

# 转炉钢渣处理酸性矿山废水的研究进展

杨磊<sup>1,2</sup>, 曹端宁<sup>3</sup>, 王叶雷<sup>3</sup>, 张硕<sup>3</sup>, 鹿存房<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 贵州中贵环保科技有限公司, 贵州贵阳 550005;

3. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054)

**[摘要]** 酸性矿山废水(Acid mine drainage, AMD)普遍具有 pH 低, Fe、Mn 等离子浓度高的特点, 其任意排放对环境危害很大。采用工业固体废弃物对酸性矿山废水进行中和吸附处理, 具有成本低、效率高、资源综合利用率高等优点, 其已成为酸性矿山废水处理的发展趋势。钢渣中含有大量的碱性物质, 且吸附效果好, 适于作为 AMD 的处理材料。对钢渣处理酸性矿山废水的研究现状进行了分析, 认为钢渣适于处理废弃小型闭坑矿废水, 其处理效果受钢渣成分、废水成分、工艺参数等因素的综合影响。钢渣中的含钙组分为中和 AMD 的主要碱性物质, 特别是自由 CaO 的含量以及含钙组分在渣中的存在形态对处理效果影响较大。钢渣对 AMD 中不同离子的去除效率有所不同, 其中, 对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{As}^{3+}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  等离子的去除效率较高, 对  $\text{SO}_4^{2-}$  的去除效率较低。另外, 废水 pH 对处理效果的影响也较大, 当 pH 低于钢渣表面零点电荷值时, 不利于钢渣对 AMD 中离子的吸附。通过对钢渣进行改性处理、优化工艺参数可提高钢渣处理 AMD 的效果。另外, 对处理 AMD 后的钢渣进行应用评估, 对于该技术的推广应用具有重要意义。

**[关键词]** 转炉钢渣; 酸性矿山废水; 中和法; 改性

**[中图分类号]** X701    **[文献标识码]** A    **[文章编号]** 1005-829X(2022)03-0041-06

## Research process on treatment acid mine drainage by basic oxygen furnace slag

YANG Lei<sup>1,2</sup>, CAO Duanning<sup>3</sup>, WANG Yelei<sup>3</sup>, ZHANG Shuo<sup>3</sup>, LU Cunfang<sup>3</sup>

(1. School of Earth Sciences and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Guizhou Zhonggui Environmental Technology Co., Ltd., Guiyang 550005, China;

3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** Acid mine drainage (AMD) is generally characterized by low pH and high concentration of Fe and Mn, and its arbitrary discharge is harmful to the environment. Neutralization and adsorption treatment of acid mine drainage by industrial solid waste has the advantages of low cost, high efficiency, and high comprehensive utilization rate of resources. It has become the development trend of acid mine drainage treatment. Steel slag contains a lot of alkaline substances and has good adsorption effect, which is suitable for the development and research of AMD treatment materials. The research status of treating AMD with steel slag is analyzed. It shows that steel slag is suitable for treating small, abandoned mine drainage, and the treatment effect is comprehensively affected by steel slag compositions, AMD composition, and technological parameters. Calcium containing components are the main alkaline substances neutralizing AMD, especially the content of free CaO and its existing form in slag, which have great influence on the neutralization effect of wastewater. The removal efficiency of different ions in AMD by steel slag is different. The removal efficiency of  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$  and  $\text{PO}_4^{3-}$  is higher, while that of  $\text{SO}_4^{2-}$  is lower. In addition, the pH of wastewater also has a great influence on the removal of AMD. When the pH is lower than the zero charge

**[基金项目]** 贵州省科技计划项目(20204Y007)

value on the surface of steel slag, it is not conducive to the adsorption of ions in AMD. Modification treatment of steel slag-based adsorbent and optimization of process parameters can improve the effect of steel slag treatment for AMD. In addition, evaluation of steel slag after treatment of AMD are also important for the extension and application of this technology.

**Key words:** basic oxygen furnace slag; acid mine drainage; neutralization; modification

我国能源资源丰富,其中“富煤、缺油、少气”的能源结构特征使得煤炭在推动我国工业化进程中占有主导地位。由于长期高强度开采,部分老矿区煤炭资源趋于枯竭,很多煤矿已经或即将关闭。根据我国煤炭工业协会统计,截止到2018年底,我国煤矿数量由最高时的8 000座减少到5 800座。随着我国对煤炭产业结构调整、资源整合、过剩能源产能淘汰等的进一步施行,在未来一段时期内,废弃矿井的数目还将继续增加。目前,我国矿山废水每年的排放量约为3.6亿t,占工业废水总排量的10%左右<sup>[1-2]</sup>,其中,煤矿开采闭坑后产生的闭坑矿酸性矿山废水(Acid mine drainage, AMD)的排放已成为矿区环境治理中一个突出的环境污染问题<sup>[3-5]</sup>。图1为贵州凯里鱼洞河地区的AMD排放现场。



图1 AMD污染照片

Fig. 1 Photos of AMD pollution

对于AMD的处理分为主动处理和被动处理两大类。主动处理技术是利用物理或化学手段对废水进行处理,主要包括石灰中和法、硫酸盐还原法、硫化物沉淀法等,我国常用方法为石灰石中和法。主

动处理方法具有建设费用高、维护费用高的特点,适于处理规模较大的AMD废水,比如贵州凯里地区的酸性废水治理。

被动处理技术是依靠化学和生物作用降低水中的酸度,此过程中很少依靠额外的动力或能量消耗,主要包括石灰转换井、开放石灰石沟、缺氧石灰石沟、人工湿地和可渗透墙等。在我国贵州、四川、重庆及西南地区存在很多关闭的小型煤矿,这些煤矿普遍具有位置偏僻、水量小的特点。对于这些小型闭坑矿AMD,可利用废弃的巷道或煤矿运行过程中遗留的水渠等构筑物,通过在水流路径内填充碱性中和吸附滤料,构建低动力消耗、低成本维护的被动处理设施对其进行处理。

被动处理中使用的中和滤料的性能,对AMD的治理效果影响很大。采用高效、低价的碱性工业固废对AMD进行中和吸附处理已成为该技术发展的趋势。常用的材料包括钢渣、粉煤灰、高岭土、煤矸石等,特别是钢渣在处理AMD方面具有独特的优势<sup>[6-7]</sup>。钢渣不仅可以释放大量的碱性物质,中和AMD中的酸度,还可以吸附去除AMD中的金属离子。N. A. KRUSE等<sup>[8]</sup>的研究表明,钢渣中的硅酸二钙( $C_2S$ )、硅酸三钙( $C_3S$ )、自由氧化钙( $f-CaO$ )都具有较好的碱中和能力,碱释放能力(以 $CaCO_3$ 计)为100~2 000 mg/L,而石灰的碱释放能力(以 $CaCO_3$ 计)为20~200 mg/L,而且石灰石的中和能力会随着处理时间的增加越来越差,但钢渣的中和能力可以长达十几年。另外,钢渣对于废水中的重金属,比如As、Zn、Cu、Cr、Pb等具有较好的去除作用,去除率高达95%<sup>[9]</sup>。A. JAFARIPOUR等<sup>[10-11]</sup>研究了钢渣对AMD中硫酸盐的去除效果,结果表明,钢渣对硫酸盐具有较好的脱除效果;当温度为25~45℃,渣水比为40~240 g/L时,AMD中硫酸盐的脱除效率随着温度和吸附剂添加量的增加而增加。

由此可见,采用钢渣对小型废弃矿坑AMD进行处理具有较好的应用前景。基于此,笔者对转炉钢

渣处理 AMD 的影响因素和技术现状进行了分析,以期 为钢渣治理 AMD 的工业应用提供技术依据。

1 钢渣处理 AMD 的影响因素分析

转炉钢渣对 AMD 的治理效果主要体现在 2 个 方面,一是通过渣内碱性物质释放,对 AMD 的酸度 进行中和,将 pH 提升至中性范围;二是通过吸附、沉 淀等作用,对钢渣中的重金属离子进行脱除。根据 钢渣与 AMD 的作用机理,从钢渣性能、水分特性等 方面进行分析。

1.1 钢渣性能

根据炼钢工艺的不同,钢渣可分为转炉(Basic oxygen furnace,BOF)渣、电炉(Electric furnace,EAF) 渣和精炼(Ladle furnace,LF)渣 3 种,其中转炉炼钢 为我国炼钢的主流工艺。冶炼钢种、炼钢原料、冷却 工艺等都会对钢渣的化学性能、物理性能产生影响, 因此不同钢厂的转炉渣成分并不相同。表 1 为我国 几个代表性钢厂的转炉渣组分<sup>[9,12]</sup>。

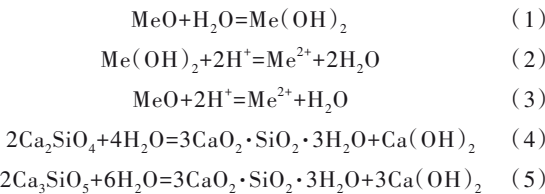
表 1 我国部分钢厂转炉渣成分 %

Table 1 Components of BOF slag in some steel mills in China

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
宝钢集团有限公司	39.3	10.9	31.2	2.2	10.1	2.3	1.6
马鞍山钢铁股份有限公司	45.1	11.4	24.3	2.1	3.7	2.1	2.0
唐山钢铁集团	46.9	12.4	24.8	1.5	7.8	1.4	0.9
广州钢铁集团	40.2	14.2	23.9	6.2	3.2	5.7	0.9
济钢集团有限公司	39.5	18.1	18.7	4.8	8.8	2.2	0.5

注:各项目数值均以质量分数计。

由表 1 可以看出,钢渣主要组分均包括自由氧 化钙、氧化镁、氧化铝、硅酸二钙、硅酸三钙、铁酸钙 等<sup>[13]</sup>,其中氧化钙、氧化镁、铁酸二钙和铁酸钙为钢 渣的主要碱性物质。不同物质中和废水中酸度的能 力并不相同。中和能力最强的为自由存在的碱性氧 化物 CaO、MgO、固溶相 RO 相和 C<sub>2</sub>S,RO 相为以 MgO 和 FeO 为主要成分的二价金属氧化物连续固溶体; 其次为与 SiO<sub>2</sub> 结合比较疏松的 CaO 和 MgO,再次为 结合紧密的 CaO 和 MgO<sup>[14]</sup>。反应过程如式(1)~(5) 所示(式中 Me=Ca,Mg)。



钢渣中的自由氧化钙主要来自炼钢过程中加入 的过量的熔剂生石灰。过量的生石灰未能与钢渣中 的二氧化硅、氧化铝、氧化镁和氧化铁反应,而是在 1 600~1 700 ℃高温下变成过烧的石灰,即自由氧化 钙。自由氧化钙具有活性低、结构致密的特点,导致 其水解过程非常缓慢,可持续长达数年甚至数十年。 这是钢渣及其建材制品存在体积稳定性不佳的 原因,对于利用钢渣生产路面材料、微粉等建材是不 利的。但对于钢渣处理酸性废水而言,持续性的碱 性释放,有利于钢渣中和酸性废水的酸度。因此,使 用钢渣处理 AMD 酸性废水,是钢渣资源化利用的重 要渠道,其可与现有的大规模应用途径(钢渣目前的 规模应用主要集中在建筑材料、铺路和厂内消化等) 形成较好的互补关系。

1.2 金属离子去除性能

AMD 的污染程度与产生 AMD 地区的矿区环境 和污染源有关。比如我国贵州地区的煤矿以高硫煤 为主,煤中硫的平均质量分数接近或高于 3%,且以 黄铁矿硫为主并常伴生 Cu、As、Hg、Cd 等元素。因 此,贵州地区的 AMD 具有 Fe、Mn、Zn 含量较高,pH 较低,硫酸根含量较高的特点,且对于浸取能力强的 酸性废水,还常含有 Cu、As 等元素。但是对于一些 有色矿酸性废水,除了含有 Fe、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等外,还含有大 量的 Pb、Zn、Ni、F、Cr、U 等。当钢渣用作吸附剂处理 酸性废水时,钢渣对废水中不同离子的去除效果如 表 2 所示<sup>[15]</sup>。

表 2 钢渣去除废水中离子的效果

Table 2 Effect of removing ions from wastewater by steel slag

离子类别	离子种类	去除率/%
阳离子	As <sup>3+</sup>	> 93.7
	Zn <sup>2+</sup>	>85
	Cu <sup>2+</sup>	99.9
	Cd <sup>2+</sup>	99.1
	Mn <sup>2+</sup>	>95
	Pb <sup>2+</sup>	99.2
	Ni <sup>2+</sup>	—
	F <sup>+</sup>	85.3
阴离子	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	>75
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	96

由表 2 可以看出,钢渣对于大部分金属离子具 有较好的去除效果,但对于部分离子,比如 Ni<sup>2+</sup>的去 除效果不明显。在应用钢渣吸附处理 AMD 时,废水 中的金属离子与吸附剂之间,以及不同的金属离子



之间会发生包括离子交换、吸附、化学反应等的过程。多污染物协同处理中,不同离子的去除机理并不相同。比如废水中的铁主要以针铁矿、赤铁矿和非晶态  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  的形式去除;铝主要以三水铝石和无定形  $\text{Al}(\text{OH})_3$  的形式去除;锰则以锰矿、硬锰矿、软锰矿的形式脱除;镁是以  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  的形式被去除;而  $\text{Ca}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  仅受石膏沉降过程控制,其他微量元素主要是通过铁、铝和锰的沉淀物共沉淀,或者吸附在这些沉淀物上而去除。

### 1.3 工艺参数

使用钢渣处理 AMD,处理时间、处理温度、水渣比、钢渣粒度、AMD 的 pH 等参数都会对处理效果产生影响,其中影响最大的因素为 AMD 的 pH。一般而言,废水的 pH 越高越有利于 AMD 中金属离子的去除。当废水 pH 高于钢渣零电荷点(Point of zero charge, PZC)时,金属离子才易于被钢渣吸附脱除<sup>[15]</sup>。 $\text{Zn}^{2+}$  在硅酸盐基材料上的吸附仅在  $\text{pH}>7$  时才有效,当  $\text{pH}<7$  时, $\text{Zn}^{2+}$  会与溶液中的  $\text{H}^+$  发生竞争性吸附,吸附效果很差。用钢渣处理含  $\text{Mn}^{2+}$  废水,当 pH 为 3~5.7 时, $\text{Mn}^{2+}$  的去除率随着 pH 的升高而升高;当 pH 为 6~8 时, $\text{Mn}^{2+}$  去除率变化不大,其最佳的吸附 pH 为 6 左右<sup>[16]</sup>。利用钢渣同时脱除废水中的  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  等金属离子,结果表明,随着 pH 的升高,脱除效率逐渐增加; $\text{pH}<3.5$  时,金属离子的去除以离子交换为主,而当  $\text{pH}>3.5$  时,金属离子的去除以水解沉淀为主<sup>[17-19]</sup>。Dan FENG 等<sup>[20]</sup> 利用钢渣对含有  $\text{Pb}^{2+}$  以及  $\text{Cu}^{2+}$  的模拟酸性废水进行处理。结果表明, $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  的去除率随着 pH 的升高而升高,最佳 pH 分别为 3.5~8.5 以及 5.2~8.5。当 pH 低于钢渣 PZC 时,钢渣对  $\text{Pb}^{2+}$  以及  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附效果较差,因为钢渣表面吸附的正电荷会与水中金属离子相互排斥。郁孟洁等<sup>[21]</sup> 利用钢渣对煤矿 AMD 进行处理,结果表明,当废水 pH 为 2.5,  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  质量浓度分别为 400、10 mg/L 时,钢渣能够将废水中的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  完全去除,并将废水 pH 提升至 5~6。因此,提高 AMD 的 pH 对脱除 AMD 中金属离子具有重要意义。

## 2 钢渣处理 AMD 研究现状

目前,有关钢渣处理 AMD 的研究主要包括钢渣改性研究、钢渣处理 AMD 工艺参数优化以及使用后钢渣后处理 3 个方面。

### 2.1 钢渣改性

为了进一步增强钢渣对 AMD 的处理效果,很多研究者开展了钢渣的改性研究。研究表明,改性后的钢渣表面活性吸附位数量、钢渣的孔结构和比表面积均得以提高<sup>[22-23]</sup>。钢渣改性方式很多,有热改性、酸碱改性、化合物改性以及钢渣中掺杂其他工业固废改性等。Xinhui ZHAN 等<sup>[24-25]</sup> 以膨润土和钢渣为基础原料,开发了适于 AMD 处理的复合颗粒。研究表明,当钢渣与膨润土质量比为 5:5,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数为 5%,老化时间为 12 h,煅烧温度为 500 °C,煅烧时间为 60 min 时,得到的复合颗粒不仅可以中和 AMD 废水的酸度,而且可以有效地吸附去除废水中的重金属离子。膨润土-钢渣吸附剂对 AMD 中  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附符合准二级动力学模型,且吸附曲线与 Langmuir 和 BET 吸附曲线高度拟合,  $R^2>0.995$ 。

N. T. SITHOLE 等<sup>[26]</sup> 使用飞灰和转炉钢渣的混合物去除 AMD 中的金属离子,实验采用飞灰作为硅基添加剂,加入到碱性转炉渣中,并使用  $\text{H}_2\text{O}_2$  作为造孔剂,来增加混合物的孔结构。研究结果表明,当飞灰质量分数为 10%,固液比为 20 g/L 时,AMD 中金属离子和硫酸盐的脱除率可以达到 99%,其中转炉渣中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的溶解为酸去除的主要原因,而金属离子主要通过沉淀反应去除。

T. S. NAIDU 等<sup>[27]</sup> 利用甘蔗渣对转炉钢渣进行改性,其中甘蔗渣具有比表面积大、不易分解的特点,可长期为硫酸盐还原菌(SBR)提供碳氢来源。利用改性后的钢渣对实际 AMD 进行处理,AMD 的 pH 为 2.44,  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度分别为 3 506.88、197.68、5 199.92 mg/L。结果表明,处理后 AMD 的 pH 可达 7~8,  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  质量浓度低于 10 mg/L,硫酸盐浓度最大降幅为 35%;且改性钢渣粒度越小,对 AMD 处理的性能越好。

### 2.2 工艺参数优化

钢渣过滤床(Steel slag leach bed, SLB)作为一种较新的处理 AMD 的方法,具有结构简单、维护成本较低等优点,具有较好的推广应用前景,其在美国俄亥俄州得到了广泛应用<sup>[28]</sup>。应用结果表明,虽然钢渣可以使 AMD 的碱度得到大幅度提高,但过滤床管道的状态难以监测,容易发生堵塞。C. B. TABELIN 等<sup>[4,29]</sup> 对已建的 12 个钢渣过滤床对 AMD 的处理效果进行了长达 1 a 的监测,并与往年历史数据进行了

比对。结果发现,钢渣过滤床出水管中的沉淀使AMD的酸中和能力有所降低,出水pH低于设计值。因此,为了保证钢渣过滤床对AMD的处理效果,在进行钢渣过滤床设计时应进行以下几方面的优化:首先避免钢渣过滤床与空气中的 $\text{CO}_2$ 接触,防止 $\text{CaCO}_3$ 等沉淀的生产,避免管道堵塞<sup>[12]</sup>。另外,要对过滤床中钢渣粒度进行优化,综合考虑钢渣粒度、比表面积、水流通道以及酸中和能力之间的关系。粒度越小,过滤池水流通道越小,越容易发生堵塞;但粒度变小会使钢渣的比表面积升高,有利于AMD中重金属离子的吸附去除和碱度的产生<sup>[30-32]</sup>。最后,还要对钢渣过滤床中的钢渣进行及时更换。此外,钢渣的使用寿命还与过滤床的水速有关,对于水速较低的过滤床,钢渣的替换时间可适当延长<sup>[30]</sup>。因此,针对钢渣过滤床处理AMD废水工艺,仍需进一步优化钢渣处理废水的工艺参数,兼顾AMD的处理效果和钢渣使用寿命,因地制宜,确保AMD的出水水质。

### 2.3 使用后钢渣的后处理

如前所述,采用钢渣处理AMD,渣中的自由氧化钙、氧化镁、硅酸二钙会发生溶解并与废水中的酸性组分发生中和反应生成硫酸钙等。与原始钢渣相比,处理后的钢渣成分和结构均会发生变化,其碱度释放能力和吸附能力也会随着处理时间的增加逐渐降低,因此钢渣在使用一段时间后必须更换。然而,目前对更换后的钢渣性能的研究还很少。比如钢渣中金属元素的浸出性能、钢渣在水泥建材方面应用的可行性等。

## 3 结语

采用钢渣对AMD进行被动式治理,具有成本低、效率高的特点,适于我国西部地区分散的小型闭坑矿废水的治理。钢渣中含有的自由氧化钙、氧化镁、硅酸二钙等碱性成分能够对AMD进行中和,并对AMD中的金属离子通过吸附、沉淀脱除。如何提高钢渣的碱度释放能力和金属去除能力始终是钢渣在水处理应用中的重要研究内容。由于钢渣在处理AMD过程中生成的硫酸钙、碳酸钙等会阻碍内部碱性物质的释放,且会影响钢渣的吸附性能,因此,为了促进钢渣处理AMD的推广应用,应进一步加强钢渣改性、工艺参数优化等方面的研究,提高钢渣处理

AMD的效果。同时,应对更换后钢渣的环境安全性和利用途径进行分析,避免二次污染的产生,并真正地使钢渣得到充分利用。

### 参考文献

- [1] 马尧,胡宝群,孙占学. 矿山废水处理的研究综述[J]. 铀矿冶, 2006, 25(11): 199-204.  
MA Yao, HU Baoqun, SUN Zhanxue. Research progress of mine waste water [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006, 25(11): 199-204.
- [2] 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): 1215-1220.  
ZHENG Yajie, PENG Yinglin, LI Changhong. Treatment of acid mine drainage by two-step neutralization [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(5): 1215-1220.
- [3] 张瑞雪,吴攀,杨艳,等. 贵州煤矿酸性废水“被动处理”技术的新方法探讨[J]. 地球与环境, 2010, 38(2): 250-254.  
ZHANG Ruixue, WU Pan, YANG Yan, et al. Discussion on a new method of “passive treatment” technology of acid mine wastewater in Guizhou province [J]. Earth and Environment, 2010, 38(2): 250-254.
- [4] TABELIN C B, CORPUZ R D, IGARASHI T, et al. Acid mine drainage formation and arsenic mobility under strongly acidic conditions: Importance of soluble phases, iron oxyhydroxides/oxides and nature of oxidation layer on pyrite [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 399: 122844.
- [5] MOHAMMED N H B, YAACOB W Z W. Remediation of AMD using industrial waste adsorbents [J]. AIP Conference Proceedings, 2016, 1784(1): 060043.
- [6] KEFENI K K, MSAGATI T A M, MAMBA B B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151: 475-493.
- [7] SAHA S, SINHA A. Review on treatment of acid mine drainage with waste materials: A novel approach [J]. Global NEST Journal, 2018, 20(3): 512-528.
- [8] KRUSE N A, MACKEY A L, BOWMAN J R, et al. Alkalinity production as an indicator of failure in steel slag leach beds treating acid mine drainage [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67: 1389-1395.
- [9] ZHANG Xiaolei, CHEN Jiaxin, JI Jingjing, et al. The potential utilization of slag generated from iron- and steelmaking industries: A review [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42(5): 1321-1334.
- [10] JAFARIPOUR A, ROWSON N A, GHATAORA G S. Utilisation of residue gas sludge (BOS sludge) for removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) [J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 144: 90-96.

- [11] NTULI F, MAGWA N P. Sulphate removal from acid rock drainage using steel slag[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 191: 012116.
- [12] MANCHISI J, MATINDE E, ROWSON N A, et al. Ironmaking and steelmaking slags as sustainable adsorbents for industrial effluents and wastewater treatment: A critical review of properties, performance, challenges and opportunities [J]. Sustainability, 2020, 12(5): 1-47.
- [13] BELHADJ E, DILIBERTO C, LECOMTE A. Characterization and activation of Basic Oxygen Furnace slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34: 34-40.
- [14] BODURTHA P, BRASSARD P. Neutralization of acid by steel-making slags [J]. Environmental Technology, 2010, 21: 1271-1281.
- [15] AHMED A. A review on potential usage of industrial waste materials for binding heavy metal ions from aqueous solutions[J]. Journal of Water Process Engineering, 2016, 10: 39-47.
- [16] HUANG Chunping, ELIZABETH A R. Adsorption of Zn(II) onto hydrous aluminosilicates[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1989, 131(2): 289-306.
- [17] DIMITROVA S V, MEHANJIEV D R. Interaction of blast furnace slag with heavy metals ions in water solutions [J]. Water Research, 2000, 34: 1957-1961.
- [18] ZAHAR M, KUSIN F M, MUHAMMAD S N. Adsorption of manganese in aqueous solution by steel slag[J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 30: 145-150.
- [19] DIMITROVA S V. Metal sorption on blast furnace slag[J]. Water Research, 1996, 30(1): 228-232.
- [20] FENG Dan, DEVENTER J S J, ALDRICH C. Removal of pollutants from acid mine wastewater using metallurgical by-product slags[J]. Separation and Purification Technology, 2004, 40: 61-67.
- [21] 郁孟洁, 张瑞雪, 吴攀, 等. 钢渣处理酸性煤矿废水的实验研究[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2014, 31: 122-125.
- YU Mengjie, ZHANG Ruixue, WU Pan, et al. Experimental study on the treatment of acid coal mine wastewater by steel slag [J]. Journal of Guizhou University: Science and Technology, 2014, 31: 122-125.
- [22] IAKOVLEVA E M, SALONEN M, SITARZ M, et al. Acid mine drainage (AMD) treatment: Neutralization and toxic elements removal with unmodified and modified limestone[J]. Ecological Engineering, 2015, 81: 30-40.
- [23] ASERE T G, STEVENS C V, LAING G D. Use of (modified) natural adsorbents for arsenic remediation: A review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 676: 706-720.
- [24] ZHAN Xinhui, XIAO Liping, LIANG Bing. Experimental study on the optimum preparation of bentonite-steel slag composite particles[J]. Sustainability, 2019, 12(1): 1-27.
- [25] ZHAN Xinhui, XIAO Liping, LIANG Bing. Removal of Pb(II) from acid mine drainage with bentonite-steel slag composite particles[J]. Sustainability, 2019, 11(16): 1-17.
- [26] SITHOLE N T, NTULI F, OKONTA F. Fixed bed column studies for decontamination of acidic mineral effluent using porous fly ash-basic oxygen furnace slag based geopolymers [J]. Minerals Engineering, 2020, 154: 106397.
- [27] NAIDU T S, VAN DYK L D, SHERIDAN C M, et al. Sugar and steel by-product utilization in acid mine drainage remediation[J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2020, 24(1): 04019028.
- [28] ZVIMBA J N, SIYAKASHANA N, MATHYE M. Passive neutralization of acid mine drainage using basic oxygen furnace slag as neutralization material: Experimental and modelling [J]. Water Science and Technology, 2017, 75(5/6): 1014-1024.
- [29] PARK I, TABELIN C B, JEON S, et al. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling[J]. Chemosphere, 2019, 219: 588-606.
- [30] GOETZ E R, RIEFLER R G. Performance of steel slag leach beds in acid mine drainage treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 240: 579-588.
- [31] KRUSE N, HAWKINS C, LOPEZ D, et al. Recovery of an acid mine drainage-impacted stream treated by steel slag leach beds[J]. Mine Water and the Environment, 2019, 38: 718-734.
- [32] WEI Xinchao, ZHANG Shicheng, HAN Yuexin, et al. Characterization and treatment of mine drainage[J]. Water Environment Research, 2018, 90: 1899-1922.
- [作者简介] 杨磊(1984—), 博士研究生。E-mail: 598770429@qq.com。通讯作者: 鹿存房, 副教授。E-mail: lucunfang@cqu.edu.cn。
- [收稿日期] 2021-12-16(修改稿)