

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4033

# Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶条带去除水体中重金属离子 Zn( ) 的效果及机理研究

田小军<sup>1</sup>,李世霞<sup>2</sup>,赵雅<sup>2</sup>,张香云<sup>3</sup>

(1. 酒钢集团西部重工股份有限公司,甘肃嘉峪关 735100 2. 甘肃钢铁职业技术学院,甘肃嘉峪关 735100 3. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室,甘肃兰州 730000)

**摘要:**采用厚度为 10 μm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶条带和 2.7 μm 零价铁粉作为去除水体中重金属离子 Zn(II) 的反应材料,对比研究去除水体中重金属离子的去除效果。结果表明,800 min 之后 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶条带的去除率达到 27.44%,溶液浓度升高,去除率上升到 36.25%,溶液温度由 298 K 升高到 318 K,去除率达到 59.88%,去除机理主要是吸附和共沉淀。

**关键词:**非晶;重金属离子 Zn(II);去除效果;吸附;共沉淀

中图分类号: TG139.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)11-1092-05

## Study of the Effects and Mechanisms of Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> Amorphous Ribbons in the Removal of Heavy Metal Ion Zn( ) Aqueous Solutions

TIAN Xiaojun<sup>1</sup>, LI Shixia<sup>2</sup>, ZHAO Ya<sup>2</sup>, ZHANG Xiangyun<sup>3</sup>

(1. Gansu Iron and Steel Vocational and Technical College, Jiayuguan 735100, China; 2. Gansu Iron and Steel Vocational and Technical College, Jiayuguan 735100, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> amorphous ribbons with thicknesses of 10 μm and 2.7 μm zero-valent iron powder were used as reaction materials to remove the heavy metal ion Zn(II) from water. The removal effects of heavy metal ions in water were compared and studied. The experimental results show that the removal rate of the Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> amorphous ribbon reaches 27.44% after 800 min. When the solution concentration increases, this rate increases to 36.25%. As the solution temperature increases from 298 to 318 K, the removal rate further increases to 59.88%. The removal mechanism is mainly adsorption and coprecipitation.

**Key words:** amorphous; heavy metal ion Zn(II); removal effect; adsorption; coprecipitation

工业废水中的锌对鱼类及水生生物的毒性远高于人类,其在土壤中富集会致土壤失活,抑制农作物生长<sup>[1-3]</sup>。鉴于锌污染的严重性,我国规定饮用水中的锌含量不得超过 1.0 mg/L<sup>[4]</sup>。因此,有效去除工业废水中的锌,兼具净化水体与回收有价金属的双重意义。目前,重金属废水的处理技术主要包括化学沉淀<sup>[5]</sup>、吸附、离子交换和膜分离等<sup>[6]</sup>。具体而言,研究者们已开发了多种方法,如使用合成重金属捕捉剂<sup>[7]</sup>、生物质吸附剂<sup>[8]</sup>及二维纳米材料<sup>[9]</sup>等。特

别值得注意的是,李金琪<sup>[10]</sup>、杜金英等<sup>[11]</sup>发现 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金能有效去除 Cu( ) 和 Ni( ),其机理主要涉及离子交换与吸附<sup>[12-13]</sup>。然而,Zn( ) 的标准电极电位( $E^0(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn})=-0.763\text{ V}$ )低于 Fe( ) ( $E^0(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe})=-0.44\text{ V}$ )<sup>[14]</sup>,从热力学角度看,单质铁难以通过还原反应直接去除 Zn( )。为了探究 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金在处理 Zn( ) 时所具备的优越性及其主导去除机理,本研究系统评估了 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B 非晶合金对 Zn( ) 的净化性能与作用机制。

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 甘肃省科技计划项目(20JR5RB605); 甘肃省教研教改项目(2023gszjy-095)

作者简介: 田小军,1979 年生,工程师。主要从事铸造工艺研究。Email: tianxiaojun@jiugang.com

通信作者: 李世霞,1979 年生。主要从事非晶及金属材料焊接工艺研究。Email: 156405323@qq.com

引用格式: 田小军,李世霞,赵雅,张香云. Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶条带去除水体中重金属离子 Zn(II) 的效果及机理研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(11): 1092-1096.TIAN X J, LI S X, ZHAO Y, ZHANG X Y. Study of the Effects and Mechanisms of Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> Amorphous Ribbons in the Removal of Heavy Metal Ion Zn( ) Aqueous Solutions[J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1092-1096.

Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶合金含有近80%的Fe,并且非晶态合金处于亚稳定状态<sup>[15]</sup>,反应所需要的活性能更低<sup>[16]</sup>。本文采用Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶条带作为反应材料与传统的零价铁粉相比,发现非晶合金具有长程无序的原子结构、大量的活性位点以及更强的反应活性,这为开发高效、稳定的水处理材料提供了新的思路。

## 1 实验材料及方法

实验所用的0.03 mm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>复合非晶条带由北京冶科科技股份有限公司提供,选择中冶鑫盾合金校企科研提供的高纯度超细铁粉(含铁量大于99.999 9%),将条带裁剪成1.00 mm×1.00 mm×0.03 mm的片状。采用D8-Advance型X射线衍射仪(XRD)对非晶条带进行物相分析。利用电子探针(JEOL8230型EPMA)及扫描电镜(SEM)观察非晶复合非晶条带及铁粉的表面形貌。

为了模拟污染环境,配置1 000 mg/L的Zn( )溶液作为模拟含锌离子的废水溶液,量取1 L,称取2.7 μm铁粉1 g和1.00 mm×1.00 mm×0.03 mm的Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>复合非晶条带1 g,分别投放到1 000 mg/L

的Zn( )溶液中,溶液pH值不做调整,温度为298 K,以300 r/min的转速对溶液进行搅拌。反应总时间为800 min,每隔10 min取出上清液,利用M31-AA2600型原子吸收分光光度计测定清液中Zn( )浓度,对比分析Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶条带去除重金属离子Zn( )的去除效果,为工业净水提供理论依据。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 Fe-Si-B非晶条带材料表征

采用XRD和SEM对Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶条带的物相组成与微观形貌进行了表征。如图1a所示,XRD图谱在40°~50°(2θ)范围内呈现一个典型的漫散衍射峰,证实了其主体为非晶结构;同时,图谱中出现的微弱布拉格衍射峰对应于α-Fe晶体相,这表明实验所用的条带是含有少量晶态铁的非晶合金。SEM结果(图1b)显示,为增大比表面积,已将条带裁剪成1.00 mm×1.00 mm×0.03 mm的方片,其表面可见金属光泽及少量微小坑洞,这有助于增加反应活性位点。尽管存在微量晶态铁,但其含量有限,预计不会对后续的重金属去除效果产生主要影响。

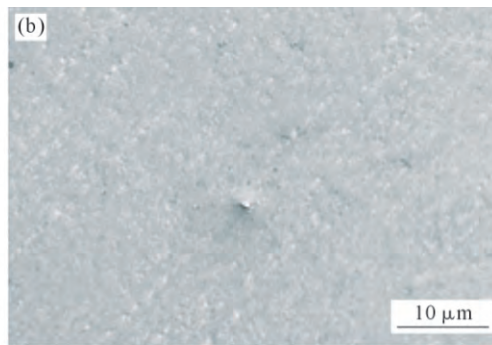
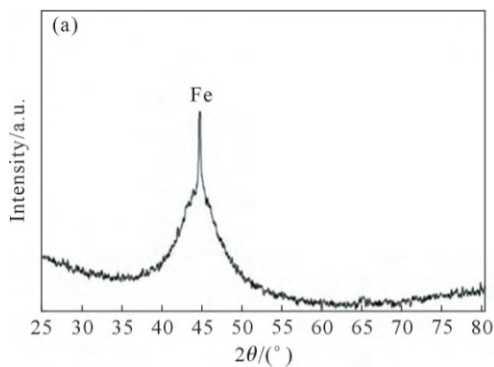


图1 10 μm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶条带XRD谱和SEM像:(a) XRD谱;(b) SEM像

Fig.1 XRD pattern and SEM image of 10 μm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> amorphous strips: (a) XRD pattern; (b) SEM image

### 2.2 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶条带去除Zn( )的效率

为了探究Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶条带对Zn( )的去除机理和效率,以零价铁作为对比材料,在298 K时将1.00 mm×1.00 mm×0.03 mm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶条带和2.7 μm铁粉分别投入到1 000 mg/L的Zn( )溶液中,Zn( )浓度随时间变化曲线如图2所示。从图中可以看出,Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>复合非晶条带刚开始以较快的速率去除水体中的Zn( )离子,300 min后反应速率减慢,趋于平缓。零价Fe刚开始反应速率非常低,到400 min之后反应速率加快,750 min之内,反应速率可通过下式计算获得:

$$\alpha = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 为去除率,%; $C_0$ 为Zn( )溶液的初始浓度,mg/L; $C_t$ 为不同反应时间下Zn( )的剩余浓度,mg/L。

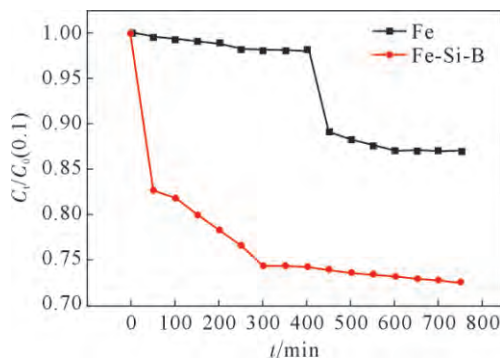


图2 Fe粉和Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>去除Zn(II)的速率

Fig.2 Removal rates of Zn(II) by the Fe powder and Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>

由此可知,当Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶条带对Zn( )的去除率达到27.44%时,2.7 μm铁粉仅有13%。考虑到两种材料的比表面积,1.00 mm×1.00 mm×0.03 mm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>

的比表面积是  $2.7\ \mu\text{m}$  铁粉的 40 倍, 因此  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  复合非晶条带对溶液中  $\text{Zn}(\ )$  的去除性能优于  $2.7\ \mu\text{m}$  铁粉。另外, 两种材料对  $\text{Zn}(\ )$  的去除过程展现出的不同趋势意味着其对  $\text{Zn}(\ )$  有不同的去除途径<sup>[18]</sup>。

### 2.3 $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 非晶条带去除 $\text{Zn}(\ )$ 机理

图 3 为零价铁去除反应结束后收集产物的 XRD 谱, 未检测到关于锌的任何布拉格衍射峰。而在烧杯底部有大量未发生反应的 Fe 粉, 这也说明零价 Fe 粉  $E^0(\text{Fe}^{2+}/\text{FeO})=-0.44\ \text{V}$  远远高于  $E^0(\text{Zn}^{2+}/\text{ZnO})=-0.763\ \text{V}$ , 不与  $\text{Zn}(\ )$  发生还原反应, 其中能够去除一部分 Zn 主要是在反应后期 Fe 被水解氧化为  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , 同时铁粉表面电荷发生变化, 而  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  的这种吸附作用毕竟有限, 因此去除  $\text{Zn}(\ )$  的效果不明显<sup>[15]</sup>。图 4 为  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶条带去除反应结束后收集产物的 XRD 谱, 未检测到关于锌的布拉格衍射峰, 这也说明  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶条带在去除过程中未与  $\text{Zn}(\ )$  发生还原反应, 而是通过其他方式去除。

通过数据发现零价铁去除水体中  $\text{Zn}(\ )$  有 2 个阶段, 第一个阶段反应速率比较慢, 第二个阶段反应速率加快。这主要是由于第一阶段 Fe 几乎不与  $\text{Zn}(\ )$  发生反应,  $E^0(\text{Zn}^{2+}/\text{ZnO})=-0.763\ \text{V}$  远远低于  $(\text{Fe}^{2+}/\text{FeO})=-0.44\ \text{V}$ , 零价铁不与  $\text{Zn}(\ )$  发生还原反应, 因此第

1 阶段零价铁反应速率非常慢。反应到 400 min 后, Fe 被水解氧化生成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 由于  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  具有一定络合作用, 会吸附水中的  $\text{Zn}(\ )$ , 出现了去除效率加快的效果。由于生成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , 导致溶液的 pH 值上升, 溶液由中性向碱性转变, pH 值大于 8, 铁粉带负电, 从而加快了铁粉对  $\text{Zn}(\ )$  的吸附作用。对于  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶合金条带, 在反应初期,  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶合金条带主要通过吸附净化水体中的  $\text{Zn}(\ )$  离子, 主要是因为  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶合金条带中含有 13% 的类金属元素 B 较为蓬松, 可以快速将  $\text{Zn}(\ )$  吸附, 因此一开始  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶合金条带就表现出较强的去除水体中  $\text{Zn}(\ )$  的效果<sup>[16-18]</sup>。当反应到 300 min 后, Fe 被水解氧化生成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 产生大量的  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$ , 与  $\text{Zn}^{2+}$  发生共沉淀, 故出现了在 400 min 之后去除效率加快的效果。

图 5a 为  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶合金条带在含  $\text{Zn}(\ )$  溶液中反应后产物的 XRD 衍射图谱, 检测到  $\text{ZnSO}_4$  的衍射图谱, 说明  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶合金条带在含  $\text{Zn}(\ )$  溶液中去除了  $\text{Zn}(\ )$  不是通过还原, 这与前面的在剩余固体物质中未检测到 Zn 的衍射图谱一致,  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  复合非晶合金条带主要通过吸附和共沉淀的方式去除溶液中的  $\text{Zn}(\ )$ 。图 5b 为非晶条带表面沉淀物 SEM 像, 白色絮状物为沉淀后的  $\text{ZnSO}_4$ 。

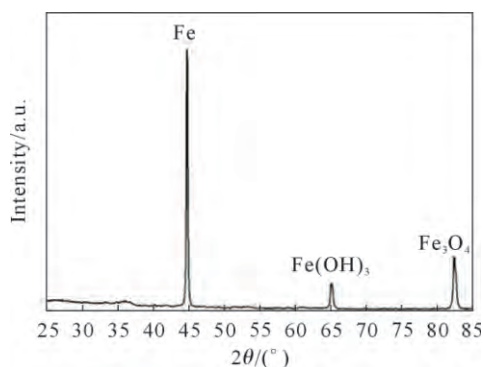


图 3 Fe 粉反应结束后剩余固体物质 XRD 谱

Fig.3 XRD pattern of the residual solid after the reaction of the Fe powder

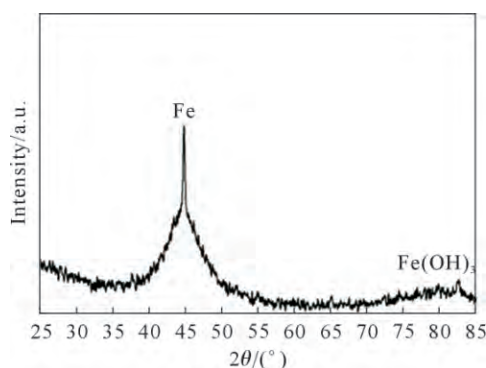


图 4  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  非晶条带反应结束后剩余固体物质 XRD 谱

Fig.4 XRD pattern of the residual solid after the reaction of  $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  amorphous band

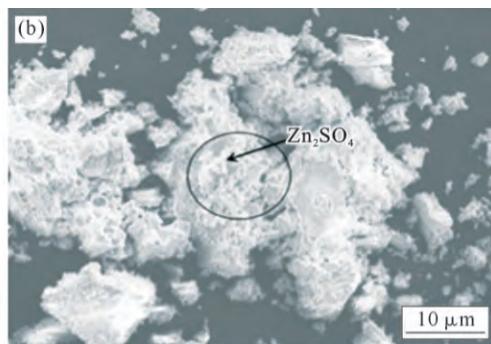
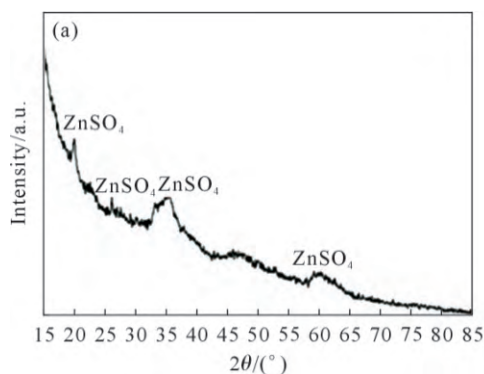


图 5 反应产物 XRD 谱和 SEM 像:(a) XRD 谱;(b) SEM 像

Fig.5 XRD pattern and SEM image of the reaction products: (a) XRD pattern; (b) SEM image



## 2.4 初始浓度对 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶条带去除 Zn( ) 效果的影响

为了进一步了解环境条件对 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金条带去除 Zn( ) 的影响,分别在 1 000、1 500、2 000 mg/L 3 种不同浓度的 Zn( ) 溶液中投入 1 g 的 1 mm×1 mm×0.03 mm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金条带进行去除试验。如图 6 所示,在 500 min 之前,3 种体系下 Zn( ) 的浓度降低非常微小,500 min 之后,下降较为明显,在 700 min 之后,基本上不再下降。可以看出,随着 Zn( ) 溶液浓度提高,等质量的 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶条带去除 Zn( ) 的量略有增加,这主要是在非晶条带表面未被吸附的 Zn( ) 完全覆盖的前提下,升高浓度可有效提高溶液中 Zn( ) 与非晶条带表面活性位点的碰撞概率,促使更多 Zn( ) 在有效时间内被吸附和共沉淀。然而毕竟吸附和共沉淀的去除效率有限,到 700 min 之后 Zn( ) 的浓度基本不再下降,3 种体系下的去除效率分别为 27.44%、32.56%、36.25%。

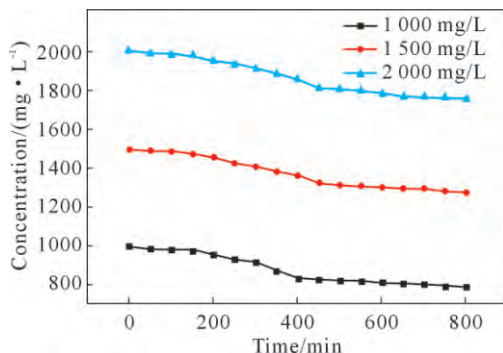


图 6 溶液 pH 值不作调整,条带投加量为 3 000 mg/L,水浴温度为 298 K 时溶液起始浓度对 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金条带去除性能的影响

Fig.6 Effect of initial solution concentration on strip removal performance of Fe-Si-B amorphous alloy under the conditions of unadjusted solution pH, strip dosage 3 000 mg/L, and water bath temperature 298 K

## 2.5 初始温度对 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶条带去除 Zn( ) 效果的影响

反应溶液温度升高,反应速率会进一步提高,为了分析反应温度对去除 Zn( ) 离子效果的影响,将 1 g 的 1.00 mm×1.00 mm×0.03 mm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶复合条带投入到浓度为 1 000 mg/L 的 Zn( ) 溶液中,分别在 298、308、318、328 K 下进行去除 Zn( ) 试验。当温度从 298 K 上升到 328 K 时,去除率从 27.44% 提高到 59.88%。可见随着反应温度的升高,Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 复合非晶合金对 Zn( ) 的去除速率会大幅度提高。这主要是由于升高温度,可以加快溶液中 Zn( ) 离子与非晶条带之间的碰撞频率,从而促进共沉淀的发生<sup>[19-21]</sup>。

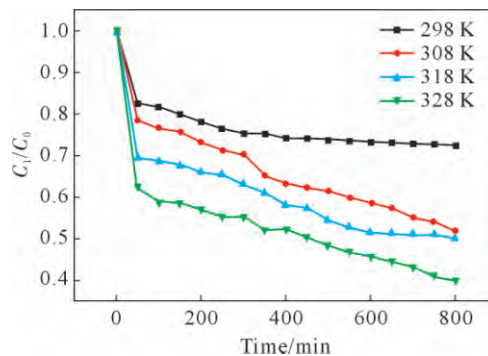


图 7 初始温度对 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金条带去除性能的影响  
Fig.7 Effect of initial temperature on the strip removal performance of the Fe-Si-B amorphous alloy

## 3 结论

(1)通过高速甩制淬法制备的 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金条带去除水体中重金属离子 Zn( ),与 2.7 μm 的 Fe 粉进行对比试验,其去除效率是零价铁的 2.11 倍,然而 1.00 mm×1.00 mm×0.03 mm Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金条带表面积大约是 2.7 μm 铁粉的 40 倍,Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶合金条带去除 Zn( )主要通过吸附和共沉淀,而零价铁主要通过吸附去除 Zn( )。

(2)Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶条带去除水体中 Zn( ) 的机理主要是吸附和共沉淀,反应过程分 2 个阶段完成,第一个阶段反应速率比较慢,第二个阶段反应速率加快,在温度为 298 K 时,反应 750 min,去除效率达到 27.44%。

(3)Zn( ) 溶液的初始浓度对去除效率也有一定影响,在 1 000、1 500、2 000 mg/L 3 种不同浓度 Zn( ) 溶液中的去除速率分别为 27.44%、32.56%、36.25%。

(4)初始温度对去除效率影响较大,溶液温度从 298 K 上升到 328 K,去除率从 27.44% 提高到 59.88%。

## 参考文献:

- [1] 王娟. 修复镉污染土壤的种质筛选及利用潜力[D]. 太原:山西大学,2021.  
WANG J. Germplasm screening and utilization potential for remediation of cadmium contaminated soil [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [2] 刘昭,周宏,曹文佳,刘伟,蓝泽涛. 清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学,2021,42(1): 175-183.  
LIU Z, ZHOU H, CAO W J, LIU W, LAN Z T. Seasonal distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water of Qingjiang River Basin[J]. Environmental Science, 2021, 42(1):175-183.
- [3] 仲科. 水体中重金属离子危害及检测方法研究[J]. 山西化工,2019,39(2): 23-30.  
ZHONG K. Study on the hazards and detection methods of heavy

- metal ions in water[J]. Shanxi Chemical Industry, 2019, 39(2): 23-30.
- [4] 慕秀松,周俊波. 电解法炼锌脱氯技术研究[J]. 化学工程, 2019(8): 6-10.  
MU X S, ZHOU J B. Study on dechlorination technology of zinc smelting by electrolysis[J]. Chemical Engineering, 2019(8): 6-10.
- [5] 智国铮. 三维荧光光谱技术在水环境中的研究与应用进展[J]. 四川环境, 2021(5): 257-261.  
ZHI G Z. Research and application progress of three-dimensional fluorescence spectroscopy in water environment[J]. Environment of Sichuan, 2021(5): 257-261.
- [6] 唐尧. 铁基非晶合金制备及偶氮染料降解性能研究[D]. 北京:清华大学, 2015.  
TANG Y. Study on preparation of iron-based amorphous alloy and degradation performance of azo dyes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [7] 韩炎,胡新利,冯邓强. 重金属捕捉剂去除废水中铁和铜的试验研究[J]. 工业用水与废水, 2025, 56(1): 75-79.  
HAN Y, HU X L, FENG D Q. Experimental study on the removal of iron and copper in wastewater by heavy metal capture agent[J]. Industrial Water and Wastewater, 2025, 56(1): 75-79.
- [8] 赵大洲,武宇杰,叶成秀,付依玮,邵依菲,任泽宇. 生物质吸附剂去除重金属离子的研究进展[J]. 皮革与化工, 2025, 42(1): 17-21.  
ZHAO D Z, WU Y J, YE C X, FU Y W, SHAO Y F, REN Z Y. Research progress on removal of heavy metal ions by biomass adsorbents[J]. Leather and Chemical Industry, 2025, 42(1): 17-21.
- [9] 陈玲玲. 膜分离技术在化工废水净化中的应用研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(2): 34-36.  
CHEN L L. Study on the application of membrane separation technology in the purification of chemical waste water[J]. Comprehensive Utilization of Tire Resources in China, 2025(2): 34-36.
- [10] 李金祺. Fe-Si-B 非晶合金去除水中 Cu(II)和 Ni(II)的性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2019.  
LI J Q. Study on the removal of Cu ( II ) and Ni ( II ) from water by Fe-Si-B amorphous alloy [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [11] 杜进英,张香云,李世霞,袁子洲. Fe-Si-B 非晶合金薄带对水中 Cu( ) 的去除性能及机理研究[J]. 铸造技术, 2020, 41(2): 111-114.  
DU J Y, ZHANG X Y, LI S X, YUAN Z Z. Study on the removal performance and mechanism of Cu ( ) in water by Fe-Si-B amorphous alloy ribbons[J]. Foundry Technology, 2020, 41(2): 111-114.
- [12] 王彬斌,于滨玮,何锋,李军,王长智,梅荣武. 基于二价阳离子去除的胞外聚合物提取方法特性比较[J]. 环境科学学报, 2022(10): 303-313.  
WANG B B, YU B W, HE F, LI J, WANG C Z, MEI R W. Comparison of characteristics of extracellular polymer extraction methods based on divalent cation removal[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022(10): 303-313.
- [13] 朱建龙,徐伟杰,郭硕铨,周佳燕,陆彤,邢沛红,蔡强,孙荣. 水体重金属污染危害及治理技术[J]. 现代农业科技, 2022(6): 129-132.  
ZHU J L, XU W J, GUO S C, ZHOU J Y, LU T, XIN P H, CAI Q, SUN R. Heavy metal pollution hazards and treatment technologies in water bodies[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022(6): 129-132.
- [14] SHENG H X, PENG G Q, TU X M, QIAN H X, ZENG X R. Fe-based powders prepared by ball milling with considerable degradation efficiency to methyl orange compared with Fe-based metallic glasses[J]. Acta Metallurgica(English Letters), 2018(11): 1207-1214.
- [15] 陈伟聪,唐建成,叶楠,石兴旺,周威威. Pt 催化作用下无氢碳化制备纳米 WC 粉及其烧结性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020(11): 3847-3853.  
CHEN W C, TANG J C, YE N, SHI X W, ZHOU W W. Preparation of nano WC powder by hydrogen-free carbonization under Pt catalysis and its sintering properties[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020(11): 3847-3853.
- [16] 王钰,易滢佳,史俊,邓慧萍. 饮用水中天然有机物的分析与表征方法[J]. 净水技术, 2021(1): 5-12, 36.  
WANG Y, YI Y J, SHI J, DENG H P. Analysis and characterization methods of natural organic matter in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2021(1): 5-12, 36.
- [17] 俞文钰,郝桐锋,南海林,张树林,张清靖. 水生植物治理水体重金属污染的研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(11): 156-158, 164.  
YU W Y, HAO T F, NAN H L, ZHANG S L, ZHANG Q J. Research progress on the treatment of heavy metal pollution in water by aquatic plants[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2023(11): 156-158, 164.
- [18] ZHANG C Q, ZHU Z W, ZHANG Z F, HU Z Q. On the decolorization property of Fe-Mo-Si-B alloys with different structures [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2011(1): 61-64.
- [19] OLOMUKORO J O, EZEMONYE L I N. Assessment of the macro-invertebrate fauna of rivers in southern Nigeria[J]. Griffiths African Zoology, 2007, 42(1): 1-11.
- [20] ZHANG C Q, ZHU Z W, ZHANG H F, HU Z Q. On the decolorization property of Fe-Mo-Si-B alloys with different structures [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2012, 358(1): 61-64.
- [21] LIU M H, WANG Y H, CHEN L T, ZHANG Y, ZHANG L. Mg(OH)<sub>2</sub> supported nanoscale zero valent iron enhancing the removal of Pb( ) from aqueous solution[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(15): 7961-7969.

(责任编辑:李亚敏)