

网络出版时间:2014-01-02 15:56

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.02.045

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.02.045.html>

# 氧化沟推流转轮半径对水流回流区 长度影响的数值模拟

刘玉玲, 吕 彬, 魏文礼

(西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

**[摘 要]** **【目的】**研究氧化沟推流转轮半径对氧化沟内流场回流长度的影响,为氧化沟工艺设计提供理论依据。**【方法】**采用气液两相流混合模型,并选取 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型封闭两相流时均方程,对氧化沟水力特性进行三维数值模拟,使用压力隐式算子分裂(Pressure-Implicit with Splitting of Operators, PISO)算法对速度与压力耦合进行求解,并采用 VOF (Volume of Fluid)法对自由水面进行模拟。**【结果】**数值模拟得到了氧化沟推流转轮半径与水流回流区长度的关系表达式,表明回流区长度和直道段长度之比与叶轮半径和小弯道半径之比呈直线关系,并通过量纲分析法对其进行了进一步验证。**【结论】**氧化沟水下推流转轮是水流运动的最主要动力来源,转轮半径的大小对沟道内水流的流速以及流场结构有重要影响。

**[关键词]** 氧化沟;回流区长度;转轮半径;数值模拟;量纲分析法

**[中图分类号]** X11

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2014)02-0229-06

## 3D numerical simulation of the influence of flow runner radius on the length of flow recirculation in an oxidation ditch

LIU Yu-ling, LÜ Bin, WEI Wen-li

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** **【Objective】** The research on the 3D numerical simulation of the influence of flow runner radius on the length of flow recirculation in an oxidation ditch can provide a reference for design of oxidation ditches. **【Method】** The gas-liquid two-phase mixture model and the 3D Realizable  $k-\epsilon$  turbulence model were used to numerically simulate the turbulence flow in an oxidation ditch, and to study the influence of flow runner size on the length of flow recirculation in an oxidation ditch. The Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO) algorithm was used to solve velocity and pressure. The Volume of Fluid (VOF) method was used to simulate the free surface. **【Result】** By the simulation research, the relation between the size of the flow runners and the length of flow recirculation was obtained and was further verified by the dimension analysis method. The ratio of flow recirculation length to the straight line segment length was linearly related to the ratio of impeller radius to small curve radius. **【Conclusion】** The flow runner is the main power source of power for oxidation ditches. The size of the flow runner has significantly influenced on the flow velocity and flow structure in an oxidation ditch.

**Key words:** oxidation ditch; length of recirculation; runner radius; numerical simulation; dimensional a-

**[收稿日期]** 2013-02-08

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目“氧化沟中气液固三相混合液的数值模拟与生物反应动力学研究”(51178391); 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科项目(106-00X101)

**[作者简介]** 刘玉玲(1969—), 女, 陕西合阳人, 教授, 博士, 主要从事环境水力学、水污染控制理论与技术研究。

E-mail: liuyuling@xaut.edu.cn

analysis

氧化沟工艺是城镇污水处理的最主要工艺之一,在国内外应用非常广泛。流场结构对氧化沟的运行效率有着非常重要的影响,国内外许多学者对此进行了大量的试验研究及数值模拟。如 Cook<sup>[1]</sup>、Simon<sup>[2]</sup>及 Argaman<sup>[3]</sup>通过试验,研究了氧化沟中的流场;曹瑞钰等<sup>[4]</sup>研究了氧化沟中流场结构的一些改善措施;许丹宇等<sup>[5]</sup>对交替曝气条件下卡罗塞尔(Carrousel)氧化沟的水力特性进行了测试;李志杰等<sup>[6]</sup>对曝气转盘作用下的氧化沟内的流场特性进行了研究。在数值模拟方面,张羽等<sup>[7]</sup>、蒋成义等<sup>[8]</sup>对氧化沟流场的计算流体力学数值模型进行了研究;Luo 等<sup>[9]</sup>采用三维  $k-\epsilon$  模型对氧化沟进行了数值模拟;张智等<sup>[10]</sup>对氧化沟缺氧区的三维流场进行了数值模拟及结构形式优化;Lesage 等<sup>[11]</sup>、Stamou<sup>[12]</sup>应用一维模型和二维垂直平均  $k-\epsilon$  湍流模型,模拟了氧化沟中简单的水力学特征;Simon 等<sup>[13]</sup>发展了基于质量和动量守恒的理论模型来模拟并预测叶轮驱动的流体平均流速。在氧化沟中,隔墙的厚度与弯道半径相比往往比较小,在这种结构中水流由弯道进入直道时会在直道段形成回流,回流区域的存在会造成污泥相滞留,这对氧化沟的运行非常不利,而转轮半径又会影响到回流区域的大小,但目前尚未见对该问题的研究报道。为此,本试验以四沟道的卡罗塞尔氧化沟为研究对象,分析了回流区长度与转轮半径之间的关系,以期对氧化沟工艺的设计提供理论依据。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

描述水流的时均控制方程有连续方程和动量方程 2 种<sup>[7-8]</sup>,其中连续方程的表达式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

式中: $\rho$  为流体密度, $u_i$  为沿  $i$  ( $i$  为笛氏坐标  $x, y$  或  $z$ ) 方向的速度分量, $t$  为时间, $x_i$  为沿  $i$  方向的空间坐标分量。

动量方程的表达式为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i. \quad (2)$$

式中: $u_i$  和  $u_j$  分别为  $i$  方向和  $j$  方向的速度分量, $x_i$  和  $x_j$  分别为  $i$  方向和  $j$  方向的坐标分量, $p$  为压强,

$\mu$  为分子黏性系数, $u'_i$  和  $u'_j$  分别为  $i$  方向和  $j$  方向的脉动速度, $g_i$  为  $i$  方向的重力加速度。

方程(2)中雷诺应力的表达式为:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}. \quad (3)$$

式中: $\mu_t$  为紊动黏度, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ,其中  $k$  为紊动动能, $\epsilon$  为紊动动能耗散率; $\delta_{ij}$  为克罗奈克(Kronecker)函数。

采用 Realizable  $k-\epsilon$  模型封闭上述方程组,其紊动动能方程和紊动动能耗散率方程可分别表示为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon. \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}}. \quad (5)$$

式中: $G_k$  表示由于平均速度梯度引起的紊动动能, $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ ;  $\nu$  为紊动黏滞率。

式(3)和(5)中经验系数的取值及各系数的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \sigma_k &= 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2, C_2 = 1.9, C_1 = \max \left( 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \eta = (2E_{ij} E_{ij})^{1/2} \times \frac{k}{\epsilon}, E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \\ C_\mu &= \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \epsilon}, A_0 = 4.0, A_s = \sqrt{6} \cos \varphi, \varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} (\sqrt{6} W), W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{ki}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}}, U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}, \\ \tilde{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \omega_k, \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk} \omega_k, \end{aligned}$$

其中  $\bar{\Omega}_{ij}$  是从角速度  $\omega_k$  的参考系统中观察到的时均速率张量。

以上方程组构成了求解水流流场分布规律的封闭方程组,根据实际工况施加相应的边界条件后,就构成该方程组的定解问题。

### 1.2 基于 VOF 法的自由水面模拟

VOF (Volume of Fluid) 法的基本思想是:定义体积率函数  $F = F(x, y, z, t)$ , 表示计算区域内流体体积与计算区域体积的相对比例。对于某 1 个计算单元,当  $F(x, y, z, t) = 1$ ,则表示该单元被液体充满;当  $F(x, y, z, t) = 0$ ,则表示其是 1 个空单元;若

$F(x,y,z,t) \in (0,1)$ ,则表示该单元部分充满液体。显然,对于自由表面问题,只在第 3 种单元中存在自由表面。 $F$  的梯度可以用来确定自由边界的法线方向。计算各单元的  $F$  数值及梯度之后,就可以确定各单元中自由表面的近似位置。在每个单元中,水和气的体积分数之和为 1,与真正的单相流相比,就会多 1 个(水或气的)体积分数变量。如果以  $a_w$  表示水的体积分数,则气体的体积分数  $a_a$  可表示为

$$a_a=1-a_w。(6)$$

只要流场中各处的水和气的体积分数都已知,所有其他水和气共有的未知量和特征参数都可用体积分数的加权平均值来表示。所以在任何给定的单元中,这些变量和特征参数要么代表纯水或气,要么代表两者的混合。换言之,在 1 个单元中,水的体积分数会有 3 种情况,即  $a_w=0,1$  或介于 0 与 1 之间,分别与充满气、充满水和包含水气界面 3 种情况相对应。

水气交界面的确定可通过求解下面的方程来实现,即:

$$\frac{\partial a_w}{\partial t}+u_i \frac{\partial a_w}{\partial x_i}=0。(7)$$

式中: $t$  为时间, $u_i$  和  $x_i$  分别为速度分量和坐标分量( $i=1,2,3$ )。

引入 VOF 法后, $\rho$  和  $\mu$  的具体表达式可通过体积分数的加权平均值给出,即  $\rho$  和  $\mu$  是体积分数的函数,而不是一个常数,其表达形式如下:

$$\rho=a_w \rho_w+(1-a_w) \rho_a。(8)$$

$$\mu=a_w \mu_w+(1-a_w) \mu_a。(9)$$

式中: $a_w$  为水的体积分数, $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别表示水和气的密度, $\mu_w$  和  $\mu_a$  分别为水和气的分子黏性系数。

通过对水的体积分数  $a_w$  的迭代求解,则  $\rho$  和  $\mu$  值可以由式(8)和(9)求出。

## 2 卡罗塞尔氧化沟的计算区域及网格划分

### 2.1 计算区域

本研究的卡罗塞尔氧化沟侧墙的厚度和水深分别为 5 和 4.5 m,废水处理规模为 25 000 m<sup>3</sup>/d。在氧化沟两侧分别布置了 3 个水下推动转轮,每个转轮由 8 个半径为 1.613 m 的盘片组成,转轮转速为 30 r/min。计算区域如图 1 所示。

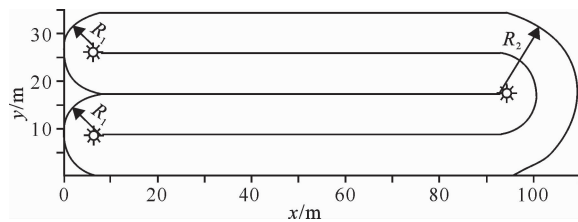
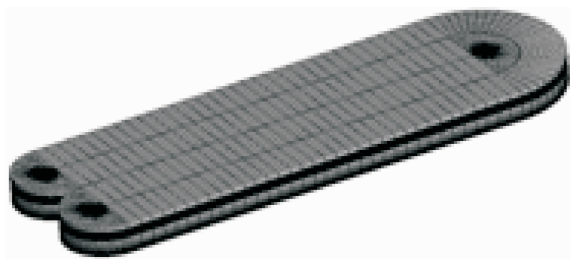


图 1 卡罗塞尔氧化沟计算区域的平面图  
Fig. 1 Computational region plan of Carroussel oxidation ditch

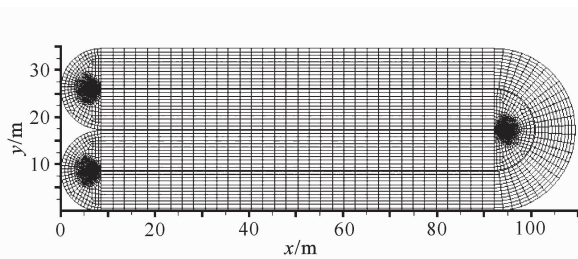
在数值计算中,计算区域大小为:总长 109 m,宽 34.6 m,单沟宽 8.5 m,小弯道半径( $R_1$ )为 8.5 m,大弯道半径( $R_2$ )为 17 m,隔墙厚度 0.2 m。

### 2.2 网格划分

在 5 种不同转轮半径下,计算区域的网格划分方法及网格的结构大体相同,计算区域网格如图 2 所示,采用有限体积法对控制方程进行离散,压力与速度的耦合采用压力隐式算子分裂(Pressure-Implicit with Splitting of Operators,PISO)算法。



(a) 三维网格图 3D grid



(b) 平面网格图 Plane grid

图 2 卡罗塞尔氧化沟计算区域网格图

Fig. 2 Grid of computational region of Carroussel oxidation ditch

## 3 初始条件及转轮数学模型的选择

在文献[2,13]的相关研究中,发现水流进出口对氧化沟内的流场结构影响不大,因而在进行数值计算时可以不用考虑,本研究也在计算时不作考虑。

在初始时给定水深 4.5 m,转轮的数学模型采用多参考系模型及滑移网格法,即先用多参考系模型对流场进行初始化,然后再用滑移网格法进行后续计算直至收敛。

4 结果与分析

4.1 不同转轮半径下氧化沟的流场结构分析

氧化沟中存在多弯道与直道相结合的结构,并且隔墙的厚度较弯道半径小得多,因此在此种弯道中,水流由弯道进入直道时很容易在隔墙端部产生

回流,回流区域的存在会造成氧化沟中污泥相滞留,这对氧化沟的运行不利,而转轮半径对弯道出口端隔墙后回流区域的大小有影响。图 3 为转轮在最优淹没深度时,不同转轮半径( $r$ )下所形成的水流流线图。

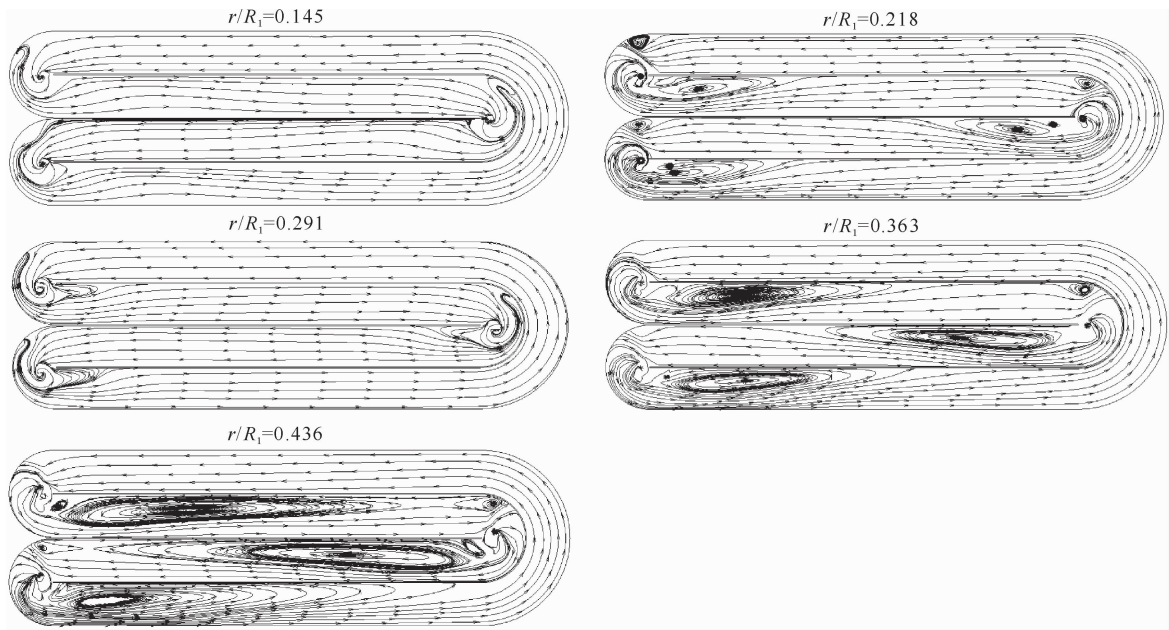


图 3 不同转轮半径( $r$ )下水流的流线图

Fig. 3 Computational flow streamlines for different runner radius ( $r$ )

由图 3 可以看出,当转轮和小弯道的半径比( $r/R_1$ )很小时,隔墙端部回流区域很小,但随着 $r/R_1$ 的增加,隔墙端部的回流区长度不断增加。当 $r/R_1$ 为 0.436 时,回流区的长度几乎与直道段的长度相等,这主要是由于转轮的转速固定时,随着转轮半径的增加,转轮叶片末端的线速度也会随之增加,这就导致弯道出口端水流流速分布极不均匀:在靠近隔墙处流速很小,在靠近外墙处流速很大;同时,在弯道出口端由于惯性力的作用,也会导致弯道出口端水流流速分布不均匀。因此,这两方面的作用导致了回流区的产生,并且回流区长度与弯道水出口端水流流速分布的不均匀性有很大关系,即流速分布越不均匀,回流区的长度越长。同时,随着转轮半径的增加,转轮对其周围水流的卷吸作用也会增强,这也会对整个氧化沟内的流场结构产生较大影响。由此可知,过大的转轮半径会造成较大的回流区产生。本研究统计了不同转轮半径下回流区的长度,结果如表 1 所示。

表 1 不同转轮半径下回流区的长度

Table 1 Recirculation zone length for radius of different runners m

| 转轮半径<br>Runner<br>radius | 回流区长度<br>Recirculation<br>length | 转轮半径<br>Runner<br>radius | 回流区长度<br>Recirculation<br>length |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1.233                    | 3.928                            | 3.086                    | 58.378                           |
| 1.853                    | 12.861                           | 3.706                    | 83.500                           |
| 2.474                    | 31.451                           |                          |                                  |

用小弯道半径  $R_1$  将转轮半径  $r$  无量纲化,用直道段长度  $L_0$  将直道回流区长度  $L$  无量纲化,然后绘制  $r/R_1-L/L_0$  关系图,结果如图 4 所示。

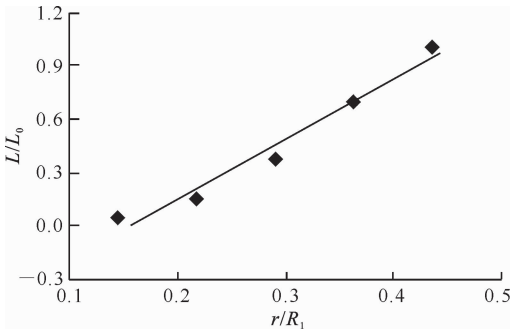


图 4  $r/R_1-L/L_0$  关系图

Fig. 4 Relation between  $r/R_1-L/L_0$

根据图 4 数据点进行拟合,得其关系式为:

$$L/L_0=3.37\times(r/R_1)-0.524。(10)$$

式中: $r/R_1$  的取值范围为 $>0.145\sim<0.436$ 。

4.2 基于量纲分析法的转轮半径与回流区长度关系的验证

经分析,在氧化沟直道段上的回流区长度  $L$  与变量转轮的半径( $r$ )、介质的密度( $\rho$ )、重力加速度( $g$ )、直道的宽度( $B$ )、水深( $H$ )、速度( $V$ )、水的黏度( $\nu$ )等有关。由已知条件可将回流区的长度公式写成如下一般函数式:

$$L=f(r,\rho,g,B,H,V,\nu)。(11)$$

上式中共有 8 个变量,其中有 7 个为自变量。选  $r$ 、 $\rho$  和  $g$  3 个物理量作为基本物理量,则上式可用 5 个无量纲数组成的关系式来表达。这些无量纲数( $\pi$ )为:

$$\pi=\frac{L}{r^{x_0}\rho^{y_0}g^{z_0}},\pi_4=\frac{B}{r^{x_4}\rho^{y_4}g^{z_4}},\pi_5=\frac{H}{r^{x_5}\rho^{y_5}g^{z_5}},\\ \pi_6=\frac{V}{r^{x_6}\rho^{y_6}g^{z_6}},\pi_7=\frac{\nu}{r^{x_7}\rho^{y_7}g^{z_7}}。$$

式中: $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  ( $i=0,4\sim7$ ) 为指数。

由于选  $r$ 、 $\rho$  和  $g$  3 个物理量作为基本物理量,所以  $\pi_1=\pi_2=\pi_3=1$ 。

对于无量纲数( $\pi$ ),上面各式右端分子与分母的量纲应相同,将上式中各物理量的量纲用长度量纲  $l$ 、时间量纲  $T$  和质量量纲  $M$  来表示,则有:

$$\left. \begin{aligned} \dim L &= \dim r^{x_0} \rho^{y_0} g^{z_0} \\ \dim B &= \dim r^{x_4} \rho^{y_4} g^{z_4} \\ \dim H &= \dim r^{x_5} \rho^{y_5} g^{z_5} \\ \dim V &= \dim r^{x_6} \rho^{y_6} g^{z_6} \\ \dim \nu &= \dim r^{x_7} \rho^{y_7} g^{z_7} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} l &= l^{x_0-3y_0+z_0} M^{y_0} T^{-2z_0} \\ l &= l^{x_4-3y_4+z_4} M^{y_4} T^{-2z_4} \\ l &= l^{x_5-3y_5+z_5} M^{y_5} T^{-2z_5} \\ l T^{-1} &= l^{x_6-3y_6+z_6} M^{y_6} T^{-2z_6} \\ l^2 T^{-1} &= l^{x_7-3y_7+z_7} M^{y_7} T^{-2z_7} \end{aligned} \right\}。(12)$$

上面各式两端相同量纲的指数应该相同,则可得到如下关系式:

$$\pi=\frac{L}{r^{x_0}\rho^{y_0}g^{z_0}}=\frac{L}{r},\pi_4=\frac{B}{r^{x_4}\rho^{y_4}g^{z_4}}=\frac{B}{r},\pi_5=\frac{H}{r^{x_5}\rho^{y_5}g^{z_5}}=\frac{H}{r},\pi_6=\frac{V}{r^{x_6}\rho^{y_6}g^{z_6}}=\frac{V}{\sqrt{rg}},\pi_7=\frac{\nu}{r^{x_7}\rho^{y_7}g^{z_7}}=\frac{\nu}{r\sqrt{rg}}。$$

根据  $\pi$  定理,用  $\pi,\pi_1,\pi_2,\pi_3,\cdots,\pi_7$  组成表示回流区长度  $L$  的无量纲函数关系式为:

$$\pi=f(1,1,1,\pi_4,\pi_5,\pi_6,\pi_7)。(13)$$

即:

$$\frac{L}{r}=f\left(\frac{B}{r},\frac{H}{r},\frac{V}{\sqrt{rg}},\frac{\nu}{r\sqrt{rg}}\right), (14)$$

$$L=f\left(\frac{B}{r},\frac{H}{r},\frac{V}{\sqrt{rg}},\frac{\nu}{r\sqrt{rg}}\right)r。(15)$$

令

$$\varphi=f\left(\frac{B}{r},\frac{H}{r},\frac{V}{\sqrt{rg}},\frac{\nu}{r\sqrt{rg}}\right)。(16)$$

于是:

$$L=\varphi r。(17)$$

由式(17)可以看出,回流区长度  $L$  和转轮半径  $r$  呈线性关系。

5 结 论

1) 气液两相流混合模型辅助 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型,能够精确地模拟氧化沟的水力特性。

2) 研究了卡罗塞尔氧化沟中直道回流区长度与转轮半径之间的关系,发现二者之间呈线性变化,其关系式为: $L/L_0=3.37\times(r/R_1)-0.524$ ,其中  $0.145<r/R_1<0.436$ 。用量纲分析法进一步验证了回流区长度与转轮半径之间的关系。

[参考文献]

[1] Cook S. Parameter estimation in oxidation ditch modeling [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1984, 6 (3):131-141.

[2] Simon S. Prediction of mean circulation velocity in oxidation ditch [J]. Environmental Technology, 2001, 22(2):195-204.

[3] Argaman Y. Engineering aspects of wastewater treatment in aerated ring-shaped channels [J]. Wat Res, 1997, 4(8):317-322.

[4] 曹瑞钰,付见中.改善氧化沟流速分布的措施[J].中国给水排水,2001,17(2):16-18.

Cao R Y, Fu J Z. Measures for improving velocity distribution in oxidation ditch [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17 (2):16-18. (in Chinese)

[5] 许丹宇,张代钧,庞子山,等.交替曝气条件下 Carrousel 氧化沟的水力特性测试 [J]. 中国给水排水, 2008, 24(4):95-99.

Xu D Y, Zhang D J, Pang Z S, et al. Determination of hydraulic characteristics of Carrousel oxidation ditch under alternating aeration conditions [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24 (4):95-99. (in Chinese)

[6] 李志杰,何建京,许言,等.曝气转盘作用下的氧化沟流场特性 [J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 39(2):143-147.

Li Z J, He J J, Xu Y, et al. Characteristics of flow fields in oxidation ditches under action of aeration turntables [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2):143-147. (in Chinese)

[7] 张 羽,黄卫东,勾全增,等. 计算流体力学在氧化沟设计中的应用 [J]. 工业用水与废水,2009,40(1):49-53.  
Zhang Y,Huang W D,Gou Q Z,et al. Application of computational fluid dynamics in design of oxidation ditch [J]. Industrial Water & Wastewater,2009,40(1):49-53. (in Chinese)

[8] 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 C Y, Huang W D,Wang G,et al. Numerical computation of flow fields in an oxidation ditch by computational fluid dynamics [J]. Model Environmental Science & Technology, 2010,33(8):135-140. (in Chinese)

[9] Luo L,Li W,Deng Y,et al. Numerical simulation of a combined oxidation ditch flow using 3D  $k-\epsilon$  turbulence model [J]. Journal of Environmental Sciences,2005,17(5):808-812.

[10] 张 智,柴 华,李柏林. A2/O 氧化沟缺氧区三维流场模拟及结构形式优化 [J]. 环境工程学报,2012(1):46-50.  
Zhang Z,Chai H,Li B L. Simutation on three-dimensional flow field and improvement on structure of anoxic zone of A2/O oxidation ditch [J]. Journal of Environmental Engineering, 2012(1):46-50. (in Chinese)

[11] Lesage N,Sperandio M,Lafforgue C,et al. Calibration and application of a 1-D model for oxidation ditches [J]. Chemical Engineering Research & Design,2003,81(9):1259-1264.

[12] Stamou A I. Modelling of oxidation ditches using an open channel flow 1-D advection-dispersion equation and ASM1 process description [J]. Water Science and Technology,1997,36(5):269-276.

[13] Simon S,Roustan M,Audic J M,et al. Prediction of mean circulation velocity in oxidation ditch [J]. Environmental Technology,2001,22(2):195-204.

(上接第 228 页)

[14] 刘 婷,贾志宽,张 睿,等. 秸秆覆盖对旱地土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(7):69-76.  
Liu T,Jia Z K,Zhang R,et al. Effect of straw mulching on soil moisture and water use efficiency of winter wheat in dryland [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat Sci Ed,2010,38(7):69-76. (in Chinese)

[15] 黄金辉,廖允成,高茂盛,等. 耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响 [J]. 应用生态学报,2009,20(11):2652-2658.  
Huang J H,Liao Y C,Gao M S,et al. Effects of tillage and mulching on orchard soil moisture content and temperature in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Apple Ecology,2009,20(11):2652-2658. (in Chinese)

[16] 冯锦泉,王中英. 秸秆覆盖对苹果树叶片几项生理指标的影响 [J]. 果树科学,1996,13(3):149-152.  
Feng J Q,Wang Z Y. The effects of straw mulching on the several physiological indexes of apple tree leaves [J]. Journal of Fruit Science,1996,13(3):149-152. (in Chinese)

[17] 郭小平,查多禄. 旱地果园蓄水保墒增产途径的研究: I . 化学调控增产技术 [J]. 北京林业大学学报,1996,18(2):82-88.  
Guo X P,Cha D L. The study on the method of soil moisture storage in dryland orchard: I . Chemical control production technology [J]. Journal of Beijing Forestry University,1996,18(2):82-88. (in Chinese)

[18] 司建华,常宗强,苏永红,等. 胡杨叶片气孔导度特征及其对环境因子的响应 [J]. 西北植物学报,2008,28(1):125-130.  
Si J H,Chang Z Q,Su Y H,et al. Stomatal conductance characteristics of *Populus euphratica* leaves and response to environmental factors in the extreme arid region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2008,28(1):125-130. (in Chinese)