

# 第一篇 精细化工过程与合成反应

## 第 1 章 精细化工的发展趋势及关键技术

精细化工（包括制药工程）传统上仅是农药、染料、香料、制药、助剂等精细化学品生产、制造工业的简称。现在，也是精细化学工程这一学科名称的简称。随着精细化工技术在国家社会、经济发展中的地位日显突出，犹如早期的化学工程由单元操作形成完整的“三传一反”理论体系一样，精细化工的理论体系正在逐步形成<sup>①</sup>。作者认为，精细化工可定义为：以农药、医药、染料及颜料为代表的精细及专用化学品的分子设计、化学合成、剂型配方及工业制造技术。它是介于化学科学与化学工程之间的应用化学技术分支之一。

围绕着具有特定应用性能的精细及专用化学品这一核心所开展的工作通常包括：合成筛选的分子设计理论与方法；具有工业实用价值的合成方法与路线；提高与强化最终应用性能的剂型配方技术及保证质量和降低能耗物耗的工业制造技术（见图 1-1）。

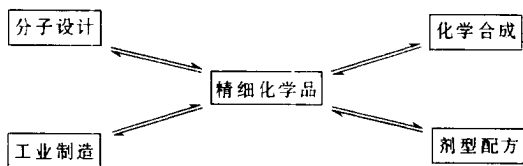


图 1-1 精细化工示意图

### 1.1 趋势与展望

早期的精细化工所强调的是技术本身的深化与密集，为竭力满足

<sup>①</sup> 此由作者《化工学报》上同名论文修改而来。

消费者的需求，对精细化学品在功能或性能上均有较全面的要求。而现代精细化工发展趋势则表现为在环境友好、生态相容的前提下追求技术的高效、专一；同样，对产品的要求是对环境、生态、使用对象作用上的高度和谐统一。准确地说，精细化工技术目前正经历着由“人与技术”概念向“人与技术及生态环境”概念转变的过程。下面仅以几个领域的进展为例加以说明。

### 1.1.1 染料与颜料

革新与拓展是染料、颜料发展的主旋律，早期的染料与颜料主要用于染色和装饰，其鲜艳度、使用寿命是人们关心的焦点；随着技术的发展，染料、颜料正经历着历史性的变革，一方面在染色、装饰与标识等应用领域中发生突进式的深化，另一方面向生物与光电等应用领域不断延伸。

在传统的纺织染色应用领域，主要有：无公害染料，由于可能致癌的偶氮类染料的大规模禁用，环境友好的无害染料的设计与生产摆在研究者面前；超真纤维染料，比天然纤维更加优越的超细旦类“超真”纤维的出现，要求寻找匀染性好的高效、专一的“超真”纤维染料；聚合染料，由于高分子材料的发展，聚合型染料正以优异的使用与加工性能而引起人们的关注。

而在非传统领域，染料向生物与光电技术领域的延伸表现在：①生物染料，用于核酸与蛋白质结构研究的生物染色及测序染料，治疗皮肤病、癌症等的 DNA 嵌入反应型染料，通过催化单线态氧而杀灭农牧渔业害虫的光敏染料和用于杀菌的 DNA 嵌入型染料；光电功能性染料，由于其结构中的大  $\pi$  电子共轭表现出对光、电、磁的敏感性，从而用于半导体光电敏化与照相感光、太阳能聚集、激光调谐与光盘记录用的光电功能性染料。

### 1.1.2 农药与生物调节剂

由对病虫害的“杀生”到“控制”的观念转变是农药发展的主旋律。早期的农药用量大、毒性高、环境污染大、抗性严重，有着破坏自然平衡的危险。人类的目的是控制与限制病虫害对粮食生产的危害，而不是消灭生物物种。因而现代农药以不给自然界带来异源物

质的危害为方针，出现了超高效、低残留、低污染的特异性农药。由早期研究工作中类同作用机制农药分子结构的改进、优化到现代不断推出多样性作用机制化学新农药是目前发展中的明显特点。

主要进展表现在：昆虫生长调节剂，它为高效、低毒的新一代杀虫剂，与传统的攻击昆虫神经系统的杀虫剂不同，它模拟昆虫激素的作用，专门攻击昆虫的生长发育过程；超低毒、超高效速效杀虫剂，此类化合物安全性很高，作用机制新，如硝基烟碱（吡虫灵）等通过与烟碱乙酰胆碱受体的作用而显示出比天然类似物强的活性；磺酰脲类除草剂，不同于以前相对用量大、效果较差的激素类及需光类除草剂，它选择性地抑制植物体内乙酰乳酸合成酶的作用，超高效、低毒、低用量、杀草谱广，已大量用于水旱地。

### 1.1.3 医药与酶及受体调节剂

由随机合成筛选化学合成医药发展到在分子水平上设计出能调节生命过程中大分子（酶、核酸和受体）及小分子（激素、神经传感调节物质和微量元素）作用各类生物合理性药物是当今医药发展的主要趋势。目前医药的品种很多，但真正基本无副作用、见效快的品种并不多，因此疗效确切的优良药物已成为人们追求的目标。

主要关键发展领域包括：酶抑制剂，酶是生命过程中绝大多数化学转换反应的高度选择性高效催化剂，如其结构已知，人们可从酶活性点的阻断或键合二个方面设计干扰酶作用的物质。它在高血压、动脉硬化、哮喘病治疗药方面已有很好进展；受体的拮抗剂，它能阻止激动剂与受体结合从而在心血管治疗药、癌症等治疗药方面发展迅速。

## 1.2 分子设计

精细及专用化学品的分子设计可分为三个阶段：早期的完全依赖于经验进行随机合成筛选的定性阶段；现代的由经验性随机筛选与定量构效关系相结合的半定量阶段，并创造出了许多指导合成筛选的各类基团等排原理；未来的以三维定量构效关系为基础的合理分子设计的定量阶段。

构效关系是分子设计的基础，与有机化学不同，精细及专用化学品的构效关系所强调的是结构与应用性能间的关系，并在此基础上借助于量子化学、分子力学探索基于生物应用性能（如杀菌剂抑菌选择性）、物理应用性能（如染料の色光、照相增感性能）及化学应用性能（如反应染料的上染及水解）合理的分子设计。

### 1.3 化学合成

由于精细及专用化学品一般价格较高，生产规模小，周期短，过去人们常常忽视了其合成过程对环境的污染及操作经济成本。目前精细化工合成技术除强调工程可放大性，工业经济可行性以外，更强调低成本、高单程转化率、高选择性，尽可能地采用环境友好的常温、常压温和反应条件。

当今较为关键的发展领域有以下几个方面。

(1) 芳香氟化学合成技术，事实证明，含氟的农药、医药具有更好的生物活性，相应的染料、颜料具有更好的色光、坚牢度及使用性能。国内许多亟待开发的含氟精细化学品都涉及到多氟芳香中间体，而其合成上的低收率、苛刻的反应条件、工业上较差的重复性使之成为发展氟精细化工的难点。如用于喹诺酮医用杀菌剂、高级液晶显示材料及拟除虫菊酯合成的多氟芳酸及其类似物的工业开发正成为热点

(2) 相转移催化合成技术，精细化工中多数反应为多相过程，收率一般较低，例如由于芳环上电子云密度较高，一般亲核反应难度较大，为便于反应在易于放大的近似均相条件下进行并获取较高收率，常使用价格昂贵的非质子极性溶剂以溶解反应体系中的碱或催化剂金属离子。为降低成本及简化操作，利用相转移催化技术，即采用普通芳香族溶剂、水及低廉的相转移催化剂可使同类反应以很高的收率完成，使一个多相反应以一个类似均相过程而进行，在工业上很有吸引力。目前此方法对于许多亲电反应过程亦有明显效果。

(3) 气相加氢和氧化技术，金属粉末（如铁屑）还原和金属盐氧化合成均是规模上不经济、环境上有污染、产品质量差且不稳定的陈旧技术。目前有大量的类似制备过程需用气相催化加氢和催化氧化方

法予以革新。

(4) 杂环合成技术，近年来多项成果表明杂环相对于类似的苯类芳烃而言，更能使农药、医药、染料、颜料具有卓越的应用性能。因而其高收率的制备方法成为人们关心的热点。在我国，具有工业化价值的吡啶及其衍生物的制备技术仍需进一步攻关，即是典型的例子。

(5) 光学异构体的选择性合成及转化，医药和农药的作用可归结为其与生物体受体间的相互作用。由于后者的组成基本单元主要为具有光学活性的氨基酸，因此当前者中一半作为医药和农药可以发挥作用时，另一半不发挥作用甚至产生副作用，这在拟除虫菊酯农药中表现得尤为突出。不对称合成的目的就是在医药和农药的合成过程中只选择性合成那些发挥作用的活性对映体。然而对于已制备出的外消旋体，则需采用适当的方式拆分，并将非活性对映体消旋化后逐次转化成活性对映体，这样既减少环境污染，提高药效，同时又降低成本，在工业上有重要意义。

## 1.4 剂型配方

与普通或基本化工不同，精细化工中的剂型配方技术左右着最终产品的性能，因而一直被人们所重视，所不同的是，过去人们仅仅视其为上述技术的补充，这一倾向在我国尤为突出，导致我国在此领域与国外差距甚大。实际上应将剂型配方视作与分子设计、化学合成及工业制造技术同等重要的精细化工技术。其核心是，单一化合物通过剂型配方而发挥出更为明显、有效的实际应用效果，并降低对非应用对象及环境、生态的有害影响。

主要关键领域有：

(1) 加和增效与助剂增效，在精细化工中，加和增效是较为普遍的现象，其特点是在多组分混合后，各组分比其单独使用时的简单加和效果还要好，如分散染料与荧光增白剂在色光强度上的二组分或多组分的加和增效现象，照相菁染料多组分组合后的超增感现象，农药中二组分或多组分的专门针对抗性病虫害的多元配方农药等。前二者与不同分子间轨道的相互作用特性有关，后者与不同分子靶标作用

的差异及协同性有关。而助剂增效是指某些没有应用效果的助剂与精细化学品混合后，可显著增强后者的应用效果，如染料在助剂促进下的载体染色过程，农药中有机磷及拟除虫菊酯的杀虫活性的助剂促进作用。

(2) 固体与液体形态控制与应用，颜料的色光与坚牢度不仅仅取决于分子结构，更与应用时其固体晶型的类别有非常大的关系，而这都是我国工业及研究开发所忽视的弱项。又如为便于使用及运输，固体粉末染料用分散剂可加工成液体染料。此外，固体颗粒的超细化明显会提高染料的上染速度、农药、医药的生物利用度及活性。

(3) 控制释放技术，为便于控制使用精细及专用化学品并稳定其使用效果，这已成为精细化工中极为重要的配方技术，在长效杀虫剂、缓释医用镇痛药、热敏及压敏染料中已有重要应用。目前制约其发展的主要因素是助剂辅料及制备技术的缺乏与不成熟。

## 5 工业制造技术

精细化工与大型石油化工目前最大区别在于前者过程间歇、以釜式反应器为主，功能集成，而后者则是过程连续、以管床式反应器为主，功能独立。由于精细化学品多品种、小批量、更替轮换迅速，就需要综合性生产流程和多功能生产装置，精细化学品一般直接面对消费者，所以必须有诸如 GMP 这样严格的质量保证体系和为防止环境污染所采取的特殊分离与反应工程技术。

主要关键领域有以下几方面。

(1) 模块式多功能集成制造技术，一次性投入大，长期投入小，按不同反应、分离过程分成不同的模块，采用多储槽、多管道实现不同模块间的连接与切换，通过自动清洗装置，实现产品间交替，但目前的难题在于进行合理的车间布局设计。

(2) GMP 技术，是精细化工中制药工程领域最为重要的技术，通过对生产每一过程的原始记录，采取档案的形式，对药品生产整个工程进行科学、严密的管理和控制，保证工厂能始终如一地稳定生产出符合医用规格和目标的产品。

(3) 特殊分离技术, 包括 a) 膜分离, 用天然或合成的高分子膜, 在外界能量推进下可用电渗析、超过滤、反渗透等方法对混合物进行分离; (b) 超临界萃取, 如二氧化碳等在超临界条件下具有与液体相当的萃取容量, 更好的流动性和连续性, 且萃取后的分离简单, 无溶剂残留, 特别在香精香料等天然产物提取中尤为重要, 近来具有挑战性的方向是中药成分的纯化与分离; (c) 光学异构体拆分, 虽然不对称合成是一个具有许多优点的方法, 但有时传统的拆分方法也不可避免, 拆分方法有 (i) 有机配体法, 拆分需要等摩尔量的光学活性有机配体与其中一异构体组成有机复盐的方式加以分离, 生产过程对环境和生态具有较大影响, 有机配体的回收成本较高; (ii) 将生物酶用于有机化合物的拆分是一个具有相当吸引力的研究方向, 其催化某一构型异构体的水解、分解等转化反应, 从而达到拆分的目的, 其优点一是不使用对环境有污染的有机物, 二是反应条件温和, 如常温常压、pH 中性等。

(4) 特殊反应工程技术, 将一些除光、电、热以外的特殊技术引入合成反应, 形成新的反应技术如超声化学合成、微波化学合成等, 这方面已有工业应用实例。

以上简要介绍了精细化工工业及技术的未来总体发展趋势, 下面将重点介绍具体的技术原理, 由于分子设计学及剂型配方在其他书籍中已有介绍, 本书的篇章节将重点涉及其中的化学合成及工业制造两部分。

本书可看作精细化工中化学合成及工业制造技术这部分的入门导论。将重点论述及介绍精细化工制备技术过程从实验室研究、开发、工程放大、经济性; 各类有机合成反应及其工业可行性分析实验室及工业中的反应过程、分离过程以及定性、定量分析过程。

## 第 2 章 精细有机化学工业

精细有机化学工业中由实验室走向工业规模的研究开发主要涉及两个大的方面，一是精细化学品本身的开发，如香料、农药、染料的分子设计与合成；二是精细化工合成过程的开发。如某一香料的工业合成路线、工程放大等。下面主要论述后一方面。

### 2.1 从实验室到工业

#### 2.1.1 实验室研究与工业化生产的差异

精细化工过程的研究与开发，无论是研制新产品、探索新的生产方法或新的工艺过程，或是开辟新的原料来源，改造原有的生产方法和工艺过程等，都是在化学理论和应用基础之上从有机化学实验室开始的。

从化学实验室到实现工业化生产，不仅有量的变化，而且有着质的飞跃。以新产品开发为例，要将实验室研制的新产品实现工业化生产，至少要研究和解决如下问题。

(1) 原料路线 在现代化的精细化工厂，原料消耗费用往往要占产品成本的 60%~85%，所以，选择何种起始原料来实现工业化生产，有着十分重要的意义。如有机合成工业过去曾以农副产品和煤为主要原料，现在大都以天然气和石油为原料。选择原料路线不仅要考虑技术经济方面的可靠性和合理性，而且还要考虑国家的资源情况。化学实验室的研究，若不事先考虑工业原料来源，往往会使研究结果无法实现工业化生产，因而也就失去了实用价值

(2) 工艺流程 即生产方法的操作程序、物料走向以及各种机械设备的组合关系。例如，在实验室用氯化钾和硝酸钠制备硝酸钾时，只要按一定配比将两种原料和水倒入烧杯中加热搅匀，反应后滤去氯化钠即可。但是，即使将这样简单的过程实现工业化生产，也必须考虑

到原料的贮存和输送，母液的循环使用、加热和混匀的方式，精制的方法和步骤，以及设备之间的相对位置等等，也就是说，也必须设计一个合理的工艺流程。

一般说来，精细有机化工产品的生产，往往不是直接由原料一步制得产品，而是由原料经过一系列复杂的反应及加工处理而得。与此同时，在生产过程中往往还会产生若干副产物，而有些副产物还需要经过若干处理步骤，才能加工成合乎要求的副产品。此外，还必须周密考虑原料的循环使用、热量的回收利用，废气、废水和废渣的处理等，使得工业流程更为复杂。

应当指出的是，即使用同一种生产方式生产同一种产品，也可能有各种不同的工艺流程。由于工艺流程不同，产品的质量和成本等也可能相差悬殊。

(3) 操作方式 当生产方法和工艺路线确定之后，在设计工艺流程的同时，需要选择采用何种操作方式，即是采用连续操作还是间歇操作。

在近代大规模化学工业中的生产过程，大都采用连续化、自动化操作。但精细化工过程因产品量小、价高，市场变化导致的产品切换及更新快，不得不常采用间歇操作，还要设置缓冲罐和中间储槽等设备加以衔接，以保证整个生产过程的连续。

(4) 工程放大与设备 当生产方法、工艺路线和工艺流程确定之后，化工设备和化工机械的选型和设计往往成为开发过程中关键的一环。有时实验室实验取得了良好的结果，而放大成工业装置后，或者效率明显地下降，或者无法正常操作，这就是所谓放大效应。在精细有机化工中，反应及分离过程是放大中应特别关注的两个方面，因精细有机合成中涉及的反应既多也复杂于一般化学工业所涉及的反应，所以反应过程的放大则最为关键。化学实验装置放大到工业规模装置，初看起来好像只是几何尺寸的变化，实际上却是一个很复杂的问题。

为了能使实验室实验结果迅速而成功地放大成大型工业装置，就必须具备这样一些条件：要有足够的基础数据；对化学工艺过的规律性有一个深入的了解；要有可靠的设计计算方法。

对化学生产来讲，设备和机械的选用和设计，还有一个重要的问题需要考虑，这就是材料的耐腐蚀性能问题。

(5) 技术经济评价 实验室研究结果能否实现工业化生产，还必须通过技术经济评价来决定，也就是必须根据技术、经济和安全等三方面的考察结果进行评价。

技术方面主要考察该项成果在技术上是否可靠、是否达到了先进水平、将其实现工业化是否适合我国资源情况和国情特点，也就是考察其技术上的先进性、实用性和可靠性。

经济方面主要考察作为研究成果的新技术或新产品的市场需求情况，及其与同类技术或产品的竞争能力，以及该成果在实现工业化之后可能取得的经济效益，当然，在进行经济评价时，社会效益也是不容忽视的。

安全方面主要考察实现工业化后对操作人员和环境可能产生的危害，是否有切实可靠的安全措施，以及对废气、废水和废渣的可靠处理方法。

以上这三个方面，尤其是后两个方面往往被从事化学研究的人们所忽视，因而影响研究成果的工业化进程，甚至使成果无法实现工业化。

### 2.1.2 精细化工过程开发程序和步骤

由以上的介绍可见，化学实验室研究成果实现工业化，需要经过长期而艰巨的开发过程，通常需要耗费大量的资金、人力和较长开发时间（或称开发周期），这点在农药、医药开发中尤为明显。一般说来，从化学实验室研究取得成果，到实现工业化生产需要经历开发研究、工程设计与建设以及工业装置的试生产等几个阶段。化工生产的开发研究大致可分为开发基础研究、过程研究、工程研究和技术经济评价等四个方面。化工开发过程的程序和步骤，可粗略地标绘成如图 2-1 所示的框图。

(1) 开发基础研究 通常也称为实验室小试，这种研究工作是根据有机化学科学的基础研究和应用研究提供的信息，确认其研究成果有工业化的可能性之后，以化学实验室规模进行的、从原料开始直到

制成产品的实验室研究，其目的在于确定由此原料出发的合成路线、工艺过程和基本的工艺条件，以及寻求原料、中间产物和产品等各种物料的分析测试方法。

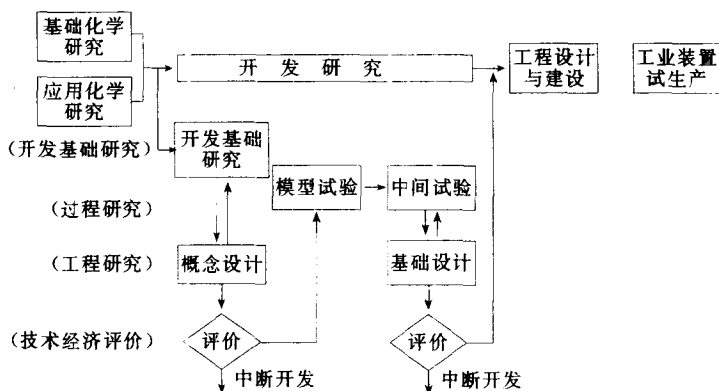


图 2-1 精细化工过程开发程序和步骤

(2)过程研究 精细化工过程研究是通过模型试验和中间试验，提供设计工业装置所必需的数据和数学模型，以解决工业化过程中必须解决的一系列工程技术问题，并对技术经济指标作进一步考核。模型试验是在实验室中利用模型化的设备，寻求生产所需的各种化工操作和设备的设计数据和数学模型。中间试验是指小型工厂规模的试验。根据不同情况，中间试验装置可以包括与大型工业装置完全类似的全部流程和设备，也可以只是其中部分流程和设备。中间试验是开发过程中最为耗费人力、物力和时间的步骤，有时甚至还需要经过多次逐级放大试验。因此，为了节省开发费用和缩短开发周期，应尽量设法减少中间试验的级数和缩小试验规模。规模越大，中间试验则越为主要。在精细有机化工中，当规模小时，可不通过中间试验，直接由实验室小试放大到工业规模装置。

(3)工程研究 工程研究主要包括概念设计和基础设计。概念设计是在实验室小试的基础上，对预定规模的工业生产装置进行预设计，其目的是检验实验室的小试成果的完整性和可靠性。一般说来，概念设计的内容应包括生产规模、原料和产品的规格，设想的工艺流程图，

初步的物料衡算和能量衡算，主要设备型式、规格和材质的初步考虑，主要技术经济指标，三废处理方案，以及对进一步开发研究的建议等。基础设计是在过程研究的基础上，为建立第一套生产装置所作的初步设计，是开发研究成果的主要表现形式，无论是概念设计或是基础设计都还是属于工程研究范畴，不属于一般常规的工程设计。

(4) 技术经济评价 技术经济评价是判断开发研究各阶段结果的有效程度和决定中止或继续开发的依据。通常，在确定开发项目后（亦即所谓“立项”之前），除应对该项目的可行性进行初步评价之外。在立项之后的整个开发过程中，还必须进行多次技术经济评价，以决定继续或中断开发。

当然，以上所述主要是生产规模较大、生产过程和技术较复杂的精细化工开发项目所必须经过的开发程序和步骤；对于如少量有机化合物、化学试剂等可以在实验室或中试装置中进行生产的项目，不一定都要经过上述所有的开发程序和步骤，但技术经济评价仍是绝对不容忽视的。

### 2.1.3 研究与开发中各学科的作用

一种精细化学品或一项精细化工技术的开发，在从化学实验室的开发基础研究开始，到实现工业化生产规模为止的整个开发过程中，应用化学、化学工艺学、化学工程学和化工机械工程学都起着作用。但是在不同的开发阶段由于主要矛盾的转化，起主导作用的学科也随之变化。这种变化可形象地用图来表示，如图 2-2 所示。

就化学产品开发而言，在实验室小试阶段，主要是研究决定原料路线和工艺路线，并寻求合适的工艺条件等等。这时，应用化学和化学工艺学在研究中起着主导作用。当实验室小试取得了理想的成果，而要使之以工业规模付诸实现时，就必须根据化学工程学的知识寻求技术上最先进、经济上最合理和操作上最安全的工业化方案。这时，化学工程学将起主导作用。最后，当开发过程进入工程建设和生产阶段，化工机械设备问题就突出出来了。不言而喻，在开发的任何阶段，都需要多种学科知识和技术的紧密结合，只是各个阶段对于不同学科知识和技术的需求各有侧重而已。

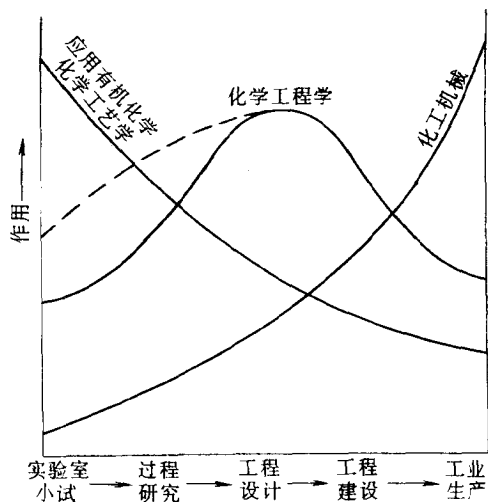


图 2-2 学科重要性比较

## 2.2 精细化工过程

### 2.2.1 精细化工过程的特点

有机化学在工业上的普遍应用是在 19 世纪 50 年代后期开始的，此时发展了合成染料工业。在以后的 30 到 40 年间，合成染料所需的中间体变成了大型工业，许多其他有机化学制品也变成了工业上的重要产品。到 1900 年普遍地建立了有机化学工业。

100 年来，化学在工业上的应用迅速扩大，已深入到我们生活的各个方面。使我们的生活更加舒适而方便的一些显而易见的代表性产品有塑料、合成纤维、药物和染料等。

虽然许多化工生产操作与实验室合成的操作在原理上是相似的，但问题在于数量上的差别巨大。例如，在实验室中加热和冷却是简单的事情，但在大规模工业生产上则是很大的问题。大规模化学工业所用设备的设计，是化学工程师的职责范围，在这里不作详细讨论但是有必要对精细化工过程，即精细化工工艺的某些方面进行扼要的介绍。

实现化学加工过程有两种主要的方法，即间歇加工过程和连续加工过程，间歇加工过程是实验室制备时最常采用的一种方法。在间歇过程中，将反应物加到反应器中，在给定的时间内进行反应，然后从反应器中放出，也许还要经过某种分离过程。设备的操作是间歇的，设备中各部分的作用随时间而改变。在连续加工过程中，原料连续不断地加入到反应器中，反应产物连续不断地从反应器中放出，通常还另有一些设备进行连续分离操作。

对于生产操作来讲，连续加工过程比间歇加工过程有许多优点。连续过程比较容易实现进度自动控制，而间歇过程的自动控制则相当困难而且昂贵。因此间歇加工过程比连续加工过程需要更多的劳动力。连续加工过程比间歇加工过程更容易实现节能。例如热的加工物流冷却时可以把热量传给原料或传给水，产生水蒸气等，而把间歇加工过程的间歇操作组合到节能系统中去，一般是行不通的。连续加工过程很容易实现缩短反应时间，而间歇加工过程则不能。因此，当需要反应时间缩短的时候，特别是气相反应，主要采用连续加工过程。

但是，事情往往不能像所想像的那样全是单方面的，有许多化学制备，特别是精细化学品的生产大多仍采用间歇加工过程进行的。因为有各种各样的原因，会使得一些反应采用连续加工过程在技术上行不通。

连续加工过程的开发通常比间歇加工过程困难得多，因此在任何特定条件下，开发连续加工过程可能会得到一定的好处，例如节省劳动力和能源费用，但必须权衡一下，看它是否抵得过进行研究和开发所需要的费用。劳动力和能源费用的节省量是和加工过程的规模成正比的，而研究和开发费用则是一定的。因此，对于小规模的生产来讲，开发一个连续过程往往是不值得的。

间歇装置的开工和停工一般比连续装置容易，间歇装置在产量多少上更有伸缩的余地，生产何种产品也有灵活性，而这确实是面向市场的精细化工工业所特别感兴趣的，而连续生产的工厂往往只能生产单一产品。

一般地说，连续加工过程用于技术上可行的大规模生产和任何规

模的气相反应；间歇加工过程用于除气相反应以外的小规模生产和用于技术上不可能实现连续化的大规模生产。

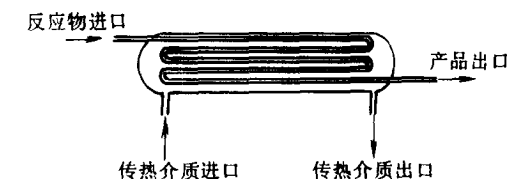
## 2.2.2 反应系统

### (1) 间歇反应器

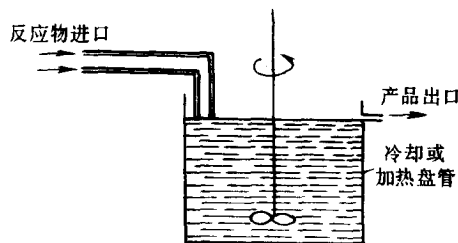
间歇加工过程所用的反应器基本上和实验室的设备类似，不同之处只是规模更大和制作材料不同。例如，反应可以在反应罐或反应槽（相当于烧杯）、带回流的封闭反应器（相当于烧瓶）或加压的高压釜中进行。最常用的加热和冷却方法，是在反应器内的盘管中或外面的夹套中循环传热介质。

### (2) 连续反应器——液相反应应用

用于液相反应的连续反应器分成两种主要类型：管式反应器和带搅拌的连续反应器。顾名思义，管式反应器实质上就是一个管子，反应物通过管子进行反应。管子外面通常有夹套，在夹套内循环传热介质。为了结构上的方便，管子常常是盘管型或蛇管型，这样，长的管子便可容纳在一个适当大小的夹套中 [ 参看图 2-3 (a) ]。沿管长几乎



(a) 管式反应器



(b) 带搅拌连续反应器

图 2-3 液相反应的连续反应器

没有返混或前混的问题，所以进料中各种成分在反应器中停留的时间近似相等。反应混合物的组成沿着管长而变化。管式反应器的动力学特征和间歇反应器的相同。

带搅拌的连续反应器基本上是一个能连续进料和连续放出产物并带有搅拌的反应器 [见图 2-3 (b)]。这种反应器可用装在反应器中的盘管、夹套或外部换热器进行换热；它的动力学特征与管式连续反应器或间歇式反应器的不同。反应混合物的组成在整个反应器中是固定不变的，但进料中各成分在反应器中的停留时间则分布在很宽的范围内。常常将许多这种类型的反应器串联起来使用，前一个反应器生成的产物连续地进入下一个反应器。在这种组合中，随着反应器数目的增加，其动力学特征接近于管式反应器。

### (3) 连续反应器——气相反应应用

非催化的气相反应，常常在和液相反应中用的反应器极相似的管式反应器中进行，可是许多气相反应是在和固体催化剂接触下进行的，这时传热和催化剂的装卸是反应器设计中的主要问题。

最简单的催化反应器是一种既不加热也不去热的反应器，称为绝热反应器。它主要包括一个盛催化剂的容器，通常为一个单层的床，反应物从床的一端加入，产物从床的另一端取出 [参看图 2-4 (a)]。这种类型的反应器制造费用比较低，催化剂的装卸也很简单，但床层的温度是变化的，即当放热反应时，从进口到出口的温度将升高；当吸热反应时，从进口到出口的温度将降低。这个特征限制了绝热反应器在许多加工过程中的应用，因为这些过程需要在较窄的温度范围内进行，才能得到满意的操作结果，而在绝热反应器中，则不能做到这一点。将许多绝热反应器串联，并带有中间加热或冷却段，可以增加系统的灵活性，但也会降低系统的简单性，而这一点本来是这类反应器吸引人的主要方面。

当绝热反应器不合适时，可用等温反应器。等温反应器带有加热或去热的设备，以便控制温度。最普通的一种等温反应器是把催化剂装在许多管子中，这些管子的周围则是加热或冷却介质。图 2-4 (b) 是用于放热反应的一种管式反应器的示意图。当进行的是吸热反应时，则

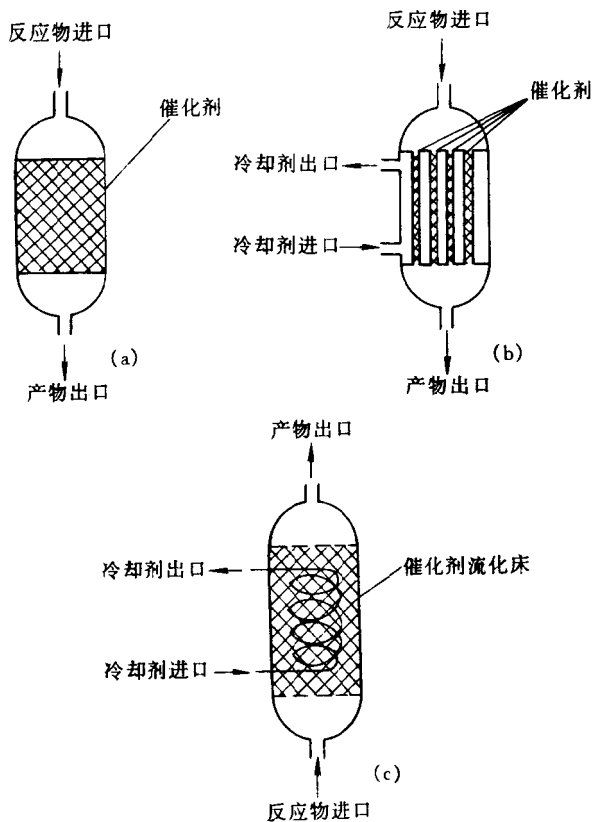


图 2-4 催化反应器

(a) 绝热反应器；(b) 管式反应器（带冷却）；(c) 流化床反应器（带冷却）

根据所需要的温度可以用液体或蒸气作传热介质加热，或者烧油或烧气直接加热。

管子的直径可以变化，例如，根据要求的传热速度和从催化剂床中心到边缘能容许的温度梯度而改变。对于高度放热并且对温度敏感的氧化过程，一般采用直径 2.5cm 的管子、而且在反应器中必须用很多管子，通常有数千根；而水蒸气转化过程则采用直径为 20cm 以上的管子。制造管式反应器比制造类似大小的绝热反应器昂贵得多，更换催化剂所需要的时间也比绝热反应器的长。