

焦树建 编著

整体煤气化燃气—蒸汽 联合循环

(I G C C)

中国电力出版社

整体煤气化燃气—蒸汽 联合循环 (I G C C)

焦树建 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

在“洁净煤发电技术”方面,整体煤气化燃气-蒸汽联合循环技术(IGCC)的发展已取得令人瞩目的成绩,它能较大幅度地提高发电厂效率,并使燃煤污染问题获得非常满意的解决。因此人们认为进入 21 世纪后,IGCC 将是一种最有发展前途的燃煤发电方式。本书详细介绍了燃气-蒸汽联合循环、IGCC、HAT 和 IGHAT 循环的工作原理和性能,并对 IGCC 的各组成部分(煤的气化炉、除尘脱硫设备、燃气轮机和蒸汽轮机、余热锅炉、制氧空分设备)逐个进行了分析介绍,还以作者研究所得的理论为指导,对当今世界上实际采用的 10 个 IGCC 工作系统的设计思想和特点进行了分析,最后还介绍了 IGCC 的经济评估方法和结果。本书可供从事能源、发电工程科研、管理、生产的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

整体煤气化燃气-蒸汽联合循环/焦树建编著. —北京:
中国电力出版社, 1996

ISBN 7-80225-233-0

1. 整… I. 焦… II. 煤气化-燃气蒸汽联合循环
发电-技术. III. TM613.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 14417 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地质矿产局印刷厂印刷

各地新华书店经售

1996 年 12 月第一版 1996 年 12 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 11.875 印张 312 千字

印数 0001—1580 册 定价 16.60 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

从 70 年代开始,国外就有计划地开展了“洁净煤技术”的研究,它主要着眼于 21 世纪能源资源的现实和环境保护的要求。当然,对于以煤作为主要能源资源而环境污染情况又日趋恶化的我国来说,密切关注这项技术的发展,并力争创造条件使该技术为我所用,已成为我国能源工作者责无旁贷的义务。

在“洁净煤发电技术”方面,燃煤的燃气-蒸汽联合循环,特别是整体煤气化联合循环 (IGCC) 技术的发展最令人瞩目,它能较大幅度地提高发电厂的热效率,并使污染问题获得非常满意的解决。人们认为:在 2000 年后,除了增殖反应堆外,IGCC 可能是一种最有发展前途的发电方式。

目前,一些发达的工业国家都在积极地建立 IGCC 示范电站。预期到 2000 年时,大约有 10 座 IGCC 电站将正式投入商业示范性运行。其单机功率可以达到 300~400MW,供电效率则介于 40%~45% (LHV) 之间,运行可用率有望实现 75%~80%。但比投资费用尚嫌偏高。预期到 2010 年左右,若能批量生产,其比投资费用就有可能低于有 FGD 装置的燃煤电站,而其供电效率则有可能提高到 50%~52%。对于急需提高发电效率并改善环境污染情况的我国来说,这些优点不能不引起人们的关注。因而,在我国建立一座先进的 IGCC 示范电站的任务必将提到日程上来。人们期望通过它来积累实践经验,以便为我国的洁净煤发电技术开创道路。

近几年来,作者悉心从事燃煤的燃气-蒸汽联合循环的理论研究和参数优化选择的计算工作,并详细地研究了国外正在建设的一些 IGCC 示范电站的方案、运行经验和设计思想。为了推进 IGCC 技术在我国的具体应用和发展,能使更多的能源工作者熟

悉 IGCC 的基本理论和工作过程，特编著本书，以供读者参考。

本书共十二章，其中第二到第四章是根据作者研究获得的理论成果，详细地介绍燃气-蒸汽联合循环、IGCC、HAT 和 IGHAT 循环的工作原理和性能，以便使读者能从理论上熟悉这些循环的特性和特征。自第五章起，将对 IGCC 的各个组成部分，如：煤的气化炉，除灰脱硫设备，适用于 IGCC 的燃气轮机和蒸汽轮机，余热锅炉以及制氧空分设备，逐个介绍和分析它们的特点和工作性能，以便使读者能具体掌握这些主要部件的工作原理和特性。在第十一章中，则以作者研究获得的理论为指导，对当今世界上实际采用的 10 个 IGCC 工作系统的设计思想和特点进行分析，从中可以总结出一些合理设计 IGCC 工作系统的基本原则和方向。在第十二章中则介绍了 IGCC 的经济评估方法和结果。

作者希望通过本书的出版和发行，能使更多的读者了解 IGCC 的工作原理和特性，以及它对于我国发电事业和环保工作的重要意义，以便促使这种新技术在我国获得实际应用和发展。

本书承蒙中国科学院工程热物理研究所林汝谋研究员审阅，并提出了许多宝贵的意见，在此深表感谢。由于作者的理论水平和实践经验有限，书中难免有许多缺点和错误，恳请读者批评指正。

作 者

1995 年 12 月于清华园

目 录

前 言

第一章 绪论 (1)

§ 1-1 联合循环的概念及其发展现状 (1)

§ 1-2 整体煤气化燃气-蒸汽联合循环的基本概念 (5)

§ 1-3 整体煤气化燃气-蒸汽联合循环的发展过程
与现状 (11)

§ 1-4 整体煤气化燃气-蒸汽联合循环的优缺点及
其发展前景 (22)

第二章 常规的余热锅炉型燃气-蒸汽联合循环

性能的理论分析 (25)

§ 2-1 热效率与功比率计算关系式的推导 (25)

§ 2-2 各种参数的选择问题 (31)

§ 2-3 各种参数对 η_{th} 和 η_{ex} 影响关系的分析 (36)

§ 2-4 有补燃和无补燃的联合循环特性的比较 (40)

第三章 燃煤的整体煤气化燃气-蒸汽联合循环

性能的理论分析 (44)

§ 3-1 以空气为气化剂的 IGCC 热效率与功比率
计算关系式的推导 (44)

§ 3-2 以氧气为气化剂的 IGCC 热效率与功比率
计算关系式的推导 (53)

§ 3-3 一种计算 IGCC 供电效率的简化式 (62)

§ 3-4 各种参数的选择问题 (63)

§ 3-5 各种参数对 η_{th} 影响关系的分析 (65)

§ 3-6 计算示例 (68)

§ 3-7 发展 IGCC 的关键技术 (77)

第四章 湿空气透平 (HAT) 循环与整体煤气

化湿空气透平 (IGHAT) 循环性能的	
理论分析	(80)
§ 4-1 概述	(80)
§ 4-2 HAT 循环供电效率的数学表达式	(82)
§ 4-3 喷水蒸发掺混倍率 x 的选取问题	(93)
§ 4-4 HAT 循环供电效率的另一种表达方式	(94)
§ 4-5 HAT 循环比功的数学表达式	(97)
§ 4-6 HAT 循环的某些特性随大气温度的变化 规律	(98)
§ 4-7 IGHAT 的工作性能	(102)
第五章 在整体煤气化燃气-蒸汽联合循环中	
使用的煤气化炉	(108)
§ 5-1 IGCC 发电系统对煤气化炉的要求	(108)
§ 5-2 煤气化炉的技术特性指标	(109)
§ 5-3 煤气化过程的化学反应特征	(111)
§ 5-4 喷流床气化炉	(113)
§ 5-5 固定床气化炉	(128)
§ 5-6 流化床气化炉	(135)
§ 5-7 几种气化炉工作特性的比较	(142)
§ 5-8 气化炉煤气成分的预测	(145)
§ 5-9 选择气化技术时应考虑的煤种的若干性质	(149)
第六章 在 IGCC 中使用的粗煤气的净化设备	
和系统	(153)
-§ 6-1 概述	(153)
§ 6-2 常温湿法的粗煤气净化系统	(156)
§ 6-3 高温干法的粗煤气净化系统	(171)
第七章 在 IGCC 中使用的燃气轮机	
§ 7-1 概述	(186)
§ 7-2 燃气轮机燃烧室的改造问题	(187)
§ 7-3 燃气轮机其他部件的改造问题	(195)
§ 7-4 IGHAT 循环燃气轮机的改造问题	(199)
第八章 在 IGCC 中使用的蒸汽轮机	
	(205)

§ 8-1	概述	(205)
§ 8-2	蒸汽轮机蒸汽参数的选择	(207)
§ 8-3	蒸汽轮机的结构特点	(213)
§ 8-4	在 IGCC 或联合循环中燃气轮机、蒸汽轮 机和发电机的布局关系	(220)
§ 8-5	关于扩容改造电站中原有的蒸汽轮机的改 造问题	(226)
第九章	在 IGCC 中采用的余热锅炉	(228)
§ 9-1	概述	(228)
§ 9-2	余热锅炉设计时节点温差和接近点温差的选择	(232)
§ 9-3	余热锅炉设计参数的选择	(237)
§ 9-4	余热锅炉的汽水系统	(240)
§ 9-5	余热锅炉的结构	(247)
§ 9-6	余热锅炉运行中可能发生的问题	(248)
§ 9-7	余热锅炉设计时需要考虑的其他一些问题	(250)
第十章	在 IGCC 中采用的制氧空气分离系统 及其设备	(252)
§ 10-1	概述	(252)
§ 10-2	在 IGCC 中可能采用的几种制氧空分系统	(252)
§ 10-3	深度冷冻法制氧的基本原理及其流程	(264)
第十一章	IGCC 工作系统分析	(278)
§ 11-1	概述	(278)
§ 11-2	采用水煤浆喷流床气化炉的 IGCC 工作系 统的分析	(280)
§ 11-3	采用干煤粉喷流床气化炉的 IGCC 工作系 统之分析	(297)
§ 11-4	采用流化床气化炉的 IGCC 工作系统之分析	(311)
§ 11-5	采用液态排渣固定床气化炉的 IGCC 工 作系统之分析	(323)
§ 11-6	综合分析	(325)
§ 11-7	设计 IGCC 工作系统时值得考虑的某些规律	(329)
第十二章	IGCC 的经济评估	(333)

§ 12-1	概述	(333)
§ 12-2	经济指标及其计算方法	(333)
§ 12-3	某些因素对 IGCC 技术经济指标的影响	(337)
§ 12-4	IGCC 的投资费用之构成	(348)
§ 12-5	IGCC 发展过程中技术经济指标和设备单位 造价变化趋势的预测	(352)
§ 12-6	IGCC 与其他燃煤发电设备经济指标的比较	(355)
§ 12-7	展望	(360)
附录 1	若干工业化国家燃煤电站的排放极限量规定	(362)
附录 2	美国燃煤电站的最新排放标准	(363)
参考文献		(364)

第一章 绪 论

§ 1-1 联合循环的概念及其发展现状

众所周知,自 50 年代开始,国外的蒸汽轮机发电技术是与燃气轮机发电技术同步发展的。随着各自热力参数的提高,蒸汽轮机和燃气轮机的单机容量和供电效率都已获得了巨大的发展。表 1-1 中给出了我国蒸汽轮机发电机组的技术参数。从中可以看出:随着主蒸汽参数的提高,其供电效率和供电煤耗的改善情况。

表 1-1 我国蒸汽轮机发电机组的技术参数

单机 容量 (MW)	蒸汽参数		供电煤耗与效率			
	压 力 (MPa)	温 度 (℃)	煤 耗 (gce [*] /kWh)	平均煤耗 (gce/kWh)	供电效率 (%)	煤耗降低率 (%)
6	2.84	435	600~800	700	17.55	100
12~25	3.43	435	500~510	505	24.33	72.14
50~100	8.83	535	391~429	409	30.04	58.43
125	12.75	550/550	382~386	384	31.99	54.86
200	12.75	535/535	376~388	382	32.16	54.57
300	16.2	550/550	376~382	379	32.42	54.14
600 (引进机组)				331	37.12	47.29

* gce 为克煤当量,相应于我们常用的标准煤的克数。

表 1-2 中则给出了国外某些燃气轮机发电机组的技术参数。从中可以看出:目前,燃气轮机发电机组的单机容量已经达到 200MW 以上,其供电效率也已提高到 35%~41.57%,它不仅能作为调峰机组使用,而且也能承担基本负荷。

表 1-2 某些典型的燃气轮机发电机组的技术参数^[1]

公司名称	机组型号	ISO 基本 功率(MW)	压 比	燃气初 温(℃)	供电效 率(%)	单位售价 (\$/kW)
GE 发电	PG9231(EC)	169.0	14.2		34.93	183
	PG9331(FA)	226.5	15.0	1288	35.66	188
ABB	GT13E2	164.3	15.0	1260	35.71	210
	GT26	240.0	30.0	1235	37.79	204
Siemens (KWU)	V64.3A	70.0	16.6	1310	36.81	319
	V84.3A	170.0	16.6	1310	38.00	
	V94.3A	240.0	16.6	1310	38.00	198
西 屋	501G	235.2	19.2	1427	39.00	180
	701F	236.7	15.6	1349	36.77	187
GE 船用 与工业	LM6000 -PA	41.2	29.6	1160	39.78	296
R-R 公司	Trent	51.19	35.0		41.57	304
普 惠	FT8	25.42	20.3	1121	38.13	362

从表 1-1 和表 1-2 中可以发现:目前,蒸汽轮机和燃气轮机发电机组的供电效率都已达到 40%左右的水平。为了进一步提高发电机组的效率,除了发展超超临界参数(30MPa/600℃/600℃以上)的蒸汽轮机技术外,人们设想:倘若能把蒸汽轮机循环与燃气轮机循环彼此结合起来的话,是否可以创造出一种效率更高的发电设备呢?

这种可能性确实是存在的。因为燃气轮机的排气温度相当高(一般总是在 500~600℃之间),而燃气工质的流率又非常大(对于大功率机组来说,工质流率在 300kg/s 以上),显然,在这股高温燃气中蕴储的能量是非常大的。倘若能在燃气轮机的后面安装一台余热锅炉,利用燃气轮机的排气余热去加热蒸汽轮机系统的给水,使之产生高温、高压的水蒸气,送到蒸汽轮机中去做功,这样,就能多发出一部分机械功,相应地必然可以提高燃料蕴储的

化学能与机械功之间的转化效率。这种循环方案就是余热锅炉型的燃气-蒸汽联合循环，如图 1-1 所示。

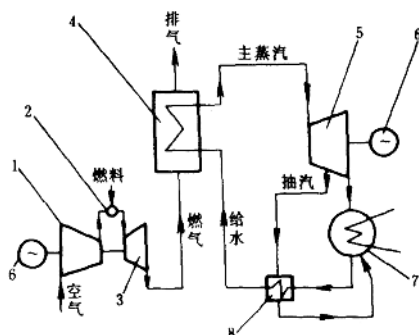


图 1-1 余热锅炉型的燃气-蒸汽联合循环

1—压气机；2—燃烧室；3—燃气透平；4—余热锅炉；
5—蒸汽轮机；6—发电机；7—凝汽器；8—给水加热器

自 50 年代初开始实现上述燃气-蒸汽联合循环方案以来，余热锅炉型的联合循环获得了突飞猛进的发展，特别是近几年来，发展的趋势更加明显。它的供电效率已经达到 54.8%（即将达到 58%），远远领先于任何形式的发电设备，并能装备成为承担基本负荷的大功率电站。加上这种设备的投资费用比较低、设备简单、占地面积小，建设周期短，因而更加具有广泛使用的潜力。

但是，目前这种联合循环主要使用的燃料是蒸馏油和气体燃料（包括天然气、焦炉煤气），尚不能直接燃用煤。

表 1-3 中给出了目前已商品化了的某些余热锅炉型燃气-蒸汽联合循环发电机组的技术数据，从中可以看出其容量和效率方面达到的水平。

据不完全统计：到 1990 年底全世界已经投入运行的烧天然气的联合循环发电机组的总功率为 14019MW。从 1991 年到 1996 年间将投产运行的新机容量的总和为 27400MW。倘若把烧油的联

合循环机组的容量也包括进去的话，总量已超过 4 亿 kW。

表 1-3 某些联合循环发电机组的技术数据^[1]

公司名称	机组型号	ISO 基本 功 率 (MW)	供 电 效 率 (%)	所配燃气轮 机 的 情 况	单位 售价 (\$/kW)
GE 发电	S-109EC	259.6	53.5	1 台 MS9001EC	
	S-109FA	348.5	54.8	1 台 MS9001FA	255
	S-209FA	700.8	55.1	2 台 MS9001FA	238
ABB	KA13E2-1	241.6	52.5	1 台 13E2, 双压蒸汽轮机	
	KA13E2-1	244.2	53.0	1 台 13E2, 三压蒸汽轮机	282
	KA13E2-2	490.8	53.3	2 台 13E2, 三压蒸汽轮机	
	KA13E2-3	737.3	53.4	3 台 13E2, 三压蒸汽轮机	255
	KA13E2-4	983.5	53.5	4 台 13E2, 三压蒸汽轮机	
	KA26-1	361.5	56.9	1 台 GT26	262
	KA26-2	725.9	57.1	2 台 GT26	
Siemens /KWU	GUD1.94.2	235.0	51.9	1 台 V94.2	255
	GUD1S.94.3A	354.0	57.2	1 台 V94.3A	
西 屋	1×1 501F	250.5	54.8	1 台 501F	
	1×1 501G	348.8	58.0	2 台 501G	
	2×1 501G	697.6	58.0	2 台 501G	

联合循环的这种发展趋势已经使得世界上燃气轮机和蒸汽轮机的制造工业发生了重大变化。自 1987 年开始，美国发电用燃气轮机的年生产总功率数已经超过了发电用蒸汽轮机的年生产总功率数。这是世界上发电设备生产过程中出现的一次重大的历史性转折。

联合循环发电设备的发展前景确实是乐观的，但是，目前它主要只能燃用天然气和液体燃料。对于我国来说，由于能源资源是以煤炭为主的，因而令人关注的问题是：这种联合循环有无燃用固体燃料——煤的可能性，以及它是否能够很好地解决因燃煤

而引起的环境污染问题。这正是当今世界上发电技术研究的关键所在。

答案是基本肯定的。但尚有许多关键技术需要研究和开发,它还需要经历一个发展和完善的过程。本书将在研讨常规的烧油或烧天然气的余热锅炉型燃气-蒸汽联合循环的基础上,着重讨论燃煤的整体煤气化燃气-蒸汽联合循环的各种方案及其关键技术,以求推动这种先进的洁净煤发电技术在我国兴起和发展。

§ 1-2 整体煤气化燃气-蒸汽联合循环 的基本概念

整体煤气化燃气-蒸汽联合循环(简称 IGCC)是在 70 年代西方国家石油危机时期开始研究的一种洁净煤发电技术,它的技术概念和路线是非常清晰的,那就是:使煤在气化炉中气化成为中热值煤气或低热值煤气,然后通过处理,把粗煤气中的灰分、含硫化物(主要是 H_2S 和 COS)等有害物质除净,供到燃气-蒸汽联合循环中去燃烧做功,借以达到以煤代油(或天然气)的目的,这样,就能间接地实现在供电效率很高的燃气-蒸汽联合循环中燃用固体燃料——煤的愿望。

显然,在这种技术方案中,燃气轮机、余热锅炉以及蒸汽轮机部分都是常规的成熟技术,所不同的主要是煤的气化和粗煤气的净化设备而已。这种燃煤的燃气-蒸汽联合循环统称为整体煤气化燃气-蒸汽联合循环(IGCC)。

人们希望通过这种技术方案,既能提高燃煤电站的供电效率,又能解决燃煤所带来的环境污染问题。因而它很有可能成为下一世纪燃煤发电设备的一种发展方向。

当然,作为一种先进的洁净煤发电技术,除了必须解决上述两大问题外,还必须要求它能具有运行的可靠性和较高的可用率,并希望其建厂的比投资费用和发电成本都能与有尾气脱硫装置(FGD)的常规燃煤电站相匹敌。目前,IGCC 正是沿着这个方向

快速地发展着。

为了使读者能对 IGCC 有一个实际的概念,下面,让我们具体介绍一下世界上最早试验过的两种 IGCC 方案。

1972 年在德国 Lünen 的斯蒂克电站投运了世界上第一个 IGCC 的示范装置^[3]。但是该循环方案是在增压锅炉型燃气-蒸汽联合循环的基础上设计的, 其热力系统如图 1-2 所示。

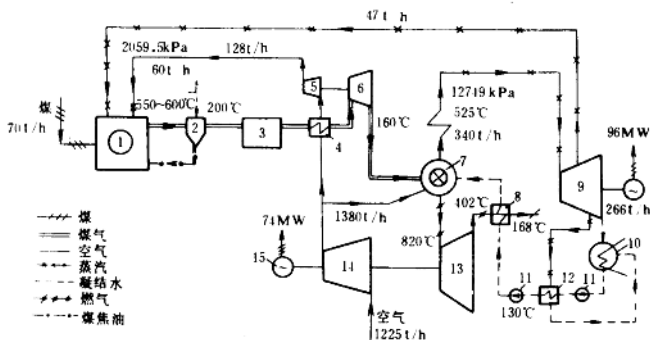


图 1-2 斯蒂克电站的整体煤气化燃气-蒸汽联合循环的热力系统

- 1—鲁奇气化炉；2—洗涤冷却器；3—除硫装置；4—空气冷却器；
5—空气增压器；6—煤气膨胀透平；7—增压锅炉；8—给水加热器；
9—蒸汽轮机；10—凝汽器；11—水泵；12—低压给水加热器；
13—燃气透平；14—压气机；15—发电机

该系统的总发电容量为 170MW。燃气轮机发电 74MW, 蒸汽轮机发电 96MW。为了煤的气化, 安装了 5 台固定床式的气化炉 (简称为 Lurgi 炉), 每台的耗煤量为 10~15t/h, 其中一台备用。其压力为 2.0595MPa, 煤的粒度为 5~30mm, 气化剂是空气和水蒸气, 气化炉出口的煤气温度为 550~600℃, 经洗涤净化后煤气的低位发热量为 6.62MJ/m³, 燃气透平前灰尘的含量小于 2mg/m³, 可以保证透平叶片不被磨损。高压的煤气首先流经煤气

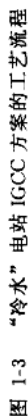
膨胀透平 6, 在其中做功, 拖动空气增压器 5, 使煤气压力降为 1.0788MPa, 随即进入增压锅炉 7 中去进行燃烧。锅炉排出的燃气温度为 820℃, 进到燃气透平 13 中去做功, 带动压气机 14, 并发出电功。燃气轮机的高温排气 (402℃) 用来预热锅炉的给水, 使其最终的排气温度降为 168℃。由增压锅炉产生的蒸汽的参数为: 12.749MPa、525℃, 蒸发量 340t/h。气化炉需用的水蒸气是从蒸汽轮机的中间级中抽取的, 需用的空气则由燃气透平带动的压气机的出口引出, 经空气冷却器 4 冷却后, 由空气增压器 5 增压到 2.0595MPa 后供入气化炉的。这股空气的流量大约占压气机 14 输出空气流量的 11.4%, 所剩的高压空气将供入增压锅炉, 与洁净煤气混合燃烧。整个电站实际达到的供电效率为 34%。

显然, 这个方案开创了煤在联合循环中应用的先例, 但是由于鲁奇气化炉的运行不很正常, 加上粗煤气中含有较多数量的煤焦油和酚, 甚难处理, 致使该示范工程最终被迫停运了。

世界上公认的真正试运成功的 IGCC 是建于美国加州 Daggett 的“冷水” (Cool Water) 电站^[4], 该厂建成于 1984 年 5 月, 其工艺流程的方框图如图 1-3 所示。

在 IGCC 方案中如何经济有效地把煤气化成为煤气, 并从中除去灰分和 $H_2S + COS$ 等污染物, 是整个工程成败的关键。

在“冷水”电站中采用了两台以水煤浆为燃料的喷流床式的德士古 (Texaco) 气化炉。其中一台是主气化炉, 另一台是备用的激冷式气化炉。浓度为 60% 的水煤浆用正排量泵喷入主气化炉中去, 在 4.2345MPa、1200~1538℃ 的条件下, 与纯度为 99.5% 的氧气作用, 气化成为主要成分是 H_2 、 CO 、 CO_2 与水蒸气、低位发热量为 9.8725MJ/m³ 的中热值煤气。那时, 煤中所含的硫将转化成为 H_2S 和少量的 COS 。从主气化炉中出来的高温煤气和处于熔融状态的灰渣将进入辐射冷却器, 在其中产生 11.1286MPa 的饱和蒸汽。经过初次冷却的煤气随即进入对流冷却器, 以进一步冷却产生水蒸气。这两股饱和水蒸气在汇集后, 被送到位于燃气



1—制氢设备；2—激冷式气化炉；3—Claus 设备；4—尾气处理装置；5—焚烧炉；6—煤气加热器；7—压气机；8—发电机；9—燃烧室；10—燃气透平；11—饱和器；12—余热锅炉；13—蒸汽轮机；14—Sclaxol 除硫装置；15—煤气冷却器；16—质点洗涤器；17—酸性水汽塔；18—德士古气化炉；19—辐射冷却器；20—对流冷却器；21—渣灰水的分离器；22—型式磨煤机；23—蒸发器；24—地下煤仓；25—贮渣坑