

十二五

普通高等教育“十二五”规划教材

微流体溶剂萃取技术

彭金辉 巨少华 编著

北京

冶金工业出版社

2015

前 言

近年来，微流体技术得到了快速发展。该技术在微观尺寸下，控制、操作和检测复杂流体，即将反应原液或气体泵入具有微纳结构的通道中不断切割为微纳尺度的流体，进而实现微纳级的混合、传质和反应。其优势在于可使流体间温度、压力、浓度和密度等物理量梯度急剧增加，传递距离减小到微纳尺度，增强传热传质推动力，从而大大降低或减小试剂消耗、能耗、乳化趋势和设备体积，反应速率、选择性、安全性大大提高。目前，微流体技术已规模化应用于分析检测、气体处理、有机合成及颗粒制备等过程中。

实现微流体反应过程的微反应器是带有通道结构且内径范围在 $10 \sim 500 \mu\text{m}$ 的装置。相对宏观尺度的反应器来说，微反应器有很多优势，如高的界面体积、短的扩散距离及精确的温度控制，从而使转化率、选择性均有明显提高，传热系数和传质性能均可得到很大程度的强化。

国外先进的化工制造公司如 DuPont、BASF、Merck、Schering、Degussa-Hüls 以及 Bayer 等已经成功开发了微流体条件下的精细产品的制造技术，并实现了高额的经济效益。

从国际发展趋势来看，作为极具前途的新一代反应器，微结构和微观混合器的选择已相当丰富，甚至可用于生产商业目录中的产品。微混合器设备可以应用的处理量范围可从每小时几毫升到几立方米。微流体条件下实现混合的方式可多达十几种，这些混合方式可根据输入能量与否分为主动和被动混合方式。合理地选择混合方式和反应器结构可处理各种气-液、液-液、液-固等多相体系的混合过程。

微结构和微观混合器未来发展最重要的任务是充分利用微结构混

合器的低耗、高效、快速、均匀混合的优势，使其成为化学工业中普遍采用的新技术，并应用到生产中去。

虽然已经有多种多样的微混合器可供选择，但还急需对这些反应器进行更科学、更多经过现场检验的方法实现标准化划分，从而为分析检测等领域中高效、合理、科学地选用微结构混合器提供更加有价值的参考。

本书旨在对微流体技术在萃取工序中的应用现状和发展前景进行剖析，同时介绍了微反应器的混合原理和国际上近年来的专利情况，并对在微流体条件下基础理论的研究方法进行了评述，对于强化微流体混合效率的各种措施手段进行了详细介绍，最后介绍了我们在湿法冶金微流体萃取方面所取得的一些进展。

全书共分6章，在第1章中简单介绍了微流体技术及微反应器的概念、应用概况、制备方法和放大工艺等。在第2章中主要探讨了微流体技术的特点及其实现方式，主要包括微流体与宏观流体的区别、微流体萃取的优势以及微流体萃取目前的发展动态等。在第3章中，首先综述了微流体混合器的几十种混合原理，包括主动混合和被动混合；然后，评述了近年来微反应器领域国际专利的发展现状。在第4章中，着重介绍了微流体萃取研究领域的一些典型研究案例，主要包括核元素溶剂萃取微混合澄清器的研制、微反应器内稀土金属的萃取与分离、微溶剂萃取体系内的镧系元素分离、从负载颗粒的溶液中微流体萃取铜、段塞流微反应器用于铯离子萃取工艺的研究等。在第5章中，介绍了微流体萃取过程中传质和流动的一些基础研究方法。在第6章中，主要介绍了我们在镍、钴萃取分离和铜、铁分离等湿法冶金微流体萃取方面的研究工作。

本书可作为相关领域和对微型反应设备和过程感兴趣的研究者、工程师的参考书。我们更希望借此书来推动微结构混合器这一21世纪的革新技术产品在中国冶金行业的应用，成为工程师们研究和生产中

广泛使用的革新型手段,从多角度来扩展现有微结构混合器系统的用途和性能,为现代工业进步作出更大贡献。

本书是在国家自然科学基金委员会(NSFC)-云南联合基金重点项目“湿法冶金微流体萃取的基础理论研究(项目编号:U1302271)”的资助和支持下完成的,我们在此对国家自然科学基金委员会深表感谢。本书中部分内容引用了荷兰埃因霍温科技大学 Volker Hessel 教授等人的研究成果,并征得了他们的同意,在此对他们表示诚挚的感谢。

本书是由昆明理工大学彭金辉教授、巨少华副教授、周俊文高工、郭胜惠教授等在相关研究成果的基础上共同编著完成的,最后由彭金辉教授进行全书的统稿。其中,周俊文完成了第1章的撰写,巨少华完成了第2~5章和第6.2节的撰写,郭胜惠完成了第6.1节的撰写;研究生魏亚乾、李传华、姜峰、刘超、王涵睿等在英文论文初译、排版等方面进行了大量的工作。由于作者水平有限,而且由于微反应器与微流体技术领域涉及物理、化学、化工、材料及微机械加工等学科,交叉综合性强,其发展也呈现日新月异的趋势,因此在撰写过程中可能会有不当之处,恳请读者批评指正。

作者

2015年3月

目 录

1 绪论	1
复习思考题	4
参考文献	4
2 微流体技术的特点及其实现方式	6
2.1 微流体技术的特点	6
2.2 微流体和宏观流体的区别	8
2.3 微流体溶剂萃取综述	11
2.3.1 传统萃取过程的局限性	11
2.3.2 微反应器在萃取中应用的优势	12
2.3.3 国内外研究现状及动态简介	13
复习思考题	15
参考文献	15
3 微流体混合器原理及微反应器开发现状	19
3.1 微混合器的混合原则	19
3.1.1 微通道混合器的混合原理、设计要素和混合效率分析	19
3.1.2 被动式混合的原理和设备	26
3.1.3 主动式混合的原理和设备	38
3.2 微反应器和微过程工程的专利综述	46
3.2.1 早期的专利情况	47
3.2.2 微流体技术专利分析	48
3.2.3 精密加工和组装	51
3.2.4 微混合器	54
3.2.5 微反应器	56
3.2.6 催化微反应器	57

3.2.7	微型分离器	59
3.2.8	微反应器组合系统	59
3.2.9	特殊微反应器系统	61
3.2.10	过程控制和操作理念	61
3.2.11	操作与分析组件	63
	复习思考题	65
	参考文献	65
4	微流体萃取研究进展	76
4.1	研制核元素溶剂萃取微混合澄清器	76
4.1.1	概述	76
4.1.2	实验	76
4.1.3	实验研究	78
4.1.4	结果与讨论	79
4.2	微反应器内钷、铈和镧的萃取与分离	79
4.2.1	概述	79
4.2.2	实验部分	80
4.2.3	结果与讨论	82
4.3	微溶剂萃取体系内的镨、钆元素的分离	86
4.3.1	概述	86
4.3.2	实验部分	86
4.3.3	结果与讨论	88
4.4	利用微流体从负载颗粒的溶液中萃取铜	90
4.4.1	概述	90
4.4.2	实验部分	92
4.4.3	结果与讨论	93
4.4.4	结论	99
4.5	段塞流微反应器用于铯离子萃取工艺的研究	99
4.5.1	概述	99
4.5.2	实验部分	100
4.5.3	结果与讨论	102
	复习思考题	106
	参考文献	106

5 微流体萃取基础研究方法	112
5.1 流体路径几何和操作参数对交叉指型微混合器中液-液型扩散的影响	112
5.1.1 概述	112
5.1.2 实验方法	113
5.1.3 结果与讨论	115
5.1.4 染料提取表征	122
5.1.5 结论与展望	122
5.2 矩形玻璃反应器中的液-液两相流模式和传质特点	123
5.2.1 概述	124
5.2.2 实验	126
5.2.3 结果与讨论	128
5.3 微反应器中气-液和液-液传质	139
5.3.1 概述	139
5.3.2 基本定义	140
5.3.3 实验研究	144
5.3.4 微结构混合器的无量纲分析和设计标准	146
5.3.5 液-液系统传质	148
5.3.6 结论和展望	158
5.4 微反应器中的萃取——通过增加惰性气体强化	159
5.4.1 概述	159
5.4.2 试验方法	160
5.4.3 结果与讨论	161
5.4.4 结论	167
复习思考题	167
参考文献	167
6 湿法冶金微流体萃取研究	172
6.1 钴、镍微流体溶剂萃取和分离	172
6.1.1 概述	172
6.1.2 实验	173
6.1.3 结果与讨论	175

6.2 微流体条件下的钢、铁萃取分离	179
6.2.1 金属钢的冶炼流程	179
6.2.2 实验设备及研究方法	183
6.2.3 层流微芯片中萃取钢的实验研究	187
6.2.4 PDMS 层流微流体芯片萃取系统实验	193
6.2.5 交叉指型微混合器萃取钢的实验研究	201
复习思考题	213
参考文献	213

1 绪 论

微流体技术是指采用微反应器,即通过微加工和精密加工制造的小型反应系统来操控、检测和分析流体的一种新技术。微反应器内流体的微通道尺寸在亚微米至亚毫米量级。微反应器按结构层次分,是由微孔、微腔室组成微结构,再附加流体管线、支撑体等元件构成微系统的单元,经过并联或串联这些微设备形成组件,组装后形成实验或生产装置;按功能分为微混合器,微换热器,微分离器,气、液或气液两相反应器等。

由于微反应器的有效通道或腔室的物理尺寸缩小到微米级别,使得流体间物理量如温度、压力、浓度和密度等的梯度急剧增加,导致传热传质推动力大大增加,可使传热系数提高几个数量级而传质反应时间降低几个数量级。因此,采用微技术加工而成的微通道管网能够快速有效地实现各种化学和物理过程,实现“芯片上的实验室(lab on a chip)”概念。由此带来的优势还表现在:由于反应速度的提高,反应设备以及反应体系可大大缩减,使得反应过程的安全性大大提高,用地投资大大节约,材料消耗急剧减少;对于原料、过程或产物存在毒性的反应,可通过采用分区域小型的分布式生产方式,从而避免有毒有害原料或产品运输风险;其处理能力可以通过增加功能单元的数目来提高,而不需要逐级放大反应设备。

作为一种极具前途的反应系统,微流体技术一经出现,就成为化学工业、分析检测等领域十分引人注目的革新技术。这是由于它具有更高的热质传递速率、单位体积产量以及过程安全性。在微反应器内,流体线尺寸减少至微米级并使流体微结构化,能够显著增加界面体积比,达到 $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{m}^3$,是常规反应器的数百倍。因此,可显著强化传质传热过程和减少操作时间。此外,微反应器可以在高压(如不锈钢微反应器可承受60MPa(600bar)高压)下操作,从而开辟了一个在高温、高压甚至爆炸模式下实现反应的新领域。此外,微反应器内流体可实现层流操作以解决界面控制问题,这在传统搅拌中是无法实现的。

微反应器通道通常由玻璃、不锈钢或高耐腐蚀性合金(如Hastalloy耐蚀镍合金)构成,并使用比“T”型或“Y”型更复杂的混合单元,如交叉指型混合器或拆分重组型混合器。让小的内部尺寸与特别设计的混合器结合,在液-液萃取中,使得表面积比超过 $10000 \text{ m}^2/\text{m}^3$,处理量在每小时几升的范围。在很多生产公司,如DSM、Lonza、Degussa和Baye等,采用不同材质微反应器,如不锈钢、合金、玻璃,开发了新的技术工艺。微反应器的扩大曾经是一个挑战,目前主要有两种解决方案:一种是并行化,即使用大量相同的微通道(见图1-1(a));另

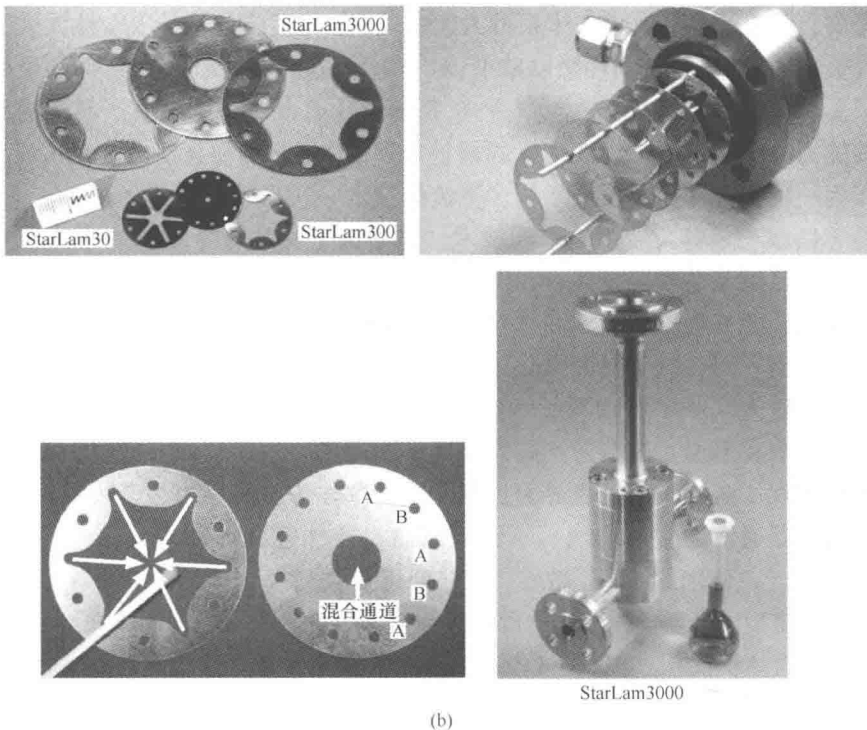
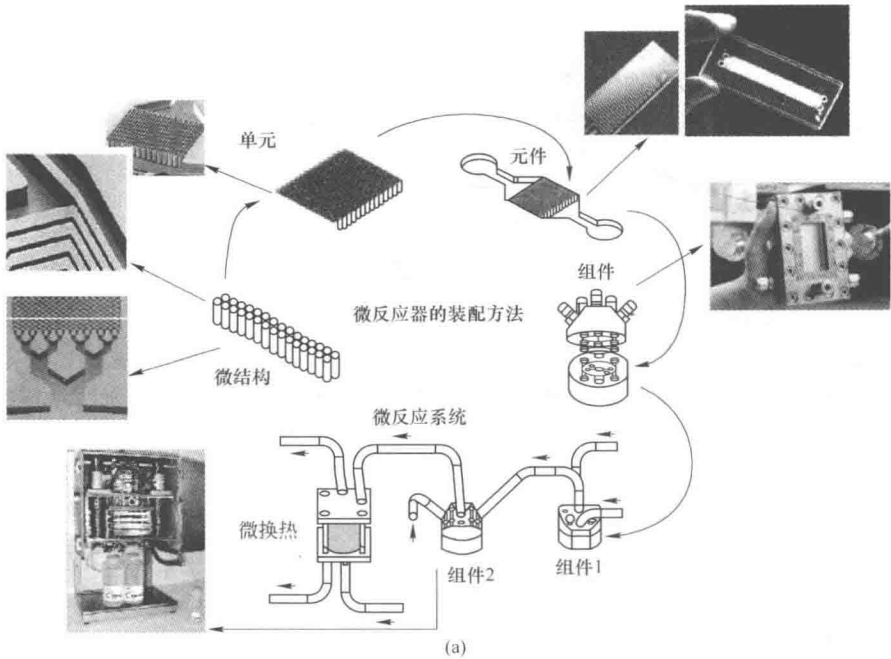


图 1-1 微反应器的两种扩大方式

(a) 并行化扩大^[1] (IMM V2); (b) 内部扩大^[2] (IMM StarLaminator)

一种是内部扩大,即将微结构通道设计和常规尺寸扩大相结合(见图 1-1(b))。

对于单相或气固反应系统,并行化被公认为是一种有效的方法。微反应器在俄亥俄州 GTL 应用并行化概念进行放大,已经成为这方面的先驱之一。来自瑞士公司 Lonza 的报告称内部扩大仍然具有广泛的应用前景。

另外,由于卓越的安全状况,加上高的混合和传质性能,小尺寸的微反应器已被誉为未来模块化生产的一种新工具。因此,有可能快速改变生产能力,让生产企业适应需求增长和需求降低的两个时期,如图 1-2 所示。

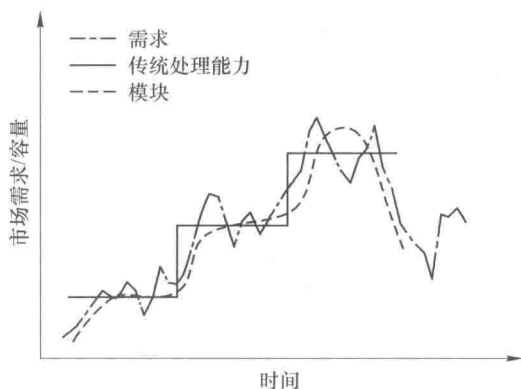


图 1-2 传统生产模式下模块化微流体技术生产能力随产品需求的变化情况^[3]

国际上的学者在气-液和液-液系统中进行了流体力学研究,提出了大量的流动模式,从传质特性和反应应用的角度来分类,主要可分为段塞流、泡沫流、层流和环形流四种。与企业相关的液-液微反应器的研究进展列于表 1-1^[3]中。

表 1-1 与企业相关的液-液微反应器的研究进展

反 应	研 究 进 展
卤化 ^[4,5]	停留时间仅为 8~10s 时,产率可达到 69%~100%;相比间歇式生产,使用微型反应器使得其选择性增加了 30%
芳烃硝化反应 ^[6,7]	可实现平行合成,其产率的范围达到 80%~95%
重氮耦合 ^[8]	停留时间为 2.3s 时,转化率高达 99%,高于其他任何宏观系统,选择性和过程的安全性得到改进
芳烃的光氰化 ^[9]	停留时间仅为 70~210s,产率可达 28%~73%
脂肪族化合物的硝化 ^[10]	产率为 75%~90%,选择性高达 100%
加氢合成 ^[11]	使用微电流来分散微混合器中的流体,实现了高达 80% 产率
赫克(Heck)反应 ^[12]	在微型反应器中进行的 Heck 反应的反应速率高于常规反应烧瓶中进行的反应速率;采用了两种微流态:层流和分段流,研究发现在分段流条件下,反应产率提高了 10% 以上

续表 1-1

反 应	研 究 进 展
相转移烷基化反应 ^[13]	微反应器中停留时间为 2 ~ 10min, 产率为 75% ~ 96%, 传统间歇式反应器的产率仅为 49%
靛蓝 (indigo) 合成 ^[14]	采用气泡流操作制度防止反应产物的沉淀堵塞微反应器, 最大产率为 87% ~ 97%
Strecker 反应 ^[15]	反应产率为 43% ~ 67%, 小体积在线生产的 HCN 反应体系的安全性大大增加

目前, 微反应器的主要应用领域是化学领域, 如气体处理、化学合成及颗粒合成等, 并能够达到年产数吨的产能规模^[7]。通过并行处理或数量叠加“Numbering-up”技术为微流体工艺过程产量的增加提供了一种新的可能。

传统冶金过程由于设备和操作过程粗放, 是耗能大户, 还存在大量浪费现象。在目前能源、资源严重紧缺的形势下, 如何强化冶金操作单元过程, 提高效率、降低能耗, 已经成为矿冶产业可持续发展的关键问题。

我们认为, 利用微反应器系统的高效、低耗、安全等特点来改造传统冶金产业的低效高耗单元过程如萃取、换热和混合等, 有可能开发出新的节能工艺过程, 从而推动冶金行业的产业升级。

复习思考题

- 1-1 什么是微流体技术?
- 1-2 微流体技术有哪些优势?
- 1-3 目前实现微流体技术放大有哪几种方法?
- 1-4 从传质特性和反应角度分类, 气-液和液-液系统中的流体存在哪四种流动模式?

参 考 文 献

- [1] Ehrfeld W, et al. Microreactors-New Technology for Modern Chemistry [M]. Germany: WILEY-VCH Verlag, 2000.
- [2] The Catalogue: Chemical Micro Process Technology Made by IMM [OL/EB]. http://www.imm-mainz.de/fileadmin/IMM-upload/Flyer-Katalog_etc/Catalogue09_StarLam.pdf.
- [3] Jovanovic J. Liquid-liquid Microreactors for Phase Transfer Catalysis [D]. Eindhoven University of Technology Library, 2011: 11 ~ 17.
- [4] Floyd T M, Jensen K F, Schmidt M A. Towards Integration of Chemical Detection for Liquid Phase Microchannel Reactors [M]. American Institute of Chemical Engineers, 2000.
- [5] Herweck T, Hardt S, Hessel V, et al. Visualization of flow patterns and chemical synthesis in transparent micromixers [M] // Microreaction Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001:

215 ~ 229.

- [6] Burns J R, Ramshaw C. Development of a microreactor for chemical production [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1999, 77 (3): 206 ~ 211.
- [7] Ducry L, Roberge D M. Controlled autocatalytic nitration of phenol in a microreactor [J]. Angewandte Chemie, 2005, 117 (48): 8186 ~ 8189.
- [8] Hisamoto H, Saito T, Tokeshi M, et al. Fast and high conversion phase-transfer synthesis exploiting the liquid-liquid interface formed in a microchannel chip [J]. Chem. Commun., 2001 (24): 2662 ~ 2663.
- [9] Ueno K, Kitagawa F, Kitamura N. Photocyanation of pyrene across an oil/water interface in a polymer microchannel chip [J]. Lab on a Chip, 2002, 2 (4): 231 ~ 234.
- [10] Antes J, Turcke T, Kerth J, et al. Application of microreactors for the nitration of ureas [C] //International Annual Conference-Fraunhofer Institut fur Chemische Technologie. Berghausen, Fraunhofer-Institut fur Chemische Technologie; 1999, 2001: 146.1 ~ 146.10.
- [11] Wiles C, Watts P, Haswell S J, et al. 1, 4-addition of enolates to α , β -unsaturated ketones within a micro reactor [J]. Lab on a Chip, 2002, 2 (2): 62 ~ 64.
- [12] Ahmed B, Barrow D, Wirth T. Enhancement of reaction rates by segmented fluid flow in capillary scale reactors [J]. Advanced Synthesis & Catalysis, 2006, 348 (9): 1043 ~ 1048.
- [13] Ueno M, Hisamoto H, Kitamori T, et al. Phase-transfer alkylation reactions using microreactors [J]. Chemical Communications, 2003 (8): 936 ~ 937.
- [14] Poe S L, Cummings M A, Haaf M P, et al. Solving the clogging problem: Precipitate-forming reactions in flow [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2006, 45 (10): 1544 ~ 1548.
- [15] Acke D R J, Stevens C V. A HCN-based reaction under microreactor conditions: industrially feasible and continuous synthesis of 3, 4-diamino-1H-isochromen-1-ones [J]. Green Chem, 2007, 9 (4): 386.

2 微流体技术的特点及其实现方式

2.1 微流体技术的特点

在液-液反应体系中，反应速率高度依赖界面面积，液-液萃取和界面反应速率也高度依赖反应界面面积。

现有的液-液多相反应通常是在机械搅拌釜反应器、填充塔和静态混合器里进行的^[1~4]。在搅拌釜反应器中，可以获得批次或连续方式的操作。批次反应器广泛应用于气体、液体和固体多相反应体系。通常搅拌不能够产生足够的液-液分散体系界面面积，导致需要更长的时间完成反应。根据反应器体积和机械搅拌器的类型，工业搅拌釜反应器可以实现的界面面积为 $100 \sim 1000 \text{m}^2/\text{m}^3$ 。虽然工业上开发了替代设备，如撞击流和旋转圆盘接触器，然而在精细化工和制药行业还不能被完全接受。为解决低界面条件下实现批量反应的问题，最常见一种方法是使用表面活性剂，但是这通常会增加分离成本和环境风险^[5~7]。

搅拌釜反应器主要的缺点是搅拌器引起的不均匀混合，从而导致温度和浓度梯度低（见图 2-1 (a)）。此外，搅拌器产生的流体液滴尺寸分布较宽，而且存在批次差异性；还可能发生一些副反应和不期望生成的副产物^[8]，从而增加分离成本；而且，产品质量也会随批次的不同而发生变化。对于一些热敏性的反应体系，由于这种不均匀混合会出现反应热点，可能导致反应失控，操作的安全性差^[9]。

近年来，微反应器已成为新兴技术的焦点，大有替代在精细化工和制药工业领域广泛应用的间歇式反应釜的趋势。微米到亚毫米的通道内径使得流体间反应表面积与体积比高达 $10000 \text{m}^2/\text{m}^3$ 以上，因而可显著地强化传质传热过程（见图 2-1 (b)^[10]）。此外，在微反应器中，可实现在小体积和层流连续操作条件下调控反应，这是在传统搅拌釜反应器中无法实现的。因此，小体积的微反应器能够获得更高的产品产量和纯度，同时增加过程的安全性。基于相转移催化的微反应器的应用还使得液-液化学过程大大受益。相转移催化已经广泛应用于精细化工、高分子和制药行业，如在甲醇蒸气的形成和费托合成反应上的应用^[11,12]。

微反应器的研究可利用各种技术解决方案，其中包括：层流接触^[13]、段塞流分割^[14]、微填充^[15]、降膜^[16]、催化剂嵌入^[17]、弯曲通道微反应器。大部分的微反应器根据结构和处理方式的不同，大致可以分为：芯片^[18]、毛细管^[19]、微

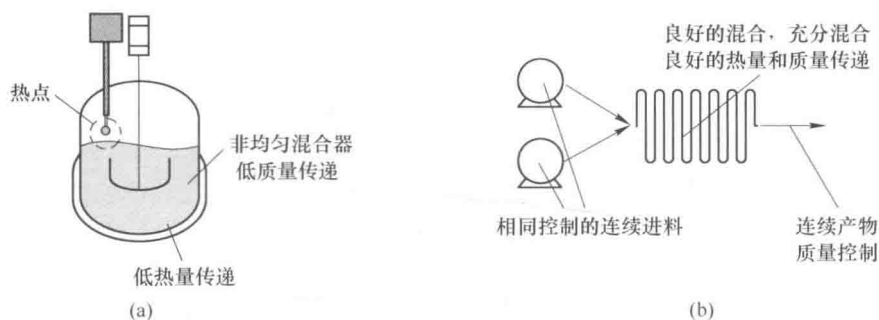


图 2-1 间歇式生产的搅拌釜反应器 (a) 与可稳定连续生产的微反应器 (b)^[10]

结构和工业微反应器^[20] (见图 2-2)。

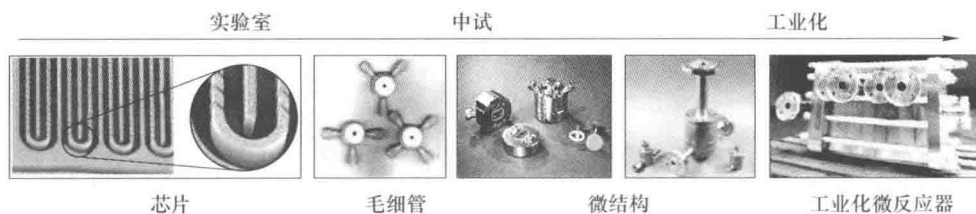


图 2-2 四个主要类别的微反应器

图 2-3 显示了上述 4 种微反应器与两种常规情况下测定的表面体积比、内部特征尺寸和处理量范围的比较。通常，芯片和毛细管微反应器通道直径低于 $250\mu\text{m}$ ，因此，能实现表面体积比值超过 $50000\text{m}^2/\text{m}^3$ 。基于芯片的微反应器通常由玻璃^[21]、硅^[22]、PDMS（聚二甲硅氧烷）和 PMMA（聚甲基丙烯酸甲酯）^[23] 组成。芯片微反应器设计可以从简单的“Y”型或“T”型到复杂的微观结构，如图 2-2 所示。由于其材料特性，芯片往往只能在低压下操作，从而限制了其工业应用^[24-26]。“Y”型或“T”型和毛细管微反应器系统使用低成本的连接方式，使其在替代芯片方面发展前景良好^[27,28]。采用不锈钢或高性能的耐化学腐蚀聚合物（如 PEEK 材质）制成的芯片可以在 45MPa （ 450bar ）压力下操作，并且多个平行通道可以固定在一个单芯片上。

大多数研究微流体液-液体系传质反应的学者注意到了段塞流，并将其应用到了工业上重要的硝化和烷基化的实验中。已进行的段塞流的大量研究主要集中在流量大小控制及产量的改善方面。

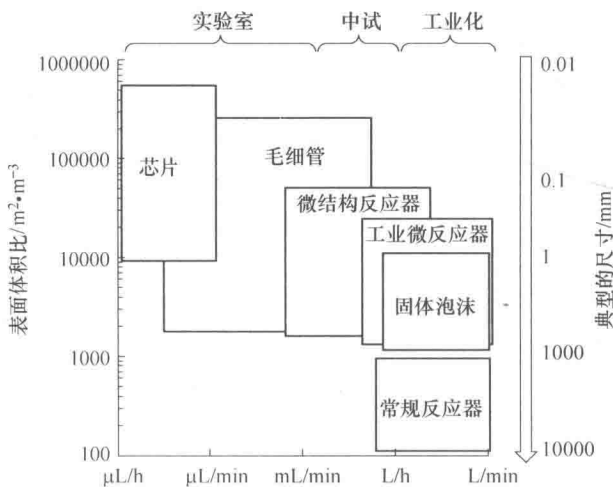


图 2-3 固体泡沫和常规反应器与芯片、毛细管、微结构和工业微反应器的表面面积比、内部特征尺寸和处理量范围的比较^[10]

2.2 微流体和宏观流体的区别

在过去的 20 年里，微流体技术作为一个新的概念在化学工程领域展现出了令人印象深刻的优势^[29-31]。目前，微反应器在较广的领域内得到了快速发展和应用。在微流体反应器中能够进行各种各样的单相和多相反应。除了消耗的试剂少，微米或亚毫米级的反应通道还可以实现反应变量的精确控制，如试剂混合、流速、反应时间、传热和传质。微流体与宏观流体的主要区别如下。

(1) 提高界面积与体积之比。在一个典型的微反应器内，界面积与体积的比值大约是 $20000 m^2/m^3$ 。与之相比，100mL 烧杯的比值是 $100 m^2/m^3$ ， $1 m^3$ 间歇式反应器的比值是 $6 m^2/m^3$ 。

以 HCl 和 NaOH 的中和反应为例^[32]，对比了在搅拌速度为 500r/min 的 $5 m^3$ 的容器内与在微结构反应器中反应的温度梯度、浓度梯度情况。

如图 2-4 所示，微反应器条件下酸碱中和反应可在较低的恒温条件下进行，这为避免一些副反应提供了可能。

(2) 有效混合。除了上述提到的传热过程，传质过程也在微反应器中得到了极大的提高。在微反应器中，可以通过层流扩散实现传质。图 2-5 显示了反应釜和微反应器中 HCl 和 NaOH 中和反应的混合传质情况。

(3) 反应体积急剧减小。当反应体系较小时，可以更容易地控制过程参数，

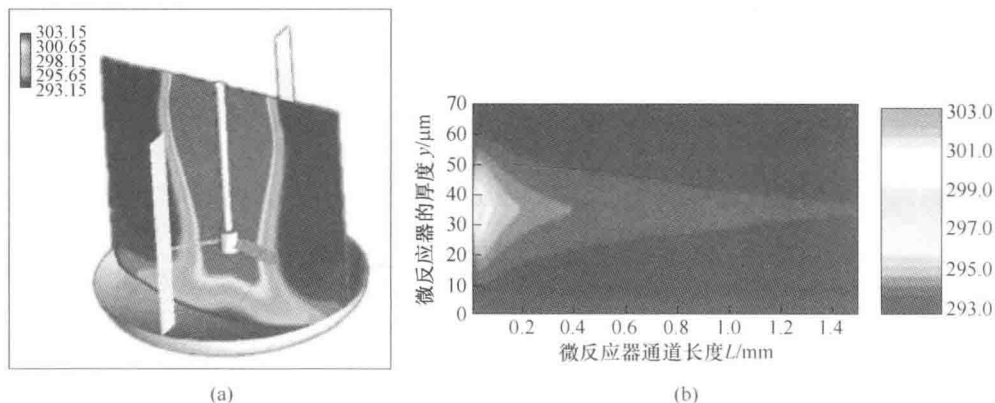


图 2-4 不同反应器中酸碱中和反应温度的影响

(a) 釜式批次中和反应 (反应的温度为 293.15 (蓝) ~ 303.15K (红)); (b) 微反应器技术

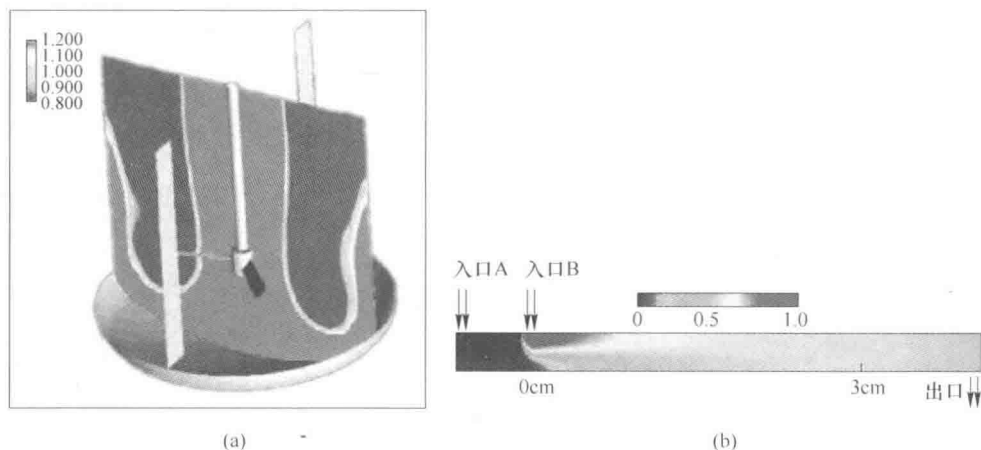


图 2-5 反应釜和微反应器中 HCl 和 NaOH 中和反应的混合传质情况

(a) 釜式批次反应条件下等浓度图 (颜色范围为 0.8 (蓝) ~ 1.2 (红)); (b) 微反应器技术条件下的等浓度图 (化合物 B 被注射到化合物 A 的流程中, 右侧均匀的颜色表示两种反应物 1:1 混合物)

如压力、温度、停留时间和流量。对于一些具有潜在威胁性的强烈放热的反应或爆炸反应, 微反应系统可以大幅度降低反应风险^[33,34]。这将使得过程具有更高的安全性, 也可以实现有毒物质参与的反应或在更高的操作压力下进行的反应。所有这些优点都可以归结为微反应器对反应动力学的准确控制。

图 2-6 为教科书中经典的化学过程的动力学学图。此图符合有机化学讨论产
此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com