

不同煤气化技术合成气发酵法制乙醇的可行性探讨

张海峰*, 张敏

(晋煤集团煤化工研究院, 山西 晋城 048006)

摘要:阐述了固定床间歇气化技术(UGI)、鲁奇气化技术、航天炉气化技术合成气发酵法制乙醇的工艺配置,并比较了投资、乙醇生产成本等,期望筛选出技术与经济可行性最优的工艺作为煤制乙醇示范工程的气化技术来源。

关键词:煤气化技术;燃料乙醇;煤基燃料乙醇;生物法乙醇;乙醇

中图分类号:TQ546.2;TQ536.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)S-0279-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.S.063

Discussion on feasibility of fermentation to produce ethanol by syngas with different coal gasification technologies

ZHANG Hai-feng*, ZHANG Min

(Coal Chemical Research Institute, Shanxi Jincheng Anthracite Mining Group Co., Ltd.,
Jincheng 048006, China)

Abstract: This paper describes the process configuration of ethanol production by fermentation of syngas respectively made by UGI fixed bed gasification technology, Lurgi gasification technology and space furnace gasification technology. The investment cost, ethanol production cost and other aspects of these three technologies are compared. It aims to select the technology with the best technical and economic feasibilities as the gasification technology source of coal to ethanol demonstration project.

Key words: coal gasification technology; fuel ethanol; coal-based fuel ethanol; bio-based ethanol; ethanol

汽油高辛烷值添加剂甲基叔丁基醚(MTBE)因具有一定毒性、污染地下水源等问题,已被美国、日本、西欧等多个国家禁用。乙醇作为替代MTBE最有潜力的汽油添加剂,无毒无污染、高辛烷值、高含氧量,可减少尾气污染物排放,在美国、巴西等国进行了大规模乙醇汽油的推广。2017年9月,我国十五部委发文要求,到2020年在全国范围内将推广使用乙醇汽油^[1]。

据统计,2018年全国燃料乙醇产能约326万t,产量约280万t。按照2018年国内汽油消费量1.26亿t、乙醇添加量10%计算,2020年燃料乙醇需求量将超过1200万t,缺口超过1000万t。面对巨大的市场缺口,煤制乙醇尤其是煤基合成气生物法制乙醇有可能得到快速发展^[2-3]。

由于不同煤气化技术配置生物法制乙醇工艺在投资、生产成本等方面各不相同,本文期望通过对固定床间歇气化技术(UGI)^[4-10]、鲁奇气化技

术^[9-12]、航天炉气化技术^[9-10,13-14]3种气化技术配置生物法制乙醇进行比较,选出经济性较优的路线^[15-16]。

1 UGI 气化技术

1.1 合成氨 UGI 炉改造煤制乙醇工艺

合成氨 UGI 炉改造制乙醇工艺流程如图 1 所示。

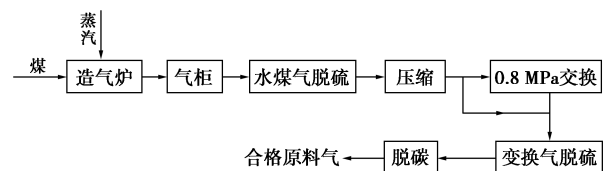


图1 UGI炉改造煤制乙醇工艺流程

由于合成氨需要氮气,因此在造气炉中有一定量的空气加入,既补充了氮气也提高了炉温和气化效率。乙醇合成不需要氮气,因此对气化炉的操作

收稿日期:2020-04-30;修回日期:2020-06-09

作者简介:张海峰(1985-),男,硕士,工程师,主要从事能源化工、新能源方面的研究,通讯联系人,13835628775, imhai fen@163.com。

控制进行了改造,气化炉中仅通入蒸汽,其他控制步骤基本相同。UGI 装置改造前后的气体成分比较如表 1 所示。

表 1 UGI 炉生产半水煤气、水煤气的气体成分

气源	组分/%					
	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
改造前半水煤气	8~12	—	66~71	—	—	17~22
改造后水煤气	6.0	0.2	38.5	48	0.5	6.4

从表 1 中可以看出,改造后有效气成分 CO、H₂ 有了大幅提高,其他成分相应减少。

1.2 UGI 乙醇合成气生产成本计算

1.2.1 新建项目分析

乙醇年产量为 8 万 t,以每吨乙醇耗有效气量 3 300 Nm³ 和一年生产时间 8 000 h 计,每小时需用有效气为 33 000 Nm³。项目总投资 38 000 万元,建设内容包括:造气、水煤气脱硫、压缩、变换、变换气脱硫、变压吸附脱碳、水处理、循环水处理、空压站等。成本估算见表 2。

表 2 UGI 炉生产乙醇合成气成本及发酵制乙醇成本

项目	数值	成本占比	备注
比煤耗/[t·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	0.705		吨无烟煤产水煤气量为 1 650 Nm ³ ,有效气含量为 86%
原料煤价格/(元·t ⁻¹)	1 100.00		
原料煤成本/[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	775.50	0.72	
蒸汽耗/[t·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	1.200		
蒸汽价格/(元·t ⁻¹)	50.00		
耗蒸汽成本/[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	60.00	0.06	
吨产品电耗/[t·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	160.00		
电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.52		
吨产品耗电成本/ (元·t ⁻¹)	83.20	0.08	
辅料消耗/(元·t ⁻¹)	15.00	0.01	
工资/(元·t ⁻¹)	34.00	0.03	全厂 150 人,平均工资 6 万元/人

折旧/(元·t ⁻¹)	100.00	0.09	固定资产按投资的 70% 计算,折旧年限为 10 年
直接生产费用/[元· kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	1 067.70	0.99	
财务费用/[元· kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	10.00	0.01	投资 38 000 万元,按 70% 贷款,贷款利率为 4.9%,还款期限为 10 年
管理费用/[元· kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	6.00	0.01	
间接生产费用/[元· kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	16.00	0.01	
总计[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	1 083.70	1.00	

生物法制乙醇单元生产成本

耗有效气量/[kNm ³ (CO+H ₂)·t ⁻¹]	3.1~3.4		
有效气价格/[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	1 083.70		
耗有效气成本/(元·t ⁻¹)	3 360~3 685		
耗蒸汽/(t·t ⁻¹)	4.25		
蒸汽价格/(元·t ⁻¹)	50.00		
耗蒸汽成本/(元·t ⁻¹)	212.50		
耗电/(kW·h)	415		
电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.52		
耗电成本/(元·t ⁻¹)	215.80		
循环水成本/(元·t ⁻¹)	36.00		循环水处理费用按 1 元/t 计
新鲜水成本/(元·t ⁻¹)	8.38		新鲜水按 2.5 元/t 计
废水处理成本/(元·t ⁻¹)	34.50		废水处理费用按 10 元/t 计
总计/(元·t ⁻¹)	3 867~4 192		

由表 2 可知,用 UGI 生产乙醇合成气时,原料煤成本占总生产成本的 72%;直接生产成本占总生产成本的 99%。因此项目的经济性与直接生产成本相关性最强,其中以煤价的影响最大。

1.2.2 系统改造

对现有 UGI 系统进行改造,充分利旧以降低投资。仅对造气炉控系统进行改造,投资约为 1 000 万元;新增压缩机,投资为 1 000 万元。总改造费用约 2 000 万元。因直接生产成本占合成气生产成本的 99%,改造投资费用对生产成本的影响不大。

2 鲁奇气化技术

2.1 新建项目分析

2.1.1 工艺流程

鲁奇炉气化技术工艺流程如图2所示。

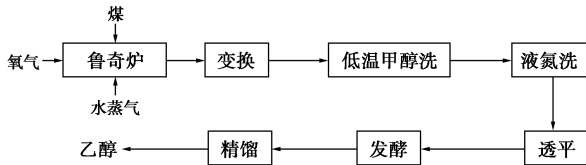


图2 鲁奇气化技术制乙醇工艺流程

原料煤经鲁奇炉气化后生成压力4.0 MPa、有效气含量约66%~68%的粗合成气,通过变换工艺将H₂/CO调节为1.7~2.3,以满足生物法制乙醇的要求。变换气经过低温甲醇洗和液氮洗净化工艺将其中的H₂S、CO₂和CH₄等气体脱除,净合成气经过减压阀或透平发电压力降至0.3 MPa后,进入乙醇发酵罐进行发酵,发酵后的产品经过脱水精制获得含量99.5%以上的无水乙醇。

2.1.2 经济性分析

对于年产8万t燃料乙醇项目,气化到透平发电投资约4亿元,合成气需量31 000~34 000 m³/h。建议鲁奇炉采用1开1备(2台),合成气成本为823.85元/kNm³,乙醇生产完全成本为3 061~3 308元/t,具体计算见表3。

表3 鲁奇炉气化工艺合成气成本及发酵制乙醇成本

项目	数值	备注
比煤耗/[t·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	0.571	
原料煤价格/(元·t ⁻¹)	945.00	
原料煤成本[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	539.60	
氧气耗/[t·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	250.000	
氧气价格/(元·t ⁻¹)	0.50	
耗氧气成本[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	125.00	
蒸汽耗/[t·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	0.710	
蒸汽价格/(元·t ⁻¹)	100.00	
耗蒸汽成本[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	71.00	
吨产品电耗/[t·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	16.00	
电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.52	
吨产品耗电成本/(元·t ⁻¹)	8.32	
辅料消耗[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	1.66	
工资[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	16.40	50人,人均年工资7.5万元

折旧[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	110.87	总投资4亿,按15年计算
财务费用[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	60.00	贷款以70%计,年利息按4.9%计
管理费用[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	16.00	
总计[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	823.85	
生物法制乙醇单元生产成本		
耗有效气量/[kNm ³ (CO+H ₂)·t ⁻¹]	3.1~3.4	
合成气价格/[元·kNm ⁻³ (CO+H ₂)]	823.85	
耗合成气成本/(元·t ⁻¹)	2 554~2 801	
耗蒸汽/(t·t ⁻¹)	4.25	
蒸汽价格/(元·t ⁻¹)	50.00	
耗蒸汽成本/(元·t ⁻¹)	212.50	
耗电/(kW·h)	415	
电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.52	
耗电成本/(元·t ⁻¹)	215.80	
循环水成本/(元·t ⁻¹)	36.00	循环水处理费用按1元/t计
新鲜水成本/(元·t ⁻¹)	8.38	新鲜水按2.5元/t计
废水处理成本/(元·t ⁻¹)	34.50	废水处理费用按10元/t计
总计/(元·t ⁻¹)	3 061~3 308	

2.2 改造项目分析

对比晋煤集团旗下现有鲁奇炉生产流程,对改造合成乙醇的可行性进行分析。以天庆公司为例,天庆公司生产合成氨和天然气,原有粗合成气变换工艺分两路,均不能满足生物法制乙醇对合成气比例的要求,需要择其一进行改造。天然气路线变换程度较浅,有效气含量63.2%,H₂/CO约为3.6,经变换后CO₂升至27.7%,CH₄和N₂变化不大,改造调节幅度较小。改造前后气体组分对比见表4。

表4 改造前后不同工段气体组分对比

气源	压力/ MPa	气体组分/%						
		CO	H ₂	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ S	其他
变换前	3.8	24.5	42.4	23.3	8.9	0.3	0.4	0.2
变换后								
改造前	3.5	13.7	49.5	27.7	8.2	0.3	0.4	0.2
改造后	3.5	21.3	44.5	24.6	8.7	0.3	0.4	0.2
净化气								
改造前	3.2	21.3	77.0	1	0.3	0.4		
改造后	3.2	31.8	66.5	1	0.3	0.4		

建议采取将天然气变换工艺进行改造,进变换前按 7:3 的比例分两路,一路走粗煤气,一路进原变换,变换后两路再混合,出合成气 $H_2/CO = 2.1$, CO_2 为 24.6%, CH_4 和 H_2S 组分基本不变。变换后依次进行低温甲醇洗和液氮洗,分离出杂质气体,最后经过减压阀或透平机将压力降至 0.3 MPa,进入发酵罐进行发酵制得粗乙醇,后经过精馏、脱水获得含量 99.5% 以上的无水乙醇。

若采用透平发电,透平机输出功率约 4 000 kW,年发电量约 32 000 MW·h,每年可节约标准煤 9 600 t。

3 航天炉气化技术

新型的干粉煤气化工艺是当前主流的制气方式,以航天炉为例,采用该技术制取合成气以满足生物法制乙醇的要求,其工艺流程如图 3 所示。

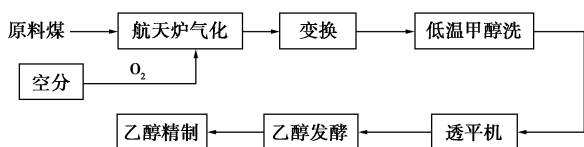


图 3 航天炉气化技术制乙醇工艺流程

原料煤经航天炉气化后生成压力 4.0 MPa、有效气含量约 90% 的粗合成气,合成气通过变换工艺调节 H_2/CO ,以满足生物法制乙醇的要求。变换气经过低温甲醇洗将其中的 CO_2 、 H_2S 等气体脱除后,通过透平机将压力降至 0.3 MPa 进入乙醇发酵罐进行发酵,发酵后的产品经过脱水精制获得含量 99.5% 以上的无水乙醇。

3.1 新建项目

对于单台 750 t/d 的航天炉,有效气量约 50 000 Nm^3/h ,对应约 12 万 t/a 的乙醇规模,其项目投资约 10 亿元。测算其完全成本约 3 200 元/t,如表 5 所示。

表 5 新建航天炉气化技术制合成气成本及发酵制乙醇成本

项目	数值	备注
可变成本/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	699.25	
原料煤成本/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	427.05	
耗氧气成本/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	190.00	
吨产品耗电成本/(元· t^{-1})	57.20	
辅料消耗/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	25.00	

固定成本/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	317.50	
工资/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	12.50	
折旧/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	160.00	
财务费用/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	140.00	投资 10 亿元,按照 70% 贷款 4.9% 年息计算
管理费用/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	5.00	
合计	826.75	

生物法制乙醇单元生产成本

耗有效气量/[$kNm^3(CO+H_2) \cdot t^{-1}$]	3.1~3.4	
合成气价格/[元· $kNm^{-3}(CO+H_2)$]	826.75	
耗合成气成本/(元· t^{-1})	2 560~2 810	
耗蒸汽/($t \cdot t^{-1}$)	4.25	
燃料煤价格/(元· t^{-1})	50.00	
耗蒸汽成本/(元· t^{-1})	212.50	
耗电/($kW \cdot h$)	415	
电价/(元· $kW^{-1} \cdot h^{-1}$)	0.52	
耗电成本/(元· t^{-1})	215.80	
循环水成本/(元· t^{-1})	36.00	循环水处理费用按 1 元/t 计
新鲜水成本/(元· t^{-1})	8.38	新鲜水按 2.5 元/t 计
废水处理成本/(元· t^{-1})	34.50	废水处理费用按 10 元/t 计
总计/(元· t^{-1})	3 070~3 320	

3.2 改造项目

若在现有航天炉装置上进行改造,对于生产甲醇的工艺,由于其变换后 H_2/CO 为 2,因此仅需将气体从低温甲醇洗之后引出,降压后即可进入发酵系统生产乙醇;对于生产合成氨的工艺,由于其变换反应的程度较深,不能满足 H_2/CO 为 2 的要求,因此需将进入变换的气体分为两股,一股为变换气,约 50%,进变换工段进行变换反应,另一股为非变换气,两股气体混合后经低温甲醇洗工段净化、降压后进入乙醇发酵系统。

为完成上述改造内容,除对部分管路进行调整外,仅需新增透平机和生物制乙醇等设备。

4 结语

通过分析可知,3 种气化技术的合成气经生物

发酵法制乙醇技术上都是可行的。UGI 气化技术具有投资低、工艺流程短等优点,但是由于气化炉本身的消耗高,再加上高煤价等因素,使合成气的成本相对较高,与其他两种气化技术相比,不具有明显的优势。鲁奇气化技术的投资低于航天炉气化技术,合成气成本与航天炉气化技术差不多,同时可以拓展晋煤集团的碎煤出路。航天炉技术投资最高,但单炉气化规模大、占地面积较小,适合大规模生产。实际应用中,可以根据不同的需求选择适合的气化技术。

参考文献

- [1] 曹国庆,曹东学,黄顺贤.乙醇汽油推广政策分析及炼厂应对建议[J].石油石化绿色低碳,2019,4(3):1-4.
- [2] 第一财经网.千万吨需求缺口何来? 央企加速布局燃料乙醇[OL]. 2019-10-23. <http://news.sina.com.cn/o/2019-10-23/doc-iicezrr4469803.shtml>
- [3] 娄岩.中国乙醇汽油和燃料乙醇市场供需现状[J].国际石油经济,2019,27(7):68-74.
- [4] 田守国.深入分析 UGI 煤气炉和造气系统技术改造概况及发展方向(下)[J].全国造气技术通讯,2009,17(6):1-10.
- [5] 田守国.深入分析 UGI 煤气炉和造气系统技术改造概况及发展方向(上)[J].全国造气技术通讯,2009,17(5):3-7.
- [6] 王云杰.关于 U-Gas 气化技术的认识[J].中氮肥,2015,(2):7-10.
- [7] 杨振江.中小型氮肥装置采用 U-GAS 加压气化炉替代常压固定床气化炉节能改造的经济性分析[J].中氮肥,2016,(6):5-9.
- [8] 田守国.论下一步的造气技改方向(中)[J].全国造气技术通讯,2004,12(6):1-3.
- [9] 楚可嘉,潘玉芹.适应晋城无烟块煤气化技术的分析与研究[J].煤炭技术,2018,37(6):294-296.
- [10] 王宏涛,吕建宁,马新宾.煤制乙醇技术的研究及开发应用进展[J].煤化工,2014,42(4):3-8.
- [11] 张敏.晋城无烟煤鲁奇气化技术路线选择的探讨[J].煤炭技术,2017,36(10):293-294.
- [12] 张敏.无烟煤鲁奇气化制工业燃料气技术经济性评价[J].应用化工,2019,48(S1):219-221.
- [13] 孙永才,刘伟.航天炉粉煤加压气化技术浅析[J].中氮肥,2010,(2):18-20.
- [14] 杜国强,曹志斌.天溪煤制油公司 30 万 t/a 甲醇项目改造及效果[J].化肥设计,2017,55(6):42-45.
- [15] 贺娜,邵效云.煤制合成气生物发酵生产燃料乙醇技术进展[J].化工工艺与工程,2018,41(6):142-144.
- [16] 龙逢兴,吴沐霜,赵尧.煤基燃料乙醇技术工业化进展及前景展望[J].四川化工,2017,20(5):9-14. ■

(上接第 278 页)

气压缩机二段出口换热器 E-1320 的换热效率也有了明显的提升。同样,因乙烯装置负荷调整最低压差下降至 34 kPa,3 月压差 45 kPa。

3.3 注洗油后聚合物排出情况

从裂解气压缩机四段换热器冲洗下来的聚合物硬度较大,类似焦粉,不溶于水和洗油。

将裂解气压缩机二段换热器排出的垢物样品分别加入洗油、洗油和阻聚剂浸泡 24 h 后发现,单独加入洗油后垢样基本分散和溶解;加入洗油和阻聚剂后,垢样完全分散和溶解。裂解气压缩机三段换热器取得的垢样与二段换热器取得样品大体相同,实验结果基本一致。

4 结论

(1)从裂解气压缩机段间换热器处理情况和取得的效果来看,改变冲洗油注入位置,直接在换热器入口增加冲洗油线可以有效地将附着在换热器上的

聚合物冲洗下来,从而改善了裂解气压缩机运行状况,避免了因乙烯装置停工带来的巨大经济损失。

(2)裂解气压缩机的冲洗油一般使用裂解汽油,但含有苯乙烯等易聚物质;更换为芳烃碳八可以减少聚合物的产生。

(3)纳尔科公司的阻聚剂和分散剂对解决本公司裂解气压缩机聚合物效果较好。

参考文献

- [1] 凌通.压缩机缓蚀剂新型注入方式的应用[J].乙烯工业,2017,29(1):26-31.
- [2] Sheri S.Ethylene plant cracker gas compressor fouling[C]//AICHE Spring National Meeting, EPC Conference, 2006.
- [3] 杨思思.乙烯装置裂解气压缩机级间结焦的诱因、机理及其对策[J].化工设备与管道,2018,55(1):43-48.
- [4] 盛在行.乙烯装置裂解气压缩机级间注水技术[J].石油化工设备技术,2009,30(4):16-18.
- [5] 李海涛.裂解气压缩机密封及平衡管法兰腐蚀泄漏分析[J].广州化工,2013,9(1):184-187. ■