

# 过程工业的绿色化与信息化

肖 焯<sup>1</sup> 张锁江<sup>1</sup> 史 丹<sup>2</sup> 李静海<sup>\*1</sup>

(1 中国科学院过程工程研究所,北京 100080; 2 中国社会科学院工业经济研究所,北京 100836)

**[摘要]** 从工业中抽提具有共性、带动性和全局性的重大关键科技问题予以突破,是实现国家发展目标的基础和前提。针对我国现行工业体系按“生产对象与产品”划分,不利于抽提共性科技需求的问题,本文提出了既可反映学科交叉和领域融合的科技发展趋势,又有利于发现、归纳重大关键科技问题的以“技术特征”为依据进行划分的新思路。据此,本文选择制造业,将其分为过程工业和装备工业后,深入分析了过程工业的发展现状和共性科技需求,针对过程工业现存的能耗高、资源浪费、污染重、产品质量差,产业化困难、大型装备和主要技术依赖引进等问题,提出了“过程工业的绿色化和信息化”的发展目标,探讨了相应的战略思路和优先发展的研究方向。

**[关键词]** 过程工业,过程工程,绿色化,信息化,科技问题

## 1 基于“技术特征”的工业分类

我国现行的工业行业主要是按生产对象与产品进行划分,不利于显示各个工业行业的一些具有共性、带动性和全局性的跨行业的重大关键科技问题。如果从“技术特征”来考虑和分类,既有利于发现、归纳和突破具有共性、带动性和全局性的重大关键科技问题,带动行业发展,又可以反映学科交叉与融合的科技发展趋势以及这一趋势对工业发展的影响及作用。

根据这一思路,本文按“技术特征”将制造业分为两类:一类是以物质转化过程为核心的产业,这类产业从事物质的化学、物理和生物转化,生成新的物质产品或转化物质的结构型态,产品计量不计件,连续操作,生产环节具有一定的不可分性,可统称为过程工业,如涉及化石资源和矿产资源利用的产业(石油化工、冶金等)等;另一类是以物件的加工和组装为核心的产业,根据机械电子原理加工零件并装配成产品,但不改变物质的内在结构,仅改变大小和形状,产品计件不计量,多为非连续操作,这类工业可统称为装备工业。

过程工业是制造业的重要组成部分,了解其对GDP的贡献和发展现状意义重大。目前,我国工业部门共分为37个大的工业行业,每个大行业下又细分为若干小行业。为获得相应数据,本文做如下规定,按照技术特征对我国现有全部工业行业进行了重新划分。

第一,可以直接判定是过程工业的工业行业,对该行业不再进行细分,直接采用大行业的数据;这类行业属于典型的过程工业或者称为第一类过程工业,如石化工业、冶金工业、医药工业等。

第二,不能直接判定是过程工业的,则对该行业进行细分,从细分行业中选出属于过程工业的行业。例如,棉织业中的印染业、烟草工业中的烟叶复烤业等,这类行业称为第二类过程工业。第二类过程工业采用细分行业的数据。

第三,行业细分后,仍不能直接确定的,采用生产环节判断法,如果细分行业的某一生产环节依靠连续操作实现物质转化式的生产,那么该行业是过程工业;这类行业称为第三类过程工业。从理论上讲,第三类过程工业的数据应该只采用与该环节相关的数据,但实际做起来有困难,所以仍采用细分行

\* 中国科学院院士。

本文于2004年8月30日收到。

业的数据。与第一、第二类数据相比,第三类过程工业的数据的准确性较差,但却反映了现代科学和工业部门的融合性与交叉性。

根据上述规定,我国 37 个大工业行业中,可直接确定为第一类过程工业的共 13 个,属于第二类和第三类的过程工业共 14 个(见表 1)。

表 1 我国过程工业所包括的范围

过程工业(按大行业分)	包含在其他大行业中的过程工业
石油加工及炼焦业	金属表面处理及热处理业
化学原料及化学制品业	铸件制造业
有色金属冶炼	粉末冶金制品业
黑色金属冶炼(钢铁冶金)	绝缘制品业
医药制造业	集成电路制造业(部分生产环节)
化学纤维制造业	电子元件制造业(部分生产环节)
橡胶	烟叶复烤业
塑料	纤维原料初步加工业
非金属矿物制造业	棉纺印染业
食品加工业	毛染整业
食品制造业	丝印染业
造纸及纸制品业	火力发电业
印刷业	煤气生产业
	自来水生产业

## 2 过程工业地位和现状

### 2.1 过程工业的地位

过程工业的产值占全部制造业产值的 46.9%, 占我国 GDP 的 16.6%。过程工业为装备工业提供原材料,在我国国民经济中有着举足轻重的地位,也是高新技术产业发展不可或缺的基础。

(i) 过程工业是我国工业的重要组成部分,国家财税收入的主要来源。按表 1 过程工业大行业和小行业加总统计,过程工业的产值占制造业总产值的 46.9%。2001 年,过程工业创造的工业产值 37 211.67 亿元,工业增加值 12 027.77 亿元,产品销售收入 41 998.45 亿元,分别占制造业的 42.9%、42.5% 和 44.8%。与 1999 年相比,过程工业的工业总产值和工业增加值分别增长了 24% 和 17%,产品销售收入和利润总额分别增长了 26% 和 68%。就利税贡献来看,过程工业是国家财税收入的重要来源,制造业中近 52% 的增值税来自过程工业。

(ii) 过程工业的发展对解决我国供给短缺,加快工业化进程发挥了不可替代的作用。过程工业的产品主要是工农业生产所需的原材料及人民生活的必需品。过程工业的发展不仅极大地丰富了我国商品供应,而且使我国一些重要工业产品的产量跃居世界前列。没有过程工业的快速发展,我国不可能

在较短的时间内由一个农业国变为世界制造业大国。

(iii) 我国过程工业尚有较大的发展空间,未来将继续保持较高的增长速度。我国过程工业虽然已有较大的发展,但目前还不能完全满足市场需要,一些产品需要从国外进口,而且进口数量不断增长。过程工业产品进口额在全部进口额中已近 50%,而出口额只有 31%。

(iv) 过程工业是资金密集型工业,发展速度与资金投入关系密切。与装备工业相比,过程工业占有较多的工业固定资产,属于高度资金密集型的行业。2001 年过程工业固定资产原值在全部工业和制造业中分别占 50.6% 和 60.8%。过程工业的万元增加值需要 3.24 万元的固定资产,比装备工业高出 1.39 万元;人均固定资产原值比装备工业高出 14.89 万元,这表明发展过程工业需要较多的资金投入。

(v) 过程工业具有较高的劳动生产率,但经济效益却较低。与装备工业相比,过程工业的全员劳动生产率处于领先水平,但过程工业的经济效益却低于装备工业。1999 年过程工业的全员劳动生产率为 5.23 万元/人年,2001 年提高到 7.68 万元/人年,比装备工业高出 2300 元/人年。过程工业的全员劳动生产率较高与生产的自动化程度较高、生产连续性较强有一定的关系,但过程工业劳动生产率的提高并没有带动经济效益的改进。

过程工业总体经济效益低与过程工业占用资金多、能源消费高有一定的关系。我国万元增加值能源消费在 5 万吨标准煤以上的工业行业绝大多数属于过程工业。近年来,过程工业中的一些行业能源消耗还呈上升趋势。过程工业能源消耗较高,除了受过程工业生产特点的影响外,生产设备陈旧、生产路线和工艺落后也是重要原因。

(vi) 过程工业的科技投入以技术改造为主,技术创新水平低于装备工业。2001 年,过程工业用于技术改造、技术引进、消化吸收以及购买国外技术的费用分别占制造业的 66.7%、38.3%、28.8% 和 41.2%。其中,过程工业技术改造费用在制造业中所占的比重高达 2/3。就上述 4 项费用支出比例来看,过程工业技术活动经费中用于技术改造的费用也高于制造业的平均水平。如以消费吸收的经费为 1,过程工业用于技术改造的费用为 134,而装备制造业用于技术改造的费用为 58,前者为后者的 2.3 倍。

近年来,过程工业的技术进步与技术创新步伐有所加快。2001年新产品产值率由1997年的5.7%提高到8.6%,新产品产值在全部工业新产品产值中的比重由21.8%提高到22.2%。但与装备工业相比,过程工业的技术创新水平较低,过程工业的新产品产值率不到制造业平均水平的1/2,过程工业新产品产值仅占制造业新产品产值的22.3%。

## 2.2 过程工业现存的主要问题和制约因素

### (1) 主要问题

改革开放以来,我国过程工业虽然取得较大成就,为经济发展做出较大的贡献,但是,与国内其他工业和国外同类行业相比,过程工业的发展速度较慢,发展水平较低。对我国一些典型的过程工业的分析表明,普遍存在以下问题。这些问题不解决就无法实现小康社会和制造业强国的目标。

(i) 资源能源浪费,环境污染严重。由于技术和装备落后,自动控制水平低下,过程工业普遍存在能耗高、资源浪费、环境污染严重等问题。

(ii) 自主研发能力很弱,过程放大和量化设计水平低。在我国,过程工业的规模化主要依靠经验逐级放大、缺乏量化设计手段和相应的技术支撑,周期长、费用高、成功率低。过程工业的主要技术都依靠引进,自主研发一直在走“研究-开发-引进”的死循环,既耗费大量外汇又无自主知识产权,还限制了后续技术的创新,其根本原因是自主开发能力差。

(iii) 产量和质量都不能满足需求。2000年我国乙烯消费量约1108万吨/年,但生产能力只有470万吨/年;钢铁产量已达世界第一,但优质钢材主要靠引进,使钢铁工业的利润率连年下降;制药工业发展迅速,但产品和技术主要靠仿制。

(iv) 无法满足高新技术发展的需求,已严重影响到一些高技术的发展。很多高新技术,如生物技术、纳米技术和先进材料制造都必须以过程工业为基础,这些领域的发展也为过程工业提供了发展的空间。然而,我国过程工业的现状已严重影响到这些高技术的发展,一些新工艺和技术无法及时实现产业化,或产品性能无法满足要求。

### (2) 制约因素

(i) 过程工业的研发投入不足,导致过程工业技术进步缓慢。我国科研机构的投入主要来源于政府、企业,其中政府拨款是主要来源。与全部工业相比,过程工业的政府拨款比例较高,2001年为44.5%,比全部工业的平均水平高出近9个百分点,从这一点看,政府对过程工业的技术投入还是比较

重视的。过程工业技术投入不足主要是企业资金。企业技术投入不足,直接影响到科研成果的产业化,导致科研成果难以转化为推动过程工业的技术进步的动力。

(ii) 区域和部门壁垒影响过程工业的资源优化配置和产业结构调整。区域和部门壁垒是造成我国过程工业规模小,生产集中度低、重复建设的根本原因。受利益驱使和计划经济的惯性思维影响,我国一些地区片面地追求建立完整的工业体系,从而造成我国小钢铁、小石化、小药厂、小纸厂等遍地开花,屡禁不止。众多小厂为了生存下去,往往寻求本地政府的保护,设置区域市场壁垒。同时,也采取一些不正当的手段与大厂争资源、争市场,扰乱市场秩序,影响我国资源的优化配置和整个行业的国际竞争能力,同时还造成严重浪费和污染。此外,企业不是依靠核心技术扩展产品范围,而是靠资金引进新产品,也往往导致失败和低水平重复,无法形成长期的技术优势。

(iii) 科研、设计、生产严重隔离,无法发挥集成优势,技术转移困难。我国过程工业相关的科研、设计和生产体系是在原有计划经济的基础上形成的。科研部门具有核心技术开发能力却无设计能力,设计部门具有设计能力却无核心技术开发能力,企业的研发能力又很弱。科研分散、行业隔离,使技术由科研到产业化的过渡十分艰难,成为阻碍过程工业发展的又一个瓶颈。

(iv) 企业管理粗放,经济增长质量不高。过程工业企业管理粗放,经济增长质量不高,在过程工业经济效益低、资源消耗大、产品质量差、大型装备和主要技术依赖引进等方面得到充分的体现。除某些行业外,过程工业管理基础薄弱,缺乏现代管理方法和手段等问题比较突出。从总体上看,过程工业的发展模式以数量扩张为主,结构调整滞后于市场需求的变化。在我国由短缺经济转向过剩经济后,这种低水平数量扩张型的发展模式必然受到市场的制约。

## 3 过程工业的发展目标和实现途径

要从根本上解决这些问题,实现社会、经济和环境协调发展,除有目标、有系统的突破前述的制约因素外,更为关键和迫切的是,从科技角度找到并突破一些具有共性、带动性和全局性的重大关键科技问题,发展和建立可实现清洁、高效、低耗的物质转化过程的带动性技术平台,实现过程工业的绿色化和

信息化。

绿色化具体包括三方面的内容:一是指在工艺上要实现物质转化过程的高转化率、高选择性和高能源利用率;二是指在原料、过程和产品上要实现低毒介质(溶剂)、低毒原材料、低毒或无毒产品;三是指在系统上实现废弃物排放量最少、副产品最少,目标是实现循环经济。信息化包涵的内容除计算机辅助设计、过程优化和自动控制以外,更为重要的是要虚拟仿真实现工艺到产业化以及系统集成全部细节,实现量化设计、直接放大取代依靠经验逐级放大的目标。

过程工业都涉及三个环节:一是物质的转化工艺,二是实现工艺的过程设备优化和工程放大,三是为实现清洁、高效和低耗转化而进行的多个工艺的系统集成。这三方面存在的问题就是发展过程工业的共性问题之所在。从反应介质、条件或通过分子设计创建绿色、清洁物质转化工艺,通过计算仿真实现实验室工艺的工程放大,以上一产业的废弃物是下一产业原料为特征的产业系统集成,是在这三方面必须要突破的关键问题,也是过程工业的绿色化与信息化的主要内容。显然,过程工业的绿色化与信息化贯穿了物质转化的全过程,其所蕴涵的科技问题就是过程工业的共性关键问题,是重大科技需求,它们的解决对整个过程工业是重大推动,是改变现状实现发展的目标、策略和途径。

#### 4 过程工业发展中的共性关键科学问题

过程工业的学科基础是过程工程,它是研究物质在化学、物理和生物转化过程中的运动、传递和反应及其相互关系的学科,正在进一步向生物、信息、环境、材料、纳米等领域扩展。目前的发展趋势体现在两个方面:一是研究尺度范围不断拓宽,向下到微纳尺度、向上到生态等系统尺度;二是研究方法由以实验为主,通过归纳、总结、经计算获得理论的方法,发展到以计算为主,从理论直接到实验预测的方法。相应地,过程工程涵盖了从分子、微纳、颗粒、聚团、单元、工厂、直至生态园区等的不同层次上的研究对象,呈现着多尺度特性。这些变化对过程工程提出了新的挑战,研究的焦点逐步转向物质转化过程中的时空多尺度结构<sup>[1-5]</sup>。

物质转化过程中的时空多尺度结构在过程工业上表现为,物质转化过程在不同的尺度上的问题不同。在微纳米和分子聚集体以及更小的尺度上,涉及的是以工艺开发为目标的化学物理和产品工程的

问题,在毫米到米的尺度量级上,主要涉及的设备及放大等过程工程问题,在此尺度以上则主要与过程系统工程和生态系统相关的绿色集成问题。

物质转化过程中的时空多尺度结构还具有前沿问题共同具有的特征:(1)由多元素和子系统构成,其本身又可以是更大系统的子系统;(2)是开放系统,是具有自适应特征,与外界有着显著的能量、物质和信息的交换耗散结构;(3)其形成和演化是受多因素控制,由非线性和非平衡过程决定。物质转化过程中所涌现的现象可以分为平衡和非平衡现象,而非平衡现象中又分为线性非平衡和非线性非平衡现象。其中,平衡和线性非平衡分别满足熵最大和熵产率最小,有现成的理论可以解释;而非线性非平衡系统则无统一的理论可以解释和描述,是当前最为活跃的研究领域和科学前沿——复杂性科学的研究内容和研究焦点。

显然,物质转化过程中的时空多尺度结构体现了科学的发展前沿,是隐藏在构成过程工业的三个环节“工艺、过程设备和放大以及系统集成”中,制约现有技术、新工艺难以产业化的科学难题。是推动和实现过程工业绿色化与信息化的基础和具有共性、带动性和全局性的重大关键科技问题。认识并掌握物质转化过程中的时空多尺度结构和它对运动、传递和反应及其相互关系的影响规律,将生态系统与化学物理过程进行跨尺度关联,对物质转化,就可以设计并开发清洁的转化工艺、实现从微观到宏观的量化放大和从宏观到微观的定向调控,在各个尺度上保证物质转化过程所需的最佳工业条件,这将是推动和建立过程工业的绿色化与信息化的关键和不可或缺的基础。可以预测,在这一科学问题上的进展,必将产生过程工业的革命性变化。

#### 5 实现绿色化与信息化的发展战略

##### 5.1 战略思路和方向

以扭转过程工业现状,实现制造业强国这一国家战略需求为牵引,以突破具有共性、带动性和全局性的重大关键科技问题——物质转化过程中的时空多尺度结构,形成一系列原创核心技术为基础,推动过程工业的绿色化与信息化的发展,通过在重大行业领域建立使资源流、能源流和信息流的相互协同且可保证环境安全的示范产业,实现经济、环境和社会协调发展的目标是总的战略思路,如图1所示。

战略方向是:在对国民经济有重大影响的领域(如能源、资源环境、材料、生物技术等),选择重要产

业(如:化石资源、矿物资源、可再生资源和原材料产业)为切入点,在工艺创新-过程放大-系统集成-模拟/仿真的层次上,以造就具备可进行产品和工艺的量化设计、能够将工艺直接产业化、可实现虚拟制造和形成循环经济的国家能力为目标,捕捉战略重

点,培育重大项目,突破共性关键科技问题,取得若干带动全局的重大科技成果,建立示范工程和产业化工程,创建过程工业绿色化和信息化的通用共性技术平台,发展过程工程。为过程工业的跨越式发展提供强有力的支撑。

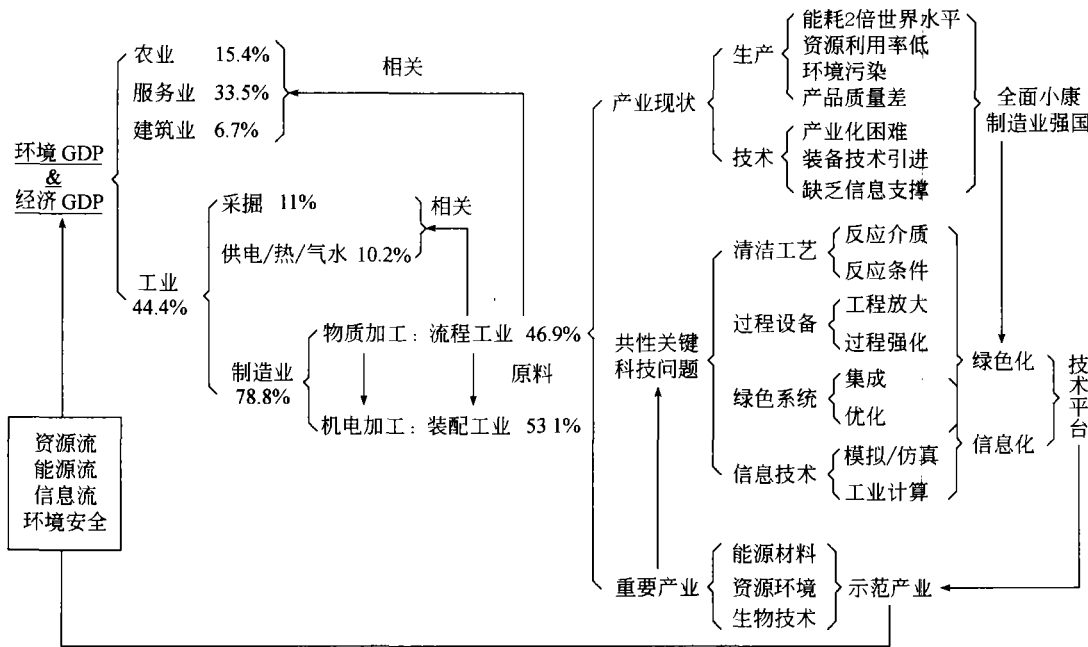


图1 过程工业绿色化和信息化的战略思路

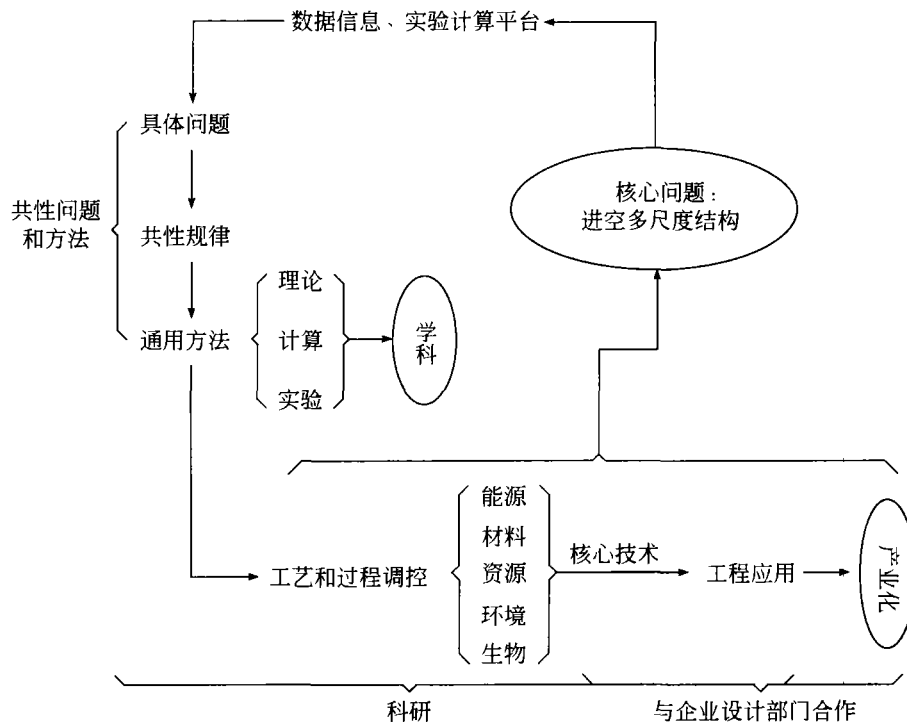


图2 发展过程工业的战略布局

## 5.2 战略布局

根据总体思路和目标,需要建立“一个核心、四个层次”的科研布局(如图2)。“一个核心”指以时空多尺度结构为核心,突破关键共性科学问题。“四个层次”分别为共性问题和方法学层次,工艺过程调控层次,工程应用层次和数据信息、实验计算平台层次。以过程工业中的具体问题为依托,建立数据信息、实验和计算平台,是过程工程研究创新的基础。归纳共性规律,促进学科发展是共性问题和方法学层次的主要内容。在工艺创新、过程调控、放大等方面形成核心技术,是工艺和过程调控层次的主要内容。针对对国民经济有重大影响的重要产业,实现核心技术的产业化是工程应用层次的主要目标。

## 5.3 战略目标

我国过程工业与发达国家现有水平存在较大差距。劳动生产率仅相当于发达国家的20%—30%。发达国家60%的石化企业应用了先进控制技术,而我国不到20%。通过在线优化增加收益一般可达3%—5%,而我国不到1%。我国10种常用有色金属年产量为650多万吨,居世界第2位,但我国有色金属行业的平均资源利用率仅为35%,发达国家可达60%以上。含有有害金属的矿渣还造成严重的环境污染。煤炭燃烧、冶金和石化工业排放的SO<sub>2</sub>和粉尘造成大面积酸雨和空气污染。另外,随着经济迅速发展,我国在CO<sub>2</sub>排放量上正面临着越来越大的国际压力。为扭转我国过程工业长期落后的局面,根据前述总的战略目标,我们应该在如下方面取得重要进展。

(1)过程工程学科是发展过程工业的基础。在该学科前沿领域和重大科学问题上取得突破,形成一批由我国科学家提出的,在国际上占有一席之地的学术理论和方法,使我国过程工程的研究水平全面跨入世界先进行列,在若干领域取得国际领先优势,提升我国过程工业的核心竞争力。

(2)通过解决具有共性、带动性和全局性的重大关键科技问题,形成若干共性科学技术平台和科学理论,如:强大的可模拟和虚拟实现物质转化全过程的信息化平台、非常规介质和极端条件下的物质清洁转化平台、复杂系统时空多尺度结构的理论及方法、以产品为导向的结构-性能-制备关系及过程强化技术、过程的绿色系统集成、针对我国资源特色的绿色工艺等。

(3)结合经济和高新技术发展需求,针对过程工业的具体行业,取得一批原创性的科技成果,并形成

具有市场竞争力的产品和行业主导技术。

(4)建立若干符合学科发展趋势和产业结构调整需求的世界一流水平的过程工程研究基地,培养一批具有国际影响的学术带头人和创新团队,为解决全局性和带动性的共性科学技术问题提供基本保障。

## 6 优先发展的研究方向

由于“物质转化过程中的时空多尺度结构”是制约过程工业发展的具有共性、带动性和全局性的重大关键科技问题,这一问题的突破需要与具体的研究方向相结合。过程工业所从事的物质转化过程是人类生存与发展的基础。可持续发展是当今人类的发展主题,也是过程工业的发展目标和趋势所在。发展可实现物质清洁、高效、低耗转化的过程工业,也是当今世界各国实现可持续发展的追求目标。根据我国过程工业的发展实情并考虑国际发展趋势<sup>[6-8]</sup>,建议优先开展如下研究方向。

### 6.1 针对我国特色资源的绿色工艺

加强绿色过程工程的理论和方法的创新。应用绿色化学的原理和过程工程的新方法,从原料绿色化、过程绿色化和产品绿色化的全新角度,发展、培育可改变我国目前存在的资源利用率低、环境污染严重这一现状的通用科技平台。面向循环经济建设,针对资源(如矿石、煤、低碳烃、秸秆等)利用,产生若干实用绿色工艺和生物技术,实现产业化。

### 6.2 非传统介质和极端条件下的物质转化新过程

常规条件下的物质转化由于受到热力学平衡和其他条件的限制,难以实现绿色化的要求,而在非常规条件(如亚熔盐、离子液体、超临界或亚临界、生物催化、外场强化等)下,有可能获得新的物质转化工艺,从而建立新的绿色过程,是突破常规工艺的技术关键之所在,受到广泛关注。研究这些体系中分子间相互作用和转化过程的共性基本规律,既能够拓展人们对物质转化过程的认识,产生深远的科学意义;还能够为突破传统工艺提供新的途径,形成原创性的可产业化系列成果,这是这一方向的实施重点。

### 6.3 以产品为导向的先进工艺及过程

要针对市场需求来设计产品功能,从保证产品功能的角度来设计工艺过程,建立以产品为导向的新工艺和新过程。要从不同层次研究结构-性能-制备之间的定量关系和调控机制;研究新的合成技术,如:纳米催化材料、生物催化、分子组装、功能材料制备等;研究与高新技术产品生产相适应的新工

艺技术,如:微反应、过程强化等。建立可根据功能设计产品,根据产品设计过程的通用科技平台。

#### 6.4 工程复杂系统及多尺度理论

物质转化各种层次(从分子到生态环境)上共性的科学问题是认识复杂系统及其结构。这是未来过程工程的核心问题,也是21世纪科学的前沿。传统的平均方法和还原论方法已很难取得进展,而多尺度方法是研究复杂系统的有效途径。这方面的任何进展都会有效推动过程工程的发展,这是一个需要多学科交叉,联合攻关的问题,已经受到学术界和工程界的关注。以具体的工程复杂系统为切入点,研究多种控制机制协调下形成多尺度结构的机制,解决跨尺度关联、时空耦合与界面的形成机理与作用等关键问题,建立分析工程复杂系统的普适性多尺度方法,为实现量化设计和突破技术产业化瓶颈做出贡献。

#### 6.5 大规模计算和虚拟过程

工艺过程的放大是困扰了过程工业一个世纪的难题。最近几年,随着计算机技术的发展和人们对复杂过程机理认识水平的提高,看到了解决这一问题的曙光。在未来的20年,一方面要重视应用多尺度和离散化等方法对复杂过程建模的工作,另一方面要重视针对模型特点的专用并行计算机及其计算机软件的开发。联合过程、计算、物理等方面的力量,针对共性的需求建立通用的过程模拟平台,并与动态无损测量技术相配合,建立大规模的虚拟过程。这样就能从根本上解决物质转化工艺和过程的量化、设计、放大和调控的瓶颈问题,并为其他领域提供有效的计算手段。这方面的进展将有效推动相关过程工业的跨越式发展。

#### 6.6 基于生态工业概念的系统集成

在实际生产中,单一过程和单一产业实现“零排

放”通常是不可能或不经济的。只有通过不同产业的集成,才能实现零或近零排放。为此,要重视不同工艺过程之间的匹配和过程合成,使过程系统工程逐步涵盖化学供应链(从分子到生态大系统)的全过程,并与绿色化学原理相结合形成新的理论体系,实现物质、能量的多级循环利用。为此,要建立绿色度理论及方法,并将其应用到工艺层次、过程层次、生态层次、以及产品或元素循环层次,逐步形成绿色系统集成理论及方法,为绿色产业集成提供科学支撑。

#### 参 考 文 献

- [1] Li J H. Complex systems and multi-scale methodology - Preface. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(8-9): 1611-1612.
- [2] Li J H, Kwauk M. Exploring complex systems in chemical engineering—the multi-scale methodology. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(3-6): 521-535.
- [3] Kwauk M, Li J H. Scale and structure in chemical engineering. *Chemical Engineering Research & Design*, 2002, 80(A7): 699-700.
- [4] 孙宏伟. 化学工程的发展趋势——认识时空多尺度结构及其效应化工进展. 2003, 3: 224-227.
- [5] Charpentier J C, McKenna T F. Managing complex systems: Some trends for the future of chemical and process engineering. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(8-9): 1617-1640.
- [6] Committee on challenges for the chemical sciences in the 21st century (Co-chairs: Ronald Breslow and Matthew V. Tirrell), *Beyond the molecular frontier—Challenges for chemistry and chemical engineering*. The National Academies Press, Washington, D. C. 2003.
- [7] Charpentier J C. The triplet molecular processes-product-process engineering: The future of chemical engineering?. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(22-23): 4667-4690.
- [8] Harold M P, Ogunnaik B A. Process engineering in the evolving chemical industry. *Aiche Journal*, 2000, 46(11): 2123-2127.

### UPGRADING AND GREENING OF PROCESS INDUSTRIES

Xiao Xin<sup>1</sup> Zhang Suojia<sup>1</sup> Shi Dan<sup>2</sup> Li Jinghai<sup>1</sup>

(1 Institute of Process Engineering, CAS, Beijing 100080;

2 Institute of Industrial Economics of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100836)

**Abstract** According to technologies characteristics, the whole spectrum of manufacturing industries could be grouped into two categories: process industries and product and equipment industries. The paper is devoted to analyzing the status of the process industries, focusing on the identification the common challenging problems. The strategy and the research priority for upgrading and greening process industries are discussed.

**Key words** process industries, process engineering, greening, upgrading