研究论文

鼓泡填料塔中水与餐厅污水氧传递特征

邹华生 陈焕钦

(华南理工大学化工学院,广东广州 510640)

摘要用不稳定传质模型对鼓泡填料塔中水和污水氧传递进行了理论分析,通过定义表面更新速率和含气率 导出了鼓泡填料塔中水和污水中氧传递系数与操作条件和填料特征之间的关系式,并通过实验确定了关系式中 特征参数.用关系式计算得到的氧传递系数与实测值基本吻合,最大偏差为20%.结果表明:采用的组合型填 料具有优良的氧传递性能;在相同操作条件下餐厅污水中的氧传递系数小于清水中的数值. 关键词 鼓泡填料塔 水/餐厅污水 氧传递 中图分类号 TQ 021.4 文献标识码 A 文章编号 0438 - 1157 (2003) 08 - 1049 - 06

FEATURES OF OXYGEN TRANSFER IN WATER AND RESTAURANT WASTEWATER IN BUBBLING PACKED TOWER

ZOU Huasheng and CHEN Huanqin

(College of Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract The features of oxygen transfer in water and restaurant wastewater in bubbling packed tower were studied theoretically and experimentally. Equations for calculating liquid-phase volumetric oxygen transfer coefficient in the bubbling packed tower were obtained by defining the rate of interface renewal and correlating experimental data. The deviation of calculated values from the experimental result is within 20 %. The results showed that the new-style combined packing is superior to the other kinds of packing in oxygen transfer , and the comparison of oxygen transfer in water with that in restaurant wastewater under the same conditions showed that volumetric oxygen transfer coefficients in restaurant wastewater is smaller than those in water.

Keywords bubbling-packed tower, water/restaurant wastewater, oxygen mass transfer

引 言

微生物呼吸、氧化降解有机物都离不开氧,尤 其是在污水好氧生物处理过程中,对氧的浓度具有 较高的要求.氧传递对于污水好氧生化处理过程是 不可缺少的重要一环.因此,对每一种好氧生化反 应设备,人们都比较关注其氧传递特征及操作性 能.影响生化处理器中氧传递速率的主要因素有3 类:一是水质特征与水质条件,如水中有机质成分 和含量、水温等;二是设备的类型、结构、尺寸和 材质;三是操作条件等.针对这样一个复杂的问

2002 - 01 - 09 收到初稿,2002 - 05 - 08 收到修改稿. 联系人及第一作者:邹华生,男,45岁,博士,副教授. 题,本文对新型组合填料塔中水和餐厅污水直流式 曝气过程的氧传递速率进行了理论分析和实验研 究.

1 理论分析

气泡在填料的缝隙中曲折流动上升,气泡顶部 某界面处先与液体微元接触,然后随着气泡上升, 液体微元沿气泡界面下滑而分离.气泡与液体微元 接触时间很短,据估算约为0.01~1.0 s^[1].因此, 液相中的扩散不可能达到稳定状态.扩散速率与气 泡和液相的接触时间有关.根据 Danckwerts 的表

Received date: 2002 - 01 - 09.

Corresponding author: ZOU Huasheng, associate professor. E-mail: zhsscht @263.net

报

面更新模型,接触时间长短由表面更新速率所决 定. 气泡与液体微元接触时间(也称为年龄)存在 一个"表面年龄分布"把年龄从零至无穷大的所 有液体微元表面的传质速率求和,就得到全部表面 积的总传质速率

$$N = \int_{0}^{0} N \operatorname{Se}^{-s} d = \sqrt{DS} (c_{i} - c_{l})$$
$$= k_{l} (c_{i} - c_{l}) \qquad (1)$$

式中 $k_l = \sqrt{DS}$. 表面更新速率 S 不易准确测定. 为了直观反映 k_i 与操作条件和设备结构特征之间 的关系,作如下假设.

在鼓泡填料塔中、气液相界面的更新速率与气 体在单位时间对单位体积液体所做功的 1/2 次方成 正比, 与液体黏度 1/2 次方成反比, 用数学式可表 达为

$$S = \left(\frac{P_g}{V} / \mu_l\right)^{\frac{1}{2}}$$
(2)

气体在单位时间对单位体积液体所做的功为

$$\frac{P_g}{V} = \frac{-1gu_g}{(3)}$$

则表面更新速率为

$$S = \left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(4)

若空塔气速小于 5 cm \cdot s⁻¹, 气泡基本呈球 形^[2]. 鼓泡填料塔中含气率为 ",则单位体积内 气液相接触面积为

$$a = n_{\rm b} \quad d_{\rm m}^2 = \frac{6_{\rm g}}{d_{\rm m}} \tag{5}$$

球形气泡的平均直径 dm 采用下式表示^[3]

$$d_{\rm m} = b_{\rm l} \left(-\frac{1}{l} \right)^{0.6} \left(\frac{P_{\rm g}}{lV} \right)^{-0.4} {}_{\rm g}^{\rm m} \left(\frac{\mu_{\rm g}}{\mu_{\rm l}} \right)^{\frac{1}{4}}$$
(6)

对于鼓泡填料塔中含气率为

$$=\frac{u_{\rm gr}}{u_{\rm t}}\tag{7}$$

气泡上升过程中受力平衡分析得到

$$u_{\rm t} = \left(\frac{4 g d_{\rm m}}{3 C_{\rm D}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

式中 曳力系数 C_D 是 Reynolds 数的函数. 常见流 动范围内用下式表示

$$C_{\rm D} = \frac{b_2}{(Re)^{-h}} = b_2 \left(\frac{-l d_{\rm m} u_{\rm t}}{\mu_l} \right)^{-h}$$
(9)

由式 (3)、式 (6) 和式 (9) 代入式 (8) 得 到

 $u_{\rm t} = b_3 {\rm g}^2 {\rm I} u_{\rm g} {\rm I}$

式中
$$b_3 = b_1^{\frac{1+h}{2-h}} \left(\frac{4}{3b_2}\right)^{\frac{1}{2-h}} g^{\frac{1-0.4(1+h)}{2-h}} \frac{0.4h-0.6}{l^{2-h}} \mu_l^{\frac{-h}{2-h}}$$

 $\left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{\frac{1+h}{4(2-h)}} \frac{0.6(1+h)}{2-h}, \quad 1 = \frac{0.4(1+h)}{2-h}, \quad 2 = \frac{m(1+h)}{2-h}.$
鼓泡填料层空隙中的气流上升速度为

(11)

$$_{g} = b_{4} \quad \overset{n}{\quad} u_{g}^{n} \tag{12}$$

 $n = \frac{1+1}{1+2}, \quad b_4 = \left(\frac{1}{b_3}\right)^{\frac{1}{1+2}}.$ 由式 (4)、式 (5)、式 (6)、式 (12) 和式

(1) 中 k₁ 的定义得到 $k_1 a = b_5 \quad u_{\sigma}$

式中

$$b_{5} = \frac{6}{b_{1}} b_{4}^{1-m} g^{0.4} D^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{l} \right)^{-0.6} \left(\frac{\mu_{g}}{\mu_{l}} \right)^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{1g}{\mu_{l}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

b5 主要与系统物性和填料结构有关. 式 (12) 和 式(13)的结果表明:空塔气速一定,空隙率增 大,含气率和液相体积传质系数 k₁a 减小,这是因 为空塔气速一定、空隙率增大时、流体在填料层空 隙中的流速减小、湍动减弱;同时空隙率增大、气 泡数量减少而直径增大、气泡与液相的有效接触比 表面减小, 故液相体积传质系数 k₁a 减小. 当空隙 率一定,空塔气速增大时,相体积传质系数 k_la 增 大,这是塔内湍动加剧的结果.根据文献 [3] 报 道:式(6)中含气率的指数 m 大致在 0.4~0.7 范围,式 (9) 中 Reynolds 数的指数 $h \in 0.5 \sim 0$ 之间.因此,可以估算式(13)中的指数 的数 值大致在 0.9~1.2. 这与文献 [2.4.5] 报道的 各种结构溶氧设备的 k_la 与空塔气速的 0.8~1.5 次方成正比结果相符.为了确定式(13)中参数 和 b5, 文中用清水和餐厅污水在4种填料塔中进行 了氧传递实验.

2 实验研究

实验装置如图1所示.塔体为有机玻璃,填料 层高 2 m. 清水或污水经离心泵加压后,通过流量 计计量送入填料塔,塔中无微生物菌种.在用空气 或纯氧曝气前,用氮气驱赶水中的氧,以测定水或 污水在曝气过程中,溶解氧的动态变化曲线.压缩

(10)

空气(或纯氧)经稳压阀后,通过转子流量计计量 从塔底气体分布器鼓泡进入塔内与水并流向上流动, 空塔气速为 2~10 mm s⁻¹.相对运动的气泡与水相 之间发生氧传递.水中溶解氧的变化用瑞士 MET-TLER 公司 M0128 型溶氧仪现场检测或从沿塔高的 3 个取样口取样,然后用 WEN KELE 方法测定^[6]. 文献 [7] 证明:若电极从氮饱和的水溶液中移到空 气饱和的水溶液中,溶解氧 DO 值从零达到 62.2% 空气饱和值所需时间 r $\frac{1}{K_la}$ 时,测定的 K_la 值相 对误差小于 6%.本文采用的 M0128 型溶解氧测定 仪的分辨率为 0.01 mg L⁻¹、相对精度为 ±1.0%, r 不超过 65 s,远小于 $\frac{1}{K_la}$,故该溶氧仪具有良好的 测量精度.该仪器使用前用氧饱和水和氮饱和水进 行两点式校正.文献 [8] 实验结果已证明水溶解氧 的过程为液膜控制,故: $k_la = K_la$.



Fig. 1 Experimental set-up
1 -air compressor; 2 -oxygen cylinder; 3 -flow meter;
4 -oil and dregs separator; 5 -pump; 6 -packing tower;
7 -second depositor; 8 -sampling port

本文实验用餐厅污水主要污染指标检测的统计 结果: COD_{Cr}为 500 ~ 1000 mg ·L⁻¹, BOD₅ 为 300 ~ 400 mg L⁻¹, 固体悬浮物 (SS) 为 300 ~ 400 mg L⁻¹, 油脂含量为 150 ~ 220 mg L⁻¹. 在常压、 室温下对焦炭、Dg38 塑料鲍尔环、Dg38 塑料鲍尔 环新型组合填料、Dg38 塑料共轭环进行了实验研 究和对比分析. 用体积法测得这 4 种填料的空隙率 如表 1 所示.

Table 1	Porosity	of	these	packings
---------	----------	----	-------	----------

Name of packings	Porosity
Dg38 plastic Pall rings	0.91
Dg38 plastic combined Pall rings	0.93
Dg38 plastic conjugate rings	0.91
$\operatorname{coke}(d_{\mathrm{e}}=45)$	0.67

Dg38 塑料鲍尔环新型组合填料是由 10 条长约 30 cm,宽0.5 cm 半软性纤维细片对称穿插地绑在 Dg38 塑料鲍尔环上构成的. 其结构见图 2. 该填 料的外缘伸展出 20 条长 8 ~ 10 cm 的半软性纤维 瓣,可以不断切割和分散气泡,均布气液相流. 鲍 尔环的立体空间部分是一个小缓冲室,其内部穿插 半软性纤维细片,可延长气流的停留时间、切割分 散气泡. 曝气量在 50 ~ 300 mg L⁻¹之间变化得到 的溶解氧动态变化实验结果如图 3 所示.



Fig. 2 Appearance of combined packings

$$K_{l}a = \frac{1}{t} \ln \frac{c_{\rm s} - c_0}{c_{\rm s} - c} \tag{14}$$

根据图 3 的数据,用式(14)计算 4 种填料塔 在某一空塔气速下,塔内中部截面处 *K_la*值,然后 取时均值在双对数坐标上作图,如图 4 所示:各种 填料的氧液相体积传质系数 *K_la* 均基本上与空塔气 速成不同的直线关系.这表明当物性相同时,除空 塔气速对氧液相体积传质系数有显著影响外,填料 的几何特性对氧液相体积传质系数也有明显的影响.

根据图 4 实验结果得到式 (13) 对于本文各种 填料的计算式,具体如下.

Dg38 塑料共轭环

$$k_l a = 0.\ 691 \quad {}^{-0.\ 84} u_g^{0.\ 84} \tag{15a}$$

Dg38 塑料鲍尔环

$$k_l a = 0.616^{-0.84} u_g^{0.84}$$
(15b)

Dg38 塑料鲍尔环新型组合填料

$$k_l a = 0.835 - 0.84 u_g^{0.84}$$
(15c)

焦炭

$$k_l a = 0.324 - 0.84 u_g^{0.84}$$
(15d)

式 [15(a)]~式 [15(d)]中的指数略低于理 论分析的结果 [式(13)中的指数值范围],这可 能是在理论分析推导过程中,曳力系数 C_D与 Reynolds数的指数关系和平均气泡直径与含气率的 关系与实际结果有所偏差所致.式(15)计算的结 果与实测值的比较结果见图 5,可见其计算值与实



Fig. 3 Results of aeration of water or wastewater in bubble-packings towers Dg38 plastic Pall rings; Dg38 plastic combined Pall rings; × Dg38 plastic conjugate rings; coke

测值吻合较好,其最大偏差不超过 ±17 %. 从上述 研究的 4 种填料的氧传递结果来看,Dg38 塑料鲍 尔环新型组合填料的空隙率增大很少,而表面积增 大比较显著;结合半软性纤维网体结构的布水布气



Fig. 4 Liquid volumetric oxygen mass transfer coefficients *versus* superficial gas velocity



Fig. 5 Comparison of oxygen transfer coefficients calculated with measured results

和切割气泡的功能,气体通过该填料层时,气泡更 小、分布更均匀.因此,在相同的操作条件下,该 填料具有更大的氧传质系数.

焦炭虽然空隙率小,但其随意性较大,粒度大 小、形状参差不齐;颗粒内无流体通道,比表面积 小,在塔内极易形成沟流、偏流和死角等不均匀 流.在实验中观察到:气体通过焦炭填料层时,气 泡数量少,直径大,出现非均相流.因此,其氧传 质系数小.

Dg38 塑料鲍尔环与 Dg38 塑料共轭环虽然它 们的空隙率相同,但由于其几何构形不同,布水布 气性和比表面积不同,实验观察到 Dg38 塑料共轭 环填料层的气泡比前者的小些、均匀些.所以这两 种填料的氧传质系数有所区别,Dg38 塑料共轭环 的氧传质系数要大些.

餐厅污水中含有油脂、食物纤维、淀粉、食 盐、糖和表面活性剂等众多的杂质,其性质与清水 有较大不同.不仅影响氧在其中的溶解度,同时在 黏度、密度、扩散系数和表面张力等方面都会发生 一些变化.使得在相同的操作条件下,餐厅污水中 的氧传递效果与清水中的不同.实验结果如图 6 所 示.





污水在 Dg38 塑料鲍尔环和焦炭填料塔中实测 溶解氧动态变化曲线用下式整理

$$(k_l a)_{w} = k_l a = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{c_s - c_1}{c_s - c_2}$$
 (16)

用上述相同的方法在双对数坐标上得到图 7. 从该图可以看到:餐厅污水曝气时,Dg38 塑料鲍尔环新型组合填料的氧传质系数明显高于同条件下的焦炭填料的氧传质系数.但均比同条件下清水中的氧传质系数小.将上述实验数据回归得到上述两种填料在餐厅污水中曝气时的氧液相体积传质系数的关联式.

$$(k_l a)_{\rm w} = k_l a = 0.51^{-0.84} u_{\rm g}^{0.84}$$



Fig. 7 Comparison of oxygen mass transfer in restaurant wastewater with those in water areation of water in Dg38 conbined Pall rings tower; areation of restaurant wastewater; areation of water in coke packing tower; areation of restaurant wastewater in coke packing tower

焦炭

$$(k_l a)_{\rm w} = k_l a = 0.271^{-0.84} u_{\rm g}^{0.84}$$
 (17b)

式[(17(a)]、式[17(b)]计算结果与实测结果的最大偏差为 20%.

3 结 论

(1) 用表面更新理论和本文定义的表面更新速率导出了水和餐厅污水中氧传质系数的计算公式, 并针对不同的填料确定了公式中的特定系数和特定指数.

(2)本文得到的水和餐厅污水中氧传质系数计算公式简单方便,计算值与实测结果的偏差不超过 20%.

(3)研究结果表明4种填料中,新型组合填料的特征系数最大,其氧传质系数大于文献 [2,5]中相同空塔气速下的数值,该填料具有优良的氧传递性能.

符号说明

a —— 比相界面积, m⁻¹ c —— 液相中溶氧浓度, mol L⁻¹ D —— 扩散系数, m² s⁻¹ d_e —— 当量直径, m g —— 重力加速度, m s⁻² K₁a —— 液相体积总传质系数, s⁻¹ k₁a —— 液相体积对流传质系数, s⁻¹ N —— 总传质速率, mol s⁻¹ N —— 瞬时传质速度, mol m⁻² s⁻¹ n_b —— 单位体积液体中气泡的个数, m⁻³ P_g —— 气体在单位时间对液相所做功, W Q_g —— 气体体积流量, m³ h⁻¹

(17a)

<i>S</i> ——相界面更新速率,s ⁻¹
<i>t</i> ——曝气时间,min
u _g ───气体空塔速度, m_ s ^{−1}
u _{gr} ──填料层空隙中气流速度,m_s ⁻¹
<i>u</i> ₊ ——气泡上升末端速度, m_ s ^{−1}
<i>V</i> ——液相体积,m ³
——餐厅污水氧传递系数校正系数
——填料层空隙率
——气液接触时间,s
µg ───气体黏度,Pa_s
μı ——液相黏度,Pa-s
, ——液相密度,kg m ⁻³
——表面张力,N ·m ^{- 1}
——餐厅污水饱和氧浓度校正系数
下角标
i ——界面
<i>l</i> ——液相
s —— 饱和
w ——-污水
0 ——初始

References

1 Tan Tianen (谭天恩), Jin yizhong (金一中), Luo Youshou (骆

有寿). The Process of Mass Transferreaction (传质-反应过程). Hangzhou: Zhejiang Univisity Press, 1990. 11-12

- 2 Deckwer W D, Burckhart R, Zoll G. Mixing and Mass Transfer in Tall Babble Columns. *Chemical Engineering Science*, 1974, 29: 2177-2188
- 3 Calderbank P H. Mixing Theory and Practice. New York: Academic Press, 1967
- 4 Bello R A, Robinson C W, Moo-Young M. Cas Holdup and Overall Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Airlift Contactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 1985, 27: 369-381
- 5 Wu Jie (吴捷), Hu Weibin (胡维兵), Feng Pusun (冯朴荪). Oxygen Transfer in a Large-scale Airlift Loop Reactor with Inner Devices. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 1992, 43 (1): 40-46
- 6 Yu Ruibao (余瑞宝). The Analyzing Methods and Equipment for Water Quality (水质污染的分析方法和仪器). Shanghai: Science and Technology Press, 1991. 59—66
- 7 Van 't Riet K Review of Measuring Methods and Results in Nonviscous Gas-Liquid Mass Transfer in Stirred Vessels. Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 1979, 18: 357
- 8 Zou Huasheng (邹华生), Chen Huanqin (陈焕钦). Oxygen Transfer in Restaurant-wastewater with New-combined or Coke Packing Towers. Journal of South China University of Technology, (华南理工大学学报) 2001, 29 (3): 76-78

美开发出不需要试剂的 DNA

电化学检测新装置

美国研究人员新开发出一种装置,它能够在不需要试剂的情况下,借助电化学原理检测出微量遗传物 质 DNA(脱氧核糖核酸),在疾病诊断、防范生物恐怖袭击等领域都有潜在用途.

目前所有的 DNA 电化学检测手段,都需要在检测前利用试剂对 DNA 进行处理.美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的研究人员发现,DNA 在大小只有 1 毫米的金电极上完成自我组装后,能够通过空间结构的变化而生成可被检测的电信号,这一过程不需要任何外源试剂的参与.研究人员说,除不需试剂外,新装置还具有轻便、检测速度快等优点,通过手持方式就可以操作.

包括 2000 年诺贝尔化学奖得主艾伦·黑格在内的一个研究小组,已在美国《全国科学院学报》上发表 了他们的上述新成果.

(摘自"新华网")