

DOI:10.11918/201911162

紊流脉动对生物膜理化性质的影响

龙天渝^{1,2}, 郭莉莎¹, 贾黎明¹, 罗 超¹

(1. 三峡库区生态环境教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;
2. 低碳绿色建筑国际联合研究中心(重庆大学), 重庆 400045)

摘 要: 在实际紊流中同时存在时均流速和脉动流速,为仅研究紊流脉动流速对生物膜理化性质的影响,设计时均流速为零、仅存在脉动流速的振动格栅生物膜反应器;采用粒子图像测速(PIV)技术测定反应器在5个格栅振动频率下的二维紊流流速场,并计算载片处的有效紊流强度;针对不同的紊流脉动速度,对振动格栅反应器中生物膜的生物量、厚度、密度和其胞外聚合物(EPS)的组成成分进行测定与分析。结果表明:改变紊流脉动流速会使生物膜的理化性质发生变化,随着紊流脉动流速的增大,生物膜生物量和厚度先增加后减小,且均在有效紊流强度为1.92 cm/s时达到最大值;生物膜密度和EPS中蛋白质、多糖的质量分数却随紊流脉动流速的增大而增大,且蛋白质和多糖在紧密结合型EPS(TB-EPS)中的质量分数多于在松散结合型EPS(LB-EPS)中,而无论在LB-EPS、TB-EPS还是总-EPS中蛋白质的质量分数均多于多糖。研究成果可为生物膜反应器的设计与运行优化提供理论参考。

关键词: 紊流脉动;有效紊流强度;振动格栅;生物膜;理化性质

中图分类号: X172 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)11-0014-07

Effect of turbulent pulsation on physical and chemical properties of biofilm

LONG Tianyu^{1,2}, GUO Lisha¹, JIA Liming¹, LUO Chao¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 2. Low Carbon Building International Joint Research Center (Chongqing University), Chongqing 400045, China)

Abstract: Time-averaged flow velocity and pulsating flow velocity coexist in actual turbulence. In order to study the effect of turbulent pulsating flow velocity on the physical and chemical properties of biofilm, an oscillating-grid biofilm reactor was designed which only has pulsating flow velocity with the time-averaged flow velocity being zero. The two-dimensional turbulent flow field of the reactor was measured by particle image velocimetry (PIV) at five oscillating-grid frequencies, and the effective turbulent intensities at biofilm carriers were calculated. The biomass, thickness, and density of the biofilm, as well as the composition of the extracellular polymeric substances (EPS) in the oscillating-grid reactor were measured and analyzed at different turbulent pulsating flow velocities. Research results show that changing the turbulent pulsating flow velocity would change the physical and chemical properties of biofilm. With the increase of the turbulent pulsating velocity, the biomass and thickness of the biofilm first increased and then decreased, and the maximum value was reached when the effective turbulent intensity was 1.92 cm/s. While the biofilm density and the content of protein and carbohydrates in EPS increased with increasing turbulent pulsating flow velocity, and the content of protein and carbohydrates in tightly bound EPS (TB-EPS) was more than that in loosely bound EPS (LB-EPS). The ratios of protein to carbohydrates content in LB-EPS, TB-EPS, and total-EPS were greater than one. This research can provide theoretical reference for the design and operation optimization of biofilm reactors.

Keywords: turbulent pulsation; effective turbulent intensity; oscillating-grid; biofilm; physical and chemical properties

生物膜广泛存在于自然环境中,当载体表面含有少量的水分和营养物质就能被微生物定植并形成生物膜^[1],因其具有良好的水处理能力而被广泛地

应用于水处理反应器中。生物膜的理化性质包含其生物量、厚度、密度和其胞外聚合物(EPS)的组成成分等,这些性质与生物膜的附着能力、传质效率和细胞活性密切相关^[2-3],因而影响了生物膜反应器的处理效果。在实际自然环境中,水体大多处于紊流状态,紊流对生物膜特性的影响是紊流时均流速、脉动流速和水流剪切力等共同作用的结果。已有研究

收稿日期: 2019-11-27
基金项目: 国家自然科学基金(41877472)
作者简介: 龙天渝(1960—),女,教授,博士生导师
通信作者: 龙天渝, longty128@cqu.edu.cn

验,每组实验同时运行 3 个振动格栅生物膜反应器,反应器在接种挂膜 24 h 后运行 10 d,5 组实验共运行 55 d,所有实验所处运行环境相同,水温由恒温控制器控制在 26 ℃ 左右。每组实验结束后,将 3 个反应器中的生物膜载片取出,并将生物膜与载片分离,进行其生物量、厚度、密度和 EPS 组成成分的测定。

实验采用间歇进水模式,每天进水两次,每次进水量为主副水箱总有效容积的 1/3,同时,为维持反应器中的营养状况,每 3 d 将两水箱完全排空,清洗两水箱后重新进水。

1.5 测定方法

振动格栅生物膜反应器紊流流场采用 PIV 技术测定,PIV 系统的 CCD 高速相机在 1 min 内拍摄 600 张示踪粒子运行轨迹照片,经过系统图像处理软件对所得照片进行一系列的处理,最终得到反应器二维流速场^[9]。

生物量由干质量(m_D)表示,采用超声法将生物膜与载片分离,分离后将其置于 105 ℃ 烘箱烘至恒质量,烘干前后的质量相减所得值即为生物膜干质量;生物膜厚度(h)采用图像分析结构法测定^[10],使用单反相机采集生物膜载片侧面图像,再用 ImageJ 软件测量厚度;根据载片尺寸($A = 30 \times$

30 mm²)、生物膜干质量和厚度,通过式(1)即可计算生物膜密度:

$$\rho = \frac{m_D}{A \cdot h} \quad (1)$$

EPS 的提取方法是在文献[11]的基础上进行了适当修改,手工刮取生物膜于 50 mL 离心管中,用 70 ℃ 0.05% NaCl 溶液定容至 50 mL,振荡 1 min 并离心 10 min 后,收集的上清液即为 LB-EPS。再向离心管中加入 NaCl 溶液,并定容至 50 mL,振荡离心管 1 min 后,将其 60 ℃ 水浴 30 min,水浴后再离心 15 min 所得上清液即为 TB-EPS。提取所得的 EPS 均冷冻保存,以备 EPS 组分测定。EPS 中蛋白质、多糖和 DNA 质量分数分别通过考马斯亮蓝显色(Bradford)法^[12]、硫酸蒽酮法^[13]和二苯胺试剂法^[14]测定。

2 结果与讨论

2.1 反应器二维流速场和载片处有效紊流强度

PIV 系统测得反应器在不同振动频率下的二维流速场,通过 Tecplot360 软件对其进行可视化处理后得到瞬时流速场分布,如图 2 所示。可以看出,紊流脉动流速随频率的增加而增大。

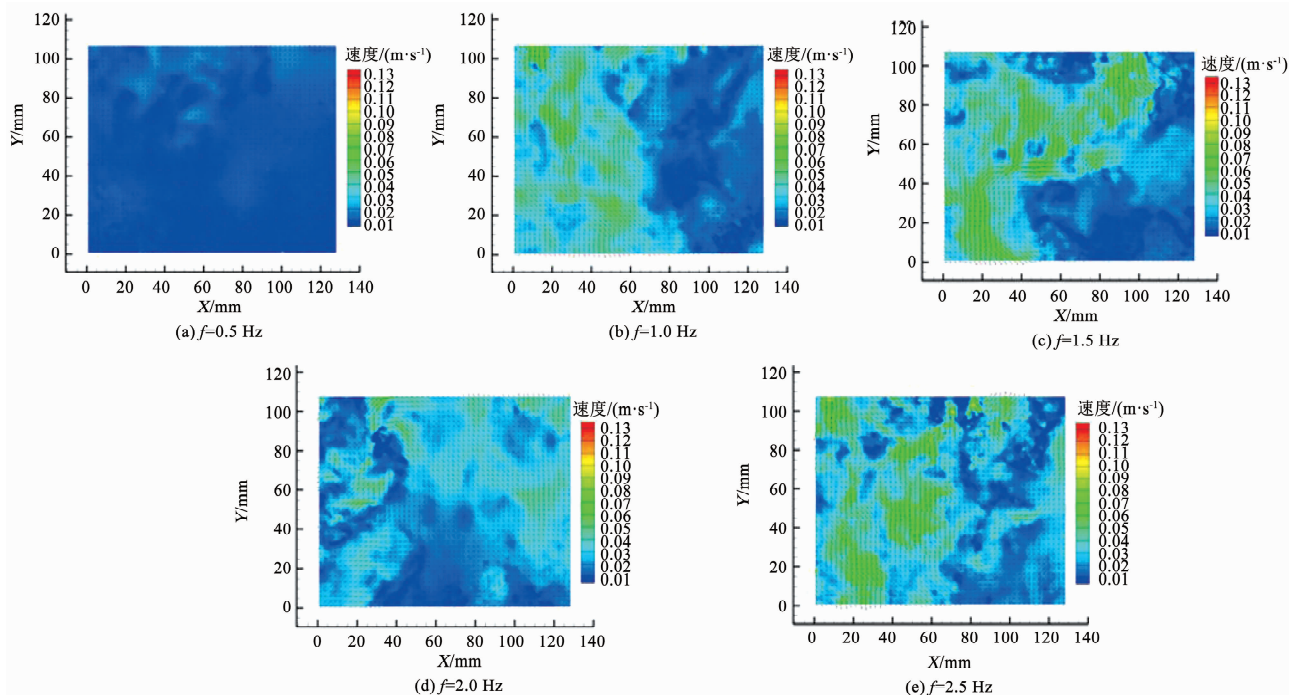


图 2 不同格栅频率下的瞬时流速场

Fig. 2 Instantaneous velocity field under different oscillating-grid frequencies

由所得的瞬时流速计算生物膜载片处两方向上脉动流速的均方根比(u/v),结果见图 3。不同振

动频率下,载片所处范围的 u/v 为 0.71 ~ 0.80,因此,载片位于近似各向同性紊流区域内^[15]。

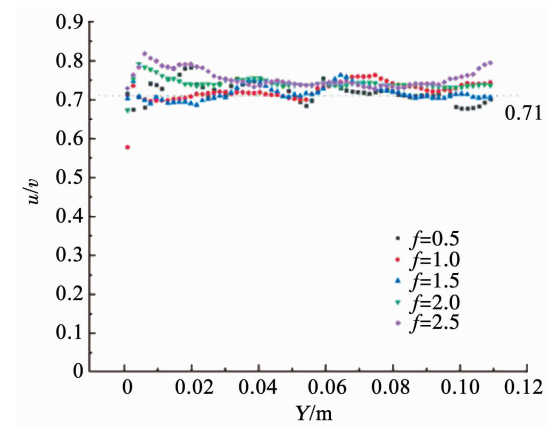


图 3 不同振动频率下的两方向均方根流速比 (u/v)

Fig. 3 Root mean square flow ratio in two directions under different oscillating-grid frequencies (u/v)

Shy 等^[16]定义某一水平高度的有效紊流强度为

$$q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{u_i'^2 + v_i'^2 + w_i'^2}{3} \right)} \quad (2)$$

式中: u'_i 、 v'_i 和 w'_i 分别为某一水平高度第 i 个测点的均方根速度的 3 个分量。根据紊流脉动瞬时流速和生物膜载片所处位置,即可计算不同振动频率下载片处的平均有效紊流强度,结果见表 1。

表 1 不同振动频率下载片处的平均有效紊流强度

Tab. 1 Average effective turbulent intensities at carriers under different oscillating-grid frequencies

f/Hz	0	0.5	1.0	1.5	2.0
紊流强度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	0	0.56	1.45	1.92	2.34

2.2 紊流脉动对生物膜生物量的影响

在不同紊流强度下,单片载片上的生物膜生物量见图 4。随着紊流脉动的增强,干质量先增大后减小。当紊流强度为 0 cm/s 时,生物膜干质量最小,为 $(2.7 \pm 0.1) \text{ mg}$,当紊流强度分别为 0.56、1.45 和 1.92 cm/s 时,生物膜干质量逐步增大至 (3.7 ± 0.3) 、 (12.01 ± 0.98) 和 $(18.29 \pm 0.8) \text{ mg}$,但当紊流强度进一步增大至 2.54 cm/s 时,生物膜干质量减小为 $(14.75 \pm 0.78) \text{ mg}$ 。生物膜传质分为外传质和内传质,水动力条件可以影响生物膜的外传质,在一定范围内,紊流脉动增强可以减少生物膜流动边界层和浓度边界层的厚度,减小膜外传质阻力,增加污水中营养物质和氧气的传质速率^[17],从而促进微生物的生长,生物膜生物量增加。但是当紊流脉动继续增强,各向同性紊流在固体边界产生的水流剪切力也会增强^[18],生物膜为抵抗高强度的水流剪切力而变得更致密^[19],传质阻力增大,微生物生长速率降低,同时水流剪切力直接影响生物膜的脱落^[20],因而在水流剪切力的作用下,部分生物膜从载片上脱落,当脱落的速率大于微生物生长速

率时,载片上的生物量便减少。

生物膜反应器中,在一定范围内生物膜生物量越多,反应器的处理效果越好,但是生物量过高,生物膜活性不一定高,污染物去除率也不一定高^[21]。叶星等^[22]用实验证明,随生物膜生物量的增大,反硝化生物滤池对总氮和硝酸盐的去除率先增大后减小。另外在生物滤池中生物量过大时,会影响滤池的过水通道,出水水质也会变差^[23]。因此,通过改变紊流脉动强度使生物膜反应器内保持合适的生物量,可以使反应器维持良好的处理能力。

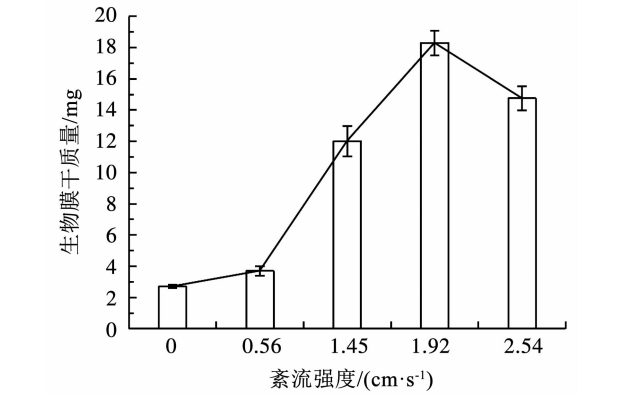


图 4 不同紊流强度下生物膜的生物量变化

Fig. 4 Changes in biofilm biomass under different turbulent intensities

2.3 紊流脉动对生物膜厚度的影响

在不同紊流强度下,生物膜厚度的变化如图 5 所示。生物膜厚度同生物量的增减规律相似,随着紊流脉动的增强,厚度先增大后减小。格栅静止不动时生物膜最薄,厚度为 $(0.43 \pm 0.02) \text{ mm}$,当紊流强度分别为 0.56、1.45 和 1.92 cm/s 时,生物膜厚度逐步增大至 (0.63 ± 0.03) 、 (0.73 ± 0.05) 和 $(0.95 \pm 0.06) \text{ mm}$,当紊流强度进一步增大至 2.54 cm/s 时,厚度减小为 $(0.51 \pm 0.02) \text{ mm}$ 。在一定范围内,紊流脉动增强,生物膜边界层变薄,传质阻力降低,传质速率加快,生物膜生物量增加,其厚度也增加;生物膜结构具有异质性和层次性,分为表层、基底层和中间层,表层生物膜很脆弱,易于从载体上脱落下来^[24],因此,当紊流脉动过强时,表层生物膜会被固体边界的剪切力冲刷并与载片分离,厚度减小。

王荣昌等^[25]发现,膜曝气生物膜反应器的氨氮表面去除率随着生物膜厚度先增大后减小。Celmer 等^[3]采用中空纤维膜生物膜反应器进行实验,结果显示,生物膜厚度越大,反应器的反硝化速率越小。因此,生物膜反应器中的紊流脉动强度可影响生物膜的厚度,进而影响反应器的处理效果。

2.4 紊流脉动对生物膜密度的影响

在不同紊流强度下,生物膜密度的变化如图 6

所示。当紊流强度为 0 和 0.56 cm/s 时,生物膜密度分别为 (6.98 ± 0.1) 和 $(6.53 \pm 0.2) \mu\text{g}/\text{mm}^3$,几乎没有变化,当紊流强度进一步增大为 1.45、1.92 和 2.54 cm/s 时,生物膜密度也随之增大,分别为 (18.28 ± 0.3) 、 (21.39 ± 0.37) 和 $(32.14 \pm 0.5) \mu\text{g}/\text{mm}^3$ 。由此可知,当紊流脉动增强时,生物膜会变得更致密,来抵抗载体边界产生的水流剪切力,避免从载体上脱落,该结果与 Beyenal 等^[19]的研究结果一致。

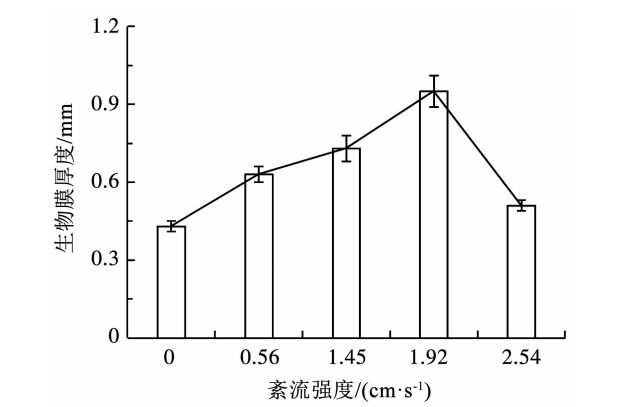


图 5 不同紊流强度下生物膜的厚度变化

Fig. 5 Changes in biofilm thickness under different turbulent intensities

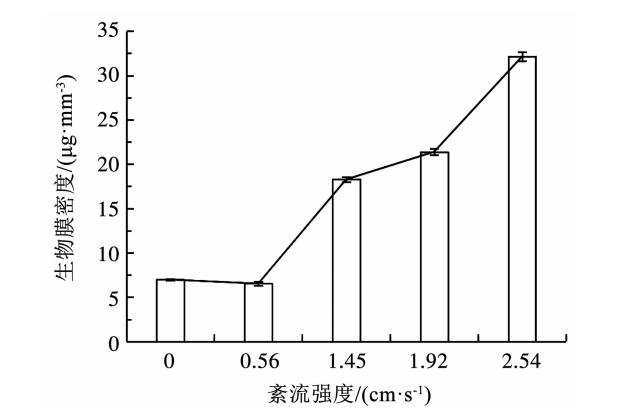


图 6 不同紊流强度下生物膜密度的变化

Fig. 6 Changes in biofilm density under different turbulent intensities

Celmer 等^[26]认为生物膜密度是底物扩散的决定性因素,生物膜密度过大,会影响底物扩散至生物膜,从而影响生物膜反应器的处理效果。因此,控制好紊流脉动和生物膜密度,有利于保持生物膜反应器良好的处理效果。

2.5 紊流脉动对生物膜 EPS 组分的影响

EPS 提取过程中的各项操作可能破坏微生物细胞,内源物质就会进入上清液,对 EPS 组分的测量产生干扰。为考察本次提取是否可靠,测量了 EPS 中 DNA 质量分数,结果见表 2。可以看出,DNA 质量分数大部分小于 10 %,细胞破碎程度在可接受范围内。

表 2 不同振动频率下生物膜 EPS 中 DNA 质量分数
Tab.2 DNA content in biofilm EPS under different oscillating-grid frequencies

EPS	<i>w</i> (DNA) / %				
	0 Hz	0.5 Hz	1 Hz	1.5 Hz	2.0 Hz
LB-EPS	9.12 ± 0.9	6.95 ± 1.0	3.37 ± 1.0	2.21 ± 0.6	7.11 ± 1.0
TB-EPS	10.87 ± 1.6	9.38 ± 0.9	9.91 ± 1.3	7.96 ± 0.7	8.15 ± 0.5
总-EPS	10.32 ± 1.1	8.63 ± 1.3	7.78 ± 1.4	5.99 ± 0.5	7.81 ± 1.3

在 5 个紊流强度下,生物膜 EPS 中蛋白质和多糖质量分数见图 7、8。蛋白质和多糖在 EPS 中的质量分数随着紊流强度的增大而增加,且该两种物质在紧密结合型 EPS (TB-EPS) 中比在松散结合型 EPS (LB-EPS) 中多,由此可见紊流脉动的增强可以促进生物膜分泌 EPS,尤其促进 TB-EPS 的分泌,TB-EPS 质量分数的增多有利于生物膜附着在载片上而不脱落。蛋白质和多糖是 EPS 的重要组成部分,影响着生物膜与载片的结合,蛋白质由于其氨基酸和官能团而具有很强的疏水性^[27],同时多糖含有氢键,可形成高含水凝聚胶,使 EPS 具有更强的凝聚

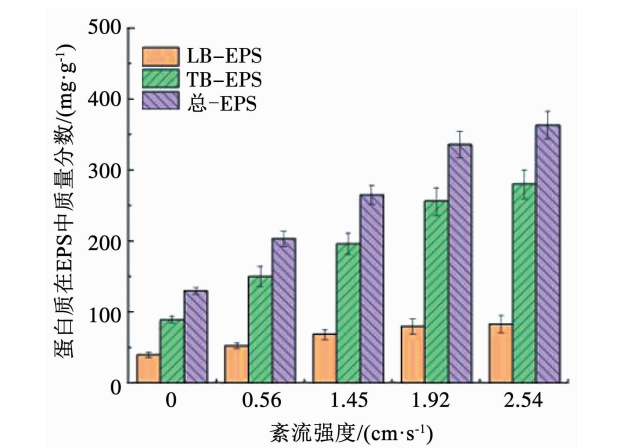


图 7 不同紊流强度下生物膜 EPS 中蛋白质质量分数

Fig. 7 Protein content in biofilm EPS under different turbulent intensities

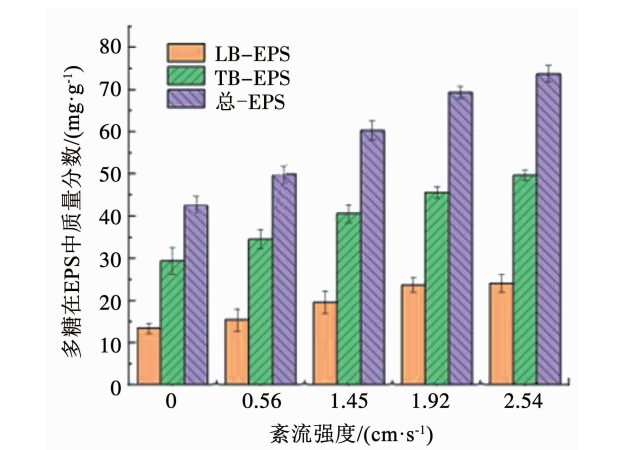


图 8 不同紊流强度下生物膜 EPS 中多糖质量分数

Fig. 8 Carbohydrates content in biofilm EPS under different turbulent intensities

力,生物膜的结构更加稳定,因此,蛋白质和多糖质量分数的增加,有利于生物膜抵御紊流脉动的增强。

王荣昌等^[25]在实验的后期发现,胞外多糖和TB-EPS的分泌增多,会导致氧传质阻力增加,从而导致氧通量降低,反应器的去除效率降低。因此,紊流脉动会影响生物膜EPS的组分和质量分数,进而影响生物膜反应器的处理效果。

在不同紊流强度下,生物膜EPS中蛋白质与多糖的比值如图9所示。无论在LB-EPS、TB-EPS还是总-EPS中,蛋白质多糖质量比均大于1,即蛋白质质量分数均大于多糖。蛋白质提供生物膜大部分的结合位点^[28],另外,蛋白质与多糖的质量分数与生物膜的密度有关,密度大的生物膜蛋白质多糖比更高,生物膜也更稳定^[3]。同时,EPS中还含有大量的胞外蛋白酶,以维持微生物的生长代谢活动。

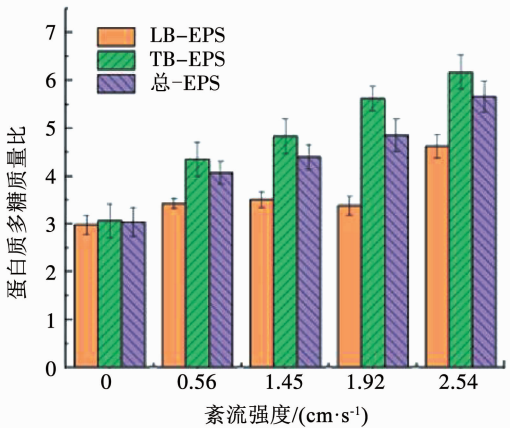


图9 不同紊流强度下生物膜EPS中蛋白质多糖质量比
Fig.9 Ratio of protein to carbohydrates content in biofilm EPS under different turbulent intensities

3 结 论

1)紊流脉动速度随着格栅振动频率的增加而增大;生物膜载片处两方向上脉动流速的均方根比(u/v)为0.71 ~ 0.80,载片处于各向同性紊流区域内;在0.5、1.0、1.5和2.0 Hz 5种频率下载片处的有效紊流强度分别为0、0.56、1.45、1.92和2.54 cm/s。

2)随着紊流脉动的增强,传质速率加快,生物膜生物量和厚度先增大后减小。当有效紊流强度为1.92 cm/s时,生物量和厚度在5个频率下达到最大,分别为(18.29 ± 0.8)mg和(0.95 ± 0.06)mm。

3)当有效紊流强度为0和0.56 cm/s时,生物膜密度变化不大,而后密度随着紊流脉动的增强而增大,生物膜变得越来越致密,从而更好地抵御水流剪切力。当有效紊流强度增加到2.54 cm/s时,生物膜密度达(32.14 ± 0.5) μg/mm³。

4)紊流脉动的增强可以促进EPS的分泌,EPS

中蛋白质和多糖的质量分数随着紊流脉动的增强而增大,且在TB-EPS中该两种物质多于LB-EPS中。同时,无论在何种形式的EPS中,蛋白质多糖质量比大于1,即蛋白质的质量分数均大于多糖。

参考文献

[1] WILKING J N, ANGELINI T E, SEMINARA A, et al. Biofilms as complex fluids[J]. MRS Bulletin, 2011, 36(5): 385. DOI:10.1557/mrs.2011.71

[2] PECHAUD Y, MARCATO-ROMAIN C E, GIRBAL-NEUHAUSER E, et al. Combining hydrodynamic and enzymatic treatments to improve multi-species thick biofilm removal [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 80: 109. DOI:10.1016/j.ces.2012.06.014

[3] CELMER D, OLESZKIEWICZ J A, CICEK N. Impact of shear force on the biofilm structure and performance of a membrane biofilm reactor for tertiary hydrogen-driven denitrification of municipal wastewater[J]. Water Research, 2008, 42(12): 3057. DOI:10.1016/j.watres.2008.02.031

[4] 罗志逢. 供水管道生物膜生长的影响因素与控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016

LUO Zhifeng. Influencing factors and control methods of biofilm growth in water supply pipeline [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016

[5] MCCORQUODALE M W, MUNRO R J. A method for reducing mean flow in oscillating-grid turbulence[J]. Experiments in Fluids, 2018, 59(12): 182. DOI:10.1007/s00348-018-2636-7

[6] YAN Jing, CHENG Niansheng, TANG Hongwu, et al. Oscillating-grid turbulence and its applications; a review/Turbulence de grille oscillante et ses applications; une revue[J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(1): 26. DOI:10.1080/00221686.2007.9521740

[7] 闫静, 唐洪武, 程年生, 等. 振动格栅紊流及其应用综述[J]. 水利学报, 2005(12): 1503

YAN Jing, TANG Hongwu, CHENG Niansheng, et al. Review on study of vibrating grid turbulence and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(12): 1503. DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2005.12.018

[8] ORLINS J J, GULLIVER J S. Turbulence quantification and sediment resuspension in an oscillating grid chamber [J]. Experiments in Fluids, 2003, 34(6): 662. DOI:10.1007/s00348-003-0595-z

[9] CAO Xiaodong, LIU Junjie, JIANG Nan, et al. Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field; a review of the technologies and applications[J]. Energy and Buildings, 2014, 69: 367. DOI:10.1016/j.enbuild.2013.11.012

[10] 赵智颖, 李良秋, 马连营, 等. 生物膜定量分析方法研究进展[J]. 生物技术进展, 2016, 6(5): 319

ZHAO Zhiying, LI Liangqiu, MA Lianying, et al. Review on the quantification analysis methods of biofilm [J]. Current Biotechnology, 2016, 6(5): 319. DOI:10.3969/j.issn.2095-2341.2016.05.03

[11] LI X Y, YANG S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. Water Research, 2007, 41(5): 1022. DOI:10.1016/j.watres.2006.06.037

- [12] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248. DOI:10.1016/0003-2697(76)90527-3
- [13] GAUDY A F. Colorimetric determination of protein and carbohydrate [J]. *Ind Water Wastes*, 1962, 7: 17
- [14] BROWN M J, LESTER J N. Comparison of bacterial extracellular polymer extraction methods [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, 40(2): 179. DOI:10.1128/AEM.40.2.179-185.1980
- [15] DE SILVA I P D, FERNANDO H J S. Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence[J]. *Physics of Fluids*, 1994, 6(7): 2455. DOI:10.1063/1.868193
- [16] SHY S S, TANG C Y, FANN S Y. A nearly isotropic turbulence generated by a pair of vibrating grids[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1997, 14(3): 251. DOI:10.1016/S0894-1777(96)00111-2
- [17] 李宇. 内环流生物膜反应器传质过程模拟及实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007
LI Yu. A simulation and experiment study on process of mass transport in internal loop biofilm reactor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007
- [18] MCCORQUODALE M W, MUNRO R J. Experimental study of oscillating-grid turbulence interacting with a solid boundary [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 813: 768. DOI:10.1017/jfm.2016.843
- [19] BEYENAL H, LEWANDOWSKI Z. Internal and external mass transfer in biofilms grown at various flow velocities [J]. *Biotechnology Progress*, 2002, 18(1): 55. DOI: 10.1021/bp010129s
- [20] KIM J W, CHOI H, PACHEPSKY Y A. Biofilm morphology as related to the porous media clogging[J]. *Water Research*, 2010, 44(4): 1193. DOI:10.1016/j.watres.2009.05.049
- [21] MOLL D M, SUMMERS R S, FONSECA A C, et al. Impact of temperature on drinking water biofilter performance and microbial community structure [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(14): 2377. DOI:10.1021/es9900757
- [22] 叶星, 马凯迪, 黄俊生, 等. 反硝化生物滤池中生物膜量与脱氮效果和脱氢酶活性的关系[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(5): 1210
- YE Xing, MA Kaidi, HUANG Junsheng, et al. Relationship between biofilm mass and nitrogen removal efficiency, dehydrogenase activity in the denitrification biological filter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(5): 1210. DOI:10.12030/j.cej.201907157
- [23] 张宝杰, 闫立龙, 甄捷, 等. 曝气生物滤池最佳反冲洗周期及反冲洗方式研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(7): 1045
ZHANG Baojie, YAN Lilong, ZHEN Jie, et al. Research on the optimum backwashed cycle and the backwashed methods of the biological aerated filtrated reactor[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(7): 1045. DOI:10.3321/j.issn:0367-6234.2006.07.009
- [24] COUFORT C, DERLON N, OCHOA-CHAVES J, et al. Cohesion and detachment in biofilm systems for different electron acceptor and donors[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 55(8/9): 421. DOI:10.2166/wst.2007.286
- [25] 王荣昌, 肖帆, 赵建夫. 生物膜厚度对膜曝气生物膜反应器硝化性能的影响[J]. *高校化学工程学报*, 2015, 29(1): 151
WANG Rongchang, XIAO Fan, ZHAO Jianfu. Effects of biofilm thickness on nitrification performance of membrane-aerated biofilm reactors [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2015, 29(1): 151. DOI:10.3969/j.issn.1003-9015.2015.01.023
- [26] CELMER D, OLESZKIEWICZ J, CICEK N, et al. Hydrogen limitation; a method for controlling the performance of membrane biofilm reactor for autotrophic denitrification of wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2006, 54(9): 165. DOI:10.2166/wst.2006.704
- [27] HOU Xiaolin, LIU Sitong, ZHANG Zuotao. Role of extracellular polymeric substance in determining the high aggregation ability of anammox sludge[J]. *Water Research*, 2015, 75: 51. DOI:10.1016/j.watres.2015.02.031
- [28] HOUGHTON J I, QUARMBY J. Biopolymers in wastewater treatment[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1999, 10(3): 259. DOI:10.1016/S0958-1669(99)80045-7

(编辑 刘 彤)