

# 双能 X 射线识别金属物料的 R 值曲线拟合算法

毛冬辉<sup>1</sup> 叶文华<sup>1</sup> 熊田忠<sup>1</sup> 王祺奥<sup>1</sup> 顾瑞华<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:** 双能 X 射线透射技术可以识别物料的种类,是一种能够用于回收废金属资源的新方法。虽然这项技术在安检行业中已经有了广泛的应用,但是其中常用的 R 值算法受物质厚度的影响较大,并且识别的物料形式也不相同,应用于回收废金属资源时有待改进。在分析 R 值算法的基础上,提出了一种 R 值曲线拟合识别算法,并通过实验验证了该方法识别铝和铜类的金属物料的有效性。

**关键词:** 双能 X 射线; 物质识别; 废金属分选; 曲线拟合

**中图分类号:** TP274+.5 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2017)05-0160-03

## R-value Curve Fitting Algorithm for Metal Materials' Identification Based on Dual Energy X-ray Technology

MAO Donghui<sup>1</sup>, YE Wenhua<sup>1</sup>, XIONG Tianzhong<sup>1</sup>, WANG Qiao<sup>1</sup>, GU Ruihua<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Dual energy X-ray transmission separation technology can be used to identify the type of materials. It can be applied to recycling scrap metal. It is widely used in safety check. However, the thickness of the materials has great influence on the R-value algorithm which is commonly used in this technology and the forms of the materials' identification is different. So, it is necessary to improve the technology for scrap metal recovery. In this paper, the R-value curve fitting algorithm is put forward based on the R-value algorithm, and the experiments are made to prove the validity of the proposed method.

**Keywords:** dual-energy x-ray; material identification; scrap metal separation; curve fitting

## 0 引言

废金属分选技术是一种将废金属物料按元素种类区分开来的技术,是再生金属资源回收利用的前提。废金属分选技术的原理一般是基于金属物料的物理性质,应用较广的自动化设备包括磁选机、色选机和涡电流分选机等<sup>[1]</sup>。磁选机是依据金属物料磁性的差异进行识别,主要应用在对分选铁等强磁性金属的场合<sup>[2]</sup>;色选机是基于金属表面颜色的不同来识别废金属物料,分选质量受金属表面的油漆、锈迹等影响较大<sup>[3]</sup>;涡电流分选机根据物料电导率与密度的比值判定物料所属种类,主要被用来从金属中分出非金属物料<sup>[4]</sup>。

然而随着电子消费品、机电装备和汽车等产品的生产淘汰周期越来越短,废金属物料的元素成分也越来越复杂。上述常见的废金属分选技术不能完全适应废金属资源循环利用产业的需求,新的自动化分选技术应运而生,其中比较有代表性的就是双能 X 射线透射分选技术。该技术根据分析不同能量 X 射线透射物料之后的衰减程度差异来识别物料的种类。与其他分选技术相比,不受物质表面状况、磁性和导电性等的影响,可以分选的金属种类多,适用的废金属物料来源广。

国外学者针对双能 X 射线透射分选技术已经投入了大量的研究,荷兰德尔夫特理工大学的 M.B. Mesina<sup>[5]</sup>, T. P.R.de Dong<sup>[6]</sup> 和 W.L. Dalmijn<sup>[7]</sup> 等联合使用双能 X 射线探测器、光学相机和电磁传感器进行多特征分析,实现了对废金属物料的有效分选,并已经将研究成果转化为产品投入工业应用。德国 STEINERT 公司的产品 XSS 建立了样本物料的双能 X 射线透射特性曲线,通过实测数据与特征曲线的比对分析能够精确分选 5~10 mm 范围内铝和铜废金属物料。

国内的研究人员还没有将双能 X 射线透射技术应用到废金属分选领域,对该项技术的研究主要集中在安检行业。其中相对常用的识别方法是 R 值算法,根据与物质有效原子序数相关的特征值划分出有机物、无机物和混合物的种类范围<sup>[8]</sup>。但是,废金属分选系统与安检系统有所不同,一方面是废金属分选要求能够准确判定物料对应哪一种金属种类,而不是划分种类范围,另一方面 R 值算法容易受到物料厚度的影响,在识别不同厚度金属物料时的准确性有待验证。在使用双能 X 射线透射技术分选废金属物料时不能直接应用这种算法,需要加以改进。

因此,本文以 R 值算法为基础,研究双能 X 射线透射分选技术,结合实验样本曲线拟合的思想,提出一种 R 值曲线拟合算法,以实现废金属物料的有效识别。

作者简介:毛冬辉(1990-),男,江苏镇江人,硕士研究生,研究方向为废金属分选设备。

## 1 R 值算法的分析

X 射线入射到物质中产生的强度衰减,与射线光子能量强度、物质的元素性质和厚度有关。根据朗伯定律<sup>[9]</sup>对单色能谱的 X 射线分析可以得到:

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

式中:  $I_0$ —X 射线光束与物质相互作用之前的强度值;

$I$ —X 射线光束与物质相互作用,衰减之后的强度值;

$\mu_m$ —质量吸收系数  $\text{m}^2/\text{kg}$ ;

$t$ —X 射线穿透物质的有效厚度  $\text{m}$ ;

$\rho$ —物质密度  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$\mu_m$  是物质的固有属性,只与物质对应的有效原子序数有关,不受外界的影响和干扰,与其化学状态和内部原子排布无关。物质的有效原子序数的不同,质量吸收系数也会不同。根据这一性质,X 射线能够实现物质种类的识别。

将式(1)两边取自然对数,可得:

$$\mu_m \rho t = \ln \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

由于双能量 X 射线系统中,高能 and 低能 2 种能级的 X 射线同时透射过待检测物料的同个部位,对应的密度和厚度相同,将高、低能 X 射线透射数据带入式(2)作比值,能够得到 R 值。

$$R = \frac{\mu_{mL}}{\mu_{mH}} = \frac{\ln(I_{L0}/I_L)}{\ln(I_{H0}/I_H)} \quad (3)$$

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质量吸收系数,  $I_H$  与  $I_L$  分别表示的是高、低能 X 射线透射过物质之后的透射强度,  $I_{H0}$  和  $I_{L0}$  分别表示的是高、低能 X 射线在入射物料之前的透射强度。

根据式(3)可知,在单色光谱 X 射线入射情况下, R 值与物质原子序数相关,不受物质的物理化学状态和厚度的影响,可以根据 R 值的大小来区分物质的种类。但是,实际的工业应用中大多数的 X 射线源是连续谱,波长连续变化,质量吸收系数  $\mu_m$  不是常数,会随着光子能量的增大而减小。R 值算法真正应用在废金属分选中的效果还需要通过实验来检验。

采集不同厚度的金属物料在双能 X 射线透射下的数据进行分析,实验样本选取阶梯状的金属铜和铝。铜试件材料为 T2 紫铜,99% 以上为铜元素,铝试件为 A00 标准铝,99.7% 以上为铝元素。实验选取 X 射线源的管电压为 200 kV,管电流为 2 mA,其中低能部分能级为 40~80 KeV,高能部分为 150~200 KeV。

在没有放置物料的情况下,低能 X 射线到达探测器的信号强度均值  $I_{L0}$  为 57 770.65,高能 X 射线对应  $I_{H0}$  为 46 628.60。带入式(3),经过数据采集和计算,分别得到铝和铜阶梯状试件不同厚度对应的 R 值,分别记录在表 1 和表 2 中。

对 R 值算法的计算结果进行分析得出:

1) 铝和铜样本物料的 R 值计算结果受厚度影响大,随着厚度的增大而减小。2) 物质种类不同,在厚度不同时也有可能出现 R 值相同的情况。

表 1 铝试件 R 值计算结果

阶梯数	厚度/mm	$I_H$	$I_L$	R
1	5	34 769.00	35 533.48	1.656 0
2	10	26 653.81	23 748.22	1.589 5
3	15	20 888.47	16 758.66	1.541 1
4	20	16 491.20	12 168.87	1.498 6
5	30	10 628.18	6 850.36	1.441 9
6	40	6 941.74	4 079.55	1.391 6
7	60	3 128.04	1 637.46	1.318 9

表 2 铜试件 R 值计算结果

阶梯数	厚度/mm	$I_H$	$I_L$	R
1	2	21 372.58	12 326.87	1.980 1
2	5	10 018.87	4 145.31	1.713 2
3	7	6 435.91	2 155.76	1.660 5
4	10	3 518.57	1 271.65	1.476 8
5	15	1 455.32	522.63	1.357 2
6	20	669.06	263.39	1.270 1
7	30	246.99	124.38	1.171 8

在双能 X 射线透射分选识别金属物料的过程中,连续谱 X 射线的能级会发生变化,厚度也无法直接检测,但是 X 射线探测器中感应带和对应能级 X 射线的物理学效应是可以估计的。在连续谱 X 射线 200 kV 的管电压下,X 射线探测器上的高能感应带对 150~200 KeV 能级部分的射线感应灵敏,这个能级段 X 射线与物质发生物理作用的主要是康普顿效应,康普顿效应对应的高能 X 射线质量吸收系数<sup>[10]</sup>为:

$$\mu_{mH} = 0.665Z \frac{N_A}{A} \quad (4)$$

式中:  $Z$ —物质的有效原子序数;

$N_A$ —阿伏加德罗常量;

$A_r$ —介质原子的相对原子质量。

对于一个特定的物质  $\mu_{mH}$  几乎是不变的,不妨设  $\psi = \mu_{mH}(E)t$ ,参照计算式(2)和式(3),可得:

$$R = \frac{\ln(I_{L0}/I_L)}{\psi \rho} \quad (5)$$

进一步推导可得:

$$I_L = I_{L0} e^{-\psi \rho R} \quad (6)$$

由此可见,低能量 X 射线对应的透射信号值  $I_L$  与 R 值存在着对应关系。因此本文从低能 X 射线透射信号值  $I_L$  和 R 值入手,通过拟合  $R-I_L$  曲线,通过分析实验曲线提出 R 值的改进算法,并修正厚度对 R 值算法的影响<sup>[11]</sup>。

## 2 R 值算法的改进

根据上一节对 R 值算法的分析,以 R 值为横坐标,  $I_L$  为纵坐标,制作  $R-I_L$  曲线图,根据式(6)确定两者的关系函数形式为  $y = ae^{bx}$  进行模拟,获得的模拟曲线图如图 1 所

示。

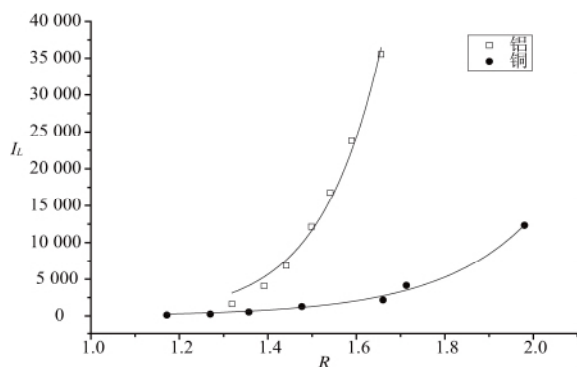


图 1  $R-I_L$  关系曲线

其中, 铝的  $R-I_L$  关系曲线函数表达式为:

$$I_{LAl} = 0.213\ 53e^{7.275\ 1R} \quad (7)$$

铜的  $R-I_L$  关系曲线函数表达式为:

$$I_{LCu} = 1.097\ 98e^{4.711\ 59R} \quad (8)$$

2 条曲线分别对应的相关系数为 0.988 72 和 0.991 3, 匹配度较好。当探测到新的高能和低能数据时, 以拟合优度检验的思想来判定该数据点与哪条样本曲线更加相关。拟合相关系数  $r$  的值越靠近 1 表示拟合相关度越高, 计算式为:

$$R = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (I_{Li} - \bar{I}_L) (I_{Fi} - \bar{I}_F) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{Li} - \bar{I}_L)^2 \sum_{i=1}^n (I_{Fi} - \bar{I}_F)^2}} \quad (9)$$

式中:  $R_i$  和  $I_{Li}$  分别为计算采集到的双能量  $R$  值和低能信号值  $\bar{I}_L$  为  $I_{Li}$  的均值,  $I_{Fi}$  和  $\bar{I}_F$  分别为  $R_i$  值带入拟合曲线函数后获得的模拟低能量值及其均值,  $n$  为检测数据的个数。

具体的改进算法步骤为:

步骤 1: 根据阶梯样本材料拟合样本  $R-I_L$  函数;

步骤 2: X 射线探测器实时采集待检测金属物料的  $n$  多个高低能透射信号  $I_H$  和  $I_L$ ;

步骤 3: 根据  $R$  值算法计算物料对应的  $R$  值, 并计算样本  $R-I_L$  关系曲线函数的模拟值;

步骤 4: 将各个点的数据  $(R_1, I_{L1}), (R_2, I_{L2}), \dots, (R_i, I_{Li}), \dots, (R_n, I_{Ln})$  和模拟值结果带入式(9);

步骤 5: 比较采集到的物料数据与铝和铜样本曲线的拟合相关系数, 判定相关系数更靠近 1 的金属曲线为该物料对应的金属种类。

### 3 实验验证与分析

对  $R$  值曲线拟合算法进行实验分析, 选取工业中常用的铝合金和黄铜材料作为实验物料, 分别为: 厚度为 40 mm 的 5052 铝合金板材, 厚度为 20 mm 的 6061 铝合金板材, 长度为 18 mm 的 H68 黄铜棒料。其中 5052 铝合金含 97% 铝和 2.5% 镁, 6061 铝合金含 96% 铝和 1.2% 镁, H68 黄铜的含有 68% 铜和 31% 锌元素。

实验物料同样在管电压为 200 kV 和管电流为 2 mA

的双能 X 射线透射下进行数据采集, 获取的  $I_H$ 、 $I_L$  和  $R$  的数据均值如表 3 所示。

表 3 实验数据均值

样本种类	厚度/mm	$I_H$	$I_L$	$R$
5052 铝合金	40	7 433.69	4 453.47	1.395 7
6061 铝合金	20	19 050.01	17 851.29	1.407 2
H68 黄铜	18	1 620.45	530.12	1.396 3

这几种实验物料的  $R$  值都很接近, 如果根据  $R$  值算法, 难以区分金属物料的种类。根据本文提出的  $R$  值曲线拟合识别算法, 对物料实验采样数据进行采集计算, 得到的数据结果列在表 4 中,  $r_{Al}$  和  $r_{Cu}$  分别表示物料对应于铝和铜曲线函数式(7)和式(8)的相关系数。

表 4  $R$  值曲线拟合识别算法计算结果

样本种类	厚度/mm	$R_{Al}$	$R_{Cu}$
5052 铝合金	40	0.998 4	0.568 2
6061 铝合金	20	0.980 4	0.503 0
H68 黄铜	18	0.453 4	0.990 1

根据判定相关系数更靠近 1 的曲线为该物料对应的金属种类的原则, 5052 和 6061 铝合金都会被判定为铝, 而 H68 黄铜会被判定为铜。铝合金的主要成分是铝和镁元素, 镁的原子序数为 12, 与铝相邻; 锌的原子序数为 30, 与铜相邻。因此利用本文提出的  $R$  值曲线拟合算法识别金属物料种类是可行的。

与此同时, 表 4 中的实验结果显示: 5052 铝合金中铝的成分比 6061 中更多, 有效原子序数更加接近于铝, 但是两者差别不大; H68 黄铜中所含的锌元素由于原子序数与铜相邻, 达到了 0.990 1。本文提出的算法主要判别依据是物质的有效原子序数, 在分辨有效原子序数相近的金属物料(如铜与锌、铝与镁)时效果有限。

### 4 结语

本文研究了基于双能 X 射线透射技术识别金属物料的方法, 在  $R$  值算法的基础上进行改进, 提出了一种  $R$  值曲线拟合识别算法, 利用  $R$  值和低能 X 射线透射信号值的样本拟合曲线来确定金属物料的种类, 减少了物料厚度对识别物料准确性的影响。最后实验结果表明, 本文提出的方法能够很好地识别出铝和铜类金属物料, 但是对有效原子序数相邻较近的金属物料的区分效果有限, 还需要后续的进一步研究。

参考文献:

- [1] 周春芳, 周占兴. 新型的废金属破碎分选生产线发展设想[J]. 冶金设备, 2014( S1): 17-21.
- [2] 孙仲元. 磁选理论[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.

(下转第 166 页)

$$\varepsilon = \frac{99.635 - 93.398}{99.635} \times 100\% = 6.26\%$$

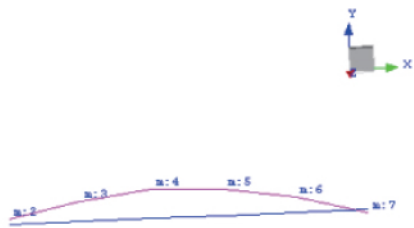
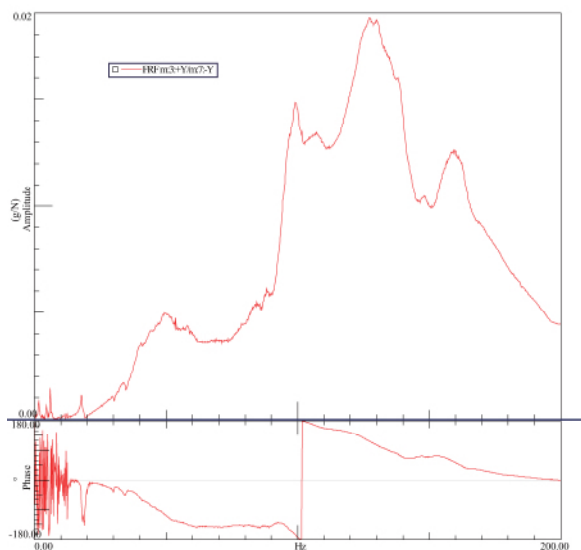
图7 尾传动轴模态振型图( $f=99.634\ 8\ \text{Hz}$ )

图8 尾传动轴第四段轴典型点动响应曲线

可以看出,按照以上建模方法可以得到工程允许的仿真计算值。

### 3 结语

论述了传动轴系的临界转速工程计算方法,分析了影响临界转速的主要因素,提出了尾传动轴系有限元模型的简化方法。通过对某型直升机进行模态分析,验证了其临界转速对 GJB.2350 的符合性,最后与工程试验对比,表明了该建模方法的可靠性。本文的研究方法可以为其他型直升机的传动轴系动力学建模和临界转速设计提供参考。

参考文献:

- [1] 宋兴武. 直升机尾传动轴系设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [2] 航空航天工业部科学技术研究院. 直升机动力学手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
- [3] 梅庆. 直升机传动轴系的动力学设计[J]. 机械传动, 2005, 29(5): 19-22.
- [4] 倪德, 李科锋, 刘建武. 基于分布质量轴模型的尾传动轴系临界转速分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(6): 822-827.
- [5] 陆凤霞, 朱如鹏, 倪德. 直升机机动飞行对尾传动轴临界转速的影响[J]. 振动与冲击, 2016, 35(11): 109-115.
- [6] Usik Lee, In Joon Jang, Il Wook Park. Frequency-Domain Spectral Element Model of a Uniform Spinning Shaft [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 224: 264-267.
- [7] Duchemin M, et al. Dynamic behavior and stability of a rotor under base excitation [J]. Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, 2006, 128(5): 576-585.

收稿日期: 2017-06-19

(上接第 162 页)

- [3] Kutila M, Viitanen J, Vattulainen A. Scrap metal sorting with colour vision and inductive sensor array [C]. Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation 2005 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, International Conference on. IEEE, 2005, 2: 725-729.
- [4] 孙云丽, 段晨龙, 左蔚然, 等. 涡电流分选机理及应用[J]. 江苏环境科技, 2007, 20(2): 40-42.
- [5] 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.
- [6] de Jong T P R, Dalmijn W L. X-ray transmission imaging for process optimisation of solid resources [J]. Proceedings R, 2002, 2: 12-15.

- [7] W. L. Dalmijn, T. P. R. de Jong. A method and apparatus for analysing and sorting a flow of material [M]. Patent WO2002050521, 2002.
- [8] 原培新, 赵秉军, 孙丽娜, 等. X 射线安检设备中双能量方式下 R 值的提取[J]. 机械与电子, 2005(9): 25-27.
- [9] E.P. 伯廷. X 射线光谱分析的原理和应用[M]. 李瑞城, 鲍永夫, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [10] Li M, Qiu M, Wu J, et al. Plasma electron temperature diagnosis in aluminum wire array Z-pinches based on soft X-ray continuum [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2012, 24(10): 2493-2496.
- [11] 徐明刚, 鲍旭东. 伪双能 X 射线透射系统矫正厚度影响的物质鉴别方法[J]. 电子器件, 2007, 30(1): 219-221.

收稿日期: 2016-01-35