

Carrousel 氧化沟的流动特性研究

范 茏¹ 陈大方² 王志强¹ 刘艳臣¹ 施汉昌^{1*}

(1. 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;

2. 中国矿业大学(北京校区)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要 采用颗粒动态分析仪(PDA)对倒伞形表面曝气机曝气的 Carrousel 小试氧化沟进行测试, 得出了氧化沟内较系统的流动特性参数。比较了固液两相在氧化沟内流动的差别, 发现固液两相流动速度差别较小, 由于惯性的影响, 固相的沉降速度略大于液相。考察了表曝机的转速、表曝机相对于液面的位置、氧化沟的深度等因素对氧化沟内流动的影响, 随着表曝机转速的增大和表曝机浸入液面深度的增加, 流动速度和沉降速度均会增大, 而氧化沟深度增加时, 距离液面同一深度处的速度则会减小。实验结果与污水处理厂的实际情况进行比较发现, 二者变化趋势一致, 说明本实验结果可用于指导工程实际, 为氧化沟的优化设计提供依据。

关键词 Carrousel 氧化沟 流动特性 颗粒动态分析仪(PDA)

中图分类号 X52; O359 文献标识码 A 文章编号 1008-9241(2006)12-0036-06

Study on flow characteristic of Carrousel oxidation ditch

Fan Long¹ Chen Dafang² Wang Zhiqiang¹ Liu Yanchen¹ Shi Hanchang¹

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Department of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083)

Abstract The flow in an experimental Carrousel oxidation ditch with two surface aerators like inverse umbrella was measured with particle dynamic analyser (PDA). It was observed that there was negligible difference between the flow velocities of solid and liquid phases, while the settling velocity of solid was a bit larger than that of liquid due to inertial effect. The influences of the speed of aerators, the location of aerators relative to the surface and the height of the oxidation ditch were investigated. With the increasing of aerator speed, the velocity came up. The deeper the aerators in the liquid, the larger the velocity. When the oxidation ditch was higher, the velocity at the same location below the surface would decrease. The experimental results were also compared with those obtained in a wastewater treatment plant of Huaibei city. They were in good agreement. This gives evidence that the experimental results presented in this paper could be used for practice. All these results will play significant roles in the design and optimization of oxidation ditch.

Key words Carrousel oxidation ditch; flow characteristic; particle dynamic analyser (PDA)

自从 1954 年氧化沟在荷兰首次使用以来, 它在废水处理行业一直发挥着不可缺少的作用。为了使氧化沟更好地发挥作用, 有必要对其进行优化设计, 而水力学参数对反应器的设计而言, 是一重要参数, 反应器的水力学特性直接影响到废水处理效果的发挥, 但文献中很少有报道讨论氧化沟内的水力学特性。Stamou 等^[1]用河流水质模型预测了实现硝化、反硝化和碳的氧化的氧化沟内水质的变化情况。Clercq 等^[2]用序批式反应器模型对氧化沟进行水力学研究, 得到了氧化沟内的混合情况, 研究的重点是整个系统内的反应。张宗才等^[3]通过模拟流场分布, 分析了装有转刷的 Carrousel 氧化沟内的水力学特性。邓荣森等^[4]对转刷曝气的一体式氧化沟内

的水力特性进行实验, 提出了设置导流板的辅助措施。本实验着重对 Carrousel 氧化沟进行研究, 得出小试氧化沟内较系统的流动特性参数, 为氧化沟的进一步优化设计提供依据。

相对于普通氧化沟, Carrousel 氧化沟用立式的搅拌机代替了卧式转刷曝气机^[5], 这大大减小了氧化沟的占地面积。倒伞型曝气机是城市污水与工业

资助项目: 国家高技术研究发展计划“863 项目”(2004AA601060); 清华大学实验室开放基金资助项目

收稿日期: 2005-11-22; 修订日期: 2006-01-20

作者简介: 范茏(1976~), 女, 博士, 主要研究方向: 环境工程、计算流体力学。E-mail: fanlong@tsinghua.edu.cn

*通讯联系人

废水治理工程中有着广泛应用的一种立轴式表面曝气机械,它具有结构简单、易于加工、运转时不易堵塞以及效率较高等优点^[6]。倒伞型曝气机的结构如图 1 所示,它利用倒伞叶轮的旋转,形成水幕,裹进大量空气,由于污水上下循环,不断更新液面,污水大面积吸入空气,空气中的氧气迅速溶入污水中,完成对污水充氧、搅拌和推流三大作用。在氧化沟,尤其在 Carrousel 氧化沟工艺中,倒伞型曝气机是常用的曝气设备^[7,8]。因此本实验将以倒伞形表面曝

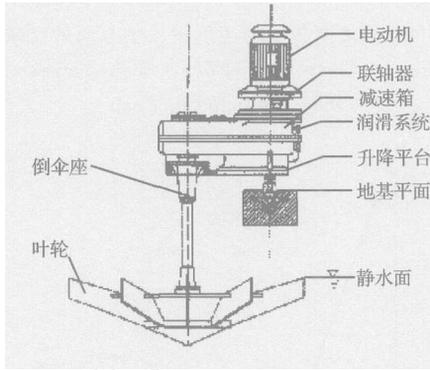


图 1 倒伞形表面曝气机结构简图

Fig. 1 Sketch of surface aerator like inverse umbrella

气机为例进行研究。对于多相流体系速度的测定,研究方法较多,一般可以分为干扰性和非干扰性。干扰性的方法有取样法^[9]、光导纤维法、电容法^[10]、热膜风速仪^[11]等,近年来随着激光多普勒技术的应用,出现了颗粒图像测速仪(PV)、激光多普勒测速技术(LDA)、颗粒动态分析仪(PDA)等技术,这些技术的出现使对流场的非接触式测量成为可能,并能同时得到流场内两相的速度。如 Long Fan 等^[12]用 PV 技术测试了搅拌槽内固相为细长颗粒的液固两相湍流流场和细长颗粒的取向分布,并对数值模拟结果进行了检验。竺晓程等^[13]用三维激光多普勒测速技术对带间隙轴流转子顶部流场进行了测量。崔金雷等^[14]用 PDA 测定了气固两相圆湍射流中的气相流动参数,讨论了颗粒的存在对气相的影响。缪骏等^[15]在小流量工况下,采用 PDA 技术对旋转离心叶轮内部的速度场进行了测量与分析。本实验用 PDA 技术对倒伞形表面曝气机曝气的 Carrousel 小试氧化沟内的流动进行测定。

1 实验部分

1.1 实验装置

小试氧化沟参照实际 Carrousel 氧化沟按 50:1 的比例缩小得到。沟内水深 120 mm,半径 144 mm,直段长为 746 mm,沟两边各装有一个倒伞形表面曝

气机。

1.2 测量系统

用颗粒动态分析仪 (particle dynamic analyser, PDA) 对小试氧化沟内的流动进行测试。颗粒动态分析仪是在传统的激光多普勒测速基础上发展起来的新型测量系统,是世界上最先进的、适于多相流场的非接触式测量仪器之一,能够在不破坏流场的情况下同时进行多物理量的高精度测量。PDA 主要包括两大部分:实验台本体和 PDA 测量系统。本实验采用的是丹麦 Dantec 公司制造的 58N50 型 PDA,它主要由氦离子激光光源、传输、接收光路系统、信号处理器、计算机、三维自动坐标架等组成。

PDA 的测速原理^[16~18]是:2 束相干单色激光束以 2θ 角相交形成测量点,在测量点处形成平行的干涉条纹。当粒子以速度 U 垂直条纹平面穿过测量点中干涉条纹时,在空间就散射明暗相间的光信号,其频率 f_b 与速度 U 之间的关系为:

$$|U| = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \cdot f_b$$

式中: λ —激光波长, m。

通过频移装置来解决多普勒测速的方向模糊,测出颗粒的运动方向。PDA 系统用光电倍增管来探测多普勒信号,利用多普勒信号的自相关方法求得信号的频率。

1.3 测量方法

实际的活性污泥粒径多在 1~1.5 mm 左右,密度在 1.1 g/cm³ 附近,由于颗粒动态分析仪测量精度的限制,示踪微粒粒径须在几微米到几十微米之间,综合比较分析,采用清水实验,用聚苯乙烯微珠代表活性污泥,聚苯乙烯密度为 1.07 g/cm³,直径为 200~400 目,折射率为 1.59。

在实验中,每个测点的测量时限一般是设定测量到的粒子总数量或设定测量点的测量时间,如果满足 2 个标准中的一个,则 PDA 在此点的测量即结束。本实验每个测点采样 1500 个,限时 4 min,在数据分析时取 0~30 mm 的微粒作为液相,直径大于 30 mm 的微粒认为是固相。

2 结果与讨论

由于氧化沟内有 2 个表曝机,沟内流动对称,故仅测定氧化沟一半即可得到整个氧化沟内的流动。实验中考察了表曝机的转速、表曝机相对于液面的位置以及氧化沟深度对流动的影响。

测试断面及坐标设置如图 2 图 3 所示,沿流动方向设置 5 个测试面, x 分别为 36 mm、186 mm、336 mm、486 mm 和 636 mm,每个断面在水平和垂直方向上分别测 5 个点和 4 个点,其中,水平方向上在 $y = 1$

mm、30 mm、60 mm、90 mm 和 120 mm 处测试, 竖直方向上在 z 为 5 mm、15 mm、60 mm 和 98 mm 处测试。

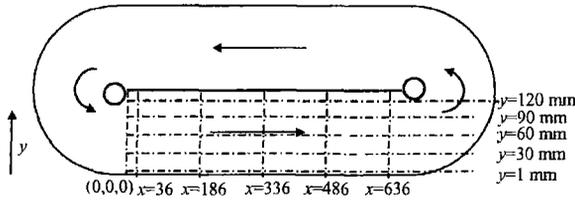


图 2 氧化沟测量点示意图 (俯视)

Fig. 2 Schematic of experimental oxidation ditch (planform)

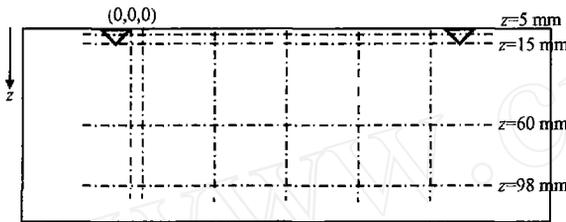


图 3 氧化沟测量点示意图 (侧视)

Fig. 3 Schematic of experimental oxidation ditch (sideview)

2.1 表曝机转速的确定

为了跟实际氧化沟内的流动比较, 按照 3 种不同方法 (Re 相似、弗劳德数相似和小试氧化沟与实际氧化沟内水流动一圈的时间相同) 确定小试氧化沟内的流速。实验发现, 按照 Re 相似和小试氧化沟与实际氧化沟内水流动一圈的时间相同所得的流速或者太大, 或者太小, 在小试氧化沟内很难达到, 因此, 实验中取按照弗劳德数相似 ($Fr = \frac{u}{\sqrt{gd_h}}$, 式中 d_h 为水力半径) 所得的流速来确定表曝机的转速, 表曝机标准转速为 150 r/min。

2.2 固液两相速度的比较

图 4~图 7 所示的是表曝机转速为 150 r/min 时固液两相的速度比较, 由图中可以看出, 固液两相的流动速度差别较小, 固相流动速度略小于液相。而沉降速度差别略大, 由于惯性的影响, 固相的沉降速度稍大于液相。图中固液两相的速度差别较小, 变化趋势一致, 因此在以后的讨论中仅考虑液相速度。

2.3 表曝机转速的影响

在 60 r/min、150 r/min、200 r/min 和 600 r/min 4 个转速下对氧化沟内的流速进行了测试, 以考察表曝机转速的影响。实验中, 氧化沟内水深为 120 mm, 表曝机与液面相平。如图 8~图 11 所示, 随着表曝机转速的增大, 流动速度和沉降速度均逐渐增大, 但沉降速度的变化趋势与流速明显不同。与

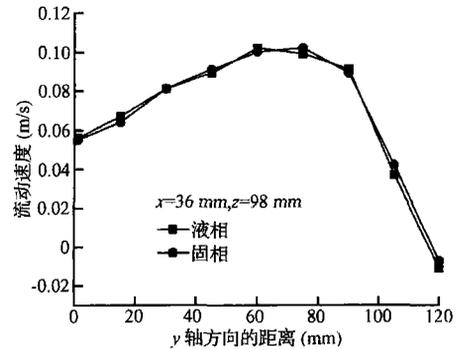


图 4 固液两相流动速度沿 y 轴方向的比较
Fig. 4 Comparison of flow velocity between solid and liquid in y axis

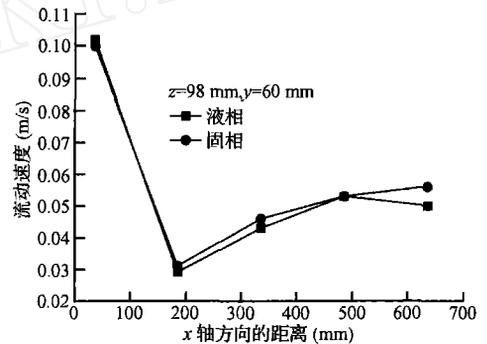


图 5 固液两相流动速度沿 x 轴方向的比较
Fig. 5 Comparison of flow velocity between solid and liquid in x axis

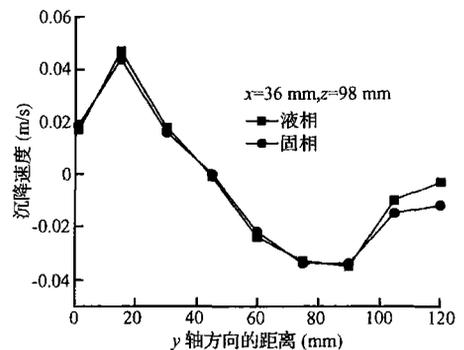


图 6 固液两相沉降速度沿 y 轴方向的比较
Fig. 6 Comparison of settling velocity between solid and liquid in y axis

图 4 对比即可发现, 沿 x 轴方向位置不同, 流动速度变化趋势也在发生变化。在流出表曝机一侧 ($x = 36$ mm), 由氧化沟壁至中间挡板, 流速先增大后减小; 而在氧化沟直段的中间位置 ($x = 336$ mm), 越靠近中间挡板流速越小, 并逐渐趋于稳定。另外, 流动速度和沉降速度均在流出表曝机一侧具有较大的速度值, 流入表曝机一侧速度较小。

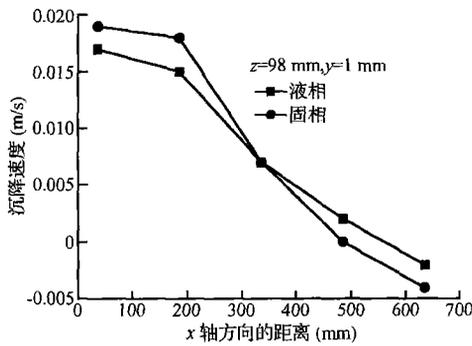


图 7 固液两相沉降速度沿 x 轴方向的比较
Fig. 7 Comparison of settling velocity between solid and liquid in x axis

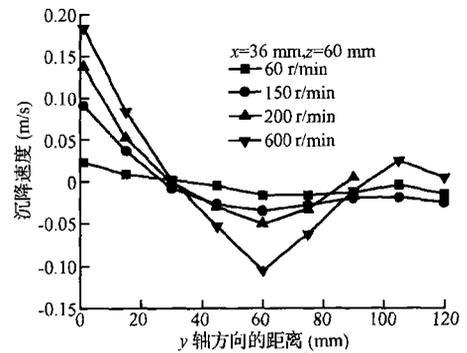


图 10 不同位置搅拌转速对沉降速度的影响 (沿 y 轴方向)
Fig. 10 Influence of aerator speed on settling velocity (in y axis)

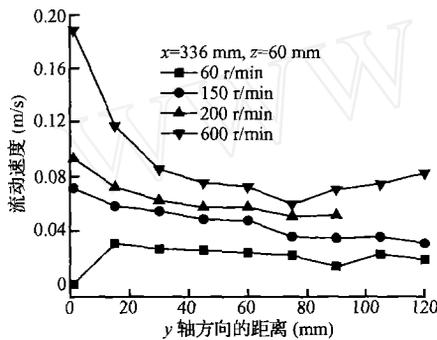


图 8 不同位置搅拌转速对流动速度的影响 (沿 y 轴方向)
Fig. 8 Influence of aerator speed on flow velocity (in y axis)

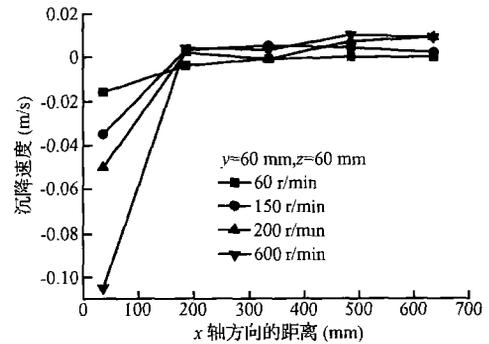


图 11 不同位置搅拌转速对沉降速度的影响 (沿 x 轴方向)
Fig. 11 Influence of aerator speed on settling velocity (in x axis)

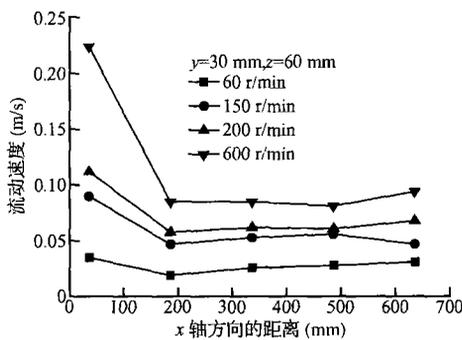


图 9 不同位置搅拌转速对流动速度的影响 (沿 x 轴方向)
Fig. 9 Influence of aerator speed on flow velocity (in x axis)

2.4 表曝机位置的影响

表曝机对于氧化沟内的流动起着非常重要的作用,其位置的改变也会影响氧化沟内的流动。实验中,改变表曝机相对于液面的位置,在将表曝机降低

至液面以下 5 mm 和升高至液面以上 5 mm 2 种情况下,对流场分别进行测定,并与标准位置的测定结果(表曝机与液面相平)进行比较。

图 12 中表曝机转速为 150 r/min,随着表曝机浸入液面深度的增加,流动速度逐渐增大。沉降速度受表曝机在液面内浸没深度的影响不明显,图 13 同样可以看出,随着表曝机浸没深度的增加,沉降速度略有增大。

2.5 氧化沟深度的影响

改变小试氧化沟内水的深度至 110 mm 和 130 mm,并与 120 mm 的结果比较,以考虑氧化沟深度对流态的影响。图 14、图 15 所示的为 150 r/min 时氧化沟深度对速度的影响,随着氧化沟深度的增加,距离液面相同位置处流体的速度逐渐减小。因此,同样表曝机转速时,较深的沟其底部流速较小,污泥沉积可能性较大,应选用大功率表曝机或在沟底添加水下推流器。

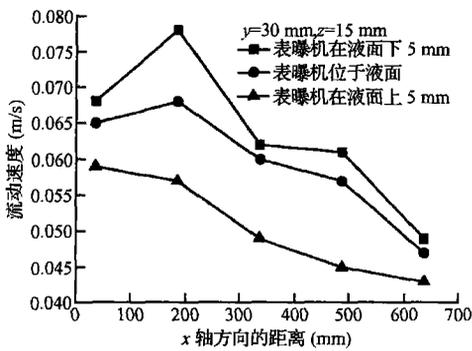


图 12 表曝机位置对流动速度的影响

Fig. 12 Influence of aerators location on flow velocity

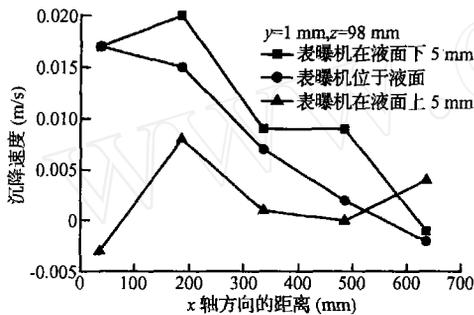


图 13 表曝机位置对沉降速度的影响

Fig. 13 Influence of aerators location on settling velocity

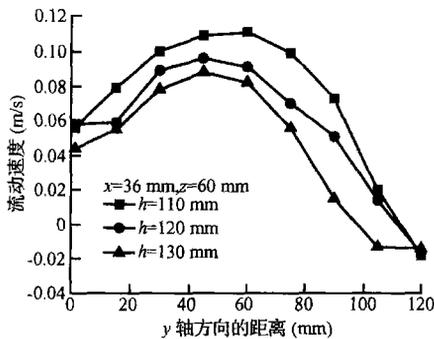


图 14 沿 y 轴方向氧化沟深度对流动速度的影响

Fig. 14 Influence of the height of oxidation ditch on flow velocity in y axis

2.6 与污水处理厂的比较

图 16 是淮北市污水处理厂 Carrousel 2000 型氧化沟测试所得到的结果,其氧化沟分 6 廊道,每廊道净宽 9 m,有效水深 5 m,测试了氧化沟外侧同一廊道上 4 个不同断面在 3 个不同深度 (0.5 m、1.5 m 和 3 m) 时的流速。将本文在 150 r/min 时的实验结果 (图 17) 与淮北市污水处理厂的结果比较发现,淮北市污水处理厂的测试点深度分别为其沟深的

0.1、0.3 和 0.67,而本实验的高度 5 mm、60 mm 和 98 mm 分别为总沟深 120 mm 的 0.04、0.5 和 0.8,虽然氧化沟的形式、测试点的深度略有不同,本实验曲线与淮北污水处理厂的速度变化趋势一致,沿着流动方向,流速先减小后增大。

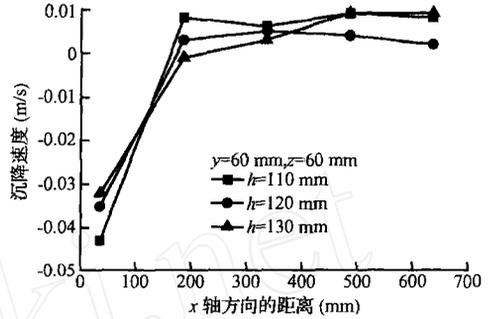


图 15 沿 x 轴方向氧化沟深度对沉降速度的影响

Fig. 15 Influence of the height of oxidation ditch on settling velocity in x axis

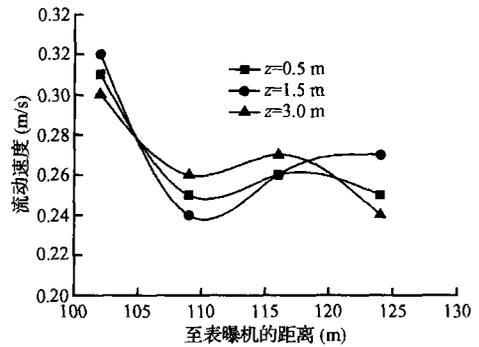


图 16 污水处理厂的结果

Fig. 16 Results of wastewater treatment plant

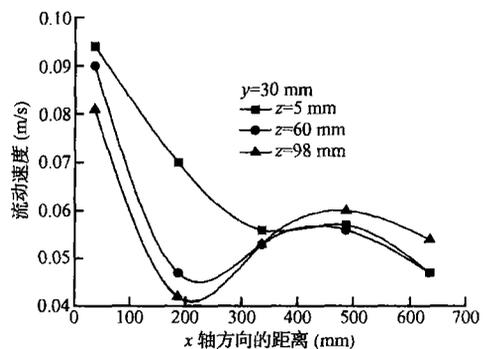


图 17 本实验结果

Fig. 17 Results of the experiment

2.7 讨论

通过对实验结果分析发现,表曝机的转速、相对于液面的位置对流速影响较大,流出表曝机时的流

速较大,随着与表曝机间距离的增大,流速会减小,同时,随着深度的增大,流速会减小。因此,氧化沟底部、流出表曝机后接近廊道直段的中间位置速度较小,有可能会发生污泥沉降。为了使整个氧化沟内有比较大的平均流速,防止污泥沉积,可以采取以下措施:

(1)可以适当增大表曝机转速或将表曝机浸入液面下一定深度,达到增大流速的作用。

(2)对于较深的氧化沟,为了保证沟底的流速,可以在沟底添加水下推流器。

(3)可以考虑在流出表曝机进入直段后的适当位置加一挡板,使流体较大的动能传递给沟底以及沟直段中间位置的流体,以达到沟内较大的平均流速,此挡板应与水流方向垂直,与竖直方向呈一定角度,即挡板底部偏向水流方向。

3 结 论

本研究通过采用 PDA 对氧化沟内的流动进行实验测定,分析考虑了表曝机的转速、表曝机相对于液面的位置、氧化沟的深度等因素对流动速度和沉降速度的影响,得出了氧化沟内较系统的流动特性,提出了一定的改进措施,为氧化沟的优化设计提供了依据。主要得出以下结论:

(1)氧化沟内固液两相的速度差别较小,由于惯性的影响,固体的沉降速度略大于液相,流速小于液相,但固相与液相的速度变化趋势相同;

(2)随着距离表曝机位置的不同,各测试断面上的速度沿 y 轴方向的变化趋势也不同,而从表曝机流出的速度明显大于流入表曝机的速度。表曝机转速的增大或表曝机在液面内浸没深度的增加,都会使氧化沟内的流速、沉降速度逐渐增大。随着氧化沟深度的增加,在距离液面同样深度处速度会有降低;

(3)将小试结果与实际污水处理厂的结果比较发现,尽管沟型有所不同,但速度的变化趋势是相同的;

(4)为了防止污泥沉积,可以采取增大表曝机转速、将表曝机浸入液面下一定深度、添加水下推流器或在流出表曝机后直段的适当位置设置挡板等措施。

参 考 文 献

- [1] Stamou A. I. Modelling of oxidation ditches using an open channel flow 1-D advection-dispersion equation and ASM1 process description. *Wat. Sci. Tech.*, **1997**, 36(5): 269 ~ 276
- [2] Clercq B. D., Coen F., Vanderhaegen B., Vanrolleghem P. A. Calibrating simple models for mixing and flow propagation in wastewater treatment plants *Wat. Sci. Tech.*, **1999**, 39(4): 61 ~ 69
- [3] 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
- [4] 邓荣森,张贤彬,潘江浚,等. 一体化氧化沟混合液循环流动情况试验研究. *给水排水*, **1998**, 24(2): 12 ~ 17
- [5] 陈学群,俞爱媚,吕斌. Carrousel 氧化沟技术演变规律的探究. *给水排水*, **2002**, 28(2): 19 ~ 21
- [6] 曹瑞钰,陈秀成,张焕文. 大功率倒伞型曝气机性能检测和研究. *给水排水*, **2002**, 28(10): 67 ~ 71
- [7] 胡天媛,徐伟. 地处西北高原的表曝型氧化沟处理厂设计. *中国给水排水*, **2003**, 19(9): 83 ~ 85
- [8] 刘家富,吕斌,曹红涛,等. 卡鲁塞尔 2000 氧化沟的调试及运行. *中国给水排水*, **2004**, 20(11): 101 ~ 103
- [9] Rhodes M. J. A simple non-isokinetic sampling probe for dense suspensions *Powder Tech.*, **1992**, 70: 141 ~ 151
- [10] Fasching G. E. Capacitive system for three-dimensional imaging of fluidized-bed density. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **1994**, 43(1): 56 ~ 65
- [11] Tillenkamp F., Loth R. Phase distribution measurements during transient bubbly two-phase flow in a vertical pipe. *Chem. Eng. Tech.*, **2000**, 23(4): 347 ~ 352
- [12] Long Fan, Zaisha Mao, Yundong Wang Numerical simulation of turbulent solid-liquid two-phase flow and orientation of slender particles in a stirred tank *Chem. Eng. Sci.*, **2005**, 60(24): 7045 ~ 7056
- [13] 竺晓程,郭强,杜朝辉. 带间隙轴流转子顶部三维整体平均速度测量. *空气动力学学报*, **2004**, 22(2): 196 ~ 200
- [14] 崔金雷,王希麟,容易. 颗粒在气固两相圆湍射流近场截面对气相的影响. *清华大学学报(自然科学版)*, **2005**, 45(8): 1088 ~ 1090
- [15] 缪骏,谷传纲,王彤,刘文华. 小流量工况下旋转离心叶轮内部流场 PDA 测量与分析. *上海交通大学学报*, **2004**, 38(7): 1209 ~ 1213
- [16] 朱德忠. 热物理测量技术. 北京:清华大学出版社, **1990**. 141 ~ 159
- [17] Rashidi M., Hetsroni G., Banerjee S. Particle-turbulence interaction in a boundary layer *Inter J. Multiphase Flow*, **1990**, 16(6): 935 ~ 959
- [18] 马仲明. 激光相位多普勒(PDA)超高速信号处理器的研制. *仪器仪表学报*, **1996**, 17(1): 61 ~ 66
- [1] Stamou A. I. Modelling of oxidation ditches using an open channel flow 1-D advection-dispersion equation and ASM1