

微反应器在精细化工领域的应用研究进展

刘 东*, 郭 帅, 刘晓东, 周 川, 邢铁瀚, 柳世皓
(沈阳化工研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110021)

摘要:从精细化工应用领域出发,介绍了微反应器在医药、农药、染料和助剂等方向连续合成中的应用。综述了近几年微反应器技术在硝化、氧化等强放热快反应中的研究进展,归纳和总结了毛细管微反应器、板式微反应器、微填充床反应器和其他新型微反应器的适用范围、优缺点,并对未来智能化与全流程集成发展进行了展望。

关键词:微反应器;精细化工;传质;传热;连续流合成

中图分类号:TQ031.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)07-0045-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.009

Research progress on the application of microreactors in the fine chemical industry

LIU Dong*, GUO Shuai, LIU Xiao-dong, ZHOU Chuan, XING Tie-han, LIU Shi-hao

(Shenyang Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Shenyang 110021, China)

Abstract: Start from the application of the fine chemical industry, the applications of microreactors for the continuous synthesis in pharmaceuticals, pesticides, dyes, and additives are introduced. The research progress of microreactor technology in highly exothermic and rapid reactions such as nitration and oxidation in recent years is systematically reviewed. The applicable scopes, advantages, and disadvantages of various microreactors, including capillary microreactors, plate microreactors, micro-packed bed reactors and other novel microreactors are summarized and generalized. Furthermore, the future development of intelligence and full-process integration are prospected.

Key words: microreactor; fine chemical industry; mass transfer; heat transfer; continuous-flow synthesis

流动化学在有机合成领域发展迅速,有效弥补了传统合成工艺的固有不足,契合了化工行业提质增效、节能降耗与减污减排的发展需求^[1]。该技术可有效改善传统精细化工生产高污染、高能耗、高成本的突出问题,通过化学合成与工程过程的深度耦合,可为各类化合物构建高效、可控的制备工艺^[2],支撑现代精细化工产业可持续发展。

我国精细化工产业经过几十年的发展壮大,逐步在化工产业中占据主导地位,2025 年精细化工率已接近 50%,同欧美发达国家的差距在逐年减小。作为现代工业的重要支柱,我国精细化工行业正朝着高端化、绿色化、智能化及安全化方向转型升级,目前处于转型与机遇并存的发展阶段^[3-4]。当下多数危险工艺仍采用间歇或半间歇生产模式,设备单位体积换热面积小、传质传热效率低,不仅生产周期长,还易发生副反应,显著增加了热失控风险^[5],已成为必须要面对和解决的问题。在现阶段我国化工安全生产事故依然频发的情况下,以微反应器为核心的连续流合成技术的进步,对提升反应单元本质安全水平具有重大而积极的影响。

近年来,微通道反应器发展迅速,毛细管、板式、微填充床等多种微反应器不断推陈出新^[6]。随着

操作参数精准调控与原位集成技术的日益成熟,微通道反应器已成为有机合成与工艺优化的重要工具,广泛应用于硝化、氧化、氯化、重氮化等强放热快反应体系。作为典型的过程强化技术载体,微反应器在精细化工领域的应用拓展迅速,逐步替代传统间歇反应器已成为行业发展的必然趋势。面对精细化工门类繁多、反应类型多样、工艺体系复杂的行业特点,亟需依托微反应连续流合成技术破解共性难题,通过优选反应器构型与优化工艺参数,提升原子经济性和绿色生产水平,构建可指导工业生产的技术理论体系,为产业化应用提供基础数据支撑。

基于上述背景,本文中从精细化工中医药、农药、染料和助剂 4 个类别涉及的有机合成工艺出发,总结近几年微反应器的应用研究进展。根据工艺中的共性问题和解决方案,归纳不同微反应器的适用范围和优势。进一步介绍微反应器技术在工业化生产方面取得的成果,并对未来的发展进行展望。

1 强放热反应

1.1 硝化反应

硝化过程具有反应速率快、放热强和非均相反应的特性,具有强腐蚀性和燃爆危险性,是典型的危

收稿日期:2025-09-02;修回日期:2026-05-06

作者简介:刘东(1984-),男,硕士,正高级工程师,研究方向为微反应器技术及化学反应工程,通讯联系人,liudong@sinochem.com。

险工艺。传统间歇工艺长期面临安全、环保及效率等多重挑战。针对这些问题,近年来微反应连续流技术取得了显著进展。如 Li 等^[7]在毛细管微反应器中研究了 3-[2-氯-4-三氟甲基苯氧基]苯甲酸的硝化反应。如图 1 所示,通过两相流型调控,在 308 K、硝酸与底物的摩尔比为 1.6、硝酸与硫酸的摩尔比为 0.57 的条件下,转化率达到 83.03%,选择性 79.52%。

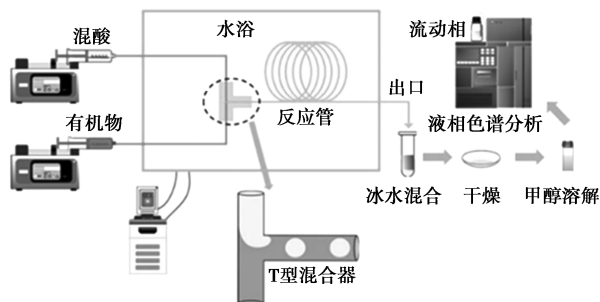


图 1 微反应器内液滴流型状态下的硝化反应

Khan 等^[8]使用带排气口的受限撞击喷射反应器用于水杨酸的硝化反应,有效解决了固体堵塞与烟气去除问题。在 343 K 温度下,停留时间为 1 min 实现了水杨酸完全转化,单硝基产率达到 82%,并对 5-硝基水杨酸有很高的选择性,产能达到 0.5 kg/h,这也为反应过程有固体产生的硝化反应提供了新的思路。Zhao 等^[9]进一步将连续流硝化拓展至硝基苯体系,并结合贝叶斯优化方法实现了动力学建模与工艺快速寻优。

研究表明,微反应器凭借优异的传递性能和本质安全特性,能显著提升硝化过程的安全性及效率,有效避免传统工艺中的局部热点与热积累问题,在硝化反应中的应用大有可为。

1.2 氧化反应

多数氧化反应剧烈放热,局部热点温度高于 200℃ 时触发链式爆炸^[10]。传统搅拌釜传热效率低 [$k < 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$],而微反应器可提升至 $10\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,能有效解决氧化反应传热效率受限问题,为氧化工艺优化提供了新路径。

二苯亚砆(DPSO)合成放热剧烈,传统工艺易因传热不足引发产物热分解。Zhang 等^[11]在毛细管微反应器中以钨酸钠为催化剂连续氧化制备 DPSO,70℃、25 min、催化剂质量分数 0.75%、摩尔比 2:1 条件下收率达 84.3%。基于动力学与热量衡算的放大分析表明,内径 0.8 mm 的毛细管反应器可使反应近等温进行,安全放大 3 倍后最大温升低

于 5℃ 且收率稳定,有效抑制了产物热分解。Xu 等^[12]在毛细管微反应器中研究了过氧化二叔丁基的合成及动力学。通过双氧水分段进料的方式,在 50℃ 下,410 s 内转化率达到 98.7%,选择性 97.6%,与间歇工艺相比,时空产率提高 112 倍。

基于氧化反应快速、过程强放热、传质和传热过程与反应速率存在强耦合性的特点,使用微通道反应器可消除传质、传热对反应速率的影响,控制反应在更接近本征反应速率的条件下进行,从而实现反应动力学的准确测定,结合 CFD 模拟,可为工业化放大生产提供安全可靠的基础数据。

1.3 氯化反应

氯化反应是生产农药、医药等高值精细化学品的关键步骤,但传统工艺普遍存在腐蚀、泄露、可控性和选择性差、“三废”高等问题。针对这些问题,微反应器技术在提高工艺安全性和产品质量上取得了突出进展。Lan 等^[13]以溶解了氯气的 1,2-二氯乙烷为氯源,在毛细管微反应器中实现了 4-硝基苯胺连续氯化合成 2,6-二氯-4-硝基苯胺,停留时间仅 1.6 s,转化率即达到了 98.3%,选择性为 90.6%。Zhao 等^[14]使用 2 个平行的填充床反应器,通过交叉在线冲洗和 Al_2O_3 填料更新策略,有效解决了不同流体路径的互连问题,实现了异戊二烯连续氯化反应。如图 2 所示,在 -15℃、0.5 当量 SOCl_2 、停留时间 15 min 条件下,产率达 90%~93%,生产率为 1.35 g/h。

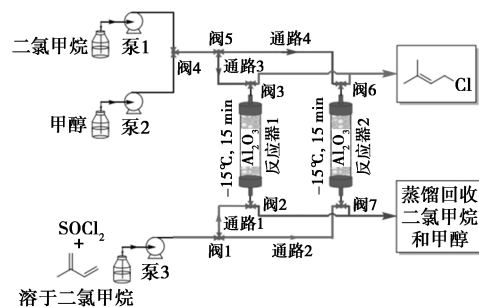


图 2 微填充床反应器内异戊二烯连续氯化反应

以上研究表明,通过微反应器设计与工艺集成的创新,可显著提升氯化反应效率、安全性与绿色性。无论涉及气-液、液-液、固-液,还是需要光照引发的自由基氯化反应,微反应器均可有效应对选择性差、堵塞和效率低等共性难题。

1.4 重氮化反应

重氮化的传统釜式反应长期受困于重氮盐不稳定、易分解爆炸及废酸污染等问题。针对上述挑战,

微反应器技术也取得了显著进步。王法军等^[15]在毛细管微反应器中研究了颜料红 57 连续化合成,在反应停留时间 20 s,反应温度 25℃,亚硝酸钠与 4-氨基甲苯-3-磺酸摩尔比 1.1:1 条件下,重氮盐收率大于 99%。Shi 等^[16]在撞击流混合器中研究了 C. I. 颜料黄 12 连续合成,将偶合组分溶于碱性水溶液进料,有效解决了传统工艺中因大颗粒导致的堵塞问题,在通量达 40 L/h 条件下实现了反应物近乎完全转化,产率 98%。与常规流动反应器相比,撞击喷射反应器不需要外部能量强化混合,能量耗散速率是连续搅拌釜反应器的 100 倍,兼具占地面积小、生产能力强、压降小、能连续处理固体浆料的优势。

以上研究表明,毛细管、板式及撞击流等微反应器均能为重氮化偶合反应提供安全、高效且连续的合成路径。

1.5 环加成反应

环加成反应本质是 2 个或多个不饱和分子通过 π 电子重组,形成新的 σ 键和环状结构的过程,具有绿色环保、产品附加值高的优点。连续流技术显著提升了该类反应的效率与可控性。Feng 等^[17]利用板式微反应器实现了双环[2,2,1]-5-庚烯-2-甲酸甲酯的连续合成。与传统间歇工艺相比,反应时间从 4.5 h 缩短至 335 s,收率提升至 96.7%,显著优于间歇工艺的 93%。Li 等^[18]借助密度泛函理论优化反应路径,在微反应器中于 260℃、4 MPa 条件下,2 min 内实现 5-降冰片烯-2,3-二羧酸酐近 100%转化率和 98%选择性,外/内型异构体比例达 1.19:1。在复杂药物分子的连续流合成中,Sagmeister 等^[19]在 CB2 激动剂 RG7774 关键前体的连续流叠氮化与[3+2]环加成时,采用微反应器与连续搅拌釜反应器组合工艺,有效克服了产物溶解度限制,三唑产物收率达到 80%,产能 9.5 g/h,纯度>99%。

上述研究表明,微反应连续流技术通过精确传质传热与集成化工艺设计,显著提升了各类环加成反应的速率、选择性与可持续性,为环合反应制备高附加值产品提供了强大工具。

1.6 烷基化反应

烷基化反应由于过程简单,原料易得,在精细化工领域应用广泛。连续流技术为其效率与绿色化提升提供了新路径。Kinkutu 等^[20]采用固定床反应器,开发了基于连续流的两步法钨催化策略,实现了糠醛衍生物的 C₃ 位高选择性烷基化。该工艺以摩尔分数 1%的 Ru₃(CO)₁₁(PPh₃) 催化剂负载量,在减少 80%催化剂用量的同时获得优于间歇收率,且

生产效率提升 3~5 倍,成功实现克级到吨级的放大。Ishitani 等^[21]设计了两步连续流无卤工艺高效合成杀菌剂甲霜灵。如图 3 所示,通过多相铂催化还原烷基化与均相酸催化酸酐酰胺化的连续串联,彻底摒弃酰卤/烷基卤试剂,从源头消除含卤副产物。经流动参数优化,该工艺在温和条件下实现 92%总收率,解决了间歇法选择性低、污染重的瓶颈问题。

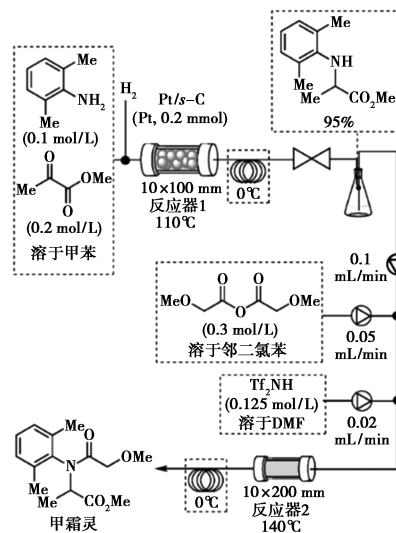


图 3 连续流合成甲霜灵

上述研究表明,微反应器能够解决传统釜式反应器烷基化反应过程生产效率低、选择性差等问题,有良好的商业应用前景。对于非均相催化剂参与的烷基化反应,填充床反应器能够增加两相界面接触面积、缩短反应时间、提高生产效率。对于均相催化剂参与的烷基化反应,毛细管微反应器和板式微反应器更具有优势,可强化混合过程,缩短反应时间,提升产品质量。

1.7 磺化反应

磺化反应放热量大、腐蚀性强,传统的间歇工艺难以精准控制。针对上述挑战,将微反应器应用于磺化反应同样取得了显著进展。

Xu 等^[22]开发了毛细管微反应器内十六烷基苯（HDB）与液态 SO₃ 的连续磺化工艺,以 1,2-二氯乙烷为稀释剂,在 10 s、50℃,SO₃/HDB 摩尔比 1.10:1 条件下,获得纯度>99%的十六烷基苯磺酸,收率为 97.2%~99.57%,且无需传统工艺的熟化工序,生产效率提升 186 倍。Geng 等^[23]进一步优化十二烷基苯磺酸（DBSA）的合成方法,提出连续与循环双工艺,如图 4 所示。在 2.5 s、50℃,SO₃/底物摩尔比 1.05:1 条件下,产物磺酸含量达到 97%,游离硫酸

小于 1.0%, 循环工艺通过反应-熟化耦合, 将溶剂用量减半并提升 DBSA 浓度, 显著降低能耗。

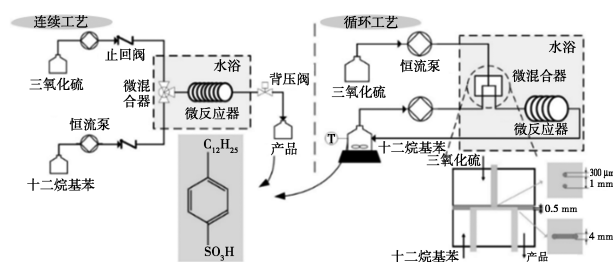


图 4 微反应器中十二烷基苯磺酸(DBSA)的连续合成

以上研究表明, 微反应器凭借体积小、持液量低、比表面积大等优势, 能及时移除磺化反应热, 避免热量累积, 结合优异的传递性能实现高度可控反应。与传统釜式工艺相比, 微反应器工艺在反应时间、产品收率和酸的消耗量方面优势明显。对于气-液磺化反应, 也可通过设计微反应器类型和调控流型进一步提高传质效率。

1.8 加氢反应

加氢反应通常涉及气-液-固三相反应, 放热量大, 传统高压釜存在传质和传热瓶颈, 限制了工业生产规模。微反应器技术为解决上述难题提供了有效路径。Wang 等^[24]开发了蜂窝状微反应器用于铈-双膦配体催化的 1-己烯加氢甲酰化反应。在最优

的反应条件下, 将醛类收率提升至 90%, 直链/支链比(L/B)显著提高, 反应时间从传统间歇工艺的 3 h 缩短至 30 min, 并表现出更高的直链醛区域选择性。Xu 等^[25]采用预钝化雷尼镍催化剂, 在室温下实现了公斤级克唑替尼中间体(R)-3-(1-(2,6-二氯-3-氟苯基)乙氧基)-2-硝基吡啶的连续加氢, 具有高选择性(99.9%)和高转化率(99.5%), 有效抑制了脱卤等副反应, 为含敏感官能团分子的安全制备提供了新方案。

微填充床反应器较高压釜具有体积小、氢滞留量低、催化剂易分离等优势, 轴向返混小、停留时间分布均匀, 可显著提升加氢反应安全性、选择性和气-液-固三相传质传热效率, 大幅缩短反应时间, 实现高效绿色连续化生产。虽存在催化剂需定期再生、高流速下压降较大等不足, 但仍是含固两相及气-液-固三相反应的优选反应器。

2 不同微反应器类型比较

微反应器为精细化工行业带来新的机遇, 推动了向绿色、安全、连续化的方向发展。根据上述研究进展情况, 分别对毛细管微反应器、板式微反应器、填充床微反应器及其他新型微反应器进行适用范围、强化方式、优点和缺点 4 个方面的比较, 列于表 1。

表 1 不同微反应器类型比较

反应器	适用范围	强化方式	优点	缺点
毛细管微反应器	混合、压力、传热要求不高的均相反应、气-液反应; 动力学研究; 实验方案探索	迪恩涡流, 内循环, 进料方式	材料成本低; 微反应系统组装容易	传质混合能力有限; 工艺放大困难; 易发生堵塞
板式微反应器	混合、传质和传热性能要求高的不含固体的反应	主动强化: 多物理场协同, 改善混合效果; 被动强化: 优化通道几何结构打破流体层流状态	传质和传热性能高; 易于工艺放大; 与其他技术集成化程度高	制造成本较高; 含固体体系易堵塞; 清理维护难度大
填充床反应器	有固体催化剂参与的两相或三相反应体系	通过填料的剪切及破碎改变相界面接触面积	能够有效处理涉及固体催化剂的反应体系	催化剂需定期再生/更换; 高流速下压降大; 填料分布影响流动均匀性
其他新型反应器	特殊反应类型, 涉及光、电、磁、超声等外场耦合反应	光/电/磁/超声能量输入、多物理场协同、微结构功能化设计	针对性强, 可实现传统反应器无法达到的反应条件与选择性	通用性差; 设计与制造成本高; 工业化应用案例较少

毛细管微反应器结构简单、成本低廉, 适用于无固体、低混合传质要求的均相及气-液反应, 常用于反应动力学研究, 可通过螺旋盘管形成迪恩涡流、调控流型或优化进料方式强化混合^[26]。但受限于混

合与传质水平, 难以直接工业化放大, 多用于实验室机理与动力学探索。

板式微反应器传质与传热性能突出, 适合无固体强放热快速反应; 可借助光刻、3D 打印及 CFD 模

拟优化通道结构,通过通道构型或外场耦合强化过程,易于串联、并联及集成放大^[27]。缺点是制造成本较高,对含固体系易堵塞且清理困难。

微填充床反应器适用于含固体催化剂的两相/三相反应,通过填料剪切破碎流体,强化传质与催化剂接触效率,在加氢等反应中应用广泛。缺点是填料需定期再生更换,高流速下压降较大,填料分布易影响流动稳定性。

此外,随着微加工技术进步,光、电、磁、超声等耦合的新型微反应器不断涌现,为更多精细化工反应的连续化合成提供了新路径^[28-29]。

3 微反应器在工业化生产上的应用

理文化工有限公司采用微反应器技术成功攻克氟化工领域关键技术壁垒,实现了国内首套氯乙烯连续法生产二氟乙烷工业化装置正式投产,标志着我国在含氟化学品生产领域出现新的工艺路线。该技术已获得“一种用于连续生产 1,1 二氟乙烷的装置和生产方法”等 2 项国家发明专利授权,填补了国内氯乙烯法二氟乙烷生产工艺的技术空白。另外,绍兴东湖高科股份有限公司及德国埃菲尔德微反应技术有限公司,以乙烯利、矮壮素、氯化胆碱 3 个关联产品为切入点,实现乙烯利等系列产品的清洁生产和资源化利用,建成全球首套年产 5 万 t 乙烯利微通道连续流生产装置。与国际现有最先进的 CHEM 公司工艺相比,乙烯利原药含量提高 4%,总收率提高 5%,生产成本下降 27%，“三废”量减少 43.6%。

上述案例表明,微反应器技术在氟化、硝化、重氮化及氯化等强放热反应的工业化生产中已取得显著成效,充分印证了该技术放大效应小、生产效率高、本质安全性好的核心优势。此类技术在精细化工领域工业化生产的成功应用,正逐步填补行业技术空白,推动化工生产过程向更安全、更绿色的方向转变,使得“谈化色变”的局面得以逐步改善。

4 总结与展望

综述了近年来微反应器技术在精细化工领域的研究进展,重点总结了其在硝化、氧化、氯化、重氮化、环加成、烷基化、磺化、加氢等强放热反应中的应用。系统比较了毛细管微反应器、板式微反应器、填充床微反应器和新型微反应器的适用范围、强化方式与优缺点。研究表明,微反应器优异的传递性能及本质安全特性,显著提升了精细化工行业生产的

安全性,与传统釜式工艺相比,在转化率、选择性、生产效率和原料消耗量方面有明显优势。

尽管微反应器技术已取得长足进展,并在精细化工很多领域实现了工业应用,但在机理认知、智能集成与全流程开发等方面仍存在深入探索的空间。未来可以从以下几个方面展开深入研究。

(1) 反应机理的探究与过程强化理论的完善。现研究进展主要围绕工艺的开发、工艺参数优化及表观动力学,缺乏对反应机理和本征动力学的深入探究。同一合成工艺在不同微反应器中表现出差异,亟需建立反应器过程强化与反应机理相结合的关联理论,指导高效反应器选型与精准工艺设计。

(2) 智能化与在线分析技术的集成。在反应器上集成光谱、色谱等在线表征检测设备,实现反应过程的实时精准监控与自动化控制,并引入 AI 智能合成路线设计,结合反应参数与数据库进行智能筛选,提升工艺开发效率与可重复性。

(3) 全流程连续化工艺开发平台的构建。将精细化工行业涉及的反应、分离、纯化及废液回收等单元操作进行系统集成,形成从原料输入到产品输出的连续化生产平台,推动精细化工真正实现全流程绿色、安全、高效生产。

参考文献

- [1] Domoks A, Nagy B, Szilagyi B, et al. Integrated continuous pharmaceutical technologies a review[J]. Organic Process Research & Development, 2021, 25: 721-739.
- [2] Kamenicka B. A critical review on applications of microreactors for the treatment of polluted water with organic dyes[J]. Science of the Total Environment, 2025, 969: 178897.
- [3] 赵丽. 绿色化工技术在精细化工中的应用[J]. 化纤与纺织技术, 2025, 54(3): 76-78.
- [4] 叶得强, 赵转霞, 张彦龙. 我国精细化工自动化控制的现状与发展趋势[J]. 当代化工研究, 2023, 23(17): 17-19.
- [5] 薛潇, 商敏静, 苏远海. 微反应器内药物连续流合成的研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(4): 1439-1454.
- [6] Li L L, Chen H W, Su S K, et al. Process intensification in continuous flow reactors: Fundamental principles and application in the synthesis of zeolites[J]. Chemical Engineering Science, 2025, 304: 121056.
- [7] Li S F, Zhang X L, Ji D S, et al. Continuous flow nitration of 3-[2-chloro-4-(trifluoromethyl) phenoxy] benzoic acid and its chemical kinetics within droplet-based microreactors[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 255: 117657.
- [8] Khan M S, Shaikh T R, Kulkarni A A, et al. A Confined impinging jet reactor for high-throughput continuous flow mononitration of salicylic acid[J]. Organic Process Research & Development, 2025, 29: 479-489.

- [9] Zhao W Y, Wang S M, Zhao W X, *et al.* Continuous flow nitration of nitrobenzene; Kinetic modeling and bayesian optimization [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2025, 64(20): 9881–9889.
- [10] Jobdeedamrong A, Crespy D. Redox-responsive polyprodrugs: Recent innovations in reduction- and oxidation-responsive drug delivery systems [J]. Chemistry of Materials, 2025, 37(6): 2073–2086.
- [11] Zhang H R, Xu F, Zhou X, *et al.* Continuous flow synthesis and kinetic study of diphenyl sulfoxide in a microreactor [J]. Organic Process Research & Development, 2025, 29: 1279–1290.
- [12] Xu Y Y, Zhao S N, Yang L X, *et al.* Continuous flow synthesis of di-tert-butyl peroxide in microreactors and kinetic study [J]. AIChE J, 2025, 71: e18727.
- [13] Lan Z, Lu Y. An intensified chlorination process of 4-nitroaniline in a liquid-liquid microflow system [J]. Reaction Chemistry & Engineering, 2021, 6(12): 2259–2265.
- [14] Zhao H, Xiao X, Hao R Q, *et al.* Continuous flow synthesis of prenyl chloride on demand through surface mediated hydrochlorination [J]. Journal of Flow Chemistry, 2025, 15: 39–46.
- [15] 王法军, 陈安, 徐建鸿. 微反应器内颜料红 57 连续化合成工艺研究 [J]. 化工学报, 2024, 75(10): 3600–3609.
- [16] Shi Z P, Wang X D, Yin D F, *et al.* High-flux continuous-flow synthesis of C.I. pigment yellow 12 from clear alkaline solutions of the Coupling Component [J]. Organic Process Research & Development, 2022, 26, 3: 661–669.
- [17] Feng B C, Hou X C, Wang T L, *et al.* Synthesis of bicyclic esters in a continuous-flow microreactor [J]. Chemistry Select, 2020, 5(3): 952–956.
- [18] Li H, Liu X, Xiao Y, *et al.* One-pot synthesis of 5-norbornene-2,3-dicarboxylic anhydride with high exo/endo ratio in a microreactor under high temperature and appropriate pressure [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 498: 155561.
- [19] Sagmeister P, Prieschl M, Kaldre D. Continuous flow-facilitated CB2 agonist synthesis, Part 1: Azidation and [3+2] cycloaddition [J]. Organic Process Research & Development, 2023, 27(4): 592–600.
- [20] Kinkutu G K, Roy L C. C₃-Alkylation of furfural derivatives by continuous flow homogeneous catalysis [J]. Beilstein Journal of Organic Chemistry, 2023, 19: 582–592.
- [21] Ishitani H, Yu Z, Ichitsuka T, *et al.* Two-step continuous-flow synthesis of fungicide metalaxyl through catalytic C—N bond-formation processes [J]. Advanced Synthesis & Catalysis, 2022, 364(1): 18–23.
- [22] Xu Y M, Liu S L, Meng W J, *et al.* Continuous sulfonation of hexadecylbenzene in a microreactor [J]. Green Processing and Synthesis, 2021, 10(2): 219–229.
- [23] Geng Y H, Huang J P, Tan B, *et al.* Efficient synthesis of dodecylbenzene sulfonic acid in microreaction systems [J]. Chemical Engineering and Processing, 2020, 149: 107858.
- [24] Wang S J, Zhang J, Peng F, *et al.* Enhanced hydroformylation in a continuous flow microreactor system [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(1): 88–98.
- [25] Xu F, Chen J L, Xie X X, *et al.* Synthesis of a crizotinib intermediate via highly efficient catalytic hydrogenation in continuous flow [J]. Organic Process Research & Development, 2020, 24(10): 2252–2259.
- [26] 宋璟, 王玉军, 邓建, 等. 微反应器内芳烃硝化反应研究进展 [J]. 化工学报, 2024, 75(11): 3911–3922.
- [27] Liu L X, Zhao S N, Yao C Q, *et al.* A novel approach to intensify fluid mixing by introducing a “pre-cavitation” stage in an ultrasonic microreactor [J]. AIChE J, 2025, 71: e18810.
- [28] Liang J, Xu H T, Zhang Z X, *et al.* Enzymatic reaction in a capillary microreactor with surface-immobilized enzyme [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63: 8542–8552.
- [29] Liu Y X, Wang D R, Chen Y, *et al.* Development of a new synthetic process for triflumezopyrim and continuous flow attempts [J]. Organic Process Research & Development, 2025, 29: 909–919. ■

(上接第44页)

- [19] 李钰佳, 段思宇, 吴浩, 等. 赤泥-粉煤灰-电石渣复合胶凝材料的力学性能及水化机理 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(3): 1041–1049.
- [20] 陈友治, 吴修齐, 殷伟淞, 等. 电石渣对复合胶凝材料力学性能和微观结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(9): 3196–3203.
- [21] Namarak C, Satching P, Tangchirapat W, *et al.* Improving the compressive strength of mortar from a binder of fly ash-calcium carbide residue [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 713–719.
- [22] 刘菁, 王记孝, 赵驰峰. 电石渣制氧化钙循环利用技术研究与应 [J]. 中国氯碱, 2025, (2): 43–48.
- [23] Yan K, Zhou K G. Preparation of nano calcium carbonate from calcium carbide residue by liquid phase process [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2008, 28(6): 535–537.
- [24] Wang Y, Ye B, Hong Z, *et al.* Uniform calcite micro/nanorods preparation from carbide slag using recyclable citrate extractant [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119930.
- [25] 李强, 刘福立, 尚超, 等. 微波外场强化电石渣制备硫酸钙晶须及其机理分析 [J]. 人工晶体学报, 2020, 49(1): 125–130.
- [26] 叶旭润, 李进, 黄忠源, 等. 电石渣-碳酸钠法脱硫废水预处理试验研究 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 124–130.
- [27] Karim M A, Nasir S, Rachman S A, *et al.* Reduction of iron (II) ions in synthetic acidic wastewater containing ferro sulphate using calcium carbide residue [C]. AIP Conference Proceedings; AIP Publishing LLC, 2019, 2085(1): 020025.
- [28] Zhu G, Meng Z, Li S, *et al.* High efficiency desulfurization behavior by the sustainable low carbon utilization of carbide slag [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 159: 809–818.
- [29] Han H, Xue J, Zhang X, *et al.* Effect of carbide slag combined with biochar on improving acidic soil of copper sulfide mines [J]. Sustainability, 2023, 15(4): 3206.
- [30] Sun Y J, Ma J, Chen Y G, *et al.* Mechanical behavior of copper-contaminated soil solidified/stabilized with carbide slag and metakaolin [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(18): 423. ■