doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.07.018

铜矿山酸性废水中和渣物性分析及浸出特性研究

胡深[1,2],张勤[1,2],刘子龙[3],杨洪英[1,2],佟琳琳[1,2]

(1. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室,沈阳 110819;
2. 东北大学 冶金学院,沈阳 110819
3. 中国黄金集团有限公司,北京 100011)

摘要:针对处理某矿山酸性废水后得到的有价元素种类多、含量低的难处理中和渣进行 XRF、XRD、激光粒度检测、SEM-EDS 等技术分析,并对中和渣进行了硫酸浸出性研究,对浸出渣进行了浸出毒性探究。分析结果表明,中和渣所含主要元素为 Ca(40.67%)、Fe(5.79%)、Cu(2.43%)、Zn(0.13%)、Ni(0.056%)、As(0.009%);渣中主要为金属氧化物、氢氧化物、硫酸盐、硅酸盐和砷酸盐等物质混合物,主要物相为 $CaSO_4$、$Ca_6Fe_2(SO_4)_2$、CaO、$CuAlO_2$、Fe_2O_3、$Fe(OH)_3$、$FeAsO_4$、CuO、$Cu(OH)_2$、ZnO;中和渣粒径 5.00~75.00 μm。浸出试验表明,在硫酸体积浓度 10%、液固比 6∶1、浸出温度 25 ℃、浸出时间 180 min 的条件下,Cu、Fe、As、Zn、Ni 浸出率分别达到 99.42%、96.71%、88.89%、99.23%、98.21%。浸出毒性试验结果表明,浸出渣 Ni、Cu、As 含量达标,可无毒排放。

关键词:铜矿山酸性废水;中和渣;物性;浸出特性;无毒排放
中图分类号:X758 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-7545(2021)07-0110-06

Characterization and Leachability of Neutralization Slag from Copper Mine Acid Wastewater

HU Shen[1,2], ZHANG Qin[1,2], LIU Zi-long[3], YANG Hong-ying[1,2], TONG Lin-lin[1,2]
(1. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. China National Gold Group Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: XRF, XRD, Laser particle size detection, SEM-EDS and other techniques were used to analyze neutralization slag with many kinds of valuable elements and low content obtained from treatment of acid wastewater in copper mine. Sulfuric acid leaching property of neutralization slag was also studied. Leaching toxicity of leaching residue of neutralization slag was investigated. The analysis results show that main elements in neutralization slag are Ca(40.67%), Fe(5.79%), Cu(2.43%), Zn(0.13%), As(0.009%), Ni(0.056%), and is a mixture of metal oxides, hydroxides, sulfates, silicates and arsenates. Main phases are $CaSO_4$, $Ca_6Fe_2SO_{42}$, CaO, $CuAlO_2$, Fe_2O_3, $FeOH_3$, $FeAsO_4$, CuO, $CuOH_2$, and ZnO. Particle size of neutralization slag is 5.00—75.00 μm. The leaching experiment shows that leaching rate of Cu, Fe, As, Zn, Ni is 99.42%, 96.71%, 88.89%, 99.23% and 98.21%, respectively, under the conditions including volume concentration of sulfuric acid of 10%, L/S of 6∶1, leaching temperature of

收稿日期:2021-02-28
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1902002);国家自然科学基金资助项目(U1608254)
作者简介:胡深(1994-),男,辽宁沈阳人,硕士研究生;**通信作者**:杨洪英(1960-),女,河北张家口人,博士,教授,博士生导师

25 ℃, and leaching time of 180 min. The results of leaching toxicity test show that content of Ni, Cu and As in leaching residue of neutralization slag meets the standard and could be discharged without toxicity.
Key words: copper mine acid wastewater; neutralization slag; physical properties; leaching characteristics, non-toxic emissions

近年来,工业的迅速发展增加了对铜的需求[1],而铜矿山在开采过程中常伴随低 pH、高浓度重金属离子和硫酸盐的酸性废水流出[2-3],对周边环境产生危害。传统矿山酸性废水处理方法有中和法、吸附法[4-5]、膜分离法[6]和微生物法[7-9],其中国内大部分厂家采用传统的石灰中和法[10],工程使用率大于90%,国外主要采用传统石灰法的改进技术——高浓度泥浆法[11](HDS),但 HDS 技术会产生大量含有铜、铁、砷、铅、锌、镍、铬、镉、钡、银等[12]有价金属的中和渣,未经处理直接填埋的话不仅会造成大量有价金属损失,且渣中的重金属元素在酸性雨水作用下还会进入土壤和地下水,污染环境[13-14]。

目前,对冶炼酸性废水的无害化处理相关研究很多[15-16],但针对处理废水后回收的中和渣的研究却近乎空白。国内炼铜企业通常将中和渣进行直接填埋处理[17],以降低成本,但随着我国绿色发展理念的不断深入及相关法规的完善,中和渣无害化治理和资源回收[18]越来越成为亟待解决的环境问题[19]。相对于直接填埋,中和渣酸浸预处理具有试剂成本低、颗粒粒度小可省去研磨工艺、有价金属富集效果好、资源充分利用可减轻环境负担、浸出渣无毒排放可避免重金属污染等优势。

本文采用 XRF、XRD、激光粒度分析、SEM-EDS 等技术,对西藏某铜冶炼厂产出的有价元素种类多、含量低的难处理中和渣(以下简称中和渣)进行物性分析,并采用稀硫酸进行浸出性研究及浸出渣毒性检测,将其从危险废物转变为固体废物,同时回收富集的有价金属元素,对资源二次利用、绿色循环发展具有极其重要的意义。

1　试验部分

1.1　试剂、材料和仪器

中和渣取自西藏某铜矿山酸性废水缓释硫化+高浓度泥浆(HDS)法处理后的回收底泥,取样前已混合均匀,保证试样具有代表性。

分析纯硫酸和硝酸,试验用水为蒸馏水。

主要仪器有 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪、M21X 型超大功率 X 射线衍射仪、JL-1177 型激光粒度分析仪、Quanta250FEG 型场发射扫描电子显微镜、AA6300 型原子吸收分光光度计、HW-FZD-6 翻转式振荡器。

1.2　浸出试验

中和渣浸出试验在恒温水浴锅中完成。首先将中和渣 15 g 加入 250 mL 烧瓶中,加入一定量的稀硫酸进行浸出试验。研究了硫酸体积浓度(10%)、液固比(6∶1,稀硫酸体积与中和渣质量比,mL/g)、浸出反应温度(25、80 ℃)、反应时间(180 min)和搅拌速度(250 r/min)对中和渣中主要元素浸出率的影响。浸出反应结束后抽滤,滤液即为浸出液,滤渣经蒸馏水多次洗涤干燥后得到浸出渣,浸出渣按照国标 HJ/T 299—2007 进行毒性浸出试验。

1.3　分析方法

1.3.1　中和渣的物性

中和渣中主要元素含量采用 XRF 技术及元素化学分析法[20]分析。中和渣中结晶物相成分采用 XRD 技术分析。中和渣用蒸馏水分散后,采用激光粒度分析仪测定其粒度。采用 SEM-EDS 技术观察中和渣的微观形貌及测定探针指定区域的元素组成[21]。

1.3.2　浸出性

采用 AAS 技术测定浸出液中 Cu、Fe、As、Pb、Zn、Ni 的含量[22],计算浸出率。采用 SEM-EDS 技术[23]观察浸出渣的微观形貌及微区分析。

1.3.3　浸出渣毒性

采用 HJ/T 299—2007 规定的检测法,以硝酸、硫酸混合溶液为浸提剂,进行浸出渣的浸出毒性测定。

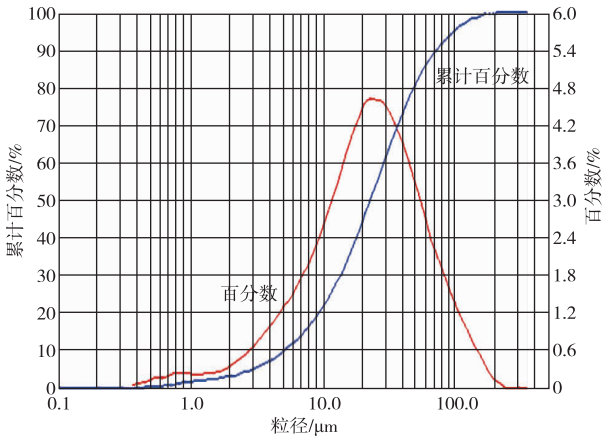
2　结果与讨论

2.1　中和渣物性分析结果

中和渣的主要元素含量(%):Ca 40.67、S 28.53、Al 14.81、Fe 5.79、Si 3.51、Cu 2.43、Zn 0.13、Ni 0.06、As 0.01、其他 4.06。中和渣主要以硫酸钙存在,Ca、S、Al 占比分别为 40.67%、28.53%、14.81%;Fe 占比 5.79%,主要以+3 价形式存在;Si 占比 3.51%;Cu 占比 2.43%,主要以+2 价形式存在;Zn、Ni、As 占比分别为 0.13%、0.056%、0.009%,其他元素占比 4.065%。可见,

中和渣是一种有害的工业废弃物,元素种类多、含量少,其中 Fe、Cu 含量较高具有回收价值,As、Pb 等元素若直接填埋会对环境造成严重危害[24]。

中和渣粒径分布曲线见图 1。由图 1 可知,中和渣粒径分布范围较宽,在 1.00～200.00 μm;其中,－5.00 μm 占 9.83%;5.00～75.00 μm 占 81.43%;＋75.00 μm 占 8.74%。由此可知,中和渣粒径较小,易在储存和运输过程中给环境带来潜在的危害。此外,中和渣粒径小,与浸出剂接触面积大,可推测浸出反应速率较快。



粒径/μm	含量/%
1	1.57
2	3.20
5	9.83
10	22.01
20	45.36
45	78.17
75	91.26
100	95.72
200	99.90
300	100.0

图 1 中和渣粒度分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of neutralization slag

中和渣 XRD 分析结果如图 2 所示。根据 JCPDS 卡片上的数据,Ca 可能存在的物相有 $CaSO_4$、$Ca_6Fe_2(SO_4)_2$、CaO;Cu、Fe 等金属元素可能存在的物相有 $CuAlO_2$、Fe_2O_3、CuO、$Cu(OH)_2$、$Fe(OH)_3$;Zn 主要存在物相为 ZnO、$Zn(OH)_2$。从图 2 可以看出,中和渣的 XRD 图谱只检测到 Ca、Al、Fe、Cu、Zn 元素的化合物,并没有检测到任何含 Ni、As、Pb、Mn、Cr、Si 物质的特征峰,表明含 Ni、As、Pb、Mn、Cr、Si 的化合物在中和渣表面以高度分散的形式存在,或所形成晶体颗粒尺寸小于 XRD 的检测下限[25]。中和渣主要为碱性氧化物和两性氧化物,宜采用酸性浸出剂浸出,且渣中 Ca、S 元素占比较高,由 $CaSO_4$ 微溶于酸和同离子效应对 $CaSO_4$ 溶解的抑制作用,在不引入其他离子的原则下,选择硫酸作为浸出剂。浸出渣主要成分为 $CaSO_4$。

中和渣 SEM 照片见图 3,图 3 中方块区域为 EDS 分析区。结合 XRD 和 SEM-EDS 分析可知,中和渣颗粒大小不同、形态各异,分散的颗粒呈长条形、球形、立方形和短棒状结晶形态[26]。图 3a 中所测球形颗粒粒径约为 25 μm,EDS 分析显示颗粒成分复杂,为含 O、Ca、Fe、As、Al、Si 的复杂物质,推测为硅铝酸盐和 $FeAsO_4$ 混合物。图 3b 中所测长约 80 μm 条状颗粒,EDS 分析显示其主要成为为 $CaSO_4$,由矿山酸性废水中和后得到,为中和渣主要成分。图 3c 中 2.5 μm 左右的似液滴状颗粒,EDS 分析显示其为 Ca、S、O、Fe、As 混合物,初步推断为 $CaSO_4$ 与 $FeAsO_4$。砷酸铁是废水中 Fe 离子及其化合物对 As 离子吸附共沉淀得到,进而达到除砷的目的。图 3d 中的长约 75 μm 条状白色结晶,EDS 分析显示其主要成分为 Fe_2O_3 并含有少量的 Cr、Mn 元素。图 3e 中的白色结晶呈颗粒状,EDS 分析显示其主要成分为 O、Ni、Cu、Zn 的混合氧化物。图 3f 中白色块状结晶粒径为 5 μm 左右,EDS 分析显示其主要成分为 CuO 和 ZnO,颗粒较小,来源于废水中有价离子生成氢氧化物后受热分解所得。

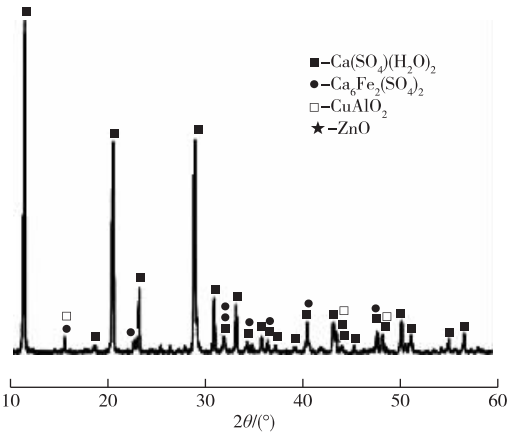


图 2 中和渣的 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of neutralization slag

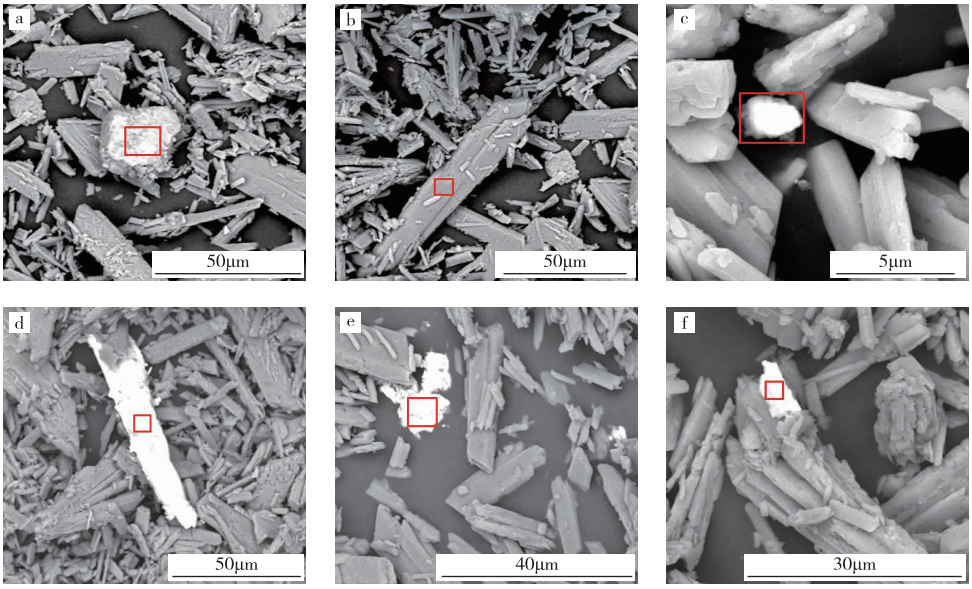


图 3　中和渣的 SEM 形貌

Fig. 3　SEM images of neutralization slag

2.2　中和渣的浸出性

上述中和渣的物性分析结果表明，中和渣有价元素含量多、种类复杂，其中大部分元素以可被酸性浸出的化合物形式存在。考虑到渣中主要物质为 $CaSO_4$，因此以稀硫酸为浸出剂，浸出液成分如表 1 所示，浸出渣成分(%)：Ni＜0.001、Cu 0.014、Fe 0.19、Zn＜0.001、As＜0.001、Ba＜0.05、Pb＜0.001、Cr＜0.01。

根据表 1 可知，中和渣硫酸浸出液 Ni 含量超出国家标准 GB 5805.3—2007 规定的 5 mg/L 浓度限值；Cu 含量超出国标该元素 100 mg/L 的限值；Cu、Fe、Zn 具有一定回收价值。因此中和渣硫酸浸出液仍需进一步处理。根据浸出渣成分可知，浸出渣中 Ni 含量降至 0.001%以下，浸出率达到 98.21%；Cu 含量降至 0.014%，浸出率为 99.42%；Fe 含量降至 0.19%，浸出率 96.71%；Zn 含量 0.001%以下，浸出率 99.23%；As 含量降至 0.001%以下，浸出率大于 88.89%。综上所述，采用硫酸浸出中和渣降低渣中有害元素含量的工艺路线是可行的，Cu、Fe、Ni、Zn、As 等元素均较充分地进入浸出液中，可进一步回收处理。

浸出渣的 SEM 照片如图 4 所示。由图 4 可知，浸出渣物相结晶种类减少。EDS 分析显示，图 4a 标注区域主要成分为 $CaSO_4$，图 4b 区域主要成分为硅铝酸盐，面扫描无其他元素结晶，上述 Cu、Fe、Zn、As、Ni 等有价元素杂质基本脱除。

表 1　中和渣硫酸浸出液成分

Table 1　Composition of leaching solution of neutralization slag

元素	浸出液成分/(mg·L^{-1})		GB 5805.3—2007	浸出率/
	常温 25 ℃	80 ℃	浓度限值/(mg·L^{-1})	%
Ni	20.9	22.7	5	98.21
Cu	1 560	1670	100	99.42
Fe	2 668.3	2 784.4		96.71
Zn	38	41	100	99.23
Cd	0.16	0.17	1	
Cr	1.36	0.87	15	
As	2.98	3.18	5	88.89
Ba	0.12	0.071	100	
Pb	4.14	4.65	5	
Hg	0.6×10^{-3}	0.5×10^{-3}	0.1	
Ag	16.7×10^{-3}	22.4×10^{-3}	5	

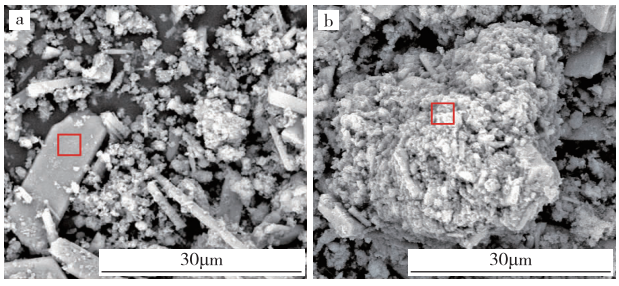


图 4　中和渣硫酸浸出渣的 SEM 形貌

Fig. 4　SEM images of leaching residue of neutralization slag

2.3 浸出渣毒性分析

浸出渣的毒性检测结果如表 2 所示。由表 2 可知,根据国家标准 GB 5085.3—2007 危险废物鉴别标准,中和渣中超标的 Ni、Cu 分别从 12.53、529.38 mg/L 降至 0.11 mg/L(25 ℃)和 0.012 mg/L(80 ℃)、9.47 mg/L(25 ℃)和 1.98 mg/L(80 ℃),低于危险浓度限值 5 mg/L 和 100 mg/L 的要求,且富集的 As、Fe、Zn 元素几乎不存在于渣中,大部分回收至浸出液中。结果表明,中和渣硫酸浸出无害化处理方案是可行的,浸出渣通过 HJ/T 299—2007 检测,可作为无毒固废稳定排放。

表 2 中和渣、浸出渣毒性检测结果

Table 2 Toxicity test results of neutralization slag and leaching residue

/(mg·L^{-1})

检测项目	中和渣检测结果	浸出渣检测结果		GB 5805.3—2007 浓度限值
		毒浸液 1 (25 ℃)	毒浸液 2 (80 ℃)	
总 Cr	1.01	0.011	<0.01	15
Ni	12.53	0.11	0.012	5
Cu	529.38	9.47	1.98	100
Fe	621.78	1.37	0.56	
As	1.41	<0.01	<0.01	5
Ag	<0.10	<0.10	<0.10	5
Cd	<0.01	<0.01	<0.01	1
Ba	0.412	0.012	0.020	100
Pb	0.29	0.26	0.16	5
Zn	12.37	2.34	1.07	100
Hg*	<0.5	<0.5	<0.5	0.1

注:* 单位为 μg/L

3 结论

1)中和渣富集的金属元素主要为 Ca(40.67%)、Fe(5.79%)、Cu(2.43%)、Zn(0.13%)、Ni(0.056%)、As(0.009%),同时含有 O、S(28.53%)、Si(3.51%)、As(0.009%)等非金属元素,元素种类多;中和渣粒径主要分布在 5.00~75.00 μm,大部分中和渣颗粒裸露,无黏结或包裹情况;金属元素主要以硫酸盐、氧化物和氢氧化物存在,可溶性盐占少数;非金属元素主要存在于含氧酸盐阴离子中。

2)采用硫酸浸出中和渣降低渣中有害元素含量的方法可行,在硫酸浓度 10%(体积浓度)、浸出时间 180 min、液固比 6∶1、浸出温度 25 ℃和 80 ℃下,可以回收 95%以上的 Cu、Fe、Zn、Ni 和 88%的 As。

3)中和渣硫酸浸出后的浸出渣经 HJ/T 299—2007 毒性检测后,Cu、Fe、Zn、Ni、As、Pb 元素含量已降至国家标准 GB 5085.3—2007 规定危险值以下,浸出渣可作为无毒固废稳定排放,不会对环境造成危害。

参考文献

[1] 邵锐,潘鑫,张思宇,等.酸性矿山废水处理技术的分析与展望[J].绿色科技,2020(4):8-10.
SHAO R, PAN X, ZHANG S Y, et al. Analysis and prospect of acid mine wastewater treatment technology[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(4): 8-10.

[2] HEDRICH S, JOHNSON D B. Remediation and selective recovery of metals from acidic mine waters using novel modular bioreactors [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 12206-12212.

[3] 曹子敏,JOSEPH F B,裴理鑫,等.安徽某铁矿不同矿山废水库中微生物群落结构特征[J].微生物学报,2019,59(6):1076-1088.
CAO Z M, JOSEPH F B, PEI L X, et al. Microbial community structure characteristics of waste reservoirs in different mines of an iron mine in Anhui[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59(6): 1076-1088.

[4] 张崎.煤基吸附剂的制备及其去除废水中重金属的研究[D].武汉:武汉科技大学,2016.
ZHANG Q. Study on the preparation of coal-based adsorbent and its removal of heavy metals from wastewater[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2016.

[5] 樊海明,何少华,周炀,等.凹凸棒石吸附废水中的重金属[J].矿业工程,2008,6(2):60-62.
FAN H M, HE S H, ZHOU Y, et al. Attapulgite adsorption of heavy metals in wastewater[J]. Mining Engineering, 2008, 6(2): 60-62.

[6] LIU M H, LÜ Z H, CHEN Z H, et al. Comparison of reverse osmosis and nanofiltration membranes in the treatment of biologically treated textile effluent for water reuse[J]. Desalination, 2011, 281: 372-378.

[7] MUHAMMAD S N, KUSIN F M, ZAHAR M S M, et al. Passive treatment of acid mine drainage using mixed substrates: Batch experiments [J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 30: 157-161.

[8] 石太宏,杨娣,冯玉香,等.SAPS 处理酸性矿山废水的模拟应用研究[J].环境工程学报,2015,9(5):2277-2283.
SHI T H, YANG D, FENG Y X, et al. Simulation and application of SAPS in the treatment of acid mine wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5): 2277-2283.

[9] ROUSSEL J, MURRAY A J, ROLLEY J, et al. Biosynthesis of zinc sulfide quantum dots using waste off-gas from metal bioremediation process [J]. Advanced Materials Research, 2015, 1130: 555-559.

[10] TOLONEN E T, SARPOLA A, HU T, et al. Acid mine drainage treatment using by-products from quicklime manufacturing as neutralization chemicals [J]. Chemosphere, 2014, 117: 419-424.

[11] 陈竹青. 高浓度泥浆法(HDS)在硫铁矿采选酸性废水处理中的应用[J]. 现代矿业, 2020, 36(6): 233-234.
CHEN Z Q. Application of high concentration mud method in the treatment of acid wastewater from pyrite mining and beneficiation [J]. Modern Mining, 2020, 36(6): 233-234.

[12] 林秀培. 矿坑水中和渣的资源化利用[J]. 工程建设, 2019, 51(8): 92-94.
LIN X P. Resource utilization of mine water and slag[J]. Engineering Construction, 2019, 51(8): 92-94.

[13] 张小俊. 土壤重金属污染及其危害[J]. 农业开发与装备, 2020(10): 109-110.
ZHANG X J. Soil heavy metal pollution and its harm[J]. Agricultural Development and Equipment, 2020(10): 109-110.

[14] 王智斌, 魏万鸿. 食品中重金属污染危害分析与其检测方法研讨[J]. 现代食品, 2020(24): 219-221.
WANG Z B, PENG W H. Hazard analysis and detection method of heavy metal contamination in food[J]. Modern Food Science and Technology, 2020(24): 219-221.

[15] MOKGEHLE T M, TAVENGWA N T. Recent developments in materials used for the removal of metal ions from acid mine drainage[J]. Applied Water Science, 2021, 11. DOI: 10.1007/s13201-020-01350-9.

[16] BERNARDEZ L A, DE OLIVEIRA L E L, DE ANDRADE L L R P. Acid mine drainage at the Bahia Gold Belt (Brazil): Microbial isolation and characterization [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193. DOI: 10.1007/s10661-021-08844-2.

[17] WANG X M, JIANG H K, ZHENG G Y, et al. Recovering iron and sulfate in the form of mineral from acid mine drainage by a bacteria-driven cyclic biomineralization system[J]. Chemosphere, 2021, 262: 127567. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127567.

[18] ZHANG T F, LIU W, HAN J W, et al. Selective separation of calcium from zinc-rich neutralization sludge by sulfidation roasting and HCl leaching[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 259: 118064. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.118064.

[19] HOU L, NIU B B, LI X J, et al. Analysis of soil fertility quality and heavy metal pollution in the Dawen River Basin, China[J]. Open Journal of Soil Science, 2020, 10(12): 602-615.

[20] 袁文明, 于长珍, 黄树茂. 贵金属合金中常见元素的简易分析方法[J]. 航空标准化与质量, 2006(6): 18-22.
YUAN W M, YU C Z, HUANG S M. Simple method for analysis of common elements in precious metal alloys[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2006(6): 18-22.

[21] SUN C, ERICH M, MATTHIAS M, et al. On the progress of scanning transmission electron microscopy (STEM) imaging in a scanning electron microscope[J]. Microscopy and Microanalysis, 2018, 24(2): 99-106.

[22] REININGER C, WOODFIELD K, KEELOR J D, et al. Absolute number densities of helium metastable atoms determined by atomic absorption spectroscopy in helium plasma-based discharges used as ambient desorption/ionization sources for mass spectrometry[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2014, 100: 98-104.

[23] 郑雄开, 陶雪琴, 杜建军, 等. 模拟土壤淋洗废液中重金属的选择性去除与淋洗液的回收研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 995-1003.
ZHENG X K, TAO X Q, DU J J, et al. Selective removal of heavy metals from simulated soil leachate and recovery of leachate [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(3): 995-1003.

[24] JAVAID A, YOUSAF W, AHMAD S R, et al. Application of pollution indices for the assessment of heavy metal hazards in soil using GIS approach[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 1212. DOI: 10.1007/s12517-020-06164-2.

[25] 杨勰, 李宏煦, 李超. 铅冶炼烟尘的物性分析及浸出性研究[J]. 化工环保, 2014, 34(5): 493-498.
YANG X, LI H X, LI C. Characterization and leachability of lead smelting dust[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2014, 34(5): 493-498.

[26] 王洪友, 邵逊哲, 王丽, 等. SiO_2 改性钒钨钛催化剂的 NH_3-SCR 反应性能[J]. 稀有金属, 2018, 42(1): 53-58.
WANG H Y, SHAO X Z, WANG L, et al. NH_3-SCR reaction performance of vanadium tungsten-titanium catalyst modified by SiO_2[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018, 42(1): 53-58.