

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.05.004

## 响应面法优化镀镍废水中磷处理工艺的研究

陈艺敏<sup>1,2\*</sup>, 陈建福<sup>1,2</sup>

(1. 漳州职业技术学院, 食品工程学院, 福建 漳州 363000; 2. 福建省高职院校精细化工应用技术协同中心, 福建 漳州 363000)

**摘要:** 为提高镀镍废水中次/亚磷酸盐到正磷酸盐的氧化率, 利用响应面法对Fenton反应条件进行优化, 再加入CaO进行化学除磷。结果表明, 响应面法建立了非正磷酸盐氧化率与初始pH、 $\text{Fe}^{2+}$ 投加量、 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 的二次多项式模型, 具有高度显著性。最佳反应条件为初始pH为3.7,  $\text{Fe}^{2+}$ 投加量为16.2 mmol/L,  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 为4时, 预测氧化率为99.72%, 与实际实验结果偏差仅为0.6%。利用CaO进行化学除磷, 当废水的pH为中性时, 出水总磷能够达到《污水综合排放标准》(GB8978—1996)的一级排放标准。

**关键词:** 响应面法; Fenton氧化; 镀镍废水; 化学除磷

中图分类号: X703

文献标识码: A

## Study on Optimization of Phosphorus Treatment Process in Nickel Plating Wastewater by Response Surface Method

CHEN Yimin<sup>1,2\*</sup>, CHEN Jianfu<sup>1,2</sup>(1. School of Food Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China;  
2. Fujian Fine Chemicals Application Technology Cooperation Center in Vocational Colleges, Zhangzhou 363000, China)

**Abstract:** In order to improve the oxidation rate of hypophosphite and phosphite to orthophosphate in nickel plating wastewater, response surface methodology was used to optimize the Fenton reaction conditions, and then CaO was added for chemical phosphorus removal. The results show that the quadratic polynomial model of oxidation rate of non-orthophosphate with the initial pH,  $\text{Fe}^{2+}$  dosage,  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  is established by response surface method, which is highly significant. The optimum reaction conditions are 3.7 for the initial pH, 16.2 mmol/L for the  $\text{Fe}^{2+}$  dosage, and 4 for  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ . Under this condition, the predicted oxidation rate is 99.72%, and the deviation is only 0.6% from the actual experimental results. Using CaO for chemical phosphorus removal, when the pH in the wastewater is neutral, the total phosphorus in effluent can meet the first class discharge standard of Integrated Sewage Discharge Standard (GB8978—1996).

**Keywords:** response surface method; Fenton oxidation; nickel plating wastewater; chemical phosphorus removal

磷是生物体必不可少的元素,但是当水体中含 有大量人为排放的磷元素时,容易导致水体富营养

收稿日期: 2020-07-21

修回日期: 2020-09-26

通信作者: 陈艺敏, Email: 43150922@qq.com

基金项目: 漳州市自然科学基金项目(ZZ2020J40);福建省科技计划项目(2018N2002)

化,造成生态平衡失调。电镀工业使用大量次磷酸盐等作为化学镀剂,导致排放的废水多存在磷超标问题<sup>[1]</sup>。化学镀镍废液中含有浓度较高的次磷酸根和亚磷酸根离子,微生物无法分解,不容易沉淀,以至于磷无法轻易去除。现有研究一般采用臭氧氧化、Fenton氧化或者次氯酸钠氧化等方法先把次/亚磷酸盐氧化为正磷酸盐,再添加除磷剂进行化学除磷,以满足日益严格的排放要求<sup>[2-5]</sup>。随着全球磷资源的萎缩,电镀废水中磷的回收也受到了广泛的关注<sup>[6]</sup>。其中Fenton氧化-化学沉淀是实际操作中最常用的除磷方法,不仅可以去除废水中高浓度有机物,还能将次磷酸盐和亚磷酸盐氧化成正磷酸盐,通过回收反应生成的磷酸铁,实现磷的资源利用。

Fenton反应受初始pH值、溶液浓度、 $\text{Fe}^{2+}$ 投加量和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的投加量等多种因素的影响,为科学地寻找最优实验条件组合,同时检验影响因素单独作用和交互作用的显著性,响应曲面法被用于实验<sup>[7]</sup>。响应面法已被证实能够优化电镀废水中重金属和有机物处理条件<sup>[8-11]</sup>,但用于优化电镀废水中次/亚磷酸盐氧化反应的研究很少。本研究采用响应面法优化Fenton氧化反应条件,以提高次/亚磷酸盐到正磷酸盐的转化率,再利用氧化钙进行化学沉淀除磷。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所用镀镍废水取自当地一家电镀企业,测

得pH值为2.4,总磷含量约为50 mg/L,次/亚磷酸盐约占总磷的96%。

实验所用药品包括: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、浓 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{NaOH}$ 、钼酸铵、酒石酸锑钾、抗坏血酸等均为分析纯。

所用仪器包括:pH计,磁力加热搅拌器,分析天平,紫外分光光度计,压力锅。

### 1.2 实验方法

取镀镍废水200 mL于烧杯中,调节废水的pH值,依次加入一定量的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 粉末和30%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液,用磁力搅拌器搅拌反应60 min。实验反应原理如图1所示。在酸性条件下过氧化氢和亚铁离子反应产生强氧化性 $\cdot\text{OH}$ ,将电镀废水中的次/亚磷酸盐氧化为正磷酸盐。静置沉淀后,取上清液经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后用钼酸铵分光光度法测量水中正磷酸盐的浓度,并计算氧化率 $\theta$ ,见公式(1)。然后往水中投加生石灰,静置沉淀后,取上清液经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后测量水中的总磷,并计算相应的去除率 $\eta$ ,见公式(2)。

$$\theta = \frac{\rho_1}{\rho_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

其中: $\theta$ 为氧化率, $\eta$ 为去除率, $\rho_0$ 为原废水中总磷浓度,mg/L; $\rho_1$ 为Fenton反应后正磷酸盐浓度,mg/L; $\rho_2$ 为沉淀反应后总磷浓度,mg/L。

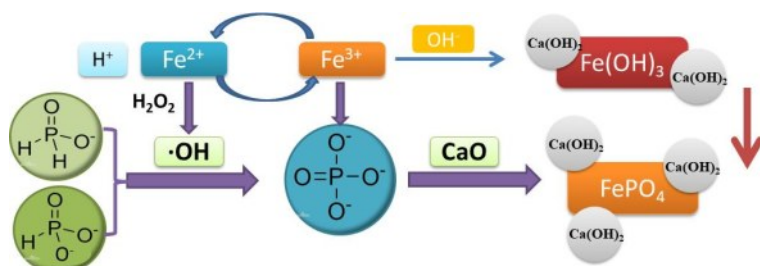


图1 实验原理

Fig.1 Experimental principle

### 1.3 Fenton反应单因素实验

已有研究证实初始pH、 $\text{Fe}^{2+}$ 投加量和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的投加量是Fenton反应的主要影响因素,反应时间和反应温度也会对反应产生影响。张存芳等<sup>[12]</sup>发现Fenton反应在前60 min反应基本完成,继续延长反应时间已没有意义。温度对Fenton试剂这种复杂的反应体系影响复杂,升高温度可以激活羟基自由基,但

温度过高会使过氧化氢分解成水和氧气。因此,单因素实验选择在室温下(25  $^{\circ}\text{C}$ )进行,氧化时间60 min,讨论初始pH、 $\text{Fe}^{2+}$ 投加量、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和 $\text{Fe}^{2+}$ 摩尔比( $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ )的变化对非正磷酸盐氧化为正磷酸盐的影响。

### 1.4 响应面实验

响应面分析是将反应体系的响应值(非正磷酸

盐氧化率)作为多个因素(初始 pH、 $\text{Fe}^{2+}$ 投加量、 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ )的函数,通过方差分析来选择实验中的最优条件。依据单因素实验结果,确定 Box-Behnken 响应面法的影响因子及水平(表 1)。

表 1 Box-Behnken 法的影响因子及水平

Tab.1 Impact factors and levels of Box-Behnken design

影响因子	影响水平及编码		
	-1	0	+1
初始 pH	3	4	5
$\text{Fe}^{2+}$ 投加量/(mmol·L <sup>-1</sup> )	10	15	20
$n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$	4	6	8

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素实验结果

#### 2.1.1 初始 pH 值的影响

在酸性条件下,Fenton 试剂中的  $\text{Fe}^{2+}$  才能催化还原  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成  $\cdot\text{OH}$ ,自身被氧化生成  $\text{Fe}^{3+}$ ,但对于不同的水质,最佳的初始 pH 条件并不一样。当初始 pH 值在 2~6 的范围内变化时,分别往废水中加入 20 mmol/L 的  $\text{Fe}^{2+}$ , $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})=10$  的过氧化氢,非正磷酸盐的氧化率呈先增加后减少的趋势(图 2)。初始 pH 在 3~5 时 Fenton 氧化效率较高,初始 pH 为 4 时达到峰值,氧化反应后生成红褐色的沉淀。当初始 pH 为 2 时,溶液中  $\text{H}^+$  浓度过高,抑制  $\text{Fe}^{3+}$  还原为  $\text{Fe}^{2+}$ ,使得产生的  $\cdot\text{OH}$  量减少<sup>[13]</sup>,反应后没有沉淀生成。而当 pH 值偏高时,溶液中  $\text{OH}^-$  浓度过高,不仅会抑制  $\cdot\text{OH}$  的产生,而且  $\text{Fe}^{3+}$  会与  $\text{OH}^-$  反应生成沉淀。因此选择初始 pH 值为 4。

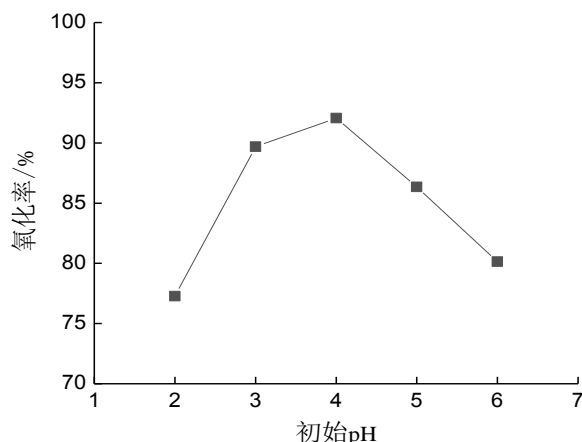


图 2 初始 pH 的影响

Fig.2 Effect of the initial pH

#### 2.1.2 $\text{Fe}^{2+}$ 添加量的影响

调节溶液初始 pH 为 4,固定  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  为 10, $\text{Fe}^{2+}$ 添加量对非正磷酸盐氧化率的影响如图 3 所示。随着  $\text{Fe}^{2+}$ 添加量的增加,氧化率先迅速增大后略有下降。这是由于当溶液中  $\text{Fe}^{2+}$ 浓度低时,Fenton 反应速度较慢;随着水中  $\text{Fe}^{2+}$ 浓度增大,反应速度迅速增加。但是当  $\text{Fe}^{2+}$ 的添加量增加至 15 mmol/L 后,继续增加  $\text{Fe}^{2+}$ 浓度对氧化率增加的作用变得不明显,甚至略有下降。这是因为过量的  $\text{Fe}^{2+}$ 在还原  $\text{H}_2\text{O}_2$ 的同时,自身氧化为  $\text{Fe}^{3+}$ ,不仅消耗药剂,而且增加出水的色度<sup>[14]</sup>。因此,选择  $\text{Fe}^{2+}$ 添加量为 15 mmol/L。

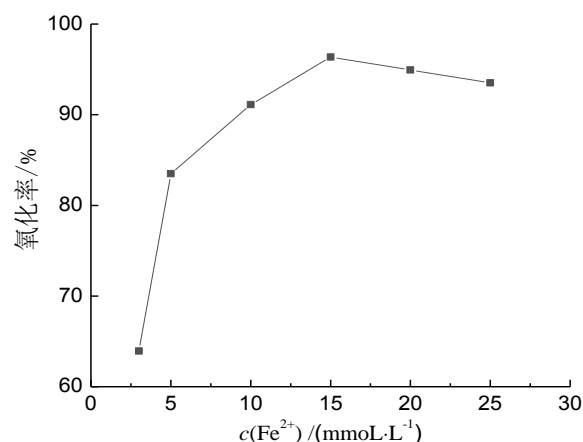


图 3 二价铁添加量的影响

Fig.3 Effect of the  $\text{Fe}^{2+}$  dosage

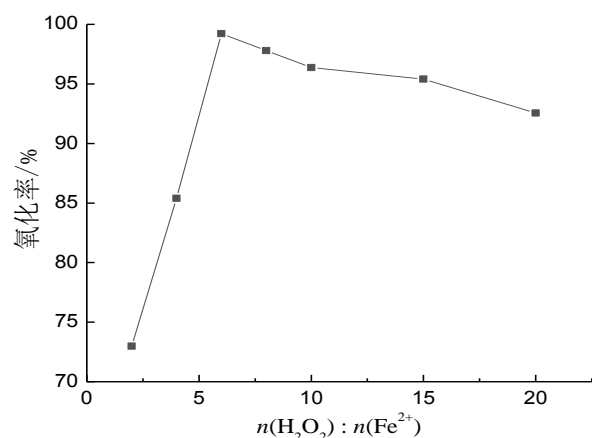
#### 2.1.3 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 的影响

调节溶液初始 pH 为 4,加入 15 mmol/L 的  $\text{Fe}^{2+}$ ,加入  $\text{H}_2\text{O}_2$  的量对非正磷酸盐氧化率的影响见图 4。随着  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  的增加,氧化率先是快速增加,然后开始减少。当溶液中  $\text{H}_2\text{O}_2$  浓度不够时,氧化速度较慢,但是当  $\text{H}_2\text{O}_2$  过量时,会在反应开始时就迅速将  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,并抑制羟基自由基的产生,反而使氧化效率降低<sup>[15]</sup>。因此,选择  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  为 6。

### 2.2 响应面法优化 Fenton 氧化实验

#### 2.2.1 模型的建立及分析

根据响应面设计方案进行实验,得到非正磷酸盐的氧化率(如表 2 所示)。应用 Design-Expert 10.0.3 对结果进行响应面的分析,建立氧化率  $\theta(y)$  与初始 pH(A)、 $\text{Fe}^{2+}$ 投加量(B)、 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ (C) 三个变量之间的二次多项式模型,可以得到以下拟

图4  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  的影响Fig.4 Effect of  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 

合的二次方程： $y=99.23-1.55A+3.10B-0.36C+0.36AB+0.12AC-0.60BC-4.11A^2-5.55B^2-0.54C^2$  ( $3\leq A\leq 5$ ,  $10\leq B\leq 20$ ,  $4\leq C\leq 8$ )。根据方程中因子的系数的大小,可以识别因子的相对影响。在讨论的范围内,三个影响因子中  $\text{Fe}^{2+}$  投加量对氧化率的影响最大,其次是初始 pH,  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  的影响最小。

二次方程的方差分析详见表3,  $F$  表示  $F$  检验值,  $P$  表示置信度。结果显示,模型的  $F$  值为 102.70, 说明该模型显著,  $F$  值为噪声的几率小于 0.01%。  $A$ 、 $B$ 、 $A^2$  和  $B^2$  项目的  $P$  值小于 0.05, 说明它们是模型中的显著影响项。二次方程的决定系数  $R^2=0.9925$ , 且失拟项不显著, 说明该模型能够较好地分析和预

表2 实验方案及结果

Tab.2 Experimental design and results

编号	初始 pH	$\text{Fe}^{2+}$ 投加量/ (mmol·L <sup>-1</sup> )	$n(\text{H}_2\text{O}_2):n$ ( $\text{Fe}^{2+}$ )	氧化率 $\theta\%$
1	3	20	6	94.46
2	5	15	8	93.02
3	4	20	8	94.93
4	4	15	6	98.75
5	5	10	6	83.96
6	4	10	4	90.16
7	3	15	4	96.36
8	4	15	6	98.75
9	4	15	6	99.23
10	5	15	4	93.50
11	4	15	6	99.70
12	5	20	6	91.59
13	3	10	6	88.25
14	4	10	8	90.64
15	3	15	8	95.41
16	4	20	4	96.84
17	4	15	6	99.70

测 Fenton 氧化非正磷酸盐实验的优化条件。校正决定系数  $R_{\text{Adj}}^2=0.9828$ , 预测决定系数  $R_{\text{Pred}}^2=0.9211$ , 两者之差小于 0.1, 说明预测值是合理可信的。从非正磷酸盐氧化率的预测值和实测值的线性回归分析可见(图5), 两者的相关性很好, 说明用模型来优化 Fenton 反应条件的可信度较高。

表3 回归方程的方差分析

Tab.3 Analysis of variance in regression equation

项目	平方和	自由度	均方差	$F$	$P$	显著性
模型	315.520	9	35.060	102.70	< 0.0001	显著
$A$ -pH 值	19.230	1	19.230	56.33	0.0001	显著
$B$ - $\text{Fe}^{2+}$ 投加量	76.920	1	76.920	225.33	< 0.0001	显著
$C$ - $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$	1.020	1	1.020	3.00	0.1269	—
$AB$	0.510	1	0.510	1.50	0.2603	—
$AC$	0.057	1	0.057	0.17	0.6953	—
$BC$	1.420	1	1.420	4.17	0.0806	—
$A^2$	71.280	1	71.280	208.82	< 0.0001	显著
$B^2$	129.490	1	129.490	379.34	< 0.0001	显著
$C^2$	1.210	1	1.210	3.55	0.1014	—
残差	2.390	7	0.340	—	—	—
失拟项	1.480	3	0.490	2.17	0.2346	不显著
纯误差	0.910	4	0.230	—	—	—
总离差	317.910	16	—	—	—	—



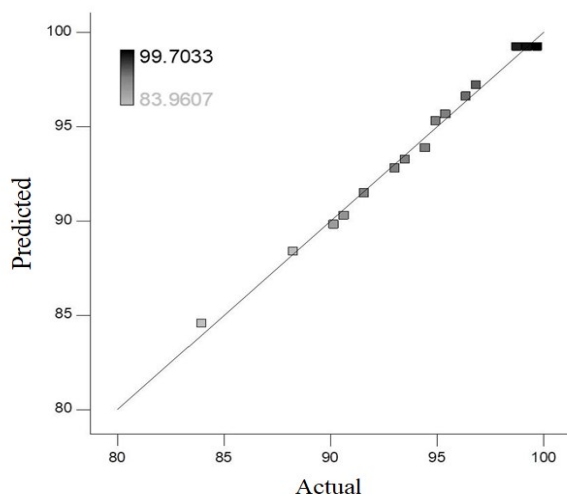


图5 氧化率的预测值与实测值的回归分析

Fig.5 Regression analysis of oxidation rates between the predicted and actual values

### 2.2.2 响应面分析

图6反映的是各因子在设计空间的中心点对响应值的影响程度。从图中可见,氧化率随初始pH值的增加呈现先增加后迅速减少的趋势,随 $\text{Fe}^{2+}$ 量的增加是先快速增加后减少的趋势,随 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 的增加而变化的趋势并不显著。

各因子之间的交互作用可以通过响应面及其等高面图直观地反映出来。当 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})=6$ 时,从AB因子的响应图(图7(a))可以发现,在研究范围内,氧化率随着初始pH的增加呈现先增大再减小的趋势,在 $\text{pH}=4$ 左右达到峰值。随着 $\text{Fe}^{2+}$ 添加量的增加,氧化率也呈现先增大再减小的趋势,在 $\text{Fe}^{2+}=16 \text{ mmol/L}$ 左右达到峰值,但是改变初始pH对变化趋势的影响很小。因此认为初始pH和 $\text{Fe}^{2+}$ 添加量的交互作用不明显,但是从图中可以明显得到这两个因素的最佳值。

当 $\text{Fe}^{2+}=15 \text{ mmol/L}$ ,从AC因子的响应图(图7(b))可以发现,在研究范围内,氧化率随初始pH的增加先增大后减小,在初始pH为4左右达到最大值。氧化率随着 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 的增加也呈现先缓慢增加后减少的趋势,但是改变初始pH值对变化趋势的影响较小。因此认为初始pH和 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 的交互作用不显著。

当初始 $\text{pH}=4$ ,在BC因子的响应图(图7(c))中,氧化率随 $\text{Fe}^{2+}$ 添加量的增加先迅速增加而后缓慢减少,当 $\text{Fe}^{2+}$ 添加量在 $16 \text{ mmol/L}$ 左右,氧化率达

到最大值。 $\text{Fe}^{2+}$ 添加量小于 $14 \text{ mmol/L}$ 时,氧化率随 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 的增加变化不明显; $\text{Fe}^{2+}$ 添加量大于 $14 \text{ mmol/L}$ 时,氧化率随 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 的增加呈现先缓慢增大后缓慢减小的趋势。但总体而言, $\text{Fe}^{2+}$ 添加量与 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 的交互作用不显著。

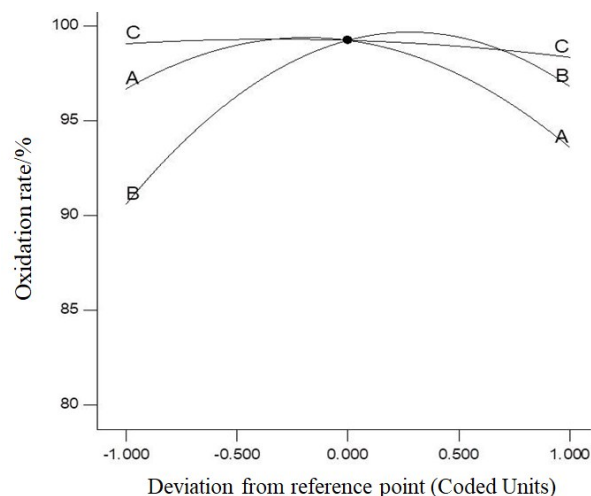


图6 各因子对氧化率的影响

Fig.6 Effects of each factor on oxidation rate

### 2.2.3 最佳实验结果分析与模型验证

Box-Behnken响应曲面法得到最大Fenton氧化率最高的最佳反应条件为:初始pH为3.7, $\text{Fe}^{2+}$ 投加量为 $16.2 \text{ mmol/L}$ , $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$ 为4,预测非正磷酸盐的氧化率可达到99.72%。根据最佳实验条件,进行三组平行实验取平均值,得到实际的氧化率为99.12%,与模型的预测偏差为0.6%,证明运用响应面法优化Fenton氧化非正磷酸盐的条件是可行的。

### 2.3 化学除磷

废水经过响应面优化Fenton氧化反应后,99%以上的次/亚磷被氧化成正磷,此时废水呈酸性,pH值约为2.5。Fenton反应后水中仍存在大量的 $\text{Fe}^{3+}$ ,利用铁盐化学除磷最佳的pH范围为5.0~5.5,此时 $\text{FePO}_4$ 的溶解性最小而沉淀下来。通过往废水中添加CaO,生成微溶的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,一方面可以提高废水的pH值,使氢氧化铁和磷酸铁沉淀;一方面能够附着在水中杂质上使其沉淀下来。当pH值大于8.5后,沉析作用使溶解的磷酸盐产生不溶性的磷酸钙而沉淀下来。从图8可见,随着CaO添加量的增加,溶液pH值升高,测得水中总磷浓度随之下降。当pH值大于5后,溶液开始出现明显的沉淀。当pH为中性时,测得水中总磷浓度小于 $0.5 \text{ mg/L}$ ,TP去

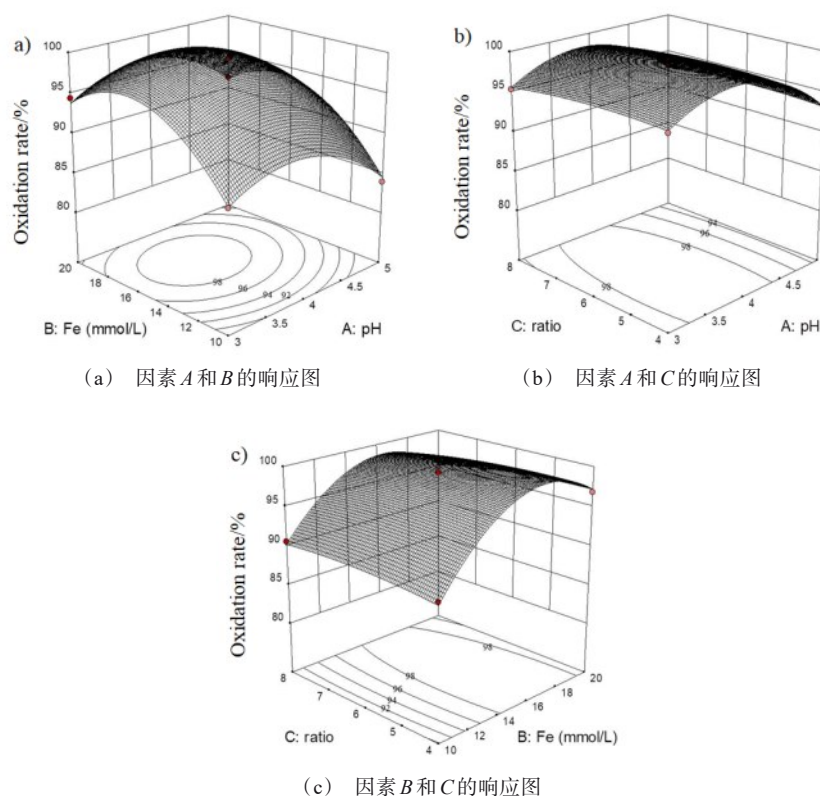


图7 各因素交互影响的响应曲面图

Fig.7 Response surface plots of the interaction of each factor

除率达到 99.65%, 达到《污水综合排放标准》(GB8978—1996)的一级排放标准。继续加入 CaO 直至溶液的 pH=10, 测得溶液中 TP 浓度 0.041 mg/L, 化学除磷率达到 99.9% 以上。

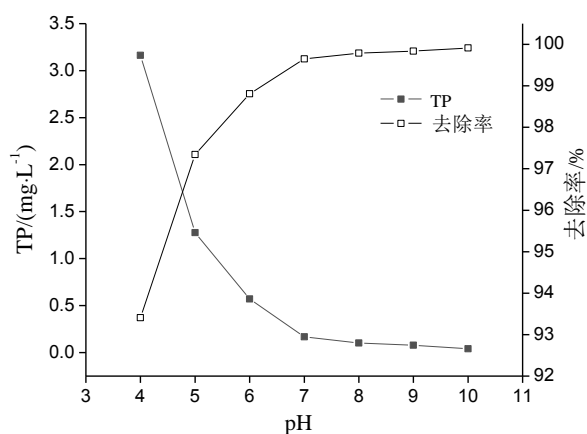


图8 氧化钙化学除磷

Fig.8 Chemical phosphorus removal by CaO

### 3 结论

(1) 根据 Fenton 氧化非正磷酸盐单因素实验结果, 确定 Box-Behnken 响应面影响水平, 建立氧化率 ( $y$ ) 与初始 pH ( $A$ )、 $\text{Fe}^{2+}$  投加量 ( $B$ )、 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  ( $C$ ) 三个变量之间的二次多项式模型。该模型具有高度显著性 ( $P < 0.0001$ ),  $R^2 = 0.9925$  且失拟项不显著, 说明与真实情况拟合性良好。模型中的  $A$ 、 $B$ 、 $A^2$  和  $B^2$  项为显著影响项。

(2) 模型预测最佳反应条件: 初始 pH 为 3.7,  $\text{Fe}^{2+}$  投加量为 16.2 mmol/L,  $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})$  为 4 时, 非正磷酸盐的氧化率为 99.72%。实际实验结果为 99.12%, 与模型预测结果偏差仅为 0.6%。

(3) 利用 CaO 进行化学除磷, 当 pH 值为中性时, 测得水中总磷浓度小于 0.5 mg/L, TP 去除率达到 99.65%, 达到《污水综合排放标准》(GB8978—1996) 的一级排放标准。

## 参考文献

- [1] 周宇航. 电镀废水中次磷酸盐去除效果的小试研究[J]. 污染防治技术, 2016, 29(5): 37-39+48.  
Zhou Y H. A small-scale test for the removal effect of hypophosphite in the electroplating wastewater[J]. Pollution Control Technology, 2016, 29(5): 37-39+48 (in Chinese).
- [2] 赵扬, 汪源浩. 化学沉淀-吸附法处理电镀废水的研究[J]. 电镀与环保, 2020, 40(1): 61-64.  
Zhao Y, Wang Y H. Study on treatment of electroplating wastewater by chemical precipitation and adsorption method[J]. Electroplating & Pollution Control, 2020, 40(1): 61-64 (in Chinese).
- [3] 李洋, 陈忠平, 孙萌萌, 等. 化学镀镍废水中磷和镍的同步去除[J]. 环境工程学报, 2020, 14(1): 96-102.  
Li Y, Chen Z P, Sun M M, et al. Simultaneous removal of phosphorus and nickel from electroless nickel plating wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(1): 96-102 (in Chinese).
- [4] 张洪亮, 王棉棉, 吕斯濠, 等. Fenton氧化-沸石吸附联合处理化学镀镍废水[J]. 电镀与环保, 2017, 37(6): 61-65.  
Zhang H L, Wang M M, Lv S H, et al. Treatment of electroless nickel plating wastewater by the combined processes of Fenton oxidation and clinoptilolite adsorption[J]. Electroplating & Pollution Control, 2017, 37(6): 61-65 (in Chinese).
- [5] 陈良, 张炜铭, 吕路, 等. 臭氧氧化-化学沉淀法深度处理电镀含磷废水的研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(7): 31-34.  
Chen L, Zhang W M, Lv L, et al. Study on the advanced treatment of electroplating phosphorus-containing wastewater by ozone oxidation-chemical precipitation process[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(7): 31-34 (in Chinese).
- [6] Guan W, Tian S, Ma N, et al. An electrochemical method through hydroxyl radicals oxidation and deposition of ferric phosphate for hypophosphite recovery[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 516: 529-536.
- [7] Xu J, Long Y, Shen D, et al. Optimization of Fenton treatment process for degradation of refractory organics in pre-coagulated leachate membrane concentrates[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 323: 674-680.
- [8] 刘裕华, 戴江汇, 陈寿昆, 等. 响应曲面法优化蜡状芽孢杆菌 ZW1 去除电镀废水有机物的研究[J]. 广东化工, 2019, 46(15): 9-12+25.
- [9] 王哲, 张思思, 黄国和, 等. 高炉水淬渣对电镀废水中重金属和 COD 吸附的响应面优化[J]. 化工进展, 2016, 35(11): 3669-3676.  
Wang Z, Zhang S S, Huang G H, et al. Application of response surface methodology to optimize adsorption conditions for heavy metals and COD in electroplating waste water by water-quenched blast furnace slag[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(11): 3669-3676 (in Chinese).
- [10] Hosseini S S, Nazif A, Shahmirzadi M A A, et al. Fabrication, tuning and optimization of poly (acrylonitrile) nanofiltration membranes for effective nickel and chromium removal from electroplating wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 187: 46-59.
- [11] Kabuk H A, Avsar Y, İlhan F, et al. Comparison of pH adjustment and electrocoagulation processes on treatability of metal plating wastewater[J]. Separation Science and Technology, 2014, 49(4): 613-618.
- [12] 张存芳, 王鹏程, 吕斯濠, 等. Fenton氧化技术处理电镀废水的研究[J]. 山东化工, 2019, 48(3): 174-176.  
Zhang C F, Wang P C, Lv S H, et al. Study on treatment of wastewater by Fenton oxidation technology [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(3): 174-176 (in Chinese).
- [13] 杨卫, 李孟. 盐析破乳-芬顿氧化预处理乳化液废水的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(12): 112-116.  
Yang W, Li M. Research of salting out demulsification-Fenton oxidation pretreatment emulsion wastewater [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(12): 112-116 (in Chinese).
- [14] 胡红伟, 李晓燕. Fenton催化氧化反应机理及影响因素研究进展[J]. 科技通报, 2012, 28(4): 220-222.  
Hu H W, Li X Y. Analysis the Fenton oxidation reaction mechanism and the influencing factors[J]. Bulletin of Science and Technology, 2012, 28(4): 220-222 (in Chinese).
- [15] 李荣喜, 杨春平. Fenton反应处理三唑磷农药废水[J]. 工业水处理, 2009, 29(3): 65-69.  
Li R X, Yang C P. Treatment of triazophos pesticide wastewater by Fenton reaction [J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(3): 65-69 (in Chinese).