

张肸同, 侯培强, 张志, 等. 基于 Fluent 模拟的管式涡轮动态混合器结构及应用参数优化[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 56-63, 74.

ZHANG X T, HOU P Q, ZHANG Z, et al. Structure and applied parameters optimization of tubular dynamic mixer based on Fluent simulation[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 56-63, 74.

## 基于 Fluent 模拟的管式涡轮动态混合器结构及应用参数优化

张肸同<sup>1</sup>, 侯培强<sup>1</sup>, 张志<sup>2</sup>, 邓承良<sup>3</sup>, 张怀宇<sup>4</sup>, 谢社平<sup>5</sup>, 夏韵<sup>1</sup>, 徐斌<sup>2</sup>, 曾国键<sup>6</sup>, 张彬<sup>1,\*</sup>

(1. 亚太建设科技信息研究院有限公司, 北京 100120; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 武汉力祯环保科技有限公司, 湖北武汉 430074; 4. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010; 5. 湖南省邵东市自来水公司, 湖南邵东 422800; 6. 四会市肇水水务有限公司, 广东四会 526200)

**摘要** 管式涡轮动态混合作为市政给水处理领域新型混合方式, 其研究与应用尚处于起步阶段, 缺乏对工艺参数选择的明确指导。为此, 研究基于管式动态混合器的工艺分析, 运用 Fluent 软件模拟了不同转速、流量、涡轮扇叶偏转角、涡轮与管道直径比以及安装位置条件下的絮凝过程中管内水流流场。通过获取的速度矢量图和迹线图, 能够更有效地优化管式动态混合器的结构参数, 并探寻其实际应用的最佳工况。研究表明, 转速和流量应进行合理配置, 实际操作过程中 100 r/min 的转速能在保证混合效果的同时实现能量节约。在偏转角方面, 大角度扇叶偏转更优, 过小的角度反而会增加水流阻力并导致动能损失。前端扇叶处的局部涡旋丰富性对于药剂与液体的充分搅拌至关重要。因此, 在管道占比方面, 70% 的比例表现更佳, 较小的比例在大、小流速及转速下均不利于前端涡旋的形成。上述研究为管式涡轮动态混合器在市政给水处理领域的应用提供了重要的理论依据和实践指导。

**关键词** 管式动态混合器 Fluent 模拟 结构优化 最佳工况 混凝

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)12-0056-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.007

## Structure and Applied Parameters Optimization of Tubular Dynamic Mixer Based on Fluent Simulation

ZHANG Xitong<sup>1</sup>, HOU Peiqiang<sup>1</sup>, ZHANG Zhi<sup>2</sup>, DENG Chengliang<sup>3</sup>, ZHANG Huaiyu<sup>4</sup>, XIE Sheping<sup>5</sup>, XIA Yun<sup>1</sup>, XU Bin<sup>2</sup>, ZENG Guojian<sup>6</sup>, ZHANG Bin<sup>1,\*</sup>

(1. Yatai Construction Science and Technology Information Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Wuhan Lizhen Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China;

4. Middle & South China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

5. Hunan Shaodong Water Supply Co., Ltd., Shaodong 422800, China;

6. Sihui Zhaoshui Water Supply Co., Ltd., Sihui 526200, China)

**Abstract** As a novel hybrid approach in municipal water supply treatment field, the exploration and application of tubular turbine dynamic mixers remain in their infancy, with process parameters selection often relying on trial and error. Therefore, we conducted extensive research on the tubular dynamic mixer process and employed Fluent simulations to examine various parameters such as rotational speed, flow rate, turbine blade, diameter ratio of turbine and pipe and installation position. This allowed us to obtain velocity vector diagrams, energy diagrams and trace diagrams under diverse conditions, facilitating the optimization of tubular dynamic mixer structure parameters and identifying the most effective operating conditions for practical application. The results indicated that both rotational speed and flow rate should be reasonably configured, and the 100 r/min rotation speed could achieving an optimal mixing

[收稿日期] 2023-07-12

[基金项目] 住房和城乡建设部 2020 年科学技术项目计划(2020-K-041)

[作者简介] 张肸同(1993—), 女, 主要从事期刊编辑发行、饮用水安全保障研究相关工作, E-mail: 304812208@qq.com。

[通信作者] 张彬(1978—), 女, 副编审, 主要从事水系统相关咨询、出版、发行等研究工作, E-mail: gsp4@vip.163.com。

effect while conserving flow rate. Regarding the deflection angle, larger angles were generally preferred. However, excessively small angles can increase water flow resistance and result in kinetic energy loss. The presence of a rich local vortex at the front fan blade enhances thorough mixing with the added liquid. Consequently, in terms of pipeline proportion, 70% ratio was more suitable, as smaller proportions did not support the formation of a frontal vortex across various flow rates and rotational speeds. The above research provides important theoretical basis and practical guidance for the application of tubular turbine dynamic mixers in municipal water treatment.

**Keywords** tubular dynamic mixer Fluent simulation structure optimization optimal working condition coagulation

混凝作为给水处理工艺的重要环节,已有超过百年的历史,并在全球范围内的水处理工艺中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。对于水厂而言,混凝效果的优劣直接关系到后续沉淀过滤的效果,进而影响水厂出厂水的水质。其中,混合性能是影响混凝效果的关键因素之一。若混合性能不佳,会增加后续设施的处理负担,影响水厂出水水质。因此,优化混合性能对于提高水处理设施的处理效果,确保水厂出水水质以及实现节能减排目标具有重要意义<sup>[2]</sup>。目前,主要的混合方式包括水泵混合、管式混合和机械混合等。在国内水厂中,机械混合和管式静态混合的应用较为广泛。机械混合通过机械动力创造絮体形成所需的水力条件,促使微絮粒相互接触碰撞,完成絮凝过程。其优势在于混合效果好、水头损失较小且混合效果不受水量影响;然而,缺点在于需建混合池,耗费动能以及管理维护复杂。管式静态混合则通过在管道内设置叶片,使水流分成2股并对流,同时产生涡旋和交叉流动,从而达到混合效果<sup>[3]</sup>。管式静态混合具有快速高效、体积小巧等特点,特别适用于中小型水厂<sup>[4]</sup>。但其混合效果受设备尺寸影响较大,对水流负荷适应性不强,且存在结构复杂、水头损失大以及易堵塞等问题,这在一定程度上限制了其在水厂中的应用<sup>[5]</sup>。

管式动态混合器结合了管式静态混合和机械混合的双重优势,其工作原理是通过外置电机驱动双涡轮沿水流方向旋转,从而在管道内形成10~50 m的强大涡流。这种涡流使药剂与水得以均匀分布并快速混合,进而提高药剂反应效率;同时还可以根据进水流量和温度自动变频调节涡轮的转速,确保达到理想的混合G值。

但是管式动态混合器的应用还处于初期阶段,为更好地优化管式动态混合器的结构参数和寻找管式动态混合器在实际应用过程中的最佳工况,此研究利用ANSYS Fluent软件,根据管式动态混合器的

设备结构参数,并参照《管式动态混合器》(T/CUWA 60053—2022)标准,建立了计算域模型。在此基础上,根据湍流模型和扇叶运动模型进行运动仿真计算,利用建立的模型分别模拟了管式动态混合器的转速、进水流量、涡轮扇叶偏转角、涡轮与管道直径比和安装点这5个因素对混凝效果的影响,以期寻找最优管式动态混合器结构参数和最佳运行工况,从而确保在实际应用中实现最佳的混凝效果。

## 1 动态混合器工况参数选择

为了确保研究的准确性和实用性,根据设备的实际生产参数与规格、材料零部件运转性要求以及实践经验,界定了各项影响因素的取值范围,动态混合器结构如图1所示。本研究中涡轮转速选取研究值为10、50、100 r/min和150 r/min;流量的研究值为100、200、300 m<sup>3</sup>/h和400 m<sup>3</sup>/h;涡轮扇叶偏转角的取值为0°、7°和14°;涡轮与混管道直径比选取研究值为50%和70%,安装点根据模拟尾流状态来确定。

## 2 动态混合器数值模拟方法

### 2.1 计算域模型建立与网格划分

为了更有效地划分网格,提高计算效率,同时确保模型的可靠性,对模型进行一定的简化是仿真模拟过程中的基本要求<sup>[6]</sup>。本模型主要研究管式动态混合器的主动搅拌的水力性能,根据《管式动态混合器》(T/CUWA 60053—2022)标准,其核心元件为前后转子及其支撑结构,而其他辅助部件如挂件、螺钉以及连接部分等对混合效果无显著影响,在模拟仿真过程中可以适当简化或者忽略。基于这一原则,本模型对辅助部件进行了精简,确保简化后的模型对最终结果无影响。采用ANSYS中SpaceClaim软件进行建模,精简后的模型如图2所示。

由图2可知,几何模型由3部分构成:前转子、中间结构以及后转子。其中前后转子尺寸相同,相距1500 mm,占比分别为50%和70%。采用滑移网格模型模拟转子转动,分别探究不同转速、流量、扇

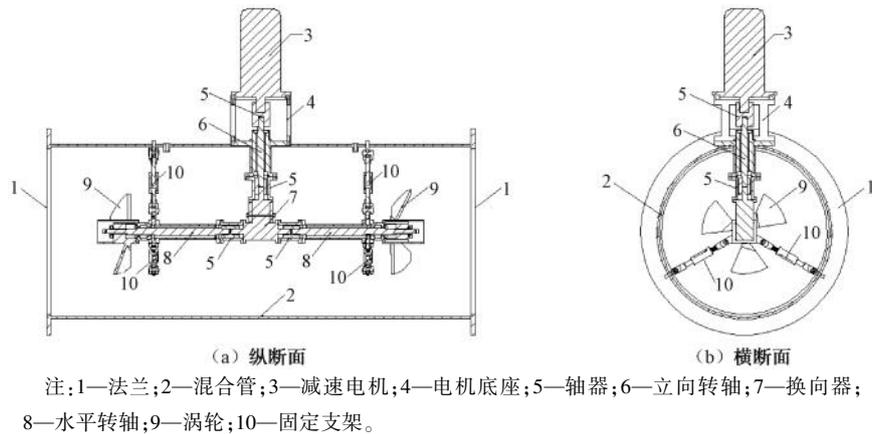


图 1 动态混合器结构

Fig. 1 Structure of Dynamic Mixer

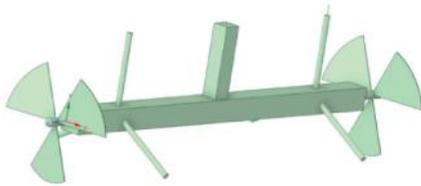


图 2 管式动态混合器建模

Fig. 2 Modeling of Tubular Dynamic Mixer

叶偏转角、管径比和安装点对管内流态的影响,从而判断混合效果的均匀性。

使用 ANSYS Meshing 对模型进行离散化网格划分,ANSYS Meshing 提供多种网格类型,包括结构化网格和非结构化网格<sup>[7]</sup>,以满足不同形状的需求。结构化网格通常适用于具有规则几何形状的部件,而非结构化网格则适用于复杂的几何形状,例如流体流动中的非常规形状。整个网格采用六面体和四面体网格混合划分的形式,并在壁面及桨叶边缘添加边界层,在桨叶周围的流体计算域实行网格加密,划分完成后总体网格数量为 120 033,添加边界层后平均网格质量为 0.82,这表明网格划分质量良好,符合计算要求,最终的网格划分如图 3 所示。

## 2.2 模型求解

旋转机械仿真一般分为 3 种方法<sup>[8]</sup>:①旋转参考系法(MRF),该方法不涉及网格的旋转,仅通过旋转参考系进行模拟,特点是在稳态计算时速度快<sup>[9]</sup>;②滑移网格法(RBM),该方法通过滑移接口连接这些网格,精准模拟旋转机械在流体中的运动,但计算量相对较大;③网格重叠法(OVERSET)<sup>[10]</sup>,该方法利用重叠区域连接网格,有效模拟旋转机械与流体间的相互作用,适用于复杂流动情况,但同样涉

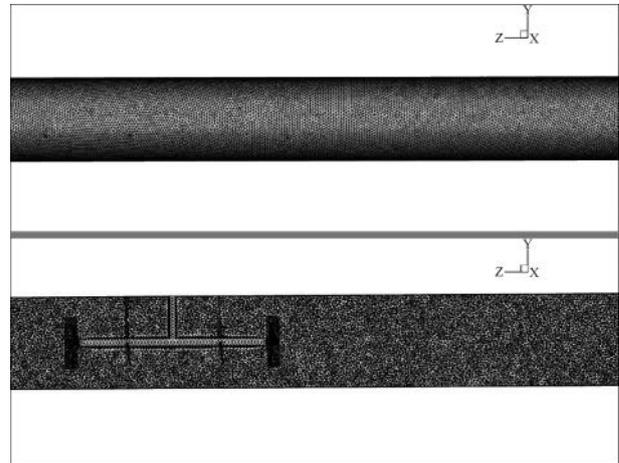


图 3 管式动态混合器及管道流体域网格划分

Fig. 3 Tubular Dynamic Mixer and Pipeline Fluid

Domain Mesh Division

及较大的计算量。这 3 种方法各有优缺点,在本案例中采用 RBM 进行扇叶的运动仿真,固定 Z 轴不变,使得前后桨叶按照顺时针方向按照不同的转速进行转动。

## 2.3 模型边界条件

在管式动态混合器的物理模型中,设定入口的边界条件:入口采用速度入口,确保流体以特定速度流入;出口则设定为压力出口,以维持出口处的压力稳定。管壁设置为默认的光滑无滑移固壁;转子壁面设置为旋转壁面,转子转速根据需要参考的值进行设置。为了保证充分研究转子前后的水流影响,在转子结构的前后分别保留了一段距离,以允许来流和尾流得以充分发展,从而更准确地模拟流体的流动特性<sup>[11]</sup>。

## 2.4 求解器设置

在进行 Fluent 模拟之前,准确设定计算参数是确保模拟结果准确性的关键因素之一。在动态混合器混合性能的求解过程中选择了三维双精度求解器,采用压力基条件下的稳态求解方法,并考虑重力作用。计算模型为单相流紊流模型,流体流动形态计算模型为 Realizable  $k-\varepsilon$  模型<sup>[12]</sup>。总时间步数设置为 1 000 步,步长设置为 0.01 s,每个步长迭代 50 次,求解算法为 SIMPLEC,压力为 STANDARD,体积分数为 QUICK 格式,其余皆采用二阶迎风格式。经过计算迭代后,收敛结果表明所有变量的残差曲线都处于  $1 \times 10^{-5}$  以内。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 动态混合器转速的数值模拟

对于水厂絮凝工艺来说,混合过程需满足快速、

急剧且均匀的基本要求<sup>[13]</sup>。这一要求在水力条件上体现得尤为明显,因为水力条件对絮凝效果具有显著影响。在投加混凝剂后,絮凝过程主要包括快速混合和絮凝反应 2 个阶段,这 2 个阶段在实际水处理中是紧密相连、不可分割的,因此在水力条件上也需保持连续性<sup>[14]</sup>。在快速混合阶段,要求混凝剂能迅速且均匀地分散到水中,以便混凝剂在水中均匀水解聚合,使胶体颗粒脱稳凝集。为实现这一目标,需要快速而剧烈的水力或机械搅拌作用,并在短时间内完成<sup>[15-16]</sup>。为了寻找管式混合器最优转速,本研究基于 DN300 的管式动态混合器,在管道占比为 70%,流量为  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  的条件下,探究了转速为 10、50、100 r/min 和 150 r/min 时管内流场的速度矢量和迹线分布情况。经过 Tecplot 软件处理后,相关结果如图 4 所示。

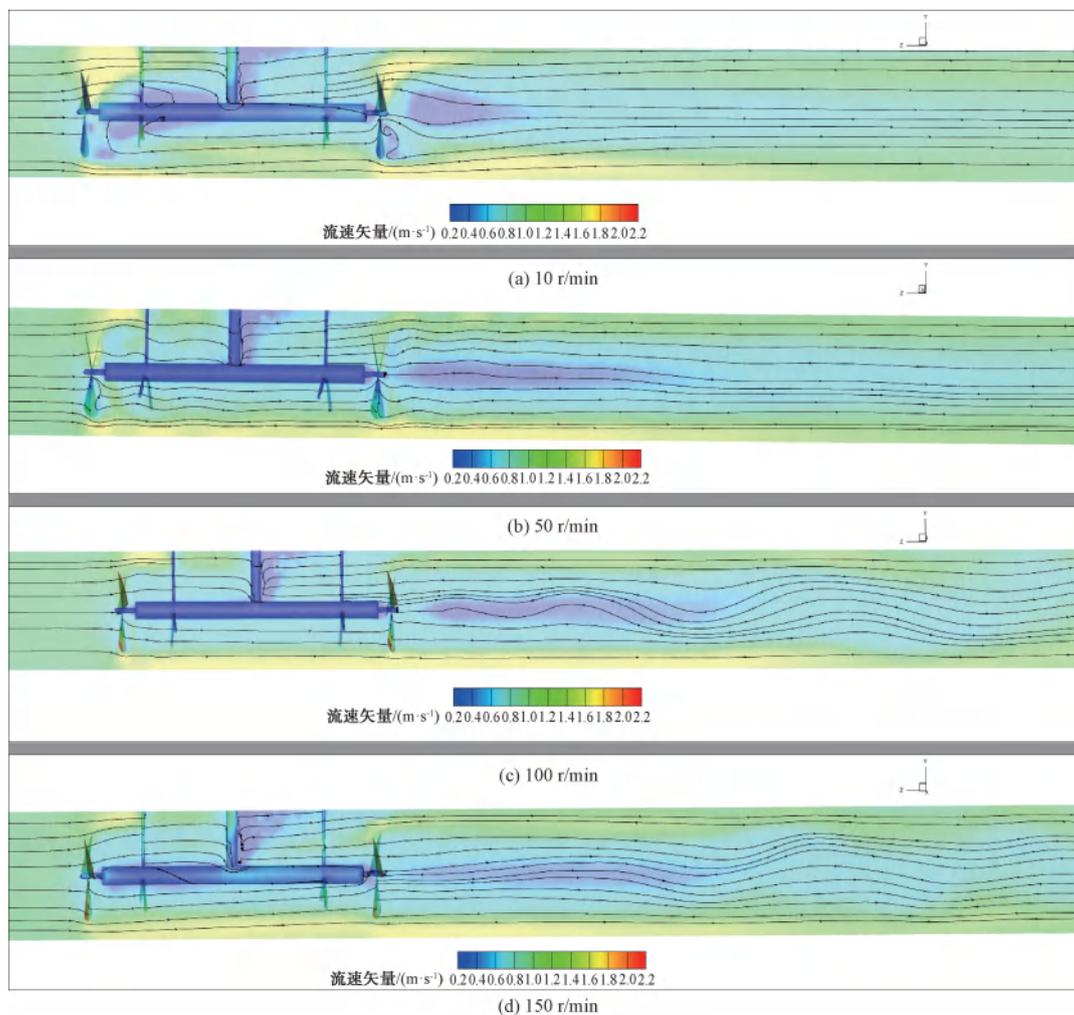


图 4 不同转速条件下管式动态混合器流场分布

Fig. 4 Flow Field Distribution of Tubular Dynamic Mixer under Different Rotational Speed Conditions

速度矢量直观地反映了管道内流体速度分布情况,迹线反映了管道内流体的轨迹及走向<sup>[17]</sup>。由图 4 可知,当涡轮转速从 10 r/min 增加到 100 r/min,尾流逐渐增长,涡旋也愈发明显且数量增多,流速方向的变化速率明显加快。但是随着速度进一步增至 150 r/min 时,尾流长度和涡旋变化不再显著。这是因为涡轮结构的特性导致其迎水面压力升高,背后则形成负压区域。在流速和转速均较低时,涡轮对水流的影响有限,后端涡流的影响范围较小,可能导致絮凝剂混合效果不佳。而在高转速情况下,由于水流的流速不够,前端涡轮附近的水流虽然快速旋转但难以有效传递能量至后端,因此不会形成较长的尾流。此外,高转速还会带来电力资源的浪费。因此,在实际工程应用中,应特别注意避免这种高转速导致的低效混合和能源浪费情况。

### 3.2 动态混合器流量的数值模拟

为了探究流量对管式混合器混合效果的影

响,本研究基于 DN300 的管式动态混合器,在管道占比为 70%,转速为 100 r/min 条件下,探究了流量为 100、200、300 m<sup>3</sup>/h 和 400 m<sup>3</sup>/h 条件下管内流体流场的速度矢量和迹线分布情况。如图 5 所示,在 100、200 m<sup>3</sup>/h 小流量情况下,尾流长度相对较短,难以形成明显的涡旋,混合效果并不理想。然而,随着流量提升至 300 m<sup>3</sup>/h,由于初始流速的增加,尾流明显延长,涡旋现象显著,速度矢量变化加快,从而显著提升混合效果。在流量继续增大至 400 m<sup>3</sup>/h 时,由于水流以高速通过涡轮,涡轮对水流垂直方向速度的影响减弱,难以形成稳定且完整的涡旋,这对药剂的充分混合造成不利。此外,大流量导致的高流速对设备材料的耐受性提出严峻挑战,甚至可能损坏涡轮扇叶。因此,在实际应用中,需根据混合需求合理控制流量,以确保混合效果和设备的稳定运行。

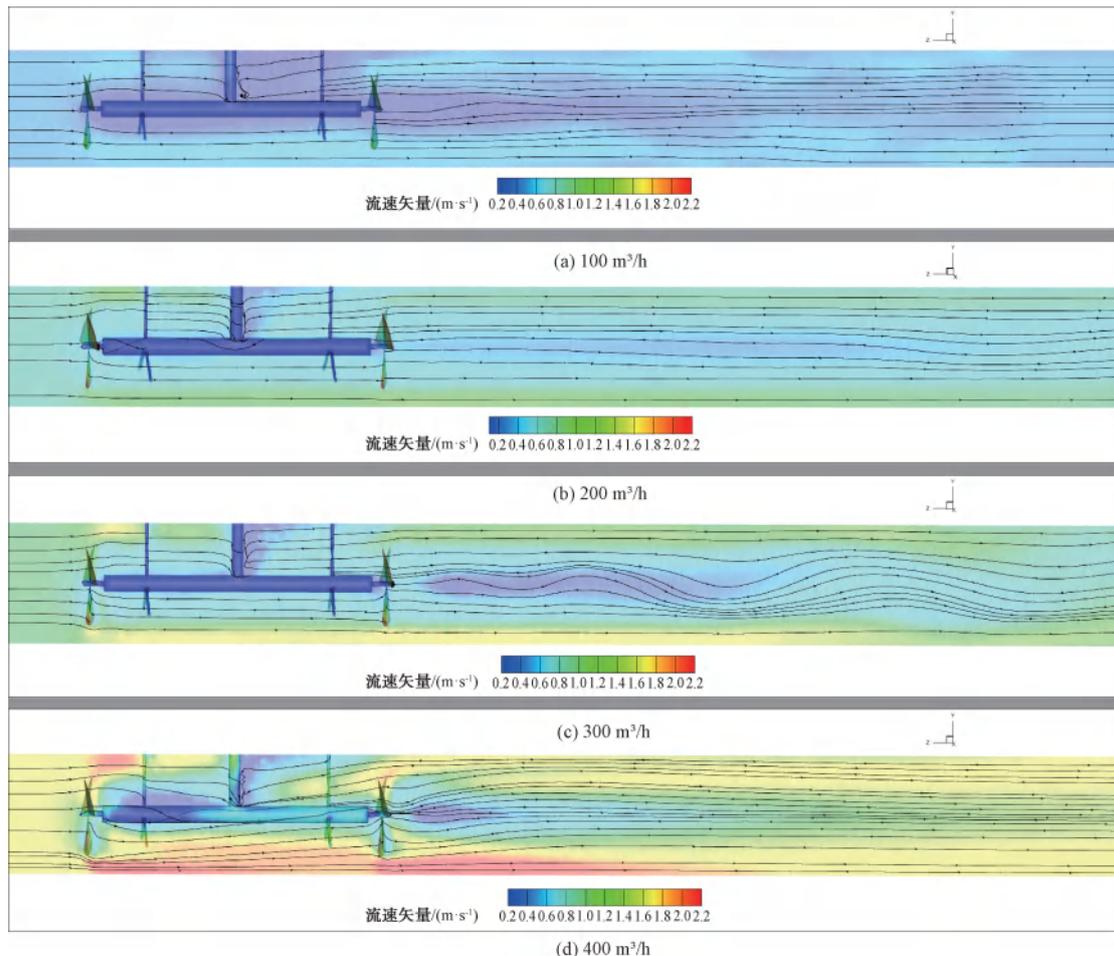


图 5 不同流量条件下管式动态混合器流场分布

Fig. 5 Flow Field Distribution of Tubular Dynamic Mixer under Different Flow Conditions

### 3.3 动态混合器涡轮扇叶偏转角的数值模拟

为了探究涡轮扇叶偏转角对管式混合器混合效果的影响,本研究基于 DN300 的管式动态混合器,在管道占比为 70%、转速为 100 r/min、流量 300 m<sup>3</sup>/h 条件下,探究了涡轮扇叶偏转角为 0°、7°、14° 条件下管内流场的速度矢量和迹线分布情况,如图 6 所示。当涡轮扇叶偏转角小于 7° 时,尾流端难以形成完整稳定的涡旋;当偏转角增大到 14° 时,形成尾流较长且涡旋完整稳定。这是由于涡轮动态混合器支撑结

构的干扰,水流经过前端涡轮转动过后,并未形成完整的涡流,而是以旋流的形式绕过整个结构,随后在后端涡轮的转动加速作用下,形成完整的涡流向后方传递。总体而言,虽然小转角有助于扇叶后方漩涡流场的形成,但其影响有限且无法在后端形成完整的涡旋。此外,小转角还会增加扇叶承受的压力,对水流的阻碍作用也更为显著,特别是在高转速条件下,能量消耗会更大。因此,综合考虑,较大的扇叶转角更有利于提升混合效果。

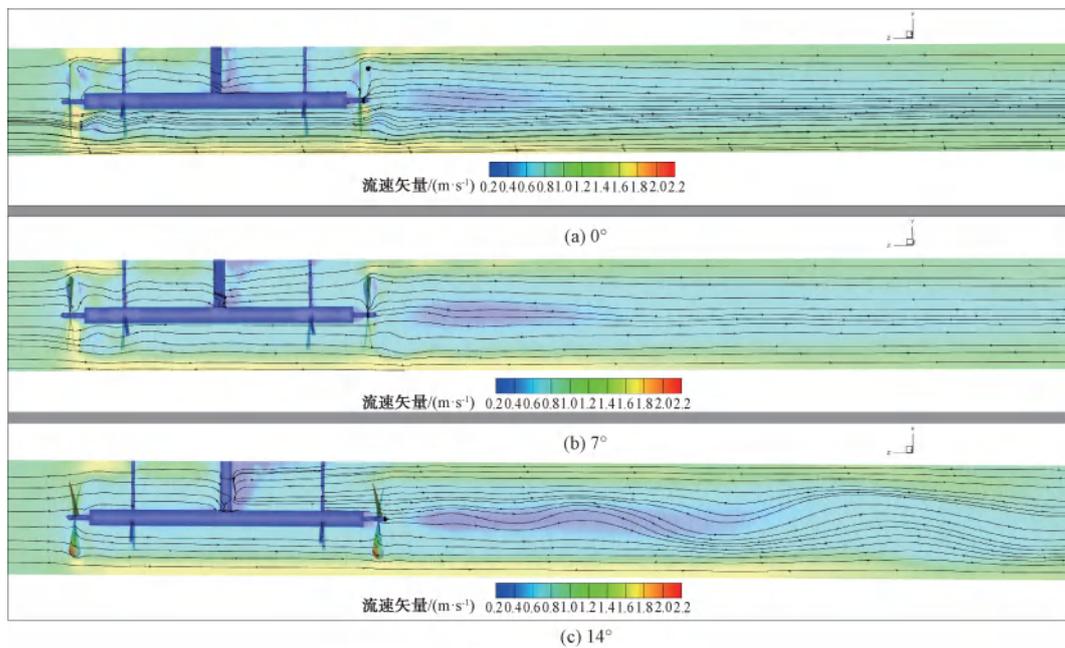


图 6 不同流量条件下管式动态混合器流场分布

Fig. 6 Flow Field Distribution of Tubular Dynamic Mixer under Different Flow Conditions

### 3.4 涡轮与管道直径比的数值模拟

为了探究涡轮与管道直径比对管式混合器混合效果的影响,本研究基于 DN300 的管式动态混合器,在转速为 100 r/min、流量为 300 m<sup>3</sup>/h 条件下,探究了涡轮与管道直径比为 50% 和 70% 条件下管内流场的速度矢量和迹线分布情况,如图 7 所示。研究发现,相较于 70% 占比情况,50% 占比的涡轮对整个管道中流场的影响极其有限。涡轮和支撑结构在管道中起到的阻碍作用大于其转动作用,在末端形成的涡旋宽度也很有限。在此情况下相当一部分水流未受到转动影响直接穿过混合器,完全起不到对混凝剂的混合效果。

### 3.5 动态混合器安装点的数值模拟

不同设备参数条件下,涡轮对水流的扰动效果各不相同,涡旋产生的大小及位置也会有较大差异,

这些因素共同决定了涡轮动态混合器的最佳安装位置<sup>[18]</sup>。为了更有效地利用计算资源并缩短计算时间,基于前期对转速、流量、偏转角和管径比的综合分析,精选了几种典型情况(DN300/DN500, 70% 占比,大流量)来深入研究涡轮动态混合器的完整尾流状况,结果如表 1 所示,尾流及其摆动情况如图 8 所示。水流经过涡轮动态混合器后,会在其后方形成一段尾流涡旋。随着水流继续向后推进,由于旋转和管道摩擦等因素导致的能量消耗和压降,管内流体逐渐从稳定的旋转状态转变为上下摆动,最终演化为稳定的层流状态。由表 1 可知,整体来看,较大的管径会产生较长的尾流长度,原因可能是管道中通过扇叶的质量更大,通过扇叶后产生的水流具有更大的惯性,会在管道后产生更长、更稳定的尾流。在相同管径条件下,改变流量和转速,稳定的尾

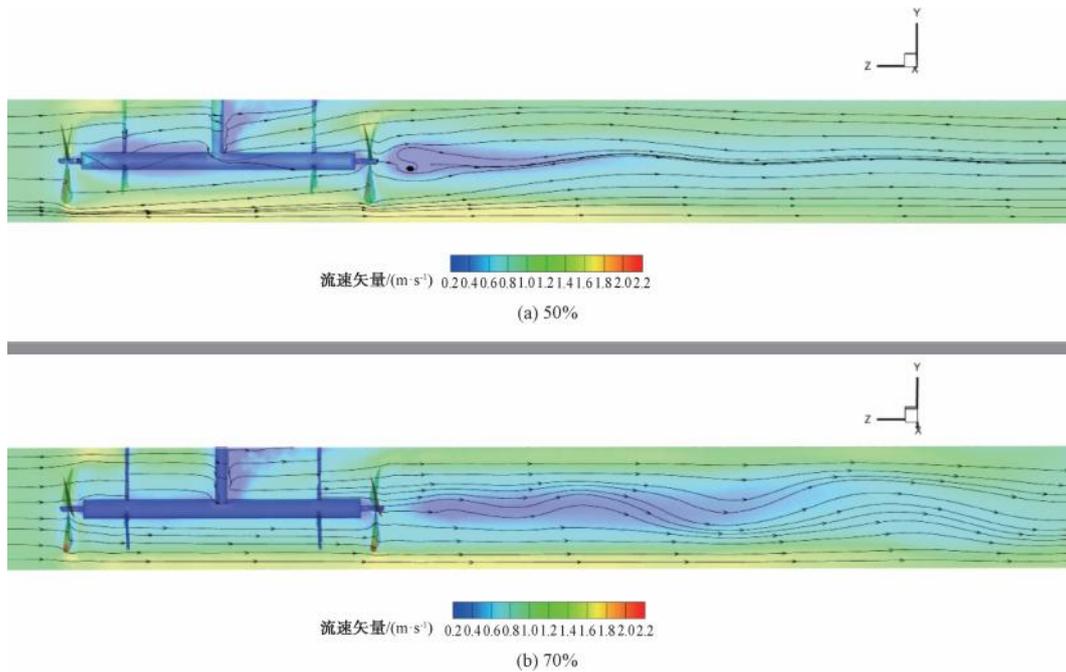


图 7 不同扇叶偏转角条件下管式动态混合器流场分布

Fig. 7 Flow Field Distribution of Tubular Dynamic Mixer under Different Blade Deflection Angles

表 1 不同工况下完整尾流长度

Tab. 1 Complete Tail Flow Length under Different Working Conditions

管径/mm	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	转速/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	完整尾流长度/m
300	200	100	3.57
300	200	150	5.64
300	300	150	4.00
300	300	200	5.29
500	600	100	10.43
500	600	150	9.99

流长度变化不显著,这可能是因为已经达到了最大

尾流长度所需的转速阈值。当转速超过这个值时,扇叶所产生的旋转和涡流的强度已经趋于饱和,再增加转速不会使它们继续增强。因此,在实际生产中需要进一步探究在当前设计装置和管道情况下的最佳工况,以优化扇叶工作模式,从而实现设备最佳的性能和效率。

#### 4 小结

文章利用 Fluent 软件对管式动态混合进行了模型模拟,通过模拟量化了各研究参数对动态混合器混合效果的影响。模拟结果直观地体现了管式动态混合器内流体流场分布和流速变化情况,也反映出了尾流状况和涡旋状况,为后续研究和工程实践提

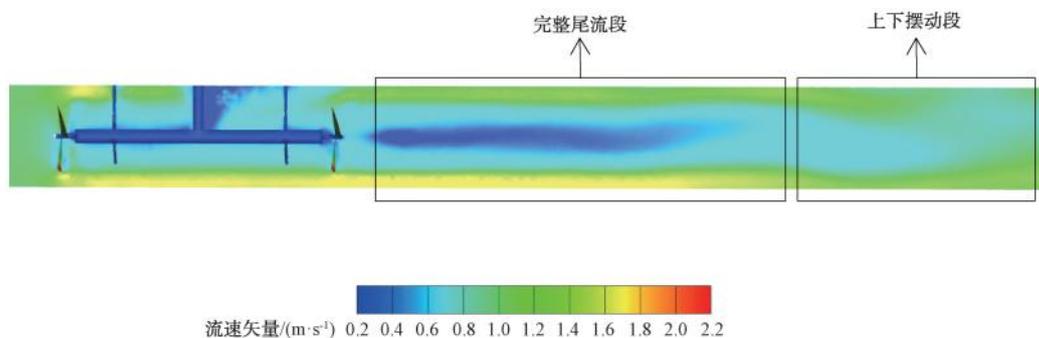


图 8 管式动态器内尾流及其摆动

Fig. 8 Tail Flow and Swinging in Tubular Dynamic Mixer

供了理论依据。在后续的研究中,建议基于本文的模拟结果,通过中试或实际工程做进一步的验证和完善。同时,根据本文的发现,为了达到更好的混合效果,在动态混合器的设备设计和实际工程应用过程中应关注以下几点。

(1)尾流的成功生成与稳定维持对混凝剂是否充分混合有较大的影响,由模拟可以得出该参数条件下的动态混合器具有一个极限尾流转速,过大的转速并不会生成更长的尾流,从绿色高效的角度来讲,100 r/min 的转速在各种工况下均展现出了良好的性能,且生成的尾流长度约为 10 m,这在实际施工生产中具有较高的实用价值。

(2)对于入管流量而言,流量过小会导致尾流涡旋难以形成,从而影响混合效果;而流量过大则会增加涡轮扇叶的负担,可能导致扇叶损坏。同时,过高的流速会使流体迅速穿过涡轮,难以形成稳定完整的涡旋,不利于混凝剂的充分混合。在本研究的参数条件下,发现入管流量为 300 m<sup>3</sup>/h 时,混合效果最佳。

(3)在管式动态混合器的转动过程中,前端扇叶处局部涡旋的丰富程度对药剂与液体的充分搅拌融合至关重要。因此,在管道占比方面,70%的占比表现更为出色。较小的占比不论是在大、小流速还是大、小转速条件下,都不利于前端涡旋的形成。此外,过小的占比对靠近管壁部分的水流扰动效果不佳,特别是在高流速、小转速的情况下,由于水体的黏性,转动的扇叶难以影响整个水管中的水流。

(4)在扇叶偏转角度的选择上,大角度更为优选。偏转角度过小会增加水流的阻力,导致动能的消耗和能量的浪费,这与低碳绿色生产的理念相悖。

### 参考文献

- [ 1 ] 俞文正. 凝聚絮体破碎再絮凝机理研究及对超滤膜污染的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.  
YU W Z. Study on the mechanism of crushing and reflocculation and its influence on ultrafiltration membrane contamination[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [ 2 ] 周锐. 基于 FLUENT 对管式静态混合器的优化设计[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.  
ZHOU R. Optimized design of tubular static mixer by using FLUENT[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [ 3 ] 李伟光,王广智,南军,等. 同心列管式静态混合器的结构参数与应用性能研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 33-36.  
LI W G, WANG G Z, NAN J, et al. Study on structure parameters and application performance of concentric tubular static mixer[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(9): 33-36.
- [ 4 ] ZIDOUNI F, KREPPER E, RZEHA R, et al. Simulation of gas-liquid flow in a helical static mixer [ J ]. Chemical Engineering Science, 2015, 137: 476-486. DOI: 10.1016/j.ces.2015.06.052.
- [ 5 ] 韩发年. 新型静态混合器结构对流动与混合特性的影响[D]. 杭州:中国计量大学, 2017.  
HAN F N. Effect of new static mixer structure on flow and mixing characteristics[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2017.
- [ 6 ] 孟庆松,原海勃. 模拟训练机模型简化算法的研究[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(2): 102-106.  
MENG Q S, YUAN H B. Research on the simplified algorithm of the simulated training machine model[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(2): 102-106.
- [ 7 ] 武淑萍,张敏,商立英. 结构化与非结构化网格中的导热计算[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2005, 3(2): 11-16.  
WU S P, ZHANG M, SHANG L Y. Thermal conductivity calculations in structured and unstructured grids [ J ]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2005, 3(2): 11-16.
- [ 8 ] 杜成林,黄伟国,吴书有,等. 采用盲源分离的旋转机械振动仿真研究[J]. 现代制造工程, 2010(2): 66-69, 131.  
DU C L, HUANG W G, WU S Y, et al. Rotational mechanical vibration simulation study using blind source separation [ J ]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(2): 66-69, 131.
- [ 9 ] 李卉,邱磊. 螺旋桨在均匀流场中的非定常水动力数值模拟[J]. 船海工程, 2011, 40(6): 40-44.  
LI H, QIU L. Numerical simulation of a propeller in a homogeneous flow field[J]. Ship & Ocean Engineering, 2011, 40(6): 40-44.
- [ 10 ] 沈海龙,苏玉民. 基于滑移网格技术的船桨相互干扰研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(1): 1-7.  
SHEN H L, SU Y M. Study on paddle mutual interference based on slip grid technology [ J ]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(1): 1-7.
- [ 11 ] 胡冬冬,陈晋南. 双螺杆挤出机流场数值模拟中流道进出口边界条件的探讨[J]. 计算机与应用化学, 2005(12): 1137-1141.  
HU D D, CHEN J N. Discussion on boundary conditions of flow field of double screw extruder [ J ]. Computers and Applied Chemistry, 2005(12): 1137-1141.

(下转第 74 页)

- [11] 杨琛, 李强. 北方中小河流春季 pH 值和高锰酸盐指数超标情况分析与对策[J]. 中国新技术新产品, 2020(17): 134-135.  
YANG C, LI Q. Analysis and countermeasures of exceeding the pH value and permanganate index in spring of small and medium-sized rivers in northern China [J]. New Technology & New Products of China, 2020(17): 134-135.
- [12] 石文平, 朱佳, 张朝升, 等. 水库浅水区底泥营养物质释放与藻类生长关系研究[J]. 环境工程, 2015, 33(5): 75-80.  
SHI W P, ZHU J, ZHANG C S, et al. Relationship between sediment nutrient release and algae growth in the shallow area of the reervoir[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(5): 75-80.
- [13] WANG Z J, LI R H. Effects of light and temperature on the odor production of 2-methylisoborneol-producing *Pseudanabaena* sp. and geosmin-producing *Anabaena ucrainica* (cyanobacteria)[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2015, 58: 219-226. DOI: 10.1016/j.bse.2014.12.013.
- [14] GAO J S, ZHU J, WANG M W, et al. Dominance and growth factors of *Pseudanabaena* sp. in drinking water source reservoirs, Southern China [J]. Sustainability, 2018, 10(11): 393611. DOI: 10.3390/su10113936.
- [15] WANG H, ZHANG Z Z, LIANG D F, et al. Separation of wind's influence on harmful cyanobacterial blooms[J]. Water Research, 2016, 98(1): 280-292.
- [16] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 506-511.  
SUN X J, QIN B Q, ZHU G W, et al. Effect of wind-induced wave on concentration of colloidal nutrient and phytoplankton in Lake Taihu [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2007, 28(3): 506-511.
- [17] 尚帅. 温度、光照对长江口几种优势藻类生长的影响研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.  
SHANG S. Study on influence of temperature and light on the growth of several dominant algae in Yangtze River estuary[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2017.
- [18] 邱爱华, 牟小林, 宋思杨, 等. 粉末活性炭在上海市饮用水处理中的应用[J]. 净水技术, 2017, 36(7): 5-12.  
QI A H, MOU X L, SONG S Y, et al. Application of powdered activated carbon in drinking water treatment in Shanghai City [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(7): 5-12.
- [19] 代倩子, 季冠宁, 徐兆安, 等. 基于多元线性回归对太浦河水源地 2-MIB 的预警研究[C]. 北京: 2022 中国水利学术大会论文集(第二分册), 2022.  
DAI Q Z, JI G N, XU Z A, et al. Study on early warning of 2-MIB in Taipu River water source based on multiple linear regression[C]. Beijing: Proceedings of the 2022 China Water Conservancy Academic Conference, 2022.

(上接第 63 页)

- [12] 白泽升, 王孟鸿, 王世方. 平稳风荷载的数值模拟及 CFD 应用[J]. 建筑结构, 2021, 51(s2): 248-252.  
BAI Z S, WANG M H, WANG S F. Numerical simulation of the stationary wind load and the application of CFD [J]. Building Structure, 2021, 51(s2): 248-252.
- [13] 冯觉民, 蒋继申, 胡修国. 现代化净水厂技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
FENG J M, JIANG J S, HU X G. Technical manual of modern water purification plant [M]. Beijing: China State Construction, Engineering and Construction Industry Press, 2013.
- [14] 戴红玲. 基于 Fluent 流场分析与机器视觉絮体检测的微涡流絮凝工艺优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.  
DAI H L. Study on the optimization of micro-vortex flocculation process based on fluent flow field analysis and machine vision flocs detection [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [15] 常青. 絮凝动力学的现状与研究方法进展[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3042-3049.  
CHANG Q. Current status and research method progress of flocculation dynamics [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10): 3042-3049.
- [16] 张新喜, 冯承民, 胡旭亮, 等. 基于 Fluent 软件的往复折流式调质池的特性数值模拟优化设计[J]. 净水技术, 2022, 41(10): 97-106.  
ZHANG X X, FENG C M, HU X L, et al. Numerical simulation of the model based on fluent software [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10): 97-106.
- [17] 于利伟. 三相流管道输送试验与数值模拟分析研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.  
YU L W. Transportation test and numerical simulation analysis of three-phase flow pipeline [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [18] 张新喜, 邱高, 钟梅英, 等. 基于 Fluent 流场模拟的絮凝剂加药管结构改进研究[J]. 给水排水, 2022, 48(9): 7-12.  
ZHANG X X, QIU G, ZHONG M Y, et al. Study on structural improvement of Flocculant drug addition tube based on Fluent flow field simulation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(9): 7-12.