

# 钢铁工业园区生态产业复合共生网络的设计与评价

张 芸, 游 春, 张树深, 刘素玲, 张 敬

(大连理工大学环境与生命学院工业生态与环境工程教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**基于生态工业技术构建了“以废治废”生态产业链,该产业链的特点是:产业链一端输入的是园区的废物,另一端输出的产品用来处理园区(或区域)排放的污染物,具有提高废品资源化率和减少污染物排放的双重作用。利用循环经济和生态学原理,构建了包含小循环、中循环、大循环以及“以废治废”产业链的钢铁工业园区生态产业复合共生网络,并对“以废治废”产业链引入前后效果进行了评价,结果表明:“以废治废”生态产业链可以有效提高钢铁工业园区的生态效率。

**关键词:**钢铁工业园;以废治废;生态产业复合共生网络;生态工业技术

中图分类号:X324

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2008)04-0074-04

## Study on eco-industrial composite symbiosis network for iron and steel industrial park

ZHANG Yun, YOU Chun, ZHANG Shu-shen, LIU Su-Ling, ZHANG Jing

(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, MOE, School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The ecological industry chain in which one kind of waste is used to treat another based on eco-industrial technology is constructed. The characteristic of the ecological industrial chain is that, the waste is input from one end of the chain, and the product from the other end of the chain is used to treat other pollutants discharged from the industrial park or zone, having the double function to increase the recovery of waste resource and decrease the emission of pollutants. Based on the principle of recycle-economy and ecology, the eco-industrial composite symbiotic network for iron and steel industrial park is established, including small, medium, and large recycling, and the industrial chain of “treating the waste through other waste”. The evaluation of the industrial chain before and after its introduction shows that, this ecological industrial chain can effectively improve the eco-efficiency of the iron and steel industrial park.

**Key words:** Iron and Steel Industrial Park; treating waste through other waste; eco-industrial composite symbiotic network; eco-industrial technology

钢铁生产过程是资源消耗高、能源消耗高、废弃物多且污染大的行业,钢铁工业的快速发展同时带来了严重的资源、能源、环境等问题。如何改变钢铁行业单一的末端污染防治,合理利用自然资源、实现工业污染的全过程控制已经成为可持续发展的重要内容,其中废物的循环利用和污染物减排被广泛关注。利用循环经济原理,运用工业生态链接技术,可以使钢铁工业生产模式由“资源—产品—废物”的单向的“直线型”产业链条,转变为“资源—产品—再生资源”的“循环型”产业链,实现工业生产过程、产品对生态环境影响最小化的目标。

在生态产业链的构建及技术方面,国内外开展

了相关研究。Danny C K Ko等<sup>[1]</sup>对报废轮胎经过高温分解生产活性炭进行了工艺过程设计,建立了废旧轮胎再生产业链,并同用煤生产活性炭进行了经济上的分析比较。Kourounis S等<sup>[2]</sup>研究了将钢渣作为原料生产复合水泥这项技术,可以建立钢精炼过程副产品的循环利用产业链。这些产业链的特点是:下游生产企业把上游企业输出的废物全部或部分作为原料,可以使得上游生产企业产生的废物变成了再生资源,使有限的资源得到高效利用。

本文利用循环经济和生态学原理,基于生态工业技术构建了“以废治废”生态产业链,这个产业链除了使具有现有产业链的废物资源得到有效利用的



小循环(图 1 中用---表示)是指在钢铁工业生产企业或其相关企业内部推行清洁生产,减少产品和服务的物料使用量,削减废物的产生量,是单个企业内部的循环经济。例如在烧结厂中符合半径要求的烧结产物被用于高炉中进行后续生产,剩余的材料或不符合要求的又重新回到烧结过程中进行重新烧结,以减少废物的产生及外排,使得原料能循环有效利用。在炼铁厂、炼钢厂中通过煤气收集和除尘装置来防止煤气放散到空气中对环境造成污染,同时也为与其他企业之间进行的“中循环”做好“原料”准备。

中循环(图 1 中用—表示)是指在钢铁工业园内部各企业通过生态链网进行物质、能量、信息集成,模仿自然生态系统建立的工业共生关系。使一个企业的副产品或废物作为另一个企业的原料,减少了不可再生资源的使用,降低了工业发展对生态所带来的影响。例如焦化厂产生的焦炉煤气、炼铁厂产生的高炉煤气、炼钢厂产生的转炉煤气不再像传统工业系统那样放散到大气中,而是在经过企业内部的小循环实施清洁生产以后通过煤气回收装置进行收集并输入电厂进行发电,电厂产生的电能再应用到整个钢铁生态园区,这一生态链构成了钢铁生态工业园区内部典型的互利共生工业关系。除此以外,如果园区内部有富余的电能还可能与园区外部进行能量交换。

大循环(图 1 中用→表示)是指钢铁生态园区与社会上各行业间进行的物质、能量循环利用。园区内部产生的炉渣可以送到砖厂制砖,社会上废钢铁可以加入高炉中作为炼钢原料,钢铁生态园中富余的电力、蒸汽也可以输送给园区周边的居民区加以利用。同时钢铁工业也具有消纳社会废物的能力,将社会上废塑料投入到高炉中,作为高炉炼铁的原料,从经济的角度来看,在特定的经济架构下投入废塑料可获得高额利润<sup>[5]</sup>,这样既可以减少对环境、社会的影响,也可以实现可观的经济效益。

## 2.2 钢铁工业园区“以废治废”生态产业链设计

### 2.2.1 生态工业技术

生态工业技术<sup>[6]</sup>是指依据工业生态学原理和生态设计原则建构的一套新的工艺流程、新的工艺方法,以及新能源、新材料、新技术的使用方法。它使工业系统中 2 个或 2 个以上的生产环节或生产体系形成“工业共生”关系,整个工业系统形成有序的工业营养结构和食物链、网,从而达到既合理利用自然资源,又将工业生产过程对环境的破坏作用降低至

最低水平的目的。

传统工业技术体系是依据物理和化学原理建构的,是通过对自然资源加工生产物质资料的事业,其本质是一种代谢的过程,其物质转化过程是线性的而非网状的,开环的而非闭环的。工业的物质转化功能会带来废物的产生和排放,引起环境的污染,即外部不经济性;而工业的经济增值功能驱使投资者为实现企业内部经济性扩大投资、扩大再生产,结果工业规模越来越大,伴随着源源不断地将资源转化为废料的过程,将会导致资源趋于耗竭,污染日趋严重。

传统的工业过程生产出的产品是人类生存发展的基础,为避免资源浪费和环境污染必须借助生态工业技术重构工业生产组织。生态工业技术使 2 个工业生产过程或单元形成了一个具有特定物质转化功能的工业共生体,而多个工业共生体则形成了复合型的生态产业网络,也即工业生态系统,其物质流动由线性模式转变为网络状模式,从而使得资源、能源、投资及人力资本得到最优化和高效利用,使工业生产过程、产品对生态环境的影响最小化。

### 2.2.2 “以废治废”生态产业链的设计

钢铁工业现有循环经济模式下产业链的特点都是下游生产企业把上游企业输出的废物作为全部或部分原料,可以使得上游生产企业产生的废物变成了再生资源,使有限的资源得到高效利用。

“以废治废”生态产业链思想的核心是基于生态工业技术构建的废物处理中心(或平台),这个中心可以设计在钢铁工业园区内部,也可以设置在外部。与上述提到的大、中、小循环的区别在于:中心所用的原料是园区某个企业的废物,在生态工业技术支持下生产出的产品具有治理或减少园区(或其他区域)所排放污染物的功能,即中心的输入是园区的废物,输出产品用来处理园区(或其他区域)生产或生活过程中产生的污染物,与其他产业链相比,不但具有提高废品资源化率的功能,同时可以实现减少环境污染的目的。

“以废治废”循环(图 1 中用-----表示)是以循环经济和生态学原理为基础,基于生态工业技术,以技术平台作为支撑,用一个企业产生的废物来处理另一个企业的废物,将 2 个或多个企业联系在一起,形成“以废治废”生态产业链,构建新型循环经济模式。

如图 1 所示,技术平台 A、B 都是以生态工业技术为依托构筑的“以废治废”技术平台。Takayuki F 等<sup>[7]</sup>发明了一项生态技术,利用钢铁生产过程中的

炼钢渣制造海洋防波四脚石和小型渔礁,将其投入海洋中,炼钢渣作为营养源使海草和贝类动物增殖来高效固定和抑制 CO<sub>2</sub>,即用钢渣这种炼钢过程中产生的固体废物通过这项生态工业技术来处理 CO<sub>2</sub>,结果实现“以废治废”目的。这项研究也满足了钢铁企业正在寻找一项新的技术来减少钢渣数量和将钢渣作为有价值的资源的要求。

我国钢铁产量连续多年稳居世界首位,在钢铁生产过程中废渣产生量巨大,用废渣来治理 CO<sub>2</sub> 实现“以废治废”,不仅可以使炼钢渣得其所用,而且可以吸收一定区域范围的 CO<sub>2</sub>。这条产业链可以表示为:转炉渣、电炉渣→防波四角石和小型渔礁→浮游植物增殖→CO<sub>2</sub>。

技术平台 B 的核心是用发电厂产生粉煤灰来处理焦化废水。张昌鸣等<sup>[8]</sup>研究人员对用粉煤灰处理焦化废水这项技术进行了研究。该项研究选用粉煤灰作为吸附剂处理焦化厂生化出水,并将使用后的吸附剂作为制砖瓦和水泥的原料,取得了良好的效果,各项指标的平均净化率为 48.85%。钢铁工业园区原有产业链是将粉煤灰作为建筑材料,而新构建的产业链网将其用来处理焦化废水,使用后再用作生产建筑材料,这样不但实现了粉煤灰的多重利用,另外还可以用来处理园区的废水,延长了生态产业链。这条产业链可以表示为:粉煤灰→粉煤灰处理焦化废水中心→焦化废水。

以上为钢铁工业生态园区“以废治废”产业链网的案例说明,是典型的生态冶金技术支撑的产业链,随着科技进步,这种模式将得到进一步丰富。这个模式具有普适性,同样适用于化工生态园区等其他工业园区。

“以废治废”生态产业链与静脉产业不同,静脉产业主要承担的是废物的处理,它属于一种末端处理方法。而“以废治废”产业链除了具有上述作用外,同时可将收集的废物进行再资源化或者进而转变成产品,产品又具有减少园区(或区域)污染排放的功能。“以废治废”生态产业链对静脉产业链进行补充,与小循环、中循环、大循环共同构成复合共生生态产业网络,从图 1 中可以看出钢铁工业园区生态产业复合共生网络中几乎每个环节都在提高着资源生产率。

### 3 生态产业复合共生网络生态效率分析

生态效率(eco-efficiency)概念最早在 1992 年由世界可持续发展商业理事会(WBCSD)提出的,现在

被国内外研究用于工业园区的评价。WBCSD 将生态效率定义为:“生态效率必须提供有价格竞争优势的,满足人类需求和保证生活质量的产品或服务,同时能逐步降低产品或服务生命周期中的生态影响和资源的消耗强度,其降低程度与估算的地球承载力相一致<sup>[9]</sup>。世界经济合作与发展组织(OECD,1998)将这个概念扩大到政府、工业企业以及其他组织,认为生态效率可视为是产出与投入的比值,意味着“用更少的资源实现更大的价值”。

生态效率概念表示为:

$$\text{生态效率} = \frac{\text{产品或服务的价值}}{\text{环境影响}}$$

其中环境影响指的是原材料、能源的使用和废弃物的排放。由该表达式可以看出,生态效率评价是指在提供满足人们生活、生产所需的产品或服务的同时,减少原材料、能源的使用和废弃物的排放对环境的影响。由此可以得出生态效率的评价是兼顾经济效益和环境影响的一种评价方法,目标是实现经济、环境、社会效益的多赢。这也与生态工业园区的设计理念相契合,从一定程度上反映了生态工业园区的生态化的水平和资源消耗强度,也可为工业生态园区的可持续性判断及日常决策提供依据。

“以废治废”共生网络的设计思想就是依据循环经济原理,用一个企业产生的废物来处理另一个企业(或区域)的废物,实现了废物的多级利用,提高了园区废品的资源化率,并在利用的过程中对废物进行消除,减少了废弃物的排放,降低了生产或服务过程对环境的影响。“以废治废”共生网络一方面以废物作为原料,这可以提高产品或服务的价值,另一方面减少了废物的排放,即减少了对环境的影响。从公式中可以看出,在产品或服务的价值增加,环境影响降低的条件下,园区的生态效率将会极大提高。

以粉煤灰处理焦化废水这一“以废治废”生态链的设计为例,正是由于技术平台 B 的引入,用粉煤灰对焦化废水进行处理实现了废物的高效利用和污染物减排的双重作用,减少了对环境的影响,同时这项处理技术与国内深度处理焦化废水的 A/O 生化脱氮法相比,投资费用节省 480 万元,每年节省约 1 500 万元的运转费用<sup>[10]</sup>,污染物治理费用的节省,使产品或服务的价值增加。生态效率的变化与产品的价值成正比,与环境影响成反比,当产品价值的提高与环境影响的降低同时变化时,将在更大程度上提高了生态效率。

气的价格、总投资额、投资回报率等)。如果气体业务外包可以削减开支,增强成本控制,重构企业组织结构,能解放部分资源用于其他目的,此项业务就可以实现外包。

(2)从优化技术方案角度选择业务外包。气体供应技术方案角度是基于优化技术方案、改善技术服务和获取接触最新技术的机会,企业可以将价值链中的此类环节由最好的专业化公司来设计。

(3)从运营管理角度选择业务外包。此角度是基于运营成本更低、可靠性更好、稳定性更好、管理方式和理念更加专业化,企业可通过气体业务外包获得更多国际化的经验,培养更多具有专业化和国际化理念的人才。

(4)从战略角度选择业务外包。基于企业战略的考量,企业首先确定自己的核心业务,把非核心业务从企业内部分离出来,并把其外包给最好的专业化气体公司。通过气体业务外包,可以提高企业的效率,使企业高层能更关注核心业务,最终提高自身的核心竞争力。

### 1.3 气体业务外包的优势

(1)降低企业的生产成本。企业在基于自身的核心业务和核心竞争力,并保持市场的竞争优势前提下,尽力降低成本已成为企业获取利润的关键。企业在考虑气体业务外包时,首先考虑的是基于安全、可靠、稳定的供气方案基础上的成本最优化,如企业自己生产运营费用、安全管理、能源的利用能力、工况的最优化、人员管理和培训、外部市场的开

拓能力等;与外包相比,投资和费用方面是否更为节省;国产化程度和供货周期是否符合企业的要求等。气体业务外包有利于企业避免在设备、技术、研发上投入巨资,减少由于资产专用性导致的企业沉没成本的增加,而把有限的资金用于培植核心竞争力上,改善企业的资本结构,保持其在市场上的竞争优势。

(2)弥补不足,实现最佳资源配置。气体业务具有专业性强、技术含量高、安全运营规范度高等特点,企业将自己不是强项的业务外包给专业化气体公司来完成,可以利用外部资源来弥补自己的能力不足。气体业务的外包可使企业将用于非关键业务的资源与设备用在刀刃上,更好地或更直接地服务于客户。

(3)提升核心竞争力,增强整体实力。企业能力与资源的有限性决定了企业气体业务外包战略,可使企业集中有限的资源和力量,发挥自己核心竞争力所在领域的技术优势或其他优势,并使其不断提升,进而构筑企业所在行业的进入壁垒,确保能够长期获得高额利润,引导行业朝着有利于企业自身的方向发展。

(4)分散和降低风险。由于市场具有不确定性,企业在经营过程中会有运营风险、营销风险、技术风险、财务风险、投资风险等各种类型的经营风险。企业掌握的价值链环节越多,规模越大,所要面对的风险也就越多。通过气体业务外包,可以获得资源进一步优化配置,企业与外包伙伴共同分担风险,从而分散和降低经营风险。

(上接第77页)

## 4 结语

基于生态工业技术构建的“以废治废”生态产业链,具有提高废品资源化率和减少污染物排放的两方面作用。该产业链与小循环、中循环、大循环一起共同构成的钢铁工业园区复合共生生态产业网络,可以提高园区的生态效率,获得良好的环境、社会和经济效益。

### 参考文献

- [1] Danny C K Ko, Edward L K M, Ken S T L, *et al.* Production of activated carbons from waste tire-process design and economical analysis[J]. *Waste Management*, 2004, 24(9): 875 - 888.
- [2] Kourounis S, Tsivilis S, Tsakiridis P E, *et al.* Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag[J]. *Cement and Concrete Re-*

search, 2007, 37(6): 815 - 822.

- [3] Marian C. Industrial symbiosis: literature and taxonomy[J]. *Annual Review of Energy and Environment*, 2000(25): 313 - 337.
- [4] 袁增伟, 毕军. 生态产业共生网络形成机理及其系统解析框架[J]. *生态学报*, 2007, 27(8): 3182 - 3188.
- [5] Frank S, Bernd E, Otto R. Flowsheeting-based simulation of recycling concepts in the metal industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(7): 737 - 751
- [6] 傅泽强, 杨明, 段宁, 等. 生态工业技术的概念、特征及比较研究[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(4): 154 - 158.
- [7] Takayuki F, Kiyoteru S. Dissolution behavior of nutrition elements from steelmaking slag into seawater[J]. *ISIJ International*, 2004, 44(4): 753 - 761.
- [8] 张昌鸣, 李爱英. 粉煤灰处理焦化废水的研究[J]. *燃料与化工*, 1998, 29(6): 319 - 322.
- [9] Stigson B. What is eco-efficiency? [M]. Sydney: WBCSD, 1999: 1 - 7.
- [10] 张昌鸣, 窦秀云. 焦化废水中  $\text{NH}_3\text{-N}$  脱除研究[J]. *工业水处理*, 1999, 19(1): 20 - 21. ■