

战略性非金属矿产

X射线拣选—反浮选工艺在宜昌中磷层磷矿选矿中的应用

李宇新¹, 田孟杰^{2,3}, 瞿定军¹, 胡学超¹, 孙伟^{2,3}, 高志勇^{2,3}

1. 湖北宜化矿业有限责任公司, 湖北 宜昌 443100;
2. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083;
3. 中南大学 战略含钙矿物资源清洁高效利用湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083

中图分类号: TD971⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)06-0052-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.06.008

摘要 宜昌中磷层磷矿平均 P_2O_5 品位仅为 22% 左右, 难以直接工业利用。中磷层磷矿有价磷矿物为磷灰石和胶磷矿, 其嵌布粒度较细、在 0.03 ~ 0.5 mm 之间, 磷灰石和胶磷矿多呈富磷矿物集合体形式存在, 富磷矿物集合体嵌布粒度较粗, 能够作为选别对象。中磷层磷矿经过筛分处理, -10 mm 粒级磷精矿 P_2O_5 品位约为 26%, 可直接给入浮选作业处理。而 -30 + 10 mm 粒级产品采用 X 射线拣选技术, 可获得 P_2O_5 品位 26% 以上、作业回收率 80% ~ 86% 的磷精矿。筛分作业 -10 mm 粒级磷精矿与 X 射线拣选得到的磷精矿合并送往反浮选作业, 最终可获得 P_2O_5 品位 32% 以上的优质磷精矿。试验结果表明, X 射线拣选—浮选联合工艺表现出优良的分选效果, 在处理其它类似低品位、嵌布粒度细的磷矿资源时, 该联合工艺有巨大的推广潜力。

关键词 宜昌中磷层磷矿; 筛分; 粗粒 X 射线拣选; 预选; 反浮选

引言

宜昌磷矿含磷岩系产生于震旦系上统陡山沱组, 属海相化学沉积型磷块岩矿床^[1]。目前开采的主要工业矿层为下磷层和中磷层^[1]。宜昌矿区西北部以中磷层为主, 如杉树垭矿和江家墩矿等。中磷层磷矿共分三层, 即 Ph_2^1 、 Ph_2^2 、 Ph_2^3 ^[2]。其中, Ph_2^1 和 Ph_2^3 以白云岩条带状磷块岩为主, 矿层平均厚度较大^[3]; 矿层与围岩分界不明显, 磷块岩条带占比为 40% ~ 70%, 矿层 P_2O_5 含量较低, 顶板和底板均为白云岩, 但呈不紧密结合, 在较粗粒度下可大部分解离^[1]。含磷层 Ph_2^2 为致密条带状磷块岩, 磷块岩占比为 75% ~ 90%, P_2O_5 含量高达 28% 以上。中磷层磷矿全层综合 P_2O_5 平均品位 22% 左右, 难以直接进行工业利用。

宜昌中磷层有价矿物为碳氟磷灰石和氟磷灰石等, 脉石矿物为白云石、石英、方解石等, 主要的有价矿

物与脉石矿物之间具有一定的密度差和表面疏水性差异, 回收该类矿石中的含磷矿物时, 目前多采用重介质选矿—反浮选工艺流程^[4]。宜昌中磷层原矿 P_2O_5 含量约为 22%, 经过粗、中和细三段一闭路破碎, 将矿石破碎到 20 mm 以下。经筛分分级 -10 mm 粒级 P_2O_5 含量约 26%, +10 - 20 mm 粒级产品经过重介质选矿, 获得磷精矿 P_2O_5 含量 26%, 综合回收率 78%。重介质分选磷精矿与 -10 mm 粒级产品合并进入反浮选, 反浮选作业磷精矿 P_2O_5 含量 30% 以上。

宜昌中磷层磷矿的有价含磷矿物多以矿物集合体的形式存在, 富磷矿物集合体密度 2.93 g/cm^3 , 脉石密度 2.85 g/cm^3 , 两者密度仅相差 0.08 g/cm^3 , 对重介质选矿的控制精度要求高。重介质选矿磷精矿中脉石夹杂严重, 选矿效果不理想。要想提高重介质分选精矿品位和降低脉石含量, 则会造成有价矿物跑尾, 回收率明显降低。因此, 亟需寻找新的处理工艺替代重介质

收稿日期: 2020-09-25

基金项目: 武汉科技大学冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室开放课题基金资助项目; 湖北宜化矿业有限责任公司与中南大学校企合作项目

通信作者: 田孟杰, 山东威海人, 副教授, 主要研究方向为锡石、锂辉石、轻稀土矿物浮选。

分选。

X 射线拣选技术,利用不同矿物在 X 射线透射后的光谱特异性进行识别^[5-6],分选精度更高,可克服重介质选矿过程中精矿脉石夹杂问题。而且,X 射线拣选设备操作简单,容易实现全自动化控制。再者,在矿物集合体充分解离情况下,X 射线拣选可以适当放宽入选粒级上限,实现大颗粒抛尾,有效代替人工手选,适用于预先抛尾作业。

本文针对宜昌中磷层磷矿,首先采用 X 射线衍射(XRD)分析和扫描电镜(SEM)研究其工艺矿物学信息,探索 X 射线拣选法处理该矿石的可行性,最终确定 X 射线智能分选一反浮选联合工艺流程。

1 矿石性质

宜昌中磷层矿石新鲜面在肉眼下显灰色,结构较为致密,总体具块状构造,少量为斑杂状构造。经镜下鉴定、X 射线衍射(XRD)分析和扫描电镜(SEM)分析综合研究表明,矿石中矿物组成较为简单,其中磷矿物主要是磷灰石,次为胶磷矿。脉石矿物以白云石为主,其次是石英,此外有少量方解石、绿泥石和云母等。金属矿物含量很少,为黄铁矿及褐铁矿等。中磷层矿石 XRD 分析结果见图 1。

矿石中磷矿物以磷灰石为主,具有明显的晶体特

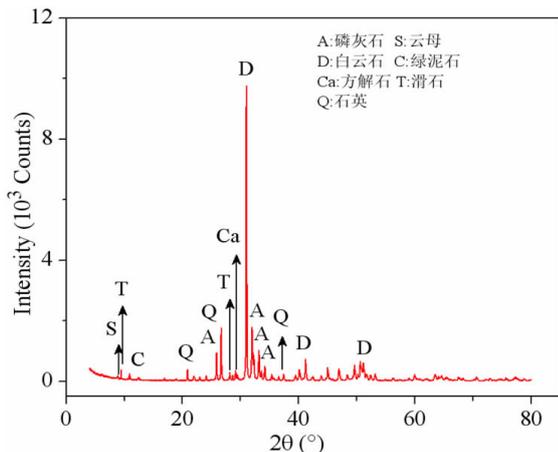


图 1 中磷层磷矿 XRD 物相分析图谱
Fig. 1 XRD phase analysis pattern of phosphorite ore of the middle phosphate layer

征,其次为成分相近的胶磷矿。磷灰石形态变化较大,多呈自形和半自形柱粒状,部分为不规则粒状和碎屑状,嵌布粒度一般在 0.05 ~ 0.5 mm 之间。磷灰石不均匀嵌布在以白云石为主的脉石中(图 2),磷灰石与白云石等脉石矿物紧密嵌布,矿石中磷灰石富集部分常呈团块状集合体。集合体中磷灰石含量一般在 70% 以上,粗粒集合体粒度可达 2 mm 以上,集合体部分与胶磷矿共生。

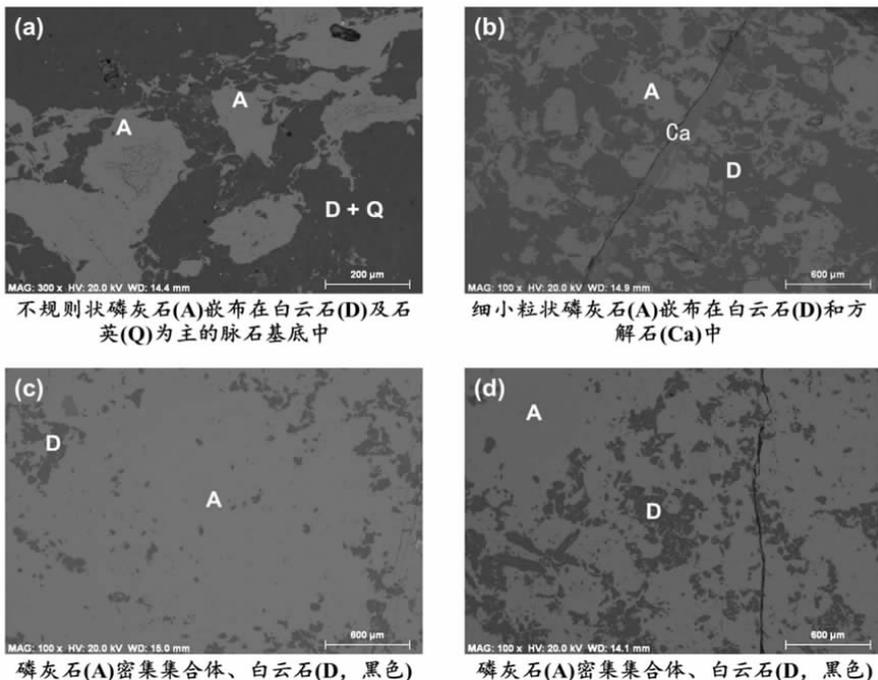


图 2 中磷层矿石中磷灰石嵌布状态 SEM 背散射电子像
Fig. 2 SEM backscattered electron images of apatite dissemination state in the middle phosphate layer

胶磷矿常呈球粒状或椭圆粒状、浑圆团粒状集合

体,部分为碎屑状。其中常包裹数量不等的细小石英

等矿物。粒度总体较磷灰石细小,一般在 0.03 ~ 0.3 mm 之间。部分重结晶形成磷灰石,二者交生构成磷矿物混合物(图 3)。

磷矿物包括磷灰石和胶磷矿,不均匀分布在矿石中,在大部分矿块中磷矿物含量在 20% ~ 50% 之间,少量矿块中含量可达 60% 以上,很少量矿块局部可见

磷灰石密集聚集。矿块中磷矿物较密集部分多以磷灰石为主,胶磷矿分布则较稀疏。

主要脉石矿物白云石多集中以基底物形式产出,其次是嵌布在磷灰石颗粒间隙中。石英多以细小颗粒分散嵌布,部分为隐晶质玉髓集合体。方解石多呈细小脉状产出(图 2b)。

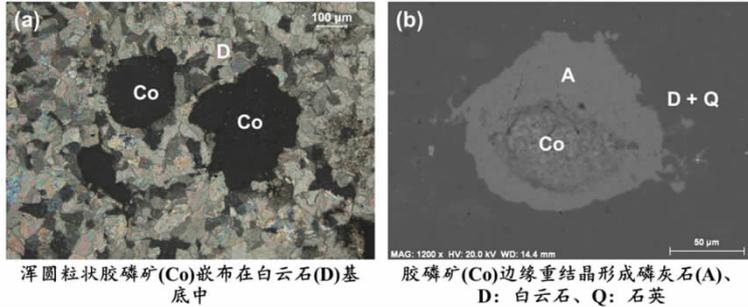


图 3 矿石中胶磷矿嵌布状态偏光显微镜照片(a)和 SEM 背散射电子像(b)

Fig. 3 Polarizing microscope photo and SEM backscattered electron images of collophanite dissemination state in ore

SEM 分析表明,中磷层磷矿物含 P_2O_5 为 33.41%、 MgO 0.58% 和 CaO 37.87%。碳酸盐矿物含 MgO 21.35% 和 CaO 34.31%。硅酸盐类矿物含 SiO_2 99.58%。黏土类矿物含 SiO_2 45.45%、 Al_2O_3 34.65% 和 MgO 0.64%。 MgO 和 SiO_2 是中磷层磷矿石的有害组分,9.67% 的 MgO 赋存在碳酸盐矿物中,19.11% 的 MgO 赋存在磷块岩单体中,只要能抛除大部分的碳酸盐矿物,就能将 MgO 含量降低到 1% 以下。43.48% 的 SiO_2 赋存在磷矿物单体中,35.19% 的 SiO_2 赋存在石英矿物中,14.77% 的 SiO_2 赋存在黏土类矿物中,只要能抛除大部分的石英和黏土类矿物,就能大大降低 SiO_2 含量,满足磷铵原料指标要求。

2 试验方案

本文研究拟采用 X 射线拣选法抛除宜昌中磷层有害矿物组分、以回收富磷矿物集合体,不同品位的原矿经过破碎和筛分作业后,分为 -10 mm、+10 - 30 mm 和 +30 mm 三种粒级产品,-10 mm 粒级产品 P_2O_5 品位为 26% 左右,能够直接进入下一步浮选作业;+10 - 30 mm 产品 P_2O_5 品位约为 20%,需要 X 射线拣选进一步富集;+30 mm 粒级产品返回破碎作业流程。

3 试验研究

3.1 筛分试验

宜昌中磷层富磷矿物集合体硬度小,致密性差,易破碎。因此,能够通过预先筛分或粗级破碎筛分获得一部分磷精矿。如表 1 所示,宜昌中磷层磷矿 P_2O_5 品

位约为 22%,通过筛分处理,-10 mm 粒级产品 P_2O_5 品位约为 26%,回收率约为 30%,能够直接给入下一步浮选作业中。

表 1 中低品位(P_2O_5 22% 左右)原矿筛分结果 / %
Table 1 Size distribution of medium - and low - grade (P_2O_5 22%) raw ore

- 10 mm 粒级			+ 10 mm 粒级		
产率	回收率	品位(P_2O_5)	产率	回收率	品位(P_2O_5)
24.65	29.76	26.89	75.35	70.24	20.43

3.2 中磷层中低品位磷矿 X 射线拣选

3.2.1 磷矿采用 X 射线分选的可行性

宜昌中磷层磷矿之前生产采用重介质分选,但由于富磷矿物集合体与白云石等脉石矿物密度接近,重介质分选效果不佳,因此亟需改变生产方式^[6]。宜昌中磷层含磷有价矿物为磷灰石和胶磷矿,其与白云石等脉石矿物对 X 射线吸收程度不同,利用 X 射线成像易于识别磷矿物、因此采用 X 射线拣选法能将含磷有价矿物与脉石矿物有效地分离^[7-8]。

3.2.2 XNDT - 104X 射线拣选原理

XNDT - 104X 射线拣选分选系统由 X 射线源、传感系统、识别系统和分离系统构成。采用 X 光透射性能(传感系统)及电脑图像处理技术(识别系统)对矿物进行识别后,再采用高压喷吹装置(分离系统)进行分离(图 4)^[6]。针对宜昌磷矿矿物特性,采集具有代

表性的磷矿石样品,用于 X 射线拣选设备识别模型初步建立。并对不同粒度下的矿石样本,综合优化模型,在保证磷矿石较好回收率的情况下最大化提高分类的准确率。图 5 为湖北宜昌杉树桧磷矿石聚类训练效果图,其中红色为胶磷矿矿样本类训练后的识别结果,蓝色为脉石矿物样本类训练后的识别结果,可以看到基于经过设计后的 X 光系统,两类矿石在识别系统中具有较好的类间差异,可以实现有效区分^[6]。

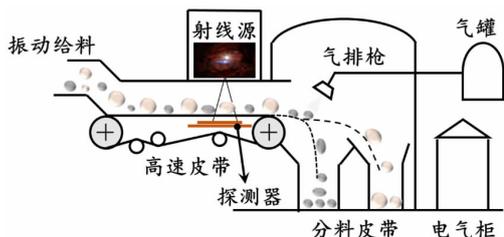


图 4 XNDT-104X 智能分选系统图
Fig. 4 XNDT-104X intelligent separation system

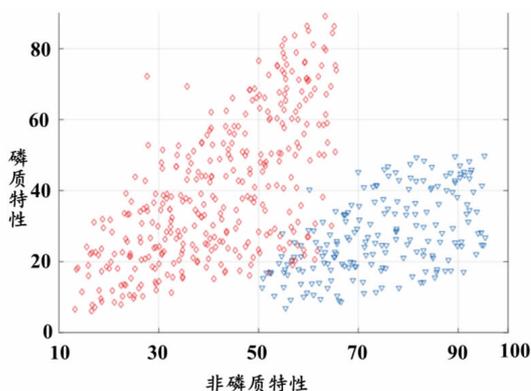


图 5 湖北宜昌杉树桧磷矿石聚类训练效果图^[6]
Fig. 5 Effect drawing of cluster training on phosphorus ore of Shashuya in Yichang city, Hubei Province

3.2.3 X 射线拣选技术指标

原矿经破碎和筛分后, +10 - 30 mm 粒级产品 X 射线拣选结果如表 2 所示。在 X 射线拣选 3 次试验中,磷精矿 P₂O₅ 含量均在 27% 以上,精矿回收率 80% ~ 86%;尾矿产率 36.5% ~ 45.1% 之间,P₂O₅ 品位 7.5% ~ 9.0% 之间。

表 2 X 射线分选试验结果 /%

Table 2 Results of X-ray sorting of +10 - 30 class ore

原矿		精矿指标			尾矿指标	
品位	产率	品位	回收率	产率	品位	回收率
19.17	54.88	28.27	80.94	45.12	8.10	19.06
19.95	58.18	27.85	81.22	41.82	8.96	18.78
20.32	63.48	27.66	86.41	36.52	7.56	13.59

3.3 中磷层磷矿反浮选

-10 mm 粒级产品与 X 射线拣选磷粗精矿合并后磨矿给入下一步浮选作业,宜昌中磷层磷矿中主要的脉石矿物是白云石、石英和方解石等,反浮选技术是提高磷精矿 P₂O₅ 品位的主要选矿方法^[9-10]。

宜昌中磷层磷矿反浮选工艺采用磷酸作为调整剂、复配油酸类捕收剂浮选白云石等脉石矿物,具体的反浮选工艺及药剂制度如图 6 所示。磷精矿 P₂O₅ 品位 32% 以上,回收率 94.7%。

归一化处理筛分、X 射线拣选和浮选试验结果表明,最终浮选磷精矿相对于初始原矿的产率为 52.18% ~ 57.18% 之间、P₂O₅ 回收率 82.02% ~ 85.66% 之间。

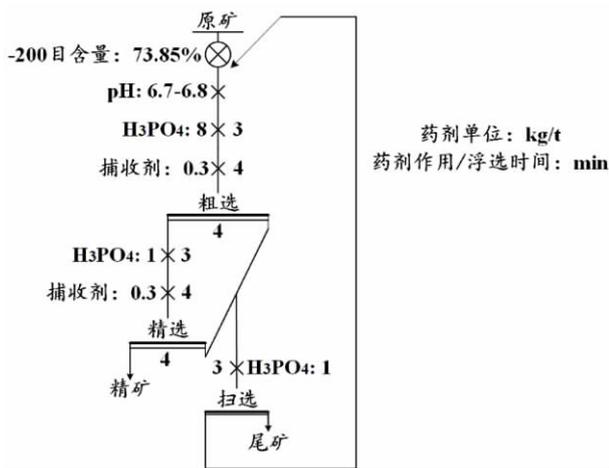


图 6 反浮选工艺流程和药剂制度
Fig. 6 Reverse flotation flowsheet and reagent regime

表 3 反浮选技术指标 /%

Table 3 Technical index of reverse flotation

原矿		精矿		尾矿		
P ₂ O ₅ 品位	P ₂ O ₅ 品位	产率	回收率	P ₂ O ₅ 品位	产率	回收率
27.25	32.15	80.27	94.7	7.32	19.73	5.3

4 结论

宜昌中磷层磷矿主要的有价磷矿物为磷灰石和胶磷矿,二者嵌布粒度较细,无法直接回收,磷灰石和胶磷矿多与白云石等脉石矿物紧密嵌布,形成粒度较粗的富磷矿物集合体。富磷矿物集合体易碎,为此,应首先预先筛分或粗碎筛分获得一部分富磷细粒级产品,即 -10 mm 粒级产品 P₂O₅ 品位 26% 左右,能够直接给入下一步浮选作业。+10 - 30 mm 粒级产品采用 X 射线拣选法进一步处理,X 射线拣选得到的磷粗精矿

P_2O_5 品位 26% 以上、回收率 80% ~ 86%。- 10 mm 粒级产品和 X 射线拣选磷精矿合并给入下一步反浮选流程,反浮选磷精矿 P_2O_5 品位 32% 以上、作业回收率 94.7%,相对原矿回收率 82% 以上。

原有工艺单纯采用浮选工艺很难获得 P_2O_5 品位 30% 以上的磷精矿。宜昌中磷层磷矿采用筛分和粗粒级 X 射线拣选,预先抛除产率为 35% ~ 45% 的粗粒废石,提高浮选给料 P_2O_5 品位,矿山产能提高 1 倍,降低运输成本和后续反浮选作业难度,最终获得的浮选磷精矿 P_2O_5 品位达到 32% 以上。在处理其它类似低品位、有价矿物嵌布粒度细的磷矿资源时,X 射线拣选—浮选联合工艺有巨大的推广潜力。

参考文献:

- [1] 黄启生,李宇新.宜昌矿区条带状磷块岩选矿技术研究与实践[J].武汉工程大学学报,2011(2):58-60.
- [2] 韩豫川,夏学惠,肖荣阁,等.中国磷矿床[M].北京:地质出版社,2012:1-723.
- [3] 杨刚忠,廖宗明.宜昌磷矿中磷层(Ph_2)选矿试验探讨[J].矿产保护与利用,2009(4):24-28.
- [4] 罗惠华,刘连坤,朱道鹏,等.浮选回收宜昌磷矿重介质分选产生的微细级低品位胶磷矿[J].矿产综合利用,2016(3):67-70.
- [5] 王修缘.X射线分选机拣选钨矿石试验研究[J].才智,2011(35):49-51.
- [6] 李宇新,童晓蕾,李艳,等.重介质选矿、X射线分选在宜昌磷矿各矿层选矿的工业应用对比[J].化工矿产地质,2020(1):77-82.
- [7] 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.
- [8] 印万忠,吴尧,韩跃新,等.X射线辐射分选原理及应用[J].中国矿业,2011(12):88-92.
- [9] HUANG Z, CHENG C, LIU Z, et al. Utilization of a new Gemini surfactant as the collector for the reverse froth flotation of phosphate ore in sustainable production of phosphate fertilizer[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 221: 108-112.
- [10] LIU X, LI C, LUO H, et al. Selective reverse flotation of apatite from dolomite in collophanite ore using saponified gutter oil fatty acid as a collector[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 165: 20-27.

The Application of X – ray Sorting – Reverse Flotation in Phosphate Rock Beneficiation of Yichang Phosphor Layer Ore

LI Yuxin¹, TIAN Mengjie^{2,3}, QU Dingjun¹, HU Xuechao¹, SUN Wei^{2,3}, GAO Zhiyong^{2,3}

1. YiHua Mining Limited Company of Hubei, Yichang 443100, Hubei, China

2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

3. Key Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium – containing Mineral Resources, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: The P_2O_5 grade of Yichang middle phosphate rock is only about 22% on average, it is difficult to direct industrial use. Apatite and colophonane are the main valuable P – containing minerals in Yichang ore. They have fine dissemination size of 0.03 – 0.5 mm. But they exists in the form of coarse – grained aggregate of P – containing minerals which can be used as separation objects. After ore of Yichang middle phosphate rock layer was screen, P_2O_5 grade in – 10 mm class is about 26% which can be directly as feed of flotation. While the – 30 + 10 mm class was treated using X – ray sorting technology, after that, phosphorus concentrate was obtained with P_2O_5 grade of more than 26% and recovery of 80% – 86%. The – 10 mm class products and X – ray sorting concentrate together feed into reverse flotation. Flotation concentrate with P_2O_5 grade of more than 32% was obtained eventually. The test results show that the X – ray sorting – reverse flotation process will show a good separation effect, in dealing with other similar low grade phosphate rock1 resources, and the combined process has great potential of popularization.

Key words: Yichang middle phosphate layer; screening; X – ray sorting; preconcentration; reverse flotation

引用格式:李宇新,田孟杰,瞿定军,胡学超,孙伟,高志勇. X射线拣选—反浮选工艺在宜昌中磷层磷矿选矿中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 52 – 57.

Li YX, Tian MJ, Qu DJ, Hu XC, Sun W, and Gao ZY. The application of X – ray sorting – reverse flotation in phosphate rock beneficiation of Yichang phosphor layer ore[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(6): 52 – 57.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E – mail: kcbh@chinajournal.net.cn