

流体混沌混合及搅拌 过程强化方法

LIUTI HUNDUN HUNHE JI JIAOBAN GUOCHENG QIANGHUA FANGFA

◇ 刘作华 王运东 陶长元 著



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

流体混沌混合及搅拌 过程强化方法

◇ 刘作华 王运东 陶长元 著

重庆大学出版社

内容提要

全书系统地论述了流体混沌混合强化及搅拌反应器强化方法,重点介绍了化工过程强化中的复杂性科学问题。通过最大 Lyapunov 指数、多尺度熵、宏观不稳定频率等参数,描述流体混沌混合强化,有利于指导搅拌反应器的设计和优化操作。全书共 6 章,主要内容包括搅拌反应器流体混合强化的基本原理、混沌混合强化特性参数的获取、混沌强化方法(射流强化机械搅拌、刚柔组合搅拌桨设计、柔性轴设计、混沌电机等)。书中还结合工程实践,介绍了流体混合操作与设备改造的最新成果,以供读者更好地理解流体混沌混合强化技术。

本书可作为从事化工过程机械,特别是从事搅拌反应器设计、加工与制造的工程技术人员的参考书,也可作为高等学校化学工程与技术、过程装备等专业学生学习工程技术的辅助读物。

图书在版编目(CIP)数据

流体混沌混合及搅拌过程强化方法/刘作华,王运东,陶长元著. —重庆:重庆大学出版社,2016.6
ISBN 978-7-5624-9824-7

I. ①流… II. ①刘…②王… III. ①混合—化工过程②搅拌—化工过程 IV. ①TQ027

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 115355 号

流体混沌混合及搅拌过程强化方法

刘作华 王运东 陶长元 著

策划编辑:杨粮菊

责任编辑:李定群 版式设计:杨粮菊

责任校对:张红梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

万州日报印刷厂印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:9.25 字数:185 千

2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-9824-7 定价:46.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

《中国制造 2025》指出,在制造生产过程中需坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展。为了保护环境,一切工业生产,都必须实现清洁生产,节能减排和可持续发展。传统的化工过程工业是制造业的基础,是我国国民经济的支柱产业,而其能源消费量约占全国能源消费总量的 16.4%。20 世纪 90 年代中期,国际上出现的以节能、降耗、环保、集约化为目标的化工过程强化技术,是有望解决化学工业“三高”问题的最有效技术手段之一,被欧美等发达国家列为当前化学工程优先发展的三大领域之一。

化工过程强化技术是指在生产和加工过程中,应用新技术和新设备,减小设备体积,或增加设备生产能力的一种高效、节能、清洁的新技术。该技术强调在生产能力不变的情况下,在生产和加工过程中运用新技术和设备,极大地减小设备体积或者提高设备的生产能力,显著地提升能量效率,大量地减少废物排放(在 1995 年召开的第一次化工过程强化国际会议上提出的)。

众所周知,化学工业的绿色、可持续发展需要创新工艺和装备。搅拌反应器是一种典型的过程强化设备,广泛应用于化工、石化、轻工、医药、冶金、水处理等行业中,例如在合成橡胶、合成纤维和合成塑料这三大合成材料的生产中,搅拌反应器约占反应器总数的 85% ~ 90%。因此,搅拌反应器的研究对其大型化、标准化、高效节能化、机电一体化、智能化和特殊化方向发展具有现实价值和理论价值。

《流体混沌混合及搅拌过程强化方法》一书,在国内外首次运用非线性理论解释流体混合过程中的复杂性科学问题,丰富了流体混合的理论基础,创新应用刚柔组合(刚柔组合桨、柔性轴)多体运动强化流体混沌混合,拓宽了搅拌设备的设计思路。本书主要介绍了现阶段化工技术强化概论、流体混合过程中非线性科学问题、强化流体混合的射流技术、刚柔组合(刚柔组合桨、柔性轴)多体运动在流体混合上的应用,以及混沌电机智能控制搅拌反应器方面的研究。参与本书编写、资料整理的还有谷德银博士、何海先、陈娜、许传林、许恢琴等,在此表示感谢。

本书由国家自然科学基金资助项目“刚柔组合搅拌器强化流体混沌混合及放大规律研究(21576033)”、重庆市科技计划项目“化工搅拌反应器安全控制与能效诊断技术研究(cstc2015shmszx0765)”资助,在此一并表示感谢。

限于作者的学识水平,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

著 者
2016 年 1 月

目 录

第 1 章 化工过程强化技术	1
1.1 化工过程强化概述	1
1.2 化工过程强化技术发展现状	2
1.3 化工过程强化技术发展趋势	13
第 2 章 流体混合过程中的复杂性	14
2.1 化工复杂性科学发展	14
2.2 流体混沌混合	24
2.3 流体混沌混合与过程强化	26
第 3 章 射流强化流体混沌混合	37
3.1 偏心射流强化混沌混合描述	37
3.2 偏心射流流场的宏观不稳定性现象	40
3.3 偏心射流流场的分形特性	45
3.4 偏心射流流场的最大 Lyapunov 指数	51
3.5 偏心射流流场的数值模拟	54
3.6 结论与展望	59
第 4 章 刚柔组合搅拌桨强化流体混沌混合	60
4.1 刚柔组合搅拌桨与仿生学简介	60
4.2 刚柔组合搅拌桨强化单相流体混沌混合	62
4.3 刚柔组合搅拌桨强化高黏度固-液混沌混合	72
4.4 刚柔组合搅拌桨强化液-液混沌混合	84
4.5 小结	88

第5章 柔性轴强化流体混沌混合	89
5.1 柔性轴及柔性搅拌轴反应器简介	89
5.2 流体混合实验	91
5.3 结果与讨论	98
5.4 小结	107
第6章 混沌电机耦合刚柔组合桨强化流体混沌混合	108
6.1 混沌电机简介	108
6.2 混沌电机耦合刚柔组合桨的搅拌反应器	110
6.3 流体混合实验	111
6.4 小结	119
附录 课题组主要成果目录	120
参考文献	123

第 1 章

化工过程强化技术

1.1 化工过程强化概述

化学工业是我国国民经济的支柱产业,为我国社会经济发展和国防建设提供了重要基础材料和能源,创造了高达 20% 的 GDP,约占工业总产值的 30%。但同时,它也是我国工业污染的主要来源和能源消耗大户之一,其“三废”排放量居全国“三废”排放总量之首位,约占 20%,能源消费量约占全国能源消费总量的 16.4%。与发达国家相比,我国的化学工业存在“高能耗、高污染和高物耗”的现实问题,严重制约着我国化学工业的可持续发展。

20 世纪 90 年代中期,国际上出现的以节能、降耗、环保、集约化为目标的化工过程强化技术,是可望解决化学工业“高能耗、高污染和高物耗”问题的最有效技术手段之一,被欧美发达国家列为当前化学工程优先发展的三大领域之一。

化工过程强化技术是指在生产和加工过程中,应用新技术和新设备,减小设备体积,或增加设备生产能力的一种高效、节能、清洁的新技术。该技术强调在生产能力不变的情况下,在生产和加工过程中运用新技术和设备,极大地减小设备体积或者提高设备的生产能力,显著提升能量效率,大量地减少废物排放(在 1995 年召开的第一次化工过程强化国际会议上提出的)。化工过程强化技术是解决现代化学工业发展所产生的“发展—污染”矛盾的有效手段,是实现化学工业生产过程节能减排的技术手段,也是 21 世纪化工技术进步的重要方向之一。

该技术包括过程强化设备(硬技术)和过程强化方法(软技术),其中前者是指将设备进行小型化和微型化处理,在减小设备体积的同时提高设备的生产能力,而后者则是指将化工的过程进行集成化处理,是系统优化的技术之一。

化工过程强化技术优势主要体现在以下4个方面:

- ①提高设备生产能力,大幅降低单位产品成本。
- ②设备体积微型化,节省设备及土地资源。
- ③充分利用能量,提高生产效率,降低能耗。
- ④反应迅速、均匀,副反应少,减少副产物的生成,减少污染环境的废物排放。与传统技术相比,它在设备体积/产量比、能量消耗、废物排放和成本等方面都具有明显的优势。

1.2 化工过程强化技术发展现状

1.2.1 过程强化设备

化工过程强化设备主要包括搅拌反应器、静态混合反应器、超重力旋转填料床、撞击流反应器及微反应器等,虽方法各异,但目的都围绕混合、反应、分离及传递的理想化进行。

(1) 搅拌反应器

搅拌反应器是一种典型的过程强化设备,广泛应用于化工、石化、轻工、医药、冶金及水处理等行业中。例如,在合成橡胶、合成纤维和合成塑料这3大合成材料的生产中,搅拌反应器占反应器总数的85%~90%。其工作原理是通过搅拌器的旋转向釜内流体输入机械能,使流体获得适宜的流场,强化过程的传热和传质,提高生产效率和能力。

以液体为主体的搅拌操作,通常将被搅物料分为液-液、气-液、固-液、气-液-固4种情况。搅拌既可作为一种独立的流体力学范畴的单元操作,以促进混合为主要目的,如进行液-液混合混合、固-液悬浮、气-液分散、液-液分散和液-液乳化等,又能作为完成其他单元操作的必要手段,以促进传质、传热、化学反应为主要目的,如在搅拌反应器内进行流体的加热与冷却、萃取、吸收、溶解、结晶及聚合等操作。概括起来,搅拌反应器的操作目的主要表现在以下4个方面:

- ①使不互溶液体混合均匀,制备均匀的混合液、乳化液,强化传质过程。

②使气体在液体中充分分散,强化传质或化学反应。

③制备均匀的悬浮液,促使固体加速溶解、浸取或发生液-固化学反应。

④强化传热,防止局部过热或过冷。

近年来,随着搅拌技术的迅速发展,搅拌设备正向着大型化、标准化、高效节能化、机电一体化、智能化及特殊化方向发展。搅拌反应器的广泛应用和飞速发展主要是因为其存在众多优势,如搅拌反应器可应用于均相反应,同时可应用于多相反应,既能进行间歇操作,又能连续操作,并且结构简单,加工方便、成本较低以及操作可控范围宽等。

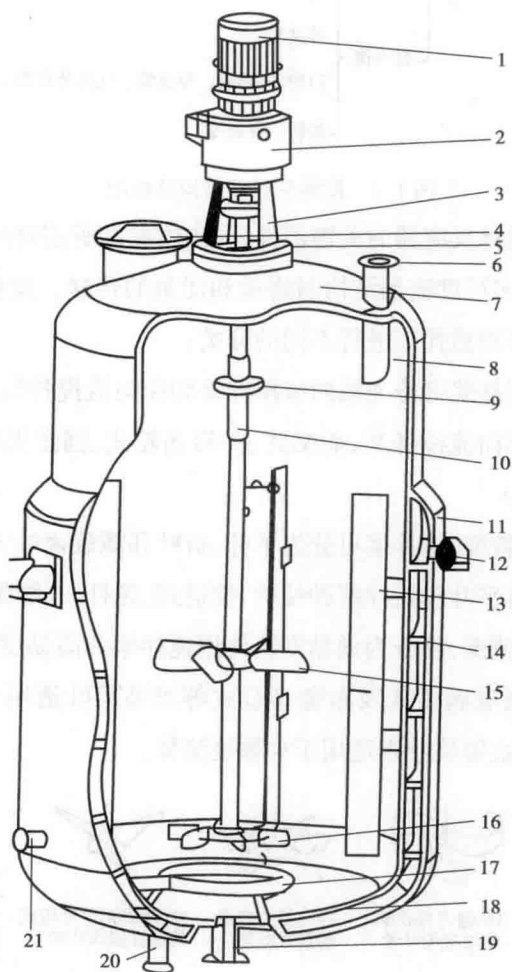


图 1.1 通气式搅拌反应器的典型结构

- 1—电动机;2—减速机;3—机架;4—人孔;5—密封装置;6—进料口;7—上封头;8—筒体;
9—联轴器;10—搅拌轴;11—夹套;12—载热介质出口;13—挡板;14—螺旋导流板;15—轴向流搅拌桨;
16—径向流搅拌桨;17—气体分布器;18—下封口;19—出料口;20—载热介质进口;21—气体出口

搅拌反应器主要是由搅拌槽、轴封和搅拌装置 3 大部分组成。其具体的构成形式如图 1.1 和图 1.2 所示。



图 1.2 搅拌反应器结构分析图

众所周知,搅拌桨是搅拌反应器的关键部件,向流体提供所需要的能量,促使流场多尺度结构的形成、运移、演化及多尺度流场结构间物质和能量的传递。搅拌桨结构多样,如图 1.3 所示。按照不同的方式,可对搅拌桨进行不同的分类:

①按流体流动形态,搅拌桨可分为轴向流搅拌桨和径向流搅拌桨两大类。推进式、框式、锚式、螺带式搅拌桨都是轴向流搅拌桨,而桨式、开启涡轮式、圆盘涡轮式、布鲁马金式、锯齿圆盘式都是径向流搅拌桨。

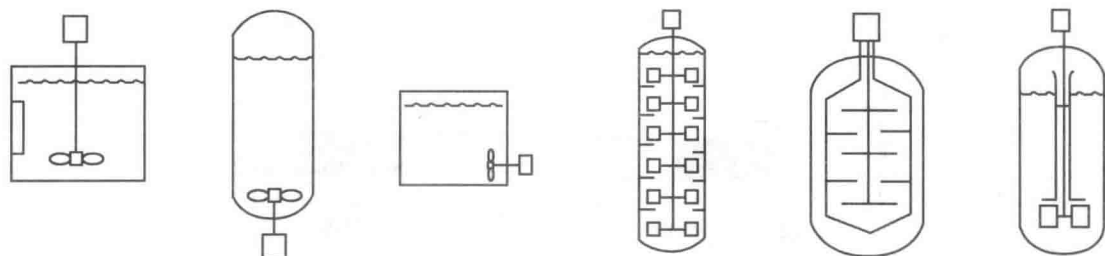
②按照搅拌桨的结构特征,搅拌桨可分为平叶、折叶和螺旋面叶 3 类搅拌桨。桨式、涡轮式、框式及锚式的桨叶都有平叶和折叶两种结构,推进式、螺杆式、螺带式的桨叶为螺旋面叶。

③按照搅拌桨的使用范围,可分为低黏度流体用搅拌桨和高黏度流体用搅拌桨两类。推进式、桨式、开启涡轮式、圆盘涡轮式及布鲁马金式等类型桨叶适用于低黏度流体的搅拌混合,而锚式、框式和螺旋桨式等桨叶则适用于高黏度流体。



图 1.3 不同形式的搅拌桨

搅拌桨的安装形式应根据生产的需要,做到易于拆卸、可靠、耐用和便于维修,如图 1.4 所示。



(a) 立式搅拌器 (b) 罐底安装式搅拌器 (c) 侧装式搅拌器 (d) 多级桨叶式搅拌器 (e) 正反双向搅拌器 (f) 分散器

图 1.4 不同形式的搅拌桨安装方法

(2) 静态混合反应器

静态混合器(SMR)是在管路中放置一系列结构相似、按一定规则排列的静止元件,使用这些元件并借助流体的自身动能,实现流体的不断分割、变形、位移和汇合,达到流体的充分混合,来完成各种工艺操作。静态混合器优点是:分散效果好、结构紧凑、占地面积小、操作成本低、维修简单等。由于静态混合器可大大地提高单位能耗下的气-液接触面积,成倍地提高传质速率,因此静态混合器已被广泛应用于气-液混合、分离和反应工程方面。静态混合器的混合机理大致可分为以下 3 类:

①静态单元对流经的介质不断起着切割作用,使其分散,随后又在两个单元间汇合得到混合。

②静态单元能使流体自身产生旋转,通过旋转方向的改变使流体混合。

③静态单元中流道的位置或截面积发生变化,能使流体产生“自身搅拌”作用。

静态混合器的发展始于 20 世纪 70 年代初期,发达国家发展比较快,80 年代初我国即出现了类似国外 Kenics, Sulzer, Ross, Hi 等型的产品。国内外已进行工业生产或正在使用的静态混合器主要型号有 SV 型、SX 型、SL 型、SH 型、SK 型和 Ross-ISC 型以及单管多旋静态混合器,如图 1.5 所示。目前,国内主要研究和广泛应用的是 SK 静态混合器和 SV 型。其中,SK 静态混合器已经被认为“标准静态混合器”。随着化学工业的发展,对物料的混合技术提出了新的要求。静态混合器必将在实际应用中取得高速进展和令人瞩目的实际效果。

(3) 超重力旋转填料床

传统的气液传质设备(如填料塔、板式塔等)是依靠重力作用而实现气液接触进行传质的,由于重力场较弱,液膜流动缓慢,传质膜系数 K_L 小,体积传质系数 $K_L a$ 低,故这类设备体

积庞大,空间利用率和设备生产强度低。19 世纪 70 年代末,英国 ICI 公司以 Ramshaw 教授为首的课题组经过数年的研制,设计出了新型的传质设备——超重力装置旋转填料床,申请了被称为“Higee”的多项专利,从此揭开了国内外学者研究超重力技术的序幕。

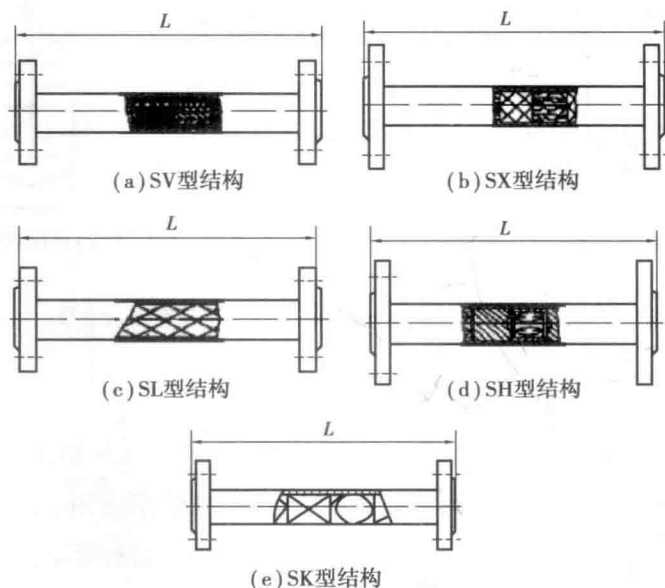


图 1.5 几种典型静态混合器的结构示意图

旋转填料床(RPB)是在填料床中环以数百至千倍重力作用下,液相在填料表面形成液膜,液膜快速向下环流动,液膜厚度急剧减小,载体湿润面积增加,相界面积增加导致了由液相控制的传质、传热和反应过程得到极大的强化。传质单元高度降低了 1~2 数量级,并且显示出许多传统设备所不具有的优点。

超重力旋转床的核心部分是转子,其主要作用是固定和带动填料旋转,实现良好的气液接触与微观混合。从公开报道的文献看,转子结构主要有填料转子、螺旋式转子和折流式转子,其中填料式转子最多。其结构如图 1.6 所示。超重力旋转床按气液接触方式分为逆流、错流、撞击流及折流等。根据填料的摆放位置可分为立式和卧式。基于超重力旋转床的结构,其处理物系是多种多样的,根据不同需要,可以是气液或液液两相,也可以是气液固三相,超重力是以气液、液液两相或气液固三相在模拟的超重力场实现“三传一反”的强化过程。但是,RPB 存在一些固有的缺陷,RPB 反应器在进行快速混合方面不及 IS 反应器,但在均匀混合方面表现出优越的特性。

撞击流旋转床(IS-RPB)(见图 1.7)是在撞击流反应器和旋转填料床的基础上发展起来的一种新型反应设备。在 IS-RPB 内,液体先在喷嘴处实现撞击,撞击后形成一扇形的雾面,在其扇形边缘处液体已实现混合且具有动能,其扇形边缘处的液体进入旋转填料床的内腔,

在离心力的作用下填料层内进一步混合与传质,使得混合与传质过程得到极大的强化。IS-RPB反应器综合了撞击流反应器和旋转填料床反应器的特点,是一种新型的强化“三传一反”过程的设备,具有传质强度高、通过强度高、停留时间短等优点。

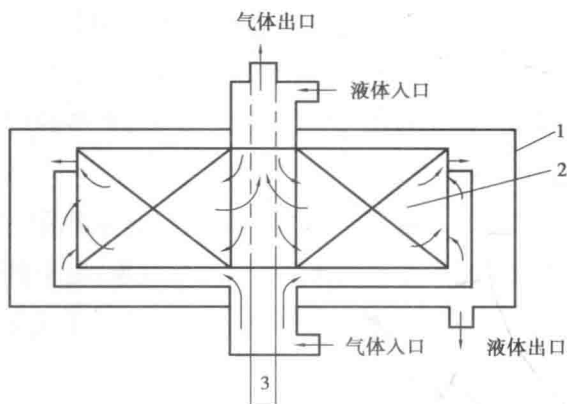


图 1.6 旋转填料床装置示意图

1—外壳;2—转子;3—转轴

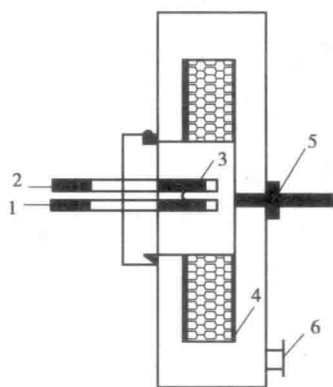


图 1.7 撞击流-旋转填料床的结构示意图

1,2—进料管;3—撞击器;4—转子;5—转轴及密封;6—出料口

(4) 撞击流反应器

撞击流(IS)的概念首先由 Elperin 提出,此后 Elperin 和 Tamir 进行了一系列基础研究和应用研究,其特点是可显著强化系统相间的热质传递过程。近年来发现其具有优越的微观混合和强烈的压力波动性质,撞击流领域的研究明显转向以液相为连续相的多相体系中。在许多由传递过程控制的化工过程,如颗粒物料干燥、混合、吸收和解吸、萃取、超细材料等过程有广阔的应用前景。

撞击流的研究与开发大致可分为 3 个阶段:第一阶段从概念提出到 20 世纪 70 年代中

期,是撞击流研究的初创时期,工作基本上集中在苏联。研究的对象集中在 GIS,尤其是有关运动与强化传递的基本规律方面。如 K-T 粉煤气化炉、Trost 射流磨机和静态射流混合器等。第二阶段从 20 世纪 70 年代中期 Elperin 去世后到 90 年代前期,主要工作集中在以色列。研究的对象开始转向液体。20 世纪 90 年代发现 LIS 具有促进微观混合的性质,是撞击流领域研究最重要的进展。虽然有关 LIS 的研究比例有所增加,但其深度和广度远不及 GIS。最近 10 多年关于撞击流的研究处于第三阶段,从事研究的地域已扩展到中国、美国、加拿大、德国等,研究的重点则明显转向以液体为连续相。

撞击流反应器是一种新型反应器,而反应物料的混合对该类反应器的性能有重要影响。其基本构想是使两股或多股均相或非均相流体相向流动碰撞,由于惯性作用,一侧流体粒子穿过撞击面渗入相向流体,并来回作减幅振荡运动,产生一个高度湍流的撞击区,为强化传递过程提供了极好的条件,如图 1.8 所示。

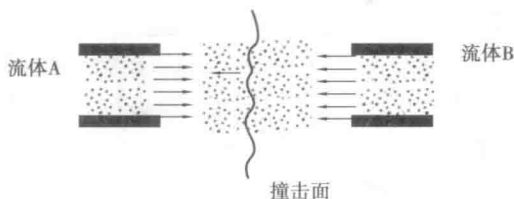


图 1.8 撞击流原理

撞击流反应器结构分为多种形式,有同轴撞击流、旋转撞击流、弧形撞击流、平面撞击流、管形和环形撞击流。如图 1.9 所示为几种典型撞击流的流动方式。

(5) 微反应器

20 世纪 90 年代以来,自然科学与工程技术发展的一个重要趋势是微型化特别是纳米材料与微电子机械系统的发展,引起研究者对小尺度或快速过程的极大兴趣。微型化设备除电子器件和微机械器件外,微型化工器件也逐渐成为其重要成员。微反应器是指内部结构定义在微小尺寸范围内,包括结构奇特的多种反应器和其他微加工器件,如微混合器、微型反应器、微型换热器、微化学分析、微型萃取器、微型泵及微型阀门等。微型化工设备具有结构简单、无放大效应、操作条件易于控制和安全可靠等优点,得到众多研究者包括化学工程及其相关领域人士的极大关注。微化工器件的一些研究结果表明,在微米尺度下反应的转化率、选择性均有明显提高,传热系数和传质性能与传统设备相比显著强化,而且可保证流体流动的均匀性和理想性。

近 10 年是微化工技术的快速发展期,国内外研究者们开发了多种新型微化工设备。通过对其内部微结构构型、特征尺度及界面效应的研究,为从新视角认识微化工过程共性规律

和实现微尺度下“三传一反”耦合过程的理性解耦和建立微化学工程理论体系提供了借鉴与指导。在几种流体作用力的竞争下,微化工设备内存在挤出、滴出、射流及层流4种分散流型,可形成直径在 $5 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 且分散高度均匀的液滴或气泡,比传统化工设备中的分散尺度小 $1 \sim 2$ 个量级。由于多相体系内存在环流与界面扰动等现象,可加快物流、热流的迁移速度,强化微设备内的热质传递效果,结果表明气-液、液-液、气-液-液及液-液-固体系的体积传质系数均比传统设备高 $1 \sim 2$ 个量级以上,单台设备内传质 Murphee 效率可达 90% 以上,而体积传热系数也可提高 $1 \sim 2$ 个量级。

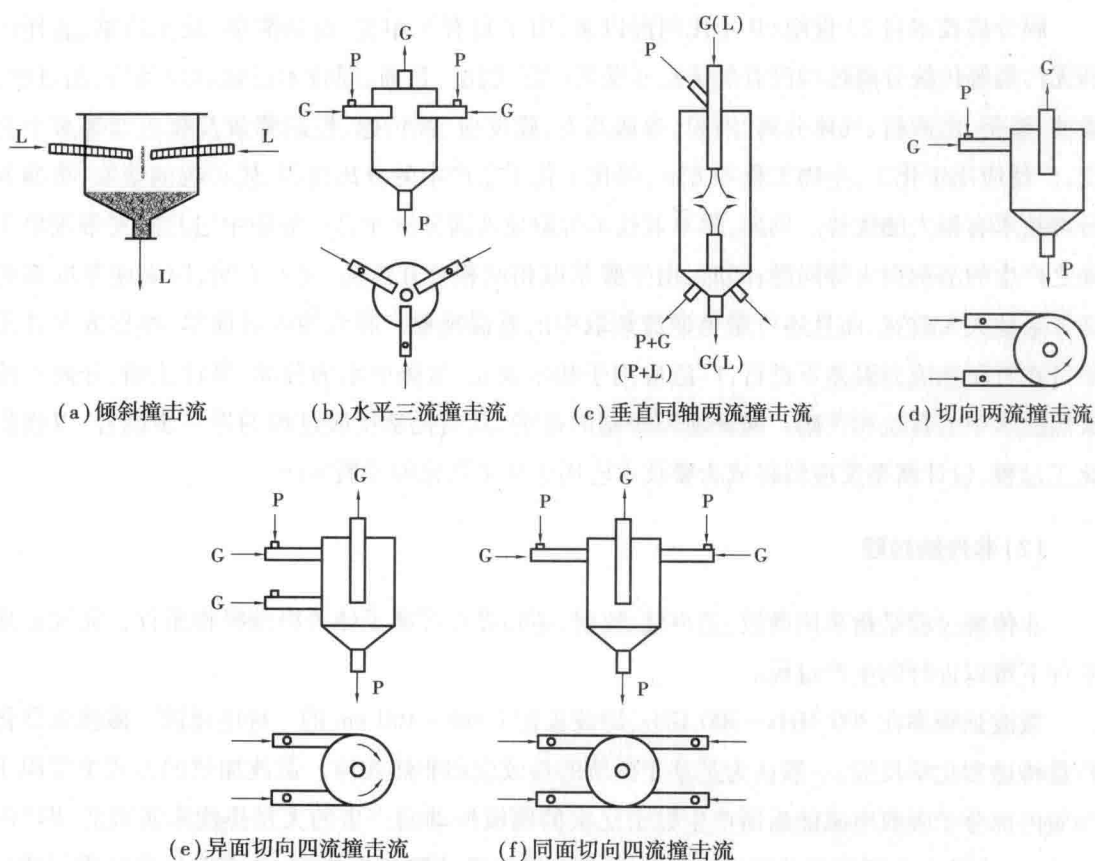


图 1.9 几种典型的撞击流流动方式

G—气体;P—颗粒;L—液体或悬浮体

微反应器目前已被公认为化学工程学科发展的新的重要方向之一,它涉及化学、化工、材料、物理、模拟计算、生物、微电子以及微机械加工等诸多领域,学科交叉综合性强,充分体现了现代科学发展的特点。有理由相信,微反应器将会为化学工程及其相关学科的发展产生极大的推动力。

1.2.2 过程强化方法

过程强化方法则包括膜技术、非传统过程(微波、超声波、辐射、超临界及等离子体等)、脉动燃烧干燥技术、连续床色谱技术及信息与控制技术。

(1) 膜技术

膜分离技术自 20 世纪 60 年代问世以来,由于具有无相变、设备简单、操作简单、能耗低和无污染等传统分离过程没有的优点而受到广泛关注。目前,膜技术已包括反渗透、超过滤、微滤、渗析、电渗析、气体分离、液膜、渗透蒸发、膜反应、膜传感、控制释放及膜蒸馏等多个分支,广泛应用于化工、生物工程等方面,强化了化工生产中的分离过程,较传统的萃取、蒸馏等分离技术有很大的优势。例如,膜萃取技术可避免液滴分散在另一液相中引起的夹带现象和随之产生的溶剂损失等问题;同时,由于膜萃取相两相分开流动,互不影响,因而使萃取剂的选择余地大大放宽,而且还可避免逆流萃取中的返混现象。膜蒸馏设备简单、操作方便并几乎可在常压和适当温差下进行,广泛应用于盐水淡化、酸碱中水的分离、果汁浓缩、分离提纯天然盐水中的食盐和芒硝。随着新膜研制的进展,其与化学反应过程的进一步耦合,以强化化工过程,设计新型反应器将成为膜技术应用于化工强化的发展方向。

(2) 非传统过程

非传统过程是指采用微波、超声波、辐射、超临界及等离子体等极端操作条件去完成常规条件下难以进行的生产过程。

微波是频率在 300 MHz ~ 300 GHz,即波长在 1 mm ~ 100 cm 的一种电磁波。微波能强化质量传递和化学反应,一般认为是基于微波的热效应和非热效应。微波加热的方式主要源于物质内部分子吸收电磁能后所产生数十亿次的偶极振动而产生的大量热能来实现的,即“内加热”。这种由分子间振动所产生的“内加热”能将微波转变为热能,可直接激发物质间的反应。与常规的加热相比,微波具有加热速度快、均匀、无温度梯度存在、能瞬时达到高温、热量损失小等优势。此外,不同的物质具有不同的电介质性质,从而有不同的吸收微波能力,这一特征又使微波辐射具有选择性加热特点。此外,微波还存在非热效应。当把物质置于微波场,其电场能使分子极化,其磁场力又能使这些带电粒子迁移和旋转,加剧了分子间的扩散运动,提高了分子的平均能量,降低了反应的活化能,可大大提高化学反应速度。

超声波是一种频率高于 20 kHz 的弹性波,由于其频率极高,因而具有一般声波所不具备的特殊效应,如机械效应、空化效应、热效应及微扰效应等,广泛应用于化工、冶金、材料、食品