

ABR 成熟颗粒污泥的分形特征与尺度效应

芦家娟¹, 王毅力^{1*}, 侯立安², 张征¹

(1. 北京林业大学资源与环境学院, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国人民解放军第二炮兵工程设计院, 北京 100011)

摘要:建立了基于 SEM 照片研究 ABR 成熟颗粒污泥分形特征的操作程序, 采用 Photoshop、Newscan 和 Fips 程序对该图形进行处理和分形维数计算. 颗粒污泥的计盒维数值处于 1.85 以上, 第 3 格室和第 5 格室形成的颗粒污泥较为致密. 不同格室颗粒污泥边界的计盒维数的值在 1.10 左右, 表明它们的边界或表面是不规则的, 而且第 1 格室和第 5 格室形成的颗粒污泥的表面不规则程度高一些. 颗粒污泥边界的圆规维数计算结果也表明其表面是不规则的, 而且每一个颗粒污泥都存在 2 个分形维数的尺度区间, 有的区间跨度达一个数量级. 另外, 不同的计算维数的方法会导致结果的差异. 建立不同尺度域下的分形维数与颗粒污泥的组成、结构及物化特征的关系将具有重要意义.

关键词: ABR; 成熟颗粒污泥; 分形特征; 分形维数; 尺度效应

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)04-0118-06

Fractal Characteristics and Scale Dependence of Mature Granular Sludge in Anaerobic Baffled Reactor (ABR)

LU Jia-juan¹, WANG Yi-li¹, HOU Li-an², ZHANG Zheng¹

(College of Nature Resource and Environment, The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education and Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. The Second Artillery Engineering Design Institute China Peoples' Liberation Army, Beijing 100011, China)

Abstract: Based on the SEM images of mature granular sludge in ABR, the research process on fractal characteristics of these granules was built. The treatment and fractal dimensions calculation of the images were carried on through Photoshop, Newscan and Fips programs. The results showed that the box-counting dimensions of the mature granular sludge were more than 1.85, and the granules formed in the third and fifth compartments were more compact. The boundaries of the same granular sludge were fractal with the fractal dimensions of approximate 1.10, demonstrating the irregularity of the boundaries or surfaces, furthermore the surface of these granules formed in the first and fifth compartments was more irregular. It seemed that the compass dimensions of the granules boundary were a proof of irregularity of their surface. Moreover, there existed two scale scopes in calculating the compass dimensions of each granule, especially some of them with a range of one order of magnitude. A little discrepancy was appeared between box-counting and compass ways to calculating fractal dimensions. It will be important to build relationship between fractal dimensions with different scales and composition, structure, physico-chemical characteristics of granular sludge.

Key words: anaerobic baffled reactor; mature granular sludge; fractal characteristics; fractal dimensions; scale dependence

厌氧折流板反应器(anaerobic baffled reactor, ABR)是 McCarty 和 Bachmann 等于 1982 年提出的一种新型高效厌氧反应器. 该反应器由多个折流板将其分隔成格室, 每个格室都可以看作相对独立的 UASB(上流式厌氧污泥床)系统; 目前在该反应器的结构形式(PABR 反应器)及在低浓度废水、难降解有机物(POPs)和难降解的有机有毒物(PTs)处理方面是研究的热点^[1~4]. 另外该反应器在运行过程中会形成颗粒污泥, 这正是 ABR 高负荷的基础, 有关颗粒污泥的生物相研究很多, 但对于颗粒污泥的物理化学特征研究较少, 将分形理论应用于其中的研究还未报道过, 而这些物理化学特征也是决定污泥高效吸附、传质、沉降和脱水性能的重要指标, 因此研究 ABR 颗粒污泥的物理化学特征, 尤其是分形特征将对

于深入了解该反应器具有重要意义^[5~8]. 本文主要采用分形几何理论研究了 ABR 成熟颗粒污泥分形特征和尺度效应, 初步建立确定生物颗粒污泥分形维数的程序, 并分析分形维数的意义, 为进一步研究其与颗粒污泥的物理化学特征的关系奠定基础.

1 分形理论与分形维数

分形(fractal)概念从 70 年代问世至今已近 30 年^[1], 首先是为了表征复杂图形和复杂过程的非线性

收稿日期: 2004-07-05; 修订日期: 2004-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178009, 20407004); 霍英东青年教师基金资助项目(91078)

作者简介: 芦家娟(1979~), 女, 硕士研究生, 主要从事环境水质学的研究

* 通讯联系人, E-mail: wangyilinet@sina.com

性规律,其与混沌(chaos)交织在一起,已越来越为人们所重视,分形理论在水环境与水处理领域的研究也越来越成为当今前沿研究课题之一^[9-17]。

一般而言,分形是组成部分以某种方式与整体相似的形体,它有如下显著的特点:精细的结构,即有任意小比例的细节;局部与整体都无法用传统的几何语言描述;自相似形式;可以用很简单的方法来定义或由迭代产生;分形维数大于拓扑维数^[14,15]。

分形维数在分形理论中是非常重要的一个概念,它与欧氏几何学维数表示整数自由度不同,分形维数属于非欧氏几何学。通常 Hausdorff 维数是分数的物体或事物称为分形,分形维数就是定量地表示自相似的随机形状和现象的最基本的量。

圆规维数由 Mandelbrot 在 1982 年提出^[9],它主要用于测量粗糙曲线的分形维数,即用不同尺度的码尺去测量粗糙曲线的长度,码尺尺度 ε 越小,码尺测量的次数 $N(\varepsilon)$ 越大,在一定的 ε 区间内, $N(\varepsilon)$ 与 ε 存在如下的幂函数关系:

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D}$$

其中, D 即粗糙曲线的圆规维数,相应的曲线的长度 L 与 ε 间成立下列关系:

$$L = N(\varepsilon) \varepsilon \propto \varepsilon^{1-D}$$

通过 $\lg L$ 与 $\lg \varepsilon$ 间线性关系的斜率可以计算出 D 值。

计盒维数就是用网格覆盖图形,计算网格中有图形像素的方格数目,不断减小网格尺度 ε ,直至最小的网格尺寸达到像素为止,得到一系列 $N(\varepsilon)$ 、 ε 的数据,如果该图形具有分形特征,则下式成立:

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D}$$

其中, D 即图形的计盒维数,通过 $\lg N(\varepsilon)$ 与 $\lg \varepsilon$ 间线性关系的斜率可以计算出 D 值。该方法适用于一、二、三维空间的不规则图形的计盒维数的测量,盒子覆盖法计算出的计盒维数可以表征该图形的粗糙或不规则程度。

2 试验装置与工艺流程

试验所用的折流板反应器由厚 5 mm 的有机玻璃制成,长 × 宽 × 高 = 500 mm × 150 mm × 310 mm,有效容积为 14.55 L。该反应器分为 5 格反应室,每室由上、下流室组成,通往上流室的折板有 45° 拐角,每格顶有导气口,侧部有取水样口,整个反应器放在恒温水槽内,其温度通过 RS008-A(50 W) 型加热棒控制在 20 ~ 30 ℃。其工艺流程如图 1 所示。

3 试验方法

试验用水为人工配水,由葡萄糖、尿素和磷酸二氢钾提供相应的碳、氮、磷源,比例为 COD: N: P = 350: 5: 1,投加适量的 Mg、Fe 及微量元素 Cu、Co、Ni、Mn,同时以 NaHCO₃ 调节进水的碱度,保证出水的 pH 值处于 6.8 ~ 7.5 之间。

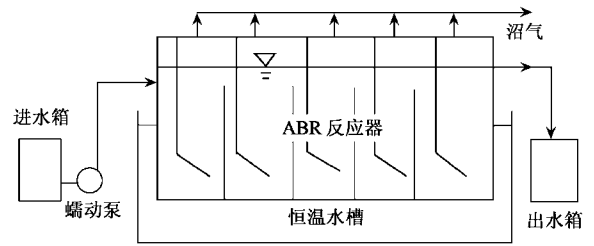


图 1 ABR 试验流程

Fig. 1 Schematic diagram of the anaerobic baffled reactor (ABR)

3.1 接种污泥

该试验所用接种污泥取自北京高碑店污水处理厂的中温硝化池污泥,将污泥均匀地加入反应器的各室中并保证一定的污泥浓度,然后按比例加入葡萄糖、尿素和磷酸二氢钾及其它元素进行动态运行。

3.2 研究分析方法

3.2.1 成熟颗粒低倍电镜照片观察

采用 FEI 公司 Quanta200 型扫描电镜(样品采用戊二酸-铬酸双固定,乙醇溶液梯度脱水,乙酸异戊脂置换,二氧化碳临界点干燥,SCD005 型离子溅射仪喷金等预处理)观察污泥的低倍电镜照片。

3.2.2 颗粒污泥图象处理流程与分形特征分析^[18]

采用 photoshop、Newscan 和 Fips2 程序对颗粒污泥的电镜照片进行图 2 处理与计算。

通过图 2 流程,可以获取颗粒污泥的去除背景的图象和边界封闭曲线,采用中国科技大学开发的 Fips2 程序,通过盒子覆盖法确定上述处理图形的计盒维数;然后采用本实验室开发的 Newscan 程序对上述颗粒污泥的边界封闭曲线以步长法计算其圆规维数,并分析其尺度效应。

4 结果与讨论

4.1 颗粒污泥图象

图 3 中所示的电镜照片表明在 ABR 反应器各格室(第 1、2、3、4、5 格室)中形成了性能良好的颗粒污泥,颗粒污泥形状不一,表面粗糙程度不同,并且在颗粒污泥表面上有气孔形成。一般而言,

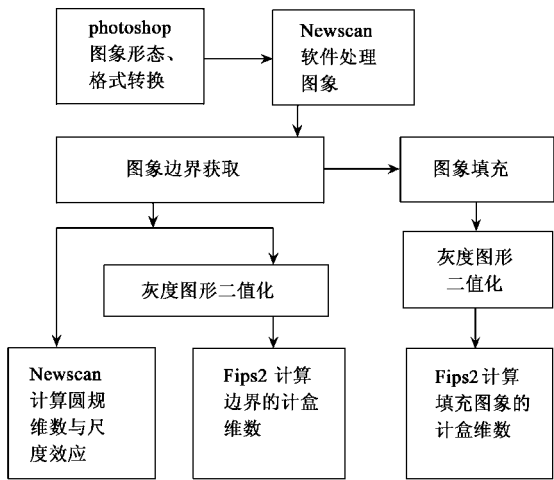


图 2 颗粒污泥图像处理流程与分形特征分析
Fig.2 Treatment process and analysis of fractal characteristics for scanning electron microscopy (SEM) images of granular sludge in ABR

颗粒污泥表面比剖面光滑一些,且具有较为致密的结构.

4.2 颗粒污泥图像的处理

依据图 2 所示程序对颗粒污泥进行处理,以 ABR 反应器中一些典型的颗粒污泥图像为例(见图 4~图 6).对于图 3 中的颗粒污泥 SEM 原始图像,运用 photoshop 和 Newscan 软件进行处理,形成了类似图 4~图 6 中颗粒污泥及其边界的灰度图像,基于这些灰度图像可以进行它们的分形特征的研究.

4.3 颗粒污泥的分形特征

4.3.1 颗粒污泥的计盒维数

应用 FispS 软件,依次对上述的灰度填充图形进行分形维数的计算,见图 7.首先设置一个灰度阈值,对这些灰度图像进行二值化,将其变为黑白二色图像,然后通过盒子覆盖法计算该图形的计盒维数,

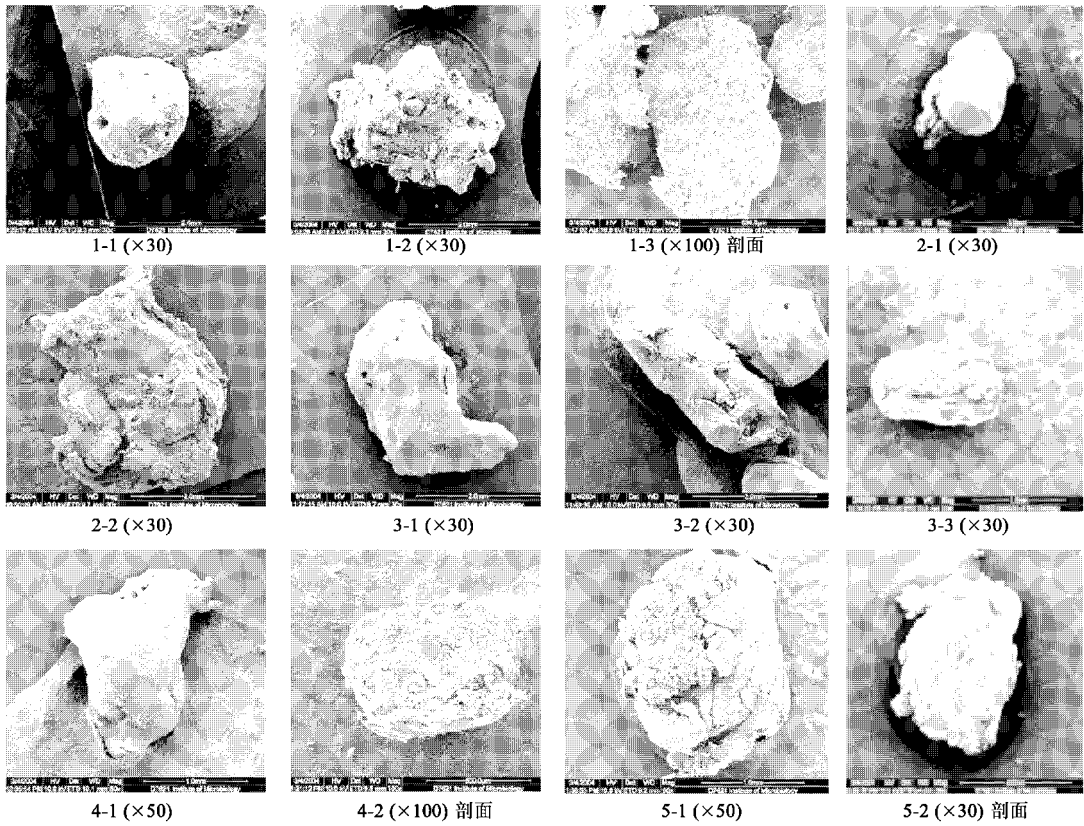


图 3 颗粒污泥的电镜照片
Fig.3 SEM images of granular sludge in ABR

计算结果见表 1.计盒维数可以显示颗粒污泥的二维平面投影图形的空间填充程度,维数值越高,表明该颗粒的空间填充程度越高.表 1 的结果显示不同格室颗粒污泥的计盒维数值在 1.85 以上,表明它们

结构较为致密,其中第 3 格室和第 5 格室形成的颗粒污泥的维数较高,也表明它们的结构更为致密.

4.3.2 颗粒污泥边界的计盒维数

应用 FispS 软件,依次对上述的灰度边界图形

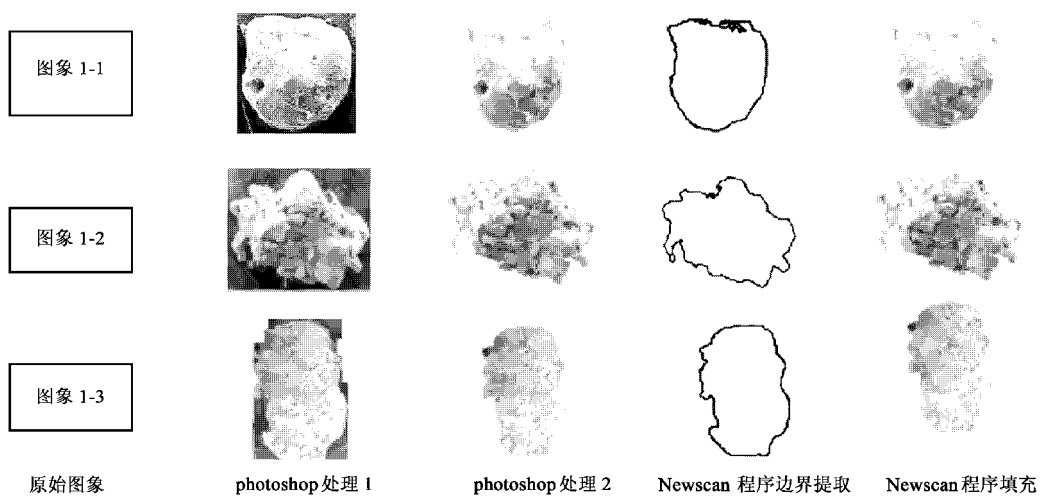


图 4 第 1 格室颗粒污泥处理过程

Fig.4 Treatment process of SEM images of granular sludge in the first compartment of ABR



图 5 第 3 格室颗粒污泥处理过程

Fig.5 Treatment process of SEM images of granular sludge in the third compartment of ABR



图 6 第 4 格室颗粒污泥处理过程

Fig.6 Treatment process of SEM images of granular sludge in the fourth compartment of ABR



图 7 填充图象计盒维数计算过程
(以第 1 格室颗粒污泥 1~2 为例)

Fig.7 Calculation process of fractal dimension of granular sludge
1~2 in the first compartment of ABR

进行分形维数的计算,见图 8.首先设置一个灰度阈值,对这些灰度图象进行二值化,将其变为黑白二色图象,然后通过盒子覆盖法计算该图形的计盒维数,

表 1 颗粒污泥的计盒维数

Table 1 The box-counting dimensions of granular sludge
in five compartments of ABR

反应器格室	1	2	3	4	5
计盒维数 1	1.896	1.875	1.943	1.935	1.991
计盒维数 2	1.915	1.962	1.962	1.913	1.943
计盒维数 3	1.903	—	1.928	—	—

计算结果见表 2.计盒维数可以显示颗粒污泥的边界图形的不规则程度,维数值越高,表明该颗粒的边界的不规则程度越高;如果假设颗粒表面为各向同性,则可以将边界维数加 1 表示颗粒污泥的表面分形维数,此值越大,表示其表面不规则程度越高.表

2 的结果显示不同格室颗粒污泥边界的计盒维数值在 1.10 左右,表明这些颗粒污泥的边界或表面是不规则的.其中第 1 格室和第 5 格室形成的颗粒污泥的维数较高,也表明它们的表面不规则程度高一些.



图 8 边界计盒维数计算过程(以第 1 格室颗粒污泥 1~2 为例)
Fig.8 Calculation process of fractal dimension of granular sludge
1~2 boundary in the first compartment of ABR

表 2 颗粒污泥边界的计盒维数
Table 2 The box-counting dimensions of granular sludge
boundary in five compartments of ABR

反应器格室	1	2	3	4	5
计盒维数 1	1.094	1.067	1.046	1.106	1.073
计盒维数 2	1.099	1.048	1.084	1.046	1.089
计盒维数 3	1.033	—	1.042	—	—

4.3.3 颗粒污泥边界的圆规维数与尺度效应^[17]

应用 Newscan 软件中的步长法,依次计算上述的灰度图形边界的圆规分形维数,计算结果见表 3.在计算圆规维数过程中,不同的步长区间,lg L 与 lg ε 具有不同的线性关系,从而可以计算出不同的

分形维数,可见分形维数具有尺度效应,以第一格室颗粒污泥 SEM 图象 1-1 为例(图 9).在颗粒污泥外表面呈各向同性假设成立时,其边界的圆规维数加 1 也表示颗粒表面维数,维数越高,颗粒表面越不规则,表 3 的维数结果表明颗粒表面是不规则的.

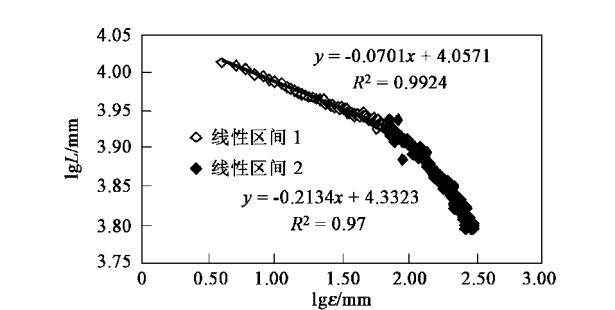


图 9 颗粒污泥 1-1 边界的圆规维数与尺度效应
Fig.9 The compass dimensions and scale dependence of granular
sludge 1-1 boundary in the first compartment of ABR

另外,每一个颗粒污泥都存在 2 个分形维数的尺度区间,有的区间跨度达一个数量级,但这些区间是不同的;一般的颗粒污泥的圆规维数为 1.0 以上,处于 1.10 左右,但在某些区间范围内,颗粒污泥的圆规维数有时达 1.35 附近,这也说明了颗粒污泥分形特征的复杂性.而且圆规维数与计盒维数的值有些区别,可见不同的计算维数的方法不同会导致结果的一些差异.

表 3 颗粒污泥边界的圆规维数及尺度效应
Table 3 The compass dimensions and scale dependence of granular sludge boundary in five compartments of ABR

颗粒污泥	项目	第 1 格室	第 2 格室	第 3 格室	第 4 格室	第 5 格室
1	测量尺度/ mm	0.04 ~ 0.68	0.04 ~ 0.68	0.04 ~ 0.33	0.024 ~ 0.32	0.024 ~ 0.41
	圆规维数 1	1.0701	1.087	1.0599	1.0671	1.096
	测量尺度/ mm	0.69 ~ 3.03	0.69 ~ 1.73	0.69 ~ 2.28	0.10 ~ 1.22	0.024 ~ 2.27
	圆规维数 2	1.2134	1.1474	1.0948	1.0699	1.1246
2	颗粒尺度/ mm	0.04 ~ 0.23	0.14 ~ 0.68	0.04 ~ 0.23	0.012 ~ 1.68	0.04 ~ 0.23
	圆规维数 3	1.0673	1.0534	1.0465	1.0483	1.0365
	测量尺度/ mm	0.28 ~ 3.78	0.68 ~ 2.22	1.03 ~ 3.78	0.60 ~ 1.13	0.69 ~ 1.83
	圆规维数 4	1.1497	1.1194	1.3515	1.221	1.0884
3	测量尺度/ mm	0.012 ~ 0.429		0.024 ~ 0.44		
	圆规维数 5	1.0475		1.0274		
	测量尺度/ mm	0.432 ~ 1.13		1.22 ~ 2.27		
	圆规维数 6	1.1699		1.3461		

5 讨论

研究表明^[1~4]:颗粒污泥对 ABR 处理废水的效果影响很大,其中所形成的颗粒污泥粒度较大,结构

紧凑,水力性能优良,并且富含大量的各种厌氧微生物.另外从处理废水的机理而言,难降解的水相有机物会通过传质过程而逐渐进入颗粒污泥,从而被其中的微生物所降解,此时颗粒污泥的化学组成、孔隙

率、电荷特征、含水率等均会影响上述传质过程^[5~16]。而分形维数作为描述不规则颗粒的特征参数,其自然会与颗粒污泥的结构和物理化学特征相联系,计盒维数可以与污泥的组成、密度、孔隙率和紧凑性相关;而圆规维数、表面分维也可以与组成、孔隙率、电荷特征、含水率等建立联系。因此通过这些分形维数可以建立分形传质模型,深入准确地理解颗粒污泥的降解性能;此外将这些分形维数用于颗粒污泥在反应器中的水力运动,可以从另一角度研究这些颗粒的运动规律,探讨 ABR 反应器的运行特征。

将分形几何理论应用于颗粒污泥的研究是一个全新的研究领域,分形维数的应用将是一个不断拓展的过程,建立不同尺度域下分形维数与颗粒污泥特征的定量关系模型将会更加深入地认识该颗粒对有机物的传质、反应过程。

6 结论

(1) 建立了基于颗粒污泥的 SEM 照片研究颗粒污泥分形特征的程序,采用 photoshop、Newsan 和 Fips 程序对该图形进行处理和分形维数计算。

(2) 颗粒污泥的计盒维数值处于 1.85 以上,表明它们结构较为致密,第 3 格室和第 5 格室形成的颗粒污泥的致密程度更高。不同格室颗粒污泥边界的计盒维数的值在 1.10 左右,表明它们的边界或表面是不规则的,而且第 1 格室和第 5 格室形成的颗粒污泥的表面不规则程度高一些。

(3) 颗粒污泥边界的圆规维数计算结果也表明其表面是不规则的,而且每一个颗粒污泥都存在 2 个分形维数的尺度区间,有的区间跨度达一个数量级。另外,计算维数的方法不同会导致结果的一些差异。建立不同尺度域下的分形维数与颗粒污泥的组成、结构及物化特征的关系将具有重要意义。

致谢:感谢中国矿业大学(北京校区)岩石力学与分形研究所的周宏伟副教授对于本文提供的指导。

参考文献:

- [1] Bachmann A, beard V L, McCarty P L. Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor[J]. Wat. Res., 1985, 19(1): 99~106.
- [2] 戴友芝, 施汉昌, 钱易. 有毒物冲击负荷对厌氧折流板反应器的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 40~44.
- [3] 贺嵩那, 易辰俞, 戴友芝. 厌氧折流板反应器处理有机磷农药废水的研究[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(4): 26~28.
- [4] Barber W P, Stuckey D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review[J]. Wat Res., 1999, 33(7): 1559~1579.
- [5] Li D H, J Ganczarczyk. Fractal geometry of particle aggregates generated in water and wastewater treatment[J]. Environ. Sci. Technol., 1989, 23(11): 1385~1389.
- [6] Britt Marie Wilén, Bo Jina, Paul Lanta. Impacts of structural characteristics on activated sludge floc stability[J]. Water Research, 2003, 37: 3632~3645.
- [7] Bo Jin, Britt Marie Wilén, Paul Lant. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settlability of activated sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 95: 221~234.
- [8] Zhao Y Q. Correlations between floc physical properties and optimum polymer dosage in alum sludge conditioning and dewatering[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 92: 227~235.
- [9] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco: Free man, 1982.
- [10] 陈建安. 分形维数的定义及测定方法[J]. 电子科技, 1999, 44~46.
- [11] Serra T, Logan Bruce E. Collision frequencies of fractal bacterial aggregates with small particles in a sheared fluid[J]. Environ. Sci. Technol., 1999, 33(13): 2247~2251.
- [12] Kaye BH 著, 徐新阳, 康雁, 陈旭, 等译. 分形漫步[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1994.
- [13] 孙霞, 吴自勤, 黄均. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2003.
- [14] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [15] 李后强, 汪富泉. 分形理论及其在分子科学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [16] 张济忠. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [17] 周宏伟. 岩石节理表面形貌的各向异性与尺度效应[R]. 北京: 中国矿业大学北京校区博士后出站报告, 2000.
- [18] 谷口庆治[日]编, 朱虹, 廖学成, 乐静译. 数字图象处理(基础篇, 应用篇)[M]. 北京: 科学出版社, 2002.