



## 报废汽车薄壁异形铜铝件涡电流分离机理

陈大林<sup>1</sup>, 刘剑雄<sup>2</sup>, 郭胜惠<sup>3</sup>, 吴毓新<sup>4</sup>, 杨慎杰<sup>4</sup>, 李浙昆<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650550;

2. 昆明理工大学 固体废弃物资源化工程研究中心, 昆明 650033;

3. 昆明理工大学 云南省特种冶金重点实验室, 昆明 650093;

4. 成都兴原再生资源股份有限公司, 成都 630000)

**摘 要:** 随着报废汽车的迅猛增长, 高效、低耗的破碎分离技术将成为其未来资源化的主流发展方向之一。涡电流分离技术在有色金属颗粒料分选方面优势明显, 但在报废汽车破碎铜铝件的高效分离方面仍有待进一步研究。通过建立单个永磁体磁场的计算模型结合仿真工具研究得到扇形、矩形永磁体以两种方式排布于磁辊上时的磁场强度及其空间分布规律。结果表明: Halbach 阵列排布较 N-S 交替排布更适用于大尺寸异形薄壁铜铝件的分离; 通过涡流计算模型, 计算得到涡电流分离过程中铜铝件理想运动状态下的最大分选尺寸。研究结果为报废汽车破碎铜铝件的有效分离提供一定的理论依据。

**关键词:** 有色金属; 永磁体; Halbach 阵列; 涡电流; 分离

**文章编号:** 1004-0609(2020)-06-1406-09

**中图分类号:** X705

**文献标志码:** A

截至 2018 年 12 月底, 中国汽车保有量已高达 2.4 亿辆, 位居世界第二。但值得关注的是仅 2018 年我国汽车报废量已突破 700 万辆, 预计 2019 年将超过 1300 万辆, 增速在 85% 以上。当前报废汽车回收处理主要采用拆解分离、剪断切割、打包压块及破碎分选 4 种主流模式。随着科技的不断发展, 高效、低耗、无污染的破碎分选处理占据了绝对主导地位, 且也是报废汽车回收处理业未来发展的主要方向。目前大型回收金属破碎机与高强度磁分选装备结合, 基本解决了报废汽车磁性材料的破碎分离回收问题, 但其中的非磁性金属材料, 尤其是复杂、异形、薄壁铜铝件的高效分离问题迄今仍未很好解决。汽车约 80% 为金属材料, 其中包括碳钢、合金钢、铸铁等磁性材料及铝、铜、锌、铅、镁等非磁性材料, 作为重要的载能资源, 其二次综合利用具有十分重要的现实意义<sup>[1-7]</sup>。

早在 1820 年, 法国物理学家 BIOT-SAVART 就发现感应磁场与励磁磁场间存在排斥力。1851 年法国物理学家 FOUCAULT 发现与磁场垂直交会的移动金属导体内会产生涡电流<sup>[8]</sup>。1889 年美国发明家 EDISON 利用方向交替变化的磁场所产生的涡电流, 试图将金沙里的砂金分离出来, 并申请了专利, 此即为最早的

涡电流分离(Eddy current separation, ECS)技术<sup>[9]</sup>, 受当时具体条件限制, 加上分离效果不太理想, 该技术未能得到广泛工业应用。直到 20 世纪, 随着钡-锶铁氧体(Barium-strontium-ferriite, 1957), 钐-钴体(Amarium-cobalt, 1974)和钕-铁-硼(Neodymium-iron-boron, 1984)等永磁材料的陆续出现<sup>[10]</sup>, 加上从固体废弃物中回收各种有色金属压力的加大, ECS 的理论研究与工业化应用才再次兴起。1970~1975 年间, 回收金属行业开始利用 ECS 技术分离固体废弃物中的铝, 由于需要很强的交变励磁电流和复杂的线圈冷却系统, 工业运用较为困难<sup>[11]</sup>。1989 年, DUYVESTYEN 等<sup>[12]</sup>利用置于转动圆盘上的钐-钴永磁体产生交变励磁磁场, 证明了用 ECS 技术从金砂中回收黄金的可能性, 并指出励磁磁场越强, 可分离物料颗粒的尺寸就越大。1991 年, NORRGRAN 等<sup>[13]</sup>利用高速旋转圆柱体上规律布置钕-铁-硼永磁体产生的交变磁场, 实现了粒径 6.4 mm 以下汽车破碎料及城市固体废弃物中有色金属的 ECS 分离。SCHLETT 等<sup>[14]</sup>让混有有色金属颗粒的物料以一定的速度通过磁极交错排布的静态永磁体阵列, 使金属颗粒的表面产生涡电流, 达到从铜-塑料混合物中分离 3 mm 以下铜颗粒的目的, 试验回收率达到

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51664035)

**收稿日期:** 2019-07-11; **修订日期:** 2019-10-08

**通信作者:** 刘剑雄, 教授, 博士; 电话: 13108893972; E-mail: jxlmust@163.com

90%。LUNGU<sup>[15]</sup>利用表面规律满布钕-铁-硼永磁体的卧式磁辊研究了5 mm以下铜和铅、铜和铝的分离效果,发现细颗粒物料的分离效果不理想;之后又尝试用同样的立式磁辊分离2~6 mm的铜铝混合物,由于落料通道极易堵塞,物料供给控制困难,导致磁场利用率不高、生产效率偏低。MEIER-STAUDE等<sup>[16]</sup>基于ECS技术从毫米级铝铜混合物中分离铝时发现,当密度不同的颗粒状物料穿越交变磁场时,附加的旋转运动会改变其受力的大小和方向,进而对分离效果产生积极的影响。ZHANG等<sup>[17]</sup>利用ECS技术研究了5 mm以下不同物理特性有色金属颗粒料的可分离性,结果表明:当磁辊线速度与物料运动方向相同时,收得率仅为50%,而当磁辊线速度与物料运动方向相反时,收得率高达80%。ZHANG等<sup>[18]</sup>还研究了双磁辊分离计算机和电路板破碎料中10 mm铜、铝、锌颗粒的效果,结果表明:增大磁辊转速及增强磁场强度可使金属颗粒的跳跃距离增加,且同粒径片板状颗粒的跳跃距离明显大于球状颗粒,物理参数的不同组合也是分离铜、铝、锌颗粒料的重要依据,进一步的研究表明,利用ECS技术分离铜、铝、锌混合物时的关键参数,按影响大小依次为:粒径、粒形、电导率、密度比、辊速、磁辊位置等。SUBRATA等<sup>[19]</sup>建立了估算收得率和品级的数学模型,试验研究表明,利用ECS很难基于形状有效分离电气和电子废弃物中粒径小于0.1 mm的有色金属颗粒。阮菊俊<sup>[20]</sup>利用ECS技术研究了报废硒鼓和电冰箱的回收处理方法,给出了5~15 mm圆形、矩形和三角形颗粒料所受涡流力和分离角的理论模型。张德浩<sup>[21]</sup>基于涡流力计算模型建立了ECS仿真平台,研究了10~50 mm见方、1 mm厚规则纯铜铝薄板穿越分离磁场时的运动规律。夏溢等<sup>[22]</sup>利用ECS技术回收城市生活垃圾焚烧炉灰中平均粒径为2.8 mm的金属颗粒,通过优化分离参数,使铝的回收率达到了73.1%,铜的回收率达到了52.7%。叶瑾玲等<sup>[23]</sup>从破碎过程对物料的解离作用入手,阐述了ECS对入料粒度和形状的要求,对电气和电子废弃物分离前的破碎分级环节具有一定指导意义。

综上所述,国内外对ECS的理论研究主要集中在励磁磁场强度、磁场变化规律、混杂于其他固体废弃物中小尺寸有色金属颗粒穿越不同变化规律磁场时的受力状况及相应力学模型上;工艺方面的研究主要集中在小尺寸有色金属粒度、形状、进料速度、运动规律、接料位置等多因素耦合效应下的分离效率上;研究对象则主要集中在计算机、手机、电视等电子产品破碎后的高纯度、低电阻率、优良导电性、小尺寸破碎铜铝上。而利用ECS技术分离报废汽车破碎产物中纯

度、电阻率、导电性稍次,薄壁异形、几何尺寸较大的破碎铜铝件仍亟待进一步研究。基于以上背景,本文在建立永磁体磁密计算模型和涡流力计算模型的基础上,研究了报废汽车复杂、异形、薄壁铜铝件在涡电流分离中的受力规律及运动模式,通过计算机仿真验证理论分析研究的正确性,研究结果对报废汽车破碎分选资源化具有一定理论价值和重要的现实意义。

## 1 单个永磁体磁密模型建立

为了研究报废汽车破碎薄壁异形铜铝件的ECS机理,首先建立单个永磁体的磁密模型。由Ampere环路定理计算得到永磁体N、S面外N-S向的等效分子环流(束缚面电流),如图1(a)所示,该环流对外显极性,箭头所示为等效环流方向,总量 $I_s$ 为:

$$I_s = J_s l \quad (1)$$

式中: $J_s$ 为单位长度上的等效面分子电流; $l$ 为截取永磁体长度。

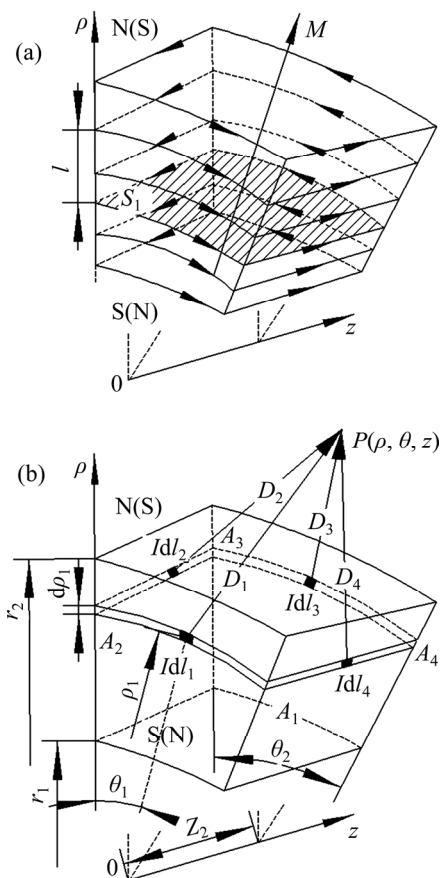


图1 单个永磁体磁密模型

Fig. 1 Single permanent magnet magnetic density model:  
(a) Equivalent molecular circulation; (b) Geometric model

则永磁体中总磁矩为:

$$\sum p_m = I_S S_1 \quad (2)$$

式中:  $p_m$  为分子磁矩;  $S_1$  为与磁化方向垂直的截面积。

由磁化强度的定义式得:

$$M = \frac{\sum p_m}{\Delta V} = \frac{J_S I_S S_1}{S_1 l} = J_S \quad (3)$$

式中:  $M$  为磁化强度, 代表单位体积内所有分子磁矩的矢量和, 在均匀磁化时为常矢量;  $\Delta V$  为磁介质内部任一微元。

设永磁体在图 1(b)所示柱坐标系中微环  $A_1 A_2 A_3 A_4$  内的电流为  $I$ , 将式(3)代入(1)得:

$$I = J_S l = Ml \quad (4)$$

则等效微环流元为:

$$\begin{aligned} Idl &= Idl_1 + Idl_2 + Idl_3 + Idl_4 = \\ &M[-2\rho_1 \sin \theta_1 d\rho_1 d\theta_1 + \rho_1(1 + \cos \theta_2) d\rho_1 dz]i + \\ &[2\rho_1 \cos \theta_1 d\rho_1 d\theta_1 + \rho_1 \sin \theta_2 d\rho_1 dz]j + (z_1 d\rho_1 dz)k \end{aligned} \quad (5)$$

由 BIOT-SAVART 定律得微环流元  $Idl$  在永磁体外空间某点  $P(\rho, \theta, z)$  所产生的磁密为:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times De_r}{|D|^3} \quad (6)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;  $e_r$  为电流元指向待求点的单位向量;  $D$  为电流元指向待求点的向量即电流元与  $P$  点的位置关系。

由微电流元与  $P$  点的位置关系, 可得:

$$\begin{aligned} D &= D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = \\ &[(4r - \rho_1) \cos \theta_2 - 2\rho_1 \cos \theta_1 - \rho_1]i + \\ &[(4r - \rho_1) \sin \theta_2 - 2\rho_1 \sin \theta_1]j + 4(z_2 - z_0)k \end{aligned} \quad (7)$$

将式(5), (7)代入(6)计算得:

$$\begin{aligned} B_r &= 2 \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\theta_2} dB_{x1} + \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\theta_2} (dB_{x3} + dB_{x4}) = \\ &\frac{\mu_0 M}{4\pi} (2 \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\theta_2} z \rho_1 \cos \theta_1 [(r \cos \theta_2 - \rho_1 \cos \theta_1)^2 + \\ &(r \sin \theta_2 - \rho_1 \cos \theta_1)^2 + z^2]^{-3/2} d\theta_1 d\rho_1 + \\ &\int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\theta_2} \{[(\rho_1 \sin \theta_2)(z - z_1) - z(r \sin \theta_2 - \rho_1 \cos \theta_2)] \cdot \\ &[(r \cos \theta_2 - \rho_1 \cos \theta_2)^2 + (r \sin \theta_2 - \rho_1 \cos \theta_2)^2 + \\ &(z - z_1)^2]^{-3/2} + z(\rho_1 \cos \theta_2 - r \sin \theta_2) \cdot \\ &[(r \cos \theta_2 - \rho_1)^2 + (r \sin \theta_2)^2 + (z - z_1)^2]^{-3/2}\} d\rho_1 dz \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)即为柱坐标下单个扇形永磁体对磁轭外部

空间任意点  $P$  径向磁密的计算数学模型。将表 1 参数代入式(8)计算得到扇形永磁体外表过轴线对称面径向磁密的变化规律, 如图 2(a)所示; 同理, 可计算得到矩形永磁体类似面 N-S 向磁密变化规律, 如图 2(b)所示。理论计算与计算机仿真结果的趋势一致, 且误差值小于 10%。

表 1 本文单个扇形永磁体相关参数

Table 1 Related parameters of a single sector permanent magnet

$z_1/$ m	$z_2/$ m	$r_1/$ m	$r_2/$ m	$\theta_2/$ (°)	$M/$ ( $10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$\mu_0/$ ( $10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ )
0	0.1	0.163	0.183	10	1.032	$4\pi$

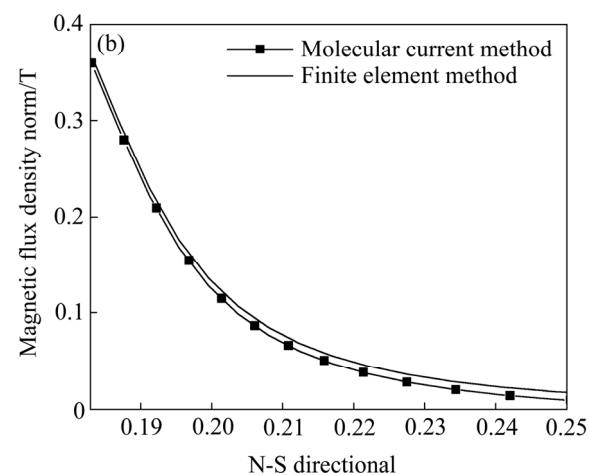
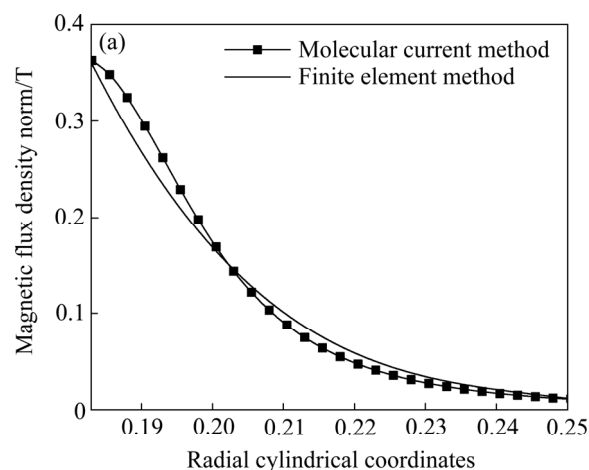


图 2 单块永磁体 N-S 向磁密度

Fig. 2 Single-block permanent magnet N-S to magnetic density: (a) Sector; (b) Rectangle

## 2 磁轭建模及仿真结果分析

现代 ECS 装备普遍以永磁体为磁源, 均匀磁化的

永磁体按特定规律排布于高速旋转的圆柱形磁辊上,据此产生高强度的高频交变磁场。传统磁辊 N-S 极交替排布如图 3(a)所示,而 HALBACH 于 1979 年提出了图 3(b)所示的排布方式。本文主要关注以上两种磁极排布方式,且两种排布方式沿磁辊轴向不变。虽然永磁体轴向磁场分量呈“马鞍形”规律变化,但周向与径向分量沿轴向不变,因此将其简化为平面问题加以研究。

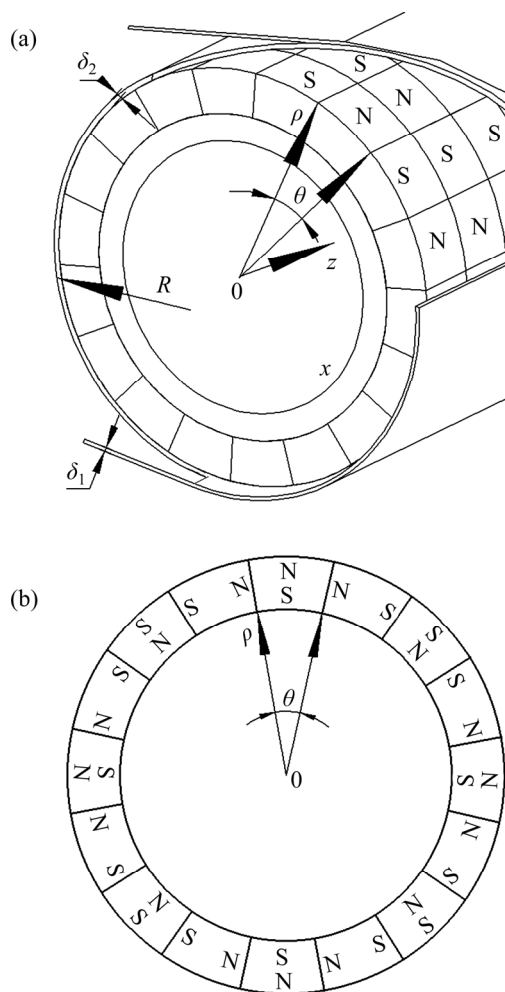


图3 磁辊磁极排方式

Fig. 3 Magnetic roller pole row mode: (a) N-S array; (b) Halbach array

永磁体的材质、大小、形状、排布方式、初始磁化强度等决定了磁辊磁场的分布规律及强弱。本文利用计算机磁场仿真工具对矩形和扇形、交替和 Halbach 排布、大小不同永磁体磁辊周围的磁场进行模拟,比较了其外部空间磁感线方向、磁通及磁密的差异,由于磁隙不同,扇形永磁体磁辊的磁场较矩形永磁体的更强,区域更广;在相同形状永磁体情况下,基于表

1 参数, Halbach 排布较 N-S 交替排布的磁场更强,区域也更广。其次在四块永磁体区域内,交替排布情况下,磁感线方向和磁通密度变化了两次,而 Halbach 排布仅变化一次。显然,在磁辊半径、永磁体数量相同的情况下, Halbach 排布更利于大尺寸物料分离。

在磁辊外径  $r=0.183$  保持不变,扇形永磁体气隙 2 mm 情况下的周向磁密: Halbach 排布时,当  $r=0.193$  时均值为 0.3978 T,是 N-S 交替排布的 1.48 倍;  $r=0.203$  时是 2.17 倍;  $r=0.213$  时是 3.1 倍,如图 4(a)所示。相同情况下的径向磁密: Halbach 排布时,当  $r=0.223$  时衰减到 0.1 T;当  $r=0.246\sim 0.267$  时,衰减到 0.04~0.02 T;交替排布时,  $r=0.203$  时衰减到 0.1 T,  $r=0.213\sim 0.223$  时衰减到 0.04~0.02 T。Halbach 排布,扇形永磁体周向尺寸( $\theta$ )为  $10^\circ$ 、厚度从 20 mm 变为 30 mm、40 mm 时,径向磁密的增幅为 40%、77%,周向磁密的增幅为 13%、21%,如图 4(b)和(c)所示。而厚度保持 20 mm 不变,周向尺寸从  $10^\circ$  增加为  $15^\circ$ 、 $20^\circ$  时,径向磁密增幅为 4%、0.5%,周向磁密降幅为 9%、17%,如图 4(d)和(e)所示。因此,增大永磁体的径向尺寸可增大其磁密与磁场作用范围。

综上所述,扇形、大径向尺寸、Halbach 排布方式增强了源磁场强度且增加了磁场作用的距离及范围,因此更有利于报废汽车大尺寸薄壁异形破碎铜铝件的分离。

### 3 涡流力计算

#### 3.1 涡电流计算

被分离物体  $S$  面上的磁通量( $\Delta\Phi$ )为:

$$\Delta\Phi = \iint_S B_r dS \quad (9)$$

式中:  $B_r$  为磁感应强度;  $S$  为磁通面积。

图 5 中剖面线区域为磁源输出的一个单向磁通作用范围,其长度分别表示为:

$$\psi = 2(R + \delta_1) \sin \theta \quad (10)$$

$$\psi' = 2(R + \delta_1) \sin \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

式中:  $\psi$  为 Halbach 排布的水平磁通长;  $R$  为磁辊半径;  $\delta_1$  为输送带厚度;  $\theta$  为永磁体占圆心角;  $\psi'$  为 N-S 交替排布的水平磁通长。

研究表明, Halbach 排布的单向磁通区域明显大于 N-S 交替排布。

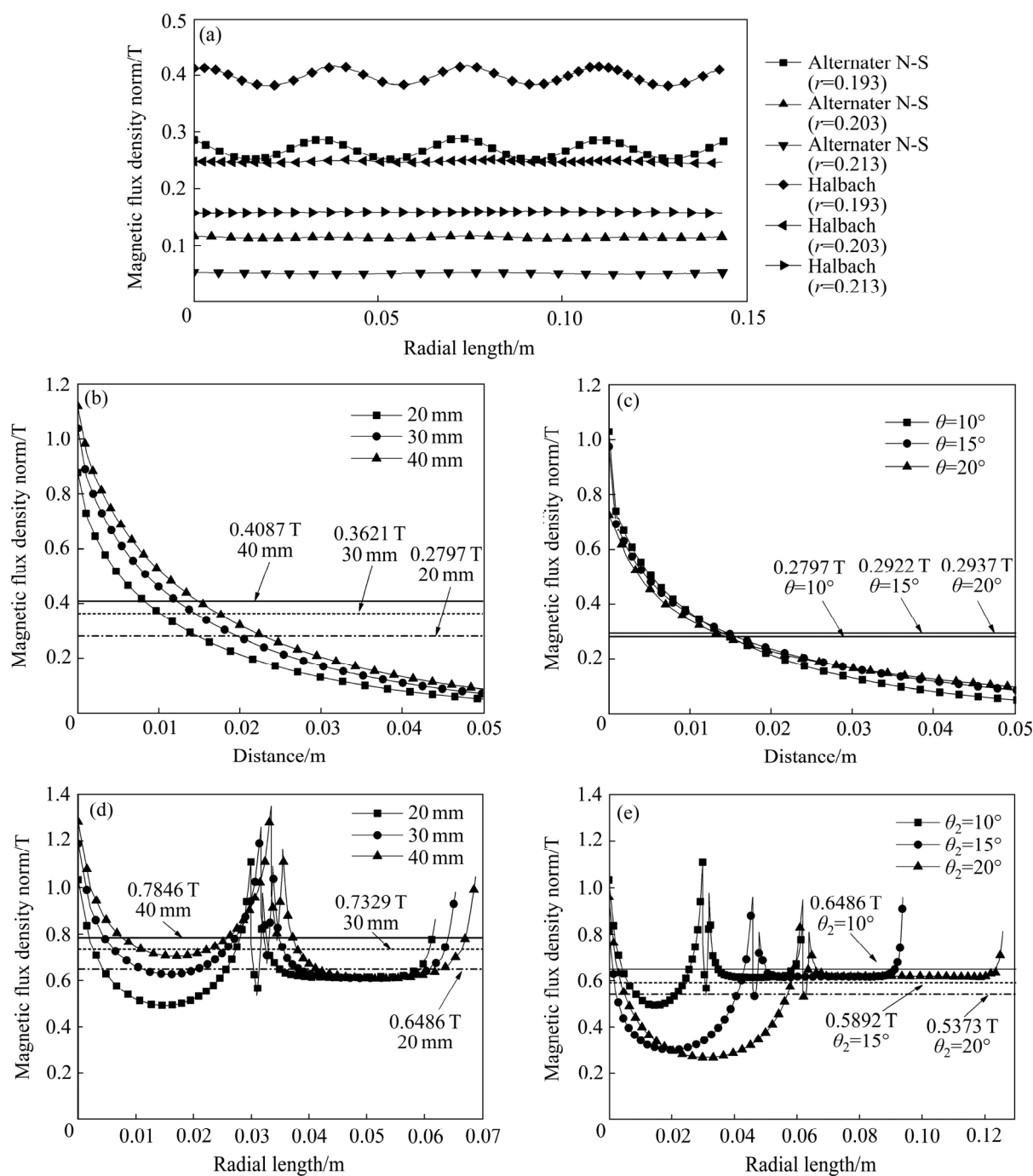


图4 磁密比较

**Fig. 4** Comparison of magnetic density: (a) Circumferential magnetic density comparison; (b) Radial magnetic density( $r$ ); (c) Radial magnetic density( $\theta$ ); (d) Circumferential magnetic density( $r$ ); (e) Circumferential magnetic density( $\theta$ )

如图 6 所示为报废汽车破碎铜、铝件(单层厚 0.9~1.3 mm), 研究表明, 由于表层金属的屏蔽作用, 涡电流集中于物料表层, 则可将破碎物料简化为双层结构。

当破碎物料的几何尺寸小于等于单向磁通作用范围时, 其在输送带上的投影面积近似为有效磁通面积, 由法拉第电磁感应定律计算其感应电动势  $\varepsilon$  为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (12)$$

式中:  $\Delta t$  为磁通量变化的时间, 即:

$$\Delta t = \frac{2\pi}{\omega R - v} \quad (13)$$

式中:  $\omega$  为磁辊角速度;  $v$  为输送带速度。

基于破碎物料表层形状, 电阻可简化为矩形和弧

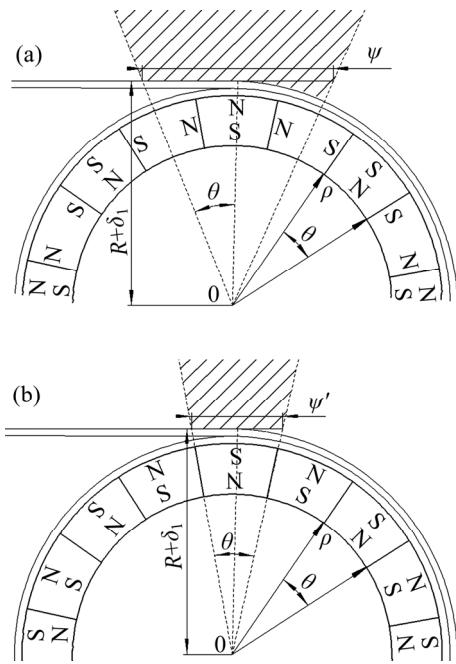


图5 磁通横截面示意

Fig. 5 Cross section of magnetic flux: (a) Halbach array; (b) N-S alternate array

形两种情况计算,如图6所示,箭头为感应电流方向。其中  $C$ 、 $D$ 、 $E$  为涡电流团的近似面尺寸,破碎物料靠近永磁体一侧越规则,其值与铜铝件尺寸越接近。由

欧姆定律求其微元电阻得:

$$d\Omega_1 = \frac{1}{\gamma} \frac{2e'' \left(1 + \frac{D}{E}\right)}{Cd \frac{e''}{2}} \quad (14)$$

$$d\Omega_2 = \frac{1}{\gamma} \frac{2\pi e'}{j d e'} \quad (15)$$

式中:  $\Omega_1$  为矩形破碎物的电阻;  $\Omega_2$  为弧形破碎物的电阻;  $\gamma$  为电导率;  $C$  为物料矩形部分涡电流金属层厚度;  $j$  为物料弧形部分涡电流金属层厚度。

综上得物料表层区域内的微涡电流为:

$$dI_1 = - \frac{B_r S \gamma C E (\omega R - v) d \frac{e''}{2}}{4\pi e'' (D + E)} \quad (16)$$

$$dI_2 = - \frac{B_r S \gamma j E (\omega R - v) d e'}{4\pi^2} \quad (17)$$

式中:  $I_1$  为矩形破碎物的电流;  $I_2$  为弧形破碎物的电流; 负号表示电流的方向。

### 3.2 涡流计算

破碎物料内感应电流所受洛伦兹力宏观上表现为安培力,即涡流力( $F$ ):

$$F = \oint_l I dl \times B \sin \beta \quad (18)$$

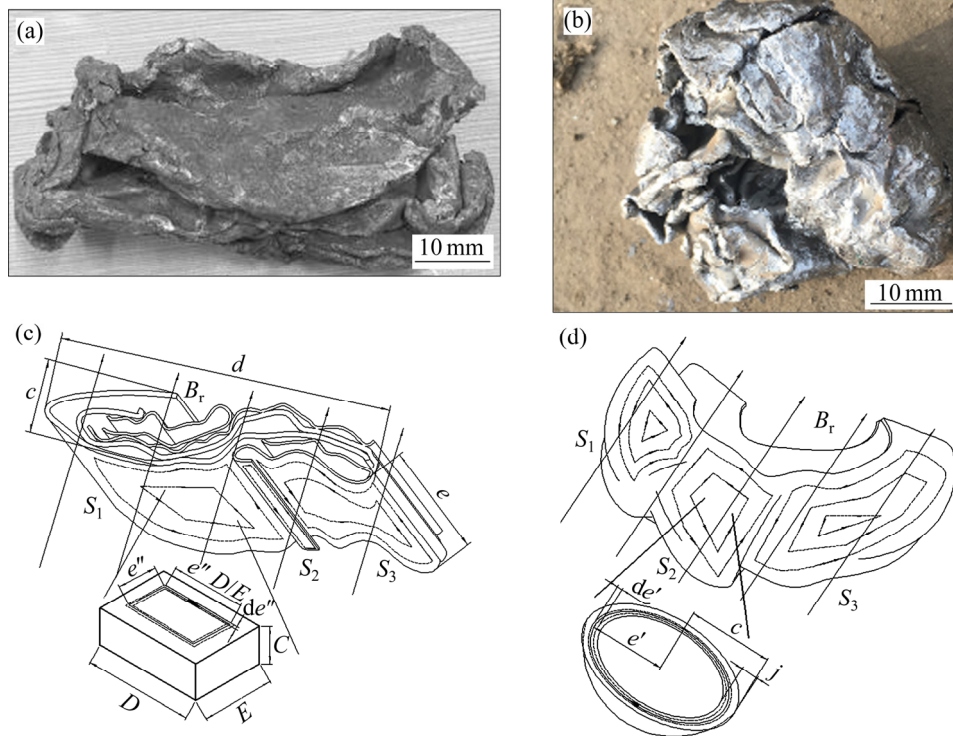


图6 报废汽车破碎物料的简化模型

Fig. 6 Simplified models of scrapped materials for scrapped vehicles: (a) Rectangle; (b) Ellipsoid; (c) Rectangular model; (d) Curved model

式中:  $\beta$  为磁感线方向与涡电流方向的夹角。

联立式(16)~(18)得破碎物料涡流力为:

$$F_{r1} = \frac{B_r^2 \sin \beta \gamma C D E^4 k (\omega R - v)}{16\pi(D+E)}$$

$$\frac{B_r^2 \sin \beta \gamma C D E^4 k (\omega R - v)}{16\pi(D+E)} \quad (19)$$

$$F_{r2} = B_r \sin \beta \frac{\varepsilon_2}{\int_0^C e' de'} \int_0^C e' de' = \frac{B_r^2 \sin \beta \gamma C^5 k (\omega R - v)}{16\pi} \quad (20)$$

式中:  $F_{r1}$  为方形物料的涡流力;  $F_{r2}$  为弧形物料的涡流力。

综上得异形物料的总涡流力可表示为:

$$F_r = F_{r1}' + F_{r1}'' + \dots + F_{r2}' + F_{r2}'' + \dots \quad (21)$$

## 4 动力学分析

实际异形破碎物料在输送带上的投影面积并不固定,且进入工作区域的姿态直接影响磁通面积的大小,同时报废汽车铜铝破碎件纯度较低,电阻较大,因此涡流力的理论计算值一般大于其真实值。

表2 本文涡流力计算参数取值

Table 2 Values of eddy current calculation parameters

$k$	$\omega/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$R/\text{m}$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho/(10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3})$		$\gamma/(10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1})$	
				Cu	Al	Cu	Al
18	3000	0.183	2	8.9	2.7	5.7	3.5

根据表2参数,通过式(21)计算破碎铜铝件在位置3时涡流力,理论最大分选铜料尺寸为  $32 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 涡流力约为  $1.22 \text{ N}$ , 铝料尺寸为  $85 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 涡流力约为  $0.921 \text{ N}$ 。

涡电流分离主要通过涡流力改变破碎物料原有的运动轨迹来实现分离。如图7(a)所示,在位置1破碎铜铝件开始进入单向磁通作用区,此时涡流较小,被自身的重力和摩擦力抵消,破碎铜铝件与输送带间没有相对运动。随输送带逐渐接近磁轭,破碎铜铝件上的磁通逐渐增大,涡流力也随之变大,在位置3时大于重力,获得瞬时铅垂向上的加速度,并做抛物线运动。以起跳点3为原点建立如图7(b)所示直角坐标系。

由几何关系得抛射到最高点的垂直距离  $L$  和水平距离  $L_1$  分别为:

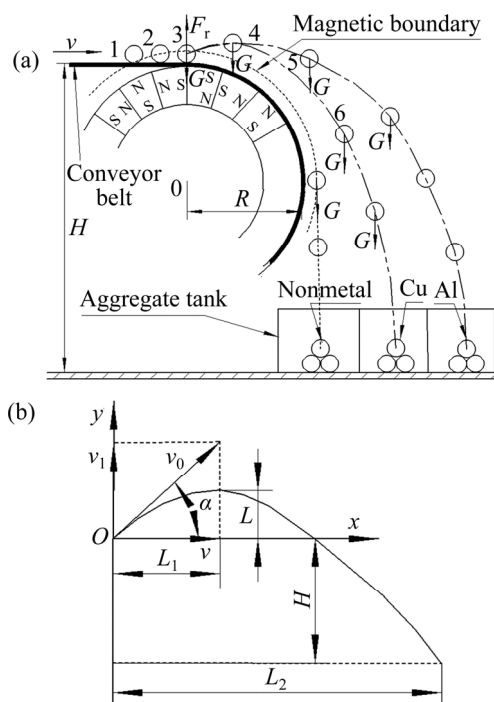


图7 破碎物料在磁场中行为

Fig. 7 Behavior of broken material in a magnetic field: (a) Material movement track; (b) Motion analysis

$$L = \frac{1}{2g} (v_1^2 + v^2) \sin^2 \alpha \quad (22)$$

$$L_1 = \frac{1}{2g} (v_1^2 + v^2) (\sin 2\alpha) \quad (23)$$

式中:  $\alpha$  为抛射角度;  $v_1$  为抛射垂直速度。

易得其运动的路径公式为:

$$y = -\frac{L}{L_1^2} x^2 + \frac{2L}{L_1} x \quad (24)$$

易得:

$$L_2 = \frac{(F_r - G)vt + v \sqrt{(F_r - G)^2 t^2 + 2 \frac{G^2}{g} H}}{G} \quad (25)$$

式中:  $t$  为涡流力作用时间。

在起跳点相同时,铜的落地点与起跳点水平距离为  $1.29 \text{ m}$ , 铝为  $1.96 \text{ m}$ , 因落地点距离差异明显,相同尺寸、相似形状的铜铝可以可靠地分离。

## 5 结论

1) Halbach 排布比交替排布的磁场作用距离更远,且相对磁通面积更大,更利于大尺寸物料分离。

2) 在  $50 \text{ mm}$  以内,永磁体沿磁轭径向的厚度尺寸越大其周向磁密越强、径向磁密衰减越少;而周向

尺寸的变化影响不显著;适当调整永磁体的几何尺寸,以适应不同块度报废汽车破碎铜铝件分离,效果会更好。

3) 提出了大尺寸异形报废汽车破碎铜铝件涡流力的计算数学模型,研究了相同情况下铜铝件的涡流力和运动规律,发现受自身几何特征限制,大尺寸薄壁异形铜铝件的有效作用面距离永磁体相对较远,因此作用区域更大、强度更高的 Halbach 排布方式分离效果更好。

4) 涡电流的大小与破碎铜铝件的几何形状及磁场强度有关,通过增强磁源的磁感应强度、缩小磁源与铜铝件间的距离、控制铜铝件的形状及尺寸,可以提升涡电流强度,进而增大涡流力,改进分离效果。

## REFERENCES

- [1] 张子扬. 中国机动车驾驶人超 4 亿 2018 小汽车保有量首破 2 亿[EB/OL]. [2019-06-11]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1624066265035168279&wfr=spider&for=pc>.  
ZHANG Zi-yang. China's motor vehicle drivers exceeded 400 million, and the number of cars in the 2018 car broke through 200 million[EB/OL]. [2019-06-11]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1624066265035168279&wfr=spider&for=pc>.
- [2] 余海军, 谢英豪, 张铜柱. 车用动力电池回收技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 448-460.  
YU Hai-jun, XIE Ying-hao, ZHANG Tong-zhu. Technical progress on power batteries recovery for electric vehicle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 448-460.
- [3] 周旭, 朱曙光, 次西拉姆, 贺文智, 李光明, 黄菊文. 废锂离子电池负极材料的机械分离与回收[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(12): 3082-3086.  
ZHOU Xu, ZHU Shu-guang, CIXI La-mu, HE Wen-zhi, LI Guang-ming, HUANG Ju-wen. Mechanical separation and recovery process of anode materials from spent lithium-ion batteries[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(12): 3082-3086.
- [4] 王冠, 周佳, 刘志文, 李落星, 刘波, 李晓青, 刘扬胜. 铝合金汽车前碰撞横梁的轻量化设计与碰撞性能分析[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 90-98.  
WANG Guan, ZHOU Jia, LIU Zhi-wen, LI Luo-xing, LIU Bo, LI Xiao-qing, LIU Yang-sheng. Lightweight design and crash performance analysis of automotive aluminum bumper[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 90-98.
- [5] 李中. 钛及钛合金在汽车上的应用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 1034-1038.  
LI Zhong. Applications of titanium and titanium alloys in automotive field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 1034-1038.
- [6] 卢东方, 王毓华, 何平波, 孙伟, 胡岳华. 基于 ANSYS 的履带式永磁磁选机磁场模拟[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(8): 2188-2194.  
LU Dong-fang, WANG Yu-hua, HE Ping-bo, SUN Wei, HU Yue-hua. Simulation of magnetic field on tracked permanent magnetic separator based on ANSYS[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(8): 2188-2194.
- [7] 杨慧芬, 景丽丽, 党春阁. 铜渣中铁组分的直接还原与磁选回收[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 1165-1170.  
YANG Hui-fen, JING Li-li, DANG Chun-ge. Iron recovery from copper-slag with lignite-based direct reduction followed by magnetic separation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(5): 1165-1170.
- [8] 朱建清. 电磁波原理与微波工程基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 33-43.  
ZHU Jian-qing. Electromagnetic wave principle and microwave engineering foundation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 33-43.
- [9] WALSH D E, WERNHAM J A, NORRGRAN D A. Eddy-current separator technology as a novel approach to Alaskan placer gold recovery[J]. Minerals and Metallurgical Processing, 2004, 21(4): 189-192.
- [10] WANG Di, MA Xiu-shui, ZHI Xiong-fei, ZHANG Shu-ming. Research review of scrap metals eddy current separation technology[J]. Sensors & Transducers, 2013, 158(11): 242-248.
- [11] 威尔逊, 维齐, 斯奎尔斯. 选矿技术应用于回收消费废弃废料中的金属[J]. 国外金属矿山, 1994(11): 49-55.  
WILSON R J, VEASEY T J, SQUIRES D M. Mineral processing technology for recycling metals in consumer waste[J]. Foreign Metal Mining Magazine, 1994(11): 49-55.
- [12] DUYVESTYEN W P C, VAN DER VALK H J L, DALMIJN W L, WAN HOUWELINGEN J A. Recovery of gold nuggets from placer ores[C]// The Reinhardt Schuhmann International Symposium of Innovative Technology and Reactor Design in Extractive Metallurgy, 1986: 237-243.
- [13] NORRGRAN D A, WERNHAM J A. Recycling and secondary recover applications using an eddy-current separator[J]. Minerals and Metallurgical Processing, 1991, 8(11): 184-187.
- [14] SCHLETT Z, CLAICI F, MIHALCA I, LUNGU M. A new static separator for metallic particles from metal plastic mixtures, using eddy currents[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(1): 111-113.
- [15] LUNGU M. Separation of small nonferrous particles using an angular rotary drum eddy-current separator with permanent magnets[J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 78(1): 22-30.



- [16] MEIER-STAUDE R, SCHLETT Z, LUNGU M, BALTATEANU D. A new possibility in eddy-current separation[J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(4): 287–291.
- [17] ZHANG S, REM P, ERIC F. The investigation of separability of particles smaller than 5 mm by eddy current separation technology. Part i: Rotating type eddy current separators[J]. *Magnetic and Electrical Separation*, 1998, 9(12): 233–251.
- [18] ZHANG S, REM P, FORSSBERG E. Particle trajectory simulation of two-drum eddy current separators[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 1999, 26(2): 71–90.
- [19] SUBRATA R, VIDYADHAR A, JAYANTA K, AVIMANYU D. Metal enrichment of finely ground electronic waste using eddy current separation[J]. *Separation Science and Technology*, 2012, 47: 1777–1784.
- [20] 阮菊俊. 破碎废弃硒鼓、废旧冰箱箱体的涡流分选及工程应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- RUAN Ju-jun. Study on eddy current separation and its engineering application for recovering crushed waste toner cartridges and refrigerator cabinets[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [21] 张德浩. 废旧有色金属涡电流分选技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- ZHANG De-hao. Study on the Technology of eddy current separation for scrap non-ferrous metal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [22] 夏溢, 章骅, 邵立明, 何晶晶. 生活垃圾焚烧炉渣中有价金属的形态与可回收特征[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(4): 586–591.
- XIA Yi, ZHANG Hua, SHAO Li-ming, HE Pin-jing. Speciation and recoverability of valuable metals in municipal solid waste incineration bottom ash[J]. *Research of Environmental Science*, 2017, 30(4): 586–591.
- [23] 叶瑾玲, 张晋霞, 万玲娟, 赵跃民. 浅析电子废弃物的破碎与分级[J]. *江苏环境科技*, 2004(2): 43–45.
- YE Cui-ling, ZHANG Jin-xia, WAN Ling-juan, ZHAO Yue-min. Preliminary analysis of break and classification of electronic wastes[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2004(2): 43–45.

## Eddy current separation mechanism on thin-wall shaped copper-aluminum mixture in end-of-life vehicles

CHEN Da-lin<sup>1</sup>, LIU Jian-xiong<sup>2</sup>, GUO Sheng-hui<sup>3</sup>, WU Yu-xin<sup>4</sup>, YANG Shen-jie<sup>4</sup>, LI Zhe-kun<sup>1</sup>

- (1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,  
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650550, China;  
2. National Engineering Research Center for Waste Resource Recovery,  
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650033, China;  
3. Yunnan Provincial Key Laboratory of Intensification Metallurgy,  
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;  
4. Chengdu Xingyuan Renewable Resources Investment Co., Ltd., Chengdu 630000, China)

**Abstract:** With the rapid growth of end-of-life vehicles (ELVs), the efficient and low-cost crushing and separation technology will become one of the mainstream development directions for its future. The eddy current separation technology has obvious advantages in the sorting of non-ferrous metal particles, but it still needs further research on the efficient separation of scrapped copper-aluminum parts for ELVs. By calculating the magnetic field of a single permanent magnet and the simulation tool, the magnetic field strength and spatial distribution of the fan-shaped and rectangular permanent magnets arranged on the magnetic roller in two ways are obtained. The results show that the Halbach array is arranged alternately with N-S. The cloth is more suitable for the separation of large-sized and shaped thin-walled copper-aluminum parts. The maximum sorting size of the copper-aluminum parts under the ideal motion state is calculated by the eddy current force calculation model. The research results provide a theoretical basis for the effective separation of scrapped copper-aluminum parts for ELVs.

**Key words:** non-ferrous metal; permanent magnet; Halbach array; eddy current; separation

**Foundation item:** Project(51664035) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2019-07-11; **Accepted date:** 2019-10-08

**Corresponding author:** LIU Jian-xiong; Tel: +86-13108893972; E-mail: jxlkmust@163.com

(编辑 王超)