

# 煤气化技术的应用与发展

高聚忠

(中国神华煤制油化工有限公司 北京 100011)

**摘要:** 介绍了国内外煤气化技术的发展概况和发展趋势,重点对几种典型煤气化技术的应用与发展进行了研究,并对 Lurgi 炉、BGL 炉、GE 气化炉、多喷嘴炉、清华炉、Shell 炉、GSP 炉、两段炉、航天炉等典型煤气化炉的结构、性能进行了对比分析。从 8 个方面分析了煤气化技术的选择需要注意的问题。提出了煤气化技术创新建议,指出未来煤炭的清洁高效转化利用将以大型、先进的煤气化技术为核心,以电、化、热等多联产为方向进行技术集成。

**关键词:** 煤气化; 气化炉; 工艺过程; 技术选择; 发展趋势

中图分类号: TQ546

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)01-0065-07

## Application and development of coal gasification technologies

GAO Ju-zhong

(China Shenhua Coal to Liquid and Chemical Co., Ltd. Beijing 100011, China)

**Abstract:** Emphasize some typical coal gasification technologies at home and abroad. Compare the structure characteristics of Lurgi gasifier, BGL gasifier, GE gasification furnace, multi-nozzle gasifier, Tsinghua gasifier, Shell gasifier, GSP gasifier, two-stage gasifier and dry coal pressurized gasifier. Give some innovative suggestions for the choice of coal gasification technologies. In the future, the core of the clean and efficient coal conversion is large-scale and advanced technologies, which must integrate the electrical, chemical and thermal technologies.

**Key words:** coal gasification; gasifier; technological process; technologies choice; development tendency

2011年,中国原煤产量35.2亿t,商品煤消费量36.8亿t<sup>[1]</sup>,分别占一次能源生产和消费总量的78%和70%。实现煤炭的清洁高效转化越来越受到关注。国家的有关能源政策倾向于支持使煤炭得到清洁利用的技术,煤气化是煤炭洁净利用的重要方面。

中国煤的气化转化利用率较低,2010年气化煤用量约1.1亿t,约占全国煤炭消费总量的3.5%,主要用于合成氨、合成甲醇和新型煤化工生产。煤气化过程中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和总悬浮颗粒物等的排放均在煤炭燃烧利用排放量的5%以下,并可回收硫,弥

补中国硫资源短缺现状,同时利于实施CO<sub>2</sub>捕集、利用、贮存等。

## 1 煤气化技术发展趋势

### 1.1 国外煤气化技术发展

国外煤气化技术的发展最早可追溯到1780年<sup>[2]</sup>,早期的煤气化技术主要是以生产燃料气为主。移动床气化是最早发展的煤气化技术,以块煤为原料,以空气、水蒸气为气化剂,固态排渣,生产发生炉煤气。1880年德国设计了世界上第一台常压移动床空气间歇气化炉,1913年被美国气体公司改革

收稿日期: 2012-10-26 责任编辑: 宫在芹

作者简介: 高聚忠(1964—)男,河北高邑人,高级工程师,长期从事煤气化及煤化工技术开发研究工作。

引用格式: 高聚忠. 煤气化技术的应用与发展[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(1): 65-71.

成 UGI 炉。UGI 炉是以焦炭为原料,用间歇气化制水煤气或半水煤气。第一次世界大战后,随着甲醇、合成氨、F-T 合成等为代表的合成化学工业的发展,为了满足合成原料气的需要,1926 年第一代流化床 Winkler 气化炉实现工业化应用。随着工业制氧技术的成功,又发展了新的用氧气气化的技术。1939 年移动床加压气化 Lurgi 炉实现工业化应用。1952 年第一代气流床气化 K-T 炉实现工业化应用。20 世纪 30—50 年代,国外煤气化技术取得了很大的成就。20 世纪 50 年代以后,随着石油和天然气工业的发展,常压固定床气化炉在国外逐渐被淘汰,其它煤气化技术的发展也基本处于停滞状态<sup>[3]</sup>。

现代煤气化技术的发展得益于石油危机。第一次石油危机时,发达国家出于对石油、天然气供应前景的预测,把发展煤气化技术作为替代石油天然气的重要手段,加快了现代煤气化的开发。20 世纪 70 年代后实现工业化的炉型有: 加压固定床液态排渣气化炉(BGL 炉), 加压流化床气化炉(HTW 炉、U-Gas 炉、KBR 炉、CFB 气化炉和恩德炉), 加压粉煤水煤浆气化( GE 炉、Destec 炉), 干煤粉加压气化( Shell 炉、Prenflo 炉和 GSP 炉)。这一时期开发的气化炉型是目前现代煤化工发展的主要选择炉型。

## 1.2 中国煤气化技术发展

中国煤气化技术起步较晚,最早于 20 世纪 30—40 年代在大连、南京用 UGI 炉生产合成氨,20 世纪 50 年代末期改用无烟煤为原料。目前,中国还有许多合成氨和合成甲醇厂以焦炭或无烟煤为原料,采用 UGI 炉生产合成气<sup>[4]</sup>。中国早期煤气化技术的开发主要以模仿创新或引进、消化吸收再创新为主。

20 世纪 60 年代,中国开始进行 K-T 式粉煤气化试验,并于 20 世纪 70 年代初在新疆建成一套 K-T 式粉煤气化制氨装置,气化炉四开一备,生产能力为每台 4800 m<sup>3</sup>/h,投产后由于耐火材料被腐蚀、碳转化率低、排渣困难等问题而改烧重油,此后没有新的发展。

中国对于新型气化炉或新型煤气化方法的研究始于 1978 年第一次全国科学大会。先后开展了固定床加压碎煤气化(相当于 Lurgi 炉),水煤浆加压气化(相当于 GE 炉),灰团聚流化床气化(相当于 U-gas 气化)。“九五”、“十五”期间国家组织开

展多喷嘴水煤浆加压气化和二段式干煤粉加压技术攻关,目前,这几项气化技术均已进入工业化应用阶段。

目前,移动床常压气化 UGI 气化炉在中国仍是主力炉型,用于生产合成气或燃料气。移动床加压气化 Lurgi 炉在劣质煤气化方面占有一定市场。随着中国现代煤化工的发展,水煤浆加压气化( GE 炉、多喷嘴炉)和干煤粉加压气化( Shell 炉、GSP、二段炉、航天炉)已成为主要选择。

## 1.3 现代煤气化技术发展方向

1) 加压气化: 提高压力有利于提高气化炉的生产能力,同时大大减少气体净化的投资,并降低压缩耗能。

2) 高温气化: 使煤中的挥发分和可燃组分充分转化,其它组分也在高温下得到钝化,得到的产品煤气较纯净,三废问题少。

3) 粉煤气化: 通过增大煤的比表面积提高气化反应速率,从而提高气化炉的单炉生产能力和碳转化率。

4) 液态排渣: 灰渣以高温熔融态排出气化炉,经过高温处理的炉渣,大多为惰性物质,无毒无害。

5) 纯氧气化: 降低惰性气升温、降温造成的热损,并减少气化剂压缩的能耗,提高气化效率,使加压、高温、熔渣气化更经济可行。

6) 气化炉大型化: 适应现代工业大型化、规模化、集约化发展,有利于降低投资,提高项目建设经济性。

## 2 典型煤气化技术的应用与发展

### 2.1 移动床加压气化技术

1927—1928 年, Lurgi 气化始于德国,主要目的是进行褐煤完全气化试验,1936 年建立了第一个工业化的 Lurgi 气化厂。二次大战期间在德国和捷克建设了 2 个 Lurgi 气化厂,战后在英国、西德、澳大利亚、南非、美国等建立了大型气化装置。美国大平原煤制天然气项目采用 14 台 Mark-IV 型 Lurgi 炉,气化用煤量达 426 万 t/a; 南非萨索尔公司间接液化厂,各种型号的 Lurgi 炉达 97 台<sup>[6]</sup>,气化用煤达 3000 万 t/a。

Lurgi 气化是中国最早引进和实现工业化应用的技术。1974 年,中国云南解放军化肥厂采用 Lurgi 炉制合成氨原料气,气化炉直径 2.72 m、压力 2.2 MPa,以褐煤为原料。1987 年,山西化肥厂 1000 t/a

合成氨装置引进 4 台直径为 3.8 m 的 MARK-IV 型 Lurgi 炉,操作压力为 3.1 MPa,气化能力 1650 t/d,以当地贫煤为原料。此后,中国先后有沈阳煤气厂、兰州煤气厂、哈尔滨煤气厂和义马煤气厂等采用此气化技术生产城市煤气,部分厂家同时联产甲醇<sup>[4]</sup>。近几年,随着国内煤制天然气产业的兴起,Lurgi 气化受到青睐,目前在建和已经投产的煤制天然气项目大多采用此气化技术,如新汶新疆煤制天然气项目、庆华新疆煤制天然气项目、大唐克旗煤制天然气项目、大唐阜新煤制天然气项目等。2012 年 8 月大唐克旗煤制天然气项目一期工程投入试生

产,气化炉压力达到 4.0 MPa。目前中国运行和在建的各类 Lurgi 气化炉型超过 50 台,用于合成氨、合成甲醇、合成天然气或城市煤气。

在 Lurgi 炉的基础上,英国煤气公司于 20 世纪 80 年代开发了 Lurgi 炉液态排渣气化技术,又称 BGL(British Gas-Lurgi)气化技术,并建立了工业示范试验厂。此气化技术的操作压力 2.0~3.0 MPa,气化温度 1400~1600℃。20 世纪 90 年代中后期,在德国东部的黑水泵煤气化厂建设了一台内径 3.6 m 的 BGL 气化炉<sup>[7]</sup>,2001 年投产后,至今运行良好。图 1 为 Lurgi 炉与 BGL 炉的结构对比。

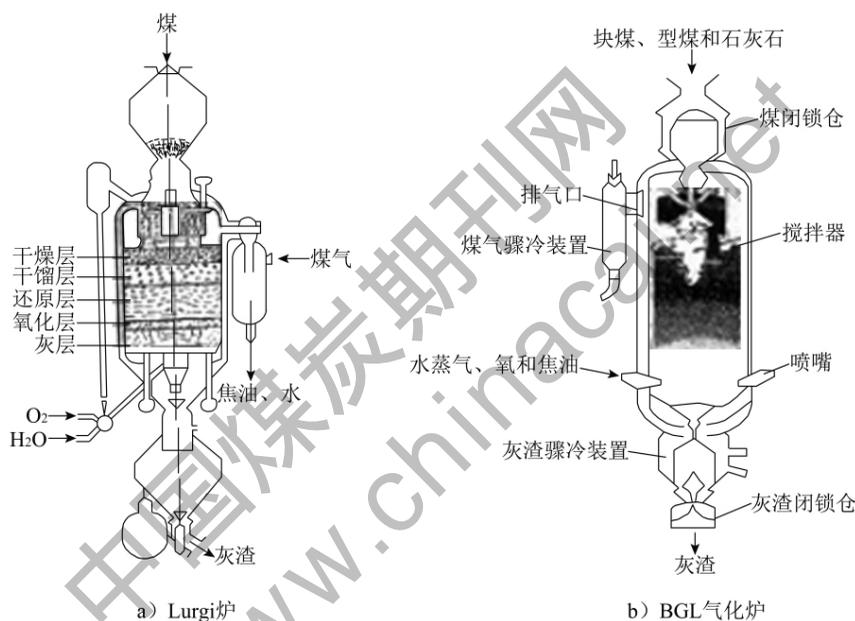


图 1 Lurgi 炉与 BGL 炉结构对比

2005 年中国云南解放军化肥厂引进了 Lurgi 液态排渣(即 BGL)气化技术,直接试烧当地褐煤,示范生产线已经建成并完成了工业试验。此气化技术气化强度大、污染物排放小。计划“十二五”未建成的中煤鄂尔多斯煤制合成氨项目拟采用此项技术,国内一些煤制天然气项目也有采用此技术的意向,但由于技术成熟度不够而选用 Lurgi 固态排渣或其它技术。BGL 技术在中国大规模应用还需要不断示范、完善和经验积累的过程。

## 2.2 水煤浆加压气化技术

Texaco 煤气化技术是最早实现工业化应用的气流床水煤浆加压气化技术。第一套工业化装置于 1983 年在美国 Eastman 化工公司投入运行,1984 年美国 Cool Water 第一套 IGCC 示范电站建成。自 1983 年至今,美国、日本、德国先后建设了多套大型

气化装置,单炉最大生产能力 2000 t/d,最高气化压力 6.5 MPa<sup>[8]</sup>。2004 年美国 GE 公司收购了 Texaco 煤气化技术,目前该技术又称为 GE 煤气化技术。

中国水煤浆气化技术开发始于 20 世纪 60 年代。1969 年在浙江建立了第一套水煤浆气化中试装置(0.7 t/h),后由于国内大量开发石油而停滞。1979—1982 年在陕西建立了水煤浆气化小试装置,1985 年又建成中试装置,规模为 1.5 t/h、气化压力 2.6 MPa。1984 年山东鲁南化肥厂引进了 Texaco 煤气化技术,于 1993 年建成了国内第一套水煤浆气化工业化生产装置,设计气化煤量为 400 t/d、气化压力为 2.8 MPa。此后,上海焦化厂、渭河化肥厂、淮南化肥厂、浩良河化肥厂、金陵石化、神木化工、神华包头煤化工有限公司等引进了多套 Texaco 煤气化装置,分别用于合成氨、合成甲醇的生产。

“九五”期间,华东理工大学完成了多喷嘴对置式水煤浆气化炉开发,2000年建成了22 t/d中试装置,2005年山东德州华鲁恒升、山东滕州兖矿国泰建成了2套气化压力为4.0 MPa,处理煤量1150 t/d的气化炉<sup>[9]</sup>。此后,神华宁夏煤业集团、兖矿鲁南化肥厂、江苏索普集团等转让了40多套多喷嘴水煤浆气化装置。

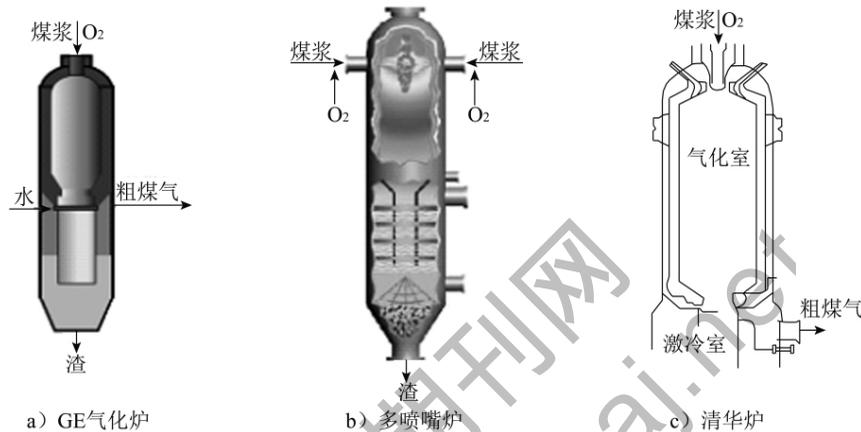


图2 GE 气化炉、多喷嘴炉和清华炉结构的对比

目前,中国在建和投入运行的各类水煤浆加压气化炉超过200台。水煤浆加压气化由于具有良好的操作性和环保性,已经成为中国现代煤化工发展的主流。

### 2.3 干煤粉加压气化技术

Shell煤气化技术是中国工业化应用最早的气流床干煤粉加压气化技术。Shell煤气化技术实际上是K-T炉的加压气化形式,其主要工艺特点是采用密封料斗加煤装置和粉煤浓相输送,气化炉采用水冷壁结构。1993年全球第一套大型工业化生产装置在荷兰建成<sup>[11]</sup>,用于IGCC发电,每天消耗煤量为2000 t。

Shell煤气化于2000年以后进入中国,中石化岳阳、洞庭、安庆3家化肥企业由于油改煤的需要,引进了Shell煤气化技术,在此带动下,截止2008年国内先后有19家企业引进了23台煤气化炉,气化压力4.0 MPa,单炉每天最大耗煤量为2800 t。

GSP煤气化技术是世界上最早实现工业化应用的气流床干煤粉加压气化技术。该技术由原民主德国燃料研究所开发,1985年在Schwarze Pump建成了第一套工业化装置,投煤量为30 t/h,工作压力为3.0 MPa,产气量为40000 m<sup>3</sup>/h。东西德合并后,该技术目前归西门子公司拥有。目前,全球在建和

2005年清华大学水煤浆水冷壁气化炉(清华炉)开始投入研发,2011年8月第一套工业生产装置在山西阳煤丰喜肥业集团投入生产运行<sup>[10]</sup>,该装置采用点火、投料程序一体化技术,此气化技术的开发成功,又为中国水煤浆气化技术的选择提供了一条新的途径。图2为GE气化炉、多喷嘴炉和清华炉结构的对比。

投入使用的GSP气化炉约有20台。

GSP气化技术也是2000年以后进入中国,2005年西门子公司与神华宁煤集团成立了合资公司,负责国内技术推广。国内神华宁煤集团5台、晋城兰花集团2台500 MW的GSP气化装置已经建成。

中国干煤粉加压气化技术开发起步较晚。两段式气化炉是西安热工研究院最新开发成功的一种干煤粉加压气化技术,1997年建成了一套0.7 t/d的小试装置,2004年建成了处理煤量为36~40 t/h的中试装置。首套工业化示范装置在天津华能“绿色煤电”项目中应用,每天耗煤量为2000 t,废热锅炉流程,用于IGCC发电<sup>[12]</sup>。另一套工业化装置投煤量1000 t/d,激冷流程,在内蒙古世林化工有限公司年产3×10<sup>5</sup> t甲醇项目应用。

2000年以后,中国航天科技集团公司成功开发了干煤粉加压气化航天炉,用于15万t/a甲醇项目,2008年建成投产<sup>[13]</sup>。截止2011年底,已有6家企业采用航天炉的项目建成,包括中能化工、中新化工、鲁西化工等,采用航天炉在建和建成的项目已经有16家。国内外各类干煤粉加压气化炉基本处于同一水平。图3为Shell、GSP、两段炉、航天炉结构的对比。

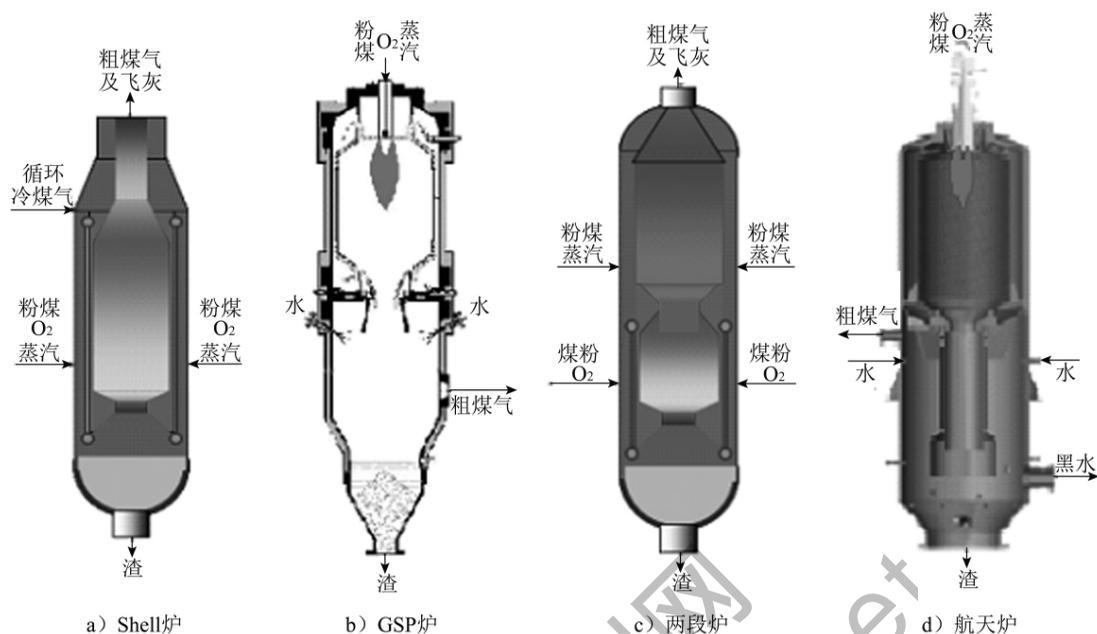


图3 Shell、GSP、两段炉、航天炉结构的对比

### 3 煤气化技术的选择与创新

#### 3.1 煤气化技术的选择

国内在工业化应用的煤气化技术十分纷杂。最先进的干煤粉加压气化技术、水煤浆加压气化技术在中国拥有全球最大规模的生产装置和最多的气化炉。最落后的移动床常压气化技术在国外已经淘汰,但在中国还有很多用户。移动床常压气化由于投资少、建设周期短、见效快等优点而得以发展,但此技术在中国已被列入淘汰技术,主要是因为中国对煤气化技术的选择更加注重环境因素。目前,还没有一种万能气化炉能气化各种煤<sup>[14]</sup>,各种煤气化炉型和气化技术都有优点和不足,以及对煤种的适应性和对煤气化产品的适配性。不同炉型对原料煤种的要求和适应性不同,同一煤种针对不同的目标产品应采用不同的气化炉型。

表1为以神华煤为原料采用移动床加压气化Lurgi炉与水煤浆气化GE炉及干煤粉气化Shell炉气化性能的比较。

神华煤是国内产量最大的商品煤,气化用户在国内也最多。神华煤具有低灰、低硫、低灰熔融性和高水分、高挥发分、高热量的特点,是一种良好的气化煤种,水分含量高、煤质年轻,制浆浓度是制约气化运行经济性的关键。神华煤用于Lurgi炉和干煤粉气化应注意其结渣和成渣性。

现代煤化工项目一般投资较高,装置间关联程

度较深,对煤气化装置的依赖度也比较大,装置开停车一次,少则损失几十万元,多则损失上千万甚至上亿元。现代煤气化技术对煤质要求都较高,目前国内投产的煤转化项目都因煤质不稳或煤质波动而受到过影响。

综合分析现代工业的发展趋势和当今各种煤炭气化技术的特点,对煤气化技术的选择最终落实到经济性能。煤气化技术与目标产品相结合,经济性能好,生命力就强。现代工业更体现的是经济、社会与环境发展的和谐统一,现代工业对煤气化选择要求如下:

- 1) 技术成熟。现代工业系统关联性强,煤气化作为龙头,其安全性、稳定性直接影响经济性能。
- 2) 环境性能好。不产生或较少产生有害物质,三废问题少。
- 3) 原料煤种适应性好。气化炉型选择因煤而异,要根据原料煤的来源和煤质特点选择适宜的气化技术<sup>[15]</sup>。
- 4) 与目标产品的匹配性要好。气化炉与先进的煤气利用技术有良好的兼容性。
- 5) 建设投资少。
- 6) 运行成本低。包括消耗低、能效高,操作和维修简单等。
- 7) 单炉气化能力大。适应现代企业大规模、集约化生产的需求。
- 8) 自动化水平高。能与现代的计算机控制技

术相结合,实现智能控制和自动控制,尽可能降低工人的劳动强度。

表1 Lurgi炉、GE炉、Shell炉气化性能对比

气化方法	移动床加压气化 Lurgi 炉	水煤浆气化 GE 炉	干煤粉气化 Shell 炉	
灰排出状态	干灰	熔渣	熔渣	
原料要求	受限 ST > 1250	不受限 FT < 1350	不受限 FT < 1450	
入炉物料	对小颗粒煤 对灰熔融性要求/℃			
	粒度/mm	6~50	<2.5	<1.0
	含水量/%	<20	38~40	2~4
	x(O <sub>2</sub> )/%	99.6	99.6	99.6
蒸汽压力/MPa	4(过热)	无	5(过热)	
操作特性	气化压力/MPa	2~3	4.0~6.5	2.0~4.0
	气化温度(出口)/℃	<400	1350~1400	1400~1550
	炉内最高温度/℃	<ST	≥2000	≥2100
煤气各成分的 物质的量分数	x(H <sub>2</sub> )/%	38~41	36~39	26~30
	x(CO)/%	17~21	43~46	65~69
	x(CO <sub>2</sub> )/%	28~32	16~18	2~4
	x(CH <sub>4</sub> )/%	10~12	<0.01	<0.01
消耗指标	氧耗/m <sup>3</sup>	240~270	370~390	300~340
	煤耗/kg	820~870	570~590	520~540
	蒸汽耗/kg	1850~2100	0	0~100
冷煤气效率/%	77~79	73~75	78~80	
总热效率 <sup>*</sup> /%	<50	>55	>65	
煤气中焦油、酚含量	大量	无	无	
适用场合	高热值燃料气(城市煤气)	制氢(以H <sub>2</sub> 为主合成气)	合成气 IGCC	

\* 仅考虑电耗(包括备煤和制氧)和蒸汽(含自产蒸汽)的消耗,不考虑变换蒸汽消耗。

### 3.2 煤气化技术创新

随着中国煤化工技术及产业的发展,煤直接液化、煤间接液化、煤制烯烃、煤制乙二醇等具有自主知识产权的煤化工新技术已达国际先进水平,但作为现代煤化工支撑的现代煤气化技术开发相对滞后。

改革开放以来,中国先后引进的煤气化技术有 Lurgi、GE、U-gas、Shell、GSP、KBR、恩德炉等各种工业化气化炉型。其中 GE、Shell 和 Lurgi 3 种气化炉总气化能力在国内排前 3 位,目前还有不断扩大的趋势。这些技术和核心专利成果基本上都是 20 世纪 80 年代前后取得的,GE 技术核心是水煤浆进料和气化炉;Shell 和 GSP 技术核心是干煤粉加压进料和气化炉,其核心专利超过 20 a,第四代 Lurgi 气化已经超过 30 a。

中国是全球最大的煤炭生产国和消费国及煤气化国家,也是全球最大的煤气化技术进口国。改革开放以来,通过技术引进,缩短了中国与国外发

达国家技术的差距,也推动了中国现代煤气化和煤化工技术的应用与发展。但长期技术引进必然会挫伤技术创新的积极性。目前,中国正处于建设创新型国家的发展时期,创新、发展、应用自主的煤气化技术势在必行。

纵观国内外不同煤气化技术的开发过程,一般都要从概念形成,经过小试、中试、工业示范的过程,最终进入工业化应用。国外的 GE、Shell、GSP、Lurgi 等气化技术和国内的多喷嘴气化、两段式气化等都是如此。

煤气化技术创新的核心是气化炉创新。煤气化技术的创新范围主要包括气化炉、加料系统(含喷嘴)、原料预处理系统、煤气冷却系统、黑水灰水处理系统、排渣系统及相关的设备和材料等。

## 4 结论与建议

1) 煤气化技术选择的多样化是中国煤气化技术发展的必然趋势。先进的煤气化技术在中国具

有很强的生命力。GE 煤气化技术进入中国 20 多年来,已向中国企业转让了几十家,占全球 GE 煤气化用户的 80% 以上。Shell 煤气化炉 2000 年前后进入中国,目前中国的 Shell 煤气化炉用户占 Shell 煤气化炉用户的 90% 以上。常压移动床气化在国外虽然早已经淘汰,但由于投资低,在中国还有近 6000 台气化炉在运行。因此在中国不可能出现任何一项煤气化技术垄断的格局。目前,应结合引进技术取得的经验,加强自主煤气化技术的创新、应用与发展。

2) 煤气化是现代煤化工的基础,随着中国现代煤化工技术及产业的发展,煤气化技术发展的重点是大型化、高效率和环境友好,其技术应用需要考虑煤种适应性、操作的可靠性和环保特性。未来煤炭清洁高效转化利用将是大型、先进的煤气化技术为核心,以电、化、热等多联产为方向技术集成。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2011 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局公报 2012.
- [2] 张东亮, 孙弄, 孙河清, 等. 煤气化制合成气资料汇编[R]. 西安: 西北化工研究院, 1996.
- [3] 贺永德. 现代煤化工技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社 2004.

(上接第 60 页)

3) 中国褐煤资源丰富,近年成型技术发展较快,应发展适合于中国褐煤煤质特点的成型技术,从而为合理、高效利用中国储量丰富的褐煤资源提供先进的工艺技术。

#### 参考文献:

- [1] 徐振刚, 刘随芹. 型煤技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社 2001.
- [2] 戴和武, 谢可玉. 褐煤利用技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社 1999.
- [3] 程守云, 闫铁雷. 国内低阶煤干燥技术的工业应用新进展[J]. 广州化工 2012, 40(16): 25-27.
- [4] 赵振新, 朱书全, 马名杰, 等. 中国褐煤的综合优化利用[J]. 洁净煤技术 2008, 14(1): 28-31.
- [5] 邵俊杰. 褐煤提质技术现状及我国褐煤提质技术发展趋势初探[J]. 神华科技 2009, 7(2): 17-22.
- [6] 崔义, 周鹏. 褐煤干燥成型技术的研究[J]. 洁净煤技术 2012, 18(1): 42-44.

- [4] 沈浚. 合成氨[M]. 北京: 化学工业出版社 2011.
- [5] 高聚忠. 神华煤 Lurgi 气化制合成气探讨[A]. 神华首届科技研讨会[C]. 北京: 煤炭工业出版社 2005: 506-515.
- [6] 王鹏, 籍绪国. 鲁奇煤气化技术的发展及应用[J]. 洁净煤技术 2009, 15(5): 48-51.
- [7] 汪家铭. BGL 碎煤熔渣气化技术及其工业应用[J]. 化学工业 2011, 29(7): 34-39.
- [8] 任相坤. 神华煤气流床气化特性分析[A]. 神华首届科技研讨会[C]. 北京: 煤炭工业出版社 2005: 443-456.
- [9] 于遵宏, 于广锁. 多喷嘴对置式水煤浆气化技术的研究开发与产业化应用[J]. 中国科技产业 2006(2): 28-31.
- [10] 王中刚, 韩喜民. 水煤浆水冷壁气化炉项目总结[J]. 化肥工业 2012, 39(1): 57-58.
- [11] H J vander Ploeg, T Chhoa, P L Zuideveld. The Shell Coal Gasification Process for the US Industry[A]. Gasification Technology Conference[C]. 2004: 1-19.
- [12] 刘晓军. HT-L 航天加压粉煤气化技术发展及应用[J]. 全国煤气化技术通讯 2012(3): 1-18.
- [13] 许世森, 王保民. 两段式干煤粉加压气化技术及工程应用[J]. 化工进展 2011, 29(S1): 290-294.
- [14] 陈家仁. 煤炭气化的理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社 2007.
- [15] 张腊, 米金英. 干煤粉加压气化技术的现状和进展[J]. 洁净煤技术 2012, 18(2): 74-78.

- [7] 徐晓光, 赵毅. 褐煤提质技术的应用现状及前景[J]. 热力发电 2012, 41(5): 1-2.
- [8] 高俊荣, 陶秀祥, 侯彤, 等. 褐煤干燥脱水技术的研究进展[J]. 洁净煤技术 2008, 14(6): 73-75.
- [9] 张伟, 王再义, 王相力, 等. 日本神户制钢 UBC 工艺的开发[J]. 洁净煤技术 2010, 16(4): 64-66.
- [10] 汪寿建. 褐煤干燥成型多联产在工程实践中的应用和发展[J]. 化工进展 2010, 29(8): 1379-1386.
- [11] 常春祥, 熊友辉, 蒋泰毅. 高水分褐煤燃烧发电的集成干燥技术[J]. 选煤技术 2006, 4(2): 19-20.
- [12] 汪寿建. 褐煤干燥成型多联产在工程实践中的应用和发展[J]. 化工进展 2010, 29(8): 1379-1387.
- [13] 朱书全. 褐煤提质技术开发现状及分析[J]. 洁净煤技术 2011, 17(1): 1-4.
- [14] 白向飞. 中国褐煤及低阶烟煤利用与提质技术开发[J]. 煤质技术 2010(6): 9-10.
- [15] 田忠坤. 褐煤干选、干燥、成型一体化工艺技术开发研究[J]. 选煤技术 2011, 4(2): 20-23.