

污泥水煤浆全生命周期综合评价

任世华

(煤炭科学研究总院 煤炭战略规划研究院,北京 100013)

摘要:为了客观评价在水煤浆中掺入污泥的综合效果,以污泥水煤浆为研究对象,建立全生命周期综合评价模型,以对外供应 1 t 蒸汽为最终目标,以煤炭准备—水煤浆生产—水煤浆利用(普通水煤浆路线)为基准路线,对比评价煤炭、污泥准备—污泥水煤浆生产—污泥水煤浆利用(污泥水煤浆路线)全过程的技术性、经济性和环境效益。评价认为,污泥水煤浆路线全过程能源效率 85.40%,全过程消耗煤炭 135.69 kg、污泥 32.94 kg、新鲜水 487.44 kg,全过程投资 8.10 元,全过程成本 129.08 元,全过程废水、烟尘、SO₂、NO_x 排放基本与普通水煤浆路线相当。

关键词:污泥水煤浆;生命周期评价;燃烧;全过程

中图分类号:X784;TQ53 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)02-0069-04

Life cycle assessment of sludge coal water slurry

REN Shihua

(Coal Strategic Planning Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to objectively evaluate the comprehensive effects of sludge coal water slurry (S-CWS), a comprehensive evaluation model of whole life cycle was built, which took 1 t steam supply as ultimate goal to evaluate technological function, economic performance and environmental benefits of S-CWS pathway including coal and sludge preparation, S-CWS produce, S-CWS utilization). The evaluation indicated that the energy efficiency of S-CWS pathway was 85.40%, the whole process consumed 135.69 kg coal, 32.94 kg sludge and 487.44 kg water, total investment was RMB 8.10 yuan, total costs were RMB 129.08 yuan. Discharges of wastewater, smoke and dust, SO₂, NO_x from S-CWS pathway were almost equal to those from CWS pathway.

Key words: sludge coal water slurry; life cycle assessment; combustion; whole process

0 引言

燃煤工业锅炉技术水平普遍较低、污染物控制措施不到位,是我国环境污染的重要因素之一^[1-2]。以煤为原料制备水煤浆,采用水煤浆锅炉燃烧再配套相应的污染物处理措施,可实现近燃气锅炉排放^[3],是城市、工业园区等人口集中区替代燃油锅炉以及燃煤普通链条炉的重要途径^[4]。在水煤浆生产过程中加入污泥,特别是印染等难处理污泥,不仅可实现污泥的无害化处置,而且能充分利用污泥的可燃成分^[5-6],实现资源化利用。笔者以污泥水

煤浆为研究对象,建立全生命周期综合评价模型,以外供 1 t 蒸汽(热值 3.12 MJ/kg)为最终目标,以煤炭准备—水煤浆生产—水煤浆利用为基准路线,对比评价煤炭、污泥准备—污泥水煤浆生产—污泥水煤浆利用全过程的技术性、经济性和环境效益,以综合评价污泥水煤浆生产和利用效果。

1 污泥水煤浆全生命周期评价模型构建

客观评价污泥水煤浆的利用效果,需要从污泥水煤浆生产利用的全过程来看其综合效果^[7]。本文按照全生命周期评价的理论和方法^[8-10],界定评

收稿日期:2015-11-04;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.02.015

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA063506)

作者简介:任世华(1980—),男,河南固始人,副研究员,现任煤炭科学研究总院煤炭战略规划研究院战略研究所副所长,长期从事技术经济评价、能源战略研究,为洁净煤技术评价模型(CCTM)主要开发者之一。E-mail:ren@cct.org.cn

引用格式:任世华.污泥水煤浆全生命周期综合评价[J].洁净煤技术,2016,22(2):69-72,78.

REN Shihua. Life cycle assessment of sludge coal water slurry[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 69-72, 78.

价边界、提出清单分析方法和影响评价指标体系^[3,11],构建污泥水煤浆全生命周期综合评价模型。

1.1 模型边界

1)研究对象。本文选择以污泥和煤炭为主要原料生产的供锅炉或气化炉燃烧使用的污泥水煤浆燃料为研究对象。

2)目标定义。以最终外供 1 t 蒸汽 (3.12 MJ/kg) 为目标,评价污泥水煤浆从原料准备、生产到被完全消耗的生命周期过程。

3)系统边界。空间上煤炭从储煤场开始、污泥从污水处理厂开始,到被完全消耗的所有环节,对象上包括空间和时间过程中的煤炭、污泥和能量流动。能量包括煤炭、污泥等一次能源和电力等二次能源。

4)功能单元。将煤炭从储煤场开始、污泥从污水处理厂开始,到被完全消耗的全生命周期过程划分成首尾相接的功能单元,分别考虑每个功能单元的煤炭流、污泥流和能量流。全生命周期过程可划分为原料准备、水煤浆生产、水煤浆利用等功能单元,如图 1 所示。

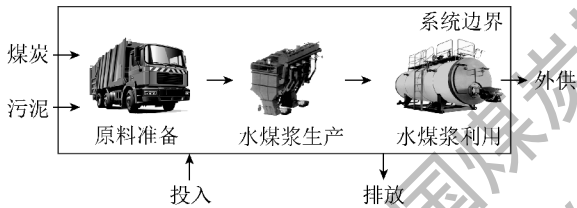


图 1 污泥水煤浆全生命周期评价模型示意

Fig. 1 Life cycle assessment diagram of sludge coal water slurry

1.2 清单分析

以投入的所有煤炭、污泥和资金作为输入,以在这个过程中转化生产的蒸汽为输出,由此列出系统内外输入和输出的清单(图 2)。按照系统输入输出的总体要求^[12],分别建立原料准备、水煤浆生产、水煤浆利用 3 个功能单元的输入输出模型。

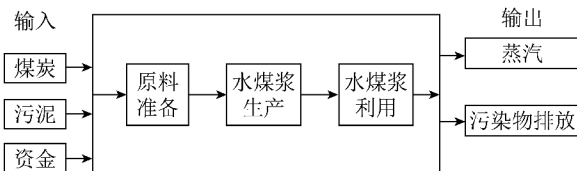


图 2 污泥水煤浆全生命周期清单分析范围

Fig. 2 Scope of life cycle inventory analysis of sludge coal water slurry

1.3 影响评价

评价污泥水煤浆的效果,重点是分析添加污

泥前后效率和消耗、经济效益、环境效益的变化。研究确定的全生命周期评价指标主要包括全过程效率、全过程消耗、全过程投入、全过程成本、全过程排放。

以煤炭和污泥流动为主线,按照功能单元的划分将生命周期路线串联起来。按从上游到下游的顺序为 m ($m=3$) 个功能单元分别编号 i ($i=1, 2, \dots, m$),则全生命周期指标的计算公式可表示为:

$$\eta = \prod_{i=1}^m \eta_i$$

$$C = \sum_{i=1}^m \omega_i \times C_i$$

$$G = \sum_{i=1}^m \omega_i \times G_i$$

$$M = \sum_{i=1}^m \omega_i \times M_i$$

$$I = \sum_{i=1}^m \omega_i \times I_i$$

$$V = V_3$$

$$P_{sw} = \sum_{i=1}^m \omega_i \times P_{swi}$$

$$P_{pm} = \sum_{i=1}^m \omega_i \times P_{pmi}$$

$$P(\text{SO}_2) = \sum_{i=1}^m \omega_i \times P_i(\text{SO}_2)$$

$$P(\text{NO}_2) = \sum_{i=1}^m \omega_i \times P_i(\text{NO}_2)$$

式中, η 为水煤浆生产利用全过程能源效率,%; η_i 为生命周期路线环节 i 的能源转换效率,%; C 为水煤浆生产利用全过程煤耗,kg/t(t 为蒸汽量,下同); C_i 为生命周期路线环节 i 煤耗,kg/t; G 为水煤浆生产利用全过程污泥消耗,kg/t; G_i 为生命周期路线环节 i 污泥消耗,kg/t; M 为水煤浆生产利用全过程水耗,kg/t; M_i 为生命周期路线环节 i 水耗,kg/t; I 为水煤浆生产利用全过程投资,元/t; I_i 为生命周期路线环节 i 投资,元/t; V 为水煤浆生产利用全过程成本,元/t; V_3 为生命周期路线环节 3 成本,元/t; ω_i 为生命周期路线根据物料流确定的功能单元 i 的系数; P_{sw} 为水煤浆生产利用全过程废水排放,g/t; P_{swi} 为生命周期路线环节 i 废水排放,g/t; P_{pm} 为水煤浆生产利用全过程烟尘排放,g/t; P_{pmi} 为生命周期路线环节 i 烟尘排放,g/t; $P(\text{SO}_2)$ 为水煤浆生产利用全过程 SO_2 排放,g/t; $P_i(\text{SO}_2)$ 为生命周期路线环节 i 的 SO_2 排放,g/t; $P(\text{NO}_2)$ 为水煤浆生产利用全过

程 NO_2 排放, g/t ; $P_i(\text{NO}_2)$ 为生命周期路线环节 i 的 NO_2 排放, g/t 。

2 污泥水煤浆全生命周期综合评价

在国家高技术研究发展计划(863计划)的支持下,“污泥掺混制备生物质燃料技术装备及应用”课题组在福建石狮 JN 水煤浆锅炉供热公司建设了一条 25 万 t/a 污泥水煤浆生产线,同时该公司还有一条 25 万 t/a 普通水煤浆生产线,分别以神华煤+印染污泥、神华煤为主要原料生产水煤浆。2 条生产线各自对应一台 100 t/h 高温高压水煤浆锅炉,外

供中压蒸汽,热值 3.12 MJ/kg 。煤炭通过小型低速货车(吨位 7 t)由距离 JN 公司 1.5 km 的储煤场运至水煤浆生产线煤仓,污泥由距离 JN 公司 1 km 的 HT 污水处理厂通过小型低速货车运至 JN 公司水煤浆生产线。以该公司为对象进行全生命周期清单分析和综合评价。按照 JN 公司 2014 年运行的平均数据计算,煤炭、污泥准备—污泥水煤浆生产—污泥水煤浆利用(污泥水煤浆路线)全过程指标(以外供 1 t 蒸汽为基准)见表 1,煤炭准备—水煤浆生产—水煤浆利用(普通水煤浆路线)全过程指标(以外供 1 t 蒸汽为基准)见表 2。

表 1 污泥水煤浆路线全生命周期评价指标

Table 1 Life cycle index of sludge coal water slurry pathway

评价指标	煤炭准备	污泥准备	水煤浆生产	水煤浆利用	合计
能量效率/%	99.93	99.86	92.40	92.50	85.40
煤耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.10	—	135.59	—	135.69
污泥消耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	—	0.05	32.90	—	32.95
新鲜水消耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	—	—	48.84	438.60	487.44
投资/(元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	—	—	0.46	7.64	8.10
成本/(元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	593.00	-299.80	409.84	129.08	129.08
废水排放/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	—	—	—	81.800	81.800
烟尘排放/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.006	0.001	—	14.100	14.107
SO_2 排放/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.035	0.006	—	20.900	20.940
NO_2 排放/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.030	0.005	—	144.000	144.035

表 2 普通水煤浆路线全生命周期评价指标

Table 2 Life cycle index of coal water slurry pathway

评价指标	煤炭准备	水煤浆生产	水煤浆利用	合计
能量效率/%	99.93	94.58	91.97	86.92
煤耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.10	144.63	—	144.73
新鲜水消耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	—	59.02	438.60	497.62
投资/(元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	0	0.41	7.27	7.68
成本/(元 $\cdot \text{t}^{-1}$)	593.00	488.37	137.82	137.82
废水排放/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	—	—	80.200	80.200
烟尘排放/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.007	—	14.000	14.007
SO_2 排放/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.037	—	20.700	20.737
NO_2 排放/($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	0.032	—	145.000	145.032

1) 全过程能源效率。污泥水煤浆路线全过程能源效率 85.40%。能量主要损失在污泥水煤浆利用和污泥水煤浆生产环节,原料准备阶段能量损失很少。污泥水煤浆利用环节,将污泥水煤浆的热值

转化为蒸汽的热量,转换效率 92.50%;污泥水煤浆生产环节,研磨、搅拌消耗电力 25 kWh/t (t 为水煤浆量),能量效率 92.40%;原料准备环节,运输车辆消耗少量柴油,但与运输的煤炭、污泥相比,占比仅 0.07% ~ 0.14%。与普通水煤浆路线相比,污泥水煤浆路线全过程能源效率下降 1.52%,主要原因是:虽然污泥水煤浆在利用环节由于掺入污泥,燃烧更加充分,能量转换效率增加 0.53%;但在生产环节污泥改性和搅拌需要消耗更多的电力,能量转换效率下降 2.18%。

2) 全过程资源消耗。每外供 1 t 蒸汽,污泥水煤浆路线消耗煤炭 135.69 kg 、污泥 32.94 kg 、新鲜水 487.44 kg ,较普通水煤浆路线少消耗煤炭 9.04 kg 、新鲜水 10.18 kg ,相当于以 32.94 kg 的污泥替代了 9.04 kg 的煤炭,替代比 1 : 3.64;污泥水分较高,在污泥水煤浆生产过程中新鲜水加入比例降低,可有效节约水资源。

3) 全过程投资。每外供 1 t 蒸汽,污泥水煤浆

路线全过程投资 8.10 元,主要集中在污泥水煤浆利用环节投资 7.64 元,污泥水煤浆生产环节投资较少,仅 0.46 元。与普通水煤浆路线相比,污泥水煤浆路线增加投资 0.42 元,主要原因是:污泥水煤浆生产环节需要对污泥进行改性增加相应设备,增加投资 0.05 元/t;污泥水煤浆利用环节,因为污泥水煤浆热值较普通水煤浆略低,锅炉出力略小,按照相同使用寿命计算,折合生产 1 t 蒸汽的投资增加 0.37 元。

4) 全过程成本。每外供 1 t 蒸汽,污泥水煤浆路线全过程成本 129.08 万元,比普通水煤浆路线降低成本 8.74 元,主要原因是:在污泥水煤浆生产环节,污泥的成本按照污水处理厂的处置成本计算为 -300 元/t,以致污泥水煤浆的成本较普通水煤浆下降 77.68 元/t(t 为水煤浆量)。

5) 全过程污染物排放。每外供 1 t 蒸汽,污泥水煤浆路线全过程排放废水 81.80 g、烟尘 14.107 g、SO₂ 20.94 g、NO_x 144.035 g,分别较普通水煤浆路线增加 1.6 g (2.00%)、增加 0.1 g (0.71%)、增加 0.203 g (0.98%)、减少 0.997 g (-0.69%)。废水、烟尘、SO₂ 排放略有增加的主要原因是污泥水煤浆热值略低,锅炉出力略有下降,折合生产 1 t 蒸汽的废水排放增加。NO_x 排放略有下降的主要原因是污泥水煤浆热值略低,燃烧温度略有降低,NO_x 产生量略有下降。

3 结 语

以污泥水煤浆为研究对象,建立全生命周期综合评价模型,以外供 1 t 蒸汽(热值 3.12 MJ/kg)为最终目标,以煤炭准备—水煤浆生产—水煤浆利用为基准路线,对比评价煤炭、污泥准备—污泥水煤浆生产—污泥水煤浆利用全过程的技术性、经济性和环境效益。评价认为,污泥水煤浆路线全过程能源效率 85.40%,较普通水煤浆路线略低 1.52%;全过程消耗煤炭 135.69 kg、污泥 32.94 kg、新鲜水 487.44 kg,较普通水煤浆路线少消耗煤炭 9.04 kg、新鲜水 10.18 kg,相当于用 32.94 kg 污泥替代了 9.04 kg 煤炭;全过程投资 8.10 元,较普通水煤浆路线增加 0.42 元,主要是因为增加了污泥改性设备;全过程成本 129.08 元,较普通水煤浆路线降低 8.74 元,主要是因为污泥的利用减少了污泥的处置费用;全过程废水、烟尘、SO₂、NO_x 排放基本与普通水煤浆路线相当。

参考文献:

- [1] 李激扬. 能源效率问题研究的新进展[J]. 求索, 2011(11): 88-89.
Li Jiyang. New progress in research on energy efficiency[J]. Seeker, 2011(11): 88-89.
- [2] 邱欣. 工业燃煤锅炉运行现状及节能改造研究[J]. 中国新技术新产品, 2013(19): 83-84.
Qiu Xin. Status and energy saving reconstruction of industrial coal-fired boiler[J]. China New Technologies and Products, 2013(19): 83-84.
- [3] 煤炭工业洁净煤工程技术研究中心. 清洁煤先进技术应用研究[R]. 北京: 煤炭工业洁净煤工程技术研究中心, 2012: 21-30.
Clean Coal Engineering and Research Center of Coal Industry. Study on advanced clean coal technology[R]. Beijing: Clean Coal Engineering and Research Center of Coal Industry, 2012: 21-30.
- [4] 刘建文, 袁瑞佳, 陈楠. 生物质水煤浆制浆燃烧集成系统技术经济分析[J]. 洁净煤技术, 2014, 19(1): 88-93.
Liu Jianwen, Yuan Ruijia, Chen Nan. Technical economics analysis of bio-CWM preparation and combustion integrated system[J]. Clean Coal Technology, 2014, 19(1): 88-93.
- [5] 史蓓. 综合利用不同类型污泥处置方法探究[J]. 资源节约与环保, 2015(8): 25-26.
Shi Bei. Study on methods of comprehensive utilization of different types of sludge[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2015(8): 25-26.
- [6] 易龙生, 康路良, 王三海, 等. 市政污泥资源化利用的新进展及前景[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 992-997.
Yi Longsheng, Kang Luliang, Wang Sanhai, et al. New progress of resource utilization of municipal sludge and its prospect[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(S1): 992-997.
- [7] 王彩琴, 曹振恒, 付小康. 环保型水煤浆添加剂研究现状[J]. 化工科技, 2014, 22(3): 61-64.
Wang Caiqin, Cao Zhenheng, Fu Xiaokang. Present research status of environment-friendly CWS additive[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2014, 22(3): 61-64.
- [8] 任世华. 煤炭资源开发利用效率分析评价模型研究[J]. 中国能源, 2015, 37(2): 33-36.
Ren Shihua. Study on analysis and evaluation model of coal development and utilization efficiency[J]. China Energy, 2015, 37(2): 33-36.
- [9] 任世华. 基于 CCTM 模型的煤炭转化方向评价[J]. 中国能源, 2012, 34(4): 15-17.
Ren Shihua. Coal conversion evaluation basis on CCTM[J]. China Energy, 2012, 34(4): 15-17.
- [10] 任世华. 洁净煤技术贡献量化分析模型研究[M]//徐振刚, 曲思建. 煤化工技术理论与实践. 北京: 中国石化出版社, 2009: 152-163.

(下转第 78 页)

壳过热问题。但回流挡板增加了燃烧器空气阻力,对鼓风机扬程的要求提高;加入保温层会使风冷前锥温度上升,在锅炉较低负荷下会提高前锥壁面损坏的风险。

参考文献:

- [1] 何海军,纪任山,王乃继. 高效煤粉工业锅炉系统的研发与应用[J]. 煤炭科学技术,2009,37(11):1-4.
He Haijun, Ji Renshan, Wang Naiji. Research and application of high efficiency pulverized coal industrial boiler system [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(11): 1-4.
- [2] 黄跃春. 煤粉锅炉燃烧器的应用现状[J]. 电力建设,1998(1):8-10.
Huang Yuechun. Application status of pulverized coal boiler burner [J]. Electric Power Construction, 1998(1): 8-10.
- [3] 王维斌,傅宪辉,李选友,等. 脉动燃烧器不同形式风冷翅片传热与流动特性的数值模拟[J]. 能源研究与利用,2010(1):24-29.
Wang Weibin, Fu Xianhui, Li Xuanyou, et al. Numerical simulation of heat transfer and flow characteristics of different forms of a pulsating burner[J]. Energy Research and Utilization, 2010(1): 24-29.
- [4] Wang C C, Jerry L, Lin Y T, et al. Flow Visualization of annular and delta winlet vortex generators in fin-and-tube heat exchanger application[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(18): 3803-3815.
- [5] 樊菊芳,何雅玲,陶文铨. 球突翅片表面的数值模拟和特性分析[J]. 工程热物理学报,2008,29(3):488-490.
Fan Jufang, He Yaling, Tao Wenquan. Numerical simulation and characteristic analysis of the surface of the spherical surface of the ball[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(3): 488-490.
- [6] 扈鹏飞,林其钊,马培勇. Swiss-Roll 燃烧器传热特性的试验研究[J]. 燃烧科学与技术,2010,16(3):281-285.
Yi Pengfei, Lin Qizhao, Ma Peiyong. Experimental Research on Heat Transfer in Swiss-Roll Combustor[J]. Combustion Science and Technology, 2010, 16(3): 281-285.
- [7] Maruta K, Takeda K, Ahn J, et al. Extinction limits of catalytic combustion in microchannels [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 957-963.
- [8] Kim N I, Kato S, Fujimori T, et al. Development and scale effects of small Swiss-roll combustors [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3243-3250.
- [9] 纪任山,王永英,李 婷. 一种燃烧室的数值模拟研究 [C]// 第七届全国煤炭工业生产一线青年技术创新文集. 北京:煤炭工业出版社,2012:599-610.
Ji Renshan, Wang Yongying, Li Ting. Numerical simulation of a combustion chamber [C]// The seventh national coal industry production line of young technological innovation. Beijing: Coal Industry Publishing Company, 2012: 599-610.
- [10] 姜思源,王永英,周建明,等. 中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J]. 煤炭学报,2014,39(6):1147-1153.
Jiang Siyuan, Wang Yongying, Zhou Jianming, et al. Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1147-1153.
- [11] 郭军刚,胡丽国,王春侠,等. 流固耦合在涡轮叶片瞬态传热仿真中的应用[J]. 机械科学与技术,2010,29(4):455-460.
Guo Jungang, Hu Ligu, Wang Chunxia, et al. Application of fluid solid coupling in transient heat transfer simulation of turbine blade [J]. Mechanical Science and Technology, 2010, 29(4): 455-460.
- [12] 李 迎,俞小莉,陈红岩,等. 发动机冷却系统流固耦合稳态传热三维数值仿真[J]. 内燃机学报,2007,25(3):252-257.
Li Ying, Yu Xiaoli, Chen Hongyan, et al. Three dimensional numerical simulation of fluid solid heat transfer in engine cooling system [J]. Journal of Internal Combustion Engine, 2007, 25(3): 252-257.
- [13] 宋翀芳. 基于流固耦合解析地下建筑动态传热[J]. 建筑热能通风空调,2011,30(3):34-37.
Song Chongfang. Dynamic heat transfers of underground buildings based on fluid structure coupling [J]. Building Heat Ventilation Air Conditioning, 2011, 30(3): 34-37.
- [14] 江洪蛟. 镍基焊条 Ni327 的焊接工艺[J]. 焊工之友,2005,34(3):71.
Jiang Hongjiao. Welding process of nickel based electrode Ni327 [J]. Friends of The Welder, 2005, 34(3): 71.
- [15] 盛益平. 锅炉燃煤所需理论空气量和烟气中水蒸气量的计算[J]. 河北电力技术,2004,23(1):9-10.
Sheng Yiping. Calculation of theoretical air quantity and water vapor amount of boiler coal [J]. Hebei Electric Power Technology, 2004, 23(1): 9-10.

(上接第72页)

Ren Shihua. Study on quantitative analysis model of clean coal technology contribution [M]// Xu Zhenggang, Qu Sijian. Theory and practice of coal chemical technology. Beijing: China Petrochemical Press, 2009: 152-163.

[11] 任世华,罗 腾,赵路正. 煤炭开发利用碳减排潜力分析[J]. 中国能源,2013,35(11):24-27.

Ren Shihua, Luo Teng, Zhao Luzheng. Carbon reduction potential of coal development and utilization [J]. China Energy, 2013, 35(11): 24-27.

[12] 武娟妮,张岳玲,田亚峻,等. 新型煤化工的生命周期碳排放趋势分析[J]. 中国工程科学,2015(9):69-74.

Wu Juanni, Zhang Yueling, Tian Yajun, et al. Anylysis on carbon emission based on the life cycle of new coal chemical industry [J]. Engineering Sciences, 2015(9): 69-74.