含转刷与推进器的全尺寸氧化沟流场模拟与 DO 分布

曾祥专¹, 张金松², 卢欢亮¹, 黄志华¹, 叶向东¹, 汪永红¹ (1. 广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045; 2. 深圳水务集团, 广东 深圳 518031)

摘 要: 运用计算流体力学(CFD)数值模拟技术建立了包含转刷和推进器的氧化沟流场模 拟模型,对于转刷的模拟,采用"两步法",首先模拟出单元转刷叶片转动所造成流场推流状况,并 从中获得推流函数,然后以自定义函数(UDF)的形式将叶片旋转形成的流场扩展到整个转刷所在 位置来实现对转刷的模拟。对于推进器,采用了船舶推进理论中的理想推进器模型来实现对推进 器推流作用的模拟。两者结合可以对整个氧化沟的真实流态情况作出完整的模拟,经过修正后流 场理论计算结果和实测值吻合情况良好。在流场模拟的基础上,运用组分输送模型对氧化沟中溶 解氧的分布趋势进行了探索性模拟研究,结果表明深沟型氧化沟内溶解氧主要分布在沟体的上部, 底部溶解氧的获得主要是由于弯道环流作用引起的,沟内溶解氧在纵向、横向、垂向的分布表现出 一定的不均匀性和规律性。

关键词: 计算流体力学; 氧化沟; 转刷; 水下推进器; 流态分析; 溶解氧分布 中图分类号: X703 文献标识码: C 文章编号: 1000 - 4602(2014) 09 - 0104 - 05

Flow Field Simulation and DO Distribution in Full-scale Oxidation Ditch with Brushes and Propellers

ZENG Xiang-zhuan¹ , ZHANG Jin-song² , LU Huan-liang¹ , HUANG Zhi-hua¹ , YE Xiang-dong¹ , WANG Yong-hong¹

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China; 2. Shenzhen Water Group, Shenzhen 518031, China)

Abstract: A simulation model for flow field in oxidation ditch with brushes and propellers was built using computational fluid dynamics. For the simulation of brushes, "two steps" method was used. The first step was to model the rotating brush. The second step was to model the whole ditch using results from the first step by using the UDF form. For the simulation of propellers, the notion of ideal eddy flow was introduced into the calculating field to reflect the drive power of submerged propellers. The two measures combined could create a complete simulation of the flow pattern of the ditch. Meanwhile , the theoretical calculation results coincided well with the measured results. Based on the simulation of flow field , the DO distribution was simulated using component transport model. The results indicated that DO was mainly distributed in the ditch 's upside , and the presence of DO in the bottom was mainly caused by the curve circulation. In the ditch , the dissolved oxygen distribution showed the imbalance and regularity in vertical , horizontal and longitudinal directions.

Key words: computational fluid dynamics; oxidation ditch; brush; submerged propeller; flow pattern analysis; DO distribution

实际运行中,如果氧化沟的功率配置不合理将 会导致能耗过大、污泥沉积、处理效率下降等问题, 氧化沟低能耗的优点往往会因为上述原因而变成其 致命缺点。另一方面,氧化沟脱氮除磷的效果得益 于氧化沟中独特的厌氧/好氧分区,但厌氧/好氧分 区与转刷布置以及流态分布密切相关,这样给以氧 化沟为对象进行的生化模拟带来困难,尤其是实现 氧化沟生化模拟所需确定的串联反应器数目、厌氧 和缺氧状态比例难以定量确定,给研究结果带来较 大误差^[12]。因此,通过建立适于氧化沟内水流运 动和沟内 DO 输移扩散的三维数学模型,模拟氧化 沟水流流速、水气界面传输以及 DO 浓度的分布情 况成为氧化沟水力学性能的研究热点。

1 模型建立

www. watergasheat. com

本研究中氧化沟计算涉及到连续性方程、动量 守恒的 Navier-Stokes 方程、湍动能和耗散率方程。

1.1 实际模拟对象氧化沟介绍

深圳某污水处理厂二期工程共设4座T型氧化 沟。该污水处理厂的氧化沟目前采用六阶段反硝化 运行模式。在好氧时段,转刷和水下搅拌机同时运 行,控制池内溶解氧浓度为0.5~2.0 mg/L;在缺氧 时段,水下搅拌机运行、转刷停止运行;在沉淀时段, 转刷和水下搅拌机均停止运行。根据设计,每座氧 化沟处理污水量平均为6.25×10⁴m³/d,氧化沟单 槽净宽为10.15 m(转刷轴长为9 m),每沟两槽净 宽共为20.30 m,有效净池长为115.0 m,每座氧化 沟总宽为62.25 m。转刷为引进设备,轴长为9.0 m、直径为1000 mm、转速为72 r/min、浸没深度为 250 mm。

1.2 曝气转刷模拟实现

该污水处理厂正常开启时边沟有十台转刷、中 沟有八台转刷,每台转刷的长度为9m,转刷叶片的 宽度为10 cm,两组叶片之间的间隔为8 cm,每组转 刷有56 组叶片,每组有12 片叶片,一条氧化沟一共 有6700多片叶片,如果不经过简化,采用两相流来 模拟真实转刷,由于网格数目庞大,收敛将会十分困 难,可能要花上数年甚至更长的时间才能够计算收 敛^[3]。

本研究中对于转刷进行简化模拟,首先获得叶 片转动形成的流场推动函数,再将整个推进效果复 制到整个流场区域。参考国外的研究经验,采用 "两步法"来实现模拟:首先计算出小型氧化沟模型 (仅含一组叶片)的模拟情况,然后将计算结果"复制"到大流场计算^[3,4]。

关于小型氧化沟模型的模拟,也就是两步法的 第一步,对于转刷的模拟起着十分重要的作用。图 1 是需要模拟的小型叶片转刷系统,由于只有浸入 水下面的叶片才会对氧化沟内的水流产生推进作 用,故只需要对浸没的部分进行模拟。



图 1 GAMBIT 中浸入水下的部分转刷叶片建模 Fig. 1 Meshing of brush submerged under water in GAMBIT

在研究中 ,考虑对称原因 ,仅仅只对相邻两组叶 片和其中间区域构成的部分进行模拟,模型里面选 取了两个相邻的转刷叶片,由于对称性,两个相邻的 叶片只取了一半的厚度。叶片在沟内以一定的速度 转动 不断地推动污水运动 建立网格的时候将网格 分为两部分,一部分是包罗叶片的旋转流体区域,另 外一个是流场内其他的静止区域。对于转刷的转动 采用 Moving Referance Frame(MRF) 模型,包罗叶片 的半圆柱体区域以一定的速度旋转,叶片设置为与 包罗其的旋转流体区域一起旋转且相对速度为零, 通过上述设置来模拟转刷的效果;模型内的其他部 分设置为静止区域,能量由运动区域传递到整个流 场。计算收敛后 将转刷运动而造成的流场速度分 布通过函数的方式复制出来。小型系统边界设定如 下:①自由水面及壁面设置成对称边界条件,用来模 拟表示许多组的转刷; ②进出口设置成压力入口及 出口 相对压强取零;③池底设置成壁面;④转刷设 置成壁面 随着旋转体一起以相对为零的速度旋转; ⑤小体积材料选择为水,选择 MRF 模型,旋转速度 按照实际情况设置。

从小型转刷叶片模型计算的流场可知,转刷的 转动对水流起到了推流作用,在转刷的下游表面流 体获得了较高流速,在能量逐步向下扩散的过程中, 速度慢慢降低。此外由于卷吸作用,转刷上游靠近 转刷的部位也获得了一定流速,这一切都是符合转 刷作用原理的,这在某种意义上表明了模拟的准确 性。

图 2、3 为转刷叶片浸没部分"槽面"在 X、Y 方 向流场的速度分布函数。

• 105 •



Fig. 3 Approximation of *Y* velocity at 72 r/min and 30 cm submergence

由于小型系统模拟过程采用单相流及模型简化 与边界条件设置等原因,将此函数代入实际全尺寸 氧化沟模型时,模拟所得水流速度一般会高出实测 值,需对函数进行修正,根据已往研究经验^[4],本研 究中结合流速实测值,对函数采用线性递减修正。

1.3 水下推进器模拟实现

理想推进器理论不考虑螺旋桨引起的水流旋转 运动 将螺旋桨看作是只向前推水以获得推力的推 进器 ,并假设:①水为不可压缩的理想流体;②推进 器是轴向尺度为零的作用盘 ,水可自由通过 ,并可吸 收外来功率推水前进;③在盘面上水流速度和压力 均匀分布。

本研究中,水下推进器虽通过桨叶的旋转运动 来吸收主机功率,但其螺旋桨引起的水流旋转运动 对整个单池的影响只是局部的。水下推进器的主要 作用就是通过大直径桨叶的转动使推进器所在的单 池主沟段面上产生较大压力差,这一压力差就是推 动液体的主要动力,也就是说水下推进器的主要功 耗是在于形成轴向速度,这与理想推进器的定义非 常类似,因此本次模拟中,在不影响单池整体流态的 情况下,把水下推进器简化为理想推进器。在实际 模拟过程中,将推进器所在盘面的边界条件设置为 FAN 或压力出入口,在控制面板里输入计算所得压 力差和其他条件,就可实现对推进器的简化模拟。

1.4 全尺寸氧化沟计算域与边界条件

全尺寸氧化沟计算模型较为复杂,首先在 CAD 里面生成模型,然后将模型导入 CFD 网格生成软件 GAMBIT 并划分网格,设定边界条件。

本研究以1[#]沟为样本,对边沟曝气过程流态进 行模拟。所计算的氧化沟单沟容积约为13707 m³、 单沟宽为20.3 m、长度为115 m、有效水深为5.8 m。边沟有六台转刷和四台推进器。

由于三沟式氧化沟进水方式复杂,边沟和中沟 交替进水,水位处于变化之中,而且进出口流速会对 模拟造成影响。但进水却是分时段进水,为简化模 拟忽略了进出水口的模拟,国内外类似的研究表明 这样的简化是可以接受的^[4,5]。图4、5 是 GAMBIT 中建立氧化沟三维模型后动力设备的网格划分情 况。可知,经过简化,转刷的作用已由一个具有速度 函数输入功能的浸没槽面代替,而推进器已简化为 一个压力跃升的面,两者的结合可对氧化沟动力系 统作出一个完整的模拟。



图 4 氧化沟动力设备转刷和推进器部分生成的网格 (六台转刷、六台推进器)

Fig. 4 Meshing of power equipment in oxidation ditch (six brushes and six submerged propellers)



图 5 GAMBIT 生成氧化沟模型整体网格

Fig. 5 Meshing of whole ditch in GAMBIT 经过分块网格划分,生成了约170万个网格。 以下是在 FLUENT 中的边界条件设置:①模型选用 标准 K-Epsilon 方程,基于压力 稳态计算;②材料为 水,其密度、黏度采用缺省值,自由水面设置成对称

• 106 •

第30卷 第9期

边界条件;③转刷设置为速度入口, 导入小型系统中 得到速度函数;④推进器定义为 FAN, 运用 FLUENT 里面的压力出入口(无限薄面则设为 FAN 面)边界 条件来模拟推进器的作用;⑤氧化沟壁面、池底均设 置成壁面,壁面的粗糙度系数根据实际情况设定。

1.5 溶解氧扩散分布模拟实现

www. watergasheat. com

在流态模型建立的基础上,采用组分输送模型 来模拟氧化沟内溶解氧的输送过程^[4],基本思路 是:在流场计算的基础上,以速度入口作为充氧区, 水流经过此断面在获得速度的同时完成充氧过程, 计算过程不考虑气液两相的传质,也不考虑涉及到 生物耗氧的模拟计算,仅仅考虑富含溶解氧的水流 在氧化沟内的混合流动过程,由于实际氧化沟溶解 氧场的数据无法获得,因此模拟没有得到验证,且模 拟所得结果并不是真实氧化沟内溶解氧的浓度值, 仅仅是氧化沟内溶解氧的分布状况。

2 结果与讨论

2.1 流场模拟结果

采用上述模拟简化方法、模拟得 1[#]沟边沟动力 机械配置情况下的流场状况。模拟计算表现出了较 好的收敛特性,速度与湍动能、耗散方程均获得了理 想的收敛,残差值在 10⁻⁵以下,连续性方程的收敛 相对较差,但也降到了 10⁻⁴以下,计算的收敛结果 可以接受。模拟结果表明,氧化沟上层水流模拟值 与实测值吻合度较高(见图 6),平均流速的模拟十 分接近,但氧化沟底部模拟则误差较大(见图 7),这 主要是由于实际氧化沟在运行过程中积泥所致。综 合考虑模型简化、网格划分、边界条件设置、测量误 差以及实际动力设备功率、设备投入的功率和氧化 沟内活性污泥性质等因素的影响,可以认为该研究 的计算结果与实测数据之间的吻合程度可以接受, 数学模型中所做的假设基本合理。





b. 模拟值

图 7 边沟曝气水面以下 4.8 m 流速实测值与模拟值 Fig. 7 Measured and simulated values of velocity at 4.8 m under water surface

2.2 溶解氧分布模拟结果

六台转刷开启方式下,采用组分传输模型中有 限反应速率方程计算所得壁面附近溶解氧的分布。 模拟结果显示,沟内溶解氧的分布呈现不均匀现象, 溶解氧主要集中在氧化沟的上部,底部有较大部分 处于缺氧或者厌氧状态,然而在弯道的出口处一段 范围内,氧化沟的底部也出现了较高的溶解氧分布, 这可能与弯道的水流特性相关,弯道环流的存在使 得上、下部水流之间存在一个相互交换作用,这种作 用恰好可以解释弯道出口处底部溶解氧的存在。

氧化沟内不同深度处溶解氧的分布趋势(见图 8)表明,氧化沟表层的溶解氧浓度较高,在靠近转 刷的下游有较高的浓度分布,在弯道的出口处发现 溶解氧浓度较低。



图 8 氧化沟不同深度断面处的 DO 浓度分布等值线 Fig. 8 Contours of mass fraction of dissolved oxygen under different depths in oxidation ditch

随着氧化沟深度的进一步加深,溶解氧浓度呈 逐渐降低趋势,水面以下2.4 m处溶解氧的浓度大 大降低,较高浓度的溶氧区出现在转刷挡板的下游, 说明表层含氧水流经挡板的导流作用向氧化沟沟体 内中下层扩散,水面以下3.6、4.8 m所代表的氧化

• 107 •

沟底部溶解氧浓度进一步降低,溶解氧区域分布主要集中在弯道出口以及靠近中心导流墙的壁面处, 这和表层水流在弯道出口的低溶解氧浓度是互补的,进一步说明深沟型氧化沟底部溶解氧是由于氧 化沟弯道的二次环流引起的。

图9表现了六台转刷开启方式下不同横坐标断 面处溶解氧的分布。在Y=2 m处,溶解氧主要集 中在上部较浅的表层; 在Y=4、6 m 处溶解氧逐步向 底部扩散,溶解氧进一步充满整个断面,在Y=6 m 弯道处溶解氧出现较高浓度; Y=8、10 m 处弯道环 流的作用使得氧化沟内溶解氧进一步均布。



图 9 氧化沟不同横坐标断面处的 DO 浓度分布等值线 Fig. 9 Contours of mass fraction of dissolved oxygen under different Y coordinates in oxidation ditch

研究氧化沟内溶解氧分布,最初的目的是为了 划分氧化沟生化模拟的反应段,溶解氧浓度高的地 方可以认定为好氧反应区,低溶解氧值的区域可以 看成是缺氧或者厌氧区域来模拟。模拟结果表明, 将氧化沟看成完全混合的 CSTR 反应器来模拟是不 符合实际的,以距离转刷的位置来确定反应器反应 段的划分是很粗糙的,可以考虑将氧化沟的底部作 为缺氧反应段、上部作为好氧反应段。

3 结论

 基于计算流体力学 K - ε 紊流模型,采用 "两步法",先计算出转刷叶片转动所造成的推流函 数,然后以自定义函数的形式将叶片造成的流场扩 展到整个转刷所在位置,可以实现对转刷推流作用 的模拟。基于船舶推进理论,将推进器简化为理想 推进器,可以实现对推进器的推流作用模拟。两者 结合可以对整个氧化沟的真实流态情况作出完整的 模拟,实测值和模拟值较为吻合。

② 氧化沟内溶解氧的分布呈现纵向、横向、垂向分布的不均匀性,具体表现在沟体内溶解氧浓度

上部高、下部低,靠近转刷的部位溶解氧浓度高、远 离转刷的部位溶解氧浓度低,在横断面的外侧溶解 氧浓度低、靠近中心墙的内部溶解氧浓度高,而底部 的溶解氧主要是由于弯道二次环流所造成。

③ 本研究在模型模拟方面由于采用了一些简化的思路,使得模拟结果出现了一些与实际差距较大的地方,尤其是溶解氧的简化模拟可能存在较大误差,在实际的反应器中,气、液两相的传质与微生物代谢的生物化学反应对溶解氧在氧化沟中的分布影响重大,由于本次模拟仅仅是探讨了溶解氧在氧化沟内由于混合流动所形成的浓度分布情况,因而没有进行实测数据的验证工作。

参考文献:

- [1] 刘广立 种云霄 ,樊青娟 ,等. 氧化沟水力特性对处理 效果和能耗的影响[J]. 环境科学 2006 27(11):2323 -2326.
- [2] 杨跃 涨金松 刘礼祥. 三沟式氧化沟工艺数学模拟的 反应器构建方法[J]. 中国给水排水 2010 26(7):46 -49.
- [3] 罗麟,李伟民,邓荣森,等.一体化氧化沟的三维流场 模拟与分析[J].中国给水排水,2003,19(12):15-18.
- [4] Pawe G. CFD Modelling of an Oxidation Ditch [D]. Cranfield: Cranfield University 2007.
- [5] Yang Y ,Wu Y Y ,Yang X *et al.* Flow field prediction in full-scale Carrousel oxidation ditch by using computational fluid dynamics [J]. Water Sci Technol 2010 62(2):256 -265.



作者简介: 曾祥专(1984 –), 男, 湖南常德人, 硕士, 工程师, 研究方向为污水厂运行优 化管理、恶臭污染防治、污泥处理与处置。 E – mail: zengxiangzhuan@126. com 收稿日期: 2013 – 12 – 14

• 108 •