

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.05.005

铁基催化剂整砌填料催化臭氧的运行工况研究

马捷汀¹, 刘新亚², 马鲁铭³, 刘海燕⁴

(1. 上海市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 南京铭宁水处理科技有限公司, 江苏 南京 211102; 3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 4. 通盛排水有限公司, 江苏 南通 226017)

摘 要: 研究了铁基催化剂整砌填料“微通道”结构对于高级氧化技术处理废水的必要性,定量分析了反应器中臭氧分解率与气液逆向流和布气装置气泡大小的关系。通过现场中试,求出填料的运行阻力系数和液泛点;应用软件对试验中70例“个案”进行了统计学分析和回归,得到了运行参数(臭氧当量、水力停留时间、进水水质)与COD去除率的函数关系,证明通过该工艺的处理可使出水水质稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准。

关键词: 臭氧氧化; 铁基催化剂; 废水深度处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0032-08

Operating Conditions of Ozonation Process Catalyzed by Iron-based Catalyst Packing

MA Jie-ting¹, LIU Xin-ya², MA Lu-ming³, LIU Hai-yan⁴

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Nanjing Mingning Water Treatment Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Tongsheng Waste Water Treatment Co. Ltd., Nantong 226017, China)

Abstract: Performance of iron-based catalyst packing with “micro-channel” structure for advanced oxidation of wastewater was investigated, and the effects of gas-liquid reverse flow and bubble size of gas distributor on ozone decomposition rate were quantitatively analyzed. The resistance coefficient and flooding point of the iron-based catalyst packing were calculated through pilot tests. Statistical analysis and regression of 70 “individual cases” was completed with the aid of professional software in the experiment, and the functional relationship between operational parameters (ozone equivalent, hydraulic retention time and influent quality) and COD removal efficiency was obtained. The results proved that the effluent quality of the process could stably meet the class IV criteria specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002).

Key words: ozonation; iron-based catalyst; advanced wastewater treatment

目前废水深度处理工艺主要有三大类。第一类是生物法,其中生物膜法弥补了活性污泥法的不

基金项目: 上海市扬帆计划项目(21YF1444100)

通信作者: 马捷汀 E-mail: majieting7@163.com

足,培养可去除难降解有机物、世代时间很长的微生物,以曝气生物滤池(BAF)为代表^[1]。该类工艺的优点是运行成本低、不产生二次污染,缺点是不能弥补生物法的局限。第二类是分离法,包括吸附法和膜分离法。吸附法使用活性炭、大孔树脂等,但吸附剂再生往往产生更大的污染,且需要对膜分离法的浓液进行处理。这类方法的优点是出水水质好,故排污企业常采用该方法。第三类是高级氧化法,工程应用中主要有二种:芬顿法和催化臭氧氧化法。此类方法与生物法互补,可去除难降解有机物,是解决有机污染的根本方法。芬顿法降解有机物的效果好,但存在药剂量大、产泥和产盐量大等问题。催化臭氧氧化法降解有机物的机制与芬顿法相同,即为羟基自由基($\cdot\text{OH}$)主导的高级氧化,但产生 $\cdot\text{OH}$ 的途径与芬顿法不同,是化学意义的催化,没有二次污染,属于绿色工艺。

过渡金属化合物,特别是羟基氧化物是臭氧的催化剂^[2]。铁为过渡金属,各种型号钢材的主要元素为铁,此外还包括碳和其他金属元素(多为过渡金属)。部分钢材型号在金属加工过程中产生的刨花状铁屑易于在特定强氧化条件下钝化,表面产生致密的 $\gamma\text{-FeOOH}$,满足催化臭氧分解的要求^[3]。有关铁基催化剂催化臭氧形成高级氧化的机制,同济大学已进行了大量研究^[4-7]。该方法的优点是:工况易于控制,处理实际废水效果好;原材料来源广泛,价格低廉;铁的各种形态安全无毒,对水处理过程有利无害。在此基础上,形成了成熟的填料装置与深度处理技术,并已大规模应用于实际工程。

1 铁基催化剂整砌填料特征分析

填料是反应器的基本构件,应有巨大的比表面积和孔隙率。中试采用的填料为同济大学等单位的发明技术(一种催化臭氧形成高级氧化的微通道整砌,专利号:202011198531.8)。该填料的有效比表面积为 $2\,800\text{ m}^2/\text{m}^3$,整砌填料孔隙率大,大小均匀,但形状不规则,有利于气液两相的高效传质。

$\cdot\text{OH}$ 的寿命只有纳秒级,是高级氧化机制的关键特征。据文献报道^[8], $\cdot\text{OH}$ 的作用域距离(ΔR)仅约为 35 nm 。但应注意到,在如此微观的空间中,有机物的布朗运动对传质起主要贡献。由此可以认为,催化剂作用域至少可扩大至 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上^[9]。尽管如此,液相主体与 $\cdot\text{OH}$ 作用域的水流交换传质仍

是关键。本整砌填料具有“微通道”结构,平均孔径 D 仅为 1.0 mm ,若 $\cdot\text{OH}$ 作用域距离为 $10\text{ }\mu\text{m}$,则作用域占微通道的体积比约为 $4\Delta R/D$ 。也就是说,至少要经过 $D/(4\Delta R)$ 次(约为25次)传质,才能使水流全部经过 $\cdot\text{OH}$ 的作用域。中试装置填料区高度为 $2\,090\text{ mm}$,设微通道折返延长比例为30%,则通道的长径比约为2 600,也就是说在长径比约为100的途径中必须完成一次更换传质,依靠水流错流紊动完全可以满足这一要求。对比之下,若某种填料的平均孔隙孔径为 10 mm ,则每1个长径比就必须完成一次更换传质,靠水流错流紊动已很难完成。且由于催化剂比表面积仅占前者的1%, $\cdot\text{OH}$ 生成量随之明显减小。由此可推导出:孔径每降低 $1/n$,废水在催化剂作用域中更换传质的次数和 $\cdot\text{OH}$ 生成量均增加 n^2 倍。因此,“微通道”是催化臭氧形成高级氧化机制有效填料的必备形态。

2 动力学分析

2.1 反应器及流程

中试装置的核心为臭氧催化反应器,如图2所示。该反应器主体外径为 300 mm ,总高为 $4\,000\text{ mm}$,壁厚为 4 mm ,填料区高 $2\,090\text{ mm}$,总容积为 280 L ,催化剂反应区的容积为 140 L 。配套氧气源臭氧发生器,当额定气体流量为 2.0 L/min 、功率因子为0.9时,臭氧产量为 200 mg/min 。试验在常温常压下进行,反应后臭氧尾气通入污水池。



图1 反应器照片

Fig.1 Photograph of reactor

2.2 动力学分析

·OH是氧化有机物的关键物质,催化臭氧形成高级氧化机制是深度处理工业废水的关键。从·OH主导有机物氧化反应式可以看出^[10],反应过程中有O₂的参与,且这些O₂可完全来自于O₃的分解,由此可以导出臭氧氧化有机物的理论当量(O₃/ΔCOD=1.125)^[11]。·OH氧化有机物为有机物自由基极其迅速,但生成·OH过程受O₃传质和催化剂活性点数量的限制,当催化活性点数量均匀时,可以认为·OH的生成速率与O₃浓度成正比。催化反应的功能就是促使臭氧在催化剂表面进行有效分解,生成·OH来氧化有机物。

设塔式反应器的流型为推流式,臭氧浓度的变化见式(1)。

$$-\frac{dG}{dt} = kG \ln \frac{G}{G_0} = -kt \quad (1)$$

式中:G为O₃浓度;t为时间;k为一级反应动力学常数。

为了便于讨论,把气程时间t比半衰期T_{1/2}的倍数定义为n,即:

$$n = t/T_{1/2} \quad (2)$$

则臭氧衰减比η按式(3)计算。

$$\eta = \frac{G}{G_0} = 2^{-n} \quad (3)$$

可见,随着气程的增加,臭氧浓度呈指数型衰减。若不采用布气装置,进入池底后仅用支撑催化剂填料的筛板分割气泡,则气泡较大,上升速度约为30 mm/s;若采用钛盘布气,则气泡较小,上升速度约为2.5 mm/s。实测表明,在大量铁基催化剂存在条件下,臭氧在水中的半衰期只有5 min。

以该中试反应器为例,当采用序批式运行时,液相静止;当采用连续运行且HRT为22 min时,液相产生的空塔流速为1.58 mm/s。当气液同向流(塔底端进水)时,气泡运行速度为两相流速相加;当气液异向流(塔顶端进水)时,为两相流速相减。不同工况时,臭氧衰减比的理论值见表1。表1中忽略了填料对气泡切割与合并的影响,实际中不同工况的效果差异比理论值小,但表1作为工况选择依据仍不失一般性。

从臭氧分解角度来看,布气装置影响甚大,应采用微孔布气装置,且气液异向流具有优势。从有机物降解角度来看,低浓度工业废水氧化过程中,

反应速率与有机物浓度成正比,也符合表观一级动力学模式,见式(4)。

表1 气程与臭氧衰减规律

Tab.1 Gas path and law of ozone decomposition

项 目		气程时间/ s	倍数n	臭氧衰减 比η/%
流向	布气方式			
序批式	筛板	70	0.232	85.10
	钛盘	836	2.790	14.50
同向流	筛板	66	0.221	85.80
	钛盘	512	1.710	30.60
异向流	筛板	73	0.243	84.50
	钛盘	2 272	7.570	0.53

$$-\frac{dC}{dt} = k_2 GC \quad (4)$$

式中:k₂为有机物降解一级反应动力学常数;C为有机物浓度。

式(4)中G并非常量,其随气程呈指数型衰减。因此,异向流使氧化反应动力均化,从而反应速度得以均化,有利于克服传质过程成为反应的控制因素,且异向流强化了气液两相的紊动传质。

2.3 填料阻力及液泛点测定

催化臭氧氧化反应器使用的是填料塔。一般化工过程使用的填料塔主要体现吸收、吹脱两种分离过程,连续相为气相;而本研究填料塔连续相为液相,不仅因为采用钛盘等布气装置分散臭氧,且气水比一般均小于1.0。

整砌填料的水流阻力始终是人们关心的问题,由于本试验填料的堆积密度为350 g/L,填料孔隙率超过了95%,单相液体流动的本质没有发生根本变化,类似于粗过滤器。文献[12]表明,粗过滤器的水头损失计算公式形式如同管道,即:

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式中:L为流程距离,在塔中即为填料高度;d为反应器内径;v为流速;λ为沿程阻力系数。

最大流速测定:出水管道的U型弯,直接放在地坪上,打开出水阀门,即作用水头为4 000 mm;通过流量计逐步调大流量,直至壅水,以至臭氧尾气出口处排水,得出最大流量为1.93 m³/h。

反应塔内径d为292 mm,催化剂区域高度为2 090 mm,计算得出最大流速为8.01 mm/s,在反应区的停留时间为260 s(4.33 min),由此计算出阻力

系数 λ 为 1.71×10^5 。

中试过程中常用工况的HRT为22 min,则流速为1.59 mm/s,计算得出水头损失为0.157 m。由此可见,本反应器在常规工况下的水头损失并不显著,比一般过滤工艺要小。

为了考察反应器正常运行工况的范围,将正常运行临界点的最大液相流速仍称为液泛流速。在化工填料塔中,液泛流速的回归方程极其复杂;而在催化臭氧氧化工艺中,气液两相物质固定,气液比、HRT等均在一定范围内,故可将问题简化,通过试验可确定液泛的空塔流速。

试验最常采用的工况是:HRT为22 min、臭氧气量为3.0 L/min、气液比为0.47。进气量保持不变,进塔废水流量逐步升高,如同测水流阻力。试验得出液泛流量为1.69 m³/h,液泛流速为7.01 mm/s,此时只是上述计算最大流速的87.5%。可见,在反应塔中水流阻力占主要部分。而HRT为22 min工况时,流速仅为液泛流速的22.7%,距液泛点甚远,液泛问题不能成为操作的难题。

3 运行工况研究

某沿江城市技术开发区污水厂提标改造工程规模为 9.8×10^4 m³/d,90%以上的进水量为工业废水,主要来自农药、印染、制药、电子、机械等行业,有一百多家企业;进水水质复杂,含有大量生物难降解物质。由此,该污水厂前端采用了水解酸化工艺,以提高好氧生物处理效率,后续还有磁混凝等物化处理手段。根据水质情况,深度处理拟采用高级氧化技术,目标是使出水COD稳定在30 mg/L以下,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准。为此,决定采用同济大学铁基催化剂整砌填料及催化臭氧氧化技术进行现场中试。

试验期间,该污水厂生化池出水COD、BOD₅、SS、氨氮、总氮、总磷分别为80、18、29、0.97、7.60、1.66 mg/L。pH值为7.47~7.77,水温为21~24 ℃,波动均较小。在该范围内,对臭氧分解及生成·OH的影响不大,对催化剂寿命也没有影响,已有实践表明催化剂寿命至少为三年。

关于高级氧化过程中有机物的降解机制,已有大量研究^[10]。简单地说,高级氧化就是由·OH主导、O₂参与的有机物氧化过程。但分子态氧气在实际臭氧发生器供气气体中大量存在,相对于臭氧对

氧化反应是过量的,且与臭氧量成固定比例,因此可不作为独立因素考虑。

氧化过程因素分析包括进水有机物浓度COD_{in}、臭氧投加量L_{O₃}、反应时间(基本等于水力停留时间HRT)。这三个参数是基本的自变量,产生主要影响。臭氧发生器的供气浓度G_{O₃},则是在相同臭氧投加量L_{O₃}条件下,影响气液紊动强度和气泡大小,属于工况影响因素。臭氧相对投加量O/C,即参数L_{O₃}/COD_{in}值,反映了反应物之间的当量关系。因此,用水力停留时间、O/C这两个变量考察氧化规律更触及反应本质。因变量包括COD去除率 η_{COD} 和出水COD浓度COD_{out}。

中试进行了35次试验,每次试验分两次取样,进水及每次出水取样间隔时间均为3倍HRT,以保证连续流达到稳定工况。根据连续运行时HRT、臭氧当量O/C是否大于理论值(1.125)将试验分成6组,结果见表2。由此从整体上得出了 η_{COD} 平均值随上述两个变量的变化规律。

表2 中试工况及废水处理效果

Tab.2 Wastewater treatment effect at different operating conditions in pilot tests

项 目		1 [#] (1次)	2 [#] (10次)	3 [#] (10次)	4 [#] (4次)	5 [#] (6次)	6 [#] (4次)
特征	HRT/min	15	22	22	30	44	44
	平均O/C值	0.15 ↓	1.56 ↑	0.62 ↓	0.64 ↓	3.34 ↑	0.97 ↓
自变量	O/C	0.15	1.16~1.96	0.15~0.79	0.43~0.75	1.99~5.03	0.92~1.03
	L _{O₃} /(mg·L ⁻¹)	11.5	45.2~94.2	11.3~33.7	23.0~42.6	106~126	62.8~67.4
η_{COD} 平均值/%		46.1	58.7	47.2	51.2	67.0	62.4
η_{COD} 变化规律		不涉及	平缓	上升	不明显	平稳	平稳
注:“↑”表示O/C值比理论值大;“↓”表示O/C值比理论值小。							

从表2很难定量把握催化臭氧氧化反应的整体规律,这不仅是由于每次试验取样和测试分析存在误差,更为重要的是氧化反应为多因素作用。通过运用相关统计软件进行多因素回归分析,能较容易地找出各工况参数对工艺效果的影响。

首先把35次试验中每次试验的二次取样测定结果作为70例“个案”,变量包括COD_{in}、HRT、G_{O₃}、L_{O₃}、O/C;因变量包括去除率 η_{COD} 和出水浓度COD_{out}。

当然,这些变量中有的不是独立变量,有的对试验结果影响不大。首先,以 η_{COD} 为因变量,对上述6个因素进行回归分析,结果如图2所示。

COD_{in} : 试验点非常分散;不仅如此,线性回归和3次方多项式回归基本水平(略向下),由此可见进水 COD_{in} 对处理效果影响的规律性不强。

G_{O_3} : 由于设备操控的原因,臭氧的供气浓度只能调节为数个浓度值,但线性回归直线基本水平,说明该参数对试验影响不大。

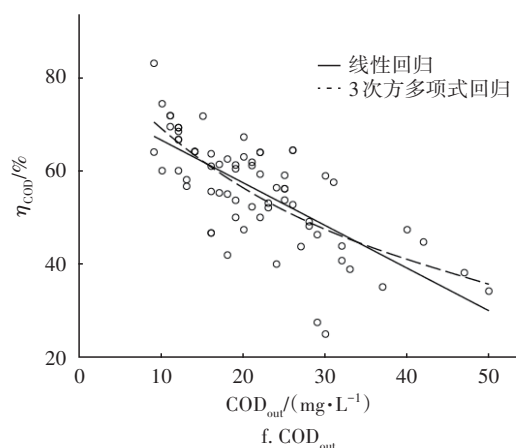
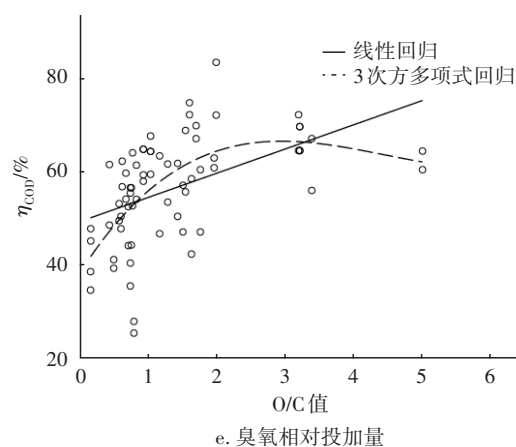
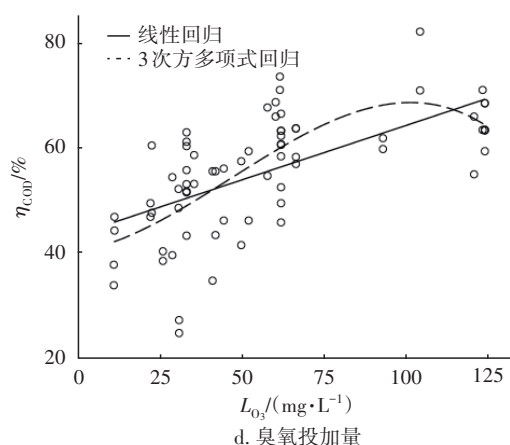
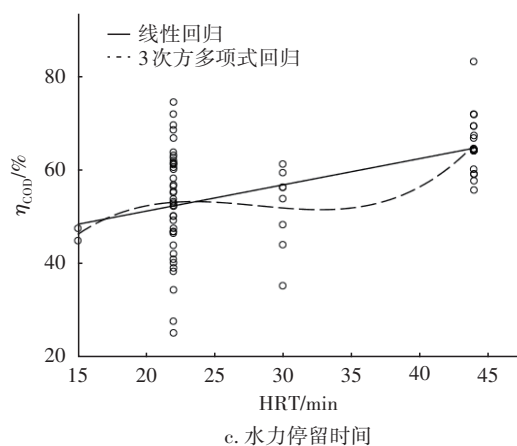
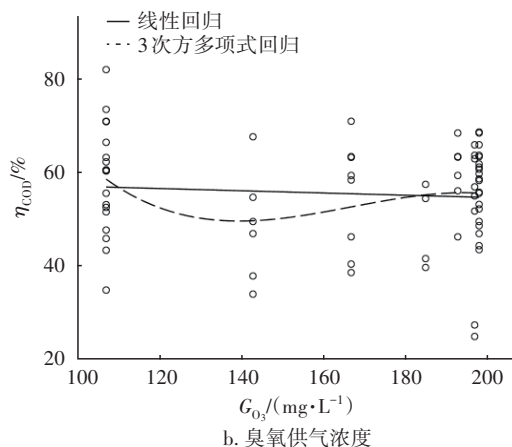
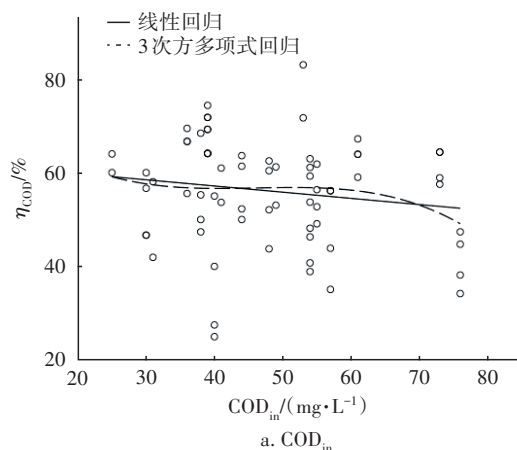


图2 η_{COD} 为因变量时各变量的回归曲线

Fig.2 Regression curves of independent variables with η_{COD} as dependent variable

HRT: 同样,由于水泵运行和操作习惯,水力停留时间HRT也只能保持数个工况,中试共有4个工况,分别是15、22、30、44 min,其中以22 min工况试验次数最多。从图2(c)可见,随着HRT的增长, η_{COD} 明显提高;还应注意,当停留时间为15 min时, η_{COD} 均低于50%。

L_{O_3} : 该参数对 η_{COD} 有明显的影响,特别是低浓度

段,随着浓度的升高,去除率增加明显。

O/C:该变量反映的是反应物当量,应成为工程设计和运行控制中的重要参数。从图2(e)可以看出,在比值较小阶段,随着O/C值的上升,对 η_{COD} 的作用很大,但大于2后去除率实测值基本不再升高。靠近 η_{COD} 最大值时,实测O/C值为1.96。

COD_{out} :该变量与 η_{COD} 的线性关系很好,说明两者是相关的因变量。

中试的目标是使出水COD浓度保持在30 mg/L以下,当以 COD_{out} 为因变量时,考察各因素的影响,结果如图3所示。

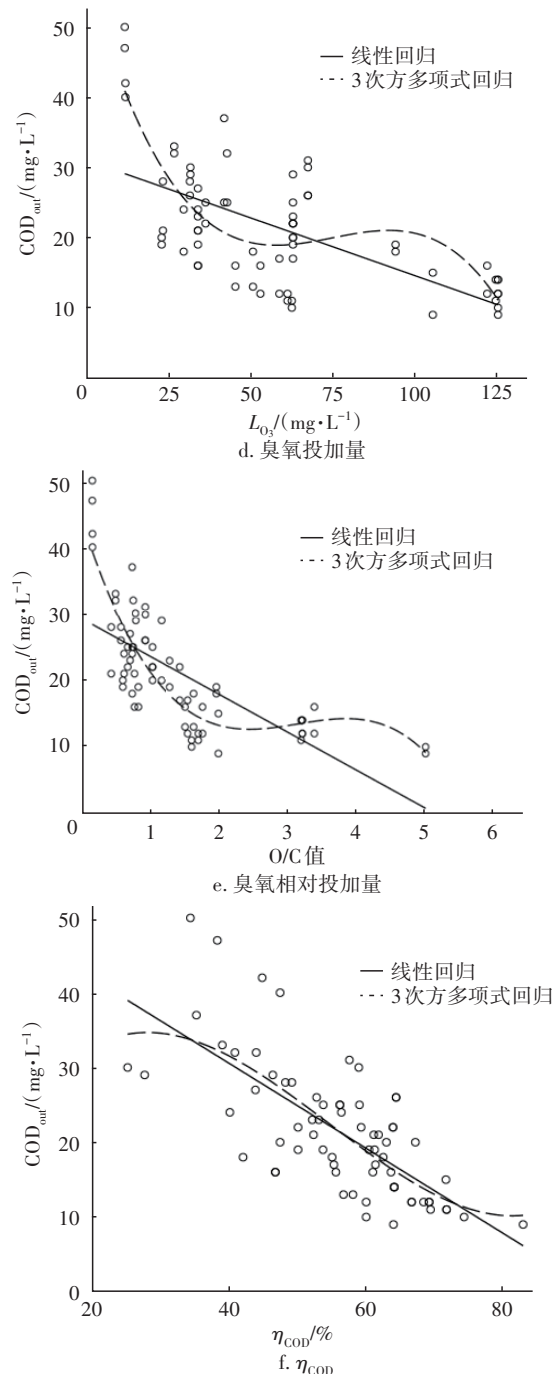
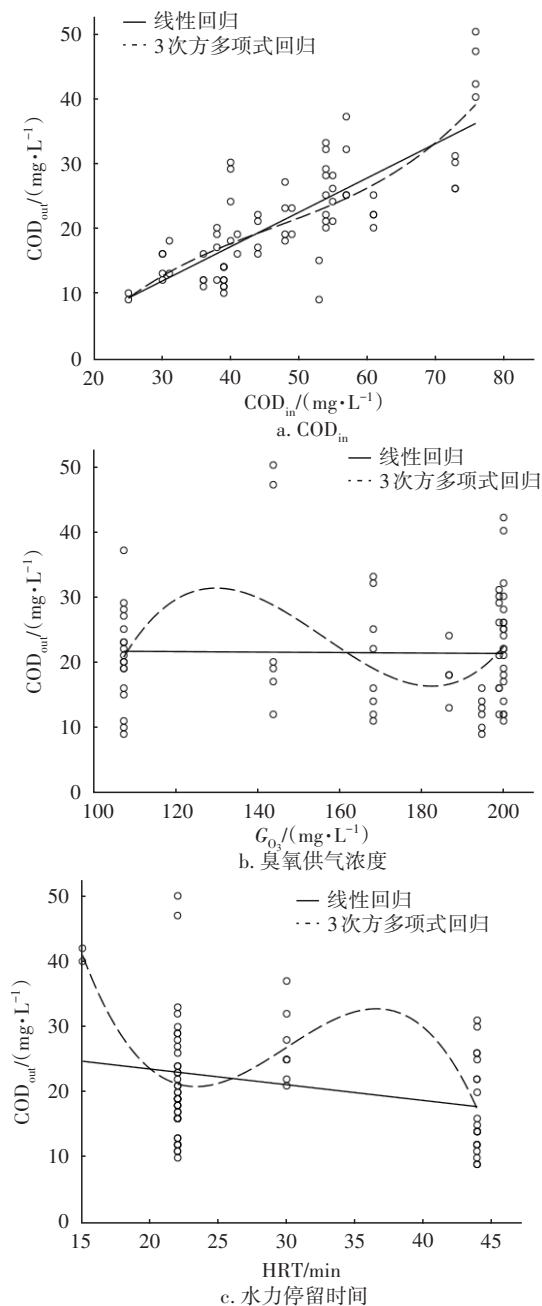


图3 COD_{out} 为因变量时各变量回归曲线

Fig.3 Regression curves of independent variables with COD_{out} as dependent variable

COD_{in} :从图3(a)可知,进水 COD_{in} 基本在30 mg/L以上,而出水 COD_{out} 很大部分在30 mg/L以下,说明该工艺的实施是完全必要的。有趣的是,两个函数的线性关系拟合较好,其斜率为0.52,说明试验中 η_{COD} 的最大出现几率为48%,但这并不是最佳工况的去除率。

G_{O_3} 、HRT、 L_{O_3} 三个参数对 COD_{out} 的作用,与对 η_{COD} 的作用类似,在此不再赘述。应注意两点:当HRT为15 min时, COD_{out} 在40 mg/L左右,出水水质不达标,见图3(c);O/C对出水水质的影响明显,当O/C值大于1.2(接近理论值)时,可以保证 COD_{out} 在30 mg/L以下,见图3(e)。

人们往往对“响应面分析”感兴趣,因为其能全面地反映自变量与因变量的关系。本研究尝试运用设计软件进行拟合,采用水力停留时间HRT、臭氧相对投加量O/C两个主要独立自变量,考察 η_{COD} 的响应。根据试验范围确定方案,每次的运行结果采用内插法分析数据,个别不在中试范围的“运行”,其数据结果可采用外延法得到,由此得出试验设计方案及结果,见表3。响应面分析结果见图4。

表3 试验设计方案及结果

Tab.3 Design and results of tests

标准 次序	运行 次序	O/C	HRT/ min	$COD_{in}/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\eta_{COD}/\%$
3	1	0.4	44	57	54
16	2	1.8	33	57	70
2	3	3.2	22	57	65
8	4	3.2	33	76	74
7	5	0.4	33	76	38
13	6	1.8	33	57	71
10	7	1.8	44	38	68
12	8	1.8	44	76	63
6	9	3.2	33	38	62
4	10	3.2	44	57	76
1	11	0.4	22	57	39
14	12	1.8	33	57	72
15	13	1.8	33	57	73
17	14	1.8	33	57	71
11	15	1.8	22	76	62
5	16	0.4	33	38	49
9	17	1.8	22	38	70

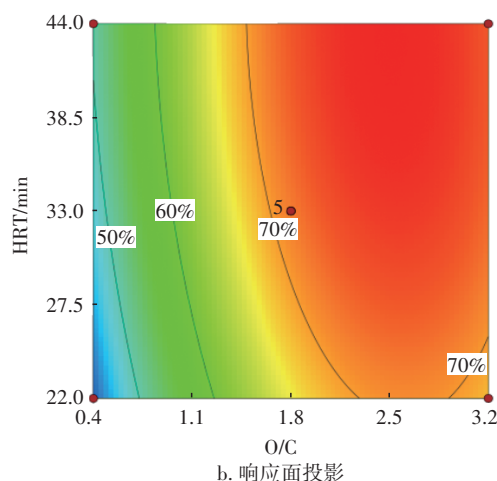
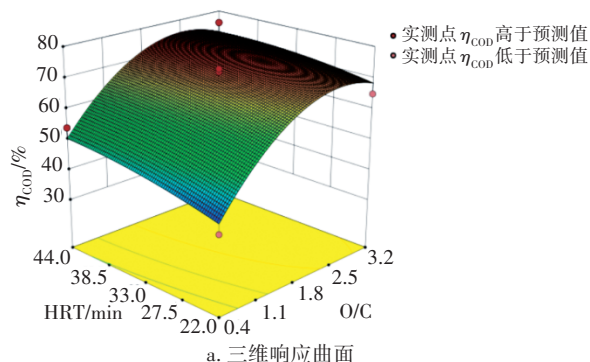


图4 响应曲面分析结果

Fig.4 Analysis results of response surface

从图4可以发现,第12次“运行”为实际最优值,当O/C值为1.8、HRT为33 min、 COD_{in} 为57 mg/L时, η_{COD} 达到72%。从图4还可以发现,当O/C值大于1.2时,可以保证 η_{COD} 在60%以上;但要达到更高的去除率,O/C要增加很多,且逐渐趋于极限,因此工程上是不经济的。

4 结论

① 铁基催化剂整砌填料具有显著的性质优势,特别是其“微通道”结构,满足了高级氧化中催化剂作用域的要求。

② 催化臭氧氧化反应器中,微气泡布气、气液两相逆流的运行方式,对氧化反应的益处巨大;正常工况范围内,铁基催化剂整砌填料水流阻力不大。

③ 催化氧化时,当臭氧当量比O/C值较小时,随着O/C值的上升,对处理效果的作用较大,但O/C值超过2后,效果不再明显;填料区水力停留时间反映了氧化时间,在30~44 min为宜。

④ 在上述参数范围内, η_{COD} 可稳定在60%以上。因此,当控制 COD_{in} 在75 mg/L以下时,可保证出水水质达到《地表水环境质量标准》Ⅳ类水标准。

参考文献:

- [1] WU C Y, ZHOU Y X, SUN X M, *et al.* The recent development of advanced wastewater treatment by ozone and biological aerated filter[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(9):8315-8329.
- [2] NAWROCKI J, KASPRZYK-HORDERN B. The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation [J].

- Applied Catalysis B: Environmental, 2010, 99 (1/2): 27-42.
- [3] LI X F, CHEN W Y, MA L M, *et al.* Industrial wastewater advanced treatment via catalytic ozonation with an Fe-based catalyst [J]. Chemosphere, 2018, 195: 336-343.
- [4] FEI J R, LIN X Z, HUANG Y X, *et al.* Effect of Fe-based catalytic ozonation and sole ozonation on the characteristics and conversion of organic fractions in bio-treated industrial wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2021, 774: 145821.
- [5] LIN X Z, LI X F, FEI J R, *et al.* In-situ growing protective Cr-substituted goethite film on iron shavings (Fe^0) as efficient catalytic ozonation catalysts: a comparative study [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125653.
- [6] WANG H, LIN X Z, HUANG Y X, *et al.* Two advanced oxidation pathways of modified iron-shavings participation in ozonation [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 244: 116838.
- [7] LI X F, CHEN W Y, MA L M, *et al.* Characteristics and mechanisms of catalytic ozonation with Fe-shaving-based catalyst in industrial wastewater advanced treatment [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 222: 174-181.
- [8] ZHANG S, QUAN X, ZHENG J F, *et al.* Probing the interphase " $\text{HO}\cdot$ zone" originated by carbon nanotube during catalytic ozonation [J]. Water Research, 2017, 122: 86-95.
- [9] 蒋长荣, 王骁勇, 刘树勇. 爱因斯坦与布朗运动[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 28-32.
- JIANG Changrong, WANG Xiaoyong, LIU Shuyong. Einstein and Brownian movement [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2005, 26 (3): 28-32(in Chinese).
- [10] ROMAN F, ACHIM L, GERTRAUD M, *et al.* Determination of $\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$, and hydroperoxide yields in ozone reactions in aqueous solution [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2003, 107(30): 7242-7253.
- [11] 马鲁铭. 浅析臭氧氧化有机物理论当量——夹议推导过程及前提 [EB/OL]. [2020-08-03]. <http://ozonation.cn/newsitem/26984>.
- MA Luming. Theoretical equivalent analysis during ozonation of organic substances: derivation process and prerequisites [EB/OL]. [2020-08-03]. <http://ozonation.cn/newsitem/26984>(in Chinese).
- [12] 南京卓泽石化设备制造有限公司. 过滤器阻力损失计算 [EB/OL]. [2021-03-02]. <https://wenku.baidu.com/view/99f797257375a417866f8fcc.html>.
- Nanjing Excellence Petro Equipment Manufacture Co. Ltd. Calculation of filter resistance loss [EB/OL]. [2021-03-02]. <https://wenku.baidu.com/view/99f797257375a417866f8fcc.html>(in Chinese).
- 作者简介:马捷汀(1990-),男,上海人,博士,工程师,主要从事排水工程设计与废水深度处理技术研究。
- E-mail:majieting7@163.com
- 收稿日期:2021-03-29
- 修回日期:2021-08-16

(编辑:任莹莹)

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力