

# 过程集成研究进展

赵月红, 王韶锋, 温浩, 许志宏

(中国科学院过程工程研究所, 北京 100080)

**摘要:** 作为过程工程研究的热点, 近年来过程集成技术发展很快. 本文从质量交换网络、考虑环境影响的过程集成、多联产系统、工业生态化以及化学供应链集成等方面介绍了过程集成的研究进展, 并指出在我国发展和应用过程集成技术的重要性.

**关键词:** 过程集成; 多联产; 生态工业; 供应链

中图分类号: TQ021.8 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2005)01-0107-06

## 1 前言

20 世纪, 过程工业在全世界取得了巨大的进步和发展, 单元技术已经达到很高的水平, 生产规模和效率不断提高. 但发展与污染的矛盾、可持续发展仍是尚待解决的问题. 过程集成作为过程工程研究的一个新领域, 从更为广泛的角度, 将一些新技术、新流程集成在一起, 有可能从源头上解决过程工业的优质、节能、环保及可持续发展等问题, 是目前过程工程研究的热点. 世界上许多机构进行了这方面的研究<sup>[1-3]</sup>. 其中, 国际能源组织(IEA)成立的过程集成委员会和英国 UMIST 成立的由 16 家跨国公司参与的过程集成研究协会, 是目前世界主要的过程集成研究中心.

过程集成的研究始于 20 世纪 70 年代末, 最初主要用于系统节能, 并发展了用于换热网络分析和设计的系统方法—夹点技术<sup>[4,5]</sup>, 在过程工业领域得到广泛应用. 大量的工业实践表明夹点技术对提高系统能量利用率、降低投资和操作成本等具有重要的作用<sup>[6-8]</sup>. 在换热网络的集成思想和夹点技术的基础上, 其应用领域逐步扩展到提高原料利用率、降低污染物排放和过程操作等方面<sup>[9-12]</sup>. 目前过程集成的尺度主要在宏观范围内<sup>[10]</sup>, 如图 1 所示. 其最简化的层次是单一生产过程内的集成; 其次, 是把不同工艺过程之间的能量及物质集成统一起来考虑, 构成企业级的过程集成; 最高层次是要考虑过程工业与社会、环境的协调发展, 形成生态工业. 其中, 过程和企业水平上的集成较为成熟. 相比之下, 工业生态化的过程集成研究则处于起步阶段. 随着过程集成技术的发展, 其应用尺度不断向更小的分子和更大规模的化学供应链扩展. 过程集成的方法也不仅限于夹点分析, 数学规划、人工智能技术以及这两种方法与热力学方法的交叉和结合也被引入过程集成<sup>[12]</sup>.

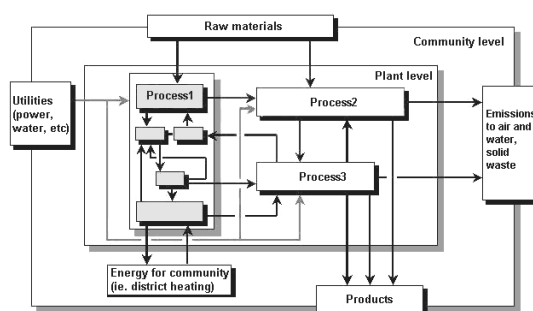


图 1 不同层次的过程集成<sup>[10]</sup>

Fig.1 Process integration at different levels

目前过程集成泛指从系统的角度进行设计优化, 将化工系统中的物质流、能量流和信息流加以综合集成, 为过程的开发提供直接的方法和工具支持<sup>[1,13-15]</sup>. 在这种情况下, 一些新的过程集成的概念和技术被提出, 如质量交换网络、考虑环境影响的过程集成、多联产系统、工业生态化以及化学供应链集成等. 下面将对这几个方面进行深入的阐述.

## 2 质量交换网络

在过去的 10 多年里, 过程集成技术逐步扩展到化工过程质量交换网络中, 形成了用于防止污染、资源回收和废物削减等方面的质量交换网络集成方法<sup>[16-18]</sup>, 提出了在生产过程中从物质流出发, 确定整个生产过程的性能目标, 优化生产以及产品路线的过程集成方法. 由于其涉及传质问题, 与换热网络相比, 质量交换网络仍受制于一些实际问题的困扰, 如传质设备、分离剂的选择等<sup>[19]</sup>. 其中用水操作由于不涉及阻碍质量交换网络实施的一些实际问题, 应用较为成功. 另外, 石化企业用氢的集成也日益受到重视<sup>[12]</sup>.

### 2.1 节水减排的用水系统集成

用水系统的集成,就是把企业的整个用水系统作为一个有机的整体来对待,考虑如何分配各用水单元的水量和水质,以使系统水的重复利用率达到最大,同时污水的排放量最小.从20世纪80年代开始,水的优化分配问题就已被提出,当时主要是用数学规划法加超结构法,且针对简单的单组分污染物.20世纪80年代末,EI-Halwagi等<sup>[20]</sup>将用于换热网络分析的夹点技术移植到质量交换网络中,发展了进行节水减排的水夹点技术,并在实际的生产应用中取得了显著的效果.Linnhoff March公司的大量工程实践表明,应用水夹点技术可实现20%~50%的节水效果<sup>[21]</sup>.与国外的普遍应用相比,水夹点技术的研究和应用在我国刚刚起步.

水夹点技术<sup>[22,23]</sup>将用水操作简化为一个从富含杂质的过程流股到水流股之间的质量传递.这里杂质包括悬浮的固体颗粒、化学需氧量以及其它约束水回用的水质因子.如同换热网络设计一样,水回用的过程集成需通过构建复合浓度-负荷曲线以确定一个夹点,称之为水夹点,如图2所示.所不同的是水夹点是基于某关键杂质的浓度,而不是温度;所含杂质水平在夹点浓度之上的流股不需要新鲜水,而是利用过程中其他现有水流.基于这一原则,系统设计者和改造者可以实现工业水回用最大、废水产生量最小.

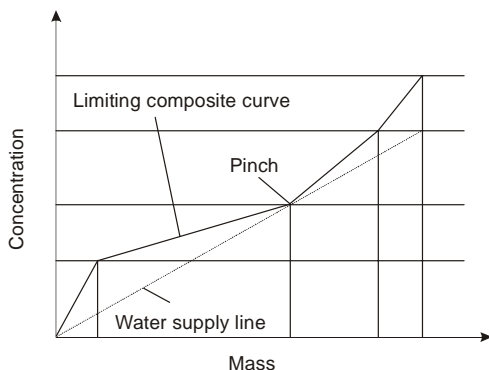


图2 水夹点示意图  
Fig.2 Water pinch diagram

实际上,企业的水供应及废水排放管网要复杂得多,且生产过程中一般为多杂质的情况,较为复杂.需要专门的水系统集成建模与集成工具软件来完成这项工作,如美国Aspen Tech开发的Aspen Water<sup>[24]</sup>和Linnhoff March公司开发的WaterTarget<sup>[25]</sup>就是这样的工具软件.

### 2.2 炼油厂中的用氢集成

长期以来,对于大多数炼油厂来说,氢气的供应并不是什么问题.实际上,许多企业还出现氢气过剩、不得不烧掉的情形,因而用氢的集成并没有受到重视.但

到20世纪末,由于以下几个原因导致炼油厂对氢气的需求量急剧增加<sup>[26]</sup>:(1)对燃料中硫含量的要求日益严格,油品加氢处理用氢增加.另外,由于对汽油中芳烃含量的规定,限制了重整操作,减少了一部分氢气的供应;(2)原料的重质化和重质油品市场的萎缩,迫使炼油厂更多地采用加氢裂化来提高油品的品质;(3)炼油厂产能的增加也导致用氢增加.随着炼油厂内用氢的增加,氢气生产能力已成为炼油厂扩产改造的瓶颈问题.在这种情况下,出现了评估氢气资源利用情况的“氢夹点技术”<sup>[9-12]</sup>.

与夹点技术用于节水减排一样,“氢夹点技术”是夹点技术在质量交换网络中的一个应用.它通过构建氢组合曲线来反映生产过程中氢气的供应和需求情况.通过氢夹点的计算以得到过程最大氢气回收目标值,从而确定氢气生产能力和需要外购氢气的数量.另外,该方法还可指导氢气纯化单元的有效利用及其设置.

## 3 考虑环境因素的过程集成

过去化工过程在治理环境污染方面多采用末端治理的方法.近年来,随着人们对环境保护的日益重视,环境因素已被纳入化工过程集成的目标中,将环境目标置于与经济目标同等重要的位置,形成了考虑环境因素的过程集成方法<sup>[27]</sup>.由于环境因素的引入,此时的过程集成成为一个多目标优化的问题<sup>[28]</sup>.由于化工过程的一些参数,如原料供应、产品市场需求等受到市场、法规等不可预见因素的影响,特别是环境目标的引入使过程集成的不确定性愈加突出,必须考虑这些不确定因素的影响.考虑不确定性的多目标优化问题,将不确定性参数作为单独一类变量引入目标函数,可以表达为如下的形式:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } z_1=f_1(x,y,k), z_2=f_2(x,y,k), \dots, z_n=f_n(x,y,k), \\ & \text{Subject to } g(x,y,k)=0, h(x,y,k) \leq 0, \end{aligned}$$

式中: $z_i$ 为目标方程, $g(x,y,k)=0$ 及 $h(x,y,k) \leq 0$ 为约束条件, $x$ 为连续变量, $y$ 为离散变量, $k$ 为不确定变量.

对于化工过程环境因素的处理,目前已有多种方法应用于化工过程环境影响的分析,如夹点技术、质量交换网络以及各种废物处理技术.这些方法着重于过程本身的废物排放最小,而未考虑过程生命周期的其他方面,如原料的获取、产品的使用和回收等环节对环境的影响.针对这种情况,近年来,生命周期分析作为过程环境影响的分析方法被用于考虑环境因素的过程集成和优化<sup>[27-31]</sup>.

由于多目标优化需要同时优化多个可能冲突的目标函数,工业界大量工程实践形成的方法虽可为实现考

虑环境影响的多目标优化问题提供一定的参考,但难以提供更高层次的技术支持.而过程集成的方法则从过程系统工程的角度把环境因素纳入过程的改造与开发,为过程工业的清洁生产提供了直接的方法和工具支持.目前,在实施清洁生产的过程中,已形成几个用于辅助在化工过程开发中实现清洁生产的工具<sup>[15]</sup>,如层次设计法、人工智能法、夹点技术和数学规划法、模拟分析法和复合式方法等.其中,数学规划法是实现经济和环境同步设计的主要工具,对于定义良好的超结构求解和优化非常有效,成为过程集成研究的热点<sup>[14-16]</sup>.它的基本思想是先把多目标优化问题转化为单一目标的优化问题,然后应用各种线性或非线性优化方法(如目标规划法、进化算法等)求出非劣解集(Pareto set),最后用决策分析法(如灵敏度分析或参数优化)获得非劣解<sup>[2]</sup>.由于常规的优化方法不能处理带有随机性和不确定性的问题,对于考虑不确定性的多目标优化问题,主要采用随机规划法和参数规划法,但由于其计算耗时巨大,目前只能处理目标较少的问题<sup>[32]</sup>.利用数学规划来选择优化的过程集成方案时,通常要和流程模拟模型联合使用,如图 3 所示.

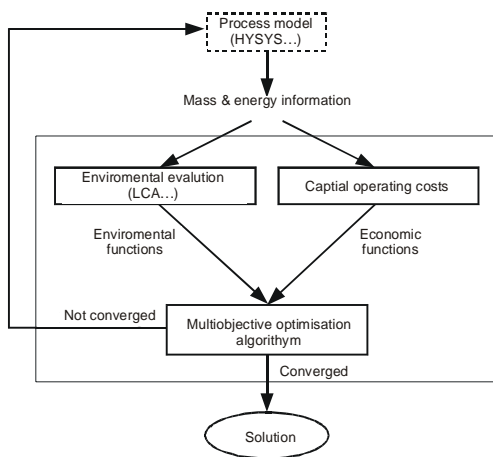


图 3 考虑环境因素的过程集成方案的计算结构<sup>[28-33]</sup>  
Fig.3 General methodology for waste minimization

### 4 多联产系统的发展

鉴于单一生产系统内的集成受到很多限制,如物料、能量品质方面的要求.这在很大程度上制约了能源利用率的进一步提高和环保性能的改善.近年来,跨行业的多联产系统的研究日益受到重视<sup>[34,35]</sup>.其基本出发点就是从系统的角度出发,把发电、供热、冶金、化工等多种生产过程集成在一起,以实现物料、能量的梯级利用,并同时获得多种高附加值的化工产品和多种洁净的二次能源.与单一生产过程相比,多联产系统有利于

实现能源、原料的高效利用和清洁生产,并降低投资<sup>[36]</sup>.

目前,多联产系统的研究尚处于起步阶段.其中,以气化工工艺为源头的多联产系统的研究最具代表性.由于其良好的发展前景,受到各国的重视,制定了相应的发展规划.如美国的 Vision 21 能源系统<sup>[37-39]</sup>、欧洲 Shell 公司提出的 Syngas Park 多联产系统的研究计划<sup>[40]</sup>.我国也非常重视这方面的研究,在 973, 863 项目中均立项予以支持.

以气化工工艺为源头的多联产系统是一个复杂的体系,多是跨行业、跨部门、超越现有技术的过程集成.其实质是通过以气化技术为“龙头”的多种煤炭转化技术的优化集成,以实现煤炭资源的梯级利用,并且达到煤炭资源的价值提升、利用效率和经济效益的最大化,同时做到煤炭利用过程对环境友好<sup>[41,42]</sup>.与一般化工生产过程中未反应气体多次重复循环利用以提高利用率不同的是,多联产系统的转化反应更注重未反应气用于动力或其他系统,因而投资少、能耗低.如大型的 IGCC 热、电、甲醇、合成气四联产系统与单独生产甲醇、合成气或进行 IGCC 发电、供热的分产系统相比,投资有可能下降约 30%,煤耗量下降 20% 以上<sup>[43]</sup>.

以气化工工艺为源头的多联产系统的终端产品主要包括煤气、热、冷、电、液体燃料、合成氨及碳一(C1)合成产品(如甲醇、二甲醚、烃类及其衍生物).围绕上述产品,多联产系统的技术思路一般以大型高效发电或大型化工合成为核心展开<sup>[44,45]</sup>,图 4 为多联产系统的概念示意图.与常规的以煤气化为源头的简单生产系统相比,多联产系统涉及更多的科技问题,不仅涉及新技术、新工艺的开发,以及对能量转换利用机理的探索,而且涉及到各过程单元的优化集成.其中过程集成是研究以气化为源头的多联产系统的关键问题,需要发展新的针对以气化工工艺为中心的集成、优化和控制策略以及相应的软件、硬件的支持<sup>[37,38]</sup>.

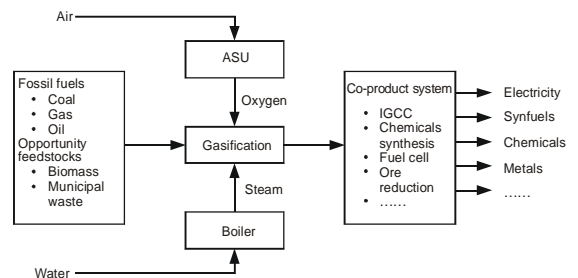


图 4 多联产系统概念示意图<sup>[46]</sup>  
Fig.4 Schematic diagram of cogeneration system

以气化工工艺为源头的多联产系统将现有的合成气

利用技术、开发的新型关键和支撑技术以不同的方式集成起来,构成了适合不同资源、技术和市场条件的生产系统,是经济、高效、清洁利用化石能源的理想方式.对于以煤为主要能源的我国来说,发展以气化工艺为源头的多联产系统是煤炭利用的理想方案.

## 5 工业生态化的过程集成

清洁生产通过对生产过程和产品运用整体预防的方法以降低对环境的影响,但其仅关注单一生产过程.多联产系统的应用也仅是若干生产过程的简单集成.这两种集成方法只能在一定程度上减少过程工业的废物排放,无法实现真正意义上的废物零排放.在反思这一现象时,人们注意到自然界资源和物种的协调发展依赖于各生物种群间废物的循环和利用.于是人们意识到,按自然界的生态模式来规划工业生产模式,才有可能从根本上解决资源、能源和环境的可持续发展,从而提出了生态工业的概念.

生态工业是指仿照自然界生态物质循环的方式来规划工业生产系统的一种工业模式<sup>[47]</sup>.在生态工业系统中,各个生产过程不是孤立的,而是通过物质流、能量流和信息流互相关联的,一个过程的“废物”可以作为另一个过程的原料而加以利用<sup>[48,49]</sup>,从而达到资源、能源、投资的最优利用,以及对环境最友好.它将过程集成技术提高到一个更高的层次,能从根本上解决资源-环境-经济的可持续发展,从而实现人类生产活动与自然协调发展<sup>[49,50]</sup>.由于其良好的前景,生态工业的研究受到广泛的重视.发达国家纷纷出资进行生态工业的理论研究和实践,如美国、荷兰、西班牙等国均在大力发展生态工业.在已建成的生态工业园区中丹麦建立的Kalundborg工业园最具代表性<sup>[51-53]</sup>.我国也在积极规划和建设生态工业园,在“十五”规划中,生态工业园区的建设是过程工业的重要发展方向.

工业生态化的过程集成关键在于实现生态工业系统内各个过程间的物质集成和能量集成<sup>[54]</sup>.其中,生态工业的物质集成包括反应过程的物质转化集成及净化分离过程的物质交换集成.而生态工业的能量集成则不仅包括每个生产过程内的能量集成,而且还包括各过程之间的能量交换,以降低能耗,同时减少环境污染.对于能量集成,现在已经有较为成熟的理论基础和实践经验<sup>[55]</sup>,如过程的能级分析、焓分析、夹点分析和数学规划等.

目前国内外在生态工业方面的研究主要集中在以下几个方面<sup>[54,56]</sup>:(1)可减轻工业对环境影响的具体技术措施;(2)对整个工业生态过程进行分析、监测和评

价的方法;(3)可促进生态工业实现的制度上的措施,以使生态工业的理念贯穿整个生产和生活过程.

## 6 化学供应链集成

传统的过程系统工程关注于化工过程的设计、控制和操作,过程单元及其集成方法是研究的重点.Grossman等<sup>[57]</sup>进一步拓展了过程系统工程所涵盖的范围,提出了化学供应链的概念,如图5所示.它将过程系统工程所涵盖的范围向微观和宏观两个方向进行了扩展.一方面向以产品设计为代表的分子和纳米尺度的微观世界延伸,一方面向以供应链管理为代表的超大规模系统延伸,使产品设计、生产、销售和服务等环节联系起来,构成一个完整的商业系统.从空间尺度看,化学供应链大体可划分为分子水平、过程单元及工厂水平、企业和企业系统水平3个层次.过程集成在这3个层次的研究均有较大的进展,其中过程和企业水平上的集成较为成熟,以上各部分对过程集成方面的综述集中在这些方面,而化学供应链集成的研究则刚刚起步.信息技术特别是Internet的快速发展、客户需求的变化、日趋激烈的国际竞争以及企业急需开发新产品的压力是推进供应链集成研究和应用的主要原因<sup>[58]</sup>.目前,化学供应链集成主要应用于日用化学品生产领域中过程单元、工厂、企业等供应链中大、中尺度的部分.其在精细化学品生产领域的应用则处于起步阶段,主要用于产品的分子设计、生产和销售计划等供应链的两端.

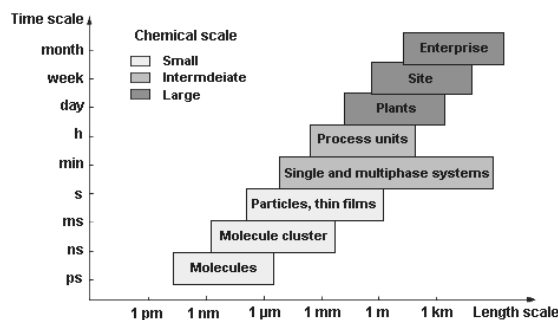


图5 化学供应链<sup>[58]</sup>

Fig.5 The “chemical supply” chain

化学供应链集成涉及到产品的发现、设计、制造、配送、销售、使用直至废弃等整个生命周期的各个环节,是一个多时间跨度、多空间尺度的过程,它的实现需要在化学供应链各个层次均有所突破<sup>[57-59]</sup>.如分子水平的新产品设计、传统日用化工领域的过程强化、过程控制和环境友好过程的开发、从产品的分子动力学到企业的计划/调度集成的多尺度建模问题、供应链各环节测量、控制和信息系统的集成问题以及相关支撑方法和工

具的研究。

## 7 总结与展望

经过 20 多年的发展,过程集成早已超出夹点技术和热交换网络的范畴。目前,其应用范围涉及到过程工业的各个方面,如节能、环保、经济以及过程操作等。针对这些应用,产生了一些新的过程集成的概念和方法,为过程集成提供了直接的技术和工具支持,对于过程工业的可持续发展具有重要的推动作用。

进入 21 世纪的时代命题是世界市场竞争和资源、能源和环境的可持续发展。对于我国过程工业的发展来说,突破一些传统的地域、行业、知识等方面的束缚,通过过程集成,从整体上解决过程工业优质、节能、环保等方面的问题是必须的。

### 参考文献:

- [1] Gundersen T. A Worldwide Catalogue on Process Integration [EB/OL]. <http://www.tev.ntnu.no/iea/pi/Catalogue.pdf>, 2003-10-24.
- [2] 杨友麒,成思危. 现代过程系统工程 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003. 140.
- [3] Ebrahim M, Al-Kawari. Pinch Technology: An Efficient Tool for Chemical-plant Energy and Capital-cost Saving [J]. Appl. Energy, 2000, 65: 45-49.
- [4] Linnhoff B, Townsend D W, Boland B, et al. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy [M]. Rugby: The Institution of Chemical Engineers, 1982. 1.
- [5] Linnhoff March Corp. Introduction to Pinch by Linnhoff March [EB/OL]. <http://www.Linnhoffmarch.com/pdfs/pinchintro.pdf>, 2003-10-24.
- [6] Matijasevia L, Otmacia H. Energy Recovery by Pinch Technology [J]. Appl. Therm. Eng., 2002, 22: 477-484.
- [7] Linnhoff March Corp. The Methodology and Benefits of Total Site Pinch Analysis [EB/OL]. <http://www.linnhoffmarch.com/pdfs/Total-SiteMethodology.pdf>, 2003-10-24.
- [8] 冯霄. 过程系统节能夹点技术介绍 [J]. 油田节能, 2000, (3): 1-6.
- [9] Hallale N. Burning Bright Trends in Process Integration [J]. Chem. Eng. Progr., 2001, (7): 30-41.
- [10] Tekes. Competitiveness with New Planning and Optimisation Methods [EB/OL]. <http://akseli.tekes.fi/Resource.Phx/bike/pi/en/publications.htx.Doc.doc.0.ppt>, 2003-10-24.
- [11] Fraga E, Perries T. Whole Process Synthesis and Integration: Scope & Vision [EB/OL]. [http://cape-alliance.ucl.org.uk/CAPE\\_Applications\\_etc/Initiatives\\_and\\_Networks/About\\_CAPENET/Key\\_Research\\_Areas/WPSI\\_Main\\_Directory/WPSI\\_Scope\\_and\\_Vision.pdf](http://cape-alliance.ucl.org.uk/CAPE_Applications_etc/Initiatives_and_Networks/About_CAPENET/Key_Research_Areas/WPSI_Main_Directory/WPSI_Scope_and_Vision.pdf), 2003-10-24.
- [12] Smith R. State of the Art in Process Integration [J]. Appl. Therm. Eng., 2000, 20: 1337-1345.
- [13] Zhu X X, Vaildeewaran L. Recent Research Development of Process Integration in Analysis and Optimisation of Energy Systems [J]. Appl. Therm. Eng., 2000, 20: 1381-1392.
- [14] 杨友麒. 可持续发展时代的过程系统集成 [J]. 化工进展, 1999, (3): 15-19, 30.
- [15] 杨友麒, 石磊. 环境影响最小的化工过程综合 [J]. 化工学报, 2001, 52(2): 95-102.
- [16] Dunn R F, Bush G E. Using Process Integration Technology for Cleaner Production [J]. J. Clean. Prod., 2001, 9: 1-23.
- [17] Noureldin M B, El-Halwagi M M. Interval-based Targeting for Pollution Prevention via Mass Integration [J]. Comput. & Chem. Eng., 1999, 23: 1527-1543.
- [18] Castro P, Matos H, Fernandes M C, et al. Improvements for Mass-exchange Networks Design [J]. Chem. Eng. Sci., 1999, 54: 1649-1665.
- [19] Sikdar A K, Hilaly A. Process Simulation Tools for Pollution Prevention [J]. Chem. Eng., 1996, 103(2): 98.
- [20] El-Halwagi M M, Manousiouthakis V. Synthesis of Mass-exchange Networks [J]. AIChE J., 1989, 35(8): 1233-1244.
- [21] Linnhoff March Corp. Linnhoff March Corp [EB/OL]. <http://www.linnhoffmarch.com/>, 2003-10-24.
- [22] Mann J G, Liu Y A. 工业用水节约与废水减量 [M]. 姚平经, 华贵, 项曙光, 等译. 北京:中国石化出版社, 2001. 8.
- [23] Wang Y P, Smith R. Waste Water Minimization [J]. Chem. Eng. Sci., 1994, 49(7): 981-1006.
- [24] Aspen Technology Inc. Aspen Water [EB/OL]. <http://www.aspentech.com/>, 2003-10-24.
- [25] Linnhoff March Corp. Water Target [EB/OL]. <http://www.Linnhoffmarch.com/>, 2003-10-24.
- [26] Hallale N, Liu F. Refinery Hydrogen Management for Clean Fuels Production [J]. Adv. Environ. Res., 2001, 6: 81-98.
- [27] Azapagic A. Life Cycle Assessment and Its Application to Process Selection, Design and Optimization [J]. Chem. Eng. J., 1999, (73): 1-21.
- [28] Alexander B, Barton G, Petrie J, et al. Process Synthesis and Optimization Tools for Environmental Design: Methodology and Structure [J]. Comput. & Chem. Eng., 2000, 24: 1195-1200.
- [29] Azapagic A, Clift R. Life Cycle Assessment and Multiobjective Optimization [J]. J. Clean. Prod., 1999, 7: 135-143.
- [30] Nielsen P H, Wenzel H. Integration of Environmental Aspects in Product Development: A Stepwise Procedure Based on Quantitative Life Cycle Assessment [J]. J. Clean. Prod., 2002, 10: 247-257.
- [31] Burgess A A, Brennan D J. Application of Life Cycle Assessment to Chemical Process [J]. Chem. Eng. Sci., 2001, 56: 2589-2604.
- [32] Banerjee I, Ierapetriton M G. Parametric Process Synthesis for General Nonlinear Models [J]. Comput. & Chem. Eng., 2003, 27: 1499-1512.
- [33] Gao Y, Shi L, Yao P J. Waste Minimization through Process Integration and Multi-objective Optimization [J]. Chin. J. Chem. Eng., 2001, 9(3): 267-272.
- [34] 邓世敏, 林汝谋, 金红光, 等. IGCC 多联产总能系统 [J]. 燃气轮机技术, 2002, 15(3): 10-16.
- [35] Gorsek A, Glavic P. Process Integration of a Steam Turbine [J]. Appl. Therm. Eng., 2003, 23: 1227-1234.
- [36] Chambers A K, Potter I. Options for Co-generation [EB/OL]. <http://www.aidis.org.br/>, 2003-10-25.
- [37] NETL. Vision 21 Technology Roadmap [EB/OL]. [http://www.netl.doe.gov/coal\\_power/vision21/](http://www.netl.doe.gov/coal_power/vision21/), 2003-10-25.
- [38] Victor K D. Vision 21-A Program for Clean Energy in the New Millennium (Thirteenth U.S.-Korean Joint Workshop on Energy and Environment, Reno, Nevada, 1999) [EB/OL]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/99/99korea/der.pdf>, 2003-10-25.
- [39] NETL. Vision Program Workshop [EB/OL]. <http://www.netl.gov/publications/others/vision21/v21.pdf>, 2003-10-25.
- [40] Williams R H. Toward Zero Emission from Coal in China [J]. Energy

- Sustain. Dev., 2001, 4(4): 37–65.
- [41] 许振刚. 多联产是煤化工的发展方向 [J]. 洁净煤技术, 2002, 8(2): 5–7.
- [42] Fang M X, Luo Z Y, Li X T, et al. A Multi-product Cogeneration System Using Combined Coal Gasification and Combustion [J]. Energy, 1999, 23 (3): 203–212.
- [43] 倪维斗, 李政, 薛元. 以煤气化为核心的多联产能源系统—资源/能源/环境整体优化与可持续发展 [J]. 中国工程科学, 2000, 2(8): 59–68.
- [44] Korhonen J. Co-production of Heat and Power: An Anchor Tenant of a Regional Industrial Ecosystem [J]. J. Clean. Prod., 2001, 9: 509–517.
- [45] 王乃计. 大型气化联产热、冷、电、燃料及化工产品 [J]. 工厂动力, 2002, (1): 36–39.
- [46] Barara N M. Vision 21 and the Clean Coal Power Initiative in America [EB/OL]. <http://www.iea.org/impagr/zets/oslo/v21.pdf>, 2003–10–25.
- [47] Korhonen J. Four Ecosystem Principles for an Industrial Ecosystem [J]. J. Clean. Prod., 2001, 9: 253–259.
- [48] Seager T P, Theis T L. A Uniform Definition and Quantitative Basis for Industrial Ecology [J]. J. Clean. Prod., 2002, (10): 225–235.
- [49] 胡山鹰, 李有润, 沈静珠. 生态工业系统集成方法及应用 [J]. 环境保护, 2003, (1): 6–9.
- [50] Lambert A J D, Boons F A. Eco-industrial Parks: Stimulating Sustainable Development in Mixed Industrial Parks [J]. Technovation, 2002, 22: 471–484.
- [51] Lowe E. Eco-industrial Parks: A Foundation for Sustainable Communities [EB/OL]. [http://www.globallearningnj.org/global\\_ata/Eco\\_Industrial\\_Parks.htm](http://www.globallearningnj.org/global_ata/Eco_Industrial_Parks.htm), 2003–10–28.
- [52] UNEP. The Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark [EB/OL]. <http://www.uneptie.org/pc/ind-estates/casestudies/kalundborg.htm>, 2003–10–28.
- [53] Cote R P. Designing Eco-industrial Parks: A Synthesis of Some Experiences [J]. J. Clean. Prod., 1998, 6: 181–188.
- [54] 李有润, 沈静珠, 胡山鹰, 等. 生态工业及生态工业园区的研究与进展 [J]. 化工学报, 2001, 52(3): 189–192.
- [55] 李有润. 过程系统节能技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1994. 1.
- [56] Wernick I K, Ausubel J H. Industrial Ecology: Some Directions for Research [EB/OL]. [http://phe.rockefeller.edu/ie\\_agenda/](http://phe.rockefeller.edu/ie_agenda/), 2003–11–01.
- [57] Grossman I E, Westerberg A T. Research Challenges in Process Systems Engineering [J]. AIChE J., 2000, 46: 1700–1703.
- [58] Yusuf Y Y, Gunasekaran A, Adeleye E O, et al. Agile Supply Chain Capabilities of Competitive Objectives [EB/OL]. <http://www.sciencedirect.com>, 2003–11–01.
- [59] Grossman I E. Challenge in the New Millennium: Product Discovery and Design, Enterprise and Supply Chain Optimization, Global Life Cycle Assessment [A]. Chen B G, Westerberg A W. Process Systems Engineering 2003 [C]. Netherlands: Elsevier Science B V, 2003. 28–47.

## Research Advances in Process Integration

ZHAO Yue-hong, WANG Shao-feng, WEN Hao, XU Zhi-hong

(Institute of Process Engineering, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Process integration, as a promising research field of process engineering, has been extensively studied in recent years. The latest academic progress in process integration is reviewed in this paper. Some new concepts and technologies of process integration, such as mass exchange network, waste minimization, cogeneration, industrial ecology and supply chain integration are described in detail, meanwhile the importance of developing and applying this technology in China is stressed.

**Key words:** process integration; cogeneration; industrial ecology; supply chain