


图4 广义总能系统中能的综合梯级利用概念图

(1) 热转功的热力循环与化工等其他生产过程有机结合,探讨热能(工质的内能)与化学能的有机结合、综合高效利用,注重温度对口的热能梯级利用,还可以有机地结合化学能的梯级利用,突破传统联合循环的概念,以实现领域渗透的系统创新;

(2) 热力学循环与非热力学动力系统有机结合,例如将燃料化学能通过电化学反应直接转化为电能的过程(燃料电池)和热转功热力学循环有机结合,实现化学能与热能综合梯级利用等。

### 2.3 多能互补利用新思路

随着能源高效利用与环境相容发展的迫切要求,单一能源输入和单一能源输出的常规利用方式无法满足多元化的能源发展需求。综合考虑不同能源资源的独特属性,基于能的综合梯级利用原理,通过多能互补的利用方式能够充分发挥各自优势,扬长避短,从而提高能源利用效率和降低污染物排放。多能源互补将实现不同种类能源和燃料的相互补充与综合利用,既包括不同种类能源的互补,也包括同一类能源不同种类燃料之间的互补,如图 5 所示。在保障不同能源系统之间的物理能在“数量”和“品位”层面满足“对口互补”以外,也要兼顾化学能利用过程的能量品位互补。另外,可再生能源借助与化石能源互补的综合利用,能够有效地克服其低能量密度、不稳定和不连续等固有特性,也为实现可再生能源的高效及低成本推广应用提供了全新思路。

太阳能等可再生能源将在未来的能源供应体系中占据重要地位,有望成为社会发展的原动力。太阳表面温度约为 6 000 K,聚光的太阳能有着较高的能量品位,然而在传统太阳能发电技术中仍然采用工作温度为 370~560℃ 的蒸汽朗肯循环,延续高参数大容量的传统能源利用模式,使得在太阳能聚

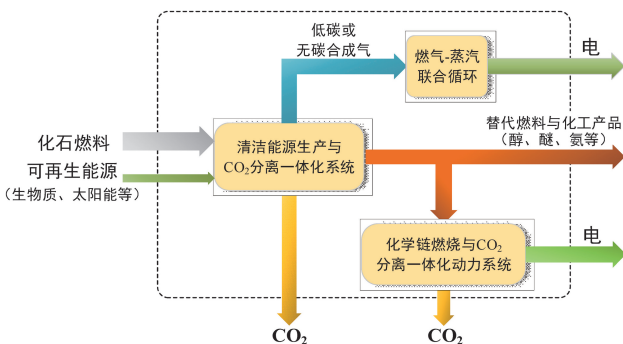


图 5 多能互补梯级利用与污染物控制的典型总系统示例

光与吸热过程存在着巨大的不可逆损失。另外,与燃料化学能不同,太阳能的辐照强度和光线入射角度随时间、季节以及气候等因素发生实时动态变化,致使太阳能集热效率和系统变工况性能较差。当前,聚光太阳能的能势与最大作功能力等基本理论还不明晰,其具有不同频率的光谱,也意味着具有不同品位和能势的能量,面对高品质的太阳能,现有的光能与循环方式不匹配,也严重制约太阳能的高效利用,需要进一步探讨新型动力循环和动力机械装置,突破聚光太阳能动力循环瓶颈。在实现太阳能与化石能源互补时,包含聚光热能与热力循环的热互补,以及驱动化石燃料进行分级转化的热化学互补,将结合不同燃料的能势特性优化互补方式,实现多能互补的能量互补,以及品位和能势的耦合。例如,驱动甲醇重整/裂解制氢的中低温太阳能热化学互补转化,其原理如图 6 所示,将梯级释放甲醇燃料化学能并显著提升中低温太阳热能品位,进而实现太阳能提质增效及平抑动态波动等目的。

多能互补利用过程,包含了多种能源和资源输入,并具有多种能源产品输出等能力,通过集成冷热电联产过程将深化物理能的高效利用,满足多元化的能源需求。进一步还能与各类化工生产过程紧密结合,并完成对污染物和 CO<sub>2</sub> 的有效分离、回收和利用,从而兼顾动力与化工、环境等协调发展,也为在分布式供能系统中实现多能互补和能的综合梯级利用指明了方向。

### 3 多能互补分布式能源发展现状与难题、发展方向

开展高效、清洁、低碳三位一体的能源技术变革是历史必然,通过构建“分布式—智能微网—多能互补—需求侧消纳”的能源生产及供应体系,将缓解能效提升与碳减排之间的矛盾、提高可再生能源的消纳能力,并有望解决当前因过于追求大规模发电、长

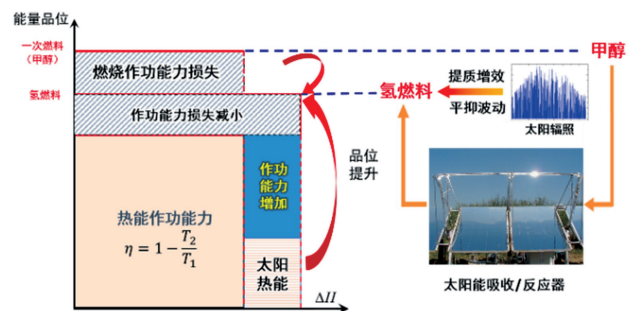


图 6 中低温太阳能热化学驱动甲醇重整/裂解制氢

距离输电所引起的“源—网—荷”不平衡等难题。

### 3.1 多能互补分布式能源系统发展困境

目前已在多能源互补和分布式能源系统等领域开展了较为深入的基础研究,但在推动分布式能源技术产业化应用时,在认识、技术和政策等层面仍然面临着多方面的难题,利用方式仍继续延续传统能源理念,严重制约了能源效率提升和产业健康发展。

(1) 认识层面:推广多能互补分布式能源技术,涉及电网、发电、石油、天然气、热力和设备制造等多个行业,各方对该项技术的认识和理解未达成统一共识,阻碍了该技术的快速发展;

(2) 方式层面:继续延续传统能源系统的设计理念,重功能、轻技术,当前的分布式能源系统多以燃气发电机组为主,传统的燃料燃烧利用方式效率仍然偏低;

(3) 技术层面:能量转化单元简单集成,涉及燃料转化、动力、制冷热泵、储能和低温余热利用等环节,主动调控难度尤为突出,多能互补的技术优势未得以充分发挥;

(4) 非技术层面:受到我国“多煤少油缺气”资源禀赋的影响,用于分布式能源的天然气资源量有限,行业利益冲突明显,其价格波动也对分布式能源技术的发展产生较大影响;

(5) 政策层面:未制定出统一的行业标准,在并网电价、节能激励和碳减排等方面的政策滞后;

(6) 发展层面:未掌握微小型动力装置等关键技术,油、气、电、热行业利益分配不够明确,企业激励体制和技术开发投入不足。

### 3.2 多能互补分布式能源的关键科学问题和研究内容

面对新时期节能减排的国家重大需求,现有的能源动力系统发展面临着新挑战,针对目前分布式能源系统节能率偏低等科技难题,应当继续从学科交叉与领域渗透出发,以能的综合梯级利用理论研究为主线,结合可再生能源高效转化,以多能互补的能势匹配为突破口,探索研究多能互补分布式能源系统中能的综合梯级利用、高效动力转换、余热利用和变工况调控的理论与方法,具体的关键科学问题包括:(1) 多能源互补的能势匹配与能的综合梯级利用原理;(2) 燃料电池中电化学与热转化的协同机制与方法;(3) 多能互补的正逆循环耦合理论;(4) 热化学储能与主动调控的理论与方法;(5) 源网荷匹配的重构。

多能互补的分布式能源系统有着更为典型的复

杂系统特性,涉及的能量转化环节过多,其非线性尤为突出,在能源转化、利用和运行调控等方面仍然面临诸多亟待突破的难题,这些重点领域也将可以作为本学科重要的资助方向布局,其中主要包括:

(1) 燃料高效转化:燃料化学能梯级利用方法,例如天然气中温重整、动力余热驱动甲醇分解等;

(2) 高效动力装置:高效内燃机、燃气轮机和燃料电池发电技术,中低热值合成气燃烧及动力装置燃料适应性,化学回热发电系统,燃料电池等技术;

(3) 动力余热梯级利用:有机朗肯循环,吸收式制冷与热泵一体机,吸收式与压缩式复合热泵技术,第二类热泵,液体吸收式除湿等;

(4) 储能技术:储电、储热、储冷技术,燃料化学储能技术,移动式储能技术等;

(5) 分布式能源系统主动调控:燃料转化、动力与制冷制热的变工况性能调节,储能与系统性能动态调控方法;

(6) 污染物控制技术:内燃机余热脱硝模块化技术等;

(7) 多能源互补:天然气、甲醇等化石能源转化与聚光太阳能耦合,光伏、风电与聚光太阳能耦合技术等;

(8) 系统集成与控制:模块化成套技术,智能化控制技术,智能微网技术等。

## 4 结 语

本次论坛深入分析了当前能源利用所存在的问题和未来多能互补分布式能源系统的发展方向,探讨了适合分布式能源的燃料化学能释放与能的综合梯级利用机理,并分析和凝练了多能互补分布式能源基础研究的关键科学问题和重要研究方向。本次论坛针对多能互补耦合、分布式能源动态调控机制开展了深入讨论,论坛讨论的成果将为构建能势与循环耦合的理论框架、发展新型分布式能源技术、实现能源环境相容的可持续发展提供理论支撑和科学指导。

## 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年). [http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_240246.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240246.htm).
- [2] 徐建中. 科学用能与分布式能源系统. 中国能源, 2005, 27(8): 10—13.
- [3] Wu DW, Wang RZ. Combined cooling, heating and power: A review. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(5—6): 459—495.

- [4] Cho H, Smith AD, Mago P. Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization. *Applied Energy*, 2014, 136: 168—185.
- [5] 金红光, 洪慧, 王宝群, 等. 化学能与物理能综合梯级利用原理. *中国科学: 技术科学*, 2005, 35(3): 299—313.
- [6] Hong H, Han T, Jin HG. A low temperature solar thermochemical power plant with CO<sub>2</sub> recovery using methanol-fueled chemical looping combustion. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, 2010, 132(3): 031002.
- [7] Han W, Jin HG, Lin RM. A novel multifunctional energy system for CO<sub>2</sub> removal by solar reforming of natural gas. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, 2011, 133(4): 041004.
- [8] 孙秋野, 滕菲, 张化光, 等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3667—3677.
- [9] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术. *电网技术*, 2016, 40(386): 124—134.
- [10] 姚啸林, 付昶, 施延洲, 等. 百万等级超超临界二次再热机组整体经济性研究. *热力发电*, 2017, 46(8): 16—22.
- [11] Wang X, Jin M, Feng W, et al. Cascade energy optimization for waste heat recovery in distributed energy systems. *Applied Energy*, 2018, 230: 679—695.
- [12] 金红光, 隋军, 徐聪, 等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究. *中国电机工程学报*, 2016, 36(12): 3150—3161.
- [13] 谢克昌. 科学认识煤化工 大力推进煤的清洁高效利用. *能源与节能*, 2011, (2): 1—2.
- [14] Liang XY, Wang ZH, Zhou ZJ, et al. Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 39: 24—31.
- [15] Fan JL, Xu M, Li FY, et al. Carbon capture and storage (CCS) retrofit potential of coal-fired power plants in China: The technology lock-in and cost optimization perspective. *Applied Energy*, 2018, 229: 326—334.
- [16] Rubin ES, Mantripragada H, Marks A, et al. The outlook for improved carbon capture technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(5): 630—671.
- [17] 电力规划设计总院. 中国能源发展报告 2018. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [18] 周强, 汪宁渤, 冉亮, 等. 中国新能源弃风弃光原因分析及前景探究. *中国电力*, 2016, 49(9): 7—12+159.
- [19] 金红光, 郑丹星, 徐建中. 分布式冷热电联产系统装置及应用. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [20] 韩雪, 任东明, 胡润青. 中国分布式可再生能源发电发展现状与挑战. *中国能源*, 2019, 41(6): 32—36+47.
- [21] 金红光, 隋军. 可再生能源的热利用与综合利用. *中国科学院院刊*, 2016, 31(2): 208—215.
- [22] Feng LJ, Dai XY, Mo JR, et al. Analysis of energy matching performance between CCHP systems and users based on different operation strategies. *Energy Conversion and Management*, 2019, 182: 60—71.
- [23] 吴仲华. 能的梯级利用与燃气轮机总能系统. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [24] Ishida M, Kawamura K. Energy and exergy analysis of a chemical process system with distributed parameters based on the enthalpy-direction factor diagram. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21(4): 690—695.
- [25] 金红光, 林汝谋. 能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统. 北京: 中国科学出版社, 2008.

## Theory and Technology of Multi-energy Complementary Distributed Energy System: Summary of the Research Progress and Development Trend

Jin Hongguang<sup>1,2\*</sup>    Liu Qibin<sup>1,2</sup>    Sui Jun<sup>1,2</sup>

1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** According to the discussion of the 233<sup>rd</sup> Shuangqing Forum held by National Natural Science Foundation of China (NSFC), this paper focuses on the efficient-clean-low carbon utilization and the environment friendly-energy compatible development of energy power systems, reviews the main problems

\* Corresponding Author, Email: hgjin@mail.etp.ac.cn

existing in the current energy utilization in China, and points out that the efficient integration of distributed energy system and large-scale centralized energy supply is the development direction of energy system in the future. The principles and methods of the development of multi-energy complementation distributed energy system are discussed, the key scientific problems to be solved and important research directions in the development of multi-energy complementation distributed energy system are identified, and the NSFC funding support suggestions on this area in the next 5~10 years are provided.

**Keywords** multi-energy complementation; distribute energy system; energy cascade utilization; renewable energy

(责任编辑 张强)

· 成果快报 ·

## 我国学者在用于高性能电子学的高密度半导体阵列碳纳米管研究方面取得进展

在国家自然科学基金项目(批准号:61888102)等资助下,北京大学信息科学技术学院电子学系/北京大学碳基电子学研究中心、纳米器件物理与化学教育部重点实验室张志勇、彭练矛教授课题组与湘潭大学湖南省先进传感与信息技术创新研究院、浙江大学、北京大学纳光电子前沿科学中心等单位合作,在用于高性能电子学的高密度半导体阵列碳纳米管研究方面取得进展,相关研究成果以“用于高性能电子学的高密度半导体碳纳米管平行阵列”(Aligned, high-density semiconducting carbon nanotube arrays for high-performance electronics)为题,于2020年5月22日在线发表在《科学》(*Science*)上。论文链接:<https://science.sciencemag.org/content/368/6493/850>。

集成电路的发展要求互补金属氧化物半导体(CMOS)晶体管在持续缩减尺寸的同时提升性能、降低功耗。随着主流CMOS集成电路缩减到亚10 nm技术节点,采用新结构或新材料对抗场效应晶体管中的短沟道效应,以进一步提升器件能量利用效率变得更加重要。半导体碳纳米管具有超高的电子和空穴迁移率、原子尺度的厚度和稳定的结构,是构建高性能CMOS器件的理想沟道材料。碳管集成电路批量化制备的前提是实现超高半导体纯度(>99.9999%)、超顺排(取向角<9°)、高密度(100~200 / $\mu\text{m}$ )、大面积均匀的碳纳米管阵列薄膜。

研究团队发展了一种全新的提纯和自组装方法,用于制备高密度高纯半导体阵列碳纳米管材料。并在此基础上首次实现了性能超越同等栅长硅基CMOS技术的晶体管和电路,展现出碳管电子学的优势。采用多次聚合物分散和提纯技术得到超高纯度碳管溶液,结合维度限制自排列法,在4英寸基底上制备出密度为120 / $\mu\text{m}$ 、半导体纯度高达99.99995%、直径分布在 $1.45 \pm 0.23$  nm的碳管阵列,从而达到超大规模碳管集成电路的需求。基于这种材料,批量制备出场效应晶体管和环形振荡器电路:100 nm栅长碳管晶体管的峰值跨导和饱和电流分别达到 $0.9 \text{ mS}/\mu\text{m}$ 和 $1.3 \text{ mA}/\mu\text{m}$ ( $V_{\text{DD}}=1 \text{ V}$ ),室温下亚阈值摆幅为90 mV/DEC;批量制备出五阶环形振荡器电路,成品率超过50%,最高振荡频率8.06 GHz,超出已发表基于纳米材料的电路10倍以上,且超越了相似尺寸的硅基CMOS器件和电路。

近三年来,在国家自然科学基金等支持下,该课题组在《科学》(*Science*)上相继发表5 nm栅长碳管CMOS器件(2017年1月)、作为高能效和高性能电子开关的狄拉克源场效应晶体管(2018年6月)等一系列碳纳米管电子学的重要研究成果,为推进碳基集成电路的实用化发展奠定了基础。

(供稿:信息科学部 唐华 张志勇 宋朝晖)