

微反应器内液相反应传质特性与反应效率研究

孔举 李哲 陈怀亮

山东荣信集团有限公司 山东省济宁市邹城市 273500

摘要：随着精细化工与制药产业对反应过程可控性要求的持续提升，微反应器因其微尺度通道所具备的高比表面积与短扩散路径，在液相反应传质强化方面展现出显著优势。微通道内毫秒级混合与近等温操作，有效消除了传统反应器中传质受限与热点失控等问题，使反应转化率与选择性获得大幅提高。围绕微反应器内液相反应的传质机理与效率提升规律展开系统分析，可为过程强化与工艺放大提供理论依据。

关键词：微反应器；液相反应；传质特性；反应效率；过程强化

引言

液相反应的传质速率与反应效率始终是化学工程领域的核心议题，传统釜式反应器受限于宏观尺度下较低的比表面积与较长的扩散路径，传质过程往往成为制约反应速率的瓶颈。微反应器凭借微尺度通道赋予的高比表面积与毫秒级混合特性，从根本上改变了液相传质的控制模式。深入探究微通道内传质机理及其对反应效率的影响规律，对推动化工过程强化与绿色制造具有重要的理论与实践意义。

一、微反应器液相反应传质机理

1.1 微尺度下传质特性的本质

微反应器通道特征尺度通常处于十微米至一千微米之间，由此产生的巨大比表面积可达一万至五万平方米每立方米，远超传统反应釜的一百至一千平方米每立方米量级。在如此高的比表面积条件下，传质系数与通道管径成反比关系，管径越小传质系数越大，混合时间与通道尺度的平方成正比，使得反应物能在毫秒级时间内完成均匀混合。这种微尺度效应从根本上改变了液相反应的传质控制模式，将原本受扩散限制的反应转变为动力学控制，大幅提升了反应速率与选择性。

1.2 液液两相传质的强化机制

液相反应中大量涉及互不相溶的液液两相体系，微反应器通过特殊的微结构设计可获得分散尺度在一微米至一毫米之间的液滴，两相间传质面积大幅增加。与常规反应器受重力和惯性力主导不同，微通道内流动以层流为主，通道表面的

湿润性、界面张力与黏性力成为决定传质性能的关键因素。微结构使特定相界面成倍增加，液滴内部存在液相循环流动，加速了物质从气泡边缘向催化剂壁面的传递，从而在液液反应中实现了接近完全的转化率。

1.3 传热与传质的协同效应

微反应器的传热系数可达到极高水平，这使得反应能在近乎等温的条件下进行，彻底消除了常规反应器中因换热不足而产生的局部过热与热点现象。对于强放热液相反应，及时导出反应热不仅避免了副产物的生成，更从根本上杜绝了飞温与冲料事故的发生。传热与传质的协同强化，使得反应物在微通道内能同时获得理想的温度场与浓度场，反应条件的均匀性与可控性达到了前所未有的水平。

1.4 停留时间的精确调控

微反应器采用连续流动模式操作，每个流体微元的停留时间严格一致，实现了优异的工艺重复性。与传统釜式反应中先加入的反应物因等待滴加而停留过长不同，微反应器可精确控制物料在反应条件下的时间，一旦达到最佳反应时间便立即传递至下一步或终止反应。这种对停留时间的毫秒级精确调控，有效消除了因反应时间过长而产生的副产物，使反应收率与产品纯度得到显著提升。

二、微反应器对液相反应效率的提升

2.1 转化率与选择性的显著提高

由于微反应器内的微通道几乎完全符合平推流模型，对于非零级反应而言，在相同处理量与相同转化率条件下，所需反应器体积远小于全混反应器。微反应器的强化传质使反应物在毫秒级范围内完全混合，大大加速了传质控制型化学反应的速率。研究表明，在微反应器中进行液相反应时，转化率与收率均可获得大幅度提升，部分反应的收率可从较低水平提高至较高水平，区域异构体比例也能通过精确控制反应条件实现大幅优化。

2.2 副反应的有效抑制

液相反应中副产物的生成往往与局部配比失衡、温度梯度过大及停留时间分布不均密切相关，微反应器的通道尺度仅有数十微米，反应物能按精确配比瞬间混合，从源头上避免了局部过量导致的副反应。同时，近乎等温的操作环境消除了热点对选择性的破坏，而精确的停留时间控制则防止了中间体因过度反应而转

化为副产物。多重机制协同作用，使得微反应器中液相反应的副产物生成量大幅降低，反应选择性显著优于传统工艺。

2.3 反应速率的数量级提升

微尺度下巨大的比表面积与极短的扩散距离，使液相传质速率获得数量级的提升。对于受传质控制的液相反应，微反应器可在维持产量不变的情况下使反应器总体积大幅减小。液液两相反应中，微结构提供的高比相界面使反应转化率从较低水平提升至接近完全转化。气液反应中，微通道内气体与液体的接触面积大幅增加，反应速率较常规方法获得显著提高，部分体系的反应时间从小时级缩短至分钟级甚至更短。

2.4 本质安全性的根本保障

微反应器持液量极小，通常仅数毫升，即使发生反应失控其危害也远小于传统大型反应釜。对于易爆炸的强放热液相反应，微米级通道能有效阻断链式反应的传播，使反应能在爆炸极限内稳定进行。设备配备过压保护、超温联锁等多重安全措施，配合自动化监控系统实现实时参数监测与自动调节。这种本质安全特性使得硝化、氧化、重氮化等传统高危液相反应得以在可控条件下安全高效地进行。

三、微反应器液相反应的工艺放大与应用前景

3.1 数增放大策略的独特优势

微反应器的工艺放大不依赖于增大通道特征尺寸，而是通过并行增加微通道数量来实现生产规模的扩大，即数增放大策略。由于微通道结构规整，各通道之间具有高度等效性，小试阶段确定的最优反应条件无需任何修改即可直接进入生产。这一特性从根本上解决了传统反应器从小试到中试再到大规模生产过程中因传热传质效率变化而需反复调整工艺条件的放大难题，大幅缩短了产品从实验室到市场的周期。

3.2 多领域应用的广阔空间

微反应器在液相反应领域的应用已覆盖药物合成、精细化学品生产、纳米材料制备及环境治理等多个方向。在制药行业，微反应器加速了新药分子的筛选与优化，在高压加氢与催化反应中展现出显著的成本优势。在新材料领域，通过精确控制混合与成核过程可合成尺寸均一的纳米颗粒与分子量分布窄的聚合物。在

环境工程中，微反应器的高效传质性能使污染物降解反应达到更高的处理效率，契合绿色化学与可持续发展的要求。

3.3 智能化与集成化发展趋势

当前微反应器技术正朝着设备小型化与集成化、高通量与并行化、智能化与自动化方向快速演进。高通量微型平行反应器已实现多通道参数的精准并行控制，一次可同步完成多个条件的优化实验，效率较传统设备提升数倍。过程分析技术与人工智能的结合，使反应参数的实时监控与过程优化性能大幅提升。未来微反应器将进一步集成自主学习能力，形成从反应开发到生产放大的全链条智能系统。

3.4 绿色化学理念的深度实践

微反应器凭借其高效的传质传热与精确的反应控制，能显著减少副反应的发生，从而极大降低废水、废气、废渣的生成量。与传统间歇式工艺相比，微反应器的连续流动模式使原料利用率与原子经济性大幅提高，溶剂消耗与能源浪费显著减少。这种从源头上减少污染的技术特征，使微反应器成为实现绿色化学与清洁生产目标的关键装备，为化工行业的可持续转型提供了强有力的技术支撑。

结束语

微反应器以其微尺度结构所赋予的卓越传质传热性能，从根本上革新了液相反应的进行方式。通过极大化比表面积、实现毫秒级精确混合与近乎等温操作，微反应器在转化率、选择性、安全性与放大可行性等方面均展现出传统设备无法比拟的优势。随着智能化技术与并行化设计的持续突破，微反应器必将在精细化工、制药、新材料与环境治理等领域发挥更加深远的变革性作用，推动化学工业向高效、安全、绿色的方向加速迈进。

参考文献

- [1]陈建峰. 微通道反应器中液液两相传质特性及反应过程强化研究进展[J]. 化工学报, 2022, 73(8):33-35.
- [2]鲍宗必. 微反应器内液相反应传质与反应效率的协同优化[J]. 高等学校化学学报, 2023, 44(3):71-73.
- [3]姜晓彬. 微通道反应器传质特性及其在精细化工中的应用研究[J]. 化学工程, 2024, 52(1):10-12.

