

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.05.013

# 不同粒径厌氧颗粒污泥产气作用对沉降性能的影响

曹宇浩, 管锡珺, 陈计洋, 夏丽佳  
(青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 取粒径为0.3~0.5、0.5~1、1~1.5、1.5~2、>2 mm的厌氧颗粒污泥(记作R1~R5),测定孔隙率和产甲烷活性,计算其在不同粒径下的理论沉降速度,并与其在清水柱和营养柱中的实际沉降速度进行对比。结果表明,孔隙率与颗粒粒径呈正相关,适当的孔隙率有利于颗粒污泥沉降,而过大的孔隙率会影响污泥密度,降低沉降性能。粒径为1.5~2 mm的颗粒污泥产甲烷活性最强,污泥产气会导致气泡黏附在污泥表面,从而降低沉降速度。中间粒径颗粒污泥(R3、R4)的沉降速度受产气作用的影响最大,其中R4颗粒污泥在营养柱与清水柱中的速度沉降差值最大达到-27 m/h。

**关键词:** 厌氧颗粒污泥; 粒径; 沉降速度; 孔隙率; 产甲烷活性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0082-05

## Effect of Biogas Production on Settling Performance of Anaerobic Granular Sludge with Different Particle Sizes

CAO Yu-hao, GUAN Xi-jun, CHEN Ji-yang, XIA Li-jia

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology,  
Qingdao 266033, China)

**Abstract:** This paper measured the porosity and methanogenic activity of anaerobic granular sludge with particle sizes of 0.3–0.5 mm, 0.5–1 mm, 1–1.5 mm, 1.5–2 mm and greater than 2 mm (abbreviated as R1–R5), calculated the theoretical settling velocity of the sludge with different particle sizes, and compared the actual settling velocity in a clean water column and a nutrient solution column. There was a positive correlation between porosity and particle size, and appropriate porosity was conducive to the settlement of granular sludge. However, excessive porosity affected the sludge density and reduced the settling performance. The granular sludge with particle size of 1.5–2 mm had the maximum methanogenic activity, and the biogas production of the sludge resulted in bubbles to adhere to the surface of the sludge, thereby reducing the settling velocity. The settling velocity of the granules with intermediate particle size (R3 and R4) was most affected by biogas production, and the maximum settling velocity difference between the granular sludge from R4 in the nutrient solution column and the clean water column was -27 m/h.

**Key words:** anaerobic granular sludge; particle size; settling velocity; porosity; methanogenic activity

厌氧生物法因其高效性和经济性在处理高浓度有机废水时被广为使用,其优势在于既可有效地降

通信作者: 管锡珺 E-mail: guanxj2004@qq.com

低水中有机物的含量,又可回收沼气进行二次利用,同时与好氧法相比节约能耗。厌氧反应器能否稳定高效地运行取决于是否能培养出具有高产甲烷活性和优良沉降性能的颗粒污泥<sup>[1-2]</sup>,作为多种厌氧菌聚集在一起生成的密实微生物团粒,厌氧颗粒污泥具有沉降性能好、固体滞留时间长、产气率高等特点。厌氧颗粒污泥具有很多孔隙,可作为营养物质进入颗粒内部和气体逸出的通道。朱邦辉<sup>[3]</sup>认为,厌氧颗粒污泥的物理化学性质与其粒径有关,粒径越大,无机离子含量越少,有机成分含量越大。冒盛鑫<sup>[4]</sup>认为,厌氧颗粒污泥粒径与胞外聚合物(EPS)含量呈正相关,且对蛋白质(PN)影响明显。An等<sup>[5]</sup>利用粒径为0.5~1、1~1.5、>1.5 mm(记作M1~M3)的Anammox颗粒污泥进行了厌氧氨氧化活性测试,证明M2的综合性能最好。金涛等<sup>[6]</sup>发现,内循环厌氧反应器上部的颗粒污泥沉降性能比下部差,且沉降速度与粒径呈正相关,粒径越大沉降速度差异越明显。

沉降速度反映了厌氧颗粒污泥沉降性能的好坏。一般认为沉降速度取决于颗粒的粒径和密度,而厌氧颗粒污泥产气对沉降速度的影响却鲜有报道。在进行厌氧颗粒污泥快速培养实验过程中发现,颗粒表面黏附的气泡对沉降速度产生了影响,由此计算了不同粒径厌氧颗粒污泥理论沉降速度,进行了清水柱、营养柱沉降速度实验,同时测定了颗粒污泥的孔隙率和产甲烷活性(SMA),探寻了造成颗粒污泥理论沉速与清水柱和营养柱中沉速不同的影响因素,探究颗粒污泥产气作用和孔隙率对沉降速度的影响,旨在为提高厌氧颗粒污泥沉降性能及新型厌氧反应器设计提供思路。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验装置

颗粒污泥沉降速度实验采用两组有机玻璃沉降柱,尺寸为 $\varnothing 0.08 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,顶部带有螺旋塞以提供厌氧环境。两个沉降柱分别通入蒸馏水和模拟厌氧反应器的营养液。营养液以醋酸为基质,N、P元素分别由 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 和 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 提供,保持碳、氮、磷的质量比为200:5:1,同时投入一定量的 $\text{NaHCO}_3$ 作为缓冲溶液,营养液中还加入了适量Na、Mg、Zn等微量元素,为微生物细胞合成提供能量<sup>[7]</sup>。

### 1.2 污泥来源

厌氧颗粒污泥取自启动成功的内循环厌氧反

应器底部,进行实验的污泥处于成熟期(125 d)。取出污泥后,先利用磷酸缓冲液冲洗,保护颗粒污泥不被破坏,再利用孔径为2、1.5、1、0.5、0.3 mm的不锈钢标准筛进行筛分,得到粒径为0.3~0.5、0.5~1、1~1.5、1.5~2、>2 mm(记作R1~R5)的颗粒污泥。

### 1.3 检测项目及方法

采用重量法测定污泥的MLSS及MLVSS,参照文献[8]测定颗粒污泥密度,参照文献[9]测定孔隙率,参照文献[10]测定颗粒污泥产甲烷活性。

颗粒污泥沉降速度的测定步骤:用接种环取不同粒径的颗粒污泥10~20个,将其转移到沉降柱中,记录污泥到柱底的时间 $t$ 和高度 $h$ ,根据 $v=h/t$ 求得颗粒污泥的平均沉降速度。测定营养柱颗粒污泥沉降速度时,分批将不同粒径的厌氧颗粒污泥接种至营养柱后,通入 $\text{N}_2$ (3 min)营造厌氧环境,之后每隔2 h倒置沉降柱,取10 cm为缓冲区,降低下落时初速度对颗粒污泥沉降速度的影响,测定不同时间颗粒污泥的平均沉降速度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 厌氧颗粒污泥的物理性质

经不锈钢标准筛筛分后,R1~R5的平均粒径分别为0.42、0.81、1.26、1.8和2.1 mm,孔隙率分别为0.32、0.41、0.45、0.49、0.51,MLVSS/MLSS分别为0.65、0.66、0.71、0.75、0.77,与其他学者的研究结果接近<sup>[3-4,11-12]</sup>。颗粒污泥密度分别为1.03、1.04、1.06、1.09、1.1 g/cm<sup>3</sup>,Tang等<sup>[13]</sup>测得粒径分布在1.33~2.50 mm(平均粒径为1.65 mm)的厌氧颗粒污泥平均密度为1.06 g/cm<sup>3</sup>,与本研究接近;王姣等<sup>[14]</sup>测得粒径在0.5~1、1~1.5、>1.5 mm的厌氧颗粒污泥密度分别为1.12、1.14、1.15 g/cm<sup>3</sup>,较本研究要高,原因可能是颗粒污泥孔隙率不同导致质量有差异。总体来说,随着粒径的增长,污泥的密度和孔隙率也随之增加,但R4和R5的密度几乎相同,说明当粒径增加到一定程度时,由于内部孔隙逐渐增大,导致密度不再增加。MLVSS/MLSS值随着颗粒污泥粒径的增大而增加,说明污泥内部有机物成分所占比例逐渐增大,而有机物含量则会对污泥活性产生影响。

### 2.2 粒径对厌氧颗粒污泥产甲烷活性的影响

经计算,R1~R5厌氧颗粒污泥产甲烷活性分别为210、290、325、360、336 mL/(gVSS·d)。可以看出,随着粒径由0.3~0.5 mm(R1)增加到1.5~2 mm

(R4), 颗粒污泥产甲烷活性不断增加。当粒径达到 2 mm 以上 (R5) 时, 产甲烷活性出现下降, 降低了 6.6%。可见, 对于产甲烷活性而言, 颗粒污泥的粒径并不是越大或越小越好, 只有适宜的粒径才有利于产甲烷菌发挥最大作用。原因是小粒径污泥虽然有更好的传质效果, 但其内部有机质含量少, 且对环境变化更为敏感, 不利的微环境会影响其产甲烷活性<sup>[6]</sup>。虽然大粒径颗粒污泥有机物含量高, 但过大的粒径影响了基质向内部的传质速度, 从而影响了反应速率<sup>[15]</sup>。Bhunja 等<sup>[16]</sup>发现, 当厌氧颗粒污泥粒径在 1.5 mm 以内时可明显检测到产甲烷活性, 而大于 2 mm 的厌氧颗粒污泥会因为核内细菌饥饿而影响产甲烷活性。在本实验中, R4 厌氧颗粒污泥的产甲烷活性最高。

### 2.3 颗粒污泥沉降速度分析

将不同粒径颗粒污泥的理论沉降速度与清水柱测得的实际沉降速度进行对比, 结果见图 1。

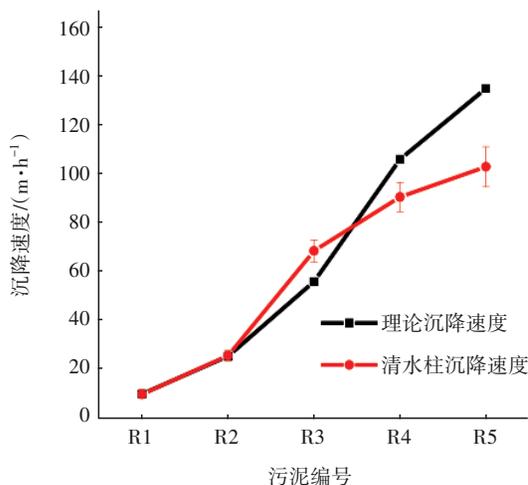


图1 不同粒径颗粒污泥的理论及清水柱沉降速度

Fig.1 Theoretical settling velocity and actual settling velocity of granular sludge in clear water column with different particle sizes

从图 1 可以看出, R1、R2 颗粒污泥的理论沉降速度与清水柱中的实际沉降速度基本吻合, 而 R3 的理论沉降速度小于实际沉降速度, R4、R5 的理论沉降速度大于实际沉降速度, 且 R5 两种沉降速度的差值最大, 达到 40 m/h。Tassew 等<sup>[17]</sup>发现, 沉降速度随雷诺数 ( $Re$ ) 的增加而增大,  $Re$  较高时, 测量值与计算值的一致性较弱。造成这种现象的原因是颗粒污泥并不是密度均匀的球体颗粒, 其内部具有一定的孔隙率, 而孔隙率对沉降速度的影响是两面的。

徐英博等<sup>[18]</sup>发现, 颗粒污泥内部的孔隙存在液体流动, 有利于颗粒污泥的沉降。R1、R2 颗粒污泥的孔隙率小, 对沉降速度几乎没有影响, R3 具有合适的孔隙率, 对沉降产生积极影响, 使实际沉降速度大于理论沉降速度。但孔隙率并不是越大越好, 过高的孔隙率说明颗粒污泥负荷过大, 因营养缺乏导致其内部中空, 使其沉降时阻力增加, 影响了自身的沉降速度。

清水柱中的沉降速度无法显示颗粒污泥产气对沉降速度的影响。颗粒污泥表面属于疏水性结构, 易与气泡发生黏附, Lu 等<sup>[19]</sup>认为胞外聚合物会堵塞颗粒污泥表面的气孔, 导致产气无法及时排出。在运用厌氧反应器培养颗粒污泥时, 发现颗粒污泥受气泡顶托的情况显著, 故进行营养柱沉降实验探究产气对颗粒污泥沉降速度的影响, 结果如图 2 所示。

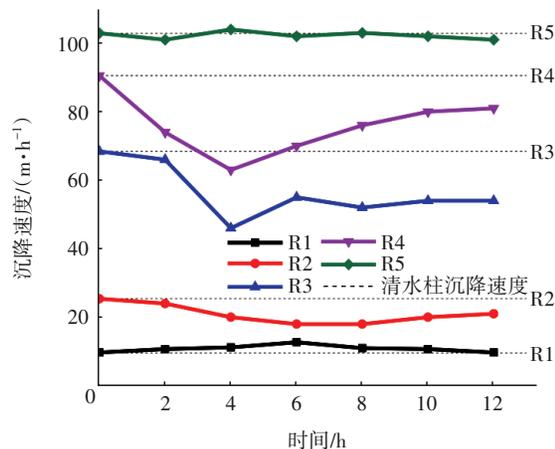


图2 营养柱中不同粒径颗粒污泥的沉降速度

Fig.2 Settling velocity of granular sludge in nutrient solution column with different particle sizes

从图 2 可以看出, R1 和 R5 颗粒污泥在营养柱和清水柱中的沉降速度几乎相同, 说明产气对沉速几乎没有影响。而 R2、R3、R4 颗粒污泥在营养柱中的沉降速度均明显小于在清水柱中的沉降速度, 尤其是中间粒径颗粒污泥 (R3、R4) 的沉降速度变动较大, 其中 R3 颗粒污泥在营养柱中的沉降速度为 46~68 m/h, 与清水柱中沉降速度的差值为 -22~0 m/h, R4 的沉降速度为 63~90.5 m/h, 与清水柱中沉降速度的差值为 -27~0 m/h。中间粒径颗粒污泥 (R3、R4) 均在 4 h 左右达到沉降速度的最低值, 之后缓慢上升, 原因是此时颗粒污泥产甲烷速率最快, 气泡无法及时与颗粒污泥分离, 导致沉降速度变慢<sup>[10]</sup>。

颗粒污泥沉降时受到重力、浮力和阻力的共同作用,包裹在内部的气泡和黏附在表面的气泡都会影响颗粒污泥的沉降速度。产甲烷活性高的污泥中,由于内部气泡不能及时排放到液相,使气泡被包裹在污泥中,导致沉降速度下降,当产生的气泡较小时,其易被吸附在颗粒表面,影响球形度,导致沉降阻力增加。小颗粒污泥自身的传质作用较好,有利于气泡向外传递,而大颗粒污泥的质量较大,气泡产生的顶托力对其影响较弱,因此产气对中等粒径的颗粒污泥影响最大。在厌氧消化过程中,中间粒径的颗粒污泥活性最强,因此如何降低产气对沉降速度的影响,对提升厌氧颗粒污泥沉降性能、降低水力停留时间、避免污泥流失具有重大意义。

### 3 结论

① 随着厌氧颗粒污泥粒径的增大,MLVSS/MLSS、密度、孔隙率也随之增加,但由于是内部孔隙变大,影响了密度的增长率,使得R4、R5颗粒污泥的密度几乎相同。

② 粒径为0.3~0.5、0.5~1、1~1.5、1.5~2、>2 mm颗粒污泥的产甲烷活性分别为210、290、325、360、336 mL/(gVSS·d),R4颗粒污泥的产甲烷活性最佳。

③ 对比颗粒污泥的理论沉降速度和清水柱中的沉降速度,R1、R2颗粒污泥的两种沉降速度基本吻合,R3的理论沉降速度小于实际沉降速度,R4、R5的理论沉降速度大于实际沉降速度。清水柱沉降实验表明,合适的孔隙率有利于颗粒污泥沉降,而孔隙率过大则会对颗粒污泥沉降产生不利影响。

④ 营养柱沉降实验表明,产气作用对中间粒径颗粒污泥(R3、R4)的沉降速度影响较大,其中R4颗粒污泥在营养柱与清水柱中的沉降速度差值最大达到-27 m/h。造成这种现象的原因是气泡的顶托作用增大了颗粒污泥下沉时的阻力和浮力,而这种作用对中等粒径颗粒污泥的影响尤为明显。

### 参考文献:

[1] 刘一山. 厌氧颗粒污泥的结构及驯化培养[J]. 纸和造纸, 2020, 39(2): 34-38.  
LIU Yishan. The structure and cultivation of anaerobic granular sludge[J]. Paper and Paper Making, 2020, 39(2): 34-38(in Chinese).

[2] 吴正杰,成凌. 厌氧颗粒污泥的形成及其应用的研究进展[J]. 山东化工, 2020, 49(9): 100-101.  
WU Zhengjie, CHENG Ling. Research progress on the formation and application of anaerobic granular sludge [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(9): 100-101(in Chinese).

[3] 朱邦辉. 厌氧颗粒污泥特性和应用研究[D]. 南昌:南昌大学, 2010.  
ZHU Banghui. Study on Characteristics and Application of Anaerobic Granular Sludge[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010(in Chinese).

[4] 冒盛鑫. 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥脱氮效能及污泥菌群特性的研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.  
MAO Shengxin. Study on Denitrification Efficiency and Characteristics of Sludge Flora of ANAMMOX Granular Sludge with Different Particle Sizes [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019(in Chinese).

[5] AN P, XU X C, YANG F L, *et al.* Comparison of the characteristics of anammox granules of different sizes [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2013, 18(3): 446-454.

[6] 金涛,曾科,刘明辉,等. 内循环厌氧反应器颗粒污泥沉降性能研究[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(2): 52-54, 65.  
JIN Tao, ZENG Ke, LIU Minghui, *et al.* Study on the settling characteristics of granular sludge in ICASB reactor [J]. Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(2): 52-54, 65(in Chinese).

[7] 夏丽佳. 旋流厌氧反应器处理果汁废水及颗粒污泥特性研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2018.  
XIA Lijia. Study on Characteristics of Juice Wastewater and Granular Sludge Treated by Swirl Anaerobic Reactor [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018 (in Chinese).

[8] 魏燕杰. SBR处理垃圾渗滤液的污泥颗粒化和稳定性及生物多样性研究[D]. 天津:天津大学, 2010.  
WEI Yanjie. Formation, Stability and Biodiversity of Aerobic Granules in Sequencing Batch Reactors Treating Landfill Leachate [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010(in Chinese).

[9] 刘娜. 不同含盐量下好氧颗粒污泥形成过程与热重特性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.  
LIU Na. Evaluation of Aerobic Granules Formative Process and Its Thermogravimetric Characteristics under Different Salinity [D]. Xi'an: Xi'an University of

- Architecture and Technology, 2008(in Chinese).
- [10] 胡纪萃. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 128-131.  
HU Jicui. Theory and Technology of Anaerobic Biological Treatment of Wastewater [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 128-131(in Chinese).
- [11] 刘峰. 厌氧颗粒污泥的培养与性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.  
LIU Feng. Study on the Development and Performance of Anaerobic Granular Sludge [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019(in Chinese).
- [12] 顾澄伟. 厌氧氨氧化颗粒污泥培养及其颗粒特性研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.  
GU Chengwei. The Cultivation and Features of Anammox Granular Sludge [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019 (in Chinese).
- [13] TANG C J, ZHENG P, ZHANG L, *et al.* Enrichment features of anammox consortia from methanogenic granules loaded with high organic and methanol contents [J]. *Chemosphere*, 2010, 79(6): 613-619.
- [14] 王皎, 孙黎明, 于冰. 不同粒径厌氧氨氧化颗粒污泥的性状研究[J]. *工业水处理*, 2014, 34(10): 59-62.  
WANG Jiao, SUN Liming, YU Bing. Research on the shape and properties of Anammox granule sludge with different grain sizes [J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(10): 59-62(in Chinese).
- [15] 郑照明, 刘常敬, 郑林雪, 等. 不同粒径的厌氧氨氧化颗粒污泥脱氮性能研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(12): 3078-3085.  
ZHENG Zhaoming, LIU Changjing, ZHENG Linxue, *et al.* The nitrogen removal performance of anammox granules of different sizes [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(12): 3078-3085(in Chinese).
- [16] BHUNIA P, GHANGREKAR M M. Required minimum granule size in UASB reactor and characteristics variation with size [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(5): 994-999.
- [17] TASSEW F A, BERGLAND W H, DINAMARCA C, *et al.* Settling velocity and size distribution measurement of anaerobic granular sludge using microscopic image analysis [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2019, 159: 81-90.
- [18] 徐英博, 冼萍, 唐铭, 等. 垃圾渗滤液厌氧处理过程颗粒污泥生长特性[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(5): 2213-2219.  
XU Yingbo, XIAN Ping, TANG Ming, *et al.* Growth characteristics of granular sludge in anaerobic treatment of landfill leachate [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(5): 2213-2219(in Chinese).
- [19] 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, 23(3): 312-317.

作者简介: 曹宇浩(1995-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为污泥厌氧颗粒化技术。

E-mail: 969333292@qq.com

收稿日期: 2020-06-28

修回日期: 2020-10-14

(编辑: 任莹莹)

贯彻执行《中华人民共和国水法》