

深水型表面曝气机的模拟计算与构型比较

施慧明 刘艳臣 施汉昌

(清华大学环境科学与工程系,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084)

王颖哲 王淦

(安徽国祯环保节能科技股份有限公司,合肥 230088)

摘要 为了加深氧化沟深度、减少其占地面积、节省污水厂建设投资,研究开发深水型表面曝气机成为氧化沟工艺的一个重要课题。由于上述原因,应用流体力学计算软件 Fluent 对 3 种深水型曝气机叶轮的构型进行了模拟计算,并从搅拌深度、推流效果和所需功率等方面对 3 种叶轮构型进行了比较。又以小试实验进行了初步的验证,证明模拟计算的结果是可靠的。流体力学数值模拟由于其简单易行、成本低、周期短等特点,作为曝气机设计研究的辅助工具可以发挥作用。

关键词 深水型表曝机 氧化沟 流体力学模拟计算

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2008)02-0154-06

CFD simulation and performance comparison of surface aerator for deep aeration

Shi Huiming Liu Yanchen Shi Hanchang

(State Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution, Department of Environmental Science and Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084)

Wang Yingzhe Wang Gan

(Anhui Guozhen Environmental Protection and Energy Conservation Technology Co. Ltd., Hefei 230088)

Abstract The research and development of deep aeration by using down-umbrella surface aerator are important for reducing investment and land occupation of the construction of wastewater treatment plants. This paper presents the numerical simulation of 3 type aerators with different structure by using CFD software. The stirring effects and power efficiency of each type aerator are analyzed and compared between the 3 type aerators. Experiment in small tank was carried out to confirm the CFD simulation.

Key words surface aerator for deep aeration; oxidation ditch; CFD

氧化沟是一种沟渠形的活性污泥法工艺,基本特征是污水和活性污泥的混合液在曝气机的推动下在曝气池中不停地循环流动,通过好氧生物反应将有机污染物降解。由于其运行成本低,构造简单,易于维护管理,出水水质好,耐冲击负荷,运行稳定,并可脱氮除磷^[1]等特点,而被广泛应用于各种污水处理厂。氧化沟工艺的缺点是池浅,占地面积大。如能增加氧化沟深度,就可以减少其占地面积,节约污水处理厂投资及运行成本。

加深氧化沟必须要保证其反应效率,即使得氧化沟底层的流体也能够得到充分的混合和曝气,并保持一定的流速防止沉淀。这些功能必须由曝气机来实现,因此改良曝气设备是发展深水型氧化沟的关键。

曝气设备有鼓风曝气设备和表面曝气设备,表

面曝气设备又有曝气转刷、曝气转盘、立式倒伞表面曝气机等。其中立式倒伞表曝机单机在氧化沟中应用得较为广泛,具有结构简单,易于制造安装,效率高特点,在不使用任何辅助推进器的情况下有效深度即可达到 5 m 以上。而且功率大,有很强的输入动力调节能力,可以适应不同的水质水量输入,达到节能降耗的目的。对于立式倒伞表曝机的研究与改良,国内外均有报道^[2-4]。

深水型表面曝气机以立式倒伞表面曝气机为基础开发而成。基本原理是:上层为大型倒伞叶轮,在旋转过程中,水呈水幕状自叶片边缘甩出,裹进大量

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2004AA601060)

收稿日期:2006-12-16;修订日期:2007-09-06

作者简介:施慧明(1981~),女,硕士,主要研究方向:流体力学。

E-mail:scarbry@tsinghua.edu.cn

空气,不断更新液面。在上层叶轮下端,或者延长转轴方向增加第 2 个叶轮,或直接将大叶轮的部分叶片加以延长,可以搅动底层流体,增加污水的上下循环速度和水平流动速度,增进曝气机的充氧、搅拌和推流三大作用^[5]。

本次研究设计了 3 种不同结构形式的深水型表曝机,在制作模型进行中试之前,先进行了小试实验及数值模拟,以比较深水型表曝机与单叶轮的表曝机效果上的差别,以及各机型的推流、搅拌作用的优劣、功率的大小,为进一步的修改和优化提供依据。

1 模拟计算概述

计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 是流体力学研究除理论、实验之外的另一种主要手段。随着计算机性能与技术的提高、各种计算方法的发展以及商用 CFD 软件如 Fluent 的普及,各种流体介质甚至多相流在大范围流场、边界层内细节等的模拟计算方法均逐步走向成熟完善。CFD 在工程上的应用日益广泛,甚至可以代替一些实验。它可以缩短实验周期、节省人力物力,并且结果显示 (如流场显示) 不受测量手段的制约,从而带来经济效益,已经成为重要的辅助设计手段^[6]。以明渠、氧化沟为对象的流体力学数值模拟见于文献^[7~9]等。

另一方面,由于数值化的差分方程与微分方程的差别,边界条件的影响等原因,受到网格密度、计算精度的制约,CFD 的结果与理论分析 (如果能够求得解析解的话) 必定有误差,与实际的实验也不可能完全一致,因此,对于一种新的流场情况或新产品的的设计来说,模拟计算主要是作为一种参考。只要条件允许,实验的支持和验证是十分必要的。本计算采用 Fluent 软件及其前处理软件 Gambit,在普通 PC 机上进行。

2 前处理及计算方法

计算区域为基本型氧化沟,直沟段长 95 m,弯道为半径 7.5 m 的半圆,曝气机位于氧化沟一端弯道中心略偏下游处。使用前处理软件 Gambit 生成模型,曝气机叶片无厚度,固体部分不输出网格。自动生成非结构化网格 (四面体网格),在曝气机表面网格尺度为 0.08 m,在氧化沟内壁网格尺度为 1 m。各模型网格总数均在 50 万左右。

曝气机在氧化沟内的位置见图 1。各曝气机的

大叶轮直径 3 m。1[#]机为国祯公司设计 DSS-19Y 翼盘式复合叶轮曝气机,浸深 1.83 m,下端小叶轮半径 0.52 m,8 叶片与轴向及水平面均有夹角,转动时起到向上推流及调节流线的的作用;2[#]机为 DS380 双层倒伞曝气机,浸深 3.19 m,下端为十字形叶轮,叶片长 0.96 m,主要起推流作用;3[#]机为清华大学环境科学与工程系设计的四延长叶片曝气机,浸深 2.0 m,将大叶轮的 4 个叶片加以延长,宽度为 0.16 m;4[#]机为 3 种深水型曝气机的上层大叶轮部分 (见图 2)。

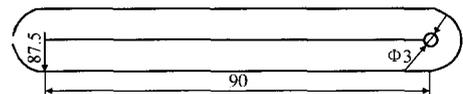


图 1 计算区域

Fig. 1 Simulation area

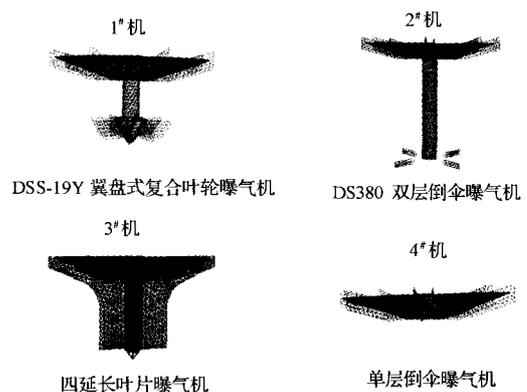


图 2 各种机型的模拟计算网格

Fig. 2 Grid generated on aerators

反应器内的流态模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,稳定模型、不可压、不考虑内能,控制方程组可写为:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

动量方程:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

式中: f_i 表示重力,密度 $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$,动力学粘性系数 $\nu = 0.001003 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$,湍流粘性系数 $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, u 表示速度, p 表示压力。

表示湍流能量和耗散率的 $k-\varepsilon$ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} k u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \varepsilon u_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{\rho} C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

其中: G_k 表示湍能产生项, $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$, 其余常数取作: $C_{1k} = 1.44$, $C_{2k} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

水的各项参数为软件默认值。设置参考压强为标准大气压, 体积力为重力。曝气机及其周边网格采用移动坐标系(MRF), 绕曝气机中轴以 60 r/min 的角速度转动。水面的设置为对称边条件。氧化沟内所有固壁均为无滑移固壁。初始化设置全流场速度及压强为 0。动量方程松弛因子为 0.3, 其他差分格式控制项均为默认值。收敛残差设为 10^{-3} , 各模型的计算均可在 3 000 步以内收敛。

3 计算流场显示

曝气机的性能指标主要有充氧能力、功率、动力效率、推动力和混合效率^[10]。其中充氧能力和动力效率可以通过实验手段来确定。推动力和混合效率指在氧化沟内流速达到不使活性污泥沉积的 0.3 m/s 时, 曝气机所推动的液体体积和曝气机所需功率, 反应了曝气机对氧化沟内流体的推动和搅拌作用。此二指标在仅有曝气机而没有相应的氧化沟时是难以用实验确定的。本部分即以流场显示来说明深水型表曝机在氧化沟内的推流和搅拌作用。

3.1 曝气机附近局部迹线

在垂直氧化沟方向过曝气机中心的截面(图3)上可以看到, 曝气机两侧形成了漩涡, 在沿氧化沟方向过曝气机中心的截面上, 曝气机外侧存在漩涡。并且由于漩涡的作用, 曝气机下方的流体产生较大的垂直速度。这有助于将气泡和水中的溶解氧带到底层。

因曝气机型号的不同, 漩涡的形状、涡量也有所不同。可以看出 4# 单层曝气机对底层流体的搅动作用较小, 曝气机正下方存在速度很小的区域; 双层曝气机对底层的作用较为明显, 尤其是 3# 曝气机, 在曝气机正下方不存在死区; 2# 机由于 2 个叶轮相距较远, 形成了多个漩涡。

3.2 平行于水面截面的流场

平行于水面的截面可以反映氧化沟内水流水平运动的整体趋势(图4)。在叶轮附近, 上层的流体被叶轮带动, 并沿着叶片向外抛射, 在氧化沟外侧形成较大的速度。由于氧化沟廊道之间隔板的导流作

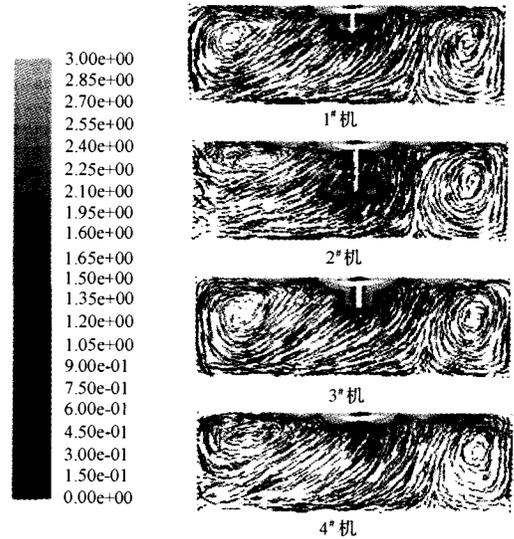


图3 过曝气机中心截面迹线

Fig.3 Path line on the vertical plane of aerator

用, 在下游廊道的内侧即隔板壁面附近, 也形成了一个高速区, 并延续到下游廊道的约 1/4 处, 此区域的大小和形状随机型的不同有所不同。下游廊道大部分区域速度在 0.5 ~ 0.6 m/s 左右。下层水流也被上层带动, 形成类似的趋势, 但流速有所减小, 约在 0.3 m/s 左右。随着与曝气机距离的远离, 上层的速度降至 0.4 m/s 左右, 而下层速度反而有所增加, 使得上下层速度比较均匀。

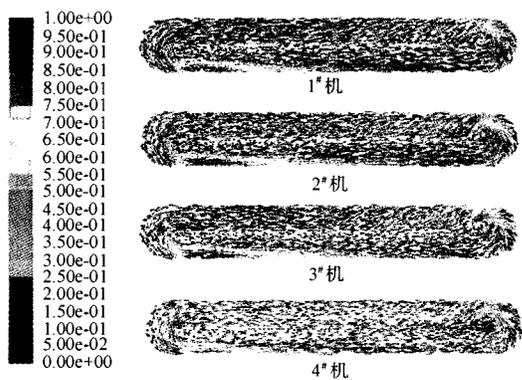


图4 水深 5 m 处截面的速度场

Fig.4 Velocity vector on the plane of 5 m deep

在氧化沟另一端的弯道处, 水流随着氧化沟的形状转弯, 弯道外侧速度很低, 为 0.3 m/s 以下。转到上游廊道之后, 在直道的外侧形成很大的速度, 大小随机型不同有所不同, 但是均在 0.8 m/s 以上。同时在廊道内侧形成了速度很低的死区。在上游廊

道内侧和外侧的速度逐渐变为均匀,但是总的趋势是外侧速度高,内侧速度低。整个上游廊道内,上下层速度也比较均匀。

3.3 氧化沟中截面速度大小分布

氧化沟的中截面理论上全场速度最低、也最均匀的截面。因此此截面上的速度大小最能够说明不同机型对于沟内流体的搅动及推流作用大小。

图 5 各小图的左侧为上游廊道,右侧为下游廊道。在上游廊道中,流速从外到内减小,内侧出现速度小于 0.3 m/s 的区域。外侧的最大速度随机型不同而不同,3#机较高为 0.6 m/s 左右,内侧速度也较大,仅在边缘速度低于 0.3 m/s。在下游廊道中,速度大小的分布趋势区别较大。单层的 4#机存在着速度随深度分层的现象,底层很大区域内速度低于 0.3 m/s。2#机的速度分布也是上大下小,但是低速的区域明显小得多。1#机和 3#机的趋势很相似,均是速度最低的区域出现在内侧中部而非底层。

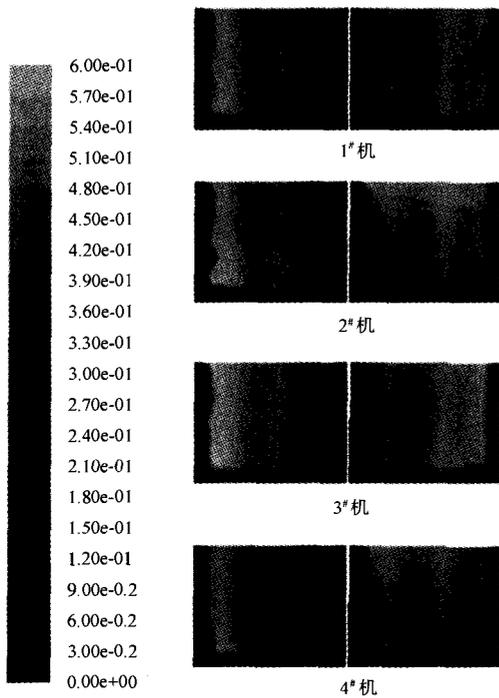


图 5 氧化沟中截面速度大小分布
Fig. 5 Velocity contour on vertical plane in middle of OD

下游廊道的速度分布更为重要,一方面因为下游的低速区域更大,另一方面因为在一般情况下,此类氧化沟内安装 2 个曝气机,因此上游会成为另一个曝气机的下游,受到较大影响。为了更清晰地看

到下游廊道各个区域的速度,将此截面平均分为 4 块,分别求出区域内的平均速度,并求出整个区域的平均速度,显示于图 6。按照氧化沟的技术要求,沟道内的平均速度应达到 0.3 m/s。4 种机型在整个中截面的平均速度分别为 0.27 m/s, 0.28 m/s, 0.3 m/s, 0.23 m/s, 3#机最高且达到要求。如果分别看 4 个区域的平均速度,则是 2#机的速度比较平均。

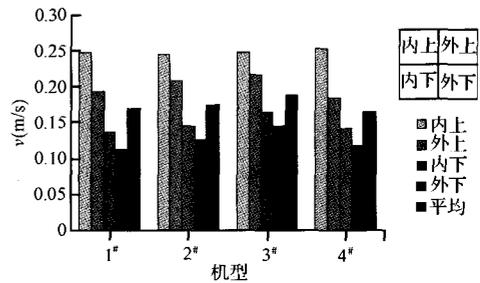


图 6 中截面区域平均速度
Fig. 6 Average velocity of 4 parts on middle plane

4 后处理

4.1 各型号曝气机的功率

依据模拟结果,计算了叶片转动引起的阻力所消耗的功率。计算方法:

$$P = v(F + \Gamma)$$

其中: v 为转速, F 为叶片到曝气机转轴的力矩, Γ 为叶轮表面剪切力引起的力矩。

$$F = \sum_{i=1}^n p_i S_i, \Gamma = \sum_{i=1}^n \tau_i S_i$$

式中: S_i 为节点 i 的面积微元, p_i 为该点压强(有正负), τ_i 为叶轮表面单位面积上的剪切力, τ_i 比 p_i 要小一个数量级左右。计算结果如表 1 所示。

表 1 各机型功率
Table 1 Output power

机 型	功率 (kW)	单层曝气机功率的倍数
1#机	84.8	1.08
2#机	82.9	1.056
3#机	95.14	1.21
4#机	78.5	1

此结果并非曝气机实际消耗的功率,仅为用于转动叶轮的功率,但是可以反应实际功率的比例关系。计算结果表明,3#机转动叶轮所需的功率最大,1#、2#机额外消耗的能量均在 10% 以内。

根据相似理论,表曝机的消耗功率正比于 $N^3 D^5 \rho^{[11]}$ 。

其中： N —为转速， D 为叶轮直径， ρ 表示水的密度。

由此，可以近似地推出不同转速下的消耗功率。

4.2 功率与效率的比较

以功率为横坐标，下游廊道中截面平均速度为纵坐标画出4种曝气机功率-中截面平均速度的关系，并作线形拟合(图7)。拟合的直线表示功率-推流效率的平均比例，在线以上的点说明其推流效率在平均水平之上，在线之下的点则反之。

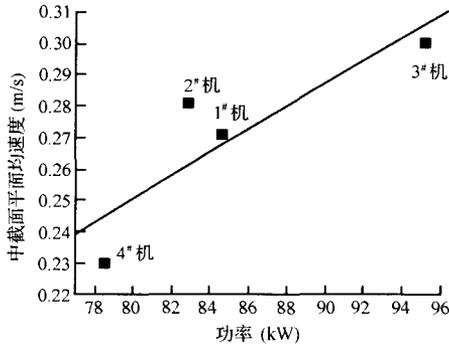


图7 功率-中截面平均速度关联
Fig. 7 Output power-average velocity

5 与小试实验的比较

5.1 小试实验

实验采用小试氧化沟，氧化沟设计尺寸按照实际氧化沟50:1的尺寸设计，长105 cm，宽30 cm，沟内有效水深40 cm。曝气机模型也按比例缩小(图8)。

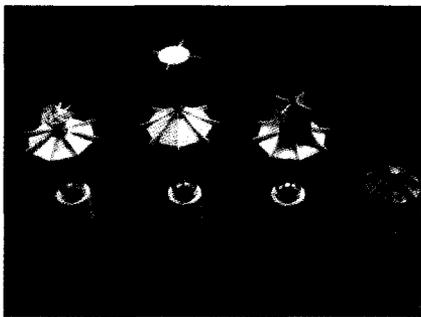


图8 小试曝气机模型
Fig. 8 Model of aerator in experiment

实验主要是以水中的气泡轨迹来反映某个截面的水流速度，通过激光面光源照射待测的液体截面，然后利用CCD镜头捕捉激光照亮平面的气泡运动轨迹，并利用计算机获得的连续的瞬间存储图片，根据不同的曝光时间，可以得到气泡不同长度的轨迹线(图9)，进而可以再利用专业的分析软件处理图片，计算获得测定平面的平均流速^[12]。

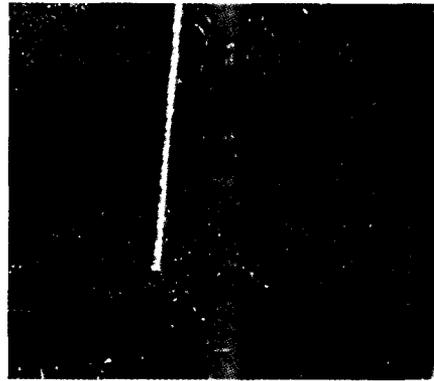


图9 气泡轨迹
Fig. 9 Trace of bubble

实验分别测定了4种不同曝气机分别在60、150、300和600 r/min的转速条件下在10个不同位置的转速情况。测定平面的窗口大小为6 cm × 6 cm。10个位置分布为上游廊道中间靠近和远离曝气机处(上、下)、下游廊道中间靠近和远离曝气机处(上、下)、氧化沟弯道曝气机下方位置等。

5.2 对小试实验的计算和结果比较

对于小试也进行了同样尺度、条件的数值模拟，模拟的前处理方法、计算模式及收敛情况与对于真实大小氧化沟及曝气机的模拟类似，参见第3部分。

模拟计算的结果，从速度矢量和迹线来看，与实验现象有相近。选取了一些位置，经后处理算出该位置的平均水平和垂直速度，与实验得到的平均速度数据进行了量化的比较。上游沟道中间靠近曝气机位置，转速为300 r/min(见图10)。

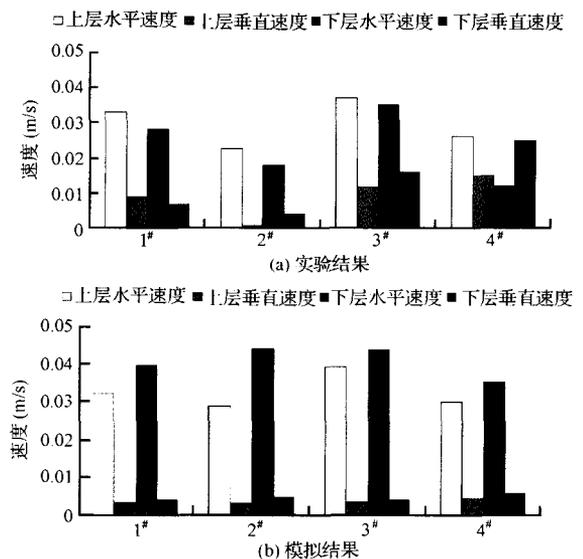


图10 小试实验与计算的对比
Fig. 10 Comparison between experiment and simulation

在此位置,上层水平速度实验和计算基本一致,计算结果略高;下层水平速度高于实验结果 30% 左右,计算的结果显示下层速度高于上层,与实验相反;上下层垂直速度各机型略有出入,3[#]、4[#] 机计算结果略低。

对于得到实验平均速度的 10 个窗口平面,均可做类似的对比。在大部分窗口内,二者具有较高的相似性。

6 结 论

由小试实验可以看出,数值模拟和实验结果在很大程度上相似,因此对真实大小模型的数值模拟有一定的可靠性,可以作为实际曝气机设计研究的参考。

从对于氧化沟内深水型表曝机的数值模拟,得出以下结论:(1)就搅动和推流效果来说,3[#] 机最好,2[#] 机对下层流体的推流作用较好,使得整个氧化沟内的速度比较平均;(2)就叶轮转动的输出功率来说,1[#]、2[#] 机较小,3[#] 机较大;(3)由功率-中截面平均速度关联来看,效率由高到低的顺序是 2[#]、1[#]、3[#]。

1[#] 即 DSS-19Y 翼盘式复合叶轮曝气机,在单层表曝机的下端增加了一个倾斜叶片的八叶片小叶轮,小叶轮转动时对周围流体有提升和改善流线的的作用。1[#] 机设计虽然精巧,但是其搅动和推流效果并不出众,因为小叶轮输出功率小;且离大叶轮近,难以作用到底层流体。因为小叶轮是八叶片的,输出功率大于 2[#],效率也没有 2[#] 高。

2[#] 即 DS380 双层倒伞曝气机,在 3 m 深处增加了一个十字叶轮,对氧化沟内下层流体起到了良好的搅拌作用。而且功率消耗小,效率较高。

3[#] 即四延长叶片曝气机,延长的叶片达到 2 m 深,也可以对中下层流体起到良好的搅拌推流作用。

相比于 1[#] 和 2[#],它构型更简单,输出功率更大。效率没有 1[#]、2[#] 高,但是在单层表曝机之上。

表曝机的充氧能力、输入功率的大小还需由实验进一步确定。曝气机型号和氧化沟形状的配合、各种型号曝气机功率改变对曝气效果的影响等问题,还有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] 高俊发,王社平. 污水处理场工艺设计手册. 北京:化学工业出版社,2003. 230 ~ 235
- [2] 张鑫衍. 新颖复合叶轮倒伞表曝机及其应用. 工程应用, 2005, (12): 22 ~ 24
- [3] 章建波,宋小文,胡树根. 曝气机的创新设计. 机械制造, 2004, (3): 46 ~ 48
- [4] Beatriz Cancino, Pedro Roth, Manfred Reub. Design of high efficiency surface aerators. Aquacultural Engineering, 2004, 31: 83 ~ 121
- [5] 安徽国祯环保节能科技股份有限公司. DS 倒伞型表面曝气机. 中国环保业, 2004, (12): 44 ~ 45
- [6] 李勇,安亦然,等. 介绍计算流体力学通用软件——Fluent. 水动力学研究与进展, 2001, (6): 254 ~ 258
- [7] Stamou A. Modeling of oxidation ditches using an open channel flow 1D advection -dispersion equation and ASMI process description. Wat. Sci. Tech., 1997, 36(5): 269 ~ 276
- [8] Fonade C., et al. CFD modeling of a two-phase jet aerator under influence of a cross flow. Wat. Res., 2000, 34 (13): 3460 ~ 3472
- [9] 张宗才,张新申,张铭让. 氧化沟水力学分析及流场计算. 中国皮革, 2004, 33(11): 22 ~ 25
- [10] 陈吕军,钱易. 氧化沟水平轴曝气机性能指标研究. 中国给水排水, 1993, 9(5): 12 ~ 16
- [11] 许葆玖,龙腾锐. 当代给水与废水处理原理. 北京:高等教育出版社, 2000. 189 ~ 196
- [12] 范茏,陈大发,王志强,等. Carrousel 氧化沟的流动特性研究. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(12): 36 ~ 41