

德国一段硝化和反硝化活性污泥法 曝气池的设计计算(上)

唐建国

[提要]本文详细介绍了德国一段硝化、反硝化活性污泥法曝气池的设计计算方法,该方法是以污泥龄为设计计算的基础参数,通过计算确定 BOD_5 污泥负荷、单位剩余污泥产量、反硝化能力等参数来计算曝气池的容积(包括反硝化池、硝化池的容积)、供氧量,并对曝气池出水的碱度、pH 值进行验算。文章最后还给出了计算过程示例。

[关键词]活性污泥法 曝气池 污泥龄 硝化 反硝化 设计 计算

德国 1989 年 9 月新修改的水法规定:在德国境内的污水处理厂,当其规模在 5000 人口当量以上时,必须扩建或建设硝化和反硝化(脱氮)设施;当其规模在 20000 人口当量以上时,必须扩建或建设除磷设施。表 1 是德国目前所执行的污水处理厂出水标准。

德国目前执行的污水处理厂出水标准 表 1

污水厂规模 (人口当量)	进水 BOD_5 负荷(kg/d)	污染物指标(mg/L)				
		COD_{Cr}	BOD_5	NH_4^+-N	TN	TP
<1000	<60	150	40			
1000~5000	60~<300	110	25			
5000~20000	300~<1200	90	20	10	18	
20000~100000	1200~<6000	90	20	10	18	2
≥100000	≥6000	75	15	10	18	1

注:测定水样为抽查样或者 2h 混合水样。

为了满足这一法律的要求,德国污水技术联合会(简称 ATV)于 1991 年 2 月重新修订了其工作报告 A131——《5000 人口当量以上规模一段活性污泥法处理设施的设计计算》。该报告详细介绍了生活污水及城市污水采用一段活性污泥法进行硝化、反硝化、除磷的工艺计算原则和方法(A131 所指的一段活性污泥法是为了区别 AB 法及两段活性污泥法)。

本文限于篇幅将主要介绍带有硝化、反硝化的曝气池的设计计算。

一、A131 所确定的污水净化目标

由于污水净化目标的不同,其曝气池和二次沉淀池的设计计算也有所不同。A131 确定

的净化目标为:

1. 无硝化反应;2. 有硝化反应;3. 有硝化反应和反硝化反应;4. 有硝化反应和反硝化反应,同时有污泥好氧稳定;5. 有附加的同步化学沉淀除磷。

二、对曝气池的要求

1. 在曝气池中有丰富的生物固体,用活性污泥干物质含量 $TS_{BS}(kg/m^3)$ 来测定;
2. 曝气池中的混合液应能被有效地被混合、搅拌;
3. 有充分的供氧量以满足需氧的要求,供氧设施能按不同的操作要求和负荷情况进行调节;
4. 为避免污泥在曝气池中沉淀,污水在池中应有一定的流速,对于较轻的污泥,池底流速至少为 15cm/s;对于较重的污泥池底流速至少为 30cm/s;
5. 在运转中曝气设备应是安全可靠的;
6. 所有设施和设备应有足够的能力,以适应污水水量和水质的变化;
7. 供氧、搅拌、混合所需要的能量应尽可能少;
8. 建造费用和运行费用应是较低的和较省的;
9. 无嗅、无噪音、无振动的影响。

三、计算的基础数据

在德国,对于大多数需要新建或扩建的污

水处理厂在设计计算时,都有自己或官方有关部门丰富的数据资料进行参考。借助对这些资料的统计分析,并考虑到将来的发展即可得到设计计算的基础数据。当资料不足时,一般必须在设计结束前需要有目的地进行一些试验。在个别情况下,可以结合当地的实际情况借助于规范的特征值进行设计计算。

1. 污水进水量

分流制污水处理厂在旱季和雨季的进水流量都是以水量资料频率分析 99% 的工作日都不超过的一日的最大小时流量和日进水量为计算标准的。

合流制污水处理厂的进水流量是以旱季(非降水日和相应的非径流日)频率分析 85% 都不超过的日进水量为计算标准的。当无小时流量资料用于分析最大小时流量时,就必须从旱季的日流量变化曲线中分析最大小时流量与日流量的比值。

无论是合流制还是分流制,其旱季设计流量 Q_i 是来自居住区的生活污水、工业区的工业废水 Q_s 与外来水(雨水、地下水、河溪水等)进入或渗入管渠系统的水量 Q_f 之和,即:

$$Q_i = Q_s + Q_f \quad (1)$$

曝气池和二次沉淀池的设计计算,均采用雨季流量 Q_m 进行水力计算,即:

$$Q_m = 2Q_s + Q_f \quad (2)$$

如果不能按资料分析计算时,其生活污水量按 $0.004\text{L}/(\text{s}\cdot\text{人})$;工业废水按 $0.5\text{L}/(\text{s}\cdot\text{ha})$;外来水按最大不超过 $0.15\text{L}/(\text{s}\cdot\text{ha})$ 计算。

2. 污染物负荷

进水负荷应按确定污泥龄为基础和确定供氧量为基础来区分。

(1) 以确定污泥龄的负荷为基础

由于硝化反应设施的污泥龄约为一周,因而确定污泥龄是以周负荷为基础的,这适用于具有最大负荷周的 BOD_5 、氮、磷负荷的日平均值,如果分析不出这一最大负荷周,则应以最近两到三年所有检测值按频率分析 85% 都不超过的值为污染物辅助计算负荷。

(2) 以确定供氧量的负荷为基础

供氧量是以 2h 的最大负荷为计算标准的,因为所要求的需氧量必须直接予以满足。对于供氧量特别是必须要有 BOD_5 、TKN 的日变化曲线,最大小时需氧量必须按考虑冲击负荷系数 f_c 和 f_N 进行验算。如果在按检测 2h 混合水样绘制的各负荷日变化曲线上的最大值小于两倍的平均值,上述负荷就可用于设计计算。在验算时,必须至少要有同时间的 6 条 NH_4^+-N 、2 条 TKN、2 条 BOD_5 变化曲线。

在设计计算时必须确定怎样贮存来自污泥处理区的污水和外来粪便污水,并在最低负荷时将其回流至曝气池中,以平衡每天的氮负荷变化。

如果无检测资料用于分析、设计计算时,可按每人(人口当量)每日的污染物负荷值计算,见表 2。

污染负荷计算表(g/(d·人)) 表 2

参 数	原污水	在旱季流量 Q_i 时污水 在一沉池中的停留时间 (h)		
		0~1.0	1.0~1.5	>1.5
BOD_5	60	50	45	40
COD	120	100	90	80
可溶、可沉 去除悬浮 物 TS_0	70	40	35	30
N	11	10	10	10
P	2.5	2.3	2.3	2.3

注:该表按人口计算的负荷未考虑污泥处理区来水的负荷。生物固体合成每 kgBOD_5 需要约 $0.04\sim 0.05\text{kg}$ 的氮和约 0.01kg 的磷,并将其转移至剩余污泥中。这些污染物的一部分又随污泥区来水进入进水中,由此进水负荷可提高 20%。

四、曝气池的设计计算

按照 ATV 新的工作报告 A131,曝气池的计算参数是污泥龄 t_{TS} ,辅助计算参数是 BOD_5 污泥负荷 B_{TS} 和 BOD_5 容积负荷 B_R 。

污泥龄可以根据活性污泥法系统的固体物平衡关系计算:

$$t_{TS} = \frac{TS_{BB} \cdot V_{BB}}{Q_{US} \cdot TS_{US} + Q \cdot TS_e} \quad (d) \quad (3)$$

式中 Q_{US} ——剩余污泥量(m^3/d);

TS_{US} ——剩余污泥中干物质浓度(kg/m^3);

Q ——处理水量(m^3/d);

TS_e ——出水中干物质浓度(kg/m^3);

TS_{BB} ——曝气池中干物质浓度(kg/m^3);

V_{BB} ——曝气池容积(m^3)。

由选定的 t_{TS} (见表 3)、 TS_{BB} (见表 4)和单位剩余污泥产量 US_B 可以计算出 BOD_5 污泥负荷 B_{TS} 和 BOD_5 容积负荷 B_R :

$$B_{TS} = \frac{B_{d, BOD_5}}{V_{BB} \cdot TS_{BB}} = \frac{1}{US_B \cdot t_{TS}} \quad (\text{kgBOD}_5/(\text{kgTS} \cdot \text{d})) \quad (4)$$

式中 B_{d, BOD_5} ——进水 BOD_5 负荷(kg/d)。

$$B_R = B_{TS} \cdot TS_{BB} = \frac{TS_{BB}}{US_B \cdot t_{TS}} = \frac{B_{d, BOD_5}}{V_{BB}} \quad (\text{kgBOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})) \quad (5)$$

US_B ($\text{kgTS}/\text{kgBOD}_5$)是去除 BOD_5 和化学除磷产生的剩余污泥之和(在不考虑化学除磷时 $US_B = US_{BOD_5}$)。去除 BOD_5 产生的剩余污泥取决于污泥龄、温度、曝气池进水中悬浮物含量 TS_0 及 TS_0/BOD_5 ,其计算见后。

TS_{BB} 一般可在已知的范围内任意选取,但是必须考虑到活性污泥的性质和曝气池与二沉池之间的关系。为了避免在二沉池中产生泡沫,一般 TS_{BB} 不应小于 $2.0 \text{ kg}/\text{m}^3$,但是高 TS_{BB} 受到活性污泥在二沉池中的浓缩性能和可达到的回流污泥中的干物质含量的限制。

这样 V_{BB} (硝化池容积 V_N 和反硝化池容积 V_D 之和)可由 B_{d, BOD_5} 和 B_R 进行计算:

$$V_{BB} = \frac{B_{d, BOD_5}}{B_R} \quad (\text{m}^3) \quad (6)$$

在有硝化反应和反硝化反应的污水净化中,反硝化池的尺寸首先取决于下列各个方面:

与设施规模和净化目标有关的最小
污泥泥龄(d)

表 3

净 化 要 求		污水处理厂规模 (人口当量)	
		≤ 20000	≥ 100000
无硝化反应		5	4
有硝化反应		10	8
有硝化反应和反硝化反应(计算温度为 10°C)	$V_D/V_{BB} = 0.2$	12	10
	$V_D/V_{BB} = 0.3$	13	11
	$V_D/V_{BB} = 0.4$	15	13
	$V_D/V_{BB} = 0.5$	18	16
有硝化反应、反硝化反应和污泥好氧稳定		25	不推荐

注:为了保证硝化反应在 12°C 水温下稳定进行,要求计算温度为 10°C ;当规模为 $20000 \sim 100000$ 人口当量时采用内插法。

活性污泥的干物质含量表

表 4

净 化 目 标	曝气池中固体物含量 TS_{BB} (kg/m^3)	
	有一沉池	无一沉池
无硝化反应	2.5~3.5	3.5~4.5
有硝化(及反硝化)反应	2.5~3.5	3.5~4.5
有污泥好氧稳定	/	4.0~5.0

1. 要求的除氮效率;
2. 被硝化的氮与曝气池进水中 BOD_5 的比值;
3. 曝气池进水中易降解的 BOD_5 含量;
4. 污泥龄;
5. 曝气池活性污泥中干物质含量 TS_{BB} ;
6. 水温。

一般而言,下列因素对反硝化反应是有有利影响的:

1. 曝气池进水中的氮与 BOD_5 的比值小于 0.2,例如进水中含有来自食品加工厂和饮料厂的废水;
2. 无一沉池(当曝气池允许时)或一沉池停留时间较短(在旱季流量时为 20min);
3. 进水中可滤去除 BOD_5 与总 BOD_5 的比值较大;
4. 前置反硝化池设计为串联形式;
5. 有污水预酸化措施;
6. 进水流量和进水污染物浓度能够保持均匀,如有均衡调节池;
7. 污水和污泥的混合搅拌产生的涡流尽可能的小;
8. 进水和污泥回流不会通过泵(如螺旋泵)给反硝化池带入过量的氧。

对反硝化反应不利的因素主要有:

1. 为反硝化反应所需的 BOD_5 较低;
2. 外来水和雨污混合水量过大;
3. 易降解 BOD_5 在管网中降解过多;
4. 一沉池停留时间过长;
5. 进水中 BOD_5 负荷和氮负荷变化频繁;
6. 由于采用前置化学沉淀除磷,使曝气池进水中的氮与 BOD_5 比值大于 0.25 以上,以及 $\text{TKN}/BOD_5 > 0.2$;
7. 反硝化反应池中含有溶解氧。

在计算温度下,每提供 1kgBOD₅(碳源)硝酸盐氮的转化率取决于 V_D 与 V_{BB} 的比值,一般为 0.05~0.14kgNO₃⁻-N/kgBOD₅,详见表 5。

对于前置反硝化系统,含有丰富硝酸盐氮的污泥水混合液进行回流是反硝化反应进行的前提条件。另外,微生物每降解 1kgBOD₅ 需要 0.04~0.05kg 的氮,并转移至剩余污泥中。由于转移到剩余污泥中的 NO₃⁻-N 又有部分随污泥水从污泥处理系统中返回到曝气池进水中,这一点在设计计算时必须加以考虑。

当进水中易降解的 BOD₅ 含量较高时,对于仅有部分除氮要求(比如由于运转方面的原因)的前置反硝化工艺系统, $V_D/V_{BB}=20\%$;同步反硝化工艺系统, $V_D/V_{BB}=25\%\sim30\%$ 。对于有深度反硝化除氮要求时(比如按法律要求、出水质量要求较高时、为了避免由于硝化的原因使 pH 值降低过多、曝气池进水中易降解的 BOD₅ 含量较低时),其 V_D/V_{BB} 最高可达 50%。

在旱季流量及平均流量情况下每提供 1kgBOD₅ 在反硝化池中硝酸盐氮的转化量

(kgNO₃⁻-N/kgBOD₅) 表 5

反硝化反应系统形式 V_D/V_{BB}	前置反硝化反应	同步反硝化反应
0.2	0.07	0.05
0.3	0.10	0.08
0.4	0.12	0.11
0.5	0.14	0.14

注:计算温度 10℃。

因为硝化菌仅能在好氧条件下增长,所以随着反硝化池容积占曝气池总容积比值 V_D/V_{BB} 的增加,相应污泥龄也要增加。如果反硝化池中安装有非堵塞型的曝气设备,在非常低的水温情况下,反硝化池也可作为硝化池使用。

在前置反硝化系统中,硝酸盐氮仅仅能够通过内、外循环回流到反硝化池中,回流量必须与最大反硝化能力相一致。最小回流比(内、外回流比之和)可按表 6 选择,但是必须在计算时为夏季运行及进水的变化留有一定的余地。

对于部分除氮的前置反硝化工艺,200%的回流比是足够的;对于深度除氮的前置反硝化工艺,回流比应为 400%。但是过高的回流比会

为前置反硝化提供足够所需要的硝酸盐氮而要求的最小回流比 R_F (内、外回流比之和) 表 6

回流所提供的硝酸盐氮(%)	R_F (%)
33	50
50	100
67	200
80	400

带来一个很大的缺点,那就是过多的溶解氧会从硝化池中回流到反硝化池中。为了避免过高的溶解氧随回流进入反硝化池中,在曝气池的末端设置一个供氧量较低的区域是非常有意义的。前置反硝化工艺的反硝化池应该和好氧池用隔墙隔开。活性污泥在缺氧的反硝化池中应能通过搅拌处于悬浮状态。

对于有较大容积的反硝化池(如超过 40%)采用同步反硝化工艺可以大大降低溶解氧,因为该工艺系统无回流这一限制因素。带有同步反硝化的曝气池一般为各种各样的氧化沟,其供氧量必须和耗氧量相一致,以形成好氧区和缺氧区,分别进行硝化反应和反硝化反应。

五、污泥产量

作为污染物生物净化的结果就是产生污泥,其绝大部分是剩余污泥,另一部分是可滤去除的悬浮物在二沉池的出水中。按照污泥龄计算的曝气池污泥产量对其有重要的影响,污泥处理设施的规模在很大程度上也取决于剩余污泥产量。表 7 是在计算温度为 10℃ 时,不同污

去除 1kgBOD₅ 产生的剩余污泥量 US_B

(kg 干物质/kgBOD₅) 表 7

污泥龄(d) TS_0/BOD_5	4	6	8	10	15	25
0.4	0.74	0.70	0.67	0.64	0.59	0.52
0.6	0.86	0.82	0.79	0.76	0.71	0.64
0.8	0.98	0.94	0.91	0.88	0.83	0.76
1.0	1.10	1.06	1.03	1.00	0.95	0.88
1.2	1.22	1.18	1.15	1.12	1.07	1.00

泥龄及 TS_0/BOD_5 情况下去除每 kgBOD₅ 的剩余污泥产量 US_B 。当水温为 20℃ 时,表中的数值应减少 10%。(待续)

★作者通讯处:314001 浙江省嘉兴市吉安路 23 号

中国市政工程西北设计研究院嘉兴分院

电话:(0573)2062740(O)

收稿日期:1996-10-7