

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.16.006

厌氧颗粒污泥孔隙堵塞原因与对策

周美洁, 曾卓, 张涵, 雷涛, 李思, 文豪, 杨睿涵
(西南交通大学 环境科学与工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 厌氧生物处理技术因其处理效率高、运行成本低而得到广泛应用,但仍然存在许多难题,如颗粒污泥钙化板结、颗粒污泥上浮流失和颗粒污泥解体破碎等,成为其工程应用的瓶颈。基于颗粒污泥、团聚体亚单位和微生物细胞等尺度,讨论了微生物细胞、胞外聚合物、内部孔隙对颗粒污泥传质功能的影响,从孔隙窄化、气体填充、无机晶体沉积、有机分子聚沉4个方面揭示了厌氧颗粒污泥孔隙堵塞的原因,提出了工艺优化、物理辅助技术和外源添加剂等对策,以缓解厌氧颗粒污泥孔隙堵塞,同时为优化厌氧生物处理工艺的运行性能提供理论依据和技术参数。

关键词: 厌氧生物处理; 厌氧颗粒污泥; 传质; 渗透性; 孔隙堵塞

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)16-0036-06

Causes and Countermeasures of Anaerobic Granular Sludge Pore Clogging

Zhou Meijie, Zeng Zhuo, Zhang Han, Lei Tao, Li Si, Wen Hao, Yang Ruihan
(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Anaerobic biological treatment technology has been widely used because of its high treatment efficiency and low operating cost. However, there are still many problems to be overcome, such as calcification of granular sludge, uplift and loss of granular sludge, and disintegration and fragmentation of granular sludge. These problems are the main bottlenecks that restrict the engineering application of anaerobic biological treatment technology. In this review, the effects of microbial cells, extracellular polymers, and internal pores on the mass transfer function of granular sludge are discussed from the different scales of granular sludge, agglomerated subunits and microbial cells. And the causes of pore blockage in anaerobic granular sludge are revealed from the aspects of pore narrowing, gas filling, deposition of inorganic crystals, and agglomeration and deposition of organic molecules. The countermeasures, such as process optimization, physically assisted technology, and exogenous additives are put forward to alleviate the pore blockage of anaerobic granular sludge. It provides theoretical basis and technical parameters for the optimization of the anaerobic biological treatment process.

Keywords: anaerobic biological treatment; anaerobic granular sludge; mass transfer; permeability; pore blockage

为实现碳达峰碳中和目标,污水处理更加注重高效节能、集成化和多样化^[1]。生物法被认为是从污水中去除污染物的低碳处理技术,现已广泛应用于各类污水的处理。与传统好氧处理技术相比,厌

氧生物处理技术具有有机负荷高、剩余污泥产量小、产生可回收能源沼气的特点。目前,大量以厌氧颗粒污泥为核心的高效厌氧颗粒污泥床反应器在污水处理中发挥了重要作用,如升流式厌氧污泥

床(UASB)、厌氧颗粒污泥膨胀床(EGSB)、内循环厌氧反应器(IC)等。

厌氧颗粒污泥内部的物质传递过程是制约其反应活性的关键因素。当厌氧颗粒污泥内部传质速率大于微生物对污染物降解的本征反应速率时,生化反应为限速步骤;当传质速率小于本征反应速率时,传质过程成为瓶颈。根据斯托克斯沉降公式,厌氧颗粒污泥的粒径越大,其沉降速率越大,但随着污泥颗粒体积的增大,物质传递路径延长且变得更加蜿蜒,这可能导致传质性能下降。厌氧颗粒污泥内部孔隙堵塞制约了颗粒污泥内部的物质传递。高钙废水中的厌氧颗粒污泥往往具有更大的粒径,沉积在外层的钙盐会堵塞厌氧颗粒污泥内部的毛细孔隙^[2]。在厌氧生物反应器运行期间,气泡的产生和释放处于动态平衡状态,当气泡产生速率高于气泡释放速率时,厌氧颗粒污泥内部孔隙被气体挤占而形成空腔。以上厌氧颗粒污泥的结构变化均会导致颗粒污泥传质阻力的增加。

为此,本文详细介绍了厌氧颗粒污泥的组成结构与传质功能构效关系,以揭示厌氧颗粒污泥内部孔隙堵塞原因,并提出厌氧颗粒污泥孔隙堵塞缓解对策。本综述有助于深入了解厌氧颗粒污泥的传质过程,优化厌氧生物反应器的运行性能。

1 厌氧颗粒污泥的结构与组成

厌氧颗粒污泥主要由微生物细胞、胞外聚合物(EPS)和孔隙组成。其中,微生物细胞是发挥降解污染物功能的核心单元。EPS是构建颗粒骨架的胞外大分子有机物,具有吸附、传质和辅助降解等功能,主要由蛋白质和多聚糖组成;另外,EPS还含有少量的脂类和核酸,其含量受废水水质和运行条件影响较大。除微生物细胞和EPS所占体积外,其余被气体或液体填充的空间为内部孔隙,是液体和气体流动的通道,在基质和代谢产物的运输传递中起关键作用^[3]。

厌氧颗粒污泥的形状极不规则,内部孔隙分布混杂,但具有一定的自相似性,可用分形理论来表征。高分形值意味着颗粒污泥内部孔隙较小,结构紧凑,传质能力较差;低分形值表示颗粒污泥骨架结构疏松多孔,传质能力较好^[4]。Mu等^[5]利用分形维数表征颗粒污泥的空间填充能力,发现UASB反应器中颗粒污泥的分形值通常为2.17~2.85。厌氧

颗粒污泥生长过程中,EPS和其他大分子组成的聚集体位于颗粒污泥外层并形成缓冲层,微生物于其中增殖,故而形成了结构致密的颗粒污泥。Ni等^[6]发现蛋白质和 α -多糖构成了颗粒污泥的核心,而活细菌和 β -多糖则主要分布在颗粒污泥外层。冷济轩等^[4]基于同步辐射技术的X射线显微断层扫描成像技术对EGSB反应器中厌氧氨氧化颗粒污泥内部三维结构进行重建,发现颗粒污泥具有中间密集、内外层稀疏的孔隙空间分布特征。

厌氧颗粒污泥中的开孔、孔道和内腔统称为孔隙^[3]。厌氧颗粒污泥表面常可见开孔,开孔是颗粒污泥进行物质交换的“大门”。孔道起到通道的作用,连接开孔和内腔,是厌氧颗粒污泥中流体的运输通道。厌氧颗粒污泥的核心存在大量的内腔,其形状类似蜂窝^[5],可能是颗粒污泥内部气体的积聚空间。

根据孔径大小,厌氧颗粒污泥内部孔隙可分为3类:孔径 $d \leq 0.1 \mu\text{m}$ 为微孔, $0.1 \mu\text{m} < d < 1.0 \text{mm}$ 为毛细孔,孔径 $d \geq 1.0 \text{mm}$ 为大孔^[7]。大孔隙有利于底物的输送,与平流密切相关,对颗粒污泥渗透性贡献最大。毛细孔和微孔则与毛细管功能、滞留、基质吸力、扩散和化学反应相关。根据包含惯性项的博桑奎特(Bosanquet)公式,大孔径毛细孔隙的入口处存在阻滞力;小孔径、短通道的毛细孔隙在渗吸过程中受惯性影响;小孔径、长通道的毛细孔隙开始出现黏性阻力。微孔中的结合水不具有流动性,不受重力和压力的影响^[7]。

2 厌氧颗粒污泥内部传质过程

厌氧颗粒污泥内部的传质过程可分为分子扩散和对流扩散两种。分子扩散是分子间自发混合,以浓度差为驱动力的分子迁移过程。分子扩散速率计算公式可由修正的非克定律表示:

$$F_{\text{MD}} = 4\pi R^2 D_{\text{M}} C \frac{\varepsilon}{\phi} \quad (1)$$

式中: F_{MD} 为分子扩散速率, mg/s ; R 为颗粒的半径, mm ; D_{M} 为底物在水中的扩散率, mm^2/s ; ϕ 为从表面到颗粒中心的扩散渗透厚度, mm ; C 为主体液体中的底物浓度, mg/L ; ε 为孔隙率。

对流传质指两股有限互溶的运动流体间的物质传递。颗粒污泥的渗透性代表流体通过的能力,这直接决定了颗粒污泥内部的传质方式^[8]。对于具有良好渗透性的颗粒,底物可以穿透颗粒内部,发

生对流传质。否则,底物只能通过浓度梯度驱动的分
子扩散传递。颗粒污泥中对流传质效率远高于
分子扩散传质效率,因此渗透性是厌氧颗粒污泥
实现高效协同传质的重要前提与物理保障。颗粒
污泥的渗透性可用流体收集效率指示。流体收集
效率指流体通过颗粒的比率,计算公式如下:

$$\eta = \frac{9(\xi - \tanh \xi)}{2\xi^3 + 3(\xi - \tanh \xi)} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{d}{2\sqrt{k}} \quad (3)$$

$$k = \frac{d^2}{18} \frac{3 - 4.5\delta + 4.5\delta^5 - 3\delta^6}{\delta^3(3 + 2\delta^5)} \quad (4)$$

$$\delta = \sqrt[3]{1 - \varepsilon} \quad (5)$$

式中: η 为颗粒流体收集效率; ξ 为渗透率; d 为
颗粒直径,mm; k 为渗透系数,mm²; δ 为孔隙系数。

通过 η 值可以计算颗粒污泥的对流扩散速率,
具体公式^[9]如下:

$$F_{cd} = 2\pi R^2 \eta CU \quad (6)$$

式中: F_{cd} 为对流扩散速率,mg/s; U 为颗粒的沉
降速度,mm/s。

根据分子扩散和对流扩散计算公式,分子扩散
时间与距离的平方成正比。对流传质效率比分子
扩散传质效率高1~2个数量级以上^[8]。具有良好透
透性的颗粒污泥指示了液体可穿透内部发生对流
传质,反之,基质只能通过分子扩散在颗粒污泥内
部传递,其传质效率会大幅下降。

3 厌氧颗粒污泥内部孔隙堵塞原因

3.1 孔隙窄化

厌氧颗粒污泥的内部孔隙随着污泥生长,逐渐
被增加的细胞或EPS侵占,颗粒污泥内部与表层孔
隙变得狭窄而易被堵塞^[2]。Veiga等^[10]发现粒径为
0.6~5.0 mm的厌氧颗粒污泥随着粒径的增加,孔隙
率从93%降至64%,EPS中的多糖(PS)和蛋白质
(PN)在污泥挥发性固体成分(VS)中的含量分别从
4.9和9.0 mg/g增至15.9和38.8 mg/g。由于微生
物分泌的EPS能够可逆地吸收和渗出水或生物体
液,体积膨胀的EPS堵塞内部孔隙,使颗粒污泥内
部形成孤立或死端的孔隙空间,并显著减少颗粒污
泥内部通道的连接。在好氧颗粒污泥和厌氧氨氧化
颗粒污泥中同样发现大粒径颗粒污泥内部孔隙堵
塞现象。Xu等^[7]比较了不同粒径厌氧氨氧化颗粒
污泥的组成结构和渗透性,发现随着粒径的增大,

颗粒污泥的孔隙结构发生明显变化,最终呈现表层
致密、内部稀疏的结构特征。颗粒污泥表层孔隙被
堵塞,其渗透性恶化,当颗粒污泥直径>1.5 mm时,
其渗透性近乎消失。由于细胞残骸和胞外高分子
物质堆积,毛细孔隙通道变窄,易造成堵塞。

有机负荷率(OLR)是影响颗粒污泥形成的关键
因素。王梦一等^[11]发现UASB反应器内OLR从4
kg/(m³·d)增至8 kg/(m³·d),颗粒污泥平均粒径从
0.7 mm增至1.92 mm,污泥EPS在VS中的含量从
103.49 mg/g增至283.85 mg/g。Wu等^[12]采用UASB
反应器处理淀粉废水,当OLR为4 kg/(m³·d)时,反
应器的顶部和底部均出现直径为2.8~4.0 mm的大
颗粒污泥,当OLR增至8 kg/(m³·d)时,颗粒污泥中
紧密附着型胞外聚合物(TB-EPS)在VS中的含量增
至223.8 mg/g。Tsui等^[13]研究发现OLR达到8.64
kg/(m³·d)时,在颗粒硫酸盐还原向上流污泥床中形
成了高强度、低孔隙率的颗粒污泥。高OLR会刺激
异养微生物迅速增殖,且细胞快速分泌EPS。

厌氧反应器内部上升流产生的水力剪切力,对
控制厌氧颗粒污泥EPS积累和粒径发展具有重要作
用。当厌氧系统中混合条件不足,特别是在剪切速
率<4.2 s⁻¹时,微生物产生的松散附着型胞外聚合
物(LB-EPS)不会被迅速剪切,而是积聚在絮凝体周
围,当LB-EPS/TB-EPS比值>0.25时会促进内部和
表层孔隙易被堵塞的颗粒污泥形成^[14]。厌氧颗粒
污泥内部和表层孔隙堵塞后,基质从液相向功能菌
的传质过程会失败,从而导致微生物死亡,颗粒污
泥中形成大量蜂窝状内腔,结构变得松散,在水力
剪切力作用下易解体破碎。

3.2 气体填充

厌氧颗粒污泥的内部孔隙分布具有级联结构
特征,与外部相连的较大孔隙逐级收敛为内部的毛
细孔隙。颗粒污泥内部孔隙中毛细孔(孔径为0.10
μm~1.00 mm)占比可达99%以上^[7],毛细管效应在
孔径为0.10~1.00 mm时逐渐显现,在孔径为0.05~
0.10 mm时变强,在孔径为5.00~50.00 μm时达到
最大^[15]。产甲烷菌、产氢细菌和发酵细菌等微生物
产生的过饱和CH₄、CO₂和H₂气体填充在细胞周围
的毛细孔中,由于较强的毛细效应,气体堵塞毛细
孔。只有气体的内部压力超过临界压力时,毛细孔
内的气体才会从孔隙中挤压出来,推开菌胶团形成
表面微泡^[7]。Lu等^[16]发现,EPS会堵塞厌氧颗粒污

泥表面气孔,微生物产生的气体无法及时排出,颗粒污泥内部孔隙被气泡占据,污泥表观密度下降,从而引起颗粒污泥上浮。

厌氧颗粒污泥内部孔隙被气体堵塞主要是不利的操作条件所致,如混合不良、基质过载、低温或其他环境因素。在高硝态氮负荷[如 $8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$]条件下,微生物消耗更多的氮源进行反硝化作用,产生 N_2 、 N_2O 、 NO 等气体,当这些气体达到饱和溶解度后形成气泡,滞留于颗粒污泥内部孔隙^[17]。Lu等^[16]发现微生物产生的气体释放阻力随着颗粒污泥粒径的增大而增大,导致大粒径颗粒污泥内部孔隙较高的气体积聚。研究发现,厌氧颗粒污泥颗粒内部的 CH_4 浓度随着温度的增加而单调增大。若温度升高,微生物产生的气体更易达到饱和,气泡积聚在颗粒污泥内部封闭性孔隙中,随着更多的气泡被捕获或附着在颗粒污泥内部孔隙,逐渐形成空腔。

3.3 无机晶体沉积

Ca是微生物的必需营养元素,在维持细胞结构和促进生理活性方面起着不可替代的作用。 $80 \sim 150 \text{ mg/L}$ 的 Ca^{2+} 浓度可刺激颗粒污泥形成^[18],但处理高钙废水时,如 Ca^{2+} 浓度达到 $780 \sim 1\,560 \text{ mg/L}$ 的造纸厂废水,高 Ca^{2+} 浓度会造成严重的钙沉淀和胶结,导致钙化颗粒污泥产生^[4]。 Ca^{2+} 在毛细孔隙微域中形成过饱和环境,附着并沉积在毛细孔隙表面,占据流体流动空间,导致其孔隙率降低、比表面积减小。Yu等^[2]发现,在 Ca^{2+} 浓度为 $1\,385 \text{ mg/L}$ 条件下形成的钙化颗粒污泥孔隙率相比于正常颗粒污泥下降13%。颗粒污泥核心区域的高pH环境会促进钙盐的沉淀,形成“钙核”。 Ca^{2+} 可与 CO_3^{2-} 或 PO_4^{3-} 反应生成沉淀,这些沉淀物如“骨骼”在颗粒污泥中充当支撑结构。同时,钙盐占据颗粒污泥中可用于细胞定殖的空间。Chen等^[19]发现,UASB反应器长期在 Ca^{2+} 为 $2\,000 \text{ mg/L}$ 的条件下运行,厌氧颗粒污泥出现钙化,表面被方解石覆盖,厚度为 $500 \sim 600 \mu\text{m}$,钙盐沉淀的覆盖包裹是传质通道堵塞的主要原因。

3.4 有机分子聚沉

废水中的高盐度会抑制微生物代谢活性,从而影响颗粒污泥内部孔隙结构。王立东等^[20]在 OLR 为 $1.6 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、表面气体流为 1.70 cm/s 条件下,对比盐度分别为 1.0%、2.5%、5.0% 的 3 个反应器

中厌氧颗粒污泥结构差异,发现高盐度会降低颗粒污泥的孔隙率。在厌氧颗粒污泥孔隙中,溶解性蛋白质胶体在高盐度环境下可产生盐析效应,从而胶结堵塞毛细孔隙。蛋白质盐析能力可用感胶离子序(霍夫曼序列)来表征,霍夫曼序列是将离子促使蛋白质析出(即盐析)的能力由高到低排序,或将离子促使蛋白质溶解(即盐溶)的能力由低到高排序。

强电解质(NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 等)对水分子的亲和力大于蛋白质,蛋白质胶体周围水化膜被破坏。同时,盐会改变溶液离子强度,中和蛋白质表面的电荷,降低蛋白质的溶解度,最终蛋白质分子间相互聚集而沉淀析出。根据霍夫曼序列推测, NaCl 溶于水电离出 Na^+ 在盐析现象中发挥着主要作用, Na^+ 水化半径小,靠近胶体质点,致使蛋白质变能力降低,蛋白质结构稳定性增强,进而发生蛋白质盐析现象,析出的蛋白质晶体会占据颗粒污泥内部孔隙空间,造成颗粒污泥内部孔隙堵塞。

4 厌氧颗粒污泥内部孔隙堵塞解决措施

4.1 优化工艺参数

微生物过度生长和EPS分泌导致的颗粒污泥内部孔隙窄化,可通过降低 OLR、提高上升流速等方式控制微生物生长,以改善孔隙堵塞情况。Wu等^[12]发现,UASB反应器中 OLR 由 $8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 降至 $4 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,颗粒污泥中TB-EPS含量由 223.8 mg/g 降至 62.0 mg/g 。Tsui等^[21]在UASB反应器中引入间歇性气体喷射,以抑制颗粒表面的生物膜过度生长,在 OLR 为 $13.31 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 长期运行条件下,没有出现污泥床板结粘连现象。Xue等^[22]通过在EGSB反应器中安装间歇运行的搅拌器,保持反应器内部相对较高的剪切力,促进了颗粒污泥内部气体的释放。

4.2 物理辅助技术

对于无机物或有机物堵塞内部孔隙的情况,采用研磨或超声波振荡等物理辅助技术可使堵塞物变得松散并排出,恢复厌氧颗粒污泥的传质性能。研究发现,通过机械研磨将大粒径颗粒污泥破碎成小粒径颗粒污泥,可一定程度上改善颗粒污泥的传质性能。低强度超声不会损伤细胞,还能有效改变颗粒污泥结构,是一种有效缓解颗粒孔隙堵塞的方法。Xu等^[23]发现,经过能量密度为 $5.6 \text{ kJ}/(\text{g} \cdot \text{cm}^2)$ 的超声处理后,厌氧颗粒污泥中孔径 $>50 \mu\text{m}$ 的微孔

比例增加。低强度超声可破坏EPS中PN的氢键,使EPS空间结构松散,有利于EPS的剥离和溶解,使孔隙扩张和疏通,从而缓解颗粒污泥内部孔隙的堵塞。

4.3 外源添加剂

添加载体介质(核)是一种有效促进颗粒污泥形成并改善其传质性能的方法。Zhou等^[24]向UASB反应器中投加固相胡敏素(HM),通过扫描电镜观察发现投加HM后厌氧反应器中的颗粒污泥孔隙明显多于未投加组。Xue等^[25]向颗粒污泥系统中添加磷以改善颗粒污泥性能,研究发现,磷浓度为22.8 mg/L系统中EPS含量是磷浓度为5.7 mg/L系统中EPS含量的28%,Ca-P沉淀限制了EPS的过度产生。

Lian等^[26]发现,通过增加进水磷浓度和添加H⁺均能实现反应器中Ca²⁺截留量的减少。UASB反应器中50 mg/L的磷酸盐浓度降低了方解石的结晶度,反应器运行90 d后,Ca²⁺截留量降至100 mg/L以下。该研究同时发现,当厌氧反应器的pH降到6.6~6.7时,反应器中观察到净Ca损失,这归因于酸化环境下EPS质子化和颗粒表面酸化导致的扩散位阻增加和沉淀位置加深,这些因素均限制了Ca²⁺的扩散。但当pH<5.0时,厌氧反应器面临严重的污泥解体 and 生物量损失。

综上所述,颗粒污泥孔隙堵塞对策及其优缺点如表1所示。

表1 颗粒污泥孔隙堵塞对策比较分析

对策	优点	缺点
降低有机负荷	操作简单	投资运行费用高、工程可行性较低
提高剪切力	无需使用化学药剂、对环境友好	需要额外投资设备、操作和维护成本高
机械研磨	操作简单、管理方便	处理时间长且成本高
低强度超声	对细胞温和、可有效调节颗粒污泥结构	操作复杂、电耗高、费用昂贵
外源添加剂	操作简单、能快速缓解孔隙堵塞	药剂种类及使用浓度难以确定

5 结语

厌氧颗粒污泥内部孔隙堵塞造成的污泥钙化、污泥上浮和污泥解体是厌氧生物处理工艺遇到的重要挑战。微生物过度生长、EPS累积、气体填充、无机晶体沉积和有机分子聚沉造成厌氧颗粒污泥

内部或表层孔隙堵塞,限制基质向微生物细胞的传质,也限制了微生物产物的向外运输,导致微生物生长代谢受到抑制,进而引起厌氧反应器处理效率降低,甚至引发运行障碍。通过增强混合、加入外源添加剂等方法可缓解颗粒污泥内部孔隙堵塞,从而提高厌氧生物反应器的运行效能和稳定性。今后宜针对颗粒污泥孔隙研究的不足,揭示颗粒污泥内部与表层孔隙堵塞原因,探明颗粒污泥孔隙堵塞对污泥活性和结构的影响机理,研发控制厌氧颗粒污泥孔隙堵塞的有效技术,为多工况下厌氧生物处理工艺的高效稳定运行提供理论依据和技术参数。

参考文献:

- [1] 刘智晓. 碳中和视角下城市可持续排水系统构建及评估指标体系[J]. 中国给水排水, 2022, 38(16): 1-15.
- [2] 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.
- [3] Xue Y, Ma H Y, Li Y Y. Anammox-based granulation cycle for sustainable granular sludge biotechnology from mechanisms to strategies: a critical review [J]. Water Research, 2023, 228: 119353.
- [4] 冷济轩, 傅慧敏, 晏鹏, 等. 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[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(12): 1-11.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Dong X Q, Wang S, Geng Z F, et al. Experimental and numerical analysis on the hydrodynamic behaviors of permeable microbial granules [J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(8): 1462-1472.
- [9] Afridi Z U R, Wu J, Li Z H, et al. Novel insight of

- spatial mass transfer conditions of upflow anaerobic reactor[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204: 390-398.
- [10] Veiga M C, Jain M K, Wu W, et al. Composition and role of extracellular polymers in methanogenic granules [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(2): 403-407.
- [11] 王梦一, 刘爽, 李文哲, 等. 有机负荷对 UASB 产氢反应器中颗粒污泥的影响研究[J]. *农机化研究*, 2020, 42(11): 229-234.
- [12] Wu J, Jiang B, Feng B, et al. Pre-acidification greatly improved granules physicochemical properties and operational stability of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treating low-strength starch wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 122810.
- [13] Tsui T H, Ekama G A, Chen G H, et al. 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.
- [14] Wang B, Wu D, Ekama G A, et al. Optimizing mixing mode and intensity to prevent sludge flotation in sulfidogenic anaerobic sludge bed reactors [J]. *Water Research*, 2017, 122: 481-491.
- [15] 黄旭德, 李明. 孔隙弹性与油气预测[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [16] Lu H F, Zheng P, Ji Q X, et al. The structure, density and settlability of anammox granular sludge in high-rate reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 312-317.
- [17] Wang F, Jin X B, Yang S S, et al. A control strategy for promoting the stability of denitrifying granular sludge in upflow sludge blankets [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(1/4): 52-59.
- [18] Chen W D, Xu D D, Li W J, et al. The evolution of calcified anaerobic granular sludge bed informs the deep insight into its agglomeration process [J]. *Water Research*, 2024, 261(11): 122035.
- [19] Chen L L, Ji Y T, Yu Z D, et al. Uncover the secret of granule calcification and deactivation in up-flow anaerobic sludge bed (UASB) reactor with long-term exposure to high calcium [J]. *Water Research*, 2021, 189(10): 116586.
- [20] 王立东, 李志华, 王晓昌, 等. 含盐量对好氧颗粒污泥结构及处理效能的影响[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(11): 19-22.
- [21] Tsui T H, Chen L, Hao T W, et al. A super high-rate sulfidogenic system for saline sewage treatment [J]. *Water Research*, 2016, 104: 147-155.
- [22] 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*, 2021, 806: 151325.
- [23] Xu D D, Fan J H, Chen W D, et al. Insights into the enhanced effect of low-intensity ultrasound on anammox granular sludge by relieving the embolism [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 137470.
- [24] Zhou N L, Xiao Z X, Chen D W. Formation/characterization of humin-mediated anaerobic granular sludge and enhanced methanogenic performance [J]. *Bioresource technology*, 2024, 399: 130603.
- [25] Xue Y, Ma H Y, Kong Z, et al. Bulking and floatation of the anammox-HAP granule caused by low phosphate concentration in the anammox reactor of expanded granular sludge bed (EGSB) [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 310: 123421.
- [26] Lian H, Liu S, Liu Z X, et al. Retardation of sludge calcification by blocking the transportation of Ca^{2+} into anaerobic granular sludge [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 663: 131112.

作者简介:周美洁(2002—),女,四川资阳人,硕士研究生,主要研究方向为废水处理生物反应器。

E-mail:3129063302@qq.com

收稿日期:2024-07-25

修回日期:2024-09-12

(编辑:丁彩娟)