

CAST 工艺设计计算方法探讨

廖 钧¹ 杨 庆² 彭永臻²

(1 天津华森给排水研究设计院有限公司, 天津 300190; 2 北京工业大学环境与能源学院, 北京 100124)

摘要 分析了目前国内 CAST 工艺采用的几种设计计算方法的共同之处、各自特点及存在的问题。在此基础上, 结合多年实际设计运行经验, 提出并推荐一种新的设计计算方法。该“推荐方法”以满足生物反应需要作为制约因素进行设计和计算, 并根据生物处理目标所确定的泥龄和生产实际运行所能达到的混合液污泥浓度来推算污泥总量、反应池有效容积及其他设计数据, 排除了凭经验设计计算的任意性。最后介绍了“推荐方法”在实际工程中的应用情况。

关键词 CAST 工艺 工程设计 计算方法 除磷脱氮

Probe into the CAST process design and calculation method

Liao Jun¹, Yang Qing², Peng Yongzhen²

(1. Tianjin Huamiao Research & Design Institute of Water & Wastewater Company Limited, Tianjin 300190, China; 2. College of Environmental & Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This paper analyzes several current design and calculation methods of CAST process in China and points out the resemblances, unique features and the existing issues. Based on the summarization of practical design and operation experiences for years, the author proposes and recommends a new design and calculation method. With the restraining factors of fulfilling the requirements of biological reaction, the “recommended method” designs and calculates sludge volume, reaction cell volume and other design datas according to the sludge age based on the biological treatment goal and MLSS concentration from practical operation in production. It abandons the arbitrariness in design and calculation by experience. In the end, the paper presents the application in practical project of the “recommended method”.

Keywords: CAST process; Project design; Calculation method; Phosphorus and nitrogen removal

1 目前国内几种 CAST 工艺设计计算方法的特点及问题

CAST 工艺占地少, 具有良好的脱氮除磷功能, 在我国中小型城市污水处理厂得到了广泛应用。但由于其生物反应和泥水分离在一个池中进行, 比一般活性污泥法更为复杂, 且为国外专业公司的专利, 其设计计算方法也各不相同, 尚不成熟。

目前国内采用的设计计算方法主要有以下几种:

(1) 日本下水道事业团主编的《序批式活性污泥设计指南》^[1] (以下简称“指南方法”)。

(2) 我国《室外排水设计规范》(GB 50014—2006) 推荐的方法^[2] (以下简称“新规范方法”)。

(3) 以沉降性能为制约因素的方法^[3~6] (以下简称“沉降因素法”)。

上述设计计算方法各式各样, 但有一个共同特点, 那就是假设非曝气(沉淀和滗水)阶段不发生生物

反应,反应池中的总污泥量(XV)要乘以一个修正系数 e $\left[e = \frac{T_A}{T}, T \text{ 为循环周期}, T_A \text{ 为曝气反应时间} \right]$ 变成反应污泥量(eXV);或者反应泥龄(θ_{CR})要除以同样的修正系数 e ,变成总泥龄 θ_{CT} $\left(\theta_{CT} = \frac{\theta_{CR}}{e} \right)$,然后才能计算出反应池的总污泥量。

1.1 “指南方法”的特点和存在的问题

(1) “指南方法”采用修正的污泥负荷计算式计算反应池容积(V)和曝气反应时间,但该方法推荐的污泥负荷值范围很宽 $L_s = 0.03 \sim 0.4 \text{ kg BOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,排水比 m 值的范围也很宽($m = 1/2 \sim 1/6$),没有明确的依据,单凭经验任意性很大,操作较困难。

(2) 该法忽略了滹水阶段污泥同样也能沉降的事实,不必要地增加了沉降阶段所需要的时间,夸大了污泥分离过程的难度。所推荐的沉速计算式也存在一些问题。

(3) 该法所采用的设计流量为最大日流量,偏于保守。

1.2 “新规范方法”的特点和存在的问题

“新规范方法”吸收了“指南方法”中合理的部分,例如其反应池容积计算式为:

$$V = \frac{24QS_o}{1\,000XL_s t_R} \quad (1)$$

式中 Q ——每个周期进水量, m^3 ;

X ——污泥浓度, g/L ;

S_o ——进水 BOD_5 浓度, mg/L ;

L_s ——污泥负荷, $\text{kg BOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$;

t_R ——反应时间,等于“指南方法”中的曝气时间 T_A , h 。

该法反应时间的计算式为:

$$t_R = \frac{24S_o m}{1\,000L_s X} \quad (2)$$

式中 m ——充水比。

显然式(1)、式(2)与“指南方法”的计算式是一致的,仅污泥浓度(X)的单位不同。但该法与“指南方法”相比有所改进。主要体现在:

(1) 所推荐的污泥负荷值较具体且范围缩小了。如生物脱氮的 $L_s = 0.05 \sim 0.15 \text{ kg BOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$;生物脱氮除磷的 $L_s = 0.1 \sim 0.2 \text{ kg BOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。

增加了可操作性。

(2) 该法不考虑沉淀性能对池容的影响,认为根据生物反应要求确定的池容积能够满足泥水分离的需要,无需再核算池容积的沉降分离功能。

(3) 按平均日污水量计算反应池容积。

尽管如此,该法仍存在一些不足:

(1) 污泥负荷的取值范围高值与低值相差 2~3 倍,还存在一定的任意性和操作困难,缺乏明确的依据。

(2) 对峰值流量缺乏应对措施。

1.3 “沉降因素法”的特点和存在的问题

以沉降性能为制约因素的计算方法,在按泥龄确定污泥总量等方面进行了不少改进,并吸收了德国 ATV 标准 A131E《单级活性污泥法污水处理厂的设计》^[7] 中很多有益的内容。其推导要点为:

(1) 在沉淀和滹水阶段,污泥沉降距离 $\geq$ 滹水高(ΔH) + 安全高(H_f),即:

$$V_s(T_s + T_D - 10/60) \geq \Delta H + H_f \quad (3)$$

式中 V_s ——污泥沉降速度, m/h ;

T_s ——沉淀时间, h ;

T_D ——滹水时间, h 。

(2) 污泥沉降速度按式(4)计算:

$$V_s = \frac{650}{XS_{VI}} \quad (4)$$

式中 S_{VI} ——污泥体积指数, mL/g 。

(3) 最高水位混合液污泥浓度 $X = \frac{S_{TP}}{V}$, 滹水高

$$\Delta H = \frac{24Q_h H}{NV}$$

(4) 根据以上各式,可得池容积的综合计算式:

$$\frac{650V}{S_{TP} S_{VI}} \left(T_s + T_D - \frac{10}{60} \right) = H_f + \frac{24Q_h H}{NV} \quad (5)$$

式中 S_{TP} ——反应池总污泥量, kg , $S_{TP} = \frac{T}{T_A} Q_d \theta_{CR} Y_t$

$$(S_o - S_e) \times 10^{-3};$$

Q_d ——最大日流量, m^3/d ;

Q_h ——最大日最大时流量, m^3/h ;

θ_{CR} ——反应泥龄, d ;

Y_t ——总产率系数, $\text{kgSS}/(\text{kgBOD}_5 \cdot \text{d})$;

S_e ——出水 BOD_5 浓度, mg/L ;

V ——反应池容积, m^3 ;

H ——反应池最大水深, m;

N ——每日的周期数。

从上述池容积计算式推导的要点可以看出, 该法有以下问题值得商榷:

(1) 该法虽然考虑了生物反应的因素, 但仍以沉淀性能作为计算池容的制约因素加以推导, 而将生物反应的需要仅作为沉降性能的附带因素予以考虑, 与实际情况不符。事实上, 沉淀性能不是计算池容的制约因素, 而生物反应才是。理由如下:

①由于脱氮泥龄长, 池容积大, 其滯水量仅占池容积的 16%~25%, 所要求的沉降距离短, 经 2 h 沉淀后, 很容易沉至滯水深度以下, 易于满足泥水分离的需要。

②CAST 工艺不设初沉池, MLVSS/MLSS 较低, 而且池首设有生物选择器, 污泥的沉淀性能优于其他工艺, 其处理城市污水时, $SVI \leq 80$ mL/g, 合流制时还会更小 (≤ 50 mL/g)^[8,9], 因此沉淀性能好, 易于沉淀。

③CAST 工艺沉淀方式属静止沉淀, 无水力干扰, 利于泥水分离; 且整个反应池均用于泥水分离, 水力负荷小, 亦利于泥水分离。

④通过实际计算的结果^[10], 也说明污泥沉降距离远大于滯水深度和安全高度之和 ($\Delta H + H_f$), 证明沉降因素并非计算池容的制约因素。

(2) 由于 CAST 工艺具有良好的泥水分离性能, 因而按该法计算出的混合液污泥浓度偏大, 超过实际生产运行所能达到的浓度。例如文献[6]中按该法计算出的最高水位(指峰值流量下的水位) $X' = 4.62$ g/L、5.32 g/L^[6], 相应正常水位 $X = 6.03$ g/L、6.75 g/L^[6]。这样高的浓度在实际运行中是难以达到的。

(3) 该法在设计流量及 SVI 的取值、沉速公式的选择等方面也存在值得商榷的地方。

2 CAST 工艺设计计算推荐方法的特点和内容

2.1 “推荐方法”的特点

根据对上述几种设计计算方法的分析, 在汲取其中有益内容, 摒弃其中不合理部分, 并在总结实际工程设计和运行经验的基础上, 提出和推荐一种实用的设计计算方法^[10](以下简称“推荐方法”), 其特点如下:

(1) 按满足生物反应的要求确定污泥总量

(S_{TP}) 和反应池容积, 无需再核算其能否满足泥水分离的要求。

(2) 计算池容积 $V = \frac{S_{TP}}{X}$ 时, 反应池中的 X

(MLSS) 应按生产实际运行所能达到的浓度取值, 而不应通过计算式(5) 计算出, 否则会导致取值偏高。

(3) 污泥总量和反应池容积及其他设计数据应按生物处理目标所确定的泥龄加以推算, 而不能凭经验任意确定。

(4) 采用日平均流量计算污泥总量和反应池容积, 并用峰值流量来考虑水力条件所要求的安全容积。既发挥了 CAST 工艺缓冲能力强的特点, 又保证了水力条件所要求的安全性。

2.2 “推荐方法”的计算步骤与内容

2.2.1 根据进水水质确定曝气和非曝气时间

对于一般城市污水, 曝气和非曝气时间各取 2 h, 以便一对一供气; 沉淀时间(T_s) 和滯水时间(T_D) 各取 1 h, 为非曝气时间。循环周期为 $T = 4$ h, 周期数为:

$$N = \frac{24}{T} = 6 (\text{次/d})$$

CAST 工艺为边进水边曝气, 进水时间 $T_F = T_A = 2$ h, 池数 $n \geq 2$ 格。

2.2.2 根据处理目标计算泥龄

(1) 具有硝化能力所需最小泥龄按式(6) 计算:

$$\theta_{CN} = F \times 3.4 \times 1.103^{15-T} \quad (6)$$

式中 θ_{CN} ——好氧硝化泥龄, d;

$3.4 \times 1.103^{15-T}$ ——水温 T 时保证硝化的最小泥龄, 其计算式为 $\frac{1.6}{\mu \times 1.103^{T-15}}$,

其中 μ 为硝化菌最大比生长速率, d^{-1} , $15^\circ C$ 时取 $0.47 d^{-1}$; 1.103^{15-T} 为温度修正系数; 1.6 为能保持足够硝化菌的经验系数;

F ——考虑 $NH_3 - N$ 波动的安全系数, 当进水 BOD_5 总量 ≥ 6000 kg/d 时, F 取 1.45, 当进水 BOD_5 总量 ≤ 1200 kg/d 时, F 取 1.8。

(2) 具有硝化反硝化能力所需最小泥龄按式

(7) 计算:

$$\theta_c = F \times 3.4 \times 10^{15-T} \times \frac{1}{1 - V_D/V} \quad (7)$$

式中 θ_c ——硝化反硝化的设计泥龄, d;

V_D ——反硝化池容积, m^3 ;

V ——生物反应池总容积, m^3 。

根据需要反硝化的硝态氮浓度(N_D)和进水的 BOD_5 浓度(S_o)的比值 N_D/S_o 来确定 V_D/V 的比值。

德国 ATV 标准给出了 V_D/V 随 N_D/S_o 而变化的关系, 见表 1, 可供设计选用。根据式(6)、(7)计算出 θ_c 的结果列入表 2, 供设计选用^[7]。

表 1 根据 N_D/S_o 确定 V_D/V 的值($T = 10 \sim 12\text{ }^\circ\text{C}$)

V_D/V	$N_D/S_o / \text{kgNO}_3^- - \text{N} / \text{kgBOD}_5$
0.2	0.06
0.3	0.09
0.4	0.12
0.5	0.15

表 2 根据水温及处理规模确定泥龄 θ_c 值

处理目标		处理厂规模			
		总 $BOD_5 \leq 1\,200\text{ kg/d}$ 或 $Q \leq 6\,000\text{ m}^3/\text{d}$		总 $BOD_5 \geq 6\,000\text{ kg/d}$ 或 $Q \geq 30\,000\text{ m}^3/\text{d}$	
		10 $^\circ\text{C}$	12 $^\circ\text{C}$	10 $^\circ\text{C}$	12 $^\circ\text{C}$
带硝化/d		10	8.2	8	6.6
带脱氮/d	$V_D/V = 0.2$	12.5	10.3	10.0	8.3
	$V_D/V = 0.3$	14.3	11.7	11.4	9.4
	$V_D/V = 0.4$	16.7	13.7	13.1	11.0
	$V_D/V = 0.5$	20.0	16.4	16.0	13.9
污泥稳定(含脱氮)/d		25.0	不建议		

表 1 中的需要反硝化的硝态氮 N_D 可按式(8)计算:

$$N_D = N_t - 0.05(S_o - S_e) - N_{te} \quad (8)$$

式中 N_t ——CAST 反应池进水总氮浓度, mg/L ;

N_{te} ——CAST 反应池出水允许总氮浓度, mg/L 。

2.2.3 计算污泥总产率系数^[7,8]

$$Y_t = K \left[0.75 + 0.6 \frac{SS_o}{S_o} - \frac{0.8 \times 0.17 \times 0.75 \times 1 \times 1.07^{(T-15)}}{1 + 0.17 \theta_c \times 1.07^{(T-15)}} \right] \quad (9)$$

式中 K ——国情修正系数, 取 0.9;

SS_o ——进水悬浮物浓度, mg/L 。

2.2.4 根据泥龄和总产率系数确定污泥负荷和反应池容积

(1) 污泥负荷计算式:

$$L_s = \frac{S_o}{\theta_c Y_t (S_o - S_e)} \quad (10)$$

(2) 反应池容积计算式:

$$V = \frac{Q_o Y_t \theta_c (S_o - S_e)}{X e} \quad (11)$$

或:

$$V = \frac{Q_o S_o}{L_s X e} \quad (12)$$

式中 X ——正常液位下的反应池混合液污泥浓度, 一般取值为 $4\,000\text{ mg/L}$;

Q_o ——日平均流量, m^3/d ;

e ——修正系数, $e = T_A/T$ 。

2.2.5 计算充水比、安全容积和修正后的反应池容积

(1) 充水比(排水比)。

由排水比 $m = Q_F/V$ 可得:

$$m = \frac{L_s T_A X}{24 S_o} \quad (13)$$

式中 Q_F ——每周期平均进水量, m^3 , $Q_F = Q_o/N$;

N ——周期数。

(2) 安全容积。

进水时间一般仅 2 h, 当峰值流量出现时, 必须具有应对峰值流量的安全调节容积, 否则会改变循环周期。

一般安全容积 $\Delta q = K_z Q_F - Q_F$, $V = Q_F/m$, 总变化系数为 K_z , 则安全容积比为:

$$\frac{\Delta q}{V} = m(K_z - 1) \quad (14)$$

(3) 修正后的反应池容积。

应对峰值流量, 计算出的反应池容积应增加安全容积(Δq), 故修正后的反应池容积按式(15)计算:

$$V' = V + \Delta q = \left[1 + \frac{\Delta q}{V} \right] V = [1 + m(K_z - 1)] V \quad (15)$$

(4) 反应池相关尺寸。

① 最大水深 $H = 4 \sim 6\text{ m}$ (峰值流量的水深)。

② 反应池平均流量的水深(正常水深):

表 3 老虎滩污水处理厂夏、冬季运行情况

季节	指标	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	TN	TP	处理水量 / 万 m ³ /d
夏季	进水/mg/L	114 84~ 247. 5	48 5~ 108. 2	58~ 358	33 49~ 12. 03	3 37~ 1. 93	8 26~ 8. 57
	出水/mg/L	17. 82~ 45. 32	3 9~ 15. 7	3~ 19	8 94~ 14. 85	0 89~ 1. 32	
	去除率/%	75~ 94	72~ 91	84~ 98	32~ 64	44~ 70	
冬季	进水/mg/L	48 66~ 303. 07	28 22~ 129. 05	16~ 286	17 49~ 31. 34	1. 27~ 3. 03	7. 37~ 9. 70
	出水/mg/L	14 88~ 36. 81	2 03~ 8. 49	1. 2~ 13. 2	8 24~ 18. 75	0 54~ 1. 59	
	去除率/%	57~ 95	76~ 98	55~ 99	21~ 73	22~ 72	

$$h_2 = \left[\frac{H}{1 + \frac{\Delta q}{V}} \right] \quad (16)$$

③ 反应池最低水深:

$$h_1 = (1 - m)h_2 \quad (17)$$

2.2.6 计算剩余污泥量和供气量

CAST 工艺的剩余污泥量和供气量的计算方法与连续流活性污泥法基本相同。

(1) 剩余污泥量(W_t)^[9]。

$$W_t = \frac{Q_0 Y_t (S_0 - S_e)}{1000} \quad (18)$$

(2) 供气量。

计算方法可参考 ATV-A131E^[7] 的计算方法。

3 “推荐方法”在实际工程中的应用

笔者所在单位按“推荐方法”成功地设计、建设、运营了 10 余座采用 CAST 工艺的污水处理厂。以大连老虎滩污水处理厂为例,说明本“推荐方法”的可行性^[10]。

3.1 工程概况

该厂采用 CAST 工艺,处理规模 8 万 m³/d,进水 BOD₅=130 mg/L, SS=150 mg/L, TN=35 mg/L, NH₃-N=26 mg/L, TP=3 mg/L。

该厂设 8 座 CAST 反应池,单池设计尺寸 $L \times B \times H = 50 \text{ m} \times 19.7 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 5910 \text{ m}^3$,污泥负荷 $LS = 0.119 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,反应周期数 $N =$

6,安全容积比 $\frac{\Delta q}{V} \approx 0.084$ 。

3.2 运行情况及分析

2006 年夏季(6 月)、冬季(12 月)运行资料整理,如表 3 所示。对运行资料进行分析,可得出以下结论:

(1) 如表 3 所示,处理效果很好,夏、冬两季的运

行数据均达到设计的 GB 18918—2002 一级 B 标准;大部分指标已达到一级 A 标准,出水可作回用。

(2) 冬季不仅除碳的效果好,硝化效果也很好。

(3) 进水量已超过设计水量的 5.4%~15.5%,但出水 SS 仍很低,夏季月平均为 7.95 mg/L,冬季月平均为 4.99 mg/L;这说明 CAST 工艺的沉淀性能好,并非确定池容的制约因素。

(4) 虽进水浓度未达到设计指标,但进水量已超过设计值很多,去除率很高,一直运行很稳定。

由此可见,“推荐方法”比较符合实际,有客观理论依据,操作性较强等特点,用于设计时是可行的。

参考文献

- 1 日本下水道事业团主编. 序批式活性污泥法设计指南. 1990
- 2 上海市政工程设计研究总院主编. 室外排水设计规范 GB 50014—2006. 北京: 中国计划出版社, 2006
- 3 周震, 周丹. 推荐一种新的 SBR 工艺设计计算方法. 给水排水, 2005, 31(4): 20~25
- 4 朱明权, 周冰莲. SBR 工艺的设计. 给水排水, 1998, 24(4): 6~11
- 5 李颖, 郭爱军, 李蔚然. SBR 工艺脱氮设计的研究. 环境工程, 2006, 24(6): 23~26
- 6 周震. 活性污泥工艺简明原理及设计计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- 7 德国 ATV 标准 ATV-DVWK-A131E. 单段活性污泥污水处理厂设计. 德国: GFA 出版公司, 2000
- 8 许劲, 孙俊怡. 不设初次沉淀池时除磷脱氮系统产率系数的选择. 中国给水排水, 2005, 21(2): 63~66
- 9 周冰莲. 活性污泥法剩余污泥量的计算. 中国给水排水, 1999, 15(6): 53~55
- 10 廖钧. CAST 污水处理工艺的应用研究: [学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2007

& E-mail: liao68811@163.com

收稿日期: 2010-09-08

修回日期: 2011-01-10