

河北邯邢式铁矿尾矿地球化学特征

徐国志, 邓金火, 徐锦鹏

XU Guo-zhi, DENG Jin-huo, XU Jin-peng

石家庄经济学院, 河北 石家庄, 050031

Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China

摘要:邯邢铁矿是中国重要的铁矿山之一,利用钻探方法对西石门铁矿后井尾矿56种元素进行地球化学评价,了解元素在尾矿库中的空间分布特征。研究表明,尾矿库中Fe、Cu、S、Co元素可进一步开采利用,局部可达到或超出原生矿的工业品位要求。后井尾矿中Fe、S、Cu、Co资源量分别是 28.5×10^4 t、 4.5×10^4 t、 0.36×10^4 t和 0.2×10^4 t,适合二次综合开发利用,同时研究中也探索了这些元素在尾矿沙中富集作用和富集机理及影响因素,旨在探索出一种利用地球化学评价尾矿的资源量勘查方法,加速实现中国尾矿资源化。

关键词:邯邢铁矿;尾矿;地球化学;资源量;资源化

中图分类号:P618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2014)09-1439-06

Xu G Z, Deng J H, Xu J P. Geochemical characteristics of Hanxing style iron ore tailings, Hebei Province. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(9): 1439-1444

Abstract: The resource crisis has attracted much attention all over the world with the development of the economy. The exploration of new mines should be accompanied by improving comprehensive utilization of the tailings. Therefore, exploring new mines together with improving comprehensive utilization of the tailing resources seem to be the way to solve this problem. The Hanxing iron mine is one of the main iron mines. However, the resource shortage and environmental problem have restricted its development with the increasing requirement and exploitation of iron ores. In order to prolong the service life of the mine and study the characteristics of iron ore tailings, the authors carried out investigations and discovered that there exists obvious enrichment of such elements as Fe, Cu, S and Co in the iron ore tailings, which can reach or even exceed the resource reserves of economic primary ores. Reasonable and adequate utilization of tailing resources has great practical significance for the resource recovery of iron ore tailings.

Key words: Hanxing iron mine; tailing; geochemistry; resource quantity; resource recovery

随着矿产资源的大量开发和利用,矿石日益贫乏,尾矿作为二次资源再利用受到世界各国的重视^[1-3]。中国对矿产资源的综合利用极为关注,陆续颁布了一系列技术经济政策法规,加强了对矿产资源综合利用工作的宏观管理,明确了指导方针^[4-6],并在矿产综合利用方面取得了一定成效。如工业固体废弃物综合利用率在60%左右,金属尾矿的综合利用率平均不到10%,而选矿尾矿利用率仅为2%^[7]。由此可以看出,中国尾矿的开发

利用基本上处于起步阶段,大多停留在回收部分有价金属组分的阶段,即使有少量研究者和企业利用尾矿生产涂料、填料,其数量也极少,达不到减量化和资源化的目的^[8-10]。截止2005年,全国尾矿或固体废弃物累积存量约为 219.62×10^8 t,各类金属矿山尾矿库存量为 $60 \times 10^8 \sim 80 \times 10^8$ t,中国矿山每年排放的尾矿以 $5 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8$ t速度增长。可见,随着经济社会的发展,资源紧缺危机已成为全国关注的热点问题,因此在加大地质勘查力度发现

收稿日期:2014-02-21;修订日期:2014-07-30

资助项目:成矿带区域地球化学调查专项(编号:科2010矿评03-03-035)

作者简介:徐国志(1957-),男,教授,从事勘查地球化学与区域地质调查研究。E-mail: 1183222653@qq.com

新矿产地的同时,提高尾矿资源综合利用水平是解决资源短缺的重要途径。

1 邯邢式铁矿矿床特征

邯邢地区铁矿体在空间上主要赋存于燕山期闪长—二长岩类与中奥陶世各组碳酸盐岩的接触带上,少量产于碳酸盐岩内及侵入体内部。矿体的长度一般为几十米到几百米,少数达几千米。矿体倾斜延伸或宽度几十米到几百米,矿体厚度几米到几百米。矿体明显受侵入体及其与围岩接触带的控制,形态多样^[11]。

矿石矿物主要为磁铁矿,其次为钴黄铁矿、假象赤铁矿、黄铜矿、镁磁铁矿、板状磁铁矿、辉铁镍矿、磁黄铁矿、斑铜矿、蓝辉铜矿、针铁矿等,铁品位在40%~45%之间^[12]。脉石矿物主要为透辉石,其次为钙铁榴石、透闪石、金云母、阳起石、蛇纹石、方解石、白云石、含氟角闪石及少量镁橄榄石、粒硅镁石、绿泥石、方柱石、石英、磷灰石、榍石、萤石、沸石等。矿石的化学成分以Fe为主,其次为Si、Al、Ca、Mg、P等。有益伴生组分元素为S、Co、Cu、Ni、Te、V、Ga等。

2 开采历史及尾矿库分布形态特征

邯邢铁矿区于20世纪60年代开始开采,在70年代进入发展期,2000年以来进入鼎盛采矿期,现有国有矿山和民营矿山多处,规模大小不一。有玉石洼、矿山村、西石门、符山、玉泉岭、午汲等大小选矿厂几十个,选矿厂下属大小尾矿库也分布较多,除少数尾矿库分布较远外,多数在矿区与选矿厂周边。成规模尾矿库主要有后井尾矿库、惠兰尾矿库、尖山北尾矿库等,其中后井尾矿库规模最大,运行参数齐全。根据尾矿库堆砌的位置,将邯邢地区尾矿库型式划分为山谷型、傍山型和平地型3种,一般都位于水系上游,坝型为透水坝体。通过调查发现,邯邢地区尾矿存储量达 $5000 \times 10^4 \text{ t}$,并以每年 $230 \times 10^4 \text{ t}$ 的速率增长^[13]。在尾矿库调查中没有发现尾矿综合利用的情况,有些尾矿库已经闭库,在尾矿库上开始了植树复垦^[14-17]。西石门铁矿曾经在尾矿综合利用上进行过可行性研究,但始终没有实施。由此看来,该地区尾矿的综合利用具有很大的潜力。

3 后井尾矿库及尾矿砂物理特征

通过尾矿库逐一调查,选取目前正在使用的后

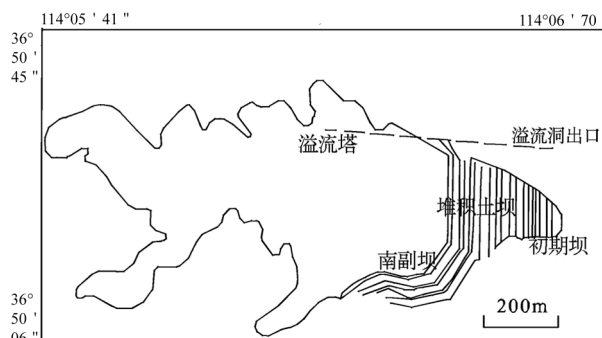


图1 后井尾矿库平面形态

Fig. 1 Planar morphology of Houjing tailings

井尾矿库为研究对象,其属山谷型尾矿库,是当地规模最大并符合国家运行要求的二类尾矿库。尾矿库汇水面积 1.72 km^2 (图1),有效库容 $1790 \times 10^4 \text{ m}^3$,水文地质条件较好,库区两岸岩坡稳定。后井尾矿库初期坝为透水堆石坝,1991年10月尾矿库开始使用^[18]。

3.1 尾矿含水率与容重

在尾矿库调查中,笔者对尾矿容重进行了测量,选取尾矿库2个钻孔81个样品称重,并求得湿重平均值为 2.04 g/cm^3 ,经过烘干后再称取1次,将烘干所取得数值求取算数平均值计算平均容重为 1.80 t/m^3 。尾矿的平均含水率为13.33%,比重为7.5。尾矿排放浓度为40%,矿浆比重为 1.363 g/L 。选矿方式为单一磁选方式^[19]。

3.2 尾矿粒度构成特征

为了调查邯邢铁矿区尾矿的粒度分布特征,利用筛分方法对现有较大型尾矿库进行粒度分析,分析结果见表1。

表1显示各个尾矿库的粒度在 0.074 mm 以下颗粒约占50%以上,特别是玉石洼和西石门在70%以上。显然小于 0.074 mm 的粒度占尾矿砂的主体。

表1 磁尾粒度筛析

Table 1 Magnetotail granularity

选厂名称	粒度/mm			合计/%
	+0.147	0.147~0.074	-0.074	
玉石洼	7.48	18.2	74.32	100
矿山村	17.14	20.41	62.45	100
西石门	14.53	15.19	70.28	100
符山	33.43	15.16	51.41	100
玉泉岭	37.93	10.25	51.77	100
午汲	19.15	27.35	53.50	100

主要研究的后井尾矿库尾矿来源主要为西石门选矿厂,磁铁矿矿物的解离粒度为+0.147mm,经过调查及粒度分析,后井尾矿库尾矿粒级主要为小于0.074mm范围,占总量的70.3%,−0.147~+0.074mm粒级比例占15.2%;粒级大于0.147mm的占14.53%。通过研究得出,邯邢矽卡岩铁矿中原生矿石中伴生的黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿、磁黄铁矿的结晶粒度比磁铁矿的结晶粒度细,一般在−0.074mm以下,含量占70%。目前尾矿砂的粒度达不到硫化物矿物解离浮选要求^[20],如果选用浮选方法进行选矿,尾矿砂必须要进一步球磨使其达到浮选分离的粒级。

3.3 尾矿矿物组成

尾矿砂样在室内进行了尾矿矿物组成分析,经鉴定邯邢铁矿所产生的尾矿属高钙镁型尾矿,除了少数没有解离的磁铁矿外,还有其他伴生矿物,主要伴生矿物及其含量为方解石(36.8%)、透辉石(25.6%)、石英(12.3%)、黄铁矿(10.6%)、绿泥石(11.0%)和长石(3.7%),次要矿物为斑铜矿、蓝辉铜矿、黄铜矿、钙铁榴石、透闪石、金云母、阳起石、蛇纹石、磷灰石、萤石及少量镁橄榄石、粒硅镁石。

4 尾砂型人工矿床地球化学特征

4.1 元素含量特征

邯邢铁矿所属的后井尾矿库共施工14个钻孔(图2),钻孔每米采集1件尾矿样品,共采集472件尾矿样品,分析了28种元素指标(表2)。从分析结果来看,在尾矿中,Fe、Cu、Co和S的品位均已达工业可利用品位。TFe的平均品位达6.65%,最低为4.39%,最高达11.1%,目前铁尾矿的回收利用品位约为7%(根据经济效益情况而定)^[20];Cu的平均品位为0.0134%,S的为1.68%,Co为0.011%,均达到铁尾矿可回收利用品位。

4.2 尾矿元素组合特征

通过对尾矿钻孔472件样品的27种氧化物和

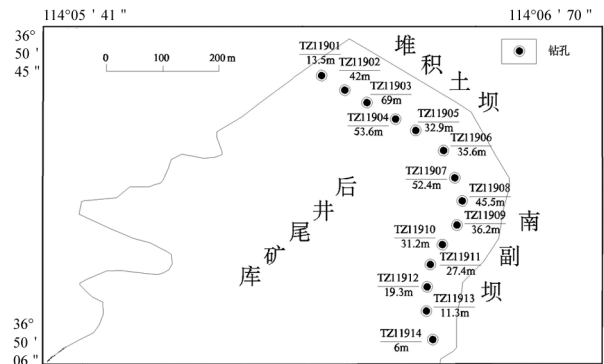


图2 后井尾矿库钻孔施工平面图

Fig. 2 Drilling engineering plan of Houjing tailings

元素分析结果进行R型聚类分析,得出的元素组合特征如图3所示。在0.6的相似系数置信度下,分析元素可划分为3组,分别代表不同的矿物组合及其相关元素的含量关系:①Na₂O、Al₂O₃、SiO₂、K₂O等造岩元素组合;②Cu、S、TFe₂O₃、Cd、Pb、CaO等成矿元素组合;③稀土元素(ΣREE+Y)组合。

4.3 元素三维空间分布与分异特征

随着矿山的开采和选冶,尾矿库经历了从无到有、从浅到深、从一地到另一地的演化发展历程。在不同时间段、不同深度、不同位置记录了矿山的开采与选排信息,如采矿矿体矿物成分的变化、选矿设备及工艺的更新、排尾口的位置与开放时间都影响着尾砂矿物及元素在表生地球化学环境下的迁移演化特征^[21]。通过对后井尾矿库的钻探取样分析,证实在尾矿库中元素的空间分布不均匀,结果表明大部分元素在垂向上呈层状分布(图4、图5),水平方向呈不规则锯齿状分布。

(1)Fe₂O₃的垂向分布特征:在−8~−16m和−28~−44m出现了Fe的2个高含量段,并具明显的层状特征,使尾砂产生了高低含量分层变化的特征。这种富集特征的形成与开采矿体和开采部位有关,同

表2 尾矿元素含量特征值(N=472)

Table 2 Element content characteristics of tailings (N=472)

分析元素	TFe	Cu	S	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	Pb	Cd	Hg	ΣREE+Y
均值	6.65	134	1.68	32.2	1.37	21.2	0.76	12.9	3.82	7.47	0.08	13.4	90.6
离差	1.13	45.5	0.61	1.93	0.24	1.99	0.24	1.13	0.57	1.74	0.02	3.56	23.4
变异系数	0.17	0.34	0.36	0.06	0.17	0.09	0.32	0.09	0.15	0.23	0.25	0.27	0.26
最小值	4.39	49.2	0.22	24.7	0.83	16.7	0.23	9.96	2.55	2.6	0.03	6.18	39.0
最大值	11.1	350	4.71	36.4	1.96	28.0	1.44	16.9	5	15.8	0.23	110	175.2

注:Cu、Pb、Cd、ΣREE+Y单位为10^{−6},Hg为10^{−9},其他为%

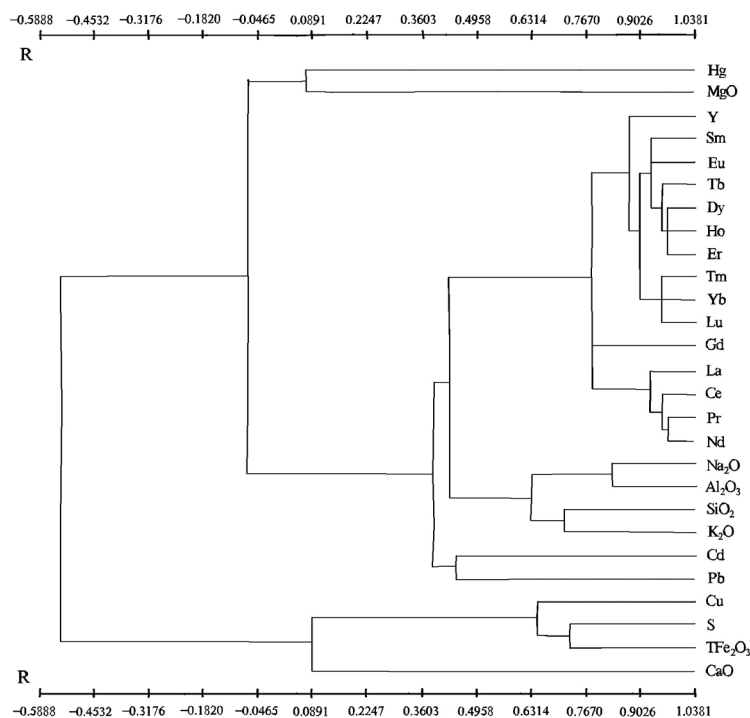


图3 尾矿元素R型聚类谱系图

Fig.3 R-cluster dendrogram of tailing elements

时也受选矿设备及工艺更新的影响;另一个原因可能是含磁铁矿尾砂比重较大,在尾砂和水的湿陷作用下较重矿物呈向下运移趋势,使其具有下富上贫的含量特征。

(2) Al_2O_3 、 Na_2O 、 SiO_2 、 K_2O 的分布特征:从表层到底层由高值到低值的变化特征,体现了该类氧化

物除受开采与选矿影响外,也受重力影响。由于这些氧化物所代表的矿物是石英,长石相对比重较轻,随着尾砂与水的湿陷,重矿物向下运移,使轻矿物相对向上漂浮富集,造成在库体顶部有较高的含量。

(3) Cu 元素的垂向分布特征:整体分为5层,从深到浅呈现低—高—低—高—低的含量变化特征。-8~-15m 与 -35~-40m 为2个高值层。Cu 元素主要赋存在原生硫化物矿物中,所以 S、Cu、Fe 在尾矿库中的分布形态基本相似。由于邯邢地区铁矿石除磁铁矿外,伴生有黄铜矿、黄铁矿、方铅矿等硫化物。这些硫化物在不同矿体、不同部位的含量有所差别,开采部位的变化导致尾砂中的硫化物不均匀分层分布。另外,硫化物的比重稍大于尾砂平均比重,因此重力作用不明显,不能形成明显的重力分层现象。因此,尾砂中亲硫金属元素含量变化特征主要受原生矿体硫化物变化特征的影响。

(4) S 元素的垂向变化特征:S 元素变化与亲硫金属元素具有相似性,由于 S 与亲硫元素关系密切,且黄铁矿相对其他硫化物含量较高,所以 S 更能反映黄铁矿的整体变化趋势。

(5) 稀土元素分布特征:轻稀土元素(LREE)整

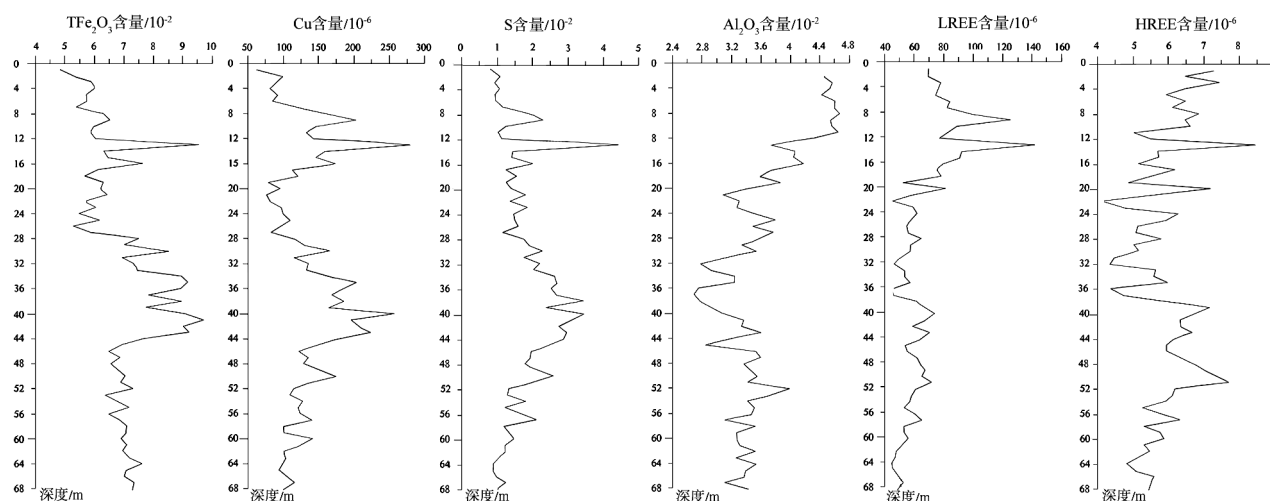


图4 TZ11903 钻孔元素垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of elements in TZ11903 drill hole

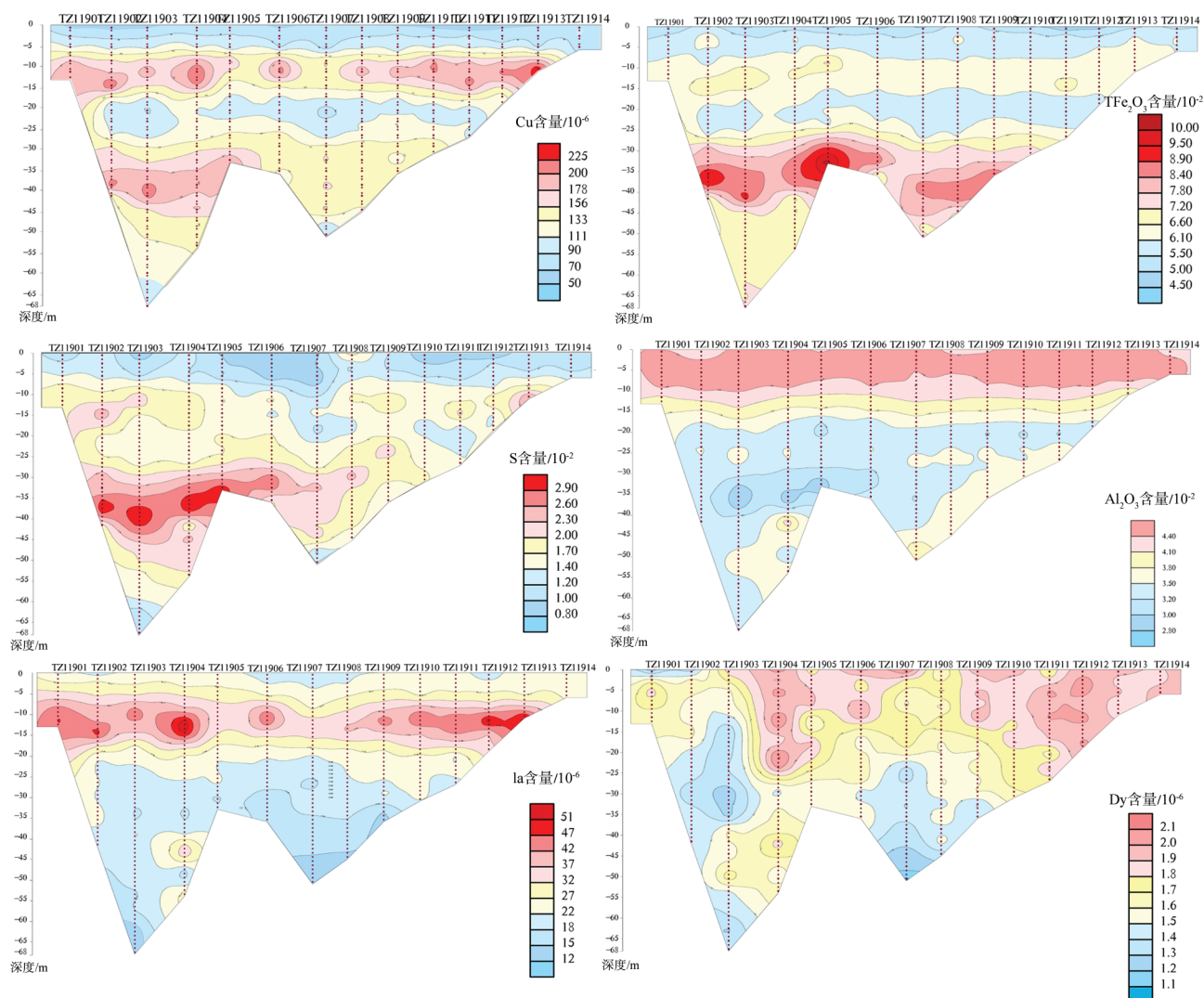


图5 钻孔剖面元素地球化学特征

Fig.5 Borehole profile element geochemical maps

体呈现从浅到深由高值到低值的形态特征,而重稀土元素(HREE)呈现从深到浅低—高一低—高的形态特征。从尾砂与原岩稀土元素配分模式可以看出,稀土元素含量变化特征主要受原岩矿物的影响,稀土元素配分模式对分析其他元素特征具有重要的对比作用。

尾砂横向上的变化特征除受开采矿体和选矿因素的影响外,还受排尾口位置和排放时间的影响,这些因素导致元素含量在横向上呈锯齿状分布。

5 尾矿资源化研究

后井尾矿库自1991年到现在,累计排放尾矿量

为 $1500 \times 10^4 \text{ m}^3$,尾矿容重为 1.8 t/m^3 ,尾砂干重为 $2700 \times 10^4 \text{ t}$,根据可利用元素平均品位,可计算后井尾矿库元素储量(表3)。据本次调查的不完全统计,邯邢地区现存尾矿量约 $5313.6 \times 10^4 \text{ t}$,由此估算,

表3 后井尾矿库潜在有用元素资源量估算

Table 3 Potentially useful element resource estimation of tailings in Houjing

元素	平均品位	元素储量/t
TFe	6.65%	2850000(63%精铁粉)
Cu	133.68×10^{-6}	3609.36
S	1.68%	453600
Co	0.011%	2970

尾矿 63%精铁粉储量达 $560 \times 10^4 \text{t}$, 铜 7102t, 硫 $89 \times 10^4 \text{t}$, 钴 5844t。如果得以充分利用, 将会给社会经济带来巨大效益, 同时也可以减少尾矿对环境的压力, 改善矿山环境, 延长矿山服务年限。此外, 经过重选利用的尾矿砂中还存在大量石英、方解石、透灰石可以应用在水泥、制砖、陶瓷等建材、化工、筑路等行业, 如尾矿得到充分利用, 经济与环境效益可观^[22]。

6 结论与建议

(1) 邯邢西石门后井尾矿中 Fe、S、Cu、Co 资源量分别是 $28.5 \times 10^4 \text{t}$ 、 $4.5 \times 10^4 \text{t}$ 、 $0.36 \times 10^4 \text{t}$ 和 $0.2 \times 10^4 \text{t}$, 适合二次综合开发利用。有用元素组分类型和含量高低与当时被开采的矿体或矿段有关。不同采矿体的岩石矿物组成及矿石品位导致尾矿中元素分布特征不同。

(2) 有用矿物在尾矿中受矿物自身重力影响, 各元素与矿物出现重力富集的特征。研磨选矿也使某些轻重矿物(或化合物、元素)得以解离, 使之容易在库体的水作用下发生重力分离, 影响元素在库体中的垂向分布。

(3) 尾矿中同样存在富集矿体, 这类矿体在尾矿库中呈不均匀分布, 主要分布在库中某些层段和部位, 其影响因素较为复杂。不同采坑的开采时段、矿石品位、选厂选矿工艺流程及设备新旧的更替时间、尾砂排泄的稳定性、尾矿排放口的位置、不同的选矿工艺流程、矿物解离程度均可以影响排放尾砂的粒度及矿物组成。

(4) 对尾砂型人工矿床的开采, 应深入了解矿区采选历史, 不同采坑的开采时段与矿石品位, 选厂选矿工艺流程及设备的更替时间。不同选矿工艺流程排放的尾砂的粒度和矿物组成的差别, 是尾矿综合利用重点调查的问题之一。调查中有必要对尾矿库进行钻探查证。

(5) 地球化学评价方法是有效、经济的尾矿地质储量评估方法。

致谢: 本次调查研究得到中国地质科学地球物理地球化学勘察研究所周国华、程志中教授级高工的帮助, 西石门铁矿张海江总工程师提供了矿山资料, 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Licskó I, Lois L, Szabényi G. Tailings as a source of environmental pollution[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 39(10/11): 333-336.
- [2] 张淑云, 薛向欣, 刘然, 等. 尾矿综合利用现状及展望[J]. 矿冶工程, 2005, 25(3): 44-47.
- [3] 陈虎, 沈卫国, 单来, 熊春兵, 等. 国内外铁尾矿排放及综合利用状况探讨[J]. 混凝土, 2012, 2: 88-92.
- [4] 国家发改委. 国家发改委将制定政策鼓励尾矿综合利用[J]. 中国矿山工程, 2006, (5): 56.
- [5] 国土资源部政策法规司. 金属尾矿综合利用专项规划(2010—2015年)[N]. 国土资源(政策法规), 2011, 5: 46.
- [6] 梅国栋. 尾矿综合利用与无尾矿山建设探讨[J]. 金属矿山, 2010, 10: 142-145.
- [7] 赖才书, 胡显智, 字富庭. 我国矿山尾矿资源综合利用现状及对策[J]. 矿产综合利用, 2011, (4): 11-14.
- [8] 陈盛建, 陈吉春, 高宏亮, 等. 铁尾矿制备微晶玻璃研究的进展[J]. 矿业快报, 2004, (3): 27-30.
- [9] Felleson D A. Iron ore and taconite mine reclamation and revegetation practices on the mesabi range in northeastern minnesota[J]. Restoration and Reclamation Review, 1999, 5(5): 1-6.
- [10] 雷力, 周兴龙. 我国矿山尾矿资源综合利用现状与思考[J]. 矿业报, 2008, 473: 5-8.
- [11] 郑建民, 毛景文, 陈懋弘, 等. 冀南邯郸—邢台地区矽卡岩铁矿的地质特征及成矿模式[J]. 地质通报, 2007, 26(2): 150-154.
- [12] 沈宝丰, 翟安民, 李增慧, 等. 冀南邯郸式铁矿成矿地质条件分析[J]. 地质学报, 1981, (2): 127-139.
- [13] 张海江. 邯邢铁矿选矿厂尾综合利用的设想[J]. 冶金矿山设计与建设, 1998, 30(3): 27-30.
- [14] 侯运炳, 唐杰, 魏书祥. 尾矿固结排放技术研究[J]. 金属矿山, 2011, (6): 59-62.
- [15] Dean K C, Froisland L J, Shirts M B. Utilization and stabilization of mineral wastes[J]. US Bureau of Mines Bulletin 688, Washington, DC, 1986: 45.
- [16] Norland M R, Veith D L. Revegetation of coarse taconite iron ore tailing using municipal solid waste compost[J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, (41): 123-134.
- [17] 雷文. 加强规划 积极开展尾矿综合利用[J]. 再生资源与循环经济, 2010, 3(12): 5-7.
- [18] 王炳荣, 裘家骅. 西石门铁矿尾矿库防汛度汛措施研究[J]. 金属矿山, 1995, (3): 43-46.
- [19] 张海江. 邯邢铁矿选矿工艺流程分析[J]. 冶金矿山设计与建设, 2001, 33(5): 5-9.
- [20] 陈甲斌, 贾文龙, 范继涛. 铁尾矿利用经济分析模式与应用[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 152-156.
- [21] 张学军, 孙彬彬, 陈志中, 等. 全国尾矿地球化学调查: 需求及工作思路[J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 715-718.
- [22] 徐光荣, 王建斌. 矿山尾矿资源化与整体综合利用[J]. 陕西地质, 2006, 24(2): 87-90.