

净水技术前沿与热点综述

高林, 史乃聪, 鲁冰格, 等. 连续流好氧颗粒污泥 Zier 工艺及自动化控制研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 1-9.

Gao L, Shi N C, Lu B G, et al. Research progress of the Zier process and automation control in continuous-flow aerobic granular sludge[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 1-9.

连续流好氧颗粒污泥 Zier 工艺及自动化控制研究进展

高林¹, 史乃聪², 鲁冰格², 王玉鸣¹, 戚伟康², 张伟^{3,*}

(1. 长岛海洋生态文明综合试验区公用事业服务中心, 山东烟台 265800; 2. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124; 3. 长江存储科技有限责任公司, 湖北武汉 430078)

摘要 【目的】针对连续流好氧颗粒污泥工艺中颗粒形成与稳定维持困难、单一强化策略作用有限及运行调控复杂等问题, 系统梳理分置曝气自循环连续流(Zier)工艺的构型特征、核心机制、技术特点及自动化控制研究进展, 为连续流好氧颗粒污泥技术研究与应用提供参考。【方法】梳理国内外相关研究, 对连续流好氧颗粒污泥成粒条件、单一强化策略、Zier 工艺构型与作用机制及其自动化控制等方面进行了综述分析。【结果】Zier 工艺通过缺氧柱、曝气柱和好氧柱组成的分置曝气自循环构型, 可在连续流条件下形成较稳定的内部循环以及底物和溶解氧空间分布, 为颗粒形成与稳定维持提供条件。与一般连续流好氧颗粒污泥工艺相比, Zier 工艺在流态强化、分区反应环境构建和系统集成方面具有一定特点, 能够在同一系统内实现供氧、内部循环和分区反应。但其运行表现仍受曝气强度、溶解氧、水力停留时间、污泥粒径、胞外聚合物和微生物群落等因素影响。【结论】Zier 工艺为连续流好氧颗粒污泥技术提供了一种新的构型思路, 有助于解决连续流条件下颗粒污泥稳定维持困难、污染物去除效果不佳等问题。后续仍需加强运行参数调控、颗粒结构演变、功能菌群响应及智能化控制方法研究, 以推动连续流好氧颗粒污泥工艺优化及 Zier 工艺工程应用。

关键词 连续流; 好氧颗粒污泥; 分置曝气自循环连续流工艺; 颗粒稳定维持; 自动化控制

中图分类号: X703 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)06-0001-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.001

Research Progress of the Zier Process and Automation Control in Continuous-Flow Aerobic Granular Sludge

Gao Lin¹, Shi Naicong², Lu Bingge², Wang Yuming¹, Qi Weikang², Zhang Wei^{3,*}

(1. Public Utilities Service Center of Changdao Marine Ecological Civilization Comprehensive Experimental Zone, Yantai 265800, China;
2. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. Yangtze Memory Technologies Co., Ltd., Wuhan 430078, China)

Abstract [Objective] A systematic review is conducted on the configuration characteristics, core mechanisms, technical features, and automated control of the separate-aeration self-circulating continuous-flow (Zier) process to address the difficulties in granule formation and stable maintenance, the limited effectiveness of single enhancement strategies, and the complexity of operational regulation in continuous-flow aerobic granular sludge processes, so as to provide a reference for the research and application of continuous-flow aerobic granular sludge technology. [Methods] Relevant domestic and international studies are reviewed, and a systematic analysis is carried out from the perspectives of the conditions required for granulation in continuous-flow aerobic granular

[收稿日期] 2026-02-14

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(42277054); 山东省重点研发计划-重大科技创新工程(2022CXGC021002, 2021CXGC011202)

[作者简介] 高林(1982—), 男, 主要从事污水处理等工作, E-mail: 6802732@qq.com。

[通信作者] 张伟, 男, 高级工程师, 主要从事污水处理等工作, E-mail: johnson_zhang@ymtc.com。

sludge, single enhancement strategies, the configuration and operating mechanisms of the Zier process, and its automated control. [**Results**] Through a separate-aeration self-circulating configuration composed of an anoxic column, an aeration column, and an aerobic column, the Zier process enables relatively stable internal circulation as well as spatial distributions of substrate and dissolved oxygen to be established under continuous-flow conditions, thereby providing favorable conditions for granule formation and stable maintenance. Compared with general continuous-flow aerobic granular sludge processes, the Zier process exhibits distinctive features in flow pattern intensification, spatially partitioned reaction environment construction, and system integration, and oxygen supply, internal circulation, and partitioned reactions can be achieved within the same system. However, its performance is still affected by factors such as aeration intensity, dissolved oxygen, hydraulic retention time, sludge particle size, extracellular polymeric substances, and variations in microbial communities. [**Conclusion**] The Zier process provides a new configuration concept for continuous-flow aerobic granular sludge technology, and helps address the problems including difficult stable maintenance of granular sludge and poor pollutant removal performance under continuous-flow conditions. Further studies are still required on the regulation of operating parameters, the evolution of granule structure, the response of functional microbial communities, and intelligent control method, so that the optimization of continuous-flow aerobic granular sludge processes and the engineering application of the Zier process can be promoted.

Keywords continuous-flow; aerobic granular sludge (AGS); separate-aeration self-circulating continuous-flow (Zier) process; granule stability; automation control

随着我国城镇污水处理朝着低碳、高效与资源化方向发展,基于好氧颗粒污泥(AGS)的污水处理工艺因具有良好的沉降性能和较强的抗冲击能力,已成为替代传统活性污泥法的重要技术^[1-2]。尽管基于序批式反应器(SBR)的AGS工艺已在 Nereda[®]等工程中获得应用^[3],但SBR的间歇运行模式与我国主流连续流污水处理设施难以兼容,限制了现有污水处理厂的技术升级改造。因此,实现AGS的连续流化是当前行业的研究重点。然而,在连续流条件下,由于缺乏显著的沉降选择压与底物浓度梯度,颗粒污泥难以通过常规手段实现长期稳定^[4-5]。针对这一难题,Qi等^[6]提出了分置曝气自循环连续流(Zier)工艺。该工艺采用分置曝气自循环构型,典型反应器由缺氧柱、曝气柱和好氧柱组成,通过曝气柱内的气提作用驱动混合液在各反应单元之间循环流动,从而在连续流体系中形成较稳定的分区反应环境,并重构水力剪切与代谢选择压^[6]。Zier工艺目前仍以实验室研究和应用探索为主,其在实际市政污水处理中对有机物和氨氮具有较好的去除效果^[7-8]。

然而,现有文献多聚焦于AGS形成的一般物理化学条件,针对Zier工艺这一特定构型的核心机制、运行优势及其局限性的系统总结仍然较少^[4,6]。同时,随着工艺复杂度提高,如何通过自动化控制协调曝气、循环与反应过程,仍缺乏较系统的梳理^[9-10]。基于此,本文聚焦Zier工艺,探讨其在连续流条件下的构型特征、作用机制、技术特点及自动化控制策

略,以期连续流AGS技术优化及Zier工艺后续研究提供借鉴。

1 连续流AGS的形成机制

AGS的形成并非单一的生物聚集过程,而是在特定水力条件、代谢环境与物理筛选作用共同影响下,微生物逐步完成聚集、结构致密化和稳定维持的结果^[4,11]。现有研究从四阶段理论、胞外聚合物(EPS)假说、自絮凝假说和晶核诱导假说等不同角度解释了颗粒形成过程(图1),这些机制大多建立在周期性剪切、底物波动和沉降筛选等条件基础之上,而这些条件在传统连续流体系中往往难以同时形成或长期维持^[4,11]。因此,连续流AGS难以长期稳定维持,并不主要是因为微生物本身缺乏颗粒化能力,而是因为成粒及稳定维持所需的外部驱动条件难以有效建立^[4-5]。

从水力条件看,AGS的形成通常需要一定强度的水力剪切,以促进初期聚集体碰撞成核、压实颗粒结构并筛除松散絮体^[11]。四阶段理论认为,颗粒形成过程表现为由疏松聚集体逐步向致密颗粒转变,实质上离不开合适的剪切和压实条件。相比之下,传统连续流反应器多呈推流或完全混合流态,整体水力环境较为平稳,缺乏SBR体系中明显的阶段性高强度剪切作用,因而难以形成持续有效的水力压实条件^[4-5]。这使得连续流体系中形成的聚集体更容易停留在结构疏松的早期状态,限制颗粒进一步致密化,相关原理如图1(a)所示。从代谢环境看,EPS的分泌和颗粒结构稳定通常依赖较明显的底物

浓度变化和代谢选择环境。研究^[12-13]表明,周期性的“盛宴/饥饿”底物梯度有利于促进胞内储存和EPS分泌,从而增强微生物之间的黏结作用,有助于保持颗粒内部结构的稳定性。但连续流工艺通常采用持续进水方式,底物供给相对平缓,微生物长期处于较稳定的基质环境中,缺乏明显的代谢胁迫和选择过程,因而不利于形成持续有效的EPS分泌动力^[4,13]。在这种条件下,即使出现初步聚集,也往往因颗粒内部黏结强度不足而难以维持稳定结构,EPS假说原理如图1(b)所示。

除水力和代谢条件外,AGS的形成与长期维持

还依赖足够的物理筛选作用。自絮凝假说认为,形成颗粒前驱体的微生物能够借助表面电荷与疏水性调节发生自聚集,从而形成颗粒前体^[14],但这些前驱体要进一步发展为成熟颗粒,还需要足够的沉降选择压,以实现致密颗粒保留和松散絮体洗脱。传统连续流系统通常依赖二沉池完成泥水分离,并通过污泥回流维持生物量,这种方式难以有效区分颗粒污泥与絮状污泥,使沉降性能较差的污泥仍有可能回到反应器内并与颗粒污泥竞争,从而削弱颗粒化维持条件^[4,15]。晶核诱导假说提出,投加惰性细小颗粒能够为分散微生物提供附着位点,加快颗粒

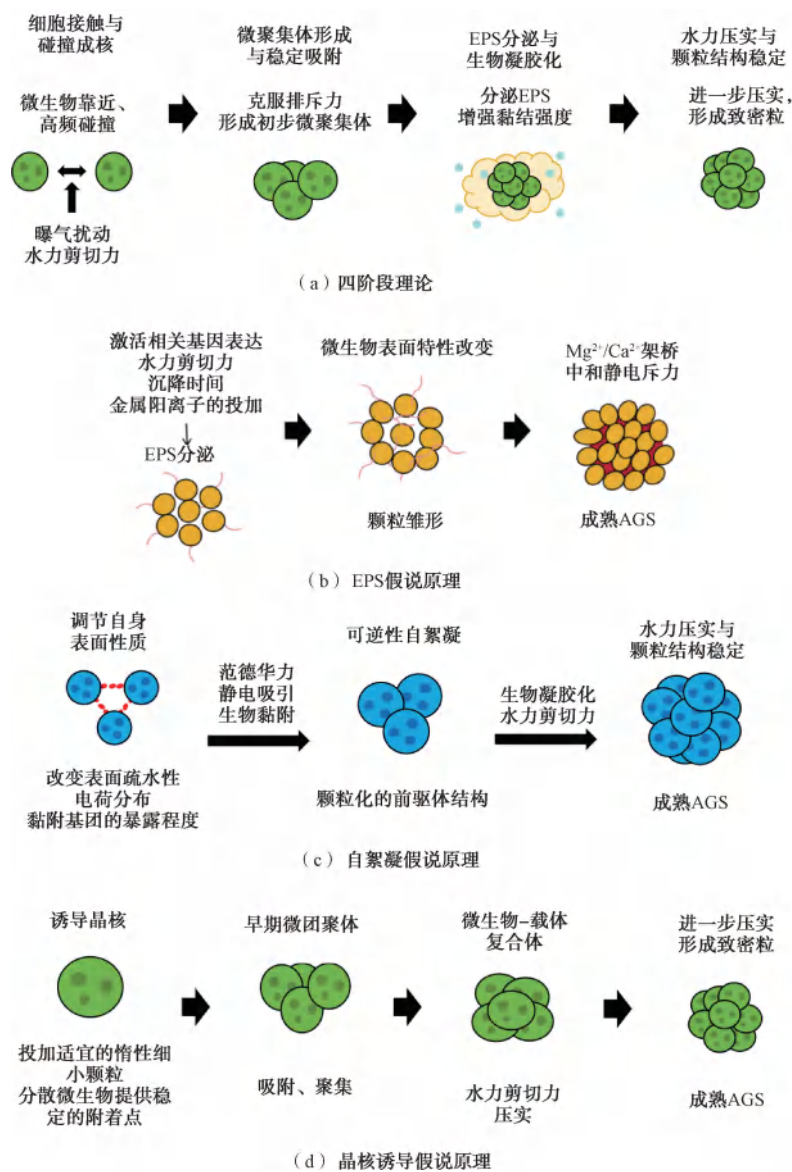


图1 AGS形成的假说原理

Fig. 1 Hypothesis Principle of AGS Formation

化启动过程^[16]。但在连续流体系中,若缺乏足够的 EPS 黏结作用、水力压实条件和颗粒保留能力,附着于晶核表面的生物膜仍易脱落,晶核本身也可能随水流流失,因此该方式更适合作为启动阶段的辅助措施,而难以单独支撑连续流 AGS 的长期稳定维持,相关原理分别如图 1(c) 和图 1(d) 所示。

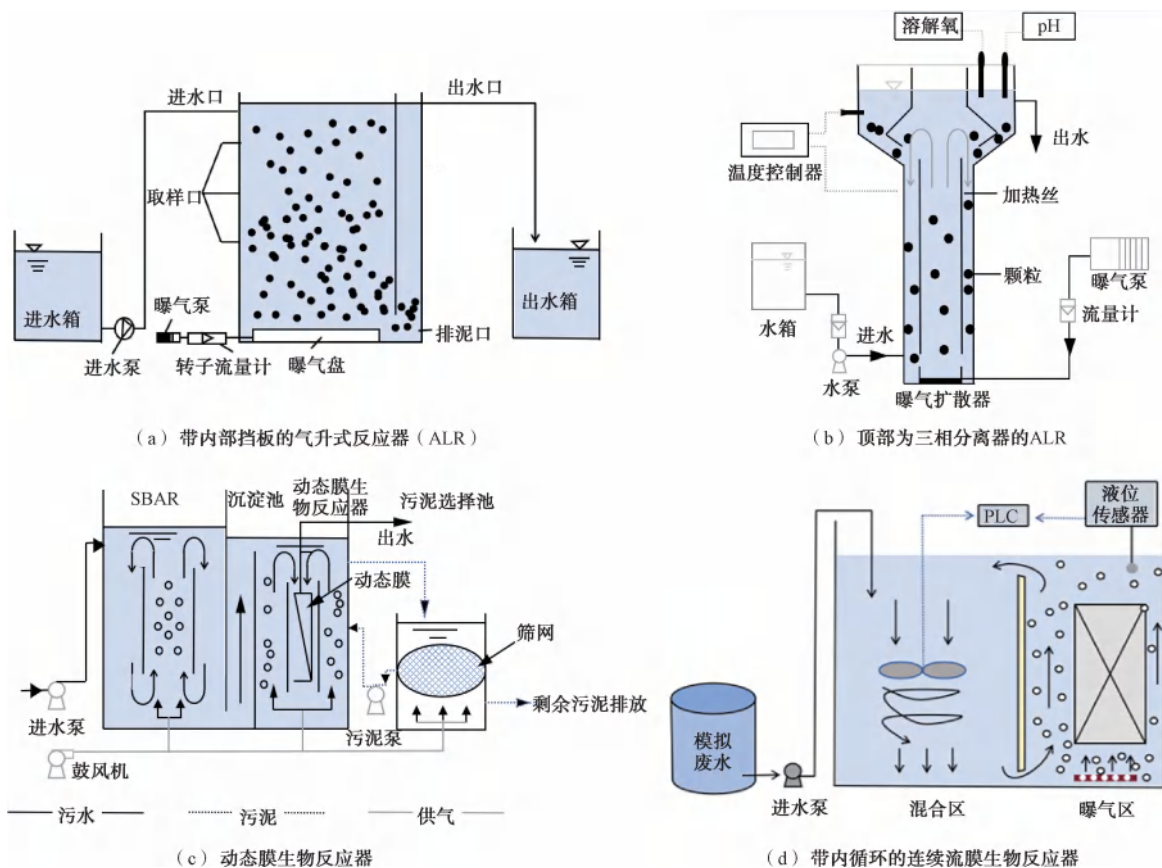
总体来看,连续流 AGS 面临的关键问题并不是缺少颗粒化机制本身,而在于连续流条件下难以同时建立并维持水力剪切、代谢选择和物理筛选等关键外部驱动条件。正因如此,后续研究仍需从反应器构型优化、流态强化和过程调控等方面进一步探索适用于连续流体系的强化路径,为 AGS 形成和稳定运行创造有利条件。

2 连续流 AGS 单一强化策略的局限性

AGS 的颗粒化驱动力在传统连续流反应器中难以有效建立^[4]。鉴于连续流工艺在工程应用中的普适性,如何在不改变连续进水方式的前提下,通过改

变反应器构型来重构这些驱动条件,成为连续流 AGS 研究的重要方向。目前,相关研究^[15]主要聚焦于物理结构优化与流态调控 2 个维度,但单一强化策略往往只能改善某一类驱动条件,难以同时满足颗粒长期稳定维持的要求。

一类研究尝试通过设置物理分离组件重建沉降和粒径筛选条件。常见做法包括在反应器内部设置挡板、三相分离器、筛网或动态膜组件等结构 [图 2(a)~图 2(c)],通过强化泥水分离和粒径选择,使沉降性能较差的絮体污泥优先排出,而沉降性能较好的颗粒污泥尽可能保留于系统内^[17]。与仅依赖重力沉降相比,这类方法在一定程度上提高了颗粒污泥保留效率,并已在部分市政污水处理升级改造研究中得到验证^[18]。另一类研究则侧重于通过构型和流态调控重建底物梯度与局部传质差异。为模拟 SBR 中随时间变化形成的底物环境,研究者^[13]尝试将这一过程转化为空间上的分区反应,设



注:PLC 为可编程逻辑控制器,SBAR 为序批式气升反应器。

图 2 基于不同 AGS 颗粒化策略的连续流反应器^[17,19-21]

Fig. 2 Continuous-Flow Reactors Based on Different AGS Granulation Solutions^[17,19-21]

置多个串联功能区,使污水沿流程依次经历高底物浓度区和低底物浓度区,从而诱导微生物进行胞内物质储存与EPS分泌。除宏观推流外,部分研究还利用内部循环结构[图2(d)]构建局部流态差异,通过气提或机械搅拌强化传质,在一定程度上形成底物和溶解氧梯度^[19]。

然而,上述方法仍主要停留在单一维度的补强。物理截留策略虽可改善颗粒保留,但本质上仍属于被动分离,长期运行中易受到污染堵塞、运行调节灵活性偏低等因素影响,同时难以从根本上改善微生物代谢环境^[17]。流态调控策略则能够在一定程度上改善底物分布,但在实际工程中易受返混效应、内循环系统、运行调节要求等因素制约,也往往难以同时兼顾足够的水力剪切和稳定的物理筛选^[4]。实际上,AGS的稳定形成并不是单一因素作用的结果,而是水力剪切、物理筛选和代谢驱动共同作用的结果^[15]。在连续流条件下,如果仅采用单一强化方

式,颗粒化过程往往表现为短期改善而长期维持不足^[15]。在此背景下,连续流AGS的研究开始由单一条件强化转向多条件协同重建,以Zier工艺为代表的新型构型也由此被提出。该工艺通过分置曝气构型与气提自循环运行方式,在同一系统内强化内部循环、分区反应环境和颗粒筛选条件,为连续流条件下AGS的稳定培养提供了新的实现路径^[6]。

3 Zier 工艺

Zier工艺采用分置曝气自循环构型,典型反应器由缺氧柱、曝气柱和好氧柱3个反应柱组成。缺氧柱主要用于进水分配、反硝化及部分有机物转化,曝气柱负责供氧并通过气提作用驱动系统内部循环,好氧柱则进一步完成有机物去除和硝化反应^[22-23]。该工艺利用曝气产生的气液密度差实现内部自循环,在同一反应系统内整合了供氧、回流和分区反应功能,为形成沿空间分布的反应环境提供了结构基础^[8]。Zier工艺构造如图3所示。

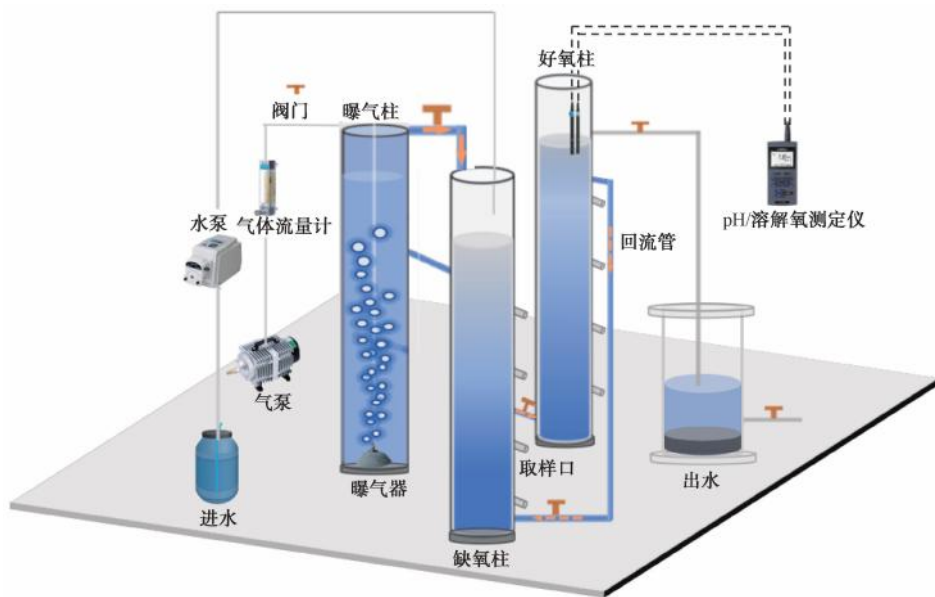


图3 Zier 工艺流程

Fig. 3 Flow of Zier Process

Zier工艺的核心机制在于通过气提自循环实现“时空置换”。与SBR依靠进水、曝气和沉淀等运行阶段交替形成选择环境不同,Zier工艺借助分置曝气构型,将原本沿时间变化形成的代谢环境转化为沿反应器空间分布的反应环境^[6,22]。在这一过程中,气提自循环形成的流场特征、底物分布和溶解氧分布相互联系,共同作用于颗粒污泥的形成与稳定

维持。一方面,较高的循环强度和上升流速增强了污泥所受的水力剪切,有利于去除结构松散的絮体,促进颗粒压实,并对污泥沉降性能形成持续筛选^[8]。另一方面,缺氧柱、曝气柱和好氧柱之间形成了相对稳定的底物和溶解氧空间差异,进水侧有机物浓度较高且溶解氧浓度较低,有利于反硝化和有机物优先利用;曝气柱和好氧柱则进一步完成供

氧、有机物去除和氨氮转化^[6,23]。研究^[8]表明,Zier 工艺可在自循环流量与进水流量之比为 12~30、上升流速为 9.8~18 m/h 的条件下维持较稳定的污泥循环与 AGS 颗粒化过程。因此,Zier 工艺中的“时空置换”并不是简单的时间梯度向空间梯度转换,而是在气提自循环驱动下,通过流场重构、底物和溶解氧空间分布、水力剪切与污泥筛选共同作用,形成适合 AGS 稳定维持的连续流反应环境^[6,8]。

与传统连续流 AGS 工艺相比,Zier 工艺在构型和运行方式上具有一定优势。该工艺通过分置曝气即可同时实现供氧、内部循环和分区反应,无需额外设置复杂回流单元,系统构型相对紧凑。依托连续的内部自循环和空间分区反应环境,Zier 工艺在连续流条件下表现出较好的颗粒保持潜力,并能够较好地兼

顾颗粒污泥维持与污染物去除,为连续流 AGS 工艺优化提供了新的思路^[6-7]。与此同时,Zier 工艺的稳定运行仍受多种因素共同影响。研究^[7]表明,颗粒形成与保持不仅与曝气强度、溶解氧、水力停留时间等参数有关,还与颗粒粒径、EPS 含量及微生物群落结构密切相关。此外,EPS 组分变化会影响颗粒间黏结作用和内部结构稳定性,而菌群组成及其空间分布也会随着溶解氧、基质浓度和水力选择压变化而调整,进而影响有机物去除、脱氮过程和颗粒稳定维持^[8]。因此,Zier 工艺后续优化仍需进一步明确运行参数、颗粒结构、EPS 特征与功能菌群响应之间的关系,以建立更系统的调控依据。为更直观说明 Zier 工艺与一般连续流 AGS 工艺在构型和运行方式上的差异,对相关特征进行比较,如表 1 所示。

表 1 Zier 工艺与一般连续流 AGS 工艺的差异比较

Tab. 1 Comparison of Differences between Zier Process and General Continuous-Flow AGS Process

比较维度	一般连续流 AGS	Zier 工艺
反应器构型	需要配置挡板、筛分装置、回流单元或其他分离结构	由缺氧柱、曝气柱和好氧柱构成的分置曝气自循环结构
循环方式	借助机械回流或外部循环维持系统运行	主要依靠曝气柱的气提作用形成系统内部循环
反应分区	通过构筑物分隔或运行条件调节形成不同反应区	在同一反应系统内形成相对稳定的底物与溶解氧空间分布
颗粒维持	依赖物理截留和外部颗粒保留措施	主要依靠循环流态、水力作用和分区反应环境维持颗粒稳定
系统集成	供氧、回流和分离功能通常由不同单元分别承担	供氧、循环和分区反应可在同一体系内协同实现
调控重点	更侧重于回流控制、分离效率及各单元运行配合	更侧重于曝气强度、循环状态和分区反应环境调节

4 自动化控制

与传统活性污泥系统相比,AGS 工艺的运行稳定性不仅取决于污染物去除过程,还受到供氧条件、水力剪切、颗粒保留及底物分布等因素共同影响,因此对过程监测和自动化调控提出了更高要求。近年来,污水处理自动化控制总体呈现出由单点反馈向多变量协调、由规则控制向预测优化、由直接测量向“直接测量+软测量”发展的趋势,为复杂生物处理系统的稳定运行提供了新的技术支撑^[24]。在 Zier 工艺中,曝气不仅承担供氧功能,同时还决定内部循环强度和空间分区反应环境,因此自动化控制已不再只是辅助运行手段,而是保障其在连续流条件下实现颗粒稳定维持、脱氮能力提升与能耗降低的重要条件。基于此,本节在回顾 SBR 控制策略演进的基础上,进一步讨论 Zier 工艺自动化控制的研究进展。

4.1 SBR 控制策略

SBR 依靠进水、反应、沉淀和排水等阶段切切实

现过程调节,其运行效果在很大程度上取决于反应终点识别、曝气时长控制和阶段转换的准确性,因此对在线监测和自动化控制具有较高要求。早期工程运行多采用固定时间控制,但该方式难以适应进水水质、水量及反应速率的变化,容易出现曝气不足或过曝现象,进而影响出水稳定性和能耗水平。随着在线监测技术的发展,基于溶解氧、pH、氧化还原电位(ORP)、氨氮、NO_x 等信号的反馈控制逐步成为 SBR 运行调节的重要方式,可用于识别反应阶段终点、优化曝气过程并提高系统运行稳定性^[9]。

在此基础上,自动化控制逐步由固定规则控制向动态调节和预测优化发展。模型预测控制可结合系统运行状态和未来负荷变化,对曝气强度、反应时间及运行约束进行综合协调,在应对进水波动和降低运行状态波动方面具有一定优势^[25]。事件触发式比例-积分-微分(PID)控制则在维持基本控制效果的同时,减少了不必要的控制更新,有助于提高控制效率^[10]。软测量方法通过融合在线监测信号、历

史运行数据和过程模型,对难以直接在线获取的状态变量进行间接估算,为高级调控和状态识别提供了补充依据^[26]。总体来看,SBR 自动化控制由依赖经验设定的时间控制,逐步发展为基于过程信号识别、状态估算和动态调节的综合控制模式。

这些控制思路对 AGS 工艺,特别是连续流 AGS 工艺具有重要参考意义。AGS 的形成与长期稳定运行不仅受供氧过程影响,还与水力剪切、底物供给、颗粒保留和分区反应环境密切相关,因此其控制对象已不再局限于单一曝气量调节,而是逐步转向对反应环境和颗粒状态的协同调节。对 Zier 工艺而言,这种由单一变量调节向多变量协同调节的发展尤为关键,因为其运行稳定性不仅与氧供需平衡有关,还与内部循环强度及空间分区反应环境密切相关。因此,SBR 中形成的在线反馈、预测调控与软测量方法可为 Zier 工艺自动化控制方案设计提供借鉴,但如何将基于时间序列的控制策略转化为适用于连续流空间分区反应器的协同控制,仍是后续研究需要重点解决的问题。

4.2 Zier 工艺的自动化控制需求与进展

与 SBR 依赖周期切换实现运行调节不同,Zier 工艺属于典型的气提自循环连续流 AGS 体系,其运行状态受曝气驱动的内部循环和氧供需平衡共同影响。对于 Zier 工艺而言,曝气不仅承担供氧功能,同时也是驱动内部循环形成的主要动力,因此曝气调节会同时影响溶解氧分布、循环强度、水力剪切和反应分区状态。Zier 工艺的自动化控制已不再是单纯维持某一位置溶解氧稳定,而是需要围绕“供氧-循环-反应环境”开展协同调节^[6]。

从控制目标看,Zier 工艺的自动化控制至少涉及 3 个方面:一是保障氧供需平衡和分区溶解氧环境的合理分布,以兼顾有机物去除、硝化和反硝化过程;二是维持内部循环强度和上升流速处于适宜范围,以保证足够的水力剪切和颗粒筛选作用;三是尽量保持颗粒污泥空间分布和污泥层位置的相对稳定,避免循环失衡导致颗粒在不同反应单元之间无序迁移,从而破坏已有的分区反应环境和颗粒生长条件。由此可见,Zier 工艺的控制对象不仅包括常规水质指标,还延伸到与流场结构、颗粒分布和系统稳定性密切相关的运行状态变量。研究^[8]表明,Zier 工艺中氧供需比和溶解氧浓度梯度对脱氮性能与颗粒稳定性具有重要影响。通过调节曝气强度,

可以在保证硝化效果的同时改善反硝化条件,并减少过曝引起的能耗上升及颗粒结构扰动等问题。在运行表征上,不同反应柱之间的溶解氧浓度差值已被用于反映循环强度和氧分布状态,这为建立基于在线信号的反馈调节提供了基础^[7]。除氧环境外,污泥层高度和污泥在不同单元中的分布稳定性也是影响 Zier 工艺运行的重要因素。若污泥层位置波动较大或颗粒在柱体之间迁移过于频繁,将改变颗粒保留条件和传质环境,进而影响系统脱氮效果和颗粒稳定性。因此,合理调节曝气和循环,使污泥层保持在合适位置并维持较稳定的内部循环结构,是 Zier 工艺自动化控制的重要内容^[8]。

从控制方法看,现阶段 Zier 工艺的自动化调节仍以比例-积分(PI)或 PID 等基础反馈控制为主,主要用于实现曝气量和分区溶解氧的基本控制。这类方法具有实现简单、工程适应性较强的特点,适用于反应器基础运行调节。但由于 Zier 工艺中曝气、循环和反应环境之间存在明显的关联关系,单一反馈控制在应对进水波动、多目标运行约束和颗粒长期稳定维持方面仍存在一定局限。基于这一背景,已有研究^[6,8]开始关注模型预测控制、状态估算和多变量协同调节在 Zier 工艺中的应用潜力,尝试通过过程模型与在线数据结合,对氧供需、循环强度、颗粒状态和能耗目标进行综合协调。这表明,Zier 工艺的控制策略正在由经验型调节逐步向预测型和协同型调节发展。

未来,Zier 工艺自动化控制的完善仍需围绕在线可观测量、关键状态变量识别以及控制目标协调 3 个方面展开:(1)需要进一步筛选能够稳定表征氧分布、循环状态和颗粒变化的在线信号,为控制系统提供更可靠的反馈基础;(2)还需要发展适用于 Zier 工艺的软测量和状态估算方法,以弥补颗粒结构、污泥层状态和分区传质特征难以直接在线测量的不足;(3)Zier 工艺的控制优化不能只关注单一出水指标,还应兼顾颗粒长期稳定、脱氮效率和能耗约束等多重目标。总体来看,自动化控制已不再是 Zier 工艺的附属手段,而是保障其在连续流条件下实现高效脱氮、颗粒长期稳定和低成本运行的重要支撑。随着在线监测、软测量和预测控制方法的发展,面向 Zier 工艺的多变量协同控制将成为后续研究和工程优化的重要方向。Zier 工艺逻辑关系控制如图 4^[23]所示。

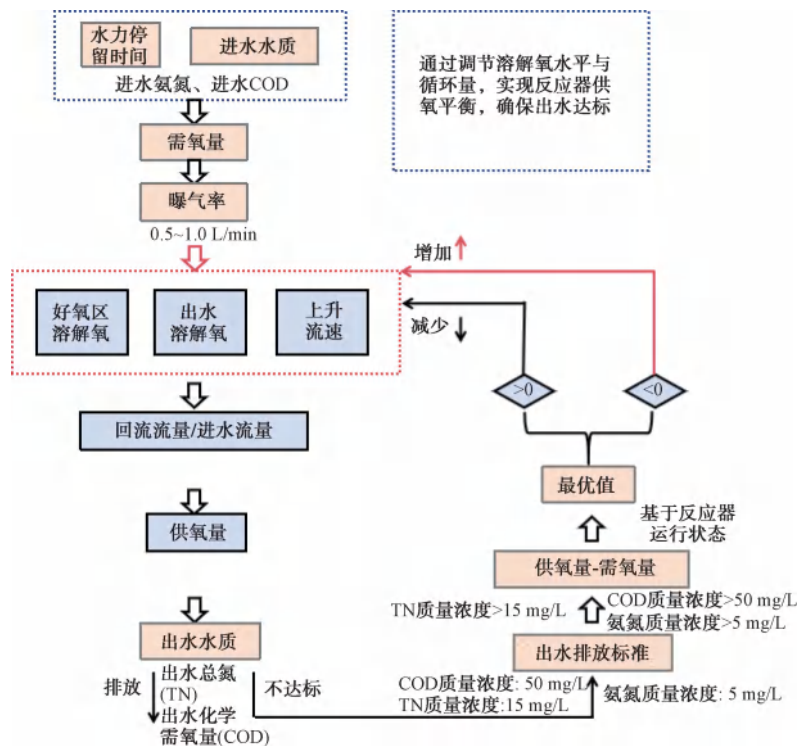


图 4 Zier 工艺逻辑关系控制图^[23]

Fig. 4 Logic Relationship Control Diagram of the Zier Process^[23]

5 结论与展望

本文综述了连续流 AGS 工艺中 Zier 工艺的构型特点、核心机制、技术特点及自动化控制研究进展。Zier 工艺通过分置曝气自循环构型,在连续流条件下实现了供氧、内部循环和分区反应环境的统一,可形成较稳定的流场、底物和溶解氧空间分布,为颗粒污泥形成与稳定维持提供条件。与一般连续流 AGS 工艺相比,Zier 工艺在流态强化、分区反应环境构建和系统集成方面具有一定特点,为连续流 AGS 工艺优化提供了新的思路。与此同时,自动化控制也是保障 Zier 工艺实现颗粒长期稳定、提高脱氮效果并维持低能耗运行的重要保障。总体来看,Zier 工艺处于研究和应用探索阶段,其运行表现受曝气强度、循环流态、颗粒结构演变及控制水平等因素共同影响。后续研究仍需进一步明确工艺参数与颗粒状态、EPS 特征及微生物群落响应之间的关系,并加强在线识别、软测量和多变量协同控制方法研究,来提升系统稳定性。

参考文献

[1] Bengtsson S, de Blois M, Wilén B M, et al. A comparison of

aerobic granular sludge with conventional and compact biological treatment technologies [J]. *Environmental Technology*, 2019, 40 (21): 2769-2778.

[2] Vydehi P, Ravindran G, Shyamala G, et al. Aerobic granular sludge-based wastewater treatment: Current trends, formation, applications, granulation, efficiency, and bottlenecks [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 70: 107075. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107075.

[3] Pronk M, de Kreuk M K, de Bruin B, et al. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment [J]. *Water Research*, 2015, 84: 207-217. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.011.

[4] Rosa-Masegosa A, Muñoz-Palazon B, Gonzalez-Martinez A, et al. New advances in aerobic granular sludge technology using continuous flow reactors: Engineering and microbiological aspects [J]. *Water*, 2021, 13(13): 1792.

[5] Chen R F, Guo W B, Li L, et al. Aerobic granulation in a continuous-flow simultaneous nitrification, endogenous denitrification, and phosphorus removal system fed with low-strength wastewater: Granulation mechanism and microbial succession [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 487: 150598. DOI: 10.1016/j.cej.2024.150598.

[6] Qi W K, Tian R F, Li B, et al. Novel separate aeration self-circulating technology for continuous aerobic granular sludge process: Performance evaluation, hydrodynamic simulation and

- control strategy [J]. *Water Research*, 2024, 261: 122025. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122025.
- [7] Wang C, Qi W K, Zhang S J, et al. Continuous self-circulating up-flow granular sludge fluidized bed process treating low-strength real municipal wastewater at high hydraulic loads [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 414: 131618. DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131618.
- [8] Qi W K, Du T Y, Zhang S J, et al. A continuous self-circulating granular sludge treatment process for real municipal wastewater; Regulation strategy, exploring granularity and stabilization, and processing performance [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 486: 144528. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144528.
- [9] Yang Q, Gu S B, Peng Y Z, et al. Progress in the development of control strategies for the SBR process[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2010, 38(8): 732-749.
- [10] Du S L, Yan Q S, Qiao J F. Event-triggered PID control for wastewater treatment plants [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 38: 101659. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101659.
- [11] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. *Water Research*, 2002, 36(7): 1653-1665.
- [12] McSwain B S, Irvine R L, Hausner M, et al. Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(2): 1051-1057.
- [13] Sun Y W, Angelotti B, Brooks M, et al. Feast/famine ratio determined continuous flow aerobic granulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141467. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141467.
- [14] Beun J J, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor [J]. *Water Research*, 2002, 36(3): 702-712.
- [15] Samaei S H, Chen J F, Xue J K. Current progress of continuous-flow aerobic granular sludge: A critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 875: 162633. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162633.
- [16] 刘绍根, 孙菁, 徐锐. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对好氧污泥快速颗粒化的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(1): 168-176.
Liu S G, Sun J, Xu R. Effects of Ca^{2+} and Mg^{2+} on rapid granulation of aerobic sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1): 168-176.
- [17] Liu H B, Li Y J, Yang C Z, et al. Stable aerobic granules in continuous-flow bioreactor with self-forming dynamic membrane [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121: 111-118. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.07.016.
- [18] 俞晟, 钟旭东, 胡涛, 等. 好氧颗粒污泥工艺在市政污水处理中的应用[J]. *净水技术*, 2018, 37(1): 40-46.
Yu S, Zhong X D, Hu T, et al. Research and application of aerobic granular sludge process in municipal wastewater treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(1): 40-46.
- [19] Chen C Q, Bin L Y, Tang B, et al. Cultivating granular sludge directly in a continuous-flow membrane bioreactor with internal circulation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 309: 108-117. DOI: 10.1016/j.cej.2016.10.034.
- [20] 鲁磊, 信欣, 鲁航, 等. 连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化[J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3778-3785.
Lu L, Xin X, Lu H, et al. Process optimization of aerobic granular sludge continuous-flow system for the treatment of low COD/N ratio sewage [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10): 3778-3785.
- [21] Zhou D D, Liu M Y, Wang J, et al. Granulation of activated sludge in a continuous flow airlift reactor by strong drag force [J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2013, 18(2): 289-299.
- [22] Zhang H L, Du T Y, Shi Q, et al. Study on denitrification control strategy and granular sludge stabilization strategy of a new continuous flow reactor [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 72: 107666. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107666.
- [23] Liu L F, Wang C, Zhang S J, et al. Underlying mechanisms of pollutant removal enhancement through the formation of low levels of granular sludge in an innovative continuous-flow reactor[J]. *Environmental Research*, 2025, 285: 122678. DOI: 10.1016/j.envres.2025.122678.
- [24] Moretti A, Ivan H L, Skvaril J. A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies. Is the shift to real-time monitoring nowadays feasible? [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 60: 105061. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105061.
- [25] Stenftoft P A, Guericke D, Munk-Nielsen T, et al. Model predictive control of stochastic wastewater treatment process for smart power, cost-effective aeration [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52(1): 622-627.
- [26] Fang G, Huang D P, Wu Z Y, et al. Effluent quality soft sensor for wastewater treatment plant with ensemble sparse learning-based online next generation reservoir computing [J]. *Water Research X*, 2024, 25: 100276. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100276.