

研究论文

矿物组分对智能分选 X 射线识别规律研究

朱金波,尹建强,杨晨光,周伟,朱宏政,张勇,史茵桢,曾秋予,郭永存,杨科

(安徽理工大学材料科学与工程学院,安徽淮南 232001)

摘要:针对煤和矸石智能分选过程中的分离依据问题,利用 X 射线识别矿物原理,结合图像灰度值提取方法,研究了不同性质的矿物及煤炭在不同尺度及密度情况下的灰度值变化规律。结果表明,单一矿物及混合矿物的灰度值随其厚度及密度的增加而逐渐减小,相同厚度时,矿物密度越大,其灰度值越小,这一规律同样适用于不同煤样。利用回归分析的方法,得到单一矿物和混合矿物厚度灰度值的回归方程,其中单一矿物石墨、石英、高岭土、蒙脱石在高能区和低能区下的回归方程系数 a 分别为 59.25、65.69、61.61、58.02 和 174.95、177.31、186.95、161.81;利用石墨分别与其他 3 种矿物混合制得石墨:石英、石墨:高岭土、石墨:蒙脱石、石墨:高岭土:石英、石墨:蒙脱石:石英、石墨:蒙脱石:高岭土样品,其高能区和低能区的回归系数分别为 151.12、156.00、153.13、152.43、152.98、151.98 和 193.34、201.34、192.93、191.26、194.68、193.08,并用单一矿物回归方程对混合矿物进行验证,发现灰度区间与密度区间相对应,符合 X 射线识别规律;不同煤种(焦煤,肥煤,气煤)的灰度值与其厚度和密度具有高度显著的规律性,且变化趋势与单一矿物和混合矿物一致。

关键词:光电分选;X 射线;矿物组成;灰度值;回归方程

中图分类号:TD94

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)01-0202-07

Study on the X-ray recognition law of intelligent sorting by mineral components

ZHU Jinbo, YIN Jianqiang, YANG Chenguang, ZHOU Wei, ZHU Hongzheng,

ZHANG Yong, SHI Qinghui, ZENG Qiuyu, GUO Yongcun, YANG Ke

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

Abstract: Aiming at the problems of selection and separation basis in the intelligent separation process of coal and gangue, the change rule of gray value of mineral and coal with different nature at different scales and densities was studied by X-rays identify minerals principle and image grayscale extraction method. The results show that the grayscale value of single mineral and mixed mineral decreases gradually with the increase of thickness and density. At the same thickness, the higher mineral density is, the smaller the gray value is, and this result is also applicable to different coal type. The regression equation for single mineral and mixed mineral was obtained by regression analysis method. The regression equation coefficients a of graphite, quartz, kaolin and montmorillonite in high and low energy regions are 59.25, 65.69, 61.61, 58.02 and 174.95, 177.31, 186.95, 161.81, respectively. Graphite is mixed with other three minerals to produce graphite : quartz, graphite : kaolin, graphite : montmorillonite, graphite : kaolin : quartz, graphite : montmorillonite : kaolin, graphite : quartz, graphite : montmorillonite : kaolin, and the regression equation coefficients in high and low energy regions are 151.12, 156.00, 153.13, 152.43, 152.98, 151.98 and 193.34, 201.34, 192.93, 191.26, 194.68, 193.08, respectively. Then, the regression equation of single mineral was used to verify the mixed minerals. It is found that the gray-scale interval corresponds to the density interval, which conforms to the principle of X-ray recognition. The gray-scale values of different kinds of coal (coking coal, fat coal, gas coal) have a highly significant regularity with their thickness and density, and the change trend was consistent with that of single mineral and mixed mineral.

Key words: photoelectric sorting; X-ray; mineral composition; grayscale value; regression equation

收稿日期:2020-11-12;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.A20111203

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1904304);安徽省科技重大专项资助项目(18030901049);国家重点实验室开放基金资助项目(SKLMRDPIC19KF11)

作者简介:朱金波(1963—),男,安徽长丰人,教授,博士生导师,研究方向为选矿理论与工艺。E-mail:jinbo_zhu@126.com

引用格式:朱金波,尹建强,杨晨光,等.矿物组分对智能分选 X 射线识别规律研究[J].洁净煤技术,2021,27(1):202-208.

ZHU Jinbo, YIN Jianqiang, YANG Chenguang, et al. Study on the X-ray recognition law of intelligent sorting by mineral components[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 202-208.



移动阅读

0 引言

智能光电分选技术应用于煤矸分选领域^[1-2],与传统选煤方法相比,具有速度快、精度高、模块化及集成扩展性强、运行成本和能耗低、易于操作维护、不用水等优势,近年来在选煤行业迅速发展^[3-4]。如韩城矿业 2016 年引进美国 BIRTLEY 公司双能 X 射线煤矸分选设备用于井上分选。山东能源临矿集团王楼煤矿 2018 年在井下成功应用煤矸智能干选设备。国内自主研发的煤矸光电分选机近年来发展迅速,逐渐由地面向井下发展^[5-6],由于井下空间限制,潮湿高温、粉尘等因素影响,应用难题较多,特别是煤矸光电分选技术与采煤、填充工艺相结合,国内外未见报道和应用案例^[7]。采用智能分选方法,实现宽粒度范围内煤矸快速识别并准确校正分离阈值^[8],做到等效煤矸按密度分选,必须深入研究煤矸矿物组成对 X 射线识别的影响规律^[9-10]。

Robben 等^[11]利用 X 射线透射(XRT)传感器对煤矸石进行分选,有效降低了难选煤的灰分;Ketelhodt 等^[12]利用双能 X 射线,有效识别褐煤中硫铁矿,并进行分选;Wang 等^[13]针对煤矸识别不准确的问题,基于煤和矸石图像的基本特征,利用数字图像处理技术,扩大了煤和矸石图像特征差异,提高了分选效率;Hou 等^[14]用神经网络方法,将煤与矸石的灰度特征与表面纹理相对应,提高了识别精度。Pu 等^[15]利用卷积神经网络(CNN)对煤矸石图像进行识别,并引入迁移学习的思想构建自定义 CNN 模型,实现了计算能力有限条件下的有关矿物大量可训练参数计算。前人对于煤与矸石光电智能分选多聚焦在图像处理上^[16-17],但鲜见从煤炭性质与矿物组成等内在因素研究影响 X 射线对煤与矸石识别的机理。

因此本文利用 X 射线穿透矿物原理,结合图像灰度值提取方法,制备单一矿物、混合矿物及不同煤种试验样品,研究不同矿物组分在不同厚度及密度下,其灰度值的变化规律,拟合不同矿物的灰度值回归方程,为进一步提高煤和矸石的有效分选提供有意义的科学参考。

1 煤炭 X 射线识别原理及试验研究

1.1 X 射线识别矿物原理

当 X 射线穿透物质时,射线强度会发生变化而波长保持不变。当 X 射线透射的物体密度高或厚度大,X 射线强度会衰减较多;当透射物体密度较低

或尺度较薄时,X 射线的强度衰减少,显示在图像上,灰度差别较大。对于煤炭来说,通常认为密度较低的是煤,密度较高的是矸石,因此,对于一定强度的 X 射线,透射过煤的 X 射线量多,射线强度的衰减较少,用图像表示的灰度值大;能透射矸石的 X 射线量少,射线强度的衰减较多,用图像表示的灰度值小^[18-20]。因此,X 射线穿透煤的图像显示较亮,而矸石的图像显示较暗,如图 1 所示。

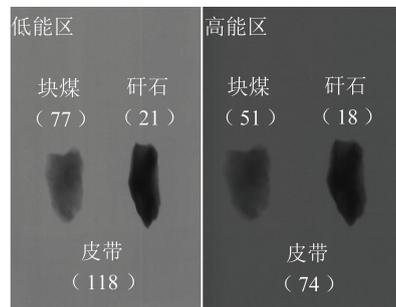


图 1 煤和矸石的 X 射线动态图像

Fig.1 X-ray dynamic image of coal and gangue

1.2 试验装置及试样

试验装置为国内某 X 射线干法分选设备(图 2),主要由 X 射线发生器、射线接收器、皮带、计算机等组成。试验时,将试验样品依次放在皮带上,经 X 射线发生器照射后,射线接收器将衰减后的电信号经过计算机转换成图像信号,利用灰度值差异识别不同矿物。

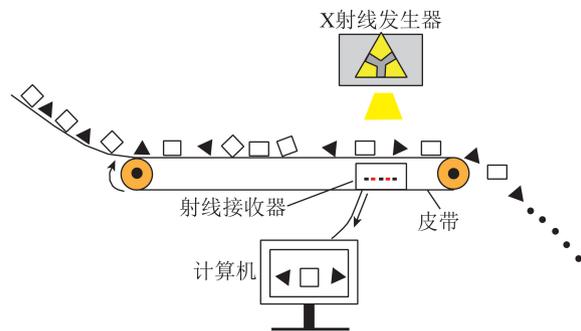


图 2 试验系统结构示意图

Fig.2 Schematic of the structure of the test system

试验样品分别采用不同种类的煤样和煤中主要矿物成分的纯矿物。通过不同种类的煤样研究 X 射线的衰减规律。进一步通过单一矿物的 X 射线衰减规律研究煤中矿物成分对灰度值的影响。

1.3 试验方案

制作煤、单一矿物、混合矿物 3 种不同类型的试验样品,研究矿物组分对 X 射线的影响规律,以厚度为变量,揭示厚度与灰度值的数学模型。

1) 煤炭试验样品

试验所用煤和矸石分别是淮北地区的焦煤、肥

煤以及淮南地区的气煤,含水量分别为 1.26%、1.63%、2.02%,经筛分后将煤样分为 30~50、50~100、30~100 mm 三个粒度级,再经过浮沉试验将各粒度级煤样分为 1.3~1.4、1.4~1.5、1.5~1.6、1.6~1.7、1.7~1.8、>1.8 kg/L 六个密度级。

2) 单一矿物试验样品

试验原料为石墨(0.013 mm)纯度 99.9%、石英(0.065 mm)纯度 98.9%、高岭土(0.039 mm)纯度 99.8%、蒙脱石(0.039 mm)纯度 99.8%,含水量都在 0.01%以下,原料性质见表 1。将 4 种矿物分别压制成为 4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0 mm 的 7 个不同厚度的纯矿物压片。

表 1 试验矿物性质

Table 1 Properties of test minerals

项目	石墨	石英	高岭石	蒙脱石
化学式	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ · 2H ₂ O	(Na, Ca) _{0.33} (Al, Mg) ₂ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₂ · nH ₂ O
分子量	12	60	258	—
密度/(kg · L ⁻¹)	2.3	2.6	2.5	2.7

3) 混合矿物试验样品

将不同纯矿物按相同比例混合压制成为不同厚度

的混合矿物样品(含水量在 0.01%以下),以石墨占比为变量,具体见表 2。

表 2 混合矿物样品制备

Table 2 Preparation of mixed mineral samples

样 品	项目	样品参数						
石墨:石英	质量比	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	
石墨:高岭土	总质量/g	10.5	10.8	11.2	12	13.5	18.0	
石墨:蒙脱石	总厚度/mm	3.0	3.1	3.2	3.5	4.0	5.5	
石墨:高岭土:石英	质量比	6:1:1	5:1:1	4:1:1	3:1:1	2:1:1	1:1:1	
石墨:蒙脱石:石英	总质量/g	12	12.6	13.5	15	18	27	
石墨:蒙脱石:高岭土	总厚度/mm	3.6	3.8	4.0	4.2	5.5	9.0	
石墨:石英:蒙脱石:高岭土	质量比	6:1:1:1	5:1:1:1	4:1:1:1	3:1:1:1	2:1:1:1	1:1:1:1	
	总质量/g	13.00	14.40	15.75	18.00	22.50	36.00	
	总厚度/mm	3.5	3.8	4.5	5.5	7.0	11.8	

由于各试验样品含水量较低,且水分子相对于各矿物分子较小,所以试验过程中,样品含水量对试验结果的影响可忽略不计。

2 煤中不同矿物组分对灰度值的影响规律

将石墨、石英、蒙脱石、高岭石试样压片分别经过 X 射线穿透,衰减后的射线信号由 X 射线接收器接受并转化为数字信号,每种样品形成高能、低能两幅图像,如图 3 所示,利用 MATLAB 软件对图像进行处理,统计灰度峰值。

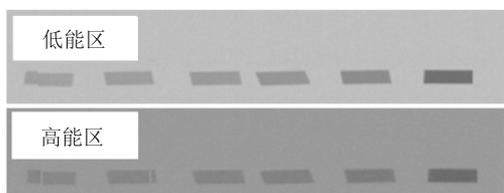


图 3 单一矿物样品灰度图像

Fig.3 Grayscale image of single mineral sample

2.1 单一矿物组分成像特征分析

将单一矿物灰度峰值按照高能区和低能区绘成曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知,单一矿的灰度值随厚度增大而减小,且呈先快后慢的趋势,与指数经验公式较符合。相同厚度时,4 种单一矿物的灰度值主要趋势为:石墨>高岭石>石英>蒙脱石,对照其在自然状态下密度表现(石墨<高岭土<石英<蒙脱石)可以看出不同矿物密度越大灰度值越小。

以矿物厚度为自变量 x ,灰度值为因变量 y ,利用经验方程 $y = ae^{bx}$ (a 、 b 为回归系数)拟合单一矿物的厚度-灰度峰值数值模型,单一矿物灰度值回归方程见表 3。

由表 3 可知,数值模型相关系数绝对值最低为 0.862 7,表明石墨、石英、高岭土和蒙脱石的厚度与灰度值呈现出良好的相关性,且这种关系不受矿物种类影响。

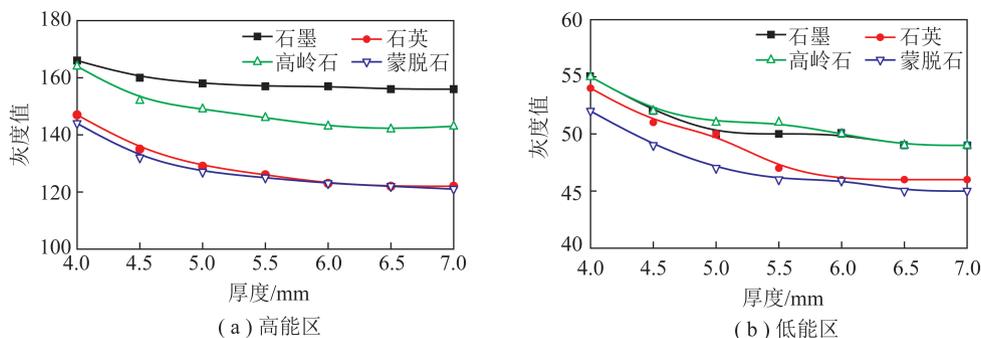


图 4 矿物组分及厚度与灰度峰值关系曲线

Fig.4 Relationship between mineral composition and thickness and gray peak value

表 3 单一矿物灰度值回归方程

Table 3 Regression equation of gray value of single mineral

矿物	回归方程		相关系数 γ	
	低能区	高能区	低能区	高能区
石墨	$y = 174.95 e^{-0.0168x}$	$y = 59.25 e^{-0.0279x}$	-0.961 4	-0.959 5
石英	$y = 177.31 e^{-0.0580x}$	$y = 65.69 e^{-0.0552x}$	-0.960 6	-0.966 0
高岭土	$y = 186.95 e^{-0.0422x}$	$y = 61.61 e^{-0.0345x}$	-0.952 9	-0.862 7
蒙脱石	$y = 161.80 e^{-0.0426x}$	$y = 58.02 e^{-0.0373x}$	-0.879 9	-0.874 5

2.2 混合矿物成像特征分析

分别以 2 种、3 种单一矿物均匀混合制样,分析

混合矿物图像灰度值与厚度的关系,具体如图 5 所示。

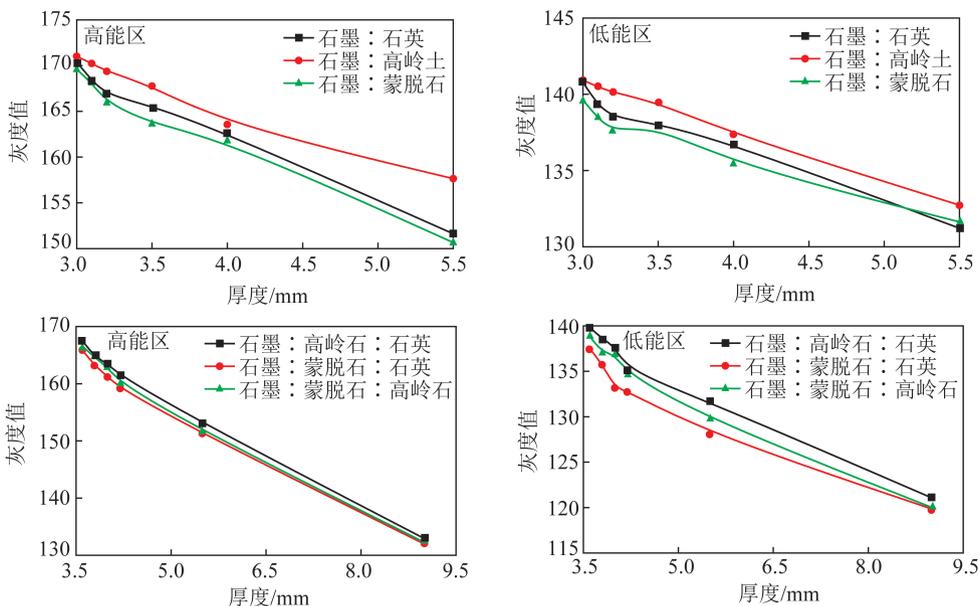


图 5 混合矿物灰度值曲线

Fig.5 Gray value of mixed minerals

由图 5 可知,同一混合矿物,其灰度值随厚度的增加而降低。相同厚度时,石墨与蒙脱石的混合矿物灰度值最小,而石墨与高岭石的混合矿物灰度值最大。相同密度时,矿物质含量随厚度的增加而逐渐变大,X 射线透过矿物后探测器接收到的衰减射线越少,经计算机转换并由 Matlab 软件计算后的图

片灰度值越低。试验中,蒙脱石密度最大,相同厚度时,石墨与蒙脱石的混合矿物密度最大,导致其灰度值最小,这与单一纯矿物灰度值试验结论保持一致。

通过分析纯矿物,发现灰度值与厚度呈指数变化形式,因此混合矿物可按照经验公式进行拟合,结果见表 4。

表4 混合矿物灰度值回归方程

Table 4 Regression equation of gray value of mixed minerals

矿物比例	回归方程		相关系数 γ	
	低能区	高能区	低能区	高能区
石墨:石英	$y' = 193.34 e^{-0.0441x'}$	$y' = 151.12 e^{-0.0256x'}$	-0.994 9	-0.988 8
石墨:高岭土	$y' = 201.34 e^{-0.0534x'}$	$y' = 156.00 e^{-0.0331x'}$	-0.996 8	-0.993 9
石墨:蒙脱石	$y' = 192.93 e^{-0.0412x'}$	$y' = 153.13 e^{-0.0275x'}$	-0.995 7	-0.994 5
石墨:蒙脱石:石英	$y' = 191.26 e^{-0.0405x'}$	$y' = 152.43 e^{-0.0266x'}$	-0.996 7	-0.995 9
石墨:高岭土:石英	$y' = 194.68 e^{-0.0438x'}$	$y' = 152.98 e^{-0.0274x'}$	-0.992 9	-0.992 6
石墨:蒙脱石:高岭土	$y' = 193.08 e^{-0.0432x'}$	$y' = 151.98 e^{-0.0263x'}$	-0.996 9	-0.995 1

选择 5.5 mm 的纯矿物和混合矿物,以石墨和石英为例,将 $x = 5.5$ 带入纯矿物低能区回归方程得到灰度值分别为石墨 159.51、石英 128.88;而混合矿物低能区回归方程中石墨:石英为 151.70。石墨与石英混合后密度介于石墨与石英之间,而灰度值也介于石墨与石英之间,符合 X 射线识别的基本规律,其他样品经验证均符合这一规律。说明混合矿物的

厚度与灰度值呈现出良好的相关关系,且不同矿物种类的相关关系趋势相同。

3 不同类型煤炭的成像特征分析

将焦煤、气煤、肥煤各密度级煤样分别放入给料系统,经计算机处理图片后按照纯矿物提取灰度值方法得到煤样灰度值,如图 6 所示。

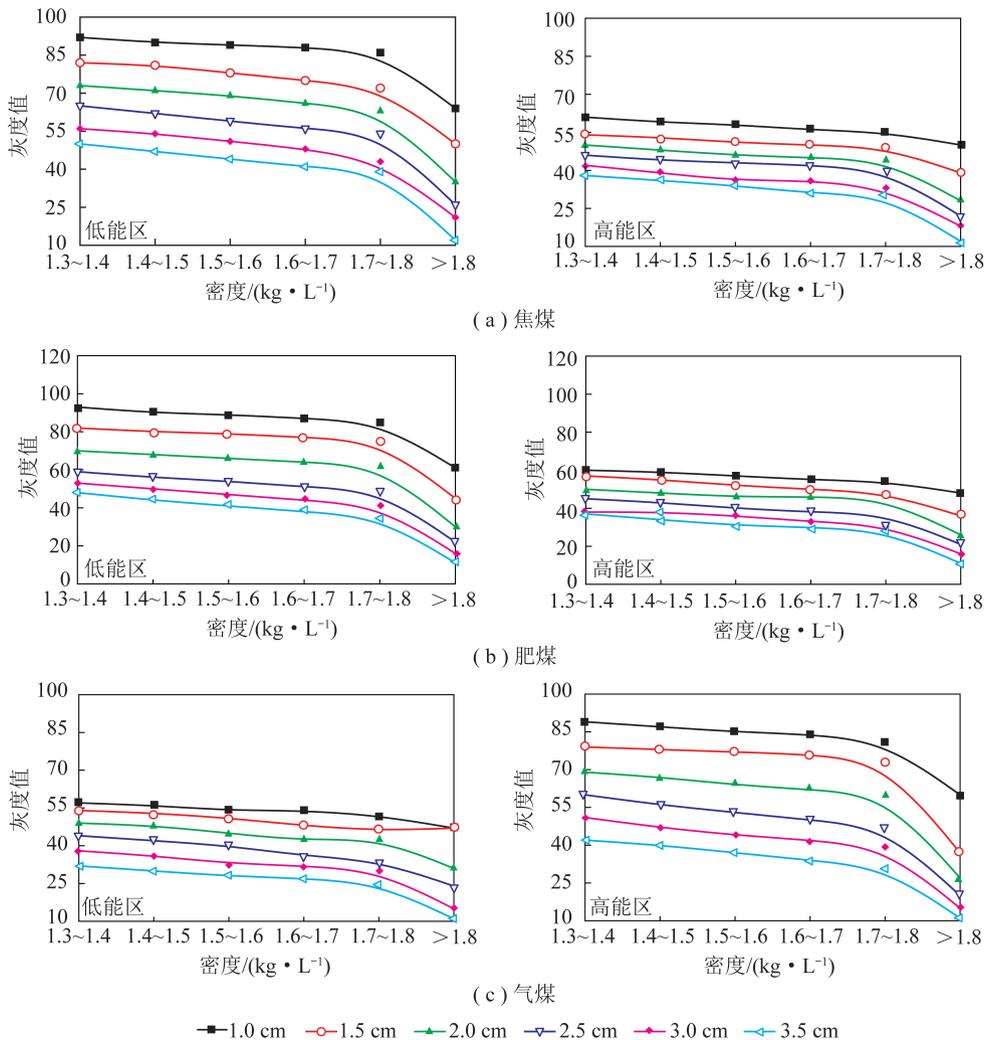


图6 不同煤种密度与灰度值关系

Fig.6 Relationship between density and gray value of different coal types

由图 6 可知,不同煤炭的灰度值均随密度的增大而逐渐减小,相同密度时,灰度值随粒度增加逐渐减小,这与单一矿物及混合矿物的灰度值规律一致。进一步分析可建立不同煤种在不同密度下的灰度值与煤炭粒度的模型 $y = ae^{bx}$ 。针对以上 3 种煤样可得到各自的回归模型。其中肥煤灰度值衰减模型规律如图 7 所示。由图 7 可知,相同密度下,肥煤样品的灰度值与粒度呈现出相关关系,焦煤与气煤也具有相同的规律。

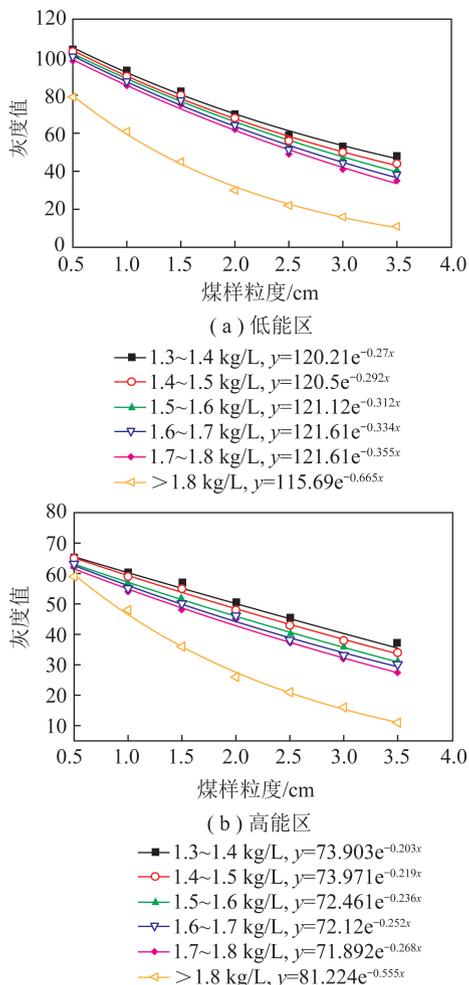


图 7 肥煤灰度值衰减模型

Fig.7 Gray value attenuation model of fat coal

4 结 论

1) 4 种单一矿物和混合矿物试验样品在 X 射线成像,利用 MATLAB 提取每个样品图片的灰度峰值,并通过回归分析的方法分析样品粒度与灰度之间的规律,其规律满足经验方程 $y = ae^{bx}$ 。

2) 将自变量厚度 5.5 mm 分别带入混合矿物和单一矿物的回归方程,得到石墨的系数为 159.51,石英为 128.88,而石墨:石英为 151.70,与其密度区间相对应的其他矿物均符合这一规律,说明灰度变化受到粒度和密度的影响。

3) 在不同粒度的 3 种煤样(焦煤、肥煤和气煤)中通过浮沉试验在每个粒度下选取不同密度的煤样,统计其灰度值,其粒度和密度都与灰度值有显著性规律,且与单一矿物和混合矿物的变化规律趋于一致。

5 展 望

1) 根据煤和矸石对 X 射线响应规律,结合煤矸粒子射线对图像传感器调制振幅灵敏度影响,可得出煤矸对应图像输出间的规律。通过 X 射线对煤中矿物识别的研究,为精确分选各种尺度与种类煤炭与矸石提供了支撑。在研究 X 射线识别煤矸的基础上,进一步实现精准分离。为井下煤矸智能分选实现源头矸石减量,采-选-充协同作业提供可能。

2) 结合所承担的课题,需要进一步研究井下复杂地质条件、狭窄硐室空间、煤质特性及产品质量要求,研究深部井下煤炭高效分选的工艺流程,探索原煤准备、煤炭分选、矿井水处理、智能监控等工艺环节的精确匹配及协同优化方法,确定适用于井下狭窄硐室空间的最优分选工艺。

3) 开发井下煤炭高效分选模块式紧凑型可移动式分选系统,研究工艺及核心环节设备的模块化、轻量化及可移动式结构设计及空间布局,突破传统地面层叠式布置理念,优化工艺流程中各作业单元的时空联系,构建井下模块式紧凑型煤炭高效分选系统,提出井下分选及就地充填系统空间布置协同优化设计方法。

参考文献 (References):

- [1] 邢欢. 动力煤选煤厂粗煤泥重介分选研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(S1): 15-17.
XING Huan. Study on heavy medium separation of coarse slime in power coal preparation plant[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(S1): 15-17.
- [2] 宋文革. 大型选煤厂智能化技术研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 144-150.
SONG Wenge. Research on intelligent technology of large-scale coal preparation plant[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 144-150.
- [3] 崔广文, 隋文浩. 高效动力煤分选工艺研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 86-91.
CUI Guangwen, SUI Wenhao. Study on the separation technology for high efficiency power coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 86-91.
- [4] 林卫国, 刘金伟, 王娜. TDS 智能干选机在微山金源煤矿初级分选中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2020(7): 117-119.
LIN Weiguo, LIU Jinwei, WANG Na. Application of TDS intelligent

- dry separator in primary separation of Weishan Jinyuan coal mine [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2020(7):117-119.
- [5] 田延锋. 上湾选煤厂干法分选工业试验研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(S1):40-46.
- TIAN Yanfeng. Industrial test study on dry separation in Shangwan coal preparation plant [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(S1):40-46.
- [6] 曹亦俊, 刘敏, 邢耀文, 等. 煤矿井下选煤技术现状和展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1):192-201.
- CAO Yijun, LIU Min, XING Yaowen, et al. Current situation and prospect of underground coal preparation technology [J]. 2020, 37(1):192-201.
- [7] 王新民, 夏云凯. 井下选煤排矸技术的发展现状及趋势[J]. 煤炭加工与综合利用, 2020(3):6-10.
- WANG Xinmin, XIA Yunkai. Development status and trend of underground coal preparation and gangue removal technology [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2020(3):6-10.
- [8] 郭永存, 于中山, 卢熠昌. 基于 PSO 优化 NP-FSVM 的煤矸光电智能分选技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4):13-19.
- GUO Yongcun, YU Zhongshan, LU Yichang. Research on optoelectronic intelligent separation technology of coal and gangue based on PSO optimized NP-FSVM [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4):13-19.
- [9] 曹亦俊, 刘敏, 邢耀文, 等. 煤矿井下选煤技术现状和展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1):192-201.
- CAO Yijun, LIU Min, XING Yaowen, et al. Current situation and prospect of underground coal preparation technology [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1):192-201.
- [10] 杨晨光, 冯岸岸, 朱金波, 等. 智能分选中煤矸 X 射线识别技术的研究[J]. 安徽化工, 2020, 46(3):25-33.
- YANG Chen'guang, FENG An'an, ZHU Jinbo, et al. Study on X-ray recognition technology of coal and gangue in intelligent separation [J]. Anhui Chemical Industry, 2020, 46(3):25-33.
- [11] ROBBEN C, KORTE J D, WOTRUBA H, et al. Experiences in dry coarse coal separation using X-ray-transmission-based sorting [J]. Coal Preparation, 2014, 34(3/4):210-219.
- [12] KETELHODT L V, BERGMANN C. Dual energy X-ray transmission sorting of coal [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining & Metallurgy, 2010, 110(7):371-378.
- [13] ZHANG Zelin, YANG Jianguo. Narrow density fraction prediction of coarse coal by image analysis and MIV-SVM [J]. International Journal of Oil Gas and Coal Technology, 2016, 11(3):279-282.
- [14] HOU Wei. Identification of coal and gangue by feed-forward neural network based on data analysis [J]. International Journal of Coal Preparation & Utilization, 2017, 39(4):1-11.
- [15] PU Yuanyuan, APEL Derek B, SZMIGIEL Alicja, et al. Image recognition of coal and coal gangue using a convolutional neural network and transfer learning [J]. Energies, 2019, 12(9):1-11.
- [16] 薛光辉, 李秀莹, 钱孝玲, 等. 基于随机森林的综放工作面煤矸图像识别 [J]. 工矿自动化, 2020, 46(5):57-62.
- XUE Guanghui, LI Xiuying, QIAN Xiaoling, et al. Coal and gangue image recognition of fully mechanized coal caving face based on random forest [J]. Automation of Industry and Mine, 2020, 46(5):57-62.
- [17] 徐志强, 吕子奇, 王卫东, 等. 煤矸智能分选的机器视觉识别方法与优化 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(6):2207-2216.
- XU Zhiqiang, LYU Ziqi, WANG Weidong, et al. Machine vision recognition method and optimization for intelligent separation of coal and gangue [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6):2207-2216.
- [18] 卢熠昌, 于中山. 煤矸光电分选系统及抗干扰技术研究 [J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(1):144-147.
- LU Yichang, YU Zhongshan. Research on electro-optical separation system of coal and gangue and its anti-interference technology [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(1):144-147.
- [19] 王冠军, 苏婷婷, 刘文博, 等. 基于 EAIDK 的智能煤矸分拣系统设计 [J]. 工矿自动化, 2020, 46(1):105-108.
- WANG Guanjun, SU Tingting, LIU Wenbo, et al. Design of intelligent coal and gangue sorting system based on EAIDK [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(1):105-108.
- [20] 李曼, 段雍, 曹现刚, 等. 煤矸分选机器人图像识别方法和系统 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(10):3636-3644.
- LI Man, DUAN Yong, CAO Xiangang, et al. Image recognition method and system of coal and gangue sorting robot [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10):3636-3644.