

# 基于双能 X 射线透射的区域分块废有色金属识别算法

黄河<sup>1</sup>,叶文华<sup>1</sup>,熊田忠<sup>1</sup>,胡品龙<sup>2</sup>,黄艰生<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 江苏华宏科技股份有限公司,江苏 江阴 214423)

**摘要:**在基于双能 X 射线透射技术的废有色金属分选中,可识别的物料厚度范围较小,无法满足废有色金属分选的需求。为解决该问题,对现有识别算法进行了分析,针对现有算法的不足,提出了一种基于低能透射信号值和双能  $R$  值双参数联合的区域分块废金属识别算法,提高了识别算法的适用厚度范围,并通过实验对算法的识别率进行了验证。

**关键词:**双能 X 射线;物质识别;废金属分选;区域分块

**中图分类号:**TP274 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)04-0026-04

## Zone Division Scrap Non-ferrous Metal Recognition Algorithm Based on Dual Energy X-ray Transmission

HUANG He<sup>1</sup>, YE Wenhua<sup>1</sup>, XIONG Tianzhong<sup>1</sup>, HU Pinlong<sup>2</sup>, HUANG Jiansheng<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Huahong Technology Stock Co., Ltd., Jiangyin 214423, China)

**Abstract:** The range of identifiable material thickness is small in the sorting process of waste non-ferrous metals based on dual-energy X-ray transmission technology, so it can not meet the demand. For this, this paper analyzes the existing recognition algorithms and proposes a zone division scrap metal recognition algorithm based on  $R$  and low energy transmission signal. The new algorithm can be used to increase the applicable thickness range and its accuracy is verified by experiments.

**Keywords:** dual-energy X-ray; material identification; scrap metal sorting; zone division

## 0 引言

废金属回收行业主要采用风选、磁选、色选和涡电流分选等技术实现废金属的分选,将金属与非金属、黑色金属与有色金属等分离。由于家电、汽车等产品中有色金属比例不断提高,铜、铝等废有色金属细化分选的需求增加,上述常见的分选方法无法适应需求,需要新的分选解决方案。

在废有色金属的识别方法中,双能 X 射线透射识别技术不受物质表面质量的影响,可识别的金属种类较多,适用于废有色金属的自动化分选<sup>[1]</sup>。国内外已有许多学者进行了相关研究并取得一定成果。Anne Bonning 根据 X 射线与不同物质的相互作用区别,在双能 X 射线技术的基础上提出了基于物质有效原子序数的成像方法<sup>[2]</sup>。M.Kutilla 和 J.Viitanen 等人提出了一种结合双能 X 射线、机器视觉与感应传感器的废金属分选系统,在实验室条件下取得了较好的分选效果<sup>[3]</sup>。王艳翔提出一种欠采样识别方法,对物质模板图像进行多阈值分割实现物质分类<sup>[4]</sup>。陈志强结合图像处理技术,通过曲线实时矫正的方法提高了基于 X 能谱曲线的识别方法的准确率<sup>[5]</sup>。张润生基于双能 X 射线透射技术和物质判别理论,确定了

最适合描述双能 X 射线材料分辨特性的有效原子序数计算方法<sup>[6]</sup>。杨斌、毛冬辉、王祺奥<sup>[7-9]</sup>等人为减弱厚度对物料识别的影响,提出了  $R$  值曲线拟合识别法,在实验条件下可以实现对一定厚度范围内铜、铝的识别与定位。

综合国内外研究情况发现,在双能 X 射线透射识别技术中常用的双能  $R$  值算法和双能曲线拟合算法均有一定的局限性,不适用于废有色金属分选,而改进后的  $R$  值曲线拟合法等算法识别物料厚度范围较小,仅可识别 2~7 mm 厚度范围的铜与 5~20 mm 厚度范围的铝。

本文将对以上算法进行分析后,针对存在的问题,提出一种利用双能  $R$  值与低能透射信号值进行区域分块的识别算法,将可识别废金属厚度范围扩大到 2~40 mm,以初步满足废有色金属分选的需求。同时,在现有技术条件下,各类识别算法无法正确识别重叠物料,因此物料在进入双能 X 射线分选系统前一般先由旋振筛等装置打散,尽量避免物料出现重叠。

## 1 废金属材料识别算法分析

### 1.1 双能 $R$ 值算法与双能曲线拟合法

双能  $R$  值算法是通过高、低能 X 射线扫描某一物质,

**基金项目:**江苏省重点研发计划项目(BE2016758);江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2014067)

**作者简介:**黄河(1992—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事废有色金属分选技术方面研究。

将物质在高、低能X射线下的线性衰减系数作比来获取物质的特征 $R$ 值,进而进行物质识别,其公式如下:

$$R = \frac{\mu_{mL}}{\mu_{mH}} = \frac{\ln(I_{L0}/I_L)}{\ln(I_{H0}/I_H)} \quad (1)$$

式中: $\mu_{mH}$ 和 $\mu_{mL}$ 分别表示高、低能X射线透射过某一物质的线性衰减系数, $I_H$ 与 $I_L$ 分别表示高、低能X射线透射后强度信号值, $I_{H0}$ 和 $I_{L0}$ 分别表示高、低能X射线透射前的强度信号值。

双能曲线拟合法是对采集到的高、低能X射线透射信号进行处理,取一种透射信号作为坐标系横坐标,另一种作为纵坐标,进行曲线拟合获得物质的样本双能曲线,当检测到新物质的数据时,根据该数据点落入的样本曲线划分的区域判断物质种类。

以上算法是基于单色谱X射线建立的,而在双能X射线透射分选废有色金属过程中,一般使用连续能谱的X射线,在连续谱条件下,基于单色谱建立的金属识别算法会受到物料厚度的影响,导致识别的准确性降低,无法满足废有色金属分选的需求<sup>[8]</sup>。

## 1.2 $R$ 值曲线拟合算法

双能 $R$ 值与低能X射线透射信号值 $I_L$ 存在着对应关系,通过拟合 $R-I_L$ 曲线,当检测到新数据时,以拟合优度检验的思路来判定该数据点与哪条样本曲线更加相关,完成物料识别,即 $R$ 值曲线拟合算法<sup>[8]</sup>。

在X射线源系统管电压为150kV,管电流为1mA的条件下,铝、铜的 $R-I_L$ 拟合曲线如图1所示。该算法可以识别2~7mm厚度范围的铜与5~20mm厚度范围的铝,无法满足废有色金属分选的要求。

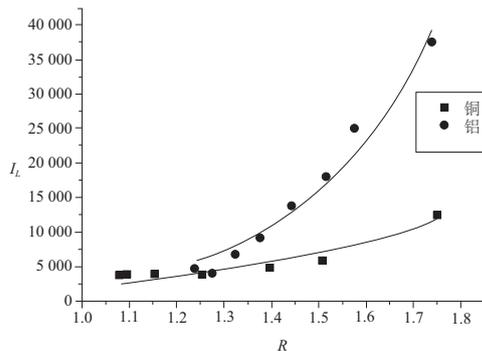


图1  $R-I_L$ 曲线图

## 2 区域分块识别算法

### 2.1 区域分块识别算法参数分析

传统的物质识别算法均希望通过单一的参数完成物质的识别,而本文在多次实验中发现,两种物质的任意单一参数均存在重叠的情况,故尝试通过两个参数建立坐标系并进行区域分块,实现对物质的识别。

涉及到物质种类的参数主要包括1)直接采集到的参数:物质的高能透射信号、低能透射信号;2)通过计算获得的参数:双能 $R$ 值、物质与拟合曲线的相关度指数 $r$ 。

在双能X射线透射系统中,透射过物质的X射线首

先辐射阵列探测器的低能探测模块,再经过铜片滤波后辐射至高能探测器模块,因此X射线在被高能探测模块采集时存在一定的能量损失,进而导致采集到的高能透射信号值偏小且存在一定误差,区分度降低。故选择低能透射信号值作为区域分块识别的参数之一,而相关度指数 $r$ 值的求值过程较复杂,故选择双能 $R$ 值作为区域分块识别的另一参数。

### 2.2 铜、铝区域分块临界值分析

实验选用X射线管电压为150kV,管电流为1mA,多次实验后取平均值,得铜、铝试件的低能透射信号值与双能 $R$ 值如表1和表2所示。以双能 $R$ 值为横坐标,低能透射信号值 $I_L$ 为纵坐标,将表1与表2中数据制成网格图以便分析,如图2所示。

表1 铜样本低能透射信号值与双能 $R$ 值

厚度/mm	$I_L$	$R$
2	9 414.86	1.749 6
5	2 784.35	1.495 3
7	1 478.89	1.437 9
10	922.41	1.273 6
15	585.51	1.250 1
20	514.18	1.168 0
30	484.44	1.082 2
40	425.76	1.089 4

表2 铝样本低能透射信号值与双能 $R$ 值

厚度/mm	$I_L$	$R$
5	34 536.56	1.711 9
10	22 072.59	1.572 8
15	14 942.04	1.506 4
20	10 795.37	1.426 1
30	5 756.41	1.384 6
40	3 456.25	1.325 0
60	1 514.73	1.239 8
90	886.42	1.276 3

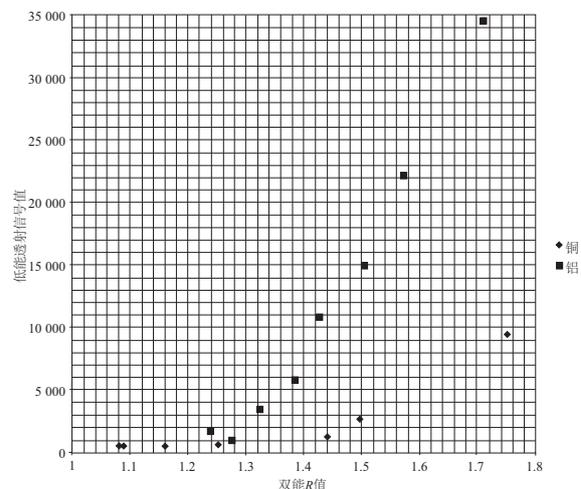


图2 铜、铝双能 $R$ 值与低能透射信号网格图

观察图2并结合表1、表2中数据,选取2mm厚的铜、60mm厚的铝、7mm厚的铜和20mm厚的铝的数据点作为临界点进行分析,分别记为A、B、C、D点。

选取临界点后,根据4个临界点选取区分2种物料的关键值:

1) 根据点A确定第1个关键值为低能透射信号值10000,当物料的低能透射信号值 $>10000$ 时判定为铝;

2) 在1)的基础上根据点B确定第2个关键值为低能透射信号值1500,当物料的低能透射信号值 $<1500$ 时判定为铜;

3) 在1)、2)的基础上根据点C和点D确定第3个关键值为双能R值1.43,即当物料的低能透射信号值在1500~10000之间时,若双能R值 $>1.43$ 则判定为铜, $<1.43$ 则判定为铝。

将临界点与关键值在图中标出,可以得到铜、铝数据点的区域分块图,如图3所示。

从图3中可以更直观地看出,3个关键值对应的直线将该坐标系划分为6个区域,其中区域1、2、3为铝的区域,区域4、5、6则为铜的区域。根据数据变化的规律可以确定,除厚度 $>60$ mm的铝的数据点可能落入铜的区域以及厚度 $<2$ mm的铜的数据点可能落入铝的区域外,其余区域均只包含一种金属的数据点。因此可以通过该方法识别厚度 $>2$ mm的铜和厚度在60mm内的铝;但当物质厚度过大时,X射线将无法透射物质,故在当前算法的使用条件下,铜、铝的识别厚度范围分别为2mm~40mm和1mm~60mm。

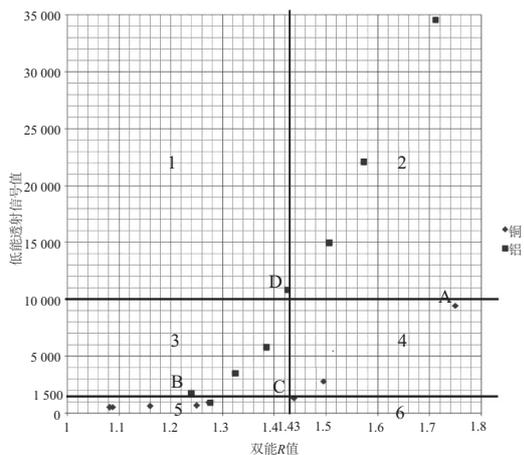


图3 铜、铝数据点区域分块

### 2.3 关键值可靠性验证

为确保所选关键值的可靠性,对临界点数据进行多次采样,以验证其数据的稳定性。

厚度为2mm的铜的低能透射信号值采样结果如图4所示。由图可见其低能透射信号值稳定在9500左右,故关键值低能透射信号值10000是可信的。

采用同样的方法对另外2个关键值进行验证,可以确定关键值低能透射信号值1500和双能R值1.43是可信的。

### 2.4 算法效率分析与验证

根据R值曲线拟合算法与区域分块算法的应用步

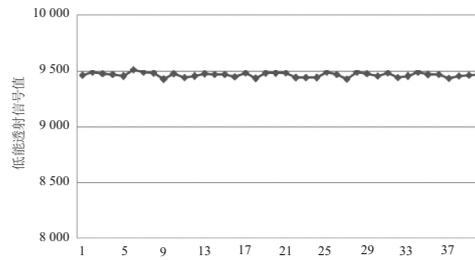


图4 2mm厚铜低能透射信号值采样结果

骤,可以分析出其时间复杂度均为 $O(n)$ ,无法判断优劣,故采用获取系统时间戳的方式对算法的运行时间进行统计,样本数为30,测试结果如表3所示。从统计结果可以看出,区域划分识别算法的耗时明显小于R值曲线拟合算法,效率更高。

表3 识别算法运行时间统计  $\mu\text{s}$

算法种类	最小值	最大值	平均值
R值曲线拟合算法	99.3	300.1	183.7
区域分块识别算法	50.2	101.4	65.3

### 2.5 算法实用性分析

当需要分选铜、铝之外的有色金属时,根据待识别有色金属的样本材料确定其区域分块关键值,完成区域分块即可。根据2.2节可知,实现铜、铝两种金属的区域分块需要3个关键值。若同时对3种金属进行识别,则需要的关键值过多,无法完成区域分块。故对于多种有色金属混合的废弃物,需要通过多次扫描或多台设备实现分选。同时,在相同能级X射线的透射下,有效原子序数相近的物质的低能透射信号值和双能R值均相近,无法通过这2个参数进行识别,故区域分块识别算法只适用于分选2种有效原子序数相差较大的物质,如有效原子序数较大的铜、锌和有效原子序数较小的铝、镁。

## 3 实验验证与分析

选取工业中常用铝和铜作为试验物料对算法效果测试,试验条件为双能X射线管电压为150kV和管电流为1mA;试验材料规格及所采集数据如表4所示;R值曲线拟合算法测试结果如表5所示;区域分块识别算法测试结果如表6所示。

表4 物料规格及试验数据

样本种类	厚度/mm	$I_L$	R
铝	40	3 426.45	1.321 7
铝	60	1 526.77	1.235 6
铜	30	495.13	1.083 3
铜	40	423.17	1.090 6

表 5 R 值曲线拟合算法测试结果

样本种类	厚度/mm	识别结果	$r_{Al}$	$r_{Cu}$
铝	40	铝	0.900 3	0.898 7
铝	60	铜	0.851 3	0.852 1
铜	30	铝	0.857 9	0.841 2
铜	40	铝	0.832 6	0.820 5

表 6 区域分块识别算法测试结果

样本种类	厚度/mm	识别结果	判断依据
铝	40	铝	$1\ 500 < I_L < 10\ 000$ & $R < 1.43$
铝	60	铝	$1\ 500 < I_L < 10\ 000$ & $R < 1.43$
铜	30	铜	$I_L < 1\ 500$
铜	40	铜	$I_L < 1\ 500$

从表 4 中可以看出,在使用 R 值曲线拟合算法时,当铝的厚度达到 40 mm,铜的厚度达到 30 mm 时,试件的数据与铜、铝样本拟合曲线的相关度指数区分度已经十分小,并且出现了误识别,该算法无法完成对铜、铝物料的有效识别。

从表 6 中可以看出,区域分块识别算法正确识别了所有试件的种类,其中通过低能透射信号值可正确识别 30 mm 与 40 mm 厚的铜,通过低能透射信号值与双能 R 值 2 个参数复合判别可正确识别 60 mm 厚的铝。

综合以上测试结果并结合前文分析可以得出,区域分块识别算法在适用厚度范围上相对其他基于双能 X 射线透射技术的识别算法有了较大的提升,将铜、铝的识别厚度范围分别扩大到了 2 mm~40 mm 和 1 mm~60 mm。

## 4 结语

本文主要对基于双能 X 射线透射技术的识别算法进

行研究,对多种识别算法进行了分析,针对各识别算法应用于废有色金属回收系统中存在的不足,提出了一种区域分块识别算法,并以铜、铝为例进行了试验验证。结果表明本文提出的算法扩大了可识别物料的厚度范围,有效提高了物料种类识别的准确率。

### 参考文献:

- [1] Mesina M B, De Jong T P R, Dalmijn W L. Automatic sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dual energy X-ray transmission sensor[J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 82(4): 222-232.
- [2] 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 & Methods in Physics Research, 2014, 318(7): 223-231.
- [3] Kutila M, Viitanen J, Vattulainen A. Scrap Metal Sorting with Colour Vision and Inductive Sensor Array[C]. International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce Vol. IEEE Computer Society, 2005:725-729.
- [4] 王艳翔. 双能 X 射线物质识别系统的研究[D]. 太原:中北大学,2017.
- [5] Zhi-Qiang Chen, Tiao Zhao, Liang Li. A curve-based material recognition method in MeV dual-energy X-ray imaging system[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, 27(1): 173-180.
- [6] 张润生,杨立瑞,孔维武. 双能量 X 射线材料分辨特性与有效原子序数关系分析[J]. 警察技术, 2010(2): 40-41.
- [7] 杨斌,叶文华,熊田忠,等. 双能 X 射线透射系统的噪声分析与滤波方法研究[J]. 机电工程, 2015, 32(7): 891-896, 908.
- [8] 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, 166.
- [9] 王祺奥,叶文华,熊田忠,等. 废有色金属分选中散布物料动态位置的实时计算[J]. 机电工程, 2017, 34(1): 94-99.

收稿日期:2018-01-22