

文章编号:1000-1964(2006)01-0025-04

## 昔阳无烟煤地下气化模型试验研究

梁 杰<sup>1</sup>, 张彦春<sup>1</sup>, 魏传玉<sup>2</sup>, 冯银辉<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 新汶矿业集团鄂庄煤矿, 山东 莱芜 271000)

**摘要:** 为了探索无烟煤地下气化过程的基本规律, 以及制定合理的工艺参数, 测定了山西昔阳无烟煤反应活性, 并进行了富氧地下气化模型试验; 研究了不同富氧浓度下, 温度场、出口煤气有效组分含量、热值、产气率及热效率的变化规律。试验结果表明, 随着氧气浓度的增加, 气化区温度升高, 煤气中  $H_2$ 、CO 含量增加, 但当氧气浓度大于 40% 时, 温度上升幅度增加, 但煤气中有效气体组分含量上升幅度减小; 添加水蒸汽后, 才能提高  $H_2$ 、CO 含量, 并有效地控制气化炉温度, 保持煤气热值的稳定; 随着富氧浓度的提高产气率下降, 气化效率在 52.10%~75.09% 之间。

**关键词:** 无烟煤; 地下气化; 富氧; 模型试验

**中图分类号:** TQ 546 **文献标识码:** A

Experiment Research on Underground Coal Gasification  
of Xiyang AnthraciteLIANG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Yan-chun<sup>1</sup>, WEI Chuan-yu<sup>2</sup>, FENG Yin-Hui<sup>1</sup>(1. School of Chemical and Environment Engineering, China University of Mining & Technology,  
Beijing 100083, China; 2. Erzhuang Mine, Xinwen Mining(Group) Co. Ltd.,  
Laiwu, Shandong 27100, China)

**Abstract:** The reaction activity of Xiyang anthracite was measured and a model experiment of rich-oxygen of underground coal gasification (UCG) was carried out for exploring the law of UCG of anthracite and proposing rational technical parameters. Under the conditions of different contents of rich-oxygen, the temperature field, the various law of the main gas component, heat value, the rate of producing gas and heat efficiency were studied. The results show that the temperature of gasification zone and the contents of  $H_2$  and CO in gas increased with the increasing of the content of rich-oxygen. When the content of rich-oxygen is bigger than 40%, the temperature increase rapidly, while the effective component content increase slowly. The content of  $H_2$  and CO in gas will rise and, the temperature of gasifier and the heat value remain stable after adding steam. With the raise of content of rich-oxygen, the rate of producing gas will be reduced, and the gasification efficiency is 52.10%—75.09%.

**Key words:** anthracite; UCG; rich-oxygen; model experiment

无烟煤作为优质煤种, 在我国煤炭资源中占的比例较小, 但无烟煤在开采过程中同样也存在着较大的资源浪费, 如井工难以开采或开采经济性、安全性较差的薄煤层、高硫煤层及深部煤层, 这些资

源都可以用地下气化技术进行开采<sup>[1]</sup>。但无烟煤由于变质程度高、反应活性低、透气性差, 增加了地下气化过程的难度, 因此目前对无烟煤地下气化过程研究较少。为此, 为了探索无烟煤地下气化过程的

收稿日期: 2005-03-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(20001AA529030)

作者简介: 梁 杰(1964-), 男, 江苏省宝应县人, 教授, 工学博士, 博士生导师, 从事煤炭地下气化方面的研究。

E-mail: ucgrc@sohu.com Tel: 010-62331601

基本规律,为昔阳现场试验制定合理的工艺参数,对山西昔阳中硫无烟煤地下气化进行了模型试验研究,测定了试验煤样对 CO<sub>2</sub> 的反应特性,通过模型试验,研究了昔阳无烟煤地下气化富氧气化温度场、出口煤气有效组分、产气率及热效率的变化规律。

1 昔阳无烟煤反应性

将昔阳煤样送煤炭部山西煤炭质检站、山西煤田地质研究所进行全面分析化验,化验项目有:工业分析、元素分析、发热量、全硫等。表 1 为试验煤样煤质分析结果。

由表 1 可看出,昔阳无烟煤基本煤质特征是:全水分含量低,挥发分低,灰分低,发热量高、硫含量中等,从煤质资料可知,昔阳无烟煤为优质无烟煤,但含硫量偏高。

表 1 煤质分析结果  
Table 1 Analysis result of coal

w <sub>B</sub> /%				
全水 M <sub>t</sub>	水份 M <sub>ad</sub>	灰份 A <sub>d</sub>	挥发份 V <sub>ad</sub>	全硫 S <sub>t,d</sub>
3.60	2.93	13.62	6.69	1.85
w <sub>B</sub> /%				
碳 C <sub>d</sub>	氢 H <sub>d</sub>	氧 O <sub>d</sub>	氮 N <sub>d</sub>	磷 P <sub>d</sub>
80.04	2.74	0.64	1.11	0.12
发热量 Q/(MJ·kg <sup>-1</sup> )				
30.69				

昔阳无烟煤对 CO<sub>2</sub> 反应测定结果见表 2。表中 α 为 CO<sub>2</sub> 还原率;V<sub>CO<sub>2</sub></sub>,V<sub>CO</sub> 分别为反应后气体中 CO<sub>2</sub> 和 CO 的体积百分比。CO<sub>2</sub> 还原率与反应后气体中 CO<sub>2</sub> 含量的关系如下公式<sup>[2]</sup>

$$\alpha = \frac{100 \times (100 - a - v) \times 100}{(100 - a) \times (100 + v)},$$

式中:a 为 CO<sub>2</sub> 还原率;α 为钢瓶 CO<sub>2</sub> 气体中杂质气体含量;v 为反应后气体中 CO<sub>2</sub> 含量。

表 2 煤对 CO<sub>2</sub> 化学反应测定结果  
Table 2 Result of coal and CO<sub>2</sub> chemical reaction

标准温度/℃	取气体积/mL	V <sub>CO<sub>2</sub></sub> /%	V <sub>CO</sub> /%	α/%
800	100	97.0	3.0	1.5
850	100	94.2	5.8	3.0
900	100	89.0	11.0	5.8
950	100	79.8	20.2	11.2
1 000	100	69.4	30.6	18.1
1 050	100	57.2	42.8	27.2
1 100	100	44.6	55.4	38.3

由此可见,在相同温度条件下,昔阳无烟煤的反应活性小于烟煤<sup>[3]</sup>

2 实验系统及实验过程

2.1 实验系统

气化炉体:模型气化炉内膛尺寸长 4.45 m,宽 1.17 m,高 1.57 m。外设耐火层、保温层、钢板密封层和钢筋混凝土承压层。炉体上设 4 个进(出)气孔、19 个温度测量孔、4 个燃烧状态观测孔和 6 个压力测点。图 1 是模拟煤层和气化炉结构示意图,气化盘区(煤层)尺寸为 4 m×1.1 m×0.3 m,倾角 12°,气化煤量 1 716 kg。

气化剂供给系统:包括供风、供氧和水蒸汽发生系统。供风采用空气压缩机,O<sub>2</sub> 由氧气瓶提供,水蒸汽制备采用 0.2 t/h 电热锅炉。

检测系统:流量采用涡街流量计测量;进出口及炉体压力采用 PT200 压力变送器显示;煤层温度测量采用镍铬—镍硅热电偶,共布置 85 个温度测点,用智能数据采集模块及 Detranfer ver2.0 采集软件进行数据采集;煤气组分采用北京分析仪器厂 GC-3420 型气相色谱仪在线分析,通过自动进样系统及本实验室自行开发的色谱工作站,将结果自动传入上位机显示、存储、分析。

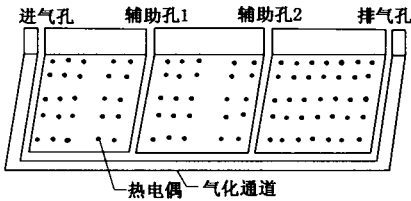


图 1 模拟煤层笔 化炉结构  
Fig. 1 Simulation of coal seam and gasifier structure

2.2 试验过程及数据

模型气化炉采用电阻丝点火器,在通道中靠近进气孔位置水平方向处点火,之后鼓入空气或少量 O<sub>2</sub> 助燃,预热气化炉,通过煤层温度变化观察气化炉升温状况,并根据点火煤层周围单点平均温度随时间的变化记录气化炉的升温状况。待气化炉形成高温温度场后,鼓入空气、富氧、或富氧—水蒸汽进行连续气化试验,实时采集煤层温度场数据,并分析记录不同气化工艺条件下不同气化时刻的煤气组成,以研究在不同的富氧浓度下气化炉温度场及出口煤气组分及热值的变化规律。

整个试验过程进行了 144 h,分为 9 个阶段,每个阶段采用不同的富氧浓度进行气化,最后两个阶段添加了水蒸汽。表 3 给出了每个试验阶段工艺参数的平均值。

表3 试验工艺参数  
Table 3 Technological parameters in the experiment

项 目	气化剂流量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	富氧浓度/ %	蒸汽流量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	平均温度/ C	平均煤气组分/%					煤气热值/ (MJ·Nm <sup>-3</sup> )
					H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
第1阶段	13.80	22.67	0	845	13.10	11.39	2.13	10.36	62.77	3.96
第2阶段	14.39	25.82	0	878	15.40	16.43	2.56	8.34	57.28	5.06
第3阶段	15.74	31.28	0	945	16.13	19.63	2.37	10.75	51.13	5.48
第4阶段	16.77	37.01	0	987	17.84	25.37	2.63	9.20	44.96	6.53
第5阶段	21.04	51.90	0	1105	20.87	22.99	4.06	17.51	34.57	7.19
第6阶段	15.33	61.28	0	1180	18.24	22.96	3.15	24.19	31.47	6.48
第7阶段	13.15	71.15	0	1217	16.56	19.35	3.12	32.31	28.66	5.80
第8阶段	11.48	81.90	5.35	1099	26.21	26.16	2.77	28.60	16.26	7.76
第9阶段	8.96	97.27	5.12	1118	36.28	28.15	2.95	31.22	1.40	9.37

### 3 试验结果分析

#### 3.1 富氧浓度对出口煤气有效组分的影响

富氧浓度对出口煤气有效组分的影响见图2。从图2可以看出,随着气化剂中O<sub>2</sub>浓度的增加,煤气中H<sub>2</sub>含量增加,当O<sub>2</sub>浓度达到50%时,H<sub>2</sub>上升幅度减小,甚至有下降的趋势;在O<sub>2</sub>浓度达到70%时仍未见升高,添加水蒸汽后,才能保持H<sub>2</sub>含量的不断提高;这是因为随着O<sub>2</sub>浓度的增加,气化炉温度提高,水蒸汽分解率提高,但无烟煤水分低,必须由外界补充水分,添加水蒸汽后H<sub>2</sub>含量显著提高。煤气中CO含量随着O<sub>2</sub>浓度的增加而迅速增加,但当O<sub>2</sub>浓度超过40%时CO含量下降,这是由于O<sub>2</sub>浓度过高,使部分CO重新氧化而生成CO<sub>2</sub><sup>[4]</sup>,添加水蒸汽后,由于水蒸汽的分解作用,CO含量显著增加。CH<sub>4</sub>含量几乎不随O<sub>2</sub>浓度的增加而发生显著变化,只是随着气化过程的进行CH<sub>4</sub>含量略有下降,低于烟煤气化。

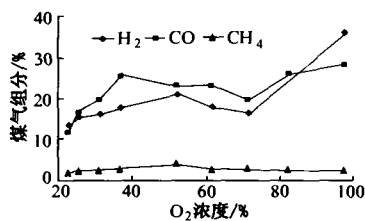


图2 煤气有效组分随着富氧浓度的变化规律  
Fig. 2 Variation of effective component of gas with various contents of rich-oxygen

图3为煤气热值随富氧浓度的变化规律。从图3可以看出,煤气热值随着富氧浓度的提高而提高,当O<sub>2</sub>浓度达到50%时上升幅度减缓,热值仍达不到8.36 MJ/Nm<sup>3</sup>(2 000 Kcal/Nm<sup>3</sup>),要使煤气热值达到8.36 MJ/Nm<sup>3</sup>必须添加水蒸汽;与烟煤气化相比,在相同的富氧浓度下,无烟煤气化煤气热值略低,这是由于无烟煤气化挥发份少、煤气中

CH<sub>4</sub>含量低,影响了煤气热值<sup>[5]</sup>。

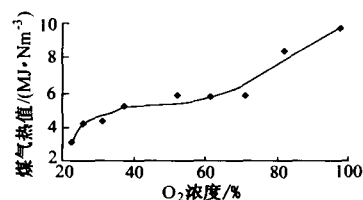


图3 煤气热值随富氧浓度的变化规律  
Fig. 3 Variation of heat value with various content of rich-oxygen

#### 3.2 气化区平均温度

随着富氧浓度的提高,气化区平均温度显著升高,见图4。其上升的平均速率约为每提高1%的O<sub>2</sub>浓度气化区平均温度上升7.67℃,当O<sub>2</sub>浓度大于40%时,温度上升幅度较大。但当O<sub>2</sub>浓度大于70%时,气化区平均温度已接近灰熔点,此时必须添加水蒸汽,控制气化区温度。当汽氧体积比控制在0.5:1左右时,能维持气化区有合适的反应温度,并获得好的煤气组分<sup>[6]</sup>。

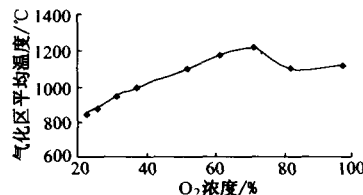


图4 气化平均温度随富氧浓度的变化规律  
Fig. 4 Variant of the temperature with various the content of rich-oxygen

图5是气化区平均温度与煤气组分的关系。在850~1 100℃范围内随着富氧浓度的提高,出口煤气中有效气体组分显著提高,但当气化区平均温度超过1 100℃时,可燃组分H<sub>2</sub>和CO含量有所下降,CO<sub>2</sub>含量显著增加,原因是此时O<sub>2</sub>浓度超过了70%,过剩的O<sub>2</sub>与可燃气体组分发生氧化,氧化区长度加大。此时气化区温度虽然较高,但煤气中有效组分降低,因此从工艺控制上来说,当O<sub>2</sub>浓度达

到 70% 时, 必须鼓入水蒸汽。

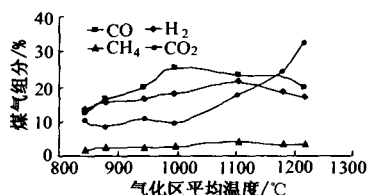


图 5 气化区平均温度与煤气组分的关系

Fig. 5 Variation of effective component of gas with various the average temperature of gasification zone

### 3.3 煤气产率及气化效率

图 6 是煤气产量与气化剂流量的比随着  $O_2$  浓度的增加的变化规律。

从图 6 可以看出, 煤气产量与气化剂流量的比随着  $O_2$  浓度的增加而增加, 这就是说  $O_2$  浓度的提高使单位体积气化剂生产的煤气量增加。

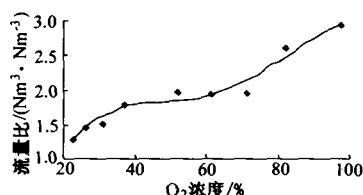


图 6 产气量随富氧浓度的变化规律

Fig. 6 Variation of gas production with various the content of rich-oxygen

图 7 是煤气产率随着富氧浓度变化的规律。随着富氧浓度地提高煤气产气率下降, 当  $O_2$  浓度由 21% 上升到 97% 时, 煤气平均产气率由  $4.43 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$  下降到  $1.64 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$ 。

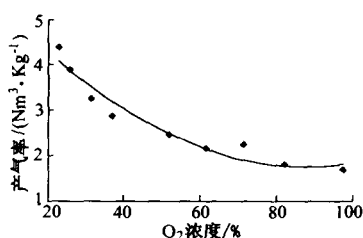


图 7 煤气产率随富氧浓度的变化规律

Fig. 7 Variation of the gas yield with various the content of rich-oxygen

图 8 是气化效率随富氧浓度的变化规律。随着富氧浓度的变化, 气化效率也随之变化, 当  $O_2$  浓度为 30% 时, 气化效率较高; 当富氧浓度大于 30% 时, 随着富氧浓度的提高气化效率降低。这是因为富氧浓度提高后, 出口煤气温度提高, 虽然煤气热值提高, 但产气量下降, 因而导致气化效率降低; 只有当鼓入水蒸汽后, 显著提高了煤气热值, 气化效率较高; 富  $O_2$  化时气化效率在 52.10%~75.09% 之间, 与烟煤气化过程相当<sup>[7]</sup>。

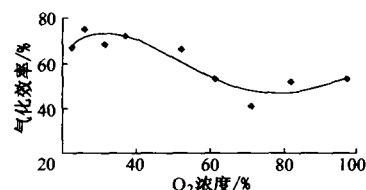


图 8 气化效率随富氧浓度的变化规律

Fig. 8 Variation of gasification efficiency with various the content of rich-oxygen

## 4 结 论

1) 无烟煤由于反应活性低, 采用富  $O_2$  化能够提高气化炉温度, 实现连续稳定生产。

2) 随着气化剂中  $O_2$  浓度的增加, 煤气中  $H_2$ ,  $CO$  含量增加, 但当  $O_2$  浓度大于 40% 时, 其上升幅度减小, 甚至有下降的趋势; 添加水蒸汽后, 才能提高  $H_2$ ,  $CO$  含量, 保持煤气热值的稳定。煤气产量与气化剂流量的比随着  $O_2$  浓度的增加而增加,  $O_2$  浓度的提高使单位体积气化剂生产的煤气量增加。

3) 随着富氧浓度的提高, 气化区平均温度显著升高, 其上升的平均速率约为每提高 1% 的  $O_2$  浓度气化区平均温度上升  $7.67^\circ\text{C}$ 。在  $850 \sim 1100^\circ\text{C}$  范围内随着富氧浓度的提高, 出口煤气中有效气体组分显著提高。但当  $O_2$  浓度大于 70% 时, 必须添加水蒸汽, 控制气化区温度。当汽氧体积比控制在 0.5:1 左右时, 能维持气化区有合适的反应温度, 并获得好的煤气组分。

4) 随着富氧浓度地提高煤气产气率下降, 当  $O_2$  浓度由 21% 上升到 97% 时, 煤气平均产气率由  $4.43 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  下降到  $1.64 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ; 富  $O_2$  化时气化效率在 52.10%~75.09% 之间。

## 参考文献:

- [1] 李耀娟, 田玉璋, 于在平. 煤炭地下气化[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1981: 112-123.
- [2] 杨金和, 陈文敏, 段云龙. 煤炭化验手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998: 459-460.
- [3] 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, 2002: 12-13.
- [4] 埃利奥特. 煤利用化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [5] 梁 杰, 刘淑琴, 常 建, 等. 太原东山煤地下气化模型试验研究[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(1): 12-17.  
LIANG Jie, LIU Shu-qin, CHANG Jian, et al. Study on underground model test of Dongshuan coal [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, 32(1): 12-17.

(下转第 34 页)

- Mode of occurrence of several harmful trace elements in Yima coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 31(1): 31-34.
- [12] 张军营, 任德贻, 赵峰华, 等. 煤中微量元素赋存形态研究方法[J]. 煤炭转化, 1998, 21(4): 12-16.
- ZHANG Jun-ying, REN De-yi, ZHAO Feng-hua, et al. Research methods of occurrences of trace elements in coal[J]. Coal Conversion, 1998, 21(4): 12-16.

(责任编辑 骆振福)

(上接第 28 页)

- [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.
- LIANG Jie, LANG Qing-tian, YU Li, et al. Study on underground gasification test of gently inclined thin seam[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 126-130.
- [7] 梁 杰, 刘淑琴, 杨 榛, 等. 煤炭地下气化过程焓分析[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 200-204.
- LIANG Jie, LIU Shu-qin, YANG Zheng, et al. Exergie analysis of underground coal gasification process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 200-204.

(责任编辑 骆振福)