

## CFD 技术在膜过滤过程中的应用

耿全月<sup>1,2</sup>, 王捷<sup>1,2</sup>, 罗南<sup>1,2</sup>, 贾辉<sup>1,2</sup>

(1. 天津工业大学环境与化学工程学院, 天津 300160;

2. 天津工业大学中空纤维膜材料与膜过程省部共建国家重点实验室培育基地, 天津 300160)

**[摘要]** 计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟应用于膜过滤过程是近年新发展起来的一种膜过滤研究方法。综述了 CFD 模拟在膜过滤过程中的应用,从膜组件过滤特性和反应器水力特性 2 个角度概述了 CFD 模拟膜内部浓差极化、质量传递系数等流态特性,膜面压力、渗透速率等流体特性参数,膜组件优化和反应器内流场分布,为膜过滤过程的评价提供了理论依据,对于实际应用具有极其重要的意义。

**[关键词]** 计算流体动力学模拟;膜过滤过程;过滤特性;水力特性

**[中图分类号]** TQ028.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2012)03-0001-05

### Application of CFD technique to membrane filtration process

Geng Quanyue<sup>1,2</sup>, Wang Jie<sup>1,2</sup>, Luo Nan<sup>1,2</sup>, Jia Hui<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China ;

2. State Key Laboratory of Hollow Fiber Membrane Material and Processes,  
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract:** Computational fluid dynamics(CFD) simulation applied to membrane filtration process is a newly-developed research method in recent years. The application of CFD simulation to membrane filtration process is summarized. From the angles of the filtration characteristics of membrane components and the hydraulic characteristics of reactor, the flowing patterns, such as the internal concentration polarization of CFD simulation membrane, mass transfer coefficient, etc.; the fluid characteristic parameters, such as membrane surface pressure, permeation rate, etc.; the optimization of membrane components; and the internal flow distribution of the reactor are introduced briefly. The simulation results provide theoretical foundations for evaluating the membrane filtration process. It plays a very important role for its practical application.

**Key words:** computational fluid dynamics simulation; membrane filtration process; filtration characteristics; hydraulic characteristics

膜过滤技术是借助一定的外加压力使液体通过膜后分离成浓缩液和渗透液的分离技术。常用于水处理的膜过滤技术依据过滤膜孔径、被截留物质的尺寸和施加的过滤压力的不同可分为微滤、超滤、纳滤和反渗透等<sup>[1-2]</sup>。该技术在长期的运转过程中,会引起膜的污染,导致渗透通量下降。获得满意的膜通量及最大限度地降低膜污染是膜技术应用的<sup>关键</sup>。选择合适的操作参数<sup>[3]</sup>是解决膜污染的主要途径。但借助实验通过改变过滤反应器的各项参数解决膜污染问题会耗费大量的人力、物力和财力,且会受到

实验仪器的精度及不稳定状况影响。对于膜过滤反应器和膜组件的优化过程首先应是对过滤运行参数的实验优化上升到过滤数学模型的建立,通过建立的数学模型再去指导实验,最后由实验来修正数学模型的循环过程<sup>[4]</sup>。

由于实验过程的复杂与多变,许多学者通过计算流体动力学来对膜过滤反应器进行优化模拟。计算流体动力学(CFD)是建立在经典流体动力学与数值计算方法基础之上的一门新型独立学科,通过计算机数值计算和图像显示的方法,在时间和空间上

定量描述流场的数值解,从而达到对物理问题研究的目的<sup>[5]</sup>。运用 CFD 模拟,可以大幅度减少实验工作量、降低实验成本,通过对膜过滤反应器的内部流态特征和分布流场的数值模拟,可形象而直观地获得各个流动参数特征,从而对膜组件的特性和运行条件进行优化,减轻膜污染。在某些不能进行实验研究的情况下,CFD 模拟还可用于指导工程设计和施工,这也将是未来各种模型优化的理想选择之一。CFD 方法与传统的理论分析方法和实验测量方法共同组成了研究流体流动问题的完整体系。笔者结合国内外的一些研究现状,综述了 CFD 技术在膜过滤过程中的研究应用,以使更多研究者关注和重视 CFD 技术未来的发展。

## 1 CFD 模拟技术

CFD 技术进行数值求解的基本思想<sup>[6]</sup>可归结为:把原来在空间与时间坐标中连续的物理量的场(如浓度场、速度场等),用有限个离散点的值的集合来代替,通过一定的原则建立起这些离散点上变量值之间关系的代数方程(称为离散方程,discretization equation),求解所建立起来的代数方程以获得所求解变量的近似值。各种数值解法的主要区别在于区域的离散方式、方程的离散方式和代数方程求解的方法这 3 个环节上。目前得以应用的方法有:有限差分法、有限容积法、有限元法及有限分析法,其中应用最广泛和最成熟的方法是有限容积法<sup>[7]</sup>。CFD 模拟所用的理论公式<sup>[8]</sup>主要是动量和能量连续性方程;对于两相流的模拟主要采用混合和欧拉模型,湍流模型采用标准的 K- $\epsilon$  模型,压力速度耦合采用相间耦合 SIMPLE 算法求解。通过这些数值模型,可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上基本物理量(如速度、压力、浓度等)的分布,以及这些物理量随时间的变化情况,确定漩涡分布特性、空间特性及脱流区等。

CFD 技术的兴起促进了实验研究和理论分析方法的发展,它将实验研究与理论分析方法联系起来,为简化流动模型的建立提供了更多的依据,使很多简化方法得到了发展和完善。采用 CFD 方法对流体流动进行数值模拟的通用流程如图 1 所示。



图 1 CFD 软件应用的通用流程

## 2 CFD 模拟在膜过滤过程中的应用

目前国内对 CFD 数值模拟的分析研究主要是从水力特性角度分析管道、反应器内的流场分布特性,从而对管道及反应器进行优化设计;国外对该技术的理论研究相对更深入些,主要是从过滤特性角度模拟流场特征、膜纤维腔内流体流动特征、膜表面质量流传递过程以及膜污染过程。S. Chang 等<sup>[9-12]</sup>对膜过滤性能参数进行了研究,建立了普遍适用的数学模型。但数学模型大多基于简化的几何特征及流动状态假设,无法体现壳程的沟流、死区以及湍流等重要因素对膜组件分离性能的影响,还需进一步研究更接近实际应用的动态模型。利用理论分析法简化流动模型,给出所研究问题的解析解或简化方程,再以观测和试验测定为基础和依据,进而运用 CFD 技术采用数值方法直接求解描述流体运动基本规律的非线性数学方程组,研究流体运动的规律<sup>[13]</sup>,可为膜过滤特性分析提供重要指标,并为膜组件和反应器的优化设计提供一定的理论研究依据。

### 2.1 CFD 模拟膜过滤特性的应用

#### 2.1.1 膜内部流态特征模拟

CFD 模拟膜通道内浓差极化、质量传递系数和膜面剪切力、渗透通量等特性,以及气液多相流条件下液体与微通道壁面之间的传质作用,其已作为分析工具广泛应用于膜分离过程,为减小膜污染提供了理论依据。

A. L. Ahmad 等<sup>[14-15]</sup>通过 CFD 模拟狭窄膜通道内的浓差极化、质量传递系数和剪切力的特性得出结论:减小剪切力可导致膜表面形成浓差极化层,而增加料液雷诺数可以缓解浓差极化现象,膜通道内浓差极化特性受流体动力和膜传质特性的限制。这一结论与实验分析结果相一致。

彭文博等<sup>[16]</sup>用 CFD 模拟 19 通道不同孔径的多孔陶瓷膜在操作压力为 0.1 MPa、膜面流速为 3 m/s 的条件下不同通道内的压力梯度及速度分布情况,分析水流在陶瓷膜中的分布。根据 Darcy 定律,采用 CFD 软件中的 Fluent 软件可以定量计算出不同平均孔径陶瓷膜的处理量,结果表明,实验值与计算值吻合较好,见表 1<sup>[16]</sup>。M. Rahimi 等<sup>[17]</sup>利用 CFD 模拟预测错流微滤时的渗透通量,结果表明,局部渗透通量与计算结果有一定的差异,其主要受跨膜压差和流动速度的影响,在低压力下 CFD 模拟结果更精确一些。实践证明利用 CFD 软件进行纯水通量的计算

是可靠的。

表 1 4种平均孔径的陶瓷膜纯水通量  
实验值与计算值的比较

19 通道陶瓷 膜孔径/ $\mu\text{m}$	纯水通量/ $(\text{L}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$		误差/%
	实验值	计算值	
3.0	4 450	4 636	4.18
0.8	2 410	2 630	9.13
0.2	985	1 028	4.37
0.05	532	488	8.27

J. M. van Baten 等<sup>[18-19]</sup>采用 CFD 数值模拟的方法,对圆形微通道内气液两相 Taylor 流进行了研究,考察了微气泡与微通道内液体与微通道壁面之间的传质作用,结果表明,强化微通道内传质传热效率,可极大地促进化学反应速率和生化分析速率。R. Gupta 等<sup>[20]</sup>基于 CFD 模拟研究发现,气泡前鼻部和尾部周围的径向流及微液滴内的液体流动促进了传热性能,可以在毫秒级时间尺度上分析微通道内的化学反应<sup>[21]</sup>,这一结论可用于指导实际应用。

### 2.1.2 膜面流体特性参数模拟

对膜过滤特性的研究主要是对膜面流体特性参数进行模拟,即对膜面的渗透速率、压力分布、料液浓度、膜面和流体的相互作用、质量传递、生物污染等进行模拟预测,通过 CFD 模拟可进一步解释膜污染的机制,为膜过滤特性分析提供重要指标。

B. Marcosa<sup>[22]</sup>对 CFD 模拟中空纤维超滤膜运行时瞬时渗透速率和压力的分布进行了研究,其结果与实验数据恰好吻合,证明跨膜压差是影响极化层浓度的重要因素。A. R. Rajabzadeha 等<sup>[23]</sup>根据局部污染和空间压力的差异、大豆蛋白提取液浓度、渗透流速、初始污染阻力等条件,通过 CFD 模拟建立了可逆与不可逆膜污染的阻力模型,模型预测与实验结果相一致。研究表明,通过改变溶液的浓度可控制膜表面的不可逆污染。

J. S. Vrouwenvelder 等<sup>[24]</sup>应用三维数值模型对 RO、NF 卷式膜系统的水力情况和生物污染情况进行了模拟,结果表明,数值模型在微生物积累、通道内压降、水流速度分布上与相同几何支撑体的实际情况呈现相同的趋势,同时发现支撑体的污染比膜表面污染更为严重。S. Wardeh 等<sup>[25]</sup>研究了 CFD 模拟矩形支撑体通道内的流体流动特性在海水淡化过程中的应用,研究表明,通道内的支撑体可以减小浓差极化和膜污染,使运行过程处于最佳状态。实验证实 CFD 模拟可用于膜污染发展过程的分析。

M. Shakaib 等<sup>[26-27]</sup>通过 CFD 模拟预测微滤膜污

染过程中膜表面剪切力的分布对膜污染进行了研究,结果表明,膜污染的不均匀取决于膜表面和流体的流动方式,错流速率大的膜表面剪切力高,在剪切力低的位置,颗粒更容易沉积,污染更严重。M. Shakaib 等<sup>[28]</sup>对卷式 RO 膜支撑体的形状对水力特性和质量转移的影响进行了三维 CFD 模拟,并与 F. Li 等<sup>[29-32]</sup>的实验做对比,根据舍伍德数和摩擦系数的变化预测支撑体长度、粗细程度和水流进水位置等参数对壁面剪切力和质量传递系数有较大的影响。实际应用中建立一个回流区域可以增加下表面膜的剪切力和质量传递系数,这样可使卷式 RO 膜组件具有更高的性能比。

## 2.2 CFD 模拟水力特性的应用

CFD 技术在水力特性角度的研究主要应用于膜组件和反应器的优化,研究膜污染和料液混合程度等特征。CFD 技术通过模拟反应器和膜组件的特性参数,分析泥变流对膜污染的影响<sup>[33]</sup>。

### 2.2.1 膜组件优化模拟

彭文博等<sup>[34]</sup>对陶瓷膜的构型进行 CFD 优化,确定了膜孔径与几何构型的关系,即对  $3\ \mu\text{m}$  孔径的膜, $\alpha$ (通道直径与通道间距离的比值)在加工的限制下越大越好。不同孔径膜的适宜  $\alpha$  为:500 nm 孔径膜的  $\alpha$  取 3,200 nm 孔径膜的  $\alpha$  取 2.5,孔径小于 50 nm 的膜的  $\alpha$  取 2。CFD 软件是优化设计多孔陶瓷膜构型的一种有力工具,可为陶瓷膜生产提供理论参考。

李昕等<sup>[35]</sup>研究了 CFD 模拟旋转圆盘式膜组件内压力场,考察了旋转速度、旋转板半径、垫板长度和支撑层厚度对局部跨膜压力和反压的影响。J. Engler<sup>[36]</sup>利用实验结果对数值模拟结果进行验证,计算旋转速度为 1 500 r/min 时,模拟计算值与 Engler 实验值一致,此项研究为膜通量的提高和旋转板式膜组件的优化和改进设计提供了基础技术支持。杨毅等<sup>[37]</sup>研究了膜组件壳程复杂结构条件下的流体力学特征,研究表明,合理安排膜丝沿轴向的排布方式是提高膜组件分离性能的潜在手段之一,此项研究可为具有特定几何结构的膜组件设计提供参考。

N. Ndinisa 等<sup>[38]</sup>用 CFD 模拟浸没平板式膜生物反应器内气液两相流特性,结果表明,由于膜面剪切力的增加和气相流的扰动作用,气泡越大,越有利于膜组件的清洗。E. Nguyen Cong Duc 等<sup>[39]</sup>用 CFD 技术研究了浸没式中空纤维膜单元内的曝气流动性,用光纤探测器测量膜组件不同位置气泡的大小、流

速,分析了浸没式中空纤维膜单元内气体的流动分布。利用 CFD 模拟两相流的流动特性对理解膜污染控制过程可起到指导作用,有利于对两相流的膜组件优化。

### 2.2.2 反应器优化模拟

Yuan Wang 等<sup>[40]</sup>将浸没式中空纤维膜生物反应器中的中空纤维膜组件在 CFD 中转换为多孔介质模型,发现经验模型与多孔介质模型模拟结果相一致。M. W. D. Brannock 等<sup>[41]</sup>用 CFD 模拟预测容器特征对流体动力学的影响,结果表明,曝气是主要的混合机制,对比 M. W. D. Brannock 等的前期模拟研究<sup>[42]</sup>,进水位置不会影响内部循环,但决定能否使系统接近完全混合和减少死流区。对反应器的隔板和出口位置等结构进行优化,确定最佳的曝气量。一般对 MBR 的设计是假设反应器完全混合,忽略了反应器内部的水力特性,通过 CFD 模拟,可以观察膜生物反应器中的水力特性,为膜生物反应器的设计提供依据。

韩杰等<sup>[43]</sup>以浸没板式膜生物反应器(MBR)中曝气槽内的流体为研究对象,运用多相流 Eulerian 模型,对其进行了模拟分析,结果得到包括气液两相多个截面的速度场及局部气含率分布等信息,模拟结果显示浸没板式 MBR 具有较好的水力条件,通过模拟结果能够合理解释实际工况中存在的膜污染等现象,该项研究表明了 CFD 技术在膜生物反应器中应用的可行性。数值求解结果可以为 MBR 中的膜污染及膜孔堵塞等问题的研究提供理论依据。

李金等<sup>[44]</sup>用 CFD 技术对浸没式超滤膜过滤器内的流场进行数值模拟,通过计算得到过滤器内流体速度场、压力场和紊流强度的分布情况,分析可知,回流区和过滤区水流均匀,能够取得较好的过滤效果。通过对浸没式超滤膜过滤器内部的流场分布进行模拟计算,可以有效地指导过滤器的设计及优化改进。

实际膜过滤过程中,不同膜与不同过滤料液之间的作用有所不同,反应器内流场变化复杂,几何结构对过滤性能影响很大,所以在实际应用过程中首先应重点分析污染的机理,精确地选择几何结构参数以有效地提高膜组件的过滤性能<sup>[45]</sup>。

## 3 结语

CFD 数值模拟是研究流体特性参数和流态分布特征的有效工具,在寻求最优化的操作条件和设备

结构设计方面具有无可比拟的灵活性,但是还没有形成规律性的认识。目前的研究重点是模拟膜污染形成过程和影响因素以及操作过程中诸因素对膜过滤的影响,指导实际应用。未来的发展方向是将 CFD 模拟与实验结合,进一步完善反应器和膜组件的优化,通过对模型本身的改进和参数的正确设置,使膜过滤过程的模拟结果更加准确。

### [参考文献]

- [1] Amy G, Cho J. Interactions between natural organic matter and membrane: Rejection and fouling[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(9): 131-139.
- [2] 徐新阳, 马铮铮. 膜过滤在污水处理中的应用研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2007, 23(4): 52-56.
- [3] Bian R, Yamamoto K, Watanabe Y. The effect of shear rate on controlling the concentration polarization and membrane fouling [J]. *Desalination*, 2000, 131(1/2/3): 225-236.
- [4] Alexiadis A, Wiley D E, Vishnoi A, et al. CFD modelling of reverse osmosis membrane flow and validation with experimental results[J]. *Desalination*, 2007, 217(1/2/3): 242-250.
- [5] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 2-5.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 10-13.
- [7] Patankar S V, Spalding D B. A finite-difference procedure for solving the equations of the two-dimensional boundary layer [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1967, 10(10): 1389-1411.
- [8] Bridgeman J, Jefferson B, Parsons S A. The development and application of CFD models for water treatment flocculators [J]. *Advances in Engineering Software*, 2010, 41(1): 99-109.
- [9] Chang S, Fane A G, Vigneswaran S. Modeling and optimizing submerged hollow fiber membrane modules [J]. *AIChE Journal*, 2002, 48(10): 2203-2212.
- [10] 王捷, 张宏伟, 贾辉, 等. 浸没式中空膜纤维尺寸的优化模拟[J]. *膜科学与技术*, 2008, 28(1): 31-34.
- [11] Wiley D E, Fletcher D F. Techniques for computational fluid dynamics modeling of flow in membrane channels [J]. *Journal of Membrane Science*, 2003, 211(1): 127-137.
- [12] Polyakov Y S. Deadend outside-in hollow fiber membrane filter: Mathematical model [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 279(1/2): 615-624.
- [13] 傅德熏, 马延文. 计算流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 10-14.
- [14] Ahmad A L, Lau K K, Abu Bakar M Z, et al. Integrated CFD simulation of concentration polarization in narrow membrane channel [J]. *Comput. Chem. Eng.*, 2005, 29(10): 2087-2095.
- [15] Fimbres-Weihs G A, Wiley D E. Review of 3D CFD modeling of flow and mass transfer in narrow spacer-filled channels in membrane modules [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2010, 49(7): 759-781.

- [16] 彭文博,漆虹,李卫星,等. 19通道多孔陶瓷膜渗透过程的CFD模拟[J]. 化工学报, 2007, 58(8): 2012-2026.
- [17] Rahimi M, Madaeni S S, Abbasi K. CFD modeling of permeate flux in cross-flow microfiltration membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2005, 255(1/2): 23-31.
- [18] van Baten J M, Krishna R. CFD simulations of mass transfer from Taylor bubbles rising in circular capillaries [J]. Chem. Eng. Sci., 2004, 59(12): 2535-2545.
- [19] van Baten J M, Krishna R. CFD simulations of wall mass transfer for Taylor flow in circular capillaries [J]. Chem. Eng. Sci., 2005, 60(4): 1117-1126.
- [20] Gupta R, Fletcher D F, Haynes B S. CFD modeling of flow and heat transfer in the Taylor flow regime [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(6): 2094-2107.
- [21] Song H, Tice J D, Ismagilov R F A. Microfluidic system for controlling reaction networks in time [J]. Angewandte Chemie Int. Ed., 2003, 42(7): 767-772.
- [22] Marcosa B. CFD modeling of a transient hollow fiber ultrafiltration system for protein concentration [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 337(1/2): 136-144.
- [23] Rajabzadeha A R, Moresolia C, Marcosc B. Fouling behavior of electroacidified soy protein extracts during cross-flow ultrafiltration using dynamic reversible-irreversible fouling resistances and CFD modeling [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 361(1/2): 191-205.
- [24] Vrouwenvelder J S, Picioreanu C, Kruijthof J C, et al. Biofouling in spiral wound membrane systems: Three-dimensional CFD model based evaluation of experimental data [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 346(1): 71-85.
- [25] Wardeh S, Morvan H P. CFD simulations of flow and concentration polarization in spacer-filled channels for application to water desalination [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(10): 1107-1116.
- [26] Shakaib M, Hasani S M F, Mahmood M. Study on the effects of spacer geometry in membrane feed channels using three-dimensional computational flow modeling [J]. Journal of Membrane Science, 2007, 297(1/2): 74-89.
- [27] Rahimia M, Madaenia S S, Abolhasani M, et al. CFD and experimental studies of fouling of a microfiltration membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 48(9): 1405-1413.
- [28] Shakaib M, Hasani S M F, Ahmood M M. CFD modeling for flow and mass transfer in spacer-obstructed membrane feed channels [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 326(2): 270-284.
- [29] Li F, Meindersma G W, de Haan A B, et al. Experimental validation of CFD mass transfer simulations in flat channels with non-woven net spacers [J]. J. Membr. Sci., 2004, 232(1/2): 19-30.
- [30] Da Costa A R, Fane A G, Wiley D E. Spacer characteristics and pressure drop modeling in spacer-filled channels for ultrafiltration [J]. J. Membr. Sci., 1994, 87(1/2): 79-98.
- [31] Geraldes V, Semião V, de Pinho M N. Flow management in nanofiltration spiral wound modules with ladder-type spacers [J]. J. Membr. Sci., 2002, 203(1/2): 87-102.
- [32] Feron P H. Hydrodynamics and mass transfer in obstructed narrow channels [D]. United Kingdom: Cranfield Institute of Technology, 1991.
- [33] Brannock M, Wang Y, Leslie G. Mixing characterisation of full-scale membrane bioreactors: CFD modelling with experimental validation [J]. Water Research, 2010, 44(10): 3181-3191.
- [34] 彭文博,漆虹,李卫星,等. 陶瓷膜通道相互作用的实验分析及CFD优化 [J]. 化工学报, 2008, 59(3): 602-605.
- [35] 李昕,刘新平,欧三得,等. 旋转圆盘式膜组件内压力场的数值分析 [J]. 化学反应工程与工艺, 2009, 25(1): 13-17.
- [36] Engler J. Investigation of membrane filtration in a rotating disk geometry: Use of computational fluid dynamics and laboratory evaluation [D]. Houston: Rice University, 1997.
- [37] 杨毅,王保国,彭勇. 中空纤维膜组件壳程流动的数值模拟 [J]. 化工学报, 2008, 59(8): 1979-1985.
- [38] Ndinisa N, Fane A, Wiley D, et al. Fouling control in a submerged flat sheet membrane system: Part two phase flow characterization and CFD simulations [J]. Sep. Sci. Technol., 2006, 41(7): 1411-1445.
- [39] Nguyen Cong Duc E, Fournier L, Levecq C, et al. Local hydrodynamic investigation of the aeration in a submerged hollow fibre membranes cassette [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 321(2): 264-271.
- [40] Wang Yuan, Brannock M, Cox S, et al. CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fiber membrane bioreactor using a porous media approach [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 363(1/2): 57-66.
- [41] Brannock M W D, De Wever H, Wang Y, et al. Computational fluid dynamics simulations of MBRs: Inside submerged versus outside submerged membranes [J]. Desalination, 2009, 236(1/2/3): 244-251.
- [42] Brannock M W D, De Wever H, Wang Y, et al. Evaluation of membrane bioreactor performance via computational fluid dynamics modelling: Effect of membrane configuration and mixing [C]. UK: IWA Harrogate, 2007.
- [43] 韩杰,朱彤,黄永刚,等. 浸没板式膜生物反应器中流体运动的数值模拟 [J]. 化学与生物工程, 2008, 25(11): 44-47.
- [44] 李金,王泽. 浸没式超滤膜过滤器内流场的数值模拟 [J]. 三峡大学学报, 2010, 32(3): 14-17.
- [45] Ghidossi R, Veyret D, Moulin P. Computational fluid dynamics applied to membranes: State of the art and opportunities [J]. Chemical Engineering and Processing, 2006, 45(6): 437-445.

[作者简介] 耿全月(1987—),天津工业大学在读硕士研究生。电话:13622051595, E-mail:gengquanyue@163.com。联系人,王捷, E-mail:wangjiemailbox@yahoo.com.cn。

[收稿日期] 2011-11-04(修改稿)