

过程工程与生态工业

金涌, 刘铮, 李有润

(清华大学化工系, 北京 100084)

摘要: 过程工业为人类社会发展做出了卓越的贡献, 但它同时又是环境污染的最主要来源, 成为社会持续发展的严重障碍. 只有遵循自然生态法则, 并用其指导过程工业的发展, 通过“资源利用-能源消耗-污染防治”综合发展模式才能走出困境. 过程工业中的多学科交叉是形成工业生产链的最佳途径, 是生态工业可能最先取得突破的工程领域.

关键词: 生态工业; 过程工程; 循环生产; 生命周期分析; 综合污染防治

中图分类号: N02; X37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2001)03-0225-05

1 前言

现代化学工业及相关产业经过百年来的发展, 已形成巨大的产业体系, 对人类社会做出了卓越的贡献, 成为人们衣、食、住、行所须臾不可缺少的物质基础. 而且无论我国今后社会经济如何发展, 即使达到美、欧等发达国家的水平, 对成千上万种化学品的需求, 也必将持续增长, 并仍然会作为国民经济的主要支柱产业来发展. 但是迄今为止这些产业也是环境污染的最主要来源, 成为人类社会持续发展的巨大障碍. 2000年我国工业废弃物已近10亿吨级, 其中危险废弃物达千万吨级, 而其中80%属于化学品污染. 由于我国能源主要构成为煤炭, 因燃煤引起的 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 污染也十分严重, 其每年排放量已分别达到2000多万吨、1000多万吨和20多亿吨. 全球污染情况同样十分严峻. 如何解决“发展-污染”这一对矛盾, 成为本世纪化学工业及相关工业面临的关键问题.

2 清洁生产的途径

解决化学污染问题, 可以在不同层次上进行.

- 最早处理化学污染的方法是对生产中出现的污染废物进行处理或稀释, 达到排放标准后释放;
- 进一步是对生产中产生的污物进行深度处理后, 在本企业中循环利用, 在正常生产条件下可以把污物控制在生产环节内部, 在正常生产、无事故条件下, 可实现微排放. 上述两种方式均属于末端治理, 在实际生产中对控制污染也起到很好的效果;
- 但是只有不断开发清洁生产的新工艺代替原有污染的生产工艺技术, 从源头消灭污染的来源, 使各环节实现清洁生产, 才能达到可持续发展的目的, 称之为“清洁化工”, 如: 国内外均致力于开发用固体酸代替强污染的 HF 和 AlCl_3 作催化剂的烷基化反应; 用水、 CO_2 等无毒溶剂代替有害溶剂等;
- 更高层次上的清洁生产, 应该是该化学品从制作-使用-废弃的全过程都不会污染环境, 生产者应该对产品从“诞生”到“消亡”的全“生命周期”不产生环境污染负责. 譬如通过易降解塑料的生产解决白色污染的问题; 采用等离子体法直接进行粉煤加氢反应生产乙炔,

不但消除了电炉法生产电石过程的污染,而且也消除了产生的废水、废渣;采用分子筛代替 HF 作催化剂进行烷基化反应生产十二烷基苯,不但生产过程的污染可以消除,而且可改变产品中异构体的分布,使由其合成的十二烷基苯磺酸盐型洗涤剂在使用后更容易降解,生活污水更易于自然代谢.这种使工业过程与自然生态循环两者由对抗转化为相互适应的理念称之为“生态化工”.1989 年联合国环境规划署工业和环境办公室制定了“清洁生产计划”,在全球范围内推行清洁生产,已成为世界各国对上述问题的共识.

3 发展“生态工业”是综合解决环境污染—资源短缺—能源浪费的根本之路

“生态工业”是指工业发展应模仿几十亿年来自然生态体系运行的法则,即在太阳能的驱动下,物质在自然界的动物、植物、微生物之间通过共生、互生、竞争、反馈等自然法则循环往复,废物与原料的角色不断交替而协调发展,形成完备的自然生态系统.而工业社会的生产模式,过去是由资源开采—加工—使用—废弃组成,是一个单向发展模式,给自然生态造成巨大的压力,濒临危机.如若能通过多种产业的综合协调发展,也可以使某一产业的副产物或废料成为另一产业的原料资源加以利用,进而形成物流的“生态产业链”或“生态产业网”.这样在一定界区内的多行业、多产品协调和联合发展,不仅可使资源在产业链中得到充分或循环的利用,而且也可以使能量资源和信息资源同时得到充分的使用.这种在一个界区内实现物质流、能量流和信息流综合利用的模式称为“生态工业园区”.

生态工业的实践目前主要在欧洲和北美的一些发达国家展开:

- 丹麦的 Kalundborg 工业园区,自 80 年代初开始发展起来,它以发电厂、炼油厂为核心,还包括生物制药厂、水泥厂、农业居民区等.园区成员间废物、废热的有偿供给和交换,实现了物质的部分循环和能源的逐级利用,不仅改善了区域环境,在经济上也取得了很大的效益.
- 美国从 1993 年开始有 20 个城市市政当局与大公司合作规划建立生态工业园区,其中有两个已基本建成.1994 年美国可持续发展总统委员会计划进行马里兰州的 Fairfield、弗吉尼亚州的 Cape Charles 等 4 个地方 4 个生态工业园区示范项目的建设.美国环境署还在 1999 年资助了 2 个生态工业园区.
- 其它一些发达国家,如法国正致力于进行其 PALME 计划,加拿大正在将其现有的一些工业园区改造为生态工业园区,日本提出建设类似的零排放社会.
- 我国在太原、枣庄和衢州等地由清华大学参与规划的示范生态工业园区也进行了很好的尝试.

通过对园区内数十家工厂的数百个不同种类、不同品质、不同大小的物质流、能量流、信息流进行集成、分析,形成物质的充分循环利用、能量交换的梯级使用和环境治理的综合优化的生态产业网,这首先要求构成园区的每一个单元生产环节是清洁的,因此要发展清洁的生产工艺(指从源头没有污物引入或产生)、原子节约工艺(指化学反应中转变为目的产品分子的分子量占原料分子分子量的比例要尽可能的高)和高选择性工艺(指化学反应生成物的专一性高,没有或很少有副产物产生),要开发清洁的生产技术与设备,如用膜分离、吸附分离代替传统精馏分离,减少能耗和热污染,用反应—反应、反应—分离耦合技术和设备解决可逆反应的平衡制约等.而且要通过生态园区内生产链和生产网的分析,发现其断点位置,并优先开发“粘结”技术,以使多个生产过程形成更高交叉度的“产业链”和“产业网”.如我国近年来成功开发出的数十万吨级用于磷石膏

分解的“粘结”技术,使磷肥厂、水泥厂、高硫煤矿、硫酸厂联合形成“生态产业网”,有效地解决了磷石膏污染问题(见图 1)以及数万吨级 KCl 与 Na_2SO_4 的复分解和结晶分离技术,避免了 K_2SO_4 生产中大量耗用 H_2SO_4 又产生大量长线副产品 HCl 的问题,这时的副产物 NaCl 也可达到食品级。由此可见,生态工业园区的成功与失败也取决于各种清洁生产硬件的成功研究与开发,这些技术都将大大促进生态工业园区集成的有效性,使物质循环经济从将废纸及废塑料生产再生纸和再生塑料、废钢铁重新炼钢、用废玻璃生产新玻璃的简单循环过程大大地向前推进一步。这就是把传统的由“资源-产品-排放污染”所构成的物质单向流动经济模式改变为物质在能量注入的驱动下不断循环利用的模式,最终改变由资源粗放的一次性利用造成资源枯竭,而且不断把资源变成废物,酿成环境污染的灾难性后果并导致人类文明失落的悲剧场面。所以生态工业发展模式是综合解决“环境污染”、“资源短缺”、“能源浪费”的根本之路。

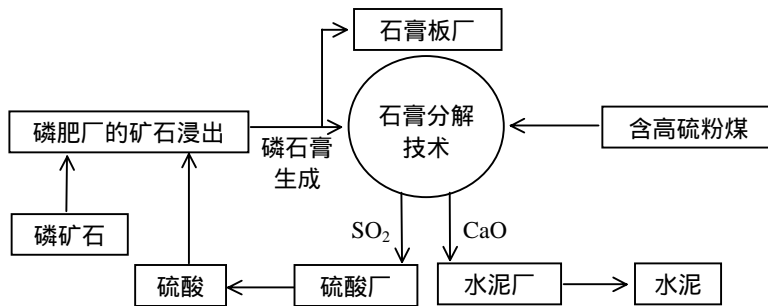


图 1 生态产业链举例

Fig.1 An example of ecological industry chain

4 “过程工程”是发展“生态工业”的主战场和突破口

“过程工程”是指化工、炼油、冶金、能源、建材、医药、日化等多种工艺过程中有共性的工程技术。由于它们的学科理论基础是共同的,泛化学工业是在化学和物理学基本原理指导下,高度交叉发展而形成的产业,它们共同的研究核心内容是:

- (1) 物质流的传递与转化过程;
- (2) 能量流的传递与转化过程;
- (3) 信息流的传递与集成过程。

三者之间交互作用,促进了过程工程的发展,既说明了过程工程中技术是相通的和可共享的,也较用“三传一反”(即动量、热量、质量传递和反应工程)来概括更为全面。

“生态工业”在原理上论述了物质循环利用的可能性,但要使其在经济上也可行,是一个漫长的技术进步过程,必须选择好主战场和突破口,使其可以获得显著经济效益。因为过程工业恰恰是造成 80%以上环境污染的源头,也是最大的资源和能源转化企业,所以构成生态工业园区产业网的主体必然是过程工业中各种工艺不同形式的优化和集成。

从根本上讲,资源虽然可以循环利用,可是这一过程中能源的消耗是绝对单向的。如果随着未来技术发展使核聚变能源得到工业利用,能源有了充分保障,也许会大规模实现由 CO_2 生产各种碳氢化合物的工业逆过程,但在能源匮乏的今天,生态工业的发展必须在能源利用最有效的条件下进行,不同品质能量流的梯级利用也必然是与发展生态过程工业技术相结合的。

从枣庄示范生态工业园区初步规划方案(图 2)可见,只有在过程工业范围内,资源-能源-环境

问题才能得到综合优化利用. 这种在一定界区内原属于不同行业的企业相互依存、相得益彰的综合发展模式更具有经济发展优势, 也促进同一先进技术在不同类型企业间的推广和再开发, 如固体流态化在炼油、化工、燃煤、冶金、煤气化和液化等多个行业中得到应用就是很好的例子. 由于当前我国社会主义市场经济发展的需要, 国家管理体制中行业“条块分割”的体制正在瓦解, 强化过程工业企业之间深层次联系, 形成相互支撑的格局, 正恰逢其时, 这一改革为取得最大经济效益和社会效益创造了社会经济条件.

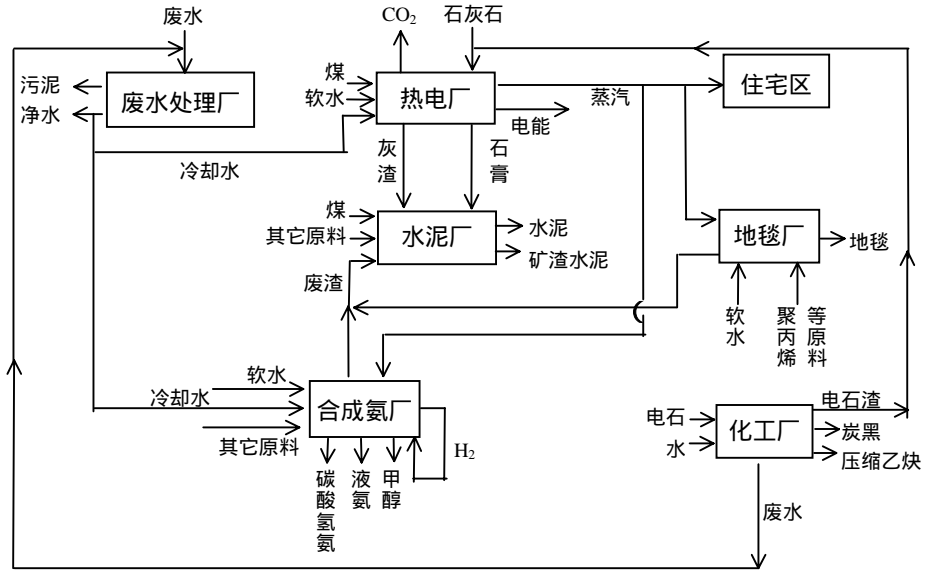


图2 枣庄生态工业园区规划方案之一

Fig.2 Eco-industrial park scenario 1 in Zaozhuang

4 加快物理学、化学、生物学最新研究成果在过程工业中实现产业化，是促进生态工业发展的基础

“生态过程工程”的发展是用高新技术对大量传统技术的改造过程，也是新产业形成的过程，是将最新物理学、化学、生物学成果在本领域内产业化的过程。由此入手进行传统产业的技术改造和开发新兴产业，使生产的工艺、设备和环境都符合绿色要求。当前可以重点进行的研究开发工作如下：

(1) 利用新型催化材料和催化反应工程与工艺技术，提高化学反应的转化率、选择性，关注化学领域有关提高化学反应专一性(包括飞秒化学、信息化学等)的催化过程，开发清洁催化反应工程与工艺过程，如新型分子筛、茂金属催化剂、非晶态合金催化剂、纳米催化剂、多功能催化剂、膜催化剂、相转移催化剂等新型催化剂的使用和引入超临界、超高温、超高压、毫秒接触、等离子、超声场、微波场、电场、磁场、反应-反应耦合、反应-分离耦合等新型化学反应工程的研究开发。

(2) 开发原子利用率($\varepsilon = \text{目标产物分子量} / \text{所有产物分子量}$)高的新工艺过程，代替有大量副产物的工艺路线。以环氧丙烷合成工艺为例，如采用传统氯醇法 $\varepsilon = 28.4\%$ ，而采用液相 H_2O_2 氧化法

$\varepsilon=76\%$ ，采用气相法 $\varepsilon=100\%$ 。

(3) 采用无污染的溶剂，特别是用 H_2O 、 CO_2 代替有机溶剂，开发可在水中工作的催化剂(如羰基合成中由过渡金属和膦配体水溶性络合催化剂等)。在超临界 CO_2 溶剂中进行合成反应、聚合反应、废物处理及再资源化以及进行从纳米到微米级的造粒、包覆缓释、表面改性和利用 CO_2 作为发泡剂等。

(4) 用生物技术大量合成化学品来代替传统工艺如丙烯酰胺、L-乳酸、谷氨酸、1-3 丙二醇、长链二元酸、各种抗生素、酶制剂、食品及饲料添加剂等，由于生化反应条件温和、选择性高、能耗低，所以较化学合成有明显优势。但同时应注意生化污水的处理与回收技术的配套开发。

(5) 大规模车用清洁燃料的合成工程与工艺，在降低传统汽油、柴油等车用燃料的硫、氮、烯烃、芳烃含量的同时，我国应特别重视清洁替代车用燃料的合成工作，如由淀粉、木质素的降解和发酵生产燃料酒精的工作，开发新型纤维素酶，把纤维素转化为糖的糖化过程与糖生成酒精的发酵过程结合起来。再如水煤气直接合成二甲醚代替柴油的研究开发，由于通过把合成反应与脱水反应的原位耦合，可以显著提高反应转化率。

(6) 采用非污染原料进行合成反应，或合成无污染的化学品代替有污染的产品。如采用 CO_2 而不用光气生产聚碳酸酯，用无毒的二乙醇胺为原料代替 HF 生产氨基二乙酸钠，及以合成全氟碳化合物代替氟里昂用于清洁冷冻剂等。

(7) 清洁有色金属、稀土金属和核燃料的生产技术。

6 结 语

总之，生态过程工程技术是关系到与人们衣、食、住、行的物质基础直接相关的国民经济支柱产业，是近代生物技术、信息技术和纳米技术大规模产业化的重要归宿地，也是困惑社会持续发展的资源-能源-环境问题综合解决的最佳途径，“生态过程工业”前景广阔。

参考文献:

- [1] 金涌, 汪展文, 王金福. 化学工业迈入二十一世纪 [J]. 化工进展, 2000, 19(1): 5-10.
- [2] 曲格平. 循环经济是解决污染的根本 [N]. 中国环境报, 2000-12-02 (3).
- [3] 张懿. 绿色过程工程 [J]. 过程工程学报, 2001, 1(1): 10-15.
- [4] Graedel T E. On the Concept of Industrial Ecology [J]. Annu. Rev. Energy Environ., 1996, 21: 69-98.
- [5] Quinn B. Creating a New Generation of Environmental Management [J]. Pollution Eng., 1997, 6: 60-62.

Process Engineering and Ecological Industry

JIN Yong, LIU Zheng, LI You-run

(Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Great contribution to the human society was made by the process industry in the past century, which, however, also resulted in serious environmental problems, hindering the sustainable development of human society. The future development of process industry should be based on a renewed infrastructure, i.e., eco-industry, in which a product-chain or product-network will be developed by incorporation of resource utilization, energy consumption and pollution control, as can be found in native ecology. Multidisciplinary research will be an essential and effective way to the development of process engineering and industry.

Key words: ecological industry; process engineering; circulating production; life cycle analysis; incorporated pollution prevention