

生物造粒流化床污水处理反应器中微生物的分布特征

刘永军, 袁宏林, 王晓昌, 左丽丽, 马美铃 (西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

【摘要】 对生物造粒流化床污水处理反应器10cm、60cm、110cm处好氧细菌总数以及反硝化菌、反硫化菌分别进行计数,同时,用光学显微镜、扫描电子显微镜以及石蜡切片技术对粒状污泥中细菌的分布情况进行研究。结果发现,流化床中好氧细菌非常丰富,在反应器10cm处,每克污泥微生物的数量可达 1.6×10^8 个,说明好氧细菌在生物造粒流化床有机物生物降解中起主导作用;同时,流化床中也有一定数量的兼性厌氧菌存在,并且随着流化床床体的升高有增加的趋势,这与溶解氧(DO)随流化床床体高度的增加而迅速降低有关;随着回流比的增加,溶解氧增高,相应的好氧细菌有所增加而兼性厌氧菌减少;对于颗粒污泥,其表面和内部微生物分布数量有很大的差异。

关键词: 生物造粒流化床反应器(FPB);好氧细菌;兼性厌氧细菌;微生物分布

中图分类号:Q938

文献标识码:A

文章编号:1008-8873(2007)01-075-04

Study on the characteristics of microorganisms distribution in a fluidized-pellet-bed bioreactor

LIU Yong-jun, YUAN Hong-lin, WANG Xiao-chang, ZUO Li-li, MA Mei-ling (College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract In order to understand the distribution of microorganisms in fluidized-pellet-bed (FPB) bioreactor, bacteria enumeration in different heights (10cm, 60cm and 110cm) of FPB was conducted respectively regarding total heterotrophic bacteria, denitrifying bacteria and sulfate-reducing bacteria. Microscopic, scanning electron microscopic (SEM), microbe fixation and embedding techniques were also applied. It was found that aerobic bacteria were dominant in both the bulk solution and pellets along the bed height, and the aerobic bacteria was about 1.6×10^8 CFU·g⁻¹ sludge at 10cm height. It can be concluded that aerobic bacteria are playing the leading role of biological degradation in the FPB bioreactor. However, certain amount of anaerobic bacteria were found in the bioreactor and there was a tendency of increase of anaerobic bacteria in the upward direction. It was related to the rapid decreasing of dissolved oxygen (DO) along the bed height. As DO supply was enhanced by increasing the recycling flow ratio, the amount of the aerobic bacteria apparently increased while the amount of the anaerobic bacteria decreased. With single pellet particles, differences were noticed between the outer surface layer and inner cores in number of microbes.

Key words: Fluidized-pellet-bed bioreactor; Aerobic; Anaerobic; Distribution of microorganisms

生物造粒流化床(FPB)应用于污水就地处理和回用,在有机物去除和磷的去除方面显示出了很高的效率^[1]。它还有一定程度的硝化和反硝化作用,而所有这些生化和生物作用均在仅仅33min的水力停留时间(HRT)里就可以完成。由于FPB反应器的生物量并不像传统的活性污泥法的生物单元一样存在于类絮体的活性污泥中,而是存在于结构紧密的球形颗粒中,FPB反应器的微生物群落特征很可能不同于传统的生物反应器。为了更好地了解FPB反应器中的生物反应机理,我们对其中微生物的分布进行了研究。

1 材料和方法

1.1 生物造粒流化床反应器

有关生物造粒流化床反应器系统的详细描述,参见作者早先发表的论文^[2,3]。本研究中所用的粒状污泥样品从生物造粒流化床柱壁上预留的取样管取样(图1),柱的有效高度是160cm,为了研究流化床柱底层、中层及顶层微生物情况,用一个特制的取样器从取样管10cm、60cm、110cm处分别取样,从而避免了其

他断面颗粒污泥的干扰。生物造粒流化床的取样过程操作均在标准操作条件下进行^[2]。用溶气泵给回流部分充氧,使得整个循环回路中都保持充氧状态。除了研究生物造粒流化床的标准回流比(回流量:原污水量) $R=1:2$ 之外,我们还在其它条件不变的情况下,研究了 $R=1:1$ 时的流化床运行情况。图2所示为两个条件下FPB反应器的溶解氧(DO)曲线。

1.2 样品采集

生物造粒流化床反应器粒状污泥样品从生物造粒流化床柱壁上预留的取样管取样(图1),柱的有效高度是160cm,为了研究流化床柱底层、中层及顶层微生物情况,用一个特制的取样器从取样管10cm、60cm、110cm处分别取样,从而避免了其他断面颗粒污泥的干扰。

收稿日期:2007-01-11,2007-02-20 接受

基金项目:国家自然科学基金重大国际合作项目(50621140001),国家自然科学基金项目(50578132)资助。

作者简介:刘永军(1969—),男,博士,副教授。主要从事污水生物处理理论与技术的研究。E-mail: liuyongjun@xauat.edu.cn

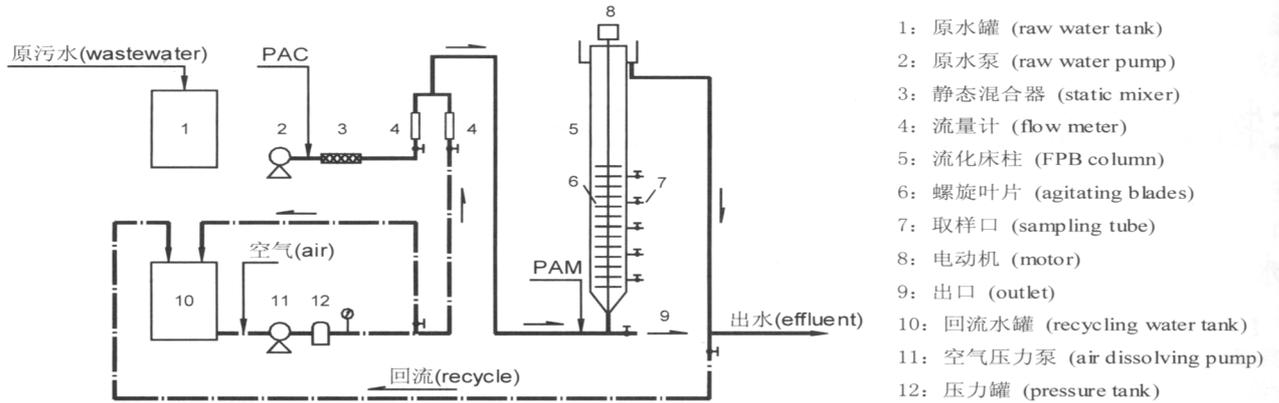


图1 生物造粒流化床反应器系统流程图
Fig. 1 Diagram of the FPB bioreactor system

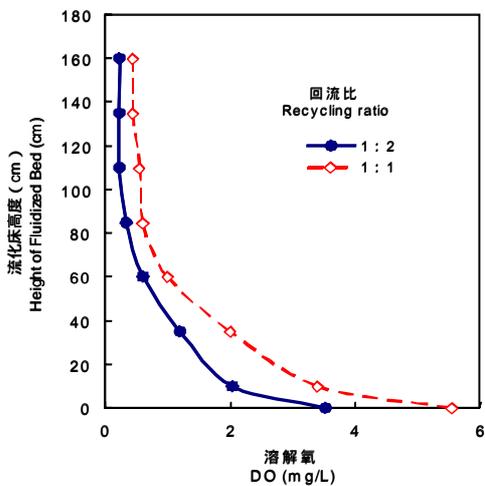


图2 DO 随生物造粒流化床高度变化情况
Fig. 2 DO profiles along the FPB column

1.3 样品分析

镜检：为了对颗粒污泥中微生物的分布进行显微镜观察，将污泥样品用甲醛溶液固定。脱水后，对固

定好的样本做电镜扫描 (SEM) 分析，以观察颗粒表面层的微生物情况。为了观察污泥颗粒内部的微生物，固定好的样品进一步用石蜡包埋，连续5 μ m切片，脱蜡后对每一个切片进行显微镜观察。

好氧菌计数：好氧菌总数的计数用平板计数法。对于水样，先对它进行梯度稀释，然后接种到平板培养皿上，37 $^{\circ}$ C 恒温培养 24 h 后对它进行计数。对于污泥样品，计数过程如下：(1)5000 r \cdot min $^{-1}$ 离心 5 min 将固体沉淀物从泥水混合物中分离，弃去上清液；(2) 用无菌水重新悬浮该固体沉淀物，充分混匀，静置 10 min；(3) 上清经梯度稀释后，接种于平板培养基上，37 $^{\circ}$ C 培养 24h；(4) 计数。

厌氧菌计数：样品的处理方法与好氧菌相同。我们选取了两种典型的厌氧菌作为代表，分别是反硝化细菌和反硫化菌，计数方法采用多管发酵法(MPN)^[4]。

反硝化菌和反硫化菌总数的和代表水中或污泥中厌氧菌的总数量。

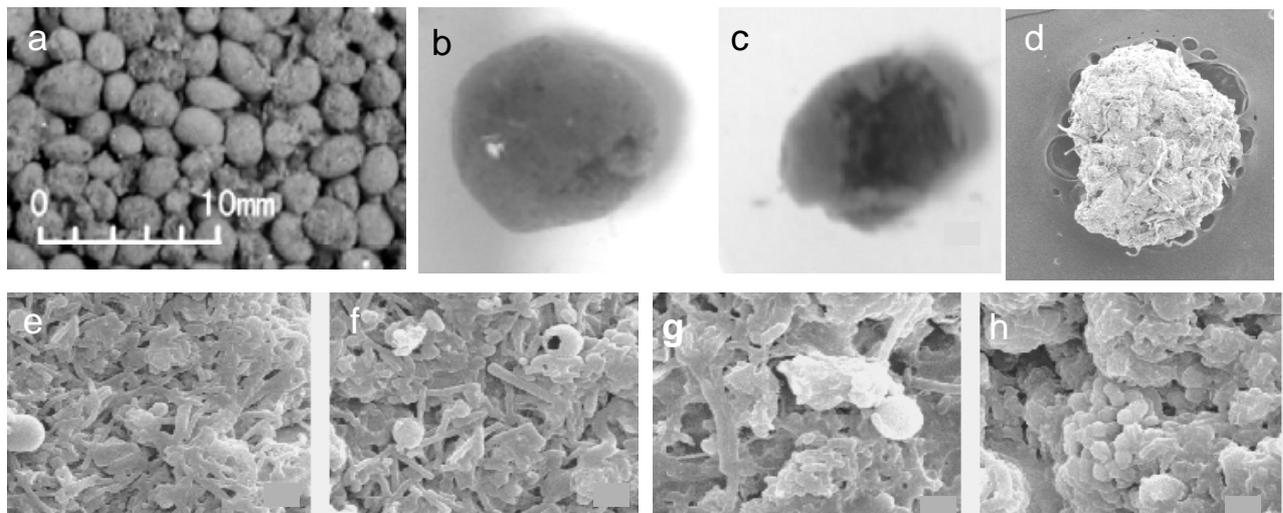


图3 生物造粒流化床粒状泥样的外部形态 (a: 水中粒状污泥的外形图; b: 单个粒状污泥外形; c: 破损的粒状污泥外形; d: 脱水后颗粒污泥外形; e-h: 颗粒污泥电镜扫描示颗粒表面的微生物分布情况)

Fig. 3 Images of pellets sampled from the FPB column (a: digital image of pellets in water; b: digital image of a single pellet; c: digital image of a broken pellet; d: SEM image of a dehydrated pellet; e-h: SEM images of microbes on the surface of pellets.)

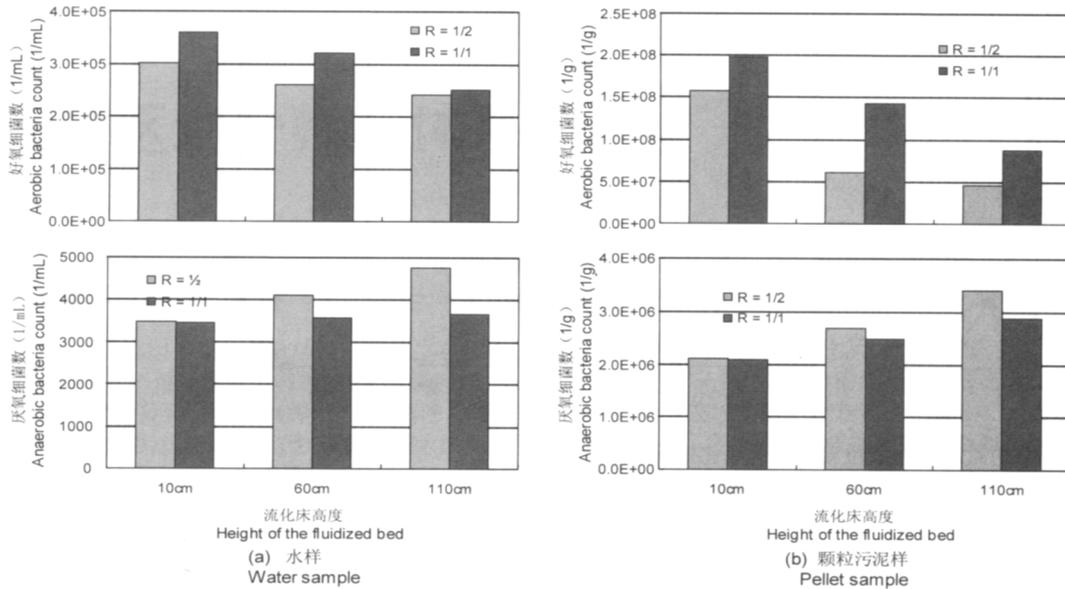


图4 生物造粒流化床水样和粒状污泥中好氧菌和厌氧菌分布情况
Fig. 4 Total count of aerobic and anaerobic bacteria in the water and pellet samples

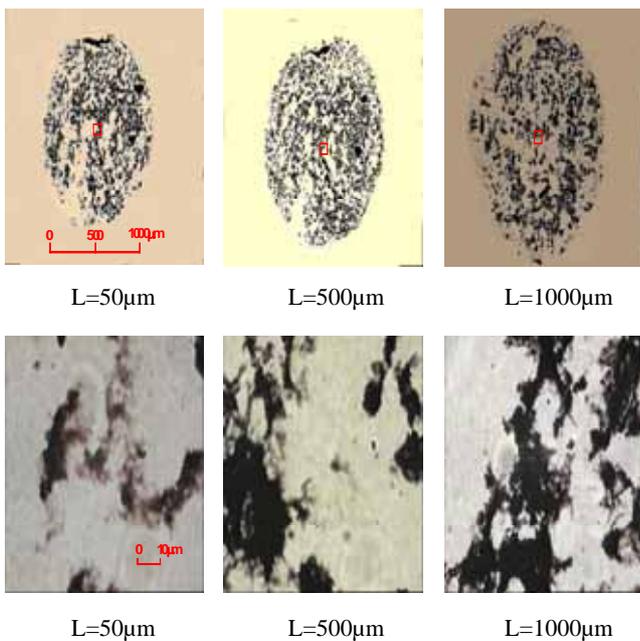


图 5 生物造粒流化床 10 cm 处颗粒污泥切片图 (L-所示切片处与颗粒污泥表面之间的距离, 切片厚度为 7µm; 上图所示为切片的整体外形; 下图所示为切片中心处微生物分布情况)
Fig. 5 Images of a sliced pellet which was collected at h=10 cm (L - distance from outer surface of the pellet, thickness of the slice as 7µm; upper - image of the whole slice; lower - magnified image of the central part of the slice.)

2 结果与讨论

2.1 颗粒污泥的形态

图3所示为一组从不同侧面观察到的污泥颗粒的照片。从生物造粒流化床中采集的污泥颗粒绝大部分为球形, 结构紧密(图3a)。图3b和图3c所示为比较完整的颗粒和剖开的颗粒, 可以发现颗粒的表层为微黄

棕色, 这与传统活性污泥法的活性污泥非常相似, 而颗粒内部中心为暗褐色, 表现为缺氧状态。图3d所示为脱水后的颗粒污泥的基本框架结构, 进一步用电镜扫描观察发现, 在颗粒表面存在着数量众多的微生物(图3 e-h)。

2.2 回流比或溶解氧对微生物分布特性的影响

图4所示为生物造流化床回流比分别为1:2和1:1时, 反应器底部(h=10 cm), 中部(h=60 cm)和顶部(h=110 cm)水样和泥样中好氧菌和厌氧菌总数。水样表示为每mL中的菌数, 泥样表示为每g干泥中的菌数。从图3中可以看出, (1)无论水中还是泥中的好氧菌均比相应位置的厌氧菌多大约2个数量级;(2)沿FPB反应柱从下到上, 好氧菌逐渐减少而厌氧菌逐渐增多;(3)随着回流比从1:2增加到1:1, 好氧菌的总数有增多趋势而厌氧菌有减少趋势。对于厌氧菌, 反硫化细菌要多于反硝化菌, 前者在水中占大约70%, 泥中占大约80%。这个比例不随高度和回流比的变化而变化。对比图2的DO曲线可以发现, 溶解氧是FPB反应器好氧菌和厌氧菌分布的控制因素。在回流比为1:2的条件下, 底部进口处DO浓度为3.5 mg·L⁻¹左右, 并且随着水流的向上流动, 溶氧量迅速降低。在柱高h=10 cm 的断面, 颗粒中好氧菌的数量约为每g干泥1.6×10⁸个, 而在柱高为60 cm处, 颗粒中的好氧菌降为6×10⁷, 而此处的溶解氧量也降到了0.6 mg·L⁻¹。回流比的增加, 增大了溶解氧的浓度, 底部进口处为5.5 mg·L⁻¹, 而在h=60 cm处, 溶解氧量也可以维持到1 mg·L⁻¹。所以, 随着溶解氧的增加, 好氧菌数量也维持在较高的水平。

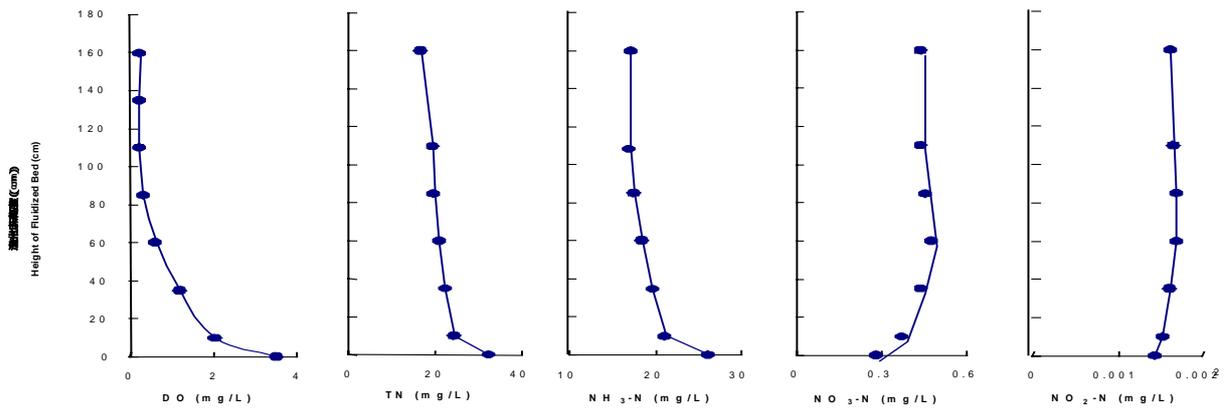


图6 DO 和各种形态的氮沿生物造粒流化床的变化情况

Fig. 6 Profiles of DO and various forms of nitrogen along the FPB column

2.3 污泥颗粒内部的微生物分布情况

图5所示为生物造粒流化床柱高10 cm处的颗粒污泥样品切片图。颗粒直径约为2000 μm ，第一行的三张图片依次为污泥颗粒从靠近表面处到中心的切面图。第二行的三张图片为每个切面中心（红色框）的放大图。

正如这些图片所示，污泥颗粒的内部呈网状结构。固体框架之间的空间为水的自由通过提供了渠道。尽管光学显微镜的放大倍数有限，仍然可以肯定固体部分的周围生长着巨大数量的微生物。在靠近表面处（图5左下）菌落成群，而越往中心，菌落数越少（图5右下）。

仅仅靠这些菌落的表现并不能确定颗粒内部好氧菌和厌氧菌的分布。但是，从图5中，我们可以得到这样的信息，尽管在颗粒中以好氧菌为主，一定数量的厌氧菌仍然存在，而且厌氧菌的数量受床体溶液溶解氧浓度的影响。对于单个的颗粒来说，DO浓度仍应从表面到中心呈降低趋势。因此，颗粒表层处于相对好氧的环境中，而颗粒内部中心为氧含量相对较少的环境。好氧菌和厌氧菌的分布也表现出相应的趋势。

2.4 FPB反应器中的硝化和反硝化作用

图6所示为回流比为1:2时，FPB反应器不同高度处DO，TN和三种无机氮的曲线。值得注意的是FPB反应器TN的去除主要是水中氨态氮的去除，伴随着微量硝酸盐和亚硝酸盐的增多。这表明生物造粒流化床反应器可以进行一定程度的硝化和反硝化作用。污泥颗粒中检测出的反硝化菌在此过程中起了重要作用。

3 结论

本文研究了生物造粒流化床反应器的颗粒污泥中的微生物分布情况。我们对好氧菌总数和两种典型的兼性厌氧菌—反硝化菌和反硫化菌进行了计数。另外还运用了光学显微镜，扫描电子显微镜（SEM）以及

污泥固定和切片等技术手段加以研究。从前面的描述中，我们可以得出如下结论：

（1）好氧菌是FPB反应器中主要的微生物，所以生物处理主要基于良好的充氧环境。尽管如此，仍有一定数量的兼性厌氧菌的存在，如反硝化菌和反硫化菌。

（2）床体溶液中的溶解氧是影响FPB反应器中微生物分布的重要参数。随着自下而上溶解氧浓度的降低，好养菌数量有减少的趋势，而兼性厌氧菌逐渐增多。提高溶氧量，好氧菌数量会相应增加。

（3）颗粒内部中心呈网状结构，并且有大量微生物附着。接近表面处菌落成群聚集，越向中心处菌落数越少。

（4）尽管好氧菌在FPB反应器的生物降解中起主要作用，但仍然有缺氧或厌氧区域的存在。厌氧微生物在有机物和氮的去除中也起到了一定作用。

参考文献

- [1] Wang X C, Yuan H L, Liu Y J. 2005. Fluidized-pellet-bed bioreactor: a promising technology for onsite wastewater treatment and reuse - Part 1[A]. In: The Specialty Conference of Wastewater Reclamation & Reuse for Sustainability, Proceedings of IWA Conference [C]. Jeju, Korea: 117-124.
- [2] Yuan H. L., Wang, X.C., Liu Y. J., *et al.* 2005. Pilot study of a fluidized-pellet-bed bioreactor for simultaneous biodegradation and solid/liquid separation in municipal wastewater treatment[A]. In: Future of Urban Wastewater Systems - Decentralization and Reuse, Proceedings of IWA Conference [C]. Xi'an: 253-260.
- [3] Wang X C, Liu Y J, H.L. Yuan, *et al.* 2006. A study on the microbiological characteristics of a fluidized-pellet-bed bioreactor for wastewater treatment[A]. In: The Specialty Conference of Wastewater Reclamation & Reuse for Sustainability, Proceedings of IWA Conference [C]. Beijing: 653-659.
- [4] Holt J G. 1994. Bergey's Manual of Determinative Bacteriology[M]. 9th Edition. Baltimore: Williams & Wilkins: 668-672.