

# 煤炭地下气化炉型及工艺

梁 杰<sup>1</sup> 崔 勇<sup>1</sup> 王张卿<sup>1</sup> 席建奋<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院,北京 100083; 2. 新奥气化采煤有限公司,河北 廊坊 065001)

**摘要:**为探讨不同煤层条件下地下气化炉结构及气化工艺,在模型试验和现场试验的基础上研究了煤炭地下气化有井式和无井式气化炉结构及其工艺参数,形成了有井式“长通道、大断面、两阶段”气化工艺和无井式渗透式气化方法。试验结果表明:空气气化时可获得热值在4.18 MJ/Nm<sup>3</sup>以上的煤气;富氧气化时,当富氧体积分数由30%上升到80%时,煤气中有效组分( $H_2 + CO + CH_4$ )体积分数由30%上升到60%;两阶段气化第2阶段可生产 $H_2$ 组分体积分数在40%、热值在11.45 MJ/Nm<sup>3</sup>以上的煤气。无井式渗透式气化通道贯通参数为:当供风压力0.75 MPa、供风流量600 Nm<sup>3</sup>/h时,贯通速度为0.34 m/d,通道当量直径0.39 m,正向供风气化和反向供风气化能获得相同质量的煤气。

**关键词:**煤炭地下气化;有井式;无井式;富氧气化;两阶段气化;渗透式气化;正反向供风

中图分类号:TD84 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2013)05-0010-06

## Gasifier Type and Technique of Underground Coal Gasification

LIANG Jie<sup>1</sup>, CUI Yong<sup>1</sup>, WANG Zhang-qing<sup>1</sup>, XI Jian-fen<sup>2</sup>

(1. School of Chemical and Environment Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. ENN Coal Gasification and Mining Company Ltd., Langfang 065001, China)

**Abstract:** In order to discuss the structure and gasification technique of the underground coal gasifier under different seam conditions, based on the model experiment and site experiment, the structure and the technical parameters of the shaft type and no shaft type gasifier were studied and the well type long channel, large cross section, two stage gasification technique and the no shaft type permeable gasification method were formed. The experiment results showed that the heat value of the coal gas with air gasification would be over 4.18 MJ/Nm<sup>3</sup>. When the enriched-oxygen gasification with an enriched-oxygen content increased from 30% to 80%, the effective component( $H_2 + CO + CH_4$ ) contents would be increased from 30% to 60%. The second stage of the two stage gasification could produce the gas with  $H_2$  component about 40% and the heat value over 11.45 MJ/Nm<sup>3</sup>. The channel connection parameters of the no shaft type permeable gasification would be when the air supply pressure was 0.75 MPa and air supply value was 600 Nm<sup>3</sup>/h, the connection velocity would be 0.34 m/d and the channel equivalent diameter would be 0.39 m. The forward air supply gasification and the reverse air supply gasification would produce the same quantity of the coal gas.

**Key words:** underground coal gasification; well type; no well type; oxygen enrichment gasification; two stage gasification; permeation type gasification; forward and reverse air supply

## 0 引言

煤炭地下气化(Underground Coal Gasification, UCG)是将处于地下的煤炭进行有控制的燃烧,通过对煤层的热作用及化学作用而产生可燃气体的过程,以建井、井工采煤和地面煤气化理论和技术为基础,变传统的物理采煤为化学采煤,适用于回收老矿

井遗弃煤炭资源,井工开采困难或开采经济性差、安全性较低的低品位煤层(高灰、高硫、高水、低发热量等)、深部煤层等,可提高煤炭资源利用率,是煤炭开发利用技术的重要补充。煤炭地下气化后燃烧的灰渣留在地下,减少了对地表环境的影响;煤气可作为燃料用于民用、发电、工业锅炉燃烧,也可作为原料气生产甲烷、甲醇、二甲醚、汽油、柴油等或用于

收稿日期:2013-03-22;责任编辑:代艳玲

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA050106);中央高校基础科研业务费专项资金资助项目(2012YH01)

作者简介:梁杰(1964—),男,江苏宝应人,教授,博士。Tel:010-62331601,E-mail:ucgrc@vip.sohu.com

引用格式:梁杰,崔勇,王张卿等.煤炭地下气化炉型及工艺[J].煤炭科学技术,2013,41(5):10-15.

提取纯氢,是开发煤基清洁能源的新技术<sup>[1-3]</sup>。鉴于 UCG 技术的显著优点,自 20 世纪初,世界许多国家相继投入了大量的人力和物力进行研究和应用,并取得了丰硕的成果<sup>[4-5]</sup>。煤炭地下气化技术研究与发展至今,形成了 2 种技术类型,即有井式 UCG 技术、无井式 UCG 技术。我国在实验室试验研究的基础上,完成了多次现场试验,并取得了良好效果。笔者在模型试验和现场试验的基础上,分析了有井式和无井式地下气化炉结构及气化工艺,获得了空气气化、两阶段气化、富氧气化、正反向供风气化等工艺参数,以期为煤炭地下气化工程设计和生产提供技术支持。

## 1 气化炉型与工艺开发

中国矿业大学(北京)煤炭工业地下气化工程研究中心,自 1984 年开始进行煤炭地下气化技术研究,在国家高技术研究发展计划(863 计划)课题的资助下,建成了具有世界先进水平的煤炭地下气化模型试验台(图 1a)和地下气化模型试验测控系统(图 1b),其能够对不同炉型和工艺进行试验研究。

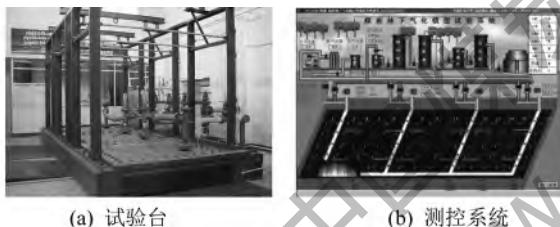


图 1 煤炭地下气化模型试验台和试验测控系统

在煤炭地下气化模型试验台上,完成了褐煤、烟煤及无烟煤地下气化模型试验,研究了空气气化、不同富氧浓度气化、富氧-水蒸气连续气化工艺及正反向供风、推进式供风、分离供风(排气)等气化工艺;完善了长通道、大断面地下气化炉结构形式和结构参数;提出并研究了“变截面流道煤层地下气化炉”和“分离控制注气点煤炭气化炉及其工艺”。在煤炭地下气化过程温度场、浓度场、速度场、气化反应速率、燃空区扩展规律、气化过程稳定性、测控技术等方面做了大量的理论研究工作,取得了一定的成果<sup>[6-9]</sup>,并在实验室地下气化模型试验的基础上,完成了多次现场工业性试验。

## 2 有井式煤炭地下气化技术

有井式气化炉进/排气通道是钻孔、井筒、巷道

或是在井筒和巷道中铺设的管道,气化通道是人工掘进的煤巷。有井式地下气化技术特点是在井下加工煤层,并可实现在井下就近操作,以控制注气点和气流流动区域。煤层加工方法主要有 2 种:一是在煤层内放置炸药,爆破松动煤层,以提高煤层渗透性;二是在煤层中施工疏松巷道,以避免煤层全部松动后,气流难以控制的缺点。

### 2.1 爆破松动煤层气化工艺

20 世纪 50 年代,前苏联进行了 3 次爆破松动煤层气化工艺<sup>[10-12]</sup>。在莫斯科近郊煤田进行了 2 次气化区全爆破松动煤层气化试验,气化煤量 1 000 t,气化剂为空气,气化盘区用坑道和砖墙包围(图 2),盘区 1 长×宽为 10 m×10 m,盘区 2 长×宽为 25 m×16 m;试验过程产气成分为:体积分数 2.5%~7.5% 的 CO<sub>2</sub>,12.0%~18.0% 的 O<sub>2</sub>,0.1%~1.0% 的 CO。试验表明,煤气生产过程不稳定,煤气质量较差,煤气中氧含量较高,说明空气发生了窜流,即气化炉进口空气没有经过燃烧区,通过松动的煤层裂隙直接流动到了气化炉出口。在顿涅茨克里希查煤田进行了第 3 次温控爆破松动煤层气化试验,采用炸药自动引爆,产气成分为:体积分数 10%~12% 的 CO<sub>2</sub>,1%~2% 的 O<sub>2</sub>,12%~14% 的 CO,1%~3% 的 CH<sub>4</sub>,14%~17% 的 H<sub>2</sub>,热值为 3.17~4.52 MJ/Nm<sup>3</sup>;由于燃烧时间较短,被松动的煤层很不均匀,导致难以连续获得可燃气体。

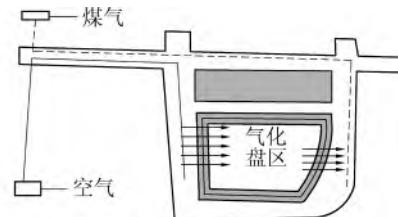


图 2 有井式气化炉

### 2.2 “长通道、大断面、两阶段”地下气化工艺

中国矿业大学(北京)开发了具有我国自主知识产权的“长通道、大断面、两阶段”地下气化工艺,以钻孔作为气化炉的进/排气孔,以矿井已有的井巷条件施工气化通道。“长通道、大断面”气化炉结构如图 3 所示,由于气化通道是人工掘进的煤巷,因此通道可根据煤层条件而延长,断面相对于定向钻进等方法形成的气化通道断面要大得多。两阶段工艺则是向气化炉循环供给空气(或富氧空气)和水蒸气,每个循环由 2 个阶段组成,第 1 阶段鼓空气燃烧

蓄热,并产生鼓风煤气;第2阶段鼓水蒸气发生还原反应产生干馏煤气和水煤气。在第2阶段,原第1阶段的高温氧化区成为水蒸气分解的还原区,水蒸气分解率提高,生产煤气中氢组分含量明显提高,煤气热值也相应提高,该工艺为煤在地下直接制氢开辟了一条新的技术途径。

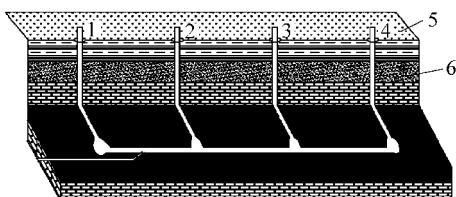


图3 “长通道、大断面”气化炉结构

采用“长通道、大断面、两阶段”地下气化工艺,先后在江苏徐州新河二号井、河北唐山刘庄煤矿、山东新汶孙村煤矿、鄂庄煤矿、山西昔阳杏丹峪煤矿等,针对不同的煤层赋存条件进行了现场试验和生产,在此基础上,进一步完善和发展了“长通道、大断面、两阶段”气化工艺,形成了“分离控制注气点煤炭地下气化炉及其工艺方法”。刘庄煤矿现场试验第1阶段鼓风煤气和第2阶段水煤气组分、热值和产量分别见表1和表2。

表1 鼓风煤气组分、热值和产量测定结果

H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	热值/煤气流量/	
					(MJ·Nm <sup>-3</sup> )	(Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
10~20	10~25	2~4	7~25	40~65	4.18~5.86	10~12

表2 水煤气组分、热值和产量测定结果

循环序号	体积分数/%					热值/(MJ·Nm <sup>-3</sup> )	煤气流量/(Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
1	40.66	28.02	7.84	5.51	17.97	11.88	1 963
2	43.57	15.68	11.02	6.92	22.81	11.89	2 287
3	47.14	13.36	12.38	20.48	6.64	12.59	2 263
4	46.69	14.45	10.27	23.55	5.04	11.83	2 345
5	47.94	16.63	12.04	18.17	5.22	12.97	2 462
6	52.00	11.24	8.65	21.83	6.27	11.45	2 430

由表2可知,“长通道、大断面、两阶段”地下气化工艺,第2阶段可生产H<sub>2</sub>组分体积分数在40%以上的煤气。欧盟的波兰等国家已开始了煤炭地下气化技术制取氢能工艺的研究,特别是波兰在其研发的地下煤气化模拟系统中应用富氧-水蒸气两阶段

气化工艺进行了无烟煤制取氢能的研究,在水蒸气阶段氢组分体积分数平均值达53.77%。以上研究表明煤炭地下气化技术可以得到较高含量的氢气组分,是未来开发氢能的一种新方法。

山东新汶鄂庄气化站已运行10余年,煤气已成功地用于工业锅炉燃烧供热、工业窑炉燃烧制陶瓷、内燃机发电和居民使用,现场试验不同氧气浓度下煤气组分含量如图4所示。河北刘庄煤矿地下气化试验实现稳定生产5年多,低热值煤气生产规模达10万~12万Nm<sup>3</sup>/d,中热值煤气约2.5万Nm<sup>3</sup>/d。因此,我国有井式“长通道、大断面、两阶段”和“分离控制注气点”煤炭地下气化技术已完成了工业性试验,具备了产业化示范的技术基础,该工艺特别适用于我国报废矿井和老矿井遗弃煤炭资源的回收。

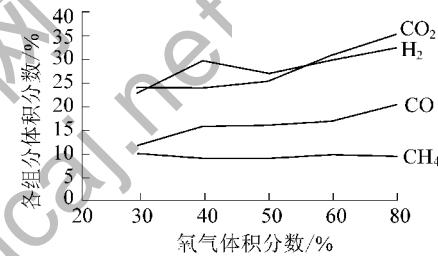


图4 不同富氧浓度下平均煤气组分含量

## 2.3 换管注气点后退式气化工艺

柴兆喜等<sup>[13]</sup>为改进气流控制方法,提出了“换管注气点后退式气化技术”,在矿井中,通过开拓布置井下操作巷、上下钻孔、气化巷、煤气巷等井巷工程构成气化工作面,在气化工作面的气化巷中,每隔20 m布置1根注气管,形成单一气化反应器(气化工作面有效尺寸为20 m×20 m)。气化反应器的数量可以根据气化工作面气化巷的长度进行灵活布置,在同一气化巷中的多个单一气化反应器构成一个气化炉。有井式气化技术一般适用于浅部煤层,它未能取消井下人工作业,在气化过程中也需要人工井下操作,因而只能进行低压或常压气化,以防止煤气泄漏,影响矿井安全。

## 3 无井式煤炭地下气化技术

### 3.1 无井式气化通道贯通方法

根据气化通道的注气方式,无井式地下气化技术可分为2类:渗透式气化和定向孔气化。无井式地下气化的所有建炉工作都在地面进行,进/排气孔由地面打钻施工,连接进/排气孔的气化通道用定向钻进技术施工或采取火力渗透贯通、水力压裂贯通、

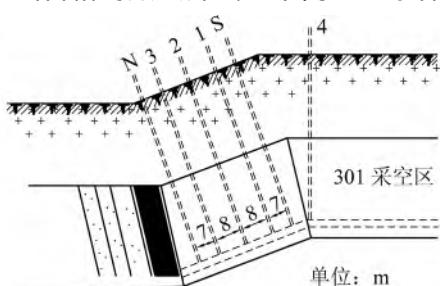
电力贯通等。无井式气化炉建炉的关键技术是气化通道的贯通,5种贯通方法比较见表3,其优缺点比较如下。  
 ①火力渗透贯通:优点为方法简单,容易掌握,设备不复杂;缺点为贯通速度慢,电耗大,方向性较差。  
 ②高压火力渗透贯通:优点为贯通速度较快,电耗较低;缺点为易损坏岩层,钻孔底部容易自燃,方向性较差。  
 ③电力贯通:优点为贯通速度较快,电耗较低;缺点为设备较复杂,操作不够简便,方向性差。  
 ④水力压裂贯通:优点为贯通速度快,电耗小;缺点为设备较复杂,操作不方便,液流不易控制。  
 ⑤定向钻进贯通:优点为贯通速度快,电耗小,通道面规整,方向性强;缺点是成本高,但有发展前景。

表3 贯通方法技术经济比较

贯通方法	贯通速度 / ( $m \cdot d^{-1}$ )	电耗量 / [( $kW \cdot h$ ) $\cdot m^{-1}$ ]	鼓风耗量 / ( $m^3 \cdot m^{-1}$ )
火力渗透	0.3~0.8	1 500	1 400
高压火力渗透	2.0~3.0	600~900	5 000
电力	2.0~5.0	800	—
水力压裂	4.0~10.0	500	—
定向钻进	10.0~20.0	83	—

### 3.2 渗透式气化

渗透式气化采用火力渗透、高压火力渗透、电力贯通、水力压裂方式开拓气化通道。当采用火力渗透贯通气化通道时,要在无气流流动的钻孔底部点火,即盲孔中点火。1987年,中国矿业大学(北京)在江苏徐州马庄煤矿进行了火力渗透气化试验,煤层条件如下:烟煤,厚度1.6 m,倾角15°,深度300 m,图5为马庄煤矿气化炉结构,采用火力渗透贯通气化通道,盲孔式电点火技术点燃孔底煤层,如图6所示。技术参数为:供风压力0.75 MPa,供风流600 Nm<sup>3</sup>/h,贯通速度0.34 m/d,通道当量直径0.39 m。气化通道形成后,先后采用了正、反向供风气化工艺,生产出合格的鼓风煤气。不同工艺条件下的煤



1,2,3—测温孔;4—注浆密封孔;N,S—进、出气孔

图5 马庄煤矿气化炉结构

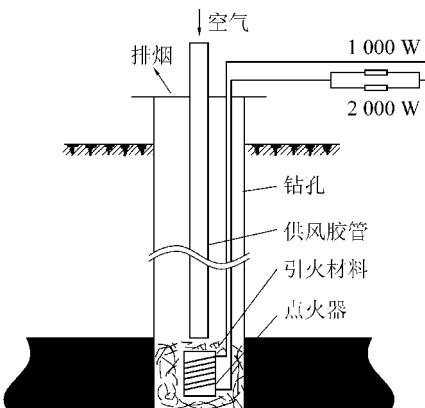


图6 盲孔式电点火系统

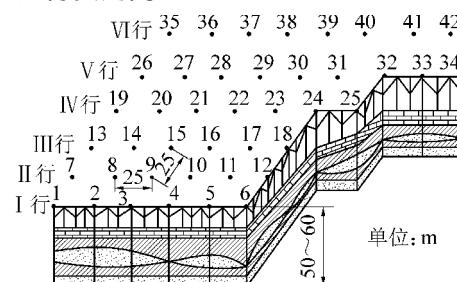
气成分含量见表4,产气规模平均为1 760 Nm<sup>3</sup>/d。由表4可看出,正向供风气化和反向供风气化能获得相同质量的煤气。

表4 马庄煤矿地下气化鼓风煤气成分及含量 %

气化工艺	$\varphi(H_2)$	$\varphi(O_2)$	$\varphi(N_2)$	$\varphi(CH_4)$	$\varphi(CO)$	$\varphi(CO_2)$
正向供风	10.87	0	65.66	2.32	7.57	13.37
反向供风	11.12	0.02	66.78	1.98	8.31	11.79

注:煤气热值均为3.53 MJ/Nm<sup>3</sup>。

前苏联在莫斯科近郊煤田设计了一个渗透式气化工业性气化炉(图7),每隔20 m施工1个垂直孔,气化褐煤,煤层储量15万t,采用火力渗透贯通气化通道,气化剂为空气。渗透贯通所建立的地下气化炉气化通道短、直径小、供风阻力大、单工作面产气量小、服务时间短,为达到工业化生产规模,必须棋盘式布置许多钻孔,组合成工业化生产气化炉,建炉和运行费用高。



1—42 为钻孔编号

图7 渗透式气化工业性气化炉

### 3.3 定向孔气化

定向孔气化是采用定向钻进技术施工气化通道,直接连通进/排气孔。随着定向钻进技术的发展,定向孔长度可达到150 m以上,因此可形成长壁式气化。为克服长壁式气化通道易堵,温度不集中

的缺点,在长壁式气化基础上,发展成为长壁式控制后退注气点气化工艺。20世纪70年代,美国Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)开发了控制后退供风点(Control Reverse Injection Point,CRIP)气化工艺<sup>[14-16]</sup>,以液氧作为气化剂,生产中热值煤气,并完成了现场试验。控制后退供风点技术原理是通道及钻孔形成之后安装同心套管(图8),以提供产气、注气、气体清洗和冷却水流的通道。注入井中的柔性管用于对后退供风点进行控制。在卷绕的柔性管末端安装1个大功率的喷嘴,用来点燃煤炭,喷嘴由卷绕的柔性管内部的2条细管分别供气化剂和可燃物形成点火系统,喷嘴及点火系统通过控制向注入孔方向移动。气化通道某一位置的煤层点燃后,煤炭燃烧气化形成燃空区,当燃空区附近的煤炭燃烧气化结束,喷嘴及点火系统将回撤,再形成新的气化区域,如图9所示。

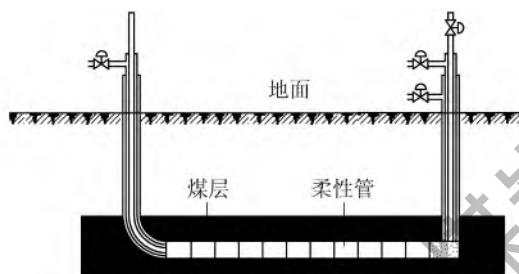


图8 控制后退供风同心套管结构

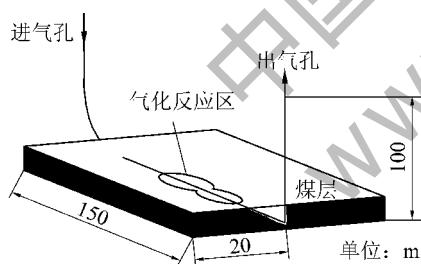


图9 控制后退供风点气化工艺

20世纪70年代,美国在怀俄明州的汉纳试验基地,采用CRIP工艺和长壁式工艺在Rocky Mountain I号实验站进行煤炭地下气化试验(煤层厚10m、深度130m),应用长壁式工艺,气化57d共消耗煤4443t,生产的煤气平均热值9.7 MJ/Nm<sup>3</sup>。应用CRIP工艺进行气化,93d共消耗11227t煤,氧气气化时生产的煤气平均热值10.7 MJ/Nm<sup>3</sup>(表5)。

欧洲煤炭地下气化试验多采用CRIP工艺,并获得一定成功。20世纪90年代,由英国、西班牙、比利时等欧盟国家组成的UCG项目组在西班牙特

鲁埃尔省的El Tremedal地区地下550m深的煤层进行了CRIP工艺气化,煤气平均热值为10.9 MJ/Nm<sup>3</sup>。另外欧盟UCG项目组还进行了高压地下煤气化试验,发现煤气组分中甲烷含量明显升高,因此增大压力有助于甲烷产生。

表5 美国Rocky Mountain试验煤气含量及热值

供风点 位置	气化时 间/d	燃烧煤 量/t	体积分数/%			煤气热值/ (MJ•Nm <sup>-3</sup> )	
			CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO		
1	43.8	4100	10.5	33.0	11.6	37.0	11.1
2	19.9	2330	8.6	33.0	10.8	40.0	10.2
3	20.0	2510	9.5	39.0	14.3	35.0	11.0
4	9.3	880	6.7	40.0	9.9	42.0	9.2

新奥气化采煤有限公司和中国矿业大学(北京)于2007年1月共同开展了无井式煤炭地下气化技术研究。2007年10月,在内蒙古乌兰察布玫瑰营煤田设计并建设了一座定向孔地下气化炉,并于2007年10月24日点火成功,完成了空气连续气化试验和富氧气化试验,煤气成功用于锅炉燃烧和内燃机发电。

#### 4 结论

1) 有井式“长通道、大断面、两阶段”气化工艺,空气气化时可获得热值在4.18 MJ/Nm<sup>3</sup>以上的煤气;富氧气化当富氧体积分数由30%上升到80%时,煤气中有效组分(H<sub>2</sub>+CO+CH<sub>4</sub>)体积分数由30%上升到60%;两阶段气化第2阶段可生产H<sub>2</sub>组分在40%、热值在11.45 MJ/Nm<sup>3</sup>以上的煤气。

2) 无井式渗透式气化通道贯通参数为:当供风压力0.75 MPa、供风流量600 Nm<sup>3</sup>/h时,贯通速度为0.34 m/d,通道当量直径0.39 m,正向供风气化和反向供风气化能获得相同质量的煤气。

3) 有井式气化工艺适用于报废矿井和老矿井遗弃煤炭资源的回收,无井式气化工艺可开采井工开采困难或开采经济性差、安全性较低的低品位煤层(高灰、高硫、高水、低发热量等)、深部煤层等。

4) 有井式煤炭地下气化技术在江苏徐州、河北唐山、山东新汶、山西昔阳等地现场试验的基础上,形成了具有我国自主知识产权的“长通道、大断面、两阶段”和“分离控制注气点煤炭地下气化炉及其工艺方法”,并完成了工业性试验。无井式煤炭地下气化研究在我国虽起步较晚,但我国无井式煤炭

地下气化试验融合了前苏联和美国的先进技术,在内蒙古乌兰察布玫瑰营煤田完成了工业性试验。因此,我国煤炭地下气化技术具备了产业化示范的技术基础。

#### 参考文献:

- [1] 余力,梁杰.煤炭资源开发与利用新方法:煤炭地下气化技术[J].科技导报,1999,17(4):33-35.
- [2] 梁杰.煤炭地下气化过程稳定性及控制技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001:1-10.
- [3] 刘淑琴.煤炭地下气化过程有害微量元素转化富集规律[M].北京:煤炭工业出版社,2009:5-12.
- [4] Evgeny S,Arvind V. Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status [J]. Ind Eng Chem Res,2009,48(17):7865-7875.
- [5] S Julio F,Ravi U,Fung-Ming K. Prospects for Underground Coal Gasification in Carbon-constrained World [J]. Energy Procedia,2009,274(2):4551-4557.
- [6] 梁杰,郎庆田,余力等.孙村矿缓倾斜薄煤层地下气化试验研究[J].煤炭学报,2003,28(2):126-130.
- [7] LIANG Jie,LIU Shu-qin,YU Li. Trial Study on Underground Coal Gasification of Abandoned Coal Resource [C]//Proceedings of Mining Science and Technology. Rotterdam: Balkema,1999:271-274.
- [8] 梁杰,刘淑琴,常建等.太原东山煤地下气化模型试验
- [9] 梁杰,张彦春,魏传玉等.晋阳无烟煤地下气化模型试验研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(1):25-28.
- [10] Kreinin E V. Nontraditional Thermal Technologies for Production of Heavy-Extractable Fuels [C]//Coal Hydrocarbons. OAO Gazprom, Moscow, Russia, 2004:1-20.
- [11] Lazarenko S N,Kreinin E V. Underground Coal Gasification in Kuzbass: Present and Future; Institute of Coal [R]. Kemerovo, Russia: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1994:32-41.
- [12] Lazarenko S N,Kreinin E V. Underground Coal Gasification in Kuzbass: New Opportunities; Institute of Coal and Geochemistry [R]. Kemerovo, Russia: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 2006:1-6.
- [13] 柴兆喜,董双干,聂世瑄等.我国矿井气化采煤技术的试验及其产业化研究[J].中国煤炭,2004,30(11):11-13.
- [14] Hill R W. Review of the CRIP Process [C]//Proceedings of the 12th Annual Underground Coal Gasification Symposium. DOE: Washington D C,1986:10-12.
- [15] Green M B. Underground Coal Gasification A Joint European Trial in Spain [R]. London: Report Coal R196 DTI Pub URN99/1093 Department of Trade and Industry Technology(DTI),1999.
- [16] Pirard J P,Brasseur A,Coeme A. Results of the Tracer Tests During the El Tremedal Underground Coal Gasification at Great Depth [J]. Fuel,2000,79:471-478.

#### (上接第9页)

- [20] DTI. The Feasibility of UCG Under the Firth of Forth DTI/Pub URN 06/885 [R/OL]. [2006-03-01]. <http://www.bis.gov.uk/files/file30689.pdf>.
- [21] DTI. A Strategy for Developing Carbon Abatement Technologies for Fossil Fuel Use DTI/Pub URN 05/844 [R/OL]. [2005-06-01]. <http://www.dti.gov.uk/ent/coal>.
- [22] Thornton Energy - Interactive Investor [EB/OL]. [2010-09-01]. <http://www.iii.co.uk/investment/detail?code>.
- [23] Alisa Murphy. B9 Coal UCG with Fuel Cells CCS Project [J/OL]. [2010-09-10]. Carbon Capture Journal, <http://www.carboncapturejournal.com/displaynews.php?NewsID=657>.
- [24] Julie Lauder. UCG Projects and Developments in the UK - Zeus Development [R/OL]. [2011-05-01]. UCG Association Zeus Underground Coal Gasification Conference. [http://archive.zeus-library.com/ucg2011/05-Lauder,%20Julie\\_UCGA\\_PresentationRev0524.pdf](http://archive.zeus-library.com/ucg2011/05-Lauder,%20Julie_UCGA_PresentationRev0524.pdf).
- [25] BCG Energy. UCG to Provide Low Cost, Long Term, Clean Secure Energy for Scotland [R/OL]. [2010-04-04]. <http://www.begenergy.co.uk/about-bcg-energy/releasen>.
- [26] Hi-Gen Power - Wikipedia the free encyclopedia [R/OL]. [2000-01-01]. [http://www.en.wikipedia.org/wiki/Hi-Gen\\_Power](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Hi-Gen_Power).
- [27] European Commission Research Fund for Coal & Steel Research Project HUGE( Hydrogen Underground Gasification for Europe) [J]. [2012-01-01]. [http://www.bookshop.europa.eu//hydrogen.underground-coal-gasification-for-europe-huge/KINA25044ENN\\_002.pdf](http://www.bookshop.europa.eu//hydrogen.underground-coal-gasification-for-europe-huge/KINA25044ENN_002.pdf).
- [28] K Stauczyk, J S wiadrowski, K Kapusta et al. Hydrogen-oriented Underground Coal Gasification for Europe( HUGE) [R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.
- [29] Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe [EB/OL]. [2000-01-01]. <http://www.huge.gig.eu/en.html>.
- [30] Natalie Nakaten, Thomas Kempka, Michael Green et al. Development of a Technical-Economic Model for Dynamic Calculation of COE, Energy Demand and CO<sub>2</sub> Emissions of an Integrated UCG-CCS Process Presentations [C]. Vienna, Austria: EGU General Assembly 22-27 April 2012.
- [31] European Commission. UCG&CO<sub>2</sub> Storage Project: For Cleaner Energy From the Dirty [R/OL]. [2011-06-01]. <http://www.certh.gr/E51BC006.en.aspx>.
- [32] Chirs Gross, Mark Van der Reit. Underground Coal Gasification [R/OL]. [2011-07-13]. [http://www.iea-coal.org.uk/publisher/system/component\\_view.asp?LogDocId=2011](http://www.iea-coal.org.uk/publisher/system/component_view.asp?LogDocId=2011).
- [33] Eskom. Eskom - Project Status Eskom's implementation Plan [R/OL]. [2011-06-01]. <http://www.eskom.co.za/live/content.php%3Flt>.