

基于分段 T 值曲线拟合的双能 X 射线的铜矿分选研究^①

余荏山^{1,2}, 何剑锋^{1,2}, 朱文松^{1,2}, 李卫东^{1,2}, 王杉³, 汪雪元^{1,2}, 钟国韵^{1,2}, 瞿金辉¹

(1. 东华理工大学 江西省核地学数据科学与系统工程技术研究中心, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 信息工程学院, 江西 南昌 330013; 3. 赣州好朋友科技有限公司, 江西 赣州 341000)

摘要: 针对传统 T 值曲线拟合算法的双能 X 射线透射技术分选铜矿偏差较大的问题, 提出了一种分段 T 值曲线拟合方法, 该方法将厚度进行区间划分, 在每个区间内进行一次 T 值曲线拟合来对铜矿进行分选, 能更准确体现不同厚度下 T 值的变化趋势, 减小厚度给分选带来的影响。采用高能、低能射线拟合 T 值曲线, 再在各个区间内计算 T 值与曲线拟合映射值的残差, 不同物质残差也存在不同, 以此达到分选铜矿的目的。验证实验结果表明, 对两类不同品位的铜矿进行分选, 将经过分段 T 值曲线拟合的矿石图像放入 ResNet18 神经网络中进行训练, 并用训练好的模型进行测试, 测试准确率达到 88.67%。

关键词: 铜矿; 双能 X 射线; T 值曲线; X 射线分选; 区间划分; 残差

中图分类号: TD952

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.05.013

文章编号: 0253-6099(2024)05-0066-04

Research on Copper Ore Sorting Using Dual-Energy X-Ray Technique Based on Curve Fitting of T -value by Segmented Straight Lines

YU Jiangshan^{1,2}, HE Jianfeng^{1,2}, ZHU Wensong^{1,2}, LI Weidong^{1,2}, WANG Shan³,

WANG Xueyuan^{1,2}, ZHONG Guoyun^{1,2}, QU Jinhui¹

(1. Jiangxi Engineering Technology Research Center of Nuclear Geoscience Data Science and System, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Information Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. Ganzhou Good Friend Technology Co., Ltd., Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Copper ore sorting by dual-energy X-ray technique based on traditional algorithms by curve fitting of T -value always results in great deviation. In view of this problem, a curve fitting of T -value by segmented straight lines was proposed. This method divides thickness into several segments, and performs a T -value curve fitting in each segment for copper ore sorting, which can more accurately reflect the changing trend of T -value with different thicknesses and also reduce impact of thickness on sorting. High-energy and low-energy rays are adopted to fit the T -value curve, and then the residual between the T -value and the curve-fitting mapping value is calculated in each segment, showing different residuals for different substances, which can be used to achieve copper ore sorting. In a verification experiment, two types of copper ores with different grades were sorted by this method. The ore images fitted with T -value curves by segmented straight lines were put into ResNet18 neural network for training, and the trained model was then used for testing. The test results show that an accuracy rate can reach 88.67%.

Key words: copper ore; dual-energy X-ray; T -value curve; X-ray sorting; segment division; residual

铜矿资源为工业、能源和科技创新提供了坚实基础,尤其在通信领域不可或缺。目前常见的铜矿分选方法有重选法、浮选法、磁选法、湿法冶炼法、离析法

等。但这些方法也存在很多问题,如对硫化铜进行浮选时操作复杂且使用大量化学试剂^[1-2],同时也容易造成环境污染等。在众多分选方法中,双能 X 射线透射

① 收稿日期: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(11865002, U2067202); 江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20225BCJ22004); 江西省重点研发计划(20203BBG73069)

作者简介: 余荏山(1999—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向为双能 X 射线、计算机视觉。E-mail: yjs-31@foxmail.com

通信作者: 何剑锋(1977—),男,江西婺源人,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能核信息处理、嵌入式系统应用开发。E-mail: hjf_10@yeah.net

技术具有高效、精确、非破坏性和环保等特点,且双能 X 射线透射技术不受物质形状、表面状况的影响。

双能 X 射线透射技术主要通过不同物质之间的有效原子序数差异进行识别^[3-5]。如今利用双能 X 射线透射技术对物质分类的方法越来越多,但大多都是以 R 值为基础提出的。如:文献[6-7]提出通过 $R-I_L$ 曲线拟合对废金属进行回收并以铜、铝作为实验对象进行验证,文献[8]在低能信号和双能 R 值基础上提出了区域分块算法来对废金属进行识别,文献[9]基于 α 曲线提出 α 特征识别,文献[10-11]在 R 值基础上利用 R 值映射进行选矿分类,文献[12]提出高能、低能曲线拟合来对稀土矿物进行识别。这些方法虽然验证了双能 X 射线在物质识别方面的有效性,但在厚度过大的情况下还是存在较大偏差^[13]。 T 值算法虽然比 R 值算法在物质识别上更精确,但在矿物分选过程中仍然不能满足需求。本文在 T 值曲线拟合基础上提出了一种分段曲线拟合的方法,更加准确地将不同厚度矿物的 T 值大小及变化趋势体现出来。

1 双能 X 射线识别物质的 T 值算法

单能谱 X 射线在透射物质的过程中与物质发生光电效应、康普顿效应和电子对效应。X 射线在透射分布均匀的物质的过程中,其衰减规律遵循朗伯-比尔定律^[14]:

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

式中: I 为 X 射线透射物质后的信号能量值; I_0 为 X 射线的入射能量值; μ_m 为物质的质量吸收系数, m^2/kg ; ρ 为物质密度, kg/m^3 ; t 为 X 射线穿过物质的有效厚度, m 。

双能 X 射线穿透物质时,将所测得的高能、低能信号能量值代入式(1),得到传统 R 值:

$$R = \frac{\ln(I_{L0}/I_L)}{\ln(I_{H0}/I_H)} = \frac{\mu_{mL}}{\mu_{mH}} \quad (2)$$

式中: I_{L0} 、 I_L 分别为低能射线透射物质前、后的信号能量值; I_{H0} 、 I_H 分别为高能射线透射物质前、后的信号能量值; μ_{mL} 和 μ_{mH} 分别为低能吸收系数和高能吸收系数。

由式(2)可知,X 射线为单能谱时, R 值与密度、厚度无关。但在现实中,X 射线多为多能谱,多能谱情况下,基于单能谱识别物质的算法就会受到厚度影响,从而对识别结果产生较大影响。

T 值算法中,定义 X 射线透射物质后的信号强度^[15]为:

$$T = \mu_m \rho t = \ln \frac{I_0}{I} \quad (3)$$

将双能 X 射线的高能、低能信号值代入式(3)后相减得到 T 值表达式:

$$T = T_L - T_H = \mu_{mL} \rho t - \mu_{mH} \rho t = \ln \frac{I_{L0} \times I_H}{I_L \times I_{H0}} \quad (4)$$

由式(4)可知, T 值算法保留了密度和厚度信息;且当双能 X 射线透射同一物质时, T 值与物质厚度 t 成正比^[15]。由式(3)可知,当低能射线透射物质时, $T_L = \mu_{mL} \rho t$,而当 X 射线透射同一物质的同一位置时, μ_{mL} 、 ρ 为定值,此时 T_L 值随着厚度 t 的变化而变化。

2 分段 T 值曲线拟合分析

实验采用伪双能 X 射线,X 射线源管电压 150 kV、管电流 1 mA,实验所用材料为 T2 紫铜。

将紫铜厚度按 T_L 值进行区间划分,将 T_L 值从 0.4~1.9 划分成 10 个区间,并对每个区间的数据进行采集,得到的结果见表 1。

表 1 不同范围 T_L 值的信号值与 T 值

T_L 值范围	I_H	I_L	T_L	T
0.4~0.5	45 372	39 593	0.415 7	0.136 2
	45 685	38 696	0.438 6	0.166 0
	45 711	38 419	0.445 8	0.173 8
	44 831	37 052	0.482 0	0.190 6
0.5~0.6	44 077	35 988	0.511 2	0.202 8
	41 953	33 314	0.588 4	0.230 6
	42 720	34 014	0.567 6	0.227 9
	43 136	34 324	0.558 5	0.228 5
0.6~0.7	41 164	32 881	0.601 4	0.224 7
	38 751	31 434	0.641 5	0.209 3
	38 160	30 205	0.686 3	0.233 8
	38 517	31 067	0.658 2	0.215 0
0.7~0.8	38 635	29 408	0.708 1	0.228 9
	35 149	27 078	0.795 6	0.260 9
	35 720	28 278	0.752 3	0.233 6
	36 078	28 625	0.740 1	0.231 4
0.8~0.9	34 836	26 704	0.809 5	0.265 8
	34 306	26 011	0.835 8	0.276 8
	35 013	25 019	0.874 7	0.336 1
	34 765	25 303	0.863 4	0.317 7
0.9~1.0	32 682	23 622	0.932 2	0.324 6
	31 942	22 802	0.967 3	0.337 1
	32 848	23 991	0.916 7	0.314 2
	31 351	22 211	0.993 8	0.344 7
1.0~1.1	30 316	21 652	1.019 2	0.336 6
	29 570	20 883	1.055 4	0.347 8
	30 223	20 284	1.084 5	0.398 8
	30 599	20 145	1.091 4	0.418 0
1.1~1.5	29 840	19 474	1.125 3	0.426 8
	26 759	17 252	1.246 4	0.438 9
	22 586	14 117	1.447 0	0.470 0
	24 682	15 770	1.336 2	0.448 0

续表

T_L 值范围	I_H	I_L	T_L	T
1.5~1.9	20 620	13 074	1.523 7	0.455 6
	19 422	11 714	1.635 6	0.505 6
	17 640	10 401	1.752 4	0.528 6
	16 701	9 530	1.839 9	0.561 0
>1.9	15 920	8 589	1.948 3	0.617 1
	14 954	7 470	2.083 4	0.626 2
	12 415	6 523	2.219 0	0.643 5
	10 571	5 227	2.440 5	0.704 2

将所得数据输入 Origin 2022 软件进行多项式曲线拟合,得到曲线如图 1 所示。

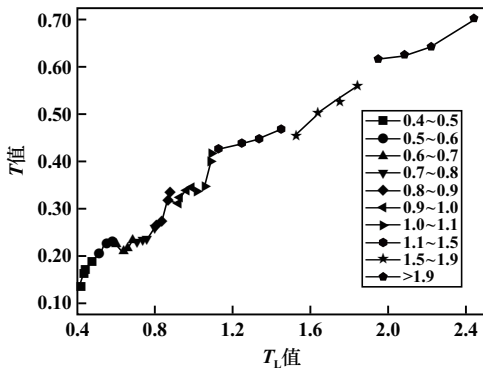


图 1 不同范围 T_L 值的 T 值拟合曲线

其中, T_L 值在 0.4~0.5 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_1 = -11.52x^2 + 11.16x - 2.514 \quad (5)$$

T_L 值在 0.5~0.6 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_2 = -5.433x^2 + 6.329x - 1.613 \quad (6)$$

T_L 值在 0.6~0.7 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_3 = 10.53x^2 - 13.45x + 4.506 \quad (7)$$

T_L 值在 0.7~0.8 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_4 = 5.638x^2 - 8.114x + 3.148 \quad (8)$$

T_L 值在 0.8~0.9 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_5 = 15.88x^2 - 25.64x + 10.61 \quad (9)$$

T_L 值在 0.9~1.0 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_6 = -2.76x^2 + 5.657x - 2.551 \quad (10)$$

T_L 值在 1.0~1.1 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_7 = 22.73x^2 - 46.86x + 24.48 \quad (11)$$

T_L 值在 1.1~1.5 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_8 = 0.2338x^2 - 0.4696x + 0.6596 \quad (12)$$

T_L 值在 1.5~1.9 之间的 T 值曲线表达式为:

$$y_9 = -0.2711x^2 + 1.229x - 0.7862 \quad (13)$$

T_L 值大于 1.9 的 T 值曲线表达式为:

$$y_{10} = 0.3516x^2 - 1.367x + 1.945 \quad (14)$$

以上曲线的相关系数分别为 0.999 8、0.993 6、

0.995 5、0.998 3、0.997 0、0.995 2、0.999 8、0.995 3、0.982 7、0.999 2, 曲线拟合相关度均较好。

再计算采集所得 T 值与不同 T_L 值对应曲线上的映射值的残差:

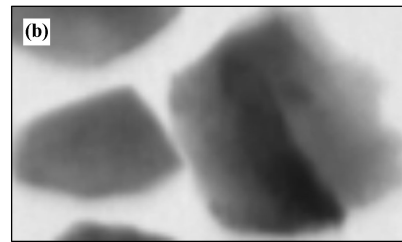
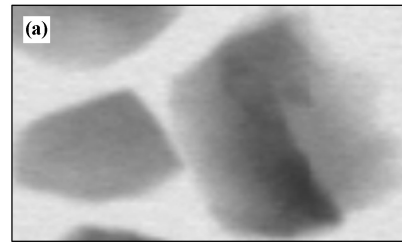
$$S = |T - y_i| \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (15)$$

式中: y_i 为对应 T_L 值在曲线上的映射值; S 为 T 值与曲线映射值的残差。

3 实验验证

双能 X 射线照射物质后会形成高能图像和低能图像, 高能图像由高能射线穿透物质形成, 信号能量值较高, 可以更好地凸显物质中密度较高的地方; 低能图像由低能射线透射物质形成, 信号能量值更低, 可以凸显物质中的低密度结构。将高能、低能图像一起分析可以获取更加全面的信息。本文选用双能 X 射线所形成的高能、低能图像对分段 T 值曲线进行实验分析。

从德兴铜矿选取两块铜矿: 一块精矿, 一块尾矿, 图 2 为精矿的高能、低能图像, 图 3 为尾矿的高能、低能图像。



(a) 高能图像; (b) 低能图像

图 2 精矿图像



(a) 高能图像; (b) 低能图像

图 3 尾矿图像

将精矿和尾矿信号能量值分别代入式(4),得到 T 值矩阵:

$$T(x,y) = \begin{bmatrix} \ln \frac{I_{L0} \times I_{H(0,0)}}{I_{L(0,0)} \times I_{H0}} & \cdots & \ln \frac{I_{L0} \times I_{H(0,j)}}{I_{L(0,j)} \times I_{H0}} \\ \vdots & & \vdots \\ \ln \frac{I_{L0} \times I_{H(i,0)}}{I_{L(i,0)} \times I_{H0}} & \cdots & \ln \frac{I_{L0} \times I_{H(i,j)}}{I_{L(i,j)} \times I_{H0}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $T(x,y)$ 为 T 值矩阵,矩阵内的每个值即为该点的 T 值; $I_{H(i,j)}$ 、 $I_{L(i,j)}$ 分别为高能、低能图像对应点的信号能量值。

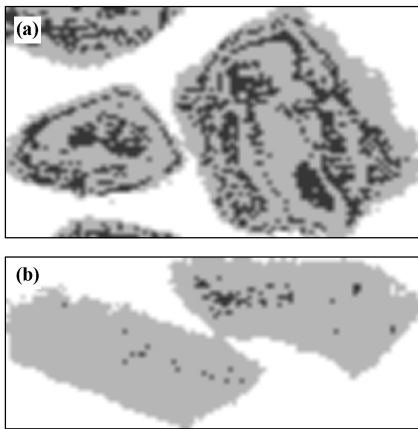
将 T 值矩阵中每个 T 值点对应的 T_L 值代入式(5)~(14)符合区间条件的相应曲线中计算曲线映射值,形成残差矩阵 $S(x,y)$:

$$S(x,y) = \begin{bmatrix} T(x_{(0,0)},y_{(0,0)}) - \bar{y}_{(0,0)} & \cdots & T(x_{(0,j)},y_{(0,j)}) - \bar{y}_{(0,j)} \\ \vdots & & \vdots \\ T(x_{(i,0)},y_{(i,0)}) - \bar{y}_{(i,0)} & \cdots & T(x_{(i,j)},y_{(i,j)}) - \bar{y}_{(i,j)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

精矿、尾矿高能和低能图像分别经过式(16)和式(17)处理后,得到残差图像,结合 T2 紫铜数据分析对比精矿和尾矿的残差差异,对铜含量较高处、矿石其余部分以及背景分别进行标记。再将标记好的图像进行线性变换:

$$G(x,y) = 255 \times S(x,y) \quad (18)$$

最后将线性变换后的图像进行 RGB 伪彩色配色,得到结果如图 4 所示。

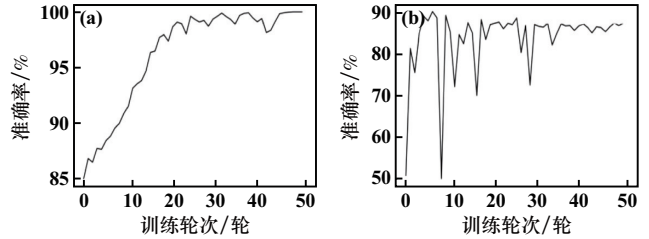


(a) 精矿; (b) 尾矿

图 4 线性变换后的精矿和尾矿伪彩图

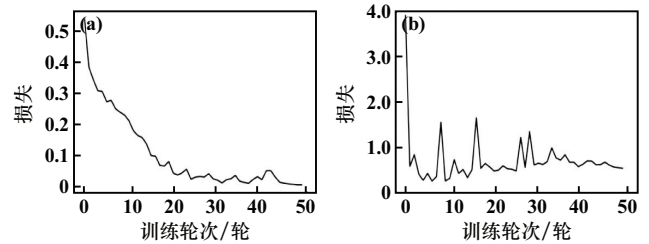
将 5 000 块铜矿的高能、低能图像分别用分段 T 值曲线拟合处理得到 5 000 张伪彩图,其中 2 500 张精矿伪彩图、2 500 张尾矿伪彩图。选取 2 000 张精矿和 2 000 张尾矿伪彩图用作训练,其余作为验证。将所有图像按照上述要求放入 ResNet18 神经网络中训练,训

练轮次为 50 轮,最终验证集准确率为 87.30%。训练集和验证集的准确率和损失结果分别见图 5 和图 6,其中损失结果纵坐标表示的是预测值与真实值的不一致程度,是一个非负实值。



(a) 训练集; (b) 验证集

图 5 准确率结果



(a) 训练集; (b) 验证集

图 6 损失结果

调用训练好的模型,用 600 张经过分段 T 值曲线拟合后的铜矿图像伪彩图进行测试,测试结果为成功预测 532 张,准确率 88.67%。

4 结 语

研究了基于 T 值曲线拟合算法的双能 X 射线透射识别方法,提出了一种分段 T 值曲线拟合方法,并将经过分段 T 值曲线拟合的铜矿图像放入 ResNet18 神经网络中进行实验测试,准确率达 88.67%,分类效果较好,验证了该方法的可行性。

参考文献:

[1] 曹玉川. 某硫化铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4): 82-84.

[2] 杨文寿. 某含铜金银多金属硫化矿尾矿资源综合利用试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3): 84-87.

[3] ABBASI S, MOHAMMADZADEH M, ZAMZAMIAN M. A novel dual high-energy X-ray imaging method formaterials discrimination[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 930:82-86.

[4] 常青青,陈嘉敏,沈天明,等. 基于双能 X 射线的有效原子序数提取算法研究[J]. 计算机仿真, 2014,31(2):297-301.

这一结果进一步说明:浮选前期,滑石比辉钼矿更容易与药剂作用,此时滑石矿物表面的起泡剂 MIBC 吸附量远大于辉钼矿表面;伴随着滑石不断脱离辉钼矿表面,辉钼矿表面不断裸露出来,起泡剂 MIBC 与辉钼矿表面作用的机会增加,辉钼矿表面起泡剂 MIBC 吸附量也不断增加;浮选后期,2种矿物表面的起泡剂 MIBC 吸附量接近。

3 结 论

1) 采用快速浮选技术,在矿物粒度 0.034~0.074 mm、起泡剂 MIBC 用量 20 g/t、浮选时间 60 s 条件下,滑石回收率 76.64%,辉钼矿回收率仅 19.72%,实现了滑石与辉钼矿的高效分离。

2) 滑石浮选过程更接近于经典一级动力学模型,辉钼矿浮选过程更接近于修正后的经典一级动力学模型。

3) 高滑石型辉钼矿浮选时,在开始阶段,可浮性好的滑石会覆盖在辉钼矿表面,阻碍浮选药剂的作用,而并不影响滑石的浮选过程。浮选 60 s 后,由于矿浆中大量的滑石随泡沫提升到矿浆表面,矿浆内部的滑石量急剧下降,伴随着矿浆不断被搅拌,辉钼矿表面的滑石同时受到矿浆内部液流的冲力以及表面药剂作用后产生的疏水力而脱离辉钼矿表面。此时辉钼矿表面裸露在矿浆中,经浮选药剂作用,辉钼矿回收率开始急

剧升高,说明快速浮选工艺可实现滑石与辉钼矿的高效分离。

参考文献:

- [1] 张其东,袁致涛,刘炯天,等. 葡聚糖对辉钼矿与滑石浮选分离的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016,26(4):884-890.
- [2] 冯其明,张程,张国范,等. 钙离子体系下羧化壳聚糖对滑石浮选行为影响[J]. 中国有色金属学报, 2018,28(6):1191-1195.
- [3] 张其东,袁致涛,刘炯天,等. 金属离子对滑石浮选行为的影响及机理研究[J]. 金属矿山, 2016(4):67-71.
- [4] 钟春晖,冯博,陈渊淦,等. 黄薯树胶为抑制剂和丁基黄药为捕收剂的辉钼矿与滑石浮选分离[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2021,31(12):3879-3890.
- [5] 张其东. 辉钼矿与滑石可浮性差异调控基础研究[D]. 沈阳:东北大学, 2016.
- [6] 钟春晖,冯博,严华山,等. 三种有机抑制剂在辉钼矿滑石浮选分离中的作用[J]. 中国有色金属学报, 2022,32(12):3843-3851.
- [7] 郑灿辉,卜显忠,王朝,等. 快速浮选技术在某高滑石型辉钼矿浮选中应用研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):70-72.
- [8] 白丽梅,刘忠义,韩跃新,等. 浮选动力学模型的应用与发展[J]. 矿产保护与利用, 2016(4):56-63.
- [9] 冉金城,邱显扬. 铜硫分离中银的选择性导向回收[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):33-38.
- [10] 柳泉洲. 低阶煤油泡浮选过程特征及其动力学研究[D]. 江苏:中国矿业大学, 2017.

引用本文: 陈帆帆,郑灿辉,卜显忠. 快速浮选分离滑石与辉钼矿动力学研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):70-74.

(上接第 69 页)

- [5] BONNIN A, DUVAUCHELLE P, KAFTANDJIAN V, et al. Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2014,318:223-231.
- [6] 毛冬辉,叶文华,熊田忠,等. 双能 X 射线识别金属物料的 R 值曲线拟合算法[J]. 机械制造与自动化, 2017,46(5):160-162.
- [7] 王祺奥. 基于双能 X 射线透射的废金属识别与分离控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
- [8] 黄河,叶文华,熊田忠,等. 基于双能 X 射线透射的区域分块废有色金属识别算法[J]. 机械制造与自动化, 2019,48(4):26-29.
- [9] 李伟毅,叶文华,熊田忠. 基于 BP 神经网络的双能 X 射线透射的金属识别算法[J]. 有色金属工程, 2020,10(8):124-130.
- [10] 高航,王建英,张雪峰,等. 双能 X 射线透射矿物识别系统图像

处理设计[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1):101-106.

- [11] 李鹏祥. 矿石智能分选方法的研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2023.
- [12] 童郭贵,李解. 基于双能 X 射线高、低能曲线拟合识别稀土矿物[J]. 内蒙古科技大学学报, 2020,39(3):212-216.
- [13] 刘磊,赵兴华,张芑. X 射线厚度测量原理及影响因素[J]. 价值工程, 2023,42(20):108-110.
- [14] 葛学海,白云飞,陈鹏,等. 煤与矸石分离系统中 X 射线探测器的设计[J]. 选煤技术, 2017(6):64-67.
- [15] 王冬阳,张雄杰,胡斌,等. 基于曲线拟合的双能 X 射线透射的金属识别研究[J]. 有色金属工程, 2022,12(2):85-91.

引用本文: 余芷山,何剑锋,朱文松,等. 基于分段 T 值曲线拟合的双能 X 射线的铜矿分选研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):66-69.