

# 同向多轴水煤浆气化数值模拟研究

李发林<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 节能工程技术研究分院,北京 100013; 2. 国家水煤浆工程技术研究中心,北京 100013;  
3. 煤炭资源开采与环境保护国家重点实验室,北京 100013; 4. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

**摘要:**为弥补现有水煤浆气流床气化技术的不足,研发了一种同向多轴煤气化装置,采用 Aspen Plus 建立了同向多轴水煤浆气化数值模拟模型,分析了水煤浆浓度、氧煤比和碳转化率对煤气化效果的影响。结果表明,随着氧煤比的增加,H<sub>2</sub>、CO、有效气含量均先增大后降低,气化温度逐渐升高,最佳氧煤比为 0.61,此时有效气含量最大。随碳转化率的升高,CO 和 H<sub>2</sub> 含量均增大,气化温度逐渐降低,对于气化炉而言,提高碳转化率可增加有效气含量。水煤浆浓度分别为 60%、62% 和 65% 时,有效气(干基)含量分别为 81.3%、82.5% 和 84.2%,水煤浆浓度每提高 1%,有效气含量增加约 0.6%。

**关键词:**水煤浆气化; Aspen Plus; 数值模拟; 氧煤比; 碳转化率

中图分类号:TQ546 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)05-0031-04

## Numerical simulation of coal water slurry gasification with synclastic multi-jet

LI Falin<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;  
2. National Research Center of Coal Water Slurry Engineering and Technology, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Environment Protection, Beijing 100013, China; 4. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to cover the shortage of current coal water slurry (CWS) fluidized bed gasification technology, a coal gasification technology with synclastic multi-jet was developed. A numerical simulation model was built using Aspen Plus. The influence of CWS concentration, oxygen-coal ratio and carbon conversion ratio on coal gasification effects was analyzed. The results indicated that with the increase of oxygen-coal ratio, H<sub>2</sub>, CO and useful gas increased first, then decreased. With the rise of gasification temperature, the content of useful gas reached the maximum when the oxygen-coal ratio was 0.61. With the increase of carbon conversion ratio, the content of H<sub>2</sub>, CO and useful gas increased and the gasification temperature lowered gradually. The percentages of effective gas (dry) could reach to 81.3%, 82.5% and 84.2% when the CWS concentration was 60%, 62% and 65% respectively. The percentage of useful gas increased about 0.6% while the CWS concentration increased 1%.

**Key words:** coal water slurry gasification; Aspen Plus; numerical simulation; oxygen-coal ratio; carbon conversion ratio

## 0 引 言

煤气化技术是现代煤化工的基础,也是煤化工产业链的龙头技术<sup>[1-2]</sup>。目前,国内煤气化技术众多,其中气流床气化是大型煤气化技术的主流,正向着规模化和大型化方向发展。按照原料划分,气流床气化可分为水煤浆气化和煤粉气化。据统计,在已投产和在建的 300 多台气流床气化炉中,水煤浆

气化炉所占比例超过 70%,水煤浆气化以德士古气化技术和多喷嘴对置气化技术最具代表性<sup>[3]</sup>。于遵宏等<sup>[4]</sup>研究了德士古气化炉停留时间分布情况,结果表明,德士古气化炉基本趋于全混流,约 50% 物料在平均停留时间之前即离开炉膛,且不到 1 s 便有物料逸出炉外,存在“逃逸”现象。针对德士古气化炉的缺点,华东理工大学开发了多喷嘴对置气化技术,该技术的特点是根据撞击流理论,水平布置

收稿日期:2016-03-17;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.05.006

基金项目:国家国际科技合作专项资助项目(2015DFR60630);科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2011EG222214,2012EG222205)

作者简介:李发林(1969—),男,山东德州人,高级工程师,硕士,从事煤炭加工利用技术及煤炭气化技术开发工作。E-mail: lifalin@139.com

引用格式:李发林.同向多轴水煤浆气化数值模拟研究[J].洁净煤技术,2016,22(5):31-34.

LI Falin. Numerical simulation of coal water slurry gasification with synclastic multi-jet[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(5): 31-34.

于气化炉上部的烧嘴向炉内喷入4股流体,通过流体相互撞击来提高气固两相间的传质速度,加强流体间的混合,进而提高化学反应速率<sup>[5]</sup>。采用多个喷嘴喷射物流形成对撞可以有效解决德士古气化炉出现的“逃逸”现象,提高碳转化率和有效气比例,但工业运行结果表明,由于水平撞击流的存在,多喷嘴对置气化炉顶部的耐火砖相对更容易损坏,出现烧炉顶问题<sup>[6]</sup>。纵观现有的水煤浆气流床气化技术,气化炉在设计上既要确保反应物有足够的停留时间,并形成良好的流场结构,为煤气化创造有利条件,又要具有对负荷的良好调节能力。为弥补现有水煤浆气流床气化技术的不足,文献[7]公开了一种同向多轴煤气化装置技术,具有气化效率高、负荷调节余地大、流场分布均匀等特点。气化炉有效气组成及影响因素是水煤浆气化技术研究的热点,研究表明,氧煤比、气化温度、水煤浆浓度等因素均对气化结果产生重要影响<sup>[8]</sup>。随着计算机技术的快速发展,利用流程模拟软件可实现煤气化工艺的全过程模拟,减少大量中间试验,进而获得试验条件下难以获取的参数及信息,同时可利用已有的理论成果低成本、无风险地对煤气化的复杂过程进行优化研究,寻找最佳操作点,提高整个过程的效率<sup>[9-10]</sup>。目前,数值模拟已成为研究水煤浆气化的重要手段,但主要集中于德士古气化炉和多喷嘴对置气化炉,尚缺乏同向多轴气化技术研究。鉴于此,笔者采用 Aspen Plus 软件建立同向多轴煤气化模型,研究了水煤浆浓度、氧煤比和碳转化率对煤气化效果的影响,为实际工业操作提供指导和建议。

## 1 同向多轴水煤浆气化技术及模型建立

### 1.1 同向多轴水煤浆气化过程

同向多轴水煤浆气化炉结构如图1所示。3个烧嘴沿圆周方向均匀布置于气化炉顶部,3股流体分别沿3个不同的烧嘴喷入炉内,烧嘴均指向气化炉下部的同一点K,具体流程见文献[7]。3股射流形成3个互相卷吸的火焰流,将其周围的流体卷吸带向下游,射流宽度随之不断扩展,卷吸的过程中伴随着相间的传热传质,最后在气化炉底部区域发生碰撞,进一步增加该区域的湍动强度,加强流体间的混合,进而提高化学反应速率,强化二次反应效果。3个喷嘴的雾化效果要优于单个喷嘴,且避免了单喷嘴中心布置时可能出现“逃逸”的问题。

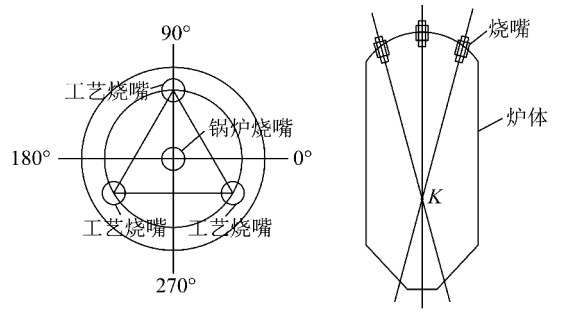


图1 同向多轴水煤浆气化炉结构示意图

Fig. 1 Structure schematic drawing of coal water slurry gasifier with synclastic multi-jet

### 1.2 数值模拟模型建立

由于 Aspen Plus 可进行包括简单和复杂工艺过程的稳态过程模拟,目前已成为模拟煤化工、发电工程和其他工艺过程的有力工具,因而被广泛应用于上述领域内的流程设计和模拟。煤气化数值模拟过程一般有2种模型方法,即化学动力学模型和反应平衡模型。反应平衡模型以反应热力学为基础,由于不考虑气化炉的流动传热、传质特性以及气化反应的过程,因此相对简单且通用性好。建立的同向多轴水煤浆气化模型如图2所示。通过对煤气化过程分析并结合 Aspen Plus 软件特点,将煤气化过程理想地分为煤的裂解和煤的缺氧燃烧气化2个过程,气化所用煤种煤质分析见表1。

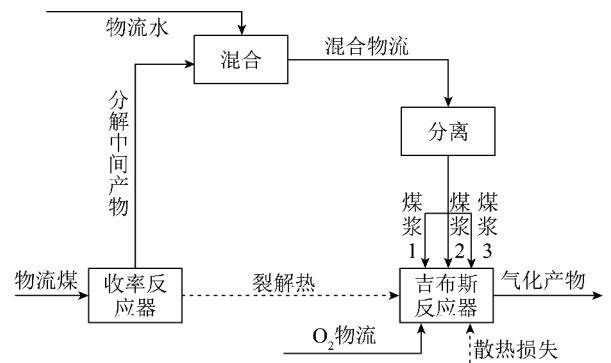


图2 同向多轴水煤浆气化模型

Fig. 2 Simulation flow chart of coal water slurry gasification with synclastic multi-jet

煤的裂解过程利用 Decom 模块模拟,Decomp 模块是一个仅计算收率的简单反应器,其作用在于将非常规组分煤分解为C、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等物质,裂解生成的物质与水、O<sub>2</sub>在吉布斯反应器内发生缺氧燃烧气化,该过程考虑碳转化率。裂解反应过程产生的热量传递给吉布斯反应器,散热损失热流代表气化过程的热损失,本文取0.5%。

表1 气化用煤的煤质分析

Table 1 Quality analysis of gasification coal

工业分析/%			元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$
$FC_d$	$A_d$	$V_d$	$w(C_d)$	$w(H_d)$	$w(O_d)$	$w(N_d)$	$w(S_{t,d})$	$(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
60.17	7.75	32.08	74.83	4.07	11.84	0.86	0.65	24.61

### 1.3 数值模拟模型的验证

为验证同向多轴水煤浆气化模型,数值模拟结果与试验数据对比见表2。

表2 同向多轴水煤浆气化数值模拟结果与试验数据对比  
Table 2 Comparison between simulation and experimental results of coal water slurry gasification with synclastic multi-jet

项目	数值模拟	试验测量
出口温度/°C	1 302	1 302
出口压力/MPa	1.17	1.17
水煤浆流量/( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	102	102
CO 组分含量/%	47.30	46.70
$\text{H}_2$ 组分含量/%	36.20	36.00
干基有效气含量/%	83.50	82.70

由表2可知,模拟计算结果与实际运行测量参数吻合较好,说明本文采用的模型以及相关参数的设置较为合理,可以确保模拟结果的准确性。

## 2 数值模拟结果与分析

### 2.1 氧煤比对气体组分和气化温度的影响

在投煤量 2 000 t/d,气化压力 4 MPa,水煤浆浓度 60%,碳转化率 98%,热损失 0.5% 的条件下,改变氧煤比,即保持水煤浆的流量和浓度不变,通过改变  $\text{O}_2$  流量,计算不同氧煤比下的气化结果,如图3所示。水煤浆气化氧碳比(O/C)通常为 0.9 ~ 1.0<sup>[11-13]</sup>,考虑到水煤浆煤种的差异性,取煤中碳含量 0.60 ~ 0.75,适当扩宽数值模拟操作范围,因此折合成水煤浆氧煤比取值为 0.5 ~ 0.7。

由图3可知,随着氧煤比的增加, $\text{H}_2$  含量先升高后降低,CO 含量持续升高,氧煤比增至 0.68 时,CO 含量达到最大,继续增大氧煤比,CO 含量略有下降。由于  $\text{H}_2$  减少量较大,有效气成分( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) 随着氧煤比的增加先增大后降低。气化温度随着氧煤比的增加而升高。这是由于氧煤比提高,反应强度增加,促使气化炉内温度升高,温度升高使水煤气反应加剧,产生更多的 CO 和  $\text{H}_2$ ,同时  $\text{O}_2$  流量增

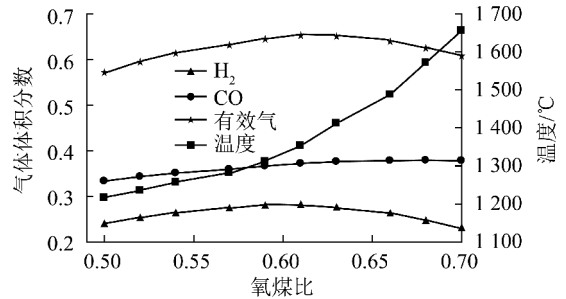


图3 氧煤比对气体组分和气化温度的影响

Fig. 3 Influence of oxygen-coal ratio on the gas composition and gasification temperature

加,CO 和  $\text{H}_2$  燃烧,因此  $\text{H}_2$  含量逐渐减少。虽然氧煤比的增加能提高气化炉反应温度,促进气化反应,但氧煤比过大会使有效气体产率下降,因此试验确定最佳氧煤比为 0.61,此时气化炉产出的有效气含量最大。

### 2.2 碳转化率对气体组分和气化温度的影响

气化压力 4 MPa,水煤浆浓度 60%,氧煤比 0.61,热损失 0.5% 的条件下,研究碳转化率对气化结果的影响,结果如图4所示。

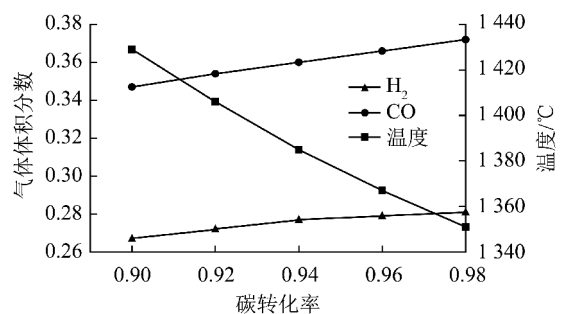


图4 碳转化率对气体组分和气化温度的影响

Fig. 4 Influence of carbon conversion ratio on gas composition and gasification temperature

由图4可知,随着碳转化率的增大,CO 和  $\text{H}_2$  含量均逐渐增加,即有效气含量增大,气化温度逐渐降低。这是由于碳转化率提高,而  $\text{O}_2$  流量不变时,更多的碳参与气化反应进而生成 CO 和  $\text{H}_2$ ,碳的气化反应属于吸热反应,需要消耗热量,因此气化温度随着碳转化率的提高而逐渐降低。在实际生产过程

中,碳转化率越高,煤的利用率也越高,因此气化后生成的有效气含量也就越高。

### 2.3 水煤浆浓度对有效气含量的影响

水煤浆气化中除小部分水参与化学反应外,大部分水在气化炉中将以过热蒸汽的形式存在,蒸发过程中所需要的热量由煤完全燃烧提供。煤完全燃烧提供热量的同时,产生  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  等大量无效气体,增加了比氧耗和比煤耗。因此,水煤浆浓度对有效气组分和单位煤的产气率起着决定性作用,提高并稳定水煤浆浓度有利于提高气化效率和有效气含量。投煤量 2 000 t/d,气化温度 1 380 °C,压力 4 MPa 的条件下,水煤浆浓度分别为 60%、62% 和 65% 时,有效气含量分别达到 81.3%、82.5% 和 84.2%,水煤浆浓度每提高 1%,有效气含量增加约 0.6%。随着水煤浆浓度的增加,有效气比例逐渐增大,这是由于当水煤浆浓度提高时,进入气化炉的水分相应减少,进而减少了水分的吸热量。温度不变时,将减少用于燃烧升温的耗煤量,而减少的这部分耗煤量将转化为有效气。

### 3 结 论

1) 投煤量 2 000 t/d,气化压力 4 MPa,水煤浆浓度 60%,碳转化率 98%,热损失 0.5% 的条件下,随着氧煤比的增加, $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  和有效气含量均先增大后降低,气化温度逐渐升高,试验确定最佳氧煤比为 0.61,此时有效气含量最大。

2) 气化压力 4 MPa,水煤浆浓度 60%,氧煤比为 0.61,热损失 0.5% 的条件下,随着碳转化率的提高, $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  含量均增大,即有效气含量增加,而气化温度下降,说明对于气化炉而言,提高碳转化率可有效增加有效气含量。

3) 水煤浆浓度分别为 60%、62% 和 65% 时,有效气含量分别为 81.3%、82.5% 和 84.2%,表明提高水煤浆浓度能够增加有效气含量,水煤浆浓度每提高 1%,有效气含量增加约 0.6%。

#### 参考文献 (References):

[1] 任相坤,袁明,高聚忠. 神华煤制氢技术发展现状[J]. 煤质技术,2006(1):4-7.  
Ren Xiangkun, Yuan Ming, Gao Juzhong. Present situation and development of coal-based hydrogen preparation technology in Shenhua group[J]. Coal Quality Technology, 2006(1):4-7.

[2] 陈家仁. 开发洁净高效的煤气化技术[J]. 煤质技术,2014(S1):66-68.

Chen Jiaren. Development of clean and efficient coal gasification technology[J]. Coal Quality Technology, 2014(S1):66-68.

[3] 唐宏青. 大型现代煤气化工艺简评[J]. 化工设计通讯,2011,37(2):7-13.  
Tang Hongqing. Brief comments on large scale coal gasification process[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2011, 37(2):7-13.

[4] 于遵宏,付淑芳,于建国,等. 德士古气化炉气化过程剖析(Ⅲ):停留时间分布测试[J]. 大氮肥,1994(2):115-118.

[5] 于广锁,龚欣,刘海峰,等. 多喷嘴对置式水煤浆气化技术[J]. 现代化工,2004,24(10):46-49.  
Yu Guangsuo, Gong Xin, Liu Haifeng, et al. Coal water slurry gasification with opposed multi-burners[J]. Modern Chemical Industry, 2004, 24(10):46-49.

[6] 刘进波,杨军红,张健. 多喷嘴对置式煤气化炉耐火砖的应用小结[J]. 中氮肥,2009(6):50-52.  
Liu Jinbo, Yang Junhong, Zhang Jian. Apply of gasifier refractory brick with opposed multi-burners[J]. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress, 2009(6):50-52.

[7] 何国锋,李发林,段清兵,等. 一种同向多轴煤气化装置:CN103525470A[P]. 2014-01-22.

[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 Zhenghua, Yu Guangsuo, et al. Simulation of entrained-flow bed coal gasifier by the method of Gibbs free energy minimization[J]. Coal Conversion, 2004, 27(4):27-33.

[9] 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,2008,46(3):14-18.  
Zhang Zongfei, Tang Lianying, Lyu Qingyuan, et al. Pulverized coal gasification simulation based on Aspen Plus software[J]. Chemical Fertilizer Design, 2008, 46(3):14-18.

[10] 李政,梁金玉,薛亚丽. 基于烟煤、褐煤的 IGCC 系统技术经济性对比[J]. 中国电机工程学报,2012,32(5):39-47.  
Li Zheng, Liang Xinyu, Xue Yali. Techno-economic comparison of IGCC systems employing bituminous and lignite[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(5):39-47.

[11] 于遵宏,王辅臣. 煤炭气化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010:88-89.

[12] 张杰,郭庆华,周志杰,等. 多喷嘴对置式水煤浆气化炉内颗粒物分布特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(20):59-65.  
Zhang Jie, Guo Qinghua, Zhou Zhijie, et al. Experimental study of particle distribution in bench-scale opposed multi-burner gasifiers of coal water slurry[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(20):59-65.

[13] 范峻铭,诸林,唐诗,等. Texaco 水煤浆气化过程动力学模拟[J]. 煤炭科学技术,2013,41(S2):379-381.  
Fan Junming, Zhu Lin, Tang Shi, et al. Simulation on kinetic process for Texaco coal water slurry gasification[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(S2):379-381.