面向煤基低碳能源战略的大规模风/光－氢储能－煤多能耦合系统

煤基低碳是煤炭富集省区低成本、可持续实现能源供给侧结构战略调整的必然要求。阐述能源系统演进规律，面向山西省、新疆省等新能源和煤碳富集省区的煤基低碳能源战略，提出以大规模风/光互补电解水制氢储能为桥梁，构建清洁高效风/光－煤能源系统创新策略。以山西省为例，探讨基于大规模氢储能技术的煤基低碳能源系统的资源需求，高比例/100%新能源电力系统中大规模氢储能系统所需要解决的关键支撑技术，为包括山西省在内的煤炭富集省区的煤基低碳能源战略的实现提供借鉴。

袁铁江[1] 彭生江[2] 胡克林[3] 杨 南[1]/1.大连理工大学电气工程学院 2.华北电力大学经济与管理学院 3.新疆维吾尔自治区科学技术厅

袁铁江/教授

关键词/Keywords
煤基低碳能源战略·
新能源·
氢储能系统·
多能耦合系统·
电解制氢·

0 引言

自18世纪以煤为燃料驱动的蒸汽机诞生以来，人类对煤、石油等传统化石能源的利用已接近200年，煤基重碳构成了中国、南非等世界煤炭储量丰富国家能源系统的典型特征，在这些国家内部煤炭资源富集区域的经济与能源结构中，煤炭工业比重大。例如中国山西省，与煤碳相关的产业长期以来在全省国民经济中处于举足轻重的地位。煤基重碳能源系统极大地推动了人类文明的进步，也支撑了煤炭富集地区的经济繁荣。传统上煤炭主要通过燃烧取暖、发电或者本质上是氢富集过程的煤制烃类化合物的利用方式，构成火力发电为主的电力能源系统、汽油/柴油/煤油内燃机为主的交通能源系统、燃煤为主的热力能源系统和煤/油基原料为主的工业能源系统等，具有环境破坏大、能耗率高以及资源约束强等弊端，难以为继。

国家自然科学基金资助项目“氢储能耦合分散式风电消纳研究”（51577163）

为了克服煤基重碳能源系统的弊端，新型能源系统创新方案不断被提出，主要成果表现为风/光等新能源发电为主的电力能源系统、电动汽车为主的交通能源系统的产生。随之而来的两个问题需要解答：①风、光等新能源能否承担起传统化石能源承担的任务；②如果问题①的答案是否定的，那么新能源为主的时代，煤基重碳能源系统如何“重生”。

1 能源系统演进规律

自第一次工业革命以来，煤基重碳能源系统基本形态的演变总体上历经了如下三代。

1.1 第一代煤基重碳能源系统

如图1所示，能源系统一次能源主要以煤炭为主，能源的利用形式主要为煤碳作为燃料利用，为人类生产、生活提供热能和电力，构成燃煤蒸汽涡轮发电为主的电力能源系统、燃煤锅炉驱动的热力能源系统、燃煤蒸汽锅炉驱动轮船、火车等为主的交通能源系统以及燃煤（冶炼）或以煤为原料的工业生产能源系统。

这个阶段能源系统支撑人类文明进入机械化时代，社会生产力得到了极大提高，但是能源系统效率很低，污染严

重，突出表现为交通能源系统的小型化困难，交通能源系统主要应用于轮船和火车等大型交通工具。

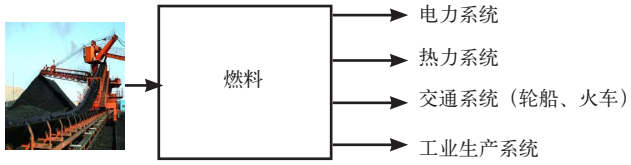

图1 煤基重碳能源系统Ⅰ

第一次工业革命之前，人类主要利用木材燃烧产生的热来加工食物和取暖，而煤炭是碳化后的木材，因此，这个阶段的人类依赖的能源系统可以归为图1中煤基重碳能源系统Ⅰ的简化版本，其输出只有供热系统。

1.2 第二代煤基重碳能源系统

如图2所示，演进后的煤基重碳能源系统一次能源主要以煤炭、石油和天然气等化石燃料为主，能源的利用形式为化石燃料作为燃料和原料利用，为人类生产、生活提供热能、电力和原料，构成燃煤蒸汽涡轮发电为主的电力能源系统、燃煤锅炉为主的热力能源系统、石油内燃机驱动为主的交通能源系统以及煤/油/气为主要原料的工业生产能源系统。

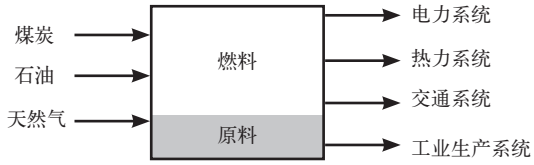

图2 煤基重碳能源系统Ⅱ

石油和天然气主要包含碳和氢两种成分，因此，相较于煤基重碳能源系统Ⅰ，煤基重碳能源系统Ⅱ的一次能源种类更多、碳含量更低，石油、天然气等碳含量较低的化石燃料广泛应用于交通能源系统，高效、小型化的交通能源系统支撑了轮船、火车、汽车和飞机等现代化交通工具的运行。此外，化石能源还大量用于工业生产的原料。

1.3 第三代煤基重碳能源系统

如图3所示，演进后的煤基重碳能源系统一次能源除了化石能源外，还有风、光为代表的可再生能源，能源的利用形式为化石燃料作为燃料和原料利用，可再生能源发电，构成燃煤蒸汽涡轮发电和可再生能源发电混合的电力能源系统、化石能源锅炉和电热混合的热力能源系统、化石能源内燃机和电力混合的交通能源系统以及煤/油/气为主要原料的工业生产能源系统。

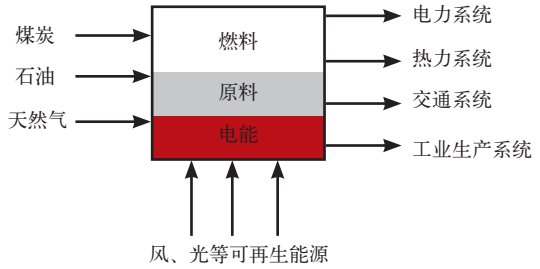

图3 煤基重碳能源系统Ⅲ

第三代能源系统中，风/光等清洁可再生能源的加入，一次能源侧进一步降低了碳含量，输出侧电气化特征更加显著。

能源系统基本形态的演变经历了一个长期过程，总的来看遵循了脱碳、重碳化石能源主要以燃料和原料两种形式被利用的演进规律。

2 煤基低碳能源战略——煤炭富集省区低成本、可持续发展的必由路径

“一煤独大”是对如山西省这样的典型煤炭富集省区经济结构的高度概况。从宏观上看，其能源系统包含了第三代煤基重碳能源系统的全部特征，但是整个能源系统和国民经济中的碳含量远远高于社会平均水平，尤其是煤炭在能源生产和消耗结构中长期处于绝对优势地位。在人类面临愈加严峻的气候变化和环境保护挑战面前，以煤为主的传统煤炭富集省区形成了强有力的倒逼，探索一条低成本、可持续的能源发展路径迫在眉睫。

经济发展离不开资源的约束，煤炭是煤炭富集省区最大的、也是最有竞争力的资源，山西省等煤炭富集省区低成本、可持续发展路径的设计，还是要立足于煤炭这个资源基础，“煤基”这个关键词不能丢。然而，根据能源系统脱碳的演进规律，煤炭富集省区发展路径需要减少煤炭的消耗，“低碳”是山西省等煤炭富集省区进行低成本、可持续发展路径设计时理应包含的关键词。因此，“煤基低碳”是山西省等煤炭富集省

区低成本、可持续能源发展战略的必由路径。煤基低碳能源发展路径的关键问题是如何减少能源系统中的碳含量，才能够实现低成本和可持续的约束或者目标。

煤炭作为燃料利用时，其产出主要是电能和热能，风/光等新能源发电，电能可以便捷地转变成热能。仅从功能上看，风/光等新能源替代煤炭作为燃料的功能，基于第三代煤基重碳能源系统的架构，实现能源系统的碳含量降低是有可能的。

第三代煤基重碳能源系统中，煤炭作为原料利用，包括：用于钢铁等行业的主要生产原料；作为一种复杂有机碳烃大分子物质，具有从石油或人工合成难以得到的特殊芳香结构，是碳纤维、针状焦和炭黑等煤基碳素材料的原料；作为化工产品原料等。从目前的技术现状来看，煤炭作为原料的功能短时间内是新能源无法替代的。

综上所述，面向山西省等煤炭富集省区低成本、可持续的能源发展战略的煤基低碳能源系统的基本架构如图4所示。

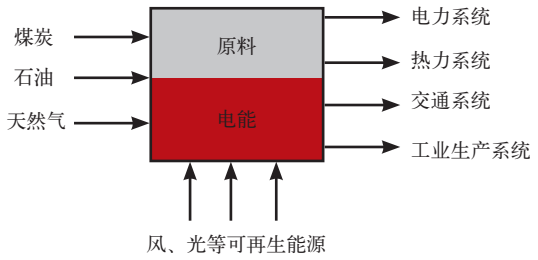

图4　煤基低碳能源系统

从图4中可以看出，基于本地资源约束的一次能源主要为煤炭和清洁可再生的风、光等新能源，煤炭主要作为原料利用，电能主要来自于可再生能源发电，构成基于含大规模新能源发电系统的电力能源系统、主要基于电转热的热力系统、主要基于电力能源（但并不一定是电力驱动）的交通能源系统以及煤为主要原料的工业生产能源系统。

3　煤基低碳能源系统的创新实现策略

由于风/光等新能源发电具有随机、间歇和波动等特性，面向煤基低碳能源系统的高比例乃至100%新能源电力系统面临清洁与稳定、经济与可靠矛盾等挑战。利用灵活的电解水制氢，等效充电、氢气和氧气存储，等效储电/能、氢/氧及其衍生物发电和氢耦合原料煤等多途径综合利用，等效放电特性，储能容量可以高达千万千瓦时以上，持续充放电数周的电网级长时间尺度氢储能技术是解决这些问题的有效技术手段。

现有技术条件下，煤化工等煤基原料工业生产系统中的大部分产业本质上是“氢”的富集和利用，按传统工艺需要排放大量的CO_2，耗费大量的能源。例如，传统煤化工工艺生产1 t甲醇，排放CO_2为2.5 t，耗煤约为1.6 t。在煤基低碳能源系统中，支撑高比例乃至100%新能源电力系统清洁与稳定、经济与可靠运行的大规模氢储能系统存储的氢气和氧气，天然地构成了煤化工等煤基原料工业生产系统所需要的二次能源系统。以大规模氢储能系统为桥梁，可以从产业链上将煤基低碳能源系统的一次能源系统中的煤与风、光等新能源耦合在一起，构成低碳风/光－煤工业生产系统，进一步降低整个能源系统的碳含量。

因此，煤基低碳能源系统的创新实现策略可以概况为：以大规模风/光－电解水制氢储能为桥梁，构建基于高比例/100%新能源电力系统高效、可靠和稳定供电的“风/光－煤能源系统”，实现风、光等新能源和煤资源在产业链上的整合、互补。具体包括：在我国山西省等煤碳资源富集地区，构建高比例/100%新能源电力系统供电的吉瓦级“清洁高效风/光－煤能源系统”，系统中：电能从风/光来，原料(泛指生产和生活需要的众多碳氢化合物CH_x)从煤来，大规模电解水制氢储能电站是清洁电能高效、可靠和稳定供给的“调节器”和原料煤的“清洁工”。清洁高效风/光－煤能源系统的基本架构如图5所示。

4　案例分析

4.1　基于氢约束的煤炭消耗量和新能源电站装机容量概算

4.1.1 山西省电力系统及新能源发电现状

（1）装机容量

截至2018年9月底，山西省电力总装机容量为

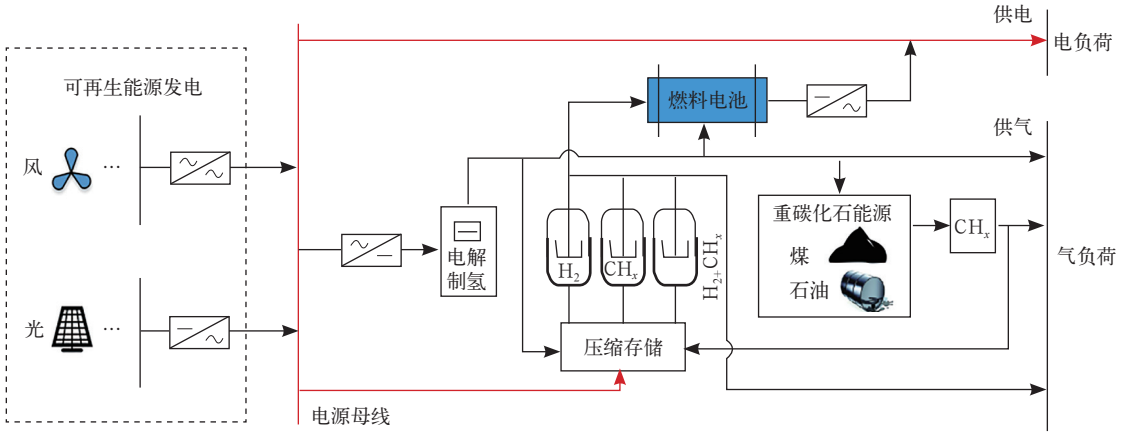

图5 清洁高效风/光－煤能源系统的基本架构

8 473.52万kW。其中：火电装机容量为6 468.83万kW，水电装机容量为222.75万kW，风电装机容量为978万kW，光伏发电装机容量为803.94万kW。

（2）负荷及发电量情况[1]

2018年最大负荷预计接近4 000万kW，全年发电量预计超过3 000亿kW·h（含外送电量约为900亿kW·h）。其中，风力、光伏发电量预计超300亿kW·h；水电发电量预计近40亿kW·h。

山西省承诺全年弃风、弃光率控制目标为4.2%[2]。此外，依据山西省人民政府发布的《山西省“十三五”综合能源发展规划》，到2020年全省新能源发电装机规模为3 800万kW，非化石能源消费占一次能源消费比重达到5%以上。其中，全省风电装机容量为1 600万kW，光伏发电装机容量为1 200万kW[3-4]。

4.1.2 煤炭消耗现状

在我国大力推行供给侧改革和能源清洁化的大政策背景下，山西省针对该省煤炭产能过剩情况采取了强有力的措施，2016年、2017年累计削减产能4 065万t，关闭43座煤矿山；在产量削减上，2015年全省规模原煤产量为95 375.6万t，2016年全省规模原煤产量为83 043万t，2017年1~11月全省累计产量为81 094万t，同期上涨3.3%，从侧面反映去产能的困难，需要重新构建能源消费系统，需求新的替代煤炭资源的新能源产业。

近年来，山西省省内国民经济生产年消耗原煤30 000万t，在煤基低碳能源系统架构下，近三分之一可以视作原料煤，折合为7 000万t标准煤[5]。

4.1.3 氢能市场预测

氢气的应用领域十分广泛，主要用于化工业中合成氨、甲醇以及石油炼化等过程的加氢反应。此外，在冶金工业、电子工业、浮法玻璃、食品加工、精细化工合成和航空航天工业等行业也得到广泛应用。目前，我国氢气作为直接产品或燃料的量较少[6]。

考虑氢气需求市场的规模和适用性的影响，根据优先级选定地点，将氢能利用途径的分类按照制氢点与用氢点之间的距离进行分类。短距离氢能利用主要为化工业；中距离氢能利用包括了城市天然气作燃气和氢能燃料电池汽车；长距离氢能利用为主干省际间的天然气输送管道掺氢。

（1）短距离用氢市场年需氢量估算

山西省年生产氮肥约450万t[8]，折合为合成氨的产量约为554.35万t。据中国石油和化学工业联合会最新数据统计显示，近年来，全国精甲醇年产量约为5 000万t，同比增长7.1%[9]，其中山西省精甲醇产量约为400万t。作为原料消耗的7 000万t原料煤假定均用来制甲烷，不考虑制取过程中氢气泄露以及其他消耗。

根据上述数据估算山西省短距离用氢市场年需氢量约为1 000万t。

（2）中距离用氢市场年需氢量估算

山西省保有公共汽车约为10 000辆，出租汽车约为30 000辆。按照现运营的氢燃料汽车运行情况，

在满载城市工况下，公共汽车百公里氢耗约为7~8 kg，取平均数7.5 kg，每天运行公里数为300 km[10]。出租汽车，在满载城市工况下，百公里氢耗约为1 kg，每天运行公里数为400 km。此处每年耗氢量约为11.54万t/年。此外，如表1所示，还有各类型载客和载货汽车约600万俩。从我国汽车燃料消耗量查询系统可以得到，小型客车的百公里耗油量为4~10 L，小型货车的百公里耗油量为6~11 L，普通重型货车的百公里耗油量为20 L。氢气的能量密度约为汽油的三倍，燃料电池的能源利用效率约为内燃机的1.75倍。常规载客汽车年平均行驶10 000km，载货汽车每天平均行驶300 km[11]。

表1 2017年山西省民用车辆数量统计

民用汽车种类	载客汽车			
	大型	中型	小型	微型
数量/万辆	3.34	1.25	507.0	14.09
比例 (%)	0.64	0.24	96.45	2.67
民用汽车种类	载货汽车			
	重型	中型	小型	微型
数量/万辆	26.76	1.29	35.57	0.31
比例 (%)	41.85	2.02	55.63	0.48

城市燃气管道掺氢可以替代日益增长的天然气需求。近年来，山西省城市供气情况数据如表2所示。在12T基准气条件下（华白数标准为50.73 MJ/m^3，燃烧势标准为40.3），为了不改变终端用户的燃具，混合气中氢气的最大允许体积分数为23%[12]。

表2 2014~2017年山西省城市燃气供应情况

类别	年份			
	2014	2015	2016	2017
天然气供气/亿m^3	17.76	24.74	26.11	31.63
人工煤气/亿m^3	4.69	3.95	3.07	5.99
液化石油气/亿m^3	6.96	6.62	3.36	9.08

根据上述数据估算山西省中距离用氢市场年需氢量约为220万t。

（3）远距离用氢市场年需氢量估算

西气东输西一线全长为4 200 km，管径为1 016 mm，设计压力为10 MPa，年设计输送量为170 × 108 m^3/年，经过临汾市蒲县和晋城市阳城县[13]。掺25%氢－天然气的混合气体在良好监管情况下不会增加爆炸引起的危险[14]。按照体积分数25%的比例掺氢，远距离用氢市场年需氢量约为38万t/年。

综上所述，短、中和远距离用氢市场，支撑山西省煤基低碳能源系统的年氢气耗量约为1 258万t，约为1 400亿N·m^{3}氢气，约需消耗6 000亿kW·h电能，约需风/光等新能源电站装机容量2.7亿kW（可以考虑输入邻近内蒙等地的新能源电能来满足），耗水1.4亿m^3（约相当于当地270万城市人口一年的生活用水量）。

由上述分析可知，基于煤基低碳能源系统及其创新实现策略的构想，一方面，海量增加的新能源电力需求可以有效提升国民经济的质量和数量，创造大量高质量的工作岗位，降低传统以煤炭作为燃料利用的产业退出过程对经济和社会的冲击，提供了经济上的可行性；另一方面，在确保环境保护目标实现的前提下，山西省已经探明的2 000多亿t煤炭储量可以确保当地乃至国家中、长期的发展需求，确保了这一战略的可持续性。

4.2 高比例新能源电力系统中大规模氢储能系统的关键技术

面向高比例乃至100%新能源电力系统的大规模氢储能系统，是确保基于清洁高效风/光－煤能源系统的煤基低碳能源系统创新策略经济性的技术基础，从理论和应用技术层面还面临诸多挑战，亟待解决，主要包括：

1）基于新能源和氢储能系统性能协调约束，大规模氢储能系统/电站构建及其大容量线性扩容集成与调控技术。

2）基于目标区域资源协调约束，大规模氢储能系统/电站并网规划理论和应用技术。

3）基于能源系统性能协调约束，大规模氢储能系统/电站并网调控运行理论和应用技术。

4）其他。

5 结束语

1）能源系统的演进遵循脱碳、重碳化石能源主要以燃料和原料两种形式被利用的基本规律，

因此，基于大规模氢储能技术的清洁高效风/光－煤能源系统创新实现策略的煤基低碳能源系统，是支撑煤炭富集省区低成本、可持续实现能源供给侧结构战略调整的可行技术路径。

2）基于大规模氢储能技术的清洁高效风/光－煤能源系统创新实现策略的煤基低碳能源系统，在确保环境保护目标实现的前提下，为包括山西省在内的煤炭富集省区的能源可持续发展战略的实现提供了技术支撑。

3）面向高比例乃至100%新能源电力系统的大规模氢储能系统，是确保基于清洁高效风/光－煤能源系统的煤基低碳能源系统创新策略经济性的技术基础，从理论和应用技术层面还面临诸多挑战亟待解决。

参考文献

[1] 山西省工业和信息化厅．行业数据[EB/OL]．[2018-10-15]．http://www.shanxieic.gov.cn/wnzz/NewsList.aspx?pid=207_0.xtj&wnzz=25&pg=1．

[2] 国家能源局．2018年前三季度风电并网运行情况[EB/OL]．[2018-10-30]．http://www.nea.gov.cn/2018-10/30/c_137569222.htm．

[3] 国家能源局．2018年前三季度风电并网运行情况[EB/OL]．[2018-10-30]．http://www.nea.gov.cn/2018-10/30/c_137569222.htm．

[3] 山西省人民政府．山西省“十三五”综合能源发展规划 [EB/OL]．[2016-12-26]．http://www.shanxi.gov.cn/sxszfxxgk/sxsrmzfzcbm/sxszfbgt/flfg_7203/szfgfxwj_7205/201612/t20161226_272758.shtml．

[4] 王普辉．国网山西省电力公司2017年信息年报[EB/OL]．[2018-3-20]．http://www.sx.sgcc.com.cn/html/main/col2749/2018-03/20/20180320090633075836393_1.html．

[5] 任培兵，任雁．利用氢气资源发展氢能经济[J]．化学工业，2011，29(Z1)：6-7．

[6] 白雪松．国内外氢气的生产和消费[J]．化学工业，2003，21(12)：18-25．

[7] 马林聪．中国氢能产业基础设施发展蓝皮书[M]．北京：中国标准出版社，2016．

[8] 山西省统计局．山西统计年鉴[M]．北京：中国统计出版社，2017．

[9] 中国报告大厅．2017年1~12月全国各省市精甲醇产量分析[EB/OL]．[2018-04-18]．http://data.chinabaogao.com/huagong/2018/04 1S30Q92018.html．

[10] 李玲．巴西瞄准氢燃料公交车市场[J]．商用汽车新闻，2009(29)：8．

[11] 财经综合报道．《中国物流大数据报告·货车司机篇》出炉！[EB/OL]．[2017-01-12]．http://business.sohu.com/20170112/n478494157.shtml．

[12] 黄明，吴勇，文习之，等．利用天然气管道掺混输送氢气的可行性分析[J]．煤气与热力，2013，33(4)：39-42．

[13] 吴宏．西气东输管道运行管理研究[D]．成都：西南石油大学，2005．

[14] 赵永志，张鑫，郑津洋，等．掺氢天然气管道输送安全技术[J]．化工机械，2016，43(1)：1-7．

(收稿日期：2018－12－26)EA