

微反应器研究最新进展

骆广生, 王 凯, 吕阳成, 徐建鸿, 邵华伟
(清华大学化学工程联合国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:微化工系统是实现化工过程绿色、安全、高效的重要方法,微反应器作为微化工系统的核心已经成为科学研究的热点之一。近年来,随着微尺度下“三传一反”研究的进展,微尺度流体的性能得到了深入揭示,微反应器技术也被广泛应用于科学研究和工业生产领域。本文以液相微反应器性能和应用为中心,重点讨论微反应器研究的最新进展。

关键词:微反应器;微尺度;微化工系统

中图分类号:TQ052.5

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)05-0027-05

Advances in research of micro-reactors

LUO Guang-sheng, WANG Kai, LU Yang-cheng, XU Jian-hong, SHAO Hua-wei

(State Key Lab of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The micro chemical engineering system is an important technology to make the chemical engineering process green, safe and highly efficient. During recent years many kinds of microreactors have been designed and the transport performance of fluid at a microscale has been widely investigated. Furthermore, the microreactor has been widely used in the research and industrial process. This paper introduces the research and development of microreactor used for the liquid phase reaction, and the latest progress in this area is pointed out.

Key words: microreactor; microscale; micro chemical engineering

进入 21 世纪,化工过程向着更为绿色、安全、高效的方向发展,而新工艺、新设备、新技术的开发对于化工过程的进步是十分重要的。在这样的背景下,微化工系统的出现吸引了研究者和生产者的极大关注。微化工系统并非简单的微型化工系统,而是指带有微反应或微分离单元的新型化工系统。在微化工系统中,微反应器是重要的核心之一。

微反应器是一类新型的反应设备,起源于 20 世纪 90 年代。具体来讲,微反应器一般是指通过微加工技术和精密加工技术制造的带有微结构的反应设备,微反应器内的流体通道或者分散尺度在微米量级^[1],而微反应器的处理量则依据其应用目的的不同达到从数微升/分钟到数万立方米/年的规模。近年来与微反应器相关的流动、混合、反应等方向的研究工作发展十分迅速,带动了微反应器技术的快速发展。

微反应器内流体的存在状态不同于传统的反应器,其内部流体的流动或分散尺度在 1 μm 到 1 mm 之间,这种流体被称为微流体。微流体相对于常规

尺度的流体具有一定的特殊性,主要体现在流体力学规律的变化、传递过程的强化、固有的安全性以及良好的可控性等。目前,微反应器已经被广泛应用于化学、化工、生物、材料等诸多领域的研究和生产过程中,体现出了良好的发展前景,这其中一大部分是主体相为液相的均相或非均相反应过程。为此,本文以液相微反应过程为重点,系统介绍和分析了微反应器的结构特点和性能优势,进而指出微反应器的研究重点和应用方向。

1 形式

作为一类新型的反应设备,微反应器的形式近年来得到了不断发展。微反应器是具有特定微结构的反应设备,微结构是微反应器的核心,按照微结构种类的不同产生了不同形式的微反应器,几种典型的微反应器有:微通道反应器、毛细管微反应器、降膜式微反应器、多股并流式微反应器、微孔阵列和膜分散式微反应器以及外场强化式微反应器等^[1]。

微通道反应器是最广泛使用的微反应器,通过

收稿日期:2009-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20525622,20876084)

作者简介:骆广生(1964-),男,博士,教授,主要研究领域为传质分离技术设备与微化工系统,010-62783870, gsluo@tsinghua.edu.cn。

光刻、蚀刻和机械加工的方法可以方便地在硅片、玻璃、聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 和聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 等材料上制作尺寸各异的微通道^[2]。根据流体的加入方式不同,微通道反应器又分为 T 型、水力学聚焦、同轴环管和几何结构破碎等多种类型^[3-4]。

毛细管微反应器是一种与微通道非常类似的反应器,利用毛细管内径的变化可以调控流体的流动和分散尺度,而毛细管的使用使得这种反应器的加工成本更为低廉,与方形的微通道不同的是毛细管通道截面为圆形,此外毛细管微反应器还可以在不影响流动的情况下,通过调整毛细管长度调整反应物的停留时间^[5]。

降膜式微反应器和多股并流式微反应器是由 Hessel 等^[6-7]课题组开发的 2 种大流量型的微反应器,与微通道反应器不同的是,这 2 种反应器本身的体积并不是微米级的。降膜式微反应器利用流体在重力作用下在与其浸润的材料上可以形成微米级液膜的原理,在一个宏观尺寸的降膜板上获得了微米级的流动尺度。多股并流式微反应器则利用指状交叉的微结构将流体分割成微米级的薄片后再混合在一起,从而获得微米级的分散和混合尺度。

微孔阵列和膜分散式微反应器是一种结构简单并且成本低的大流量型微反应器,这种反应器是在一个常规尺度混合通道内集成了众多微孔结构的反应器,因此这种反应器可以在一定程度上看成 T 型微通道的放大。笔者课题组的研究结果表明,这 2 种微反应器可以高效完成均相流体的混合和非均相流体的分散过程^[8-9]。外场强化式的微反应器在几何结构上可以是以上的任意一种,但是在外场的作用下微反应器内的反应和分离过程可以进一步得到强化,目前主要采用的外场有电场、光照等^[10-11]。

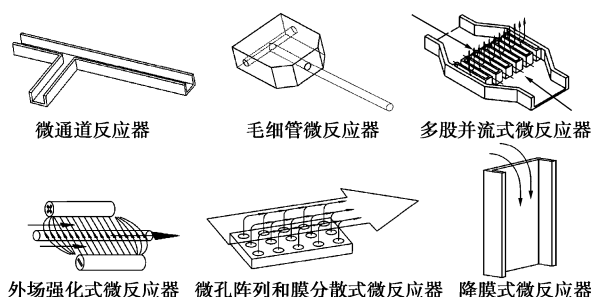


图 1 基于不同微结构的微反应器示意图^[1]

除了以上几种微反应器之外,目前开发出的微反应器还有很多,在微加工技术的促进下,微反应器的设计和制作可以方便地完成,有些已经实现了商业化生产。然而,目前对于微反应器的研究仍处于

起步阶段,目前的微反应器还不能完全适用于所有的反应过程,对适应科学研究和生产过程要求的新微反应器的深入开发仍然十分必要。

2 性能

相对于传统反应器,微反应器内流体的流动和分散尺度要小 1~2 个数量级,这使得微反应器具备了很多优异的性能,而微流体的引入也使得微反应器内流动、传递规律和常规设备相比发生了一定的变化,这些新的现象和规律引起了研究者的关注。

2.1 微尺度流体间的作用力和多相流型

单一液相流体在微反应器内的流动规律仍然满足连续介质模型,连续性方程和 N-S 方程对于液相微流体仍然是适用的,因此目前对于微反应器内的液体单相流流动行为研究还比较少,但是对微尺度下以液相为主的多相流的研究却发展十分迅速。在微反应器内影响多相流流动行为的作用力相对于常规反应设备发生了一定变化,在微尺度下黏性力、惯性力和界面张力是主要的作用力,重力的作用比这些力小 1~5 个数量级^[12], Ca 数、We 数是描述微尺度流动的重要的无量纲数。在微反应器内基本上不存在搅拌桨等动力输入设备,因此在微反应器内液滴或者是气泡的破碎、聚并规律也主要取决于流体自身黏性力、惯性力和界面张力的作用。在微反应器内这几种作用力的大小和作用方向可以通过微结构的结构形式、反应器壁面的浸润性和实验的操作条件来调控。例如,通过调整微通道的进料方式和流体与壁面的接触角,就能够控制微通道内是哪一相分散、分散的尺度是多少等影响反应过程的关键参数^[13]。

微反应器基本上都采用连续操作的方式,在均相体系中,小流量的微通道和毛细管微反应器内的流动以层流为主^[14],而大流量的几种微反应器内可以在较高的流速下获得湍流。在非均相流动体系中,随着不互溶流体的引入,微反应器内产生更为丰富的气/液、液/液、气/液/液等多相流型^[15]。与传统的开放空间式的反应器不同,微反应器内的流体处于一个受限的空间内,在微通道的结构、浸润性和流体相含率的共同作用下,微反应器内产生了两相层流、液(气)柱流、液滴(气泡)流、环状流等丰富的流型,同一设备内的不同流型主要受设备结构、相比、Ca 数、We 数等因素影响^[16-17]。而不同的流型带来了不同的流场情况,这对于反应过程的影响是十分显著的,在微反应器内因为相界面对流体的分

割作用和微通道对于流体的摩擦作用的存在,使得微反应器内存在强烈的内循环和二次流流动^[18],这对于强化反应物的混合是十分重要的。

2.2 传递过程的强化

高效的传热、传质能力对于反应器来说十分重要,而传热、传质过程又与流体的流动和分散尺度密切相关,微米级流动和分散尺度能够有效地强化宏观混合和热交换过程,促进微观传递过程的快速完成。在微反应器内流体的比表面积能够达到 $10^4 \sim 10^6 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的量级,因此流体与壁面能够进行高效的热交换,从而有效地控制反应温度^[19]。在微反应器内,微米级的混合尺度和有效的内循环作用能够促进反应物料快速混合,进而保证反应器内物料分布的均匀性,从而保证反应过程的一致性^[20]。对于非均相反应,微分散的乳液在微反应器内能够有效强化相间传热、传质过程,微反应器内新的液滴和气泡形成方式以及快速的内循环作用是传递过程得到强化的重要原因^[21]。研究表明,微反应器内相间体积传质系数可以达到传统设备的 $10 \sim 1\,000$ 倍^[22],相间体积传热系数也可以达到传统设备的 $10 \sim 50$ 倍^[23]。

2.3 良好的安全性和可控性

微小的反应体积是微反应器的突出特点,这是因为一方面微反应器主要通过微结构来完成反应物的混合过程,而不再需要大型的搅拌设备;另一方面微反应器大都采用连续平推流的操作模式,反应时间通过与反应器相连管道的长度来调控,较少有釜式结构的存在,所以在微反应器内反应物的滞存体积很小,这就是微反应器具有固有安全性的主要原因。在微通道和毛细管微反应器内反应物的体积在微升量级,即使是大通量的微反应器,其主流道的水力学直径也仅有几个毫米。高活性的反应物在微反应器内存留量少而且快速地被消耗,所以微反应器非常适合完成剧烈的化学反应过程^[24]。

微反应器内的流体分散和混合尺度都在微米量级,相对于传统设备内多尺度的流动、混合状态,微反应器内的分散尺度更为均一,这也是得益于微反应器内取消了搅拌设备,代之以更为温和的微结构来完成流体的破碎和混合过程。研究表明,在微通道内可以获得多分散性因子小于2%的单分散乳液流和气泡流^[25-26]。另外通过合理设计微结构的排列方式,还可以获得复杂的双乳液和多乳液结构^[27-28],这使得微反应器对反应物的存在状态更为可控。微反应器多使用连续操作的模式,在流动

状态上微反应器内的流动较为接近平推流,特别是在液柱流、液滴流等流型下,反应器内的轴向扩散作用被极大地削弱^[29],这使得反应时间可以得到精确的控制。微反应器内的反应时间一般在毫秒到秒的量级,快反应可以在微反应器内高效完成,但对于慢反应在微反应器内的应用还有待于深入研究。微小的反应体积带来的另一个优势就是从开车到反应系统稳定的时间被大幅缩短。笔者所在课题组的研究结果表明,一个长1.2 m的毛细管微反应器,其稳定时间仅需 90 s ^[30],这种短暂的稳定时间对于提高实验效率和简化开车流程都是十分重要的。

3 应用

微反应器具有比常规反应设备更为突出的性能,因此微反应器也被广泛应用于化学、化工、生物、材料等诸多领域。

3.1 高性能的基础研究平台

作为一种具有良好性能的反应设备,微反应器在化学、生物等基础科学研究中成为良好的研究工具。首先,微反应器内反应体积小,混合迅速且具有快速稳定的特点,因此利用微反应器可以减少反应物或催化剂的消耗,特别是对于需要昂贵药品的实验,利用微反应器可以有效降低实验成本,提高实验效率。例如,可以在微反应器内快速进行大量的组合化学实验^[31];而对于具有一定危险性的实验来说,利用微反应器又可以减少危险药品的使用,提高实验过程的安全性。笔者所在实验室就利用T型微反应器成功研究了以发烟硫酸为反应物的SINA预混合反应,和传统的实验设备相比利用微反应器单次实验发烟硫酸的消耗量仅为传统搅拌设备的 $1/7$ ^[32]。其次,利用微反应器内混合迅速和反应时间易于控制的特点,在微反应器内可以方便地进行动力学测量实验。例如,Ismagilov的课题组在微反应器内研究了酶反应的反应动力学,他们利用荧光技术对不同反应时间下的反应产物进行浓度标定,在一个微通道内获得了不同反应时间下的浓度信息,从而方便地测量反应的动力学^[33]。再次,借助微反应器温度易于控制的特点,利用微反应器可以方便地调控反应温度,甚至于在短时间内完成反应体系的升温降温过程,因此微反应器已被成功开发为一种高效的PCR设备,用于DNA的分析^[34]。

3.2 提高产品质量和过程效率的有效手段

在化工、材料、制药等重要应用研究领域,微反应器则是提高反应产物质量和提高过程效率的重

要手段。借助微反应器良好的混合和传热性能,微反应器可以有效地控制反应物的混合状态和反应温度,从而提高化学反应的选择性。研究表明,对于很多有机合成反应,利用微反应器可以有效地提高反应的选择性和收率。Nagaki^[35]的课题组利用多股并流式微反应器,强化了 Friedel-Crafts 反应的混合过程,并将反应产物的收率从 37% 提高到了 92%。笔者所在实验室也使用了 T 型微反应器成功强化了 SINA 预混合反应的混合性能并有效控制了反应的停留时间,将反应选择性由 93% 提高到了 99%^[30]。对于聚合反应,利用微反应器还可以有效控制聚合过程的温度以及引发剂在反应单体中的分布。Iwasaki 等^[36]利用毛细管微反应器良好的换热性能,有效缩小了一种自由基聚合反应产物的分子质量分布。微反应器还被广泛应用于有机、无机材料的制备领域,借助微反应器流动和分散的可控性,在微反应器内可以制备出单分散性的聚合物微球、微胶囊和无机氧化物微球^[37-39],这些材料良好的宏观形态对于发挥材料的性能是十分重要的。此外,利用微反应器良好的均相、非均相混合性能,在微反应内可以快速混合沉淀反应的物料,从而在反应器内实现高的过饱和度,这对于纳米颗粒制备反应十分重要。目前笔者所在实验室使用 T 型微反应器,已经成功实现了纳米硫酸钡、二氧化钛、碳酸钙、氧化锆等颗粒的可控制备^[40-41]。

4 工业化

在工业生产领域,微反应器的应用还处于起步阶段,将微反应器推向工业化面临着反应器的放大问题。微反应器的放大采用的是数目放大的思路,这一点不同于常规的放大过程,但这种集成式的放大可能会带来化学工程领域的一场革命。常规的放大过程容易造成反应器的性能下降,这主要是由反应器尺寸变大带来的反应器内流动、混合尺度分布变宽造成的,采用数目放大的方法可以保持微反应器的优势。在数目放大过程中最为关键的就是要如何保证每个微反应单元内流动和混合情况一致。目前在国内工业微反应器的设计上已经做了一定的尝试,例如,中国科学院大连化学物理研究所已经成功研制出 10 万 t/a 的液氨稀释和氨气吸收微系统,并进行了工业生产规模试运行^[42]。笔者所在本课题组也成功开发出 1 万 t/a 的纳米碳酸钙微反应器装置,并已实现工业化生产;但是对于数目放大的过程来讲目前还没有一个统一的规律性的认识,因此微

反应器的放大还是未来研究工作的重点之一。

5 结语

从微反应器的出现到现在已经经历了 10 余年的时间,对于微反应器的研究也获得了大量的成果,微尺度流体的特殊性在研究中得到了揭示,微反应器优异的性能也随着研究过程的不断深入而逐渐被研究者们认知。但是,作为一个新兴的领域,关于微尺度流体和微反应器的深入研究还有待开展,微反应器内复杂的多相流行为和调控规律还需要深入研究,目前对于微尺度下流体间传质、传热规律的认识还并不完善,新型的微反应器还有待开发,特别是在微反应器的放大规律研究和工业化研究上还需要大力加强。

参考文献

- [1] Ehrfeld W, Hessel V, Lowe H. 微反应器:现代化学中的新技术[M]. 骆广生,王玉军,吕阳成,译. 北京:化学工业出版社,2004.
- [2] 方肇伦. 微流控分析芯片的制作及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [3] Christopher G F, Anna S L. Microfluidic methods for generating continuous droplet streams[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(19): R319 - R336.
- [4] Link D R, Anna S L, Weitz D A, et al. Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(5): 054503.
- [5] Dumann G, Quittmann U, Groschell L, et al. The capillary-microreactor: A new reactor concept for the intensification of heat and mass transfer in liquid-liquid reactions[J]. *Catalysis Today*, 2003, 79(1/2/3/4): 433 - 439.
- [6] Pennemann H, Hessel V, Lowe H. Chemical microprocess technology from laboratory-scale to production[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(22/23): 4789 - 4794.
- [7] Lob P, Lowe H, Hessel V. Fluorinations, chlorinations and brominations of organic compounds in micro reactors[J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2004, 125(11): 1677 - 1694.
- [8] Chen G G, Luo G S, Li S W, et al. Experimental approaches for understanding mixing performance of a minireactor[J]. *AIChE Journal*, 2005, 51(11): 2923 - 2929.
- [9] Xu J H, Luo G S, Chen G G, et al. Mass transfer performance and two-phase flow characteristic in membrane dispersion mini-extractor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, 249(1/2): 75 - 81.
- [10] Kralj J G, Schmidt M A, Jensen K F. Surfactant-enhanced liquid-liquid extraction in microfluidic channels with inline electric-field enhanced coalescence[J]. *Lab on a Chip*, 2005, 5(5): 531 - 535.
- [11] Dendukuri D, Tsoi K, Hatton T A, et al. Controlled synthesis of non-spherical microparticles using microfluidics[J]. *Langmuir*, 2005, 21(6): 2113 - 2116.
- [12] Gunther A, Jensen K F. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis[J]. *Lab on a Chip*, 2007, 7

- (7):935-935.
- [13] Xu J H, Li S W, Tan J, *et al.* Controllable preparation of monodisperse O/W and W/O emulsions in the same microfluidic device[J]. *Langmuir*, 2006, 22(19):7943-7946.
- [14] Hessel V, Lowe H, Schonfeld F. Micromixers: A review on passive and active mixing principles[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(8/9):2479-2501.
- [15] Hashimoto M, Garstecki P, Whitesides G M. Synthesis of composite emulsions and complex foams with the use of microfluidic flow-focusing devices[J]. *Small*, 2007, 3(10):1792-1802.
- [16] Xu J H, Luo G S, Li S W, *et al.* Shear force induced monodisperse droplet formation in a microfluidic device by controlling wetting properties[J]. *Lab on a Chip*, 2006, 6(1):131-136.
- [17] Zhao Y C, Chen G W, Yuan Q. Liquid-liquid two-phase flow patterns in a rectangular microchannel[J]. *AIChE Journal*, 2006, 52(12):4052-4060.
- [18] Taha T, Cui Z F. CFD modelling of slug flow inside square capillaries [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61:665-675.
- [19] Qu W L, Mudawar I. Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks: I. Experimental investigation and assessment of correlation methods[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(15):2755-2771.
- [20] Li S W, Xu J H, Wang Y J, *et al.* Mesomixing scale controlling and its effect on micromixing performance[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(13):3620-3626.
- [21] Xu J H, Tan J, Li S W, *et al.* Enhancement of mass transfer performance of liquid-liquid system by droplet flow in microchannels[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 141(1/2/3):242-249.
- [22] Zhao Y C, Chen G W, Yuan Q. Liquid-liquid two-phase mass transfer in the T-junction microchannels [J]. *AIChE Journal*, 2007, 53(12):3042-3053.
- [23] Wang K, Lu Y C, Shao H W. Heat transfer performance of liquid/liquid micro-dispersed system [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(23):9754-9758.
- [24] Schneider M A, Stoessel R. Determination of the kinetic parameters of fast exothermal reactions using a novel microreactor-based calorimeter [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 115(1/2):73-83.
- [25] Xu J H, Li S W, Tan J, *et al.* Preparation of highly monodisperse droplet in a T-junction microfluidic device [J]. *AIChE Journal*, 2006, 52(9):3005-3010.
- [26] Xu J H, Li S, Chen G G, *et al.* Formation of monodisperse microbubbles in a microfluidic device [J]. *AIChE Journal*, 2006, 52(6):2254-2259.
- [27] Chu L Y, Utada A S, Shah R K, *et al.* Controllable monodisperse multiple emulsions[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2007, 46(47):8970-8974.
- [28] Chu L Y, Kim J W, Shah R K, *et al.* Monodisperse thermoresponsive microgels with tunable volume-phase transition kinetics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(17):3499-3504.
- [29] Gunther A, Khan S A, Thalmann M, *et al.* Transport and reaction in microscale segmented gas-liquid flow[J]. *Lab on a Chip*, 2004, 4(4):278-286.
- [30] Wang K, Lu Y C, Shao H W, *et al.* Improving selectivity of temperature-sensitive exothermal reactions with microreactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(14):4683-4688.
- [31] Garcia-Egido E, Spikmans V, Wong S Y F, *et al.* Synthesis and analysis of combinatorial libraries performed in an automated micro reactor system[J]. *Lab on a Chip*, 2003, 3(2):73-76.
- [32] Kohler J M, Zieren M. Chip reactor for microfluid calorimetry[J]. *Thermochimica Acta*, 1998, 310(1/2):25-35.
- [33] Song H, Ismagilov R F. Millisecond kinetics on a microfluidic chip using nanoliters of reagents[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125(47):14613-14619.
- [34] Felbel J, Reichert A, Kielpinski A, *et al.* Reverse transcription-polymerase chain reaction (RT-PCR) in flow-through micro-reactors: Thermal and fluidic concepts[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 135: S298-S302.
- [35] Nagaki A, Togai M, Suga S, *et al.* Control of extremely fast competitive consecutive reactions using micromixing[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(33):11666-11675.
- [36] Iwasaki T, Yoshida J. Free radical polymerization in microreactors. Significant improvement in molecular weight distribution control [J]. *Macromolecules*, 2005, 38(4):1159-1163.
- [37] Xu J H, Li S W, Tan J, *et al.* Controllable preparation of monodispersed calcium alginate microbeads in a novel microfluidic system[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2008, 31(8):1223-1226.
- [38] Gong X C, Lu Y C, Xiang Z Y, *et al.* Preparation of uniform microcapsules with silicone oil as continuous phase in a micro-dispersion process [J]. *Journal of Microencapsulation*, 2007, 24(8):767-776.
- [39] Chen Y, Wang Y J, Yang L A, *et al.* Micrometer-sized monodispersed silica spheres with advanced adsorption properties[J]. *AIChE Journal*, 2008, 54(1):298-309.
- [40] Chen G G, Luo G S, Xu J H, *et al.* Membrane dispersion precipitation method to prepare nanoparticals[J]. *Powder Technology*, 2004, 139(2):180-185.
- [41] Wang K, Wang Y J, Chen G G, *et al.* Enhancement of mixing and mass transfer performance with a microstructure minireactor for controllable preparation of CaCO₃ nanoparticles[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(19):6092-6098.
- [42] 陈光文. 微化工技术研究进展[J]. *现代化工*, 2007, 27(10):8-13. ■

《现代化工》“海外纵横”栏目征稿启事

《现代化工》“海外纵横”主要介绍国外某一国家或地区热点科研领域的开发应用状况、开发方向,或某一行业的发展现状、发展方向和问题探讨,以及有突出表现的国外公司的科研动态和研发经验等。

有意投稿的作者,请与“海外纵横”栏目编辑董志勇联系,以确定合适的主题和格式。联系电话:010-64444105-839, Email: tongzy@cheminfo.gov.cn。(本刊编辑部)