煤气化工艺技术分析

于光元，李亚东

（河南省中原大化集团有限责任公司 煤气化项目组，河南 濮阳，457004）

摘要：从2种典型的煤气化工艺技术出发，比较了水煤浆进料方式与干粉进料方式的差异对气化整体性能的影响。分析了水煤浆气化与粉煤气化不同的工艺特点、工艺流程及关键设备，得出干粉进料方式避免了水煤浆进料方式因水气化升温带来的能量损失，采用的喷嘴分布方式更灵活，最后通过这2种气化技术的主要性能参数进一步说明了粉煤气化技术的优越性。

关键词：煤化工；煤气化；Shell 工艺；Texaco 工艺

中图分类号：TQ54　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-6772（2005）04-0039-05

中国是目前世界上最大的煤炭生产和消费国。煤的年产量在10亿t以上，其中大部分是直接燃烧用于电力工业和运输业，煤通过气化形式生产合成气的比重较低，随着石油和天然气的相对短缺，发展我国的煤化工产业愈显重要。

煤化工是指某产品采用以煤为原料的工艺路线，经过化学反应，从CO加H_2合成各种化工产品，从而可以节约石油、天然气资源，优化能源结构[1]。特别是进入20世纪80年代后，随着洁净煤气化工艺的开发研究，采用先进的气流床反应器，以水煤浆或干粉煤为原料，进行大规模，单系列，加压气化生成合成气的方式提高了合成气工业化生产的程度，且气化指标好，成为了煤气化技术的主流，也是现代煤化工中研究最为活跃的领域。

现代煤化工分为3个工业化层次，第一层次为煤制合成气，水煤浆或干煤粉经过部分氧化法生成合成气（CO + H_2），水煤浆气化在国内已经工业化。第二层次为合成气加工，合成气加工工艺主要有三条路线：醇类、烃类和其它碳氧化台物的合成。其中醇类合成包括合成气制甲醇、二甲醚（DIVIE）、乙醇和进一步制乙二醇等。第3层次是深加工，深度加工甲醇和烯烃的下游产品最多，是化工行业的支柱。

1　煤气化技术的应用背景

煤气化方法很多，目前已成功开发出的对煤种适应性广、气化压力高、生产能力大，气化效率高，污染少的新一代煤气化工艺主要有水煤浆气化和粉煤气化。现已工业化的水煤浆气化工艺代表有：美国Texaco（德士古）水煤浆加压气化、美国Dow水煤浆加压气化；粉煤气化的典型代表工艺有荷兰Shell（壳牌）的SCGP粉煤气化工艺。本文分别以Texaco和Shell为典型煤气化应用技术加以分析和对比。

Texaco水煤浆加压气化工艺简称TCGP[2,3]，是由美国德士古石油公司开发的。第一套处理15t/d煤的中试装置于1948年在美国洛杉矶附近的MONTEBELLO建成。1958年在美国圣弗吉里亚MONGANTOWN建立了处理100t/d煤的原形炉，操作压力为2.8MPa，气化剂为空气，生产的合成气用于合成氨。Texaco提出了水煤浆的概念，水煤浆采用柱塞隔膜泵输送，克服了煤粉输送困难及不安全的缺点，经过研究机构的逐步完善，已于20世纪80年代投入工业化生产，成为具有代表性的第二代煤气化技术。中国从20世纪90年代初开始大量引进该技术。如山东鲁南化肥厂、上海焦化

收稿日期：2005-08-05

作者简介：于光元（1973—），男，河南范县人，工程师，1995年毕业于郑州工学院化工专业，现从事煤气制甲醇工艺技术工作。

厂、陕西渭河化肥厂、淮化集团有限公司等均采用该流程。

Shell 粉煤气化（SCGP）技术是 Shell 公司于 20 世纪 70 年代开始基于以油为原料的壳牌气化技术上开始进行研究[4]。1978 年在德国汉堡壳牌炼油厂设计，建设和投产了第一套日投煤量 150t 中试装置，公司得用这座装置进行了一系列成功的试验，验证了煤气化数据的合理性并进行了设备测试。1987 年在美国休斯敦壳牌 Deer Park 总厂设计建设第二套日投煤量 250～400t 示范装置，积累了 15 000h 的操作经验，进一步规范了实际操作规程并充分验证了其煤气化技术的可靠性、原料适用性、负荷可调性。此外，在环保方面亦达到了较高的水平。现已成为较为先进的第二代煤气化工艺的典范之一。如湖北双环集团、洞庭氮肥厂、中原大化集团等已引入该技术。

2 煤气化工艺原理及工艺流程

2.1 水煤浆气化工作原理及工艺流程

水煤浆气化是煤经破碎至不大于 Φ6mm 后，进入湿式球磨机与水、添加剂磨制成固含量为 60% ±2% 的水煤浆，将其用隔膜泵送入气化炉烧嘴与含量大于 99.6% 的氧气在烧嘴出口处混合雾化后进入气化炉内进行气化反应（炉内压力 3.84MPa，温度约 1 400℃），生成以 CO + H_2 为主要成分的粗合成气。

在气化炉内进行的反应相当复杂，一般分为 3 步进行：①是煤的裂解和挥发分的燃烧，煤粉变成煤焦，放出大量的反应热；②是燃烧及气化反应，生成的煤焦一方面和剩余的氧气发生燃烧反应，生成 CO、CO_2 等气体，另一方面，煤焦又和水蒸汽、CO_2 等发生化学反应，生成 CO、H_2；③是气化反应，主要进行的煤焦、甲烷等与水蒸汽、CO_2 发生的气化反应生成 CO 和 H_2。

产生的煤气经下降管进入激冷室，在除去灰、尘、渣后，含有饱和水蒸汽的 Texaco 煤气经气、水分离，换热器的热量回收后，进入林德脱硫脱碳工序。净化后的合成气被送入后续工序。

Texaco 气化工艺有激冷流程和废热锅炉流程，典型的激冷流程工艺流程如图 1 所示。该流程设备简单，投资少。

工艺流程[3]为原料煤与水、添加剂、石灰石、氨水，经磨机研磨成具有适当粒度分布的水煤浆由煤浆泵送入煤浆槽中。水煤浆经加压后与高压氧气经德士古烧嘴混合后呈雾状喷入气化炉燃烧室，在里面进行了复杂的气化反应，生成的煤气又称为合成气和熔渣经激冷环及下降管进入气化炉激冷室底部冷却、固化，定期排出。在碳洗塔中，合成气进一步冷却、除尘并控制水气比，然后进入后工序。

落入激冷室底部的固态熔渣，进入锁斗系统，用于定期收集炉渣。而黑水沉降槽主要用于水的回收处理。

2.2 粉煤制气工作原理及工艺流程

由载气携带的煤粉与氧气和蒸汽混合后进入气化炉，在高温高压的条件下碳、挥发分及部分反应产物（H_2、CO 等）以发生燃烧反应为主；在 O_2 消耗殆尽之后发生碳的各种转化反应，气化炉顶部约 1 500℃的高温煤气由除尘冷却后的冷煤气激冷到 900℃左右进入废热锅炉。经废热锅回收热量后的煤气进入干式除尘及湿法洗涤系统，处理后的煤气尘含量小于 1mg/m^3 送后续工序。

由于煤粉夹带在气流中，固相颗粒的体积浓度

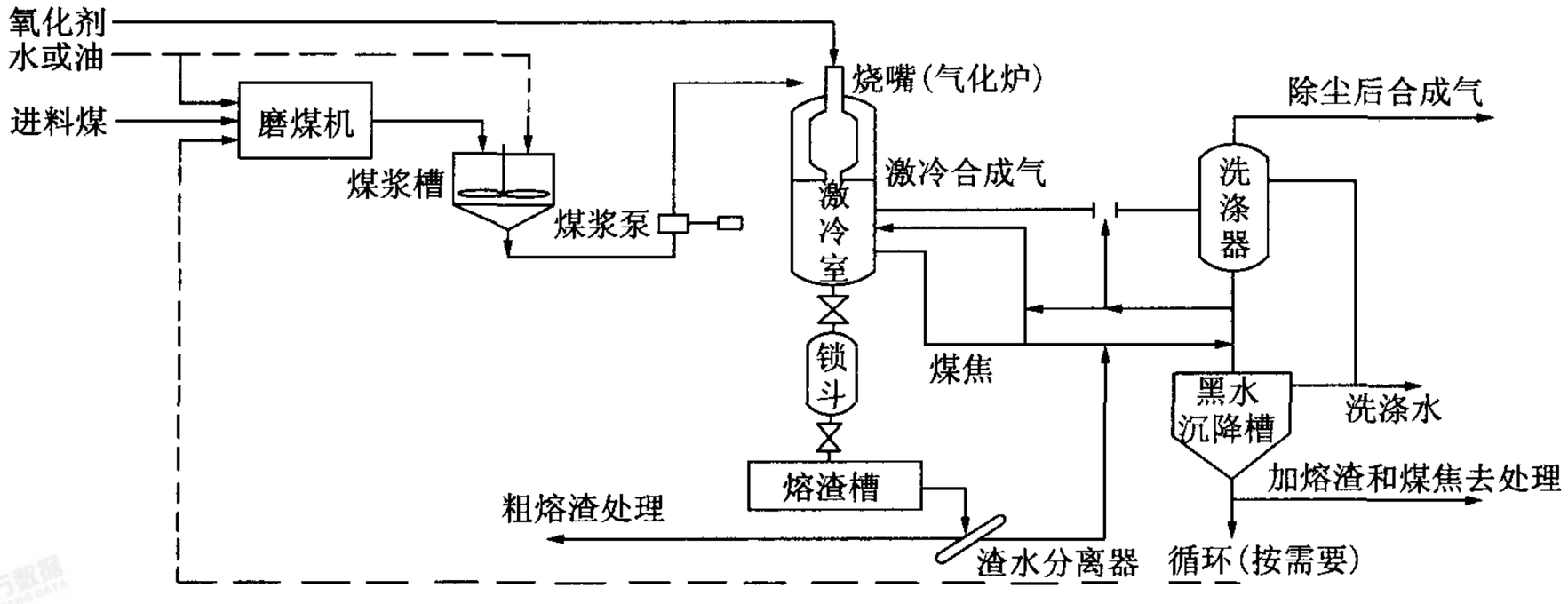


图 1 激冷式 Texaco（德士古）气化工艺流程

较气体低，各个颗粒可以认为是被气体隔开而独立进行的燃烧和气化反应。在气化炉中进行燃烧和氧化时，受空间的限制，反应必须在数秒内完成。入炉煤小于0.1mm，粒度需达100%，以保证有足够的反应面积。气固相对速度低，反应朝反应物浓度降低的方向进行。因此必须提高反应温度，以增加反应推动力。

在SCGP工艺中[5]，因炉内气化温度高、反应速度快，尽管煤粉在气化炉中停留时间很短，但碳的转化率大于99%，由于为焰中心温度2 000℃以上属高温气化，故液态排渣是其必然结果。其工艺流程如图2所示。

来自备煤工段的煤粉经常压粉煤、粉煤锁斗及粉煤给料仓，由高压气将粉煤送到气化炉喷嘴。来自空分的氧气经预热后导入喷嘴。粉煤、氧气及蒸汽在气化炉内高温加压条件下发生部分氧气反应，出气化炉顶部约1 500℃的高温煤气由除尘冷却后的冷煤气激冷到900℃左右，经输气管进入合成气冷却器。回收热量后的合成气进入干法除尘、湿法洗涤系统，洗涤后尘含量小于1mg/m^{3}的合成气送出界区。合成气冷却器产生的高、中压蒸汽配入粗合成气中、气化炉水冷壁副产的中压蒸汽可供压缩机透平使用。

3 煤气化工艺关键设备

3.1 水煤浆气化关键设备

Texaco水煤浆气化工艺有磨机、煤浆泵、Texaco烧嘴、气化炉、碳洗塔、激冷环、破渣机7个主要设备[6]。

德士古烧嘴是德士古的专利设备，主要用于水煤浆和氧气的高度混合和雾化。烧嘴为3通道设计，工艺氧走1、3通道，水煤浆走2通道。烧嘴头部有冷却水夹套及冷却水盘管，以保护烧嘴不被烧坏。由于水煤浆以约30m/s的较高线速流动，对金属材质的冲刷磨蚀较大，所以烧嘴头部采用耐磨蚀材质，并用耐磨陶瓷喷涂。

气化炉由气化室和激冷室组成。上部为气化室，是气化反应的场所，内衬三层作用不同的耐火砖及耐火材料。下部为激冷室，安装有激冷环和下降管等，煤粉燃烧后产生熔渣在激冷室水浴中冷却、固化。

喷嘴、气化炉、激冷室为Texaeo水煤浆气化的技术关键。

3.2 粉煤气化关键设备

Shell煤气化关键设备是气化炉、输气管和合成气冷却器3大件[7]. 壳牌气化炉的水冷膜式壁传热面并挂渣进行炉壁冷却和防煤气冲刷是壳牌煤气化的专利技术。气化炉内件由气化段、渣池、激冷段3个部分构成，该内件首先要形成气化空间，气化反应在此完成；炉渣收集空间，反应完后的炉渣通过淬冷排出炉外；激冷空间，高温合成气被快速冷激到900℃左右。输气管内件主要是把经激冷后的合成气输送到合成气冷却器。为了使煤粉气化和气体冷却过程得到有效控制，内件均采用膜式水冷壁结构即管子－翅片－管子结构型式，气化炉水冷壁的内壁形成渣保护层，以防煤气的冲刷和磨蚀。

4 两种典型煤气化工艺特点的比较

从前述的Texaco和Shell 2种气化工艺的描述

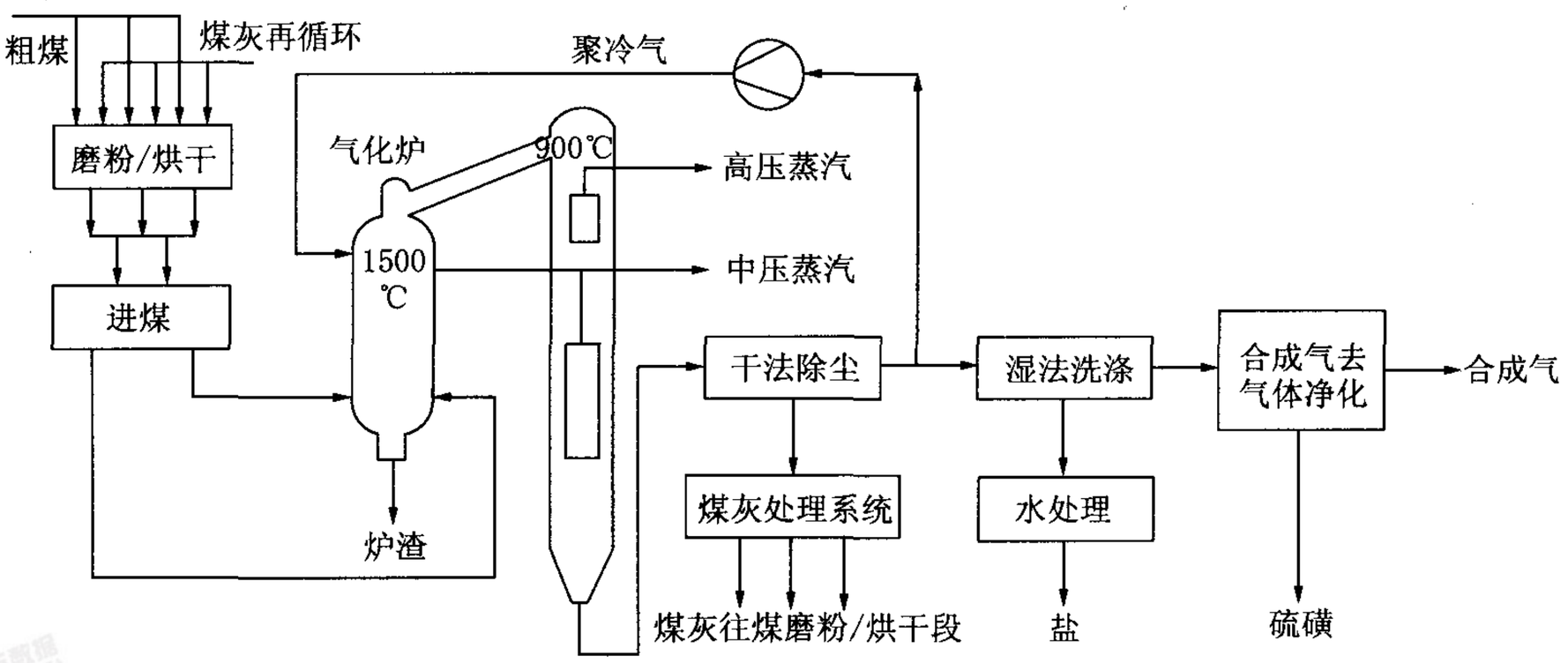


图2 Shell（壳牌）煤气化工艺流程

知道，这2种气化过程的最主要区别是Texaco气化是水煤浆给料，给料中含有20%质量的水；而Shell气化过程是干煤粉给料方式。由于采用氮气作为输送介质，Shell气化炉避免了水煤浆给料时水蒸发所带来的热损失。使得煤中更多的化学能传递给煤气，气化过程冷煤气效率上升。对于Texaeo流程，水煤浆中所含有的水份已完全可以满足气化反应的要求，而Shell流程则需要提供额外的水以满足气化过程需要。

4.1 Texaeo水煤浆气化工艺的特点

①原料适应性广，各种烟煤、气煤等都可以用来制气，对煤的水分、灰分、可燃物含量、灰熔点等没有苛刻的要求，有利于厂家就近选煤，可大大节约成本；②对高压煤浆泵的质量要求较高；③仅有一个装在气化炉顶部的烧嘴，在合成所生产时，通常是三流道型，为固定式非可调，需用喷嘴本身的弹性范围来适应生产负荷变动的工况；④气体有效成分（$CO + H_2$）高约80% ~82%，排渣无污染，污水少，易处理。由于是高温气化，气体中甲烷含量小于0.1%，无焦油，废渣可以综合利用；⑤气化压力范围大，2.5 ~6.5MPa工业化装置皆有，尤以4.0MPa装置较为普遍。因气化压力高，可节省合成压缩功；⑥碳的转化率98%；⑦气化炉热量利用有激冷、废锅或两者相结合3种流程，可以根据产品选择合适的流程。由激冷工艺制得合成气，汽气比达1.4，特别适合作生产合成氨和甲醇的气头等，用途广泛。⑧激冷型水煤浆气化工艺，夹带在煤气中所有灰分全部转人激冷室排出黑水，温度高，水量大渣水系统流程较长，而且减压阀、部分管道磨损较为严重。

4.2 Shell煤粉气化技术的特点

相比较而言，在技术上，Shell技术有以下技术特点：①煤种的广泛适用性，原料煤的选择范围更宽，对煤的反应活性几乎没有要求，对高灰熔点、高灰分、高水分、高含硫量的煤种同样也适应。因此合成气成本更低；②加煤方式用氮气密封和输送，并由程序控制进行，操作可靠安全性有保证，但占地和造价比水煤浆大。③采用成双层对称布置多个喷嘴，遇到负荷变动时，可以增减进喷嘴的粉煤量，也可调整喷嘴运行个数来适应生产要求。且喷嘴寿命长，使得气化炉坚固耐用；④碳转化率高，任何煤种碳的转化率均大于99%；⑤氧耗和煤的消耗低。Shell工艺与Texaco工艺相比，每吨煤可多产10%的合成气，氧气消耗量可节省15% ~25%。有效气体成分（$CO + H_2$）高达93%；⑥Shell的工艺炉内壁采用水冷壁技术，熔态排渣，利用熔渣在炉壁上冷却硬化结成的渣层保护炉壁不受磨损。⑦煤气中携带的细灰大部分在干法除尘中分离，从而湿法洗涤的排水含灰低，温度也不高，大部分进行循环使用。

表1为水煤浆加压气化法与煤粉加压气化法的主要性能参数比较表。

表1 两种典型气化法比较

项目	Texaco水煤浆加压气化法	Shell煤粉加压气化法
原料煤		
灰熔点/℃	<1 300	<1 500
水分/%	<8	<8(褐煤)
		<2(烟煤)
灰分/%	<13	<13
其它	可磨性、成浆性好,相对活性高	可磨性好，<100μm干分占80%
操作压力/MPa	2.65 ~6.5	2.0 ~3.0
操作温度/℃	1 350 ~1 400	1 400 ~1 700
排灰方式	液态	液态
碳的转化率/%	98 ~99	>99
生产强度/$m^3(m^2 \cdot h)^{-1}$	5 000	>8 000
氧耗/$m^3 \cdot m^{-3}$	0.3	0.225 ~0.255
有效成分(CO+H2)/%	80 ~82	>90
CH_4/%	0.05	<0.05
煤气水处理	较简单	简单
原料准备	复杂、费用高	复杂、费用高
维护工作量	较简单	简单
工程经验	多	少
炉最大生产能力/$t \cdot a^{-1}$	1 500	2 000

通过对2种典型煤气化工艺的技术特点、工艺流程及主要性能参数进行的分析比较，可以看出，Shell气化工艺与Texaco气化工艺相比，在煤种适应性、氧气消耗、碳转化率、热效率等方面，Shell气化技术占有一定的优势[4,6,7~9]。

5 结 论

（1）Shell的SCGP技术采用干粉煤进料，避免了湿法因水气化升温带来的能量损失，提高了冷煤气效率；加压气流床吹入纯氧，使设备紧凑，气化效率高，降低了非有效成分。气化炉维持在1 300 ~1700℃温度范围之内，采用膜式水冷壁，

炉渣呈熔融状态，起到隔热保护炉壁的作用达到以渣抗渣的目的。原料中的碳在炉内的高温下99%以上已经转化，这一高温也防止了高分子有机物和焦油类物质的生成。对称式烧嘴保证了良好的混合性与转化率，并且易于放大。

（2）Texaco气化技术在国内已有化工应用，需进一步改进喷嘴、激冷环及水煤浆制备等关键技术。

（3）煤气化是煤化工发展的先导和关键技术，需大力开发对煤种适应性强、单炉生产能力高、煤气成本低、气体成分可调的各种先进加压气化技术。

参考文献：

[1] 唐宏青，相宏伟．煤化工工艺技术评述与展望[J]．燃料化学学报，2001，29（3）：193～200.

[2] 王传贤．水煤浆加压气化与联产甲醇、CO与煤气的三联供技术[J]．天然气化工，1998，23（1）：40～44.

[3] 黎军．德士古水煤浆气化工艺概况[J]．安徽化工，2001，109（1）：46～49.

[4] 门长贵．干法粉煤加压气化技术的开发现状和应用前景[J]．煤化工，2000，90（1）：16～19.

[5] 李志远，张大晶，宋甜甜．壳牌煤粉加压气化技术[J]．化工进展，2003，22（9）：998～999.

[6] 吕运江，王冬，赵绍民．德士古煤气制甲醇工艺浅析[J]．中氮肥，2004，5：9～11.

[7] 汪寿建．壳牌煤气化关键设备设计探讨[J]．气体净化，2003，3（5）：11～13.

[8] 汪寿建．壳牌煤气化氨醇联产浅析[J]．湖北化工，2003，4：37～38.

[9] 刘泽龙，金红光，高林，等．水煤浆与干粉给料方式两种IGCC系统的分析[J]．工程热物理学报，2003，24（1）：1～4.

Analysis of Coal Gasification Technology

YU Guang－yuan，LI Ya－dong

（*Zhongyuan Dahua Group Co. Ltd. Henan Province，Puyang* 457004，*China*）

Abstract：It was introduced two kinds of representative coal gasification processes. The Texaco configuration using slurry coal feed gasifier and Shell configuration with dry coal feed gasifier were compared for finding affection to total gasification performance. Different technical features and critical equipment are also analyzed. The dry feed method avoid losing energy for gasified water，and more flexible distribution of nozzle than the coal water slurry feed method were illuminated. Finally，described the Shell process had more advantage than Texaco process by some primary performance parameters.

Keywords：coal chemical industry；coal gasification；Shell process；Texaco process.

启　　事

2006年《洁净煤技术》杂志征订工作已经开始，请还未订阅的广大作者及读者及时订阅，以免耽误你及时收到本刊。

订刊电话：010－84262927

《洁净煤技术》编辑部

2005年11月