

厌氧-好氧活性污泥法快速低耗氧 去除 COD 的机理初探

刘延华 冯生华 杨造燕

摘要 作者研究了厌氧-好氧活性污泥工艺中活性污泥所含糖类物质的代谢特征,考察了该代谢过程与厌氧条件下污泥吸收 COD 之间的定量关系,结合污泥聚磷酸盐的作用,揭示了厌氧-好氧活性污泥工艺快速低耗氧去除 COD 的作用机理。

关键词 H_2O A^2/O 污泥含糖量 聚磷酸盐 厌氧 好氧

一、前言

厌氧-好氧活性污泥工艺的一个主要特征是它能在非曝气的进水端(厌氧段)快速去除大部分(60~90%)原污水中的 COD^[1,2,10]。这一现象可发生在传统活性污泥工艺曝气强度不足的进水端^[1]、SBR 的非曝气进水阶段^[5]和厌氧-好氧活性污泥工艺生物除磷过程中^[6]。它不但大幅度减小了好氧反应时间和曝气量,而且由于降低了好氧段有机物浓度,从而大大加快了硝化反应速度。因此,厌氧-好氧活性污泥工艺在国内外得到了广泛的研究和应用^[7]。活性污泥具有在厌氧条件下大量吸收和贮存 COD 的能力这一观点逐渐被人们广泛接受,但这一过程中微生物所消耗的能量来源尚不完全清楚。在厌氧-好氧活性污泥工艺生物除磷过程中,一般认为活性污泥微生物水解其体内贮存的聚磷酸盐以供能。可是在很多研究中,非聚磷污泥也同样能够在厌氧条件下大量吸收 COD^[8,10]。因此,有人推测微生物贮存的糖类物质(分子式为 $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$,以 CH 表示)可能是另一种可利用的能量。污泥在厌氧条件下降解 CH,又在好氧条件下再生 CH,这一过程已被证明是厌氧-好氧活性污泥工艺中活性污泥的主导代谢过程^[10],并已在实际生物除磷污水处理厂中得到证实^[11]。本试验以两种不同的有机物为基质,研究了厌氧-好氧活性污泥工艺中污泥 CH 的代谢过程及它与污泥厌氧吸收 COD 之间的定量关系,并结合聚磷酸盐的作用,揭示了该工艺快速

低耗氧去除 COD 的作用机理。

二、试验装置与方法

1. 连续试验

连续试验在两只 SBR 反应器中进行(见图 1),模拟废水分别以葡萄糖和醋酸盐为主要进水有机物(见表 1)。每个反应循环包括进水、反应、沉淀和闲置四阶段。反应器的运行模式见表 2。日常运行是由时间控制器自动控制的。

模拟废水成份 (mg/L) 表 1

废水种类	不同成份		相同成份	
	成份	数值	成份	数值
进水 A	葡萄糖 (以 COD 计)	300	$\text{Ca} [\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$	5
	蛋白胨	50	$\text{K} [\text{KCl}]$	20
	NaHCO_3	260	$\text{Mg} [\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$	10
	$\text{P} [\text{K}_2\text{HPO}_4]$	10	$\text{Cu} [\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$	0.1
	$\text{N} [\text{NH}_4\text{Cl}]$	18	$\text{Zn} [\text{Zn}(\text{Ac}) \cdot \text{H}_2\text{O}]$	0.1
进水 B	NaAc (以 COD 计)	300	$\text{Co} [\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$	0.1
	蛋白胨	200 ~ 50	$\text{Fe} [\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$	0.1
	$\text{P} [\text{K}_2\text{HPO}_4]$	16	$\text{Mn} [\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$	0.1
	$\text{N} [\text{NH}_4\text{Cl}]$	22		

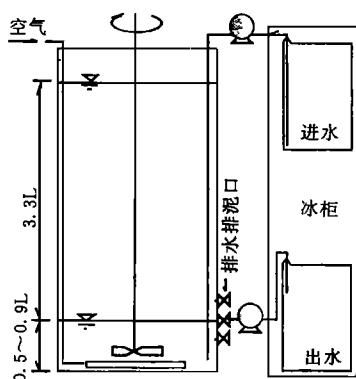
* 仅在运行的第一个月。

运行模式 表 2

模式	一	二	三	四
厌氧 (h)	2.0	2.5	1.0	4.5
缺氧 (h)	-	-	3.5	-
好氧 (h)	3.25	4.0	5.5	5.5
每天循环次数 (次)	3	2	2	2

2. 小瓶试验

小瓶试验的目的是为考察污泥 CH 在厌氧-缺氧-好氧条件下的代谢过程及污泥厌氧吸收 COD 与降解 CH、水解聚磷酸盐 (HPO_3) 之间的定量关系。试验在一只 300mL 的玻璃瓶



中进行。所用污泥来自两只 SBR 反应器好氧反应阶段结束之前。试验所用基质溶液不含蛋白胨, 其盐类成份同表 1。为模拟厌氧和缺氧条件, 将瓶口密封并用磁力搅拌器进行温和搅拌。

3. 分析方法

葡萄糖和污泥 CH 用 Anthrone 方法^[2]测定。细胞外 CH 的提取过程是先将污泥在 130℃ 下蒸 30min 随后高速离心, 再用 Anthrone 法测定上清液中的 CH。聚 β-羟基丁酸 (分子式为 $\text{CH}_{1.5}\text{O}_{0.5}$, 以 PHB 表示) 的测定方法见参考文献^[3]。COD 用密闭回流法^[4]测定。

三、试验结果与分析

1. 葡萄糖反应器的运行结果

反应器 (A) 以葡萄糖为主要进水有机物 (表 1, 进水 A)。在运行的第一个月, 反应器按模式一 (表 2) 运行。在好氧反应阶段由于曝气强度较高, 混合液溶解氧 (DO) 浓度在曝气开始后很快升到 5mg/L 以上, COD 的去除率保持在 97% 左右。跟踪测试发现混合液液相的 COD 浓度在进水结束时已降到 10mg/L 左右。因此, COD 的去除与曝气强度之间没有直接关系。所以, 在此后的试验中将好氧段的曝气强度降低, 将混合液 DO 浓度控制在 $1.5 \sim 2.8\text{mg/L}$ 范围内。运行结果表明, COD 的去除效率并未因此而受到影响。

当反应器按照模式三运行时, 缺氧段是通过向混合液加注硝酸钾溶液实现的, 使缺氧段开始时混合液硝酸盐氮浓度达到 22mg/L 。值得指

出的是, 虽然在缺氧段混合液液相中的 COD 浓度保持在 10mg/L 左右, 污泥却表现出了很强的反硝化能力。这可能是由于反硝化微生物以厌氧反应产物为碳源进行反硝化。在整个试验过程中, 活性污泥 CH 含量保持在 9~19% (CH/MLSS 计) (图 2 (A)), 其含磷量则保持在 2~6% (P/MLSS 计)。

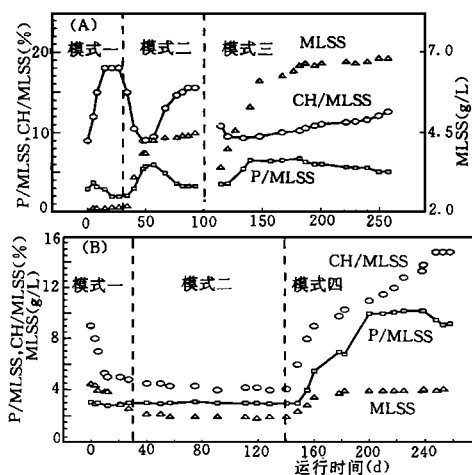


图 2 反应器中活性污泥浓度及污泥 CH、P 含量

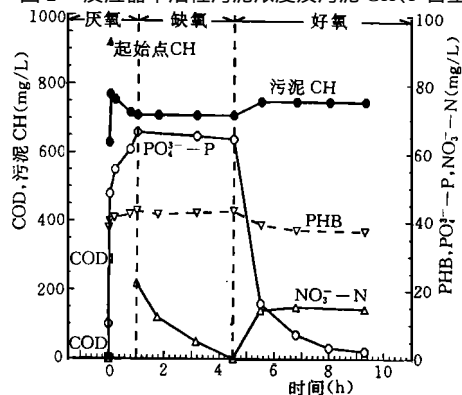


图 3 以葡萄糖为进水有机物的小瓶试验结果

图 3 是第 182 天反应器污泥 (CH/MLSS = 9.3%, P/MLSS = 5.9%) 的小瓶试验结果。在加入进水 2min 之后, 混合液液相的 COD 浓度降到 10mg/L 左右。值得注意的是此时混合液 CH 总量小于反应前进水及污泥中所含 CH 量之和。说明有一部分 CH 在此期间被迅速转化为非糖类物质。由于此间污泥细胞外 CH 含量基本不变 (CH/MLSS = 1.8~1.9%), 因此, CH 总量的转化是由于细胞内 CH 的转化造成的。在整个小瓶试验中, 污泥 PHB 的含量

并未发生明显变化。根据目前的研究结论^[6],厌氧反应的产物可能是 PHAs (polyhydroxyalkanoates)。而 PHAs 又在反硝化和好氧反应中被用做碳源。

在改变小瓶试验进水葡萄糖浓度的条件下,污泥厌氧吸收葡萄糖和污泥 CH 转化量之间表现出很好的线性关系(图 4)。因此,可以进一步确定两者之间有密切关系。这些测试所用污泥的特性各有不同,在厌氧段污泥释放磷与吸收葡萄糖之比例也各有不同。总的结论是在吸收等量葡萄糖的条件下,高含磷污泥降解 CH 较少,而释放磷较多。

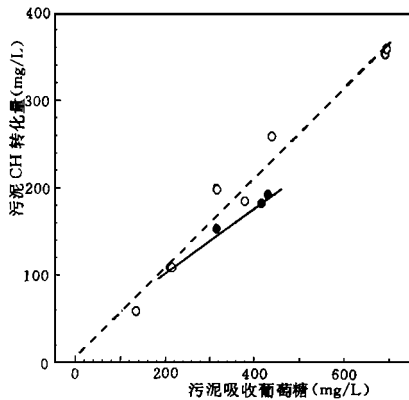


图 4 活性污泥厌氧吸收葡萄糖与同步转化 CH 的定量关系

○表示 CH/ MLSS 含量为 16 %,P/ MLSS 含量为 3 %。
●表示 CH/ MLSS 含量为 9 %,P/ MLSS 含量为 6 %。

2. 醋酸盐 (分子式 $C_2H_4O_2$, 以 HAc 表示) 反应器的运行结果

反应器 (B) 以醋酸盐为主要进水有机物 (表 1, 进水 B), 反应器中混合液悬浮物固体浓度及其 CH 含量的变化情况见图 2 (B)。在运行的第一个月反应器按模式一运行时, 污泥 CH 含量逐日下降, 污泥的沉降性能很差。在反应器沉淀容积不变的情况下, 污泥浓度由开始的 $4g/L$ 降到了 $2g/L$ 。污泥在厌氧段吸收 COD 的量只占进水 COD 的 20% 左右。其余的 COD 则是在好氧段被去除的, 出水 COD 浓度在 $10mg/L$ 左右。在好氧段也没有硝化作用发生。

这种状况一直持续到第 140 天。当运行模式改为模式四 (表 2) 之后, 污泥 CH 含量开始逐

渐上升, 污泥的沉降性能也得到改善。活性污泥浓度逐步上升并稳定在 $4g/L$, 污泥龄为 40d, 污泥产率为 $0.35gMLSS/gCOD$ 。

在第 238 天进行的一次小瓶试验 ($MLSS = 3700mg/L$, $P/MLSS = 10\%$, $CH/MLSS = 14\%$) (见图 5) 表明, 进水 COD 在厌氧段被全部去除, 与此同时, 污泥 CH 含量同步下降。PHB 是该厌氧反应的重要产物, 其中一部分在好氧段被氧化为污泥 CH。

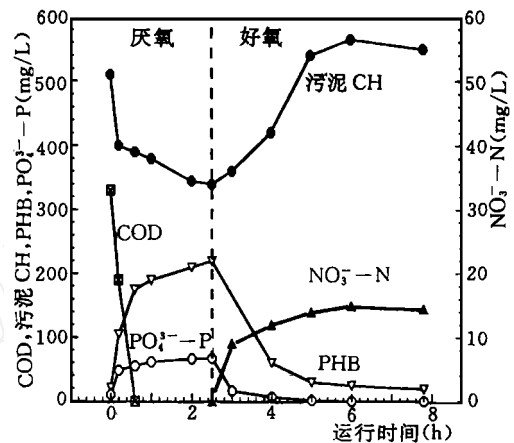


图 5 以醋酸盐为进水有机物的小瓶试验结果

3. COD 的去除原理

以上试验表明, 厌氧-好氧活性污泥工艺中, 污泥 CH 的厌氧降解和好氧再生是活性污泥微生物的重要生命活动。污泥 CH 的厌氧降解与它厌氧吸收 COD 的能力密切相关。过低的 CH 含量 (4%) 不仅使污泥沉降性能明显变差, 而且使污泥厌氧吸收 COD 的能力显著下降。

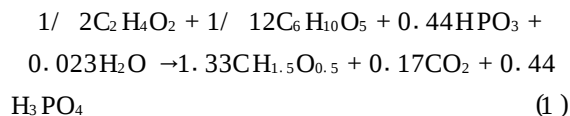
一定的污泥 CH 含量可以保证污泥在厌氧条件下吸收几乎全部的进水 COD。因此曝气强度与 COD 的去除没有直接关系。好氧段的作用在于实现污泥 CH 和聚磷酸盐的再生。

根据图 5 可以算出, 污泥每吸收 $1mol$ 醋酸醋酸的厌氧吸收与污泥 CH 降解及磷的

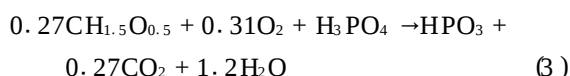
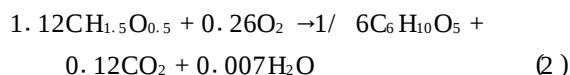
释放之间的摩尔比				表 3
项 目	数 值			
$\Delta P / \Delta HAc$	0.4	0.8	0.8	1.1
$\Delta CH / \Delta HAc$	0.12	0.17	0.17	0.14
参考文献	本文	[10]	[15]	[16]

*理论值

盐释放 0.4mol 磷酸根,并降解 0.12mol CH。对于含磷量相当 (10%) 的污泥来说,这一结果与其它研究者的结果近似 (表 3)。该厌氧反应方程式为式 (1)^[10]。

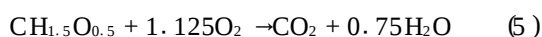
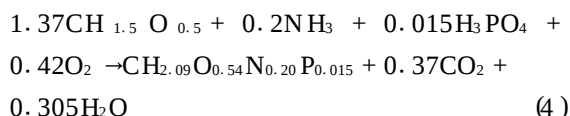


在好氧条件下,微生物氧化厌氧反应产物 PHB,为 CH 和聚磷酸盐的合成提供碳源及能源^[10]。



因此,可以计算出每去除 1mol 醋酸盐,再生聚磷酸盐和 CH 所耗氧的总量为 0.53mol。而传统活性污泥法中氧化 1mol 醋酸成为 CO₂ 所需氧量为 2mol,是前者的 4 倍。这是由于在厌氧-好氧工艺中,相当一部分醋酸盐既没有被氧化成 CO₂,也没有被氧化为 CH,而是以厌氧反应产物 (PHB) 的形式被去除。

由于 DO 是污泥 CH 合成的必要条件 (图 3),充分的好氧反应将把更多的厌氧反应产物氧化为 CH 和 CO₂。因此,将好氧反应控制在一定限度是厌氧-好氧工艺节省供氧量的外界条件。在此条件下该工艺的需氧量主要取决于微生物细胞物质的合成 (见式 (4)) 和活性维持 (见式 (5))。利用 Smolders^[10] 给出的经验参数可以计算出反应器 (B) 在稳定运行条件下用于细胞物质合成和活性维持所耗氧量为 0.15 和 0.09 (mol/ mol HAc)。这样去除 1mol 醋酸盐总需氧量为 0.77mol。而在同样的污泥产率和泥龄的条件下,传统活性污泥法去除 1mol 醋酸盐需氧量为 1.45mol,比前者高 1 倍左右。



四、结论

1. 活性污泥所含糖类物质的代谢是厌氧-

好氧活性污泥工艺中活性污泥微生物的主导性生命活动。它与污泥厌氧吸收 COD 的能力密切相关。将污泥 CH 含量维持在一定水平不仅保证了污泥厌氧吸收 COD 的能力,而且对维持污泥良好的沉降性能极为重要。

2. 进水中的有机物大部分可以在厌氧条件下被去除。而好氧反应的作用在于实现聚磷酸盐和 CH 的再生。由于有一部分进水 COD 未经氧化直接以厌氧反应产物的形式被去除,厌氧-好氧活性污泥工艺比传统活性污泥法大大节省了供氧量。

参考文献

- [1] 许保玖,《当代给水与废水处理原理》,高等教育出版社,1990。
- [2] Barnard J. L., "Cut P and N without chemicals", Water and Wastes Eng., 1974, 11 (7), 33~48.
- [3] Somiya L. et al, "Phosphorus release-storage reaction and organic substrate behavior in biological phosphorus removal", Water Res., 22 (1), 49~58, 1986
- [4] Ketchum L. H. et al, "A comparison of biological and chemical phosphorus removal in continuous and sequencing batch reactors", J. WPCF, 1987, 59, 13~18.
- [5] Irvine R. L. et al, "Sequencing batch biological reactors-an overview", J. WPCF, 1979, 51 (2), 243~265.
- [6] Comeau Y. et al, "Biological model for enhanced biological phosphorus removal", Water Res., 1986, 20, 1511~1521.
- [7] Wanner J. et al, "New process design for biological phosphorus removal", Water Sci. Tech., 1992, 25 (4/5), 445.
- [8] Fukase T. et al, "The role of anaerobic stage on biological phosphorus removal", Water Sci. Tech., 1985, 17, 69.
- [9] Cech J. S. et al, "Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacteria in biological phosphorus removal systems", Water Res., 1993, 27, 1219~1225.
- [10] Smolders G. J. F. et al, "A metabolic model for the biological phosphorus removal process", Water Sci. Tech., 1995, 31 (2), 79~93.
- [11] Satoh H. et al, "Anaerobic substrate uptake by the enhanced biological phosphorus removal activated sludge treating real sewage", proceedings for the 18th IAWQ conference in singapore, 1996.