

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.05.011

预氧化 - 亚铁盐除砷工艺研究

刘鹏程, 肖利, 陈艺锋, 田思雨

(湖南工业大学 冶金与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 采用预氧化 - 亚铁盐除砷法, 对模拟含砷废水亚砷酸钠溶液进行了除砷研究。以过氧化氢为氧化剂, 将 As(III) 氧化成 As(V), 加入氯化亚铁生成砷酸铁。考察反应时间、溶液 pH 值、反应温度、铁砷物质的量之比对砷酸铁生成的影响。研究表明, 当反应时间为 2 h、反应温度为 85 °C、溶液 pH 值为 4、铁砷物质的量之比为 2.2 时, 氯化亚铁除砷效率最高, 达 99.85%。X-ray 分析结果表明沉淀产物为砷酸铁, SEM 分析结果表明沉淀为直径 5 μm 左右砷酸铁。

关键词: 氯化亚铁; 除砷; 砷酸铁

中图分类号: X781

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)05-0060-06

Study on the Arsenic Removal Process by Pre-Oxidation Ferrous Salt

LIU Pengcheng, XIAO Li, CHEN Yifeng, TIAN Siyu

(College of Metallurgy and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A research has been carried out on the arsenic removal from simulated arsenic containing wastewater by sodium arsenite solution with the pre-oxidation ferrous salt method adopted. Using hydrogen peroxide as its oxidant, an oxidization of As(III) to As(V) can be achieved, followed by the formation of iron arsenate with the addition of ferrous chloride. An investigation is to be conducted on the effects of reaction time, solution pH, reaction temperature and molar ratio of iron and arsenic on the formation of iron arsenate. The results show that the removal efficiency of arsenic by ferrous chloride reaches the highest point, i.e. 99.85%, with the reaction time being 2 h, the reaction temperature being 85 °C, the pH value of the solution being 4, and the molar ratio of iron to arsenic being 2.2. An X-ray analysis shows that the precipitation product is to be iron arsenate, and SEM analysis shows that the precipitation is to be ferric arsenate slag with a diameter of about 5 micron.

Keywords: ferrous chloride; arsenic removal; iron arsenate

1 研究背景

砷是一种剧毒的类金属元素, 是许多有色金属

(铜、铅、锌等) 的伴生元素。环境中的砷通常来自人类的化工制造、冶金生产、矿山开发、电子加工、发电、造纸等活动。工业上砷主要以 As(III)、

收稿日期: 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774127)

作者简介: 刘鹏程(1995-), 男, 湖南湘潭人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为资源回收利用,

E-mail: 961571582@qq.com

通信作者: 肖利(1973-), 女, 湖南湘潭人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为二次资源循环利用, 冶金物理化学,

E-mail: xiaoli_csu@163.com

As(V)、有机砷等形式存在于废水中^[1-3], 其中As(III)的毒性远大于As(V), 亚砷酸盐的毒性是砷酸盐毒性的数十倍, 是公认的致癌因子^[4]。因此, 砷被定为国家污水综合排放标准中的第一类污染物, 排放标准为0.5 mg/L^[5]。随着现代工业化的发展, 采矿、冶金、化工等过程产生了大量的含砷废水, 并进入自然环境中。因此, 发展高效、低成本、环保的废水除砷技术是社会持续发展的要求。

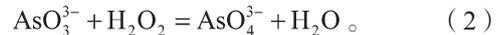
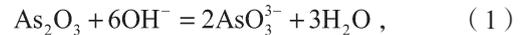
目前工业上主要利用砷和铁、镁、铝、硫、钙等形成溶解度极低的难溶化合物, 以此过滤除去废液中的砷。其中铁盐除砷法具有除砷率高、经济、容易操作等优点^[6-8]。其原理是利用 Fe^{3+} 与含砷阴离子结合成砷酸铁沉淀和 Fe^{3+} 水解形成的氢氧化铁吸附除砷^[9-10]。研究者采用了许多方法研究铁盐除砷, 叶恒朋等^[11]采用三氯化铁除砷, 考察了pH值、反应时间、铁砷物质的量之比对三氯化铁除砷的影响, 在pH值为2, 反应时间为1 h, 铁砷物质的量之比为2的最佳条件下, 除砷效率可达99.2%, 但是沉淀物为悬浮物, 需要加入絮凝剂聚丙烯酰胺提高沉淀物的沉降速率。方兆珩等^[12]研究了以氢氧化钠、氢氧化钙等为中和剂直接处理含砷铁废水, 发现pH值是影响除砷率的主要因素, 在pH值不大于3时, 沉淀产物为砷酸铁的微晶体; pH值为3~6时, 沉淀产物以氢氧化铁为主。廖亚龙等^[13]采用二段铁盐沉淀法除砷, 废水经过二次除砷后可达到排放标准, 除砷效率主要受pH值、反应温度、铁砷物质的量之比、反应时间的影响, 沉淀产物为无定型砷铁渣。因此, 铁盐除砷法存在的问题也非常明显, 除砷过程中容易产生氢氧化铁胶体导致过滤困难, 同时大量的无定型沉淀渣和氢氧化铁在中性或酸性环境下容易溶解, 存在二次污染^[14-17]。

由于氢氧化亚铁的溶度积常数 $K_{sp}=4.87 \times 10^{-17}$, 氢氧化铁的溶度积常数 $K_{sp}=2.79 \times 10^{-39}$, 所以酸性环境中 Fe^{2+} 的水解程度较 Fe^{3+} 小。采用氯化亚铁除砷, 可以减少氢氧化铁的生成, 同时对含砷废水进行预氧化处理, 使除砷产物为比As(III)化合物的溶解度更小的As(V)化合物^[18-19], 以此得到大颗粒砷酸铁沉淀, 提高沉淀物质的过滤性能和稳定性。因此, 本研究拟对“铁盐除砷”进行优化。研究表明, 铁盐除砷的效果主要与水中砷的形态和pH值、反应温度、反应时间、铁砷物质的量之比等有关^[11-17]。本文以过氧化氢为氧化剂, 预氧化亚砷酸钠溶液为砷酸钠溶液, 采用氯化亚铁为除砷剂处理砷酸钠溶液, 设置单因素实验, 逐一考察沉淀反应液pH值、沉淀反应时间、沉淀反应温度、铁砷物质的量之比对氯化亚铁除砷的

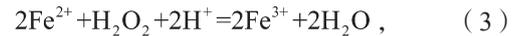
影响, 研究不同条件下氯化亚铁除砷的效率, 以期获取最优除砷条件。

2 理论部分

过氧化氢溶液氧化亚砷酸钠溶液的反应如下:



氯化亚铁溶液除砷过程主要发生以下反应:



根据反应式(5)可知, 当溶液中pH值较高时, 主要发生 Fe^{3+} 的水解反应, 生成大量的氢氧化铁沉淀, 不仅浪费铁源还导致除砷率降低, 因此pH值对溶液中的反应具有很大影响。廖亚龙等^[13]研究了70℃下Fe-As-H₂O系的 E_h -pH值图, 结果如图1所示。

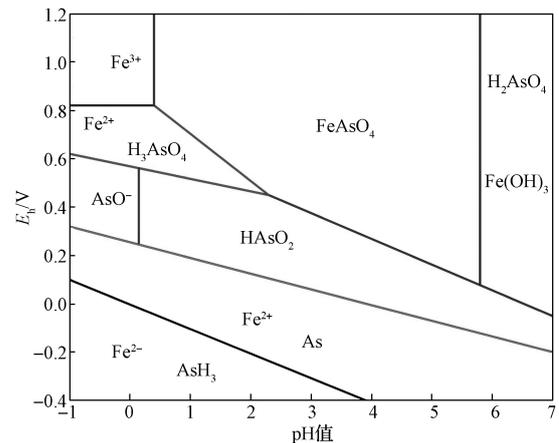


图1 70℃下含砷物质的 E_h -pH值图^[13]

Fig. 1 E_h -pH diagram of arsenic substances at the temperature of 70 °C

从图1可知, 在低电位和低pH值范围内砷和铁为低价态, 随着pH值的增大, 砷酸铁的稳定区域增大。在pH值为0.4~5.9时, 溶液中的砷和铁主要以溶度积 $K_{sp}=5.7 \times 10^{-21}$ 的 FeAsO_4 形式存在^[20-21], 因此实验应当在酸性环境下进行。

3 实验部分

3.1 实验设备及主要试剂

1) 设备及仪器。恒温水浴锅, DZKW-D2型, 巩义市予华仪器有限公司; 烘箱, DGG-9053A型, 上海森信实验仪器有限公司; 电子分析天平, TE4101-L型, 北京赛多利斯仪器系统有限公司; 磁力搅拌器, 07HWS-2型, 杭州仪器电机有限公司; pH计, PHS-3C型, 上海雷磁仪器厂; 等离子体发

射光谱仪 ICP-AES, Optima 8000 型, PerkinElmer; X 射线衍射仪, Rigaku Ultima IV 型, 日本理学。

2) 主要试剂。三氧化二砷 As_2O_3 , 水口矿务局衡阳实业总公司; 氯化亚铁 $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ 、体积分数为 30% 的过氧化氢溶液 H_2O_2 、氢氧化钠 $NaOH$ 、浓盐酸溶液 HCl , 均为国药集团化学试剂有限公司生产; 所有试剂纯度均为分析纯。

3.2 实验方法和内容

配置总砷质量浓度为 10 g/L 的亚砷酸钠溶液, 将其预氧化处理后备用; 在实验设定的条件下 (温度、pH 值、反应时间、铁砷物质的量之比) 向砷酸钠溶液中缓慢滴加氯化亚铁溶液, 采用氢氧化钠溶液调节反应液 pH 值, 沉淀反应完毕后, 将溶液与沉淀过滤分离; 将滤液稀释后进行电感耦合等离子体发射光谱 (inductively coupled plasma optical emission spectrometer, ICP-OES) 测试砷浓度, 将沉淀烘干研磨后进行 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD), 采用 Cu 靶 $K\alpha$ 辐射, 扫描角度为 $5 \sim 90^\circ$, 扫描速度为 $8^\circ/\text{min}$, 采用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 分析沉淀颗粒。

4 实验结果与讨论

4.1 预氧化亚砷酸钠溶液

取少量三氧化二砷加入氢氧化钠溶液中, 溶解后向其中加入过量过氧化氢溶液并搅拌 1 h, 反应温度为 30°C , 根据 Dong H. R.^[22] 和黄自力^[23] 等的研究, 取过氧化氢过量系数 $n(H_2O_2)/n(As) \geq 2$, 反应完毕后砷酸钠溶液储存备用。

4.2 pH 值对除砷率的影响

控制反应温度为 85°C , 反应时间为 2 h, 铁砷物质的量之比为 3, 使用氢氧化钠溶液和盐酸溶液控制反应 pH 值分别为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 研究除砷率与 pH 值的关系, 所得结果如图 2 所示。

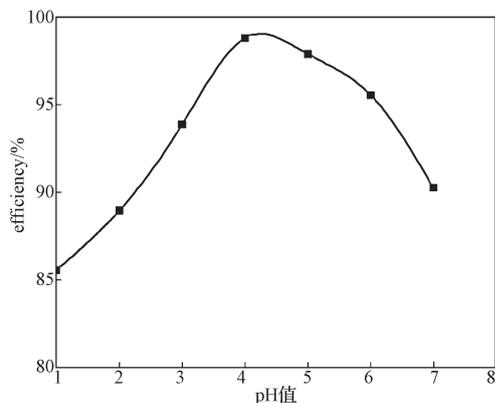


图 2 pH 值对除砷率的影响

Fig. 2 Effects of pH on the arsenic removal rate

由图 2 可知, 除砷率随着 pH 值的增加先增大后减小, 当 pH 值在 1~4 范围内, 除砷率持续增加, 当 pH 值为 4 时达最大值, 当 pH 值在 4~7 范围内, 随着 pH 值的增加反而减小。这与铁砷水系的 E_h -pH 值图中砷酸铁的稳定区域吻合。在强酸性环境中, 砷主要以 H_3AsO_4 和 $H_2AsO_4^-$ 的形式为主^[24-25], 难以提供足够的砷酸根离子与 Fe^{3+} 反应, 形成砷酸铁沉淀, 导致强酸性环境下除砷率较低。 Fe^{3+} 在 pH 值大于 2.2 后开始水解形成氢氧化铁, 在弱酸性环境中 Fe^{3+} 的水解程度加强, 除砷过程主要为氢氧化铁吸附除砷, 因此导致除砷率降低^[26]。所以, 最佳除砷 pH 值为 4。

4.3 反应时间对除砷率的影响

控制反应温度为 85°C , 反应 pH 值为 4, 铁砷物质的量之比为 3, 反应时间分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 h 的条件下进行实验, 得到除砷率与反应时间的关系, 如图 3 所示。

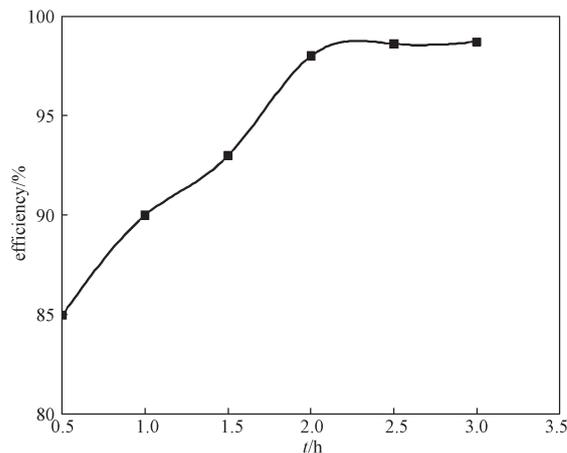


图 3 反应时间对除砷率的影响

Fig. 3 Effects of reaction time on the arsenic removal rate

由图 3 可知, 反应时间为 0.5~2.0 h 时, 除砷率迅速增加, 在 2.0 h 后除砷率增长缓慢。这是因为在沉淀过程中, 晶粒的成核与长大需要一定的时间, 达到反应限度之后, 沉淀颗粒保持“沉淀-再溶解”平衡, 此时除砷率基本不变。因此, 最佳反应时间为 2.0 h。

4.4 反应温度对除砷率的影响

在反应时间为 2.0 h, 反应 pH 值为 4, 铁砷物质的量之比为 3 的条件下, 控制反应温度分别为 25, 45, 65, 75, 85, 95 $^\circ\text{C}$ 。考察除砷率与反应温度的关系, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 当温度为 25~85 $^\circ\text{C}$ 时, 除砷率随着温度的升高而增加; 温度为 85~95 $^\circ\text{C}$ 时, 除砷率稳定在 99% 以上。这是由于反应 (4) 和 (5) 是吸热反应, 较高的反应温度有利于砷酸铁沉淀的形成, 提高反应温度有利于促进晶核的生长和二次成核^[27]。因此, 课题组选择 85°C 为最佳反应温度。

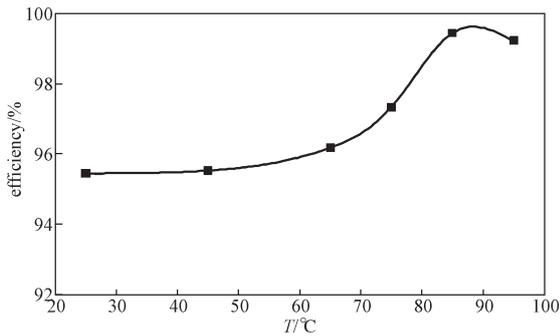


图4 反应温度对除砷率的影响

Fig. 4 Effects of reaction temperature on the arsenic removal rate

4.5 铁砷物质的量之比对除砷率的影响

在控制反应时间为 2 h, 反应温度为 85 °C, 反应 pH 值为 4 的条件下, 考察铁砷物质的量之比对除砷率的影响, 其结果如图 5 所示。

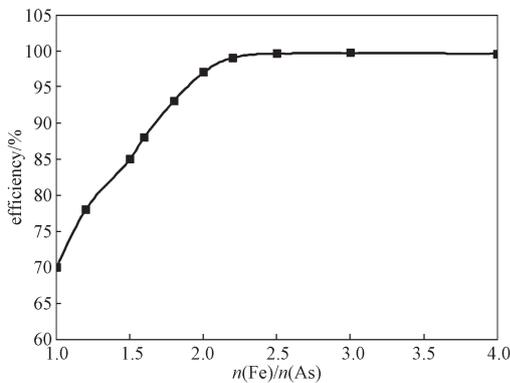


图5 铁砷物质的量之比对除砷率的影响

Fig. 5 Effects of molar ration of Fe to As on the arsenic removal rate

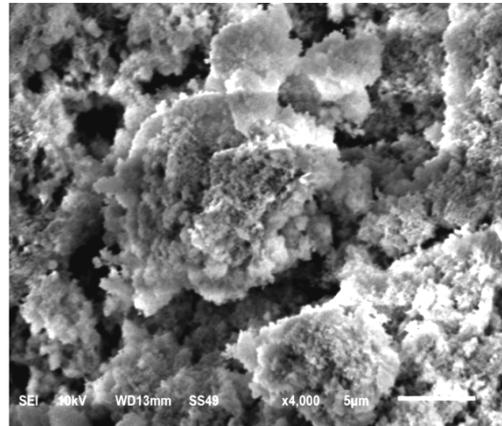
由图 5 可知, 除砷率在铁砷物质的量之比为 1~2 的范围内, 随铁砷物质的量之比的增加从 70% 增加到 96%; 铁砷物质的量之比达 2.2 以后, 除砷率基本稳定在 99% 以上。综合考虑, 课题组选择铁砷物质的量之比为 2.2 为最佳反应条件。

4.6 沉淀物质分析

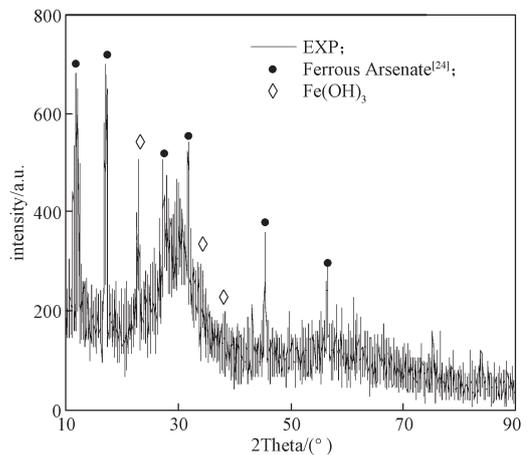
为了验证沉淀物质物相和考察沉淀物质颗粒大小, 采用最优的实验条件 (沉淀反应时间为 2 h, 反应温度为 85 °C, 反应 pH 值为 4, 铁砷物质的量之比为 2.2) 下反应, 将得到的沉淀物质烘干后, 进行扫描电镜测试和 X 射线衍射测试, 以分析其形貌和物相, 所得结果如图 6 所示。

由图 6a 可知, 沉淀物质颗粒大小为 5 μm 左右, 颗粒尺寸较大, 与实验中容易过滤的情况相符合, 因此预氧化铁盐法可以有效合成大颗粒砷酸铁。由图 6b 的测试结果可知, 沉淀物的主要物相为砷酸铁, 分析结果与 B. Dash 等^[24]研究的砷酸铁沉淀晶型相一致, 但仍有部分氢氧化铁沉淀, 这是由于部分溶液

中的 Fe²⁺ 被氧化成 Fe³⁺, 不可避免反应 (5) 的进行。因此, 采用预氧化-亚铁盐法除砷不仅具有较高的除砷效率, 而且其砷酸铁沉淀物稳定, 同时为较大的颗粒。



a) 沉淀物质 SEM 测试图



b) 沉淀物质 XRD 测试图

图6 沉淀物质颗粒大小与类型分析图

Fig. 6 Analysis chart of particle sizes and types of precipitated matter

5 结论

本研究采用预氧化-亚铁盐法除砷, 考察了不同反应条件对除砷效率的影响, 得出最佳除砷条件, 并对沉淀产物进行了 X 射线衍射和扫描电子显微镜检测, 分析了沉淀物质类型和沉淀物质颗粒。实验结果表明:

1) 采用预氧化-亚铁盐法除砷效果良好, 除砷效率随反应时间 (0.5~3.0 h)、铁砷物质的量之比 (1~4)、反应温度 (25~95 °C) 的增加而增加, 在 pH 值为 1~7 的范围内随 pH 值增加除砷率先升后降, 在最优条件 (反应时间为 2.0 h、反应温度为 85 °C、反应 pH 值为 4、铁砷物质的量之比为 2.2) 时除砷率可以达到 99.85%。

2) 预氧化-亚铁盐法的除砷产物为砷酸铁,能够减少氢氧化铁胶体的含量,并且沉淀结晶度良好,颗粒尺寸较大,容易过滤。

参考文献:

- [1] 陈小凤,周新涛,罗中秋,等.化学沉淀法固化/稳定化除砷研究进展[J].硅酸盐通报,2015,34(12):3510-3516.
CHEN Xiaofeng, ZHOU Xintao, LUO Zhongqiu, et al. Progress on Arsenic Immobilization/Stabilization with Chemical Precipitation Method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(12): 3510-3516.
- [2] 石靖,易宇,郭学益.湿法冶金处理含砷固废的研究进展[J].有色金属科学与工程,2015,6(2):14-20.
SHI Jing, YI Yu, GUO Xueyi. Research Progress of Arsenic-Bearing Solid Waste by Hydrometallurgy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2015, 6(2): 14-20.
- [3] 水志良,陈启超,水浩东.砷化学与工艺学[M].北京:化学工业出版社,2014:5.
SHUI Zhiliang, CHEN Qichao, SHUI Haodong. Arsenic Chemistry and Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 5.
- [4] 赵素莲,王玲芬,梁京辉.饮用水中砷的危害及除砷措施[J].现代预防医学,2002,29(5):651-652.
ZHAO Sulian, WANG Lingfen, LIANG Jinghui. Hazard of Arsenic in Drinking Water and Arsenic Removal[J]. Modern Preventive Medicine, 2002, 29(5): 651-652.
- [5] 陈锋,关中杰,兰尧中.含砷废水处理研究现状[J].云南冶金,2010,39(4):63-66.
CHEN Feng, GUAN Zhongjie, LAN Yaozhong. Research Status of Arsenic Wastewater Treatment[J]. Yunnan Metallurgy, 2010, 39(4): 63-66.
- [6] 邱建森.高浓度含砷酸性废水处理工艺研究[J].世界有色金属,2016(20):19-23.
QIU Jiansen. Research on Treatment Technology of Acidic Wastewater with High Concentration Arsenic[J]. World Nonferrous Metals, 2016(20): 19-23.
- [7] 张明琴,周新涛,罗中秋,等.石灰-铁盐法处理工业含砷废水研究进展[J].硅酸盐通报,2016,35(8):2447-2453.
ZHANG Mingqin, ZHOU Xintao, LUO Zhongqiu, et al. Treatment of Arsenic-Bearing Industrial Wastewater by Lime-Ferric Salt Method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(8): 2447-2453.
- [8] 赵金艳,王金生,郑骥.含砷废渣的处理处置技术现状[J].资源再生,2011(11):58-59.
ZHAO Jinyan, WANG Jinsheng, ZHEN Ji, et al. Status of Arsenic Waste Treatment and Disposal Technologies[J]. Resource Recycling, 2011(11): 58-59.
- [9] 朱义年,张学洪,解庆林,等.砷酸盐的溶解度及其稳定性随pH值的变化[J].环境化学,2003,22(5):478-484.
ZHU Yinian, ZHANG Xuehong, XIE Qinglin, et al. Dependence of Arsenate Solubility and Stability on pH Value[J]. Environmental Chemistry, 2003, 22(5): 478-484.
- [10] LUCAS M S, BELTRÁN-HEREDIA J, SANCHEZ-MARTIN J, et al. Treatment of High Strength Olive Mill Wastewater by Fenton's Reagent and Aerobic Biological Process[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A, 2013, 48(8): 954-962.
- [11] 叶恒朋,杜亚光,严立爽.三氯化铁除砷的工艺研究[J].化学与生物工程,2012,29(9):67-69.
YE Hengpeng, DU Yaguang, YAN Lishuang. Study on Process of Removing Arsenic with Ferric Chloride[J]. Chemistry & Bioengineering, 2012, 29(9): 67-69.
- [12] 方兆珩,石伟,韩宝玲,等.高砷溶液中和脱砷过程[J].过程工程学报,2000,21(4):359-362.
FANG Zhaoheng, SHI Wei, HAN Baoling, et al. Removal of Arsenic from High Arsenic Solutions by Scorodite Precipitation[J]. Engineering Chemistry & Metallurgy, 2000, 21(4): 359-362.
- [13] 廖亚龙,周娟,彭志强,等.二段铁盐沉淀深度脱除高浓度含砷废水中的砷[J].环境工程学报,2015,9(11):5261-5266.
LIAO Yalong, ZHOU Juan, PENG Zhiqiang, et al. Removal of Arsenic from Wastewater Containing High Arsenic by Secondary Precipitating in Presence of Ferric Salt[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(11): 5261-5266.
- [14] HARRIS B. The Removal of Arsenic from Process Solutions: Theory and Industrial Practice[EB/OL]. (2013-10-04). [2017-07-23]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118804407.ch62>.
- [15] 吴烈善,邓玮.含砷废水治理方法的研究进展[J].广西科学院学报,2011,27(2):172-174.
WU Lieshan, DENG Wei. Review on Arsenic Wastewater Treatment Technique[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2011, 27(2): 172-174.
- [16] 李晓波,吴水波,顾平.铁盐和铝盐混凝微滤工艺除As(V)的比较研究[J].环境科学,2007,28(10):2198-2202.
LI Xiaobo, WU Shuibao, GU Ping. Arsenic(V) Removal from Drinking Water by Ferric Salt and Aluminum Salt Coagulation Microfiltration Process[J]. Environmental Science, 2007, 28(10): 2198-2202.
- [17] 姚娟娟,高乃云,夏圣骥,等.饮用水除砷技术研究

- 新进展[J]. 工业用水与废水, 2007, 38(4): 1-5.
- YAO Juanjuan, GAO Naiyun, XIA Shengji, et al. Research Progress on Arsenic Removal from Drinking Water[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2007, 38(4): 1-5.
- [18] 张学洪, 朱义年, 刘辉利. 砷的环境化学作用过程研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 25-31.
- ZHANG Xuehong, ZHU Yinian, LIU Huili, et al. Study on Environmental Chemical Process of Arsenic[M]. Beijing: Science Press, 2009: 25-31.
- [19] MONHEMIUS A J, SWASH P M. Removing and Stabilizing As from Copper Refining Circuits by Hydrothermal Processing[J]. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 1999, 51(9): 30-33.
- [20] 张荣良, 丘克强, 谢永金, 等. 铜冶炼闪速炉烟尘氧化浸出与中和脱砷[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(1): 73-78.
- ZHANG Rongliang, QIU Keqiang, XIE Yongjin, et al. Treatment Process of Dust from Flash Smelting Furnace at Copper Smelter by Oxidative Leaching and Dearsenifying Process from Leaching Solution[J]. *Journal of Central South University(Natural Science)*, 2006, 37(1): 73-78.
- [21] 李文辉, 唐业梅. 酸性高砷废水处理方法的探讨[J]. 湖南有色金属, 2001, 17(6): 40-41.
- LI Wenhui, TANG Yemei. Techniques of High Concentrated Arsenic Acidic Wastewater Treatment[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2001, 17(6): 40-41.
- [22] DONG H R, GUAN X H, WANG D S, et al. A Novel Application of H_2O_2 -Fe(II) Process for Arsenate Removal from Synthetic Acid Mine Drainage (AMD) Water[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(7): 1115-1121.
- [23] 黄自力, 刘缘缘, 陶青英, 等. 石灰沉淀法除砷的影响因素[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 734-738.
- HUANG Zili, LIU Yuanyuan, TAO Qingying, et al. Influencing Factors of Arsenic Removal by Lime Precipitation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(3): 734-738.
- [24] DASH B, MISHRA G, SANJAY K, et al. Arsenic Removal from Industrial Effluents Through Ferric Arsenate Precipitation[EB/OL]. [2017-07-23]. https://www.researchgate.net/publication/303971288_Arsenic_Removal_from_Industrial_Effluents_through_Ferric_Arsenate_Precipitation.
- [25] 梁美娜, 朱义年, 刘海玲, 等. 氢氧化铁对砷的吸附研究[J]. 水处理技术, 2006, 32(7): 32-35.
- LIANG Meina, ZHU Yinian, LIU Hailing, et al. Absorption of Arsenic by Ferric Hydroxide[J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, 32(7): 32-35.
- [26] HAN B, RUNNELLS T, ZIMBRON J, et al. Arsenic Removal from Drinking Water by Flocculation and Microfiltration[J]. *Desalination*, 2002, 145(1): 293-298.
- [27] 闵小波, 廖映平, 柴立元, 等. 臭葱石沉淀法脱除和固定阳极泥中的砷[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2015, 25(4): 1298-1306.
- MIN Xiaobo, LIAO Yingping, CHAI Liyuan, et al. Removal and Stabilization of Arsenic from Anode Slime by Forming Crystal Scorodite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(4): 1298-1306.

(责任编辑: 申 剑)