

# 华亭煤炭地下气化产气与发电试验研究

辛 林<sup>1,2,3</sup>, 王作棠<sup>1,2,3</sup>, 黄温钢<sup>1,2,3</sup>, 李兴泉<sup>1,2,4</sup>, 张 朋<sup>1,2,3</sup>, 王建华<sup>1,2,3</sup>

(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 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院 江苏 徐州 221116; 3. 深部煤炭资源开采教育部重点实验室 江苏 徐州 221116; 4. 山东建筑大学 可再生能源建筑利用技术省部共建教育部重点实验室 山东 济南 250101)

**摘 要:**为回收华亭原安口煤矿残留煤资源,采用煤炭地下气化技术对残留煤进行二次开采和发电利用,通过空气连续法、空气蒸汽连续法、空气蒸汽两阶段、富氧和纯氧蒸汽连续法等不同注气工艺对残留煤进行了地下气化试验,研究了残留煤在不同气化工艺时的产气和发电特性。结果表明:添加蒸汽和氧气均可提高煤气中有效组分含量和煤气热值;采用连续法和两阶段气化工艺,能够获得热值4.07~10.69 MJ/Nm<sup>3</sup>的煤气,可作为2×500 kW 燃气发电机组的燃料气。通过气化指标对比分析和现场发电对比试验,确定了低富氧蒸汽连续法(O<sub>2</sub>体积分数32%)为匹配该燃气发电机组的合理气化工艺。

**关键词:**煤炭地下气化; 气化工艺; 煤气; 燃气发电

中图分类号:TD84 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2013)05-0028-07

## Study on Underground Coal Gasification Production and Power Generation Experiment in Huating Area

XIN Lin<sup>1,2,3</sup>, WANG Zuo-tang<sup>1,2,3</sup>, HUANG Wen-gang<sup>1,2,3</sup>, LI Xing-quan<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2,3</sup>, WANG Jian-hua<sup>1,2,3</sup>

(1. National Key Lab of Coal Resources and Safety Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. MOE Key Lab of Deep Coal Resources Mining, Xuzhou 221116, China; 4. Provincial and MOE Joint Key Lab of Renewable Energy Utilization Technology of Building, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** In order to recover the coal resources left in previous Ankou Mine of Huating area, an underground coal gasification technology was applied to the secondary mining and the power generation of the left coal. The underground coal gasification experiment was conducted on the left coal with the air continuous method, air and steam continuous method, air and steam two stage method, enriched oxygen and pure oxygen-steam continuous method and different gas injection techniques. The gas production and power generation features of the different gasification experiments with the left coal were conducted. The experiment results showed that the effective component content and coal gas heat value could be improved with the steam and oxygen injected. With the application of the continues method and two stage gasification technique, the coal gas with heat value of 4.07~10.69 MJ/Nm<sup>3</sup> could be obtained and could be the fuel gas for 2×500 kW gas-fired power generation unit. With the comparison analysis of the gasification index and the comparison experiments of the site power generation, the low enriched oxygen(O<sub>2</sub> volume fraction of 32%) steam continuous method determined would be a rational and economic gasification technique for the gas-fired power generation unit.

**Key words:** underground coal gasification; gasification technique; coal gas; gas-fired power generation

## 0 引 言

甘肃华亭原安口煤矿由于可采资源枯竭而闭井,但仍有超过60%的煤炭资源由于受开采条件限

制而无法开采,如何实现“三下”压煤资源的二次开采和利用,对煤矿企业延长矿井服务年限和转型发展具有重要意义。煤炭地下气化(Underground Coal Gasification, UCG)将采煤和气化合二为一,从根本

收稿日期:2013-03-22;责任编辑:代艳玲

基金项目:教育部科学技术研究重点资助项目(02019);煤炭资源与安全开采国家重点实验室资助项目(SKLCRSM10X04);江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35)

作者简介:辛 林(1984—),男,山东泰安人,博士研究生。通信作者:王作棠,教授,博士生导师, E-mail:ucgwangzt@163.com

引用格式:辛 林,王作棠,黄温钢,等.华亭煤炭地下气化产气与发电试验研究[J].煤炭科学技术,2013,41(5):28-34.

上改变了煤炭的开采方式,其煤种和煤层条件适应性广<sup>[1]</sup>,尤其适合于常规采煤方法技术经济不可采的高硫、高灰等低品质煤、地质构造及赋存条件复杂(急倾斜、严重突出、高瓦斯煤层等)以及“三下”压煤的开采。与地面气化相比,煤炭地下气化投资与运行成本低,具有显著的经济效益<sup>[2]</sup>。基于此,采用煤炭地下气化技术对原安口煤矿工业广场下压煤进行开采和煤气发电。历经 1 年的建设期,试验工程于 2010 年 5 月 4 日进行地下气化炉煤层点火,并于次日顺利实现地面放散火炬点火,在此期间,根据地下气化工艺要求,从点火成功到实施闭炉,成功进行了不同气化剂配比产气对比与燃气发电试验。通过工业化试验,确定了匹配燃气发电机组的技术经济合理的地下气化煤气方案,为“三下”压煤二次开

发和低碳化利用探索一条新的途径。

## 1 地质概况

煤炭地下气化试验区域内地质结构简单,无褶曲和断层,与含水层无直接联系。试验工程气化煤层由下到上分别为侏罗系煤一和煤二,平均厚度分别为 8.8、4.4 m,中间夹 1 层 0.5 m 厚泥岩。煤层埋深 118 ~ 156 m,煤层倾角 28°,试验区地质储量 240 万 t。煤二顶板主要为细砂岩、砂质泥岩,煤一底板为中~细砂岩,具备适宜的气化条件。试验气化煤层总厚度达 13.2 m,煤层厚度大,设计采用条带气化炉,气化工作面沿走向布置,沿倾向推进。根据煤质化验分析和分类方案,气化煤层为低灰、低硫、高活性、高挥发性不黏煤,煤质分析结果见表 1。

表 1 原煤工业分析和元素分析

煤样	工业分析/%			元素分析/%					发热量 $Q_{gr,ad}$ / (MJ · kg <sup>-1</sup> )
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$w(C)_{ad}$	$w(H)_{ad}$	$w(O)_{ad}$	$w(N)_{ad}$	$w(S)_{t,ad}$	
不黏煤	8.50	6.60	33.70	66.74	3.82	13.16	0.63	0.54	23.80

## 2 地下气化系统

地下气化采用有井式地下气化工艺,其系统分为地面和井下 2 部分。①地面部分包括:气化剂制取(鼓空气、制氧、制蒸汽)、注排气管网(注排气钻孔及管路、引风)、净化系统、测控系统及发电系统;②井下部分主要为气化炉体、井下导控平台及管路、气化炉密闭。

工业性试验采用深冷空分制氧技术生产纯度 99.6% 的氧气,用于地下气化纯氧蒸汽或富氧蒸汽气化试验。为了提高气化炉生产自动化水平,对气化炉运行参数、产气参数、发电参数进行了在线实时监测。在气化炉内布置温度热电偶,用于监测炉内温度;在地面注气管路和煤气管路布设流量、组分、温度和压力测点,实时监测注排气管路、净化区、发电区和放散区管路的流量、组分、温度和压力参数,以实现了对气化炉运行状态的实时调控。华亭煤炭地下气化生产及测控系统如图 1 所示。

## 3 试验过程与结果

### 3.1 气化炉点火

在正式点火运行之前进行了冷态试验,包括气化炉静压卸压试验、动态漏失率测定、管路气密性检

测等,当气化炉压力下降速率不大于 1 kPa/min、气化炉动态漏失率小于 3% 和管路气密性满足要求时,认为冷态试验成功。采用固定点火器渗流点火技术,在气化炉点火平巷内预埋点火器和引燃材料,点火前调整气化炉鼓空气流量,并实时监测出口气体的爆炸性气体含量,在混合气体小于爆炸极限时,满足点火条件。2010 年 5 月 4 日 12:58 平巷内点火器通电点火,当日 17:20,放散塔出口烟尘持续稳定冒出,气化炉内点火成功。5 日 10:25,在实时检测可燃气体组分满足点火条件的基础上,实施放散塔火炬点火,并一次点火成功。以下试验都在一个气化炉中进行,在不同时间段单独进行试验,工业性试验气化剂生产设备产能如下:鼓风机的最大鼓风量为 5 400 Nm<sup>3</sup>/h,蒸汽锅炉房的蒸汽最大供应量为 1 600 m<sup>3</sup>/h(120 °C,0.2 MPa),深冷空分制氧机的最大制氧量为 800 Nm<sup>3</sup>/h。

### 3.2 空气连续法气化试验

以空气为气化剂,通过对地下气化炉进行连续供空气,产生空气煤气。与其他气化工艺相比,该工艺最简单、设备投资最小、生产成本低。但气化热效率低,空气煤气含 N<sub>2</sub> 较高(大于 50%),因此,煤气热值低,一般仅为 3.35 ~ 4.61 MJ/Nm<sup>3</sup>,一般只能供工业窑炉使用。

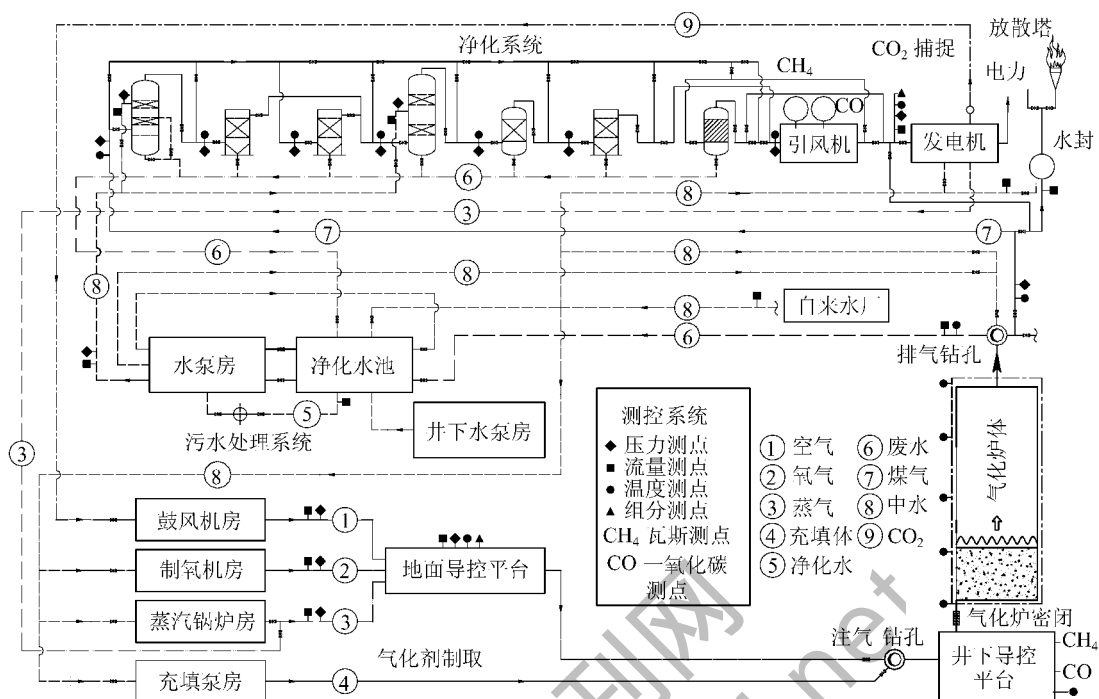


图1 煤炭地下气化生产及测控系统

2010年9月14—16日进行了空气连续法气化试验,试验中控制鼓风量为 $5\ 000\ \text{Nm}^3/\text{h}$ ,日产空气煤气 $18.40\ \text{万}\ \text{Nm}^3$ ,平均低位热值为 $4.07\ \text{MJ}/\text{Nm}^3$ 。空气连续法煤气组分含量及热值如图2所示。各组分含量波动范围(均值)如下: $\text{H}_2$ 为 $15.50\% \sim 17.18\%$ ( $16.35\%$ ); $\text{CO}$ 为 $11.93\% \sim 13.56\%$ ( $12.73\%$ ); $\text{CH}_4$ 为 $1.38\% \sim 1.64\%$ ( $1.52\%$ ); $\text{C}_m\text{H}_n$ 为 $0.22\% \sim 0.28\%$ ( $0.25\%$ ); $\text{CO}_2$ 为 $16.41\% \sim 18.58\%$ ( $17.46\%$ ); $\text{O}_2$ 为 $0$ , $\text{N}_2$ 及其他组分为 $49.74\% \sim 53.64\%$ ( $51.69\%$ )。

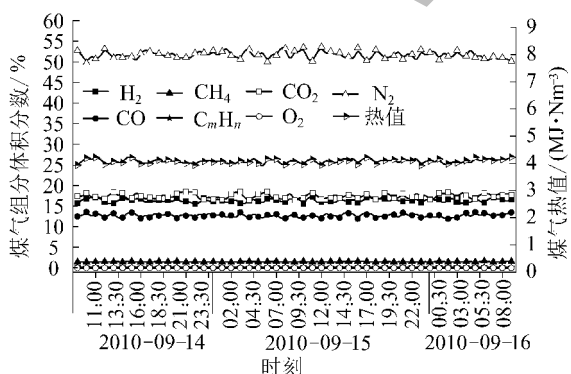


图2 空气连续法气化试验煤气组分含量与热值

### 3.3 空气蒸汽连续法气化试验

以空气蒸汽为气化剂,通过向地下气化炉中连续注入空气和蒸汽混合组成的气化剂,生产混合煤

气。与其他气化工艺相比,该方法工艺简单、设备投资小、生产成本低。与空气煤气相比,显著提高了煤气热值和气化效率,热值一般为 $4.2 \sim 5.0\ \text{MJ}/\text{Nm}^3$ ,可以供工业窑炉燃用和进行低热值燃气发电。

2010年8月9—12日进行了空气蒸汽连续法气化试验,试验过程中注气流量为 $6\ 450\ \text{Nm}^3/\text{h}$ ,其中空气流量 $5\ 300\ \text{Nm}^3/\text{h}$ ,蒸汽流量 $1\ 150\ \text{m}^3/\text{h}$ ,日产混合煤气 $19.20\ \text{万}\ \text{Nm}^3$ 。混合煤气平均低位热值为 $4.77\ \text{MJ}/\text{Nm}^3$ 。空气蒸汽连续法煤气组分含量及热值如图3所示。各组分含量波动范围(均值)如下: $\text{H}_2$ 为 $18.57\% \sim 20.60\%$ ( $19.50\%$ ); $\text{CO}$ 为 $13.41\% \sim 14.45\%$ ( $13.94\%$ ); $\text{CH}_4$ 为 $1.89\% \sim 2.07\%$ ( $1.98\%$ ); $\text{C}_m\text{H}_n$ 为 $0.28\% \sim 0.34\%$ ( $0.31\%$ ); $\text{CO}_2$ 为

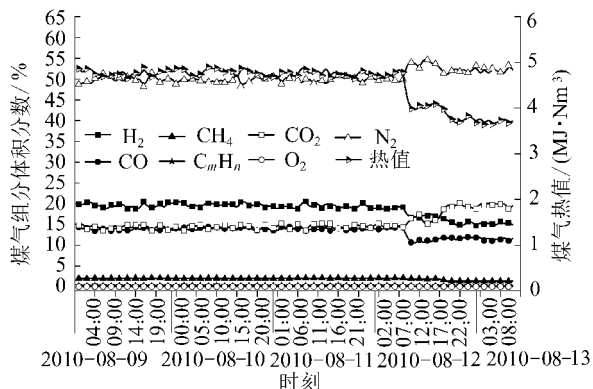


图3 空气蒸汽连续法气化试验煤气组分含量与热值

13.42% ~ 15.26% (14.37%);  $O_2$  为 0,  $N_2$  及其他组分为 48.15% ~ 51.84% (49.91%)。

### 3.4 富氧蒸汽连续法气化试验

以富氧空气和蒸汽为气化剂, 通过向地下气化炉中连续注入纯氧、空气和蒸汽混合组成的气化剂, 生产半水煤气。该方法具有工艺简单、产气量大等特点, 煤气热值达  $5.0 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$  以上, 可作为合成氨联醇生产的原料气<sup>[2]</sup>, 也可供 IGCC 整体联合循环燃机发电。本项目通过调整气化剂中氧气浓度进行了 2 组试验: 低富氧(干空气中氧体积分数为 32%) 和中富氧(干空气中氧体积分数为 42%) 蒸汽连续法气化试验。

1) 低富氧蒸汽连续法气化试验。2010 年 9 月 30 日 14:30 至 10 月 2 日 7:00 进行了低富氧蒸汽连续法气化试验, 试验过程中注气流量  $6400 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , 其中空气  $4500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、纯氧  $700 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、蒸汽  $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ , 日产煤气量 20.40 万  $\text{Nm}^3$ 。低富氧蒸汽连续法煤气组分含量及热值如图 4 所示。煤气平均低位热值为  $5.51 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$ , 各组分含量波动范围(均值)如下:  $H_2$  为 20.05% ~ 21.22% (20.60%);  $CO$  为 16.51% ~ 18.54% (17.97%);  $CH_4$  为 2.01% ~ 2.19% (2.11%);  $C_mH_n$  为 0.35% ~ 0.47% (0.41%);  $CO_2$  为 20.53% ~ 21.80% (21.26%);  $O_2$  为 0,  $N_2$  及其他组分为 36.31% ~ 39.54% (37.64%)。

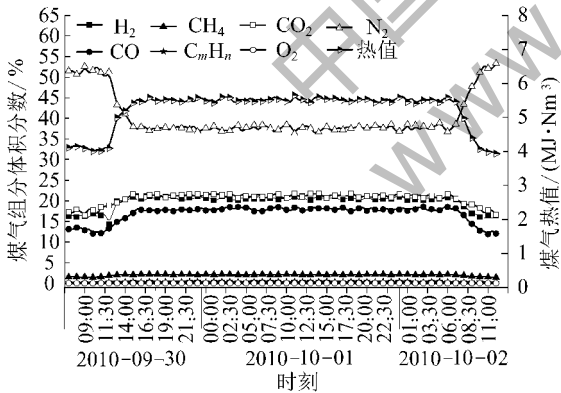


图 4 低富氧蒸汽连续法气化试验煤气组分含量与热值

2) 中富氧蒸汽连续法气化试验。2010 年 7 月 31 日 11:00 至 8 月 6 日 16:00 进行了中富氧蒸汽连续法气化试验, 试验过程中注气流量  $3800 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , 其中空气  $2200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、纯氧  $800 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、蒸汽  $800 \text{ m}^3/\text{h}$ , 日产煤气 12.58 万  $\text{Nm}^3$ 。中富氧蒸汽连续法煤气组分含量及热值如图 5 所示。煤气平均低位热值为  $6.64 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$ , 各组分含量波动范围(均值)如

下:  $H_2$  为 21.49% ~ 26.73% (25.30%);  $CO$  为 15.78% ~ 23.24% (22.05%);  $CH_4$  为 1.77% ~ 2.50% (2.30%);  $C_mH_n$  为 0.35% ~ 0.51% (0.47%);  $CO_2$  为 18.52% ~ 23.86% (21.11%);  $O_2$  为 0,  $N_2$  及其他组分为 25.75% ~ 42.09% (28.77%)。

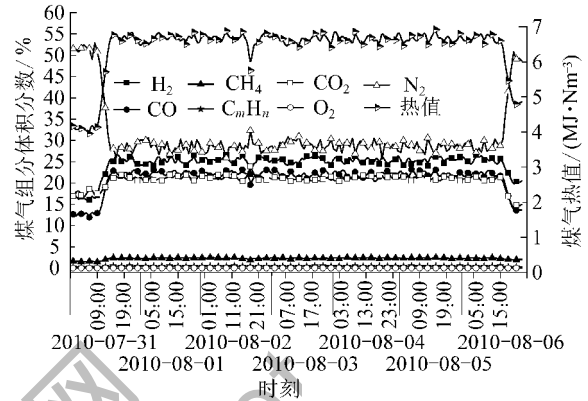


图 5 中富氧蒸汽连续法气化试验煤气组分含量与热值

### 3.5 纯氧蒸汽连续法气化试验

以纯氧和蒸汽为气化剂, 通过向地下气化炉中连续地注入纯氧和蒸汽混合组成的气化剂, 生产热值较高的煤气。深冷空分与变压吸附相比, 前者可以获得很高纯度的氧气, 但制氧设备普遍投资大, 成本高, 所产煤气的成本高, 流量较小, 但煤气热值高, 一般在  $9.2 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$  左右。

2010 年 7 月 4 日 3:00 至 7 月 5 日 00:00 进行了纯氧蒸汽连续法气化试验, 试验过程中氧气流量为  $800 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , 蒸汽流量为  $1500 \text{ m}^3/\text{h}$ , 日产煤气量 6.84 万  $\text{Nm}^3$ 。煤气平均低位热值为  $9.21 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$ 。纯氧蒸汽连续法煤气组分含量及热值如图 6 所示。

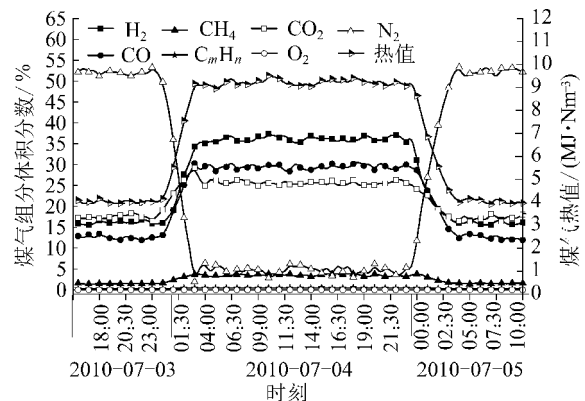


图 6 纯氧蒸汽连续法气化试验煤气组分含量与热值

各组分含量波动范围(均值)如下:  $H_2$  为 34.27% ~ 37.32% (36.11%);  $CO$  为 28.38% ~

30.77% (29.51%);  $\text{CH}_4$  为 3.13% ~ 3.90% (3.54%);  $\text{C}_m\text{H}_n$  为 0.45% ~ 0.53% (0.49%);  $\text{CO}_2$  为 24.82% ~ 29.28% (25.71%);  $\text{O}_2$  为 0,  $\text{N}_2$  及其他组分为 1.93% ~ 6.39% (4.65%)。

### 3.6 空气蒸汽两阶段气化试验

空气蒸汽两阶段气化试验<sup>[3]</sup>: 第1阶段强鼓空气蓄热,同时生产低热值的空气煤气;第2阶段停止鼓风,只供蒸汽,蒸汽与炽热的碳发生分解反应,产生高氢水煤气,含氢量可达40%以上,热值在9.2 ~ 12.6  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ,可用于发电、廉价提氢<sup>[4]</sup>或化工工业。2010年7月20—21日进行了空气蒸汽两阶段气化试验。第1阶段鼓空气量5400  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ,产气量7336  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ,所产煤气平均低位热值3.48  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ (图7)。各组分含量波动范围(均值)如下: $\text{H}_2$ 为13.50% ~ 15.37% (14.03%);  $\text{CO}$ 为9.63% ~ 10.90% (10.34%);  $\text{CH}_4$ 为1.41% ~ 2.09% (1.49%);  $\text{C}_m\text{H}_n$ 为0.15% ~ 0.21% (0.19%);  $\text{CO}_2$ 为15.08% ~ 16.36% (15.66%);  $\text{O}_2$ 为0,  $\text{N}_2$ 及其他组分为55.27% ~ 60.05% (58.28%)。第2阶段停止鼓空气,开始鼓入蒸汽,注蒸汽量1600  $\text{m}^3/\text{h}$ ,产气量2216  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ,水煤气平均低位热值10.69  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ,各组分含量波动范围(均值)如下: $\text{H}_2$ 为41.20% ~ 43.17% (42.38%);  $\text{CO}$ 为25.33% ~

26.98% (25.98%);  $\text{CH}_4$ 为6.82% ~ 7.27% (7.06%);  $\text{C}_m\text{H}_n$ 为0.45% ~ 0.52% (0.48%);  $\text{CO}_2$ 为18.40% ~ 20.01% (19.22%);  $\text{O}_2$ 为0,  $\text{N}_2$ 及其他组分为3.00% ~ 6.39% (4.87%)。空气蒸汽两阶段气化试验效果好,第2阶段生产的水煤气热值高且产气稳定。

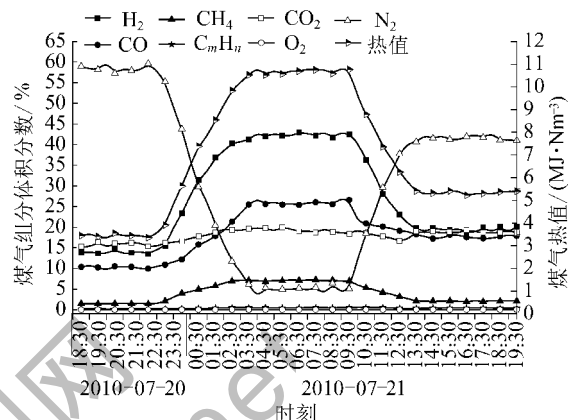


图7 空气蒸汽两阶段气化试验煤气组分含量与热值

## 4 产气效果对比分析及发电试验

### 4.1 产气效果对比分析

根据工业性试验产气结果,进行了各气化试验的物料衡算和热量衡算,各试验气化指标见表2,产气效果对比分析如下。

表2 各试验气化指标

气化工艺	空气蒸汽两阶段						
	空气连续法	空气蒸汽连续法	低富氧蒸汽连续法	中富氧蒸汽连续法	纯氧蒸汽连续法	第1阶段	第2阶段
气化效率/%	70.18	74.01	74.54	77.33	83.57	84.81	84.81
煤耗量/( $\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	0.27	0.30	0.34	0.40	0.51	0.24	0.45
空气消耗量/( $\text{Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	0.65	0.63	0.50	0.36	0.00	0.74	0
蒸汽消耗量/( $\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	0	0.09	0.15	0.24	0.46	0	0.58
氧气消耗量/( $\text{Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	0	0	0.08	0.13	0.24	0	0
煤气产率/( $\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.74	3.35	2.95	2.53	1.97	4.23	2.23

1) 煤气组分及热值。从图8可以看出,添加蒸汽和氧气都可以提高煤气中有效组分含量和煤气热值;空气煤气的热值最低,平均只有4.07  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ (低位热值),煤气中的有效组分仅为30.85%,而两阶段水煤气平均热值最高,达10.69  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ,煤气中有效组分也最高,达75.91%。

2) 煤气产率与煤耗。煤气产率指1 kg原料煤气化后制得的煤气量。对于同一气化煤种,煤气产

率与煤气中碳含量( $\text{CO} + \text{CO}_2$ )有关,当煤气中 $\text{CO} + \text{CO}_2$ 含量增加时,其煤气产率降低,反之则升高<sup>[5-6]</sup>。由图9可知,空气、空气蒸汽、低富氧蒸汽、中富氧蒸汽以及纯氧蒸汽连续法气化试验碳含量( $\text{CO} + \text{CO}_2$ )整体呈上升趋势,其煤气产率由3.74  $\text{Nm}^3/\text{kg}$ 逐渐降至1.97  $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ;两阶段气化过程中,第1阶段与第2阶段煤耗比为1.47,第2阶段水煤气 $\text{CO} + \text{CO}_2$ 含量为45.00%,小于纯氧蒸汽连续

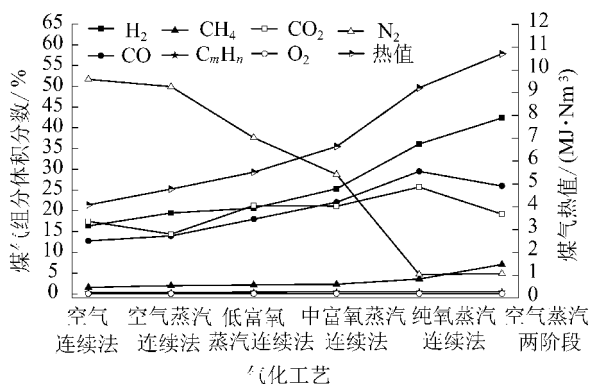


图 8 不同气化试验的煤气组分含量与热值

法煤气,而煤气产率为  $2.23 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ,大于纯氧蒸汽连续法煤气,符合上述变化规律。煤气的煤耗指产生  $1 \text{ Nm}^3$  煤气消耗的煤量,与煤气产率互为倒数关系,煤耗最高为纯氧蒸汽气化试验,为  $0.51 \text{ kg}/\text{Nm}^3$ ,最低为空气气化试验,为  $0.27 \text{ kg}/\text{Nm}^3$ 。

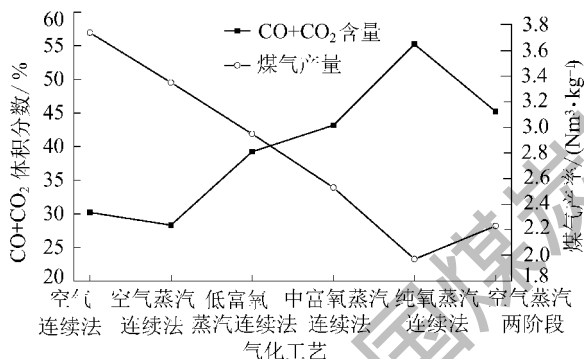


图 9 不同气化试验的煤气产率与 CO + CO₂ 含量

3) 气化效率。气化效率是指生成物的发热量占原料发热量的百分率<sup>[7]</sup>。气化效率是衡量其气化工艺优劣的一项综合性技术指标。气化效率与煤气热值和煤气产率有关(图 10)。虽然空气、空气蒸汽、低富氧蒸汽、中富氧蒸汽和纯氧蒸汽连续法气化试验的煤气产率呈降低趋势,但其煤气热值依次升高,气化效率整体呈上升的趋势,由  $70.18\%$  升至  $83.57\%$ 。空气蒸汽两阶段气化试验气化效率为总气化效率,包括鼓风阶段和鼓蒸汽阶段的气化效率,虽然鼓风阶段气化效率较低,但第 2 阶段的气化效率较高,因此两阶段气化试验的气化效率仍高于纯氧蒸汽,达  $84.81\%$ 。

4) 氧含量对煤气组分和热值影响。从空气蒸汽、富氧蒸汽和纯氧蒸汽连续法气化试验可以看出,随着气化剂中氧含量的增加,煤气组分中除  $\text{N}_2$  等惰性气体外,其余组分含量及煤气热值均呈上升趋势。

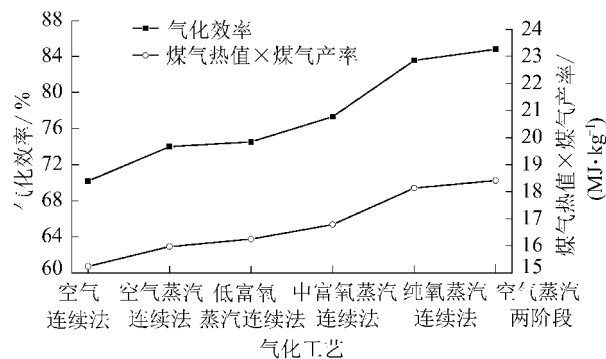


图 10 不同气化试验的气化效率与煤气热值 × 煤气产率

如图 11 所示,当气化剂氧体积分数在  $32\% \sim 42\%$  时,煤气的有效组分含量及热值上升速度最快,此后随着氧浓度的增加,煤气热值上升速度变缓。

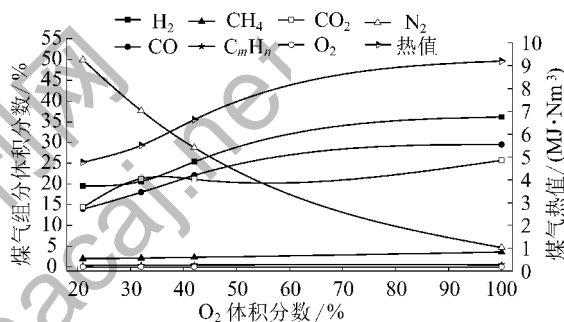


图 11 不同氧浓度气化试验的煤气组分含量与热值

5) 氧含量对气化剂消耗指标影响。由图 12 可知 ①氧气消耗量:随着气化剂中氧浓度的增加,氧气消耗量也随之增加,且在干空气中氧体积分数达到  $42\%$  之前,氧气消耗量增加速率最大,此后增加速率逐渐减小,氧气消耗量由  $0$  快速增长至  $0.13 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$  ( $42\% \text{ O}_2$  时),之后缓慢增长至  $0.24 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$  ( $100\% \text{ O}_2$  时)。②空气消耗量:与氧气消耗量呈相反趋势,且下降速率在氧气体积分数为  $42\%$  之前具有较大数值,此后下降速率逐渐减小。③煤耗量:基本与氧气消耗量呈相同趋势,整体保持上升,在氧体积分数  $42\%$  之前变化率最大,此后变化率逐渐减小。④蒸汽消耗量及分解率:随着气化剂中氧浓度的增加,蒸汽消耗量增加,但蒸汽分解率下降,且两者均在氧体积分数  $42\%$  之前具有较大变化率。蒸汽分解率下降,其原因是气化剂中氧浓度越高,氧化区温度越高,则冷却氧化区所需的蒸汽量越多,而在还原区中蒸汽分解率降低<sup>[8]</sup>,但分解的蒸汽量仍然增加,增幅较小。⑤汽氧比:汽氧比是纯氧蒸汽气化过程中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,蒸汽分解率下降,蒸汽耗量增加<sup>[9]</sup>,汽氧比与煤种反应活性有关,试验得出华亭煤纯氧蒸汽连续法气化试验汽氧比为1.92。

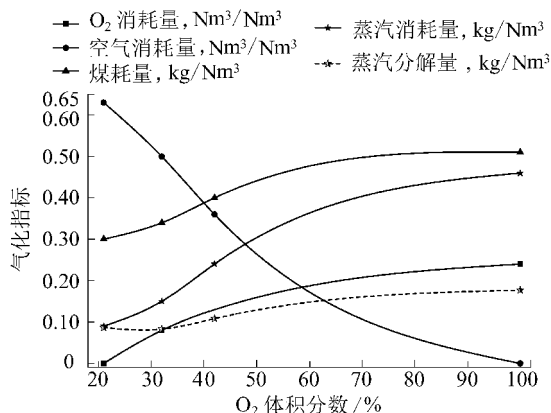


图 12 不同氧浓度气化试验的消耗指标

#### 4.2 发电试验

在产气试验的基础上,分别对空气、空气蒸汽、富氧蒸汽和纯氧蒸汽连续法所产煤气进行了燃气发电机组发电试验,发电机组为2台500GF1-RD型。结果表明,煤气中H<sub>2</sub>体积分数在20%以下是可行的,煤气热值在3.8~4.2 MJ/Nm<sup>3</sup>时,单台机组发电功率达220~250 kW;煤气热值在5.0~5.4 MJ/Nm<sup>3</sup>时,单台机组发电功率可达320~360 kW;当热值提高时,发电功率没有明显增加,因此,初步确定本工业性试验合理的发电功率为350 kW,其燃料气热值为5.51 MJ/Nm<sup>3</sup>,即低富氧(32% O<sub>2</sub>)蒸汽连续法气化试验所产煤气为该燃气发电机组的匹配燃料气,单台机组煤气消耗为691 Nm<sup>3</sup>/h,热耗率为10.88 MJ/kW·h。通过分析氧含量对煤气组分和热值影响可知,当气化剂氧体积分数在32%~42%时,煤气的有效组分含量及热值具有较大提高,因此,选用低富氧(32% O<sub>2</sub>)蒸汽连续法气化工艺具有技术经济合理性。

## 5 结 论

1) 通过华亭煤气化项目气化剂配比与产气指标对比及发电试验研究,得出:各试验煤气组分中,空气煤气的低位热值最低,平均只有4.07 MJ/Nm<sup>3</sup>,煤气中的有效组分体积分数仅为30.85%,而两阶段水煤气平均低位热值最高,达10.69 MJ/Nm<sup>3</sup>,煤气中有效组分也最高,体积分数达75.91%。

2) 煤气产率和煤耗指标与煤气中碳含量(CO +

CO<sub>2</sub>)有关,空气连续法煤气产率最高,达3.74 Nm<sup>3</sup>/kg,纯氧蒸汽连续法煤气产率最低,为1.97 Nm<sup>3</sup>/kg。煤耗与煤气产率互为倒数关系,煤耗最高为纯氧蒸汽连续法气化试验,为0.51 kg/Nm<sup>3</sup>,最低为空气连续法气化试验,为0.27 kg/Nm<sup>3</sup>。

3) 气化效率与煤气热值和煤气产率有关,从空气、空气蒸汽、富氧蒸汽、纯氧蒸汽连续法到空气蒸汽两阶段气化试验,气化效率依次升高,最低为70.18%,最高为84.81%。

4) 随着气化剂中氧含量的增加,煤气组分中除N<sub>2</sub>等惰性气体外,其余组分及煤气热值均呈上升趋势,气化剂中氧体积分数为32%~42%时,煤气组分及热值增加明显;氧气消耗和煤耗增加,空气消耗相应下降,蒸汽消耗量增加,蒸汽分解率下降,但蒸汽总分解量仍有所增加,但增幅较小。

5) 确定工业性试验单台机组技术经济合理的发电功率为350 kW,其燃料气热值为5.5 MJ/Nm<sup>3</sup>,单台机组煤气消耗为691 Nm<sup>3</sup>/h,热耗率为10.88 MJ/kW·h,匹配的气化工艺为低富氧(32% O<sub>2</sub>)蒸汽连续法气化工艺。

6) 工业性试验表明,采用煤炭地下气化技术,解决了“三下”压煤资源的开采和利用难题,其产气和发电的成功,表明煤炭地下气化技术可以在我国衰老报废矿井残留煤开采及发电方面推广应用。

#### 参考文献:

- [1] Abdul Waheed Bhutto, Aqeel Ahmed Bazmi, Gholamreza Zahedi. Underground Coal Gasification: From Fundamentals to Applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science 2012(1): 1-26.
- [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] 杨兰和, 梁杰, 余力, 等. 煤炭地下气化工业性试验 [J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(3): 36-38, 66.
- [4] 杨兰和, 梁杰, 尹雪峰. 煤炭地下气化制氢技术理论与实践 [J]. 煤炭科学技术 2000, 28(6): 37-39, 56.
- [5] WANG Zuo-tang, HUANG Wen-gang, ZHANG Peng, et al. A contrast Study on Different Gasifying Agents of Underground Coal Gasification at Huating Coal Mine [J]. Journal of Coal Science and Engineering(China) 2011, 17(2): 181-186.
- [6] 黄温钢, 王作棠, 段天宏, 等. 华亭煤空气、富氧及纯氧地下气化特性研究 [J]. 洁净煤技术 2011, 17(3): 71-74, 78.
- [7] 乌幼云. 煤炭气化 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1989: 68.
- [8] 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.
- [9] 刘淑琴, 梁杰, 余学东, 等. 不同煤种地下气化特性研究 [J]. 中国矿业大学学报 2003, 32(6): 624-628.