

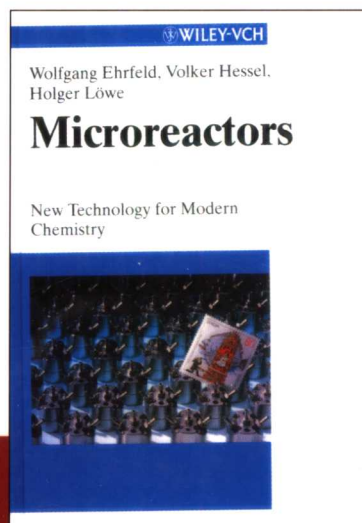


国外优秀科技著作出版专项基金资助

# 微反应器

## ——现代化学中的新技术

[德] W. 埃尔费尔德 V. 黑塞尔 H. 勒韦 著  
骆广生 王玉军 吕阳成 译



Chemical Industry Press



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心



27387

国外优秀科技著作出版专项基金资助

591  
24  
1

# 微反应器

## ——现代化学中的新技术

[德] W. 埃尔费尔德 V. 黑塞尔 H. 勒韦 著  
骆广生 王玉军 吕阳成 译



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

微反应器——现代化学中的新技术/[德] 埃尔费尔德 (Ehrfeld, W.), [德] 黑塞尔 (Hessel, V.), [德] 勒韦 (Löwe, H.) 著; 骆广生, 王玉军, 吕阳成译. —北京: 化学工业出版社, 2004. 8

书名原文: Microreactors: New Technology for Modern Chemistry  
ISBN 7-5025-6051-3

I. 微… II. ①埃…②黑…③勒…④骆…⑤王…⑥吕… III. 反应器-基本知识 IV. TQ052. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 086006 号

Microreactors: New Technology for Modern Chemistry/by W. Ehrfeld,  
V. Hessel, H. Löwe

ISBN 3-527-29590-9

Copyright©2001 by Wiley-VCH. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Wiley-VCH.

本书中文简体字版由 Wiley-VCH 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。  
未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-1412

---

微 反 应 器

——现代化学中的新技术

[德] W. 埃尔费尔德 V. 黑塞尔 H. 勒韦 著

骆广生 王玉军 吕阳成 译

责任编辑: 辛 田

文字编辑: 贾 婷

责任校对: 陈 静 吴 静

封面设计: 于 兵

\*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

工业装备与信息工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$  字数 306 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6051-3/TQ·2065

定 价: 39.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 国外优秀科技著作出版专项基金

FUND FOR FOREIGN BOOKS OF  
EXCELLENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY  
(FFBEST)

## 管理委员会名单

名誉主任：成思危 全国人大常委会副委员长  
主任委员：谭竹洲 中国石油和化学工业协会会长  
副主任委员：李学勇 王心芳 阎三忠 曹湘洪  
潘德润 朱静华 王印海 龚七一  
俸培宗 魏 然

## 委 员 (按姓氏笔画顺序排列)：

王子镐	王光建	王行愚	申长雨
冯 霄	冯孝庭	朱家骅	刘振武
杨晋庆	李 彬	李伯耿	李静海
吴剑华	辛华基	汪世宏	欧阳平凯
赵学明	洪定一	徐静安	黄少烈
曹 光	盛连喜	葛 雄	焦 奎
曾宝强	戴猷元		

秘 书 长：魏 然

副 秘 书 长：徐 宇

山西化工研究院协助出版

## 前 言

当微反应技术刚刚发展时，有些人对其持有不理解甚至怀疑的态度。但经过四年多可行性基础研究，并随着技术方法的不断进步，这项新兴技术成功地得到了人们的认可。今天微反应技术已不再处于哺乳期，人们发现小型微制造反应器不仅具有良好的传质和传热性能，而且可以保证流体流动的均匀性和理想性。目前已有一些微设备作为商品问世，吸引了越来越多研究者的关注。如交叉式微混合器就是其中的一个典型例子，它的问世极大地促进了有关微混合基础知识的发展。

目前，庞大的微反应技术研究队伍主要由化学、物理、化学工程、材料和机械等诸多学科的专家组成。为便于成果的交流 and 学术思想的讨论，“微反应技术国际会议”成为十分活跃的学术会议，使人感觉到该技术似乎是在一夜之间爆发出来的，且具有改变目前化学和化学工程方法论的势头，甚至蕴含着更大的革新。

在微反应技术的发展过程中，工业界的贡献起到了十分重要的作用，致力于技术革新的公司，如杜邦和 BASF 等从一开始就积极推动和促进微反应技术的发展，Merck 公司已经利用微反应技术实现了一个新过程的工业化，其他还有 Schering、Degussa-Hüls 以及 Bayer 等公司，在此不一一列举。不仅德国的公司积极推动微反应技术的发展，其他如法国、荷兰、英国以及美国的国际化大公司也在积极地促进该技术的发展。

近年来微反应器技术和科学的发展十分迅速，有关微制造、模型化、设计概念以及检测等相关知识在许多媒体上得到传播。微反应器研究成果的发表量不断增加，而目前又缺乏一个公共的平台，如还没有有关微反应技术的杂志，因此，我们感到迫切需要综述和分析本领域近年的发展状况。本书的目的就在于综述微反应技术的发展状况，当然也希望借此机会展示微反应技术完美和激动人心的一面。

本书的读者可以是工业界和高校的专家学者，也可以是微反应技术领域的初学者，它不仅是为了吸引化学家和化学工程师的关注，也不仅仅是为了微技术本身。微反应技术实际上具有很强的学科交叉的特点，因此，本书在于说明多学科相互作用带来的成功，以及强调这

种学科交叉的益处。

本书的内容主要分为两大类，即在每章的开始分别阐述不同微设备的总体情况，然后在随后的小节中对于这些设备进行详细的讨论。书中大部分内容是将大量的单个信息集中在一起，当然微反应设备概念以及它们的应用也有所涉及。但由于目前一些微反应器的研究还处于初始阶段，因此对它们进行系统的分析还受到很大的限制，这应该是本书下一版所应该追求的。

一本书作为艰苦工作和智慧的结晶，不可能仅靠某个人或小团体就可以完成，它应该是许多人共同合作的结果。在这里，我们要感谢微反应技术和化学系的所有成员，特别应该感谢的是 L. Agueda、J. Schiewe、Th. Richter 和 Ch. Hofmann 等人。此外，还希望借此机会，感谢所有的资助者和支持者，特别是来自化学工业界的 DECHEMA 和 DARPA 组织。同样要感谢 Wiley-VCH 出版公司，正是由于它们很早就认识到微反应技术的重要性和提供出版的机会，才有本书面世的机会。最后，要感谢所有活跃在微反应技术领域的同行，他们给予了很多的帮助。

第四届国际微反应技术会议即将召开，相信该技术会以更快的速度发展。微反应器的标准化、系统集成化以及商业化将成为重要的课题，基于微反应器的生产在两年前作为一个课题已悄悄展开，并不断引起人们的重视。所有这些课题一定会促进微反应技术的不断发展。

我们为可以亲身体会神奇的微反应技术的发展而感到由衷的高兴。

**W. Ehrfeld, V. Hessel, H. Löwe**

**德国 Maniz, 2000 年 3 月**

## 译者序

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向微型化迈进, 特别是纳米材料以及微电子机械系统(MEMS)的发展, 引起了研究者对小尺度和/或快速过程的极大兴趣。微型化设备除微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, 如微混合器(micro-mixer)、微反应器(micro-reactor)、微化学分析 $\mu$ TAS(micro-total-analysis-systems)、微型换热器(micro-heat-exchanger)、微型萃取器(micro-extractor)、微型泵(micro-pump)和微型阀门(micro-valve)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内在安全等优点, 引起了众多研究者包括化学工程及其相关领域人士的极大关注。世界著名高等学府以及跨国化工公司如MIT、杜邦、Merck和BASF等纷纷开展了这方面的研究工作。微型化工器件的一些研究结果表明, 在微尺度条件下反应的转化率、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也得到很大强化。微化工设备与过程被公认为化学工程学科发展的新的重要方向之一, 它涉及物理、化学、化工、生物、材料、微电子以及微机械加工等诸多领域, 学科交叉综合性强, 充分体现了现代学科发展的特点, 有理由相信微型化工设备与过程将会为化学工程及其相关学科的发展产生巨大的动力。

本书内容丰富翔实, 首先介绍了微型反应器的现代化制造技术, 接着描述了微型混合器中的流动、混合特性, 微型换热器中的流动、传热特性以及微型萃取器的特性, 又详细介绍了微型反应器中液-液、气-气、气-液等多相体系的传递、反应特性。在此基础上, 介绍了微型系统用于甲烷部分氧化制合成气, 以及快速评价多种催化剂的催化活性, 证明了微型反应器具有传统装置不可比拟的优越性。最后论述了微型化工厂的可行性。书中内容既有基础理论分析, 又联系化工中的实际体系, 收集了大量微反应器的研究成果, 并对其进行了评述, 实现了理论和实践的有机结合, 同时反映了微型反应器的最新进展, 具有前瞻性。书中插图精美、直观, 可读性强。

微观世界的规律和现象不断激发人们的探索欲望, 微型化工设备与过程的迅速发展也为化工学科的发展提供了一个新方向, 本书大量

的第一手资料和相关结果的评述，相信可以为广大读者提供本领域发展的全貌，一方面使读者感觉到微型化工设备与过程的神奇；另一方面可以使读者产生在该领域一展身手的愿望。因此，本书既可以作为高校相关学科高年级本科生和研究生选修课的教材和课外读物，也可以作为相关领域和对微型化工设备和过程有兴趣的研究者的参考书。

本书由清华大学化工系骆广生、王玉军和吕阳成等共同翻译，最后由骆广生进行全书的统稿。由于译者水平有限，加之微型化工设备与过程作为一个新兴的学科方向，涉及到众多的学科，本书的内容又相当广泛，从基本理论到微设备制造，再到微反应器在不同领域的应用等，因此在翻译中可能会有不当之处，恳请读者批评指正。

**译 者**

**2004 年 7 月**



# 目 录

<b>第 1 章 微反应技术的发展现状</b> .....	1
1.1 定义 .....	1
1.1.1 以微反应器为核心的微系统 .....	1
1.1.2 微反应器的结构层次 .....	1
1.1.3 按功能分类的微反应器 .....	3
1.1.4 分析和反应系统的区别 .....	4
1.2 微反应器的主要优点 .....	4
1.2.1 小型分析系统的主要优点 .....	4
1.2.2 纳尺度反应器的主要优点 .....	4
1.2.3 物理尺寸的减小为微反应器带来的优势 .....	5
1.2.4 单元数的增加为微反应器带来的优势 .....	6
1.3 微反应器在应用中的潜在优势 .....	8
参考文献 .....	10
<b>第 2 章 微反应器的现代微制造技术</b> .....	14
2.1 可用于制造微反应器的微加工技术 .....	14
2.2 技术的适用性评价 .....	14
2.3 硅材料的各向异性湿法蚀刻 .....	16
2.4 硅的干法蚀刻 .....	17
2.5 LIGA 过程 .....	18
2.6 注模技术 .....	19
2.7 玻璃湿法化学蚀刻 .....	20
2.8 先进机械加工技术 .....	20
2.8.1 钻石工具的表面切割 .....	21
2.8.2 碾磨、翻转及钻孔 .....	21
2.8.3 冲压 .....	21
2.8.4 压花 .....	22
2.9 金属薄片的各向同性湿法化学蚀刻技术 .....	22
2.10 导电材料的电子放电机械加工 .....	23
2.10.1 钢丝钳腐蚀及开模 .....	24
2.10.2 $\mu$ -EDM 钻孔 .....	25

2.11	激光微型机械加工	25
2.12	连接技术	26
2.12.1	金属薄片的微型叠片技术	26
2.13	功能涂层	28
2.13.1	抗腐蚀的功能涂层	29
2.13.2	防止污垢形成的功能涂层	29
	参考文献	30
<b>第3章</b>	<b>微混合器</b>	<b>36</b>
3.1	混合规则和宏观混合设备的分类	36
3.2	混合规则和小型混合器分类	38
3.3	微型混合设备的潜在优势	40
3.4	T形混合结构中两股支流的接触	43
3.4.1	T形混合结构	43
3.4.2	双T形混合结构	44
3.5	通过高能支流的碰撞实现喷射和雾化作用	46
3.5.1	微型喷射反应器中三股支流的碰撞	46
3.6	一种组分的多股支流注入另一组分的主流体中	46
3.6.1	多股微型喷射流的注入	46
3.7	两组分两种流体层多次分叉及重新汇合	48
3.7.1	由流道形变产生的流体多次分割和重新组合	48
3.7.2	叉形元件实现流体多次分叉及重新汇合	50
3.7.3	采用分离板实现流体多次分割及重组	52
3.7.4	采用坡形通道实现流体的多次分割及重组	53
3.8	两组分的多股支流注入实现混合	55
3.8.1	交叉型通道结构中流体层的多次分层	55
3.8.2	采用V形喷嘴阵列实现流体层的多次垂直分层	63
3.8.3	采用微结构堆叠平板实现分层混合	65
3.8.4	采用含星形开孔的堆叠平板实现多次分层	68
3.9	通过提高流速缩短垂直于流动方向的扩散路径	69
3.9.1	通过水力学聚焦减小流体层厚	69
3.10	通过搅拌、超声波、电能及热能等外部手段强化传质	71
3.10.1	采用磁性球进行动态混合	71
	参考文献	72
<b>第4章</b>	<b>微型换热器</b>	<b>75</b>
4.1	带宽而扁平通道的微型换热器	77

4.1.1	堆叠平板设备中的错流热交换	77
4.1.2	基于错流混合的错流式换热器	79
4.1.3	堆叠板式逆流换热器	81
4.1.4	电加热堆叠式板型设备	83
4.2	带有窄而深通道的微型换热器	85
4.2.1	含单侧通道结构的换热器	85
4.2.2	含双面通道结构的换热器	85
4.3	含穿透通道的微型换热器	87
4.4	轴向热传导	88
4.4.1	材料选择对传热效率影响的数值计算	89
4.4.2	热模块结构的应用	90
4.5	采用翅片不断形成入口流	91
4.6	利用正弦波形微通道产生周期性流动分布	91
4.7	基于微型技术的化学热泵	92
4.8	微型换热器的性能测定	93
4.8.1	利用红外相机测量微型换热器中的温度分布	93
	参考文献	95
<b>第 5 章</b>	<b>微分离系统和特殊分析模块</b>	<b>98</b>
5.1	微萃取器	98
5.1.1	通道部分重叠	98
5.1.2	楔形流接触器	101
5.1.3	由微机械膜分开的微通道接触器	103
5.1.4	微通道由筛板状隔板分开的微接触器	107
5.1.5	微混合-澄清系统	107
5.2	微过滤器	110
5.2.1	等筛孔微过滤器	110
5.2.2	错流微过滤器	111
5.3	气体纯化微系统	111
5.4	气体分离微设备	113
5.5	微反应器特殊分析模块	114
5.5.1	原位红外光谱分析模块	114
5.5.2	快速 GC 分析模块	114
	参考文献	118
<b>第 6 章</b>	<b>液相反应微系统</b>	<b>121</b>
6.1	液相微反应器的种类	122

6.2	复合式微设备内维生素中间体的液液合成 .....	122
6.3	微反应器内丙烯酸酯聚合反应 .....	127
6.4	Grignard 试剂酮还原反应 .....	130
6.5	微混合器/管式反应器内的小规模有机合成 .....	134
6.6	用水力学聚焦的混合器和高纵横比的换热器实现 Dushman 反应 .....	136
6.7	连续分段流管式反应器内的微晶合成 .....	138
6.8	电化学微反应器 .....	139
6.8.1	板式电极微反应器内合成 4-甲氧基苯甲醛 .....	139
6.8.2	封闭式微电池系统 .....	142
	参考文献 .....	143
<b>第 7 章</b>	<b>气相反应微系统</b> .....	<b>146</b>
7.1	微反应器的催化剂 .....	146
7.2	气相微反应器的类型 .....	149
7.3	微通道催化结构 .....	150
7.3.1	微通道催化反应器中的流动分布 .....	150
7.3.2	丙烯部分氧化制丙烯醛 .....	150
7.3.3	环三烯选择性部分加氢 .....	151
7.3.4	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> 反应 .....	155
7.3.5	苯的选择性部分加氢 .....	157
7.3.6	丁烯选择性氧化制马来酸酐 .....	157
7.3.7	乙烯选择性氧化制环氧乙烷 .....	158
7.3.8	周期操作的影响 .....	158
7.4	集成催化剂结构层和换热器的微系统 .....	162
7.4.1	乙醇氧化脱氢 .....	162
7.4.2	异氰酸甲酯和多种其他危险气体的合成 .....	165
7.4.3	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> 体系在爆炸浓度范围内的反应 .....	168
7.5	集成催化结构层和混合器的微系统 .....	171
7.5.1	环氧乙烷的合成 .....	171
7.6	集成催化剂结构层、换热器和传感器的微系统 .....	175
7.6.1	氨气氧化 .....	175
7.6.2	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> 反应 .....	180
7.7	集成混合器、热交换器、催化剂结构层和传感器的微系统 .....	181
7.7.1	通过 Andrussov 过程合成 HCN .....	181
	参考文献 .....	187

<b>第 8 章 气/液微反应器</b> .....	193
8.1 气/液接触原理和微型化接触装置的类型 .....	193
8.2 T 形混合构件内气/液相的接触 .....	195
8.2.1 单股气体和液体支流的注入混合 .....	195
8.2.2 多个气体和液体支流注入一个共同通道 .....	197
8.2.3 多个气体和液体支流注入一个填充通道 .....	198
8.2.4 多股气体支流注入含催化剂壁面的液体通道 .....	200
8.2.5 多种气体和液体支流注入多通道 .....	201
8.3 降膜微反应器内薄膜的生成 .....	206
参考文献 .....	215
<b>第 9 章 能源制造微系统</b> .....	218
9.1 液态燃料气化微器件 .....	218
9.2 气化燃料部分氧化制合成气的微设备 .....	221
9.2.1 部分氧化制氢气 .....	221
9.2.2 叠片式微系统内甲烷的部分氧化 .....	221
9.2.3 微通道反应器内甲烷部分氧化 .....	223
9.3 蒸汽重整制备合成气的微器件 .....	225
9.3.1 微结构板式器件内甲醇的蒸汽重整 .....	225
参考文献 .....	227
<b>第 10 章 催化剂和材料筛选微系统</b> .....	229
10.1 在微通道反应器内非均相催化剂的平行筛选 .....	229
10.2 传统小尺度反应器用于平行筛选非均相催化剂 .....	232
参考文献 .....	233
<b>第 11 章 分散式生产方法</b> .....	235
11.1 迷你工厂概念 .....	235
11.1.1 生产 HCN 的迷你工厂概念 .....	236
11.1.2 可丢弃的间歇式迷你工厂 .....	237
11.2 大型化设计向迷你设计的观念变化 .....	238
参考文献 .....	240
<b>索引</b> .....	242

# 第 1 章 微反应技术的发展现状

本章的目的在于界定微反应技术的领域，分析和评价微反应技术的优势，总结已有研究成果以及目前工业应用状况，并指出今后微反应技术的发展方向。

## 1.1 定义

### 1.1.1 以微反应器为核心的微系统

根据广泛接受的微系统 (microsystem) 定义，微反应器 (microreactor) 一般是指通过微加工和精密加工技术制造的小型反应系统，微反应器内流体的微通道尺寸在亚微米到亚毫米量级。对于通道尺寸小于或大于这个范围的反应器，一般称之为纳反应器 (nanoreactor) 和毫反应器或小型反应器 (milli-/minireactor)。但在本书中仅涉及微反应器 (microreactor) 的内容。

### 1.1.2 微反应器的结构层次

微系统的构建一般采用分层次的方法，如图 1-1 所示，即一个单元往往由其下属单元组合而成。这种方法对于以增加单元为构建特征的微反应系统，即所谓数目放大 (numbering-up) 的微反应器而言是十分有效的<sup>[1,2]</sup>。下面我们将定义微反应系统的不同单元。

#### (1) 有关结构层次的定义

微型流动系统的最小单元 (unit) 称为微结构，它一般是指微通道结构。在微结构的基础上加上入口和出口部件就构成了微系统的一个元件，如微混合元件就是由多个交叉的微通道构成的。此外，元件有时还可以包括一些腔室、微孔等微结构。

微系统的单元 (unit) 由元件、流体管线及支撑体等共同构成，例如含有交叉微结构和管线的平板就构成一个微混合单元。为了增加微设备的处理量，可以通过数个同样的单元累加成一堆 (stack) 来达到目的。当然，这些单元也可以在同一平板上平行排列。无论是单元还是单元的累加均不能单独构成微设备，微设备还必须配有外壳或上下盖板等。由外壳或上下盖板与单元共同构成的器件称为微设备 (device)，也可称为组件 (component)。几个微设备相连就构成一个系统。在实际过程中，具有不同功能的单元集成到一个设备内构成复杂微系统 (complex system)。

组件之间、系统之间或组件与系统之间相互并联或串联组成装置 (set-up 或 plant)，这些装置可以是实验装置，也可以是工业生产装置，这些装置可以仅包

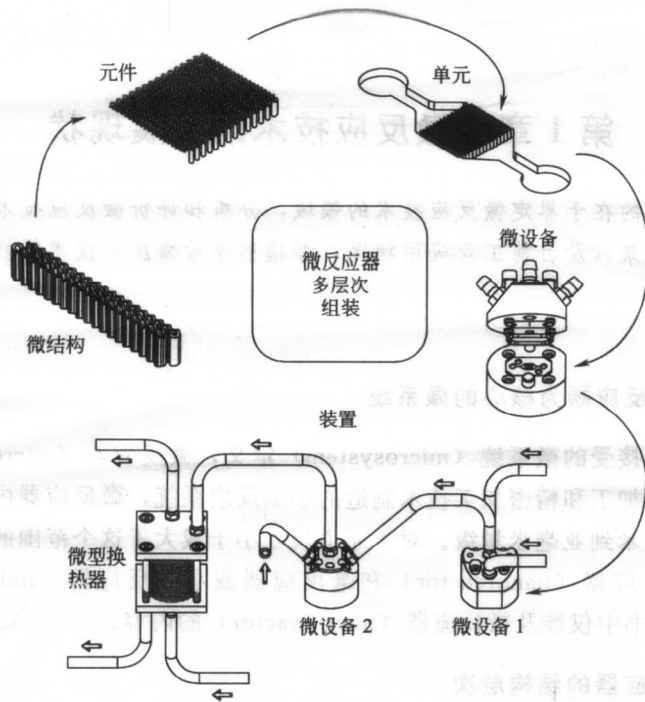


图 1-1 微反应器的多层次组装

括微设备或微系统本身，但更多的时候应该是微设备和一些常规设备的组合体。

## (2) 本书章节内容的划分

前文涉及的微结构、微通道、元件、单元、设备、组件、系统和装置等均为本书的定义。书中章节划分将主要围绕不同的反应类型和操作单元所涉及的组件和系统来进行，章节分法为：

- 微混合器；
- 微换热器；
- 微分离器；
- 气相反应器；
- 液相反应器；
- 气液两相反应器。

对于同时包含几种操作单元的微系统，则以设计微系统的目的来分类，如一个系统中同时含有微混合器、热交换器和催化剂平板，但其主要目的是气相反应，对于这样的系统，我们将在气相反应器章节中进行讨论，该系统的其余组件如微混合器和热交换器则不会在其他相关章节中进行描述。但若这些组件还代表某种特殊的流动形式，则会分别在相关的单元操作章节和相关的微反应系统中进行论述。

对于含有多种形式反应器的复杂微系统也会在不同的章节中进行讨论，这些微系统主要与它们的应用领域有关。如当前两个极具商业价值的特殊应用领域——催化剂/材料筛选和能源生产领域，本书中就有两个专门的章节涉及。此外，如何将几个微系统组合成一个完整的工厂将在第 11 章“迷你工厂概念”中进行讨论。

在描述组件的章节中将以一定流型结构和具有一定功能的微设备为主，涉及了一些与功能相对应的原理，目的是对目前该领域的各种方法有一个全面的理解，并说明小型化在实际应用中的潜在优势。对不同组件和系统的性能比较是加深理解微反应技术的关键。例如在微混合器一章中就包含有一些具有特殊流动结构微元件的章节，对其章节的划分为：

- 两股支流体的接触，如 T 字形混合器；
- 两股高能流体的对撞；
- 两薄层流体的多次分叉和再汇合。

为了加深对某一方法的认识，将在相关章节下设有子章节，子章节的内容主要是针对这一方法的特殊变化和发展进行探讨，如“两薄层流体的多次分叉和再汇合”章节下设有子章节，内容为：

- 通过通道的形变实现流体的多次分叉和再汇合；
- 利用交叉型元件实现流体的多次分叉和再汇合；
- 利用分离板实现流体的多次分叉和再汇合。

但在微反应系统中不再采用这样的分类方法，如在“气相反应器”的章节是以反应类型来对微系统进行分类。

### 1.1.3 按功能分类的微反应器

若以分析应用来进行分类，微反应器可分为两大类：一类是在化学和生物中应用的反应器；另一类则是在化学工程和化学中应用的反应器。尽管这两个应用领域有着本质区别，就如同分析型设备和制备型设备的差别一样，但微反应器仍可能同时实现这两种类型的应用。如用于组合化学和筛选的微器件既可作为分析工具收集信息，也可以作为合成装置完成毫克量级产品的生产。

微反应器的另一种分类方法是根据操作模式进行的，如连续流动式或间歇式反应器的分类。在本书中大部分微器件为连续流动式设备。间歇式系统在本书中没有专门涉及，如用于药物固相化学合成的微、纳定量板（titer plates）就没有进行描述。有关这方面的知识，读者可以参阅一些综述性文章和书籍<sup>[3~5]</sup>。

对于 20 世纪 80 年代后期发展起来的微全分析系统（micro total analysis systems,  $\mu$ TAS）本书也将很少涉及。微全分析系统是将过滤、混合、分离和混合等一系列过程集成到一个单元的微系统<sup>[6~12]</sup>，这种微系统主要用于化学和生



物分析，目前主要集中在聚合酶链式反应、电泳分离和蛋白酶分析等方面<sup>[13~15]</sup>。

微反应器在化学和生物分析中的应用已有较为全面的综述<sup>[16]</sup>，本书将主要讨论与化学微反应相关的微设备，因为以分析为目的和以合成为目的的微设备具有相似的结构。因此从连贯性和新颖性出发，本书的最后章节将讨论用于工艺过程改进、生产或材料筛选的化学微反应器。

#### 1.1.4 分析和反应系统的区别

反应系统主要用于生产或转化物质，分析系统主要用于收集信息，如测量湖水中某种成分的浓度。对比微小的反应系统和分析系统，它们的差别几乎消失，因为反应系统的微型化将不断减小物质转化量，直到与分析系统的处理能力相当。所以微型反应系统不仅能用于合成，还可以用于工艺过程的改进或材料筛选等。

无论是应用于工艺过程改进，还是用于材料筛选，这两者均是以测量作为主要任务。前者是为了找到工艺过程的最优化条件，后者则是为了提高材料性能。事实上，这些测量工具与分析系统相似，也是收集信息，但两者收集信息的目的完全不同。在分析系统中，信息收集就是它的目的，即这种系统是为了收集信息而收集信息，如分析一定大气层中的臭氧浓度是为生态研究提供重要信息。而微型反应系统收集信息则是为了优化实验室合成条件或大规模生产条件以及合成具有先进功能的新材料等，它的最终目的是为生产服务，因此，小型分析系统与化学微反应系统之间有一个明显的界线。

### 1.2 微反应器的主要优点

在探讨微反应器的主要优点之前，有必要首先看看小型分析系统的优势，因为小型分析系统具有与微反应器和纳反应器相似的小尺度特点。

#### 1.2.1 小型分析系统的主要优点

在过去十几年中，小型分析系统的大量应用已经清楚地显示了其优势，小型器件不仅具有所需空间小、质量和能量消耗少以及响应时间短的优点<sup>[7]</sup>，更重要的是其在单位体积和单位时间内得到的信息量明显较大。微器件的大批量生产和自动化安装可以使每个微设备的生产成本降低。此外，通过减小组件的尺寸，可以集多组件于一体，增强整个微系统的性能<sup>[7]</sup>。

#### 1.2.2 纳尺度反应器的主要优点

纳尺度反应器一般是指通过超分子自组装而得到的反应单元，这些单元可以提供很小的反应体积，有时甚至仅能容纳一个分子。超分子自组装可以通过形成分子钳(见图 1-2)、沸石、胶束、脂质体以及 LB 膜等结构为反应提供场所。在