

华亭煤空气、富氧及纯氧地下气化特性研究

黄温钢^{1,2}, 王作棠^{1,2,3}, 段天宏^{1,2}, 辛林^{1,2}

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;

2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

3. 中国矿业大学 低碳能源研究院, 江苏 徐州 221008)

摘要:对比研究了气化剂中氧气体积分数分别为 21%、32%、42% 和 100% 条件下的主要产气指标。结果表明,随着气化剂中氧气体积分数的上升,煤气有效组分和煤气热值呈上升趋势;氧气的消耗随之增加,空气消耗相应降低,煤耗量增加,水蒸汽消耗量增加,而水蒸汽分解率下降;煤气产率呈下降趋势,而气化效率呈上升趋势;煤气产量和气化剂体积比由 1.31 降至 1.16。

关键词:华亭煤;氧气体积分数;地下气化;产气指标

中图分类号:TD849;TQ546.2

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2011)03-0071-04

煤炭气化是煤炭洁净利用的关键技术之一,地面煤炭气化是将井下采出的煤送入地面气化炉中进行气化。这一过程中环节多、产气成本高、技术复杂。而煤炭地下气化集采煤与气化于一体,具有适应性广(从褐煤、烟煤到无烟煤),经济性好等特点。煤炭地下气化成本与地面气化相比,生产合成气下降 43%,生产天然气代用品下降 10%~18%,发电下降 27%^[1],基建投资降低 53%~66%,产气成本更低^[2]。

煤炭地下气化的产气效果直接影响其经济效益,产气效果取决于多方面因素,不仅与煤层赋存条件、煤质有关,还受气化工艺的影响。按注入气化剂的种类不同,煤炭地下气化可分为空气、空气-水蒸汽、富氧-水蒸汽和纯氧-水蒸汽气化等。气化方式的选择取决于所产煤气的用途及生产规模^[3]。笔者在华亭煤地下气化项目现场试验的基础上,对华亭煤的空气蒸汽、富氧蒸汽以及纯氧蒸汽等气化试验的主要产气指标进行了分析研究。

1 试验条件

1.1 地质条件

煤炭地下气化试验区地质结构简单,煤层埋深为 40~400 m,区域内含煤 8 层,自上而下分别为煤 5、煤 4-4、煤 4-3、煤 4-2、煤 4-1、煤 3、煤 2 和煤 1,平均含煤厚度 19.95 m,煤炭总储量 2.45 Mt,煤层平均倾角 28°。气化区域内,煤 4-1、煤 4-2、煤 4-3、煤 4-4 局部已被开采,完整性较差,而煤 3 和煤 5 (平均厚度 0.5 m) 较薄,上述煤层均不利于地下气化开采。因此,选择煤 1 和煤 2 进行气化试验,平均厚度分别为 8.8 m 和 4.4 m,中间夹有 1 层厚度为 0.5 m 的泥岩,这 2 层煤可进行联合气化开采。煤 2 的顶板主要为细砂岩、砂质泥岩,煤 1 的底板为中细砂岩。煤 1 和煤 2 均与含水层无直接联系。

1.2 煤质分析

根据煤质化验分析资料和分类方案,煤质具有低灰、低硫、高活性、高挥发性的特点,为不粘煤。

收稿日期:2011-01-25

基金项目:教育部科学技术研究重点项目(02019);中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点试验室资助项目(SKLCRSM10X04)

作者简介:黄温钢(1986—),男,江西上饶人,中国矿业大学在读硕士,主要研究方向为煤炭地下气化。E-mail:wengang-huang@163.com

华亭煤的工业分析及元素分析结果见表1。

表1 煤质工业分析及元素分析结果

工业分析/%			元素分析/%					高位发热量/	灰熔点/	容重/
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	$\omega(C_{ad})$	$\omega(H_{ad})$	$\omega(O_{ad})$	$\omega(N_{ad})$	$\omega(S_{l,ad})$	($MJ \cdot kg^{-1}$)	$^{\circ}C$	($kg \cdot m^{-3}$)
8.5	6.6	33.7	66.74	3.82	13.16	0.63	0.54	23.8	1197	1.40

1.3 煤炭地下气化系统

华亭煤炭地下气化项目采用有井式气化法,试验区域为华亭煤业集团原安口煤矿工业广场保护煤柱,气化系统包括井下系统和地面系统2个部分。井下系统以气化炉(气化工作面)为主,气化炉与行人巷道间由特制密闭墙隔离,以确保巷道中行人和设备的安全。气化炉封闭前,在各气化平巷内预先布置点火装置,并沿着气化炉布置一些温度传感

器,配合其它各种仪器设备,在煤层点燃后,能够对气化过程中工作面温度、压力、煤气流量及组分等进行实时监测。井下气化炉通过注、排气钻孔与地面各生产系统连接。地面气化站的生产系统主要由6个部分构成,即注气系统、排气系统、净化系统、测控系统、制氧系统及发电系统。华亭煤炭地下气化系统如图1所示。

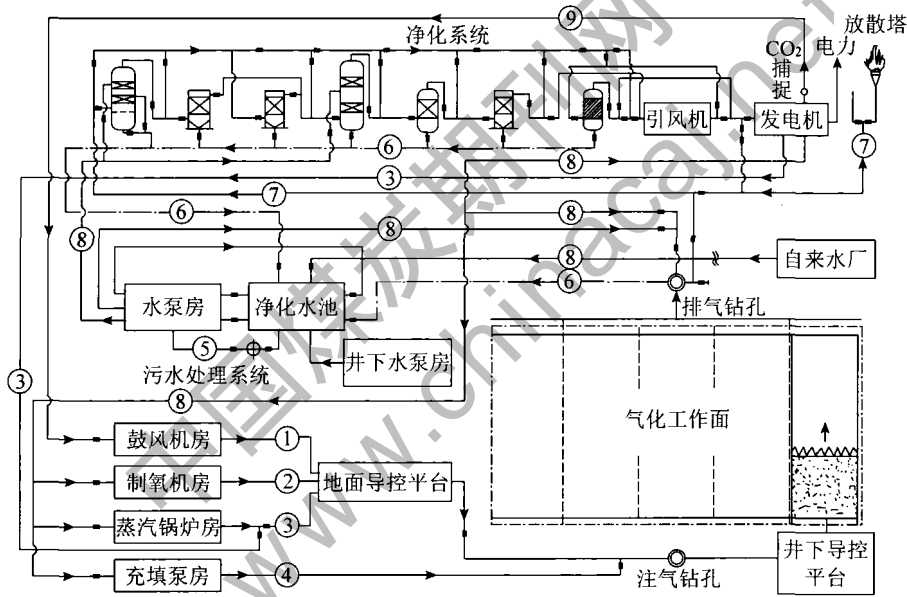


图1 华亭煤炭地下气化系统示意

- ①—空气管路;②—富氧管路;③—蒸汽管路;④—注浆管路;
⑤—净化水管;⑥—污水管路;⑦—煤气管路;⑧—供水管路;⑨—CO₂回填管路

2 试验过程及结果

华亭煤炭地下气化项目于2010年5月—2010年11月在现场进行了气化剂氧气体积分数(干空气中)分别为21%、32%、42%和100%的地下气化试验,试验过程中均注入了适量的水蒸汽,且各试验均在同一气化炉中进行。

(1) 空气蒸汽气化试验

空气蒸汽气化是指向地下气化炉中注入空气和水蒸汽混合组成的气化剂,产生混合煤气。所用水蒸汽均由蒸汽锅炉房制得,通过管道在地面与其

它气化剂预混注入井下。空气蒸汽气化试验的注气量为6450 m³/h,其中空气量5300 m³/h,蒸汽量1150 m³/h,日产混合煤气量19.20万 m³。空气蒸汽气化试验的各项产气指标见表2。

(2) 富氧蒸汽气化试验

富氧蒸汽气化即采用富氧和水蒸汽作为气化剂,实施连续供风的工艺方法,可大规模连续生产半水煤气。进行了2组富氧蒸汽气化试验:“低富氧”(干空气中氧气体积分数为32%)和“中富氧”(干空气中氧气体积分数为42%)蒸汽气化试验。低富氧蒸汽气化试验的注气量为6400 m³/h,其中

空气 4500 m³/h, 纯氧 700 m³/h 和蒸汽 1200 m³/h, 日产煤气量 20.40 万 m³。中富氧蒸汽气化试验注气量为 3800 m³/h, 其中空气 2200 m³/h, 纯氧 800 m³/h 以及蒸汽 800 m³/h, 日产煤气 12.58 万 m³。富氧蒸汽气化试验的各项产气指标见表 2。

(3) 纯氧蒸汽气化试验

纯氧蒸汽气化是使用纯氧和水蒸汽混合组合作为气化剂, 并实施连续注气生产高热值煤气的工艺方法。为增大产气量, 将气化剂中纯氧量注入速率调至最大 800 m³/h, 蒸汽量为 1500 m³/h, 根据物料平衡计算得, 实际汽氧比为 2.1 kg/m³, 其余所需水蒸汽由地下水转化的水蒸汽补给。纯氧蒸汽气化试验煤气产量为 2851 m³/h, 即日产煤气量为 6.84 万 m³。纯氧蒸汽气化试验的各项产气指标见表 2。

表 2 不同氧气体积分数气化试验的气化指标

气化剂中氧气体积分数/%	21	32	42	100	
煤气组分/%	H ₂	19.56	20.61	25.37	36.19
	CO	13.93	18.02	22.13	29.61
	CH ₄	1.98	2.10	2.30	3.52
	CO ₂	14.33	19.04	21.16	25.73
	N ₂	49.89	39.82	28.57	4.46
	C _m H _n	0.31	0.41	0.47	0.49
煤气热值/(MJ·m ⁻³)	低位热值	4.81	5.56	6.71	9.27
	高位热值	5.24	6.00	7.24	10.06
消耗指标	煤耗/(kg·m ⁻³)	0.30	0.34	0.40	0.51
	空气消耗/(m ³ ·m ⁻³)	0.61	0.50	0.36	—
	水蒸汽消耗/(kg·m ⁻³)	0.12	0.15	0.27	0.50
	氧气消耗/(m ³ ·m ⁻³)	—	0.08	0.13	0.24
煤气产率/(m ³ ·kg ⁻¹)	3.31	2.95	2.53	1.97	
水蒸汽分解率/%	74.71	55.03	40.52	35.61	
气化效率/%	72.77	74.23	77.00	83.21	

3 结果分析

3.1 煤气组分与热值

从实验结果可得, 随着气化剂中氧气体积分数的增加, 煤气热值呈上升趋势, 当干空气中氧气体积分数为 30%~40% 时, 煤气热值变化最为明显。就华亭煤而言, 较佳的氧气体积分数为 30%~40%,

超过此范围会增加制氧成本。煤气组分中, 除 N₂ 外, 其它组分的体积分数随氧气体积分数升高的变化趋势和煤气热值相同。煤气中 CO 和 CO₂ 含量与气化剂中氧气体积分数有关, 氧气体积分数增加, 煤气中 CO 和 CO₂ 含量呈上升趋势, 反之降低。图 2 为不同氧气体积分数对煤气组分及热值的影响。

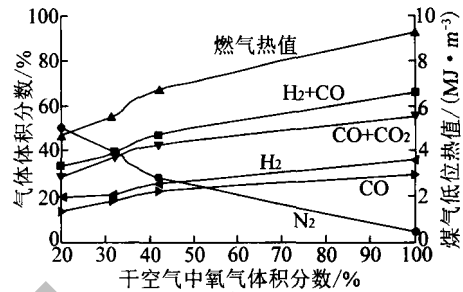


图 2 不同氧气体积分数对煤气组分及热值的影响

由图 2 可知, 当气化剂中氧气体积分数上升时, 煤气中主要可燃成分 H₂ 和 CO 的变化趋势基本和煤气热值一致。首先, H₂+CO 体积分数由空气蒸汽气化试验时的 33.49% 缓慢升至低富氧蒸汽气化试验时的 38.63%, 之后加速上升至 47.5% (中富氧蒸汽气化试验), 最后, 增加速度又有所放缓直到纯氧蒸汽气化试验时的 65.8%。而煤气中 N₂ 含量逐渐降低, 主要是气化剂中空气含量减少造成的, 因此当气化剂中氧气体积分数为 100% (纯氧蒸汽试验) 时, 煤气中几乎不存在 N₂, 所产煤气可用作合成甲醇的原料气。而且, 由于煤气中 N₂ 成分降低到一定水平时, 煤气燃烧产生高浓度 CO₂, 有利于烟道气中 CO₂ 的回收, 且成本也大为降低, 对实现煤炭资源低碳化利用具有重要意义。

3.2 消耗指标

随着气化剂中氧气体积分数的增加, 氧气消耗量也随之增加。但在气化剂中氧气体积分数达到 40% 之前, 氧气消耗量随氧气体积分数增加上升速度最快, 此后, 随氧气体积分数提高, 气化过程消耗氧气量增加变缓, 氧气消耗量由 0 快速增长至 0.13 m³/m³ (氧气体积分数为 42%), 之后缓慢增长至 0.24 m³/m³ (纯氧)。相反, 当气化剂氧气体积分数由 21% 上升至 42% 时, 空气消耗量则由 0.61 m³/m³ 降至 0.36 m³/m³, 纯氧蒸汽气化试验无需消耗空气。随着气化剂中氧气体积分数的增加, 煤气的煤耗整体保持上升, 煤耗量由空气蒸汽的 0.3 kg/m³ 增加至纯氧蒸汽的 0.51 kg/m³。

随着气化剂中氧气体积分数的增加, 水蒸汽消

耗量增加,水蒸汽分解率下降。当气化剂中氧气体积分数由21%提高至32%时,蒸汽消耗由 0.12 kg/m^3 缓慢增加至 0.15 kg/m^3 ,之后便快速升高至 0.27 kg/m^3 (氧气体积分数为42%),最后又缓慢增加至纯氧蒸汽时的 0.5 kg/m^3 。而蒸汽的分解率却呈完全相反的趋势,随着气化剂中氧气体积分数的增加,蒸汽分解率先是由74.71%迅速下降至55.03%,之后缓慢降低至纯氧蒸汽气化试验时的35.61%。水蒸汽分解率下降,原因是气化剂中氧气体积分数越高,则冷却氧化层所需的水蒸汽越多,使得在还原层中水蒸汽分解率降低^[4]。虽然蒸汽分解率随气化剂氧气体积分数提高逐渐降低,但由图2可知,煤气中 H_2 含量随氧气体积分数提高呈上升趋势,说明气化过程中蒸汽的总分解量依然是增加的,因为煤气中氢含量主要与原煤中氢组分含量以及气化蒸汽消耗量和蒸汽分解率有关^[5],而对于同一种煤而言,煤气中的 H_2 含量完全取决于蒸汽消耗量及分解率。

3.3 煤气产率及气化效率

煤气产率是指1 kg原料煤气化后制得的煤气量,与煤耗互为倒数关系。对于同一气化煤种,煤气产率与煤气中碳含量有关,即主要与煤气中 CO 和 CO_2 总量有关,当煤气中 CO 和 CO_2 总量增加时,其产气率降低,反之则升高。如图2所示,随着气化剂中氧气体积分数的增加,煤气中的 CO 和 CO_2 含量上升,因此,产气率由空气蒸汽时的 $3.31 \text{ m}^3/\text{kg}$ 下降到纯氧蒸汽时的 $1.97 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

气化效率是指生成物的发热量占原料发热量的百分率,是衡量气化优劣的一项综合性技术指标^[6]。气化效率与煤气热值和产气率有关,在气化试验中,虽然空气蒸汽、低富氧蒸汽、中富氧蒸汽和纯氧蒸汽气化试验的产气率呈降低趋势,但其煤气热值依次升高,气化效率整体仍呈上升趋势,由72.77%升至83.21%。

3.4 煤气产量与气化剂体积比

煤气产量和气化剂体积比值可用于描述注、排气的关系,研究其变化规律有利于指导现场操作。图3为不同氧气体积分数下注、排气体积比的关系。由图3可知,随着气化剂中氧气体积分数的上升,煤气产量和气化剂体积比总体呈下降趋势,先是由空气蒸汽的1.31平缓降低至低富氧的1.3,随后迅速下降至空气氧气体积分数为42%时的1.21,

之后煤气产量和气化剂体积比下降速度放缓,直到纯氧蒸汽时1.16。煤气产量和气化剂体积比降低的主要原因是,随着气化剂中氧气体积分数增加,注气量减少,使得煤的气化强度降低,同时,煤气产率也有所降低。

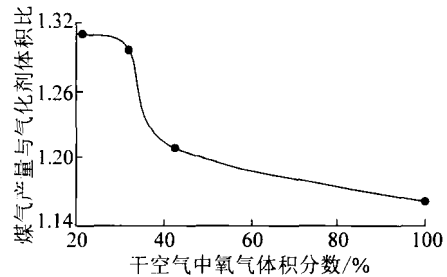


图3 不同氧气体积分数下注、排气体积比的变化

4 结论

(1)随着气化剂中氧气体积分数的上升,煤气各组分(除 N_2 外)体积分数和煤气热值呈上升趋势,且为提高煤气热值,气化剂中氧气体积分数较佳范围为30%~40%。

(2)当气化剂中氧气体积分数增加时,氧气消耗随之增加,空气消耗相应降低,煤耗量增加,水蒸汽消耗量增加,而水蒸汽分解率下降,但气化过程中水蒸汽的总分解量依然增加。

(3)随着气化剂中氧气体积分数的增加,煤气产率由 $3.31 \text{ m}^3/\text{kg}$ 下降至 $1.97 \text{ m}^3/\text{kg}$,而气化效率则由72.77%上升至83.21%。

(4)当气化剂中氧气体积分数从21%升至100%,煤气产量和气化剂体积比由1.31降至1.16。

参考文献:

- [1] 艾利奥特. 煤利用化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [2] 刘淑琴, 张军, 梁杰, 等. 煤炭地下气化的综合利用前景[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(7): 50-53.
- [3] 戢绪国, 邓一英, 王鹏. 七种煤常压纯氧固定床气化的特性[J]. 洁净煤技术, 2004, 10(4): 49-52.
- [4] 戢绪国, 步学朋, 邓一英, 等. 煤常压富氧及纯氧固定床气化的研究[J]. 煤气与热力, 2005, 25(4): 9-12.
- [5] 戢绪国, 步学朋, 王鹏, 等. 煤常压固定床空气气化的特性研究[J]. 煤气与热力, 2004, 24(12): 660-664.
- [6] 马魁民. 提高煤气炉气化效率的对策[J]. 节能技术, 1993(2): 46-48.

(下转第78页)

原料成本 30% 以上,经济效益十分明显,具有广泛的推广应用前景,证实了污泥煤浆的经济可行性。

3 结 论

碱法黑液中的碱性物质可以与污泥中的聚丙烯酰胺起化学反应,将污泥网状结构中的水释放为自由水,从而提高污泥的流动度。同时碱法黑液中的碱性物质也可以和污泥中的部分含氧官能团反应,降低了含氧官能团的含量,提高其成浆性。经黑液改性后污泥制备的生物质煤浆各项指标均有突破性提高,具有重要的推广价值和意义。

参考文献:

- [1] GB/T 18856. 2—2008,水煤浆试验方法第 2 部分:浓度测定[S].
- [2] GB/T 18856. 4—2008,水煤浆试验方法第 4 部分:表观黏度测定[S].
- [3] 何国锋,段清兵. 生物质煤浆的制备与新型燃烧器的研究报告[R]. 北京:煤炭科学研究总院,国家水煤浆工程技术研究中心,2009.
- [4] 何国锋,段清兵. 高效节能水煤浆制备工艺及关键设备的研究报告[R]. 北京:煤炭科学研究总院,国家水煤浆工程技术研究中心,2009.

Experimental study on biomass coal slurry preparation using municipal sludge and black liquor

DUAN Qing-bing^{1,2}

(1. National CWS Engineering and Technology Center, Beijing 100013, China;

2. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The municipal sludge is a by-product in raw sewage treatment process. High moisture, ash and volatile matter content, low heat value and unstable property are its shortcomings. The black liquor can cause serious environmental pollution if wouldn't be treated effectively. The target of this study has tried to prepare biomass coal water slurry using the municipal sludge and black liquor as raw materials. The results show that this process has remarkable economic and social benefits because it can achieve waste to treasure.

Key words: municipal sludge; black liquor; coal water slurry; slurry forming ability

(上接第 74 页)

Characteristics of underground gasification with air, rich oxygen or pure oxygen of Huating coal

HUANG Wen-gang^{1,2}, WANG Zuo-tang^{1,2,3}, DUAN Tian-hong^{1,2}, XIN Lin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Low Carbon Energy Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Make a contract study on the chief gasification indexes of field test used steam and various levels of oxygen enrichment air of 21%, 32%, 42% and 100%. The results show that, with the increasing of O₂ volume fraction in gasifying agents, the gas calorificity, effective components as well as the consumption of O₂, steam, coal rise, and the air consumption and steam decomposition efficiency decrease. Meanwhile, the gas productivity drops down and the gasification efficiency trends upwards. The volume ratio of gas production and gasifying agent reduces from 1.31 to 1.16 as the O₂ concentration in dry air grows from 21% to 100%.

Key words: Huating coal; O₂ concentration; underground coal gasification (UCG); gasification indexes