

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.05.004

微曝氧化沟水力特性和气泡羽流传质规律研究

许晓飞,魏文泽,曾倩,刘凤霞,刘志军

(大连理工大学 流体与粉体工程研究设计所,辽宁 大连 116024)

摘要:研究微曝氧化沟曝气充氧和横向推流配合运行状态下非牛顿流体流动和气液两相传质问题,有助于实现氧化沟的优化设计和高效运行。以微曝氧化沟内清水和不同质量分数的羧甲基纤维素钠(CMC)水溶液为实验对象,研究曝气量、横向推流强度、曝气器布置方式和液相流变特性对微曝氧化沟内水力特性和气泡羽流传质的影响。实验结果表明,液相的流变特性对微曝氧化沟内水力和传质参数均有较大影响。与清水相比,CMC水溶液中沟道底部流速更小,体积氧传质系数更低。氧化沟底部横向流速随着曝气量的增大呈先减小后增大的变化趋势。基于量纲分析,得到气泡直径和体积氧传质系数的无量纲关联式,可为微曝氧化沟系统实现节能降耗和优化运行的目的提供理论依据。

关键词:微曝氧化沟;气泡羽流;非牛顿流体;横向流动;传质

中图分类号:TQ 021.4

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)05-0023-09

Hydrodynamics and Bubble Plume Mass Transfer Characteristics in Microporous Aeration Oxidation Ditch

XU Xiaofei, WEI Wenzhe, ZENG Qian, LIU Fengxia, LIU Zhijun

(Research & Design Institute of Fluid and Powder Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The study of non-Newtonian fluid flow and gas-liquid mass transfer under the coordinated operation of aerator and flowmaker in microporous aeration oxidation ditch is helpful to optimize the design and efficient operation of the oxidation ditch. Tap water and carboxyl methyl cellulose (CMC) aqueous solution with different mass fraction were selected to study the hydrodynamics and mass transfer in microporous aeration oxidation ditch by accounting for the effect of aeration rate, cross flow strength, aerator arrangement and liquid phase rheological properties. The experimental results

收稿日期:2018-05-04。

基金项目:国家自然科学基金项目(11502046);教育部留学回国人员科研启动基金项目(第50批);辽宁省博士科研启动基金项目(201501179)。

作者简介:许晓飞(1981—),男,辽宁大连人,博士,副教授。通信联系人:刘志军(1969—),E-mail:liuzj@dlut.edu.cn

引用本文:许晓飞,魏文泽,曾倩,等.微曝氧化沟水力特性和气泡羽流传质规律研究[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(5):23-31.

show that the rheological properties of liquid phase have great influence on the hydraulic and mass transfer parameters in microporous aeration oxidation ditch. Compared with the clean water, the flow velocity at the bottom of the ditch is smaller and the volumetric oxygen mass transfer coefficient is lower than those in CMC aqueous solutions. The cross flow velocity at the bottom of the ditch decreases first and increases then with the increase of aeration rate. Based on the dimensional analysis, dimensionless correlations of bubble diameter and oxygen mass transfer coefficient are obtained. It can provide a theoretical basis for the purpose of saving energy and optimizing operation of the microporous aeration oxidation ditch system.

Key words: microporous aeration oxidation ditch; bubble plume; non-Newtonian fluid; cross flow; mass transfer

随着中国经济发展从求量到求质的转型,对水环境的治理和水资源的循环利用也越来越重视。氧化沟工艺因其具有结构简单,基建投资费用低、耐冲击负荷能力强及污泥产量低且稳定等特点^[1],已经在国内外广泛应用于生活污水和工业污水的治理,而中国近 1/3 的污水处理厂采用氧化沟污水处理工艺^[2]。然而,在国内氧化沟工艺发展过程中,由于研究不足,使得我国国内氧化沟工艺还普遍存在曝气充氧效率低和协调运行能力差等突出问题,曝气设备的能耗占污水处理厂总能耗 60% 以上,从而导致污水处理平均能耗高和处理效率低。

传统的氧化沟普遍采用机械曝气方式,它兼有曝气充氧和混合推流的功能,在实际运转操作时很难分别独立控制充氧量和流速。与此相比,微曝氧化沟则采用微孔曝气器和潜水推流设备组合的方式,可以分别独立完成对氧化沟内混合液的充氧和混合推流,从而更有利于控制氧化沟内混合液的流速和溶解氧分布^[3-4]。与传统氧化沟相比,采用微孔曝气方式的微曝氧化沟的综合能耗降低 30%,运行费用节省 20%^[5]。微曝氧化沟呈封闭的沟渠形,活性污泥和污水混合液在潜水推流设备的作用下于环状的渠内循环横向流动。微曝氧化沟的微孔曝气系统运行时会形成微小气泡群,在沟渠环流的环境中卷吸氧化沟内的混合液从而形成气泡羽流。横向运动的存在势必对气泡羽流运动和氧传质过程产生很大影响。而迄今为止,具有横向速度水环境中气泡羽流运动特性和氧传质机理的研究文献发表很少,有必要研究横向流速存在条件下微曝氧化沟的水力特性和气泡羽流传质规律。

微曝氧化沟内的污泥污水混合液是非牛顿流体,具有剪切稀化特性^[6-7]。Barbot 等^[8]明确指出生物量浓度高会导致表观粘度的增加和湍流强度减弱,这两个参量会直接导致体积氧传质系数的减小,这说明污泥污水混合液的流变性在氧化沟的水动力学和氧传质过程中扮演着重要角色。目前,涉及气泡羽流气液两相流问题的研究更多的局限在牛顿流体中,而有关微曝氧化沟内非牛顿流体中的气泡羽流和横向推流综合作用下的水力特性的研究仍处在研究阶段,涉及到气泡羽流在具有横向流动非牛顿流体中的传质规律的研究相对较少,需要进一步深入研究。

本文基于实验测试,研究微曝氧化沟内横向推流条件下曝气充氧过程中牛顿流体(清水)和非牛顿流体(CMC 水溶液)的水力学特性和气泡羽流传质规律,主要考察曝气量、横向推流强度、曝气器布置方式和液相流变特性对微曝氧化沟内流动速度和体积氧传质系数的影响规律。利用高速摄影技术和图像处理技术,确定不同工况条件下气泡尺寸,并提出气泡大小的预测模型。基于量纲分析,综合考虑曝气量、横向流速和液相流变特性等参量,借助舍伍德数 Sh 、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 和施密特数 Sc 建立适用于微曝氧化沟内牛顿流体和非牛顿流体体系的体积氧传质系数,进一步研究微曝氧化沟渠内环流、气泡羽流和液相复杂流变特性共同作用下的气液相间氧传质的影响机制。

1 实验部分

1.1 实验装置

图 1 是微曝氧化沟气泡羽流传质实验装置示意图。微曝氧化沟气泡羽流传质实验装置由微曝氧化沟水槽、气泡羽流发生装置、横向流动测试系统和溶解氧测试系统组成。根据弗劳德数相似定律,按照小试氧化沟和工程实际氧化沟的尺寸比 1:36 确定小试氧化沟尺寸,保证小试氧化沟能够正确反映工程实际氧化沟的水力特性。微曝氧化沟水槽由有机玻璃加工,尺寸为 1.3 m×0.277 m×0.33 m(长×宽×高),包含直流区(0.950 m)和弯道 2 部分。实验有效水深为 0.2 m。气泡羽流发生装置采用微孔曝气管模拟工程氧化沟的曝气器,其管外径和内径分别为 15 mm 和 10 mm,有效曝气长度为 200 mm。微孔曝气管产生的气泡直径较小,有利于提高气液接触的界面面积和气泡在液相中的停留时间,从而具有较好的曝气充氧效果。图 2 给出了曝气装置和 2 台推流泵的布置位置以及水平流速观测断面处观测点的布置。曝气管固定在直沟道底部,经气体转子流量计与空气压缩机相连。溶解氧探头安装在距离曝气中心 340 mm 处,潜水推流泵分别置于 2 个弯道入口处,距离入口 208 mm。

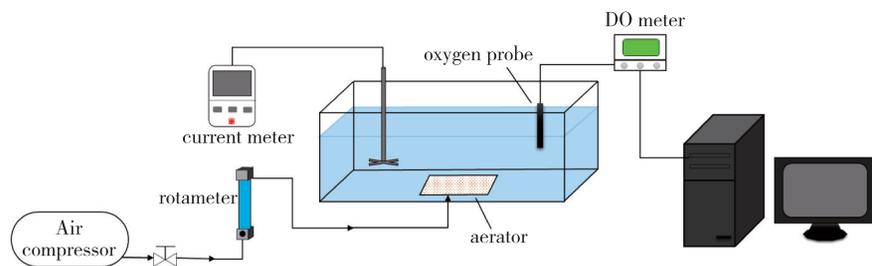


图 1 实验装置示意图

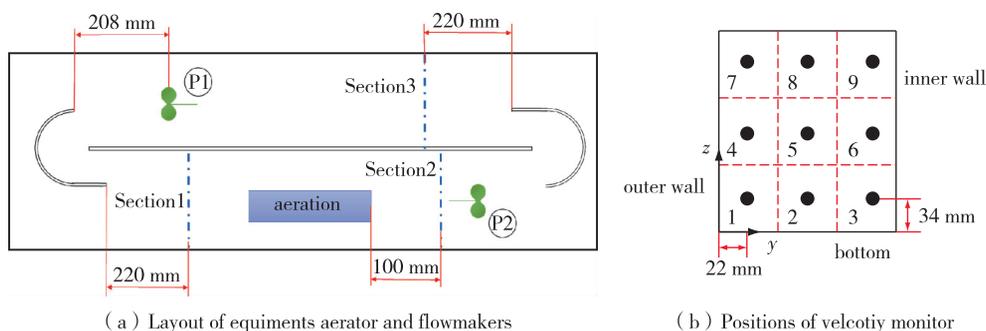


图 2 微曝氧化沟曝气器、推流设备布置和速度监测位置

图 3 给出了曝气管的布置方式。表 1 列出不同工况下推流泵的开启方式。实验中,选取 6 种曝气量(0.5,1,1.5,2,2.5,3 m³/h)、4 种曝气器管布置方式(A₁—单管中间式;A₂—单管侧壁式;A₃—双管式;A₄—均布式)和 5 种横向流动强度(S₁—推流泵 P₁和 P₂均关闭;S₂—推流泵 P₁半开,P₂关闭;S₃—推流泵 P₁全开,P₂关闭;S₄—推流泵 P₁半开,P₂半开;S₅—推流泵 P₁全开,P₂全开),探究不同参数对微曝氧化沟复杂水力条件下氧传质的影响规律。

实验采用羧甲基纤维素钠水溶液(剪切稀化非牛顿流体)模拟废水,用清水作为牛顿型流体的参考体系。通过对比分析,确定废水的流变特性

表 1 不同操作条件下推流泵的功率 kW

Operating conditions	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
P ₁	0	0.022 5	0.045	0.022 5	0.045
P ₂	0	0	0	0.022 5	0.045

对微曝氧化沟中水力特性和气泡羽流传质规律的影响。采用同轴圆柱体流变仪(BROOKFEILD R/S+CC)在室温下测定不同剪切速率下 CMC 水溶液的表观粘度。根据幂率模型对数据进行拟合,得到黏稠系数 K 和流动特性指数 n 。图 4 表示不同质量分数 CMC 水溶液的表观粘度随剪切速率变化的曲线。利用全自动表面张力仪(K100-Kruss)测得溶液的表面张力。水和不同质量分数 CMC 水溶液的物性参数见表 2。

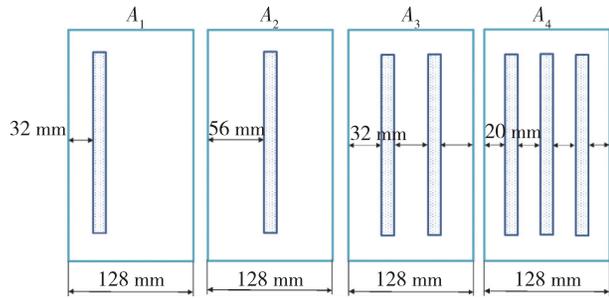


图 3 曝气管布置方式

1.2 气泡大小和传质参数的确定

1.2.1 体积氧传质系数

根据 ASCE 准则对微曝氧化沟内液相中溶解氧(DO)含量进行实时测量。通过向清水中加入脱氧剂亚硫酸钠(Na_2SO_3)和催化剂氯化钴(CoCl_2)进行一定时长的脱氧,直至溶解氧浓度趋近于 0;然后打开空气压缩机,向氧化沟内鼓入一定流量的空气,溶解氧测定仪对沟道内相应位置的溶解氧浓度进行实时测量,直至趋近于饱和;随后根据记录的实验离散点利用线性回归方程拟合即可得到氧传质系数。

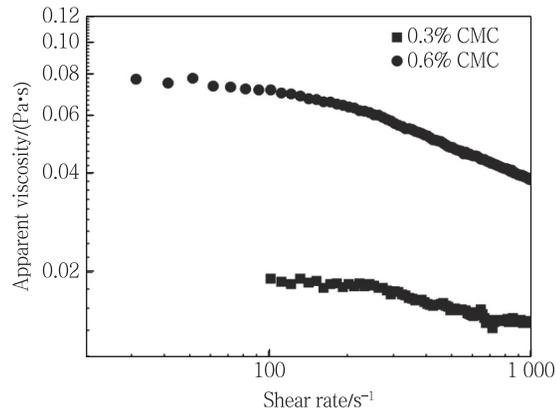


图 4 CMC 水溶液表观黏度随剪切速率的变化

表 2 液相物性参数

Fluid	Mass fraction/ %	Consistency/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)	Flow index	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Surface tension coefficient/ ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)
Tap water	0	0.001 0	1	998.21	72.75
CMC aqueous solutions	0.3	0.043 0	0.836 3	1 002.79	52.17
	0.6	0.302 9	0.705 6	1 008.02	71.34

基于微曝氧化沟装置内的流动特性,可采用非稳态的方法在清水中对氧传质实验进行一系列的测定。非稳态法又称再曝气法,通过测定充氧过程相应位置处的水体溶解氧浓度,以此来代表沟道中参数的变化情况。以曝气过程中 DO 浓度随时间变化的增加速率来评估曝气充氧性能,采用非稳态法所获得的数据代入由式(1)简化的质量传递模型^[9]。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_L a (C_s - C) \tag{1}$$

积分可得

$$\ln \frac{C_s - C_0}{C_s - C} = K_L a (t - t_0) \tag{2}$$

式中: C_0 表示溶解氧在 $t = t_0$ 时刻的溶解氧浓度; C 表示溶解氧在 t 时刻的溶解氧浓度,曝气开始后,利用溶氧仪时刻记录水体中溶解氧浓度 C 随时间的变化情况; C_s 表示对应温度下饱和溶解氧浓度。将实验获得的 C, t 和已知的 C_s 代入式(2),利用线性回归方程即可拟合得到体积氧传质系数 $K_L a$ 值。然后

对其进行校正,转换成标况 20 °C,可利用下式计算得到^[10]

$$K_{L,a_{20}} = K_{L,a} \times 1.024^{(20-T)} \quad (3)$$

1.2.2 气泡直径

在有机玻璃槽的一侧放置平板光源,在对面一侧采用 Photron 高速摄像机(FASTCAM SA4)拍摄记录气泡上升过程中气泡大小的时间序列图像。微曝氧化沟内气泡的 Sauter 平均直径 d_e ^[9]为

$$d_e = \frac{\sum_{i=1}^N N_i d_i^3}{\sum_{i=1}^N N_i d_i^2} \quad (4)$$

式中: N_i 为第 i 张图片中采集气泡的总个数; N 是采集处理图片的总张数; d_i 为第 i 张图片中采集气泡的平均直径,可定义为^[9]

$$d_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} d_{ij}}{N_i} \quad (5)$$

式中 d_{ij} 为第 i 张图片中第 j 个气泡的当量直径。设气泡的最长轴为 p ,最短轴为 q ,则有^[9]

$$d_{ij} = \sqrt[3]{p^2 q} \quad (6)$$

2 结果分析与讨论

2.1 氧化沟内流速的对比

图 5 给出了无曝气条件下清水和不同质量分数 CMC 水溶液中推流方式对截面 1 靠近外壁面沿水深方向流速的变化。图 5 中 $y-z$ 坐标可参考图 2(b)的定义。如图 5 所示,随着横向推流作用的增强,清水和 CMC 水溶液中截面 1 靠近底面处水平流速均呈现出增加的趋势。当推流方式由 S_3 工况过渡到 S_4 工况,虽然沟道内推流泵的总功率未发生改变,但推流泵的统一布置导致沟道底部液相流速增大,有利于达到节能降耗的目的。当推流方式从 S_4 工况过渡到 S_5 工况,清水和低浓度的 CMC 水溶液中靠近底面处流速变化较大,而高浓度 CMC 水溶液中流速增加幅度相对较小。这是因为在质量分数高的 CMC 水溶液表现粘度相对较大,对流体的横向流动的抑制作用更强,若要达到清水和低质量分数 CMC 水溶液中液相相同的速度则需要更大功率的推流。这也说明过往研究将氧化沟中的污泥污水混合液简化为清水具有很大的局限性。

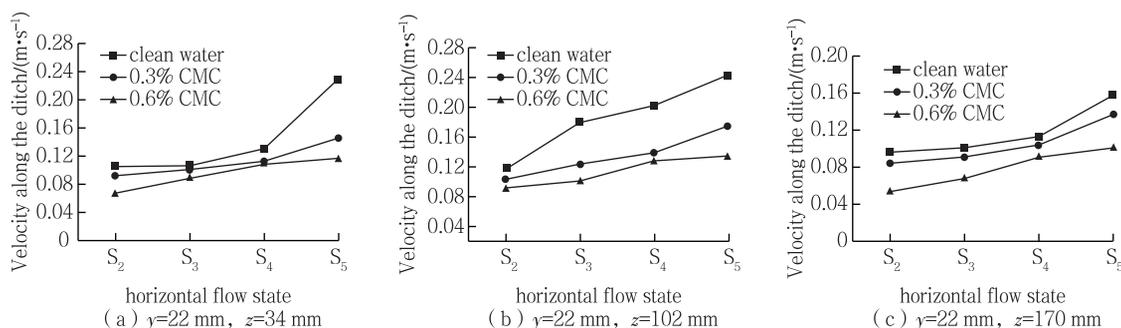


图 5 清水和 CMC 水溶液中不同横向流工况下截面 1 近壁处的流速

微曝氧化沟沟道底部的流速会对污泥沉降造成重要影响,因此考察不同操作条件对氧化沟沟道底部速度的影响规律有重要意义。图 6 表示推流工况为 S_1 和曝气布置方式为中间式 A_2 条件下截面 2 位置沟道底部附近流速随曝气量的变化规律。图 6 中 $y-z$ 坐标可参考图 2(b) 的定义。从图 6 可以看出,沟道底面附近的水平流速随曝气量的增大呈先减小后增加的变化规律。当 $Q=1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,清水中内挡板附近 $y=110 \text{ mm}$ 和中间位置 $y=66 \text{ mm}$ 处流速最小,而近壁处 $y=22 \text{ mm}$ 处流速最低点出现在 $Q=1 \text{ m}^3/\text{h}$;低浓度 CMC 溶液流速最低点同样出现在 $Q=1.5 \text{ m}^3/\text{h}$;当 $Q=0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,0.6 wt% CMC 溶液底部近壁处 $y=22 \text{ mm}$ 和 $y=66 \text{ mm}$ 点流速最低。相同曝气量下,横向流速随溶液表观粘度的增加而降低。

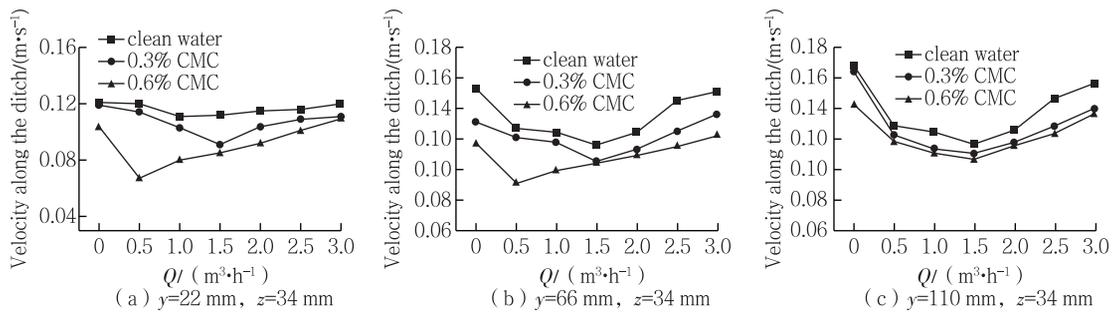


图 6 清水和 CMC 水溶液中不同曝气量下截面 2 底部的流速

2.2 气泡尺寸的变化规律和预测模型

清水和 CMC 水溶液中气泡尺寸大小对比如图 7 所示。由图 7 可知,非牛顿流体中气泡的平均尺寸要明显大于牛顿流体中气泡的尺寸,且 CMC 浓度越高,气泡直径越大;气泡索特平均直径 D_{32} 随流量 Q 的增加呈现出缓慢递增的趋势,高浓度和低浓度 CMC 溶液中气泡尺寸之间的差异也逐渐增加。这是因为 CMC 水溶液的质量分数越高,气泡生成和运动过程受到的表面张力和黏性阻力越大,延长了气泡在微孔曝气器上的停留时间,造成气泡尺寸变大。

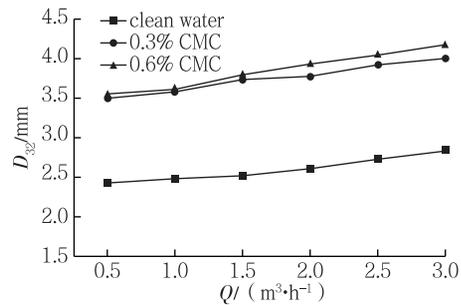


图 7 曝气量和液相物性对气泡直径的影响

气液两相流中影响气泡 Sauter 平均直径 D_{32} 的因素主要包括曝气量大小 Q 、周围液体粘度 μ 、曝气截面积 S 、气液两相密度差 $\Delta\rho$ 、重力加速度 g 和表面张力系数 σ 共 6 个物理参数,可确定气泡 Sauter 平均直径 D_{32} 与相关物理量的函数关系为

$$D_{32} = f(Q, \mu, S, \Delta\rho, g, \sigma) \tag{7}$$

根据 II 定理进行量纲分析,可得无量纲表达式为

$$\frac{D_{32}}{S^{0.5}} = f(Re, We, Fr) = a(Re)^b (We)^c (Fr)^d \tag{8}$$

式中: a, b, c 和 d 为常数。无量纲数雷诺数 Re 、韦伯数 We 和弗劳德数 Fr 分别定义为:

$$Re = \frac{\Delta\rho \cdot Q \cdot S^{-0.5}}{\mu}; We = \frac{\Delta\rho \cdot Q^2 \cdot S^{-1.5}}{\sigma}; (Fr)^2 = \frac{Q^2}{S^{2.5} \cdot g} \tag{9}$$

考虑到液相的流变特性,将幂律模型带入式(8),通过多元线性回归函数得到 CMC 水溶液中气泡直径

的关联式

$$\frac{D_{32}}{S^{0.5}} = f(Re, We, Fr) = 1.84 \cdot (Re)^{0.12} (We)^{-0.65} (Fr)^{1.24} \quad (10)$$

由式(10)可知,非牛顿流液体相环境下气泡 Sauter 直径的函数预测模型与雷诺数及弗劳德数呈现出正比关系,而与韦伯数成反比关系。根据无量纲参数的物理意义可知,剪切稀化非牛顿流体中,气泡平均直径随表面张力的增加而增大。

2.3 氧传质效果的对比分析

图 8 比较了曝气器均匀布置条件下清水和 CMC 水溶液中氧传质性能随曝气量的变化规律。图 8(a),8(b)和 8(c)分别表示曝气器均匀布置条件下横向推流工况 S_1 、工况 S_4 和工况 S_5 时曝气充氧规律。从图 8 可以看出,随着曝气量的增加,清水和 CMC 水溶液中的体积氧传质系数均有所增加;在相同的曝气器布置方式和曝气量下,清水中体积氧传质系数最大,CMC 水溶液中的氧传质系数相对较小,且 CMC 水溶液的质量分数越大,体积氧传质系数越小。清水中体积氧传质系数随曝气量的增加变化幅度最大;而在 CMC 水溶液中体积氧传质系数随曝气量的增加变化幅度不大,且随液相表观黏度的增加,体积氧传质系数增长速率逐渐趋于平缓。

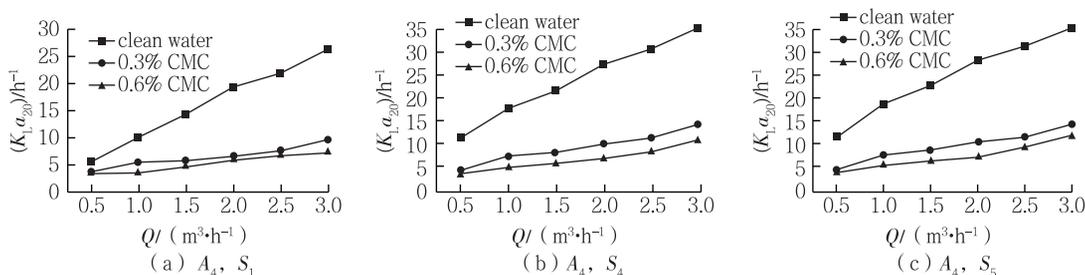


图 8 清水和 CMC 水溶液中不同曝气量下的体积氧传质系数

图 9 比较了曝气量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,不同横向推流工况对不同物性的两相流传质效果的影响。图 9 分别表示单管中间式 A_2 、双管式 A_3 和均布式 A_4 的曝气器布置方式下体积氧传质系数在不同横向推流工况下的变化规律。从图 9 可以看到,随着横向推流作用的增强,清水和 CMC 溶液中的体积氧传质系数均增大,表明横向流动对强化传质有帮助。清水中的体积氧传质系数随推流作用增强而增大的趋势更明显,增长幅度最高可达 140%。CMC 水溶液中的体积氧传质系数随推流作用增强而增大的幅度虽然相对较小,但考虑到 CMC 水溶液中体积氧传质系数相对清水中的体积氧传质系数要小很多,所以横向推流对剪切稀化非牛顿流体中氧传质效果影响同样不能忽视。

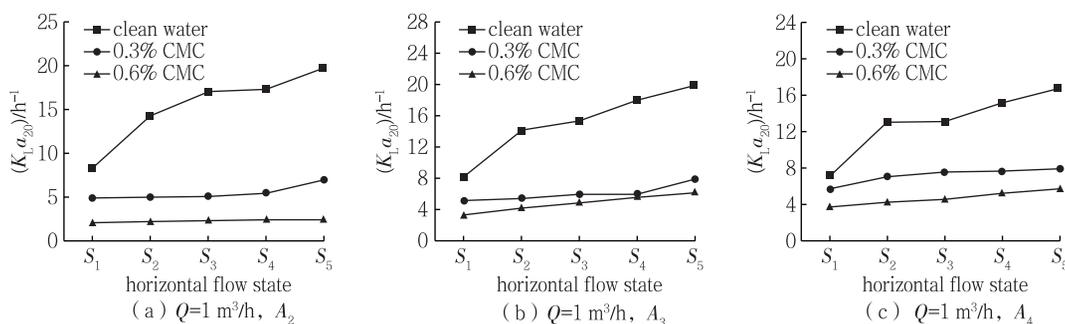


图 9 不同横向推流工况下清水和 CMC 水溶液中的体积氧传质系数

3 结 论

以微曝氧化沟内清水和不同质量分数的 CMC 水溶液为实验对象,研究曝气量、横向推流强度、曝气器布置方式和液相流变特性对微曝氧化沟内水力特性和气泡羽流传质的影响,结论如下:

1)与清水相比,CMC 水溶液中沟道底部流速更小,说明液相的流变特性对微曝氧化沟内的水力特性有重要影响。随着推流泵功率的增加,横向流动强度增大。相同功率条件下,均匀布置推流泵更有利于提高横向流动强度。在相同推流泵运行工况下,随着曝气量的增大,横向流动强度先减小后增大。

2)气泡羽流气泡尺寸随着曝气量的增大而增大。基于量纲分析,利用雷诺数 Re ,韦伯数 We 和弗劳德数 Fr 建立了微曝氧化沟内非牛顿流体中气泡尺寸的预测模型,模型可靠性高。

3)相同工况下,CMC 水溶液中的体积氧传质系数要小于清水中的体积氧传质系数。清水和 CMC 水溶液中的体积氧传质系数均随曝气量和推流强度的增大而增大。基于量纲分析,利用舍伍德数 Sh 、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 和施密特数 Sc 建立气泡体积氧传质系数的无量纲关联式,可为微曝氧化沟系统实现节能降耗和优化运行的目的提供理论依据。

参考文献:

- [1]HONG K H, CHANG D, HUR J M, et al. Novel phased isolation ditch system for enhanced nutrient removal and its optimal operating strategy[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2003, 38(10), 2179-2189.
- [2]杨凌波,曾思育,鞠宇平,等.我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析和定量识别[J].*给水排水*, 2008, 34(10): 42-45.
- [3]NAKAMACHI K, FUJIWARA T, CHEN X, et al. Energy efficiency of full-scale oxidation ditch with dual dissolved oxygen control technology in clean water and domestic wastewater[J]. *Journal of water and environment technology*, 2012, 10(3): 229-240.
- [4]杨亚红,彭党聪,李磊,等.微孔曝气变速氧化沟循环特性的中试研究[J].*环境工程学报*, 2013, 7(4): 1336-1340.
- [5]郭昌梓,程飞,陈雪梅.氧化沟的优缺点及发展应用模式[J].*安徽农业科学*, 2011, 39(23): 14288-14291.
- [6]LAERA G, GIORDANO C, POLLICE A, et al. Membrane bioreactor sludge rheology at different solid retention times[J]. *Water Research*, 2007, 41(18): 4197-4203.
- [7]WANG Y L and DENTEL S K. The effect of high speed mixing and polymer dosing rates on the geometric and rheological characteristics of conditioned anaerobic digested sludge (ADS)[J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 6041-6052.
- [8]BARBOT E, SEYSSIECQ I, ROCHE N, et al. Inhibition of activated sludge respiration by sodium azide addition: effect on rheology and oxygen transfer[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 163: 230-235.
- [9]董鑫,许晓飞,刘凤霞,等.鼓泡反应器中幂律型流体流动与传质特性[J].*化工学报*, 2018, 69(6): 2446-2454.
- [10]RITTMANN B E, MCCARTY P L. *Environmental biotechnology: principles and applications*[M]. [S.l.]: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2001: 335-339.

(责任编辑:李艳)