

## 智能分选中煤矸X射线识别技术的研究

杨晨光,冯岸岸,朱金波,张勇,尹建强

(安徽理工大学材料科学与工程学院,安徽淮南 232001)

**摘要:**以煤矸分选系统和X双能射线为试验平台,从MATLAB和煤质分析入手,结合灰度值和R值法,探索利用X射线识别焦煤、肥煤、气煤中煤和矸石的可行性,进一步研究了不同煤种的密度和灰分的线性关系,得出厚度和密度的作用可以改变原煤的灰度值,阐述了R值法对于煤矸的识别,建立了煤和矸石的分离阈值并在此阈值下进行了识别试验。结果表明:不同煤种的灰分随着密度的增加而增加,且呈正相关关系。当原煤的密度以0.1 kg/L递增时,肥煤、气煤和焦煤的灰分会分别提高9.44、9.48、8.42个百分点;在同一密度级,原煤的厚度与灰度值呈现出良好的负相关关系;将R值法运用在煤和矸石的识别中,在30~100 mm粒级中识别正确率在93%以上。

**关键词:**X射线;Matlab;灰度值;R值法;密度;厚度;灰分

**doi:**10.3969/j.issn.1008-553X.2020.03.008

**中图分类号:**TD94

**文献标识码:**A

**文章编号:**1008-553X(2020)03-0025-06

随着煤炭资源开发的日益加深,煤与矸石的快速有效分离成为煤炭行业所关心的热点问题之一。近年来,众多学者研究新型选矸技术。米强等<sup>[1]</sup>对煤与矸石的成像特征进行了探究,把灰度共生矩阵法和局部二值法用于提取煤与矸石的成像纹理,对矸石的识别率达到96%,煤达到94%。谭春超等<sup>[2]</sup>对识别煤与矸石的成像提出了新的方案,用灰度的分布来表示煤矸成像。以灰度平均值和平滑度作为识别煤与矸石的参数,提高了识别率。K Guru等<sup>[3]</sup>提出了一种用于煤和矸石分离的数字图像处理技术,基于灰度直方图阈值提取的特征值实现煤矸石的在线识别。笔者在X双能射线识别煤与矸石的基础上,探究煤矸的成像灰度特征和原煤性质。

### 1 试验概况

#### 1.1 试验机构

试验机构由四个部分组成:给料系统、识别机构、成像机构和分选机构。给料系统主要有给料漏斗、振动分级筛、皮带;识别机构主要有X射线探测器、X射线发生器、数据收集卡;成像机构主要有PLC控制柜、计算机终端;分选机构主要有高压喷阀、储气罐和收集槽。机构由220 V电压供电,X射线发生器可产生2 mA、160 kV的射线;X射线探测器采用线阵列探测器,由5个X-card组成,用以接收X射线在穿透物料后的衰减信号并将X射线的光信号转换为电信号;探测器发出的电信号被数据收集卡接收转化并传递到计算机终端形成图像。系统结构示意图如图1所示。

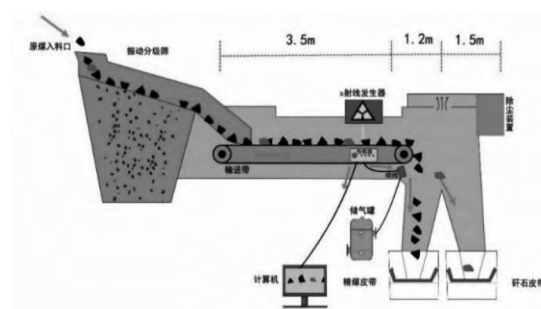


图1 试验系统结构示意图

#### 1.2 试验原理

物质的密度、厚度<sup>[4]</sup>和组成,主要与物质吸收X射线的光电效应和热效应有关。物质与X射线的相互作用如图2所示。

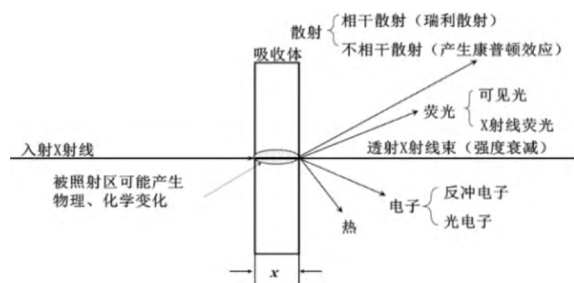


图2 X射线与物质的相互作用

实验表明,X射线强度的衰减程度与透过的物质厚度成正比关系<sup>[5]</sup>,当波长一定的X射线以 $I_0$ 强度透过厚度为 $t$ 的物体时,满足Lambert-Beer定律:

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1)$$

式中: $I$ 是衰减后的射线强度, $I_0$ 是射线的入射强度, $\mu$ 是被透过物体的线性衰减系数, $t$ 是被透过物体的

收稿日期:2020-03-25

基金项目:安徽省重大科研项目(18030901049)

作者简介:杨晨光(1996-),男,硕士研究生,从事光电智能选煤理论与设备的研究工作,zdpask528@163.com。

厚度。因为 X 射线的衰减程度是反映物质对射线散射与吸收的效果,所以其衰减系数是散射系数与吸收系数的和<sup>[6]</sup>:

$$\mu = \tau + \sigma \tag{2}$$

式中: $\sigma$ 为散射系数, $\tau$ 为吸收系数。由于衰减过程中,吸收导致的衰减远大于散射导致的衰减,因此常将 $\sigma$ 忽略,认为 $\mu = \tau$ 。即:

$$\mu^* = \mu / \rho \tag{3}$$

式中: $\mu^*$ 是质量吸收系数, $\rho$ 是被透过物体的密度。

当波长一定时,物体的质量吸收系数仅与物体本身和波长有关,同种物体的 $\mu^*$ 为常数。

1.3 试验材料制备

试验样品取自临涣选煤厂的焦煤、许疃煤矿的肥煤以及顾桥煤矿的气煤。各煤种的测量粒度均为 30~100 mm,原煤破碎后用岛津 LabX XRD-6000 型 X 射线衍射仪进行 XRD 分析,使用 MDI Jade6.5 对原煤的 X 射线图谱进行定性分析,得出其主要矿物组成,再依据 RIR<sup>[7]</sup>法计算各组试验样品的矿物含量<sup>[8]</sup>。

表 1 不同粒度级下三种煤种的灰分

密度级 (kg/L)	平均密度 (kg/L)	各粒度级灰分(%)								
		30 ~ 50 (mm)			50 ~ 100 (mm)			30 ~ 100 (mm)		
		焦煤	肥煤	气煤	焦煤	肥煤	气煤	焦煤	肥煤	气煤
1.3 ~ 1.4	1.35	7.35	9.76	9.79	6.78	8.98	8.17	6.97	9.33	8.48
1.4 ~ 1.5	1.45	14.11	15.99	18.06	13.45	17.66	16.98	13.85	16.93	19.02
1.5 ~ 1.6	1.55	24.03	27.25	25.24	23.07	26.78	27.93	23.55	26.11	26.12
1.6 ~ 1.7	1.65	30.95	36.38	37.77	32.32	35.24	37.87	31.27	37.31	36.34
1.7 ~ 1.8	1.75	39.96	46.98	46.2	41.92	46.68	47.88	41.86	46.33	47.21
+1.8	-	85.92	87.03	89.48	83.27	90.22	90.29	84.48	88.71	90.08

1.4 试验方案设计

(1) 将煤样制成 6 个密度级:1.3 ~ 1.4 kg/L, 1.4 ~ 1.5 kg/L, 1.5 ~ 1.6 kg/L, 1.6 ~ 1.7 kg/L, 1.7 ~ 1.8 kg/L, + 1.8 kg/L。

(2) 取各密度级煤样将其制成厚度分别为 0.5 cm、1 cm、1.5 cm、2 cm、2.5 cm、3 cm、3.5 cm 的试样,每种厚度制 3 块原煤试样,试验数值取其平均值。

(3) 以焦煤为例,将 1.3 ~ 1.4 kg/L,0.5 cm 厚度的焦煤投入给料漏斗,通过成像系统后在计算机终端成像,然后依次将 1 cm、1.5 cm、2 cm、2.5 cm、3 cm、3.5 cm 厚度的焦煤投入,在识别系统采集图像,每块原煤均有高、低能区两张图像。

(4) 用 Matlab 软件处理采集的图像,获得肥煤和气煤在不同密度和厚度下的灰度峰值。



图 3 穿过 X 射线的煤和矸石

2 试验结果及分析

2.1 密度和灰分的线性关系

不同密度级试样的灰分,如图 4 ~ 图 6。

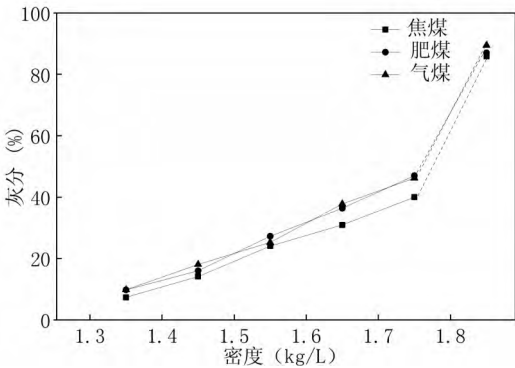


图 4 30~50 mm 各煤种的原煤灰分

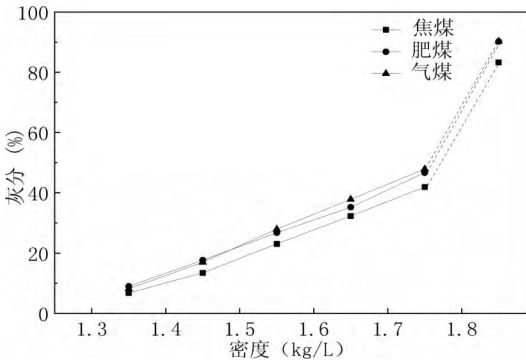


图 5 50~100 mm 各煤种的原煤灰分

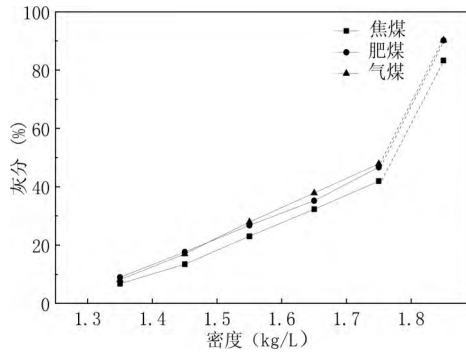


图6 30~100 mm各煤种的原煤灰分

由图6可知,各煤种的密度和灰分正相关。在相同粒度级,原煤的灰分随着密度的增大而增大。因为煤的密度越小,其内杂质矿物含量越少,所以煤的密度增大时其内杂质矿物的含量增多,工业分析上表现为灰分的增大<sup>[9-11]</sup>。

由以上分析,建立试样煤的密度与灰分的线性关系,以

焦煤30~100 mm粒度级为例,拟合的曲线如图7所示。

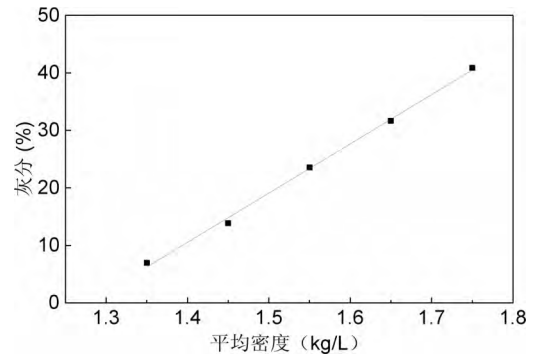


图7 焦煤的密度-灰分趋势图

由图7可得到焦煤密度与灰分之间的回归方程:

$$y_{\text{焦}} = 87.2x - 111.66$$

表2中,三个煤种的线性回归方程显著程度均为高度显著,表明各煤种的灰分和密度之间的线性关系可信度较高。

表2 不同煤种的灰分回归方程和相关系数

项 目 \ 煤种	焦煤	肥煤	气煤
回归方程	$y = 87.2x - 111.66$	$y = 94.38x - 119.09$	$Y = 94.78x - 119.48$
相关系数( $\gamma$ )	0.997 7	0.998 1	0.997 9
显著程度	高度显著	高度显著	高度显著

## 2.2 密度及厚度与灰度值的关系

不同厚度的煤和矸石试样经过X射线透射后利用计算机终端处理,得到深浅有别的图像,如图8所示。

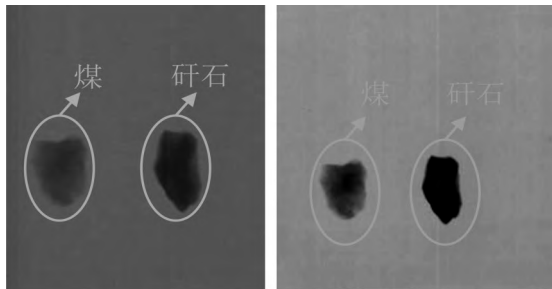


图8 煤和矸石的X射线动态图像

以焦煤为例,将图像经过Matlab软件处理,得到煤和矸石试样的灰度值,其中图9中(a)(b)为高能区,(c)(d)为低能区,由(a)(c)可知:密度相同时,原煤的灰度峰值随厚度的增加而逐渐减小,呈先快后慢的趋势,且矸石的下降幅度比煤快。由(b)(d)可知:厚度相同时,原煤的灰度峰值随密度的增加而逐渐减小,且煤的灰度峰值高于矸石的灰度峰值。原因是矸石的主要成分为页岩,其密度远大于煤。高、低能区的灰度值随厚度和密度的变化趋势相似,但由于高能区的X射线波长短,

衰减程度小,低能区的X射线波长长,衰减程度大。在同种参数下,高能区的灰度峰值远小于低能区。气煤和肥煤呈现与焦煤相同的变化趋势。

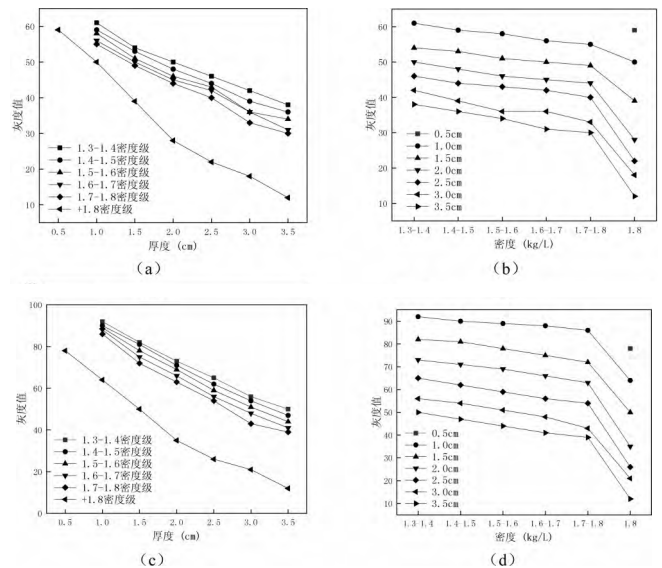


图9 不同厚度及密度下焦煤和矸石灰度值变化曲线

以焦煤为例,建立灰度值与厚度的数学模型,根据经验方程: $y = ae^{bx}$ ,通过计算可得 $b = -0.246$ , $a = 118.61$ ,故焦煤在1.3~1.4 kg/L密度级,灰度值与厚度的回归方程

为:  $y=118.61e^{-0.246x}$ ,  $\gamma$  值为负, 表明灰度值和厚度呈负相关关系, 即密度相同时, 灰度值随厚度的增加而逐渐减小, 与结论一致。按上述方法可依次计算得出不同密度的煤的厚度与灰度峰值之间的关系, 如表 3 ~ 表 5 所示。

### 2.3 煤和矸石的识别试验

由于在实际应用中利用灰度值进行煤和矸石的识别存在煤和矸石灰度值重叠的现象, 导致计算机识别精度不高, 故有学者提出利用物质属性值, 即 R 值法进行识别。R 值是以 X 射线在高、低能区的衰减程度为基础提出来的, 与被 X 射线穿透物质的等效原子序数有关。

经典 R 值公式为:  $R = \frac{G_l}{G_h}$ ,  $G_h$ 、 $G_l$  分别为物质被穿透后的高、低能区的灰度峰值。将 R 值法运用于煤和矸石的识别, 通过整理试验数据计算不同煤种的 R 值, 拟确定 1.30 为煤和矸石的分离阈值, 即 R 值大于等于 1.30 为煤, 小于 1.30 为矸石。利用 X 射线对原煤的识别方法, 对粒度为 30~50 mm 的原煤进行试验, 可得煤和矸石的灰度值, 试验结果如图 10~图 12 所示。

由图 10~图 12 知, 当原煤的粒度为 10~30 mm 时, 焦煤、气煤和肥煤的块煤识别准确率分别为 100%、97% 和 93%, 焦煤、肥煤和气煤的矸石识别准确率分别为

表 3 焦煤的灰度值回归方程

项目 密度(kg/L)	回归方程		相关系数( $\gamma$ )	
	低能区	高能区	低能区	高能区
1.3~1.4	$y = 118.61e^{-0.246x}$	$y = 72.328e^{-0.183x}$	-0.999 1	-0.996 3
1.4~1.5	$y = 118.95e^{-0.263x}$	$y = 71.674e^{-0.199x}$	-0.998 2	-0.998 1
1.5~1.6	$y = 119.39e^{-0.283x}$	$y = 71.404e^{-0.216x}$	-0.998 6	-0.98 6
1.6~1.7	$y = 119.5e^{-0.304x}$	$y = 71.208e^{-0.229x}$	-0.999 2	-0.986 5
1.7~1.8	$y = 118.51e^{-0.323x}$	$y = 71.239e^{-0.246x}$	-0.993 0	-0.983 8
+1.8	$y = 115.89e^{-0.607x}$	$y = 81.98e^{-0.528x}$	-0.981 9	-0.990 8

表 4 肥煤的灰度值回归方程

项目 密度(kg/L)	回归方程		相关系数( $\gamma$ )	
	低能区	高能区	低能区	高能区
1.3~1.4	$y = 120.21e^{-0.27x}$	$y = 73.903e^{-0.203x}$	-0.991 3	-0.977 5
1.4~1.5	$y = 120.5e^{-0.292x}$	$y = 73.971e^{-0.219x}$	-0.994 9	-0.994 8
1.5~1.6	$y = 121.12e^{-0.312x}$	$y = 72.461e^{-0.236x}$	-0.994 8	-0.995 1
1.6~1.7	$y = 121.61e^{-0.334x}$	$y = 72.12e^{-0.252x}$	-0.993 8	-0.990 3
1.7~1.8	$y = 121.61e^{-0.355x}$	$y = 71.892e^{-0.268x}$	-0.993 0	-0.987 2
+1.8	$y = 115.69e^{-0.665x}$	$y = 81.224e^{-0.555x}$	-0.997 7	-0.995 4

表 5 气煤的灰度值回归方程

项目 密度(kg/L)	回归方程		相关系数( $\gamma$ )	
	低能区	高能区	低能区	高能区
1.3~1.4	$y = 118.29e^{-0.283x}$	$y = 72.018e^{-0.214x}$	-0.990 5	-0.967 4
1.4~1.5	$y = 118.56e^{-0.304x}$	$y = 72.09e^{-0.232x}$	-0.992 2	-0.964 8
1.5~1.6	$y = 119.23e^{-0.327x}$	$y = 71.152e^{-0.251x}$	-0.991 1	-0.972 9
1.6~1.7	$y = 119.89e^{-0.349x}$	$y = 70.276e^{-0.266x}$	-0.987 3	-0.995 9
1.7~1.8	$y = 119.06e^{-0.371x}$	$y = 70.039e^{-0.284x}$	-0.985 7	-0.984 3
+1.8	$y = 115.36e^{-0.66x}$	$y = 81.521e^{-0.563x}$	-0.991 0	-0.996 4



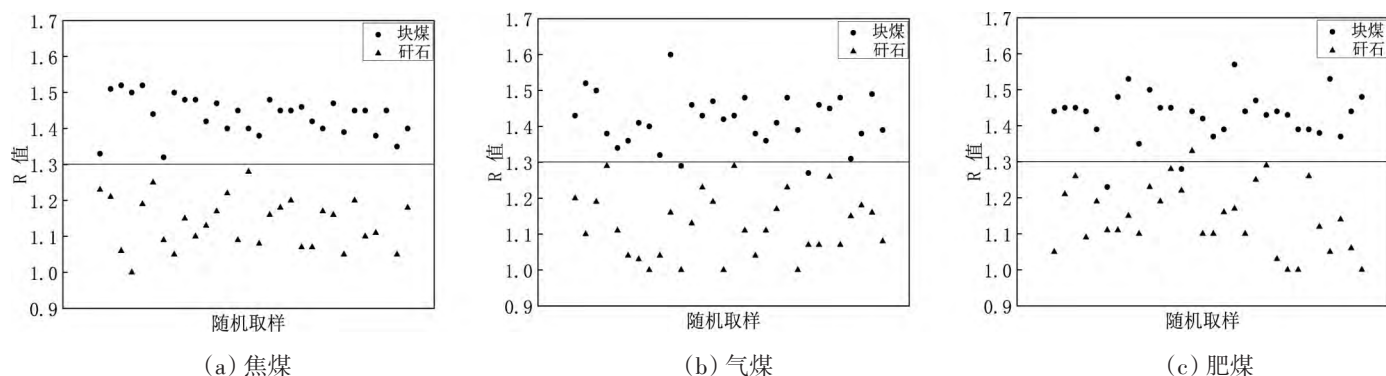


图10 30~100 mm三个煤种的R值识别结果

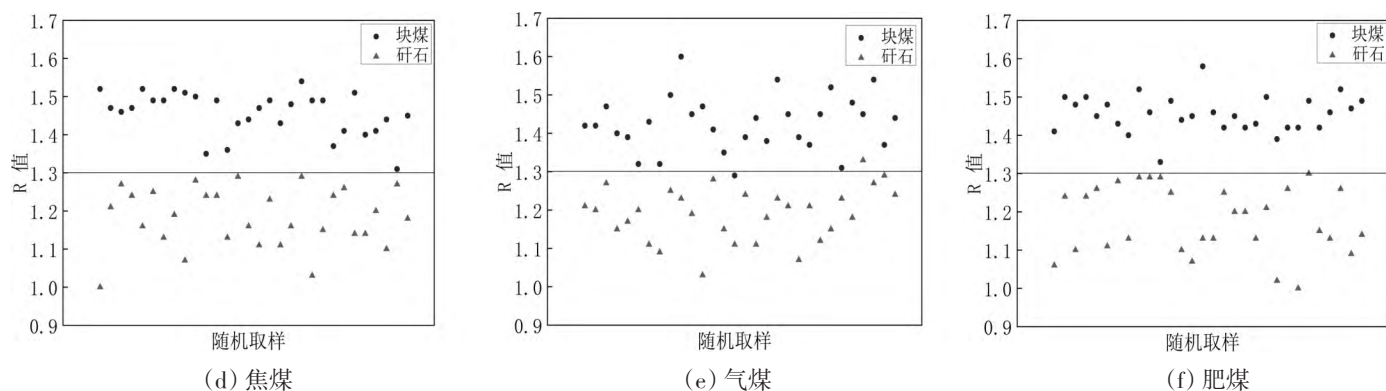


图11 30~50 mm三个煤种的R值识别结果

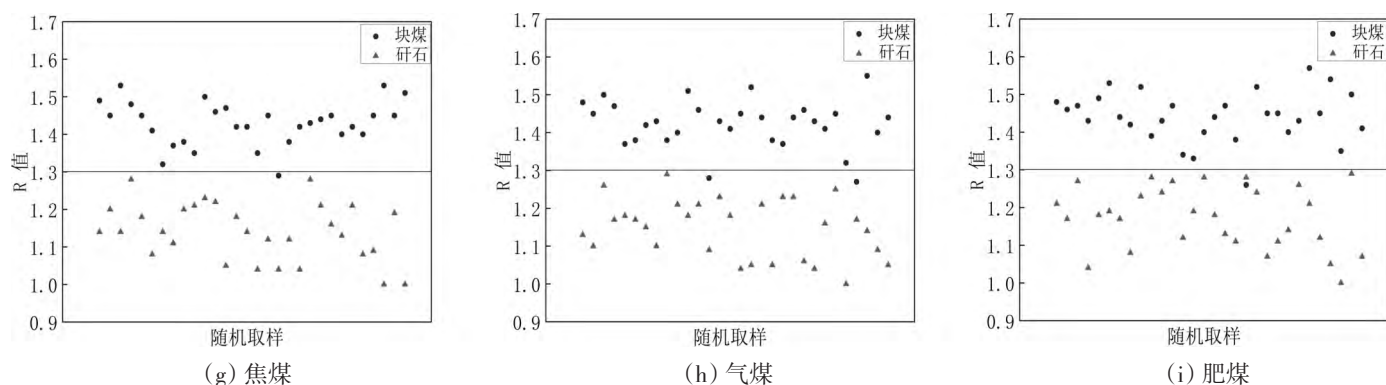


图12 50~100 mm三个煤种的R值识别结果

100%、100%和97%。由此可见,在原煤不进行分级时,块煤的识别准确率低于矸石。当粒度为30~50 mm时,块煤和矸石的识别准确率均达97%以上,此时较薄的矸石有可能被误断为块煤。当粒度为50~100 mm时,块煤的识别准确率达93%以上,矸石的识别准确率达100%,此时较厚的煤有可能被误断为矸石。结合三个煤种的煤、矸石识别准确率可以发现,R值法适用于智能分选过程中各煤种的识别。

### 3 结论

(1) 试验测定了三个煤种的原煤灰分,通过建立原煤密度和灰分的关系方程  $y_{\text{焦}}=87.2x-111.66$ ,  $y_{\text{肥}}=94.38x-$

$119.09$ ,  $y_{\text{气}}=94.78x-119.48$ ,得出其线性回归方程为高度显著。

(2) 探究了原煤的厚度和密度对灰度值的影响,得出灰度的峰值是厚度与密度共同作用的结果,并计算了灰度值与厚度之间的回归方程。

(3) 将R值法运用于煤和矸石的识别中,当原煤的粒度为30~50 mm时,块煤和矸石的识别准确率均可达97%以上;当原煤的粒度为50~100 mm时,煤的识别准确率可达93%以上;当原煤入料粒度为30~10 mm时,对块煤的准确率最高可达100%,最低为93%,对矸石的准确率最高为100%,最低为97%。

(下转第33页)

优先选用氧化钙、氧化铜、氧化铁、氧化锌、氧化铝和氧化镁6种物质代替二氧化锰作为氯酸钾分解制氧气的催化剂。其优点是首先避免了副产物氯气的产生,实验过程中没有白雾产生;其次是催化剂易得,费用低廉;第三是实验过程比较安全;第四是实验结束后催化剂(氧化钙、氧化铜、氧化铁、氧化锌、氧化铝和氧化镁)回收方便,可反复使用。

### 参考文献

- [1] 王亚南,郑莉,耿婉如,等.经鼻高流量氧疗与常规氧气疗法对急性左心衰竭患者心脏功能作用研究[J].内蒙古民族大学学报

(自然科学版),2019,34(6):532-534.

- [2] 邱立军,翟金泉,史智超,等.常压氧气对急性脑缺血卒中大鼠保护作用及治疗时间窗的MRI研究[J].临床放射学杂志,2018,37(9):1584-1587.  
[3] 楚立超,王伟芝,张彩云,等.氧气对兔胃应激性溃疡预防及治疗作用的研究[J].中华临床医师杂志(电子版),2013,7(23):11063-11065.  
[4] 黄哈达,李友银.高锰酸钾加热分解过程研究[J].化学教育,2009,30(2):65-66,76.  
[5] 潘国荣,白显圣,陈正美.实验室制取氧气方法的对比及建议[J].化学教学,2015(9):45-48.□

## Study on the Activity of Oxygen Catalyst Decomposed by Potassium Chlorate

LONG Dong-mei, YUAN Rong, FU Cai-cai, ZHOU Xiao-wei, MAO Ze-chuan, LIANG Yong-feng  
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ningxia Normal University, Guyuan 756000, China)

**Abstract:** Preliminary study on catalytic activity of sixteen common substances (calcium oxide etc.) in replace of manganese dioxide to catalyze decomposition of potassium chlorate for preparation of oxygen is conducted. Results suggest that calcium oxide, copper oxide, iron oxide, zinc oxide, aluminum oxide and magnesium oxide have excellent catalytic activity to the decomposition reaction of potassium chlorate, preventing the occurrence of the white fog and the irritating gas when manganese dioxide is used as the catalyst. In addition, oxygen generation speed is uniform, alleviating the collection process. These catalysts are easy to obtain and to recycle with high recovery efficiency.

**Key words:** calcium oxide; catalyst; oxygen preparation; catalytic activity

(上接第29页)

### 参考文献

- [1] 米强,徐岩,刘斌,等.煤与矸石图像纹理特征提取方法[J].工矿自动化,2017,43(5):26-30.  
[2] 谭春超,杨洁明.煤与矸石图像灰度信息和纹理特征的提取研究[J].工矿自动化,2017,43(4):27-31.  
[3] Guru K, Reddy R, Tripathy P D P. Separation of gangue from coal based on histogram thresholding[J]. International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research, 2013, 1(4): 31-34.  
[4] 杨和庆. X射线介质识别方法研究[D]. 西安石油大学,2016.  
[5] 赵瑶,方国川,魏珍,等. X射线衍射原理及掺杂石墨的物相分析[J]. 河北北方学院学报(自然科学版),2018, 34(11): 10-14.

- [6] 江超华. 多晶X射线衍射技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2014.  
[7] 郭明明,董宪姝,乌鹏飞. 浮选精煤中杂质矿物含量变化规律研究[J]. 中国矿业,2016, 25(9): 123-126.  
[8] 丰芸,李寒旭,丁立明. 利用XRD分析高温下淮南煤灰矿物质变化[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2008(5): 53-57.  
[9] 苏壮飞,王敏,王兴兴,等. 煤泥真相对密度与其灰分正相关性的再次验证[J]. 煤质技术,2017(2): 61-63.  
[10] 任利勤,马涛,梁辽,等. 选煤厂较高密度煤及重选产物密度与灰分正相关关系[J]. 煤质技术,2018(3): 55-59.  
[11] 陈德奋,程灏,陈峰峰. 原煤浮沉基元灰分与密度的线性回归及不确定度评定[J]. 煤质技术,2015(1): 32-33.□

## Study on X-ray Recognition Technology of Coal and Gangue in Intelligent Separation

YANG Chen-guang, FENG An-an, ZHU Jin-bo, ZHANG Yong, YIN Jian-qiang

(School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** The separation system of coal and gangue based on dual-energy X-ray is used as the test platform in this study. Based on coal analysis and Matlab software and combined gray value and R value, the paper explored the feasibility of using X-rays to identify coal and gangue in coking coal, fat coal, and gas coal. Then the linear relationship between density and ash of different coal types was further studied. The change of gray value of coal was the result of the combination of density and thickness. The principle of identifying the coal and gangue by R value method was discussed, and the separation of coal and gangue was established. The threshold was tested at this threshold. The results show: the ash content of different coal types increased with the increase of density, and it was positively correlated. The density of raw coal increased by 0.1 kg/L, and the ash of coking coal, fat coal and gas coal increased by 8.42, 9.44 and 9.48 percentage points respectively. At the same density, the thickness of the raw coal shows a good negative correlation with the gray value. The R value method is applied to the identification of coal and gangue, and the recognition accuracy rate is above 93% in the 30 ~ 100 mm grain size.

**Key words:** X-ray; Matlab; gray value; R value method; density; thickness; ash