能源前沿技术：煤炭与可再生能源协同利用系统

斯蒂芬·米尔斯（Stephen Mills）国际能源署洁净煤中心高级顾问

当今世界需要能源，而且能源需求日益增长，这一点毋庸置疑。因此，拓宽能源资源势在必行。到 2040 年，全球人口总数将达到 90 亿[1]。要解决这 90 亿人的住房、供养和生计问题，无疑需要更多的能源。到 2040 年，世界能源需求将在目前水平上增长三分之一[2]。在某些情况下，增加可再生能源利用可以替代并减少一部分常规化石能源需求，但尽管如此，石油、天然气和煤炭仍将被广泛使用。无论如何，从全球范围来看，煤炭仍将发挥重要作用。对某些新兴经济体而言，随着工业化和城市化进程的不断推进，无疑将推动用电需求大幅增长。

如今，全球有超过 12 亿人口无电可用，此外还有 20 亿人电力供应不足。2010 年《哥本哈根协议》的一项主要目标就是要解决这一群体的能源供给问题。在某些国家，可用的能源资源十分有限，只有煤炭储量丰富，可以提供廉价、稳定的能源供给。尽管某些发达国家的煤炭消费正在减少，但从全球范围看，煤炭使用依然广泛，煤炭消耗量非常可观。在过去的十多年里，全球的煤炭

消费，尤其是非经合组织（non-OECD）国家的煤炭消费稳步上升。在这一期间，煤炭消费量增长了近 60%，从 2000 年的 46 亿吨上升到 2012 年的 78 亿吨[3]。虽然全球都在努力推动能源多元化，但对于多数国家来说，煤炭依旧至关重要。从 2000 年开始，除可再生能源外，煤炭是全球增长速度最快的能源，满足了全球 30% 以上的一次能源需求，成为仅次于石油的全球第二大能源。

全球煤炭储量最多的国家分别是美国、俄罗斯、中国、澳大利亚和印度。这些国家的煤炭大部分用于发电；其中部分国家将煤炭出口至资源短缺的国家以获取经济效益。现今，煤炭的主要用途仍然是发电，燃煤发电量占全球总发电量的 41% ~ 42%。在未来几年，发电技术会趋于多样化发展，但技术结合还需因地制宜。国际能源署（IEA）在《世界能源展望 2012》中预测，在可预见的未来，大部分发电能源的发电量将会持续上升[4]，如图 1 所示。在许多国家，煤炭与可再生能源协同利用系统的使用程度将不断提高，因此，越来越多的目光集中于寻找最佳的协同组合方式上。事实上，煤炭与可再生能源协同利用的组合方式有很多。

同步发展

在全球各类化石能源使用量不断增长的同时，可再生能源也呈现显著增长趋势。在许多国家，可再生能源的发电占比迅速增长。截至 2012 年底，可再生能源装机容量最多的几个国家如表 1 所示。

2013 年，可再生能源的发电装机容量占全球总发电装机容量的 26%，发电量占全球总发电量的 22%。可再生能源发电装机容量持续上升。2013 年，新增水电和太阳能光伏发电装机容量各占可再生能源新增发电装机容量的 33%；风电位居其后，新增发电装机容量占 29%[5]。

几个因素共同推动了可再生能源的发展。所有的发达国家都非常依赖充足便利的电力供应，电力需求在过去很长一段时间内持续增长。然而，近年来能源消耗和气候变化问题凸显，引发了众多关注。为此，许多西方国家采取能源供应战略（Supply-side Strategy）以应对这

波兰贝乌哈图夫（Belchatów）燃煤电厂是欧洲地区最大的火电站。
来源：PGE Elektrownia Belchatów 公司提供

一问题，即将可再生能源（除水电以外）在发电能源结构中的比重提升至 20% 以上。尽管太阳能发电的装机容量不断提高，风能仍是目前大规模安装应用、最具竞争力的可再生能源。因风能、太阳能等可再生能源的技术特性使其推广应用备受欢迎。虽然可再生能源系统的初期投资很高，但运行成本很低，日常运营的排放量基本为零。

尽管能源市场发展迅速，可再生能源系统并没有取代现有燃煤电厂，也不可能替代新建燃煤电厂。可再生能源发电和燃煤发电是同步增长的。因此，有必要探索开发具有成本效益、环保价值、能够将不同能源相结合的新途径。目前，全球已经提出了多种煤炭与可再生能源协同发电系统的设想，一些技术方案正在研发当中，部分技术类型具有潜在的发展前景。

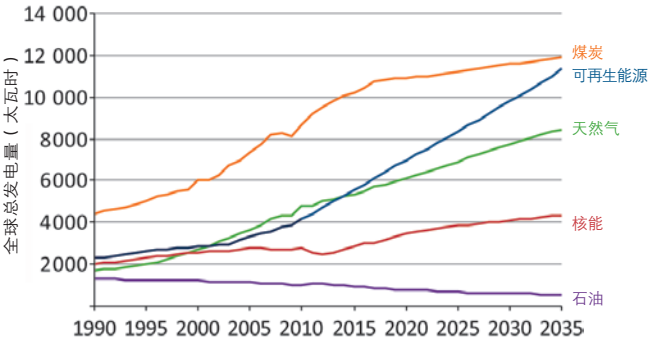

图 1 未来全球发电能源结构[4]

表 1 2013 年全球可再生能源发电装机容量[5]（单位：GW）

发电技术	全球	欧盟 28 国	金砖五国[2]		中国	美国	德国	西班牙	意大利	印度
生物质发电	88	35	24		6.2	15.8	8.1	1	4	4.4
地热发电	12	1	0.1		0	3.4	0	0	0.9	0
潮汐能发电	0.5	0.2	0		0	0	0	0	0	0
太阳能光伏发电	139	80	21		19.9	12.1	36	5.6	17.6	2.2
聚光太阳能发电	3.4	2.3	0.1		0	0.9	0	2.3	0	0.1
风电	318	117	115		91	61	34	23	8.6	20
可再生能源发电[1]	560	235	162		118	93	78	32	31	27
水电	1000	124	437		260	78	5.6	17.1	18.3	44
可再生能源总发电	1560	360	599		378	172	84	49	49	71

注：1. 不包含水电的可再生能源发电装机容量；
2. 金砖五国为巴西、俄罗斯、印度、中国和南非。

煤炭与生物质协同利用

生物质与煤炭结合是可再生能源和煤炭协同发展的典范。在大型常规燃煤电厂中将煤炭与生物质燃料混合燃烧的协同利用方式早已被广泛应用。在全球，越来越多的燃煤电厂采用经过合理加工的生物质燃料代替部分煤炭。目前，全球有 150 多座燃煤电厂在试验基础上尝试过采用混合燃烧生物质和废弃燃料的方式。约有 40 座商业煤粉炉电厂使用煤炭与生物质混合燃烧方式发电，其中生物质占能源投入量的平均比例为 3%。

生物质能的形式丰富，来源多样。有专门的能源作物（例如柳枝稷和芒草）、速生木材、农作物和农业废弃物，还有林业废料。生物质与煤炭结合具有多种优势。然而，生物质能的大规模商业应用也会带来一系列问题。例如，需要收割和处理的生物质体积较大，部分类型的生物质可用性有限或受季节影响，此外，还需要进行多项前期处理工作。这些问题必然会增加能源生产的复杂性和成本。

生物质与煤炭协同利用技术并不仅限于在现有电厂的混合燃烧方式，其他可行的方式还包括煤炭与生物质混合气化。煤炭气化是一项日趋完善的通用技术。混合不同原料进行气化颇具效益。例如，与单一生物质气化设备相比，大型煤气化炉混合生物质进行气化能提高效率，扩大规模经济，提高工艺经济性。将煤炭与生物质混合气化，也可以降低生物质燃料供应的不确定性和变化特性的影响。煤炭与生物质气化扬长避短，发挥了每种燃料的优势，也克服了单独利用的缺陷，具有很好的经济效益和环保效益。在煤炭燃烧或煤炭气化过程中加入生物质可以降低 CO_2 排放。用生物质替代部分煤炭（假设生物质可实现可持续的生产）可以有效减少 CO_2 总排放量。如果能利用碳捕集与封存（CCS）技术，就有可能实现碳平衡（Carbon-neutral），甚至是负碳（Carbon-negative）生产。全球可用的生物质能储量潜力巨大，而在很多国家，生物质燃料还尚未开发。

与常规燃煤电厂一样，如今一些商业化运营的整体煤气化联合循环（IGCC）电厂也尝试在煤炭燃料中混合使用生物质，几家在建的 IGCC 电厂也计划采用这种方式。例如波兰肯杰任（Kedzierzyn）规划建设的 IGCC 发电和化工制品生产项目（配备 CCS 技术），就计划混合煤炭与生物质进行气化[7]。如今，气流床气化炉、流化床气化炉和固定床气化炉等各种类型的气化炉，都积累了有效的煤炭与生物质混合气化经验。各种类型的煤炭也都已经成

功地与多种物料混合进行气化，包括多种需要填埋的、难以处理的废弃物。

煤炭与生物质的协同利用不仅仅用于发电。很多国家提出或尝试利用煤炭与生物质多联产技术生产合成天然气、发电或供热、生产液态运输燃料等。虽然煤炭与生物质的混合气化可以满足部分产品生产，但为了进一步推动生物质协同生产，有人提议在系统中添加其他成分或协同利用可再生能源，例如将具有间歇性的可再生能源如风能和太阳能与煤炭协同发电。

煤炭与风能、太阳能和地热能协同利用

风能发电是全球发展应用范围最广的可再生能源。2013 年，全球风电装机容量达到了 318 GW，其中中国的风电新增装机容量达到了 16 GW。中国计划到 2020 年将风电装机容量再翻一番，从如今的 90 GW 增长到近 200 GW[8]。相比之下，欧盟国家的总风电装机容量只有约 90 GW。2013 年，风电超过核能成为中国第三大能源资源，仅次于煤炭和水电 [9]。报告称，这是迄今为止全球可再生能源发展的最大推动力之一 [10]。

绝大部分风电和太阳能发电设施都不是独立运作的。这些发电设施通常需将电力并入现有电网。电网的电力通常来源于不同类型的发电设施，如燃煤发电、燃气发电、水力发电和核电等。基于地理情况和地域资源，各个国家发电的实际情况不同，电网结构与电力构成比率也完全不同。从表面判断，将风力发电生产的大量电力并入电网是一项重要进步。然而，大量间歇性电力并入电网，会扰乱配电网的稳定性，电网系统中的火电厂运行也会受到严重的影响。因此，许多燃煤电厂和燃气电厂不仅要提供基荷电力，还要增加运行的弹性，机组开停机次数和负荷调整频率都要较初始设计有所增加。这不可避免带来一系列问题：电厂设备的损耗因此加大，机组效率因非设计运营变化降低，排放控制系统效率也会降低。理论上说，在任何能源生产计划中都应考虑到这些重要影响因素，尤其是结合间歇性可再生能源和传统火电厂的发电规划中。

很明显，风电和太阳能发电最大的缺点就是间歇性。由此导致了发电高峰期和用电高峰期常常不同步，反之亦是如此。有时会出现电力产能过剩，风电场尤为如此。这种现象十分普遍，通常的解决方式是关闭风机。然而，与其浪费这些电力产能，还不如将这些电能有效地利用起来。

英国国际电力公司的鲁奇利（Rugeley）电厂，装机容量为 1GW。该电厂也尝试混合燃烧煤炭与多种生物质燃料。

来源：罗素·米尔斯

挪威斯莫拉（Smola）风电场。
来源：挪威国家电力公司（Statkraft）

其中一个方式就是利用过剩的电能电解水，生产氢气和氧气。氢气和氧气都能成为协同能源系统中的一部分。例如，氢气可以作为气化系统的原料，用于燃料电池，或直接用于运输燃料，或利用燃气轮机直接燃烧发电，具有多种潜在利用方式。

同样，氧气也具有广阔的商业价值和工业用途，可以为煤炭与生物质气化炉提供氧气或用于富氧燃烧电厂发电。结合煤气化、间歇性可再生能源和电解技术的各种设想和计划都处于检测阶段。有些计划还将碳捕集与封存技术结合起来。例如，德国正在开展一项结合煤基发电、碳捕集技术、风力发电与先进电解技术的试验（电解水生成氧气与氢气）[11]。该试验的成功将会推动电解技术发展，使之成为煤炭与可再生能源协同系统中的一部分。如果各国都能行动起来，这些计划的前景广阔。

德国开展的另外一个项目有望取得巨大进步，大幅提升电解过程的总效率。该项目是德国意昂集团公司（E.On）位于法尔肯哈根（Falkenhagen）的电制气（Power to Gas）项目。该技术利用附近风电场多余的电能提供电力，供给多级电解槽电解生成氧气和氢气。该风电场的发电量经常超出需求，当供过于求时，风电场不必关闭风轮机停止发电，而是可以将多余的电能供给电解槽，电解产生的氢气并入当地的天然气系统，天然气系统成为氢气的存储系统，这是存储可再生能源的有效方式。

此外，也可以将燃煤电厂与地热能或太阳能等可再生能源结合起来。在这种协同利用系统中，可再生能源能够利用现有燃煤电厂的基础设施，如蒸汽循环、电网和变压器等。这比单一的可再生能源电厂更具吸引力。但是，这种协同利用系统的前提是燃煤电厂附近有可用的可再生能源。

利用可再生能源的热能提高燃煤电厂锅炉给水温度的热能协同系统可以有效地使用可再生能源替代部分煤炭（或是用相同数量的煤炭生产更多的电能），提高电厂效率。这种热能协同利用系统是大规模利用太阳能和地热能最具成本效益的方式，在可再生能源激励措施下，这种方式肯定会得到认可并被采用。在未来，可再生能源资源也有可能为碳捕集与封存技术提供所需热能负荷，大大减少电厂对环境的总体影响，减少温室气体排放。

目前，全球有 15 座正在开发建设的太阳能热能与燃煤和燃气电厂协同利用电厂，总装机容量达 460 MW[12]。其中，有 1 个热能协同利用项目正在运行，其他几个项目正在筹备或开发之中 [13]。

现状

上文提及的部分协同利用系统仍处于发展的初级阶

位于德国法尔肯哈根的德国意昂集团电制气项目。
来源：德国意昂集团。

段或者在小规模试验阶段，因此还难以将其投入商业规模的应用，也难以获得确切的成本。出于各种原因，不是所有的方案都在技术层面或经济层面可行。但是，部分方案也表现出巨大潜力。正在发展的技术（如气化炉、电解槽的设计）可以提高成本竞争力。把氢气、氧气纳入能源协同利用方案，采用可再生能源提供的电能，可以降低电力成本，从而提高电解的效益。表 2 还列举了几个现行的能源协同利用项目。尽管有些项目只注重生物质，但这些工艺中的不同组成也有可能并入煤炭与生物质的协同利用系统。

开发规划顺利进行的部分项目更为先进。共同气化的设备如今已经成型，其他设备也在研发、试行阶段，例如利用风电生产氢气的商业性示范、先进电解技术测试。多种协同利用系统都具有发展潜力。假设技术和经济问题可以完全解决，在近期和中期内，大多数协同利用系统都可以投入市场，或用于特定、有利的能源市场环境中。

结论

在全球人口总量不断增长和能源需求不断上升的背景下，人们迫切需要新型、清洁、可靠、成本效益好的能源系统。为了解决这一问题，人们提出了许多能源协同利用方案，部分方案更有实际意义。尽管很多国家努力促进能源结构多元化，但在可预见的未来，煤炭等化石能源仍然将在国际能源市场中发挥重要的作用。出于各种原因，将煤炭和可再生能源结合起来都具有重要意义。任何一种单一的能源生产系统都有优点和缺点，但将不同能源相结合的协同系统却有可能扬长补短，相互促进。基于这一理念，结合煤炭与多种能源协同利用的技术设想才被付诸于实践。

从实际应用的角度出发，任何能源协同利用方案都应与所有的能源生产系统一样，确保清洁、切实可行、经济的利用方式。国际能源署洁净煤中心近期开展的工作表明，部分能源协同利用系统是可行的，并具有发展

表 2 能源协同生产系统实例

研发机构	技术方案	进展
美国国家可再生能源实验室（NERL)	气化 / 共同气化 + 电解（风电）	项目正在测试几种以气化为基础的协同利用系统，包括： 1. 风电和生物质气化结合 2. 生物质气化和电解技术结合 3. 煤炭与生物质共同气化技术
美国国家能源技术实验室（NETL）	煤气化 + 电解（风电）	1. 协同利用系统可以生产合成天然气、电力和生物柴油 2. 规划建设日处理 3000 吨燃料的电厂 3. 气化炉未转化的煤炭送入富氧燃烧室
新西兰 CRL 能源（CRL Energy）	煤炭与生物质共同气化 + 电解(风电）	1. 系统可以生产费托合成化工制品和合成燃料 2. 电解的氧气供气化炉使用，氢气用于生产合成气、储备，或用作运输燃料，或者用于燃料电池
美国 Leighty 基金会 (Leighty Foundation)	煤炭与生物质共同气化 + 电解(风电）	将电解产生的氧气送入气化炉中
瑞典隆德大学	生物质（木材）气化炉 + 电解（风电）	将电解产生的氧气送入气化炉中
丹麦 Elsam/DONG 公司	生物质气化 + 电解（风电、太阳能）	1. 测试生产电力、热能和交通运输燃料的多联产方式 2. 将氢气加入合成气，将氧气用于生物质气化
瑞士洛桑大学	生物质（木材）气化 + 电解	利用几种工艺检验合成气生产
中国	各种气化技术 + 电解（风电）	1. 将电解产生的氧气送入气化炉；将氢气混入合成气中 2. 主要用于生产合成天然气、甲醇和乙烯乙二醇

煤炭与可再生能源的结合可产生协同效益。

来源：拉塞尔·米尔斯（Russell Mills）

前景[14,15]。尽管煤炭和可再生能源看起来毫不搭调，但未来几年内，这两种全球发展最为迅速的能源资源将以协同利用的方式得到进一步发展。

参考文献

[1] United Nations Population Division. (2014). Concise report on the world population situation 2014, www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/trends/Concise%20Report%20on%20the%20World%20Population%20Situation%202014/en.pdf

[2] International Energy Agency (IEA). (2012, 25 July). State of play: New IEA statistics publications highlight latest global and OECD trends across major energy sources, www.iea.org/newsroomandevents/news/2012/july/name,28615,en.html

[3] IEA. (2014). Coal information, www.iea.org/w/bookshop/646-Coal_Information_2014IEA. (2012).

[4] World energy outlook 2012,www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2012/

[5] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). (2014). Renewables 2013 global status report, www.ren21.net/portals/0/documents/resources/gsr/2013/gsr2013_lowres.pdf

[6] Adams, D. (2013). Sustainability of biomass for cofiring. CCC/230. London: IEA Clean Coal Centre.www.iea-coal.org.uk/documents/83254/8869/Sustainability-of-biomass-for-cofiring,-CCC/230

[7] Cornot-Gandolphe, S. (2012, October). The European coal market: Will coal survive the EC's energy and climate policies? Paris: Institut Français des Relations Internationals.

[8] IEA. (2011). Technology roadmap: China wind energy development 2050. Available at: www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-china-wind-energy-development-roadmap-2050.html

[9] Yang, C. (2013). Wind power now No.3 energy resource. People's Daily English Edition, english.peopledaily.com.cn/90778/8109836.html

[10] Shukman, D. (2014, 8 January). China on world's "biggest push" for wind power. British Broadcasting Corporation, www.bbc.co.uk/news/science-environment-25623400

[11] Farchmin, F. (2013, 6 November). Integration of regenerative energy into Power2Gas by PEM electrolyzer technology. CO2RRECT Project. Smart Grid-Infotage 2013, Munich, Germany,www.industry.siemens.com/topics/global/en/pemelectrolyzer/silyzer/Documents/2013-11-06_SMARTGRID_Munich_stick.pdf

[12] Electric Power Research Institute, (2012, April 18–20). Utility perspective: Solar thermal hybrid projects. Clean Energy Regulatory Forum, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, U.S., www.cleanskies.org/wp-content/uploads/2012/04/Libby_CERF3_04192012.pdf

[13] Bean, N., & Varney, J. (2014). Geothermal assisted power generation for coal-fired power plants. Cornerstone, 2(4), X–X.

[14] Mills, S.J. (2011). Integrating intermittent renewable energy technologies with coal-fired power plants. CCC/189. London: IEA Clean Coal Centre.

[15] Mills, S.J. (2013). Combining renewable energy with coal. CCC/223. London: IEA Clean Coal Centre.