

旋转曝气器的曝气充氧性能研究

王祖恒, 朱菊香, 沈绍传, 姚克俭*

(绿色化学合成技术国家重点实验室培育基地, 浙江工业大学化学工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要:针对曝气池中的实际充氧情况, 提出新的曝气性能指标—充氧均匀性指数, 并提出一种新型曝气器旋转曝气器。在长宽高尺寸为 600 mm×800 mm×910 mm 的有机玻璃曝气池内, 以空气-清水为体系, 对旋转曝气器的曝气充氧性能进行了研究。主要考察了充氧均匀性指数、氧总传质系数和曝气效率等曝气充氧性能, 并与微孔曝气器进行对比。实验结果表明, 当曝气流量为 1.0~2.5 m³/h, 旋转曝气器和微孔曝气器的氧总传质系数、氧传质速率、氧传质效率和曝气效率很相近; 旋转曝气器的充氧均匀性指数介于 0.040 4~0.049 4, 而微孔曝气器的充氧均匀性指数介于 0.054 7~0.127 5。旋转曝气器产生的旋转流场能使气泡在水平面分布更均匀, 提高了氧传质效果。

关键词: 旋转曝气器; 微孔曝气器; 充氧均匀性指数; 旋转流场

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)06-0161-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.06.038

Study on aeration and oxygenation performances of rotary bubble diffuser

WANG Zu-heng, ZHU Ju-xiang, SHEN Shao-chuan, YAO Ke-jian*

(College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Based on the actual situation oxygenation in the aeration tank, a novel rotary bubble diffuser and a novel aeration performance index-oxygenation uniformity index are both proposed. The aeration performances of the rotary bubble diffuser are experimentally studied by using an air-water system in a glass reinforced fiber aeration tank with a size of 600×800×910 mm. The oxygenation uniformity index, oxygen transfer coefficient and aeration efficiency of the rotary bubble diffuser are analyzed and compared with those of a fine bubble diffuser. The results show that the oxygen transfer coefficient, oxygen transfer rate, oxygen transfer efficiency and aeration efficiency of rotary bubble diffuser are very close to those of fine bubble diffuser under an air flow rate of 1.0 to 2.5 m³/h. The oxygenation uniformity index of the rotary bubble diffuser varies from 0.040 4 to 0.049 4, while that of the fine bubble diffuser varies from 0.054 7 to 0.127 5. The rotary flow field generated by the rotary bubble diffuser makes the bubble more evenly distribute in horizontal scale, which improves the oxygen transfer.

Key words: rotary bubble diffuser; fine bubble diffuser; oxygenation uniformity index; rotary flow field

自 20 世纪 80 年代起, 微孔曝气器越来越多地应用于污水处理曝气反应池、养殖池塘、受污染水库等水体中, 成为很常用的水体增氧装置^[1]。有统计资料表明^[2-3], 曝气系统电耗费用占整个污水处理系统运行成本的 40% 左右^[4-5]。因此, 改进曝气设备使其提高效率、降低能耗成为环保产业的重要研究课题。

在实际的污水处理中, 微孔曝气器自身的特点及安装方式会导致曝气池内充氧不均匀, 即在偏离曝气器正上方区域的气含率明显偏低, 导致充氧能力大大降低。而在旋转浮阀相关的气液两相流动与传质的研究中发现, 主动旋转阀塔板和旋转浮阀塔板的气含率分布比 F1 型浮阀塔板均匀且气液传质效率更高, 主要是旋转浮阀形成的旋转流场可以促进气液接触更为均匀^[6-8]。

因此, 鉴于主动旋转浮阀的特点, 本文中提出一种新型的曝气器—旋转曝气器, 并针对曝气池中的实际充氧情况, 提出新的曝气性能指标—充氧均匀性指数。本工作以空气-清水为体系, 在曝气流量为 1.0~2.5 m³/h 时, 对旋转曝气器的曝气性能进行研究, 通过实验数据分析充氧均匀性指数、氧总传质系数和曝气效率等性能, 并与微孔曝气器的性能进行比较。

1 实验部分

1.1 曝气器结构与特点

旋转曝气器的结构如图 1 所示, 其盖在水平面上的投影面为 $\Phi 63.66$ mm 的圆形区域, 盖周围均匀排布 3 个条形腿片及 3 个条形翅片, 盖周边设置向下弯曲的折边。在盖中心位置焊接一直径为

收稿日期: 2016-11-11; 修回日期: 2017-04-05

基金项目: 浙江省科技计划项目公益技术研究工业项目(2012C21019)

作者简介: 王祖恒(1993-), 男, 硕士生, 13456399190@163.com; 姚克俭(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为传质与分离, 通讯联系人, 0571-88320952, yaokj@zjut.edu.cn。

6 mm 的圆柱形金属杆作为支撑轴,金属杆的另一端与电机连接,由电机转动带动盖的旋转,驱动电机为伺服步进电机,固定在曝气池顶部,设置电机转速为 120 r/min。

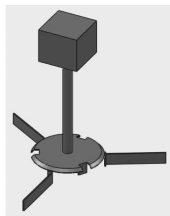


图 1 旋转曝气器的结构

旋转曝气器和微孔曝气器进行组合使用,其中,微孔曝气器起到气体初始分布的作用,而旋转曝气器则起到均匀分布气体的作用。当气泡从微孔曝气器上升冲击到旋转曝气器时,由于旋转曝气器的作用形成了旋转流场,使气泡由垂直运动转化为部分水平运动,弯曲的折边使气泡产生斜向下的运动;经过盖的旋转和翅片导向作用后,可使气泡从盖的边上以螺旋旋转的方式散出。旋转产生的旋转流场能加快气液表面更新,促使气含率分布均匀,减少曝气传质死区,提高曝气充氧效果。

1.2 试剂和仪器

无水亚硫酸钠:AR,温州市化学用料厂;六水合氯化钴:AR,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

溶解氧测量仪:奥豪斯 ST300D 型,测量范围 0.00~19.00 mg/L,测量精度 $\pm 1\%$ 。

(上接第 160 页)

化反应过程;绝热甲烷化出口气体与原料气混合后,冷激段 C、D 温度基本一致,且平稳维持在 390~400℃,低温换热出口温度维持在 290~300℃。

(3) 反应器出口气组成稳定,其中 CO₂ 转化率大于 98.0%,CO 转化率大于 99.8%,该反应器能够实现焦炉煤气甲烷化一步转化,工艺简单,设备投资小。

(4) 反应器能够在高负荷(焦炉煤气进气流量为 1 650~1 900 m³/h)下稳定工作。

参考文献

- [1] Razzaq R, Li C, Zhang S. Coke oven gas: Availability, properties, purification, and utilization in China[J]. Fuel, 2013, 113(2): 287-299.
- [2] Anderson D M, Roop J M. The Technology-energy-environment-health (TEEH) Chain in China: A case study in cokemaking, edited by karen R. polenske[J]. Journal of Regional Science, 2007,

1.3 实验装置与方法

实验装置见图 2,主要包括尺寸为 600 mm×800 mm×910 mm 曝气池、罗茨鼓风机和转子流量计等。旋转曝气器的排布见图 3(a),其中编号 1、3 的旋转曝气器距离微孔曝气器的高度均为 70 mm,编号 2、4 的旋转曝气器距离微孔曝气器的高度均为 20 mm。溶氧仪测量高度距离池底分别为 425、525、625 mm,每个高度平面的测量点选择中心和边界各 1 个,旋转曝气器的测量点命名为 A1、B1、A2、B2、A3、B3,微孔曝气器的测量点命名为 a1、b1、a2、b2、a3、b3,两者测量点在曝气池内空间分布见图 3(b)。

本实验参照 CJ/T 475—2015 标准进行^[9]。分别进行旋转曝气器、微孔曝气器曝气实验。以旋转曝气器为例,其实验流程如下:校准溶氧仪,按图 2 连接实验装置,检查装置气密性;加水至 850 mm 高度,投加无水亚硫酸钠和六水合氯化钴,使水中的溶解氧降至 0.2 mg/L 以下;开始实验,每隔 0.5 min 记录一次溶解氧值,一段时间后可延长间隔至 1 min,观察实验现象并记录水温、气温,当 5 min 内水中溶解氧浓度基本保持不变时或者水中溶解氧浓度 10 min 内增加值小于 0.1 mg/L 时停止实验;为了排除其他因素对测试结果的干扰,实验装置处于相同的条件下来测得水中溶解氧浓度 C^[10-11],每池水重复实验不应超过 2 次。微孔曝气器的性能测试水温为 25.9~26.5℃,旋转曝气器的性能测试水温为 28.6~29.8℃。

47(2):397-398.

- [3] Li Q, Du S, Liao Z, et al. Analysis of Misunderstandings in developing coal gasification in China [J]. Sino-Global Energy, 2011, 38(8): 35-39.
- [4] Razzaq R, Zhu H, Jiang L, et al. Catalytic methanation of CO and CO₂ in coke oven gas over Ni-Co/ZrO₂-CeO₂ [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(6): 2247-2256.
- [5] Zhu H, Razzaq R, Jiang L, et al. Low-temperature methanation of CO in coke oven gas using single nanosized Co₃O₄, catalysts [J]. Catalysis Communications, 2012, 23(21): 43-47.
- [6] Lu H, Yang X, Gao G, et al. Mesoporous zirconia-modified clays supported nickel catalysts for CO and CO₂ methanation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(33): 18894-18907.
- [7] 杨养龙, 杨扬. 焦炉煤气制天然气的技术进展及思考 [J]. 现代化工, 2015, 35(1): 11-14.
- [8] Christian Wix, Ib Dybkjaer, Niels R. Udengaard. 煤制天然气-甲烷化工艺 [C]. 2010 中国新型煤化工发展及示范项目进展论坛, 2010.
- [9] 托普索公司. 煤制替代性天然气高温甲烷化工艺 [C]. 全国化肥甲醇技术年会, 2007.
- [10] 朱艳艳, 袁慧, 郭雷, 等. 国内外甲烷化技术进展研究 [J]. 天然气化工: c1 化学与化工, 2014, (4): 77-82. ■

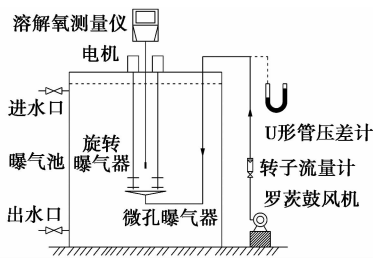


图2 实验装置图

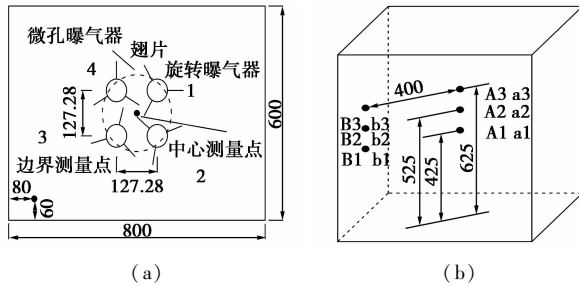


图3 旋转曝气器的布置图和溶氧仪测量点布置图

1.4 性能指标

均匀性指数用来评价均匀程度广泛用于流体流动和含气率分布的研究^[12-13],本实验提出充氧均匀性指数仅用来评价曝气池充氧的均匀程度。常规的性能指标包括氧总传质系数、氧传质速率、氧传质效率和曝气效率,对相关性能指标的影响因素进行理论分析^[14-15]。

1.4.1 充氧均匀性指数

充氧均匀性指数是指单个曝气器在其曝气服务区域内的曝气充氧均匀程度,定义为曝气服务区域中心和边界的实验饱和溶解氧差值占曝气服务区域中心的实验饱和溶解氧值的百分比,且数值越小则表示充氧越均匀。其定义式表示为:

$$Er = \sum_{i=1}^n [(C_{s1i}' - C_{s2i}') / NC_{s1i}'] \quad (1)$$

式中, Er 为曝气器的充氧均匀性指数; C_{s1i}' 为第*i*次实验曝气服务区域中心的实验饱和溶解氧值,mg/L; C_{s2i}' 为第*i*次实验曝气服务区域边界的实验饱和溶解氧值,mg/L; N 为曝气实验次数。

1.4.2 氧总传质系数

氧总传质系数是指在标准状态(101.3 kPa, 20℃)下,曝气器在单位传质推动力作用时,单位时间内向单位体积水中传递氧的数量。由双膜理论的氧转移速率方程整理得:

$$\ln(C_{\infty}^* - C) = \ln C_{\infty}^* - K_{La} \cdot t \quad (2)$$

式中, C_{∞}^* 为溶解氧饱和浓度,mg/L; C 为*t*时刻的溶解氧浓度,mg/L; t 为曝气时间,min。

数据处理后,以时间*t*为横坐标, $\ln(C_{\infty}^* - C)$ 为纵坐标,绘制 $\ln(C_{\infty}^* - C) \sim t$ 关系直线图,其斜率即 K_{La} 值。非标准状态下的 K_{La} 转换成标准状态(101.3 kPa, 20℃)下的 K_{Las} ,采用以下公式计算:

$$K_{Las} = K_{La} \times 1.024^{(20-T)} \quad (3)$$

1.4.3 氧传质速率

氧传质速率是指在标准状态(101.3 kPa, 20℃)下,曝气器单位时间内向溶解氧浓度为零的水中转移的氧气质量,其公式表示为:

$$SOTR = (60/1000) \times K_{Las} \cdot C_{\infty 20}^* \cdot V \quad (4)$$

式中, $SOTR$ 为标准状态下曝气器的氧传质速率,kg/h; $C_{\infty 20}^*$ 为标准状态、测试条件下的饱和溶解氧浓度值,mg/L; V 为曝气池中水的体积, m^3 。

1.4.4 氧传质效率

氧传质效率是在标准状态(101.3 kPa, 20℃)下,曝气器传递到水中的氧气量占曝气器供氧量的百分比,其公式表示为:

$$SOTE = SOTR / (0.28 \times q) \quad (5)$$

$$q = q_b (T_s P_b / T_b P_s) \quad (6)$$

式中, $SOTE$ 为标准状态下曝气器的氧传质效率,%; q 为标准状态下曝气器通气量, m^3/h ; q_b 为气体的实际流量, m^3/h ; P_b 为测试时气体的绝对压力,Pa; T_b 为测试时气体的绝对温度,K; T_s 为293.15 K; P_s 为101.325 kPa。

1.4.5 曝气效率

曝气效率是在标准状态(101.3 kPa, 20℃)下,曝气器消耗1 kWh的有用功转移到水中的氧气量,其公式表示为:

$$SAE = SOTR / N_T \quad (7)$$

$$N_T = (q_b \times P) / (3600 \times 1000) \quad (8)$$

式中, SAE 为标准状态下曝气器的曝气效率,kg/kWh; N_T 为曝气器充氧时所消耗的理论功率,不计管道、风机的损失,只考虑曝气充氧时所消耗的有用功,kW; q_b 为气体的实际流量, m^3/h 。

2 结果与讨论

2.1 充氧均匀性指数

当曝气流量为1.0 m^3/h ,测量高度分别为425、525、625 mm,旋转曝气器和微孔曝气器的中心和边界溶解氧变化曲线见图4。从图4中可以看出,随着曝气实验的开始,旋转曝气器和微孔曝气器的中心和边界的溶解氧浓度都由零开始增加,直至曝气时间45 min左右,溶解氧浓度达到饱和几乎不变,且在每个溶解氧变化曲线图中,旋转曝气器中心和

边界的溶解氧变化 2 条曲线较微孔曝气器的 2 条曲线重合程度高。可以得知,相对于微孔曝气器在不同高度平面的中心和边界的充氧速度差异较大,旋转曝气器在不同高度下的中心和边界的充氧速度比较相近。实验在气量分别为 1.5、2.0、2.5 m³/h, 仍都得出相同的结论。

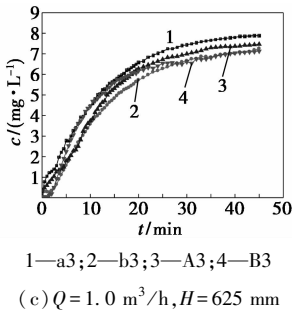
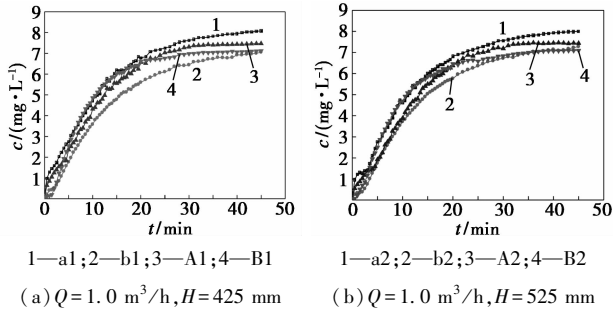


图 4 曝气池水中溶解氧浓度变化曲线

图 5 给出了不同气量下多个测量点的实验溶解氧饱和值和对比情况。从图 5 中可以看出,对于微孔曝气器,不同气量的实验饱和溶解氧值在 7.05 ~ 8.08 mg/L 变化;对于旋转曝气器,不同气量的实验饱和溶解氧值在 7.10 ~ 7.47 mg/L 变化。可以得知,在同一高度平面处,相对于微孔曝气器,旋转曝气器的中心和边界的实验饱和溶解氧值差异较小;相对于旋转曝气器,微孔曝气器由于气泡分散不均匀导致边界传质死区的存在,故其边界的实

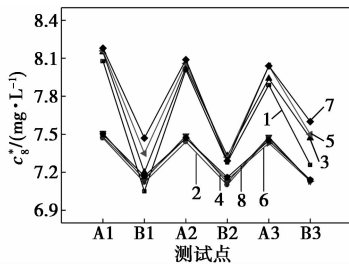
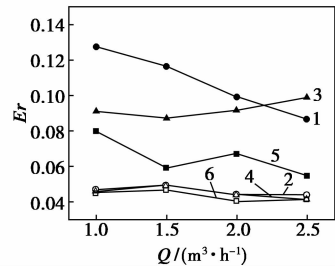


图 5 曝气池水中实验饱和溶解氧值比较

验饱和溶解氧值和中心的实验饱和溶解氧值相差较大。

由以上实验现象和结果发现,当采用曝气器常规的曝气性能指标即氧总传质系数、氧传质速率、氧传质效率和曝气效率,这些指标不能直观评价出曝气服务区域的充氧均匀程度,即无法体现出曝气池内中心和边界的充氧差异。故本文中提出充氧均匀性指数这一新的曝气性能指标,并用来定量地评价曝气池的充氧均匀程度。

通过计算得出不同气量下的每个高度的充氧均匀性指数如图 6 所示。从图 6 中可以看出,对于旋转曝气器,不同气量的充氧均匀性指数在 0.040 4 ~ 0.049 4 变化;而对于微孔曝气器,不同气量的充氧均匀性指数在 0.054 7 ~ 0.127 5 变化。随着曝气流量的减小,由微孔曝气器的 0.127 5 减小到旋转曝气器的 0.049 4,说明旋转曝气器的充氧均匀性指数峰值大大优于微孔曝气器。



1—425 mm(微孔曝气器); 2—425 mm(旋转曝气器);
3—525 mm(微孔曝气器); 4—525 mm(旋转曝气器);
5—625 mm(微孔曝气器); 6—625 mm(旋转曝气器)

图 6 旋转曝气器和微孔曝气器的充氧均匀性指数比较

结合图 6 分析可知,在不同高度平面处,旋转曝气器的充氧均匀性指数均优于微孔曝气器。这是由于旋转曝气器的自身特点使其在曝气池中能产生旋转流场作用,使得气体对液体的搅拌作用加强,增大了曝气池溶液的紊动程度;曝气服务区域的气含率分布均匀,气泡广泛均匀地分布于整个曝气池中;延长了气泡停留时间,边界区域气液传质死区较少,曝气池充氧均匀程度大幅提高。

2.2 常规性能指标

在曝气流量分别为 1.0、1.5、2.0、2.5 m³/h 时,旋转曝气器和微孔曝气器的氧总传质系数、氧传质速率、氧传质效率和曝气效率的对比情况分别见图 7(a) ~ (d)。从图 7 中可以看出,随着气量的变大,旋转曝气器的氧总传质系数在 0.080 6 ~ 0.151 6 min⁻¹ 变化,微孔曝气器的氧总传质系数在

0.080 2~0.155 5 min^{-1} 变化;旋转曝气器的氧传质速率在0.016 4~0.030 9 kg/h 变化,微孔曝气器的氧传质速率在0.016 3~0.031 6 kg/h 变化;旋转曝气器的氧传质效率在4.407 9%~5.860 0%变化,微孔曝气器的氧传质效率在4.462 2%~5.830 9%变化;旋转曝气器的曝气效率在3.867 8~5.612 9 kg/kWh 变化,微孔曝气器的曝气效率在3.965 9~5.585 1 kg/kWh 变化。

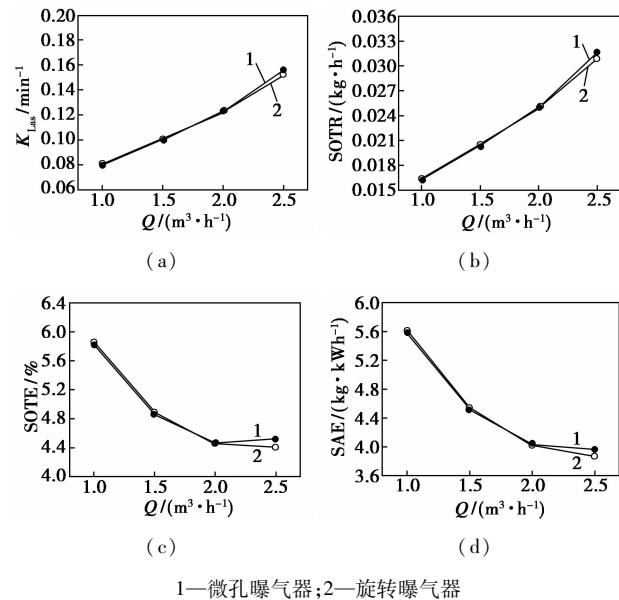


图7 旋转曝气器和微孔曝气器的常规性能比较

旋转曝气器和微孔曝气器的常规曝气性能指标变化曲线几乎重合,由于电机的能量较小可忽略,旋转曝气器和微孔曝气器的曝气效率几乎相等,反映出能耗几乎相当。两者的曝气性能几乎相等,这是由于旋转曝气器采用微孔曝气器作为气体初始分布,且计算常规的曝气性能指标多采用曝气池中心、水深1/2处的充氧数据。但旋转曝气器的充氧均匀性指数优于微孔曝气器,旋转曝气器能减少曝气池内边界传质死区,因此,完成相同的污水处理量,旋转曝气器需要的曝气时间较微孔曝气器短,可以认为旋转曝气器能作为一种性能优良和节能型的曝气器。

3 结论

(1)在微孔曝气器基础上,结合主动旋转阀的特点,提出了一种新型曝气器—旋转曝气器。

(2)提出新的曝气性能指标—充氧均匀性指数,其定义为曝气服务区域中心和边界的实验饱和溶解氧差值占曝气服务区域中心的实验饱和溶解氧

值的百分比,其数值越小则表示充氧越均匀。

(3)不同曝气流量下,旋转曝气器的充氧均匀性指数介于0.040 4~0.049 4,而微孔曝气器的充氧均匀性指数介于0.054 7~0.127 5;随着气量减小,由微孔曝气器的0.127 5减小到旋转曝气器的0.049 4,说明旋转曝气器的充氧均匀性指数峰值大大优于微孔曝气器。

(4)曝气流量相同时,旋转曝气器的氧总传质系数、氧传质速率、氧传质效率和曝气效率均相助于微孔曝气器。

(5)通过研究初步说明旋转曝气器是一种性能优良和节能型曝气器,具有重要的研究价值和广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 程香菊,曾映雪,谢骏,等.微孔曝气流量与曝气管长度对水体增氧性能的影响[J].农业工程学报,2014,30(22):209-210.
- [2] 原建光,孙娟,宛丽,等.污水处理厂节能降耗的运行措施[J].中国给水排水,2013,29(18):149-150.
- [3] Zhou X, Wu Y, Shi H, et al. Evaluation of oxygen transfer parameters of fine-bubble aeration system in plug flow aeration tank of wastewater treatment plant [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(2):295-301.
- [4] 庄健,王洪臣,齐鲁,等.孔径对微孔曝气充氧性能的影响[J].环境工程学报,2014,8(5):1723-1726.
- [5] 张斌,郝玉萍,周京徽.橡胶膜微孔曝气器的清水充氧性能试验研究[J].环境科学与技术,2010,33(12F):304-305.
- [6] 张绪满,姚克俭,何健烽,等.旋转浮阀塔板的流体力学性能研究[J].石油化工,2012,41(8):916-920.
- [7] 袁云峰,齐亮,姚克俭,等.旋转浮阀塔板的气含率分布研究[J].石油化工,2013,42(9):990-995.
- [8] 詹宇木,齐亮,刘静,等.主动旋转阀的流体力学性能研究[J].高校化学工程学报,2016,30(2):332-340.
- [9] CJ/T 475—2015.微孔曝气器清水氧传质性能测定[S].
- [10] 张凌新,闻仲卿,邵雪明.多泡相互作用对气泡溃灭的影响[J].力学学报,2013,45(6):861-867.
- [11] 吴媛媛,周小红,施汉昌,等.污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析[J].环境科学,2013,34(1):194-197.
- [12] 郑瑞朋,齐亮,田端正,等.三溢流分隔壁塔板上气含率的研究[J].石油化工,2013,42(6):646-650.
- [13] 陶红歌,陈焕新,谢军龙,等.基于面积加权平均速度和质量加权平均速度的流体流动均匀性指标探讨[J].化工学报,2010,61(52):116-120.
- [14] 徐鹏,孙毅,张海玲,等.微孔曝气系统多参数曝气性能实验分析[J].水处理技术,2016,42(6):51-52.
- [15] 郭烨烨,汤淑英,黄莹,等.间歇曝气潜流人工湿地的污水脱氮效果[J].环境工程学报,2014,8(4):1405-1409. ■