

化工技改项目中微流控技术对反应效率提升研究

王佳丽 王斌 莫智高

浙江新鸿检测技术有限公司 浙江嘉兴 314000

【摘要】处于化工技改项目期间,传统反应设备的局限性以及工艺设计的不合理等状况,导致反应效率难以提高,本文就微流控技术对反应效率的提升作用展开研究,讲解微流控技术的含义、种类、原理及特性,分析其凭借强化传质传热、精确设定参数以提升反应效率的作用机理,考察流体动力学特性对混合、传质、均一性及反应进程控制的影响,微流控技术为化工反应效率的提升找到了新路径。

【关键词】化工技改项目;微流控技术;反应效率;流体动力学特性

Research on Enhancing Reaction Efficiency through Microfluidic Technology in Chemical Process Upgrading Projects

Wang Jiali Wang Bin Mo Zhigao

Zhejiang Xinhong Testing Technology Co., Ltd. Jiaxing, Zhejiang 314000

【Abstract】 During chemical process upgrading projects, the limitations of traditional reaction equipment and irrational process designs have hindered the improvement of reaction efficiency. This study investigates the role of microfluidic technology in enhancing reaction efficiency. It explains the definition, types, principles, and characteristics of microfluidic technology, analyzes its mechanism of improving reaction efficiency through enhanced mass and heat transfer and precise parameter control, and examines the impact of fluid dynamics characteristics on mixing, mass transfer, homogeneity, and reaction process control. Microfluidic technology has identified a new pathway for improving chemical reaction efficiency.

【Key words】 chemical process upgrading projects; microfluidic technology; reaction efficiency; fluid dynamics characteristics

引言:

化工界一直追求生产的高效化,关键指标聚焦于反应效率,传统化工反应受设备跟工艺的制约,难以契合发展要求,微流控技术借由其独特的微尺度操控特点,为化工反应效率提升开启新契机之门,反应效率跟流体动力学特性紧密相依,着力探究二者关联,对推动化工技改项目优化与行业技术革新意义重大。

一、化工技改项目中反应效率现状

(一) 传统反应设备的局限性

传统反应釜等设备在化工生产当中普遍应用,然而有不少影响反应效率的毛病,其结构引发热量分布的不均衡现象,局部温控失效频繁显现,对反应的稳定推进造成干扰,处于强放热反应开展阶段,热量未能及时做到均匀散发,局部出现过热情况易诱发副反应,引起目标产物产率下降。反应釜内物料混合效果未达预期,尤其是高黏度物料的情形,难以达成充分的混合效果,反应物相互间接触不充分,妨碍反应的迅速进行,引起反应所需时间增长,单位时间产出水平受限,设备传质效率欠佳,对于气液、液液等多相反应这个阶段,物质的传递速度迟缓,阻碍了反应速率的进一步提升,令反应效率无法满足现代化工高效生产的条件^[1]。

(二) 工艺设计不合理

目前化工工艺设计在流程规划上存在缺陷,反应路径及单元操作顺序未体现科学合理性,存在冗余的操作步骤,引

起物料传递距离的拉长和时间的消耗,于多步反应开展期间,倘若未合理采用连续、半连续化操作模式,设备开启、关闭操作频繁,徒然浪费大量时间,还加剧了能源的消耗,引起整体反应效率的降低。各个反应阶段在温度、压力等条件上要求不一,工艺设计若未精准吻合各阶段需求,未能为反应营造出最佳环境,会引起反应速率变弱、转化率降低,工艺设计时催化剂、溶剂等反应助剂的选择出现差错,未能高效削减反应活化能,难以充分施展其推动反应进程加快的功效,拖慢反应效率提升的步伐。

(三) 反应条件控制困难

化工反应对温度、压力、流量等条件的要求极为苛刻,于实际生产时精确掌控这些条件挑战重重,外界环境波动不定、设备换热能力不稳定等情形,让反应温度难以维持在既定数值,反应速率与选择性受温度偏差的干扰,在压力控制的阶段,设备密封性能未过关、气体流量呈现不稳,引起压力的波动状态,就压力敏感型反应而言,会对反应进程造成极大干扰。流量控制若存在误差,反应物进料比例走向失调,未能达成化学计量比要求,让反应无法彻底进行下去,产物纯度呈下降态势,反应的效率出现下降,借助人工操作去调整反应条件的时候,反应的速度偏慢,应对反应状况快速变化力不从心,让反应条件的失控局面进一步恶化,阻滞反应效率的提升步伐。

(四) 原料与能源利用效率低

化工生产原料质量存在差异,劣质原料含较多杂质,参与反应时易引发副反应,消耗反应物,使产物纯度和产率降低,还会影响催化剂活性,缩短其使用周期,增加生产成本与反应耗时,降低反应效率。原料供应存在不稳定情况,常

出现短缺或供应中断,导致生产停滞,打乱生产节奏,造成设备利用率和整体反应效率下降,在能源利用环节,传统化工生产能耗较高,反应过程中能量损失较大,加热、冷却等环节存在严重能源浪费,不少企业未对能源进行有效回收与循环利用,余热、余压等未得到合理利用,致使能源成本居高不下,且因能源供应波动影响反应条件稳定性,对反应效率产生间接降低作用。

二、微流控技术概述

(一) 含义

微流控技术关注于微米级通道网络内,对皮升(10^{-12} L)至纳升(10^{-9} L)量级微小流体进行精准操控。它借助光刻、蚀刻等微细加工方式,在玻璃、硅片、聚合物等基底材料上构建微通道、微反应腔、微混合器等精细结构,搭建起完整的微流体操控系统。此技术融合化学、流体物理、微电子、材料科学、生物学及生物医学工程等多学科知识,成为一门新兴交叉学科,通过这些微结构,可实现对流体的导流、混合、反应、分离与检测等操作,如同把传统大型实验室功能浓缩到方寸芯片上,开创微观尺度下流体操控的全新研究领域与应用方向。

(二) 技术类型

1. 压力驱动技术

压力驱动技术采用构建可控的气压与液压的差值,带动流体在微通道里流动,气压驱动一般利用压电元件、电磁式气泵实现气压的调控,液压驱动凭借微米尺度活塞泵、蠕动式液压泵实现对流量的精密调节,若在压力驱动的微流控系统场景下,依靠精准把控气压,可让流体以稳定的流速流经微通道,保证反应物料按精准比例输送,压力驱动系统可跟高精度压力传感器与反馈控制系统搭配,实时监控、校准压力,维持流体流速的平稳性,实现反应条件的整齐划一,为化学反应、生物分析等构建稳定的流体输送情境。

2. 电驱动技术

基于电渗、电泳等原理,电驱动技术实现对流体的操控,就电渗现象而言,在微通道的两头施加电场,受通道壁面相互作用影响,带电荷的流体定向流动;电泳借助的是带电粒子在电场里受力大小的不同,实现分离、富集等相关作业,处于核酸分析实验阶段,采用电泳举措,按照不同核酸片段在电荷及分子量方面的差异,令其在微通道之中迁移速率出现差别,进而实现核酸分离及检测操作,电驱动技术可达成对流体的迅速响应与精准操控,可由调节电场强度、频率等相关参数,灵活改变流体的运动格局,契合多样化的实验要求。

3. 离心驱动技术

离心驱动技术借助旋转得来的离心力驱动流体前行,处于离心式微流控芯片里,芯片高速旋转的那个瞬间,受离心力影响,流体沿径向从中心往边缘流动,利用别出心裁的芯片结构,如安排不同半径大小的储液腔、微通道等,可精准控制流体进行转移、混合、进样等操作,在临床诊断开展血液检测时,离心式微流控芯片可迅速达成血液成分分离操

作,实现血浆与血细胞的分离,便于后续开展生化相关分析,此技术可顺利集成多个操作步骤,简化掉检测的繁琐流程,达成自动化、高通量检测^[2]。

4. 被动式微流控技术

被动式微流控技术借助流体自身物理属性与芯片结构设计达成流体操控,毛细力驱动技术凭借液体与固体表面的浸润特性,处在亲水性微通道里头,因表面张力,液体自发地把通道填充,采用调整通道壁面亲疏水性及截面形态的做法,能对流体的流速与流向实施调控。按照流体力学原理,采用几何形状调控技术,创建变截面、弯曲、分叉等特殊结构样式的微通道,凭借文丘里效应、离心力以及流体阻力差异等掌控流体的行为情况,重力驱动技术把微流控芯片倾斜了一定角度,处于重力分力作用的状态下,流体顺着通道淌动,借助精确调整芯片倾斜角度跟通道高度差,实现流速的精准把控。

(三) 原理

微流控技术基于微尺度下特有的流体行为。层流特征明显,因微通道尺寸小,雷诺数低,流体呈高度有序的层状流动,各层流体互不干扰,为精准控制流体混合与反应过程提供基础。微尺度下分子扩散作用增强,通道尺寸缩小使分子扩散路径变短,扩散速率提高,加速反应物混合,提升反应效率,表面效应显著,微通道内流体与壁面接触面积占比大,壁面润湿性、粗糙度等因素对流体流动状态、速度分布及混合效果影响显著,系统设计时需重点考量。依托这些特性,结合微通道、微反应腔等结构设计,实现对流体的精准操控,完成各类化学、生物反应。

(四) 特点

微流控技术呈现显著微小尺寸特性,微通道尺寸多在几微米至几百微米范围,可处理纳升甚至皮升级微量流体,大幅减少样品与试剂用量,其功耗极低,微小流量与结构尺寸使运行所需能量远低于传统设备,符合绿色节能理念。具备高通量与高效率特点,能在短时间内并行处理大量微小体积样品,多通道、多反应单元设计显著提升实验通量与处理效率,精确控制与灵活性表现突出,可精准调控流体流速、温度、浓度、压力等关键参数,适应多样化实验需求,为实验提供高度精确、灵活的操作环境。

三、微流控技术提升反应效率的作用机制

(一) 强化传质过程

微流控技术通过微通道的特殊结构显著强化传质过程。

微通道比表面积 S_v 计算公式为 $S_v = \frac{4}{D_h}$, 其中 D_h 为水力

直径,典型微通道 D_h 在 10 - 500 μm 范围,对应 S_v 可达 1000 - 10000 m^2/m^3 ,较传统反应釜提升 1 - 3 个数量级。

层流状态下,依据菲克第一定律 $J = -D \frac{dC}{dx}$,微尺度缩短扩散距离 x ,使分子扩散通量 J 显著提升。对于多相反应,

采用分散相界面面积公式 $A_i = \frac{6\varphi}{d_p}$ (φ 为分散相体积分数,

d_p 为液滴 / 气泡直径), 微通道可将 d_p 降至微米级, 大幅增加 $A_{[i]}$ 。同时, 流体剪切速率 $\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}$ 在微通道内梯度分布, 通过控制通道几何参数可优化剪切力, 促进分散相细化, 强化相间传质效率。

(二) 优化传热性能

微流控反应器的微尺度结构实现高效传热。依据傅里叶定律 $q = -kA \frac{dT}{dx}$, 微通道薄壁设计显著缩短热传导距离 x , 高比表面积增加传热面积 A 。热扩散时间 τ 与特征长度 L 平方成正比 ($\tau \propto L^2$), 微通道特征尺寸下 τ 较传统设备降低 2 - 3 个数量级。通过努塞尔数 Nu 关联式

$$Nu = \frac{D}{k} h \quad (h \text{ 为对流传热系数}),$$

微通道层流流动下可通过优化通道表面粗糙度提升 $h^{[9]}$ 。外部集成微型热交换器时, 采用总传热速率方程 $Q = UA \Delta T_m$, 通过调节传热系数 U 和对数平均温差 ΔT_m , 可将温度波动控制在 $\pm 0.1 - 1^\circ\text{C}$, 确保反应温度稳定性。

(三) 精准控制反应参数

流量控制方面, 基于泊肃叶定律 $Q = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128 \mu L}$ (Q 为流量, ΔP 为压力差, μ 为动力黏度, L 为通道长度), 通过调节 ΔP 可将流量控制精度达纳升每分钟量级。停留时间 τ_r 计算式 $\tau_r = \frac{V}{Q}$ (V 为微通道体积), 通过流速与通道尺寸协同设计, 可实现从毫秒到分钟量级调控。对于多步连续反应, 串联 n 个微反应单元时, 各单元温度 T_i 、压力 P_i 、流量 Q_i 可独立控制, 依据反应动力学方程 $\frac{dC}{dt} = k(T)f(C)$, 通过梯度调节 T_i 优化反应速率, 实现复杂反应体系的精准过程控制。

四、流体动力学特性对微流控技术提升反应效率的影响

(一) 层流特性保障混合稳定性

低雷诺数下流体分层流动, 各层互不干扰形成规整层状结构, 稳定分层使反应物有序进入微通道, 在通道内保持清晰接触界面, 为分子扩散提供稳定路径。层流状态避免流体紊乱导致的混合不均, 使反应物沿预定方向充分扩散, 确保

其在有限停留时间内均匀分布, 为后续反应高效进行创造条件, 直接影响反应速率和产物收率。

(二) 扩散作用增强物质传递

微尺度下扩散在传质中占主导, 显著提升反应物传递效率, 微通道尺寸微小使浓度梯度驱动的扩散路径大幅缩短, 物质扩散耗时显著减少, 多相反应体系中, 扩散促使反应物在相界面快速迁移, 提高反应位点局部浓度。气-液反应中, 气体分子经扩散迅速穿过液膜与液相反应物充分接触, 提升气液界面反应物浓度, 增强反应活性位点物质供给, 扩散推动产物从反应位点向主体相迁移, 减少产物积累对反应的抑制, 优化反应选择性, 保障反应高效进行。

(三) 剪切力推动反应体系均一

微流控系统内流体流动产生的剪切力, 保障反应体系均匀性, 微通道中靠近壁面的流体存在较大速度梯度, 由此产生的高剪切力可有效分散团聚的反应物颗粒或液滴。乳液聚合反应中, 剪切力将大液滴破碎成尺寸均一的小液滴, 使反应体系内各反应位点环境一致, 剪切力促使反应物在微观尺度均匀分布, 避免因局部浓度失衡导致的反应进程差异, 防止部分区域反应过度或不足, 提升产物质量均一性, 维持反应速率稳定。

(四) 流速分布调控反应进程

微流控通道内流速分布可精准调控反应物停留时间, 非均匀截面或分叉结构会使流速分布不均, 形成不同流路的停留时间差异, 据此可设计分级反应过程。串联微反应单元中, 通过精确匹配各单元流速, 能确保反应物在每个单元内经历适宜反应时间, 对停留时间敏感的反应, 有效控制流速分布可让反应物在微通道内充分反应, 避免停留时间过短导致反应不完全或过长引发副反应, 确保整体反应按预期推进, 有效提升反应效率与产物纯度。

结语:

化工技改项目存在传统反应效率瓶颈, 微流控技术凭借独特技术特性与作用机制, 为突破困境提供有效办法, 其流体动力学特性在混合、传质、均一性及反应进程调控中发挥关键作用。未来, 随着研究深入与技术完善, 微流控技术有望在化工领域实现更广泛应用, 推动化工生产向高效、精准方向不断发展。

参考文献

- [1]董钰漫.微流控双水相液滴流强化酶催化反应及其应用于尿素检测的研究[D].西南交通大学, 2020.
 [2]尹峰.基于微流控技术功能高分子微球的制备及其吸附性能研究[D].西南石油大学, 2018.
 [3]朱旭东.基于微孔板技术及微流控技术的工业微生物高通量筛选平台构建及应用研究[D].华东理工大学, 2018.
 作者简介: 王佳丽 (1992—), 330482199211063065, 女, 汉族, 浙江嘉兴, 本科, 中级工程师, 从事工作为化工安全技术与管理。