

穿孔旋流絮凝池污泥斗高度对絮凝条件的影响

崔丽娜, 王 军

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 通过改变穿孔旋流絮凝池中污泥斗的高度和絮凝池的尺寸,利用计算流体动力学(CFD)数值模拟对絮凝池内部流场和流态特性进行分析;以涡旋速度梯度、湍动能和湍动能耗散率作为絮凝评价指标,研究污泥斗高度对絮凝水力条件的影响,并确定不同处理规模的絮凝池所对应的最优污泥斗高度。将数值模拟结果与设计手册的参考值进行对比,发现模拟得到的污泥斗高度最优值比设计手册中提供的污泥斗高度参考值低10 cm,这在一定程度上减少了絮凝池施工的工程量,降低了工程造价,且更加有利于絮凝池的运行管理。

关键词: 穿孔旋流絮凝池; 数值模拟; 污泥斗高度; 涡旋速度梯度; 湍动能

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)07-0047-04

Influence of Sludge Bucket Height on Flocculation Conditions of Perforated Vortex Flocculation Tank

CUI Li-na, WANG Jun

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: By changing the sludge bucket height of perforated vortex flocculation tank, the characteristics of flow field was analyzed using the method of numerical simulation in CFD. The evaluation indices of flocculation included vortex velocity gradient, turbulent kinetic energy, and turbulent kinetic energy dissipation rate. The influence of sludge bucket height on flocculation hydraulic conditions was discussed. Numerical simulations of different sizes of the vortex flocculation tank were performed to explore the relationship between sludge bucket height and treatment scale. The results indicated that the optimal sludge bucket height from numerical simulation was 10 cm lower than the suggested sludge bucket height provided in the design handbook, which reduced the construction amount of the flocculation tank to a certain extent, the cost of the project, and the flocculation tank was more conducive to operation and management.

Key words: perforated vortex flocculation tank; numerical simulation; sludge bucket height; vortex velocity gradient; turbulent kinetic energy

随着水资源紧缺的加剧以及人们对饮用水水质要求的不断提高,如何提高中小型水厂的处理效果逐渐受到人们的重视。穿孔旋流絮凝池结构简单、造价较低、施工方便,适用于规模较小的农村水厂,

但穿孔旋流絮凝池的絮凝效果易受水量变化的影响,且相关设计规范中对穿孔旋流絮凝池设计参数的规定较少,其过水孔洞的位置、污泥斗高度等参数主要依靠设计者的经验取值,易造成参数选取的随

意性,不能提高实际工程中絮凝池的运行效果。近年来许多学者通过计算流体力学(CFD)数值模拟的方法对穿孔旋流絮凝池进行了研究。丁美兰用速度场和湍动能耗散率作为絮凝效果评价指标,通过模拟发现将穿孔旋流絮凝池竖井末尾直角设计成圆弧形状时絮凝效果最好,并利用 Fr 相似理论,对絮凝过程进行了试验,验证了数值模拟结果的正确性^[1]。薛英文等通过对穿孔旋流絮凝池进行数值模拟发现,当过水孔洞是高宽比为2:1的矩形断面时絮凝水力条件最好,并依照 Fr 相似理论,设计连续流试验对絮凝过程进行了验证^[2]。Samaras 等也利用 CFD 的方法对絮凝过程进行了研究^[3,4]。数值模拟方法为实际工程的优化提供了一种新途径。

1 穿孔旋流絮凝池模型

模拟模型的实体取自安徽省青阳县丁桥水厂。该水厂的供水规模为 $2\,000\text{ m}^3/\text{d}$,按《村镇供水工程设计规范》(SL 687—2014)该工程类型属于集中供水Ⅲ型,絮凝池采用下方进水,过水孔洞对角交错布置,孔洞形状为矩形,其高宽比为1.5:1,污泥斗高度取80 cm。池体被穿孔旋流隔板分为大小相同的6个竖井,竖井截面为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$;竖井断面形状为缺角正四边形,缺角边长为0.15 m;有效水深为3.6 m;进水管管径为200 mm。

为了保证模拟精度并从整体上分析穿孔旋流絮凝池污泥斗高度对絮凝水力条件的影响,模拟对象采用实体模型中的全部竖井。结合实际工程中相关参数的设置,穿孔旋流絮凝池污泥斗高度依次取50、60、70、80、90 cm。模拟过程穿孔旋流絮凝池过水孔洞尺寸按水流方向依次为 $230\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 、 $250\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 、 $270\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ 、 $300\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、 $350\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ 、 $440\text{ mm} \times 280\text{ mm}$ 。本研究采用的模型如图1所示。

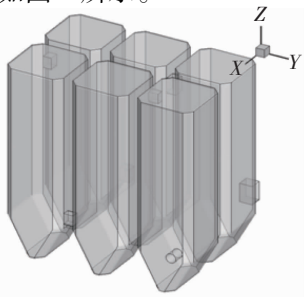


图1 穿孔旋流絮凝池模型

Fig. 1 Model of perforated vortex flocculation tank

2 边界条件及计算模型

穿孔旋流絮凝池的进口条件为速度进口(Velocity inlet),进口流速为 0.80 m/s ;出口边界条件为自由出口(outflow);近壁区采用标准壁面函数来模拟,固体壁面上采用无滑移的边界条件模拟。

采用 Gambit 软件自动生成的非结构混合网格(TGrid)。计算模型采用目前使用最为广泛的标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型。

3 模拟结果与分析

3.1 絮凝评价指标

在传统絮凝池设计运行中,主要用速度梯度 G 值进行校核,但是近年来许多学者对此提出了异议,认为 G 值仅代表能量的空间平均分布,不能反映各局部能量的分布。此次模拟采用涡旋速度梯度 G_0 、湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 作为絮凝评价指标。

涡旋速度梯度可由 $G_0 = \sqrt{\frac{\rho\varepsilon}{\mu}}$ 计算,其中 ρ 为水的密度, μ 为水的粘性系数。可知,湍动能耗散率 ε 越大,则涡旋速度梯度 G_0 越大,絮凝过程中絮体颗粒的有效碰撞频率越高。

穿孔旋流絮凝池模型污泥斗高度分别为50、60、70、80、90 cm。提取 $Y-Z$ ($X=1.125\text{ m}$) 截面的湍动能 k 、湍动能耗散率 ε 和涡旋速度梯度 G_0 进行分析。有效作用区的计算零点为距离污泥斗顶端10 cm高的 Z 截面。

3.2 不同污泥斗高度的模拟

由原模型的模拟结果得到沿水流流向6个竖井的涡旋速度梯度: $G_{0(1)} = 31\text{ s}^{-1}$ 、 $G_{0(2)} = 29\text{ s}^{-1}$ 、 $G_{0(3)} = 28\text{ s}^{-1}$ 、 $G_{0(4)} = 26\text{ s}^{-1}$ 、 $G_{0(5)} = 24\text{ s}^{-1}$ 、 $G_{0(6)} = 20\text{ s}^{-1}$ 。在实际絮凝过程中, G 值一般为 $20 \sim 70\text{ s}^{-1}$,计算得到的6个竖井的涡旋速度梯度满足絮凝要求且沿各竖井逐级递减。

由穿孔旋流絮凝池湍动能和湍动能耗散率的云图可知:穿孔旋流絮凝池内部湍动能 k 值在过水孔洞周边较大,进入竖井内沿水流方向逐渐减小。在穿孔旋流絮凝池中,水流沿池壁切线方向进入竖井,在竖井内形成旋流。湍动能可由 $k = \frac{3}{2}(vI)^2$ 计算,其中 v 为平均流动速度, I 为湍流强度。可知,湍动能 k 值越大,则絮凝池内湍流强度越大,说明絮凝池内湍流程度越剧烈,絮凝颗粒碰撞越频繁,越有利于絮凝效果的提高。在处理规模为 $2\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 的穿

孔旋流絮凝池的有效作用区内取平均湍动能和平均湍动能耗散率绘图,如图2、3所示。

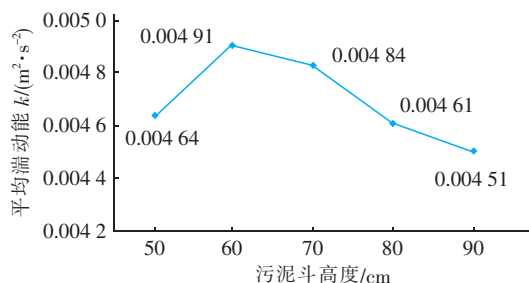


图2 各污泥斗高度下平均湍动能分布(2 000 m³/d)

Fig. 2 Average turbulent kinetic energy with different sludge bucket height

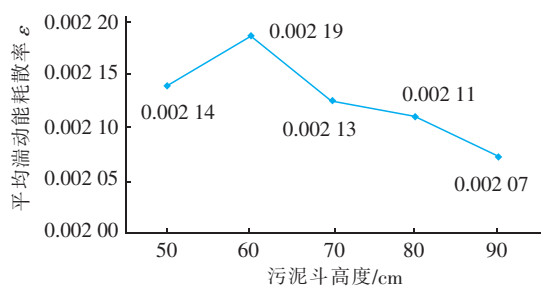


图3 各污泥斗高度下平均湍动能耗散率分布(2 000 m³/d)

Fig. 3 Average turbulent kinetic energy dissipation rate with different sludge bucket height

由图2可知,穿孔旋流絮凝池有效作用区内平均湍动能随污泥斗高度的增加呈先增大后减小的趋势。当污泥斗高度为60 cm时,其有效作用区的平均湍动能最大,为 $4.91 \times 10^{-3} m^2/s^2$,涡旋速度梯度 G_0 为 $47 s^{-1}$,符合规范要求。此时絮凝池内湍动强度最大,絮体颗粒间的碰撞最激烈,絮凝效果最好。

湍动能耗散率 ε 作为絮凝效果的评价指标,表征了流体分子通过内摩擦力将损耗的湍动能转化成分子动能的能力。 ε 值越大,流体分子获得的动能越大,絮体颗粒越易碰撞并粘合,絮凝效果越好。由图3可知,当污泥斗高度为60 cm时,其有效作用区的平均湍动能耗散率 ε 最大,絮凝水力条件最好。

3.3 不同规模絮凝池最优污泥斗高度模拟

根据《给水排水工程快速设计手册:给水工程》提供的穿孔旋流絮凝池参考尺寸,分别建立了处理规模为960、1 440和1 920 m³/d的穿孔旋流絮凝池模型。3种规模的穿孔旋流絮凝池的有效水深均为2.5 m,池体被分为大小相同的6个竖井,竖井断面形状为缺角正四边形。单格竖井截面尺寸分别为

1.0 m × 1.0 m、1.2 m × 1.2 m、1.4 m × 1.4 m,竖井缺角直角边边长分别为0.14、0.15、0.16 m,污泥斗高度分别为40、50、60 cm,进水管管径分别为0.15、0.15、0.2 m。过水孔洞形状取高宽比为2:1的矩形。絮凝池规模为960 m³/d时,过水孔洞的尺寸分别为90 mm × 180 mm、100 mm × 200 mm、110 mm × 220 mm、125 mm × 250 mm、145 mm × 290 mm、175 mm × 350 mm;絮凝池规模为1 440 m³/d时,过水孔洞的尺寸分别为110 mm × 220 mm、120 mm × 240 mm、140 mm × 280 mm、150 mm × 300 mm、180 mm × 360 mm、210 mm × 420 mm;絮凝池规模为1 920 m³/d时,过水孔洞的尺寸分别为130 mm × 260 mm、140 mm × 280 mm、160 mm × 320 mm、180 mm × 360 mm、210 mm × 420 mm、240 mm × 480 mm。

将处理规模为960 m³/d的絮凝池污泥斗高度设置为20、30、40、50 cm进行模拟。分别计算其有效作用区平均湍动能和平均湍动能耗散率,结果如图4、5所示。

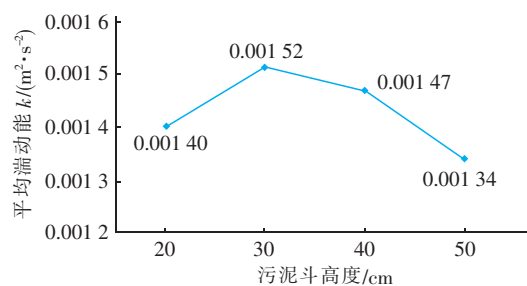


图4 规模为960 m³/d的絮凝池各污泥斗高度下的平均湍动能

Fig. 4 Average turbulent kinetic energy of 960 m³/d flocculation tank with different sludge bucket height

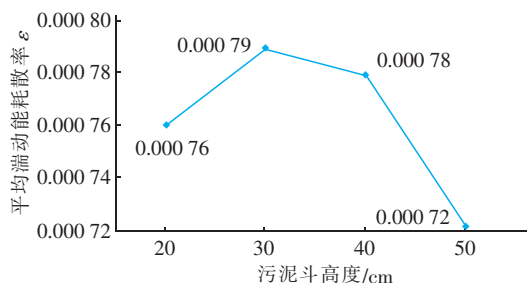


图5 规模为960 m³/d的絮凝池各污泥斗高度下的平均湍动能耗散率

Fig. 5 Average turbulent kinetic energy dissipation rate of 960 m³/d flocculation tank with different sludge bucket height

由图4、5可知,当污泥斗高度为30 cm时,其

有效作用区的平均湍动能和湍动能耗散率最大,此时湍流强度最强,絮凝效果最好。由此可知,处理规模为 $960\text{ m}^3/\text{d}$ 的穿孔旋流絮凝池的污泥斗高度为 30 cm 时絮凝水力条件最好。

同理得到处理规模分别为 $1\,440$ 、 $1\,920\text{ m}^3/\text{d}$ 的穿孔旋流絮凝池,对应的最佳污泥斗高度分别为 40 、 50 cm 。

将上述3种规模穿孔旋流絮凝池污泥斗高度的参考值和通过数值模拟得到的污泥斗高度最优值进行比较,可知穿孔旋流絮凝池的处理规模越大,通过数值模拟得到的污泥斗高度最优值越大,且最优值均比《给水排水工程快速设计手册:给水工程》中污泥斗高度参考值低 10 cm 。

4 结论

通过CFD数值模拟方法,以涡旋速度梯度、湍动能和湍动能耗散率作为絮凝效果评价指标,研究了穿孔旋流絮凝池的污泥斗高度对其絮凝效果的影响。结果表明,对处理规模为 $2\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 的穿孔旋流絮凝池,将污泥斗高度设置为 60 cm 时,絮凝水力条件最佳,絮凝效果最好。而对于处理规模分别为 960 、 $1\,440$ 、 $1\,920\text{ m}^3/\text{d}$ 的穿孔旋流絮凝池,对应的最佳污泥斗高度分别为 30 、 40 、 50 cm ,较设计手册提供的参考高度值降低了 10 cm ,这在一定程度上减少了絮凝池施工的工程量,降低了工程造价,且更加有利于絮凝池的运行管理。

参考文献:

- [1] 丁美兰. 旋流扰流絮凝池流场数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

Ding Meilan. Numerical Simulation of Fluid Field in Rotational-disturbed Flocculator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese).

- [2] 薛英文,邵森林,邱寒. 水力絮凝池数值模拟及实验研究[J]. 中国农村水利水电,2009,(9):19-22.
Xue Yingwen, Shao Senlin, Qiu Han. Numerical simulation of hydraulic coagulate reactor and experimental research on it[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009,(9):19-22 (in Chinese).
- [3] Samaras K, Zouboulis A, Karapantsios T, et al. A CFD-based simulation study of a large scale flocculation tank for potable water treatment[J]. Chem Eng J, 2010, 162(1):208-216.
- [4] Lai Y P, Zhao J H. The numerical simulation study of a flocculation reactor[J]. Appl Mech Mater, 2013, 260/261(8):1022-1025.



作者简介:崔丽娜(1991-),女,河南鹤壁人,硕士研究生,从事穿孔旋流絮凝池以及穿孔旋流网格絮凝池方面的模拟和研究。

E-mail: cuilina0406@163.com

收稿日期:2017-10-12

像保护眼睛一样保护生态环境,
像对待生命一样对待生态环境