

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.04.030

应用 LCA 分析中国典型钢铁企业的环境负荷

高成康¹,陈 杉¹,陈 胜²,王申川³

(1.国家环境保护生态工业重点实验室(东北大学),110819 沈阳;2.海信容声(广东)冰箱有限公司开发中心,528000 广东 佛山;3.上海嘉德环境能源科技有限公司,200336 上海)

摘 要:为得到钢材的环境负荷,基于生命周期评价方法对中国典型钢铁企业中不同流程中的各工序,系统、定量地分析评价环境负荷.采用 GaBi 4.3 软件提供的 CML2001 环境影响分类方法,将各工序的环境影响进行分类,并根据特征化因子,分析生产 1 t 钢材产生的环境影响.分析结果表明:长流程生产过程主要的环境影响是焦化、烧结、高炉炼铁和废钢回收环节产生的水生生态毒性、人体毒性、化石能源耗竭和矿产资源耗竭等.其中,长流程的炼钢过程对气候变化、人体毒性、水生生态毒性和固体废物废弃物的影响较大,分别约占该类型总环境影响值的 30%,95%,50%和 90%;短流程生产过程主要的环境影响为铁水和电炉炼钢过程产生的气候变化、酸化和光化学臭氧形成等.该研究结果可为钢铁企业调整两种不同流程提供一定的理论依据,有助于准确发现生产过程中各环节节能降耗、降低环境负荷的潜力所在,从而有利于钢铁企业对生产流程进行改进或优化.

关键词:生命周期评价;钢铁联合企业;长流程;短流程;环境影响

中图分类号: X757 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)04-0177-05

Life cycle assessment of integrated iron and steel works in China

GAO Chengkang¹, CHEN Shan¹, CHEN Sheng², WANG Shenchuan¹

(1.State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry(Northeastern University), 110819 Shenyang, China;
2.Hisense Rongshen (Guangdong) Refrigerator Co., Ltd Development Center, 528000 Foshan, Guangdong, China;
3.Shanghai Cadre Environment Energy Science and Technology Co., Ltd, 200336 Shanghai,China)

Abstract: Based on the data from a steel company, this paper applied life cycle assessment and GaBi 4.3 to analyze the material, energy consumption and emission during production of 1 t on steel by CML2001 method was used to perform environmental impact assessment of steel production. The results showed that the major environmental impact of BF-BOF steelmaking process includes aquatic ecotoxicity, human toxicity, fossil energy depletion and mineral resource depletion from coking, sintering, blast furnace and steel scrap recycling. And climate change, human toxicity, aquatic ecotoxicity, solid waste take up 30%, 95%, 50% and 90% of the total environmental impact, respectively. The major environmental impact of electric furnace steelmaking process includes mainly climate change, acidification and photochemical ozone formation from the molten iron and electric steelmaking processes. So a reliable basis of for decision making for iron and steel enterprises to adjust two different processes is provided. And the research helps to accurately discover energy saving, reduce the potential for environmental load in various aspects of the production process, thus contribute to iron and steel enterprises to improve or optimize production processes.

Keywords: life cycle assessment;integrated iron and steel works;BF-LD process;electric furnace steelmaking process;environmental impact

由于钢铁企业高能耗、高污染、高排放,因此钢

铁行业的发展与资源、环境问题密切相关^[1].钢铁工业“十二五”规划中提出单位工业增加值能耗和二氧化碳排放分别下降 18%,固体废弃物综合利用率达 97%以上^[2].

现代钢铁生产工艺主要分为高炉-转炉长流程和电炉短流程两类.基于生命周期评价法(LCA)研究钢铁两个全生产流程环境负荷对比的文献较少,

收稿日期:2014-09-10.

基金项目:国家自然科学基金(41301643,71373003,41401636);辽宁省社会发展攻关计划资助(2012201011);国家环保部公益项目资助(201009063).

作者简介:高成康(1977—),女,副教授.

通信作者:高成康,gaock@smm.neu.edu.cn.

文献[3]对高炉-转炉钢铁生产流程的环境影响进行了研究;文献[4]对比长流程和短流程的半生命周期评价.本文选取了国内典型的钢铁联合企业,对该企业长、短两种流程的钢铁产品进行全生命周期评价,并对生产过程中各工序进行系统、定量的环境负荷分析.从中可以准确识别生产过程中各环节节能降耗、降低环境负荷的关键环节,为钢铁企业对生产流程进行改进或优化提供理论依据.

1 研究模型

生命周期评价(life cycle assessment, LCA),用于评估与产品有关的环境因素及其潜在的影响,其研究贯穿产品生命全过程(即从“摇篮”到“坟墓”)[5].生命周期评价的技术框架分为4个部分[6],如图1所示.

本次评价采用目前比较常用的 CML2001 (Centre for Environmental Science, Leiden University,

Netherlands)环境影响分类方法[7].文中各清单项目对环境影响的特征化因子中气候变化的特征化因子参考 IPCC 的成果[8],酸化、光化学臭氧形成、水体富营养化的特征化因子参考美国 EPA 的成果. CML2001 中描述固体废弃物产生量的环境影响是土地占用,有些环节排放的固体废弃物可以循环利用,不占用土地.因此,直接以固体废弃物的质量表征其产生量,不转换成土地占用面积.本文研究的各清单项目对环境影响的特征化因子见表1[9-10].

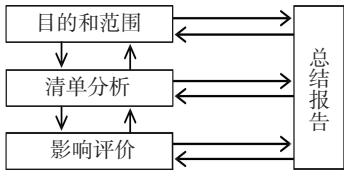


图1 生命周期评价技术框架

为了便于比较评价结果,文中对各环境影响归一化后加权求和,权重的确定采取专家咨询法,各环境影响的权重,见表2.

表1 环境影响类型和相应的特征化因子

环境影响	物质	特征化因子	环境影响	物质	特征化因子
气候变化/ (kgCO ₂ -eq · kg ⁻¹)	CO ₂	1.0	人体毒性/ (kgC ₆ H ₄ Cl ₂ -eq · kg ⁻¹)	SO ₂	3.1×10 ⁻¹
	NO _x	3. 2×10 ²		NO _x	1.2
	CO	2.0		PM ₁₀	9.6×10 ⁻²
	CH ₄	6.2×10 ¹		氰化物	4.9×10 ⁻²
酸化/ (kgSO ₂ -eq · kg ⁻¹)	SO ₂	1.0	富营养化/ (kgPO ₄ ³⁻ -eq · kg ⁻¹)	挥发酚	7.1×10 ³
	NO _x	7.0×10 ⁻¹		COD	2.2×10 ⁻²
	CH ₄	7.0×10 ⁻³		NH ₃	3.3×10 ⁻¹
	NMVOc	4.2×10 ⁻¹		氰化物	7.9
矿产资源耗竭/ (kgSb-eq · kg ⁻¹)	铁矿	4.5×10 ⁻⁶	化石能源耗竭/ (kgSb-eq · kg ⁻¹)	挥发酚	2.4×10 ²
				煤	8.0×10 ⁻⁸

注:kg X_nY_m-eq·kg⁻¹表示1 kg 相应物质产生的环境影响等同于特征化因子对应的质量 X_nY_m产生的环境影响.

表2 各环境影响的权重值

环境 影响	气候 变化	酸化	光化学 臭氧形成	富营 养化	人体 毒性	水生 生态毒性	矿产资源 耗竭	化石资源 耗竭	固体 废弃物	总环境 影响
权重	0.15	0.10	0.15	0.05	0.15	0.10	0.15	0.10	0.05	1.00

2 典型钢铁联合企业的生命周期评价

本研究对钢铁企业 A 的长流程和短流程进行分析评价.污染物排放包括气体污染物、液体污染物和固体废弃物.此外,生产过程可能导致的其他生态影响,如采矿过程会造成植被破坏等,由于其影响程度与管理部門的管理情况密切相关,且难以获得准确数据.因此,本研究不予考虑.

2.1 钢铁企业 A 长流程的全生命周期评价

长流程钢铁产品的生命周期评价包括原材料的开采和选矿、烧结、球团、高炉炼铁、转炉炼钢、连铸、轧钢、成品及废钢处置和回收利用环节,对其建立的

研究边界如图2所示.

结合实际情况,本文针对长流程炼钢过程作如下简化:1)考虑到连铸环节的能耗相对较小,本文不对此阶段进行数据清单分析;2)由于钢铁成品的种类多,各产品的污染物排放少且种类复杂,对此作忽略处理;3)炼钢过程中所需的电力由外购和自产两部分组成.考虑到我国发电的主要来源为燃煤发电,本文以文献[11]的相关数据另行来计算污染物排放量.

基于对钢铁企业 A 的调研,分别计算出单位原煤生产污染物排放清单;每 t 精铁矿产品、焦化工序中单位产品、烧结工序中单位产品,球团工序中单位产品、高炉炼铁工序单位产品、转炉炼钢中单位产

品、轧钢工序中生产单位产品等的输入输出清单,以及回收 1 t 废钢的环境影响值.其中:

①生产精铁矿过程产生的气体污染物主要为煤气燃烧的产物,包括 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和烟尘,计算为

$$W = V(P_1 + P_2 + P_3) \rho. \tag{1}$$

式中: W 为生产 1 t 钢材生成的 CO_2 的质量; V 为生产

1 t 钢材生成的焦炉煤气或高炉煤气的体积; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为煤气中 CO_2 、 CO 和 CH_4 的体积百分比; ρ 为 CO_2 的密度取 1.98 kg/m^3 .

②焦化生产过程中 SO_2 、 NO_x 和工业粉尘的排放数据从第 1 次全国污染源普查(2008 年)工业污染源排污系数^[12]中得到.

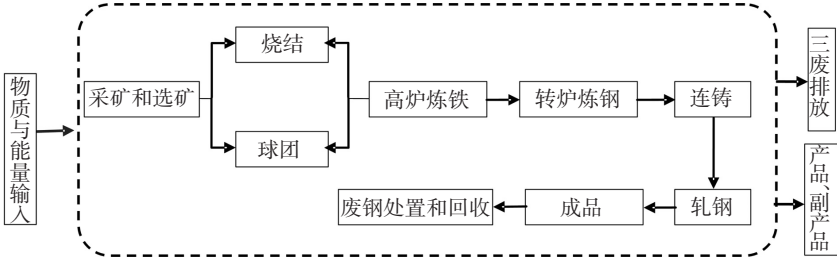


图 2 长流程钢铁产品全生命周期评价边界

③烧结过程固体燃料的 CO_2 排放量根据中国燃煤中碳的排放系数和实际的燃煤量计算.碳的排放系数取 $24.74 \text{ t/TJ}^{[13]}$, 碳的氧化率取 90%.不完全燃烧产物 CO 和 CH_4 的排放因子根据 IPCC 推荐的值, 分别为 150 和 $10 \text{ kg/TJ}^{[14]}$, NMVOC 的排放因子取 $15 \text{ g/GJ}^{[15]}$.烧结生产过程中 SO_2 、 NO_x 和工业粉尘的排放数据取自第 1 次全国污染源普查(2008 年)工业污染源排污系数.

④球团矿生产的主要燃料消耗是高炉煤气和转炉煤气.因此,球团工序的二氧化碳排放量可以按式(1)计算,其他污染物的排放量根据第 1 次全国污染源普查(2008 年)工业污染源排污系数来求得.

⑤高炉炼铁过程中固体燃料的 CO_2 排放量根据中国燃煤中碳的排放系数和实际燃煤量计算.煤气燃烧产生的 CO_2 量按式(1)计算.把固体燃烧 CO_2 排放量与煤气燃烧 CO_2 排放量相加就是高炉炼铁过程的总 CO_2 排放量.生产过程中 SO_2 、 NO_x 和工业粉尘

的排放数据取自第 1 次全国污染源普查(2008 年)工业污染源排污系数.

⑥ 转炉炼钢过程的污染物排放量与高炉炼铁工程的计算方法相同.

⑦轧钢工程中煤气燃烧产生的 CO_2 量按式(1)计算.其他污染物的排放数据取自第 1 次全国污染源普查(2008 年)工业污染源排污系数,且水处理采用化学混凝沉淀.

⑧在废钢回收阶段,根据第 1 次全国污染源普查(2008 年)工业污染源排污系数 0.03 t/t -原料和我国平均废钢回收率为 $38\%^{[16]}$ 可知,每 t 钢产品最后回收能够得到 0.38 t .

在电力排放清单中,根据对企业 A 的调研可知,长流程每生产 1 t 不锈钢材的电耗为 $88.63 \text{ kW} \cdot \text{h}$,其中有 $69.35 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电力来自外购,那么长流程每生产 1 t 不锈钢材的电耗所携带的环境负荷,见表 3.

表 3 生产单位不锈钢材外购电力的主要环境负荷

污染物类型	CO_2	SO_2	NO_x	CO	CH_4	NMVOC	烟尘
排放量/kg	7.42×10^1	6.89×10^{-1}	4.48×10^{-1}	1.07×10^{-1}	1.41×10^{-1}	3.38×10^{-2}	1.40

在企业 A 长流程生产过程中物质消耗以及污染物排放分析的基础上,根据环境影响特征化因子,对 1 t 不锈钢材的全生命周期所产生的环境影响值进行综合比较分析,结果见表 4.

基于上述建立的模型和分析过程,如图 3、4 所示,图中结果表明:

1)在长流程的炼钢过程中,主要是焦化、烧结、高炉炼铁和废钢回收环节的环境影响.其中,高炉炼铁工序的环境影响最大,占全生命周期总环境影响的 31%.其次是废钢回收过程的环境影响,占总环境影响的 22%.相对来说,转炉炼钢过程、原材料生产和轧钢过程的环境影响都很小.

2)针对各环节的不同环境影响类型的比较可以得出,高炉炼铁过程对气候变化、人体毒性和固体废弃物的影响最大,分别占该类型总环境影响值的 33%,95%,92%.这是由于在高炉炼铁过程中的 SO_2 、 NO_x 和工业粉尘的大量排放.因此,在炼铁过程中要做好污染物的监测和治理,并普及高炉炼铁过程的相关清洁生产技术.

3)焦化过程中对化石能源耗竭的影响最大,占该类型总影响值的 84%.其次是对水生生态毒性的影响,占总影响值的 59%.这主要是在生产焦炭的过程中产生的挥发酚和氰化物造成的.因此,做好副产品的回收利用工作以及污水的处理很重要.

表 4 长流程生产 1 t 不锈钢材的环境影响值

环境影响	原材料生产	焦化	烧结	球团	高炉炼铁	转炉炼钢	轧钢	废钢回收	合计
气候变化/(10 ² kgCO ₂ -eq)	4.32	3.20	1.92	0.55	8.58	0.430	1.44	5.74	26.20
酸化/(10 ⁻¹ kgSO ₂ -eq)	2.52	1.65	31.60	14.20	2.26	0.371	1.34	14.00	67.90
富营养化/ (10 ⁻³ kgPO4 ³⁻ -eq)	0.59	3.98	-	-	6.46	-	9.02	37.90	57.90
光化学臭氧形成/ (10 ⁻³ kgC ₂ H ₄ -eq)	0.45	-	8.62	-	-	-	-	308.00	332.00
人体毒性/ (10 ⁻¹ kgC ₆ H ₄ Cl ₂ -eq)	4.36	14.9	14.8	5.11	837.00	0.465	1.16	-	878.00
水生生态毒性/ (10 ⁻² kgC ₆ H ₄ Cl ₂ -eq)	-	4.30	-	-	3.00	-	-	-	7.30
化石能源耗竭/ (10 ⁻⁵ kgSb-eq)	-	6.07	0.02	-	1.16	-	-	-	7.24
矿产资源耗竭/ (10 ⁻³ kgSb-eq)	-	-	2.21	1.89	-	-	-	-	4.10
固体废弃物/kg	0.34	-	-	-	350.00	-	-	30.00	380.00

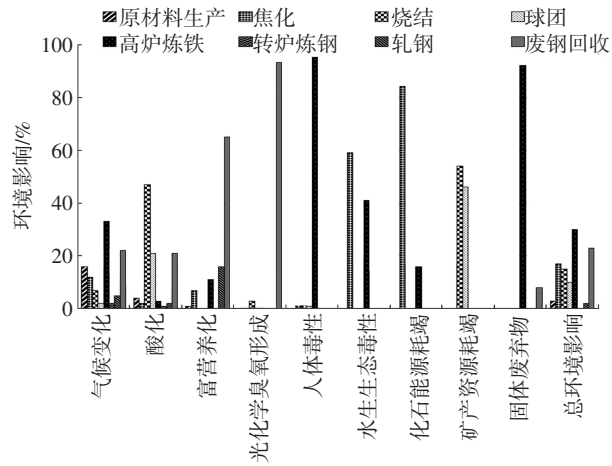


图 3 长流程各生产环节环境影响比例统计

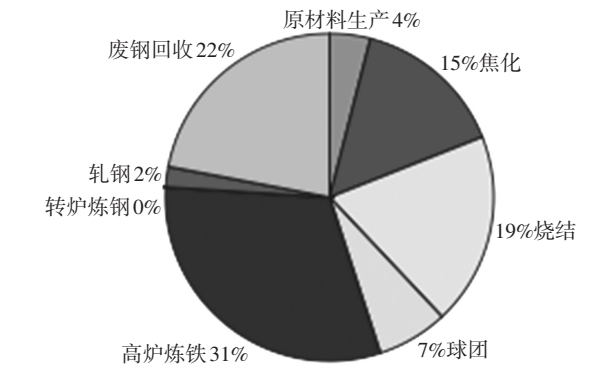


图 4 钢铁企业 A 全生命周期各环节总环境影响值比较

4) 烧结工序中以对酸化影响较大, 占总影响值的 47%。这主要是由于在生产烧结矿时 SO₂ 和 NO_x 的大量排放造成的。其次, 烧结工序和球团工序对矿产资源耗竭的影响最大, 分别占总影响值的 54%, 46%。这是由于在生产烧结矿和造球过程中对铁精矿的大量消耗造成的。

5) 在废钢回收过程中, 产生的污染物对水体富营养化的形成和光化学臭氧形成的影响最大, 分别占总影响值的 65%, 93%。这主要是由于废钢在加工

时产生了二次污染。

2.2 钢铁企业 A 短流程全生命周期评价

钢铁生产的短流程包括废钢、电炉炼钢、薄板坯连铸和热轧工序。对于短流程的生命周期评价则还包括了成品和最后产品的处置回收阶段, 故整个流程为废钢、电炉、连铸、轧钢、成品和产品报废处置回收, 如图 5 所示。

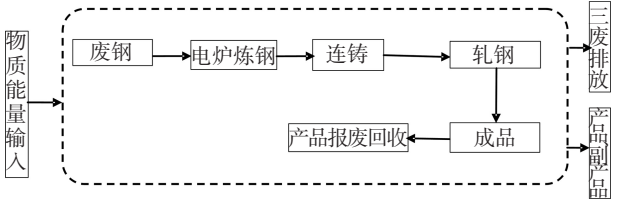


图 5 短流程钢铁生产生命周期评价边界

依据相关参数和计算分析模型, 同样分析企业 A 短流程生产过程中环境负荷排放, 如图 6 所示。

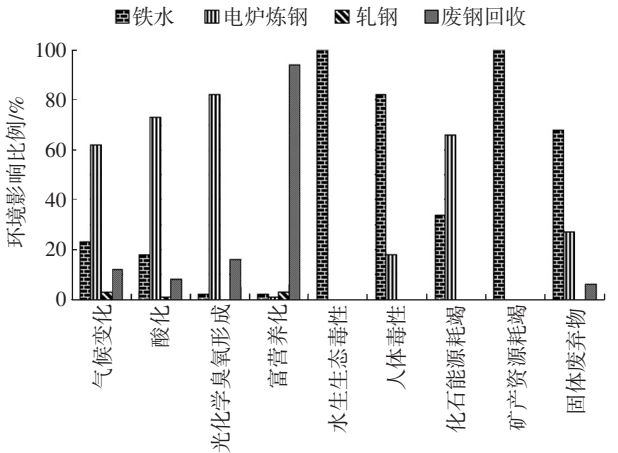


图 6 企业 A 短流程各生产环节环境影响比例统计图

分析图 6 可得: 1) 在企业 A 的短流程炼钢过程中, 主要的环境影响来源于铁水和电炉炼钢过程, 分别占总影响值的 50%, 31%; 2) 比较各环节的环境影响, 电炉炼钢过程对气候变化、酸化和光化学臭氧形成的影响最大, 分别占相应环境总影响值的

62%, 73%, 82%.这主要是由于电炉炼钢过程对电力的大量消耗,而电力的主要来源为燃煤发电;3)铁水所携带的环境负荷主要对水生生态毒性、人体毒性、固体废弃物和矿产资源耗竭有影响,分别占相应环境总影响值的 100%, 82%, 68%和 100%.因此,对于短流程炼钢过程要尽量减少铁水的投入.

2.3 长流程与短流程全生命周期评价结果比较分析

对比企业 A 不锈钢长流程和短流程全生命周期的环境影响值,见表 5,结果表明:企业 A 长流程在化石能源耗竭、矿产资源耗竭、水生生态毒性和人体毒性的环境影响分别是短流程的 177.18%, 143.93%, 175.30%, 175.21%.这是由于在烧结球团高炉炼铁过程消耗了许多能源和矿产资源,焦化对化石能源消耗影响、水生生态毒性很大,而高炉炼铁也是影响水生生态毒性的主要因素之一.而在对气候变化、酸化和光化学臭氧形成的影响中,长流程只有短流程的 56.22%, 40.42%, 24.74%.这是因为考虑了电力生产的环境影响.对于固体废弃物,长流程却是短流程的 72.11%,这是由于短流程的炼钢过程中投入了大量的铁水,而在短流程的评价过程中考虑了铁水所携带的环境负荷.

表 5 企业 A 生产 1 t 不锈钢长流程和短流程环境影响评价结果比较

环境影响	长流程	短流程	相对值/%
气候变化/(kgCO ₂ -eq)	2.62×10 ³	4.66×10 ³	56.22
酸化/(kgSO ₂ -eq)	6.79	1.68×10 ¹	40.42
光化学臭氧形成/(kgC ₂ H ₄ -eq)	5.79×10 ⁻²	2.34×10 ⁻¹	24.74
富营养化/(kgPO ₄ ³⁻ -eq)	3.32×10 ⁻¹	3.27×10 ⁻¹	101.53
水生生态毒性/(kgC ₆ H ₄ Cl ₂ -eq)	7.30×10 ⁻²	4.12×10 ⁻²	177.18
人体毒性/(kgC ₆ H ₄ Cl ₂ -eq)	8.78×10 ¹	6.10×10 ¹	143.93
化石能源耗竭/(kgSb-eq)	7.24×10 ⁻⁵	4.13×10 ⁻⁵	175.30
矿产资源耗竭/(kgSb-eq)	4.10×10 ⁻³	2.34×10 ⁻³	175.21
固体废弃物/kg	3.80×10 ²	5.27×10 ²	72.11

3 结 论

- 1)利用生命周期评价方法,对中国典型钢铁企业的不同生产流程进行生命周期评价,结果发现:在整个长流程的生产过程中,主要是焦化、烧结、高炉炼铁和废钢回收环节的环境影响.其中,高炉炼铁工序的环境影响最大,约占全生命周期总环境影响的 30%.其次是废钢回收过程的环境影响,约占总环境影响的 20%,说明在利用生命周期评价钢铁产品时不能忽略废钢回收环节.
- 2)针对各环节的不同环境影响类型的比较可以看出,高炉炼钢过程对气候变化、人体毒性、水生生态毒性和固体废弃物的影响较大,分别约占该类型总环境影响值的 30%,95%,50%,90%.
- 3)比较钢铁生产的两类不同流程的环境影响,

可以看出短流程生产过程主要的环境影响为气候变化、酸化和光化学臭氧形成.因此,可适当增加电炉炼钢.

参考文献

[1] 刘晋波. 钢铁行业节能减排刻不容缓[J]. 经济,2011,(12):96-97.

[2] 中华人民共和国工业和信息化部. 钢铁工业“十二五”发展规划[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11293907/n11368223/14303771.html>,2011.

[3] 安静,薛向欣.高炉-转炉钢铁生产流程环境影响研究[J].钢铁,2011,46(7):90-94.

[4] 杜涛,蔡九菊.应用 LCA 方法分析钢铁产品的环境负荷[J].钢铁,2002,37(s):696-699.

[5] 冷如波. 产品生命周期 3E+S 评价与决策分析方法研究[D].上海:上海交通大学,2007:40-65.

[6] 邓南圣,王小兵.生命周期评价[M]. 北京:化学工业出版社,2003:129-144.

[7] DREYER L C, NIEMANN A L, HAUSCHILD M Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CM L2001 and ecoindicator 99-does it matter which one you choose? [J]. International Journal of Life Cycle Assessment,2003,8(4):191-200.

[8] 王寿兵,吴峰,刘晶茹. 产业生态学[M]. 北京:化学工业出版社,2005:58-59.

[9] GAO Feng, NIE Zuoren, WANG Zhihong, et. al. Characterization and normalization factors of abiotic resource depletion for life cycle impact assessment in China [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(1):215-222.

[10] HUIJBREGTS M A J, THISSEN U, GUINEE J B, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment,Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA [J]. Chemosphere,2000,41(4):541-573.

[11] 狄向华,聂祚仁,左铁镞.中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J].中国环境科学,2005,25(5):632-635.

[12] 中华人民共和国环境保护部.第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数查询单机版数据库[DB/OL]. (2008-05-13)[2008-05-14].<http://cpsc.mep.gov.cn/pwxs/>.

[13] 吴宗鑫,陈文颖.以煤为主多元化的清洁能源战略[M]. 北京:清华大学出版社,2001:144-145.

[14] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual (Vol.3) [EB/OL][2009-09-01]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>.

[15] KLIMONT Z, STREETS D G, GUPTA S, et.al. Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(8):1309-1322.

[16] 徐曙光,曹新元.我国废钢的利用现状与分析[J].国土资源情报,2006,8:25-28. (编辑 张 红)