

好氧颗粒污泥工艺在市政污水处理中的应用

阐述了在市政污水处理工艺中所形成的新颗粒污泥的相关特性、成粒理论以及影响颗粒污泥形成的主要因素，同时介绍了好氧颗粒污泥市政污水领域的历史发展进程。最后结合相关学者研究，对好氧颗粒污泥在市政污水处理领域的发展方向和应用前景进行了展望。

近年来，虽然好氧颗粒污泥研究得到学者和专家的广泛关注，对其研究也逐渐增多，但由于好氧颗粒污泥相关理论没有达成共识，工程化应用培养周期长（约40d），工艺运行参数需优化确定，需进一步提高颗粒污泥成粒稳定性等因素，限制其在工程中的推广和应用，其研究规模主要局限于小规模工业废水应用的案例，至于其在市政污水处理领域内的应用，国内外更是鲜有报道。

因此，在市政污水好氧生化工艺中如何优化运行参数、缩短培养周期、提高成粒污泥稳定性及其在工程应用中推广将是今后研究重点。本文旨在通过对文献查阅和分析，综述国内外市政污水处理工艺中好氧颗粒污泥工艺研究与应用的现状，阐述好氧颗粒污泥成因机理、相关特性、影响因素，并对其在市政污水处理工程化研究应用进行讨论。

1、颗粒污泥研究

好氧颗粒污泥是在有氧条件下，微生物通过自聚集形成具有颗粒状规则外形、结构密实、沉降性能优良、污染物处理效果明显的特殊的微生物聚集体，即在流体动力条件下微生物自固定形成生物体团聚的特殊过程，较之传统活性污泥工艺，好氧颗粒污泥不易出现污泥膨胀和处理水质变差等问题。

1.1、颗粒污泥的基本特性

在好氧条件下，培养颗粒污泥的条件较为苛刻，并且在不同市政污水中不同操作条件和培养目的下培育出的好氧颗粒污泥在颗粒大小、粒径分布、颜色、功能上也存在着差异。

1.1.1、色泽与粒径

好氧颗粒污泥外表面呈现出橙黄色或浅黄色，表面含有大量孔隙，且成熟的好氧颗粒污泥外表面光滑致密，具备清晰规则的球形或椭球型轮廓。好氧颗粒粒径一般为0.5~2.3mm（其中最佳粒径为1.0~2.0mm），且随着颗粒污泥的粒径增加，污泥沉降速率、颗粒污泥密度以及污泥比表面和疏水性数值均有所增大，而污泥体积指数（SVI）则进一步减小。

但当颗粒污泥粒径>4.0mm以后，因颗粒内部或核内部传质和扩散阻力增大，影响了胞外多聚物的分泌和微生物的生长繁殖，引发颗粒污泥外表面表层发生破裂，致使其颗粒污泥由外向内逐层疏松而重新分散为絮状活性污泥。因此，要得到颗粒污泥最经济效率和运行状态，就必须考虑颗粒污泥粒径和生物活性等相互间的关系。

1.1.2、沉降性能

好氧颗粒污泥的平均密度约为 $1.04\sim 1.05 \times 10^{-3} \text{kg/m}^3$ ，污泥沉降比（SV）在14~30%之间，污泥体积指数（SVI）=20~50mL/g。虽然好氧颗粒污泥平均含水率介于97~98%之间，但其具有更高的沉降速率（可达30~70m/h），是絮状污泥的5~6倍，因此可在较高的水力负荷条件下仍具有较高的运行稳定性和效率。

表1传统活性污泥与好氧活性颗粒污泥比较

指标	传统生化污泥	好氧颗粒污泥
粒径/mm	0.02~0.2	0.5~2.3
活性污泥平均密度/($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.00~1.01	1.04~1.05
污泥浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	2 500~3 500	5 000~8 000
沉降速度/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	5~8	30~40
SVI/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	50~150	20~50

1.1.3、微生物多样性

颗粒污泥由外至内形成了好氧区、缺氧区以及厌氧区。微生物有氧代谢，降解有机污染物，同时将氨氮等氧化为硝态氮(NO^3)和亚硝态氮(NO^2)。随着扩散进入缺氧和厌氧区后，微生物便以 NO^3 和 NO^2 等为电子受体进行代谢，将 NO^3 和 NO^2 反硝化为如 N_2O 和 N_2 等低价态氮素而降低污水中氮素污染，同时完成吸磷准备。

可见丰富的微生物使得颗粒污泥具备良好的COD、BOD和TN去除效率，并且因其在反应池中MLSS和MLVSS较大，从而有利于增加反应池的污染负荷和容积负荷，提高了系统抗外界冲击负荷的能力，进而减少市政污水处理厂占地面积。

1.2、颗粒污泥的成粒理论

好氧颗粒污泥的形成过程是一个包含物理、化学和生物作用的复杂过程。目前，对于好氧颗粒污泥成粒机理仍然众说纷纭，尚未形成统一定论，但是从文献来看，与市政污水处理工艺密切相关的理论得到更多学者认可，但也存在较多争议。

表2好氧颗粒污泥成粒理论比较

名 称	理 论 内 容	争 议 点
选择压驱动理论	大密度颗粒污泥可以得到沉淀而小密度絮状污泥因其沉降性差而被洗脱出系统 ^[30] ,致使高密度、易沉降的颗粒污泥保留于反应池中 ^[29-33]	大密度颗粒污泥是经由小密度絮状污泥聚集凝结而成,并在系统中生长和成熟 ^[34] ,此选择压驱动颗粒污泥成形理论仍需要进一步完善和补充
续 表		
名 称	理 论 内 容	争 议 点
自凝聚理论	微生物在高曝气溶解氧和适当水力剪切作用条件下形成一种密度大、形状规则、活性和传质条件均良好的活性污泥颗粒共生聚集体 ^[14,22,33-35] 。结合选择压驱动理论,可以顺利解释污泥由絮体成为颗粒的过程 ^[18,21,30]	对于更低选择压下好氧颗粒污泥自分解现象仍然得不到合理的解释
晶核理论	传统好氧活性污泥以球状惰性颗粒或沉积盐为晶核,形成球形的棕色或棕黄色颗粒污泥,而其核心因厌氧和缺氧而解体为“内核”和“模板”来促成好氧颗粒污泥(二次成核理论) ^[40-43]	研究证实在没有晶核的生化反应池中也可形成好氧颗粒污泥 ^[27,30]
胞外多聚物理论	胞外多聚物(EPS)是目前公认定最高的一种理论解释 ^[44] ,并证实EPS多寡改变了好氧颗粒污泥形成趋势增强或减弱 ^[25,30,33]	EPS并不是污泥造粒的决定性因素,并非所有具备EPS的微生物都聚集成好氧颗粒污泥,而细胞表面疏水性下降也减弱微生物自聚集推动力 ^[44-47]
阶段形成理论	在前人研究的基础上 ^[30,33,44] ,又分别提出了好氧颗粒污泥成形的三阶段形成理论和四阶段形成理论。这些理论均提出了微生物通过碰撞-聚集-生长-成熟后形成好氧颗粒污泥,为今后好氧颗粒污泥理论和实践研究提供了可行性思路	

1.3、颗粒污泥成形的影响因素

好氧颗粒污泥虽以污泥代谢活性高、消化速率快、运行连续性强及出水水质好等特点而备受青睐,但是由于运行条件苛刻、过程复杂等诸多限制因素,目前对好氧颗粒形成的影响因素的了解和报道还不够深入。综合已有文献,笔者就市政污水处理工艺中有机物种类及负荷、水力条件以及反应器结构等进行分析 and 阐述。

表3好氧颗粒污泥成形的影响因素

影响因素	内容说明
有机物种类及负荷	主要通过丝状菌或杆菌相互连接而形成可处理各类有机污染物负荷的颗粒污泥,并且具备相应的硝化和反硝化能力 ^[48-50] ;有机负荷在 $2.5 \sim 15 \text{ kg COD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 有利于颗粒污泥形成和稳定,随着有机负荷的增加,易引起丝状菌等急速增长,导致污泥被大量洗脱出系统而恶化反应器出水水质 ^[50-51] ;另外,外碳源降解阶段和内源碳降解阶段中富营养期与贫营养期占总曝气时间比值约为 $1:4$ ^[50,52] ,促使结构紧凑的颗粒污泥成形和团聚
水力学条件	(1) 水力剪切力:保持反应池中剪切力高于特定数值时,才能形成好氧颗粒污泥,且剪切力越大,颗粒物外观约规则,结构也更紧凑 ^[49,50-52] (2) 沉淀时间:较短污泥停留时间(SRT),有利于漂洗出沉降性较差的絮状活性污泥,保留密度大的颗粒污泥,实现颗粒污泥的选择培养,也刺激微生物细胞体分泌更多 EPS,大大改善了细胞表面的疏水性能,促使微生物形成颗粒 ^[53-54]

影响因素	内容说明
其他成形控制因素	(1) Ca^{2+} : Ca^{2+} 为污泥团聚提供晶核供其生长聚合 ^[40,55] 形成好氧颗粒污泥,因 Ca^{2+} 存在,表现出了更为优异的沉降性能和强度,也不断刺激微生物细胞分泌更多的 EPS 而使颗粒污泥强度提高、密度增加 (2) 溶解氧和温度的影响:溶解氧(DO)是好氧生化工艺的一个重要参数;虽然其并不是影响好氧颗粒污泥形成的关键因素 ^[54,56] ,但 DO 值的高低决定着颗粒污泥粒径的大小 ^[57-58] ;此外,随着温度下降,颗粒污泥容易再次分散成为絮状污泥 ^[58]

2、颗粒污泥的工程应用

过去20年中,废水生物处理理论研究和工程应用证明,固定化的活性污泥在水质净化方面比悬浮活性污泥更有效率。2004年,荷兰DELFT大学vanLoosdrecht教授等人的全球专利成功运用到城市污水中试研究,其效明显。2008年,

世界上第一个Nereda™技术工艺

的市政污水厂在南非Gansbaai落成, 处理量为5000m³

/d, 出水经过消毒后, 作为灌溉水回用, 工艺的基建投资低20%, 节电35~45%, 年运行费用降低50%。

随后, 2011年的荷兰Epe污水处理厂, 设计规模为1500m³

/h, 设计运行温度为8~25℃, 已成为荷兰全国能耗最低的市政污水厂(降低25%投资和运行费用), 并完全满足总氮

小于5mg/L、总磷小于0.3mg/L的出水限值要求。荷兰Garmerwolde污水厂的扩建工程自2013年开始运行投产以来, 服

务周边52万人口, 处理能力提高到了30000m³/d, 高峰流量为4200m³

/h, 出水水质TN小于7mg/L、TP小于1mg/L, 完全满足排放标准要求, 同时能耗降低了50~60%。

当前, 荷兰公司DHV (Royal HaskoningDHV) 正在以Nereda作为技术品牌, 对好氧颗粒污泥技术进行商业化推广。

随着该技术的日渐成熟, DHV公司已在全球拥有20多个在市政污水中应用Nereda工艺的合同, 也已经在巴西获得了

多个合同, 其中包括在Limeira (设计规模为57024m³

/d) 和在里约热内卢 (设计规模为86400m³/d) 的两座市政污水厂。

2.1、效果及优势

好氧颗粒污泥起源于上世纪80年代, 因颗粒密实、沉降性能好、抗冲击和有毒污染物强和较强的脱氮除磷能力, 目前其在已有市政污水处理工艺中发挥着无可比拟的优势。在现有成功案例的污水处理厂中, 市政污染物中COD、BOD和SS等去除率均高达90%以上, 而TN去除率也达到了80%以上, 与传统絮体活性污泥技术法相比, 好氧颗粒污泥平均节约能耗30%、土地20%, 其运行成本节约更是高达50%。可见, 虽然现有研究对颗粒污泥的成形理论和控制参数尚未有统一的定论, 但好氧颗粒污泥技术正凭借其特有的技术优势, 而快速全球化推广使用。

2.2、技术难点及解决方案

2.2.1、技术难点

当前, 关于好氧污泥颗粒的研究时间尚短, 其成形的理论和机制仍在积极研究之中, 同时由于培养周期长和控制条件相对复杂等条件, 大大限制了其工程化(特别是市政工程)领域的大量应用, 加之以对好氧颗粒污泥的形成过程、形成环境条件等因素缺乏实践深入的探究, 故而目前关于好氧颗粒污泥的研究, 大部分还处于实验室阶段, 因此现有工程化领域中关于好氧颗粒污泥的实践应用报道较少。

一般认为形成和稳定好氧颗粒污泥, 生物

有机负荷宜为2.5~15kgCOD/m³

d, 此负荷量在实验室条件下可以通过人工配水(如葡萄糖基质)来实现, 而对于COD负荷较低(通常为150~250mg/L)且污染物复杂(包含颗粒有机物和其它潜在有害物质)的市政污水, 颗粒污泥的形成相对困难, 通常需要更长时间形成颗粒污泥, 且所成形的颗粒污泥粒径更小。

此外, 现有活性污泥法工艺大都采用完全混合式的处理方法, 不能有效形成类似SBR水体动力学以及伴随的物质和能量转变, 故而不利于反应池中形成大量的好氧颗粒污泥。同时, 目前传统活性污泥法处理市政污水, 效果仍然较好, 而且现有污水厂升级改造的需求并不强烈, 因此也阻碍了好氧颗粒污泥在市政污水厂的推广使用。

2.2.2、解决方案

总结前述, 控制活性污泥工艺技术条件和环境是形成颗粒的主要因素, 因此笔者从反应器结构和污泥环境条件方面对颗粒污泥形成控制进行讨论。

(1) 改进反应器结构

目前, 多数好氧颗粒污泥反应器的报道主要为序批式活性污泥法反应器(SBR), 使活性污泥富营养期与贫营养期相互交替更迭, 工程实践也表明SBR操作模式和较大的高径比(H/D)数值可选择截留密度更大、沉降性更好的颗粒污泥。

笔者在工程实践基础上, 自行设计了具有专利技术的基于固液分离的浸没式好氧活性污泥成粒工艺装置(表4), MLSS经由气泡-活性污泥分选导流锥、曲线交错平滑鼓凸的好氧活性污泥自团聚成粒通道、固液分离仓实现泥水分离

，处理出水经由上清液缓冲仓和锯齿出水堰流出，截留于固液分离仓的成粒好氧活性污泥，在自重的作用下进一步密实后再次流出进入好氧生化池，而固液分离仓内小密度成粒好氧活性污泥则筛分截留活性污泥絮体，以进一步降低了上清液缓冲区和出水中SS数值。技术处理后出水的COD、BOD和SS处理率均远高于传统好氧生化活性污泥反应器，迎合目前阶段城镇污水厂提标改造的发展趋势。

表4传统生化处理与好氧活性污泥成粒生化处理市政污水工程化比较

指 标		传统污泥 ^[8,13,37]	成 粒 污 泥	
			SBR 技术 ^[18,36,55]	自主专利技术
负荷/(g·g ⁻¹ MLSS)	COD _{Cr}	0.40~0.55	1.0~3.0	2.5~8.0
	BOD	0.25~0.35	0.8~2.8	2.2~7.0

续 表

指 标		传统污泥 ^[8,13,37]	成 粒 污 泥	
			SBR 技术 ^[18,36,55]	自主专利技术
COD _{Cr}	进水/(mg·L ⁻¹)		280~350	
	出水/(mg·L ⁻¹)	53~67	44~49	31~46
	去除率	76%~85%	83%~86%	84%~92%
BOD	进水/(mg·L ⁻¹)		210~280	
	出水/(mg·L ⁻¹)	16~23	7~10	5~8
	去除率	91%~95%	95%~97%	96%~98%
SS	进水/(mg·L ⁻¹)		150~230	
	出水/(mg·L ⁻¹)	14~22	7~10	3~7
	去除率	85%~94%	95%~96%	95%~98%
排放出水符合标准(GB 18918—2002)		一级 B	一级 A	一级 A
占地/(m ² ·t ⁻¹ 水)		0.8~1.2	0.9~1.1	0.6~0.9

(2) 调整环境条件

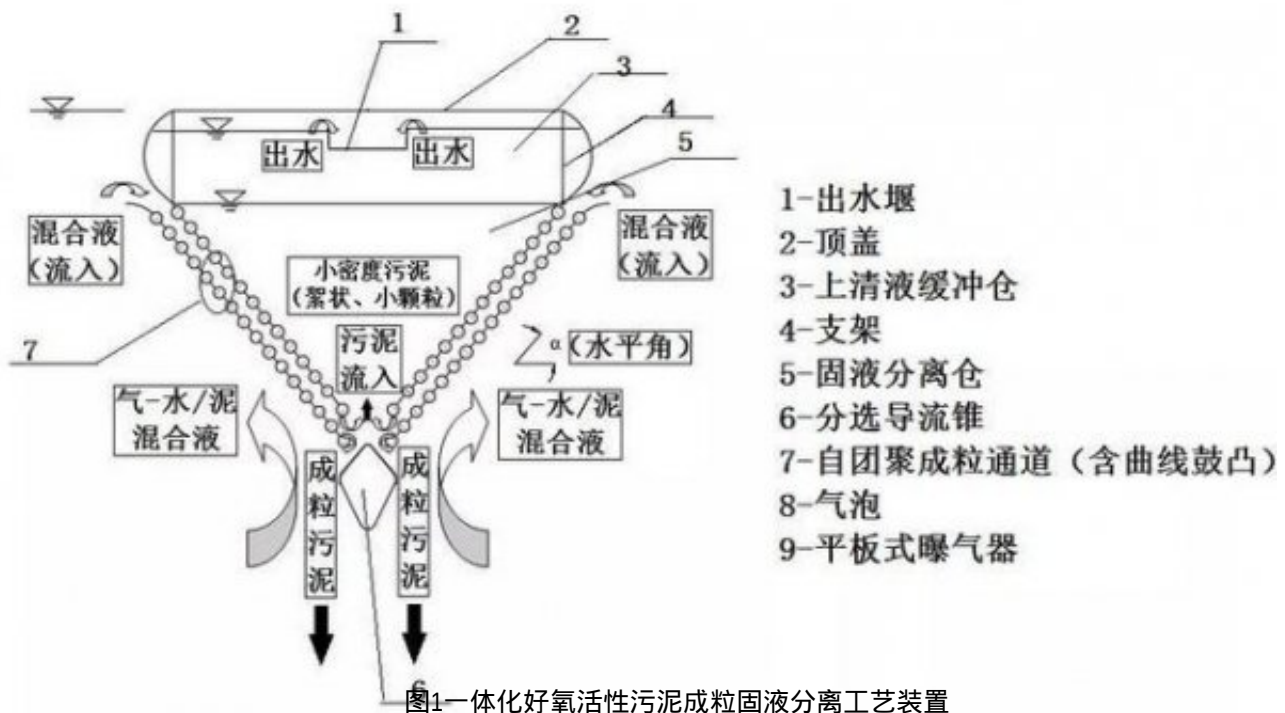
好氧颗粒污泥成形的两个先决条件便是水力剪切作用和反应池DO浓度。由前所知，水力剪切力为反应器曝气强度和HRT综合体现。现有工艺技术条件下，HRT和SRT往往相一致，而较高水力剪切作用造成污泥流失，不利于活性污泥在好氧生化池中累积和富集，造成活性污泥微生物种群单一。

而现有曝气布设，未能有效使反应池中水流呈周期循环往复，同时为了节约能耗而一再减少曝气强度，直接造成污泥间摩擦减少，致使所形成颗粒状污泥粒径较小且松散。且现有工艺中二沉池污泥回流常用机械泵实现，在污泥进过泵体的过程中，易将初期形成的小颗粒污泥再次机械切割破碎至絮体，不利于颗粒污泥的成长和稳定。

笔者的基于固液分离的浸没式好氧活性污泥成粒工艺装置专利技术可以有效避免了以上问题的发生，在传统完全混合型好氧生化池中加装该装置，有效促使MLSS形成长距离循环流动，实现污泥运动流经不同基质浓度条件和不同DO条件，有利于絮状污泥产生更多EPS而促进颗粒污泥形成。

在MLSS流经此装置的过程中，絮状污泥在平滑鼓凸通道内惯性自旋，产生的向心力引导絮状污泥自团聚，而分选导流锥和分离仓一方面起到隔离上升气泡干扰，另一方面的筛分作用造成MLSS中HRT和SRT的彻底分离，因此可在高水力剪切作用条件下截留更多活性污泥而丰富污泥中微生物种群结构。

可见一体化好氧活性污泥成粒固液分离工艺装置改变了传统活性污泥法反应池条件（图1），在此基础上创造了长程污泥循环流动，进而可培养出好氧颗粒污泥，且此技术条件相对简单，简化了大量控制参数，促成好氧颗粒污泥快速成形和聚集，从而有利于完成污水厂升级和提标改造任务。



3、\结语

比较传统活性污泥工艺技术，全文分析好氧颗粒污泥诸多优势，已成为当前研究热点，但由于成形影响因素复杂多变，运行条件控制苛刻等问题，如若运行参数可条件控制不当便会造成污泥解体、出水水质恶化。此外，因成形理论存在争议性，颗粒污泥数学模型的不完整性，造成好氧颗粒污泥的研究缺乏规律性和操作性。

市政污水厂运用好氧颗粒污泥处理工艺技术，可以提高污染物负荷、增加抗冲击能力、缩短停留时间、减少占地，因此在活性污泥工艺百年之际，颗粒污泥工艺技术的诞生与使用，为好氧生化工艺注入新的活力，有利于我国在市政污水领域占领技术先机，以及促成行业发展，为环境水污染控制贡献一份力量。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/120855.html>