

选矿废水处理技术现状及展望

胡尚军^{1,2,3}, 谢贤^{1,2,3}, 黎洁^{1,2,3}, 李博琦^{1,2,3}, 朱辉^{1,2,3}, 吕晋芳^{1,2,3}

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093;
3. 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD926.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)04-0043-07

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.04.005

摘要 矿产资源开发过程中会产生大量的废水, 这些废水含有酸、碱、固体悬浮物、重金属离子和各种残留的浮选药剂等, 对矿山环境会造成严重污染。改善矿山生态环境, 治理这些废水刻不容缓。该文介绍了选矿废水的基本特征和危害性, 并综述了当前选矿废水处理的主要方法, 从简单的凝结、絮凝和酸碱中和, 到较为复杂的化学沉淀和化学氧化, 再到综合性更强的人工湿地和微生物处理, 并对未来选矿废水治理的发展提出了展望。

关键词 选矿废水; 处理方法; 化学氧化; 人工湿地

矿产资源的开发在创造了巨大经济效益的同时, 也给环境带来了一定的影响。其中, 选矿废水是造成矿山环境恶化的主要因素。废水中含有的大量悬浮物、残留药剂和重金属离子会对矿山周围的土壤和动植物造成长期的影响, 并最终会危害到人类的身体健康。因此, 展开对选矿废水有效处理的研究非常重要。

1 选矿废水的来源及基本特征

1.1 选矿废水的来源

在选矿厂生产过程中所产生的所有外排水统称为选矿废水^[1], 其来源主要包括选矿工艺排水、尾矿池溢流水和矿场排水。具体分为: (1) 精矿含的水, 精矿产品脱水时所排出的滤液。(2) 尾矿含的水, 指在尾矿库经澄清和净化后再排放的废水。(3) 工业场地的冲洗水, 主要由地面的流失矿浆和洗矿水组成。(4) 选矿设备用水, 主要由清洗水和冷却水组成。(5) 选矿厂的卫生废水和雨水, 成分较复杂, 水量较小, 其中含有大量的固体颗粒、悬浮物、无机或有机药剂等^[2-4]。(6) 选矿流程中可能会出现“跑、冒、滴、漏”, 这部分水主要由于设备的老化及管道密封性下降所导致的,

其会对工艺流程中的参数及后续药剂的添加造成影响, 一定程度上会增加废水中药剂的残留量。

1.2 选矿废水的基本特征

1.2.1 排放量大

我国矿产资源开发存在矿石品位低、选矿工艺复杂、入选矿石量大等特征, 这使得用浮选法每处理 1 t 矿石, 需耗水 4~6 m³。因此, 选矿作业的耗水量是巨大的, 并且能够做到将这些用水循环利用的只是一小部分企业, 大多数企业都将其作为废水排出^[5]。

1.2.2 固体悬浮物含量高

废水中的固体悬浮物主要是矿泥颗粒, 它会对水体的透明度和浊度产生一定的影响。若在选矿过程中使用了水玻璃等分散剂, 则会导致水中的悬浮物含量更高、更稳定和更不易沉降, 从而给环境造成更大的影响^[6]。

1.2.3 含有残留的化学药剂和重金属离子

含有残留的化学药剂和重金属离子是选矿废水对

收稿日期: 2021-03-12

基金项目: 云南省应用基础研究计划基金项目(2019FA021)

作者简介: 胡尚军(1997-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生。

通信作者: 谢贤(1981-), 男, 湖南怀化人, 博士。

环境造成危害的最主要因素之一,也是废水难以得到有效治理的难点所在^[7]。不可降解的重金属离子,能够长期地在水中存在,很难去除,其对环境 and 人体健康都有着长远的影响;废水中残留的化学药剂(如过量捕收剂)对环境的影响,主要是导致水体的化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)和pH值(水体的酸碱度)等指标超标^[8],一定程度上破坏了水体的自净能力,使得水体维持不了原先的生态平衡,从而造成了水体的污染。

2 选矿废水对环境的危害

选矿废水对自然环境的危害主要体现在:(1)大量含有酸或碱的废水外排,对环境的危害主要是会降低或升高所接受水体的pH值,使其偏离水中生物能够正常生存的pH值范围,从而导致水中生物的大量死亡,进而加剧水体自净能力的破坏程度,给水体造成难以逆转的损害。(2)废水中含有的大量悬浮物,会对浮游植物的光合作用施加影响,恶化水体环境,使水体富营养化^[9]。(3)废水中含有的大量重金属离子,若其被植物吸收进入体内后,会导致植物的生长和发育受到影响,甚至枯萎、死亡;同时重金属还能打乱水生动物的正常机体代谢,影响到它们的发育。另外,人类健康也会因为食物中的重金属富集而遭受损害^[10]。(4)废水中残留的药剂,除了会增加水体的COD和BOD外,还会一定程度上影响水生生物的生长。Benin^[11]研究发现,废水中残留药剂如黄药能够对水生浮游植物的生长造成影响。另外,如果残留药剂中含有氰化物,那么该种废水将具有剧毒^[12]。

3 选矿废水的处理方法

由于选矿废水对环境危害很大,故展开对废水的有效处理研究是十分重要的。然而不同的矿山所产生的选矿废水的性质差别很大,所以在具体治理时只能因地制宜,根据当地的废水性质来选择合适的处理方法,废水处理的方法有絮凝法、化学沉淀法、人工湿地法和微生物等。

3.1 絮凝法

絮凝法是一种常用的选矿废水治理方法,其原理即为絮凝剂的作用机理。常用的絮凝剂有聚合氯化铝、聚丙烯酰胺和三氯化铁等。絮凝剂在水中的作用过程分为凝结、架桥和沉降三个阶段。在凝结过程中,药剂中和微粒表面上的电荷,其作用力为范德华力。在该力的作用下,粒子间相互吸引,相互靠近,最终凝结在一起;在架桥过程中,絮凝剂通过架桥作用将微细粒聚集成大颗粒的絮凝体;在沉降阶段,絮凝体由于尺

寸大,在重力作用下沉降下来。

周玉玲等^[13]采用田菁胶和聚丙烯酰胺对铜录山选矿厂废水进行了处理。结果表明:沉降速度因加入了絮凝剂而加快。陈伟等^[14]研究发现,向pH 11~12的选矿废水中加入稀硫酸,将废水的pH值调节到10左右,然后再加入硫酸亚铁溶液作为混凝剂,以及聚丙烯酰胺溶液作为絮凝剂,反应30~60 min后,其处理的废水可以返回到原工艺流程中回用。严群等^[15]在处理某钨矿高砷选矿废水时发现,三氯化铁为最佳的除砷混凝剂。

尽管用絮凝法处理废水比较简单,但是其处理效果却很难保证,而且该法所用到的絮凝剂量较大,容易造成二次污染,后续的沉渣往往也很难处理。故该法一般只用来作为选矿废水的预处理。

3.2 酸碱中和法

酸碱中和法作为一种传统的处理废水方法被广泛采用。该方法的原理是用中和剂中的 OH^- (或 H^+)与废水中含有的过量 H^+ (或 OH^-)反应生成水分子,从而使废水的pH恢复到中性。如果适当地调整好矿浆的酸碱度,还可以使重金属离子生成难溶的氢氧化物沉淀。

在日常的生产中用到的中和剂有石灰、消石灰、硫酸、碱性废渣和酸性废气(如 CO_2)等。在实际的选择中,本着减少成本的原则,可以优先考虑就近废弃资源。另外,在采用中和法时,可以有意地控制好pH值,使其在平衡废水pH值的同时,也起到除去重金属离子的效果。郑雅杰等^[16]在采用二段中和法处理某矿山的酸性废水时发现,用石灰和氢氧化钠进行二段中和,Fe、Mn和Zn离子的去除率均较低。这可能是因为在碱性环境下,Fe、Mn和Zn离子更容易与 OH^- 反应生成难溶的氢氧化物沉淀。另外,德兴铜矿在采用碱性废水中和采场的酸性废水时发现,其能提高选硫指标和取得一定的环境效益^[17]。王辉等^[18]在采用分段中和法处理某铀矿山的酸性废水时发现,在一段中和池中加入部分二段中和后浓密机底流,不仅可以达到节省石灰的效果,而且还能使得废水的沉降效果更好,处理效率更高。

作为调节废水pH值的最主要处理方法,酸碱中和法被运用在各个废水处理流程中,但因为一般废水的处理量都很大,这使得相应中和剂的消耗量也很大,大大增加了处理成本,给企业造成了巨大的经济负担。在具体的生产实践中,企业在选择厂址时,应该优先考虑与本厂排放废水酸碱度相中和的企业相邻,以废治废;或者改善选矿流程,尽量使废水接近中性、弱酸性或弱碱性。

3.3 吸附法

吸附法是利用多孔固体(吸附剂)吸附污水中某种或几种污染物(吸附质)以回收或去除这些污染物,从而净化污水的方法。具体的过程为先利用多孔固体吸附剂将废水中的一种或数种污染物吸附在固体的表面上,然后再利用相应的技术解吸被吸附的污染物,达到分离和富集废水中污染物的目的,进而净化水质。依照吸附剂类别,吸附法可分为材料吸附法和生物吸附法。

吸附法处理选矿废水的效果好坏主要取决于所选用的吸附剂。杨震等^[19]在采用粉煤灰处理含 Hg 废水时发现,粉煤灰的吸附效果比常规的活性炭还要好。另外,除了可以从现有的材料中寻找具有良好吸附性的吸附剂外,还可以对吸附能力差的吸附剂进行改性,使其转变为具有良好吸附性的吸附剂。在 Qiu JY 等^[20]的研究中,他们通过照射诱导接枝技术合成了叔胺基类的硅基吸附剂。该硅基吸附剂能够克服吸附剂稳定性差、吸附过程复杂、处理费用高以及吸附效率低等缺陷,大幅度提高吸附能力。郝鹏飞等^[21]研究发现,经盐酸改性后的吸附剂对 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 和 Cd^{2+} 的去除能力增强。

在处理选矿废水的过程中,吸附法有着操作简单、高效且污染较小的特点。然而,吸附法对废水的水质要求很严格,即废水的水量和其中含有的污染物浓度要很稳定。一旦废水中的污染物含量变大,超出了吸附剂的最大吸附量,若不能及时更换吸附剂,吸附法将完全失去作用,所以,吸附法一般适用来作为废水的后续处理。

3.4 化学氧化法

化学氧化法的具体应用机理是:向废水中添加氧化剂,然后将有机污染物氧化成危害性较小的小分子物质;或者将它们转化为另外一种物质,并将其从水除去,从而降低废水中的 COD 含量。常见的氧化剂有臭氧、Fenton 试剂^[22-24]、双氧水和次氯酸钠等。化学氧化法能够有效治理含残留药剂的废水,能够将废水中的难降解有机污染物彻底氧化^[25]。

在处理含有大量残留浮选药剂的铜钼尾矿废水时,王然等^[26]发现,臭氧氧化法对 PJ-053、煤油等捕收剂以及起泡剂松醇油的去除率均很高。金洁蓉等^[27]用铁粉还原—Fenton 氧化法处理含络合铜废水时发现,在 pH 3 的初始条件下,先向废水中加入过量的铁粉,同时控制 H_2O_2 与 COD 质量比为 1.5 : 1,然后反应 30 min,最后再加碱调节废水的 pH 至 9 后沉淀处理,此时废水的 COD 去除率可以达到 86.5%, $Cu(II)$

的去除率达到了 99.9%。

化学氧化法能够有效去除选矿废水中的有机污染物,降低废水的 COD 含量,并且该方法运行稳定,处理效率高。但是,该法的处理成本较高,只适合于废水处理量较小的企业,或者与其他处理方法搭配使用。

3.5 化学沉淀法

化学沉淀法的基本原理是通过向废水中添加一些化学物质,与废水中的要除去的目标物发生反应,生成难溶的沉淀物,从而去除目标物。化学沉淀法常常被用来处理含有汞、铅、铜、锌、铬、氟以及砷等有毒化合物的废水。在该法中向废水中投加氢氧化物、硫化物或碳酸盐等,这些物质会与上述有毒化合物反应生成沉淀从而被去除。例如利用钡盐能与六价铬反应生成铬酸盐沉淀的机理,可用它来处理含六价铬的工业废水;利用石灰能与氟化物反应生成氟化钙的性质,可将石灰投入废水中,用以去除水中的氟化物;同样地,向含氰废水中投加硫酸亚铁,能够将废水中的氰化物转化为亚铁氰络合物,降低水中氰根离子的浓度。另外,该方法生成的亚铁氰络合物还能与废水中含有的重金属离子发生反应生成 $(Me_2Fe(CN)_6 \cdot 6H_2O)$ 沉淀^[28],可以起到一定的重金属离子去除效果。

在化学沉淀法的具体应用研究中,王斌喜^[29]发现,若向 CN^- 浓度为 3.258 mg/L 的废水中加入 $FeSO_4$ 和 $FeCl_3$ 溶液,出水中 CN^- 的浓度可以降到 0.459 mg/L。赵永红^[30]等人利用黄药与亚铁离子反应形成沉淀的原理,去除废水中的黄药。其结果表明,剩余黄药浓度随着硫酸亚铁添加量的增加而逐渐降低。

化学沉淀法常被用来去除废水中的重金属离子,其能够有效降低废水中重金属离子的浓度,减少废水对周围土壤的污染。然而,废水中一般含有多种重金属离子,在使用化学沉淀法时,需要合理搭配好所需添加化学药剂的种类和加入顺序,否则,不仅无法起到净化效果,甚至还可能造成二次污染。

3.6 人工湿地法

人工湿地法是一种新型的废水治理技术。其原理主要以基质—植物—微生物为核心,构建人工参与控制的综合仿生系统。湿地的运行机理是先通过基质和植物的共同拦截作用来使一部分污染物得到分解和富集;然后利用微生物的摄食和吸收,来彻底去除污染物。该法充分发挥了物理吸附、化学反应和生物代谢的协同作用^[31],同时也因其环保,无二次污染及废水处理效率高等优点而广泛地受到国内外学者的青睐。

Onur CT^[32]等人研究平流式人工湿地系统对某硼矿废水的净化效果时发现,湿地中的宽叶香蒲对硼的

吸收能力为 1.3 g/kg, 芦苇对硼的吸收能力为 0.839 g/kg。而在广东凡口铅锌矿建立的人工湿地试验研究中, 其废水中悬浮物的去除率可以达到 99%, Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 的去除率也能达到 84% ~ 90%, 同时其他金属离子也有不同程度的减少^[33]。

人工湿地法因其生态友好、环保、处理效率高和可单独成系统的特点, 具有很大的发展潜力。同时, 如果规划得当, 还可能具有一定的生态价值, 进而可以开辟其他产业。但是, 人工湿地法占地面积一般较大, 并需要的前期投入较多, 同时, 其易受气候的干扰, 处理效果不稳定。企业在实际运用时, 需要综合考虑, 并做好相对应的补充处理流程。

3.7 微生物处理法

作为一种具有良好发展前景的微生物处理法近年发展很快, 尤其是在治理酸性选矿废水方面, 更具有其独特的优势。其原理是利用微生物体内的生化反应来消耗掉水体中的有机污染物, 同时微生物因其具有的一些构造和生物特性, 能够吸附和分解部分重金属离子, 最终使废水得到净化。

但是由于不同矿山所产生的选矿废水的性质差异, 若想采用微生物处理法来处理这些废水, 就必须找到相应的、能够对这些废水中的污染物有很好处理效果的微生物。陈月芳等^[34]发现, 他们从某铅锌矿区的排水沟土壤中分离出来的耐铅锌微生物菌株 T1, 对酸性选矿废水中的 Zn^{2+} 和 Pb^{2+} 具有很好的吸附效果。闫虎祥等^[35]在利用生物制剂对云南某铅锌矿废水处理工艺进行改进时, 可以使得改造后废水中的铅离子去除率大于 99.7%, 锌离子的去除率大于 99.2%, 砷离子的去除率大于 96% 以及铊离子的去除率达到 90%; 同时出水中的 COD 的去除率也能达到 80%。

微生物处理法可以同时去除废水中的有机污染物和重金属离子, 从而缩短废水处理流程, 降低企业的投资成本。而且, 微生物代谢和繁殖速度均较快, 能够自我更新, 进而提高废水处理效率, 降低维护成本, 是一种很经济实惠的方法。但是, 微生物处理法所需要的微生物很难培养, 在企业实际应用时, 需要依靠其他方法来度过前期。

3.8 光催化氧化法

作为上个世纪 80 年代才发展起来的一种新型废水治理技术, 光催化氧化法因其降解污染物速度快和节能环保的特点成为了研究热点。其原理是利用吸收光能后的光催化剂与吸附在其表面的 H_2O 作用, 生成强氧化性自由基 $\cdot\text{OH}$, 然后再由 $\cdot\text{OH}$ 将废水中的有机污染物氧化分解成小分子物质, 从而净化废水。

光催化氧化法获得最大效益的关键在于光催化剂的选取。 TiO_2 耐腐蚀, 催化效率高, 是一种优良的光催化剂, 但是其利用太阳能的能力较弱, 无法满足生产要求。为此, Vignesh K 等^[36]对 TiO_2 纳米颗粒进行了化学浸渍, 有效提高了其光催化活性。

光催化氧化法不同于化学氧化法, 其不需要通过加入氧化剂来氧化污染物, 而是直接借助太阳能来分解, 更环保、更经济。但是, 其具有一定的局限性, 即该法只能在阳光充足的时候有很好的效果, 到了晚上或者碰上阴雨天气, 便很难发挥作用, 所以, 需要配备相应的备选流程。

3.9 膜分离法

膜分离法是一种非常规的废水治理方法, 它不需要修筑一定的工程构筑物, 也不需要选择一定的废水处理药剂组合, 它所需要的只是具有特定孔径尺寸的半透膜。该法的原理是先对选矿废水进行预处理, 然后再利用特定的半透膜对废水中的污染物进行选择性的筛分和截留, 使出水达到排放标准。

Hung C. Duong 等^[37]在处理某含镍废水时, 使用膜分离法, 能够将废水中的镍含量提高 100 多倍, 有效提取了废水中的镍, 同时还得到了一部分的淡水。

膜分离法与吸附法一样, 都是借助具有特定功能的材料直接将污染物与水体分离, 处理效率高, 操作简单。但是, 因为其成本较高, 且废水处理量小, 在具体实践中, 仍具有一定的局限性。

在具体的矿山选矿废水治理工程实践中, 往往用到的治理方法都不止一种。这是因为矿石里一般含有多种有用矿物, 而将这些有用矿物分选出来需要用到多种不同的工艺方法, 由此造成排出的选矿废水水质较为复杂。若采用单一的治理方法去治理废水, 根本无法满足废水排出时所要达到的各项指标。所以, 为了更好地达到废水的排放标准, 工程人员会选择多种治理方法合理混用, 充分地利用好各个治理方法的优点, 进而加强选矿废水的治理效果。例如湖南水口山有色金属集团有限公司在处理第四冶炼厂废水时, 李薇等^[38]采用 S-005 系列生物制剂, 在原化学沉淀的基础上, 增加了 2 段生物制剂处理流程, 使得废水中的铊质量浓度由原先的 20 ~ 4 000 $\mu\text{g}/\text{L}$ 降到了 0.1 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。这其中的原理可能是, 在原化学沉淀反应的基础上加上生物制剂作用, 可以加强对冶炼废水中重金属离子的螯合和絮凝沉淀作用。长沙有色冶金设计研究院有限公司^[39]发明了一种新的白钨矿选矿废水处理工艺, 该工艺采用电解、混凝和氧化相结合, 可以使得废水中有机物和水玻璃的去除率分别达到 98% 和 94.5% 以上。董栋等^[40]曾研究过联用混凝沉淀与活性炭

吸附法处理模拟的铅锌选矿废水和实际选矿废水;张诚等^[41]联用电石乳中和法与絮凝法来处理酸碱混合废水;Li等^[42]在微生物法与水热液化耦合处理废水技术研究中,提出了一种微生物污水治理、重金属回收和生物能源转化的综合治理模式;张玉芝^[43]在采用酸碱中和-混凝沉淀组合工艺处理煤矿灯房含酸和含铅废水时,可以使处理后的废水达到排放标准。此外,胡波^[44]、姜智超^[45]、付金涛^[46]、龙中^[47]和宋淑敏^[48]等人对选矿废水治理方法的合理混合使用做了研究,且都取得了不错的效果。

4 对未来选矿废水处理发展的展望

尽管当前选矿废水的处理有多种方法,但是,大多数企业采用的仍然是化学沉淀法和化学氧化法等容易造成二次污染的老方法。像人工湿地法、微生物处理法和光催化氧化这类处理效率高且生态友好的新方法却很少被企业采用,这主要是因为这些新方法有的还只是处于实验室阶段,无法实际运用;有的受外界影响较大,运行不稳定。只有解决好这些问题,废水的处理方法才能做到更新换代,向着更加环保、更加生态的方向进步。为了更好地找到解决方案,未来选矿废水处理技术应向以下方向发展:

(1)企业在仍采用化学氧化法、化学沉淀法以及絮凝法等老处理方法来处理选矿废水时,应该积极研发一些易降解、对环境友好的药剂,尽量减少二次污染。

(2)国家应加大投资力度,首先在国有企业展开人工湿地法和微生物处理法等具有巨大发展潜力的新处理方法的工程实践研究,不断完善其运用理论,突破它们的局限性。

(3)地方政府应该为中小型企业提供一些政策支持,鼓励他们使用新的处理方法,并资助企业研发人员根据当地背景对新方法进行自主完善。

(4)科研人员在探索新的废水处理方法时,不仅要考虑其在实验室阶段的成功运用,还应该走出实验室,积极将新方法应用于实践中。

参考文献:

[1] 李超,王丽萍. 选矿废水处理技术的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(1):72-78.

[2] 戴晶平. 凡口选矿回水中铅锌硫化矿浮选基础研究与工业实践[D]. 长沙:中南大学,2005.

[3] 熊道陵,陈湘清,蒋玉仁. 含钙物质对黄铜矿和黄铁矿浮选行为的影响[J]. 湖南有色金属,2004,20(6):8-10.

[4] 宋强,谢贤,杨子轩,等. 国内外选矿废水处理及回收利用研究进展[J]. 价值工程,2017,36(2):90-93.

[5] 罗仙平,谢明辉. 金属矿山选矿废水净化与资源化利用现状与研究发展方向[J]. 中国矿业,2006(10):51-56.

[6] 张春菊. 白钨选矿废水零排放技术研究[D]. 赣州:江西理工大学,2009.

[7] CHEN JM, LIU RQ, SUN W, et al. Effect of mineral processing wastewater on flotation of sulfide minerals[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009(2):454-457

[8] GONG X, CHEN ZH, LUO ZH. Spatial distribution, temporal variation, and sources of heavy metal pollution in groundwater of a century-old nonferrous metal mining and smelting area in China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2014(12):9101-9116.

[9] 乐成峰,李云海,查勇,等. 太湖悬浮物对水体生态环境的影响及其高光谱反演[J]. 环境科学学报,2008(10):2148-2155.

[10] KRUPSKAYA LT, ZVEREVA VP. Bioaccumulation of heavy metals with environmental objects and assessment of health risks (the former mining enterprise Khingansky GOK as an example)[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2014(13):2542-2544.

[11] BENIN DW. Xanthate salt water toxicity and environmental outcomes[J]. Express Information of Mineral Processing Abroad, 1999(9):18-20.

[12] 仲崇波,王成功,陈炳辰. 氧化物的危害及其处理方法综述[J]. 金属矿山,2001(5):44-46.

[13] 周玉玲,梁兵锋,胡罗珍. 氧化铜铁矿选矿废水处理研究[J]. 国外金属矿选矿,1982(12):14-15.

[14] 陈伟,彭新平,陈代雄. 某铅锌矿选矿废水处理复用与零排放试验研究[J]. 环境工程,2011,29(3):37-39.

[15] 严群,桂勇刚,周娜娜,等. 混凝沉淀法处理含砷选矿废水[J]. 环境工程学报,2014(9):3683-3688.

[16] 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(5):1215-1219.

[17] 吴飞. 德兴铜矿矿山废水治理现状及其前景[J]. 铜业工程,2000(1):27-29.

[18] 王辉,孔凡峰,李世俊. 分段中和法处理钼矿酸性废水[J]. 湿法冶金,2013(5):329-332.

[19] 杨震,金立忠. 粉煤灰在废水处理中的应用[J]. 科技创新导报,2012(32):114-114.

[20] QIU JY, WANG ZY. Adsorption of Cr(VI) using silicabased adsorbent prepared by radiation-induced grafting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166:270-276.

[21] 郝鹏飞,梁靖. 改性沸石对含铅废水的处理研究[J]. 环境科学与管理,2009,34(6):106-108.

[22] BACH A, SHEMER H, SEMIATR. Kinetics of phenol mineralization by Fenton-like oxidation[J]. Desalination, 2010(3):188-192.

[23] WANG X, LIU W, DUAN H, et al. Degradation mechanism study of amine collectors in fenton process by quantitative structure-activity relationship analysis[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2018(3):713-721.

[24] CHEN S, DU DY. Degradation of n-butyl xanthate using fly ash as heterogeneous fenton-like catalyst[J]. Journal of Central South University, 2014(4):1448-1452.

[25] 冯章标,何发钰,邱廷省. 选矿废水治理与循环利用技术现状及展望[J]. 金属矿山,2016(7):71-77.

[26] 王然,孙春宝,曾慧峰,等. 臭氧氧化法处理尾矿废水中浮选药剂的研究[J]. 水处理技术,2011(9):41-43.

[27] 金洁蓉,陈赛松,杨岳平,等. 铁粉还原-Fenton氧化处理络合铜废水的研究[J]. 环境工程学报,2010(6):1353-1356.

[28] 郑明东. 含氰废水处理方法的评述[J]. 有色矿冶,1996(5):41-43.

- [29] 王斌喜. 凝聚沉淀法处理焦化废水中氰化物试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2000.
- [30] 赵永红, 谢明辉, 罗仙平, 等. 去除水中黄药的试验研究[J]. 金属矿山, 2006(6): 75-77.
- [31] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/3): 48-65.
- [32] ONUR CT, CENGIZ T, HARUN B, et al. Constructed wetlands as green tools for management of boron mine wastewater[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2014(16): 537-553.
- [33] 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]. 铀冶炼, 2008, 27(4): 202-205.
- [34] 陈月芳, 高琨, 林海, 等. 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(4): 1741-1746.
- [35] 闫虎祥, 周杰, 高宝钗. 生物制剂深度处理技术在选矿废水改造工程中的应用[J]. 广东化工, 2019, 46(14): 147-148.
- [36] VIGNESH K, PRIYANKAR, HARIHARANR, et al. Suganthi fabrication of CdS and $CuWO_4$ modified TiO_2 nanoparticles and its photocatalytic activity under visible light irradiation[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014(2): 435-443.
- [37] HUNG C., DUONG, THAO M., et al. A novel application of membrane distillation to facilitate nickel recovery from electroplating wastewater[J]. *Environmental science and pollution research*, 2019, 26(23): 23407-23415.
- [38] 李薇, 吴楠楠, 龚兔彰, 等. 含铈工业废水的处理技术研究现状[J]. 工业水处理, 2018, 38(12): 7-9.
- [39] 长沙有色冶金设计研究院有限公司. 白钨选矿废水处理工艺: CN102826695A[P]. 2012-12-19.
- [40] 董栋, 郭保万, 孙伟, 等. 铅锌选矿废水净化处理试验[J]. 现代业, 2013, 20(9): 143-145.
- [41] 张诚, 柳建设, 付瑾, 等. 铜矿矿山废水的物化净化处理研究[J]. 铜业工程, 2011, 18(2): 73-75.
- [42] LI H G, WATSON J, ZHANG Y H, et al. Environment-enhancing process for algal wastewater treatment, heavy metal control and hydrothermal biofuel production: A critical review[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 298: 122421.
- [43] 张玉芝. 煤矿灯房含酸废水处理[J]. 广东化工, 2009, 36(10): 145-146.
- [44] 胡波. 复杂多金属硫化矿选矿废水处理与回用工艺研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [45] 姜智超, 杨国超, 付向辉, 等. 5000t/d 钨铋选矿废水处理工业分流试验[J]. 矿业工程, 2019, 39(3): 77-80.
- [46] 付金涛. 锡铁山铅锌选矿废水高效循环利用实践[J]. 中国有色金属, 2018, (S1): 367-370.
- [47] 龙中, 吴攀, 黄家琰, 等. 多级复氧反应-垂直流人工湿地深度处理煤矿酸性废水[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6): 1391-1399.
- [48] 宋淑敏, 刘伟, 朱丽云, 等. 云南某锌冶炼厂废水深度处理工程改造与实践[J]. 化学工业工程, 2019, 36(1): 78-83.

Current Status and Prospects of Treatment Technology for Mineral Processing Wastewater

HU Shangjun^{1,2,3}, XIE Xian^{1,2,3}, LI Jie^{1,2,3}, LI Boqi^{1,2,3}, ZHU Hui^{1,2,3}, LV Jinfang^{1,2,3}

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China;

3. National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Mine Tailings Resources, Kunming 650093, China

Abstract: The exploitation of mineral resources will produce a large amount of wastewater during the separation process. The wastewater contains acids, alkalis, suspended solids, heavy metal ions and various residual flotation reagents, etc., which will cause serious pollution to the mining environment. To improve the ecological environment of mines, it is urgent to treat these wastewater. This article introduces the basic characteristics and hazards of beneficiation wastewater as well as summarizes the main methods of current beneficiation wastewater treatment. The treatment method is first simple coagulation, flocculation and acid – base neutralization, then more complex chemical precipitation and chemical oxidation, and finally more comprehensive constructed wetland and microbial treatment. The prospect for the future development of mineral processing wastewater treatment is put forward.

Key words: mineral processing wastewater; treatment method; chemical oxidation; constructed wetland

引用格式:胡尚军,谢贤,黎洁,李博琦,朱辉,吕晋芳. 选矿废水处理技术现状及展望[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(4): 43 – 49.

Hu SJ, Xie X, Li J, Li BQ, Zhu H and Lv JF. Current status and prospects of treatment technology for mineral processing wastewater [J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(4): 43 – 49.

投稿网址: <http://kebh.cbpt.cnki.net>

E – mail: kcbh@chinajournal.net.cn