

文章编号:1000-1964(2003)06-0624-05

不同煤种地下气化特性研究

刘淑琴, 梁 杰, 余学东, 余 力

(中国矿业大学 化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 在地下气化模型试验及理论分析的基础上,研究了不同煤种的地下气化特性. 比较了空气连续气化及纯氧-水蒸汽气化条件下的煤气组成,并从气化煤层升温速率、气化速率、煤气产率、气化效率等方面比较了不同煤种的地下气化特性. 试验结果表明,煤种的不同组成决定了空气煤气中 CO , H_2 , CH_4 含量的不同,鼓风量影响着空气煤气的组成. 在适宜的汽氧比条件下,不同煤种纯氧-水蒸汽地下气化均可以获得中热值煤气. 对于试验煤种,褐煤具有高的气化活性、气化速率及低的煤气产率,其纯氧-水蒸汽气化效率达 87%,最适于地下气化;瘦煤地下气化,气化煤层温度上升缓慢,其气化活性较低,气化速率变化平缓,纯氧-水蒸汽气化效率为 74%,但气化过程稳定,且具有高的煤气产率,可以进行地下气化;气肥煤煤层升温速率最快,煤气产率仅次于瘦煤,但在煤挥发分析出后,气化速率减小,气化稳定性变差.

关键词: 煤炭地下气化;纯氧-水蒸汽气化;气化速率

中图分类号: TQ 546 **文献标识码:** A

煤炭地下气化是将地下煤层就地气化的工艺过程. 煤的地下气化不仅与煤层情况、地质条件、煤层顶底板岩石性质及煤层所处的水文条件有关,还受到煤的性质和种类的影响. 因此,本文在地下气化模型试验的基础上,比较了不同煤种的地下气化特性,以为不同煤种的地下气化现场试验及地下气化工艺的选择提供依据.

1 试验系统及试验方法

1.1 试验系统

气化炉体:外壳采用 5 mm 厚钢板焊接而成,气化煤层采用耐火水泥整体浇注,模拟煤层尺寸为 400 mm×400 mm×2000 mm,煤层倾角依据煤样实际赋存倾角设置. 气化通道断面均为 $\phi 50$ mm,煤层中间设置辅助通道. 煤层中共布置热电偶 96 个. 外保温层采用膨胀珍珠岩,填充于炉体与外壳之间. 气化炉体剖面图如图 1 所示.

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,氧气由氧气瓶提供(98%),水蒸汽制备采用 ZFQ-B 型医用水蒸汽发生器.



图 1 气化炉体剖面图

Fig. 1 Sketch of gasifier section

检测系统:流量测量采用涡街流量计. 进出口及炉体压力采用 PT200 压力变送器,进计算机和二次仪表显示. 煤层温度测量采用镍铬-镍硅热电偶,通过 DataTaker 温度采集器及 Detranfer ver2.0 采集软件进上位机显示. 煤气组分分析采用东西电子公司开发的煤矿专用自动进样色谱分析仪,通过色谱工作站 GC-85,进入上位机显示、存储、分析.

煤样:试验煤种为褐煤、气肥煤、瘦煤,分别由内蒙大雁矿、山西太原东山矿、甘肃华亭矿提供,其煤质分析结果如表 1 所示.

收稿日期:2003-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(20207014);863 计划项目(2001AA529030)

作者简介:刘淑琴,(1972-),女,山西省离石市人,中国矿业大学讲师,工学博士,从事煤炭地下气化工艺及环境科学方面的研究.

表1 试验用煤煤质分析结果
Table 1 Analysis of the test coal

| 煤种 | $w_B/\%$ | | | | | | | | $Q_{gr,ad}/(MJ \cdot kg^{-1})$ |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------------------|
| | M_{ad} | A_{ad} | V_{ad} | C_{ad} | H_{ad} | O_{ad} | N_{ad} | S_{ad} | |
| 褐煤 | 32.83 | 10.91 | 24.89 | 44.49 | 3.34 | 7.07 | 0.90 | 0.46 | 16.76 |
| 气肥煤 | 9.77 | 6.69 | 35.90 | 65.56 | 3.85 | 13.43 | 0.27 | 0.43 | 27.75 |
| 瘦煤 | 6.38 | 13.63 | 12.31 | 70.51 | 3.71 | 1.98 | 1.01 | 2.78 | 28.93 |

1.2 试验方法

模型气化炉采用液化气在气化炉进气侧点火,之后鼓入空气或少量氧气助燃,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,鼓入空气或 $O_2-H_2O(g)$ 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工艺条件下不同气化时刻的煤气组成.

2 结果与讨论

2.1 点火及气化炉升温速率

实体煤的点火难易程度主要取决于煤的燃点,而煤的燃点随煤化程度的加深而增加.因此,对于试验煤种,褐煤最易着火,气肥煤次之,瘦煤相对难燃.另外,在气化炉填煤过程中渗入大量水分,使煤层点火相对困难.不同煤种的煤层升温速率如图2所示.

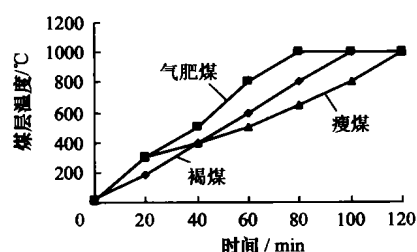


图2 气化煤层升温速率比较

Fig. 2 Comparison of the rate of temperature development

可以看出,达到相同的高温条件,气肥煤的升温速率最快,升温时间最短,褐煤次之,瘦煤需要的时间最长,这与煤种的燃烧活性密切相关.褐煤虽然易燃,但由于其煤层中含有大量水分,水分蒸发消耗大量热量,因此其升温速率小于气肥煤.瘦煤结构致密,且为大块煤燃烧,初期燃烧活性小,气化煤层升温速率最慢,升温时间最长.

2.2 空气连续气化

空气连续气化是以空气为气化剂的气化过程.空气气化过程,由于其中氧气浓度较低,气化强度较弱.不同煤种地下气化的空气煤气组成如表2所示.可以看出,空气煤气的热值基本稳定在 $3.50 \sim$

$4.50 MJ/m^3$.煤中挥发分的不同导致空气煤气中 CH_4 含量不同.气肥煤挥发分含量较高,煤气中 CH_4 含量达到5%以上,气化初期更高,因此煤气热值最高.试验用褐煤由于其中含水量高,水分蒸发并在高温下分解,导致煤气中 H_2 含量较高.同时水蒸汽优先分解,使得 CO_2 还原率及还原速率降低,煤气中 CO 含量显著降低;瘦煤气化,由于其有效碳含量高,在稳定气化阶段可以形成较其它两煤种相对高的温度场, CO_2 还原反应加强,因此煤气中 CO 含量最高.

表2 不同煤种地下气化的空气煤气组成(干基)

Table 2 Air gas composition of different coal in UCG process

| 煤种 | H_2 | CO | CO_2 | CH_4 | O_2 | N_2 |
|-----|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| 褐煤 | 16.15 | 3.52 | 19.68 | 3.50 | 0.20 | 56.95 |
| 气肥煤 | 9.28 | 12.32 | 18.40 | 5.82 | 0.10 | 54.08 |
| 瘦煤 | 9.50 | 15.00 | 18.50 | 3.01 | 0.15 | 53.84 |

此外,空气连续气化过程的鼓风量对煤气组成有着重要的影响.鼓风量决定着地下气化通道中的气流速度,气流速度越大,气体扩散速率也越大,煤的气化强度增加,从而导致煤气中可燃气体含量增加,煤气热值提高.而若鼓风速率过大,则缩短了 CO_2 与还原区半焦的接触时间,使煤气中 CO 含量下降^[1].图3为不同煤种空气气化过程中 CO 随鼓风速率的变化情况,可以看出,对于相同的气化系统,不同煤种稳定气化的适宜鼓风速率不同.

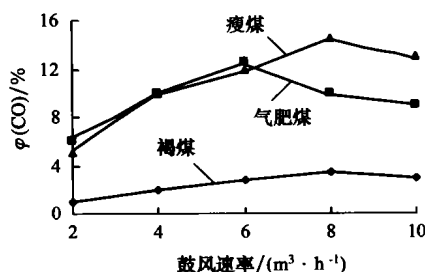


图3 CO 随空气鼓风速率的变化

Fig. 3 Change of CO content with the velocity of air blast

2.3 $O_2-H_2O(g)$ 连续气化

为了提高煤气热值,增加煤气中 H_2 和 CO 的含量,可以改变气化剂组成,如采用空气-水蒸汽、富氧-水蒸汽为气化剂,或采用两阶段气化工工艺,即空气气化、水蒸汽气化过程轮流进行,间歇生产水

煤气的方法. 实践表明, $O_2-H_2O(g)$ 气化工艺是连续生产中热值鼓氧煤气的最佳选择.

1) 不同煤种 $O_2-H_2O(g)$ 气化的煤气组成

不同煤种 $O_2-H_2O(g)$ 连续气化过程的平均煤气组成、气化剂用量及煤气流量如表 3 所示.

可以看出, 尽管不同煤种的气化反应活性存在差别, 而采用 $O_2-H_2O(g)$ 气化工艺, 在适宜的氧汽比条件下, 均可获得中热值煤气, 煤气中 CO, H_2 具

有较高的含量. 这是由于采用 $O_2-H_2O(g)$ 为气化剂, 气化剂中氧气含量的提高增加了气化煤表面的氧气浓度, 加快了煤的燃烧速率, 强化了气化过程, 从而维持了气化(氧化、还原)区的高温温度场. 而在此条件下, CO_2 及 $H_2O(g)$ 的还原速率及还原率增加, 煤气中 H_2 和 CO 含量增加. 此外, 在地下气化长通道中, $H_2O(g)$ 存在下的水煤气变换反应加强, 煤气中 H_2 含量进一步增加^[2].

表 3 不同煤种 $O_2-H_2O(g)$ 地下气化煤气组成

Table 3 Gas composition of different coal in $O_2-H_2O(g)$ gasification process

| 煤种 | $\varphi/\%$ | | | | | | 热值/ | 纯氧量/ | 蒸汽量/ | 煤气量/ |
|-----|--------------|-------|--------|--------|-------|-------|----------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | H_2 | CO | CH_4 | CO_2 | O_2 | N_2 | $CO+H_2$ | $(MJ \cdot m^{-3})$ | $(m^3 \cdot h^{-1})$ | $(m^3 \cdot h^{-1})$ |
| 褐煤 | 43.44 | 27.56 | 4.04 | 23.71 | 0.00 | 1.25 | 71.00 | 10.42 | | |
| | 41.93 | 28.12 | 2.52 | 24.93 | 0.00 | 2.50 | 70.05 | 9.73 | 3.0 | 5.4 |
| | 39.67 | 28.53 | 2.96 | 26.34 | 0.10 | 2.40 | 68.20 | 9.66 | | |
| 气肥煤 | 41.74 | 23.74 | 5.90 | 26.78 | 0.00 | 1.84 | 65.48 | 10.56 | | |
| | 40.36 | 22.89 | 6.24 | 28.71 | 0.10 | 1.70 | 64.25 | 10.43 | 3.0 | 8.1 |
| | 39.82 | 24.16 | 7.02 | 27.11 | 0.00 | 1.89 | 64.98 | 10.66 | | |
| 瘦煤 | 40.22 | 24.93 | 3.61 | 30.03 | 0.00 | 1.21 | 65.15 | 9.53 | | |
| | 40.41 | 24.18 | 3.79 | 30.20 | 0.00 | 1.42 | 64.59 | 9.53 | 3.0 | 6.0 |
| | 41.46 | 24.55 | 3.13 | 29.13 | 0.20 | 1.53 | 66.01 | 9.45 | | |

2) 汽氧比的影响

汽氧比是气化过程中水蒸汽和氧气的耗量比, 它是控制气化温度的重要操作条件. 随着汽氧比的增加, 气化温度将降低, 水蒸汽分解率下降, 水蒸汽耗量增加. 不同煤种因其反应性不同, 要求不同的反应温度, 相应地选择不同的汽氧比^[3]. 反应性好的煤可在较低的温度下气化, 因而耗氧量减少, 汽氧比相对增大.

汽氧比的改变对煤气组成也有影响. 随着汽氧比的增加, 水蒸汽的浓度增加, 有利于变换反应的进行. 因而煤气中一氧化碳含量减少, 氢气和二氧化碳含量增加. 煤气中 H_2 与 CO 总和 φ 随汽氧比的变化如图 4 所示.

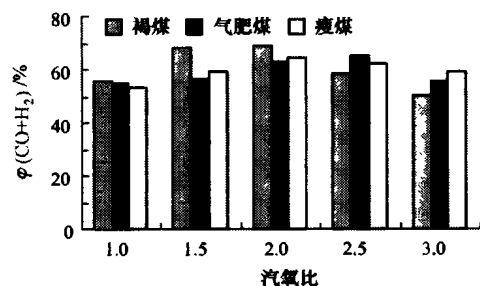


图 4 煤气组成随汽氧比的变化

Fig. 4 Change of gas composition with the $H_2O(g)/O_2$ ratio

2.4 气化速率

在地下气化过程中, 煤的气化速率包括火焰工作面(气化工作面)沿气化通道向前移动的速率和

煤层的横向气化(燃烧)速率^[4]. 它们取决于气化过程的供风、供氧速率、气化炉温度、通道形式等因素.

火焰工作面向前移动的速率, 可以根据在不同气化时刻, 气化炉内最高温度点所处的位置来确定, 即用两个不同时刻最高温度点的间距除以这两时刻间的时间间隔. 在不同时刻煤层燃烧范围边界的扩展速度, 就相当于煤层的横向燃烧速度. 根据试验时所测试的温度数据, 可以计算出在不同时刻、不同位置煤层的燃烧高度等温线位置, 由此可以计算出横向气化速度, 即通道扩展速度^[5].

根据试验过程中不同气化时刻的煤层温度场数据, 计算得到了不同煤种 $O_2-H_2O(g)$ 地下气化过程中的水平气化速率及横向气化速率的变化情况, 如图 5 所示.

可以看出, 在供风点(包括进气孔、辅助孔、出气孔)附近, 煤层水平气化速率及横向气化速率均出现最大值. 这是由于, 在供风点附近, 反应煤表面氧气浓度较高, 气流压力大, 煤的氧化还原速率加剧, 气化速率增大. 而当供风点较远时, 由于气化燃空区增大, 反应煤表面氧气浓度减小, 氧化还原过程相对较缓, 气化速率下降.

与地面气化不同, 在地下气化过程中, 实体煤的碎裂, 能够增加气化反应表面积, 增加气化强度, 从而有利于气化过程的进行.

褐煤, 由于其水分、挥发分含量高, 受热后水分迅速蒸发导致大块煤不断碎裂, 结构疏松, 相对气

化反应的比表面积大,且褐煤具有丰富的过渡孔和大孔,高温条件下容易破碎,使反应剂容易扩散到这些反应煤表面,因而气化反应活性最高,气化速

率最快.同时,褐煤中含有 Fe_2O_3 等大量矿物质,对气化过程具有强烈的催化作用^[6].

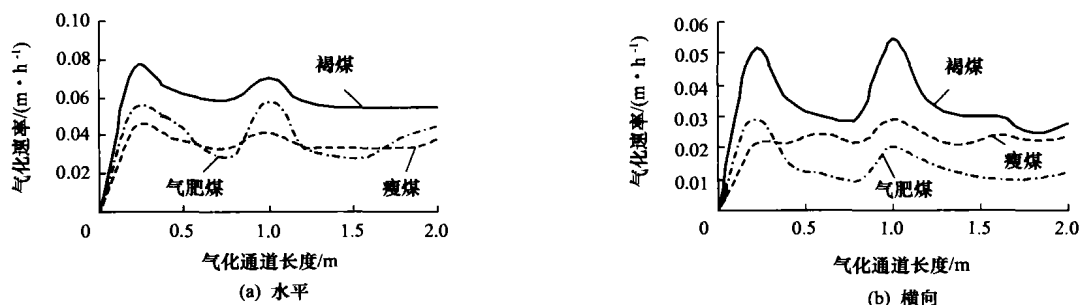


图5 水平、横向气化速率变化
Fig. 5 Change of horizontal and extending gasification velocity

瘦煤因为其水分、挥发分含量低,加之结构致密,它生成的煤焦孔隙少,反应比表面积小,活性低.但这种结构致密的煤热稳定性差,在受热后由于内外温差大,膨胀不均产生应力,容易爆裂,在煤地下气化条件下,有利于实体煤的碎裂,增加了气化反应表面积,提高了气化活性,并能够使气化过程稳定进行,因此瘦煤气化速率平稳变化.

气肥煤具有较强的粘结性,对于煤的气化过程,粘结性往往是不利的,而在地下气化过程中,气化过程沿气化通道横向移动,自身结焦粘结的煤会继续提供相似的固体表面供气体接触和完成反应,因为气体的流动断面是较宽的气化通道,因此地下气化过程仍可以进行下去.但同时气肥煤热稳定性好,不易碎裂,使得气化反应面积相对较小,气化渗透速率减小,因此在气化中后期,气化速率明显下降,气化过程稳定性较差.

2.5 煤气产率、气化效率及比消耗量比较

煤气产率是指 1 kg 原料煤气化后制得的煤气量,干煤气产率可按下式计算

$$V_g = \frac{V_t}{G_c}$$

式中: V_g 为干煤气产率, m^3/kg ; V_t 为干煤气总产量, m^3 ; G_c 为气化煤消耗量, kg .

在地下气化模型试验中,根据实际的煤气产量及气化炉解剖后得到的实际气化煤量,可以求得不同煤种地下气化的干煤气产率.由此可进一步求得气化效率,即单位重量气化原料的化学热转化为所产生的煤气化学热的比例.

$$\eta = \frac{Q_g}{Q_c} = \frac{V_g H_g}{Q_c}$$

式中: Q_c 为每千克气化煤产生的化学热, MJ/kg ; H_g 为干煤气的热值, MJ/m^3 ; η 为气化效率, %.

比消耗量为生产 1 m^3 煤气所消耗的水蒸汽和氧气量^[7],它是煤气生产的重要技术经济指标.

三种煤种 $\text{O}_2\text{-H}_2\text{O(g)}$ 气化条件下的煤气产率、气化效率及比消耗量如表 4 所示.

表4 不同煤种的煤气产率、气化效率及比消耗量比较
Table 4 Comparison of gas rate, gasification efficiency and ratio consumption

| 煤种 | 煤气产率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) | 气化效率/ % | 比消耗量 | |
|-----|--|------------|--------------|----------------------|
| | | | O_2 | H_2O |
| 褐煤 | 1.49 | 87 | 0.22 | 0.40 |
| 气肥煤 | 2.11 | 79 | 0.25 | 0.67 |
| 瘦煤 | 2.24 | 74 | 0.28 | 0.60 |

计算结果表明,褐煤气化效率最高,达 87%,但其水分大,矿物质含量高,碳含量低,因此气化煤气产率最低,氧气和蒸汽的比消耗量也最低;瘦煤含碳量最高,因此其氧气比消耗量最大,但由于其气化活性较低,气化效率只有 74%;气肥煤挥发分含量高,相对进入气化区的半焦量少,因此其氧气比消耗量低于瘦煤,同时由于原料中的挥发分在干馏过程中转化为干馏煤气,因此稳定气化过程的煤气产率低于瘦煤,其气化效率介于褐煤和瘦煤之间,为 79%.三种试验煤种的气化效率均较理想条件下低,这可能是由于模型地下气化炉热损失较高的缘故.

3 结论

1) 对于试验煤层,褐煤最易着火,气肥煤次之,瘦煤相对难燃.达到相同高温条件,气肥煤升温速率最快,瘦煤最慢.

2) 不同煤种地下气化的空气煤气热值基本稳定在 3.50~4.50 MJ/m^3 .煤种的不同组成决定了空气煤气中 CO , H_2 , CH_4 含量的不同.空气连续气化过程的鼓风量对煤气组成有着重要的影响.

3) 试验表明,不同煤种 $O_2-H_2O(g)$ 地下气化均可以获得中热值煤气(H_2 与 CO 含量之和在 65% 左右, O_2 含量小于 0.5%). 不同煤种稳定地下气化的适宜汽氧比不同.

4) 试验条件下的煤层水平气化速率及横向气化速率变化情况表明,在供风点附近,气化速率均出现最大值. 褐煤气化活性最高,气化速率最快. 瘦煤气化活性较小,气化速率变化平稳. 气肥煤在气化初期具有较高的气化速率,而在气化中后期,气化速率明显下降,气化稳定性变差.

5) 褐煤气化效率最高,但煤气产率小,比消耗量也小;瘦煤气化效率较低,但其煤气产率最高,相应比消耗量也最高;气肥煤煤气产率也较高,但气化效率较低.

参考文献:

[1] 刘淑琴, 梁 杰, 余 力. 煤炭地下气化中 CO_2 化学

反应特性及其影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(6): 606-610.

[2] 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.

[3] 戢绪国, 步学朋, 应幼菊, 等. 五种煤固定床气化小试试烧综合研究[J]. 煤炭转化, 2002, 25(3): 65-69.

[4] 杨兰合, 余 力, 梁 杰. 煤炭地下气化温控爆破渗流燃烧模型试验[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 526-529.

[5] 杨兰合, 刘裕国, 江 国. 倾斜煤层煤炭地下气化模型试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 23(5): 10-13.

[6] 王同章. 煤炭气化原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[7] 高福焯. 燃气制造工艺学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.

Characteristics of Underground Gasification of Different Kinds of Coal

LIU Shu-qin, LIANG Jie, YU Xue-dong, YU Li

(School of Chemical and Environmental Engineering, CUMT, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on UCG (underground coal gasification) model test and theoretical analysis, the characteristics of underground gasification of different coal were studied from the aspect of gas composition of air gasification and oxygen-steam gasification process, the rate of temperature increasing, gasification reaction rate, gas yield and gasification efficiency etc. The results show that air gas composition is affected by coal kind and air blast velocity. On optimum ratio of vapor to oxygen, oxygen-steam gasification of different coal can produce middle heat value gas. Lignite in test has high gasification reactivity, high gasification reaction rate and lower gas yield. It is most suitable for UCG with gasification efficiency of 87%. The test lean coal has lower rate of temperature increasing due to its lower reactivity. Its gasification rate gently changes and the efficiency of oxygen-steam gasification process was dit the UCG process is more stable and also has high gas yield. The test fat coal has high rate of temperature increasing and its gas yield is only lower than that of lean coal. The gasification rate of fat coal decreases after pyrolysis, which will make the UCG process unstable.

Key words: underground coal gasification; oxygen-steam gasification; gasification rate

(责任编辑 王玉浚)