基于 CFD 的搅拌器与管道混合器的混合效果比较

曹井国^{1,2}, 王宗华³, 顾 平², 张光辉², 张大群¹

(1. 天津水工业工程设备有限公司, 天津 300070; 2. 天津大学 环境科学与工程学院,
 天津 300072; 3. 南阳师范学院 土木建筑工程学院, 河南 南阳 473000)

摘 要: 采用计算流体力学(CFD)的方法比较了折叶桨式搅拌器和SK 型管道混合器的混合效果,利用 FLUENT 系列软件对两者内部流体流线、压力损失、应变速率和湍动强度等进行了分析。结果表明:管道混合器的平均应变速率高于搅拌器的,单位时间内的混合效率更高;由于搅拌器内搅拌桨的搅拌作用以及较长的停留时间,弥补了其单位时间内混合效率相对较低的不足,使搅拌器的最终混合效果优于管道混合器。

关键词: 计算流体力学; 搅拌器; 管道混合器; 混合效果 中图分类号: TQ051.7 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2012)13-0084-04

Comparison of Mixing Effect of Hinge Paddle Mixer and Static Mixer Based on CFD

CAO Jing-guo^{1,2}, WANG Zong-hua³, GU Ping², ZHANG Guang-hui², ZHANG Da-qun¹
(1. Tianjin Water Industry Engineering Equipment Co. Ltd., Tianjin 300070, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Department of Civil Engineering and Architecture, Nanyang Normal College, Nanyang 473000, China)

Abstract: The mixing effect of hinge paddle mixer and Kenics static mixer was compared by the method of computational fluid dynamics (CFD). Fluid flow line, pressure loss, strain rate and turbulent intensity in the two mixers were analyzed by FLUENT series software. The results showed that the average strain rate of static mixer was higher than that of paddle mixer, which enabled static mixer to achieve a higher mixing effect in unit time. Due to stirring effect and more stirring time of paddle, the mixing efficiency of paddle mixer was compensated. The final mixing effect of paddle mixer was better than that of static mixer.

Key words: computational fluid dynamics; paddle mixer; static mixer; mixing effect

通过对流体的动量方程、质量方程和能量方程 的计算,现代计算流体力学(CFD)软件为流场分析、 传热传质、化学反应以及其他流体的流动过程分析 提供了便利,并且已广泛用于给水和废水处理过程 的模拟和预测^[1,2]。对搅拌器和管道混合器的混合 特性也引起了学者们的广泛关注^[3-5]。笔者采用 FLUENT 系列软件对折叶桨式搅拌器和 SK 型管道 混合器的流场进行模拟,通过流体流线、压力损失、 应变速率和湍动强度等参数对两者的混合效果进行 了比较。

1 搅拌器与管道混合器的结构模型

1.1 搅拌器的结构与尺寸

试验用搅拌器的结构如图 1 所示,为折叶桨式 搅拌器,单个搅拌桨与联轴器呈 45°,上下两对搅拌 桨平行,中间一对搅拌桨与上下两对搅拌桨呈 90° 角。搅拌器的有效体积为 2.9 L,直径为 90 mm,有 效高度为 450 mm;搅拌桨的长 × 宽 = 38 mm × 20 mm、厚度为 2 mm,搅拌桨联轴器间距为 120 mm。 原水与药剂从搅拌器上部进入,底部流出,定义Z 轴负向为流体流动方向,通过搅拌桨的搅拌强制混 合。



图 搅拌器模型 Fig. 1 Model of paddle mixer

1.2 管道混合器的结构与尺寸

试验用管道混合器的结构如图 2 所示, 型号为 SK25-200,其混合元件为扭旋叶片(5个), 扭曲成 180°的左、右旋叶片错开 90°排列。管道混合器的 内径为 25 mm、长度为 200 mm, 扭旋叶片的直径 × 长度 = 25 mm × 40 mm、厚度为 2 mm。流体在装有 扭旋叶片的直管中流动时被分割成 2 个半圆部分, 在沿轴线前进的同时被迫绕轴线做旋转运动, 定义 X 轴正向为流体流动方向。



2 搅拌器与管道混合器的 CFD 方法

2.1 CFD 数学模型

经计算,搅拌器和管道混合器的雷诺数 Re 分别 为5 764、6 200。由此可知,搅拌器与管道混合器内 流体流态都介于层流与湍流的过渡流态(2 000 < Re <12 000),而由于其内部都存在混合元件的扰动, 因此内部流体都处于湍流状态,故流体模型采用三 维雷诺平均 N-S 方程,采用标准 k-e 方程模型进行 模拟。

2.2 模拟方法

搅拌器模型采用 Mixsim2.0 软件建立,计算时 采用多重参考坐标系(MRF)模型,选取整个流场区 域为计算域,对桨叶区和桨外区分别进行网格划分, 网格类型均为非结构化的四面体网格,数量约为 328×10⁴个。根据 MRF 模型的要求,定义桨叶区流 体以 60 r/s 的角速度旋转,定义搅拌轴及搅拌桨所 在壁面为移动壁面,与桨叶区流体同步转动,固体壁 面条件均采用无滑移固壁条件,近壁区采用标准壁 面函数。流体计算采用 Mixsim 内置的 FLUENT 6.1 进行,计算的人口边界条件为速度平均分布入口,入 口流速为0.069 m/s;出口边界条件为压力出口,出 口压力为 20 kPa;模拟计算以水为流体介质,粘度 *μ* 为1.003×10⁻³ Pa•s,密度为998.2 kg/m³,认为介 质不可压缩。

管道混合器采用 FLUENT 的前处理软件 Gambit 2.3.16 建立,采用非结构化的四面体网格对流 体区域进行划分,网格数量约为 55 × 10⁴ 个。流体 计算采用 FLUENT 6.3 进行,计算的人口边界条件 为速度平均分布入口,入口流速为 0.283 m/s;出口 边界条件为压力出口,出口压力为 200 kPa;其他未 设置的面默认为固壁无滑移光滑界面,对近壁区采 用标准壁面函数。模拟计算以水为流体介质,粘度 μ为 1.003 × 10⁻³ Pa•s,密度为 998.2 kg/m³,认为 介质不可压缩。

搅拌器和管道混合器迭代精度均设为 0.001, 分别经过 1 307 步和 305 步迭代后,计算结果收敛。

3 结果与讨论

3.1 流体流线与压力损失

流线是表示某时刻流动方向的曲线,曲线上各 质点的速度矢量都与该曲线相切^[5]。搅拌器和管 道混合器内流体的流线见图 3,左侧标尺代表的是 不同质点的 ID 号码,最高值可看做质点的数量。



• 85 •



图 3 搅拌器和管道混合器内流体的流线 Fig. 3 Fluid flow line of paddle mixer and static mixer

由图 3(a) 可知,流体从搅拌器上部进水管进 入,向 Z 轴负向移动,经三组搅拌桨搅拌后,从底部 出水口流出,在搅拌器内向下移动的同时,被迫沿搅 拌桨进行旋转运动,其旋转轴心为搅拌轴。由图 3 (b) 可知,流体在管道混合器向 X 轴正向移动的同 时,被迫沿扭旋叶片产生旋转运动,其旋转轴心为管 中心;除此之外,流体还存在自转,即绕半圆形截面 的水力学中心做环形旋转;由于相连的叶片之间错 开 90°夹角,且扭旋方向交替改变,使流体在流入下 一个扭旋叶片时被迫发生翻动。

通过 Fluent 软件计算出流体流经搅拌器和管道 混合器的压力损失分别约为 38、496 Pa。流体流经 搅拌器的过程中,由于流体质量流率与搅拌器内流 体质量比值较小,在考虑重力作用的情况下,其压力 损失可忽略。在研究管道混合器的混合效率时,由 于流体质量流率与管道混合器内流体质量比值较 大,可忽略重力的影响,且因为扭旋叶片的作用,使 流体在管道混合器内混合的同时存在较大的压力损 失。通常情况下,研究人员可通过研究压力损失来 反映不同类型管道混合器的混合效果,但由于本文 需要比较搅拌器和管道混合器的混合效果,因此,采 用应变速率和湍动强度综合比较两者的混合效果。

3.2 应变速率

混合效率与应变速率呈正相关,混合效率可通 过应变速率来分析^[6]。假设流体沿 X 轴方向移动, 在 Y 轴方向拥有一个径向速度 v,则应变速率计算 公式如下:

$$\varepsilon' = \frac{\delta\varepsilon}{\delta t} = \frac{1}{l_0} \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} = \frac{v}{l_0} \tag{1}$$

显然,应变速率与径向的速度梯度相同。在牛顿流体中,剪切应力与应变速率呈线性关系^[6]。

采用 FLUENT 软件直接计算流体流经搅拌器和 管道混合器的应变速率,结果如图 4 所示。



图 4 搅拌器和管道混合器内流体的应变速率

Fig. 4 Fluid strain rate of paddle mixer and static mixer

在图 4(a) 中,横轴由 0.45 m 到零为搅拌器进 口到出口的长度方向,纵轴数值为横轴所对应的混 合器截面上的应变速率值,可以看出,搅拌器应变速 率较大值出现在搅拌桨附近区域内,从进口到出口 之间的三个搅拌桨区域应变速率最大值分别为 497、617 和 552 s⁻¹,平均值为 16.7 s⁻¹。在图 4(b) 中,横轴由零到 200 mm 为管道混合器进口到出口 的长度方向,纵轴数值为横轴所对应的管道混合器 截面上的应变速率值,可以看出,管道混合器应变速 率较大值出现在进水口,最大值为 2 747 s⁻¹,平均 值为 417.1 s⁻¹。综上可知,管道混合器的平均应变 速率高于搅拌器的,单位时间内的混合效率较高。

3.3 湍动强度

湍动强度是湍流脉动速度与平均速度的比值, 是湍动流体分析的重要依据,湍动强度可按下式计 算:

$$I = u'/\overline{u} = 0.16(Re_{Du})^{-1/8}$$
(2)

式中 u、亚——分别为湍流脉动速度与平均速度

Re_{DH}——按水力直径 D_H 计算的雷诺数 搅拌器和管道混合器内流体的湍动强度如图 5 所示。



图 5 搅拌器和管道混合器内流体的湍动强度 Fig. 5 Fluid turbulent intensity of paddle mixer and static mixer

在图 5(a) 中, 横轴由 0.45 m 到零为搅拌器进 口到出口的长度方向,纵轴数值表示横轴所对应的 混合器截面上的湍动强度值,可以看出,搅拌器中湍 动强度较大值出现在进水口和搅拌桨上下端面,从 进水口到三个搅拌桨区域湍动强度最大值依次为 31.5%、41.3%、44.2%和47.6%,搅拌器流场的平 均湍动强度为 25.6%。在图 5(b) 中,横轴由零到 200 mm 为管道混合器进口到出口的长度方向,纵轴 数值表示横轴所对应的管道混合器截面上的湍动强 度值,可以看出,管道混合器中湍动强度较大值出现 在进水口和各扭旋叶片相连接的位置,这是由于叶 片扭旋方向的改变,使流体在流入管道混合器或下 个扭旋叶片时被迫发生翻动,湍动程度增加所致。 从进水口到五个扭旋叶片相连接位置的湍动强度分 别为7.5%、17.4%、20.0%、22.4%和22.1%,管道 混合器流场的平均湍动强度为10.7%。通过比较 可知,搅拌器的平均湍动强度高于管道混合器的。

4 结论

① 流体在管道混合器移动的同时,被迫沿扭旋叶片产生旋转运动,其旋转轴心为管中心。除此之外,流体还存在自转,即绕半圆形截面的水力学中心做环形旋转。由于相连的叶片之间错开 90°夹角,且扭旋方向交替改变,使流体在流入下一个扭旋叶片时被迫发生翻动,湍动程度增加,加强了管道混合器的径向混合作用,其应变速率和速度梯度 6 值都高于搅拌器的。

② 流体在搅拌器内移动的同时,由于搅拌桨的旋转与剪切作用,使湍动强度在搅拌桨的上下边界处局部升高,且搅拌器的直径与进水口的直径比值较大(约为11:1),与进水流速相比,搅拌器内流体的径向流速相对较小,当流体从进水口进入搅拌器时,较高的湍动强度将使其与搅拌器内流体强制接触,由于搅拌桨的搅拌作用,以及相对较长的水力停留时间,能够弥补搅拌器在单位时间内混合效率相对较低的不足,使得搅拌器的最终混合效果优于管道混合器。

参考文献:

- Pramparo L, Pruvost J, Stuber F, et al. Mixing and hydrodynamics investigation using CFD in a square-sectioned torus reactor in batch and continuous regimes [J]. Chem Eng J,2008,137(2):386-395.
- Terashima M, Goel R, Komatsu K, et al. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters [J]. Bioresour Technol, 2009,100(7): 2228 - 2233.
- [3] Wang X, Ding J, Ren N Q, et al. CFD simulation of an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor for biohydrogen production [J]. Int J Hydrogen Energ, 2009, 34 (24): 9686 - 9695.
- [4] Ding J, Wang X, Zhou X F, et al. CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production [J]. Bioresour Technol, 2010, 101(18): 7005 7013.
- [5] Kumar V, Shirke V, Nigam K D P. Performance of Kenics static mixer over a wide range of Reynolds number [J]. Chem Eng J,2008,139(2):284-295.
- [6] 姬宜朋. 旋转式 Kenics 型混合器混合性能及流动特性 研究 [D]. 北京:北京化工大学,2005.

E – mail: twieese@ 163. com 收稿日期: 2011 – 12 – 10

• 87 •