

新型气升式氧化沟流体力学特性的数值模拟

庞洪涛,施汉昌*,施慧明 (清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084)

摘要: 以基于计算流体力学的 FLUENT 软件为工具,选用雷诺应力模型对小试气升式氧化沟的三维流场进行模拟研究,比较了进气量分别为 0.25,0.5,0.75m³/h 以及污泥浓度分别为 2.5,5.0g/L 时的流速和流态.结果表明,气升式氧化沟的流态从整体上看是完全混合的,但其底部由于流速较大又具有推流特性;进气量对液相流速影响明显,对整体流态并无影响,污泥浓度对流速和流态影响都很小;将模拟结果与实际测试数据对比,表明该模拟结果可靠,可用于小试反应器的流体力学特性研究.

关键词: 气升式氧化沟; 流体力学特性; 数值模拟

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2008)05-0438-06

Numerical simulation of the hydrodynamic characteristics of an innovative air-lift oxidation ditch. PANG Hong-tao, SHI Han-chang*, SHI Hui-ming(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2008,28(5): 438~443

Abstract: Based on the principle of computational fluid dynamics the flow characteristics of a bench-scale air-lift oxidation ditch was simulated by using FLUENT software and three dimensional Reynolds stress model. Hydrodynamic behaviors with different airflow rate, respectively 0.25,0.5,0.75m³/h, and MLSS of 2.5g/L and 5.0g/L were compared. The flow pattern of the whole reactor was complete mixing, but plug flow characteristic appeared in the bottom area as relatively higher flow velocity. The airflow rate had obvious influence on flow velocity, and no influence on flow pattern. MLSS had little influence on flow velocity and flow pattern. Simulation results were compared with corresponding experimental data. The result indicated that numerical simulation was reliable, and could be used to investigate the hydrodynamic characteristics of bench-scale air-lift oxidation ditch.

Key words: air-lift oxidation ditch; hydrodynamic characteristics; numerical simulation

近年来,作为废水处理主要工艺的氧化沟技术,其研究及应用发展迅速.在实际应用中,氧化沟具有基建费用低,工艺流程简单,运行管理简便,脱氮效果好等诸多优点,但也同时存在能耗相对较高,占地面积大的不足.由于氧化沟多采用表面机械曝气,造成沟深浅,传质效率较低,在能源和土地资源日趋紧张的情况下,氧化沟的应用会受到一定的限制^[1-2].针对氧化沟工艺存在的主要问题,本研究将气升原理引入氧化沟,采用水下微孔曝气和折流板结合替代传统氧化沟中的机械表面曝气设备作为充氧和动力系统开发了一种新型污水处理反应器——气升式氧化沟^[3],其流态与传统氧化沟明显不同.

气升式氧化沟利用水下微孔曝气设备和折流板同时实现供氧、推流与混合,沟内流动十分

复杂,因此深入了解反应器的流体力学特性是十分必要的.基于计算流体力学(CFD)的数值模拟在研究反应器流体力学特性方面,具有简单、快捷和准确等优点,在氧化沟和其他类型污水反应器的流体力学特性研究中已有较为广泛的应用^[4-8].这些研究表明基于计算流体力学的数值模拟可以准确描述反应器内的流态,并为反应器的设计和优化提供指导.作者以基于计算流体力学的商用软件 FLUENT 为工具,模拟了小试气升式氧化沟的三维湍流流场,研究了沟内流态特征和流速分布,以及进气量和污泥浓度对流速的影响.

收稿日期: 2007-08-17

基金项目: 国家“863”项目(2004AA601061)

* 责任作者, 教授, hanchang@mail.tsinghua.edu.cn

1 研究方法

1.1 研究对象

小试气升式氧化沟结构如图 1 所示,反应器两侧各有 1 组折流板,每组由 3 块折流板共同构成,在折流板之间利用微孔曝气设备曝气,同时起到充氧、混合和推动反应器中混合液循环流动的作用.反应器的结构参数 $L, D, H, h_1, h_2, h_3, l_1, l_2$, 的取值分别为 50, 30, 40, 10, 30, 10, 10, 10cm.

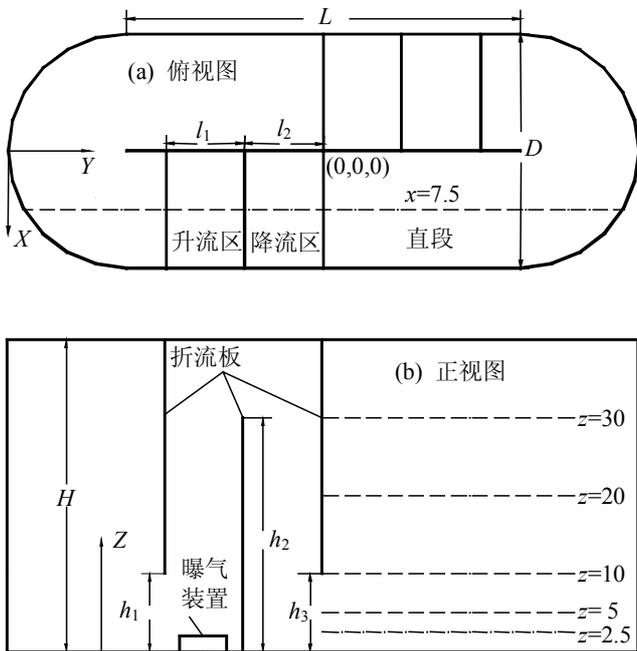


图 1 气升式氧化沟的俯视图与正视图

Fig.1 Plant form and side view of air-lift oxidation ditch

1.2 多相流模型的选择

本研究的模拟对象属于气-液两相流问题,在 FLUENT 中,共有 3 种欧拉-欧拉多相流模型,分别为流体体积模型(VOF),混合物模型以及欧拉模型^[9].气升式氧化沟内的流动属于气动运输的均匀流动,忽略自由表面和相间传质将问题简化,采用混合物模型是最佳的.

1.3 三维湍流模型的选择

$k-\varepsilon$ 模型是目前使用最广泛的湍流模型,FLUENT 提供了 4 种 $k-\varepsilon$ 模型:标准 $k-\varepsilon$ 模型、压力修正 $k-\varepsilon$ 模型、雷诺应力模型(RSM)、以及大漩涡模拟模型.对多种湍流模型模拟比较后认为直接对雷诺应力建立方程的 RSM 模型是最适合的.对于不同的进气量,它的收敛情况比

较稳定,而且模拟结果符合小试反应器的实际流动情况.

在 FLUENT 中 RSM 是最精细制作的模型,RSM 放弃了等方性边界速度假设,使得雷诺平均 N-S 方程封闭,解决了关于方程中的雷诺压力,还有耗散速率.这意味这在二维流动中加入了 4 个方程,而在三维流动中加入了 7 个方程.由于 RSM 比单方程和双方程模型更加严格地考虑了流线型弯曲、漩涡、旋转和张力快速变化,它对于复杂流动有更高的精度预测潜力^[9-10].
雷诺应力方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i' u_j') + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u_i' u_j'}) = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user} \quad (1)$$

式中: u_i' 为 i 方向上的速度脉动量; $i, j, k=1,2,3$, 对于本问题 $\partial/\partial t$ 项为 0,方程左边仅有对流项; $D_{T,ij}$ 为湍流扩散项,

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + p(\delta_{ij} u_i' + \delta_{ik} u_j') \right];$$

$$D_{L,ij} \text{ 为分子扩散项, } D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i' u_j'}) \right];$$

$$P_{ij} \text{ 为压力产生项, } P_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right);$$

$$G_{ij} \text{ 为浮力产生项, } G_{ij} = -\rho \beta \left(\overline{g_i u_j' \theta} + \overline{g_j u_i' \theta} \right);$$

$$\phi_{ij} \text{ 为应力应变模量, } \phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right);$$

$$\varepsilon_{ij} \text{ 为耗散项, } \varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k};$$

F_{ij} 为系统旋转产生的力,本问题中为 0; S_{user} 为其他,本问题中为 0.

1.4 模拟参数取值

以实际反应器的运行条件作为参考,确定模拟参数的取值,研究了反应器内的流态特征和流速分布,并对进口气速和污泥浓度对流态的影响进行了模拟.反应器的进气量和污泥浓度的取值如下:

实际反应器进气量 $Q=(0.25\sim 0.5)\text{m}^3/\text{h}$,模拟中进气口表观气速分别取 1,2,3cm/s 进行模拟,对

应进气量分别为 0.25,0.5,0.75m³/h.

使用 Brookfield DV-I 型黏度计测试了实际反应器中的液相黏度,在污泥浓度 2~6g/L 的范围内,污泥浓度与液相黏度呈良好的线性关系.模拟中液相黏度分别取 1.60,2.76mPa·s(对应污泥浓度分别为 2.5,5.0g/L)来模拟不同污泥浓度对反应器流动的影响.

2 结果和讨论

2.1 气升式氧化沟流态特征

取进气流速 $v=2\text{cm/s}$,液相黏度 $\mu=1.33$ 的模拟结果对小试气升式氧化沟的流态进行分析.气升式氧化沟两侧呈对称结构,流态基本一致.且沿 X 方向曝气均匀,因此取 $x=7.5\text{cm}$ 断面分析整个氧化沟内的流态特征.由图 2 可见,在流态稳定的氧化沟断面上,流速分布呈现一定的规律:水流进入升流区被空气推动,再经过降流区进入氧化沟直段($0<y<25\text{cm}$),直段底部的高速水流带动中上部流动形成湍流.因而,气升式氧化沟内升流区流速最大,降流区次之,在直段底部流速大于中上部流速.这与表面机械曝气气氧化沟上部流速大,沟底流速小的情况完全相反,因此可以有效克服沟底污泥沉积问题.

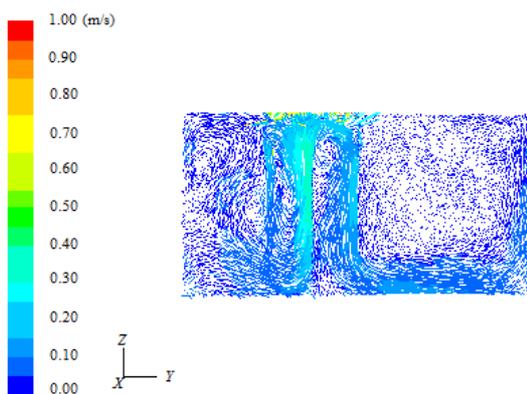


图 2 $x=7.5\text{cm}$ 平面处速度矢量图

Fig.2 Vector of liquid velocity at the plane of $x=7.5\text{cm}$

分别取 $z=5\text{cm}$ 和 $z=20\text{cm}$ 处断面进一步分析氧化沟底部和中部流态.由图 3 可见,气升式氧化沟两侧流态基本一致,底部具有明显的推流特征,靠近弯道壁面的水流速度小于直段;直段中部呈现复杂的湍流,靠近弯道壁面的水流速度大于

直段,并在另一侧的升流区前形成旋涡.结合图 3 综合分析,这是由于直段底部的高速水流与壁面发生碰撞后向上流动,一部分水流后折回同侧的直段并在中上部形成湍流,另一部分水流向下流动进入另一侧的升流区.

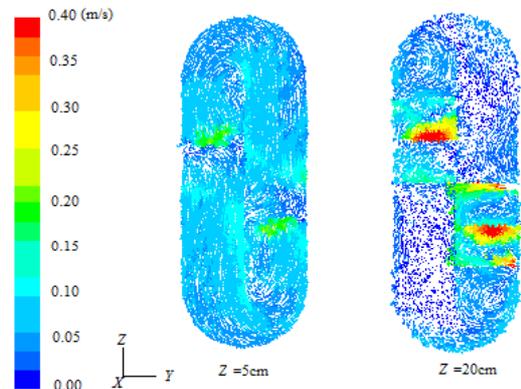


图 3 $z=5$ 和 $z=20\text{cm}$ 平面处速度矢量图

Fig.3 Vector of liquid velocity at the plane of $z=5,20\text{cm}$

图 4 是在 $x=7.5\text{cm}$ 断面, $z=5\text{cm}$ 和 $z=20\text{cm}$ 直线上各点沿 X 、 Y 、 Z 方向的速度分布,可以更准确地说明 $z=5\text{cm}$ 和 $z=20\text{cm}$ 断面处的流态特征.由图 4 可见,在氧化沟直段 $z=5\text{cm}$ 和 $z=20\text{cm}$ 断面上水流沿 X 和 Z 方向的流速均 $<0.02\text{m/s}$.在 Y 方向上, $z=5\text{cm}$ 处流速均 >0 ,直段流速约为 0.08m/s ,流动方向为 Y 轴正方向,而在 $z=20\text{cm}$ 处,降流区之后的直段流速均 <0 ,流动方向为 Y 轴负方向,这也再次证明在直段是由底部高速水流带动中上部形成湍流.综上所述,气升式氧化沟的流态从整体上看是完全混合.

2.2 气升式氧化沟流速分布

2.2.1 沟底流速分布 在 $x=7.5\text{cm}$ 的断面上,分别取 $z=2.5,5,10\text{cm}$ 对氧化沟底部流速进行分析.如图 5 所示,在降流区距沟底距离越大流速越大,而在直段情况恰好相反,在 $z=2.5\text{cm}$ 处流速最大,平均流速约为 0.10m/s .

2.2.2 中上部流速分布 在 $x=7.5\text{cm}$ 的断面上,分别取 $z=10,20,30\text{cm}$ 对氧化沟内中上部流速进行比较.如图 6 所示,在降流区 $z=30\text{cm}$ 处流速略高,在直段 $z=10\text{cm}$ 处流速最大, $z=20\text{cm}$ 和 $z=30\text{cm}$ 处流速差别很小,说明中上部流场比较均匀,平均流速约为 0.02m/s .

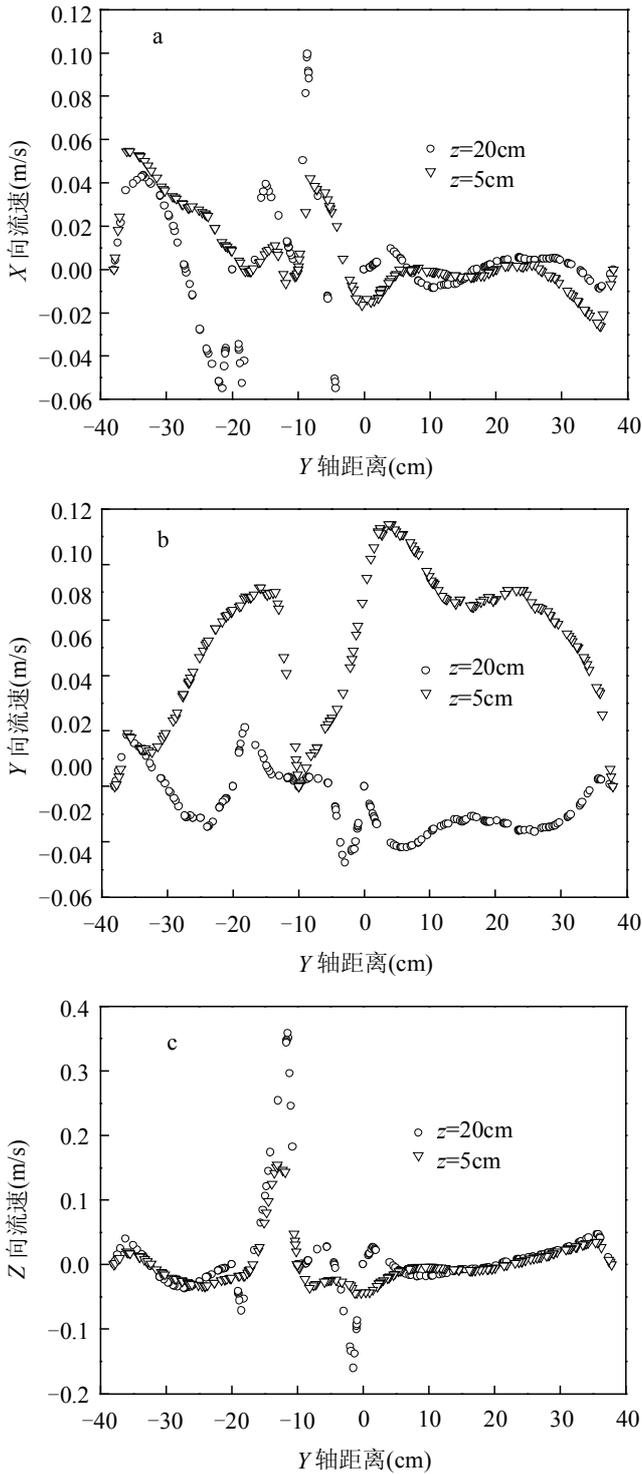


图4 $x=7.5\text{cm}$ 断面处 X,Y,Z 方向流速
Fig.4 Velocity of X,Y,Z directions at the plane of $x=7.5\text{cm}$

2.3 进气量对流速的影响

通过改变曝气区出口表观气速(v)来研究进气量对流速的影响.图 7,图 8 是出口气速(v)分别为 1,2,3cm/s 时, $x=7.5\text{cm}$ 断面处氧化沟底部($z=5\text{cm}$)和中部($z=20\text{cm}$)的流速分布.由图 7,图 8 可见,随着进气速度的增加,各区域液相流速均增

大,在氧化沟底部,进气量变化对流速影响明显,而在氧化沟中部,进气量对流速变化影响较小.尽管改变进气量会使反应器内的液相流速发生变化,但不同进气量下流速分布规律相同,说明进气量对反应器的整体流态并无影响.

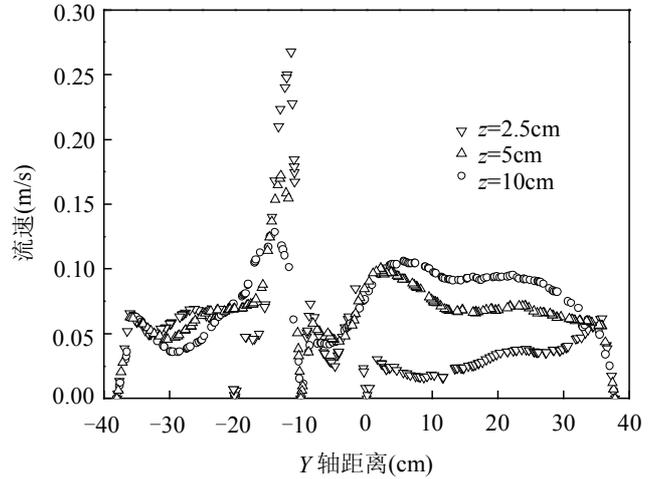


图5 气升式氧化沟底部流速分布
Fig.5 Liquid velocity in the bottom area of air-lift oxidation ditch

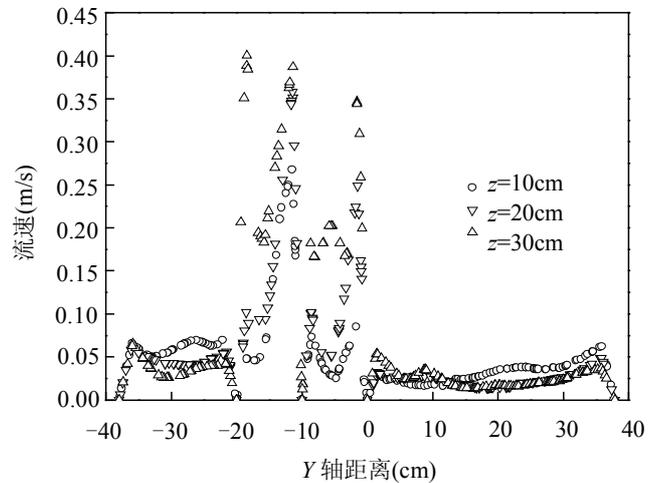


图6 气升式氧化沟中上部流速分布
Fig.6 Liquid velocity in middle and top area of air-lift oxidation ditch

2.4 污泥浓度对流速的影响

气升式氧化沟小试反应器的污泥浓度一般控制在 2~4g/L,污泥浓度的增加会提高反应器内的液相黏度,增加流动阻力.为了考察液相黏度对流态的影响,实验模拟了液相黏度分别为 1.60, 2.76mPa·s,对应污泥浓度分别为 2.5,5.0g/L 时的反应器流态.如图 9,图 10 所示,在液相黏度分别为 1.60,2.76mPa·s 时,氧化沟底部($z=5\text{cm}$)和中部

($z=20\text{cm}$)的流速差别甚小,流态也基本一致,说明污泥浓度在 $2.5\sim 5\text{g/L}$ 间变化时对流态几乎没有影响.

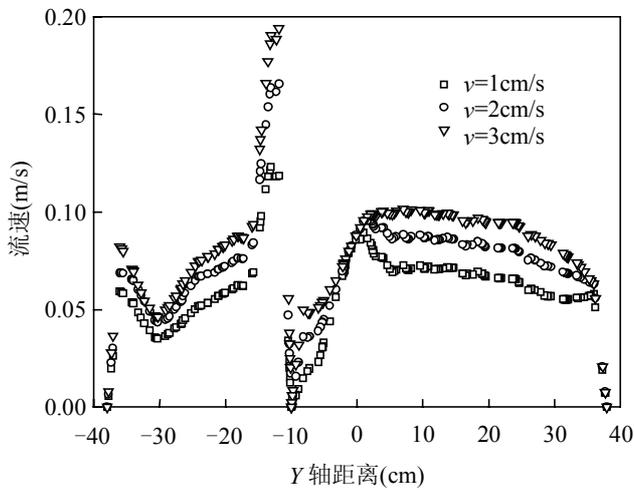


图7 进气量对底部流速的影响

Fig.7 Effect of airflow rate on liquid velocity in bottom area

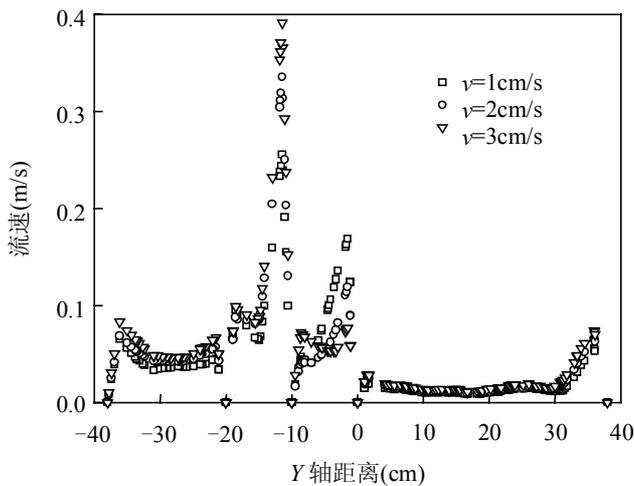


图8 进气量对中部流速的影响

Fig.8 Effect of airflow rate on liquid velocity in middle and top area

2.5 模拟结果的检验

为了检验 FLUENT 模拟小试气升式氧化沟流态的准确性,采用 LYG-III型多功能智能流速仪测试了小试反应器的Y方向流速,图11是模拟流速与实测流速在氧化沟底部($z=2\text{cm}$)和中部($z=20\text{cm}$)的速度大小对比.由图11可见,模拟流速值与实测流速值相差很小,整体上实测流速略高于模拟流速,模拟结果能够准确地反映反应器内的实际流速.

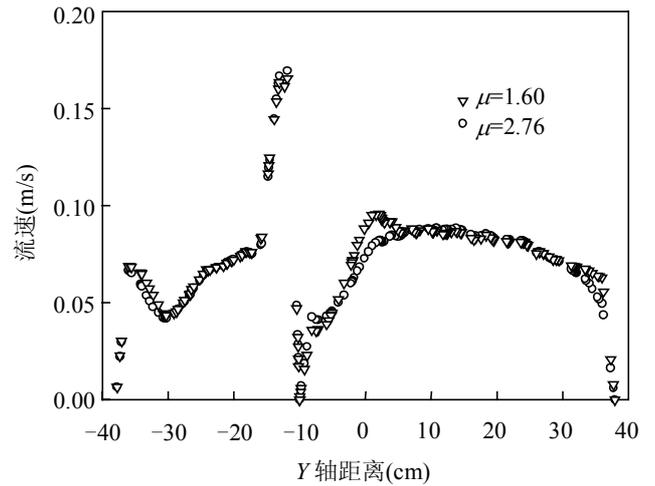


图9 污泥浓度对底部流速的影响

Fig.9 Effect of MLSS on liquid velocity in bottom area

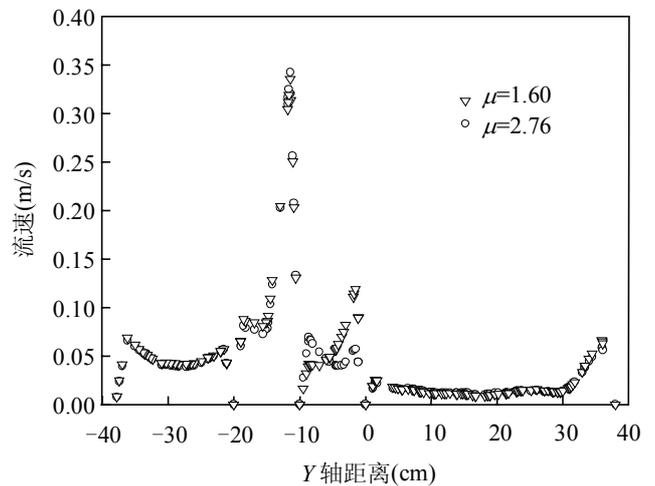


图10 污泥浓度对中部流速的影响

Fig.10 Effect of MLSS on liquid velocity in middle and top area

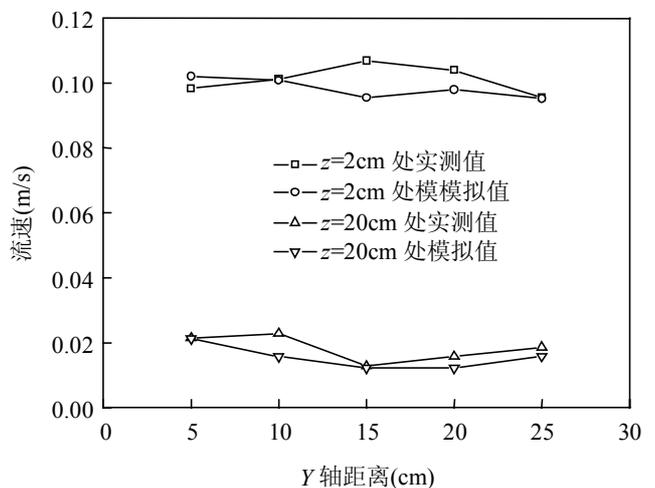


图11 模拟流速与实测流速的对比

Fig.11 Comparison on simulation data and test results

3 结论

3.1 选用雷诺应力模型对小试气升式氧化沟的三维流场进行模拟,结果表明,气升式氧化沟的流态从整体上看是完全混合的,但是在底部由于其流速较大又具有推流特性。

3.2 气升式氧化沟直段底部流速高于中上部,由底部水流带动中上部形成湍流,因此可以提高氧气利用率,并有效防止沟底污泥沉积。

3.3 进气量分别为 0.25,0.5,0.75m³/h 时,随着进气量的增加反应器内各区域流速均变大,但进气量变化对整体流态并无影响;污泥浓度分别为 2.5,5.0g/L 时对流速和流态影响均很小。

3.4 采用基于计算流体力学的 FLUENT 软件对小试气升式氧化沟流态进行数值模拟,能够快速、准确地模拟反应器的流体力学特性,有望在中试反应器的设计中得到进一步应用。

参考文献:

- [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, 2006:1-8.
- [2] 区岳州,胡有为.氧化沟污水处理技术及工程实例 [M]. 北京:

化学工业出版社, 2005: 1-10.

- [3] 施汉昌,殷益明.气升式深水型氧化沟 [P]. 中国:200510008928. 5,2005-11-09.
- [4] Karama A B, Onyejekwe O O, Brouckaert C J, et al. The use of computational fluid dynamics (CFD):technique for evaluating the efficiency of an activated sludge reactor[J]. Water Science and Technology, 1999,39(10/11):329-332.
- [5] 罗麟,李伟民,邓荣森,等.一体化氧化沟的三维流场模拟与分析 [J]. 中国给水排水, 2003,19(12):15-18.
- [6] LUO Lin, LI Wei-min, DENG Rong-sen, et al. Numerical simulation of a combined oxidation ditch flow using 3Dk-ε turbulence model [J]. Journal of Environmental Sciences, 2005,17(5):802-818.
- [7] 张宗才,张新申,张铭让.氧化沟水力学分析及流场计算 [J]. 中国皮革, 2004,33(11):22-25.
- [8] 李敏,王光谦,占树华,等.内循环生物流化床反应器流体力学特性的数值模拟 [J]. 环境科学学报, 2004,4(3):400-404.
- [9] 韩占忠,王敬,蓝小平.FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004: 1-22.
- [10] 王福军.计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004:1-23.

作者简介: 庞洪涛(1980-),男,辽宁大连人,清华大学环境科学与工程系博士研究生,主要从事水污染控制技术的研究。

计算机和打印机排放室内空气污染物

办公室一些设备如计算机和打印机可能会造成一些健康危害,人们对这些设备的潜在有害排放日益关注。

人们在努力使建筑物更加节能的同时,往往会限制与外界的通风,结果是即使相当低水平的排放也能使污染物积累在值得关注的水平。

在这方面的研究虽不是很多,但已有的文献确定了从一些办公室设备中释放出来的污染物.美国国立劳伦斯·柏克利研究所(LBNL)、加利福尼亚大学和亚利桑那州立大学已做过计算机和打印机排放的系统研究.2007年11月,在密尔沃基举行的环境毒理学和化学学会年会上,LBNL的室内环境部副主任 Thomas E Mchone 报告了他们的初步研究成果。

目前对室内办公设备的排放没有政府法规.各州对建筑物定出一些规范,但没有涉及健康危险.现在已知室内颗粒物和挥发性化合物与头痛、疲乏和眼、鼻、喉的刺激有关.有些研究则表明这类污染物会干扰内分泌系统.设在乔治亚 Marietta 的一家空气测试公司的首席科学家 Marilyn S Black 说:“必须尽量减少人们对室内空气污染物的暴露.办公室设备会释放化学物质和颗粒物的混合物,会产生协同作用。”

加利福尼亚州空气资源局为此造访 LBNL 的研究人员,要求表征从计算机和打印机排放出来的污染物种类和数量.为此 LBNL 研究人员进行了二轮较深入的研究,污染物包括不同种类的阻燃剂、邻苯二甲酸酯、甲苯、乙基苯、二甲苯、苯乙烯等.打印机还会排放细颗粒物。

江英摘自《Chemical & Engineering News》December 24,43(2007)