

## 工业水处理

江训金, 张锋, 郑雪松, 等. 化学法高效去除某铜矿酸性废水  $Mn^{2+}$  的方案与应用[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 109-114.

Jiang X J, Zhang F, Zheng X S, et al. Solution and application of chemical process of efficient  $Mn^{2+}$  removal for acid wastewater in a copper mine[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 109-114.

## 化学法高效去除某铜矿酸性废水 $Mn^{2+}$ 的方案与应用

江训金\*, 张 锋, 郑雪松, 贾 锐

(江西铜业技术研究院有限公司, 江西南昌 330096)

**摘 要** 【目的】江西某铜矿酸性水处理厂的外排水锰质量浓度超出《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中规定的 2.0 mg/L, 因此在国内外广泛寻求相关解决方案。现场废水具有成分复杂、日处理量大等特点, 物理法处理成本较高, 微生物法适应性差、处理量小, 而化学法因其处理量大、成本低、适应性强而被采用。同时, 出于安全考虑, 企业要求禁止使用危化品如高锰酸钾、双氧水。【方法】基于上述分析, 本文以含锰废水作为研究对象, 创新地采用项目组自主研发的除锰(DM)复合盐作为除锰药剂, 考察了不同除锰药剂、反应体系温度、反应体系 pH、反应时间等相关因素对除锰效果的影响。【结果】最佳的除锰药剂为 DM 盐, 最佳反应条件为 20% 质量分数 DM 盐添加 0.5 mL/L、溶液体系 pH 值为 6.0、搅拌速度为 300 r/min、反应时间为 15 min 即可将废水中的锰质量浓度降至 2.0 mg/L 以下; 此外, 该技术处理成本低, 仅需 2 元/m<sup>3</sup>; 有较强的温度适应性, 可以在 0~45 °C 条件下使用, 适用于一年四季; 同时该除锰技术对于现场现有工艺与设施的兼容性均较好。【结论】目前该技术已在该酸性水处理厂工业化应用并取得很好的效果, 可为全国矿山酸性水锰含量超标问题的解决提供借鉴与指导。

**关键词** 酸性废水 氧化沉淀 絮凝沉淀 除锰 自控系统

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)05-0109-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.014

## Solution and Application of Chemical Process of Efficient $Mn^{2+}$ Removal for Acid Wastewater in a Copper Mine

Jiang Xunjin\*, Zhang Feng, Zheng Xuesong, Jia Rui

(Jiangxi Copper Technology Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

**Abstract** [Objective] According to the *Integrated Wastewater Discharge Standard* (GB 8978—1996), the limited standard of manganese mass concentration in the external drainage water is 2.0 mg/L. A acid mine wastewater treatment plant of a copper mine in Jiangxi whose manganese concentration exceeds has widely sought relevant solutions. Due to its complex composition and large amount of wastewater, the chemical method is adopted because of its large treatment capacity, low cost and strong adaptability while the physical method with high cost and the microbial method with poor adaptability and limited treatment capacity. At the same time, the company requires the prohibition of the use of hazardous chemicals such as potassium permanganate and hydrogen peroxide. [Methods] Based on the above analysis, this paper selected manganese-containing wastewater as the research objective, innovatively used the self-developed manganese removal (DM) composite salt from the research group as the reagent, and explored the influences of different manganese removal reagents, reaction temperature, pH, and reaction time on manganese removal efficiency. [Results] The best agent was DM salt, and the mass concentration of manganese could be reduced to less than 2.0 mg/L with the following optimal reaction conditions: the addition amount of a 20% mass fraction DM salt was 0.5 mL/L, pH value was 6.0, the stirring speed was 300

[收稿日期] 2024-01-15

[基金项目] 江西省赣鄱俊才支持计划(20232BCJ23076)

[通信作者] 江训金(1988—), 男, 研究员, 研究方向为工业废水的处理, E-mail: 1518676445@qq.com.

r/min, and the reaction time was 15 min. In addition, the technology had a low cost of 2 yuan/ $m^3$ , and it had a strong temperature adaptability which had a good removal effect of manganese between 0 °C to 45 °C. Meanwhile, this technology had good compatibility with the existing processes and facilities on site. [ **Conclusion** ] Currently, this technology has been applied in the acid mine wastewater treatment plant and achieves good result, which can provide reference and guidance for solving the problem of excessive manganese content in acid mine water in China.

**Keywords** acid wastewater oxidation sedimentation flocculation and sedimentation manganese removal automatic control system

锰元素是人体生长发育所必需的微量元素<sup>[1-2]</sup>,广泛分布于人体各组织与器官,但是摄入过多会引发呼吸道、血液等方面的众多疾病甚至致死<sup>[3-4]</sup>。因此,在《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中规定企业外排水的总锰质量浓度 $\leq 2.0$  mg/L。

目前去除锰离子的方法可分为 3 类:化学法<sup>[5-15]</sup>、物理法<sup>[16-22]</sup>与微生物法<sup>[23-25]</sup>。物理法具有前期固定投资大、后期运行成本高、处理速度慢、占地面积大、无法处理复杂废水和效果较差等缺点;微生物法具有适应性差、对操作与管理要求较高、处理速度较慢和占地面积较大等缺点。而此次需要处理的废水具有水量大(单套系统最大处理量为 1 000  $m^3/h$ )、成分复杂(高盐、酸性、多重金属)、锰浓度高等特点,且业主要求必须利用现场已有设施以减少投资。因此,物理法与微生物法难以适用,本文重点研究化学法中的氧化沉淀法。氧化沉淀法一般使用的氧化剂为高锰酸钾、次氯酸钠、高铁酸钾等,但是高锰酸钾具有成本高、属于危化品等缺点;次氯酸钠具有反应速度慢、属于危化品等缺点;高铁酸钾具有价格昂贵、水溶液不稳定等缺点,因此相关的研究大多在实验室或者中试装置上进行,实际工业应用案例较少。本文依托实际案例介绍一种全新的除锰(DM)复合盐,并对其除锰效果进行了详细探究,希望可以为类似矿山废水除锰工作的开展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试剂:磷酸三钠[分析级别纯度(AR)]、双氧水(AR)、氧化钙[化学级别纯度(CP)]、次氯酸钠(CP)、高铁酸钾(AR)、氢氧化钠(AR)、高锰酸钾(AR)、硫酸亚锰水合物(AR)、过硫酸钠(AR)等,均采购于国药集团化学试剂有限公司。DM 盐为自制药剂。

### 1.2 试验方法

实验室小试阶段:将硫酸亚锰水合物溶于去离子水配制质量浓度为 100 mg/L 的溶液备用,后续用到的含锰溶液由该溶液稀释获得。取稀释后的溶液

500 mL 置于磁力搅拌器上,加入定量的药剂后搅拌 30 min,静置后取上清液分析锰含量。在条件筛选试验中,pH 值分别设定为 2、4、6、8、10,温度分别设定为 0、30、45 °C,反应时间为 5、10、15、30 min。

现场小试阶段:取现场高浓度泥浆(HDS)系统 2<sup>#</sup>反应池浆料 500 mL 置于磁力搅拌器上,加入定量的药剂后搅拌 30 min,静置后取上清液分析锰含量。

以上每组试验均进行 2 次以上,由 2 人分别进行,取所得结果平均值进行数据分析。

工业试验阶段:现场工艺处理水量为 800  $m^3/h$ ,其余工况条件不变,通过自动控制加药系统控制 HDS 系统 2<sup>#</sup>反应池入口的加药量,每隔 2 h 取 HDS 系统浓密机溢流槽出水分析。

### 1.3 分析项目与方法

试验中检测方法均采用标准方法,其中重金属离子采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)与火焰原子吸收法<sup>[26]</sup>,氨氮采用纳氏试剂分光光度法,铁采用邻菲罗啉分光光度法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 除锰药剂的筛选

对除锰药剂包括碱、硫化物、氧化剂等进行了筛选。试验控制过程:取实验室配制的 20 mg/L 含锰溶液各 500 mL,分别加入一定量的不同种类的除锰药剂,以 300 r/min 的转速搅拌 30 min,最后静置 10 min,取上清液分析,结果如表 1 所示。

表 1 除锰药剂的筛选(单位:mg/L)

Tab. 1 Screening of Manganese Removal Chemicals

(Unit: mg/L)

除锰药剂(药剂代号)	处理前 $Mn^{2+}$	处理后 $Mn^{2+}$
磷酸三钠(药剂 1)	20	15.9
次氯酸钠(药剂 2)	20	1.0
高铁酸钾(药剂 3)	20	<0.5
双氧水(药剂 4)	20	2.6
DM 盐(药剂 5)	20	<0.5
氧化钙(药剂 6)	20	8.2

(续表1)

除锰药剂(药剂代号)	处理前 Mn <sup>2+</sup>	处理后 Mn <sup>2+</sup>
高氯酸钾(药剂7)	20	<0.5
亚氯酸钠(药剂8)	20	<0.5
高锰酸钾(药剂9)	20	<0.5
氢氧化钠(药剂10)	20	<0.5
过硫酸钠(药剂11)	20	0.9

由表1可知,药剂2、药剂3、药剂5、药剂7、药剂8、药剂9、药剂10、药剂11均具有较好的除锰效果,综合考虑药剂成本、药剂稳定性、购买难易程度等因素,初步确定药剂2、药剂3、药剂5、药剂9作为待选药剂并对它们进行其他因素的考察。

## 2.2 溶液温度对药剂除锰效果的影响

考察了反应体系温度对上述几种药剂的除锰效果的影响。试验控制过程:取20 mg/L的含锰溶液500 mL分别加入除锰药剂,置于恒温水浴锅中并以300 r/min的转速搅拌30 min,最后静置10 min,取上清液分析,结果如表2所示。

表2 温度对除锰效果的影响(单位:mg/L)  
Tab. 2 Effect of Temperature on Manganese Removal  
(Unit: mg/L)

药剂代号	0 °C	30 °C	45 °C
药剂2	0.2	0.1	0.6
药剂3	<0.1	<0.1	<0.1
药剂5	0.2	0.2	<0.1
药剂9	<0.1	0.1	<0.1

理论上来说,温度越高,分子间的碰撞越剧烈,反应速度越快。试验分别在0、30、45 °C条件下进行,由表2可知,药剂2在高温条件下的除锰效果略有下降,其他温度下,4种药剂均具有较好的除锰效果。这证明这4种药剂具有较广的温度适应性,可全年应用于我国南方。

## 2.3 溶液 pH 对药剂除锰效果的影响

考察了反应体系 pH 对药剂除锰效果的影响。试验操作过程:取50 mg/L的含锰溶液500 mL,先分别用硫酸、氢氧化钠调整溶液的pH值为2、4、6、8、10,随后加入上述除锰药剂并以300 r/min的转速搅拌30 min,最后静置10 min,取上清液分析,结果如表3所示。

由表3可知,当体系pH较大时,4种药剂的除锰效果均较差;药剂2在中性、碱性条件下的除锰效

表3 pH值对除锰效果的影响(单位:mg/L)  
Tab. 3 Effect of pH Values on Manganese Removal  
(Unit: mg/L)

药剂代号	pH值为2	pH值为4	pH值为6	pH值为8	pH值为10
药剂2	41.6	26.9	10.4	0.2	2.3
药剂3	18.5	12.8	<0.1	0.1	<0.1
药剂5	18.1	10.7	<0.1	<0.1	<0.1
药剂9	23.5	11.7	0.2	<0.1	<0.1

果不如其他3种。这是由于在强酸性条件下,H<sup>+</sup>与Mn<sup>2+</sup>发生竞争反应,影响了药剂的除锰反应。因此,为了保证药剂的除锰效果,结合现场工艺初步确定现场合适的加药点为HDS系统2#反应池入口,既可以保证反应体系有合适的pH,又可以减少药剂用量。

## 2.4 反应时间对药剂除锰效果的影响

考察了反应时间对药剂除锰效果的影响。试验操作过程:取20 mg/L的含锰溶液500 mL,加入上述除锰药剂,分别以300 r/min的转速搅拌5、10、15、30 min,最后静置10 min,取上清液分析,结果如表4所示。

表4 反应时间对除锰效果的影响(单位:mg/L)  
Tab. 4 Effect of Reaction Time on Manganese Removal  
(Unit: mg/L)

药剂代号	5 min	10 min	15 min	30 min
药剂2	5.0	4.7	1.6	0.1
药剂3	0.2	0.2	<0.1	<0.1
药剂5	0.7	0.3	0.1	0.1
药剂9	1.9	1.5	1.5	0.1

由表4可知,药剂2与药剂9在15 min内的除锰效果不佳,药剂3与药剂5的反应速度较快、除锰效果最好,5 min即可快速除锰。但是,结合现场生产工艺,现场反应池最短水力停留时间为15 min,因此反应时间初步定为15 min。

## 2.5 放大试验

完成小试条件筛选后,进一步扩大其规模以观察其效果。试验过程:在中性条件下,将含锰溶液的体积放大至5 L,分别加入相应药剂,以300 r/min的转速搅拌30 min,最后静置10 min,取上清液分析锰含量,观察反应体系放大是否会对除锰效果造成负面影响。试验结果如表5所示。

由表5可知,放大至溶液体积为5 L后,药剂5、药剂9仍具有很好的除锰效果。但是,由表4的试

表 5 扩大试验  
 Tab. 5 Test Scale-Up

药剂代号	溶液体积/L	$Mn^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	
		处理前	处理后
药剂 2	5	20	7.9
药剂 3	5	20	0.6
药剂 5	5	20	<0.1
药剂 9	5	20	<0.1

验数据可知,药剂 9 在 15 min 的反应时间内除锰效果较差,因此,初步选定药剂 5 作为最佳除锰药剂。

### 2.6 现场小试

考虑到实际废水的复杂性,接下来以 HDS 系统 2<sup>#</sup>反应池入口带浆废水进一步开展研究。试验过程:取一定量的带浆废水,加入相应量的药剂 5,搅拌 15 min,最后静置 10 min,取上清液分析锰含量。具体试验结果如表 6 所示。

表 6 现场试验  
 Tab. 6 Field Experiment

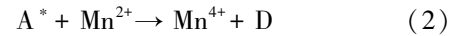
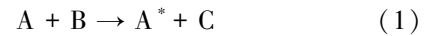
废水量/L	$Mn^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	
	处理前	处理后
0.2	17.4	0.2
0.2	19.7	<0.1
0.2	10.3	<0.1
0.2	12.3	<0.1
0.2	17.1	<0.1
1.0	19.7	0.2
1.0	17.1	0.2
3.0	14.2	<0.1
3.0	18.4	0.8
3.0	16.1	<0.1

由表 6 可知,药剂 5 对现场水样仍具有很好的除锰效果,具有除锰速度快、效率高的特点。同时,利用现场水样对药剂 5 的综合效果进行了进一步确认,并且经第三方检测机构确认,药剂不会对废水中的其他指标产生影响,因此,药剂 5 具备进行下一步工业试验的条件。

### 2.7 药剂成分及反应机理介绍

DM 药剂(药剂 5)是一种组合药剂,由活性成分(A)与活化剂(B)组成,活性成分主要为过硫酸盐;其反应机理为活性成分与活化剂反应生成高活性的自由基,随后自由基迅速将  $Mn^{2+}$  氧化为高价锰

沉淀下来,从而达到去除锰的效果,反应机理如式(1)~式(2)( \* 表示自由基)。



## 3 工业试验效果及成本分析

### 3.1 工业试验效果

工业试验时,在不改变现有处理工艺的基础上仅新增 1 套加药设备,其中加药点位置为 HDS 系统 2<sup>#</sup>反应池入口,系统平均处理水量为 800 m<sup>3</sup>/h,采用小试得到的最佳工艺参数考察药剂 5 除锰效果的有效性以及自控系统应对各种突发工况时的稳定性。经过 1 个月的工业试验,系统经受住了各种极端工况的考验,外排水锰含量达标且不影响其他指标。具体工业试验结果如图 1、图 2 所示。

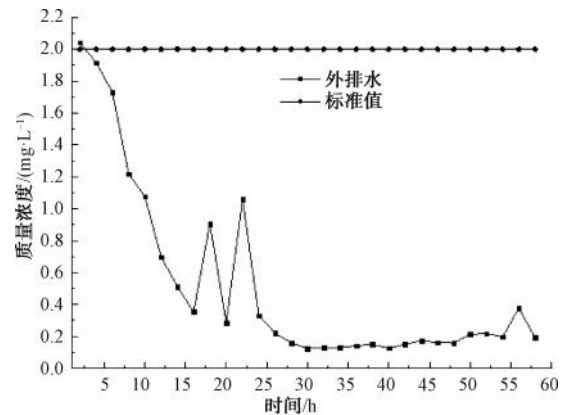


图 1 工业试验期间(第 1 批次)外排水锰浓度  
 Fig. 1 Manganese Concentration in Effluent during Industrial Experiments (Batch 1)

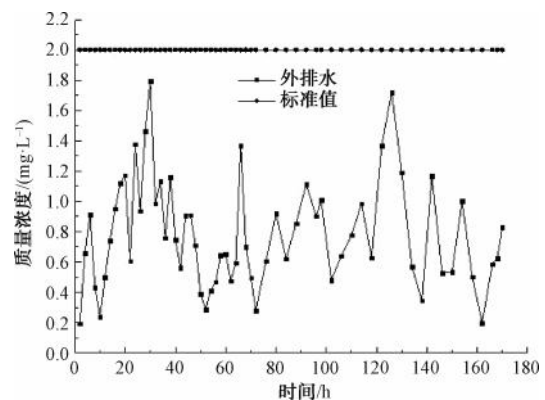


图 2 工业试验期间(第 2 批次)外排水锰浓度  
 Fig. 2 Manganese Concentration in Effluent during Industrial Experiments (Batch 2)

由图 1 可知,随着手动控制除锰药剂的加入,外排水锰含量急剧下降,锰质量浓度大部分维持在 0.5 mg/L 以下,远低于标准排放值,严重浪费药剂,造成处理成本上升。由图 2 可知,通过自动控制系统降低药剂用量,外排水锰质量浓度基本上在 0.5~1.0 mg/L,极大地减少了药剂用量,降低处理成本。整个工业试验期间,水中锰质量浓度在 50~400 mg/L,而酸性水处理站外排水经第三方机构检测锰质量浓度均小于 2.0 mg/L,符合国家相关规定。同时,试验期间沉淀的絮凝效果、外排水的外观、气味等其他指标未受到影响。因此,该除锰技术具备工业化应用前景。由于实验室试验属于静态试验,溶液 pH、锰含量比较稳定,因此,比较容易控制药剂用量确保锰浓度维持在比较狭小的范围;而工业试验时溶液 pH、锰含量波动较大,因此,前期难以控制锰浓度维持在比较狭小的范围。鉴于试验期间大部分时间锰质量浓度小于 1.0 mg/L 且波动比较大,后期通过引入一条恒流加药管路及优化自动控制系统以尽可能减少波动,使锰质量浓度稳定在 1.5 mg/L 左右,提高去除率,降低运行成本。目前,该技术已经在该企业稳定运行 12 个月,运行期间外排水水质稳定达标,符合国家《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)规定的锰质量浓度不高于 2.0 mg/L。

### 3.2 运行成本分析

改造后的运行成本为 20 万元/t,以 HDS 系统 1<sup>#</sup>反应池出水平均锰质量浓度为 10 mg/L 计算,运行成本为 2 元/m<sup>3</sup> 左右。

## 4 结论

(1)采用 DM 盐氧化絮凝沉淀法可以有效去除工业废水中高浓度的锰,适宜的工艺条件为:质量分数为 20%的 DM 盐溶液添加量为 0.5 mL/L、工业废水体系 pH 值为 6、搅拌速度为 300 r/min、反应时间为 15 min,此时可将废水中的锰质量浓度降至 2.0 mg/L 以下,符合相关的排放标准。

(2)工业运行期间外排水锰质量浓度一直维持在小于 2.0 mg/L,证明该药剂的除锰效果较好,具有无色、无味、非危化品、除锰速度快、效率高、适应性强等特点。

(3)该除锰技术已在相关企业稳定运行 12 个月,证明该技术具有很好的稳定性与可靠性,能够适应不同工况及极端情况的变化。该先进技术以及改

造经验,可为类似矿山酸性水锰浓度超标问题的处理提供借鉴与参考。

(4)该技术虽然具有较好的除锰效果,但是在工业试验与工业运行过程中发现,外排水锰浓度波动较大、抗冲击能力较弱,未来可以从增加自控系统及优化与之相关的监测指标等方面改进;另外,药剂处理成本偏高,未来药剂的开发可以从整合沉淀而非氧化机理的方向出发;最后,未来废水中锰的脱除应以资源化回收以及高值化利用为研究方向。

## 参考文献

- [1] 鲍羽. 微量元素与人的健康[J]. 邵阳师范高等专科学校学报, 2015, 35(6): 16-19.  
Bao Y. Trace element and human body health[J]. Journal of Yunyang Teachers College, 2015, 35(6): 16-19.
- [2] 马彦平, 石磊, 何源. 微量元素铁、锰、硼、锌、铜、钼营养与人体健康[J]. 肥料与健康, 2020, 47(5): 12-17.  
Ma Y P, Shi L, He Y. Trace elements iron, manganese, boron, zinc, copper, molybdenum and human health[J]. Fertilizer & Health, 2020, 47(5): 12-17.
- [3] 荆俊杰, 谢吉民. 微量元素锰污染对人体的危害[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(2): 6-9.  
Jing J J, Xie J M. Hazards of manganese pollution to health[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2008, 15(2): 6-9.
- [4] Qi Y M, Si H F, Jin X F, et al. Changes in serum TIM-3 and complement C3 expression in workers due to Mn exposure[J]. Frontiers in Public Health, 2023, 11: 1289838. DOI: 10.3389/fpubh.2023.1289838.
- [5] Shen C Y, Zhang C M, Huang Z G, et al. Ozone pre-oxidation to accelerate the ripening of manganese oxides filter for efficient manganese removal from drinking water[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354: 128645. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.128645.
- [6] 李美娴, 杨勇, 陆青艳, 等. 高浓度含锰废水的处理及资源化利用[J]. 中国锰业, 2017, 35(S1): 51-54.  
Li M X, Yang Y, Lu Q Y, et al. Treatment and resource utilization of wastewater with high manganese concentration[J]. China Manganese Industry, 2017, 35(S1): 51-54.
- [7] 尹翠琴, 丁亚洲, 王凌峰, 等. 自来水厂臭氧预氧化工艺除锰应用效果研究[J]. 城镇供水, 2023(2): 14-17.  
Yin C Q, Ding Y Z, Wang L F, et al. Application effect of ozone pre oxidation process for manganese removal in waterworks[J]. City and Town Water Supply, 2023(2): 14-17.
- [8] 朱满四. 次氯酸钠应急处理突发锰污染厂试研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(5): 22-25.  
Zhu M S. Plant pilot study on sodium hypochlorite emergency treatment of sudden manganese pollution [J]. Shanxi

- Architecture, 2023, 49(5): 22-25.
- [ 9 ] 程永康, 王锡良, 张含斌, 等. 水库水锰超标去除方法及高锰酸钾除锰[J]. 净水技术, 2021, 40(S2): 76-79, 83.  
Cheng Y K, Wang X L, Zhang H B, et al. Removal methods of excess manganese in reservoir water and removal of manganese by potassium permanganate [ J ]. Water Purification Technology, 2021, 40(S2): 76-79, 83.
- [ 10 ] 杨学光, 陈丽琼, 刘娟. 饮用水中二氧化氯除锰应用实例[J]. 净水技术, 2020, 39(4): 156-159.  
Yang X G, Chen L Q, Liu J. Application of chlorine dioxide on manganese removal in drinking water [ J ]. Water Purification Technology, 2020, 39(4): 156-159.
- [ 11 ] 贺宁, 熊珊, 熊道文, 等. 电絮凝法处理含锰废水试验研究[J]. 工业用水与废水, 2013, 44(6): 24-26.  
He N, Xiong S, Xiong D W, et al. Treatment of manganese-containing wastewater by periodic reversal electrocoagulation[J]. Industrial Water & Wastewater, 2013, 44(6): 24-26.
- [ 12 ] Shafaei A, Rezayee M, Arami M, et al. Removal of  $Mn^{2+}$  ions from synthetic wastewater by electrocoagulation process [ J ]. Desalination, 2010, 260(1/2/3): 23-28. DOI: 10.1016/j.desal.2010.05.006.
- [ 13 ] Ince M. Treatment of manganese-phosphate coating wastewater by electrocoagulation [ J ]. Separation Science and Technology, 2013, 48(3): 515-522.
- [ 14 ] 尹双星, 李贵伟, 齐天天, 等. 粉末活性炭催化氯氧化法去除北方某大型水库水中锰[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 73-80.  
Yin S X, Li G W, Qi T T, et al. Catalytic chloride oxidation with PAC process for manganese removal in water of a large reservoir in northern China [ J ]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 73-80.
- [ 15 ] 陈晨, 杨颖. 高锰酸钾除锰法在高锰水处理中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 135-138.  
Chen C, Yang Y. Application of Mn removal by potassium permanganate in high-manganese water treatment [ J ]. Water Purification Technology, 2019, 38(10): 135-138.
- [ 16 ] 冯昌龙, 刘成, 李聪聪, 等. 生物活性炭工艺的除锰效能及作用机制[J]. 净水技术, 2022, 41(12): 137-146.  
Feng C L, Liu C, Li C C, et al. Efficiency and mechanism of biological activated carbon process for manganese removal [ J ]. Water Purification Technology, 2022, 41(12): 137-146.
- [ 17 ] 秦娟, 杨尚文, 鲍雨晴, 等. 钙铝黄长石陶粒改性及处理含锰废水效能[J]. 环境工程, 2022, 40(8): 47-54.  
Qin J, Yang S W, Bao Y Q, et al. Modification of gehlenite ceramicsite and its treatment efficiency on manganese-containing wastewater [ J ]. Environmental Engineering, 2022, 40(8): 47-54.
- [ 18 ] Cándido G C, Santos A A, Santiago A F, et al. Insights into manganese removal from mine water by *Chlorella vulgaris* [ J ]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 21(5): 4715-4726.
- [ 19 ] 白朗明, 赵焯琦, 丁俊文, 等. 改性硅铝矿石除锰效能及机制研究[J]. 给水排水, 2020, 46(S2): 10-16.  
Bai L M, Zhao X Q, Ding J W, et al. Study on removal of manganese from modified silica alumina sand [ J ]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(S2): 10-16.
- [ 20 ] Kononova O N, Bryuzgina G L, Apchitavea O V, et al. Ion exchange recovery of chromium ( VI ) and manganese ( II ) from aqueous solutions [ J ]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(8): 2713-2720.
- [ 21 ] 邓慧东, 舒祖骏, 周志全, 等. 离子交换法从某铀尾矿库废水中除锰技术研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(2): 115-118.  
Deng H D, Shu Z J, Zhou Z Q, et al. Removing manganese from effluent in the tailing pond of one uranium milling plant by ion exchange [ J ]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(2): 115-118.
- [ 22 ] Fatemeh Seyedpour S, Rahimpour A, Mohsenian H, et al. Low fouling ultrathin nanocomposite membranes for efficient removal of manganese [ J ]. Journal of Membrane Science, 2018, 549: 205-216. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.12.012.
- [ 23 ] Therdkiatikul N, Kidkhunthod P, Chairapa J, et al. Initial stage of innovative cell-entrapped biofilter start-up for removal of manganese in water: Treatment performance, manganese speciation, and microbial community [ J ]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 54: 103951. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103951.
- [ 24 ] 铁文周, 农小芳, 赵伊, 等. 微生物除 Mn ( II ) 机制及影响因素研究进展[J]. 生物工程学报, 2022, 38(1): 14-25.  
Tie W Z, Nong X F, Zhao Y, et al. The mechanism of microbial removal of Mn ( II ) and its influencing factors: A review [ J ]. Chinese Journal of Biotechnology, 2022, 38(1): 14-25.
- [ 25 ] 陈建军, 翁国永. 除锰菌筛选及其生物活性[J]. 净水技术, 2017, 36(12): 79-83.  
Chen J J, Weng G Y. Screening of manganese removal microorganism and the performance of biological activity [ J ]. Water Purification Technology, 2017, 36(12): 79-83.
- [ 26 ] 邵海青. 火焰原子吸收法测定硫酸铜中锰和铬[J]. 铜业工程, 2001(1): 59-60.  
Shao H Q. FAAS determination of manganese and chromium in cupric sulphate [ J ]. Copper Engineering, 2001(1): 59-60.