

## A/A/O 氧化沟流态特性研究及积泥分析

李柏林<sup>1a,1b</sup>, 张智<sup>1a,1b</sup>, 刘少武<sup>2</sup>, 卢昌松<sup>2</sup>, 柴华<sup>1a,1b</sup>, 王维忠<sup>2</sup>, 袁相贵<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;  
2. 重庆水务集团股份有限公司, 重庆 400015)

**摘要:** 为了探求氧化沟内流速分布规律, 解决积泥问题并实现系统能量的优化配置, 以重庆市某污水处理厂的 A/A/O 氧化沟为试验平台, 根据曝气转盘及水下推流器的不同组合方式设计了 3 种试验工况, 重点对氧化沟外沟大弯段处的流速分布进行了测试及分析。结果表明: 第 1 沟段下部流速过大容易造成能量浪费, 间歇开/停水下推流器可以优化系统的能量配置; 第 2 沟段水力情况复杂, 外侧流速高、内侧流速低, 形成了明显的滞水区, 造成了内侧部分区域积泥; 提出了解决积泥问题的措施, 即在第 2 沟段的弯道处加设偏心导流墙、调整水下推流器的位置。

**关键词:** 氧化沟; 流态; 积泥; 节能降耗

**中图分类号:** X703.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2011)01-0118-06

## Sludge Deposition Analysis and Flow Pattern Test on Oxidation Ditch Integrated A/A/O Technique

LI Bo-lin<sup>1a,1b</sup>, ZHANG Zhi<sup>1a,1b</sup>, LIU Shao-wu<sup>2</sup>, LU Chang-song<sup>2</sup>, CHAI Hua<sup>1a,1b</sup>,  
WANG Wei-zhong<sup>2</sup>, YUAN Xiang-gui<sup>2</sup>

(1a. College of Urban Construction and Environmental Engineering; 1b. Key Laboratory of Three Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;  
2. Chongqing Water Group Co. Ltd., Chongqing 400015, P. R. China)

**Abstract:** To study the velocity distribution rule, the sludge deposition and the energy-optimized distribution of the oxidation ditch, the experiment was processed in a WWTP with A/A/O Oxidation Ditch technology. The study individually focused on the velocity distribution of curved sections in out-ditch by testing three operation conditions of the Oxidation Ditch. The result shows: firstly, the velocity of the first ditch is too large; easily lead to waste of energy, intermittent on/off submerged flow drivers can optimize the energy distribution of the system. Secondly, in the second ditch, the flow pattern in crook ditches were very complex, there existed high velocity outside and low inside. For such situation, it is easy to cause sludge deposit in the inside of the ditch. Finally, in order to improve the problem of sludge deposition, the measures were put forward as follows: installing off-center training in curved sections of the second ditch, adjusting the position of submerged flow driver.

**Key words:** Oxidation Ditch; flow patterns; sludge deposition; energy saving and consumption reduction

**收稿日期:** 2010-06-25

**基金项目:** 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2009ZX07315-002-01); 重庆大学研究生科技创新基金项目(CDJXS11210001)

**作者简介:** 李柏林(1983-), 男, 博士生, 主要从事污水处理理论与技术研究, (E-mail) bolly1221@163.com。  
张智(通讯作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) zhangzhicq@126.com。

起源于荷兰的氧化沟是一种简易高效的污水处理工艺,氧化沟由较长的直道和弯道组成,形成无终端的封闭沟渠曝气系统,并采用机械曝气设备向水中供氧和推动水流前进<sup>[1]</sup>,其独特的水力环流特性是氧化沟技术发展经久不衰的原因所在<sup>[2]</sup>。但是氧化沟工艺也存在一些问题,其一,氧化沟内特别是外沟大弯道处由于曲率半径较大,水力流态复杂,容易在弯道及前后的直段形成滞水区,导致污泥沉积<sup>[3]</sup>,从而降低氧化沟内的容积利用率及处理效果。其二,氧化沟内多采用表面曝气推流与水下推流相结合的方式,曝气与推流设备的功能相互交叉,如果设备的运行工况缺乏合理的优化,将会导致系统能耗过大,不利于节能降耗。因此,研究氧化沟外沟大弯道及其前后直段的水力流态特性对氧化沟工艺的功能提升有着重要的理论及实践意义。目前,专家学者进行了氧化沟弯道流态特性的研究,如 Littleton<sup>[4]</sup>、邓荣森<sup>[5-6]</sup>、张代钧<sup>[7]</sup>、李思敏<sup>[8]</sup>等课题组在不同沟型的生产性氧化沟中研究了导流墙、水下推流器及曝气转盘的设置方式对弯道及前后直段流态的影响。邓荣森<sup>[9-10]</sup>、赵星明<sup>[11]</sup>、施汉昌<sup>[12]</sup>、

Littleton<sup>[13]</sup>等课题组对不同沟型氧化沟弯道的流态进行了仿真模拟。目前的研究工作多集中在直道流在惯性力作用下进入弯道后的流态变化,对于外沟大弯道处设有曝气设备的 Carrousel 型氧化沟的弯道流态研究较少。该文以 A/A/O 氧化沟为试验平台,研究了外沟大弯道处设置了曝气转盘的氧化沟的流态,分析了积泥的原因并提出了解决措施,同时进行了运行工况的优化,以实现系统能量的优化配置及工艺的节能降耗。

## 1 试验场地及试验方案

### 1.1 试验场地

试验在重庆市某污水处理厂进行。该厂采用 A/A/O 氧化沟工艺,好氧段为 Carrousel 氧化沟沟型,采用曝气转盘供氧并与水下推流器协助推流,曝气转盘共设 5 台,3 台变速转盘,2 台定速转盘,转盘前后加装有导流板。好氧区有效容积为 3 360 m<sup>3</sup>,单沟沟宽 6 m,有效水深 4 m。外沟大弯道处内侧半径  $R_1=6$  m,外侧半径  $R_2=12$  m。好氧区设备配置情况如表 1 所示。

表 1 A/A/O 氧化沟好氧区设备配置情况

	曝气转盘			水下推流器		
	功率/kW	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	数量	功率/kW	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	数量
变速	18.5/22	43/58	3	2.2	42	2
定速	18.5	43	2			

### 1.2 试验方案

按照图 1 所示划分出流速测试断面,1# 曝气转盘与 5# 曝气转盘之间的区域称为第 1 沟段,4# 曝气转盘与 5# 曝气转盘之间的区域称为第 2 沟段。各断面测点分布如图 2 所示。试验仪器为 LS45A 型旋杯式流速仪,测定下限为 0.015 m/s,当流速低于仪器测定下限时,表中以“—”表示。试验共有 3 种工况,如表 2 所示。

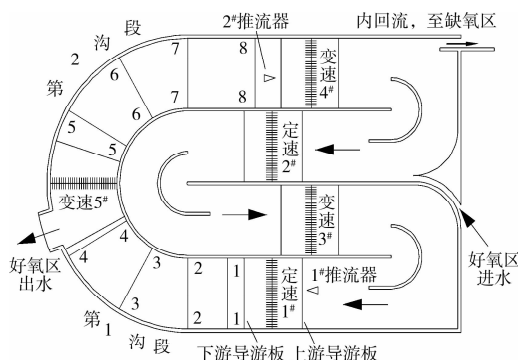


图 1 A/A/O 氧化沟流速测试断面分布

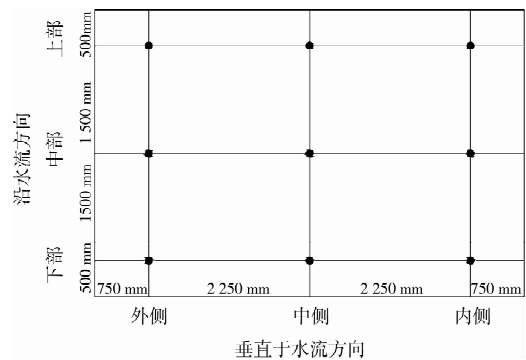


图 2 好氧区断面测点分布

表 2 流速试验工况安排

工况	定速转盘	变速转盘	水下推流器
1		3#、4#、5# 低速	1#、2# 开启
2	1#、2# 开启	3#、4#、5# 低速	1# 停止、2# 开启
3		3#、4# 低速,5# 高速	1#、2# 开启

## 2 试验结果及分析

### 2.1 常用工况条件下的流态特性

**2.1.1 第 1 沟段流态特性分析** 工况 1 是该厂目前常用的运行工况。第 1 沟段的流速测试结果如表

表 3 工况 1 流速测定数据  $/(m \cdot s^{-1})$

断面	上部			中部			下部		
	内侧	中侧	外侧	内侧	中侧	外侧	内侧	中侧	外侧
1	0.052	0.073	0.070	0.369	0.116	0.198	0.401	0.299	0.265
2	0.253	0.044	0.148	0.304	0.134	0.102	0.325	0.380	0.290
3	0.298	0.118	0.198	0.172	0.129	0.145	0.278	0.266	0.238
4	0.087	0.077	0.089	0.318	0.254	0.291	0.326	0.253	0.237
5	0.088	0.051	0.129	0.280	0.135	0.132	0.177	0.259	0.211
6	0.059	0.047	0.083	0.272	0.066	0.170	0.205	0.339	0.384
7	0.027	0.082	0.143	0.104	0.090	0.198	0.200	0.332	0.310
8	0.045	0.036	0.051	0.079	0.122	0.197	—	0.274	0.330

由于曝气转盘和导流板的作用,被曝气转盘掀起的水流落下时刚好碰到了倾斜的导流板,于是这部分高速水流就沿着导流板向氧化沟下部推进,而第 1 断面的上部测点刚好位于导流板的后面,因此该断面的表面流速较低,流速范围为 0.052 ~ 0.073 m/s。第 4 断面位于 5<sup>#</sup> 曝气转盘的上游挡流板附近,和第 1 断面情况类似,上部流速较低,流速范围为 0.077 ~ 0.089 m/s。

曝气转盘属于表面曝气设备,经过其推动的水流上部流速大、中下部流速小,在氧化沟沟深较大的情况下,需要较长的直线距离来完成流速的均匀分布。对于该污水处理厂的氧化沟来说,由于 1<sup>#</sup> 曝气转盘与弯道进口(第 2 断面所在位置)之间的直线距离仅有 7.5 m,表面的高速水流来不及分配至沟道底部,从而容易在该直道区域发生污泥沉积。为了解决这一问题,在曝气转盘的下游设置了导流板,将经过 1<sup>#</sup> 曝气转盘推动的表面高速水流快速地传向中下层,增大该段水流的中下部流速,促进沟内上层和下层水流的垂直混合<sup>[2]</sup>,同时还在距离 1<sup>#</sup> 曝气转

3 所示。

从表 3 可以看出,第 1 沟段内、中、外侧流速变化趋势相同,被 1<sup>#</sup> 曝气转盘推动的混合水流,经过 1 ~ 4 断面时,水平方向流速相差不大,竖直方向存在着一定的流速梯度;而且上部流速小,中下部流速大。

盘上游 3.5 m 处的沟底设置了水下推流器,使水流呈螺旋形推流流动,水流流程变长,有效地减少了短流现象,在一定程度上避免流速分层现象,使氧化沟内的流速分布得到改善,防止污泥沉积。

在导流板和水下推流器的联合作用下,第一沟段各断面的中、下部流速得到了较好的均匀分布,中部流速范围为 0.102 ~ 0.369 m/s,下部流速范围为 0.237 ~ 0.401 m/s,下部流速高于氧化沟内污泥沉降的临界流速(0.15 m/s)<sup>[6]</sup>。随着水流的推进,从第 1 断面至第 4 断面时,中部流速与下部流速的差值逐步减小,由 0.098 m/s 减小至 0.026 m/s。总体而言,水流在第 1 沟段后段的中下部已基本呈现均匀分布的状态。

**2.1.2 第 2 沟段流态特性分析** 第 2 沟段的流速测试结果分别如表 4 所示。从表中可以看出,从第 1 沟段流过的水流,经过 5<sup>#</sup> 曝气转盘的提升和推动作用后进入第 2 沟段,由于倾斜导流板向下的导流作用,从而导致上部流速较小、中部流速次之,而底部流速较大,这与第 1 沟段的情况类似。

表 4 工况 2 流速测定数据  $/(m \cdot s^{-1})$

断面	上部			中部			下部		
	内侧	中侧	外侧	内侧	中侧	外侧	内侧	中侧	外侧
1	0.044	0.061	0.058	0.430	0.121	0.081	0.177	0.247	0.251
2	0.117	0.088	0.101	0.244	0.123	0.198	0.235	0.306	0.230
3	0.196	0.095	0.159	0.190	0.113	0.185	0.167	0.129	0.151
4	0.089	0.089	0.070	0.195	0.209	0.225	0.163	0.204	0.219

续表 4

断面	上部			中部			下部		
	内侧	中侧	外侧	内侧	中侧	外侧	内侧	中侧	外侧
5	0.056	0.057	0.173	0.237	0.046	0.068	0.173	0.239	0.394
6	0.070	0.061	0.032	0.226	0.050	0.197	0.219	0.304	0.410
7	0.083	0.019	0.090	0.139	0.072	0.091	0.153	0.271	0.366
8	0.044	0.024	0.064	0.100	0.021	0.210	—	0.149	0.291

外沟大弯道曲率半径较大,且存在二次流等不利流态<sup>[8,14]</sup>,因此容易在内侧形成积泥。设置 5<sup>#</sup>曝气转盘后,将第 1 沟段的液流提升后重新进行流速分布,可以有效防止第 4 至 6 断面内侧的积泥,但是由于 5<sup>#</sup>曝气转盘位于整个弯道的中心部位,推动水流与第 2 沟段外壁发生强烈的冲撞,在惯性力、离心力和弯道壁的作用下沿弯道外壁扩散,当水流流动至第 7、8 断面时,呈现外侧流速高,而内侧流速低的特点,从而在第 7 至 8 断面的内侧形成明显的滞留回水区域,容易造成能量的浪费和污泥的沉积。第 8 断面的下部内侧的流速无法测出,经过现场测量,发现该区域有明显的污泥淤积,积泥厚度约为 0.7~1.0 m。

## 2.2 常用运行工况的优化

该厂水下推流器功率为 2.2 kW,直段推进距离约为 13~14 m,而 1<sup>#</sup>推流器与弯道进口的距离为 11 m,再加上曝气转盘下游倾斜导流板的作用,使得第 1 沟段下部流速(下部各测点平均流速为 0.297 m/s)过大,大于氧化沟底部所需的最低流速(0.15 m/s),造成了一定程度的能量浪费。为了使第 1 沟段的中下部流速进一步实现均匀分布,并减少能耗,对工况 1 进行了优化。根据该厂的实际情况设置了工况 2(1<sup>#</sup>推流器停止运行),流速测试结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,第 1 至 4 断面底部平均流速分别为 0.335 m/s、0.326 m/s、0.273

m/s、0.277 m/s,高于 0.15 m/s,与工况 1 相比,工况 2 每年可节省电耗 1.93 万 kW·h。因此,结合该厂实际情况,可以将工况 1 与工况 2 结合使用,即 1<sup>#</sup>推流器可以间歇性开启,这样既能保证第一沟段下部水流的最低流速,防止污泥沉积,又能优化能量配置,实现系统的节能降耗。

## 2.3 积泥原因分析及改进措施

**2.3.1 积泥原因分析** 对于第 8 断面内侧明显的积泥现象,分析原因认为,首先是因为第 7 至 8 断面的滞水区的存在,容易造成污泥沉积,这是最主要的原因;其次,由于污水处理厂预处理段 SS 的去除率较低(设计沉砂池出水 SS 为 250 mg/L,2009 年平均值为 450 mg/L),大量悬浮物进入氧化沟内,再加上该厂剩余污泥浓缩脱水能力的不足,致使氧化沟好氧区内污泥浓度经常超过 8 000 mg/L(设计值为 4 000 mg/L),如此高的污泥浓度,势必会加速滞留回水区的污泥下沉,从而加重该区域的污泥沉积。

**2.3.2 防止污泥沉积的改进措施** 针对积泥问题,提出以下几种改进措施,并根据实际情况进行了现场试验或数值模拟。

措施 1:将 5<sup>#</sup>曝气转盘调整为高速运行状态(工况 3,对应的流速测试数据如表 5 所示),第 2 沟段下部流速将会大大增加,部分区域甚至超过 0.5 m/s,但是第 8 断面的下部内侧流速依然无法测出,同时转盘的高速运行也造成了较大的能量浪费,因此该措施不可行。

表 5 工况 3 流速测定数据

/(m·s<sup>-1</sup>)

断面	上部			中部			下部		
	内侧	中侧	外侧	内侧	中侧	外侧	内侧	中侧	外侧
1	0.048	0.070	0.075	0.340	0.174	0.185	0.390	0.327	0.288
2	0.230	0.107	0.133	0.200	0.178	0.120	0.345	0.335	0.297
3	0.283	0.175	0.200	0.178	0.130	0.155	0.288	0.257	0.273
4	0.060	0.061	0.100	0.405	0.257	0.250	0.349	0.271	0.212
5	0.048	0.075	0.255	0.247	0.144	0.146	0.182	0.250	0.378
6	0.060	0.055	0.114	0.072	0.075	0.221	0.328	0.523	0.549
7	0.039	0.025	0.158	0.093	0.054	0.323	0.215	0.462	0.470
8	0.043	0.079	0.211	0.096	0.128	0.327	—	0.241	0.440

措施 2 为在第 2 沟段的弯道处加设导流墙;措施 3 为将 2<sup>#</sup> 推流器上移;措施 4 为同时加设导流墙,并将推进器上移。

措施 2 至 4 从理论上分析是可行的方案,但必须通过实验验证。对于正在运行的 A/A/O 氧化沟来说,进行现场试验是不切实际的。而 Fluent 三维数值模拟是实际可行及有效的方法。

选用改进后的 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型进行模拟,进、出水口忽略不计,水面假设为水平面。在计算域的设置中,水下推流器和曝气转盘的定义是十分重要的,研究中把推进器假设为理想推进器(推进器的功耗仅在于形成轴向速度,即理想推进器理论不考虑螺旋桨引起的水流旋转运动,将螺旋桨看作只向前推水以获得推力的推进器)同时,引入运动网格的概念以反映曝气转盘对水流的推动力。盘片浸入水中部分被构建为运动壁面(无滑移固壁),盘片外缘的转动所包含部分均设置为运动网格。运动网格与沟内主体流体的直接接触部分设为网格界面,沟内流体将由此界面所驱动。

3 种改进措施的模拟结果分别如图 3—5 所示,限于篇幅,文中只列出了下部流速的模拟结果。

措施 2:在第 2 沟段的弯道处加设导流墙,使水流平稳转弯。根据已有的研究基础及工程经验发现<sup>[15]</sup>,导流墙宜设置成偏心导流墙,并向下游方向延伸一个沟宽的长度,导流墙的圆心应设在偏向弯道的进口一侧,以使更多的水流量向中隔墙内侧汇集,避免弯道出口靠中隔墙附近的流速过低,形成滞水区,引起污泥下沉。根据现场实际情况设置了偏心导流墙。从图 3 中可以看出,设置导流墙后,第 7 断面至第 8 断面内侧下部流速低于 0.15 m/s,该区域仍然为积泥区域,说明该措施无法解决积泥问题。

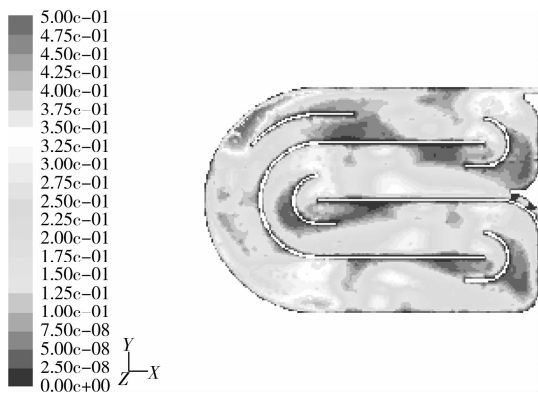


图 3 措施 2 中好氧区下部流场速度矢量图

措施 3:将 2<sup>#</sup> 推流器移动至第 7 断面和第 8 断

面之间,使推流器能够直接推动第 8 断面的水流,这样既能将已经沉积的污泥卷起,又能避免污泥的再次下沉,可能从根本上改善第 8 断面的下部流速。从图 4 中可以看出,积泥区域流速有显著提高,但流速仍然偏低,存在积泥的隐患。分析认为,这可能是由于水下推流器的叶轮直径较小(仅有 1.2 m),在较短的距离内无法将第 7 断面至第 8 断面下部内侧的积泥卷起。

措施 4:在第 2 沟段的弯道处加设导流墙,同时将推进器上移至第 7 断面至第 8 断面之间。模拟结果如图 5 所示。从图中可以看出,积泥区域的流速得到了很好的改善,该区域平均流速为 0.203 m/s,说明该措施能解决积泥问题。

经过 4 种措施的比较,选择措施 4 作为解决积泥问题的最优措施。

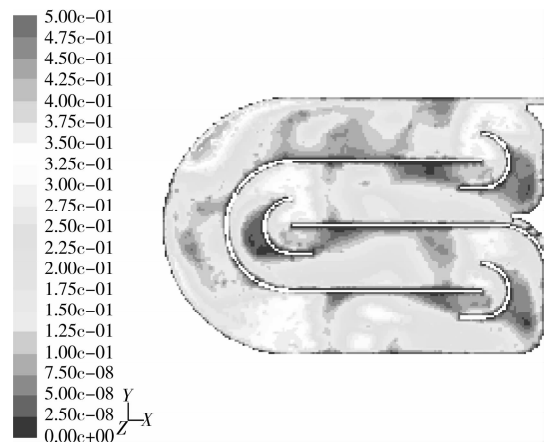


图 4 措施 3 中好氧区下部流场速度矢量图

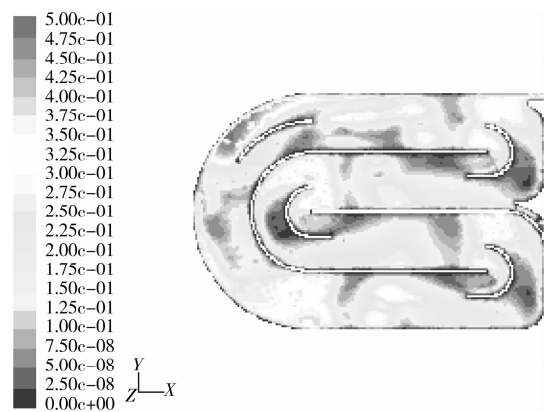


图 5 措施 4 中好氧区下部流场速度矢量图

### 3 结论

1)在污水处理厂目前常用的运行工况下,氧化沟第 1 沟段和第 2 沟段呈现上部流速较小、中部流速次之、底部流速较大的特点。

2)导流板和水下推流器的设置,能促进沟内上

层和下层水流的垂直混合,在一定程度上避免流速分层现象,改善氧化沟内的流速分布,防止污泥沉积。

3)针对第1沟段下部流速过大而造成的能量浪费,建议对1#推流器实施间歇运行,这样既能保证第1沟段下部水流的最低流速,又能优化能量配置,节能降耗。

4)第2沟段的第7、8断面呈现外侧流速高、内侧流速低的特点,形成了明显的滞水区,造成了第8断面下部内侧区域的污泥沉积,积泥厚度约为0.7~1.0 m。

5)提出了解决积泥问题的措施,并进行了试验验证:在第2沟段的弯道处增设偏心导流墙,同时将2#推流器移动至第7断面和第8断面之间。

#### 参考文献:

- [1] THAKRE S B, BHUYAR L B, DESHMUKH S J. Oxidation ditch process using curved blade rotor as aerator [J]. *International Journal of Environment Science and Technology*, 2009, 6(1): 113-122.
- [2] 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, 2006: 8-156.
- [3] WATER Environment Federation. Design of municipal wastewater treatment plants [M]. Virginia: Alexandria, 1992.
- [4] LITTLETON H X, DAIGGER G T. Application of computational fluid dynamics to closed loop bioreactors- Analysis of macro-environment variations in simultaneous biological nutrient removal systems [C]// Proceedings of the Water Environment Federation 74th Annual Conference & Exposition on Water Quality and Wastewater Treatment, 2001.
- [5] 杨华展, 王涛, 邓荣森. 一体化氧化沟弯道流态特性研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(3): 106-109.  
YANG HUA-ZHAN, WANG TAO, DENG RONG-SEN. Research on flow characteristic of curve channel of integrated oxidation ditch [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(3): 106-109.
- [6] 邓荣森, 况力, 李媛, 等. Orbal 氧化沟混合液流态试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(2): 86-89.  
DENG RONG-SEN, KUANG LI, LI YUAN, et al. Research and experiment on mixed liquor of Orbal oxidation ditch [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(2): 86-89.
- [7] 张代钧, 陈园, 许丹宇, 等. 卡鲁塞尔氧化沟流速与水质组分分布的现场测试[J]. 环境工程学报, 2009, 3(4): 607-611.  
ZHANG DAI-JUN, CHEN YUAN, XU DAN-YU, et al. Practically testing the distribution of flow rate and wastewater component in a full scale carrousel oxidation ditch [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(4): 607-611.
- [8] 秦卫峰, 李思敏, 李艳平, 等. 改良型氧化沟工艺的流态测试及分析[J]. 中国给水排水, 2008, 24(11): 84-88.  
QIN WEI-FENG, LI SI-MIN, LI YAN-PING, et al. Test and analysis on flow pattern of modified oxidation ditch [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(11): 84-88.
- [9] LUO LIN, LI WEI-MIN, DENG RONG-SEN, et al. Numerical simulation of a combined oxidation ditch flow using 3D k-ε turbulence model [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(5): 802-818.
- [10] 李媛. AIRE-O<sub>2</sub> 充氧机性能浅析与 Orbal 氧化沟流态测试及三维模拟[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2005.
- [11] 赵星明, 张庆华, 黄廷林, 等. 氧化沟弯道的污泥沉积分析与水力计算[J]. 中国给水排水, 2008, 24(6): 38-40.  
ZHAO XING-MING, ZHANG QING-HUA, HUANG TING-LIN, et al. Sludge deposition analysis and hydraulic calculation of oxidation ditch bend [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(6): 38-40.
- [12] LONG FAN, NONG XU, ZHIQIANG WANG, 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.
- [13] LITTLETON H X, DAIGGER G T, STROM P F. Application of computational fluid dynamics to closed-loop bioreactors: I. Characterization and simulation of fluid-flow pattern and oxygen transfer [J]. *Water Environment Research*, 2007, 79(6): 600-612.
- [14] 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 DAN-YU, ZHANG DAI-JUN, PANG ZI-SHAN, et al. Determination of hydraulic characteristics of carrousel oxidation ditch under alternating aeration conditions [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(4): 95-99.
- [15] 王红菊, 郭亚兵, 胡钰贤, 等. 氧化沟弯道流场的模拟与改进[J]. 能源与环境, 2009, 6: 10-12.