

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.260

废水生物处理颗粒污泥内三维孔隙结构研究 ——以厌氧氨氧化颗粒污泥为例

冷济轩, 傅慧敏, 晏鹏, 陈猷鹏

(重庆大学环境与生态学院, 重庆 400045)

摘要: 颗粒污泥的三维结构极大地影响其沉降性能和结构稳定性, 但是目前缺乏对颗粒污泥内部三维结构、孔隙结构分布特征等在维持颗粒结构稳定性中的作用的研究。以厌氧氨氧化颗粒污泥为对象, 采用同步辐射的 X 射线显微断层扫描成像技术扫描颗粒, 通过 Avizo 软件对颗粒污泥进行三维重构, 获得了颗粒污泥中孔径、孔隙的空间分布和分形维数, 建立了颗粒污泥的孔隙网络模型, 并计算颗粒污泥的绝对渗透率, 为颗粒污泥系统在污水处理中的稳定高效应用提供理论依据。

关键词: 颗粒污泥; 孔隙结构; 分形维数; 渗透性

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)12-001-11

Three-dimensional pore structure of granular sludge in biological wastewater treatment system — taking Anammox granules as an example

LENG Jixuan, FU Huimin, YAN Peng, CHEN Youpeng

(College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Understanding the three-dimensional(3D) structure distribution of granular sludge is crucial for its settlement ability and stability, yet research on the 3D pore structure and distribution characteristics remains scarce. In this study, anaerobic ammonium oxidation granular sludge is scanned using synchrotron radiation X-ray phase microscopic computed tomography, and its structure is reconstructed using Avizo. The diameter, spatial distribution, and fractal dimension of the pore structure are analyzed to establish a pore network model for granular sludge. Subsequently, absolute permeability calculations are performed. This research contributes to the theoretical foundation for the stable and efficient application of granular sludge systems in sewage treatment.

Keywords: granular sludge; pore structure; fractal dimension; permeability

颗粒污泥由于其结构紧凑、生物截留率高、沉降性能良好和抗冲击能力强等优点而备受环境工程界青睐。但颗粒污泥在运行过程中容易出现颗粒解体、污泥上浮等问题, 极大程度上影响了工艺的稳定运行。颗粒解体、污泥上浮与颗粒污泥的内部结构与特性密不可分。Li 等^[1]和 Tao 等^[2]总结了颗粒污泥上浮的机理主

收稿日期: 2022-02-16 网络出版日期: 2022-04-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFD1100704)。

Supported by the National Key Reserach and Development Program of China(2020YFD1100704).

作者简介: 冷济轩(1997—), 男, 重庆大学硕士研究生, 主要从事环境微生物方向的研究。

通信作者: 陈猷鹏(1982—), 教授, 博士生导师, (E-mail) ypchen@cqu.edu.cn。

要为:颗粒污泥中的微生物在生长和增殖过程中会产生气体,在达到气体饱和和溶解度后形成气泡,一部分附着于颗粒污泥表面或滞留在颗粒污泥内部形成气穴,使颗粒污泥密度降低,进而导致颗粒上浮。由此可见,颗粒污泥的气穴分布和孔隙结构对其沉降性能影响极大,研究颗粒污泥的三维结构、孔隙以及气穴分布对颗粒污泥工艺的稳定性具有重要意义。但是目前缺乏颗粒污泥内部三维结构、孔隙结构和气腔分布特征的有效表征方法,这些特征参数在维持颗粒结构稳定性中发挥的作用仍待探索。

关于多孔结构的观测与表征,目前主要的方法是核磁共振成像,荧光原位杂交结合激光共聚焦和扫描电子显微镜等方法^[3-7],此外,分形理论也成功运用于活性污泥和土壤等多孔结构的分布性质的研究^[8-10]。然而这些方法只能得到颗粒污泥内某个尺寸的孔的丰度,无法得到连续的孔径分布,也不能提供直观的三维结构信息。基于同步辐射技术的X射线显微断层扫描成像(computed tomography, CT)技术可以对含水生物样品进行原位动态的无损三维微观结构成像,但目前缺乏基于同步辐射X射线显微CT成像技术对颗粒污泥内部三维结构系统性表征的研究。本研究以厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, Anammox)颗粒为例,通过同步辐射X射线显微CT成像技术对颗粒污泥进行扫描,利用图像处理软件得到了能够准确描述颗粒污泥内部孔隙结构的三维模型,定位颗粒污泥内部孔隙体积和空间分布特征,为解读污泥上浮过程和颗粒污泥结构稳定性提供思路。根据断层图像计算颗粒污泥的孔隙度、分形维数等物理属性,探究颗粒污泥内部孔隙的连通性,进而计算颗粒污泥的渗透率,为预测颗粒污泥的渗透率乃至探究基质运输过程提供一种新思路,从而为颗粒污泥工艺的高效运行提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 反应器运行

采用膨胀颗粒污泥床(EGSB)反应器实现厌氧氨氧化工艺。反应器由有机玻璃制成,高1 800 mm,内径90 mm,总有效容积17.59 L,其中反应区容积11.45 L,沉淀区容积6.14 L。反应器外设置厚度为100 mm的环形水浴保温层,反应器温度保持在(32±1) °C。反应器进水和回流由蠕动泵从反应器底部泵入,回流比为25:1,向上流速为1.69 m/h。合成废水具体组成见表1^[11]。

表1 合成废水中各成分质量浓度

Table 1 Component concentration in synthetic wastewater

废水组成	质量浓度/(g·L ⁻¹)	微量元素	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
NH ₄ Cl	200	EDTA-2Na	14.1
NaNO ₂	240	H ₃ BO ₄	0.014
KHCO ₃	2.13	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.99
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.2	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.25
KH ₂ PO ₄	0.025	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.43
CaCl ₂	0.2	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.19
EDTA-2Na	0.005	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.22
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.005	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.24

1.2 颗粒预处理

厌氧氨氧化颗粒污泥从实验室规模的EGSB反应器中取样,共使用8个颗粒污泥进行表征、分析和计算,颗粒粒径大小为3.5~4.0 mm。将颗粒污泥置于含有2.5%戊二醛和2%甲醛的氯化钙缓冲溶液中4 h,然后将颗粒污泥置于无水丙酮中以替换其结合水,并在包埋过程中加入着色剂^[12],以提高颗粒的对比度。之后在60 °C下将样品在树脂中固化,再扫描含有目标颗粒污泥的树脂。

1.3 同步辐射显微CT扫描

本研究中X射线CT扫描于上海同步辐射光源的BL15W1线站中完成。与X射线管中产生的X射线(例如工业和医疗应用中)相比,基于同步加速器的X射线是单色光,具有更高的亮度,可以避免射线硬化伪影,从而显著提高重建图像的质量。光学变换系统(Optique Peter PCO2000)提供多物镜切换功能,放大倍数为

原始尺寸的 1.25 至 20 倍。电荷耦合器件(CCD)探测器(Hamamatsu ORCA-Flash4.0)视野大小为 $6.8 \text{ mm} \times 7.2 \text{ mm}$, 对应为 $1360 \text{ 像素} \times 1430 \text{ 像素}$, 即每个方向上 1 像素代表 $5 \mu\text{m}$ 。

1.4 数字图像处理和孔隙定量分析

相位衬度图像经过 PITRE 软件进行重构后,使用 Avizo 19.1 软件与 fiji/ImageJ 共同进行图像过滤和图像分割过程。为了提高图像分割的准确性和效率,使用 Avizo19.1 中值滤波器进行图像滤波,用于随后的体绘制、定量标记分析和渗流计算分析。使用 SPSS 软件对颗粒污泥的孔径及配位数等属性进行统计学分析。

2 结果与讨论

2.1 颗粒污泥的三维结构重构

2.1.1 颗粒污泥的三维结构

CT 扫描后所得投影图像是相位衬度经过拉普拉斯变换后的分布,即边缘衬度图像。采用同轴相衬方法从边缘衬度图像中恢复相位衬度,从而得到片层图像。采用 PITRE 软件中的 GRIDREC 算法对得到的相位衬度图像进行重构,其与传统的 FBP 算法相比,能在不降低重构图像质量的前提下大幅度降低重构图像所需的时间^[13-15]。

颗粒污泥的三维重建如图 1 所示。基于 CT 扫描获取颗粒污泥样品重构二维灰度片层图像见图 1(a),图中的灰色、白色区域为高密度的颗粒污泥骨架(包括生物质及无机物质),黑色区域为低密度的孔隙空间。基于 CT 扫描获取的颗粒污泥三维灰度图像可见图 1(d)。

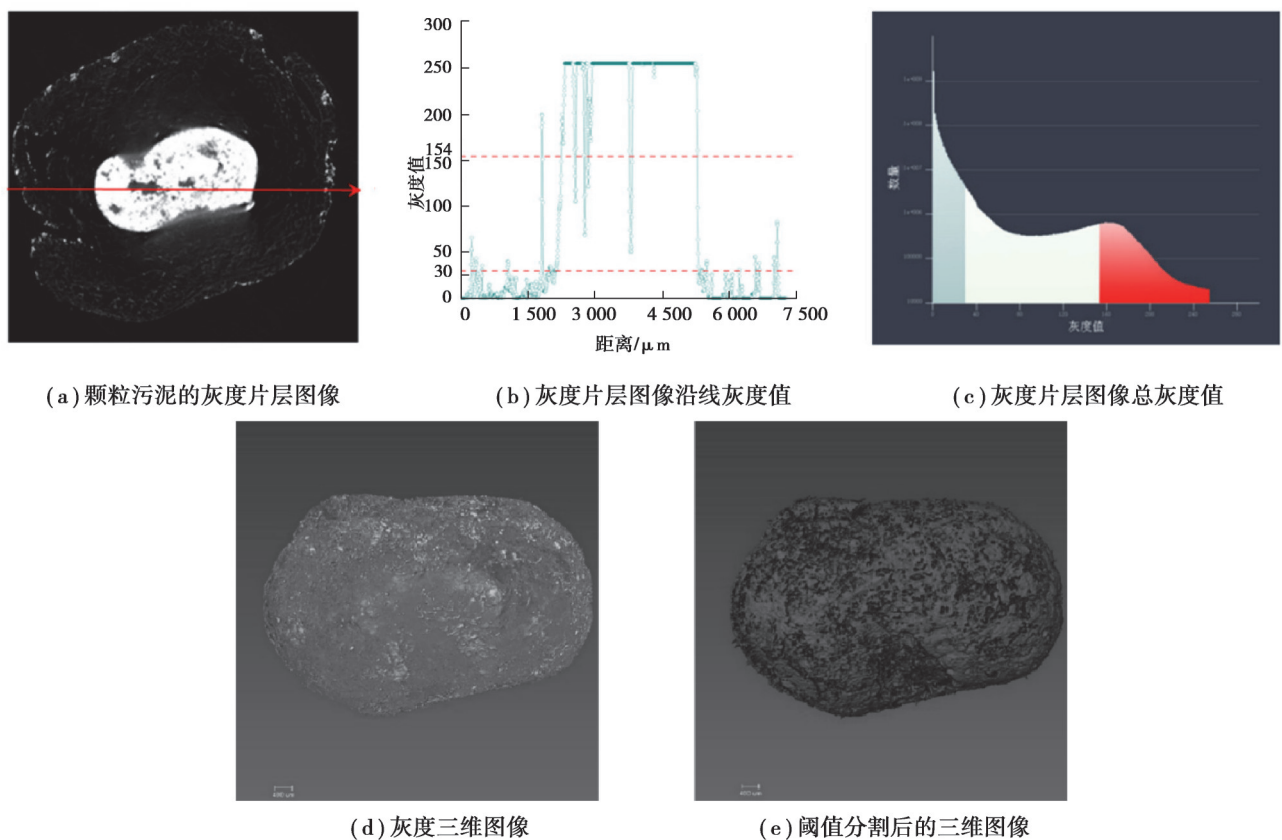


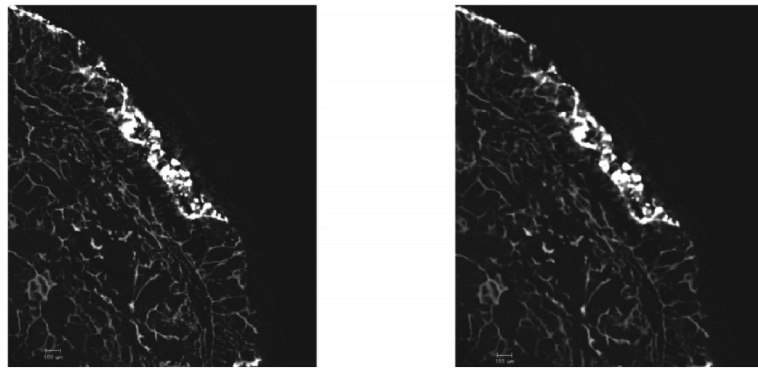
图 1 颗粒污泥的三维重建

Fig. 1 3D reconstruction of granular sludge

二维 CT 片层灰度图像中存在系统噪声,因此需要通过滤波算法提高信噪比。针对三维图像,比较常用的滤波算法有低通线性滤波、高斯平滑滤波及中值滤波,通过综合对比 3 种算法的滤波效果,采用中值滤波对灰度图像进行滤波处理,去除了部分伪影,孔隙和颗粒污泥骨架之间的过渡变得自然,边界也变得平滑,同时也尽可能地保留了图像重要特征信息(见图 2)。

为划分出颗粒污泥骨架和孔隙,还需要对滤波后的灰度图像进行二值化分割,使其由灰度图像转变为二

值化图像。图像二值化的关键在于分割阈值的选取,如图1(c)中所示,左侧峰值代表着孔隙空间,实体骨架对应右边的峰值,因此只要在两峰的峰谷处选择一个适当的阈值就可以有效地对孔隙和固体进行分割^[16],本研究中采用最小误差算法自动选择阈值^[17]。此外,颗粒污泥骨架中生物质和非生物质(包括晶核和吸附于颗粒污泥浅层的矿物质颗粒)的灰度值也有较大的区别,如图1(b)所示,在阈值34处将颗粒污泥孔隙和骨架区分开之后,于阈值154处进行划分并利用 Interactive top-hat 模块,选出表面的非生物细颗粒,去除重复的部分后,得到颗粒污泥的生物质骨架和非生物质骨架,最终重构的三维模型如图1(e)所示。



(a) 中值滤波前的片层图像

(b) 中值滤波后的片层图像

图2 中值滤波

Fig. 2 Median filter

2.1.2 颗粒内部孔隙尺寸分布

从灰度图和二值图中可以发现颗粒污泥结构中存在大量孔隙,这些孔隙被认为是微生物菌群在外部选择压的强化下,适应环境的结果,它们为基质和代谢产物的传递提供必要的内部通道。研究表明,颗粒污泥的孔隙率一般在0.58到0.92之间,小于传统絮状活性污泥的孔隙率(大于0.95)^[18]。由于颗粒污泥中的孔隙的形状和空间分布相当复杂,在分析其尺寸特点时,按等效法将孔隙规范化为三维球体,从而获得等效球体直径^[19],即等效孔径 d ,对颗粒污泥的孔隙体积与数量进行统计,结果见图3。Liu等^[20]发现大孔隙在溶质迁移和气泡运动过程中起重要的输移通道作用,但从图3中发现其中等效直径小于100 μm 的孔隙体积占比超过了85%,说明颗粒污泥中直径小于100 μm 的孔隙占据主导地位,可能是决定颗粒空间结构和传质过程的关键因素。

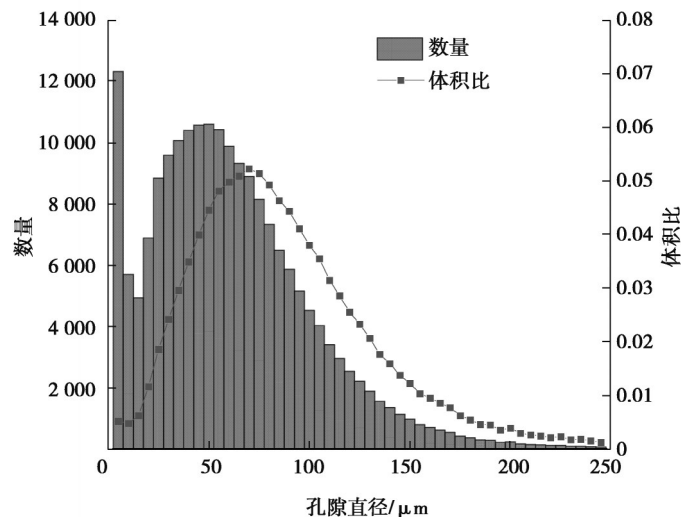


图3 颗粒污泥孔隙直径及体积比

Fig. 3 Pore diameter and volume ratio of granular sludge

2.2 颗粒内部孔隙的空间分布特征

选取 8 个粒径相近的颗粒,从晶核(约 250 μm 处)向外,根据距颗粒中心的距离,每 125 μm 划分为 1 个区间,共计 13 个区间。根据孔隙的空间坐标,将区间内的孔隙体积除以区间体积,得到颗粒内每个区间内的孔隙度并进行拟合,从而得到式(1)和图 4,图 4 中的 8 条曲线分别代表 8 个颗粒的区间孔隙度。拟合后颗粒孔隙中的区间分布服从 $\mu = 7.56, \sigma = 6.34$ 的高斯分布,其 $r^2=0.80$ 。在区间 7 即距晶核 1 125 ~ 1 250 μm 处孔隙率达到最大值 75.77%。孔隙主要分布在团聚体中心区域,内部和外部分布密度较低,说明孔隙主要分布在颗粒污泥中部,而靠近晶核的区域和靠近外侧的区域颗粒污泥结构则较为致密。这与 Ni 等^[21]和 Liu 等^[22]的报道类似。

$$y = -0.0434 + \frac{6.48}{6.34 \sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-7.56)^2}{6.34^2}} \quad (1)$$

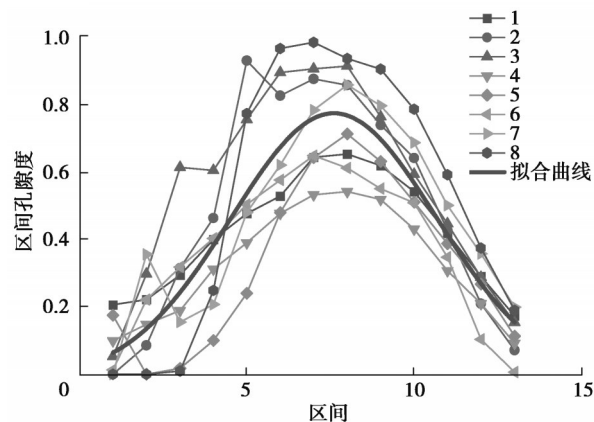


图 4 区间孔隙度

Fig. 4 Interval porosity

2.3 颗粒污泥的分形维数

与经典的欧几里德几何不同,分形几何认为物体的维数可以是一个非整数。分形维数可以用来描述对象的空间填充能力。Anammox 细菌从细胞聚集成团、形成亚单位,与胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)和无机物质相互粘结,最终形成颗粒污泥^[23],因此 Anammox 颗粒污泥具有明显的分形特征。根据 Mu 等^[24]的研究,颗粒污泥的分形值通常在 2.17 ~ 2.85 的范围内。利用 ImageJ 的 Fractal Box Count 插件对颗粒污泥固相部分二值图的分形维数进行计算,得到颗粒污泥的分形维数如图 5 所示,平均值为 2.58。一般来说,较低的分形值通常表示骨架结构更疏松、更多孔,因此传质能力更好,而较高的分形值表明颗粒污泥形成了更致密、更强的结构。

将分形维数与颗粒污泥的孔隙度进行相关性分析,从图 5(a)中看到,分形维数和孔隙度的变化趋势并不完全同步,其 p 值为 0.817,认为 2 个变量之间无显著相关性,究其原因是因为分形维数不仅受片层图像内孔隙多少的影响,还受孔隙分布是否规则的影响。因此根据 Xu 等^[25]的研究,采用弯曲分形维数表征流体流动通道中毛细管的弯曲程度,按式(2)对颗粒污泥的弯曲分形维数进行计算。

$$D_T = 1 + \frac{\ln(\tau_{ave})}{\ln(L_s/\lambda_{ave})} \quad (2)$$

式中: τ_{ave} 为平均迂曲度,是反映通道迂回曲折程度的参数,由 Avizo 软件对图像处理得到; L_s 为孔隙的平均宏观长度, mm; λ_{ave} 为孔隙的算数平均孔径, mm。计算结果与孔隙度的关系如图 5(b)所示,弯曲分形维数与孔隙度呈负相关, $r^2=0.853$,这也与 Yu 等^[26]的研究吻合。

由此可得,灰度图像的分形维数是孔隙多少和分布情况共同作用的结果,所以其与孔隙度并不一定保持线性递增的关系^[27-28],但弯曲分形维数与孔隙度具有良好的线性关系,这与 Othman 提出的由多孔介质的孔隙率和弯曲分形维数定义的渗透率分形模型相吻合^[29]。根据 Xu 等^[30]的研究,流动特性和弯曲度既取决于孔隙

介质的统计特征(孔隙度、分形维数),也取决于孔隙介质的形态特征(颗粒排列、孔隙连接)。孔隙度大,孔隙量多,但是孔隙分布集中、规则、连通性好,对应的灰度图像规则,分形维数较小;相反,孔隙少,但是孔隙分布离散、不规则、孔隙通道扭曲多变,那么对应的灰度图像就十分崎岖,分形维数就较高。

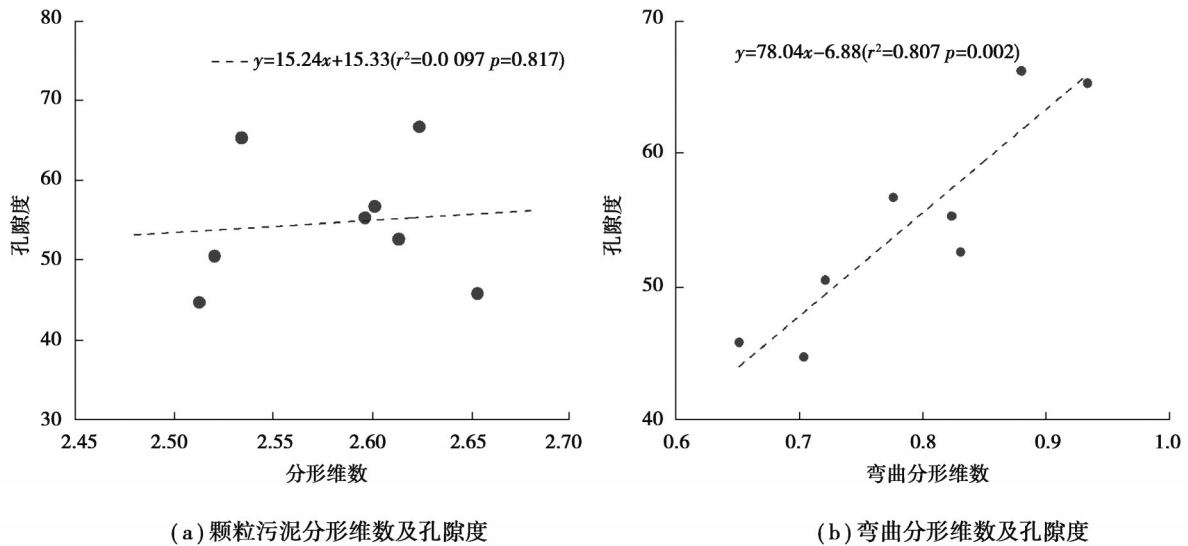


图5 颗粒污泥的几何分布

Fig. 5 Geometric distribution of granular sludge

2.4 颗粒污泥内部孔隙渗透性分析

2.4.1 颗粒污泥内部孔隙连通性分析

使用 Avizo 软件中的 Axis Connectivity 模块对二值化后的图像进行连通性分析,并将二值化图和连通性孔隙图做差量化运算,得到颗粒污泥中独立的孔隙分布。从图6中可以看到,颗粒污泥中的独立孔隙多分布于颗粒污泥表层,且多为小孔径的孔隙,这可能是颗粒污泥产生气泡时粘附在颗粒污泥表面产生的气穴。此外,在靠近晶核的位置也有较多分布,而且孔径较大的孔隙多分布于此,可能是菌胶团或细菌 EPS 粘合导致气孔阻塞,或因钙、铜等无机物的迁移过程使小孔隙堵塞所致^[31-33]。独立孔隙与全部孔隙体积比一般不超过10%,平均值为4.5%,这说明颗粒污泥内部孔隙连通性较好,为基质和产物的物质交换提供了条件。

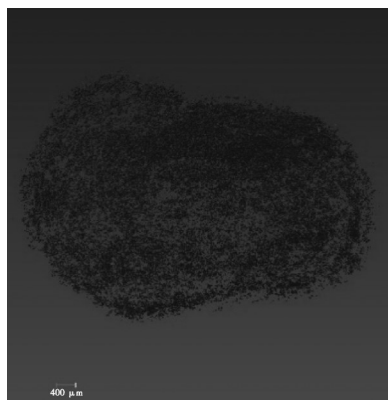
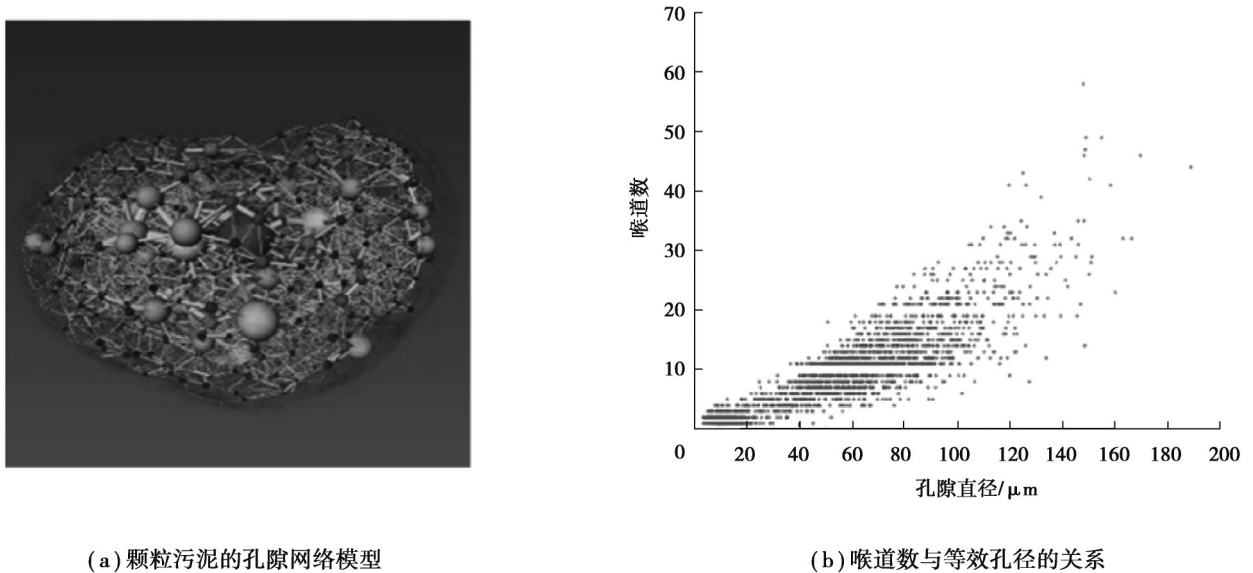


图6 独立孔隙三维结构

Fig. 6 Independent pore structure

为了更加简明直观地展示连通孔隙空间的结构,采用 Avizo 细化算法获取孔隙空间,建立了能够简化表征孔隙空间结构的等价孔隙网络模型(图7(a))。图中球体表征孔隙,管束表征喉道,球体体积与相应位置的孔隙体积近似相等^[34]。可以看到,与2.2中结果类似,体积较大的孔隙多分布在颗粒污泥中部,而体积小的微

孔隙则分布在表层和靠近晶核的核心层,导致了颗粒污泥区间孔隙度高斯分布的情况。另外,等效孔隙的配位喉道数与等效孔隙直径正相关(图 7(b)),具有类似肺部的结构^[35],小孔隙汇集到大孔隙再与外界连通,这说明颗粒污泥内部大孔隙具有良好的连通性,使得大孔隙在气体排出颗粒污泥的过程中起重要作用。



(a) 颗粒污泥的孔隙网络模型

(b) 喉道数与等效孔径的关系

图 7 颗粒污泥孔隙的连通性

Fig. 7 Pore connectivity of granular sludge

2.4.2 颗粒污泥的渗透性

颗粒污泥的渗透性代表了流体通过的能力,直接决定了其传质模式和传质效率^[36]。计算渗透性要求颗粒污泥内部必须存在相互连通的有效孔隙,才能提供相应渗流路径。因此,需对颗粒污泥孔隙空间做连通性测试,移除独立孔隙,才能保证计算顺利进行并较快收敛。采用 Avizo 软件的渗透率计算模块计算不可压缩 Navier-Stokes 方程(式(3)),来完成孔隙空间的标记图像的单相流微流动计算^[37],流体基本属性按常态下水的参数赋值。

$$\nabla P = \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] - \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right), \quad (3)$$

式中: \mathbf{u} 为流体速度; P 为流体压力, Pa; ρ 为流体密度即 998.2 kg/m^3 ; μ 为流体动力黏度即 $1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。模型中相对立的两面分别作为速度入口及压力出口边界,固相即颗粒污泥骨架视为不可渗透固体,无流体通过,其余流动边界及孔壁视为无滑移壁面(流速为 0)^[38],得到流线图如图 8 所示。

在计算结果中,由出口或入口边界上对流动速度进行积分,可以得到通过颗粒的体积流量,再代入达西定律公式中即可求得绝对渗透率^[39]。

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta P}, \quad (4)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为颗粒污泥截面积, m^2 ; L 为流体渗流的直线距离, m ; ΔP 为压差, Pa。据此分别计算了 x 、 y 、 z 3 个方向的渗流特性, x 、 y 、 z 方向上渗透率分别为 140.08 、 356.67 、 $325.72 \text{ }\mu\text{m}^2$, 平均值为 $274.16 \text{ }\mu\text{m}^2$ 。3 个方向上渗透率差距不大,可以认为颗粒污泥在渗透率上具有各向同性,与文献报道的好氧颗粒污泥各向同性结论一致^[40]。颗粒污泥在反应器中的实际沉降速度比根据斯托克斯方程计算得到的无渗透性刚体球快 4~8.3 倍^[41],这也说明颗粒污泥内部大量的孔隙导致颗粒污泥具有良好的渗透率,是颗粒污泥良好水力特性的关键因素。

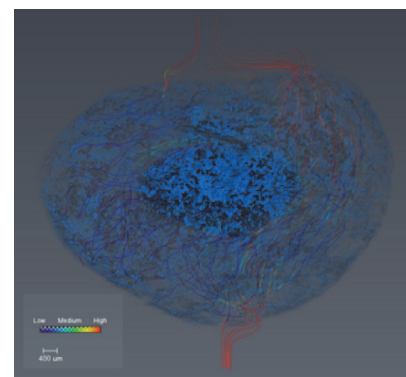


图 8 颗粒污泥渗流流线图

Fig. 8 Percolation streamline

根据得到的平均渗透率和2.4.1中得到的独立孔隙体积,得到图9。从图9中可以看出,颗粒污泥中独立孔隙体积比和渗透率成负相关趋势($r^2=0.734, p=0.007$),即独立孔隙体积比越大,其渗透率越小,这是因为独立孔隙由于其封闭特性,难以参与到气或水的交换过程中,从而降低颗粒污泥的渗透性。

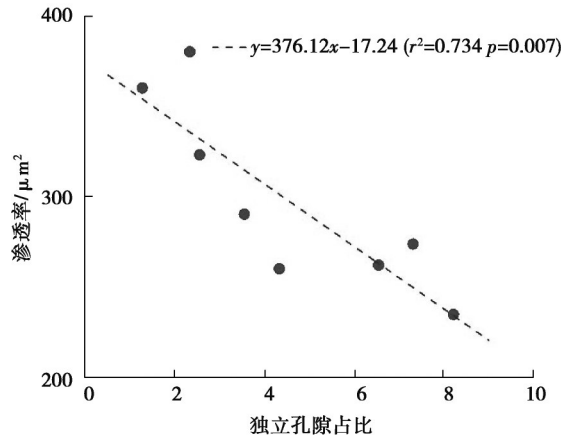


图9 颗粒污泥渗透率和独立孔隙占比

Fig. 9 Permeability and independent pore of granular sludge

根据 Kozeny-Carman 方程,多孔介质的渗透性应与其孔隙度呈正相关。

$$K = \frac{\phi^3}{c(1-\phi)^2 S^2}, \quad (5)$$

式中: c 为 Kozeny-Carman 常数; ϕ 为孔隙度; S 为固体相的比表面积。而本研究中所选取颗粒污泥的渗透性与孔隙度的相关性不显著($p=0.756$)。根据 Kozeny-Carman 方程,颗粒污泥的渗透性不仅与孔隙度相关,也与孔喉比相关,且孔喉比的影响程度更大^[42]。此外,颗粒污泥的渗透率还与孔隙连通性和表层孔隙占比相关^[43,44]。因此,为了得到空间分布与渗透率的相关关系,可能还需要进一步计算分析相同条件下颗粒污泥的其他相关因素^[45,46]。

2.5 三维孔隙结构对颗粒传质与结构稳定性的重要性

在 Anammox 颗粒污泥中,蛋白质和 α -多糖构成了颗粒污泥的主干,而活细菌和 β -多糖则主要分布在外层^[21,22]。据此推测,在颗粒污泥生长的过程中,EPS 和其他大分子组成的聚集体位于颗粒污泥外层形成缓冲层,Anammox 菌于其中增殖,故而结构比较致密。随着颗粒粒径增大,传质性能降低,导致颗粒内部基质缺乏,EPS 被消耗,甚至细菌发生内源性呼吸,产生空腔,导致中层孔隙度较大^[47];而靠近晶核的核心区域,由于缺乏基质,Anammox 活菌很少,产气过程很弱,核心处的矿物质等堆积形成较为致密的结构。通过构建颗粒污泥的三维结构模型,探究颗粒污泥孔隙的空间分布情况,可以侧面反映细胞增殖和 EPS 的变化,有助于理解污泥的颗粒化过程。

颗粒污泥的分形特性和多孔结构使其具有良好的渗透性,可以降低颗粒污泥受到的阻力^[48],使其在水力剪切作用下形成大小合适的颗粒^[49]。Wang 等^[50]的研究探究了分形维数和颗粒污泥沉降性能的对数正态分布关系,使利用分形维数预测颗粒沉降速度成为可能。Yu 等^[51]提出了孔隙分形维数和曲折分形维数是影响多孔介质中相对渗透率的两个重要机制。另外有研究提出分形法是经典立方体渗透率计算模型的重要补充^[52]。基于以上论述,本研究得到了弯曲分形维数与孔隙度的良好线性关系,颗粒污泥的分形维数由孔隙度和迂曲度共同作用。

颗粒污泥内部孔隙的连通性与其水力渗透性和产气过程密切相关。Xue 等^[53]的研究通过流变学分析阐明了 Anammox 污泥的漂浮特性,其内部空腔的存在会提高颗粒污泥的强度和结构稳定性,使颗粒污泥具有合适的密度,改善沉降性能,避免过多排泥。Tsui 等^[54]据此建立了颗粒污泥内部等效空腔体积与颗粒上浮过程之间的数学模型。但过高的独立孔隙占比会降低颗粒污泥的渗透性,从而影响传质过程^[55],降低污泥的脱

氮能力。本研究将独立孔隙体积与全部孔隙体积之比作为指标评估颗粒污泥孔隙的连通性,据此可以估算颗粒污泥的传质能力。

Fukumoto 等^[56]从微观力学的角度对土壤颗粒与渗流之间的相互作用进行耦合计算,发现临界水力梯度的测算值与理论值吻合良好。Wang 等^[57]利用 CFD 方法模拟颗粒型多孔介质的液体渗流过程,发现渗透率与驱动压力成正相关,且较大的孔隙可以增强流体压力,从而增大渗流速度。本研究利用 Avizo 软件对重建的颗粒污泥模型进行渗透性计算,并发现了其与孔隙连通性的相关性。

3 结 论

1)建立了 X 射线 CT 扫描颗粒污泥片层图像的三维重构方法,并发现了中间密集内外层稀疏的颗粒孔隙空间分布特征,为解读污泥上浮过程和颗粒污泥结构稳定性提供思路。

2)得到了颗粒污泥内部孔隙的分形维数及弯曲分形维数,发现了弯曲分形维数与颗粒孔隙度的负相关关系,并发现灰度图像的分形维数受颗粒的孔隙度及迂曲度共同影响。

3)利用 Avizo 软件对颗粒污泥的连通性进行分析,将独立孔隙体积与全部孔隙体积之比作为指标评估颗粒污泥孔隙的连通性,并建立了颗粒污泥孔隙网络模型,得出颗粒污泥内部等效孔径与其配位喉道数呈正相关。

4)对去除独立孔隙后的颗粒污泥进行绝对渗透率计算,颗粒污泥渗透率分布在 $200 \sim 400 \mu\text{m}^2$ 之间,并发现了渗透率与独立孔隙占比之间的负相关关系,为预测颗粒污泥的渗透率乃至探究基质输运过程提供了一种新思路。

参考文献

- [1] Li W, Zheng P, Ji J Y, et al. Floatation of granular sludge and its mechanism: a key approach for high-rate denitrifying reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 152: 414-419.
- [2] Tao J S, Xing J L, Wang D P, et al. Deciphering the genesis of anammox granular sludge floating from the perspective of microbial community[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 36: 101265.
- [3] Rao B Q, Pang H R, Fan F B, et al. Pore-scale model and dewatering performance of municipal sludge by ultrahigh pressurized electro-dewatering with constant voltage gradient[J]. *Water Research*, 2021, 189: 116611.
- [4] Rao B Q, Su X Y, Qiu S X, et al. Meso-mechanism of mechanical dewatering of municipal sludge based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Water Research*, 2019, 162: 161-169.
- [5] Qiu S X, Yang M, Xu P, et al. A new fractal model for porous media based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124890.
- [6] Li X J, Sung S. Development of the combined nitrification-anammox process in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor with anammox granules[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 281: 837-843.
- [7] Wang J, Zhang Z J, Zhang Z F, et al. Production and application of anaerobic granular sludge produced by landfill[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(12): 1454-1460.
- [8] Shen J F, Zhang Y, Ling C, et al. Comparative study on the fractal dimensions of soil particle size[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 267(2): 022039.
- [9] Xu Y, Lu Y Q, Zheng L K, et al. Effects of humic matter on the anaerobic digestion of sewage sludge: new insights from sludge structure[J]. *Chemosphere*, 2020, 243: 125421.
- [10] Tijani H I, Abdullah N, Yuzir A, et al. Rheological and fractal hydrodynamics of aerobic granules[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 186: 276-285.
- [11] van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, et al. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam[J]. *Water Research*, 2007, 41(18): 4149-4163.
- [12] Wheatland J A T, Bushby A J, Spencer K L. Quantifying the structure and composition of flocculated suspended particulate matter using focused ion beam nanotomography[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(16): 8917-8925.
- [13] Marone F, Stampanoni M. Regridding reconstruction algorithm for real-time tomographic imaging[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2012, 19(Pt 6): 1029-1037.
- [14] Phatak C, Gürsoy D. Iterative reconstruction of magnetic induction using Lorentz transmission electron tomography[J].

Ultramicroscopy, 2015, 150: 54-64.

- [15] Pelt D M, de Andrade V. Improved tomographic reconstruction of large-scale real-world data by filter optimization[J]. *Advanced Structural and Chemical Imaging*, 2017, 2(1): 17.
- [16] Wang H P, Yang Y S, Wang Y D, et al. Data-constrained modelling of an anthracite coal physical structure with multi-spectrum synchrotron X-ray CT[J]. *Fuel*, 2013, 106: 219-225.
- [17] 龙建武, 申铨京, 陈海鹏. 自适应最小误差阈值分割算法[J]. *自动化学报*, 2012, 38(7): 1134-1144.
Long J W, Shen X J, Chen H P. Adaptive minimum error thresholding algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(7): 1134-1144.(in Chinese)
- [18] Xu D D, Fan J H, Li W J, et al. Deciphering correlation between permeability and size of anammox granule: "pores as medium"[J]. *Water Research*, 2021, 191: 116832.
- [19] 刘向君, 朱洪林, 梁利喜. 基于微CT技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(4): 1133-1140.
Liu X J, Zhu H L, Liang L X. Digital rock physics of sandstone based on micro-CT technology[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(4): 1133-1140.(in Chinese)
- [20] Liu L, de Kock T, Wilkinson J, et al. Methane bubble growth and migration in aquatic sediments observed by X-ray μ CT[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 2007-2015.
- [21] Ni S Q, Sun N, Yang H L, et al. Distribution of extracellular polymeric substances in anammox granules and their important roles during anammox granulation[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, 101: 126-133.
- [22] Liu W L, Wu Y, Zhang S J, et al. Successful granulation and microbial differentiation of activated sludge in anaerobic/anoxic/aerobic (A^2O) reactor with two-zone sedimentation tank treating municipal sewage[J]. *Water Research*, 2020, 178: 115825.
- [23] Shi Z J, Guo Q, Xu Y Q, et al. Mass transfer characteristics, rheological behavior and fractal dimension of anammox granules: the roles of upflow velocity and temperature[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244: 117-124.
- [24] Mu Y, Yu H Q. Rheological and fractal characteristics of granular sludge in an upflow anaerobic reactor[J]. *Water Research*, 2006, 40(19): 3596-3602.
- [25] Xu P, Chen Z Y, Qiu S X, et al. An analytical model for pore and tortuosity fractal dimensions of porous media[J]. *Fractals*, 2021, 29(6): 2150156.
- [26] Yu B M. Fractal character for tortuous streamtubes in porous media[J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, 22(1): 158-160.
- [27] 宣科佳. 颗粒污泥和絮状污泥物理性质与分形特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
Xuan K J. Study on physical and fractal structure characteristics of floc sludge and granular sludge[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009. (in Chinese)
- [28] 王合明. 多孔介质孔隙结构的分形特征和网络模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Wang H M. The study on fractal characteristics and net-work model of pore-structure of porous media[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [29] Othman M R, Helwani Z, Martunus. Simulated fractal permeability for porous membranes[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34(9): 2452-2464.
- [30] Xu P, Zhang L P, Rao B Q, et al. A fractal scaling law between tortuosity and porosity in porous media[J]. *Fractals*, 2020, 28(2): 2050025.
- [31] Zhang J, Pan J Q, Zhao S S, et al. Calcium migration inside anaerobic granular sludge: evidence from calcium carbonate precipitation pattern[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 625: 126890.
- [32] Zheng X Y, Wang X N, Huang X, et al. Effects of Cu^{2+} on morphological structure, functional groups, and elemental composition of aerobic granular sludge[J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(2): 219-224.
- [33] Mu Y, Yu H Q, Wang G. Permeabilities of anaerobic CH_4 -producing granules[J]. *Water Research*, 2006, 40(9): 1811-1815.
- [34] Yu X L, Peng G Y, Lu S G. Characterizing aggregate pore structure by X-ray micro-computed tomography and a network model[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(4): 744-756.
- [35] Xu D D, Kangda, Yu T, et al. A secret of high-rate mass transfer in anammox granular sludge: "lung-like breathing"[J]. *Water Research*, 2019, 154: 189-198.
- [36] 周律, 李弢, SHIN Hangsik, 等. 污水生物处理中生物膜传质特性的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(8): 1580-1586.
Zhou L, Li G, Shin H, et al. Research progression mass transfer in biofilms for wastewater treatment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(8): 1580-1586.(in Chinese)
- [37] Noiriel C, Steefel C I, Yang L, et al. Effects of pore-scale precipitation on permeability and flow[J]. *Advances in Water*

- Resources, 2016, 95: 125-137.
- [38] Li K W, Horne R N. Numerical simulation without using experimental data of relative permeability[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2008, 61(2/3/4): 67-74.
- [39] Koponen A, Kataja M, Timonen J, et al. Simulations of single-fluid flow in porous media[J]. International Journal of Modern Physics C, 1998, 9(8): 1505-1521.
- [40] van den Berg L, Kirkland C M, Seymour J D, et al. Heterogeneous diffusion in aerobic granular sludge[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2020, 117(12): 3809-3819.
- [41] Li W W, Yu H Q. Physicochemical characteristics of anaerobic H₂-producing granular sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(18): 8653-8660.
- [42] 李传亮. 孔喉比对地层渗透率的影响[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(5): 78-79, 87, 116.
Li C L. Effect of pore-throat ratio on reservoir permeability[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(5): 78-79, 87, 116.(in Chinese)
- [43] Lafhaj Z, Goueygou M, Djerbi A, et al. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(4): 625-633.
- [44] Shin C H. Permeability variation analysis using the superficial diameter correlation with porosity change[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(5): 053108.
- [45] Gamage K, Screaton E, Bekins B, et al. Permeability-porosity relationships of subduction zone sediments[J]. Marine Geology, 2011, 279(1/2/3/4): 19-36.
- [46] Niya S M R, Selvadurai A P S. A statistical correlation between permeability, porosity, tortuosity and conductance[J]. Transport in Porous Media, 2018, 121(3): 741-752.
- [47] Jiang J K, Wu J, Zhang Z L, et al. Crater formation on anaerobic granular sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 300: 423-428.
- [48] Liu L, Sheng G P, Li W W, et al. Experimental and numerical analysis of the hydrodynamic behaviors of aerobic granules[J]. AIChE Journal, 2011, 57(10): 2909-2916.
- [49] Li W, Zheng P, Wang L, et al. Physical characteristics and formation mechanism of denitrifying granular sludge in high-load reactor[J]. Bioresource Technology, 2013, 142: 683-687.
- [50] Wang Z Y, Zheng P. Predicting settling performance of ANAMMOX granular sludge based on fractal dimensions[J]. Water Research, 2017, 120: 222-228.
- [51] Yu B M, Liu W. Fractal analysis of permeabilities for porous media[J]. AIChE Journal, 2004, 50(1): 46-57.
- [52] Liu G N, Liu J S, Liu L, et al. A fractal approach to fully-couple coal deformation and gas flow[J]. Fuel, 2019, 240: 219-236.
- [53] Xue H, Wang W G, Xie H C, et al. Deciphering the floatation reversibility of anammox sludge: a balance between sludge rheological intensity and external hydraulic shearing[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 151325.
- [54] Tsui T H, Ekama G A, Chen G H. Quantitative characterization and analysis of granule transformations: role of intermittent gas sparging in a super high-rate anaerobic system[J]. Water Research, 2018, 139: 177-186.
- [55] Yu T, Tian L L, You X C, et al. Deactivation mechanism of calcified anaerobic granule: space occupation and pore blockage[J]. Water Research, 2019, 166: 115062.
- [56] Fukumoto Y, Ohtsuka S. 3-D direct numerical model for failure of non-cohesive granular soils with upward seepage flow[J]. Computational Particle Mechanics, 2018, 5(4): 443-454.
- [57] Wang K, Tan W, Zhu Y K, et al. Liquid seepage in coal granular-type porous medium[J]. ACS Omega, 2020, 5(32): 20321-20334.

(编辑 郑洁)