

废水处理反应器流体力学特性测试 与研究系统的研制

施慧明, 庞洪涛, 单立志, 施汉昌

(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)

摘要: 随着废水处理技术的发展, 对反应器内部流态及传质过程的研究显示出其重要性。为此, 清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开发了废水处理反应器流体力学特性测试与研究系统。该系统由废水处理反应器基本单元模型平台、流体力学特性测试系统和计算流体力学仿真模拟系统组成, 各单元均有其技术特点, 在教学和科研中得到了应用。

关键词: 废水处理反应器; 流体力学; 模拟实验; 模拟计算

中图分类号: X703.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1002-4956(2009)05-0073-03

Development of testing and research system for the performances of fluid mechanics in wastewater treatment reactor

Shi Huiming, Pang Hongtao, Shan Lizhi, Shi Hanchang

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The research of flow characteristic in wastewater treatment reactor becomes an important problem with the development of wastewater treatment technology. A testing and research system on this problem is designed by the staff of Department of Environmental Science and Engineering of Tsinghua University. This system includes bench-scale reactor, flow characteristic testing unit, and numerical simulation units. Each unit is technically eligible and meets the need of teaching and research.

Key words: wastewater treatment reactor; fluid mechanics; simulation experiment; numerical simulation

1 水处理技术中流体力学研究的必要性

目前, 我国应用的废水处理技术绝大部分是在引进国外工艺技术的基础上发展起来的。随着我国经济技术和环境保护需求的发展, 这一状况已经不能满足国家的要求, 需要在现有的技术基础上自主创新, 研制和发展高效低耗的废水处理技术。为了达到这一目标, 迫切需要在水处理工程的教学与研究中加强反应器的流体力学特性及传质理论的内容。

在以往的水处理教学中, 注重生物反应动力学过程, 而忽略了反应器的流体力学特性和物质的传输过程。常常假设反应器内的流体处于均匀混合、充分曝气的理想状态, 而在实际中, 这种理想状态很少存在。这一缺陷导致了废水处理知识的不全面和在新型废水

处理反应器研究上自主创新不足。污水在反应器内的流态和流速条件直接影响到反应器内溶解氧、污泥浓度的分布和水力停留时间, 进而影响到污染物降解反应的速度和效率。一些反应过程要求存在浓度梯度, 需要保证一定的流速, 以防止短流和死区的发生。因此, 研究反应器内的流体力学特性对水处理技术的发展具有重要的理论意义和应用价值。近年, 运用计算流体力学和先进的测试手段对废水处理反应器的模拟、计算和优化设计已经显现出良好的发展前景, 并得到环境工程领域科学工作者的广泛重视。

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开发的“废水处理反应器流体力学特性测试与研究系统”, 可以通过实验和计算两种手段对废水处理反应器的流体力学问题进行测试和研究。实验装置可以进行实验演示和仿真模拟, 具有良好的可视性。该系统的建立将能够增加新的实验内容, 使学生了解水处理工程中曝气、搅拌、推流等典型

收稿日期: 2008-06-30 修改日期: 2008-08-31

作者简介: 施慧明(1981—), 女, 北京市人, 硕士, 助理, 主要研究方向为流体力学。

流体力学过程,认识到流体力学在水处理工程中的作用和重要性,并学习流态测试技术和计算流体力学(CFD)软件的应用。该系统具有良好的展示功能,可增进参观者对水处理工程中流体流动现象的直观了解。废水处理反应器的流体力学特性测试与 CFD 模拟的实验系统,在国内各大院校环境系中尚属首创。

2 系统的研发

利用环境模拟与污染控制国家重点实验室人员现有的丰富经验和技能,制作了水处理工艺中的典型反应器及其附属设备,并搭建适于测量研究和教学演示的实验平台。

添置设备,进一步改进和完善激光照相测速方法,使之成为一套准确可靠、简便易用的系统。

购买 CFD 正版软件,聘用专业人员,普及提高 CFD 模拟的水平,总结表面曝气、微孔曝气、推流、沉淀等水处理工程中常见流体力学过程的 CFD 模拟方法。

具体的技术路线如图 1 所示。

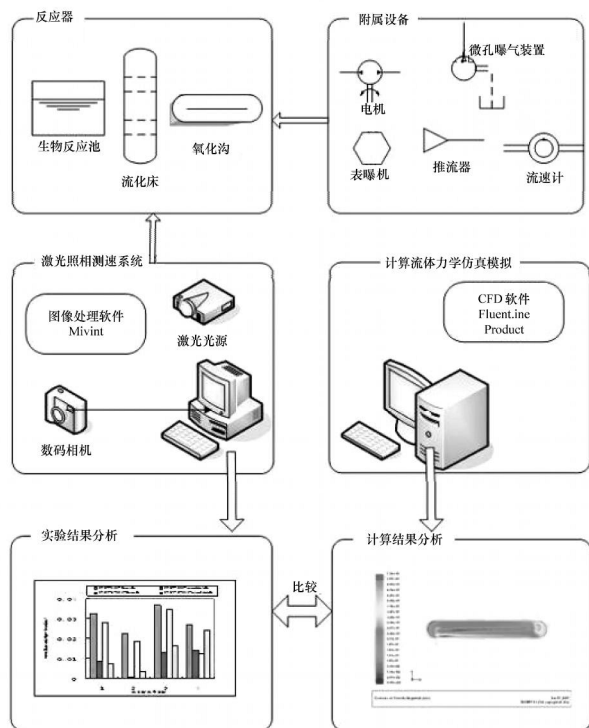


图 1 技术路线

3 系统的组成

废水处理反应器流体力学特性测试与研究系统由废水处理反应器基本单元模型平台、流体力学特性测试系统和计算流体力学模拟系统 3 个单元组成。三者的关系如图 2 所示。

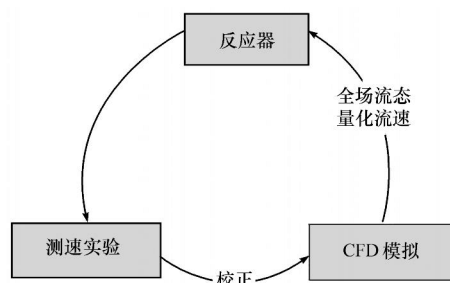


图 2 系统的 3 个单元

(1) 废水处理反应器基本单元模型是系统的基础,也是流体力学研究的对象。依据经验,构建了废水处理中常用的 3 种模型,即方形生物反应池、氧化沟和流化床。该模型与真实反应器的比例约为 $1:10 \sim 1:100$ 。材料采用透明有机玻璃,便于观察流态及应用激光照相测速设备。

反应器需安装附属设备,比较重要的有生物反应池的推流器、流化床的微孔曝气设备和氧化沟的表曝机。这几种动力输入设备均带有控制器,可进行调节。反应器模型如图 3 所示。

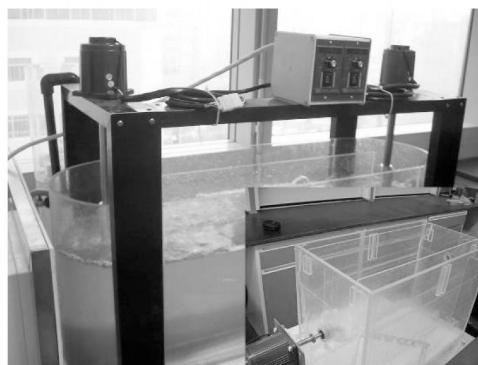


图 3 反应器模型

(2) 流动显示及测量设备为本系统的重要组成部分。由实验室博士后范芳、研究生肖尧等人开发的激光照相测速系统(见图 4)以 PIV 为原理,兼具流动显示与流速测量功能,且成本低廉,易学易用,是测量单元的主要工具。除此之外,还购买了南京水利 LGY—型旋桨式、重庆水文 LS25-3A 型旋桨式、LS45 型旋杯式机械流速仪进行校准及辅助测量流速。

(3) 计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD),是研究流体流动等物理现象的、是随着计算机技术而迅速崛起的一门新学科。CFD 技术具有成本低、速度快、资料完备且可模拟各种不同工况等独特的优点,可应用于航空、航天、船舶、动力、水利、化工、核能、冶金、建筑、环境等许多相关领域。流体是水处理反应器中物质和能量传递的主要载体,反应器的

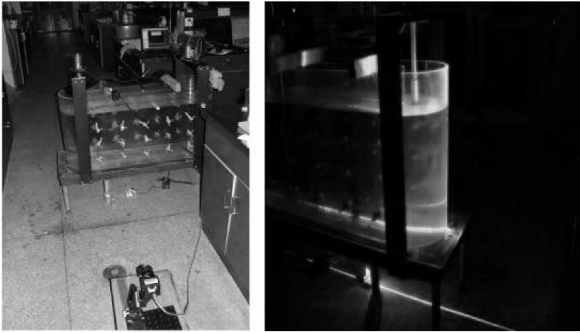


图4 激光照相测速系统

水力特性直接影响反应器的混合过程,制约着反应器的处理效果。利用流体力学的方法研究反应器的水力特性,结合反应器基本原理建立反应器模拟和分析的数学模型,对反应器的设计和运行状况进行分析,将为水处理反应器的优化设计和运行开辟一条新的思路和方法。

4 系统主要技术特点

废水处理反应器流体力学特性测试与研究系统建成后,进行了“氧化沟内水平流速对污泥沉降影响”、“流化床高度-气泡直径统计”、“生物反应池内流态”等实验,并用 CFD 方法模拟对照,得到了良好的实验结果,在教学和科研中都有应用。这套系统的主要技术特点有:

(1) 实验平台主体。采用不锈钢制成,配有专用电源及防水装置,能保证用电安全,而且移动方便,节省空间。

(2) 氧化沟模型。曝气机转速在 $100 \sim 600 \text{ r/min}$ 范围内可调,直段流速在 $0.01 \sim 0.3 \text{ m/s}$,流态稳定,能够进行氧化沟流态演示实验及污泥沉降模拟实验。

(3) 流化床模型。可稳定曝气并控制流量,垂直流速在 $0.01 \sim 0.3 \text{ m/s}$,能够进行曝气实验。曝气头前设有防止水倒流设备,以保证压缩机安全运行。

(4) 推流式反应器模型。推流器转速在 $100 \sim 600 \text{ r/min}$ 范围内可调,能形成较稳定的推流区,流速在 $0.01 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 。

(5) 流体力学特性测试系统。激光照相测速系统可测速、流动显示。LGY—型流速仪精度达 $0.1 \sim$

1 m/s ,可满足实验要求。

(6) 计算流体力学仿真模拟系统。台式机硬件适合计算软件的需求,采用商用软件 Fluent 进行 CFD 模拟、辅助教学和科研。

5 结束语

本系统将流体力学特性研究引入水处理工艺,从流体力学角度研究反应器内的流动及传质过程。通过实验和计算两种手段对废水处理反应器的流体力学问题进行测试和研究,有助于在现有的技术基础上自主创新、研制和发展高效低耗的废水处理技术。

激光照相测速系统通过定时曝光拍照,得到微气泡或固体微颗粒的运动轨迹,并根据曝光时间和轨迹长度可计算出粒子的运动速度与方向。它解决了曝气过程中气液两相流中的测速问题,与可达到同样功能的测速手段,如 PIV 和超声多普勒仪相比,简单易用,成本低廉,且具有良好的可视性,有利于观察流态。

本系统可以对比实验结果与 CFD 模拟结果,实验为 CFD 模拟提供依据,CFD 模拟因其成本低、速度快,又可作为实验的参考,辅助指导实践,二者相辅相成,符合流体力学实验与计算流体力学相结合的发展趋势。

参考文献(References):

- [1] 顾夏声. 水处理工程[M]. 北京:清华大学出版社,1985:159-202.
- [2] 苏铭德,黄素逸. 计算流体力学基础[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [3] 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,2006:77-84.
- [4] 许葆玖,龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [5] 王铁峰,王金福,杨卫国,等. 三相循环流化床中气泡上升速度的实验研究[J]. 高校化学工厂学报,2000(8):334-338.
- [6] 单立志,王锐. 污泥比阻实验设备的改造[J]. 实验技术与管理,2006,23(8):62-64.
- [7] 范珑,陈大方,刘艳臣,等. Carrousel 氧化沟单个表曝机流态的模型试验和分析比较[J]. 环境科学研究,2007(4):97-101.
- [8] Fayolle Y, Cockx A. Oxygen transfer prediction in aeration tanks using CFD[J]. Chemical Engineering Science,2007,62(24):7163-7171.