

# 连续流好氧颗粒污泥形成影响因素及应用研究进展

汪彪<sup>1</sup>, 姚昕<sup>1</sup>, 刘绍根<sup>1,2</sup>, 周安澜<sup>1</sup>, 戚功奇<sup>1</sup>, 刘垚<sup>1</sup>

(1. 安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽合肥 230601;

2. 水污染控制与废水资源化安徽省重点实验室, 安徽合肥 230601)

**[摘要]** 我国污水处理厂对污水进行生物处理时应用最广泛的工艺是活性污泥法。但该工艺存在占地面积大的问题, 而随着城市化进程的加快, 土地使用越来越受到限制。学者们对新型污水处理技术进行了研究。连续流好氧颗粒污泥技术被认为是最具潜力的污水生物处理技术之一。简要论述了连续流好氧颗粒污泥的培养方法与形成机制, 重点综述了连续流系统中, 水力剪切力、HRT、微生物饱食-饥饿期、反应器构型及运行方式等因素对污泥颗粒化及稳定性的影响, 介绍了该技术对氯化苄生产废水、实际生活污水、黄连素废水、乳制品废水等污水的处理效果, 并对该技术目前存在的技术差距进行讨论, 最后指出连续流好氧颗粒污泥技术未来的研究重点。

**[关键词]** 连续流; 好氧颗粒污泥; 培养方法; 污水处理

**[中图分类号]** X703; TU992.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)04-0007-09

## Research progress on influencing factors and application of continuous flow aerobic granular sludge

WANG Biao<sup>1</sup>, YAO Xin<sup>1</sup>, LIU Shaogen<sup>1,2</sup>, ZHOU Anlan<sup>1</sup>, QI Gongqi<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Water Pollution Control and Wastewater Reuse, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The most widely used process for biological treatment in wastewater treatment plants in China is activated sludge method. However, it has the problem of occupying large site area. With the accelerated urbanization, land use is increasingly restricted. Researchers have investigated new wastewater treatment technologies. Continuous flow aerobic granular sludge technology is considered one of the most promising biological treatment technologies for wastewater. The cultivation method and formation mechanism of continuous flow aerobic granular sludge were briefly discussed, focusing on the effects of factors such as hydraulic stress, HRT, microbial satiation-starvation period, reactor configuration and operation mode on sludge granulation and stability in continuous flow systems. The treatment effects of the technology on benzyl chloride wastewater, domestic wastewater, berberine wastewater and dairy wastewater were presented, and the current technical gaps of the technology were discussed. Finally, the future research focus of continuous flow aerobic granular sludge technology was proposed.

**Key words:** continuous flow; aerobic granular sludge; cultivation method; wastewater treatment

活性污泥法是我国污水处理厂(WWTP)对污水生物处理应用最广泛的工艺。但该工艺存在占地面积大的问题, 应用范围受到限制。好氧颗粒污泥(AGS)是微生物在特定条件下相互聚合形成的结构紧凑、外形规则的微生物聚集体, 与传统的活性污泥法相比更具优势, 如占地面积小、沉降性能良好、生

物量浓度高、耐有机负荷高且不易发生污泥膨胀等, 有望取代运行百年的活性污泥法, 是目前最具潜力的污水生物处理技术<sup>[1-4]</sup>。过去几十年中的中试研究与实际应用案例主要集中在 SBR 反应器。但该反应器为间歇性进水排水, 不能连续运行, 曝气时间长、能耗大, 运行时间长会出现污泥解体, 同时处

理水量较少,不适于大规模污水处理工程应用<sup>[5-6]</sup>。相比之下,连续流反应器具有更简单的操作控制系统,安装成本低,同时其连续流动模式处理水量大、运行成本低,且目前大多数大型污水厂采用连续流工艺,对连续流状态下的 AGS 研究具有重要的应用价值<sup>[6-10]</sup>。

国内外研究者已对连续流 AGS 的培养方法、形成过程、颗粒化影响因素、应用进行研究并取得一定成果。笔者对连续流 AGS 技术的发展现状进行综述与讨论,并提出未来研究方向,以期今后连续流 AGS 工艺的工程化应用与推广提供一定理论基础。

表 1 不同类型连续流系统中好氧颗粒污泥的培养

Table 1 Culture of aerobic granular sludge in different types of continuous flow systems

进水基质	接种污泥类型	连续流反应器类型	反应器容积/L	培养控制条件	颗粒污泥理化性质	参考文献
人工配水	厌氧颗粒污泥	连续流完全混合反应器 CSTR	17	HRT 在 8 h 左右, DO 为 2 mg/L, 碳氮比为 6~8	平均粒径 1.5~2.5 mm, 氨氮、COD 去除率达到 82% 及 94% 以上	[12]
真实低强度废水	活性污泥	双沉淀连续流反应器 CFR-TST	26.8	HRT 为 18 h, OLR 为 0.16 kg/(m <sup>3</sup> ·d), 选择压力逐渐增加	平均粒径 1.05 mm, SVI 为 26 mL/g, 对有机物去除率较低	[13]
人工配水	厌氧颗粒污泥	连续流好氧颗粒膜生物反应器 AGS-MBR	20	HRT 为 18 h, 引入生物载体形成稳定纵向循环	结构紧凑、形状清晰, 氨氮、COD 去除率分别 >85%、90%	[14]
人工配水	成熟 AGS+活性污泥	连续流双柱循环好氧颗粒反应器 DCCAGR	18	HRT 为 4 h, OLR 为 6 kg/(m <sup>3</sup> ·d) 高水力剪切力 表面气速为 1.2 cm/s	平均粒径 1.2 mm, COD、氨氮、TP 去除率分别在 97%、90%、87%	[15]
混合污水	厌氧污泥	改进厌氧折流板反应器 ABR-CSTR	110	HRT 逐步由 2.0 h 缩短至 0.75 h, 有机负荷提高	平均粒径为 0.58 mm, 对 COD、氨氮、TP、TN 的去除率分别在 90%、80%、65%、45% 左右	[16]
人工配水	除磷颗粒污泥	连续流反应器 CFR	24	HRT 为 6 h, 污泥回流比 50%, DO 为 2~5 mg/L, 温度在 (22±3) °C	成熟 AGS 对 COD、TP 去除率分别为 96.5%、98.5%	[17]
市政污水	活性污泥	改进的气举回路反应器 AG-RPIR	31	HRT 为 10.8 h, 动态进水, 上升流速为 2.88 cm/s	颗粒生长到 2~4 mm, 对 COD、TP、TN 去除率分别在 89.4%、87.9%、89.1%	[18]
混合污水	成熟 AGS	连续流颗粒自形成动态膜生物反应器 CGSFDMBR	35	HRT 为 13 h, DO 在 2~3 mg/L, 温度在 20~25 °C	平均粒径为 0.1~1.0 mm, 对 COD、氨氮、TN、TP 去除率分别为 83.3%、73.3%、67.3%、60%	[19]

由表 1 可见,大部分研究采用人工配水进行 AGS 的培养,且接种污泥类型、实验培养控制条件及反应器构型差别很大。值得注意的是,连续流 AGS 对进水基质有较高的有机物降解能力,可能是由于配水中的有机物容易被微生物吸收利用。

## 1.2 好氧颗粒污泥颗粒化形成过程

在连续流反应器中 AGS 的形成是一个复杂的传质过程,与传统 AGS 相比最主要的区别在于进水方式及反应器构造不同,但本质上 AGS 都是微生物在特定情况下发生的自凝聚。因此大多数情况下都基于 SBR 模型进行解释,主要有胞外多聚物假说、

## 1 连续流好氧颗粒污泥的培养及形成

### 1.1 连续流好氧颗粒污泥培养

K. MISHIMA 等<sup>[11]</sup>首次在连续流好氧升流式污泥床反应器(AUSB)中接种活性污泥成功培养出 AGS,但运行条件极其苛刻,必须在纯氧条件下运行,且培养出的颗粒污泥不具备脱氮除磷能力。研究者随后对 AGS 的培养方法和形成机理进行研究,但未得出统一结论。AGS 形成过程复杂、反应器构型差异及运行稳定性限制了连续流 AGS 的进一步发展。连续流系统中 AGS 的培养条件如表 1 所示。

丝状菌假说、诱导核假说、自凝聚假说、金属阳离子假说、信号分子假说、选择压驱动假说<sup>[20-21]</sup>。目前 AGS 培养形成机理中认可度较高的是 Yu LIU 等<sup>[22]</sup>提出的四步阶段形成假说,如图 1 所示。

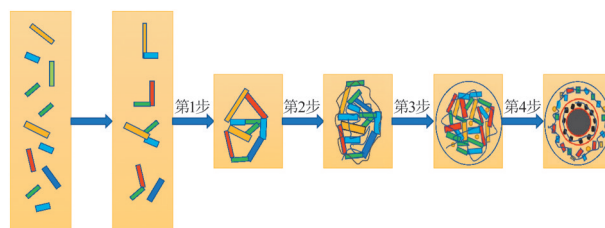


图 1 好氧颗粒污泥的颗粒化形成过程

Fig. 1 Granulation formation of aerobic granular sludge

首先,微生物在重力或水流推动力等的作用力下相互接触、碰撞形成聚合体;聚合体在物理、化学或生物作用力下使微生物发生相互吸附;微生物分泌胞外多聚物(EPS)产生生物凝胶作用,形成微生物聚集体;最后在水流剪切力作用下颗粒污泥的三维结构更加成熟稳定,AGS形成。AGS阶段形成假说综合了多种假说的研究成果,考虑多种因素之间的作用效果,未限于单方面的实验研究成果,但没有解释完整的AGS形成过程<sup>[4]</sup>。

## 2 主要影响因素

开发连续流生物反应器已成为好氧颗粒污泥研究的新趋势,但在连续系统中很难获得稳定的好氧颗粒污泥<sup>[7,23]</sup>。以往的AGS参数优化研究集中在SBR反应器中,因此有必要研究连续流反应器中好氧颗粒污泥形成主要影响因素,以确定最佳培养方法。影响好氧颗粒污泥形成及维持稳定的关键影响因素有水力剪切力、HRT、微生物饱食-饥饿期、反应器的构型与运行方式等。

### 2.1 水力剪切力

在连续流AGS形成过程中,水力剪切力起到重要作用<sup>[16]</sup>。水力剪切力一方面可促进絮状污泥相互碰撞进行凝聚,同时加速AGS中的微生物分泌大量EPS加速颗粒化形成进程,另一方面能够吹脱颗粒污泥表面多余的丝状菌,减少污泥发生膨胀的几率<sup>[24]</sup>。侯典训等<sup>[25]</sup>发现表面风速(SUAV)为0.8 cm/s时,连续运行条件下可形成AGS,平均粒径在1~2 mm,对COD的去除率达到90%以上,连续水力剪切力对连续流中AGS的形成起到关键促进作用。Jiaheng ZHOU等<sup>[26]</sup>在一种改进的连续流反应器中提供较低的表面上流空气速度,运行40 d后好氧造粒平均粒径>1 mm,沉降速度在40 m/h,对COD和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除率分别约为96%、94%。该研究认为在连续流系统中,EPS对于维持固定化细胞群落的结构完整性起到至关重要的作用,而EPS的产生与剪切力密切相关。尽管该连续流系统具有很好的有机物降解能力,但这种改进的连续流装置操作流程较复杂,不适用于实际工程中的应用推广。

综上所述,水力剪切力主要影响AGS的稳定性。在连续流中培养AGS,液体流动提供的推动力、颗粒之间的碰撞剪切和气泡提供的剪切力是AGS形成的关键因素。

### 2.2 水力停留时间(HRT)

在连续流AGS反应器中,HRT很大程度决定颗粒污泥的稳定性以及造粒能否成功,主要原因在于连续流反应器有内部沉降区时,HRT与基于沉降速度的选择压力直接相关。只有颗粒污泥的沉降速度大于水流上升速度时,颗粒污泥才会沉降并保留在反应器内。因此,HRT是实现泥水分离的关键控制因素。张雯等<sup>[12]</sup>研究了HRT对CSTR连续流反应器中AGS稳定性的影响,发现HRT>4 h时微生物生态结构系统保持稳定的平衡;当HRT由4 h提高至15 h时反应器的硝化性能增强,而HRT减少会加速AGS的形成,并最终确定最佳HRT为8 h。鲁磊等<sup>[27]</sup>在合建式连续流反应器中以实际生活污水为进水基质,研究HRT对AGS脱氮除磷与颗粒污泥稳定性的影响,发现HRT对污泥硝化有影响,HRT为7.5 h时对有机物的去除率最高。李冬等<sup>[10]</sup>采用缺氧/好氧两级连续流系统,以实际生活污水为进水基质,研究曝气强度和HRT对连续流AGS系统的影响,发现HRT对连续流系统的影响更大。Chunli WAN等<sup>[8]</sup>考察连续流好氧颗粒污泥床中HRT对部分硝化速率的影响,发现在HRT分别为7.2、12 h的2个反应器中氨氮和亚硝酸盐的去除率均超过90%,HRT为2.4 h时反应器性能恶化,去除率较低,同时发现HRT对微生物群落也有显著影响。

根据上述研究结果,可得出HRT是影响连续流系统运行稳定和有机物降解率的重要因素。尽管也有报道指出在连续流系统中较低HRT能够形成AGS,可能是由于过短的HRT会抑制悬浮微生物的生长,但根据水力选择压理论,HRT过短时会造成接种污泥无法在相应时间内充分沉降而出现跑泥现象,使得沉降性能良好的絮状污泥被冲出反应器,系统内污泥浓度降低,有机物降解率下降,难以聚集形成AGS。若选择的HRT较长则可能导致污泥处于内源呼吸阶段而降低污泥生长速度,因此需选择和控制在合适的HRT,以保障微生物的生长与繁殖。

### 2.3 微生物饱食-饥饿期

微生物以外部基质进行生长的阶段称为饱食期,以内部基质生长的阶段则称为饥饿期。传统SBR反应器中基质浓度处于贫富交替的环境,表现为反应器运行刚开始处于基质丰富状态,此时微生物迅速繁殖;随着微生物的消耗,基质浓度开始降低

并转变为贫乏状态。在这种饱食-饥饿交替的条件下微生物会分泌大量EPS,这些EPS保留在反应器内有利于颗粒的聚集吸附并加速颗粒污泥的形成。饱食-饥饿条件的交替会抑制丝状微生物的繁殖,而有利于絮凝细菌的生长<sup>[28]</sup>。但连续流反应器培养AGS时很难创造这种饱食-饥饿期,主要是由于连续流系统的底物常被微生物消耗,因此整个进水基质浓度处于相对较低的底物浓度水平<sup>[29]</sup>。如何在连续流反应器中创造该条件成为技术难点。

S. F. CORSINO等<sup>[7]</sup>在连续流膜生物反应器中培养AGS并研究颗粒污泥的稳定性,发现微生物饱食-饥饿期是维持连续流系统中AGS稳定性的必须保证的关键因素。接种成熟AGS到反应器内,在连续流操作下颗粒污泥很快失去结构稳定性,丝状菌使污泥变得松散,不稳定聚集体形成,通过间歇喂养后AGS的稳定性显著提高。Jiaheng ZHOU等<sup>[26]</sup>在改性连续流系统中采用塞流工艺,通过“从左到右”和“从右到左”的流动模式来创造饱食-饥饿期,成功实现了好氧造粒,其认为饱食-饥饿期对污泥颗粒化起到重要作用。同样地,Yewei SUN等<sup>[30]</sup>设计了一种具有10个串联挡板塞流生物反应器,可实现进水由高到低的底物浓度,提供饱食和饥饿阶段,在连续流动中成功实现好氧造粒。J. H. TAY等<sup>[31]</sup>研究发现周期性的饱食-饥饿方式是颗粒污泥形成的关键因素。其认为饱食-饥饿期会引起微生物表面特性的变化,促进微生物聚集形成大的微生物聚集体,然后在水力剪切力条件下形成颗粒状污泥。

微生物饱食-饥饿期在污泥颗粒化过程中具有十分重要的作用,在连续流系统中实现微生物饱食-饥饿期成为好氧制粒及稳定运行的关键。

#### 2.4 反应器的构型及运行方式

近年来有研究报道了连续流AGS反应器的优化和设计,但其结构和运行方式复杂且稳定性差,设计思路也基于传统培养AGS的关键因素进行设计,对于实际工程应用仍有挑战性<sup>[32-33]</sup>。

牛姝等<sup>[33]</sup>以城市实际污水为进水基质接种絮状污泥,采用逐级递增负荷的运行方式在连续流气提式好氧颗粒污泥流化床反应器(CAFB)中驯化培养AGS,反应器运行6 d可观察到AGS形成;但运行32 d时大量丝状菌生长繁殖发生污泥膨胀现象,仅运行36 d反应器关闭。由此看出CAFB反应器虽然

能基于三相分离器提供选择压力实现泥水分离和高剪切力驱动生物颗粒快速形成,但也存在运行不稳定等问题。CAFB反应器示意图如图2所示,主要由升流区、降流区及气液固三相分离区组成。升流区底部安装曝气装置向升流区混合液提供水力剪切力,使升流区混合液向上流动,降流区混合液向下流动,且混合液流至反应器底部经过三相分离区时,曝气气体、污泥及液体在此处分离,气体从装置口溢出,上清液从出水口排出,污泥随升流区至降流区的循环过程在降流区沉降并回流至升流区,混合液又自升流区一降流区一升流区循环流动。此类连续流反应器能够造粒的关键在于以持续的液相剪切力代替SBR反应器的气相剪切力强化颗粒快速聚集,同时基于三相分离器实现良好的泥水分离,避免造粒过程中污泥大量流失。

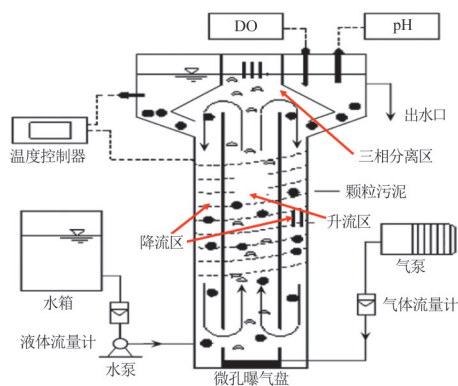


图2 连续流气提式好氧颗粒污泥流化床反应器

Fig. 2 Continuous flow airlift aerobic granular sludge fluidized bed

贺鹏鹏<sup>[34]</sup>采用连续流网板反应器历经30 d成功培养出平均粒径为2.5 mm的AGS,发现连续流网板反应器可加快颗粒化污泥形成并维持稳定运行。反应器示意图如图3所示。原水从反应器底部进水,在水流和上升气流作用下由好氧区进入厌氧区,之后在重力作用下进入好氧及缺氧区,最后进入AGS形成与处理区。实现连续流AGS造粒的关键主要在于网板反应器能够改善水力条件。网板为微生物的生长繁殖提供载体,在表面形成生物膜,随着网孔面积的逐渐减小,水流穿过网板的速度增大,进而导致水流剪切力逐渐增加。在水力剪切力作用下生物膜破碎成微生物碎片,之后成为AGS核心,从而促使AGS形成。但运行到43 d时,AGS因丝状菌过度生长出现解体现象,此后通过阶梯式提升进水有机负荷可有效抑制丝状菌膨胀。

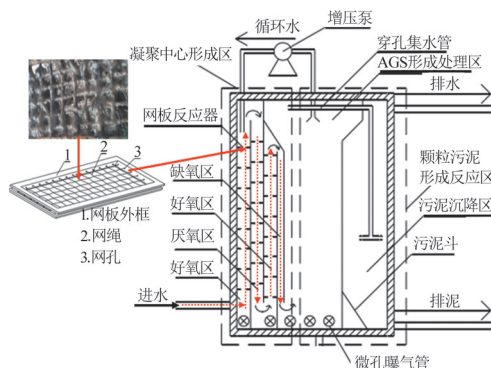


图3 连续流网板反应器

Fig. 3 Continuous flow stencil reactor

Jinte ZOU 等<sup>[13]</sup>设计了一种双区沉淀池,采用真实低强度城市废水作为进水基质,以气提回流污泥方式实现连续流 AGS 造粒,如图 4 所示。原水从进水口进入到曝气池,混合液在第一沉淀区和第二沉淀区进行污泥选择和泥水分离。反应器运行时,沉降性能较好、密度较大的 AGS 在第一沉淀池得到有效沉降,并经气提式回流系统完整保留在曝气池内继续生长,而沉降性能较差、密度较小的絮状轻污泥则被选择至第二沉淀区内进行泥水分离,从出水口排出。整个污泥经过双区沉淀池“生长—选择—生长”的循环,逐步实现污泥颗粒化。双区沉淀池的污泥筛选机制为 AGS 的形成提供了需要的选择压,促进双区沉淀池连续流反应器中 AGS 的颗粒化。同时,气提式污泥回流系统很好地避免了传统机械污泥回流泵对颗粒污泥结构稳定性的破坏,通过设置外部沉淀池实现泥水分离,对于连续流反应器的设计和应用有重要参考价值。

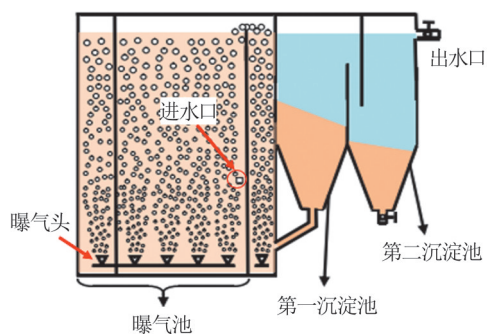


图4 双区沉淀池连续流反应器

Fig. 4 Continuous flow reactor with dual zone settling tank

反应器的运行方式对连续流系统培养 AGS 也有很大影响。张瑞环等<sup>[35]</sup>研究了进水运行模式对

AGS 污泥特性的影响,发现运行模式从序批式变为连续流时,污泥含量降低、沉降性能下降,优势种群也发生演替。明炉发<sup>[36]</sup>考察了连续流动态生物膜反应器(DMBR)中进水运行方式(间歇进水、连续进水)对 AGS 特性的影响,发现连续进水条件下丝状菌生长旺盛,颗粒污泥结构出现松散;在有机物去除方面,间歇运行方式对 TN 和 TP 的去除率高于连续运行模式,但对于 COD 的去除 2 种运行模式相差不大。沈耀良等<sup>[37]</sup>在连续流完全混合反应器(CSTR)中培养 AGS,发现不同进水方式下有机物的去除效果相差不大,但采用重力流进水方式时较早出现 AGS,且运行效能高于恒定流进水方式。Shuai LI 等<sup>[38]</sup>评估了时间与空间的间歇运作模式对同步硝化、反硝化和除磷连续流颗粒系统的影响。结果表明,在时间间歇运作模式下脱氮除磷的性能优于空间间歇运作模式。

## 2.5 其他因素

影响连续流 AGS 颗粒化进程及稳定性的因素很多,还包括有机负荷(OLR)、溶解氧浓度(DO)、接种污泥类型等。

OLR 不仅可表征污水处理设施的处理能力,还是影响连续流 AGS 反应器稳定性与颗粒污泥形成时间的重要运行参数之一<sup>[23]</sup>。低 OLR 下微生物生长缓慢,高 OLR 下微生物会快速生长繁殖,但过高的 OLR 不利于加速颗粒化进程。宋泽洋<sup>[39]</sup>考察了进水 OLR 对连续流 AGS 反应器的影响,发现反应器运行到 40 d、进水 COD 增至 1 600 mg/L 时,连续流系统会因丝状菌膨胀而失去稳定性,并认为该连续流反应器极限承受 COD 的负荷为 4.51 kg/(m<sup>3</sup>·d)。Bei LONG 等<sup>[40]</sup>研究了 AGS 在循环好氧颗粒反应器(CAGR)中对 OLR 的耐受性,发现 OLR < 15 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时 AGS 能保持其结构稳定性;OLR 增至 18 kg/(m<sup>3</sup>·d) 时 AGS 逐渐解体,最终导致系统崩溃;并从实验中观察到 AGS 解体主要归因于颗粒内核的不稳定。

DO 是影响连续流系统中颗粒污泥稳定性和粒径的重要影响参数,一方面是因为 DO 可提供颗粒污泥中微生物生长繁殖所需的条件,另一方面 DO 对颗粒化反应器运行性能、颗粒粒径、脱氮效率、硝化能力、种群群落分布等都有一定影响<sup>[41]</sup>。在低 DO 条件下,AGS 因粒径较大、结构致密存在 DO 传质限制,导致颗粒内部微生物死亡,最终出现 AGS

解体<sup>[42]</sup>,因此低 DO 可能会限制 AGS 的生长,进一步影响 AGS 结构及稳定性。传统 SBR 培养 AGS 的结果表明,较高的 DO 有利于好氧造粒,主要是因为高浓度 DO 会使菌胶团细菌与丝状菌相互竞争,丝状菌生长繁殖受到抑制。也有报道指出,DO<2.5 mg/L 时传统 SBR 反应器中不会出现 AGS<sup>[43]</sup>,原因主要是较低 DO 下丝状菌会大量繁殖,导致颗粒污泥解体。但 Xiangjuan YUAN 等<sup>[41]</sup>在低 DO 条件下(0.3~0.6 mg/L)于连续流反应器中经过 27 d 成功培养出平均粒径在 2.5 mm 的颗粒污泥。从经济角度来看,高曝气量会导致运行成本增加,这也是限制 AGS 技术实际应用的一个重要原因。

研究者培养连续流 AGS 的接种污泥一般为絮状污泥、厌氧污泥、成熟 AGS 等。接种污泥类型主要影响连续流 AGS 颗粒化进程时间,但一定程度上也会影响颗粒污泥的理化性质。Xin XIN 等<sup>[44]</sup>采用连续流反应器处理低碳氮比城市污水,接种反硝化

细菌 TN-14 污泥,40 d 后成功培养出平均粒径在 0.5~2.0 mm 的棕黄色 AGS。接种反硝化细菌 TN-14 污泥具有较高的合成胞外蛋白 PN 的能力,能进一步增加微生物分泌 EPS 的含量。对于接种微生物种类多的污泥,反应器开始运行阶段能够快速适应污水的生长条件,且培养出的 AGS 具有该微生物种类丰富的多样性。

### 3 连续流好氧颗粒污泥的应用及技术差距

#### 3.1 应用情况

连续流 AGS 技术在污水处理领域受到越来越广泛的关注。一方面是因为连续流处理污水仍是我国绝大多数城镇污水处理厂选择的进水运行方式,另一方面,连续流 AGS 培养运行成本低、经济效益高。目前连续流 AGS 技术已在多种实际污水中开展试验研究,如氯化苳废水、实际生活污水、黄连素废水等,具体处理效果如表 2 所示。

表 2 连续流好氧颗粒污泥在实际污水处理中的应用

Table 2 Application of continuous flow aerobic granular sludge in actual wastewater treatment

进水基质	反应器容积/L	接种污泥	处理效果	优点	缺点	文献
氯化苳废水	25	成熟 AGS	COD、TN 去除率分别在 90%、80% 左右	AGS 结构稳定,处理效果较好	驯化后的 AGS 活性降低,同时 AGS 作为稀缺资源大量接种不经济	[45]
实际生活污水	4.3	絮状污泥+硝化菌 TN-14	COD、氨氮、TN、TP 去除率分别为 83%、91%、69%、65%	系统对有机物的去除率较高,TN-14 适应污水能力及反硝化能力强	温度降低出现丝状菌膨胀,导致污泥结构松散,浓度下降	[46]
黄连素废水	60	活性污泥	COD、氨氮、黄连素去除率分别在 90%、95%、99% 以上	反应器运行稳定,抗冲击能力强,去除效率较高	运行的生物膜反应器通常极易出现膜阻塞问题,且生物膜容易脱落,导致出水含有污泥	[47]
乳制品废水	10	成熟 AGS	COD、氨氮、TN 去除率分别为 87%、91%、80% 左右	反应器启动时间快,有机物去除率较高	混合液中出现絮状污泥,导致出水悬浮固体浓度较高	[48]
市政污水	5.6	絮状污泥	COD 去除率为 75%,出水 COD 维持在 70 mg/L 左右	反应器启动时间短,出水水质稳定,抗冲击能力强	运行 32 d 后丝状菌生长发生污泥膨胀	[33]
实际生活废水	128	活性污泥	COD、氨氮去除率分别约为 89%、99%	有利于现有污水设施改造,适应季节性温度变化	出水总悬浮固体含量高,需要额外设置二级处理或设置澄清池	[30]
市政污水	180	活性污泥	COD、TN、TP 去除率分别为 89.4%、89.1%、87.9%	反应器结构简单,有机物降解效率高	动态进水策略比较复杂	[18]
生活污水	140	脱水污泥	COD、氨氮、TN 去除率分别为 88%、92%、22% 左右	快速造粒,节能、环保,有可能全面实施	采用连续曝气,导致 TN 去除率较低、能耗高	[9]
乙二醇工业废水	25	成熟 AGS	COD、氨氮去除率分别为 91%、95% 左右,出水乙二醇浓度低于检测限	降解实际工业乙二醇废水的潜力	COD>9 000 mg/L 时,乙二醇的毒性会导致 AGS 解体	[49]

由表 2 可见,在连续流反应器中成功培养 AGS 处理实际污水的应用报道目前尚处于中试水平。连续流 AGS 工艺可以处理不同类型的污水,具有处置难处理实际工业废水的潜力。虽然在连续进水运行条件下,整个反应器的基质浓度通常低于实际进水浓度,避免进水高有机负荷对颗粒污泥的冲击,但仍存在反应器启动时间长、能耗高,丝状菌大量繁

殖,污泥解体等突出问题,若应用到实际工程还需进一步探索。

#### 3.2 技术差距

连续流 AGS 技术具有广阔的应用前景。实现连续流 AGS 一直是研究者追求的目标,但目前连续流 AGS 技术大多数停留在实验室阶段。限制该技术发展的瓶颈主要有以下几点:

(1)较多学者尝试在连续流中培养AGS,但大部分使用的是人工配水。与配水不同,来自市政或工业的污水成分复杂,有机负荷波动较大,会导致微生物生长受限,对于颗粒污泥培养、反应器启动及运行稳定都有挑战性。AGS在连续流反应器处理实际废水的中试和应用将成为未来研究的热点和难点。

(2)连续流系统中的AGS培养和系统运行稳定性经验缺乏,尤其是长时间连续流运行下AGS的稳定性有待进一步考量。目前绝大多数实际应用报道的连续流AGS都是在SBR中培养成熟,随后接种到CFR内,因而难以评价反应器的可行性与可靠性。尽管能够减少生物反应器的启动时间,但操作较复杂、去除效果较差,连续运行几天后普遍观察到颗粒污泥解体现象<sup>[6-7,10]</sup>。AGS作为一种稀缺资源大量接种对于实际工程的应用似乎不经济。连续流与SBR工艺最大的区别在于进水方式及反应器构造不同。与传统的AGS在SBR中培养反应器的单一性相比,连续流培养好氧颗粒污泥反应器的构型设计呈现多样性,但大多数设计还是基于SBR反应器的特点,如设置沉淀选择压、创造微生物的饱食-饥饿期、实现良好的泥水分离机制等。这些设计理念的差异导致连续流反应器构型千差万别,无规律可循,难以重复和推广。目前还没有学者比较现有连续流AGS反应器的运行性能,指出最适培养AGS的连续流反应器。设计适合AGS长期稳定运行的连续流反应器也是该技术发展的难点。

(3)尽管近几年研究者从连续流AGS形成的主要影响因素出发,寻求反应器最佳运行工况,以期找出短时间内培养出性能优良AGS的方法,但有关连续流AGS的形成机理尚不明确,影响因素众多。在连续进水条件下维持颗粒污泥稳定及反应器启动时间较长仍是该技术的发展瓶颈。同时,能否调控AGS的形成、信号分子在污泥颗粒化中的作用机理尚未明确,如何表征连续流中造粒成功颗粒粒径及微生物的特性等未得到深入研究。反应器运行到后期出现丝状菌导致的污泥解体问题亟待解决。对于未来工程化的应用,必须在基于反应器长期运行稳定和快速启动这2个基础条件下,对整个连续流系统综合考量,且未来连续流反应器的设计应尽可能基于现有污水厂处理设施进行改造,以降低造价成本<sup>[30]</sup>。

## 4 结语与展望

连续流AGS技术已成为污水处理领域研究的热点之一,但该技术在工业化连续流反应器中尚未应用。最主要的限制原因为连续流系统中培养AGS的影响因素多且不易有效控制、造粒时间长、实际运行很难长时间保持反应器的运行稳定性。如何有效控制培养影响因素,改良连续流反应器的构造设计,实现快速启动AGS反应器处理实际污水,并保持长期运行稳定,是该技术工程化推广必须解决的关键。相信随着研究的不断深入,研究者能设计出适合AGS长期稳定运行的连续流反应器。未来不仅能实现连续流AGS工艺在城镇污水处理工程中的应用,还能实现污水变废为宝,着眼于资源利用与回收。

### 参考文献

- [1] 王建龙,张子健,吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 449-473.  
WANG Jianlong, ZHANG Zijian, WU Weiwei. Research advances in aerobic granular sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(3): 449-473.
- [2] 陈颖,陈焱,李聪,等. 好氧颗粒污泥结构特点及稳定性研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 28-35.  
CHEN Ying, CHEN Yao, LI Cong, et al. Research progress on the structural characteristics and stability of aerobic granular sludge [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(10): 28-35.
- [3] VAN LOOSDRECHT M C M, BRDJANOVIC D. Anticipating the next century of wastewater treatment [J]. Science, 2014, 344(6191): 1452-1453.
- [4] 周瑶,王少坡,于静洁,等. 污水生物处理中的好氧颗粒污泥技术[J]. 工业水处理, 2020, 40(5): 12-18.  
ZHOU Yao, WANG Shaopo, YU Jingjie, et al. Application of aerobic granular sludge technology in biological wastewater treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(5): 12-18.
- [5] LIU Hongbo, XIAO Hang, HUANG Shuai, et al. Aerobic granules cultivated and operated in continuous-flow bioreactor under particle-size selective pressure [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(11): 2215-2221.
- [6] JUANG Yuchuan, ADAV S S, LEE D J, et al. Stable aerobic granules for continuous-flow reactors: Precipitating calcium and iron salts in granular interiors [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(21): 8051-8057.
- [7] CORSINO S F, CAMPO R, BELLA G D, et al. Study of aerobic granular sludge stability in a continuous-flow membrane bioreactor [J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 1055-1059.
- [8] WAN Chunli, YANG Xue, LEE D J, et al. Influence of hydraulic re-

- tention time on partial nitrification of continuous-flow aerobic granular-sludge reactor[J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(14):1760-1765.
- [9] XU Dong, LI Jun, LIU Jun, et al. Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two-zone clarifiers[J]. *Water Research*, 2020, 175:115704.
- [10] 李冬, 杨敬畏, 李悦, 等. 缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制[J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2385-2395.
- LI Dong, YANG Jingwei, LI Yue, et al. Aerobic granular sludge operation and nutrient removal mechanism from domestic sewage in an anaerobic/aerobic alternating continuous flow system[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5):2385-2395.
- [11] MISHIMA K, NAKAMURA M. Self-immobilization of aerobic activated sludge: A pilot study of the aerobic upflow sludge blanket process in municipal sewage treatment[J]. *Water Science and Technology*, 1991, 23(4/5/6):981-990.
- [12] 张雯, 邓风, 何超群. CSTR反应器好氧颗粒污泥脱氮影响因素研究[J]. *水处理技术*, 2011, 37(1):116-120.
- ZHANG Wen, DENG Feng, HE Chaoqun. Study on influencing factors of denitrification of aerobic granular sludge in cstr[J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 37(1):116-120.
- [13] ZOU Jinte, TAO Yaqiang, LI Jun, et al. Cultivating aerobic granular sludge in a developed continuous-flow reactor with two-zone sedimentation tank treating real and low-strength wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247:776-783.
- [14] DAI Chencheng, BIN Liying, TANG Bing, et al. Promoting the granulation process of aerobic granular sludge in an integrated moving bed biofilm-membrane bioreactor under a continuous-flowing mode[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703:135482.
- [15] LONG Bei, YANG Changzhu, PU Wenhong, et al. Rapid cultivation of aerobic granular sludge in a continuous flow reactor[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, 3(4):2966-2973.
- [16] 巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 等. ABR耦合CSTR一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(8):2947-2953.
- WU Kaicheng, WU Peng, XU Yuezhong, et al. Formation mechanism of aerobic granular sludge and removal efficiencies in integrated ABR-CSTR reactor[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8):2947-2953.
- [17] LI Dong, LV Yufeng, ZENG Huiping, et al. Enhanced biological phosphorus removal using granules in continuous-flow reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 298:107-116.
- [18] LI Yun, LIU Shujie, CHEN Fuming, et al. Development of a dynamic feeding strategy for continuous-flow aerobic granulation and nitrogen removal in a modified airlift loop reactor for municipal wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714:136764.
- [19] LIU Hongbo, LI Yajie, YANG Changzhu, et al. Stable aerobic granules in continuous-flow bioreactor with self-forming dynamic membrane[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121:111-118.
- [20] 明婕, 黄子萌, 董清林, 等. 好氧颗粒污泥的性质及形成机制[J]. *水处理技术*, 2019, 45(7):1-5.
- MING Jie, HUANG Zimeng, DONG Qinglin, et al. Properties and formation mechanism of aerobic granular sludge[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(7):1-5.
- [21] 刘莎莎, 梁家豪, 李晋, 等. 信号分子在好氧污泥颗粒化中的作用及其控制策略[J]. *工业水处理*, 2021, 41(1):25-29.
- LIU Shasha, LIANG Jiahao, LI Jin, et al. Function and control strategies of signal molecules in aerobic sludge granulation[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(1):25-29.
- [22] LIU Yu, YANG Shufang, LIU Qishan, et al. The role of cell hydrophobicity in the formation of aerobic granules[J]. *Current Microbiology*, 2003, 46(4):270-274.
- [23] KENT T R, BOTT C B, WANG Zhiwu. State of the art of aerobic granulation in continuous flow bioreactors[J]. *Biotechnology Advances*, 2018, 36(4):1139-1166.
- [24] DEVLIN T R, BIASE A D, KOWALSKI M, et al. Granulation of activated sludge under low hydrodynamic shear and different wastewater characteristics[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224:229-235.
- [25] 侯典训, 王紫嫣, 梁爽. 连续流好氧颗粒污泥流化床启动与颗粒污泥形成特征研究[J]. *中国环境管理丛书*, 2010(2):31-32.
- HOU Dianxun, WANG Ziyang, LIANG Shuang. Research on start-up and aerobic granular sludge formation in continuous up-flow fluidized bed[J]. *China Environmental Management*, 2010(2):31-32.
- [26] ZHOU Jiaheng, WEI Su, LI Jun, et al. Aerobic granulation in a modified continuous flow system[C]. 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2011.
- [27] 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 Lei, XIN Xin, LU Hang, 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.
- [28] RÍO A V D, FIGUEROA M, ARROJO B, et al. Aerobic granular SBR systems applied to the treatment of industrial effluents[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95:88-92.
- [29] SHOW K Y, LEE D J, TAY J H. Aerobic granulation: Advances and challenges[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, 167(6):1622-1640.
- [30] SUN Yewei, ANGELOTTI B, WANG Zhiwu. Continuous-flow aerobic granulation in plug-flow bioreactors fed with real domestic wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688:

- 762-770.
- [31] TAY J H, LIU Q S, LIU Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor[J]. Journal of Applied Microbiology, 2001, 91(1): 168-175.
- [32] 刘孟媛. 好氧颗粒污泥反应器的研究进展[J]. 资源节约与环保, 2019(4): 135-137.
- LIU Mengyuan. Research progress of aerobic granular sludge reactor[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2019(4): 135-137.
- [33] 牛姝, 段百川, 张祚薰, 等. 连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 986-992.
- NIU Shu, DUAN Baichuan, ZHANG Zuoli, et al. Cultivation of aerobic granular sludge with municipal wastewater and studies on its characteristics under the continuous flow[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 986-992.
- [34] 贺鹏鹏. 好氧颗粒污泥在连续流网板反应器中快速形成与稳定运行研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- HE Pengpeng. Rapid formation and stable operation of aerobic granular sludge in continuous-flow network board reactor[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [35] 张瑞环, 袁林江, 陈希. 污水处理运行模式对好氧颗粒污泥特性的影响[J]. 水处理技术, 2021, 47(2): 106-111.
- ZHANG Ruihuan, YUAN Linjiang, CHEN Xi. Effect of sewage treatment operation mode on characteristics of aerobic granular sludge[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(2): 106-111.
- [36] 明炉发. 连续流好氧颗粒污泥—动态膜生物反应器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- MING Lufa. Study on aerobic granular sludge in a continuous flow dynamic membrane bioreactor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [37] 沈耀良, 李媛, 孙立柱. 连续流反应器中培养好氧颗粒污泥的运行效能研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(1): 1-4.
- SHEN Yaoliang, LI Yuan, SUN Lizhu. Cultivation of aerobic granule sludge in continuous-flow CSTR reactor: Operational performance[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(1): 1-4.
- [38] LI Shuai, LI Dong, YE Xuesong, et al. Effect of different operational modes on the performance of granular sludge in continuous-flow systems and the successions of microbial communities[J]. Bioresource Technology, 2020, 299: 122573.
- [39] 宋泽洋. 连续流好氧颗粒污泥反应器的启动及运行研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- SONG Zeyang. Study on start-up and operation of aerobic granular sludge reactor with continuous flow[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [40] LONG Bei, YANG Changzhu, PU Wenhong, et al. Tolerance to organic loading rate by aerobic granular sludge in a cyclic aerobic granular reactor[J]. Bioresource Technology, 2015, 182: 314-322.
- [41] YUAN Xiangjuan, GAO Dawen. Effect of dissolved oxygen on nitrogen removal and process control in aerobic granular sludge reactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/2/3): 1041-1045.
- [42] ZHENG Yuming, YU Hanqing, LIU Shuangjiang, et al. Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions[J]. Chemosphere, 2006, 63(10): 1791-1800.
- [43] WANG Hailei, YU Guangli, LIU Guosheng, et al. A new way to cultivate aerobic granules in the process of papermaking wastewater treatment[J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, 28(1): 99-103.
- [44] XIN Xin, LU Hang, YAO Li, et al. Rapid formation of aerobic granular sludge and its mechanism in a continuous-flow bioreactor[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2017, 181(1): 424-433.
- [45] 姜宸, 濮文虹, 杨昌柱, 等. 连续流中好氧颗粒污泥处理氯化苯生产废水[J]. 水处理技术, 2017, 43(8): 58-62.
- JIANG Chen, PU Wenhong, YANG Changzhu, et al. Benzyl chloride wastewater treatment by aerobic granular sludge in a continuous flow reactor[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(8): 58-62.
- [46] 姚力. 连续流好氧颗粒污泥的快速培养及其除污性能[D]. 成都: 成都信息工程学院, 2014.
- YAO Li. The rapid formation of aerobic granular sludge in continuous flow and the decontamination performance[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2014.
- [47] 邱光磊, 宋永会, 曾萍, 等. 连续流膜生物反应器中好氧颗粒污泥的形成及机制探讨[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 476-484.
- QIU Guanglei, SONG Yonghui, ZENG Ping, et al. Mechanism of formation of aerobic granular sludge in a continuous-flow membrane bioreactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(3): 476-484.
- [48] BUMBAC C, IONESCU I A, TIRON O, et al. Continuous flow aerobic granular sludge reactor for dairy wastewater treatment[J]. Water Science and Technology, 2015, 71(3): 440-445.
- [49] QI Kang, LI Zhengwen, ZHANG Chen, et al. Biodegradation of real industrial wastewater containing ethylene glycol by using aerobic granular sludge in a continuous-flow reactor: Performance and resistance mechanism[J]. Biochemical Engineering Journal, 2020, 161: 107711.

【作者简介】汪彪(1995—), 硕士研究生。E-mail: 2210218950@qq.com。通讯作者: 刘绍根, 博士, 教授。E-mail: liushgen@mail.ustc.edu.cn。

【收稿日期】2022-02-19(修改稿)