

铅锌矿废石产酸潜力及模拟强酸雨环境下 重金属淋溶规律分析

曹耀华^{1,2}, 张永康^{1,2}, 刘红召^{1,2}, 王威^{1,2}, 柳林^{1,2}

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 河南 郑州 450006; 2. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 这是一篇矿山生态修复领域的论文。矿山开发过程中不可避免产生大量废石, 废石中重金属元素在风化、淋溶等作用下释放, 将对矿区周边水土环境质量产生影响。为了研究某铅锌矿废石重金属元素淋溶规律, 分析了该废石的化学组成和产酸潜力。模拟强酸雨环境下, 分析了废石中重金属元素溶出率及淋溶前后废石的矿物组成。结果表明: 该废石中重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、As 元素无独立矿物, 在废石中分散赋存; 废石酸中和能力较高, 净产酸量 NAG 为 0 kg H₂SO₄/t, 无产酸潜力。在模拟强酸雨淋溶实验中, 淋出液 pH 值均呈弱碱性, 这与废石含较多的碱性矿物有关, 废石具有一定的酸缓冲能力; 第 1 轮淋溶过程 Cu、Pb、Zn、Cd、As 元素随淋溶时间延长累积溶出率逐渐升高; 第 2 轮淋溶 2 周期后 Cu、Pb、Zn、Cd 元素累积溶出率趋于稳定, 后续基本不溶出; As 元素累积溶出率随淋溶时间延长而升高; 总体而言, 废石中重金属溶出率低。废石淋溶前后矿物成分不变, 矿物含量略有变化。本文可为矿山废石堆场管理及其周边重金属污染防治提供依据。

关键词: 矿山生态修复; 铅锌矿废石; 产酸潜力; 重金属; 淋溶

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.029

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 05-0204-07

引用格式: 曹耀华, 张永康, 刘红召, 等. 铅锌矿废石产酸潜力及模拟强酸雨环境下重金属淋溶规律分析[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 204-210.

CAO Yaohua, ZHANG Yongkang, LIU Hongzhao, et al. Acid production potential of lead-zinc waste rocks and analysis of heavy metal eluviating at simulated strong acid rain environment[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 204-210.

铅锌矿是重要的战略性矿产资源, 我国的铅锌矿资源丰富, 探明资源储量大, 但贫矿多, 富矿少^[1], 开采过程需剥离大量废石^[2]。铅锌矿废石经过风化、雨水淋溶, 尤其在酸雨环境的雨水侵蚀作用下, 废石中的重金属元素也将被释放, 通过废水渗透、吸附、离子交换等作用进入周边水体和土壤, 成为矿区周边重金属污染源^[3-5]。张永康等^[6]采集了江西宜春某铅锌矿区典型水、土壤、尾矿、废石等样品, 研究了该矿区土壤重金属污染现状, 结果表明, 矿区重金属污染元素主

要为 Cu、Pb、Zn、Cd、As, 重金属污染集中分布在尾矿库和排土场(废石堆场)下游地块, 尾矿库和排土场可能是重金属污染来源。针对矿山固废堆存对周边环境存在的潜在危害, 国内外学者研究了废石产酸潜力^[7-10], 并通过静态浸泡、动态淋溶模拟实验、模拟酸雨淋溶实验等研究了矿山固废中重金属的释放规律、溶出动力学、迁移转化及环境行为的影响^[11-23], 取得了大量研究成果, 为以后的科研工作者提供了借鉴和参考。

为了进一步研究江西宜春某铅锌矿废石中重

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190269); 国家重点研发计划课题(2020YFC1908801)

作者简介: 曹耀华(1966-), 女, 研究员, 从事矿产资源综合利用及矿山地质环境保护研究。

通信作者: 张永康(1987-), 男, 硕士, 工程师, 从事矿产资源综合利用及矿山地质环境保护研究。

金属淋溶规律及其对周边土壤的潜在危害，本文采集了该铅锌矿区老废石堆场的废石样品，研究了废石的化学组成和产酸潜力，结合该矿区亚热带温湿气候降雨较多的特点，模拟强酸雨环境（pH 值=4）开展废石淋溶实验，研究了重金属元素淋溶规律以及强酸雨淋溶对废石矿物组成的影响。本文可为矿山废石堆场管理及其周围环境重金属污染防治提供依据。

1 材料与方 法

1.1 实验原料及采集方法

该铅锌矿露天开采，废石、围岩剥离后由汽车装运至废石堆场存放。老废石堆场占地面积约 0.02 km²，结合废石堆场的形貌、面积、堆存状况等特征，总体以网格法布设样品，采集废石样品 5 件，现场废石粒度范围主要为 2~50 cm，为了尽可能保证样品的均一性，把废石粒度分为 2~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 等 5 个粒度；假定废石各个粒度均匀分布，每个粒度为一个分样采样约 20 kg。5 件废石样品总重约 500 kg，将采集的废石样品自然风干，经颚式破碎机粗碎至-15 mm，混匀再经中碎破碎机破碎、混匀、缩分制备出-5 mm 粒级的样品。-5 mm 的样品四分法缩分为 2 份，一份用于淋溶实验，另一份进一步缩分、研磨至-0.074 mm，送化验分析和产酸潜力分析。

1.2 产酸潜力分析方法

酸中和能力（acid neutralizing capacity, ANC）：称取 1 g 样品加入到 100 mL 的烧杯中，注入 25 mL 0.2 mol/L 的 HCl 溶液。在 90 ℃ 水浴锅中加热 3 h，冷却后用 0.2 mol/L 的 NaOH 滴定过量的 HCl，则 ANC 可按下式计算：

$$ANC \text{ (kgH}_2\text{SO}_4/\text{t)} = \frac{(25 - m) \times 0.2 \times 98 \times 10^{-6}}{2 \times W \times 10^{-6}}$$

式中：m 为 NaOH 的用量，w 为样品的重量。

净产酸量（net acid generation, NAG）：加 2.5 g 样品到 500 mL 的锥形瓶中，再加入 250 mL 150 g/L 的 H₂O₂ 于通风橱中放置 24 h，煮沸 1 h 左右除去残余的 H₂O₂，冷却，测 pH 值，即为 NAG-pH，再用 0.1 mol/L 的 NaOH 将其滴定至 pH 值 7。NAG 可按下式计算：

$$NAG \text{ (kg H}_2\text{SO}_4/\text{t)} = \frac{0.1 \times m \times 98 \times 10^3}{2 \times W}$$

式中 m 为 NaOH 的用量，w 为样品的重量。

1.3 淋溶实验方法及设备

淋溶实验装置为自制的 Φ20 mm×350 mm 小型玻璃淋溶柱，以 BT601L 型恒流微型蠕动泵控制淋溶液（模拟酸雨溶液）流量，见图 1。称取定量的废石置于玻璃淋溶柱内，用去离子水充分浸润淋溶柱内的废石 8 h 后排空水分。用分析纯的硫酸、硝酸和去离子水配制淋溶液，硫酸和硝酸的体积比为 2:1（酸液配比参考《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》（HJ/T 299—2007）中浸提剂配比方法），淋溶液 pH 值为 4.00。采用间歇淋溶的方式模拟降雨过程，实验中淋溶液流速为 16 mL/（d/kg），每轮连续动态淋溶 10 周期，共进行了 2 轮淋溶实验。第 1~10 周期为第 1 轮，第 11~20 周期为第 2 轮，每轮淋溶酸液量相当于年平均降雨量。淋溶实验温度为 20~28 ℃。每周集中收集淋出液检测分析。为了验证淋溶实验的重复性，相同条件下设置了 2 组实验，一组为实验组，另一组为对照组。淋溶实验结束后，淋溶柱内的残渣为废石淋溶渣，自然风干后研磨至-0.074 mm，送化验分析。

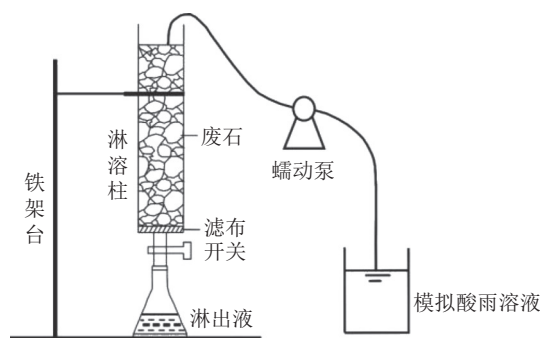


图 1 淋溶实验装置

Fig.1 Schematic of the eluviating test apparatus

1.4 测试分析

利用 X 衍射仪（D/max-2500PC）分析废石的矿物组成，利用电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS（CAP RQ ICPMS）测试废石样品及淋出液中 Cu、Pb、Zn、Cd、As 等元素含量，采用 pH 计（LE438）测量淋出液 pH 值。

淋出液重金属元素累积溶出率计算公式：

$$Q = \sum \frac{C_i \times V_i}{M \times A} \times 100\%$$

式中: Q 为某重金属元素累积溶出率, 单位 %; C_i 为该重金属元素第 i 周期淋出液的浓度, 单位 $\mu\text{g/L}$; V_i 为该周期淋出液的体积, 单位 L ; M 为装入淋溶柱内废石的质量, 单位 μg ; A 为该重金属元素在废石中的含量, 单位 %。

2 结果与讨论

2.1 废石成分分析

经 X 衍射分析, 铅锌矿废石中金属矿物为菱铁矿、黄铁矿, 非金属矿物为石英、白云母、白云石、斜长石、高岭石。废石 X 衍射结果见

图 2。废石重金属元素含量分析结果见表 1。

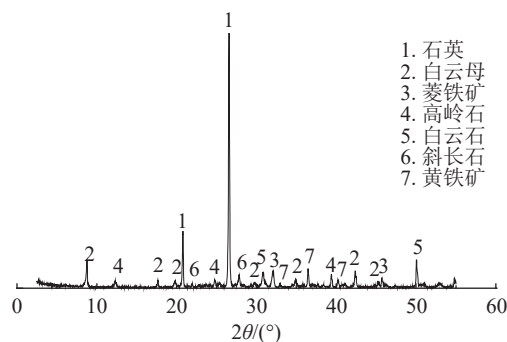


图 2 废石样品 XRD
Fig.2 XRD of waste rocks

表 1 废石中重金属元素结果/(mg/kg)
Table 1 Results of heavy metal elements in waste rocks

名称	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
废石中的含量	470	620	1 200	87	73	6	120	0.079
农用地土壤污染风险筛选值	50	100	200	250	70	0.4	30	0.5
宜春土壤背景值 ^[24]	22.14	33.01	71.3	58.08	21.43	0.11	11.67	0.1

由图 2 可知, 重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、As 无独立矿物, 在废石中分散赋存。由表 1 可知, 重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、As 含量较高, 远高于国家《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中对应的农用地土壤污染风险筛选值; 废石中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、As 含量也远超当地的土壤背景值。可见, 废石中的重金属元素经风化、淋溶等作用释放于周边水土环境中, 可能会造成土壤重金属含量超标, 是矿区周边重金属污染潜在污染源。对于该废石应重点关注 Cu、Pb、Zn、Cd、As 元素及其淋溶释放规律。

2.2 废石产酸潜力分析

废石产酸潜力实验结果表明, 废石酸中和能力 ANC 为 $97.02 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$, ANC 值较高, 酸中和能力较强, 净产酸量 NAG 为 $0 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$, NAG-pH 值为 7.07, 表明该废石样品无产酸潜力。净产酸量 NAG 主要是通过加入 H_2O_2 , 使废石中的 S 快速氧化产酸, 在此过程中, 所产生的酸与废石的碱性物质发生中和反应, 酸性物质被 ANC 消耗后, 剩余酸量为 NAG, NAG 为 $0 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$ 也表明了废石含一定量的碱性矿物。

2.3 溶出液 pH 值的变化

在初始淋溶液 pH 值均为 4.00 时, 进行了

2 轮动态淋溶实验, 淋出液 pH 值变化见图 3。由图 3 可知: 实验组在第 1 轮淋溶第 1 周期时, 淋出液 pH 值急剧升高至 7.68, 在 1~5 周期内 pH 值变化范围 7.68~8.39, pH 值逐渐升高, 第 5~9 周期, 淋出液 pH 值变化较小, 而第 10 周期 pH 值明显降低; 第 2 轮淋溶过程 pH 值变化范围 7.67~8.36, 淋出液的 pH 值随淋溶时间延长, 呈不规则窄幅波动。对照组淋出液 pH 值变化规律与实验组相似, 实验重复性较好。两轮淋溶过程的淋出液 pH 值均呈弱碱性, 这与该废石含碱性矿物成分较高有关, 碱性矿物中和酸性溶液, 使淋出液 pH 值升高, 该废石具有一定的酸缓冲能力。

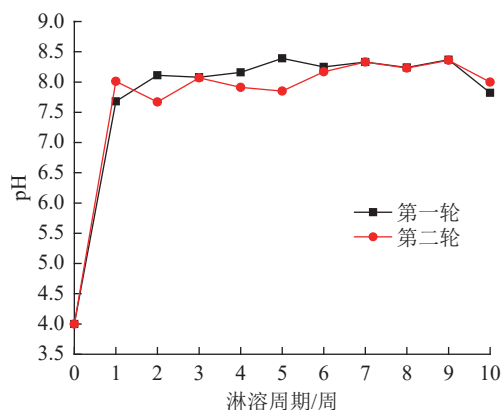


图 3 废石淋溶实验淋出液 pH 值
Fig.3 pH value of leaching solution from waste rocks eluviating test

2.4 淋出液中重金属溶出结果

2.4.1 重金属 Cu 元素溶出结果

废石中重金属 Cu 元素淋溶结果见图4。从图4可知，实验组第1轮淋溶过程中，Cu 元素累积溶出率总体呈上升趋势，第8~10周期急剧上升。第2轮淋溶过程中，Cu 元素累积溶出率在淋溶2周期时（第12周）达到最大值，此后 Cu 元素基本不再溶出。同一淋溶周期，对照组 Cu 元素累积淋溶率与实验组相当。

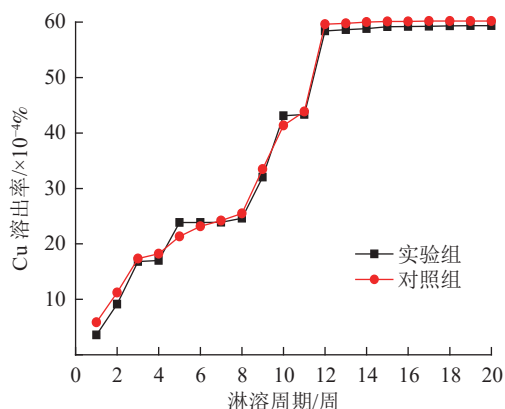


图4 废石淋溶实验 Cu 元素溶出率

Fig.4 Leaching rate of Cu element from waste rocks eluviating test

2.4.2 重金属 Pb 元素溶出结果

重金属 Pb 元素溶出结果见图5。从图5看出，实验组在第1轮淋溶过程的第1~8周期，Pb 元素溶出率随淋溶周期延长缓慢提高，至第8~10周期时，Pb 元素溶出率快速升高。第2轮淋溶过程，淋溶2周期后（第12周）Pb 元素累积溶出率基本不变。同一周期内，对照组与实验组溶出结果基本一致。废石淋溶实验中 Cu、Pb 元素

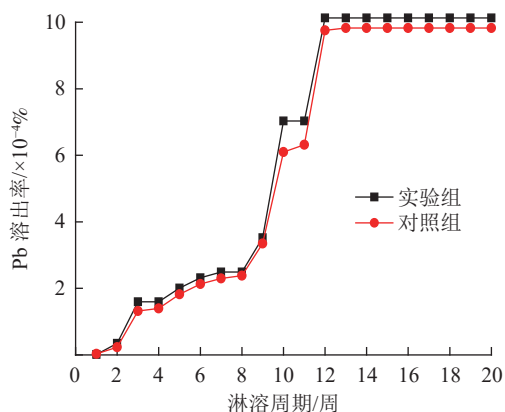


图5 废石淋溶实验 Pb 元素溶出率

Fig.5 Leaching rate of Pb element from waste rocks eluviating test

溶出规律基本一致。

2.4.3 重金属 Zn、Cd 溶出结果

重金属 Zn、Cd 元素溶出率见图6、7。从图中看出，实验组在第1轮淋溶过程中的1~8周期，Zn、Cd 元素溶出率均随淋溶周期延长缓慢升高，第8~10周呈快速升高趋势。第2轮淋溶过程，前2周期（第11~12周）Zn、Cd 元素溶出率均迅速升高，在随后的淋溶过程中累积溶出率变化较小。同一周期，实验组和对照组溶出结果基本相当，Zn 和 Cd 元素溶出规律基本一致。

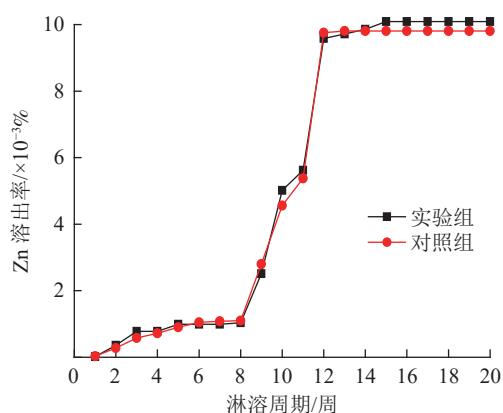


图6 废石淋溶实验 Zn 元素溶出率

Fig.6 Leaching rate of Zn element from waste rocks eluviating test

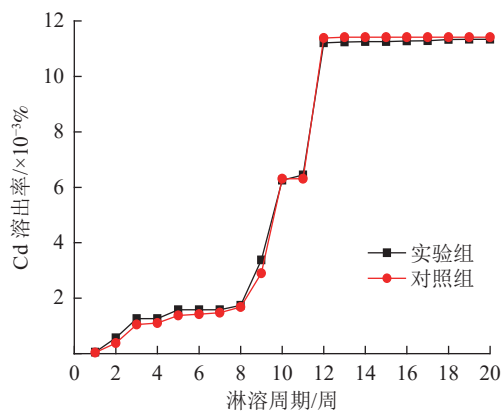


图7 废石淋溶实验 Cd 元素溶出率

Fig.7 Leaching rate of Cd element from waste rocks eluviating test

2.4.4 重金属 As 元素溶出结果

As 元素溶出结果见图8。可以看出实验组在两轮淋溶过程 As 元素溶出随淋溶周期延长均呈升高趋势。第1轮淋溶过程1~3周期内 As 元素累积溶出率增速较快，第二轮10个淋溶周期内（第11~20周），As 元素溶出率增加幅度大致相同；同一周期，对照组与实验组溶出结果基本相当。

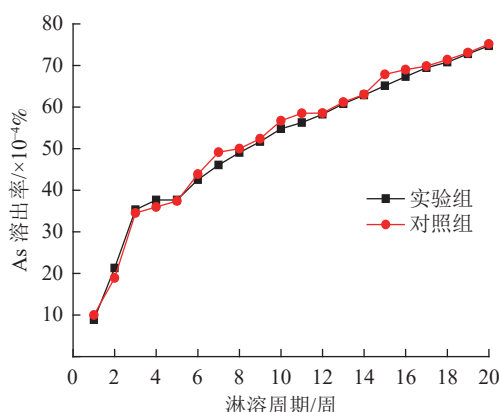


图8 废石淋溶实验 As 元素溶出率

Fig.8 Leaching rate of As element from waste rocks eluviating test

综合图4~8结果可知,第1轮淋溶过程Cu、Pb、Zn、Cd、As溶出率变化规律基本一致,随淋溶周期延长溶出率逐渐升高;第2轮淋溶过程Cu、Pb、Zn、Cd元素在前2周期内(第11~12周)溶出率明显升高,随后趋于稳定,基本不再溶出;重金属As元素溶出率随淋溶周期延长而升高,在两轮淋溶实验周期内,As元素累积溶出率均呈增加趋势。总体来说,该废石中重金属元素在模拟强酸雨淋溶实验中溶出率很低。这可能与废石酸缓冲能力、废石中重金属元素赋存化学形态以及堆存时间有关。文献^[9]表明,废石中化学形态为残渣态的重金属元素难以溶出,当淋出液为酸性溶液时,重金属元素将加快溶出。本实验采集的废石野外露天堆存近50年,可能其中大量的重金属元素已淋溶释放。

2.5 废石淋溶渣矿物性质

废石样品在淋溶实验前后X衍射结果见图9,废石淋溶前后矿物成分及含量结果见表2。由图9和表2可知,废石淋滤前后矿物成分不变,石英、白云母、白云石含量不变,淋溶后菱铁矿含量略有减少,斜长石、高岭石的含量略有增加。

3 结论与建议

(1) 铅锌矿废石中重金属元素Cu、Pb、Zn、Cd、As无独立矿物,分散赋存;废石酸中和能力较高,净产酸量NAG为0,无产酸潜力。

(2) 在两轮模拟强酸雨淋溶实验中,淋出液pH值均呈弱碱性,这与该废石含较多的碱性矿物有关,废石具有一定的酸缓冲能力;第1轮淋溶

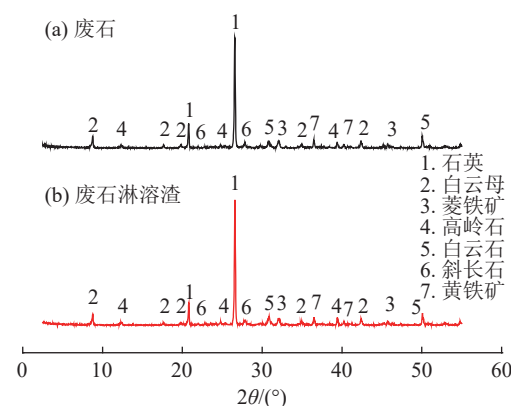


图9 废石淋溶前后XRD

Fig.9 XRD patterns of waste rocks before and after eluviating tests

表2 淋溶前后废石矿物成分检测结果/%

Table 2 Results of waste rocks mineral composition before and after eluviating test

矿物名称	废石	废石淋溶渣
石英	50~55	50~55
白云母	20~25	20~25
白云石	8~10	8~10
菱铁矿	6~8	4~6
斜长石	4~6	5~7
高岭石	1	3
黄铁矿	1	1

过程Cu、Pb、Zn、Cd、As元素随淋溶时间延长累积溶出率逐渐升高;第2轮淋溶2周期后(第12周后)Cu、Pb、Zn、Cd元素累积溶出率趋于稳定,后续基本不溶出;As元素累积溶出率随淋溶时间延长而升高。总体而言,在模拟强酸雨淋溶实验中,废石中重金属元素溶出率低。废石淋溶前后矿物成分不变,矿物含量略有变化。

(3) 建议进一步研究废石中重金属元素的化学形态,分析重金属淋溶释放作用机制,提高废石堆场周围的排水能力,在历时较长的雨季更加注重雨水淋溶防控工作,避免堆场积水致使废石长时间浸泡,定期监测废石堆场周围环境中重金属元素含量变化。

参考文献:

- [1] 刘晓,张宇,王楠,等.我国铅锌矿资源现状及其发展对策研究[J].中国矿业,2015(增刊1):6-9.
- LIU X, ZHANG Y, WANG N, et al. Pb-Zn metal resources situation and suggestion for Pb-Zn metals industry development in China[J]. China Mining Magazine, 2015(S1):6-

- 9.
- [2] 蓝卓越, 高天锐, 吕晋芳, 等. 矿山废石对环境的污染及其综合利用研究现状[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(3):126-131.
- LAN Z Y, GAO T R, LYU J F, et al. Research status of environmental pollution and comprehensive utilization of mine waste rocks[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(3):126-131.
- [3] 徐争启, 倪师军, 滕彦国, 等. 矿业活动固体废弃物中重金属元素释放机理的浸出实验[J]. 地质通报, 2012, 31(1):101-107.
- XU Z Q, NI S J, TENG Y G, et al. Research on releasing of heavy metals in solid wastes from mining activity[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(1):101-107.
- [4] LI L, ZHU L. International development trend analysis for patented technology of the soil heavy metal pollution and remediation[J]. Science Focus, 2016, 11(2):25-32.
- [5] 秦燕, 徐晓春, 谢巧勤, 等. 铜矿采矿废石重金属环境污染的淋溶实验研究-以安徽铜陵凤凰山矿田药园山铜矿床为例[J]. 地球学报, 2008, 29(2):247-252.
- QIN Y, XU X C, XIE Q Q, et al. Leaching experiments of environmental pollution caused by heavy metals of waste rocks in the copper mine: a case study of the Yaoyuanshan ore deposit in the Fenghuangshan copper ore field, Tongling, Anhui, China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(2):247-252.
- [6] 张永康, 冯乃琦, 张耀, 等. 某铅锌矿区土壤重金属污染分析[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2021(3):102-108.
- ZHANG Y K, FENG N Q, ZHANG Y, et al. Analysis of heavy metal pollution in soil of a lead-zinc mining area[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(3):102-108.
- [7] 姜利国, 梁冰, 尹成薇. 冻-融及干-湿循环对采矿废石风化产酸影响的实验研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3):262-267.
- JIANG L G, LIANG B, YI C W. Experiments on the weathering effects of freezing-thawing and drying-wetting circulation on the mining waste rock behaviors[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(3):262-267.
- [8] 韩玉立, 王琼, 韩烈保. 德兴铜矿不同年份废石产酸规律研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3):805-811.
- HAN Y L, WANG Q, HAN L B. Acid production rules of waste rocks in different years from Dexing copper mine[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(3):805-811.
- [9] 林海, 李洁, 董颖博, 等. 不同淋溶方法下石煤钒矿废石释钒特性[J]. 稀有金属, 2017, 41(12):1391-1396.
- LIN H, LI J, DONG Y B, et al. Vanadium leaching characteristics of stone coal waste rocks under different leaching methods[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(12):1391-1396.
- [10] 张耀, 张永康, 刘岩, 等. 江西赣州矿山废石酸化潜力[J]. 现代矿业, 2019(1):119-122.
- ZHANG Y, ZHANG Y K, LIU Y, et al. Acidification potential of waste ores in Ganzhou city, Jiangxi province[J]. *Modern Mining*, 2019(1):119-122.
- [11] 林海, 李洁, 董颖博. 粒度对石煤钒矿废石重金属静态淋溶的影响规律[J]. 稀有金属, 2017, 41(12): 694-700.
- LIN H, LI J, DONG Y B. Heavy metal static leaching rules affected by different particle sizes of vanadium waste Rock[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(12): 694-700.
- [12] 林海, 于明利, 董颖博. 不同粒度锡采矿废石重金属淋溶规律及影响机制[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3):664-671.
- LIN H, YU M L, DONG Y B. The heavy metal leaching rules and influence mechanism of different particle size of tin mining waste rock[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3):664-671.
- [13] 刘应冬, 徐力, 王先达, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中主要金属元素淋滤浸出行为研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):88-94.
- LIU Y D, XU L, WANG X D, et al. Study on leaching behavior of main metal elements from Panzhihua vanadium-titanium magnetite tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):88-94.
- [14] 罗丽萍, 刘应冬, 范良千, 等. 攀枝花地区煤矸石中重金属元素浸出行为研究[J]. 矿产综合利用, 2021(4):59-65.
- LUO L P, LIU Y D, FAN L Q, et al. Leaching behavior of main heavy metal from coal gangue in Panzhihua Region[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):59-65.
- [15] 钱玲, 李冰, 陈希, 等. 黄金尾砂重金属淋溶释放规律[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2020, 50(6):1084-1089.
- QIAN L, LI B, CHEN X, et al. Leaching characteristics and release rule of heavy metals from gold tailings[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2020, 50(6):1084-1089.
- [16] 袁丽, 刘阳生. 铅锌尾矿中重金属在模拟酸雨淋溶下的浸出规律[J]. 环境工程, 2012(2):586-590,292.
- YUAN L, LIU Y S. The leaching principles of heavy metals in lead and zinc talings in simulation acid rain[J]. Environmental Engineering, 2012(2):586-590,292.
- [17] 濮阳雪华, 邓汝英, 王春春, 等. 德兴铜矿尾砂重金属在模拟降雨下的淋溶特征[J]. 环境工程, 2019, 37(5):61-65.
- PUYANG X H, DENG R Y, WANG C C, et al. Leaching characteristics of heavy metals from tailings under simulated rain fall in Dexing copper mine[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(5):61-65.
- [18] 罗乐, 王金霞, 周皓. 锰渣中重金属在模拟酸雨环境下的浸出规律[J]. 湿法冶金, 2019, 38(5):352-357.
- LUO L, WANG J X, ZHOU H. Leaching regularities of heavy metals in electrolytic manganese residue using simulation acid

rain[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2019, 38(5):352-357.

[19] Xu Zh Q, Ni Sh J, Teng Y G, et al. Leaching experiment on the release mechanism of heavy metal elements in solid waste from mining activities[J]. *Geological Bulletin*, 2012, 31(1):101-107.

[20] 彭越, 马文明. 云南某炼锌尾矿砂重金属释放实验研究[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(1):26-32.

PENG Y, MA W M. Experimental research on heavy metal release from a zinc mine tailings in Yunnan province[J]. *Journal of Southwest Minzu University(Natural Science Edition)*, 2020, 46(1):26-32.

[21] 李晓涵, 吴永贵, 刘明凤, 等. 模拟酸雨对铅锌冶炼废渣重金属释放及生物毒性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(11):2504-2514.

LI X H, WU Y G, LIU M F, et al. Effects of simulated acid rain on heavy metal release and biological toxicity of lead and zinc smelting waste residues[J]. *Journal of Agro-Environment*

Science, 2020, 39(11):2504-2514.

[22] 韦岩松, 甘志欢, 韦德阳, 等. 模拟酸雨对冶炼废渣中重金属溶出行为的影响[J]. *湿法冶金*, 2018, 37(2):135-137.

WEI Y S, GAN Z H, WEI D Y, et al. Effect of simulated acid rain on leaching of heavy metals in smelting slag heap[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2018, 37(2):135-137.

[23] 李媛媛, 吴平霄, 党志. 模拟酸雨对大宝山尾矿淋滤实验研究[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(8):6-9.

LI Y Y, WU P X, DANG Z. Experimental study on the leaching effect of simulated acid rain on tailings of Dabaoshan mine[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(8):6-9.

[24] 何积力, 徐光炎, 朱惠民, 等. 江西省土壤环境背景值研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 135-142.

HE J L, XU G Y, ZHU H M, et al. Study on the environmental background values of soils in Jiangxi Province[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006: 135-142.

Acid Production Potential of Lead-zinc Waste Rocks and Analysis of Heavy Metal Eluviating at Simulated Strong Acid Rain Environment

CAO Yaohua^{1,2}, ZHANG Yongkang^{1,2}, LIU Hongzhao^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, LIU Lin^{1,2}

(1.Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources CAGS, Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, MNR, Zhengzhou 450006, Henan, China; 2.Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: This is an article in the field of ecological restoration of mines. A large amount of waste rock is inevitably produced in the process of mine development, and the release of heavy metal elements in the waste rock at the effect of weathering and eluviating will pose a threat to the water-and-soil quality around the mining area. In order to study the eluviating rule of heavy metal elements in lead-zinc waste rocks, the chemical composition and acid production potential of the waste rocks were analyzed. The leaching rates of heavy metal elements in the waste rocks and their mineral composition before and after eluviating were analyzed at simulated strong acid rain environment. The results showed that heavy metals elements of Cu, Pb, Zn, Cd, As in the waste rocks had no independent minerals and were dispersed. The waste rocks had an ability of high acid neutralization, whose NAG was 0, with no acid production potential. In the eluviating tests at simulated strong acid rain environment, the pH values of leached solution were weakly alkaline, which was related to the waste rocks containing more alkaline minerals, and the waste rocks had a certain acid buffer capacity. The cumulative leaching rates of Cu, Pb, Zn, Cd and As increased with the leaching time in the first round. After the second round, the cumulative leaching rates of Cu, Pb, Zn and Cd tended to be stable, with almost nothing dissolved in the subsequent cycles. The cumulative leaching rates of As increased with the leaching time. In general, the leaching rates of heavy metals in the waste rocks were low. The mineral composition of the waste rocks was stable before and after leaching, and the mineral contents changed slightly. This article can provide a basis for the management of mine waste-rock dumps and the prevention and control of heavy metal pollution around them.

Keywords: Ecological restoration of mines; Lead-zinc waste rocks; Acid production potential; Heavy metal; Eluviating