

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.004

# 改性净水污泥负载纳米零价铁去除水中的 Cr(VI)

江宇<sup>1</sup>, 孙康<sup>1</sup>, 王东田<sup>1,2</sup>, 魏杰<sup>2</sup>

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学 化学生物与材料工程学院, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 以净水污泥为原材料,通过高温煅烧和盐酸活化制备得到改性净水污泥。利用液相还原法,以  $\text{NaBH}_4$  为还原剂还原  $\text{Fe}^{3+}$  合成改性净水污泥负载纳米零价铁(MWS-nZVI)吸附剂,将其用于去除水中的 Cr(VI);并将 MWS-nZVI 与净水污泥负载纳米零价铁(WS-nZVI)作对比,考察了溶液 pH 值、吸附剂投加量和 Cr(VI)初始浓度对吸附效果的影响;另外,采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线光电子能谱(XPS)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)等表征手段,分析吸附材料的物理特性和化学组成。结果表明,MWS-nZVI 对 Cr(VI)具有良好的去除效果,当投加量为 0.3 g/L、pH 值为 2、Cr(VI)初始浓度为 20 mg/L、反应时间为 3.5 h 时,对 Cr(VI)的最大吸附量可达到 26.0 mg/g。表征结果显示,MWS-nZVI 的比表面积较大,且对纳米零价铁的负载效果更好。通过拟合发现,Freundlich 吸附等温方程更适合模拟 MWS-nZVI 对 Cr(VI)的去除过程。

**关键词:** 净水污泥; 改性; 纳米零价铁; Cr(VI)

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0020-06

## Removal of Cr(VI) in Wastewater by Modified Waterworks Sludge Supported Nanoscale Zero-valent Iron

JIANG Yu<sup>1</sup>, SUN Kang<sup>1</sup>, WANG Dong-tian<sup>1,2</sup>, WEI Jie<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. School of Chemistry, Biology and Materials Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** Modified waterworks sludge was prepared by high temperature heat treatment and hydrochloric acid activation. The modified waterworks sludge supported nanoscale zero-valent iron (MWS-nZVI) was prepared by reduction of  $\text{Fe}^{3+}$  with  $\text{NaBH}_4$  through liquid phase chemical reduction method, and the adsorbent was applied for the removal of Cr(VI) in wastewater. The adsorption performance of MWS-nZVI was compared with that of waterworks sludge supported nanoscale zero-valent iron (WS-nZVI), and the effects of pH, adsorbent dosage and initial concentration on adsorption of Cr(VI) were evaluated. Physical properties and chemical composition of the adsorbent were analyzed by different kinds of characterization methods (SEM, XPS and FTIR). The results indicated that MWS-nZVI had a good removal efficiency on Cr(VI). When the dosage was 0.3 g/L, pH value was 2, initial concentration of Cr(VI) was 20 mg/L and reaction time was 3.5 h, the maximum adsorption capacity

基金项目: 苏州科技大学研究生科研创新计划项目(SKCX17\_016); 国家自然科学基金资助项目(51778392)  
通信作者: 王东田 E-mail: dongtianw@163.com

was 26.0 mg/g. The characterization results showed that MWS-nZVI had a large specific surface area and a better loading effect on nanoscale zero-valent iron. The Freundlich adsorption isotherm equation was more suitable to simulate the removal process of Cr(VI) by MWS-nZVI.

**Key words:** waterworks sludge; modification; nanoscale zero-valent iron; Cr(VI)

重金属离子对水生动植物和人类皆有巨大危害,其中Cr(VI)废水因毒性大、污染广而备受关注。纳米零价铁是纳米材料家族的一员,具有高活性和强还原性,是性能优异的环境修复材料,但其易氧化、易团聚的缺点也为实际应用带来了困难。对纳米零价铁进行负载改性可有效减少团聚现象,是简单快捷的改性方法<sup>[1-2]</sup>。净水污泥是自来水厂生产的副产品,对其进行高温和盐酸活化改性,可使其拥有更大的比表面积以达到最佳负载效果<sup>[3-4]</sup>。笔者同时采用高温煅烧和酸活化对净水污泥进行改性,并负载纳米零价铁,考察其对Cr(VI)的去除性能。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 吸附剂的制备与测试方法

取苏州高新区某自来水厂秋季生产饮用水时产生的净水污泥作为试验原材料。先将净水污泥进行自然风干,然后称取适量风干的净水污泥置于120℃电热烘箱中干燥12 h,烘干成密实块状固体;将块状净水污泥研磨成颗粒状,筛选出平均粒径为100 μm的净水污泥颗粒待用。

取上述净水污泥颗粒放入400℃马福炉中煅烧3 h,冷却后取出,放入2~3 mol/L的盐酸中浸泡12 h,然后进行固液分离,用蒸馏水将净水污泥润洗至中性,干燥后得到高温和酸活化改性净水污泥颗粒。

按照固液比1:60向0.3 mol/L的 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液中投加净水污泥(或改性净水污泥),在室温25℃条件下振荡360 min,得到吸附饱和的净水污泥(或改性净水污泥)和 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 的混合液,另外配制1 mol/L的 $\text{NaBH}_4$ 溶液于恒压滴液漏斗中待用。

通过磁力低温超声萃取仪设置反应温度为5℃,按 $\text{Fe}^{3+}$ 和 $\text{BH}_4^-$ 的物质的量之比为1:4,向上述配制的净水污泥(或改性净水污泥)和 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 混合液中以0.5 mL/min的速度滴加 $\text{NaBH}_4$ 溶液,在氮气氛围下同时磁力搅拌和超声(25 kHz,功率为100 W)持续反应2 h。反应完毕后,放入离心机进行固液分离得到黑色固体,经蒸馏水洗涤3次,移入真空干燥器中干燥12 h,待用。净水污泥负

载纳米零价铁吸附剂记为WS-nZVI,改性净水污泥负载纳米零价铁吸附剂记为MWS-nZVI。

### 1.2 去除Cr(VI)的试验方法

试验采用重铬酸钾溶液模拟含铬废水,在250 mL锥形瓶中加入50 mL浓度为20 mg/L的Cr(VI)模拟废液,用0.1 mol/L的HCl和NaOH调节溶液pH值,投加0.3 g/L吸附剂,振荡3.5 h,放入离心机中以4 000 r/min离心,取上清液采用二苯碳酰二肼分光光度法检测剩余Cr(VI)浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 比表面积与SEM分析

比表面积、孔径和孔体积是衡量吸附剂性能的重要指标。净水污泥、WS-nZVI和MWS-nZVI的比表面积分别为13.17、29.87、35.95  $\text{m}^2/\text{g}$ ,吸附平均孔径分别为9.73、7.26、4.42 nm,吸附累积孔体积分别为0.036 7、0.095 9、0.086 8  $\text{cm}^3/\text{g}$ 。可以看出,净水污泥、WS-nZVI和MWS-nZVI的比表面积依次递增,孔径依次递减。从净水污泥改性角度来说,高温煅烧、酸活化改性和负载纳米零价铁都增大了净水污泥的比表面积,但两种改性发挥的作用有所不同。400℃高温煅烧不但使净水污泥表面的片状结构坍塌,增加孔数、扩大孔容,而且导致净水污泥含有的水分和羟基挥发形成新孔<sup>[4]</sup>。而从纳米零价铁负载改性来分析,纳米零价铁附着在原泥表面具有造孔的效果,产生的大量新孔增大了净水污泥的比表面积和孔体积,减小了原泥的孔径。

通过SEM可以观测到吸附剂表面的尺寸大小和形貌特征。净水污泥、WS-nZVI和MWS-nZVI的SEM照片如图1所示。

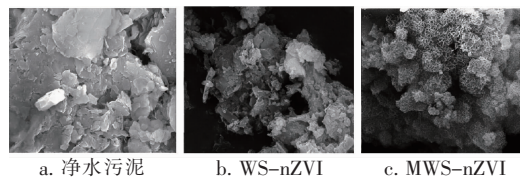


图1 3种吸附剂的SEM照片

Fig.1 SEM photographs of three adsorbents

将比表面积数据与SEM图片进行对比分析可

知,净水污泥、WS-nZVI 和 MWS-nZVI 的表面形貌呈现不一样的特征。净水污泥表面存在大量的片状菱形结构,表面光滑而厚重,片状结构层叠形成孔径较大的孔洞结构,孔数少、孔径大;WS-nZVI 是将纳米零价铁负载于净水污泥上而合成的新材料,净水污泥进行负载后,菱形片状结构上生成了密集的球形聚集体,推测球形聚集体为发生团聚现象的纳米零价铁,这些球体附着、填充在原泥表面和孔洞中,提高了比表面积、增加了孔数、缩小了孔径;MWS-nZVI 与 WS-nZVI 不同之处在于负载物不一样,纳米零价铁负载于热酸改性净水污泥上而合成的 MWS-nZVI,具有花状网状的形貌特征,这是由于热酸改性净水污泥具有更大的负载空间和点位,纳米零价铁更均匀地覆盖于改性净水污泥表面,凸成峰、凹成谷、聚成花。

## 2.2 FTIR 分析

在吸附试验中,吸附剂官能团的种类和数量直接影响吸附效果。为定性分析吸附剂所含的官能团,对净水污泥和 MWS-nZVI 进行了红外光谱分析,结果见图 2。净水污泥在  $3440\text{ cm}^{-1}$  和  $1640\text{ cm}^{-1}$  处有强的吸收峰,证明净水污泥中存在大量的羟基( $\text{—OH}$ )和水分子<sup>[5]</sup>;  $1028$ 、 $800$  和  $524\text{ cm}^{-1}$  处出现吸收峰是由于  $\text{Si—O}$ 、 $\text{Si—O—Si}$  和  $\text{Al—OH}$  振动引起的<sup>[6-7]</sup>。MWS-nZVI 的 FTIR 图谱中,净水污泥的各项特征峰均有所减弱;同时,在  $1056$  和  $470\text{ cm}^{-1}$  处出现了  $\gamma\text{—FeOOH}$  和  $\text{Fe—O}$  的特征峰,说明纳米零价铁已负载在净水污泥上<sup>[8]</sup>。

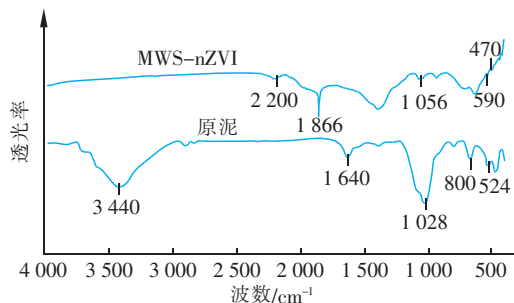


图2 净水污泥和 MWS-nZVI 的 FTIR 图谱

Fig.2 FTIR patterns of waterworks sludge and MWS-nZVI

## 2.3 XPS 分析

XPS 可以考察吸附剂材料表面的元素种类和价态组成,将吸附饱和后的 MWS-nZVI 进行 XPS 表征分析,结果如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出,

MWS-nZVI 表面的元素主要包括 Si、C、O 和 Fe 等。图 3(b)是 MWS-nZVI 中 Fe 的分谱图,  $711.3\text{ eV}$  和  $724.9\text{ eV}$  出现的两个强峰分别是  $\text{Fe(III)}\ 2p_{3/2}$  和  $2p_{1/2}$  的结合能<sup>[9]</sup>。  $719.9\text{ eV}$  出现的弱峰为  $\text{Fe}^0$  的  $2p_{1/2}$  结合能。因此可知,改性净水污泥表面已经负载上了纳米零价铁,且纳米零价铁部分已被氧化生成  $\text{Fe(III)}$  的各类氧化物。图 3(c)中出现  $\text{Cr(III)}$  说明 MWS-nZVI 在去除  $\text{Cr(VI)}$  的过程中,  $\text{Cr(VI)}$  在吸附剂表面被还原成了  $\text{Cr(III)}$ <sup>[10]</sup>。

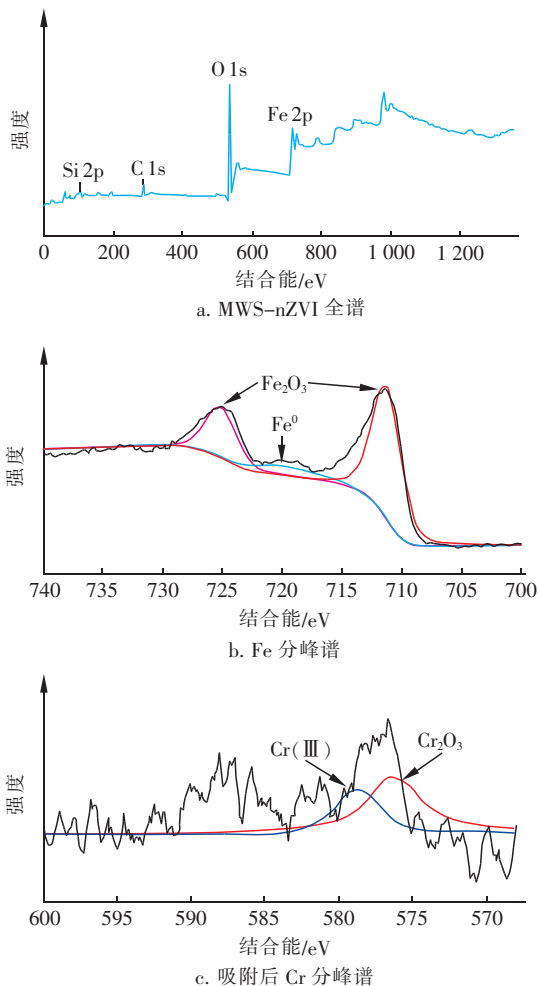


图3 MWS-nZVI 的 XPS 图谱

Fig.3 XPS patterns of MWS-nZVI

## 2.4 MWS-nZVI 对 $\text{Cr(VI)}$ 的去除效果及影响因素

### 2.4.1 不同吸附剂对 $\text{Cr(VI)}$ 的去除效果对比

$0.5\text{ g}$  的净水污泥、WS-nZVI 和 MWS-nZVI 在 pH 值为 2 时对  $20\text{ mg/L}$  的  $\text{Cr(VI)}$  的去除效果见图 4。可知,3 种吸附剂对  $\text{Cr(VI)}$  都有去除作用,连续振荡反应  $3.5\text{ h}$  后,对  $\text{Cr(VI)}$  的去除率由大到小依次为 MWS-nZVI、WS-nZVI、净水污泥,分别为

95%、87.5%和39%。设置0.5 h为时间间隔,连续取样测定剩余Cr(VI)浓度,发现MWS-nZVI反应体系中的剩余Cr(VI)浓度低于WS-nZVI体系,说明MWS-nZVI对Cr(VI)的去除速率更快。3种吸附剂在去除效果上具有差异是由于去除Cr(VI)的机理不同。净水污泥对Cr(VI)的去除仅表现为吸附作用,而负载纳米零价铁的净水污泥既保留了吸附性又增加了纳米零价铁的还原性,吸附和还原作用协同实现对Cr(VI)的去除。

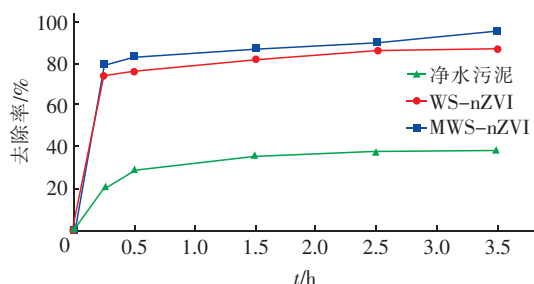


图4 不同吸附剂对Cr(VI)的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of Cr(VI) by different adsorbents

#### 2.4.2 初始pH值对Cr(VI)去除效果的影响

采用0.1 mol/L的HCl和NaOH调节pH值,在吸附剂投加量为0.3 g/L的条件下,考察初始pH值对Cr(VI)去除效果的影响,结果如图5所示。

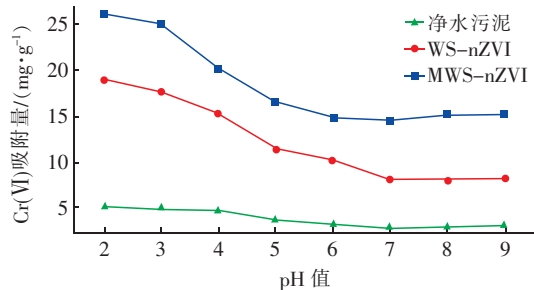


图5 初始pH值对Cr(VI)去除效果的影响

Fig. 5 Effect of initial pH value on removal efficiency of Cr(VI)

由图5可以看出,初始pH值对3种吸附剂去除Cr(VI)的影响规律大致相同。在初始pH值为1~7范围内,3种吸附剂的Cr(VI)吸附量随pH值的增加而降低;当初始pH值为2时,WS-nZVI、MWS-nZVI的Cr(VI)吸附量分别为18.9和26.0 mg/g。对比3条曲线可以发现,净水污泥受pH值的影响小于WS-nZVI和MWS-nZVI,推测pH值主要通过影响纳米零价铁活性从而实现对吸附效果的控制,低pH值时H<sup>+</sup>与铁发生反应,可以消除纳

米零价铁表面的氧化层,加速纳米零价铁与Cr(VI)的还原反应;高pH值时,纳米零价铁表面发生钝化,减小了还原反应的接触面积,进而影响Cr(VI)的去除效果<sup>[11]</sup>。

#### 2.4.3 初始浓度对Cr(VI)去除效果的影响

设置Cr(VI)的初始浓度梯度为10、20、30、40和50 mg/L,分别向250 mL锥形瓶投加0.3 g/L吸附剂和50 mL不同浓度的Cr(VI)模拟废液,连续振荡反应3.5 h后测定剩余Cr(VI)浓度,计算各吸附剂的Cr(VI)吸附量,结果如图6所示。可以看出,3种吸附剂的Cr(VI)吸附量均随Cr(VI)初始浓度的增大而增加;在Cr(VI)初始浓度相同的条件下,吸附量大小为MWS-nZVI > WS-nZVI > 净水污泥,当Cr(VI)初始浓度为50 mg/L时,吸附量分别为50.83、37.80和8.17 mg/g。

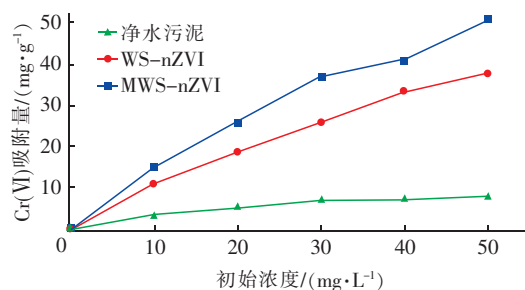


图6 Cr(VI)初始浓度对其去除效果的影响

Fig. 6 Effect of initial concentration on removal efficiency of Cr(VI)

#### 2.4.4 吸附剂投加量对Cr(VI)去除效果的影响

控制吸附剂的投加量分别为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6和0.7 g/L,在室温25℃、初始pH值为2、Cr(VI)初始浓度为20 mg/L的条件下连续反应3.5 h,对Cr(VI)的去除率如图7所示。可以看出,当MWS-nZVI投加量从0.1 g/L增至0.7 g/L时,Cr(VI)去除率从15.9%增长至52%。而WS-nZVI在同等试验条件下,当投加量为0.7 g/L时,对Cr(VI)的最高去除率为40.3%。在连续增加投加量的过程中,Cr(VI)去除率曲线呈现先陡后缓的增加趋势。由于MWS-nZVI具有比WS-nZVI更大的比表面积和更多的接触点位,所以当投加量增加时,两者对Cr(VI)的去除效果差异也逐步扩大。但随着吸附剂投加量的增加,溶液中的Cr(VI)浓度与吸附剂提供的吸附点位数量不匹配,降低了单位面积吸附点位的利用率,从而减缓了去除率增大的



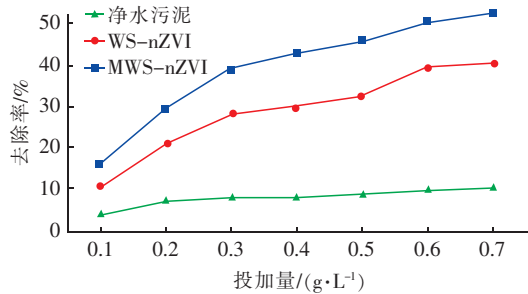
趋势<sup>[12]</sup>。

图7 吸附剂投加量对Cr(VI)去除效果的影响

Fig. 7 Effect of adsorbent dosage on removal efficiency of Cr(VI)

## 2.5 吸附等温线

采用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温方程分析 MWS-nZVI 对 Cr(VI) 的吸附机理。当温度为 298 K 时,设置初始 Cr(VI) 浓度为 20~400 mg/L,将得到的试验数据代入式(1)和式(2)中,得到相关方程参数如表 1 所示。通过吸附等温方程拟合相关系数  $R^2$  可知,Freundlich 方程更适合拟合 MWS-nZVI 去除 Cr(VI) 的过程。从 Freundlich 吸附等温方程的假设和适用条件可知,MWS-nZVI 对 Cr(VI) 的吸附为表面不均一或吸附点位吸附粒子后相互作用的吸附过程<sup>[13]</sup>。MWS-nZVI 对 Cr(VI) 的最大吸附量为 220.2 mg/g, $n$  值为 1.779,在 1~10 之间,说明 Cr(VI) 易于吸附<sup>[14]</sup>。

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (1)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2)$$

式中: $C_e$  为吸附平衡时溶液的剩余 Cr(VI) 浓度,mg/L; $q_e$  为平衡吸附量,mg/g; $K_F$  和  $b$  为方程参数; $n$  为与温度等有关的常数; $Q^0$  为单分子层饱和吸附量,mg/g。

表1 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温方程的拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of Langmuir and Freundlich adsorption isotherm equations

项目	Langmuir			Freundlich		
	$Q^0 / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$b$	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$
数值	220.2	0.008 1	0.94	6.172	1.779	0.998

## 2.6 MWS-nZVI 去除Cr(VI)的机理分析

pH 值会影响纳米零价铁的活性,当高 pH 值时纳米零价铁生成钝化膜阻碍还原反应,从而降低了

Cr(VI) 去除效果;而当低 pH 值时纳米零价铁的氧化膜会与  $\text{H}^+$  反应,增大了接触面积,所以提高了对 Cr(VI) 的去除效果<sup>[15]</sup>。采用 XPS 对吸附 Cr(VI) 后的 MWS-nZVI 进行表征,发现 Cr 元素以三价附着在吸附剂表面,证明 Cr(VI) 已被纳米零价铁还原为 Cr(III)<sup>[16]</sup>。Freundlich 吸附等温拟合结果说明,MWS-nZVI 对 Cr(VI) 的去除过程是表面不均一或吸附点位吸附粒子后相互作用的吸附过程。综上,MWS-nZVI 对 Cr(VI) 的去除机理为先吸附于净水污泥表面、而后发生还原反应生成 Cr(III)。

## 3 结论

① 与 WS-nZVI 相比,MWS-nZVI 表面负载的纳米零价铁更均匀,且比表面积更大,具有更强的吸附能力。

② MWS-nZVI 比 WS-nZVI 对 Cr(VI) 的去除效果要好。当初始 pH 值为 2、吸附剂投加量为 0.3 g/L 时,MWS-nZVI 和 WS-nZVI 对 Cr(VI) 的最大吸附量分别为 50.83、37.80 mg/g。与 Langmuir 吸附等温方程相比,Freundlich 吸附等温方程更适合拟合 MWS-nZVI 去除 Cr(VI) 的过程。

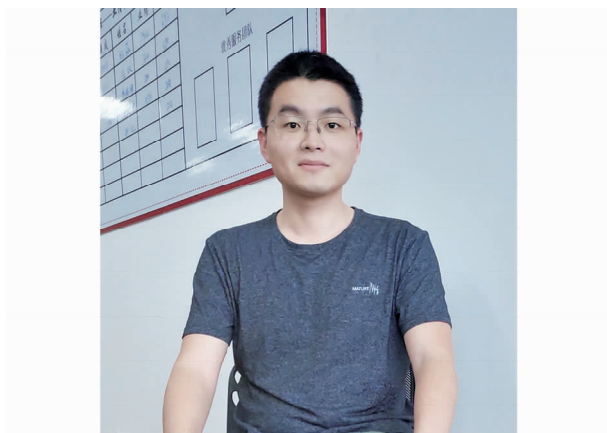
③ MWS-nZVI 对水中 Cr(VI) 的去除机理推测为先吸附后还原,即 Cr(VI) 先被改性净水污泥吸附至表面,然后与纳米零价铁发生还原反应生成 Cr(III),从而实现 Cr(VI) 的去除。

④ 改性净水污泥对纳米零价铁有较好的负载效果,因此改性净水污泥可作为纳米零价铁的新载体,为净水污泥的资源化利用开拓了思路。

## 参考文献:

- [1] Ezzatahmedi N, Ayoko G, Millar G J, et al. Clay-supported nanoscale zero-valent iron composite materials for the remediation of contaminated aqueous solutions: A review[J]. Chem Eng J, 2017, 312: 336-350.
- [2] 曹秀芹,杨春苗,刘文昊,等. 碳纳米管负载纳米零价铁去除水中多氯联苯[J]. 中国给水排水, 2019, 35(3): 87-92.  
Cao Xiuqin, Yang Chunmiao, Liu Wenhao, et al. Removal of polychlorinated biphenyls from water by nanoscale zerovalent iron supported on carbon nanotube [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(3): 87-92 (in Chinese).
- [3] 江宇,朱加豆,李荣,等. 净水污泥负载零价纳米铁去除水中 Cr(VI) [J]. 环境工程, 2018, 36(9): 16-20.

- Jiang Yu, Zhu Jiadou, Li Rong, *et al.* Waterworks sludge-supported nanoscale zero-valent iron for Cr(VI) removal from aqueous solution [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(9): 16–20 (in Chinese).
- [4] 张玉妹, 杨兰, 刘宗元, 等. 净水污泥对水中氨氮的吸附效能研究 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 192–196.
- Zhang Yumei, Yang Lan, Liu Zongyuan, *et al.* Study on the adsorption efficiency of ammonia nitrogen in water by water treatment residual sludge [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 192–196 (in Chinese).
- [5] 张玉妹, 韩乙萱, 魏杰, 等. 碱改性净水污泥对水中氨氮的吸附效能研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(10): 2484–2490.
- Zhang Yumei, Han Yixuan, Wei Jie, *et al.* Adsorption efficiency of alkali-modified water treatment sludge for ammonia nitrogen in water [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(10): 2484–2490 (in Chinese).
- [6] 王帅, 王楠, 李翠兰, 等. 赤铁矿和三羟铝石吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的红外光谱研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(9): 2403–2406.
- Wang Shuai, Wang Nan, Li Cuilan, *et al.* FTIR spectroscopic analysis of  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption on hematite and bayerite [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(9): 2403–2406 (in Chinese).
- [7] 苏小丽, 夏光华, 廖润华. 有机海泡石的制备及其结构性能的研究 [J]. 陶瓷学报, 2010, 31(2): 310–314.
- Su Xiaoli, Xia Guanghua, Liao Runhua. Study on preparation and properties of organic sepiolite [J]. Journal of Ceramics, 2010, 31(2): 310–314 (in Chinese).
- [8] 孟哲, 贾振斌, 魏雨.  $\delta$ -FeOOH 的制备及热处理产物的 FTIR 光谱 [J]. 过程工程学报, 2004, 4(2): 146–149.
- Meng Zhe, Jia Zhenbin, Wei Yu. Preparation and FTIR spectra of amorphous  $\delta$ -FeOOH [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2004, 4(2): 146–149 (in Chinese).
- [9] Yan W, Zhang W, Li S. Solvent-free production of nanoscale zero-valent iron (nZVI) with precision milling [J]. Green Chemistry, 2009, 11(10): 1618–1626.
- [10] Lyu H, Tang J, Huang Y, *et al.* Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions by a novel biochar supported nanoscale iron sulfide composite [J]. Chem Eng J, 2017, 322: 516–524.
- [11] Dong H, Deng J, Xie Y, *et al.* Stabilization of nanoscale zero-valent iron (nZVI) with modified biochar for Cr(VI) removal from aqueous solution [J]. J Hazard Mater, 2017, 332: 79–86.
- [12] Wu L M, Liao L B, Lv G C, *et al.* Micro-electrolysis of Cr(VI) in the nanoscale zero-valent iron loaded activated carbon [J]. J Hazard Mater, 2013, 254/255: 277–283.
- [13] Mortazavian S, An H, Chun D, *et al.* Activated carbon impregnated by zero-valent iron nanoparticles (AC/nZVI) optimized for simultaneous adsorption and reduction of aqueous hexavalent chromium: Material characterizations and kinetic studies [J]. Chem Eng J, 2018, 353: 781–795.
- [14] Zhu S, Huang X, Wang D, *et al.* Enhanced hexavalent chromium removal performance and stabilization by magnetic iron nanoparticles assisted biochar in aqueous solution: Mechanisms and application potential [J]. Chemosphere, 2018, 207: 50–59.
- [15] Qian L, Shang X, Zhang B, *et al.* Enhanced removal of Cr(VI) by silicon rich biochar-supported nanoscale zero-valent iron [J]. Chemosphere, 2019, 215: 739–745.
- [16] Choppala G, Bolan N, Kunhikrishnan A, *et al.* Concomitant reduction and immobilization of chromium in relation to its bioavailability in soils [J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22(12): 8969–8978.



作者简介: 江宇 (1994–), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与回用技术。

E-mail: jy\_4869@qq.com

收稿日期: 2019–06–05