

浸提剂 pH 值对煤矸石和煤泥污染物浸出特性的影响研究

王 俭, 吴永贵, 刘 方, 喻阳华, 曾 理, 秦 中, 苏连文

(贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550003)

摘 要:为了研究煤矿外排固体废物的污染特征及其潜在生态危害,采用 6 种不同 pH 值的浸提剂对贵州 4 个煤矿区的煤矸石、煤泥和原煤进行了振荡浸提试验,探讨了浸出液的 pH、EC 和 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd 6 种重金属含量随浸提剂 pH 值的变化规律。结果表明,随着浸提剂的 pH 值逐渐升高,浸出液的 pH 值也逐渐升高,其 EC 逐渐下降,当 pH 值大于 4.0 以后逐步趋于稳定;所有重金属在强酸性环境中浸出量较大,并随 pH 值的增大呈下降趋势,浸出液中 Fe、Mn 的浓度普遍较高。3 类样品中,煤矸石在酸性条件下其重金属的潜在浸出能力强,环境污染风险大。

关键词:煤矿;煤矸石;浸出;pH;重金属

中图分类号:X752 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)06-1144-06

Various pH Values of Extractant Impact on the Leaching Characteristics of Coal Mining Discharge Waste Pollutants

WANG Jian, WU Yong-gui, LIU Fang, YU Yang-hua, ZENG Li, QIN Zhong, SU Lian-wen

(College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract:To investigate the pollution characteristics and potential ecological risk, oscillating and leaching experiments were employed to coal gangue, coal slurry and raw coal which were collected from four coal mines under six extractants of different pH values, and variations of pH, EC, the contents of six heavy metals(Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd) of the extractions were discussed as pH values of extractants were changed. The results showed that as the pH values of extraction gradually increase the pH values of extractions increased gradually, otherwise, the EC values decreased gradually and stabilize when pH values were more than 4.0. The contents of all the six metals of extractions were very high under strong acidic conditions, decrease as pH values increased and the contents of Fe, Mn were generally high. Among the three samples, the coal gangues had the strongest potential ability to release heavy metals under acidic conditions and had more hazardous pollution to environmental.

Keywords:coal mine; coal gangue; leaching; pH; heavy metals

煤炭资源在大规模开发和利用的同时,不可避免地带来一系列生态环境问题,其中煤矿外排固体废物是最为突出的环境问题之一^[1]。煤矿的固体废物主要有矸石、露天矿剥离物、煤泥等^[2],它们在周围环境中多种条件的长期作用下,特别是酸雨作用,导致其中

部分有害微量元素发生淋溶而析出,进而渗透到土壤或地下水中,从而降低土壤功能、污染水体、影响生态环境和人体健康^[3-4]。

浸出实验可有效地模拟矿山废物与水接触时重金属的释放规律,国内外学者已经对矿渣中重金属的浸出毒性及淋溶特性等方面做了大量的研究^[5]。李光德等^[6]采用蒸馏水模拟降水对煤矸石进行淋溶试验,研究淋溶液中重金属含量的变化;吴代赦等^[7]在对淮南潘谢矿区煤矸石浸泡实验的基础上,研究了在雨水 pH 值波动范围内有害微量元素从煤矸石中淋溶析出的变化规律,探讨了煤矸石的淋溶对水环境及周围土壤的影响。Ondra Sracek 等^[8]对波兰南部一个废弃的

收稿日期:2009-11-19

基金项目:973 国家重点基础研究发展计划项目(2008CB417209);国家自然科学基金项目(20977020);贵州省自然科学基金项目(QJ20072015);贵州省社会发展攻关项目(黔科合 SY 字[2008]3034)

作者简介:王 俭(1984—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事环境生态学及污染控制方面的研究。

E-mail:wangjianmm999@163.com

通讯作者:吴永贵 E-mail:ygwu72@126.com

煤矸石堆的渗滤液进行了监测与评价,认为矿山水体中含有高的硫酸盐,同时对地下水和附近的河流造成严重污染。

重金属的浸出行为受多种因素的影响,pH 值被公认为决定金属浸出能力最重要的影响因素^[9]。pH 主要通过对物理、化学以及生物反应过程的影响来间接影响重金属的有效性^[10]。王希梅等^[11]研究粉煤灰中元素的浸出特性不仅与元素的种类及赋存形式有关,而且浸出物的浓度与浸出液的 pH 值有很大关系。P. A. Hesbach 等^[12]对粉煤灰在不同 pH 条件下浸提,研究了其中有害元素的潜在浸出能力。李晓晨等^[13]研究了浸提剂 pH 值对污泥中重金属浸出的影响,党志等^[14-15]研究了煤矸石的环境地球化学效应,并用实验模拟的方法对煤矸石中重金属的活动性进行了研究,采用不同酸度的反应液进行了淋溶。研究浸提剂在酸性条件下对煤矿固体废物中重金属的浸出特性的影响,对研究煤矿固体废物中重金属的潜在浸出能力以及预测其潜在环境污染风险具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

对贵州省水城县大河边煤矿、贵阳市花溪区麦坪九架洞煤矿、黔西南兴义市安龙县戈塘镇青杠林煤矿和大坝村洪胜煤矿 4 个矿区的煤矸石、煤泥及原煤进行采样,采样点分布示意图如图 1,每个样品随机采集,然后均匀混合,共计 12 个样品(见表 1)。花溪麦坪九架洞煤矿的矸石经历了约 20 a 的自然风化,水城大河边煤矿矸石为开采出来后自然风化 1~2 a,戈

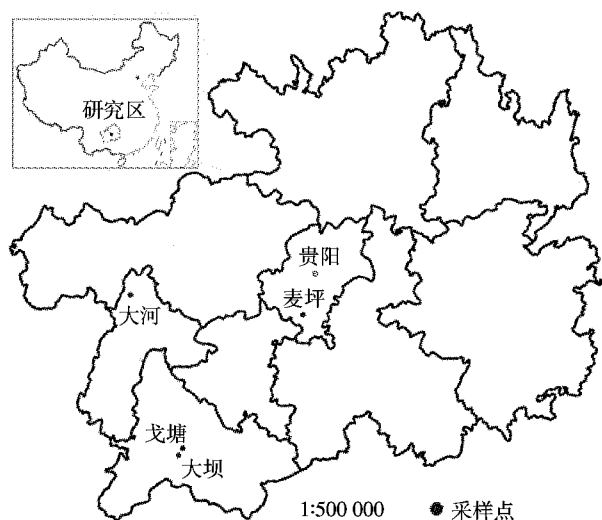


图 1 4 个煤矿区采样点分布示意图

Figure 1 Distribution of collection stations for Coal Mine sample

塘镇青杠林煤矿的矸石经历了约 10 a 的自然风化,大坝村洪胜煤矿矸石为刚开采不久的新鲜煤矸石。采集后的样品经自然风干、磨碎,过 60 目筛后,装入封口袋中置于阴凉干燥处待处理。

1.2 浸出毒性实验设计

根据研究区域降水的 pH 值范围^[16]及煤矸石堆场渗滤液的实际酸度,设计不同 pH 值(2.0、3.0、4.0、5.0、6.0)的浸提剂对各样品进行振荡浸提,用去离子水对照(pH=6.8)。浸提剂采用去离子水加稀硫酸稀释成不同 pH 值(用氢氧化钠调节,误差 ± 0.1)。浸出实验根据“固体废物浸出毒性的浸出方法(GB 5086.2—1997)”进行,取 25 g 样品于 500 mL 的聚乙烯瓶中,按固液比 1:10 加入浸提剂,设置振荡频率为 (110 ± 10) 次 $\cdot \text{min}^{-1}$,于台式气浴恒温振荡器(上海跃进医疗器械厂)振荡 8 h,静止 16 h。浸出液先用慢速定量滤纸过滤,再用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,存放于洗净的聚乙烯瓶中,随即测定浸出液的 pH、EC 值。加浓硝酸使得样品 pH<2,放冰箱 4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏待测。

1.3 固体样品及浸出液理化分析

样品重金属元素含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国热电元素公司产 Intrepid II XSP 型 ICP)测定;浸出液的 pH、EC 用 HI98130 笔式电导率仪(意大利哈纳科技有限公司)测定;Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、Pb 采用 WFX-110 原子吸收分光光度计(北京瑞利分析仪器有限公司)测定。样品各指标的测定精度通过空白样、平行样和标准样进行控制。

2 结果与分析

2.1 样品中重金属元素的含量

4 个矿区煤矿固体样品中的 6 种重金属含量见表 1。不同类型样品中不同重金属含量有很大的差异,戈塘镇青杠林煤泥中 Fe 的含量最高,其煤矸石中 Mn 的含量最高,原煤中 Zn 的含量也最高;水城大河边煤矿煤矸石中 Cu 的含量最高,其原煤中 Pb 的含量最高;而大坝洪胜煤矿原煤中 Cd 的含量最高。总体表现为样品中 Fe、Mn、Cu、Zn 的含量较高,而 Pb、Cd 的含量则相对较低。

2.2 浸提剂 pH 值对浸出液 pH 值的影响

浸出液的 pH 值变化范围在 8.02~2.70 之间,煤矿样品浸出液的 pH 绝大多数呈酸性。浸提剂对浸出液的 pH 值具有显著影响,随着浸提剂 pH 值的增高,浸出液的 pH 值总体表现为增高的趋势,但增高到一定程度后其变化不再明显。pH 在 2~4 之间时,浸出液

表 1 煤矿固体样品的重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 1 The content of heavy metal in mine solid wastes($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

编号	名称	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd
SC1	水城大河边煤矿煤矸石	379.6	569.9	153.6	405.5	54.9	6.2
SC2	水城大河边洗煤厂煤泥	289.8	565.6	121.4	319.8	121.4	4.8
SC3	水城大河边煤矿粉煤	120.9	435.4	99.3	996.1	432.8	5.3
MP1	麦坪九架洞煤矸石	216.1	280.7	30.3	175.5	124.8	2.9
MP2	麦坪九架洞灰色煤泥	176.5	101.9	26.2	108.5	12.6	1.8
MP3	麦坪九架洞小煤块	19.7	144.5	15.3	133.8	74.7	0.4
QGL1	戈塘镇青杠林矸石	345.4	787.0	76.7	139.5	79.6	5.4
QGL2	戈塘镇青杠林煤泥	406.2	532.4	70.4	187.9	57.9	3.9
QGL3	戈塘镇青杠林煤	287.6	18.5	77.5	2 175.7	0.5	1.7
HS1	大坝洪胜煤矿煤矸石	52.1	75.8	9.6	95.2	20.8	0.2
HS2	大坝洪胜煤矿煤泥	90.9	66.4	34.0	119.7	138.6	2.0
HS3	大坝洪胜煤矿煤块	102.9	113.5	46.9	96.2	73.5	22.7

的 pH 值变化明显,几乎呈直线升高;当 pH 大于 4 时,浸提剂 pH 对浸出液 pH 影响不大。选取有代表性的样品,绘制出浸提剂 pH 对浸出液 pH 影响曲线图(图 2)。虽然所有研究样品的浸出液 pH 值总体变化趋势相同,但不同矿区的样品之间却存在很大的差异:水城煤矿区样品浸出液的 pH 普遍较高,均在 5.69 以上,最大值为 8.02;而洪胜煤矿区样品浸出液的 pH 则普遍较低,均在 3.77 以下,最小值为 2.70。用酸性溶液浸提样品时,浸出液 pH 值的高低可以在一定程度上反映出样品缓冲能力的强弱,由图 2 可见,样品 SC1 对酸的缓冲能力最强。

2.3 浸提剂 pH 值对浸出液 EC 的影响

图 3 为浸出液电导率与浸提剂 pH 变化的关系。从图中可以看出,同一个样品的浸出液的 EC 随着浸提剂 pH 值的逐渐增大,浸出液的 EC 逐渐减小,当 pH 大于 4 时,浸提剂 pH 对浸出液 EC 影响不大。pH 在 2~4 之间时,浸出液的 EC 值变化明显,在 pH 值为

2 时,浸出液 EC 为最大值,pH 从 2 增加到 3 时,浸出液的 EC 迅速下降,最大差值为 $6.57\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。引起这种变化的原因主要是当 pH 小于 4 时,浸提剂具有较强的溶解性,在振荡浸提的过程中,将煤矿样品中的各种物质逐渐溶解出来,使浸出液的 EC 增大,这说明酸性较强的浸提剂能加速样品中一些离子的溶出。由图 3 可见,不同矿区的样品浸出液之间的 EC 值也存在很大的差异。

2.4 浸提剂 pH 值对重金属浸出影响

浸出液中重金属离子浓度的多少直接反映样品中重金属元素在浸提条件下活动能力的强弱。对浸出液 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd 的浓度进行测定,分别选取有代表性的样品绘图(图 4)。浸出液中所研究的 6 种重金属的含量差异较大,Fe 和 Mn 的浸出浓度最高,其次是 Pb 和 Zn。由图可看出,各重金属在初始 pH 为 2 的浸取液中浸出浓度最高,并随 pH 值的增高呈减小趋势,而 pH 大于 4 之后,这种减小趋于平缓。表明

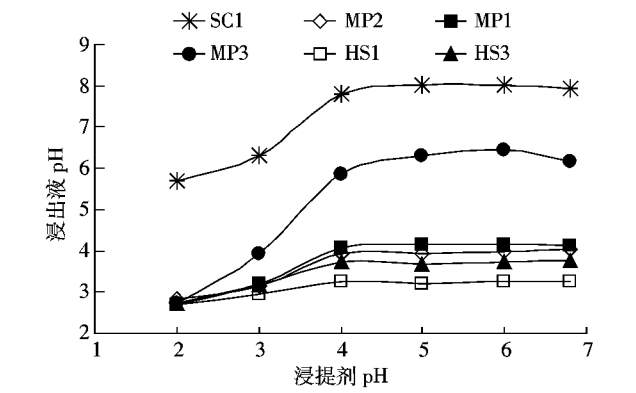


图 2 浸提剂 pH 对浸出液 pH 的影响
Figure 2 The influence of extractant's pH on the pH of leachate

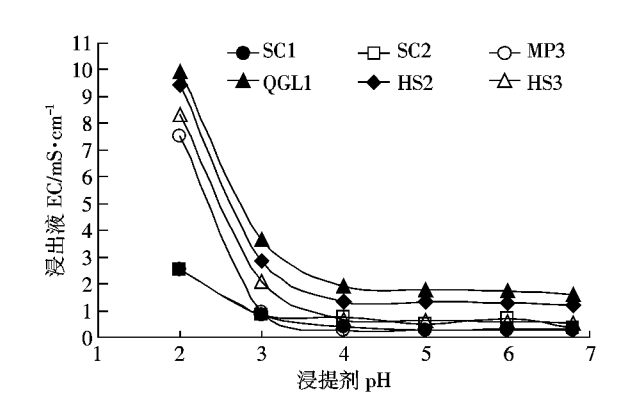


图 3 浸提剂 pH 对浸出液 EC 的影响
Figure 3 The influence of extractant's pH on the EC of leachate

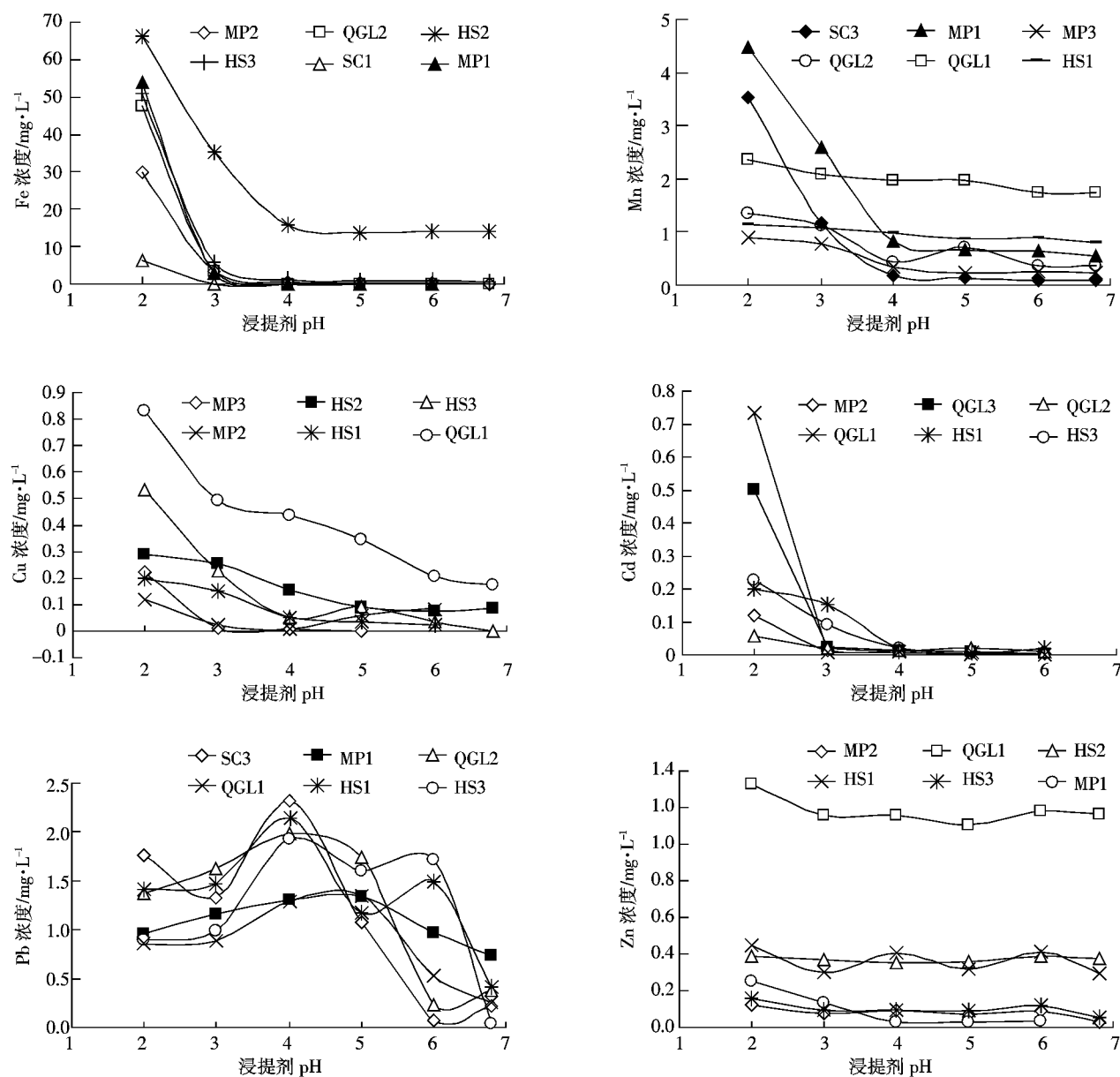


图4 浸提剂 pH 值对重金属浸出浓度的影响

Figure 4 The influences of pH values of extractants on the leachability of heavy metals

样品中的重金属较易在酸性环境下浸出,此结果与王陆军等^[17]的研究结果一致。

浸出液中 Fe、Mn 的浓度均随着 pH 值的升高而逐渐下降,当 pH 大于 4 时,其浓度变化不明显,但 Fe 与 Mn 的浓度变化也存在很大的差异。在浸提剂 pH 从 2 升高到 4 时,Fe 的浓度迅速下降,浸提剂 pH 大于 4 时,Fe 的浓度随 pH 的增高没有明显的变化。Mn 的浓度除了少数样品(如图 4 中 MP1 和 SC3)在浸提剂的 pH 介于 2~4 之间时急剧下降,大部分浸出液中 Mn 的浓度随着浸提剂 pH 的升高缓慢下降,其浓度差别不大。由此表明,浸提剂或者是环境溶液的 pH

值超过 4,将会有利于增强煤矿固体废物中 Fe 和 Mn 的稳定性。

与 Fe、Mn 相比,浸出液中 Cu、Cd 的浓度均随着浸提剂 pH 值的升高呈现出逐渐减小的趋势,在浸提剂 pH 为 2.0 时表现出最大浓度。其中,在浸提剂 pH 值为 2~4 之间,Cu 浓度下降得较快;而在 4~6.8 之间时,不像 Fe 和 Mn 浓度变化不明显,依然是逐渐下降。Cd 的浓度变化则较大,在浸提剂的 pH 值小于 4 时,其与 pH 之间的变化曲线呈近似于线性的下降趋势。在浸提液 pH 值在 4~6.8 之间时,Cd 的浓度无明显差异。可见其酸性的敏感度表现在强酸性溶液中溶

出量的逐渐增加。因此,煤矿固体废物中的 Cu 和 Cd 的可迁移性会随着环境溶液 pH 值的降低而逐渐提高。

浸出液中 Zn 和 Pb 的浓度随浸提剂的 pH 变化趋势则与前面所讨论的 4 种元素不完全相同。浸提剂的 pH 变化对 Zn 的浓度变化无显著影响,在 pH 为 2.0~6.8 之间,Zn 的浓度整体变化不大,总体趋势减小。浸出液中 Pb 浓度随浸提剂 pH 值的变化较复杂,随着 pH 的逐渐增高,呈现出降低、增加的循环趋势。但是,在图中还是可以看出其存在一个明显的最大浸出浓度的 pH 范围,即 pH=4.0 左右。Pb 浸出浓度随着浸提剂 pH 值的升高呈现出的反复变化趋势可能与浸提过程混合液中存在的 $\text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightleftharpoons \text{PbSO}_4$ 动态平衡受浸出液中 SO_4^{2-} 影响有关。

3 讨论

上述分析结果表明,浸提剂的 pH 值对煤矿样品中重金属的浸出浓度具有显著影响,在 pH 为 2~3 的强酸性条件下,各种重金属的浸出浓度很高,并随 pH 的升高而急剧下降;在 pH 为 4~6.8 时,重金属的浸出浓度没有明显的规律性变化,这与段华波^[8]的研究结果相似。重金属浸出浓度变化特点产生原因可能有以下几个方面:

(1)不同重金属浸出浓度差异显著与样品中各元素的本底值及存在形态有关,煤矸石中 Fe、Mn 元素含量高,就使得浸出液中 Fe、Mn 的浓度较高,而 Cu、Zn、Pb、Cd 则较低;但样品的本底值含量最高,浸出液中浓度却不一定是最高,这种现象是样品元素本底值、pH 值及赋存状态等多种因素共同影响作用的一个结果。

(2)煤矿固体废物具有一定的酸缓冲能力,一般认为煤矿样品的硫化物是造成酸性的主要原因,煤矿样品中也同时存在 Ca、Mg、K、Na 等碱土和碱金属化合物,在弱酸性水中会发生溶解,产生中和作用^[9]。 H_2SO_4 有助于金属的浸出,但不具有缓冲能力,浸出后混合液的 pH 反映的是样品的酸度。本文研究的水城煤矸石样品,用 pH 为 2 的浸提剂浸提,其浸出液的 pH 为 5.69;用 pH 为 6 的浸提剂浸提洪胜煤矿的煤矸石,其浸出液的 pH 为 3.26,可见样品对酸的缓冲能力差异大,从而影响重金属的浸出。

(3)从金属氢氧化物沉淀规律看,大多数重金属离子仅出现于强酸性溶液中,这些阳离子很容易因 pH 值稍微增高就从溶液中沉淀出来,迁移能力很弱^[20]。当

浸提液的 pH 值大于 4 时,重金属在溶液中的浓度变化不大,即重金属释放逐步趋于稳定。

(4)本研究中重金属浸出浓度没有呈现出严格的随酸碱度的下降而升高,除了影响重金属活性的各种因素的共同作用外,还可能与实验误差有关,测试的精密程度及样品的制备过程都有可能带来一定误差,从而影响到浸出的规律性。

4 结论

(1)浸提剂 pH 值对浸出液的 pH 及 EC 有较大的影响,随着浸提剂 pH 值的升高,浸出液的 pH 逐渐增大,EC 逐渐减小,强酸条件下有利于样品中各种物质的溶解释放,煤矿固体废物具有一定的酸缓冲能力。

(2)浸提剂的 pH 值对煤矿样品中不同重金属的浸出具有重要影响,并因重金属的不同而存在较大的差异。但总体趋势是浸提剂的 pH 值与样品中重金属的浓度呈负相关关系,即低 pH 情况下有利于重金属的迁移及释放,其浓度较高;高 pH 情况下则有利于提高重金属的稳定性,其浓度变化范围不大。

(3)不同样品在同一 pH 值下浸提,各种元素的浸出浓度差别很大,整体表现为 Fe、Mn 的含量高。研究区煤矿样品重金属的潜在浸出能力以及其潜在环境污染风险较大,特别是戈塘镇青杠林煤矸石,具有较高的 Fe、Mn、Cd 浸出浓度,应当引起足够重视。

参考文献:

- [1] 李龙海, 缪应棋. 酸性矿山废水生化处理及其资源化的探索[J]. 江苏理工大学学报, 1998, 19(2): 69-73.
LI Long-hai, MIAO Ying-qi. Probe the resource recovering of acid mine drainage with biochemical treatment[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology*, 1998, 19(2): 69-73.
- [2] 樊金拴. 煤矸石对环境的危害与开发利用研究[J]. 资源开发与市场, 2008, 24(1): 56-59.
FAN Jin-shuan. Present situation of researching on environmental effect and comprehensive utilization of gangue[J]. *Resource Development & Market*, 2008, 24(1): 56-59.
- [3] 刘 迪. 煤矸石的环境危害及综合利用研究[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(3): 60-62.
LIU Di. Research on environmental effect and comprehensive utilization of coal-waste rock[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(3): 60-62.
- [4] 曾玲玉. 论煤矸石山的灾害及防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(1): 20-22.
ZENG Ling-yu. The disaster of coal refuse and its prevention and cure counter measure[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2008, 19(1): 20-22.

- [5] 朱 萍, 李晓晨, 马海涛, 等. 污泥中重金属形态分布与可浸出性的相关性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 121-124.
ZHU Ping, LI Xiao-chen, MA Hai-tao, et al. Correlation between chemical forms and leachability of heavy metals in sludge samples[J]. *Journal of Hehai University(Natural Sciences)*, 2007, 35(2): 121-124.
- [6] 李光德, 张 成. 煤矸石模拟淋溶水重金属污染的研究[J]. 山东环境, 1998(5): 10-12.
LI Guang-de, ZHANG Cheng. Study on simulated leaching of coal gangue heavy metal contamination[J]. *Shandong Environment*, 1998(5): 10-12.
- [7] 吴代赦, 郑宝山, 康往东, 等. 煤矸石的淋溶行为与环境影响的研究——以淮南潘谢矿区为例[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 55-59.
WU Dai-she, ZHENG Bao-shan, KANG Wang-dong, et al. Leaching behavior of coal spoils and environmental impacts[J]. *Geology-Geochemistry*, 2004, 2(1): 55-59.
- [8] Ondra Sracek, Grzegorz Gzyl, Adam Frolik, et al. Evaluation of the impacts of mine drainage from a coalwaste pile on the surrounding environment at Smolnica, southern Poland[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, DOI 10. 1007/s10661-009-0941-6.
- [9] 王代长, 蒋 新, 卞永荣, 等. 模拟酸雨对不同土层酸度和 K⁺淋失规律的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 30-34.
WANG Dai-zhang, JIANG Xin, BIAN Yong-rong, et al. The influence of simulated acid rain on acidity and K⁺ leaching regulation of different soil layers[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(2): 30-34.
- [10] Avudainayagam S, Naidu R, Kookana R S, et al. Effects of electrolyte composition on chromium desorption in soils contaminated by tannery waste[J]. *Austral Journal of Soil Research*, 2001, 39: 1077-1089.
- [11] 王希梅, 张永波. 粉煤灰浸出特性及其贮放对地下水环境的影响[J]. 山西水利, 2007(1): 89-90.
WANG Xi-mei, ZHANG Yong-bo. Leaching characteristics and storage of fly ash impact on groundwater environmental[J]. *Shanxi Water-Resources*, 2007(1): 89-90.
- [12] Hesbach P A, Kim A G, Abel A S P, et al. Serial batch leaching procedure for characterization of coal fly ash[J]. *Environ Monit Assess*, DOI 10. 1007/s10661-009-1132-1.
- [13] 李晓晨, 赵 丽, 印华斌. 浸提剂 pH 值对污泥中重金属浸出的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 190-194.
LI Xiao-chen, ZHAO Li, YIN Hua-bin. The influence of pH value of extractant on the leachability of heavy metals in sewage sludge[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(1): 190-194.
- [14] 党 志, 刘丛强, 李 忠. 煤矸石中微量重金属元素化学活性的实验模拟研究[J]. 华南理工大学学报, 2001, 29(12): 1-5.
DANG Zhi, LIU Cong-qiang, LI Zhong. Experimental simulation of chemical activity of heavy metals in coal gangue[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2001, 29(12): 1-5.
- [15] 党 志. 煤矸石-水相互作用的溶解动力学及其环境地球化学效应研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(4): 259-261.
DANG Zhi. Kinetics of coal mine spoil water interaction and environmental impact[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1997, 16(4): 259-261.
- [16] 袁红兰. 贵州酸雨和 SO₂ 污染的危害及防治对策 [J]. 环境保护, 2006(15): 74-77.
YUAN Hong-lan. Harmful and countermeasure of acid rain and sulfur dioxide contamination in Guizhou Province[J]. *Environmental Protection*, 2006(15): 74-77.
- [17] 王陆军, 金明吉, 富田太平. 城市固体废物焚烧炉飞灰中重金属酸溶出研究[J]. 西南师范大学学报, 2006, 31(6): 90-94.
WAN Lu-jun, JIN Ming-ji, Tomida. The elution research of heavy metals from municipal solid waste incinerator fly ash by acids[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2006, 31(6): 90-94.
- [18] 段海波. 危险废物浸出毒性鉴别理论和方法研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2006.
DUAN Hua-bo. Study on identification theory and method for extraction toxicity of hazardous waste[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2006.
- [19] 刘 锋, 王 琪, 黄启飞, 等. 固体废物浸出毒性浸出方法标准研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 9-15.
LIU Feng, WANG Qi, HUANG Qi-fei, et al. Study on the standard methods of leaching toxicity of solid waste[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(6): 9-15.
- [20] 刘会虎, 桑树勋, 周效志, 等. 模拟雨水浸泡生活垃圾重金属浸出特征研究[J]. 地球化学, 2008, 37(6): 587-594.
LIU Hui-hu, SANG Shu-xun, ZHOU Xiao-zhi, et al. Leaching characteristics of heavy metals in municipal solid waste under simulated rain[J]. *Geochimica*, 2008, 37(6): 587-594.