

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.01.021

高效低耗活性炭水处理工艺设计方法的优化

应维琪,胡 娟,黄流雅,李冰嫻,蒋文新,张 巍

(华东理工大学国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室,上海 200237)

摘要 介绍活性炭吸附工艺设计的基本步骤和方法,说明如何建立高效低耗的活性炭水处理工艺,并通过吸附容量实验与连续流穿透实验获得工艺设计的基本参数。以吸附性能指标选炭法、微型快速穿透实验及生物活性炭系统的案例,论述活性炭塔中生物活性炭现象、活性炭催化/降解功能以及再生炭应用等高效低耗的功效,以达到进一步降低活性炭水处理成本的目的。

关键词 吸附容量指标 微型快速穿透 活性炭耗量 生物活性炭 吸附工艺设计

中图分类号 X505 **文献标识码** B **文章编号** 1004-6933(2012)01-0089-06

Optimized techniques for design of cost-effective treatment of water pollutants by activated carbon

YING Wei-chi, HU Juan, HUANG Liu-ya, LI Bing-jing, JIANG Wen-xin, ZHANG Wei

(State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract : The main procedures and techniques for the adsorption process design of activated carbon are introduced, and the method of developing cost-effective treatment of water pollutants with activated carbon is described in this paper. Based on the process design parameters obtained by the adsorption capacity experiment and continuous flow breakthrough experiment, the adsorptive capacity indicator method for carbon selection and the micro-column rapid breakthrough method were used for a case study of a biological activated carbon system. It is demonstrated that establishing the biological activated carbon capability in the adsorption tower, utilizing the catalytic property of activated carbon, and reusing the reactivated spent carbon can further reduce the cost for treatment of water pollutants by activated carbon.

Key words : adsorptive capacity indicator ; micro-column rapid breakthrough ; activated carbon consumption rate ; biological activated carbon ; adsorption process design

活性炭是一种常用吸附剂,在美国及其他一些发达国家常被用于深度水处理工艺。

本文推荐高效低耗的活性炭水处理工艺设计方法 ①掌握活性炭吸附技术的基本概念 ②依据吸附性能指标值或进行吸附容量实验选择合适炭型 ③进行有效的穿透实验,确定最佳炭型,估计实际使用时的耗量 ④建立生物活性炭功能,使活性炭柱能长期去除目标污染物 ⑤利用活性炭催化能力去除个别污染成分 ⑥再生已失效的活性炭。以例说明使用 4 个吸附性能指标(苯酚值,碘值,甲基蓝值,丹宁酸值)方法筛选出吸附潜力较好的活性炭,使用改良式的微型快速穿透实验(micro column rapid

breakthrough, MCRB)方法取得必要的污染物穿透曲线,并通过形成生物活性炭功能、利用活性炭的催化作用或使用再生炭等方式进一步降低活性炭水处理技术的应用成本,发挥该技术环境友好的优势。

1 活性炭吸附水处理工艺

在对受污染水体进行吸附处理时,虽然 PAC 和 GAC 均可使用,但其处理工艺的构建及应用性截然不同。PAC 可以依需要投加在已有处理装置(如混合池)中,用以快速降低污染物浓度而进行紧急应急处理;GAC 则添加到设计良好的吸附塔中进行连续流处理,更长效地去除进水中目标污染物,使出水符

合严格的排放标准(质量浓度降至 $\mu\text{g/L}$ 级别)。在应用的可行性研究阶段,首先要对多种炭样进行批式吸附容量实验,通过 Freundlich 模型拟合而遴选出少数性能较好的活性炭;再通过连续流穿透试验确定最佳炭型。在模拟实际处理条件的穿透曲线中,可获得设计吸附工艺的参数,并计算出活性炭容量利用率从而能估算处理成本。

活性炭吸附的相关计算参数公式:

a. 批式吸附容量实验中的活性炭单位吸附容量计算分式为

$$w_C = (\rho_0 - \rho_f) V/m \tag{1}$$

式中: w_C 为活性炭的吸附质量比, mg/g ; ρ_0 为水相中有机物起始质量浓度, mg/L ; ρ_f 为水相中有机物最终质量浓度, mg/L ; V 为水样体积, L 。

b. 连续流穿透试验中吸附床内活性炭单位吸附容量计算公式为

$$w_Q = \rho_{in} V_T f / m_1 \tag{2}$$

式中: w_Q 为连续流实验中活性炭吸附质量比, mg/g ; ρ_{in} 为进水有机物质量浓度, mg/L ; V_T 为总处理水量, L ; f 为穿透实验中平均去除率; m_1 为吸附床内总炭量, g 。

c. 混合池中 PAC 的理论需要量计算公式为

$$P_C = (\rho_{in} - \rho_{out}) / w_{Cout} \tag{3}$$

式中: P_C 为混合池中活性炭理论需要量, g/L ; ρ_{out} 为出水质量浓度, mg/L ; w_{Cout} 为在出水浓度时的活性炭吸附质量比, mg/g 。

d. 活性炭床中 GAC 的理论需要量计算公式为

$$G_C = \rho_{in} / w_{Cin} \tag{4}$$

式中: G_C 为活性炭床中活性炭理论需要量, g/L ; w_{Cin} 为在进水浓度时的活性炭吸附质量比, mg/g 。

以下举例说明水处理过程中 PAC 和 GAC 理论需要量(最低耗量)的计算^[4-5]。

例 1 在处理黄浦江上游原水作为上海市水厂的进水中,目标污染物的质量浓度(COD_{Mn})需要从 $\rho_{in} = 5.2 \text{ mg/L}$ 降到 $\rho_{out} = 4.0 \text{ mg/L}$ 。在批式吸附容量实验里,得到: $w_{Cout} = 0.894 \rho_{out}^{1.356}$,那么由式(3)可得混合池中 PAC 的理论需要量为: $P_C = (\rho_{in} - \rho_{out}) / w_{Cout} = (5.2 - 4.0) / (0.894 \times 4.0^{1.356}) = 0.200 \text{ g/L}$,而在活性炭床中 GAC 的理论需要量为 $G_C = \rho_{in} / w_{Cin} = 5.2 / (0.894 \times 5.2^{1.356}) = 0.622 \text{ g/L}$ 。

例 2 需要利用活性炭吸附工艺将进水中目标污染物质量浓度从 100 mg/L 降至 1 mg/L ,在吸附容量实验里得到 $w_{Cout} = 13.0 \rho_{out}^{0.355}$,那么混合池中 PAC 的理论需要量为 $P_C = (\rho_{in} - \rho_{out}) / w_{Cout} = (100 - 1) / 13.0 \times 1^{0.355} = 7.62 \text{ g/L}$,而在活性炭床中 GAC 的理论需要量为 $G_C = \rho_{in} / w_{Cin} = 100 / 13.0 \times 100^{0.355} = 1.50 \text{ g/L}$ 。

分析如下 在第 1 例中,所达目标仅为降低进水中以 COD_{Mn} 表征的有机成分总量的 23%,较适合 PAC 的应用 相对于 GAC 炭塔,混合池中 PAC 耗量较少。由于 PAC 可以直接投入既有处理设备中,因此能够快速用于各种紧急情况中。然而在多数出水排放标准严格的应用场合(如例 2),由于排放标准中目标污染物的质量浓度很低(有时小于 $1 \mu\text{g/L}$),GAC 耗量比用 PAC 少得多,适合选用 GAC^[6-7]。

图 1 和表 1 显示了目标污染物穿透曲线形态与炭床出水排放要求对活性炭吸附容量利用率的影响,图 2 为研究应用的 3 种不同尺寸的炭柱装置图:微型、传统小型及传统缩小型炭柱^[8-9] 在目标污染物的去除要求较高或较易发生穿透的情况下(如图 1 中曲线 C 和曲线 D),串联模式的活性炭吸附床为优选的处理工艺。用后置炭床确保最终出水浓度(ρ_2)的达标^[1,5],而前置炭床中的 GAC 可以一直用到较高的出水浓度(ρ_1)以达到较好的吸附容量利用率。

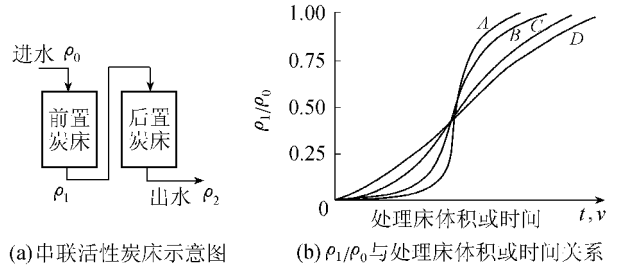


图 1 污染物穿透曲线形态与炭床出水排放要求对活性炭吸附容量利用率的影响

表 1 污染物穿透曲线形态与炭床出水排放要求对活性炭吸附容量利用率的影响

穿透曲线类型	前置炭床穿透程度			
	$\rho_1/\rho_0 = 0.05$	$\rho_1/\rho_0 = 0.10$	$\rho_1/\rho_0 = 0.50$	$\rho_1/\rho_0 = 0.75$
A	80	87	92	95
B	60	77	87	93
C	41	56	83	92
D	24	40	75	91



注 从左至右依次为 3 根 MCRB 柱(内径 5,5,8 mm),2 根微型柱(内径 15,15 mm),2 根小型柱(内径 36,36 mm) 柱下方依次为 3 台活塞泵,1 台蠕动泵,1 台自动取样器

图 2 活性炭穿透实验装置

2 预测活性炭吸附容量及获取穿透曲线的简便方法

活性炭对水体中污染物的吸附容量取决于其颗粒的表面化学性质和孔径结构(比如表面积,孔容积和孔径的分布),图 3 显示了 5 种不同材质活性炭的比表面积和孔径分布。由于获得孔径分布数据耗时耗力,研究提出了以活性炭 4 项性能指标(苯酚值,碘值,甲基蓝值,丹宁酸值)为依据初选活性炭^[1,3-4]。较高的苯酚值表明活性炭微小孔(孔径小于 1 nm)的内表面积较大,表面酸性较低,适合极性小分子有机化合物的吸附。碘值、甲基蓝值和丹宁酸值的大小分别代表了其微孔(孔径小于 1.5 nm)、小孔(孔径等于 1.5 ~ 2.8 nm)、中孔(孔径大于 2.8 nm)分布的情况^[8-10]。实际应用中,建立一些常见商用活性炭的 4 项指标值数据库很有意义,依据相应指标的相对值筛选出性能较优炭型。目前以利用该法成功优选出处理苯酚^[11]、二氯苯酚、硝基苯、一些汽油组分(BTEX:苯,甲苯,乙苯,二甲苯)、甲基叔丁基醚(MTBE)、染料 X3B、三氯甲烷、三氯乙烯(TCE)、联苯、邻苯二甲酸甲酯等^[10,12-13]等不同水体污染物的活性炭。

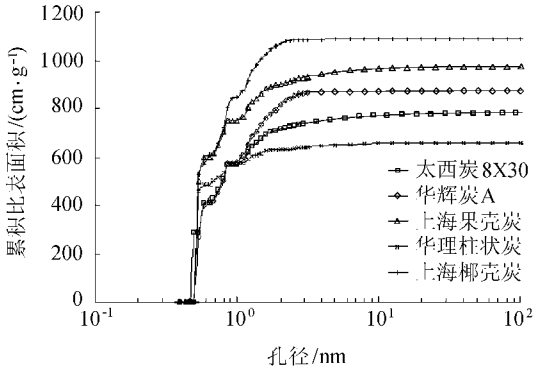


图 3 5 种 GAC 累积比表面积与孔径对数关系

以传统方式进行穿透实验时,通常使用相同粒径 GAC 的传统缩小型(炭量大于 100 g)或传统小型炭柱(炭量大于 5 g,柱内径与炭粒径比大于 15),并以与实际处理相同的空床停留时间(EBCT 大于 10 min)来调控进水流速,但耗时长、水样需量大,实验条件要求高。笔者在美国 Calgon 公司^[14] HPMC 方法及美国环保局(USEPA)RSSCT^[15-16](EBCT 小于 10 s)的基础上做了简化与改进,提出了更为快速简便的 MCRB 法,一般可在 24 h 内(<1% 常规实验耗时)完成穿透,获得准确可靠的数据。该改进方法的有效性已通过 4 指标化合物及一些典型水污染物^[8,17]的吸附穿透曲线得到验证。图 4 以苯酚为例考察了不同规格炭柱的吸附穿透曲线。

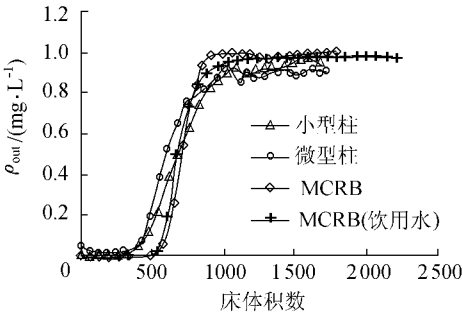


图 4 使用不同大小炭柱苯酚穿透曲线($\rho_{in} = 100 \text{ mg/L}$)

3 去除地下水中 TCE 的研究案例

研究采用不同原材料制备的 4 种常用国产活性炭 煤质(Coal)、椰壳(Coconut)、果壳(Fruit)及竹炭(Bamboo)和 3 种美国常用炭型(椰壳 Norit GCN830 及煤质 Calgon F300、F400),对水体中 TCE 的去除进行了研究,详细叙述了选用最佳炭型及获得最优处理条件的步骤^[18]。表 3 列出了 7 种活性炭的指标值,图 5 显示各活性炭在井水中对 TCE 的吸附容量。图 6 为在自来水和井水中 6 种活性炭的 MCRB 穿透曲线,表 4 为实验数据总结。结果表明 ①活性炭对 TCE 的吸附容量大小与苯酚值大小一致,其吸附容量利用率可由丹宁酸值来预测;②水样中共存有机物的竞争吸附降低了活性炭对纯水中 TCE 的吸附容量,自来水中小分子有机物比井水中天然有机物更具有竞争力;③MCRB 数据可进一步确定活性炭对 TCE 的吸附容量。炭床串联操作模式是取得高效低耗处理效果的关键,这是由于前置炭床的吸附容量在出水排放浓度较高的条件下得以充分利用;④相对于煤质炭或椰壳炭,由国内原材料丰富的毛竹制备成的竹炭在实际使用中,对 TCE 的去除更具优势。这种价格低廉并可再生且具有环境友好特性的竹炭应值得重视。

表 3 7 种 GAC 的 4 项吸附性能指标值					mg/g
炭样代号	苯酚值 ^①	碘值 ^②	甲基蓝值 ^③	丹宁酸值 ^④	
椰壳 GCN830	116	1 204	279	12.7	
椰壳	112	999	164	13.2	
果壳	102	1 033	307	61.4	
煤质 Calgon F400	100	1 175	279	26.5	
煤质 Calgon F300	98.0	1 125	281	29.6	
竹炭	95.0	1 163	237	20.0	
煤质	62.5	998	262	31.7	

注 ①苯酚平衡质量浓度为 20 mg/L 时,1 g 活性炭所吸附的苯酚质量;②碘平衡质量浓度为 2.54 g/L 时,1 g 活性炭所吸附的碘质量;③甲基蓝平衡质量浓度为 1 mg/L 时,1 g 活性炭所吸附的甲基蓝质量;④丹宁酸质量浓度为 2 mg/L 时,1 g 活性炭所吸附的丹宁酸质量。

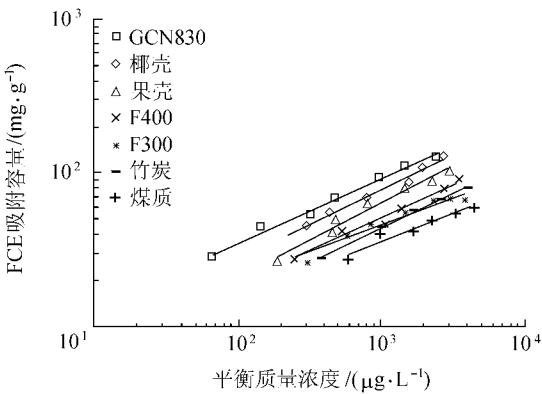


图5 井水中 TCE 吸附容量与 Freundlich 等温线对数关系

- △-- 煤质 $\rho_{in}=1.4\text{ mg/L}$ EBCT=4.02 s
- 竹炭 $\rho_{in}=1.7\text{ mg/L}$ EBCT=4.04 s
- ◇-- GCN830 $\rho_{in}=3.6\text{ mg/L}$ EBCT=4.02 s
- ◇-- 椰壳 $\rho_{in}=2.6\text{ mg/L}$ EBCT=4.20 s
- △-- 煤质 $\rho_{in}=1.8\text{ mg/L}$ EBCT=4.12 s
- ×-- F400 $\rho_{in}=2.7\text{ mg/L}$ EBCT=4.15 s
- ◇-- 椰壳 $\rho_{in}=2.0\text{ mg/L}$ EBCT=4.04 s
- ×-- 果壳 $\rho_{in}=1.4\text{ mg/L}$ EBCT=4.04 s
- ×-- F400 $\rho_{in}=3.0\text{ mg/L}$ EBCT=4.02 s
- 竹炭 $\rho_{in}=2.5\text{ mg/L}$ EBCT=4.14 s
- ×-- 果壳 $\rho_{in}=1.8\text{ mg/L}$ EBCT=4.14 s
- △-- GCN830 $\rho_{in}=2.8\text{ mg/L}$ EBCT=4.13 s

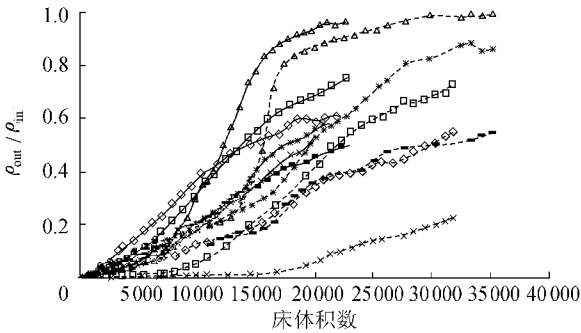


图6 自来水(实线)和井水(虚线)中 TCE 的穿透曲线

表4 TCE 的穿透实验

水质背景	MCRB炭柱	进水质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	EBCT/ s	TCE 去除量/ mg		总吸附容量/ mg	吸附容量利用率/%	
				ρ_{out}/ρ_{in} = 0.05	ρ_{out}/ρ_{in} = 0.50		ρ_{out}/ρ_{in} = 0.05	ρ_{out}/ρ_{in} = 0.50
自来水	椰壳	2.6	4.20	4.6	23.8	38.4	12.0	62.0
	竹炭	2.5	4.14	7.0	23.1	28.0	25.1	82.6
	煤质	1.8	4.12	8.5	16.1	19.6	43.3	82.2
	果壳	1.8	4.14	8.3	25.7	29.9	27.6	86.0
	F400	2.7	4.15	9.5	29.0	33.4	28.4	86.9
井水	GCN830	2.8	4.13	7.7	37.8	57.1	13.5	68.4
	椰壳	2.0	4.04	6.9	32.0	53.6	12.9	59.7
	竹炭	1.7	4.04	12.8	23.9	28.3	45.5	84.6
	煤质	1.4	4.02	4.1	18.4	23.5	16.6	78.4
	果壳	1.4	4.04	19.2	> 36.7 ^④	40.8	47.1	> 90.0 ^④
	F400	3.0	4.02	5.3	32.0	38.1	13.8	83.9
	GCN830	3.6	4.02	8.6	49.8	78.6	10.9	63.4

注 ①TCE 去除量等于运行一定时间的污染物总质量乘以(曲线上部面积/总面积) ②总吸附容量由 48 h 批次吸附平衡实验所得的 Freundlich 吸附等温线计算 ③吸附容量利用率等于运行一定时间的去除量除以平衡吸附容量乘以 100% ④预测值。

4 延长活性炭柱使用寿命的有效方法

4.1 生物活性炭(BAC)

BAC 工艺是 1970 年前后作为二级生物处理工艺(活性污泥或生物滤膜)的替代工艺而被推荐的,适合处理 TOC 较低的进水,如含持久性有机物(POPs)的生化出水 and 含微量有机污染物的地下水中,可使炭床中活性炭被生物再生而减少更换次数^[19]。图 7 显示 3 个小炭柱(10 g, Calgon F400)中活性炭吸附功能失效后,通过接种环丁砜高效降解菌,陆续建立生物活性炭功能,达到长期去除进水中环丁砜的效果 图 8 表明实际应用 BAC 工艺去除美国加州 Lathrop 地下水中环丁砜的长期处理情况(环丁砜质量浓度小于 $57\text{ }\mu\text{g/L}$)^[7]。

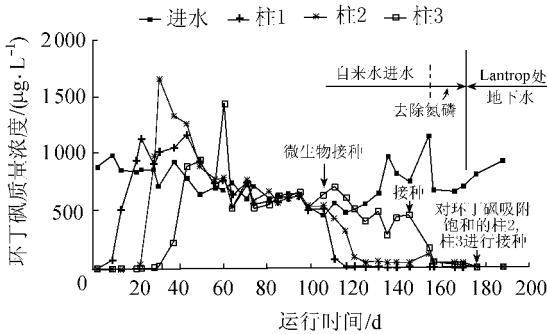


图7 小型炭柱 GAC/BAC 去除水中环丁砜的情况

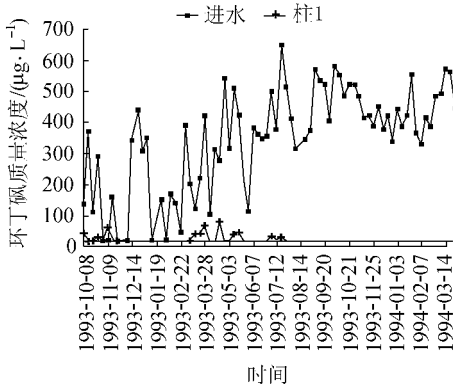


图8 美国加州 20t 炭塔 BAC 去除地下水中环丁砜的运行情况

笔者近期研究也表明,小型 BAC 柱对苯系物 BTEX 具有较高处理能力(图 9),并且耗氧量远远低于常规生物处理的耗氧量^[19-20]。图 10(a)为笔者在美国加州大学河滨分校实验室建立的 BAC 柱(内径 5 cm,炭柱高 28 cm,100% 菌源炭,EBCT 为 110 min)启动 8 个月的运行情况。柱中填充炭量对 MTBE 的理论吸附容量为 578 mg,而在实际去除量超过理论量 2 倍(1297 mg)时仍具有明显去除功能。进水浓度的突增(110 d 后)也没有导致出水迅速恶化,可见 BAC 的建立能缓解进水负荷突变对处理系统带来的干

扰。图 10(b)为 3 个添加不同比例新鲜炭的炭柱(总炭量为 10 g)启动后 6 个月的运行情况(华东理工大学实验室)。表 5 显示在实际去除量已超过理论量 5 倍的情况下,均能继续保持大于 50% 的去除率,印证了 BAC 的高效低耗处理效果^[21]。

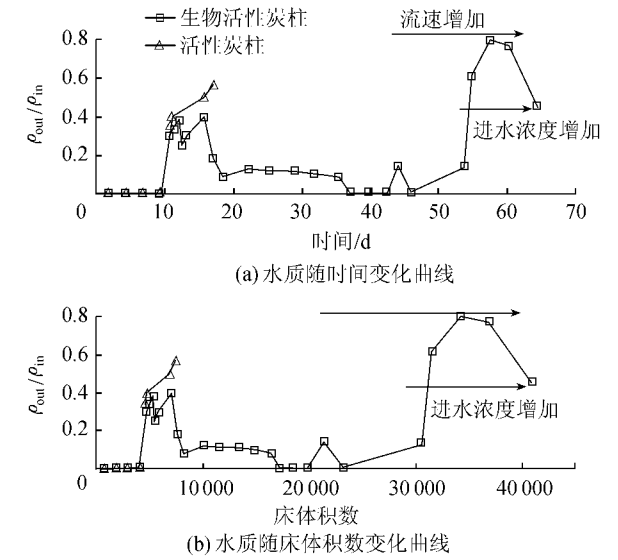


图 9 小型活性炭柱/生物活性炭柱去除水中苯的运行情况

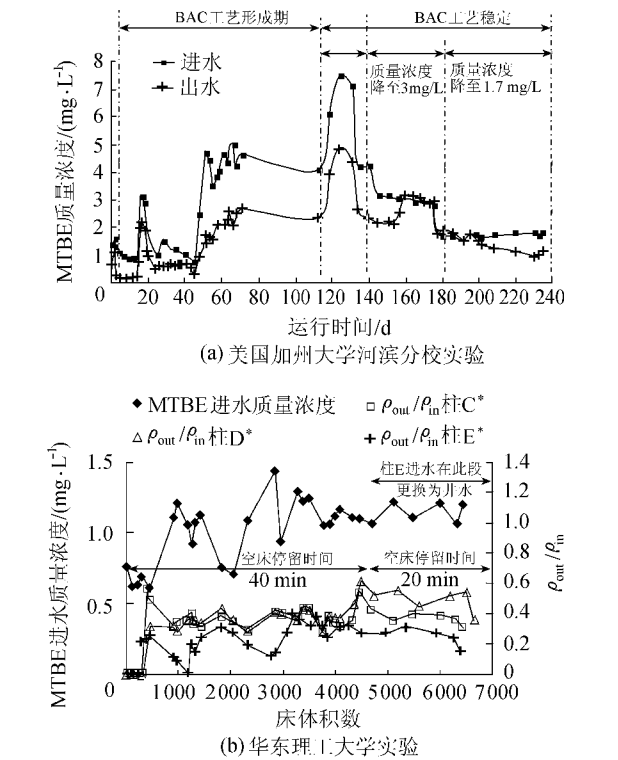


图 10 BAC 炭柱去除水中 MTBE 的运行情况

图 11 显示两个内装 14 g 煤质活性炭(新炭和饱和炭)的炭柱在上海焦化厂生化出水深度处理研究中,通过 20 d 左右的 POPs 降解菌繁殖和驯化过程,都建立了有效的 BAC 功能,使得出水能长期达标($\rho(COD_{Cr})$ 小于 50 mg/L , 总氮质量浓度小于 0.5 mg/L)^[22]。

表 5 生物活性炭柱处理低 MTBE 浓度进水实验数据									
炭床	废炭比例/%	内径/cm	炭量/g	炭床高度/cm	炭体积/mL	进水流量/ ($mL \cdot min^{-1}$)	空床停留时间/min	总吸附容量 ^① /mg	总去除量/mg
A	100	2.52	62.9	25	124.63	0.50	249.25		85.79
						0.91	136.35	49.13	36.60
						1.74	71.62		16.57
B	100	2.52	62.9	25	124.63	0.50	249.25	49.13	15.34
						1.00	101.29		57.44
						1.94	50.77	19.96	36.16
C	90	1.8	10.15	8	20.35	0.51	40.03	9.33	57.47
						0.85	23.99		4.73
D	70	1.8	10.15	8	20.35	0.53	38.15	11.95	56.8
						0.92	22.11		3.88
E	50	1.8	10.15	8	20.35	0.51	40.03	14.57	68.8
						0.92	22.04		6.04

注 ①总吸附容量的计算公式为炭柱内活性炭总质量 $\times$ 废炭比例 $\times 0.84 mg/g + (1 - \text{废炭比例}) \times 2.08 mg/g$ ②上层覆盖新椰壳炭的吸附等温式为 $w_C = 2.08 \rho_m^{0.51}$ 。

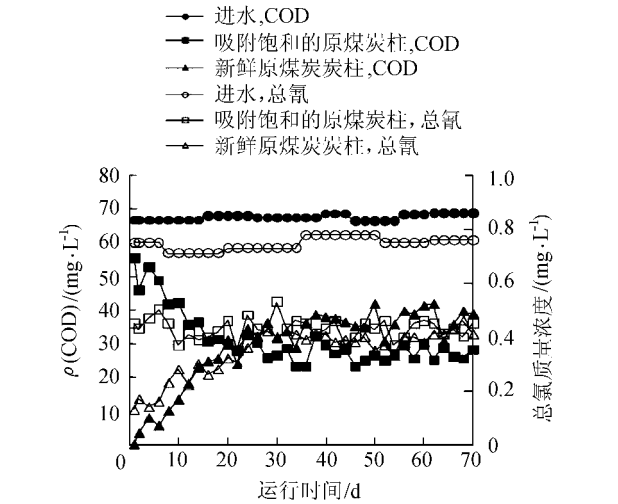


图 11 两个小型炭柱 BAC 去除 Fenton 预处理后焦化生化出水中 COD 和总氮的情况

4.2 活性炭催化作用去除水体余氯

活性炭常常被用来去除水体中的余氯。由于活性炭除了吸附作用去除余氯外,还具有催化还原作用,因此长期使用于去除余氯后的废弃活性炭仍会具有除氯功能。图 12 显示,使用 1 a 后而废弃的椰壳炭和果壳炭对余氯仍然有很好的余氯去除能力^[23] 图中 2 h 时的去除量是吸附作用,催化作用的

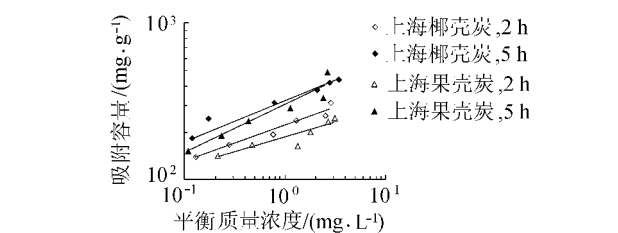


图 12 两种废炭的余氯去除性能对数曲线(去氯 1 a 运行后)

余氯去除量可通过 5 h 和 2 h 时去除量之差来推算。

4.3 失效活性炭的再生

建立炭柱中的 BAC 功能及利用活性炭的催化作用之外,将失效活性炭再生并循环使用是降低活性炭吸附工艺应用成本的一个有效方法。由于高温再生废弃活性炭的设备费用高,而且需要专业操作人员,在美国普遍应用的商业性活性炭再生服务(包括废弃活性炭的收集、活性炭再生及再生活性炭的供应,如图 13 所示)在中国将有很大的发展空间。

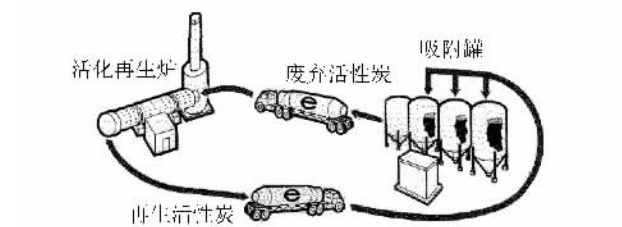


图 13 典型的商业废弃颗粒活性炭再生服务过程

5 结 语

活性炭吸附工艺可有效去处水体中的污染物。值得推介的设计步骤为：

- 了解吸附工艺的基本特征。
- 确定进行吸附容量实验和穿透实验的最佳实验方法。
- 对备选炭型进行可行性研究并确定最佳处理工艺。
- 在活性炭床内建立 BAC 功能以避免频繁更换 GAC。
- 利用活性炭的催化作用延长活性炭床的服务寿命(如水中余氯的去除)。
- 对失效炭进行再生后循环使用以降低使用成本。

设计高效低耗的活性炭水处理工艺,并通过形成生物活性炭功能、利用活性炭的催化作用或使用再生炭进一步降低活性炭水处理技术的应用成本,发挥活性炭吸附工艺的环境友好优势。

参考文献：

[1] YING W C, TUCKER M. Selecting activated carbon for adsorption treatment [C]//Proceedings of 44th Purdue Industrial Waste Conference. Chelsea MI USA: Lewis Publishers Inc,1990 313-324.

[2] SHIH T, WANGPAICHITR M, SUFFET M. Evaluation of granular activated carbon technology for the removal of MTBE from drinking water[J]. Water Research,2003,37 375-385.

[3] MARTIN R. Activated carbon product selection for water and wastewater treatment[J]. Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development,1980,19 435-441.

[4] ANSI/AWWA B600 - 96 AWWA Standard for Powdered Activated Carbon[S]. 1997.

[5] U.S. Environmental Protection Agency. Process Design Manual for Carbon Absorbers[R]. Washington DC:US EPA,1973.

[6] YING W C, DIETZ E A, WOEHR C. Adsorption capacities of activated carbon for organic constituents of wastewaters [J]. Environmental Progress,1990,9(1) 1-9.

[7] YING W C, HANAN S, TUCKER M. Successful application of biological activated carbon process for removing sulfolane from groundwater [C]//Proceedings of 49th Purdue Industrial Waste Water Conference. Chelsea,MI,USA: Lewis Publisher, 1994.

[8] 应维琪,常后刚,张巍,等. 简易水处理活性炭的选择和应用方法[J]. 环境污染与防治,2005,27(6) 430-439.

[9] YING W C, ZHANG W, CHANG Q G. Improved methods for carbon adsorption studies for water and wastewater treatment [J]. Environmental Progress,2006,25(2) 110-120.

[10] 张巍,应维琪,常后刚,等. 水处理活性炭吸附性能指标表征与应用[J]. 中国环境科学,2007,27(3) 289-294.

[11] 苏敬华,译. 活性炭、杏壳和胡桃壳炭对废水中苯酚的吸附去除率比较[J]. 中国环境科学,2009,29(10) 1104.

[12] 李冰嫻,张巍,刘婉冬,等. 去除饮用水中三卤甲烷和腐殖酸的活性炭选型方法[J]. 环境污染与防治,2008,30(4) 48-51,55.

[13] 孙晓峰,徐斌,高乃云,等. 颗粒活性炭对水中邻苯二甲酸二甲酯的吸附特性[J]. 中国环境科学,2006,26(6) 693-697.

[14] ROSENE M R, DEITHORN R T, LUTCHKO J R, et al. High-pressure technique for rapid screening of activated carbons for use in potable water[J]. Ann Arbor Science,1980 309-316.

[15] CRITTENDEN J, BERRIGAN J. Design of rapid small-scale adsorption tests for a constant diffusivity [J]. Journal Water Pollution Control Federation,1986,58 312-319.

[16] D6586-00. Standard practice for the prediction of contaminant adsorption on GAC in aqueous systems using rapid small-scale column tests[S]. ASTM Standards,2000 382-886.

[17] 常后刚,应维琪,张巍,等. 活性炭应用测试新技术 微型快速穿透实验[J]. 中国环境科学,2006,26(3) 275-279.

[18] 黄流雅,胡娟,张巍,等. 颗粒活性炭吸附去除水中三氯乙烯的研究[J]. 环境污染与防治,2009,31(9) 34-39.

[19] YING W C. Investigation and modeling of bio-physicochemical processes in activated carbon columns [D]. Michigan:US University of Michigan,1978.

[20] 张巍. 生物活性炭技术去除地下水中 BTEX 和 MTBE 的基础研究[D]. 上海 华东理工大学,2008.

[21] 李冰嫻. 吸附和生物降解在活性炭塔中去除进水中 MTBE 的研究[D]. 上海 华东理工大学,2010.

[22] 蒋文新. 强化活性炭吸附技术在焦化废水深度处理中的应用研究[D]. 上海 华东理工大学,2008.

[23] LI B J, YING W C, ZHANG H X. Cost effective activated carbon treatment process for removing free chlorine from water [C]//Asia Pacific Journal of Chemical Engineering. The 12th Asia-Pacific confederation of chemical Engineer Meeting. 大连 2008.

(收稿日期 2010-12-08 编辑 高渭文)