X射线辐射分选技术及设备的发展与应用

韩跃新，王泽红，陈晓龙
（东北大学资源与土木工程学院，辽宁　沈阳　110819）

摘要：本文阐述了射线辐射选矿的概念与技术特点，详述了X射线辐射选矿技术及装备的发展历史，结合应用实例重点介绍了X射线选矿机的结构、工作原理及操控软件，分析了影响选分效率的相关因素。

关键词：X-射线辐射分选；X-射线选矿机；预选
doi：10.3969/j.issn.1000-6532.2013.06.004
中图分类号：TD921⁺.7　**文献标识码**：A　**文章编号**：1000-6532(2013)06-0011-05

拣选是一种较为常见的固体物料分离方法，其应用于矿物分选的历史较为悠久。第二次工业革命以后，特别是在核物理研究发展至相当水平的一段时期，拣选与高能射线（如激光、X射线和γ射线）和电子计算机技术的应用实现了结合，由此产生了射线辐射选矿的新兴学科研究方向，以射线为鉴别工具的拣选也真正从一种传统经验方法上升成为一门技术性科学。

1　射线辐射选矿技术综述

1.1　辐射选矿的主要目的

采矿的剥离作业和表外矿石的堆存是造成金属流失的重要原因，因此表外矿及废石的拣选是提高矿石利用效率的重要途径之一，此外，对已达到工业品位矿石进行预选可以抛除废石，可提高矿石的入选品位。

射线辐射选矿主要用于分选粒状和块状矿石，物料粒度级别通常介于20～150mm之间。该技术应用于矿石预选阶段，其目的在于分选出一部分有用成分品位低于规定标准的废石或围岩。在多金属共生矿床中，大部分原矿是合格的，废石数量很少，以至于预选作业在经济上是不合理的。同时，该种矿石通常是各种自然类型矿石的混合矿，且其中每类矿石都符合一定技术品级，因此在这种情况下，预选阶段应将原矿分类与选出废石恰当地结合起来[1]。以某铅-锌复合矿石为例，对于该种矿石的预选目的包括将矿石分类和选出废石。要选出的第一类产品是铅精矿，其中铅品位应尽可能高，而锌品位应不超过浮选尾矿品位，第二类产品是铅-锌复合矿石，其余则是废石。其产品再作进一步处理，块状铅精矿进行铅优先浮选，复合铅-锌产品则进行铅一锌混合浮选。

1.2　射线辐射选矿的主要方法

射线辐射选矿的方法很多，据前苏联统计，若将所有用于分选矿石的放射性方法都联合起来，这些不同能量和波段的射线相互结合可以推算出100多种手段，原理上可以分离各种有价成分，但实际应用中只有4～6项成功[2]。如利用自然射线的天然放射性分选法、利用γ射线的吸收法和散射法、利用无线电波的无线电谐振法等[3]。有关射线辐射选矿的研究一度在世界上掀起热潮，据文献记载，在二十世纪七十年代全世界每年提出的有关辐射选矿方法和装置的发明申请就有几百项之多[4]。

在诸多射线辐射选矿法当中，较为常用的一种是X射线选矿法，与γ射线法相比。X射线在放射性安全和能在很宽范围内调节初级射线的强度方面都具有明显的优越性[5]。X射线辐射分选法所记录的信号是矿石中被选元素或元素组的含量，因此分选过程不受矿石其他性质的影响。由于大部分元素在有足够能量的辐射激发时均会产生荧光辐射，因而X射线分选法在选矿领域应用前景极其广阔[6]。

X射线辐射方法又可以分为三类[6]：(1)X射线荧光分选法。利用某些矿物受X射线照射时会发射可见天蓝色荧光的特性来实现矿物分离，金刚石便是其中最典型的一例。(2)X射线吸收分选法。利用不同的矿物或岩石对一定波长和能量的X射线吸收系数之差进行分选，例如区分煤和页岩。(3)X射线辐射分选法。利用矿石在受到X射线（一次X射线）照射后，受到激发而产生的特征谱线（二次X射线）来分选矿石的方法。每个元素特征

收稿日期：2013-04-12；**改回日期**：2013-05-27
基金项目：国际科技合作项目"高性能X-射线选矿技术及装备的引进与研发"(2010DFR70060)
作者简介：韩跃新(1961-)，男，东北大学教授，博士生导师，主要从事矿物加工工程的科研及教学工作。

万方数据

谱线的波长和频数与其原子序数 Z 具有相关性，即著名的“莫塞莱定律”，因此采用该方法可检测并分离许多矿物。

1.3　射线辐射选矿的应用条件

辐射选矿需要有三个条件：矿床的矿化不均匀，采出的矿块间品位有较明显差别；矿石有一定块度，必须为粒状或块状，以便于机械装置分离；矿石具有符合辐射分选原理的分离特征，从利用荧光这一分离特性分选含金刚石的矿石至今，已经有二十多种分离特性可供辐射选矿法使用[4,7]。

2　X 射线辐射选矿技术及其配套装备的发展历程

2.1　射线辐射选矿技术发展简史

早在 1939 年，前苏联波戈罗夫斯基就提出了利用金刚石的 X 射线—荧光性来选别金刚石的建议。到上世纪七十年代中期，利用高能射线荧光进行选矿的方法就已经具备了一定的研究基础，当时较为常用的是 β 射线、X 射线和 γ 射线，这些射线选矿法适用于处理含原子序数 Z≥19 元素的矿石。在当时 β 射线辐射法分选钼矿石的原则可能性经研究得到了证实。γ 射线荧光法是利用 γ 放射性同位素源来激发被分析元素固有的 x 射线为基础的，因此可以视为 X 射线辐射法的变种[5]，采用 γ 射线分选贫锡矿石，获得的分选指标为：尾矿产率 22.9% ~ 70.6%，富集比 1.26 ~ 2.82，回收率为 76.7% ~ 80.2%，分选效果十分显著[8]。

几年以后，前苏联矿物原料研究所又将锡矿石作为 X 射线选矿法的第一个研究对象，研究表明，锡矿石与废石具有最大的对比度，分出作为尾矿的矿块产率约占原矿量 60%，分选机选别粒度不小于 25mm 的锡石是适宜的，尾矿中锡的品位为 0.07%，这比用摇床处理粒度为 0.2mm 锡矿石所得尾矿中锡的品位还要低[9]。1982 ~ 1983 年间，前苏联中央锡业科学研究所进一步对某矿床的贫锡矿石进行了 X 射线辐射分选的工业试验。结果表明该技术具有很高的技术效果。-185+45mm 级别精矿锡品位 1.78%，产率 6.39%，回收率 63.20%，富集比达到 9.95[6]。其他试验的研究结论也证明了 X 射线辐射选矿法可大大缩减进入破碎、磨矿和分选作业的矿石量，而且不降低被处理矿石中锡的回收率[10]。

与此同时，前苏联将研究方向拓展到采用 X 射线辐射法来实现钨、钼、金等稀贵金属单元素的有效分选，并取得了成功[5]。二十世纪八十年代中期，采用 X 射线辐射预选多金属矿石得到了进一步深入研究。针对某钨-钼矿样，前苏联研究人员采用实验室组装的 X 射线分选装置成功将含黑钨矿、辉钼矿、黄铜矿和辉铋矿的原矿分离为石英岩型矿石、云英岩型矿石和废石三种产品，其中，首要回收元素钨主要富集于石英岩型矿石中，元素钼、铜、铋在石英岩和云英岩型矿石中各占约一半。针对某多金属硫化矿，成功将原矿分离为块状铅精矿、铅锌混合精矿和废石三种产品。上述分选指标见表 1、2[1]。

表 1　钨-钼矿石 X 射线辐射预选结果(-150+20mm)

Table 1　The X-ray radiation pre-concentration test results of the tungsten molybdenum ore(-150+20mm)

产品名称	产率/%	品位/%					回收率/%			
		Rb	WO_3	M_0	Bi	Cu	WO_3	M_0	Bi	Cu
石英岩	15.68	0.003	1.431	0.560	0.291	0.700	77.47	40.61	42.65	27.78
云英岩	43.18	0.058	0.122	0.273	0.136	0.507	16.73	54.43	54.70	55.29
废石	41.11	0.046	0.041	0.026	0.008	0.163	5.80	4.93	2.65	16.93
原矿	100.00	0.044	0.29	0.216	0.107	0.396	100.00	100.00	100.00	100.00

表 2　铅-锌复合矿石的 X 射线辐射预选结果(-150+20mm)

Table 1　The X-ray radiation pre-concentration test results of the lead zinc ore(-150+20mm)

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Pb	Zn	Pb	Zn
块状铅精矿	41.08	10.83	0.34	76.3	8.23
铅-锌复合矿	49.05	2.78	3.08	23.20	89.97
废石	9.87	0.40	0.29	0.76	1.71
原矿	100.00	5.88	1.68	100.00	100.00

2.2　X 射线辐射分选设备的发展历程

X 射线分选机主要包括 X 射线荧光分选机和 X 射线辐射分选机两大类。利用 X 射线辐照金刚石可致其产生荧光的特性，X 射线-荧光分选机被率先研制出来，上世纪六十年代 C 型 X 射线-荧光分选机就成为苏联金刚石选矿厂的主要设备。英国岗萨斯拣选机有限公司也于 1968 年开始生产该种设备。其工业分选机有 XR-11，XR-21 和 XR-112B 等，这些分选机同样用于金刚石的拣选[6]。

自上世纪 80 年代始，前苏联有色冶金工业部已

万方数据

着手研制和试生产各种 X 射线分选机[9]。在大量前期研究工作的基础上,俄罗斯专家不但研制出新型的放射性选机,而且研发制造了可用于分选有色金属、贵金属和稀有金属的 X 射线辐射分选机。前苏联列宁格勒选矿设计院研制出的白钨矿矿块 X-射线辐射分选机,处理-100+20mm 矿石的能力为 40t/h,能从含 $WO_3$0.04% 的表外矿石中选出品位 0.17% 的工业品位矿石,钨的回收率为 30% ~ 40%[13]。

表 3　X 射线分选含金矿石的指标

Table 3　The X-ray separation indexes of the ore containing gold

矿石种类	矿石粒度/mm	产品名称	产率/%	品位/g·t^{-1}	回收率/%
贫硫化矿	-150+80	精矿	37.4	4.4	63.3
		尾矿	62.6	1.4	36.7
		原矿	100.0	2.6	100.0
	-80+40	精矿	36.8	5.20	60.1
		尾矿	63.2	1.96	39.9
		原矿	100.0	3.13	100.0
贫硫化矿	-150+50	精矿	14.3	19.50	87.9
		尾矿	85.7	0.44	12.1
		原矿	100.0	3.17	100.0
	-50+25	精矿	21.6	3.30	53.2
		尾矿	78.4	0.80	46.8
		原矿	100.0	1.34	100.0
斑岩,闪长岩	-150+80	精矿	26.0	3.2	92.0
		尾矿	74.0	0.1	8.0
		原矿	100.0	0.9	100.0
石英硫化矿	-150+40	精矿	38.8	14.4	91.0
		尾矿	61.7	0.8	8.0
		原矿	100.0	6.0	100.0

1995 年,经 AO"РАДОС"公司(俄罗斯克拉斯诺雅尔斯克公司)的不懈努力,其研制的 X 射线辐射分选机开始市场投放,迄今为止该公司已研制出四种型号的分选机,分别为 СРФ2-300、СРФ3-300、СРФ4-150、СРФ4-50[2],该设备应用广泛,可用于处理分选多种有色、稀贵金属和非金属矿石,处理矿石的粒度为-150+40(30)mm,处理量为 10 ~ 15t/h。该设备在分选 4 个矿区贫金矿及表外金矿时,得到了很好的结果[14],所得数据见表 3。

俄罗斯化工科学研究院(ВНИИХТ)和 Консит-А 公司于上世纪末研制出了 УАС 型放射性分选机,共分三种型号,分别为 УАС-200、УАС-100、УАС-50。从 1999 年开始,经过了 5 年的生产考察,证明该设备性能先进,技术可靠,可称得上是新型的放射性分选机。该设备不但可以实现放射性矿石的高效分选,在主机不变、只增加照射源、更换探测器及相应调节控制仪表的前提下,可以实现有色金属和稀有金属矿石的辐射分选。

3　X 射线辐射分选机的应用

3.1　分选机的结构及其选分过程

X 射线辐射分选机本质可以看作是给料系统、X 射线荧光分析系统、计算机判断决策系统、动作执行装置的集合体,其中最关键的部件是 X 射线荧光分析系统,该系统本质上可以理解为一台 X 射线辐射荧光分析仪,一种利用 X 射线辐射产生的特征谱线来进行元素定性定量分析的仪器,1966 年劳伦斯辐射实验室的 Bowman 等人研制出世界上第一台高分辨率能量色散 X 射线荧光分析仪,较世界上第一台波长色散 X 射线荧光分析仪要晚十几年[15]。

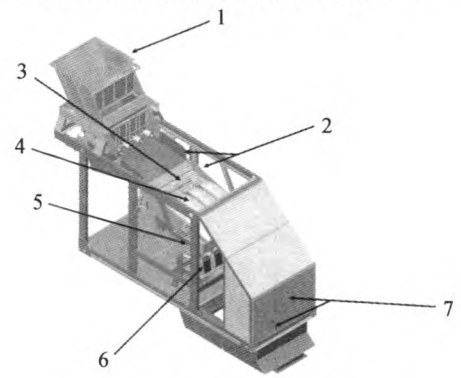

图 1　X-射线辐射分选机结构

Fig. 1　The structure of the X-ray radiation separator

图 2　X-射线辐射分选机工业现场

Fig. 2　The X-ray radiation separator on site

本文以下将以俄罗斯 RODOS 公司的 CP 系列分选机(分选机结构及工业现场应用见图 1、2)为例,介绍 X 射线辐射分选机的拣选过程:经过分级的块状物料经皮带运输机输送至料仓 1,在振动电

万方数据

机组 2 的作用下，矿石经给料通道 4 进入分选区域，途经筛分装置 3，-20mm 物料被筛除，筛上物料在分选区域内做抛物线运动，落经 X 射线发射及接收装置 5 前方的区域，表征矿石内元素含量的特征信息被采集，并由装置 5 内的工业计算机分析，根据操作员预先设定的分选阈值该矿块最终被计算机判定为“贫块”或者“富块”，计算机继而向弹出装置 6 发出动作指令，矿块被弹板击中改变下落轨迹进入精矿仓或尾矿仓 7，分选过程结束。

3.2 X 射线辐射分选机软件

X 射线分选软件为分选过程提供了方便、友好的人机界面，操作人员通过分选软件可以达到获得矿石特征谱线、设计分离阈值及调整分选过程机器参数等应用目的。软件操控大体分为：开机、获取空气光谱、获取基础光谱、设置分选参数、开始分选等几个步骤。上述步骤中最关键的是设置分选阈值 H，阈值的选取需要对待分选物料进行随机取样，拣取 50 ~ 100 块样品，逐一测量其特征 H 值，并绘制所有随机样品的特征 H 值分布曲线，该曲线通常呈正态分布，用该组随机样品的 H 值分布近似推断所有待分选物料的 H 值分布，最终选取一合理特征 H 值作为分选阈值。

3.3 影响分选效率的有关因素分析

(1)矿石分选阈值设定问题。分选阈值是分选机是否对待分选矿块实施动作的唯一标准，阈值的选定与分选作业的产率密切相关。如果分选阈值选取过高，则导致精矿产率过低，甚至产生分选机所有矿石都不分选的结果；反之，如果分选阈值选取过低，则会使得精矿产率过高，选出的矿石达不到产品的质量要求。因此，分选前对待分选物料的特征 H 值分布情况进行预评估是非常必要的。

(2)矿石分级问题。分选机的应用经验表明，分选前对物料进行合理分级可以大幅提高矿石的选分效率。不同型号的分选机具有不同的处理物料粒度上限，同一台分选机在其分选粒度上限范围内选别不同粒级的矿石所获得结果也是不相同的。以分选粒度上限为 200mm 的设备为例，+20-80mm 粒级、+80-140mm 粒级和+140-200mm 粒级物料的分选效果差别较为明显。

(3)给矿速率问题。给矿速率是分选机操作软件界面的可调选项之一，其数值的大小决定了单位时间内通过分选区域的矿块数量，并进而影响设备对矿石的分选效率。如果给矿速率过慢，则显然降低分选机的单位时间处理能力；若给矿速率过快，则单位时间通过分选区域的矿块数量会超过弹板的动作频率上限，使得一定数量的矿块虽经甄别但无法对其实施击打动作，最终导致分选机对该部分矿块无法进行分选，则分选效率必然大幅降低。

(4)振动电机振幅问题。振动电机的振幅决定了待分选矿块滑出给料通道后继续向前“跳跃”的距离，也可以视为矿块作抛物线运动水平方向初始速度。如果振动幅度过小，则矿块直接作近似自由落体运动，此时无论其是否符合分选标准，矿块都会撞击在弹板上改变运动路径，使分选无效；如果电机振幅过大，矿块在跳离给矿溜槽后，向前行进的距离会超出 X 射线辐照范围，进而致使分选实效。在分选机工作过程中振动电机的振幅是不可调节的，只能通过手工向电机添加或拆卸配重铁块来实现。

3.4 分选实例

表 4 是采用 RODOS 分选机对某含铜矿石进行分选试验所获得的选别结果。由上表数据分析可知，在 0.5，0.35，0.2，0.1 四个分选阈值条件下，原矿被分选为五种级别的产品，在分选阈值从 0.5 降低到 0.1 的过程中，产品正累计产率与回收率不断增加，而铜的品位则不断下降。可见在分选前，通过试验确定产品适宜的分选阈值是至关重要的，该因素分选出合格产品的首要条件。

表 4 X-射线辐射预选含铜矿石试验结果

Table 4 The X-ray radiation pre-concentration test results of the ore containing copper

阈值级别/mm	产率/%	正累计产率/%	Cu 品位/%	正累计品位/%	Cu 回收率/%	正累计回收率/%
+0.5	11.99	11.99	4.25	4.25	50.78	50.78
-0.5+0.35	10.85	22.84	1.30	2.85	14.05	64.83
-0.35+0.2	19.84	42.68	0.66	1.83	13.05	77.88
-0.2+0.1	27.75	70.43	0.48	1.30	13.27	91.16
-0.1	29.57	100.00	0.30	1.00	8.84	100.00
给料	100.00		1.00		100.00	

万方数据

4 结　语

辐射分选技术发展至今已经经历了半个多世纪的时间,自利用矿物的天然放射性分选含铀矿石开始,到利用波谱范围的各种射线进行分选为止,其分选的矿石种类和应用的工业领域愈来愈广,囊括了有色金属、稀贵金属、黑色金属、部分非金属在内的大部分工业原材料。

在国家高度重视矿产资源高效开发与利用以及大力倡导冶金矿山节能、减排、降耗的今天,X射线辐射分选技术作为一种高效低耗、环境友好的选矿技术手段,正逐步受到国内冶金矿山与能源化工企业及相关科研院所的关注与青睐,目前国外关于X射线辐射分选技术与配套设备的应用已相当成熟,相信通过国内矿业工作者的不断努力,X射线辐射分选技术与设备应用的发展前景必将十分广阔。

参考文献:

[1]张登福译.X射线辐射预选法应用的可能性[J].湿法冶金,1987(03):12-14.

[2]费德罗夫,张岩.X-射线分选技术及分选机[J].矿山机械,2008(23):110-113.

[3]汪淑慧.辐射选矿法分选大块有色、黑色及放射性金属矿石[J].国外金属矿选矿,1986(09):36-40.

[4]张文彬.国外辐射选矿[J].国外金属矿选矿,1979(11):1-4.

[5]刘绍译.X射线萤光法在大块矿石预选中的应用[J].矿产保护与利用,1988(04):37-39.

[6]周克华.X射线选矿法研究及应用进展[J].江西冶金,1986(01):19-23.

[7]汪淑慧.用辐射选矿法分选大块有色、黑色和放射性金属矿石[J].金属矿山,1987(03):52-55.

[8]B.A,王光闾.γ-萤光选矿法-一种预先处理有色金属矿石的有前途方法[J].国外金属矿选矿,1979(06):30-32.

[9]莫克罗乌索夫,杨军.锡石—应用X射线选矿法的第一个对象[J].矿产保护与利用,1985(04):55-60.

[10]张登福.用X射线辐射法分选贫锡矿石[J].湿法冶金,1988(03):26-29.

[11]汪淑慧.分选铀矿石及有色金属和稀有金属矿石的新型拣选机[J].国外金属矿选矿,2008(06):9-12.

[12]汪淑慧.辐射分选在现代矿山生产中的应用[J].国外金属矿选矿,2000(12):2-6.

[13]兰兴华.苏联选矿设计院在选矿方面的研究工作[J].中国钨业,1989(04):21-24.

[14]汪淑慧.辐射分选的新进展[J].铀矿冶,1998(05):93-101.

[15]郭龙滨.便携式X射线荧光仪在铁矿石选矿中的应用研究[D].成都:成都理工大学,2011.14-28.

Development and Application of X-ray Radiation Separation Technology and Equipment

HAN Yue-Xin, WANG Ze-hong, CHEN Xiao-long

(College of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China)

Abstract: The definition and characteristics of the X-ray beneficiation technology were stated. Also, the history of X-ray radiation beneficiation technology and its equipment was presented. Combined with the applied example, the structure, working mechanism as well as the manipulating software were introduced. Finally, the relevant factors which might affect the separation efficiency were analyzed.

Key words: X-ray radiation separation; X-ray separation concentrator; Pre-concentration

万方数据