

## 水源与饮用水保障

赵嘉珩, 李星, 池文君, 等. 多级耦合静态管道混合器的结构参数与混合效率优化的评价方法[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 45-52.

Zhao J H, Li X, Chi W J, et al. Evaluation method of a multi-stage coupled static pipe mixer for structural parameters and mixing efficiency optimization [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 45-52.

## 多级耦合静态管道混合器的结构参数与混合效率优化的评价方法

赵嘉珩<sup>1,2</sup>, 李星<sup>2,\*</sup>, 池文君<sup>3</sup>, 池国正<sup>3</sup>

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 3. 浙江联池水务设备股份有限公司, 浙江杭州 310004)

**摘要** 【目的】混合是混凝过程的关键环节, 会显著影响混凝效果。静态管道混合器是重要的混合设施, 具有种类多、混合方式不同、型式各异等特点, 且混合效率与结构参数密切相关。但静态管道混合器的结构及其优化仍缺少有效的表征方法与评价手段。本文旨在建立一种静态管道混合器结构参数与混合效率的协同优化方法, 为水处理混凝工艺中混合器的设计与性能优化提供理论依据。【方法】本文构建了 DN200 型多级耦合静态管道混合器三维模型, 采用计算流体动力学(CFD)方法分析了药液体积分数分布与流场变化规律, 系统考察了内外腔径比、加药导流槽数、导流槽扭转角和导/汇流部件长度等关键结构参数对速度梯度( $G$ 值)和药液体积分数变异系数(CoV值)的影响, 并采用灰色关联分析法综合量化 $G$ 值与CoV值以评价混合效率。【结果】结构参数对混合效率的影响程度大小依次为导/汇流部件长度、加药导流槽数、导流槽扭转角、内外腔径比, 导/汇流部件长度和加药导流槽数为混合效率的关键影响参数。最优结构参数组合如下: 内外腔径比为 200 mm : 340 mm、加药导流槽数为 6 个、导流槽扭转角为 180°、导/汇流部件长度为 75 mm, 对应的灰关联度为 0.762 3、 $G$ 值为 548  $s^{-1}$ 、CoV 值为 0.084 7, 在出口处药液体积分数达到 3.2%~4.0%, 在 1 级与 2 级混合段均形成了顺时针方向旋流, 其中内腔中心流速为 0.82~1.64 m/s, 内腔周边流速为 0.40~0.82 m/s,  $G$ 值显著增加。【结论】本文结合 CFD 模拟与灰色关联分析, 定量分析了结构参数与混合效率的构效关系, 混合效率与 CoV 值与  $G$  值总体呈现负相关关系, 仅以  $G$  值或 CoV 值无法有效表征混合效率的变化规律, 需建立灰关联模型以综合表征  $G$  值与 CoV 值的变化规律对混合效率的影响。本文为不同型式静态管道混合器的结构参数优化与混合效率改善提供了有效的评价方法。

**关键词** 静态管道混合器 混合效率 结构参数 计算流体动力学(CFD) 评价方法

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)04-0045-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.005

## Evaluation Method of a Multi-Stage Coupled Static Pipe Mixer for Structural Parameters and Mixing Efficiency Optimization

Zhao Jiaheng<sup>1,2</sup>, Li Xing<sup>2,\*</sup>, Chi Wenjun<sup>3</sup>, Chi Guozheng<sup>3</sup>

(1. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100010, China;

2. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Zhejiang Lianchi Water Equipment Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

**Abstract** [Objective] Mixing is a crucial step in coagulation process, significantly influencing its effectiveness. Static pipeline

[收稿日期] 2025-06-13

[基金项目] 国家自然科学基金(52370002)

[作者简介] 赵嘉珩(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水处理过程模拟技术, E-mail: 1823687930@qq.com。

[通信作者] 李星(1963—), 男, 教授, 研究方向为给水处理技术与工艺, E-mail: lixing@bjut.edu.cn。

mixers are important mixing facilities characterized by their diverse types, varying mixing method, and different configurations, with their mixing efficiency closely related to structural parameters. However, effective characterization methods and evaluation method for the structure and optimization of static pipe mixers are still lacking. This paper aims to establish a synergistic optimization methods for the structural parameters and mixing efficiency of static pipe mixers, providing a theoretical basis for their design and performance optimization in water treatment coagulation processes. [Methods] A three-dimensional model of a DN200 multi-stage coupled static pipe mixer was constructed in this paper. Computational fluid dynamics (CFD) was employed to analyze the distribution of the chemical solution volume fraction and flow field variation patterns, systematically investigating the effects of key structural parameters, including the inner/outer cavity diameter ratio, number of chemical dosing guide grooves, twist angle of flow guide grooves, and length of converging-diverging components on the velocity gradient ( $G$ -value) and coefficient of variation (CoV value) of chemical solution volume fraction. Grey correlation analysis was used to comprehensively quantify the  $G$ -value and CoV value to evaluate mixing efficiency. [Results] The degree of influence of structural parameters on mixing efficiency in descending order was length of converging-diverging components, number of chemical dosing guide grooves, twist angle of flow guide grooves, and inner/outer cavity diameter ratio. The length of converging-diverging components and the number of chemical dosing guide grooves are identified as key influencing parameters for mixing efficiency. The optimal structural parameter combination was as follows. Inner/outer diameter ratio of 200 mm : 340 mm, 6 chemical dosing guide grooves, a twist angle of  $180^\circ$ , and a converging-diverging component length of 75 mm, the corresponding grey correlation degree,  $G$ -value, and CoV reached 0.762 3,  $548 \text{ s}^{-1}$ , and 0.084 7, respectively, chemical volume fraction reached 3.2%–4.0% at the outlet. Clockwise vortical flow formed in both the primary and secondary mixing stages, with inner cavity center velocities ranging from 0.82 m/s to 1.64 m/s and peripheral velocities from 0.40 m/s to 0.82 m/s, indicating a significant increased  $G$  value. [Conclusion] By combining CFD simulation with grey correlation analysis, this paper quantitatively analyzes the structure-efficiency relationship between parameters and mixing efficiency. Neither  $G$ -value nor CoV-value alone can effectively characterize the variation pattern of mixing efficiency. Changes in either  $G$ -value or CoV alone can not effectively characterize variations in mixing efficiency; hence, a grey relational model is necessary to comprehensively represent the influence of  $G$ -value and CoV variations on mixing efficiency. This paper provides an effective evaluation method for optimizing structural parameters and improving mixing efficiency in different types of static pipe mixers.

**Keywords** static pipe mixer mixing efficiency structural parameter computational fluid dynamics(CFD) evaluation method

混合过程是水处理混凝单元的重要环节, 混凝剂、高分子絮凝剂等的投加方式与混合条件存在很大差异, 药剂的混合过程会显著影响混凝效果<sup>[1]</sup>。静态管道混合器是常用的混凝剂投加和混合设施, 具有种类多样、混合方式不同、型式各异等特点<sup>[2]</sup>, 评价和优化静态管道混合器的混合效率具有很大的实际意义和应用价值。混合过程时间短、流态变化幅度大<sup>[3]</sup>, 流体动力学特性复杂, 混合效率受结构参数影响大<sup>[4]</sup>, 难以直观地表达混合过程的局部细节<sup>[5]</sup>, 多采用后续的混凝与沉淀效果等间接地反映混合效率。计算流体动力学(CFD)技术可进行水流及混凝剂药液的流体运动数值仿真, 直观地模拟混合过程的实时流态、混合程度、变化规律等<sup>[6]</sup>, 从微观流体角度解析混合过程<sup>[7]</sup>。CFD 模拟结果能准确地反映实际混合过程的速度梯度( $G$ 值)、药液体积分数变异系数(CoV值)与流场等参数的变化规律<sup>[8-9]</sup>, 可应用于静态管道混合器的混合过程, 是混合过程和混合效率研究的有效表征方法<sup>[10]</sup>。

本文基于一种多级耦合静态管道混合器<sup>[11]</sup>, 采用 CFD 技术构建了管道混合器模型, 进行了不同结构参数组合的混合效率数值模拟, 探究了主要结构参数对灰关联度、 $G$ 值、CoV值的综合影响, 提出了静态管道混合器的最优结构参数组合, 考察了最优混合器的药液体积分数分布与流场变化规律。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 静态管道混合器模型

采用 SolidWorks 软件建立的多级耦合静态管道混合器数值模型如图 1(a)~图 1(b)所示。多级耦合静态管道混合器由 1 级混合段与 2 级混合段构成, 1 级混合段为内外双腔体结构, 在外腔设有环形加药管、内凹螺旋导流槽, 在内腔设有导/汇流部件; 2 级混合段为直管段。混合器流体域示意如图 1(c)所示, 红色区域为混合器计算流体域, 混合器总长为  $L$ , 1 级混合段长为  $L_1$ , 进水口直径、流速、流量分别为  $d_1$ 、 $v_1$ 、 $Q_1$ , 进药口直径、流速、流量分别为  $d_2$ 、 $v_2$ 、 $Q_2$ , 各参数值如表 1 所示。

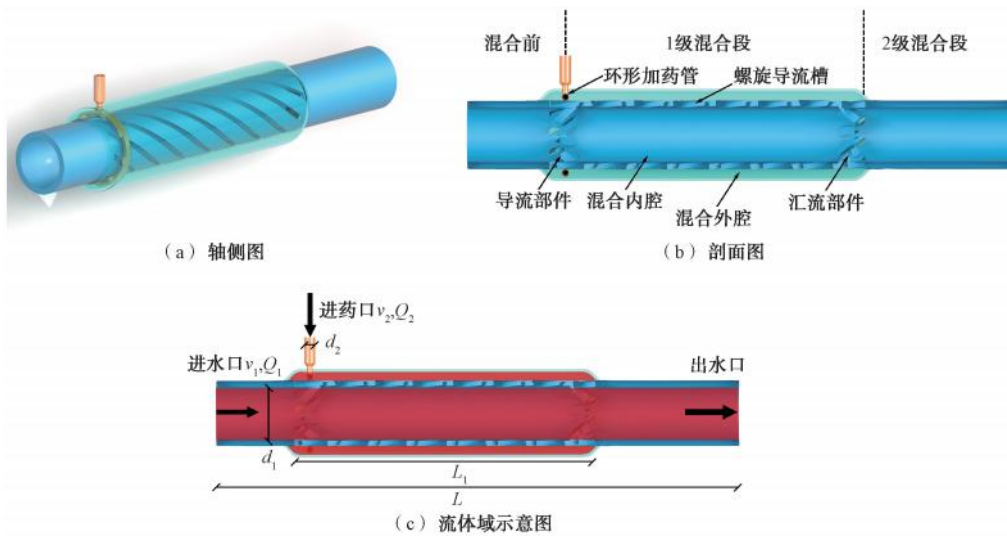


图 1 多级耦合静态管道混合器模型

Fig. 1 Model of Multi-Stage Coupled Static Pipe Mixer

表 1 多级耦合静态管道混合器基本参数

Tab. 1 Basic Parameters of Multi-Stage Coupled Static Pipe Mixer

参数名称		数值
长度/m	$L$	2.0
	$L_1$	1.0
直径/mm	$d_1$	200.0
	$d_2$	40.0
流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v_1$	1.0
	$v_2$	1.0
流量/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	$Q_1$	$3.140\times 10^{-2}$
	$Q_2$	$1.256\times 10^{-3}$

## 1.2 静态管道混合器结构参数

采用 DN200 型的多级耦合静态管道混合器为例作为研究对象,其主要结构参数包括内外腔径比(A)、加药导流槽数(B)、导流槽扭转角(C)、导/汇流部件长度(D)。各结构参数分别选取 4 个水平进行正交试验,如表 2 所示。

表 2 静态管道混合器的结构参数水平

Tab. 2 Structural Parameter Levels of the Static Pipe Mixer

水平种类	A/mm	B	C/( $^\circ$ )	D/mm
水平 1	200 : 330	2	180	75
水平 2	200 : 340	4	270	80
水平 3	200 : 350	6	360	85
水平 4	200 : 360	8	450	90

选用 4 因素、5 水平的  $L_{16}(4^5)$  型正交表进行正交试验,多级耦合静态管道混合器的结构参数组合如表 3 所示。

表 3 结构参数组合正交试验表

Tab. 3 Orthogonal Experiment of Structural Parameter Combinations

编号	结构参数				*	结构参数组合	编号	结构参数				*	结构参数组合
	A	B	C	D				A	B	C	D		
1	1	1	1	1	1	$A_1B_1C_1D_1$	9	3	1	3	4	2	$A_3B_1C_3D_4$
2	1	2	2	2	2	$A_1B_2C_2D_2$	10	3	2	4	3	1	$A_3B_2C_4D_3$
3	1	3	3	3	3	$A_1B_3C_3D_3$	11	3	3	1	2	4	$A_3B_3C_1D_2$
4	1	4	4	4	4	$A_1B_4C_4D_4$	12	3	4	2	1	3	$A_3B_4C_2D_1$
5	2	1	2	3	4	$A_2B_1C_2D_3$	13	4	1	4	2	3	$A_4B_1C_4D_2$
6	2	2	1	4	3	$A_2B_2C_1D_4$	14	4	2	3	1	4	$A_4B_2C_3D_1$
7	2	3	4	1	2	$A_2B_3C_4D_1$	15	4	3	2	4	1	$A_4B_3C_2D_4$
8	2	4	3	2	1	$A_2B_4C_3D_2$	16	4	4	1	3	2	$A_4B_4C_1D_3$

注:标注“\*”列为误差列。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 控制方程

采用多相流混合模型作为求解混合问题的数学模型,通过求解不可压缩流的连续性方程、动量方程、各相浓度方程及标准  $k-\varepsilon$  湍流方程来描述混合发展变化规律<sup>[3]</sup>,各控制方程如式(1)~式(5)。

连续性方程如式(1)。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

其中: $x_i(i=1,2,3)$ ——直角坐标系下的 3 个速度分量,  $\text{m/s}$ ;

$\bar{u}_i (i = 1, 2, 3)$  ——直角坐标系下的 3 个  
时均速度分量, m/s。  
动量方程如式(2)。

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

其中:  $\mu$  ——动力粘度系数, kg/(m·s);  
 $\bar{P}$  ——时均压力, kg/(m·s<sup>2</sup>);  
 $X_i, X_j$  ——时空坐标, m;  
 $\rho$  ——流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\bar{u}_j$  ——时均速度分量, m/s;  
 $\overline{\rho u'_i u'_j}$  ——雷诺应力, kg/(m<sup>2</sup>·s<sup>2</sup>)。

浓度方程如式(3)。

$$\bar{u}_i \frac{\partial \bar{C}_j}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{\gamma}{S_c} + \frac{\gamma_t}{S_{ct}} \right) \frac{\partial \bar{C}_j}{\partial X_i} \quad (3)$$

其中:  $\bar{C}_j$  ——时均质量浓度, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\gamma$  ——分子扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  
 $\gamma_t$  ——湍流扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  
 $S_c$  ——施密特数;  
 $S_{ct}$  ——湍流施密特数。

湍动能  $k$  方程如式(4)。

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial X_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (4)$$

其中:  $k$  ——湍动能, m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>;  
 $\varepsilon$  ——湍动能耗散率, m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>;  
 $\mu_t$  ——湍流粘度, kg/(m·s);  
 $\sigma_k$  ——湍动能的普朗特数。

$\varepsilon$  方程如式(5)。

$$\rho \bar{u}_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} + \frac{C_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial X_i} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中:  $x_k$  ——空间坐标, m;  
 $\sigma_\varepsilon$  ——耗散率的普朗特数;  
 $C_1, C_2$  ——经验常数;  
 $\bar{u}_k$  ——时均速度分量, m/s。

浓度方程与  $k$ - $\varepsilon$  方程中的各系数值如表 4 所示。

表 4  $k$ - $\varepsilon$  方程各系数值  
Tab. 4 Values of Coefficients in  $k$ - $\varepsilon$  Equations

系数名称	数值
$C_1$	1.44
$C_2$	1.92
$\sigma_k$	1.0
$\sigma_\varepsilon$	1.219
$S_{ct}$	0.9

### 1.3.2 物性参数与边界条件设置

流体物性参数设置如下:水相密度为 998.2 kg/m<sup>3</sup>,  
动力粘度为 1.003×10<sup>-3</sup> kg/(m·s);药液相密度为  
1 000.0 kg/m<sup>3</sup>,动力粘度为 1.1×10<sup>-3</sup> kg/(m·s)。

混合器边界条件设置如下:进水口与加药口均  
为速度入口,流速均为 1.0 m/s;单位时间内水相与  
药液相的流量比均为 25 : 1;出口处边界条件为自由  
出流,混合器管壁边界条件均设为无滑移壁面。

### 1.3.3 求解器设置

采用瞬态求解方式,基于 SIMPLE 算法进行压  
强-速度场耦合。各控制方程的离散化格式均为一  
阶迎风格式,压力项、动量项、 $k$  项、 $\varepsilon$  项松弛因子值  
分别为 0.3、0.7、0.8、0.8。计算时间步长设置为  
0.01 s,总时间步数设置为 2 000 步,总计算时长为  
20.0 s,使混合过程充分发展。迭代次数均为  
10 000~20 000 次,使各控制方程的残差精度控制  
在 1×10<sup>-5</sup> 以下。

## 1.4 分析方法

采用灰色关联分析法以灰关联度顺序描述多指  
标间关系的强弱与次序,开展多评价指标综合优化,  
进行  $G$  值<sup>[8]</sup>与  $CoV$  值<sup>[9]</sup>对混合效率的综合影响评  
价。 $G$  值计算式如式(6)。

$$G = (gh/\nu T)^{1/2} \quad (6)$$

其中:  $g$  ——重力加速度,取值为 9.8 m/s<sup>2</sup>,  
m/s<sup>2</sup>;  
 $h$  ——混合器局部水头损失, m;  
 $\nu$  ——水的运动粘度,取值为 1×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s,  
m<sup>2</sup>/s;  
 $T$  ——水力停留时间, s。

$CoV$  值计算式如式(7)。

$$C_{ov} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\Phi_{s,j} - \Phi_{s,mean})^2}{N-1}} \frac{1}{\Phi_{s,mean}} \quad (7)$$

其中： $\Phi_{s,j}$ ——出口截面上各控制点的药液体积分数值；

$\Phi_{s,mean}$ ——出口截面药液体积分数平均值；

$N$ ——出口截面上的总样本数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 网格无关性验证

在基于 Fluent 软件的数值模拟过程中,流体域网格划分质量对计算准确性与计算效率具有显著影响<sup>[12]</sup>。采用 2# 混合器(内外腔径比为 200 mm : 330 mm、加药导流槽数 4 个、导流槽扭转角为

270°、导/汇流部件长度为 80 mm) 在 1 m/s 流速条件下进行网格无关性验证,分别考察  $G$  值与  $CoV$  值随网格数的变化情况,如图 2 所示。由图 2(a)可知,随网格数增加, $G$  值在 537 ~ 552  $s^{-1}$  内小幅波动,无明显变化,表明网格数增加对  $G$  值无显著影响。由图 2(b)可知,当网格数为 20 万时, $CoV$  值较低(0.083 9),当网格数达到 40 万~100 万时, $CoV$  值增长至 0.141 1~0.157 0,这表明随网格数增加, $CoV$  值的样本数量增多,计算值更接近真值,可认为网格数在 40 万~100 万时, $CoV$  值无显著差异。综合考虑  $G$  值与  $CoV$  值随网格数的变化,可认为在 40 万~100 万网格时,网格数对  $G$  值与  $CoV$  值的影响较小、网格无关性较好。

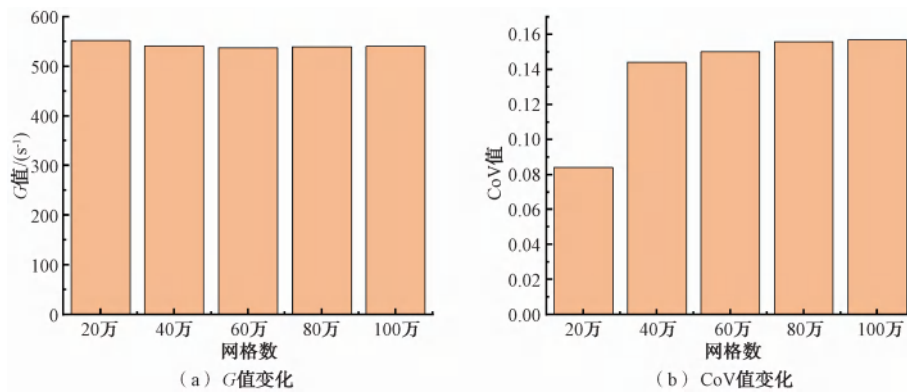


图 2  $G$  值与  $CoV$  值随网格数变化

Fig. 2 Variation of  $G$  and  $CoV$  Values with the Number of Grids

### 2.2 网格划分情况

本研究建立的混合器模型在流体域网格划分过程中均采用根据曲率变化的划分网格方式,在加药口处局部加密网格,如图 3 所示,最大面尺寸为 100 mm、网格生长率设为 1.2、最小面尺寸为 1 mm、常规曲率角度设为 15°、网格平滑质量设为中等。不同结构参数组合的网格划分数为 60 万~80 万,单元质量为 0.81~0.82,倾斜度为 0.24~0.25,正交质量为 0.74~0.75,混合器模型的流体域网格划分质量较高。

### 2.3 混合效率变化规律

不同结构参数组合条件的  $CoV$  值与  $G$  值变化关系如图 4 所示。可知, $G$  值为 394~884  $s^{-1}$ ,其中 1# 组合的  $G$  值最小(394  $s^{-1}$ ),4# 组合的  $G$  值最大(884  $s^{-1}$ ); $CoV$  值为 0.067 5~0.417 5,其中 7# 组合的  $CoV$  值最小(0.067 5),5# 组合的  $CoV$  值最大

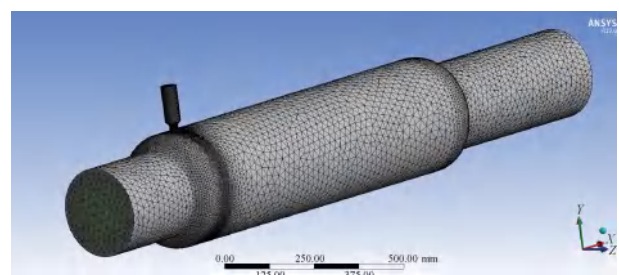


图 3 流体域网格划分

Fig. 3 Fluid Domain Meshing

(0.417 5)。由图 4 可知,各结构参数组合的  $CoV$  值与  $G$  值总体呈现负相关关系,即随着  $G$  值的增加, $CoV$  值趋于减小,这表明提高速度梯度可增加混合的均匀度。当混合过程的  $G$  值与  $CoV$  值均较小时,即速度梯度较小、混合均匀度较高时,可达到更高的混合效率<sup>[13]</sup>。

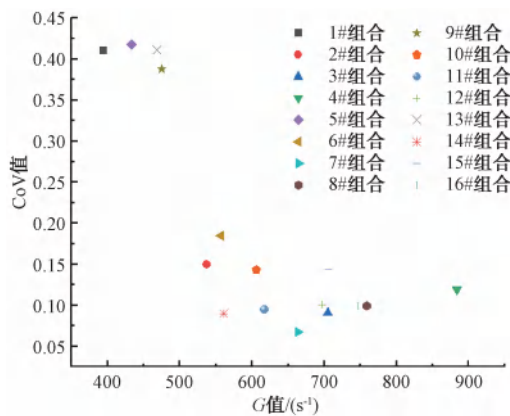


图4 CoV值与G值的相关性

Fig. 4 Correlation between CoV and G Values

## 2.4 不同结构参数组合的混合效率

在不同结构参数组合条件下,  $G$  值与  $CoV$  值的灰色关联分析如表 5 所示。可知, 14#组合的灰关联度最大(0.741 3),  $G$  值为  $561 \text{ s}^{-1}$ ,  $CoV$  值为 0.089 6, 达到均匀混合程度 ( $CoV < 0.100 0$ )<sup>[4]</sup>, 表明 14#组合条件可使  $G$  值与  $CoV$  值同时达到最优解。

表5 G值与CoV值的灰色关联分析

Tab. 5 Grey Relational Analysis between G and CoV Values

组合编号	评价指标		灰关 联度	灰关联度 排序
	$G$ 值/ $(\text{s}^{-1})$	$CoV$ 值		
1#	394	0.410 4	0.669 0	4
2#	537	0.150 0	0.655 6	6
3#	705	0.091 1	0.660 9	5
4#	884	0.119 1	0.552 8	14
5#	433	0.417 5	0.598 0	12
6#	557	0.184 8	0.599 6	11
7#	664	0.067 5	0.737 9	2
8#	759	0.099 2	0.624 1	9
9#	475	0.388 0	0.552 4	16
10#	606	0.143 0	0.617 4	10
11#	617	0.095 1	0.693 6	3
12#	697	0.100 8	0.643 7	7
13#	468	0.411 2	0.552 7	15
14#	561	0.089 6	0.741 3	1
15#	706	0.143 9	0.568 0	13
16#	747	0.099 0	0.628 6	8

另外, 7#组合的灰关联度为 0.737 9, 仅次于 14#组合, 且  $G$  值为  $664 \text{ s}^{-1}$ , 比 14#组合提高 18.4%,

$CoV$  值为 0.067 5, 比 14#组合低 24.7%, 表明 7#组合的混合均匀度比 14#组合明显提高, 速度梯度也有明显增加。11#组合的灰关联度为 0.693 6,  $G$  值为  $617 \text{ s}^{-1}$ , 比 7#组合低 7.1%,  $CoV$  值为 0.095 1, 比 7#组合高 40.9%, 表明 11#组合的速度梯度低于 7#组合, 混合均匀度大幅下降。综上可知, 仅以  $G$  值或  $CoV$  值的变化不能有效表征混合效率的变化趋势, 需建立灰关联模型以评价  $G$  值与  $CoV$  值的变化规律对混合效率的影响。

## 2.5 结构参数对混合效率的影响

结构参数的灰关联度均值极差如表 6 所示。A、B、C、D 的灰关联度均值极差分别为 0.017 2、0.072 1、0.032 5、0.129 8, 表明结构参数对混合效率的影响程度依次为 D、B、C、A, 可见 D 与 B 对混合效率的影响更显著。

表6 结构参数灰关联度均值极差

Tab. 6 Mean Ranges of Grey Relational Grades for Structural Parameters

项目	结构参数				
	A	B	C	D	*
水平 1 灰关联度均值	0.634 6	0.593 0	0.647 7	0.698 0	0.619 6
水平 2 灰关联度均值	0.639 9	0.653 5	0.616 3	0.631 5	0.643 6
水平 3 灰关联度均值	0.626 8	0.665 1	0.644 7	0.626 2	0.614 2
水平 4 灰关联度均值	0.622 7	0.612 3	0.615 2	0.568 2	0.646 4
极差	0.017 2	0.072 1	0.032 5	0.129 8	0.032 2

需注意的是, 误差列的灰关联度均值极差为 0.032 2, 表明仍有其他参数对构效关系产生了影响。分别取表 6 中各结构参数的水平灰关联度均值最大值, 可知多级耦合静态管道混合器的理论最优结构参数组合为  $A_2B_3C_1D_1$ , 即 A 为 200 mm : 340 mm、B 为 6 个、C 为  $180^\circ$ 、D 为 75 mm。

## 2.6 最优结构参数组合的混合效率检验

将  $A_2B_3C_1D_1$  结构参数组合作为 17#组合, 进行了  $G$  值与  $CoV$  值计算以及加密网格的灰色关联分析检验, 其中 1#~16#组合的灰关联度检验结果均与表 5 一致。14#组合(正交试验最优型)与 17#组合(理论最优型)结果, 如表 7 所示。可见, 17#组合的灰关联度达 0.762 3, 比 14#组合提高了 2.8%,  $G$  值与  $CoV$  值分别为  $548 \text{ s}^{-1}$ 、0.084 7, 降低了 2.3%、5.5%, 这表明 17#组合可在稍低的速度梯度条件下达到更均匀的混合效果, 具有更佳的混合效率, 是最优的结构参数组合。

表 7 最优结构参数组合的混合效率检验

Tab. 7 Mixing Efficiency Verification of Optimal Structural Parameters Combination

组合编号	结构参数组合	G 值/(s <sup>-1</sup> )	CoV 值	灰关联度
14#	A <sub>4</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	561	0.089 6	0.741 3
17#	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	548	0.084 7	0.762 3

## 2.7 药液体积分数分布规律

最佳的 17#组合的药液体积分数分布规律如图 5 所示,在第 1 级混合段,药液分布在混合器外

腔,在混合器内腔无药液分布。在混合长度( $X$ )=0.36~0.55 m 时,外腔药液体积分数为 0.8%~10.0%,混合均匀程度较差。在  $X=0.55\sim 1.35$  m 时,外腔药液体积分数逐渐增至 8.0%~10.0%,混合均匀度逐渐增加。在  $X=1.35\sim 1.55$  m 时,外腔混合液与内腔原水持续混合,药液体积分数降至 1.6%~4.0%。在  $X=1.55\sim 2.00$  m 时,药液体积分数正逐渐增至 3.2%~4.0%,在出口处达到了较均匀混合状态。

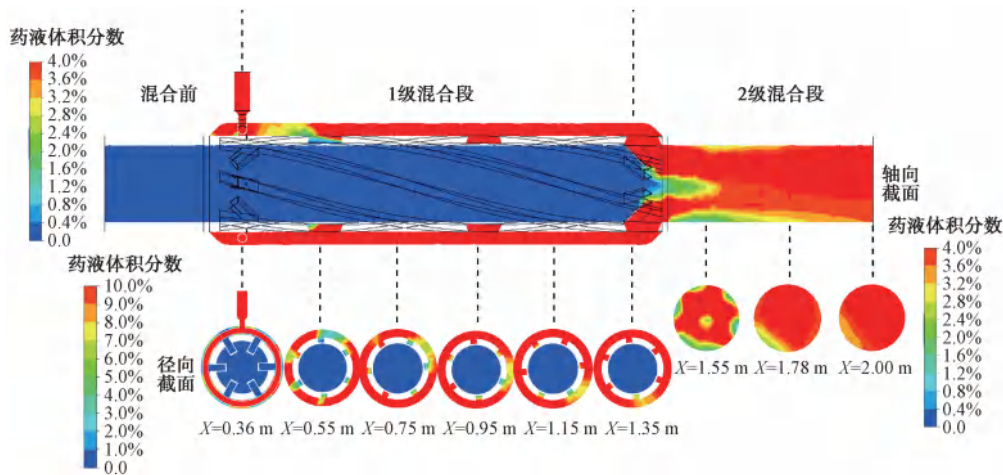


图 5 药液体积分数分布规律

Fig. 5 Distribution Rule of Chemical Solution Volume Fraction

## 2.8 混合流场变化规律

最佳的 17#组合的流场变化规律如图 6 所示,由轴向截面速度矢量可看出,在环形加药直管段流速最大(2.46~3.29 m/s)。1 级混合段内腔与 2 级混合段的流速为 0.82~1.64 m/s,1 级混合段外腔的流速为 0.40~0.82 m/s。从各径向截面速度矢量

可看出,在 1 级与 2 级混合段均形成了顺时针方向旋流,内腔中心流速为 0.82~1.64 m/s,内腔周边流速为 0.40~0.82 m/s,自中心处向周边产生了速度梯度。在 1 级混合段,旋流于螺旋导流槽内部产生,在离心作用与剪切拉伸作用下,促进了外腔旋流的形成<sup>[14]</sup>;在 2 级混合段,受惯性力与粘性力的共同

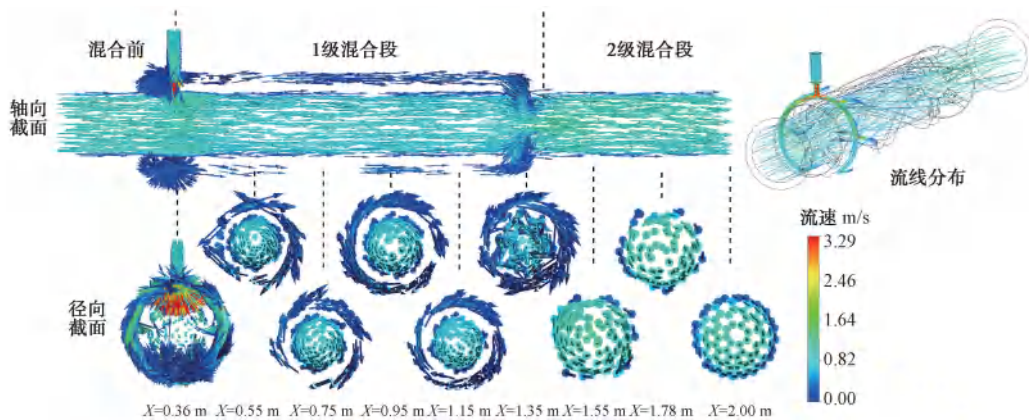


图 6 流场变化规律

Fig. 6 Variation of the Flow Field

作用<sup>[15]</sup>,内外腔流体在汇流过程保持了旋流状态。各流线均呈现顺时针螺旋运动趋势,在混合器内部相互交错,强化了旋流混合效果。

### 3 结论

(1)静态管道混合器的混合效率与 CoV 值与  $G$  值有明显相关性,总体呈现负相关关系。仅以  $G$  值或 CoV 值的变化不能有效表征混合效率的变化,需建立灰关联模型以综合表征  $G$  值与 CoV 值的变化规律对混合效率的影响。

(2)静态管道混合器结构对混合效率有显著作用,影响程度依次是 D、B、C、A。

(3)静态管道混合器最优结构参数组合为 A 为 200 mm : 340 mm、B 为 6 个、C 为 180°、D 为 75 mm,对应的灰关联度为 0.762 3、 $G$  值为 548 s<sup>-1</sup>、CoV 值为 0.084 7。

(4)在最优结构下,混合器在 1 级混合段形成顺时针方向旋流、自中心向周边产生速度梯度,在 2 级混合段维持旋流状态,药液体积分数达到 3.2%~4.0%,实现了快速均匀混合、提升了混合效率。

(5)结合 CFD 模拟与灰色关联分析,可定量解析结构参数与混合效率的构效关系,为不同型式静态管道混合器的设计与改进提供了有效的多指标协同评价方法。

### 参考文献

- [ 1 ] Ji J, Qiu J P, Wai N, et al. Influence of organic and inorganic flocculants on physical - chemical properties of biomass and membrane-fouling rate [ J ]. *Water Research*, 2010, 44 ( 5 ): 1627-1635.
- [ 2 ] Xiao Y H, Zhao H, Tian X N, et al. Design and evaluation of novel static mixers for SCR application [ J ]. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2024, 23 ( 1 ): 55-66.
- [ 3 ] Meng H B, Zhu G X, Yu Y F, et al. The effect of symmetrical perforated holes on the turbulent heat transfer in the static mixer with modified Kenics segments [ J ]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 99: 647 - 659. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2016. 03. 110.
- [ 4 ] Ghanem A, Lemenand T, Della Valle D, et al. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods - A review [ J ]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, 92 ( 2 ): 205-228.
- [ 5 ] Chakleh R, Azizi F. Performance comparison between novel and commercial static mixers under turbulent conditions [ J ]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2023, 193: 109559. DOI: 10.1016/j.cep. 2023. 109559.
- [ 6 ] Ferrari S, Rossi R, Di Bernardino A. A review of laboratory and numerical techniques to simulate turbulent flows [ J ]. *Energies*, 2022, 15 ( 20 ): 7580. DOI: 10.3390/en15207580.
- [ 7 ] Valdes J P, Kahouadji L, Liang F Y, et al. Direct numerical simulations of liquid - liquid dispersions in a SMX mixer under different inlet conditions [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 462: 142248. DOI: 10.1016/j.cej. 2023. 142248.
- [ 8 ] Jones S C, Sotiropoulos F, Amirtharajah A. Numerical modeling of helical static mixers for water treatment [ J ]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, 128 ( 5 ): 431-440.
- [ 9 ] Haddadi M M, Hosseini S H, Rashtchian D, et al. Comparative analysis of different static mixers performance by CFD technique: An innovative mixer [ J ]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28 ( 3 ): 672-684.
- [ 10 ] Valdés J P, Kahouadji L, Matar O K. Current advances in liquid-liquid mixing in static mixers: A review [ J ]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 177: 694-731. DOI: 10.1016/j.cherd. 2021. 11. 016.
- [ 11 ] 池文青. 无阻型管道混合器: CN201520270585.9 [ P ]. 2015-11-04.  
Chi W Q. Unobstructed pipeline mixer: CN201520270585.9 [ P ]. 2015-11-04.
- [ 12 ] Zhang S, Chen X Y, Wu Z L, et al. Numerical study on stagger Koch fractal baffles micromixer [ J ]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 133: 1065-1073. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2019. 01. 009.
- [ 13 ] Zhao S F, Wei Y M, Yu P J, et al. High throughput millifluidics mixer with double triangle baffle for improvement of mixing performance and reduction of flow resistance designed by grey relational analysis [ J ]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, 181: 109166. DOI: 10.1016/j.cep. 2022. 109166.
- [ 14 ] Wu B, Li C H, Zhang M X, et al. Liquid mixing intensification by adding swirling flow in the transverse jet mixer [ J ]. *AIChE Journal*, 2021, 67 ( 8 ): e17276. DOI: 10.1002/aic. 17276.
- [ 15 ] Forte G, Brunazzi E, Alberini F. Effect of residence time and energy dissipation on drop size distribution for the dispersion of oil in water using KMS and SMX + static mixer [ J ]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 148: 417-428. DOI: 10.1016/j.cherd. 2019. 06. 021.