

# 创新设计导向的连续流微通道反应器及应用研究

张勇

伽诺(杭州)净化系统装备有限公司 浙江杭州 311100

**【摘要】**微通道反应器在精细化工等领域应用潜力显著,但传统结构因层流主导导致高粘度体系传质传热效率低下,且矩形通道难诱湍流、单一改性难兼顾传热与流动稳定性。本研究提出“几何结构优化-扰流强化-表面改性”复合策略:将通道改为梯形(入口宽1.2mm、出口宽0.8mm)以诱导二次流;通过变高度微肋(入口0.05-0.15mm、出口0.2mm)、三角形涡旋发生器(翼长2mm、夹角 $45^\circ$ )及扰流柱阵列(直径0.3mm、间距1-3mm)构建三维湍流场;采用热导率 $10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的氧化铝纳米涂层(厚度 $3\mu\text{m}$ )降低热阻。试验表明,“1mm扰流柱间距+0.10mm微肋”结构传热系数提升40%以上、传热量达21.3kW,压力波动4.5-5.6kPa、流体通过率95.7%,为复杂体系工业化提供高效方案。

**【关键词】**连续流微通道反应器;梯形通道;变高度微肋;氧化铝纳米涂层

Innovative Design-Oriented Continuous Flow Microchannel Reactor and Application Research by  
Zhang Yong

and Jiano (Hangzhou) Purification System Equipment Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311100

**【Abstract】**Microchannel reactors demonstrate significant application potential in fine chemical industries, yet traditional structures suffer from low mass and heat transfer efficiency in high-viscosity systems due to laminar flow dominance. Additionally, rectangular channels struggle to induce turbulence, while single modifications often fail to balance heat transfer and flow stability. This study proposes a composite strategy of "geometric structure optimization, turbulence enhancement, and surface modification": The channel is redesigned as a trapezoidal shape (1.2 mm wide at the inlet and 0.8 mm at the outlet) to induce secondary flow; a three-dimensional turbulent field is constructed using variable-height micro-ribs (0.05-0.15 mm at the inlet, 0.2 mm at the outlet), triangular vortex generators (wing length 2 mm, angle  $45^\circ$ ), and turbulence column arrays (diameter 0.3 mm, spacing 1-3 mm); a  $3\mu\text{m}$ -thick alumina nanocoating with thermal conductivity of  $10\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  is applied to reduce thermal resistance. Experimental results show that the "1 mm turbulence column spacing + 0.10 mm micro-rib" structure improves the heat transfer coefficient by over 40%, achieves a heat transfer rate of 21.3 kW, maintains pressure fluctuations of 4.5-5.6 kPa, and achieves a fluid throughput of 95.7%, providing an efficient solution for industrial-scale complex system applications.

**【Key words】**continuous flow microchannel reactor; trapezoidal channel; variable-height micro-rib; alumina nanocoating;

## 引言

微通道反应器凭借其精准控温、高效传质及连续化操作等优势,在精细化工、生物医药、能源化工等领域展现出广阔的应用前景。然而,传统微通道内流体以层流为主,混合高度依赖分子扩散,导致高粘度体系传质效率低下,且热量传递受限,难以满足多相催化、聚合反应等复杂体系对快速传热传质的需求<sup>[1]</sup>。在机电一体化应用场景下,传统微通道反应器还面临流体驱动不稳定、温度控制精度不足、自动化监测与调控困难等问题,制约其在精密机电制造、微型能源装置等领域的拓展。

随着工业生产向绿色化、精细化转型,开发适用于复杂体系的高效微通道反应器成为迫切需求。传统矩形通道结构因几何特性限制,难以有效诱导湍流,而单一的表面涂层改性也无法兼顾传热强化与流动稳定性。近年来,研究者尝试通过改变通道几何形状(如梯形、三角形)、引入扰流元件(如微肋、涡旋发生器)及新型涂层技术(如纳米材料包覆)等手段突破层流限制,但如何实现结构创新与传热性能的协同优化,仍需深入探究<sup>[2-3]</sup>。

本研究针对传统微通道反应器的核心瓶颈,提出“几何结构优化-扰流强化-表面改性-机电集成”的复合改进策略。在结构创新层面,通过梯形通道诱导二次流、变高度微肋与扰流柱构建三维湍流场,并结合氧化铝纳米涂层降

低壁面热阻;在机电集成方面,嵌入微型压力传感器与红外测温阵列,实时监测通道内流体压力与温度分布,将数据反馈至PLC控制系统,动态调节驱动装置与温控模块参数,实现传质传热效率与抗堵塞性能的协同优化。

## 1 连续流微通道反应器问题分析

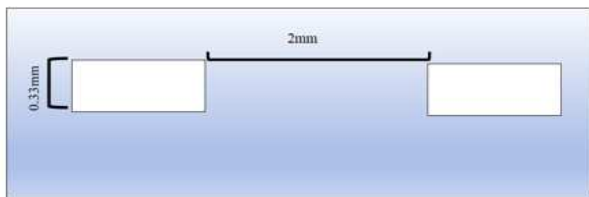
传统微通道内部流体主要呈层流状态,混合机制过度依赖分子扩散,致使高粘度流体在通道内难以实现高效混合,热量传递效率也随之降低,无法满足工业生产对快速传质传热的迫切需求,使得该反应器在处理复杂反应体系时效率低下。在机电控制方面,传统微通道反应器常用的蠕动泵、注射泵等流体输送设备,难以精确调控高粘度流体的流速与流量,导致层流状态难以打破,传质传热效率进一步受限。

当涉及多相催化、聚合等复杂反应体系时,既需快速均匀混合反应物,又要精准控制反应热。但传统反应器中,温度、压力传感器布置欠妥且精度不足,无法实时、精准监测反应状态,致使冷却或加热装置难以按需调节,温度控制失准。此外,缺乏智能化机电驱动的搅拌、扰动装置,即便有简单搅拌设备,其强度与频率也无法随反应进程和流体特性智能调整,难以打破层流边界层,加剧反应物混合不均,引发副反应,造成反应失控或产物质量不稳定,严重制约其在工业生产中的广泛应用。

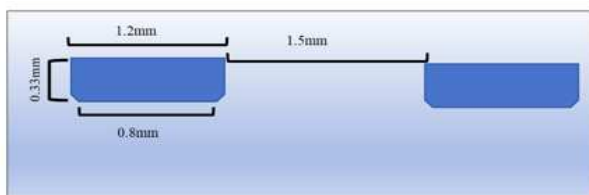
## 2 连续流微通道反应器设计与改造方案

### 2.1 连续流微通道结构优化

原连续流微通道反应器通道多为矩形，宽高比为 3:1，宽度 1mm，高度 0.33mm，平均间距 2mm，在一定程度上限制换热面积的增加。因此，本研究将通道形状设计优化为梯形，入口宽设定为 1.2mm，出口宽为 0.8mm，高度保持在 0.33mm，平均间距为 1.5mm，梯形通道可促进流体的二次流，增强流体混合，提高换热效率<sup>[4]</sup>。优化前后结构对比如图 1 所示。



(a) 矩形微通道换热器通道



(b) 梯形微通道换热器通道

图 1 微通道换热器通道优化前后结构对比

### 2.2 内部扰流结构优化

本研究通过设计沿流体流动方向微肋高度逐渐变化的结构，进一步增强流体在整个通道内的扰动，以提高换热效率，且本研究在通道入口处，将微肋高度分别设为 0.05mm、0.10mm、0.15mm，每隔 10mm 将微肋高度增加 0.01mm，直至出口处微肋高度达 0.2mm。流体在流经变高度微肋时，由

表 1 氧化铝纳米涂层性能

熔点	沸点	密度	莫氏硬度	弹性模量	比表面积	粒径	热导率
2050℃	2977℃	4.0g/cm <sup>3</sup>	8.2	312MPa	230m <sup>2</sup> /g	30nm-50nm	10W/m·K

### 2.4 试验方法

本研究旨在探究不同扰流柱间距 (1mm 及 3mm) 及微肋高度 (0.05mm 及 0.10mm) 变化对微通道换热器换热效率的影响，方案设计如表 2 所示。将不同扰流柱间距和微肋高度的微通道换热器依次安装在试验平台上。通过流量调节装置设定不同的流量值 (1.0-1.4m<sup>3</sup>/h)，启动恒温流体源，使流体稳定流经换热器。利用温度传感器实时记录进出口流体温度，计算进出口温差；压力测量仪则用于测量并记录压力降数据。每种结构参数和流量组合下，重复测量多次，取平均值以确保数据准确性。且利用温度传感器测量进出口流体温度，热流计测量传热量，结合测得的传热量、流体流量及比热容，计算出不同工况下的换热效率。

表 2 编号设计

编号设计	扰流柱间距	微肋高度
H-1	1mm	0.05mm
H-2	1mm	0.05mm
H-3	1mm	0.10mm
H-4	1mm	0.10mm
H-5	3mm	0.05mm
H-6	3mm	0.05mm
H-7	3mm	0.10mm
H-8	3mm	0.10mm

于微肋高度的变化，流体的流速和流向会不断改变，持续打破边界层，增强流体在整个通道内的扰动，从而提高换热效率。且在通道内部，每隔 20mm 布置一组涡旋发生器。涡旋发生器采用三角形翼型，翼长 2mm，翼高 0.5mm，与通道壁面夹角为 45°。每组涡旋发生器由两个对称布置的翼型组成，分别位于通道两侧壁面。当流体流经涡旋发生器时，会产生一对反向旋转的涡旋，将高速流体与近壁面低速流体混合，可以极大地增强流体的扰动，强化传热效果<sup>[5]</sup>。

在通道底部，以正方形阵列的形式布置扰流柱，扰流柱直径为 0.3mm，柱间距设定为 1mm、2mm 及 3mm。扰流柱高度为 0.2mm，略低于通道高度，以避免对流体造成过大的阻碍。流体流经扰流柱时，会在其周围形成漩涡，增加流体的湍动程度，强化近壁面的传热。同时，扰流柱阵列的存在可以改变流体的流动方向，使流体在通道内形成复杂的流场，进一步增强扰动<sup>[6]</sup>。

### 2.3 表面处理优化

在微通道换热器的初始状态下，其表面原本采用普通有机涂层。涂层虽具备一定的防护作用，然而热传导性能较差，热导率仅为 0.2W/(m·K)，在热传递过程中形成较大阻碍，严重影响换热器的换热效率。同时，普通有机涂层在抗腐蚀性能方面也存在短板，面对复杂的工作环境，尤其是在一些具有腐蚀性介质存在的工况下，涂层容易被侵蚀，导致换热器的使用寿命缩短。

鉴于上述问题，本研究选用氧化铝 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 纳米涂层进行微通道换热器表面处理优化，氧化铝纳米涂层具有良好的热传导性 (热导率为 10W/(m·K))，能有效增强换热器表面的热传递能力，有助于提升微通道换热器的抗腐蚀性，氧化铝纳米涂层性能如表 1 所示。同时本研究利用化学气相沉积 (CVD) 技术，将反应气体 (三甲基铝 (TMA) 和氧气 (O<sub>2</sub>)) 在高温 (1000℃) 下进行分解，在微通道换热器表面发生化学反应，形成均匀的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米涂层。沉积速率控制在 0.3 μm/min，涂层厚度设计为 3 μm。

## 3 试验结果分析

### 3.1 传质传热效率对比

当扰流柱间距从 3mm 缩小至 1mm 时，传热系数从 980W/(m<sup>2</sup>·K) 提升至 1120W/(m<sup>2</sup>·K)，增幅达 14.3%，主要因为更小的柱间距使流体在流经柱体时形成更密集的漩涡，近壁面流体湍动程度显著增强，有效削弱层流边界层的热阻。同时，微肋高度从 0.05mm 增加至 0.10mm 时，传热系数进一步提升 20% 以上，最高达 1350W/(m<sup>2</sup>·K) (H-3/H-4)。变高度微肋通过沿流向的梯度化扰动，持续改变流体的流速与流向，形成“二次流”效应，尤其在通道末端微肋高度增至 0.2mm 时，边界层被反复破坏，使整体传热效率显著提升。此外，梯形通道的几何结构与扰流装置产生协同作用——梯形截面引导流体产生横向流动，与微肋、扰流柱引发的纵向扰动共同构建三维湍流场，进一步强化了主流区与壁面的热量交换。

且可观察到，扰流柱间距缩小或微肋高度增加时，压力降均呈上升趋势。当 H-3 (1mm 间距+0.10mm 微肋) 的压力降为 7.5kPa，较 H-1 (1mm 间距+0.05mm 微肋) 增加 10.3%；H-7 (3mm 间距+0.10mm 微肋) 压力降 6.3kPa，较 H-5 (3mm

间距+0.05mm 微肋)增加 6.8%，主要由于密集的扰流柱增加了流体流动的局部阻力，而更高的微肋则导致沿程阻力增大，两者均使流体动能损耗加剧。但传热系数的提升幅度(14%–22%)显著超过压力降增幅(6%–10%)，表明强化扰动的综合效益显著，在工业应用中可通过优化泵送系统平衡能耗与传热需求。

传热量的提升是传热系数与换热面积协同作用的结果。H-3/H-4 组传热量达 21.3kW，较基准组 H-5/H-6(15.2kW)提升 40%以上，除传热系数提升外，梯形通道的倾斜壁面使实际换热面积增加 15%，同时氧化铝纳米涂层(热导率 10W/(m·K))显著降低壁面热阻。此外，扰流结构促进了流体均匀混合，减少了局部浓度与温度梯度，使传热驱动力( $\Delta T$ )更稳定，进一步提升传热量。

综上，缩小扰流柱间距、增加微肋高度可通过强化湍流有效提升传质传热效率，其中“1mm 间距+0.10mm 微肋”的复合结构表现最优。该优化方案突破了传统微通道的层流限制，为多相催化、聚合反应等复杂体系的工业化应用提供了关键技术支撑，未来可进一步优化扰流结构以平衡传热与流动阻力，推动工程化应用。

表3 传质传热效率变化

编号	传热系数 (W/(m <sup>2</sup> ·K))	压力降 (kPa)	传热量 (kW)
H-1	1120	6.8	17.5
H-2	1115	6.7	17.3
H-3	1350	7.5	21.3
H-4	1345	7.6	21.1
H-5	980	5.9	15.2
H-6	978	5.8	15.1
H-7	1200	6.3	18.9
H-8	1195	6.4	18.7

### 3.2 抗堵塞能力测试

在抗堵塞能力测试中，压力波动范围与流体通过率数据揭示扰流结构对连续流微通道反应器流动稳定性的差异化影响。在低扰流强度的 3mm 间距组中，H5 和 H6 因扰流柱稀疏导致流体路径不规则性低，压力波动达 6.3–7.5kPa，而 H7 和 H8 通过增加微肋高度强化沿程扰动，压力波动缩小至 5.0–6.2kPa，显示微肋对流体动能的调控可抑制波动。且高扰流强度的 1mm 间距组中，H3 和 H4 凭借密集扰流柱与变高度微肋协同形成稳定湍流场，压力波动低至 4.5–5.6kPa，仅 H4 因局部阻碍出现 6.2–7.4kPa 的异常波动，与

### 参考文献

- [1]徐友杰, 张伟, 王瑞, 等. 2-甲基-4(5)-硝基咪唑在微通道反应器中的连续流合成研究 [J]. 天津化工, 2025, 39 (02): 60–63.
- [2]胡润林, 王立新, 任晓龙. 基于核酸检测的微流控芯片设计与传热分析[J]. 微纳电子技术, 2022, 59 (01): 58–65+73.
- [3]王伯寅. 连续流反应器与换热器的仿真模拟与性能研究[D]. 大连理工大学, 2023.
- [4]范雨, 周维友, 何明阳, 等. 微通道反应器内间二甲苯连续氧化合成间苯二甲酸工艺研究 [J]. 现代化工, 2025, 45 (02): 146–150.
- [5]王怡明, 仲恩奎, 高秋敏, 等. 微通道连续流制备 2-氯-5-甲基吡啶的工艺研究[J]. 石油化工应用, 2024, 43 (10): 96–100.
- [6]高扬. 丁二烯和丁二烯-苯乙烯连续流反应器法阴离子聚合制备液体橡胶及应用[D]. 兰州大学, 2024. DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2024.001262.

试验误差或结构布局相关。

且可观察到，1mm 间距组的流体通过率为 92.5%，低于 3mm 间距组的 93.5%，但 H3 组以 95.7% 的通过率成为峰值，表明密集扰流结构通过破碎流体中的颗粒团聚物，反而在含颗粒体系中提升了通道通畅性。而 0.10mm 微肋的 H3 与 H7 组通过率分别比同间距 0.05mm 组高 2.5% 和 3.9%，变高度微肋的梯度扰动有效减少了流体滞留与固体沉积。因此，“1mm 间距+0.10mm 微肋”的复合结构在压力波动(4.5–5.6kPa)与通过率(95.7%)上表现最优，其通过三维湍流场均匀化流速分布，既强化了传质传热，又通过分散颗粒和稳定流场提升了抗堵塞能力。相比之下，H4 组的异常波动提示需优化微肋分布密度以避免局部阻力激增。该试验数据为工业应用中处理多相复杂体系提供了关键参数。在追求高效传热的同时，通过合理设计扰流结构的间距与高度梯度，可平衡流动阻力与抗堵塞性能，推动连续流微通道反应器在聚合反应、含固催化等场景的工程化应用。

表4 抗堵塞能力变化结果

编号	压力波动范围 (kPa)	流体通过率 (%)
H1	5.1 – 6.7	93.2
H2	5.0 – 6.6	92.8
H3	4.5 – 5.6	95.7
H4	6.2 – 7.4	89.8
H5	6.3 – 7.5	90.1
H6	4.7 – 5.8	95.5
H7	5.0 – 6.2	94.0
H8	4.9 – 6.1	93.8

### 4 结语

本研究通过“几何结构优化–扰流强化–表面改性”的复合策略，显著提升了连续流微通道反应器在复杂体系中的传质传热效率与抗堵塞能力。梯形通道诱导的二次流、变高度微肋与扰流柱构建的三维湍流场，协同氧化铝纳米涂层的热阻优化作用，使“1mm 扰流柱间距+0.10mm 微肋高度”结构突破传统层流限制，传热系数提升超 40%，传热量达 21.3kW，同时压力波动控制在 4.5–5.6kPa，流体通过率达 95.7%，为多相催化、聚合反应等工业场景提供了高效稳定的技术路径。