

文章编号: 1000-582X(2003)02-0047-04

缓倾斜煤层反向两阶段煤炭地下气化模型实验

杨兰和¹, 梁杰²

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221008; 中国矿业大学化工与环境工程系, 北京 100083)

摘要: 为了提高煤炭地下气化产品煤气的热值, 提出并研究了缓倾斜煤层反向2阶段煤炭地下气化方法。在物料平衡的基础上, 建立了2阶段煤炭地下气化方法理想气化参数的计算模型。通过对模型试验结果的分析, 指出了该气化方法温度场发展过程的一般规律和中热值地下水煤气的形成原因, 从而得到了一些工艺控制参数。反向2阶段煤炭地下气化方法能够获得热值 $Q^{\ominus} = 12.56 \text{ MJ/m}^3$ 以上的地下水煤气, 该煤气由水煤气和干馏气组成, 与同向2阶段气化方法相比, 进一步提高了气化过程的热效率。

关键词: 缓倾斜煤层; 煤炭地下气化; 地下水煤气

中图分类号: TQ546

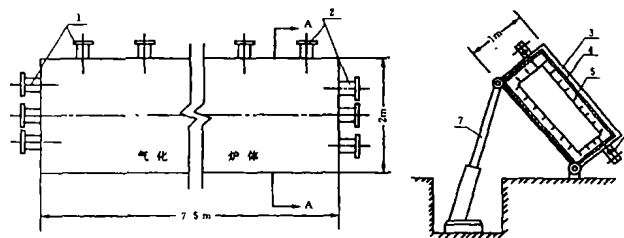
文献标识码: A

煤炭地下气化把建井、采煤、气化3大工艺融为一体。并直接从地下煤层中提取含能组份, 因而具有安全性好、投资少、效率高、污染少、效益高等优点。早在60~70年代, 前苏联、美国等许多国家对煤炭地下气化技术进行了大量的理论和试验研究^[1-4], 取得了很大的进展。然而, 由于国外采用传统式的地下气化工艺, 因而所生产的煤气热值比较低, 不能满足民用和一些工业锅炉的正常使用。为了解决煤气热值低和产气量小的问题, 笔者总结了国内外地下气化经验的基础上, 提出了长通道、大断面、两阶段地下气化新工艺^[5]。新汶、肥城及昔阳等地现场试验表明, 新工艺使地下气化炉的生产能力和煤气热值均得到较程度的提高。但根据目前现场试验情况, 在缓倾斜煤层中进行地下气化, 存在的主要问题是煤气热值的稳定性不够理想, 从而影响了煤炭地下气化商业性规模生产。作者在前人工作的基础上, 借助多功能工艺技术模型试验台, 在缓倾斜煤层中, 进一步对反向两阶段煤炭地下气化工艺进行了模型试验研究, 为进一步推广该技术工艺, 提供了重要的生产设计参数及技术规范参数。

1 多功能工艺技术模型试验台

模型气化炉炉体外形尺寸长7.5 m, 高2 m, 宽1 m, 炉

体分为炉底和炉盖2部分, 如图1所示。



1. 进气口; 2. 出气口; 3. 炉外壳; 4. 保温层; 5. 耐火层; 6. 密封液压槽; 7. 液压支撑架

图1 模型实验台示意图

炉底下面装有一组液压千斤顶, 可使气化炉处于任一角度。炉膛较大, 可充填其他材料, 模拟不同厚度的煤层。在炉体侧面设有多个进气孔、排气孔或注浆孔, 可模拟各种不同的炉型、研究不同的供风方式和不同长度的气化通道。试验台还同时设置一循环供气(汽)管路, 以实现正反向供风(汽)和移动点供风(汽)。气化炉密封采用液压密封技术。在炉底上侧面设置一块有液压推杆推动的推板, 气化过程中推板给煤层施加一定的压力, 以模拟煤层上部压力。

炉体内填煤尺寸为 $6.4 \text{ m}^3 \times 1.1 \text{ m}^3 \times 0.25 \text{ m}^3$, 约填煤 2.112 t, 煤层倾角为 25° 左右。煤质工业分析结果示于表 1。

· 收稿日期: 2002-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(59906014; 5027606); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2001AA529030)

作者简介: 杨兰和(1964-), 男, 山东省禹城人, 副教授, 工学博士, 主要从事煤炭地下气化与环境规划教学与研究工作。

表1 煤样工业分析及热值

项目	取样间距/m								模型实验煤样
	10	20	40	60	80	100	120	140	
分析基水份	4.07	4.90	3.66	3.66	6.91	3.69	5.98	7.54	4.18
灰份	21.93	13.08	9.80	12.57	12.15	11.91	30.29	42.33	7.61
挥发份	27.08	26.77	32.22	30.27	28.09	29.06	25.29	20.02	23.08
C	61.00	66.56	71.35	68.73	68.93	64.60	53.37	37.03	72.72
H	4.17	3.92	5.00	4.49	4.09	4.37	3.32	2.20	4.71
O	6.81	10.09	8.54	8.88	6.35	13.96	5.80	8.87	8.32
N	0.74	0.84	0.89	0.94	1.01	0.64	0.70	0.55	1.13
S	1.28	0.59	0.76	0.73	0.56	0.83	0.54	0.48	1.33
弹筒热量/MJ·kg ⁻¹	/	26.25	28.90	/	/	/	/	/	29.45
高位	/	26.17	25.16	/	/	/	/	/	29.31
低位	/	28.81	27.59	/	/	/	/	/	28.14

填煤时尽量采用大块原煤,以便尽可能保持煤层的原始状态。缝隙处用小块煤填充,最后再用少量水泥与煤粉的混合物抹实。在填煤过程中,按设计的位置预留出气化通道,其当量直径为 $\phi 75$ mm。

2 试验系统

模型试验系统如图2所示。

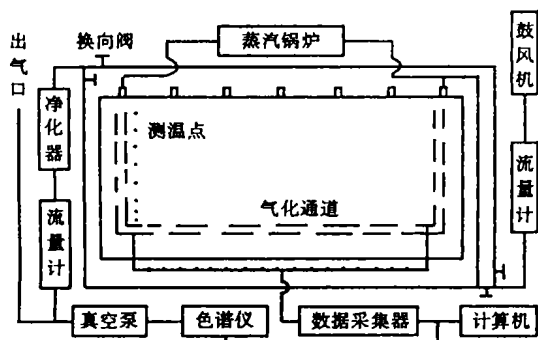


图2 模型试验系统

管路系统设计成环形回路,通过换向阀门可以实现从正反两方向鼓入空气或水蒸汽。煤气净化器主要是除去煤气中的焦油,同时降低出口煤气的温度。为了准确测定炉体内的温度分布,对测温点进行了加密布设,气化盘区内埋设了24排测温点,每排布置8个点,共192个测温点。测温元件采用已严格标定过的NiCr-NiSi热电偶,由全自动数据采集器定时采集,通过微机自动显示并记录下来。产生的煤气由气相色谱仪进行分析,便可得出各种成份的含量。

为了测定气化炉的漏气率,以及检查整个系统的运行情况是否正常。需要首先进行冷态试验,试验结果如表2所示。由表2可知,气化炉的漏失率基本上在8.5%以内,在允许的损失范围内。并且整个试验系统运行正常,这保证了模型试验的顺利进行。

表2 冷态实验结果

项目	正向供风				反向供风			
	鼓入量/m ³ /h	流出量/m ³ /h	漏出量/m ³ /h	漏失率/%	鼓入量/m ³ /h	流出量/m ³ /h	漏出量/m ³ /h	漏失率/%
鼓入量/m ³ /h	35.1	31.5	3.6	10.27	33.0	31.0	2.0	6.10
流出量/m ³ /h	28.3	26.0	2.3	8.12	23.0	21.9	1.1	4.78
漏出量/m ³ /h	23.0	37.6	4.2	10.24	41.8	31.2	2.8	8.23
漏失率/%	34.0	23.7	1.3	5.20	34.0	23.7	1.3	5.20
平均/%	25.0	17.5	1.5	7.87	25.0	17.5	1.5	7.87
平均/%	7.32				7.89			

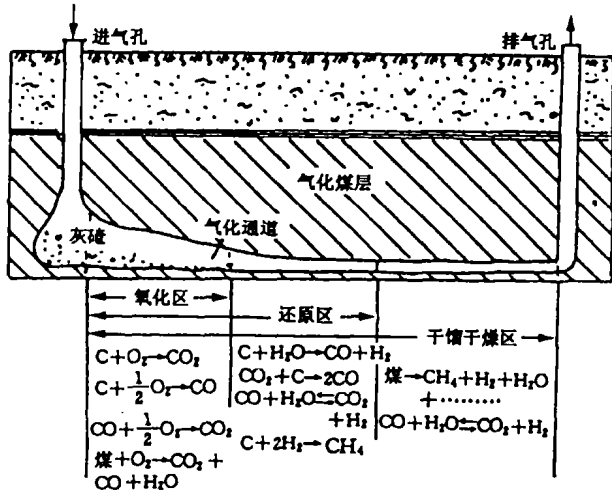
3 反向2阶段煤炭地下气化原理

反向2阶段地下气化是一种循环供给空气(或富氧空气)和水蒸汽的气化方法,每个循环有2个阶段组成。

第1阶段,正向鼓风(由进气孔供风),气流经过氧化区、还原区、干馏干燥区后,形成鼓风煤气,其反应过

程如图1所示。在鼓风煤气的生产过程中,燃烧产生的化学反应热,一部分被积蓄在煤层中,这一蓄热对煤层加热的过程是相对缓慢的,当煤层温度不高时,则产生初次热解产物——轻质气体(如H₂、CH₄)、焦油和油类。当煤层温度足够高时,初次焦油和油类又与扩散的水蒸汽反应转化为轻质化合物(如CH₄、CO、C_mH_n)。

等),形成自气化作用^[6],进一步提高了出口煤气中可燃组分的含量。



第 2 阶段,由排气孔注入水蒸汽(与供风方向相反,称为向 2 阶段;由进气孔注入水蒸汽,称同向 2 阶段),水蒸汽首先在排气孔和干馏干燥区被进一步加热,当进入还原区、高温氧化区时,即发生分解反应,生成以 CO, H₂ 为主的水煤气。由于消除了 N₂ 对煤气热值的影响,第 1 阶段的高温氧化区也成为制气的还原区,且整个气化通道长度上都产生了干馏煤气,因此,气相中 H₂ 和 CO 的浓度大大提高,这样,在某些金属或灰渣中某此金属氧化物的催化作用下,将发生一定程度的碳的加氢反应和甲烷化反应,进一步提高了煤气热值,所以,第 2 阶段可获得中热值煤气。当煤层温度下降到一定程度,则停止鼓入水蒸汽,重新由进气孔鼓入空气,实现一个循环。如此循环,则可得到 2 种热值不同的煤气。

4 2 阶段气化方法理想气化参数的计算

煤炭地下气化过程中最主要的参数是出口煤气的组分及热值,笔者在物料平衡的基础上对 2 阶段气化参数进行了计算。在理论上应对参加反应的每个元素进行平衡,那样使计算非常复杂。因此,仅对几个重要的元素进行平衡^[7]。计算以 0.1 t 煤参加化学反应为基准。具体步骤如下:

- 1) 由综合计算法求得燃烧煤量中干馏气数量;
- 2) 气化过程物料平衡方程:
 - ① 碳平衡方程: $n_1(CO) + n_2(CO_2) = n_3(C)$;
 - ② 氢平衡方程: $n_4(H_2) + n_5(H_2O) = W$;
 - ③ 氧平衡方程: $2n_2(CO_2) + n_1(CO) = 0.532n_6(N_2) + n_4(H_2)$;

④ 平衡常数方程: $K_p = \frac{n_1(CO)n_5(H_2O)}{n_2(CO_2)n_4(H_2)}$;

⑤ 被气化碳量与鼓风空气中氮量有如下关系:

$$\eta = \frac{n_1(CO) + n_2(CO_2)}{n_6(N_2)} \times 100\%$$

式中, $n_1(CO)$, $n_2(CO_2)$, $n_4(H_2)$, $n_5(H_2O)$, $n_6(N_2)$ 分别为气化气中一氧化碳、二氧化碳、氢气、水蒸汽和氮气的含量, kmol; W 为进入气化区的水蒸汽量, kmol; $n_3(C)$ 为进入气化区碳量, kmol; K_p , η 为经验常数,地面水煤气发生炉实测数据表明 $k_p = 2.25$,对已有煤炭地下气化组分数据统计表明 $\eta = 0.35 \sim 0.65$,计算中第 1 阶段取 η 为 0.442。

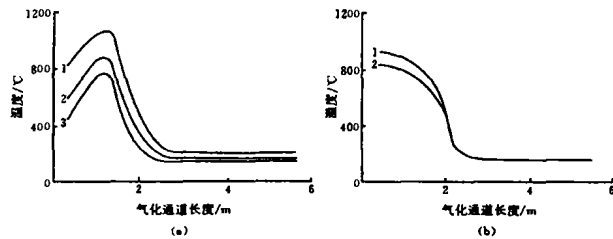
将上述 5 个方程联解即得气化的数量,将干馏煤气量和气化煤气量加和,则可得到第一阶段煤气组分、热值。在第 2 阶段,取方程①~④计算;干馏煤气的加入量是难以估计的,计算中假定:0.1 t 煤气化后,贮存在煤层中的热量相当于使煤层温度上升到 600 °C 时,在确定的范围内干馏煤气贮量的 20% 进入气化通道。根据上述物料平衡项目编程计算,对江苏徐州新河气煤的计算结果见表 3。

表 3 煤气组分及热值计算 %

种类	$\varphi(H_2)$	$\varphi(CO)$	$\varphi(CH_4)$	$\varphi(CO_2)$	$\varphi(N_2)$	$Q^0/MJ \cdot m^{-3}$
鼓风煤气	15.42	9.56	2.11	16.46	56.45	4.19
地下水煤气	50.92	28.07	13.27	6.39	1.35	16.34

5 结果分析

第 1 阶段,升温过程中,最高温度点逐渐向出气孔方向移动,试验表明,升温速度和位移速度主要取决于气化剂的组成及其在气化通道里的流速,当氧化区温度达到 1 000 °C 时,则可以停止鼓风,进入第 2 阶段。第 2 阶段,反向和同向供水蒸汽所导致的温度场变化是不同的,如图 4 所示。



(a) 反向: 1~3 表示曲线温度值的测量时间分别为 1992-07-13-23:34, 1992-07-14-23:43 和 1992-07-14-00:13; (b) 同向: 1, 2 表示曲线温度值的测量时间分别为 1992-07-15-18:10 和 1992-07-15-18:15

图 4 第 2 阶段温度场下降过程

在模型试验条件下,反向时,最高点温度下降速度平均为 $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,同向时每次循环其值变化较大,平均约为 $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。当蒸汽流量增加时,下降速度增大。比较图 4(a)和图 4(b)可看出,只有反向加蒸汽时,干馏干燥区温度才下降,说明水蒸汽在此段吸热提高

了温度。第 2 阶段煤气组分及热值见表 4。当炉内最高温度区温度降至 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,第 2 阶段结束,重新鼓风,提高炉温,进行下一个循环。反向两阶段气化和正向两阶段气化,尽管在持续时间上区别不大,但热值和产气量前者要大于后者。

表 4 第二阶段煤气组分和热值

序号	时间/min	$\varphi(\text{H}_2)$	$\varphi(\text{CO})$	$\varphi(\text{CH}_4)$	$\varphi(\text{CO}_2)$	$\varphi(\text{N}_2)$	$Q^{\circ}/\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$	流量/ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	备注
1	45	46.9	21.6	14.6	8.4	8.3	14.5	3.1	反
2	10	37.7	21.4	13.1	5.7	22.0	12.7	3.1	反
3	39	41.5	19.3	12.1	4.8	22.3	12.5	3.1	反
4	40	42.0	10.7	12.7	0.9	33.6	11.8	2.5	反
5	50	33.2	8.2	18.3	4.7	35.6	12.6	3.1	反
6	53	16.0	2.2	17.5	15.3	48.8	9.3	2.5	同
7	20	31.9	7.6	14.5	29.8	16.2	10.8	2.5	同
8	16	40.6	8.7	21.0	11.1	18.5	14.6	3.1	反
9	14	46.7	12.2	4.6	4.1	32.4	9.3	2.5	同
10	18	59.5	10.5	12.3	11.6	6.1	13.8	3.1	反
11	18	52.0	14.2	16.0	10.2	7.5	14.8	3.1	反
12	12	60.7	7.1	12.8	10.6	8.8	13.7	3.1	反

在同一循环中,随着时间的持续,CO 的含量越来越低,而甲烷含量越来越高,氢气含量基本上保持不变,如图 5 所示。

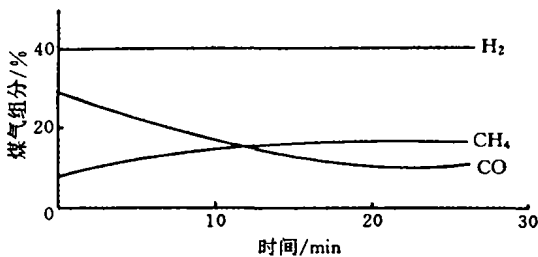


图 5 第 2 阶段煤气组分和时间的关系

第 2 阶段刚开始时,煤层温度高,水蒸汽分解率高,因此,水煤气是出口煤气的主要部分;随着水蒸汽的持续鼓入,炉内温度逐渐降低,水蒸汽分解反应越来越弱,致使出口煤气中干馏煤气的比例越来越大。

无论是哪种气化方法,所能利用的热量都是由第一阶段提供的,由于反向气化时,干馏干燥区的蓄热能够转化为煤气热值,因此从能量平衡角度来看,反向气化将第 1 阶段提供的能量转化为煤气热值的量要大于同向气化的量,而同向气化中相当一部分热量转化为出口煤气和水蒸汽的显热。

6 结论和建议

1) 模型实验结果表明,缓倾斜煤层反向 2 阶段煤炭地下气化方法是可行性的,它能够制取热值 $Q^{\circ} = 12.56\text{ MJ}/\text{m}^3$ 以上的煤气,以满足工业、发电、民用和

作为化工原料的需要,为煤炭地下气化技术走向工业化生产奠定了基础。

2) 中热值地下水煤气由水煤气和干馏煤气组成。

3) 2 阶段的切换控制可以以气化炉内温度为标志,当氧化区温度达到 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,则可以鼓入水蒸汽,当氧化区温度下降到 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,则需重新鼓风。

4) 反向 2 阶段气化比同向 2 阶段气化进一步提高了气化过程的热效率。

5) 从煤气组分数据分析来看, H_2 和 CH_4 含量较高,由此可见,“自气化”作用和 CH_4 化反应在煤炭地下气化过程中是存在的,这是区别于地面气化的关键所在,故应对此进行深入研究。

参考文献:

- [1] 杨兰和. 煤炭地下气化渗流燃烧方法的研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [2] BEBELLE B, MALMENDIER M. Modelling of flow at thulin underground coal gasification experiments[J]. Fuel, 1992, 71(2): 95-104.
- [3] 郭楚文. 煤炭地下气化数学模拟研究综述[J]. 矿业世界, 1994, 15(1): 3-5.
- [4] 杨兰和, 梁杰, 余力. 煤炭地下气化新工艺的试验研究[J]. 东南大学学报, 1999, 29(2): 124-128.
- [5] 余力. 研究与开发煤炭地下气化技术[J]. 科技导报, 1995(2): 54-56.
- [6] 蔡 T H, 埃德加 T F. 煤地下气化中干燥和热解的模型化[J]. 现场技术, 1983, 7(3): 25.
- [7] 郭绉云. 煤炭气化[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1989.

(下转第 55 页)

- ① 按设计施工图纸在上排与下排钢筋之间放置撑钩。
- ② 悬挑板(雨篷、阳台板)按设计施工图纸放置主筋撑钩。
- ③ 混凝土浇捣时,发现钢筋被踩下,及时纠正。

参考文献:

- [1] 建设部标准定额司编. 工程建设标准强制性条文(房屋建筑部分)辅导教材[M]. 北京:中国计划出版社,2000.
- [2] 杨南方,尹辉主编.住宅工程质量通病防治手册[M].北

- 京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3] 上海市工程建设质量监督研究会编.住宅工程创优质量通病手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [4] 全国监理工程师培训教材编写委员会.工程建设质量控制[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [5] 刘艺.Delphi 第三方控件使用大全[M].北京:中国水利电力出版社,2001.
- [6] SATZINGER J W, JACKSON J W, BURD S D. Systems Analysis and Design in a Changing World (影印版)[M].北京:机械工业出版社,2001.

Control System of Construction Quality of Building Engineering

YAO Gang¹, GUO Ping², LIN Lan³

- (1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. College of Computer, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. College of Electric Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Through construction market survey, the paper proposes the way of the control system of construction quality of building engineering and establishes objective system of its on becoming core of quality control spot. It puts forward many grade control and evaluation net and expounds the method to produce quality evaluation form, control system of quality ordinary question and quality analysis. It determines technology way and movement foundation on system development. The paper introduces the model and its function on the control system of construction quality of building engineering. This system is a opening system, it may be filled and complemented with new content at any time. It has better adaptable to change of construction code.

Key words: building engineering; construction; quality; control; system

(责任编辑 姚飞)

(上接第 50 页)

Model Test Two – Stage Underground Coal Gasification in Counter Directions with Gently Inclined Coal Seam

YANG Lan-he¹, LIANG Jie²

- (1. College of mineral Resource and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China;
2. Department of Chemistry and Environment Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve heat value of gas produced in the process of Underground coal Gasification, two-stage Underground coal Gasification in counter directions with gently inclined coal seam is put forward and studied. On the basis of material balance, a model of two-stage underground coal gasification in counter directions is built with ideal gasification parameters. According to the results of model test, the general rules of development of the temperature field and formation of underground water gas of medium heat value are described. Some parameters for controlling the technology are obtained. Gas with a heat value greater than $Q^{\ominus} = 12.56 \text{ MJ/m}^3$ can be obtained by using the method and it consists of water gas and pyrolysis gas. Thermal efficiency of counter directions process is higher than that of same directions.

Key words: gently inclined coal seam; counter direction; two-stage; underground coal gasification; underground water gas

(责任编辑 姚飞)