

# 矿山废石淋溶对水环境的影响

王俊桃<sup>1</sup>, 谢娟<sup>2</sup>, 张益谦<sup>2</sup>

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为了研究废石堆砌对水环境的影响, 通过对废石做淋溶实验, 分析了出入水的水质变化规律, 对废石衍生环境效应的过程、机制、影响因素方面进行讨论, 揭示了人们容易忽视的酸性水中硫酸根、总硬度、微量金属离子的动力学变化机理, 指出矿山废石对水环境的污染不至限于使水质酸化, 硫酸根、总硬度也会大幅度提高, 废石堆放应充分考虑当地的地理气候及水文条件, 合理堆放, 减少污染。

[关键词] 废石; 矿产开发; 地下水污染; 淋溶; 水环境

[中图分类号] X75 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6561(2006)04-0092-05

## Effect of Waste Rock Eluviation on Water Environment

WANG Jun tao<sup>1</sup>, XIE Juan<sup>2</sup>, ZHANG Yi qian<sup>2</sup>

(1. Chinese Institute of Geological Environment Inspection, Beijing 100081, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract** In order to study the effect of waste rock piling on water environment, the character of water quality change after the waste rock is dipped into water is analyzed by eluviation experiment. The process, mechanism and factors of derivative environmental effect of waste rock is investigated. The dynamic change mechanisms of  $\text{SO}_4^{2-}$ , gross rigidity, micromental irons in acidic solution are discussed, which are usually neglected. It was pointed out that waste rocks not only make the water acid, but also make  $\text{SO}_4^{2-}$  and gross rigidity increase, and waste rocks should be piled up reasonably, and the local geographical, climatic and hydrographical conditions must be considered when piling, which can insure the reduction of environmental pollution.

**Key words:** waste rock; mineral resource development; groundwater pollution; eluviation; water environment

## 0 引言

中国矿业发展速度很快, 取得了令人瞩目的成就, 呈现出快速发展趋势。同时, 矿业开发的同时产生大量的固体废物, 据统计, 目前中国每年生产各种工业固体废物和尾矿近  $6 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$ 。大量废弃矿石的堆放, 不仅占用大量土地, 而且污染环境。废石因降水的淋溶作用随地表径流将有害物质带入环境, 污染土壤、地下水、地表水, 给生态及水环境造成严重影响。目前对粉煤灰的研究较多<sup>[2]</sup>, 而对矿山废石研究不多见, 笔者以某钼矿区为例, 采用

蒸馏水与当地原水进行试验与分析, 研究废石淋溶液中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、pH 及其微量金属离子含量的变化对水环境的影响, 为废石堆放及环境治理提供依据。

## 1 实验材料及过程

### 1.1 样品的来源及处理

实验的矿物样品均采自钼矿区的废石场。为了使取得的样品具有代表性, 沿废石堆布置了多个取样点。由于当地废石中金属硫化矿物已有部分风化, 对于每个取样点尽量采集表层风化程度比较高的小颗粒矿物, 将其与所附着的岩石剥离, 自然

风干后破碎, 将样品分为 10~19 目(1~2 mm)、19~40 目(0.42~1.00 mm)、40~60 目(0.25~0.42 mm)、60~100 目(0.15~0.25 mm)4 个等级, 以备淋滤、淋溶-循环、浸泡实验使用。对于破碎后的样品按粒度等级进行了矿物鉴定, 结果如表 1。

表 1 岩石的矿物成分

Tab. 1 Mineral Component of Rock					$w_B/\%$
样品粒度/mm	金属硫化矿物	石英	白云母	碳酸盐	岩屑
1~2	56.5	41	0.5	2	—
0.42~1	52.0	37	—	—	11
0.25~0.42	64.0	31		5	—

矿物样品的金属硫化物以黄铁矿为主, 还含有少量的黄铜矿、闪锌矿、方铅矿, 碳酸盐矿物, 以方解石、白云石为主。

1.2 实验部分

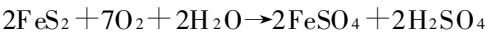
淋滤实验过程为: 取直径为 10 cm, 高为 35 cm, 带刻度的有机玻璃管 2 个, 管子上端开口, 底部封闭, 在距管底部高约 2 cm 处的侧面设有一直径约 1 cm 的出水孔。为防滤料流出, 出水口装了过滤网, 为便于出水的收集, 出水孔用有机玻璃管连接后套上乳胶管作为渗滤水出口。由于矿物粒度小, 为了出水孔不被矿渣堵塞, 在管子底部铺上高约 3 cm, 主要成分为石英的较大颗粒碎石, 高度超过出水孔 1 cm, 再在碎石上面铺设一层玻璃纤维丝。于 1、2 号柱内分别装入 10~19 目和 40~60 目的

矿样 3.5 kg, 装样时边装边捣实。柱中样品高度为 27 cm, 样品装好后, 为了使水从顶部均匀渗入, 在样品面上铺一层滤纸。用虹吸装置控制进水的稳定流速约 30 mL/h, 采用昼夜连续淋滤方式, 出水用 5 L 的容器承接。

淋滤实验中每次都用相同的原水从柱顶部淋入而从底部流出, 流出的水样只分析其中成分的变化并没有循环使用, 这样从整体上模拟了水流每天都流进废石堆, 流出后水质的变化, 揭示出水流和矿石的相互作用, 也可模拟大气降水入渗, 实际是渗滤成分的衰减过程, 原水淋滤实验数据见表 2。

从表 2 可以看出, 粗颗粒成分较细粒成分渗滤液的 pH 低, 且粗粒的 pH 值都低于原水的 7.75, 而细粒矿物在淋滤 6 天内 pH 值均高于 7.75, 6 天后才基本低于进水。

产生原因分析是: 淋滤第 1 天 pH 值显著降低, 主要是所取矿样中金属硫化物含量较高且已部分风化, 尤其是废石样品中的黄铁矿在淋滤过程中发生氧化溶解时会产生部分硫酸, 如  $FeS_2$  在水淋滤过程中氧化溶解的过程为



从而增加了淋滤液中  $H^+$  的浓度, 使渗滤液的 pH 值降低, 硫化物含量越高, 淋滤后的液体酸化越强。2 号柱 pH 值降低的程度比 1 号柱大, 是因 2 号柱中不仅硫化物含量高, 且颗粒小, 比表面积大, 硫化

表 2 原水淋滤实验结果

Tab.2 Experiment Result in Original Water											$\rho_B/(mg \cdot L^{-1})$		
项 目	柱号	时间/d											
		原	1	3	14	16	18	20	22	24	26	28	30
pH	1	7.75	7.42	7.50	7.53	7.51	7.40	7.40	7.43	7.40	7.52	7.50	7.46
	2	7.75	7.89	7.88	7.87	7.88	7.67	7.58	7.64	7.60	7.76	7.73	7.66
$HCO_3^-$	1	63.46	50.77	44.42	50.77	63.46	63.46	63.46	44.42	44.42	44.42	38.08	44.42
	2	63.46	152.31	120.58	133.27	114.23	114.23	114.23	120.58	114.23	120.58	114.23	120.58
$Ca^{2+}$	1	22.95	77.05	60.65	44.26	44.26	44.26	47.57	49.18	55.74	47.54	50.82	47.54
	2	22.95	245.91	19.31	139.34	90.16	90.16	122.95	114.75	106.55	106.55	100.00	90.16
$Mg^{2+}$	1	4.97	—	3.98	4.97	1.99	2.98	2.98	1.99	2.98	7.95	5.97	5.97
	2	4.97	9.94	9.97	—	9.94	9.94	—	9.94	14.91	7.95	3.98	7.95
总硬度以 $CaCO_3$ 表示	1	77.77	192.38	167.82	130.98	118.70	122.8	130.98	130.98	151.45	151.45	151.45	143.26
	2	77.77	654.90	532.13	347.93	266.06	266.06	307.00	327.46	327.46	298.81	266.06	257.88
$SO_4^{2-}$	1	27.50	145.32	125.32	85.21	62.35	69.89	75.68	92.13	110.25	113.94	113.94	110.05
	2	27.50	503.21	230.12	226.15	165.78	165.78	205.32	223.56	223.56	198.75	167.89	165.32

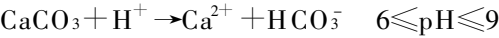
注: 1. 号柱内装 1~2 mm 矿样, 2. 号柱内装 0.25~0.42 mm 矿样

物氧化溶解程度高,初次淋滤时生成较多的  $\text{H}^+$ 。

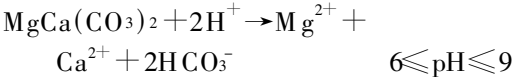
细粒矿物渗滤液中溶出的  $\text{HCO}_3^-$  的量均高于粗粒矿物渗滤液中溶出的  $\text{HCO}_3^-$ 。

产生原因分析是:渗滤液中  $\text{HCO}_3^-$  的量取决于淋滤原水中的  $\text{HCO}_3^-$  和碳酸盐矿物缓冲作用所生成  $\text{HCO}_3^-$  量的总和减去被  $\text{H}^+$  消耗的  $\text{HCO}_3^-$ 。常见的碳酸盐矿物如方解石和白云石的中和反应不仅使水中  $\text{HCO}_3^-$  含量增加,同时也使水的硬度增大,反应为:

(1) 方解石溶解



(2) 白云石溶解



由于实验过程中溶出  $\text{Mg}^{2+}$  的质量浓度很小,所以矿物中碱性物质的缓冲作用主要以方解石的溶解为主,在实验中由于淋滤水的 pH 值为中性,所以  $\text{H}^+$  消耗  $\text{HCO}_3^-$  的能力较弱。

在淋滤过程中,两个柱的淋滤液中均未有  $\text{CO}_3^{2-}$ ,所以在整个实验过程中  $\text{HCO}_3^-$  和总碱度变化的趋势几乎是完全相同的,故对总碱度的变化不再详述。

$\text{SO}_4^{2-}$  变化趋势及原因分析,第 1 天溶出液中  $\text{SO}_4^{2-}$  增大,说明了废石风化过程中,由于黄铁矿发生氧化,使难溶性的硫转变为可溶性的硫酸盐,在接受水的淋滤时,可溶性的硫酸盐极易发生迁移,导致淋滤液中的硫酸根质量浓度迅速增大。这段时间溶出的  $\text{SO}_4^{2-}$  以已风化的矿物生成的  $\text{SO}_4^{2-}$  为主。随后几天的淋滤中,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度逐渐降低,第 2 个阶段中溶出的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量比第 1 阶段大大降低且逐渐达到平衡的原因有 3 个:

(1) 由于黄铁矿的氧化溶解作用减弱,大量  $\text{SO}_4^{2-}$  的前期淋出后其生成的量减小。

(2) 初期 S 的氧化速率较高,随着样品表面和裂隙中最容易被接触到的 S 的氧化溶出,溶解过程逐渐转为对赋存于矿物内部 S 的氧化,这就有一定难度,因为矿物表面已经覆盖了一些次生氧化物使得溶剂氧化内部 S 变得困难,但是仍然发生了氧化生成了  $\text{SO}_4^{2-}$ ,达到了动态平衡。

(3) 这种变化规律与 Fe、Cu、Zn、Pb、Ca 的次生硫酸盐相沉淀或溶解有关。

从实验开始到终了,1 号柱的  $\text{SO}_4^{2-}$  大多比 2 号柱多,且两者均大于原水的  $\text{SO}_4^{2-}$ 。表明细颗粒

矿物氧化溶解能力较粗粒矿物高,氧化溶解出的  $\text{SO}_4^{2-}$  多,且淋滤水在细颗粒的矿物孔隙中流动速度相对缓慢,也有充分的时间溶解  $\text{SO}_4^{2-}$ 。

矿石上的离子不断解吸下来,溶解到水中。第 1 次时溶解到水中的离子比较多,表现为测量值较大。随着实验过程的进行,矿石上吸附的离子越来越少,能够解析到水中的也越来越少,数值也就呈现下降的趋势,并最终达到一种平衡状态。

使用蒸馏水代替原水对矿石样品进行淋滤实验,所得数据见表 3。由数据可以看出,各种离子的浓度基本上呈下降趋势。由于蒸馏水中不含其他离子,用蒸馏水淋溶矿石样品,主要还是将矿石中的可溶离子溶出,矿石上的离子不断解吸下来,溶解到水中。第 1 次溶解到水中的离子比较多,表现为测量值较大。随着实验过程的进行,矿石上吸附的离子越来越少,能够解析到水中的也越来越少,数值也就呈现下降的趋势,并最终达到一种平衡状态。期间同样发生物理、化学变化。和原水淋滤结果相比较,使用蒸馏水所得的值偏低,但是,在整体的变化趋势上是一致的。

表 3 蒸馏水淋滤实验结果

Tab. 3 Experiment Result in Distilled Water						
项目	柱号	时间/d				
		5	10	15	20	25
pH	1	7.44	7.38	7.26	7.30	7.20
	2	7.50	7.44	7.40	7.32	7.25
$\rho(\text{HCO}_3^-) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1	58.25	52.56	48.00	49.03	45.10
	2	134.54	128.65	124.96	110.98	108.15
$\rho(\text{Ca}^{2+}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1	55.58	52.46	43.28	40.68	38.54
	2	130.21	86.87	84.38	84.25	83.12
$\rho(\text{Mg}^{2+}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1	11.23	8.50	—	—	—
	2	9.52	—	—	—	—
$\rho(\text{SO}_4^{2-}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1	150.54	145.36	143.28	134.98	129.76
	2	174.38	168.54	167.87	152.23	151.14
$\rho(\text{Cl}^-) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1	5.75	5.60	—	—	—
	2	6.88	4.05	—	—	—

2 矿区的岩石成分及水化学特征

2.1 岩石成分

钼矿蕴藏于安山岩中,岩石中含有多金属硫化矿物,除主采的辉钼矿外,岩石中还含有黄铁矿、黄

铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿、褐铁矿、赤铁矿、金红石、锡石、辉铋矿、金、银、镓、硒等, 其中黄铁矿是金属硫化矿物中含量最高的, 黄铜矿含量较少, 但分布较稳定。其造岩矿物有长石、石英、辉石、角闪石、云母等。次生矿物有萤石、云母、高岭土等。矿床硫质量分数为 2%~3%, 平均 2.8%。根据原矿的多元素分析数据<sup>[3]</sup>, 矿石的元素组成如表 4。

废石化学组成是评价其环境效应最基本的资料, 其中硫含量是研究废石环境效应的一个重要指标, 而黄铁矿是废石中硫的主要赋存形式, 其氧化会加速其他组分的溶出, 使水环境遭受严重破坏。

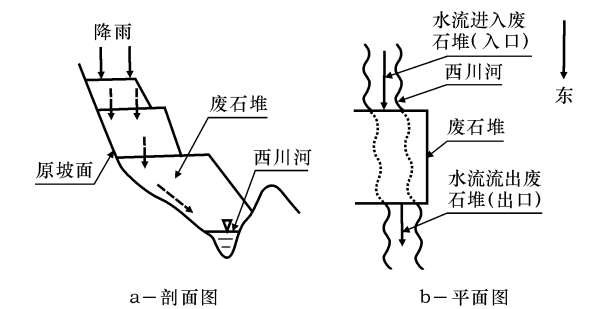


图 1 废石场掩埋河段示意图

Fig. 1 River Section Buried by Waste Quarry

表 4 原矿多元素分析

Tab. 4 Analysis of Many Elements in Original Mine			
元素	w <sub>B</sub> /%	元素	w <sub>B</sub> /%
M o	0.097	F	0.700
Cu	0.039	TiO <sub>2</sub>	1.280
T	7.630	ZrO	0.020
Fe	0.013	Be	0.002
Pb	0.071	Sn	0.0014
Zn	55.620	As	0.010
SiO <sub>2</sub>	11.050	Co	0.015
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.990	Ni	0.003
M gO	3.040	Cr	0.0074
CaO	2.20		

2.2 露天矿区水的化学特征

露天矿区附近地下水的水质, 根据前人的研究成果<sup>[4]</sup>, 在不同类型地下水及不同岩性中有所差别。在天然堆积物的孔隙含水层中, 地下水以 SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Ca 和 SO<sub>4</sub>-Ca 型水为主, pH=5.5~8.5, 硬度大于 180 mg/L, 矿化度小于 1.0 g/L; 在变质岩系中以 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca 和 SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>-Ca 型为主, 另外还有 SO<sub>4</sub>-Ca·Mg 及 SO<sub>4</sub>·

Cl-Ca 型水, pH=7.5~8.9 矿化度小于 0.35 g/L; 在岩浆岩裂隙含水岩组的泉水中, 水化学类型为 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Na 或 SO<sub>4</sub>·Cl-Ca 型, pH=7.0~9.2, 矿化度小于 1.0 g/L, 而在开挖的输水洞中, 部分出水点水的 pH 小于 3。

研究过程中, 分别在入口点和出口点取水样进行分析, 在较长时间没有下雨的条件下, 入口处的水样可代表当时支流上游地下水的水质, 出水点的水样既有支流入口处水, 也有来自废石堆积物中侧向的地下水。

由表 5 可见, 矿区废石场附近河流流经废石堆的水质变化特点:

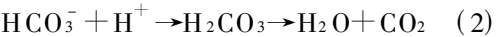
(1) pH 值变化大。从废石堆入口处的 7.75 降低到出口处的 5.58, 水质明显酸化。其原因主要是由于受露天矿碎石堆积影响所致, 碎石中大量的金属硫化矿物(主要是黄铁矿, 另外还有黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等)与外界接触, 氧化生成硫酸, 增加了水中 H<sup>+</sup> 浓度, 使水变为弱酸性水。

表 5 水样分析结果

Tab 5 Analytical Result of Water Sample					
项 目	入口	出口	项 目	入口	出口
pH	7.75	5.58	总硬度	77.77	523.94
γ/(μS·cm <sup>-1</sup> )	173	972	ρ(K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup> )	4.09	49.64
ρ(CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	0.00	0.00	矿化度	127.29	818.20
ρ(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	63.46	12.69	侵蚀 ρ(CO <sub>2</sub> )	4.58	16.02
ρ(Cl <sup>-</sup> )	4.32	5.76	ρ(Cu)	0.0020	0.7422
ρ(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	27.50	589.30	ρ(Zn)	0.0274	2.1235
ρ(Ca <sup>2+</sup> )	22.95	85.24	ρ(Pb)	0.00	0.0257
ρ(Mg <sup>2+</sup> )	4.97	75.57	-	-	-

注: pH, γ 除外, 其余项目单位为 mg/L

(2) 总碱度降低。由于水质明显酸化, 使得总碱度由入口的 52.05 mg/L 降到出口处的 10.41 mg/L, pH=5.58 表明总碱度由 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 控制。



HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 通过反应式(1)质量浓度增加, 但经反应式(2)又消耗了 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 这 2 种作用同时存在, 但是总碱度的降低表明反应式(2)占优势, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 在水中一部分以 CO<sub>2</sub> 气体逃逸出去。

(3) 电导率大幅度提高。水的电导率与其所含无机酸、碱、盐的量有一定关系, 该指标常用于推测水中离子的总质量浓度或含盐量, 不同类型的水有不同的电导率。由于废石中硫化物的风化作用

释放出大量的硫酸,而酸性水又溶解了废石中许多碱性矿物,使水中离子的浓度增加,含盐量增加,因而电导率从入口处的  $173 \mu\text{S}/\text{cm}$  增加至出口处的  $972 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,增加了 5.6 倍以上。

(4)  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度增大 20 多倍。 $\text{SO}_4^{2-}$  浓度从入口处的  $27.50 \text{ mg/L}$  增加到出口处的  $589.30 \text{ mg/L}$ ,出口水样中的  $\text{SO}_4^{2-}$  超过了地面水环境质量标准<sup>[5]</sup> 2 倍以上,这是由于硫化物的氧化作用释放出大量的  $\text{SO}_4^{2-}$  的缘故。

(5) 总硬度大幅度提高,由入口处的  $77.77 \text{ mg/L}$  增加到出水口的  $523.94 \text{ mg/L}$ 。由于大量  $\text{H}^+$  的出现,使水的溶解能力提高,从而增加了对废石中造岩矿物钙镁盐岩的溶解,使水的硬度大幅度提高。

(6) 侵蚀性  $\text{CO}_2$  增大。水中侵蚀性  $\text{CO}_2$  由入口的  $4.58 \text{ mg/L}$  增加到  $16.02 \text{ mg/L}$ 。

(7) 总 Fe 增大 100 多倍。黄铁矿的风化氧化作用在生成  $\text{SO}_4^{2-}$  的同时会生成大量的 Fe,所以总 Fe 由入口处的  $0.0042 \text{ mg/L}$  变为出口处的  $0.7974 \text{ mg/L}$ 。铁离子在微酸性的条件下很不稳定,易水解生成铁的沉淀或氧化物,同时释放出的  $\text{H}^+$  又与造岩矿物发生反应生成了更多的其他离子如 Ca、Mg、Al、K、Na,或者生成的铁离子被细粒硫化矿物或粘土矿物及沉积物吸附。

(8) 矿化度增大,水化学类型发生变化。入口处的水化学类型为  $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca}$  型水,矿化度很低,仅  $0.127 \text{ g/L}$ ,其矿化度与水化学类型均与当地的地质与自然条件相匹配,反映了基岩山区地下水的基本特点,水的化学成分为溶滤作用形成。出口处水样的水化学类型为  $\text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$  水,矿化度为  $0.818 \text{ g/L}$ ,此水样的水化学类型与其他特征都不是一般基岩山区天然地下水应有的化学特征。

河水在流经含有金属硫化矿物的废石场后,各组分的含量主要与黄铁矿的氧化速率、废石的风化程度、不同元素的迁移速率、废石孔隙水的水力交换速率等有关<sup>[5-9]</sup>。通过废石堆出口处水样中主体成分的分析,可以看出废石堆处于黄铁矿的氧化和中和反应阶段,所以出口水溶液是一种  $\text{Ca} - \text{Mg} - \text{O} - \text{H} - \text{S}$  的体系,容易导致相连水体的

严重污染,污染指标为: pH、 $\text{SO}_4^{2-}$  和总硬度。此时微量组分大多束缚于废石堆中,还未达到微量组分的大量迁移阶段。随着钙镁碳酸盐的减少,体系酸性增强,可迁移的微量组分就会发生溶解。

### 3 结论及建议

(1) 通过原水与蒸馏水分别对矿石样品淋滤的对比分析,发现变化趋势是一致的,说明了在淋滤过程中,主要是吸附与解吸的过程。

(2) 金属硫化矿床地区采矿排放的废石对水的污染不只限于使水酸化,在与地下水的作用过程中,  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量浓度可大于  $1000 \text{ mg/L}$ ,总硬度也会大幅度的增加,直到达到极硬水,对水源造成严重的污染。

(3) 风化硫化矿物粒度越小,比表面积大,氧化溶解和中和能力强<sup>[7]</sup>,在与淋溶水接触的过程中溶出  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度高,易造成水质总硬度、硫酸盐污染。离子溶出趋势是在水对矿物样品的淋滤初期,离子的浓度高;随着时间的增长,离子的大量溶出,溶出的离子浓度处于平衡状态。说明了对已风化的矿物进行淋滤,初期淋滤水中常量离子变化较大。

(4) 实验过程中 Mg 的质量浓度较低,与当地废石堆进出口水中 Mg 的变化出现差异,进一步证明了出口处的水不仅包括西川河水,还有来自侧向的补给。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 毕振明,高忠爱. 固体废物的处理与处置[M]. 北京,高等教育出版社,2002.
- [2] 余运波. 煤矸石堆放对水环境的影响[J]. 地学前缘,2001,8(1): 168-169.
- [3] 阎兴虎. 金堆城钼矿伴生元素赋存特征及综合利用[J]. 有色矿山,1995(1): 50-52.
- [4] 马保平,胡高社. 金堆城钼业公司露天排土场稳定性及排土场规划研究报告[R]. 西安:长安大学,2002.
- [5] 马少健. 硫化矿物尾矿重金属离子溶出实验研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2002,27(4): 273-275.
- [6] 卢龙,王汝成. 硫化矿物的表面反应及其在矿山环境研究中的应用[J]. 岩石矿物学杂志,2001,20(4): 388-392.
- [7] 陈天虎,冯军会. 国外尾矿酸性排水和重金属淋滤作用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2001,2(2): 41-46.