排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 2 月 Feb. 2018 | 第 36 卷 第 2 期 Vol. 36 No. 2

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0101



明加意

明加意[1*]，董亮[1,2]，刘厚林[1]，赵宇琪[1]，姚瀚[3]

（1.江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013；2.过程装备与控制工程四川省高校重点实验室，四川 自贡 643000；3.沈阳鼓风机集团石化泵有限公司，辽宁 沈阳 110869）

摘要：为了探究直叶片和倾斜叶片对倒伞曝气机性能的影响，获得不同叶片形状倒伞曝气机驱动下氧化沟的流场特性，以 1 个符合几何相似、运动相似和动力相似理论的缩比双倒伞曝气机驱动下的氧化沟模型为研究对象，采用 VOF 自由液面模型与标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型相结合的方法，对不同叶片形状的倒伞曝气机驱动下的氧化沟内部流动进行了三维数值模拟. 结果表明，2 类倒伞曝气机消耗的功率相近，叶片形状的不同影响着倒伞曝气机的充氧能力和推流能力：直叶片倒伞曝气机驱动下，氧化沟过轴截面的气相体积分数较倾斜叶片大 0.66%；直叶片倒伞曝气机对表层水域的推动能力较强，而倾斜叶片倒伞曝气机则对底层流体有较强的推动能力，沟底死水区相较于直叶片倒伞曝气机减小 0.70%，且倒伞曝气机附近的流体能以较快的速度流向壁面；在双倒伞曝气机驱动下，氧化沟内的流动呈对称分布，下游倒伞曝气机能够明显提升和加速来流速度.

关键词：倒伞曝气机；氧化沟；叶片形状；VOF；数值模拟

中图分类号：X703.3；S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)02-0104-07

明加意，董亮，刘厚林，等. 叶片形状对倒伞曝气机性能的影响[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(2)：104-110.

MING Jiayi，DONG Liang，LIU Houlin，et al. Influence of blade shape on performance in inverse umbrella aerator[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(2)：104-110.(in Chinese)

Influence of blade shape on performance in inverse umbrella aerator

MING Jiayi[1*]，*DONG Liang*[1,2]，*LIU Houlin*[1]，*ZHAO Yuqi*[1]，*YAO Han*[3]

(1. National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China；2. Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control，Zigong，Sichuan 643000，China；3. Shenyang Blower Group，Petrochemical Pump Co. Ltd.，Shenyang，Liaoning 110869，China)

Abstract：In order to study the effect of radial straight blade and leaned blade on the performance of inverse umbrella aerator and obtain the flow characteristic of an oxidation ditch driven by two inverse umbrella aerators with different kinds of blade shape，a lab scale oxidation ditch according with geometric similarity，kinematic similarity and dynamic similarity was taken as the research object. The volume of fluid (VOF) model was adopted and the standard $k-\varepsilon$ turbulence model was applied to close the governing equations. Through changing the blade shape of inverse umbrella aerator，three-dimensional numerical simulations were conducted. The results show that the power assumption of these two kinds of inverse umbrella aerators is much the same，the blade shape has a significant impact on

收稿日期：2016-05-09；**修回日期**：2016-09-13；**网络出版时间**：2018-01-09

网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180109.1105.006.html

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51309119)；浙江省重大科技专项重大工业项目(2014C01004-1)；过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金资助项目(GK201403)；江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016072-01)；江苏高校优势学科建设工程资助项目

第一作者简介：明加意(1988—)，男，湖北黄石人，硕士研究生(通信作者，747091492@qq.com)，主要从事流体机械的设计优化研究.

第二作者简介：董亮(1981—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，副研究员(dongliang@ujs.edu.cn)，主要从事离心泵 CFD 网格划分及内流场分析研究.

oxygenation capacity and plug-flow capacity on the inverse umbrella aerator. Under the drive of inverse umbrella aerator with radial straight blade, the gas volume fraction of the section crossing the driving shaft in the oxidation ditch is 0.66% higher than that in the oxidation ditch driven by the inverse umbrella aerator with leaned blade. While the inverse umbrella aerator with radial straight blade has a stronger ability to promote the fluid near the surface, the inverse umbrella aerator with leaned blade does better on driving fluid at the bottom of the ditch, with the dead water zone 0.70% less than that in the ditch driven by the inverse umbrella aerator with radial straight blade. The fluid stirred by the inverse umbrella aerator with leaned blade flows to the wall at a higher speed. The flow distribution of the oxidation ditch driven by two inverse umbrella aerators is symmetrical. The downstream inverse umbrella aerator has an ability to lift and accelerate the incoming flow.

Key words: inverse umbrella aerator; oxidation ditch; blade shape; VOF; numerical simulation

氧化沟又称连续循环反应池,是活性污泥法的1种改型,其曝气池呈封闭的沟渠型,故其在水力流态上不同于传统的活性污泥法,在中国城镇污水处理厂中受到广泛应用. 倒伞曝气机因结构简单、维修方便,常被用在卡鲁塞尔氧化沟中[1-2],起到曝气充氧和推流的作用,市面上倒伞曝气机的叶片形状没有统一的标准,常见的有径向直叶片和倾斜叶片2种,不同的叶片形状影响着水面气液混合程度及氧化沟内的流速分布,从而影响倒伞曝气机的性能.

国内外学者通常使用试验手段来测定曝气机的曝气充氧能力[3-6],而对于推流能力的预测则更多地采用数值模拟的方法[7-8]. FAN 等[9]对配备倒伞曝气机装置的1个缩小的卡鲁塞尔氧化沟进行三维数值模拟,研究氧化沟内的流场分布,并用 PDA 试验验证了模拟的可行性. 施慧明等[10]采用数值模拟和试验验证的手段对3种深水型曝气机进行了比较,得出下端为十字形叶轮的深水曝气机对下层流体推动作用强,推流效果好. 施清华[11]对全尺寸氧化沟进行数值模拟,获得了直道段的流速分布特征,并通过增设挡流板对氧化沟的结构进行优化.

目前在对氧化沟的数值模拟中,水面的边界条件一般设置成壁面或者对称面,没有考虑液面变化对氧化沟整体流场的影响. 文中将采用 VOF 自由液面模型[12-13]对倒伞曝气机驱动下的氧化沟进行三维数值模拟,通过分析氧化沟内测点流速的变化及池底死区率的大小来比较叶片形状对倒伞曝气机推流性能的影响,并通过气相体积分数定性地比较倒伞曝气机的充氧能力,以期为倒伞曝气机的选型和设计提供参考.

1 模型建立与方案设计

文中的模拟对象为1个缩小的双倒伞曝气机驱动下的氧化沟模型. 模型在满足几何相似、运动相似的基础上,选择能够表征自由液面变化的弗劳德准则作为其动力相似准则[14].

为了贴合实际工况,参照实际污水处理厂的卡鲁塞尔氧化沟,按 26.67∶1 的比例缩小,具体尺寸见表1. 表中,ϕ 为直径,h 为高度,n 为转速,s 为叶片数,L 为长度,W 为宽度.

表1 模型缩放前后尺寸对比

Tab.1 Dimension comparison before and after scaling

类型	倒伞曝气机				氧化沟		
	ϕ/mm	h/mm	n/(r·min^{-1})	s	L/mm	W/mm	h/mm
原型	4 000	1 305	33	6	53 000	14 000	4 150
模型	150	49	170	6	2 000	525	155

弗劳德相似准则

$$F_r = \frac{u_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{u_m}{\sqrt{g_p L_m}}, \tag{1}$$

式中:F_r 为弗劳德数;u 为流速;g 为重力加速度;L 为特征长度;p,m 为下标,分别代表原型和模型.

1.1 模型建立

运用 UG 三维造型软件建立计算模型,考虑气相对模拟结果的影响以及准确捕捉自由液面的位置,氧化沟总高 450 mm,其中初始气相高 295 mm,初始液相高 155 mm,倒伞曝气机浸没在液面下 6 mm 处,如图1所示.

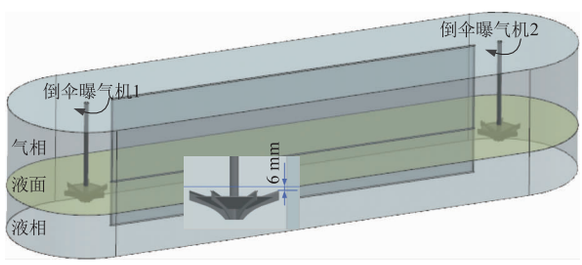
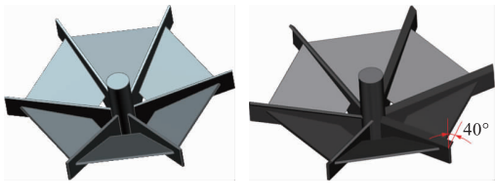


图1 计算模型

Fig.1 Computational model

1.2 对比方案

氧化沟内的流场变化与倒伞曝气机的叶片形状密切相关,因此倒伞曝气机的叶片形状是影响其性能的关键几何参数,为了解不同的叶片形状对氧化沟沟内流动的影响,文中以市面上常见的2类倒伞曝气机作为研究对象,其结构如图2所示. 方案1为径向直叶片;方案2为倾斜叶片:底部为径向直叶片,上部有40°折边.



(a) 径向直叶片 (b) 倾斜叶片

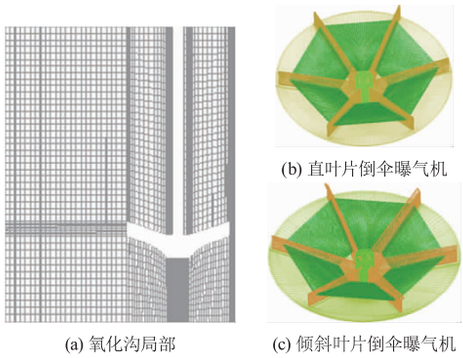
图2 不同叶片形状倒伞曝气机

Fig. 2 Inverse umbrella aerators with different blade shapes

2 数值计算设定

2.1 网格划分

将计算模型划分为氧化沟及倒伞曝气机2个计算域,利用ICEM对各部分计算域进行六面体网格划分,经计算,网格质量均在0.3以上,满足网格质量的要求. 以氧化沟某一截面速度的加权平均变化小于1%作为网格无关性检查的标准,并综合考虑计算精度和计算时间,最后选定计算域网格总数为350万. 图3为氧化沟和倒伞曝气机计算域的网格示意图.



(a) 氧化沟局部 (b) 直叶片倒伞曝气机 (c) 倾斜叶片倒伞曝气机

图3 计算网格

Fig. 3 Computational grid

2.2 数学模型及边界条件

用CFX软件对氧化沟进行流场计算,文中模拟的多相流模型选用VOF自由液面模型,湍流模型则采用标准 $k-\varepsilon$ 模型[15].

VOF方法通过求解动量方程和追踪通过计算网格每一相的体积分数来模拟互不掺混的两相或多相流动.

体积分数连续性方程

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\alpha_1=0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\alpha_2=0. \tag{3}$$

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{u})=0. \tag{4}$$

动量方程

$$\frac{\partial \rho\boldsymbol{u}}{\partial t}+(\rho\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=-\nabla p+\nabla\cdot[\mu(\nabla\boldsymbol{u}+\nabla\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}})]+\rho\boldsymbol{g}+\boldsymbol{F}, \tag{5}$$

式中:α_1 和 α_2 分别为水和空气的体积分数,$\alpha_1+\alpha_2=1$;ρ 为密度;μ 为动力黏度系数;t 为时间;$\boldsymbol{u}$ 为速度;∇ 为哈密顿算子;p 为静压强;$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度;$\boldsymbol{F}$ 为表面张力的等价体积力形式.

等物质属性参数是由控制体积中的分相决定的,其表达式分别为

$$\rho=\alpha_1\rho_1+\alpha_2\rho_2, \tag{6}$$

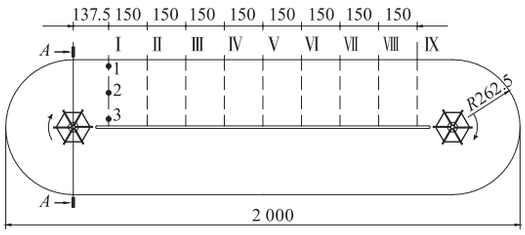
$$\mu=\alpha_1\mu_1+\alpha_2\mu_2, \tag{7}$$

式中:ρ_1 和 ρ_2 分别为水和空气的密度;μ_1 和 μ_2 分别为水和空气的动力黏度系数.

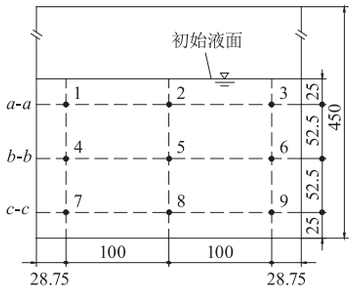
氧化沟设置成静止域,倒伞曝气机设置成旋转域,转速为170 r/min,氧化沟与倒伞曝气机的交界面设置成动静交界面;参考压力为101.325 kPa,重力加速度设为9.81 m/s^2,气液两相的表面张力系数为73.5 dyn/cm;氧化沟顶部敞开表面设置成“opening”,相对压力为0,气相体积分数为1,液相体积分数为0. 通过编制CEL表达式来控制氧化沟的初始有效水深(155 mm)及压力随水深的变化,收敛精度设置成10^{-4}.

2.3 监测位置

从水面看,2个倒伞曝气机均顺时针旋转. 测试断面及测点如图4所示. 氧化沟以及2个倒伞曝气机均呈对称布置,因此沟内流体的流动对称,测定一半即可得到整个氧化沟内流体的流动,分别在9个断面Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ,Ⅶ,Ⅷ,Ⅸ布置测点,每个断面共有9个测点;断面 $A-A$ 过倒伞曝气机1的轴心,且垂直于氧化沟长度方向;断面 $a-a$,$b-b$,$c-c$ 均垂直于倒伞曝气机传动轴,表示氧化沟的不同深度位置.



(a) 氧化沟及倒伞曝气机分布



(b) 监测点

图 4　氧化沟监测位置格

Fig. 4　Monitoring location of the oxidation ditch

3　计算结果与分析

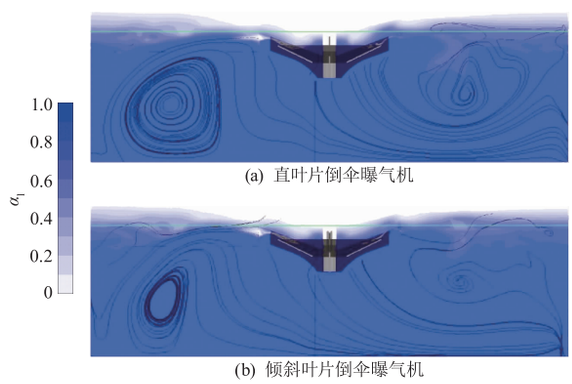
当转速为 170 r/min 且叶轮顶端浸没于水下 6 mm 时，直叶片倒伞曝气机和倾斜叶片倒伞曝气机消耗的功率分别为 2.514 W 和 2.531 W，相差 0.017 W，说明该运行工况下 2 类倒伞曝气机消耗的功率几乎相同.

3.1　充氧能力

在断面 $A-A$ 截取液相体积分数大于 5% 的区域，得到图 5 的液相体积分数 α_l 及速度流线图. 从图中可以看出，随着倒伞曝气机的旋转，位于倒伞曝气机中心位置的液体在离心力的作用下被甩出水面，造成中心部位液相体积分数降低，被甩出的液体在重力的作用下，在远处又重新落回水面，形成水幕；同时，水幕裹挟大量的空气进入氧化沟，使倒伞曝气机附近水域变成富氧区.

在 CFD - POST 中通过编写 CEL 表达式 [areaInt(air. Volume Fraction)@A - A/area()@A - A]，求得分析区域气相所占的体积分数：图 5a 中的气相体积分数为 11.10%，图 5b 中的气相体积分数为 10.44%. 双膜理论指出，气液两相接触面积越大越有利于氧的转移. 因此，可以定性地看出直叶片倒伞曝气机的充氧能力强于倾斜叶片倒伞曝气机，气相体积分数大 0.66%，这是由于倾斜叶片倒伞曝气机的叶片上部有折边，折边抑制了液体垂直流向大气的速度，降低了水跃的高度，减少了液体与空气间的相互接触的强度和时间，从而导致气相体积分数的减小.

从图 5 还能看出，由于倒伞曝气机的搅拌作用，在弯道出口截面（图中左侧）形成明显垂直于主流方向的螺旋运动. 受叶片折边的影响，倾斜叶片倒伞曝气机作用下形成的旋涡明显靠近壁面，这同样是由于叶片的折边引起的，折边在抑制液体甩向大气的同时起到了一定的导流作用，加速了液体的横向流动速度，使得液体以较快速度流向壁面.



(a) 直叶片倒伞曝气机

(b) 倾斜叶片倒伞曝气机

图 5　断面 $A-A$ 液相体积分数及速度流线

Fig. 5　Fluid volume fraction and velocity streamline in section $A-A$

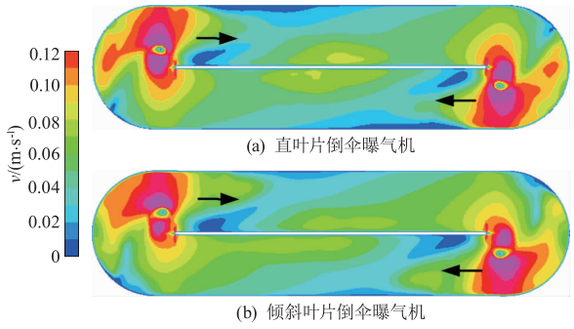
3.2　推流能力

3.2.1　死区率

在卡鲁塞尔氧化沟中，为了获得其独特的混合和处理效果，混合液必须以一定的流速在沟内循环流动. 一般认为，最低流速应为 0.15 m/s[16]，不发生沉积的平均流速应达到 0.3 ~ 0.5 m/s. 文中模拟对象为一缩小的氧化沟模型，根据弗劳德相似准则，换算得到的最低流速为 0.03 m/s. 死区率作为衡量淤泥沉积的标准，本例中取流速低于 0.03 m/s 区域所占的体积分数.

淤泥沉积发生在氧化沟底部，选取距离池底 5 mm 高的截面（截面 $c-c$ 以下 20 mm），截面速度云图如图 6 所示. 由于倒伞曝气机对称布置，速度云图也是对称分布，底层水域受液体黏性力的作用将呈现与近水面相似的速度分布，在 2 种不同叶片形状的倒伞曝气机驱动下，氧化沟的流速分布大致相仿，高速区均出现在倒伞曝气机旋转的出口区域，在出口挡板内壁及靠近氧化沟外壁附近有较明显的低速区，这是倒伞曝气机垂直水面做旋转运动的结果，当忽略液体的黏性摩擦力的时候，液体从倒伞曝气机流出的迹线是 1 条对数螺旋线，越靠近叶

片外缘流速越高，在考虑黏性力的情况下，出口水流会受到较大的阻力，在出口挡板内壁附近流速降低，甚至出现回流，氧化沟外壁因不在液体高速流轨迹线上，流速也相对较低，且直叶片倒伞曝气机驱动下的氧化沟外壁低速区明显大于倾斜叶片倒伞曝气机.



(a) 直叶片倒伞曝气机

(b) 倾斜叶片倒伞曝气机

图 6 氧化沟横截面速度云图

Fig. 6 Velocity contour in cross-section of oxidation ditch

为了更直观地得到各流速段所占的体积分数，利用 CFD－POST 里的 Iso Clip 功能，选取图 6 速度云图所在截面，通过控制流速的取值范围得到该速度区间所占的面积，然后将所得面积与截面总面积相除得出图 7 所示的死区率图，图中 δ 为速度占比.

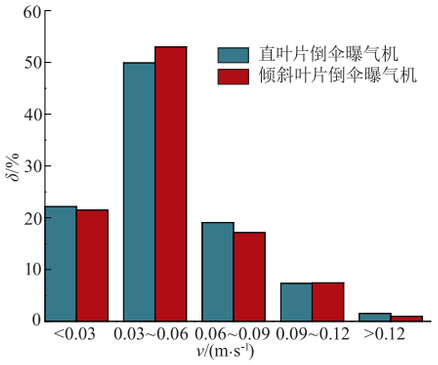


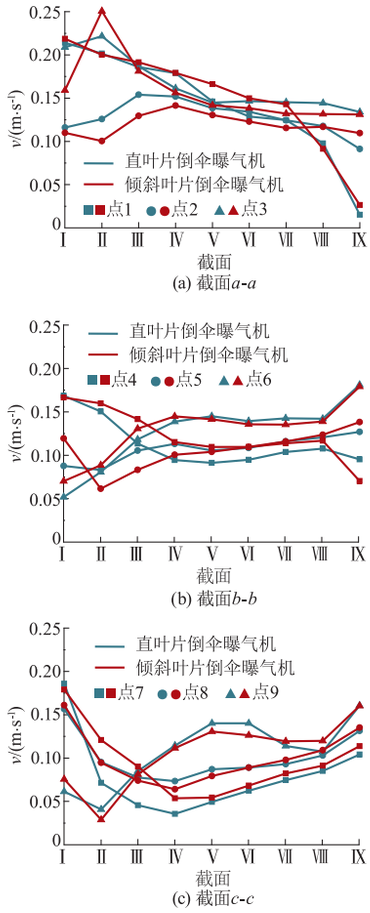
图 7 死区率

Fig. 7 Dead water zone rate

从图 7 可以看出流速主要集中在 0.03 ~ 0.06 m/s，占总体积分数的 50% 左右，小于 0.03 m/s 和 0.06 ~ 0.09 m/s 的区段占比均为 20% 左右，流速大于 0.12 m/s 的区段占比很少，仅为 1% 左右. 倾斜叶片倒伞曝气机驱动下的氧化沟的死水区少于直叶片倒伞曝气机，死水区减小 0.7%，且流速较多的集中在 0.03 ~ 0.06 m/s 的区段，比直叶片倒伞曝气机高出 3%，有利于沟内水流循环. 这说明折边叶片有利于倒伞曝气机的推流作用，通过减小液体与空气接触，将更多的能量用在推动液体流动上.

3.2.2 流场特性分析

对图 4 中各截面测点在软件中进行标记，得出各断面测点的流速，整体比较 2 类倒伞曝气机影响下的氧化沟不同深度的流场特性，如图 8 所示. 氧化沟内各对应点的流速呈现相同的变化趋势，第Ⅸ断面上点 1 的流速在 0.03 m/s 以下，其余横截面 $a-a$，$b-b$，$c-c$ 上的点的流速均在 0.03 m/s 以上.



(a) 截面a-a

(b) 截面b-b

(c) 截面c-c

图 8 测点流速分布图

Fig. 8 Distribution of flow velocity of monitoring points

在横截面 $a-a$ 上（距水面 25.0 mm），沟外壁点 1 的流速随着距离的增加逐渐减小，点 2 的流速变化不大，挡板附近点 3 的流速在倒伞曝气机出口变化剧烈，之后也逐渐减小，这是因为氧化沟外壁远离液体高速流轨迹线，近壁水流靠黏性力带动，当沟内流速降低时，流速也随之降低，挡板靠近出口的位置直接受到倒伞曝气机甩出的液体的影响，流态紊乱，测点流速存在突变；从整体上，直叶片倒伞曝气机上各点的流速大于倾斜叶片倒伞曝气机上测点的流速，这是因为横截面 $a-a$ 靠近水面，而直叶片倒伞曝气机对水面的搅动更加剧烈，受表层水流的影响，近水面的流速高于倾斜叶片倒伞曝气机.

在横截面 $b-b$ 上(距水面 77.5 mm),各点流速变化幅值较小,除点 4 的流速在第Ⅸ断面上有所下降外,点 5,6 的流速在氧化沟后半程均有小幅上升,且在第Ⅸ断面上升幅值较大,这是受倒伞曝气机 2 影响的结果,倒伞曝气机 2 对来流有提升加速的作用;同时,折边叶片对下层水流的影响也逐渐凸显,倾斜叶片倒伞曝气机使得横截面 $b-b$ 上点 6 的流速在第Ⅳ断面前,点 4,5 的流速在第Ⅳ断面后,大于直叶片倒伞曝气机的测点流速.

在横截面 $c-c$ 上(距沟底 25.0 mm),倾斜叶片倒伞曝气机驱动下点 7 的流速明显高于直叶片倒伞曝气机,最多高出 0.050 m/s,点 8,9 的流速变化相差不大,最大相差 0.014 m/s,说明倒伞曝气机叶片形状的不同对氧化沟底层液体流速也有较大影响;在下游倒伞曝气机 2 的提升作用下,除点 9 外,点 7,8 的流速在第Ⅳ断面后逐渐增加,最多提速 0.070 m/s.

4 结 论

通过改变倒伞曝气机的叶片形状,探索了 2 种常见叶片形状对倒伞曝气机性能及氧化沟流态的影响,所得结论如下:

1) 叶片形状影响着倒伞曝气机的充氧能力,直叶片倒伞曝气机的充氧能力要大于倾斜叶片倒伞曝气机,过驱动轴平面上的气相体积分数要比倾斜叶片高出 0.66%.

2) 倒伞曝气机对称布置使得氧化沟内的流场也呈对称分布,在出口挡板内壁及靠近氧化沟外壁附近有较明显的低速区,倾斜叶片倒伞曝气机的整体推流能力强于直叶片倒伞曝气机,相较于直叶片倒伞曝气机,倾斜叶片倒伞曝气机驱动下的氧化沟底部死水区降低 0.7%,位于 0.03 ~ 0.06 m/s 的流速段要高出 3.0%,将更有利于氧化沟内水流的循环流动.

3) 倒伞曝气机叶片形状对不同截面液体的推动能力不同,直叶片倒伞曝气机对截面 $a-a$ 流体的推动能力较强,而倾斜叶片倒伞曝气机则对截面 $b-b$,$c-c$ 流体有更强的推动能力;受下游倒伞曝气机提升能力的影响,低层液体流速在氧化沟直段后半程明显增加,最多提高 0.07 m/s.

参考文献(References)

[1] 邓荣森. 氧化沟污水处理理论与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010.

[2] 邓荣森,张新颖,王涛,等. 氧化沟工艺的技术经济评估[J]. 中国给水排水,2007,23(16):37 - 40.
DENG Rongsen, ZHANG Xinying, WANG Tao, et al. Technical and economic evaluation of oxidation ditch process[J]. China water and wastewater,2007,23(16):37 - 40. (in Chinese)

[3] THAKRE S B, BHUYAR L B, DESHMUKH S J. Oxidation ditch process using curved blade rotor as aerator [J]. International journal of environmental science & technology,2009,6(1):113 - 122.

[4] ADACHI T. Oxygen transfer and power consumption in an aeration system using mist and circulation flow generated by a rotating cone[J]. Chemical engineering science,2015,126:625 - 632.

[5] 王淦,彭永臻,侯红勋,等. C 型倒伞表面曝气机充氧性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(9):91 - 96.
WANG Gan, PENG Yongzheng, HOU Hongxun, et al. Study on oxygen mass-transfer characteristics of a turbine surface aerator with vertical shaft[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition),2013,41(9):91 - 96. (in Chinese)

[6] 潘哲,汪家权,范奎,等. 几种倒伞型表面曝气机的充氧性能[J]. 环境工程学报,2012,6(6):1936 - 1940.
PAN Zhe, WANG Jiaquan, FAN Kui, et al. Oxygenating properties of different inverted umbrella surface aerators [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2012,6(6):1936 - 1940. (in Chinese)

[7] 蒋成义,黄卫东,王淦,等. 氧化沟流场的计算流体力学数值模型研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(8):135 - 140.
JIANG Chengyi, HUANG Weidong, WANG Gan, et al. Numerical computation of flow fields in an oxidation ditch by computational fluid dynamics model[J]. Environmental science and technology,2010,33(8):135 - 140. (in Chinese)

[8] 许丹宇,张代钧,陈园,等. 卡鲁塞尔氧化沟液 - 固两相流动混合物模型与两相水力特性模拟[J]. 环境科学学报,2008,28(12):2622 - 2627.
XU Danyu, ZHANG Daijun, CHEN Yuan, et al. A fluid and soild two-phase flow model and modeling of a Carrousel oxidation ditch[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2008,28(12):2622 - 2627. (in Chinese)

[9] FAN L, XU N, WANG Z, et al. PDA experiments and CFD simulation of a lab-scale oxidation ditch with surface aerators[J]. Chemical engineering research and design,2010,88(1):23 - 33.

[10] 施慧明,刘艳臣,施汉昌,等. 深水型表面曝气机的模拟计算与构型比较[J]. 环境工程学报,2008,2(2):154 - 159.
SHI Huiming, LIU Yanchen, SHI Hanchang, et al. CFD simulation and performance comparison of surface aerator for deep aeration[J]. Chinese journal of environmental engineering,2008,2(2):154 - 159. (in Chinese)

[11] 施清华. 倒伞型曝气机驱动的氧化沟流场模拟及优化[D]. 长沙:湖南大学,2014.

[12] 魏文礼,白朝伟,郑艳,等. 90°弯道明渠横向环流的大涡模拟研究[J]. 应用力学学报,2015,32(3):466 - 472.
WEI Wenli, BAI Chaowei, ZHENG Yan, et al. Simulation of transverse circulation of 90° open channel using two phase gas - liquid large eddy model[J]. Chinese journal of applied mechanics,2015,32(3):466 - 472. (in Chinese)

[13] 杨锋苓,周慎杰,张翠勋. 无挡板搅拌槽内的自由表面湍流流场研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2015,47(2):179 - 183.
YANG Fengling, ZHOU Shenjie, ZHANG Cuixun. Free-surface turbulent flow in unbaffled stirred tanks[J]. Journal of Sichuan University(engineering science edition),2015,47(2):179 - 183. (in Chinese)

[14] 范茏,王志强,刘艳臣,等. 双表曝机 Carrousel 氧化沟流态的 PDA 实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2007,30(11):1454 - 1457.
FAN Long, WANG Zhiqiang, LIU Yanchen, et al. Experimental study of the flow in a Carrousel oxidation ditch equipped with two aerators by PDA[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science edition), 2007,30(11):1454 - 1457. (in Chinese)

[15] 丁荣,谈明高,刘厚林,等. 双流道泵偏工况不同叶轮外径时压力脉动[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(4):301 - 306.
DING Rong, TAN Minggao, LIU Houlin, et al. Effects of impeller diameter on pressure pulsation in a double-channel sewage pump under partial conditions[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016,34(4):301 - 306. (in Chinese)

[16] 陈斌,王炳祺,张华,等. 推流器布置对氧化沟流场特性的影响[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(3):227 - 231.
CHEN Bin, WANG Binqi, ZHANG Hua, et al. Effects of propeller layout position on flow characteristics in oxidation ditch[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2016,34(3):227 - 231. (in Chinese)

(责任编辑 盛杰)

(上接第 97 页)

XIA Yong, WANG Chunlin, YANG Xiaoyong, et al. [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(6):483 - 489. (in Chinese)

[8] 代翠,董亮,孔繁余,等. 泵作透平振动噪声机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 114 - 119.
DAI Cui, DONG Liang, KONG Fangyu, et al. Mechanism analysis of vibration and noise for centrifugal pump working as turbine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15):114 - 119. (in Chinese)

[9] 夏书强. 气液两相介质下液力透平基本方程和换算关系曲线的研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2013.

[10] 黄思, 陈宇, 宿向辉. 离心泵作水力透平起动过程的非定常流场模拟计算[J]. 水泵技术, 2015(5):25 - 30.
HUANG Si, CHEN Yu, SU Xianghui. Unsteady flow field simulation of centrifugal pump for starting process of hydraulic turbine[J]. Pump technology, 2015(5):25 - 30. (in Chinese)

[11] XIAO Huahua, MAO Zhanli, AN Weiguang, et al. Experimental and LES investigation of flame propagation in a hydrogen/air mixture in a combustion vessel[J]. Chinese science bulletin,2014(20):2496 - 2504.

[12] MAJIDI K. Numberical study of unsteady flow in a centrifugal pump [J]. Journal of turbomachinery, 2005, 127(2):363 - 371.

(责任编辑 盛杰)