

好氧颗粒污泥的基本特性和形成机理

秦 忍, 叶丽君, 冷林秀, 金敬慈, 严爱兰*

浙江水利水电学院环境科学与工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年2月6日; 录用日期: 2025年3月30日; 发布日期: 2025年5月19日

摘 要

随着工业化与城市化进程的加速, 污废水排放量不断攀升, 水体富营养化问题日益凸显。传统活性污泥法在处理污水时存在占地面积大、投资及运营成本高显著弊端。为此, 新型好氧颗粒污泥技术应运而生, 成为污水处理领域的新秀。本文旨在全面阐述好氧颗粒污泥的基本特性, 包括其形态、组成与结构特征; 深入探讨其形成机制, 如胞外聚合物(EPS)假说、微生物自凝聚假说、污泥颗粒化四阶段理论、晶核诱导假说及丝状菌假说等; 并分析影响好氧颗粒污泥形成的关键因素。好氧颗粒污泥技术在污水生物处理技术中展现出独特优势与重要性, 对其特性、形成机制及影响因素的深入探究, 对于推动污水处理技术的革新、实现环境保护与可持续发展目标具有重要意义。

关键词

污水处理, 好氧颗粒污泥, 结构特征, 形成机理, 影响因素

Fundamental Characteristics and Formation Mechanisms of Aerobic Granular Sludge

Ren Qin, Lijun Ye, Linxiu Leng, Jingci Jin, Ailan Yan*

School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 6th, 2025; accepted: Mar. 30th, 2025; published: May 19th, 2025

Abstract

With the acceleration of industrialization and urbanization, the discharge of wastewater continues to rise, and the problem of water eutrophication has become increasingly prominent. Traditional activated sludge processes have significant drawbacks such as large land occupation, high investment, and high operating costs when treating wastewater. In response, the novel aerobic granular

*通讯作者。

文章引用: 秦忍, 叶丽君, 冷林秀, 金敬慈, 严爱兰. 好氧颗粒污泥的基本特性和形成机理[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 765-773. DOI: 10.12677/aep.2025.155086

sludge technology has emerged as a rising star in the field of wastewater treatment. This paper aimed to comprehensively elaborate on the basic characteristics of aerobic granular sludge, including its morphology, composition, and structural features; delve into its formation mechanisms, such as the extracellular polymeric substances (EPS) hypothesis, the microbial self-aggregation hypothesis, the four-stage theory of sludge granulation, the crystal nucleus induction hypothesis, and the filamentous bacteria hypothesis; and analyze the key factors influencing the formation of aerobic granular sludge. Aerobic granular sludge technology exhibited unique advantages and significance in biological wastewater treatment technologies. In-depth exploration of its characteristics, formation mechanisms, and influencing factors is of great importance for promoting the innovative development of wastewater treatment technologies and achieving environmental protection and sustainable development goals.

Keywords

Wastewater Treatment, Aerobic Granular Sludge, Structural Features, Formation Mechanism, Factors Affecting

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

在当今社会，污废水的处理问题始终是一项极为关键且紧迫的任务。随着工业化进程的加速以及城市化规模的不断扩大，污废水的排放量与日俱增，成为了改善生态环境的巨大阻碍。在污水处理领域中，活性污泥法的应用最为成熟广泛，但是活性污泥法在运行过程中确实存在诸多弊端，主要包括占地面积广阔，工艺流程冗长，以及运行基础设施投资庞大。因此，深入研究占地面积小的污水处理新技术，能够有效缓解土地资源紧张的难题，尤其适用于城市中土地稀缺的污水处理站点。工艺布置结构紧凑这一特性优化处理流程，减少管道铺设与设备连接的复杂性，还能降低建设过程中的人力与物力投入。并且高效节能生物脱氮除磷新技术能显著降低能源消耗，在长期运营中大幅削减成本，契合全球节能减排的趋势。因此当前的研究重点之一在于开发一种污水处理的新技术，此技术集众多优势于一体，这对于解决当前的污水处理难题具有深远的意义，是当前研究领域至关重要且亟待推进的方向。

研究人员发现好氧颗粒污泥技术具备占地面积小、工艺流程简洁、基础设施投资低以及运营成本低廉等诸多优势，这些特点使其能够在一定程度上有效应对当前污水处理所面临的挑战。好氧颗粒污泥是微生物在人为营造的特定环境条件下通过自然聚集与生长过程而形成的一种复杂而有序的微生物聚集体。这些颗粒不仅形态各异而且内部结构精细，具有其独特的分层特性。好氧污泥颗粒外层区域由于直接暴露于富含氧气的环境中，适宜进行好氧硝化反应；好氧污泥颗粒的内层区域则因氧气传递受限而呈现出厌氧或缺氧状态，这为进行反硝化过程提供了理想的条件[1]。这种外层好氧硝化、内层厌氧反硝化的独特分层结构，使得好氧污泥颗粒能够在单个反应器内同时完成氮的硝化和反硝化过程，极大地提高了污水处理的效率和质量。此外，好氧污泥颗粒还因其结构稳定、沉降性能优异等特点，在污水处理过程中展现出了良好的应用前景，为解决当前水资源短缺和水环境污染问题提供了新的技术路径[2]。与传统的活性污泥工艺相比，好氧颗粒污泥展现出诸多优势，例如能高效留存生物量、具备出色的沉降性能以及结构稳定性。近年来，好氧颗粒污泥技术也因此成为国内外研究的重点领域。

2. 好氧颗粒污泥的基本特性

2.1. 好氧颗粒污泥的发现及定义

1991 年, 日本学者 Mishima 与 Nakamura 在污水处理技术领域取得了重大突破。他们首次在连续流好氧上流污泥床反应器内, 凭借精心策划的操作环境和培养方案, 成功培育出了一种新型的好氧颗粒污泥。这一创举不仅被视为好氧颗粒污泥技术研究的起点, 更为后续研究奠定了坚实的基础[3]。然而, 遗憾的是该培养过程对纯氧环境有严格要求, 这不仅使得能耗增加还极大提升了培养难度, 并且所培育出的颗粒污泥在脱氮除磷方面的性能并不理想。随后, 德国和荷兰等国的研究人员在好氧颗粒污泥的研究和应用上取得了不少进展。现如今, 好氧颗粒污泥处理工艺在污水生物处理领域中具有其独特的优势, 如高效的污染物去除能力、良好的沉降性能以及较低的运行成本等, 使得该技术备受关注。

在 2004 年首届好氧颗粒污泥研讨会上, 好氧颗粒污泥被定义为一种微生物聚集体, 其显著特征是能够在低水力剪切环境下保持非絮凝状态, 并且在沉降性能方面表现出极大优势, 沉降速度远快于活性污泥[4]。在 2006 年第二届好氧颗粒污泥研讨会上, 对好氧颗粒污泥给出了以下五条解释性定义: 好氧颗粒污泥是微生物来源的颗粒; 在减小的流体剪切力作用下, 这些颗粒不会发生凝结; 其沉降速度显著快于活性污泥絮凝体; 颗粒的最小尺寸应设定为 0.2 毫米, 以确保生物量能满足上述沉降速度的优势, 但这一限制可根据具体情况和颗粒类型进行调整; 筛分是从活性污泥池或好氧颗粒反应器中收获颗粒的适当方法。当前, 好氧颗粒污泥被广泛定义为: 在有氧环境中, 微生物通过自聚集作用形成的一类微生物聚集体, 具有表面光滑、结构紧实、沉降性能优良以及污染物降解效果显著等特性[5]。

2.2. 好氧颗粒污泥的形态、组成和结构

2.2.1. 形态

好氧颗粒污泥一般呈浅黄色或橙黄色球形、椭球形, 表面光滑、结构紧密、含有大量孔隙, 粒径一般为 0.3~4.5 mm, 平均密度约为 $1.04\sim1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 沉降速率可达 30~70 m/h。

2.2.2. 组成

好氧颗粒污泥的组成可以分为微生物部分、无机部分和有机部分。

(1) 微生物部分

异养菌和硝化菌: 这些是好氧颗粒污泥的主要成分, 负责有机物的氧化和氮的转化过程。

丝状菌和真菌: 这些微生物大量缠绕形成颗粒的骨架, 有助于颗粒的稳定和生长。

原、后生动物: 这些生物在颗粒表面生长, 可能参与颗粒的维护或对出水水质产生影响。此外, 还有一些特定的古菌种类, 如产甲烷菌和氨氧化古菌, 这些古菌在好氧颗粒污泥中扮演着重要的角色。这些古菌的分布与颗粒的结构和功能密切相关, 例如产甲烷古菌主要分布于颗粒的核心区域, 有助于颗粒结构的形成和稳定。

(2) 无机部分

通过 XRD 图谱分析可以看出, 其成分比较复杂, 主要成分有: SiO_2 、 CaSO_4 、 $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ 、 Fe_2O_3 。其中最高波峰为 SiO_2 。无机成分在颗粒污泥的形成过程中起到结晶核心的作用, 帮助微生物聚集形成颗粒。

(3) 有机部分

胞外聚合物(EPS): EPS 是微生物细胞分泌到细胞表面的一类大分子有机化合物, 它在颗粒污泥的形成与稳定过程中发挥着关键作用。在微生物的生命活动进程中, 胞外聚合物(EPS)扮演着极为关键的角色, 它由多糖、蛋白质、酶、核酸、磷脂以及腐殖酸等多种成分构成, 显著提升了细胞间的结合力有效推动

了颗粒的产生与稳固。

2.2.3. 结构

分层结构：好氧颗粒污泥的分层结构主要包括三个区域：好氧区、缺氧区和厌氧区。这种结构的形成主要依赖于颗粒内部的溶解氧梯度，使得不同的细菌种群能够根据其生理需求在颗粒的不同部位进行分布。

(1) 好氧区：这一区域的氧气供应充足，适合好氧细菌如硝化细菌和异养菌的活动。这些细菌主要负责将有机物氧化，同时产生氨和亚硝酸盐，为后续的反硝化过程提供前体物。

(2) 缺氧区：相对于好氧区，缺氧区氧气供应较少，有利于反硝化细菌如亚硝酸菌的生长。这些细菌利用较少的氧气将亚硝酸盐进一步转化为氮气和无害的盐分，从而完成氮的去除过程。

(3) 厌氧区：在厌氧区内几乎没有氧气存在，其主要活动者主要为厌氧微生物，如厌氧氨氧化菌将氨氧化成氮气和甲烷。

这种分层结构不仅优化了不同微生物的生理功能，还提高了整个污水处理过程的效率和稳定性。通过各功能区的协同作用，好氧颗粒污泥能够有效地去除有机物和氮、磷等有害物质，从而支持水体的健康治理。

孔隙结构：是指好氧颗粒污泥内部孔隙的分布、大小和连通性。好氧颗粒污泥是由微生物自聚集形成的微生物聚集体，其结构紧密且含有大量孔隙，这些孔隙对于污泥的沉降性能和生物降解能力至关重要。

3. 好氧颗粒污泥的形成机制

好氧颗粒污泥的内部结构错综复杂，犹如一个微缩的生态世界包含了多种多样的微生物群落，它们通过错综复杂的相互作用共同维持着整个系统的稳定与高效。这样独特的结构特性使得好氧颗粒污泥在污水处理领域展现出了巨大的潜力。然而，好氧颗粒污泥的培养却并非易事，它通常需要在人工精心设定的环境下，经历一个漫长且复杂的驯化流程才能得以成功形成[6]。围绕这一课题，各国学者针对反应器运行工况、多样的物理化学条件，以及微生物群落分布特征展开比研究，并在此基础上，归纳提出了如下假说。

3.1. EPS 假说

EPS，即胞外聚合物，是微生物在自身生长代谢过程中分泌出的一种物质，它具有一定的黏度，并且能够增强细胞表面的电荷性和疏水特性。在胞外聚合物(EPS)强大的黏附作用下，微生物个体开始相互靠近并逐渐聚集在一起，这一过程是好氧颗粒污泥形成的初步阶段。胞外聚合物作为微生物分泌的黏性物质为微生物提供了相互连接的桥梁，还增强了微生物群落的整体稳定性和凝聚力，并且随着微生物自身新陈代谢与繁殖活动的持续进行，这些聚集在一起的微生物开始形成更为紧密的团簇结构使得污泥颗粒体积逐渐增大[7]。

在这一阶段中，水力剪切力等外力因素发挥了至关重要的塑形作用。水力剪切力主要来自于反应器内的水流运动，它不断地对正在形成的污泥颗粒进行冲刷和修整。这种冲刷作用有助于去除颗粒表面附着的松散微生物和杂质，对颗粒的形态进行精细的调控使其逐渐呈现出规则而紧密的结构[8]。增加水力剪切力，有助于减少沉淀时间，通过补充 Ca、Mg 等金属离子，可增强细胞外聚合物(EPS)的分泌有利于颗粒污泥的形成[9]。

3.2. 微生物自凝聚假说

微生物自凝聚假说深入探讨了微生物在好氧颗粒污泥形成过程中的自身功能与作用机制。这一假说

强调, 在一定的环境条件下, 微生物能够通过精细调节其内部生理机制和化学功能, 从而改变自身的表面特性以适应不断变化的外界环境[10]。详细来说, 微生物的表面特性, 如电荷性质、亲疏水性以及表面附着物的种类和数量等会影响其在环境中的聚集和黏附。在适宜的环境条件下微生物能够感知并响应外界信号, 如营养物质浓度、溶解氧水平、pH 值以及温度等, 进而调整其表面特性以优化与周围环境的相互作用。这种适应性使微生物能够自主地聚集在一起形成密集且稳定的微生物群落, 还确保了这些群落能够保持高水平的代谢活性。高水平的代谢活性意味着微生物群落能够更有效地利用环境中的营养物质进行生长和繁殖, 同时产生更多的胞外聚合物(EPS)等黏性物质巩固和增强微生物群落的稳定性和凝聚力。

3.3. 污泥颗粒化四阶段理论

(1) 在持续的水力作用下, 微生物群落之间不断发生接触与碰撞导致微生物逐渐凝聚成核, 形成了最初的微生物聚集体。这一过程是污泥颗粒化的起始阶段, 为后续污泥颗粒的形成和发展奠定了关键基础。

(2) 在多种相互作用力和吸引力的共同驱动下, 多种微生物相互依存并发生复杂的交互作用, 逐渐汇聚形成颗粒状结构。这些初步形成的、类似晶核的污泥颗粒, 在诸如水力剪切力、重力及表面张力等多种外部力量的综合影响下, 继续发展并演变成为结构相对稳固的微生物聚集体[11]。

(3) 随着微生物的持续生长、繁衍和集结, 它们逐渐分泌出胞外聚合物(EPS), 这些 EPS 在微生物细胞间构建起一种生物凝胶, 并产生了强大的黏合力[12]。在这样的环境下, 微生物群落的生长代谢活动与周围环境发生交互作用, 逐步促使形态发生演变。经过长时间的累积, 这一系列过程共同孕育出了高度复杂且精细的微生物结构。

(4) 水力剪切力在系统内的作用促使颗粒污泥逐渐成熟, 进而使颗粒污泥形成了合理的空间布局、优化的结构和高效的功能, 这些变化共同稳固并提升了颗粒污泥的整体性能[13]。

3.4. 晶核诱导假说

晶核诱导法的操作流程如下: 首先在反应器中引入细小的颗粒物质, 这些颗粒作为预培养颗粒污泥的核心基质[14]。随后微生物开始在这些核心基质上自我聚集、生长与繁衍, 逐渐形成一个成熟的好氧颗粒污泥体系, 这些作为晶核的细小颗粒可以由无机物质或者惰性的有机物质构成。

3.5. 丝状菌假说

絮状污泥转变为颗粒污泥的前提是必须由絮状污泥中的丝状菌丝构建起骨架, 构建而成的骨架形成污泥中颗粒最初的框架, 同时细菌可以附着在丝状菌丝上完成生长和繁殖, 随着细菌不断的聚集, 颗粒的沉降性能逐渐增强使其在污水处理不易随出水而流出[15]。水力选择压的持续作用成为了推动污泥颗粒化进程的重要外力。水力选择压通过不断筛选和优化污泥中的微生物种群, 促使污泥内部形成具有复杂结构和独特性质的菌胶团促进污泥从絮状向颗粒状的逐步演变。在这一过程中, 污泥颗粒的形态、结构和功能都得到了显著的优化和提升, 最终形成了具有高效污水处理能力的颗粒污泥。

4. 好氧颗粒污泥形成的影响因素

好氧颗粒污泥的生成是一个多维度、多因素交织的复杂过程, 其成长阶段深受多种环境参数的协同影响。

4.1. 基质成分

丝状菌假说中丝状菌的形成是形成好氧颗粒污泥的关键因素。李志华[16]等提出, 当丝状菌以适量的

速度生长时,它们能够发挥极其积极的作用,成为颗粒污泥形成的天然骨架,为污泥颗粒提供了结构上的支撑和促进了污泥颗粒内部的物质传输和微生物间的相互作用,从而加速了颗粒污泥的成形过程。并且这种由丝状菌构成的网络骨架还有助于提高污泥颗粒的机械强度和稳定性,使其在面对水力剪切等不利条件时仍能保持良好的形态和性能。

可以通过对 pH 值的调节来形成丝状菌好氧颗粒污泥和非丝状菌类好氧颗粒污泥。由傅金祥[17]等人的研究表明,在酸性条件 $\text{pH} = 3.0\sim 6.0$ 下更有利于丝状菌的繁殖,丝状菌以其独特的生长形态和生理特性,在酸性环境中展现出较强的适应性。

但是丝状菌过量增长便可能成为污泥稳定性的威胁,过量的丝状菌会在污泥颗粒内部的空间中大量存在,颗粒结构因此变得疏松,甚至引发污泥颗粒的解体。因此,在不同的工艺情况下,为避免过量丝状菌的生长,可以调节 pH 值培养非丝状菌类好氧颗粒污泥避免此类情况。研究表明在偏碱性条件下有利于非丝状菌类的生长,这些细菌通过分泌胞外聚合物,形成菌胶团,进而通过菌胶团之间的互相粘连作用,逐渐构建起非丝状菌类好氧颗粒污泥的结构。与丝状菌好氧颗粒污泥相比,非丝状菌类好氧颗粒污泥可能具有不同的物理和化学性质,如更高的密度、更强的稳定性和更广泛的底物利用能力[18]。

除此之外,在培养过程中的底物不同也可以形成丝状菌好氧颗粒污泥和非丝状菌类好氧颗粒污泥。培养过程中的底物不同所生长的菌种也不同,在以葡萄糖为底物的颗粒污泥时,有较多的丝状细菌生长;而以醋酸钠为基质进行培养的颗粒污泥时,其表面具有更多的杆菌生长。因此基质成分的组成和选择是好氧颗粒污泥形成中相当重要的一个环节[19]。

4.2. 混凝剂

根据晶核理论,在培养初期加入混凝剂,它可以作为诱导核,对好氧颗粒污泥的附着、聚集以及最终形成过程产生重要影响。由于细菌表面带有大量负电荷,因此添加金属离子能够有效地促进细菌的聚集,从而缩短好氧颗粒污泥的形成时间,并提高颗粒的密度。混凝剂在好氧颗粒污泥(ACS)的培养中可充当诱导核,影响其附着、聚集和最终形成过程。由于细菌表面普遍带有负电荷,因此适量添加金属离子能够促进细菌之间的聚集,从而加快好氧颗粒污泥的形成速度,并增加污泥的颗粒密度[20]。

4.3. 胞外聚合物

对于好氧颗粒形成机制的各类假说当中,都离不开胞外聚合物这个关键的因素,胞外聚合物(EPS)是一种普遍存在于微生物细胞周围环境中的复杂有机物质,它们广泛分布于细胞的黏液层以及细胞荚膜之中。这些聚合物主要由两大类生物大分子构成:多糖(PS)和蛋白质(PN)。多糖部分通常包括各种不同类型的糖类分子;蛋白质部分则包含了氨基酸序列多样的多肽链。EPS 在微生物生态系统中扮演着重要角色,它不仅影响着微生物细胞间的相互作用,还参与调节微生物群落的结构与功能。此外, EPS 还能促进微生物细胞的聚集,从而加快好氧颗粒污泥的形成。

在多数好氧污泥颗粒化过程中都观测到伴随着 EPS 总量的大幅度变化,因此 EPS 被认为是污泥颗粒化过程中的粘合剂,通过特殊的蛋白质与多糖,吸附电中和与吸附架桥等作用力将分散的污泥絮体结合起来[21]。王景华[22]等人的研究表明,外加 EPS 条件下颗粒污泥生长迅速,70d 内污泥平均粒径增长至 $377.5\text{ }\mu\text{m}$,最大粒径达到 $1.4\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。由此可说明培养好氧颗粒污泥过程中,通过投加 EPS 能够加快絮状污泥颗粒化的进程。

4.4. 群体感应和群落分布

群体效应是一种新兴的调控细菌群体行为的机制,近年来受到了广泛关注。许多细菌能够分泌一

种或多种自体诱导物,通过感知这些自体诱导物的浓度,细菌可以评估自身的群体密度并监测周围环境的变化。当细菌群体数量达到一定阈值时,会激活一系列相应基因的表达,从而调控细菌群落的群体行为[23]。研究发现,群体感应效应能够促进细菌分泌胞外聚合物(EPS),进而影响好氧颗粒污泥的形成。

在培养好氧颗粒污泥的过程中,其内部逐渐形成了丰富多样的微生物群落。这些群落的空间布局与组织结构对好氧颗粒污泥的净化效能以及结构稳固性均产生了影响。如果在培养过程中硝化细菌和厌氧氨氧化细菌占主导地位,好氧颗粒污泥的形成速率可能会降低;不过,由此产生的污泥稳定性会增强,物理化学性质也更优越。并且有适量的丝状菌存在可以作为很好的框架,促进好氧颗粒污泥的形成和稳定[24]。

5. 好氧颗粒污泥技术的挑战与建议

近些年来,对于好氧颗粒污泥技术的基础理论与实际应用,全球范围内的学者们进行了广泛而深入的探究,这一领域的研究成果的不断涌现,极大地推动了环保技术的进步。但是关于好氧颗粒污泥技术的研究仍然存在着很多需要深入挖掘和改进的地方。

(1) 关于好氧颗粒污泥的成形机理方面,至今仍未获得一个精确详细且普遍公认的解释。当前流行胞外聚合物假说,微生物自凝聚假说、晶核理论等都只是对部分研究现状的整理与总结,尚未能全面揭示好氧颗粒污泥的成形奥秘。由于成形机制的不明确,在好氧颗粒污泥技术的各项方面研究都带来了不小的阻碍。

(2) 好氧颗粒污泥的成形过程存在耗时较长和容易出现失稳现象,这进一步增加了其应用的难度。

(3) 关于好氧颗粒污泥技术的研究所取得的成果,很大一部分都是在实验室规模下的好氧颗粒污泥技术反应器中进行的。然而对于大多数污水处理厂目前都在使用连续流反应器进行污水处理,现如今关于好氧颗粒污泥技术在连续流中的培养研究却相对较少。

(4) 在研究好氧颗粒污泥技术处理污水时,许多实验都是在良好控制条件下进行的,并且使用的是实验室中较为简单稳定的仪器来测验模拟合成废水。然而,这种模拟合成废水与实际废水之间仍存在着不小的差异。实际废水成分复杂多变、且不稳定,处理起来更加困难。

针对好氧颗粒污泥技术面临的挑战和根据现有的好氧颗粒污泥研究成果,以下是一些建议:

(1) 深入研究成形机理:好氧颗粒污泥的成形机理涉及微生物学、流体力学、化学等多个学科。建议加强跨学科合作,综合运用多种研究手段,如模型构建、分子生物学技术等,深入探讨不同假说之间的相互作用[25]。也可以通过长期的实验观察和动态监测,记录好氧颗粒污泥在不同条件下的形成过程,积累更多数据以揭示其成形规律。

(2) 优化颗粒污泥的培养条件:可以通过优化操作条件,如调整水力剪切力、溶解氧浓度、有机负荷等,加速颗粒污泥的形成来缩短其形成时间。例如,采用微氧-好氧耦合沉淀反应器,通过控制水力剪切力和丰盛-饥饿条件,能够有效促进颗粒污泥的快速形成。除此之外,在培养过程中控制水力条件和曝气强度,避免过强的剪切力导致颗粒破碎。同时,通过优化微生物群落结构,提高颗粒污泥的抗冲击能力以增强好氧颗粒污泥的稳定性[26]。

(3) 加强连续流反应器中的应用研究:对反应器进行设计优化,针对连续流反应器的特点设计更适合好氧颗粒污泥培养的反应器构型。如采用逆流折流式反应器或串联多个搅拌槽式反应器,形成周期性的饱食-饥饿条件促进颗粒污泥的形成[27]。

(4) 提高对复杂实际废水的处理能力:在实验室研究中,模拟废水成分应与实际废水成分越接近越好或者直接使用实际废水进行实验,以更好地评估好氧颗粒污泥的处理效果。

6. 结论

好氧颗粒污泥具有优良的结构特性和生物特性,能够高效去除污水中的有机污染物和氮素等。其形成机理复杂多样,涉及物理、化学和生物等多个方面。未来,随着对好氧颗粒污泥形成机理的深入研究和手段的不断进步,有望实现好氧颗粒污泥技术的工程化应用,为污水处理领域带来新的突破和发展。

基金项目

浙江省自然科学基金项目((LZJWZ23E080002))。

参考文献

- [1] 郑晓英,李汶霏,张会杰,等.内源短程反硝化颗粒污泥培养及关键影响因素研究[J].环境工程,2024,42(9): 116-123.
- [2] 汪彪.交替曝气策略下好氧颗粒污泥特性及微生物群落研究[D]:[硕士学位论文].合肥:安徽建筑大学,2022.
- [3] 黄全江,王三反,吴楠,等.连续流态下好氧颗粒污泥技术的研究进展[J].化学与生物工程,2016,33(9): 12-14+22.
- [4] 周安澜.水解酸化-AGSBR工艺处理汽车涂装废水试验研究[D]:[硕士学位论文].合肥:安徽建筑大学,2020.
- [5] 王帅.胞外多糖特性及其对颗粒污泥聚集性能及稳定性的影响机制研究[D]:[博士学位论文].重庆:重庆大学,2021.
- [6] 张浩然,戚元辉,欧阳二明.好氧颗粒污泥技术的研究与应用[J].应用化工,2023,52(9): 2669-2673.
- [7] 郑逸涵,杨英,李卫华,等.好氧颗粒污泥的培养及其胞外聚合物的分析与应用[J/OL].工程科学与技术,1-16.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240625.1652.001.html>,2025-05-09.
- [8] 王闯.好氧颗粒污泥形成机理及影响因素[C]//中国环境科学学会(Chinese Society for Environmental Sciences).2019中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷).沈阳:沈阳建筑大学,2019: 585-589.
- [9] 孔德枫,赵雅光.好氧颗粒污泥形成机制及影响因素研究[J].科技创新与应用,2021,11(26): 82-85.
- [10] 周律,钱易.好氧颗粒污泥的形成和技术条件[J].给水排水,1995(4): 11-13.
- [11] 蔡春光,刘军深,蔡伟民.胞外多聚物在好氧颗粒化中的作用机理[J].中国环境科学,2004,24(5): 623-626.
- [12] 刘玉玲,高升,白凯.好氧颗粒污泥形成过程与机理分析[J].环境科学与技术,2012,35(9): 125-128.
- [13] 郭都.基于旋流分离的水力剪切条件对好氧颗粒污泥形成的影响[D]:[硕士学位论文].天津:天津科技大学,2022.
- [14] 常笑丽,何士龙,刘浩.好氧颗粒污泥快速培养的方法研究[J].环境工程,2015,33(8): 27-31.
- [15] 李志华,莫丹丹,赵静,等.好氧颗粒污泥系统中丝状菌演替规律及其菌丝缠绕特性分析[J].环境工程学报,2013,7(8): 2813-2817.
- [16] 李志华,刘超,赵静,等.丝状菌颗粒污泥形成过程及其对膨胀控制的启示[J].中国给水排水,2013,29(13): 23-27.
- [17] 傅金祥,唐玉兰,王海彪,等.不同pH值下好氧颗粒污泥形成过程与特性[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(4): 734-738.
- [18] 朱苏鹏.连续流反应器好氧颗粒污泥解体与丝状菌膨胀研究[J].广东化工,2023,50(23): 82-85.
- [19] 张志,任洪强,张蓉蓉,等.pH对好氧颗粒污泥同步硝化反硝化过程的影响[J].中国环境科学,2005,25(6): 650-654.
- [20] 宋雪松,刘永军,刘喆,等.混凝强化形成好氧颗粒污泥[J].环境工程学报,2014,8(3): 929-934.
- [21] 陆佳,刘永军,刘喆,等.有机负荷对污泥胞外聚合物分泌特性及颗粒形成的影响[J].化工进展,2018,37(4): 1616-1622.
- [22] 王景华,袁林江,贺向峰,等.EPS对细菌凝聚和絮状污泥颗粒化的作用[J].中国环境科学,2024,44(9): 4893-4900.
- [23] 李文.典型新污染物胁迫下群体感应对好氧颗粒污泥系统的影响[D]:[硕士学位论文].上海:上海海洋大学,

2023.

- [24] 何瑜, 何成达, 朱腾义, 等. 生物除磷颗粒污泥的培养及其特性[J]. 中国给水排水, 2024, 40(23): 91-98.
- [25] 陈翰. 进水有机物浓度对好氧颗粒污泥形成的影响机制[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [26] 鲍任兵, 万年红, 邹磊, 等. 城镇污水生化处理原位提标技术路径研究[J]. 给水排水, 2024, 60(9): 33-42.
- [27] 张海耿, 曹鑫圆, 上官端阳, 等. 连续流好氧颗粒污泥强化策略研究进展[J]. 环境工程学报, 2024, 18(5): 1219-1232.