

IGCC's Development and Technology ---Review the Global IGCC Technology Development and Outlook the Market

Jin Hao, Guoqi Chen

North China Electric Power University
Pinggu Power Supply Bureau

Abstraction: While more and more IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) power plants start building around the world, common people are interested to know what IGCC is. This article is trying to introduce IGCC's theory, process, technology, and market, and give readers a general view of this industry.

Keywords: IGCC, CCS, Gas Turbine

IGCC 的发展与技术 ----回顾国际 IGCC 技术发展及市场展望

郝进, 陈国旗

华北电力大学
平谷供电公司

摘要: 随着世界上越来越多的 IGCC 电厂开工或计划开工建设, 普通群众希望了解什么是 IGCC。本文正是想通过介绍 IGCC 的原理、流程、技术、以及相关技术和设备市场, 给予读者对 IGCC 这个行业有一个整体认识。

关键词: IGCC, 整体煤气化联合循环电厂, 碳捕捉, CCS, 燃气轮机

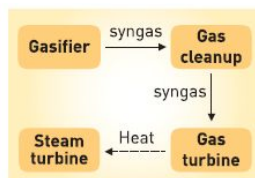
1 简介

而今, 在一些学术文章和论坛中, IGCC 这个词被越来越多地提及, 吸引了众多政治家、学者、专业人士、投资者和供应商的注意。那么, 什么是 IGCC, 为什么它具有如此的吸引力呢?

1.1 原理

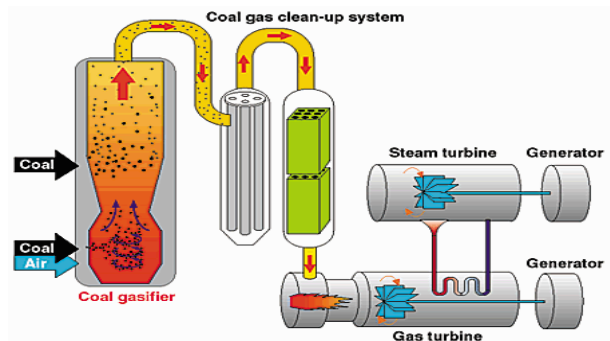
IGCC 是英文 Integrated Gasification Combined Cycle 的首字母缩写, 直译就是集成气化的联合循环电厂。被认为是一种从可以燃料中最大化提取能量的技术。

简单来看, IGCC 厂可以看作是气化厂与联合循环电厂的结合。



1.2 过程

通过 IGCC 的名称和以上的简单介绍, 我们可以大致了解到其生产的基本过程包含了燃料气化、燃气-蒸汽联合循环发电两大部分, 分别由气化厂和联合循环电厂实现。



煤的气化是煤化工的重要过程之一。

在气化厂中, 含碳的原料在高温常压或加压条件

下，与气化剂反应，转化为气体产物和少量残渣。气化反应是在气化炉中发生的，所需要的气化剂，例如氧气由氧气厂制造，通过压缩机吹入气化炉中。通过控制和调整煤、空气或者氧气的比例实现不同的气化产品-合成气(syngas)。

气化厂产生的气体经过调整净化等处理，成为适合燃烧的天然类气。类天然气通过在燃气轮机中燃烧做功，带动发电机。燃烧后的高温尾气用于加热循环水，产生的蒸汽带动蒸汽轮机发电。

相比传统电厂或者化工厂，IGCC 增加了若干生产环节，工艺相应复杂了许多，导致单位建造成本和运营成本比传统电厂高很多。

1.3 设备

在 IGCC 中，关键的技术和设备是

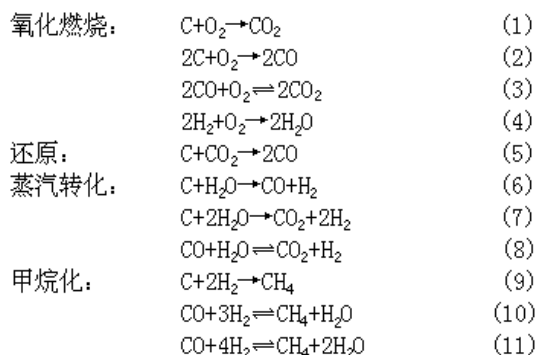
气化剂的制备-> 气化炉 Gasifier -> 合成气处理 Syngas Treatment -> 燃气轮机 Gas Turbine -> 蒸汽轮机 Steam Turbine -> 发电机 Generator

2 Gasification Technology 气化技术

按照气化的原料形式的不同，气化可分为固体材料气化、轻质燃料气化和重油的气化。

以煤气化为例，整个气化过程基本包括：煤料加工、气化反应和煤气净化处理几个部分。

煤或焦炭、半焦等固体燃料，在高温常压或加压条件下，与气化剂反应，转化为气体产物和少量残渣的过程。煤气化过程可用于生产燃料煤气，作为工业窑炉用气和城市煤气，也用于制造合成气，作为合成氨、合成甲醇和合成液体燃料的原料。是煤化工的重要过程之一。



气化过程将含碳物质转化为以一氧化碳和氢气为主的合成气，具有成为用做发电供热的燃料或基本化

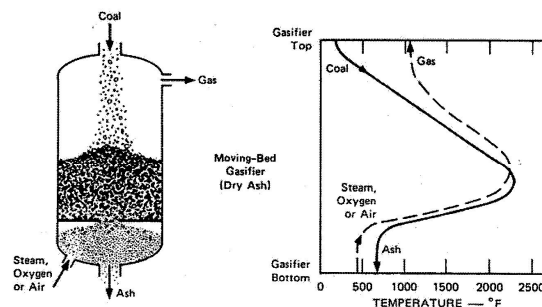
学材料等众多用途。通过气化技术，低价值甚至负价值的原料转化为具有商业意义的燃料和产品。

根据不同的给料形式，气化可以分为气态或液体燃料气化、重油及残油气化、以及固体燃料气化。显然，煤的气化属于最后者。

根据氧化方式的不同，气化又可以分为吹氧和吹气两种气化方式。

目前有几种吹氧气化技术得到广泛的应用，分别是固定床式、流化床式、气流床式气化系统。

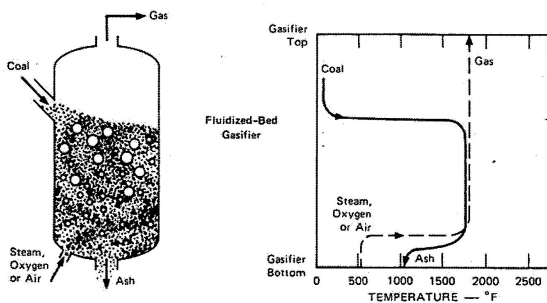
- 固定床（又称为移动床）气化炉：是最早开发出的气化炉，它和燃煤的层燃炉类似，炉子下部为炉排，用以支承上面的煤层。通常，煤从气化炉的顶部加入，而气化剂（氧或空气和水蒸气）则从炉子的下部供入，因而气固间是逆向流动的。这种气化炉和燃煤的层燃炉一样，对煤的粒径有一定的要求。卢奇(Lurgi)固态排渣气化炉和 BGL 气化炉都应用了这种技术。



- 流化床由固态颗粒构成，通常是惰性材料。当气体或其它介质以一定的速度(该能维持流化床颗粒悬浮在气化炉中)穿过这些流化床时，颗粒被剧烈搅拌，并发生反应。流化床气化炉可以充分利用床内气固两相间的高强度的传热和传质，使整个床层内温度分布均匀，混合条件好，有利于气化反应的进行。同时，可以利用流化床低温燃烧，在燃烧和气化过程中加入脱硫剂（石灰石或白云石），将产生的大部分 SO₂ 和 H₂S 脱除。由于流化床气化炉内的反应温度一般控制在 850—1000℃，因此，它产生的焦油、烃、酚、苯和萘等大分子有机物基本上都能被裂解为简单的双

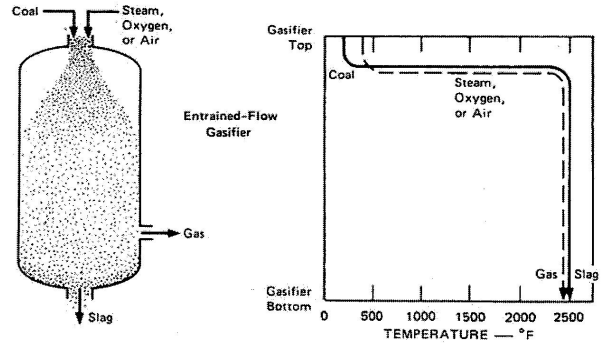
原子或三原子气体，煤气的主要成本是 CO 和 H₂，CH₄ 的含量一般少于 2%。HTW 和 KRW 使用了这种设计。

氧化反应或者气化反应的实现是通过将床加热至超过煤的燃烧点或气化点时加入燃料。被点燃后，燃料的能量被释放，进而燃烧或气化反应得以持续。通常这个反应在加压（超过 10bar 或 10kg/平方厘米）条件下进行，因此这个反应装置又被称为加压流化床气化炉(PFBG, Pressurised Fluidized-Bed Gasifier)。



- 气流床系统运行在高温条件下，粉煤与氧气和蒸汽反应。这种系统的优点是可以气化各种品质的煤。根据所用燃料形式的不同（例如干粉煤或水煤浆）以及热回收系统的不同，可以设计不同的气流床系统。
- 气流床气化炉中，由于是煤粉高温高压气化，因此煤种适应性广，碳转化率高，能达到 99% 以上。
- 由于喷流床气化炉的单炉生产能力大，并且具有较高的效率，燃料适应性广，因而在今后发展大容量高效率的 IGCC 电站中具有强有力的竞争地位。目前全球已经投入运行或正在建设的 IGCC 电厂中，约有 70% 使用气流床式气化装置。提供气流床气化装置产品的厂家有：通用电气(GE), 康菲石油(ConocoPhillips), 壳牌石油(Shell), 普伦弗洛(Prenflo) 和德国 Noell。西安热工院开发的两段式干煤粉加压气化技术也属于气流床气化技术。
- 空气气化产生的低热值气体(LBG)包含约 50% 的氮气且热值低于 170btu/scf。由于这种气体的低热值和高含氮量，使之较难做为燃气应用。

它也不适于取代天然气通过管道传输。同时，不适于化学合成反应，应为这些反应需要浓缩的由一氧化碳和氢气组成的合成气。到目前为止，只有三菱在 Nasoko 的 IGCC 电厂正在尝试使用空气气化反应。



3 空气分离装置 ASU

空分装置是 IGCC 的耗能大户，空分装置的工艺流程及其与 IGCC 的匹配对 IGCC 的整体性能影响较大。当氧气产量大于 2500Nm³/h 时，工业上一般采用深度冷冻法来制取氧气，简称深冷法。它是空气液化后根据氧、氮沸点差精馏，从而实现气体分离的。其技术比较成熟，效率高且成本低，被广泛用于化工行业中，适合于大规模生产且所得的氧气纯度高可达 99% 以上。这种空气分离方法从 1902 年德国林德公司制造出第一台 10Nm³/h 的制氧设备以来至今已有 90 多年的历史，流程经历了高压、中压到全低压的变革，能耗不断降低。近二十年来深冷法制氧的工艺和设备都取得了长足的进步，氧的提取率提高了 10% 能耗下降近 20%。目前全低压空分系统的单位制氧能耗已降到大约 0.35kWh/Nm³-O₂。但是，目前全低压空分在流程上的改进余地非常有限，于是人们的注意力开始移向空分产品的应用领域，即生产综合型的空分设备，使包括用户在内的综合能耗最低，投资最省。IGCC 电站就是热能设备与化工设备成功结合的产物。

目前，在 IGCC 系统设计中主要有两种典型的空分系统工艺流程方案，一种是低压独立空分系统，一种是高压完整体化系统。

独立空分系统具有以下特点：（1）空分压缩机与燃气轮机无直接联系因而在燃气轮机尚未工作时，可以提前启动，一般启动全过程需 2~3 天，对燃

气轮机的工作毫无干扰；（2）变负荷时空分压缩机的出口空气压力较稳定即空分系统中精馏塔压力变化不大，O₂ 浓度稳定；（3）变负荷时，只需调节空分压缩机的进口可转导叶，对燃气轮机的工作也无干扰；（4）调节系统较简单；（5）IGCC 电站负荷的跟踪性能不受空分系统延迟特性的影响，仅受限于余热锅炉的热惯性。高压完全整体化系统具有以下特点：（1）电厂自用电消耗小；（2）由于空分系统的启动过程长，而空分系统所需的空气必须完全从燃气轮机中抽取，燃气轮机的正常运行也离不开空分系统，因此，完全整体化 IGCC 电站的启动过程复杂；（3）电厂的变工况性能差。

世界上大型空分制造厂比较著名的有法国空气液化公司（Air Liquid）、德国林德公司（Linde）和美国空气产品和化学品公司（APCI），其空分流程成熟可靠。我国生产大中型空分设备的企业有杭州制氧机集团有限公司、开封空分集团有限公司、四川空分设备有限公司、哈尔滨制氧机厂等。其中杭氧在国内制氧领域占据比重较大。目前，国内已可以生产 5×104m³/h 等级的空分装置，正在设计制造 6×104m³/h 等级的空分装置，有能力制造配套 400MW 级 IGCC 的空分装置

4 合成气净化

对气化反应产生的气体进行净化处理是这部分系统的核心功能。

从气化炉中排出的合成气中主要成分是 CO 和 H₂，另外也含有烟尘、一定量的 H₂S 和 CO₂、NH₃、COS、HCL、HCN 等。合成气净化包括调整氢气和 CO 的比例，除酸，脱硫，脱汞等等。

烟尘颗粒通常使用过滤器除掉，而再生法除酸则为化工和 IGCC 所应用。包括化学除酸、物理除酸以及化物混合除酸。根据需要的产品不同，各种除酸办法都有较为广泛的应用，相应的技术供应商也相当众多。

H₂/CO 的比例调整：为了制备氢气或其它化工合成剂，合成气中的 H₂/CO 需要被调整到所需要的比例。这个调整过程又称作水煤气转换，在催化剂作用下：



如果 IGCC 为联产氢气的设计，则通过 H₂/CO 比例调整的氢气可以被进一步用来进行其它化工合成，也可用来制备合成天然气(合成甲烷)



5 碳捕捉和存储

碳捕捉可以认为是一种气体处理方式，发电厂中进行碳捕集的技术路线主要有三类：燃烧后脱碳、燃烧前脱碳和富氧燃烧脱碳。目前，这三种路线在世界上都有相应的示范工程。

- 燃烧后脱碳：即从烟气中分离出 CO₂，目前，该 CO₂ 回收途径的首选分离方法是化学溶剂吸收法，类似于燃煤电厂的烟气脱硫，这种技术路线适合于从现役常规燃煤电厂中捕集 CO₂。燃烧后分离的技术难点主要是溶剂 MEA（单乙醇氨）对烟气的适应性以及烟气中存在 SO₂、NO_x 及粉尘等杂质。此外，化学溶剂的再生过程需要耗用大量的低压水蒸汽（9~12bar、350~400℃）；同时燃烧后分离的 CO₂ 压力较低，不到 2bar，储存运输时还要将其压缩至超临界流体状态（约 100bar）。耗用大量的压缩功；CO₂ 回收、压缩、储存及下游运输的基础设施等环节的投资成本和运行维护成本较大。燃烧后脱碳典型示范项目包含：美国 Warrior 电厂年回收 4.5 万吨 CO₂ 用于啤酒生产、挪威 Statoil/壳牌公司合作的从天然气发电厂烟气中回收 CO₂ 用于强化石油开采、中国华能北京热电厂年分离 3000 吨 CO₂ 项目等。
- 富氧燃烧：富氧燃烧是指用 O₂/CO₂ 的混合物代替空气，作为化石燃料燃烧的氧化剂，燃烧后烟气中含有高浓度的 CO₂。采用 O₂/CO₂ 混合物（循环烟气部分）而不是纯氧的原因是为了控制火焰温度。富氧燃烧的优势在于，烟气中含有高浓度的 CO₂（≥90%），简化了后续的分选纯化过程。由于燃烧环境中氮气量很少，NO_x 排放量会大大降低。缺点在于需要昂贵耗能的空分厂，另外回收 CO₂ 压力较低。目前富氧燃烧仍在实验研究和验证阶段，实际应用还需要解决较多的问题。
- 燃烧前脱碳：首先化石燃料经过气化或重整转化成主要成份为 CO 和 H₂ 的煤气，然后利用水煤气变换反应大大提高 CO₂ 的浓度，CO₂ 分离后得到的富氢燃气燃烧发电。目前美国 Great Plains 合成燃料厂正是通过这种途径为加拿大 Weyburn 油田强化石油开采/CO₂ 埋存项目提供

CO₂。我国 9 个合成氨项目应用这种途径回收 CO₂，最终得到尿素。

- 而对二氧化碳存储研究主要集中在几种方式：
- 地理封存：将二氧化碳注入油田、岩层、废弃的矿井等等，利用地壳自然或人为形成的缝隙做为二氧化碳存储的空间。利用地球化学或物理作用(例如高度非渗透盖层)锁住气体。这种方法有时候被用于原油开采，通过将二氧化碳注入地下油层，而增加该油层的开采利用率。
- 海洋封存：通过管道将二氧化碳注入深度超过 1000m 的海洋中，由于压力的作用，CO₂ 溶解在海水中；或者将 CO₂ 注入超过 3000m 深的海床，由于 CO₂ 的密度大于海水，CO₂ 有可能形成一个水下的“湖”。
- 生物封存：生物封存则是将二氧化碳转化为碳酸盐、甲烷或可再生的燃料。最常见的生物封存就是绿色植物的光合作用，绿色植物由大气中吸收二氧化碳，通过光合作用将二氧化碳固定并转化为生物能。

6 Gas Turbine 燃气轮机

燃气轮机用于 IGCC 时，唯一不同就是燃料由天然气变为了合成煤气，因而造成了燃机的一系列问

题。

从表中我们可以看出，合成气的热值仅为天然气热值的 1/5 到 1/3。为了达到相同的输出功率，合成煤气的燃烧量需要比合成天然气更多。因此，IGCC 项目通常要使用低热值重型燃机。

Combustion Characteristics of Representative Syngas and SNG

| | Syngas | | Synthetic Natural Gas |
|------------------------------|-------------|----------------|-----------------------|
| | Low-Btu Gas | Medium-Btu Gas | |
| Gas analysis, % | | | |
| Carbon monoxide | 28.6 | 51.2 | 0.1 |
| Hydrogen | 15.0 | 33.7 | 0.4 |
| Methane | 2.7 | - | 91.1 |
| Ethane | - | - | 3.2 |
| Carbon dioxide | 3.4 | 12.7 | 2.2 |
| Nitrogen, argon, and water | 50.3 | 2.4 | 3.0 |
| Flame temperature, °F | 3,200 | 3,750 | 3,560 |
| Heating value, Btu/scf (HHV) | 170 | 280 | 980 |

目前国际上有重型燃机生产经验的制造商只有四家：通用电气、西门子、阿尔斯通、三菱重工。

主要为 E 级和 F 级燃气轮机，50Hz 产品主要为：

| 制造商 | E 级 | F 级 | H 级 |
|------|--------------------------|--------------------|-------------------|
| 通用电气 | 9E(126MW) | 9F(267MW) | 9H(研发中,520MW) |
| 西门子 | SGT5-2000E(156MW) | SGT5-4000F(287MW), | SGT5-8000H(340MW) |
| 三菱 | M701D(144MW) | M701F(278MW) | M701G(334MW) |
| 阿尔斯通 | GT11(115MW), GT13(180MW) | GT26(288MW) | |

在中国，哈汽和南汽与通用电气、上汽与西门子、东汽与三菱分别合作生产重型燃气轮机。

7 Market 市场

7.1 发展背景和历史

目前全世界上有 30 余座在运的 IGCC 电厂，其中有部分使用的是煤气化技术，部分使用燃油气化技术。

7.2 优势

- 高效率：燃气-蒸汽联合循环带来热能的高效利用，例如 1+2(一台燃机+两台汽机)甚至可以达

到 51%

- 低排放：由于燃料的气化，使得硫化物和氮化物易于在燃烧前得到去除。而碳捕捉技术更使控制二氧化碳排放得以实现。理想情况下，IGCC 甚至可以实现零排放。

此外，IGCC 也易于实现多联产：在合成气净化过程中，可以分阶段提取所需化工原料。

7.3 市场动力

- 京都议定书-为了人类免受气候变暖的威胁，1997 年 12 月，《联合国气候变化框架公约》第 3 次缔约方大会在日本京都召开。149 个国家和地区的代表通过了旨在限制发达国家温室气

体排放量以抑制全球变暖的《京都议定书》。中国于 1998 年 5 月签署并于 2002 年 8 月核准了该议定书。欧盟及其成员国于 2002 年 5 月 31 日正式批准了《京都议定书》。目前已有 170 多个国家签订了该协定。2007 年 12 月，澳大利亚签署《京都议定书》，至此世界主要工业发达国家中只有美国没有签署《京都议定书》。

- 2005 年 2 月 16 日，《京都议定书》正式生效。这是人类历史上首次以法规的形式限制温室气体排放。

- 2007 年 3 月，欧盟各成员国领导人一致同意，单方面承诺到 2020 年将欧盟温室气体排放量在 1990 年基础上至少减少 20%。2008 年 7 月 8 日，八国集团领导人在八国集团首脑会议上就温室气体长期减排目标达成一致。八国集团领导人在一份声明中说，八国寻求与《联合国气候变化框架公约》其他缔约国共同实现到 2050 年将全球温室气体排放量减少至少一半的长期目标，并在公约相关谈判中与这些国家讨论并通过这一目标。

| | | | | | | | |
|----|---------------------------|-------|-----|----|-------------------------|-------|-----|
| 1 | LONG LAKE IGCC | 170MW | 加拿大 | 18 | BUGGENUM, ROERMOND/IGCC | 280MW | 荷兰 |
| 2 | 福炼泉港电厂 | 300MW | 中国 | 19 | PERNIS IGCC | 80MW | 荷兰 |
| 3 | 兖矿 IGCC | 60MW | 中国 | 20 | PEARL/IGCC, RAS LAFFAN | 450MW | 卡塔尔 |
| 4 | VRESOVA IGCC | 360MW | 捷克 | 21 | JURONG ISLAND/IGCC | 140MW | 新加坡 |
| 5 | Kymijärvi ACFBG Plant | 48MW | 芬兰 | 22 | PUERTOLLANO/IGCC | 350MW | 西班牙 |
| 6 | GONFREVILLE IGCC | 250MW | 法国 | 23 | VARNAMO IGCC DEMO | 4MW | 瑞典 |
| 7 | Leuna Methanol Anlage | 162MW | 德国 | 24 | ARBRE IGCC EGGBOROUGH | 12MW | 英国 |
| 8 | Sustec SVZ/Schwarze Pumpe | 75MW | 德国 | 25 | FIFE /IGCC | 130MW | 英国 |
| 9 | IES/Sanghi IGCC Plant | 50MW | 印度 | 26 | COOL WATER/IGCC | 135MW | 美国 |
| 10 | Agip IGCC | 250MW | 意大利 | 27 | DELAWARE CITY/IGCC | 140MW | 美国 |
| 11 | FALCONARA/IGCC, ANCONA | 250MW | 意大利 | 28 | EL DORADO/IGCC | 38MW | 美国 |
| 12 | ISAB | 512MW | 意大利 | 29 | LGTI | 160MW | 美国 |
| 13 | PRIOLO GARGALLO/IGCC | 540MW | 意大利 | 30 | PINON PINE IGCC, TRACY | 120MW | 美国 |
| 14 | SANNAZZARO/IGCC | 230MW | 意大利 | 31 | PLAQUEMINE /IGCC | 200MW | 美国 |
| 15 | SARROCH IGCC | 600MW | 意大利 | 32 | POLK COUNTY/IGCC/GT | 300MW | 美国 |
| 16 | NAKOSO/IGCC | 250MW | 日本 | 33 | WABASH RIVER /IGCC | 192MW | 美国 |
| 17 | NEGISHI/IGCC | 450MW | 日本 | | | | |

- 美国 FutureGen 计划-FutureGen 是由美国前总统乔治.W.布什提出的一项政府计划，期望通过碳捕捉和存储技术来建设“零”排放的燃煤电厂，用于生产电力并制造氢气。全球共有 13 家电力生产商加入了美国的 FutureGen 项目。但受全球金融危机的影响，部分新建发电项目被推迟。
- 中国绿色煤电-2007 年，在国家发改委的支持下，由华能集团牵头，联合了大唐集团、华电集团、国电集团、中电投集团、神华集团、国投集团、中煤集团等共 8 家企业集团成立了中国绿色煤电有限公司。
- 绿色煤电计划分三个阶段实施
- 第一阶段 IGCC 电厂：实现 2000 吨/日煤气化；建设 250MW 多联产 IGCC 电厂(电-热-气),建立绿色煤电实验室；
- 第二阶段关键技术研发、改进 IGCC 技术：改进 IGCC 多联产技术；3500 吨/日与 2*2000 吨/日气化装置的经济性和技术性比较；氢气生产；碳捕捉与存储；燃料电池发电技术；绿色煤电示范预备工程；
- 第三阶段绿色煤电示范工程：建设 400MW 绿色煤电示范工程，包括氢气生产，燃料电池发电、燃氢轮机循环电厂和碳捕捉及存储；绿色

煤电电厂运营；证明绿色煤电的经济可行；为绿色煤电的商业运行做准备。

- 华能集团已经在天津临港新区建设 2*200MW IGCC 示范项目，使用西北热工院的煤气化技术和上海-西门子联合体的燃气轮机。预计 2011 年上半年投产试运行。此外，天津华能绿色煤电二期也获得国家发改委的批准。
- 欧盟 Hypogen-2004 年 12 月，欧盟启动了一项 Hypogen 计划(Hydrogen Power Generation)，结合 12 个欧盟主要成员国和 32 个能源产业组织的力量，希望能于 2012 年正式开始 CCS 在欧洲的商业运转。其第一阶段称为 Dynamis 计划，希望在 2010 年前研发出无碳化燃煤或以氢气为主的大型商业发电示范项目，并实现二氧化碳 90%捕捉。同时英国也已经要求未来新建电厂必须具备碳捕捉条件(capture ready)。

7.4 执行中和计划中的项目

目前，全球共有近 190 个 IGCC 项目正在或者计划修建，计划发电装机容量约 35GW。项目主要分布在中国(12 个，约 12GW)，欧洲 (18 个，约 10GW) 和北美地区(20 个，约 10GW)。

8 结束语

作为一种高效清洁的能源利用形式，IGCC 获得了广泛的关注，但是在现阶段，推广 IGCC 仍然面临着许多困难，需要科技人员继续努力改进。

较低的可靠性-由于系统较传统电厂更加复杂，直接导致在目前状态下，其可靠性远低于传统电厂。

较低的灵活性-虽然近几年 IGCC 电站的设备可靠性、电站可用率都有了明显的提高，但其技术特点决定 IGCC 电站不适合用于电网调峰。首先，气化装置只能在负荷范围 50~100%运行（采用 Texaco 气化炉为 60~100%），造成了 IGCC 电站的变负荷范围窄；其次，IGCC 电站的变负荷速率不可以太高，一般认为调解负荷率为 3%/min 左右（常规燃煤电厂

8%/min）；再次，IGCC 启动时间长，热启动需要 1.5 小时~2 天，冷启动大概需要 2~3 天(40h~80h)，常规电厂冷启动仅需(8h~10h)；最后，受燃气轮机部分负荷效率低的影响，IGCC 部分负荷时效率降低幅度很大。

建设成本较高-由于 IGCC 设计多种技术，部分技术仍不够成熟。同时 IGCC 仍属于新事物，缺乏对系统的整体优化设计，这使得设计和制造成本要比传统的燃油或燃煤电厂高许多。目前 IGCC 的建设成本约为一千美元/千瓦，而超超临界电厂建设成本不足五百美元/千瓦。

References (参考文献)

- [1] <http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/futuregen/>
- [2] Department of Energy Office of Fossil Energy FutureGen page.
- [3] http://www.fossil.energy.gov/news/techlines/2008/08003-DOE_Announces_Restructured_FutureG.html
- [4] http://www.fossil.energy.gov/news/techlines/2008/08023-FutureGen_FOA_Released.html
- [5] The Future of Coal, http://web.mit.edu/coal/The_Future_of_Coal.pdf
- [6] Sleipner—A Carbon Dioxide Capture-and-Storage Project.
- [7] FutureGen - Alliance Members
- [8] Mattoon lands FutureGen power plant", Champaign-Urbana News-Gazette (2007-12-18). Retrieved on 18 December 2007.
- [9] <http://www.futuregenalliance.org/technology.stm> FutureGen Technology Overview
- [10] <http://www.futuregenalliance.org/technology/coal.stm> Coal Gassification
- [11] <http://www.futuregenalliance.org/technology/carbon.stm> Carbon Sequestration
- [12] Carbon Dioxide Capture and Geologic Storage: A Core Element of A Global Energy Technology Strategy To Address Climate Change, p. 26. http://www.pnl.gov/gtsp/docs/gtsp_reportfinal_2006.pdf
- [13] New York Times, "New Type of Coal Plant Moves Ahead, Haltingly" <http://www.nytimes.com/2007/12/18/business/18coal.html?ex=1355634000&en=0e9a1555019f1ce2&ei=5124&partner=permalink&exprod=permalink>
- [14] Stroud, Rob (2008-04-19). "FutureGen sounds upbeat note, Supporters lobbying presidential candidates", Decatur Herald & Review. Retrieved on 22 April 2008.
- [15] Thilmony, Meg (2008-04-19). "Alliance, local group buying land for FutureGen plant", Champaign News-Gazette.
- [16] "No matter what you've heard, FutureGen is alive." America's Power, Behind the Plug, November 24, 2008.
- [17] Barack Obama and Joe Biden: New Energy for America BarackObama.com. Retrieved November 25, 2008.