

循环经济与生态工业工程^①

金 涌, 魏 飞

(清华大学 化工系, 北京 100084)

摘 要: 生态工业工程是通过向自然生态学习, 以“社会发展”、“珍惜资源”和“环境质量”为多重目标, 构建循环经济技术基石。在发展这一新的工业生产模式过程中需依托物理、化学、生物学最新成果的注入, 为此泛化学工程可以发挥重要作用。讨论了循环经济模式提出的历史背景, 循环经济的内涵、主要技术挑战、学科范畴、主要指导原则等。

关键词: 循环经济; 生态工业; 可持续发展

Sustainable development and ecological process engineering

JIN Yong, WEI Fei

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

Abstract: Challenges to the attainment of sustainable development in China include: the efficient use of an abundance of labor, the growing population and growing pollution in cities, a gross national production that is relatively high but that on a per capita basis is low, and a big market and a situation where the rate of primary goods production is high with large depletion of energy and materials for which there is much room for improvement. The main problems are: energy and materials resources per capita are lower than the world level, the level of technology is low with a need for more advanced techniques for higher added value, and the environmental pollution and ecological degradation problems are severe. The only way to respond is by building a cycle economy and metabolic society. This requires the development of an ecological industry and technologies for clean production. The development needs to follow the 3R principles of reduce, recycle and reuse of resources. The cycle economy is comprised of three levels and three supports, in which the three levels are the metabolic society, the establishment of ecological industrial parks, and the realization of clean production, and the three supports are growth by hi-tech R&D, the rules of ecological systems, and ecology education and upholding of moral standards.

A distinction is made between two possible modes of economic expansion. Mode 1 is a true and intrinsic development that is driven by progress in science and technology, which would achieve GDP growth while decreasing resource depletion and pollution. Mode 2 is a market based development, in which there is duplication of construction at a low technological level with increased resources depletion and pollution. Process engineering in the industries of petroleum products, metallurgy, chemicals, building materials, pharmaceuticals and others is very important in the national economy. They are also the largest users of energy and resources, and cause the heaviest pollutions. The optimal use, reuse and recycle of resources are discussed by a classification into three categories: category 1 in which the reuse of a product is considered on the basis of functionality recovery by mechanical means, category 2 in which metabolic processes are developed for several important elements in industry, and category 3 in which carbon and hydrogen cycles function as energy carriers. The concept of “clean production” is considered at five levels: pollution treatment of standard discharges, recycled utilization to minimize discharge, green chemical engineering processes in which pollution sources are replaced by clean alternative processes, ecological chemical engineering and full life-cycle clean product design, and the establishment of eco-industrial parks (EIP).

In summary, sustainable development is an urgent and international task. New technological developments are the

① 作者简介: 金 涌(1935-), 男, 教授, 中国工程院院士。

通讯作者: 金 涌, 教授; 电话: 010-62794769; E-mail: yjy@chemeng.tsinghua.edu.cn

corner stone of a cycle economy. Ecological process engineering can make significant contributions.

Key words: cycle economy; ecological process engineering; sustainable development

1 循环经济模式提出的历史背景

由于过去的100年中,核能技术、信息技术、生物技术、航天技术、先进制造技术等的高速发展,进入21世纪的人类社会,社会生产已达到空前规模,人类创造社会财富的能力和实施诸多伟大工程的智慧,都令人赞叹不已,人类社会从来没有如此强大,而对未来发展踌躇满志,期待着更好的生活质量,更健康更长寿等。但从另一面来讲,不幸的是人类社会从来没有像今天这样充满巨大的生存危机和面临强烈挑战,诸如世界人口的爆炸性增长,矿物资源、化石能源的高速消耗,日益严重的水资源的匮乏和水环境污染,每年数百亿吨的工业废气和废渣的排放造成严重的大气污染和对田园的侵蚀,土地荒漠化,酸雨蔓延,森林、耕地锐减,再加上生物多样性的濒危,全球性气候变暖,臭氧层的破坏,这些问题无一不危及到人类的健康和生活,也极大地制约着经济的发展,甚至对地球40多亿年来演化形成的生态系统也造成了严重威胁。而它是如此珍贵,在茫茫宇宙之中不是唯一,也是极为罕见的。

对诸多环境问题进行分析,可以看出上述危机都是人类自己制造的,是工业、农业和消费高速发展的结果。人们合成了成百上千万种新的化合物,为人类衣、食、住、行创造了极大的舒适和方便,但也为人类当代和后代理下了定时炸弹。面对着社会高速发展和生存危机的剧烈矛盾,面对着人类生死存亡的抉择,从20世纪60年代开始世界上许多有识之士便开始进行了严肃的思考,1972年6月联合国在斯德哥尔摩召开了“人类与环境会议”并通过了“人类环境宣言”,提出了震撼人心的口号是“人类只有一个地球可赖以生存”、“这个地球不是我们从上一代人那里继承的,而是从子孙后代手里借来的”。其后,1987年的“世界环境与发展委员会”报告,1992年联合国在里约热内卢举行的“环境与发展大会”宣言,……直至2002年在约翰内斯堡举行的联合国可持续发展首脑会议和在北京举行的“全球环境基金成员国大会”的新宣言和讲话都不断反复强调一个理念,人类必须遵循“既符合当代的需求,又不致损害后代的需求和发展”。

我国正处于工业社会发展前期,上述矛盾更为突出,我国根本上不存在走发达国家的老路而得以发展的物质基础和客观条件。江泽民同志指出:“只有走以最有效利用资源和保护环境为基础的循环经济之路,可持续发展才能得到实现”。

出路何在?人们的思考转向地球自然生态系统,经40多亿年自然界生态系统演化,各种物质在动物、植物、微生物之间不断被循环反复利用,原料与废物的角色不断交替转化,生生不息,永无休止,而且这一循环仅仅依靠能量密度很低的太阳光的驱动即可完成(图1)。正是由于人类300年工业社会发展的介入,才使情况发生了变化。由于过去工业社会发展是以效率和效益为最重要的追求目标,采取的单向发展模式,在“人定胜天”、“征服自然”的功利主义驱动下,一方面不断扩大挖掘开采矿物资源和化石能源的规模,一方面在加工和使用过程中,不断废弃造成污染(图2)。这种单向发展的经济模式规模越来越大,造成资源的匮乏,化石能源的短缺和环境的污染越严重。我们面临的巨大危急的根源是工业系统所采用的单向发展模式,只有效法自然生态系统循环法则,建立循环经济模式,发展生态农业、生态工业和生态消费体系,以“效率效益”、“珍惜资源”和“环境质量”多重指标重复审视过去工农业生产技术与过程并加以改造,自然资源才能得到合理有效的利用,污染物排放才能大大减少,人民的生活质量才能够得到持续改善,人类地球家园及地球所孕育的整个自然生态体系才能够千秋万代地持续生存下去(图3,图4)。

2 循环经济的定义与内涵

循环经济也称为资源闭环利用型经济,在保持生产扩大和经济增长的同时,通过建立“资源→生产→产品→消费→废弃物再资源化”物质的清洁闭环流动模式,才能既提高人民生活水平,又避免由于对地球掠夺式开发所导致的自然生态的破坏。循环经济把清洁生产、资源综合利用、可再生能源开发、灵巧产品的生态设计和生态消费等融为一体,运用生态学规律来指导人类社会经济活动的模式。依照其物质循环层次深度的不同,可以分为以下几类。

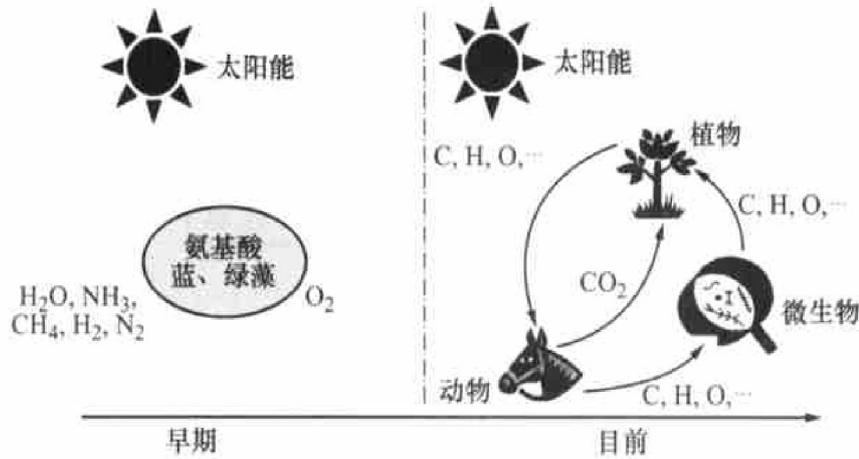


图 1 自然生态的循环发展模式

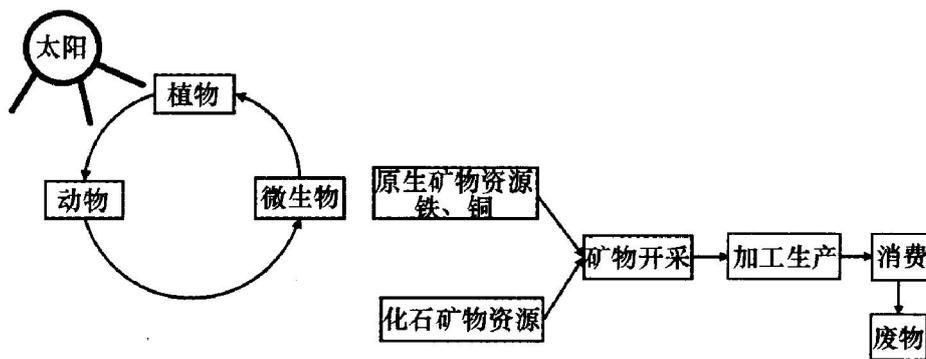


图 2 工业经济的单向发展模式

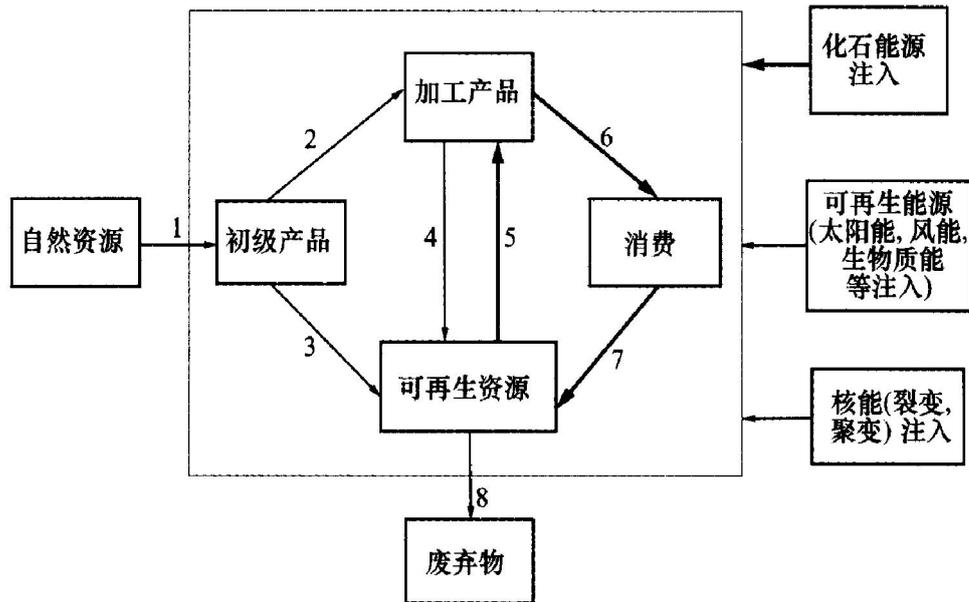


图 3 循环经济模式的逐步形成

1) 初级资源循环利用型。可再生资源的简单回用,这在 20 世纪初已经工业化,如废钢铁的回收利用,废纸张、废玻璃的再生利用,都已有相当规模。最近日本理光公司把可口可乐聚酯瓶回收纺丝制成工作服,可以称为最新进展。这时物质在分子水平上没有变化,仅形态上的改造,就可以实现循环利用(图 5)。

2) 由“生产者-分解者”构成的循环利用型。

20 世纪末由于家电产业、汽车产业的发展,出现了把废家用电器分解,即把热塑性塑料部件重新造粒复用,热固性塑料粉碎作填料,铜、银、汞等金属分别浸出回收,即把复杂产品的物质分别拆分成原料再利用。废汽车也可以如此处理。这种物质循环利用已向前进了一步(图 6)。

3) 由生态产业链组成的资源循环利用型。以我国已成功开发的“硫酸厂-磷肥厂-水泥厂”大型

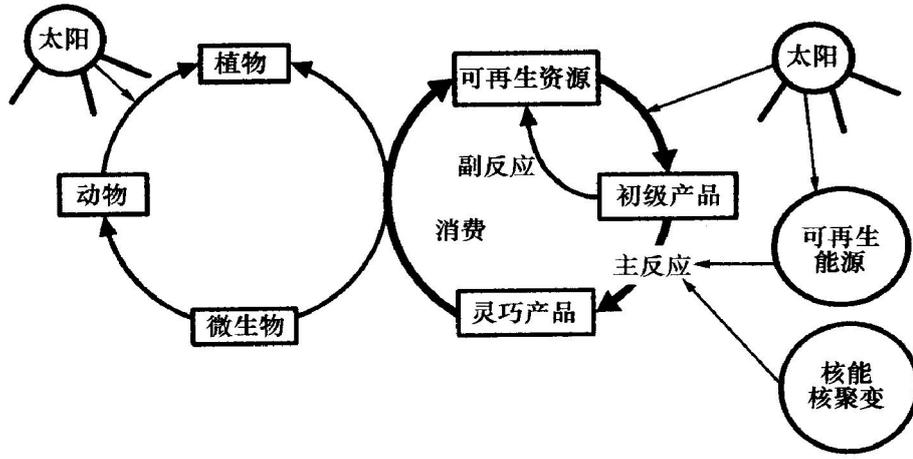


图4 与自然生态系统耦合的理想循环经济模式

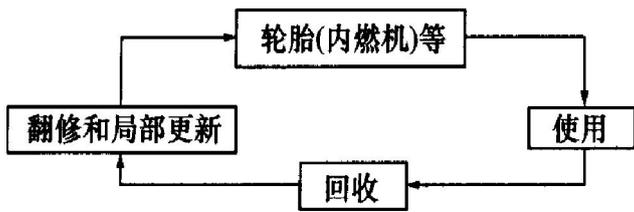


图5 初级资源循环利用模式

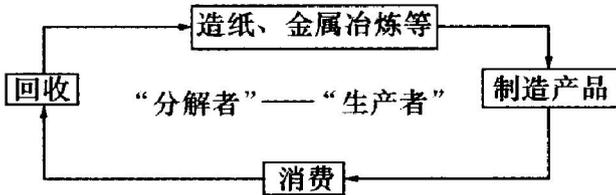


图6 由“生产者”——“消费者”构成的循环利用型

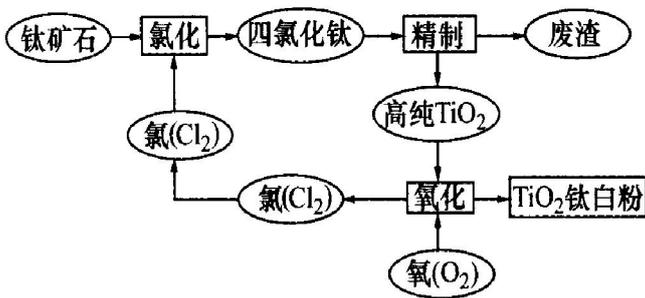


图7 由生态产业链组成的资源循环利用型

生态产业链为例，把硫酸厂的硫酸用于磷肥厂生产磷肥，磷肥厂所副产的石膏经过加热分解成二氧化硫与生石灰，生石灰用于水泥厂生产水泥，而二氧化硫送硫酸厂生产硫酸，硫酸再循环用于磷肥生产。既解决了大量石膏堆弃污染问题，又使硫元素得到循环利用。这种模式通过物质在产业链间发生的分子水平变化，深层次地实现了物质循环利用（图7）。

4) 由“生态工业系统”与“自然生态系统”相耦合的资源循环利用型。这是处于开发中的一种最新

模式，例如，当前工业生产过程中二氧化碳排放量巨大，通过生物转基因技术培育速生树种，和含油藻类，其大量繁殖会把空气中的二氧化碳固定成生物质，生物质再加工成生物质油作为能源，这种生物质能源的利用不会净增加工业二氧化碳排放（图8）。

3 生态工业工程面临的主要技术挑战

1) 散资源的富集、分离、纯化问题

生态工业工程在资源转化过程中，首先面对的是如何把分散的资源富集、分离、纯化，而且在消费过程中资源会再度被分散。由于所有自发的过程都是熵的增加过程，所以资源循环利用首先遇到的问题又是资源再富集、分离、纯化的过程。这一过程的难点在于：①世界所需循环利用的物质不仅品种繁多，而且循环量巨大，多种品种的物质循环量已超过几十亿吨/年；②所需要的富集、分离、纯化技术本身必须是清洁的，没有二次污染；③所有富集、分离、纯化技术必须是高效率的，节能的，而且在经济上是合理的，可以接受的。当然这一过程应该把生产与消费模式统一考虑才容易实现。

2) 化学势物质最小能量注入转化问题

传统工业的单向发展模式导致过程的最终产物大都是低化学势物质，如 CO₂, H₂O, NaCl, CaCO₃, HCl 等，其中一些产物已被利用作为原料，重新进入资源循环利用过程，而另一类则由于技术或经济原因目前尚没有被循环利用，所以打通物质循环的“静脉”渠道的工程技术对可持续发展极为重要。自然界生态的可持续发展，是由于所有物质均在动物、植物、微生物之间不断循环代谢，废物和原料的角色不断变换所致，而且极其重要的是这一

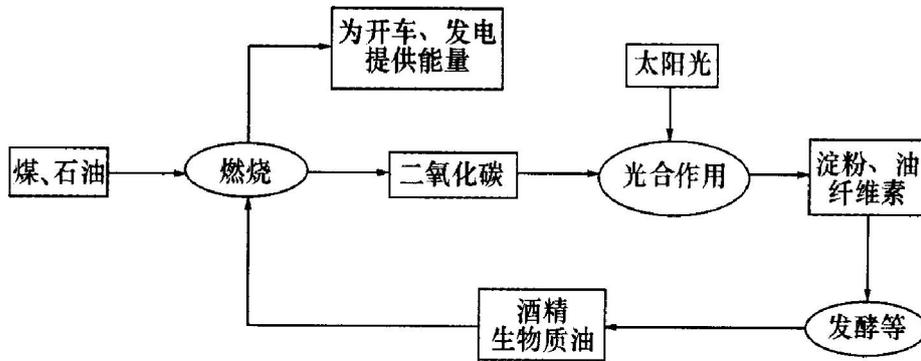


图 8 由“生态工业系统”与“自然生态系统”相耦合的循环利用型

循环的驱动力仅为能量密度很低的太阳能。所以通过对元素在工业过程中的代谢分析入手, 开发低化学势物质在最小能量注入下的转化技术十分重要。

3) 低价位可再生资源的高附加值转化问题

全球尚未得到有效利用的大规模可再生资源之一是植物代谢产物纤维素、木质素, 当前全球产量大约为 1.64×10^{11} t/a。如果改变工业生产以化石能源为基础的现状, 去利用这些低价位再生能源, 如通过生物转基因技术培育出太阳能利用率更高效的林木、藻类等。这些资源的工业转化方法的研究对人类可持续发展贡献将是十分巨大的。由加拿大开发的超短接触(0.01 s, 400 °C) 热解技术, 其产品的液相部分可达 80%; 由 Shell 公司开发的 HTU-Process 水热法(250 °C, 3~10 MPa) 重油产率为 45%~55%, 其热值为 25~30 MJ/kg。以生产乙酰丙酸为平台化合物的纤维素发酵法也有一定进展。上述尝试都是很好的开端。

另外, 以低品质动植物油脂为可再生原料(菜籽油、棉籽油、废食用油、含油达 40% 以上的微藻) 的加工业, 已初具规模, 法国采用酯交换法由此生产的生物柴油已达 35 万 t/a, 并副产甘油。其他如动物内脏和药用植物有效成分的提取, 也是高附加值转化技术。

4) 太阳能及其直接衍生的可再生能源高效利用问题

人类社会可持续发展的极终制约因素是能量问题。地球能源源于太阳能的部分占 99.99%, 约为 156×10^{16} kW·h/a, 是目前人类每年消耗化石能源的 3.5 万倍。照射到地球太阳能的 32% 直接反射给外宇宙, 被接收的太阳能 20% 用于蒸发海水, 形成水的生态循环, 其中 0.1% 为植物利用, 植物在生命代谢过程耗用了 50%, 遗存在植物产物中的部分大约亦占 50%。太阳能的高效利用是循环经济的根本保障, 而且是最为清洁的能源。当前最有吸引力

的太阳能利用技术有: ①利用生物转基因技术培育速生植物, 并直接工业转化; ②直接进行光电转化的半导体技术; ③光催化技术用于水的直接分解, 生产氢能。这些技术都显示出良好前景。

5) 低品位、低密度工业能源有效利用问题

能量的梯级利用早已为化工、冶金、建材工业采用, 主要为能量交换的逆流原则和传热过程的强化原则。近年来采用夹点技术组织企业内数十股温度不同、相态不同、数量大小不同的物流之间优化热交换, 是这一思想的新进展。另外采用热泵技术利用低品位蒸气, 采用热管技术提高传热效率都是概念创新的技术。

建立循环经济模式所遇到的技术挑战是一个复杂系统问题。

4 生态工业工程学科研究的指导原则

4.1 资源的循环利用、重复利用

4.1.1 物质生产过程中的共生原则

在资源转化过程中高效率、低物耗和能耗的技术, 常需要打破传统工业技术门类的分割。例如生铁的冶炼, 世界不少国家提出采用熔池法, 即铁矿石用粉煤直接还原, 减少了炼焦过程的污染和适宜炼焦用煤种资源不足的限制, 另一方面把 $C \rightarrow CO$ (110.5 kJ/mol) 的氧化反应用于有效铁矿石还原, 而 $CO \rightarrow CO_2$ (283.0 kJ/mol) 用于制氢或水煤气生产, 进而作为合成甲醇、二甲醚、乙烯等化工原料, 或直接作为氢能用于燃料电池或用于联合循环发电, 从而提高热电转换效率, 这形成了一个冶金、化工、能源工业过程的优化组合(参见图 9)。

4.1.2 工业生态演变进化原则

首先, 物质转化过程应适应资源结构的改变, 使技术不断演变进化, 如我国原油资源不断重质化, 进口高硫原油份额不断增加, 对原油需求高速

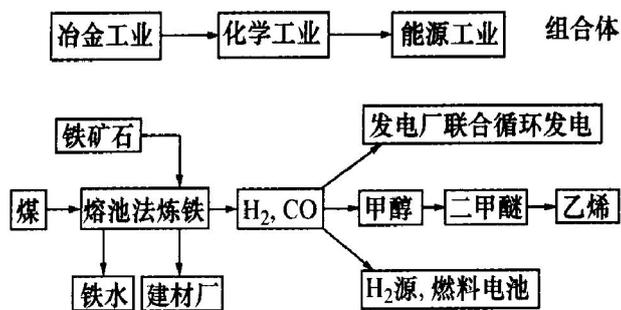


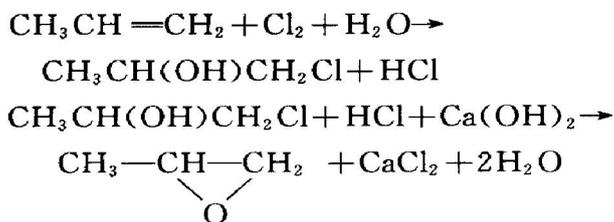
图9 物质生产中的共生原则

增加,需要煤和天然气的液体燃油的转化技术,黑钨矿资源的枯竭而对白钨矿高难冶炼技术的需求,和我国高硅铝矿石的冶炼技术等,都属适应资源改变所致。

其次,为适应环境指标要求提高,也驱动工业技术演变进化。例如以合成环氧丙烷为例,有不同的工艺流程,如用原子利用率 ϵ ($\epsilon = \frac{\text{目的产物的分子量}}{\text{所有产物分子的总和}}$) 作为度量清洁生产的指数时,则有3种不同工艺,将推动我们去追求更洁净技术。

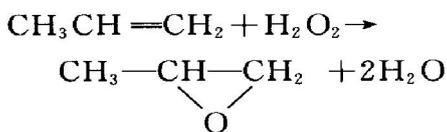
最后,新的科学发现或技术进步也会导致工业技术的演变进化,这种例子更十分普遍。例如,石油裂解技术随着催化剂的进步,反应器从20世纪40年代采用氧化铝移动床反应器,至50~60年代采用流化床反应器,进而在20世纪70~90年代分子筛催化剂开发成功,则需要反应时间更短的提升管反应器相匹配,新世纪则进而开发出下行床裂解工艺,使技术不断完善(见图10)。

1) 氯醇法



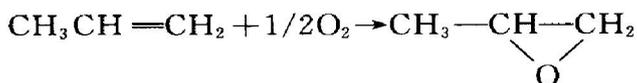
$\epsilon = 58/204 = 28.4\%$

2) 液相氧化法(钛硅分子筛,醇体系内催化)



$\epsilon = 58/76 = 76\%$

3) 气相氧化法(金属卟啉催化)



$\epsilon = 58/58 = 100\%$

4.1.3 从元素工业代谢分析入手推行资源循环利用原则

对重要元素如C、S、Cl、Cr...等的工业代谢分析入手,研究资源循环利用,既可节约资源消耗,又可以减少污染。以Cl为例,Cl元素参与许多重要工业反应,但不进入最终产品,最终生成HCl副产物(见图11)。如果能开发出节能的HCl→Cl₂的技术,可以实现Cl元素循环利用。如采用部分氧化法(见图11)即可实现低能耗Cl元素重复利用。

4.1.4 物流循环减量化原则

物流减量化意味着要求产品的高质量、多功能和有效的管理等,如25kg光纤信息传输量相当于1t铜,其生产中能耗也减少了95%。再如推行溶剂、催化剂的“分子租用”,进行统一再生、复用,也是物流循环减量化的好方法。

4.1.5 产品灵巧化原则

根据市场对产品功能需求来设计和制造产品称之为产品工程,也是有利物流高效利用和减量化的好方法,如灵巧化肥的合成。

我国氮肥的产量和消费量居世界第一,而利用率仅为30%~35%,磷肥产量居世界第二,消费量为世界第一,利用率仅为10%~20%;钾肥产量居世界第一,消费量为世界第二,利用率为35%~50%。其主要原因为化肥在土壤中的分解速率与植物吸收速率不匹配,造成资源浪费和水系污染。如果生产出跟随植物生长周期需求能相应变化释放速率和成分的灵巧化肥,则污染和节约资源问题可以同时解决(参见图12,13)。

4.1.6 物质转化中的柔性原则

自然生态系统中生态链的多重网状结构使其具有很大柔性,局部链结出现问题,不会影响整体的功能和效率。工业工程中,应同样开发多联产工艺以体现其柔性。图14所示即是煤加工过程的柔性链结过程。

4.1.7 低物耗转化工艺优先原则

具有同样功能的产品在品种选择时,应以低物耗工艺优先。如煤的液化生产车用燃料问题,对我国十分重要,有以下产品和工艺可供选择。1)煤直接加氢液化:产品为劣质柴油,需加氢重整,后续加工物耗能耗高,折合约5.5t标煤合成1t液体燃料;2)煤间接液化:产品为劣质汽柴油,也需要后续加工改质,约需5t标煤合成1t液体燃料;3)合成甲醇:可以与汽油混用或独用,单独使用由于能量密度低,发动机出力较低,不可以电喷,有毒性,但物耗能耗低,折合约2.5t标煤合成1t液体燃

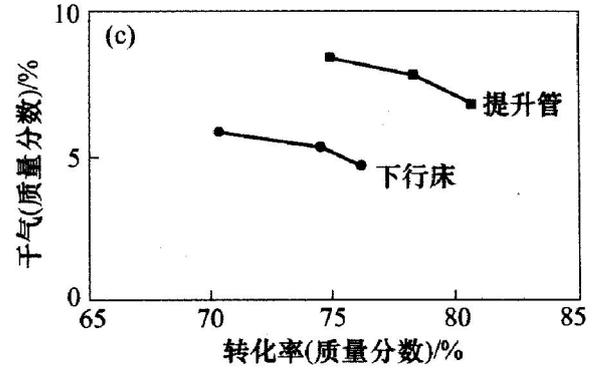
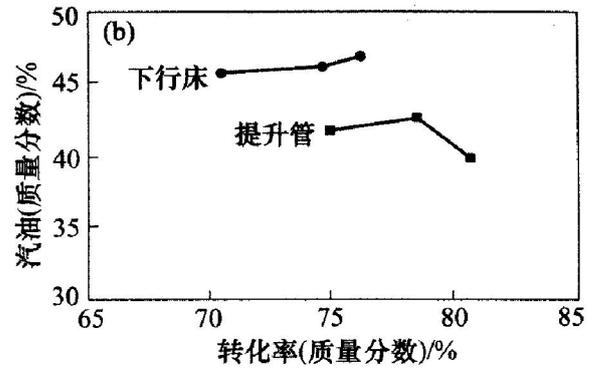
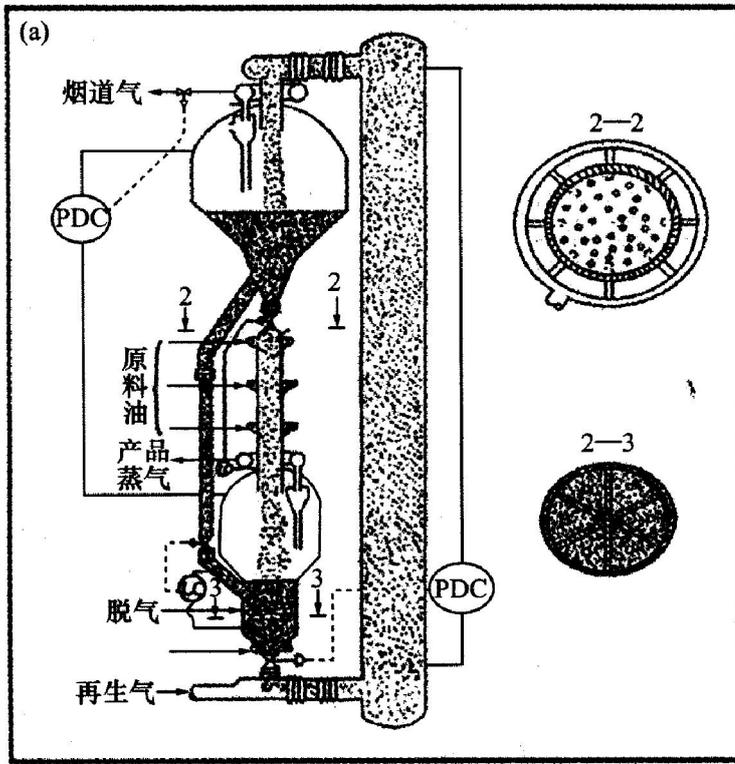


图 10 提升管与下行床石油催化裂化反应对比

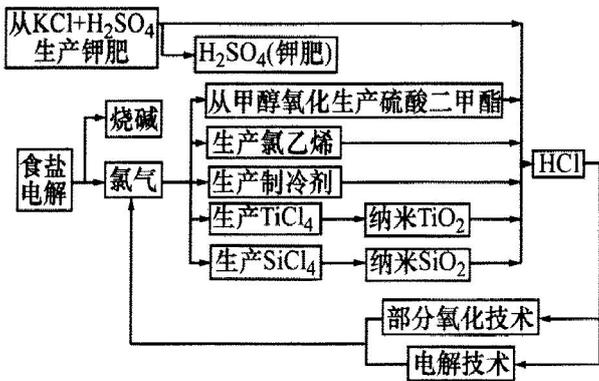


图 11 氯元素的工业循环

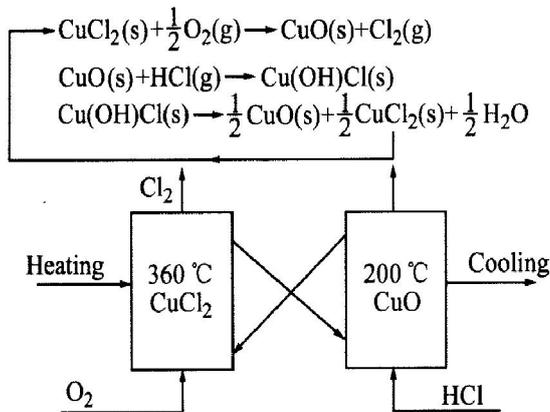


图 12 部分氧化法实现 $2\text{HCl} \rightarrow \text{Cl}_2$

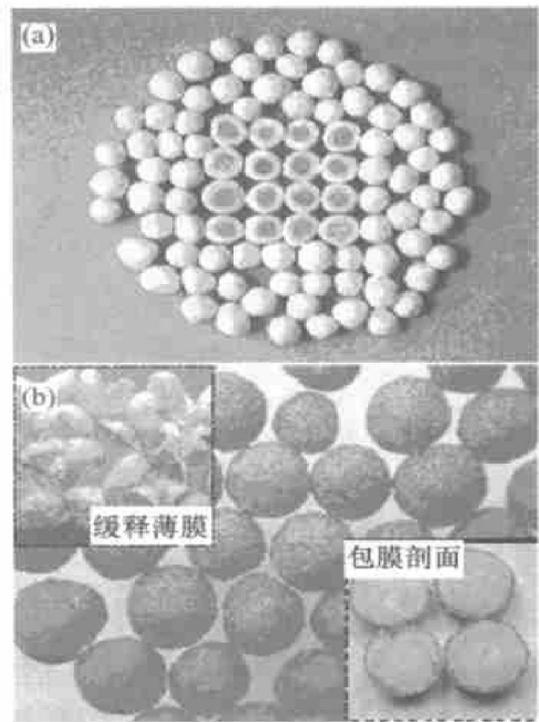


图 13 大粒可控缓释化肥制备

料; 4) 合成二甲醚: 十六烷值高于柴油, 由于沸点低, 使噪音低于柴油车 10 分贝, 排气清洁度符合欧洲-3 标准, 因燃料含氧所以完全燃烧时气缸内吸

入的氧和氮气量少, 故仍可保持较高发动机效率, 单位行车里程耗用二甲醚与柴油基本相同, 尽管二甲醚的热值低于柴油, 但是合成 1 t 二甲醚其标煤耗用量仅为 2.6 t 左右, 因此被世界公认为清洁代用燃料。特别是如采用一步浆态床合成工艺, 单程转化率可达 60%~ 90%(二步法甲醇单程转化率仅

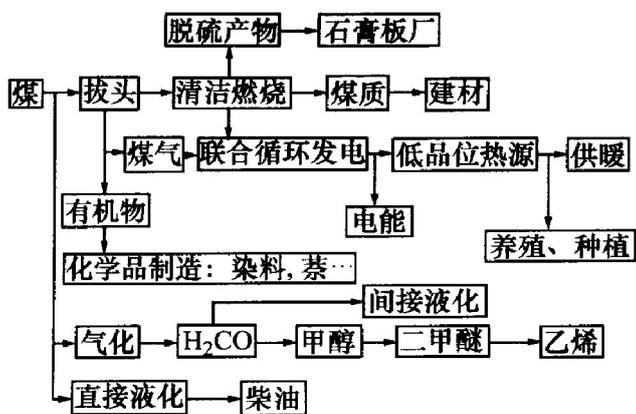


图 14 物质转化中的柔性原则

8%~14%), 可使成本大大低于柴油, 有很强的竞争能力。

4.2 能源的优化利用和可再生能源的开发

4.2.1 能量的梯级利用原则

在化工、能源、石油、材料等工业中已广泛采用, 如逆流热交换原则, 利用夹点技术进行企业换热网络规划等。

4.2.2 低能耗转化技术优先原则

为了达到同样功能的产品或达到同样效能的工艺应优先选择低能耗者, 例如处于开发过程中的氢等离子体煤粉合成乙炔技术, 由于钙元素不再介入转化过程, 与传统电石法相比可减少能耗 35%, 减少废渣、废水和废气排放, 既节能又环保(参见图 15)。

再例如物质分离过程, 以能耗由大至小排序为精馏、萃取-反萃、吸附-脱附、膜技术等。当然应首选低能耗工艺。

4.2.3 生化技术优先原则

生物过程经过数十亿年的进化是唯一的逆熵过程, 至今人类没有能制造出可与叶绿素、根瘤菌相媲美的大规模合成催化剂和催化技术。当前已经可以用生物化工技术规模化合成乙醇、1-3 丙醇、丁二醇、乳酸、1,2 苯二酚、维生素 C 等。生物化工的优势在于反应条件温和、选择性高、能耗低、污染少, 但其主要不足之处是反应速度低, 需要开发大型化生产技术。

4.2.3 可再生能源开发优先原则

如生物柴油制备、秸秆转生物油等工艺, 发展迅速。

4.3 污染的源头治理

关于“清洁生产”概念有一个演化过程, 第一层

次是污染治理、达标排放, 仅限定排放浓度。第二层次为治理后区域内回用, 实现微排放, 达到排放总量控制。以上作为污染的尾端治理方法在一定条件下是十分必要的, 而且也发挥着重要作用。但从生态学角度看, 它存在着根本的缺欠: ①尾端治理常会导致污染转移, 如固体垃圾焚烧处理可能污染大气, 灰烬可能污染土地和地下水; ②尾端治理一般为渐进式技改, 而常牺牲了真正的革新, 阻碍技术进步; ③随着对环境质量要求的提高, 尾端治理投入递增, 而效益递减; ④尾端治理形成的巨大市场, 间接地使污染本身形成国民生产总值的重要部分, 污染等于增加了国民财富(如香烟业), 将对欠发达地区造成严重威胁。所以污染必须从源头消除, 进行工业生态建设, 需遵循以下原则。

1) 清洁生产工艺优先原则

清洁生产包括以下内容: ①使用无毒害原料、溶剂、催化剂新工艺代替传统污染工艺; ②生产对环境友好的产品, 代替可造成污染的产品; ③采用对环境友好的工艺路线。在这一领域美国从 1996 年至 2001 年已执行“总统绿色化学挑战奖”多年, 取得可喜成果, 可供参考(参见表 1)。

新工艺和设备的改进也可导致清洁工艺的成功开发, 如传统钾肥生产技术是以氯化钾与硫酸反

表 1 美国“总统绿色化学挑战奖”

更新合成路线奖	
1996年	Monsanto 公司 不用 HCN 为原料, 生产氨基二乙酸钠-除草剂
1997年	BASF 与 Hoechst 合营公司 消炎药(ibuprofen)新工艺, 原子利用率从 40% 升至 80%
1998年	Flexsys America 公司 4-氨基二苯胺(4-ADPA)新工艺, 用苯胺与硝基苯直接合成, 不需加入氯或溴作氧化剂
1999年	Lilly 实验室 抗痉挛药(anticonvulsion)新工艺, 避免了大量溶剂使用和污染物产生, 采用生物酶(gosaccharomyces rouxii)固定化催化剂
2000年	Roche Colorado 公司 抗病毒药(gallicloui)新工艺, 将反应物和中间产物数量从 22 种降低至 11 种, 气体排放减少 66%, 固体废物减少 89%, 4/5 中间产物可循环利用
2001年	Bayer 和 Bayer AG 公司 可生物降解的整合剂-氨基二琥珀酸盐, 100% 无废物释放, 用作助洗剂, 漂白稳定剂, 肥料添加剂等
2002年	Pfizer 公司 开发了合成 Sertraline(重要药物 Zoloft 的有效成分)的新工艺, 将原有的三步变为一步, 大大减少了污染, 提高了工人的安全性

续表 1

改进溶剂和反应条件奖		
1996 年	Dow 化学公司	用 CO ₂ 代替氟氯烃作苯乙烯泡沫塑料发泡剂
1997 年	Imation 公司 (明尼苏达州)	发明光热法曝光胶片, 显影只需加热, 称 Dryview 技术, 不需化学显影, 定影
1998 年	阿员国家实验室	高效高选择性乳酸酯工艺, 可代替各种溶剂用量的 80%, 目前美国此类溶剂用量为 380 万 t
1999 年	Naclo Chem. CO.	开发带电聚丙烯酰胺的水基生产过程, 用于废水处理除去悬浮固体及污染物
2000 年	Bayer Corp. Pittsburgh	开发了二组分水性多羟基化合物涂膜技术
2001 年	NOVOzymes 公司	利用果胶裂解酶进行棉纤维润湿脱脂 Biopreparation 工艺, 纺织厂节水 30%~50%
2002 年	Cargill Dow LLC 公司	开发了一种 Nature Works™PLA (聚乳酸) 的绿色生产工艺, 产率高, 不用有机溶剂。PLA 可降解, 由可再生资源制备, 可替代传统的石化制品。
设计更安全化学品奖		
1996 年	Rohm & Haas 公司	环境友好海洋生物防腐剂, 用于船舶表面防海洋动植物附着, 选出 4, 5 二氯 2-正辛基 4-异噻唑啉-3-酮 (DC01) 代替三丁基氧化锡 (TBTO)
1997 年	Albright & Wilson 公司 (弗吉尼亚州)	开发四羟甲基硫酸磷 (THPS) 杀生物药剂, 它有良性毒理, 选择毒性 (对人毒性小)
1998 年	Rohm 和 Haas 公司	开发二酰基胍杀虫剂 (Confirm), 除毛虫外对所有生物无害
1999 年	Dow Agrosciences LLC (Dow Chem. CO 子公司)	开发 Spinosad 高选择性, 环境友好杀虫剂, 对毛虫, 苍蝇...有害, 而不影响益虫, 环境中不累积, 不挥发
2000 年	Dow Agrosciences	开发 hexaflum 白蚁诱饵, 抑制昆虫角质素合成, 使其在脱皮时死亡, 为低害杀虫剂
2001 年	PPG 工业集团	把阳离子电沉积油漆用于汽车工业, 用钇 (在地壳中比铅丰富) 代替铅, 铬, 镍抗腐蚀性强
2002 年	Chemical Specialties 公司 (CSI)	采用环境友好的碱式四元铜盐 (ACQ) 替代有毒害性的铬砷合剂 (CCA) 作为木材防腐剂
小企业奖		
1996 年	Donlar 公司	开发两种生产热聚天门冬氨酸代替聚丙烯酸, 它可被生物降解
1997 年	Legacy System 公司	开发冷却臭氧过程, 除硅晶片上有机物, 清洁蚀刻电路板, 代替溶剂清洗

续表 1

1998 年	Pyrocool 技术公司	推出 PyrocoolFEF 灭火剂和制冷剂, 环境友好产品
1999 年	Biofine 公司	废纤维素转化成乙酰丙酸新技术, 用于处理造纸废物, 垃圾, 废纸, 废木材, 产率可达 70%~90%, 可代替双酚 A 用于高分子材料 (双酚 A 破坏内分泌系统)
2000 年	Revlon 公司	发明 Enbriogluv 玻璃印花技术, 原料不含重金属, 成分有生物降解性, 美观耐久
2001 年	EDEN 生物子公司	Harpin (无毒性蛋白质) 技术, 用于激发植物自然分泌防御系统, 抗病, 害虫, 已批准使用的 Messenger 产品已由 40 多种农作物证明有效
2002 年	SC Fluids 公司	超临界 CO ₂ 用于半导体工业中光致抗蚀剂的去除技术
学术奖		
1996 年	Texas A & M 大学 M. Holtzapple 教授	把废生物质转化为饲料, 化学品与燃料 (用石灰水或高压低温液氨处理纤维素使膨化, 再酶降解)
1997 年	北卡罗来纳大学 J. M. Desirmone 教授	开发能溶于 CO ₂ 表面活性剂, 用于微电子和光谱清洗
1998 年	斯坦福大学, Barry M. Trost 教授	创立“原子经济”概念
1999 年	Carnegie Mellon 大学 Collins 教授	发展了一系列 Fe(III) 配位化合物 (TAML 活性剂) 增强过氧化氢的氧化能力低温下 (55 °C) 活化 H ₂ O ₂ 漂白木浆
2000 年	Scripps 研究所 Chihuey Wong 教授	开发了不可逆的酶催化的酯转化反应, 用于药品生产
2001 年	Tulane 大学, Chaor Jun Li 教授	发展了“准自然”催化作用, 开发在空气和水中应用的过渡金属催化剂, 用于以水为溶剂的多种合成反应
2002 年	Pittsburgh 大学, Eric J. Beckman 教授	提出一种简单的判断方法, 可以用来筛选能以低压 CO ₂ 做溶剂的有机物质, 从而拓宽 CO ₂ 的应用领域。

应, 而副产品盐酸价值较低。新工艺采用芒硝与氯化钾进行复分解与结晶分离相结合, 可同时得到有用的钾肥 (K₂SO₄) 和食盐, 而且无需耗用硫酸, 该工艺在国内已实现工业化 (参见图 16)。

2) 全生命周期清洁产品原则

生态工业工程要求产品从生产原料、生产过程、使用、再循环利用或废弃、回归自然的整个过程都是清洁的, 能与自然生态相融合, 即产品自其“诞生”至“坟墓”的全生命周期都符合上述要求。其中典型的例子为光降解塑料和生物降解塑料的合成

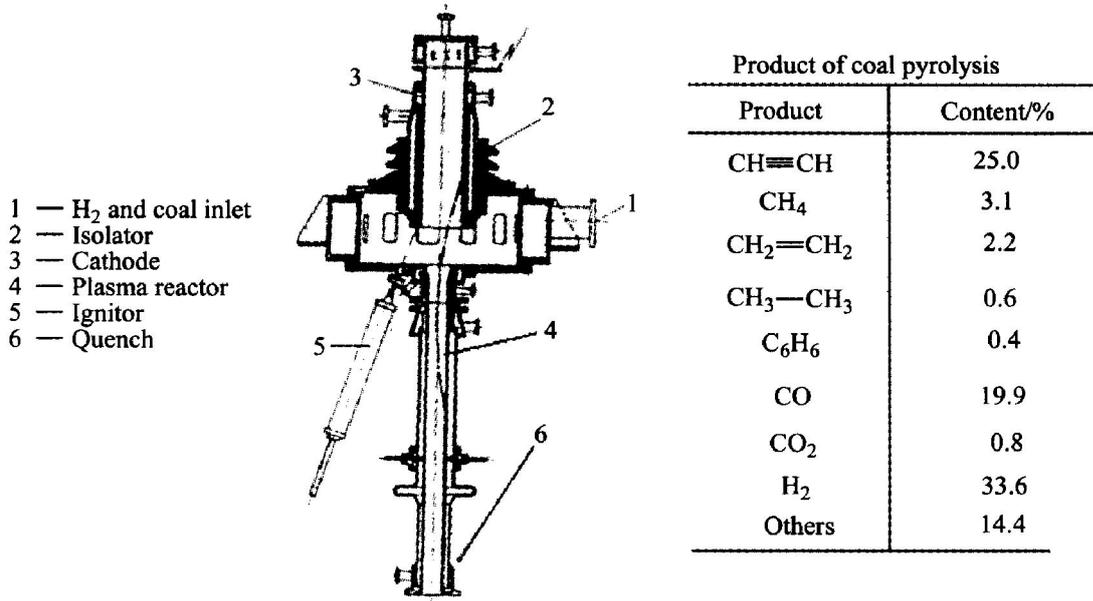


图 15 氢等离子体-煤粉合成乙炔

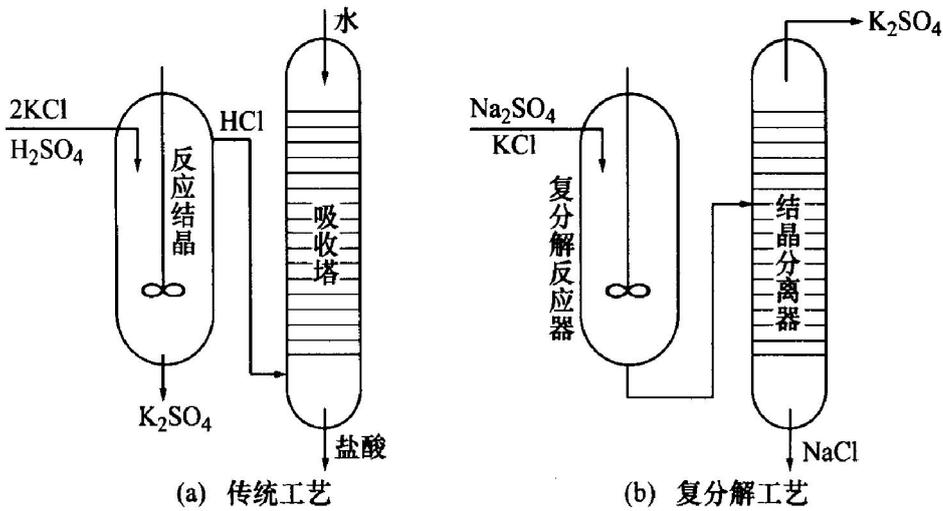


图 16 钾肥生产的不同工艺比较

问题, 近年来获得显著进展。如以玉米为原料特别是以植物秸秆为原料的聚乳酸塑料合成已渐成熟, 2001年美国已投产一套13.6万t/a装置; 由微生物在体内合成的高分子-聚羟基丁酸酯(PHB), 通过高效菌种筛选, 在国内已完成工程研究, 它与人体有很好相容性, 用于人造骨骼、血管、缝线、皮肤效果好。

3) 工业园区集成优化原则

通过多种产业的综合协调发展, 使某一产业的副产物或废料成为另一企业的原料资源加以利用, 由模拟自然生态系统建立生态工业系统, 通过对“生产者-消费者-分解者”的循环“食物链网”的模拟, 形成物流的“生态产业链”或“生态产业网”, 同时能流形成多次梯级利用, 使一定界区内的多行业、多产品得到联合发展。总之工业生态园区建设是建立在物流、能流、信息流区域优化组合基础上

的。最早形成的丹麦 Kalundborg 生态工业园区成为联合国推广的生态产业的典范(参见图 17)。

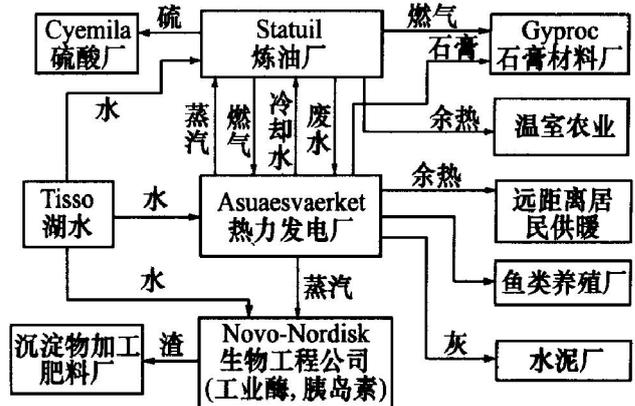


图 17 Kalundborg 生态工业园区

近年国内也已经在许多地方进行了同样的试点, 如贵港、南海等示范工业生态园, 都取得了很

好的经验。

4) 粘合技术开发优先原则

在生态工业园区规划过程中, 会发现许多“网”、“链”的断点, 研究开发新的粘合技术可以提升原有生态园区的水平。我国自行开发成功的数十万吨级磷石膏分解技术, 就可把磷肥厂、水泥厂、高硫煤矿和硫酸厂链接在一起, 形成一个紧密型的“生态群落”(Ecological community), 有效地解决了磷石膏污染问题, 又使资源得到合理利用(参见图 18)。粘合技术既可用于加大多种产业集成的柔性, 又可形成紧密型的生态群落。

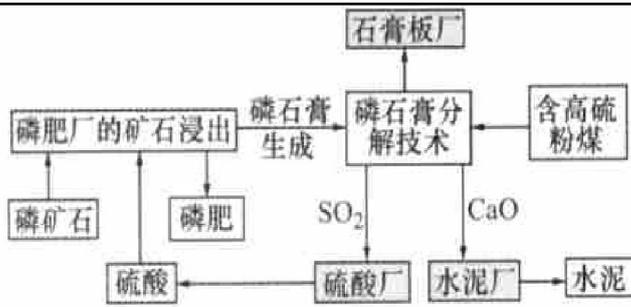


图 18 粘合技术开发优先

5 生态工业系统的分析与集成

通过对生态工业系统进行分析和各单元之间的集成, 采用系统工程的方法, 寻求各个工业系统的总体与自然生态协调。

5.1 工业代谢分析

工业代谢分析方法(Industrial metabolism)是建立生态工业的一种行之有效的分析方法。它是基于模拟生物和自然界新陈代谢功能的一种系统分析方法。工业代谢分析通过分析系统结构、进行功能模拟和输入输出信息流分析来研究生态工业系统的代谢机理。工业代谢方法可以适用于不同层次的分析要求。通过这种分析, 可以为公众或是企业的决策者提供一幅详细的物流图, 并从中可以看出某一地区或企业所具有的可持续发展的潜力。

5.2 投入产出分析

由 Leontief 提出的投入产出分析(Input-output analysis, IOA)方法作为一个成熟的工具, 在经济学领域已得到广泛应用。它通过平衡方程, 借助数学模型分析初始投入、中间投入、总投入, 中间产品、

最终产品、总产出之间的关系, 通常可以用平均路径长度、循环指数等指标和效用分析方法来深入衡量生态系统结构和效率。

5.3 热力学分析

作为自然生态系统定量分析工具, Jorgensen 引入 Solar energy 和 Exergy 等热力学函数, 并定义为直接和间接植入生态系统的太阳能值; 或引申为一个产品、流动体系和贮存体系直接和间接需要的太阳能(H. T Odum), 定义为生态系统的有用能。分析说明自然生态系统进化过程是不断积累的过程, 而且以化石矿物形成沉积。

可以采用类似方法定量分析工业生态系统, 这时定义为表征产品制造和服务过程中直接和间接需要引入的能量, 工业生态系统演化是不断加速增加的过程, 定义为工业系统的有用能, 即该系统与环境达到平衡时可对外作的最大有用功, 它在单一和多重循环中都不断减少。一般结论是资源可以循环利用, 但有用功不断损失。

5.4 生态工业系统的生命周期评价

1990 年环境毒理学与化学学会(SETAC)将生命周期评价(Life cycle assessment)定义为:“生命周期评价是一种评价产品、生产工艺以及活动对环境的压力的客观过程, 它是通过对能量和物质的利用以及由此造成的环境废物排放进行辨识的量化来进行, 其目的在于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以及如何利用这种机会。这种评价贯穿于产品, 工艺和消费活动的整个生命周期, 包括原料提取与加工, 产品制造, 运输以及销售, 产品的使用, 再利用和维护, 以及废物循环和最终废物的处置”。生命周期评价使生态工业工程开发有一个全景视野, 已被广泛接受, 并形成了操作规范和系统软件。

5.5 生态工业系统集成

系统集成是在区域范围内实现生态工业的方法, 它综合考虑区域系统的物质流、能量流和信息流, 通过共享信息和公共基础设施, 考虑区域范围内企业、社区和自然之间的物质交换和能量利用, 建立高效率、低消耗的可持续发展的区域工业生态系统。系统集成包含以下方面的内容: ①物质集成;

②水集成; ③能量集成; ④信息集成。

阔。

6 结束语

1) 坚持社会经济与自然生态和谐发展, 人类文明是一定可以得到持续发展的。

2) 需要以最有效资源、能源利用和保护环境为基础的循环经济理念, 去创建生产和消费新模式。

3) 以“效益”、“资源”和“环境”多重标准, 重新审视已有工业体系, 新工业生产体系的建立有赖于高新科技的注入, 所以生态工业工程发展前景广

参考文献

- [1] 苏伦, 埃尔克曼. 工业生态学[M]. 北京: 经济日报出版社, 1989.
- [2] 解振华. 生态工业理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [3] 邓南圣, 吴峰. 工业生态学[M]. 北京: 化工出版社, 2002.
- [4] 金涌, 李有润, 冯久田. 生态工业: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(编辑 袁赛前)