

300 MW 电站锅炉煤粉部分气化多联产系统模拟及经济性分析

陈嘉豪,袁野,何勇,王智化,谭佳昕,朱燕群,岑可法

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘要:为实现煤炭的清洁高效低碳利用,结合粉煤部分气化、半焦燃烧实现煤炭的煤气、电力分级分质利用,采用 Aspen Plus 流程模拟软件针对 300 MW 煤粉锅炉进行了煤粉部分气化、半焦燃烧的煤气、电力多联产系统模拟研究。首先在一定假设条件下,使用 Aspen Plus 软件建立了基于反应平衡原理的煤气化模型,并将模拟计算结果与试验台架气化结果进行比对验证,模拟结果与试验结果基本吻合。在此煤气化模型的基础上探究了氧煤比和煤种对气化炉出口的煤气组成以及 300 MW 多联产系统经济效益的影响规律。计算结果显示,氧煤比从 0.1 提高到 0.3 时,神府东胜煤煤气化的有效气产率从 58.49% 提高到 82.85%,多联产系统增加的年收益从 16 084 万元增加到 62 246 万元;氧煤比为 0.3 时,神府东胜煤、巩义无烟煤、神华烟煤和锡盟褐煤煤气化的有效气产率分别为 82.85%、74.51%、77.21% 和 95.16%,以前 3 者煤种为原料的多联产系统增加的年收益分别为 46 392 万元、28 910 万元和 62 246 万元。在模拟的氧煤比范围内,随着氧煤比升高,煤气品质、有效气产率以及多联产系统的经济效益均明显提高;在氧煤比为 0.3 的工况下,使用神府东胜煤作为原料时系统经济效益最优,其次是神华烟煤以及巩义无烟煤,锡盟褐煤由于煤气化后产生半焦量过低不利于多联产系统的运作。

关键词:煤粉;部分气化;半焦燃烧;多联产;稳态模拟

中图分类号:TQ53

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)05-0020-06

Simulation and economic analysis of pulverized coal partial gasification polygeneration system in 300 MW power station boiler

CHEN Jiahao, YUAN Ye, HE Yong, WANG Zhihua, TAN Jiaxin, ZHU Yanqun, CEN Kefa

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

Abstract: In order to realize the clean, efficient and low-carbon utilization of coal, combined with partial coal gasification and semi-coke combustion to realize the grading and separating utilization of coal-gas and electricity, the Aspen Plus process simulation software was used to simulate the partial pulverized coal gasification and semi-coke combustion of gas and electric power polygeneration system for 300 MW coal powder boiler. First, under certain assumptions, a coal gasification model based on the principle of reaction equilibrium was established by using Aspen Plus software, and the simulation results were compared with the experimental bench gasification results, and the simulation results were basically consistent with the experimental results. On the basis of this coal gasification model, the influence of oxygen-to-coal ratio and coal type on the gas composition at the outlet of the gasifier and the economic benefit of the 300 MW polygeneration system was explored. The calculation results show that the effective gas production rate of Shenfu Dongsheng coal gasification increases from 58.49% to 82.85% when the oxygen-to-coal ratio increases from 0.1 to 0.3, and the increased annual revenue of the polygeneration system increases from 160.84 million yuan to 622.46 million yuan; when the oxygen-to-coal ratio is 0.3, the effective gas production rates of Shenfu Dongsheng coal, Gongyi anthracite, Shenhua bituminous coal and Ximeng lignite coal gasification are 82.85%, 74.51%, 77.21% and 95.16%, respectively. The increased annual income of the polygeneration system by using the three coal types as raw materials is

收稿日期:2020-07-23;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20072301

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB1502900)

作者简介:陈嘉豪(1995—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为煤粉富氧燃烧。E-mail: cjh95@zju.edu.cn。通讯作者:何勇,副教授,研究方向为煤热解燃烧分级利用。E-mail: heyong@zju.edu.cn

引用格式:陈嘉豪,袁野,何勇,等.300 MW 电站锅炉煤粉部分气化多联产系统模拟及经济性分析[J].洁净煤技术,2020,26(5):20-25.

CHEN Jiahao, YUAN Ye, HE Yong, et al. Simulation and economic analysis of pulverized coal partial gasification polygeneration system in 300 MW power station boiler[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 20-25.



移动阅读

463.92 million yuan, 289.1 million yuan and 62.46 million yuan, respectively. It is concluded that the gas quality, effective gas production rate, and the economic benefits of the polygeneration system are significantly improved within the simulated range of oxygen-to-coal ratio, as the oxygen-to-coal ratio increases; in the operating condition where the oxygen-to-coal ratio is 0.3, the economic benefits of the system are the best when using Shenfu Dongsheng coal as the raw material, followed by Shenhua bituminous coal and Gongyi anthracite. The semi-coke produced by coal gasification of Ximeng lignite is too low to be conducive to the operation of the polygeneration system.

Key words: pulverized coal; partial gasification; semi-coke combustion; polygeneration; steady-state simulation

0 引 言

目前煤炭仍是我国主要能源,2019 年我国原煤产量高达 37.5 亿 t,煤炭消费量占能源消费总量的 57.7%^[1],且在未来几十年内,煤炭在我国能源结构中的主导地位不变。然而我国煤炭利用存在煤炭以低效率燃烧方式消耗以及污染物排放严重等问题^[2]。因此探寻煤炭清洁高效利用技术迫在眉睫^[3-4]。煤基多联产技术以煤气化为核心,集发电、供热和化工合成等系统于一体,目前主要有以煤热解、完全气化和部分气化为基础的 3 种技术路线。其中以煤的部分气化为基础的多联产系统的主要原理是根据煤中不同成分特点对煤加以分级分质利用。工艺流程如下:首先煤在气化炉中进行部分气化,产生的煤气可根据成分选择用于工业用气或民用气,气化剩余的半焦则可送入锅炉进行燃烧发电或供热。相较于以完全气化为基础的多联产技术,部分气化系统有以下特点:煤气化过程无需炉膛高压、很长的反应停留时间以及过高的碳转化率,可以在技术要求相对简单的气化炉中进行部分气化,降低了技术难度和成本;该系统通常采用流化床气化技术,相较于气流床,流化床的运行成本更低。美国 Foster Wheeler 公司开发的第 2 代增压循环流化床联(APFBC)和循环和燃煤高性能发电系统(HIPPS)以及日本开发的第 2 代增压流化床循环(APFBC)和增压内部循环流化床联合循环(PICFG)都是基于部分气化多联产技术^[5]。本文对 300 MW 煤粉锅炉进行煤气、电力多联产改造也主要基于煤的部分气化多联产技术,可实现煤炭的煤气、电力分级分质利用。

数值模拟是煤气化的重要研究手段之一^[6],模拟煤气化过程的模型方法一般分为 2 种:反应平衡模型和化学动力学模型^[7]。两者的理论基础分别为反应热力学和反应动力学。反应平衡模型的建模以及计算过程相对简单,但需做出相对较多的假设,如假设整个气化过程都是稳态,最终化学反应都达到平衡状态,忽略流动传热传质特性等,此模型通用性较好。化学动力学模型的建模过程比较复杂,模拟计算的准确程度与气化炉的参数有很强的关联

度,通用性差,优势是其对气化炉出口的煤气组成模拟更为准确。在模拟煤气化过程时,目前国内外学者主要采用反应平衡模型进行建模。张斌等^[8]通过建立气化炉平衡模型研究了不同气化炉的最佳平衡温度,简单设定系统的热损失为煤总热值的 2%,模拟计算所得的气体组分和 EPRI 公布的典型数据基本一致。林立^[9]使用化学渗滤脱挥发分模型(CPD)模拟煤的脱挥发分过程,利用 Gibbs 自由能最小原理计算化学反应平衡得到产物组成,发现用 Aspen Plus 软件模拟气流床气化,对煤气中关键组分的预测结果较为准确,但对 CH₄等微量组分的预测准确性较差。张宗飞等^[10]同样选用了反应平衡模型,应用 Gibbs 自由能最小化方法建立了 Shell 粉煤气化模型,并在模拟参数设定时导入实际工业煤气化的碳转化率以及估算的热损值用以提高模拟结果的准确度,研究了不同操作条件下的气化性能。原满等^[11]利用 Aspen Plus 软件建立了固定床高温气化模型,研究了煤气化过程随空煤比和空气预热温度的变化情况,根据模拟计算结果,分析得知在模拟温度范围内,有效煤气产率随气化剂预热温度上升而提高;气化剂温度相同时,空煤比 1.5 的有效煤气产率最高。综上所述,Aspen Plus 软件模拟煤气化过程的可行性已得到认可和验证,利用反应平衡模型可较为准确地预测煤气主要成分和半焦产量,进而研究不同工况对气化炉运行状况的影响,以探寻其最佳操作条件。

本文基于我国某电厂 300 MW 电站锅炉,对其进行多联产改造研究,在原有系统上新增一套气化系统,用煤部分气化后产生的半焦代替煤作为锅炉的燃料进行燃烧发电。此外,在原有单纯发电的基础上,新增一项煤气产出。整个多联产系统最关键的气化炉反应过程使用 Aspen Plus 软件进行建模计算,得到产出的煤气组分以及半焦产率后,对整个 300 MW 多联产系统进行经济效益分析。

1 Aspen Plus 煤气化模拟

1.1 模型的建立

本文选择通用性较强的反应平衡模型。首先做

以下假设^[12]:① 将整个煤气化过程分为热解和部分燃烧 2 个阶段,且均为稳态;② 煤粉颗粒为球状且忽略其内部的传热和传质;③ 气化炉内气体在径向无温度和浓度梯度;④ 炉压无明显变化。

为提高模拟准确性,需选择最合适的物性方法。煤燃烧生成的烟气主要成分为 N_2 、 CO_2 、 O_2 和 H_2O ,总体上呈非极性或弱极性,适用的物性方法有 RK-SOAVE、PR-BM 或 RKS-BM 等^[13],本文模型采用的状态方程方法为 PR-BM。气化过程中的反应物和产物有: C 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 H_2 、 H_2O 、 O_2 、 N_2 、 NO 、 NO_2 、 N_2O 、 H_2S 、 S 、 SO_2 、 SO_3 、 COAL (煤)和 ASH (灰分)^[14]。其中,煤和灰分为非常规组分,两者的焓模型都选择 HCOALGEN,密度模型选择

DCOALIGT^[15]。焓模型后的选项代码值依次表示燃烧热、生成热、热容和焓基准,选项代码值代表不同的计算方法,煤设定为 6、1、1、1,灰分设定为 1、1、1、1^[16]。

Aspen Plus 中建立的煤气化模拟流程如图 1 所示^[17],其中产率反应器模块(RYield)不规定化学计量系数和动力学数据,用于模拟非常规组分煤按收率转化成常规组分 C 、 H_2 、 O_2 、 H_2O 、 N_2 、 S 的过程(其中 ASH 无需转化),以便进行后续的模拟反应计算,此过程不需输入额外热量,由燃烧过程提供^[11]。吉布斯反应器模块(RGibbs)^[18]用于模拟气化炉的燃烧反应,此模块从理论上计算反应完全时的产物组成,其结果不受反应器大小、进料量等参数影响。

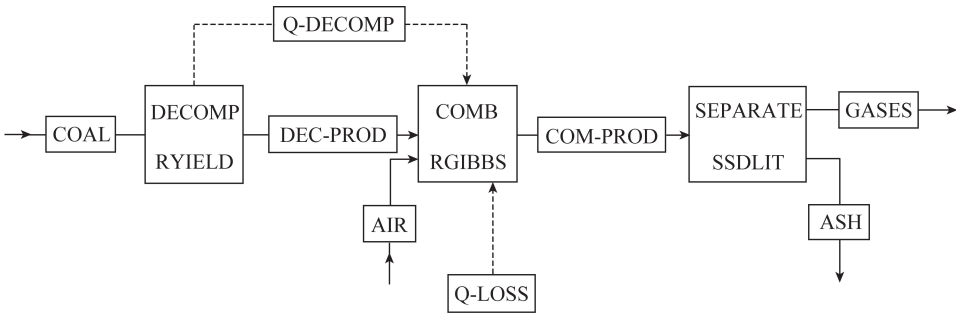


图 1 Aspen Plus 煤气化流程模型

Fig.1 Aspen Plus coal gasification process model

1.2 模型的检验

用于模型检验的对照试验基于浙江大学设计研发的煤粉高温裂解气化试验平台进行^[5]。平台的核心部分是气化炉本体,最高可以承受 1 400 ℃ 的气化温度。对照试验的气化温度选定为 1 200 ℃,炉膛压力为常压,原料采用内蒙古混煤,给煤量为 72 kg/h,煤质分析见表 1。

表 1 煤样工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal									
工业分析/%				元素分析/%				$Q_{\text{net,ar}}/$	
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	$S_{\text{t,ad}}$	O_{ad}	($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
10.36	8.96	29.40	51.28	58.27	3.01	0.70	0.32	18.38	25.59

对照试验开始前将炉膛预热到 1 200 ℃,给粉系统开始向煤粉燃烧器输送煤粉,与氧气或空气混合后进入炉膛发生煤气化反应。反应产物主要为半焦和煤气,半焦通过半焦冷却和分离系统进行收集,煤气在取样后由焚烧火炬焚烧以防污染环境。

使用建立的 Aspen Plus 煤气化流程模型模拟 3 种不同气氛条件下的煤气化过程,分别为纯氧、50% 氧气、空气。Aspen Plus 模拟值与试验值对比见表 2~4。

表 2 纯氧条件下模拟值与试验值对比

Table 2 Comparison between simulated and experimental values under pure oxygen

产物	模拟值/%	试验值/%	绝对误差/%
CO_2	5.61	9.20	3.59
CO	62.14	61.30	0.84
H_2	31.30	29.49	1.81
CH_4	0.40	0	0.40

表 3 50%氧气条件下模拟值与试验值对比

Table 3 Comparison between simulated and experimental values under 50% oxygen

产物	模拟值/%	试验值/%	绝对误差/%
CO_2	6.20	8.82	2.62
CO	46.69	46.16	0.53
H_2	24.82	23.80	1.02
CH_4	0.36	0	0.36

表 4 空气条件下模拟值与试验值对比

Table 4 Comparison between simulated and experimental values under air conditions

产物	模拟值/%	试验值/%	绝对误差/%
CO_2	6.85	7.79	0.94
CO	24.22	23.06	1.16
H_2	15.32	17.12	1.80
CH_4	0.29	0	0.29

由表 2~4 可知,模拟结果与试验结果基本吻合,证明本文建立的气化模型可以较为准确地预测气化炉的出口组分,具有一定的参考价值。

2 300 MW 机组煤粉部分气化多联产研究

2.1 方案设计

本文基于我国某电厂 1 号锅炉(300 MW 煤粉锅炉)进行煤粉部分气化多联产改造,设计的多联产方案流程如图 2 所示,纯氧和煤粉输入气化炉中进行气化反应,产物主要有煤气、半焦和水,半焦代替原煤进入电站锅炉燃烧发电^[19]。在原单纯靠电站锅炉燃煤发电的基础上,增加了一项煤气产出。

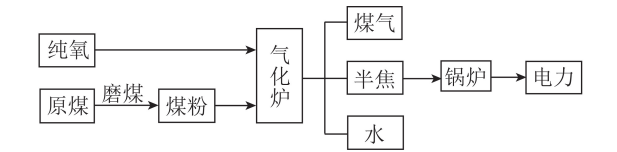


图 2 煤粉部分气化多联产方案流程

Fig.2 Flowchart of coal partial gasification polygeneration project

2.2 模拟计算结果与讨论

2.2.1 氧煤比对多联产系统的影响

1) 氧煤比对煤气组成的影响

为保证多联产系统最后输出的发电功率保持 300 MW 恒定不变,利用 Aspen Plus 软件进行迭代模拟煤气化过程。

该厂所用原煤为神府东胜煤,煤质分析见表 5。5 组不同氧煤比下原煤和纯氧的输入量见表 6。

表 5 神府东胜煤的工业分析和元素分析
Table 5 Proximate and ultimate analysis of Shenfu Dongsheng coal

工业分析/%				元素分析/%				
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	$S_{t,ad}$	O_{ad}
14.00	11.00	27.33	47.67	60.33	3.62	0.70	0.41	9.94

依据 Aspen Plus 的模拟计算结果,整理得到氧煤比对煤气组成以及有效气产率(出口气中 CO、H₂ 和 CH₄ 的占比总和)的影响,如图 3 所示。可知在模拟的氧煤比范围内,其他条件相同时,氧煤比越高,

表 6 不同氧煤比下的原料输入量
Table 6 Input amount of raw materials under different oxygen to coal ratios

氧煤比/(Nm ³ ·kg ⁻¹)	原煤量/t	纯氧量/Nm ³
0.10	166.75	16 675.00
0.15	177.50	26 625.00
0.20	198.78	39 756.20
0.25	240.39	60 097.50
0.30	310.91	93 271.50

有效气率越大。这是因为 C 和 CO₂在高温条件下可以发生反应生成 CO,氧煤比增大使煤粉燃烧反应变得更加剧烈,产生更多热量,促进了上述反应的进行,消耗 CO₂生成更多的 CO,有效气产率随之上升。图中 CO₂和 CO 的占比曲线也证实了这一点。

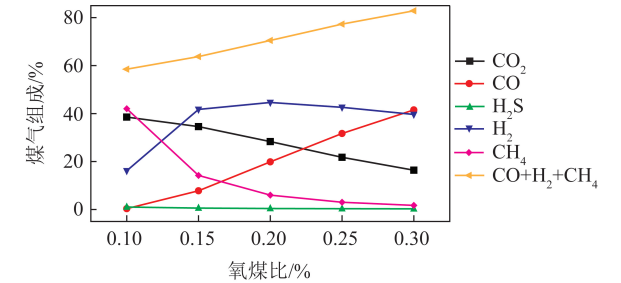


图 3 氧煤比对煤气组成的影响

Fig.3 Effect of oxygen to coal ratio on gas composition

2) 氧煤比对多联产系统经济效益的影响

得到煤气化过程的模拟计算结果后,进一步计算整个多联产系统的投入和产出,以研究氧煤比对多联产系统整体经济效益的影响以及 300 MW 机组进行多联产改造前后的经济性对比。

主要物料价格为:原煤 500 元/t,氧气 173.91 元/kNm³,煤气 920.55 元/kNm³,电 0.40 元/kWh。其中原煤和电的价格均按市场价估算;氧气采用空分制氧(92%纯度),成本取 0.4 kWh/Nm³;煤气先计算热值,价格按天然气进行折算(36 MJ/Nm³,3 元/Nm³),煤气组分热值分别为:CO 12.64 MJ/Nm³、H₂ S 25.35 MJ/Nm³、H₂ 12.74 MJ/Nm³、CH₄ 39.82 MJ/Nm³。根据以上数据计算经济效益,见表 7。

表 7 不同氧煤比下系统改造前后经济效益对比

Table 7 Comparison of economic benefits before and after modification under different oxygen to coal ratios 万元										
项目	氧煤比 0.10		氧煤比 0.15		氧煤比 0.20		氧煤比 0.25		氧煤比 0.30	
	投入	产出	投入	产出	投入	产出	投入	产出	投入	产出
多联产	8.63	19.66	9.34	21.09	10.63	24.44	13.06	31.36	17.17	43.18
纯发电	8.34	16.69	8.88	17.78	9.94	19.88	12.02	24.08	15.55	31.18
增加的小时收益	2.68		2.85		3.87		6.23		10.37	
增加的年收益 ^a	16 084		17 112		23 226		37 381		62 246	

注:a 按 6 000 h 计算,下同。

由表 7 可知,在模拟的氧煤比范围内,300 MW 电站锅炉机组经多联产改造后可以显著提高经济效益,且增加的收益随氧煤比的增大而提高。氧煤比从 0.1 提高到 0.3 时,增加的小时收益从 2.68 万元增加到 10.37 万元,增幅达 287%,可见氧煤比是影响多联产系统经济效益的重要参数。

表 8 3 种对比煤的工业分析和元素分析

Table 8 Proximate and ultimate analysis of three comparative coals

煤种	工业分析/%				元素分析/%				
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	$S_{t,ad}$	O_{ad}
神华烟煤	11.04	5.09	29.67	54.20	64.82	3.86	0.79	0.44	13.96
锡盟褐煤	20.41	13.65	30.57	35.37	47.24	3.35	1.18	0.61	13.56
巩义无烟煤	1.62	11.09	7.67	79.62	77.53	2.38	1.29	0.32	5.77

将氧煤比固定为 0.3,使用 Aspen Plus 软件分别对 4 种煤进行煤气化模拟,获得的煤气组成如图 4 所示。

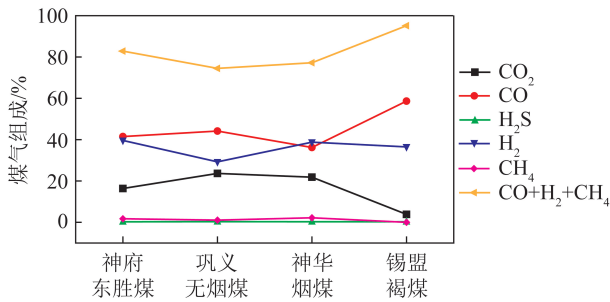


图 4 煤种对煤气组成的影响

Fig.4 Effect of coal type on coal gas composition

表 9 不同煤种系统改造前后经济效益对比

Table 9 Comparison of economic benefits before and after modification of different coal types

万元

项目	神华烟煤		巩义无烟煤		神府东胜煤	
	投入	产出	投入	产出	投入	产出
多联产	13.54	33.52	8.28	20.28	17.17	43.18
纯发电	12.26	24.51	7.50	14.68	15.55	31.18
增加的小时收益	7.73		4.82		10.37	
增加的年收益 ^a	46 392		28 910		62 246	

由表 9 可知,氧煤比为 0.3 时,使用不同煤样对 300 MW 电站锅炉机组进行多联产改造都可以显著提高经济效益,神府东胜煤最优,神华烟煤次之,巩义无烟煤的选择优先度最低。

3 结 论

1)利用 Aspen Plus 建立了煤气化模型,模拟结果与试验值吻合较好,并将该模型应用于 300 MW 电站锅炉机组的煤粉部分气化多联产改造研究。

2)在模拟的氧煤比范围内,随着氧煤比的升

2.2.2 煤种对多联产系统的影响

1)煤种对煤气组成的影响

为研究煤种对多联产系统的影响,除该电厂所用神府东胜煤外,本文选用了神华烟煤、锡盟褐煤以及巩义无烟煤 3 个煤种进行对比研究,煤质分析见表 8。

由图 4 可知,氧煤比为 0.3 时,锡盟褐煤气化后的有效气产率最大,而神华烟煤、巩义无烟煤、神府东胜煤的有效气率基本持平,略低于锡盟褐煤,该结果主要与煤中碳含量有关。

2)煤种对多联产系统经济效益的影响

为研究煤种对多联产系统整体经济效益的影响以及 300 MW 机组进行多联产改造前后的经济性对比,进一步计算整个多联产系统的投入和产出。结果发现锡盟褐煤气化后产生的半焦含量过低,导致系统维持 300 MW 电力输出需投入巨量原煤,因此后续计算只包括神华烟煤、巩义无烟煤和神府东胜煤。主要物料价格同 2.2.1 节,且假设不同煤种价格一致。经济效益计算结果见表 9。

高,煤气品质、有效气产率以及多联产系统的经济效益均明显提高。

3)氧煤比为 0.3 时,使用神府东胜煤的多联产系统经济效益最优,其次是神华烟煤以及巩义无烟煤,锡盟褐煤由于煤气化后产生半焦量过低不利于多联产系统的运作。

4)本文多联产改造经济效益研究只是基于煤气化模型的模拟结果,没有考虑气化炉设计、制造成本以及气化炉与电站锅炉耦合的具体工艺,需在以后的研究中进一步考虑。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2019 年国民经济和社会发展统计公报([1])[N]. 人民日报, 2020-02-29(5).
- [2] 葛立超. 我国典型低品质煤提质利用及分级分质多联产的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- GE Lichao. Basic research on typical low-quality coal upgrading and poly-generation system based on the cascade utilization of coal [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [3] 邢文朝. 采用高速空气射流的煤粉气化炉数值模拟[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2018.
- XING Wenchao. Numerical simulation of pulverized coal gasifier with high-speed air jet [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, Institute of Engineering Thermophysics, 2018.
- [4] YE C, WANG Q, ZHENG Y, et al. Techno-economic analysis of methanol and electricity poly-generation system based on coal partial gasification[J]. Energy. 2019, 185: 624-632.
- [5] 李谦. 煤粉高温裂解特性试验及裂解气化中试系统设计与试验[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LI Qian. Research on high temperature pyrolysis characteristics of pulverized coal, design and pulverized coal, design and experiment of pilot-scale pyrolysis-gasification system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [6] 靳皎, 姚晓虹, 刘晓花, 等. Aspen Plus 在煤气化技术中的应用进展[J]. 山东化工, 2016, 45(13): 71-73.
- JIN Jiao, YAO Xiaohong, LIU Xiaohua, et al. The application progress of Aspen Plus simulation in coal gasification[J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(13): 71-73.
- [7] 吴学成, 王勤辉, 骆仲浚, 等. 气化参数影响气流床煤气化的模型研究(I): 模型建立及验证[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(10): 124-128.
- WU Xuecheng, WANG Qinhui, LUO Zhongyang, et al. Modelling on effects of operation parameters on entrained flow coal gasification(I): Model establishment and validation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38 (10): 124-128.
- [8] 张斌, 李政, 江宁, 等. 基于 Aspen Plus 建立喷流床煤气化炉模型[J]. 化工学报, 2003, 54(8): 1179-1182.
- ZHANG Bin, LI Zheng, JIANG Ning, et al. Modeling of entrained bed coal gasifiers with Aspen Plus [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2003, 54(8): 1179-1182.
- [9] 林立. AspenPlus 软件应用于煤气化的模拟[J]. 上海化工, 2006, 31(8): 10-13.
- LIN Li. Coal gasification simulation using Aspen Plus software [J]. Shanghai Chemical Industry, 2006, 31(8): 10-13.
- [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, 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.
- [11] 原满, 刘亮, 田红, 等. 基于 Aspen Plus 的固定床高温煤气化模拟[J]. 广东化工, 2012, 39(12): 123-125.
- YUAN Man, LIU Hong, TIAN Hong, et al. Fixed bed gasifier simulation based on Aspen Plus software [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(12): 123-125.
- [12] 陈世豪, 曹志凯, 师佳, 等. 基于 ASPEN PLUS 的固定床煤气化稳态模拟方法研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S1): 167-172.
- CHEN Shihao, CAO Zhikai, SHI Jia, et al. Steady-state simulation of fixed bed for coal gasification using ASPEN PLUS [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 167-172.
- [13] 罗伟, 陈隆, 崔豫泓. 基于 Aspen Plus 煤粉工业锅炉系统建模与分析[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(6): 91-94.
- LUO Wei, CHEN Long, CUI Yuhong. Modeling and analysis of industrial pulverized coal boiler based on Aspen Plus [J]. Clean Coal Technology. 2015, 21(6): 91-94.
- [14] KAMBLE A D, SAXENA V K, CHAVAN P D, et al. Co-gasification of coal and biomass an emerging clean energy technology: Status and prospects of development in Indian context [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(2): 171-186.
- [15] 江成林, 李士雨. 基于 Aspen Plus 的循环流化床锅炉效率的计算[J]. 计算机与应用化学, 2015, 32(9): 1109-1112.
- JIANG Chenglin, LI Shiyu. Calculation of the efficiency of circulating fluidized bed boiler based on Aspen Plus [J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, 32(9): 1109-1112.
- [16] 邓昌俊. 基于 Aspen Plus 的低阶煤液态 CO₂ 煤浆气化系统模拟研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016.
- DENG Changjun. Simulation research of CO₂(1)/low rank coal slurry gasification system based on Aspen Plus [D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2016.
- [17] 肖祥, 周臻, 黄歆雅. 基于 Aspen Plus 的水煤浆气化模拟[J]. 广东化工, 2012, 39(18): 22-24.
- XIAO Xiang, ZHOU Zhen, HUANG Xinya. Coal-water-slurry gasification simulation based on Aspen Plus [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(18): 22-24.
- [18] NIKOO M B, MAHINPEY N. Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS [J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(12): 1245-1254.
- [19] ZHAO H, JIANG P, CHEN Z, et al. Improvement of fuel sources and energy products flexibility in coal power plants via energy-cyber-physical-systems approach [J]. Applied Energy, 2019, 254: 113554.