

组合沉淀工艺处理酸性矿山废水的实验研究^{*}

麦戈^{1,2,3} 陈涛¹ 晏波¹ 肖贤明¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室 广州 510640; 2. 仲恺农业工程学院 广州 510225; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为研究中和-沉淀-混凝工艺中不同沉淀剂对酸性矿山废水处理效果的影响,以广东省大宝山矿槽对坑尾矿库废水为例,采用3种常用的沉淀剂(硫化钠、碳酸钠及DTCR)构成3种组合沉淀工艺(分别为L-SS-F, L-SC-F与L-DTCR-F)进行了对比研究。结果表明:在L-SS-F与L-SC-F工艺中,硫化钠与碳酸钠的投加量分别达到100, 200 mg/L,废水中除Mn以外的其他重金属去除率高达94%~100%;在L-DTCR-F工艺中,DTCR投加量达到40mg/L,废水中所有重金属的去除率均在94%以上。3种组合沉淀工艺的药剂费之比为L-SS-F:L-SC-F:L-DTCR-F=1:1.3:1.5。建议对于 $\rho(\text{Mn}) < 25 \text{ mg/L}$ 的酸性矿山废水,可采用硫化钠作为沉淀剂;对于更高Mn含量的酸性矿山废水,可采用DTCR沉淀技术。

关键词: 酸性矿山废水; 组合沉淀工艺; 沉淀剂类型; 处理效果

AN EXPERIMENTAL STUDY ON TREATMENT OF ACID MINE DRAINAGE BY MEANS OF COMBINATION PRECIPITATION TECHNOLOGY

Mai Ge^{1,2,3}, Chen Tao¹, Yan Bo¹, Xiao Xianming¹

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Zhong Kai Agriculture Engineering Institute, Guangzhou 510225, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different precipitators on acid mine drainage treatment efficiency in a combination precipitation technology (neutralization-precipitation-flocculation) proposed in this study, three kinds of common precipitants of sodium sulfide, sodium carbonate and DTCR were applied to this technology to form three combinations named as L-SS-F, L-SC-F and L-DTCR-F respectively. A wastewater sample taken from the Caoduikeng tailings reservoir of the Guangdong Dabaoshan Mine was treated by the three combination precipitation technologies for a comparison on their efficiency and economy. The result shows that heavy metals except Mn in the wastewater have a removal rate of up to 94%~100% as the dosage of sodium sulfide in the L-SS-F and sodium carbonate in the L-SC-F was added to 100mg/L and 200 mg/L respectively, and the removal rate of all heavy metal is over 94% when DTCR was increased to 40 mg/L in the L-DTCR-F. The agent cost ratio of the three combination precipitation technologies is L-SS-F:L-SC-F:L-DTCR-F=1:1.3:1.5. Sodium sulfide can be used as precipitating agent for an acid mine drainage with $\text{Mn} < 25 \text{ mg/L}$, and DTCR deposition technology is suggested for an acid mine drainage with a greater Mn content ($> 25 \text{ mg/L}$).

Keywords: acid mine drainage; combination precipitation technology; type of precipitant; treatment efficiency

0 引言

酸性矿山废水治理的方法很多,如:中和法、沉淀法、气浮法、混凝(絮凝)法、反渗透法、氧化还原

法、离子交换法、吸附法、电渗析法、溶剂萃取法、生物处理法及液膜法^[1-10]。其中,中和法、沉淀法、混凝法在实际工程应用中应用最为广泛^[11-14]。

向酸性矿山废水中投加碱性中和剂,一方面可以使废水的pH值接近中性,另一方面可使废水中的重金属离子与中和剂发生化学反应形成溶解度较小

^{*} 广东省自然科学基金杰出青年基金项目(S2013050014122); 广东省环境资源利用与保护重点实验室开放运行项目(2014B030301060)。

收稿日期:2015-08-23

的氢氧化物沉淀^[15]。最常用、价格低廉的中和剂是石灰与石灰乳^[16]。中和法的优点是工艺简单、操作方便、运行费用低,但也存在结垢严重、污泥量大、储运困难、对某些重金属处理效果不好、有价金属难回收等实际问题^[10]。

为了提高处理效果,常将中和法与沉淀法/絮凝法组合使用^[17]。常用的沉淀剂包括碳酸钠、硫化钠和钠癸酸^[18-22],他们可与废水中的一些重金属离子形成不溶或难溶的硫化物或者碳酸盐沉淀。近年来,一种称之为重金属捕集剂的二硫代氨基甲酸盐(DTCR)广泛应用于重金属废水的处理,其作用机理是DTCR分子官能团上的配位原子S能与重金属离子反应生成的稳定螯合物,从而沉淀析出^[23-24]。向废水中投加混凝剂或者絮凝剂可破坏胶体的稳定性,使细小悬浮颗粒和胶体颗粒聚集成较粗大的颗粒,促进污染物沉降与沉淀^[25-26]。因此,絮凝法一般是配合中和法或者沉淀法使用。

虽然在理论上,采用组合沉淀工艺可提高酸性矿山废水的处理效果,但缺乏系统的实验研究。本论文以广东省大宝山矿酸性矿山废水为例,对比研究中和-沉淀-混凝工艺中3种不同沉淀剂(硫化钠、碳酸钠及DTCR)对酸性矿山废水处理效果的影响,并对其经济性进行了初步分析。

1 实验部分

1.1 废水样品

实验所用废水样品取自大宝山槽对坑尾矿库没有经过处理的酸性废水。水样密封保存于磨口玻璃瓶中,保存温度为4℃。

1.2 实验方法

1.2.1 中和实验

为取得良好的沉淀效果以及达到废水达标排放对pH值的限定,首先需要调节废水水样的pH值至中性。实验方法如下:取废水样品500mL,逐步加入

一定数量的Ca(OH)₂溶液(浓度2%),充分搅拌,测定废水样品的pH值,直至pH值达到6.5~7.5。

1.2.2 沉淀实验

实验分为3组,其工艺流程及使用药剂见表1。实验过程如下:取废水500mL,加入浓度2%为Ca(OH)₂溶液调节废水的pH值至6.5~7.5;加入一定数量的沉淀剂或者螯合剂,搅拌1min;再加入25mg硫酸铝(浓度1%)搅拌3min;静置沉淀30min,取上清液分析重金属含量,据此计算废水中重金属的去除率。

表1 组合沉淀工艺及药剂

组合沉淀工艺	中和剂	沉淀剂/螯合剂	混凝剂
中和-硫化钠沉淀-混凝(L-SS-F)	石灰乳	硫化钠	硫酸铝
中和-碳酸钠沉淀-混凝(L-SC-F)	石灰乳	碳酸钠	硫酸铝
中和-DTCR螯合-混凝(L-DTCR-F)	石灰乳	DTCR	硫酸铝

在实验中,Ca(OH)₂加入数量由本论文1.2.1设计的实验确定;沉淀剂或者螯合剂的加入数量为20~250mg/L;硫酸铝的加入数量为均50mg/L。

1.2.3 水样分析

采用岛津AA-6300C原子吸收仪,测定水样中的金属元素。水样制备方法如下:取水样200mL,加硝酸10mL,电热板中温加热,水样蒸发至10mL左右时,添加2%硝酸50mL,煮10min,冷却后定容至100mL。采用玻璃电极法测定水的pH值(雷磁E-201),使用的参考缓冲液pH值分别为4.00、6.86和9.18。

2 结果与讨论

2.1 废水样品污染物特征

废水样品为典型的酸性废水,pH值为3.20,含有多种金属元素(表2)。含量较高的有价金属元素包括Fe、Cu、Zn、Mn,总量达到68.17mg/L;第一类污染物主要有Cd、As、Cr、Pb、Ni,总量为3.55mg/L。超过GB8978-1996《污水综合排放标准》的重金属指标有Pb、Mn、Zn、Cu。因此,废水需要处理方可排放。

表2 废水样品主要水质指标

指标	pH	COD	TDS	SS	Cr	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Ni	Co	As	Cd
数量	3.20	16.37	2280	44	0.09	32.94	15.51	11.25	8.47	3.11	0.21	0.29	0.07	0.06

2.2 废样pH值与加碱量的关系

中和实验结果(图1)表明:废水pH值与加入的氢氧化钙数量呈很好的正相关(相关系数为0.98);调节实验水样pH值至6.5需石灰乳约230mg/L。在中和过程中,氢氧根离子会与废水中一些金属离子反应,生成氢氧化物沉淀物得以去除^[27]。去除率最高的是Fe,

去除率可达到99%;其次是Cr与As,去除率分别可达78%与73%;对Pb、Mn、Zn、Cu的去除率均较低,达不到排放标准(图2)。因此,简单的中和法对该废水处理效果较差,需要投加高效沉淀剂作进一步处理。

2.3 L-SS-F工艺的废水重金属的去除效果

在L-SS-F工艺中,硫化钠的投加量分别为50,

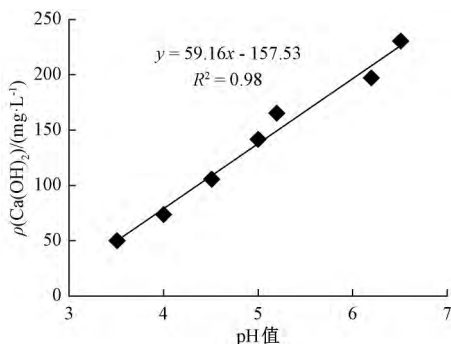


图1 废水 pH 值与氢氧化钙加入数量的关系

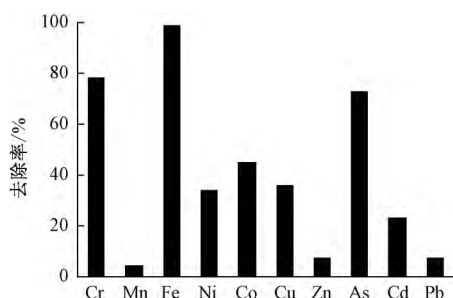


图2 废水样品经过中和处理后一些主要的重金属元素去除效果对比

100, 150 mg/L。实验结果见表3。可见,加入沉淀剂(硫化钠),废水中的重金属得到进一步去除。当硫化钠的加入量达到100 mg/L时,废水中的Cr、Cu和Pb的去除率分别达到了100%、100%和98%;Zn、Ni和Cd的去除率分别达到了87%、85%和91%,这些重金属指标达到GB 8978—1996的一级排放标准。进一步增加硫化钠至150 mg/L,这些重金属的去除率仅略有所增加。

对比不同重金属的去除率,可见:硫化钠优先沉淀废水中的Cu与Cr,当硫化钠的加入量为50 mg/L时,两者的去除率接近100%;该组合沉淀工艺对废水中的Mn去除率较低,不到80%,残留Mn含量达到3 mg/L以上,GB 8978—1996一级排放标准的Mn含量限值为2 mg/L;二级排放标准的限值为5 mg/L。通过进一步调节废水pH值至8.5~9.0,Mn的去除率可提升至97%以上,残留Mn含量仅为0.47 mg/L。

2.4 L-SC-F工艺的废水重金属去除效果

在L-SC-F工艺中,碳酸钠的投加量分别为100, 200, 250 mg/L。实验结果见表4。随着碳酸钠投加数量的增加,各种重金属的去除率增加。当碳酸钠的加入数量为200 mg/L时,除Mn外,废水中其他重金属元素的沉淀去除率均达到了90%以上,Cr、Cu和Pb的去除率达到了100%,Ni、As和Zn的去除率分

表3 硫化钠投加量对L-SS-F工艺废水重金属去除效果的影响

重金属元素	硫化钠投加量/(mg·L ⁻¹)			
	50	100	150	
Fe	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.17	0.17	0.17
	去除率/%	99	99	99
Cr	浓度/(mg·L ⁻¹)	0.01	0.00	0.00
	去除率/%	89	100	100
Mn	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	12.96	3.19	3.09
	去除率/%	17	79	80
Ni	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.08	0.02	0.02
	去除率/%	60	95	90
Co	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.03	0.02	0.01
	去除率/%	89	94	96
Cu	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.08	0.02	0.00
	去除率/%	99	100	100
Zn	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	9.22	1.46	0.90
	去除率/%	18	87	92
As	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.00	0.00	0.00
	去除率/%	100	100	100
Cd	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.01	0.00	0.00
	去除率/%	100	100	100
Pb	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.16	0.06	0.00
	去除率/%	95	98	100

表4 碳酸钠投加量对L-SC-F工艺废水重金属去除效果的影响

重金属元素	碳酸钠投加量/(mg·L ⁻¹)			
	100	200	250	
Fe	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.16	0.15	0.15
	去除率/%	99	99	99
Cr	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.02	0.00	0.00
	去除率/%	75	100	100
Mn	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	3.64	3.14	2.58
	去除率/%	76	80	83
Ni	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.11	0.02	0.01
	去除率/%	43	95	97
Co	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.06	0.02	0.01
	去除率/%	79	93	95
Cu	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	1.10	0.00	0.00
	去除率/%	87	100	100
Zn	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	3.71	0.79	0.68
	去除率/%	67	94	94
As	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.01	0.00	0.00
	去除率/%	89	100	100
Cd	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.03	0.00	0.00
	去除率/%	53	100	100
Pb	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.02	0.00	0.00
	去除率/%	75	100	100

别达到了95%、100%和94%,出水中重金属含量均低于0.01 mg/L,达到GB 8978—1996。废水中Mn的去除率为83%(碳酸钠的加入量250 mg/L),残留Mn含量为2.58 mg/L。与L-SC-F工艺类似,可进一

步调节废水至更高 pH 值(8.5~9.0),彻底去除废水中的残留的 Mn。

2.5 L-DTCR-F 工艺的废水重金属去除效果

在 L-DTCR-F 中,DTCR 的加入量分别为 20,40,60,100 g/m³。实验结果见表 5。可见,DTCR 对废水中的各种重金属均具有很强的捕获与沉淀能力,基本上不存在选择性。当其加入量为 40 g/m³时,废水中的重金属去除率均大于 94%,处理后水中 Mn 浓度为 0.3 mg/L,Zn 为 0.22 mg/L,其余重金属含量均低于 0.1 mg/L,各项重金属指标均达到 GB 8978—1996 的一级排放标准。

2.6 三种工艺技术经济性对比

2.6.1 处理效果对比

由于 Fe 在 pH 值为 3.5~4.0 时发生沉淀,易于去除,因此本研究选择了废水中其他 4 种含量较高的重金属(Mn、Zn、Cu、Pb)的去除率进行对比与讨论。根据图 3,应用组合沉淀工艺,三类沉淀剂对 Zn、Cu、Pb 均有很好去除效果,当达到一定投加量(硫化钠、碳酸钠及 DTCCR 投加量分别为 100,200,40 mg/L),去除率可达到 95%~99%。但是,硫化钠与碳酸钠对 Mn 的去除效果不好,即使两者的投加量分别高达 150 mg/L 与 250 mg/L,Mn 的去除率仅为 80%左右,

表 5 DTCCR 投加量对 L-DTCR-F 工艺废水重金属去除效果的影响

重金属元素	DTCCR 投加量/(mg·L ⁻¹)	DTCCR 投加量/(mg·L ⁻¹)			
		20	40	60	100
Fe	处理后浓度/(mg·L ⁻¹)	0.14	0.03	0.03	0.03
	去除率/%	99	99	99	100
Cr	浓度/(mg·L ⁻¹)	0.01	0.00	0.00	0.00
	去除率/%	83	97	94	99
Mn	浓度/(mg·L ⁻¹)	2.18	0.3	0.25	0.35
	去除率/%	57	94	95	98
Ni	浓度/(mg·L ⁻¹)	0.10	0.01	0.01	0.00
	去除率/%	46	97	97	100
Co	浓度/(mg·L ⁻¹)	0.09	0.01	0.01	0
	去除率/%	69	98	98	99
Cu	浓度/(mg·L ⁻¹)	1.27	0.08	0.08	0.08
	去除率/%	85	99	99	99
Zn	浓度/(mg·L ⁻¹)	4.84	0.22	0.22	0.11
	去除率/%	57	98	98	99
As	浓度/(mg·L ⁻¹)	0.01	0.00	0.00	0.00
	去除率/%	79	100	100	100
Cd	浓度/(mg·L ⁻¹)	0.03	0.00	0.00	0.00
	去除率/%	53	100	100	100
Pb	浓度/(mg·L ⁻¹)	0.47	0.09	0.16	0.09
	去除率/%	85	97	98	98

而且随着投加量的增加,其去除率没有显著的增加。要实现 Mn 的达标排放(GB 8978—1996 一级排放标准),需要进一步提高 pH 值至 8.5~9.0,但沉淀 Mn

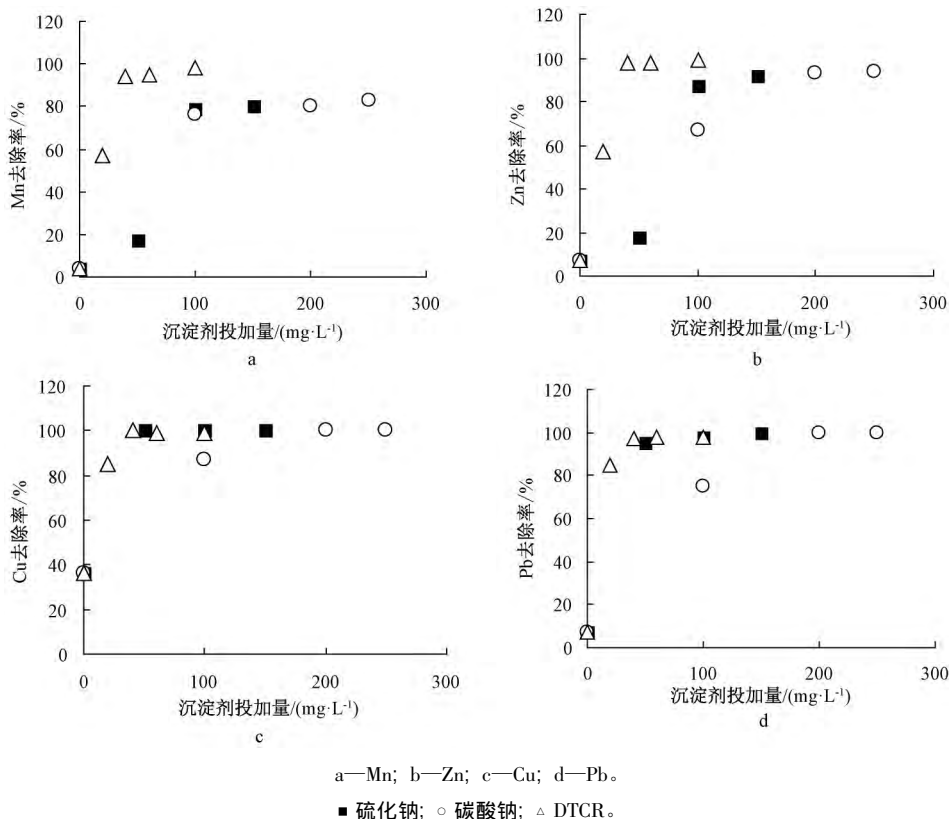


图 3 组合沉淀工艺中,不同类型沉淀剂对废水中几种重金属的去除效果对比

后,需要再加少量酸调节水的 pH 至中性,方可排放。而 DTCR 沉淀剂对废水中各种重金属元素的去除基本上不存在选择性,对在中性的条件下难沉淀的 Mn 同样具有很强的沉淀效果,可实现直接达标排放。

2.6.2 经济性分析

化学沉淀法处理酸性矿山废水主要运行成本包括三个方面:药剂费、污泥处置费、能耗费。化学沉淀

法需要消耗大量的化学药剂,一般占总运行成本的 60% 左右。表 6 是根据槽对坑尾矿库酸性矿山废水水样实验结果,初步计算的药剂费。仅从药剂费用评价,L-SS-F 工艺药剂费用最低,具有明显的优势,而 L-DTCR-F 工艺药剂费用最高,是 L-SS-F 工艺的 1.5 倍。L-SC-F 介于两者之间,其药剂费用大约是 L-SS-F 工艺的 1.3 倍。

表 6 废水处理药剂费用分析

费用指标	L-SS-F			L-SC-F			L-DTCR-F		
	石灰乳	硫化钠	硫酸铝	石灰乳	碳酸钠	硫酸铝	石灰乳	DTCR	硫酸铝
用量/(kg·m ⁻³)	0.2	0.1	0.05	0.2	0.2	0.05	0.2	0.04	0.05
单价/(元·t ⁻¹)	300	5 000	800	300	3 500	800	300	20 000	800
费用/(元·m ⁻³)	0.60			0.80			0.90		

值得说明的是,对于 L-SS-F 与 L-SC-F 工艺的药剂费用计算,没有考虑 Mn 进一步去除的药剂费。对于本研究废水样品,采用 L-SS-F 与 L-SC-F 处理后,废水中的 Mn 可达到 GB 8978—1996 的二级排放标准。如要达到一级排放标准,需要进一步投加石灰乳,提高 pH 值至 8.5~9.0, Mn 的去除率可达 97% 以上^[27],沉淀 Mn 后,需要再加酸调节水的 pH 至中性方可排放,这必然增加一些处理药剂成本。因此,对于含 Mn 较高(>25 mg/L)的酸性矿山废水,在组合沉淀工艺中,可采用 DTCR 沉淀剂。

3 结论

1) 大宝山矿槽对坑尾矿库酸性废水水样, pH 值为 3.20,含有多种金属元素, Pb、Mn、Zn、Cu 含量较高,超过国家相关排放标准。

2) 在组合沉淀工艺(中和-沉淀-混凝)中,硫化钠与碳酸钠的投加量分别为 100、200 mg/L 时,废水中除 Mn 外的其他重金属的去除率可高达 94~99% 以上; DTCR 投加量为 40 mg/L 时,废水中所有重金属的去除率均在 94% 以上,可实现达标排放。

3) 在组合沉淀工艺中,硫化钠作为沉淀剂的药剂费用最低,其次碳酸钠, DTCR 最高,3 种组合工艺的药剂费用之比为 1:1.3:1.5。

4) 采用组合沉淀工艺处理酸性矿山废水,沉淀剂选择应当考虑废水水质特征与经济性。对于低 Mn (<25 mg/L) 酸性矿山废水,可采用硫化钠作为沉淀剂;对于 Mn 含量较高(>25 mg/L)的酸性矿山废水,建议采用 DTCR 沉淀技术。

参考文献

[1] Chuichulcherm S, Nagpal S, Peeva L, et al. Treatment of metal

containing wastewaters with a novel extractive membrane reactor using Sulfate-Reducing Bacteria [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 2001, 76(1): 61-68.

[2] Johnson D B, Hallberg K B. Acid mine drainage remediation options: a review [J]. Sci Total Environ, 2005, 338: 3-14.

[3] Sheoran A S, Sheoran V. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review [J]. Minerals Engineering, 2006, 19: 105-116.

[4] Cheng S A, Dempsey B A, Logan B E. Electricity generation from synthetic acid-mine drainage (AMD) water using fuel cell technologies [J]. Environ Sci Technol 2007, 41: 8149-8153.

[5] 钟常明, 许振良, 方夕辉, 等. 超低压反渗透膜处理矿山酸性废水及回用 [J]. 水处理技术, 2007, 33(6): 77-80.

[6] 张春婵, 肖利萍. 同步除 S、脱 N、除 P 的矿山废水综合治理可行性分析 [J]. 能源与环境, 2008(5): 82-86.

[7] 周仲魁, 陈泽堂, 孙占学. 人工湿地在治理矿山废水中的应用 [J]. 铀矿冶 2008, 27(4): 202-210.

[8] Mahiroglu A, Tarlan-Yel E, Sevimli M F. Treatment of combined acid mine drainage (AMD) —Flotation circuit effluents from copper mine via Fenton's process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166: 782-787.

[9] 张武刚, 王兆慧, 王焕丽, 等. Fenton 氧化/高浓度泥浆法处理矿山废水 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(4): 1117-1120.

[10] 左莉娜, 贺前锋. 酸性矿山废水的治理技术现状及进展 [J]. 环境工程, 2013, 31(5): 35-38.

[11] Matlock M M, Howerton B S, Atwood D A. Chemical precipitation of heavy metals from acid mine drainage [J]. Water Research, 2002, 36(19): 4757-4764.

[12] 严群, 黄俊文, 唐美香, 等. 矿山废水的危害及治理技术研究进展 [J]. 金属矿山 2010(8): 183-186.

[13] 严群, 韩磊, 赖兰萍, 等. 铅、锌矿选矿废水净化回用工艺的试验研究 [J]. 中国矿业, 2007, 16(9): 57-61.

[14] 孙水裕, 谢光炎, 宁寻安, 等. 硫化矿浮选废水净化与回用的研究 [J]. 有色金属. 选矿部分, 2001(4): 33-41.

(下转第 61 页)

为常规的 1/15 左右。

传统絮凝工艺的沉淀池占地较大,往往只能形成固定的构筑物,无法利用絮凝技术对大水量的微污染河湖水体进行应急处理,而加载絮凝由于占地面积小,沉降速度快,设备形式多样,可以通过车载式等移动设备形式,应对微污染的河湖水体应急处理。潘涌璋等人^[10]在广州市猎德涌和石井河两条河道进行磁种加载絮凝,取得与本文类似的处理效果,可通过化学一级处理迅速处理河道污染物。

当微污染水体作为饮用水原水时,需去除寄生虫卵、原生虫、致病细菌和肠道病毒。1997年墨西哥当局采用 ACTIFLO 砂加载絮凝工艺进行了6个月的中试研究,结果表明即使在 200 m/h 的高表面负荷下,也能使 ACTIFLO 出水寄生虫卵平均值小于 1 个/L^[11]。清河污水处理厂能力提升应急工程系统中所使用的磁种絮凝也证明了加载絮凝对细菌、病毒、油、重金属及磷的去除效果比传统工艺要好^[2]。

因此加载絮凝利用其处理速度快,占地小,处理效果好和设备多样化的特点,相比较常规絮凝沉淀,针对微污染河湖大水体尤其是微污染原水在常规和应急处理方面均具有较大的优势和应用前景。

4 结论

1) 通过磁种或石英砂对微污染水进行加载絮凝,可以在 10 min 内完成絮凝沉淀,大幅度去除微污染水体中的浊度、COD_{Mn}和 TP。

2) 在同样絮凝剂投加量的情况下,加载絮凝的实验组几项污染物指标的去除率均优于仅投加絮凝剂的实验组。

3) 加载絮凝具备沉淀速度快,沉淀效果好的特点,因此设备可以多样化,抗冲击负荷能力强,可以单独或形成组合工艺对微污染大水体进行常规或应急处理,具有较高的应用前景。

参考文献

- [1] 俞三传,高从培,张慧. 纳滤膜技术和微污染水处理[J]. 水处理技术, 2005, 31(9): 6-9.
- [2] 邓大鹏,董惠芳,李大功,等. 磁分离技术的工程应用实践[J]. 中国给水排水, 2011, 27(18): 83-86.
- [3] 周大农,杨友春. ACTIFLO® 微砂沉淀技术在北京第九水厂的应用[J]. 城镇供水, 2006, 6: 26-29.
- [4] 张雅玲,李芝,张韵,等. 磁加载絮凝技术在清河污水处理厂应急工程中的应用[J]. 给水排水, 2010, 36(8): 47-49.
- [5] 熊仁军,肖松文,习兴梅,等. 城镇污水磁种絮凝-高梯度磁分离处理扩大连续试验研究[J]. 矿冶工程, 2004, 24(2): 27-29.
- [6] 宋力. 絮凝剂在水处理中的应用与展望[J]. 工业水处理, 2010, 30(6): 4-7.
- [7] 刘睿,周启星,张兰英,等. 水处理絮凝剂研究与应用进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1558-1562.
- [8] 李峰. 加载磁絮凝技术处理微污染原水的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [9] 朱洁,张东,陈洪斌,等. ACTIFLO 高效澄清池的运行优化研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(21): 47-50, 54.
- [10] 潘涌璋,梁瑛瑜. 磁种-磁滤技术处理污染河水的试验研究[J]. 四川环境, 2005, 24(2): 15-17, 43.
- [11] 龚卫俊,郑燕,吴志超. ACTIFLO 高效沉淀工艺用于污水处理[J]. 中国给水排水, 2005, 21(10): 104-106.

第一作者: 陈煜权(1963-),男,高级工程师,主要从事给水排水、水环境保护行业。

(上接第 49 页)

- [15] 雷兆武,孙颖. 矿山酸性废水重金属沉淀分离研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(11): 59-61.
- [16] Akcil A, Koldas S. Acid mine drainage (AMD): Causes, treatment and case studies [J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14: 1139-1145.
- [17] 梁刚. 有色金属矿山废水的危害及治理技术[J]. 金属矿山, 2010(12): 158-161.
- [18] 黄万抚,王淑君. 硫化沉淀法处理矿山酸性废水研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(8): 60-62.
- [19] Jameson E, Rowe O F, Hallberg K B, et al. Sulfidogenesis and selective precipitation of metals at low pH mediated by Acidithiobacillus spp. and acidophilic sulfate-reducing bacteria [J]. Hydrometallurgy, 2010, 104(3/4): 488-493.
- [20] Michalkova E, Vanek M, Veverka M. Acid mine drainage and sludge potential resource for an organic pigments, TOP 2007-Engineering of Environmental Protection [C] // The 13th Year of International Conference, Senec, Slovak Republic, 2007: 221-226.
- [21] Mauchauffée S, Meux E, Schneider M. Selective precipitation of cadmium from nickel cadmium sulphate solutions using sodium decanoate [J]. Sep Purif Technol, 2008, 62(2): 394-400.
- [22] Tokuda H, Kuchar D, Mihara N, et al. Study on reaction kinetics and selective precipitation of Cu, Zn, Ni and Sn with H₂S in single metal and multi-metal systems [J]. Chemosphere, 2008, 73(9): 1448-1452.
- [23] Cheng Q, Wang G. Study on the macromolecular coagulant PEX which traps heavy metals [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62: 4636-4643.
- [24] 万金保,刘秀梅,王榕. DTCR-2 处理低浓度矿山废水[J]. 南昌大学学报. 工科版, 2013, 35(3): 236-240.
- [25] 张舞剑,李姣. 镍钼矿冶炼废水的处理[J]. 湖南有色金属, 2010, 26(5): 42-45.
- [26] 田丰,夏文喜,李飞飞,等. 镍矿山废水治理技术研究进展[J]. 中国矿业, 2014, 23(增刊2): 85-88.
- [27] Tao Chen, Bo Yan, Chang Lei, et al. Pollution control and metal resource recovery for acid mine drainage [J]. Hydrometallurgy, 2014, 147/148: 112-119.

第一作者: 麦戈(1970-),女,博士研究生,副教授. gdgzmg@163.com
通信作者: 肖贤明(1962-),男,博士,博导,研究员,主要从事地球化学研究. mxmiao@gig.ac.cn