

•特约评述•

过程工程

郭慕孙

(中国科学院化工冶金研究所, 北京 100080)

摘要: 化学工程经过归纳、综合和与其它知识的交叉, 形成了以传递和反应为主且还在不断发展的三传一反+X 的学识基础. 这一学识基础的应用对象已远远超出了化工起家时的化学产品, 覆盖了所有物质的物理和化学加工的工艺, 将化学工程提升至过程工程. 过程工程的学识基础将如何扩展成长, 面对 21 世纪, 在我们国家又该如何建立过程工程的前沿将成为今后的热点.

关键词: 化学工程; 过程工程; 三传一反; 前沿

中图分类号: TB1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2001)01-0002-06

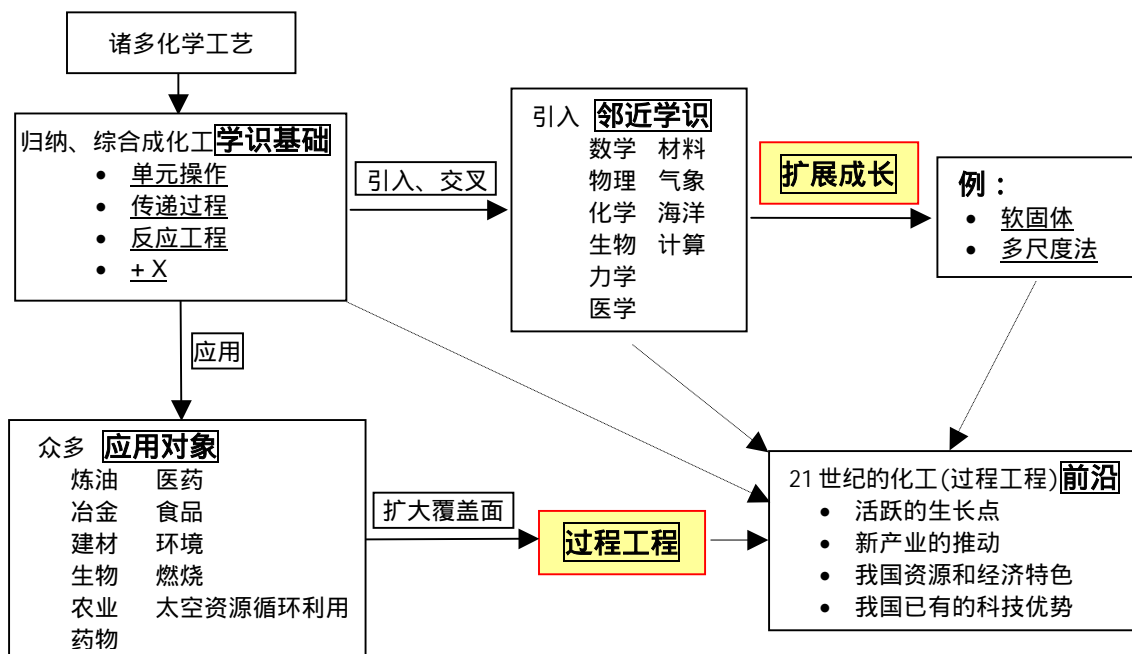
化学工程 目前覆盖了所有物质的物理和化学加工工艺, 可称为过程工程. 不象其它工程, 从开始至今, 化学工程没有固定的对象, 但过去一个世纪中发展了一套普适性的学识基础. 我准备阐述四个问题(见图):

第一是 化学工程的学识基础. 它是怎样形成的, 包含什么内容;

第二是 这一学识基础有哪些应用对象, 为什么将化学工程改称过程工程;

第三是 这一学识基础将如何扩展成长;

第四是 面对 21 世纪, 在我们国家该如何建立化工(过程工程)的前沿.



收稿日期: 2000-09-08, 修回日期: 2000-10-25

作者简介: 郭慕孙 (1920-), 男, 广东省潮州市人, 硕士, 中国科学院院士, 化工冶金研究所名誉所长, 化学工程专业.
注: 此文为作者于 2000-05-15 在河北邢台市“21 世纪科技发展与进步”报告上的发言稿.

1 化工的学识基础

化工起源于将众多化学工艺中的共性操作进行归类和归纳，各个分别进行研究。例如，从发酵液中分离出酒精采用精馏，同样，浓缩醋酸也采用精馏；从甘蔗液制糖和从海水中制盐同样属结晶过程。归纳众多工艺操作的学识基础成为单元操作。美国人将麻省理工学院三位教授将多年积累的单元操作教材编撰成教科书的 1923 年看为单元操作的正式起点。但英国人认为，他们的戴维斯于 1901 年撰写的化工手册早已采用了单元操作的概念。

从事有机合成的化工专家也根据归类和归纳的思路，将有机合成工艺按其化学反应组合成单元过程，例如磺化、硝化、酯化等。首发的教科书于 1935 年出版。随即，单元过程被延伸到所有具有化学反应的工艺，1950 年出版了教科书。但是，所述单元过程的内涵大都限于化学，缺乏新的科技见解。

此时，出现了单元操作的进一步的归纳，将其有关的物理过程归纳为三种传递过程：

- 动量的传递是所有流动过程的物理基础，包括管道中流体的运输、精馏塔板上液体和蒸汽的两相流动等；
- 质量的传递是所有传质分离过程的物理基础，例如精馏、吸收、萃取等；
- 能量的传递是所有传热、换热过程的物理基础，包括加热、冷却、热交换等。

对操作过程的两级归纳中引进了许多物理和数学的内涵和方法，使量化分析成为可能，大大促进了化工的设计、预测和控制。

传递过程的方法很快被化工界接受，并逐步与具有化学反应的工艺结合，在此交叉领域中再经归类和归纳，形成一门新的分支化工学科：化学反应工程。大约自 60 年代初开始，这方面出现了不少专著和教科书。

由此可见，化学工程通过两级归纳和一次综合，形成了当前以传递过程和反应工程为主的学识基础。这一学识基础可简称为三传一反+X。X 包括那些不一定如三传一反那样重要和预计将来会出现的内涵。

2 学识基础的应用对象

三传一反+X 学识基础的应用对象极其广泛，包括国民经济、生命健康，并正在延伸到高技术领域。

- 量大面广的化学产品是化学工程的渊藪，如酸、碱、无机盐、合成氨和其它化肥，无不需三传一反+X 的学识基础。
- 炼油 炼油的第一步是对原油进行拔头(拔顶)精馏，回收气体和低挥发的轻质烃类，然后继以裂化，使重组份分解成更有用的轻组份。当前炼油工艺采用催化裂化，即应用催化剂来控制裂化过程，在尽量低的温度下反应，并促使有用的产品的生成。石油在裂化过程中同时生成以碳为主的重产物，沉积于催化剂上，需要周期性的燃烧将之脱除。将石油喷入催化裂化反应器，要求有一定性能的喷嘴。炼油设备的设计、炼油工艺的操作和控制都离不开三传一反+X 的学识基础。
- 冶金 许多年来，从矿石中提取金属沿着经验的道路发展，缺乏学识基础的指导。几乎同时，在 50 年代中期，美国麻省理工学院的舒曼教授和化工冶金研究所的创始人叶渚沛教授提出，用化工原理来指导金属的提取冶金。早在 50 年代，化冶所提出炼

铁高炉的“三高理论”，主张采用高温、高压炉顶、高湿度，来强化高炉的产出和对特殊矿物的适应性；首先在国内进行转炉炼钢的试验，进而系统地研究了氧气喷嘴与钢水的作用，提出了缩短炼钢时间的喷嘴设计方案；进行了用氨水浸取难选铜矿提铜的方法，再从铜氨溶液中用高压氢气还原铜铵离子获取金属铜粉；用流态化焙烧，还原贫铁矿所含的三价铁至具有磁性的四氧化三铁，经磁选可得富铁精矿。进行上述研究都依靠三传一反+X的学识基础。

- 建材 传统烧水泥的回转窑中热的炉气与水泥生料的热交换效率很差，作为改进方案，目前普遍采用旋风预热和悬浮预分解，其关键问题都可通过三传一反+X的学识基础来处理。砂状石灰石可采用化学工程师所惯用的多层流态化床来进行低温煅烧，获取活性石灰。
- 生物 生物过程(例如发酵)的初级产物的浓度一般都很低，其提取和提纯都要采用生物学家所不太习惯的“下游”化工技术。就是“上游”的生物技术的设备放大至生产尺寸、其操作运转和工艺控制，也都有赖于化学工程师的参与。特别是近年来发展的大规模培养动物和植物细胞的工艺，具有许多特殊问题，例如其搅拌必须足够以保证氧气的输入，但不能达到破坏细胞的程度。三传一反+X的学识基础有助于解决这些问题。海洋资源的利用包括许多生物、化学、化工以及三者交叉的问题。
- 农业 许多化学肥料要求在长时间内在土壤中缓慢、持久见效。缓释化肥一般采用包覆外层。包覆层的厚薄和渗透特征，化肥颗粒本身的大小、形状和结构，以及包覆技术都属三传一反+X的对象。目前许多农产品采用无土培制，有关的溶液配方、净化、循环等技术也包含三传一反+X的课题。
- 药物 许多药物还不能通过化学合成获得，而要动从动植物中提取。一个正在发展的提取方法是超临界二氧化碳萃取。许多物质在超临界二氧化碳中的溶解度很高，且一旦溶解，溶质可通过降低二氧化碳的压力而析出。超临界萃取属三传一反+X的对象。目前超临界萃取都采用间歇操作，连续化要求发明一种能将物料从常压加入每平方公分 80 公斤压力萃取器的进料和排料设备。虽然药物的化学合成属化学领域，但药物的制备，例如片、丸、膏、剂，也包含三传一反+X的内容。
- 医药 医药中的三传一反+X问题，如：药物在人体脏器间和脏器内的流动、扩散、停留、吸收；需要缓慢减压释气的潜水症；超细颗粒(如碳酸钙)通过血管壁的渗透。
- 食品 食品的加工、保鲜、速冻、储存、包装都包含不少具有三传一反+X内涵的问题。啤酒的连续生产、软饮料的加二氧化碳的碳化工工艺也都含有三传一反+X问题。
- 环境 污染物在大气中的扩散及其物理和化学变化可看作一个大规模的化学反应器内的行为。模拟其流动可采用定点释放小量示踪剂，例如六氟化硫，然后在十多公里半径范围内定点用电子俘获检测器测定，可测定的浓度低达兆分之一，并将数据按时间绘制等浓度曲线，进行分析。污染物在河流中的扩散及其物理和化学变化也可同样按一个二维空间问题，写出数学模型，进行量化分析。海上泄油的处理可将油消失的各种途径看作并行的时态过程，写出并列公式，采用实验室测定的时间常数，进行预测和分析。这些过程中的关键问题都属三传一反+X的范畴。
- 燃烧 燃烧是复杂过程。燃料在燃烧热量反馈的作用下蒸发或挥发，气态可燃物与助燃剂氧反应形成稳定的反应前沿。这一复杂过程包含了许多三传一反+X的问题。

特别是粉煤在燃烧室或流态化床中的燃烧涉及颗粒流体的多相流问题，以及为了在燃烧同时脱硫而加入的氧化钙、碳酸钙或其它脱硫剂与燃烧气体的反应问题。

- 太空资源的循环利用 进入 20 世纪后人类不断为进入太空、移民星际而操心，特别是近几十年来许多过去的幻想已成事实。太空不具备地球上能维持生命的物质资源，所以，一旦进入太空，必须保持太空仓内的有用分子和原子，并通过化学处理循环使用。需要处理的一类原子和分子与维持生命有关，特别是氧气和水。另一类原子和分子可供与星际可能获得的其它原子和分子合成燃料，供返回地球用。这些都是包含三传一反+X 内涵的、具有挑战性的 21 世纪或更后的问题。

以上罗列了许多包含可以应用三传一反+X 学识基础的领域。这些领域的共同特征是物质的物理和化学加工工艺。因此，将当前显得狭义的化学工程更名为覆盖面更宽阔的过程工程似更为确切合理。对于这些领域，三传一反+X 的学识基础具有知一通百的无穷前途。

3 学识基础的扩展成长

化工学识基础的形成包括对有关工艺的不断归纳以及从其它科技领域的不断引进。三传来自诸多工艺操作的两级归纳，同时，从物理和数学等知识领域引进概念和方法。反应工程来自三传和反应的综合，也可看为三传引进了反应或反应引进了三传。显然反应工程的特征并非三传和反应的简单加和，而两者的综合带来了增效作用。综合带来增效正是所谓的复杂系统的特征。化工的学识基础还将按这一模式发展，不断引进其它领域的学识：数、理、化、生、力、医、材料、气象、海洋等。因此，化工与其它众多学识领域的结合被称为无缝的交接过程。这样的发展将带来新的子领域的出现，当然，这种子领域不一定具有象传递现象那样概括、普适的重要意义，但也属化工学识基础发展的必不可少的一部分。对业已初露头角的发展可举两例：

- 软固体 或称软物质，也有人称为有结构的物质，大都属产量并不太大但经济价值较高的产品，例如冰淇淋、牙膏、灰浆、软硬膏剂、乳液、胶乳、糊剂、凝胶、悬浮体、泥状沉淀物、泡沫等。这些大都属复合物质，其成份、结构、多相组份之间的表面特征、制备方法等与其宏观性能的关系都不是传统化工常遇的问题。因此有关的研究和开发形成了一个特殊的子领域，包含了许多不拘于某特殊工艺而具有一定普适意义的问题。
- 多尺度方法 化工工艺中许多现象以不同层次出现。一般层次可用时间和空间尺度来标定。工艺过程及其设备的设计、操作、控制为宏观，但有关的物理、化学现象为微观。为达到更好设计、操作、控制工艺过程及其设备的目的，要在宏观和微观之间寻找有关的中间尺度的现象，如此可分割难题，然后既要按不同尺度的层次分别研究，又要综合层次进行跨尺度研究。当然，在研究中必须引进有关的其它知识。

4 面对 21 世纪，建立我国的过程工程前沿

为了今后的发展，我们必须建立我国自己的化工(过程工程)前沿。我们不能见热就上，而要认清当前活跃的生长点，接受新产业的推动，结合我国的资源和经济特色，并发挥我们已有的科技优势。

4.1 活跃的生长点

我们可考虑例如软固体和多尺度方法的生长点,但对现有的和我们提出的生长点要有所区别.

- 软固体 这是国际上已经启动的生长点,例如在英国由其工程与物质科学研究会大力支持,每年召开一次全国性会议.我们可以站队,从事这方面的二级前沿工作,但必须创新.
- 多尺度方法 约 16 年以前我国开始了这方面的工作,发表了一些研究成果.最近由中科院、工程院、基金委、科技部在北京召开了第 139 次香山会议,讨论了多尺度效应,有 40 人参加,其中 11 人为科学院和工程院院士.与会同志一致呼吁,希望国家支持这一工作.

4.2 新产业的推动

- 超细颗粒是介于大块物质和原子间的中间物质,具有许多尚未被充分揭示的物理性能.超细碳化硅和氮化硅可用于制备精细陶瓷,超细铁和镍可用于制备金属磁带,其它超细颗粒可用于制备红外敏感器件、太阳能吸收膜、微电子器件的储存器、气体敏感膜、超导薄膜等.突出的问题是功能与成份、结构和加工方法之间的关系.
- 动植物细胞培养可用于制备生物制剂,生产中草药,替代植物的栽培.
- 电子元件中的化学迁移沉积和溶液刻蚀,以及有关反应器的设计和溶液的制备和处理.

4.3 我国资源和经济特色

结合我国资源和经济特色的工作很可能引向别人不注意的前沿发展.举例如下:

- 三次采油 传统的采油方法一般只能回收地下资源的三分之一,如通入蒸汽,根据不同情况还可回收一些.由于我国石油资源有限,我国很重视三次采油,即向地下注入表面活性剂和化学品,籍此回收更多的石油.在这方面我国安排了重点研究课题,成立了联合研究队伍,并组织了成果评定.当前还有两个重要问题,需要进一步的研究,即三次采油中地下具有化学变化的多相流数学模型的建立和与成本有关的科技问题的建立和分析.
- 煤的综合利用 我国四分之三的能源来自煤,石油的年产量仅为煤的十分之一.煤可以制作为液体燃料补充石油的不足,传统的方案是通过煤的高压加氢制成液体燃料,或先将煤全部气化制成合成气,然后将之转化为液体燃料.但是更容易的方法是在燃煤之前先将之加热分解,获取可燃气体和液体烃类,其总重量不少于煤的十分之一.这是将原煤部分增值的较容易的方法,其原理与石油的拔头(拔顶)精馏类同.煤的拔头,可根据沸腾燃烧技术的日益广泛采用,结合循环流态化燃煤同时进行,使燃煤锅炉厂同时副产液烃和可燃气体.所产的液烃既有燃料价值,也可供有机化工产品的原料.
- 贫铁矿和复杂铁矿的处理 我国的铁矿大都为低品位贫铁矿.还原贫铁矿所含的三价铁至具有磁性的四氧化三铁.继以磁选富铁精矿的工艺,我们已进行过日处理 100 吨贫矿的中间试验.如将这一工艺与炼铁厂的低热值煤气综合利用结合,或采用粉煤在还原焙烧时就地气化,或在有便宜的天然气地区进行,有可能使这一工艺更经济先进.

- 粉煤粉矿钢铁工艺 对于非高炉炼铁炼钢工艺我国已进行过若干方案的试验，但对于全部用粉煤和粉矿的技术路线、避免矿石的烧结或团矿以及煤的炼焦工艺，长久处于知难而退的状态。在进入 21 世纪的今天，希望有志者至少对此方案的软课题研究先行一步。
- 稀土 我国是稀土资源大国，其储量居世界首位，分布广、种类多、品种齐全。包头白云鄂博的氟碳铈矿的储量占全世界的 70%，但目前用硫酸焙烧法还不能综合回收稀土，且放射性钍的排放问题也未解决。南方离子吸附型稀土，是中、重稀土的主要来源，但萃取法提取工艺的成本高、能耗大，且对环境污染严重。
- 高硅铝矿 我国铝矿含硅高，如用拜耳法，铝的回收率低，如用烧结法，能耗高，两者都不利于降低成本。两年前，我国与美国铝公司签订了 30 年每年向其购买 400 000 吨氧化铝的合同。此举对独立自主开发我国自己的资源极为不利。
- 盐湖 我国盐湖多达 700 多个，除含石盐、石膏、芒硝、镁盐、氯化钾、硼矿、天然石膏、天然碱、溴、碘之外，还含稀有元素。柴达木盆地盐湖的钾盐储量占我国已探明钾资源的 97%，盐湖卤水中锂的含量高、储量大。但总的来说，我国盐湖化工产品品种不多，产量不大，工艺落后，经济效益不高。

4.4 发展我国已有的科技优势

建国 50 年来，我国逐步建立了自己在化工学识基础方面的一些优势，特别是溶液萃取、精馏、固定床反应器、聚合反应工程和流态化技术。我们要保护好已有的优势，并继续发展。

总结以上，可以看出，一个世纪以来，化工积累了不少知识，经过归纳、综合和与其它知识的交叉，形成了以传递和反应为主且还在不断发展的三传一反+X 的学识基础。这一学识基础的应用对象已远远超出了化工起家时的化学产品，覆盖了所有物质的物理和化学加工的工艺，将化学工程提升至过程工程。虽然传统的化工对象中不少已成熟成为所谓的“夕阳工业”，但从过程工程的学识基础的制高点展望 21 世纪，已可见到其正在进入量少价高、解决有无的高新技术领域。

Process Engineering

Mooson Kwauk

(Institute of Chemical Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Through induction, integration and cross-disciplinary interaction, chemical engineering has acquired an ever-expanding **knowledge base** involving **transport** and **reaction** as its main contents. The application of this knowledge base has far extended beyond its namesake, the chemical products, to encompass all **physical as well as chemical processing**, upgrading chemical engineering to the much larger field of **process engineering**. How to further foster the **expansion and growth** of this knowledge base of process engineering, and, in facing the challenges of the 21st millennium, the identification of appropriate **frontiers** for China, are becoming the foci of attention.

Key words: chemical engineering; process engineering; transport; reaction frontier