

利用液态 CO₂ 提高水煤浆煤水配比 对气化效果影响的数值模拟

周俊虎, 匡建平, 周志军, 刘建忠, 岑可法

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Mathematical Simulation for Coal Water Slurry Gasification by Adding Liquid Carbon Dioxide

ZHOU Jun-hu, KUANG Jian-ping, ZHOU Zhi-jun, LIU Jian-zhong, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027,
Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: In order to improve the carbon conversion and cold gas efficiency, some effective action must be taken to strengthen coal water slurry gasification process. In this paper, the mathematical simulation analysis about adding liquid carbon dioxide on both carbon conversion and cold gas efficiency were conducted, also the effect of the o/c ratio in the coal-water-slurry (CWS) in CWS gasification was considered. The results showed that the concentration of CO and CO₂ increased, but H₂ reduced with the increase of liquid carbon dioxide concentration; at the same time, the carbon conversion and cold gas efficiency enhanced sharply, up to the maximum of 98.58%, 76.74% respectively, which were 3.7%, 6.1% higher than that of before; the temperature of gasifier declined in the beginning, then changed slowly. These results indicated that adding liquid carbon dioxide could strengthen the secondary reaction in the gasifier, which also increased the coke burnout velocity.

KEY WORDS: thermal power engineering; coal liquor slurry; gasification; carbon conversion; cold gas efficiency; liquid carbon dioxide

摘要: 提高水煤浆气化碳转化率和冷煤气效率, 是强化气化过程的必然结果。利用 FLUENT 软件平台, 该文用数值模拟方法模拟了水煤浆气化过程中水煤浆煤、水配比和氧、碳原子比对气化过程和出口煤气成分的影响; 尤其是研究了利用添加液态 CO₂ 的方法提高水煤浆煤、水配比, 对提高气化炉碳转化率和冷煤气效率的影响。模拟结果显示: 随着液态 CO₂ 浓度的不断升高, 煤气成分中 CO 大幅上升, H₂ 略有降低, CO₂ 浓度升高; 气化炉的碳转化率和冷煤气效率都有较

大幅度提高, 分别达到最大值 98.58%、76.74%, 比原工况分别提高了 3.7%、6.1%; 气化炉温度先降低后变化趋缓。结果证明添加液态 CO₂ 后强化了气化炉内的二次反应, 提高了焦炭燃烧速率。

关键词: 热能动力工程; 水煤浆; 气化; 碳转化率; 冷煤气效率; 液态 CO₂

0 引言

由于石油价格不断上涨, 全球正面临日益紧迫的能源危机, 自20世纪70年代以来, 国内外都加快了新一代煤气化技术的开发和工业化进程。美国能源部(DOE)提出的Vision21方案, 其基本思想是以煤气化为龙头, 利用合成气制氢和用于蒸汽燃气联合循环(IGCC)。Shell公司提出Syngas Park, 以煤的气化或石油和渣油气化为核心, 所得的合成气用于IGCC发电, 用一步法生产甲醇和化肥, 并作为城市煤气供给用户^[1]。我国在不断引进Texaco和Shell煤气化技术的同时, 也在不断研究和开发自主知识产权的气化技术^[2-4]。煤气化是煤洁净利用的关键技术之一, 强化气化过程、提高气化效果的目的主要是尽量提高碳转化率、冷煤气效率和降低氧耗。目前国际上普遍采用的气流床气化技术, 主要是以干粉为原料的Shell气化技术和以水煤浆为原料的Texaco气化技术。相比较而言, 水煤浆气化技术是一种较为成熟、已有多年工业化应用的技术, 但是与Shell煤气化技术相比, 碳转化率相对较低, 只有95%左右, Shell煤气化为99%; 冷煤气效率只有

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划: 2004CB217701)。

Foundation of the National Programme for Basic Research's Development of China(Project 973: 2004CB217701).

71%~76%, 而Shell煤气化为81%~84%^[5]。

从气化工艺的角度而言, 要提高Texaco气化炉碳转化率和冷煤气效率, 就目前技术来说可能有两途径: ①提高炉膛温度。由于Texaco气化炉炉衬为耐火砖结构, 所以气化温度一般在1400℃左右, 而Shell气化炉温度可达1600℃左右。②提高煤浆浓度, 减少水份含量。由于水煤浆粘度过高时, 其流动性和雾化性能变差, 所以煤浆浓度一般不高于65%。

不少研究者^[6]认为提高煤浆中煤的浓度有明显的优势, 当煤浆浓度从60%提高到65%时, 合成气的产量可增加2.45%, 同时O₂消耗量可减少3.57%。本文主要研究采用通入液态CO₂的方法来提提高煤浆煤、水配比, 以达到对水煤浆气化效果的影响。主要措施是: 在62%浓度(煤粉质量百分数为62%, 水的质量百分数为38%)水煤浆基础上, 将水的质量百分数逐步降低, 然后通入相应浓度的液态CO₂。通过数值模拟的手段, 来分析添加液态CO₂提高水煤浆煤、水配比后, 对改善水煤浆气化效果的影响, 尤其是对提高碳转化率和冷煤气效率的影响。

1 试验方法及数值模拟

1.1 试验对象

模拟计算的气化炉模型选择国内某化肥厂6.4MPa, 40 t/h 的水煤浆气化炉。气化剂为纯氧, 入炉水煤浆体积流量为17 500 m³/h, 气化炉净高4.7m, 内径1.676m。煤浆浓度62%, 制浆用的煤粉工业分析和元素分析见表1。气化炉结构简图如图1所示。

表 1 煤样工业分析、元素分析及发热量

	工业分析 /w%					Q _{net,ar} /kJ/kg	元素分析 /w%				
	M _t	A _{ar}	V _{ar}	FC _{ar}			C _{ar}	H _{ar}	N _{ar}	S _{t,ar}	O _{ar}
Coal	3.40	7.73	27.05	61.82	24268	75.90	3.50	1.21	0.84	7.42	

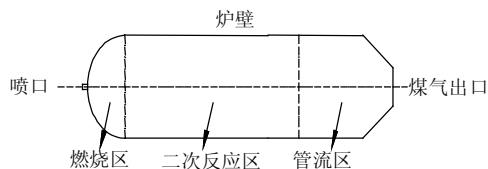


图 1 气化炉轮廓图

Fig. 1 The contour of gasifier

1.2 数学模型

在该水煤浆气化炉炉膛底部模拟了出渣口, 炉膛上部近似模拟了球形炉顶, 在整个模拟区域内通过分区(分为燃烧区、二次反应区、管流区)划分网

格以提高模拟精度。划分网格时采用四面体网格, 处理后用于模拟计算的网格如图2所示。

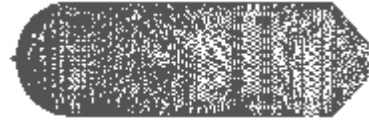


图 2 气化炉网格划分

Fig. 2 The furnace mesh of gasifier

数值模拟采用三维稳态计算, 为了避免伪扩散的产生^[7], 利用QUICK格式进行方程的离散, 并采用SIMPLEC算法求解。湍流模型采用可实现k-e双方程模型(realizable k-e model)^[8-10], 用混合分数-概率密度函数(mixture-reaction, PDF)模拟气相湍流燃烧^[11], 用P-1辐射模型(P-1 radiation model)计算辐射传热, 采用双匹配速率模型(the two competing rates model)模拟煤粉挥发份的析出^[12], 焦炭燃烧采用动力/扩散控制燃烧模型(kinetics/diffusion-limited char combustion model), 水煤浆颗粒跟踪采用拉格朗日离散相模型(DPM)模拟^[13]。

数值计算中边界条件设定很重要, 关系到计算结果的真实性、收敛性和稳定性。根据CFD软件特点, 氧化剂入口的边界条件采用速度入口边界条件, 出口边界条件选择压力出口边界条件, 壁面采用无滑移速度。在计算过程中收敛条件规定各支配方程迭代计算的余量至少小于10⁻³, 而对于能量方程和P1辐射模型迭代计算余量至少小于10⁻⁶。

1.3 水煤浆水分蒸发以及液态 CO₂ 的处理

水煤浆中包含约30~38%的水分, 通常在进行水煤浆水份蒸发计算时, 忽略固相(煤粉)对内部传质的影响, 气化过程中由于炉温较高, 水分蒸发迅速, 蒸发时间占燃尽时间的比例在1%的数量级^[14], 因此水煤浆经喷嘴雾化进入炉内后, 水分在瞬间吸收所需的气化潜热后立刻蒸发完毕。CO₂在6.25 MPa, 20℃时呈液态^[15], 在水煤浆制备过程中将适量浓度的液态CO₂添加到煤浆中, 制备成含水为25%~38%, 含液态CO₂为0%~13%的水煤浆。因为水煤浆中含水量降为25%后, 理论上水煤浆浓度提高到75%。当液态CO₂进入气化炉炉内后, 因为温度急剧升高立即变为气态CO₂, 参与到炉内的气化反应, 也充当了气化氧化剂的作用。

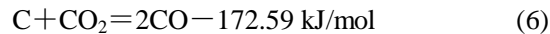
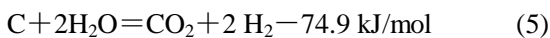
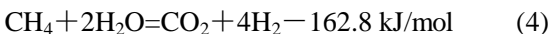
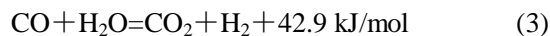
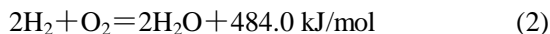
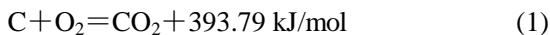
2 气化反应机理及数值模拟分析

2.1 添加液态 CO₂ 对气化效果的影响

水煤浆气化过程中, 各种运行参数对气化炉运

行工况都将产生一定影响, 这些操作参数包括: 水煤浆煤、水配比、气化剂(氧气)浓度、氧、碳原子比、煤粉粒度、气化炉工作压力以及气化温度。正如本文前面所述, 要提高水煤浆气化炉碳转化率, 较为行之有效的两条途径是提高气化温度和提煤、水配比。由于水煤浆气化炉采用耐火砖结构, 所以气化温度受限; 而要提高煤、水配比, 从水煤浆成浆性以及输送和雾化的角度来讲, 存在技术上的难度。目前水煤浆正常的煤水配比为 65% 左右, 最大限度地提高水煤浆浓度, 减少其中的水分, 可以提高水煤浆的着火性能^[14]。研究表明, 当煤中水分含量在 1%~30% 时, 每 1% 的含水量大约要降低 0.1% 的热值, 这是应该努力避免的。另一方面, 还需改善水煤浆的流动特性以便满足储运、输送、雾化的要求。当水煤浆的浓度超过 70% 时, 其表观粘度迅速提高, 以致不宜输送和燃烧。本文主要从提煤、水配比的角度分析通过添加液态 CO₂ 对水煤浆气化特性的影响, 尤其是对提高碳转化率和冷煤气效率的影响。

水煤浆气化反应实际上是加压条件下的高温热化学反应, 在气化炉中进行的主要反应有: ①煤的热裂解与挥发份的燃烧气化; ②固定碳与气化剂(氧气、水蒸汽)间的反应; ③反应生成的气体与气化剂、固定碳间的反应^[16]。其可能进行的化学反应方程式如下:



反应(1)、(2)是燃烧反应, 主要发生在燃烧区; 反应(3)是均相水煤气反应, 它是气化过程中最重要的反应之一, 决定了最终煤气成分的分布; 反应(4)是甲烷-蒸汽重整反应, 该反应随气化温度升高而减弱; 反应(5)、(6)属于非均相气固反应^[17], 主要发生在二次反应区。反应(6)的反应时间大约为 10s 左右, 已有研究表明^[18]反应(5)的速率快于反应(6)。碳与 H₂O 和 CO₂ 反应的时间较微观混合的时间长, 即化学反应是残碳气化反应的控制步骤^[19]。当添加液态 CO₂ 后, 意味着可以相应减少等量的水分, 藉以提高水煤浆煤、配比。

表 2 列举了不同浓度的液态 CO₂ 条件下气化炉

的出口煤气成分, 图 3 显示了不同液态 CO₂ 浓度与平衡组成气的关系。当液态 CO₂ 的浓度从 0 增加到 13% 时, CO 浓度从 42.29% 增加到 50.65%, 增加了 8.36%; H₂ 先增后减, 从 18.96% 变化到 17.70%, 减少了 1.26%; CO₂ 浓度从 15.98% 增加到 16.23%, 增加了 0.25%。由气化原理知, 提高煤水配比后, 由于水分减少, 变换反应(3)平衡点左移, H₂ 减少; CO₂ 浓度增加, 氧化反应(6)平衡点右移, CO 增加; 同时 CO₂ 的浓度增加抑制了碳的燃烧反应, 放热减少, 导致气化炉温度水平降低; 由于 H₂ 绝对浓度变化受到两种因素的影响: 一是由于气化炉内平均温度降低, 均相水煤气反应(3)减弱, H₂ 减少; 同时又由于水煤浆中含水量下降, 变换反应(3)平衡点左移, 两种因素综合作用的结果是 H₂ 绝对浓度减少。表 2 数值模拟的结果印证了上述分析结果。图 3 中 CO 的浓度随液态 CO₂ 的浓度的增加呈上升趋势; 当液态 CO₂ 浓度高于 6% 时开始减少; 炉内 CO₂ 浓度随液态 CO₂ 浓度增加有波动, 总体上是增加的。

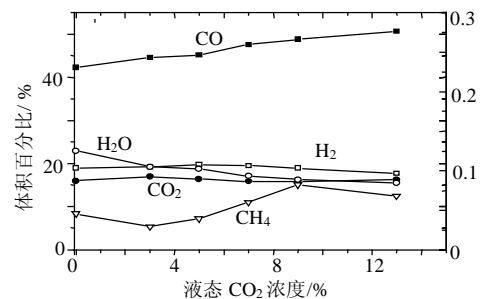


图 3 不同液态 CO₂ 浓度与平衡组成气的关系
Fig. 3 Relationship between gas composition and different different liquor CO₂ concentration

表 2 不同液态 CO₂ 条件下生成气模拟计算结果
Tab. 2 Numerical simulation results of gas composition in different liquid carbon dioxide concentration

项目	工业炉		仿真结果						
	CO ₂ 浓度/%	CWS 浓度/%	0	3	5	7	9	13	
气体组分/%	CO	62	41.0	42.29	44.58	45.25	47.57	48.81	50.65
	H ₂	62	20.0	18.96	19.23	19.73	19.49	18.97	17.68
	CO ₂	62	18.0	15.98	16.99	16.34	15.84	15.91	16.23
	H ₂ O	62	20.0	22.99	19.23	18.70	17.10	16.32	15.49
	CH ₄	62	0.10	0.0453	0.029	0.0392	0.0599	0.0822	0.068
	O ₂	62	0	0	0	0	0	0	0
	COS	62	0.80	---	---	---	---	---	---
冷煤气效率	---	---	70.16	71.74	74.41	76.74	76.94	76.26	
温度/K	---	---	1670	1539	1535	1535	1536	1558	
碳转化率/%	---	---	94.88	96.37	97.08	98.58	98.44	97.56	
OC	---	---	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	

注: “—” 为没有提供或未测出的数据。

2.2 添加液态 CO₂ 对气化温度的影响

添加液态 CO₂ 后，气化炉温度与液态 CO₂ 浓度的关系见图 4。从图可见，随着液态 CO₂ 浓度的提高，气化炉温度的变化趋势是：先较大幅度降低后变化平缓并略有升高。气化温度最低为 1262℃，当液态 CO₂ 浓度升到 13% 时，气化炉出口煤气温度升高到 1285℃。根据气化反应机理，由于液态 CO₂ 进入高温炉膛后，吸收气化潜热后迅速蒸发，形成气态 CO₂，炉内 CO₂ 浓度增加，从而迫使燃烧反应(1)的平衡点左移，燃烧反应效果减弱，气化炉温度水平降低。但是当继续提高液态 CO₂ 的浓度时，由于受到反应平衡的控制，燃烧反应效果不再减弱，所以气化温度没有继续大幅波动；随着液态 CO₂ 浓度不断增大，煤、水配比不断增加，单位时间进入气化炉的煤流量增加，当氧、碳比一定时，氧气供应量已增加，所以气化炉最终平均温度将略有升高。

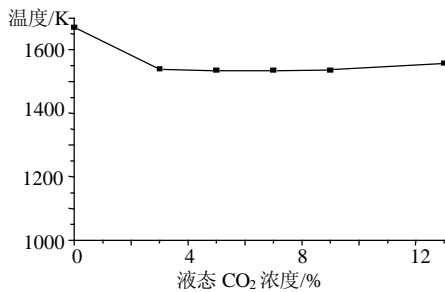


图 4 不同液态 CO₂ 浓度与温度的关系
Fig 4 Relationship between temperature and liquor CO₂ concentration

图 5~图 8 是对煤、水配比为 62% 和 69% (添加了 7% 的液态 CO₂) 两种工况下，气化炉内温度场和焦炭燃尽率进行的对比分析。从图 5 可以看出，在气化炉 Z 轴约为 -0.9~0m 处(喷嘴在 Z 轴 -0.9m 处)是燃烧反应区，主要进行的反应是(1)和(2)，氧气在该区燃烧殆尽，气化温度最高达 1800K；在二次反应区(Z 轴上约 0~3.0m 处)，主要进行非均相反应(5)和(6)，由于两个反应都是吸热反应，所以在该区平均温度较低，约为 1612 K；在 Z 轴 3.0m 至出渣口为管流区，该区气化反应已经较为充分，煤气成份较为稳定，温度略高于二次反应区，约为 1670 K 左右。从图 7 可以看出焦炭燃烧速率的情况，该工况条件下焦炭的最大燃烧速率约为 0.5776kg/s,位置在 Z 轴上 1.0~1.5m 处。

当煤、水配比提高到 69%(添加了 7% 的液态 CO₂，同时减少相应数量的水份)时，从图 6 和图 8 可以看出与上面工况的差别。由于减少了约 7% 左

右的水份，在燃烧区最高温度达到 2100K，高于煤水配比为 62% 的工况；区别主要在二次反应区，由于添加 7% 的 CO₂，导致其分压增加，使非均相反应(6)平衡点左移，客观上促进了反应的进一步进行直至达到新的反应平衡点，所以该反应会吸收更多的燃烧反应热，降低二次反应区的温度，但是由于该反应效果起到了强化二次反应的作用，所以提高了气化效果，从图 9 可以看出焦炭燃烧速率最高达

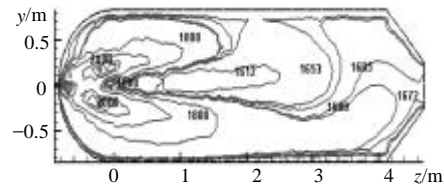


图 5 煤水配比为 62% 时气化炉中轴面温度分布
Fig. 5 Contour of temperature in coal-water of 0.62

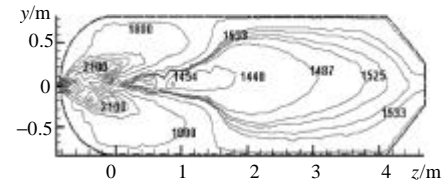


图 6 煤水配比为 69% 时气化炉中轴面温度分布
Fig. 6 Contour of temperature in coal-water of 0.69

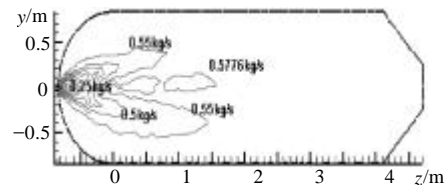


图 7 煤水配比为 62% 时气化炉内焦炭燃烧速率
Fig. 7 Contour of coke burnout velocity in coal-water of 0.62

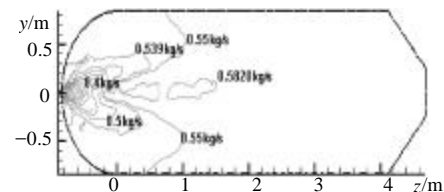


图 8 煤水配比为 69% 时气化炉内焦炭燃烧速率
Fig. 8 Contour of coke burnout velocity in coal-water of 0.69

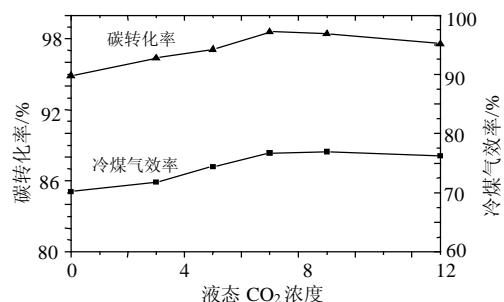


图 9 不同液态 CO₂ 浓度与碳转化率和冷煤气效率的关系
Fig. 9 Relationship between liquid CO₂ concentration and carbon conversion、cold gas efficiency

到 0.5820 kg/s, 高于没有添加 CO₂ 时的工况约 0.0044 kg/s。

2.3 添加液态 CO₂ 对碳转化率和冷煤气效率的影响

从图 9 可以看出, 通过添加液态 CO₂ 的手段, 来提高碳转化率和冷煤气效率的方法起到了很好的效果。随着 CO₂ 浓度的提高, 碳转化率和冷煤气效率随都逐步升高, 并在液态 CO₂ 浓度为 7% 时达到最大值。其主要原因是: 按气化反应机理, 当 O/C 为 1 时煤中的碳完全反应生成 CO, 通入的 CO₂ 起到气化剂的作用, 提高非均相反应(6)的速度, 焦炭烧反应速率增加, 并通过该反应生成 CO 和 H₂, 所以 CO₂ 中的氧原子代替了一部分氧气的作用, 从而使氧气的消耗量降低。这样由液态 CO₂ 带入的一部分氧原子数应计算在 O/C 比值中, 即参加反应的实际 O/C 比值大于 1, 相当于提高了氧、煤比, 从而增加了煤气中的有效气成分, 提高了碳转化率。综合碳转化率和冷煤气效率的变化趋势, 可以得出当液态 CO₂ 浓度为 7% 即煤水配比为 69% 时, 碳转化率和冷煤气效率最高, 分别为 98.58%、76.74%。

2.4 不同氧、碳比条件下, 气化炉出口煤气成分的变化

提高气化炉进料过程中的氧碳原子比, 气化炉出口煤气成份和温度变化见表3。氧、碳原子比为 1.01265 时, 气化炉出口煤气温度为 1370℃, 当氧、碳原子比降为 0.90 时, 温度降为 1232℃。氧碳原子比越高, 意味着气化剂流量和氧气流量增加, 因此燃烧反应(1)加强, 气化炉温度水平提高, 有利于 CO₂ 还原反应(6)和蒸汽分解反应(5)的进行, 可以增加煤气中有效气成分, 提高碳转化率; 但负面影响是反应(2)平衡点左移导致 H₂ 浓度降低。

表 3 不同氧碳比条件下, 气化炉出口煤气成分

项目	不同条件下的仿真结果					
	工业炉	≈1.0	1.01265	1.0	0.95	0.90
OC						
气体 组 分/ %	CO	41.0	42.27	42.29	43.83	43.94
	H ₂	20.0	18.92	18.96	21.71	22.63
	CO ₂	18.0	16.01	15.98	14.41	14.23
	H ₂ O	20.0	23.03	22.99	20.01	18.69
	CH ₄	0.10	0.0202	0.0453	0.0546	0.672
	O ₂	0.10	5.22×10 ⁻¹⁹	6.05×10 ⁻¹⁹	1.56×10 ⁻¹⁸	1.48×10 ⁻²⁰
	CO _S	0.80	—	—	—	—
	温度/K	—	1672	1670	1566	1505
碳转化率/%	—	95.25	94.88	93.52	90.23	
压力/MPa	6.2~6.3	6.25	6.25	6.25	6.25	

3 结论

通过对添加液态 CO₂ 提高水煤浆煤、水配比后对气化效果的数值模拟和气化机理分析, 得到如下结论:

(1) 提高水煤浆煤水配比后, 随着液态 CO₂ 浓度的升高, CO 浓度不断增大, H₂ 浓度有所降低, CO₂ 浓度有一定升高。

(2) 气化炉温度随液态 CO₂ 的增加, 由于 CO₂ 分压增大, 抑制了燃烧反应(1), 导致炉温有一定幅度降低, 后由于 O/C 原子比的增大, 气化温度变化趋缓, 并略有升高。因此, 添加液态 CO₂ 的负面效果是是气化炉的炉温有所降低。根据气化煤种的灰熔点应保证气化温度在灰熔点之上 50℃; 对于高灰熔点的煤种可以添加部分添加剂降低其灰熔点以满足工况要求。

(3) 碳转化率和冷煤气效率随液态 CO₂ 浓度升高而增加, 并在当液态 CO₂ 浓度为 7% 即煤、水配比为 69% 时, 分别达到最大值 98.58%、76.74%, 比原工况分别提高了 3.7%、6.1%。

(4) 提高气化炉进料过程中的氧、碳原子比, 可增加气化炉出口煤气成份中有效气成分, 同时气化炉温度升高, 碳转化率亦有所增大。

总之, 从上述数值模拟和气化机理分析来看, 通过添加液态 CO₂ 的方法提高水煤浆煤水配比对提高碳转化率、提高冷煤气效率是有帮助的, 客观上起到了弥补水煤浆气化碳转化率、冷煤气效率较低的弊端, 但是实际工业应用还需检验。

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, 2(1): 3-10.
Ni Weidou Li Zheng. Muti-generation energy system from coal gasification process[J]. Coal Chemical Industry 2003, 2(1): 3-10(in Chinese).
- [2] 龚欣, 王辅臣. 新型撞击气流床水煤浆气化炉[J]. 燃气轮机技术, 2002, 15(2): 23-25.
Gong Xin, Wang Fuchen. A new type of imping streams entrained bed gasfier used for coal-water-slurry gasification process[J]. Gas Turbine Technology, 2002, 15(2): 23-25(in Chinese).
- [3] 王智化, 王勤辉. 新型煤气化燃烧集成制氢系统的热力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 91-97.
Wang Zhihua, Wang Qinhuai. Thermodynamic analysis of hydrogen production by new coal utilization technology with combined gasification and combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 91-97(in Chinese).
- [4] 徐越, 吴一宁. 二段式干煤粉气化技术的模拟研究与分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 186-190.

- Xu Yue, Wu Yining. Simulation and analysis on gasification technology of a two-stage Dry feed entrained flow bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 186-190(in Chinese).
- [5] 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.
- Jiao Shujian. Comparison of gasifier performance between dry coal feed and coal slurry feed[J]. Gas Turbine Technology, 2000, 13(2): 2-7(in Chinese).
- [6] 唐宏青. 煤化工工艺技术评述与展望[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(1): 1-5.
- Tang Hongqing. Perspectives for R&D in coal chemical industry [J]. Journal of chemical and technology, 2001, 29(1): 1-5(in Chinese).
- [7] 帕坦卡. 传热与流动的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [8] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new *k-e* eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation[J]. Computers Fluids, 1995, 24(3): 227-238(in Chinese).
- [9] 潘维, 池作和. 200MW 四角切圆燃烧锅炉改造工况数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 110-115.
- Pan Wei, Chi Zuohe. Numerical simulation of combustion process in a 200MW tangen-Tially fired furnace to study furnace reconstruction [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 110-115(in Chinese).
- [10] 丁宁, 曹欣玉. 高长宽比六角切向锅炉缺角流场试验与数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 152-157.
- Ding Ning, Cao Xinyu. Experiments and numerical simulation on flow field of hexagonal arraged boiled with a high length-width ratio during absent-angle running[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 152-157(in Chinese).
- [11] Sivathanu Y R, Faeth G M. Generalized state relationships for scalar properties in non-premixed hydrocarbon/air flames combust [J]. Flame, 1990, 82(2): 227-238.
- [12] 于海龙, 赵祥. 氧碳原子比和水煤浆质量分数对水煤浆气化影响的数值模拟[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(4): 390-394.
- Yu Hailong, Zhao Xiang. Numerical simulation analysis on the effects of O/C ratio and coal concentration in coal water slurry on gasification process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2004, 32(4): 390-394(in Chinese).
- [13] 岑可法. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [14] 岑可法, 姚强, 曹欣玉, 等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [15] 张美化. 二氧化碳生产及应用[M]. 西安: 西北大学出版社, 1988.
- [16] 高聚中, 韩伯奇. 水煤浆加压气化煤种评价模型[J]. 煤化工, 1998, 83(2): 17-23.
- Gao Juzhong, Han Boqi. Coal evaluation model for CWS gasification [J]. Coal chemical industry, 1998, 83(2): 17-23(in Chinese).
- [17] 李政, 王天娇. Texaco 煤气化炉数学模型的研究——建模部分[J]. 动力工程, 2001, 21(2): 1161-1168.
- Li Zheng, Wang Tianjiao. Study on mathematical model of texaco gasifier-modeling [J]. Power Engineering, 2001, 21(2): 1161-1168(in Chinese).
- [18] Smoot L D, Smith P J. Coal combustion and gasification [M]. New York: Plenum Press, 1985.
- [19] 王辅臣, 刘海峰. 水煤浆气化系统数学模拟[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(1): 33-38.
- Wang Fuchen, Liu Haifeng. Mathematical simulation for coal water slurry gasification system[J]. Journal of Fuel Chemistry and Thchnology, 2001, 29(1): 33-38(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-12。

作者简介:

周俊虎(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事燃烧理论、新能源开发、能源清洁利用等领域的研究, enejhzhou@zju.edu.cn;

匡建平(1973—), 男, 博士, 主要研究方向为水煤浆、煤粉燃烧及气化;

周志军(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为煤粉燃烧及煤气化;

刘建忠(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为煤高效低污染利用;

岑可法(1935—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事燃烧、能源利用、工程热物理等领域的研究。

(编辑 贾瑞君)