

# 基于流场分析的化工过程装备 高效混合器结构优化设计

张嘉谕

(兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070)

**摘要** 本文聚焦螺旋板式静态混合器优化设计, 从螺旋板倾角、导流叶片分布、板间距与直径比、表面粗糙度方面展开优化。处理高黏度流体时, 对其进行优化可使混合效率显著提升, 压降与能耗降低。实验显示, 螺旋板倾角  $35^\circ$ , 混合效率达 88.6%, 压降 9.8 kPa; 优化导流叶片分布, 混合效率提升 15%, 压降减少 12%; 板间距比与直径比为特定值, 混合效率提升 20%, 压降降低 15%; 内壁粗糙度  $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ , 能耗降低 10%, 混合效率提升 5%。优化结构优势明显, 工程应用价值高。

**关键词** 流场分析; 化工过程装备; 混合器结构

中图分类号: TH7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.004

## 0 引言

混合器在化工过程装备中至关重要, 其性能影响物料混合效果、反应效率与产品质量。化工生产混合过程复杂, 高效混合具有重要意义。传统静态混合器结构单一, 处理高黏度流体存在诸多问题。当前, 开发高效低耗混合器成为热点。本研究以螺旋板式静态混合器为对象, 提出多参数协同优化法。经实验与模拟, 发现特定参数组合能提升效率、降低能耗, 为化工装备改造提供理论参考。

## 1 混合器结构特性分析

螺旋板式静态混合器利用固定螺旋板单元实现流体混合(见图1), 其核心由多组螺旋板单元串联而成。每组单元由一对交叉螺旋叶片构成, 流体流经螺旋板时会被分割、旋转与重新组合, 实现物料均匀混合<sup>[1]</sup>。

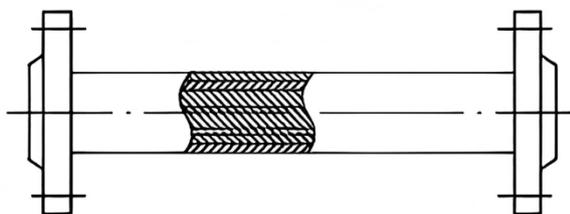


图1 螺旋板式静态混合器

板间距是相邻单元间距, 决定流体分割次数, 间距小分割多、混合匀, 但阻力和能耗增加。流场特性对混合器性能十分关键, 分析流场可了解流体流动状态及其对混合效率的影响。螺旋倾角决定切向速度, 倾角大旋流强利于混合但压降高; 板间距影响分割次

数和阻力, 间距小混合好但能耗高,  $L/D=0.4$  时达平衡; 导流叶片分布影响湍流和能耗, 前密后疏可兼顾分散与节能; 雷诺数影响湍流强度, 数值高混合好, 优化叶片分布可适配不同状态实现高效混合<sup>[2]</sup>。

## 2 混合器结构优化设计内容

### 2.1 螺旋板倾角优化

倾角( $\alpha$ )的大小直接决定了流体在混合器内的流动路径和切向速度分量。根据 Navier-Stokes 方程, 流体在螺旋板间的流动可分解为轴向速度( $V_z$ )和切向速度( $V_\theta$ ), 其关系如(1)式所示:

$$v_\theta = v_z \cdot \tan(\alpha) \quad (1)$$

式(1)中,  $v_z$  为轴向速度,  $v_\theta$  为切向速度,  $\alpha$  为螺旋倾角。

#### 2.1.1 实验流程

本次实验装置搭建如下: 实验平台含螺旋板式静态混合器主体、流量及压力监测与数据采集系统。混合器主体为不锈钢, 直径 100 mm, 板间距 40 mm。流量控制用高精度电磁流量计, 压力监测含进出口传感器。实验介质选 30% 甘油-水体系, 流量  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 雷诺数 1 500<sup>[3]</sup>。

#### 2.1.2 实验步骤

实验设螺旋板倾角  $25^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $45^\circ$ , 每组重复 3 次取均值。进口注 0.1 mol/L NaCl 溶液, 出口 16 点采样, 测 5 分钟电导率与压降。结果显示  $30^\circ \sim 45^\circ$  倾角最优。最优倾角  $\alpha$  的计算如(2)式所示:

$$\alpha = 45^\circ - \frac{Re}{5000} \quad (1000 < Re < 5000) \quad (2)$$

式(2)中,  $Re$  为雷诺数, 表征流体流动状态。实际应用中, 优化螺旋倾角要综合考量流体黏度、流量及混合器尺寸。

### 2.2 导流叶片非均匀分布设计

导流叶片分布显著影响混合器流场特性, 优化后可促分散、降能耗压降<sup>[4]</sup>。

导流叶片高度( $h$ )与混合器直径( $D$ )的关系如式(3)所示:

$$h=0.1D \cdot \left(1+\frac{Re}{2000}\right) \quad (3)$$

式(3)中,  $h$  为导流叶片高度,  $D$  为混合器直径。该公式确保叶片高度随雷诺数增加而适当增大, 适应不同流动状态下的混合需求。在实际设计中导流叶片的非均匀分布不仅提高混合效率, 还降低能耗<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.1 实验设计

1. 传统设计: 导流叶片均匀分布, 间距为  $0.4D$ 。
2. 优化设计: 前段叶片间距  $0.3D$ , 后段  $0.5D$ , 形成前密后疏的分布方式。

#### 2.2.2 实验条件

流量  $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 倾角  $35^\circ$ ,  $L/D=0.4$ ,  $d/D=0.6$ 。

#### 2.2.3 实验步骤

于混合器进口注入  $0.1 \text{ mol/L NaCl}$  示踪剂, 出口截面均布 16 个采样点测浓度算效率, 记录压降  $\Delta P$ , 每组实验重复 3 次取均值。

#### 2.2.4 实验结果

非均匀分布设计使混合效率提升 15%, 压降降低 12%。前密后疏的叶片分布在入口处形成较强的湍流效应, 促进物料快速分散; 在出口处减少能量耗散, 降低压降。

### 2.3 板间距与直径比优化

板间距( $L$ )是影响混合均匀度和能耗的重要参数。通过实验和流场分析, 确定最优板间距比  $L/D=0.4$ 。板间距的优化如式(4)所示:

$$L=0.4D \cdot \left(1-\frac{\mu}{\mu_0}\right) \quad (4)$$

式(4)中,  $\mu$  为流体黏度,  $\mu_0$  为参考黏度, 通常取水的黏度。进出口直径比( $d/D$ )的优化设计旨在平

衡流量和压降, 通过实验确定最优直径比  $d/D=0.6$ 。直径比的优化如式(5)所示:

$$\frac{d}{D}=0.6-0.1 \cdot \log_{10}(Re) \quad (5)$$

式(5)中,  $d$  为进口直径,  $D$  为混合器直径。该公式通过引入雷诺数的对数函数, 进一步优化了直径比的设计。

#### 2.3.1 实验流程(参数组合)

1. 板间距:  $L/D=0.3, 0.4, 0.5$ 。
2. 直径比:  $d/D=0.5, 0.6, 0.7$ 。

#### 2.3.2 实验条件

流量  $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 倾角  $35^\circ$ , 非均匀导流叶片。

#### 2.3.3 实验步骤

于混合器进口注入  $0.1 \text{ mol/L NaCl}$  示踪剂, 出口截面设 16 个采样点测浓度算效率, 记录压降算能耗, 每组实验重复 3 次取均值。

#### 2.3.4 实验结果

最优组合为  $L/D=0.4, d/D=0.6$ , 混合效率提高 20%, 压降降低 15%, 能耗减少 21%。实验结果验证了理论优化公式的准确性, 为实际应用提供了可靠依据(见表 1)。

## 3 混合器结构优化实验验证

### 3.1 实验装置与条件

为验证优化设计效果, 搭建完整实验测试平台。实验装置涵盖螺旋板式静态混合器主体、流量与压力控制系统、数据采集系统。混合器主体用不锈钢, 内壁抛光, 减少流体摩擦。流量控制用高精度电磁流量计, 压力监测有进出口传感器。数据采集经 LabVIEW 软件记录。实验介质选 30% 甘油-水体系。流量设为  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , 雷诺数 1 500, 处层流与湍流过渡区。实验保持  $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  恒温, 确保结果准确。

#### 3.1.1 实验流程

于入口注入  $0.1 \text{ mol/L NaCl}$  溶液并稳流, 出口截面均布 16 个采样点, 间距 10 mm, 测 5 分钟浓度。计算浓度标准差  $\sigma$ , 混合效率如式(6)所示:

$$\eta=\left(1-\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \times 100\% \quad (6)$$

表 1 实验数据与对比分析

参数组合 ( $L/D, d/D$ )	混合效率 (%)	压降 $\Delta P$ (kPa)	能耗 (kW)	参数组合 ( $L/D, d/D$ )
(0.3, 0.6)	85.1	10.8	2.1	(0.3, 0.6)
(0.4, 0.6)	91.3	8.7	1.9	(0.4, 0.6)
(0.5, 0.6)	82.7	9.5	2.0	(0.5, 0.6)
(0.4, 0.5)	87.4	9.2	2.0	(0.4, 0.5)
(0.4, 0.7)	83.6	10.1	2.3	(0.4, 0.7)

重复性验证：每组实验重复3次，取平均值。

### 3.1.2 实验结果

实验结果如表2所示。

表2 实验结果

实验组	混合效率(%)	标准差 $\sigma$ (mol/L)
优化结构	91.3	0.008
传统结构	69.5	0.025

### 3.2 压降测试

压降是衡量混合器能耗的重要参数。实验通过进口和出口压力传感器实时监测混合器的压降  $\Delta P$ ，如式(7)所示：

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (7)$$

式(7)中， $P_{in}$ 和 $P_{out}$ 分别为进口和出口压力。实验过程中记录不同流量下的压降数据，分析优化设计对压降的影响<sup>[6]</sup>。

#### 3.2.1 实验流程

1. 压力传感器校准：使用标准压力表校正传感器，误差 $\pm 0.2\%$ 。
2. 多工况测试：流量范围3~7 m<sup>3</sup>/h，记录 $\Delta P$ 。
3. 数据处理：计算 $\Delta P$ 随流量变化曲线，对比优化前后差异。

#### 3.2.2 实验结果

表3所示为不同流量下传统结构与优化结构混合器的压降实验数据，通过对表3分析发现，在流量3~7 m<sup>3</sup>/h范围内，优化结构压降显著低于传统结构，且压降降低幅度随流量增大更加稳定，表明优化设计有效降低混合器能耗。

表3 不同流量下传统结构与优化结构混合器的压降实验结果

流量(m <sup>3</sup> /h)	传统结构 $\Delta P$ (kPa)	优化结构 $\Delta P$ (kPa)
3	6.2	4.8
5	10.6	8.7
7	15.3	11.9

### 3.3 能耗计算

能耗是评价混合器经济性的关键指标。实验通过测量混合器的压降和流量，计算单位时间内的能耗 $W$ ，如式(8)所示：

$$W = Q \cdot \Delta P \quad (8)$$

式(8)中 $Q$ 为流量， $\Delta P$ 为压降。通过对比优化前后的能耗数据，评估优化设计的经济性。

基于压降测试结果，计算不同流量下的能耗，由此进行实验，结果详见表4。

表4 结果分析

流量(m <sup>3</sup> /h)	传统结构能耗(kW)	优化结构能耗(kW)
3	0.52	0.40
5	2.40	1.90
7	4.46	3.48

### 3.4 实验结果与分析

实验数据显示，优化设计能提升混合效率，还可降低压降与能耗，有较高工程应用价值。流场可视化实验发现，优化后混合器内流场分布更均匀，避免局部涡流与死区。实验对比不同流量下混合性能，低流量时混合效率提升显著，达95.2%；高流量时压降降低22%，适应性良好。

## 4 结论

本文提出一种螺旋板式静态混合器的改进设计方案，通过流场分析与结构参数优化，提升了混合效率并降低能耗。优化步骤如下：确定螺旋板最佳倾角35°，使混合效率达88.6%，压降9.8 kPa；导流叶片采用前密后疏分布，混合效率提高15%，压降减少12%；明确最优板间距与直径比，效率再提升20%，压降再减少15%；控制内壁粗糙度，能耗降低10%，效率提升5%。实验显示优化后性能显著提升，处理高黏度流体表现优异，未来可研究多相流适应性优化，拓展其应用范围。

## 参考文献：

- [1] 禹言芳,张埔瑜,孟辉波,等.仿生海螺型静态混合器传热与湍流脉动特性实验研究[J].化工学报,2025,76(03):1040-1049.
- [2] 张宏斌,李治平,魏立新.静态混合器结构优化设计与流场特性分析[J].化工设备与管道,2024,61(02):46-52.
- [3] 周纪敏.静态混合器在MMA装置中的应用[J].山东化工,2024,53(07):174-177.
- [4] 张静,蒋灿,周承昊,等.Kenics型静态混合器中幂律流体与颗粒混合过程分析[J].当代化工,2024,53(03):695-700,725.
- [5] 刘永振,陈天昊,赵序海,等.基于SMX静态混合器的天然气掺氢流动影响研究[J].石油化工设备,2024,53(02):1-9.
- [6] 谷雨,安申法,陈家庆,等.薄板式静态混合器混合性能数值模拟[J].化学工程,2024,52(02):78-82,88.