

煤基多联产中两种煤气化工艺的模拟与性能比较

刘传亮 朱志劼 范雪飞 陈洪溪 危 奇

(上海发电设备成套设计研究院,上海 200240)

摘要:以 Aspen Plus 为模拟工具,采用 Gibbs 最小自由能反应平衡方法建立了煤气化反应模型,分别模拟了水煤浆气流床的代表 Texaco 气化工艺、粉煤气流床的代表 Shell 气化工艺,分析了合成气成分、热值、冷煤气效率、氧耗率、煤耗率等性能指标,探讨了水煤浆浓度、氧煤比、煤种对气化性能的影响,并对两种气化工艺的模拟结果进行了比较。结果表明:在煤的成浆性允许范围内,提高水煤浆浓度有利于提高合成气有效气体含量,可获得更高冷煤气效率;在保证碳转化率的前提下,应尽量降低氧煤比,获得更优气化性能;挥发分高、灰分低的煤种,气化性能更好;粉煤气化的氧耗率、煤耗率低于水煤浆气化,其气化性能更为先进。

关键词:煤气化; 气化性能; 多联产; Aspen Plus 软件; 模拟

中图分类号: TQ536; TD849 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2014)02-0064-05

Simulation and performance comparison of two kinds of coal gasification process in coal based poly-generation

LIU Chuanliang, ZHU Zhijie, FAN Xuefei, CHEN Hongxi, WEI Qi

(Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China)

Abstract: Taking Aspen Plus as simulation tool, build coal gasification model with Gibbs minimum free energy equilibrium method. Simulate the Texaco process and Shell process, the former is presented by coal water mixture entrained-flow bed, the latter is presented by fine coal entrained-flow bed. Analyse the synthesis gas composition, calorific value, cold gas efficiency, oxygen consumption rate, coal consumption rate and other performances. Investigate the influence of coal water mixture concentration, ratio of oxygen to coal, coal types on gasification performance. The results show that, within the slurryability of coal, the increase of coal water mixture concentration is beneficial for the improvement of effective gas content in synthesis gas and cold gas efficiency. On premise of high carbon conversion rate, the reduction of ratio of oxygen to coal can improve the gasification efficiency. The coal with high volatile and low ash is beneficial for gasification. Comparing with the coal water mixture gasification, the pulverized coal gasification has more advantages, such as lower oxygen and coal consumption rate.

Key words: coal gasification; gasification performance; poly-generation; Aspen Plus software; simulation

0 引 言

煤气化多联产是实现煤清洁利用的最有效途径之一,大型煤气化技术是多联产系统的核心技术^[1-2]。气流床气化炉气化温度、压力高、气化强度高、负荷大,煤种适应范围广,是目前煤气化技术发展的主流^[3-5]。笔者研究对象是煤气化多联产系统

中获得工业化应用最多的两种典型气化工艺,即以水煤浆为原料的 Texaco 气流床气化技术和以干粉煤为原料的 Shell 气流床气化技术^[6-7]。

煤气化工艺是在一定温度、压力下,以煤为原料,以空气或富氧(纯氧)、水蒸气等为气化介质,使煤经过部分氧化和还原反应,将其中所含碳、氢等物质转化为 CO、H₂、CH₄ 等可燃组分为主的气体产物

收稿日期: 2013-12-31; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.02.017

基金项目: 上海市科委重大科技攻关项目(08DZ1200103)

作者简介: 刘传亮(1984—),男,江苏宿迁人,工程师,主要从事电站系统、煤气化多联产及 IGCC 方面的研究。E-mail: liuchuanliang@gmail.com

引用格式: 刘传亮,朱志劼,范雪飞,等.煤基多联产中两种煤气化工艺的模拟与性能比较[J].洁净煤技术,2014,20(2):64-68,72.

LIU Chuanliang, ZHU Zhijie, FAN Xuefei et al. Simulation and performance comparison of two kinds of coal gasification process in coal based poly-generation [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(2): 64-68, 72.

的多相反应过程^[8]。煤气化为复杂的物理化学反应过程,在高温、高压下进行,受原料成分、气化介质、反应条件等诸多因素影响,实验研究难度大、周期长、成本高。Aspen plus 全世界公认的标准大型流程模拟软件。Aspen Plus 软件提供包括 50 多种严格模型组成的模型库及 5000 多种纯化合物的物性数据库,可以设定物质流、功流、热流;进行质量和能量平衡以及相态、化学平衡、反应动力学计算;交互地改变设定可进行工况分析;通过物性分析,可获得物流组分、温度、压力及热负荷等参数^[9-11]。借助 Aspen Plus 的强大模拟功能,建立气化反应模型,模拟气化过程并分析多种运行参数对气化性能的影响,为多联产系统中的煤气化提供数据参考。

1 模型的建立

1.1 气化反应模型

模拟气化过程一般有两种模型方法:化学动力学模型和反应平衡模型。动力学模型以气化系统的反应动力学为基础,能真实地反映炉内的气化过程,但建模过程比较复杂,通用性也较差。平衡模型以反应热力学为基础,相对比较简单,并且具有较好的通用性,对碳转化率高、反应接近平衡的工况预测相对较好^[12-13]。根据气流床气化炉碳转化率高、高温下反应接近平衡的特征,笔者选择了反应平衡模型用于模拟,并应用其中的非化学计量的 Gibbs 自由能最小化方法,不需再设定气化炉内部的流动、传热、传质以及气化反应的过程。

以下为利用 Aspen Plus 软件建立煤气化炉模型时的假设条件:①气化炉内的气相反应速度都很快,且达到了平衡,参数为稳态;②气化炉内各处压力、温度相同,无梯度;③气化炉中物料颗粒均匀,无差异;④气化剂与煤的混合在炉内瞬间完成;⑤煤中 H、O、N、S 全部转为气相,仅 C 随条件的变化不完全转化;⑥原煤中灰分为惰性物质,不参与气化反应。

Texaco 水煤浆气化炉计算模型主要包括水煤浆供应及制备部分、水煤浆加压输送部分、氧气供应 COMP 模块、气化炉 GASIFIER 模块。其中水煤浆制备系统由 MIXER、MIX 1 MILL 1、MILL2、SCREEN 等模块构成,实现制备符合浓度要求和粒度要求的水煤浆。RSTOIC 模块是物料转化模块,可消除颗粒粒径的差异。PUMP 为水煤浆加压泵,将水煤浆加压至设定压力;COM 为物料分解模块,其作用是将煤分解成单元素分子和灰分并将裂解热导入后续

气化模块。COMP 为氧气加压模块。GASIFIER 模块是 Aspen Plus 中的 RGibbs 平衡反应器模型,此模型是通过 Gibbs 自由能最小实现化学和相平衡,GASIFIER 模块求得气化炉出口煤气温度与成分。

Shell 气化炉计算模型包括干煤粉制备及输送部分、氧气供应 COMP 模块、水蒸气供应部分、气化炉 GASIFIER 模块。其中干煤粉制备系统由 MIXER、CRUSHER、SCREEN 等模块构成,实现制备符合粒度要求的干煤粉。RSTOIC 模块、COMB 模块、COMP 模块、GASIFIER 模块的设定与水煤浆气化工艺相同。

1.2 气化炉的设定参数

水煤浆气化反应的物料输入参数设定为:煤 69.06 kg/h,水 31.13 kg/h(即水煤浆浓度 69%),水煤浆粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$,95% 纯度 O_2 (O_2 95%, N_2 3.5%, Ar 1.5%)。粉煤气化炉原料为经过干燥的煤粉,水分 2%,采用 N_2 输送,输送煤粉的 N_2 为 7.11 t/h。气化反应的物料输入参数设定:煤 62.5 kg/h,气化用水温度 235.9 °C,压力 13.33 MPa,流量 7.11 t/h(汽煤比 0.11), O_2 流量 57.51 t/h (O_2 95%, N_2 3.5%, Ar 1.5%)。其他运行参数见表 1。

表 1 气化炉的计算设定参数

项目	Texaco 气化炉	Shell 气化炉
气化炉压力/MPa	2.65	2.69
气化炉温度/°C	1370	1500
O_2 纯度	95%	95%
空分来氧压力/MPa	0.26	0.26
入气化炉氧压/MPa	3.36	3.50
氧煤比/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.96	0.92
煤耗量/($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)	1657	1500
水煤浆浓度/蒸汽煤比	0.69	0.11

1.3 气化煤种分析

两种气化炉模拟计算中采用多种煤种,其中水煤浆气化物料即为原煤;粉煤气化物料为经过干燥的煤粉,水分控制为 2%。各煤种的工业分析和元素分析见表 2 和表 3。

2 模拟结果分析

2.1 气化性能指标

通常,可用以下技术特性指标衡量气化炉气化性能的好坏^[14]。①碳转化率:是指煤中所含的碳元素在气化炉中转化成为煤气成分中含碳量的百分比;②冷煤气效率 η_1 : $\eta_1 =$ 气化生成的煤气的化学

能/气化用煤的化学能(以低位发热量为计算基准);③煤耗率:产生单位数量有效气体CO与H₂所消耗煤的质量,kg/1000 m³(CO+H₂);④氧耗率:产

生单位数量有效气体CO与H₂所消耗的氧气量,m³/1000 m³(CO+H₂);⑤所产煤气的容积组成及其低位或高位发热量。

表2 煤的工业分析

项目	王庄	皖南	晋城	岳阳1	岳阳2	贝斯沃特	纽兰兹	艾瓦拉
M _{ar} / %	5.7	1.8	9.2	8.5	3.9	10.0	8.5	7.0
FC _{ar} / %	63.2	75.7	65.7	71.2	66.7	47.1	52.2	57.3
V _{ar} / %	12.7	3.2	5.9	5.5	10.4	30.5	24.8	19.7
A _{ar} / %	18.4	19.3	19.2	14.8	19.0	12.5	14.4	16.0
Q _{net,ar} / (kJ·kg ⁻¹)	26475	22718	23731	25060	25939	25143	25574	26497

表3 煤的元素分析 %

项目	王庄	皖南	晋城	岳阳1	岳阳2	贝斯沃特	纽兰兹	艾瓦拉
A _{ar}	19.51	19.65	21.15	16.17	19.77	13.87	15.62	17.20
C _{ar}	72.01	76.04	72.25	77.43	72.47	71.53	71.35	72.90
H _{ar}	3.48	1.20	2.44	2.77	3.75	4.43	4.15	4.10
N _{ar}	1.26	0.69	0.91	0.84	1.16	1.54	1.55	1.30
Cl _{ar}	0.06	0.12	0.06	0.01	0.03	0.20	0.02	0
S _{ar}	0.32	0.53	0.40	0.65	0.17	0.94	0.46	0.40
O _{ar}	3.36	1.77	2.79	2.13	2.65	7.49	6.85	4.10

2.2 水煤浆浓度对气化性能的影响

在实际工业应用中,水煤浆浓度是重要操作参数。水煤浆浓度定义为煤的质量/(煤的质量+水的质量),通过保持煤和O₂的流量不变,改变水的流量,进而改变水煤浆浓度。在保持氧煤比为0.96,碳转化率为95%,气化压力2.65 MPa等操作参数不变的前提下,以同一煤为计算对象,研究水煤浆浓度由61%变化到69%时的气化性能。

图1为不同水煤浆浓度下的气化性能。

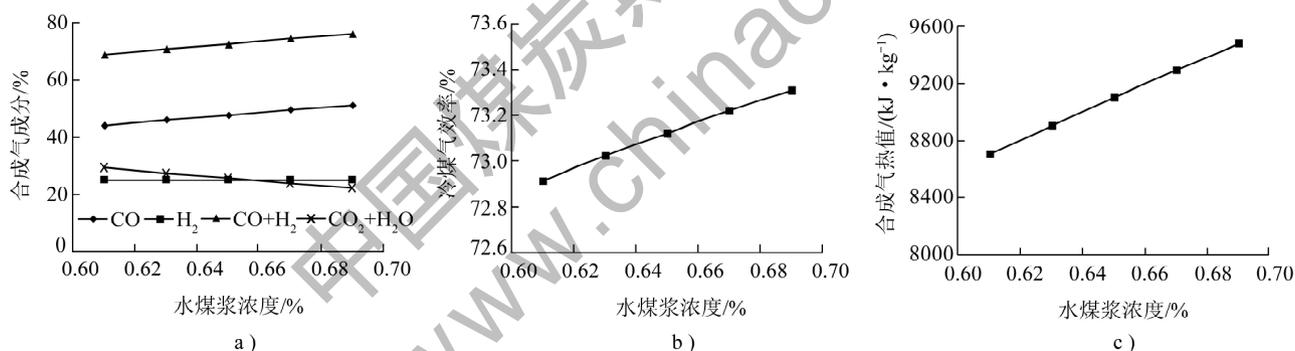


图1 不同水煤浆浓度下的气化性能

从图1a)可以看出,随着水煤浆浓度的增加,CO含量增加,H₂含量基本不变(稍有降低),有效气体CO+H₂总量随水煤浆浓度增加而提高,从69%增加到76%;而合成气中的水蒸气和CO₂含量不断降低,从29%降低到22%。主要原因为:水煤浆浓度增大,进入气化炉的水分减少,水分气化潜热对燃烧反应的热量需求降低,使得完全燃烧消耗的碳随之减少,因此CO₂体积分数从10.4%降低到8.7%。随着水煤浆浓度的增加,合成气中CO与H₂体积比不断提高,主要是因为燃烧反应消耗的碳减少,减少了CO₂的生成,产生了更多CO,使CO含量有所提高。

由图1b)可知,随着水煤浆浓度的增加,冷煤气效率不断提高,这主要得益于合成气热值的不断提

高。由图1c)可知,随着水煤浆浓度的增加,合成气的热值不断提高,这主要是因为合成气中的有效气体CO+H₂含量不断增加。因此,在保证气化炉运行参数符合要求的前提下,在煤的成浆性允许范围内,应尽可能提高水煤浆浓度,以提高合成气中有效气含量,获得更高的合成气热值和更高的冷煤气效率。

2.3 氧煤比对气化性能的影响

对于水煤浆气化炉,以同一煤为计算对象,保持气化温度为1370℃、气化压力为2.65 MPa、煤耗为69.06 t/h、水煤浆浓度为69%等操作参数不变,通过改变O₂的流量,达到改变氧煤比的目的。计算了氧煤比由0.92 kg/kg变化到1.0 kg/kg时的合成气成分。对于粉煤气化炉,保持气化温度1500℃、气

化压力 2.76 MPa、煤耗 62.5 t/h、蒸汽耗 0.11 kg/kg 等操作参数不变,通过改变 O_2 流量,计算了氧煤比由 0.88 kg/kg 变化到 0.96 kg/kg 时的合成气成分。图 2 为不同氧煤比对合成气成分的影响。

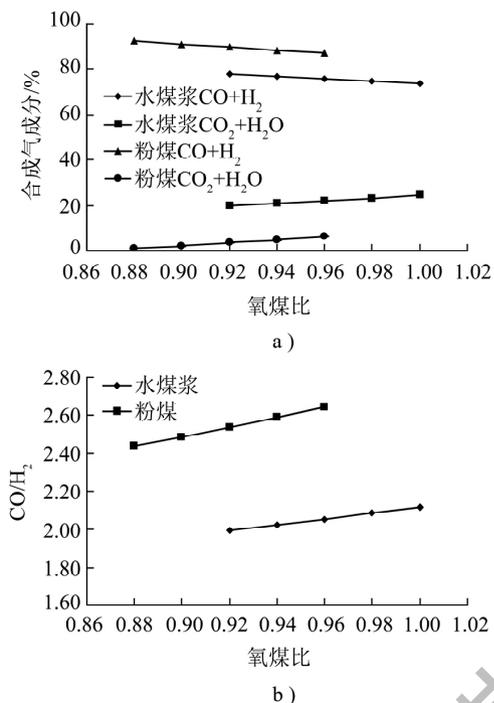


图 2 不同氧煤比对合成气成分的影响

由图 2a) 可知,随着氧煤比的增加,两种气化炉的合成气有效成分 $CO + H_2$ 相对含量降低,而合成气中 $CO_2 + H_2O$ (水蒸气) 含量有所增加。这是因为随着 O_2 流量增大,同样数量的煤获得了更多 O_2 ,超过了气化反应所需 O_2 的化学当量比,导致燃烧反应增加,部分 CO 和 H_2 被多余 O_2 烧掉,使合成气中 $CO_2 + H_2O$ (水蒸气) 含量有所增加。由图 2b) 可知,随着氧煤比的增加,合成气的有效成分 CO 与 H_2 比例增加, O_2 过量时, CO 与 H_2 含量均随氧煤比的增加而减少,但 H_2 含量减少的速度更快,这说明合成气中的 H_2 相对更容易被过量 O_2 氧化消耗。另外,

随着氧煤比的增加,合成气的热值与冷煤气效率也随之降低。

2.4 煤种对气化性能的影响

2.4.1 煤种对水煤浆炉气化性能的影响

以晋城、岳阳 1、岳阳 2、贝斯沃特、纽兰兹这 5 种煤为计算对象,研究不同煤种下的水煤浆气化性能。煤种变化时,保持气化温度为 1370 °C、气化压力为 2.65 MPa、煤耗为 69.06 t/h、水煤浆浓度为 69% 等操作参数不变。

图 3 为两种气化炉不同煤种下的气化性能。对于水煤浆气化炉,煤种合成气中有效气体 $CO + H_2$ 含量较为接近,含量在 66.1% ~ 67.9%。由图 3a) 可知,煤种变化时,冷煤气效率在 71% ~ 74%;由图 3b)、c) 可知,煤种贝斯沃特和纽兰兹两种煤的氧耗率均较低,煤种岳阳 2、贝斯沃特和纽兰兹 3 种煤的煤耗率均较低。通过分析煤的成分发现,煤耗较低的 3 种煤的挥发分相对较高,而灰分较低,这些都有利于水煤浆气化。综合考虑冷煤气效率、氧耗率、煤耗率性能之后,纽兰兹煤的气化性能相对更好。

此外,不同煤种具有不同的成浆性,在 Aspen 模拟计算中,并没有考虑这一因素。在实际工业应用中,不同煤种制备的水煤浆浓度不同,其雾化程度的好坏必将对气化性能产生影响。

2.4.2 煤种对粉煤炉气化性能的影响

以上述 5 种煤为计算对象,研究不同煤种下的粉煤气化性能。煤种变化时,保持气化温度为 1500 °C、气化压力为 2.76 MPa、煤耗为 62.5 t/h、蒸汽耗为 0.11 kg/kg 等操作参数不变。

在合成气中有效气体 $CO + H_2$ 含量接近的基础上,比较煤种对气化性能的影响。前 4 种煤的有效气体 $CO + H_2$ 含量非常接近,冷煤气效率在 78% ~ 84%;而后两种煤的有效气体成分含量较低,其对应的冷煤气效率也较低。

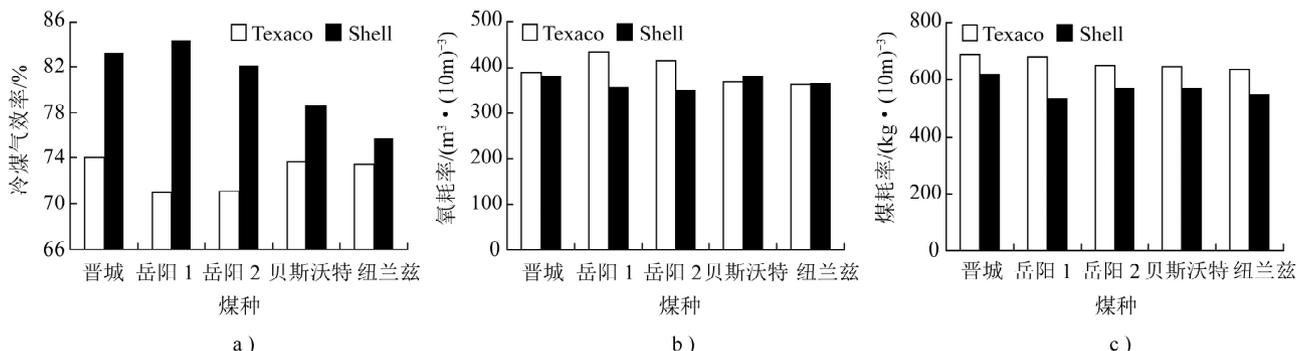


图 3 两种气化炉不同煤种下的气化性能

由图3可知,岳阳1和岳阳2煤样的氧耗率均较低,考虑煤耗率性能之后,岳阳1煤的气化性能最好。分析煤的成分发现,岳阳1煤的灰分相对较低,为14.8%,比其他几种煤低4%~5%。由此可见,采用低灰分煤种,有利于提高气化性能。另外,对干粉气化炉来说,煤粉在进入气化炉前需要进行干燥,以控制水分低于某一数值,这需要消耗一定能量。因此,采用低水分煤,有利于减少干燥能耗。

3 两种气化工工艺的性能比较

两种气化炉处理岳阳2时的气化性能比较见表4。针对不同煤种,进一步比较两种气化炉的冷煤气效率、氧耗率、煤耗率等重要指标。

表4 Texaco 气化炉与 Shell 气化炉性能对比

特性指标	Texaco 气化炉	Shell 气化炉	
煤	69% 水煤浆, 滴径 $\leq 100 \mu\text{m}$	水分2%的干燥煤粉, 粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$	
氧化剂	95% O_2 + 3.5% N_2 + 1.5% Ar	95% O_2 + 3.5% N_2 + 1.5% Ar	
合成气成分	CO	43.57	64.05
	H_2	24.26	26.90
	H_2S	0.04	0.05
	CO_2	10.91	1.05
	H_2O	19.28	1.63
	N_2	1.56	5.93
碳转化率/%	97	99	
冷煤气效率/%	71.1	82.1	
水蒸气消耗率/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0	0.11	
氧耗率/ ($\text{m}^3 \cdot (10 \text{ m})^{-3}$)	416	348	
煤耗率/ ($\text{kg} \cdot (10 \text{ m})^{-3}$)	651	580	

从表4、图3可以看出:

1) 有效气体。Texaco 气化炉的有效气体为 $\text{CO} + \text{H}_2 \approx 68\%$; Shell 气化炉所产生的合成煤气中,有效气体 $\text{CO} + \text{H}_2 > 90\%$ 。因此,干煤气化炉在有效气体含量方面优于水煤浆气化炉。

2) 无效气体。Shell 气化炉的无效气体 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 含量近3%;而 Texaco 气化炉合成气中,无效气体 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 含量高达30%,且水蒸气就有近20%。Texaco 气化炉必须合理地配置显热回收过程,严防水蒸气凝结潜热的损失。

3) 碳转化率。Texaco 气化炉的碳转化率一般略低于 Shell 炉,主要因为干粉炉的气化温度较高,有利于碳转化的提高。

4) 冷煤气效率。Shell 气化炉的冷煤气效率82%,比 Texaco 的71%高很多,冷煤气效率高的合成气用于多联产及 IGCC 时可提高供电效率。

5) 氧耗率。Shell 气化炉采用1号、2号、3号煤时的氧耗率要低于 Texaco 炉,而采用4号、5号煤时,两种气化炉的耗氧基本接近。

6) 煤耗率。Shell 气化炉的煤耗率比 Texaco 炉低得多,不同煤种时约低10%~20%。

当煤种相同时,Shell 干粉气化炉在碳转化率、冷煤气效率、氧耗率和煤耗率方面均优于 Texaco 气化炉。因而,从纯粹满足发电过程要求的角度看,Shell 气化炉用来生产合成气要优于 Texaco 炉。

虽然,干法供煤的 Shell 气化炉在碳转化率、冷煤气效率、氧耗率等气化性能方面优于 Texaco 炉,但其结构和运行方面,也有一些弊端^[14]: ①煤在进入 Shell 气化炉之前,必须经过预先干燥处理,使烟煤水分降至2%,或者使褐煤水分低于6%。为此需要设置一套比较复杂的煤干燥、磨碎、储存和输送系统;另外,还需要配置一套高纯度(99.9%)的 N_2 制备和增压系统,用来输送干燥煤粉^[15]。这将导致系统复杂化,并增加功耗与投资。②Shell 气化炉采用4个对喷式烧嘴,其煤粉和 O_2 、 N_2 的输送与调节控制系统要比 Texaco 气化炉复杂得多。

4 结 论

以 Aspen Plus 建立了煤气化反应模型,分别模拟并比较了两种典型的煤气化工艺的气化性能,分析了水煤浆浓度、氧煤比、煤种对气化性能的影响。

1) 在一定范围内,提高水煤浆浓度可提高合成气中有效气含量,获得更高的冷煤气效率;

2) 在保证碳转化率的前提下,应尽量降低氧煤比,可获得更优的气化性能;

3) 挥发分高、灰分低的煤种,气化性能更好;

4) 粉煤气化的氧耗率、煤耗率低于水煤浆气化,冷煤气效率更高,其气化性能更为先进。

参考文献:

- [1] 倪维斗,李政.以煤气化为核心的多联产能源系统[J].煤化工,2003(1):3-10.

(下转第72页)

分CO和CO₂平均体积分数均明显降低,分别由改造前的5.20%和3.79%降至改造后的0.78%和

0.85%,CO单程转化率平均值由40%增至78%,平均每天增加甲醇产量29t,达到预期目的。

表8 新增合成塔后系统运行效果

%

日期	原料气(合成塔进口)				循环气(合成塔出口)				CO转化率	产量/(t·d ⁻¹)
	φ(CO)	φ(N ₂)	φ(CH ₄)	φ(CO ₂)	φ(CO)	φ(N ₂)	φ(CH ₄)	φ(CO ₂)		
2012-09-01	3.21	7.90	5.55	1.53	0.83	9.25	6.44	0.92	78	775
2012-09-11	3.18	9.00	5.62	1.50	0.84	10.32	6.40	0.90	77	764
2012-09-12	3.02	9.35	5.33	1.45	0.75	10.72	6.09	0.87	78	770
2012-09-13	2.92	8.89	5.71	1.34	0.70	10.30	6.47	0.72	79	768
平均	3.08	8.79	5.55	1.46	0.78	10.15	6.35	0.85	78	769

4 结 语

焦炉煤气制甲醇工艺改造后,甲醇产量明显提高。增加横管式煤气冷却器后,夏季高温时焦炉煤气温度得到有效控制,有效降低了温度对煤气体积的影响。对焦炉气压缩机进行扩缸改造,夏季焦炉气压缩机打气量由142.29万m³/d增至152.23万m³/d,平均每天增加打气量约10万m³,夏季甲醇产量提高50.33t/d。新增合成塔一台,采用与老合成塔并联的方式进行连接,改造后出口气体中有效成分CO、CO₂单程转化率明显提高,驰放气中碳含量明显降低,平均每天增加甲醇产量29t。

参考文献:

- [1] 陈贵锋,俞珠峰,成玉琪.中国煤炭加工技术发展的思考[J]. 洁净煤技术 2001,7(1):9-13.
- [2] 谭静,王乃继,肖翠微,等.煤制天然气镍基催化剂的研究进展[J]. 洁净煤技术 2011,17(2):43-53.
- [3] 谷红伟,邢秀云.煤制天然气展望[J]. 煤质技术 2011(3):50-53.
- [4] 杨明.煤制天然气现状及发展建议[J]. 洁净煤技术 2011,

17(3):3-5,97.

- [5] 蔡东方,王黎,徐静,等.煤制天然气煤气化技术的研究现状及分析[J]. 洁净煤技术 2011,17(5):44-47.
- [6] 刘思明.关于我国煤气化技术进展和升级发展方向的思考[J]. 化学工业 2013,31(8):7-19.
- [7] 王育红.利用焦炉煤气作合成气生产甲醇的探析[J]. 河南冶金 2005,13(5):19-20.
- [8] 汪家铭.利用焦炉煤气制取氮肥和甲醇概况[J]. 小氮肥设计技术 2006,27(1):18-19.
- [9] 李昆瑜.CO₂的应用及产品开发生[J]. 天然气化工,1996,21(3):40-43.
- [10] 吴昊.应对二氧化碳浓度上升问题的研究:CO₂的捕获、储存与利用[J]. 中国安全科学学报 2008,18(8):5-11.
- [11] 薛祖源.甲醇生产发展机遇和潜在市场风险探讨[J]. 现代化工 2008,28(8):1-9.
- [12] 苏凤林,陈艳春,刘丽涵.综合开发利用二氧化碳变废为宝减少污染[J]. 黑龙江环境通报 2007,31(4):93-95.
- [13] 张晶,孙显锋,乔婧,等.合成气制芳烃研究进展[J]. 洁净煤技术 2013,19(5):60-62,67.
- [14] 陈艳丽,陈慧勇.甲醇化工技术概述[J]. 山东化工 2007,36(3):28-30.
- [15] 鲁东霞.以煤制甲醇的清洁生产技术[J]. 中国资源综合利用 2005(11):8-11.

(上接第68页)

- [2] 苗真勇,韩甲业.美国煤气化工艺现状及对中国气化技术的启示[J]. 煤炭工程 2007(10):97-99.
- [3] 王辅臣,于广锁,龚欣,等.大型煤气化技术的研究与发展[J]. 化工进展 2009,28(2):173-180.
- [4] 许世森,张东亮,任永强.大规模煤气化技术[M]. 北京:化学工业出版社 2006.
- [5] 武利军,周静,刘路,等.煤气化技术进展[J]. 洁净煤技术 2002,8(1):30-34.
- [6] 汪家铭.Shell煤气化技术及其在我国的应用[J]. 煤炭加工与综合利用 2007(2):37-39.
- [7] 唐宏青.煤化工工艺技术评述及展望[J]. 燃料化学学报, 2001,29(1):1-5.
- [8] 陈鹏.中国煤炭性质、分类和利用[M].2版.北京:化学工业出版社 2006.

- [9] 刘钧,李建伟,赵晓,等.煤化工多联产系统中的煤气化过程模拟[J]. 化学工程师 2009,160(1):21-23.
- [10] 张宗飞,汤连英,吕庆元,等.基于Aspen Plus的粉煤气化模拟[J]. 化肥设计 16(3):14-18.
- [11] 王辅臣,龚欣,刘海峰,等.Shell粉煤气化炉的分析与模拟[J]. 大氮肥 2000,25(6):381-384.
- [12] 吴学成,王勤辉,骆仲决,等.气化参数影响气流床的模拟研究(I)——模型建立及验证[J]. 浙江大学学报:工学版, 2004,38(10):1361-1366.
- [13] 代正华,龚欣,王辅臣,等.气流床粉煤气化的Gibbs自由能最小化模拟[J]. 燃料化学学报 2005,32(2):129-133.
- [14] 焦树建.干法供煤和水煤浆供煤的气化炉性能之比较[J]. 燃气轮机技术 2000,13(2):2-7.
- [15] 韩梅.德士古与壳牌两种煤气化技术的比较[J]. 煤炭加工与综合利用,1999(1):15-17.