

# 生物除磷系统中尚未明确的厌氧稳定问题

邱慎初

(国家城市给水排水工程技术研究中心, 天津 300074)

**摘要:** 介绍了 20 世纪 80 年代以来 Randall 等人为探明生物除磷系统的厌氧稳定作用所进行的几个试验实例。COD/需氧量的物料平衡结果表明, 厌氧区对有机物的稳定作用导致了系统的实测需氧量低于计算需氧量, 从而降低了能耗。试验中对于作用机理也进行了探讨, 但理论依据不足, 致使厌氧稳定成为至今尚未明确而有待继续研究的问题。

**关键词:** 生物除磷; 厌氧稳定; COD/需氧量; 物料平衡

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2001)10-0023-05

关于生物除磷系统是否存在厌氧稳定(AnS)并导致系统需氧量降低的问题, 几年来各国学者持有不同看法。通常认为在厌氧区并不发生基质的氧化, 聚磷菌在厌氧区利用胞内聚磷酸盐分解产生的能量, 只是输送挥发性脂肪酸(VFAs)进入细胞和转化为聚  $\beta$  羟基丁酸(PHB)以及其他碳储存聚合物, 并将无机磷酸盐释放, 储存物质只能在好氧区被氧化分解并提供能量, 因此系统的需氧量并未在厌氧段得到减少。需氧量一般根据水质和处理要求按公式进行计算, 然而一些试验的结果表明, 在生物除磷工艺中的需氧量小于计算值。从 20 世纪 80 年代开始, Lan, Randall, Bordacs 和 Tracy 等陆续报道了一些生物除磷系统因厌氧段的设置使系统需氧量得以减少的情况; Randall 等人于 1992 年报道了关于生物除磷系统厌氧稳定导致需氧量减少的详细试验结果, 提出了 COD/需氧量的物料平衡式用以说明系统中全部 COD 和氮的平衡关系; Wable 和 Randall 于 1994 年又继续对此作了进一步探讨。根据物料平衡关系可发现, 系统的预计需氧量大于实测需氧量。经试验观察表明, 需氧量的减少范围约为 10%~30%, 但对于厌氧稳定的机理至今尚未明确。

## 1 COD/需氧量的物料平衡关系

生物除磷系统的厌氧反应器中有机物的稳定是指厌氧区中所去除的有机物不会随后转化为新的细胞物质或导致系统内外的耗氧。因此, 所述厌氧稳定就是将有机物转化为完全氧化或完全还原的最终

产物。由于在厌氧区所去除的有机物将被聚磷菌储存, 厌氧区 COD 的稳定不可能采用直接测定的方法而得出准确的结果。为此, 在有机物和耗氧速率(OURs)测定的基础上使用了 COD/需氧量物料平衡方程式, 以期量化厌氧稳定。

系统的 COD/需氧量的物料平衡关系见图 1。

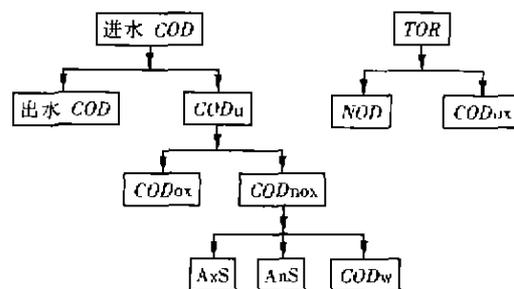


图 1 COD/需氧量的物料平衡关系

系统所利用的进水  $COD_u$  (进水 COD - 出水 COD) 可分成需氧部分 ( $COD_{ox}$ ) 和非需氧部分 ( $COD_{nox}$ ), 若总的进水 COD 中非需氧部分的量增加, 则系统的需氧量就将减少。在稳态生物除磷系统中, 可以设想非需氧部分 COD 的消耗减少就是由于存在 COD 的厌氧稳定 (AnS)、缺氧稳定 (缺氧区的 COD 稳定 AxS) 以及用作细胞合成, 形成生物体 ( $COD_w$ ) 所致。COD 的缺氧稳定 (AxS) 可通过测定反应器中氧化氮含量的变化乘以氧当量转换系数加以确定。测定排泥量 (MLSS) 和出水生物量 (MLSS) 并将其转化成 COD 当量即可确定

$COD_w$ ,宜直接测定混合液悬浮固体 (MLSS) 的  $COD$  以获取准确的转换系数。 $COD_{ox}$  表示有机物好氧稳定所需的氧量,可通过测定系统的总耗氧量 (TOR) 减去氮的需氧量 (NOD) 求得。

Randall 等人根据图 1 的关系,提出生物除磷系统的厌氧稳定可由以下  $COD$  物料平衡关系确定:

$$AnS = \frac{COD_u + NOD - AxS - COD_w}{TOR} \quad (1)$$

上式右边各项可通过直接测定并采用适当的转换系数确定。

$$AnS = (\text{进水 } COD - \text{出水 } COD) + 4.57 (NO_3 - N)_p + 3.43 (NO_2 - N)_p - 2.86 (NO_3 - N)_u - 1.71 (NO_2 - N)_u - (COD/VSS)(MX)_w - (COD/VSS)(MX)_e - TOR \quad (2)$$

式中  $p$  ——表示产生  
 $u$  ——表示利用  
 $w$  ——表示排除  
 $e$  ——表示出水  
 $MX$  ——生物量。

式(2)中所有各项的量均以氧当量表示。

生物除磷系统中  $COD$  稳定的总量 ( $COD_s$ ) 系微生物生长率的函数,在稳态下这一生长率与排泥率相等,因此  $COD_s$  随平均细胞停留时间 (MCRT) 而变化,见式(3)。

$$COD_s = COD_u - COD_w \quad (3)$$

对于具有硝化作用完全好氧的常规活性污泥法,在理论上  $AnS$  与  $AxS$  为零,这样将式(1)重新排列如下:

$$\text{预计 } TOR = COD_u - COD_w + NOD \quad (4)$$

式(4)右边各项均可通过测定并计算出  $TOR$ , 由此可预测  $TOR$ 。预计  $TOR$  值与实测  $TOR$  值作比较后,可用于对  $COD$ /需氧量物料平衡的测定可靠性进行检查。

若生物除磷系统中的  $AnS$  作用不明显,则可采用类似上述的步骤确定  $TOR$ , 设  $AnS$  为零,式(1)重排如下:

$$\text{预计 } TOR = COD_u - AxS - COD_w + NOD \quad (5)$$

预计  $TOR$  值和直接实测  $TOR$  值的一致性可表明系统中的  $AnS$  作用不明显,但是若预计值明显大于实测值时,只要测定可靠,则两者的差值就是

$AnS$ 。

## 2 厌氧稳定研究工作的进展

研究工作相继进行了无硝化/反硝化和具有硝化/反硝化的生物除磷系统的小试、中试以及生物除磷系统与常规活性污泥系统的对比试验。

### 2.1 无硝化/反硝化的生物除磷系统

早在 1983 年, Lan 等人在单池活性污泥系统的小试研究中首次观察到池首厌氧段的设置可减少系统的需氧量。采用配水试验 (流量为 28 L/d), 用右旋糖 (dextrose) 作为快速降解基质并投加 2-咪唑啉硫酮 (2-imidazolidinethione) 抑制剂防止硝化作用的发生。整个试验工作分为 3 个阶段, 其进水  $COD$  分别为 542、529、548 mg/L,  $MCRT$  为 14、11、8 d,  $MLVSS$  为 5 600、4 700、3 400 mg/L。试验发现约有 1/2 的  $COD$  在厌氧段中被去除, 好氧段中的耗氧速率很低 ( $0.12 d^{-1}$ ), 属典型的活性污泥内源呼吸。然而, 所测得的理论产率系数 (0.5) 和微生物衰减系数 ( $0.09 d^{-1}$ ) 均属典型的完全好氧系统的数值, 表明污泥积累正常。1984 年 Randall 等人对这一试验结果进行了需氧量详细分析, 设系统需氧量的减少是由于厌氧稳定所致, 为取得量化数据, 使用  $COD$ /需氧量物料平衡关系式取得了如下结果 (见表 1)。

表 1  $COD$ /需氧量物料平衡结果

项 目	平均氧当量(mg/d 或%)		
	阶段 1	阶段 2	阶段 3
$COD_u$	14 200	13 700	14 100
$COD_w$	-6 500	-8 900	-8 900
$COD_s$ (预计 $TOR$ )	7 700	4 800	5 200
实测 $TOR$	4 500	3 700	2 700
$AnS$	3 200	1 100	2 500
$AnR$	6 600	8 400	7 600
$AnS/COD_s$ (%)	42	23	48
$AnS/AnR$ (%)	48	13	33

注:  $AnS = \text{预计 } TOR - \text{实测 } TOR$ ;  $AnR = \text{厌氧区所去除的 } COD_s$ 。

从表 1 中可看出, 实测  $TOR$  值远低于系统中所稳定的  $COD$  值 ( $COD_s$ )。由于硝化作用已被抑制, 若  $COD$  未被非氧化过程所稳定, 则实测的  $TOR$  照例应与  $COD_s$  相同。因此, 在阶段 1~3 中, 分别为 42%、23% 与 28% 的总  $COD$  不可能属于氧化或细胞合成去除。从而表明, 除非测定错误, 系统内确实发生了明显的厌氧稳定作用。试验中对活性

污泥的 COD 值未进行直接测定,采用缺省值(1.42)作为氧当量的转换系数。

## 2.2 具有硝化/反硝化的生物除磷系统

Randall 等人于 1985 年—1987 年间在试验室内对生物除磷系统中 COD 的去向作了进一步研究,其主要目的在于弄清楚了反硝化导致氧的回收外,系统的需氧量是否可通过厌氧稳定得以减少。该项试验与前述试验有两个主要区别,一是该系统具有硝化/反硝化作用,使得系统的 COD/需氧量物料平衡需要更多的综合性测定;二是基质的变更更有利于考察有关机理。试验模型模拟 UCT 系统,采用配水试验(流量为 28 L/d),分为 3 个阶段,阶段 1、2 以右旋糖作为快速降解基质,右旋糖需经发酵后才能被厌氧区的聚磷菌所利用;阶段 3 改用不可发酵的醋酸钠作为快速降解基质,在厌氧条件下可被聚磷菌直接利用。3 个阶段的进水 COD 分别为 620、610、640 mg/L,实际 MCRT 为 18、12、13 d,MLVSS 为 4 600、4 000、3 600 mg/L,应用 COD/需氧量物料平衡关系对试验数据进行整理后取得的结果见表 2。

表 2 COD/需氧量物料平衡结果

项目	平均氧当量(mg/d 或%)		
	阶段 1	阶段 2	阶段 3
$COD_u$	16 100	1 850	20 300
$COD_w$	-5 800	-79 000	-6 700
$COD_s$ (预计 TOR)	10 300	10 600	13 600
实测 TOR	10 900	11 100	15 400
实测 NOD	-5 200	-4 500	-4 800
$AeS$ (好氧稳定)	5 700	6 600	10 600
实测 $AxS$ (缺氧稳定)	1 800	1 600	1 600
$AeS + AxS$	7 500	8 200	12 200
$AnS$	2 800	2 400	1 400
$AnR$	13 100	13 700	12 100
$AnS/COD_s$ (%)	27	23	10
$AnS/AnR$ (%)	21	18	12

注:  $AnS = COD_s - (AeS + AxS)$ ;  $AnR =$  厌氧区去除的 COD。

系统中稳定的 COD ( $COD_s$ ) 减去好氧区稳定的 COD ( $COD_{ox}$ ) 与反硝化稳定的 COD ( $AxS$ ) 之和后即可看出在阶段 1、2 中发生了明显的稳定作用,而这一作用不能用好氧稳定或反硝化稳定来加以解释。厌氧稳定值分别占整个系统 COD 稳定值的 27% 和 23%。

在阶段 1,经测定活性污泥的 COD 得出

MLVSS 的氧当量转换系数平均值为 1.44,由于此值与 1.42 相近,故采用 1.42 进行物料平衡计算。

## 2.3 生物除磷系统的中试

中试历时 15 个月,进水浓度较低, COD 值为 190~300 mg/L。试验模拟了处理规模为 150 000  $m^3/d$  的城市污水处理厂,采用 UCT 流程。该项试验的 COD/MLSS 值、OUR 值均系现场实测, COD/VSS 的平均比值为 1.42 (范围为 1.25~1.56)。对中试数据进行 COD/需氧量物料平衡分析的结果表明,整个系统中从 0~50% 的 COD 稳定数值系在厌氧区中发生。当进水 COD 为 190 mg/L 左右时,  $AnS$  基本上为零,而该值随进水 COD 浓度的增加而增加(见图 2)。可见,  $AnS$  量与可利用 COD 发生紧密关系。由于该废水系受磷限制,对生物除磷而言,通常有过剩的 COD 可资利用。由此可见,产生的  $AnS$  只是超过聚磷菌用于转化、储存 PHB 的那部分 COD。这一结果意味着非聚磷菌的存在导致  $AnS$  的产生。

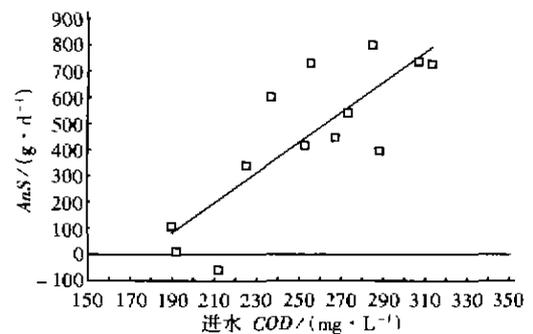


图 2 厌氧稳定值与进水 COD 含量的关系

## 2.4 生物除磷与常规活性污泥系统的对比试验

以上试验结果表明,生物除磷系统中存在厌氧稳定,因此有必要对实际需氧量的测定方法进行检验,以进一步确认厌氧稳定方面 COD/需氧量物料平衡结果的可靠性。为此,进行实验室规模的生物除磷系统(UCT)与常规活性污泥系统的平行对比试验。两者除工艺流程不同外,其试验运行条件完全一致,即进水水质、流量、MCRT 和温度等都是相同的。为防止废水受磷的限制,投加磷酸钠溶液使废水中磷的浓度提高至 13 mg/L 左右。流量为 151.2 L/d,进水 COD 为 170~320 mg/L,MLVSS 为 970~2 650 mg/L,温度为 10~20 °C,MCRT 为 5~15 d,各项指标均用标准方法进行分析测定。

如上所述,常规活性污泥法的总需氧量可通过

实测与采用式(4)求得,比较两者的数值可对确定 $COD_u$ 、 $COD_w$ 、 $NOD$ 、 $TOR$ 值所作测定的可靠性进行检查。活性污泥系统的这一检查分析见表3。除阶段2外,各阶段的需氧量预计值与实测值之差均 $\leq 4\%$ 。

表3 COD/需氧量物料平衡结果

阶段	系统	预计 TOR(g/d)	实测 TOR(g/d)	$AzS/COD_s$ (%)
1	常规	23.88	24.95	
	生物除磷	20.16	16.47	18.3
2	常规	31.93	27.41	
	生物除磷	19.91	18.23	8.4
3	常规	43.27	42.41	
	生物除磷	36.19	32.56	10.0
4	常规	26.12	25.63	
	生物除磷	21.96	19.42	11.6
5	常规	34.91	34.07	
	生物除磷	28.71	21.71	24.6
6	常规	33.82	34.20	
	生物除磷	29.46	21.44	27.3

从表3中同时也可看到生物除磷系统进行COD/需氧量的物料平衡分析的结果,预计TOR系由式(5)计算所得,表示系统在不发生厌氧稳定情况下的预期需氧量。然而在各阶段中,预计TOR值总是超过实测TOR值。由于从对照系统(常规活性污泥法)运行所得的物料平衡结果表明,COD/需氧量物料平衡的测定方法是可靠的,在理论上预计TOR与直接测定的TOR两者之差即归诸于生物除磷系统厌氧区中发生的厌氧稳定。在试验温度下,当MCRT为5d和15d时,COD的厌氧稳定范围分别为8%~18%和12%~27%。

### 3 结果与讨论

① 由于生物除磷系统的厌氧稳定值难以在厌氧区直接测定,因此,在有有机物和耗氧速率( $OUR_s$ )测定的基础上使用COD/需氧量物料平衡方程式来量化厌氧稳定是可行的,问题的关键是测定方法必须准确可靠。在生物除磷系统与常规活性污泥系统的平行对比试验中,对 $COD_u$ 、 $COD_w$ 、 $NOD$ 、 $AzS$ 、 $TOR$ 值的测定可靠性进行了检查,所得的物料平衡结果表明,COD/需氧量物料平衡所用各项指标的测定方法是准确可靠的。

② 以往对于生物除磷系统的需氧量有所减少问题,往往归诸于反硝化和在好氧区尚未降解的PHB进入了污泥系统。经对系统中所有各项输入

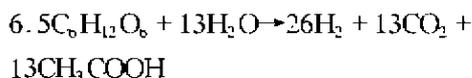
和输出值作仔细监测,并采用COD/需氧量物料平衡对所有非需氧作用所消耗的COD进行量化,发现厌氧稳定和反硝化可明显降低系统的需氧量,但是系统的需氧量减少值总是大于反硝化导致的减少值。另外,活性污泥的COD值接近1.42 mgCOD/mgMLVSS,从而表明所排出的生物量中不会含有多少未氧化分解的储存有机物。生物除磷系统内由于厌氧区的设置而发生有机物的厌氧稳定,而这一厌氧稳定是指厌氧区中所去除的有机物不会转化为新的细胞物质或导致其后的耗氧,从而减少了系统的能耗。

③ 污水中有机物的生物降解性能,特别是快速降解基质的含量对生物除磷过程的影响至为重要。生活污水中的快速降解基质系VFAs和其他生命活动所产生有机物的混合物,VFAs所占比例取决于下水道中所产生的发酵作用的程度。通常,聚磷菌在厌氧段仅能将短链VFAs(乙酸和丙酸)输送至细胞内并转化为PHB加以储存,但兼氧菌可将其他快速降解基质进一步发酵产生VFAs而被聚磷菌所利用。若VFAs在进水快速降解有机物中仅占很小比例,则厌氧段的反应速率将受发酵限制。可见,聚磷菌所需VFAs有两个来源:其一为原污水本身所含,其二为兼氧异养菌对其他快速生物降解基质进行发酵的产物。如前者的VFAs含量较高,则有利于聚磷菌进行快速吸收;而后者只要可发酵有机物的含量足够,其发酵产物同样可被聚磷菌吸收,但除磷系统厌氧段的大小将受到污水成分的影响。

小试的第1、2阶段均采用可发酵有机物右旋糖作为快速降解基质,系统中都发生了明显的厌氧稳定,但在2.2节试验中的第3阶段,进水中的快速降解基质从可发酵基质(右旋糖)改为可被聚磷菌直接快速吸收的不可发酵基质(醋酸钠)后,经过3个泥龄阶段,系统的厌氧稳定( $AzS$ )值逐渐减少至接近零。另外,从中试(图2)可看出,当进水 $COD < 190$  mg/L左右时,系统的厌氧稳定值约下降至零。如上所述,聚磷菌能在厌氧区将VFAs吸收至细胞内作为PHB加以储存,但当可发酵有机物(如右旋糖)的含量足够而VFA的含量不足时,则必须通过兼氧异养菌对可发酵有机物的发酵作用,使之成为简单的有机酸(VFAs),这样才能在厌氧条件下形成PHB储存在细胞内。因此,在含有可发酵快速降解

基质的除磷脱氮系统中存在两类微生物(聚磷菌和兼氧发酵菌)进行生物代谢。由此可见,若废水中可发酵快速降解基质含量的比值较高且有发酵菌存在时,系统的厌氧稳定在基质发酵过程中得以产生,而厌氧稳定值的大小取决于废水的浓度。

④ Wable 和 Randall 等人对厌氧稳定的机理进行了研究探讨,认为许多兼氧异养菌能将葡萄糖等基质发酵产生氢、二氧化碳和乙酸,并引用了 Daniels(1984 年)提出的如下化学计量式:



但是,上式并不是一个通用的反应式,葡萄糖的发酵过程不一定都能产生氢气,而且在所有的试验中均未见到阐明这一机理的试验数据。我国在设计生物除磷系统时,有的给排水设计工作者曾提出在需氧量计算中应考虑厌氧稳定的减少量,但苦于无计算上的理论依据。因此,重要的问题还是在于厌氧稳定的机理研究方面需要有所突破,为设计中需氧量的计算提供理论依据。

#### 4 结语

综上所述,生物除磷系统的厌氧稳定问题,经多年研究已取得相当成果,但由于有关机理至今尚未最后明确,在生物除磷系统的设计中难以对此进行量化和计算。因此,在这一需要继续研究的难题尚

未解决前,生物除磷系统设计需氧量的计算中还不能考虑厌氧稳定问题。建议在设计中采取措施,使系统投入运行后有降低供氧量的可能,以便于在运行中一旦发现实际需氧量确实低于设计计算的需氧量时可以进行调节,从而降低能耗。

#### 参考文献:

- [1] Randall C W, *et al.* The Case for Anaerobic Reduction of Oxygen Requirements in Biological Phosphorus Reduction Systems[J]. *Water Environment Research*, 1992, (64): 824-833.
- [2] Wable M V, Randall C W. Investigation of Hypothesized Anaerobic Stabilization Mechanisms in Biological Nutrient Removal Systems [J]. *Water Environment Research*, 1994, (66): 161-165.
- [3] Barker P, P L Dold. COD and Nitrogen Mass Balance in Activated Sludge Systems [J]. *Water Research*, 1995, (29): 633-643.
- [4] C P Leslie Grady, Jr, Glen T Digger, *et al.* *Biological Wastewater Treatment (Second Edition)* [M]. 1999. 538-539.

电话:(022)23342168·2025

E-mail:jennyql@public.tpt.tj.cn

收稿日期:2001-07-02

#### ·技术交流·

### 无砂管降水在管道开槽施工中应注意的问题

无砂管降水在市政排水管道开槽施工中应注意以下几个问题:①无砂管工艺适用于层渗透系数较大且降水较深的土层,如亚砂土及粉砂土,尤其在其中夹杂淤泥或不透土层交替出现时,效果较好。②打井时要注意成孔的垂直度,以免造成塌孔或影响安装。井孔深度应考虑抽水期间沉淀物的高度,一般比设计深度深 2 m。③井点安装后要及时清井并抽水,抽水要连续作业,避免造成管外泥浆将滤孔堵塞形成“死井”。④无砂管降水过程中要派专人管理,及时测量井深及井内水位变化情况。⑤开槽应在降水 3~5 d 后进行,随后应不间断抽水。工程后期,当水量不大且水位在设计要求水位以下时,可间隔撤泵,以节省费用。⑥降水工作应尽量避开雨季,且对地表水应进行有效的截流,对抽出的水要及时排放。⑦降水过程中,由于地下水位的下降会导致周围土壤收缩固结而引起地面沉降,应加强对周围建筑物或构筑物等的沉降观测,必要时采用回灌法加以补救。⑧工程完工后,井点孔要用素土回填,以免留下安全隐患而影响以后工程的施工。⑨抽水试验应力争大降深,尽可能延长其抽水时间。

(胜利石油管理局工程建设三公司 温建祥 吴兆启 孟凡森 杨守喜 唐明军 供稿)