

• 计算机技术 •

计算机数值仿真在射流曝气器及其反应器设计中的应用

高激飞¹ 顾国维¹ 张亚雷¹ 赵子龙¹ 吴勇² 郑勇²

(1 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2 达源环境科技工程有限公司, 上海 200092)

摘要 在射流曝气器的传统设计中, 一般应用经验的关联数据确定关键结构参数, 很少考虑到射流器内部的流场特性, 而实际气体吸入、剪切破碎、混合传质过程与内部流动过程关系密切。数值仿真技术可以从理论的角度分析射流器和反应器内部的流动特性, 进行大量参数真实工况的数值模拟, 反映射流器性能与关键参数之间的关系, 为优选设计参数提供依据。应用商用 CFD 软件 PHOENICS 3.5.1 在这方面作了初步研究。

关键词 数值仿真 数值模拟 CFD 射流曝气器

CFD 数值仿真技术是利用数值模拟计算方法, 离散和求解流动微分方程, 从而获得流场内有限点上流动参数的近似值。CFD 技术具有计算成本低、速度快、周期短、可以为试验研究提供预测等优点, 而日益被应用于解决工程中的实际问题。但目前国内未发现类似应用这个技术手段进行射流曝气器设计的报道。国外有关于射流曝气器两相模型的报道, 应用 CFD 处理曝气区域的建模、动量和氧气传递方程的计算, 以建立曝气池的完整的流动动力学和生物处理的模型^[1]。

射流曝气器是水处理中一种高效的传质设备, 根据国外的研究报道, 装有射流器的反应器, 其平均气液传质性能比其他类型的反应器高出 10 倍多^[2], 而且设计紧凑, 可靠性高, 制造简单, 便于维修, 投资较省, 运行费用低^[3~5], 因此应用 CFD 数值仿真技术, 克服传统设计中存在的问题有利于其更好地推广应用。

1 传统的设计方法

传统的设计往往应用经验或试验关联数据, 逐步确定各部分的结构参数, 再通过试验检验得到性能较好的一组结构参数, 确定射流器的尺寸, 但其中很少考虑到射流器内部的流动状况。而气体的吸入、剪切破碎、混合传质过程与内部流动过程关系密切, 只有结构设计参数合理, 符合流动规律, 才能达

到较高的动力效率, 降低水处理成本。在参数选择问题上, 一方面射流器在实际工作过程中受到了多个因素(结构尺寸、运行状况及污水特性等)的影响, 往往由于设计时借鉴的是经验数据, 这些数据未必使现在设计的射流器工作在高效区, 也就是说传统设计并不能直接反映影响因素与性能之间的关系, 只是一个比较粗放和宏观的关联。另一方面是试验研究参数个数涉及到费用、成本与研发周期的问题, 一般选择研究的参数个数不会太多, 这样在试验中确定的结构参数有可能未必最优。

2 CFD 的设计应用

在射流器设计中, 数值仿真由于成本费用低, 计算周期又快于试验周期, 所以可以尽可能多的选择参数, 这是传统设计选择参数所覆盖不到的, 同时, 数值模拟涉及的是场概念, 也就是可以达到细观尺度, 不仅可以反映真实工况内部的流动特性, 还可以得到射流过程吸入的流体流量和参数之间的关系, 为设计参数提供依据。

此外, 由于射流器内部流道和流动情况的复杂性, 要测量流场参数将十分困难。而数值仿真可以比较准确地预测出喷嘴内部的压力和速度分布, 有助于进一步改进曝气器的充氧性能。试验后, 根据试验数据, 设置计算参数, 将验证试验过程的数据的可靠性, 并有助于推动射流器的虚拟化设计。

3 射流器模型

衡量射流曝气器性能的指标有动力效率和氧利用率, 由于此类曝气器氧利用率很高, 所以动力效率

国家“十五”科技攻关资助项目(2003BA808A17), 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2004AA649310)。

在一定程度上与射流器的吸气量关系密切,吸气量几乎成了射流器的性能指标之一,很多研究也围绕于如何增加吸气量展开。本文的研究也基于以上思想,通过建立射流器及其反应器的数学模型,一是希望得到较大的吸入量,二是在一定的能量输入条件下,得到较好的布水特性,进一步改善射流反应器内部的流态,尽可能消除死区,本文将为后续研究——SBR 工艺处理小城镇污水研制设计高性能射流器,并通过清水试验研究,分析吸气量与结构参数的试验规律,还可为今后高性能的射流曝气器及其反应器的设计提供有用数据。

本文计算采用商用 CFD 软件 PHOENICS 最新版本 3.5.1,其算法与求解过程此处不再赘述。

根据射流曝气器具体形式,建立了二维单相不可压模型,选择了 $k-\epsilon$ 湍流模型,通过改变不同的结构参数,计算了射流曝气器的内部流场,进而得到吸入性能较好的参数。这本质上是水喷嘴与吸入口之间真空度的问题,真空度越大,流体吸入量越大,也就意味着气体吸入量越大,这就建立了不同结构参数与吸入量之间的关系,从而作为射流器设计的参数依据。射流器计算模型见图 1,由于实际安装的射流器尺寸较长,为了简化模型计算,模型只包括吸入室和混合管部分,但已涵盖所关心的关键参数,包括混合管与水喷嘴的面积比,混合管的长径比,混合管进口与水喷嘴出口的水平距离(喉嘴距或喉嘴比)。



图1 射流器计算模型示意

计算域进口采用均匀流,进水管直径 100 mm,速度设为 7.3 m/s,出口给定压力条件,出流速度由网格迭代得到。网格由 PHOENICS 自动生成,由于射流器尺寸的变化,网格数也变化,X 向(即水平方向)基本上隔 5 mm 打一个网格,Z 向(即竖直方向)网格为 40 个,吸入室直径 200 mm(钢管壁厚 8 mm),吸入室的直径选择了 60 mm,混合管前收敛角为 60° 。计算时结构参数的变化范围为:长径比为 10~30,面积比为 4.48~5.82,喉嘴比为 2~5.38,喉嘴比为 0。

4 讨论

根据以上设定,计算结果见图 2~图 5。图 2 为射流器内部的速度矢量图,流体从吸入口被吸入,在混合管中混合,混合管长度 $L_1 = 864$ mm,混合管直径 $d_1 = 76$ mm,喉嘴距 $L_2 = 153$ mm 时,计算域为 1 207 mm×216 mm,网格 241×40 (个)。



图2 射流器内部速度矢量图

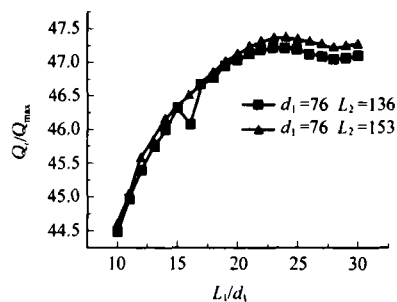


图3 长径比与吸入性能之间的关系

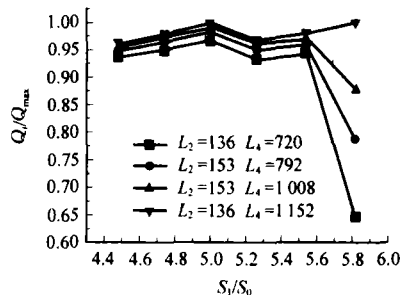


图4 面积比与吸入性能之间的关系

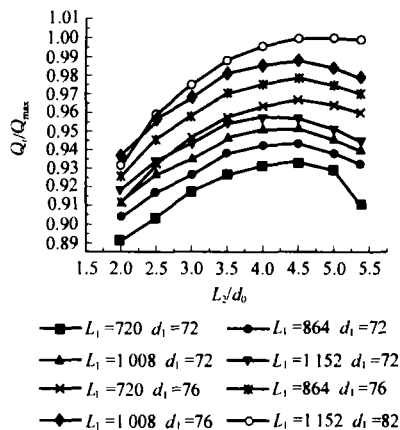


图5 喉嘴比与吸入性能之间的关系

从图 3 计算结果可以看出,混合管长径比存在一个吸入性能合理的参数范围,本射流器约在 14 以

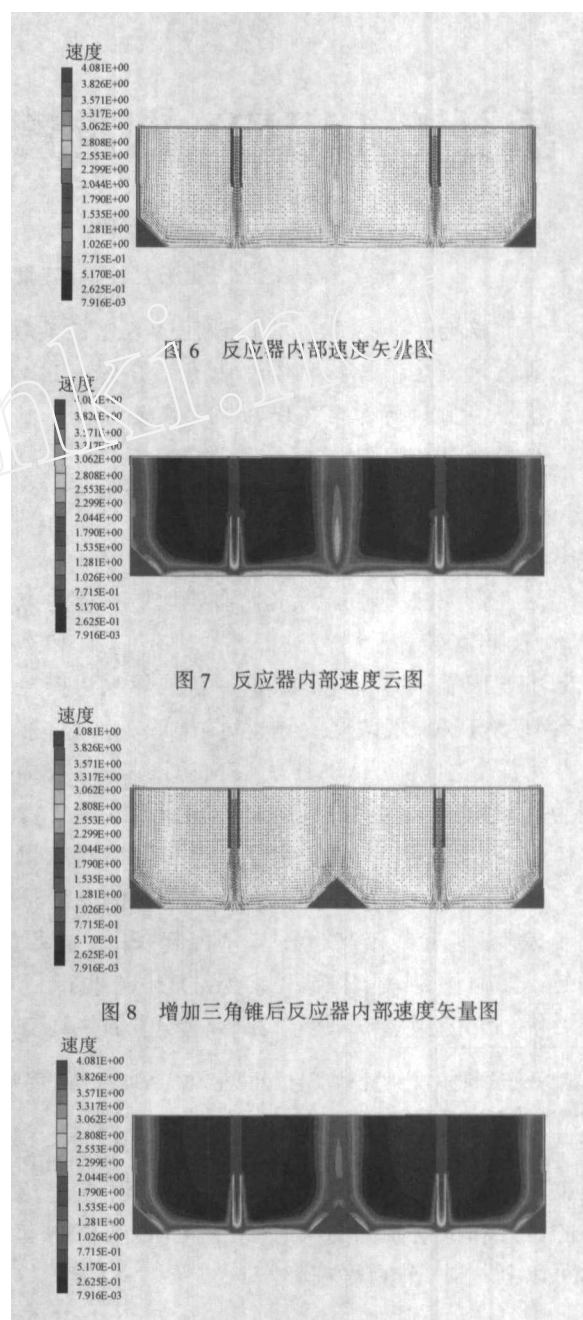
后基本上呈现较好的吸入性能,文献[6]中介绍混合管长径比达到 15 以上,能量利用充分,吸气量较大。图 4 是关于面积比与吸入效果之间的关系,在不同的喉嘴距上,可以发现本射流器的吸入效果基本上在面积比 4.74~5.54 时效果较好,文献[6]中介绍设计面积比为 4.5~6.5。图 5 在不同的面积比时,不同的混合管长下改变喉嘴比,可以看出喉嘴比一般在 3~5 时效果较好,文献[6]介绍设计喉嘴比为 1.5~2.5,文献[7]为 0.5~2。

5 射流反应器模型

在射流反应器中,二维不可压模型见图 6~图 9,选择了 $k-\epsilon$ 湍流模型,计算了常见的尾管直接排放形式,计算域为 $4\text{ m} \times 1.2\text{ m}$,底部两边是 45° 斜面,高 0.3 m,底边 0.3 m,两个射流器中心距离反应器左边壁面分别为 1 m 和 3 m 处,尾管部分直径 80 mm,长 0.6 m,尾管上部入口为计算进口域,均匀来流,速度设为 4 m/s,流量相当于 $66.4\text{ m}^3/\text{h}$,进口以外的同一水平部分是出口,出口给定压力条件,速度由计算迭代得到,网格为 164×40 (X 向 $\times$ Z 向),自动生成,尾管内部网格局部加密。在图 6,图 7 中可以看到,射流沿着底部和两边壁面流向出口,在反应器中间,两股流体将对撞冲击再流向出口,在靠近射流器两边,流体向下流动,形成清晰的环流,这个环流的存在增加了水处理过程紊动,有助于气泡进一步剪切扩散和抑制气泡并聚,加强活性污泥、氧气和混合液之间的传质。从图中也可以看出,环流中心位于水平距离射流器 0.5~0.6 m,速度较小。图 8,图 9 在前面模型的基础上底部中心增加了一个三角锥,底边 0.6 m,高 0.3 m,目的是为了改善底部的流动,减少两股流体对撞的能量损失,增加环流的强度,有了这个锥面,三角锥附近的流态要好于前一个模型。这两个数值仿真的模型,在不测量流场参数的情况下,可以比较直观地预测出内部流动特性,为射流器与反应器的配合设计,改进反应器内部结构形式,进出水布置提供设计依据。当然目前的研究是初步的,在此基础上,根据不同的射流器布水形式,需进一步做改进工作。

6 结论

从以上算例可以看出,应用 CFD 数值仿真模拟真实工况条件下的射流曝气是可行的,不仅速度快,



周期短,费用低,从理论的角度得到一个较为理想的流动预测,而且可以进行大量参数(结构参数和运行参数)的计算,为试验优选关键结构参数,这与宏观地给定一个或几个经验关联值设计相比,要精确得多。

根据加工及安装的实际情况,选择研究的关键参数范围:长径比 10~15,面积比 4.48~5.54 和喉嘴比 3~5。随后将进行结构参数与吸气规律的试验研究,如果将 CFD 得到的大量数据与具体试验数据进行验证,将为以后系列射流器及其反应器配套

基于 LabVIEW 的推流式活性污泥法动态仿真研究

方 芳 郭劲松 朱建军

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要 介绍了利用 LabVIEW6.1 及其数学子模板中一阶微分方程组的龙格库塔算法函数, 根据活性污泥法 1 号数学模型一阶微分方程组的特征, 开发出适用于推流式活性污泥法仿真系统的方法。应用该仿真系统模拟了重庆某污水处理厂的运行记录, 结果表明仿真效果良好。该方法降低了软件的编程难度。

关键词 LabVIEW 龙格库塔算法 活性污泥法 1 号模型 仿真系统

活性污泥法是目前污水生物处理最主要的方法之一, 长期以来对活性污泥工艺的研究、设计和运行控制主要依靠试验和经验数据。自国际水污染控制协会 (IAWPRC, 现改名为国际水协 IWA) 先后推出活性污泥数学模型 (ASM1 ~ ASM3) 以来, 以数学模型为基础的污水生物处理仿真模拟研究在国外发展很快^[1~5], 同时也为活性污泥工艺的研究和应用提供了一个重要的手段。国内在这个领域的发展虽然起步较晚, 但近些年来也逐步重视起来, 例如黄勇、杨铨大、顾国维等对模型参数的测定进行了研究^[6,7], 而在进水组分测定的研究^[8,9]方面主要有施

国家“十五”科技攻关资助项目 (2003BA808A17-02), 国家自然科学基金项目 (50178069)。

虚拟化设计提供直接的理论指导。因此, 在进行具体的设计和试验研究的同时, 结合 CFD 数值仿真技术可以互相补充, 相得益彰。

参考文献

- 1 Morchain J, Maranges C, Fonade C. CFD modeling of a two-phase jet aetator under influence of a crossflow. *Water Research*, 2000, 34 (13): 3460 ~ 3472
- 2 F Thalasso, H Naveau, E-J Nyns. Design and performance of a bioreactor equipped with a Venturi injector for high gas transfer rates. *The Chemical Engineering Journal*. 1995, 57: B1 ~ B5
- 3 Havelka P, Linek V, Sinkule J, et al. Hydrodynamic and mass transfer characteristics of ejector loop reactors. *Chemical Engineering Science*. 2000, 55: 535 ~ 549
- 4 Zahradnik J, Fialova V, Linek, et al. Dispersion efficiency of

汉昌、顾国维、陈莉荣、彭党聪等。其中施汉昌、季民、杨青、卢培利等人还结合实际工艺, 开发了一些仿真模拟软件^[10~13], 并取得了较好的仿真效果, 对运行管理有一定的指导作用。这些仿真软件大多使用 MATLAB 为开发工具, MATLAB 的优点是具有强大的数学开发工具, 但这些数学工具在水处理仿真中很少用到。而它的编写对于从事水处理的工作者, 却显得较为复杂, 开发成本较大。并且软件的可界面化较差, 导致软件整体的可视性和易用性差, 不利于今后的推广、使用和再开发。

在计算机技术飞速发展的今天, 面向用户的图形开发软件日新月异, 如 LabVIEW, VB, VC 等。其中, 由美国 National Instruments 公司开发的

ejector-type gas distributors in different operating modes. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(24): 4499 ~ 4510

- 5 Havelka P, Linek V, Sinkule J, et al. Effect of the ejector configuration on the gas suction rate and gas hold-up in ejector loop reactors. *Chemical Engineering Science*. 1997, 52: 1701 ~ 1713
- 6 潘涛, 邬扬善, 王绍堂. 三相生物流化床射流曝气器的研究与设计. *给水排水*, 1997, 23(5): 11 ~ 15
- 7 高远, 岳晓勤. 浅析影响射流曝气的因素. *中国市政工程*, 2002, (96): 49 ~ 51

◎通讯处: 200092 上海市密云路 528 弄同济大学博士公寓 3 号楼 604-2

电话: (021) 65985908

E-mail: jifeigao@163.com

收稿日期: 2004-08-03