

剪切应力对好氧颗粒污泥形态结构和微生物活性的影响机制研究

王超, 郑晓英*

(河海大学环境科学与工程学院浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 对不同剪切应力 (0.189、0.267、0.327 和 0.377 N/m²) 下 4 个序批式反应器(SBR)中好氧颗粒污泥的形态结构、比耗氧速率(SOUR)以及胞外聚合物进行了对比分析. 结果表明, 好氧颗粒污泥具有稳定的基本形态特征, 其微生物主要由杆菌、球菌和丝状菌组成; 其中杆菌能承受高剪切作用, 是剪切应力为 0.377 N/m² 时的优势菌群. 4 个反应器中污泥粒径分布范围分别为 0.2~0.5、0.5~1.5、0.5~1.5 和 0.3~0.5 mm; SOUR 分别为 34.54、40.08、46.26 和 46.42 mg/(g·h), 胞外多聚糖分别为 59.71、66.81、80.88 和 109.99 mg/g, 胞外蛋白质分别为 9.29、9.80、12.35 和 17.02 mg/g. 好氧颗粒污泥比耗氧速率 SOUR 和胞外聚合物与剪切应力有很好的正相关性, 确定了好氧颗粒污泥微生物活性与剪切应力的响应关系.

关键词: 剪切应力; 好氧颗粒污泥; 形态结构; 生物活性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2235-07

Effect of Shear Stress on Morphology, Structure and Microbial Activity of Aerobic Granules

WANG Chao, ZHENG Xiao-ying

(Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The aerobic granules were cultivated in four sequencing batch reactors (SBRs) under the shear stress of 0.189, 0.267, 0.327 and 0.377 N/m², respectively. The morphology and structure, specific oxygen utilization rate (SOUR) and extracellular polymeric substances of different aerobic granules were studied. Results show that aerobic granules can maintain the stable morphologic characteristics. A close examination of the granule surface revealed the presence of a large diversity of microbial morphotypes, including bacterial rods and cocci, and fungi. These microorganisms are embedded in an extracellular polymeric matrix. The bacterial rods were the dominant microbes in the granules under 0.377 N/m². In the four reactors, the diameters of the granules are 0.2-0.5, 0.5-1.5, 0.5-1.5 and 0.3-0.5 mm; SOUR are 34.54, 40.08, 46.26 and 46.42 mg/(g·h); the extracellular polysaccharides are 59.71, 66.81, 80.88 and 109.99 mg/g; the extracellular proteins are 9.29, 9.80, 12.35 and 17.02 mg/g; respectively and correspondingly. The positive relationship of the microbial activity of the aerobic granules with the shear stress was introduced depending on the analysis of the variation of SOUR and extracellular polymeric substances.

Key words: shear stress; aerobic granules; morphology and structure; microbial activity

近年来的研究发现, 将生物自絮凝原理应用于好氧反应系统中, 可实现好氧污泥的颗粒化. 与传统絮状污泥相比, 好氧颗粒污泥具有良好的沉降性, 能保持高污泥浓度, 并能承受高有机负荷, 可间歇运行, 重新启动时间短等优点, 成为目前污水生物处理技术的研究热点之一^[1-5]. 好氧颗粒污泥的培养及其性质特征受诸多环境因素的影响, 其中剪切作用是其重要影响因素之一^[6-10]. 不同的剪切条件能改变微生物的聚集性质, 从而影响好氧颗粒污泥的粒径、比重等理化特征^[11, 12]. 然而, 从生化反应的实质来看, 反应器中保存大量形态结构稳定、微生物相丰富, 并具有高生物活性的好氧颗粒污泥是保证反应器稳定高效运行的重要条件. 但是目前有关剪切应力对好氧颗粒污泥形态特征和生物活性的影响等方

面的研究还鲜见报道. 本研究通过对比分析不同剪切应力 (0.189、0.267、0.327 和 0.377 N/m²) 下序批式反应器(SBR)中好氧颗粒污泥的形态结构组成, 跟踪检测颗粒在不同反应时间的比耗氧速率 (SOUR) 以及胞外聚合物, 分析剪切应力对好氧颗粒污泥的形态结构的影响规律, 确定好氧颗粒污泥微生物活性与剪切应力的响应关系, 以期从微生物角度揭示剪切应力对好氧颗粒污泥性质的影响本质.

收稿日期: 2007-12-28; 修订日期: 2008-02-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(50238050); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412303)
作者简介: 王超(1958~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水污染控制理论与技术.
* 通讯联系人, E-mail: zhxyqq@hhu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 装置

SBR 反应器为有机玻璃制成, 尺寸为直径 $\phi 80$ mm, 有效高度为 1 000 mm, 有效容积为 5 L, 每周期换水量 2.5 L, 试验装置和流程见图 1. SBR 反应器运行周期为 8 h, 具体安排为: 进水 20 min, 曝气 440 min, 沉淀 5 min, 排水 15 min. 反应各阶段通过时间控制器和进、出水蠕动泵实现自动控制, 采用气泵和曝气砂头供气, 通过转子流量计控制气量, 反应器温度通过温控装置稳定在 $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$.

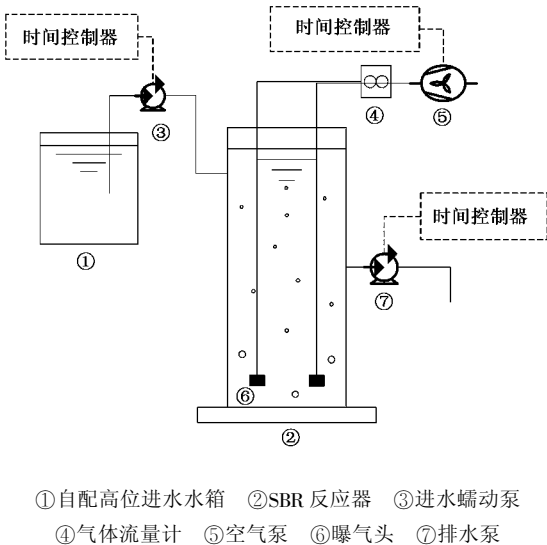


图 1 试验装置和流程

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipments and process

1.2 材料

进水采用人工合成的模拟废水, 以葡萄糖和 NH_4Cl 为主要组成, 其基质浓度见表 1.

表 1 污水组成¹⁾

Table 1 Composition of wastewater

基质组成	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	基质组成	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
COD	1 200	Na_2CO_3	60
氨氮	60	$\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.0
K_2HPO_4	30	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.07
KH_2PO_4	30	$\text{MnSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.60
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	37.5	$\text{ZnCl}_2\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.75
$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	15	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.45

1) 其中基质组成浓度随着进水有机物浓度的升高而增加

1.3 分析项目及方法

微生物形态结构及其组成采用扫描电子显微镜观察, 扫描电子显微镜为日本明石 (AKASHI) 公司生产, 型号为 SX-40, 工作电压 20 kV. 实验中 SOUR 的

测量方法为: 从 4 个反应器中各取出一定量成熟好氧颗粒污泥 (为反应器运行周期结束后, 处于内源呼吸期的污泥), 同时加入浓度和组分相同的污水, 污水的 COD 浓度为 1 200 mg/L , 其组成成分见表 1. 并控制测量混合液的 MLSS 浓度大致相近, 将总体积为 400 mL 的样品装入带密封塞的广口瓶中, 并保证 DO 仪探头与橡胶瓶塞紧密连接, 将密封好的广口瓶至于磁力搅拌器上, 磁力搅拌器可保证混合液中污泥呈悬浮状态. 胞外多聚物的提取采用硫酸提取法^[13~16], 胞外多聚糖采用蒽酮-硫酸法^[17], 胞外蛋白质采用考马斯亮蓝比色法^[17].

2 结果与讨论

2.1 反应器中剪切作用的表示

好氧颗粒污泥的培养及其性质特征受诸多环境因素的影响, 其中剪切作用是其重要影响因素之一. 反应器中的剪切作用可来源于水流/气流或颗粒之间的摩擦. 在 SBR 工艺中, 曝气反应是在进水结束后进行, 因此 SBR 反应器中反应阶段的剪切作用主要来源于曝气过程所激发的液体传动. SBR 反应器中剪切作用的大小通常和反应器中表观气体上升流速成正比, 当表观上升流速大时, 剪切作用强, 反之, 剪切作用则较弱. 文中剪切应力定义为单位面积流体上的切向力. 对于通常的牛顿型流体而言, 剪切应力的大小为液体动力粘滞系数和速度梯度的乘积. 同时, 反应器中由于曝气过程引发气流剪切产生的速度梯度与曝气过程中输入反应器中的能量和反应器总容积有关. 曝气时输入反应器中的能量消耗包括两部分: 一部分作为气泡膨胀的体积功; 另一部分作为气泡在反应器中上升克服重力所作的功. 这两部分能量消耗可以用单位污水量的送气量和曝气深度进行近似计算^[18~21]. 由此计算出不同表观气体上升流速条件下的剪切应力见表 2.

表 2 不同反应器的剪切应力

Table 2 Shear stress in four reactors

项目	反应器编号			
	1	2	3	4
表观气体上升流速/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	0.5	1.0	1.5	2.0
剪切应力 $\tau/\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	0.189	0.267	0.327	0.377

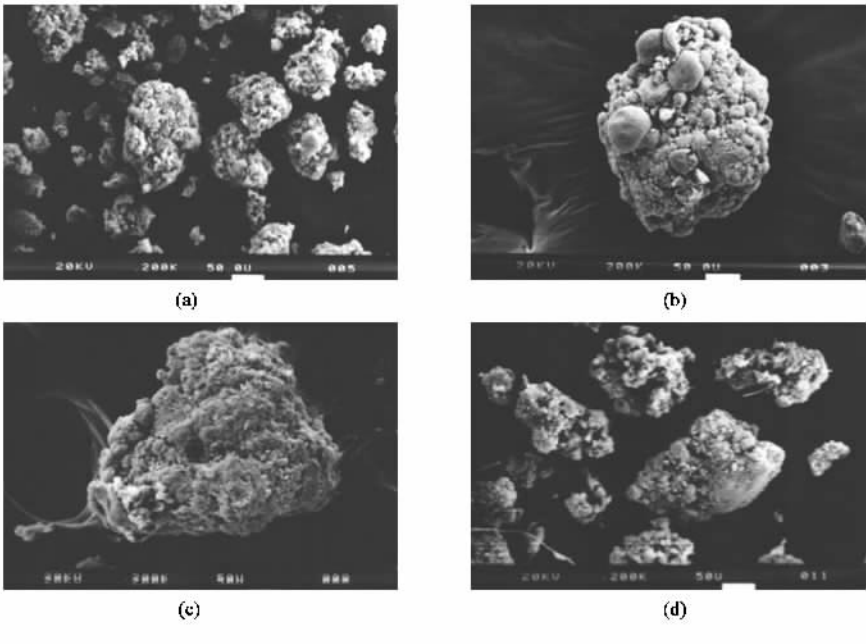
2.2 好氧颗粒污泥的形态与结构

不同剪切应力条件下的 4 个反应器中均能得到成熟的好氧颗粒污泥, 其为土黄色, 扫描电子显微镜观察发现 (图 2), 成熟好氧颗粒污泥个体形态以椭圆球状为主, 外观轮廓清晰, 表面凹凸不平, 比表面积

较大,颗粒污泥基本形态没有发生明显的变化.当剪切应力在 $0.189 \sim 0.327 \text{ N/m}^2$ 范围内时,剪切应力的增加会促进微生物在好氧颗粒污泥表面的聚集,得到个体尺寸更大的好氧颗粒污泥.但是,过大的剪切应力(0.377 N/m^2)会增加反应器内的选择压力,破坏好氧颗粒污泥微生物的平衡,使得固着能力不强的微生物被洗出反应器中,导致好氧颗粒污泥的粒径降低.经显微镜观察测量,1 号、2 号、3 号和 4 号反应器中污泥粒径分布范围分别为: $0.2 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 1.5$ 、 $0.5 \sim 1.5$ 和 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$.

不同成熟好氧颗粒污泥表面的电子显微镜观察见图 3.从中可以看出好氧颗粒污泥表面有许多大小不一的空隙,并形成了通往内部的良好通道.好氧

颗粒污泥主要由球菌、杆菌和丝状菌组成.在剪切应力为 0.189 、 0.267 和 0.327 N/m^2 的反应器中,好氧颗粒污泥的结构以丝状菌相互缠绕作为颗粒骨架,杆菌和球菌受胞外聚合物的黏附作用而固定在好氧颗粒污泥的表面(图 4).当剪切应力进一步增加到 0.377 N/m^2 时,好氧颗粒污泥表面的丝状菌和球菌也大量减少,杆菌成为了好氧颗粒的最优势菌类,此时的杆菌呈射线状,向心式分布.因此,在强剪切应力作用下,微生物必然通过其它方式维持好氧颗粒污泥微生物的自身稳态结构,例如分泌大量的胞外聚合物以确保杆菌、球菌之间能相互黏附.随着剪切作用的增强颗粒内部轻质的丝状菌和球菌被逐渐选择出反应器,留下了以杆菌为主的颗粒污泥.



(a)、(b)、(c)、(d)表示剪切应力分别为 0.189 、 0.267 、 0.327 和 0.377 N/m^2 条件下的好氧颗粒污泥形态($\times 200$)

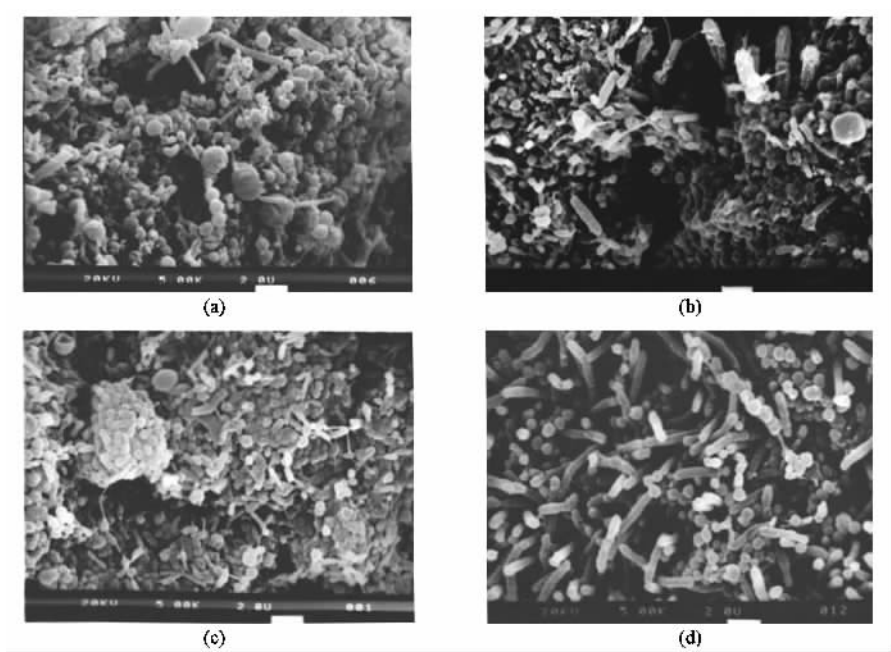
图 2 不同剪切作用的好氧颗粒污泥外观形态电镜照片

Fig.2 Morphology of aerobic granules under different shear force in SEM

2.3 剪切条件对好氧颗粒污泥微生物活性的影响分析

采用微生物的比耗氧速率(specific oxygen utilization rate, SOUR)、胞外聚合物的分泌评价好氧颗粒污泥的微生物活性.比耗氧速率的定义为单位质量的微生物单位时间对氧气的吸收量,可以说明其新陈代谢过程的快慢即微生物活性的大小,反映微生物对有机物的降解能力.胞外聚合物通常定义为单位质量微生物分泌的胞外多聚糖(extracellular polysaccharides, EPS)和蛋白质(extracellular proteins,

EPN)的质量.本实验数据所涉及的微生物重量以混合液悬浮固体总量(mixed liquid suspended solid, MLSS)计.胞外聚合物的大量分泌不仅有助于微生物直接相互附着,维持污泥结构的稳定;还可以吸附和黏附污水中的有机物,实现污水有机物向污泥中快速转移,从而推动有机物的迅速降解.在遇到恶劣环境时,微生物的自我保护机制会刺激细胞大量分泌胞外聚合物以抵制环境因素对污泥的侵蚀.大量分泌的胞外聚合物包裹在细胞壁外形成了一道良好的屏障,保护细胞免遭毒物的破坏.在营养物不足的



(a)、(b)、(c)、(d)表示剪切应力分别为 0.189、0.267、0.327 和 0.377 N/m² 条件下的好氧颗粒污泥表面(×5 000)

图 3 不同剪切作用的好氧颗粒污泥结构的扫描电镜照片

Fig.3 Microorganisms structure of aerobic granules under different shear force by SEM

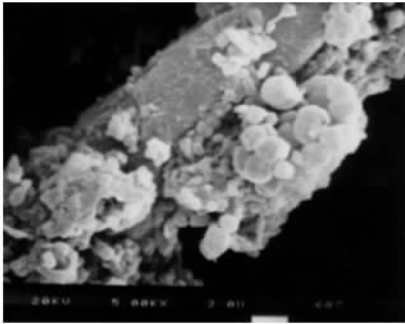


图 4 胞外聚合物的黏附作用

Fig.4 Attachment of extracellular polymeric

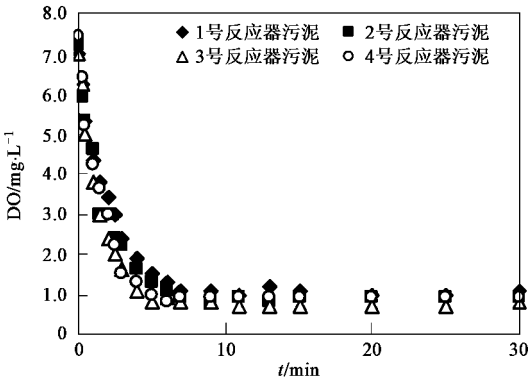


图 5 不同污泥的溶解氧变化曲线

Fig.5 Dissolved oxygen reduction by different aerobic granules

情况下,胞外聚合物又可转化为微生物可利用的碳源和能源.胞外聚合物对确保生物絮体结构稳定和微生物活性具有重要意义.

2.3.1 好氧颗粒污泥的 SOUR

不同污泥在实验中的溶解氧变化曲线见图 5,根据 DO 值随时间的变化情况进行分析计算求得污泥的 SOUR 值,见图 6.

从图 6 中可以看到,好氧颗粒污泥的比好氧速率大于普通活性污泥, SOUR 随着剪切应力的增加而逐渐提高.4 个反应器中颗粒污泥的 SOUR 分别为 34.54、40.08、46.26 和 46.42 mg/(g·h).进一步分析发现(图 7),好氧颗粒污泥的 SOUR 值与剪切应力具有很好的相关性,两者呈正比关系.进行相关性计算

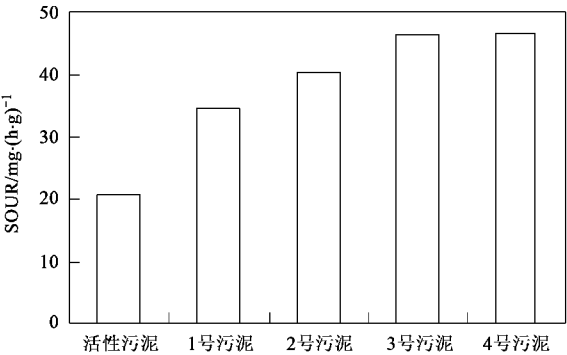


图 6 不同剪切应力下的污泥 SOUR

Fig.6 Comparison of SOUR of aerobic granules under different shear stress

分析得到方程式:

$$y = 67.920x + 22.145 \tag{4}$$

式中, y 为 SOUR 值, $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$; x 为剪切应力, N/m^2 . 相关性: $R^2 = 0.941$.

2.3.2 好氧颗粒污泥的胞外聚合物

对不同剪切条件下,不同曝气反应时间对好氧颗粒污泥进行取样,检测好氧颗粒污泥的胞外聚合物分泌情况,结果见图 8.

从图 8 可以看出,采用葡萄糖为主要碳源培养的好氧颗粒污泥,其 EPN 和 EPS 具有相似的变化规律.在一个反应周期内,随着曝气时间的递增,胞外

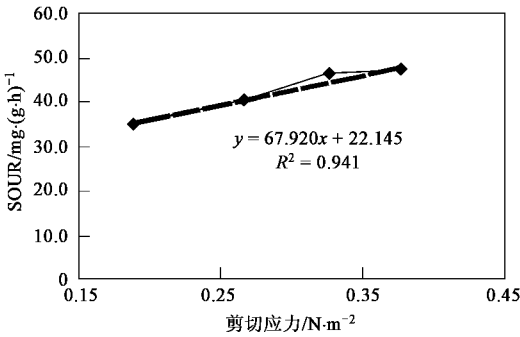


图 7 好氧颗粒污泥 SOUR 值与剪切应力的响应关系
Fig.7 Relationship of shear stress and SOUR of aerobic granules

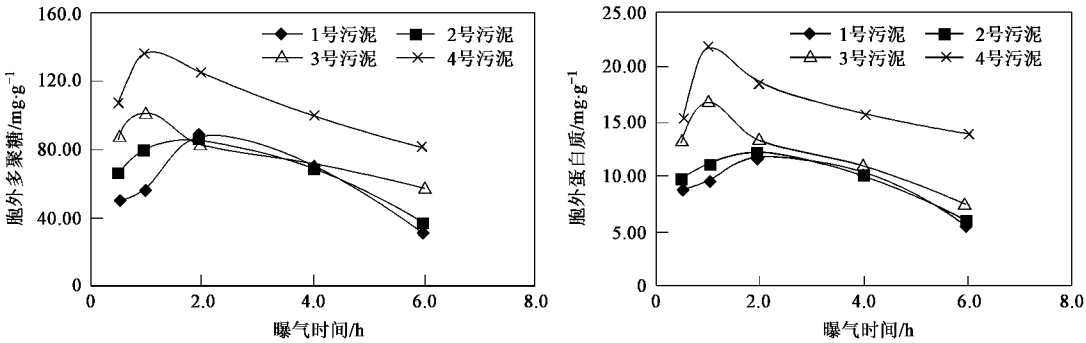


图 8 不同剪切应力下的好氧颗粒污泥外聚合物变化曲线
Fig.8 Variation of extracellular polymeric substances of aerobic granules under different shear stress

聚合物呈先增加后降低的变化趋势,1 号和 2 号反应器好氧颗粒污泥分泌胞外聚合物的最大值发生在反应 2.0 h 时,3 号和 4 号反应器污泥发生在反应 1.0 h 时,胞外聚合物最小值发生都在反应末端.好氧颗粒污泥的微生物在经历了一个周期的运行后,呈极端饥饿状态.当新周期的开始时,有大量的营养物质可摄取,而污泥降解有机物是按先吸附后降解的步骤进行的.为了快速有效地获取有机物,微生物势必及时调整,加快胞外聚合物的分泌,以期待能黏附更多的有机物,为自身的生长代谢聚集更多的营养物质.因此,出现了在曝气的前 2.0 h 内,污泥胞外聚合物的分泌逐渐增加,并快速达到了最大值.随着反应的不断进行,污水的有机营养物质逐渐减少,微生物分泌的黏性物质也随之降低.到反应的末期,由于营养物质降到最低水平,微生物分泌的胞外聚合物分泌也到逐渐降低.而在外界营养物水平匮乏的条件下,微生物也可利用胞外聚合物合成新的细胞,维持自身生长代谢的需要,因此,反应末期的胞外聚合物处于最低的水平.剪切应力分别为 0.189、0.267、0.327 和 0.377 N/m^2 的好氧颗粒污泥在反应周期内分泌胞外多聚糖分别为 32.36 ~ 88.42、6.03

~ 86.05、58.02 ~ 103.57 和 81.76 ~ 136.26 mg/g ,胞外蛋白质分别为 5.71 ~ 11.66、5.89 ~ 12.20、7.44 ~ 16.79 和 13.81 ~ 21.77 mg/g .

EPN 和 EPS 均为胞外聚合物的组成部分,以葡萄糖为主要碳源培养的好氧颗粒污泥,其胞外聚合物中 EPS 远远高于 EPN,成为胞外聚合物的首要组成部分.将不同时刻、不同条件下测得成熟好氧颗粒污泥的 EPS 和 EPN 进行相关性分析(见图 9),证实了 EPS 和 EPN 呈正相关,EPS/EPN 基本保持稳定.统计分析发现,好氧颗粒污泥的 EPS/EPN 有 91.7%

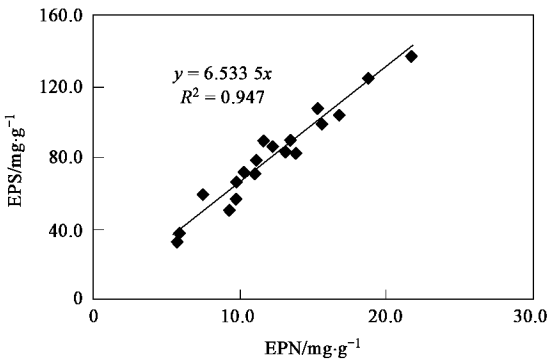


图 9 EPS 和 EPN 的相关性分析
Fig.9 Relationship of EPS and EPN

分布在 6.5 ± 1.0 的范围内,其平均值为 6.55.

当剪切应力在 $0.189 \sim 0.377 \text{ N/m}^2$ 范围内逐渐递增时,好氧颗粒污泥的微生物可以通过自身的主动代谢来适应环境的要求,胞外聚合物的分泌量增加但是其组成稳定,好氧颗粒微生物可保持良好的平衡.将不同条件下测得的多个胞外聚合物数据取平均值(图 10),4 个反应器中好氧颗粒污泥的胞外多聚糖分别为 59.71、66.81、80.88 和 109.99 mg/g,胞外蛋白质分别为 9.29、9.80、12.35 和 17.02 mg/g.随着剪切应力的递增,好氧颗粒污泥分泌的胞外聚合物平均值呈增加的趋势,EPS/EPN 比值基本保持稳定,其中胞外多聚糖随剪切应力的变化规律可以用以下线性方程描述:

$$y = 16.49x + 38.11 \quad (5)$$

式中, y 为 EPS 值, mg/g; x 为剪切应力, N/m^2 ; 相关系数: $R = 0.957$.

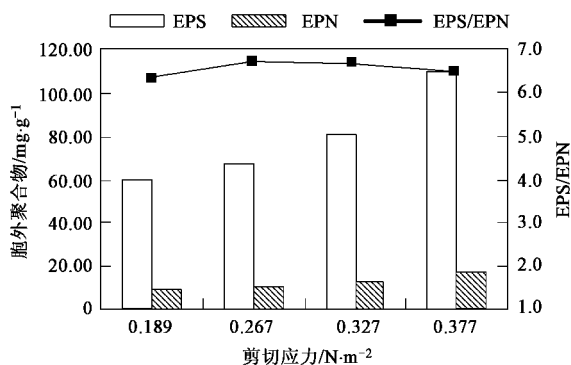


图 10 好氧颗粒污泥的胞外聚合物平均值

Fig.10 Comparison of extracellular polymeric substances of aerobic granules under different shear stress

3 结论

(1) 好氧颗粒污泥能维持稳定的基本形态结构特征.经显微镜观察测量,1 号、2 号、3 号和 4 号反应器中污泥粒径分布范围分别为: $0.2 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 1.5$ 、 $0.5 \sim 1.5$ 和 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$.好氧颗粒污泥的尺寸随着剪切应力的增加而增大,而过高剪切应力 (0.377 N/m^2) 会降低好氧颗粒污泥粒径.好氧颗粒污泥的表面有大量通往内部的空隙和通道,微生物主要由杆菌、球菌和丝状菌组成,球菌和杆菌在胞外聚合物的作用下固着在丝状菌相互缠绕的骨架中.杆菌能承受高剪切应力,成为该条件下的优势菌群.剪切作用是好氧颗粒污泥微生物活性的重要影响因素之一.

(2) 在一定范围内,剪切应力的增加对好氧颗粒污泥的微生物活性是有促进作用的.当剪切应力分别为 0.189 、 0.267 、 0.327 和 0.377 N/m^2 时,好氧颗粒污泥的 SOUR 分别为 34.54、40.08、46.26 和 46.42 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,胞外多聚糖分别为 59.71、66.81、80.88 和 109.99 mg/g ,胞外蛋白质分别为 9.29、9.80、12.35 和 17.02 mg/g .较高的剪切力不仅可以提高好氧颗粒污泥微生物的比耗氧速率,还有利于分泌更多的胞外聚合物,提高污泥的快速吸附能力和建立更为完善的自我保护、自我调节机制.好氧颗粒污泥的 SOUR 和 EPS 与剪切应力的变化规律,可用线性方程来描述.成熟的好氧颗粒污泥具有稳定的胞外聚合物结构组成,剪切应力在适宜范围内的变化并不会改变好氧颗粒污泥胞外聚合物要素的组成比例.

参考文献:

- [1] de Bruin L M M, de Kreuk M K, Van der Roest H F R, *et al.* Aerobic granular sludge technology: An alternative to activated sludge? [J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(11-12): 1-7.
- [2] Liu Y, Tay J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. Biotechnology Advances, 2004, **22**(7), 533-563.
- [3] Toh S K, Tay J H, Moy B Y P, *et al.* Size-effect on the physical characteristics of the aerobic granule in a SBR [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2003, **60**(6): 687-695.
- [4] Tay J H, Tay S T L, Ivanov V, *et al.* Biomass and porosity profile in microbial granules used for aerobic wastewater treatment [J]. Lett Appl Microbiol, 2003, **36**(5): 297-301.
- [5] Zhu J, Wilderer P A. Effect of extended idle conditions on structure and activity of granular activated sludge [J]. Water Res, 2003, **37**(7): 2013-2018.
- [6] Wang Z W, Liu Y, Tay J H. The role of SBR mixed liquor volume exchange ratio in aerobic granulation [J]. Chemosphere, 2006, **62**(5): 767-771.
- [7] Li Z H, Kuba T, Kusuda T. The influence of starvation phase on the properties and the development of aerobic granules [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, **38**(5): 670-674.
- [8] 沈祥信, 李小明, 杨麒, 等. 预加好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2467-2472.
- [9] 胡林林, 王建龙, 文湘华, 等. SBR 中厌氧颗粒污泥向好氧颗粒污泥的转化 [J]. 环境科学, 2004, **25**(4): 74-77.
- [10] 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒活性污泥的培养及理化特性研究 [J]. 环境科学, 1999, **20**(2): 39-41.
- [11] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. Applied Microbiological and Biotechnology, 2002, **57**(1): 227-233.
- [12] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. Water Research, 2002, **36**(7): 1653-1665.

- [13] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. J Biotechnology, 2002, **95**(3): 249-256.
- [14] Frlund B, Palmgren R, Keiding K, *et al*. Extraction of extracellular polymers from activated sludge using acation exchange resin [J]. Wat Res, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [15] Neyens E, Baeyens J, Dewil R, *et al*. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, **106B**: 83-92.
- [16] Gulas V, Bond M, Benefield L. Use of extracellular polymers for thickening and dewatering activated sludge[J]. Water Pollut Control Fed, 1979, **51**: 798-807.
- [17] 何忠效. 生物化学实验技术[M]. (第一版). 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [18] 陈玉璞. 流体动力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990.
- [19] 洞沢勇, 著, 张自杰, 译. 污水的生物处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980.
- [20] 冯骞, 汪翔, 薛朝霞. 计算流体力学在水处理反应器优化设计运行中的应用[J]. 水资源保护, 2006, **22**(2): 11-15.
- [21] 冯骞, 薛朝霞, 汪翔, 等. 水流剪切力对活性污泥特性影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, **34**(4): 374-377.