

洁净燃煤发电技术全生命周期评价

周亮亮, 刘朝

(低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400030)

Assessment on Whole Life Cycle of Clean Coal-fired Power Generation Technology

ZHOU Liangliang, LIU Chao

(Key Laboratory of Low Grade Energy Utilization Technology and System, Ministry of Education (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400030, China)

ABSTRACT: A whole life cycle inventory of the clean coal-fired power generation technology was produced by life cycle analysis methodology. A new comprehensive assessment index of whole life cycle was put forward. Assessment on the energy and resource consumption, the effects to environment, and the cost of life cycle was carried out at construction, operational and decommissioning phases for power plants in circulating fluidized bed combustion (CFBC), pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC), integrated gasification combined cycle (IGCC) and ultra super critical (USC). Comprehensive assessment of the above four power plants was executed. The results show that USC technology has the advantages of higher energy payback ratio, lower effect on environment, lower cost and energy consumption, and the better comprehensive assessment indexes. Finally, suggestions were proposed to develop Chinese clean coal-fired technology.

KEY WORDS: clean coal-fired power generation; life cycle inventory; energy and resource consumption; environment impact; life cycle cost; comprehensive assessment of the life cycle

摘要: 采用全生命周期分析方法, 建立洁净燃煤发电技术的完整性生命周期清单, 提出了一个新的全生命周期综合评价指标。对循环流化床、增压流化床联合循环、整体煤气化联合循环和超超临界洁净燃煤电厂, 从建设、运行、退役 3 个阶段的能源和资源消耗、环境影响、生命周期成本进行评价, 并对 4 种电厂进行了生命周期综合评价。结果表明, 超

超临界发电的能源回报率高、环境影响较小、资源和成本低, 其综合评价指标较好。最后提出我国发展洁净燃煤发电技术的建议。

关键词: 洁净燃煤发电; 生命周期清单; 资源与能源消耗; 环境影响; 生命周期成本; 生命周期综合评价

0 引言

我国经济的飞速发展, 导致能源需求愈来愈大, 据统计^[1]2007 年能源消费总量为 26.56 亿 t 标准煤, 其中煤炭占能源消费总量的 69.5%, 而煤电生产占到煤炭消耗量的 70.7%。这种以煤炭为主要一次能源, 煤电在发电中占主导地位的趋势长期不会改变^[2]。快速发展的煤电给经济增长和社会进步提供了强大动力, 同时这种用能的方式也带来了一系列社会和环境问题。积极发展洁净燃煤发电技术可以缓解这些问题, 实现燃煤发电的可持续性发展。目前, 国内对于洁净燃煤发电技术的评价, 主要从发电过程中各种性能的表现来考虑, 从电力生产的全生命周期综合评价角度来评价的较少^[3]。国外相关学者在电力生产的全生命周期评价方面做了大量工作, 大部分将重点放在能耗和温室气体的减排上^[4-6]。开展洁净燃煤发电技术全生命周期综合评价, 有助于识别和改进电力生产的全生命周期各阶段的影响因素, 实现电厂“低耗、高产、环保、低成本”的可持续发展, 并为相应的政策制定提供理论支持。

本文将生命周期理论用于洁净燃煤发电技术, 进行能源与资源消耗、环境排放、经济性的全生命周期评价, 提出了生命周期综合评价指标, 对 4 种洁净燃煤发电技术进行了综合分析。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2011CB710701); 重庆大学“211 工程”三期建设(S-09101)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB710701); Project Supported by the Third Stage Traing of “211 Project” of Chongqing University (S-09101).

1 生命周期边界与研究对象

1.1 生命周期边界的确定

洁净燃煤发电系统的全生命周期分为建造、运行和退役3个阶段。主要包括原料与燃料的开采、加工、运输, 电力生产和排放, 以及固废的运输和处理, 本文建立的生命周期边界未包括电力输送。洁净燃煤发电系统全生命周期边界如图1所示。

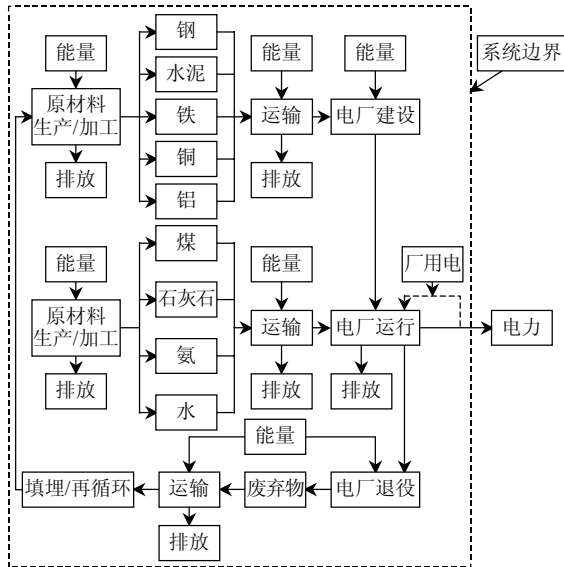


图1 洁净燃煤发电系统全生命周期边界

Fig. 1 Life cycle boundary of clean coal-fired power generation system

1.2 研究对象

根据我国目前清洁燃煤发电技术的研发及商业化应用现状, 示范性电厂投入运行情况, 未来发展趋势, 选取4种清洁燃煤电厂: 循环流化床(circulating fluidized bed combustion, CFBC)、增压流化床联合循环(pressurized fluidized bed combustion combined cycle, PFBC-CC)、整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)和超超临界(ultra super critical, USC)清洁燃煤电厂作为研究对象, 其具体参数如表1所示。清洁燃煤发电系统以输出1kW·h作为该系统的功能单元。

表1 4种清洁燃煤电厂基本参数

Tab. 1 Primarily parameters of the four kinds of clean coal-fired power plants

参数	CFBC	PFBC-CC	IGCC	USC
额定功率/MW ^[7]	300	360	300	1000
净效率/% ^[7]	39.0	41.5	44.0	45.0
年利用率/%	75	75	75	75
服役期限/a	30	30	30	30
厂用电率/%	7.0	4.0	11.0	4.97

2 数据获取与计算方法

2.1 电厂建造

电厂建造阶段主要包括原材料开采、加工、运输, 厂房建造和设备安装。

由于厂房建造和设备安装过程数据缺乏, 建造阶段能耗只考虑原材料的开采、加工、运输过程所消耗的煤、石油、天然气产生热能和电能。建造阶段总能耗由原材料消耗量, 各种原材料在开采、加工、运输中的能耗因子^[1,8]计算得到。假定建造阶段原材料全部采用公路运输, 运距采用全国公路货物运输的平均运距69km^[1], 燃煤、燃油、天然气热值分别取20209kJ/kg、41816kJ/kg、38937kJ/m³。

建造阶段资源消耗包括非能源和能源资源消耗。非能源资源主要有钢材、水泥、铁、铝、铜, 根据选定的额定功率和折算得到的不同电厂单位功率原材料需求量^[9-13], 计算4种清洁燃煤电厂建造阶段原材料清单, 如表2所示。能源资源指开采、加工、运输非能源资源所消耗的煤、石油、天然气。由于水可以进行循环利用, 故未包括在本次研究中。能源资源消耗由非能源资源需求量, 单位非能源资源在开采、加工、运输的能源资源消耗值^[1,8]计算得到。

表2 4种清洁燃煤电厂建造阶段原材料清单

Tab. 2 Material inventory in construction phase of four kinds of clean coal-fired power plants t

电厂建造原材料	CFBC	PFBC-CC	IGCC	USC
钢材	25 875.0 ^[9]	13 998.2 ^[11]	12 020.0 ^[12]	40 293.0 ^[13]
水泥	47 627.4 ^[10]	61 306.0 ^[11]	56 900.0 ^[12]	74 257.0 ^[13]
铁	185.7 ^[10]	222.8 ^[10]	196.0 ^[12]	619.0 ^[10]
铝	125.7 ^[10]	204.4 ^[11]	125.7 ^[10]	255.0 ^[13]
铜	281.3 ^[9]	408.7 ^[11]	171.0 ^[12]	454.0 ^[13]

建造阶段污染物排放主要来自4个方面: 1) 能源资源生产过程产生的排放; 2) 非能源资源开采、加工过程中, 由于能源资源的使用产生的排放; 3) 生产能源与非能源资源消耗的电力在其生产过程中的排放; 4) 非能源资源的运输过程的排放。排放包括CO₂、SO₂、NO_x、CO、CH₄、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、固体废弃物、烟尘和灰尘。能源生产过程的污染物排放量由能源产量与各种排放因子^[8]计算得到。非能源资源开采加工过程中污染物排放量根据各种能源消耗量和相应排放因子^[1,8,14-15]计算得到。生产能源与非能源资源消耗的电力, 非能源资源的运输产生的污染排放, 同理可由消耗量与排放因子^[1,8,14-15]计算得出。

建造阶段工程造价包括建筑工程费用、设备购置费用、安装工程费用和其他费用。工程造价根据电厂单位容量投资^[2]与装机容量计算得到，其中，单机容量增加 1 倍，投资费用降低 20%^[16]，视工程造价为资本成本^[17]。

由电厂建设阶段的总能耗、资源消耗、污染物排放和全生命周期发电量，计算 4 种清洁燃煤发电方式在建造阶段清单，如表 3 所示。

表 3 4 种清洁燃煤电厂建造阶段的清单

Tab. 3 Inventory in construction phase of four kinds of clean coal-fired power plants

建造阶段指标	电厂类型			
	CFBC	PFBC-CC	IGCC	USC
能源消耗/(kJ/(kW-h))	4.66	5.11	5.22	2.24
煤/(kg/(kW-h))	8.38×10^{-4}	1.20×10^{-4}	1.05×10^{-3}	9.29×10^{-4}
石油/(kg/(kW-h))	3.32×10^{-5}	5.29×10^{-6}	4.30×10^{-5}	4.27×10^{-5}
天然气/(m ³ /(kW-h))	1.59×10^{-2}	2.86×10^{-3}	1.47×10^{-2}	9.47×10^{-3}
资源消耗				
钢/(kg/(kW-h))	4.37×10^{-4}	1.97×10^{-4}	2.03×10^{-4}	2.04×10^{-4}
铁/(kg/(kW-h))	3.14×10^{-6}	3.14×10^{-6}	3.32×10^{-6}	3.14×10^{-6}
水泥/(kg/(kW-h))	8.05×10^{-4}	8.64×10^{-4}	9.62×10^{-4}	3.77×10^{-4}
铜/(kg/(kW-h))	4.76×10^{-6}	5.76×10^{-6}	2.89×10^{-6}	2.30×10^{-6}
铝/(kg/(kW-h))	2.13×10^{-6}	2.88×10^{-6}	2.13×10^{-6}	1.29×10^{-6}
环境排放				
CO ₂ /(kg/(kW-h))	9.04×10^{-2}	1.59×10^{-2}	8.84×10^{-2}	6.16×10^{-2}
SO ₂ /(kg/(kW-h))	7.43×10^{-4}	1.30×10^{-4}	7.31×10^{-4}	5.14×10^{-4}
NO _x /(kg/(kW-h))	4.41×10^{-4}	7.74×10^{-5}	4.32×10^{-4}	3.01×10^{-4}
CO/(kg/(kW-h))	2.32×10^{-4}	4.09×10^{-5}	2.27×10^{-4}	1.58×10^{-4}
CH ₄ /(kg/(kW-h))	1.83×10^{-2}	3.21×10^{-3}	1.80×10^{-2}	1.26×10^{-2}
COD/(kg/(kW-h))	2.15×10^{-6}	3.75×10^{-7}	2.13×10^{-6}	1.50×10^{-6}
固体废弃物/(kg/(kW-h))	3.34×10^{-3}	5.86×10^{-4}	3.29×10^{-3}	2.31×10^{-3}
烟尘和灰尘/(kg/(kW-h))	6.75×10^{-4}	1.18×10^{-4}	6.64×10^{-4}	4.64×10^{-4}

2.2 电厂运行

电厂运行阶段主要包括燃料和原料的开采、运输，电力的生产，污染物的排放和控制，固废和粉尘的运输。

电厂运行阶段能耗包括直接能耗和间接能耗。直接能耗指电厂在整个生命周期内消耗燃料产生的能量，其值由消耗的燃料总量和对应的发热量计算得到。间接能耗指电厂运行所需燃料和原料的开采、加工、运输及固体废弃物运输的耗能，其值由燃料和原料的消耗量与对应各过程的能耗因子^[1,8]计算得到。在计算过程中假定燃料和原材料 70% 采用铁路运输、30% 采用公路运输，铁路运距取为 757 km^[1]，固体废弃物完全采用公路运输，运距取为 5 km。

运行阶段的资源消耗主要有煤、石油、天然气、石灰石和氨水，计算过程与电厂建造阶段相似。为了使 4 种发电方式有相同的对比基准，选取同一种煤样^[18]，其特性分析如表 4 所示。假定煤样全水分 M_t 为 M_{ad} 的 2.5 倍，将煤样各种成分折算为收到基

表 4 煤样特性分析

Tab. 4 Characterization of coal samples

工业分析			元素分析(daf)/%				
M _{ad} /%	A _d /%	Q _{ar.net} /(MJ/kg)	C	H	N	S	O
7.14	21.52	20.95	73.37	5.28	2.13	1.54	17.68

基准，计算采用煤的收到基低位发热量。运行阶段除建造阶段列举的 4 个方面产生的污染物排放外，还包括发电过程产生污染物排放。依据文献^[19-20]的污染物计算方法，并根据实际情况做了一些修改，计算发电过程中产生的污染物排放量。其中，USC 电厂采用烟气脱硫(flue gas desulfurization, FGD)、选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)烟气脱硝、静电除尘(electrostatic dust precipitation, ESP)。 $[Ca]/[S]$ (摩尔比)为 1.1，脱硫效率取为 90%， $[NH_3]/[NO_x]$ (摩尔比)为 0.9，脱氮效率取为 75%，粉尘的去除率取为 99.5%^[21-22]；CFBC 和 PFBC 的 $[Ca]/[S]$ 为 2 时，脱硫效率取为 90%^[22]，2 种电厂均采用布袋除尘器，粉尘去除率取为 99%^[22]；由于 IGCC 机组中普遍采用气流床气化炉，同时该机组又具有粗煤气的净化系统，所以其在运行过程中不仅具有较好脱硫、脱氮，除尘的性能，而且可以减排一定量的 CO₂，二氧化碳的减排率取为 30%。IGCC 采用文丘里洗涤器湿法除尘和甲基二乙醇胺法脱硫，由于甲基二乙醇胺法脱硫数据的缺乏，脱硫过程消耗氨水浓度为 20% 的氨水溶液数据替代，粉尘的去除率取为 99%^[16,21-22]。对于石灰石、氨水生产的部分排放数据，通过将生产能耗^[1]折算为标煤计算得到。

电厂在运行过程中主要包括运行(制粉和燃烧

表 5 4 种清洁燃煤电厂运行阶段的清单

Tab. 5 Inventory in operation phase of four kinds of clean coal-fired power plants

运行阶段指标	电厂类型			
	CFBC	PFBC-CC	IGCC	USC
能源消耗/(kJ/(kW-h))	1218.64	1040.58	1275.48	1000.10
资源消耗				
煤/(kg/(kW-h))	5.68×10^{-1}	5.34×10^{-1}	5.03×10^{-1}	4.92×10^{-1}
石油/(kg/(kW-h))	2.36×10^{-3}	2.22×10^{-3}	2.09×10^{-3}	2.02×10^{-3}
天然气/(m ³ /(kW-h))	9.42×10^{-6}	8.86×10^{-6}	2.49×10^{-3}	9.29×10^{-4}
石灰石/(kg/(kW-h))	2.31×10^{-2}	2.17×10^{-2}	0	1.10×10^{-2}
氨水/(kg/(kW-h))	0	0	1.04×10^{-2}	3.87×10^{-3}
环境排放				
CO ₂ /(kg/(kW-h))	1.61	1.61	1.15	1.35
SO ₂ /(kg/(kW-h))	6.47×10^{-3}	6.08×10^{-3}	4.74×10^{-3}	5.20×10^{-3}
NO _x /(kg/(kW-h))	5.07×10^{-3}	4.76×10^{-3}	2.57×10^{-3}	2.82×10^{-3}
CO/(kg/(kW-h))	2.76×10^{-3}	2.59×10^{-3}	2.33×10^{-3}	2.28×10^{-3}
CH ₄ /(kg/(kW-h))	4.50×10^{-3}	4.23×10^{-3}	3.98×10^{-3}	3.89×10^{-3}
COD/(kg/(kW-h))	3.48×10^{-5}	3.27×10^{-5}	2.96×10^{-5}	2.86×10^{-5}
固体废弃物/(kg/(kW-h))	1.26×10^{-1}	1.19×10^{-1}	8.98×10^{-2}	9.87×10^{-2}
烟尘和灰尘/(kg/(kW-h))	1.30×10^{-2}	1.21×10^{-2}	1.08×10^{-2}	1.08×10^{-2}

系统、烟风系统、汽水系统)费用,维护费用(周期性维护费用、更换费用、工资)和燃料费用。运行、维护费用为资本成本的4%,其年增长率和贴现率都取为1%^[17]。

煤炭的价格为450元/t,年增长率为4%。

由运行阶段的总能耗、资源消耗、污染物排放和全生命周期发电量,计算出4种清洁燃煤发电方式在运行阶段清单,如表5所示。

2.3 电厂退役

由于电厂拆除和废弃物再循环过程数据缺乏,退役阶段只考虑废弃物运输的影响。退役阶段的总能耗、资源消耗、环境排放计算方法与其他2个阶段一致,其中,废弃物采用公路运输,运距取为69 km^[1]。退役和处理费用为资本成本的3%,电厂折余值为资本成本的5%,年贴现率为1%^[17]。由退役阶段的总能耗、资源消耗、污染物排放和全生命周期发电量,计算出4种清洁燃煤发电方式在运行阶段清单,如表6所示。

表6 4种清洁燃煤电厂退役阶段的清单

Tab. 6 Inventory in decommissioning phase of four kinds of clean coal-fired power plants

退役阶段指标	电厂类型			
	CFBC	PFBC-CC	IGCC	USC
能源消耗/(kJ/(kW·h))	5.26×10^{-1}	4.51×10^{-1}	4.93×10^{-1}	2.47×10^{-1}
资源消耗 石油/(kg/(kW·h))	1.59×10^{-5}	1.37×10^{-5}	1.49×10^{-5}	7.48×10^{-6}
CO ₂ /(kg/(kW·h))	2.06×10^{-5}	1.76×10^{-5}	1.93×10^{-5}	9.64×10^{-6}
环境排放 SO ₂ /(kg/(kW·h))	1.31×10^{-8}	1.34×10^{-8}	1.47×10^{-8}	7.37×10^{-8}
NO _x /(kg/(kW·h))	6.61×10^{-8}	5.66×10^{-8}	6.19×10^{-8}	3.10×10^{-8}
CO/(kg/(kW·h))	6.69×10^{-8}	1.91×10^{-7}	2.09×10^{-7}	1.05×10^{-7}

3 结果与讨论

3.1 能量回报率

能源回报率(energy payback ratio, EPR)指电厂全生命周期内的总输出电能和建造、运行、退役3个阶段能耗比值,计算公式为^[12,23]:

$$\varepsilon_{\text{EPR}} = \frac{E_e}{E_{\text{con}} + E_{\text{ope}} + E_{\text{dec}}} \quad (1)$$

式中: E_e 为电厂全生命周期内输出的电能; E_{con} 、 E_{dec} 分别为建造、退役阶段的总能耗, E_{ope} 为运行阶段的间接能耗。根据电厂各个阶段的能源消耗清单和EPR计算方法,对4种清洁燃煤电厂的EPR进行计算。4种发电方式中EPR由高到低依次为USC、PFBC-CC、CFBC和IGCC,其值分别为3.59、3.44、2.94和2.81。由于USC具有较高的净效率,在节能方面有良好的优势。4种电厂在运行阶段的能耗占全生命周期能耗的99%以上,其他2个阶段

能耗不足1%,因此在确定的电厂净效率条件下,降低运行阶段的能耗是提高EPR最有效的途径。

3.2 全生命周期资源消耗

电厂全生命周期资源消耗(resource consumption, REC),由建造、运行和退役3个阶段能源和非能源资源消耗总和得到。其计算公式为

$$\beta_{\text{REC}} = \left(\sum_i R_{e,i} + \sum_i U_{e,i} \right)_{\text{con}} + \left(\sum_i R_{e,i} + \sum_i U_{e,i} \right)_{\text{ope}} + \left(\sum_i R_{e,i} + \sum_i UR_{e,i} \right)_{\text{dec}} \quad (2)$$

式中: $R_{e,i}$ 为第*i*种能源资源消耗量; $U_{e,i}$ 为第*i*种非能源资源消耗量。图2为不同发电方式电厂在全生命周期内,输出1 kW·h电量所消耗的资源量。

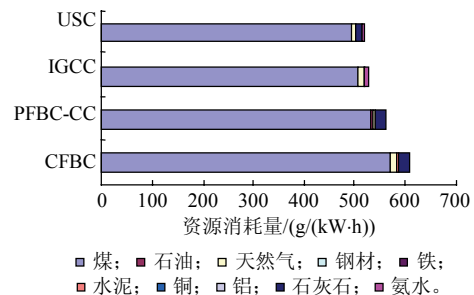


图2 4种清洁燃煤电厂在全生命周期中的资源消耗
Fig. 2 Resources consumption in the entire life cycle of four kinds of clean coal-fired power plants

由图2可以看出,在全生命周期内资源消耗量最大的为CFBC,资源消耗量最小的为USC,其值分别为607.2和518.2 g/(kW·h)。资源消耗量中煤所占的比例在93.7%~95.2%之间,因此煤的特性对资源消耗的影响比较显著。由于CFBC资源消耗量较大,所以不宜将其建在离煤矿较远的地方,而对于USC和IGCC完全可以实现电厂与煤矿的远距离分布。石灰石在CFBC、PFBC-CC和USC电厂中的消耗量仅次于煤,主要是由于这些电厂都采用石灰石脱硫。IGCC电厂中粗煤气经过常温煤气净化系统,净化过程需要消耗以液氨为原料的甲基二乙醇胺溶液,所以IGCC电厂的氨水消耗量比其他电厂高。其他种类的资源消耗主要在电厂的建造阶段,从整个生命周期来看数值均较小。

3.3 全生命周期环境影响

依据国际环境毒理学与化学学会(society of environmental toxicology and chemistry, SETAC)、联合国政府间气候变化专家委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)和ISO14042建立的框架,将环境影响进行分类和特征化。考虑到已建立的清单和中国环境的实际情况,将电厂整个生命周期过程环境影响潜值分为:

全球变暖潜值(global warming potential, GWP)、酸化潜值(acidification potential, AP)、富营养化潜值(eutrophication potential, EP)、人体毒性潜值(human toxicity potential, HTP)、固体废弃物潜值(solid waste potential, SWP)和烟尘及灰尘潜值(soot and dust potential, SAP)。环境影响特征化的过程主要包括环境影响潜值的计算, 其计算公式^[8]为

$$\delta_{\text{EEP}}(j) = \sum \delta_{\text{EEP}}(j)_i = \sum [Q(j)_i \times \delta_{\text{EF}}(j)_i] \quad (3)$$

式中: $\delta_{\text{EEP}}(j)$ 为第 j 种环境影响潜值; $\delta_{\text{EEP}}(j)_i$ 为第 i 种排放物质对第 j 种潜在环境影响的贡献; $Q(j)_i$ 为第 i 种物质排放量; $\delta_{\text{EF}}(j)_i$ 为第 i 种排放物质对第 j 种潜在环境影响的当量因子。

特征化过程中全球变暖潜值以 CO_2 当量计算, 酸化潜值以 SO_2 当量计算, 富营养化潜值以 NO_3 当量计算。由每种物质的排放量乘以相应的当量因子^[8], 计算得到分类后的环境影响潜值如表 7 所示。

表 7 4 种清洁燃煤电厂在全生命周期内的环境影响潜值

Tab. 7 Environment effect potential in the entire life cycle of four kinds of clean coal-fired power plants

环境影响潜值	CFBC			PFBC-CC		
	建设阶段	运行阶段	退役阶段	建设阶段	运行阶段	退役阶段
GWP/(kg CO_2 eq/(kW·h))	6.16×10^{-1}	3.34	4.18×10^{-5}	1.08×10^{-1}	3.23	3.61×10^{-5}
AP/(kg SO_2 eq/(kW·h))	1.05×10^{-3}	1.00×10^{-2}	5.93×10^{-8}	1.84×10^{-4}	9.42×10^{-3}	5.30×10^{-8}
EP/(kg NO_3 eq/(kW·h))	4.95×10^{-7}	8.00×10^{-6}	0	8.63×10^{-8}	7.52×10^{-6}	0
HTP/(kg/(kW·h))	1.24×10^{-3}	1.18×10^{-2}	6.87×10^{-8}	2.17×10^{-4}	1.10×10^{-2}	6.26×10^{-8}
SWP/(kg/(kW·h))	3.34×10^{-3}	1.26×10^{-1}	0	5.86×10^{-4}	1.19×10^{-1}	0
SAP/(kg/(kW·h))	6.75×10^{-4}	1.30×10^{-2}	0	1.18×10^{-4}	1.21×10^{-2}	0
环境影响潜值	IGCC			USC		
	建设阶段	运行阶段	退役阶段	建设阶段	运行阶段	退役阶段
GWP/(kg CO_2 eq/(kW·h))	6.04×10^{-1}	2.06	3.95×10^{-5}	4.23×10^{-1}	2.34	1.98×10^{-5}
AP/(kg SO_2 eq/(kW·h))	1.03×10^{-3}	6.54×10^{-3}	5.80×10^{-8}	7.25×10^{-4}	7.17×10^{-3}	2.91×10^{-8}
EP/(kg NO_3 eq/(kW·h))	4.90×10^{-7}	6.82×10^{-6}	0	3.45×10^{-7}	6.57×10^{-6}	0
HTP/(kg/(kW·h))	1.22×10^{-3}	7.72×10^{-3}	6.84×10^{-8}	8.53×10^{-4}	8.47×10^{-2}	3.43×10^{-8}
SWP/(kg/(kW·h))	3.29×10^{-3}	8.98×10^{-2}	0	2.31×10^{-3}	9.87×10^{-2}	0
SAP/(kg/(kW·h))	6.64×10^{-4}	1.08×10^{-2}	0	4.64×10^{-4}	1.08×10^{-2}	0

2) 对酸化潜值有贡献的气体主要有 SO_2 和 NO_x 。整体上 AP 由高到低依次为 CFBC、PFBC-CC、USC、IGCC, AP 的范围由 IGCC 中的 $0.0076 \text{ kg SO}_2 \text{ eq/(kW·h)}$ 到 CFBC 中的 $0.011 \text{ kg SO}_2 \text{ eq/(kW·h)}$ 之间分布, 建造和退役阶段 AP 所占比例分别为 9.4%、1.9%、13.6%、9.2%。即使 AP 在最大值时也仅为常规电厂的 10% 左右^[9], 因此这几种清洁燃煤发电方式都有很好的低 AP 特性。整个生命周期内各个过程消耗电力产生的 AP 所占比例, 分别为 74.0%、74.0%、92.0%、82.0%。IGCC 的 AP 受电力消耗的影响较大, 因此降低电力消耗产生的 AP, 将使 IGCC 更具有环境优势; CFBC 和 PFBC-CC 的 AP 虽然受电力消耗影响较小, 但它们整体的 AP 较大。

1) 对全球变暖潜值有贡献的气体主要有 CO_2 、 NO_x 、CO 和 CH_4 。整体上 GWP 最低的为 IGCC $2.67 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/(kW·h)}$, 最高的为 CFBC $3.95 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/(kW·h)}$, 建设和退役阶段 GWP 总和约为全生命周期 GWP 的 15%。这 4 种发电方式的 GWP 比国外相关研究者得出的结果^[6,9,13]高出 3~5 倍, 主要是由于在全生命周期中, 非能源资源所需的能源(煤、石油、天然气、电)在生产 and 消耗过程中排放大量温室气体, 尤其是能源开采中 CH_4 的大量排放, 其对 GWP 的贡献率在 50% 以上。电厂全生命周期内各阶段消耗电力对总的 GWP 贡献率最大, 去除该因素后得到 GWP, 其值分别为 $1.62 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/(kW·h)}$ 、 $1.59 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/(kW·h)}$ 、 $0.65 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/(kW·h)}$ 、 $0.96 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/(kW·h)}$, 由于 IGCC 对燃料进行燃烧前净化, 故其在运行阶段具有较好的温室气体减排效果。

3) 采用对富营养化有贡献的 COD 来计算富营养化潜值。CFBC 在全生命周期内表现出高 EP 特性, USC 在全生命周期内表现出低 EP 特性。4 种电厂的建造阶段 EP 所占比例较低, 范围为 1.1%~6.7%, 全生命周期内资源生产和消耗电力产生的富营养化约占到总 EP 的 66%, 退役阶段无富营养化的影响。运行阶段的电力生产过程中富营养化影响, 由大到小依次为 CFBC、PFBC-CC、IGCC、USC, 这些 EP 占到全生命周期 EP 的 33.3%~35.1%。所以对于水质受外界环境影响较敏感的区域, 发展火电应优先考虑 USC。

4) 对人体毒性潜值有贡献的气体主要有 SO_2 、 NO_x 和 CO。CFBC 在 4 种发电方式中 HTP 最大,

值为 0.018kg/(kW·h), IGCC 的 HTP 最小, 值为 0.0077kg/(kW·h)。不同发电方式运行阶段 HTP 占整个生命周期比例分别为 90.5%、98.1%、86.4%、90.8%, 而发电过程的 HTP 在运行阶段比例分别为 22.9%、22.9%、4.5%、14.6%。由此可以看出, 运行阶段的非电力生产对整个生命周期内 HTP 贡献率最大, 主要由于燃煤的生产和运输过程, 引入大量对 HTP 有贡献的气体。

5) 对固体废弃物潜值有贡献的物质主要有煤矸石、废渣和炉渣。4 种发电方式中 CFBC 的 SWP 最高, 值为 129.6g/(kW·h), PFBC-CC 和 USC 的 SWP 次之, IGCC 的 SWP 最小。主要是因为 CFBC 效率较低, 脱硫时的硫、钙摩尔比高, 增加了固体废弃物排放量。建造阶段的 SWP 占全生命周期的 SWP 比例依然很低, 分别为 2.6%、0.5%、3.5%、2.3%, 所以固体废弃物的减排应从运行阶段着手。

6) 根据电厂 3 个阶段的烟尘和灰尘排放量, 得到不同发电方式的烟尘和灰尘潜值。CFBC 在整个生命周期内 SAP 最高, 值为 13.6g/(kW·h), PFBC-CC 的 SAP 值为 12.3g/(kW·h), IGCC 的 SAP 值为 11.4g/(kW·h) USC 的 SAP 值最小为 11.2g/(kW·h), 此时 4 种电厂因电力消耗和运输产生的 SAP 约为全生命周期 SAP 的 98%。从运行阶段的电力生产过程来看, CFBC 中飞灰占总灰分的比例较高、净效率较低, 使 SAP 依然最高; PFBC-CC 由于使用循环流化床锅炉, 飞灰占总灰分的比例也较低, 所以 SAP 略低于 CFBC; IGCC 将燃料气化后除尘, 降低了灰尘和烟尘的排放, 此时 IGCC 的 SAP 为 CFBC 的 4/5; USC 采用液态排渣, 安装效率很高的 ESP, 因此 USC 的 SAP 最小。

为了比较不同环境影响的严重性, 对各种环境影响潜值标准化后加权。将各种环境影响潜值与已研究得出的标准人当量相比, 进行标准化。用标准化后的环境影响潜值乘以相应的权重因子得到可比较的环境影响潜值^[8], 其计算公式为

$$E_{WP}(j) = W_F(j) \times N_P(j) \quad (4)$$

式中: $E_{WP}(j)$ 为加权后的环境影响潜值; $W_F(j)$ 为第 j 种环境影响的权重因子; $N_P(j)$ 为标准化后的影响潜值。4 种电厂全生命周期的加权环境影响潜值如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 4 种清洁燃煤电厂对环境的潜在影响大小依次是: SAP、HTP、GWP、SWP、AP、EP, 其值占全部环境影响的比例分别为 27.9%、

20.9%、20.4%、18.5%、4.9%、0.0062%。对 SAP 贡献最大的是运行阶段燃料、原料的运输过程粉尘的排放; 对 HTP 影响最大的是运行阶段除电力生产之外的其他过程电力消耗; 对 GWP 影响较显著的是运行阶段电力生产和其他阶段的电力消耗产生的温室气体; 对 SWP 影响较大的是能源开采和电力生产过程; EP 对环境影响最小, 其均值为 0.0001 毫人当量。整体上, IGCC 的各种环境影响最小, PFBC-CC 的环境影响最大, 主要是由于 IGCC 采用燃料的前处理方式, 使得整体环境影响较小。

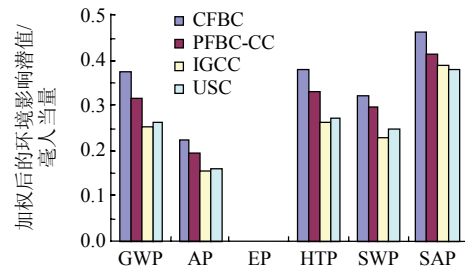


图3 4种清洁燃煤电厂的加权环境影响潜值

Fig. 3 Weight of environment effect potential of four kinds of clean coal-fired power plants

3.4 生命周期成本

生命周期成本(life cycle cost, LCC)是指电厂在生命周期的3个阶段成本的总和, 其包括资本成本、运行和维护成本、燃料成本、退役成本^[17]。其计算公式^[24]为

$$\begin{aligned} \pi_{LCC} = & P + C_E \cdot \frac{1+e_1}{1+d} \cdot [1 - (\frac{1+e_1}{1+d})^n] / (1 - \frac{1+e_1}{1+d}) \\ & + C_{O,M} \frac{1+e_2}{1+d} \cdot [1 - (\frac{1+e_2}{1+d})^n] / (1 - \frac{1+e_2}{1+d}) + \\ & \sum_{r=1}^n C_{Rr} [\frac{1}{(1+d)^r}] + (C_{D-D} - L) \frac{1}{(1+d)^n} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: P 为资本成本; n 为电厂的使用期限; C_E 为每年所需的燃料成本; $C_{O,M}$ 为电厂年运行和维护成本; C_{Rr} 为第 r 年的替换成本; d 为贴现率; e_1 为燃料年增长率; e_2 为运行、维护费用年增长率; L 为电厂折余值; C_{D-D} 为电厂的退役和处理成本。根据已有模型和确定的数据, 计算出 4 种电厂生命周期成本, 如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 4 种电厂生命周期成本由最低的 USC 0.28 元/(kW·h) 到最高的 CFBC 0.33 元/(kW·h) 之间分布。PFBC-CC 和 IGCC 的工程造价较其他 2 种电厂高, 工程造价占到生命周期成本的比例分别为 8.6%、11.0%。4 种发电方式的燃料成本由大到小依次为 CFBC、PFBC-CC、USC、IGCC, 它们所占生命周期成本的比例为 91.8%、91.2%、

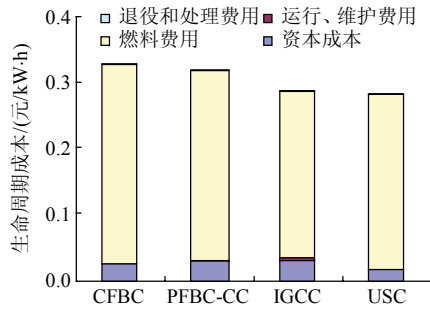


图 4 4 种清洁燃煤电厂的生命周期成本
Fig. 4 Life cycle cost of four kinds of clean coal-fired power plants

93.7%、88.7%，所以煤炭价格对 IGCC 的生命周期成本影响较其他 3 种小。

3.5 电厂生命周期综合评价指标

在电厂全生命周期中的费用主要有投资成本、运行和维护成本、燃料成本、退役成本、副产品的收入、发电的收入和环境的外部经济效应^[17,25]。将发电的收入和副产品的收入作为电厂系统的收益，将投资成本、运行和维护成本、燃料成本、退役成本和环境的外部经济效应作为电厂系统的支出，采用系统收益与支出的比值作为生命周期综合评价指标，用 ξ_{LCA} 表示。生命周期综合评价指标值越大，评价对象就越有优势。

由于副产品收入数据的缺乏，收益的计算中只考虑发电的收入，发电的收入由发电量和上网电价计算得到，用 M_{in} 表示，则收益的计算公式为

$$M_{in} = E_e \times P_E = \varepsilon_{EPR} \times (E_{con} + E_{ope} + E_{dec}) \times P_E \quad (6)$$

式中： E_e 为电厂全生命周期发电量； P_E 为电厂的上网电价，上网电价取为 0.2887 元/(kW·h)。

除环境的外部经济效应外，其他的成本可归到生命周期成本当中，环境的外部经济效应 E_c 通过避免环境污染造成损失所产生的费用来定量^[26]，所以 ξ_{LCA} 计算公式为

$$\xi_{LCA} = \frac{\varepsilon_{EPR} \times (E_{con} + E_{ope} + E_{dec}) \times P_E}{E_c + \pi_{LCC}} \quad (7)$$

整个生命周期内的 M_{in} 、 E_c 和 π_{LCC} 如表 8 所示。

根据式(7)计算得出 4 种清洁燃煤电厂的生命周期综合评价指标，其值分别为 0.041、0.048、0.059、0.057。可以看出 IGCC 的 ξ_{LCA} 值最高，CFBC 的 ξ_{LCA}

表 8 清洁燃煤电厂收益和支出
Tab. 8 Revenue and expenditure of clean coal-fired power plants

收益和支出	CFBC	PFBC-CC	IGCC	USC
$M_{in}/\text{元}$	1.71×10^{10}	2.05×10^{10}	1.71×10^{10}	5.69×10^{10}
$E_c/\text{元}$	3.98×10^{11}	4.08×10^{11}	2.71×10^{11}	9.39×10^{11}
$\pi_{LCC}/\text{元}$	1.93×10^{10}	2.26×10^{10}	1.69×10^{10}	5.58×10^{10}

值最低，这是因为 CFBC 的低效率和高的环境排放使 CFBC 的 ξ_{LCA} 值最低，IGCC 优良的环境特性使其环境成本较低，导致最终 ξ_{LCA} 值最高。所以从整体上来看 IGCC 和 USC 对环境、资源、经济的压力较小，其次为 PFBC-CC，最后为 CFBC。

4 结论

通过对 4 种清洁燃煤电厂，从建设到退役的全生命周期过程中，能源和资源消耗、环境影响、成本及综合评价指标的分析，可以得出：

1) 电厂运行阶段的性能决定了各种评价指标的优劣；电厂全生命周期消耗的资源主要有煤、石灰石、天然气、石油、氨水；生命周期成本主要由燃料和资本成本构成；环境影响的程度由大到小依次为烟尘及灰尘潜值、人体毒性潜值、全球变暖潜值、固体废弃物潜值、酸化潜值、富营养化潜值。

2) CFBC、PFBC-CC、IGCC、USC 的生命周期综合评价指标分别为 0.041、0.048、0.059、0.057。IGCC 和 USC 的生命周期综合评价指标最优、其次为 PFBC-CC，最后为 CFBC。建议从技术和工艺上进一步降低 IGCC 电厂耗能和单位容量投资，并利用 IGCC 良好的环保特性和 USC 的低生命周期成本优势，积极发展这两种电厂。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009: 149-291.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2008[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009: 149-291 (in Chinese).
- [2] 吕伟业, 汤蕴琳, 方正. 中国火电结构优化和技术升级研究概论[J]. 电力建设, 2002, 23(11): 9-22.
Lü Weiyue, Tang Yunlin, Fang Zheng. Outline of optimization of thermal power structures and study on technical upgrading in China [J]. Electric Power Construction, 2002, 23(11): 9-22(in Chinese).
- [3] 俞珠峰, 陈贵峰, 杨丽. 中国洁净煤技术评价方法及评价模型 CCTM[J]. 煤炭学报, 2006, 31(4): 515-519.
Yu Zhufeng, Chen Guifeng, Yang Li. Methodology of Chinese clean coal technologies evaluation and CCTM model[J]. China Coal Society, 2006, 31(4): 515-519(in Chinese).
- [4] Naser A, Timothy T. Life cycle analysis of UK coal fired power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(2): 212-220.
- [5] Hiroki H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case[J]. Energy, 2005, 30(11-12): 2042-2056.
- [6] Daniel W. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies[J]. Energy, 2007, 32(9): 1543-1559.
- [7] 李君, 吴少华, 李振中. 超超临界燃煤发电技术是我国目前发展洁净煤发电技术的优先选择[J]. 中国电力, 2004, 37(9): 13-17.
Li Jun, Wu Shaohua, Li Zhenzhong. Ultra-supercritical — a

- preferential choice for china to develop clean coal technology[J]. *Electric Power*, 2004, 37(9): 13-17(in Chinese).
- [8] 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: 79-123.
Yang Jianxin, Xu Cheng, Wang Rusong. Product life cycle assessment and application[M]. Beijing: Meteorological Press, 2002: 79-123(in Chinese).
- [9] Cottrell A, Nunn J, Urfer A, et al. Systems assessment of electricity generation using biomass and coal in CFBC[R]. Australian: BHP Billiton Newcastle Technology Centre, 2003.
- [10] Spath P, Mann M, Kerr D. Life cycle assessment of coal-fired power production [R]. Washington D.C: National Renewable Energy Laboratory, 1999.
- [11] Dones R, Gantner U, Hirschberg S. Environmental inventories for future electricity supply systems for Switzerland[R]. Switzerland: Paul Scherrer Institute, 1996.
- [12] Daniele F, Lidia L. Integrated gasifier combined cycle plant with integrated CO₂-H₂S removal: performance analysis, lifecycle assessment and exergetic life cycle assessment[J]. *Applied Thermodynamics*, 2002, 5(1): 13-24.
- [13] Scott W, Gerald L. Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO₂ gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2000, 48(248): 473-481.
- [14] 袁宝荣, 聂祚仁, 狄向华, 等. 中国化石能源生产的生命周期清单(1)—能源消耗与直接排放[J]. *现代化工*, 2006, 26(3): 59-64.
Yuan Baorong, Nie Zuoren, Di Xianghua, et al. Life cycle inventories of fossil fuels in China (1): energy sources consumption and direct pollutant emissions[J]. *Modern Chemical Industry*, 2006, 26(3): 59-64(in Chinese).
- [15] 国家统计局, 国家环境保护总局编. 中国环境统计年鉴 2006[M]. 中国统计出版社, 2007: 72-96.
State Statistics Bureau, State Environmental Protection Administration Code. China environment statistical yearbook 2006[M]. China Statistics Press, 2007: 72-96 (in Chinese).
- [16] 王大中. 21 世纪中国能源科技发展展望[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 110-153.
Wang Dazhong. 21st century energy technology development prospects[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 110-153(in Chinese).
- [17] Kannan R, Tso C, Ramli O, et al. LCA-LCCA of oil fired steam turbine power plant in Singapore[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(18-19): 3093-3107.
- [18] 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 656-660.
Chen Peng. China's coal properties, classification and use[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 656-660(in Chinese).
- [19] Di Xianghua, Nie Zuoren. Life cycle inventory for electricity generation in China[J]. *Life Cycle Ass*, 2007, 12(4): 217-224.
- [20] Yasuna M, Michael B. Development of life cycle inventories for electricity grid mixes in Japan[J]. *Life Cycle Ass*, 2000, 5(5): 295-305.
- [21] Odeh A, Timothy T. Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(1): 367-380.
- [22] 惠世恩, 庄正宁, 周屈兰, 等. 煤的清洁利用与污染防治[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 172-187.
Hui Shien, Zhuang Zhengning, Zhou Qulan, et al. Clean coal use and pollution prevention[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 172-187 (in Chinese).
- [23] Luc G, Camille B, Yohji U. Life-cycle assessment of electricity generation options: the status of research in year 2001[J]. *Energy Policy*, 2002, 30(14): 1267-1278.
- [24] Albert Thumann. Handbook of energy audits[M]. 5 Edition. The Fairmont Press, 1998: 35-61.
- [25] 徐越, 邓世敏, 危师让. 一种电站技术筛选模型——TLCC 模型[J]. *热力发电*, 2000, 29(1): 12-14.
Xu Yue, Deng Shimin, Wei Shirang. Total life cycle cost model for electric power station [J]. *Thermal Power Generation*, 2000, 29(1): 12-14(in Chinese).
- [26] Vogtlander J, Bijma A. The virtual pollution prevention costs'99, a single LCA-based indicator for emissions[J]. *Life Cycle Ass*, 2000, 5(2): 113-124.



周亮亮

收稿日期: 2010-06-25。

作者简介:

周亮亮(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统生命周期评价与优化, lianglianghd@163.com;

刘朝(1962), 男, 博士生导师, 研究方向为热力学及工程应用, liuchao@cqu.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)