

煤炭洁净燃烧

3 种燃煤供暖锅炉环境影响的生命周期评价

刘安源¹, 刘丝雨², 马玉峰³

(1. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院 山东 青岛 266580; 2. 浙江大学 能源工程学院 浙江 杭州 310058;
3. 中国石化集团胜利石油管理局 胜利发电厂 山东 东营 257087)

摘要: 为了比较链条炉、流化床锅炉以及水煤浆锅炉等不同燃煤供热方式的能耗和环境影响, 采用生命周期评价方法对3种供暖热水生产方式从原煤开采到燃烧供热全过程进行了生命周期清单分析及环境影响评价。生命周期清单结果表明: 当产生相同热量时, 3种锅炉在其生命周期的各种污染物排放中, CO₂排放均最高, 其次是固体废弃物和粉尘。3种锅炉中, 燃煤链条炉的环境影响总负荷最大, 水煤浆锅炉的环境影响总负荷最小。生命周期环境影响评价结果表明各种锅炉对环境的影响在固体废弃物方面影响程度均最大, 然后是粉尘、光化学烟雾、全球变暖、酸雨和富营养化。

关键词: 链条炉; 流化床锅炉; 水煤浆锅炉; 生命周期评价; 环境影响

中图分类号: TK229.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2016)01-0066-05

Comparison of environmental impact for three different coal-fired boilers using life cycle assessment method

LIU Anyuan¹, LIU Siyu², MA Yufeng³

(1. School of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. School of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Shengli Power Plant Administration Bureau of Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257087, China)

Abstract: In order to compare the energy consumption and environmental impact of three coal-fired boilers (grate boiler, fluidized bed boiler, coal water slurry fired boiler) for district heating, life cycle inventory analysis and environmental impact evaluation were conducted using life cycle assessment (LCA) method. Life cycle inventory results showed that: generating the same amount of hot water, three kinds of boilers all had high CO₂, solid waste and particulate matter emission during the whole life cycle period. Environmental impact research results showed that the environmental impact load of coal-fired grate boiler was the highest, and the one of CWS-fired boiler was the least. In addition, for each kind of boiler, the environmental impact of produced pollutants on solid waste in environment was the largest, followed by particulate matter, photo-chemical smog, global warming, acid rain and eutrophication.

Key words: grate boiler; fluidized bed boiler; coal water slurry boiler; life cycle assessment; environmental impact

0 引言

生命周期评价是一种用于评价产品在其整个生命周期, 即从产品原材料的获取和处理、产品的加工与生产、产品的分配与运输、产品的使用与维护、到产品材料的再循环及废弃产品的最终处置等整个过程中, 对环境产生影响大小的技术和方法^[1]。

国内外已有较多研究者利用生命周期评价方法研究了燃烧过程对环境的影响。如: 李娇^[2]对燃煤循环流化床锅炉热电厂进行了生命周期评价研究, Huang等^[3]对生物质碳与煤混烧过程进行了生命周期分析研究, Restrepo等^[4]对煤粉燃烧发电厂进行了生命周期环境评价, 敖红光^[5]基于生命周期评价方法对燃油与燃煤供暖的环境影响进行

收稿日期: 2015-08-19; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.01.013

作者简介: 刘安源(1968—), 男, 山东寿光人, 副教授, 博士, 从事煤燃烧技术及气固两相流方面的教学与科研工作。E-mail: ayliu@163.com

引用格式: 刘安源, 刘丝雨, 马玉峰. 3种燃煤供暖锅炉环境影响的生命周期评价[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(1): 66-70.

LIU Anyuan, LIU Siyu, MA Yufeng. Comparison of environmental impact for three different coal-fired boilers using life cycle assessment method [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(1): 66-70.

了分析比较,晓斌等^[6]对我国洁净煤发电技术进行了生命周期清单分析,崔福华等^[7]则对2种不同半干法垃圾焚烧烟气净化工艺进行了生命周期分析比较。

目前,我国燃煤供热锅炉主要有直接燃用固体煤炭的链条炉和流化床锅炉以及燃用水煤浆的供暖锅炉3种方式。3种锅炉燃烧装置的结构及原理不同,运行能耗及对环境的污染程度也不同。尽管有关文献已经对不同燃煤供暖锅炉的特点进行了介绍^[8-10],但未见对3种供暖锅炉从采煤到热输出全过程产生的环境影响进行比较分析。本文将就产生单位热量条件下整个生命周期过程中不同锅炉形式的煤耗及对环境影响的程度进行研究。

1 生命周期评价研究对象与边界

1.1 锅炉形式及燃料

本研究以位于山东东营市胜利油田的一座供暖锅炉房为对象,选择的3种燃煤供暖锅炉出力均为14 MW。其中,链条炉型号为DHL14-1.28/130/70-A II,锅炉热效率为73.04%;流化床锅炉型号为SHX14-1.25/130/70-A II,锅炉热效率为82.113%;水煤浆锅炉型号为QXFS14-1.0/115/70-SM,锅炉效率为89.975%。

除锅炉本体外,锅炉房还包括锅炉运行所必须的燃料制备、送引风及烟气净化设施。本文中认为3种锅炉均采用相同的烟气净化工艺,即除尘采用干式静电除尘工艺、脱硫采用石灰石湿法烟气脱硫工艺(对于水煤浆燃烧方式,由于采用精煤制浆,硫含量较低,因此无脱硫工艺)、烟气氮氧化物脱除采用选择性催化还原脱硝工艺。

链条炉和循环流化床锅炉用煤来源于淄博矿业集团济北矿区(东营-博山距离250 km),水煤浆锅炉选用由济北矿区精煤制成的水煤浆。

1.2 评价边界

生命周期评价中的能量消耗及污染物排放应当包括从原料生产到最后结束的全部过程。本文生命周期过程包括了3个阶段,即煤炭的开采阶段、燃料的加工及运输阶段、燃料在锅炉内的燃烧阶段。

为了便于比较不同锅炉能耗及对环境的影响,本文以产生1 GJ热量为标准进行分析。另外,本文没有考虑锅炉及附属设备的制造、运输及安装等因素对能源消耗及环境的影响。

2 生命周期清单分析

2.1 能耗及环境影响参数的计算方法

2.1.1 原煤生产阶段能耗及环境影响的计算

由于本文中3种供暖方式所用到的原煤均来自同一煤矿,因此原煤生产阶段的有关数据均直接采用了敖红光^[5]研究结果。

2.1.2 燃料加工与储运阶段能耗及环境影响计算

原煤储存过程中煤堆扬尘损失量根据文献^[11]方法计算,运输过程中散煤的遗洒按经验值3%遗洒量计算,原煤运输过程中消耗燃油量根据运输距离由中国交通年鉴2003中基础数据计算获得^[12],原煤运输过程中污染物排放数据根据文献^[13]计算得到。水煤浆制备过程的电耗根据水煤浆厂的实际数据确定。

2.1.3 燃料使用阶段能耗及环境影响的计算

燃料使用过程自身能耗根据锅炉出厂性能参数指标确定。另外,锅炉运行过程中燃料制备、送引风机等辅机设备的电耗根据厂家提供设备的性能参数确定。锅炉运行过程耗电假定由燃煤电厂提供,根据燃煤火力电厂的平均能耗和排放水平确定该部分电耗引起的能耗和环境影响^[14]。

燃烧过程温室气体排放根据燃料燃烧量确定,其他污染物排放量根据锅炉设备厂家提供的性能指标及所采用的污染物控制设备达到平均水平确定^[14-15]。

2.2 生命周期清单计算结果

2.2.1 链条炉生命周期清单

产生1 GJ热量链条炉燃煤供暖方式生命周期内总煤耗为74.8697 kg/GJ,污染物排放结果见表1。

2.2.2 流化床锅炉

产生1 GJ热量流化床锅炉生命周期内总耗煤量为66.954 kg/GJ,污染物排放结果见表2。

2.2.3 水煤浆锅炉生命周期分析清单

产生1 GJ热量水煤浆炉生命周期内总煤耗为46.00 kg/GJ,污染物排放结果见表3。

2.2.4 3种锅炉生命周期分析清单结果分析

对于每种燃煤锅炉形式,各种污染物排放按绝对值大小的排列顺序均为:CO₂、固体废弃物、粉尘、SO₂、NO_x和CH₄。由于煤是碳及固体杂质含量较高的化石燃料,在锅炉中主要的化学反应是碳与氧的燃烧放热反应,因此燃烧产物中CO₂的排放量

表1 链条炉生命周期分析清单
Table 1 Life cycle analysis inventory of grate boiler

项目	开采阶段	运输	煤场	燃烧阶段	厂用电	合计
烟尘	0.0258	2.093	3.221	12.674	0.011	18.0248
CO ₂	2.924	5.5	—	93.201	8.362	109.987
SO ₂	0.00362	0.001	—	0.4619	0.03514	0.50166
NO _x	0.01514	0.00266	—	0.1627	0.03185	0.21235
CH ₄	0.06353	—	—	—	—	0.06353
固体废弃物	22.3347	—	—	29.083	1.709	53.1177

表2 流化床锅炉生命周期分析清单
Table 2 Life cycle analysis inventory of fluidized bed boiler

项目	开采阶段	运输	煤场	燃烧阶段	厂用电	合计
烟尘	0.0234	1.774	2.732	13.788	0.0209	18.3384
CO ₂	2.65138	4.305	—	93.201	15.913	116.071
SO ₂	0.00328	0.001	—	0.4619	0.06677	0.53295
NO _x	0.01372	0.00266	—	0.1331	0.06138	0.21086
CH ₄	0.05761	—	—	—	—	0.05761
固体废弃物	21.1562	—	—	19.274	2.538	42.9682

表3 水煤浆锅炉生命周期分析清单
Table 3 Life cycle analysis inventory of CWS-fired boiler

项目	开采阶段	运输	煤场	燃烧阶段	厂用电	合计
烟尘	0.01588	—	—	4.068	0.0163	4.0843
CO ₂	1.79665	4.948	—	77.81	4.798	87.556
SO ₂	0.00222	0.01652	—	0.5258	0.02016	0.56248
NO _x	0.00931	0.00531	—	0.1271	0.01827	0.15999
CH ₄	0.03904	—	—	—	—	0.03904
固体废弃物	14.3369	—	—	13.639	0.7474	28.7233

最高;对于固体废弃物和粉尘,除了煤在开采过程中排放较高外,煤中的固体杂质在燃烧过程中主要以固体灰渣的形式存在,还有部分较细粒径的固体杂质随烟气以灰尘的形式排放到大气中,因此固体废弃物与粉尘在整个燃料生命周期中的排放量也较高;对于SO₂和NO_x排放,由于加装了烟气脱硫和脱硝装置,因此排放量较小;至于CH₄的排放,在锅炉运行状况良好的条件下,其排放可忽略不计。

在采用不同锅炉形式对煤燃料进行燃烧时,污染物排放数值有较为明显的差别。链条炉与流化床锅炉均使用经过初步破碎的具有一定粒径的固体煤

粒作为燃料,由于流化床锅炉燃烧效率相比链条炉要高近10%左右,因此在产生相同热量的情况下,大部分污染物的排放数值比链条炉方式要低。但产生相同热量时流化床锅炉CO₂排放量相比链条炉要高,原因是流化床锅炉需要较高压力的流化风使固体床料处于流化状态,故厂用电消耗较大,而该部分电能的生产过程需要消耗较多煤炭从而导致CO₂排放较高。

水煤浆锅炉与其他2种锅炉相比,除SO₂排放外,其他类型污染物排放均有所降低。由于水煤浆燃料中煤的粒径较细,且所用制浆煤种为精煤,因此

水煤浆锅炉的燃烧效率较高。水煤浆制浆所用原料煤中灰含量较低,且水煤浆燃料采用罐车运输、储罐储藏和管线输送,因此燃料在储运过程的损失和对环境的粉尘污染影响较小。上述2个原因使得水煤浆锅炉CO₂、固体废弃物、粉尘等排放较低。水煤浆锅炉方式中SO₂排放略高是由于水煤浆锅炉一般没有采用专门烟气脱硫设施所致。

3 生命周期影响评价及结果分析

3.1 生命周期影响评价计算过程

生命周期影响评价是对生命周期全过程向环境释放的污染物对各具体环境方面的影响潜值进行量化评估。本文根据相关文献中采用的环境影响评价模型框架来进行生命周期影响评价^[5,16-17]。

3.1.1 环境影响分类及影响潜值计算

本文中的环境影响分类包括全球变暖、光化学烟雾、酸雨、富营养化、粉尘、固体废弃物等6种。

环境影响潜值是整个生命周期中所有排放物对该影响方面产生影响的总和,由公式(1)计算:

$$EP(j) = \sum EP(j)_i = \sum [Q(j)_i \times EF(j)_i] \quad (1)$$

式中, $EP(j)$ 为生命周期中对第 j 种潜在环境影响的贡献, kg/GJ (kg 为污染物质量,下同); $EP(j)_i$ 为第 i 种排放物质对第 j 种潜在环境影响的贡献, kg/GJ; $Q(j)_i$ 为第 i 种污染物排放量, kg/GJ; $EF(j)_i$ 为第 i 种排放物质对第 j 种潜在环境影响的当量因子,无量纲。当量因子为以某种选定污染物为参考物时其他物质对该污染物的相对大小,本文中采用了文献[17]中给出的当量因子数据。

3.1.2 污染物环境影响潜值的当量化计算

为了对各种不同环境影响潜值提供可比较的标准,需要对环境影响潜值进行标准化。标准化计算公式如下

$$NP(j) = \frac{P(j)}{R(j)} \quad (2)$$

式中, $R(j)$ 为第 j 年的标准基准,本文采用了文献[5]中的当量基准数据; $P(j)$ 为各种类型环境影响的潜值。

3.1.3 不同影响类型对环境污染的加权评估

加权评估是对不同影响类型的严重性进行排序,然后根据重要性赋予不同影响类型不同的权重值。加权后的影响潜值计算公式如下:

$$WP(j) = WF(j) \times NP(j) \quad (3)$$

式中, $WP(j)$ 为第 j 种影响类型潜值加权后的数值; $WF(j)$ 为第 j 种影响类型的权重系数; $NP(j)$ 为第 j 种影响类型潜值加权前的数值。本文计算采用文献[16]根据属性层次模型法(AHM)得出的权重因子结果。

3.2 不同燃烧方式环境影响总负荷的比较

将每种燃烧方式不同环境影响类型潜值经标准化、加权后的数值相加,得到其生命周期的环境影响总负荷(EIL),单位为每人每年标准当量。

3种不同锅炉产生1GJ热量对环境影响总负荷的比较如图1所示。可以看出,3种燃烧方式中链条炉对环境影响总负荷最大,水煤浆锅炉对环境影响总负荷最小。这主要和链条炉燃烧方式生命周期内各种主要污染物排放量较高,而水煤浆锅炉的污染物排放较低有关。

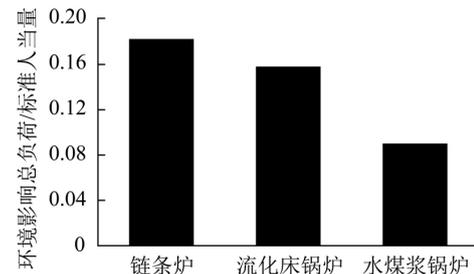


图1 3种不同燃烧方式的环境影响总负荷比较

Fig. 1 Comparison of environmental impact total loads for 3 combustion modes

3.3 各种燃烧方式对不同环境影响的比较

图2为3种锅炉对不同环境影响的比较。

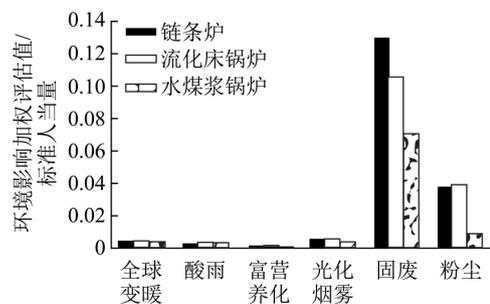


图2 3种锅炉不同环境影响的比较

Fig. 2 Comparison of different environmental impact aspects for 3 kinds of boilers

由图2可以看出,各燃烧方式在不同环境影响方面的相对大小关系基本类似,即固体废弃物方面影响最大,然后是粉尘、光化学烟雾、全球变暖、酸雨和富营养化。但水煤浆锅炉在各环境影响方面加权

评估值均比其他2种燃烧方式要小。

另外,尽管在生命周期分析清单中CO₂的排放量最大,但由于全球变暖属于全球化影响,其标准化基准较大,因此全球变暖潜值经标准化计算后变得较小。固体废弃物和粉尘排放由于排放量较高,标准化基准又不大,经标准化后的数值仍然较高。

4 结 论

1) 对每种燃煤锅炉,产生1 GJ热量时在其生命周期排放的各种污染物中,CO₂最高,其次是固体废弃物和粉尘。这3种污染物排放绝对值要远高于其他类型污染物排放。

2) 3种锅炉中,水煤浆锅炉生命周期的各污染物排放数值最小。在环境影响总负荷方面,链条炉最大,水煤浆锅炉最小。

3) 3种锅炉对环境的影响在固体废弃物方面影响均最大,然后是粉尘、光化学烟雾、全球变暖、酸雨和富营养化。

参考文献:

- [1] 邓南圣,王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
Deng Nansheng, Wang Xiaobing. Life cycle assessment [M]. Beijing: Chemical Industry Press 2003.
- [2] 李 娇. 循环流化床锅炉燃煤技术热电厂生命周期评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Li Jiao. Life cycle assessment of thermal power plant based on circulating fluidized bed combustion technology [D]. Dalian: Dalian University of Technology 2013.
- [3] Huang Y F, Syu F S, Chiueh P T *et al.* Life cycle assessment of biochar cofiring with coal [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 13(1): 166-171.
- [4] Restrepo Á, Miyake R, Kleveston F *et al.* Exergetic and environmental analysis of a pulverized coal power plant [J]. *Energy*, 2012, 45(1): 195-202.
- [5] 敖红光. 大庆王家围子地区燃油和燃煤供暖的生命周期评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
Ao Hongguang. Life cycle assessment of the heating from oil and coal in Wangjiaweizi district of Daqing city [D]. Harbin: Harbin Institute of University 2006.
- [6] 晓 斌, 张阿玲, 陈贵锋. 中国洁净煤发电的生命周期清单分析[J]. 洁净煤技术, 2005, 11(2): 1-4.
Xiao Bin, Zhang Ailing, Chen Guifeng. Life cycle inventory of clean coal-fired power generation in China [J]. *Clean Coal Technology* 2005, 11(2): 1-4.
- [7] 崔福华, 史 敏, 陈德珍. 两种半干法垃圾焚烧烟气净化工艺的生命周期分析比较[J]. 能源技术, 2007, 28(3): 133-136.

Cui Fuhua, Shi Min, Chen Dezhen. Comparison of two kinds of semi-dry incineration flue gas scrubbing technologies based on life cycle assessment [J]. *Energy Technology* 2007, 28(3): 133-136.

- [8] 姜秀民, 马玉峰, 崔志刚, 等. 水煤浆流化悬浮高效洁净燃烧技术研究与应用[J]. 化学工程, 2006, 34(1): 62-65.
Jiang Xiumin, Ma Yufeng, Cui Zhigang *et al.* Study and application of fluidization-suspension high efficiency cleaning combustion technology of coal-water slurry [J]. *Chemical Engineering (China)* 2006, 34(1): 62-65.
- [9] 吕俊复, 张建胜, 岳光溪. 循环流化床锅炉运行与检修[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
Lyu Junfu, Zhang Jiansheng, Yue Guangxi. Operation and maintenance of fluidized bed boiler [M]. Beijing: China water & Power Press 2003.
- [10] 奚士光, 吴味隆, 蒋君衍. 锅炉及锅炉房设备[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
Xi Shiguang, Wu Weirong, Jiang Junyan. Boiler and equipments in boiler room [M]. 3rd. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996.
- [11] 谢海燕. 煤场扬尘污染及治理[J]. 干旱环境监测, 1994, 8(2): 114-115.
Xie Haiyan. Dust pollution and control in coal yard [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 1994, 8(2): 114-115.
- [12] 中国交通运输协会. 中国交通年鉴 2003 [M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2003.
Society of China transportation and communication. Year book of China transportation and communication: 2003 [M]. Beijing: Renmin Transportation and Communication Press 2003.
- [13] 张 亮. 车用燃料煤基二甲醚的生命周期能源消耗、环境排放与经济性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Zhang Liang. Study of life cycle energy consumption, environmental emission and economics of coal-based dimethyl ether as vehicle fuel [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University 2007.
- [14] 张建宇, 潘 荔, 杨 帆, 等. 中国燃煤电厂大气污染物控制现状分析[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(3): 185-196.
Zhang Jianyu, Pan Li, Yang Fan *et al.* Study on current status of air pollution control for coal-fired power plants in China [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology* 2011, 1(3): 185-196.
- [15] 阎维平. 洁净煤发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Yan Weiping. Clean coal power generation technology [M]. Beijing: China Electric Power Press 2002.
- [16] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(2): 234-237.
Yang Jianxin, Wang Rusong, Liu Jingru. Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products [J]. *Journal of Environmental Sciences* 2001, 21(2): 234-237.
- [17] 杨建新, 徐 成, 王如松. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
Yang Jianxin, Xu Cheng, Wang Rusong. Life cycle assessment method of Products and its application [M]. Beijing: China Meteorological Press 2002.