

# 秸秆气化发电系统的生命周期评价研究

崔和瑞, 艾宁

(华北电力大学 经济管理系, 河北保定 071003)

**摘要:** 本文以 2MW 秸秆简单气化—内燃机发电系统为具体研究对象, 建立了基于生命周期分析方法的数学模型和支撑数据库, 对系统边界、环境影响指标、决定系统环境性的重要参数进行了讨论。同时, 对秸秆气化发电系统进行了生命周期评价, 全面分析了秸秆气化发电过程中不同排放物和能源消耗对环境的影响。最后, 得出秸秆气化发电是一种环境友好型的能源生产方式, 发展秸秆气化发电要注意对其排放物的处理等结论。

**关键词:** 秸秆气化发电; 生命周期评价; 环境影响

**中图分类号:** TK6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1002-980X(2010)11-0070-05

## 1 研究背景

随着社会经济的发展, 环境和能源问题日益严重, 人类开始加快寻找替代能源的步伐, 秸秆能成为全球热点<sup>[1]</sup>。我国是一个农业大国, 每年仅农作物秸秆产量达 7 亿吨, 其中可以作为能源利用的秸秆约 3.995 亿吨<sup>[2]</sup>。在秸秆的各种利用途径中, 秸秆发电技术是比较成熟的。加大秸秆发电的开发力度, 能有效利用秸秆过剩资源, 改善环境质量, 有效减少温室气体的排放<sup>[3]</sup>。目前我国秸秆的主要来源是农业废弃物, 资源丰富但分布分散, 美国、欧盟等发达国家和地区多采用大规模 (> 10MW) 的秸秆直接燃烧发电作为秸秆利用的主要方式, 而这种技术在美国的实用性较差<sup>[4]</sup>。国内专家的大量研究表明, 数兆瓦的秸秆气化发电技术符合我国秸秆资源特点和国情, 已具备规模化发展的条件<sup>[4]</sup>。

秸秆发电在实际应用中也存在一些问题。在原料获取和转化过程中, 需要耗费大量的人力、物力进行收集、储存、运输, 在生产出洁净能源的同时, 也要消耗大量的能源, 排放出污染物。因此, 应该结合秸秆发电项目的特点对秸秆发电的生命周期过程加以认识、判断、评价和控制<sup>[5]</sup>。

生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 是评价产品或行为过程在生命周期内对环境所产生的影响的一种工具。生命周期评价通过对能量和物质的利用以及由此造成的废物排放进行辨识和量化,

评估能量和物质利用以及废物排放对环境的影响, 寻求改善环境影响的机会<sup>[6]</sup>。目前, 国内外有一些学者运用生命周期法对秸秆的利用进行了评价。如瑞典农业科学大学 Goran Forsberg 采用生命周期方法对秸秆运输链进行分析, 认为不同的秸秆运输方式对环境的影响差别不大<sup>[7]</sup>。美国能源部以假想的秸秆 IGCC (integrated gasification combined cycle) 发电系统为研究对象进行生命周期评价<sup>[8]</sup>。我国中科院广州能源研究所赵琳等对秸秆直燃发电系统的关键技术环节改善与降低环境影响的关系进行了讨论<sup>[9]</sup>。我国华南理工大学电力学院冯超等测算出秸秆直燃发电项目在减少温室气体排放上能起积极作用<sup>[10]</sup>。河南农业大学信息与管理科学学院王文亮等依据研发产业的特征分析和产业生命周期理论, 给出了促进研发产业健康发展的策略<sup>[11]</sup>。大连理工大学管理学院孙辉等根据生命周期理论, 探讨产业集群在不同运行模式下应采取的战略, 进而提升产业集群的核心竞争力<sup>[12]</sup>。

本文基于生命周期评价方法, 对秸秆气化发电系统进行评价, 辨别秸秆气化发电过程中不同的排放物和能源消耗对环境的影响, 全面分析秸秆气化发电的环境影响和能源消耗。通过分析, 进一步得出秸秆气化发电的主要环境影响指标和次要环境影响指标, 并指出在发展秸秆气化发电的同时要注意对其排放物的处理。

收稿日期: 2010-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (70671039)

作者简介: 崔和瑞 (1967—), 男, 河北易县人, 华北电力大学经济管理系教授、硕士生导师, 博士, 研究方向: 能源系统分析与评价、复杂系统研究、数量经济分析; 艾宁 (1985—), 男, 河北石家庄人, 华北电力大学经济管理系硕士研究生, 研究方向: 能源系统分析与评价。

## 2 研究内容与方法

### 2.1 研究内容

本文以小麦秸秆为例, 选取 2M W 秸秆简单气化—内燃机发电系统为具体研究对象。该系统年发电时间为 6000h, 气化效率为 75%, 发电效率为 18%, 秸秆消耗量为 1.35kg/kW·h, 秸秆搜集半径约为 20km。本文以系统每生产 10<sup>4</sup> kW·h 电能需要的能耗和所造成的环境影响进行计算和分析。

### 2.2 研究方法

生命周期评价方法是丹麦技术大学开发的工业产品设计方法, 即采用政策目标距离法确定标准化基准和不同环境潜质的重要性权重。国内杨建新等人基于以上方法建立了中国的标准化基准和权重因子, 定义了中国的区域污染当量因子<sup>[13]</sup>。本文采用该生命周期评价方法, 将清单分析中的结果按照环境影响类型进行分类划分, 计算各种环境影响类型的潜值, 然后对所得数据进行标准化以及加权处理, 据此分析和比较不同环境影响类型对环境损害的严重性, 同时分析秸秆发电系统的不同阶段产生的环境影响特点。

## 3 秸秆气化发电系统的生命周期评价

### 3.1 确定生命周期系统边界

在确定生命周期评价的边界系统时, 考虑到数据可获得性和数据质量等问题时做了如下假设与简化:

- (1) 按照我国现在的电力组成, 除气化发电阶段需要消耗的电力采用本系统自发电之外, 其他阶段所用电力均采用煤电;
- (2) 本研究重点分析原材料收集运输、电厂建设和运行发电 3 个单元阶段, 忽略了种植过程和运输过程的设备制造部分;
- (3) 不计小麦种植过程产生的环境影响;
- (4) 由于秸秆发电系统是一种新型系统, 因此暂未考虑生产设备回收报废单元阶段;
- (5) 系统各环节产生的污染物直接排放环境, 不进行后处理和再利用。

系统边界划分如图 1 所示。

### 3.2 清单分析

清单分析是生命周期评价的核心环节, 生命周期清单分析中, 对同时输出多种产品的单元系统要进行能流和污染排放物的分配。

- 1) (辅助) 材料获取阶段。煤炭、石油、钢铁、电力等的开采和制造, 会向环境产生排放。根据生产各产品的排放系数, 可以计算出(辅助)材料获取阶段的污染物排放量。
- 2) 设备和材料的生产阶段。包括农业机械、运

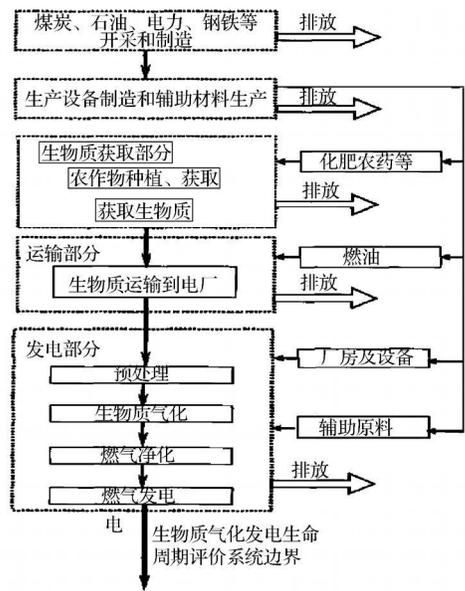


图 1 秸秆气化发电系统的边界划分

输工具和电厂设备的制造, 电厂厂房的建造, 以及燃油、化肥和农药的生产。这些同样会向环境产生排放, 根据生产各产品的排放系数, 可以计算出设备和材料的生产阶段的污染物排放量。

- 3) 秸秆种植阶段。虽然麦秸是小麦种植过程中的副产物, 但它可以用于造纸、堆肥、还田或作为饲料, 有一定的经济价值。但为了方便分析讨论不计小麦种植过程产生的环境影响。
- 4) 秸秆运输阶段。根据运输中能源生产和燃烧的排放系数, 可以计算出运输过程中的污染物排放量。

5) 秸秆发电阶段。电厂运行发电过程主要包括秸秆的预处理、秸秆气化、燃气净化、燃气发电 4 个阶段。预处理阶段主要包括粉碎、干燥和成型阶段。假设预处理阶段消耗的能量完全由燃煤提供, 通过产生 CO<sub>2</sub> 量可推算出所消耗标准煤数量, 进而推算出 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 和粉尘的排放量。在秸秆气化发电系统中, 气化及发电过程的能量由系统自身的发电量提供, 不需要耗能。

- 6) 生产设备回收报废阶段。由于生物质发电系统是一种新型系统, 还未达到报废年限, 因此暂未考虑生产设备回收报废单元阶段, 仅研究本系统正常生产阶段。

### 3.3 清单汇总

建立清单的过程是在所确定的秸秆气化发电系统中, 在能量和物质守恒的条件下, 对每个单元阶段建立功能单元的系统输入和输出, 最后得到秸秆发电系统的消耗和排放清单。本文的清单分析采用功能单位为 10<sup>4</sup> kWh 的电能, 本系统最终输入输出量

按式(1)计算:

$$SUM_i = \sum Annual_{i,j} + \frac{\sum First_{i,j}}{L} \quad (1)$$

式(1)中:  $i$  为秸秆气化发电生命周期系统中的某种消耗或排放的物质;  $j$  为系统中的某个单元阶段;  $SUM_i$  为以功能单元为基础的第  $i$  种输入或输出的总量;  $Annual_{i,j}$  为第  $j$  个单元阶段的第  $i$  种输入和输出量;  $First_{i,j}$  为系统中第  $j$  个单元阶段在开始生产时第  $i$  种输入和输出量, 以后不再追加;  $L$  为系统的寿命期。小麦秸秆气化发电系统每发  $10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$  电的部分输入和输出清单如表 1 所示。

表 1 小麦秸秆气化发电系统输入和输出清单

分类	项目	平均值	单位
输入	秸秆	13.5	t
	常规电力	0.053	GJ
	原油	12.6	GJ
	燃料油	0.26	GJ
	汽油	3.6	GJ
	柴油	2.4	GJ
	管道运输	0.12	kt·km
	水	19.1	t
输出	CO <sub>2</sub> (全生命周期)	7745	kg
	CO <sub>2</sub> (不含电厂运行)	470	kg
	CO	0.83	kg
	SO <sub>2</sub>	2.58	kg
	NO <sub>x</sub>	1.11	kg
	NMHC	0.47	kg
	粉尘	3.37	kg
	COD	1.92	kg
	SS	13.96	kg
	氨氮	1.34	kg
	焦油	1500	kg
	灰渣	4500	kg

注: 表中数据只是生秸秆气化发电系统部分主要的输入和输出数据。

### 3.4 影响评价

将清单分析中的结果按照环境影响类型进行分类划分, 计算各种环境影响类型的潜值, 然后进行标准化(无量纲化)、加权, 据此分析和比较不同环境影响类型对环境损害的严重性, 同时分析秸秆发电系统的不同阶段产生的环境影响特点。

#### 3.4.1 环境影响潜值计算

环境影响的类型根据其影响的范围可分为全球性影响、区域性影响和局地性影响。全球性影响包括枯竭性资源消耗(nonrenewable resource depletion)、全球变暖(global warming)、臭氧层损耗(ozone depletion)等; 区域性影响包括可再生资源消耗(renewable resource depletion)、酸化(acidification)、光化学臭氧形成(photochemical ozone crea-

tion)、水体富营养化(eutrophication)等; 局地性影响包括人体毒性(human toxicity)、水生生态毒性(aquatic ecotoxicity)、固体废弃物(solid waste)、烟尘及灰尘(dust)等。一种排放输出可能对一种影响类型有贡献, 也可能涉及几种影响类型, 所以清单分析中的输入和输出要根据环境影响类型进行分类<sup>[13]</sup>。2MW 秸秆气化发电系统的各类型环境影响所包含的主要污染排放物及污染物的当量因子归纳见表 2。

表 2 2MW 秸秆简单气化—内燃机发电系统的主要环境影响类型和当量因子

环境影响类型		物质	单位	当量因子	
全球性影响	枯竭性资源消耗潜力(NRDP) <sup>[14]</sup>	钢铁	kgFe 当量/kg	1	
		铜		668.57	
		原煤		0.031	
	全球变暖潜力(GWP) <sup>[13]</sup>	原油	kgCO <sub>2</sub> /kg	1.33	
		CO <sub>2</sub>		1	
		CH <sub>4</sub>		21	
		NO <sub>x</sub>		320	
	区域性影响	可再生资源消耗潜力(RRDP) <sup>[14]</sup>	水	kgFe 当量/kg	0.00082
			森林		23057.91
		酸化潜力(AP) <sup>[13]</sup>	SO <sub>2</sub>	kgSO <sub>2</sub> /kg	1
NO <sub>x</sub>			0.7		
NH <sub>3</sub>			1.88		
光化学臭氧形成潜力(POCP) <sup>[15]</sup>		甲醛	kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg	0.421	
		NMHC		0.0377	
		VOC		1	
		苯		0.189	
		甲苯		0.563	
水体富氧(EP)		NO <sub>x</sub>	kg 硝酸根离子/kg	1.35	
		NH <sub>3</sub>		3.64	
		COD		0.23	
		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		1	
局地性影响		人体毒性潜力(HTP) <sup>[16]</sup>	CO	kg 人体重/kg	0.012
	SO <sub>2</sub>		1.2		
	NO <sub>x</sub>		0.78		
	BaP		1.7		
	苯		3.9		
	甲苯		3.9		
	水生生态毒性潜力(AEP) <sup>[16]</sup>	萘	kg 水重/kg	3.9	
		BaP		750	
		苯		2.9	
		甲苯		2.9	
		萘		2.9	
	固体废弃物潜力(SWP) <sup>[13]</sup>	铜	kg 固废/kg	200	
		煤矸石		1	
		炉渣		1	
		高炉渣		1	
烟粉尘		1			
烟尘及灰尘潜力(Dustp) <sup>[13]</sup>	粉煤灰	kg 烟尘/kg	1		
	尘泥		1		
	尘泥		1		

环境影响潜值指整个系统中所有同类环境排放影响的总和(包括资源消耗)。用公式表示,即

$$EP(m) = \sum EP(m)_n = \sum [Q(m)_n \cdot EF(m)_n] \quad (2)$$

式(2)中:  $EP(m)$  为产品生命周期中第  $m$  种环境影响潜值;  $EP(m)_n$  为第  $n$  种排放物的第  $m$  种环境影响潜值;  $Q(m)_n$  为第  $n$  种物质的排放量;  $EF(m)_n$  为第  $n$  种排放物的第  $m$  种环境影响的当量因子。

### 3.4.2 标准化

标准化是将各种类型的影响潜值无量纲化, 本文采用《产品生命周期评价方法及应用》中的标准化方法和基准, 即将 1990 年全社会资源消耗总量和环境潜在总影响分别作为标准化基准, 对所得数据进行标准化处理, 而标准化后所得的环境影响潜质体现了相对于整个社会活动所造成的总的环境影响而言, 秸秆发电系统的资源消耗、环境污染潜值究竟有多大<sup>[13]</sup>。标准化的计算公式是:

$$NEP(m) = \frac{EP(m)}{ER(m)} \quad (3)$$

式(3)中:  $NEP(m)$  为第  $m$  种环境影响潜值标准化后的值;  $EP(m)$  为秸秆气化发电系统中的第  $m$  种环境影响潜值;  $ER(m)$  为标准化基准, 是 1990 年全社会的第  $m$  种环境影响潜值。

### 3.4.3 加权评估

标准化的影响潜值可以反映潜在环境影响量的大小, 但还不能比较不同环境影响类型的相对严重性, 通过针对不同影响类型对环境的损伤程度赋予不同权重, 可以更加合理地评价秸秆气化发电系统的环境影响。权重的确定采用“目标距离”方法, 即某种环境影响的严重性用该环境影响全社会当前水平与全社会给定的目标水平之间的比值来表示权重<sup>[13]</sup>。权重因子的确定公式为:

$$WF(m) = \frac{ER(m)_{base}}{ER(m)_{aim}} \quad (4)$$

式(4)中:  $WF(m)$  为第  $m$  种环境影响类型的权重因子;  $ER(m)_{base}$  为基准年第  $m$  种环境影响潜值;  $ER(m)_{aim}$  为目标年第  $m$  种环境影响潜值。

当权重等于 1 时, 说明目标年的排放和消耗水平与基准年的水平持平; 当权重小于 1 时, 说明目标年的排放和消耗水平大于基准年的水平; 当权重大于 1 时, 则说明在目标年时, 消耗和排放水平要比基准年的水平在绝对值上减少, 说明这种环境影响类型造成的影响严重, 必须严格控制。因此, 权重因子越大, 则该种环境类型的影响越严重。加权后的第  $m$  种环境影响潜值  $WP(m)$  为:

$$WP(m) = WF(m) \times NEP(m) \quad (5)$$

### 3.4.4 环境影响指数

将加权后各种环境影响潜值按分类相加, 最终得到了环境影响指数, 本文对于秸秆气化发电系统计算了 10 种环境影响指数。2MW 秸秆气化发电系统的生命周期评价的加权环境影响潜值如图 2 所示。

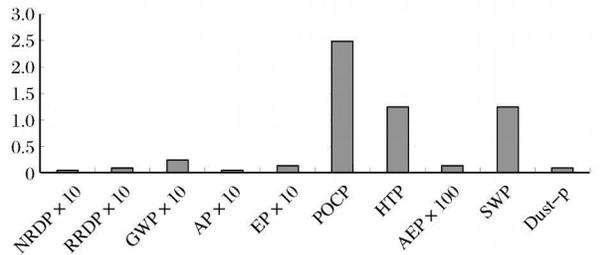


图 2 生物质气化发电系统生命周期评价加权环境影响潜值

## 4 结论

在秸秆气化发电系统的各类环境影响类型中, 光化学臭氧形成的潜值最大, 处于第二位是人体毒性潜值, 这两项潜值较大主要是由秸秆发电过程中排放焦油所造成的。

固体废弃物和工业烟尘及灰尘在秸秆气化发电系统中的潜值也较大。固体废弃物绝大部分来源于谷壳燃烧后的灰分, 而灰分可以综合利用, 这部分的环境影响可以去除。

秸秆气化发电系统的温室效应的产生主要是电厂的运行。如果我们考虑到秸秆的碳循环特点, 即不考虑秸秆发电产生的  $CO_2$ , 则秸秆气化发电系统中的温室气体主要来源于运输阶段, 设备制造阶段的温室气体的排放很少。

秸秆气化发电系统消耗的枯竭性资源量和可再生资源量的消耗都较小。

根据马晓茜等对我国当前火力发电的主力机组(300MW 蒸汽轮机发电机组)的生命周期评价数据, 火电每发电  $10^4 kW \cdot h$ , 要向大气排放  $CO_2 10t$ 、 $SO_2 80kg$ 、 $NO_x 50kg$ <sup>[17]</sup>, 本文的分析结果表明秸秆气化发电过程中, 每发电  $10^4 kW \cdot h$ , 向大气排放  $CO_2 7.7t$ (不含电厂运行  $CO_2 0.47t$ )、 $SO_2 2.58kg$ 、 $NO_x 1.11kg$ , 远远低于火力发电, 是一种环境友好型的能源生产方式。

因此, 我们要加大对秸秆气化发电项目的投入, 让这种环境友好型的能源生产方式得到广泛的应用。而在发展秸秆气化发电项目的同时, 要特别注意对秸秆气化发电项目焦油排放的处理, 引进先进

技术和设备处理排放的焦油,进一步减少秸秆气化发电对环境的不良影响,使其更加符合能源—环境可持续发展的需要。

### 参考文献

- [1] DEMIRBAS A. Combustion systems for biomass fuels [J]. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2007, 29(4): 303-312.
- [2] 张培栋, 杨艳丽, 李光全, 等. 中国农作物秸秆能源化潜力估算[J]. *可再生能源*, 2007, 25(6): 80-83.
- [3] DEMIRBAS M F, HAVVABALAT M B. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(7): 1746-1760.
- [4] 阴秀丽, 吴创之, 郑舜鹏. 中型生物质气化发电系统设计及运行分析[J]. *太阳能学报*, 2000, 21(3): 307-312.
- [5] 段林玲. 生物质发电项目风险管理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [6] 刘黎娜, 王效华. 沼气生态农业模式的生命周期评价[J]. *中国沼气*, 2008, 26(2): 17-24.
- [7] FORSBERG G. Biomass energy transportation analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 22(2): 17-30.
- [8] MANN M K, SPATH P L, CRAIG K R. Life cycle assessment of a biomass gasification combined cycle system[R]. US: DOE, 1997.
- [9] 林琳, 赵黛青, 李莉. 基于生命周期评价的生物质发电系统环境影响分析[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(5): 618-623.
- [10] 冯超, 马晓茜. 秸秆直燃发电的生命周期评价[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(6): 711-715.
- [11] 王文亮, 王丹丹. 研发产业的生命周期特征及发展策略分析[J]. *技术经济*, 2008, 27(3): 60-64.
- [12] 孙辉, 刘晓英, 王国红. 基于生命周期理论的产业集群运行模式[J]. *技术经济*, 2005(12): 20-22.
- [13] 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.
- [14] HAUSCHILD M Z, WENZEL H. Environmental life cycle assessment of products [C]. *Scientific Background*, Chapman and Hall, London, U K, 1998.
- [15] ANDERSSON-SKÖLD Y, HOLMBERG L. Photochemical ozone creation potentials (POCP) and replacement of solvents in Europe [J]. *Atmosphere Environment*, 2000, 34(19): 3159-3169.
- [16] VAN DEN BERG N W, HUPPES G, DUTILH C E. Beginning LCA: a Dutch Guide to Environmental life cycle assessment [C]. *Environmental Life Cycle Assessment*, McGraw-Hill Companies, 1996.
- [17] 邹治平, 马晓茜. 太阳能热力发电的生命周期分析[J]. *可再生能源*, 2004(2): 12-15.

## Assessment on Life Cycle of Straw Gasification Power Generation System

Cui Herui, Ai Ning

(Department of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

**Abstract:** Taking the power generation system with simple gasification internal combustion of 2WM straw as a case study, this paper establishes a general methodological model and a basic database based on the life cycle analysis method, and discusses the system boundary, the index of environmental impact and the important key factors in environmental characteristic of system. And it evaluates the life cycle of straw gasification power generation system, and analyzes the impacts of different emissions and energy consumption on environment in the process of straw gasification power generation. Finally, it draws the conclusion that straw gasification power generation is an friendly environmental energy production, and developing it should pay attention to the treatment of its emissions.

**Key words:** straw gasification power generation; life cycle assessment; environmental impact

### 勘校说明

《技术经济》2010年第29卷第8期第2页《设计驱动式创新》中原刊文“2004年, Von Hippel 等页提出了类似的概念, 并将其称为 Design inspired innovation”更正为“2006年, James Utterback 等也提出了类似的概念, 并将其称为 Design inspired innovation”。