

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目：废旧手机破碎后电路板与塑料混合颗粒的涡流电选机制

学生姓名：姜轶群

学生学号：5107409020

专 业：环境科学与工程

指导教师：李佳

学院(系)：环境科学与工程学院

废旧手机破碎后电路板与塑料混合颗粒的涡流电选机制

摘要

有调查结果显示我国每年更换下来的废旧手机约 1 亿部,造成了极大的资源浪费。废旧手机里含有大量重金属,会对水和土壤造成潜在污染,增加环境的负担。目前废旧手机的拆解工艺基本处于手工作业阶段,没有形成规模化和机械化操作,而且大多数拆解作业都是家庭作坊式,极易造成二次污染。因此本课题旨在利用涡流电选的方式规模化机械化的回收废旧手机。通过计算机模拟研究并优化的方法,找到分离破碎后废旧手机中的塑料外壳和电路板等复合材料的最优参数,并为其他小家电的资源化处理提供理论支持。

课题研究的技术路线主要包括对废旧手机进行破碎,对破碎后的混合颗粒进行物料表征;通过对涡流电选设备表面磁场分布计算完成颗粒在磁场中受到的涡流力的模型建立;通过预实验了解涡流电选设备的条件参数,皮带喂料速率 v 和磁辊转速 ω ;建立在此参数基础上,运用电脑软件 MATLAB 对颗粒在分离过程中的脱离点和运动轨迹进行模拟分析,发现颗粒半径和颗粒中的金属层厚度越大,颗粒脱离角度越大,越早脱离皮带;同时通过 Design-Expert 中心复合实验设计和优化的方法分析影响颗粒轨迹及落地点的多个因素,颗粒粒径 R_p ,皮带喂料速率 v 和磁辊转速 ω ,得到最优参数的组合: $v = 1.18 \text{ m/s}$, $\omega = 3000 \text{ rpm}$, $R_p = 8.44 \text{ mm}$;最后通过实验验证优化轨迹模拟模型,在最优参数下,得到分选效率为 95.54%。

关键词: 废旧手机, 涡流电选, 轨迹模拟, MATLAB, Design-Expert

COMPUTER SIMULATION OF SEPARATING MIXTURE METAL AND PLASTIC PARTICLES FROM WASTE MOBILE PHONES BY EDDY CURRENT SEPARATOR

ABSTRACT

It's been estimated that over the past year, the number of scrapped mobile phones in China has reached about 100 million, resulting in a tremendous waste of resources. Scrapped mobile phones contain high concentration of heavy metals, which can cause potential contamination to the water and soil, do harm to our living environment. While the dismantling of scrapped mobile phones nowadays is basically artificial and requires great human resources, there is no large scale of mechanical crushing and recycling operations. In addition, most of artificial dismantling process takes place in small family workshops, which can easily cause secondary pollution. Although there are researched on finding ways to recycle waste batteries, LCD panels and other utilization of mobile phone in China and foreign countries, there is still little about large-scale mechanization of recycling mobile phone, especially separating the plastic and circuit boards containing composite materials after mass crushing.

This paper is focused on using Eddy Current Separation (ECS) to separate between the crushed boards with both metal and plastic of small appliances like mobile phones. And it's realized by stimulating the trajectory of the particles during separation with MATLAB language. Based on the computer stimulation, it's found that ECS can be used to separate metals and plastics of crushed phone boards with specific parameters. Guided by Design-Expert, the optimum separation conditions and proper eddy selected operating parameters are analyzed concerning with different particle size, feeding speed and the rotation speed. It is simulated that under the condition of $v = 1.18$ m/s, $\omega = 3000$ rpm, $R_p = 8.44$ mm, the separation reaches its optimal condition. And it's verified with practical experiments with a separation efficiency of 95.54%. Such a model can be used to select separators for specific applications like waste phones and other small household appliances and decide the optimal working parameters.

Key words: scrapped mobile phone, ECS, trajectory simulation, MATLAB, Design-Expert

目 录

第一章 绪论	1
1.1 废旧手机等电子废弃物简述.....	1
1.1.1 电子废弃物.....	1
1.1.2 废旧手机资源性与危害性.....	2
1.2 废旧手机等电子废弃物回收现状与问题.....	3
1.2.1 废旧手机的回收现状.....	3
1.2.2 废旧手机回收产生的问题.....	4
1.3 废旧手机等电子废弃物机械-物理回收技术.....	5
1.3.1 按密度分选.....	6
1.3.2 磁选和高压静电分选.....	8
1.3.3 涡流电选.....	9
1.4 本课题研究目的与内容.....	10
1.4.1 研究目的.....	10
1.4.2 研究内容.....	10
第二章 技术路线与研究方法.....	11
2.1 技术路线与研究方法.....	11
2.2 原材料.....	11
2.3 实验设备与器材.....	12
2.4 实验应用的软件.....	15
第三章破碎后废旧手机混合颗粒的物理特性表征.....	16
3.1 废旧手机回收样品分析.....	16
3.1.1 废旧手机的款式和品牌分类.....	16
3.1.2 废旧手机各部分质量比.....	17
3.2 破碎后废旧手机的物料特性表征.....	17
3.2.1 颗粒密度.....	17
3.2.2 颗粒粒径.....	18
3.2.3 颗粒形状.....	19
3.2.4 电路板颗粒中金属层厚度.....	19
第四章涡流电选混合颗粒的模型建立.....	21
4.1 涡流电选原理.....	21
4.2 涡流电选机磁轭磁场分布和强度模拟.....	22
4.2.1 磁场分布公式.....	22
4.2.2 磁场分布测量及计算.....	23
4.3 涡流模型建立及计算.....	24
4.3.1 电路板金属颗粒内部感应涡电流的强度计算.....	24
4.3.2 电路板金属颗粒产生的感应磁场的计算.....	27

4.3.3 变频磁场中电路板金属颗粒受涡流力计算.....	27
4.4 涡流电选操作参数选择.....	28
4.4.1 皮带线速度.....	28
4.4.2 磁辊转速.....	28
4.5 涡流电选中混合颗粒从皮带脱离时脱离点的计算.....	29
4.5.1 颗粒分离过程中的受力分析及脱离点的判断条件.....	29
4.5.2 颗粒脱离点的计算模拟.....	30
4.5.3 颗粒脱离点的计算结果分析.....	30
4.5.4 颗粒脱离点的实验验证.....	32
4.6 涡流电选中混合颗粒的轨迹模拟.....	35
4.6.1 轨迹模拟理论依据.....	35
4.6.2 颗粒轨迹计算模拟结果.....	37
4.6.3 影响颗粒运动轨迹的因素.....	38
第五章 涡流电选中混合颗粒的轨迹模拟的优化及实验验证.....	43
5.1 涡流电选中混合颗粒的轨迹模拟模型的优化.....	43
5.1.1 塑料颗粒与电路板颗粒落地点之间的距离.....	43
5.1.2 优化软件及方法.....	44
5.1.3 优化结果.....	45
5.2 轨迹模拟模型的优化后的实验验证.....	48
5.2.1 实验方法.....	49
5.2.2 验证结果.....	50
第六章 结论.....	52
参考文献.....	55
谢辞.....	58

第一章 绪论

1.1 废旧手机等电子废弃物简述

随着科技的不断进步以及人类对电子产品的要求不断提高，电子产品更新换代的频率越来越快，报废量急剧增长，引发了相关的很多资源和环境问题。

1.1.1 电子废弃物

早在 2003 年 1 月，欧盟就发布了有关回收带有危险物质的电器与电子设备的指令，欧洲议会与理事会指令 2002/96/E^[1]。然而，电子废弃物^[2] (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE) 这个关于废旧电器和电子设备的概念的真正提出是在 2012 年 6 月，于欧洲议会和理事会指令 2012/19/EU 上。电子废弃物主要分为十个类别：大型家用器具，小型家用器具，信息技术和远程通讯设备，用户设备，照明设备，电气和电子工具（大型静态工业工具除外），玩具、休闲和运动设备，医用设备（所有被植入和被感染产品除外），监测和控制器械，自动售货机^[3]。

据 2010 联合国环境规划署发布的报告，我国已成为世界第二大电子垃圾生产国，每年生产超过 230 万吨电子垃圾，仅次于美国的 300 万吨。此外，考虑到一些发达国家会通过各种手段将电子废弃物转移到像我国这样的发展中国家，因此，据统计全世界每年产生 5 亿多吨电子废弃物，最终有大概 70% 会被转移到中国处理^[4]。

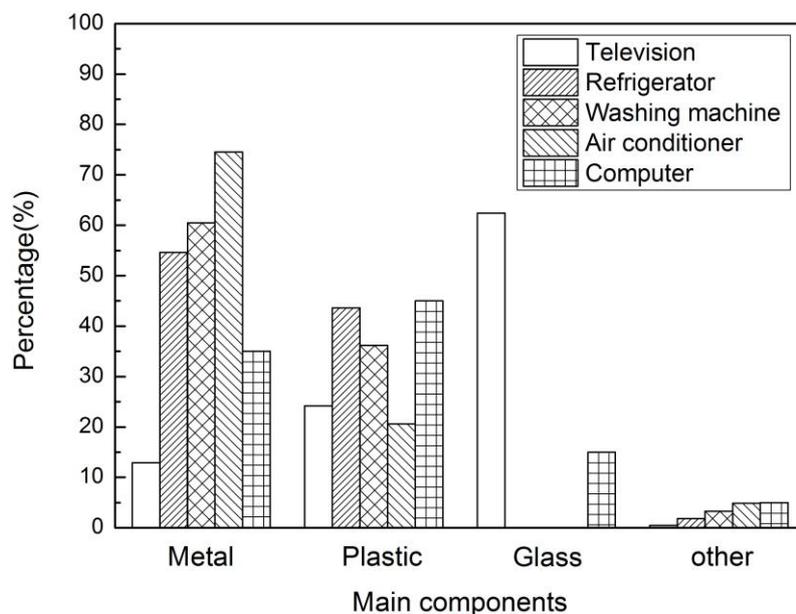


图 1-1 电子废弃物的主要成分

Fig.1-1 Main components of WEEE

电子废弃物的回收利用逐渐受到了人们的关注和重视，作为资源的综合体，电子废物蕴藏着众多珍贵的资源，如图 1-1 所示。有统计，1t 废弃的电脑及部件中约有 0.45kg 黄金，价值约 6000 美元，此外还有 270kg 塑料、128.7kg 铜、1kg 铁、58.5kg 铅、39.6kg 锡、36kg 镍、19.8kg 铈，还有钇、铂等贵金属^[5-6]。所以按照循环经济理念再利用电子废物能可以最大程度上避免环境污染^[7]，解决资源紧缺及环境污染等问题。通过提高资源利用率，变废为宝，充分发挥包括电子废物在内的各类废物资源的作用，成为支撑我国经济社会的快速发展的一种方式之一。

而从 1980 年开始，中国的家用电器和电子设备的产量和消费量都急剧增大，据统计就 2007 年共有约 240 万吨包括电脑、打印机、电冰箱、电视机和手机等的电子废弃物投放到了中国市场^[8]。而根据政府的统计，在 2009 年，约有 2500 万台电视、540 万台电冰箱、1000 万台洗衣机、100 万台空调、1200 万台电脑和约 4000 万部手机等待报废^[9]。由此可想到随着电子产品和设备的不断更新推广，其中可有回收利用的资源也是无穷无尽的。随着 2000 年开始，移动通信手机自在国内投资生产，它的生产总量也以平均每年 34% 的速率迅猛地增长。随着科技的不断进步，人们对手机功能外观各方面要求的提高，到 2011 年，手机的产量已超过十一亿台，这比计算机生产总量还要高出近三倍^[10]，成为了电子废弃物中重要的一部分。

1.1.2 废旧手机资源性与危害性

随着时代的进步和科技的发展，人们对高科技的期待和对手机新功能的渴望导致手机更新换代的速度与日俱增。2013 年全球手机报废量已高达 6.8 亿部^[11]，有调查显示，手机在发展中国家的使用年限约为三年，在发达国家约为两年，已经成为了电子产品中使用年限最短的商品之一。越来越短的手机使用年限带来的将会是日益庞大的手机报废量，它几乎成为了世界电子废弃物中增长最迅猛的一头怪兽^[12]。然而手机作为一种电子产品，也蕴藏了丰富的资源，如果随意丢弃没有得倒回收处理，将会带来很多环境问题。据统计，金属材料占整部手机重量的 40%，每一吨废旧手机中就含有 130 千克金属铜，3.5 千克金属银，0.34 千克金属金，以及 0.14 千克金属钇^[13]，这些贵金属的回收将带来巨大的经济效益。手机电池中也含有镍、铜、锂、铝、铁、钴、钨等有价金属，可以回收并将其再一次利用于生产生活中去。锂离子电池中可以回收的金属钴，用来制作话筒电池；镍镉电池可以回收镍、镉等金属，用来制作不锈钢和电池；而镍氢电池可以回收金属镍，用来制造不锈钢^[14]。此外，手机塑料外壳键盘等部分也可以通过高温热解^[15]和燃烧的方式回收或者利用来产能^[16]。因此，废旧手机作为电子废弃物中重要的一部分，具有很高的回收利用资源价值。甚至在日本，废旧手机被誉为最好的“都市稀有金属矿”^[17]。

然而，也正因为手机材料主要包括金属和高分子材料，在手机废弃后，这些材料散落在环境中很难通过自然方式降解，因此会造成长期存在的污染^[18]。据统计，一部手机的材料中含有超过四十种元素，平均每部手机中的金属元素超过二十种，占整部手机质量的 35-40%，其中十二种金属元素被认定为有毒有害，如铈、砷、钷、镉、铜、铅、镍和锌等金属元素会通过生物富集作用长期存在于环境中，并可能会引发癌症，生殖，神经和发育等疾病^[19]。如果废旧手机只是被简单的填埋，手机电池中的镍、铜、锂、镉等重金属会慢慢渗入土壤，污染土壤、地表水和地下水。而手机塑料外壳中含有的有机成分如溴化阻燃剂材料如多溴联苯（PBB）和多溴二苯醚（PBDE），这两种物质都有可能造成癌症、性功能、免疫和内分泌系统功能障碍。如果废旧手机被简单焚烧处置，有些高分子材料被燃烧会生成二噁英和呋喃等持久性有毒污染物。其实，在中国地某些电子废弃物回收地区，从

当地的树皮中检测出来很高浓度的 PBB 和 PBDE^[20]。所以如果把废旧手机或者其他电子废弃物直接通过填埋或是焚烧的方法处理，都将会对环境造成严重的破坏。因此从环境保护的角度看来，我们需要对废旧手机进行正规的回收和处理^[21]。

1.2 废旧手机等电子废弃物回收现状与问题

相关调查结果表明，尽管中国政府已经颁布了 12 条电子废弃物回收处理相关的法律条例来规范电子废弃物的回收，并试图通过建立了一个电子废弃物回收的特殊法律体系来鼓励群众积极参与到其中去，但是目前在中国，所有电子废弃物相关的回收活动仍然是出于群众自愿或者自发的形式；而且由于缺乏相关机制来强制消费者参与到官方的回收中去，更多人选择出售自己淘汰的手机以谋取微薄的利益^[22]。此外，调查发现中国手机消费者的手机使用平均年限小于三年，在一些经济发展较快的发达地区，消费者的使用年限更短，更换周期大约为 1 年，这个使用时间是远小于手机本身的使用期限的，这也造成了巨大的废旧手机报废量。但是又由于消费者的观念、政府政策问题和回收渠道的限制等种种原因导致我国废旧手机的回收率很低，据统计约为 1% 左右，远远低于西方发达国家。而回收的方式主要有无偿回收，有偿回收，闲置家中或者直接丢弃^[17]。

1.2.1 废旧手机的回收现状

目前，受观念、经济及技术等因素的影响，我国还没有真正建立废旧手机回收系统，主要存在以下途径进行回收和利用。

(1) 自发公益无偿回收或正规企业回收

这种回收方式主要是一种通过一些手机的生产厂商、销售商家和部分运营商主导的无偿的自发的手机回收方式^[17]，具体关系如图 1-2。据调查，在 2002 年到 2012 年期间，诺基亚、摩托罗拉、中国移动通信等企业都纷纷开展过相关的废旧手机回收的绿色环保项目^[14]，其中 2005 年由中国移动通信、摩托罗拉和诺基亚三家企业在北京联合发起的“绿箱子环保计划—废弃手机及配件回收联合行动”在包括直辖市和省会城市在内的全国 40 个重点城市中展开，共收集手机、充电器等配件 3 万个左右。

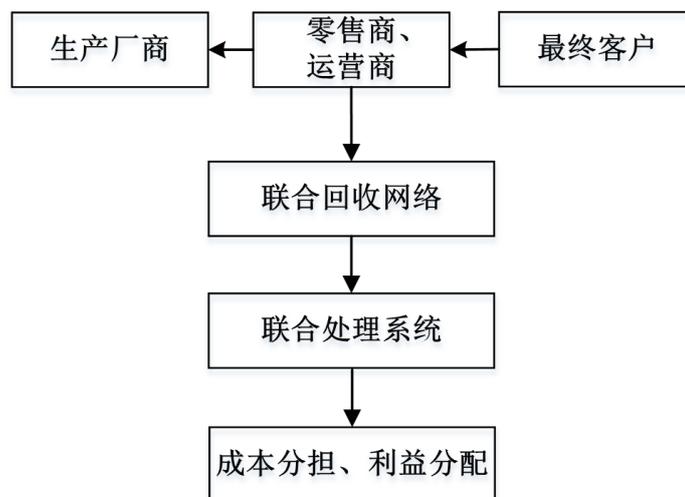


图 1-2 手机回收过程中生产厂商、销售和运营商与客户直接的关系^[23]

Fig. 1-2 Relationship among phone producer, retailer and customers

(2) 流动商贩、手机维修商回收商主导的有偿回收

流动的街头小商贩或者一些手机维修商个体都会有偿收购废旧手机，对于这部分回收的废旧手机，有一些通过翻新重新流入二手市场；对于其余无法翻新的废旧手机就将其进行拆解，取用其中部分可以回收使用的手机零部件，具体过程如图 1-3 所示。

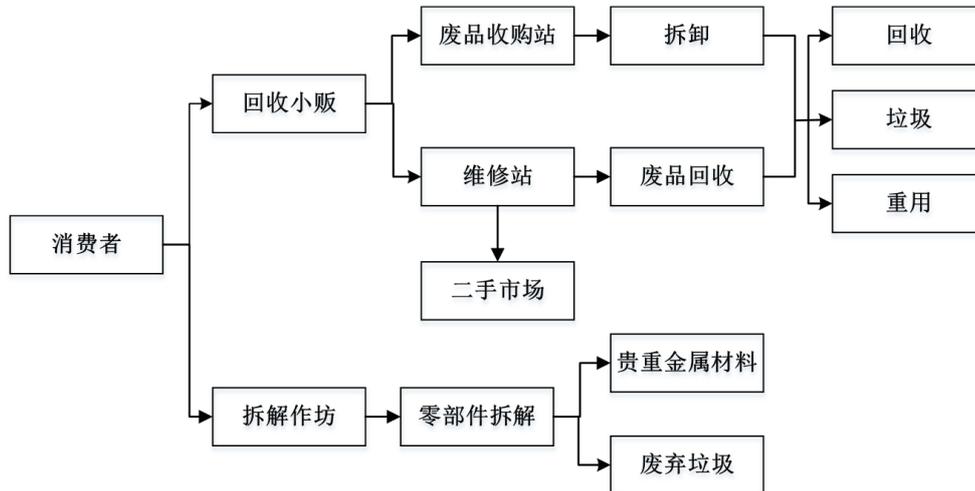


图 1-3 流动商贩、手机维修商回收手机流程图

Fig.1-3 The recycling process of second-hand mobile phones

(3) 闲置家中或者当作垃圾回收处理

绝大多数消费者将旧手机闲置家中，这也导致了大量的废旧手机无法被有效地回收利用。对北京市民对废旧手机处理方式的调查显示，其中有 36.59% 和 21.62% 的市民选择丢弃和闲置废旧手机，并且有超过 70% 的消费者对手手机的处理方式是闲置在家或馈赠亲友，甚至有 3% 的消费者将废旧手机视为一般固体垃圾，认为可以直接丢弃或焚烧等方式处理^[17]。

1.2.2 废旧手机回收产生的问题

(1) 自发公益无偿回收或正规企业回收

虽然企业在倡导绿色环保回收手机方面付出了一些努力，但由于宣传力度的限制，以及群众缺乏相关的主动回收意识，回收活动的效果并不显著。再者就是这种回收方式着眼于手机回收本身，并没有进一步探索回收废旧手机的资源化问题，所以其收获和长远意义仍有局限。

(2) 流动商贩、手机维修商回收商主导的有偿回收

不规范的二手回收市场对废旧手机的集中回收处理带来了巨大的威胁。手机的不规范拆解过程中也会产生许多二次污染物，加大了电子废弃物回收处理的难度。有一些家庭手工作坊甚至专门回收废旧手机中的贵金属。在浙江、广东、福建等地的农民，把电子垃圾放入硫酸池以腐蚀掉电路板的塑料成分提取贵金属，而酸液等大量有害物质源源不断地排入河流、深入地下，污染环境^[24]。拆解过程中，不能利用的部分甚至也会被当作垃圾随意丢弃，也会造成环境污染。

(3) 闲置家中或者当作垃圾回收处理

消费者将废旧手机直接丢弃的行为，使得手机被当作一般生活垃圾处理，如果被填埋将会对土壤地下水等环境都造成严重的长期的污染，而如果被焚烧，更会产生二噁英等环境优先污染物，污染大气，危害人类健康。

由于缺乏相关政策的引导，没有正规的废旧手机回收处理渠道，没有规范化的二手手机市场，再加之群众严重缺乏废旧手机回收相关的环保观念和意识；我国目前还没有建立起一个良好健全的废旧手机回收体系。废旧手机等电子废弃物的拆解、回收工作专业性很强，必须采用先进的技术、工艺，才能避免二次环境污染。考虑到人力资源和成本，我们需要通过大规模的机械操作这种规模化产业化的回收的方法，才能兼得环境和经济效益。

1.3 废旧手机等电子废弃物机械-物理回收技术

考虑到手机的内部结构复杂，如图 1-4 所示，人工拆解往往耗费很多时间。因此，对于手机等电子废弃物可以通过机械处理的方式减小其体积，然后通过不同材料之间物理特性的差异如密度、导电性、磁性、表面特性等进行分选最终实现废弃物组成物质的分离。机械-物理处理回收技术主要包括拆解、破碎、分选等 3 个过程^[25]。它的机械化处理可以直接依靠去除废旧手机中的电池成分后破碎完成，然后选择适当的分选方式分离破碎后附加值较低的塑料外壳与电路板金属混合物，得到相对纯度较高，附加值较高的金属电路板和手机外壳再进行下一步地回收过程。对于废旧手机破碎后的金属与塑料混合物，主要存在以下几种分选回收方式。

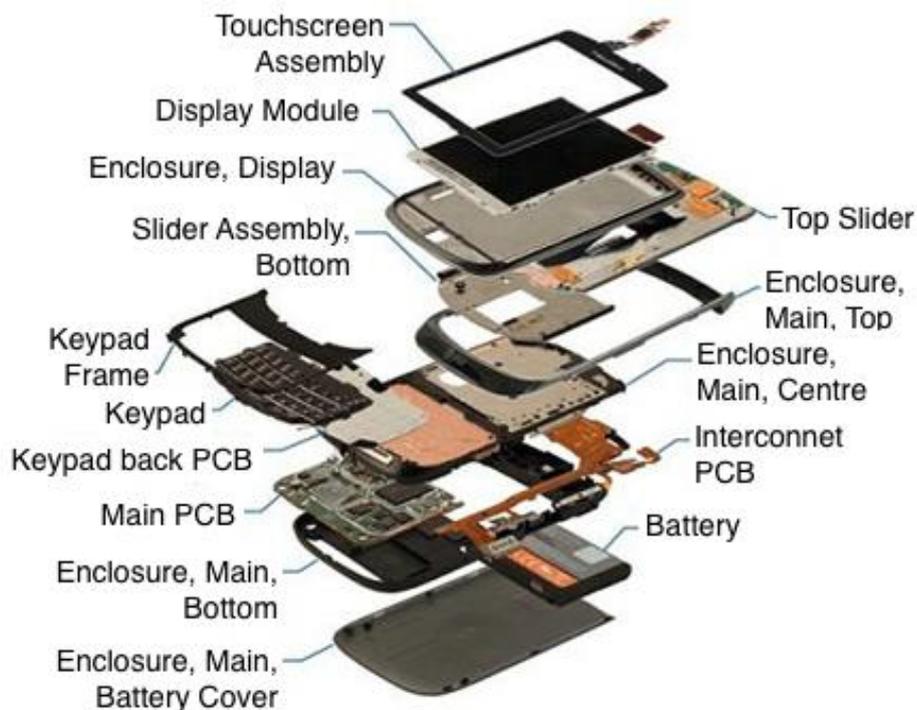


图 1-4 手机拆解后的结构图^[26]

Fig.1-4 The inner structure of mobile phone after dismantling^[26]

1.3.1 按密度分选

密度分选是根据物料的密度和粒度的不同，借助于流体动力和各种机械力的作用，造成适宜的松散分层和分离条件而得到不同粒度产品的工艺过程。目前，风力摇床已经在电子废弃物商业化回收中得到了成功的应用^[27-28]，其结构示意图如图 1-5，原理是利用床面的振动以及空气的上升气流使颗粒按密度分层^[29]。

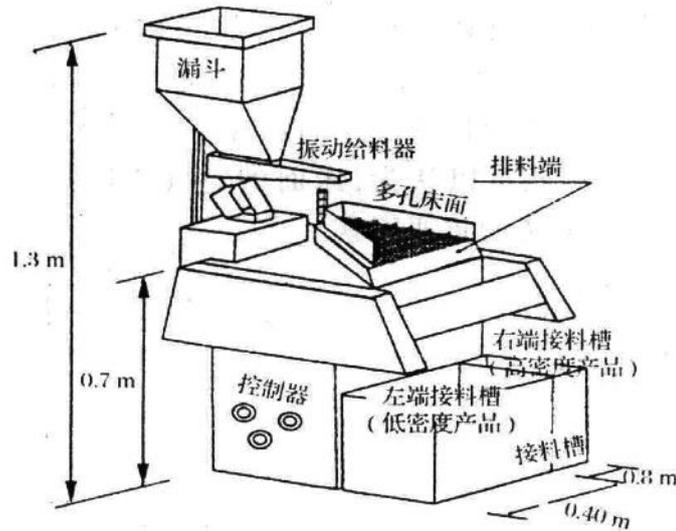
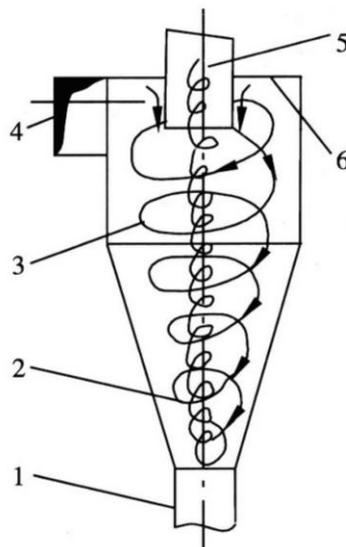


图 1-5 风力摇床示意图^[29]

Fig.1-5 The diagram of wind shaker^[29]



1.排灰管 2.内旋气流 3.外旋气流 4.进气管 5.排气管 6.旋风顶板

图 1-6 旋风分离器示意图^[35]

Fig.1-6 The diagram of cyclone^[35]

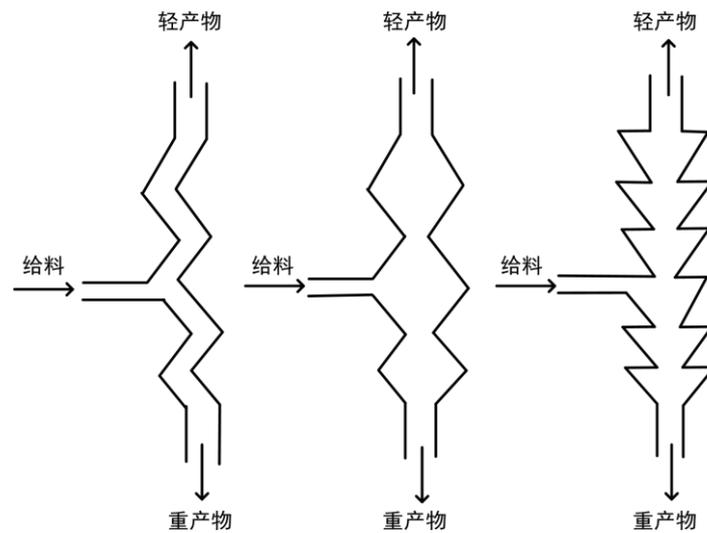


图 1-7 阻尼式脉动气流分选装置示意图^[36]

Fig.1-7 The diagram of damping pulsing air separation unit^[36]

其他一些常用的分选设备还包括有风力分选机、旋风分离器、气流分选装置及脉动气流分选装置等^[30-33]。其中直筒式风力风选机可以用来分离铜片和铝片。它的原理是通过改变风速，当物体的沉降末速小于风速时，物体具有向上运动的速度作为溢流产品被回收；当物体的沉降末速大于风速时，物体向下运动作为底流产品被回收^[34]。旋风分离器如图 1-6 所示，随着气体经切向方向进入分离器后作圆周运动，气体旋转速度逐渐减小最终向上运动从顶部流出带走密度小的颗粒，密度大的颗粒最终会从底部流出^[35]。而阻尼式脉动气流分选装置的示意图如图 1-7，其原理是气流通过阻尼区域时会产生气流的加速，携带密度较小的颗粒运动向上运动，达到分离的效果^[36]。利用阻尼式脉动气流分选装置可以用来分选电子废弃物中的铝和塑料颗粒^[33]。

表 1-1 电子废弃物中不同塑料材料的密度分布^[37]

Table 1-1 Distribution of densities of different plastics in WEEE^[37]

Type of particle	Abbreviation	Ranges in density (g/m ³)	Typical density (g/m ³)
Low density polyethylene	LDPE	0.918–0.93	0.932
Medium density polyethylene	MDPE	0.926–0.940	0.935
High density polyethylene	HDPE	0.941–0.965	0.94
Polystyrene	PS	1.03–1.07	1.06
Cross-linked polyethylene	XLPE	1.15–1.28	1.15
Poly (ethylene terephthalate)	PET	1.35–1.40	1.37
Poly (vinyl chloride)	PVC	1.37–1.42	1.39
Polytetrafluoroethylene	PTFE	2.07–2.20	2.17

由于一般的电子废弃物中含有大量的金属和塑料，它们的密度差异较大，容易按密度分离。对电子废弃物中主要塑料材料的分析^[37]，得到其密度从小到大分布如表 1-1 所示。

手机中的塑料成分主要为 PC 和 ABS，密度在 1.03–1.22 g/m³。而废旧手机破碎后的金属成分主要存在于电路板中，它的基板材料通常为玻璃纤维增强酚醛树脂或环氧树脂，其中含有多种金属与非金属元素，成份非常复杂^[38]。在对电路板分离回收的研究中指出^[39]，片状 WPCBs 电路板的密度颗粒为 1548.56 kg/m³，条状颗粒为 1941.64 kg/m³。

所以尽管电路板中也含有大量铜等其他金属，但是比较发现电路板复合材料的密度与手机塑料外壳密度差距不大，因此无法通过密度分选的方法实现高效的分离。

1.3.2 磁选和高压静电分选

磁力分选是指利用混合物料在磁场或者高压电场中的磁性的差异将物料中的某些组分进行分离的一种方法，其装置与分选过程如图 1-8 所示。例如，在线路板破碎后，可以利用传统的磁选机将具有铁磁性的金属组分分离出来^[41]。

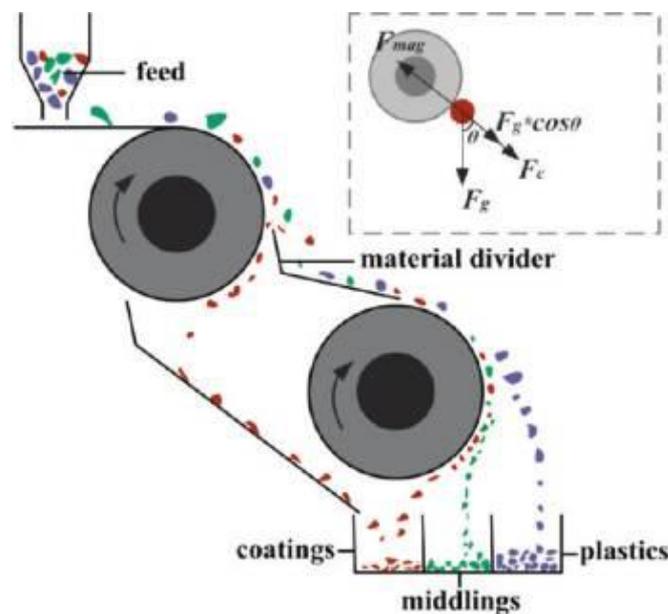


图 1-8 磁力分选装置示意图^[40]

Fig.1-8 The diagram of magnetic separator^[40]

然而磁选因为对材料磁性的要求，多用于除去废弃电路板中的铁磁性物质。而研究^[42]统计电路板中含有的 30% 金属主要包括：铜 16%，焊料约 4%，铁和铁素体 3%，镍 2%。由此可知，废旧手机破碎后的电路板颗粒中物中的铁磁金属含量并不高，最高的为铜，因此无法用磁选的方式完成有效分选。

而高压静电分选电选是利用颗粒在高压电场中所受电场力不同，实现金属与非金属分离，颗粒荷电方式有两种^[43]：一是通过离子或电子碰撞荷电，如电晕圆筒型分选机如图 1-9 所示，二是通过接触和摩擦荷电，如带有滚筒的摩擦电选机^[45]。

然而该工艺分离颗粒的粒级主要为小于 1mm 的细粒级，甚至能够从粉尘中回收金属，对于废旧手机破碎后的混合颗粒来说，考虑到破碎到此粒级范围的能耗过高和塑料颗粒由于熔沸点低可能无法承受如此高强度破碎产生的热能等因素，静电分选也不适用于对废旧手机破碎后的混合颗粒的有效的分离回收。

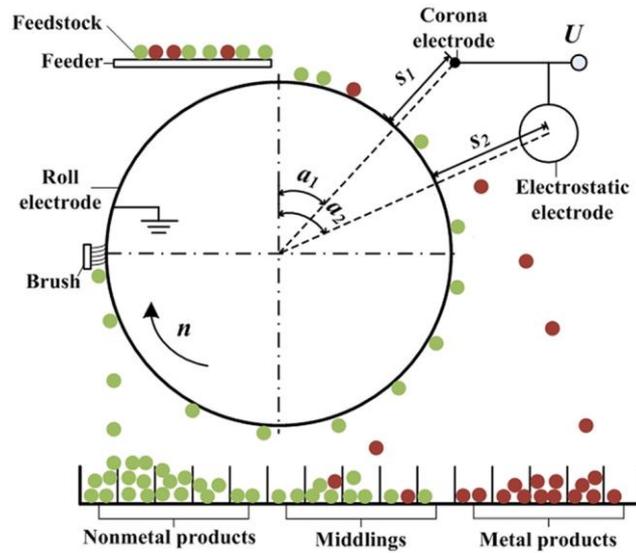


图 1-9 电晕圆筒型高压静电分选机示意图^[44]

Fig.1-9 The diagram of corona electrostatic separator^[44]

1.3.3 涡流电选

涡流电选是利用物质电导率不同的一种分选技术，是可以用来分选金属组分和非金属组分的一种分选方法^[46]。涡流电选设备中有一个高速旋转的永磁铁，将会产生一个交变磁场，当给非铁磁性金属通过交变磁场时，它们内部会产生涡电流，如图 1-10 所示。然而金属内部的变化了的涡电流本身也会产生交变磁场，并与旋转的永磁辊产生的磁场方向相反，相互排斥，对金属产生排斥的涡流力(洛仑兹力)，从而使得金属颗粒从物料中分离，达到分选的目的。

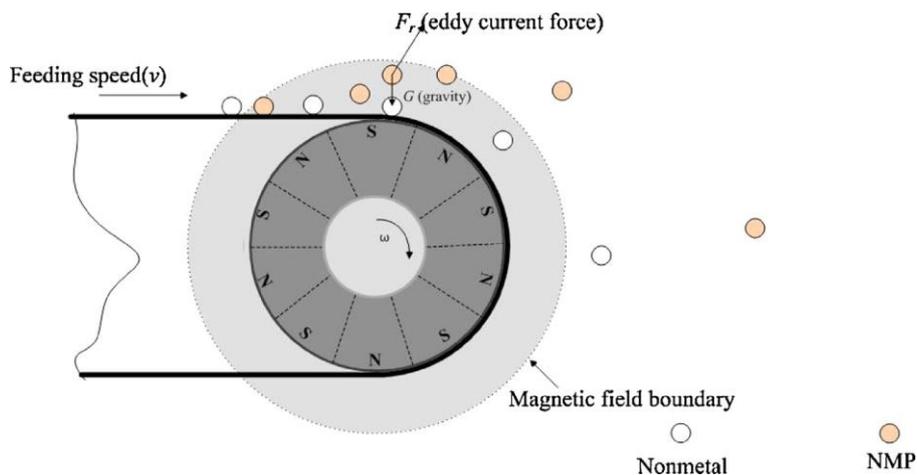


图 1-10 涡流电选机示意图^[47]

Fig.1-10 The diagram of eddy current separator^[47]

该方法已经广泛地用于从电子废弃物中回收非铁金属，特别适用于轻金属材料与比重相近的塑料材料(如铝和塑料)之间的分离^[41]，主要分离回收形状规则且粒度较大的金属^[48]。涡流电选的方式现已成熟应用于铜、铝等有色金属的分离回收中。考虑到破碎后的废旧手机中待分离的电路板颗粒中铜为含量最高的金属，因此该方法可能适用。传统涡流电选的方法已经成熟应用于有色金属的分离和选别，也有研究利用涡流电选机对铜、铝和塑料的样品进行分选，可以得到分选效率达到 95% 以上^[49]。但是对于利用涡流电选来分离类似废旧手机中的复合材料与纯塑料颗粒的研究目前仍在存在空白，尚没有一个完善合理的分选模型来指导选择最优的涡流电选参数，提高分选效率。

比较上述几种机械-物理回收技术的分离特点，如表 1-2 所示，根据对每种分选方法的可行性分析，可以发现想利用其分离回收废旧手机破碎后的混合颗粒，它们都有各自的缺陷，除了涡流电选。因此最终选择研究废旧手机破碎后电路板与塑料混合颗粒的涡流电选机制。

表 1-2 不同机械-物理回收技术的分离特点比较

Table 1-2 Comparison of different physical separation methods

Type of separation method	Features of the particle that be separated
Density separation	particles with great difference in densities
Magnetic separation	particles with great difference in magnetic properties
Electrostatic separation	particles with great difference in the amount of electricity
Eddy current separation	particles with great difference in generated eddy current

1.4 本课题研究目的与内容

1.4.1 研究目的

本课题研究目的是希望通过涡流电选的方法来大规模处理回收的废旧手机，分离废旧手机破碎后的混合颗粒（包括其塑料外壳，键盘和电路板），使其各自进入下一步的回收过程，更高效得回收利用废旧手机中的资源，既能节省资源，又可以保护环境。考虑到传统的涡流电选主要成熟用于纯金属与塑料颗粒的分离，而塑料与电路板这种复合材料的混合颗粒，在传统的分选参数下不能达到理想的分类效果。因此，本研究希望通过软件模拟的方法，建立一个涡流电选混合颗粒的模型，来帮助选择最优的分选操作参数，实现不同颗粒的分离回收。

1.4.2 研究内容

课题的研究内容：一是通过软件模拟建立一个涡流电选模型，判断涡流电选是否能用来分离破碎后的废旧手机混合颗粒，使得不同的颗粒，即塑料颗粒和电路板颗粒分别进入各自的下一步回收过程中去；二是通过软件优化以及实验验证，修正和完善涡流电选混合颗粒的软件模型，得到高分离回收效率的分选条件和参数，并将其应用于大规模的废旧手机回收现实中去。

第二章 技术路线与研究方法

2.1 技术路线与研究方法

本研究主要通过运用软件模拟计算来探究涡流电选是否可以用来分离废旧手机破碎后的电路板与塑料混合颗粒。研究的技术路线与方法如图 2-1 所示，首先通过对破碎后的混合颗粒进行物理特性表征，确定颗粒的密度、粒径、形状和电路板颗粒中的金属层厚度。然后完成对涡流电选机表面的磁场分布模拟和颗粒受到的涡流力模型的建立，从而继续对颗粒进行受力分析，用 MATLAB 软件帮助计算颗粒的脱离点。在脱离点计算模拟出的基础上，继续对颗粒的运动过程进行分析，完成涡流电选混合颗粒的轨迹模拟和落地点水平位置的计算。最后通过轨迹模拟的结果，在 Design Expert 软件的优化下，得到最优的分选参数，并进行实验验证。

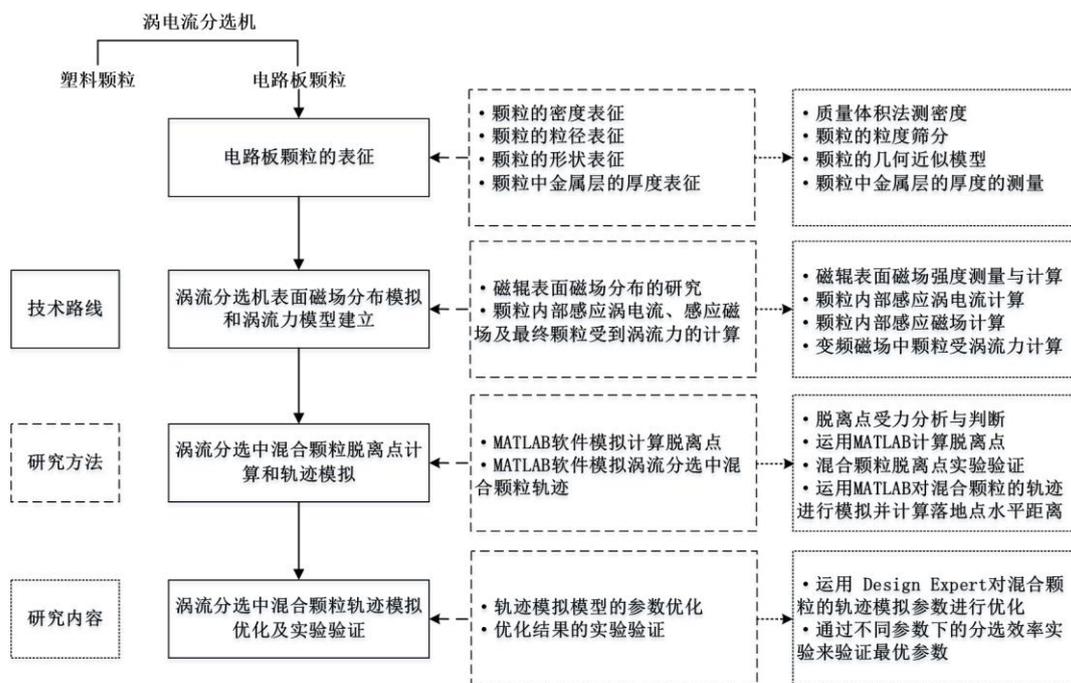


图 2-1 技术路线与研究方法

Fig.2-1 Experimental procedures of this study

2.2 原材料

本实验中原材料为对从上海新金桥环保有限公司回收的废旧手机进行破碎后得到的塑料与电路板金属混合颗粒。塑料颗粒主要来自于手机的外壳、键盘和其他连接件部分，而另一部分主要为电路板破碎后带有金属、树脂的复合材料颗粒。具体过程如图 2-1 所示。



图 2-2 原材料获取过程
Fig.2-2 Process of getting raw materials

2.3 实验设备与器材



图 2-3 Y132S2-2 型破碎机
Fig.2-3 Y132S2-2 Type of crusher

本实验中对废旧手机中破碎处理时采用的上海远霸机电有限公司生产的 Y132S2-2 型破碎机, 如图 2-3 所示。其配有三相异步电动机, 功率 7.5 kW, 电压 380 V, 电流 14.32 A, 最高转速 2930 rpm, 可以将废旧手机破碎至理想粒度范围。



图 2-4 8411 型振动筛分机
Fig.2-4 8411 Type of Electric screen

实验对于破碎后废旧手机中的混合颗粒的筛分采用的是 8411 型振动筛分机，如图 2-4 所示。将破碎后的物料放入最大粒径 2.5 mm 的筛网，再使用振动筛分机筛选出粒径大于 2.5 mm 的混合颗粒，并称量记录。



图 2-5 BS600 电子天平
Fig.2-5 BS600 Type of Electric balance

实验过程中的物料称量使用的是信号为 BS 600 的电子天平，如图 2-5 所示。另外，它还用于称量分选实验结束后物料的称量。其量程为 0 - 500 g，精度为 0.1 g。



图 2-6 HT201 型特斯拉计
Fig.2-6 HT201 Type of Tesla meter

对于涡流电选装置磁辊表面磁场强度的测量使用的测量仪器为特斯拉计，如见图 2-6 所示，特斯拉计型号为 HT201 智能数显特斯拉计，量程为 200 -2000 mT。



图 2-7 ESC-60 型涡电流有色金属分选机
Fig.2-7 ESC-60 Type of Eddy current separator

实验所使用的涡流电选机为抚顺金生宇毅机电设备有限公司生产型号 ESC-60 涡电流有色金属分选机，如图 2-7 所示。该分选机重 1000kg，外形尺寸（长×宽×高）mm 为 2430×1055×1080，滚筒直径 300mm，皮带宽度 450mm，驱动功率 3.0kw。其磁辊转速范围为 0 - 3200rpm，皮带速度范围为 0 - 3200 m/s。



图 2-8 i-SPEED TROLYMPUS 高速视频摄像机
Fig.2-8 i-SPEED Type of High-speed camera

在涡流电选混合颗粒实验验证时，采用了高速摄影设备，如图 2-7 所示。该设备为用于研发的 OLYMPUS 高速视频摄像机，型号为 i-SPEED TR，该摄像机分辨率为 1280×1024 ，最高速度达 10,000 帧/秒，可适用于绝大多数测试，可以在电脑中回顾与分析图像而捕捉高品质视频图像。

2.4 实验应用的软件

本实验中主要运用到软件包括以下：

MATLAB (Version_R2014b)，MATLAB 可以进行矩阵运算、绘制函数和数据、实现算法、创建用户界面、连接其他编程语言的程序等，主要应用于工程计算、控制设计、信号处理与通讯、图像处理、信号检测、金融建模设计与分析等领域。在本实验中，它主要用于涡流电选混合颗粒脱离点的模拟计算和颗粒轨迹的模拟。

Design Expert 8.0.6，Design-Expert 是全球顶尖级的实验设计软件，拥有强大的响应曲面(RSM) 优化试验功能，可以帮助找到实验中自变量设置使得相应变量得到最佳值，它是目前实验优化相关领域最广泛使用的软件之一。在本实验中，它主要用于涡流电选混合颗粒的轨迹模拟的优化和分选操作最优参数的选择。

Microsoft Visio 2013，Microsoft Visio 是 Windows 操作系统下运行的流程图和矢量绘图软件，帮助创建具有专业外观的图表，以便理解、记录和分析信息、数据、系统和过程。本实验中部分示意图均使用 Microsoft Visio 2013 人工绘制得到。

Origin 8.5，Origin 为 OriginLab 公司出品的较流行的专业函数绘图软件，是公认的简单易学、操作灵活、功能强大的软件，既可以满足一般用户的制图需要，也可以满足高级用户数据分析、函数拟合的需要。本实验中结果分析的图片均使用 Origin 8.5 人工绘制得到。

第三章 破碎后废旧手机混合颗粒的物理特性表征

3.1 废旧手机回收样品分析

对实验室从上海新金桥环保有限公司回收的总共 105 台废旧手机进行了分类和记录,以帮助更全面的了解废旧手机的主要款式,包括老式直板机、翻盖手机、滑盖手机和大屏智能手机等。通过对不同手机的电池进行拆解,了解手机中电池所占比重。继而通过拆解手机实物,机械破碎去掉电池后的完整手机若干部,并筛分混合颗粒中的塑料与电路板金属复合材料颗粒,得到手机中塑料与金属混合物的比重,并得到后续涡流电选实验的物料颗粒,同时对混合颗粒的物理特性进行表征。

3.1.1 废旧手机的款式和品牌分类

实验室从上海新金桥环保有限公司回收了共 105 台报废的旧手机,手机使用时间约在上世纪 90 年代末期到二十一世纪初,目前的报废量相当大。我们对报废的 105 台废旧手机进行了分析和记录,其中直板机有 55 台,翻盖手机有 36 台,滑盖手机有 14 台,如图 3-1 所示。通过观察就可以发现,这些报废的旧手机与如今的一体的智能机在结构上有很大的不同,液晶屏幕的所占比重很小,去掉电池以后剩下大部分为的塑料外壳、键盘和内部富含高回收价值的金属的电路板。



图 3-1 手机机型示意图

Fig.3-1 Different models of mobile phone

进一步对其中手机的 brand 分析记录后发现,大致有老牌的诺基亚 Nokia、摩托罗拉 Moto、三星 Samsung、飞利浦 Philips、爱立信 Ericsson、斯达康 UTStarcom 和其他国内外品牌,其中诺基亚品牌的手机比重最大,占总数的 29%,摩托罗拉手机也有占到了总数的 20%,三星手机占到 17%,其余为其他品牌的手机,其具体数据分布如图 3-2。

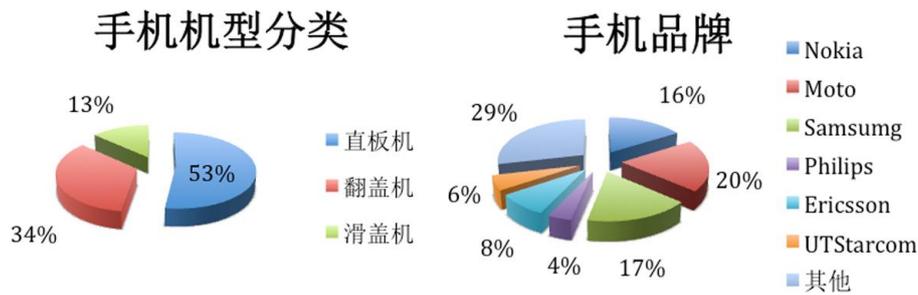


图 3-2 手机机型及手机品牌分类

Fig.3-2 Proportion of different models and brands of mobile phone

3.1.2 废旧手机各部分质量比

接下来，对 105 台手机中带有电池的完整手机 84 台的称重记录发现，电池所占整个手机的质量比约为 25.37%。其中直板机电池重量比约为 26.40%，翻盖机电池重量比约为 25.01%。通过对 84 部回收的废旧手机的拆解分析：总重量为 7783.3g，其中电池总重 1287.0g，电路板总重 1529.2g，塑料外壳总重 4967.1g，如图 3-3 所示。由各部分所占比例可以知，除去电池之后，废旧手机中的电路板与塑料外壳的质量比约为 1：3。

废旧手机各部分质量

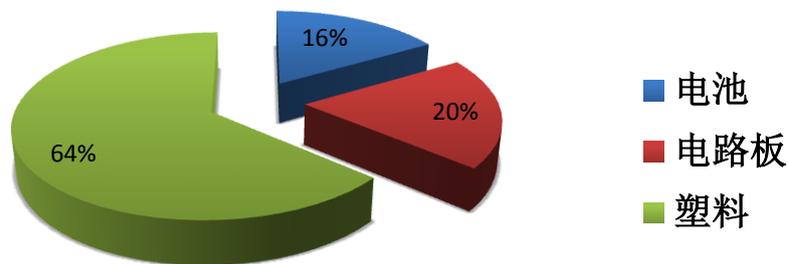


图 3-3 废旧手机各部分质量

Fig.3-3 Proportion of different parts in waste mobile phones

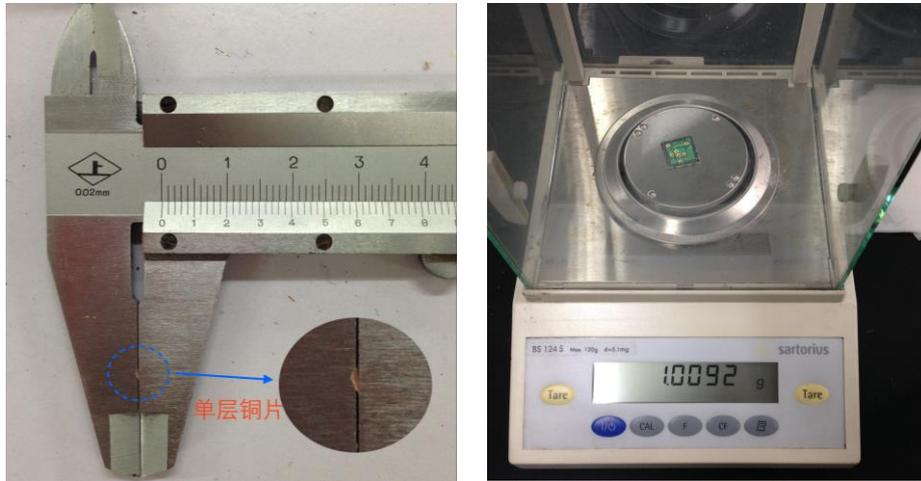
3.2 破碎后废旧手机的物料特性表征

本实验中破碎后的废旧手机中的塑料与电路板金属混合颗粒都通过破碎回收的废旧手机通过得到。考虑到实际破碎的效果，通过筛分选择，确定颗粒的粒径的密度、大小、形状、电路板金属复合材料中金属层的厚度这几个物料特性。

3.2.1 颗粒密度

将废旧电路板剪成 2.5 cm×2.5 cm 的正方形，厚度约为 1 mm，如图 3-4 所示。并且将废旧电路板上的单层金属层分离一部分下来，可以发现金属层为单层铜的材料，厚度很薄，

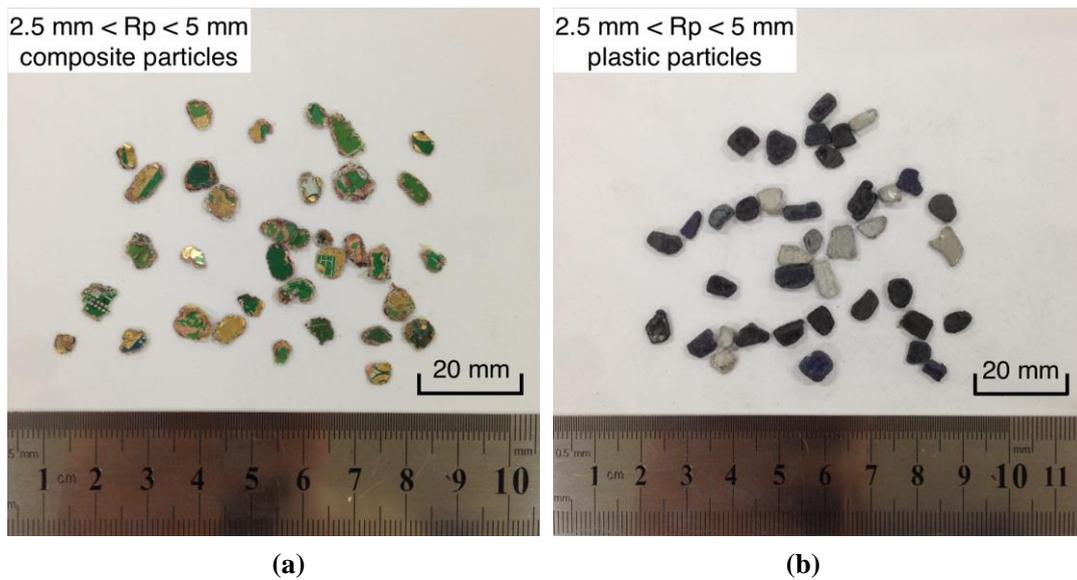
可以用游标卡尺测量，厚度为 0.1mm。最后用分析天平称量其重量，为 1.0092 g。则计算得到废旧电路板的平均密度为 ρ 约为 1.5 kg/m^3



(a) (b)
图 3-4 废旧电路板厚度和质量测定
Fig.3-4 Thickness and mass measuring of PCB

3.2.2 颗粒粒径

在涡流电选的实验验证部分，通过对破碎后废旧手机的混合颗粒的分析，考虑到实际破碎的力度和涡流电选的效率，将颗粒看做圆形，则半径 R_p 分为 $2.5 - 5 \text{ mm}$ ，以及半径 R_p 大于 5 mm ，具体如图 3-5 所示。



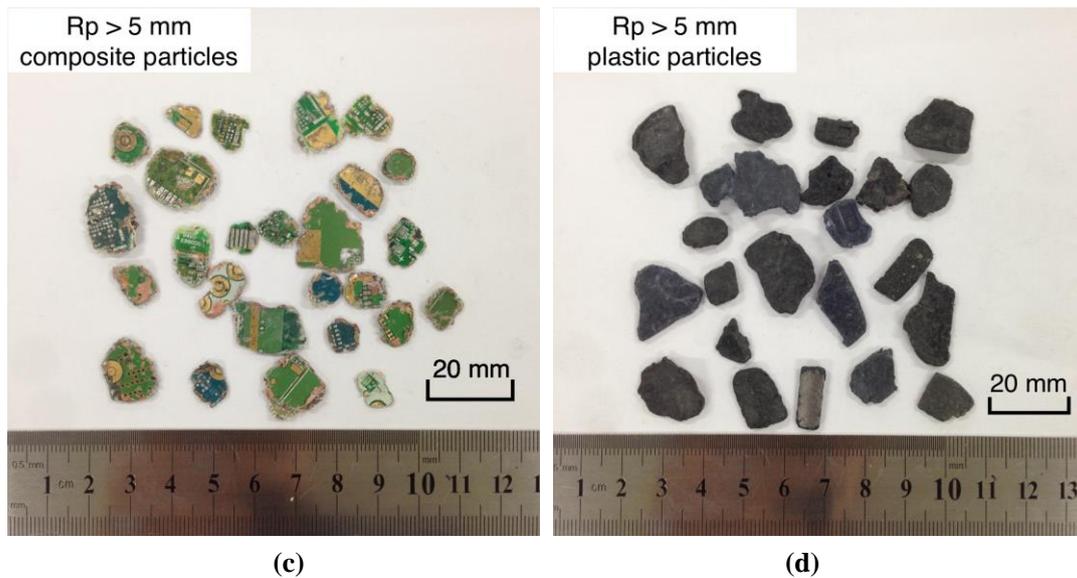


图 3-5 颗粒粒径大小示意图
Fig.3-5 Particle size ranges

3.2.3 颗粒形状

通过观察破碎后废旧手机塑料与电路板混合颗粒，将颗粒形状归结为截面形状为圆形、矩形和三角形三种形状的颗粒，如图 3-6 所示，另附有其几何近似模型。颗粒尤其是含有金属的电路板颗粒的形状将会影响到它在涡流电选过程中受到的排斥力涡流力的大小，进而影响它在分选过程中的状态，是否最终可以达到与塑料颗粒分离的效果，因此形状也作为颗粒物理特性的一个重要表征。

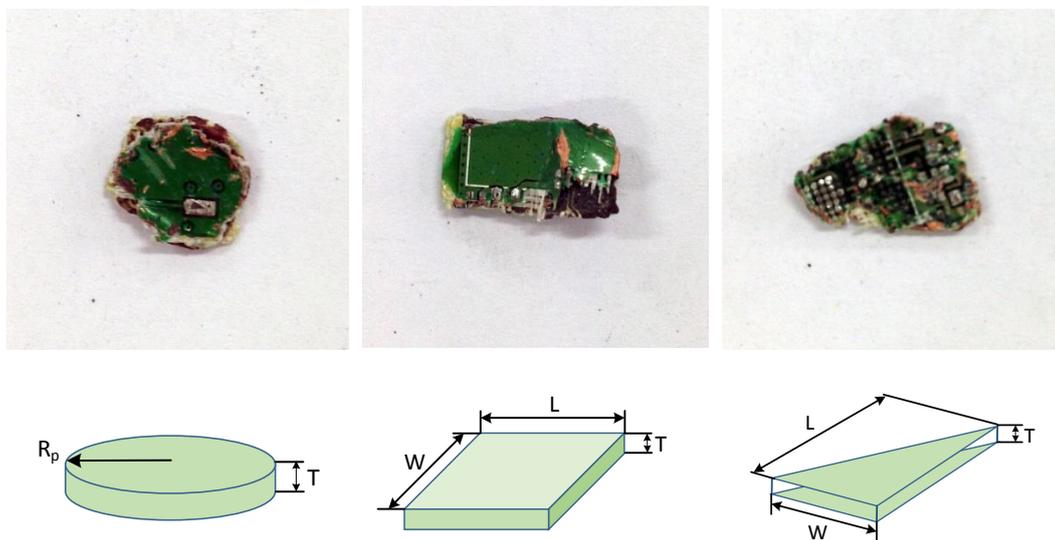


图 3-6 颗粒的形状示意图
Fig.3-6 Particle shape and geometric model

3.2.4 电路板颗粒中金属层厚度

由于需要被分离的电路板颗粒为金属与非金属的复合材料，通过观察破碎后的电路板颗粒的截面如图 3-7，可以发现电路板含有多层铜板和多层玻璃纤维和树脂板复合而成。通过

测量发现电路板的总厚度约为 1mm，而其中每一层铜片的厚度约为 0.1mm。在涡流电选的过程中，由于金属受到排斥力的作用会飞离皮带表面达到分离的效果，因此电路板颗粒中的金属层含量，及金属层的厚度 T 一定程度上影响着颗粒在分选过程中的运动过程和最终的分离效果，因此电路板颗粒中金属层厚度也作为颗粒物理特性的另一个重要表征。

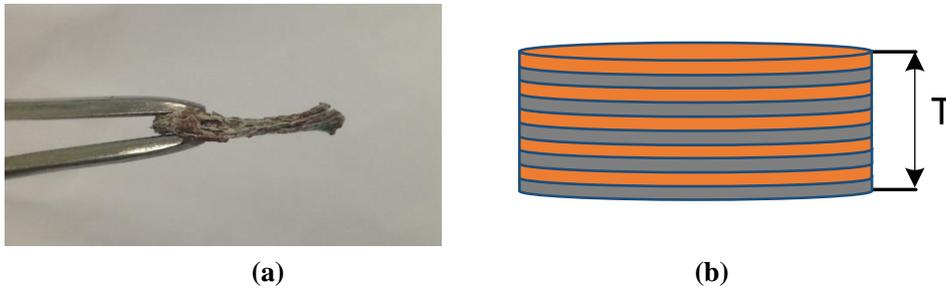


图 3-7 电路板颗粒截面图

Fig.3-7 Cross section of PCB particles

第四章 涡流电选混合颗粒的模型建立

4.1 涡流电选原理

涡流电选早在上世纪 90 年代就被发现用来分离提纯非铁磁性金属如铜、铝和铂等或者分离混合的不同种类金属。其主要结构为传送皮带，皮带下方装有采用永磁铁为材料，磁极交替排列的磁辊，工作时，在分选磁辊表面产生高频交变的磁场，当有导电性的有色金属经过磁场时，会在有色金属内感应出涡电流，此涡电流本身会产生与原磁场方向相反的磁场，有色金属（如铜、铝等）则会因为磁场的排斥力作用而沿其运输方向向前飞跃，实现与其他非导体物或非金属类物质的分离，达到分选的目的，如图 4-1 所示。本课题希望通过涡流电选来分离电路板这种金属复合材料和塑料颗粒。

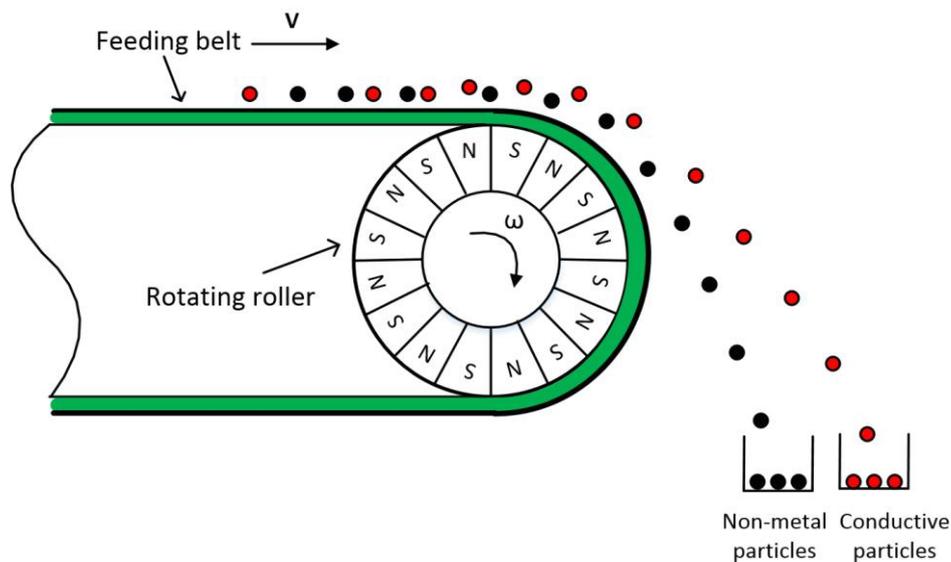


图 4-1 涡电流有色金属分选机分选示意图

Fig.4-1 Diagram of eddy current separator and separation process

涡流电选过程的实现是将混合颗粒通过传送带送至高速旋转的以永磁铁为材料的磁辊，它将会产生一个交变磁场，通过其中的非铁磁性金属内部会产生涡电流，而金属内部的变化了的涡电流本身又会产生与永磁铁转辊产生磁场方向相反的交变磁场，从而对金属产生排斥的涡流力^[50]。德国研究学者 Rem 等人提出颗粒在涡流电选过程中运动的模型，包括用一个一阶线性方程描述圆柱坐标 (r, ϕ, z) 内涡流电选机旋转的磁辊所产生的变化的磁场分布。式中 k 为涡流电选机成对磁铁的数量， ω 为磁辊转速， b_n 为傅里叶系数， R 为磁辊的半径， n 为自然常数。同时，该模型还提出了颗粒的尺寸、形状、金属材料的导电性对颗粒在磁场中的运动轨迹都有定量的影响。

$$B_r = \sum_{n=0}^{\infty} b_n (r/R)^{-(2n+1)k-1} \sin(2n+1)k(\alpha - \omega t) \quad (4-1)$$

$$B_\alpha = \sum_{n=0}^{\infty} b_n (r/R)^{-(2n+1)k-1} \cos(2n+1)k(\alpha - \omega t) \quad (4-2)$$

$$B_z = 0 \quad (4-3)$$

在之前对颗粒在双辊涡流电选机中运动轨迹的研究中^[51]曾提出了颗粒在涡流电选过程中所受到的切向力和径向力涡流力的计算模型，以用来预测颗粒在分离后的水平位移。式中 s 为颗粒形状因素， V 为颗粒体积， τ 为颗粒导电性， μ_0 为真空磁导率， B_a 为磁辊磁场强度， k 为磁辊磁极对数， ω_m 为磁辊转速， Ω 为颗粒运动角速度， w 为磁辊中单个磁极的宽度。

$$F_t = \frac{2\pi s V}{\mu_0 w} \frac{(k\omega + \Omega)\tau^2}{1 + (k\omega + \Omega)^2 \tau^2} B_a^2 \quad (4-4)$$

$$F_r = \frac{2\pi s V}{\mu_0 w} \frac{(k\omega + \Omega)^2 \tau^2}{1 + (k\omega + \Omega)^2 \tau^2} B_a^2 \quad (4-5)$$

通过该受力计算模型模拟的轨迹与实际试验结果吻合度很高。此外，该研究还发现，通过增大磁场的强度，增大磁辊的转速可以有效地分离粒径更小的颗粒。在对涡流电选金属与非金属颗粒抛物线模拟的研究中发现^[52]，相比颗粒的具体形状，颗粒的尺寸大小是影响颗粒运动轨迹较为关键的因素。学者们还通过对建立的涡流力模型进行积分，结合计算机软件模拟了颗粒在涡流电选过程中的运动轨迹。在此基础上，结合涡流电选实验，定性的讨论了涡流电选的影响因素。有研究发现^[53,54]在利用涡流电选回收废弃电脑中铝材料时，分析了不同颗粒（粒径，形状，电导率），不同喂料速度对物料分离的影响。当颗粒粒径小于 2-3 mm 时，颗粒无法进行有效分离。颗粒形状因素对涡流电选效果的依次为不规则形状>球型>片型，片型颗粒分选效果最好。纯金属颗粒分选效果要好于金属合金颗粒。此外当处理粒径较小的颗粒时，增强磁场强度和提提高刺辊的转速可以提高分离质量。

由于对废旧手机破碎后的混合颗粒在涡流电选过程影响的因素有很多，包括颗粒本身的尺寸大小、形状、和电路板颗粒中金属层的厚度等，还有设备参数对颗粒分离效果的影响，包括皮带传送速度和磁辊旋转速率等。再加上之前对涡流电选模型的研究主要集中于分离纯有色金属于塑料颗粒或者不同金属颗粒，没有对用涡流电选分离塑料与金属塑料复合颗粒的研究，因此对于颗粒的性质、设备的参数都没有完全相同的数据可以参照。所以本研究希望通过颗粒在分离过程中的涡流力模型的建立，帮助计算所要分离的混合颗粒的脱离点，进一步计算它们在分离过程中的运动轨迹，以判断分离效果。

4.2 涡流电选机磁辊磁场分布和强度模拟

涡流电选过程中磁辊磁场的分布直接关系到金属颗粒在磁场中产生的涡流力的大小，是之后进一步对金属的受力分析，建立涡流力的模型，计算颗粒在皮带上的脱离点和对颗粒在分离过程中的轨迹的模拟的基础。

4.2.1 磁场分布公式

在涡流电选原理中已经提到^[30]已有人提出圆柱坐标 (r, φ, z) 内涡流电选机旋转的磁辊所产生的变化的磁场分布公式。然而在实际涡流电选过程中，由于磁辊转速与皮带线速度相差较大，且颗粒尺寸远小于磁辊尺寸，因此，当颗粒随输送带靠近磁辊时，磁辊转动所提供的变频磁场可以视为垂直穿越铝片颗粒。因此公式 (4-4) 和 (4-5) 中 $(\alpha - \omega t)$ 的数值可认为 $\pi/2$ 。而本实验的涡流电选设备中磁辊半径 R 为 0.150 m, k 的数值为 8 对, n (1, 2, 3...), 取自然数, 于是公式可以化简为:

$$B_r = \sum_{n=0}^{\infty} b_n (r/R)^{-(16n+9)} \quad (4-6)$$

4.2.2 磁场分布测量及计算

在公式 4-1 的基础上, 进一步测量不同距离磁辊中心 r 高度的磁场强度值带入公式。测量方法如图 4-2, 用标尺固定标高, 同时利用特斯拉计测量每隔 1cm 高度磁辊表面的磁场强度。将测量结果带入公式 (4-1) 可以得到涡流电选机的傅里叶系数 b_0 和 b_1 的值分别为 0.175 和 0.074, 由于幂次方系数的原因 b_2 的值几乎为 0, 可以忽略。带入 b_0 和 b_1 的值后可以得到实验所用的涡流电选机磁辊周围的磁场强度分布方程如下为:

$$B_r = 0.145829(r/R)^{-9} + 0.855432(r/R)^{-25} \quad (4-7)$$

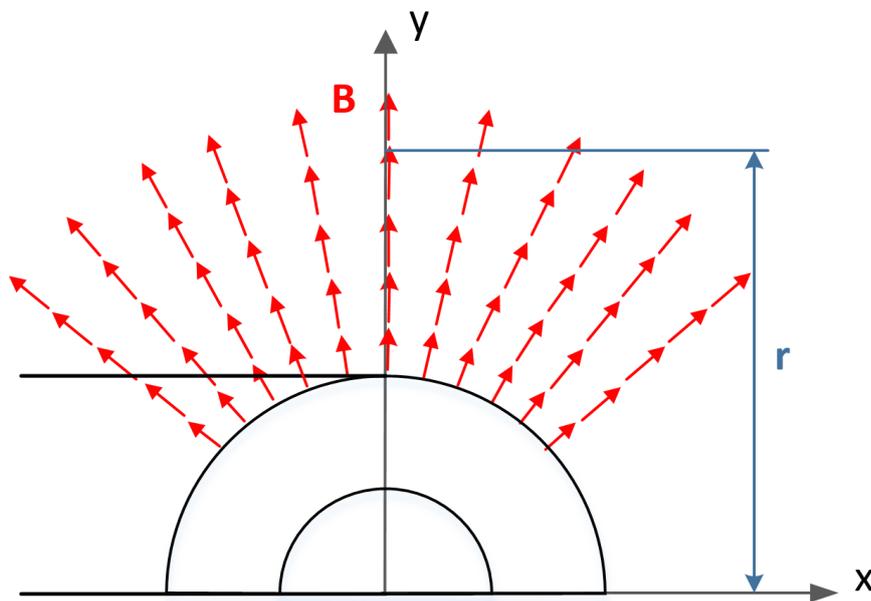


图 4-2 磁场强度分布测量示意图

Fig.4-2 Measuring the distribution of magnetic field above the roller

根据公式 4-2, 通过 origin8.5 软件可以绘制所计算的磁场模拟分布值曲线, 如图示 4-3, 为了进一步验证公式计算所得的磁场分布与实际磁场分布是否相同, 图中红色曲线还绘制出了实际测量距离磁辊表面不同高度的磁场强度值。观察发现计算的磁场分布曲线与实际测量的磁场强度分布基本吻合, 表明公式 4-2 可以可靠的计算涡流电选机磁辊磁场分布。

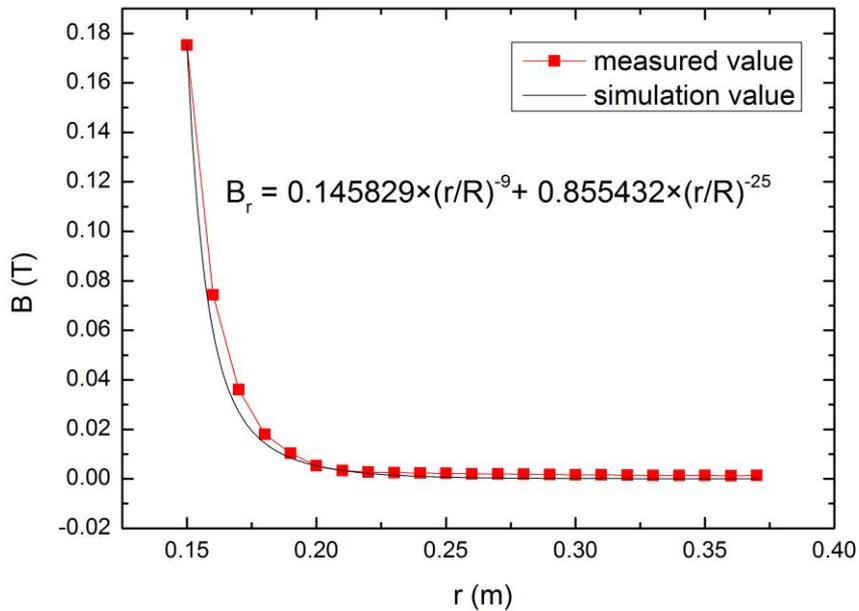


图 4-3 涡流电选机磁辊表面磁场强度分布

Fig.4-3 Distribution function of the magnetic field above the roller

另外，通过对计算所得的涡流电选机磁辊磁场强度分布分析可以发现，在磁辊表面处的磁场强度最大，随着距离磁辊表面距离增大，磁场强度呈近乎指数倍数下降，当距离磁场表面超过 0.05m 时，磁场强度降低至接近为零。

4.3 涡流力模型建立及计算

在完成了涡流电选机磁辊磁场分布和强度模拟的基础上，进一步完成在涡流电选过程中，在变频磁场中电路板金属颗粒受到的涡流力的分析计算，建立模型。

4.3.1 电路板金属颗粒内部感应涡电流的强度计算

由于金属颗粒在变化磁场中运动时，其内部产生的变化的涡电流本身也会产生交变磁场，所以在计算金属颗粒所受到涡流力之前需要先计算它内部产生的涡电流的强度，从而计算出颗粒自身产生的变化磁场强度。因电路板颗粒的尺寸、速度都与磁辊本身相差比较大，所以我们不妨假设颗粒垂直穿过变化的磁场，则电路板金属颗粒内部磁通量变化量为：

$$\Delta\Phi = \iint_S B_r dS_p \quad (4-8)$$

式中 B_r 为颗粒所在的位置处的磁场强度，可以由磁场分布公式计算得到，而 S_p 为颗粒垂直在磁辊径向方向的横截面积。由于颗粒所经受的磁场方向交替变化，在铝片颗粒内部产生方向交替改变的涡电流。由于感应电流的趋肤效应，因此不同形状的金属颗粒内部涡电流的形状如图 4-4 所示：

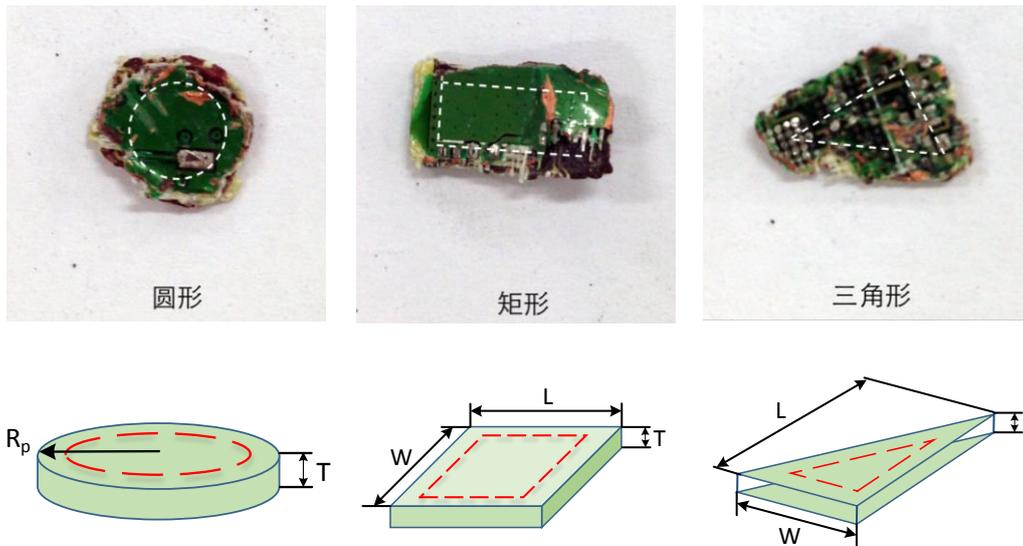


图 4-4 不同形状的金属颗粒内部涡电流

Fig.4-4 The eddy current generated in particles with different shapes

(1) 圆形金属颗粒中感应涡电流的强度计算

如果圆形金属颗粒的半径设为 R_p ，不妨假设圆形颗粒的内部有一个半径为 τ ；金属层厚度为 T 同心圆线圈，如图 4-4 所示。则线圈所遭受的磁通量变化量可以表示为：

$$\Delta\Phi = B_r\pi\tau^2 \quad (4-9)$$

由法拉第电磁感应定律得到线圈中产生的感应电动势为：

$$\varepsilon_i = -\frac{B_r\pi\tau^2k(\omega R - v)}{\pi R} \quad (4-10)$$

同时计算整个圆形线圈的电阻的计算为：

$$d\Omega = \frac{1}{\gamma} \frac{2\pi\tau}{T d\tau} \quad (4-11)$$

式中 γ 为电路板中主要金属铜的电导率，进而可以计算线圈中感应电流的强度为：

$$dj = \frac{B_r k(\omega R - v)\gamma T d\tau}{2\pi R} \quad (4-12)$$

通过对圆形线圈中感应电流的积分可以得知圆形金属颗粒内产生的感应电流强度为：

$$J^c = \int dj = \frac{B_r k(\omega R - v)\gamma T \tau d\tau}{2\pi R} \int_0^{R_p} r dr = \frac{B_r k(\omega R - v)\gamma T}{4\pi R} R_p^2 \quad (4-13)$$

(2) 矩形金属颗粒中感应涡电流的强度计算

参照圆形金属颗粒的计算过程，同样可以计算矩形金属颗粒中感应涡电流的强度。假设矩形金属颗粒的长和宽分别表示为 L 和 W (如图 4-4)。如果矩形颗粒内部也有一个同心矩

形线圈，那么它的长为 $\frac{w}{W}L$ ，宽为 w ；金属层厚度为 T 。此矩形线圈在变频磁场中所遭受到的磁通量变化可以表示为：

$$\Delta\Phi = B_r \frac{w}{W} L \quad (4-14)$$

矩形线圈中的感应电动势可以表示为：

$$\varepsilon_i = - \frac{B_r \frac{w}{W} L k (\omega R - v)}{\pi R} \quad (4-15)$$

矩形线圈的电阻可以表示为：

$$d\Omega = \frac{1}{\gamma} \frac{2w(\frac{w}{W}L+1)}{T d \frac{w}{2}} \quad (4-16)$$

则，矩形线圈中的感应电流强度可以表示为：

$$dJ = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma T L w d \frac{w}{2}}{2\pi R W (\frac{L}{W} + 1)} \quad (4-17)$$

通过对线圈内感应电流强度积分可以得矩形金属颗粒中的感应电流强度为：

$$J^R = \int dJ = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma T L}{2\pi R W (\frac{L}{W} + 1)} \int_0^{\frac{W}{2}} w d \frac{w}{2} = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma T L W^2}{8\pi R W (\frac{L}{W} + 1)} \quad (4-18)$$

(3) 三角形金属颗粒中感应涡电流的强度计算

参照圆形金属颗粒的计算过程，同样可以计算三角形金属颗粒中感应涡电流的强度。对于三角形金属颗粒，可以假设其底边长，高，周长，及金属层厚度分别设为 W 、 L 、 C 、 T 。

如果三角形颗粒内部也有一个同心三角形线圈，则其底边长为 $\frac{l}{L}W$ ，高为 l ，周长为 $\frac{l}{L}C$ ，金属层厚度为 T (如图 4-4 所示)，该线圈在变频磁场中所经受的磁通量变化可以表示为：

$$\Delta\Phi = B_r \frac{l^2 W}{2L} \quad (4-19)$$

三角形线圈内的感应电动势可以表示为：

$$\varepsilon_i = - \frac{B_r l^2 W k (\omega R - v)}{2L \pi R} \quad (4-20)$$

三角形线圈的电阻可以表示为：

$$d\Omega = \frac{1}{\gamma} \frac{l C}{L T d \frac{l}{2}} \quad (4-21)$$

则在变频磁场中三角形线圈内部产生的感应电流强度为：

$$dJ = \frac{B_r k \gamma (\omega R - v) W T l d \frac{l}{2}}{2\pi R C} \quad (4-22)$$

通过对线圈内感应电流强度积分可以得三角形金属颗粒中的感应电流强度为:

$$J^T = \int dJ = \frac{B_r k \gamma (\omega R - v) W T}{\pi R C} \int_0^{\frac{l}{2}} \frac{l}{2} d\frac{l}{2} = \frac{B_r k \gamma (\omega R - v) W T L^2}{8 \pi R C} \quad (4-23)$$

4.3.2 电路板金属颗粒产生的感应磁场的计算

由 Biot-Savart 定律, 知道交变电流强度可以计算其诱发的磁场强度。其感应磁通量密度和感应磁通量分别为(式中 μ_0 为真空磁导率):

$$B_p = \mu_0 J \quad (4-24)$$

$$\Phi_p = B_p S_p \quad (4-25)$$

为了方便不同形状颗粒的感应磁场公式的清晰表达, 参照圆形颗粒的计算公式, 定义了矩形和三角形颗粒的形状因子 δ_R 和 δ_T , 分别为:

$$\frac{W}{2(L+W)} = \delta_R \quad (4-26)$$

$$\frac{L}{C} = \delta_T \quad (4-27)$$

所以将(4-13)、(4-18)、(4-23)式中计算出的感应电流强度代入式(4-24), 然后再带入式(4-25)便可以求出不同形状颗粒内部产生的感应磁场的磁通量, 分别为(其中 V 为不同形状颗粒的体积):

$$\Phi^C = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma V S_p \mu_0}{4 \pi^2 R} \quad (4-28)$$

$$\Phi^R = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma V S_p \delta_R \mu_0}{4 \pi R} \quad (4-29)$$

$$\Phi^T = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma V S_p \delta_T \mu_0}{4 \pi R} \quad (4-30)$$

4.3.3 变频磁场中电路板金属颗粒受涡流力计算

金属颗粒受到的涡流力是由于颗粒在涡流电选机磁辊周围的变化磁场磁通量 (Φ_m) 与其内部产生的感应磁场磁通量 (Φ_p) 方向相反, 相互排斥产生。如果把产生的排斥力, 即涡流力看作是两个方向相反的磁极间的作用力, 则其公式为:

$$F_r = \frac{\Phi_p \Phi_m}{4 \mu_0 \pi h^2} \quad (4-31)$$

式中 h 为颗粒与磁极之间的径向距离, 假设颗粒与磁辊轴心连线与垂直方向之间夹角为 α 的话, 那么径向距离 h 可以表示为:

$$h = \frac{R}{\cos \alpha} - R \quad (4-32)$$

颗粒内部产生的感应磁场磁通量 Φ_p 可以通过颗粒的位置求出, 而涡流电选机磁辊周围的变化磁场磁通量 Φ_m 为(其中 B_m 为测量的刺辊表面磁场强度):

$$\Phi_m = B_m S_p \quad (4-33)$$

将式 (4-32)、(4-33)以及不同形状的颗粒的感情磁场磁通量公式 (4-28) 、(4-29) 或者 (4-32) 带入式 (4-33), 可以计算得不同形状颗粒在变化磁场中受的涡流力的公式, 分别为:

$$F_r^C = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma V S_p^2 B_m}{16\pi^3 R^3} \frac{1}{(\sec \alpha - 1)^2} \quad (4-34)$$

$$F_r^R = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma V S_p \delta_R B_m}{16\pi^2 R^3} \frac{1}{(\sec \alpha - 1)^2} \quad (4-35)$$

$$F_r^T = \frac{B_r k (\omega R - v) \gamma V S_p \delta_T B_m}{16\pi^2 R^3} \frac{1}{(\sec \alpha - 1)^2} \quad (4-36)$$

4.4 涡流电选操作参数选择

涡流电选的操作参数主要包括控制物料传送的皮带速度 v , 和控制磁辊旋转速度的磁辊转速 ω 两个参数, 如图 4-1 中所示。实际涡流电选过程中, 还会受到一些其他因素的影响, 为了提高分离的效率, 查阅相关研究涡流电选过程中操作参数对涡流电选的影响文献发现, 磁辊转速与皮带喂料线速度之差 $(\omega R - v)$ 是影响涡流电选的关键因素, 输送带喂料线速度 (v) 为一般因素, 当喂料线速度越小, 磁辊转速与输送带喂料线速度之差越大时, 分选效果越好^[55]。

4.4.1 皮带线速度

参考之前研究中的分选操作参数^[35], 选择在磁辊 721Hz, 转速 ω 约 808rpm, 皮带频率 318Hz, 对应皮带线速度 v 约 0.4m/s 时, 将颗粒半径小于 5mm 的 24.7g 废旧电路板碎片均匀抖撒到传送带上, 观察实验现象, 记录实验结果。大部分颗粒在皮带上进入磁场区域时没有任何现象, 直接掉入非金属收集槽; 少数碎片颗粒在进入磁场区域后开始向回翻转, 翻转剧烈的碎片飞入金属收集槽, 不太剧烈的进入非金属收集槽, 最后金属收集槽中回收得到的电路板碎片质量约 0.6g。

此实验结果说明参考传统的有色金属分选实验参数下, 分选效果较差, 大部分碎片颗粒在变化磁场中的受力情况不明显, 可能原因是涡流力大小相比重力还太小, 不足以使颗粒在磁场中发生运动, 脱离皮带。仔细观察被分选出的碎片颗粒发现, 碎片大多较轻薄, 塑料层相对较少, 金属镀层面积较大, 因此受到的涡流力较大, 考虑到本身质量较小, 更易发生翻滚飞出皮带。

4.4.2 磁辊转速

在不改变皮带转速的情况下, 逐渐提高磁辊转速 ω 至约 2600 rpm, 再次进行相同碎片的分选, 结果虽然金属收集槽中电路板碎片质量略有提高, 但是仍有大部分的碎片颗粒不能被磁场分离弹出皮带。在现有涡流电选条件参数下, 对半径 R_p 小于 5mm 的废旧电路板碎片的分离结果并不是很理想, 大多数颗粒都不能被分离, 其原因可能是因为颗粒本身重力远大于其在进入磁性转辊区域所受到的涡流力, 因此无法翻转脱离皮带实现分离。

通过预实验, 最终选择皮带速度 v 为 0.4 m/s, 磁辊转速 ω 为 2600 rpm 为基本分选操作参数。考虑到被分离颗粒的粒径大小和磁场强度、皮带转速都是影响分离的关键, 因此为避免盲目实验, 需先运用计算机软件模拟分析电路板金属碎片在磁场中的受力运动情况, 才能挑选出合适的皮带线速度, 转速和颗粒半径范围。

4.5 涡流电选中混合颗粒从皮带脱离时脱离点的计算

建立在对涡流电选机磁辊表面附近磁场强度分布计算，以及对电路板金属颗粒在涡流电选过程中所受涡流力的分析计算的基础上，进一步开始对混合颗粒在分选过程中，从涡流电选机皮带上脱离的脱离点进行计算和模拟。首先通过颗粒的受力分析，确定脱离点的判断条件，然后通过 MATLAB 软件，编辑程序来计算不同的颗粒参数和涡流电选参数下，颗粒的脱离点。

4.5.1 颗粒分离过程中的受力分析及脱离点的判断条件

在涡流分析过程中，混合颗粒物料一开始在传送带上随着皮带匀速前进，而含部分金属的电路板颗粒在进入磁辊产生的磁场范围内后，产生感应磁场，继而受到颗粒位置与轴心连线相反方向的排斥的涡流力(F_r)的作用，随着金属颗粒在皮带上的水平位置逐渐靠近磁辊中心，磁场强度的不断增大，金属颗粒本身受到的涡流力逐渐增大，而当涡流力在颗粒重力方向的分力大于颗粒本身重力(F_g)时，颗粒便开始脱离皮带表面，如图 4-5 所示，而脱离时颗粒所处的位置 (x_0, y_0) 就是下一步要计算的脱离点，也可以用颗粒与磁辊中心连线与竖直方向(y 轴)的夹角 α 来表示。

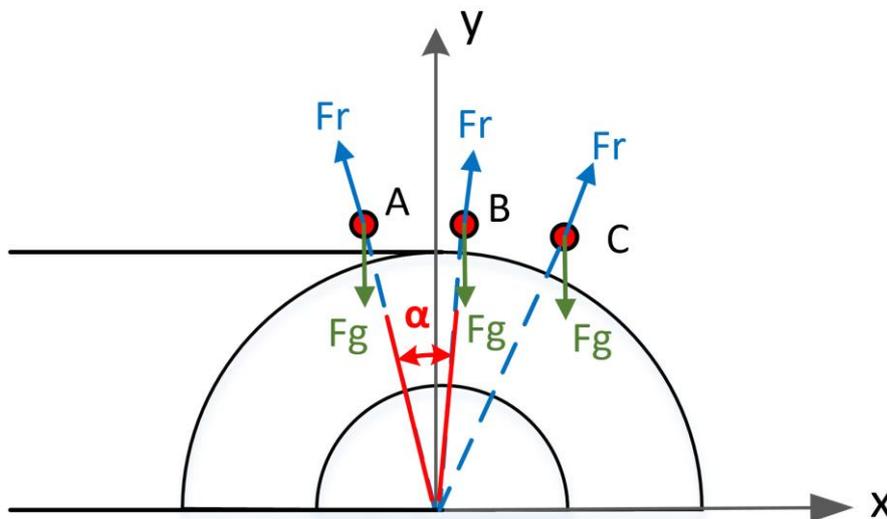


图 4-5 颗粒分离过程中的受力分析

Fig.4-5 Force analysis of particles during separation

通过上图的分析，可以看出，如果不考虑皮带摩擦，空气阻力等因素的影响，在变频磁场中受到涡流力的金属颗粒在其脱离皮带的脱离点时应满足的条件为：

$$F_g - (F_r \cos(\alpha)) = 0 \quad (4-37)$$

而对于废旧手机破碎后混合颗粒中的纯塑料颗粒来说，在变频磁场中不会受到涡流力的作用，因此在涡流分离过程中，塑料颗粒随着皮带运动受到皮带给的离心力(F_c)的作用，当离心力的垂直分量大于塑料颗粒本身重力时，塑料颗粒开始脱离皮带表面，脱离时颗粒所处的位置(x_0, y_0)就是塑料颗粒的脱离点，也可以用颗粒与磁辊中心连线与竖直方向(y 轴)的夹

角 α 来表示。塑料颗粒在其脱离皮带的脱离点时应满足的条件为：

$$F_c - (F_g \cos(\alpha)) = 0 \quad (4-38)$$

4.5.2 颗粒脱离点的计算模拟

在对涡流电选过程中混合颗粒的受力分析之后，确定了两种不同颗粒的脱离点的判断条件，接下来将进入混合颗粒脱离点的计算模拟。由于缺乏相关参数的理论依据，再加之影响颗粒脱离点的因素很多很复杂，如混合颗粒密度、粒径、形状和颗粒中金属层厚度这几个参数，同时还有涡流电选机的皮带线速度和磁辊转速两个参数。所以本研究通过运用 MATLAB 软件，编辑程序来计算不同的颗粒参数和涡流电选参数下，颗粒的脱离点。

MATLAB 计算混合颗粒脱离点的程序如图 4-6 所示，需要输入关于混合颗粒密度、粒径、形状和颗粒中金属层厚度这几个参数，同时也要根据实验条件，确定涡流电选机的皮带线速度和磁辊转速两个参数。基于输入了颗粒参数和分选设备参数的基础上，以及之前对磁场的计算模拟和对电路板金属颗粒所受到的涡流力的模型建立，编辑程序语言分别对电路板金属颗粒和塑料颗粒在分离过程中的受力与位置的关系进行计算，一旦满足脱离点的判定条件，程序就会主动终止，并会输出颗粒脱离点的数据，即颗粒与磁辊中心连线与竖直方向(y 轴)的夹角 α 。

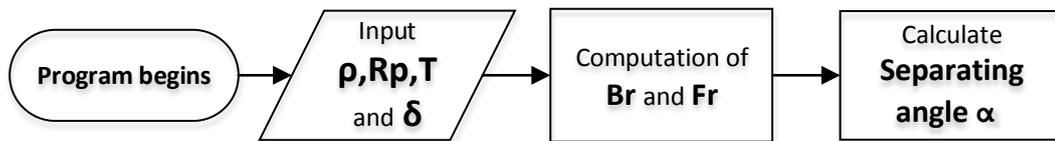


图 4-6 MATLAB 计算混合颗粒脱离点的程序流程图

Fig.4-6 Diagram of MATLAB program computing the separating angle

4.5.3 颗粒脱离点的计算结果分析

通过运用 MATLAB 软件模拟，可以方便地计算出不同的颗粒参数条件和分选设备条件下，待选混合颗粒的脱离角度。在这里我们首先分析的是电路板金属颗粒，因为对于金属颗粒需要考虑到涡流力的大小，影响因素比较复杂，与磁辊转速，颗粒本身参数都有关系。因此参照 4.4 中选择的涡流电选操作参数，确定皮带线速度 v 为 0.4 m/s，磁辊转速 ω 为 2600 rpm 保持不变的情况下，通过改变颗粒的粒径、形状和金属层厚度三个参数中的一个，可以得到颗粒本身特性对其在涡流电选过程中，脱离点位置的影响结果。对于塑料颗粒来说，由于只考虑离心力和重力，所以只有与离心力大小有关的皮带转速和颗粒本身重力大小有关的颗粒粒径两个因素对塑料颗粒的脱离点有影响，这里将不对结果作进一步探讨。

(1) 颗粒粒径对脱离点的影响

在皮带线速度 v 为 0.4 m/s，磁辊转速 ω 为 2600 rpm，选择截面为圆形的金属，且固定其金属层厚度 T 为 0.1 mm，总厚度为 1 mm，保持不变的情况下，改变颗粒的粒径大小，即颗粒的半径 R_p ，从 2.5 mm 增加到 6 mm，得到不同尺寸颗粒的脱离角度，并绘制出图 4-7。

由图中可见，随着颗粒的半径的不断增大，颗粒所受到的涡流力成倍增长，颗粒的脱离角度也越来越大，表明颗粒越早从皮带上脱离。因此，颗粒的粒径越大，脱离角度越大，越早脱离皮带。

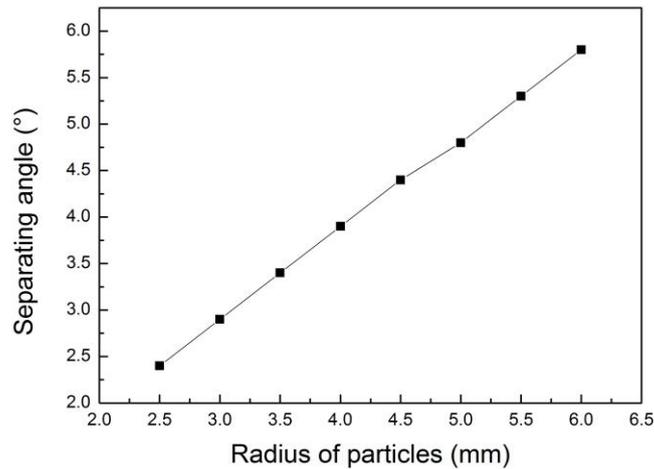


图 4-7 颗粒粒径对脱离点的影响

Fig.4-7 Influence of particle size on separating angle

(2) 颗粒形状因子对脱离点的影响

在皮带线速度 v 为 0.4 m/s，磁辊转速 ω 为 2600 rpm，并保持其半径 R_p 为 2.5 mm，金属层厚度 T 为 0.1 mm，总厚度为 1 mm 不变的情况下，改变颗粒的形状因子，分别为圆形、矩形和三角形，得到不同形状颗粒的脱离角度，如表 4-1。由表可知，随着颗粒中金属层数的不断增大，颗粒所受到的涡流力也成倍增长，颗粒的脱离角度也越来越大，表明颗粒越早从皮带上脱离。因此，颗粒中金属层数越多，脱离角度越大，越早脱离皮带。

表4-1 颗粒形状对脱离点的影响

Table 4-1 Influence of particle shape on separating angle

Shape	Area (mm ²)	$R_p/L \times W$ (mm)	Separating angle (°)
Circle	78.5	5 (R_p)	7.3
Rectangle	78.1	11×7 ($L \times W$)	6.82
Triangle	78.1	14.2×11 ($W \times L$)	7.45
Circle	19.6	2.5 (R_p)	3.79
Rectangle	20	5×4 ($L \times W$)	3.8
Triangle	20	10×4 ($W \times L$)	4.13

从表中数据不难发现，在面积相等或比较接近的情况下，不同形状的金属颗粒的脱离角度非常相近，因此如果颗粒面积大小相等时，颗粒的形状因子对于颗粒脱离点位置的影响并不大。所以在之后对于颗粒的脱离点验证和运动轨迹的模拟时，我们都选择圆形颗粒为代表，进一步研究其他参数对颗粒在分选过程中的运动的影响。

(3) 颗粒中金属层厚度对脱离点的影响

在皮带线速度 v 为 0.4 m/s, 磁辊转速 ω 为 2600 rpm, 选择截面为圆形的金属, 并保持其半径 R_p 为 2.5 mm, 总厚度为 1 mm, 保持不变的情况下, 改变颗粒中所含金属的层数, 即其金属层的总厚度 T , 从 0.1 mm 增加到 1 mm, 得到不同尺寸颗粒的脱离角度 α , 并绘制出图 4-8。由图可知, 随着颗粒中金属层数的不断增大, 颗粒所受到的涡流力也成倍增长, 颗粒的脱离角度也越来越大, 表明颗粒越早从皮带上脱离。因此, 颗粒中金属层数越多, 脱离角度越大, 越早脱离皮带。

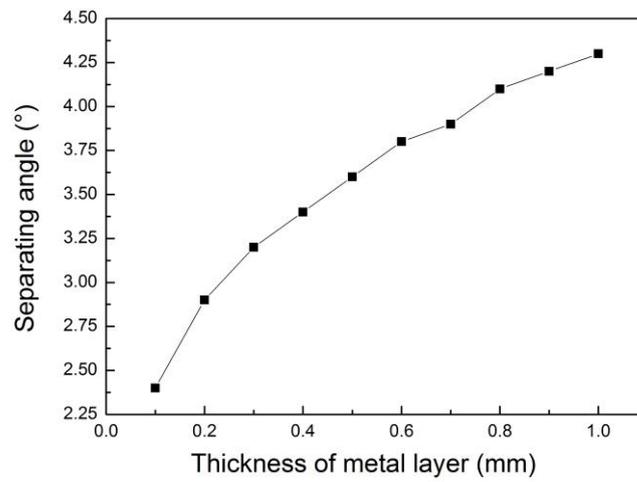


图 4-8 颗粒金属层厚度对脱离点的影响

Fig.4-8 Influence of thickness of metal layer on separating angle

4.5.4 颗粒脱离点的实验验证

通过前期的模型建立, 受力分析, 加上运用 MATLAB 软件模拟, 可以计算不同的颗粒参数条件和分选设备条件下混合颗粒的脱离角度。而为了验证 MATLAB 软件模拟的脱离角度是否与实际分选过程中金属颗粒的脱离角度相一致, 我们运用每秒 300 帧的高速摄像机拍摄的方法, 帮助记录下整个分选过程中颗粒的运动状态, 通过标记颗粒脱离点的大致位置, 来判断模拟结果与实际结果是否相符。实验时, 将设备位置固定在涡流电选机附近合适地点, 调整好镜头焦距, 通过配套软件将记录的图像实时传送到电脑, 如图 4-9 所示。

实验前要先选择适合的像素和帧数, 保证能比较清晰的记录下涡流电选的过程。然后打开涡流电选设备, 设置设备参数, 即皮带转动频率和磁辊转速, 然后将一定参数的金属颗粒放入分选设备皮带上方, 开始分选过程。待颗粒即将脱离时, 触动摄像机快门线, 电脑软件将帮助记录下触动快门前后几秒钟时间内的全部运动过程, 可以以图片或者视频的形式存储, 以便于后续的分析。

验证实验选用一定数量的金属颗粒 R_p 分别为半径 5 mm 和 7.5 mm 的两种颗粒, 固定一定的涡流电选操作参数, 做三组平行实验, 记录下每次金属颗粒在分选过程中的运动过程。将每一次完整的分选过程合成为一个完整的颗粒运动轨迹, 如图 4-10 所示, 以便于确定脱离点的位置, 并计算脱离时的角度。

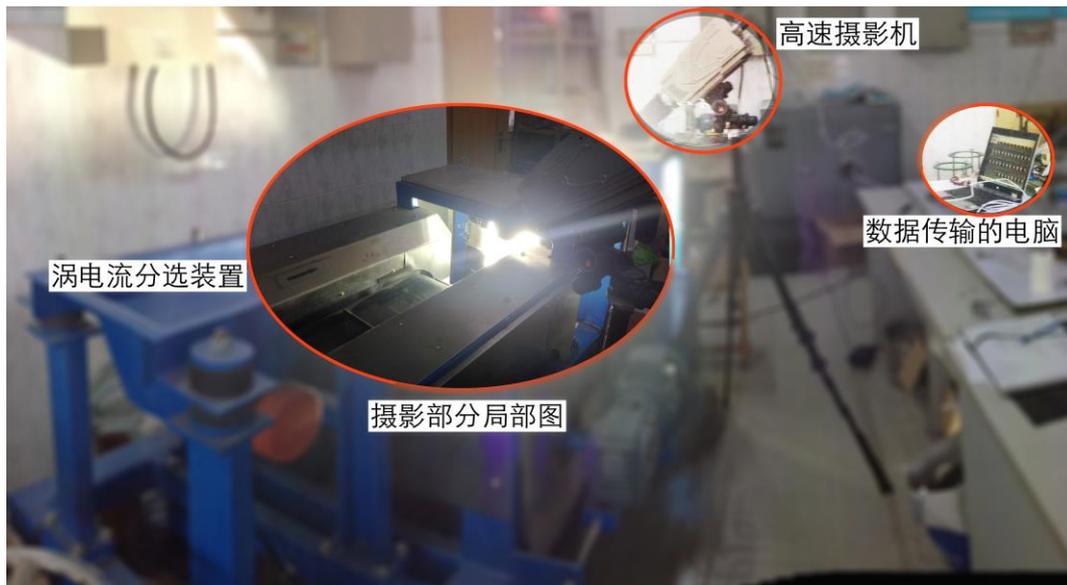


图 4-9 高速摄像设备记录分选过程图

Fig.4-9 Recording the separation process with high-speed camera

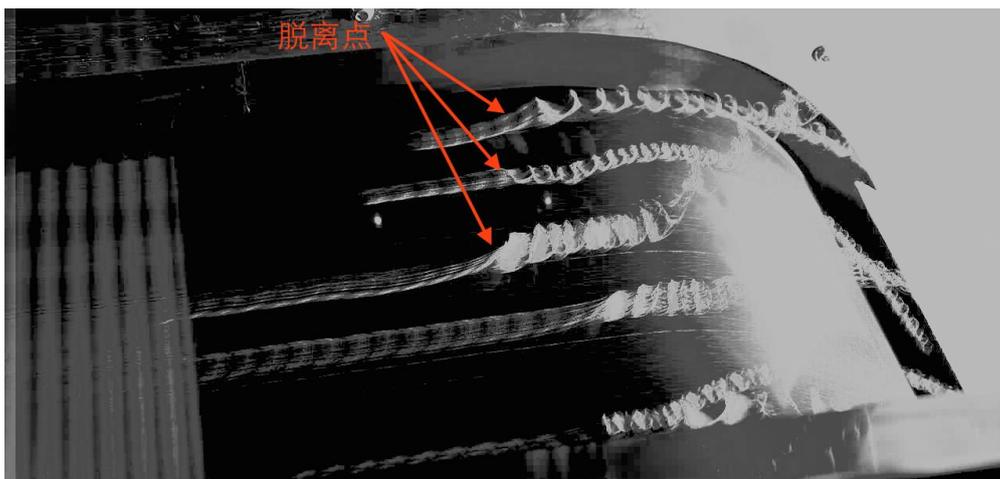


图 4-10 颗粒的脱离点判断

Fig.4-10 Judgment of the separating angle of the particle

在确定了脱离点的位置以后，通过事先确定的平行线的位置，来找到颗粒脱离皮带的位置距离磁辊轴心所在位置的垂直距离，由刻度尺直接读取距离轴心垂直线方向的水平距离 d ，如图 4-11 所示。根据公式 4-40，已知磁辊的半径 R ，就可以计算出此时颗粒位置与轴心连线与垂直方向之间的夹角 α ，即为脱离角。对于每次记录过程中的所有颗粒都完成上述工作，一共进行三组平行试验，计算在一定涡流电选设备操作参数下，两种不同粒径金属颗粒的脱离角的平均值。同时将实际的脱离角度值与 MATLAB 软件模拟值进行比较，以判断软件模拟是否真实可靠。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d}{R}\right) \quad (4-39)$$

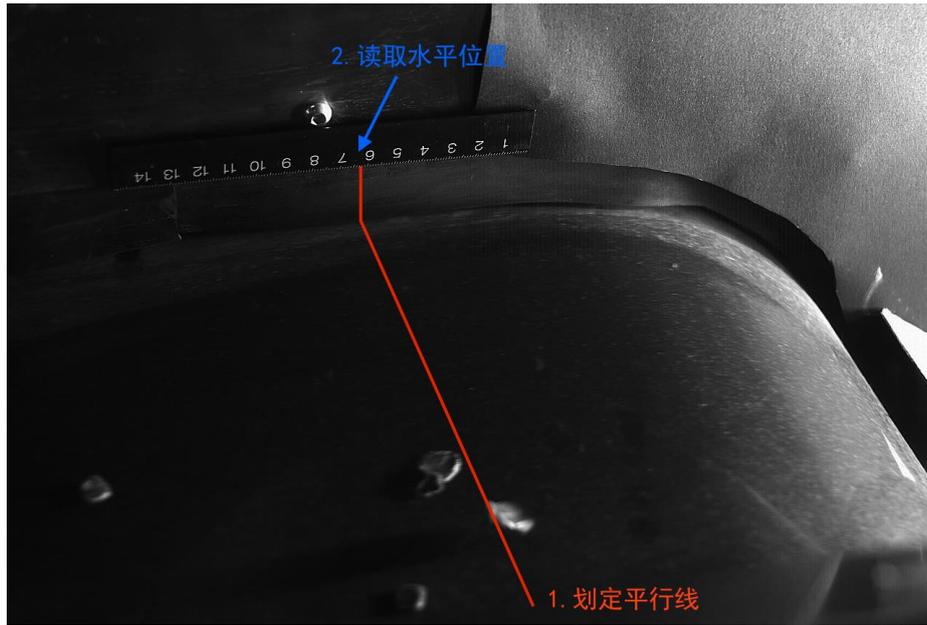


图 4-11 脱离点时颗粒的位置确定

Fig.4-11 Methods to determine the position of the separating angle

在皮带转动频率为 860 Hz, 磁辊转动频率为 2322 Hz, 即在皮带线速度 v 为 1 m/s, 磁辊转速 ω 为 2600 rpm 的操作参数下, 通过 3 次实验记录两种不同粒径的金属颗粒的分选过程, 按照以上方法, 计算出了脱离角度的平均值, 并与 MATLAB 软件模拟值进行了比较, 具体结果如下图 4-12。

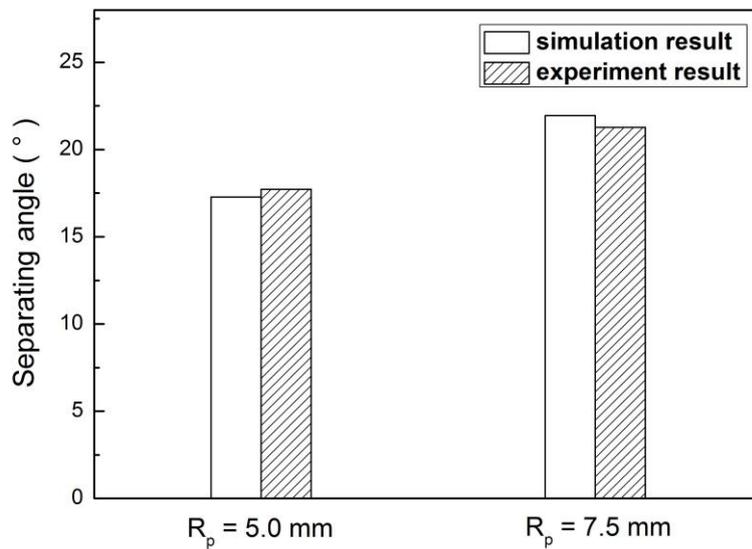


图 4-12 颗粒脱离点的实验验证结果

Fig.4-12 Result of experiments on verifying the separating angle

假设脱离角度的模拟值 α_s 与实际测量平均值 α_r 的误差为 β ，计算如下式：

$$\beta = \frac{\alpha_s - \alpha_r}{\alpha_r} \times 100\% \quad (4-40)$$

实验验证结果发现对于两种粒径 5 mm 和 7.5 mm 的金属颗粒，脱离角度的误差绝对值分别为 2.60 % 和 3.10 %，为比较理想的范围，说明本章基于磁场分布计算，涡流模型建立基础上的脱离点软件模拟的结果是比较可靠的，可以指导下一步对颗粒脱离之后的运动状态的分析计算，以便最终判断不同颗粒是否能够达到分离的效果。

4.6 涡流电选中混合颗粒的轨迹模拟

在对涡流电选过程中颗粒的脱离点的模拟计算的基础上，继续借助 MATLAB 软件计算颗粒脱离皮带表面后的运动过程，最终得到颗粒在涡流电选过程中的运动轨迹和颗粒落地点的坐标，并得到塑料和电路板金属颗粒两种颗粒落地点的水平位移差。根据这两种颗粒的水平位移差可以判断涡流电选能否用来分离废旧手机破碎后的混合颗粒。

4.6.1 轨迹模拟理论依据

在对颗粒脱离点的计算的基础上，确定了颗粒脱离皮带的位置。在此基础上，进一步对颗粒的运动轨迹进行模拟。假设颗粒在脱离皮带后很短的时间内 ($t = 0.0001s$)，颗粒的受力情况不发生改变，即看作匀加速运动，已知颗粒此刻的位置和初速度，再通过对颗粒受力分析，得到此时的加速度大小方向，便可以计算出 t 时间之后颗粒的位置，如图 4-13 所示。然后通过 MATLAB 软件循环这个过程，采用步进法最终得到颗粒在涡流电选中的完整运动轨迹。

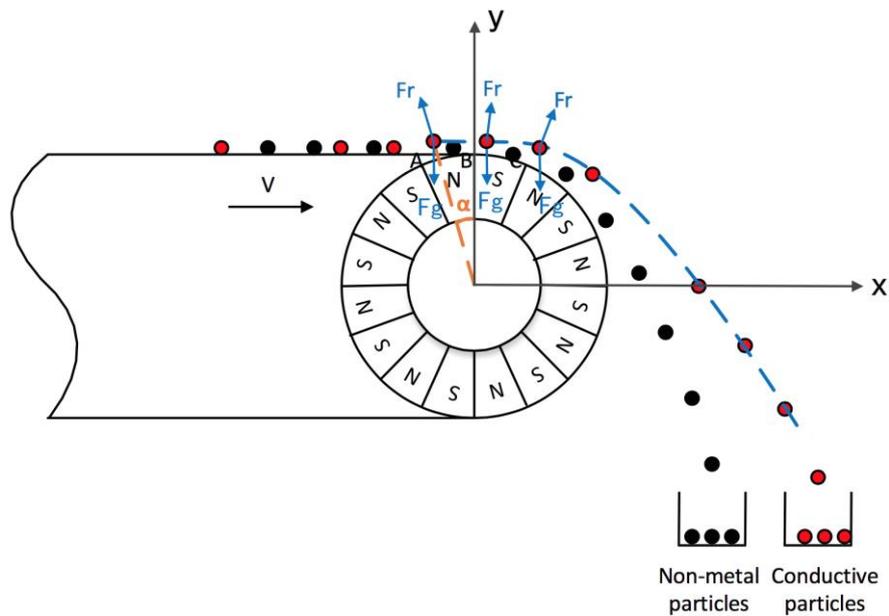


图 4-13 颗粒脱离后的轨迹计算步进法示意图

Fig.4-13 Marching on method of computing the trajectory

当颗粒脱离皮带时具有与皮带线速度相同的初速度设为 v_{x0} ，竖直方向的速度为 v_{y0} ，而此时脱离点的位置 (x_0, y_0) 可以根据第三章中模拟计算出的脱离角度 α 计算得到，如下式：

$$v_{x0} = v \quad (4-41)$$

$$v_{y0} = 0 \quad (4-42)$$

$$x_0 = -R * \tan\alpha \quad (4-43)$$

$$y_0 = 0.15 \quad (4-44)$$

通过受力分析可以得到颗粒在 α 位置的磁场强度 B_r ，从而计算出它受到的涡流力 F_r 和重力 F_g ，然后根据受力分析计算得到此时颗粒的水平方向和竖直方向的加速度 a_{x0} 和 a_{y0} 。利用已知的初速度 v_{x0} ， v_{y0} 、起始位置坐标 (x_0, y_0) ，通过速度、加速度和位移之间的关系便可以计算得到下一时刻颗粒的位置 (x_1, y_1) ，具体如下式：

$$B_r = 0.145829(\sec \alpha)^{-9} + 0.855432(\sec \alpha)^{-25} \quad (4-45)$$

$$F_r = \frac{B_r k(\omega_m R - v) \gamma V S_p^2 B_m}{16\pi^3 R^3} \frac{1}{(\sec \alpha - 1)^2} \quad (4-46)$$

$$F_g = \rho g V \quad (4-47)$$

$$a_{x0} = \frac{-F_r \sin \alpha}{\rho V} \quad (4-48)$$

$$a_{y0} = \frac{F_r \cos \alpha - F_g}{\rho V} \quad (4-49)$$

$$x_1 = x_0 + v_{x0} \times t + 0.5 \times a_{x0} t^2 \quad (4-50)$$

$$y_1 = y_0 + v_{y0} \times t + 0.5 \times a_{y0} t^2 \quad (4-51)$$

同样通过计算位于 (x_i, y_i) 位置的颗粒受到涡流力 F_{ri} ，然后根据受力分析计算得到此时颗粒的水平方向和竖直方向的加速度 a_{xi} 和 a_{yi} 。利用已知的此刻的速度 v_{xi} ， v_{yi} ，通过速度、加速度和位移之间的关系便可以计算得到下一时刻颗粒的位置 (x_{i+1}, y_{i+1}) ，具体如下式：

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{x_i}{y_i}\right) \quad (4-52)$$

$$B_{ri} = 0.145829(\sec \alpha_i)^{-9} + 0.855432(\sec \alpha_i)^{-25} \quad (4-53)$$

$$F_{ri} = \frac{B_{ri} k(\omega_m R - v) \gamma V S_p^2 B_m}{16\pi^3 R^3} \frac{1}{(\sec \alpha_i - 1)^2} \quad (4-54)$$

$$a_{xi} = \frac{-F_{ri} \sin \alpha_i}{\rho V} \quad (4-55)$$

$$a_{yi} = \frac{F_{ri} \cos \alpha_i - F_g}{\rho V} \quad (4-56)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{xi} \times t + 0.5 \times a_{xi} t^2 \quad (4-57)$$

$$y_{i+1} = y_1 + v_{yi} \times t + 0.5 \times a_{yi}^2 \quad (4-58)$$

通过 MATLAB 软件编辑程序, 重复以上计算的循环, 通过不断输出很短的时间间隔 t 内颗粒所在的位置直到颗粒竖直位移高度达到收集槽的位置, 最终将得到一个完整的颗粒运动过程的轨迹图, 而 MATLAB 程序的完整流程如图 4-14 所示。

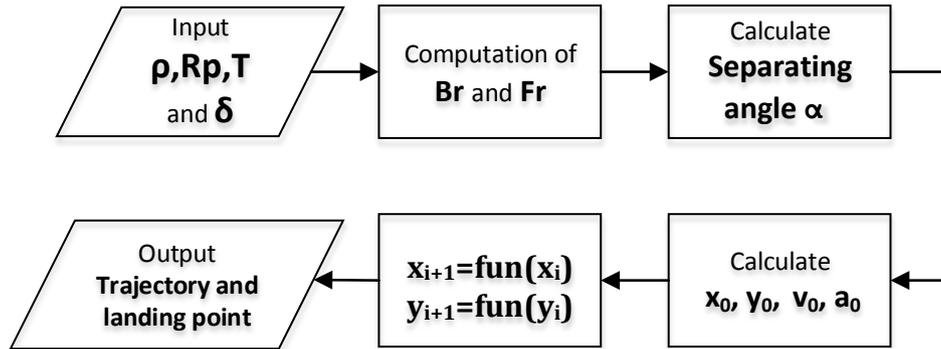


图 4-14 MATLAB 轨迹模拟程序流程图

Fig.4-14 Diagram of the program on trajectory simulation

4.6.2 颗粒轨迹计算模拟结果

通过 MABLAB 软件模拟, 按照图 4-14 中的流程输入颗粒相关参数就最后可以得到如图 4-15 中所示的涡流电选中颗粒的运动轨迹图, 并输出颗粒落地点的水平距离。

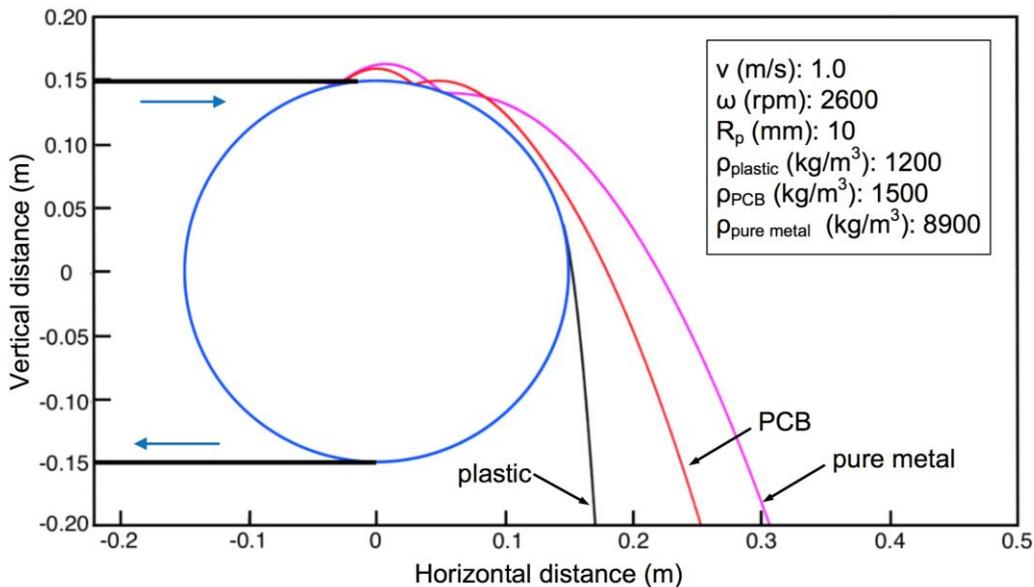


图 4-15 MATLAB 模拟涡流电选不同颗粒的运动轨迹图

Fig.4-15 Result of simulated trajectories of different particles with MALAB

为了清楚的比较不同颗粒的运动轨迹，给不同属性的颗粒（塑料、电路板复合材料、纯金属颗粒）设置了不同的轨迹颜色。比较涡流电选过程中不同颗粒的运动轨迹可以发现，电路板金属颗粒的运动轨迹相比纯金属铜的运动轨迹还是存在一定的差异的。由于电路板成分复杂，含有部分非金属材料，所以其受到的涡流力大小是小于同粒径的纯金属铜颗粒的，这也导致了最后电路板金属颗粒的落地点的水平距离不如纯金属通颗粒的水平距离大。但是，尽管电路板金属颗粒落地点的水平位置没有纯金属铜那么大，它的水平距离与塑料颗粒的水平距离之间已有约 0.1 m 的明显差异，这也就表面了在一定的操作条件下，涡流电选可以用来分离破碎废旧手机中的塑料与电路板混合颗粒。

同时，通过 MATLAB 软件模拟不同形状颗粒的运动轨迹，如图 4-16 中所示。比较发现无论是从颗粒的运动轨迹还是落地点的水平位置都没有明显差异。这说明颗粒的形状对于颗粒的运动轨迹和落地点水平位置没有很大影响，因此在之后对颗粒运动轨迹的影响因素研究中选定圆形颗粒作为进一步的研究对象。

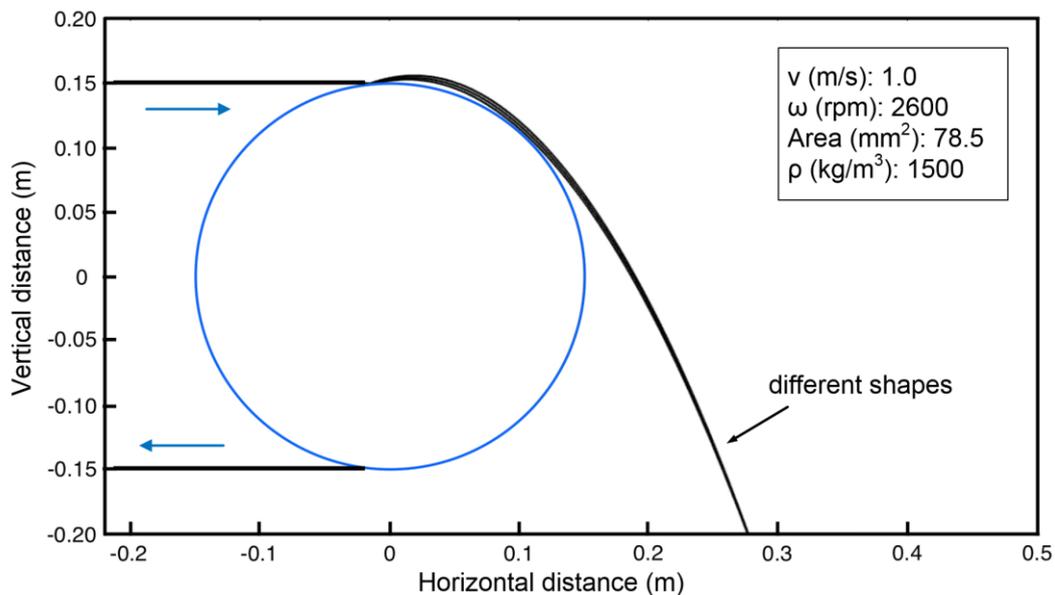


图 4-16 MATLAB 模拟涡流电选中不同形状颗粒的运动轨迹图

Fig.4-16 Result of simulated trajectories of particles of different shapes with MALAB

4.6.3 影响颗粒运动轨迹的因素

通过运用 MATLAB 软件可以方便的计算在不同的颗粒参数和分选参数下，颗粒脱离皮带表面后的运动过程，最终得到颗粒在涡流电选过程中的运动轨迹和颗粒落地点的坐标。这就便于我们用来探究对颗粒运动轨迹和落地点水平距离的影响因素。对于塑料颗粒来说，由于只考虑受到本身的重力和磁辊的离心力，脱离点后发生平抛运动，因此落地点的水平距离只与皮带的线速度，即颗粒脱离时的速度有关。本小节主要讨论的是涡流电选过程中，影响电路板金属颗粒的落地点水平距离的因素。由于考虑到之前发现电路板颗粒的形状对脱离点的影响较小，就以圆形颗粒为代表，其他影响颗粒运动轨迹的因素主要有以下三个：涡流电选机皮带线速度 v 、磁辊转速 ω 以及颗粒的半径 R_p 。

(1) 涡流电选机皮带线速度对颗粒运动轨迹的影响

在保持其他参数不变的情况下（磁辊转速 ω 为 2600 rpm，颗粒半径 R_p 为 5 mm，金属层厚度 T 为 0.1 mm，总厚度 1 mm），改变涡流电选机传送带速度 v ，分别在 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 m/s 五种条件下，模拟颗粒半径 R_p 为 5 mm 的运动轨迹，如图 4-17，得到其水平距离分别如图 4-18。

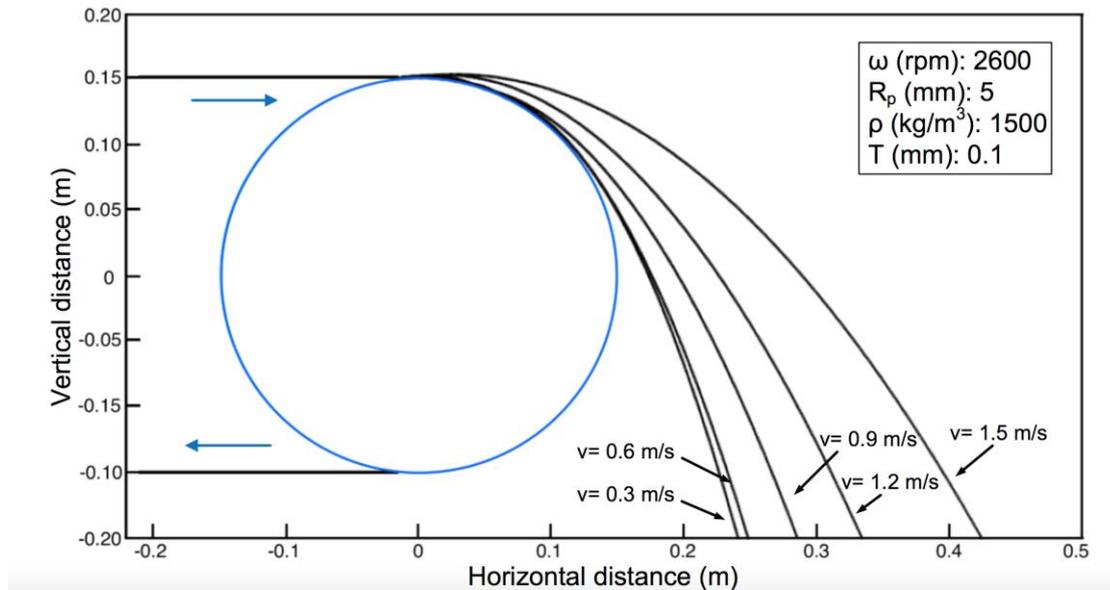


图 4-17 不同皮带线速度下颗粒轨迹模拟

Fig.4-17 Trajectory simulation under different feeding speed

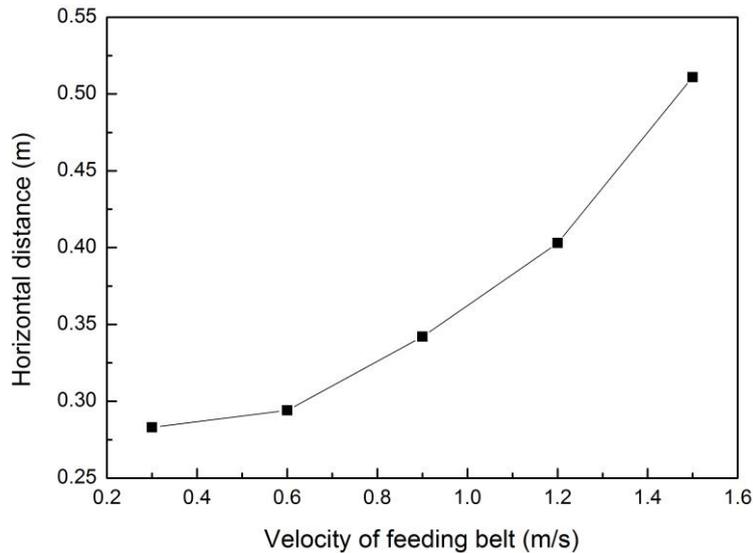


图 4-18 不同皮带线速度下颗粒落地点水平距离

Fig.4-18 Horizontal distance under different feeding speed

由图 4-18 可看出,保持磁辊转速不变,随着传送带速度增加颗粒的脱离角度逐渐减小,而水平位移逐渐增加,当颗粒粒径过大,且传送速度过快时可能因为翻转碰撞导致最后落地的水平位移反而减小。但对于粒径中等以及偏小的颗粒,传送带速度越大越有利于分离。

(2) 涡流电选机磁辊转速对颗粒运动轨迹的影响

在保持其他参数不变的情况下(传送带速度为 v 为 0.6 m/s, 颗粒半径 R_p 为 5 mm, 金属层厚度 T 为 0.1 mm, 总厚度 1 mm), 改变涡流电选机磁辊转速 ω , 分别在 1800、2100、2400、2700、3000 rpm 五种条件下, 模拟颗粒半径 R_p 为 5 mm 的运动轨迹, 如图 4-19, 得到其水平距离分别如图 4-20。

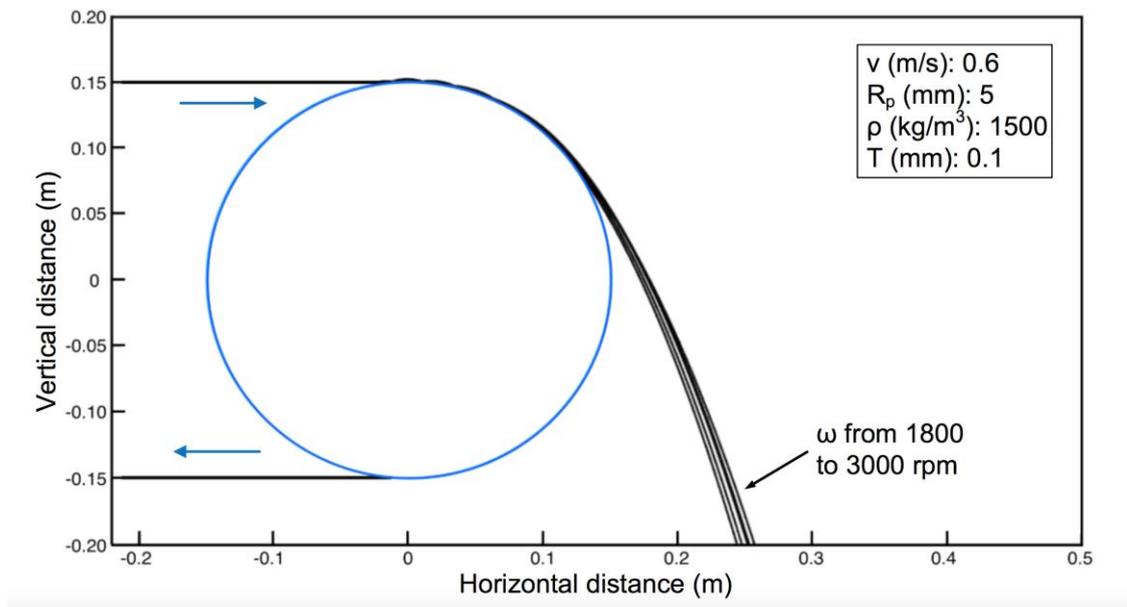


图 4-19 不同磁辊转速下颗粒轨迹模拟

Fig.4-19 Trajectory simulation under different rotation speed

由图 4-20 可看出,在保持传送带速度不变的情况下,随着磁辊转速的增加,颗粒的脱离角度逐渐增大,但是水平位移的变化没有很明显的规律。考虑到不同大小的颗粒的受力和脱离磁辊后的碰撞弹跳等因素的影响,导致它们的最终的落地点与磁辊的转速并没有正相关的关系,因此磁辊转速 ω 在 2100-3000rpm 转速范围都比较适合分离。

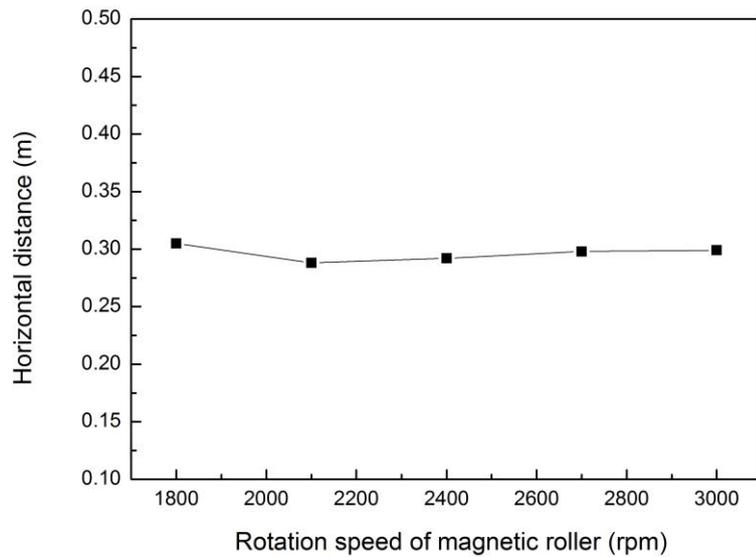


图 4-20 不同磁辊转速下颗粒落地点水平距离

Fig.4-20 Horizontal distance under different rotation speed

(3) 颗粒的半径对颗粒运动轨迹的影响

在保持其他参数不变的条件下（传送带速度为 v 为 1.2 m/s，磁辊转速 ω 为 2600 rpm，金属层厚度 T 为 0.1 mm，总厚度 1 mm），改变颗粒半径大小，分别模拟颗粒半径 R_p 为 5、10、15、20、25 mm 的运动轨迹，如图 4-21，得到其水平距离分别如图 4-22。

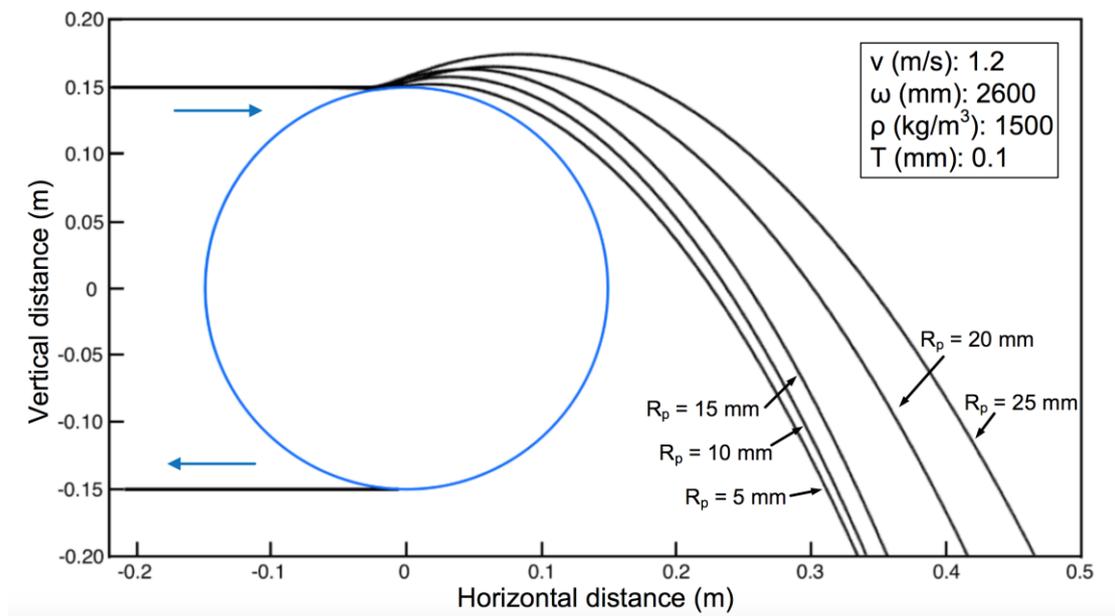


图 4-21 不同颗粒半径下颗粒轨迹模拟

Fig.4-21 Horizontal distance under different radius of particle

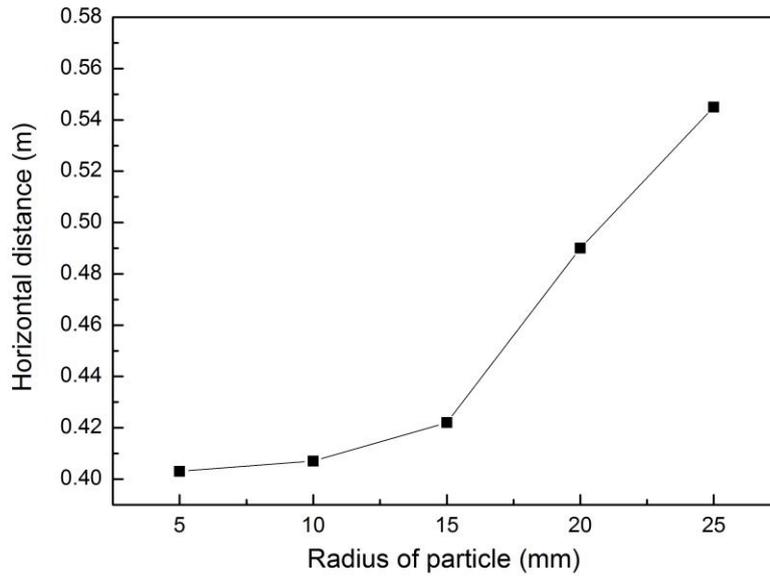


图 4-22 不同颗粒半径下颗粒落地点水平距离

Fig.4-22 Horizontal distance under different radius of particle

由图 4-22 可看出，在相同的涡流电选操作参数下，随着颗粒半径的增大，颗粒落地点的水平距离基本呈现不断增大的趋势。但是不排除由于金属颗粒在脱离点之后运动过程有弹跳和碰撞，因此有部分能量的损失，所以有些情况下颗粒的落地点水平距离可能不完全保持持续的增大。但是总体上看，随着颗粒粒径的增大，颗粒受到的涡流力也不断增大，颗粒落地点的水平位置也越来越大。因此，粒径越大的颗粒，颗粒的落地点的水平位置也越大。

第五章 涡流电选中混合颗粒的轨迹模拟的优化 及实验验证

5.1 涡流电选中混合颗粒的轨迹模拟模型的优化

在使用 MATLAB 软件成功模拟出混合颗粒在涡流电选过程中的运动轨迹,并得到不同颗粒落地点的水平距离的基础上,上一节运用控制变量的方法探究了影响颗粒运动轨迹的三个因素对颗粒落地点的水平距离的单独影响作用。然而在实际选择操作参数时,需要结合颗粒本身性质、分选机器参数和能耗等多个方面,所以本节主要研究的是运用 MATLAB 软件模拟出的结果,以不同条件下塑料颗粒与电路板颗粒落地点之间的距离为判断标准,在优化软件的帮助下,指导我们选择最佳的涡流电选参数,使得混合颗粒在分离过程中达到最佳的分离效果。

5.1.1 塑料颗粒与电路板颗粒落地点之间的距离

通过计算在不同条件参数下,塑料颗粒与电路板颗粒落地点距离,以此来判断这一条件下,混合颗粒的分离效果,如果两种颗粒之间的落地点水平距离差值越大则表明在此条件下的分离效果较好。确定磁辊转速 ω 为 2600rpm 的条件下,改变皮带线速度 v 分别为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5m/s, 此时塑料颗粒与电路板颗粒落地点之间的距离如图 5-1 :

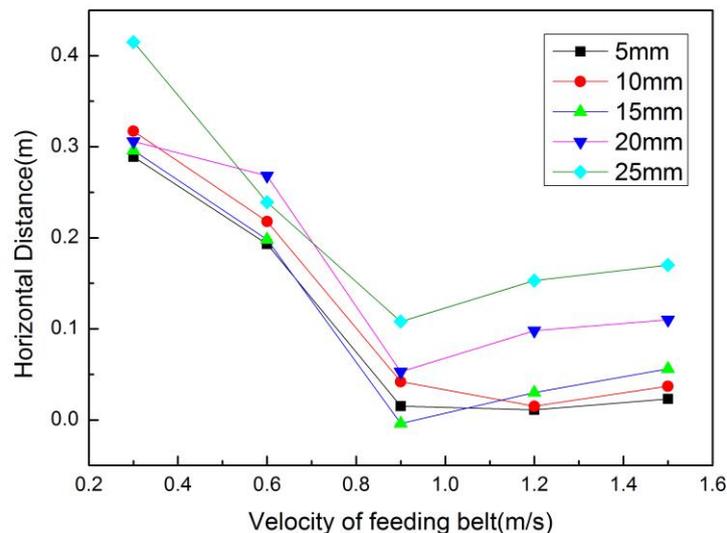


图 5-1 不同皮带线速度下两种颗粒落地点水平距离差

Fig.5-1 Horizontal distance between different particles with different feeding speed

可以发现随着传送带速度的增加，颗粒的水平位移先减小后增大，在传送带速度 v 较低在 $0.3 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 和 $1.4 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 阶段颗粒落地点的水平位移差值较大。

在确定皮带线速度 v 为 0.6 m/s 的条件下，改变转辊转速 ω 分别为 1800, 2100, 2400, 2700, 3000 rpm，此时塑料颗粒与电路板颗粒落地点之间的距离如图 5-2：

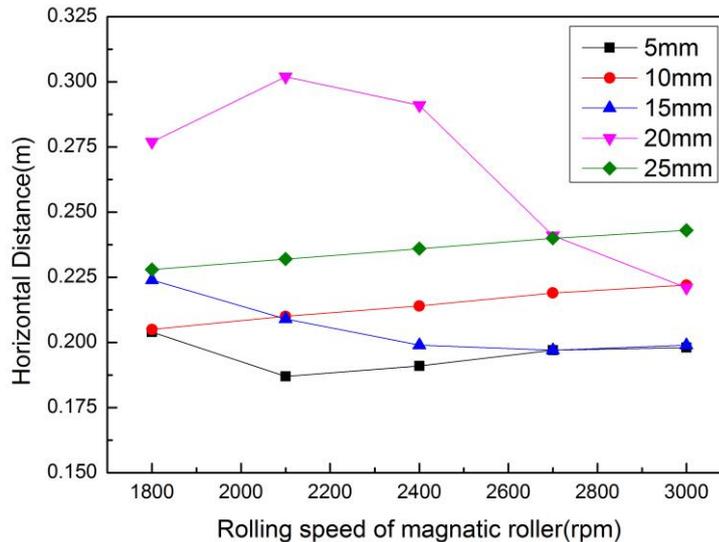


图 5-2 不同磁辊转速下两种颗粒落地点水平距离差

Fig.5-2 Horizontal distance between different particles with different rotation speed

从图中可以发现磁辊转速的改变对颗粒水平位移的影响不是很大，在 2600~3000rpm 的合理范围内，不同粒径颗粒的水平位移差距不大。

5.1.2 优化软件及方法

然而考虑到涡流电选机皮带线速度、磁辊转速以及颗粒的半径这三个因素同时对混合颗粒落地点水平距离差的影响时，很难通过直观的比较得到结论，所以利用 Design Expert 8.0.6 软件优化试验，采用响应面方法(Response Surface Methodology, RSM)和中心复合实验设计(Central Composite Design, CCD) 的方法优化涡流电选参数。优化时采用三因素两水平条件，根据单因素实验结果，选择皮带线速度 v 在 $0.3 - 1.5 \text{ m/s}$ ，磁辊转速 ω 在 $2600 - 3000 \text{ rpm}$ ，颗粒粒径 R_p 在 $2.5 - 10 \text{ mm}$ ，软件给出的因素与水平见表 5-1。

表5-1 独立变量参数的范围和水平

Table 5-1 Experimental ranges and level of independent variables

Independent Variables	Ranges and levels				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
Feeding speed v (m/s)	-0.109076	0.3	0.9	1.5	1.90908
rotation speed ω (rpm)	2463.64	2600	2800	3000	3136.36
Radius R_p (mm)	-0.0567231	2.5	6.25	10	12.5567

根据表 5-1 优化软件安排了随机实验参数,输入模拟得到的实验结果,如表 5-2 所示:

表5-2 中心复合实验设计与结果

Table 5-2 Result of Central Composite Design

Number of trail	Feeding speed v (m/s)	rotation speed ω (rpm)	Radius R_p (mm)	Horizontal distance (m)
1	1.5	3000	2.5	0.087
2	0.9	2800	6.25	0.1502
3	1.5	2600	10	0.124
4	0.3	3000	2.5	0.016
5	0.9	2463.64	6.25	0.149
6	1.91	2800	6.25	0.062
7	0.9	2800	6.25	0.1502
8	0.9	2800	6.25	0.1502
9	0.3	2600	10	0.137
10	0.3	2600	2.5	0.126
11	1.5	3000	10	0.125
12	0.9	2800	-0.06	0
13	1.5	2600	2.5	0.086
14	0.9	2800	6.25	0.1502
15	0.9	2800	6.25	0.1502
16	-0.11	2800	6.25	0
17	0.9	2800	12.56	0.133
18	0.3	3000	10	0.061
19	0.9	3136.36	6.25	0.15
20	0.9	2800	6.25	0.1502

5.1.3 优化结果

(1) 基于响应面方法的分析

运用 Design-Expert 软件的二次多项式模型涡流电选后混合颗粒之间的水平距离差的数据进行回归分析,得到模型的方差分析结果如表 5-3。

表 5-3 中模型的 F 值为 11.14 表明该模型是很显著的。对于 Prob > F 的之来说,一般小于 0.0500 就表示这一项是显著项。由此可见,在本模型中 A, B, C, AB, A2, C2 是显著项。

最终通过软件回归拟合得到流分选后混合颗粒之间的水平距离差 y 回归方程为:

$$y = 1.36866 - 0.3398 \times A - 7.47 \times 10^{-4} \times B + 0.013188 \times C + 1.96 \times 10^{-4} \times AB + 1.11 \times 10^{-3} \times BC + 5.67 \times 10^{-6} \times AC - 0.10708 \times A^2 + 8.37 \times 10^{-8} \times B^2 - 1.85 \times 10^{-3} \times C^2 \quad (5-1)$$

对于流分选后混合颗粒之间的水平距离差 y 回归方程方差的分析结果如表 5-4 所示。

表5-3 涡流电选后混合颗粒之间的水平距离差回归方程模型的方差分析

Table 5-3 Variance analysis of the regression function

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	0.049	9	5.41E-03	11.14	0.0004
A-feeding speed	2.54E-03	1	2.54E-03	5.24	0.0451
B-rotation speed	2.43E-03	1	2.43E-03	5.02	0.049
C-radius of particle	9.26E-03	1	9.26E-03	19.1	0.0014
AB	4.42E-03	1	4.42E-03	9.11	0.0129
AC	5.00E-05	1	5.00E-05	0.1	0.7548
BC	1.45E-04	1	1.45E-04	0.3	0.5972
A ²	0.021	1	0.021	44.15	< 0.0001
B ²	1.61E-04	1	1.61E-04	0.33	0.5768
C ²	9.74E-03	1	9.74E-03	20.08	0.0012
Residual	4.85E-03	10	4.85E-04		
Lack of Fit	4.85E-03	5	9.70E-04		
Pure Error	0	5	0		
Cor Total	0.054	19			

其中 A, B, C 分别代表涡流电选机皮带线速度、磁辊转速以及颗粒的半径三个影响因素。

表5-4 涡流电选后混合颗粒之间的水平距离差回归方程的方差分析

Table 5-4 Result of variances of the regression function

Source	Value
Std. Dev.	0.022
R-Squared	0.9093
Adj R-Squared	0.8278
Pred R-Squared	0.3079
Adeq Precision	11.006

该回归方程的决定系数(R-Squared)为 0.9093, 表明此模型可以用来解释 90.93% 的混合混合颗粒之间的水平距离差值。但是预测拟合度(Pred R-Squared)为 0.3079, 与校正拟合度(Adj R-Squared) 0.8278 之间的差值较大, 表明模型中仍然可能存在一定的屏蔽因素。而回归方程的信噪比(Adeq Precision) 为 11.006 > 4, 表明模型拟合度高, 可以用来预测。

进一步通过两两因素交互影响的三维响应面图可以更明显的看出不同因素之间对水平距离差值的影响, 分别见图 5-3, 5-4 和 5-5。从图中我们可以看出这些响应曲面都呈凸起状态, 曲面的高低表明了所求的距离差值随着影响因素变化而变化的趋势, 而凸起最高点即为最优化的结果。从图 5-3 中可以明显看出, 随着皮带线速度的增大, 颗粒间水平距离差呈现出明显的先增大后减少, 这是因为皮带线速度越大, 颗粒的水平初速度也越大, 落点

的水平距离越远。但是线速度增大到一定程度后，两种颗粒的距离差反而减小，可能因为水平初速度过大，颗粒运动过快，电场力作用时间变短导致。

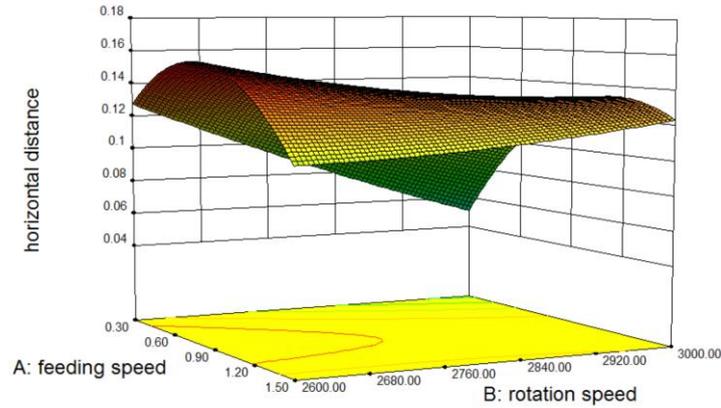


图 5-3 皮带线速度和磁辊转速对颗粒间水平距离的三维响应面图

Fig.5-3 Response Surface diagram of the horizontal distance between different particles under different feeding speed and rotation speed

从图 5-4 中同样观察到了皮带线速度对颗粒间水平距离的影响。此外，随着颗粒的粒径不断变大，颗粒间的水平距离也不断增大，这是因为随着颗粒半径增大，电路板金属颗粒受到的电场力也不断增大，水平位移随之增大。相比相比 5-3 和 5-5 中的两个因素组合，皮带线速度和颗粒半径的曲面凹凸度最大，说明这两个因素作用下对颗粒间的距离影响最大。这也与之前对颗粒轨迹影响因素分析中，磁辊转速的影响不明显一结论相符合。

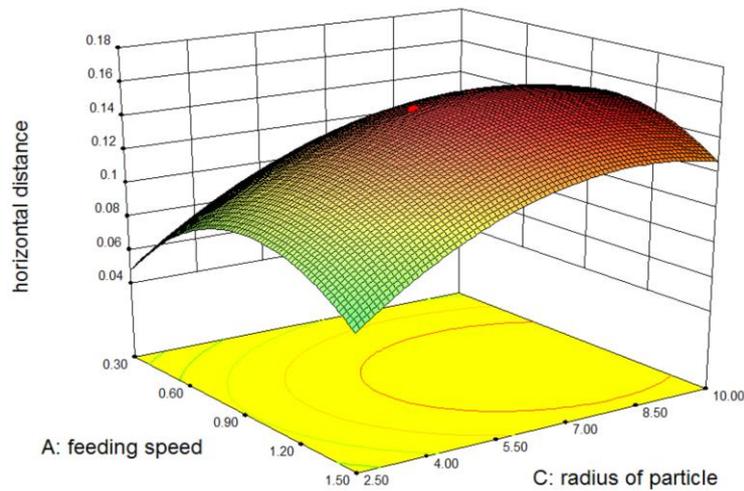


图 5-4 皮带线速度和颗粒半径对颗粒间水平距离的三维响应面图

Fig.5-4 Response Surface diagram of the horizontal distance between different particles under different feeding speed and radius of particle

从图 5-5 中同样观察到了磁辊转速和颗粒半径同时对颗粒间水平距离的影响，也可以发现磁辊转速对距离的影响面很平，影响较小。颗粒间水平距离随着颗粒半径增大而增大，

这也与之前对颗粒轨迹影响因素分析中，颗粒半径的影响结论相一致。

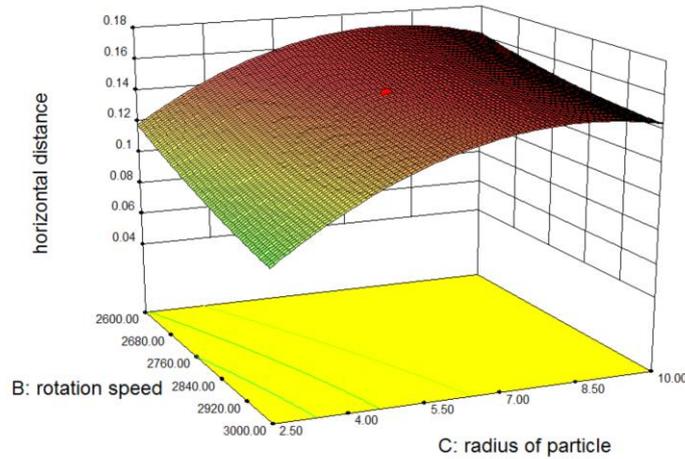


图 5-5 磁辊转速和颗粒半径对颗粒间水平距离的三维响应面图

Fig.5-5 Response Surface diagram of the horizontal distance between different particles under different rotation speed and radius of particle

(2) 参数优化结果

运用 Design-Expert 软件的优化功能，选择三个影响因素分别是皮带线速度 v 在 0.3 - 1.5 m/s，磁辊转速 ω 在 2600 - 3000 rpm，颗粒半径 R_p 在 2.5 - 10 mm 的范围内，设定最大颗粒之间水平距离为目标，如图 5-6 所示。

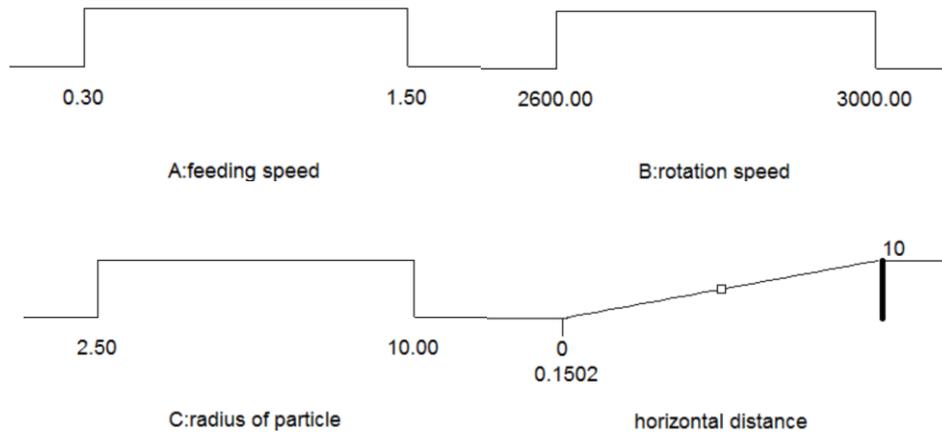


图 5-6 涡流电选后混合颗粒之间的水平距离差的优化条件与目标

Fig.5-6 The conditions for optimizing the horizontal distance between different particles

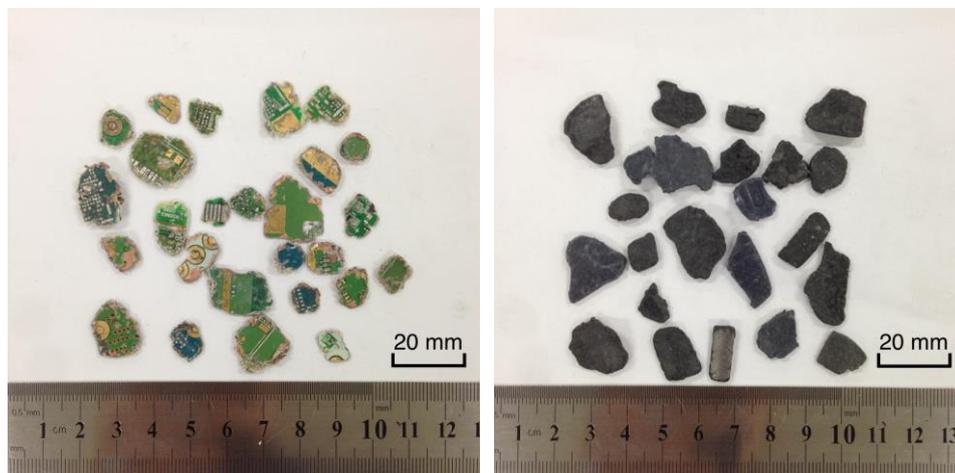
根据设定的条件和目标，Design-Expert 软件给出了 9 种组合方案，其中，当皮带线速度 v 为 1.18 m/s，磁辊转速 ω 为 3000 rpm，颗粒半径 R_p 为 8.44 mm 时，涡流电选后混合颗粒之间的水平距离最大，为 0.158084 m，因此选择它为涡流电选破碎后废旧手机中混合颗粒的最优化的参数。

5.2 轨迹模拟模型的优化后的实验验证

通过前期的 MATLAB 软件模拟，可以计算不同的颗粒参数条件和分选设备条件下混合颗粒落地点之间的水平距离，然后通过 Design-Expert 软件优化，得到了水平距离与三个主要影响因素之间的回归关系方程，并得到了最佳分离效果时各个影响因素的参数值。而为了验证 Design-Expert 软件优化的最佳分选参数是否真的能指导实际分选过程，并得到较好的分选结果，我们通过对实际的破碎后废旧手机的混合颗粒进行涡流电选实验，记录不同参数条件下混合颗粒的分选效率，并以此作为判断标准，来检验软件的优化结果是否能真正指导实际分选。

5.2.1 实验方法

选择粒径 R_p 为 5 - 10 mm 的破碎后的废旧手机混合颗粒，如图 5-7 所示，按照之前测量所得废旧手机混合颗粒中金属：塑料为 1: 3 的配比进行涡流电选效率验证实验，验证实验的涡流电选机模型如图 5-8 所示。



(a)

(b)

图 5-7 粒径为 5 - 10 mm 的破碎后的废旧手机混合颗粒

Fig.5-7 mixed particles with radius of 5 to 10 mm

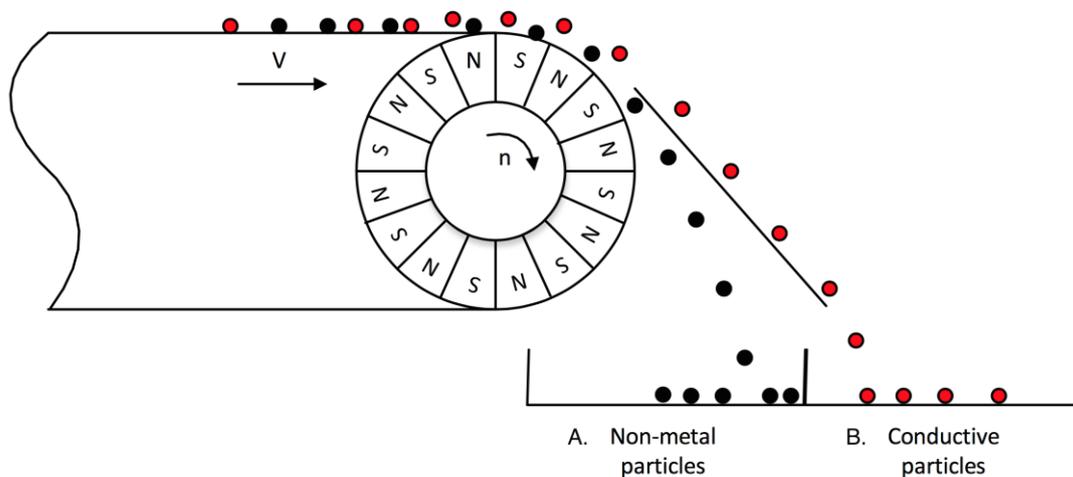


图 5-8 验证实验的涡流电选机模型图

Fig.5-8 Models of practical experiments on separating efficiency

由图 5-8 可知, 实际的涡流电选机有 A 和 B 两个收集槽, 通过涡流电选使得塑料颗粒进入收集槽 A, 电路板金属颗粒进入收集槽 B, 即达到了成功分选的目标。而我们用“分选效率”这一概念作为判断标准, 来检验涡流电选后混合颗粒的分离效果。假设分离前塑料颗粒的总质量为 M_a g, 电路板颗粒的总质量为 M_b g; 而分离后收集槽 A 内塑料颗粒的质量为 m_a g, 分离后收集槽 B 内电路板颗粒的总质量为 m_b g; 则塑料与电路板颗粒的回收率 R_a 和 R_b 可以分别表示为:

$$R_a = \frac{m_a}{M_a} \times 100\% \quad (5-2)$$

$$R_b = \frac{m_b}{M_b} \times 100\% \quad (5-3)$$

而总的分选效率 E_s 可以表示为:

$$E_s = \sqrt{R_a R_b} \times 100\% \quad (5-4)$$

根据软件优化组合结果, 在皮带线速度 v 为 1.18 m/s, 磁辊转速 ω 为 3000 rpm, 颗粒半径 R_p 为 8.44 mm 时, 混合颗粒分选后的水平距离差最大, 分离效果最好。因此, 验证试验选择颗粒半径 R_p 在 5 – 10 mm 的混合颗粒, 首先在磁辊转动频率为 2607 Hz, 即磁辊转速 ω 接近 3000 rpm 时, 通过改变皮带线速度 v , 分别为 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5m/s 五种实验情况下, 测量对应条件下混合颗粒的分选效率 E_s 。接着在皮带线速度 v 接近 1.2 m/s 时, 通过改变磁辊转速, 分别为 2400、2600、2800、3000、3200 rpm 五种实验情况下, 测量对应条件下混合颗粒的分选效率 E_s 。

5.2.2 验证结果

在以上设定的分选条件分别进行的验证实验, 记录每一次分离前塑料颗粒和电路板颗粒的总质量以及分离后收集槽 A 内塑料颗粒的质量和分离后收集槽 B 内电路板颗粒的质量, 然后计算出每一次涡流电选后混合颗粒的分选效率, 结果如图 5-9, 5-10 所示。

通过对图 5-9 的数据分析可以看出, 当保持磁辊转速 ω 为 3000 rpm 不改变时, 随着皮带线速度的不断增大, 电路板的回收率不断增大, 分选效率明显提高, 然而当皮带转速 v 达到 1.5 m/s 时, 由于塑料回收率的下降, 分选效率也有所下降。皮带线速度 v 为 1.2 m/s 时, 分选效率最高达到 95.54%。

通过对图 5-10 的数据分析可以看出, 保持皮带线速度 v 为 1.2 m/s 不改变时, 随着磁辊转速的不断增大, 电路板的回收率也逐渐增大, 但并没有改变皮带速率那样明显, 总的分选效率有明显提高, 然而当磁辊转速 ω 超过 3000 达到 3200 rpm 时, 由于电路板的回收率的下降, 分选效率也有所下降。磁辊转速 ω 为 3000 rpm 时, 分选效率最高达到 95.54%。

通过实验验证发现, 在皮带线速度 v 为 1.2 m/s, 磁辊转速 ω 为 3000 rpm 的分选参数下, 颗粒半 R_p 在 5 – 10 mm 的混合颗粒通过涡流电选取得了相对最高的分选效率, 达到 95.54 %, 这就表明了本研究中运用 MATLAB 软件对颗粒轨迹模型的模拟结果及计算出的颗粒落地点水平位置的结果与实际相符, 通过借助优化软件, 将这个模拟模型的结果转化为回归拟合方程, 可以用来帮助指导对涡流电选分离破碎废旧手机的混合颗粒, 选择分离效果最好的涡流电选操作参数, 并应用于实际分选过程中。

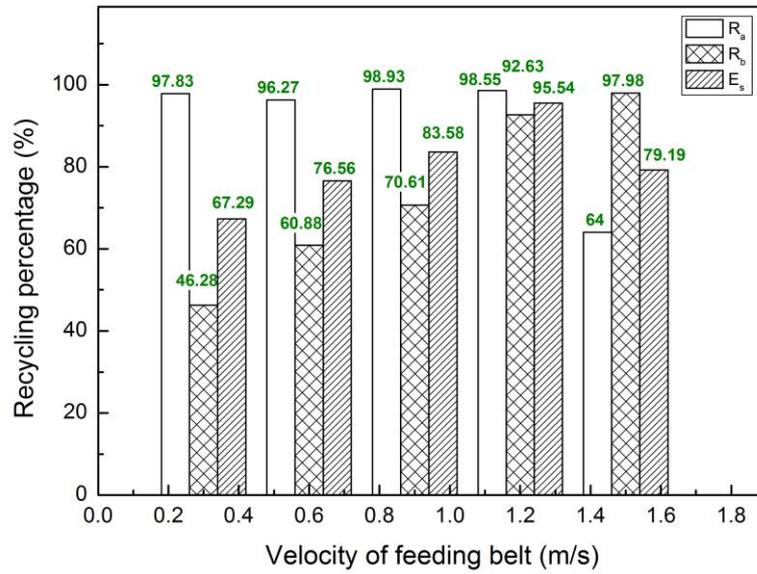


图 5-9 不同皮带线速度下混合颗粒的分选效率 E_s
 Fig.5-9 Separating efficiency under different feeding speed

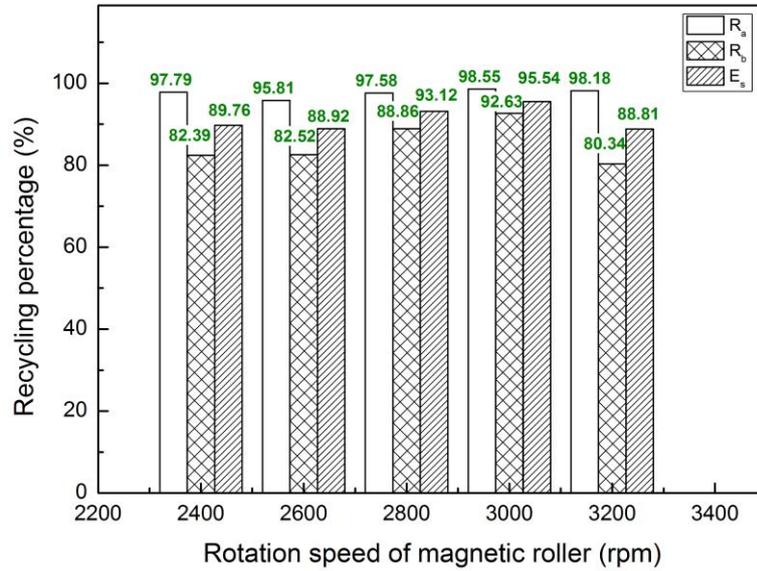


图5-10 不同磁辊转速下混合颗粒的分选效率 E_s
 Fig.5-10 Separating efficiency under different rolling speed

第六章 结论

在本次的研究中主要得到的结论如下:

(1) 通过对涡流电选机表面磁辊附近磁场的测量, 计算出了磁场强度的分布公式。在此基础上, 通过进一步的计算不同形状电路板金属内部产生的感应涡电流强度以及产生的感应磁场强度, 最终计算得到了圆形、矩形和三角形三种不同形状的金属颗粒在变频磁场中所受到的涡流力的公式, 建立起了涡流力模型。

$$B_r = 0.145829(r/R)^{-9} + 0.855432(r/R)^{-25} \quad (4-7)$$

$$F_r^C = \frac{B_r k(\omega R - v) \gamma V S_p^2 B_m}{16\pi^3 R^3} \frac{1}{(\sec \alpha - 1)^2} \quad (4-34)$$

$$F_r^R = \frac{B_r k(\omega R - v) \gamma V S_p \delta_R B_m}{16\pi^2 R^3} \frac{1}{(\sec \alpha - 1)^2} \quad (4-35)$$

$$F_r^T = \frac{B_r k(\omega R - v) \gamma V S_p \delta_T B_m}{16\pi^2 R^3} \frac{1}{(\sec \alpha - 1)^2} \quad (4-36)$$

(2) 通过对颗粒的受力分析, 运用 MATLAB 编程计算出颗粒脱离点, 并找到了影响脱离点的主要因素, 即金属颗粒的半径越大, 所含金属层厚度越大, 其脱离角度也越大, 即越早从皮带上脱离。通过高速摄像技术, 在 $v = 1.0 \text{ m/s}$, $\omega = 2600 \text{ rpm}$, $R_p = 5$ 和 $R_p = 7.5 \text{ mm}$ 两种情况下, 对颗粒分选过程记录, 并计算实际脱离角度, 完成脱离点的实验验证。结果实际脱离角度与模拟值的误差绝对值在百分之二到三之间, 说明本研究得出的脱离点软件模拟的结果是与实际相符, 并用于指导下一步对颗粒脱离之后的运动状态的分析计算。

(3) 在脱离点计算模型的基础上, 通过对脱离后颗粒的受力分析, 运用 MATLAB 编程建立了颗粒在分选过程中的运动轨迹模型, 得到落地点的水平位置, 探讨了涡流电选机皮带线速度 v 、磁辊转速 ω 以及颗粒的半径 R_p 这三个因素分别对颗粒落地点水平距离的影响。当颗粒本身半径越大、皮带线速度越大时, 颗粒的落地点水平距离也越大。

(4) 通过进一步计算塑料颗粒与电路板颗粒落地点之间的距离来分析涡流电选对分离废旧手机混合颗粒的效果, 通过 Design Expert 中心复合实验优化的方法得到了涡流电选的一组最优参数: $v = 1.18 \text{ m/s}$, $\omega = 3000 \text{ rpm}$, $R_p = 8.44 \text{ mm}$ 。利用实际分离效率为判断标准, 通过实验验证以上模型, 发现在 $v = 1.2 \text{ m/s}$, $\omega = 3000 \text{ rpm}$ 时, 对 R_p 在 $5 - 10 \text{ mm}$ 的混合颗粒进行分选, 分选效率最高, 达到 95.54% 。涡流电选中混合颗粒轨迹模拟模型的结果与实际相符合, 可以用来指导实际中利用涡流电选分离破碎废旧手机的混合颗粒, 选择分离效果最好的涡流电选操作参数。

然而, 对于废旧手机破碎后电路板与塑料混合颗粒的涡流电选机制的研究并不止步于此, 对于未来的研究前景有如下展望:

(1) 目前对涡流电选混合颗粒的脱离点和轨迹模拟的模型只限于对实验的涡流电选装置的模拟, 如果改变分选装置, 还需要重新对其转辊表面的磁场强度进行测量和分布的计算。

(2) 对涡流电选混合颗粒的脱离点和轨迹模拟的模型中的受力分析时，把颗粒看做一个质点且忽略了空气阻力和摩擦力等其他因素，而且优化结果也显示该模型中仍可能存在其他的被屏蔽的因素，需要完善。

(3) 通过对涡流电选混合颗粒的轨迹模拟的模型分析和对实际高速摄影记录的颗粒分选过程分析发现，实际在分选过程中，金属颗粒因为受到涡流力产生的力矩作用，会翻身翻转和弹跳，这也会从一定程度上影响颗粒的运动轨迹，需要更深入的分析才能加以完善。

(4) 在软件优化结果的实验验证中虽然得到了超过 95% 的分选效率，但是考虑到应用于实际中大规模的工业破碎和分选回收混合颗粒，是否也有这么高的效率，仍需加大预实验的规模，或者通过多次分选提高分选效率。

(5) 涡流电选混合颗粒的脱离点和轨迹模拟的模型仍然需要进一步优化，进一步提高其准确性。

Nomenclature

a	acceleration of the particle (m/s^2)
B_m	intensity of magnetic field on the surface of belt (T)
B_r	intensity of magnetic field of the magnetic roller (T)
C	perimeter of triangle particle (mm)
E_s	separation efficiency (%)
F_g	gravity force (N)
F_r	eddy current force (N)
g	acceleration due to gravitation (m/s^2)
d	horizontal distance of particle in practical experiments (cm)
L	length of rectangle or height of triangle particle (mm)
M_a	total mass of plastic particle (g)
M_b	total mass of PCB particle (g)
m_a	mass of recycled plastic particle (g)
m_b	mass of recycled PCB particle (g)
n	natural number
r	distance from the center of the magnetic roller (m)
R	radius of the magnetic roller (m)
R_a	recycling rate of plastic particle (%)
R_b	recycling rate of PCB particle (%)
R_p	radius of particle (mm)
T	thickness of metal layer (mm)
v	velocity of the feeding belt (m/s)
V	volume of the particle (mm^3)
W	width of rectangle or bottom width of triangle particle (mm)
x	horizontal position of particle (m)
y	vertical position of particle (m)
α	separating angle (°)
α_r	true value of separating angle in experiments (°)
α_s	simulated value of separating angle with MATLAB (°)
β	error rate used in verifying the separating angle (%)
δ_R	shape factor of rectangle particle
δ_T	shape factor of triangle particle
μ_0	vacuum conductivity (S/m)
ω	rotation speed of the magnetic roller (rpm)
ρ	density of the particle (kg/m^3)
τ	conductivity of particle (S/m)
Ω	resistance of coil in eddy current model (Ω)
ϕ_m	magnetic flux generated by magnetic field (Wb)
ϕ_p	magnetic flux generated by particle itself (Wb)

参考文献

- [1] EU, Directive 2002/96/EC of the European parliament and of the council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)-joint declaration of the European parliament, the council and the commission relating to article 9. Official Journal L 037:0024-39[13/02/2003;2002a <http://europa.eu.int/eur-lex/en>].
- [2] Wikipedia-term WEEE, http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_waste 。
- [3] 百度百科, 词条 WEEE, <http://baike.baidu.com/view/419107.htm> 。
- [4] 陈和祥, 秦玉芳, 曾明敏, 等. 我国电子废弃物处理产业现状与前景探讨[J]. 中国环保产业, 2011 (2): 37-39.
- [5] 江博新, 蔡艳秀, 张晓东等. 废旧电脑再生利用现状及技术探索[J]. 中国资源综合利用, 2002(11):16-18.
- [6] 王绍文, 梁复智, 王纪曾. 固体废弃物资源化技术与应用[M]. 北京:工业出版社, 2003.
- [7] 董锁成, 范振军. 中国电子废弃物循环利用产业化问题及其对策[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 39-45.
- [8] Xinhua News Agency, 2010b. New Rule to Manage E-waste [Internet]. Available from: http://news.xinhuanet.com/english2010/china/2010-06/07/c_13336556.htm (last accessed 16.08.10).
- [9] Ongondo F O, Williams I D, Cherrett T J. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes[J]. Waste management, 2011, 31(4): 714-730.
- [10] 劳晓东, 程从前, 赵杰, 等. 中国电子废弃物现状及回收政策演变[J]. 周口师范学院学报, 2014, 31(2): 52-55.
- [11] Yadav S, Yadav S, Kumar P. Metal toxicity assessment of mobile phone parts using Milli Q water[J]. Waste management, 2014, 34(7): 1274-1278.
- [12] Soo V K, Doolan M. Recycling Mobile Phone Impact on Life Cycle Assessment[J]. Procedia CIRP, 2014, 15: 263-271.
- [13] Petter P M H, Veit H M, Bernardes A M. Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones[J]. Waste management, 2014, 34(2): 475-482.
- [14] 郑秀君, 王景伟. 循环经济理念下的废旧手机资源化模式探讨[J]. 生态经济, 2014, 30(002): 30-36.
- [15] Hall W J, Williams P T. Analysis of products from the pyrolysis of plastics recovered from the commercial scale recycling of waste electrical and electronic equipment[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2007, 79(1): 375-386.
- [16] Tange L, Drohmann D. Waste electrical and electronic equipment plastics with brominated flame retardants—from legislation to separate treatment—thermal processes[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 88(1): 35-40.
- [17] 王佑莹, 马洁, 马步青. 中国废旧手机回收现状及回收模式研究[J]. 经济师, 2013 (6): 51-53.
- [18] 何益波, 李立清. 关于我国废旧手机回收和利用的研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2007, 28(2): 91-94.

- [19] Silveira G T R, Chang S Y. Cell phone recycling experiences in the United States and potential recycling options in Brazil[J]. Waste Management, 2010, 30(11): 2278-2291.
- [20] Wen S, Yang F, Li J G, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofurans (PCDD/Fs), polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), and polychlorinated biphenyls (PCBs) monitored by tree bark in an E-waste recycling area[J]. Chemosphere, 2009, 74(7): 981-987.
- [21] 常静. 废旧手机的回收利用及资源化管理对策[J]. 再生资源研究, 2006 (1): 27-30.
- [22] Yin J, Gao Y, Xu H. Survey and analysis of consumers' behaviour of waste mobile phone recycling in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65: 517-525.
- [23] 吉亮. 我国电子产品逆向物流系统构建的设想——以废旧手机为例[J]. 生态经济, 2009, (5):125-127.
- [24] 黄勇. 襁褓中的废旧手机回收产业[J]. IT 时代周刊,2004(17):54-55.
- [25] 王野平, 李晓祥. 机械分离回收方法处理电子废弃物探讨[J]. 上海环境科学, 2009 (2): 80-83.
- [26] iSuppli 公司对 Blackberry Torch 的拆解分析报告:
http://www.eet-china.com/ART_8800616684_626963_NT_09bdb35c.HTM
- [27] ZHANG S L, FORSSBERG E. Mechanical separation oriented characterization of electronic scrap[J]. Resources, conservation of electronic scrap recycling, 1997 (21): 247-269.
- [28] 叶瑾玲, 张晋霞, 万玲娟等.浅析电子废弃物的破碎与分级[J].江苏环境科技,2004,17(2): 43-45.
- [29] 古山隆. 用摩擦带电静电分选机和风力摇床回收 PVC[J]. 国外金属矿选矿, 2007, 44(2): 34-39.
- [30] 王卓雅, 温雪峰等. 电子废弃物资源化现状及处理技术. 能源环境保护, 2004, 18(5)
- [31] 白庆中, 王晖等. 世界废弃印刷电路板的机械处理技术现状. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2 (1)
- [32] 王海锋, 段晨龙等. 电子废弃物资源化处理现状及研究. 中国资源综合利用, 2004, (4)
- [33] 段晨龙, 何亚群, 赵跃民等. 阻尼式脉动气流分选装置处理电子废弃物的基础研究. 环境工程, 2005, 23 (4)
- [34] 刘宗炎, 林皓. 加速柱式风力分选机的开发: 铜和铝的分选[J]. 国外金属矿选矿, 2003, 40(5): 38-42.
- [35] 钱付平, 章名耀. 旋风分离器分离性能的经验模型与数值预测[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 35-39.
- [36] 何亚群, 王海锋, 段晨龙, 等. 阻尼式脉动气流分选装置的流场分析[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 574-578.
- [37] Wu G, Li J, Xu Z. Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review[J]. Waste management, 2013, 33(3): 585-597.
- [38] 李佳. 废旧印刷电路板的破碎和高压静电分离研究 [D][J]. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [39] Li J, Gao B, Xu Z. New Technology for Separating Resin Powder and Fiberglass Powder from Fiberglass-Resin Powder of Waste Printed Circuit Boards[J]. Environmental science & technology, 2014, 48(9): 5171-5178.
- [40] Xue M, Li J, Xu Z. Environmental friendly crush-magnetic separation technology for recycling metal-plated plastics from end-of-life vehicles[J]. Environmental science & technology, 2012, 46(5): 2661-2667.
- [41] 徐金球, 马红, 王景伟, 等. 电子废弃物资源化处理技术[J]. 上海第二工业大学学报,

- 2008, 24(4): 263-270.
- [42] Zhan L, Xu Z. Separating and recovering Pb from copper-rich particles of crushed waste printed circuit boards by evaporation and condensation[J]. *Environmental science & technology*, 2011, 45(12): 5359-5365.
- [43] 陈泉源, 柳欢欢, 朱凌云. 电子废弃物回收利用的物理分选技术[J]. *中国资源综合利用*, 2007, 24(11): 6-10.
- [44] Xue M, Li J, Xu Z. Management strategies on the industrialization road of state-of-the-art technologies for e-waste recycling: the case study of electrostatic separation—a review[J]. *Waste Management & Research*, 2013, 31(2): 130-140.
- [45] Wu G, Li J, Xu Z. Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review[J]. *Waste management*, 2013, 33(3): 585-597.
- [46] 孙云丽, 段晨龙, 左蔚然, 等. 涡流电选机理及应用[J]. *江苏环境科技*, 2007, 20(2): 40-42.
- [47] Jujun R, Yiming Q, Zhenming X. Environment-friendly technology for recovering nonferrous metals from e-waste: Eddy current separation[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 87: 109-116.
- [48] 周蕾, 许振明. 我国电子废弃物回收工艺研究进展[J]. *材料导报*, 2012, 26(13): 155-160.
- [49] 王全强, 段晨龙, 张洪建. 涡电流操作参数对铝分选影响的研究. *中国资源综合利用*, 2005, 12: 22-25.
- [50] Rem P C, Leest P A, Van den Akker A J. A model for eddy current separation[J]. *International journal of mineral processing*, 1997, 49(3): 193-200.
- [51] Zhang S, Rem P C, Forssberg E. Particle trajectory simulation of two-drum eddy current separators[J]. *Resources, conservation and recycling*, 1999, 26(2): 71-90.
- [52] Maraspin F, Bevilacqua P, Rem P. Modelling the throw of metals and nonmetals in eddy current separations[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2004, 73(1): 1-11.
- [53] Zhang, S.; Forssberg, E. Mechanical recycling of electronics scrap: the current status and prospects. *Waste Management Resource*, 1998, 16 (2), pp. 119-128.
- [54] Zhang, S.; Forssberg, E.; Arvidson, B.; Moss, W. Separation mechanisms and criteria of a rotating eddy-current separator operation. *Resources, Conservation and Recycling*, 1999, 25 (3-4), pp. 215-232.
- [55] 阮菊俊. 破碎废弃硒鼓, 废旧冰箱箱体的涡流电选及工程应用 [D][D]. 上海交通大学, 2012.

谢辞

完成毕业设计对我而言是一个漫长却又短暂的过程。幸运的是，从前期准备、到方案确定、到中期实验进行并不断改善，最终得到结果，每一个环节我都参与其中，用心体会，使得这一漫长的过程变得充满节奏，一步步的前行，直到此刻，完成论文时，回首整个毕设的过程，发现它竟如此短暂，心里有些许不舍。一路走来，要感谢很多曾经给予我帮助和支持的人。

首先要感谢的是我的导师，李佳老师。感谢李老师把我带上了科研的道路，培养了我严谨的科学态度，启发我不断思考，鼓励我不断前行。在整个毕设过程中，李老师都始终耐心的指导着我，从实验方案的制定，到每一个环节对结果的分析 and 讨论，对下一步实验的分析和规划。每一次与李老师的讨论，都能有对毕设更深入的思考，或对原有方案有所改进，进而推动着整个实验的顺利进行。李老师让我体会到了对待科研应有那种契而不舍、精益求精的态度和精神，这也为我以后的科研、生活注入了新动力。再一次衷心的感谢李老师！

另外也要感谢 WEEE 课题组的师兄师姐们对我在实验上的帮助和指导。感谢高开师兄耐心的教授我高速摄影设备与软件的使用技巧，帮助我一起完成了一部分重要的实验内容。感谢 Canon 师兄在 MATLAB 使用上给与我的帮助和支持。

还要感谢一直以来在我身边默默支持，鼓励我的家人和朋友。感谢父母对我的无条件支持，作我永远坚实的后盾。感谢室友袁锐、崔文琦同学！我们互相探讨，互相鼓励，在每一个写论文的夜晚，有你们的陪伴变得不那么寂寞。感谢好友邵晶毅、阚阅、夏慧、冯诗婧和董航筠！能够在大学期间认识你们是一件无比开心和珍贵的事情，有你们的陪伴走过的日子，分享的汗水与泪水，都将是我永恒的回忆。希望以后就算天南地北，我们都还是好朋友。

感谢上海交通大学，感谢环境科学与工程学院的每一位老师和同学，感谢所有！

COMPUTER SIMULATION OF SEPARATING MIXTURE METAL AND PLASTIC PARTICLES FROM WASTE MOBILE PHONES BY EDDY CURRENT SEPARATOR

Nowadays, smart phones have taken large parts of people's life and the update of these phones has contributed significantly to the global e-waste. Recycling of waste mobile phones, especially the printed circuit boards that contain higher quantities of metals can bring large benefits in economic perspective and reduce environmental problems. As the dismantling process of mobile phones often requires a large amount of time and human resources, mechanical processes are usually employed during the recycling of waste phones, after which the various metals and materials contained are liberated and separated by some kind of shredding or crushing process. In this case, a more efficient way to separate metals and plastic needs to be found out in order to improve the recycling productivity. Eddy current separation (ECS) is most often applied to gather large-scale nonferrous metals from waste streams that contain mainly non-metallic particles. However, there is little research about using ECS to separate the metal from crushed plastic boards of small appliances like mobile phones. The aim of this paper is to testify whether the eddy current separator can be used to separate conductive metals and plastics particles for better recycling crushed phone particles. In this study, the particle shape characterization and particle trajectories simulation were performed on samples of mixed particles with theoretic model of the trajectory of the particles supported by MATLAB language. And suitable conditions of ECS are found and verified with the actual operation. The simulation results pointed out that PCB pieces and plastic pieces had different detach trajectories at the conditions of same size and certain device parameters. With the help of Design-Expert, the optimization was studied. An experiment carried out using an eddy current separator to sort these particles based on the optimization parameter. The separation efficiency got 95.54%. Such a model can be used to select separators for specific applications like waste phones and other small household appliances and obtain the optimal working parameters.

The eddy current separator consists of a rotating roll and feeding system where particles are transported on the feeding belt to pass through the fast rotating roll. There exist alternating magnets beneath the rotating roll and as the rotating roll spins, it induces eddy currents in electrically conductive particles moving close to it. The Lorentz force generated by the eddy current in the magnetic field of the particles combined with its gravity force, centrifugal force and other mechanical forces will decide the moving trajectory of the particles. The particles tend to follow the motion of the rotating roll at first, as they get closer to the magnetic field, the Lorentz forces on them change simultaneously. When the co-acting forces exceed its own gravity, the particles will detach from the rotating roll.

The magnetic factors are considered by measuring the intensity of magnetic fields with the different distance from the alternating magnets. The data of the intensity are fitted with an empirical formula and used in computing the Lorentz force. Based on the intensity distribution function of the magnetic field, MATLAB is used to simulate the detachment point of particles with different size ranges (radius of 5mm to 25mm), also with different shapes (cylindrical, triangular and rectangular) and with different thickness of metal layer. The particle density $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$, the metal layer having a thickness of 0.1mm, the total thickness of 1mm, the velocity of feeding belt $v = 0.4 \text{ m/s}$, the velocity of the magnetic roller $w = 2600 \text{ rpm}$, surface magnetic field strength $B_m = 0.17 \text{ T}$ and with 8 pairs of magnets. Through observation, it is found that with increasing particle size, the angle of the detachment point also increases, indicating that the particles with the larger surface area in the separation process will fly off the belt earlier. In addition to particle size, the thickness of the metal layer in each particle also has influence on the detachment angle, because the thickness is proportional to the size of the particles generated the Lorentz force. Thus, the thicker the metal layer, the earlier state of detachment from the belt. But the shape of the particle has little to do with the detachment angle when the particles have similar area of cross section. The computation of the separating angle has been verified by actual experiment by high-speed video capture. The separation process of PCB particles with the radius of 5 and 7.5 mm under the condition of 1 m/s feeding velocity and 2600 rpm rotation speed. It's calculated from the footage that the actual separating angle corresponds to the simulated one and the rate of error between the two is about 2% to 3%. It turns out that the computation of separating angle with MATLAB is quite reliable.

After the detachment, it is assumed that the crashed particle moves along with constant acceleration in 0.001 seconds and by calculating the velocity and accelerated velocity of one point and the next, a program written by MATLAB is used to plot the trajectories. The horizontal distances of particles containing different thickness of metal layer are used to judge if they can be separated. The output data includes detachment angle and landing coordinate. By inputting different characteristics of the particle and the parameter of the separator (v, w, ρ, R_p), the trajectory can be simulated under different conditions, which can be used to judge to which extent different particles can be separated by setting the height of the collectors. By changing the velocity of the feeding belt while fixing other parameters, the horizontal distances are calculated. If we use the distance between two kinds of particles to judge the effect of separation, we find out that the larger the velocity of the feeding belt, the larger the distance between two particles and the better the separation effect. By changing the velocity of the magnetic roller while fixing other parameters, the horizontal distances of different particles can be calculated as well. It is found that, when the velocity of the magnetic roller changes from 2100 to 3000 rpm, the results of horizontal distances of different particles turn out to be quite similar. In addition, the larger the size ranges of the particle, also the larger the distance between two particles and the better the separation effect.

These stimulations can help to find out the optimal conditions of ECS for different particles. In this study, the response surface methodology (RSM) was used to analyze the interaction of several independent factors by the Design-Expert software (version 8.0.6, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN). Experiments were conducted in a standard RSM design called central composite design (CCD) for the optimization of indium recovery ratio. The belt speed, the rotation speed of magnetic roller, and the particle size were selected as factors on the response horizontal distance with the coded values at 3 levels (-1, 0, and +1), which refers to the belt speed of 0.3 -

1.5 m/s, the rotation speed of magnetic roller of 2600 - 3000 rpm, and the particle radius of 2.5 - 10 mm. It's modified by Design-Expert with a function of the horizontal distances of different particles related to the three influence factors. $y = 1.36866 - 0.3398 \times A - 7.47 \times 10^{-4} \times B + 0.013188 \times C + 1.96 \times 10^{-4} \times AB + 1.11 \times 10^{-3} \times BC + 5.67 \times 10^{-6} \times AC - 0.10708 \times A^2 + 8.37 \times 10^{-8} \times B^2 - 1.85 \times 10^{-3} \times C^2$. Besides, Design-Expert also helps to decides a few groups of optimal parameters, of which the belt speed of 1.18 m/s, the rotation speed of magnetic roller of 3000 rpm, and the particle radius of 8.44 mm are selected to be the most optimal for the best separation effect. The result of modified model is also verified with operation in reality by using the most optimal parameters to separate mixed particles. The idea of separation efficiency E_s is used to judge the effect of separation in real experiments. By changing doing separation with particle radius of 5 - 10 mm, it's found that when the belt speed is set to 1.2 m/s and the rotation speed of magnetic roller is 3000 rpm, the separation efficiency reaches its maximum to 95.54%. This verifies that the stimulation model designed by MATLAB can help to find out the optimal conditions of ECS for different particles and can be used in real life experiments. The further modification is needed to make this model more accurate to explore its more uses in guiding the choices of optimal parameters in separating other particles.