

厌氧法污水处理系统的优化设计

隋 军 王宝贞
(哈尔滨建筑工程学院)

X703

摘 要

通过对厌氧污水处理系统的能耗过程及节能措施的分析,建立了厌氧反应器单体结构的优化设计模型,以及利用换热器或热泵回收余热的优化设计模型。

1 引言

在污水处理领域中,利用厌氧方法处理有机废水,并同时回收有机物所含的部分能量,已成为非常热门的研究课题。各国学者对厌氧反应的微生物学、厌氧反应器结构、工艺形式、工程设计方法及运行参数等,作过许多研究并取得了很多成果,使厌氧法从早期的低效、停留时间长、只能处理污泥和极高浓度有机废水,已发展到高效、停留时间短、能处理一般的高浓度污水,甚至低浓度污水和城市污水。但厌氧法在实际工程中未得到普通应用,主要的原因是厌氧法污水处理一般需在中温 35℃(或高温 55℃)的条件下进行,在没有余热可利用的条件下,加热中消耗大量的能量,限制了厌氧法在污水处理上的应用。因此,可以认为解决热能消耗问题

是厌氧法污水处理能否得到普通应用的关键。

如何确定厌氧反应器的结构尺寸及高程(埋深),使其基建费用与长期效应的运转综合费用最小,是厌氧反应器经济节能措施的一个方面;另外,分析厌氧法的工艺过程,发现它消耗的热能和其排出的废热几乎是等量的。由此,回收厌氧法出水所含的热能,是厌氧反应器的十分重要的节能措施。基于以上两点,本文就厌氧法污水处理系统的工程经济、节能、自身废热回收等问题做以下优化分析。

2 厌氧反应器的单体优化设计

2.1 费用函数的构成

已知消化温度 T (按中温 35℃)、待处理水量 W_L 、停留时间 t 、有效容积 $V=t \cdot W_L$,求年费用最小时的反应器直径 $2R$ 、高度 H 及埋深 h_2 ,

表 3 不同负荷的产泥率

日期	负荷率 ($\text{kgCOD}_{\text{cr}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)	产泥率 ($\text{kgSS}/\text{kgBOD}_5$)
12月1日	11.30	0.276
12月3日	10.99	0.282
12月21日	11.01	0.289
12月25日	11.53	0.293
平均值	11.21	0.285

据有关资料介绍,啤酒废水在进行生物处理时产泥量较高,一般都在 0.35 $\text{kgSS}/\text{kgBOD}_5$ 以上。本反应器处理啤酒废水,当有机负荷率达 11.21 $\text{kg COD}_{\text{cr}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ (相当于 7.4 $\text{kgBOD}_5/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)时,其产泥率仍较低,仅为 0.285 kgSS/kg

BOD_5 ,分析认为这主要是泥龄很长的缘故。

4 参考文献

- 1 Bjorn Rnsten "Wastewater treatment with aerated Submerge Biological filters" Journal WPCF, VOL56, NO. 5 PP424—431
- 2 秦麟源《废水生物处理》,同济大学出版社 1989 年。
- 3 郑元景等《生物膜法处理污水》,中国建工出版社,1983 年。
- 4 C. P. Leslie Grady, Jr and Henry C. Lim 著,李献文等译《废水生物处理理论与应用》,中国建工出版社。
- 5 刘天来“生物接触/氧化法处理高浓度有机废水”化工环保,1988(2) PP79—84。

见图 1。反应器的费用函数,按动态经济分析中年费用法建立^[1],其形式:

$$C = PC_r + S$$

式中 C ——年总费用

P ——年投资回收因子

C_r ——基建投资,包括罐体、设备和土建造价

S ——年运行费,包括热损失费用和水泵运行费用

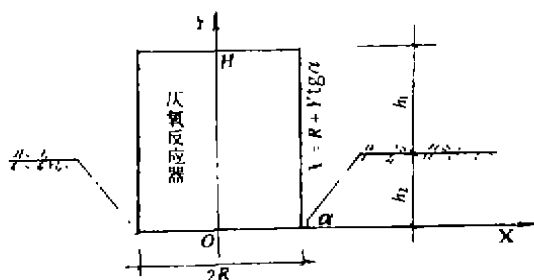


图 1

2.2 各部分的费用函数

2.2.1 池体造价

设: C_1 ——单位体积钢筋混凝土价格

C_2 ——单位体积保温层的价格

a ——壁厚

b ——保温层厚

则池体造价为

$$\begin{aligned} F_v &= (2\pi R^2 + 2\pi RH) \cdot a \cdot C_1 + (2\pi R^2 + 2\pi RH) \cdot b \cdot C_2 \\ &= (2\pi R^2 + 2\pi RH)(aC_1 + bC_2) \end{aligned}$$

2.2.2 土方量造价

分为三部分,即开挖费、提升至地面费和回填费用。

设: r ——土壤容重

α° ——开槽边坡角,见图 1

C_3 ——挖 1m^3 土的价格

C_5 ——每 m^3 土提升 1m 的价格

C_4 ——每回填 1m^3 土的价格

假设:开挖费用与土方总量成正比,提升费用与作功总量成正比,回填土费用与回填土方量成正比。

另外,由图 1 总土方量为:

$$\begin{aligned} V_2 &= \int_0^{h_2} \pi x^2 dy = \int_0^{h_2} \pi (R + y \text{ctg} \alpha)^2 dy \\ &= \pi h_2 (R^2 + Rh_2 \text{ctg} \alpha + \frac{1}{3} h_2^2 \text{ctg}^2 \alpha) \end{aligned}$$

将挖出的土提升到地面所做的功为:

$$\begin{aligned} W_s &= \int_0^{h_2} r \pi x^2 dy \cdot (h_2 - y) \\ &= \int_0^{h_2} r \pi (R + y \text{ctg} \alpha)^2 (h_2 - y) dy \\ &= r \pi (\frac{R^2}{2} h_2^2 + \frac{R}{3} h_2^3 \text{ctg} \alpha + \frac{1}{12} h_2^4 \text{ctg}^2 \alpha) \end{aligned}$$

回填土量为:

$$\begin{aligned} V_h &= \int_0^{h_1} (\pi x^2 - \pi R^2) dy \\ &= \int_0^{h_1} \pi [(R + y \text{ctg} \alpha)^2 - R^2] dy \\ &= \pi (Rh_1^2 \text{ctg} \alpha + \frac{1}{3} h_1^3 \text{ctg}^2 \alpha) \end{aligned}$$

则总土方量造价为:

$$\begin{aligned} F_t &= C_3 \cdot V_2 + C_5 \cdot W_s + V_h \cdot C_4 \\ &= C_3 \cdot \pi h_2 (R^2 + Rh_2 \text{ctg} \alpha + \frac{1}{3} h_2^2 \text{ctg}^2 \alpha) + \\ &\quad C_5 r \pi h_2^2 (\frac{R^2}{2} + \frac{R}{3} h_2 \text{ctg} \alpha + \frac{h_2^2}{12} \text{ctg}^2 \alpha) + C_4 \\ &\quad \cdot \pi \cdot h_1^2 (R \text{ctg} \alpha + \frac{1}{2} \text{ctg}^2 \alpha) \end{aligned}$$

2.2.3 罐体年补热费用

设: T_f ——年平均气温 $^\circ\text{C}$

T_s ——年平均土壤温度

K_s ——地面以上部分罐体的传热系数

K_r ——地面以下部分罐体的传热系数

C_q ——锅炉热价

η_q ——锅炉热效率

则年补热费用为

$$\begin{aligned} F_q &= C_q \cdot Q_{\text{总}} \cdot \frac{24 \times 365 \times 10^{-4}}{\eta_q} \\ &= 8.76 \times 10^{-3} \cdot \frac{C_q}{\eta_q} \cdot [\sum A \cdot K \cdot \Delta T] \\ &= 8.76 \times 10^{-3} C_q / \eta_q [(\pi R^2 + 2\pi Rh_1) K_s (T - T_f) + (\pi R^2 + 2\pi Rh_2) K_r (T - T_s)] \\ &= 8.76 \times 10^{-3} C_q / \eta_q [K_s (T - T_f) (\pi R^2 + 2\pi Rh_1) + K_r (T - T_s) (\pi R^2 + 2\pi Rh_2)] \end{aligned}$$

2.2.4 水泵运行费用

设: h' ——上水管在地面以下深度,见图 2

余热回收系统优化的目的是求在来水温度 T_1 、反应温度 T 一定的条件下,年费用(包括换热器投资的年折旧和热介质“ k ”的年费用)最小时,出水的最终排放温度 T_1 和所需热介质温度 T_4 及热介质流量 W_k ,从而可确定 1[#] 及 2[#] 换热器的换热面积 A_1, A_2 。

3.1.1 A_1, A_2 与 T_3, T_4 的关系

设: W_k ——热介质流量

T_4, T_5 ——热介质温度

A_1, A_2 ——1[#]、2[#] 换热器面积

K ——换热器传热系数

C ——水热容, $C=4.187, \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

1[#] 换热量 Q_1 :

$$Q_1 = W_L \cdot r_L \cdot C(T - T_3)$$

$$= W_L \cdot r_L \cdot C(T_2 - T_1)$$

$$\therefore T - T_3 = T_2 - T_1 \quad (7)$$

$$\text{或 } T - T_2 = T_3 - T_1 \quad (7')$$

即换热器各处温度差相等,所以 1[#] 换热器的平均温差为

$$\Delta T_m' = T_3 - T_1 = T - T_2$$

$$\text{又 } Q_1 = KA_1 \cdot \Delta T_m' = KA_1(T_3 - T_1)$$

$$= W_L \cdot r_L \cdot C \cdot (T - T_3)$$

$$\therefore A_1 = \frac{W_L \cdot r_L \cdot C \cdot (T - T_3)}{K(T_3 - T_1)} \quad (8)$$

$$\text{同理 } Q_2 = W_k \cdot r_k \cdot C \cdot (T_4 - T_5)$$

$$= W_L \cdot r_L \cdot C \cdot (T - T_2)$$

$$\text{令 } W_L/W_k = B$$

则 $T_5 = T_4 - B(T - T_2)$, 将(7)式代入得

$$T_5 = T_4 - B(T_3 - T_1) \quad (9)$$

按对数平均温差法, 2[#] 的对数平均温差为:

$$\begin{aligned} \Delta T_m'' &= \frac{\Delta T_1'' - \Delta T_2''}{\ln \frac{\Delta T_1''}{\Delta T_2''}} \\ &= \frac{(T_4 - T) - (T_5 - T_2)}{\ln \frac{T_4 - T}{T_4 - T_2}} \end{aligned}$$

将(7)、(9)二式代入上式得:

$$\Delta T_m'' = \frac{(B-1)(T_3 - T_1)}{\ln \frac{T_4 - T}{T_4 - T - (B-1)(T_3 - T_1)}} \quad (10)$$

而 $Q_2 = KA_2 \cdot \Delta T_m'' = W_k \cdot r_k \cdot C \cdot (T - T_2)$, 将式(7')及(10)代入得

$$A_2 = \frac{W_L \cdot r_L \cdot C(T_3 - T_1)}{K(B-1)(T_3 - T_1)}$$

$$\ln \frac{T_4 - T}{T_4 - T - (B-1)(T_3 - T_1)}$$

$$\therefore A_2 = \frac{W_L \cdot r_L \cdot C}{K(B-1)}$$

$$\ln \frac{T_4 - T}{T_4 - T - (B-1)(T_3 - T_1)} \quad (11)$$

3.1.2 余热回收及加热系统的年费用函数

设: 换热器造价与面积成正比; C_a ——单位面积换热器价格; T_u ——环境温度 $^\circ\text{C}$ 。

则 2[#] 换热器消耗的热能为

$$Q_2' = W_k \cdot r_k \cdot C \cdot (T_4 - T_0) \quad (12)$$

所以按(1)式, 年费用为

$$\begin{aligned} F_Q &= PC_r + S \\ &= PC_a(A_1 + A_2) + \frac{Q_2'}{\eta_Q} \cdot C_Q \times 8.76 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

将(8)、(11)、(12)式代入上式得

$$\begin{aligned} F_Q &= P \cdot C_a \left[\frac{W_L \cdot r_L \cdot C \cdot (T - T_3)}{K(T_3 - T_1)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{W_L \cdot r_L \cdot C}{K \cdot (B-1)} \ln \frac{T_4 - T}{T_4 - T - (B-1)(T_3 - T_1)} \right] \\ &\quad + 8.76 \times 10^{-3} C_Q \cdot W_k \cdot r_k \cdot C \\ &\quad (T_4 - T_0) / \eta_Q \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $B = W_L/W_k$

3.1.3 约束条件

$$T_1 \leq T_3 \leq T \quad (14)$$

$$0 \leq W_k \leq W_L \quad (15)$$

$\therefore T_2 \leq T_5$, 再由(7)及(9)式

$$\therefore T_4 \geq T + (B-1)(T_3 - T_1)$$

当热介质为热水时, $T_4 \leq 98^\circ\text{C}$

$$\therefore T + (B-1)(T_3 - T_1) \leq T \leq 0.98^\circ\text{C} \quad (16)$$

3.1.4 用换热器回收余热时的优化设计数学模型

$$\begin{cases} \min & (13) \text{式} \\ \text{s. t.} & (14) \text{式} \\ & (15) \text{式} \\ & (16) \text{式} \quad (\text{各式略}) \end{cases}$$

上式可用一般约束非线性规划法求解也可用全枚举法求解。

3.2 利用热泵回收余热的最优化

热泵是利用一定量的功, 把低温处的热量

吸取出来并送往高温处,使其成为更有用的热能系统。热泵输出的热能大于对其输入的功,因此其供热系数 >1 。热泵有许多种形式,生产上多用蒸汽压缩式,它是以系统中工作介质的物态变化,即汽化吸热、冷凝放热的特性来供热的,如图4。其供热系数为:

$$\varepsilon_h = \frac{q_2 + W}{W} = \frac{q_2}{W} + 1 = \varepsilon_f + 1$$

式中 ε_f ——制冷系数

W ——压缩机做功量

q_1 ——蒸发器获热量

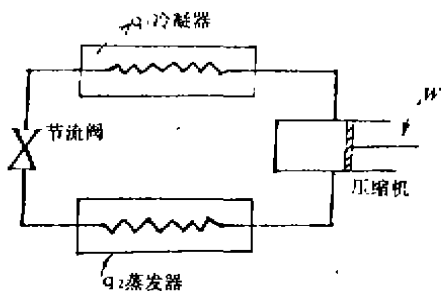


图4

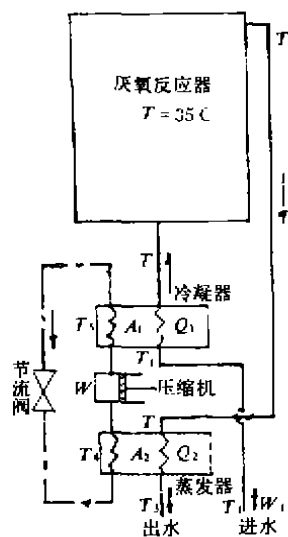


图5

因此,利用热泵系统回收厌氧反应器出水所含废热,再用其加热厌氧反应器进水,将更有效地回收和利用余热,从而达到最大限度节能。

设想的回收厌氧反应器出水所含热能,并加热进水的热泵系统如图5所示。它的优化设计是在 T_1 、 T 一定的条件下,求年费用最小时的

T_3 、 T_4 、 T_5 ,从而确定 A_1 、 A_2 及 W 。

3.2.1 系统内各参数间的关系

设: W ——压缩机功率

Q_1 ——蒸发器吸热量

A_1 ——蒸发器换热面积

Q_2 ——冷凝器供热量

A_2 ——冷凝器换热面积

R_{12} ——循环介质

T_4 ——蒸发器吸热温度

T_5 ——冷凝器放热温度

$C_1(T_4)$ —— R_{12} 在 T_4 时的潜热

$C_1(T_5)$ —— R_{12} 在 T_5 时的潜热

W_R ——介质循环流量

K_1 ——蒸发器传热系数,有相变的情况: $K_1 = K(C_1, T, T_3) = K(T_4, T, T_3)$

K_2 ——冷凝器传热系数,有相变的情况: $K_2 = K(T_5, T, T_1)$

则蒸发器换热量

$$Q_1 = W_L \cdot r_L \cdot C \cdot (T - T_1) \quad (17)$$

冷凝器换热量

$$Q_2 = W_L \cdot r_L \cdot C \cdot (T - T_3) \quad (18)$$

所以压缩机年做功量为

$$\begin{aligned} W_{\text{年}} &= [Q_1 - Q_2] \times 8.76 \times 10^{-3} \\ &= W_L \cdot r_L \cdot C \cdot (T_3 - T_1) \\ &\quad \times 8.76 \times 10^{-3} (10^6 \text{kJ}) \end{aligned} \quad (19)$$

按对数平均温差法,蒸发器及冷凝器的平均温差为

$$\begin{aligned} \Delta T_m' &= \frac{(T_5 - T_1) - (T_5 - T_1)}{\ln \frac{T_5 - T_1}{T_5 - T}} \\ &= \frac{T - T_1}{\ln \frac{T_5 - T_1}{T_5 - T}} \quad (\text{蒸发}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_m'' &= \frac{(T_4 - T_3) - (T_4 - T)}{\ln \frac{T_4 - T_3}{T_4 - T}} \\ &= \frac{T - T_3}{\ln \frac{T_4 - T_3}{T_4 - T}} \quad (\text{冷凝}) \end{aligned}$$

$$\text{又} \because Q_1 = K_1 A_1 \cdot \Delta T_m' = K_1 A_1 \frac{T - T_1}{\ln \frac{T_5 - T_1}{T_5 - T}}$$

