

微通道反应器内气液两相流特性及传质强化机制

张蒙

内蒙古鑫元硅材料科技有限公司

DOI: 10.12238/j.pm.v6i12.8626

[摘要] 为了使得微通道反应器在化工流程里的工程运用成效获得提高, 本文着重围绕它内部的气液两相流特征以及传质强化原理开展探讨。通过对比如流形产生、界面相互作用、传质动力学此外内循环流动这些关键技术原理加以分析, 来确定在现阶段工程应用当中流型稳定把控、传质效率一致性、压降损耗以及规模化扩大等存在的困难点。从而提出比如结构优化、界面调节、压降管控以及扩大设计等工程方面的优化办法。此研究为微通道反应器气液两相系统的工程化运用给出技术方面的支持, 推动它在化工生产过程中达成高效稳定的运作。

[关键词] 微通道反应器; 气液两相流; 传质强化

Characteristics of gas-liquid two-phase flow and mass transfer enhancement mechanism in microchannel reactors

Zhang Meng

Inner Mongolia Xinyuan Silicon Material Technology Co., Ltd.

[Abstract] In order to improve the engineering application effectiveness of microchannel reactors in chemical processes, this article focuses on exploring their internal gas-liquid two-phase flow characteristics and mass transfer enhancement principles. By comparing key technical principles such as manifold generation, interface interactions, mass transfer dynamics, and internal circulation flow, the difficulties in controlling flow pattern stability, ensuring consistent mass transfer efficiency, reducing pressure loss, and scaling up in current engineering applications can be identified. Thus, optimization methods for engineering aspects such as structural optimization, interface adjustment, pressure drop control, and expansion design are proposed. This study provides technical support for the engineering application of gas-liquid two-phase systems in microchannel reactors, promoting their efficient and stable operation in chemical production processes.

[Key words] microchannel reactor; Gas-liquid two-phase flow; Mass transfer enhancement

引言

微通道反应器具备诸如比表面积较大、传质传热效率较高以及操作条件相对容易掌控等多方面优势, 于气液两相反应进程之中呈现出相当突出的应用潜在价值。就工程实际操作层面来讲, 需要深度分析气液两相流动以及传质这一关键技术的内在原理, 搞清楚应用过程中的难点所在, 并且制定出具有针对性的优化办法, 从而能够推动微通道反应器在化工范畴实现规模化与稳定化的运用。

1 微通道反应器气液两相流及传质核心技术原理

1.1 气液两相流型形成机制

微通道里面气液两相流型的产生, 和通道的几何参数、流体的特性以及操作时的条件紧密相连。当气液这两相在微通道中一同流动的情况下, 通道的水力直径 (一般处于 10 – 1000 μm 范围) 对于流动的形态起着主导性的作用, 较小的水力直

径会让表面张力所产生的效应明显增强。在表观气速处于 0.01 – 1 m/s 、表观液速处于 0.001 – 0.5 m/s 这样的操作范围之内, 常见的流型包含弹状流、分层流、环状流以及雾状流。就弹状流而言, 气泡呈现出椭球形或者圆柱形, 会在通道里面按照一定周期移动, 液膜围绕着气泡分布, 它的形成取决于气液流速的比例以及通道横截面的形状; 分层流是在气液两者的密度差异比较大, 而且表面张力比较小的情况下出现的, 两相沿着通道横截面分层流动, 界面相对比较平稳; 环状流表现为液体沿着通道的壁面形成连续的液膜, 气体则在中心区域流动, 一般是在较高的气相流速情况下形成的; 雾状流里气体作为连续相, 液体被破碎成微小的液滴, 分散在气相里面, 需要有比较高的气液相对速度来驱动。

1.2 气液界面张力作用机制

界面张力对于微通道里气液两相的流动以及传质状况起

着至关重要的作用。它的数值大致处于 $10 - 70\text{mN/m}$ 此区间, 具体数值会因流体的类型以及温度有所不同。在气液两相相互接触的界面上, 界面张力是通过改变接触角(该角度一般在 $30^\circ - 150^\circ$ 此范围之内), 来对两相的分布形态产生影响。当接触角比较小时, 液体比较容易湿润通道的壁面, 进而形成沿着壁面的液膜流动; 若是接触角比较大, 故此气体就更容易占据通道的中心区域。不仅如此, 界面张力还对气泡的形状以及液膜的厚度起着决定性作用。相对较低的界面张力, 能够有助于气泡破碎以及液膜变薄, 这样就能加大气液的接触面积; 而较高的界面张力, 会使得气泡较易维持完整, 同时液膜厚度也会增加。

1.3 传质过程基础动力学

在微通道此特定空间内, 气液两相间的传质进程是依照双膜理论来运行的。其中, 传质所面临的阻力大多集中于气膜和液膜里面, 而传质系数则受到流动情形、界面更新频次以及流体自身特性等因素的作用。具体来看, 在弹状流的工作状态下, 气泡的移动会带动其周围的液体产生循环流动, 这种流动能够让液膜内的物质快速地进行更新替换。在这种情况下, 液相传质系数可以达到 $10 - 4 - 10 - 3\text{m/s}$, 与传统反应器相比, 这一数值要高很多。至于环状流, 此时液膜是沿着通道的壁面进行流动的, 液膜内的传质方式主要是对流扩散。而且, 传质系数会随着液膜流速的加大而变大。当液膜雷诺数 (Re_L) 超过 100 的情况下, 液膜内就会出现湍流现象, 传质所遭遇的阻力便会明显下降。气相传质系数一般处于 $10 - 3 - 10 - 2\text{m/s}$ 此范围, 其会受到气相流速以及气泡大小的影响。相对较小的气泡尺寸能够扩大气相一侧的传质面积, 从而提高传质的效率。

2 微通道反应器气液两相流及传质工程应用难点

2.1 流型稳定性控制难点

在工程实际应用当中, 微通道里面气液两相流型的稳定性, 很容易受到操作参数产生的波动以及流体物性出现改变的影响, 进而造成反应器在运行的情况下稳定性降低。若是进料流量的波动范围超过了 5%, 流型就容易产生变化, 比如弹状流有可能变成环状流或者雾状流。这种流型的改变, 会让气液接触面积猛地发生变化, 传质效率的波动范围能达到 10% 到 20%。除此以外, 像流体的黏度、密度这些物性发生改变, 也会对流型的稳定性产生影响。当液体的黏度增加超过 50% 的情况下, 分层流出现的可能性明显提高, 而且流型过渡的区域变宽了, 很难维持住稳定的目标流型。在连续开展生产的过程中, 流型若是不稳定, 此外可能造成通道出现堵塞的情况。特别是在气体流速比较低、液体流速比较高的工作状况下, 液体容易在通道里面积攒起来, 从而形成液塞, 将通道的截面堵住, 影响到流体输送的效率。这就需要经常停下机器进行清理, 降低了生产的连续性。

2.2 传质效率均一性难点

微通道反应器在工程运用方面, 有个很关键的问题, 就是其内部传质效率的均一性不够理想。这一状况主要是由通道里的流速分布不平均, 以及局部传质阻力存在差别所导致。在多个通道并行运作的微反应器模块当中, 如果流体分配器的设计不太科学, 就容易造成各个通道内气液流速出现偏差, 这种偏差的幅度大概在 15% - 25% 之间。如此一来, 不同通道之间传质效率就会有比较明显的差异, 有些通道的传质效率差不多只有设计数值的 70%。即便只是在单个通道内部, 沿着流动方向, 传质效率同样存在梯度方面的变化。在通道的入口区域, 气液这两种物质还没有充分地混合在一起, 传质效率相对比较低; 到了通道的中间部分, 当流型变得稳定之后, 传质效率达到最高值; 而在通道出口区域, 由于气泡出现聚并的情况, 或者液膜有所增厚, 传质效率又会有所降低。另外, 通道壁面的润湿性产生变化, 也会对传质的均一性造成影响。经过长时间运行之后, 壁面有可能因为结垢, 或者吸附了溶质, 从而导致润湿性发生改变, 接触角的变化幅度能够达到 $20^\circ - 30^\circ$ 。这种情况会使得局部液膜厚度变得不均匀, 传质阻力差异进一步加大, 使得传质效率的非均一性变得更加严重。

2.3 压降损失优化难点

微通道里气液两相流动所造成的选择性损失比较大, 而且明显受到流动形态、通道构造以及操作相关参数的影响, 这就让流体输送体系的能源消耗和运行花费都有所增加。在弹状流的工作状态下, 压力下降主要是由气泡移动过程中的摩擦阻力和局部阻力所组成。当呈现出的气体速度达到 0.5m/s 、呈现出的液体速度达到 0.1m/s 的情况下, 单个通道每米的压力下降能够达到 $50 - 100\text{kPa}$ 。在环状流的工作状态下, 由于液体薄膜与通道壁面之间的摩擦面积变大, 压力下降情况进一步加剧, 每米能够达到 $100 - 200\text{kPa}$ 。通道的构造对于压力下降也有着关键的影响, 矩形横截面通道的压力下降一般会比圆形横截面通道高出 10% - 15%, 这是因为在其边角的地方容易出现涡流, 进而加大了能量的损耗。在进行工程设计的情况下, 如果只是单纯地想要提高传质的效率, 就去减小通道的尺寸或者提升流体的速度, 这样会造成压力下降急剧上升。当通道的水力直径从 $500\mu\text{m}$ 降低到 $100\mu\text{m}$ 的情况下, 压力下降能够增大 5 - 10 倍。如此一来, 就需要配备功率更高的输送泵, 这不仅提高了设备投入的资金, 也增大了运行过程中的能源消耗, 使得很难在传质效率和压力下降损失之间达成平衡。

3 微通道反应器气液两相流及传质工程优化路径

3.1 流型调控结构优化

借由对微通道内部构造进行优化设计, 能够切实提升流型的稳定性, 达成针对目标流型的精确调控。运用阶梯型的通道截面设计方案, 让通道截面从圆形逐步转变为矩形, 把阶梯的高度控制于 50 至 $100\mu\text{m}$ 的范围, 将阶梯的间距设定在 200 至 $500\mu\text{m}$, 如此便可强化气液两相之间的剪切作用, 抑制气泡的聚合合并现象, 使得弹状流的稳定操作范围拓宽 20% 到 30%。

于通道内部设置微凸起结构, 凸起高度为通道水力直径的五分之一至三分之一, 凸起间距设定为 2 到 5 倍的通道水力半径, 该凸起能够破坏液膜的稳定性, 推动气泡的破碎, 从而在表观气速处于 0.05 至 0.8m/s、表观液速处于 0.005 至 0.4m/s 的区间内, 维持稳定的弹状流状态。与此同时, 对进料口结构加以优化, 选用同轴进料的方式, 内管负责输送气相(其内径为 100 至 200 μm), 外管负责输送液相(其内径为 300 至 500 μm), 并在进料口部位设置渐缩段(锥角为 15° 到 30°), 这样能够减少气液两相初始混合时产生的扰动, 降低流型转变的可能性。在操作参数的管控层面, 采用流量反馈调节系统, 当流量出现超过 3% 的波动时, 系统会自动调节阀门的开度, 保持气液流速的稳定, 以此进一步保障流型的稳定性。

3.2 界面强化传质优化

借助对界面实施改性操作以及运用添加剂进行调控, 能够强化气液界面间的相互作用, 进而提高传质的效率。具体而言, 运用等离子体表面改性这种技术来处理微通道的壁面, 把处理功率限定在 50 – 100 瓦此范围, 处理的时长保持在 10 到 30 分钟之间, 如此就可以让壁面的化学构成以及粗糙程度发生改变。使得接触角稳固在 60 度到 90 度的区间内, 从而增强液体对于壁面的浸润特性, 让液膜的厚度得以减小, 液相传质系数能够提升 15% 至 25%。在液相里添加像十二烷基硫酸钠这类表面活性物质, 将其浓度控制在 0.01% 到 0.1% (按照质量分数来计算), 如此便可以把气液界面的张力降低至 20 到 40 毫牛/米, 促使气泡发生破碎现象, 增大气体与液体相互接触的面积。与此同时, 加快界面位置的物质扩散速度, 让传质效率提升 20% 到 30%。

3.3 压降损失控制优化

经过对通道构造以及流体输送体系的优化, 能够切实减少气液两相流动过程当中的压降损耗。运用变截面通道的设计方式, 在通道的入口部分(长度处于 5 至 10 倍通道水力半径此范围)设定渐扩的区段(锥角为 5° 到 10°), 以此降低气相进入时产生的局部阻力; 在通道的中间部分选用圆形的截面(水力半径为 200 至 500 μm), 使沿程摩擦阻力得到降低; 在通道的出口部分设置渐缩的区段(锥角为 5° 到 10°), 防止流体在出口的情况下出现涡流损耗, 如此一来整体的压降能够降低 15% 至 25%。在流体输送体系里面, 采用变频输送泵, 依据反应器内部的压力改变状况, 自动对泵的转速进行调节。若是压降超过了设定的数值(例如 80kPa/m), 就适当调低泵速, 让流速有所减少, 将压降控制在合理的范围之内; 同时, 在气液混合之前设置缓冲罐, 缓冲罐的容积为每小时处理量的五分之一到三分之一, 这样可以让流体压力保持稳定, 减少因流量波动而造成的压降突变。

3.4 规模化放大优化

经由多通道整合规划以及系统的协调把控, 能够达成微通道反应器在高效层面的规模化拓展。运用并行通道的阵列布局

方式, 通道数量会依据处理规模来加以确定, 每组阵列涵盖 50 到 100 根通道, 通道之间的距离设定为通道外径的 2 至 3 倍, 这样做的目的是防止通道之间在传热方面产生干扰。在阵列的入口处设置多级的流体分配装置, 该分配器划分成气相分配空间、液相分配空间以及混合空间, 在气相分配空间和液相分配空间都安置均流板(开孔比例在 30% 至 50%, 孔的直径在 50 至 100 μm), 以此保证气液两种物质能够均匀地分配到每一根通道中, 将分配的偏差控制在 5% 以内。在热量传递以及温度调控环节, 采用夹套形式的换热构造, 在夹套内部通入导热油导热系数处于 0.1 – 0.2W/(m·K), 让导热油的流动速度达到通道内流体流动速度的 2 到 3 倍, 借助温度控制系统实时调整导热油的温度, 使得反应器内部的温度偏差维持在 2°C 以内。

结语

本文全面阐释了微通道反应器内气液两相流与传质的关键技术原理。这些原理涵盖流型的形成过程、界面张力所发挥的作用、传质动力学相关情况以及内循环流动的运作机制。同时, 本文也清晰指明了在实际工程应用时, 会遇到一些关键难题。比如如何确保流型的稳定控制, 怎样实现传质效率的均一性, 如何解决压降损失问题以及怎样进行规模化放大。针对这些问题, 本文提出了一系列具有针对性的工程优化办法, 包括对结构进行优化处理、实施界面调控手段、做好压降控制工作以及推进规模化放大举措等。并且, 文中还给出了具体的技术参数与详细的实施步骤。该研究成果为微通道反应器气液两相体系的工程化使用, 提供了一套切实可行的技术方案。这对于推动微通道反应器在化工生产当中达成高效、稳定以及规模化的运行状态具有重要意义, 进而为化工过程的强化升级给予了有力支持。

参考文献

- [1] 秦利涛, 刘润, 岳金彩, 等. TLFT 型螺旋微通道反应器的涡旋强化性能及其作用机理[J/OL]. 化工进展, 1-15[2025-09-12].<https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-0835>.
- [2] 刘胜学, 王光耀, 赵晓欣. 基于微反应技术的五氟磺草胺连续化合成工艺开发[J]. 石化技术, 2025, 32(09): 215-217.
- [3] 齐亚兵, 王康康, 吴子波, 等. 微反应器在药物、载药递释材料和诊疗药物制备领域应用的研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(16): 44-56.
- [4] 张佳亮, 刘学森, 俞伦, 等. 药物合成反应器的发展现状与展望[J]. 山东化工, 2025, 54(14): 99-104. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2025.14.034.
- [5] 周川, 边策, 王珂, 等. 微通道连续选择性合成线性 α -烯烃[J/OL]. 精细化工, 1-11[2025-09-12].<https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20250346>.

作者简介: 张蒙(1999—), 女, 汉族, 内蒙古乌兰察布市, 本科学历, 工程师, 研究方向: 化学工程。