

美国煤气化联合循环发电技术 研究现状和发展趋向

董卫国

(水电部西安热工研究所)

[提要]本文综述了煤气联合循环发电技术的发展概况,介绍了美国五种主要气化技术的研究情况、试验结果和发展趋向。

主题词 煤气化 联合循环

一、概 述

从七十年代开始,由于石油价格上涨和对环境污染的严格控制,很多先进工业国家相继开展了新型燃煤发电技术的研究。其中煤气化燃气蒸汽联合循环(IGCC)被认为是最有希望的发电方式。与具有烟气除硫的常规燃煤电厂相比,IGCC具有以下主要优点:

1. **热效率高** 联合循环的高效率足以弥补煤的气化过程中的损失。随着高温燃气轮机技术的发展,热效率为41%—42%的IGCC电站是完全可能实现的。而最好的燃煤亚临界蒸汽电站的热效率仅37%。

2. **对环境污染小** 煤中所含硫的99%以上能以元素硫的形式回收。 NO_x , SO_2 的排放量远远低于美国NSPS的规定。

3. **便于分期建设** 使装机容量与负荷增长相适应。首先安装燃油或天然气的燃气轮机;第二阶段加装余热锅炉和汽轮机,扩大发电能力;第三阶段再加装煤气化系统,最终组成整体煤气化联合循环电厂。

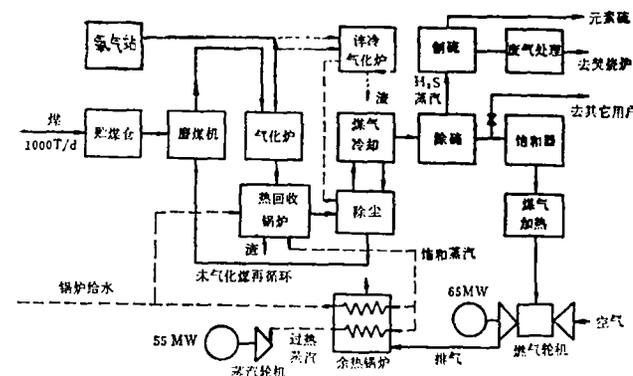
十几年来,IGCC发电技术的研究工作在各国深入开展,尤以美国、西德、英国和日本等国进行的工作为多。早在1972年西德STEAG公司在Lünen市建成了总容量为170MW的Kellermen煤气化联合循环试验电站,采用Lurgi固定床气化技术,用空气作气化剂产生低热值煤气,日处理煤能力为1680t/d,实际电站发电热效率为34%。目前美国有五种主要的IGCC技术正在研究开发中,其中四种已开始了不同阶段的商业性试验,一种尚在计划阶段。

本文收到日期:1988年5月5日

• 49 •

二、研究现状

1. 德士古 (Texaco) 和南加州爱迪生公司 (SCE) 合作, 在加利福尼亚州的 Dagget 建立了美国第一座 IGCC 商业性试验电站。即容量为 120MW 的 Cool Water 煤气化联合循环电站, 耗资 2.63 亿美元, 于 1984 年 6 月投入运行, 计划进行为期五年的试验运行。图 1 所示为该电站的流程框图。



该电站采用 Texaco 加压喷流床气化技术, 以氧气作为气化剂, 生产中热值煤气, 日处理煤能力为 1000t/d。净化后的煤气用作 MS7000 燃气轮机的燃料, 燃气轮机实际发电容量为 65MW。分别利用热煤气和燃气轮机排气热量的两台余热锅炉产

生 11MPa 的过热蒸汽, 驱动 55MW 的蒸汽轮机发电。装置循环热效率为 31%。试验电站还配置有一台淬冷气化炉, 生煤气直接在气化炉底部的水池中淬冷, 不需专门的冷却系统, 因而气化炉尺寸小造价低。但是不能产生可用蒸汽, 这时总发电容量下降到 87MW。这种气化炉适用于矿口电站。到目前为止, 已对三种煤进行了成功的试验。设计值和实际运行性能列于表 1。SO₂、NO_x 和粉尘的排放量仅为美国 NSPS 规定值的 10%—20%。99.5% 的硫以元素硫的形式得到回收。用水量仅为具有烟气除硫的常规燃煤电站的 40%。

图 1 Cool Water 试验电站流程框图

生 11MPa 的过热蒸汽, 驱动 55MW 的蒸汽轮机发电。装置循环热效率为 31%。试验电站还配置有一台淬冷气化炉, 生煤气直接在气化炉底部的水池中淬冷, 不需专门的冷却系统, 因而气化炉尺寸小造价低。但是不能产生可用蒸汽, 这时总发电容量下降到 87MW。这种气化炉适用于矿口电站。到目前为止, 已对三种煤进行了成功的试验。设计值和实际运行性能列于表 1。SO₂、NO_x 和粉尘的排放量仅为美国 NSPS 规定值的 10%—20%。99.5% 的硫以元素硫的形式得到回收。用水量仅为具有烟气除硫的常规燃煤电站的 40%。

表 1 Cool Water 电站实际运行性能

煤种	设计值	实际运行性能		
		西部低硫煤 SUFCO	依利诺斯*6煤	匹茨堡*8煤
含硫量 (量重%)	0.48	0.4	3.1	2.9
耗氧量 (t/d)	962	908	885	1004
毛出力 (MW)	114	118	120	129
硫回收量 (t/d)	4.6	3.8	30	27
碳转化率 (%)	98.3	98.3	97.2	97.8
气化炉耐火材料寿命 (年)	1	4	2	2
总热耗 (MJ/kwh)	12.14	12.19	12.34	12.09

对进一步提高气化过程经济性, 德士古已和能源部商定开发适用于喷流床的热煤气净化技术。

2. 美国 Allis—Chalmers 公司早在七十年代就开发研究 KILN GAS 气化技术（旋转窑炉气化技术），后来在 Wood River 电站建立了试验装置，并于 1983 年 6 月开始投入试验运行。图 2 为该试验装置的流程框图。

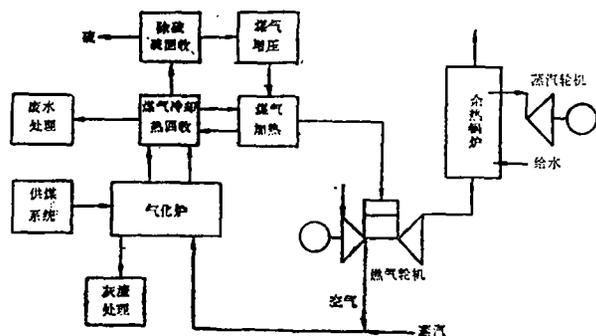


图 2 Kilngas 联合循环流程框图

气化炉是一个长 51.82m，直径为 4m 的旋转窑炉。煤由一端进入，沿微微倾斜的炉身，随着窑炉的转动向另一端移动。在炉内经历干燥、预热、脱去挥发成分和气化四个阶段。窑炉由电动机带动旋转（55r/min）。试验煤种为依利诺斯*6高硫煤，日处理煤能力 600t/d，生产的低热值煤气热值为 5.4—5.96MJ/m³。炉内工作压力为 0.42MPa。作为气化剂的蒸汽和空气由炉底若干入口进入煤层下部。不同温度的生煤气分别由进料端和出渣端引出，经过各自的旋风分离除尘器、热量回收装置、湿法除尘除焦油装置后，再合并进入采用 stretford 法的除硫装置，在那里 H₂S 由碱性溶液吸收并直接转化成元素硫。这样可除去煤中含硫量的 90% 以上。脱硫后的煤气由管道输送到该电站 3 号机锅炉作燃料。

到 1986 年底止，该试验装置完成了 5 项主要性能试验，均达到预期目标。碳的转化率 93%。可以气化各种高硫高灰量煤。

与其它气化技术相比 Kilngas 有以下主要优点：①气化温度相对较低，因此可以获得较高效率；②用空气和蒸汽作气化剂，不要制氧设备，节省基本投资和运行维修费用；③挥发性物质不经转化直接进入煤气中。

可望在 90 年代采用 Kilngas 气化技术组成 IGCC 电站。设想中的第一座电站发电总容量为 400MW，包括两台 145MW 的燃气轮机，余热锅炉和一台 120MW 的蒸汽轮机。日气化煤能力为 3800t/d，采用依利诺斯*6煤，热耗为 9.5MJ/(kw·h)，最低可运行于 25% 额定负荷。

3. 美国 DOW 化学公司在路易斯安那州的 Plaquemine 建立的气化试验装置于 1987 年 4 月开始投入运行。日气化煤能力 2400—3000t/d，向现有的 160—200MW 联合循环电站供气。这是迄今为止世界上最大的煤气化联合循环电站。图 3 为该装置流程图，点划线内的部分为原有设备，不包括在试验装置内。DOW 研制的气化装置以氧气为气化剂，生产中热值煤气，热值为 8.57—9.18MJ/m³。

与其它喷流床气化技术相比，DOW 气化过程的特点是在气化炉内有两级气化过程，以保证获得高的转化率，尤其对低质煤。首先，水煤浆经预热后送入气化炉，炉内压力 2.24MPa，在燃烧器喷嘴处与氧气混合。炉内温度由进入的氧气量来控制，使高于灰熔点，以保证熔渣的排放。在第一级内产生的热煤气进入第二级，约占总给煤量

气化炉是一个长 51.82m，直径为 4m 的旋转窑炉。煤由一端进入，沿微微倾斜的炉身，随着窑炉的转动向另一端移动。在炉内经历干燥、预热、脱去挥发成分和气化四个阶段。窑炉由电动机带动旋转（55r/min）。试验煤种为依利诺斯*6高硫煤，日

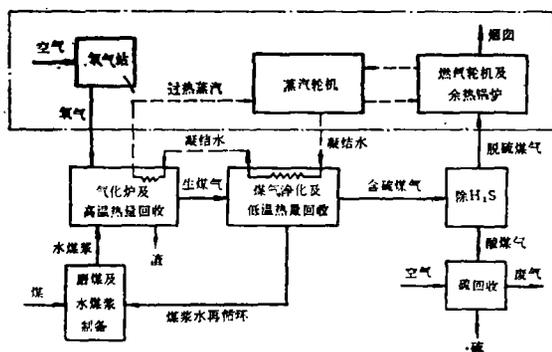


图3 DOW煤气化装置流程图

20%的水煤浆直接进入气化炉的第二级，冷却热煤气。这种两级布置的气化炉有利于提高碳的转化率。DOW 预计，碳的转化率可高达99.5%。与气化炉做成一体的热回收锅炉把煤气冷却到约230℃，同时产生4.5MPa的过热蒸汽供给蒸汽轮机。然后煤气通过一个高效文丘利喷淋除尘器，除尘后的煤气进一步冷却，进入除硫装置。各种不同温度水平的热回收设备加热水和蒸汽，供给气化、除硫等过程用。

该气化装置原计划采用褐煤，但实际试验中将采用低硫烟煤。煤中所含的硫在气化过程中几乎全部变成 H_2S ，然后再还原成元素硫。

4. 美国 Shell 石油公司在得克萨斯州 Deer Park 建造了一套煤气化试验装置，采用 Shell 加压喷流床气化技术，按计划应在1987年底投入运行。图4为该试验气化系统的流程图。

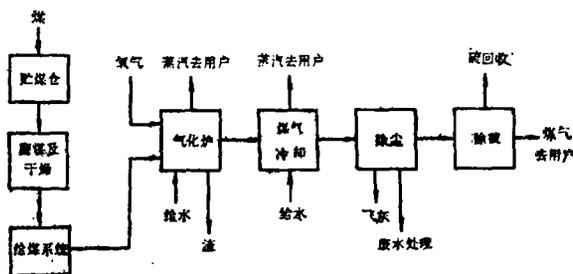


图4 Shell 气化系统流程图

该气化装置采用干式料斗给煤方式，以氧气为气化剂，气化能力为250t/d高硫烟煤或400t/d高灰量褐煤。日产 $340km^3$ 中热值煤气及384t蒸汽供基地使用。

煤首先磨成煤粉并经干燥，

进入气化炉时含水量约为7—9%。产生的生煤气经冷却和净化后用作锅炉、燃气轮机燃料，或用作化工原料。煤气主要成分为 H 和 CO 。

Shell 气化技术的特点有：

- ①对煤的性质较不敏感，几乎能气化任何煤种，并获得高的转化率。
- ②气化过程热效率高，原煤中所含能量的80%转移到煤气中，其它17%以高压蒸汽的形式回收。
- ③有极好的环境排放标准，净化后的煤气用作燃料时，能满足对商用锅炉和燃气轮机 SO_2 及 NO_x 的排放限制。气化过程的排渣、飞灰和少量净化过程废水也已经过处理并满足环境保护标准。

④气化设备的单机容量高。

5. 最近美国 Kellogg 公司、通用电气公司和宾夕法尼亚电力公司计划资助 建立一座 60MW 的商业性 IGCC 试验电站, 作为能源部 (DOE) 煤的净化燃烧技术项目的一个内容。电站将建在宾夕法尼亚州的 Cairnbrook, 按计划在 1987 年 秋季开工, 1989 年底投入运行, 然后进行为期两年的商业性试验运行。试验电站采用 Kellogg-Rust-Westing house (KRW) 的流化床气化技术。以空气为气化剂, 干式供煤, 灰结团除渣。煤首先进入气化炉的燃烧区, 很快挥发、破碎、剩余的碳在气化炉的上部与蒸汽反应而气化。随煤气飞出的微小碳粒由一外部旋风分离器收集并送回到气化炉中。试验装置日气化煤能力为 485t/d 烟煤, 产生的煤气供联合循环电站用。构成联合循环的燃气轮机为通用电气公司的 MS6001 型燃气轮机。

在这一项目中采用 KRW/DOE 的热煤气净化技术, 使进入燃气轮机的煤气温度可高达 540—650℃。高温净化的核心是将石灰石加入气化炉中, 实行炉内脱硫, 然后在炉外用锌铁氧体作吸收剂, 除去高温硫化物, 达到深度除硫。煤气中的固体微粒是用粉末冶金制成的金属过滤器来除去的。

11000 小时的试验表明, 在采用东部高硫煤时, 炉内除硫效率可达 93%。其余的硫在炉外由锌铁氧体来吸收。

三、发展趋向

由于上述若干试验电站已经达到或超过了预期的运行和环保特性指标, 成为当今世界上最清洁的燃煤电厂。

EPRI 对 IGCC 发电技术的投资费用和发电成本进行了对比分析。以 80 年代后期投运的

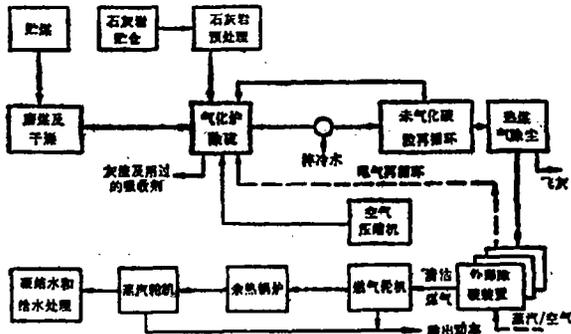


图 5 60MW IGCC 试验电站流程图

IGCC 500MW 电站为例, 与具有烟气除硫的常规燃煤电厂相比, 发电成本为:

常规燃煤电厂	4.8美分/(kW·h)
Texaco 型IGCC	4.8美分/(kW·h)
Shell 型 IGCC	4.7美分/(kW·h)

到目前为止已有 40 个成员单位的美国公共煤气协会, 对 IGCC 技术 尽快商业化的可能性进行了细致的研究。认为 IGCC 电厂不仅具有满足严格排放标准的巨大潜力, 并且有可能成为近期煤碳利用的重要手段。可望在 90 年代电力需求增长时正式开始商业应用。1987 年在巴黎举行的世界能源大会预计, IGCC 发电装置将成为 21 世纪 火力发电的主力机组。

在美国公共煤气化协会成员中, 已有 16 家电力公司表示考虑采用 IGCC。其中两 家已决定建立 IGCC 电站。波托马克 (Potomac) 电力公司已和 Fluor 公司签订了在

马里兰的 Dickerson 附近建造一座 750MW IGCC 电站的合同。1988 年完成初步设计。弗吉尼亚电力公司已和有关单位共同完成了 500MW IGCC 电站的原则性设计和经济分析, 采用 Shell 喷流床气化技术, 配置 4 台气化能办为 1000t/d 的气化炉和 Kraftwerk 的 V84 型燃气轮机, 计划 1995 年发电。

通用电气公司提出了一种新的设想, 尝试能否对煤气化联合循环电站的系统进行简化。计划采用喷注蒸汽燃气轮机来代替燃气轮机和蒸汽轮机的联合循环, 可以提高效率, 减少设备和简化系统。该项技术将采用移动床气化炉, 高温除硫, 高温旋风除尘, 并采用高效的航空改型燃气轮发电机组。余热锅炉回收燃气轮机排气中的热量, 产生蒸汽, 然后重新注入到燃气轮机。

另外, 煤气化技术还可用于对老厂的改造并用于热电联产。

IGCC 电厂还可以发展综合利用, 生产液体燃料和化工原料, 如硫、甲醇和氨等。使电力公司成为能生产能源和有关产品的综合经济实体。

参 考 文 献

- <1> Gool Water IGCC at threshold of commercial application, International Power Generation, 10, (8), 1987, 10.
- <2> Cornett M. S.: Process improvements make intergrated gasification combined cycle viable, Modern Power Systems, 1987, 10.
- <3> Coal gasification: Ready for the 1990s, Electrical World, 1987, 4.
- <4> Jason Makarsi: Gasifier makes coal-fired turbine a commercial powerplant, Power, 1987, 4.
- <5> Irwin Stambler: Utilities backing comb cycle coal gasification powerplants, Gas Turbine World, 1986, 7-8.

Integrated Gasification Combined Cycle Technology in U.S

Dong Weiguo

(Xian Thermal Power Engineering Research Institute)

Abstract

This paper presents a review on the development of integrated coal-gasification combined cycle (IGCC) technology in U.S. Several IGCC units currently in various stages of research are introduced.

Key words: gasification, combined cycle