

主动式微反应器的设计及其混合性能研究

栗宏顺, 张仕凯, 李文龙, 孙东鹏*, 陈 东*

(浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 微反应器因其显著优势, 已在化学合成、药物生产与能源材料等多个领域实现广泛应用。在高黏度以及含固体颗粒反应体系中, 被动式微反应器因其设计特性, 普遍存在压降大和易堵塞的问题, 限制了其实际应用。为解决该问题, 将微通道放大至厘米级, 开发了一种以电机驱动搅拌轴进行混合的新型主动式微反应器, 适用于高黏度以及含固体颗粒反应体系, 兼具高混合性能与高生产通量的优势。围绕搅拌结构的流动特性, 设计了直叶桨、直叶桨加挡板、螺旋桨 3 种搅拌结构。结合计算流体力学(CFD)模拟与实验验证, 以离集指数(X_s)、混合效率(η)为评估指标, 详细研究了时间、进口流速与搅拌转速对混合性能的影响, 并对强化传质机理进行了分析。在 3 种搅拌结构中, 直叶桨通过局部高剪切诱发径向射流强化混合过程; 直叶桨加挡板通过抑制周向旋涡转化周向动量为径/轴向流动强化混合过程; 螺旋桨通过轴向驱动形成贯通环流强化混合过程。研究表明, 3 种搅拌结构混合性能从高到低依次为直叶桨加挡板、直叶桨、螺旋桨; 并且进口流速对混合效果的影响小于搅拌转速。

关键词: 主动式微反应器; 搅拌结构设计; 高黏度; 数值模拟; 混合效率; 传质强化

中图分类号: X505

文献标识码: A

Design and Mixing Performance of Active Microreactors with Different Impeller Configurations

LI Hongshun, ZHANG Shikai, LI Wenlong, SUN Dongpeng*, CHEN Dong*

(College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Microreactors are widely applied in fields including chemical synthesis, pharmaceutical production, and energy material applications. However, passive microreactors are generally limited by inherent design constraints, including significant pressure drops and a high clogging risk, which restrict their practical application in reaction systems involving high viscosity and solid particles. To address this problem, this study enlarges the microchannel dimensions to the centimeter scale and develops a novel active microreactor driven by a motor-driven stirring shaft to achieve mixing. This design is suitable for high-viscosity and solid-particle-containing reaction systems, offering the advantages of high mixing performance and high production throughput. Three impeller configurations were designed within a 100 mm diameter flow domain: a straight blade (26 mm high), a straight blade with baffles (incorporating four transverse baffles), and a propeller (110 mm pitch). By combining computational fluid dynamics (CFD) simulations with experimental validation, the effects of time, inlet velocity, and stirring speed on mixing performance were investigated, with segregation index (X_s) and mixing efficiency (η) as evaluation metrics. Simulations utilized the RNG k - ϵ turbulence model and sliding mesh technique on a water/glycerin system, with a grid size of 1.5 mm determined via grid

收稿日期: 2025-11-04

修回日期: 2026-01-15

接受日期: 2026-01-17

DOI: 10.20078/j.eep.20260201

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22278352); 国家自然科学基金资助项目(22278352)

第一作者: 栗宏顺(1999—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要研究方向为微化工、催化剂筛选。E-mail: 22327009@zju.edu.cn

*通讯作者: 陈 东(1983—), 男, 福建龙岩人, 研究员, 主要研究方向为微流控、微化工、生物材料。E-mail: chen_dong@zju.edu.cn

孙东鹏(1993—), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 主要研究方向为微流控系统集成与装备开发。E-mail: sun_dongpeng@zju.edu.cn

independence tests. Analysis of mass transfer enhancement mechanisms showed that the straight blade impeller induces a radial jet via localized shear; the straight blade impeller with baffles suppresses circumferential vortices to convert momentum into radial/axial flow; and the propeller forms an axial-driven through-flow ring. Mixed fluid reached the outlet fastest with the propeller (0.9 s), followed by the straight blade (1.2 s) and the straight blade with baffles (1.3 s). Subsequently, the mixing efficiency (η) rose rapidly and then stabilized. Mixing performance was ranked as: straight blade with baffles > straight blade > propeller. Quantitative analysis indicated that the straight blade impeller reached a peak efficiency of 90.74% at 358 r/min, while the straight blade impeller with baffles further improved this to 93.70%. Although the propeller performed poorest at low speeds, its efficiency surpassed that of the straight blade at high speeds (956 r/min). Simulations also indicated that η decreased as inlet velocity increased (0.1 to 1.0 m/s) due to reduced residence time. To validate the simulation results, a mixing platform was constructed using the iodide-iodate reaction ($c(\text{H}^+)=0.012\ 55\ \text{mol/L}$). Experiments verified the simulation reliability and analyzed the effects of inlet velocity and stirring speed on the segregation index (X_s). Results showed that stirring speed had a significantly greater impact on mixing effectiveness than inlet velocity. Notably, increasing stirring speed from 0 to 280 r/min significantly reduced X_s from 0.978 to 0.268. The study concludes that the strategy of combining centimeter-scale scale-up with forced mechanical shearing effectively resolves the mixing challenges of high-viscosity systems, providing theoretical data and design criteria for industrial applications.

Keywords: Active microreactor; Stirring structure design; High viscosity; Numerical simulation; Mixing efficiency; Mass transfer enhancement

0 引言

连续流反应技术通过将反应物料持续泵入反应系统,实现了生产流程的不间断运行与高度自主化,已成为现代化学工业的关键技术^[1-3]。相较于传统间歇式反应,连续流技术能够精确调控工艺参数^[4-5],支持模块化系统构建^[6-7],且过程安全性更强^[8-9]。作为该技术体系的重要组成部分,微反应技术通过在微尺度下精确操控流体,能够更加高效地强化混合和控制反应过程^[10-12]。微反应器作为微反应技术的核心装备,其微米至毫米级通道结构所提供的极大比表面积与极短传递路径展现出优异的传质传热性能与精准的过程调控能力,为化工过程强化奠定了关键技术基础^[13-15]。微反应器通常采用模块化设计,集成流体分配、反应核心、热量管理及测控等基本单元,并可根据具体工艺需求灵活配置功能模块^[16]。这种高度集成的模块化架构,结合其高效率、高安全和精准调控等特点,使微反应器在液-液/固-液多相催化、化学合成及药物开发等领域展现出广泛的适用性,推动相关行业的技术升级与工艺创新^[17-19]。

微反应器可根据混合过程是否依赖外部能量,划分为被动式与主动式两大类型^[20]。被动式

微反应器通过精心设计的流道结构(如弯曲通道、障碍物设置等)来引导流体产生分割、碰撞或二次流动,从而实现混合强化,具有结构简单、能耗较低等优势^[21-23]。然而,当处理高黏度流体或含有固体颗粒的复杂体系时,此类反应器往往面临流动阻力急剧增大、通道易堵塞等工程难题^[24]。相比之下,主动式微反应器通过引入机械搅拌等外部能量,主动干预流场结构、增强流体湍动,在维持较高通量的同时实现快速且均匀的混合,有效克服了被动式反应器的固有限制^[25-27]。

在聚合反应、结晶过程及多相催化等工业应用中,高黏度或含固体颗粒的复杂反应体系日益普遍。这类物系通常表现出较高的流变学复杂性,分子扩散过程缓慢,传统被动混合方式效果有限,而声、电、磁等外场作用力也因黏性耗散效应而显著衰减^[28]。机械搅拌通过旋转部件将机械能直接转化为强烈的流体剪切与强制对流,能够有效突破黏性阻力,为这类难处理物系提供了可靠的混合解决方案^[29]。然而,目前的主动式微反应器多采用磁力驱动或微型转子结构,受限于微小的通道尺度与有限的驱动力矩,难以在维持高黏度体系流动稳定性的同时提供足够的剪切破碎能力,且极易发生通道堵塞。关于搅拌混合的研究

多集中于传统釜式反应器,其流场特性和混合机理与微观尺度下的受限流动存在本质差异,无法直接指导微反应器的设计。因此,针对连续流微反应器内搅拌结构的设计优化及其混合机理仍有待系统研究。

本研究将反应通道尺度拓展至厘米级,开发了一种由电机直接驱动搅拌轴的新型主动式微反应器。设计了直叶桨、直叶桨加挡板及螺旋桨3种典型搅拌结构,并重点探究了不同搅拌结构对主动式微反应器混合性能的调控规律。“厘米尺度拓展”与“强制机械剪切”协同强化策略大幅提升了处理通量与抗堵塞能力。结合计算流体力学(CFD)模拟与实验验证,深入解析了不同搅拌结构下的流体动力学行为与混合特性,考察了混合时间、进口流速及搅拌转速等关键参数对混合效率的影响规律,系统研究了其流场特性与强化传质机理。本研究旨在建立面向高黏度及含固体颗粒体系的主动式微反应器结构设计原则,为相关工业过程的混合强化提供理论依据和技术支持。

1 主动式微反应器搅拌结构设计及数值模拟

1.1 主动式微反应器搅拌结构的设计

不同搅拌结构决定了能量输入的方式和流体运动的模式,常见的流场强化机制包括利用局部高剪切诱发径向射流、抑制周向旋涡以转化动量为径/轴向流动,以及通过轴向驱动形成贯通环流等。基于此,本研究设计了直叶桨、直叶桨加挡板及螺旋桨3种搅拌结构,如图1所示。其中直叶桨通过桨叶旋转剪切诱发径向射流强化混合过程;直叶桨加挡板通过抑制周向旋涡,将周向动量转化为径/轴向流动,从而增强混合效果;螺旋桨结构主要通过轴向驱动形成贯通环流,实现全域混合强化。所有搅拌结构均具有相同的筒体结构,筒体右侧设有2个进口,分别输送不同流体,左侧设有1个出口。进出口通道的直径均为60 mm,流域接触面的直径均为100 mm。直叶桨桨叶高26 mm,宽20 mm,厚5 mm,间隔90 mm;直叶桨加挡板在直叶桨的基础上增设4根横向挡板,每根

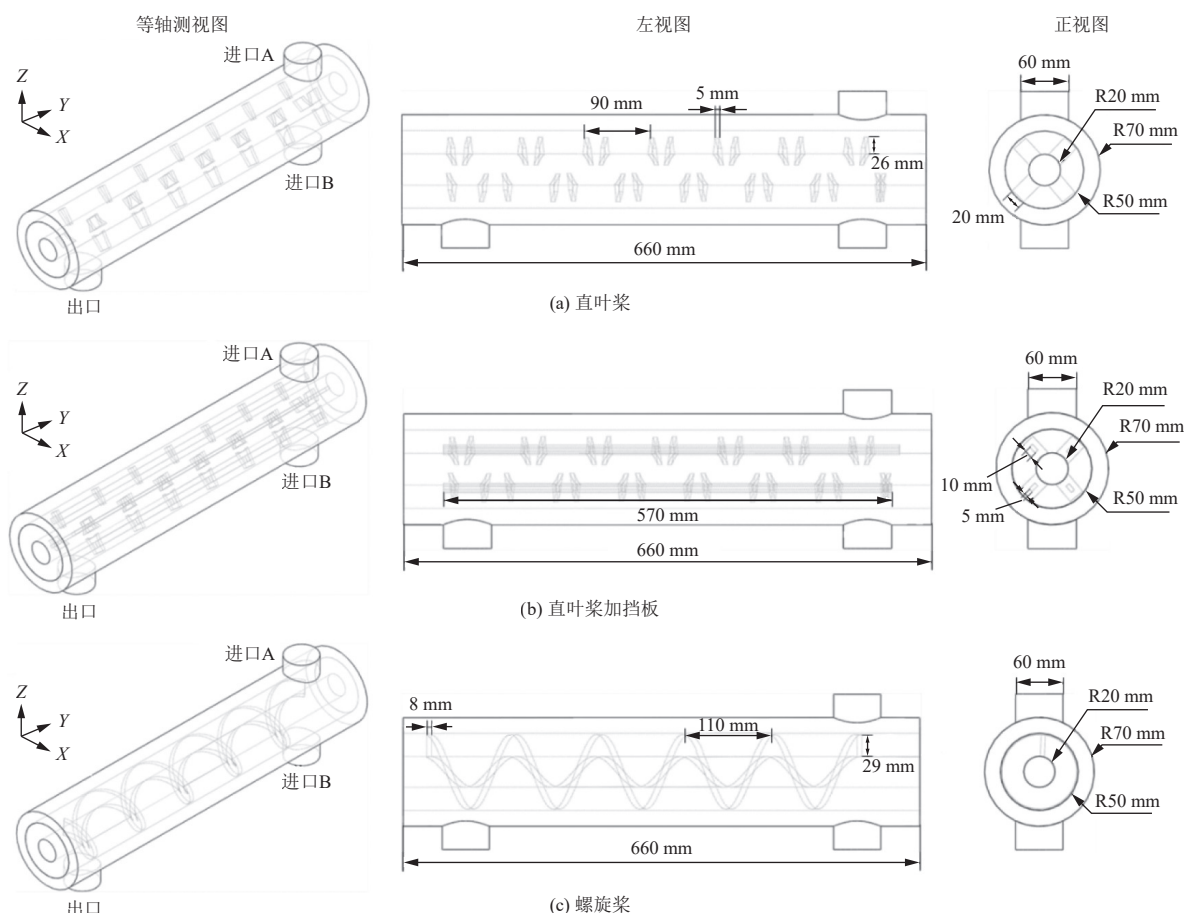


图1 3种搅拌桨片的结构设计

Fig. 1 Structural design of different impeller configurations

挡板将同角度的桨片互相连接,挡板长 570 mm,宽 10 mm,厚 5 mm;螺旋桨片间距 110 mm,高 29 mm,厚 8 mm。

1.2 主动式微反应器混合数值模拟

1.2.1 数值模拟理论与方法

本研究以质量、动量及能量守恒原理构建的流体控制方程为理论基础^[30],该方程组描述了反应器内速度、压力、浓度与温度等参数的时空分布,具体形式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 U + f_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (U \cdot \nabla)C = D \nabla^2 C \quad (3)$$

式中: ∇ 为矢量微分算子; ρ 为流体密度 (kg/m^3); t 为时间 (s); U 为流体速度矢量 (m/s); μ 为流体动力黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); P 为压力 (Pa); f_v 为单位质量流体的体积力矢量 (N); C 为物质浓度 (kg/m^3); D 为扩散系数 (m^2/s)。

本研究采用水与甘油均相混合体系进行数值模拟,设定水/甘油体系扩散系数为 $9.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。基于主动式微反应器内搅拌轴旋转诱发强弯曲流线的特点,使用黏性选项中的 RNG $k-\varepsilon$ 模型计算湍流状态下单相流体流动的速度场和压力场,使用组分传递模型计算多组分流体系统中组分扩散和对流运动的浓度场。考虑到计算精度与效率,采用滑移网格法处理桨叶转动。

2 种组分的入口边界均为速度型边界条件;出口为压力型出口,相对压力为 0 Pa,选择抑制回流;其余边则设置为壁面,且壁面为无滑移条件。将内部流体域设置为转动域,选择网格运动,确定旋转轴以及旋转方向,并按模拟条件设置旋转角速度。在初始时间,系统整体的操作温度为 25 °C,操作压力为 0 Pa。在初始化后,整个微通道中水的质量分数为 100%。

数值模拟过程采用基于压力的瞬态时间求解器类型,并且考虑重力影响。速度压力耦合采用 SIIMPLEC 算法,速度与压力与组分采用二阶迎风离散化方案,湍动能与耗散率采用一阶迎风离散化方案,时间步长取 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$,当速度、连续性和组分的归一化残差小于 10^{-3} 时,认为数值模拟的解收敛。

数值模拟中,引入式(4)计算混合效率(η),以定量评估不同桨片结构的混合效果^[31]:

$$\eta = \left(1 - \frac{1}{c^*} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - c^*)^2} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中: N 为数据集的样本数量; c_i 为第 i 个取值点处组分浓度 (kg/m^3); c^* 为理想混合情况下组分浓度 (kg/m^3)。混合效率 η 的范围为 0~100%,当 η 为 0 时,表示 2 种溶液完全没有混合;当 η 为 100% 时,表示 2 种溶液 100% 混合。

为确保数值解的准确性并评估其与网格尺寸的无关性,进行了网格独立性检验,对比了不同网格密度下的计算结果。使用不同尺寸的网格模拟进口流速为 0.2 m/s (体积流量 $Q_v = 1.1304 \text{ L/s}$)、直叶桨转速为 477 r/min 时主动式微反应器内的流体混合过程,并在反应器出口处设置采集点,根据公式 (4) 计算 η 以评估网格单元数量的影响。根据几何模型尺寸分别设置 6 种网格尺寸,对应的网格单元数量见表 1。

表 1 不同网格尺寸对应的参数

Table 1 Parameters corresponding to different grid sizes

网格尺寸/mm	网格单元数量/个	混合效率 η /%
4.0	327 416	97.12
3.0	412 549	96.04
2.5	874 657	95.43
2.0	1 794 120	95.14
1.5	3 027 461	94.82
1.0	4 207 913	94.73

当网格尺寸从 4.0 mm 逐渐细化至 1.0 mm,可以观察到 η 整体呈现下降趋势,且变化的幅度逐渐减小,最后趋于平稳,如表 1 和图 2 所示。当网格尺寸从 1.5 mm 细化至 1.0 mm 时, η 变化率较小,降低了 0.05%,此时网格尺寸对流体混合数值

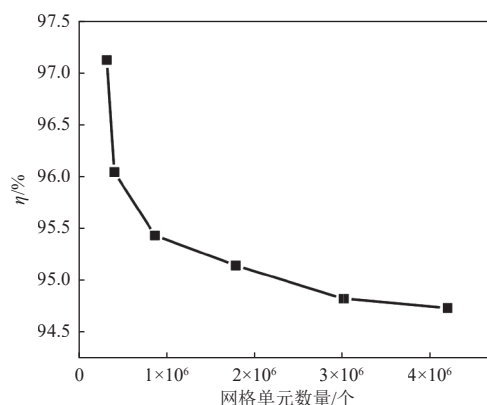


图 2 网格无关性分析

Fig. 2 Grid independence analysis

模拟的结果无显著影响。因此,确定数值模拟的网格尺寸采用 1.5 mm。

1.2.2 数值模拟结果与讨论

为揭示不同桨片结构在主动式微反应器中的混合强化机制,在进口流速 1 m/s、搅拌转速 477.7 r/min 条件下,对 3 种桨片结构反应器内的流场进行数值模拟,获得的速度矢量分布如图 3 所示。从速度矢量分布可以看出,直叶桨、直叶桨加挡板和螺旋桨 3 种搅拌结构均能在反应器内形成特定的高速剪切区与涡流结构,这些强扰动区域有效增强了流体的湍动程度,破坏了原有的层流状态,从而显著强化了混合过程。进一步分析表明,不同搅拌结构诱导的流动形态与混合机制存在显著差异。

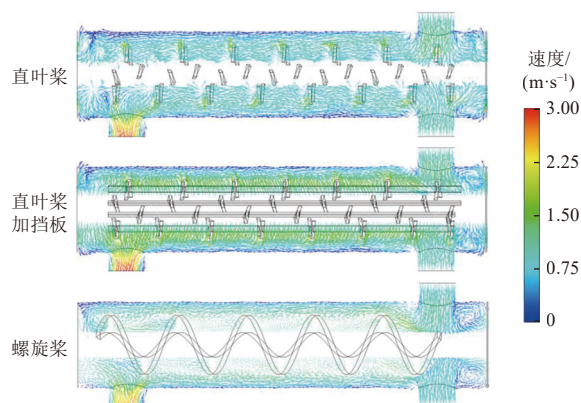


图 3 3 种桨片结构的速度矢量图

Fig. 3 Velocity vector diagrams of three impeller configurations

对于直叶桨结构,高速旋转的桨叶产生强烈离心作用,驱动流体沿径向运动,在壁面阻滞下形成显著涡流,最高流速与最大速度梯度集中分布于桨叶上边缘区域。在直叶桨基础上增设挡板后,可有效抑制周向整体旋涡,促进流动动能向径向与轴向转化,挡板附近流速显著提升且流向变化加剧,形成的周期性涡流有效增强了高黏度流体的掺混能力,此时最高流速区分布于挡板与桨叶上边缘。螺旋桨结构则通过轴向推进作用形成贯通式循环流动,最高流速出现于桨叶外缘,桨叶间产生的大尺度周期性涡流进一步强化了传质过程。

除搅拌结构外,时间、进口速度与搅拌转速对主动式微反应器内流体的流动与混合行为亦具有重要影响,如图 4 所示。以水/甘油均相体系为研究对象,分别从浓度场分布和混合效率两个维度分析了时间、进口速度与搅拌转速的作用规律。

图 4(a)~(c)通过甘油质量分数的空间分布直观表征了混合过程的发展规律。在进口流速为 1 m/s、搅拌转速为 477.7 r/min 条件下,不同混合时间的浓度场演变如图 4(a)所示。反应器初始充满水,随着甘油/水混合液的持续进入,进口附近桨叶区域因强烈湍动首先形成高浓度梯度区,随后混合范围逐步扩展,最终实现全域均匀混合。

图 4(b)展示了不同进口流速下的混合状态对比。低流速条件下,充足的停留时间确保了甘油与水具有良好的混合效果。随着流速增大,停留时间则相应缩短,流体微团需要更长的流道才能达到相同混合效果。值得注意的是,桨叶附近始终保持明显的浓度梯度,证实了对流传质在混合过程中的主导地位。与其他操作参数相比,搅拌转速对混合性能的影响尤为显著,不同搅拌转速下的混合性能演变如图 4(c)所示。提升转速显著增强了桨叶对流体的剪切作用,湍动程度的加剧有效促进了组分间的质量交换。较高的转速不仅扩大了高效混合区域,还显著提升了混合均匀度。

在此基础上,进一步通过混合效率 η 对 3 种桨片结构的混合性能进行了定量评估。3 种桨片结构下 η 随时间的变化规律如图 4(d)所示。初始阶段 $\eta=0$,表明出口为纯水;随着反应进行, η 快速上升并最终稳定。螺旋桨结构下甘油在 0.9 s 最先到达出口,直叶桨与直叶桨加挡板分别需要 1.2 s 和 1.3 s。在 2.1 s 前,螺旋桨的混合性能最优;2.1 s 后,直叶桨加挡板展现出最佳的混合效果。

进口流速对混合效率的影响如图 4(e)所示。随着流速从 0.1 m/s 增至 1.0 m/s,3 种结构的 η 均持续下降,主要原因是停留时间缩短,导致搅拌时间缩短,从而影响混合效果。 η 下降速率先加快后减缓,这是因为停留时间对进口流速变化的敏感性降低,混合性能下降趋势也趋于平缓。在所有测试进口流速下,直叶桨加挡板始终保持最高的混合效率,直叶桨次之,螺旋桨相对最弱。

搅拌转速对 η 的定量影响如图 4(f)所示。静止状态下(0 r/min),3 种结构的 η 均处于较低水平。随着转速提升, η 快速上升并趋于稳定。具体而言,直叶桨在 358 r/min 时达到峰值 90.74%;增设挡板后,由于增强了流场剪切与宏观循环, η 进一步提升至 93.70%;螺旋桨的 η 则随转速持续增长,在 956 r/min 时超越直叶桨。

为了深入揭示进口流速与搅拌转速对混合效率的影响机理,通过数值模拟系统分析了 3 种桨

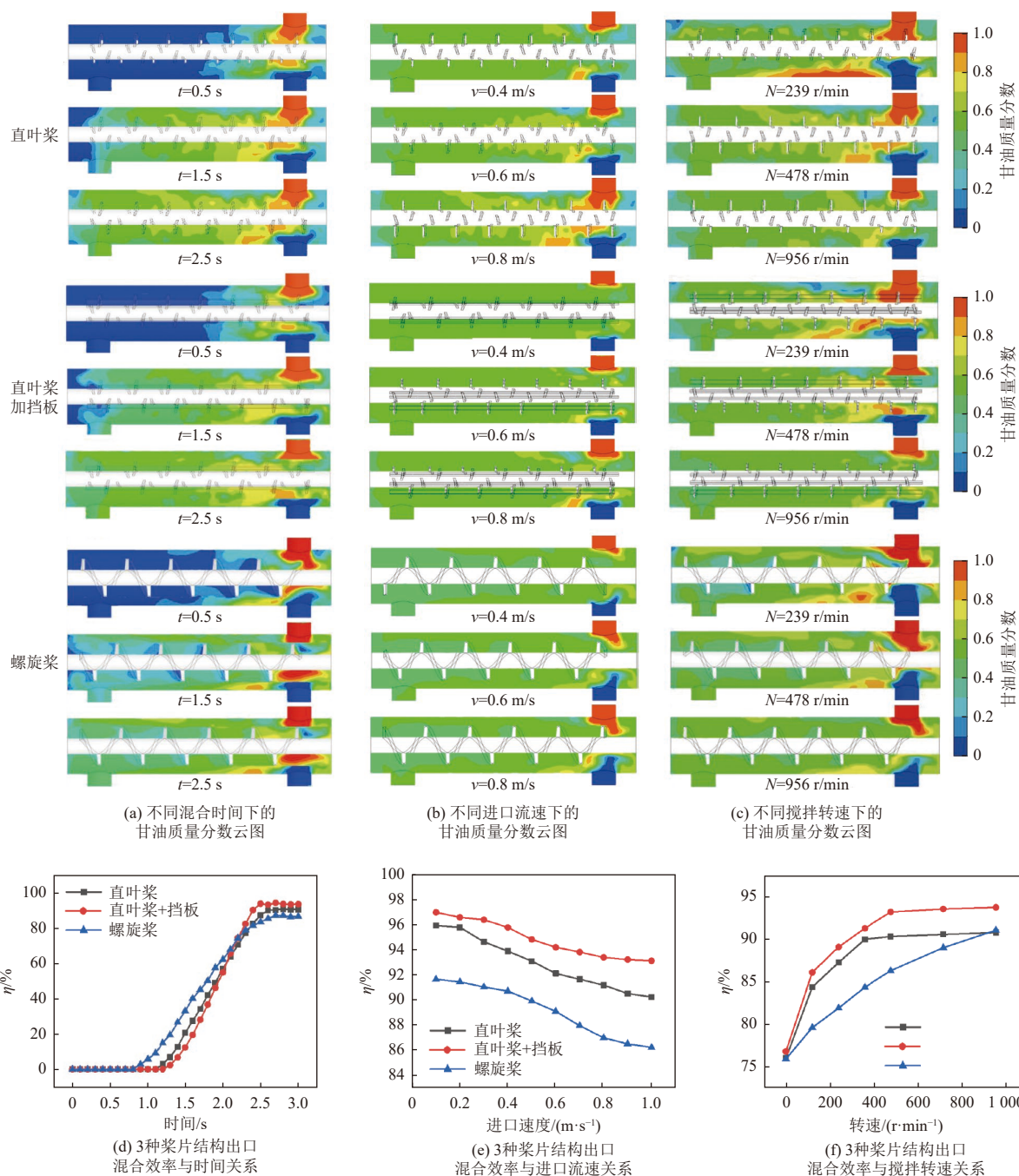


图 4 时间、进口速度、搅拌转速对混合效率的影响规律

Fig. 4 Effects of time, inlet velocity, and stirring speed on mixing performance

片结构在不同操作参数下的流场特性,结果如图5所示。图5(a)展示了不同进口流速下的流场分布。在3种桨片结构中,反应器左右两侧壁面处均可观察到两对对称涡旋。随着进口流速增大,反应器内部整体流速增大,但桨叶诱导的涡旋强度相对减弱,这是导致混合效果随流速增加而下降的重要原因。

不同搅拌转速下的流场演变如图5(b)所示。随着转速提升,3种结构的整体流速显著增加,其

中桨叶顶部及挡板区域流速最为突出。同时,流体湍动程度持续增强,流线弯曲程度加剧,并在桨叶后方形成明显的涡旋结构。这些由高速旋转搅拌轴推动产生的涡旋,有效促进了流体的混合与物质交换过程。通过对比分析可知,进口流速主要通过改变流体停留时间影响混合效率,而搅拌转速则通过增强湍动和涡旋强度优化混合效果。该结论为理解不同操作参数下的混合机理提供了重要依据。

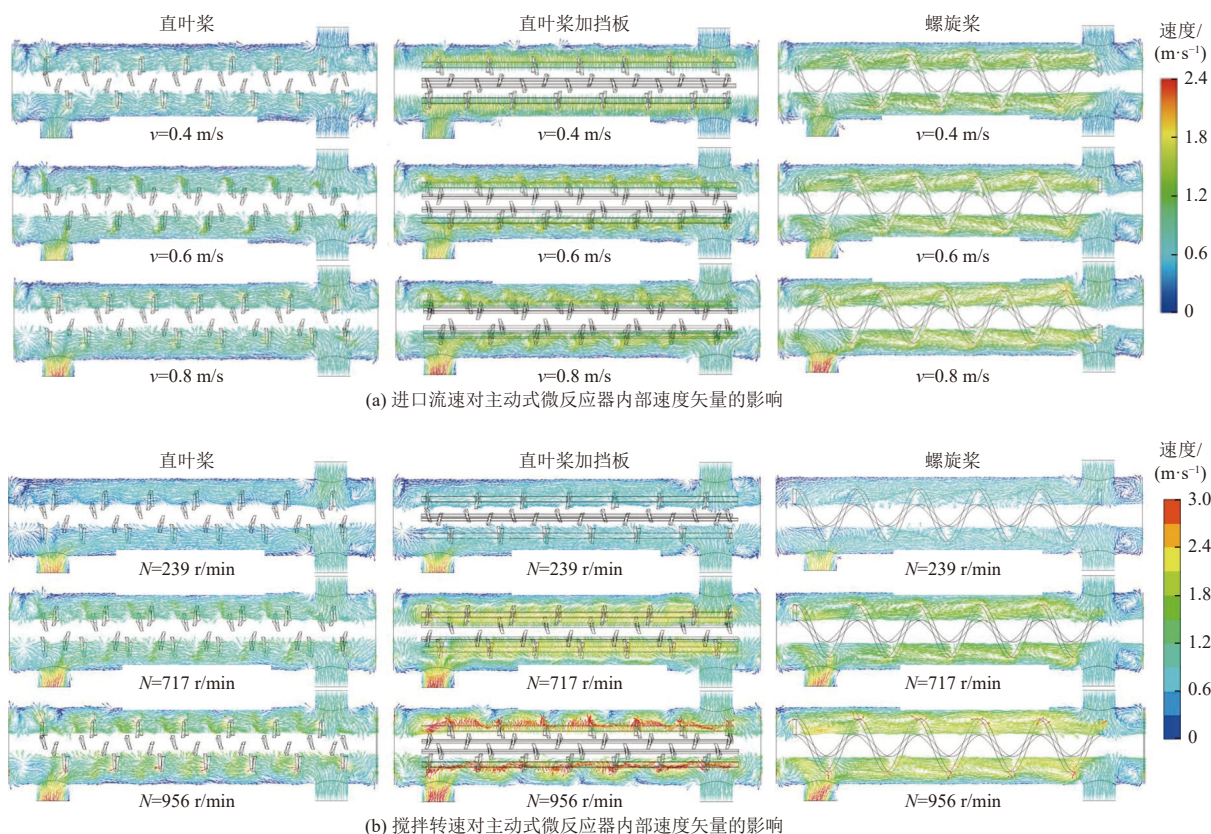


图 5 3 种桨片结构在不同进口流速和搅拌转速下的速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector diagrams of three impeller configurations at different inlet velocities and stirring speeds

2 主动式微反应器混合性能的实验研究

2.1 实验平台设计与搭建

为了验证数值模拟方法的准确性与可靠性,本研究拟选取具有代表性的主动式反应器搅拌结构进行实验验证。基于数值模拟结果的对比分析发现,直叶桨类结构在处理高黏度流体时,其宏观混合效果明显优于螺旋桨。考虑到实验加工难度与成本,在验证实验中选择了结构相对简单且具备良好混合效果的直叶桨搅拌结构。

为了验证直叶桨数值模拟结果,设计并搭建了主动式微反应器微混合实验测试平台,如图 6 所示。具有直叶桨结构的主动式微反应器装配结构如图 6(a)所示,主要由筒体、法兰、封头、搅拌轴、轴承、动密封等零部件组成。考虑到微反应器的耐腐蚀性、耐磨性和焊接性,主体材料选用 316L 不锈钢。筒体为圆柱状直筒,两边开口,在右端设置有流体出口,左端设置有上下 2 个流体进口,所述流体进出口均设有标准快装法兰,法兰上安装标准螺纹卡套接头。筒体两边设有相同规格的平焊法兰,与封头间设有垫片进行密封,并通过螺栓连接。封头内部设有机械密封以防反应物

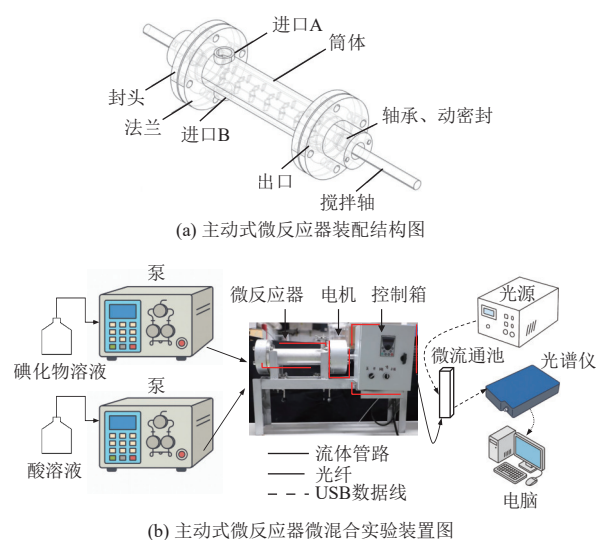


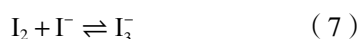
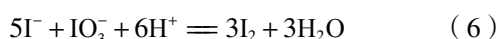
图 6 主动式微反应器混合性能测试平台

Fig. 6 Testing platform for mixing performance of the active microreactor

流出及外部杂质进入反应器内,设有轴承用于搅拌轴的装配与转动,封头设有用于与法兰连接的螺纹孔。搅拌轴贯穿整个筒体,搅拌轴上设有常规的直桨片,每隔 90°旋转分布的 4 片桨片为 1 组,共 6 组桨片,且每组桨片之间间隔相等。为

模拟高黏度含固体颗粒的反应物料,采用二氧化硅粉末配制悬浮液通入反应器并启动搅拌调整至适当转速。出口处悬浮液均匀流出,无堵塞现象,说明符合质量要求。

主动式微反应器微混合实验装置如图6(b)所示。采用碘化物-碘酸盐平行竞争反应作为模型体系评估微反应器的混合性能,相关反应式见(5)~(7)。



首先使用平流泵输送去离子水充满整个反应器内部,通过控制箱开启搅拌轴并调整至指定转速,然后从2个进口处等流量比同时泵入碘化物混合液与酸溶液至微反应器中。理想快混合时, H^+ 由酸碱中和(反应(5))瞬时消耗,不发生反应(6)与(7);非理想慢混合下,反应(5)发生后局部存在 H^+ 高浓度区域,发生反应(6)和(7)。因此微反应器中2种溶液混合时会生成 I_3^- 并流入微流通池, I_3^- 浓度越高,表明溶液混合越慢。启动氙卤光源和光谱仪,并将其模式设置为吸光度,设定353 nm的测试波长,氙灯发出的光通过光纤到达透明窗口,部分光线被反应液吸收,而剩余光线透过反应液并沿光纤进入光谱仪。光谱仪连续记录吸光度时间曲线,采用光谱仪稳定后的吸光度数据计算 I_3^- 浓度,并依据公式(8)~(10)计算离集指数 X_s 描述混合性能。

$$X_s = \frac{Y}{Y_{\text{ST}}} \quad (8)$$

$$Y = \frac{2(Q_{\text{buffer}} + Q_{\text{acid}})([\text{I}_2] + [\text{I}_3^-])}{Q_{\text{acid}}[\text{H}^+]_0} \quad (9)$$

$$Y_{\text{ST}} = \frac{6[\text{IO}_3^-]_0}{6[\text{IO}_3^-]_0 + [\text{H}_2\text{BO}_3^-]_0} \quad (10)$$

式中: Y 为氧化还原反应消耗的 H^+ 与总加入的 H^+ 的摩尔比; Y_{ST} 为完全离集极限下由酸碱中和与氧化还原两条并行途径对 H^+ 竞争决定的上限分配比; Q_{buffer} 为入口处通入的碘化物-碘酸盐缓冲溶液的体积流量, mL/min; Q_{acid} 为入口处通入的酸溶液的体积流量, mL/min; $[\text{I}_2]$ 为反应器出口处 I_2 的浓度, mol/L; $[\text{I}_3^-]$ 为反应器出口处 I_3^- 的浓度, mol/L; $[\text{H}^+]_0$ 为酸溶液中 H^+ 的初始浓度, mol/L; $[\text{IO}_3^-]_0$ 为碘化物-碘酸盐缓冲溶液中 IO_3^- 的初始浓度, mol/L; $[\text{H}_2\text{BO}_3^-]_0$ 为碘化物-碘酸盐缓冲溶液中 H_2BO_3^- 的初始浓度, mol/L。反应器出口处 I_2 的浓

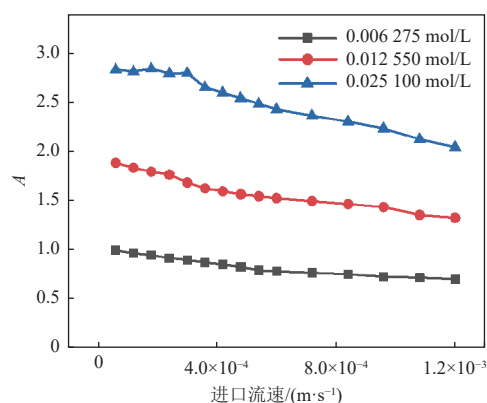
度由碘的质量守恒和配位平衡反应的平衡常数计算得到。其他参数由实验得到。 X_s 为0和1分别对应于理想的微观混合与完全离集状态,后者意味着混合过程极为缓慢。

2.2 实验结果与讨论

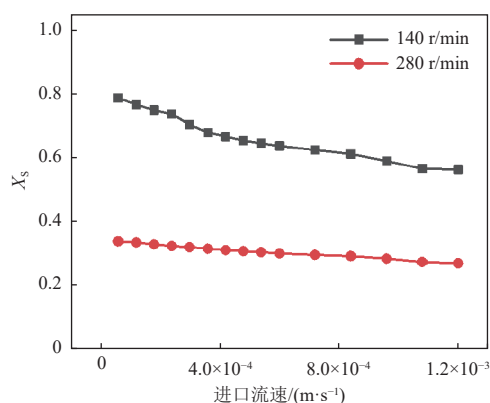
为了确定实验中最佳的 H^+ 浓度,测试了3种 H^+ 浓度下不同进口流速时的出口吸光度 A 。如图7(a)所示,3种 H^+ 浓度的吸光度曲线均随着进口流速增加呈现缓慢下降的趋势。 H^+ 浓度为0.025 100 mol/L时,浓度较高,在进口流速为 6×10^{-5} m/s到 3×10^{-4} m/s时,由于超出光纤光谱仪的量程,吸光度在2.8附近震荡。 H^+ 浓度较低时(0.006 275 mol/L),吸光度变化不明显。在 H^+ 浓度为0.012 550 mol/L下,变化趋势明显,吸光度从1.88下降至1.32,位于光谱仪量程中心位置。因此, H^+ 浓度为0.012 550 mol/L是最优的实验条件。在140 r/min和280 r/min搅拌转速下,向微反应器泵入等体积分量的碘化物混合液和酸溶液,测量了不同进口流速下的出口溶液吸光度并计算了离集指数 X_s ,如图7(b)所示。在140 r/min转速下, X_s 随进口流速的增加从0.786下降至0.562,且下降幅度逐渐减小,与模拟结果存在差异,这是因为流速的提升有助于增强入口处局部湍动,微混合效果小幅提升。与此同时,较高的搅拌转速下, X_s 变化非常小,说明搅拌效应明显大于进口流速的影响。在进口流速为 1.2×10^{-3} m/s时,测量了不同搅拌转速下的吸光度并计算 X_s ,如图7(c)所示。无搅拌时, X_s 为0.978,表明混合效率较低,仅依赖扩散进行混合。 X_s 随搅拌转速的升高而呈现下降趋势,且在280 r/min时降至0.268,达到最高混合效率。这表明,高搅拌转速能大幅增强微混合效果,进一步验证了搅拌转速在微混合中的主导作用。

3 结 论

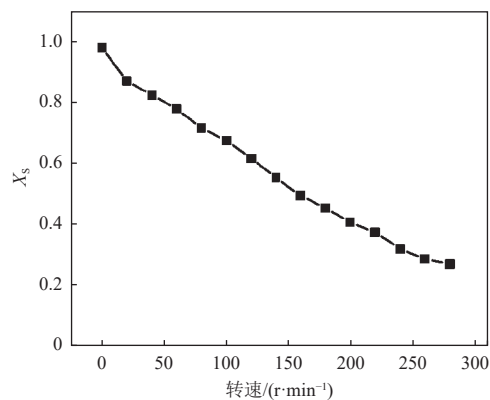
本研究聚焦于不同搅拌结构下主动式微反应器的混合性能。针对高黏度以及含固体颗粒的反应体系,本文将微通道放大至厘米级,开发了一种新型的以电机驱动搅拌轴进行混合的主动式微反应器。设计了直叶桨、直叶桨加挡板、以及螺旋桨3种典型的搅拌结构,分析了不同搅拌结构的强化传质机理,并研究了混合时间、进口流量和搅拌转速对混合性能的影响。数值模拟结果显示,主动式微反应器出口处 η 经一定时间后开始上



(a) 不同氢离子浓度下进口流速对吸光度 A 的影响



(b) 进口流速对离集指数 X_s 的影响



(c) 搅拌转速对离集指数 X_s 的影响

图 7 主动式微反应器混合性能的实验研究

Fig. 7 Experimental study on the mixing performance of the active microreactor

升,最后达到平稳,平稳段的 η 可以定量评价主动式微反应器的宏观混合效果。 η 随进口流速增加呈现出下降趋势,且下降幅度先增大后减缓; η 随搅拌转速的增加有明显提升,最终趋于平稳。在3种搅拌结构中,混合效果最好的是直叶桨加挡板,其次为直叶桨,螺旋桨表现最差。结合数值模拟结果与加工难度,选择直叶桨作为最佳搅拌结构搭建了微混合实验测试平台,测试了进口流速和搅拌转速对微混合效果的影响。实验结果表明,

搅拌转速在混合性能中起着主导作用,搅拌转速增大,混合效果大幅提升;而进口流速的变化对混合性能影响较小,随着进口流速的增大,入口处局部湍动增强,混合效果有小幅提升。直叶桨在宏观和微观混合方面表现出色,为适用于高黏度及含固体颗粒反应体系的主动式微反应器设计提供了重要参考,也为后续相关搅拌结构的优化与工程应用奠定了理论基础与实践依据。

参考文献 (References):

- [1] YUAN Jiashu, LIU Laihao, GAN Tongtong, et al. Continuous flow-electrochemical coupling technology for metal nanoparticle synthesis: Applications for catalysis[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(3): 2796–2805.
- [2] 孙东鹏, 郑园, 陈东. 微流控在二氧化碳捕集、利用与封存的研究[J]. *能源环境保护*, 2023, 37(2): 117–124.
SUN Dongpeng, ZHENG Yuan, CHEN Dong. Applications of microfluidics in carbon capture, utilization and storage (CCUS) [J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(2): 117–124.
- [3] 吉笑盈, 郑园, 李晓鹏, 等. 微流控可控制备液滴、颗粒和胶囊及其应用[J]. *化工学报*, 2024, 75(4): 1455–1468.
JI Xiaoying, ZHENG Yuan, LI Xiaopeng, et al. Controlled preparation of droplets, particles and capsules by microfluidics and their applications[J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(4): 1455–1468.
- [4] SANOJA LOPEZ K A, NOPE E, LUQUE R. Sustainable optimization of pharmaceutical synthesis: Applications and benefits of continuous flow chemistry[J]. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2025, 18(1): 2549732.
- [5] BRÁS E J S, CHU V, CONDE J P, et al. Recent developments in microreactor technology for biocatalysis applications[J]. *Reaction Chemistry & Engineering*, 2021, 6(5): 815–827.
- [6] WANG Xin, LIU Zhanqiang, WANG Bing, et al. An overview on state-of-art of micromixer designs, characteristics and applications[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023, 1279: 341685.
- [7] BAI Cheng, ZHOU Wen, YU Shifeng, et al. A surface acoustic wave-assisted micromixer with active temperature control[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 346: 113833.
- [8] WAN Li, JIANG Meifen, CHENG Dang, et al. Continuous flow technology—A tool for safer oxidation chemistry[J]. *Reaction Chemistry & Engineering*, 2022, 7(3): 490–550.
- [9] ZHANG Kaikai, SU Weike. Progress in continuous-flow oxidation of aromatic hydrocarbons[J]. *Pharmaceutical Fronts*, 2025, 7(2): e65–e76.
- [10] LAMEU DA SILVA J, SILVA SANTANA H, JOACHIM

- HODAPP M. Microreactor technology applied to catalytic processing of Hydrogen: A review[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2025, 143: 65–84.
- [11] SARMA P, PATOWARI P K. A review on fluid flow and mixing in microchannel and their design and manufacture for microfluidic applications[J]. *Micro and Nanosystems*, 2023, 15(3): 167–184.
- [12] HESSEL V, MUKHERJEE S, MITRA S, et al. Sustainability of flow chemistry and microreaction technology[J]. *Green Chemistry*, 2024, 26(18): 9503–9528.
- [13] ZHAO Xianglong, JIANG Hanyu, WANG Su, et al. Microreactors in chemical process intensification: Chemical reactions, crystallizations, extractions and emulsifications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 519: 165223.
- [14] YU Weifei, WEI Zhiyong, XU Ruijuan, et al. Explosive synthesis: Novel intrinsically safe method and application with micro-channel reactor[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1507(2): 022030.
- [15] HOU Junsheng, WU Junjie, CHEN Hongqiang, et al. Microfluidic controllable synthesis and size-dependent flow boiling heat transfer of silica nanofluids[J]. *Materials Today Nano*, 2023, 24: 100419.
- [16] 伊绘霖. 微反应器内有机过氧化物合成研究进展 [J]. *应用化学*, 2024, 41(11): 1535–1551.
YI Huilin. Research progress on the synthesis of organic peroxide in microreactor[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2024, 41(11): 1535–1551.
- [17] BIZUALEM Y D, NURIE A G, NADEW T T. A review on biodiesel micromixers: Types of micromixers, configurations, and flow patterns[J]. *Heliyon*, 2024, 10(15): e34790.
- [18] HAN Wenbo, LI Wei, ZHANG Hongpeng. A comprehensive review on the fundamental principles, innovative designs, and multidisciplinary applications of micromixers[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(10): 101306.
- [19] 张仕凯, 罗沧海, 郑园, 等. 微反应器强化传热传质在化工过程的应用 [J]. *能源环境保护*, 2023, 37(5): 174–182.
ZHANG Shikai, LUO Canghai, ZHENG Yuan, et al. Enhancements of mass transfer and heat transfer by microreactors and their applications in chemical engineering[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(5): 174–182.
- [20] SOLTANI D, PERSOONS T, ALIMOHAMMADI S. Micromixing strategies for efficient mixing processes: A comprehensive review[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2024, 34(11): 113001.
- [21] WANG Xin, LIU Zhanqiang, CAI Yukui, et al. A cost-effective serpentine micromixer utilizing ellipse curve[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2021, 1155: 338355.
- [22] BABAIE Z, BAHRAMI D, BAYAREH M. Investigation of a novel serpentine micromixer based on Dean flow and separation vortices[J]. *Meccanica*, 2022, 57(1): 73–86.
- [23] 刘蓉蓉, 张仕凯, 陈磊, 等. 被动式微反应器的设计及其混合性能研究 [J]. *能源环境保护*, 2025, 39(5): 125–133.
LIU Rongrong, ZHANG Shikai, CHEN Lei, et al. Design and mixing performance of passive microreactors: Simulation and experimental study[J]. *Energy Environmental Protection*, 2025, 39(5): 125–133.
- [24] LIU Jianchen, ZHENG Meiqin, MA Yanli, et al. Microreactor with coupled oscillatory flow: Research on liquid-solid two-phase characteristics and clogging mechanism[J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 302: 120790.
- [25] YANG Lin, SUN Yutao, ZHANG Lijing. Microreactor technology: Identifying focus fields and emerging trends by using CiteSpace II[J]. *ChemPlusChem*, 2023, 88(1): e202200349.
- [26] BEHERA R, PATEL S R, PARIKH J K. Hydrodynamics and transport mechanism of microfluidic mixing in precipitation of nanodrugs: A review[J]. *Crystal Research and Technology*, 2023, 58(7): 2300007.
- [27] ZHANG Chuanyu, LIU Shuo, QIN Xianming, et al. Acoustic-assisted microreactor for high-efficient synthesis of energetic materials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 524: 168975.
- [28] ORBAY S, OZCELIK A, LATA J, et al. Mixing high-viscosity fluids via acoustically driven bubbles[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(1): 015008.
- [29] FAN Yuewei, LI Chunlin, WANG Shibo, et al. Enhancement of mixing efficiency in mechanical stirring reactors via chaotic stirring techniques: Application to the treatment of zinc-containing solid waste[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 249: 117367.
- [30] CHEN Xueye, LI Tiechuan, LI Xiyu. Numerical research on shape optimization of microchannels of passive micromixers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(17): 6527–6532.
- [31] WOLDEMARIAM M, FILIMONOV R, PURTONEN T, et al. Mixing performance evaluation of additive manufactured milli-scale reactors[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 152: 26–34.