

我易通

用户名:

密码:

[登录](#) [注册](#) [忘记密码](#)

2008 第四届中国(成都)分布式能源国际研讨会

——推广分布式能源，促进节能减排，加强区域能源供应安全

2008.5.28-29 四川·成都

论文分类

- 综合
- 能源政策
- 节能新能源
- 热电与供热
- 石油天然气
- 循环流化床
- 煤炭
- 暖通空调
- 能源环保标准
- 项目方案
- 环境保护
- 电力工业
- 水利水电
- 燃气轮机
- 核能
- 化工
- 统计
- 其它

新书推荐



暂无图片

[节约能源资源政策法规汇编](#)



[城市垃圾的处理与利用技术](#)



暂无图片

[2007-2008年中国火力发电行业分析及投资咨询报告](#)



[太阳能制冷技术](#)

整体煤气化联合循环(IGCC)技术进展

段立强 林汝谋 金红光 蔡睿贤 [中国科学院工程热物理研究所] 2003-07-25

上世纪70年代初期由中东战争引发的石油危机以及不断恶化的环境污染问题，给世界带来巨大影响和冲击。西方主要工业国家从经济发展和国家安全的战略角度考虑，推行能源多样化的政策，并鼓励发电行业燃料多样化。根据对世界能源结构的分析，化石燃料中煤的储量丰富、价格低廉、供应稳定，但直接燃煤严重污染环境是一个不容忽视的问题。因此，各国政府在考虑利用储

量丰富的煤炭资源时，特别重视洁净煤技术的研究与开发工作。各种形式的洁净煤发电技术经过几十年的努力得到了很大发展。如整体煤气化联合循环(IGCC)，增压流化床燃煤联合循环(PFBC)，常压流化床燃煤联合循环(AFBC)，外燃式燃煤联合循环(IFCC)，直接烧煤粉(或水煤浆)联合循环(DFCCC)，整体煤气化燃料电池联合循环(IGFCC)以及磁流体发电联合循环(MH-DCC)等。但从大型化和商业化发展来看，近期各国开发研究的重点主要放在IGCC上，投入人力物力最多，已建和在建的示范项目也占多数。越来越多的实践证明：IGCC是最有发展前景的洁净煤发电技术。美国、西欧、日本等国相继提出并推行洁净煤计划^[1]。据统计，美国能源部自1986年开始实施洁净煤计划以来，经过长达9年，在5轮竞争性的论证后，目前共选中43个项目，项目投资超过70亿元^[2]，其中IGCC占的份额最大。

整体煤气化联合循环(IGCC-Integrated Gasification Combined Cycle)发电技术是将煤气化技术和高效的联合循环相结合的先进动力系统。它由两大部分组成，即煤的气化与净化部分和燃气-蒸汽联合循环发电部分。第一部分的主要设备有气化炉、空分装置、煤气净化设备(包括硫的回收装置)，第二部分的主要设备有燃气轮机发电系统、余热锅炉、蒸汽轮机发电系统。典型的IGCC发电系统如图1，IGCC的工艺过程如下：煤经气化成为中低热值煤气，经过净化，除去煤气中的硫化物、氮化物、粉尘等污染物，变为清洁的气体燃料，然后送入燃气轮机的燃烧室燃烧，加热气体工质以驱动燃气透平做功，燃气轮机排气进入余热锅炉加热给水，产生过热蒸汽驱动蒸汽轮机做功。

由于它采用了燃气-蒸汽联合循环，大大地提高了能源的综合利用率，实现了能的梯级利用，提高了整个发电系统的效率，更重要的是它较好地解决了常规燃煤电站固有的污染环境的问题。因此，世界各国纷纷建立了IGCC示范电站。表1列出国外已经建成的部分电站。截止1997年，全世界正在建设或计划建设的IGCC工程达24项，总功率8200MW，正在评估论证的IGCC有16项，总功率达7700MW^[3]。



暂无图片

2007-2008年中国齿轮
行业分析及投资咨询
报告



中国能源网论文库是中国最大的能源专业论文库，现收集论文几千篇，涉及到能源政策、环境保护、电力工业、热电冷联供、燃气轮机、石油天然气、节能与新能源、循环流化床等多个方面。

敬候读者对我们的工作提出宝贵意见。

希望作者与我们联系，我们可以免费为作者建立个人主页。

版权声明

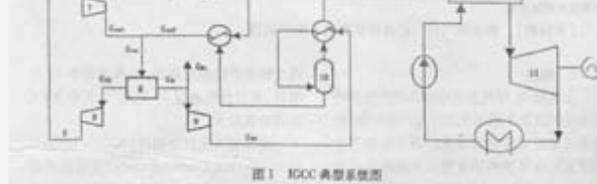


图1 IGCC典型系统图

- 1 气化炉, 2 净化系统, 3 压气机, 4 燃烧室, 5 燃气透平, 6 空分装置, 7 空气压缩机,
8 氧气压缩机; 9 氮气压缩机, 10 气饱和器, 11 余热锅炉, 12 蒸汽轮机

表 1 国外已建成的主要IGCC电站

国家	美国	美国	荷兰	美国	美国	美国	西班牙
电厂	Cool Water	LTGI	Buggenum	Wabash River	Tampa	Pi non Pine	Puertollano
投运时间	1984	1987	1994	1995	1996	1997	1997
净功率MW	96	161	253	265	250	100	300
气化炉型	Texaco	Destec	Shell I	Destec	Texaco	KRW	Prenflo
气化炉容量 t/d	1000	2200	2000	2500	2000	800	2640
气化炉台数	2台 一开一备	1台	1台	2台 一开一备	1台	1台	1台
燃机型号	GE-7E	WH-501D	Siemens-V94.2	GE-7FA	GE-7FA	GE-6FA	Siemens-V94.3
燃机功率 MW	65	110	156	198	192	61	190
燃机初温 °C	1085	1090	1105	1260	1260	1288	1250
净化方式	湿式	湿式	湿式	干式除灰湿式脱硫	湿式+10%干式示范	干式	干湿式除灰湿式脱硫
汽机功率 MW	55	51	128	104	121	46	145
蒸汽参数 MPa°C	8.6/510		12.9/511 2.9/511	10.3/3.1/510/510	10.3/538 2.2/538	6.363/510	12.7/3.7
总投资亿美元	2.63		4.62	3.58	5.06	2.32	6.91

至今，IGCC技术的发展已经过原理概念性开拓验证阶段，并进入商业示范验证阶段。在走向商业化应用的同时，许多学者又在研究构思新一代IGCC的框架和技术突破口。IGCC之所以受到重视，是因为它有以下几个优点：

(1) 高效率，且具有提高效率的最大潜力 IGCC的高效率主要来自联合循环，燃气轮机技术的不断发展又使它具有了提高效率的最大潜力。现在，燃用天然气或油的联合循环发电系统净效率已达到58%，本世纪初可望超过60%。随着燃气初温的进一步提高，IGCC的净效率能达到50%或更高。

(2) 煤洁净转化与非直接燃煤技术使它具有极好的环保性能 先将煤转化为煤气，净化后燃烧，克服了由于煤的直接燃烧造成的环境污染问题，其NO_x和SO₂的排放远低于环境污染排放标准，脱硫率>=98%，除氮率可达90%。废物处理量少，副产品还可销售利用，能更好地适应本世纪火电发展的需要。

(3) 耗水量少 比常规汽轮电站少30-50%，这使它更有利于在水资源紧缺的地区发

挥优势，也适于矿区建设坑口电站。

(4)易大型化 单机功率可达到300-600MW以上。

(5)能够利用多种先进技术使之不断完善 IGCC是一个由多种技术集成的系统，煤的气化、净化技术、燃气轮机技术以及汽轮机技术等的发展都为它的发展提供了强有力的支撑。

(6)能充分综合利用煤炭资源适用煤种广，能和煤化工结合成多联产系统，能同时生产电、热、燃料气和化工产品。

1 原理概念性验证阶段

在这个阶段，主要目的是通过建立各种试验电站向世人展示煤气化转化技术和高效联合循环热力系统相结合的IGCC作为一种新型的洁净煤发电技术不仅理论上可行，而且能够安全、可靠运行，真正“洁净”，解决常规燃煤电站所固有的污染问题，并且有可能大型化商业应用。

世界上第一座IGCC装置是1972年在德国Lünen市的Kellerman电厂，容量为170MW，采用五台Lurgi固定床气化炉，配Siemens公司V93型74MW功率燃气轮机等组成增压锅炉型联合循环。1972年投入试验运行时曾遇到一系列问题，经过调试改进，大多得到解决，但由于气化岛的实际空

气耗量比设计值大得多，导致装置出力和效率都低于设计值，加之粗煤气中含有焦油和酚等有害物质极难处理，该电站完成原定全部试验内容后于70年代末停运。尽管如此，但它作为tGCC的先驱开创了洁净煤发电技术新对代。

第一座IGCC电站未能长期运行的主要原因是气化炉问题。因而，如何经济有效地将煤转化为煤气并从中去除有害物质成为IGCC示范电站成败的一个关键。而世界上真正试运成功的第一座IGCC电站是建于美国加州DaggeLt的Cool Water(“冷水”)电站，它采用水煤浆供料、容量为1000t/d的Texaco喷流床气化炉。利用99.5%的氧气为气化剂，独立空分装置(N₂不回注)，常温湿法除尘脱硫技术。通过27100小时的运行考核，表现性能良好、运行可靠，尤其是排放污染很小，被誉为“世界上最清洁的燃煤电站”。美国同时建的另一座IGCC示范电站是建于Louisiana州Piquemine的Dow化工厂内的LGTI电站，它采用水煤浆供料、容量为2200t/d的Destec气流床，配西屋公司生产的110MW功率WH-501D燃气轮机，电站折合总功率为161Mw，净效率为34.2%(HHV)，从1984年4月投运，直到1994年3月停运累计进行33637小时，是目前世界上运行时间最长的IGCC机组。它曾对不同煤种进行试验，显示了Destec气化炉对不同烟煤都有好的适应性。

由此可知，Kellerman电厂为人们提供了一种将煤气化转化技术与燃气-蒸汽联合循环相结合的新思路，虽然它不是很成功，但是它为后来建IGCC示范电站提供了宝贵的经验和指出了努力的方向，并使它尽快地成为现实。Cool Water的成功证明了这种新型发电技术是可行的：一是它相当彻底地解决了污染问题，从表2完全可以证实这点；二是它高的运行可用率和负荷因素证明它有可能大型化商业应用，是实用的洁净煤发电方式。Cool Water电站在1987年7、8、9三个月内，机组的负荷因素曾达到88.7%、85.4%和96.7%，LGTI电站在1992-1993年度内的平均运行可用率已达到80%，LGTI的成功进一步证明了IGCC作为一种新的洁净煤发电方式的实用性。

表2 “冷水”电站中余热锅炉后排气的实测排放量

排放物种类	美国对燃煤电站规定的最新排放物限量 (mg/MJ)	烧SUFco煤时的实测量 (mg/MJ)	烧Illinois#煤时的实测量 (mg/MJ)	烧Pittsburg#煤时的实测量 (mg/MJ)
SO ₂ 高S燃料	258	7.03	29.24	52.46
SO ₂ 低S燃料	103			
NO _x	258	30.1	40.42	28.38
CO		1.72	1.72	<0.86
固体质点	13	0.43	3.9	3.9

总之，Cool Water和LGTI等第一批试验电站的运行成功，从原理上完全肯定了煤通过高压气化技术与先进的燃气-蒸汽联合循环相结合的洁净煤发电技术的新途径，重要的是从实践上验证了其技术的可行性，环保性能的优越性。但早期IGCC试验电站也存在一些明显问题，主要有：

(1) 供电效率低, 并没有显示出其高效率的优越性 Cool Water 电站供电效率仅 31.2% (HHV), LGTI 电站只达 34.2% (HHV)。造成效率低的主要原因是当时燃气轮机技术水平低, 应用 E 型技术, 初温不到 1100°C。再者是系统没有优化, 例如: N₂ 不回注, 未得到动力回收, 造成能量损失; 蒸汽循环没优化致使燃气轮机排气余热未获充分利用, 余热锅炉排向大气的温度为 205.6°C。另外, 采用水煤浆供料与高纯度的氧化剂和独立空分系统, 空分装置消耗功

率高达系统额定功率的 14.7%, 致使总厂用电率达 20% 等。

(2) 比投资费用和发电成本高 Cool Water 电站的比投资成本高达 \$2828 / kW, 远远高于有 FGD 设备的普通燃电站的比投资费用。

(3) 整个系统未进行综合优化严格地说, 在这个阶段的 IGCC 系统只能称之为 GCC 系统, 它仅是各种技术、设备的简单组合, 还没有考虑各子系统间的优化配置。比如空分系统与燃气轮机系统间的组合、余热锅炉及蒸汽轮机侧系统流程与参数选择等都未从影响系统总体性能的高度来综合优化。

2 商业示范验证阶段

自 Cool Water 电站成功运行后, 为了克服原理性验证阶段的 IGCC 呈现的种种缺陷, 突破制约 IGCC 商业化发展的瓶颈(供电效率、发电成本和运行可用率), 美国、英国、日本、荷兰、德国、印度等国纷纷建起了 IGCC 示范电站, 其中最受关注的是美国 CCT 计划中的 Wabash River、Tampa 和 Pi-non Pine 电站和欧洲西班牙的 Puertollano 电站以及荷兰的 Buggenum 电站等 IGCC 示范工程(见表 1)。人们在通过不同的途径来寻找 IGCC 的关键技术的突破和整个系统的性能的提高。另外, 从 IGCC 系统的组成看, IGCC 是多种设备, 多种技术集成(包括燃气轮机、煤气化装置、煤气净化系统、空分装置以及余热锅炉和蒸汽轮机等)的一个复杂系统。因此, IGCC 整个系统的性能取决于子系统的性能及各子系统间的匹配, 而各子系统的组合及其性能都直接影响整个系统的性能指标。这一批示范电站(第二代 IGCC)一方面通过提高于系统的性能和系统综合优化的方法来改进整个系统性能, 提高供电效率; 另一方面还通过大型化和简化系统等手段来降低发电成本, 提高其经济性。

2.1 燃气轮机系统

IGCC 联合循环系统是以燃气轮机为主, 燃气轮机与蒸汽轮机的功比为 1.3-2.0, 因此, 燃气侧系统是影响整个 IGCC 系统性能指标的主要因素, 燃气轮机性能的提高是发展 IGCC 的前提。凡是能使燃气轮机性能改进的技术手段都将最终提高 IGCC 的整体性能。为此, GE、ABB 等公司不断推出高性能的燃气轮机, 不断提高初温。表 3^[4] 列出燃气轮机及其 IGCC 性能参数的典型值。显然, 八十年代, 初温 1100°C 燃气轮机组成的 IGCC 还难以和常规汽轮机电站相匹敌; 而九十年代后, 研制出一批高性能燃气轮机, 如 GE 公司推出的 F、FA 型和 Siemens 推出的 3、3A 型燃气轮机, 其透平初温为 1250°C-1310°C, 可建造供电效率 40%-46% 的大型 IGCC 装置, 在热力性能上足以和传统的燃煤电站相竞争。如西班牙的 Puertollano 电站配 Siemens 的 V94.3 燃气轮机的初温为 1250°C, 其净效率可达到 43% (LHV); 美国 Tampa 电站配 GE 的 7FA 型燃气轮机的初温为 1260°C, 其净效率达 42% (LHV)。美国能源部还专门制定了先进透平系统 (AST) 计划, 以推动燃气轮机的技术开发。至今新型商业应用工业燃气轮机的透平进气初温高达 1430°C, 用其组成的 IGCC 系统净效率可达 50% 以上。

表 3 燃气轮机及其 IGCC 热力性能参数与预测

	燃气轮机初温 (°C)	简单循环		燃油气联合循环		IGCC	
		单机功率 (MW)	供电效率 (%)	单机功率 (MW)	供电效率 (%)	单机功率 (MW)	供电效率 (%)
80年代	1100	100	32-34	150	45	180	36
90年代	1250-1288	230	34-38	350	55	400	40-46
2000年	1430	280	38-40	480	60	600	≥50

2.2 煤气化系统

利用高压煤气化技术生产合成煤气, 以取代天然气作为燃料, 是发展 IGCC 技术的一个重要内容。目前 IGCC 采用的气化炉主要有三种型式: 喷流床、流化床和固定床。它们各有优缺点。对发电用途的气化炉, 主要要求是高的碳转化率 η_c 和冷煤气效率 η_1 、大容量(尽可能做到单炉电站)以及与发电设备运行的匹配性好等。高压纯氧和富氧氧化的喷流床单炉容量最大(2000-3000t / d), 且由于反应温度高达 1500-2000°C, 碳的转化率很高(97% 以上), 特别是干法供煤并采用未反应炭粒再循环措施时, 如西班牙 Puertollano 电站采用的 Prenflo 气化炉和 Buggenum 电站的 Shell 气化炉的 η_c 都达到 99%, η_1 达到 80% 左

右。而对水煤浆供料喷流床的 η_c 和 η_1 都要低些, Tex-aco气化炉 η_c 一般只有96%-98%, η_1 只有69%-75%。因此, Destec气化炉采用两段气化方式, 把 η_1 提高到80%-82%。固定床气化炉, 由于煤在炉内停留时间很长, 反应温度也高, 因而碳的转化率最高, 可达99.5%, 但煤气的生产能力最低, 不能满足电站大型化需要, 且含焦油、酚类数量多, 难以处理。对于流化床气化炉如KRW和U-Gas朋来说, 碳的转化率仅91%-97%, 比前两种要低很多。另外, 以空气做为气化剂时, 可省去复杂空分系统, 但煤气热值低, 不利于燃烧, 且气化炉容量小, 不利于电站大型化; 而采用纯度高的氧气要比用空气为气化剂时冷煤气效率高, 但却增大了厂用电率, 这要综合考虑。

2.3 煤气净化系统

从气化炉产生的粗煤气含有大量有害杂质, 无法满足燃气轮机安全可靠运行和环保法规的要求, 必须预先净化处理, 以除去粗煤气中的硫化物、粉尘、氮化物以及碱金属与卤化物等有害物质。现多采用常温湿法除尘脱硫工艺, 相对成熟。由于在净化前, 先要将高温煤气冷却降温, 虽然可以回收部分煤气显热, 但由于能量的品位降低, 必将影响到IGCC整体的效率。因此, 人们正致力于研究开发高温干法脱硫技术, 它与煤气低温净化技术相比能使IGCC的净效率提高0.7-2.0个百分点。目前Tampa电站采用常温湿法的煤气净化工艺再配合10%干法净化方式, 不过高温干法净化还处于试验阶段。

2.4 空分装置与空气测系统整体化

为了供给气化炉所需的纯氧或高浓度富氧的气化剂, 需设置制氧空分设备及其系统。对于不同空分系统利用不同的压力等级(高压或低压), 但目前对各种压力等级空分系统大多采用深度冷冻方法分离空气以制取氧气。如对独立空分系统, 常用低压(0.6MPa)流程, 一般需把空气冷却到-172℃左右才进入制氧过程。由于空气系统中氧气和氮气的压缩耗电很大, 采用上述常规空分工艺流程的IGCC的厂用电耗率较高, 因此人们正在研究使液 N_2 和液 O_2 先增压、后气化的空分制氧流程。IGCC中空分系统和燃气轮机系统组成的空气侧系统的整体综合优化对IGCC系统的热力性能、比投资费用以及运行可靠性等都有很大影响。从空分系统的空气来源看, 空气侧整体化有独立空分、完全整体化和部分整体化三种一体化方式。独立空分会使厂用电率增大, 但它运行灵活; 完全整体化方式的厂用电率低, 但运行不灵活。比如荷兰Bugge-num电站采用完全整体化, 厂用电率仅10.92%; 部分整体化可兼顾两方面的优点。随着IGCC空分整体化程度的提高, IGCC的经济性也相应提高。但是完全整体空分方式IGCC的运行灵活性却受到限制。因此, 目前IGCC电站较多倾向于采用部分整体化方式。

2.5 余热锅炉及蒸汽轮机系统

性能先进的IGCC离不开高效率的蒸汽底循环, 余热锅炉和蒸汽轮机系统不可避免要与煤气化、净化系统等进行质量、能量交换, 因此IGCC蒸汽系统的联结、匹配与优化要比一般的联合循环复杂得多、也重要得多。为了充分地吸收各子系统的余热、废热, 目前IGCC系统中。一般根据燃气轮机排气温度, 合理地选择蒸汽循环流程, 当燃气轮机排气温度 T_4 低于538℃时, 不采用再热循环方案; 当高于580℃时, 采用多压再热方案。另外, 一般不从汽轮机拍汽加热给水, 同时尽可能提高蒸汽初温和初压。如Buuggenum电站采用双压再热方案(12.9MPa / 511℃, 2.9MPa/511℃)。随着燃气轮机初温的提高, IGCC中蒸汽循环完全有可能采用更高蒸汽参数, 现在有学者在研究设计亚临界、甚至超临界的IGCC蒸汽系统。

制约IGCC走向商业化的另一因素是其比投资费用和发电成本过高, 即经济性问题。早期IGCC示范工程的单位造价高达\$2500 / kW以上, 目前计划筹建的项目也介于\$1500-\$2500 / KW之间。为了突破这个瓶颈, 人们采取的措施主要有:

(1)继续改进关键设备, 优化和简化系统, 不断提高系统性能 如应用新一代燃气轮机(G型或H型系列产品)和高温干法净化技术, 优化整体空分方案以及发展IGHAT和多联供IGCC等。技术进步和性能提高将使IGCC投资成本迅速下降。表4^[4]列出GE公司对IGCC技术性能和成本关系的分析结果。在对整个系统的优化组合方面, 过去的优化措施多局限于对特定的流程结构或具体案例分析, 或特定条件下的某些参数的优化, 这种方法还是局部优化, 相对于整个系统来说, 未必是最优的。因而, 现在研究一种参数和流程同步优化^[5-8], 尝试利用此方法对IGCC系统燃气侧顶循环系统、空分系统侧及余热锅炉侧底循环系统进行了优化并得出了一些有意义的结论。

表4 IGCC技术性能和成本的联系

	IGCC系统类型	燃气轮机初温 (°C)	IGCC热效率% (LHV)	装置比投资成本 (\$/KW)
九十年代 初期	常规PC机组		36-37	1200
	常规IGCC低温净化, 独立空分	1260 (F型)	38-42	1400-1600
九十年代 中期	低温净化, 整体空分	1260 (F型)	43-46	1350-1550
	高温净化, 整体空分	1260 (F型)	45-48	1180-1380
九十年代 后期	高温净化, 整体空分	1370 (G、H 型)	46-50	1130-1330

(2)继续增大IGCC电站的装机容量,使之达到规模经济的水平,并尽可能采用单台大容量的气化炉和燃气轮机,取消备用炉。许多研究表明,装机容量对投资的影响很大,若机组功率每翻一番,单位造价将会下降10%-20%。

(3)争取早日转入批量生产 不言而喻,若干台(第N台)后装置的造价将明显低于首台。如美国CRSS公司曾对500MW级IGCC批量生产对价格影响进行详细分析,其结论为:若干台后造价将比第一台下降40%。在进行经济性分析时,多采用下列的成本减小系数R:第一台, R=1.1; 第二台, R=0.9; 第三台, R=0.8; 第四台, R=0.7。

(4)燃用廉价的高硫煤 IGCC的优势还在于能燃用高硫煤,若燃用比常规PC电站便宜10-25%的煤,则会使发电成本降低10%左右。再很好利用销售副产品(包括元素硫、玻璃状渣等),则经济性还会进一步改善。

随着IGCC技术进一步发展,特别是达到规模经济容量水平和批量生产后,其单位造价会大幅度下降,预计本世纪初就可降到PC+FGD的水平。表5^[4]中列出几种不同发电方案的技术经济指标,以便进行比较。

除了上述供电效率和成本问题外,IGCC电站运行的可靠性、可用性和维护性也是使它尽快步入商业化阶段的重要因素。只有它的运行可用率提高了,才能承担发电设备的基本任务。第一阶段的IGCC电站就已经显示出它有足够高的可靠性及可用率,已经接近常规电站的可用率。Bugge-num电站IGCC机组在1997年6月以后的运行可用率已达到85%,而气化岛部分的运行可用率已达95%^[9]。这证明IGCC发电技术能满足电力工业对发电设备的基本要求。随着IGCC各系统技术的不断完善,它的运行可用率还有走高的趋势,从而显示出它的强大的竞争力。

在污染物排放方面,也开发了一些新技术,比如抑止NO_x产生的措施有:加湿合成煤气;回注N₂;向燃烧室注水或蒸气;应用预混稀相燃烧的干式低NO_x(DLN)燃烧室;分级燃烧和催化燃烧等措施。

表5 几种不同发电方案的技术经济指标比较

		PC		PFBC	IGCC
		常规	带FGD		
电站规模 (MW)	目前	300-1300	300-1300	80-350	200-600
	2010			500	1000
供电效率 (%)	目前	36-38 (SC: 40-42)	34.5-36.5	36-39	40-46
	2010			40-50 (第二代)	50-54
用水量比		100	100	70-80	50-70
环保性能 (排放量比)	SO _x	100	6-12	5-10	1-5
	NO _x	100	18-90	17-48	17-32
	粉尘	100	2-5	2-4	2
	固态废料	100	120-200	95-600	50-95
	CO ₂	100	107	98	95
单价造价\$/KW		1160	1400	1300-1400	1400-1700
发电成本*mi lls/kWh		48-57	56-66	54-66	49-63

*摘自美国吉尔帕特公司的经济分析报告(以1991年美元价为计算基准)

3 新一代IGCC的构思与研究

二十多年来,依靠集成技术进展和综合,IGCC技术发展迅速,系统净效率已经提高到42%-46%,单机功率已达300MW等级,正在由商业性示范走向商业化应用。与此同时,

许多学者也从不同角度看到，煤洁净转化技术与高效联合循环热力系统相结合的IGCC洁净煤发电技术还有提高性能的巨大潜力。因此，他们正在探索研究新技术、新概念、新循环，以开拓新一代IGCC系统。

3.1 先进的关键技术

从现有IGCC系统五大集成技术寻求大的突破，是进一步提高系统性能的现实途径。这包括：

(1)高性能的高温燃气轮机 依靠高温材料和冷却技术的改进来不断提高透平初温 T_3 ，仍然是燃气轮机发展的主要趋势。文献[10]对IGCC、PFBC-CC以及AFBC-CC三种系统性能进行分析得出的结论认为IGCC的优势在高温段(1200℃以上)，当初温提高到足够高时，升温获益渐渐冲淡气化和净化环节能量损失的影响，且由于透平排温的同步上升，蒸汽侧也能采用高参数(亚临界、超临界)，有着更大的提高效率的潜在能力。正在商业化的 $T_3=1430℃$ 的G型机组，也许是传统气冷技术和材料所能达到的初温的极限。目前正在开发的H型技术的主要特征是采用更有效的蒸汽冷却技术，超级合金材料隔热涂层与先进工艺(定向结晶和单晶叶片)，还有先进的气动热力学设计方法(如可控扩压原理)和低 NO_x 燃烧器等，有望把 T_3 提升到1400-1600℃。若要把 T_3 再提升到1600-1800℃，只能借助于革命性新材料，它应是小密度($<5g/cm^3$)和更好的综合高温性能，新陶瓷材料是一种选择。

(2)适用于发电用的大容量、高性能气化装置单炉3000t / d以上的气化炉对IGCC达到规模经济大型化是必要的，喷流床在这方面有优势，但进一步提高热力性能的潜力有限。不同技术融汇和渗透将使煤气化技术有大的突破，如气化技术和流化床燃烧技术的汇合，炉内固态脱硫和炉外气体净化技术的互补，使煤在气化过程中就经济有效地把大部分硫去掉，从而简化或省去后置的煤气净化设备。Pi non Pi ne电站采用KRW流化床气化炉，干煤块供煤方式，炉内加石灰石粗脱硫，第二步细脱硫过程在固定床中进行。

(3)高温煤气净化技术它在500-600℃的高温条件下除尘和脱硫，使系统热效率有所提高，并简化系统、降低比投资成本。Tampa电站正在试验的482-538℃条件下高温脱硫和除尘装置，粗煤气经高温过滤器除灰后，用锌钛氧化物为脱硫剂吸取 H_2S ，再生系统中则产生浓度为13%的 SO_2 ，被送到硫酸厂中去制造硫酸，脱硫率为98%。Pi non Pi ne电站正试验的高温脱硫除灰系统采用高温旋风分离器和陶瓷过滤器(593℃)除灰，第二级脱硫过程是在一个以金属氧化物为吸附剂的固定床中进行的，脱硫率为98%--99%^[9]。高温净化技术的突破将主要依赖于新材料和新脱硫剂的开发，这包括长寿命的陶瓷过滤器和高重复回收使用的脱硫剂。

(4)新型空分装置 空分流程分为四种(见表6)^[3]，现在多为气氧压缩，该流程在化工中普遍使用，技术比较成熟，但由于氧、氮的压缩是在气体状态下，因此耗电大。采用液氧泵内压缩技术在消耗同样功率的前提下可得到更高的氧气出口压力，这样可节省厂用电。发展空气的膜分离技术，可以简化空分装置并降低厂用电率。

(5)高参数的汽轮机 高温燃气轮机和高参数汽轮机技术的联合应用是保证IGCC系统高性能的关键，也是IGCC技术发展的一个趋势。IGCC中蒸汽循环采用更高蒸汽参数，如亚临界、甚至超临界不是技术问题，而是时间问题。

美国能源部预测了今后20年IGCC发电系统的技术水平、经济性和排放值可能达到的目标如表7。

表6 空分流程分类比较

流程种类	气氧压缩	液氧蒸发	液氧泵内压缩	部分液氧泵
压缩机	氧气压缩机	氧气压缩机	氧气压缩机+液氧泵	氧气压缩机+液氧泵
	氮气压缩机	氮气压缩机	氮气压缩机+液氮泵	氮气压缩机+液氮泵
氧气出口压力	低	较低	高	较高

表7 IGCC的发展目标预测

年份	供电效率 (%)	投资成本 (\$/KW)	排放值 (1h/10 ⁶ Btu)		
			NO _x	SO _x	粉尘
2000	45	1350	0.08	0.20	0.02

2010	52	1150	0.07	0.17	0.015
2020	60	1100	0.06	0.15	0.01

3.2新的热力循环

热力循环是动力装置发展的理论基础,也是IGCC系统的核心。广义总能系统新概念的提出,使得IGCC系统中热转功热力系统的研究思路有了突破,重在不同循环、不同技术、不同产品的有机结合和多目标优化。

(1)整体煤气化湿空气透平循环(Inter-grated Gasification Humid Air Turbine, IGHAT)它是把新颖的HAT循环和先进的燃煤技术结合起来的洁净煤电发电技术,是降低IGCC的比投资费用和发电成本的有效途径,具有高效率、高比功、低污染、低费用和变工况性能好等特点。美国采GE的MS7001F改造和ABB公司用HAT专用的发动机方案,并和Texaco煤气化装置组成500MW级的IGHAT型发电主力机组,效率分别为40.7%和43.69%,它们分别高于相同机组改造的IGCC的效率制约,同时比投资费用低于常规IGCC的相应值^[11]。因此,随着技术的不断提高和发展,IGHAT也将有更广阔的发展前景,困难在于如何解决空气加湿过程中大量消耗水的问题。

(2)整体煤气化燃料电池联合循环(IGFC-CC)热力学循环的热转功效率总是要受卡诺循环效率制约,而把非热力学热转功过程和热力循环结合成的多重联合循环,会有很高的热效率(突破60%)。IG-FC就是把煤气化产生的合成煤气的化学能直接转化为电能的燃料电池和常规的燃气

或和蒸汽循环联合的多重联合循环,它有很高热效率,也有很好的环保特性。

(3)磁流体发电联合循环(MHD-CC)它是把利用等离子体直接发电的磁流体发电装置(MHD)和常规的燃气或蒸汽热力循环结合的另一种多重联合循环。理论上它能达到很高的热效率和很好的环保性能,但目前处于关键技术攻关阶段。

(4)多联产和综合利用IGCC系统IGCC系统很容易实现热电联产,也可以做成同时生产多种化工产品和燃料气的多联产系统,还可做到废弃物资源化(如灰渣、高纯元素硫和硫酸等回收利用),而有利于煤炭资源的综合利用和降低发电成本。

3.3 全新概念的新一代能源动力系统

大量研究表明,传统动力系统中燃烧过程是造成能量损失和引起环境生态污染的主要环节;另外,所有常规净化技术对减少CO₂排放的效果都不大。所以,燃烧过程的革新和新的CO₂分离回收技术应用将推动全新概念的新一代能源动力系统开拓发展。

(1)新型化学链反应的动力系统(CLSA)^[12-13]它应用化学链反应燃烧新机理实现无火焰燃烧过程,将传统燃烧过程分解为两个气固化学反应(燃料和金属氧化物的还原反应,金属与氧的氧化反应)。其新颖点在于:一是回收CO₂不需要消耗额外的能量,由于燃气例的燃气作完后只有CO₂的水蒸汽,因此只需要利用简单的物理方法即可回收CO₂;二是它从根本上去除了NO_x,这主要由于燃料与空气不直接接触以及反应温度远低于NO_x产生的温度所致;还有就是它的高热效率,据分析,与1200℃级的分离CO₂的燃气-蒸汽联合循环电站比较,它的热效率要高出17个百分点。

(2)带CO₂分离回收的IGCC半封闭式循环系统^[14]它采用富氧为气化剂,燃烧室产物主要由CO₂和H₂O组成,经过膨胀、热回收及冷凝过程,燃烧室产物几乎是CO₂(H₂O经冷凝被去除),为了保持循环的质量平衡,部分气体被排出去,其余的参与再循环。被排出的气体(主要由CO₂组成)经过压缩、液化,很容易将它储存利用。从理论上讲,此种电厂几乎无污染。因为燃烧室内缺乏N₂,NO_x排放很小,硫化物在净化过程中被去除。CO₂又被回收起来。目前,基于这种循环方式的示范工程正在筹建中。

二十一世纪火电站发展要求有较高的能源利用率,较好的经济性并且要具有良好的环保性能,即达到能源(Energy)、环境(Environment)、经济性(Economy)三者结合(三E)。IGCC能很好地满足这些需求,因此,它必将成为新世纪火电动力发展的主要方向。

参考文献

[1]DOE / USA, Clean Coal Technology Demonstration Prgram. February, 1993

[2]Dr. Benjamin, C. B. Hsieh. Overview of Clean Technology in the United States. The United States of America and the People' s Republic of China Experts Report on Integrated Gasification Combined -Cycle Technology (IGCC). Dec, 1996

[3]郑莉莉. 整体煤气化联合循环燃气侧子系统热力学研究. 中国科学院工程热物理研

究所硕士论文. 1999年

[4]中国科学院工程热物理研究所、美国杜兰大学、中美专家关于整体煤气化联合循环(IGCC)技术报告, DOE/FE-0357. 1996

[5]L Jiang, R Lin, R Caj, H Jin, L Zheng. Study on Thermodynamic Characteristic and Optimization of Steam Cycle System In IGCC, ECOS '99, TOKYO: 1999

[6]刘泽龙, 林汝谋. IGCC空气侧整体综合优化的研究. 中国工程热物理学会, 工程热力学与能源利用学术会议, 1997年

[7]江丽霞, 林汝谋, 蔡睿贤. 整体煤气化联合循环系统特性分析研究. 工程热物理论, 2000, 21(1)

[8]James C. Corman Douglas M. Todd. Technology Considerations for Optimization IGCC Plant Performance. IASME, 93-GT-358, 1993

[9]焦树建. 对目前世界上五座IGCC电站技术的评估. 燃气轮机技术, 1999, 12(2)

[10]林汝谋, 蔡睿贤, 江丽霞. 三种燃煤联合循环系统特性分析比较. 中国动力工程学会《能力与环境》学术会议特邀报告, 杭州, 1998

[11]赵丽风, 刘泽龙, 张世铮. 整体煤气化湿空气透平(IGHAT)循环的性能分析. 中国工程热物理学会, 工程热力学与能源利用学术会议, 1999

[12]金红光. 新颖化学链式燃烧与空气湿化燃气轮机循环. 中国工程热物理学会, 工程热力学与能源利用学术会议, 1999

[13]Jin H., and Ishida M., A New Advanced IGCC Power Plant with Chemical-Looping Combustion. Proc. of TAIES' 97, Beijing, 1997

[14]Pado Chiesa, Giovanni Lozza. CO₂ Emission Abatement in IGCC Power Plants by Semiclosed Cycles. Part A: With Oxygenblown Combustion, ASME, 98-GT-384, 1998

[15]中国IGCC示范项目可行性研究课题组. 整体煤气化联合循环(IGCC)发电示范项目技术可行性研究. 内部报告, 1998

[16]林汝谋, 蔡睿贤, 肖汉汉整体煤气化联合循环-燃煤联合循环发电技术之一, 燃气轮机技术, 1993, 6(4)

[17]Destec Energy, Inc., IGCC Pre-Feasibility Study for Chinese IGCC Team. 1994

[18]邓世敏, 危师让, 林万超. IGCC热力系统的特点及提高热经济性潜力分析. 燃气轮机技术, 1998, 11(2)

[19]焦树建. 整体煤气化燃气-蒸汽联合循环(IGCC). 北京: 中国电力出版社, 1996
本文原载于《燃气轮机技术》2000年第1期

燃气轮机设备推荐

招聘栏目开通

能源行业投资咨询报告

Copyright © 1999-2006 Falcon Power Ltd. All rights reserved. 群鹰公司 版权所有

地址: 北京市海淀区北蜂窝8号中雅大厦A座14层 邮政编码: 100038

电话: 010-51915010,30 传真: 010-51915237 Email: china5e@china5e.com

支持单位: 中国企业投资协会|中国动力工程学会|中国电机工程学会|中国城市燃气协会 承办单位: 群鹰公司 免责声明
京ICP证040220号

