

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

刘应冬¹, 徐力¹, 王先达², 缪家鑫², 范良千²

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心, 四川 成都 610041; 2. 四川农业大学土木工程学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 本文以攀枝花地区的典型钒钛磁铁矿尾矿样品为研究对象, 采用分批静态浸出方式, 开展了浸提液 pH 值、环境温度、液固比、时间和粒径因素下的金属浸出试验。结果表明浸提液 pH 值、环境温度和液固比对浸提液中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Ti 和 Zn 的浸出浓度影响显著, 低 pH 值、高温和高液固比有利于金属元素的浸出。大部分金属 (Co、Cr、Fe、Mn、Ni 和 Ti) 的浸出浓度与粒径大小呈反比。铁尾矿中大部分金属 (Co、Cr、Fe、Mn、Ni 和 Zn) 的释放持续时间较长。对于铁尾矿的重金属污染防控, 应考虑季节变化引起的金属浸出量变化, 重点防控时期为夏季。此外, 细粒径铁尾矿的金属释放量大, 在金属污染防治过程中应当予以重视。

关键词: 攀枝花; 钒钛磁铁矿; 尾矿; 静态浸出; 重金属元素; 污染防控

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.06.015

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 06-0084-07

矿山的开采会导致大量的尾矿暴露地表, 在选矿废水及雨水的淋滤作用下, 重金属元素也随之释放出来, 通过废水渗透、吸附、离子交换等作用进入水体和土壤, 从而危害人类健康^[1-3]。

攀枝花是我国钒钛磁铁矿的主要成矿带, 蕴藏着极其丰富的钒钛磁铁矿资源, 也是世界上同类矿床的重要产区之一。从南至北主要由攀枝花、红格和白马三大矿区构成。钒钛磁铁矿保有储量超过 70 亿 t。经过近五十年的资源开发产生了巨量的固体废弃物, 其中尾矿是重要的固体废弃物之一。据不完全统计, 三大矿区资源开发共形成大小尾矿库 52 个, 尾矿累积堆存量约 5.7 亿 t, 对环境造成了重大的影响^[4]。

为探究环境条件对攀枝花地区钒钛磁铁矿尾矿金属元素的浸出影响, 在实验室开展模拟试验, 模拟不同条件下, 尾矿中重金属元素的淋滤浸出

特征, 以了解重金属元素的淋滤环境条件, 为钒钛磁铁矿尾矿库修复治理及污染防控提供依据。

1 试验

1.1 样品制备及样品物化性质测定

样品采集于 2019 年 7 月份采自攀枝花红格矿区一立钒钛尾矿库, 采集堆放时间较短的新鲜尾矿样品, 样品自然阴干, 用震击式标准震筛机将之进行粒度筛分, 测定各粒径样品的重量, 计算各粒径的占比, 结果见表 1。尾矿中中等粒径占比较大, 粒度主要集中在 $-0.5+0.075$ mm 之间。

表 1 尾矿样品粒径分布
Table 1 Particle size distribution of tailings

粒径分级 /mm	+1	-1+0.5	-0.5+0.15	-0.15+0.075	-0.075	总计
分布率/%	0.35	5.33	46.83	35.78	11.71	100.00

尾矿样品的化学多项分析结果见表 2。

收稿日期: 2020-09-19

基金项目: 国家公益性基础调查二级项目 (DD20189501)

作者简介: 刘应冬 (1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事地质找矿及矿山环境地质调查研究。

通讯作者: 徐力 (1992-), 男, 主要从事矿山地质环境调查工作。

表 2 尾矿中主要金属元素含量 / (mg·kg⁻¹)
Table 2 Contents of main metal elements in tailings

As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Ti	Zn
<MDL*	2.29	161.98	613.48	22.69	114135.19	1381.6	61.45	<MDL	26059.6	124.95

*<MDL 低于检测限。

从表 2 可以看出, Fe 的含量特别高, 其余金属中 Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Ti 和 Zn 的含量相对较高, As、Cd 和 Pb 含量较低。考虑到尾矿中各金属元素的含量及其环境危害, 后续试验主要探讨 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Ti 和 Zn 的浸出变化特征。

1.2 试验设计

前人研究表明, 受到矿产类型、采矿区域以及加工工艺的影响, 不同矿产资源金属污染释信息和规律可能有较大区别。浸提液 pH 值、温度、液固比、时间和粒径等五项因素对尾矿金属浸出的影响往往受到前人的着重考察^[5-8]。综合各文献, 并基于铁尾矿基本物化性质分析的测试结果, 本论文以采用分批静态浸出试验的方式, 考察了浸提液 pH 值、温度、液固比、时间和粒径条件对铁尾矿

中的金属元素释放的影响, 具体技术路线见图 1。

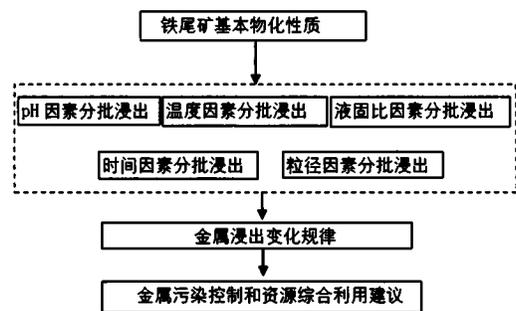


图 1 技术路线

Fig. 1 Technicel route routine

试验采用单因素设计。表 3 给出了各因素试验的具体条件。结合研究区域降水情况^[19], 试验中所使用的浸提液以质量比为 8:1 硫酸和硝酸混合酸 (SO₄²⁻/NO₃⁻ = 8:1) 为储备液, 按梯度稀释法进行逐级稀释配制, 并用 pH 值计测定控制。

表 3 各因素试验设置条件

Table 3 Test setting conditions for each factor

因素	浸提液体积 /L	初始 pH 值	温度 /℃	液固比 / (L·kg ⁻¹)	浸出时间 /h	粒径 /mm
pH 值	0.05	2、3、4、 5、6、7	25	20:1	10	/
温度	0.05	2	15、25、35、45	20:1	10	/
液固比	0.05	2	25	50:1、30:1、 20:1、10:1、 5:1、2:1、1:1	10	/
时间	0.05	2	25	20:1	0.5、1、2、4、6、 8、10、12、24、 48、72、96、120	/
分级 粒径	0.05	2	25	20:1	10	+1、-1 - +0.5、 -0.5 - +0.15、-0.15 - +0.075、-0.075

1.3 分批静态浸出试验

1.3.1 pH 值因素试验

在 100 mL 离心管中, 加入 2.5g 铁尾矿样品, 分别加入 pH 值为 2、3、4、5、6 和 7 的浸提液 50 mL, 放置于恒温振荡摇床中, 设置温度为 25℃, 振荡频率为 150 r/min, 振荡 10 h。将反应后的浸提液用慢速滤纸初步过滤, 再通过 0.45 μm 的滤膜滤于

塑料瓶中, 加入千分之一的浓硝酸, 于 4℃ 冰箱内保存至测定。

1.3.2 温度因素试验

在 100 mL 的离心管中, 加入 2.5 g 铁尾矿样品, 加入 pH 值为 2 的浸提液 50 mL 后, 放置于恒温振荡摇床中, 分别设置温度为 15℃、25℃、35℃、

和 45℃，振荡频率为 150 r/min，振荡 10 h。将反应后的浸提液用慢速滤纸初步过滤，再通过 0.45 μm 的滤膜滤于塑料瓶中，加入千分之一的浓硝酸，于 4℃ 冰箱内保存至测定。

1.3.3 液固比试验

在 100 mL 的离心管中，分别加入 0.5 g、1.0 g、1.67 g、2.5 g、5 g、10 g 铁尾矿样品，加入 pH 值为 2 的浸提液 50 mL 后，放置于恒温振荡摇床中，设置温度为 25℃，振荡频率为 150 r/min，振荡 10 h。将反应后的浸提液用慢速滤纸初步过滤，再通过 0.45 μm 的滤膜滤于塑料瓶中，加入千分之一的浓硝酸，于 4℃ 冰箱内保存至测定。

1.3.4 时间因素试验

在 100 mL 的离心管中，加入 2.5 g 铁尾矿样品，再向离心管中加入 pH 值为 2 的浸提液 50 mL 后，放置于恒温振荡摇床中，设置温度为 25℃，振荡频率为 150 r/min。分别振荡样品 30 min、1 h、2 h、4 h、6 h、8 h、10 h、12 h、24 h、48 h、72 h、96 h 和 120 h 后，将反应后的浸提液用慢速滤纸初步过滤，再通过 0.45 μm 的滤膜滤于塑料瓶中，加入千分之一的浓硝酸，于 4℃ 冰箱内保存至测定。

1.3.5 粒径因素试验

取自然粒径分级下 +1 mm、-1+0.5 mm、-0.5+0.15 mm、-0.15+0.075 mm、-0.075 mm 的铁尾矿样品各 2.5 g 置入 100 mL 离心管中，加入 pH 值为 2 浸提液 50 mL，放置于恒温振荡摇床，设置温度为 25℃，振荡频率为 150 r/min，振荡 10 h。将反应后的浸提液用慢速滤纸初步过滤，再通过 0.45 μm 的滤膜滤于塑料瓶中，加入千分之一的浓硝酸，于 4℃ 冰箱内保存至测定。

2 结果与讨论

2.1 pH 值对铁尾矿中金属的溶出行为的影响

8 种重金属元素中，Ni 未检出，Co 在 pH 值 >3 后也未检出。图 2 (a)~(d) 分别给出了铁尾矿中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 随浸提液初

始 pH 值变化的浸出浓度变化趋势。从图可以看出，各金属的浸出浓度具有随 pH 值的升高而降低的趋势。其中，Cr、Fe 和 Ti 均在 pH 值 >3 后便趋于平衡，Cu、Mn 和 Zn 则在 pH 值 >4 后趋于平衡外。对 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 进行单因素方差分析，发现 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 均随 pH 值升高而下降显著。其中，Cr、Fe 和 Ti 在 pH 值 >3 后，浸出浓度在 pH 值因素下组间无显著性差异，而 Cu、Mn 和 Zn 在 pH 值 >4 后，浸出浓度在 pH 因素下组间无显著性差异。该结果表明低 pH 值条件能促使尾矿中的大部分金属溶出。在 pH=2 条件下各金属分别达到最大溶出浓度，Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 的浓度分别为 0.06161 mg/L、0.02721 mg/L、0.06245 mg/L、11.01267 mg/L、0.18061 mg/L、0.01710 mg/L 和 0.22507 mg/L。研究结果表明铁尾矿中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 的浸出浓度受到浸提液酸性强度的影响，酸性越强浸出量越大，该结果与前人研究结果一致 [9-10]。浸提液 pH 值的升高会促进各金属由于水解和沉淀反应，可能会导致各金属的浸出浓度的出现降低 [6]。本文中，高 pH 值浸提液浸提铁尾矿中金属元素的效果

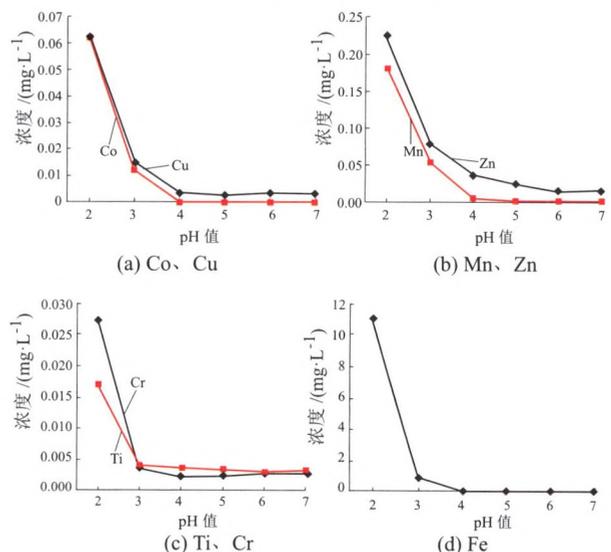


图 2 不同 pH 值下铁尾矿浸出液中的浓度变化
Fig. 2 Concentration changes of tailings leaching solution at different pH values

较差，可能正是水解和沉淀反应所导致的。

2.2 温度对铁尾矿中金属的浸出行为的影响

8 种重金属元素中，Ni 未检出。图 3 (a)~(d) 分别给出了铁尾矿中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 随环境温度变化的浸出浓度变化趋势。从图可以看出，Co、Cr、Cu、Fe、Mn 和 Zn 的浸出浓度随温度的升高均呈增加趋势，在 45℃ 时的浸出率分别比其在 15℃ 条件下增加了 2.18、5.23、1.42、7.03、2.92 和 1.75 倍。不同的其他金属，Ti 的浸出浓度则呈现先增加后减少的趋势，在 35℃ 时达到最高，为 15℃ 时的 1.28 倍。根据原始测定数据，对 7 种金属浓度进行单因素方差分析，结果显示 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 的浸出率在不同

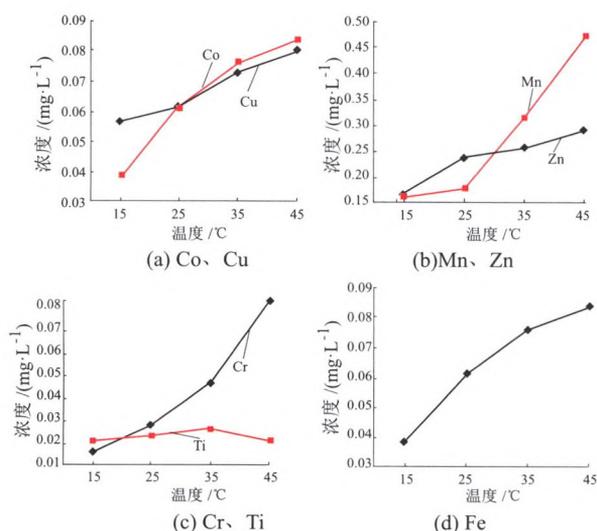


图 3 不同温度下铁尾矿浸出液中的浓度变化

Fig. 3 Concentration changes of tailings leaching solution at different temperatures

温度组间均存在显著的差异。分析表明温度能显著影响 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 的浸出。

前人研究指出，随着温度的升高，金属盐的溶解度积常数 K_{sp} 会增大^[6]。溶解度的增加可能是导致 Co、Cr、Cu、Fe、Mn 和 Zn 的浸出浓度增加的原因。在试验体系中，随着温度升高金属量溶出增大，铁尾矿对酸的消耗可能也随之增大，这会导致浸提液的 pH 值上升。对于 Ti 而言，其对 pH 值比较敏感，在 45℃ 条件下由于溶液中 pH 值较高，其可能生成了 $Ti(OH)_4$ 沉淀。这可能是 Ti 的浸出浓度在 45℃ 出现下降的原因。总体上讲，

高温有利于铁尾矿中大部分金属的释放。对于铁尾矿的金属污染治理而言，应加在高温多雨的盛夏季节加强铁尾矿库的污染防控。

2.3 液固比对铁尾矿中金属的浸出行为的影响

8 种重金属元素中，Ni 未检出。图 4 (a)~(d) 分别给出了铁尾矿中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 随液固比变化的单位质量浸出量的变化趋势。从图中可以看出，随液固比的增大，Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Pb、Ti 和 Zn 的单位质量矿石浸出量均呈增大趋势。Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Pb、Ti 和 Zn 在液固比 100:1 L/kg 时的单位质量浸出量为 (0.00203、0.00147、0.00276、0.54885、0.00621、0.00136 和 0.00843) mg/g，分别是液固比 5:1 L/kg 时对应金属的单位质量浸出量的 3.28、14.17、7.44、12.69、3.75、16.87、22.45 和 3.88 倍。对 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Pb、Ti 和 Zn 元素的单位质量浸出量进行单因素方差分析，结果显示不同液固比下的各金属的单位质量浸出量在组间存在显著性差异。结果表明液固比能显著影响铁尾矿中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 元素的浸出释放，液固比的增大对单位质量铁尾矿的金属浸出量有促进作用。前人研究指出，液固比较小会使溶液在浸出界面容易达到饱和，阻止界面物质的浸出反应；而随着液固比不断增大，传质速度会相应提高，加速液固界面处的物质溶出^[11]。上述液固比增大促进液固界面处物质

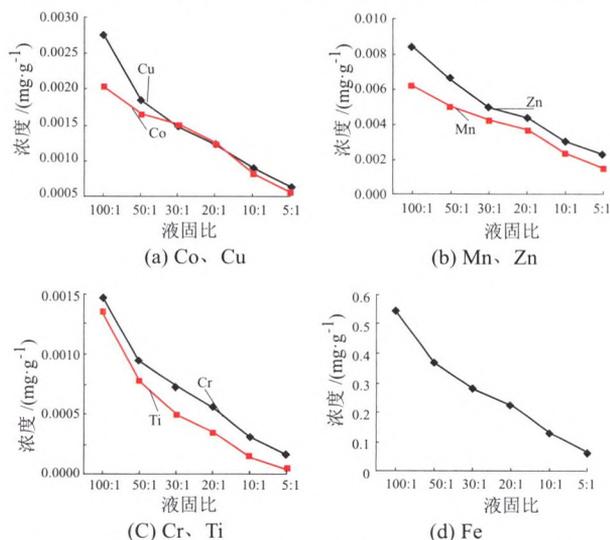


图 4 不同液固比下铁尾矿浸出液中的浸出量变化

Fig. 4 Changes of leaching quantities of tailings leaching solution under different liquid-solid ratios

属溶出现象，可能正是液固比促进铁尾矿单位质量浸出量增加的原因。

2.4 时间对铁尾矿中金属的浸出行为的影响

8 种重金属元素中，Ni 未检出。图 5 (a)~(d) 分别给出了铁尾矿中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 随时间变化的浓度变化趋势。从图可以看出在试验时间范围内，Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 在加入浸提液后均迅速溶出。Co、Cr、Fe、Mn 和 Zn 的的释放持续时间较长，分别在 120、72、72、72 和 120 h 时达到最高浸出浓度 0.09285、0.04652、33.09012、0.41090 和 0.31162 mg/L。此外，随浸泡周期延长，Co 和 Zn 的浸出浓度逐渐达到平衡，Cr、Fe 和 Mn 的浸出浓度则发生一定程度的降低且并未在试验阶段达至平衡。有别于其他金属，Ti 的浸出浓度呈随时间变化一直降低的趋势。Ti 的最大浸出浓度出现在 0.5 h，为 0.02346 mg/L，并在 0.5 h 后持续性降低，在 72 h 时达到平衡。

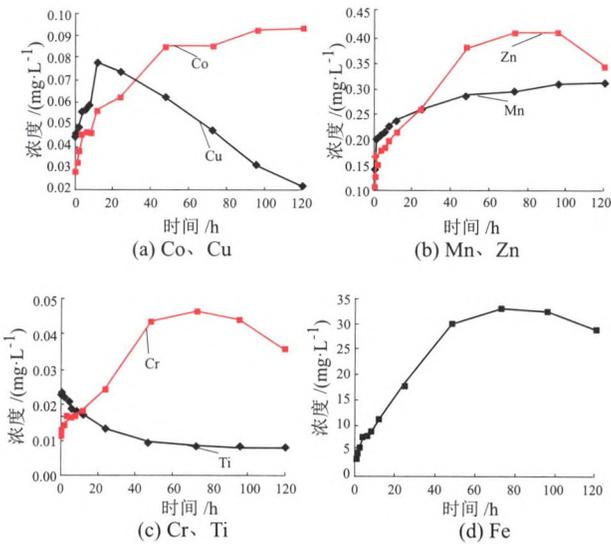


图 5 不同时间下铁尾矿浸出液中的浓度变化

Fig. 5 Concentration changes of tailings leaching solution at different times

对于 Cu，其浸出浓度呈先快速上升再持续降低的趋势，12 h 时达到较大值，为 0.07741 mg/L。

对于 Co、Cr、Fe、Mn 和 Zn，铁尾矿中相应氧化物与酸的反应以及相应盐的溶解可能是导致其浸出浓度持续性上升的原因。前人研究发现，

Fe 在酸性较强 (pH 值 <4) 的富铁硫酸盐溶液中会被消耗，形成黄钾铁矾与施威特曼石沉淀^[12]。Fe 的浸出浓度下降可能是形成黄钾铁矾与施威特曼石沉淀时溶液中的 Fe 被消耗所导致。对于 Cr，有研究表明溶液中的 Cr 会受到施威特曼石的吸附作用，出现浓度降低的现象^[13]。Cr 的浸出浓度降低可能是溶液中出现了施威特曼石所导致。此外，Mn 会受到高岭石的吸附，而铁尾矿库所在地攀枝花市的铁尾矿中正好含有大量对 Mn 具有的吸附作用的高岭石^[14-15]。Mn 的浸出浓度降低可能正是高岭石吸附了浸提液中的 Mn 所导致。Ti 对酸性比较敏感，在低 pH 值情况下也会生成了 Ti(OH)₄ 沉淀^[16]。随着浸提时间的延长，铁尾矿中各金属溶出消耗了浸提液中的酸，致使 Ti 随 pH 值上升而出现沉淀，降低了 Ti 的浸出浓度。Ti(OH)₄ 沉淀的产生可能正是 Ti 的浸出浓度降低的原因。对于 Cu 浸出浓度的降低，研究推测，施威特曼石（或其他铁的水解物）可能 12 h 时便开始形成，并持续对 Cu 进行的吸附，降低了 Cu 的浸出浓度。

试验结果表明，铁尾矿中大部分金属随浸泡时间的延长持续释放，而 Ti 在快速释放后便开始沉淀，Cu 则在短期的释放后浓度持续下降。总体而言，铁尾矿中大部分金属的浸出浓度与时间呈正相关。对于铁尾矿库的重金属污染防治，应注重降雨历时较长的雨季时期的防控工作。此外，应提高铁尾矿库的排水能力，避免铁尾矿库积水致使铁尾矿被长时间浸泡。

2.5 粒径对铁尾矿中金属的浸出行为的影响

8 种重金属元素中，Ni 未检出。图 6 (a)~(d) 分别给出了铁尾矿中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 在不同粒径分级下的浸出浓度变化趋势。从图可以看出，Co、Cr、Fe、Mn 和 Ti 的浸出浓度随着粒径变小均呈增大趋势，在最小粒径等级 (-0.075 mm) 时达到较大其值分别为 (0.05859、0.03066、7.87334、0.26096 和 0.01749) mg/L。Cu 和 Zn 的浸出浓度则随着粒径变小均出现先减小后

增大的趋势，并均在 +2 mm 粒径达到较大，分别为 (0.20399 和 0.42532) mg/L。对 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ti 和 Zn 元素的浸出浓度进行单因素方差分析，结果显示铁尾矿的重金属浸出浓度在不同粒径间具有显著性差异。不同粒径的铁尾矿之间的金属浸出差异可能是各粒径矿物的组成成分和比表面积大小有所不同造成的。

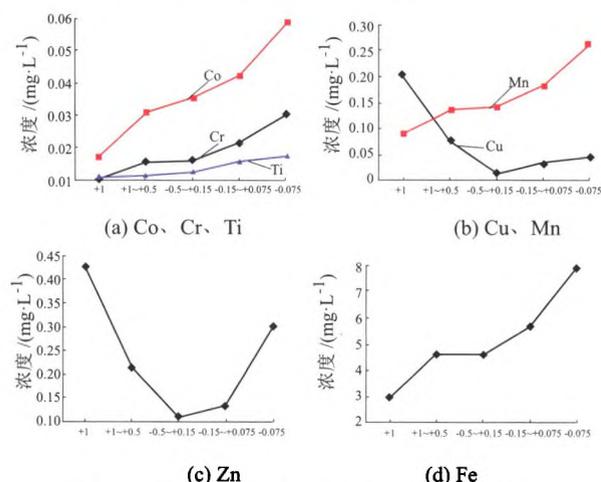


图6 不同粒径下铁尾矿浸出液中的浓度变化

Fig. 6 Concentration changes of tailings leaching solution with different particle sizes

结果表明，铁尾矿中大部分金属的浸出浓度与铁尾矿粒径大小呈负相关关系，细粒径铁尾矿中的大部分金属更容易浸出。铁尾矿中细粒径占比不低，故在铁尾矿的污染防治时，应重视细粒径等级的铁尾矿的管理。

4 结论与建议

(1) 铁尾矿的主要金属元素为 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Ti 和 Zn，组成复杂，具有种类多、含量高的特点。尾矿样品中中等粒径占比较大，粒度主要集中在 0.075 ~ 0.5 mm 之间。

(2) 铁尾矿浸出的金属元素主要为 Fe、Zn 和 Mn，Co、Cr、Cu 和 Ti 的浸出量不大，Ni 则难以浸出。浸提液 pH、环境温度和液固比对浸提液中 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Ti 和 Zn 的浸出浓度影响显著，低 pH 值、高温和高液固比有利于 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Ti 和 Zn 的浸出。铁

尾矿中大部分金属 (Co、Cr、Fe、Mn、Ni 和 Ti) 的浸出浓度与粒径大小呈反比。铁尾矿中大部分金属 (Co、Cr、Fe、Mn、Ni 和 Zn) 的释放持续时间较长。

(3) 在铁尾矿金属污染控制过程中应重点关注 Fe、Zn 和 Mn。在考虑使用生态修复技术修复铁尾矿库周围的土壤污染时，应选用耐受 Fe、Zn 和 Mn 的植物进行栽种。对于 Fe、Zn 和 Mn，浸提液 pH 值、温度和液固比能显著影响其浸出浓度，且 Fe、Zn 和 Mn 释放持续时间较长。因此，对于铁尾矿的重金属污染防治，应考虑季节变化引起的金属浸出量的变化，重点防控阶段应为降雨量大、降雨历时长且温度较高的夏季。此外，细粒径铁尾矿的金属释放量大，在金属污染防治过程中应当予以重视。

(4) 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿量巨大，含有大量有价元素，可进行尾矿再选，先进行有价元素回收，再进一步加工形成建筑材料或土壤改良剂，开发高附加值产品，加强综合利用，实现尾矿整体规模利用，是实现尾矿污染防治最有效的途径。

参考文献：

- [1] Zhang L C, Zhao G J. The species and geochemical characteristics of heavy metals in the sediments of Kangjiaxi River in the Shuikou shan Mine area [J]. Applied Geochemistry, 1996, 11(1/2): 217-222.
- [2] Dang Z, Liu C Q, Martin J H. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal [J]. Environmental Pollution, 2002, 118(3): 419-426.
- [3] 李媛媛, 吴平霄, 邢宁, 等. 大宝山尾矿重金属风化淋滤试验研究 [J]. 矿物学报, 2010, 30(2): 235-241.
- [4] 刘应冬, 徐力, 陈超, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿资源及综合利用 [C]. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集.
- [5] Liu Y D, Xu Li, Chen Ch, et al. Tailings resources and comprehensive Utilization of Panzhihua Vanadium-titanium magnetite [C]. Abstract of papers of the 9th National Conference on Metallogenic Theory and Prospecting Methods.
- [5] Wong M H, Kwan S H. Leachate quality from iron-ore

tailings leached with deionized water of different pH[J]. Waste Management & Research, 1988, 6(1):45-49.

[6] Guo Y G, Huang P, Zhang W G., et al. Leaching of heavy metals from Dexing copper mine tailings pond[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(10):3068-3075.

[7] 张丽君, 袁旭音, 王兵, 等. 铁镁质尾矿中的钙镁浸取效果优化 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(9):3951-3958.

Zhang L J, Yuan X Y, Wang B, et al. Optimization of extraction effect of calcium and magnesium in ferrite tailings [J]. Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9):3951-3958.

[8] 宋早明, 李鹤, 陈俊, 等. 巢湖地区汪家凹尾矿库生态环境影响因素研究 [J]. 生物学杂志, 2016, 33(2):22-25.

Song Z M, L H, Chen J, et al. Study on the influencing factors of ecological environment of Wangjia Aoweimine reservoir in Chaohu area [J]. Journal of Biology, 2016, 33(2):22-25.

[9] 孙娇, 徐争启, 赵永鑫. 金属矿山尾矿中重金属元素的浸出率试验 [J]. 地球科学进展, 2012(S1):405-407.

Sun J, Xu Zh Q, Zhao Y X. Experimental study on leaching Rate of heavy metal elements from metal mine tailings [J]. Progress in Earth Science, 2012(S1):405-407.

[10] 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试验 [J]. 地质通报, 2012, 31(1):101-107.

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.

[11] Zhang Y L, Li H M, Yu X J. Fe extraction from high-silicon and aluminum cyanide tailings by pretreatment of water leaching before magnetic separation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4):1165-1173.

[12] Heepark J., Han Y. S., Ahn J. S. Comparison of arsenic co-precipitation and adsorption by iron minerals and the mechanism of arsenic natural attenuation in a mine stream [J]. Water Research, 2016, 106:295-303.

[13] Eskandarpour A., Maurice O., Tanahashi M., et al. Magnetic fixed-bed column for Cr(VI) removal from aqueous solution using schwertmannite [J]. ISIJ International, 2008, 2(48):240-244.

[14] 叶巧明, 刘建, 张其春. 川南煤系硫铁矿尾矿高岭土综合利用研究 [J]. 矿产综合利用, 2002(1):41-45.

Ye Q M, Liu J, Zhang Q Ch. Comprehensive Utilization of kaolin from pyrite tailings in south Sichuan [J]. Comprehensive Utilization of mineral Resources, 2002(1):41-45.

[15] Sathyanarayana B., Sessaiah K. Kinetics and equilibrium studies on the sorption of manganese(II) and nickel(II) onto kaolinite and bentonite [J]. Journal of Chemistry, 2011, 8(1):373-385.

[16] Andriamahamanana C., Laberty-Robert C., Sougrati M. T., et al. Room-temperature synthesis of iron-doped anatase TiO₂ for lithium-ion batteries and photocatalysis [J]. Inorganic Chemistry, 2014, 53(19):10129-10139.

Study on Leaching Behavior of Main Metal Elements from Panzhuhua Vanadium-titanium Magnetite Tailings

Liu Yingdong¹, Xu Li¹, Wang Xianda², Miao Jiabin², Fan Liangqian²

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Technical Innovation Center of Rare Earth Resources, China Geological Survey, Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China; 2. College of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, the typical vanadium-titanium magnetite tailings in Panzhuhua area were taken as the research object, the metal leaching experiments were carried out under the conditions of pH value, ambient temperature, liquid-solid ratio, time and particle size. The results showed that the leaching concentration of Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti and Zn were significantly affected by pH, ambient temperature and liquid-solid ratio of the extract, and low pH, high temperature and high liquid-solid ratio were favorable for the leaching of metal elements. The leaching concentration of most metals (Co, Cr, Fe, Mn, Ni and Ti) is inversely proportional to the particle size. Most metals in iron tailings (Co, Cr, Fe, Mn, Ni and Zn) have a long release duration. For the prevention and control of heavy metal pollution in iron tailings, the change of metal pollution caused by seasonal changes should be considered, and emphasis should be focus on the prevention and control of summers with high rainfall, long duration of rainfall and high temperature, and the greater metal release of fine particle size iron tailings.

Keywords: Panzhuhua; Vanadium-titanium magnetite; Tailings; Static leaching; Heavy metal elements; Pollution prevention and control