



玢岩型铁矿床尾矿中磷、稀土战略性矿产资源调查与综合利用研究:以安徽凹山矿田为例*

段超¹, 张长青^{1**}, 王丛林², 杨秉阳², 刘冠男¹, 邓杰³, 邓善芝³, 康博文³,
侯可军¹, 谢京佳¹, 刘欢¹, 秦燕¹

(1 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 安徽马钢矿业资源集团南山矿业有限公司, 安徽 马鞍山 243033; 3 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041)

摘要 玢岩型铁矿床是铁矿石的重要来源, 其除了赋存巨量铁矿产资源外, 还以产出大量磷灰石为特征, 伴生大量的磷、稀土、钒等资源。20 世纪, 矿业开发大多只回收主要矿种铁, 对伴生资源的评价和综合利用较少。文章以凹山玢岩型铁矿田尾矿库为研究对象, 开展伴生资源调查评价和综合利用示范研究。通过系统钻探采样、矿物组合分析、元素赋存状态和综合利用实验等研究, 文章揭示出尾矿库中经济矿物为磷灰石, 可综合利用资源为磷和稀土, 并估算尾矿库中磷储量超过 115 万 t, 稀土 5 万 t, 社会和经济效益巨大, 可作为范例进一步研究并推广应用。

关键词 磷; 稀土; 尾矿; 调查评价; 综合利用; 玢岩型铁矿床

中图分类号: P618.7; P619.21³

文献标志码: A

Phosphorus-Rare Earth Elements resources hosted in tailings of iron oxide-apatite deposit: Survey and comprehensive utilization study on Washan ore field, Anhui Province

DUAN Chao¹, ZHANG ChangQing¹, WANG CongLin², YANG BingYang², LIU GuanNan¹, DENG Jie³, DENG ShanZhi³, KANG BoWen³, HOU KeJun¹, XIE JingJia¹, LIU Huan¹ and QIN Yan¹

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Nanshan Mining Co., Ltd., Anhui Masteel Mining Resources Group, Maanshan 243033, Anhui, China; 3 Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract

The iron oxide-apatite deposit (IOA) is an important source of Fe ores, characterized by the abundant production of magnetite and apatite. Besides containing a huge amount of Fe ores, this type of deposit is also considerably associated with critical element ores, such as P, V, and REE. In the 20th century, most mining operations have only focused on the main minerals (Fe), with less utilization of associated resources in mineral deposits. In this study, systematic drilling sampling, mineral association study, element occurrence state analysis, and comprehensive utilization study have been performed on the Washan tailing pond at the Washan IOA ore field in eastern China. It is revealed that the primary resources that can be comprehensively utilized in the tailings pond are P and

* 本文得到国家重点研发计划(编号:2016YFC2903703)、国家自然科学基金(编号:41402078, 41473014)和企业横向项目联合资助

第一作者简介 段超,男,1983年生,副研究员,矿床学和矿床地球化学研究方向。Email: duanchao@cags.ac.cn

** 通讯作者 张长青,男,1975年生,研究员,金属矿床成矿作用、区域成矿规律及资源综合利用研究方向。Email: zcqcqchangqing@163.com

REE, and the main economic mineral is apatite. Preliminary calculations show that the reserves of P and REE in the Washan tailings pond exceed 1.15 million tons and 50000 tons, respectively, which has enormous social value potential and could be further studied and promoted as an example.

Key words: phosphorus, rare earth elements, tailings, survey and assessment, comprehensive utilization, iron oxide-apatite deposit

玢岩型铁矿床(铁氧化物-磷灰石矿床, IOA 型矿床;火山岩型矿床)以产出大量磁铁矿和磷灰石为特征,是铁矿石的重要来源之一,其还伴生磷、稀土、钒等资源(Reich et al., 2022)。20 世纪的矿业开发大多仅利用矿床中的主要矿种铁,对伴生资源综合利用较少。随着社会经济发展对矿产资源需求的提升,伴生资源已成为中国以及全球的战略关键矿产资源的重要来源,越来越受到世界各国政府、科研工作者、矿山企业的重视(Taylor et al., 2019)。中国玢岩型铁矿床主要分布于长江中下游多金属成矿带(Mao et al., 2011;周涛发等, 2011;Zhang et al., 2014),其中以宁芜矿集区最为典型,亦是玢岩型铁矿成矿模型的发祥地(宁芜研究项目编写小组, 1978)。本次研究选择宁芜矿集区凹山矿田中凹山尾矿库为对象,开展玢岩型铁矿尾矿伴生资源调查和综合利用研究,以期通过尾矿中伴生战略性矿产资源的二次利用示范,提升中国矿产资源综合利用效能。

凹山尾矿库位于安徽省马鞍山市东南方向 13 km,库容 8000 多万 m^3 ,是一座大型的三等级尾矿库。尾矿库自 1965 年投产至 2023 年闭库,在近 60 年的生产中,储存了来自凹山、高村、东山等典型玢岩型铁

矿床开采产生的尾矿。本次工作对该尾矿库首先开展了地表调查和采样,同时为进一步查明库内深部资源状况,在尾矿库内系统布置勘查钻孔进行纵深剖面的勘查和采样,应用 X 射线衍射仪、矿物综合分析仪、激光剥蚀等离子质谱等设备以及实验室综合利用实验对尾矿的矿物组分、有用矿物组成与赋存、尾矿综合利用可行性开展了系统性研究。

矿物分析结果显示,凹山尾矿库中尾矿的主要组成为钠长石、斜长石、磷灰石、阳起石、绿泥石、角闪石、石英、黄铁矿等,多为玢岩型铁矿床的典型脉石矿物(Duan et al., 2019;李延河等, 2021)。成分分析显示,尾矿主要元素包括 Si、Al、Fe、Ca、Mg、P 以及稀土元素等,其中可用元素主要为磷和稀土。磷主要来自磷灰石,稀土亦主要赋存于磷灰石,这与全球范围内玢岩型铁矿床的特征相一致(Reich et al., 2022)。磷灰石是该类型矿床尾矿综合利用中的一个关键矿物。对磷灰石开展的成分分析测试以及尾矿稀土离子淋滤实验表明,磷灰石在选矿过程以及尾矿库内储存过程中存在矿物的分解以及稀土的离析迁移现象(图 1)。由于尾矿库中黏土等吸附矿物缺失,迁移出的稀土元素产生了流失,表现为不同深度岩芯尾矿样

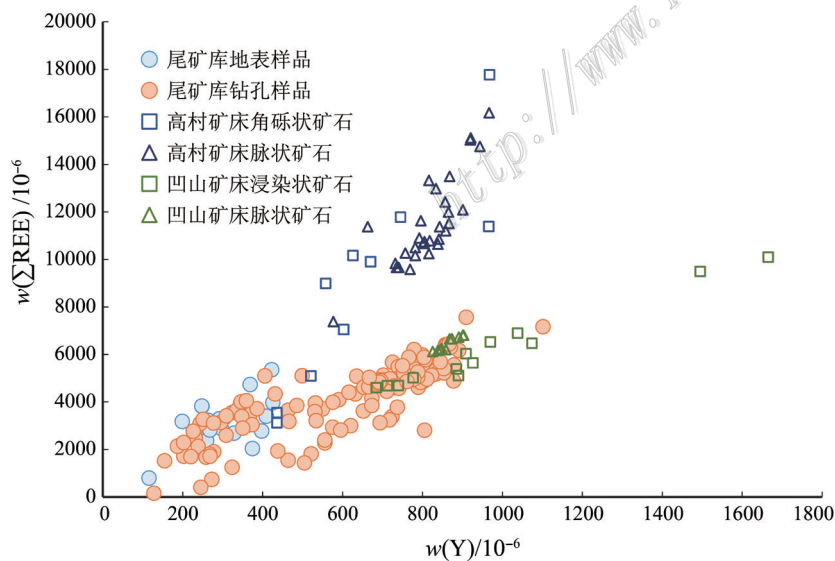


图1 凹山尾矿库尾矿中磷灰石与矿山原矿石中磷灰石稀土含量对比图

Fig. 1 Comparison of REE contents of apatite in tailings of the Washan tailings pond and in ores of mines

品中离子态稀土含量极低(图2)。相关性分析显示,尾矿中的磷和稀土含量呈正相关关系,表明稀土元素仍主要赋存于磷灰石中。尾矿堆存对磷和稀土带来明显的分层现象,尾矿中磷和稀土含量在尾矿库30~35 m深处存在一个显著的含量变化分界线(图3、图4)。其中,尾矿库在该层之上部分稀土含量大多低于 400×10^{-6} ,该层以下大多高于 500×10^{-6} (部分地区临近库底10 m范围可达到 1000×10^{-6})。这可能是由于在开采过程中矿体上部富含磷灰石的矿石(Duan et

al., 2019)优先开采的结果。值得注意的是,尾矿内平均 $w(P)$ 为 8160×10^{-6} ,具有较大的开发潜力。

本次研究基于尾矿库原貌和现状图等基础资料,以 Surpac 软件为平台,构建了尾矿库三维模型,并以钻孔纵向稀土和磷含量为基础,采用反距离加权插值法建立了稀土和磷含量三维空间块体模型,估算尾矿库磷资源量大于115万t,相当于35%五氧化二磷精矿750 t;稀土含量超过5万t。通过尾矿综合利用实验室研究,优化后的选矿流程能够分离提

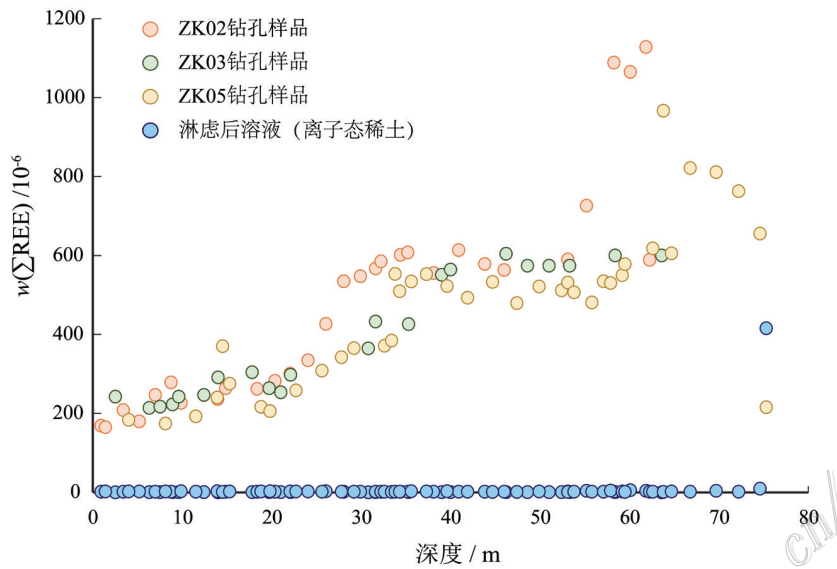


图2 凹山尾矿库尾矿中离子态稀土含量特征

Fig. 2 Characteristics of ionic REE contents in tailings of the Washan tailings pond

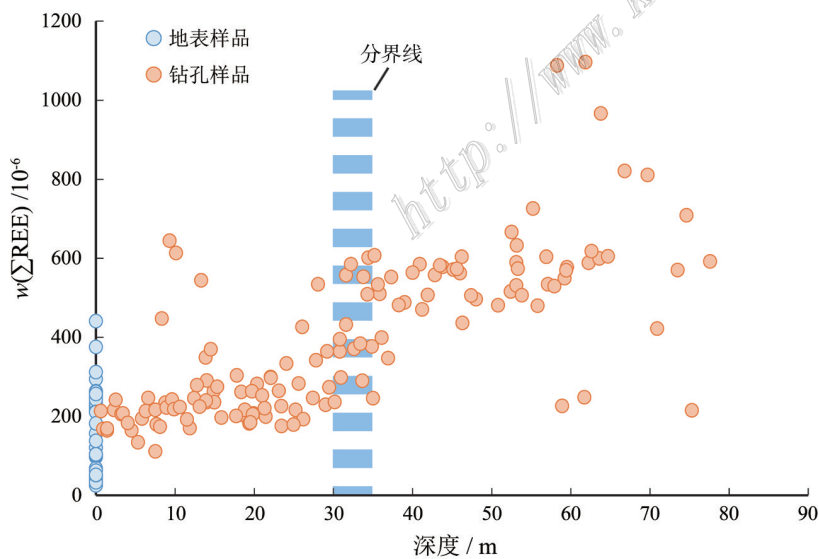


图3 凹山尾矿库稀土含量与赋存深度二元图解

Fig. 3 Binary diagram of REE content and occurrence depth in the Washan tailings pond

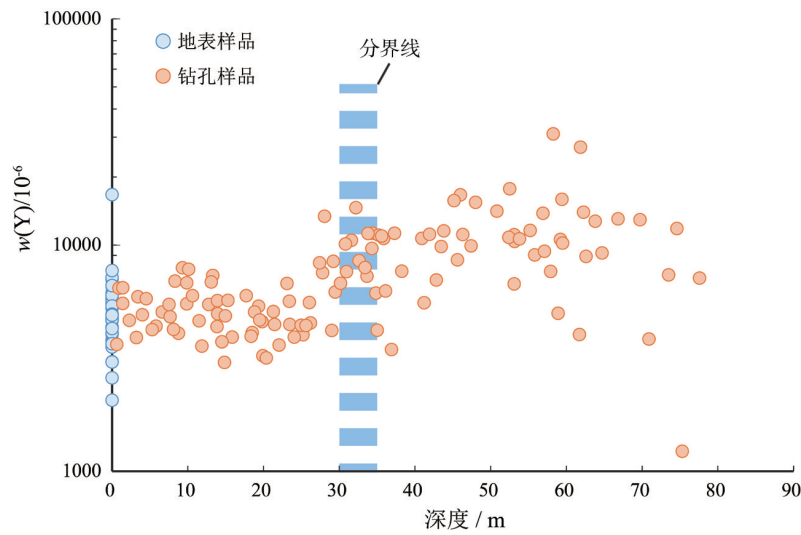


图4 凹山尾矿库磷含量与赋存深度二元图解

Fig. 4 Binary diagram of P content and occurrence depth in Washan tailings pond

纯形成 P_2O_5 精矿(品位34%),产率约为5.5%。结合当前生产成本和经济价值分析,经济效益巨大。此外,磷灰石作为主要经济矿物的综合利用是挖掘该类型矿床老矿山以及正在开发矿山资源潜力的关键,本研究可作为范例进行参考。

致谢 感谢安徽省地质矿产勘查局322地质队谢祖军教授级高级工程师在野外工作中给予的帮助和指导。感谢中国地质科学院矿产资源研究所郑瑜林博士和马子惠、胡金盟硕士在野外工作和实验分析中给予的帮助。感谢两位审稿专家对本文的详细审阅和提出的建设性修改意见。

References

- Duan C, Li Y H, Mao J W, Hou K J, Wang C L, Yang B Y, Wang Q and Li W. 2019. Ore formation at the Washan iron oxide-apatite deposit in the Ningwu ore district, eastern China: Insights from in situ LA-ICP-MS magnetite trace element geochemistry[J]. *Ore Geology Reviews*, 112: 103064.
- Li Y H, Duan C, Wang C L, Yang B Y, Hou K J, Zhang C and Liu J L. 2021. Washan iron oxide-apatite deposit, Anhui Province: A metallogenic study in the Ningwu ore district[M]. Beijing: Geological Publishing House. 124p (in Chinese).
- Mao J W, Xie G Q, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen Y C. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 294-314.

- Ningwu Research Group. 1978. Magnetite porphyry deposits in Ningwu area[M]. Beijing: Geological Publishing House. 196p (in Chinese).
- Reich M, Simon A C, Barra F, Palma G, Hou T and Bilenker L D. 2022. Formation of iron oxide-apatite deposits[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3: 758-775.
- Taylor R D, Shah A K, Walsh G J and Taylor C D. 2019. Geochemistry and geophysics of iron oxide-apatite deposits and associated waste piles with implications for potential rare earth element resources from ore and historical mine waste in the eastern Adirondack Highlands, New York, USA[J]. *Economic Geology*, 114 (8): 1569-1598.
- Zhang Z C, Hou T, Santosh M, Li H M, Li J W, Zhang Z H, Song X Y and Wang M. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China, An overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 247-263.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Ma L, Qian B and Xie J. 2011. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85 (5): 712-730 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜矽岩铁矿[M]. 北京: 地质出版社. 196页.
- 李延河, 段超, 王丛林, 杨秉阳, 侯可军, 张成, 刘佳林. 2021. 安徽凹山矽岩型铁矿床—宁芜矿集区矽岩型铁矿床成矿作用研究[M]. 北京: 中国地质出版社. 124页.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 马良, 钱兵, 谢杰. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. *地质学报*, 85(5): 712-730.