

混凝沉淀法处理钨多金属矿选矿废水

郭朝晖, 姜智超, 刘亚男, 王 硕

(中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘 要: 多金属矿选矿废水具有悬浮物浓度和化学需氧量(COD)高、重金属浓度低但种类多等特点, 难以稳定达标排放。采用含铝无机高分子混凝剂和有机助凝剂两步混凝沉淀处理钨铋钼矿选矿废水, 24 h 现场动态取样研究表明, 混凝沉淀法可高效处理钨多金属矿选矿废水。在废水中先后投加 0.75%(体积分数)质量浓度为 27 g/L(以铝计)的含铝无机高分子混凝剂和 0.5%(体积分数)质量浓度为 1 g/L 的有机助凝剂, 混凝沉淀 4 min 后, 选矿废水浊度去除率达 96.5%以上, COD 去除率达 70%左右; 废水中 As 和 Pb 去除率分别达 90%和 97.6%以上, Be 和 Cd 去除率几乎达 100%。处理后废水浊度小于 50 NTU、COD 平均含量降至 58 mg/L, 废水中 As 和 Pb 浓度分别降至 0.5 mg/L 和 80 $\mu\text{g/L}$ 以下, 未检出 Be 和 Cd, 出水水质满足《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准。

关键词: 钨铋钼矿; 多金属矿选矿废水; 混凝沉淀法; 现场试验

中图分类号: X703

文献标志码: A

Coagulation and sedimentation treating wastewater from W containing multi-metal ore dressing process

GUO Zhao-hui, JIANG Zhi-chao, LIU Ya-nan, WANG Shuo

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Dressing wastewater is characterized by several aspects, such as high suspended solids and chemical oxygen demand (COD) concentration, low metal concentrations, and hardly meets the discharge demand, and so on. In this work, the treatment of wastewater from W, Bi and Mo ore dressing process using inorganic polymer coagulant containing aluminum followed with organic flocculant was studied through 24-hour dynamic test on site. The results show that the wastewater from W containing multi-metal ore dressing process can be treated effectively by the coagulation combined with sedimentation. When 0.75% (volume percentage) inorganic containing aluminum polymer coagulant of 27 g/L (balance with aluminum) and 0.5% (volume percentage) organic flocculant of 1 g/L were added to the wastewater from W, Bi and Mo ore dressing process, the removal percentage of wastewater turbidity exceeds 96.5% after 4 min, that of COD is about 70%, and those of As and Pb in wastewater exceed 90% and 97.6%, while those of Be and Cd are both almost 100%, respectively. The residual concentrations of turbidity and COD in wastewater are only 50 NTU and 58 mg/L, while those of As and Pb are less than 0.5 mg/L and 80 $\mu\text{g/L}$ and of Be and Cd are below the detection limit, respectively. After coagulation and sedimentation, the quality of wastewater from W, Bi and Mo ore dressing process can meet the grade I level of the National Integrated Wastewater Discharge Standard (GB 8978-1996).

Key words: W, Bi and Mo ore; multi-metal ore dressing wastewater; coagulation-sedimentation method; field test

选矿企业产生的废水中化学需氧量(COD)、重金属离子浓度和固体悬浮物(SS)含量等均不同程度地超过《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)。由于排放量大, 因此对选矿企业周边环境构成了较大的潜在污

染^[1]。国内外选矿废水处理主要有化学沉淀法^[2]、混凝法^[3]、吸附法^[4-5]和生物法^[6-7]等。目前, 选矿废水处理普遍采用石灰中和沉淀等传统方法, 存在如下问题: 沉降速度慢, 石灰消耗量大^[8], 处理效果受废水温度、

pH 值等影响^[9], 且污泥产生量大, 污泥沉淀时间长, 难以快速泥水分离, 出水水质难以稳定达标等。近年来, 采用混凝法处理铅锌、钨业等选矿废水研究较多^[1, 10-14]。对铅锌选矿废水, 采用混凝沉淀—活性炭吸附—回用工艺处理, 用 30 mg/L 明矾与 0.2 mg/L 聚丙烯酰胺混凝沉淀后, 投加 200 mg/L 粉末活性炭吸附净化, 出水中 COD_{Cr} 含量降至 160 mg/L, Pb 质量浓度降至 0.8 mg/L^[1]; 采用 84 mg/L 聚合硫酸铁-FeSO₄ 复合混凝剂和 1 g/L Na₂S 处理, 出水中 Cu、Pb、Zn 和 Cr 质量浓度分别降至 0.098、0.001、0.29 和 0.42 mg/L, 浊度降至 1.2 NTU^[10]。对钨业选矿废水, 当新型高效复合絮凝剂投加量为 120 mg/L 时, 出水中 SS 低于 10 mg/L^[11]; 以 16 mg/L 三氯化铁处理钨矿选矿废水, 处理后废水中 SS 和 COD_{Cr} 含量均低于 50 mg/L, pH 为 6.5 左右^[12]。对钨矿尾矿库废水, 采用石灰脱稳—絮凝剂沉降法处理, 用石灰乳调节 pH 值至 11.5 并静置 10 min 后加入聚丙烯酰胺, 处理后废水上清液 pH 值为 8.5, SS 降至 128 mg/L, COD_{Cr} 含量低于 50 mg/L, Pb、Cd、As 质量浓度依次降至 0.03、0.005 和 0.064 mg/L^[13]。对钨铋选矿废水, 采用聚硅酸硫酸铝铁絮凝剂处理后废水浊度可降至 70 NTU, COD_{Cr} 含量降至 72 mg/L, As、Be 和 Pb 质量浓度分别降至 34、0.2 和 13 μg/L, 达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996) 一级标准^[14]。聚合氯化铁、聚合硫酸铁等无机高分子絮凝剂在选矿废水处理中具有絮凝能力强等优势^[15]。本文作者针对钨多金属矿复杂难处理选矿废水, 利用本课题组研制的含铝无机高分子混凝剂和有机助凝剂组合, 在某钨铋钼多金属矿选矿厂开展现场试验, 为混凝沉淀处理钨铋钼选矿废水的工程应用提供科学依据。

1 实验

1.1 钨铋钼矿选矿废水的基本特性

湖南省某多金属矿是以钨、铋为主的多金属矿床, 伴生有钼、萤石、石榴石、铁(磁铁矿、磁黄铁矿)等矿石。本研究中钨铋钼矿选矿废水取自其 3 个多金属

矿选矿厂, 选厂 1 以钨钼矿为主, 选厂 2 以钨铋矿为主, 选厂 3 以钨铋钼矿为主, 产生的废水(依次分别用 DW1、DW2 和 DW3 表示)总排放量约为 3000 m³/d。废水呈深灰色, pH 值变化范围为 8.27~11.79(见表 1)。为提高钨、铋和钼精矿收率, 3 个选厂均采用细磨浮选工艺, 选矿过程中大量投加具有强分散性的硅酸钠等多种浮选药剂, 导致产生的选矿废水具有硅酸钠含量高、碱度大、SS 含量高、废水体系稳定性强。

从表 1 中可以看出, 3 种供试选矿废水中 SS 和 COD 含量高, 废水中 As、Be、Cd、Pb 等含量均超过《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)。

1.2 现场试验设计

钨铋钼矿选矿废水处理采用本课题组研发的混凝沉淀工艺: 首先, 选矿废水与复配的含铝无机高分子混凝剂反应使废水快速脱稳并高效絮凝; 然后, 投加有机助凝剂进一步使絮体粗化并快速沉降, 实现泥水高效分离。现场连续 24 h 动态取样试验中(取样时间 1 代表凌晨 1 时, 3 代表凌晨 3 时, 其他依此类推), 同时从 3 个选厂废水原水排放口取废水样。其中, 在废水水质波动幅度较大的白天时段(8~17 h 时段)每隔 1 h 取样一次, 在废水水质波动幅度较小的傍晚和夜间时段(17~8 h 时段)每隔 2~3 h 取样一次, 共计采样 16 次。现场测定处理前后废水的 pH 值和处理后废水的浊度。试验时, 取 4 L 原废水于 5 L 大塑料烧杯中, 首先向废水中均匀、缓慢地加入 0.75%(体积分数)质量浓度为 27 g/L(以铝计)的含铝无机高分子混凝剂, 以 250 r/min 的转速搅拌 2 min, 然后加入 0.5%(体积分数)质量浓度为 1 g/L 的有机助凝剂, 再以 250 r/min 转速搅拌 2 min, 静置 30 min 后, 于液面下 2~3 cm 处取上清液测定处理后废水浊度和 pH 值。处理前后废水均带回实验室进行 SS、COD 和重金属全量检测。

1.3 测试方法

选矿废水的 COD 按照《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》(HJ/T 399-2007)测定; 废水 pH 值采用 pH 计(PHSJ-3F, 上海精密科学仪器有限公司

表 1 钨铋钼矿选矿废水的基本特性

Table 1 Basic properties of wastewater from W, Bi and Mo ore dressing process

Sample No.	pH	$\rho(\text{COD})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SS})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{As})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Be})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cd})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Pb})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
DW1	9.16-11.20	0.11-1.01	1.73-74.52	0.40-2.50	0.50-3.30	0.01-0.20	2.40-8.10
DW2	8.95-11.79	0.10-2.86	0.09-17.97	0.50-14.30	0.04-2.40	0.02-0.50	1.50-32.00
DW3	8.27-9.89	0.16-0.63	6.61-23.64	1.00-9.20	0.90-2.10	0.04-0.20	1.40-11.70

生产)测定;处理前废水悬浮物含量按照《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901-89)方法测定;处理后废水浊度采用光电浊度仪(WZT-3A,上海劲佳科学仪器有限公司生产)测定;原废水用王水消解,处理后的废水用硝酸消解,消解液中 As、Be、Cd 和 Pb 浓度采用 ICP-AES(PS-6 真空型电感耦合等离子体原子发射光谱仪,美国 Baird 公司生产)测定。

2 结果与分析

2.1 废水中重金属的去除效果

图1所示为混凝沉淀对钨铋钼矿选矿废水中 As、Be、Cd 和 Pb 的去除效果。从图1中可以看出,原废水 DW1、DW2 和 DW3 中 As 浓度依次为 0.40~2.50 mg/L、0.50~14.30 mg/L 和 1.00~9.20 mg/L, As 浓度较高,处理后废水中 As 去除率达到 90%以上,残留浓度低于 0.50 mg/L。原废水中 Be 含量具有变化范围广、浓度高的特点。原废水 DW1、DW2 和 DW3 中 Be 含

量依次为《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级排放标准的 100~660、8~480 和 180~420 倍,处理后废水中 Be 去除率几乎为 100%。不同时间段同一选厂原废水中 Cd 和 Pb 含量变化范围较大。原废水 DW1 和 DW2 中 Cd 浓度分别高达 0.20 和 0.50 mg/L,尤其是 DW2 中 Pb 浓度高达 32 mg/L,是《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级排放标准的 32 倍。处理后废水中 Cd 去除率几乎达到 100%,Pb 去除率达到 97.6%以上。废水中 As、Be、Cd 和 Pb 浓度均达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准。这与前期报道的聚硅酸硫酸铝铁絮凝剂可高效去除选矿废水中重金属的研究结果相一致^[14]。

2.2 废水浊度的去除效果

图2所示为混凝沉淀法对钨铋钼矿选矿废水中浊度的去除效果。从图2可以看出,3个选厂原废水中悬浮物含量高、浊度变化幅度大。原废水 DW1、DW2 和 DW3 中浊度分别为 $22.30 \times 10^2 \sim 978.93 \times 10^2$ 、 $1.44 \times 10^2 \sim 236.26 \times 10^2$ 和 $87.00 \times 10^2 \sim 310.00 \times 10^2$

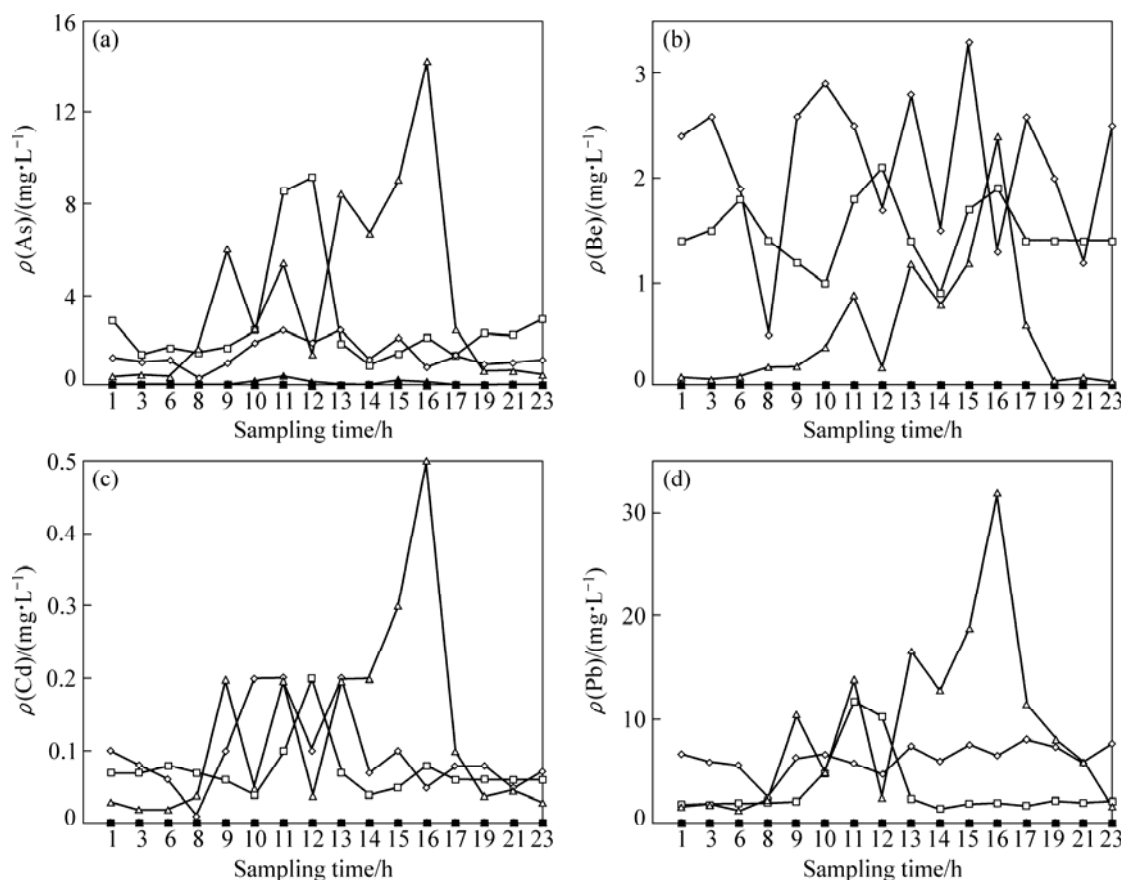


图1 混凝沉淀对钨铋钼矿选矿废水中 As、Be、Cd 和 Pb 的去除效果

Fig. 1 Effect of coagulation and sedimentation on removal of As (a), Be (b), Cd (c) and Pb (d) in wastewater from W, Bi and Mo ore dressing process: ◇—DW1(Before cleaning); ◆—DW1(After cleaning); △—DW2(Before cleaning); ▲—DW2(After cleaning); □—DW3(Before cleaning); ■—DW3(After cleaning)

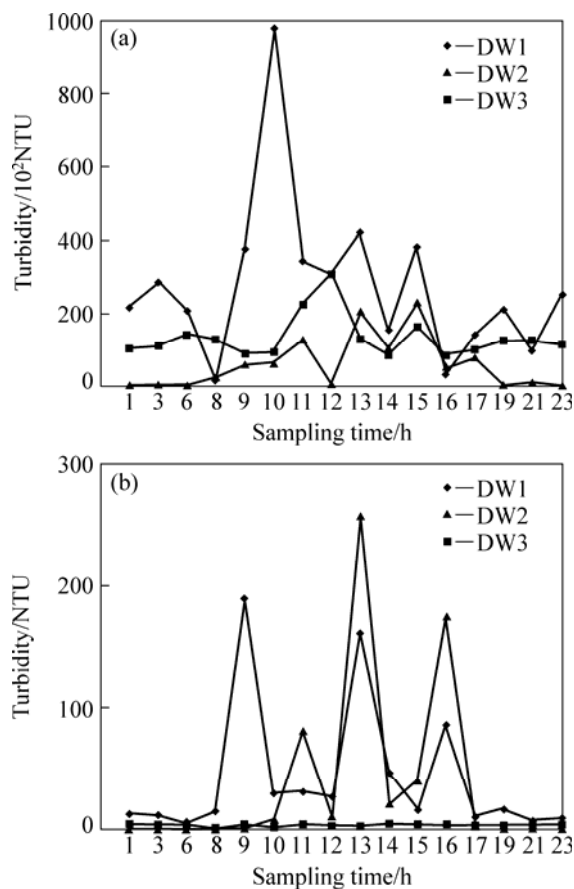


图2 混凝沉淀法对钨铋钼选矿废水中浊度的去除效果
Fig. 2 Effect of coagulation and sedimentation on removal of turbidity in wastewater from W, Bi and Mo ore dressing process: (a) Before cleaning; (b) After cleaning

NTU, 对应废水中悬浮物浓度依次达到 1.73~74.52、0.09~17.97 和 6.61~23.64 g/L。处理后 3 个选厂废水中浊度去除率分别大于 97.5%、96.5%和 99.5%, 选矿废水浊度得到高效去除, 废水中残留浊度基本满足国家《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准。由于所用含铝无机高分子混凝剂和有机助凝剂中含有多种形态的羟基络合物, 具有吸附电中和以及卷扫作用, 其吸附包裹在悬浮物表面之后絮凝架桥, 使絮体变大沉淀。这与前期报道的石灰脱稳-絮凝剂沉降法能大幅度降低含有大量水玻璃等分散剂的钨矿尾矿库废水浊度的研究结果相一致^[13]。值得关注的是, 现场试验过程中, 选厂 1 在 9 h 和 13 h 时段废水残留浊度分别为 190.4 和 162.5 NTU, 选厂 2 在 13 h 时段废水残留浊度为 259 NTU, 仅符合《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)二级标准 420 NTU(SS 300 mg/L), 与一级标准 157 NTU(SS 100 mg/L)存在明显差距。这两个时段恰好为选矿过程中浮选药剂集中投加时段, 大量的

硅酸钠等浮选药剂使废水中微细悬浮物形成较为稳定的胶体分散系, 严重影响了含铝无机高分子混凝剂和有机助凝剂的快速脱稳絮凝效果, 造成废水浊度偏高, 必须采取相应的处理措施进行综合处理。

2.3 废水中 COD 的去除效果

3 个选厂原废水中 COD 值差异较大。DW1 和 DW3 原废水中 COD 整体含量低于 1.00 g/L, DW2 原废水中 COD 含量变化范围大, 最高浓度达到 2.86 g/L。处理后废水中 COD 大幅下降, 3 个选厂 COD 平均值分别为 73.80、72.10 和 30.20 mg/L(见图 3)。含铝无机高分子混凝剂和有机助凝剂对钨铋钼选矿废水中有机物的去除主要是通过电中和作用、网捕作用以及吸附络合形成难溶聚合物而沉淀^[16], 与前期报道的 FeCl₃ 混凝处理钨矿选矿废水时 COD 大幅度降低的研究结果一致^[12]。然而, DW1 在 11 h、13~16 h 时段, DW2 在 11~15 h 时段以及 DW3 在 13 h 时段处理后废水的 COD 值介于《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一

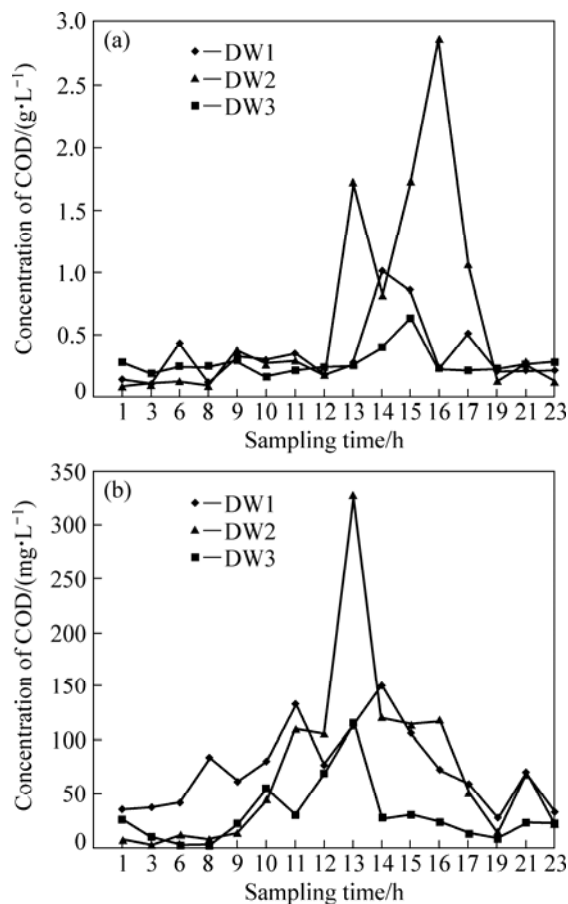


图3 混凝沉淀法对钨铋钼选矿废水中 COD 的去除效果
Fig. 3 Effect of coagulation and sedimentation on removal of COD in wastewater from W, Bi and Mo ore dressing process: (a) Before cleaning; (b) After cleaning

级标准 100 mg/L 和二级标准 150 mg/L 之间,甚至个别处理后废水中 COD 值更大。因此,在选矿过程中集中投加或投加起分散作用的硅酸钠等浮选药剂后的高峰时段,同样必须采取相应的处理措施进行综合处理。

上述试验结果表明,混凝沉淀两步处理过程中,存在个别时段废水的浊度和 COD 值均未能满足《污水综合排放标准》一级标准,说明混凝效果受浮选工艺药剂投加量、废水浊度及废水中各种无机和有机杂质等影响^[17-18]。为此,针对选矿废水经处理后废水浊度和 COD 值超标时段对应的 3 个选厂废水等比例混合进行混凝沉淀处理,处理后废水浊度和 COD 值分别达到 37 NTU 和 43 mg/L, As 和 Pb 含量分别降至 0.5 mg/L 和 80 $\mu\text{g/L}$ 以下,未检出 Be 和 Cd,全部检测指标达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准。上述结果进一步表明,采用混凝沉淀两步处理钨铋钼矿选矿废水,可以根据废水水质波动情况分时段适当调整混凝剂和有机助凝剂的投加量。在废水水质稳定的大部分时段,可以减少混凝剂和助凝剂的投加量;在废水水质剧烈波动的特殊时段,可以适度增加混凝剂和助凝剂的投加量及其配比^[19],快速解决浮选药剂投加时段造成的废水浮选药剂浓度过高导致废水浊度和 COD 值难以大幅度降低的现象,最终实现钨铋钼矿选矿废水的稳定达标排放。

2.4 混凝沉淀处理对废水 pH 值的影响

原废水 DW1、DW2 和 DW3 pH 值的变化范围分别为 9.16~11.20、8.95~11.79 和 8.27~9.89(见图 4),废水主要呈碱性或强碱性。处理后废水 pH 值均不同程度地下降,3 个选厂废水 pH 值范围依次为 7.91~10.71、7.77~11.64 和 7.61~8.93,下降幅度明显,但部分废水 pH 值仍不达标。DW1 在 8~14 h 时段 pH 值均为 10 左右, DW2 在 11 h、12 h、14~17 h 和 23 h 时段 pH 值均在 10~12 之间,超过《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准(pH 值为 6~9)。原废水 DW3 的 pH 值则全部达标。这表明,该混凝剂和有机助凝剂对 pH 值变幅范围较宽的碱性废水处理效果稳定。随着废水中含铝无机高分子混凝剂不断加入,废水 pH 值下降,这与前期报道的絮凝剂对废水 pH 值影响结论一致^[14]。然而,由于浮选过程中针对不同特性的矿石原料投加了大量不同的浮选药剂,造成原废水 pH 值过高,尽管混凝剂和有机助凝剂有较强的选矿废水处理适应能力,且混凝剂中阳离子可与废水中 OH^- 结合生成氢氧化物,但由于投加量少,处理后废水 pH 值难以稳定达标。上述钨铋钼矿选矿废水经处理后碱度明显过高,需要酸中和等辅助措施来进行调整处理。

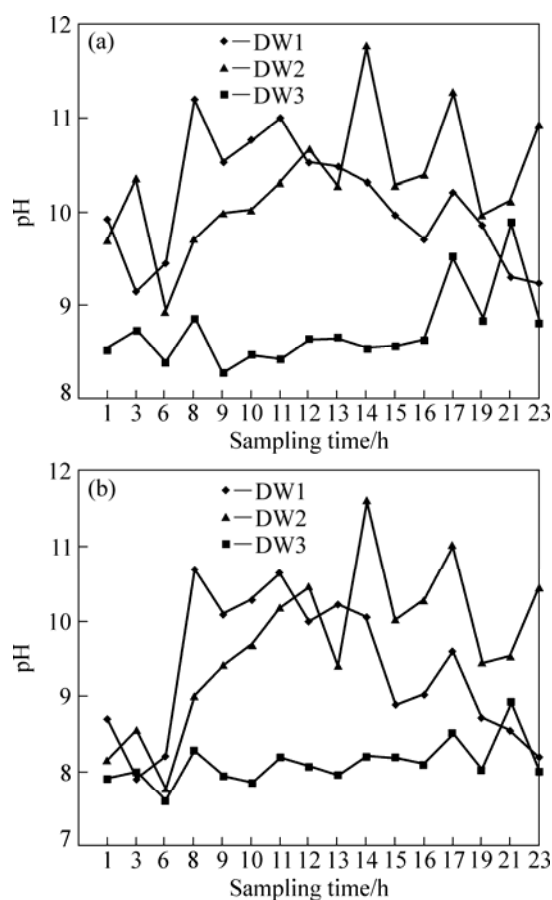


图4 混凝沉淀法对钨铋钼矿选矿废水 pH 值的影响

Fig. 4 Effect of coagulation and sedimentation on pH value of wastewater from W, Bi and Mo ore dressing process: (a) Before cleaning; (b) After cleaning

3 讨论

采用传统混凝沉淀法处理选矿废水,对废水 pH 值要求较高^[20]、反应时间较长^[10]。在本研究中,采用含铝无机高分子混凝剂和有机助凝剂对选矿废水进行两步处理,对大幅度 pH 值范围废水有较好适应性,反应时间仅为 4 min,不但处理效果较为理想,而且大大减少了絮体污泥产生量。含铝无机高分子混凝剂 Al(III)在溶液中发生“自发水解”和“强制水解”两个过程^[21],生成大量有较高稳定性的聚十三铝,在一定时间和 pH 值范围内,可以保持自身形态不变,并立即吸附在废水中颗粒物表面。此外,含铝无机高分子混凝剂中铝的水解-混凝过程中 Al(III)随着水解度增加而不断变化。在水解度较低时,混凝剂中铝离子主要以羟基络合物形态存在;随着水解度增加,铝离子主要以单核羟基铝离子形态存在;当水解程度进一步提

高, 水解生成多核络合物或低聚物而凝聚脱稳^[22]; 有机助凝剂的投加进一步促进了废水中重金属离子的配合, 吸附并贮存在废水污泥中, 随着絮体不断长大而快速沉降^[23]。此外, 在碱性环境下混凝沉淀时, 其中无机阳离子逐渐水解形成氢氧化物聚集体, 同时阴离子聚合形成的带负电的凝聚体不断积聚长大, 产生明显的吸附架桥作用, 具有更好的混凝效果^[22], 使得废水中重金属离子浓度迅速降低。因此, 采用混凝沉淀两步处理钨铋钼矿选矿废水, 首先通过含铝无机高分子混凝剂的电中和、网捕以及吸附络合作用与有机物及悬浮物形成难溶聚合物而沉淀, 再利用有机助凝剂对废水中细絮体和剩余杂质进一步絮凝、粗化并快速沉淀, 从而使出水水质达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准。

4 结论

1) 在钨铋钼矿选矿废水中先后投加 0.75%(体积分数)质量浓度为 27 g/L(以铝计)的含铝无机高分子混凝剂和 0.5%(体积分数)质量浓度为 1 g/L 的有机助凝剂, 混凝沉淀 4 min 后, 废水中浊度去除率达到 96.5%以上, COD 去除率达 70%左右, 处理后废水浊度低于 50 NTU, COD 平均值达到 58 mg/L; 废水中 As 和 Pb 去除率依次达 90%和 97.6%以上, Be 和 Cd 去除率几乎达到 100%; 处理后废水中 As 和 Pb 的质量浓度分别降至 0.5 mg/L 和 80 $\mu\text{g/L}$ 以下, 未检出 Be 和 Cd, 出水水质完全满足《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)一级标准。表明两步混凝沉淀法可以高效净化钨多金属矿选矿废水。

2) 含铝无机高分子混凝剂和有机助凝剂两步混凝沉淀对钨多金属矿选矿废水的处理效果稳定。在细磨浮选工艺中集中投加浮选药剂的个别时段, 通过调整混凝剂和有机助凝剂的配比及投加量并将选矿废水集中混合处理, 可实现废水稳定达标排放。

3) 在钨多金属矿选矿过程中, 针对不同类型矿石和选别目标, 选矿工艺中不同时段投加的浮选剂及其种类不同, 造成废水 pH 值波动幅度较大, 需用加酸等措施中和碱度, 使废水 pH 值稳定达标。

致谢

感谢湖南柿竹园有色金属有限责任公司魏大为和肖文工工程师在多金属矿选厂现场废水取样过程中给予的支持和帮助!

REFERENCES

- [1] 赵永斌, 袁增伟, 戴文灿, 孙水裕, 刘如意. 混凝吸附处理选矿废水的研究[J]. 广东工业大学学报, 2001, 18(4): 94-97.
ZHAO Yong-bin, YUAN Zeng-wei, DAI Wen-can, SUN Shui-yu, LIU Ru-yi. A study of the coagulative precipitation adsorption of floatation wastewater[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2001, 18(4): 94-97.
- [2] 李建永. 葫芦岛锌厂重金属废水的治理与回用[J]. 有色金属, 2002, 54(4): 117-119.
LI Jian-yong. Disposal and reuse of heavy metal wastewater from Huludao zinc plant[J]. Nonferrous Metals, 2002, 54(4): 117-119.
- [3] 刘睿, 周启星, 张兰英, 王兵, 孙丕武. 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.
LIU Rui, ZHOU Qi-xing, ZHANG Lan-ying, WANG Bing, SUN Pi-wu. Advances in research and application of water-treatment flocculants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(8): 1558-1562.
- [4] EI-SHAFFEY E, COX M, PICHUGIN A A, APPLETON Q. Application of a carbon sorbent for the removal of cadmium and other heavy metal ions from aqueous solution[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2002, 77(4): 429-436.
- [5] 朱静, 吴丰昌. 改性粉煤灰在处理铋矿选矿废水中的应用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 361-367.
ZHU Jing, WU Feng-chang. Treatment of wastewater released from antimony ore processing using acidified coal fly ash[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 30(2): 361-367.
- [6] 柴立元, 刘恢, 闵小波, 郑栗, 王云燕. 改性活性污泥处理含铬废水[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(9): 1458-1464.
CHAI Li-yuan, LIU Hui, MIN Xiao-bo, ZHENG Su, WANG Yun-yan. Treatment of chromium-containing wastewater by modified activated sludge[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9): 1458-1464.
- [7] 陈月芳, 高琨, 林海, 董颖博, 汪涵, 李洋子, 霍汉鑫, 曹丽霞. 耐铅锌微生物对矿山酸性废水中 Zn^{2+} 和 Pb^{2+} 吸附性能分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(4): 1741-1746.
CHEN Yue-fang, GAO Kun, LIN Hai, DONG Ying-bo, WANG Han, LI Yang-zi, HUO Han-xin, CAO Li-xia. Adsorption properties of microbe resistant to lead and zinc on Zn^{2+} and Pb^{2+} in acid mine drainage (AMD)[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(4): 1741-1746.
- [8] 郑雅杰, 彭映林, 李长虹. 二段中和法处理酸性矿山废水[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(5): 1215-1219.
ZHENG Ya-jie, PENG Ying-lin, LI Chang-hong. Treatment of acid mine drainage by two-step neutralization[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(5): 1215-1219.

- [9] ZENG Y B, PARK J. Characterization and coagulation performance of a novel inorganic polymer coagulant-Poly-zinc-silicate-sulfate[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, 334(1/2/3): 147-154.
- [10] 郑雅杰, 彭振华. 铅锌矿选矿废水的处理及循环利用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(3): 468-473.
ZHENG Ya-jie, PENG Zhen-hua. Treating and recycling of wastewater from lead-zinc mineral processing plant[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2007, 38(3): 468-473.
- [11] 郑祥明, 杨三妹. 钨矿选矿废水处理新技术[J]. 化工矿地质, 2012, 34(3): 187-190.
ZHENG Xiang-ming, YANG San-mei. Design of high effect compound flocculent HNXY in the reuse of tungsten mine wastewater[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2012, 34(3): 187-190.
- [12] 张学洪, 陈志强, 张颖, 吕炳南, 许立巍. 混凝沉淀法处理钨矿选矿废水生产实践研究[J]. 吉林化工学院学报, 2000, 17(3): 38-40.
ZHANG Xue-hong, CHEN Zhi-qiang, ZHANG Ying, LÜ Bing-nan, XU Li-wei. The engineering study on tungsten mine ore washing wastewater treatment by coagulation-sedimentation[J]. *Journal of Jilin Institute of Chemical Technology*, 2000, 17(3): 38-40.
- [13] 陈明, 朱易春, 黄万抚. 某钨矿尾矿库废水石灰脱稳-絮凝剂沉降法处理试验研究[J]. 中国钨业, 2007, 22(5): 43-46.
CHEN Ming, ZHU Yi-chun, HUANG Wan-fu. On treatment of tailing dam wastewater by using lime for elimination of colloid stability and flocculating sedimentation[J]. *China Tungsten Industry*, 2007, 22(5): 43-46.
- [14] 郭朝晖, 袁珊珊, 肖细元, 刘亚男, 姜智超. 聚硅酸硫酸铝铁复配及在钨钼选矿废水中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(2): 461-468.
GUO Zhao-hui, YUAN Shan-shan, XIAO Xi-yuan, LIU Ya-nan, JIANG Zhi-chao. Combination of polysilicate-aluminum-ferric-sulfate and application to W and Bi dressing wastewater treatment[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(2): 461-468.
- [15] MOUSSAS P A, ZOUBOULIS A I. A study on the properties and coagulation behavior of modified inorganic polymeric coagulant-polyferric silicate sulfate (PFSiS)[J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 63(2): 475-483.
- [16] SUN Tong, SUN Chun-hua, ZHU Guo-li, MIAO Xiao-jun. Preparation and coagulation performance of poly-ferric-aluminum-silicate-sulfate from fly ash[J]. *Desalination*, 2011, 268(1/2/3): 270-275.
- [17] DENTEL S K, GOSSETT J M. Mechanisms of coagulation with aluminum salts[J]. *Journal American Water Works Association*, 1988, 80(4): 187-198.
- [18] DENTEL S K. Coagulation control in water treatment[J]. *Critical Reviews in Environmental Control*, 1991, 21(1): 41-135.
- [19] 游晓宏, 陈晓琼. 混凝技术及其发展[J]. 工业水处理, 2002, 22(11): 7-9.
YOU Xiao-Hong, CHEN Xiao-qiong. Technology and development of coagulation-flocculation[J]. *Industrial Water Treatment*, 2002, 22(11): 7-9.
- [20] 宿程远, 黄秀玫, 吕宏虹, 高菲, 农光厦, 赖振东, 谭霖. 混凝法处理锰矿选矿废水的试验研究[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(7): 46-49.
SU Cheng-yuan, HUANG Xiu-mei, LÜ Hong-hong, GAO Fei, NONG Guang-xia, LAI Zhen-dong, TAN Lin. Study on the treatment of manganese mineral processing wastewater with coagulation[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(7): 46-49.
- [21] 汤鸿霄. 无机高分子絮凝剂的几点新认识[J]. 工业水处理, 1997, 17(4): 1-5.
TANG Hong-xiao. Some new concepts in the development of inorganic polymer flocculants[J]. *Chinese Journal of Industrial Water Treatment*, 1997, 17(4): 1-5.
- [22] 汤鸿霄. 羟基聚合氯化铝的絮凝形态学[J]. 环境科学学报, 1998, 18(1): 1-10.
TANG Hong-xiao. Flocculation morphology for hydroxyl polymer of poly-aluminum chloride[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1998, 18(1): 1-10.
- [23] 张国杰, 王栋, 程时远. 有机高分子絮凝剂的研究进展[J]. 化学与生物工程, 2004, 21(1): 10-13.
ZHANG Guo-jie, WANG Dong, CHEGN Shi-yuan. Development of organic polymer flocculants[J]. *Chemistry and Bioengineering*, 2004, 21(1): 10-13.

(编辑 陈卫萍)