

## 金矿石在线拣选方法研究

王团锋, 杨建玺, 徐文静

(河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 针对矿山极薄矿脉开采后, 矿石与废石全部进入后期处理时会造成能源极大浪费的问题。本文分别采用视觉检测法、激光诱导击穿光谱法、X射线荧光法对金矿石和废石进行分析, 通过颜色差别、特征元素含量差异等拣选特征, 区分金矿石和废石, 并拣选出混杂在金矿石中的废石。通过三种拣选方法的试验与分析, 确定了X射线荧光法在线拣选的可行性, 使矿石预选阶段即可丢弃大量的废石, 提高了入选原矿的品位, 具有很大的工程应用价值。

**关键词:** 视觉检测法; 激光诱导击穿光谱法; X射线荧光法; 金矿石; 在线拣选

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.03.009

**中图分类号:** TD921+.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6532 (2018) 03-0047-05

我国金矿资源丰富, 但是, 黄金矿产的分布比较分散, 且矿脉比较薄, 极薄型金矿占总金矿的58%<sup>[1]</sup>, 开采难度大, 贫化率高。

本文以河南某金矿矿石为研究对象, 对金矿石在线拣选方法进行探究, 分别采用视觉检测法、激光诱导击穿光谱法和X射线荧光法对金矿石和废石进行分析, 以探索快速拣选金矿石的方法。

### 1 视觉检测法

视觉检测即用CCD代替人眼做出测量和判断, 由于其可快速获取大量信息、易于自动处理和系统集成等优点, 广泛应用于自动化生产过程中。

在选矿领域, 机器视觉技术目前主要应用于矿石粒度在线检测、矿石在线拣选、矿物浮选泡沫图像分析等方面。张继民<sup>[2]</sup>等针对我国存在大量低品位矿石难以经济地开发利用的问题, 利用图像识别技术进行拣选抛废处理, 通过分选试验及最终的化验分析, 获得了较为理想的钾长石拣选效果。丁涛<sup>[3]</sup>等研制了一种基于视觉识别技术的矿石在线分选机, 能够分选直径1~200 mm的矿石, 具有速度快、处

理量大的特点。

#### 1.1 图像获取

对河南某金矿中混杂的废石按照颜色特征归类, 主要有黄色、暗红色、绿色三种, 金矿石颜色近似于绿色。在获取图像前金矿石和废石需经分级、冲洗、烘干等工序, 以排除外表其他等因素对检测的影响。图像采集采用高速线阵彩色CCD, 结合工业相机的帧率设定传送带运动的速度, 确定传感器的位置。金矿石和废石在传送带上匀速运动, 到达相机拍摄焦点时传感器触发, CCD拍照后将图像传送到计算机进行处理, 实验时采用了蓝色的环形光源增强图像的识别效果。

#### 1.2 图像处理与分析

为了改善金矿石和废石图像的视觉效果, 提高图像的清晰度, 对采集到的图像进行了增强处理、平滑处理和锐化处理。采用RGB彩色向量进行彩色区域分割, 确定金矿石和废石中黄色、暗红色、绿色等彩色样本。

废石颜色有黄色、暗红色和绿色三种, 采用对颜色进行多次提取的方法进行判断。分别提取

**收稿日期:** 2016-12-05

**基金项目:** 河南省科技攻关计划项目(162102210048)和企业合作项目资助

**作者简介:** 王团锋(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为自动化检测技术。

**通讯作者:** 杨建玺(1958-), 男, 博士, 博士生导师, Email: yjx221@163.com。

图像中的黄色区域、暗红色区域、绿色区域作为训练模板，与矿石进行匹配，发现金矿石与废石中黄色像素点和暗红色像素点差别比较明显，容易区分。而金矿石与废石中绿色像素点差别不大，无法区分。据河南某金矿统计数据，该金矿中绿色原矿石占总量大于 50%，如果以黄色像素、暗红色像素、绿色像素点的个数作为拣选阈值，将会有大量的绿色矿石难以准确分拣。

## 2 X 射线荧光光谱法

X 射线荧光分析是由 X 射线管发出的一次 X 射线激发样品，使样品所含元素辐射特征荧光 X 射线，即二次 X 射线，根据荧光 X 射线的波长（能量）和强度对被测样品中的元素进行定性和定量分析的一种技术<sup>[4]</sup>。因其具有无需制样、分析速度快、分析元素范围广等优点，广泛应用于矿石拣选领域。汪淑慧等主要进行了 X 射线辐射分选法以及在金刚石拣选上的应用研究<sup>[5-7]</sup>。韩跃新<sup>[8]</sup>等研究了 X 射线选矿机的结构工作原理及操控软件，分析了影响分选效率的相关因素。赵能平等<sup>[9-10]</sup>研究了 X 射线分选技术在钨矿、钼矿拣选上的应用。钨矿、钼矿等矿种则是由于矿石中钨和钼的含量非常高，直接利用目标元素的含量差异进行拣选。而金矿石由于金的粒度小且含量很低，无法实现直接检测。金矿石伴生元素较多，利用与废石伴生元素含量的差异进行间接拣选，是本文探索的重点。

### 2.1 特征元素的确定

选取河南某金矿中金矿石和废石若干，采用 X 射线分析仪进行检测。由于矿石形状是不规则的，且每个面上元素含量是不均匀的，为了确保检测结果的准确性，对多个面进行测量，每个面的测量时间为 30 s，每块矿石根据粒度大小随机测得 5 组数据，并求其平均值。随机抽取 5 块金矿石和 5 块废石，其中关键元素含量平均值见表 1：

表 1 金矿石和废石中关键元素含量平均值 / %  
Table 1 Mean value of key elements content in gold ore and waste rock

编号	S	Si	Al	Ca	K	Fe
1	0.69006	19.9472	8.67318	11.3234	3.65340	9.59190
2	0.45128	23.3006	7.99073	6.20471	1.33863	12.7954
3	0.80184	22.3185	10.9224	4.38882	5.81584	7.14698
4	0.49743	23.2582	5.00368	12.3149	2.50776	10.1013
5	0.85916	18.4881	7.98648	16.9148	1.95378	8.77026
6	5.07215	26.9175	7.11102	0.49502	6.42365	5.72947
7	5.34454	26.2905	8.49418	0.60234	5.19446	5.53842
8	6.01082	27.6294	8.53994	0.98096	3.58186	4.76238
9	10.0076	24.1283	6.04284	0.86878	4.44298	7.72012
10	11.6750	17.8490	6.86648	0.48434	2.86424	5.82838

表 1 中序号 1-5 为废石，6-10 为金矿石。对比 10 组数据发现，金矿石和废石中 S 元素、Ca 元素含量有明显的差异，金矿石中 S 元素含量较高、Ca 元素含量较低，废石中 S 元素含量较低、Ca 元素含量较高，这是金矿本身具有一定的亲硫特性所造成的。在该化学性质作用下，虽然很难形成硫化物，然而亲和性依然存在，易附着在硫化物如依附在黄铁矿表面生长和发育。此外，金矿在成矿过程中会发生不同的围岩蚀变，主要有去碳酸盐化、绢云母化、硅化等，会造成了金矿石中 Ca 元素流失，因此会出现金矿石中 S 元素含量较高、Ca 元素含量较低的现象。实验共测得 181 组数据，金矿石中 S 元素的平均质量分数是废石的 6.5 倍，废石中 Ca 元素的平均质量分数是金矿石的 3.4 倍，金矿石和废石中 S 元素和 Ca 的含量差异都比较明显。因此以 S 元素和 Ca 元素的含量为特征元素可区分金矿石与废石。

### 2.2 特征元素的 X 射线荧光分析

为了满足工业化需求，X 射线荧光分析仪在设计上要考虑仪器轻便、适应恶劣环境、分析时间短、分析精度高等特点。X 射线管辐射窗采用端窗型，能够发射较大功率的 X 射线，探测器采用 SDD 电制冷探测器，分辨率达到 125 eV，检测速度快，计数效率高。采用多参数性拟和方法，

使元素间的吸收、增强效应得到明显的抑制, 提高分析准确度。由于已经确定区分金矿石与废石的特征元素为 S 元素和 Ca 元素, X 射线荧光分析仪只分析特征元素, 以加快分析速度。

金矿石和废石在生产线上匀速运动, 对一个样品多点测量并计算平均值, 降低矿石和废石表面元素含量不均匀的影响, 提高分析的准确度。矿石与探测器之间有一定的距离, 由于矿石大小不同、表面不平整等因素, 造成探头与矿石之间的距离发生变化, X 射线会随着距离的变化而衰减, 影响最后的分析结果。推导出 X 射线荧光的强度与距离的关系, 可准确计算出每个位置的强度值, 从而得到在同一标准下特征元素的含量。X 射线的衰减规律为:

$$I=I_0e^{-\mu x} \quad (1)$$

式中:  $I_0$  为 X 射线分析样品前的强度;  $I$  为 X 射线分析样品后的强度;  $x$  为样品的厚度;  $\mu$  为 X 射线在样品中的衰减系数。

以 Ca 元素为例, 分别测量探测器与矿石距离为 40 mm、49 mm、60 mm、71 mm、81 mm、99 mm、110 mm 等位置处的 Ca 元素的强度值, 以 40 mm 处的强度值为标准, 通过曲线拟合出强度差与距离差之间的函数关系:

$$y=3.597e^{1.27x} \quad (2)$$

式中:  $x$  为距离差;  $y$  为强度差。

则实际强度计算公式为:

$$I=I_n/3.597e^{-1.27(Hn/40)} \quad (3)$$

式中:  $I_n$  为不同距离的强度值;  $Hn$  为不同的距离。

将实际强度计算公式作为修正公式编入处理软件中, 修正因测量距离的变化引起的测量误差。

### 2.3 分析与讨论

X 射线荧光法的优点就是样品分析的面积较大, 分析结果具有代表性, 不容易受到灰尘和距离的影响, 定标和定量分析更加容易和方便。只对特征元素进行分析, 分析时间短, 并推导出强度与距离的关系式, 可以得到在同一标准下特征

元素的含量, 使得所测结果更精准。探测器与矿石之间的距离为 40 mm, 分析时间为 1s/块, 拣选效率高, 特征元素含量差异明显, 拣选准确率高。因此, X 射线荧光法是比较合适的金矿石在线拣选方法。

## 3 激光诱导击穿光谱法

激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术作为一种新兴的物质成分检测与分析技术, 有快速、简便、能实时在线分析, 对样品的处理相对简单且对样品微损等特点, 已应用于多个领域<sup>[11]</sup>。在煤质分析方面, Redoglio<sup>[12]</sup> 等通过一个大景深 LIBS 测量系统对移动装置上的煤样品进行测量, 得到碳和氢的浓度以及一些无机成分含量 (Al, Fe, Ca, Si), 可以较好的评估煤的质量。在矿石分析方面, Caft<sup>[13]</sup> 等开发了工业 LIBS 设备, 可以成功测量铁、铝、骨磷石灰 (BPL) 的金属杂质率 (MER) 和煤的灰分含量, 证明 LIBS 具有现场条件下原矿石在线分析的能力。

### 3.1 特征元素的光谱分析

利用 LIBS 分析仪对金矿石和废石样品进行测量, 激光激发脉冲能量为 32 mJ, 重复率为 5 Hz, 光谱仪采样延时 3  $\mu$ s, 扫描时间为 100 ms。试验样品通过 LIBS 探头, 探头与样品距离为 100 mm。一般来说, 每个波段范围内都会有比较多的金属和非金属元素的特征谱线, 为了降低其他元素对特征元素的影响, 取 500 ~ 800 nm 波段范围内的特征元素光谱图。

在激光脉冲激发出等离子体的过程中, 为了能够容易区分金矿石和废石, 选取其中强度适中、峰值突出且差异明显的谱线进行分析。试验金矿石和废石中 S 元素和 Ca 元素的光谱图, 见图 1、2。

图中样品 1、2 是金矿石, 样品 3、4 是废石。可以看出, 金矿石样品中的 S 元素强度相对较高, 废石样品中的 Ca 元素强度相对较高。由图 1 可知, 金矿石和废石中 S 元素的谱线强度差距非常明显, 在 545.54 nm 处, 金矿石样品 1、2 中 S 元素的强度分别为 3503 和 5045, 废石样品 3、4 中 S 元素的强

度为 865 和 1343。而图 2 中，Ca 元素在 643 nm 处，金矿石样品 2 的 Ca 元素强度大于废石样品 3 却小于废石样品 4 的强度，这就造成采用 Ca 元素的光谱强度来区分金矿石与废石的难度。

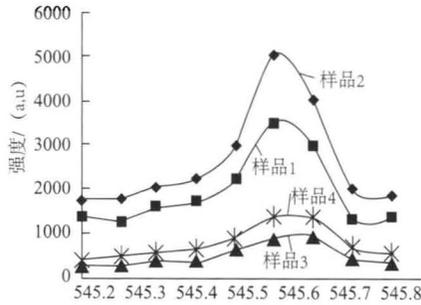


图 1 样品 1-4 中 S 元素的光谱  
Fig. 1 S elements spectra of samples 1-4

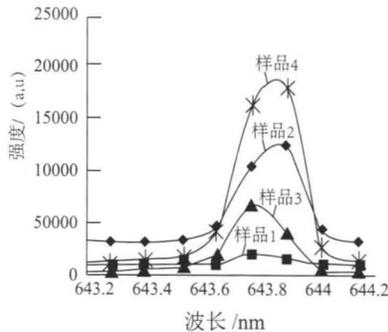


图 2 样品 1-4 中 Ca 元素的光谱  
Fig. 2 Ca elements spectra of samples 1-4

### 3.2 拣选阈值的确定

目前，基于 LIBS 测量的方法有外标法、内标法以及自由定标法等，而测量的样品一般为粉末状或者饼状，还无法实现直接对原矿石进行定标、量化计算。

根据以上分析，为了能够快速区分金矿石和废石，可采用峰值法计算相对强度，依据相对强度进行拣选。在金矿石和废石的光谱图分析中，发现 H 元素含量较多、特征明显且易于测定，因此，将 H 元素作为内标定元素。分别选取内标定 H 元素 656.25 nm 和 588.94 nm 处谱线强度，样品 1-4 中 Ca、S 元素与 H 元素的相对强度分别为：

表 2 样品 1-4 中 Ca 元素相对强度值  
Table 2 Relative strength value of Ca elements in sample 1-4

波长	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
643.89	1571	12399	4021	18124
656.25	8185	19430	616	12463
相对强度	0.19	0.64	6.5	1.45

表 3 样品 1-4 中 S 元素相对强度值

Table 3 Relative strength value of S elements in sample 1-4

波长	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
545.54	3503	5045	865	1343
588.94	35000	25000	15000	35000
相对强度	0.1001	0.2018	0.0576	0.0383

对比之后发现，废石样品中 Ca 元素的相对强度值较高，金矿石样品中 S 元素的相对强度值较高，它们之间的差异都是数量级的，因而不需要精确计算 Ca 元素和 S 元素的具体含量，直接使用相对强度值就可以简单、快速进行区分。

### 3.3 分析与讨论

采用 LIBS 法进行金矿石在线拣选，其优点是可实现快速非接触测量，分析时间为 ms 级别，拣选效率高。但是 LIBS 法是对金矿石或者废石表面的点测量，测量范围小，矿石表面元素含量不均匀对测量结果影响较大。另外，激光脉冲的能量在空气中会衰减且衰减规律难以确定，使得分析结果误差较大。

## 4 结论

(1) 采用视觉检测法，黄色废石和暗红色废石与金矿石容易区分，绿色废石与金矿石不容易区分，而该矿山绿色废石占废石总量较大，因此，采用视觉检测法进行拣选，会造成误拣率较高或者拣出率较低。

(2) 采用 X 射线荧光法，金矿石和废石中特征元素 S 和 Ca 含量差异明显，容易区分，探测器与矿石距离以 40 mm 为佳，拣出正确率和拣选效率高，可很好地应用于金矿石的在线拣选。

(3) 采用 LIBS 法，也可以实现金矿石在线快速拣选，但分析结果容易受到矿石表面元素含量不均匀、矿石表面不平整等因素的影响，误拣率较高。

### 参考文献：

[1] 孙英翔, 刑超, 时利. 金矿极薄矿脉开采方法与要点 [J]. 城市建设理论研究; 电子版, 2013(22):43-43.  
 [2] 张继民, 马丰原, 王勤民. 钾长石图像分选方案与算法研究 [J]. 新型工业化, 2014 (7):70-74.  
 [3] 丁涛, 胥和平, 王峻松等. 基于视觉识别技术的矿石在线分选机的研究 [J]. 装备制造技术, 2014 (7):106-108.  
 [4] Mitchell A, Barraud B, Segalini G, et al. Gas While Drilling (GWD): A real time geologic and reservoir interpretation tool[J]. 1999.  
 [5] 汪淑慧. 金刚石的 X 光拣选 [J]. 国外金属矿选矿, 2006 (4):20-22.

[6] 汪淑慧. 分选矿石的 X 射线辐射分选法 [J]. 国外金属矿选矿, 2007 (8):4-8.  
[7] 汪淑慧. 矿石拣选的新进展 [J]. 铀矿冶, 2007 (1):24-28.  
[8] 韩跃新, 王泽红, 陈晓龙. X 射线辐射分选技术及设备的发展与应用 [J]. 矿产综合利用, 2013(6):11-15.  
[9] 赵能平, 韩跃新, 牟红歌, 等. LPPC 分选机在有色金属矿中的预选试验研究 [J]. 有色金属: 选矿部分, 2013, S1:222-223+226.  
[10] 王修缘. X 射线分选机拣选钼矿石试验研究 [J]. 才智, 2011(35):53-55.

[11] 汪家升, 陆运章, 李威霖, 等. 激光诱导击穿光谱技术分析岩石和煤样品 [J]. 冶金分析, 2009 (1):30-34.  
[12] Redoglio D, Golinelli E, Musazzi S, et al. A large depth of field LIBS measuring system for elemental analysis of moving samples of raw coal [J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 2015, 116:46-50.  
[13] Gaft M, Sapir-Sofer I, Modiano H, et al. Laser induced breakdown spectroscopy for bulk minerals online analyses [J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 2007, 62(12):1496-1503.

## Research on Online Sorting Method for the Gold Ore

Wang Tuanfeng, Yang Jianxi, Xu Wenjing

(School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan, China)

**Abstract:** DAiming at the extra narrow veins of mine, the mining of ore and waste rock all into the post-processing, which will cause a great waste of energy, in this paper, visual inspection, laser induced breakdown spectroscopy, X-ray fluorescence method were adopted to analyze the gold ore and waste rock, distinguish the gold ore and waste rock by the characteristics of color difference, characteristic element content difference and so on, and pick out the waste rock that mixed in the gold ore. Through the test analysis of the three sorting methods, the feasibility of X-ray fluorescence online sorting was determined, which made a large number of waste rock can be discarded in the ore pre-selection phase. It not only improves the grade of raw ore, but also has great engineering application value.

**Keywords:** Visual inspection; Laser induced breakdown spectroscopy; X-ray fluorescence; Gold ore; Online sorting

////////////////////////////////////  
(上接 129 页)

## Study on the Properties of Polyvinyl Alcohol Modified Geopolymer Composites

Kan Xinyu<sup>1</sup>, Xue Ping<sup>1</sup>, Jia Mingyin<sup>1</sup>, Zhang Ya<sup>2</sup>

( 1. Research Division of New Materials and Process Machinery of Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China; 2. Zhongao Global Building Technology Co., Ltd., Tianjin, China)

**Abstract:** Because of the poor toughness of the slag/fly ash based geopolymers, the polyvinyl alcohol (PVA) fiber and the water-soluble powder are used to modify the geopolymers to improve the toughness. The research shows that the compressive strength and flexural strength increased by 9.6% and 25% respectively. When the content of PVA is 0.5%, which could enhance the toughness. However, the increase of PVA powder content could lead to the decrease of the mechanical properties. With the increase of the content of PVA fiber, the compressive strength decreases continuously, the flexural strength increases and the compressive to flexural ratio decreases. When the content of PVA fiber is 3%, the flexural strength increased by 35%, the compressive to flexural ratio decreased by 35%. The effects of PVA on the microstructure of geopolymers are investigated by XRD and SEM-EDS and the results show that PVA fiber and PVA water-soluble powder have different mechanism.

**Keywords:** Geopolymers; Polyvinyl alcohol; Compressive to flexural ratio; Toughening