



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201904076

中图分类号 X703

文献标识码 A

曹迎晨, SONNENBURG Alexander, URBAN Wilhelm. MBR 平板膜中气泡运动的水力特征的数值分析[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 414-422.

CAO Yingchen, SONNENBURG Alexander, URBAN Wilhelm. Numerical analysis of hydrodynamic characteristics induced by bubble movements in flat sheet membrane[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 414-422.

MBR 平板膜中气泡运动的水力特征的数值分析

曹迎晨¹, SONNENBURG Alexander², URBAN Wilhelm^{1,*}

1. 达姆施塔特工业大学 IWAR 研究所, 达姆施塔特 64287

2. IWW 水研究中心莱茵-美因研究所, 比贝斯海姆 64584

第一作者: 曹迎晨(1990—), 女, 博士研究生。研究方向: 平板膜的数值模拟。E-mail: y.cao@iwar.tu-darmstadt.de

*通信作者: URBAN Wilhelm(1957—), 男, 博士, 教授。研究方向: 水处理。E-mail: w.urban@iwar.tu-darmstadt.de

摘要 膜污染是膜生物反应器系统在污水和废水处理应用中最主要的问题之一。针对这一问题, 通过计算流体力学(CFD)仿真模拟, 研究了单个气泡以及气泡群在平板膜中的水力学特征, 包括气泡速度和膜表面剪切应力等, 以达到优化膜组件几何特征和运行条件的目的。模拟结果表明, 对于单个气泡而言, 随着气泡尺寸的增加, 气泡上升速度开始随着直径的增加而升高, 在气泡直径为 4 mm 时, 其可达到最大值, 随后随着直径的增加反而降低。此外, 对于直径为 4 mm 的气泡, 随着膜间隙距离的增加, 气泡上升速度明显呈升高的趋势, 而剪切应力呈现下降趋势。考虑到实际运行中的膜堵塞问题, 建议在平板膜组件中使用 7 mm 的膜间距, 以适当增强膜表面剪切应力。气泡群的模拟结果表明, 当膜间液相上升流速较大时, 气相和液相所产生的剪切应力相当。而当膜间液相上升流速较小时, 气相产生的剪切应力占主导。以上研究结果可为膜生物反应器的设计及运行提供参考。

关键词 CFD 模拟; 平板膜; 膜污染; 剪切力; 单气泡; 气泡群

膜生物反应器(MBR)是结合传统的活性污泥工艺与膜过滤工艺的污水处理设备。与传统的活性污泥法相比, MBR 具有很多优势^[1-2], 如出水质量好、污泥产量相对较低、占地面积小等。因此, 膜过滤工艺已广泛应用于环境领域和工业领域。然而 MBR 中存在复杂的多相流, 其水力特征难以通过实验得到充分的研究。计算流体力学(CFD)是非常强大的流体模拟分析工具^[3-4], 能获取整个 MBR 流场、膜表面剪切力分布等信息, 从而为设计 MBR 提供理论指导。

现阶段, 膜生物反应器最大的缺点是由于控制膜污染而产生的高运行成本^[5]。在降低膜污染的各类方法中^[6], 曝气工艺是最为简单有效的方法之一。MBR 系统中的曝气工艺能通过气泡运动产生剪切应力, 从而去除附着在膜表面的污垢。提高曝气强度, 虽能有效控制膜污染, 却容易造成膜的机械损坏及高能耗。在大型 MBR 污水厂中, 能耗支出大约占总运营支出的 60%^[1]。曝气工艺的能耗分别约占 MBR 总能源需求的 60%^[1] 和平板膜组件总能源需求的 80%^[7]。因此, 优化平板膜组件的几何特征以及曝气工艺运行条件能有效降低 MBR 系统的总能耗。

大量研究表明, 膜表面剪切应力是评价膜过滤性能的关键参数之一。LEBERRE 等^[8] 在早期研

究中建议最好使用膜面剪切应力来衡量错流对于膜污染控制的影响。此后,膜过滤过程中产生的膜面剪切应力与膜污染控制之间的关系通过实验与数值模拟得到了充分研究^[9-13]。WRAY 等^[13]发现了膜污染率在施加剪切应力的情况下显著低于未施加剪切应力的情况。CHAN 等^[9]发现了剪切应力的大小、持续时间长短和频率都会影响膜污染。所有这些研究表明,剪切应力是衡量膜过滤性能的良好指标,并且通常增加剪切应力可以增加膜渗透通量。然而,鲜有研究关注气泡运动所产生的剪切应力以及曝气平板膜组件中气泡群的最佳尺寸^[14]。目前,仅有少数研究测量了平板膜组件中气泡群引起的剪切应力,而且侧重点各不相同。其中 DUCOM 等^[15]定义了通过两相流与通过单相流所产生剪切应力之比,并发现在平板膜组件中相较于单相流,两相流条件下剪切应力得到了增强。但是他们采用的实验装置较小,选择的膜间距也较小,并不符合实际应用中的平板膜组件。

为了理解平板膜系统中的复杂多相流过程,目前,已有若干研究针对膜系统中的两相流进行了实验以及数值分析^[16-18]。由于研究对象是较小膜间距下的两相流,这种情况下包括剪切应力在内的各关键性参数难以用实验手段获取,因此,多数学者采用了计算流体力学(CFD)方法进行研究。NDINISA 等^[19]描述了浸没式平板膜中的气液两相流特性,同时,通过研究包括膜间距、曝气速率、气泡大小等在内的多种水力学参数,确认了考虑减缓膜污染时的最佳两相流条件。然而,在这些关于气泡运动的数值研究中,多数学者采用欧拉-欧拉方法来模拟 MBR 中的气液流。这种方法将气泡视为具有固定直径的球体,因此,其变形、破裂及合并等相互间的作用无法被考虑在内。由于这种方法未考虑气泡的行为,导致模拟计算出的剪切应力可能并不准确^[20]。而作为另一种多相流建模手段,流体体积(VOF)方法可以考虑到单个气泡的运动和变形。大多数研究采用 VOF 方法的 MBR 模拟均是在二维^[21]或非常小的三维模型^[19]中进行的,可能导致模拟结果与实际结果相差甚远。PRIESKE 等^[22]模拟了膜通道中单个气泡的上升,其模型高度为 1 500 mm。然而由于应用了对称边界条件,其结果可能并不准确。在相关研究中,仅 WANG 等^[23]使用了 VOF 方法研究平板膜组件中的新型曝气策略。然而,在兼顾模型高度与气泡间相互作用情况下,尚未发现有任何数值研究分析 MBR 平板膜组件的常规曝气策略。简而言之,目前仅有相当有限的研究^[16-17]集中于平板膜组件的曝气过程。

因此,本研究基于 VOF 技术的数值模拟,可深入地探讨平板膜曝气过程中的流体动力学特性,以便更深入地了解平板膜组件中的曝气过程,达到优化膜组件设计和运行条件的目的,从而降低 MBR 系统的总能耗和运行成本。本研究首先研究了单个气泡在不同结构和操作参数下的运动情况,并将实验数据与模拟数据进行了对比,然后通过模拟分析单个气泡及气泡群所产生的剪切应力,从而为 MBR 的设计与运行提供参考。

1 研究方法

1.1 CFD 数值模拟

在本研究中,开源软件 OpenFOAM 中的流体体积法(VOF)被用于气液两相流的模拟。其中气相和液相近似为不可压缩的牛顿流体。

VOF 作为 Ansys Fluent 12.0 理论指南中被经常推荐用于气液两相流模拟的方法之一,是一种可以预测流体形状的气液分界面捕捉技术。VOF 模型最初由 HIRT^[24]创建,其基础概念是液体占据的总体积的体积分数。考虑以下 3 种情况(α_l 和 α_g 分别表示液体体积分数和气体体积分数): $\alpha_l = 1$, $\alpha_g = 0$,网格充满液体,没有气体; $\alpha_l = 0$, $\alpha_g = 1$,网格没有液体,充满了气体; $0 < \alpha_l < 1$, $0 < \alpha_g < 1$,网格同时具有液体和气体,可以视为 2 种流体的界面^[25]。

对 2 种流体界面的捕捉是根据求解体积分数 α 的连续性方程(式(1))完成的。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0 \quad (1)$$

在VOF方法中,混合流体的所有性质(密度 ρ 和黏度 μ)均是2种流体的体积分数加权平均值,如式(2)和式(3)所示。

$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g \quad (2)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_g \mu_g \quad (3)$$

式中: ρ_l 和 ρ_g 分别表示液体和气体的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; μ_l 和 μ_g 分别表示液体和气体的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

在式(1)中,速度 u 是质量加权平均值,根据式(4)进行计算。

$$u = \frac{\alpha_l \rho_l u_l + \alpha_g \rho_g u_g}{\rho} \quad (4)$$

式中: u_l 和 u_g 分别表示液相和气相的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

流体动力学的基本控制方程,即质量方程和动量方程^[26],如式(5)和式(6)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f \quad (6)$$

式中: p 为压力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; f 为每单位体积的外部体积或体力, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

开源软件OpenFOAM结合Paraview分别用于模拟与后处理。在OpenFOAM中,单个气泡及气泡群的上升通过interFoam求解器采用VOF方法得到模拟。本研究湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型。标准 $k-\varepsilon$ 模型是目前最常见也是得到最多验证的2方程湍流模型。同时该模型灵活性与经济性均较好,应用于MBR系统中的多相流也能提供精度较高的数值结果^[27]。另外,PIMPLE算法被用于压力-速度耦合,界面捕获方法为MULES算法。

本研究在模拟中使用了不同的模型,但是每个模型的物理尺寸均相对较大。用于校核的模型以及研究单个气泡的主要模型长为30 mm,宽为6~10 mm,高为500 mm。校核模型的宽以及高度与实验模型一致,为了节省模拟资源,其长度则根据测试模拟结果选出。测试模型长度为8~40 mm,其他参数设置完全一致。对于直径为4 mm的气泡,其上升速度受模型长度影响如表1所示。但是,当模型长度为气泡直径4倍时,模型长度的影响就已经较小,大约为3%。模型长度30 mm为最大气泡直径的5倍,对于单个气泡上升过程影响小。在模拟初始,直径为2~6 mm的单个气泡置于模型底部。气泡在初始阶段由于浮力较大而在水中做加速运动,之后由于浮力与阻力相等,则达到相对匀速状态。这个相对稳定的速度视为气泡上升速度而广泛用于研究中。此外,动网格(AMR)技术也被用于模拟中,即网格的尺寸与气体体积分数有关。在充满水的求解区域内,网格为1 mm的立方体,然而在有气体的求解区域中,网格加密变为0.125 mm或0.25 mm的立方体。动网格技术应用用于两相流时的准确性已在若干研究^[28-29]中得到了验证。该模型中膜的边界条件是墙面边界条件,另外2个竖直面定义为对称。模型底部设置为墙面边界条件,顶部为出口。

对于气泡群上升过程的模拟,本研究模型采用大小为0.25 mm的固定网格。模型长为30 mm,宽为8 mm,高为2 200 mm,按照高度分为膜通道区(2 100 mm)和出口区(100 mm)。考虑到高度对于气泡群上升运动以及因此在膜板间产生的水力学特性的影响,为更准确反映

表1 由不同长度模型模拟得到的直径为4 mm的单个气泡上升速度

Table 1 Rising velocity of a 4 mm single bubble simulated with in different length models

模型	宽度/mm	气泡上升速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	与参照模型的相对误差/%
模型1	8	0.187	13.0
模型2	16	0.208	3.3
模型3	20	0.211	1.9
模型4	24	0.213	0.9
参照模型	40	0.215	—

实际情况, 此模型的建立基于型号为 BIO-CEL[®] 52 的商业平板膜组件。该模型出口区的边界条件均为对称, 而在膜通道区内, 膜的边界条件为墙面边界条件, 另外 2 个竖直面为对称。模型底部为速度入口, 顶部为出口。为了研究错流速度的影响, 根据已有研究^[16-22] 结果, 模拟中从模型底部分别对液体施加 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的固定上升速度。模拟初始, 1 427 个 3 mm 的气泡群分布在整個膜通道内, 然后每隔 0.01 s, 再在模型底部添加 2 个或者 4 个气泡。由于浮力的作用, 气泡群会在膜通道区上升, 经过一段时间后, 离开膜通道进入出口区。

1.2 实验装置

本研究中使用的实验装置如图 1 所示。该装置由 1 个塑料容器 (长为 300 mm, 宽为 300 mm, 高为 1 000 mm), 2 个内置透光塑料膜板 (高为 500 mm, 间距为 6~10 mm), 光源和测量系统 (贴在容器背面的刻度以及水中的刻度尺) 组成。2 块膜板之间的距离可调, 实验中使用的距离为 6~10 mm。此外, 具有高速记录功能的卡西欧 Exilim EX-ZR100 照相机用于记录气泡运动, 其中照相机的位置及高度也可调。在实验过程中, 氮气通过具有不同孔径大小的曝气装置注入滞水中, 形成直径为 2~6 mm 的气泡, 然后通过摄像机记录气泡在膜板之间的上升过程。摄像机在特定间隔时间对整个系统拍照, 通过刻度尺可以测定出每个时间点所对应的气泡位置。已知时间间隔以及每个时间点对应的气泡位置, 可以计算出气泡的上升速度, 用于验证模拟结果。但由于 VOF 所需的计算资源太大, 所以校核模型计算区域并不包含实验装置中的塑料容器, 而是限制在 2 个塑料板之间。

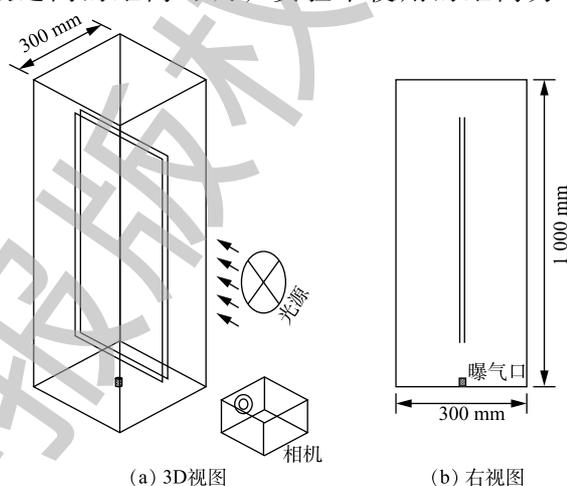


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental setup

2 结果与讨论

2.1 模型验证

使用 OpenFOAM 模拟计算体积等效直径为 2~6 mm 的单个气泡在间距为 8 mm 的膜之间的上升速度, 可以绘制出倒三角实线 (图 2)。模拟气泡上升速度分别与实验测得气泡上升速度 (图 2(a) 方块实线) 以及 CLIFT 等^[30] 的研究进行比较。CLIFT 等^[30] 分别测量了纯水中不同直径气泡的上升速度 (图 2(a) 实线) 以及微污染水中不同气泡直径的上升速度 (图 2(a) 虚线)。通过数据对比发现, 实验测量速度与模拟速度吻合度较高, 并且均介于清水与微污染水之间。尽管实验和模拟都使用清水, 但所测速度以及模拟速度均低于 CLIFT 等^[30] 所测的气泡在清水中的上升速度。考虑到 CLIFT 等^[30] 实验容器较宽, 其壁面对于泡泡上升影响较小; 而本研究实验模型以及模拟模型的宽度为 6~10 mm, 间距较小, 气泡由于壁面约束上升较慢, 数据对比结果符合预期 (图 2(b))。本研究中模拟得到直径为 4 mm 的气泡的上升速度为 $0.22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而在 MA 等^[31] 的研究中发现, 同等大小的气泡的上升速度为 $0.225 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 ISLAM 等^[32] 的研究中为 $0.218 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。尽管在他们的研究中气泡的上升并没有受到狭窄的膜间隙限制而是较为自由地移动, 但其结果与本研究相符。

2.2 气泡大小

气泡上升速度随着气泡尺寸的增加而升高, 这一结论可以由图 2(a) 中的实验结果得到证实。模拟结果则显示, 气泡上升速度首先随着气泡变大而升高, 在气泡直径为 4 mm 时, 达到最大值并保持稳定, 之后则开始下降。究其原因可能是, 对于小气泡, 壁面效应对气泡运动影响相对较

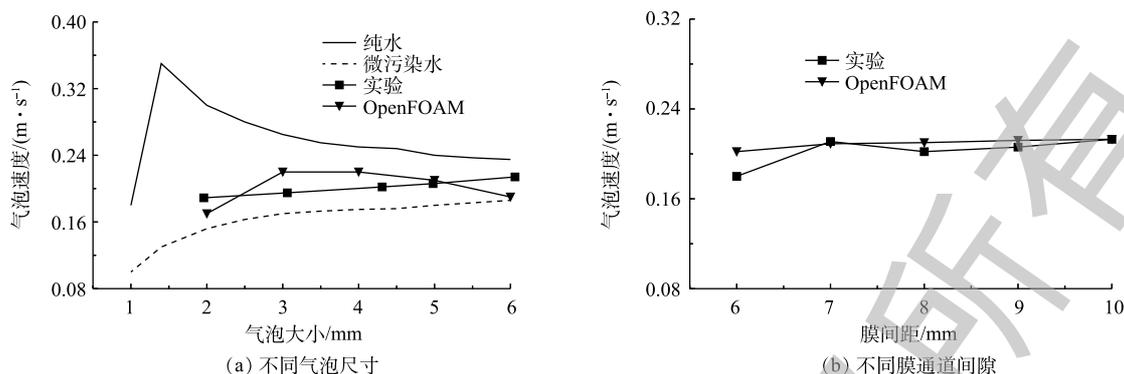


图2 实验与模拟得出的气泡上升速度对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated rising velocity of bubble

小, 上升速度的决定性因素为气泡尺寸, 当气泡尺寸增加时, 所受浮力也较大, 因此, 上升速度会随着气泡尺寸增大而升高。而对于较大的气泡, 平板膜对于气泡运动的影响开始变为主导, 因此, 较大的气泡上升速度随着气泡尺寸的增加反而降低。实验与模拟所显示出的趋势并不一致, 其原因在于模拟设置与实验条件存在一定的差异性, 模拟中整个膜通道仅有单个气泡, 而实验中是由一个曝气口释放的间隔较大的一连串气泡, 虽然间隔较大, 但是气泡之间仍会相互影响。此外, 液体黏度不同也可能是原因之一。实验中所用的是自来水, 黏度与模型中液体黏度接近。考虑到实验装置是敞口系统, 容器里的自来水经过放置与实验操作, 可能从清水变成了微污染水。由图2也可看出微污染水对气泡上升速度的影响。因此, 对于严格意义上的单个气泡的上升速度, 模拟结果可能更为准确。

图3为在膜间距为8 mm的情况下, 由体积等效直径为2~6 mm的单个气泡上升而引起的最大剪切应力。当单个气泡在水中运动时, 膜面最大剪切应力根据气泡大小, 出现在气泡中心在膜上面的投影点的附近, 或者是气泡尾流区对应在膜上面的区域。由于单个气泡产生的影响对于整块膜面太小(基于整块膜面的加权平均剪切应力太小), 最大剪切应力因为更能反映出单个气泡对于某块膜面的影响而被选为研究参数。由图3可知, 气泡运动引起的最大剪切应力随着气泡尺寸的增加而增加。这种变化趋势也与NDINISA等^[19]的研究结果一致。

2.3 膜间距

大多数膜生产商生产的平板膜组件的膜间距为6~10 mm。在本实验和模拟中, 平板膜的膜间距也被设置为6~10 mm, 以研究膜间隙对膜面最大剪切应力以及气泡上升过程的影响。图2(b)为不同膜间隙下体积等效直径为4.31 mm的气泡上升速度, 对于相同体积的气泡上升速度, 模拟与实验结果相符。此外, 体积等效直径为4.31 mm的气泡上升速度随着膜间距的增加而呈现微弱增加的趋势。导致该现象的原因可能在于膜的存在会减缓气泡上升。当膜间距较小时, 这种壁面影响较大, 气泡速度较小。反之, 壁面效果影响较小, 气泡上升速度较大。整体来讲, 体积等效直径为4.31 mm的气泡上升速度受膜间距的影响不大。

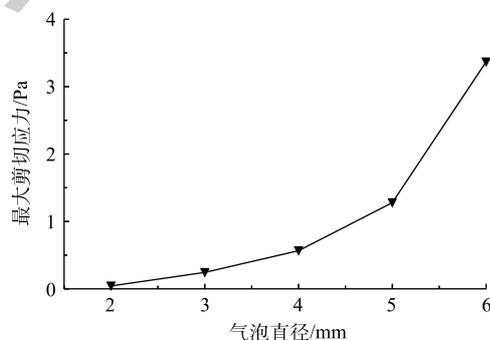


图3 通过模拟得出的不同气泡尺寸下的最大剪切应力
Fig. 3 Numerical maximal shear stress at different bubble sizes through simulation

图 4 为体积等效直径为 4.31 mm 的气泡引起的膜面最大剪切应力以及与之对应的膜间距。由图 4 可知, 对于体积等效直径为 4.31 mm 的气泡, 由气泡上升而引起的膜面最大剪切应力, 在较小膜间距的情况下大于等大气泡在较大膜通道中上升引起的膜面最大剪切应力, 且最大剪切应力出现在膜间距为 7 mm 时。NDINISA 等^[19]和 PRIESKE 等^[22]的研究也得到类似的结论, 即由气泡上升而引起的膜面剪切应力在较小膜间距中较大。因此, 建议设计 MBR 系统中的平板膜组件时尽量使用较小的膜间距, 以便获得较高的膜面最大剪切应力, 从而获得最佳膜污染控制效果。同时需要注意, 当膜板间隔太近时, 实际运行中可能会出现堵塞问题。PRIESKE 等^[22]考虑到这个问题, 故推荐在 MBR 系统中使用膜间距为 5 mm 的平板膜组件。由于商业平板膜组件的膜间距大多数在 6~10 mm, 在这个膜间距范围内, 根据模拟结果, 7 mm 的膜间距能够获得最高膜面最大剪切应力值。因此, 建议 MBR 系统中的平板膜组件的膜间距设计为 7 mm。

2.4 膜间流速

对于气泡群的模拟须考虑 Air-Lift 效应, 即由于气泡群上升而带动的膜间液体向上流动的现象。为了研究膜表面剪切应力产生的原因, 即主要是由于液体错流产生还是由于气泡上升运动引起, 本研究通过模拟分别计算了在液体上升速度为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下, 加入 3 mm 气泡群和不加气泡群时的面积平均膜面剪切应力, 结果如图 5 所示。膜表面上的每个点所对应的剪切应力均可以通过数值模拟计算得出, 对于这些剪切应力进行面积平均加权, 则可以得到膜表面面积平均剪切应力值。考虑到面积平均剪切应力更能体现气泡群运动对于膜污染控制的全局影响, 本研究选取面积平均剪切应力为研究参数。图 5 为在有、无气泡群的情况下, 液体上升速度分别为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以及 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时面积平均剪切应力随时间的变化情况。在相同的膜间液体上升速度下加入气泡群, 其对于膜面的冲刷效果明显, 能使面积平均剪切应力提升约 0.4 Pa。在较低的液体流速下, 膜面面积平均剪切应力主要由气泡上升运动引起。当液体上升速度提高时, 由液体流动而产生的面积平均剪切应力也显著提高。然而, 较高流速的水力冲刷效果并不如低流速加曝气的组合对于膜污染控制效果好。

为了具体显示气泡群对于膜面面积平均剪切应力的影响, 图 6 展示了相同流速下, 加入与未加气泡群而产生的面积平均剪切力之比。在较小流速下, 面积平均剪切应力的比值较大, 意味着由气泡群上升运动而产生的面积平均剪切应力占主导地位。从图 6 中也可以看出, 面积平均剪切应力比值随着时间而增加, 这也表明气泡群上升对于膜表面面积平均剪切应力的作用逐渐增强。然而在较高流速下, 剪切应力比值在 0.4 s 以后基本稳定在 1.8 左右, 表明由气泡上升与由液体错流而产生的面积平

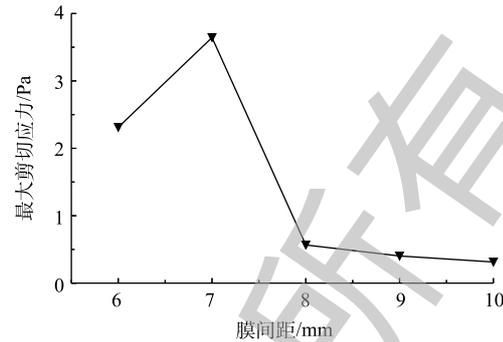


图 4 通过模拟得出的不同膜间距所对应的最大剪切应力

Fig. 4 Numerical maximal shear stress at different gap distances through simulation

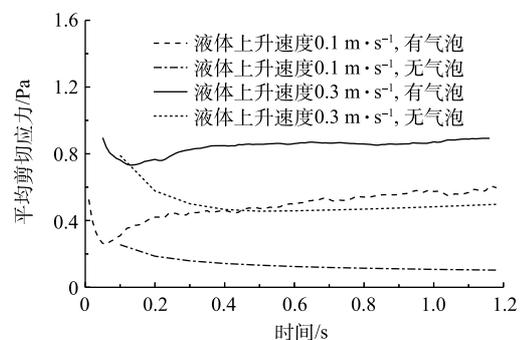


图 5 不同膜间流速下的面积平均剪切应力

Fig. 5 Area-weighted shear stress at different liquid velocities between membrane gaps

均剪切应力相当。

3 结论

1) 气泡速度随着气泡尺寸的增加先升高, 在气泡直径为 4 mm 时速度达到最高, 之后逐渐降低。而膜面最大剪切应力随着气泡变大则呈上升的趋势。

2) 气泡速度受膜间距的影响不大, 但随着膜间距的增加仍呈现缓慢增长趋势。最大剪切应力则受膜间距影响较大, 低膜间距的最大剪切应力要远大于高膜间距的最大剪切应力, 其最大值则出现在膜间距为 7 mm 时。考虑到实际应用中过小的平板膜间距可能会造成堵塞问题, 建议平板膜之间的间距为 7 mm。

3) 通过比较不同膜间流速下气泡群加入与否而产生的面积平均剪切应力, 发现膜间流速的提高会增大膜表面的面积平均剪切应力。在低流速的情况下, 面积平均膜面剪切应力主要由气泡群上升而产生; 而在高流速的情况下, 气泡群上升与液体向上流动而产生的面积平均剪切应力相当。

参考文献

- [1] XIAO K, XU Y, LIANG S, et al. Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: Current state and future prospect[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(6): 805-819.
- [2] SUN J, LIANG P, YAN X, et al. Reducing aeration energy consumption in a large-scale membrane bioreactor: Process simulation and engineering application[J]. *Water Research*, 2016, 93: 205-213.
- [3] TAHA T, CUI Z F. CFD modelling of slug flow in vertical tubes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(2): 676-687.
- [4] DU X, WANG Y, LESLIE G, et al. Shear stress in a pressure-driven membrane system and its impact on membrane fouling from a hydrodynamic condition perspective: A review[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2017, 92(3): 463-478.
- [5] VERRECHT B, JUDD S, GUGLIELMI G, et al. An aeration energy model for an immersed membrane bioreactor[J]. *Water Research*, 2008, 42(19): 4761-4770.
- [6] MENG F, ZHANG S, OH Y, et al. Fouling in membrane bioreactors: An updated review[J]. *Water Research*, 2017, 114: 151-180.
- [7] IGLESIAS R, SIMÓN P, MORAGAS L, et al. Cost comparison of full-scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors[J]. *Water Science and Technology*, 2017, 75(11): 2562-2570.
- [8] LEBERRE O, DAUFIN G. Skimmilk crossflow microfiltration performance versus permeation flux to wall shear stress ratio[J]. *Journal of Membrane Science*, 1996, 117(1/2): 261-270.
- [9] CHAN C C V, BÉRUBÉ P R, HALL E R. Relationship between types of surface shear stress profiles and membrane fouling[J]. *Water Research*, 2011, 45(19): 6403-6416.
- [10] KAYA R, DEVECI G, TURKEN T, et al. Analysis of wall shear stress on the outside-in type hollow fiber membrane modules by CFD simulation[J]. *Desalination*, 2014, 351: 109-119.

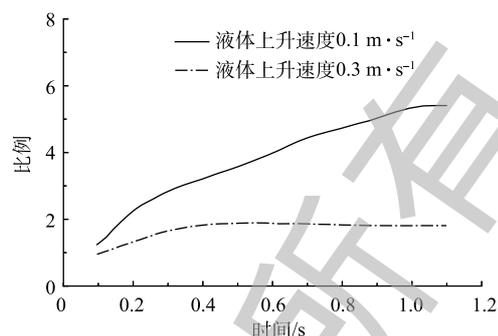


图6 膜通道中加入与不加气泡群面积平均壁面剪切应力之比

Fig. 6 Ratio of area-weighted shear stress with and without bubble swarm in membrane channels

- [11] CHAN C C V, BÉRUBÉ P R, HALL E R. Shear profiles inside gas sparged submerged hollow fiber membrane modules[J]. *Journal of Membrane Science*, 2007, 297(1/2): 104-120.
- [12] ABDULLAH S Z, WRAY H E, BÉRUBÉ P R, et al. Distribution of surface shear stress for a densely packed submerged hollow fiber membrane system[J]. *Desalination*, 2015, 357: 117-120.
- [13] WRAY H E, ANDREWS R C, BÉRUBÉ P R. Surface shear stress and membrane fouling when considering natural water matrices[J]. *Desalination*, 2013, 330: 22-27.
- [14] YAMANOI I, KAGEYAMA K. Evaluation of bubble flow properties between flat sheet membranes in membrane bioreactor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 360(1/2): 102-108.
- [15] DUCOM G, PUECH F P, CABASSUD C. Gas/liquid two-phase flow in a flat sheet filtration module: Measurement of local wall shear stresses[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2003, 81(3/4): 771-775.
- [16] DREWS A, PRIESKE H, MEYER E L, et al. Advantageous and detrimental effects of air sparging in membrane filtration: Bubble movement, exerted shear and particle classification[J]. *Desalination*, 2010, 250(3): 1083-1086.
- [17] BÖHM L, KRAUME M. Fluid dynamics of bubble swarms rising in Newtonian and non-Newtonian liquids in flat sheet membrane systems[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 475: 533-544.
- [18] PRIESKE H, DREWS A, KRAUME M. Prediction of the circulation velocity in a membrane bioreactor[J]. *Desalination*, 2008, 231(1/2/3): 219-226.
- [19] NDINISA N V, FANE A G, WILEY D E, et al. Fouling control in a submerged flat sheet membrane system: Part II Two-phase flow characterization and CFD simulations[J]. *Separation Science and Technology*, 2006, 41(7): 1411-1445.
- [20] RATKOVICH N, CHAN C C V, BERUBE P R, et al. Experimental study and CFD modelling of a two-phase slug flow for an airlift tubular membrane[J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(16): 3576-3584.
- [21] ESSEMIANI K, DUCOM G, CABASSUD C, et al. Spherical cap bubbles in a flat sheet nanofiltration module: Experiments and numerical simulation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(21): 6321-6327.
- [22] PRIESKE H, BÖHM L, DREWS A, et al. Optimised hydrodynamics for membrane bioreactors with immersed flat sheet membrane modules[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 18(1/2/3): 270-276.
- [23] WANG B, ZHANG K, FIELD R W. Novel aeration of a large-scale flat sheet MBR: A CFD and experimental investigation[J]. *AIChE Journal*, 2018, 64(7): 2721-2736.
- [24] HIRT C W, NICHOLS B D. A computational method for free surface hydrodynamics[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1981, 103(2): 136-141.
- [25] ZAHEDI P, SALEH R, MORENO-ATANASIO R, et al. Influence of fluid properties on bubble formation, detachment, rising and collapse; Investigation using volume of fluid method[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2014, 31(8): 1349-1361.
- [26] 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: Process Intensification*, 2010, 49(7): 759-781.
- [27] VLAEV S D, TSIBRANSKA I. Shear stress generated by radial flow impellers at bioreactor integrated membranes[J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, 50(6): 959-968.

- [28] COOKE J J, ARMSTRONG L M, LUO K H, et al. Adaptive mesh refinement of gas-liquid flow on an inclined plane[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2014, 60: 297-306.
- [29] THEODORAKAKOS A, BERGELES G. Simulation of sharp gas-liquid interface using VOF method and adaptive grid local refinement around the interface[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2004, 45(4): 421-439.
- [30] CLIFT R, GRACE J R, WEBER M E. Bubbles, Drops, and Particles[M]. Courier Corporation, 1978:171-175.
- [31] MA D, LIU M, ZU Y, et al. Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns[J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 72: 61-77.
- [32] ISLAM M T, GANESAN P, SAHU J N, et al. Single air bubble rise in water: A CFD study[J]. *Mechanical Engineering Research Journal*, 2013, 9: 1-6.

(本文编辑: 曲娜, 郑晓梅, 张利田)

Numerical analysis of hydrodynamic characteristics induced by bubble movements in flat sheet membrane

CAO Yingchen¹, SONNENBURG Alexander², URBAN Wilhelm^{1,*}

1. IWAR Institute, Technical University of Darmstadt, Darmstadt 64287, Germany

2. IWW Water Center Site Rhein-Main, Biebesheim 64584, Germany

*Corresponding author, E-mail: w.urban@iwar.tu-darmstadt.de

Abstract Membrane fouling is the major obstacle hindering the wide application of membrane bioreactors system (MBR) configured with different membrane modules in wastewater treatment. Aiming at this problem, the computational fluid dynamics (CFD) simulation was used to study the behaviors of single bubbles and bubble swarms during their rise in the membrane channel, such as the bubble rising rate and shear stress on the membrane surface, and achieve the goal of optimizing the geometrical characteristic module and operating conditions of the flat sheet membrane. The simulation results showed that for single bubble, its velocity first increased with the increase of bubble size (diameter), and reached the maximum value at the bubble diameter of 4 mm, then decreased when bubble size further increased. In addition, for bubbles with diameter of 4 mm, with increasing gap distance of membranes, the bubble rising velocity increased significantly, while the shear stress decreased. Considering the clogging problem in practice, it is recommended that a channel gap depth of 7 mm should be applied to the MBR system for the shear stress enhancement. The simulation results of bubble swarms indicated that the shear stresses in liquid and gas phases were close at high upwards flow rate, while the shear stresses in gas phase dominated at a relatively low flow rate. This work can provide the theoretical basis and technical support for the design and operation of MBR system.

Keywords CFD simulations; flat sheet membrane; membrane fouling; shear stress; single bubble; bubble swarms