

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.01.013

基于响应面法的改性氧化铝吸附除氟效能优化

魏晨¹, 任会学¹, 梁伟纯¹, 毕宇鑫¹, 董群², 孙圆圆³

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 济南市生态环境局章丘分局, 山东 济南 250106; 3. 山东本源环境科技股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 针对水体氟污染治理需求,通过化学浸渍法成功制备了铈改性纳米氧化铝(CA)吸附材料,并基于响应面法(RSM)构建了多因素协同优化体系。采用Box-Behnken实验设计方法,系统考察了反应时间、溶液pH和CA投加量对氟离子去除率的影响,建立了以去除率为响应值的二次多项式回归模型。方差分析结果表明,各因素显著性顺序为pH($P<0.0001$)>CA投加量($P<0.0001$)>反应时间($P<0.0001$),模型失拟项不显著($P=0.3596$),证实了模型的可靠性。优化后的工艺参数如下:反应时间为122 min、pH为6.65、CA投加量为2.16 g/L,此时对氟离子的理论去除率达87.49%,经验证实际去除率为90.53%,绝对误差仅为3.04%,氟离子浓度可降至1.17 mg/L,满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水要求(≤ 1.5 mg/L)。通过扫描电子显微镜-能量色散X射线光谱仪(SEM-EDS)、X射线光电子能谱仪(XPS)、拉曼光谱表征证实,铈元素成功负载于纳米氧化铝上,增加了活性位点,提高了氟离子去除率。

关键词: 改性氧化铝; 响应面法; 吸附; 除氟; 效能优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)01-0078-07

Optimization of Defluorination Efficiency Using Modified Alumina Adsorption Based on Response Surface Methodology

WEI Chen¹, REN Huixue¹, LIANG Weichun¹, BI Yuxin¹, DONG Qun²,
SUN Yuanyuan³

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Zhangqiu Branch of Jinan Municipal Ecological Environment Bureau, Jinan 250106, China; 3. Shandong Benyuan Environmental Technology Co. Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: In response to the growing demand for fluoride pollution control in aquatic environments, cerium-modified nano-alumina (CA) adsorption materials were successfully prepared via the chemical impregnation method, and a multi-factor collaborative optimization system was established using the response surface methodology (RSM). Box-Behnken experimental design was employed to systematically evaluate the effects of reaction time, solution pH, and CA dosage on the fluoride ion removal rate. A quadratic polynomial regression model was subsequently developed with removal rate as the response variable. The analysis of variance results indicated that the factors were significant in the

基金项目: 山东省重点研发计划(中小企业创新)项目(2024TSGC0099); 山东省新旧动能转换重大产业攻关项目(2020-370600-26-03-110192)

通信作者: 任会学 E-mail: renhx138@163.com

following descending order: pH ($P<0.000\ 1$), CA dosage ($P<0.000\ 1$) and reaction time ($P<0.000\ 1$), while the lack-of-fit term of the model was not statistically significant ($P=0.359\ 6$), thereby confirming the model's reliability. The optimized process parameters were determined as follows: reaction time of 122 minutes, pH of 6.65, and CA dosage of 2.16 g/L. Under these conditions, the theoretical fluoride ion removal rate reached 87.49%, while the experimentally verified removal rate was 90.53%, yielding a absolute error of only 3.04%. The residual fluoride ion concentration after treatment was reduced to 1.17 mg/L, which complied with the class III water quality limit (1.5 mg/L) specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The characterization using scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and Raman spectroscopy confirmed the successful loading of cerium onto nano-alumina, which increased the number of active sites and enhanced the fluoride ion removal efficiency.

Keywords: modified alumina; response surface methodology; adsorption; defluorination; performance optimization

氟离子(F^-)对人体健康具有双重影响,饮用水含氟0.5~1.0 mg/L可预防龋齿并促进骨骼健康,但过量(>1.5 mg/L)会导致氟斑牙、氟骨症及代谢紊乱^[1]。环境中的氟污染源可分为自然源(岩石风化、火山活动)和人为源(工业排放、含氟化肥施用),其迁移转化过程受区域水文地质特征与人类活动强度的双重调控^[2]。

在含氟废水处理过程中,目前广泛采用化学沉淀-吸附组合工艺。化学沉淀法适用于高氟废水(初始 $F^->1\ 000$ mg/L),可将其降至20~50 mg/L,但进一步达标较难(<1.5 mg/L)^[3]。离子交换与反渗透虽可实现深度净化,但成本高昂,限制其工程推广^[4]。吸附法因高效、经济与环境友好等优势而备受关注,其中稀土改性材料凭借表面羟基易解离的特性,表现出优良的阴离子交换能力^[5]。

铝基复合材料通过碱(土)金属、其他金属或非金属氧化物进行改性,但存在活性位点不足、pH适用范围有限和再生性能差等问题^[6]。卢伟光等^[7]发现,溶胶过程中加入的La、Ce稀土元素能保护氧化铝表面羟基,从而提高 $\gamma-Al_2O_3$ 的高温稳定性。He等^[8]通过浸渍法制备了La和Ce改性介孔氧化铝,发现La和Ce的改性极大地提高了 F^- 的吸附能力。因此,开发新型纳米复合吸附体系对实现低成本高效除氟具有重要的工程价值。

笔者采用化学浸渍法制备了铈改性纳米氧化铝(CA),重点探讨其除氟性能的关键影响因素。针对传统单因素优化法存在的交互作用忽略问题,将

响应面法(RSM)引入新型纳米材料除氟体系进行优化。基于Box-Behnken(BBD)实验设计,系统考察pH、反应时间、CA投加量的协同效应,构建二次多项式模型解析参数间的交互机制,并通过扫描电子显微镜(SEM)、X射线光电子能谱仪(XPS)和拉曼光谱表征材料改性前后的形貌演化规律,旨在为优化吸附工艺提供理论依据,同时可为纳米复合材料在环境修复领域的应用拓展技术路径。

1 材料与方法

1.1 实验试剂与检测方法

实验试剂:氟化钠(NaF)、纳米氧化铝、六水合硝酸铈 $[Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O]$ 、氢氧化钠(NaOH)、盐酸(HCl),以上药剂均为分析纯。

检测方法:氟离子浓度通过离子色谱仪测定;溶液pH通过pH仪测定;表面形态采用SEM表征;表面化学成分和元素化学态采用XPS进行测试;分子结构和官能团类型采用拉曼光谱进行检测,激光器波长为532 nm。

1.2 改性材料的制备

采用化学浸渍法制备CA。配制一定浓度的硝酸铈溶液,取适量纳米氧化铝浸渍于硝酸铈溶液中,得到乳白色液体。在室温下以150 r/min恒温振荡2 h后进行抽滤,采用蒸馏水冲洗3次以去除未负载的 Ce^{3+} ,将白色泥状产物在105℃下烘干12 h,取出冷却即得到CA。

1.3 废水处理实验

取200 mL浓度为10.0 mg/L的氟化钠溶液置于

锥形瓶中,调节pH,加入CA,在室温下以150 r/min恒温振荡吸附一定时间后,取出上清液,过0.45 μm 滤膜后利用离子色谱仪测定剩余氟离子浓度。

1.4 吸附性能评价和响应面优化

吸附剂性能采用氟离子去除率评价。基于单因素实验结果设定BBD中心点,重点考察CA投加量、pH、反应时间3个因素对氟离子去除效果的影响。以氟离子去除率为响应值,利用BBD法设计优化实验,实验数据采用Design-Expert 13软件进行分析,建立CA投加量、pH、反应时间与氟离子去除率之间的二次回归模型,确定最佳反应条件。

2 结果与讨论

2.1 单因素实验

2.1.1 CA投加量对除氟效果的影响

向初始浓度为10.0 mg/L的含氟废水中投加不同质量的CA,摇床速度为150 r/min,pH约为7.0,吸附时间为2.0 h。当CA投加量为0.5~1.5 g/L时,对氟离子的去除率呈显著上升趋势;然而,当CA投加量从1.5 g/L增加至5.0 g/L时,氟离子去除率的提升速度明显减缓,并稳定维持在90.00%以上。随着CA投加量的增加,其表面活性位点数量增多,导致对氟离子的去除率快速提升,表现为曲线的陡峭上升。然而,当CA投加量达到一定阈值后,吸附趋于平衡,过量的CA可能导致颗粒团聚现象,进而降低活性位点的利用率,减弱CA的吸附能力。实验结果表明,当CA投加量为1.5 g/L时,氟离子浓度可降至1.5 mg/L以下,去除率约为89.00%。

2.1.2 pH对除氟效果的影响

在其他条件相同的情况下,当pH为5.5~7.5时,对氟离子的去除率可达80.00%以上。当pH<5.5时,去除率逐渐降低。分析原因,过低的pH导致CA溶解,从而影响其结构的稳定性。此外,在酸性条件下,CA表面带正电荷,对 F^- 具有较强的静电吸附作用,可能导致 F^- 以HF的形式存在,从而降低溶液中有效 F^- 浓度,抑制除氟效果。当pH>7.5时,对氟离子的去除率显著下降,这是因为在碱性条件下, Ce^{3+} 易水解生成氢氧化物,致使其有效浓度降低。同时,溶液中 OH^- 与 F^- 竞争CA表面活性位点,抑制了 CeF_3 的生成过程,CA表面正电荷的减少削弱了对 F^- 的静电吸附作用,从而导致去除率下降。实验结果表明,当pH=6.5时,对氟离子的去除率可

达85.00%以上。因此,pH=6.5被认为是优化除氟效果的最佳条件。

2.1.3 吸附时间对除氟效果的影响

在其他实验条件相同的情况下,氟离子去除率随着反应时间的延长呈现显著上升的趋势,当反应时间为30~90 min时,氟离子去除率增长速度较慢;90 min以后去除率显著提升,可以达到80.00%以上;反应时间为120 min时,氟离子去除率达到91.77%。初始阶段含氟废水中氟离子浓度较高,CA表面具有相对丰富的活性位点,且形成的浓度梯度较大,因此表面活性位点的吸附作用占据主导地位;当时间延长至120 min时, F^- 与纳米氧化铝上的铈元素持续结合,导致浓度梯度逐渐降低,活性位点逐渐饱和,此时孔隙填充作用占主导,氟离子去除率趋于稳定。

2.1.4 共存离子对除氟效果的影响

天然水体或废水中含有一些常见的阴离子,它们在不同程度上与 F^- 竞争CA表面的活性位点。分别选择 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 作为共存离子,分析其对CA除氟效果的影响,共存阴离子浓度与 F^- 物质的量之比均为5:1。实验结果表明,5种阴离子对CA除氟均有一定影响,不同阴离子对CA除氟影响的排序为 $\text{CO}_3^{2-}>\text{PO}_4^{3-}>\text{SO}_4^{2-}>\text{NO}_3^->\text{Cl}^-$ 。其中, CO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 对CA除氟影响显著,系统对氟离子的去除率仅分别为29.31%、55.42%,推测 CO_3^{2-} 影响显著是其水解导致的pH升高进一步削弱吸附剂表面正电荷,抑制了CA除氟。

2.2 RSM优化分析

2.2.1 实验设计与模型建立

根据BBD原理设计,以CA投加量(A)、pH(B)、反应时间(C)3个因素为自变量,以氟离子去除率(Y)为响应值,设计3因素3水平的响应面实验,实验参数设计见表1。基于BBD的实验设计方案及结果见表2。

表1 响应面实验因素及水平设计

Tab.1 Factors and levels setting of response surface experiment

水平	A/(g/L)	B	C/min
-1	0.5	4.5	60
0	1.5	6.5	120
1	2.5	8.5	180

表2 响应面实验结果

Tab.2 Results of response surface experiment

序号	A/(g/L)	B	C/min	Y/%
1	1.5	4.5	180	77.27
2	0.5	4.5	120	75.36
3	2.5	4.5	120	77.83
4	0.5	8.5	120	78.90
5	1.5	8.5	180	79.53
6	1.5	6.5	120	89.51
7	1.5	6.5	120	89.82
8	1.5	4.5	60	76.29
9	1.5	6.5	120	89.79
10	0.5	6.5	60	77.52
11	2.5	6.5	180	79.10
12	1.5	6.5	120	89.57
13	2.5	6.5	60	78.00
14	2.5	8.5	120	79.23
15	1.5	8.5	60	79.33
16	0.5	6.5	180	77.53
17	1.5	6.5	120	89.57

利用 Design-Expert 13 软件对实验数据进行多元回归分析,各因素与响应值之间的拟合回归方程式(1)。

$$Y = 89.65 + 0.61A + 1.28B + 0.29C - 0.54AB + 0.27AC - 0.19BC - 5.95A^2 - 5.88B^2 - 5.67C^2 \quad (1)$$

2.2.2 回归方程方差分析

对回归方程进行方差分析,结果见表3。

表3 二次回归模型方差分析

Tab.3 Variance analysis of quadratic polynomial regression model

项 目	平方和	自由度	均方	F 值	P
模型	498.40	9	55.38	2 307.34	<0.000 1
A	2.94	1	2.94	122.51	<0.000 1
B	13.11	1	13.11	546.12	<0.000 1
C	0.655 5	1	0.655 5	27.31	0.001 2
AB	1.14	1	1.14	47.70	0.000 2
AC	0.297 0	1	0.297 0	12.38	0.009 8
BC	0.152 1	1	0.152 1	6.34	0.040 0
A ²	148.80	1	148.80	6 199.82	<0.000 1
B ²	145.44	1	145.44	6 059.83	<0.000 1
C ²	135.35	1	135.35	5 639.49	<0.000 1
误差	0.168 0	7	0.024 0		
失拟项	0.087 1	3	0.029 0	1.44	0.359 6
纯误差	0.080 9	4	0.020 2		

从表3可以看出,模型的P<0.000 1,这表明方

程具有高度的显著性,拟合度良好;失拟项的P为0.359 6(>0.05),表明失拟项不显著,进一步验证了回归方程的精确性,可用于后续数据分析。一次项(A、B、C)及二次项(AB、AC、A²、B²、C²)的P值均小于0.01,表明这些参数对氟离子去除率的影响极为显著。二次项BC的P<0.05,表示该参数对氟离子去除率的影响显著。根据F值的大小,各因素对氟离子去除率的影响程度为:B>A>C,即pH>CA投加量>反应时间。方差分析结果表明,该回归方程能够有效预测在不同CA投加量、pH及反应时间条件下CA对氟离子的去除率。

2.2.3 响应面分析

在反应时间为120 min的条件下,CA投加量和pH对氟离子去除率的影响如图1所示。

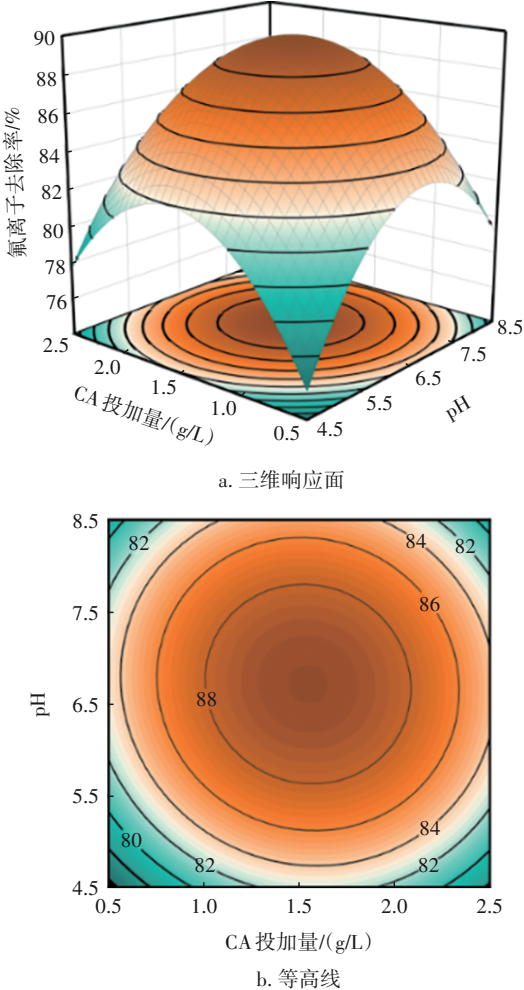
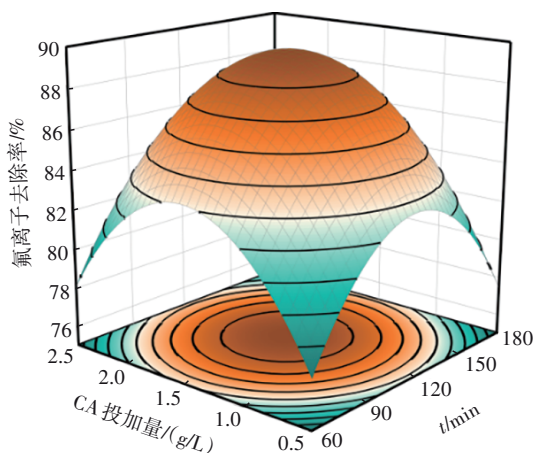


图1 CA投加量和pH对氟离子去除率影响的三维响应面和等高线

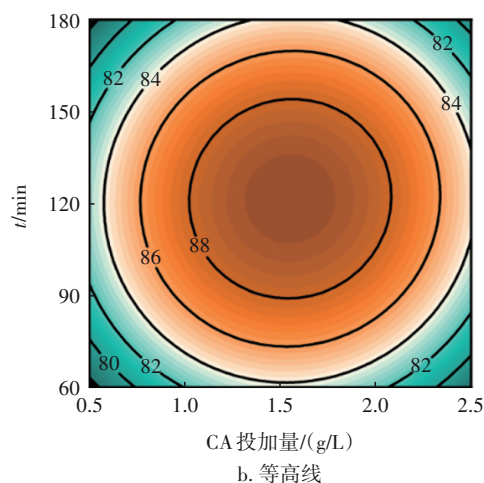
Fig.1 3D surface and contour plot of influence of CA dosage and pH on fluoride ion removal rate

由图1(a)可知,在固定pH、以CA投加量为自变量、以氟离子去除率为因变量的情况下,氟离子去除率呈先上升后下降的趋势。具体而言,当CA投加量为0.5~2.5 g/L时,氟离子去除率波动较大。另一方面,以pH为自变量、固定CA投加量来分析,氟离子去除率同样在pH为4.5~8.5范围内呈先上升后下降的趋势。且在pH一侧的变化幅度更为显著,其曲面的陡峭程度远高于CA投加量一侧,表明pH对氟离子去除率的影响更为显著。曲面在CA投加量为1.5 g/L、pH为6.5时达到峰值,表示两者存在显著的协同效应。由图1(b)可知,当CA投加量为1~2 g/L、pH为5.5~7.5时,CA对氟离子的去除率较高,这是A、B因素交互影响下的最优区域。综合分析表明,在此交互实验中,pH对氟离子去除率的影响大于CA投加量。

CA投加量和反应时间对氟离子去除率影响的三维响应面和等高线如图2所示。由图2(a)可知,在CA投加量和反应时间的交互作用下,当pH一定,且CA投加量为0.5~2.5 g/L时,氟离子去除率波动显著,三维响应面表现出明显的陡峭变化程度,具体为先上升后下降。相比之下,当反应时间在60~180 min时,三维响应面的变化幅度一般。曲面在CA投加量为1.5 g/L、反应时间为120 min处达到峰值,表明两者之间存在显著的协同效应。由图2(b)可以看出,当CA投加量为1~2 g/L、反应时间为90~150 min时,CA对氟离子的去除率较高,这是A、C因素交互影响下的最优区域。通过分析可知,在此交互实验中,CA投加量对氟离子去除率的影响大于反应时间。



a. 三维响应面

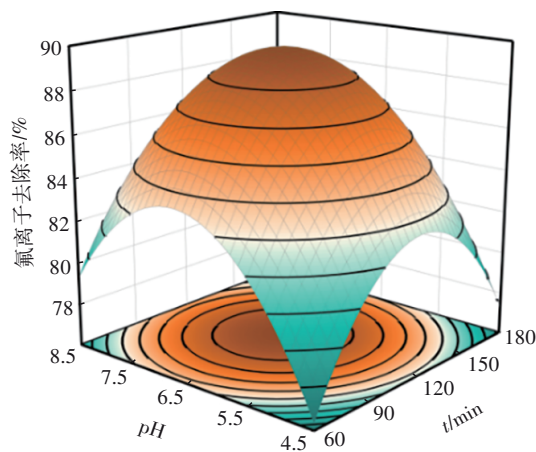


b. 等高线

图2 CA投加量和反应时间对氟离子去除率影响的三维响应面和等高线

Fig.2 3D surface and contour plot of influence of CA dosage and reaction time on fluoride ion removal rate

pH和反应时间对氟离子去除率影响的三维响应面和等高线见图3。由图3(a)可知,在pH与反应时间的交互作用影响下,当CA投加量一定时,随着pH在4.5~8.5范围内变化,氟离子去除率波动显著,三维响应面表现出明显的陡峭变化程度,呈先升后降的趋势。而当反应时间在60~180 min范围内变化时,相比以pH作为自变量对氟离子去除率所产生的变化趋势,三维响应面的变化幅度稍弱。曲面在pH为6.5、反应时间为120 min处达到峰值,表示两者之间存在显著的协同效应。由图3(b)可知,在pH为5.5~7.5、反应时间为90~150 min的条件下,CA对氟离子的去除率较高,此为B、C因素交互影响下的最优区域。经过分析可知,在此交互实验中,pH对氟离子去除率的影响明显大于反应时间。



a. 三维响应面

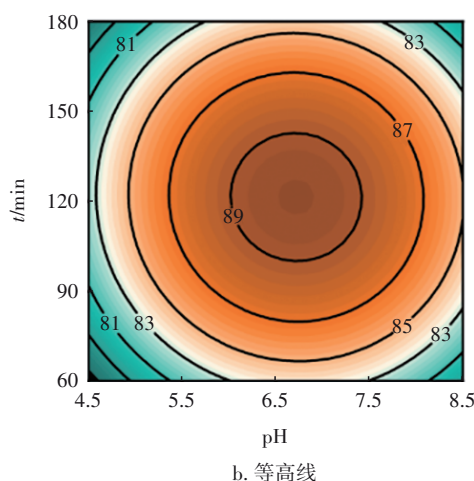


图3 pH和反应时间对氟离子去除率影响的三维响应面和等高线

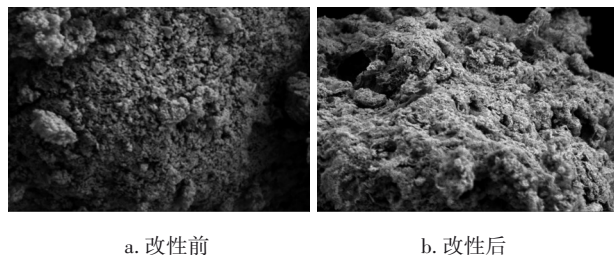
Fig.3 3D surface and contour plot of influence of pH and reaction time on fluoride ion removal rate

2.2.4 最佳反应条件

基于模型优化结果,CA去除氟离子的工艺条件如下:CA投加量为2.16 g/L、pH为6.65、反应时间为122 min,在此条件下预测的氟离子理论去除率为87.49%。为验证模型预测与实际结果的一致性,按照上述优化条件进行实验验证。结果表明,在上述优化工艺条件下,出水氟浓度为1.17 mg/L,氟离子去除率为90.53%,与理论预测值的绝对误差为3.04%。这一结果证实了诱导结晶除氟模型具有较高的准确性,优化结果可靠。

2.2.5 机理分析

纳米氧化铝改性前后的SEM照片如图4所示。可以看出,改性前的纳米氧化铝颗粒呈规则球形,表面具有明显的纳米级凹凸结构,粗糙度较高,部分颗粒形成松散团聚体。改性后的纳米氧化铝表面粗糙度显著增加,并附着凸起颗粒,说明铈元素成功负载于纳米氧化铝表面。



a. 改性前

b. 改性后

图4 纳米氧化铝改性前后的SEM照片

Fig.4 SEM photos of nano-alumina before and after modification

通过XPS分析纳米氧化铝改性前后的表面电子状态。使用高斯函数和洛伦兹函数组合进行Shirley型背景减除后,对结果进行了曲线拟合,具体如图5所示。可知,样品表面出现了明显的Ce 3d特征峰,这说明经过改性以后铈元素与纳米氧化铝进行了紧密结合。

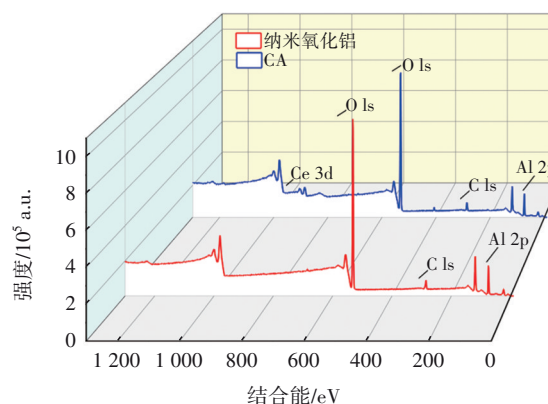


图5 纳米氧化铝改性前后的XPS能谱

Fig.5 XPS energy spectrum before and after modification of nano-alumina

Ce 3d光谱相对比较复杂,主要包括Ce 3d_{5/2}和Ce 3d_{3/2},其中Ce 3d_{5/2}的5个峰分别位于879.78、882.56、884.72、888.20和898.80 eV,Ce 3d_{3/2}的5个峰分别位于898.68、901.53、903.53、907.22和915.25 eV,882.56、888.20、898.80、901.53、907.22、915.25 eV对应的峰是Ce⁴⁺,而879.78、884.72、898.68、903.53 eV对应的峰是Ce³⁺[9]。Ce⁴⁺的存在可能缘于CA制备过程中引起的价态转变。改性后的O 1s峰值有明显偏移,位于529.25 eV的主峰归因于晶格氧,推测可能是Ce—O基团,而结合能为531.07 eV的峰是由羟基(—OH)引起的,推测CA中可能有Ce—OH基团。改性后的Al 2p图谱出现的峰,其结合能在73.00~75.50 eV之间,是氧化铝的特征峰。

纳米氧化铝改性前后的拉曼光谱如图6所示。在464、597 cm⁻¹处的波数分别对应F_{2g}和缺陷诱导模式(D带),D带与氧空位相关[10]。在CA的光谱中,F_{2g}带强度更高,D带强度更低。与氧化铝相比,CA中ID/IF_{2g}值降低,说明氧空穴数量下降,即CA表面富氧形成较多的羟基,提升了除氟效果。结合SEM和XPS结果推断,对于CA去除氟离子,起主要作用的是Ce—O键。

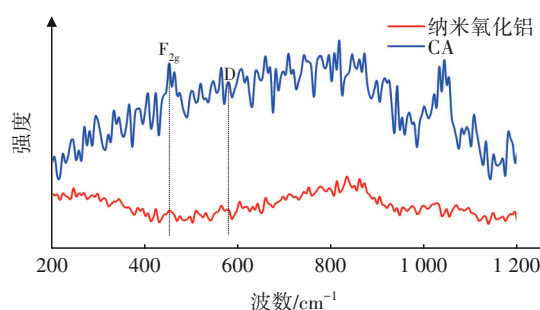


图6 改性前后纳米氧化铝的拉曼光谱

Fig.6 Raman spectra before and after modification of nano-alumina

3 结论

① 成功制备了铈改性纳米氧化铝,以氟离子去除率为评价指标,通过BBD实验研究了该材料的吸附性能,结果表明其处理含氟废水的最佳条件如下:pH为6.65、CA投加量为2.16 g/L、反应时间为122 min,在此条件下,对氟离子的去除率可达85.00%以上。

② CA投加量、pH及反应时间与氟离子去除率之间的二次回归模型如下: $Y = 89.65 + 0.61A + 1.28B + 0.29C - 0.54AB + 0.27AC - 0.19BC - 5.95A^2 - 5.88B^2 - 5.67C^2$ 。模型的拟合精度较高,在优化条件下,氟离子去除率为90.53%,氟离子浓度可降至1.17 mg/L,满足相关水质标准要求。

③ 通过SEM表征发现,纳米氧化铝在改性前后表面形貌发生显著变化,由原始的团簇颗粒转变为表面附着的凸起颗粒,结合XPS和拉曼光谱发现,CA除氟起主要作用的是Ce—O键。

参考文献:

- [1] KABIR H, GUPTA A K, TRIPATHY S. Fluoride and human health: systematic appraisal of sources, exposures, metabolism, and toxicity [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2020, 50(11): 1116-1193.
- [2] AHMAD S, SINGH R, ARFIN T, et al. Fluoride contamination, consequences and removal techniques in water: a review[J]. Environmental Science: Advances, 2022, 1(5): 620-661.
- [3] 雅茹,陈姝璇,奥妮琪,等. 水中氟离子去除方法的研究进展[J]. 三峡生态环境监测, 2022, 7(3):

1-13.

YA R, CHEN S X, AO N Q, et al. Research progress of fluoride ion removal methods in water[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2022, 7(3): 1-13(in Chinese).

- [4] WAN K L, HUANG L, YAN J, et al. Removal of fluoride from industrial wastewater by using different adsorbents: a review [J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145535.
- [5] SARACI F, QUEZADA-NOVOA V, DONNARUMMA P R, et al. Rare-earth metal-organic frameworks: from structure to applications[J]. Chemical Society Reviews, 2020, 49(22): 7949-7977.
- [6] ALHASSAN S I, HUANG L, HE Y J, et al. Fluoride removal from water using alumina and aluminum-based composites: a comprehensive review of progress [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2021, 51(18): 2051-2085.
- [7] 卢伟光,龙军,田辉平. 镧和铈改性对氧化铝性质的影响[J]. 催化学报, 2003, 24(8): 574-578.
LU W G, LONG J, TIAN H P. Effect of lanthanum and cerium modifiers on properties of alumina [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2003, 24 (8) : 574-578 (in Chinese).
- [8] HE Y X, ZHANG L M, AN X, et al. Enhanced fluoride removal from water by rare earth (La and Ce) modified alumina: adsorption isotherms, kinetics, thermodynamics and mechanism [J]. Science of the Total Environment, 2019, 688: 184-198.
- [9] RESENDE K A, NORONHA F B, HORI C E. Hydrodeoxygenation of phenol over metal supported niobia catalysts [J]. Renewable Energy, 2020, 149: 198-207.
- [10] LI M S, AMARI H, VAN VEEN A C. Metal-oxide interaction enhanced CO₂ activation in methanation over ceria supported nickel nanocrystallites [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, 239: 27-35.

作者简介:魏晨(1998—),女,陕西宝鸡人,硕士,主要研究方向为水污染控制。

E-mail:wichen1217@163.com

收稿日期:2025-03-06

修回日期:2025-05-25

(编辑:任莹莹)