

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}, 段天宏^{1,2}, 辛林^{1,2}

(1. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

5 2. 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)

摘要: 对比研究了气化剂中氧浓度分别为 21%、32%、42% 和 100% 条件下的主要产气指标。结果表明, 随着气化剂中氧浓度的上升, 煤气有效组分和煤气热值呈上升趋势; 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; 煤气产率呈下降趋势, 而气化效率呈上升趋势; 煤气产量和 5 气化剂体积比由 1.31 降至 1.16。

10 **关键词:** 采矿工程; 华亭煤; 氧浓度; 煤炭地下气化; 产气指标

中图分类号: TD844; TQ546.2

Characteristics of Underground Gasification with Air, Rich Oxygen or Pure Oxygen of Huating Coal

15 Huang Wengang^{1,2}, Wang Zuotang^{1,2}, Duan Tianhong^{1,2}, Xin Lin^{1,2}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, JiangSu XuZhou 221116;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, JiangSu XuZhou 221008)

Abstract: This paper described 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%. Results show that, with the increasing of O₂ content in gasifying agents, the gas calorificity, available composition, O₂ consumption, steam consumption and coal consumption 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%.

25 **Key words:** Mining engineering; Huating coal; O₂ concentration; underground coal gasification (UCG); gasification indexes

0 引言

30 煤炭气化是煤炭洁净利用的关键技术之一, 传统的煤炭气化是将井下采出的煤送入地面气化炉中进行气化, 该技术成本高、产气量小且技术复杂。而煤炭地下气化集采煤和气化于一体, 具有适应性广(从褐煤、烟煤到无烟煤), 经济性好等特点。资料表明, 煤炭地下气化与地面气化相比, 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], 基建投资降低了 53%~66%, 且产气成本更低^[2]。

35 煤炭地下气化的产气效果直接影响着其经济效益, 而产气效果理想与否又取决于多方面因素, 不仅与煤层赋存条件、煤质有关, 还受气化工艺的影响。因此, 本文基于华亭煤炭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, 以期进一步优化气化工艺参数并为工业化合理选择气化工艺提供科学依据。

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实验室资助项目

作者简介: 黄温钢(1986-), 男, 中国矿业大学硕士在读, 主要研究方向: 煤炭地下气化

通信联系人: 王作棠(1958-), 男, 中国矿业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向: 矿山岩层控制和地下气化开采理论与技术的科学研究和教学工作. E-mail: wangzt@cumt.edu.cn

40 1 试验条件

1.1 地质条件

煤炭地下气化试验区域内地质结构简单，无褶曲和断层。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 (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，其平均厚度分别为 8.8 m 和 4.4 m，中间夹有一层厚度为 0.5 m 的泥岩，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 均无与含水层直接联系。

1.2 煤质分析

50 资料表明^[3]，一般适宜于作为气化原料的煤种有：不粘煤、弱粘煤、无烟煤、长焰煤、褐煤、贫煤和部分气煤。根据华亭煤的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。因此，华亭煤适合进行地下气化，其工业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 (空气干燥基)
Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of coal sample (on air dry basis)

煤 质	工业分析/%			元素分析/%					高位发热量/MJ·kg ⁻¹	灰熔点/°C	容重/kg·m ⁻³
	M _{ad}	A _{ad}	V _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{t,ad}			
不粘煤	8.5	6.6	33.7	66.74	3.82	13.16	0.63	0.54	23.8	1 197	1.40

1.3 煤炭地下气化系统

本项目采用有井式煤炭地下气化，试验区域为华亭煤业集团原安口煤矿工业广场煤柱，气化系统包括井下系统和地面系统两部分。地下气化工作面 (即气化炉) 倾向布置，其标高为 +1 147 m~+1 178 m，工作面长 (倾斜方向) 62 m，宽 22 m。气化炉封闭前，在各气化平巷内堆放一些木刹和干煤块，并在木柴和煤块堆下预先布置点火装置，点火装置由电操纵点燃上方的木刹和干煤块从而引燃煤层。为了防止煤气泄漏，气化工作面和行人巷道间砌有一层具有隔气、隔热、隔爆功能的密闭墙，以确保行人巷道中行人和设备的安全。此外，沿着气化炉布置有一些温度传感器，配合其它各种仪器设备，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，以便于控制气化炉的燃烧状态和产气效果。

65 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六部分构成，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。鼓风机、蒸汽锅炉房和制氧机根据气化工艺制取相应的空气、水蒸汽和纯氧，各种气体混合后通过注气钻孔进入地下气化炉，气化剂经过气化炉的氧化区、还原区和干燥干馏区后产生带有大量杂质的高温煤气，粗煤气由排气钻孔排出，经过管道进入净化系统，煤气经过冷却和净化后被引致发电系统发电，或经由放散塔燃烧排空。煤炭地下气化系统如图 1 所示。

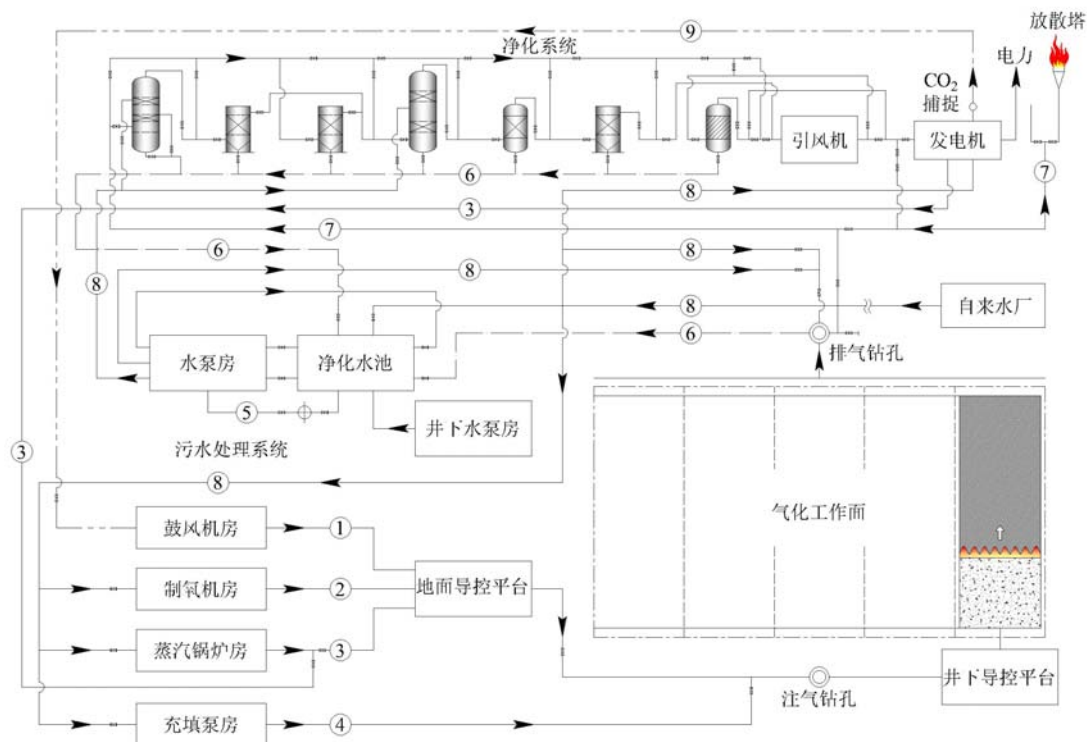


图 1 华亭煤炭地下气化系统示意图

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 回埋管路

75

Fig. 1 UCG system used in Huating Coal Mine

①—Air (injection); ②—Enriched oxygen (injection); ③—Steam (injection); ④—Filling;
⑤—Purified water; ⑥—Waste water; ⑦—Coal gas; ⑧—Water; ⑨—CO₂ sequestration

2 试验过程及结果

为了研究华亭煤在不同氧浓度条件下的地下气化特性，华亭煤炭地下气化项目于 2010 年 5 月至 2010 年 11 月期间进行了气化剂氧体积分数（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。各试验均在同一气化炉中进行，且由于处于试验阶段，该项目的气化剂生产设备产能有限，鼓风机的最大鼓风量为 5 400 Nm³/h，蒸汽锅炉房的蒸汽最大供应量为 1 600 Nm³/h，制氧机的最大制氧量为 800 Nm³/h。

80

2.1 空气蒸汽气化试验

空气蒸汽气化试验：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；也可通过提高或降低空气的温度来调节其水蒸汽饱和含量，达到控制蒸汽注入量的目的，而无需另外生产水蒸汽。该法显著提高了气化热效率和气化效率，改善煤气品质、增加煤气 H/C 比组成和热值，混合煤气适用于低热值燃机发电。

85

本项目进行的空气蒸汽气化试验是利用蒸汽锅炉产生水蒸汽并和空气混合作为气化剂注入井下，注气量为 6 450 Nm³/h，其中空气量 5 300 Nm³/h，蒸汽量 1 150 Nm³/h，日产混合煤气量 19.20 万 Nm³。空气蒸汽气化试验的各项产气指标见表 2。

90

2.2 富氧蒸汽气化试验

富氧蒸汽气化试验：采用富氧和水蒸汽作为气化剂，即在空气蒸汽连续工况气化试验气化剂的基础上增鼓纯氧，并实施连续供风的工艺方法，可大规模地连续生产半水煤气。该法具有工艺简单、产气量大等特点，煤气热值可达 1 200 kcal/Nm³ 以上，可作为合成氨联醇生

95

产的原料气, 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的体积分数进行了两组富氧蒸汽气化试验: “低富氧”(干空气中氧浓度为 32%)和“中富氧”(干空气中氧浓度为 42%) 蒸汽气化试验。

低富氧蒸汽气化试验所产煤气可用于整体煤气化燃气—蒸汽联合循环发电(简称 IGCC)。注气量为 6 400 Nm³/h, 其中空气 4 500 Nm³/h, 纯氧 700 Nm³/h 和蒸汽 1 200 Nm³/h, 日产煤气量 20.40 万 Nm³。低富氧蒸汽气化试验的各项产气指标见表 2。

进行中富氧蒸汽气化试验时, 每小时注入 3 800 Nm³ 气化剂, 其中空气 2 200 Nm³, 纯氧 800 Nm³ 以及蒸汽 800 Nm³, 可日产煤气 12.58 万 Nm³。中富氧蒸汽气化试验的各项产气指标见表 2。

2.3 纯氧蒸汽气化试验

纯氧蒸汽气化试验: 使用纯氧和水蒸汽混合组成的气化剂, 并实施连续注气的工艺方法, 可连续生产热值较高的煤气, 其热值一般在 2 200 kcal/Nm³ 左右。

为增大产气量, 将气化剂中纯氧量调至最大 800 Nm³/h, 蒸汽量为 1 500 Nm³/h, 根据物料平衡计算得, 其实际的汽氧比为 2.46, 其余所需水蒸汽由地下水转化的水蒸汽进行补给。纯氧蒸汽气化试验每小时产煤气量为 2 851 Nm³/h, 日产煤气量为 6.84 万 Nm³。中富氧蒸汽气化试验的各项产气指标见表 2。

表 2 不同氧浓度气化试验的气化指标
Tab. 2 Gasifying indexes of different levels of oxygen enrichment gasification experiments

气化剂氧体积分数/%		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	15.53	19.04	21.16	25.73
	O ₂	0.00	0.00	0.00	0.00
	N ₂	48.69	39.82	28.57	4.46
	C _m H _n	0.31	0.41	0.47	0.49
煤气热值/MJ·Nm ⁻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·Nm ⁻³	0.30	0.34	0.40	0.51
	空气消耗/Nm ³ ·Nm ⁻³	0.61	0.50	0.36	0.00
	蒸汽消耗/kg·Nm ⁻³	0.12	0.15	0.27	0.50
	氧气消耗/Nm ³ ·Nm ⁻³	0.00	0.08	0.13	0.24
煤气产率/Nm ³ ·kg ⁻¹	3.31	2.95	2.53	1.97	
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	

115

3 结果分析

3.1 煤气组分与热值

从实验结果可得, 随着气化剂中氧浓度的增加, 煤气热值呈上升趋势, 且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。因此, 若是为了提高煤气热值而增加气化剂中的氧浓度, 就华亭煤而言, 较佳的氧体积分数为 30%~40%, 超过此范围会增加制氧的成本而效果不明显。煤气组分中, 除 N₂ 外, 其它组分的体积分数随氧浓度升高的变化趋势和煤气热值的相同。煤气中 CO 和 CO₂ 含量与气化剂中氧气浓度有关, 氧气浓度增加, 煤气中 CO 和 CO₂ 含量呈上升趋势, 反之降低。

120

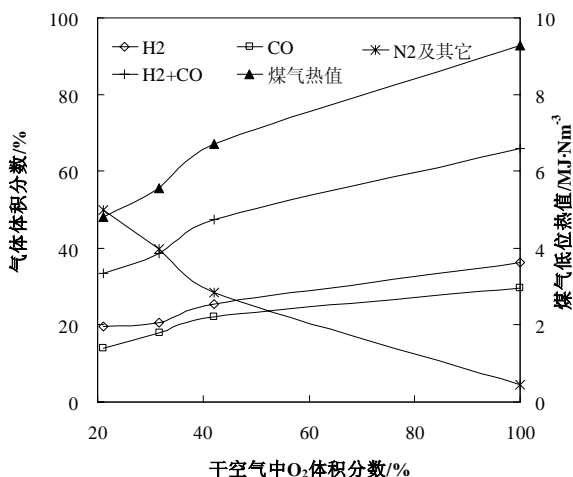


图2 不同富氧浓度煤气组分及热值的变化情况

Tab. 2 Changes of gas composition and heat value of different levels of oxygen enrichment gasification experiments

125

由图 2 可知，当气化剂中氧浓度上升时，煤气中主要可燃成分 H₂ 和 CO 的变化趋势基本和煤气热值的一致，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时），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，这主要是由气化剂中空气含量减少造成的，因此当气化剂中氧浓度为 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。此外，当煤气中 N₂ 成分降低到一定水平时，煤气燃烧产生的 CO₂ 易于回收，且成本也将大大降低，这对实现煤炭资源低碳化利用具有重要意义。

135

3.2 消耗指标

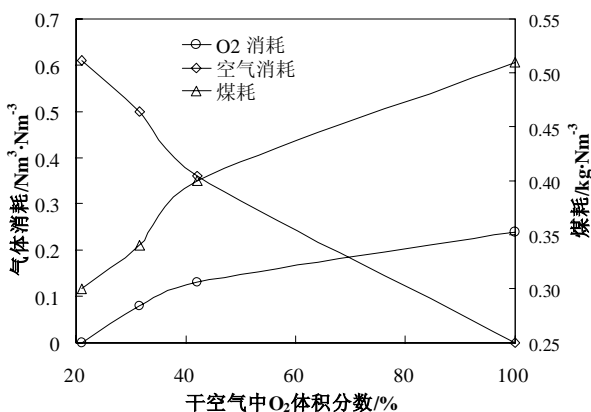


图3 不同富氧浓度下消耗指标的变化

Tab. 3 Changes of consumption index of different levels of oxygen enrichment gasification experiments

140

随着气化剂中氧浓度的增加，氧气消耗量也随之增加。但在气化剂中氧浓度达到 40% 之前，氧气消耗量随氧浓度增加上升速度最快，此后，随氧浓度提高气化过程消耗氧量增加速度变缓，氧气消耗量由 0 快速增长至 0.13 Nm³/Nm³（氧浓度为 42% 时），之后缓慢增长至 0.24 Nm³/Nm³（纯氧时），如图 3 所示。空气消耗曲线与氧气消耗曲线呈相反趋势，当气化剂氧浓度由 21% 上升至 42% 时，空气消耗量则由 0.61 Nm³/Nm³ 降至 0.36 Nm³/Nm³，纯氧蒸汽气化试验无需消耗空气。随着气化剂中氧含量的增加，煤气的煤耗整体保持上升，煤耗量由空气蒸汽的 0.3 kg/Nm³ 增加至纯氧蒸汽的 0.51 kg/Nm³。

145

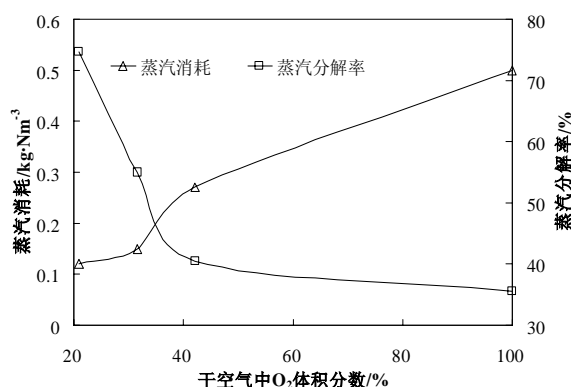


图4 不同富氧浓度下蒸汽消耗及其分解率的变化

Tab. 4 Changes of steam consumption and decomposition efficiency of different levels of oxygen enrichment gasification experiments

随着气化剂中氧浓度的增加，水蒸汽消耗量增加，水蒸汽分解率下降。当气化剂中氧含量由 21% 提高至 32% 时，蒸汽消耗开始由 0.12 kg/Nm^3 缓慢增加至 0.15 kg/Nm^3 ，之后便快速升高至 0.27 kg/Nm^3 （氧浓度为 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现完全相反的趋势，随着气化剂中氧浓度的增加，蒸汽分解率先是由 75% 迅速下降至 41%，之后缓慢降低至纯氧蒸汽气化试验时的 36%，如图 4 所示。水蒸汽分解率下降，其原因是气化剂中氧浓度越高，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浓度提高逐渐降低，但由图 2 可知，煤气中 H_2 含量随氧气浓度提高呈上升趋势，这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 含量完全就取决于蒸汽消耗量及其分解率了。

3.3 煤气产率与气化效率

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。因此，随着气化剂中氧浓度的增加，煤气中的 CO 和 CO_2 含量上升，而产气率则由空气蒸汽时的 $3.31 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 下降至纯氧蒸汽时的 $1.97 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 。

气化效率是指生成物的发热量占原料发热量的百分率。气化效率是衡量其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的有关，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，所以气化效率整体呈上升的趋势，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。

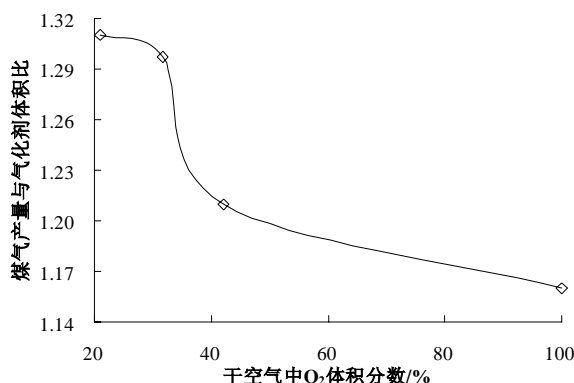


图5 不同富氧浓度下注、排气体积比值的变化

Tab. 5 Changes of volume ratio of gas production and gasifying agent from different levels of oxygen enrichment gasification experiments

180 由图5可知,随着气化剂中氧浓度的上升,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浓度为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主要原因是,随着气化剂中氧浓度增加时,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。

185 4 结语

(1) 试验表明,随着气化剂中氧浓度的上升,煤气各组分(除N₂外)的体积分数和煤气热值呈上升趋势,且为提高煤气热值,气化剂中较佳的氧浓度范围为30%~40%。

(2) 当气化剂中氧浓度的增加时,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,但气化过程中蒸汽的总分解量依然是增加的。

190 (3) 煤气产率随着气化剂中氧浓度的增加由3.31下降1.97,而气化效率则由72.77%上升至83.21%。

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

195 [参考文献] (References)

[1] 埃利奥特M A. 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] 寇公. 煤炭气化工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.

[4] 戟绪国, 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.

200 [5] 戟绪国, 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. 提高煤气护气化效率的对策[J]. 节能技术, 1993, (2): 46-48.