



高等院校“十一五”规划教材

精细化工 反应过程与设备

张晓娟 编著
唐丽华 主审

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

高等院校“十一五”规划教材

精细化工反应过程与设备

张晓娟 编著

唐丽华 主审

中国石化出版社

内 容 提 要

本书结合精细化学品生产特点,着重论述精细化工反应过程所涉及的设备,即反应器的结构、设计原理、分析及应用。全书共分十章,介绍了精细化学品生产特点及其对反应器的要求,反应器设计的基本概念、基本方法及均相反应器动力学等基础知识,在此基础上分别介绍了间歇釜式反应器、釜式反应器的搅拌与传热、连续釜式反应器、管式反应器(循环反应器组)、塔式反应器、固定床反应器和流化床反应器的设计与分析,同时介绍了停留时间分布与流动模型。反应器设计理论着重于基本原理的应用,反应器的分析和计算在保留了目前传统反应设备的基础上,加强了对精细化工领域常用的反应设备如间歇釜式反应器、半连续釜式反应器、釜式反应器的搅拌与传热、循环反应器组的介绍。每章后附有思考题和习题。

本书可作为高等院校精细化工专业的教材,也可供从事精细化学品生产和开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

精细化工反应过程与设备/张晓娟编著. —北京:中国石化出版社,2008
高等院校“十一五”规划教材
ISBN 978-7-80229-647-3

I. 精… II. 张… III. ①精细化工-化学反应工程-高等学校-教材②精细化工-化工设备-高等学校-教材
IV. TQ03 TQ052

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 099458 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

金圣才文化(北京)发展有限公司排版

北京科信印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 15 印张 360 千字

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

前 言

精细化学品的生产需要经过原料的纯化、反应制备、产物的分离与精制及产品复配或商品化等过程。上述过程按其原理不同可分为化学过程和物理处理过程。精细化学品生产过程中的原料纯化、产物分离与精制及产品复配或商品化等过程多数为物理处理过程,这些单元过程的原理、设备等内容在“化工原理”、“分离工程”、“后处理技术”、“复配技术”等课程或专著中都有介绍,本书对此不予深入讨论。虽然反应过程的费用在项目总投资中所占比例不大,然而,它的好坏却直接影响到其他各步操作设备的选择和投资,是精细化学品的生产过程的核心。目前,系统介绍生产精细化学品的反应设备的书籍比较短缺,大多为适用化学工程的反应工程类书籍。为此,本书结合精细化学品生产特点,着重论述精细化工反应过程所涉及的设备即反应器的结构、设计分析、原理及应用。结合精细化工产品的生产多采用间歇式操作、反应复杂、物料循环场合多等特点,本书加强了对间歇操作、半间歇操作及循环反应器组等相关内容的论述。

全书共分十章,首先介绍了精细化学品生产特点及其对反应器的要求,介绍了反应器设计的基本概念、基本方法及均相反应器动力学等基础知识,在此基础上分别介绍了间歇釜式反应器、釜式反应器的搅拌与传热、连续釜式反应器、管式反应器(循环反应器组)、塔式反应器、固定床反应器和流化床反应器的设计、分析及应用,同时介绍了停留时间分布与流动模型。反应器理论着重于基本原理的应用、反应器的设计和分析。在保留了目前传统反应设备的基础上,加强了精细化工领域使用的反应设备,如间歇釜式反应器、半连续釜式反应器、釜式反应器的搅拌与传热、循环反应器组的介绍。每章附有思考题和习题。

本书由沈阳工业大学张晓娟教授编著。本书的编著完成得益于国内外大量参考资料,主要参考资料列于书末,编者对各参考资料的作者表示诚挚的谢意!同时,本书的编写得到了唐丽华、沈国良、于大伟等同志的关心、指导和帮助,在此一并表示谢意。全书由唐丽华教授主审。

鉴于水平和能力所限,书中不当之处在所难免,恳请专家学者和广大读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 精细有机合成反应分类及其在精细化学品中的使用频率	(1)
1.2 精细化工产品生产的特点及其对反应器的要求	(2)
1.2.1 精细化工产品生产的特点	(2)
1.2.2 精细化学品生产对反应器的一般要求	(4)
1.3 工业反应器类型	(4)
1.3.1 按几何形式分类	(4)
1.3.2 按传热方式分类	(6)
1.3.3 按反应物相态分类	(7)
1.4 反应器的操作方式与选型	(8)
1.4.1 反应器的操作方式	(8)
1.4.2 反应器的选型	(8)
1.5 反应器设计的基本方程	(9)
1.5.1 反应动力学方程式	(10)
1.5.2 物料衡算式	(10)
1.5.3 热量衡算式	(11)
1.5.4 动量衡算式	(11)
1.6 工业反应器放大	(12)
1.7 一些重要的基本术语	(14)
1.7.1 反应器内物料的流动模型	(14)
1.7.2 反应转化率、产率及选择性	(15)
第2章 均相反应动力学基础	(17)
2.1 反应速率方程	(17)
2.1.1 化学反应速率	(17)
2.1.2 反应速率方程	(18)
2.2 温度对反应速率的影响	(21)
2.3 复合反应	(24)
2.3.1 反应组分的转化速率和生成速率	(25)
2.3.2 复合反应的基本类型	(25)
2.3.3 反应网络	(27)
2.4 反应速率方程的变换与积分	(28)
2.4.1 单一反应	(29)
2.4.2 复合反应	(33)
第3章 间歇釜式反应器	(35)
3.1 釜式反应器的特点及其应用	(35)

3.1.1	釜式反应器的结构	(35)
3.1.2	间歇釜式反应器的特点及其应用	(36)
3.2	间歇釜式反应器的容积与数量及设备间的平衡	(36)
3.2.1	间歇釜式反应器的容积与数量	(36)
3.2.2	间歇操作设备间的平衡	(40)
3.3	等温间歇反应釜的计算	(41)
3.3.1	单一反应	(42)
3.3.2	复杂反应	(45)
3.4	变温间歇釜的计算	(49)
3.5	半间歇釜式反应器	(54)
第4章	釜式反应器的搅拌与传热	(59)
4.1	搅拌器型式及其液体流型	(59)
4.1.1	搅拌器的一般型式	(59)
4.1.2	搅拌流体的流型	(61)
4.1.3	搅拌附件	(63)
4.2	搅拌过程的种类及搅拌器的选型	(64)
4.2.1	搅拌过程的种类	(64)
4.2.2	搅拌的混合机理	(65)
4.2.3	循环流量	(66)
4.2.4	叶轮的剪切性能	(67)
4.2.5	搅拌功率的分配	(67)
4.2.6	搅拌器的选型	(68)
4.3	搅拌器功率的计算	(69)
4.3.1	搅拌器功率的计算	(69)
4.3.2	附件的附加搅拌功率	(76)
4.3.3	电动机功率	(76)
4.3.4	搅拌器的放大	(76)
4.4	釜式反应器的传热	(79)
4.4.1	传热装置	(79)
4.4.2	高温热源的选择	(82)
4.4.3	釜式反应器的传热系数计算	(85)
4.5	搅拌系统传热时间	(90)
4.5.1	内蛇管或外夹套, 加热介质为恒温	(90)
4.5.2	蛇管或夹套, 冷却介质为恒温	(90)
4.5.3	蛇管或夹套, 加热介质非恒温	(90)
4.5.4	蛇管或夹套, 冷却介质非恒温	(91)
第5章	连续釜式反应器	(93)
5.1	连续釜式反应器的特点及应用	(93)
5.2	连续釜式反应器的设计	(93)

5.2.1	反应体积	(93)
5.2.2	停留时间	(94)
5.2.3	平均停留时间的图解法求解	(95)
5.3	连续釜式反应器的并联与串联	(96)
5.3.1	并联	(97)
5.3.2	串联	(98)
5.3.3	多釜串联反应器组的各釜转化率的最佳分配	(101)
5.4	釜式反应器的热量衡算与定态操作	(102)
5.4.1	连续釜式反应器的热量衡算方程	(102)
5.4.2	连续釜式反应器操作的热稳定性分析	(104)
5.5	返混对复杂反应产品分配的影响	(106)
5.5.1	平行反应	(106)
5.5.2	串联反应	(107)
第6章	管式反应器	(111)
6.1	物料在反应器中的流动	(111)
6.1.1	管式反应器的特点、型式及其应用	(111)
6.1.2	管式反应器的换热	(112)
6.1.3	物料在管式反应器中的流动(理想置换假设)	(112)
6.2	等温管式反应器的计算	(113)
6.2.1	反应体积	(114)
6.2.2	管径与管长的确定	(115)
6.2.3	等温变容管式反应器	(116)
6.3	变温管式反应器	(119)
6.4	管式反应器与连续釜式反应器的比较	(125)
6.4.1	生产能力的比较	(125)
6.4.2	反应选择性的比较	(128)
6.5	循环反应器	(130)
6.5.1	带循环回路的恒容等温管式反应器	(130)
6.5.2	带循环回路的间歇釜式反应器	(131)
6.5.3	带循环回路的连续釜式反应器	(132)
6.6	管式反应器的最佳温度序列	(133)
6.6.1	单一反应	(134)
6.6.2	复合反应	(135)
第7章	停留时间分布与流动模型	(138)
7.1	停留时间分布	(139)
7.1.1	停留时间分布密度函数	(140)
7.1.2	停留时间分布函数	(140)
7.1.3	$E(t)$, $F(t)$ 之间的关系	(141)
7.2	停留时间分布的实验测定	(141)

7.2.1 脉冲示踪法	(141)
7.2.2 阶跃示踪法	(143)
7.2.3 示踪剂的选择条件	(144)
7.3 停留时间分布函数的统计特征值	(145)
7.4 理想反应器的停留时间分布	(146)
7.4.1 平推流模型	(146)
7.4.2 全混流模型	(146)
7.5 非理想流动模型	(147)
7.5.1 离析流模型	(147)
7.5.2 多釜串联模型	(148)
7.5.3 轴向扩散模型	(150)
7.6 流动反应器中流体的混合	(152)
7.6.1 流体的混合对反应速率的影响	(153)
7.6.2 流体的混合对反应工况的影响	(153)
第8章 塔式反应器	(158)
8.1 概述	(158)
8.1.1 塔式反应器特点及应用	(158)
8.1.2 附属装置	(158)
8.2 填料塔	(159)
8.2.1 物理吸收	(160)
8.2.2 化学吸收	(161)
8.3 鼓泡塔	(164)
8.3.1 鼓泡塔操作状态	(165)
8.3.2 鼓泡塔流体力学	(166)
8.3.3 鼓泡塔的轴向混合	(170)
8.3.4 鼓泡塔传热特性	(170)
第9章 固定床反应器	(173)
9.1 固定床反应器的特点及结构	(173)
9.1.1 固定床反应器的特点	(173)
9.1.2 固定床反应器的构型	(174)
9.2 固定床反应器内的流体流动	(177)
9.2.1 固定床反应器的床层特点	(177)
9.2.2 固定床反应器中的流体流动特性	(179)
9.2.3 固定床反应器的床层压力降	(180)
9.3 固定床反应器中的传质与传热	(182)
9.3.1 固定床反应器中的传质	(182)
9.3.2 固定床反应器内的传热	(185)
9.4 固定床反应器的计算方法	(186)
9.4.1 经验算法	(187)

9.4.2	数学模型法	(189)
9.4.3	固定床反应器设计和操作的几个工程问题	(195)
第 10 章	流化床反应器	(199)
10.1	流化床反应器的特点及结构	(199)
10.1.1	流化床反应器的工业应用及特点	(199)
10.1.2	流化床反应器的类型及结构	(201)
10.2	流化床反应器内的流体流动	(202)
10.2.1	固体流态化的形成	(202)
10.2.2	流态化的类型及特征	(203)
10.2.3	流化床的压降	(204)
10.2.4	流化速度	(205)
10.3	流化床的传热	(209)
10.3.1	流化床反应器的传热过程分析	(209)
10.3.2	床层与器壁之间的给热	(210)
10.3.3	内换热器传热面积的计算	(214)
10.4	流化床反应器的构件	(215)
10.4.1	气体分布板与预分布器	(215)
10.4.2	内部构件	(218)
10.4.3	气固分离装置	(220)
10.5	流化床主体尺寸的确定	(222)
10.5.1	流化床直径的确定	(223)
10.5.2	流化床层高度的确定	(223)
参考文献		(229)

第1章 绪 论

围绕着具有特定应用性能或功能的精细及专用化学品这一核心开展的工作通常包括：合成筛选的分子设计理论和方法；具有工业实用价值的合成方法和路线；提高和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的工业制造技术(见图1-1)。

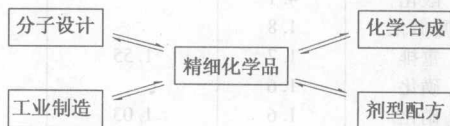


图 1-1 精细化工过程示意图

精细化工包括化学医药、农药、染料、香料、助剂等，名目繁多，其工业制造技术一般包括原料纯化、反应制备、反应产物的分离和提纯、产品的复配和商品化(加工应用)。按照化学反应的要求将原料进行处理，一般属于物理过程；由于副反应的存在，会生成不希望生成的副产物，又因为反应不完全以及某些反应物过量，致使所得的反应产物不那么纯净，这就需要对产物进行分离，以获得符合规格的产品。由此可见，第三步同样是不可缺少的，这一步主要也是物理过程。为了满足各种专门用途的需要，许多化学合成的产品，除了要求加工成多种剂型外，常常必须加入多种其他试剂进行复配。在一般情况下，虽然反应过程的费用在全厂或车间在总投资中占的比重并不大，然而它的好坏却直接影响到其他各步。比如，反应对原料的要求过于苛刻，必然导致原料预处理过程复杂、费用增加；又如反应效果不佳，则副产品增多，反应转化率低，定然增加分离的困难。所以，化学反应这一步是整个工厂或车间的核心，是起主导作用的一步，往往是实现工程放大与工业化的关键之一。为此，对精细化工产品生产中反应设备的设计与分析是十分重要的。

1.1 精细有机合成反应分类及其在精细化学品中的使用频率

精细有机合成反应的类型及其在典型化学品合成中的使用频率见表1-1。

通过对几大类精细化工过程中常涉及到的合成反应大类、小类的统计分析，以掌握精细化工各大类合成反应的异同点(在其他资料中有述)，一方面有助于在开发技术时选择合适的反应方法和反应装置；另一方面可帮助人们在建设多功能车间时，合理集约安排反应装置。

表 1-1 不同反应使用频率

反应类型	不同行业使用频率/%					
	医 药	香 料	农 药	中间体	染 料	颜 料
烷基化	22.3	13.42(含酰化)	24.6(含酰化)	1.8	4.0	
溶剂分解	12.3					
缩合	11.3	17.5	6.3	8	17.6	9.6
卤化	10.9	2.32	10.3	7.5	3.2	

续表

反应类型	不同行业使用频率/%					
	医 药	香 料	农 药	中间 体	染 料	颜 料
酰化	9.6			4.9	2.6	
还原	9.0	11.3	5.36(含氧化)	18.6	4.3	0.8
氧化	5.3	12.6		8.8	3.0	1.2
酯化	5.3	11.8	32.3			
酸化	4.1					
重氮化	1.8			3.5	23.3	41.4
重排	1.7	1.55	2.3		21.1(偶合)	37.8(偶合)
磺化	1.6			13.3	2.1	1.2
硝化	1.6	1.03			1.8	0.8
脱羧	1.5	1.80				
消除	1.5	3.35				
环化		7.73	4.5	2.2	2.2	
水解		4.38	14.1		2.8	
加成		2.58		4.9		
开环		0.52			1.2(硫化)	
氨解				5.8	0.9	8.4
其他				7.1	9.2	4.8

1.2 精细化工产品生产的特点及其对反应器的要求

1.2.1 精细化工产品生产的特点

精细化学品工业,简称精细化工。包括医药、兽药、农药、染料、涂料、有机颜料、油墨、催化剂、试剂、香料、粘合剂、表面活性剂、合成洗涤剂、化妆品、感光材料、橡胶助剂、增塑剂、稳定剂、塑料添加剂、石油添加剂、饲料添加剂、高分子凝结剂、工业杀菌防霉剂、芳香消臭剂、纸浆及纸化学品、汽车化学品、脂肪酸及其衍生物、稀土金属化合物、电子材料、精密陶瓷、功能树脂、生命体化学品和化学促进生命物质等行业。这些精细化学品的生产涉及的化学反应多、工艺流程复杂,是高技术密集度行业,其主要特点如下:

(1) 多品种、小批量

如前所述,精细化工包括30多个行业,在每个行业中其品种也很繁多。精细化学品的专用性强,有一定的应用范围,导致其用量不大,多数品种是以克、毫克、甚至ppm(百万分之一)计。例如染料在纺织品上的用量是织物重量的3%~5%;造纸化学品和皮革化学品的用量一般为1%~4%等。同时产品更新换代快、市场寿命短,因此其生产批量较小。精细化学品多品种的特点是与其批量小及具有特定功能的特征相联系的,是与满足应用对象对产品性能的多种需要而对应的。例如:对于染料来说,不仅要求色谱齐全,能上染多种纤维,而且还要求能应用于塑料、木材、金属等各种材料的着色,以及满足正在开发的其他许多功能性用途的需要。同时不同的颜色,每种染料又有不同的性能以适应不同的工艺。

(2) 化学反应复杂

一个品种的生产往往要经过一连串化学反应,有些反应本身常常是复杂反应,如平行反应、串联反应、可逆反应、链反应等。一个反应有时生成多种异构物,伴随生成主产物的同时还有副产物生成。例如H酸的生产,涉及化学反应的单元操作就有8个;药物非那甾胺

的合成涉及 10 步反应。

(3) 反应物料相态多样化

在精细化工生产中, 较少遇见均相物料体系, 经常是非均相物料体系。例如, 苯、甲苯硝化反应是液液相体系, β -氯蒽醌氨化反应是液固相体系、甲苯液相氧化反应是气液相体系, 邻二甲苯、蒽催化氧化反应是气固相体系, 硝基物催化加氢是气液固三相体系。

(4) 反应介质腐蚀性强

在各种精细化学品生产中, 经常使用强腐蚀性介质, 如硫酸、硝酸、盐酸、氯磺酸、有机酸和高温浓碱、湿氯化氢、二氧化硫、氯气等腐蚀性物质。

(5) 许多反应过程热效应大

许多单元反应过程都有很大的反应热效应, 如邻二甲苯空气氧化制苯酐, 每摩尔邻二甲苯反应转化生成苯酐将放出 1271.53kJ 的热量; 甲苯氧化制苯甲酸, 其摩尔反应放热为 652.8kJ; 硝基苯还原制苯胺, 摩尔反应热为 434kJ; 其他如硝化、磺化及氯化等反应都有很强的放热效应。因此为了确保反应在正常的工艺温度条件下进行, 必须移除大量的热量, 在对反应器设计和选型时要求具有良好的传热效果。

(6) 工艺条件变化范围宽

由于生产中具有繁多的各种化学反应, 所以就有各种不同的工艺条件。从温度来说, 有在零度左右进行的重氮化、低温硝化和低温酯化等反应, 有在 300℃ 以上进行的氧化反应及碱熔反应; 从压力来讲, 有在加压条件下的氨化、水解和氢化等反应, 也有在减压下进行的烘焙磺化、硝基苯氯化等反应。所以在反应器设计时不仅要考虑到高低温传热剂的应用, 还必须考虑到反应器材质的耐温、耐压等问题。

(7) 高技术密集度

首先, 在实际应用中, 精细化学品是以商品的综合功能出现的, 这就需要在化学合成中筛选不同的化学结构, 在剂型生产中充分发挥精细化学品自身功能及与其他配合物质的协同作用, 完成从剂型到商品化的复配过程。以染料为例, 图 1-2 表示出了它们的应用性能与外界条件的关联。这些内在的和外在的因素既互相联系, 又互相制约, 是形成精细化学品高

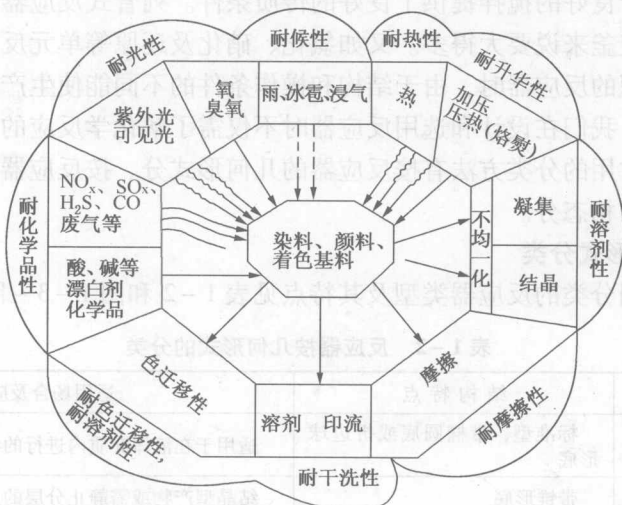


图 1-2 染料应用性能与外界条件关联

技术密集度的一个重要因素。

其次,技术开发成功率低、时间长、费用高,产品的更新换代快,市场寿命短,技术专利性强和市场竞争激烈。据报道,美国和德国的医药、农药新品种开发成功率为 $1/10000$, 日本为 $1/10000 \sim 1/30000$ 。染料新品种开发成功率为 $1/6000 \sim 1/8000$ 。另外,表面活性剂、功能树脂、电子材料等品种技术开发成功率也都很低。

由于精细化工产品技术开发的成功率低、时间长、费用大,其结果必然导致技术垄断性强,销售利润高。就技术密集度而言,以机械制造工业的技术密集指数为 100,化学工业为 248,精细化工中的医药、油脂和涂料分别为 340 和 279。

技术密集也表现为情报密集、信息快。因为精细化学品是根据具体应用对象而设计的,而应用对象的要求会经常发生变化,一旦有新的要求提出,就必须按照新要求来重新设计产品结构,或对原有的化学结构进行改进,或者调整配方和剂型,以便生产出满足应用对象要求的新产品。随着世界各国环保意识的日益增加,新产品开发的投资和速度必将会受到严重的影响。同时,大量的基础研究所产生的新化学品也需要寻求新的用途。为此,某些大型化学公司已经采用计算机信息处理技术对国际化学界研制的各种新化合物进行储存、分类及功能检索,以达到快速设计和筛选的目的。

1.2.2 精细化学品生产对反应器的一般要求

为了满足精细化工产品生产的上述特点,对反应设备的选型和设计提出如下基本要求:

有较好的适应性,以完成多品种或多步反应;建立合适的浓度、温度分布体系,以尽可能地抑制副反应的发生;在结构上,反应器能确保良好的传质效果和较强的传热能力,对于强放热或吸热反应要保证足够快的传热速率和可靠的热稳定性;根据操作温度、压力和介质的腐蚀性能,要求设备材料、型式和结构具有可靠的机械强度和抗腐蚀性能。

1.3 工业反应器类型

由于反应器类型结构不同,对在其中进行的化学反应的效果是不同的,如在搅拌反应锅中进行的反应,由于良好的搅拌提供了良好的传质条件。列管式反应器的单位体积物料的传热面积比起夹套反应釜来说要大得多。又如氯化、硝化及还原等单元反应中的许多产品的生产,在使用相同体积的反应器时,由于结构和操作条件的不同能使生产能力提高数十倍甚至上百倍之多。因此,我们在设计和选用反应器时不仅需了解化学反应的特点,还必须掌握各种反应器的特点。常用的分类方法有按反应器的几何形式分、按反应器的传热方式分、按操作方式分、按反应物相态分。

1.3.1 按几何形式分类

按几何形式不同分类的反应器类型及其特点见表 1-2 和图 1-3 ~ 图 1-12。

表 1-2 反应器按几何形式的分类

型 式	图 号	结 构 特 点	适用场合及应用举例
釜式 反应器	立式搅 拌釜	1-3(a)	标准型,带椭圆底或折边球形底
		1-3(b)	带锥形底
		1-3(c)	半球形底
			适用于在液体介质内进行的各种反应
			结晶型产物或需静止分层的产物
			压热反应,如氨化、水解等加压下的反应

续表

型 式	图 号	结 构 特 点	适用场合及应用举例
釜式反应器	1-4(a)	卧式圆筒内设搅拌	带固体沉淀物的反应, 如 β -氯蒽醌的氨化
	1-4(b)	圆筒形, 内设钢球或磁球, 筒体旋转	需要不断粉碎结块固体的场合, 用于固相缩合反应等
管式反应器	1-5(a)	水平管式	气相或均液相反应, 如热裂解、氨化及水解等反应
	1-5(b)	垂直排管	气液相反应, 带悬浮固体的液固或气液固反应, 如液相催化加氢还原
	1-5(c)	环形管内设搅拌器	非均液相反应, 如芳烃的硝化反应
	1-5(d)	水平管带螺杆搅拌器	粘稠物料与半固态物料的反应, 例如固相缩合
塔式反应器	1-6(a)	圆柱形塔体内设挡板及鼓泡器	气液相反应, 气液固三相反应, 如芳烃液相氧化及焦化反应, 硝基物加氢还原
	1-6(b)	塔内部有填充物	气体的化学吸收, 苯的沸腾氯化制氯苯
	1-6(c)	塔体内部有塔板结构	气液相逆流操作的反应, 要求伴随蒸馏的化学反应, 如酯化反应、异丙苯氧化反应
	1-6(d)	塔体内部有搅拌装置或脉冲振动装置	气液、液液、液固等非均相反应及要求伴随萃取的化学反应, 如烃类液相氧化、硝化废酸的萃取
	1-6(e)	喷雾塔内部不设任何构件	气液反应
固定床反应器	1-7(a)	单筒体内装催化剂	气固、液固、气液固相催化反应。如硝基物气相加氢还原及液相加氢还原
	1-7(b)	列管式, 管内装催化剂	反应热较大的快速气固相催化反应, 如芳烃的气相催化氧化
流化床反应器	1-8	圆筒体, 催化剂靠气速或液速呈流化状态	放热量较大的气固相或气液固相催化反应, 如芳烃的氧化、硝基物催化加氢还原
喷射型反应器	1-9	类似喷射器结构	气液、液液相快速反应, 例如某些中和及酯化反应、气体的化学吸收
泵式反应器	1-10	类似水环泵式透平泵结构	液相、气液相等快速反应如烷基苯的磺化反应, 酸性硝基物中和

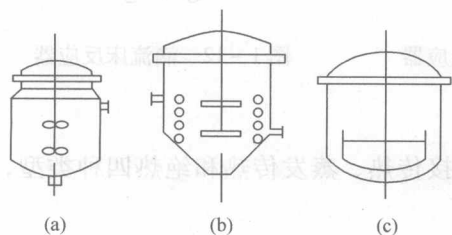


图 1-3 立式搅拌反应釜

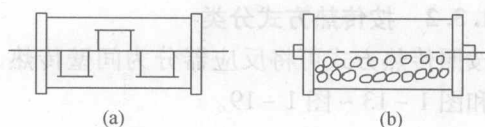


图 1-4 卧式反应釜

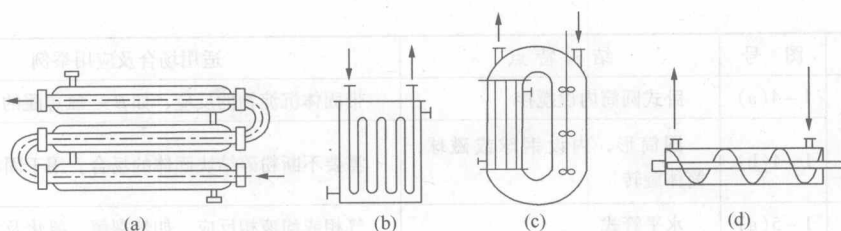


图 1-5 管式反应器

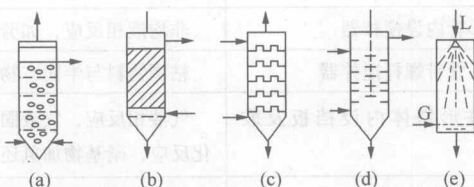


图 1-6 塔式反应器

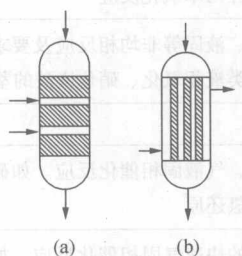


图 1-7 固定床反应器

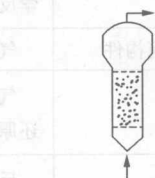


图 1-8 流化床反应器

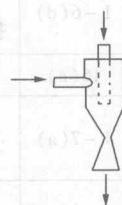


图 1-9 喷射反应器

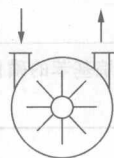


图 1-10 泵式反应器

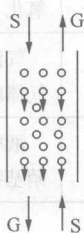


图 1-11 移动床反应器

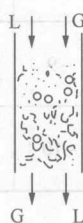


图 1-12 滴流床反应器

1.3.2 按传热方式分类

按照传热方式可将反应器分为间壁传热、直接传热、蒸发传热和绝热四种类型,见表 1-3 和图 1-13 ~ 图 1-19。

表 1-3 反应器的传热类型

类 型	特 点	适用场合	控温方法
间壁传热	反应物与热载体通过间壁传热	反应物不能直接与热载体接触	热载体的流量、温度及压力

续表

类 型	特 点	适用场合	控温方法
直接传热	使反应物直接与传热剂接触	允许反应物直接与传热剂接触	热载体的温度及用量
蒸发传热	靠挥发性物料蒸发传热	沸腾状态下的反应	物料沸点、气相压力等
绝 热	靠进料的显热及反应热维持温度	允许温度在一定范围内变化的场合	进料的温度、流量

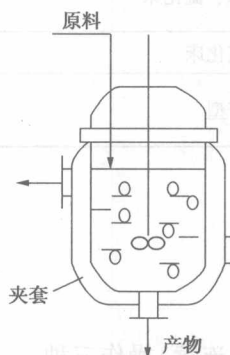


图 1-13 外部热交换型(夹套)操作

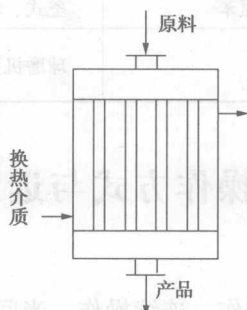


图 1-14 外部热交换型(蛇管)操作

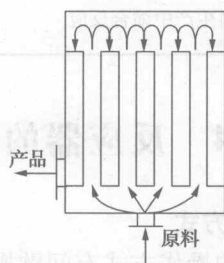


图 1-15 内部热交换型反应操作

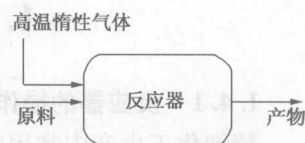


图 1-16 混合反应操作

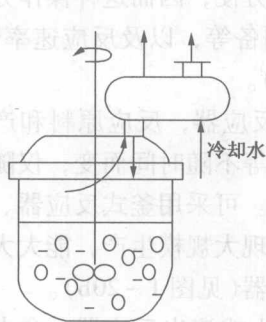


图 1-17 蒸发式反应操作

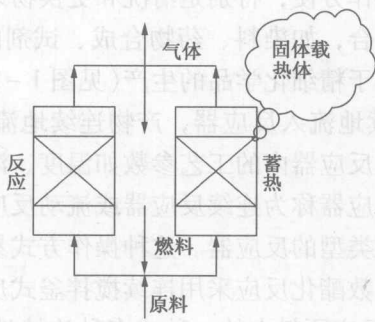


图 1-18 蓄热式反应操作

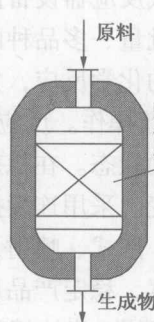


图 1-19 绝热型反应操作

1.3.3 按反应物相态分类

首先可将反应设备分为均相和非均相两大类。前者又可分为气相和均液相反应器两类，后者则可分为气液、液液、液固、气固、气液固和固相等类型。反应设备按物料相态分类，实质上是反映了反应动力学的特征。对均相反应，无相间界面，反应速度仅与温度、浓度有关。对非均相反应，过程的速度不仅与温度和浓度有关，还与相间传质速率有关。各种相态组合的反应举例及其适用的反应器型式见表 1-4。

表 1-4 按反应物相态分类适用的反应器型式

相 态	反 应 举 例	适用的反应器型式
均相	气相 乙酸裂解制乙烯酮	管式
	液相 邻硝基氯苯氨解、均相中和反应	釜式、管式、喷射器式
非均相	气液相 甲苯、二甲苯液相氧化, 甲基蒽醌氮化脂肪醇与环氧乙烷加成聚合, 洗涤剂烷基苯的 SO_3 磺化	釜式、管式、塔式
	液液相 苯、甲苯、氯苯的硝化	釜式、列管式
	液固相 蒽醌硝化、 β -氯蒽醌氮化	釜式、塔式
	气固相 奈、蒽等芳烃的气相催化氧化, 硝基物气相催化加氢还原, 苯酚、 β -奈酚的羧化	固定床、移动床、流化床
	气液固相 硝基物液相催化加氢还原, 苯氯化制氯苯	釜式、塔式、流化床
固相 半固相	某些还原染料生产中缩合反应	球磨机型、螺杆型

1.4 反应器的操作方式与选型

1.4.1 反应器的操作方式

精细化工生产中常用的操作方式有间歇操作、连续操作、半间歇(半连续)操作三种。

① 间歇操作。是指进行化学反应的物料一次投到反应器内, 然后在其中进行反应, 经一定时间到达反应终点后卸料, 然后清洗(干燥), 为下批操作做准备。其特点是反应器内的工艺参数如温度、压力、反应物的浓度等随时间而变化, 一般采用釜式反应器。间歇操作的搅拌釜式反应器设备简单、操作方便, 特别是清洗和更换物系很方便, 因而这种操作方式适用于小批量、多品种的生产场合, 如染料、药物合成、试剂的制备等, 以及反应速率慢、热效应小的化学反应, 尤其适用于精细化学品的生产(见图 1-20a)。

② 连续操作。反应原料连续地流入反应器, 产物连续地流出反应器, 反应原料和产物均处于流动状态。在稳态状态下反应器内的工艺参数如温度、浓度等不随时间而变, 仅随空间位置而变。采用连续操作反应器称为连续反应器或流动反应器。可采用釜式反应器、管式反应器、塔式、喷射及泵式等类型的反应器。这种操作方式易实现大规模生产, 能大大减轻劳动强度, 稳定产品质量。多数酯化反应采用连续搅拌釜式反应器(见图 1-20b)。

③ 半间歇(半连续)操作。反应原料中的一种或多种连续地流入或流出反应器, 余者则一次加入或移出, 一般采用釜式反应器实现, 主要用于复杂反应或热效应很大的反应(见图 1-20c)。

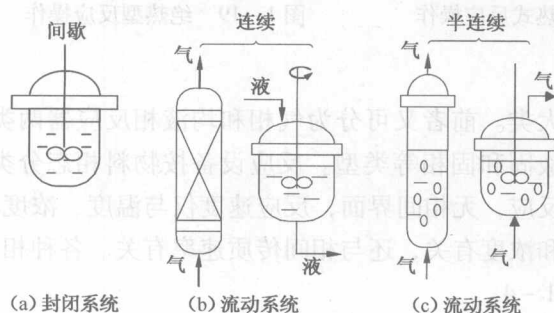


图 1-20 反应器的操作方式

1.4.2 反应器的选型

综上所述, 化学反应器种类繁多, 每一种类型都有自己的特点和适用范围。当开发一个化学反应使其实现工业规模生产或设计一个新的生产车间时, 如何合理地选择反应器类型和设计内部构件及传热方