

工程应用实例

DOI 10.12030/j.cjee.201801118 中图分类号 X592 文献标识码 A

孙文静, 卫皇墨, 李先如, 等. 催化湿式氧化处理助剂废水工程及过程模拟[J]. 环境工程学报, 2018, 12(8): 2421-2428.

SUN Wenjing, WEI Huangzhao, LI Xianru, et al. Engineering and process simulation of auxiliary wastewater treated by catalytic wet air oxidation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(8): 2421-2428.

催化湿式氧化处理助剂废水工程及过程模拟

孙文静^{1,2}, 卫皇墨¹, 李先如³, 熊子昂⁴, 孙承林^{1,*}

1. 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院大连化学物理研究所张家港产业技术研究院有限公司, 张家港 215600

4. 大连理工大学化工与环境生命学部, 大连 116024

第一作者: 孙文静 (1992—), 女, 博士研究生, 研究方向: 催化湿式氧化过程及机制。E-mail: sunwenjing@dicp.ac.cn

* 通信作者, E-mail: clsun@dicp.ac.cn

摘 要 助剂废水是一种高浓度难降解有机废水, 以催化湿式氧化 (CWAO) 为主体的 CWAO-UASB-AOA-接触氧化-混凝沉淀工艺能够对其进行有效降解。在 CWAO 工业化装置设计中, 床层温升 (T_g) 和换热器总传热系数 (K) 是换热器设计的 2 个重要参数。采用 Aspen Plus 对 CWAO 过程进行稳态模拟, Aspen Plus 对 T_g 模拟结果同分布式控制系统 (DCS) 实测结果相对误差在 $\pm 2.0\%$ 以内。根据计算结果可知, K 为 $800 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。结合 K 和 T_g 可以用来估算换热面积, 进而指导 CWAO 过程系统工程的工业化设计。

关键词 助剂废水; 催化湿式氧化; 工程实例; 过程模拟

助剂废水是一种高浓度难降解有机废水, 高浓度有机废水具有污染物含量高、毒性大、排放点分散、水量少等特点, 会引发水体重度污染、生态环境恶化并威胁人体健康。目前国内外处理高浓度难降解有机工业废水的方法主要为焚烧法和 CWAO。焚烧法成本较高, 经济效益分析表明, 焚烧法处理每吨废水的运行费用为 318 元^[1], 且焚烧法会产生硫氧化物、氮氧化物和二恶英等废气。CWAO 是一种经济高效降解高浓度有机废水的方法, 并且可以大幅度提高废水的可生化性^[2]。CWAO 和焚烧法相比, 设备简单, 占地面积小, 可实现自动化管理, 不产生硫氧化物、氮氧化物和二恶英等废气, 也不产生污泥, 而且当废水 $\text{COD} > 20\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应系统可实现自热, 不需要提供辅助燃料, 只有在设备开车时需要提供辅助燃料^[3]。CWAO 反应条件为: 温度 $125 \sim 320\,^\circ\text{C}$, 压力 $0.5 \sim 20 \text{ MPa}$; CWAO 的进水 COD 要求为 $10\,000 \sim 100\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; CWAO 的工业化应用广泛, 可以用来处理垃圾渗滤液、酚类废水、农药废水、市政废物等^[4-11]。

目前, 国外 CWAO 研究技术已取得了较大进展, 如美国、德国、意大利、日本等国家的 CWAO 工艺技术较成熟, 但是国内自主研发且稳定运行的 CWAO 工业化装置较少^[9]。CWAO 工艺设计中需要进行严格热量衡算的设备为反应器和换热器, 其中换热器的计算比较复杂, 因为换热器中气水混合物的温度大于 $250\,^\circ\text{C}$ 、压力大于 6.5 MPa 。《化学化工物性手册》中无法查到其准确的物性参数; CWAO 工业化装置采用套管式换热器, 换热方式为气水混合物-气水混合物, 《石油化工设计手册》中仅对换热方式为水-水、空气-水、水-水蒸气的套管式换热器的总传热系数给出了经验参数。这 2 个原因导致 CWAO 装置中套管式换热器的热量衡算困难较大。CWAO 反应条件苛刻, 换热器材质一般为 316L

收稿日期: 2018-01-16; 录用日期: 2018-04-19

基金项目: 山东省科技重大专项 (2015ZDXX0402B01); 中国科学院重点部署项目 (ZDRW-ZS-2016-5); 中国科学院大连化学物理研究所科研创新基金项目 (DICP ZZBS201614)

或钛材,若换热器传热系数(K)选取偏大会导致系统无法达到换热需求,而 K 值偏小会增加换热器成本。综合考虑CWAO工艺设计中的难题,本研究对以CWAO为主体的CWAO-UASB-AOA-接触氧化-混凝沉淀工艺处理助剂废水工程实例进行了探讨,其中重点研究了CWAO技术,并采用Aspen Plus对CWAO过程进行稳态模拟。根据Aspen Plus对中国科学院大连化学物理研究所自主研发的CWAO工业化装置中床层温升模拟结果,并结合总传热系数 K ,可以实现对CWAO其他工业化装置实际换热面积的估算,从而用来指导CWAO过程系统工程的工业化设计。Aspen Plus在煤化工、生物化工、盐化工等化学反应工程中都有广泛的应用^[12-16]。

1 实施方案

1.1 工程概况

某助剂厂主要生产高性能聚合物助剂,产品包括受阻胺光稳定剂、光稳定剂中间体及其他精细化学品。废水主要成分为哌啶酮类化合物,实际废水量为 $36\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,该企业废水主要特点:色度高、COD高、不可生化、污染物浓度变化幅度较大。

废水处理工艺为:CWAO-UASB-AOA-接触氧化-混凝沉淀,工艺主体为CWAO,该项目于2015年建造并于同年8月成功开车。CWAO设计规模为 $72\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,装置占地面积 235 m^2 ,催化剂为中国科学院大连化学物理研究所自主研发的Ru基催化剂,经过CWAO处理后废水的可生化性(B/C)由0提高至0.6以上,COD去除率达75%以上。废水进水水质见表1。

表1 废水进水水质
Table 1 Inlet water quality of wastewater

COD / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH
10 000~65 000	0	8~9

1.2 工艺流程

助剂废水处理的工艺流程为CWAO-UASB-AOA-接触氧化-混凝沉淀,其中CWAO为主体工艺。助剂废水首先经过调节池对水质水量进行调节,将进水COD调至 $10\,000\sim 65\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而后对废水进行一级板框过滤和二级滤芯过滤滤出粒径较大的颗粒,三级过滤采用袋式过滤器滤除粒径大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒,过滤后的废水经过高压计量泵打入换热器冷端入口,设备开车时采用导热油对进水进行预热,待装置运行稳定后即可关闭导热油使用CWAO反应器出水对换热器冷端进水进行预热,从而实现装置自热,不需要额外提供热源。经过CWAO处理后,助剂废水的B/C由0提高至0.6以上,CWAO出水COD为 $1\,000\sim 8\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH为6~7,适合进一步生化处理。整体工艺流程如图1所示,其中CWAO工艺流程如图2所示。

1.3 工艺参数

1.3.1 过滤装置

一级过滤使用板框过滤,滤纸尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,共22张滤纸;二级过滤使用pp棉滤芯过滤,共12根滤芯;三级过滤为袋式过滤器,滤布孔径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.3.2 泵和空压机

工业化装置中泵使用高压计量泵,功率 22 kW ,压力 10 MPa 。空气压缩装置使用4台空压机轮换使用,每台空压机功率 15 kW ,压缩空气量为标准状况下 $1\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.3.3 换热器

换热器分为2部分,第1部分为导热油换热器,第2部分为废水换热器,均为套管式换热器,其中热物流走壳程,冷物流走管程。导热油换热器换热面积为 13.8 m^2 ;废水换热器换热面积为 32.8 m^2 。换热器材质采用TA10,设计压力 7.7 MPa ,设计温度 $280\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.3.5 催化湿式氧化装置报警连锁

为保证高温高压装置安全运行,各重要工艺单元温度压力范围设置如表2所示,开车后如果超过以下范围则发生报警连锁,装置自动停车。

表2 CWAO 装置报警参数
Table 2 Alarm parameters of CWAO apparatus

工艺单元	反应器出口压力/MPa	计量泵出口压力/MPa	反应器入口温度/℃	反应器中部温度/℃	反应器上部温度/℃
报警下限	5.5	—	10	—	—
报警上限	7.2	7.5	273	273	275

2 工程运行效果

2.1 CWAO 工业化装置运行效果

CWAO 装置调试运行稳定后,连续运行320 h,废水 COD 去除率如图3所示。虽然进水 COD 波动较大,但是 COD 去除率保持在75%以上。

2.2 CWAO 工业化装置床层温升模拟

通过计算反应器的床层温升可以为换热器设计提供理论依据。汪晓军等^[17]的研究结果表明:尽管有机物的标准燃烧热差异较大,但其对应的 COD 热值比较接近,每种有机物之间热值相对误差都在10%以内,这在工程上是允许的。

下面给出 Aspen Plus 配套输入计算流程。

1) COD 模拟,使用甲醇作为模型底物模拟进水 COD。应用 CH₃OH 转化率模拟 COD 去除率,即降解 1 g COD 相当于转化 0.67 g CH₃OH。计算过程见式(1)和式(2):



$$M_{\text{甲醇}}/1.5M_{\text{氧气}} = C_{\text{甲醇}}/C_{\text{氧气}} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{甲醇}}$ 为甲醇相对分子质量,32.04; $M_{\text{氧气}}$ 为氧气相对分子质量,32.00; $C_{\text{甲醇}}$ 为甲醇浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $C_{\text{氧气}}$ 为 COD 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2) 床层温升模拟,即绝热温升。在 Aspen Plus 软件中使用化学计量反应器,反应压力假设恒定。在 Aspen Plus 中需要输入的变量有:废水进水流量及温度、空气进气流量及温度、管道混合器压力、反应器入口温度、换热器换热面积。物性方法选择 PENG-ROB,换热器计算方法选择简捷计算方法,应用图4所示流程进行过程模拟。并根据 DCS 中的床层温升结果进行验证(随机选取40组数据),结果如表3所示。根据实验室小试及中试 CWAO 装置中 COD 去除率数据可以推算 CWAO 工业化装置床层温升。

$$\Delta T = \frac{(-\Delta H) C}{\rho c_p} \quad (3)$$

式中: ΔH 为反应热, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; C 为物料摩尔浓度, $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; ρ 为物料平均密度, $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_p 为物料平均比热容, $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ 。

模拟后可得到反应器出口温度和换热器总换热量 Q 。

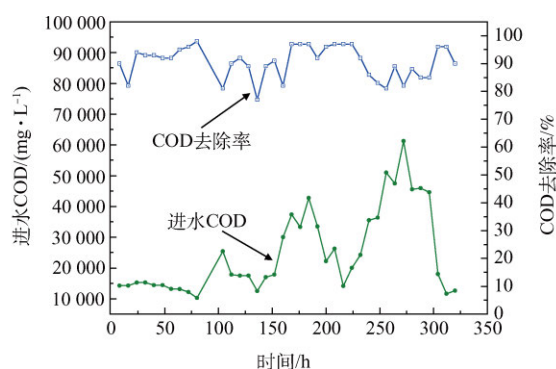


图3 CWAO 单元 COD 去除率
Fig. 3 COD removal efficiency of CWAO unit

表 3 CWAO 中 T_g 模拟值同 DCS 实测值对比
Table 3 Comparison of relative error T_g between simulation and testing results of DCS in CWAO

序号	DCS 标况 下空气量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	DCS 废 水量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	实测进 水 COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	模拟进水 COD 甲醇质 量分数/%	COD 去 除率/%	DCS 反应 压力/MPa	DCS 反应 器入口 温度/℃	DCS 反应 器出口 温度/℃	Aspen Plus 反应器出 口温度/℃	相对误 差/%
1	248.00	2.48	14 275	0.95	90	6.70	261.60	268.00	266.93	-0.40
2	206.00	2.80	14 275	0.95	82	6.74	259.50	266.51	266.51	0
2	200.00	2.80	15 290	1.02	94	6.80	263.31	269.00	270.10	0.41
4	200.00	2.80	15 290	1.02	93	6.80	262.30	269.10	269.51	0.15
5	201.00	2.80	14 420	0.96	93	6.70	262.00	269.30	268.60	-0.26
6	214.00	2.96	14 420	0.96	92	6.80	259.82	269.00	267.73	-0.47
7	206.00	2.84	13 190	0.88	92	6.87	261.32	269.10	268.35	-0.28
8	198.00	3.10	13 115	0.87	95	6.83	260.40	267.10	268.37	0.48
9	199.00	2.94	12 175	0.81	96	6.87	250.40	264.40	262.09	-0.87
10	246.00	3.00	10 290	0.69	98	6.80	248.50	260.10	258.39	-0.66
11	225.00	2.11	25 435	1.70	81	6.73	265.20	270.90	270.85	-0.02
12	267.00	1.50	17 854	1.19	90	6.69	253.49	262.10	260.49	-0.61
13	253.00	2.00	17 500	1.17	92	6.69	260.00	265.40	266.03	0.24
14	233.00	2.40	17 500	1.17	89	6.71	264.30	270.00	269.49	-0.19
15	285.00	2.10	12 535	0.84	77	6.60	262.19	266.90	265.20	-0.64
16	260.00	2.00	17 000	1.13	89	6.71	255.54	262.70	262.96	0.10
17	259.90	1.51	17 854	1.19	91	6.77	253.29	262.80	260.86	-0.74
18	248.00	2.10	30 000	2.00	82	6.73	265.05	270.60	271.13	0.20
19	150.00	1.09	37 340	2.49	97	6.50	260.50	268.20	270.29	0.78
20	178.80	1.13	33 310	2.22	97	6.50	260.20	268.10	267.75	-0.13
21	150.00	1.09	37 340	2.49	0.97	6.50	260.50	268.20	270.29	0.78
22	178.80	1.13	33 310	2.22	0.97	6.50	260.20	268.10	267.75	-0.13
23	151.20	1.10	42 730	2.85	0.97	6.50	259.90	267.80	269.57	0.66
24	151.90	1.05	33 470	2.23	0.92	6.50	259.50	267.50	267.56	0.02
25	146.10	1.15	22 190	1.48	0.96	6.50	250.40	261.00	261.64	0.25
26	100.20	1.15	26 240	1.75	0.97	6.70	249.80	262.20	266.62	1.69
27	105.10	1.12	14 130	0.94	0.97	6.70	250.70	262.80	261.08	-0.65
28	112.90	1.12	20 020	1.33	0.97	6.70	247.20	259.60	261.90	0.89
29	86.10	1.15	24 220	1.61	0.92	6.70	251.20	263.80	266.96	1.20
30	150.80	0.97	35 490	2.37	0.86	6.70	258.90	266.80	266.89	0.03
31	143.70	0.99	36 330	2.42	0.83	6.50	258.80	266.70	266.90	0.07
32	190.00	1.01	50 970	3.40	0.81	6.50	259.10	267.40	267.67	0.10
33	138.00	0.99	47 440	3.16	0.89	6.50	258.80	266.70	269.16	0.92
34	182.70	1.06	61 230	4.08	0.82	6.50	259.90	268.60	270.75	0.80
35	168.30	0.87	45 560	3.04	0.88	6.70	260.70	269.10	269.20	0.04
36	158.00	0.95	45 920	3.06	0.85	6.70	260.80	268.80	269.80	0.37
37	159.50	0.85	44 580	2.97	0.85	6.70	253.80	263.80	266.11	0.88
38	88.10	1.13	18 000	1.20	0.96	6.70	249.40	262.60	263.56	0.37
39	83.80	1.07	11 600	0.77	0.96	6.70	249.30	262.40	259.59	-1.07
40	115.00	1.10	12 610	0.84	0.90	6.70	255.40	265.60	262.20	-1.28

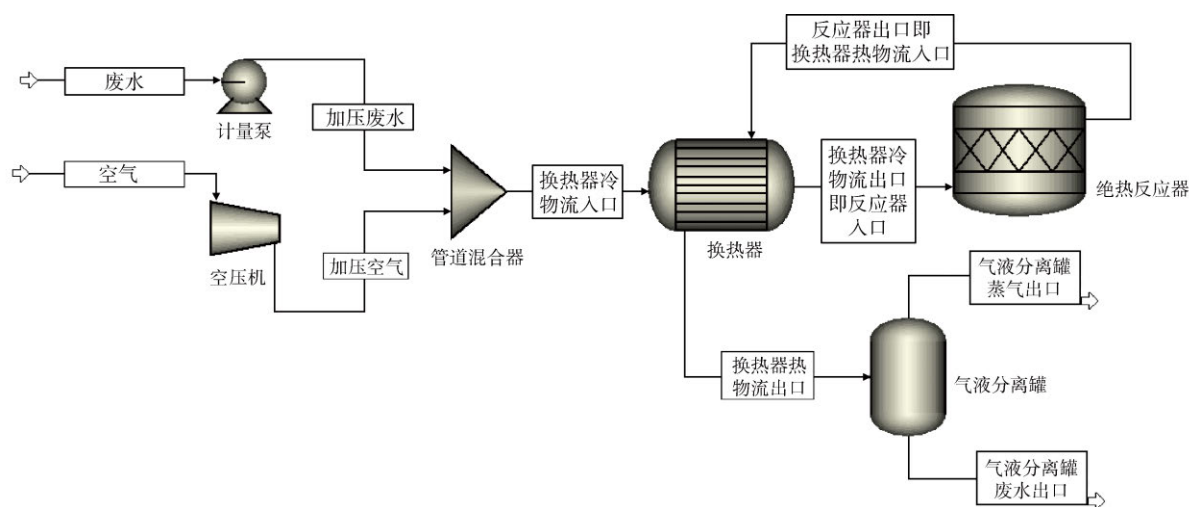


图4 CWAO 过程模拟流程
Fig. 4 Process flow simulation of CWAO

2.3 CWAO 工业化装置换热器传热系数计算

使用 Aspen Plus 对表 3 中数据进行稳态过程模拟, 物性方法采用 PENG-ROB, 换热器计算方法选择简捷计算方法, 根据式 (7) 计算传热系数 K 。

因为 2 种介质是逆流, 所以传热系数计算方法如下。

$$\Delta t_1 = T_1 - t_2 \quad (4)$$

$$\Delta t_2 = T_2 - t_1 \quad (5)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)} \quad (6)$$

式中: t_1 为换热器冷物流进口温度, $^{\circ}\text{C}$; t_2 为换热器冷物流出口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_1 为换热器热物流进口温度, $^{\circ}\text{C}$; T_2 为换热器热物流出口温度, $^{\circ}\text{C}$; Δt_1 为换热器进口处两侧流体温度差, $^{\circ}\text{C}$; Δt_2 为换热器出口处两侧流体为温度差, $^{\circ}\text{C}$; Δt_m 为对数平均温度差, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据式 (7) 计算传热系数。

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (7)$$

式中: A 为换热器换热面积, m^2 ; K 为换热器传热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

对计算结果进行统计可知, $K > 800 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ 的实验数据所占比例为 90%, 所以在实际换热器设计中总传热系数 K 可选取 $800 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。在 CWAO 实际应用中可使用此参数并结合床层升温数据实现对换热面积的估算, 进而用来指导 CWAO 过程系统工程的工业化设计。

2.4 CWAO 工业化装置投资及运行费用

该套 CWAO 装置建设成本 700 万元。运行成本主要包括电费、人工费和催化剂。经过计算, 处理每吨废水运行成本为 71.8 元, 其中包括电费 19.7 元、人工费 14.8 元及催化剂 37.3 元。

1) 电费。由于催化湿式氧化装置在运行过程中可实现自热, 所以主要耗电单元只有高压计量泵和空压机。其中高压计量泵功率 22 kW, 空压机功率 15 kW。废水实际处理规模 $36 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

$$q_H = q_D / 24 = 36 / 24 = 1.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} \quad (8)$$

式中: q_H 为处理废水量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$; q_D 为废水处理量, $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

$$C_{\text{电-H}} = U (P_{\text{泵}} + P_{\text{空压机}}) = 0.8 \times (22 + 15) = 29.6 \text{ 元} \cdot \text{h}^{-1} \quad (9)$$

式中: $C_{\text{电-H}}$ 为电耗, $\text{元} \cdot \text{h}^{-1}$; $P_{\text{泵}}$ 为高压计量泵功率, kW ; $P_{\text{空压机}}$ 为空压机功率, kW ; U 为工业用电单价, $\text{元} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ 。

$$C_{\text{电-t}} = C_{\text{电-H}}/q_{\text{H}} = 29.6/1.5 = 19.7 \text{元} \cdot \text{t}^{-1} \quad (10)$$

式中: $C_{\text{电-t}}$ 为处理废水电耗, $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

2) 催化剂费用。催化湿式氧化装置每年运行 330 d, 催化剂质保期 3 年。

$$C_{\text{催化剂}} = U_{\text{催化剂}} M_{\text{催化剂}} = 950\,000 \times 1.4 = 1\,333\,000 \text{元} \quad (11)$$

式中: $C_{\text{催化剂}}$ 为催化剂总投资, 元; $U_{\text{催化剂}}$ 为催化剂单价 $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$; $M_{\text{催化剂}}$ 为催化剂质量, t 。

$$C_{\text{催化剂-t}} = C_{\text{催化剂}}/q_{\text{质保}} = 1\,333\,000/(36 \times 330 \times 3) = 37.3 \text{元} \cdot \text{t}^{-1} \quad (12)$$

式中: $C_{\text{催化剂-t}}$ 为处理废水催化剂投资, $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$; $q_{\text{质保}}$ 为催化剂质保期内废水总处理量, t 。

3) 人工费。包括 4 名工人工资, 每人每月工资 4 000 元。

$$C_{\text{人工费}} = U_{\text{人工费}} M_{\text{人}} = 4\,000 \times 4 = 16\,000 \text{元} \quad (13)$$

式中: $C_{\text{人工费}}$ 为每月总人工费, 元; $U_{\text{人工费}}$ 为每个工人每月工资, $\text{元} \cdot \text{月}^{-1}$; $M_{\text{人}}$ 为工人数量。

$$C_{\text{人工费-t}} = C_{\text{人工费}}/q_{\text{M}} = 16\,000/(36 \times 30) = 14.8 \text{元} \cdot \text{t}^{-1} \quad (14)$$

式中: $C_{\text{人工费-t}}$ 为处理废水人工费, $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$; q_{M} 为每月处理废水量, t 。

处理每吨废水总运行费用:

$$C_{\text{运行费-t}} = C_{\text{电-t}} + C_{\text{催化剂-t}} + C_{\text{人工费-t}} = 19.7 + 37.3 + 14.8 = 71.8 \text{元} \cdot \text{t}^{-1} \quad (15)$$

式中: $C_{\text{运行费-t}}$ 为处理废水总运行费用, $\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

3 结论

1) 采用以 CWAO 为主体的 CWAO-UASB-AOA-接触氧化-混凝沉淀工艺可以实现对助剂废水的高效降解, 其中 CWAO 系统可实现自热。该项技术还可以推广到其他高浓度难降解废水处理过程。

2) 应用 Aspen Plus 可以实现对 CWAO 系统床层温升的准确模拟, Aspen Plus 对床层温升的模拟值和 DCS 实测值相对误差在 $\pm 2.0\%$ 以内。根据实验室小试及中试 CWAO 装置 COD 去除率可以实现对 CWAO 工业化装置床层温升的准确推算, 进而为后续换热器设计提供数据支撑。

3) 在 CWAO 工业化装置换热器设计中, 总传热系数 (K) 可选取 $800 \text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。结合 K 和床层温升可以用来估算换热面积, 进而指导 CWAO 过程系统工程的工业化设计。

4) CWAO 处理每吨废水运行成本为 71.8 元, 其中包括电费 19.7 元、人工费 14.8 元及催化剂 37.3 元。

参考文献

- [1] 钟璟, 韩光鲁, 陈群. 高盐有机废水处理技术研究新进展[J]. 化工进展, 2012, 31(4): 920-926.
- [2] ARENA F, DICHIO R, GUMINA B, et al. Recent advances on wet air oxidation catalysts for treatment of industrial wastewaters[J]. Inorganica Chimica Acta, 2015, 431: 101-109. DOI:10.1016/j.ica.2014.12.017.
- [3] MISHRA V S, MAHAJANI V V, JOSHI J B. Wet air oxidation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1995, 34(1): 2-48. DOI:10.1021/ie00040a001.
- [4] 蔡先明, 秦侠, 张丽, 等. 催化湿式氧化法处理垃圾渗滤液[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 189-193.

- [5] 柏亚成, 陈晔. 高浓度苯酚废水的均相催化湿式氧化研究 [J]. 现代化工, 2015, 35(6): 136-138.
- [6] 雷燕, 雷必安, 杨其文, 等. 催化湿式氧化处理城市污水厂污泥的研究进展 [J]. 现代化工, 2015, 35(3): 41-44.
- [7] 韩玉英. 催化湿式氧化吡虫啉农药废水 Cu/Mn 催化剂稳定性 [J]. 陕西科技大学学报 (自然科学版), 2012, 30(4): 42-45.
- [8] 曾经, 彭青林. 催化湿式氧化技术处理高浓度有机废水的研究 [J]. 中国给水排水, 2010, 26(19): 99-102.
- [9] 习成成, 桑培伦, 姜玲, 等. Ru/TiO₂ 催化湿式氧化废离子交换树脂技术研究 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(6): 104-109.
- [10] 刘俊, 曾旭, 赵建夫. NaOH 强化催化湿式氧化处理制药污泥 [J]. 化工环保, 2017, 37(1): 106-109.
- [11] 龙辉. 均相催化湿式空气氧化连续处理高含盐高浓度有机废水 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [12] 王思远. 基于 Aspen plus 的高温甲烷化流程模拟及能量分析 [D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [13] 华宇瑞, 龚志军, 张智羽, 等. 基于流化床的煤部分气化 ASPEN PLUS 模拟 [J]. 煤炭技术, 2016, 35(1): 310-311.
- [14] 刘利平, 王恒, 方书起, 等. Aspen Plus 软件模拟生物油模块化水蒸气重整制氢热力学 [J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(3): 330-334.
- [15] 柏静儒, 白章, 王擎, 等. 基于 Aspen Plus 的棒甸式油页岩干馏工艺系统模拟 [J]. 化工学报, 2012, 63(12): 4075-4081.
- [16] 贾晓华. Aspen plus 在真空制盐蒸发中的模拟应用 [J]. 盐科学与化工, 2017, 46(3): 8-13.
- [17] 汪晓军, 肖锦. 有机废水的热值及焚烧处理能耗分析 [J]. 环境工程, 1990, 8(6): 9-11.
- (本文责任编辑: 郑晓梅)

Engineering and process simulation of auxiliary wastewater treated by catalytic wet air oxidation

SUN Wenjing^{1,2}, WEI Huangzhao¹, LI Xianru³, XIONG Ziang⁴, SUN Chenglin^{1,*}

1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Zhangjiagang Industrial Technology Research Institute Co. Ltd., Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Zhangjiagang 215600, China

4. Faculty of Chemical, Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

* Corresponding author, E-mail: clsun@dicp.ac.cn

Abstract Auxiliary wastewater is a kind of wastewater containing high-concentration and hard-degraded organic pollutants. Catalytic wet air oxidation (CWAO) is the main process of CWAO-UASB-AOA-contact oxidation-coagulation method, which can effectively treat hard-degraded organic pollutants in auxiliary wastewater. In this CWAO industrialization apparatus, the temperature gradient between the reactor inlet and outlet (T_g) and heat transfer coefficient (K) are two important parameters for heat exchanger design. To this end, we carried out the steady-state simulation of CWAO process by Aspen Plus, and revealed that the relative error T_g of between the simulation and testing results of distributed control system (DCS) was less than 2.0%. Then, the K factor was calculated to be $800 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$. As a consequence, the heat exchanger area was readily estimated in term of T_g and K , and then provided an insightful engineering design guideline of CWAO industrialization system.

Key words auxiliary wastewater; catalytic wet air oxidation; engineering example; process simulation