

专论与评述

编者按:由于我国的经济增长方式还未实现根本性的转变,在经济高速发展的同时给资源和环境带来的压力进一步加大。循环经济作为一种新的经济发展模式,倡导在物质不断循环的基础上发展经济,从 20 世纪末开始在国际上已得到广泛的关注。本栏目刊出的 2 篇文章,介绍了循环经济的内涵、背景、国际经验,探讨了化学工业如何推行循环经济;基于循环经济理念,提出黄磷产业的一种多产品共生模式。欢迎阅读。

——本刊编辑部

化学工业与循环经济

石磊 张天柱

(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘要:现代化学工业在很大程度上成就了目前“大规模生产和大规模消费”的发展模式,其行业性质也决定了它必将在循环经济建设过程中扮演重要的角色。在阐述循环经济内涵和国际经验基础上,论述了绿色化学与循环经济的关系,并提出了一些初步的发展建议。

关键词:循环经济;化学工业;绿色化学

中图分类号:X196;F205;TQ-9

文献标识码:C

文章编号:0253-4320(2004)07-0001-03

Chemical industry and circular economy

SHI Lei, ZHANG Tian-zhu

(Department of Environmental Sciences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The chemical industry once played a great role in creating a “mass production, mass consumption” society, and will also play the same role in creating a recycling-oriented society. Followed by the introduction of circular economy conception and international experiences, this paper discusses the relationship between green chemistry and circular economy. Some fundamental suggestions are finally given for the development of the chemical industry according to circular economy principles.

Key words: circular economy; chemical industry; green chemistry

目前,支撑我国高速度经济增长的模式依然是粗放式的,资源被大量消耗,能源、运输等形成“瓶颈”,生态环境状况堪忧。显然,这种发展模式是难以为继甚至是得不偿失的,失去资源和环境依托的经济增长会后劲乏力,经济大起大落的风险也会加大。因此,以科学发展观指导生产和消费模式的转变,成为我国当前重要而又紧迫的任务。循环经济正是在这种形势下得到了迅速而又广泛的实践:辽宁省成为第一个循环经济试点省,贵阳市成为第一个循环经济试点市,江苏省第一次面向全国进行循环经济规划公开招标。在未来的一段时期内,循环经济将是我国发展的主流之一。

石油和化学工业是我国国民经济的重要支柱产业。对石油及化学工业而言,循环经济意味着什么,它对于化学工业的发展提出什么样的挑战,化学工业又应该如何通过自身的发展推动循环经济的演

进,本文略作阐述。

1 循环经济的产生背景及内涵

简单、形式化的理解循环经济是在人类经济体系中构建各种“链”与“圈”,片面无条件地追求废物的资源再生循环,刻意使人类社会变成一个自我封闭的系统。事实上,循环经济的目的是倡导在物质不断循环的基础上发展经济。

纵观工业革命尤其是 20 世纪 50 年代以来的发展,从环境角度而言,至少存在着 3 个较大的发展趋势。第一,人们关注的重点逐渐从资源耗竭转移到了废物产出及其所引发的生态失衡方面。远在我们耗竭资源之前,由于人为物质流的影响,生态反馈的综合作用将威胁自然、人类、甚至经济增长^[1]。第二,环境政策的核心逐渐从对环境污染物质的控制转移到对大宗非污染性物质的关注。氮磷等营养物

质以及二氧化碳等温室气体就是最具说服力的例子。第三,大多数化学污染物,如二氧化硫、汞、铅等在世界范围内尤其在发达国家已经得到了有效的控制,然而,持久性有机污染物(POPs)等的控制形势越发严峻。

事实上,以上 3 个方面的趋势都是与工业化时代大规模生产和大规模消费的经济发展模式密切相关。该模式包括以下特征:①生产和消费的规模空前扩大;②新材料、药品和化学制品的增多;③人工制品增多。以石油、煤炭和天然气为基础原料的化学工业的发展对于这一模式起到了决定性的作用。Grubler 从技术轨迹演变的角度明确指出过去 80 年间的主导技术群是以石油和电力为特征的。同时,Grubler 也指出,可能的新的替代技术群应该是以环保技术、可分解和可循环技术为特征的^[2]。由此可见,循环经济的提出正是针对大规模生产和大规模消费模式的深刻反思。它开启了一个从物质流动视角探究社会经济活动对生态环境所造成的影响及其作用机制的渠道。

2 循环经济的国际经验

德国和日本是循环经济的先行者。德国于 1996 年出台了《循环经济与废物管理法》,这一法令标志着物质闭合循环的真正开始,是跨向循环经济的重要一步。日本将 2000 年命名为资源循环型社会元年,该年日本国会通过了有关循环型社会的 6 项法案,于 2003 年 3 月制定了促进创建循环型社会的基本计划,更是在全国范围内建立了以废物循环为特征的 18 个生态城镇(Eco-Town)。德国和日本在循环经济方面的共同之处在于,确立生产者责任延伸和消费者付费等原则,不仅要求在生产过程中需要避免废物的产生,同样要求生产者、销售方与使用者都承担起避免废物产生、再回收、再利用与环境友好处置的责任。在做法上,则是在近期集中出台了有关废物循环的法令和举措。

除德国和日本外,美国和加拿大等发达国家也通过采取污染防治或责任关怀(Responsible Care)等举措达到循环经济的目的。例如,作为《应急计划与社区知情权法案》的一部分,美国国会于 1986 年创建了有毒物排放清单(Toxic Release Inventory, TRI)。当时,两次重大的有毒化学物质泄漏案,即 1984 年印度 Bhopal 事件与 1985 年西弗吉尼亚州 Institute 事件正余波未平,公众日益要求得到关于有毒化学物质和社区受到致命污染可能性的信息,TRI 应运而

生。与许多环境法规不同的是,TRI 并未要求企业治理或削减污染排放,而仅仅要求它们估计并向美国环保署报告直接排放至空气、土壤及水体,或送至处理、储存、处置有毒废物场所的化学物质数量。在 TRI 实施之前,关于有毒物质排放量的估计争议很大。工业部门的代表常常批评环保学家与国会提出的数据是“夸大”的。而当 1988 年第 1 年度的报告公布时,它显示总排放量远远高于工业部门或环保署的估计。在随后的 12 年里,有毒物质(包含在最初清单中的)直接排入空气中的数量降低了 63.3%,排入地表水体的数量降低了 65.1%。

导致德国与日本等发达国家出现这种循环经济社会实践的原因是多方面的。首先,这源于发达国家追求可持续发展上的积极与努力,特别是具有强烈环境保护意识的欧洲国家,如德国;其次,发达国家高度积累的社会财富为废物循环提供了持续需求的市场;再次,一个直接的动因是由于这些国家在采用传统填埋方式处理废物时所遭遇到的土地空间现实约束,加之资源匮乏,因而促使其迈上了针对社会消费废物的循环之路。当然,这种对消费环节废物的管理要求不可否认地要涉及到生产与流通环节,从而影响着这些环节过程的绿色变革。

如果将发达国家循环经济的做法归结为废物循环或者资源综合利用,并将其举措简单移植到我国的做法是难有成效的。必须看到德国和日本在“循环经济/社会法”外所进行的更大量的产业生态化实践。一段时期以来,德国经济增长转变的重要特征之一就是生产领域的生态化。尽人皆知的简单例子就是它在国际上最早针对产品实施的“蓝天使”计划以及曾让我国吃过“苦头”的偶氮染料禁令。而在日本,迫于资源压力,特别是 70 年代的石油危机,极大地促进了全国工业生产的能源效率,明显提高了日本经济发展的质量与产品的国际竞争力。因此,我国的循环经济除要加强末端的废物循环外,更应该与经济结构调整、产业转移和技术进步等前端因素结合起来。实际上,我国快速增长的经济和产业快速转移的国内外环境为此提供了难得的机遇。

3 绿色化学为循环经济提供了坚实的基础

如前所述,化学工业是造就大规模生产和大规模消费模式的主因。根据 Sheldon 提出的环境因子即 E 因子(每生产 1 kg 产品所产生的废弃物的量)来衡量,石油化工的 E 因子为 0.1~0.5,基础化工原料为 1~5,精细化学品更高,达 5~50,并且许多

精细化学品都是环境高风险性物质,例如国际 POPs 公约首批清单所禁止的 12 种物质大多数归属于精细化学品。

化学工业正在也应该在循环经济的演进中发挥主导作用,绿色化学化工的进展充分说明了这一点。2002 年美国《科学》杂志发表了题为“化学走向绿色”的文章,指出近几十年来化学工业正向绿色化迈进^[3]。化学工业在原材料绿色化、反应过程绿色化、反应介质绿色化和产品绿色化等方面取得了长足的进步,出现了固体酸替代传统液体酸催化剂、一步法生产布洛芬(Ibuprofen)、超临界 CO₂ 作为反应介质等经典绿色化学案例。美国等更是在国家层面上推动化学化工的绿色化,于 1995 年开始设立“总统绿色化学挑战奖”,在环保和经济可行的前提下促进化学品和工艺的创新,下设 5 个奖项:学术奖、中小企业奖、合成路线改进奖、反应条件改进奖和安全化学品开发奖。借鉴美国的成功经验,日本也于 2002 年发起了绿色和可持续发展化学奖。我国也早在 1995 年由中科院开展了“绿色化学与技术推进化工生产可持续发展的途径”的院士咨询课题,启动了“石油炼制和基本有机化学品合成的绿色化学”(“973”)项目,在新催化材料、新反应工程、新合成/加工路线、环境友好溶剂等方面取得了进展^[4]。

绿色化学化工发展的一个核心要求在于不再将环境因素看作是约束性的外生变量,而是将其视作产业发展的内生要素。为此,绿色化学提出了“12 条基本原则”:① 废物预防优于废物治理和清除;② 合成方法尽可能向“原子经济反应”靠拢;③ 原料、中间产物以及最终产品尽可能对人体健康和环境无毒无害;④ 化工产品设计时,在保持高效功能的同时尽可能降低毒性;⑤ 应尽可能避免使用不必要的助剂;⑥ 能量优化原则;⑦ 尽可能采用可再生资源;⑧ 尽量避免不必要的衍生反应;⑨ 优先选用催化反应;⑩ 尽量设计成生物可降解或环境友好产品;⑪ 开发在线监测控制技术,避免有毒有害物质的产生;⑫ 优选物质,降低生产潜在风险^[5]。

上述 12 条原则基本上是循环经济“减量化、再使用、再循环”的 3R 原则在化学工业中的体现,涵盖了产品设计、路线选择、反应条件和材料选择等方面。然而,两者提出的视角是有所不同的。绿色化学的 12 条原则是针对反应本身出发的,而 3R 原则是从生产和消费模式转变的视角提出的。因此,从循环经济视角,化学工业还需要在下述几个方面进一步加强:

(1) 加强化工产品的物质减量化设计。新的替代技术群既然以“环保技术、可分解和可循环技术”为特征,化学工业应该继续发挥主导作用,除尽量实现自身产品的生物可降解性、耐久性和可循环性外,还应该为其他工业产品的再利用、再制造、再循环提供技术和物质的支持,通过促进信息替代物质、材料轻型化替代等实现经济系统的物质减量化。

(2) 化工企业加强社会责任感,落实生产者责任延伸原则,将“责任关怀”行动从产业拓展到社会消费等整个产业链,促进倡导溶剂等化学品的租赁服务模式,降低整个社会应用化学品的安全风险,通过化学工业的核心影响力,促进消费模式的转变。

(3) 在改善化学工业自身生产模式的同时,注重与能源、冶金、建材、建筑等其他产业的生态化关联,创建生产环节的工业生态链,组建生态工业园区。

(4) 加强对 CO₂、SO₂、有机废物等大宗物质化学利用的研发。

4 结语

绿色化学的提出已近 10 年了,然而依据绿色化学工艺建立的工厂仍然寥寥无几,化学工业的绿色化必然是一个漫长的过程。其中,要克服诸多来自技术、经济、行为、组织体制等方面的阻力。2002 年美国《科学》杂志发表的题为“绿色化学:变革的科学”对此进行了阐述^[6]。

除存在上述共性的阻力外,我国化学工业还面临着国际和国内两方面的挑战。在国际方面,由于化学工业是一个技术密集、资本密集的产业,容易实行技术封锁政策,国际贸易的绿色壁垒日益加强。例如,2003 年 7 月,欧盟向全球公布了未来化学品政策《关于化学品注册、评估和授权办法》草案及《欧洲化学品政策咨询文件》,尽管遭到了美国、日本以及我国等国的反对,但这已经反映出我国化学工业所面临的国际环境压力正在不断加大。在国内方面,我国的化学工业大大落后于发达国家,存在产业结构落后、产品技术含量偏低;科研开发、技术创新能力较弱;化工企业规模小且分散等弱点^[7-8]。最近 10 年来,我国对化学工业的清洁生产进行了不懈的努力,取得了一些成就^[9],但清洁生产仍然没有成为大多数企业的自愿行动,化学工业的绿色化将是一个艰巨的复杂的过程。尽管如此,我国化学工业的发展还是面临很大的机遇,快速增长的经济以及国内外产业的转移为化学工业的更新换代提供了良好的市场机会。

(下转第 5 页)

品共生方案。重点对多产品共生方案中的产品进行工艺技术分析,提出方案的实施计划,并分析该方案的经济、生态环境和社会效益。

1 多产品共生方案

黄磷生产过程中伴随大量的副产物产生,如炉渣、尾气、磷铁、磷泥等。绝大多数黄磷企业的废弃物未实现资源化再利用,废渣大部分直接排放,尾气则以“火炬”的形式燃烧放空。若将这些废弃物进一步加工后,可变为高质量生产原料,或者直接作为产品销售,在创造巨大的经济效益的同时减轻了环境负担。

黄磷生产中资源化利用的内容包括:尾气的利用、磷泥的利用、磷铁的利用、黄磷渣的利用。每一种副产物有多种资源化利用的方式,一种合适的利用方案必须是综合了各种废弃物回收工艺的成熟程度、经济效益以及相互关联性等的方案。

在黄磷副产的废弃物中,黄磷渣占绝大部分,黄磷渣利用方案无论在环境还是经济角度对整个黄磷副产品方案都具有决定性的影响。因此,多产品共生方案主要针对黄磷渣的资源化,从环境、能量、经济等方面进行定量分析与评价。

方案以年产黄磷 7 000 t、磷渣 7 万 t 的企业为计算基础,在黄磷渣资源化的物流、能量流、资金流定量分析和对几种共生方案评价的基础上,结合熔融态黄磷渣热态直接熔制技术,将黄磷、微晶玻璃、人造硅灰石、微细粉体掺合料和玄武岩连续纤维生产工艺有机地组合在一个综合的系统中,实现跨化工、建材和冶金 3 个行业的多种产品的共生,使黄磷生产中废弃的“渣、气、热”完全利用,同时将磷泥、磷铁资源化利用,集成如图 1 所示的多产品共生方案。

在整个方案中,黄磷产品生产电力能耗为 11 万 kVA,而微晶玻璃基础液的熔炼、硅灰石熔制均利用高温熔渣余热,并用尾气加热至工艺温度,黄磷原料、基础玻璃料的烘干以及微晶玻璃、硅灰石的晶化

处理、玄武岩连续纤维的熔制均使用黄磷尾气为燃料,不足部分通过电力或煤炭补足。方案中还可将黄磷尾气作原料生产附加值更高的甲酸等化工产品。

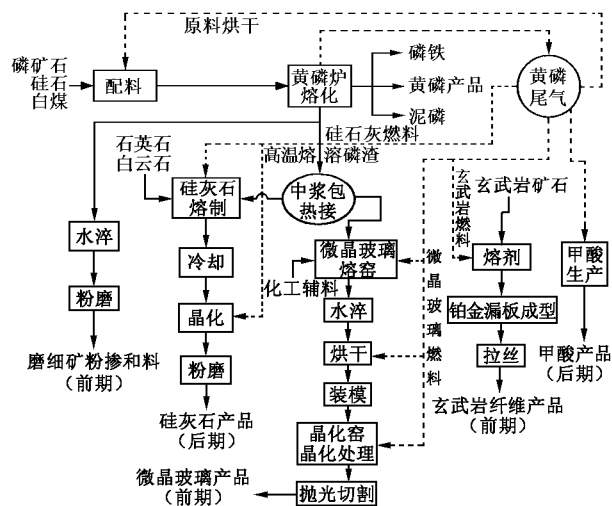


图 1 多产品共生方案

考虑到资金、技术、人力的因素,所有项目不可能一步到位,应采取滚动发展的思路,项目将分两阶段(前、后期)实施。多产品共生方案合理、有效地利用磷矿石、玄武岩矿石等矿产资源,从资源及废弃物利用的深度和广度拓展产业结构,采用高新技术,综合利用黄磷尾气、黄磷渣、磷泥、磷铁以及生产过程余热等潜在资源和能源,延伸和深化资源加工产业链,可以盘活资产。

2 多产品共生方案的关键工艺

2.1 黄磷渣化学成分分析

黄磷渣化学成分主要含有 CaO 、 SiO_2 , 质量分数总量达 87% 以上,属于高钙高硅渣^[4]。与天然硅灰石矿石的化学成分极为相似^[5],其 Ca、Si 含量可满足陶瓷、油漆、电焊条、磨料等工业生产对成分的要求,总体化学成分适合陶瓷工业的质量标准。杂质成分主要有 Al_2O_3 、 MgO 、 P_2O_5 、 FeO_3 、F 及少量的 MnO 、 K_2O 、 Na_2O 等,占总量 5% ~ 13% 的 CaO 、 SiO_2

(上接第 3 页)

参考文献

- [1] Freidrich, Schmidt-Bleek. 人类需要多大的世界: MIPS-生态经济的有效尺度[M]. 吴晓东, 翁端译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] Arnulf Grubler. 技术与全球性变化[M]. 吴晓东, 赵宏生, 翁端译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] Julia Fahrenkamp-Uppenbrink. [J]. Science, 2002, 297: 798.

- [4] 郝小明, 张晓昕, 何鸣元. [J]. 中国基础科学, 2003, (2): 15-21.
- [5] Anastas P T, Warner J. Green Chemistry Theory and Practice[M]. Oxford: Oxford Univ Press, 1998.
- [6] Martyn Poliakoff, Michael Fitzpatrick J, Farren T R, et al. [J]. SCI-ENCE, 2002, 297: 807-810.
- [7] 董涛. [J]. 化工技术经济, 2004, 22(2): 6-11.
- [8] 黄传荣. [J]. 化工技术经济, 2003, 21(5): 1-4.
- [9] 齐红卫. [J]. 产业与环境, 2003, (S1): 75-77. ■