

*Coal Water Slurry Gasfication Technology and
Numerical Simulation Computational Method*

水煤浆气化技术 及数值模拟计算方法

◆ 于海龙 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

水煤浆气化技术 及数值模拟计算方法

于海龙 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水煤浆气化技术及数值模拟计算方法 / 于海龙著.
—杭州: 浙江大学出版社, 2012. 11
ISBN 978-7-308-10734-1

I. ①水… II. ①于… III. ①水煤浆—煤气化—数值模拟—计算方法 IV. ①TQ536.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 243019 号

水煤浆气化技术及数值模拟计算方法

于海龙 著

责任编辑 李峰伟
封面设计 王波红
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州星云光电图文制作工作室
印 刷 杭州杭新印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 9.75
字 数 237 千
版 印 次 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-10734-1
定 价 32.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换
浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

前 言

水煤浆气化技术在近年来一直受到世界各国的高度重视,我国“六五”、“七五”、“八五”、“九五”科技攻关项目中一直列有水煤浆技术。由此水煤浆技术在我国得到了空前的发展,并在发展中取得了可喜的成绩。然而,与发达国家相比,我国的水煤浆气化技术还存在许多问题,在喷嘴的设计与制造、大容量高压煤浆泵的制造、喷嘴与气化炉结构的配置、数值模拟计算机软件的开发、高温炉衬耐火砖的制造、PDP软件包的设计等方面还不尽如人意。另外,由于受到Texaco(德士古)水煤浆气化技术专利的限制,在引进时都要向其支付昂贵的技术专利费,因此开展不同原料(如渣油、油水煤浆、焦水煤浆、黑液水煤浆等)的气化技术是解决这个问题的良好途径。

本书即在目前我国水煤浆气化技术存在的上述问题下开展了部分研究工作。利用实验室现有的设备和技术结合其他形式水煤浆喷嘴的优点,开发了三通道多级内混撞击式水煤浆气化喷嘴,并进行了大量的试验,对喷嘴内各部件结构尺寸对雾化的影响展开了研究,通过优化选择确定了各部件的结构尺寸,得到了最佳雾化效果的水煤浆气化喷嘴,确定了喷嘴内各部件结构尺寸对雾化的影响规律;在岑可法导师的指导和帮助下开发了新型多口水煤浆气化炉,并利用数值模拟计算方法对不同炉侧喷嘴入口高度、不同炉侧喷嘴入口角度等因素对气化炉内流场分布的影响进行了冷态数值模拟,得到了不同形式的气化炉内流场分布、颗粒浓度分布等,确定了最佳形式的喷嘴与气化炉结构配置方式,同时将上述因素对气化炉内流场分布、颗粒浓度分布、压力分布等进行了冷态试验研究,得到的结果与数值模拟计算结果吻合良好,确定了数值模拟计算代替试验研究的可行性;利用数值模拟计算方法对现场工业炉气化过程进行了数值模拟计算,并进行了现场工业炉试验测试,数值模拟计算方法得到的结果和试验测试结果吻合很好,证实了该数值模拟计算方法的可靠性和优越性;利用上述方法对新型多喷嘴口水煤浆气化炉进行了热态水煤浆气化过程的数值模拟,确定了不同氧煤比、煤浆浓度、气化压力、炉侧喷嘴入口角以及各喷嘴不同煤浆量和氧气的配比对气化过程和出口煤气成分的影响规律,得到了不同影响因素下气化炉内的温度分布、速度分布、压力分布,CO、CO₂、H₂、H₂O、CH₄、O₂等的浓度分布规律,同时得到了出口煤气组成,为今后气化炉的设计和运行提供了理论依据

和指导,并且为气化炉的开发设计和改造提供了一套完整的数值模拟计算方法;进一步运用该方法对焦水煤浆、油水煤浆在该气化炉内的气化过程进行了数值模拟,为今后不同原料的气化提供了理论依据和指导,并且为不同原料气化炉的开发和设计提供了一套可行的简便方法。

通过笔者的研究证实,利用数值模拟计算方法进行水煤浆气化炉的初期开发或改造是切实可行的,不但节省了大量的人力、物力资源,缩短了开发周期,而且可以为气化炉的运行提供理论指导。

于海龙
2012年7月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
引言	(1)
1.1 国外开发概况	(3)
1.1.1 德士古水煤浆气化技术的开发概况	(3)
1.1.2 道水煤浆气化技术的开发概况	(4)
1.2 国内开发概况	(5)
1.2.1 国内早期开发	(5)
1.2.2 西北化工研究院中试	(6)
1.2.3 鲁南化肥厂工业示范装置	(7)
1.3 各种煤气化工艺比较	(7)
1.3.1 Texaco 水煤浆气化技术	(9)
1.3.2 道化学公司水煤浆气化技术	(11)
1.3.3 Shell 煤气化技术	(11)
1.3.4 鲁奇循环流化床煤气化技术	(11)
1.3.5 固定层常压气化技术	(12)
1.3.6 鲁奇块煤加压气化工艺	(12)
1.3.7 UGI 煤气化工艺	(12)
1.4 目前水煤浆气化工艺存在的技术难题	(13)
1.4.1 气化喷嘴	(13)
1.4.2 高压煤浆泵	(13)
1.4.3 喷嘴与气化炉结构的配置	(13)
1.4.4 气化炉的设计和数值模拟计算方法	(13)
1.4.5 气化炉运行参数计算软件	(13)
1.4.6 气化机理研究	(13)
1.4.7 向火面耐火砖	(14)
1.4.8 排渣	(14)
1.5 若干建议	(14)
1.5.1 开展冷模试验	(14)
1.5.2 开展不同原料的气化试验	(14)
1.5.3 开展气化炉数值模拟计算方法的研究	(15)
1.6 本书的工作内容	(15)
1.6.1 新型喷嘴的开发	(15)
1.6.2 新型喷嘴雾化过程试验研究	(15)

1.6.3	新型水煤浆气化炉的开发和冷态数值模拟	(15)
1.6.4	新型水煤浆气化炉冷态试验研究	(15)
1.6.5	现场工业炉气化过程的数值模拟和试验研究	(15)
1.6.6	对水煤浆气化炉气化过程数值模拟	(15)
1.6.7	在新型气化炉中对不同原料气化过程的数值模拟	(16)
1.6.8	小型多功能气化实验台的设计	(16)
第2章	水煤浆气化喷嘴的开发	(17)
	引言	(17)
2.1	水煤浆雾化喷嘴开发现状	(17)
2.2	新型内混撞击式水煤浆气化喷嘴的开发	(19)
2.2.1	喷嘴的设计计算	(20)
2.2.2	新型水煤浆枪的总体结构	(22)
2.3	本章小结	(22)
第3章	新型水煤浆气化喷嘴雾化性能试验研究	(23)
3.1	雾化试验测试系统	(23)
3.2	实验用喷嘴型号和各部件结构尺寸	(24)
3.3	实验用雾化工质和雾化介质的性质	(25)
3.4	实验结果和数据分析	(25)
3.4.1	雾化工质流量对雾化的影响	(25)
3.4.2	气耗率对雾化的影响	(27)
3.4.3	中心管喷嘴出口直径对 SMD 的影响	(27)
3.4.4	雾化工质喷嘴出口截面对 SMD 的影响	(28)
3.4.5	外环管喷嘴开孔直径和开孔数目对 SMD 的影响	(29)
3.4.6	雾化头开孔直径和开孔数目对 SMD 的影响	(29)
3.4.7	中心管和外环管气化剂流量对比对 SMD 的影响	(30)
3.5	理想喷嘴结构的选择和实验测试	(30)
3.6	本章小结	(32)
第4章	新型水煤浆气化炉的开发和冷态数值模拟	(33)
4.1	水煤浆气化炉的型式	(33)
4.1.1	Texaco 水煤浆气化炉	(33)
4.1.2	道水煤浆气化炉	(34)
4.1.3	多喷嘴对置式水煤浆气化炉	(35)
4.2	新型水煤浆气化炉的开发	(36)
4.3	水煤浆气化炉冷态流场数值模拟的控制	(37)
4.3.1	数值模拟计算的基础	(37)
4.3.2	计算物理模型的描述	(38)
4.3.3	连续相三维流动的控制方程	(38)
4.3.4	流场内三维颗粒浓度分布的模拟	(39)
4.4	多喷嘴对置式水煤浆气化炉冷态流场数值模拟	(41)
4.4.1	气化炉内速度分布	(41)

4.4.2	压力分布	(43)
4.4.3	湍流混合强度	(43)
4.4.4	湍流动能分布	(44)
4.4.5	颗粒平均停留时间	(44)
4.5	新型水煤浆气化炉冷态数值模拟	(44)
4.5.1	炉侧喷嘴入口位置的影响	(45)
4.5.2	炉侧喷嘴入口角度的影响	(49)
4.6	多喷嘴对置式气化炉和新型水煤浆气化炉的对比	(53)
4.7	本章小结	(56)
第5章	新型水煤浆气化炉冷模试验研究	(58)
	引言	(58)
5.1	冷模试验测试系统	(58)
5.2	试验测试结果	(59)
5.2.1	炉侧喷嘴入口位置的影响	(59)
5.2.2	炉侧喷嘴入口角度的影响	(65)
5.3	本章小结	(70)
第6章	现场工业炉气化过程数值模拟和试验研究	(71)
	引言	(71)
6.1	气化模拟的控制	(72)
6.1.1	计算对象的物理模型	(73)
6.1.2	二维流动的控制方程	(74)
6.1.3	辐射模型	(74)
6.1.4	水分蒸发的处理	(75)
6.1.5	挥发分析出模型	(76)
6.1.6	焦炭燃烧模型	(76)
6.1.7	边界条件的处理	(77)
6.2	数值模拟计算的结果	(77)
6.2.1	氧碳原子比对气化的影响	(77)
6.2.2	煤浆浓度对气化的影响	(78)
6.2.3	压力对气化的影响	(79)
6.2.4	温度和浓度分布	(79)
6.2.5	流场分布	(80)
6.3	现场工业炉运行数据	(81)
6.3.1	开车增压过程运行数据	(81)
6.3.2	正常运转工业炉运行数据	(82)
6.4	本章小结	(83)
第7章	新型水煤浆气化炉气化过程数值模拟	(84)
	引言	(84)
7.1	计算的物理模型和数学模型的控制	(84)
7.2	各参数对气化影响的数值模拟计算结果	(84)

7.2.1	炉侧喷嘴入射角对气化的影响	(84)
7.2.2	氧碳原子比对气化的影响	(95)
7.2.3	煤浆浓度对气化的影响	(99)
7.2.4	压力对气化的影响	(102)
7.2.5	不同炉顶和炉侧煤浆流量对气化的影响	(107)
7.2.6	不同炉顶和炉侧氧气流量对气化的影响	(112)
7.3	多喷嘴对置式与新型气化炉气化数值模拟结果的对比	(117)
7.3.1	流场分布	(117)
7.3.2	温度分布	(118)
7.3.3	粗煤气组成等	(119)
7.4	本章小结	(119)
第8章	不同原料气化过程的数值模拟	(122)
8.1	目前国内焦水煤浆开发现状	(122)
8.2	目前国内油水煤浆开发现状	(124)
8.3	焦水煤浆气化过程数值模拟	(125)
8.3.1	气化炉内温度分布	(125)
8.3.2	气化炉内各种物质浓度分布	(126)
8.3.3	气化炉出口粗煤气组成等	(127)
8.4	油水煤浆气化过程数值模拟	(128)
8.4.1	气化炉内温度分布	(128)
8.4.2	气化炉内各种物质浓度分布	(129)
8.4.3	气化炉出口粗煤气组成等	(130)
8.5	本章小结	(131)
第9章	小型多功能热态气化实验台的设计	(132)
	引言	(132)
9.1	小型多功能热态气化实验台系统	(132)
9.2	气化炉本体结构	(134)
9.3	取样装置和测孔	(135)
9.4	下降管	(136)
9.5	异型耐火砖结构	(137)
9.6	本章小结	(138)
第10章	全书总结及进一步工作展望	(139)
10.1	本书总结	(139)
10.2	本书的创新点	(142)
10.3	进一步研究工作展望	(142)
	参考文献	(143)

第1章 绪论

引言

我国煤炭资源丰富,原煤年产量居世界第一位^[1]。煤炭是发电、化肥、甲醇等能源转化工业的主要原料和燃料。在我国,煤炭的生产和消费占一次能源构成的75%左右^[2,3],在未来几十年,煤炭仍将是中国主要的一次能源^[4]。

我国煤炭资源的主要特点是:高硫、高灰、低热值。目前,传统的煤炭生产与消费过程中约86%的煤炭用于直接燃烧,导致煤炭利用过程中产生两大显著的社会问题和经济问题:①能源利用的低效率。目前,我国煤炭的平均利用效率为30%,比世界平均水平低10%,比发达国家低25%~28%;与国际先进水平相比,工业锅炉低15%~20%,火电厂平均煤耗高约25%,城市居民生活燃煤热效率平均仅有25%~45%^[5]。②日益严重的大气污染、酸雨和温室效应等区域性和全球性的环境与气候问题^[6~9]。据1995年的数据统计表明,我国烟尘排放量为1719万吨,SO_x排放量为2360万吨,NO_x排放量为800万吨,其中由于燃煤产生的固态粉尘、SO_x和NO_x排放量分别占我国总排放量的77%、90%和70%,成为我国大气污染的主要来源。

随着经济建设的不断发展,煤炭开发利用对环境的影响越来越大,与日益严格的环境保护指标的矛盾也越来越突出。为了实现经济的可持续发展,洁净煤技术(clean coal technology,简称CCT)便应运而生,并且在近几年得到了迅猛的发展。洁净煤技术已成为当前世界各国解决环境问题的主导技术之一,同时也是国际高技术竞争的一个重要领域^[10]。因此如何开发应用高效率、洁净的煤炭利用技术受到了世界各国的重视。我国的洁净煤技术主要包括煤炭加工、高效洁净燃烧和发电、煤转化、污染排放控制及废弃物处理4个领域,涉及煤炭、电力、化工、建材、冶金5个主要行业。

水煤浆技术是我国洁净煤技术中隶属煤炭加工技术之一,它可以大量利用粉煤,消除粉尘污染,实现无需化学转化,只经物理加工即可达到以煤节油、代油的目的。1.8~2.1t水煤浆可代替1t原油,当燃料油与水煤浆的比价大于2.25时,水煤浆在经济上就有竞争力。另外,燃用水煤浆可使燃烧效率提高5%~10%,能耗降低约20%。它经过20世纪70年代末和80年代初的中期实验室阶段,于80年代后期步入工业化。我国水煤浆技术自1981年起,连续10年被列为国家“六五”、“七五”重大科技攻关项目。在“六五”实验室开发研究的基础上,经过“七五”、“八五”的努力,我国已掌握了一套完整的水煤浆生产使用技术,迄今已建成总能力100万t/a以上的制浆厂6个,2个添加剂厂,3个覆盖制浆、储存、管道运输、锅炉和窑炉燃烧全过程的水煤浆实验研究中心,还建立了水煤浆成浆性数据库和多个商业性示范工程,已具备工业性应用的条件^[10]。水煤浆技术将在我国得到前所未有的快速发展。

随着水煤浆技术在我国乃至全世界各国的高速发展,寻求水煤浆更加合理、高效的利用

途径成为目前水煤浆技术推广应用的关键。水煤浆除直接用于燃烧来节油、代油外,目前主要用于化工行业,作为生产化工原料气的主要原料,此即为水煤浆气化技术(第二代煤技术)。在化工领域,如何开发应用高效率、洁净的煤炭利用技术已受到世界各国的重视。过去多以块煤、粉煤和焦炭的形式生产化工产品(第一代煤技术),由于气化技术落后,导致生产流程长、基础建设投资大、环境污染严重、生产成本高等技术问题,发展受到了很大限制。近年来人们在探索开发煤的新技术时,出现了前述的水煤浆气化技术,为现代煤化工的发展开辟了新的前景。

水煤浆气化技术是涉及煤炭、化工、电力、建材四大主要行业的一项新技术。

西方发达国家自 20 世纪 70 年代开始就从事洁净煤技术的研究开发工作。美国能源部自 80 年代起就开始了洁净煤技术计划。80 年代,世界上第一座整体煤气化联合循环(IGCC)——冷水(cool water)电站问世,采用水煤浆气化生产煤气作为燃气轮机燃料,被国际誉为“世界上最洁净(煤)电站”^[11]。

水煤浆气化是在重油气化基础上发展起来的第二代煤气化技术,属于加压气流床(又称喷流床)气化工艺,火焰型部分氧化反应,液态排渣。水煤浆气化是一个很复杂的物理-化学反应过程,水煤浆和氧气喷入气化炉后经历煤浆预热、水蒸发、煤热解、挥发物燃烧和气化、残碳气化和水煤气平衡等化学反应,最终生成以 CO 和 H₂ 为主要组分的合成气,基本不含烃类和凝聚物。

水煤浆气化的主要优点有:

(1)原料煤的适应范围较宽,对烟煤、褐煤、劣质煤、黏结性煤和高硫煤等均能气化;灰熔点低于 1350℃ 最为理想,高于 1350℃ 时应添加助熔剂。对采煤粒度无任何特殊要求,占煤矿机械化采煤 30% 的粉煤均可得到充分利用,此外还可以烧焦炭和石油焦,掺烧垃圾(如废塑料和废轮胎等),几乎可以使用所有的碳氢化合物,如天然气、液化石油气、原油、重油等。

(2)合成气质量好,有效成分高,而且 H₂/CO 的比值具有较宽幅度的可调性。特别适合制氢工艺、合成甲醇、氨、醋酸、合成汽油等化工产品和城市煤气,此外,也可与煤气化联合循环发电(IGCC)配套。

(3)气化生成气纯度高,不产生焦油、萘和酚等污染环境的废物。由于炉温高,煤气中的氰、酸等有毒物质产生很少,几乎无废气排放,气体净化和废水处理简便,废水排放量少,废渣液可用来制作水泥和建筑材料。

(4)工艺流程简单,不污染环境。

(5)生产能力大,一般单台炉生产能力每天达 500~1000t 煤(折合氨 350~700t/d),国外最大气化能力达 2000t/d。

(6)碳转化率高达 98%,产生的高温煤气可以采用直接或间接的热能回收方法,综合利用好。

(7)气化压力高,且可在较大范围内调整,可做到等压合成(如甲醇),取消合成气中间压缩工序,能耗低(一般 < 46.05GJ/t NH₃)。

水煤浆气化的主要缺点有:氧耗较高、冷煤气效率较低、对设备材料(如耐火砖)要求较严等。

1.1 国外开发概况

1.1.1 德士古水煤浆气化技术的开发概况

国外将水煤浆气化工艺称作德士古煤气化工艺(TCGP),至今已有60多年历史。1946年美国德士古石油公司受重油气化的启发,首先创建了水煤浆气化工艺,采用将入炉前的水煤浆预热($375\sim 540^{\circ}\text{C}$)→气化→75%蒸汽分离的方法,先后进行了扩大试验和中间试验(70 t/d),并在加利福尼亚州洛杉矶近郊的蒙蒂贝洛(Montebello)建设第一套中试装置(15t/d),这在煤气化发展史上是一个重大的开端^[12~22]。

早期的德士古气化工艺存在以下明显的缺点:

- (1)由于当时技术水平较低,在配制煤浆时还不会应用水煤浆添加剂,而且未掌握粒级配比技术,煤浆浓度低,一般只有50%左右;
- (2)水煤浆制备采用干磨湿配,操作复杂,环境较差;
- (3)煤在蒸发过程中易结垢堵塞和磨损;
- (4)分离出去的部分蒸汽($\sim 50\%$)夹带少量煤粉,无法利用,且在排入空气时造成污染。

德士古公司在Montebello中试基础上,于1956年在西弗吉尼亚州的摩根敦(Morgantown)建造了规模为100t/d的原型气化炉,断断续续开车两年后于1958年停运。停炉的主要原因是当时油价低,煤无法与之竞争,另外技术上也有问题。

水煤浆气化技术由于受到当时油价的冲击和一些其他的客观原因,停顿了10多年,直到70年代后才出现了新的转机。由于70年代初期发生了第一次世界性能源危机(石油危机),一些工业发达国家(如美国、西德、英国等)重新开发所谓第二代煤气化技术,如Texaco(德士古)、HTW(高温温克勒)、Saarberg/oTTo、Shell-Koppers和BGL等相继问世,并在某些气化工艺开发方面(如德士古炉)取得了突破性进展^[23~25]。

20世纪70年代初期,德士古公司重新恢复Montebello试验装置,于1975年建设一台低压气化炉(LP),规模15t/d,气化压力2.4MPa,反应器内径4英尺;1978年再建两台高压气化炉(HP-1、HP-2),规模30t/d,气化压力8.0MPa,反应器内径也为4英尺,三台气化炉都是急冷流程。在水煤浆进料方面,由水煤浆蒸发改成直接入炉方案,简化了工艺,确保了操作稳定性。中试的主要任务是进行煤种评价试验及其他研究开发,共试验了20多个煤种,其中有中国的七五煤(鲁南化肥厂)和大台无烟煤(首都钢铁公司)。

1978年,德士古公司和西德鲁尔化学公司(RCH)以及鲁尔煤公司(RAG)合作,在西德奥伯豪森(Oberhausen)的鲁尔化学厂内建设一台德士古示范炉(RCH/RAG),规模150t/d,气化压力4.0MPa,废锅流程。示范装置是将美国中试成果推向工业化的关键一步,共气化了20余种固体燃料(包括12种煤、石油焦和煤的液化残渣等),取得了大量的实验数据。这些数据已用于在特定条件下选择最为经济的原料,指导数学模型的开发。试验期间,安装了改进后的气化炉,评价了煤浆粗固粒相对含量以及煤浆浓度(60%~70%)、气化压力(4.0MPa)等对气化产物的影响。

1979年,又一个用空气作氧化剂的煤气化工厂在路易斯安那州的道化学公司投产,该厂的目标是论证向燃气轮机供给煤气发电的可行性。设计参数为总煤耗360t/d,发电能力1.5万千瓦,气化压力3.2MPa。随后,美国、日本、瑞典、意大利等先后投入雄厚力量,致力

于水煤浆气化技术的开发,取得了优异的成绩。

RCH/RAG 示范装置研究开发了以下工业化技术:

- (1)煤的研磨技术,开发了球磨、棒磨、齿圈磨等多种研磨设备;
- (2)水煤浆喷嘴的结构研究,进行了三流式和可调式喷嘴的开发研究;
- (3)水冷壁法间接测温技术的研究;
- (4)耐火材料的实验研究,含实验室耐火材料腐蚀机理的研究;
- (5)余热回收研究;
- (6)渣水和灰水处理研究;
- (7)数学模型和其他工程研究。

1982年美国 TVA 投运一套德士古气化装置,急冷流程,规模 180t/d,气化压力 3.6MPa,用于部分改造一座以天然气为燃料的氨厂。RCH/RAG 的实验成果给工程公司提供了全套的工程放大技术,美国的 Bechtel 工程公司首次设计并承包了所有工程,于 1988 年建设并投运一套田纳西-依斯特曼(TEC)煤气化工厂,规模 820t/d,操作压力 6.5MPa,急冷流程,用于等压合成甲醇。气化工艺选用废锅流程,回收的高参数蒸汽和洗涤冷却后的合成气用于联合发电,输出功率 100MW,总发电效率 34%,另备用一台急冷式气化炉。1984 年日本宇部氨厂投运一套气化装置,急冷流程,规模 1500t/d(NH_3 1000t/d),操作压力 3.6MPa,气化炉三开一备。同年美国 Cool Water 电站投运一套大型气化装置,规模 910t/d,压力 4.0MPa,用于 IGCC。1986 年西德投运一套气化装置(SAR),废锅流程,规模 800t/d,操作压力 4.0MPa,用于 OXO 合成。国外已建大型水煤浆气化装置见表 1.1;国外德士古(Texaco)气化工厂见表 1.2。

在美国佛罗里达建成的这套德士古气化装置为废锅流程,规模 2400t/d,气化压力 2.8MPa,用于 IGCC,输出功率 250MW。据称由于提高了燃气轮机入口温度,总的发电效率高于 40%,与早期的 Cool Water(IGCC)项目相比有较大的改进,其中 90%是冷法净化,10%是热净化(除尘和脱硫)。如果全部改为热净化,发电效率将提高到 42%~43%,但是热净化是国际公认的难题,尚在开发之中,要实现工业化尚需时日^[26~31]。

1.1.2 道水煤浆气化技术的开发概况

道水煤浆气化技术又称作 Destec 气化工艺,是由美国 Dow 化学公司开发的两段式水煤浆进料的气流床气化炉。Dow 化学公司于 1975 年开始水煤浆气化方面的研究工作,1976 年开始进行水煤浆气化的小型实验,1979 年建成日处理 38t 水煤浆的氧气气化中试装置,1982 年建成发电能力 16 万千瓦的气化装置;1983 年建成日处理 1088t 煤的氧气气化工业试验装置;1984 年开始处理次烟煤 1480t/d 的气化炉实验装置建设,1987 年投运。商业化装置同时在 1987 年也投入运行,建于美国路易斯安那州的伯克明市,气化炉一开一备,每日处理美国西部煤 2400t,处理得克萨斯州褐煤 2900t,产气量 $353\sim 315\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,煤气的发热量为 $8959.75\sim 10048.32\text{kJ}/\text{m}^3$ 。1995 年在印第安那州的 Wabish River 建成以 Destec 气化工艺为气头的 IGCC 发电装置^[11]。

Dow 化学公司的煤气炉是当今世界上规模最大的商业气化炉,属第三代炉型。它主要用于蒸汽燃气联合循环发电(IGCC),但该公司有意将该工艺用于化工生产。例如:我国在引进渭河化肥装置时该公司曾经参与投标,但是由于该公司缺乏在化工生产方面的经验等一些客观原因而未能竞标成功^[13~17]。

表 1.1 国外已建大型水煤浆气化装置

国家	工厂名称	气化炉数量(台)	气化炉型式	气化压力(MPa)	用煤量(t/d)	产品规模	投产时间
美国	Eagtman	1+1	激冷式	6.37	820	甲醇、醋酐,蒸汽 11.0MPa	1983
	Eastman	—	—	6.5	—	甲醇 500t/d、醋酐 700 t/d 1991 年后产量翻一番	1983
	Cool Water	1+1	废锅式	4.2	910	煤气用于发电 12 万千瓦, 联合循环发电并生产合成 氨和甲醇	1984
	Tampa	4	废锅式	2.8	2400	煤气用于发电 25 万千瓦, 联合循环发电并生产合成 氨和甲醇	1996
日本	宇部氨厂	3+1	激冷式	3.53	1380	合成氨 1000t/d	1984
瑞典	NEK	4	—	6.5	4550	生产氨 1300t/d, 甲醇 1250t/d, 燃料气 60MW, 热 水 42MW	1984
德国	SAR	1	废锅式	3.92	730	氢气和 OXO 合成气 $5 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$	1986
	Ruhrchem/ Ruhrkohle	1	激冷式	4.2	720	甲醇、醋酐等化学产品	1990

表 1.2 国外德士古(Texaco)气化工厂

工厂或公司名称	类型	地点	能力(吨煤/日)	开车年份	产品
德士古公司	中试	加利福尼亚	15	1973	—
德士古公司	中试	加利福尼亚	15	1978	—
德士古公司	中试	加利福尼亚	15	1981	—
鲁尔煤化学公司	工业示范	西德	150	1978	化学产品
道化学公司	工业示范	路易斯安娜	360	1979	发电
TVA	工业示范	亚拉巴马	170	1982	氨
冷水工程公司	工业化	加利福尼亚	910	1984	发电
日本宇部氨厂	工业化	日本	1380	1984	氨
德国 SAR	工业化	西德	730	1986	化学产品
田纳西-依斯特曼公司	工业示范	田纳西	820	1988	醋酸酐
Ruhrchem/Ruhrkohle	工业化	德国	720	1990	化学产品
Tampa 电站	工业化	佛罗里达	2400	1996	发电

1.2 国内开发概况

1.2.1 国内早期开发

20 世纪 60 年代末期,化工部上海化工研究院就开始了水煤浆气化工工艺的开发^[11]。中

试装置于 1969 年建于浙江巨州化工厂(现巨化集团)合成氨分厂造气车间,规模 0.7t/d,气化压力 0.2MPa,由上海化工研究院技术总负责。当时用的水煤浆蒸发方案基本上是仿制早期的德士古气化工艺。煤和水在球磨机中研磨成 50%~56%的水煤浆(因当时技术水平有限,没有应用表面活性剂,煤粉粒度的级配也不十分合理,因此浓度较低),煤浆经柱塞泵送入外热式蒸发器,用中压(约 4.0MPa)过热蒸汽加热,煤浆在盘管内生成汽-煤悬浮物,在旋风分离器分离出约 50%的蒸汽后,蒸汽、煤粉以 0.5:1 的比例通过喷嘴中心管送入气化炉,氧气由喷嘴外环送入炉内。该气化炉由一、二段两个反应器构成一个直立的圆筒,位于炉下部的两只喷嘴将反应物对喷入炉,液渣从一段反应器(冷壁)排出。C、H₂O、CO₂ 在上部二段反应器(热壁)继续反应,生成 CO 和 H₂ 为主的合成气,并被急冷至露点。此中试装置断断续续运转了 2 年,于 1971 年停运。试验期间气化炉运转正常,但是蒸汽器结垢(主要是 CaSO₄)堵塞和磨损,造成气化炉不能长期运转(最长不超过 24 小时)。20 世纪 60 年代末 70 年代初,化工部决定把煤气化研究由上海化工研究院转到西北化工研究院,参加该院煤气化开发的大多数技术人员也同时调入西北化工研究院。

1.2.2 西北化工研究院中试

1978 年 12 月国家科委主持召开了全国第一次煤的气化液化会议,决定在煤的气化方面开发两项科技攻关项目:一是液态排渣加压碎煤气化,由煤炭部主管;另一项是水煤浆加压气化(相当于 Texaco 炉),由化工部负责。西北化工研究院接受任务后立即开展水煤浆气化模型试验(煤浆直接入炉),规模 20kg/h,气化压力 2.0MPa。模试任务是对关键技术如煤浆制备、喷嘴、耐火材料、测温等进行探索性研究,为开展中试作好技术准备^[12,13]。模试于 1984 年完成攻关任务后结束。1985 年西北化工研究院承担国家“六五”科技攻关任务,建成一套水煤浆气化中试装置,规模 1~1.5t/h,采用煤湿磨制浆、水煤浆直接入炉技术方案。用辐射式和对流式废锅回收合成气显热,生产 4.0MPa(实际操作 1.6MPa)的饱和蒸汽。由于投资费用所限,中试未建酸气脱除装置,合成气未加利用,而送入锅炉房燃烧。中试装置共完成了以下试验内容:

(1)煤种评价(试烧)试验。到 1991 年共评价试烧以下 10 种煤:陕西铜川煤、陈家山煤、仓村煤、田庄煤、于元煤、黄陵煤、神府煤;山东七五煤、兖州煤泥;黑龙江鹤岗煤。

(2)开发高灰熔点、高灰黏度煤的气化技术。通过添加钙系(CaCO₃)或铁系(Fe₂O₃)助熔剂可以降低煤灰熔点,以满足气化工艺的需要。

(3)开发高性能水煤浆喷嘴。通过试验开发出三流式及双级内混式两种结构形式的喷嘴,满足工艺试验及煤种评价的要求。喷嘴研究的质量和深度达到德士古公司的水平。

(4)通过实验室及中试的试验研究,解决了水煤浆制备技术关键,包括煤的粒级配比、水煤浆添加剂、球磨机工程放大、煤浆输送、水煤浆流体力学等;水煤浆研究达到国际水平,并为鲁南化肥厂提供煤浆制备技术。

(5)气化炉直接和间接测温研究。

(6)向火面耐火材料试验研究,包括铬铝砖(炉内捣打成型,冷壁气化炉)和铬镁砖(热壁炉)的应用研究。耐火材料研究由冶金部洛阳耐火材料研究院负责,西北化工研究院配合。

(7)灰水沉降絮凝剂的应用研究,已应用于鲁南化肥厂水煤浆气化装置。

(8)高压和低压煤浆泵的试验研究。

(9)气化废水微量组分(五十多种)分析方法的研究。

1990年,美国德士古公司与西北化工研究院合作评价试烧与德士古公司有许可证关系的中国煤种。西北化工研究院主持评价试烧工作和编制试烧报告,德士古公司派专家在现场观察试烧和采集数据,审核并批准报告作为编制工艺设计包(PDP)的依据^[14]。1991年,双方成功地合作评价陕西黄陵煤和神府煤,作为编制渭河化肥厂和上海焦化厂PDP的依据。利用几种方法处理的数据结果基本一致,气化炉C、H、O物料平衡精度在97%~103%,基本符合德士古公司要求^[15]。因此认为试烧有效,其数据可以应用于PDP设计。

1.2.3 鲁南化肥厂工业示范装置

山东鲁南化肥厂引进Texaco技术,在与国内开发相结合的基础上,于1993年建成并投运一套德士古水煤浆气化示范装置,规模400t/d(折合氨为8万t/a),操作压力2.6MPa,气化炉一开一备。参加工业示范装置技术开发及攻关的有鲁南化肥厂、化工部第一设计院(工程设计)、化工部西北化工研究院(水煤浆气化)和南京化工集团公司研究院(NHD净化)等。鲁南煤气化示范装置对喷嘴、耐火砖、渣水处理和NHD脱酸气等进行了工业化试验,并获得化工部科技进步一等奖。

国内已建大型水煤浆气化装置见表1.3。国内大型水煤浆气化装置运行情况见表1.4^[16]。

表 1.3 国内已建大型水煤浆气化装置

工厂名称	气化炉数量(台)	气化炉型式	气化压力(MPa)	用煤量(t/d)	产品规模	投产时间
鲁南化肥厂	2	激冷式	2.35	380	年产合成氨8万吨,尿素13万吨	1993
首都钢铁	—	激冷式	—	1170	燃料气	1994
上海焦化总公司	4	激冷式	—	1100	城市煤气170万m ³ /d,年产甲醇20万吨,醋酐10万吨,辅助发电	1994
陕西渭河化肥厂	4	激冷式	6.4	1500	年产合成氨30万吨,尿素52万吨	1996

表 1.4 国内大型水煤浆气化装置运行情况

年份	1997			1998			1999		
	鲁南	上海	渭河	鲁南	上海	渭河	鲁南	上海	渭河
开停车次数	25	64	40	24	40	41	15	56	56
开停一次平均寿命(d)	13.40	10.40	9.73	14.50	17	10.87	22.00	12.50	10.20
运行时间(d)	326.5	330	241.7	344.7	341.1	256.5	337.2	348.6	273.5
开工率(%)	89.33	90.41	66.21	94.43	93.44	70.26	92.40	95.52	75.00
系统大修时间(d)	17.00	25.23	9.00	8.00	22.65	43.00	14.00	14.10	27.00
扣除大修时间开工率(%)	93.68	97.13	68.00	96.5	99.62	80.00	96.1	99.35	81.00

1.3 各种煤气化工艺比较

目前,煤气化技术主要有德士古水煤浆气化技术、道水煤浆气化技术、谢尔煤气化技术、鲁奇循环流化床气化技术、固定层常压气化技术和鲁奇块煤加压气化技术。以上各种气化技术或工艺的对照见表1.5、表1.6、表1.7和表1.8^[13~17]。

表 1.5 各种气化工艺对煤种的要求

项目	Texaco	Shell	CFB	Lurgi	UGI
煤种	活性好,灰熔点 1350℃以下	烟煤、半贫煤、 长焰煤和褐煤	活性好、灰熔点 高的各种煤	活性好的褐煤, 弱黏结性烟煤	无烟煤、焦炭
粒径	0.1mm 以下	0.1mm 以下	<3mm	6~50mm	25~80mm
灰分	最好小于 20%	无限制	无限制	无限制	最好小于 20%
灰熔点	不高于 1500℃, 否则可加 入助熔剂,降低灰熔点	1450~1550℃	>1000℃	不低于 1200℃, 最好高于 1400℃	>1000℃
水分	煤浆浓度 60%~65%	2%以下	<6%	一般在 20%以下, 不超过 38%	无限制
黏结性	高挥发、高黏结性 烟煤	可使用弱黏结 性煤	无限制	以自由膨胀指数小于 7 的弱黏结性煤为最好	低黏结性、 低膨胀指数

表 1.6 各种气化工艺技术指标比较

项目	Texaco	Shell	CFB	Lurgi	UGI
气化压力(MPa)	2.6~8.5	2.0~4.0	0~0.15	3.0	0
气化温度(℃)	1350~1450	1400~1600	1050~1100	1200~1500	900~1000
单炉处理能力(t/d)	500~750	2000	300~500	600	50~100
每立方千米(CO+H ₂)氧气用量(m ³)	400~420	310~320	300~320	270~300	
灰中含碳(%)	<5	0.5	<5	3~5	25~30
蒸汽分解率(%)	—	—	75	37.5	40~60
碳转化率(%)	98	99	<91	98	60~65

表 1.7 各种气化工艺操作特性比较

项目	Texaco	Shell	CFB	Lurgi	UGI	
床型	气流床属第二 代煤气化技术	气流床属第二 代煤气化技术	流化床煤 气化技术	移动床属第一 代煤气化技术	移动床属第一 代煤气化技术	
进煤系统	煤浆进料	氮气输送	干碎煤	锁斗间断加入	间歇干块	
助熔剂加入量	按煤的灰熔点 而定	按煤的灰熔点 而定	—	—	—	
排渣状态	熔渣	液态	固态	干态	固态	
每立方千米(CO+H ₂) 需蒸汽	不需要蒸汽作 气化剂	少量蒸汽	520kg	3.1MPa、400kg 蒸汽作气化剂	600kg	
粗 煤 气 成 分	CO(%)	40.2	60.2	43.21	24.6	32
	H ₂ (%)	37.2	23.6	35.87	39.8	44
	CO ₂ (%)	21.8	1.3	2.07	24.6	6.8
	CH ₄	50×10 ⁻⁶	<100×10 ⁻⁶	1%~2%	8.7%	1.0%
	(N ₂ +Ar)(%)	0.8	7.5	0.71	1.2	14
有效气(%)	77.4	>83.6	80	64.4	76	
净热效率(%)	68~70	94~99	73	64	54	