

## 超声波辅助法制备纳米 FeS 处理酸性含铬废水工艺研究

郭旭颖<sup>1</sup>, 姜国亮<sup>2</sup>, 狄军贞<sup>2</sup>, 吕雅欣<sup>2</sup>, 赵文琦<sup>2</sup>, 仝重凯<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 理学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:** 针对排放酸性含铬废水所产生的环境污染问题, 采用超声波辅助法制备纳米 FeS, 用于处理酸性含铬废水。通过正交试验确定了超声波辅助法制备纳米 FeS 的最佳制备条件, 并讨论了反应时间、pH 值和 Cr(VI) 初始浓度对纳米 FeS 处理酸性含铬废水的影响。结果表明: 超声波辅助法制备纳米 FeS 的最佳制备条件为超声波频率 40 kHz、超声波处理时间 10 min、制备反应温度 15 ℃, 在此条件下 Cr(VI) 和总铬的去除率分别为 81.03%、63.40%; 当反应时间达到 50 min 后, 纳米 FeS 对酸性含铬废水的处理效果趋于稳定, 酸性条件能促进纳米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的去除; 随着 Cr(VI) 初始浓度的升高, 纳米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的单位去除量逐渐增大, 当 Cr(VI) 初始浓度为 300 mg/L 时, Cr(VI) 和总铬的单位去除量分别可达 486.65 和 383.55 mg/g。可见, 超声波制备的纳米 FeS 可以有效去除废水中的铬离子, 为今后实际工程应用提供了一定的理论指导。

**关键词:** 超声波辅助法; 纳米 FeS; 酸性含铬废水; 工艺; 正交试验

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)06-0031-05

### Study on the preparation of nano-FeS by ultrasonic assisted method for the treatment of acidic chromium-containing wastewater

GUO Xuying<sup>1</sup>, JIANG Guoliang<sup>2</sup>, DI Junzhen<sup>2</sup>, LÜ Yaxin<sup>2</sup>, ZHAO Wenqi<sup>2</sup>, TONG Chongkai<sup>2</sup>

(1. School of Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In view of the environmental pollution caused by the discharge of acidic chromium-containing wastewater, nano-FeS was prepared by ultrasonic assisted method for the treatment of this kind of wastewater. The optimum preparation conditions of nano-FeS were determined by orthogonal test, and the effect of reaction time, pH and initial concentration of Cr(VI) on the treatment of acidic chromium-containing wastewater by nano-FeS was discussed. The results show that the optimum preparation conditions for the preparation of nano-FeS by ultrasonic assisted method are as follows: ultrasonic frequency 40 kHz, ultrasonic treatment time 10 min, preparation reaction temperature 15 ℃. Under these conditions, the removal rate of Cr(VI) and total chromium is 81.03% and 63.40%, respectively. When the reaction time reaches 50 min, the treatment effect of nano-FeS on acidic chromium-containing wastewater tends to stabilize. Acidic conditions can facilitate the removal of Cr(VI) and total chromium by nano-FeS, as the initial concentration of Cr(VI) increases, the unit removal rate of Cr(VI) and total chromium by nano-FeS gradually increases. When the initial concentration of Cr(VI) is 300 mg/L, the unit removal rate of Cr(VI) and total chromium can reach 486.65 mg/g and 383.55 mg/g. It is found that the nano-FeS prepared by ultrasonic can effectively remove chromium ions from wastewater, which provides some theoretical guidance for practical engineering applications in the future.

**Key words:** ultrasonic assisted method; nano-FeS; acidic chromium-containing wastewater; preparation

收稿日期: 2020-03-08; 修回日期: 2020-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672247、51304114); 辽宁省“兴辽英才”青年拔尖人才计划项目(XLYC1807159); 省级大学生创新训练项目(201810147208)

作者简介: 郭旭颖(1977-), 女, 辽宁阜新人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 从事水污染控制理论与技术研究工作。

method; orthogonal test

## 1 研究背景

煤矿在开采过程中会产生大量的酸性矿山废水,这些废水具有 pH 低、重金属离子浓度高等特点,而未经处理的矿山废水随意排放会对周围的环境造成巨大危害<sup>[1-2]</sup>。铬离子作为矿山废水中重金属离子的一种,其主要危害是通过对周围环境的污染和食物链的逐级积累<sup>[3]</sup>,最终积累在人体中,过多的铬离子会对人的皮肤及器官造成损伤以及引发致癌风险<sup>[4]</sup>。因此,铬元素也被美国环保署列为最具毒性的 A 类致癌物质之一<sup>[5]</sup>。重金属铬的毒性与其价态有关<sup>[6]</sup>,据大量研究报告显示 Cr(VI)在其所有价态中的毒性最强,比 Cr(III)的毒性要高出 100 多倍<sup>[7]</sup>。目前,应用于含铬废水处理的方法主要有化学还原法<sup>[8]</sup>、离子交换法<sup>[9]</sup>、电解法<sup>[10]</sup>、活性炭吸附法<sup>[11-12]</sup>以及膜渗析<sup>[13]</sup>等技术。

近几年随着纳米技术的发展,纳米材料在处理含铬废水领域中有更广阔的应用前景<sup>[14]</sup>。其中,纳米 FeS 由于具有良好的还原性被广泛关注。狄军贞等<sup>[15]</sup>报道,超声波可以致使大分子物质转化为小分子物质,与传统的共沉淀法制备的纳米 FeS 相比,超声波辅助法制备的纳米 FeS 粒径更为细小、均匀,且可抑制纳米 FeS 的团聚现象,可以显著降低矿山废水中铬离子的浓度。因此,本研究基于正交试验确定了超声波辅助法制备纳米 FeS 的最佳制备条件,并讨论了反应时间、pH 值、Cr(VI)初始浓度对纳米 FeS 处理酸性含铬废水的影响。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料和仪器

药品:七水合硫酸亚铁、九水合硫化钠、铬酸钾、硫酸、磷酸、二苯碳酰二肼、丙酮、高锰酸钾、尿素以及亚硝酸钠均为分析纯。

模拟酸性含铬废水:将 0.373 5 g 的  $K_2CrO_4$  溶于 1 L 去离子水中,使 Cr(VI)初始浓度为 100 mg/L,调节废水 pH 为 4。

仪器:F01-STP 蠕动泵,BS-224-S 电子天平,V-1600PC 可见光光度计,PHS-3C 精密 pH 计,YW0410 超声清洗机,DZF-6050AB 真空干燥箱,80-2 低速离心机。

### 2.2 检测方法

根据《水质 六价铬的测定 二苯碳酰二肼分光

光度法》(GB 7467-87)<sup>[16]</sup>,水中 Cr(VI)浓度采用二苯碳酰二肼分光光度法测定;总铬浓度采用高锰酸钾氧化-二苯碳酰二肼分光光度法测定。

### 2.3 纳米 FeS 的制备

称取 3.607 2 g 的  $Na_2S \cdot 9H_2O$  和 4.170 3 g 的  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ,分别溶于 100 mL 去离子水中。通过蠕动泵以 0.44 mL/s 的流速将  $FeSO_4$  溶液滴加到  $Na_2S$  溶液中,采用机械搅拌器以 350 r/min 的转速进行搅拌,并用超声波清洗机进行超声波处理。待超声波处理结束后,将纳米 FeS 的悬浊液以 4 000 r/min 离心 10 min,并用去离子水清洗 3 次。取部分纳米 FeS 样品在 60 °C 条件下真空干燥 12 h,计算含水率,其余样品放入 4 °C 冰箱冷藏,密封保存备用。

### 2.4 正交试验设计

根据前期单因素实验结果,确定了超声波频率、超声波处理时间以及反应温度是超声波辅助法制备纳米 FeS 的主要影响因素。基于此,通过  $L_9(3^3)$  正交实验制备纳米 FeS。其中, $L_9(3^3)$  正交实验的因素水平设置见表 1。将制备的纳米 FeS 添加到 250 mL 的酸性含铬废水中,用磁力搅拌器在 700 r/min 的转速下搅拌 50 min 后,分别检测水样中的 Cr(VI)和总铬浓度。为保证实验的准确性,实验设置两组平行实验,取平均值。以 Cr(VI)和总铬的去除率为评价指标,确定  $L_9(3^3)$  正交实验中纳米 FeS 的最佳制备条件。

表 1 制备纳米 FeS 的  $L_9(3^3)$  正交试验因素水平

| 水平 | A:超声波<br>频率/kHz | B:超声波处理<br>时间/min | C:反应<br>温度/°C |
|----|-----------------|-------------------|---------------|
| 1  | 28              | 5                 | 10            |
| 2  | 40              | 10                | 15            |
| 3  | 28/40           | 15                | 20            |

### 2.5 反应时间、pH 和 Cr(VI)初始浓度对纳米 FeS 处理酸性含铬废水的影响

基于  $L_9(3^3)$  正交实验确定的超声波辅助法制备纳米 FeS 的最佳条件,制备纳米 FeS。探究反应时间、pH 和 Cr(VI)初始浓度对纳米 FeS 处理酸性含铬废水的影响。

(1)反应时间的影响:将 1.2 g 纳米 FeS 投加到 pH=4、Cr(VI)浓度为 100 mg/L 的 250 mL 酸性含铬废水中,用磁力搅拌器以 700 r/min 的转速进行搅拌。当反应时间为 2、5、10、20、30、40、50、60 min

时,分别检测水样中 Cr(Ⅵ)和总铬的浓度,并设置两组平行实验。

(2)pH 的影响:将 1.2 g 纳米 FeS 分别投加到初始 pH 分别为 3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0 的 250 mL、Cr(Ⅵ)浓度为 100 mg/L 的含铬废水中。用磁力搅拌器在 700 r/min 的转速下搅拌 50 min 后,分别检测水样中 Cr(Ⅵ)和总铬的浓度,并设置两组平行实验。

(3)Cr(Ⅵ)初始浓度的影响:将 1.2 g 纳米 FeS 分别投加到 pH = 4、Cr(Ⅵ)浓度分别为 50、100、150、200、250、300 mg/L 的 250 mL 酸性含铬废水中。用磁力搅拌器在 700 r/min 的转速下搅拌 50 min 后,分别检测水样中 Cr(Ⅵ)和总铬的浓度,并设置两组平行实验。

3 结果与分析

3.1 正交实验结果与分析

以超声波频率(A)、处理时间(B)和反应温度

(C)为因素的  $L_9(3^3)$  正交实验组次及实验结果如表 2 所示,不同因素影响下 Cr(Ⅵ)和总铬去除率比较如表 3 所示。

表 2  $L_9(3^3)$  正交实验组次及 Cr(Ⅵ)和总铬去除率实验结果

| 组次 | A:频率/<br>kHz | B:处理<br>时间/min | C:温度/<br>℃ | Cr(Ⅵ)去<br>除率/% | 总铬去<br>除率/% |
|----|--------------|----------------|------------|----------------|-------------|
| 1  | 28           | 5              | 10         | 74.25          | 65.12       |
| 2  | 28           | 10             | 15         | 76.40          | 66.30       |
| 3  | 28           | 15             | 20         | 69.20          | 57.20       |
| 4  | 40           | 5              | 15         | 79.65          | 65.10       |
| 5  | 40           | 10             | 20         | 80.90          | 68.20       |
| 6  | 40           | 15             | 10         | 74.10          | 62.30       |
| 7  | 28/40        | 5              | 20         | 73.80          | 59.20       |
| 8  | 28/40        | 10             | 10         | 78.00          | 66.10       |
| 9  | 28/40        | 15             | 15         | 71.80          | 58.50       |

注:表中组次 7~9 的实验频率为 28/40 kHz,表示实验频率为 28 kHz 与 40 kHz 之间交替进行,每次交替间隔时间为 4 s。

表 3 不同因素影响下 Cr(Ⅵ)和总铬去除率比较

| 类别    | Cr(Ⅵ)去除率/% |        |        | 总铬去除率/% |        |        |
|-------|------------|--------|--------|---------|--------|--------|
|       | A:超声频率     | B:处理时间 | C:温度   | A:超声频率  | B:处理时间 | C:温度   |
| 均值 1  | 73.283     | 75.900 | 75.450 | 62.873  | 63.140 | 64.507 |
| 均值 2  | 78.217     | 78.430 | 75.950 | 65.200  | 66.867 | 63.300 |
| 均值 3  | 74.533     | 71.700 | 74.633 | 61.267  | 59.333 | 61.533 |
| 极差(R) | 4.934      | 6.730  | 1.317  | 3.933   | 7.534  | 2.974  |

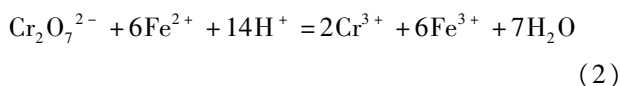
注:表中均值 1、2、3 分别指表 2 中的相同超声频率、处理时间和温度条件下的平均去除率。

极差 R 为表示数据离散程度的一个统计量<sup>[17]</sup>,通过比较表 3 中的极差,可以分析出处理时间、超声频率和温度对超声波辅助法制备纳米 FeS 去除 Cr(Ⅵ)和总铬的影响顺序为处理时间>超声频率>温度。对超声波辅助法制备纳米 FeS 去除 Cr(Ⅵ)和总铬影响最大的因素是处理时间。这是因为随着超声波处理时间的增加,超声波的超空化作用使得液体高频振荡<sup>[18]</sup>,在此条件下制备的纳米 FeS 晶体更均匀且分散性更强,有效减少了纳米 FeS 的团聚现象<sup>[19]</sup>。均值为各因素水平对指标的平均影响<sup>[20]</sup>,通过表 3 中均值的大小可以分析出去除 Cr(Ⅵ)的最佳组合为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>,去除总铬的最佳组合为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>。考虑到 Cr(Ⅵ)的毒性在其所有价态中最强,比 Cr(Ⅲ)的毒性要高出 100 多倍<sup>[7]</sup>。因此选择 Cr(Ⅵ)为优先控制指标,最终确定 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub> 为超声波辅助法制备纳米 FeS 的最优制备条件,即超声频

率 40 kHz,超声时间为 10 min,温度为 15 ℃。

3.2 反应时间对去除效果的影响

通过实验得出的 Cr(Ⅵ)和总铬去除率随反应时间的变化曲线见图 1。由图 1 可知,随着反应时间的增加,纳米 FeS 对 Cr(Ⅵ)和总铬的去除率呈递增趋势。当反应时间为 0~2 min 时,纳米 FeS 对 Cr(Ⅵ)和总铬的去除率迅速上升;当反应时间达到 50 min 以后,去除率趋于稳定,此时纳米 FeS 对 Cr(Ⅵ)和总铬的去除率分别为 81.03% 和 63.40%。这是由于 FeS 的 pK<sub>sp</sub> 一般在 3.50~4.87 之间,溶度积相对较小<sup>[21]</sup>,在酸性条件下极易溶解,在反应初期酸性含铬废水 pH 为 4,溶液中存在大量的 H<sup>+</sup>,促使 FeS 发生电离,产生具有强还原性的 Fe<sup>2+</sup> 和 S<sup>2-</sup><sup>[22]</sup>,Fe<sup>2+</sup> 与 Cr(Ⅵ)发生氧化还原反应并生成 Cr(Ⅲ),因此反应初期 Cr(Ⅵ)和总铬的去除率迅速上升。在酸性条件下溶液中的反应如下:



随着反应时间的增加,废水中的  $\text{H}^+$  不断被消耗,废水 pH 逐渐上升至碱性,而  $\text{OH}^-$  的存在会阻碍纳米 FeS 在溶液中的电离,反应速率逐渐减缓,所以反应 50 min 后 Cr(VI) 和总铬的去除率趋于稳定。肖文燕<sup>[23]</sup>采用 Fe/FeS 晶体处理含铬废水实验所得出的反应平衡时间为 4 h,远高于本实验采用超声波辅助法制备的纳米 FeS 处理含铬废水达到反应平衡所需时间。

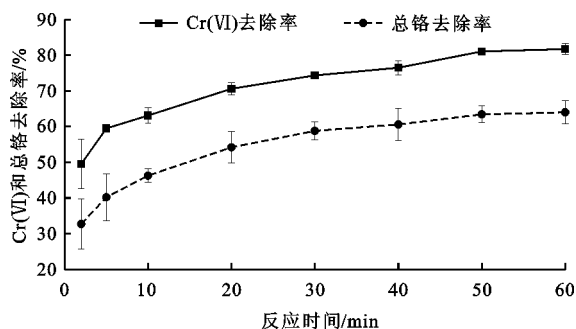


图1 Cr(VI)和总铬去除率随反应时间的变化曲线

### 3.3 pH 对去除效果的影响

通过实验得出的 Cr(VI) 和总铬去除率随初始 pH 的变化曲线见图 2。由图 2 可知, pH 对纳米 FeS 处理酸性含铬废水的影响较大。随着 pH 的逐渐增大,纳米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的去除率均呈下降趋势。当 pH 为 8 时, Cr(VI) 和总铬的去除率到达最低值,分别为 55.43%、36.63%。这是由于在酸性条件下,会促进 FeS 的电离,有利于对 Cr(VI) 和总铬的去除。而在碱性环境下,纳米 FeS 绝大部分以固体形态存在,只有少量的 FeS 发生溶解<sup>[21]</sup>。同时,  $\text{OH}^-$  的大量存在抑制了 Cr(VI) 与  $\text{Fe}^{2+}$  的氧化还原,溶液中  $\text{Fe}^{2+}$  以  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  形式存在<sup>[24]</sup>,使得 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的去除率大幅度下降。

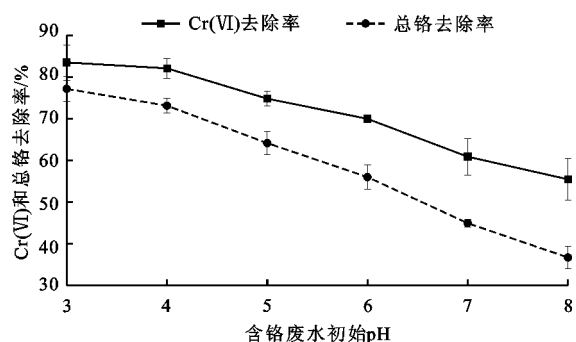


图2 Cr(VI)和总铬去除率随初始 pH 的变化曲线

而从电化学角度进行分析可以看出在酸性条件下标准电势如下:

$$\Phi^\theta (\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{Cr}^{3+}) - \Phi^\theta (\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}) = 0.56\text{V}$$

$$\Phi^\theta (\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{Cr}^{3+}) - \Phi^\theta (\text{S}/\text{H}_2\text{S}) = 1.19\text{V}$$

在碱性条件下标准电势如下:

$$\Phi^\theta (\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}/\text{CrO}^-) - \Phi^\theta [\text{Fe}(\text{OH})_3/\text{Fe}(\text{OH})_2] = 0.44\text{V}$$

$$\Phi^\theta (\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}/\text{CrO}^-) - \Phi^\theta (\text{S}/\text{S}^{2-}) = 0.36\text{V}$$

从上面反应式可以看出,酸性条件中的标准电势均大于碱性条件中的标准电势,说明在酸性条件下更有利于纳米 FeS 对 Cr(VI) 的去除<sup>[25]</sup>,因此在 pH 为 3 时去除效果最好。

### 3.4 Cr(VI) 初始浓度对去除效果的影响

通过实验得出的 Cr(VI) 和总铬单位去除量随 Cr(VI) 初始浓度的变化曲线见图 3。由图 3 可知, Cr(VI) 初始浓度对纳米 FeS 去除 Cr(VI) 和总铬有很大影响。纳米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的单位去除量随着 Cr(VI) 初始浓度增加而增大。在 Cr(VI) 的初始浓度为 300 mg/L 时, Cr(VI) 和总铬的单位去除量最大,分别为 486.65、383.55 mg/g。这是由于纳米 FeS 具有高比表面积、高吸附性能以及高反应活性<sup>[26]</sup>,当纳米 FeS 投加量一定时,随着 Cr(VI) 初始浓度的增加,单位体积内活化分子数增加, Cr(VI) 和纳米 FeS 的碰撞概率增大,纳米 FeS 与 Cr(VI) 的反应加快,生成 Cr(III) 的反应速率也大大加快,当 Cr(III) 浓度达到  $\text{Cr}_2\text{S}_3$  的溶度积常数时<sup>[27]</sup>, Cr(III) 又源源不断被 FeS 吸附或者通过与  $\text{S}^{2-}$  相结合生成  $\text{Cr}_2\text{S}_3$  沉淀,所以导致纳米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的单位去除量不断提高。

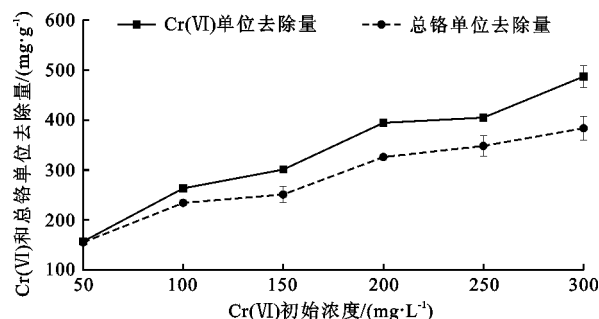


图3 Cr(VI)和总铬单位去除量随 Cr(VI) 初始浓度的变化曲线

## 4 结 论

(1) 通过正交试验得出纳米 FeS 的最佳制备条件为:超声波频率为 40 kHz、超声波处理时间为 10 min、制备反应温度为 15 °C。在此条件下制备的纳

米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的去除率分别可以达到 81.03% 和 63.40%。

(2) 当反应时间达到 50 min 后, 纳米 FeS 对酸性含铬废水的处理达到平衡阶段。酸性条件能促进纳米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的去除, 当废水 pH 为 3 时, 纳米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的去除率分别为 83.50%、77.17%。随着 Cr(VI) 初始浓度的升高, 纳米 FeS 对 Cr(VI) 和总铬的单位去除量逐渐增大。在 Cr(VI) 初始浓度为 300 mg/L 时, Cr(VI) 和总铬的单位去除量可达 486.65 和 383.55 mg/g。

#### 参考文献:

- [1] 狄军贞, 江富, 朱志涛, 等. Fe~0 协同生物麦饭石的 PRB 系统井下原位处理煤矿酸性废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5111-5116.
- [2] 马尧, 胡宝群, 孙占学. 矿山酸性废水治理的研究综述[J]. 矿业工程, 2006, 4(3): 55-57.
- [3] 蒋丽, 谌建宇, 李小明, 等. 粉煤灰陶粒对废水中磷酸盐的吸附试验研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1413-1420.
- [4] 张双杰, 邢宝林, 黄光许, 等. 核桃壳水热炭对六价铬的吸附特性[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 950-956.
- [5] 周栋, 高娜, 高乐. 工业含铬废水处理技术研究进展[J]. 中国冶金, 2017, 27(1): 2-6.
- [6] KOÇBERBER N, DÖNMEZ G. Chromium(VI) bioaccumulation capacities of adapted mixed cultures isolated from industrial saline wastewater[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(11): 2178-2183.
- [7] 余思伍, 牧灏, 李军卫, 等. 白云石分离环境样品中的六价铬与三价铬[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 1885-1892.
- [8] 赵玉华, 魏志宇, 王成雨, 等. 化学还原法处理 Cr(VI) 废水沉淀及过滤效能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(4): 737-740.
- [9] 张云. 新型整合吸附剂的制备及其对重金属微污染废水的净化处理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [10] 郭雪娥, 罗建中, 何潇, 等. 电解/超声强化铁炭法处理饮用水源中的 Cr(VI)[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2150-2156.
- [11] 闵敏. 超声波对硝酸改性活性炭吸附 Cr(VI) 的影响[J]. 化学与生物工程, 2012, 29(1): 81-84.
- [12] 姚书恒, 姜小祥, 沈德魁, 等. 稻壳活性炭对 Cr(VI) 离子吸附过程的机理[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 515-520.
- [13] 黄婕, 李超, 杨俊和. 纳滤膜处理含铬废水溶液的研究[J]. 化学工程, 2013, 41(5): 64-68.
- [14] 王留锁. 纳米材料处理工业废水的研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2019, 39(9): 14-17.
- [15] 狄军贞, 郭俊杰, 董艳荣, 等. 超声波强化生物麦饭石固定化颗粒处理 AMD 试验[J]. 非金属矿, 2019, 42(4): 90-92.
- [16] 国家环境保护局. 水质六价铬的测定 二苯碳酰二肼分光光度法: GB 7467-87[S]. 北京: 标准出版社, 1987.
- [17] 刘亚琴, 谢菁, 刘宁宇, 等. 基于沸石循环的倒置 A/O 工艺对市政污水脱氮效果试验研究[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(6): 42-47.
- [18] 徐锁平, 朱广军. 超声波-均匀沉淀法制备纳米氧化铁[J]. 涂料工业, 2005, 35(2): 31-33+63.
- [19] LUO P, NIEH T G, SCHWARTZ A J, et al. Surface characterization of nanostructured metal and ceramic particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 1995, 204(1-2): 59-64.
- [20] LIU Yuanyuan, XIAO Wenyan, WANG Jiajia, et al. Optimized synthesis of FeS nanoparticles with a high Cr(VI) removal capability[J]. Journal of Nanomaterials, 2016(4): 1-9.
- [21] 李冬丽, 张国平, 马超, 等. 化学合成硫化亚铁(FeS)对三价铈的吸附作用研究[J]. 地球与环境, 2019, 47(5): 738-744.
- [22] SKYLLBERG U, DROTT A. Competition between disordered iron sulfide and natural organic matter associated thiols for mercury(II) - An EXAFS study[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(4): 1254-1259.
- [23] 肖文燕. FeS 和 Fe/FeS 颗粒的制备、表征及用于水中 Cr(VI) 去除的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [24] 谢翼飞, 李旭东, 李福德. 生物硫铁纳米材料特性分析及其处理高浓度含铬废水研究[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1060-1065.
- [25] 赵玉华, 王成雨, 李洋洋, 等. 硫化亚铁处理含 Cr(VI) 废水试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(6): 1043-1045+1050.
- [26] 陆红佳, 文红丽, 刘雄. 超声波辅助酸法制备纳米薯渣纤维素的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(4): 96-100.
- [27] 石俊仙, 鲁安怀, 陈洁. 天然黄铁矿除 Cr(VI) 中 Cr<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 物相的发现[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(6): 539-542.