

# 叶片间隙对潜水搅拌机流场特性的影响

徐 顺<sup>1</sup>, 汤方平<sup>1</sup>, 汪文生<sup>2</sup>, 刘玉永<sup>2</sup>, 许 乔<sup>1</sup>

(1. 扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 南京贝特环保通用设备制造有限公司, 江苏 南京 210029)

**摘 要:** 潜水搅拌机叶片间隙对搅拌效果有重要影响,是影响流场的一个重要参数。通过 CFX 软件对不同叶片间隙潜水搅拌机流场进行数值模拟,得到了内部流场图、整个流场图以及外特性参数。对不同叶片间隙潜水搅拌机外特性参数进行分析的结果表明,轴功率和出口流量不受叶片间隙的影响。潜水搅拌机的轴推力与搅拌效果呈正相关。随着叶片间隙的增加,有效搅拌比先增加后减小,最佳叶片间隙值为 6 mm,对应的有效搅拌比为 84.7%,单位有效能耗为 18.0 W。

**关键词:** 潜水搅拌机; 叶片间隙; CFX; 有效搅拌比

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0106-04

## Influence of Different Blade Gaps on Flow Field of Submersible Mixer

XU Shun<sup>1</sup>, TANG Fang-ping<sup>1</sup>, WANG Wen-sheng<sup>2</sup>, LIU Yu-yong<sup>2</sup>, XU Qiao<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Energy Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Nanjing Beite Environmental Protection Equipment Manufacture Co. Ltd., Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The gap between blades has an important influence on the mixing effect of the submersible mixer, and it is an important parameter influencing the flow field. The flow field of the submersible mixer with different blade gaps was stimulated using CFX software. The internal flow field, the whole flow field and the external characteristic parameters of the submersible mixer were obtained. The external characteristic parameters of the submersible mixer with different blade gaps were analyzed, and the results showed that the axial power and the outlet flow rate were not affected by the blade gap. The axial thrust of the submersible mixer showed a positive correlation with the mixing effect. With the increase of blade gap, the effective mixing ratio increased first and then decreased. The optimal blade gap was 6 mm, the effective mixing ratio was 84.7%, and the effective energy consumption per unit was 18.0 W.

**Key words:** submersible mixer; blade gap; CFX; effective mixing ratio

潜水搅拌机作为水处理工艺中的关键设备之一,被广泛用于各类污水处理过程中。目前,国内外对潜水搅拌器的研究相对较少,尤其是关于池内流速场的变化尚缺少相关研究。然而,随着 CFD 技术

的发展,数值模拟已成为研究潜水搅拌机性能的一种重要手段。笔者利用 CFX 软件对不同叶片间隙潜水搅拌机污水池内的流场进行数值模拟。通过改变叶片间隙,比较潜水搅拌器的搅拌功率和搅拌效

果,分析水力性能特点,从而得到最优叶片间隙值,为有导流环潜水搅拌机叶片间隙的选择提供依据。

## 1 结构参数

试验水池的尺寸为  $6\text{ m} \times 5\text{ m} \times 1.4\text{ m}$ ,选用南京贝特环保通用设备制造有限公司生产的 QJB320/960-4/C/S 型潜水搅拌机,其安装位置见图 1。

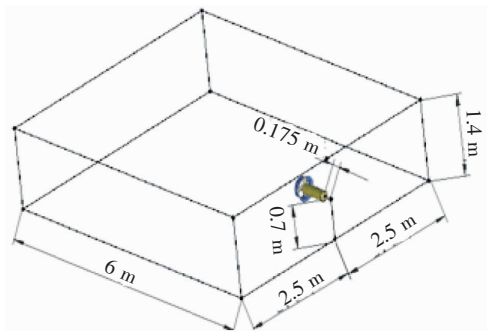


图 1 潜水搅拌机在水池中的位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of position for submersible mixer in tank

图 2 为 3 叶片潜水搅拌器的叶轮结构模型,叶轮直径  $D = 320\text{ mm}$ ,外围为潜水搅拌器的导流环。



图 2 潜水搅拌机叶轮模型

Fig. 2 Impeller model of submersible mixer

潜水搅拌器的安装结构如图 3 所示。

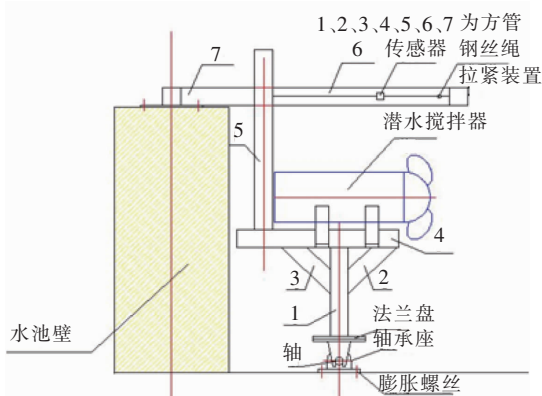


图 3 潜水搅拌机安装结构示意

Fig. 3 Schematic diagram of installation structure for submersible mixer

将轴承安装在轴承座上,通过膨胀螺丝将轴承座固定在池底,利用过盈配合方式装配轴与轴承,中间部件采用方管焊接,方管的尺寸为  $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 。

## 2 结构参数

### 2.1 三维建模及网格划分

将潜水搅拌器的电机简化为圆柱体,用 ICEM 软件对潜水搅拌器的叶轮区域进行非结构化网格划分,对电机、水池等采用结构化网格划分。由于水池和潜水搅拌机比例相差较大,对潜水搅拌器的叶轮区域进行局部加密,最终网格总数为 412 万个。

### 2.2 边界条件

在潜水搅拌机实际运行中液面波动幅度很小,可近似将水池液面看做一个平面,采用刚盖定理设置水池液面的边界条件<sup>[1]</sup>。查阅有关资料,设置污水的密度  $\rho = 1\,050\text{ kg/m}^3$ ;池壁、电机壳、轮毂、叶轮均采用无滑移壁面边界条件;轮毂和叶轮的转速均为  $576\text{ r/min}$ ,静区域交界面采用静静交界面,叶轮动区域和静区域采用动静交界面。采用基于压力-速度耦合的 Simple 算法求解 N-S 方程组,并选用 High Resolution 高阶精度离散方程和 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型,收敛精度为  $1 \times 10^{-4[2,3]}$ 。

## 3 数值模拟分析

探讨叶片间隙 (Tip) 对潜水搅拌机性能的影响,其中 Tip 分别为 1、3、6、8、10、14 mm。

### 3.1 潜水搅拌机流场分析

当 Tip = 1 mm 时,有导管潜水搅拌机轴面速度矢量如图 4 所示。

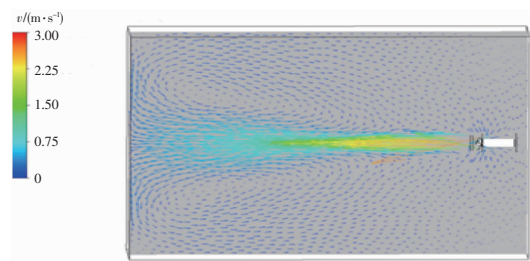


图 4 潜水搅拌机轴面速度矢量

Fig. 4 Surface velocity vector of submersible mixer

可知,流体从导流环入口处卷吸进入叶轮工作区,经叶轮作用后流体被推出去,遇到水池壁后反射回来,形成回流。在搅拌池中,可以看到有两个明显的大漩涡。由于射流的卷吸作用,射流出流后与周围流体存在切向间断面,间断面处有强烈、掺混的漩

涡微团,原来静止或低速运动的流体被卷吸到射流中。从流速的分布看,同一截面上中心处的流速最大,随着射流向下游流动,中心处的流速逐渐减小,射流宽度逐渐增加<sup>[2,3]</sup>。

潜水搅拌机不同叶片间隙叶轮内部流场的轴面速度矢量如图5所示。

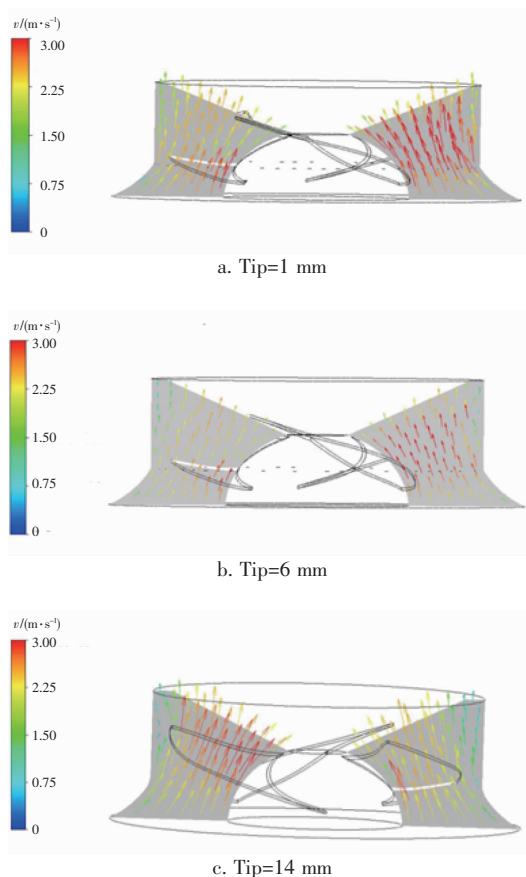


图5 潜水搅拌机不同叶片间隙叶轮内部的轴面速度矢量

Fig. 5 Surface velocity vector of impeller with different blade gaps in submersible mixer

由图5可知,当Tip=1 mm时,叶片间隙较小,接近轴流泵叶片间隙值,在靠近导流环边界时,潜水搅拌机导流环边壁层对流动的影响较大,此时可视为小间隙流动,由于离心力和导管的作用,边界层的流体沿着导流环壁面旋转射流出去;当Tip=6 mm时,潜水搅拌机导流环边壁层对流动的影响变小,流体的流动受到了一定的扰动,部分流体的流动方向将偏离原方向,且由于叶轮离心力较大,流体还是沿着导管壁旋转射流出去;当Tip=14 mm时,叶片间隙较大,导流环壁对搅拌流体的作用进一步减弱,流体经过叶轮吸力面通过叶轮作用后,由叶轮推力面旋转射流出去,受到的扰动更大,流体由于旋转射流

受到离心力的作用,且叶片间隙大,射流出去的流体呈径向扩散,间隙越大,这种扩散趋势越明显。

### 3.2 潜水搅拌机扭矩和推力理论值

当潜水搅拌机叶片间隙为1、3、6、8、10、14 mm时,对应的轴功率分别为0.634、0.640、0.642、0.635、0.637、0.627 kW,对应的出口流量模拟值分别为163.6、165.5、164.7、164.9、165.1、168.2 kg/s,对应的推力分别为178.8、184.8、196.6、190.4、186.2、180.4 N。可见,随着叶片间隙的增大,轴功率和出口流量基本保持不变;而轴推力呈现先增大后减小的趋势,当Tip=6 mm时,潜水搅拌器的轴推力达到最大值。

### 3.3 池内流场分析

假设叶轮中心出口处的坐标为0,以叶轮中心出口处到池壁的距离(轴向距离)为横坐标,对应监测点的轴向流速为纵坐标,则轴向距离与轴向流速的关系如图6所示。

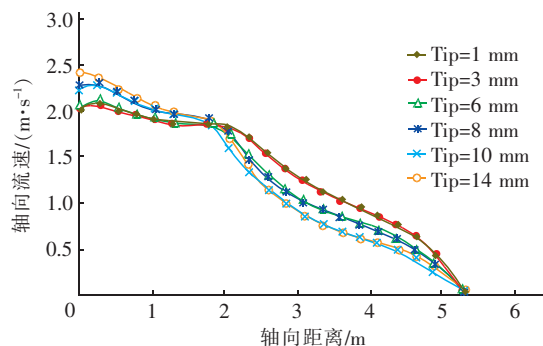


图6 轴向距离与轴向流速的关系

Fig. 6 Relationship between axial distance and axial flow velocity

由图6可知,随着轴向距离的增加,轴向流速逐渐减小;在叶轮中心出口处,随着叶片间隙的增加,出口流速逐渐增大。以Tip=6 mm为例,初始出流为射流核心区,轴向流速很大,受到的外界扰动较小,到达流场中某一点后潜水搅拌机轴向衰减的趋势变快,当达到壁面时,由于边壁效应,流体的轴向流速并不为零,但非常小。

### 3.4 潜水搅拌机搅拌效果评定

潜水搅拌机有效搅拌比和有效单位能耗的计算见式(1)和式(2)。

$$\eta = V_1 / V_2 \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为搅拌池的有效搅拌比<sup>[4]</sup>,%; $V_1$ 为搅拌池内流场流速 $\geq 0.1$  m/s的流体体积, $\text{m}^3$ ; $V_2$ 为搅



拌池的体积,  $\text{m}^3$ 。

$$P_2 = P_1 / V_3 \quad (2)$$

式中,  $P_1$  为潜水搅拌器的电机功率,  $\text{W}$ ;  $P_2$  为达到搅拌要求流体(流速  $v \geq 0.1 \text{ m/s}$ ) 的单位能耗,  $\text{W}/\text{m}^3$ ;  $V_3$  为达到搅拌要求的流体体积,  $\text{m}^3$ 。

当叶片间隙为 1、3、6、8、10、14 mm 时, 对应的有效搅拌比分别为 70.5%、75.1%、84.7%、77.5%、75.8%、73.6%, 对应的有效单位能耗分别为 21.4、20.3、18.0、19.5、20.0、20.2  $\text{W}/\text{m}^3$ 。可见, 随着叶片间隙的增加, 有效搅拌比先增加后减小, 而有效单位能耗则先减小后增大。当  $\text{Tip} = 6 \text{ mm}$  时, 有效搅拌比最大, 且有效单位能耗最小。考虑到实际工程中, 拦污栅的间隙为 5 mm, 所以需要叶片间隙  $> 5 \text{ mm}$ , 同时结合运行效果和经济性考虑, 6 mm 为最佳叶片间隙, 因此分析  $\text{Tip} = 6 \text{ mm}$  的流场。

图 7 为叶片间隙为 6 mm 时搅拌池内的流线。

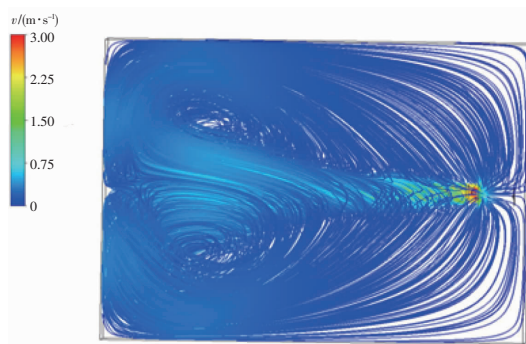


图 7  $\text{Tip} = 6 \text{ mm}$  的池内流线

Fig. 7 Flow chart of pool when  $\text{Tip} = 6 \text{ mm}$

由图 7 可知, 流体经过叶轮作用后, 以旋转射流的方式流出导流环, 径向扩散, 轴向流速不断减小。在旋转射流区内, 同一截面中心线上的流速最大, 离中心越远, 流速越小。随着射流向下游流动, 射流宽度逐渐增大, 射流中心线上的速度逐渐减小。由于射流在有限空间内, 射流出去后受到边壁的约束, 在达到壁面时, 形成回流。

#### 4 结论

① 不同叶片间隙的内部流场有微小区别, 随着叶片间隙的增大, 边界层流体受到扰动, 呈现扩散的趋势, 叶片间隙越小, 边界层受到的扰动越小。

② 随着轴向距离的增加, 轴向流速逐渐变小。

初始出流时, 潜水搅拌机由于旋转射流在核心区, 所以轴向速度衰减较慢。

③ 不同叶片间隙的潜水搅拌机轴功率和出口流量基本不变, 说明叶片间隙不是影响轴功率和出口流量的因素, 随着叶片间隙的增加, 推力先增大后减小, 当  $\text{Tip} = 6 \text{ mm}$  时, 推力最大, 且有效搅拌比也最大, 推力与有效搅拌比呈正相关关系。

④ 随着叶片间隙的增大, 有效搅拌比先增加后减小, 而单位有效能耗则先减小后增大, 当  $\text{Tip} = 6 \text{ mm}$  时, 有效搅拌比最大, 单位流体的有效能耗最小, 综合考虑叶片间隙为 6 mm 最佳。

#### 参考文献:

- [1] 田飞. 潜水搅拌机射流特性及实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- [2] 田飞, 施卫东, 陈斌, 等. 污水处理搅拌机的水力设计与试验研究[J]. 流体机械, 2011, 39(6): 1-4.
- [3] 金建华, 张红伟. 潜水搅拌机三维两相流的数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2014, (10): 159-162.
- [4] 张晓宁. 潜水搅拌机工作方式及其对搅拌效率的影响研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.



作者简介: 徐顺(1990-), 男, 江苏溧阳人, 硕士研究生, 主要从事潜水搅拌机流场特性分析和优化研究。

E-mail: ashun1990@163.com

收稿日期: 2016-08-12