

# 天然焦 - H<sub>2</sub>O 气化反应 Aspen Plus 模拟研究

林良生<sup>1</sup> 赵长遂<sup>2</sup>

(1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 2. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 运用 Aspen Plus 软件平台对天然焦 - H<sub>2</sub>O 气化反应进行了热力学模拟计算, 研究了反应碳份额、水蒸气流量、反应温度、压力和反应气氛对天然焦气化反应煤气成份、热值的影响。结果表明, RYIELD 模块在整个模拟系统中能很好地描述天然焦“热解”过程; 水蒸气流量 1.16 kg/h 是天然焦完全气化的临界点; 增大温度和压力能有效促进气化和改善煤气的品质, 但并非越大越好, 综合考虑下, 实际运行的温度和压力宜分别在 850 ~ 1 000 °C 和 0.1 ~ 6.0 MPa 范围内选定; 不同的反应气氛下, 天然焦气化反应特性有很大差异, 在水蒸气气氛下能获得更好的煤气品质。

**关 键 词:** 天然焦; 气化; Aspen Plus; 煤气成份; 煤气热值  
中图分类号: O643; TQ517 文献标识码: A

## 引 言

天然焦是煤接触岩浆岩受热分解后的固体残余物, 热值在 18 ~ 30 MJ/kg 之间<sup>[1]</sup>, 在我国储量丰富, 华东地区的总储量就达 20 亿吨<sup>[2]</sup>。但由于其自身着火点高、热爆性等特性, 天然焦随着煤的开采而被弃置于大自然中, 造成了巨大的能源浪费和环境污染<sup>[3]</sup>。将天然焦气化是一种既能合理利用天然焦, 又能提供高热值煤气的洁净能源技术。至今, 有关天然焦的研究主要集中在其成因和表现形态上, 而有关气化反应的研究很少<sup>[4-5]</sup>, 仅庞克亮等分析了天然焦 - CO<sub>2</sub> 的气化反应特性<sup>[6]</sup>。

Aspen Plus 是一种通用的化工过程模拟、优化和设计软件, 近年来, 已在煤和生物质的燃烧、气化等领域得到了广泛的应用, 且得到许多精确的模拟结果, 即使计算结果和实际数据有所差异, 也能够反映化学变化的趋势<sup>[7]</sup>。汪洋等人采用 Gibbs 自由能最小化法建立了气流床气化炉模型<sup>[8]</sup>, 模拟了气化反应, 得到很好的结果。Aspen Plus 也是基于 Gibbs 自由能最小化法建立气化模块。因此, 本研究运用了 Aspen Plus 软件模拟了天然焦 - H<sub>2</sub>O 气化反应, 主要分析了几种因素对反应产物及煤气热值的影响, 以便得到气化反应的特性, 为今后 IGCC 等系统

的燃料供应与系统设计提供参考。

## 1 模拟对象

### 1.1 天然焦 - H<sub>2</sub>O 气化反应的 Aspen Plus 模型

为了更好地运用 Aspen Plus 软件平台模拟天然焦气化过程, 需作下列假设: (1) 天然焦的热解、气化过程稳定, 不受时间限制, 即把反应时间视为无限长; (2) 整个模拟过程中没有任何压力损失; (3) 气化剂与天然焦试样在炉内瞬间完全混合, 且混合均匀; (4) 气化炉中温度场分布均匀; (5) 天然焦中的灰分为惰性物质, 不参与反应。

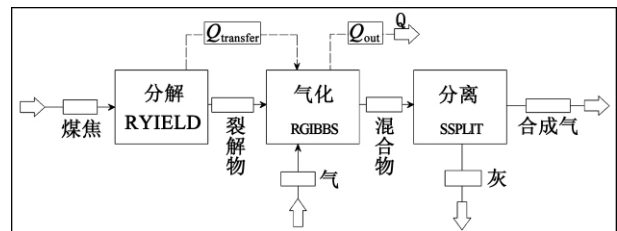


图 1 天然焦 - H<sub>2</sub>O 气化反应的模拟流程图

Fig. 1 Chart showing the flow path of simulation of a natural coke-H<sub>2</sub>O gasification reaction

反应模型主要有 3 个反应模块、1 个控制模块、6 股物流和 2 股热流组成, 流程如图 1 所示。模拟时把天然焦气化反应分成两个独立的过程: 一是天然焦的裂解过程, 采用由 Fortran 子程序来控制的收率反应器 RYIELD 模块模拟, 将天然焦裂解为单元素分子和灰分, 并把裂解热导入 RGIBBS 模块; 二是裂解产物与气化剂反应及气化产物之间的相互反应过程, 由 RGIBBS 模块模拟, 运用 Gibbs 最小自由能原理求得气化炉出口组成及热损失, 即在给定的压力、温度和系统组成条件下, 当系统的 Gibbs 自由能最小时, 化学反应处于热力平衡状态, 此时系统由热力稳定的化学组分和相组成, 最后得到粗煤气。SS-

收稿日期: 2011 - 6 - 20; 修改日期: 2011 - 11 - 10

作者简介: 林良生(1982 -), 男, 福建武平人, 苏州热工研究院有限公司工程师。

PLIT 模块用于模拟气固分离过程,将灰分从粗煤气中分离出来。图 1 中的  $Q_{transfer}$  为天然焦裂解热,  $Q_{out}$  为气化系统的热损失。

模拟样品为徐州沛城煤矿天然焦,其工业分析、元素分析及硫形态分析如表 1 所示。

表 1 天然焦的工业分析与元素分析及硫形态分析

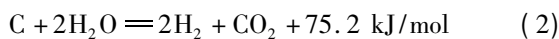
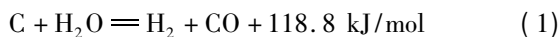
Tab. 1 Industrial elementary and sulfur morphological analysis of natural coke

工业分析 / % (ad)			元素分析 / % (ad)					硫组成 / % (S)			低位热值 / $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
M	A	V	C	H	O	N	S	Sp	Ss	So	
0.81	16.15	9.05	77.33	1.65	2.67	0.91	0.48	0.2	0.12	0.16	26.59

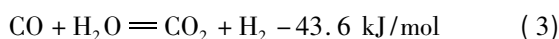
### 1.2 焦碳 - $\text{H}_2\text{O}$ 气化机理

天然焦 -  $\text{H}_2\text{O}$  气化反应是典型的非均相反应,由表 1 可以看出,天然焦含碳量高、挥发分少,故气化时主要发生焦碳 -  $\text{H}_2\text{O}$  反应,有:

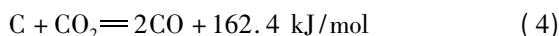
水蒸气分解反应:



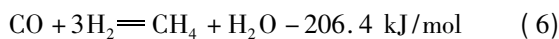
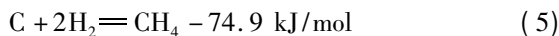
水煤气反应:



$\text{CO}_2$  还原反应:



$\text{CH}_4$  生成反应:



在不同的条件下这些反应的反应速率不同,并且相互间存在作用。

## 2 结果与分析

在 RYIELD 模块和 SSPLIT 模块各自功能的理论基础上进行试验,发现它们的操作参数对整个流程的结果没有影响,代正华等人也证实了此观点<sup>[9]</sup>。因此,在试验中,均给定 RYIELD 模块的操作温度为  $300\text{ }^\circ\text{C}$  与操作压力为  $0.1\text{ MPa}$ ,天然焦进料量为  $1\text{ kg/h}$ ,以考察 RYIELD 模块中反应碳份额和 RG-IBBS 模块中操作压力、温度、气化剂流量及成份等因素对天然焦 -  $\text{H}_2\text{O}$  气化反应的影响。而 SSPLIT 模块的压力与温度均取决于 RGIBBS 模块相应的操作参数。

### 2.1 反应碳份额对天然焦 - $\text{H}_2\text{O}$ 气化反应的影响

RYIELD 模块是系统的主要组成部分之一,起着模拟天然焦的“热解”过程的作用。为了探究其对整个流程的影响,依据 RYIELD 模块把煤分解成单分子成份的功能,把天然焦中碳分成两部分,一部分碳作为残碳,另一部分参与气化反应,即通过改变

天然焦中真实参与气化反应的碳(反应碳)份额进行试验。另外,给定 RGIBBS 模块的参数为  $0.1\text{ MPa}$  和  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ,水蒸气流量为  $4.5\text{ kg/h}$ ,结果如图 2 所示。从图中可以看出,在所研究的反应碳份额范围内,随着反应碳份额的增加,  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}_2$  含量逐渐减小,分别减小了  $7.98\%$  和  $5.38\%$ ,  $\text{CO}$  含量增加了  $11.49\%$ ,而  $\text{CH}_4$  含量几乎不变。而由于参与反应的碳含量增大,煤气产量相应增大了  $2.44\text{ m}^3/\text{h}$ ,煤气热值和小时产气热值也分别提高了  $0.78\text{ MJ/h}$  和  $22.94\text{ MJ/h}$ 。这就说明了参与裂解的反应碳份额不同,即天然焦的“热解”过程不同,则会产生不同的气化结果,故通过改变反应碳份额所得试验结果可以真实反映 RYIELD 模块在整个系统中能很好地描述天然焦“热解”过程。为了准确合理地分析各种因素对天然焦 -  $\text{H}_2\text{O}$  气化反应的影响,在此后的试验中 RYIELD 模块反应碳的份额均给定为 1。

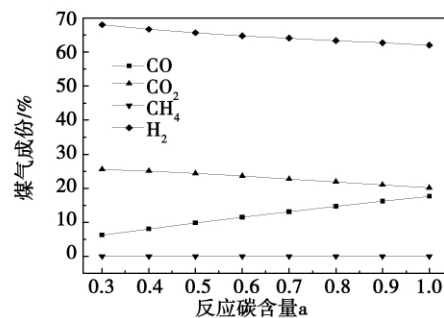


图 2 反应碳份额对气化反应的影响

Fig. 2 Influence of reactive carbon component on gasification reaction

### 2.2 水蒸气流量对天然焦 - $\text{H}_2\text{O}$ 气化反应的影响

给定 RGIBBS 模块的参数为  $0.1\text{ MPa}$  和  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ,气化剂为水蒸气,考察水蒸气流量于  $0.6\sim 3.0\text{ kg/h}$  之间变化时对反应的影响,结果如图 3、图 4 所示。从图 3 可以看出,水蒸气流量  $1.16\text{ kg/h}$  是反应的转折点,事实上,在水蒸气不足的情况下,气化

反应以反应(1)为主,根据质量守恒定律可计算出 1 kg/h 天然焦完全气化需要 1.16 kg/h 的水蒸气。当水蒸气流量小于 1.16 kg/h 时,随着水蒸气流量的增加,反应(2)增强,同时水不足使得系统除了供应水气化所需的热量外,还有剩余的热量促进反应(2)生成的部分 CO<sub>2</sub> 参与强吸热反应(4),故 CO、CO<sub>2</sub> 含量有所增大,只是 CO<sub>2</sub> 变化相对不明显,又由于数据处理时采用相对体积百分率的方法,故 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 含量相对减小,而 CH<sub>4</sub> 含量较少,故减小量也很小;当水蒸气流量超过 1.16 kg/h 后, H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 含量大幅增长,其在 3.0 kg/h 下的含量较 1.16 kg/h 下的分别增长了 7.9%、14.2%,而 CO 含量快速下降,降低了 22.4%,CH<sub>4</sub> 含量则降至零。这是由于水蒸气流量的增加,需要更多的热量将水转化成水蒸气,反应体系所得能量的降低一定程度上抑制了强吸热反应(1)和(4),而弱吸热反应(2)和弱放热反应(3)相对增强,CH<sub>4</sub> 则与过量的水蒸气发生了重整反应生成了 CO 和 H<sub>2</sub>,故 CH<sub>4</sub> 含量降低。

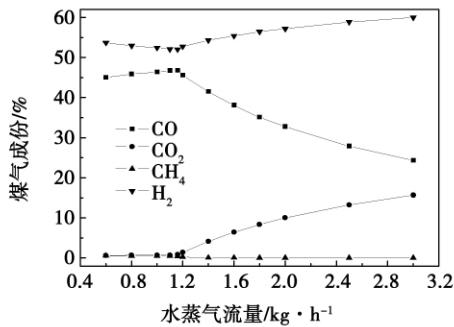


图 3 水蒸气流量对煤气成份的影响  
Fig. 3 Influence of steam flow rate on coal gas constituents

水蒸气流量对碳转化率与煤气热值的影响如图 4 所示,其中小时产气热值定义为单位时间内气化反应产生的煤气热值,即为单位时间的煤气产量与煤气热值的乘积。碳转化率则用下式计算:

$$X = \frac{12V(\theta_{CO_2} + \theta_{CO} + \theta_{CH_4})}{22.4WC_{ad}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: V—煤气产量, m<sup>3</sup>/h; W—天然焦进料量, kg/h; C<sub>ad</sub>—天然焦中 C 空气干燥基含量, %; θ<sub>CO<sub>2</sub></sub>、θ<sub>CO</sub>、θ<sub>CH<sub>4</sub></sub>—相应成份的体积分数, %。

从图 4 中可以看出,水蒸气流量小于 1.16 kg/h 时,随着水蒸气流量的增加,煤气热值几乎恒定在 11.7 MJ/m<sup>3</sup>,碳转化率从 53.7% 上升至 100%,小时产气热值也从 19.64 MJ/h 快速增至 35.27 MJ/h,这

是因为有越来越足够的气化剂参与反应,气化逐渐趋于完全,煤气产量增长了 1.34 m<sup>3</sup>/h;水蒸气流量超过 1.16 kg/h 后,天然焦已能完全气化,可由于 CO 含量的大幅降低,CO<sub>2</sub> 含量的增大,致使煤气热值剧速下降,但煤气产量却有所增大,故小时产气热值降幅很小,仅有减小 0.87 MJ/h。

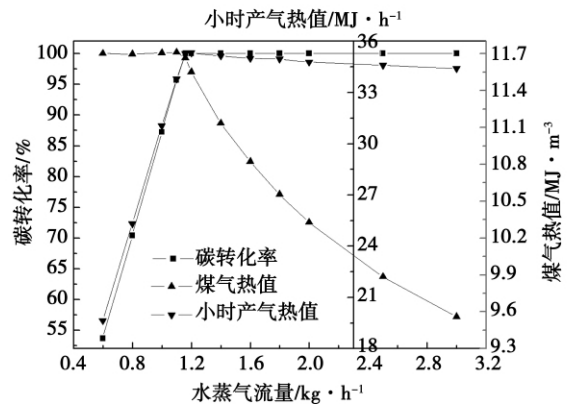


图 4 水蒸气流量对碳转化率、煤气热值的影响  
Fig. 4 Influence of steam flow rate on carbon conversion rate and coal gas heating value

### 2.3 反应温度对天然焦 - H<sub>2</sub>O 气化反应的影响

为了消除水蒸气流量在不同温度下对天然焦气化反应的影响并保证天然焦均能完全气化,试验时水蒸气流量定为 4.5 kg/h, RGIBBS 模块的操作压力仍为 0.1 MPa,只改变其操作温度,结果如图 5 所示。随着反应温度的升高, H<sub>2</sub> 含量有稍有下降,减少了 2.6%, CO 含量增长了约 9%, CO<sub>2</sub> 含量则降低了 6% 左右, CH<sub>4</sub> 含量略有减小。这是因为,煤焦和 CO<sub>2</sub> 发生的非均相气固反应是强吸热反应,温度越高越有利于该反应的进行,而生成 CH<sub>4</sub> 的反应均是放热反应,因此升高温度对 CH<sub>4</sub> 生成不利, H<sub>2</sub> 含量的略降是由于升温虽对水蒸气分解反应(1)有利,但更有利于促进水煤气反应逆方向进行,同时造成 CO 含量进一步增大,这与 Haynes W P 等人的结论相一致<sup>[10]</sup>。

煤气热值、小时产气热值随反应温度的变化如图 6 所示。从图中可以看出,煤气热值随温度的升高线性增长,由 700 °C 时的 8.44 MJ/m<sup>3</sup> 增至 1 000 °C 时的 9.26 MJ/m<sup>3</sup>,而小时产气热值随温度的升高波线上升,且增长幅度较小,700 °C 时仅比 1 000 °C 时相差 0.53 MJ/h。这是因为随着温度的升高, CO<sub>2</sub> 含量减小,气化炉中燃烧份额减少;而 CO 含量增加, H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 含量有所下降,致使气化份额在小额

增长,从而煤气中可燃气体含量也在小幅度增加,但燃烧份额减少量大于气化份额增加量,造成煤气总产量在波动中小幅减小。

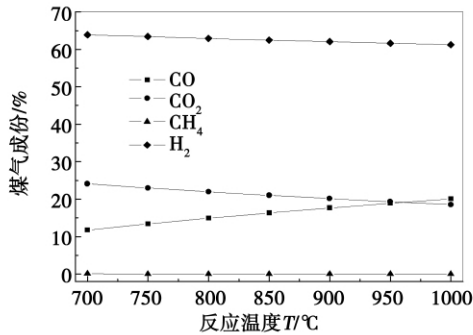


图5 反应温度对煤气成份的影响  
Fig. 5 Influence of reaction temperature on coal gas constituents

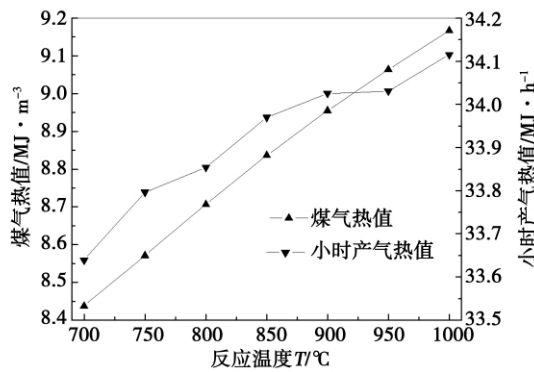


图6 反应温度对煤气热值的影响  
Fig. 6 Influence of reaction temperature on coal gas heating value

总的来说,高温有利于气化,但反应温度并非越高越好。因为温度越高,需要外界供应更多的热量,且造成煤气产量在下降,致使小时产气热值的增长速率降低,实际运行中亦带来很多热问题<sup>[11]</sup>。因此,操作温度在850~1000 °C范围内既可实现较好的气化效率,又能避免不必要的热问题产生。

2.4 压力对天然焦-H<sub>2</sub>O 气化反应的影响

保持水蒸气流量为4.5 kg/h,给定RGIBBS模块操作温度为900 °C、仅变化其操作压力进行试验,结果如图7所示。随着压力的加大,H<sub>2</sub>和CO含量降低,分别下降了5.3%、2.0%,CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>含量增大,依次增长了2.7%、4.6%。这是因为压力的加大促进了焦炭与H<sub>2</sub>的反应,故有利于CH<sub>4</sub>生成,而H<sub>2</sub>含量减少;又由于焦炭与H<sub>2</sub>的反应即反应(5)是

放热反应,放出的热量与反应(2)进行所需吸收的热量相近,从而有利促进反应(2)进行,而强吸热反应(1)、(4)需要较多的热量,根据能量守恒和分配原则可知它们较难得到足够的热量,故受到限制,同时弱放热反应(3)因能为系统供应一定的热量而得到加强。

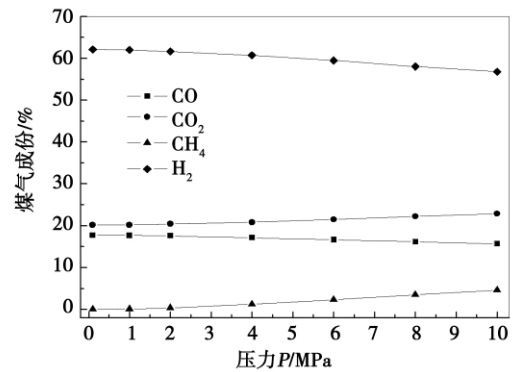


图7 压力对煤气成份的影响  
Fig. 7 Influence of pressure on coal gas constituents

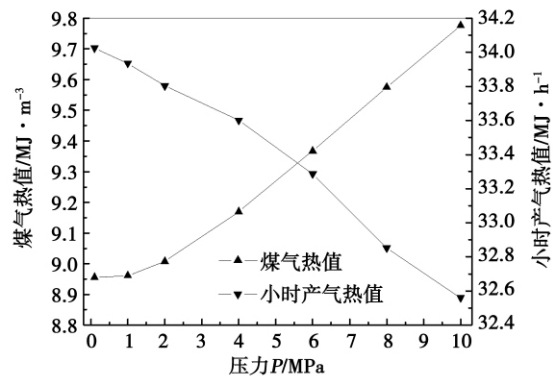


图8 压力对煤气热值的影响  
Fig. 8 Influence of pressure on coal gas heating value

图8表示了压力对煤气热值的影响。从图中可以看出,压力小于2.0 MPa时,煤气热值变化很小,随后煤气热值却大幅增长,由2.0 MPa时的9.01 MJ/m<sup>3</sup>增至10 MPa时的9.78 MJ/m<sup>3</sup>,而小时产气热值却在一直下降,共降低了1.47 MJ/h。这主要是因为随着压力的增大,高热值的CH<sub>4</sub>含量在增大,但CH<sub>4</sub>含量增大的份额毕竟有限,有前文的分析可知,CO、H<sub>2</sub>含量降幅很大,即气化份额在大幅减少,而CO<sub>2</sub>含量的小幅增加说明燃烧份额有一定程度的增加,从而造成煤气产量也在不断减少。从图中还可以看出,煤气热值曲线与小时产气热值曲线在6.0 MPa附近位置发生交叉,可知此处存在天然焦

- H<sub>2</sub>O 气化反应的拐点。

加压能促进气化,但压力过大会带来燃烧份额增加等负面效果,使气化效率降低,综合分析,在实际运行中操作压力宜在 0.1 ~ 6.0 MPa 范围内。

### 2.5 反应气氛对天然焦 - H<sub>2</sub>O 气化反应的影响

由前面的分析可知,在 RGIBBS 模块的操作参数为 0.1 MPa 和 900 °C 下天然焦完全气化的水蒸气临界流量为 1.16 kg/h,同样通过试验亦可知在其它条件同等、CO<sub>2</sub> 气氛下天然焦完全气化的 CO<sub>2</sub> 临界流量为 1.5 kg/h。图 9、图 10 分别表示了这两种条件下的煤气成份、产量和热值的比较。从图 9 可以看出,在水蒸气气氛下 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 含量均比 CO<sub>2</sub> 气氛下的高出 4 倍以上,而 CO 含量比 CO<sub>2</sub> 气氛下的少 42.37%。这是因为两种气氛下天然焦的气化机理不同,在水蒸气气氛下主要发生水蒸气分解反应和水煤气反应,在 CO<sub>2</sub> 气氛下气化则以 CO<sub>2</sub> 还原反应为主,故两种气氛下 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 的含量表现出了图 9 所示的趋势,而 H<sub>2</sub> 体积浓度的增大,就促进了 CH<sub>4</sub> 生成反应(5)、(6) 正方向进行,因而水蒸气气氛下 CH<sub>4</sub> 的含量高于 CO<sub>2</sub> 气氛下的含量。从图 10 可知,两种气氛下的煤气热值相近,相差不到 1 MJ/m<sup>3</sup>,可由于水蒸气气氛下的煤气产量是 CO<sub>2</sub> 气氛下的将近 2 倍,故 CO<sub>2</sub> 气氛下的小时产气热值比水蒸气气氛下的小 14.98 MJ/h。因此,在水蒸气气氛下气化效率更高,且能获得更好的煤气品质。

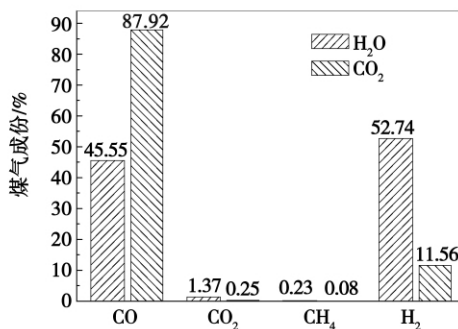


图 9 不同反应气氛下煤气成份的比较

Fig. 9 Comparison of coal gas constituents in various reaction atmospheres

### 3 结 论

(1) 通过改变反应碳的份额所得试验结果可以真实反映 RYIELD 模块在整个模拟系统中能很好地描述天然焦“热解”过程。随着反应碳份额的增大,

H<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub> 含量逐渐减小,CO 含量增加,煤气热值和小时产气热值大幅增大;

(2) 水蒸气流量对天然焦 - H<sub>2</sub>O 气化反应有很大的影响,水蒸气流量 1.16 kg/h 是天然焦完全气化的临界点,此处能获得最大的小时产气热值;

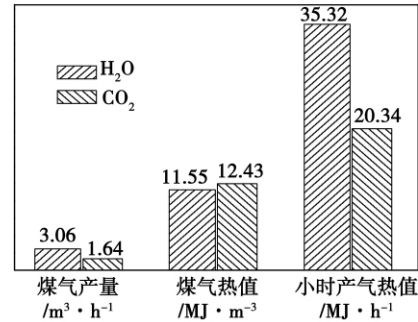


图 10 不同反应气氛下煤气热值的比较

Fig. 10 Comparison of coal gas heating values in various reaction atmospheres

(3) 高温有利于气化,且能改善煤气的品质,大幅降低 CO<sub>2</sub> 含量,提高 CO 含量,煤气热值随温度呈线性增长,但温度过高会带来不必要的热问题,故操作温度宜在 850 ~ 1 000 °C 范围内;

(4) 加压能促进气化,随着压力的增大,虽然 H<sub>2</sub>、CO 含量均有所下降,但由于高热值的 CH<sub>4</sub> 含量大幅增大,导致煤气热值上升。考虑到压力过高带来的负面影响,实际运行中操作压力宜在 0.1 ~ 6.0 MPa 范围内选定;

(5) 不同的反应气氛下,天然焦气化反应的特性有很大差异。在水蒸气气氛下 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 含量均比 CO<sub>2</sub> 气氛下的高很多,但 CO 含量相对较少,同时由于煤气产量较大,故其小时产气热值也较高。

### 参考文献:

[1] Kwiecinska B, Petersenb H I. Graphite, semi-graphite, natural coke and natural char classification - ICCP system [J]. International Journal of Coal Geology 2004, 57(2): 99 - 116.

[2] 江 明. 天然焦及其综合利用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 1995 (6): 46 - 48.

JIANG Ming, Natural coke and its comprehensive utilization [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 1995(6): 46 - 48.

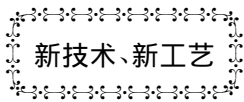
[3] 庞克亮, 向文国, 赵长遂. 天然焦的热解及动力特性 [J]. 东南大学学报, 2006, 36(5): 751 - 754.

PANG Ke-liang, XIANG Wen-guo, ZHAO Chang-sui. Pyrolytic and dynamic characteristics of natural coke [J]. Journal of Southeast University 2006, 36(5): 751 - 754.

[4] Merritt Roy D, Khorasani Ganjivar Khavari, Murchison Duncan G,

- et al. Molecular disordering in natural cokes approaching dyke and sill contacts [J]. *Fuel*, 1990, 69(8): 1037 - 1046.
- [5] Shinobu Sugiyama, Naoki Suzuki, Yoshitaka Kato, et al. Gasification performance of coals using high temperature air [J]. *Energy*, 2005, 30: 399 - 413.
- [6] Pang Keliang, Xiang Wenguo, Zhao Changsui. Investigation on pyrolysis characteristic of natural coke using thermogravimetric and Fourier-transform infrared method [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007, 80: 77 - 84.
- [7] Mathieu P, Dubuisson R. Performance analysis of a biomass gasifier [J]. *Energy Conversion & Management*, 2002, 43 (9/12): 1291 - 1299.
- [8] 汪洋, 代正华, 于广锁, 等. 运用 Gibbs 自由能最小化方法模拟气流床煤气化炉 [J]. *煤炭转化*, 2004, 27(4): 27 - 33.  
WANG Yang, DAI Zheng-hua, YU Guang-suo, et al. Simulation of gas flow bed coal gasification reactor by using Gibbs free energy minimum method [J]. *Coal-coke Conversion*, 2004, 27(4): 27 - 33.
- [9] 代正华, 龚新, 王辅臣, 等. 气流床煤气化的 Gibbs 自由能最小化模拟 [J]. *燃料化学学报*, 2005, 33(2): 129 - 133.  
DAI Zheng-hua, GONG Xin, WANG Fu-chen, et al. Gibbs free energy minimum simulation of gasification in a gas fluidized bed [J]. *Journal of Fuel Chemistry*, 2005, 33(2): 129 - 133.
- [10] Haynes W P, Gasior S J, Forney A J. Catalysis of coal gasification at elevated pressure // [C]. *Coal Gasification, Advances in Chemistry Series No131*. Washington DC: American Chemical Society, 1974. 179 - 187.
- [11] 李乾军, 章名耀, 施爱阳, 等. 加压喷动流化床煤部分气化试验 [J]. *东南大学学报*, 2006, 36(5): 765 - 768.  
LI Qian-jun, ZHANG Ming-yao, SHI Ai-yang, et al. Coal partial gasification test of a pressurized spouted fluidized bed [J]. *Journal of Southeast University*, 2006, 36(5): 765 - 768.

(陈滨 编辑)



新技术、新工艺

## 利用生物气燃料电池再循环废水

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2011 年 1 - 2 月刊报道, 美国加利福尼亚州芝诺市的 IEUA 公司已与 UTS 生物能源公司签订了一份 20 年购电协议, 后者将为 IEUA 公用事业公司安装、运行和维护一个 2 800 kW 燃料电池电站。该电站将给 IEUA 在加利福尼亚州安大略市最大的水再循环装置提供电力和热能。

该 2 800 kW 电站至少使用 75% 从废水产生的生物气作为燃料, 利用天然气补充作为其余部分的燃料。电站具有基于 PLC(可编程序逻辑控制器) 的控制系统, 允许自动地补充生物气。

标准的输出电压为 13 800 V, 标准频率为 60 Hz。可供选择输出的交流电压为 4 160 - 12 700 V, 频率为 50 Hz。

电站系统的输出功率为 2 800 kW, 效率为 47%, 并且从冷态到满功率输出的需要 90 h。

电力将用于供应废水处理装置所需电力的 60%。来自燃料电池系统的热量将用来加热城市废水的加热器, 加热器提供用作燃料的生物气。

加热器气体处理系统净化气体, 除去水分、微粒、挥发性硫化物和硅氧烷。燃料电池接受净化的蒸解气; 如果它不足以保持满电力输出则使用补充的天然气。

(吉桂明 摘译)

dence time of the pulverized coal particles in the furnace is shortened and the pulverized coal particles enter into the flue gas passage at the tail portion ,which having not yet burned out ,leading to a comparatively high combustible content of the flying ash ,around 10% . In the light of this problem ,an optimization adjustment was made of the combustion system. After the adjustment ,the combustible content of the flying ash went down to about 4% . **Key words:** low  $\text{NO}_x$  burner , combustible content of flying ash , optimization adjustment

流化床  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  燃烧( II) —高氧浓度的中试研究 =  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  Combustion in a Fluidized Bed ( II) —High Oxygen Concentration Pilot Study [刊 ,汉] ZHAO Ke ,DUAN Cui-jiu ,TAN Li ,LU Qing-gang( Engineering Thermophysics Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 3) . - 350 ~ 354

To offer reference for the combustion in a large-sized circulating fluidized bed of an  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  combustion system at a high oxygen concentration ,a combustion test was performed of coal at a high oxygen concentration in  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  atmosphere in a 0.15 MW circulating fluidized bed combustion test system with a combustion chamber having a diameter of 140 mm and a height of 6000 mm. The test results show that when the oxygen concentration of the primary air ranges from 49.0% to 53.3% and that of the secondary air is in a range from 50.8% to 56.0% ,the above-mentioned combustion system can still undergo a safe and stable combustion. During the combustion process of coal ,the  $\text{SO}_2$  yield was in a range from 92.2% to 94.0% and the air provided had little influence on the  $\text{SO}_2$  yield. At various air quantities ,the  $\text{NO}_x$  yield ranged from 6.71% to 7.64% and the  $\text{N}_2\text{O}$  yield from 5.13% to 7.23% . To reduce the oxygen content of the primary air will help reduce both  $\text{NO}_x$  and  $\text{N}_2\text{O}$  yield. To delay the time of the admission of the secondary air will help reduce the  $\text{N}_2\text{O}$  yield but enhance the  $\text{NO}_x$  one. **Key words:** fluidized bed ,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  , coal combustion ,

天然焦- $\text{H}_2\text{O}$  气化反应 Aspen Plus 模拟研究 = Study of the Simulation of Natural Coke- $\text{H}_2\text{O}$  Gasification Reaction By Using the Software Aspen Plus [刊 ,汉] LIN Liang-sheng ( Suzhou Thermotechnical Research Institute ,Suzhou ,China ,Post Code: 215004) ,ZHAO Chang-sui ( College of Energy Source and Environment ,Southeast University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 , 27( 3) . - 355 ~ 360

By utilizing the Aspen Plus software platform ,a thermodynamic simulation calculation was performed of the natural coke- $\text{H}_2\text{O}$  gasification reaction and the influence of the share of the reaction carbon ,steam flow rate ,reaction temperature ,reaction pressure and reaction atmosphere on the composition and heating value of the coal gas during the natural coke gasification reaction was studied. The research results show that the RYIELD module can depict very well the natural coke “pyrolytic process” in the whole simulation system. The steam flow rate of 1.16 g/h is the

critical point of the natural coke to be fully gasified. To increase temperature and pressure can effectively promote the gasification and improve the quality of coal gas ,but not the greater the better. In a comprehensive consideration ,the practical operating temperature and pressure should be chosen in a range from 850 to 1000°C and from 0.1 to 6.0 MPa respectively. In different reaction atmospheres ,the reaction characteristics of natural coke vary greatly. However ,in the steam atmosphere ,coal gas quality will be better. **Key words:** natural coke ,gasification ,Aspen Plus ,composition of coal gas ,heating value of coal gas

R134a 在水平内微翅管管内凝结换热的实验研究 = **Experimental Study of the Condensation Heat Exchange of Coolant R134a in a Horizontal Inner-micro-finned Tube** [刊 汉] OUYANG Xin-ping ,CHEN Qi-wei ( College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 361 ~ 365

Experimentally studied was the condensation heat exchange performance of coolant R134a in a horizontal intensified heat exchange tube. The test tubes were two types of inner-micro-finned tube ,designated as tube A and B respectively. The test pieces adopted a tube-in-tube structure with the glycol water solution passing through the passage between the outer surface of the intensified heat exchange tube and the inner surface of the outer tube ( between tubes) . During the test ,the condensation temperature inside the tube was 51 °C and the flow speed of the glycol water solution between tubes was 3.35 m/s. The inlet temperature of the glycol water solution was adjusted according to the mass flow speed of the coolant to ensure a supercooling degree of the coolant at the outlet of the test piece. The test results show that both in-tube condensation heat exchange coefficients of the two types of horizontal intensified heat exchange tube will increase with an increase of the mass flow speed of the coolant. When the mass flow speed of the coolant increases from 300 kg/( m<sup>2</sup> · s) to 700 kg/( m<sup>2</sup> · s) ,the in-tube condensation heat exchange efficient of tube A is 1.87% to 6.28% higher than that of tube B while the flow resistance of the coolant in tube B is 9.56% to 11.05% higher than that in tube A. Therefore ,the structure of tube A is superior to that of tube B. **Key words:** engineering thermophysics ,intensified heat exchange ,inner-micro-finned tube ,in-tube condensation heat exchange

余热制冷用氯化钙/硅胶复合吸附剂的制备及性能研究 = **Preparation and Performance Study of Silica Gel/ Calcium Chloride Compound Adsorbent for Use in Refrigeration by Using Waste Heat** [刊 汉] WANG Ling-bao ,BU Xian-biao ,MA Wei-bin ,LU Zhen-neng ( Chinese Academy of Sciences Key Laboratory on Renewable Energy Sources and Natural Gas Hydrate ,Guangzhou Energy Source Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(3) . - 366 ~ 371