

申请上海交通大学博士学位论文

废旧印刷电路板的破碎和高压静电分离研究

学 校： 上海交通大学

院 系： 环境科学与工程学院

作者姓名： 李佳

工程领域： 环境工程

导 师： 周尧和（教授）

导 师： 许振明（教授）

上海交通大学环境科学与工程学院

2007 年 12 月

**Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University for the Degree
of Ph. D**

**Mechanical scraping and corona electrostatic separating
of waste printed circuit boards**

Candidate: Jia Li

Specialty: Environmental Engineering

Advisor: Prof. Yaohe Zhou

Advisor: Prof. Zhenming Xu

School of Environmental Science and Engineering

Shanghai Jiao Tong University

Shanghai, P.R.China

December, 2007

废旧印刷电路板的破碎和高压静电分离研究

摘要

目前,我国的家电及电子产品已达到淘汰报废的高峰期,报废量每年达 100 多万吨,而且国外又有大量的电子垃圾流向国内。但国内缺少无污染和全部资源化处理电子垃圾的技术和装备,落后的处理方法造成严重的环境污染和大量的资源浪费。印刷电路板是电子工业的基础,其中部分贵金属的含量是天然矿藏品位的几十倍甚至几百倍,具有很高的回收价值。电路板是玻璃纤维强化树脂和多种金属的混合物,其中金属和非金属紧密结合,分离难,是电子垃圾中最复杂、最难处理的,处理时要求技术含量高。目前国内处理废旧印刷电路板主要采用破碎后利用密度差的气流风选和水选进行金属与非金属的分离,存在效率低和二次污染等问题。因此,急需研究对废旧印刷电路板无害化处理和资源化利用的技术与装备。

本研究通过理论分析,自主研发破碎机与高压静电分选机并对废旧印刷电路板进行无害化、资源化处理。首先研究电路板的破碎特性,利用 MATLAB 模拟分选空间的高压静电场分布,并通过 MATLAB 编程模拟金属颗粒的运动轨迹;由非金属颗粒的动力学分析得到电选机转辊的临界转速模型;对电选机应用于分离混合金属颗粒领域进行了探索;最终实现可工业应用的处理废电路板的成套生产线,为废旧印刷电路板无害化处理与资源化技术的开发提供理论依据,并为推动该技术走向工业应用奠定了基础。

自行研制破碎机与高压静电分选机,确定剪切式旋转破碎机和冲击式旋转破碎机相结合的两级破碎方式对废旧印刷电路板进行破碎,使电路板中金属成分和非金属基板有效解离。剪切式旋转破碎机的工作转速为 1440 rpm,转子半径为 0.25 m,冲击式破碎机工作转速为 2000 rpm,转子半径为 0.2 m。高压静电分选机的供电系统最高电压达 30 kV;电极结构为丝状电晕极与柱状静电极相结合的复合电极结构;电极位置可调;接地转辊表面镀铬处理,转速可调(10 rpm-1000 rpm)。

Type-A(来自废旧电器)物料破碎后颗粒尺寸在 1.2 mm 以下达到完全解离,Type-B(来自电路板厂废料)物料破碎后颗粒尺寸在 0.6 mm 以下完全解离。破碎后电路板物料颗粒形状以球状和片状及多棱角状为主。

MATLAB 模拟高压静电分选空间电场强度分布,发现电场强度最大值位置偏向于静电极方向。不同工艺参数下电场强度分布表明,加大电压、采用复合电极结构、减小电极与接地转辊间的距离、增加静电极半径、减小静电极角度、加大电晕电极角度等参数变化可以提高电场强度,改善分选效果。当电选机工艺参数为以下范围时,可以得到较好的分选效果: $U = 20 \text{ kV} \sim 30 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_1 = 0.114 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$ 。

建立了金属颗粒运动轨迹模型。该模型适用于多组电选机工艺参数的优化组合,为提高高压静电分选机的金属回收效率及扩展分选机的应用领域提供理论依据。应用模型对颗粒尺寸与受力关系的分析得到:小尺寸颗粒($r_0 < 0.1 \text{ mm}$)受到外界因素影响更大,易出现特殊运动轨迹,破坏分选过程,在分选前应调整电选机的工艺参数,避免碰撞现象发生。

在非金属颗粒的带电过程与受力模型基础上,建立高压静电分选机转辊的临界转速模型,得到颗粒饱和荷电判定方程。同时提出了“临界荷电转速 n^* ”、“临界脱离转速 n' ”与“临界转速 N ”的概念。并得到提高临界脱离转速的方法:1) 增加电晕极数量可增大电晕区宽度和电晕电场强度,从而提高临界荷电转速(n^*);2) 避免火花放电的前提下,提高电压并减小电极之间的距离,以提高电晕电场强度及颗粒的荷电量;3) 改变转辊的曲率和电晕极位置,以减少颗粒在转辊表面的电荷损失。高脱离转速可同时提高非金属回收率与金属纯度,对高压静电分选机参数设置具有重要的指导意义。

计算机模拟混合金属颗粒的运动轨迹,拓展了高压静电分选机的应用领域。通过分析高压静电因素,机械因素,物料因素对混合金属颗粒分选的影响效果,得到一组优化工艺参数用于分选铜铝混合颗粒: $U = 30 \text{ kV}$, $R_2 = 0.025 \text{ m}$, $\alpha = 30^\circ$, $L = 0.07 \text{ m}$, $H = 0.28 \text{ m}$, $R_1 = 0.125 \text{ m}$, $n = 60 \text{ rpm}$, $r_0 = 0.2 \text{ mm}$ 。

在对废旧印刷电路板的破碎及高压静电分选的理论研究基础上,设计制造了一套处理废旧印刷电路板的生产线。生产线处理量可达 300 kg/h ,分选效率达到 90% 。为我国废旧电路板处理与资源化达到国际先进水平,提供绿色处理技术和先进的装备,对我国经济、社会和环境的可持续发展战略具有重要意义。

关键词: 电子垃圾, 印刷电路板, 破碎, 高压静电分离, 计算机模拟, 金属颗粒轨迹模型, 临界转速模型

Mechanical scraping and corona electrostatic separating of waste printed circuit boards

ABSTRACT

New technological innovation continues to accelerate the replacement of equipment leading to a significant increase of waste electrical and electronic equipments (WEEE). At present, the discarding and eliminating peak of electrical appliances and the electronic products has arrived in China. The annual discarding quantity was more than 1 million tons and large quantities of WEEE flows to the nation from foreign countries. Because there is lack of technology and equipments for recycling WEEE in domestic, backward processing methods caused serious environmental pollution and wasted large quantity of resources. The production of printed circuit boards (PCB) is the basis of the electronic industry as it is the essential part of all most electrical and electronic equipments (EEE). PCBs contain nearly 28% metals which have abundant nonferrous metals such as Cu, Pb, Sn etc, and the purity of precious metals which is about more than 10 times of rich-content mineral. Therefore, recycling of PCB is an important subject not only from the treatment of waste but also from the recovery of valuable materials. The PCBs contain glass fiber, reinforced resin and metals. Their special physical and chemical characteristics make it difficult to recycle them. At present, the major processing method in domestic was density-based separation, which was time-consuming and emits waste to the environment. So, it is necessary to have research on recycling resources from waste PCBs without impact to the environment.

On the basis of theoretical analysis, the scraping machines and corona electrostatic separator (CES) were originally created to research the harmless and resources processing

for the waste PCBs in this study. At first the scraping characteristic of waste PCBs was studied. The software of MATLAB was used to simulate the distribution of electric field strength in the CES and the program was written to compute the trajectory of metal particle from scraped waste PCBs. The critical rotational speed model of CES was established from the analysis of dynamics of nonmetal particle. The method of applying the CES to separate mixture metal particles was explored. Finally, the complete equipment was manufactured. The complete equipment provided theoretical basis and industrial application experiences for recycling resources from waste PCBs without impact to the environment.

The scraping machines and CES for researching the methods of processing the waste PCBs were originally created. Two-step scraping process which was combined with shearing machine and hammer grinder was adopted. The metal parts were completely striped from base boards of waste PCBs during scraping. The parameters of shearing machine were: Rotational speed (n) was 1440 rpm and the radius of rotor was 0.25 m; the parameters of hammer grinder were: Rotational speed (n) was 2000 rpm and the radius of rotor was 0.2 m. The peak value of direct current power of CES was 30 kV. the electrodes include the filar type corona electrode and the columnar electrostatic electrode. The position of electrodes can be adjusted freely. The surface of rotating roll has chromate treatment and the rotational speed can be adjusted from 10 rpm to 1000 rpm.

When the particle size of scraped Type-A materials (from waste electronic equipments) was below 1.2 mm and the particle size of scraped Type-B materials (from local PCBs factory) was below 0.6 mm, the metal parts were completely striped from the base boards. The shapes of particles from scraped waste PCBs were spherical, flaky and polyhedral.

The PDE tool box from software of MATLAB was used to simulate the distribution of electric field strength in the CES. It was found that the position of maximum value of electric field strength closed to the direction of electrostatic electrode. The way of increasing the applied voltage, radius of static electrode, angle of corona electrode and decreasing center distance, angle of electrostatic electrode were good for the separation. Through the correlation of simulated and experimental results, the good separation results were got under the optimized operating parameter: $U = 20\text{KV} - 30\text{KV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21\text{m}$, $R_1 = 0.114$, $R_2 = 0.019\text{m}$, $\theta_1 = 20^\circ$ and $\theta_2 = 60^\circ$.

The program wrote by MATLAB was used to establish the trajectory model for metal particle from scraped waste PCBs. The model was suitable for multi-compositions of

operating parameters and provided theoretical support to enhance recycling efficiency and expand the applied domain of CES. From the analysis of relation between the particle size and particle stress, it was found that the small particles ($r_0 < 0.1$ mm) were easy to be impacted from outside factors and broke the separation. So the operating parameters of CES should be adjusted to avoid colliding phenomenon.

The charging process and stress of nonmetal particle were analyzed. The critical rotational speed model was established. From the model, the judgment equation of charging critical rotational speed was got. The concepts of the charging critical rotational speed (n^*), the detaching critical rotational speed (n') and the critical rotational speed (N) were proposed from the model. The method of increasing n' are: 1) increasing the number of corona electrodes, width of corona field and electric field strength to increase the charging critical rotational speed (n^*); 2) under the premise of avoiding spark discharge, increasing applied voltage and decreasing discharge gap to increase corona electric field strength and charging value of particles; 3) changing the curvature of rotating roll electrode and position of corona electrodes to decrease the loss of charge value on the surface of rotating roll electrode. Large n' could simultaneously improve the purity of metal parts and recycle percentage of nonmetal parts. The critical rotational speed model has the important guiding significance to the setting of operating parameters of CES.

The computer simulation was used to compute the trajectories of mixture metal particles and the applied domain of CES was expanded. The impacts of electrical, material and mechanical factors to the particle trajectory were analyzed and the optimized operating parameters for separating copper and aluminum particles were got: $U = 30$ kV, $R_2 = 0.025$ m, $\alpha = 30^\circ$, $L = 0.07$ m, $H = 0.28$ m, $R_1 = 0.125$ m, $n = 60$ rpm, $r_0 = 0.2$ mm.

On the basis of study the theory of scraping and corona electrostatic separating waste PCBs, a set of production line for recycling resources from waste PCBs was manufactured. The products of the line were metal particles, glass fiber powders. The capacity of production line was 300 kg/h and the separating efficiency was 90%. The green processing technology and advanced equipments were provided to make our treatment methods and recovery of waste PCBs reaching the international advanced level, which has great signification for China's economic, social and environmental sustainable development strategies.

Keywords: WEEE, Printed circuit board (PCB), scraping, corona electrostatic separation, computer simulation, metal particle trajectory model, critical rotational speed model

目 录

摘 要.....	III
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 废旧印刷电路板的资源性与危害性	3
1.2.1 废旧印刷电路板的资源性	4
1.2.2 废旧印刷电路板的危害性.....	5
1.3 废旧印刷电路板的回收利用技术.....	5
1.3.1 火法冶金技术.....	6
1.3.2 湿法冶金.....	8
1.3.3 生物方法回收贵金属.....	9
1.3.4 机械处理法	9
1.4 高压静电分选的研究进展	18
1.4.1 颗粒荷电研究	18
1.4.2 电场及空间电荷分布研究	18
1.4.3 电选机工艺参数研究	20
1.5 论文研究内容与目标	21
参考文献.....	23
第二章 技术路线与研究方法	31
2.1 引言	31
2.2 原材料.....	31
2.3 技术路线与研究方法	31
2.3.1 拆解.....	31
2.3.2 两级破碎.....	34
2.3.3 筛分分级与烘干.....	34
2.3.4 高压静电分选.....	36
参考文献.....	37
第三章 废旧印刷电路板的破碎与高压静电分选设备研制	38
3.1 引言	38
3.2 破碎设备的研制方案	38
3.2.1 破碎机的选择.....	38
3.2.2 破碎原理.....	39
3.3 破碎设备	43

3.4 高压静电分选设备的研制.....	44
3.4.1 电极结构	45
3.4.2 加料装置	45
3.4.3 直流电源	47
3.5 高压静电分选设备.....	48
3.6 小结.....	49
参考文献	50
第四章 废旧印刷电路板的破碎研究.....	51
4.1 引言.....	51
4.2 废旧印刷电路板破碎后颗粒特性分析.....	51
4.2.1 颗粒形状	52
4.2.2 颗粒粒度分布	52
4.2.3 金属成了解离状况	54
4.3 破碎后颗粒解离度及粒度分布不同的分析.....	55
4.4 冲击破碎过程的能耗分析.....	57
4.5 本章小结.....	58
参考文献	59
第五章 高压静电分选机电场的计算机模拟.....	60
5.1 引言.....	60
5.2 MATLAB 电场模拟	60
5.3 电压影响.....	62
5.4 电极特性.....	65
5.4.1 电极结构影响	65
5.4.2 电极形状影响	67
5.4.3 中心距离影响	68
5.4.4 静电极尺寸影响	70
5.4.5 电极角度影响	72
5.5 实验验证.....	78
5.5.1 电压影响验证	79
5.5.2 电极位置	80
5.6 本章小结.....	81
第六章 高压静电场下金属颗粒运动轨迹的计算机模拟.....	82
6.1 引言.....	82
6.2 金属颗粒运动轨迹模型.....	82
6.2.1 模型建立	82
6.2.2 电场计算	84
6.2.3 颗粒脱离点计算	85

6.2.4 颗粒轨迹计算.....	87
6.2.5 模拟轨迹验证.....	88
6.3 模型的修正.....	91
6.3.1 小颗粒碰撞修正.....	91
6.3.2 电极修正.....	94
6.4 模型的扩展应用.....	95
6.5 本章小结.....	96
参考文献.....	97
第七章 高压静电分选机转辊临界转速模型.....	98
7.1 引言.....	98
7.2 模型的建立.....	98
7.3 模型验证.....	104
7.4 本章小结.....	109
参考文献.....	111
第八章 高压静电场下混合金属颗粒的运动轨迹模型.....	112
8.1 引言.....	112
8.2 混合金属颗粒分离装置.....	112
8.3 混合金属颗粒分离模型.....	112
8.4 分离模型应用.....	116
8.4.1 高压静电场因素.....	117
8.4.2 机械因素.....	120
8.4.3 物料因素.....	121
8.4.4 工艺参数的优化.....	122
8.5 本章小结.....	123
第九章 废旧印刷电路板处理生产线成套设备.....	124
9.1 引言.....	124
9.2 设计与制造.....	124
9.2.1 全套生产线.....	124
9.2.2 A-粗粉碎系统.....	126
9.2.3 B-传送系统 I.....	127
9.2.4 C-分料系统.....	128
9.2.5 D-二次粉碎系统.....	130
9.2.6 E-风力输送系统.....	131
9.2.7 F-传送系统 II.....	133
9.2.8 G-静电分离系统.....	133
9.3 本章小结.....	135
结论与展望.....	136

创新点.....	139
研究成果及获奖情况.....	140
致 谢	142

第一章 绪论

1.1 引言

从上世纪九十年代,在以电子计算机为核心,以微电子技术为依托的电子信息产业迅速发展的支撑下,整个电子工业突飞猛进。到上世纪九十年代后期,在全世界的电子产品年增长率为13%左右这一万众瞩目的现实下,电子工业成为了世界上最大的产业。随着科技的进步与市场需求的增加,电子产品的需求急剧增大,其更新换代的速度也不断加快,由此导致了大量电子废弃物的产生。

电子废弃物也被称作电子垃圾,包括各种废旧电脑、通讯设备、家用电器以及淘汰的电子仪器仪表等。美国环境保护署估计美国每年的废弃电子设备2.1亿吨,占城市垃圾的1%;欧盟每年废弃电子设备更是高达600-800万吨,占城市垃圾的4%,且以每5年16%-28%的速度增长,是城市垃圾增长速度的3-5倍^[1]。日本的废弃家电每年也可达60万吨,占城市垃圾的1%^[2]。来自中国统计局的资料表明:我国目前电视机的社会保有量已达到3.5亿台,冰箱、洗衣机也分别达到1.3亿和1.7亿台^[3]。随着更新周期的不断缩短,我国的电子废弃物将以前所未有的速度增加。仅在2002年,我国就淘汰了400多万台电视机、500多万台洗衣机、500多万台冰箱、600多万台电脑及3000万部手机^[4]。目前,我国的家电及电子产品已到了淘汰报废的高峰期,报废量每年达100多万吨,而且国外大量的电子垃圾流向国内^[5](图1-1)。但国内缺少无污染和全部资源化处理电子垃圾的技术和装备,落后的处理方法造成严重的环境污染和大量的资源浪费。同时,也造成我国电子产品出口的贸易壁垒。为此,国家“十一五”规划中将建设若干废旧家电回收利用示范基地。在国家中长期发展规划中把“综合治污与废弃物循环利用”列为优先主题。电子废弃物的资源化、减量化和无害化处理迫在眉睫。



图 1-1 亚洲电子废弃物流向

Fig.1-1 Asia e-waste traffic

印刷电路板是电子工业的基础，也是各种电子产品的核心部件，主要用于电子元件的互相连接。它被广泛应用于电脑、通讯设备、测控仪器仪表、家庭电器等领域（图 1-2）。文献中^[6]指出电路板在电子废弃物中所占的比重为 3%左右。近年来，世界印刷电路板业的平均增长率为 8%-9%，中国内地的增长率为 14.4%^[7]。而亚洲的韩国、东南亚的一些国家和中国的台湾地区增长率更高达 20%-30%^[8]。到 1995 年，我国印刷电路板的总产量已居世界第 5 位，产值已占世界印刷电路板总产值的 5.2%。目前，我国的电子产品市场总规模已达 1 万亿元、电子工业产值已居世界第 4 位。而大量的生产必然造成大量的废弃。以电子工业发达的广东东莞市为例，每月产生的印刷电路板、覆铜板边角料等电子废弃物就超过 5000 吨，而整个广东省则超过 8000 吨^[9]。

如何有效地进行废旧印刷电路板等电子废弃物的资源化处理，已经成为当前关系到我国经济、社会和环境可持续发展及我国再生资源回收利用面临的一个新课题。

1.2.1 废旧印刷电路板的资源性

从资源的角度来看，“废旧印刷电路板”并不是“废物”，而是有待开发的“第二资源”，具有很高的回收利用价值^[12]。表 1-1^[13]为瑞典的 Rönnskär 冶炼厂，分析个人计算机(PC)中的印刷电路板的组成，其中金属的含量高达 49%；而废弃手机中的印刷电路板也含有铜(Cu)、金(Au)、银(Ag)、钯(Pd)等有价金属，其含量^[14]为：含金 80 g/t、银 3.3 kg/t、铜 26.8 kg/t、钯 100 g/t。金矿的含金量即品位低至 3 g/t 也有开采价值，即使由选矿而得到的金精矿也只有 70 g/t 左右。我国铂族金属的平均品位只有 0.4 g/t，世界铂族金属矿的品位为 0.6-23 g/t，铜矿、银矿也达不到废旧印刷电路板中的含量。不同电子设备的电路板中元素的组成和含量是有差别的，电视机中印刷电路板上的贵金属含量比计算机少，铁、铅和镍含量多，但所有含元素的种类基本相同^[15]。废旧印刷电路板中含有高品位的贵重金属及具有回收意义的可再生材料，具有很高的资源价值。而相对于从原矿中提取这些金属来说，对废旧印刷电路板进行回收处理所需要的能耗较少，回收过程中产生的二次废物量也少^[16]。贵重金属的回收一直是推动印刷电路板回收工业的巨大动力，而基板中的树脂纤维还可以用来当填料以减少能源资源的损耗，含有的塑料则由于满足较为严格的焊接工艺及其他材料要求，能抵制较高的热力学检验和苛刻的环境条件，所以可作为良好的阻燃剂和建筑材料。因此，在自然资源供求矛盾日益加剧的今天，回收利用废旧电路板中的贵金属和再生材料可以有有效的缓解资源压力，同时能够显著降低生产成本。

表1-1 PC中PCB的元素含量^[13]

Table 1-1 Contents of PCB from PC ^[13]

成分	Ag	Al	Mg	As	Au	S	Ba	Be	-
含量	3300g/t	4.7%	1.9%	<0.01%	80g/t	0.10%	200g/t	1.1g/t	-
成分	Bi	Br	C	Cd	Cl	Cr	Cu	F	-
含量	0.17%	0.54%	9.6%	0.015%	1.74%	0.05%	26.8%	0.094%	-
成分	Fe	Cn	Mn	Mo	Ni	Zn	Sb	Se	-
含量	5.3%	35g/t	0.47%	0.003%	0.47%	1.5%	0.06%	41g/t	-
成分	Sr	Sn	Te	Ti	Se	I	Hg	Zr	SiO ₂
含量	10g/t	1.0%	1g/t	3.4%	55g/t	200g/t	1g/t	30g/t	15%

1.2.2 废旧印刷电路板的危害性

废旧印刷电路板中含有大量能够对环境造成严重危害的物质，处理不当会严重危害人们的健康。印刷电路板里含有溴化阻燃剂、以硅酸盐形式存在的铅元素；电路板上的焊料为铅锡合金；SMD 薄片电阻，红外探测仪和半导体等构成中都含有镉^[17,18]。其中的有害物质都对环境、对人体有着不容小觑的危害。如铅会破坏人的消化、血液、生殖系统，还有强烈的致畸作用；镉会损害肾小管，干扰肾脏对蛋白质的排出和再吸收，引起蛋白尿、糖尿、氨基酸尿等，还会使人的全身骨骼疼痛，引发骨痛病；有机汞会侵害人的神经系统，使人出现广泛的知觉障碍，还可以突破胎盘屏障，具有致畸作用；铬能透过皮肤，进入人体，造成严重过敏，引发哮喘，破坏 DNA；砷也会进入人体，其化合物能引起呕吐、腹泻，引发神经炎，造成中毒；含有的多氯联苯等物质燃烧会产生二恶英、呋喃等致癌、致畸物质。因此，对于废旧印刷电路板必须妥善处理 and 处置，若仅仅作为一般的城市垃圾进行填埋，其中所含的铅、镉等重金属会渗透入地下水和土壤，经过自然界中的迁移转化、食物链的循环、生物富集等作用，对整个自然环境和人们的健康造成难以预计的危害。

综上所述，如果没有对废旧印刷电路板进行有效的回收处理，不仅对环境造成严重影响，而且浪费大量资源。同时，电路板是玻璃纤维强化树脂和多种金属的混合物，其中金属和非金属紧密结合，分离难，是电子废弃物中最复杂、最难处理的。因此，处理时要求技术含量高。目前国内处理废旧电路板主要采用破碎后利用密度差的气流风选和水选进行金属与非金属的分离，存在效率低、和二次污染等问题。同时，非金属材料只能进行掩埋和焚烧处理。因此，急需开发出废旧印刷电路板无害化处理与完全资源化技术和装备。

1.3 废旧印刷电路板的回收利用技术

废旧印刷电路板的资源化回收最早始于 1969 年，当时美国矿业局(USBM)采用了机械的方法，尝试从废弃军事设备的破碎产品中回收贵金属，并建成了处理量达 0.23 t/h 的中试厂。其处理流程为：废弃的军事设备经锤式磨破碎后，再经气力分级，磁选除铁，涡流分选等作业回收铜—铝合金，再用电选机回收金属富集体^[19]。此后，随着人类对二次资源利用及环境保护的重视，电子废弃物的资源化回收研究迅速发展。1986 年，美国国家矿物局组织研究开发电子废物处理及贵金属回收新工艺，包括手工拆卸、机械处理、火法冶金、湿法冶金、生物技术冶金及电冶金等技术^[20]。德

国、日本、俄罗斯、加拿大等国家都在这方面作了不少研究和工 作，并在工艺技术上取得较大的进展和突破^[21-23]。

1.3.1 火法冶金技术

火法冶金技术^[24-26]是指通过焚烧、热解、熔炼等火法处理的手段去除印刷电路板中的塑料及其他有机成分，使金属得到富集并进一步回收利用的方法，包括燃烧/焙解、等离子体炉或鼓风机熔炼、烧结、熔解、热析以及在高温气相中反应等过程^[27,28]。

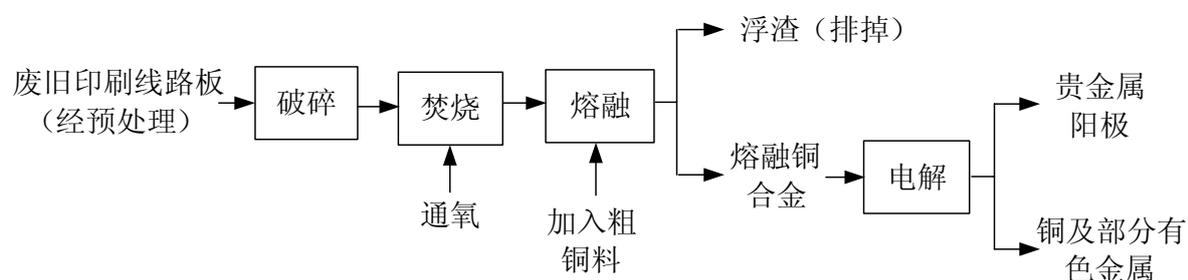


图1-3 火法冶金从废旧印刷电路板中回收贵金属的工艺流程

Fig.1-3 Flow chart of recycling noble metals from waste PCBs with combustion

火法冶金的基本原理是利用冶金炉高温加热剥离非金属物质，贵金属熔融于其它金属熔炼物料或熔盐中，再加以分离，通常在一个二级装置中进行。首先将破碎后的废旧印刷电路板送入一次焚化炉中焚烧，将有机成分完全分解破坏，使有机气体和固体分离，焚烧后的残渣先经粉碎然后用物理和化学方法分别回收；含有机成分的气体则进入二次焚化炉燃烧处理后排放^[29]。图 1-3 显示了一种常用的从废旧印刷电路板中回收贵金属的火法冶金工艺流程。

火法冶金的最大优点是可以处理几乎所有形式的电子废弃物,废弃物的物理成分限制要求不高,回收的主要金属铜及金、银、钯等贵金属具有非常高的回收率。但是也存在着如下严重问题:

1) 印刷电路板上粘结剂和其他有机物等经焚烧会产生大量有害气体形成二次污染易造成有毒气体逸出, Menad^[30]等研究发现,阻燃剂中的溴化结构在燃烧过程中会生成较多的遮蔽性烟雾,腐蚀性气体和某些有毒产物,如多溴二苯醚(一种阻燃剂)可生成多溴二苯并二恶烷及多溴化二苯并呋喃等有毒气体;

2) 废旧印刷电路板中的陶瓷及玻璃成分使熔炼炉的炉渣量增加,大量浮渣的排放又增加了二次固体废弃物,同时浮渣中残存的一些有用金属也被废弃掉,由此造成

金属的流失；

3) 其它金属的回收率相当低(如锡、铅等)或几乎无法回收（如铝和锌），大量非金属成分如塑料等也在焚烧过程中损失；

4) 能耗大，处理设备昂贵，经济上获益不高。

文献^[31,32]报道，电子垃圾的集散地广东省贵屿，许多小作坊采用露天焚烧或酸洗的原始方法处理废旧电子垃圾，地点多集中在河流附近，对周围的生态造成了严重的破坏（图 1-4）。焚烧与酸洗处理的河岸附近土壤中，多溴联苯醚(polybrominated diphenyl ether, PBDE)的含量超过贵屿北部山区水库附近土壤的 930 多倍；二恶英和呋喃(PCDD/Fs)的含量超过水库周边土壤中含量的 85 倍，等效毒性量（WHO-TEQ）更超过了 630 倍。

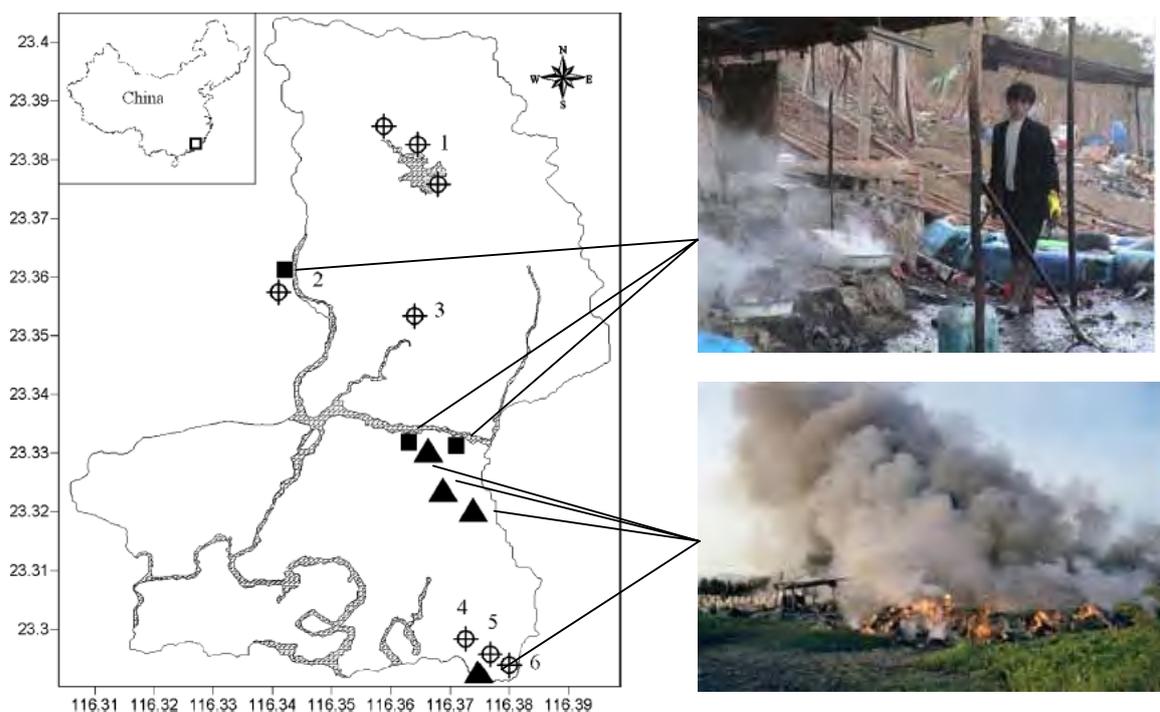


图 1-4 广东省贵屿地图：(■) 酸洗处理电路板；(▲) 电子垃圾露天焚烧

Fig. 1-4 Map of Guiyu and sampling locations: (■) acid leaching of printed circuit boards site; (▲) e-waste dumping and open burning site

1.3.2 湿法冶金

由于火法冶金方法的缺点,尤其是当电子废物中贵金属含量低时,使用这种方法有很大的问题,促使湿法冶金方法^[33]的开发以达到回收利用贵金属的目的。湿法冶金的主要过程包括对破碎后的废旧印刷电路板颗粒在酸性或碱性条件下的浸出,采用溶剂萃取、沉淀、置换、离子交换、过滤及蒸馏等方法对溶液进行分离,使所需要的金属析出和聚集。通过这一处理可获得高品位及高回收率的金、银等贵金属及铜等有色金属。由于湿法冶金技术的废气排放少、提取贵金属后的残留物易于处理、经济效益显著、工艺流程相对简单,所以比火法冶金提取贵金属技术的应用更加普及和广泛。

目前发展的湿法浸出贵金属的新工艺主要有:

1) 电化学方法^[34-36]包括英国利物普大学的 Elaine 提出的浸出-电解法提取贵金属技术^[26];

2) 前西德中央固体物理与材料研究所的 Gloe 等,于 90 年代初研究推出的硝酸-盐酸/氯气联合浸取工艺^[37];

3) 双氧水-硫酸湿法工艺^[38];

4) 鼓氧氰化工艺^[39];

5) 1996 年巴西圣保罗大学的 Tenorio 等在前人的研究基础上改进推出的一项浸取工艺,该工艺针对贵金属浸取将它们有效分离,使后面的浸取工艺简化,浸取率提高,在生产实际中得到应用^[40]。

湿法的主要缺点有:

1) 不能直接处理复杂的电路板;

2) 部分金属的浸出效率低,作用有限,当金属被覆盖或敷有焊锡时回收率较低,包裹在陶瓷中的贵金属更是无法通过湿法回收;

3) 浸出液及残渣具有腐蚀性及毒性,若处理不当,易引起更为严重的二次污染;

4) 只能回收贵金属及铜等金属,不能回收其他金属及非金属成分。

Quinet^[41]等人研究出一个化学处理流程来回收手机电路板的贵金属金、银、钯等,虽然金、银、钯的回收率分别高达 95%、93%、99%,但回收每吨原料将耗费 74 kg 的 H_2O_2 和 19 kg 的 NaCN 等氧化剂,其中 NaCN 是剧毒物质,排放出含氰的废液将对生态环境和人类健康带来极大的危害。我国广东、浙江等地的许多个人小作坊就是利用化学处理方法回收电路板中的贵金属,将废液废气直接排入环境,从而带来了极其严重的环境污染问题。另外,随着电路板中的贵金属含量逐渐减少,用该法回收电路板的经济可行性也逐渐降低。

1.3.3 生物方法回收贵金属

利用细菌浸取或富集贵金属是 20 世纪 80 年代开始研究的提取低含量物料中贵金属的新技术,也称为微生物湿法冶金^[42-44],包括微生物氧化浸出和微生物积累和吸附^[45]。生物技术提取金等贵金属,具有工艺简单,操作方便,环境污染小,成本低等优势。在微生物治理废水、废气方面已有产业化的应用,它可能代表着未来技术发展的方向,但此方法浸取时间较长,浸取率较低,在电子废弃物处理方面,目前尚无工业应用,而且生物方法只对贵金属进行提取,有一定的局限性。

1.3.4 机械处理法

作为废旧电路板回收的一项重要处理技术,机械处理技术已经得到了非常完善的发展。90 年代后,机械处理方法不仅在西欧和美国得以实施,在日本、中国台湾和新加坡都已经开始研究并进行了工业规模的回收利用^[46]。瑞典的科学家提出了一套包括破碎、磁分选和风力分选等基本工艺流程机械处理方法^[19],德国开发了包括低温破碎技术的四段式机械处理工艺^[47,48],加拿大的一个废弃物回收公司开发出了经筛选后与铜精矿混合再处理的回收模式,使它成为世界上最大的铜与贵金属再循环企业之一^[49],日本也是较早利用机械处理方法的国家之一,知名电器企业卡西欧、日本 IBM 和日本电气株式会社(NEC)等均建有自己的回收再生工场^[50],而且日本 NEC 公司开发出了两段式破碎法处理工艺^[51]。国内清华大学与中国矿业大学的研究者报道了液体浮选^[52]与静电分选技术^[16,53]的研究成果。各种机械处理法均以破碎为预处理手段,研究发现^[54],一般物料破碎到 0.6 mm 时金属基本上可以达到 100%的解离,但破碎方式和级数的选择依后续工艺而定。

破碎后废旧印刷电路板的混合颗粒再由各种不同的分选方法,分选出金属与非金属成分。主要的分选方法有磁选、涡流电选、液体浮选、风力分选、高压静电分选等。

1.3.4.1 磁选

磁选只能分离出破碎后废旧电路板中的铁磁性物质,而废旧电路板中的金属中含有大量铜等非铁磁性物质。因此,该方法只适合预处理破碎后废旧印刷电路板的混合物料。

1.3.4.2 涡流电选

涡流电选是利用涡电流力分离金属和非金属的方法。将非磁性而导电的金属（铜、铅、锌等）置于不断变化的磁场中，金属内部会产生涡电流并产生排斥力，而非金属不受磁场作用而实现分离。

涡流代表法拉第电磁感应定律的另外一种现象。如果材料中的磁感应强度 B 随时间而改变，那么在此材料中将产生电压。在导体中，感应电压产生一种电流，称为涡流。根据楞次定律，内部产生涡流的导体颗粒在磁场中受洛伦兹力作用，如图 1-5 所示。图 1-5 中假定穿过导体的磁场是水平向右移动的， S 、 N 表示磁场的方向， F 表示洛伦兹力， I 表示涡电流。

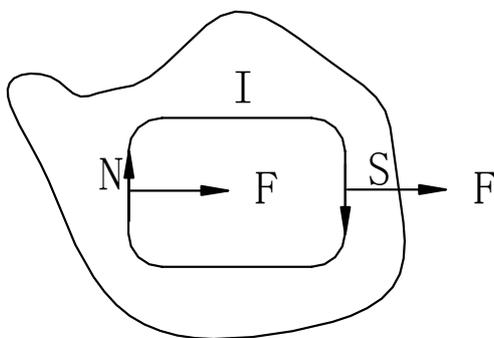


图 1-5 带有涡流的导体颗粒在磁场中的受力

Fig.1-5 Stress of particle with eddy flow in the magnetic field

在涡流分选过程，颗粒受到重力、摩擦力、电磁力等综合作用，涡流分选的方式按物料的运动方式分：辊筒分选、水平移动分选、垂直式分选、斜面滑动分选。图 1-6、1-7 分别为辊筒分选与斜面分选的原理图^[55,56]。

涡流电选机是根据颗粒电性的差异实现分选的设备。该技术已成功应用于电子垃圾处理。Shunli Zhang^[57]等利用一种新开发的涡流分选机从电脑及线路板废弃物中回收金属铝，可获得品位高达 85%金属铝富集体，回收率也可达 90%。但该法主要适用于轻金属材料与比重相近的塑料材料（铝和塑料）之间的分离，且要求进料颗粒的形状规则、平整，粒度不能太小。如果金属导体粒度太小，导体内部产生涡流电流过小，从而不足以使金属受到足够大的排斥力作用，金属与非金属不能有效分离。因此，该技术用于分离废旧印刷电路板的金属颗粒与非金属颗粒（破碎废旧电路板的粒度 0.6 mm 以下，才能实现金属颗粒与非金属颗粒的完全解离）受到限制。

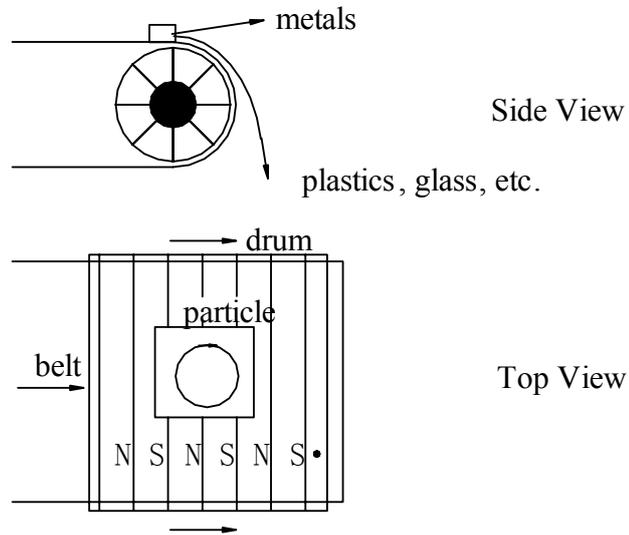


图 1-6 带有交替磁场的辊筒涡流分选

Fig.1-6 An eddy current separator consists of a drum covered with magnets that are oriented alternately N-S and S-N

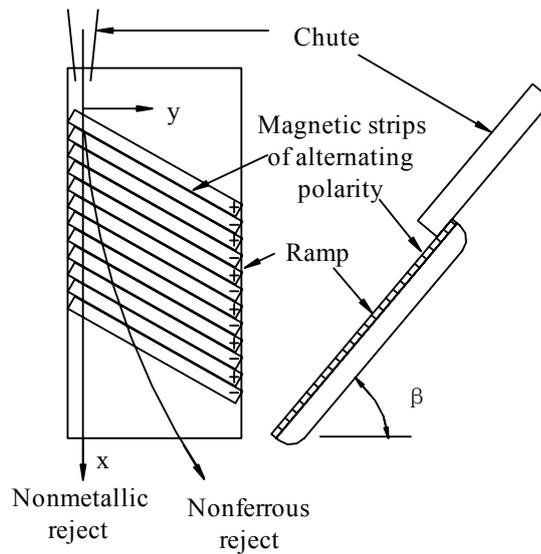


图 1-7 斜面分选原理，左图为前视图，右图为侧视图

Fig.1-7 Schematic diagram of Ramp separator: (left) front view; (right) side view

1.3.4.3 液体浮选

利用密度差的液体浮选技术，又称湿法重力分选(摇床分选)，是把破碎后的废旧印刷电路板混合物料经过水槽分离金属与非金属材料^[58]。摇床分选是在一个倾斜的床面上，借助床面的不对称往复运动和薄层斜面水流的综合作用，使颗粒按密度差异在床面上呈扇形分布的分选方法。颗粒在摇床上受到重力、水流冲力、床层摇动产生的惯性力以及摩擦力的综合作用。如图 1-8 所示，不同密度（或粒度）的颗粒以不同的速度沿床面纵向和横向运动，它们的合速度偏离摇动方向的角度也不同，致使不同密度颗粒在床面上呈扇形分布，达到分离目的。密度大的颗粒具有较大的横向移动速度和较小的纵向移动速度，偏向重产物区。密度小的颗粒具有较大的纵向移动速度和较小的横向移动速度，偏向轻产物区。密度大的粗颗粒与密度小的细颗粒偏向中重产物区。

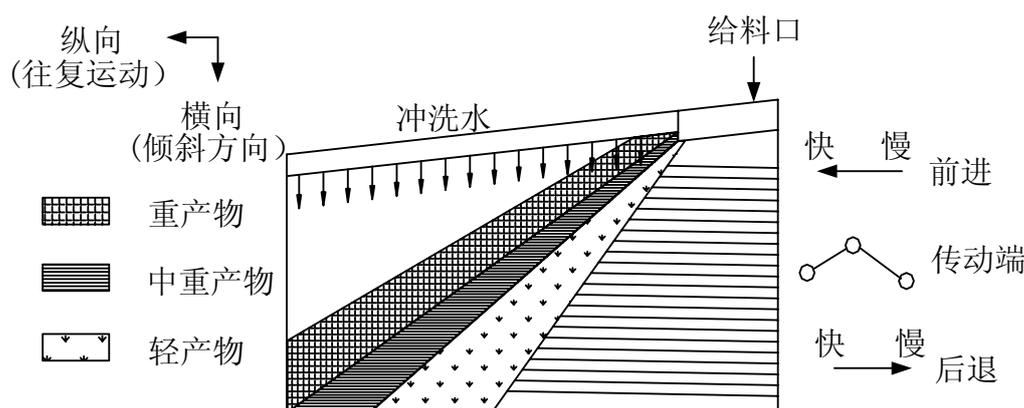


图1-8 摇床（液体浮选技术）处理设备原理图

Fig.1-8 Schematic diagram of the fluid bed separator

湿法重力分选方式在重力场或离心力场下可以实现金属与非金属的分离，而且设备结构简单，不耗费贵重生产资料，作业成本也较低。但所有破碎的物料采用水、重液或重悬浮液进行分选，能耗大，分离效果差。如图 1-9 所示，大多数国内回收企业所采用的以水作为介质进行分选的摇床设备。该设备在处理过程中，存在污泥和废水，废液中含有重金属成份，造成严重的环境污染治理问题。由于细物料在水中难以分散，所以少部分金属不会下沉，因而湿法重力分选对微细级物料的分选效果较差，金属产品在脱水、干燥等处理中易氧化而降低品位。

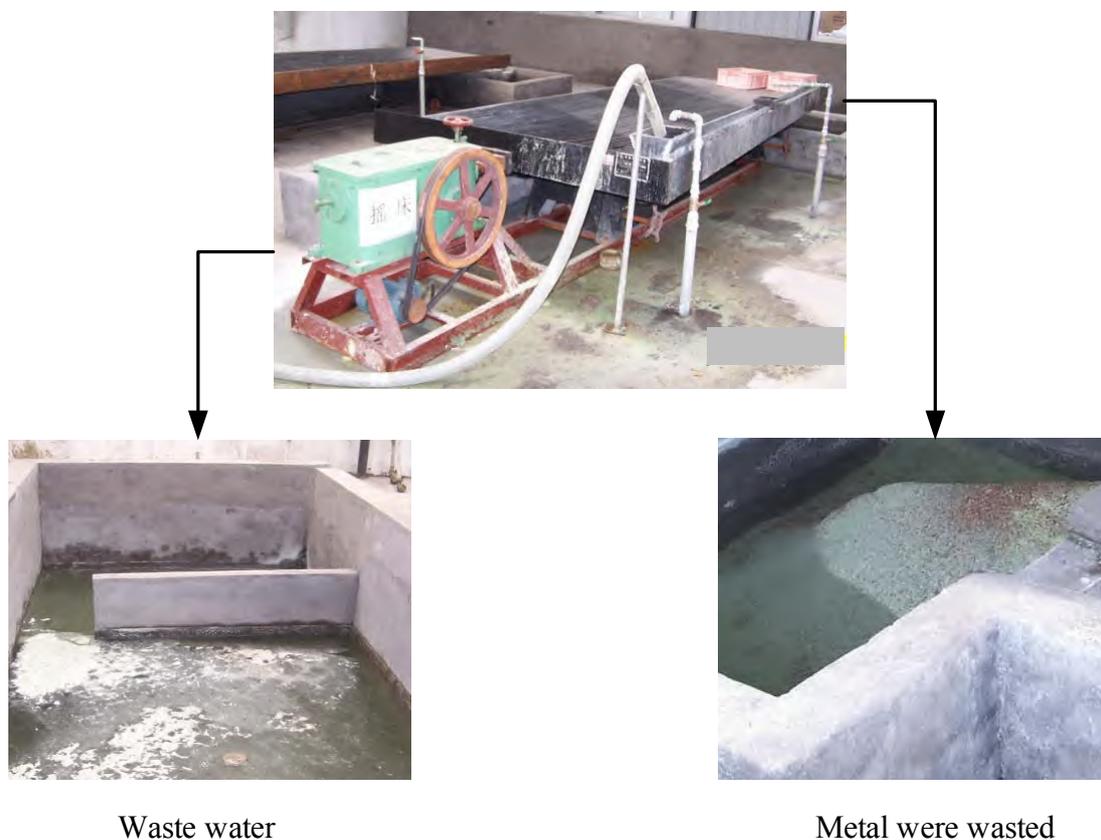


图1-9 摇床分选破碎后电路板

Fig.1-9 Scraped PCBs were separated by fluid bed

1.3.4.4 风力分选

风力分选简称风选，又称气流分选。是以空气为分选介质，在气流作用下使破碎后废旧印刷电路板颗粒按密度和粒度进行分选的一种方法。在风选过程中风压不超过 1 MPa，可以忽略空气的压缩性，将其视为具有液体性质的介质。故颗粒在空气中的沉降末速度 (v_0) 为^[59]：

$$v_0 = \sqrt{\frac{\pi d \rho_s}{6\psi\rho} g} \quad (1-1)$$

式中， d 为颗粒的直径， ρ_s 为颗粒的密度， ρ 为空气的密度， ψ 为阻力系数， g 为重力

加速度。

利用上升气流可以缩短颗粒到达沉降的时间和距离，达到分离的目的。上升气流使颗粒做干涉沉降，颗粒的干涉末速度(v_s)为：

$$v_s = v_0(1 - \lambda)^n \quad (1-2)$$

式中， λ 为物料的容积密度； n 值大小与颗粒的形状及粒度有关，介于 2.33-4.65 之间。在干涉沉降条件下，上升气流的大小，应根据颗粒的性质，通过实验确定。

水平气流在风选中也较为常用。分选过程中颗粒受到空气动力和重力的作用如图 1-10 所示：

合力的方向为颗粒的运动方向，合力与水平方向的夹角 α 的正切值为：

$$\text{tg}\alpha = \frac{\text{Gravitation}}{\text{Air pressure}} = \frac{\pi d^3 \rho_s g}{6\psi d^2 u^2 \rho} = \frac{\pi d \rho_s g}{6\psi u^2 \rho} \quad (1-3)$$

式中， d 为颗粒直径， ρ_s 为颗粒的密度， ψ 为阻力系数， u 为水平气流的速度， ρ 为空气的密度。如式 1-10 所示，当水平气流速度一定，颗粒粒度相同时，密度差异导致运动方向与水平夹角 α 的不同，而达到分离目的。

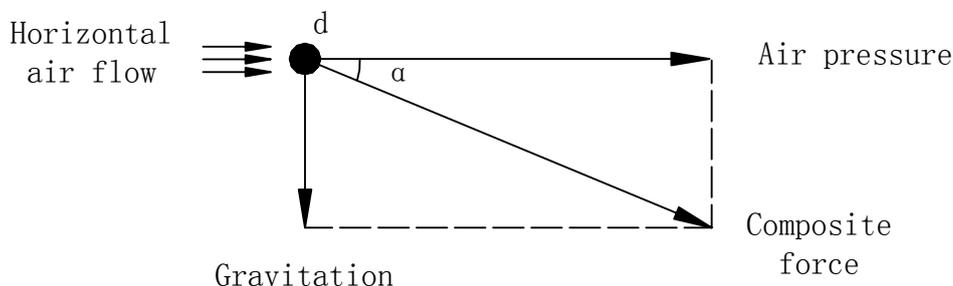


图 1-10 水平气流下颗粒的受力情况

Fig.1-10 Stress of the particle under horizontal air flow

Shunli Zhang^[60]等研究利用风力分选从电子废弃物中分选金属。金属铜、金、银的回收率分别为 76%，83%及 91%。但风力分选对入料颗粒的大小和形状要求较高，且存在运转不稳定及效率低等问题。

1.3.4.5 高压静电分选

高压静电分选是利用静电现象来进行物质的分离、提纯、分级的一类技术。它利

用物质的摩擦特性、导电特性、介电常数差异，使静电力、重力、离心力等有效的作用在所有粒子上面而实现分选。由于荷电方式、电场特征等的不同，电选设备可分为很多种，例如：按结构特征可分为辊（筒、鼓）式、室式、带式、滑板式、圆盘式等。较常用的电选机为辊（筒、鼓）式。图 1-11 所示为辊式高压静电分选机结构图，辊式高压静电分选机包括加料装置，电晕极，静电极，转辊，毛刷，物料收集槽等部分。

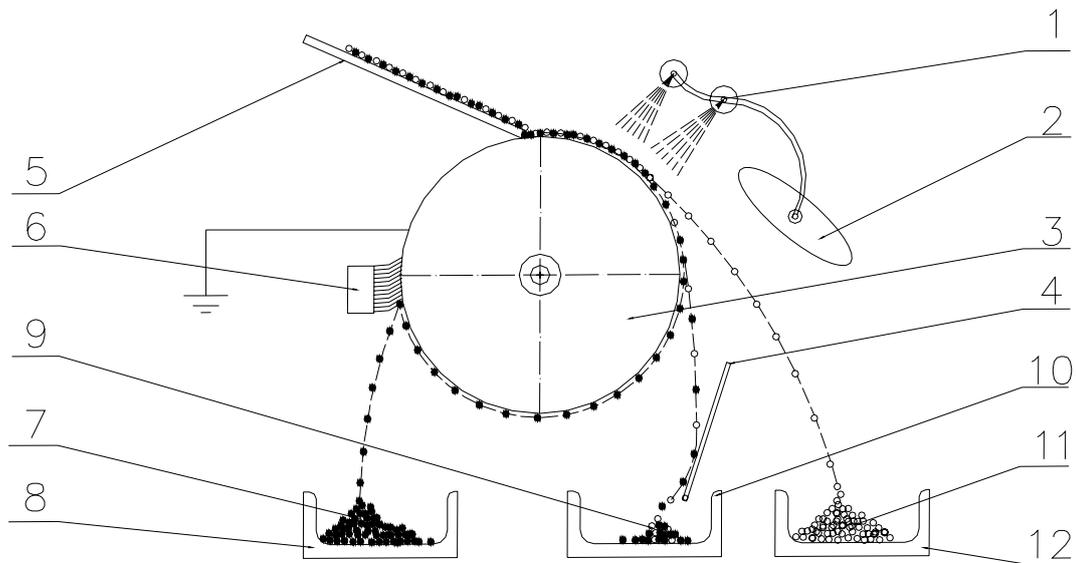


图1-11 高压静电分选机构简图：1.电晕电极；2.静电极；3.转辊；4.分料板；5.加料板；6.毛刷；7.非金属颗粒；8.非金属收集区；9.半导体颗粒；10.半导体颗粒收集区；11.金属颗粒；12.金属颗粒收集区

Fig.1-11 Diagram of corona electrostatic separator: 1.corona electrode, 2.electrostatic electrode, 3.roll, 4.split, 5.feed, 6.brush, 7.nonmetal particles, 8.nonmetal collecting zone, 9.middling, 10.middling collecting zone, 11.metal particles, 12.metal collecting zone

辊式高压静电分选机物料颗粒带电机制包括电晕荷电和感应荷电两种方式：

1) 电晕荷电通常伴随着电晕放电现象，电晕放电是电极间的气体还没有被击穿，电荷在高电压的作用下发生移动而进行的放电。在电晕电极与接地电极之间施加高电压可使电晕电极周围空气或气体电离，在电极之间产生气态的离子流。如图 1-12 所示,离子流对进入到电晕电场中的所有颗粒带电影响很大，形状和粒度不同的绝缘体和导体均获得了非零的纯电荷。随着丝状电极带正电或负电，可以产生正电晕和负电晕。正电晕比较稳定，在几乎所有气体介质中都可产生正电晕，而且产生的发光颜色较淡。但是，负电晕只能在能提供电子吸着的气体中发生。两种电晕都有用途。负电晕产生较强电晕的放电电压更高。

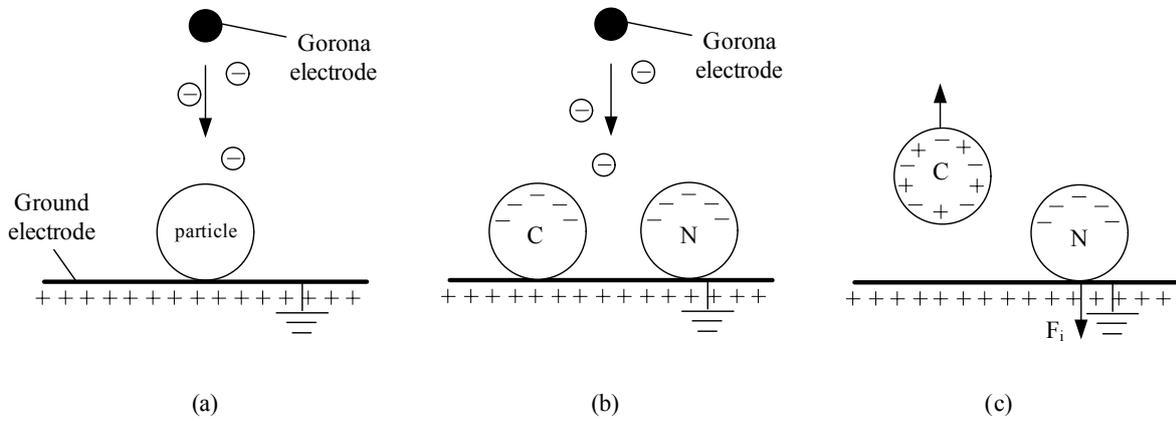


图1-12 颗粒电晕荷电过程: (a)未荷电; (b)正在电晕荷电; (c)已荷电
 Fig.1-12 Corona charge process: (a) No charge, (b) Charging, (c) Charged

2) 感应荷电: 在感应时, 未带电的导体、半导体或绝缘体颗粒在电场作用下开始极化。形成偶极子, 面向电极的一端带有与电极相反的电荷, 而另一端带有与电极相同的电荷。导体的电导率高, 电荷立刻均匀分布在整个表面上。对于绝缘材料, 由于电荷不能重新在其表面上分布, 所以持续极化。当颗粒与接地电极接触时, 迅速失去它的电荷, 而绝缘体失去电荷很慢, 甚至不失去电荷。如图 1-13 所示, 良导体和非良导体的感应荷电过程。

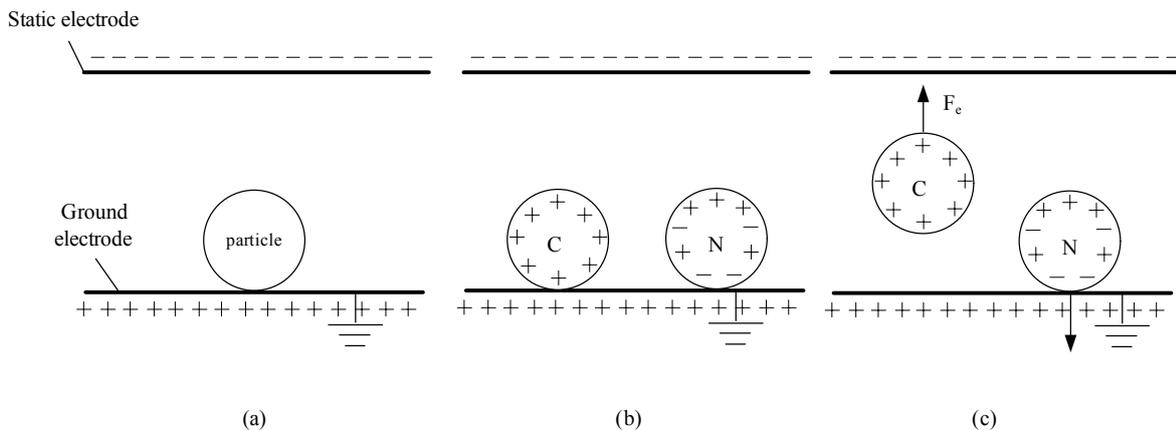


图1-13 颗粒感应荷电过程: (a)未带点; (b)正在感应荷电; (c)已荷电
 Fig.1-13 Induction charge process: (a) No charge, (b) Charging, (c) Charged

辊式高压静电分选机是利用曲率半径相差很大的电极之间施加高电压,形成不均匀电场,电晕电极附近发生电晕放电,从而使空气电离,产生大量的正、负离子,它们将分别向与之极性相反的电极运动,在电晕区以外的空间电荷-负离子和电子,它们在电场力作用下,向正电极(接地电极)高速运动,当碰到待分选的物料时,便失去自身速度附着在物料上,从而使物料荷电。导电性好的物料(金属颗粒)受到电晕作用将电荷传递给正极(接地电极),又由于感应带电与静电极带异种电荷,受静电极吸引。加之颗粒本身又受到离心力和重力的切向分力作用,致使导体颗粒从辊筒的前方落下,进入导体收集区。绝缘体(非金属颗粒)由于其导电性很差,获得的电荷很难通过转辊传递,即或传走一部分也是极少的,绝缘体表面的电荷与转辊表面产生“映像力”使颗粒吸在转辊表面上,随转辊运动至后方,被毛刷强制刷下,进入非导体收集区。实现导体颗粒与绝缘体颗粒的分离。

目前,该技术已应用于冶金选矿^[61,62]、药品分离、纤维选检、产品筛选、静电除尘,固体废弃物分离^[63-65],种子优选^[66]等很多方面。高压静电分选机可以分离尺寸小于 0.1 mm 的颗粒,甚至从粉尘中回收贵金属^[48]。

综上所述,相对于其他的处理方法,机械处理技术具有效率高、污染小、成本低、易于工业应用等显著优点。就前述的 5 种物理分选技术在工业中都有应用,甚至为了提高回收效率和回收的金属品位,可以将几种分离方法整合在一条回收生产线上,但综合各方法进行比较,可以发现:

1) 磁选只能分离出破碎废旧印刷电路板中的铁磁性物质,因此磁选只能是一种预分离处理;

2) 涡流分选在大多数的回收生产线上也有应用,用于回收粒度较大的金属,对于机械分离来说,各种材料能充分地单体解离是高效率分离的基础。废旧印刷电路板破碎到 0.6 mm 以下时金属基体基本上达到 100%的解离^[54],所以由于尺寸的限制,涡流分选也只能作为一种前处理工艺,以减低后续作业的压力;

3) 液体浮选技术和风力分选已在国内一些企业的废旧印刷电路板处理生产线上应用。但液体浮选技术和风力分选技术本身的不足也限制了设备的进一步推广,如摇床(液体浮选技术)处理技术会产生大量的污泥和废水等,而水中含有铜铅等金属,再次造成了环境污染。风力分选技术是二次污染相对少的分选方法,风选是利用密度差来达到金属与非金属分离的技术,当印刷电路板粉碎后的粒径很小时,金属的品位难以保证。

4) 对于破碎后的废旧印刷电路板,金属成分与非金属基板完全解离,物料的粒径小,多为粉尘状,颗粒形状各异包括:金属球、金属丝、金属片、非金属片、非金属

纤维以及不规则形状。从电选机的荷电、分选原理来看，破碎后废旧印刷电路板的特性完全符合高压静电分选的要求；而且高压静电分选工艺简便，设备易于操作，维修方便；设备运行时高压静电场能耗低；由于是干式作业，因此不存在废水污染及处理问题，节能减排，有利于环境保护和劳动保护。所以与其他物理方法相比，用高压静电方法对已破碎废旧印刷电路板进行分选更为合理。高压静电分选技术成为分选破碎后废旧印刷电路板的最佳处理技术。

1.4 高压静电分选的研究进展

1.4.1 颗粒荷电研究

多年来，关于高压静电处理技术已经有大量研究。其中电晕荷电机制的研究^[67-69]，包括电晕起晕条件的研究^[70,71]等，这些研究在前人的基础上，把已有的电晕荷电机制、公式方程以及前人在电晕荷电方面提出的一些理论应用到高压静电分选机上，为计算颗粒的电晕荷电量，空间电荷量^[72]等提供了理论基础。感应荷电^[73-75]是导体颗粒在高压静电场作用下主要的荷电方式，感应荷电机制的研究对导体颗粒带电量的计算以及其所受感应电场力的计算有重要意义，Y. Wu 等利用几个荷电模型对颗粒的感应荷电进行了研究^[76,77]，并通过实验对模型作了验证。为颗粒感应荷电的研究开辟了道路。

1.4.2 电场及空间电荷分布研究

由于高压静电分选的电场分布不均匀，电场强度的计算和模拟是研究的难点。L. Dascalescu 等^[78,79]提出用电荷模拟法(Charge Simulation Program)对空间电场进行近似计算，在高压静电分选机中，不均匀电场的计算方面做出了贡献。

Rafroiu 等^[79]，采用 Two-Loop 计算方法研究了离子化(电晕)电极和非离子化(静电)电极同时存在时电场及空间电荷的分布情况(图 1-14)，并证实了空间电荷对电场的影响并给出了电晕电流随电压的变化趋势。同时认为，离子化(电晕)电极和非离子化(静电)电极的同时存在，增大了电晕电极的起晕电压。

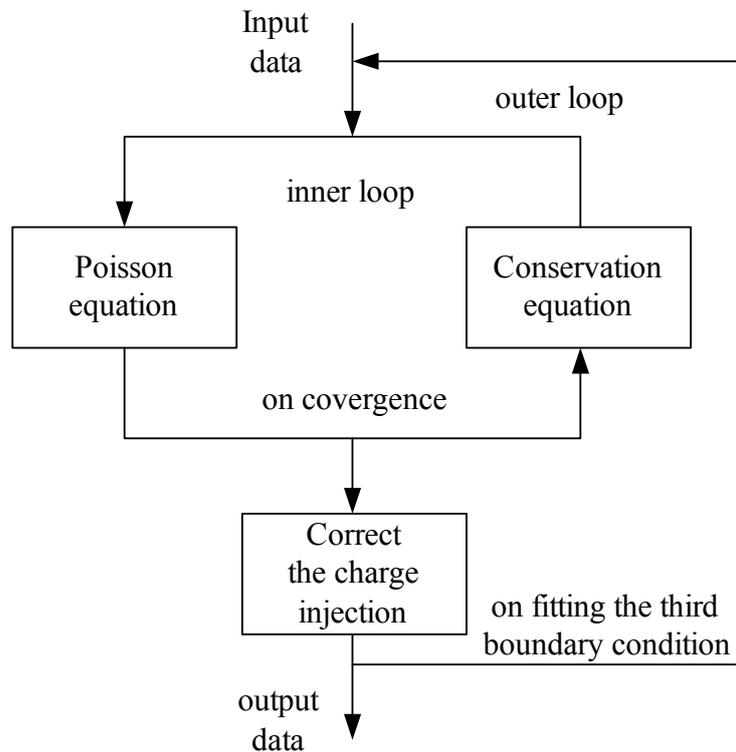


图 1-14 静电分选机中电晕电极的电场及空间电荷的分布计算模型

Fig.1-14 Block diagram of the algorithm for the computation of the electric field and of the space charge in wire electrode arrangements for electrostatic processes applications

Caron等^[80]采用了改进的逼近非线性算子(approximation of non-linear operators)算法对电晕-静电联合作用场进行了模拟，解决了系统的非线性微分方程问题。实验证实能够较好的模拟电晕电流随电压的变化。L. M. Dumitran 等^[72]在上述研究的基础上，采用图形投影法（图1-15）讨论了离子化(电晕)电极和非离子化(静电)电极同时存在时，接地电极上的电场强度分布和空间电荷密度分布，通过数值计算建立模型并可预测电流随电极电压的变化以及离子电流在接地电极上的分布。模型的精确性得到了实验数据的支撑，可以实现对不同条件下静电分选的电极配置优化。

文献^[81-83]在研究颗粒受力的基础上对分选过程模拟，通过对过程模拟前提条件的探讨^[84]，结合模拟点合法，对颗粒的运动过程及其轨迹进行了模拟^[85-87]，对颗粒的运动轨迹进行模拟，对理解和优化静电处理技术是十分有意义的。

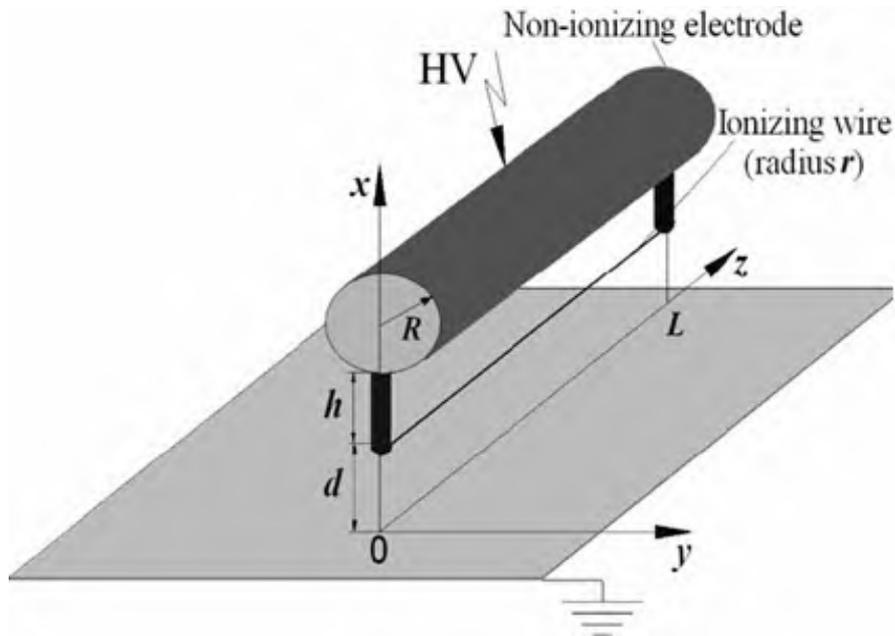


图 1-15 电晕-静电电极系统

Fig.1-15 Investigated corona-electrostatic electrode system

1.4.3 电选机工艺参数研究

Samuila 等^[88]，利用表面荷电模型(Superficial Charge Simulation Program)^[89]给出了在电晕电极角度变化的情况下，辊轴电极表面电场强度分布以及电晕电极附近空间电场强度分布（图 1-16）。并利用 RSM(Response Surface Methodology)^[90]研究了电晕电极位置对分选效果的影响。认为，通过利用 RSM 对电晕电极的位置条件进行控制，能够有效的优化辊式高压静电机的分选效果，提高金属的回收率并减小中间混合物产量。

一些影响处理过程的因素在相关文献也有所报道^[91,92]，如：待处理物料的湿度过大时，收集金属的品位会降低，因此对于湿度过大的待处理物料应该进行烘干处理，以达到最佳的分选效果^[93]；阴极高电压更利于提高金属品位^[94]；不同电晕电极类型的比较^[95]等，为以后的研究指出了方向。

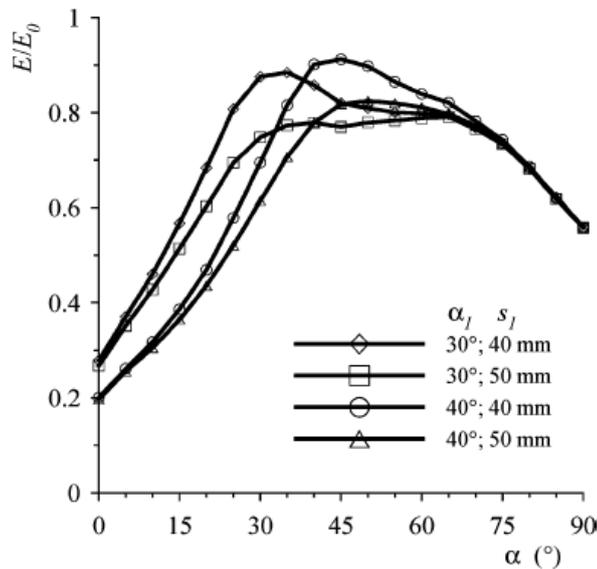


图 1-16 四种不同电晕电极配置下电场强度分布计算结果

Fig.1-16 Computed electric field strength at the surface of the roll electrodes function of the position angle for four positions of the corona electrode

1.5 论文研究内容与目标

综上所述，虽然静电分选在选矿中进行应用^[61,62,96,97]，在破碎废旧电路板的金属与非金属有初步的研究结果报道^[98]，并有大量关于静电分选理论的研究报告^[61-98]，但高压静电分离的基础研究仍不够系统。由于电路板的特性与矿物存在很大差别。在废旧印刷电路板的处理与资源化回收工艺中，对于废旧印刷电路板的破碎特性，及利用高压静电分选机分选破碎后废旧印刷电路板颗粒的过程中仍存在研究空间，主要有：

1) 高压静电分选机电极之间非均匀电场的分布情况、不同电极参数对电场的影响、电场对分选效果的影响。不同物理性质(密度、导电性、粒度等)的破碎印刷电路板混合物料在高压静电场中所带的静电量，所受电场力等的研究。

2) 破碎后废旧印刷电路板颗粒的物料特性，以及物料在分选过程中的受力模型，针对颗粒运动的动力学分析，颗粒运动轨迹的模拟，尚待研究。

3) 影响分选效果的因素，加料速度、加料量、分离辊的转速和直径大小、电晕电极和静电极的电压、电流等电选机各工艺参数的耦合关系，最优的工艺参数有待探索。

4) 如何利用高压静电分选原理对几种混合金属颗粒进行金属间分离提纯也是值得研究的问题。

为此,本研究把资源、材料、机械工程、计算机科学等多学科与环境工程进行交叉,利用交叉学科的优势自主研发的破碎机与高压静电分选机对废旧印刷电路板进行资源化处理。研究废旧印刷电路板的破碎特性;利用数学模拟软件 MATLAB 模拟分选空间的电场分布;通过 MATLAB 编程模拟金属颗粒的运动轨迹;由非金属颗粒的动力学分析得到高压静电分选机的转辊的转速模型;对电选机应用于分离混合金属颗粒领域进行探索;最终实现了可工业应用的处理废旧印刷电路板的成套生产线。主要研究内容如下:

1) 废旧印刷电路板的破碎:针对废旧印刷电路板的特性研究破碎机械的选择,破碎机的破碎原理分析,破碎工艺参数的确定以及对破碎现象的分析;利用自制的破碎机对废旧印刷电路板进行破碎,研究破碎后混合物料特性。

2) 高压静电分选机的电场分布模拟:根据高压静电分选机的机械结构,利用数学模拟软件 MATLAB 中的偏微分建模工具箱(PDE)对高压静电分选机内部电场分布进行模拟,研究机械结构对电场强度的分布的影响。定性的得到高压静电分选机的最优化的机械结构。

3) 高压静电分选机的最优工艺参数:对破碎废旧印刷电路板混合颗粒进行受力分析,利用 MATLAB 编程模拟金属颗粒的运动轨迹,得到优化的工艺参数;并结合非金属颗粒的动力学分析,确定临界转速条件;

4) 建立混合金属颗粒的分离机制:利用高压静电分离原理,设计一种混合金属颗粒的分离机制,建立不同金属分离的工艺参数组合模型,为高压静电分选机开拓应用领域。

5) 处理废旧印刷电路板成套生产线:开发处理废旧印刷电路板的成套生产线技术,达到高效、节能、无污染的处理废旧印刷电路板,科研成果成功的转化为工业产品。

参考文献

- [1] D. Boghe, Electronic Scrap: A Growing Resource, *Precious Metals*, 2001, (7): 21–24.
- [2] O. Danielle, Japanese recycling law takes effect, *Waste Age*, 2001, 32 (6): 25–26.
- [3] 王震, 马鸿发, 上海市电子废弃物产生量及管理对策初探[J], *再生资源研究*, 2003, (3): 16–18
- [4] 夏志佳, 电子垃圾污染与防治对策, *黑龙江环境通报*, 2003, (2): 24–25
- [5] R. Windmer, H.O., Krapf, D.S., Khetriwal, M. Schnellmann, H. Boni, Global perspectives on e-waste, *Environmental Impact Assessment Review*, 2005, (25): 436–458.
- [6] A. Bernardes, I. Bohlinger and D. Rodriguez, Recycling of printed circuit boards by melting with oxidizing/reducing top blowing process. In: B. Mishra, Editor, *Proceedings of sessions and symposia sponsored by the extraction and processing division Orlando, FL, USA, 9–13 February 1997*, TMS (1997): 363–375.
- [7] 吴峰, 浅论废弃电路板综合利用的意义, *环境保护*, 2000, (12): 43–44
- [8] 国家发展改革委, 《废弃家电及电子产品回收处理管理条例》(征求意见稿, 2004年9月17日).
- [9] 赵肖峰, 广东电子垃圾里淘“金”, *再生资源研究*, 2001, (1): 46–48
- [10] K. Brodersen, D. Tartler, B. Danzer, Scrap of electronics A challenge to recycling activities, *IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, 1994, (5): 174–176.
- [11] J. Linton, Electronic products at their end-of-life: option and obstacles, *Journal of Electronics Manufacturing*, 2000, 9 (1): 29–40.
- [12] 顾帼华, 戚云峰, 废弃印刷电路板的粉碎性能及资源特征, *中国有色金属学报*, 2004, 14 (6): 1037–1041
- [13] T. Lehner, Integrated recycling of non-ferrous metals at Boliden Ltd, Rönnskär Smelter, *IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, 1998, 42–47.
- [14] 和田安彦, 三浦浩之, 中野加度子等, 需要考虑手机材料循环利用的生态设计, *都市と废弃物*[日], 2001, 31 (30): 70–75
- [15] J.B., Legarth, Environmental decision making for recycling options, *Resources, Conservation and Recycling*, 1997, (19): 109–135.
- [16] 马俊伟, 王真真, 杨志峰, 聂永丰, 白庆中, 电选法回收利用废印刷线路板, *环境污染治理技术与设备*, 2005 (7) : 63–66
- [17] J. Cui, E. Forssberg, Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 99 (3): 243–263.

- [18] 姜宾延, 吴彩斌等, 电子垃圾的危害及其机械处理技术现状, 再生资源研究, 2005, (3): 23-26
- [19] S. Zhang, E. Forssberg, Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap, Resources, conservation and Recycling, 1997, (21): 247-269.
- [20] B.W., Dunning, Jr., Precious Metals Recovery from Electronic scrap and solder Used in Electronics Manufacture, Precious Metals Recovery Low Grade Resource, IC 9059 (Washington, D, C.: U. S. Bureau of Mines, 1986), 44-56.
- [21] V.N., Bredikhin, A.I., Shevelev, Eddy Current Classification of Nonferrous Metal Scrap, Tsvetn, Metal, 1986, (12): 75-79.
- [22] Lu, M.X., Zhou, G.H., Recover metals from electronic scrap by dry Separation. In: Chen Q R, Tanaka Z, Dry Separation Science and Technology, Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2002, (7): 259-262.
- [23] Cao, Y.J., Zhao, Y.M., Wen, X.F., et al, The dry separation technology of WEEE, In: Chen Q R, Tanaka Z. Dry Separation Science and Technology, Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2002, (7): 268-277.
- [24] Y. Masuda, R. Miyabayashi, H. Yamaguchi, Japan Kokai Tokyo Koho [P]. JP 6311627[8811626] (CI.C22B11/02), 1988.
- [25] Y. Masuda, R. Miyabayashi, H. Yamaguchi. Japan Kokai Tokyo Koho [P]. JP 6311627[8811627] (CI.C22B11/02), 1988.
- [26] H.B., Salibury, L.J., Duchene, J.H., Bilrey, Report of Inestgation, R I8561 [J]. Washington, D C..U. S.Bureau of Mines. 1981.
- [27] Sum, Elaine Y.L., The recovery of metals from electronic scrap, Journal of Metals, 1991, (43): 53-68.
- [28] J.E., Hoffmann, Recovering precious metals from electronic scrap, Journal of Metals, 1992, (44): 43-48.
- [29] 洪大剑, 张德华, 邓杰, 废印刷电路板的回收处理技术, 云南化工, 2006, 33 (1) : 31-34
- [30] N. Menad, B. Bjorkman, E.G., Allain, Combustion of plastics contained in electronic and electronic scrap, Resources, Conservation and Recycling, 1998, 24 (1) : 65-85.

- [31] Anna O.W. Leung, William J. Luksemburg, Anthony S. Wong, Ming H. Wong, Spatial distribution of polybrominated diphepyl ethers and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in soil and combusted residue at Guiyu, an electronic waste recycling site in southeast China, *Environmental Science and Technology*, 2007, (41): 2730-2737
- [32] The High-Tech Trashing of Asia, February 25, 2002, Prepared by: The Basel Action Network (BAN), Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC), <http://www.ban.org/E-waste/technotrashfinalcomp.pdf>
- [33] H.E., Hilliard, B.W., Dunning, Report of Investigation, RI8940 [J]. U. S. Bureau of Mines, 1981.
- [34] K. Scott, Chen X., J.W. Atkinson, M. Todd, R.D., Armstrong, Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit boards, *Resources, Conservation and Recycling*, 1997, 20 (1): 43–55.
- [35] A.X., Sokirko, Y.I., Kharkats, A possible mechanism for the increase in limiting current of copper electrode position from nitrate solutions, *Soviet Electrochem*, 1990, 26 (1): 36–40.
- [36] L.H., Madkour, Electride position of lead and its dioxide from Egyptian carbonate ore residuum, *Bull. Electrochem*, 1996, 12 (2): 234–236.
- [37] K. Gloe, P. Muehl, M. Knothe, Recovery of Precious Metals from Electronic Scrap, in *Particular from Waste Products of the Thick-layer Te chnique Hydrometallurgy*, 1990, (25): 99–110.
- [38] Ginn R, Barnce BA. *Anal Chem*, 1986, (66): 527–571.
- [39] 周全法, 朱雯, 废电脑及其配件中金的回收[J], *中国资源综合利用*, 2003, (7): 315-35
- [40] 胡天觉, 曾光明等, 从家用电器废物中回收贵金属. *中国资源综合利用*, 2001, (7): 12-15
- [41] P. Quinet, J. Proost, A. Van Lierde, Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. *Minerals and Metallurgical Processing*, 2005, 22 (1): 17–22.
- [42] H. Brandl, R. Bosshard, M. Wegmann, Computer-munching microbes: metal leaching from electronics scrap by bacteria and fungi, *Hydrometallurgy*, 2001, 59 (2-3): 319–326.
- [43] M.S., Hahn S. Willscher, G. Stranbe, Copper leaching from industrial wastes by heterotrophic microorganisms, in: A.E.Torma, J. E.W ey, V.L.Lakshamam (Eds.), *Biohydrometal-lurgical Technology*. The Minerals, Metals & Material Society, Warrendale, 1993: 99–108.
- [44] K. Bosecker, Microbial recycling of mineral waste products, *Acta B iotechnol.*, 1987, (7): 487–497.
- [45] 杨显万, 陈庆峰, 郭玉霞, 微生物湿法冶金[M], 北京: 冶金工业出版社, 2003.(14)

- [46] 白庆中, 王晖, 韩洁, 聂永丰, 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): 84-89
- [47] M. Melchiorre, R. Jakob, Electronic Scrap Recycling, *Microelectronics Journal. IEEE*, 1996, (28): 8-10.
- [48] M. Melchiorre, R. Jakob, Nerartiges Verfahren zur Aufbereitung von Elektronikschrott-Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Rohstoffgewinnung, *G alvanotechnik*, 1996, 87 (12): 4136-4140.
- [49] Hennie Keldhizen, Bob Sippel, 开采废弃电子产品. 产业与环境, 1995, 17 (3): 7-11
- [50] 郭廷, 杰译, 日本《家电再生法》实施状况简介[J], 再生资源研究, 2002, (3): 7-9
- [51] Yokoyamas, Jim, Recycling of printed wiring board waste, *Proceedings of 1993 IEEE/Tsukuba. International Work Shop on Advanced Robotics, IEEE*, 1993: 55-58.
- [52] Mou peng, Wa Layiding, Xiang Dong, Gao jiangang, Duan Guanghong, A physical process for recycling and reusing waste printed circuit boards, *Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, May 10-13, 2004 , Scottsdale, AZ, United States: 237-242*
- [53] 胡利晓, 温雪峰, 刘建国, 李金惠, 聂永丰, 俞子达, 废印刷电路板的静电分选实验研究, 环境污染与防治, 2005, 27 (5), 326-329
- [54] S. Zhang, E. Forssberg, Intelligent liberation and classification of electronic scrap, *Powder Technology*, 1999, (105): 295-301.
- [55] [0]P.C., Rem, P.A., Leest, A.J.van den Akker, A Model for Eddy Current Separation, *Int. J. Miner. Process*, 1997, (49): 193-200.
- [56] E. [0]Schloemann, Separation of Nonmagnetic Metals from Solid Waste by Permanent Magnets I Theory, *J. Appl. Phys.*, 1975, (46): 5012-5021.
- [57] S. Zhang, E. Forssberg, B. Arvidson, W. Moss, Aluminum recovery from electronic scrap by High-Force R eddy-current separators, *Resources, Conservation and Recycling*, 1998, (23): 225-241.
- [58] 王文彬, 一种印刷电路板回收有价值物质的方法, 专利号 98105592.3
- [59] 聿振明, 高忠爱, 祁梦兰, 吴大宝, [0]固体废物的处理与处置, 北京: 高等教育出版社, 1993
- [60] S. Zhang, E. Forssberg, N. Menad, B. Bjorkman, Metals recycling from electronic scrap by air table separation - theory and application, *TMS Annual Meeting, EPD Congress*, 1998: 497-515.

- [61] A. Iuga, I. Cuglesan, A. Samuila, M. Blajan, D. Vadan, L. Dascalescu, Electrostatic separation of muscovite mica from feldspathic pegmatites, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2004, (40): 422–429.
- [62] I. I. Inculet, *Electrostatic Mineral Separation*, Research Studies Press, Wiley, Letchworth, England, New York (1984).
- [63] A. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, I. Csorvassy, V. Neamiu, Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals, *Journal of Electrostatics*, 1989, (4): 235–243.
- [64] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, L. Dascalescu, Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes, *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings*, 2001, 148 (2): 47–54.
- [65] S. Gotoh, Waste management and recycling trends in Japan, *Resources and Conservation*, 1987, (14): 15–28.
- [66] R. Morar, R. Munteanu, E. Simion, I. Munteanu, L. Dascalescu, Electrostatic treatment of bean seeds, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1999, (35): 208–212.
- [67] R. Morar, I. Suarasan, S. Budu, I. Ghizdavu, Monica Porca, L. Dascalescu, Corona discharge effects on some parasitical insects of cultured plants, *Journal of Electrostatics*, June 1997, (40-41): 669–673.
- [68] L. Dascalescu, A. Urs, L.M. Dumitran, A. Samuila, Charging of one or several cylindrical particles by monopolar ions in electric fields, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, March-April 2003, 39 (2): 362–367.
- [69] L. Dascalescu, D. Rafiroiu, A. Samuila, R. Tobazeon, Charging of insulating spheres on the surface of an electrode affected by monopolar ions, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Jan.-Feb. 1998, 34 (1): 35–42.
- [70] D. Rafiroiu, I. Suarasan, R. Morar, P. Atten, L. Dascalescu, Inception of corona discharges in typical electrode configurations for electrostatic processes applications, *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*, 1999, (1): 387–392.
- [71] D. Rafiroiu, I. Suarasan, R. Morar, P. Atten, L. Dascalescu, Corona inception in typical electrode configurations for electrostatic processes applications. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2001, 37 (3): 766–771.

- [72] L.M., Dumitran, L. Dascalescu, P. Atten, P.V., Notingher, Computational and Experimental Study of Ionic Space Charge Generated by Combined Corona–Electrostatic Electrode Systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2006, 42 (2): 378–384.
- [73] A. Iuga, M. Mihailescu, A. Cocis, L. Dascalescu, Particle charge neutralization in roll-type electroseparators, *Journal of Electrostatics*, June 1997, (40-41): 639–644.
- [74] M. Sugihara, L. Dascalescu, G. Touchard, H. Romat, P.O., Grimaud, S. Watanabe, Charge generated by impact of balls on a metallic wall, *Journal of Electrostatics*, July 1995, 35 (1): 125–132.
- [75] A. Urs, A. Samuila, A. Mihalcioiu, L. Dascalescu, Charging and discharging of insulating particles on the surface of a grounded electrode, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2004, 40 (2): 437–441.
- [76] Y. Wu, G.S.P., Castle, I.I., Inculet, S. Petigny, G. Swei, Induction charge on freely levitating particles, *Powder Technol.*, 2003, (135–136): 59–64.
- [77] Y. Wu, G.S.P., Castle, I.I., Inculet, Induction Charging of Granular Materials in an Electric Field, *Transactions On Industry Applications*, September/October 2005, 41 (5): 2366-2372
- [78] R. Morar, L. Dascalescu, A. Iuga, Modelling of high-intensity electric fields - a method to improve the design of corona-electrostatic separators. *Journal of Electrostatics*, April 1989, (23): 445–452.
- [79] D. Rafiroiu, C. Munteanu, R. Morar, A. Meroth, P. Atten, L. Dascalescu, Computation of the electric field in wire electrode arrangements for electrostatic processes applications, *Journal of Electrostatics*, May 2001, (51-52): 571–577.
- [80] A. Caron, L. Dascalescu. Numerical modeling of combined corona–electrostatic fields. *Journal of Electrostatics*, 2004, 61 (1): 43–55.
- [81] N.J., Felici, Forces et charges de petits objets en contact avec une electrode affectee d’un champ electrique, *Rev. Gen. Electr.*, 1966, (75) : 1145–1160.
- [82] L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazeon, P. Atten, R. Morar, A. Iuga, M. Mihailescu, A. Samuila, Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1995, 31 (5): 947–956.
- [83] L. Dascalescu, R. Tobazeon, P. Atten, Behaviour of conductive particles in corona-dominated electric fields, *Industry Applications Society Annual Meeting, 1992.*, Conference Record of the 1992 IEEE 4-9 Oct, 1992: 1479–1486.

- [84] D. Rafiroiu, R. Morar, P. Atten, L. Dascalescu, Premises for the mathematical modeling of the combined corona-electrostatic field of roll-type separators, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2000, 36 (5): 1260–1266.
- [85] L. Dascalescu, M. Mihailescu, Mathematical modelling of conductive particle movement in d.c. corona fields, *Journal of Electrostatics*, May 1993, (30): 297–306.
- [86] S. Vlad, A. Iuga, L. Dascalescu, Numerical computation of conducting particle trajectories in plate-type electrostatic separators *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Jan.-Feb. 2003, 39 (1): 66–71.
- [87] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, L. Dascalescu, Numerical modelling of conductive particle trajectories in roll-type electrostatic separators, *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, 2-6 Oct. 2005*, (4): 2601–2606.
- [88] A. Samuila, A. Urs, A. Iuga. Optimization of Corona Electrode Position in Roll-Type Electrostatic Separators. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2005, 41 (2): 527-534.
- [89] P.L., Levin, A.J., Hansen, D. Beatovic, Aunified boundary-element finite-element package, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 1993, 28 (2): 161–167.
- [90] F. Aman, R. Morar, R. Köhnlechner, High-voltage electrode position: a key factor of electrostatic separation Efficiency. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2004, 40(3): 905–910.
- [91] A. Samuila, A. Iuga, R. Morar, R. Tobazeon, L. Dascalescu, Factors which affect the corona charging of insulating spheres on plate and roll electrodes, *Journal of Electrostatics*, June 1997, (40-41): 377–382.
- [92] R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu, A. Samuila, Factors which influence the insulation-metal electroseparation, *Journal of Electrostatics*, May 1993, (30): 403–412.
- [93] L. Dascalescu, A. Samuila, A. Iuga, R. Morar, I. Csorvasy, Influence of material superficial moisture on insulation-metal electroseparation, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1994, 30 (4): 844–849.
- [94] V. Neamtu, A. Iuga, R. Morar, I. Suarasan, L. Dascalescu, Influence of high-voltage polarity on insulation-metal electroseparation, *Journal of Electrostatics*, May 1993, (30): 423-432.
- [95] L. Dascalescu, A. Samuila, D. Rafiroiu, A. Iuga, R. Morar, Multiple-needle corona electrodes for electrostatic processes application, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1999, 35 (3): 543–548.

- [96] H.R.马诺切赫里等, 电选法应用实践评述(II), 国外金属矿选矿, 2002, (11): 4-12
- [97] R.科恩勒彻, M.博茨, 静电分选及其在处理各种再生物料混合物的工业应用, 国外金属矿选矿, 1998, (9): 22-25
- [98] 温雪峰, 范英宏, 赵跃民, 用静电选的方法从废弃电路板中回收金属富集体研究, 环境工程, 2004, 22 (2): 78-81

第二章 技术路线与研究方法

2.1 引言

本研究的技术路线及研究方法如图 2-1 所示。首先对破碎工艺进行研究；破碎后混合物料的特性对后续分选的影响效果明显，混合物料的特性分析十分关键；利用计算机模拟辅助高压静电分选过程的仿真，对金属颗粒与非金属颗粒在分选过程中的行为进行探索；并尝试利用高压静电分选机对混合金属颗粒进行分离。由整个技术路线形成了资源回收废旧印刷电路板的成套工艺流程，最终转化为成套的生产设备，投入工业应用，为废旧印刷电路板处理工艺产业化奠定基础。

2.2 原材料

本文所选的实验材料，废旧印刷电路板由两大类组成。如图 2-2 所示，一类来自上海市闵行废品处理站(Type-A),主要由废旧电脑，打印机，电话等家用电器中的电路板组成，电路板上带有电子元件。另一类来自上海华丰电路板厂(Type-B)，由印刷电路板生产线上的边角料及次品组成，为无任何元器件的覆铜板。目前世界上的废旧印刷电路板主要由这两种类型组成。两类电路板上不含贵金属（金、银、铂等），实验材料的选择具有代表性。

2.3 技术路线与研究方法

2.3.1 拆解

拆解是一种系统方法，即从电子废弃物中去除特定的成份或部件（也就是部分拆解），或将产品完全拆解成各种元件（也就是完全拆解）^[1]，再根据各种元件不同的物理特性，如磁性、密度、导电性等进行分离。经过拆解，含有有害物质的电子元件（如铅电池、电容器等）可以单独处理，防止污染后续工艺，减少处理成本；而高纯

度的材料（如显示器外壳、玻璃等）可以得到富集，减少再加工成本；具有一定价值且仍可以继续使用的元件（如计算机内存条等）可以用于修理或新设备生产；某些需要采用特殊方法单独处理的元件（如显像管等）则单独进行后续处理^[2]。

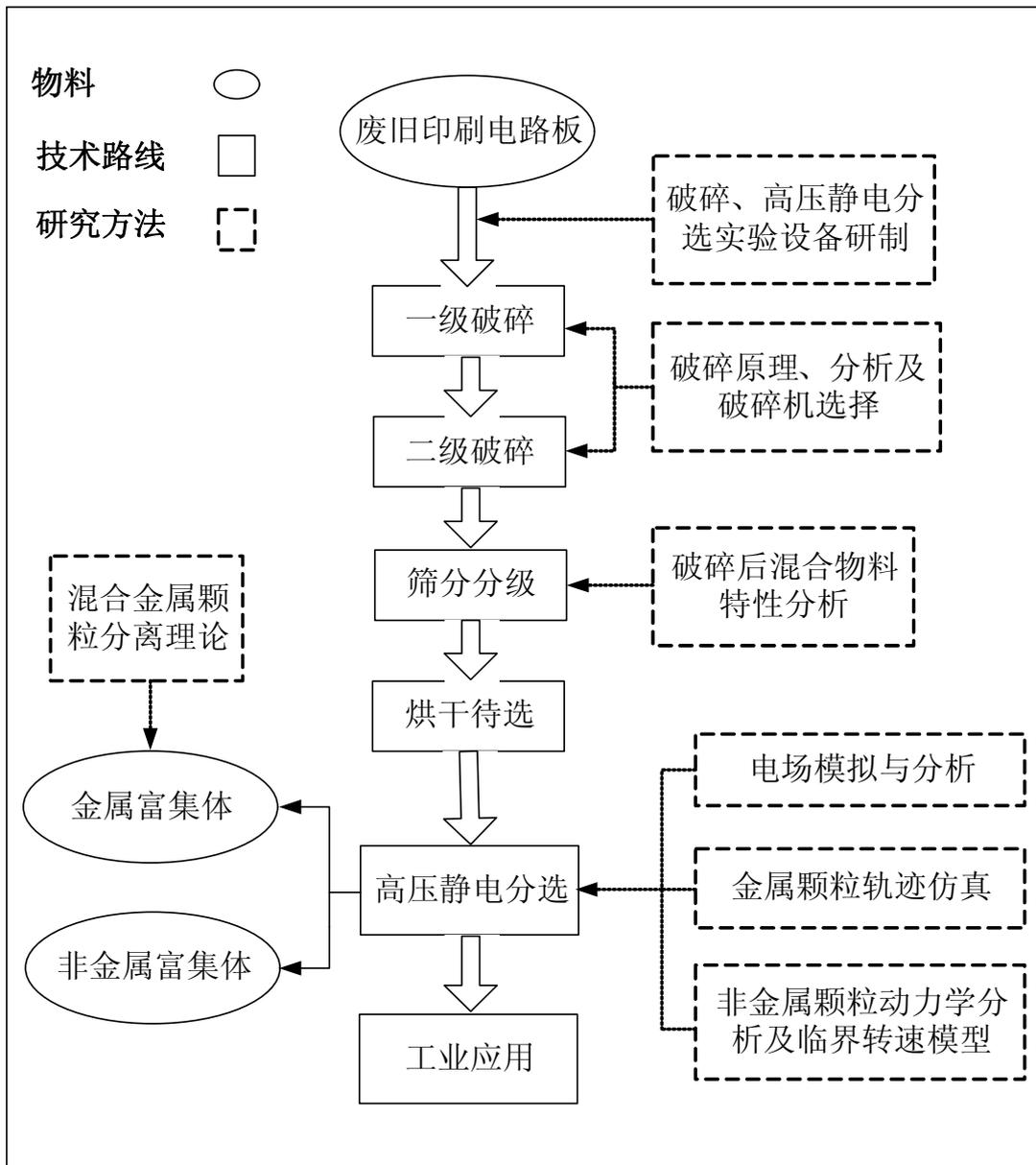


图 2-1 本论文研究方法、技术路线

Fig.2-1 Experimental procedures used in this paper

Type-A



(a)

Type-B



(b)

图 2-2 废旧印刷电路板, (a)电器中废板, (b)电路板厂废板

Fig.2-2 Waste printed circuit boards (PCB), (a) from waste of electric and electrical equipments, (b) from PCB making factory

本文所采用的原料如图 2-2 所示,来自废旧电器中的印刷电路板表面元器件众多,必须经过手工拆解含有有毒物质的电子元件(图 2-3),再进行后续处理;而来自电路板厂的印刷电路板表面无元器件,无需拆解。

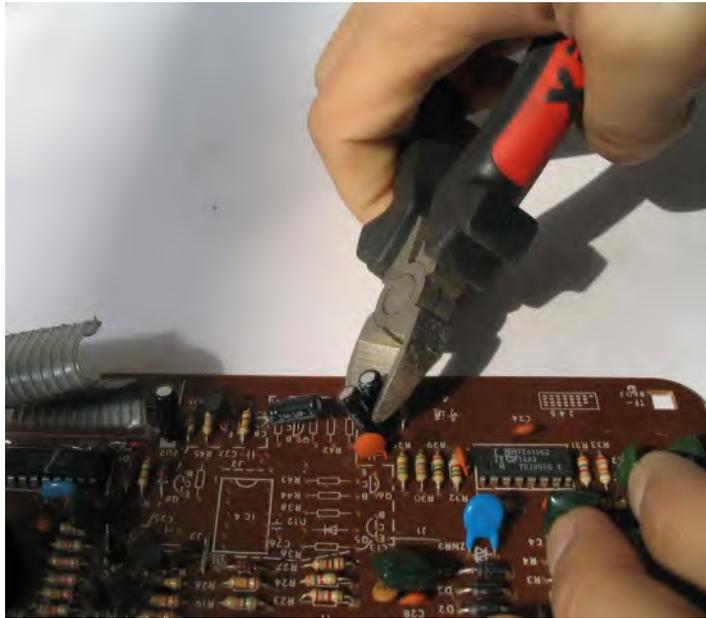


图 2-3 手工拆解电路板上的电容

Fig.2-3 Dismantling the capacitors from waste PCBs

2.3.2 两级破碎

利用外力克服固体质点间的内聚力而使大块固体分裂成小块的过程称为破碎。破碎是进行后续处理的一种预处理方法。对于机械处理而言，破碎可以使废旧电路板中的各种成分最大限度的分离，实现金属和非金属单体解离，为分选的有效进行打下基础，是非常关键的一步。本研究采用自制的两级破碎系统对废旧印刷电路板进行破碎，详见第三章。

2.3.3 筛分分级与烘干

经过两级破碎后，对混合物料进行筛分，称重及烘干处理。混合物料的粒径分级是分析废旧印刷电路板破碎特性的基础。同时也为研究高压静电分选中物料粒径对分选效果的影响提供条件。本研究采用电子振筛机对混合物料分级。在分选之前，物料必须经过烘干处理(100°C, 3h)确保金属颗粒与非金属颗粒表面干燥，防止水汽影响分选效果。所用设备(图 2-4)参数如下：

◆ 8411 型电子振筛机

7 级粒度分布，1 级(+1.2 mm)，2 级 (-1.2+0.8 mm)，3 级 (-0.8+0.6 mm)，4 级

(-0.6+0.45 mm), 5 级 (-0.45+0.3 mm), 6 级 (-0.3+0.15 mm), 7 级 (-0.15 mm)

◆ BS 600 电子天平

量程: 500 g; 精度: 0.1 g

◆ 101A-6 电热鼓风恒温干燥箱

温度调节范围: 0-300 °C



图 2-4 筛分、称量与烘干实验设备: (a) 8411 型电子振筛机; (b) BS 600 电子天平; (c) 101A-6 电热鼓风恒温干燥箱

Fig.2-4 Equipments for screening, weighing and drying: (a) electric screen, (b) electric balance, (c) dry oven

2.3.4 高压静电分选

高压静电分选是本研究的核心。针对破碎后电路板混合颗粒的特性，自制高压静电分选机，详见第三章。分选机供电系统最高电压 30 kV；采用振动加料方式确保均匀给料；电极系统由丝状电晕电极，圆柱状静电极组成，各电极位置可二维调节，方便不同电极参数的实验研究；转辊电极表面镀铬处理，转速可调(10 rpm-1000 rpm)；电选机内设有多个收集槽，方便取料称重。

参考文献

- [1] K.E., Moore, A. Gungor, S.M., Gupta, Petri net approach to disassembly process planning, Comput. Ind. Eng, 1998, (35): 165–168.
- [2] G. Frohlich, U. Kramer, Configuration of a dismantling and processing plant for the recycling of electrical equipment and electronic scrap, Proceeding of the XX IM PC, 1997: 253–260.

第三章 废旧印刷电路板的破碎与高压静电分选设备研制

3.1 引言

通过第一章的分析，由破碎、筛分和高压静电分选三部分组成的处理废旧印刷电路板的工艺最为合理。虽然该技术已经发展起来^[1,2]，但相关研究还不够系统与完善。为了系统全面的发展该技术，本文自行研制用于破碎与高压静电分选废旧印刷电路板的小型实验设备，并实现废旧印刷电路板的破碎与高压静电分选工艺。该技术的开发将为废旧印刷电路板的资源化、无害化处理奠定基础。

3.2 破碎设备的研制方案

3.2.1 破碎机的选择

按功能不同破碎机械包括破碎机和粉磨机两类。按构造与工作原理的不同，常用的破碎机有颚式破碎机、锤式破碎机、圆锥破碎机、反击式破碎机和辊式破碎机等；常用的粉磨机有球磨机、自磨机、风扇磨、振动磨和气流磨等^[3]。

通常情况下，依据物料硬度、强度、粘结性等性能，以及对待处理物料的粒度组成及最大粒度等要求，对破碎机械进行选择。与矿石、塑料等相比，电路板有其独特的破碎特性：

1) 废旧印刷电路板经预处理后主要由强化树脂板和树脂板上附着的铜线等金属及电子器件组成，硬度较高，韧性较强（图 3-1）。所以电路板在挤压力作用下不易破碎，而在剪切力和冲击力作用下更容易破碎。

2) 大多数电路板的基板中有纤维结构，这种纤维结构在剪切作用下更容易被破坏。

常规破碎机中颚式破碎机、圆锥破碎机和辊式破碎机主要依靠挤压力对物料进行破碎，其粉碎产品中细粒级含量很低，很难达到回收物料充分解离的效果^[4]。以剪切力作为主要作用力的破碎机，更适合电路板的破碎。通过对本研究所用电路板特性的进一步分析，同时由于：

1) 物料的二维尺寸很大，不能直接用粉磨机进行粉碎；

2) 破碎后要求物料颗粒粒度均匀，单一破碎难以达到预期效果；

3) 破碎后物料粒度尺寸要求应在 $-3+0.3\text{ mm}$ 范围^[5,6], 单一剪切式破碎机难以达到要求。

因此本研究采用二级破碎方法，即一级粗粉破碎和二级细粉磨碎过程相结合。通过对各种破碎机的破碎方式进行比较，在粗粉破碎过程选用施力方式以劈碎和磨碎为主的自制剪切式旋转破碎机；在细粉过程中，采用施力方式主要为冲击和磨削的自制冲击式旋转破碎机。

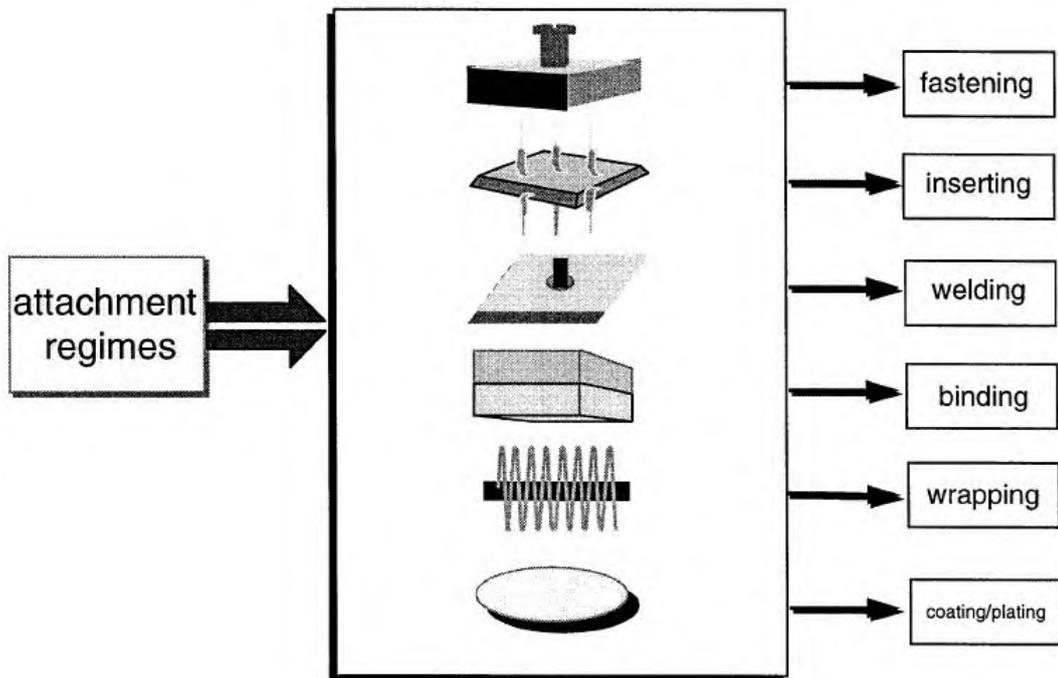


图 3-1 电路板上元器件的连接方式

Fig.3-1 Attachment regimes of materials encountered in electronic scrap

3.2.2 破碎原理

物料的最终粒径及粒度分布由细粉即冲击式破碎机的粉碎过程决定。对细粉过程工艺参数的研究可以更好的控制物料粉碎过程，并对破碎机的结构与参数进行改进。冲击式破碎机的结构示意图及物料在冲击式破碎机内的破碎过程如图 3-2 所示。冲击式破碎机的主要工作部件为带有锤头的转子。转子由主轴、圆盘、销轴和锤子组成。物料自上部给料口入机内，受高速运动的锤头打击、冲击、剪切、研磨作用而粉碎。在转子下部，设有筛板，粉碎物料中小于筛孔尺寸的颗粒通过筛板排出，大于筛孔尺

寸的粗颗粒阻留在筛板上继续受到锤头的打击和研磨，最后通过筛板排出机外。该粉碎机对物料粉碎的方式主要有如下形式：

- 1) 高速旋转的锤头对物料实施的冲击粉碎作用及磨削作用；
- 2) 颗粒与衬板间的高速碰撞粉碎作用；
- 3) 颗粒间的碰撞粉碎作用。

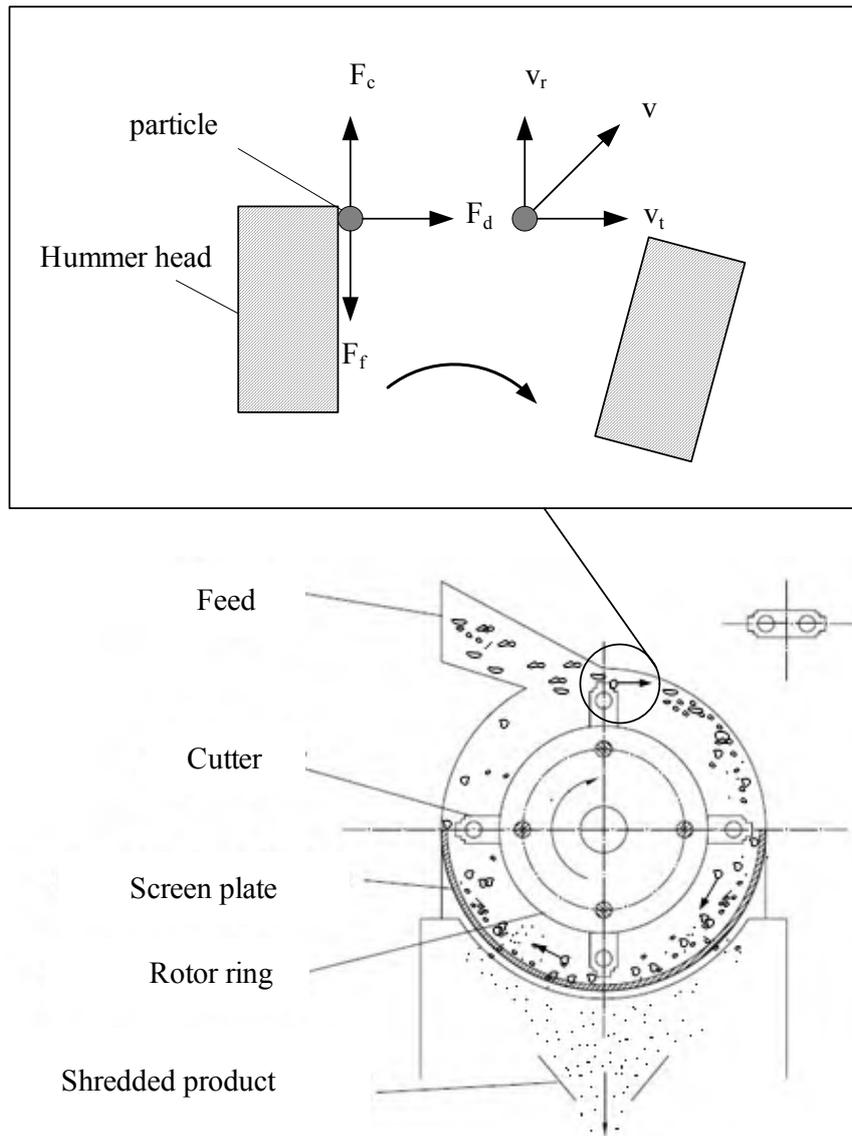


图 3-2 冲击式破碎机结构示意图及物料在破碎机内的受力过程

Fig.3-2 Structure chart of hammer grinder and the process of particle pulverization

图 3-2 描述了物料颗粒的受力状况, F_c 为离心作用力, F_f 为颗粒与锤头间摩擦力, F_d 为物料颗粒在受锤头撞击瞬间所受的撞击力。根据动量定理, 可以近似计算 F_d 。转子的转速为 n (rpm), 转子半径为 r , 则锤头瞬间线速度为 $2\pi rn/60$ 。假设未撞击前颗粒的切向速度为 0, 撞击后瞬间切向速度 v_t 与锤头线速度一致。撞击在瞬间完成, 由转速 n 知, 转子每转一圈的时间为 $60/n$ (min), 可假定撞击时间近似为锤头越过在圆周中以最小维度顺序排列一个单体的时间, 即 $t = d60/2\pi rn$, d 为颗粒的最小维度, 既最小直径 (电路板的厚度), 物料颗粒在受锤头撞击时:

$$\begin{aligned} dv &= \frac{2\pi rn}{60} \\ dt &= \frac{d60}{2\pi rn} \end{aligned} \quad (3-1)$$

由冲量公式 $F = m \frac{dv}{dt}$, 得式 3-2,

$$\frac{60dF_d}{2\pi rn} = \frac{m2\pi rn}{60} \quad (3-2)$$

式中, m 为单体颗粒质量。则单体颗粒在冲击式破碎机中所受撞击力为:

$$F_d = \frac{m(2n\pi r)^2}{60 \times 60d} = \frac{m(nr)^2}{91.28159 \times d} \quad (3-3)$$

式中, n 为转子的当前转速, 由式 3-3 得到物料颗粒所受 F_d 、转速 n 及转子半径 r 的函数关系。冲击式破碎机进料的单体物料颗粒尺寸为 $0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} \times 0.002 \text{ m}$ (电路板厚约为 0.002 m) 时, 经计算物料的松散密度 δ 为 615 kg/m^3 , 松散系数为 1.21, 可得单体物料颗粒的质量。撞击力 F_d 与破碎机转速 n 及转子半径 r 关系如图 3-3。

从图 3-3 可见, 当转速 n 为 1440 rpm, 转子半径 r 为 0.2 m, 可得单体物料颗粒在冲击式破碎机中所受的撞击力为 68.15 N, 相当于 6.95 公斤力作用在面积仅为 3.5 mm^2 (锤刃宽 7 mm) 的物料颗粒表面, 计算可得压强为 19.4714 Mpa, 每平方米受力为 9.735 kN, 电路板的抗冲击强度^[7]约为 1176 J/m^2 , 当超过电路板基板的冲击强度时, 即可达到物料的完全破碎。

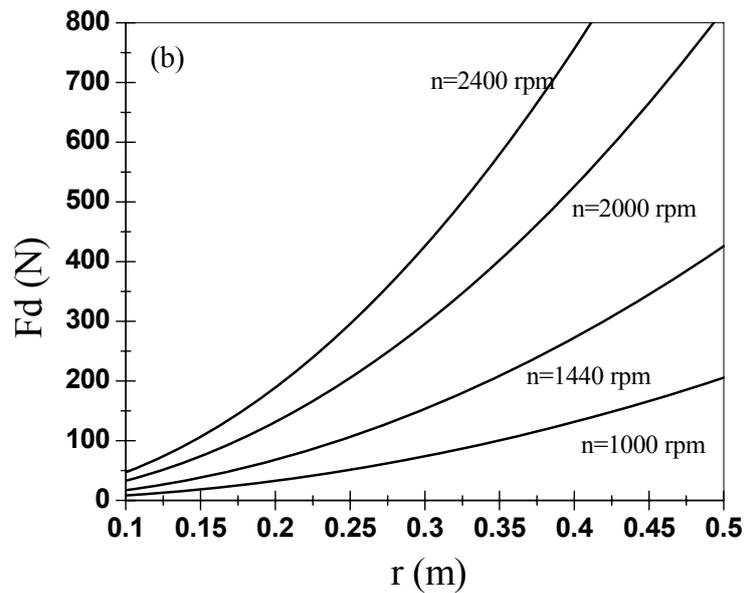
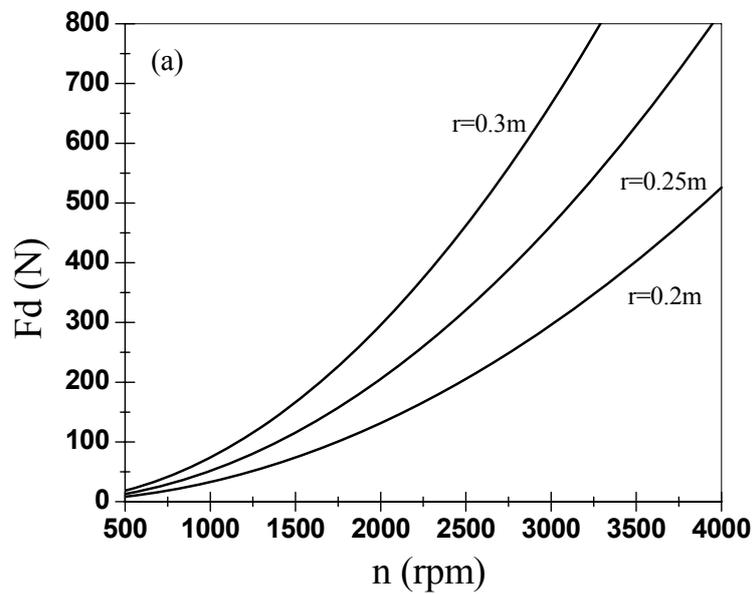


图 3-3 冲击式破碎机中单个物料颗粒所受撞击力 F_d 与破碎机转速及转子半径关系: (a) 撞击力 F_d 与破碎机转速 n 的关系; (b) 撞击力 F_d 与转子半径 r 的关系

Fig.3-3 Calculated relationships between impact force and circular & velocity rotor radius of crusher: (a) impact force & rotational speed of crusher, (b) impact force & rotor radius

3.3 破碎设备

废旧电路板经一级破碎前后的物料状态，如图 3-4 所示。物料颗粒基本为片状，平面尺寸大约 1 cm^2 ，金属成分没有从基板上剥离。所以本研究采用剪切式旋转破碎机和冲击式旋转破碎机相结合进行一级破碎和二级破碎，以达到充分剥离电路板中的金属成分的效果。剪切式破碎机（图 3-5a）作为粗粉机对废旧印刷电路板一级破碎，静刀头与动刀头之间的剪切作用将物料破碎成小片。冲击式旋转破碎机（图 3-5b）作为细粉机对物料进行二级破碎。物料进入细粉机后受到锤头的冲击与研磨作用。锤头不仅起到从基板上剥离金属的作用，而且有效阻止了金属线缠绕现象的产生。细粉机的筛网尺寸为直径 1 mm ，从而保证了金属从基板上完全剥离。剪切式破碎机转速为 1440 rpm ，转子半径为 0.25 m 。由以上推导的颗粒受力关系，确定冲击式旋转破碎机转速为 2000 rpm ，转子半径为 0.2 m 。

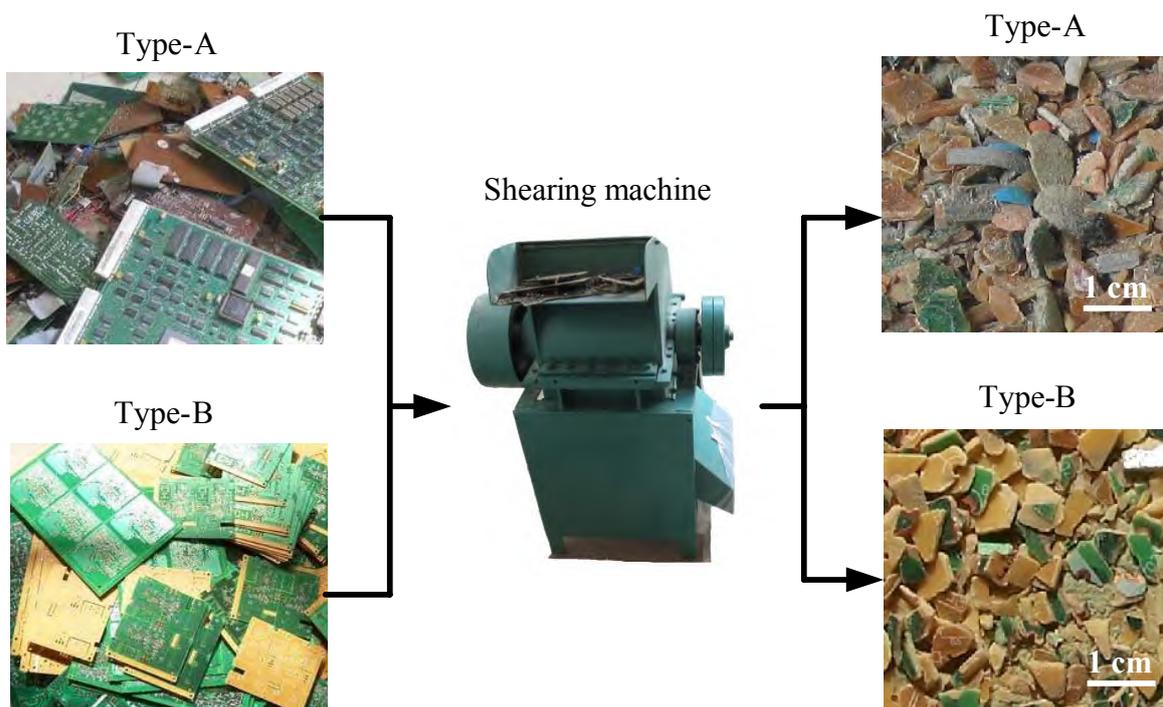
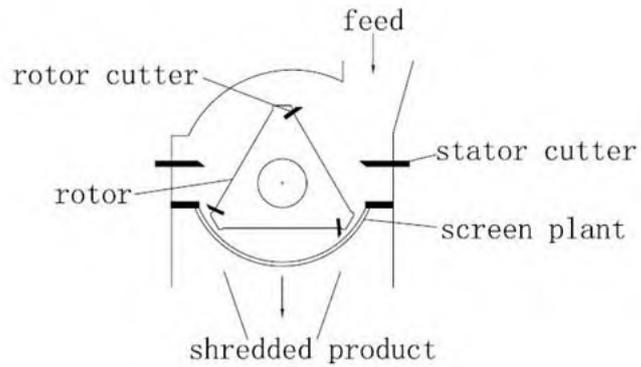
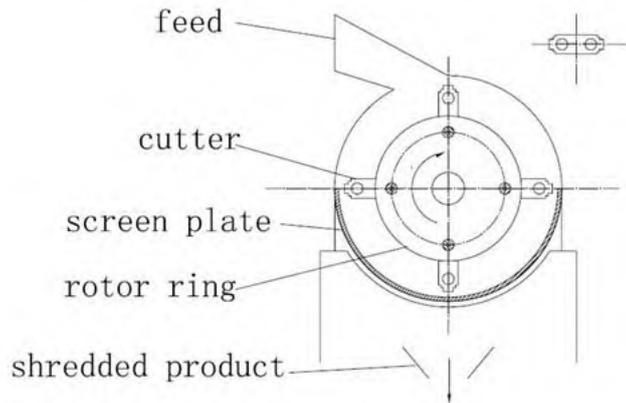


图 3-4 一级破碎前后物料的形貌

Fig.3-4 Material appearance before and after scraping by shearing machine



(a)



(b)

图 3-5 (a)自制剪切式旋转破碎机及其原理图, (b)自制冲击式旋转破碎机及其原理图

Fig.3-5 Prototype and schematic diagram of, (a) shearing machine, (b) hammer grinder

3.4 高压静电分选设备的研制

综合高压静电分选方法的优缺点（详见第一章）后，本文选择辊式高压静电分选装置。该装置有许多优点，如占地面积小，易操作控制，适用范围广等，符合用于研究分选破碎后的废旧印刷电路板物料的要求。

3.4.1 电极结构

电极是高压静电分选机的重要组成部分。电极的形状、大小、位置直接影响分选空间电场强度的分布。为了有效的分选破碎后废旧印刷电路板颗粒中的金属与非金属，采用电晕电极与静电极组合的复合电极结构。如图 3-6 所示，电晕极为丝状电极，静电极为柱状电极。电极安装在传动齿轮与滑槽相结合的机构上，该机构加大了电极位置的调节范围，角度范围达到 0-90°可调，电极与转辊的间距达到 0-500 mm 可调。可调节的电极结构对分选空间电场强度分布的研究提供了有利条件。



图 3-6 电极结构实物图

Fig.3-6 Photograph of electrodes construction

3.4.2 加料装置

如图 3-7 所示，为电选机的振动加料装置，振动加料器确保均匀喂料。破碎后的废旧印刷电路板物料颗粒尺寸差异较大。为研究不同颗粒尺寸的分选特性，分选前利用筛分机对物料筛分分级。如图 3-8 所示，加装挡料板有效的防止分选时大尺寸颗粒在转辊表面弹起，引起火花放电的现象。如图 3-9 所示，小颗粒在加料时易受电晕极影响，产生团聚现象，影响分选效果。加装屏蔽板使颗粒均匀单层的送入转辊表面，可达到入料要求。



图 3-7 振动加料器实物图
Fig.3-7 Photograph of vibrating feeder

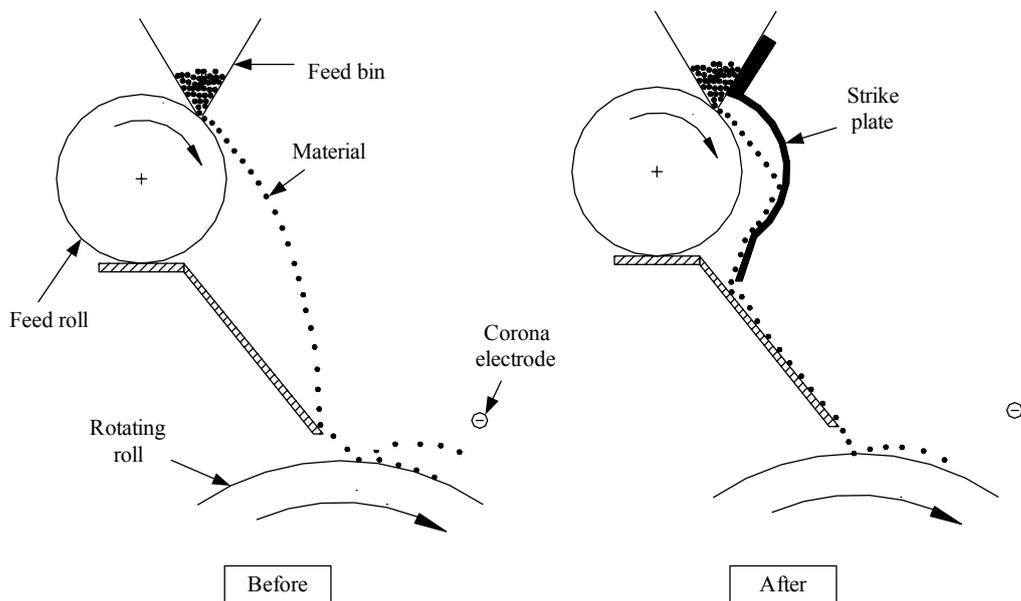


图 3-8 加装挡料板示意图
Fig.3-8 Diagram of fixing the strike plate

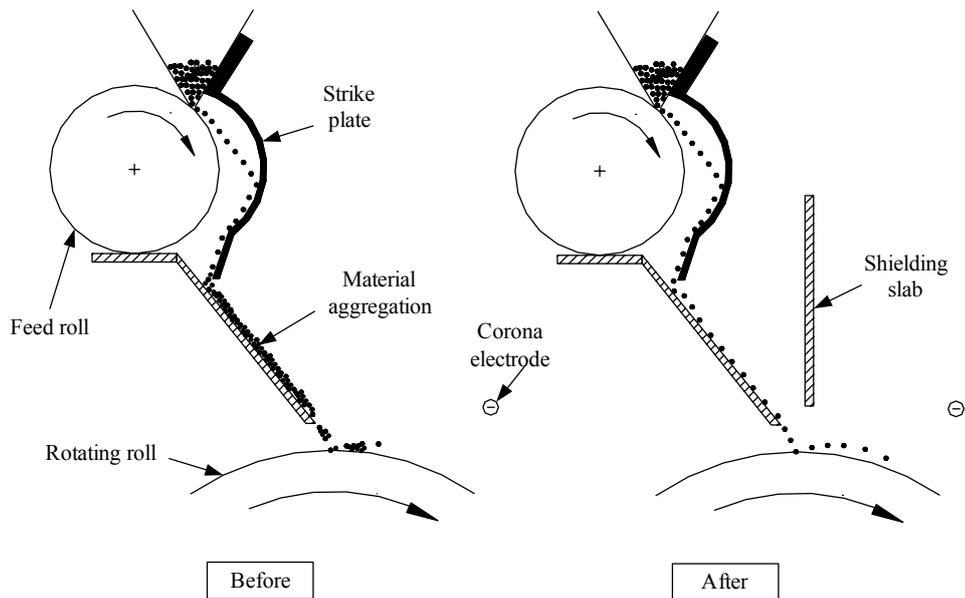


图 3-9 加装屏蔽板示意图
Fig.3-9 Diagram of fixing shielding slab

3.4.3 直流电源

高压设备的电源直接影响设备的工作状态，电源的选择至关重要。对于高压静电分选机，当施加电压达到电晕电极的起晕电压时，电晕电极开始放电。电晕电极的起晕电压及起晕电场强度可利用 Peek's law 计算，

$$E_0 = k_1 \left(1 + k_2 / r^{1/2} \right) \quad (3-4)$$

式中， E_0 为电晕电极表面的起晕电场强度， r 为电晕丝半径。 k_1 、 k_2 与电极结构和施加电压的类型和极性以及环境大气压力 P 、温度 T 相关，在 $T = 298 \text{ K}$ 和 $P = 101325 \text{ Pa}$ 条件下，对处于空气中的阴极平行电晕电极， $k_1 = 3.01 \times 10^6 \text{ V/m}$ ， $k_2 = 0.0301 \text{ m}^{1/2}$ 。当电晕丝半径 $r = 0.00015 \text{ m}$ ，得到起晕电场强度为 $1.04 \times 10^7 \text{ V/m}$ ，起晕电压可由下式得到：

$$V_0 = E_0 r \ln(2L/r) \quad L \gg r \quad (3-5)$$

经计算得到起晕电压为 12.31 kV 。理论上说明在分选过程中，施加电压必须高于 12.31 kV ，电晕电极才起作用。本电选机配备直流高压电源，电压最高可达 30 kV ，以满足实验要求。如图 3-10 所示，施加电压为 13 kV 时，电晕电极产生电晕，与理论计算结果相一致。

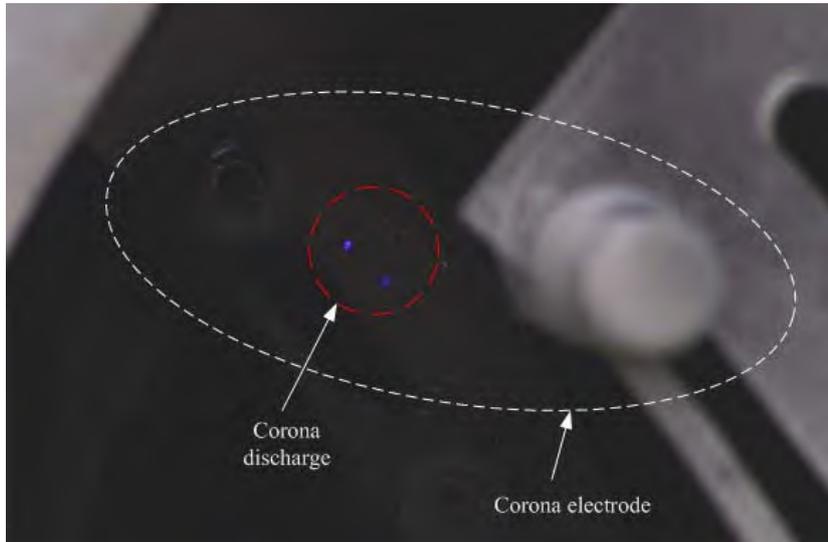


图 3-10 电晕放电图

Fig.3-10 Photograph of Corona discharge

3.5 高压静电分选设备



图 3-11 自制高压静电分选机实物图

Fig.3-11 Photograph of corona electrostatic separator

通过以上分析,针对破碎后电路板混合颗粒的特性,自制高压静电分选机,如图 3-11 所示。分选机供电系统最高电压 30 kV;采用振动加料方式确保均匀给料;电极系统由丝状电晕电极,圆柱状静电极组成,各电极位置可二维调节,方便不同的电极参数实验研究;接地转辊表面镀铬处理,转速可调(10-1000 rpm);电选机内有多个收集槽,方便取料称重。

3.6 小结

1) 确定剪切式旋转破碎机和冲击式旋转破碎机相结合的两级破碎方式对废旧印刷电路板进行破碎,使电路板中金属成分和非金属基板有效解离。剪切式旋转破碎机的工作转速为 1440 rpm,转子半径为 0.25 m,冲击式破碎机工作转速为 2000 rpm,转子半径为 0.2 m。

2) 自制高压静电分选机,供电系统最高电压 30 kV;电极结构为丝状电晕极与柱状静电极相结合的复合电极结构;电极角度范围达到 0-90°可调,电极与转辊的间距达到 0-500 mm 可调;接地转辊表面镀铬处理,转速可调(10-1000 rpm)。

参考文献

- [1] 马俊伟, 王真真, 杨志峰, 聂永丰, 白庆中, 电选法回收利用废印刷线路板, 环境污染治理技术与设备, 2005 (7): 63 - 66
- [2] 胡利晓, 温雪峰, 刘建国, 李金惠, 聂永丰, 俞子达, 废印刷电路板的静电分选实验研究, 环境污染与防治, 2005 年 8 月, 27 (5): 326-329
- [3] 唐敬麟, 破碎与筛分机械设计选用手册[M], 北京: 化学工业出版社, 2001
- [4] 顾帼华, 戚云峰, 废弃印刷电路板的粉碎性能及资源特征, 中国有色金属学报, 2004, 14 (6): 1037 - 1041
- [5] R. Meier-Staude, R. Koehnlechner, Elektrostatische trennung von leiter/nichtleitern gemischen in der betrieblichen praxis (electrostatic separation of conductor/non-conductor mixtures in operational practice) [J], Aufbereitungs-Technik, 2000, (41): 118-123.
- [6] Y. Higashiyama, K. Asano, Recent progress in electrostatic separation technology [J], Particul. Sci. Technol., 1998, (16): 77-90.
- [7] J. Cui, E. Forsberg, Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, Journal of Hazardous Materials, 2003, 99 (3): 243-263.

第四章 废旧印刷电路板的破碎研究

4.1 引言

破碎是机械处理电子废弃物的必备工艺。许多学者在电子垃圾的破碎处理方面做了深入的研究^[1-3]。为了避免因粉碎过程中产生的热量使废电路板中的塑料氧化而产生有毒气体,低温破碎技术^[4]也开始应用于废旧电路板的破碎。但以上研究多集中于单一破碎方式。拆解后的废旧印刷电路板主要由强化树脂板和附着其上的铜线等金属组成,连接方式复杂^[5],硬度较高、韧性较强。采用单一的破碎设备很难在能耗,破碎效率与破碎效果之间达到良好平衡。为此,本章分析两级破碎后电路板的物料特性,为研究混合物料的高压静电分选奠定基础。

4.2 废旧印刷电路板破碎后颗粒特性分析

经两级破碎后的混合物料颗粒,利用 8411 型电动振筛机对其分级筛选,筛分分级便于分析各粒级物料的粒度、形状、解离度等特性,从而进一步对破碎过程进行优化。筛分得到 7 级粒度分布,1 级(+1.2mm),2 级 (-1.2+0.8 mm),3 级 (-0.8+0.6mm),4 级 (-0.6+0.45mm),5 级 (-0.45+0.3mm),6 级 (-0.3+0.15mm),7 级 (-0.15mm)。破碎后物料的平均粒径按以下公式计算:

$$D = \frac{\sum_i d_i \times m_i}{\sum_i m_i} \quad (4-1)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots$, D 为一次破碎的平均粒径 (mm), d_i 表示各级颗粒的平均粒径 (mm), m_i 表示各级颗粒质量 (kg)。

实验所用物料包括 Type-A 电路板 60 kg, Type-B 电路板 60 kg。两级破碎后,由式 4-1 计算得 $D_{\text{Type-A}}$ 为 0.4106 mm, $D_{\text{Type-B}}$ 为 0.4077 mm。

4.2.1 颗粒形状

破碎后物料颗粒的形状对回收电路板的后续处理（金属与非金属分选）是至关重要的，并直接影响分选的效果和效率。由于 Type-A 物料上附有电子器件种类较多，破碎后物料颗粒的形状差别很大。图 4-1 中(a)所示，金属颗粒为球状、片状和丝状等，非金属颗粒多为片状或多棱角状。图 4-1(b)为 Type-B 物料颗粒，其中金属与非金属主要为薄片状。

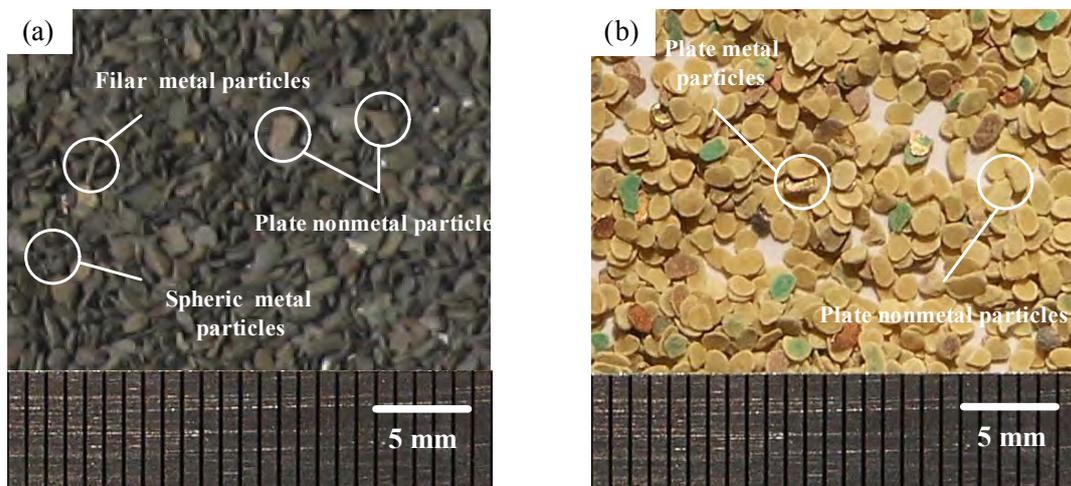


图 4-1 物料的颗粒形状 (a) Type-A 物料; (b) Type-B 物料

Fig.4-1 Particle shape of scraped waste PCB particles: (a) Type-A materials, (b) Type-B materials

4.2.2 颗粒粒度分布

两种物料粒度分布如图 4-2 所示，第 1 级粒度的质量都相对较少，而第 7 级物料的质量几乎都占总量的 50%左右。在 $-1.2+0.45$ mm 两种物料差异很大，Type-A 物料 $-1.2+0.8$ mm (2 级粒度) 只占总量的 12%，而 Type-B 物料在此粒级含量则达到 20%；Type-A 物料 $-0.6+0.45$ mm (4 级粒度) 占总量的 16%，而 Type-B 物料在此粒级含量只有 8%。两种物料不同颗粒的粒度分布差异较大。

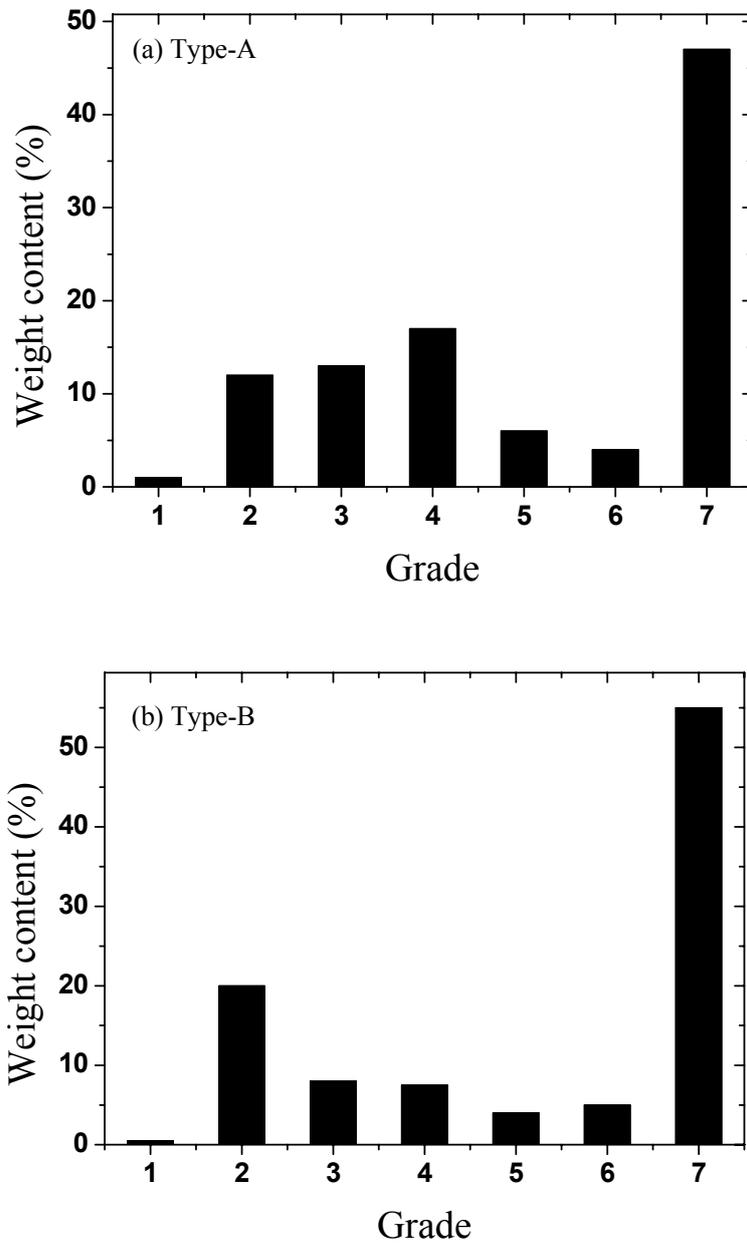


图 4-2 两种物料分级后的粒度分布图

Fig.4-2 Particle size distribution chart of Type-A and Type-B materials

4.2.3 金属成分解离状况

对物料进行机械破碎的目的是使电路板中金属与非金属达到完全解离,同时破碎到一定的粒径范围,利用后续处理对已解离的金属与非金属颗粒进行分选。实验结果表明,两种物料解离尺寸明显不同,Type-A物料在 -1.2 mm 可以达到100%的解离,如图4-3(a)所示。图4-3(b)、(c)分别是 -1.2 mm 的废旧电路板物料经高压静电分选后的金属和非金属颗粒。从图4-3(b)中可见,金属颗粒中含有一些硬质多棱角的陶瓷颗粒,来自Type-A物料中所含有的电子元器件。而Type-B物料在 $-1.2+0.8\text{ mm}$ 时只有50%达到解离,如图4-4(a); $-0.8+0.6\text{ mm}$ 解离仍不完全,如图4-4(b);在物料粒径为 -0.6 mm 时才达到完全解离,如图4-4(c)。

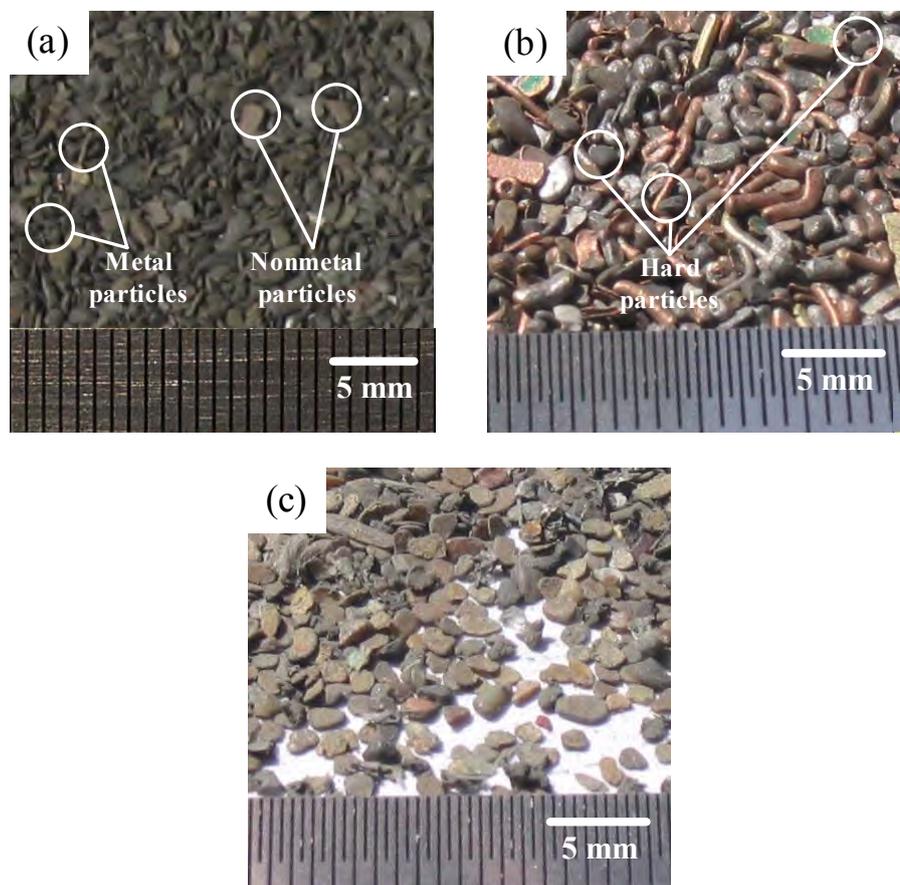


图 4-3 Type-A 物料解离示意图: (a) 破碎后完全解离颗粒($-1.2+0.8\text{ mm}$); (b) 金属颗粒及硬质粒子;
(c) 非金属颗粒

Fig.4-3 Stripping size for scraped Type-A materials: (a) complete stripping particles ($-1.2+0.8\text{ mm}$), (b) metal particles and hard particles, (c) nonmetal particles

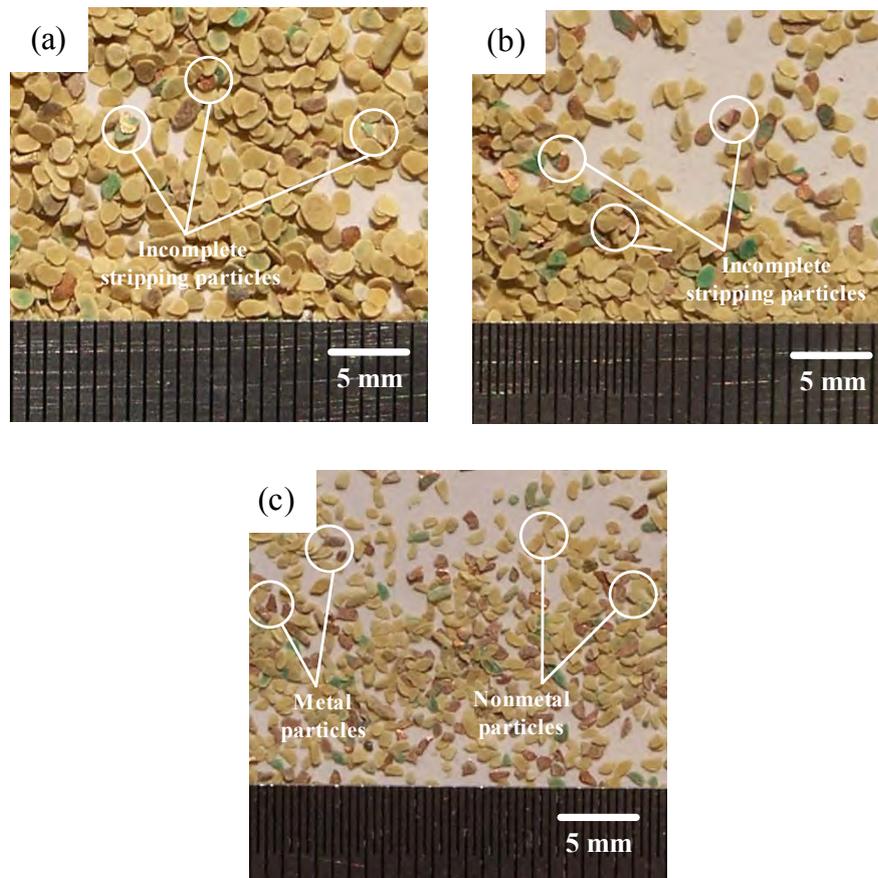


图 4-4 Type-B 物料解离示意图: (a) 破碎后非完全解离颗粒(-1.2+0.8 mm); (b) 破碎后非完全解离颗粒(-0.8+0.6 mm); (c) 破碎后完全解离颗粒(-0.6+0.45 mm)

Fig.4-4 Stripping size for scraped Type-B materials: (a) incomplete stripping particles (-1.2+0.8 mm), (a) incomplete stripping particles (-0.8+0.6 mm), (c) complete stripping particles (0.6+0.45 mm)

4.3 破碎后颗粒解离度及粒度分布不同的分析

对于两种不同的物料，最终破碎结果如图 4-3 与 4-4 所示，解离度差异很大。对两种物料分析发现，Type-A 物料中电子元器件多，含有较多的铜线、陶瓷颗粒等，破碎后易形成尖角状或小的圆球状硬质颗粒（图 4-3 b），其硬度较大，在物料破碎过程中，这些硬质点起了很大作用，使物料更容易破碎，金属更容易从基板上解离。

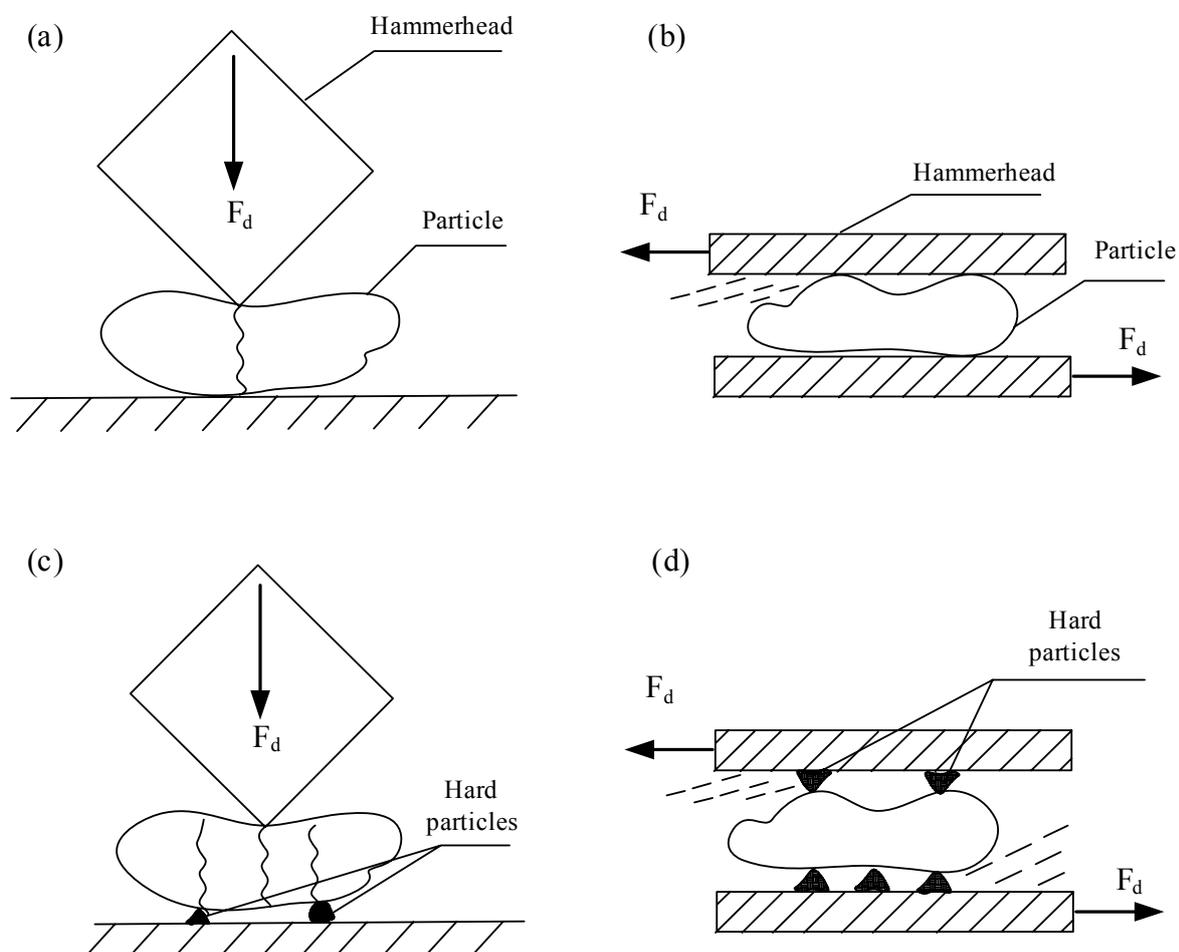


图 4-5 单体物料颗粒受冲击力及磨剥力示意图: (a)冲击力; (b)磨剥力; (c)Type-A 颗粒受冲击力; (d)Type-A 颗粒受磨剥力

Fig. 4-5 Diagrams of impact force and grind force of single particle: (a) impact force, (b) grind force, (c) impact force of Type-A particle, (d) grind force of Type-A particle

在冲击式破碎机破碎物料过程中,物料颗粒主要受锤头的冲击力和锤头表面的磨剥力作用,如图 4-5 中(a)与(b)所示,颗粒在力的作用下出现裂纹破碎。在 Type-A 物料破碎过程中,有两种情况与 Type-B 物料破碎过程不同:

1) 在冲击破碎过程,硬质点相当于楔尖,由于此种硬质点更小,更尖锐,在单位面积上颗粒的受力点增多,受力面减小,单位面积上受力更大,如图 4-5 (c),在力 F_d 作用下,硬质颗粒对颗粒施加强烈的张应力,当张应力达到颗粒的抗劈强度极限时颗粒被劈碎。

2) 在 Type-A 物料破碎过程中, 锤头与物料可能不直接接触, 而是锤头打击陶瓷颗粒等硬质点, 由于锤头对陶瓷等硬质点的传动作用, 使得硬质点获得和锤头同样的速度, 对物料颗粒产生剪切力作用, 如图 4-5 (d), 当达到物料颗粒的剪切强度极限时, 物料颗粒被剥离。

由于硬质点在破碎过程的作用, 使得物料颗粒上的金属与非金属更容易剥离。同时两种物料颗粒的粒度分布也受此影响, Type-A 物料比 Type-B 在-1.2+0.8 mm 所占的质量分数小, 既大粒径的颗粒少, 符合以上分析。而 Type-B 料在-0.15 mm 粒级比例高于 Type-A 料比例, 这是由于 Type-B 料含金属含量少, 剪切强度极限低, 所以粉屑较多。

4.4 冲击破碎过程的能耗分析

电路板的破碎过程前述已经分析, 但实际的破碎过程要比理想状况复杂得多, 物料颗粒的受力与锤头和衬板的距离、物料在机腔内的松散度及物料与锤头的接触位置等都有关系。当物料颗粒受力达到其屈服强度时, 直接与锤头接触的物料颗粒在瞬间一次破碎, 而其他不直接接触的物料颗粒则不一定一次达到破碎的程度, 可以认为在多次交变载荷作用力下, 物料颗粒先后发生不同程度的变形, 积累一定的能量后, 产生裂纹, 最后才破碎。同样依照表面粉碎模型, 在磨削过程, 仅在颗粒表面产生破坏, 从颗粒表面不断削下微粉成分, 这一破坏不涉及颗粒的内部, 即P.R.雷廷格提出的面积能耗学说, 认为破碎的能耗和破碎后物料新生表面积成正比, 也即 $A \propto \Delta S$, 微分表达式为:

$$dA = n_p K_1 dS \quad (4-2)$$

式中, K_1 为比表面功, 即生成一个单位新表面所需的功。假设电路板物料的总质量为 m , 直径为 D , 其松散密度为 δ , 形状系数为 ϕ_s 和 ϕ_r , 则可计算出质量为 m 的物料中含有颗粒数 n_p :

$$n_p = \frac{m}{\delta D^3 \phi_r} \quad (4-3)$$

则破碎质量为 m 的电路板所需的微功为:

$$d_A = n_p K_1 dS = \frac{K_1 m}{\delta \phi_r D^2} d\phi_s D^2 = \frac{2K_1 \phi_s m}{\delta \phi_r D^2} dD \quad (4-4)$$

式中, ϕ_s 为表面积形状系数, 取为5, ϕ_v 为体积形状系数, 取为5, 经计算, 物料的松散密度 δ 为 615 kg/m^3 , 积分上式得:

$$A = \frac{2K_1 m}{615} \int_{D_2}^{D_1} \frac{1}{D^2} dD = \frac{2K_1 m}{615} \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (4-5)$$

式中, D_1 为物料给料的平均粒径, 即一级破碎后物料的平均粒径, 经测量大约为 1 cm , D_2 为二级破碎后物料的平均粒径, 如前述为 0.4 mm , 则破碎的能耗为:

$$A = \left(\frac{2K_1 m}{615} \right) \left(\frac{1}{0.0004} - \frac{1}{0.01} \right) = 7.8K_1 m \quad (4-6)$$

试验用粉碎机的功率为 5.5 kw , 根据破碎时间及破碎物料的质量, 推得系数 K_1 为 300 , 则破碎废旧电路板所需能耗的经验公式:

$$A = 2340 \cdot m \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (4-7)$$

从能耗的角度考虑, 一级破碎的能耗必然低于二级破碎, 达到整个破碎过程能耗最小, 就必须按照“多碎少磨”的原则。废弃线路板作为一种电子垃圾, 它的回收处理要求低成本, 能耗低, 因此在量产处理时, 如何在破碎过程使能耗最小化是十分重要的, 实际操作中可以按照公式4-7得出一级破碎和二级破碎的最佳比例。

4.5 本章小结

1) Type-A 物料破碎后颗粒尺寸在 1.2 mm 以下达到完全解离, Type-B 物料破碎后颗粒尺寸在 0.6 mm 以下完全解离。解离度不同的原因是物料不同导致冲击破碎的机理不同。Type-B 物料破碎后 $+0.6 \text{ mm}$ 的颗粒在二次粉碎后可完全解离。

2) 本机械破碎系统, 可以将废旧电路板破碎到平均粒径为 0.4 mm 左右, 粒度主要集中在 $-1.2+0.1 \text{ mm}$ 范围内, 破碎后电路板物料颗粒形状以球状和片状及多棱角状为主。

参考文献

- [1] S. Zhang, E. Forssberg, Intelligent liberation and classification of electronic scrap, *Powder Technology*, 1999, (105): 295–301.
- [2] 白庆中, 王晖, 韩洁, 聂永丰, 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): 84–89
- [3] 顾帼华, 戚云峰, 废弃印刷电路板的粉碎性能及资源特征, *中国有色金属学报*, 2004, 14 (6): 1037–1041
- [4] B. Kopacek, P. Kopacek, Intelligent disassembly of electronic equipment, *Annual, Reviews in Control*, 1999, (23): 165–170.
- [5] S. Zhang, E. Forssberg, Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap, *Resources, conservation and Recycling*, 1997, (21): 247–269.
- [6] 唐敬麟, 破碎与筛分机械设计选用手册[M], 北京: 化学工业出版社, 2001
- [7] R. Meier-Staude, R. Koehnlechner, Elektrostatische trennung von leiter/nichtleitergemischen in der betrieblichen praxis (electrostatic separation of conductor/non-conductor mixtures in operational practice) [J], *Aufbereitungs-Technik*, 2000, (41): 118–123.
- [8] Y. Higashiyama, K. Asano, Recent progress in electrostatic separation technology [J], *Particul. Sci. Technol.*, 1998, (16): 77–90.
- [9] J. Cui, E. Forssberg, Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 99 (3): 243–263.

第五章 高压静电分选机电场的计算机模拟

5.1 引言

废旧印刷电路板破碎后,金属成分达到充分解离,混合物料(金属颗粒与非金属颗粒)利用高压静电分选装置进行分选,高压静电分选装置如图 5-1。高压静电分选的基础是被分选物料在分选空间受力的差别而导致的不同颗粒的运动轨迹不同,而决定被分选物料的受力的差别的主要因素是物料本身的电性和空间电场强度以及其他的机械因素,空间电场强度是十分关键的因素,而电压强度和高压电极特性是决定空间电场强度的两个重要参数。本章利用数学模拟软件 MATLAB 中的偏微分建模工具箱 (PDE) 对高压静电分选机内部电场分布进行模拟,研究电极特性与电压对电场强度分布的影响。并通过实验加以验证,在模拟分析和实验验证的基础上确定了电压及电极特性的工艺参数的大概范围,为进一步研究打下基础。

5.2 MATLAB 电场模拟

MATLAB 是 Matrix Laboratory 的缩写,早期主要用于现代控制中复杂的矩阵、向量的各种运算。由于 MATLAB 提供了强大的矩阵处理和绘图功能,很多专家因此在自己擅长的领域用它编写了许多专门的 MATLAB 工具包 (toolbox),比如, MATLAB 可以进行电场模拟等等。

现在 MATLAB 已经成为攻读学位的大学生,硕士生,博士生必须掌握的基本技能。一种语言之所以能迅速地普及,显示出如此旺盛的生命力,是由于它有着不同于其他语言的特点,正如同 FORTRAN 和 C 等高级语言使人们摆脱了需要直接对计算机硬件资源进行操作一样,被称作为第四代计算机语言的 MATLAB,利用其丰富的函数资源,使编程人员从繁琐的程序代码中解放出来。MATLAB 最突出的特点就是简洁。MATLAB 用更直观的,符合人们思维习惯的代码,代替了 C 和 FORTRAN 语言的冗长代码。MATLAB 给用户带来的是最直观,最简洁的程序开发环境。

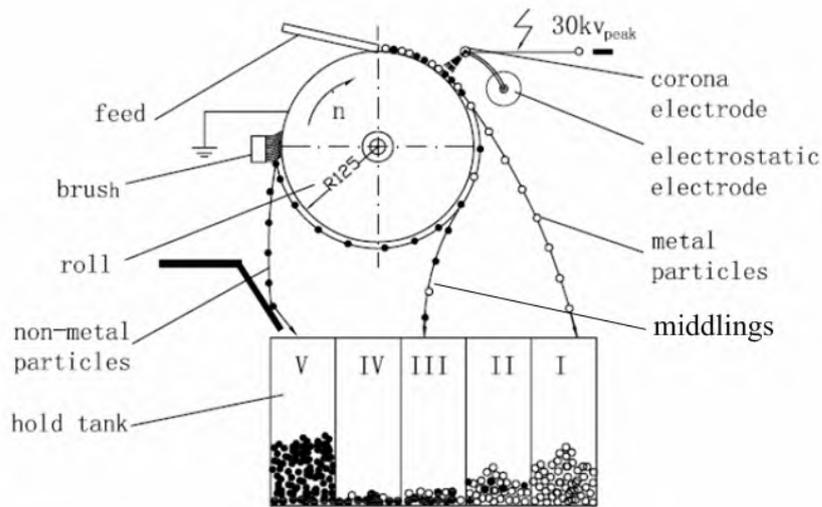


图 5-1 高压静电分选机原理图

Fig.5-1 Diagram of corona electrostatic separator

本章利用 MATLAB 的偏微分工具 (PDE) 对电晕电极与接地转辊电极间的电场、静电电极与接地电极间的电场以及三者的耦合电场的电场强度分布进行模拟, 边界条件为: 接地电极的电势为 0, 电晕电极和静电电极的电势为施加电压值, 四周为屏蔽, 并假设:

- 1) 忽略电晕放电产生的空间电荷对电场的影响;
- 2) 忽略颗粒自身产生的电场;
- 3) 忽略颗粒间相互作用。

由于电极的长度远大于其截面直径, 空间静电场可以简化为二维问题。如图 5-2 所示, 各电极简化成曲率不同的圆柱。图中 R_1 为接地转辊电极半径, R_2 为静电极半径, L_1 为电晕极与转辊的中心距离, L_2 为静电极与转辊中心的距离, θ_1 为静电极中心所在位置的水平角度, θ_2 为电晕极中心所在位置的水平角度。

电场强度模拟的应用方程: 利用电势 V 与电场强度 E 之间的关系 $-\nabla V = E$, 以及麦克斯韦方程 $\nabla \cdot D = \rho$ 和 $D = \epsilon E$ 得到泊松方程:

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = \rho \quad (5-1)$$

式中, ϵ 为介电系数, ρ 为空间电荷密度。

在电场分布的模拟中, 转辊半径为 0.114 m, 电晕电极半径为 0.00015 m, 相邻电场线的差距为 5000 V/m。

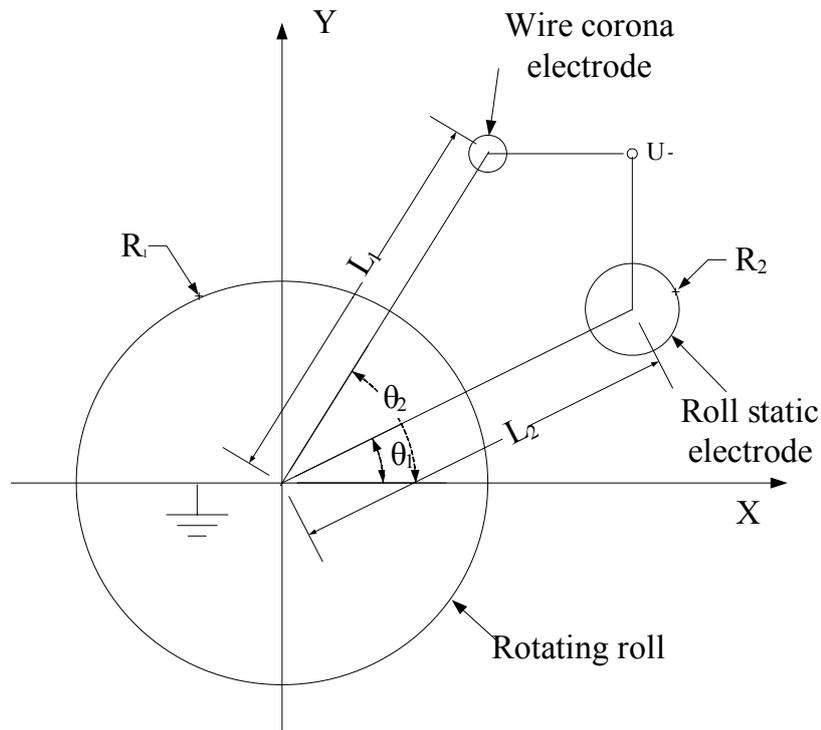
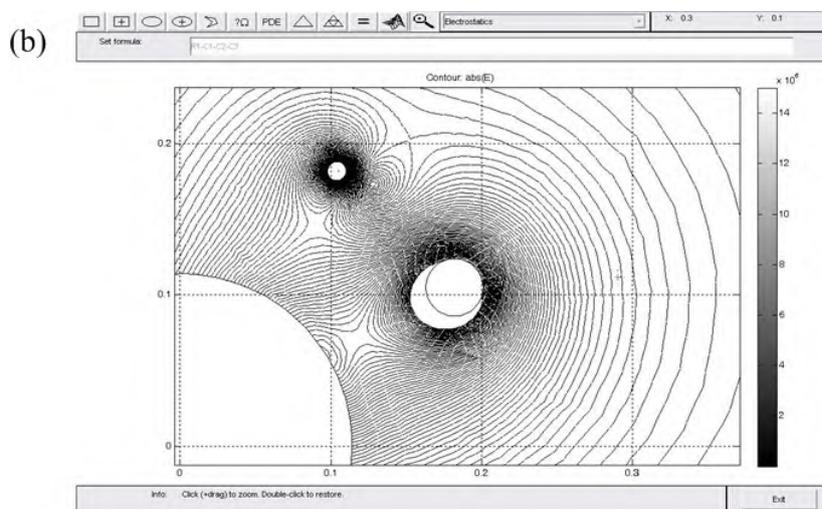
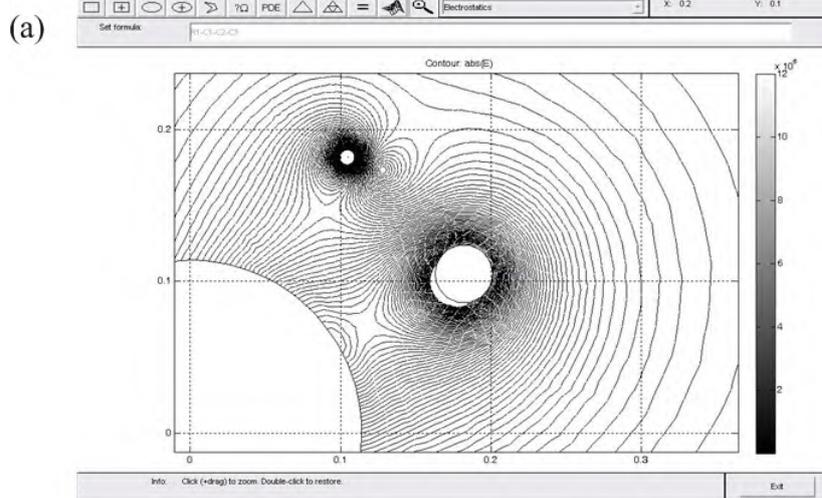


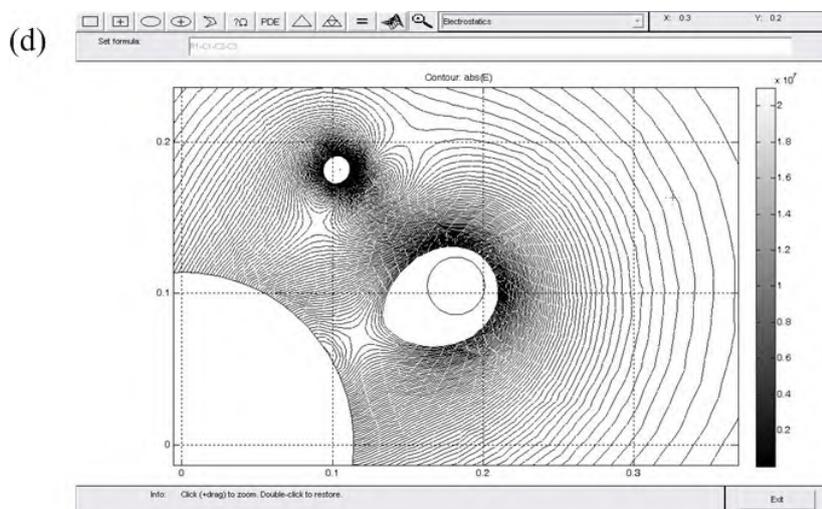
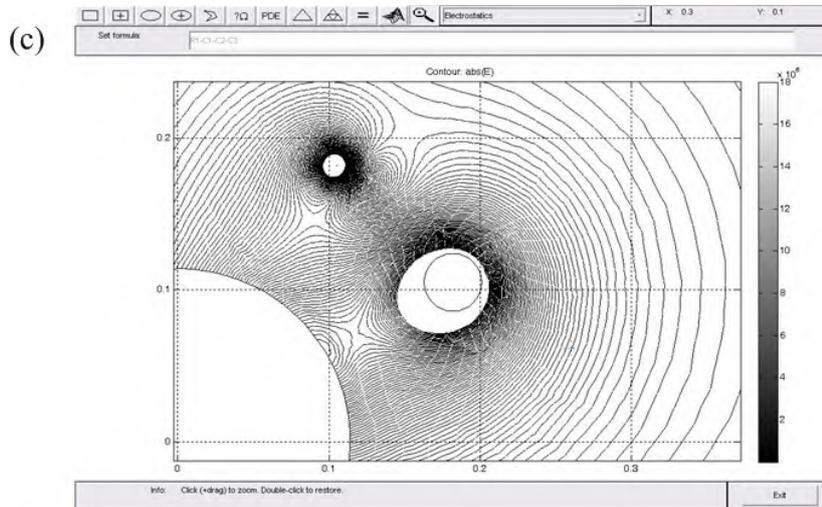
图 5-2 电场模拟的几何模型

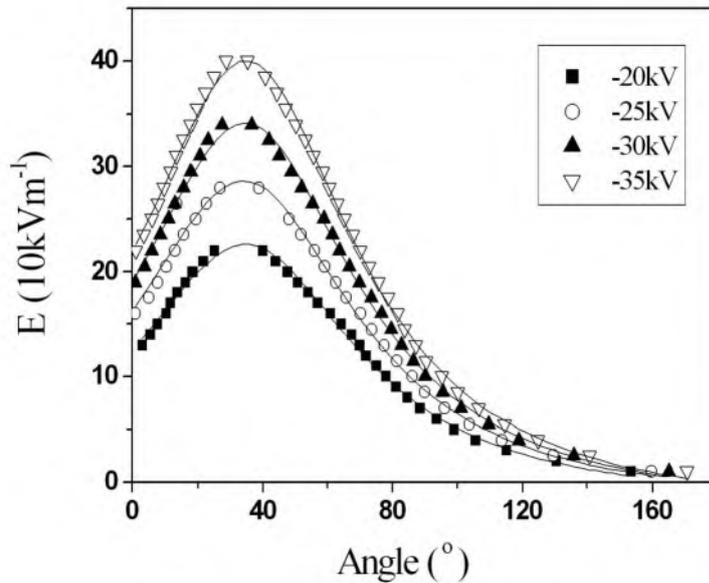
Fig.5-2 The geometric model used in electrostatic field simulation

5.3 电压影响

应用 MATLAB 的 PDE 工具箱中静电场模拟工具，高压静电分选机中电场强度的分布以二维曲线的形式表示。以通过转辊圆心的水平线为角度计量起点，逆时针方向为正值测量角度。以每点所对应的角度为横坐标，电场强度为纵坐标得出电场分布曲线图 5-3(e)。由图 5-3 可知：随着电压的不断增大，电场强度的最大值也相应增大。电场强度最大值位置偏向于静电极方向。电压的增大对物料颗粒的荷电起到积极作用，但在实际应用中，也不能无限提高电压。实验中发现，在其它条件不变的情况下，电压提高到一定值（接近 30 kV）电极之间发生火花放电，破坏分选过程。







(e)

图 5-3 不同电压下的电场分布 (a) 20 kV; (b)25 kV; (c)30 kV; (d)35 kV; (e)电场分布曲线 (模拟参数: $L = L_1 = L_2 = 0.21\text{m}$, $R_2 = 0.019\text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$)

Fig.5-3 Electric-field strength distributions on the rotating roll under different voltages: (a) 20 kV, (b)25 kV, (c)30 kV, (d)35 kV, (e) Curve of distributions. The parameters of simulation were: $L = L_1 = L_2 = 0.21\text{m}$, $R_2 = 0.019\text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$

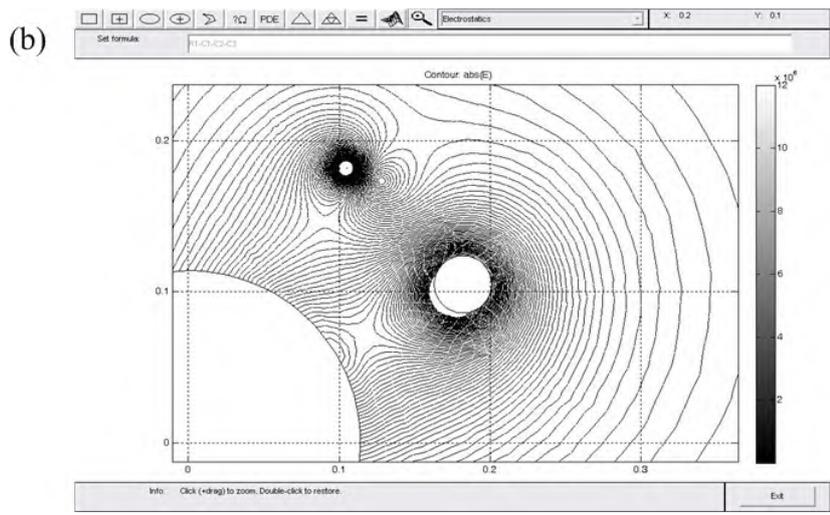
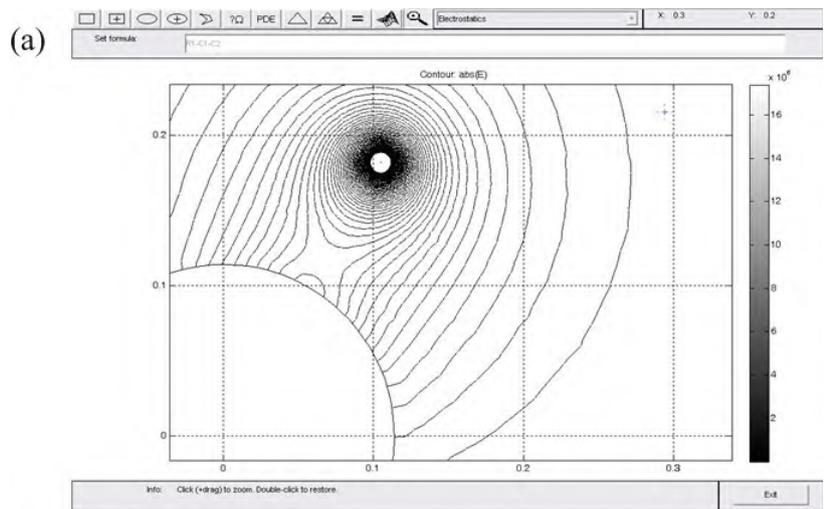
5.4 电极特性

静电极与电晕电极组成了高压静电分选机的电极结构。电极的，大小，形状，位置等因素都会对电场强度的分布造成影响。为此分别对以上因素进行模拟。

5.4.1 电极结构影响

由图 5-4(a)与(c)可以看出，单电晕电极结构的转辊表面的电场强度关于电晕电极呈正态分布：电场强度在电晕电极与转辊圆心的连心线上达到最大值，并随着与电晕电极之间的角度偏差越来越大，电场强度逐渐减小并呈现出良好的对称性。由图 5-4(b)可以看出，增加了静电极以后，转辊表面电场强度比单电晕电极时增大了许多，不再是正态分布，且电场强度最大值也发生了偏移，不是正对着电晕电极的方向，而是旋转了一定的角度，偏向静电极方向。

静电极的加入大幅提高了电场强度，静电极对电场整体的分布起主要的影响作用。当电晕电极和静电极同时存在时，电极的作用区域加宽，电场强度提高。静电极使转辊表面的电场分布由正态分布变成非正态分布，对电晕电极的电晕放电也有屏蔽作用，使电晕放电减弱。但是，静电极对导体颗粒的吸引提升作用以及对非导体颗粒的排斥、压紧作用，可以改善分选效果。



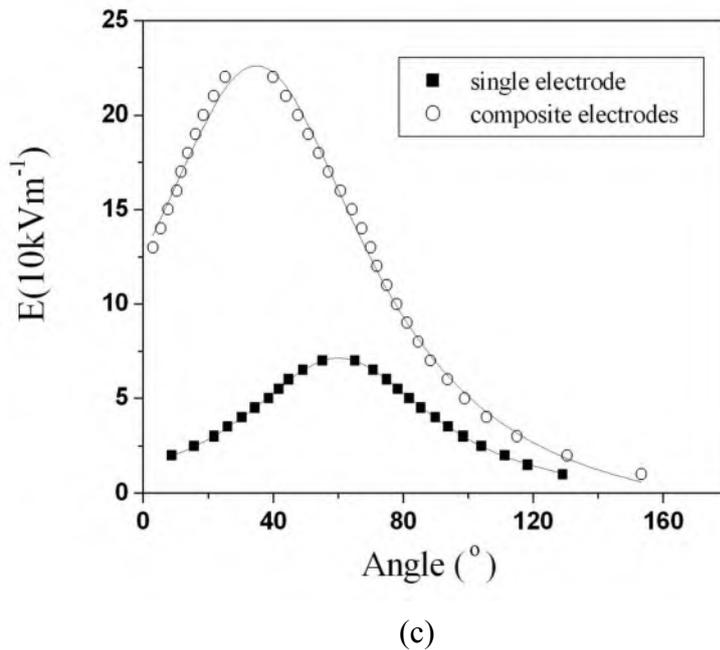


图 5-4 不同形状电极的电场分布 (a)单电晕电极; (b)复合电极; (c)电场分布曲线 (模拟参数: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$)

Fig.5-4 Electric-field strength distributions on the rotating roll of different electrodes: (a) single electrode; (b) multi-electrodes; (c) Curve of distributions. The parameters of simulation were: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$

5.4.2 电极形状影响

由图 5-5 可知, 在大小相近, 其它条件相同的情况下, 不同形状的静电极产生的电场分布是相似的, 并且电场强度分布曲线不论形状或者是最大值的大小都基本是一致的。因此理论上使用大小相近的圆形静电极或椭圆形静电极对电场分布没有实质的影响。

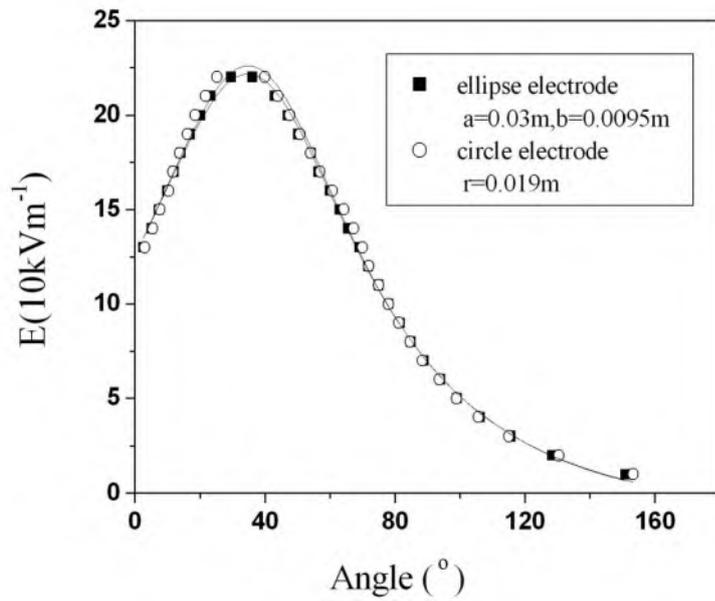
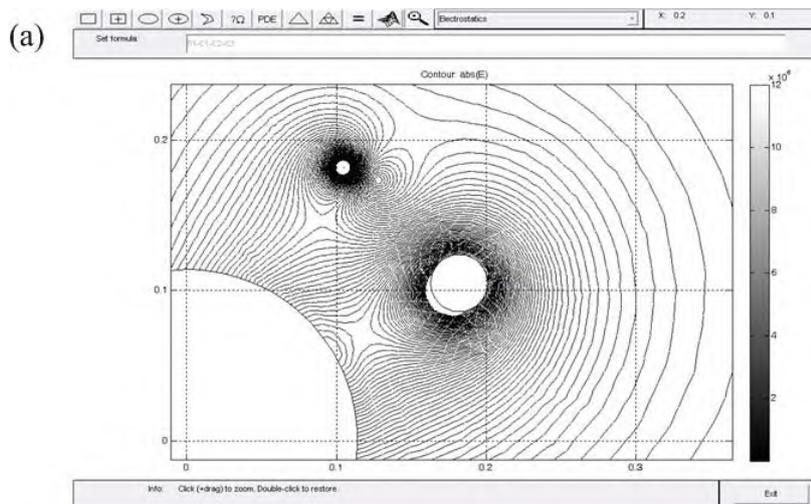


图 5-5 大小相近的椭圆形与圆形静电极的电场强度分布 (模拟参数: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$)

Fig.5-5 Electric-field strength distributions on the rotating roll of ellipse electrode and circle electrodes. The parameters of simulation were: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$

5.4.3 中心距离影响



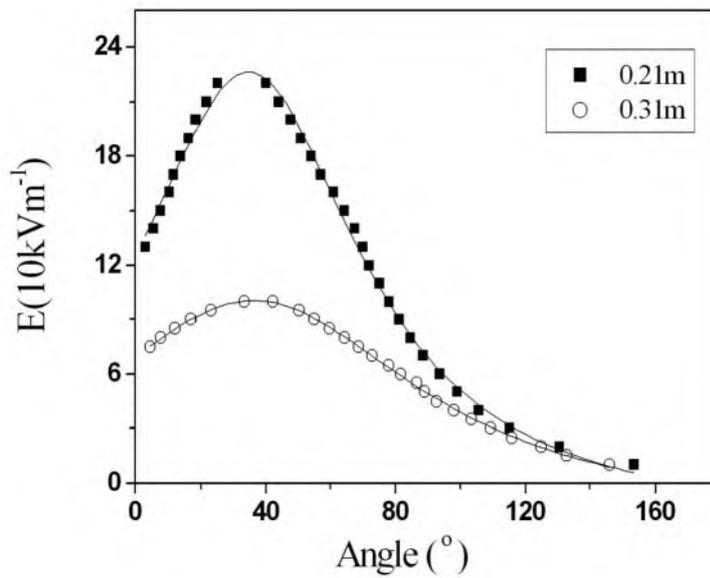
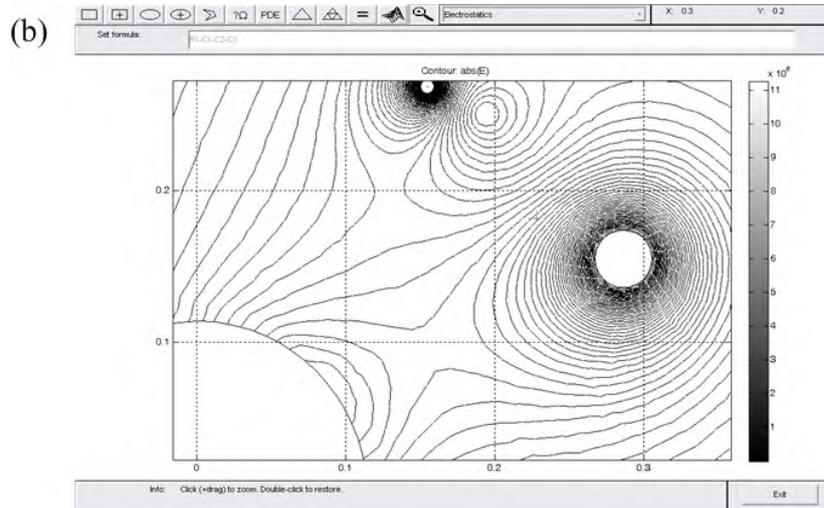


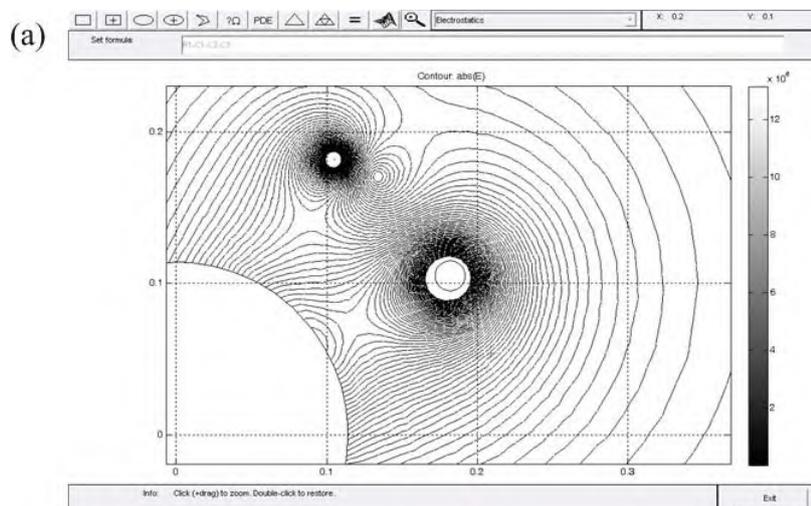
图 5-6 不同中心距离下的电场分布: (a) 0.21 m; (b) 0.31 m; (c)分布曲线 (模拟参数: $U = 20 \text{ kV}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$)

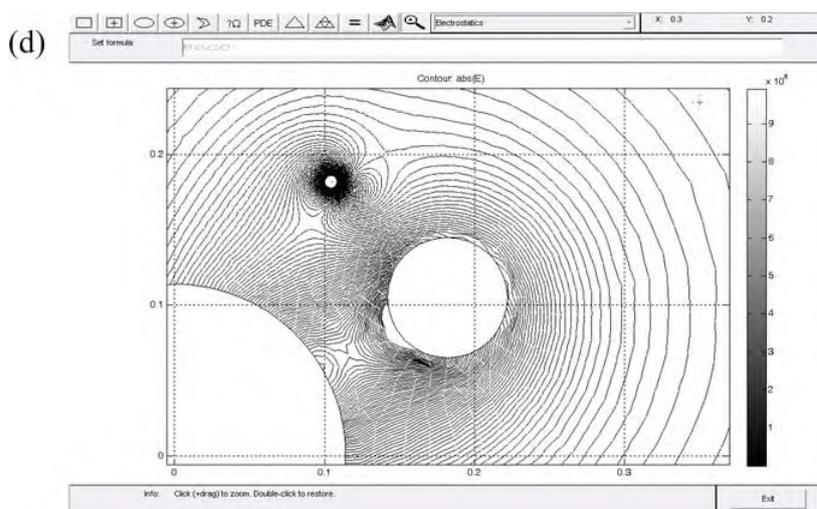
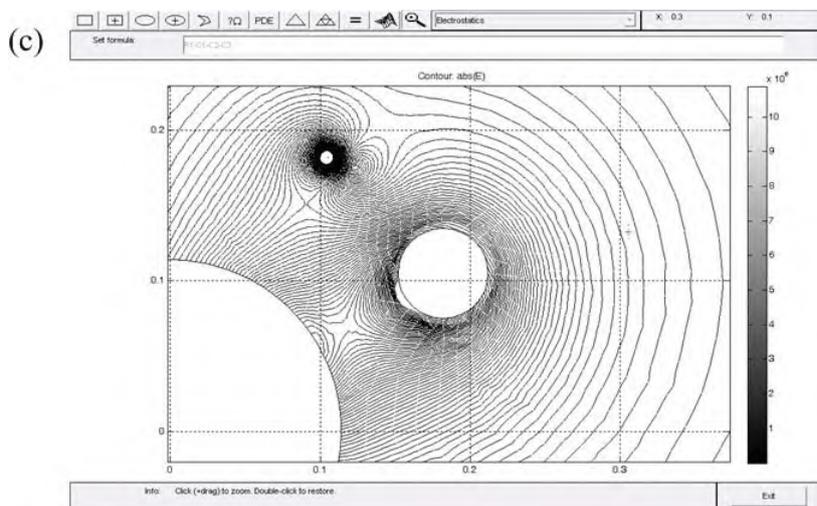
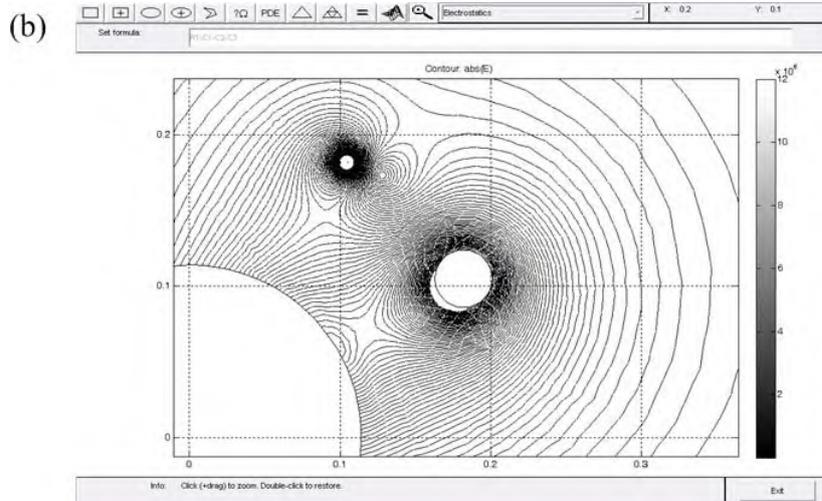
Fig.5-6 Electric-field strength distributions on the rotating roll under different center distances, (a) $L = 0.21 \text{ m}$, (b) $L = 0.31 \text{ m}$, (c) Curve of distributions. The parameters of simulation were: $U = 20 \text{ kV}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$

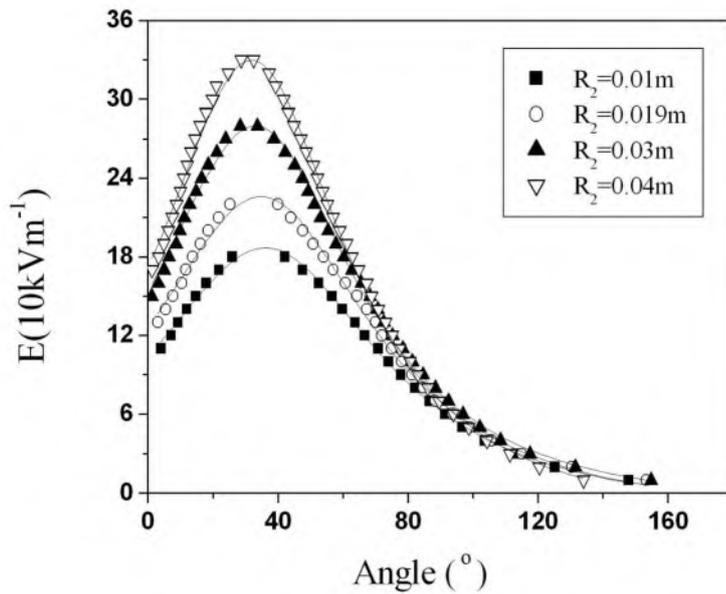
电极中心与接地转辊中心之间的距离对分选空间的电场有很大影响。如图 5-6 所示,在不同的中心距离下,电场分布差别明显。随着中心距离的增大,场强的最大值急剧减小,在与电极夹角较大处(大于 90°)的电场强度差别不大。但随着与电极夹角的减小,电场强度的差别逐渐增大,在最大值处差别最大。最大值的角度偏向于静电极方向。因此,减小中心距离可提高电场场强,改善分选效果,效果与增大电压相同。但实验中发现,若中心距离很小(小于 0.15 m),起始电晕放电时就很容易发生火花放电,使分选过程遭到破坏。

5.4.4 静电极尺寸影响

图 5-7 所示的是圆形静电极的尺寸变化对电场分布造成的影响。随着静电极半径的不断增大,电场强度的最大值也随之增大,且变化十分明显;但电场强度的整体分布趋势不变,最大值对应角度也仍然是偏向静电极方向。由此可知,静电极半径的增大对分选效果的影响类似于提升电压或减小中心距离,增大静电极半径可提高电场强度,改善分选结果。但是静电极的半径也不能无限增大,半径过大的静电极会影响电晕极放电过程,影响分选效果;同时设备机械加工难度加大,提高设备生产成本。







(e)

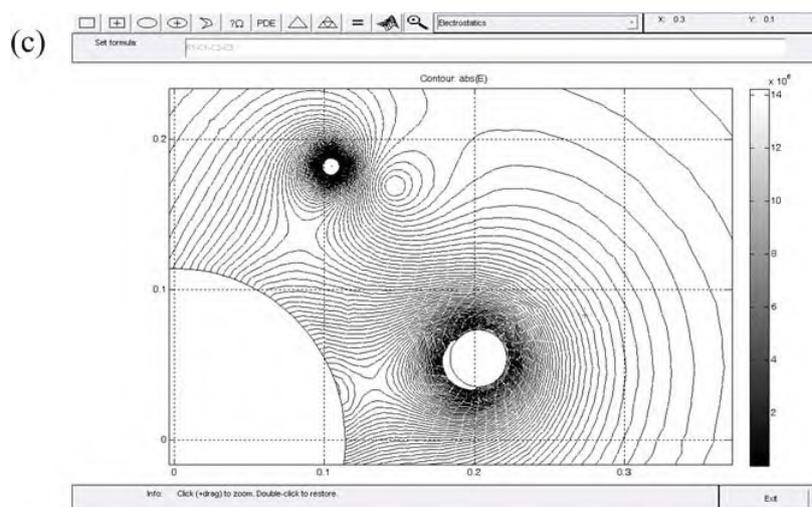
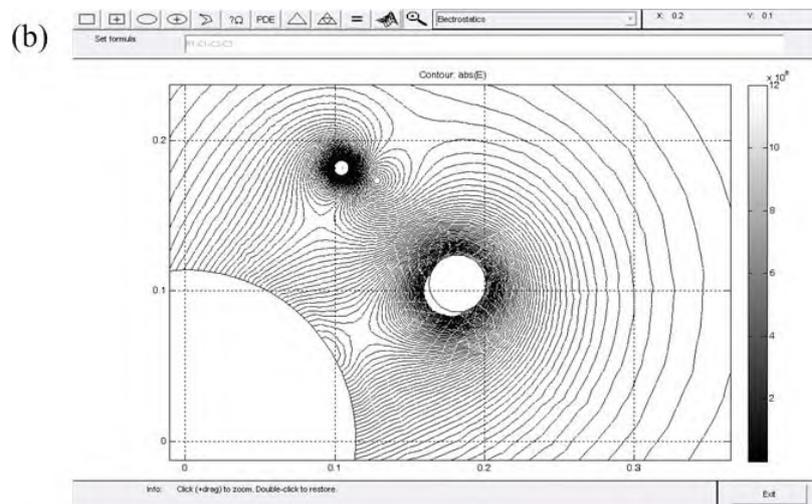
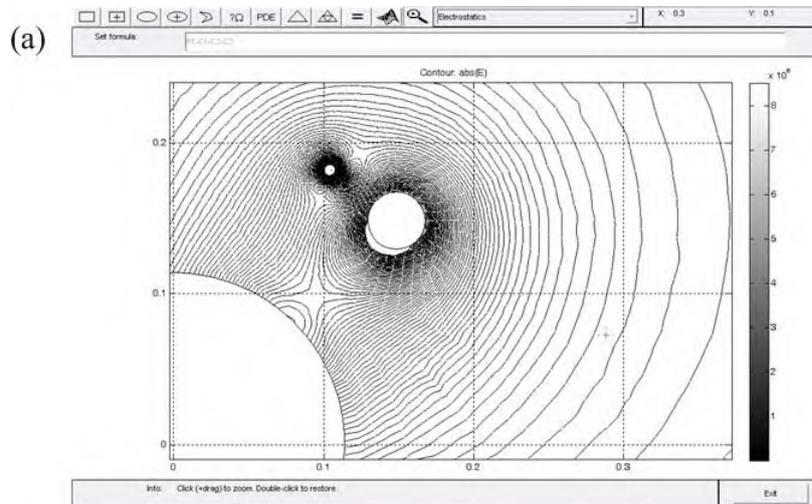
图 5-7 不同大小的圆形静电极下的圆辊表面电场分布: (a) 0.01 m; (b) 0.019 m; (c) 0.03 m; (d) 0.04 m; (e) 电场分布曲线 (模拟参数: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$)

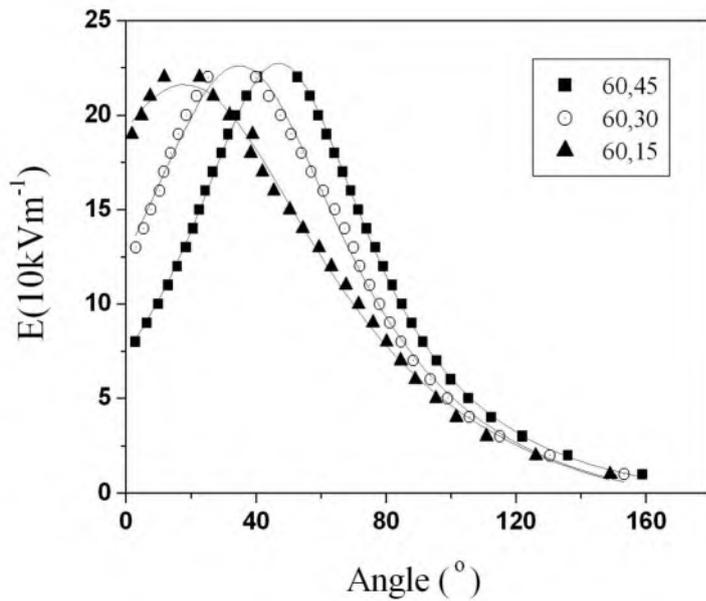
Fig.5-7 Electric-field strength distributions on the rotating roll under different radius: (a) 0.01 m, (b) 0.019 m, (c) 0.03 m, (d) 0.04 m, (e) Curve of distributions. The parameters of simulation were: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$

5.4.5 电极角度影响

5.4.5.1 电晕电极角度不变, 静电极顺时针偏转

由图 5-8 所示,随着静电极顺时针的偏转,电晕电极与静电极之间夹角逐渐增大,两者间的电场逐渐稀疏;电场强度最大值大小不变,但其角度随着静电极角度的减小而减小。静电极的顺时针偏转导致电场强度分布顺时针偏转,会降低混合物料中金属颗粒脱离的效果;同时减小对电晕极放电的影响,使混合物料中非金属颗粒的荷电更加充分,从而提高金属的收集纯度。





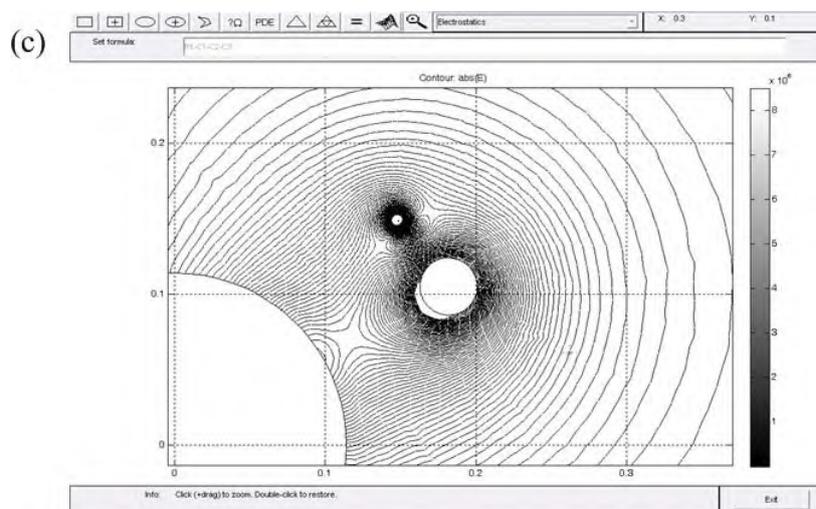
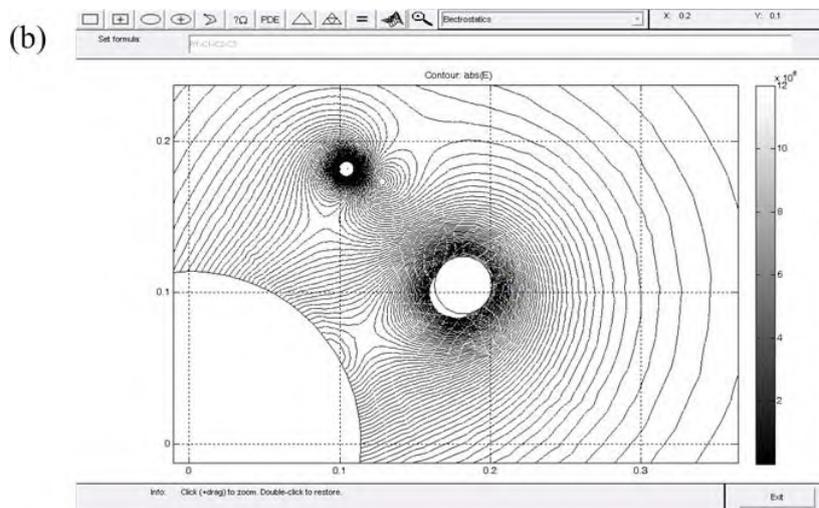
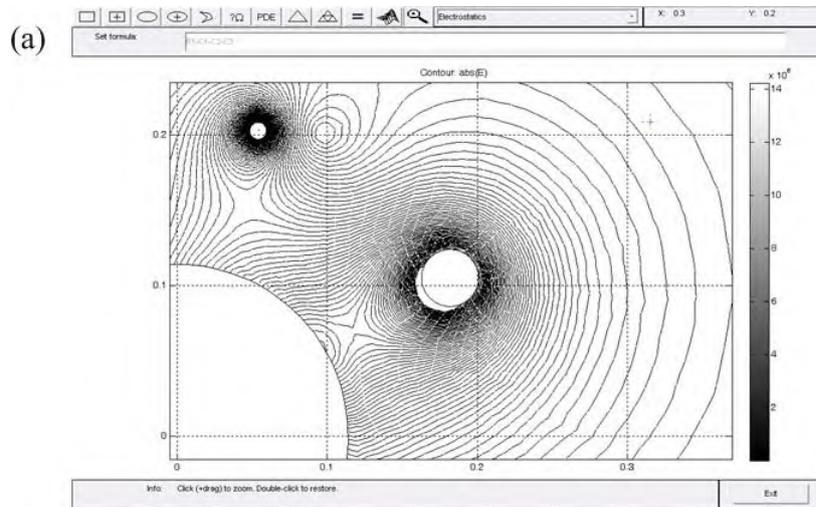
(d)

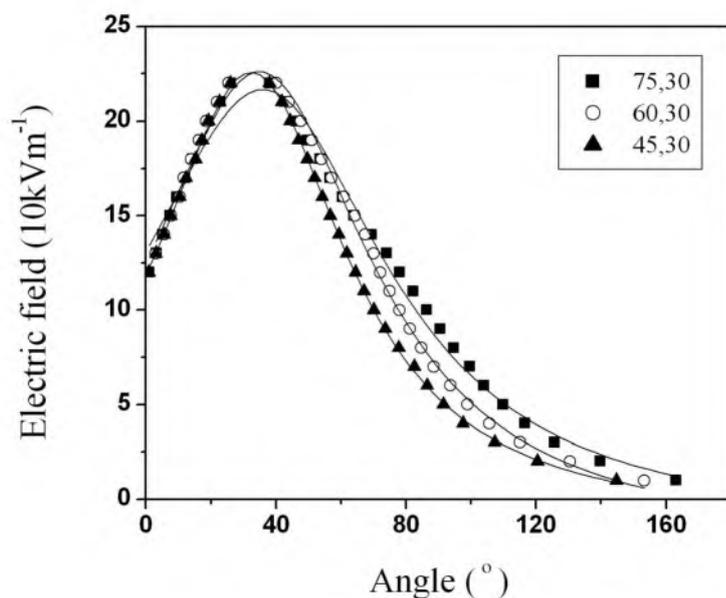
图 5-8 电晕电极与静电极间夹角与电场强度之间关系图: (a) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ$; (b) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$; (c) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 15^\circ$; (d) 分布曲线(模拟参数: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_2 = 60^\circ$)

Fig.5-8 The relationship between electric field distributions and angle of electrodes: (a) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ$, (b) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$, (c) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 15^\circ$, (d) Curve of distributions. The parameters of simulation were: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_2 = 60^\circ$

5.4.5.2 电晕电极顺时针偏转, 静电极角度不变

由图 5-9 可知, 随着电晕电极顺时针的偏转, 电晕电极与静电极之间的夹角逐渐减小, 两者间的电场逐渐密集, 电场强度最大值大小不变, 且出现角度也基本保持不变。可见, 整体电场分布主要受静电极影响, 电晕电极的顺时针偏转对整体电场分布没有明显改善。所以, 可以在不破坏分选过程的前提下, 根据工艺的实际状况来确定电晕电极的角度。





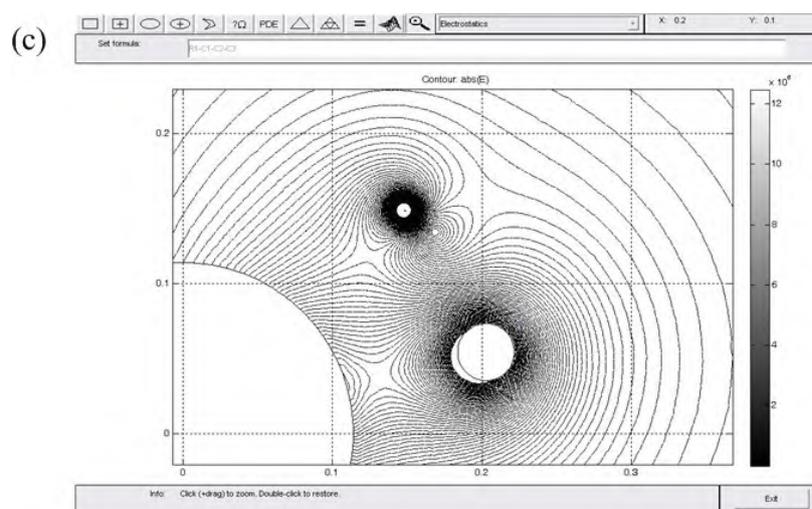
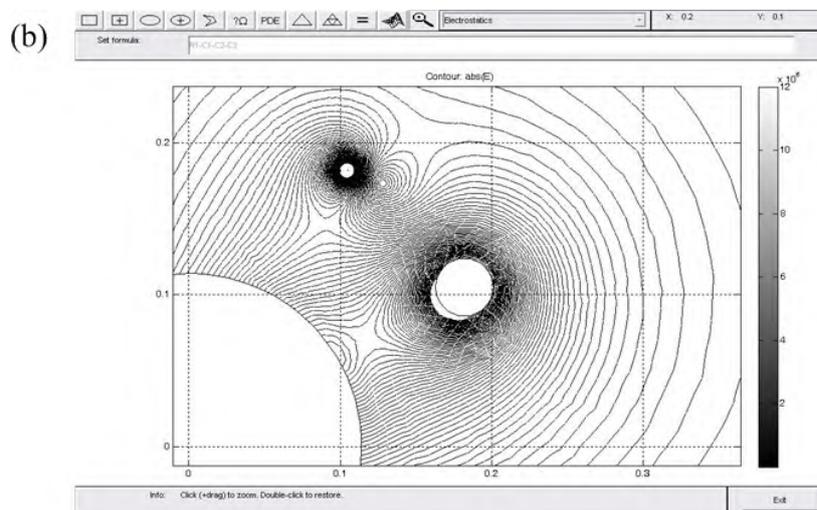
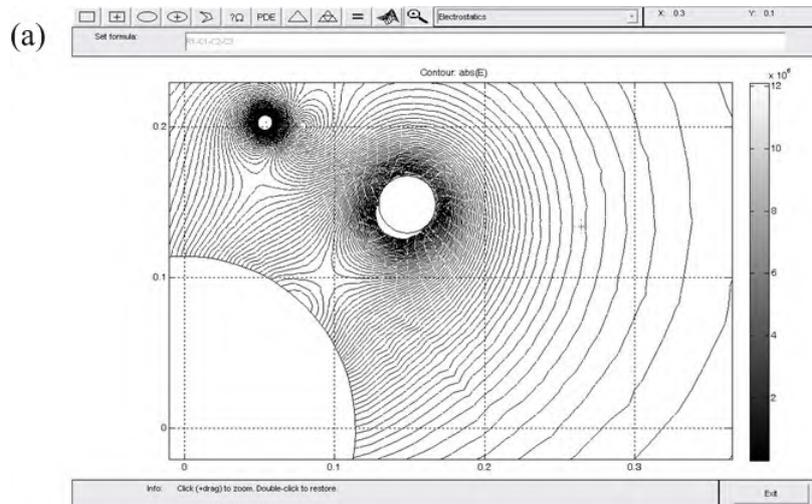
(d)

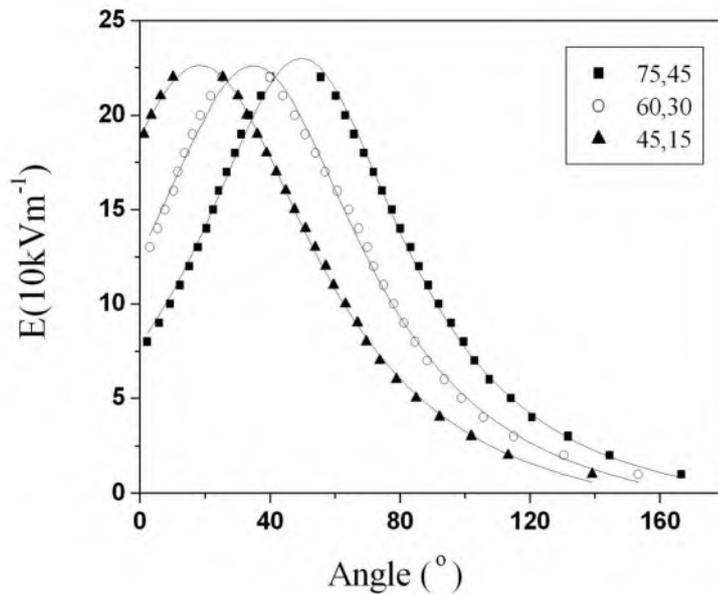
图 5-9 电晕电极与静电极间夹角与电场强度之间关系图: (a) $\theta_2 = 75^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$; (b) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$; (c) $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$; (d) 分布曲线(模拟参数: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_2 = 60^\circ$)

Fig.5-9 The relationship between electric field distributions and angle of electrodes: (a) $\theta_2 = 75^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$, (b) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$, (c) $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$, (d) Curve of distributions. The parameters of simulation were: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_2 = 60^\circ$

5.4.5.3 电晕电极与静电极间夹角不变, 整体顺时针偏转

如图 5-10 所示, 电晕电极与静电极间夹角不变, 而其整体角度变化造成的转辊表面电场分布的变化。电场分布只是随着电晕电极与静电极的角度变化而旋转了相同的角度, 造成了整体电场的偏转; 电场强度最大值的大小仍保持不变。





(d)

图 5-10 电晕电极与静电极间角度与电场强度之间分布曲线关系图: (a) $\theta_2 = 75^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ$; (b) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$; (c) $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_1 = 15^\circ$; (d) 分布曲线 (模拟参数: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_2 = 60^\circ$)

Fig.5-10 The relationship between electric field distributions and angle of electrodes: (a) $\theta_2 = 75^\circ$, $\theta_1 = 45^\circ$, (b) $\theta_2 = 60^\circ$, $\theta_1 = 30^\circ$, (c) $\theta_2 = 45^\circ$, $\theta_1 = 15^\circ$, (d) Curve of distributions. The parameters of simulation were: $U = 20 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_2 = 60^\circ$

综合以上分析,在高压静电分选机的实际应用中宜采用高电压、大中心距离的工艺参数。为提高金属的回收率,在一次分选时,提高静电极的角度,改善金属的脱离,使绝大部分金属颗粒落至前方收集器;二次分选时,应降低静电极的角度,提高非金属收集的纯度,使绝大部分的非金属进入非金属的收集器,以便下一步处理利用。

5.5 实验验证

根据以上的模拟结果,利用自制高压静电分选机对破碎后 Type-A 废旧电路板颗粒进行分选。实验验证影响电场分布的主要因素(电压,电极角度),对分选结果的作用,并与模拟结果相比较。

5.5.1 电压影响验证

实验使用的是破碎后 Type-A 废旧印刷电路板，物料粒径为 $-0.8 +0.6$ mm。高压静电分选机操作参数：电晕电极半径：0.00015 m，圆形静电极半径：0.019 m，转辊半径：0.114 m，中心距离：0.21 m，电晕电极角度： 60° ，静电极角度 30° 。

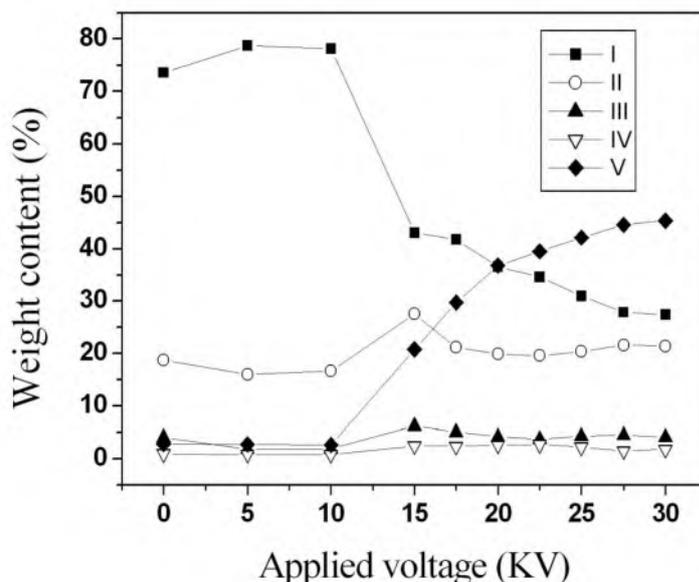


图 5-11 不同电压下的静电分选结果

Fig.5-11 Results of particles under different voltage

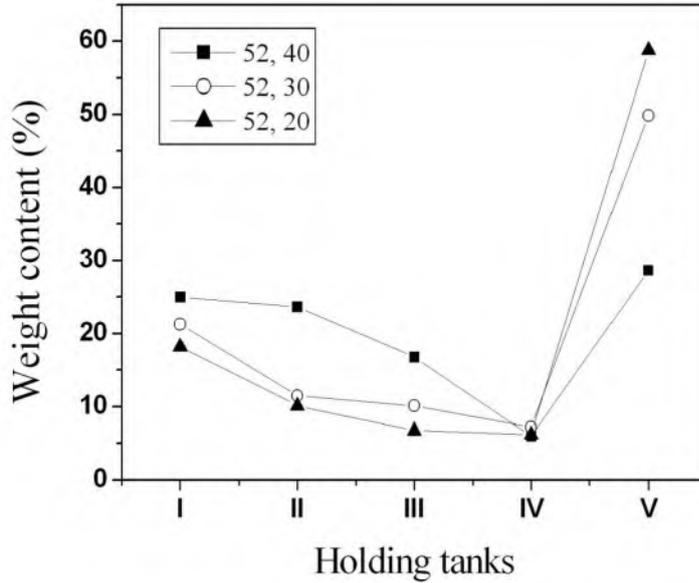
图 5-11 为各料槽（见图 5-1，I 槽为金属收集槽，V 槽为非金属收集槽，II、III、IV 为中间体收集槽）中颗粒的重量比例与所施加的电压之间的关系，由图可知：

1) 施加电压 15 kV 是一个转折点，各收集槽中物料重量比例都出现了明显的变化，且实验中发现非金属颗粒紧紧依附在转辊上，随着转辊转动至非金属收集区才开始掉落或被刷子刷落。

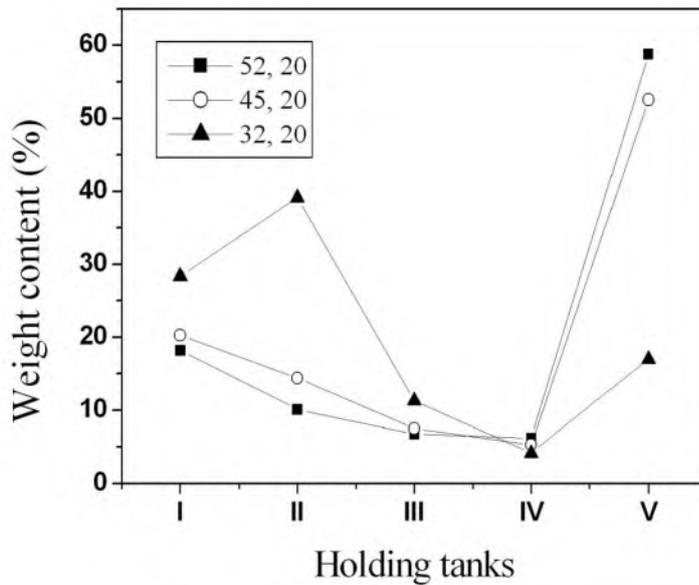
2) II 槽中颗粒重量比例在 17.5 kV 时明显减小，说明非金属大颗粒也已经被排除金属收集区；且在施加电压为 20 kV 到 30 kV 之间时重量比例稳定在 20%左右。20 kV 时的电场对 $-0.8 +0.6$ mm 的非金属物料已经具有了很好的分选效果。

3) V 槽中颗粒重量比例在施加电压大于 15 kV 之后，随电压增高不断的上升。说明加大电压可以使非金属的淘汰率增加，提高金属的收集纯度，改善了分选结果，与模拟结果相同。因为随着电压的增大，电晕放电加剧，产生的空间的负电荷数量增加，待选颗粒带电充足，从而提高了分选效率，使分选效果明显。所以通过提高电极电压可以提高分选效率，改善分选结果。

5.5.2 电极位置



(a)



(b)

图 5-12 不同电极角度下的静电分选结果: (a) θ_1 改变, θ_2 不变; (b) θ_1 不变, θ_2 改变 (模拟参数: $U = 25 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_1 = 0.114$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$)

Fig.5-12 Results of particles under different angle of electrodes: (a) θ_1 was changed and θ_2 was constant, (b) θ_1 was constant and θ_2 was changed. The operating parameters of experiment were: $U = 25 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21\text{m}$, $R_1 = 0.114$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$.

如图 5-12 (a)所示,当电晕电极位置保持不变,静电极顺时针旋转时,随着静电极角的减小,中间体中物料重量比例不断减小。如图 5-12 (b)所示,静电极位置保持不变,随着电晕电极角度的增大,中间体中物料重量比例不断减小。说明大角度电晕电极与小角度静电极的参数设置有利于分选。这与模拟推导的结论基本一致。

通过实验发现,施加电压的改变、电极特性的改变直接导致分选空间高压静电场的电场强度分布变化。电场强度分布的差异影响了破碎后废旧电路板颗粒的分选结果。对空间电场强度的分布的计算机模拟能够更加透彻和清晰的理解分选过程,并能定量的、更加直观地分析电压改变、电极特性改变、对分选的影响,进而通过模拟和实验验证,得出高压静电分选机优化的工艺参数范围: $U = 20 \text{ kV} - 30 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_1 = 0.114 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 20^\circ$ and $\theta_2 = 60^\circ$ 。

5.6 本章小结

本章利用数学模拟软件 MATLAB 对高压静电分选机内高压静电场的电场强度进行模拟。并通过模拟分析电压与电极特性对分选效果的影响,结合实验验证优化高压静电分选机的工艺参数,得到:

1) 电场强度最大值位置偏向于静电极方向。加大电压、采用复合电极结构、减小电极与转辊之间的距离、增加静电极半径、减小静电极角度、加大电晕电极角度等都可以提高电场强度,改善分选效果。

3) 计算机模拟结果与实验结果相一致。计算机模拟成功的用于优化高压静电分选机的工艺参数,工艺参数为以下范围时,可以得到较好的分选效果: $U = 20 \text{ kV} - 30 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_1 = 0.114 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 20^\circ$ and $\theta_2 = 60^\circ$ 。

第六章 高压静电场下金属颗粒运动轨迹的计算机模拟

6.1 引言

破碎后废旧印刷电路板中的金属颗粒主要是铜颗粒，具有很高的回收价值^[1]。在高压静电分选过程中，金属颗粒的轨迹受到颗粒特性、尺寸、密度及分选空间的静电场分布等诸多因素的影响。为了使高压静电分选应用领域最大化及更利于金属回收，一种精确的计算金属颗粒运动轨迹的方法是十分必要的。许多研究着在高压静电分选机的参数优化^[2,3]及电场分布计算领域做了大量的工作^[4-6]。M. Younes 等^[7]报道了柱状颗粒在高压静电分选中轨迹的研究。但关于高压静电分选过程中的金属轨迹的研究还不够系统、深入。本章利用数学模拟软件 MATLAB 编程，建立金属颗粒运动轨迹模型，该模型适应多种工艺参数变化，为提高高压静电分选机的金属回收效率及扩展分选机的应用领域提供理论依据。

6.2 金属颗粒运动轨迹模型

6.2.1 模型建立

被称作为第四代计算机语言的 MATLAB，利用其丰富的函数资源，使编程人员从繁琐的程序代码中解放出来。结合第四章模拟电场强度分布结果，利用 MATLAB 编程实现金属颗粒运动轨迹的模拟。

如图 6-1 所示，物料颗粒由电子振动加料器输送到接地转辊表面随转辊一起运动，当金属颗粒经过高压静电场区时感应带电，金属颗粒受到的静电力 (F_e) 不断加大，当颗粒径向所受的合力为 0 时，颗粒脱离转辊飞向金属颗粒收集区，此点成为“脱离点”，脱离点位置用此点与转辊中心连线的水平夹角 θ 表示，颗粒在脱离点的速度和位置为“脱离点速度”和“脱离点位置”， θ 是计算金属颗粒运动轨迹的初值。

如图 6-2 所示，为颗粒轨迹模拟计算流程图。程序的初始赋值为：高压静电分选机的设备参数（转辊半径 R_1 ，静电极半径 R_2 ，转辊与静电极的截面中心距离 L ，静电极水平角度 α ，电压 U ，转辊转速 n ）和物料特性参数（密度 ρ ，物料颗粒半径 r ）。

利用初始赋值与电场公式计算电场分布，由颗粒的受力分析得到脱离点 θ 及颗粒脱离时的位置与速度。以脱离点为初始点，计算颗粒脱离后每一点的位置，得到运动轨迹。

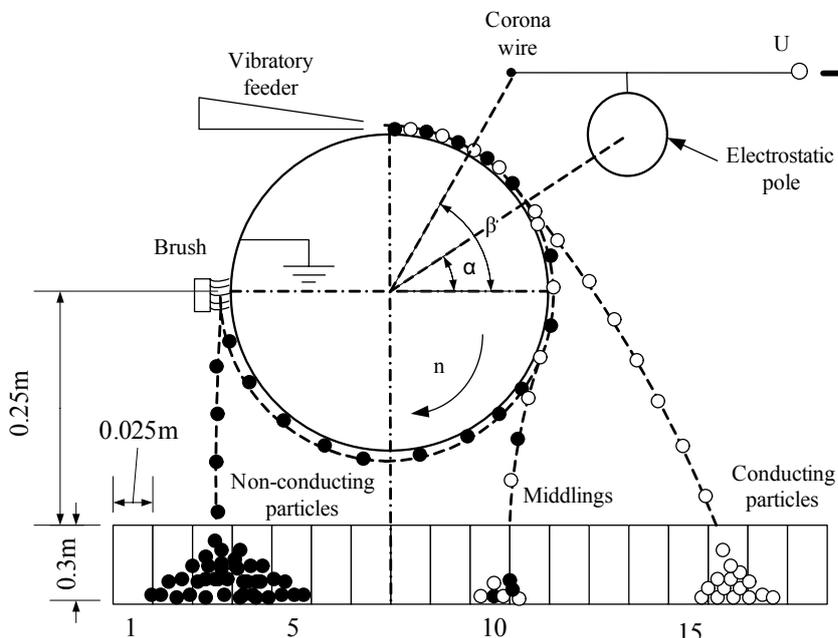


图 6-1 高压静电分选过程示意图
Fig.6-1 Diagram of corona electrostatic separator

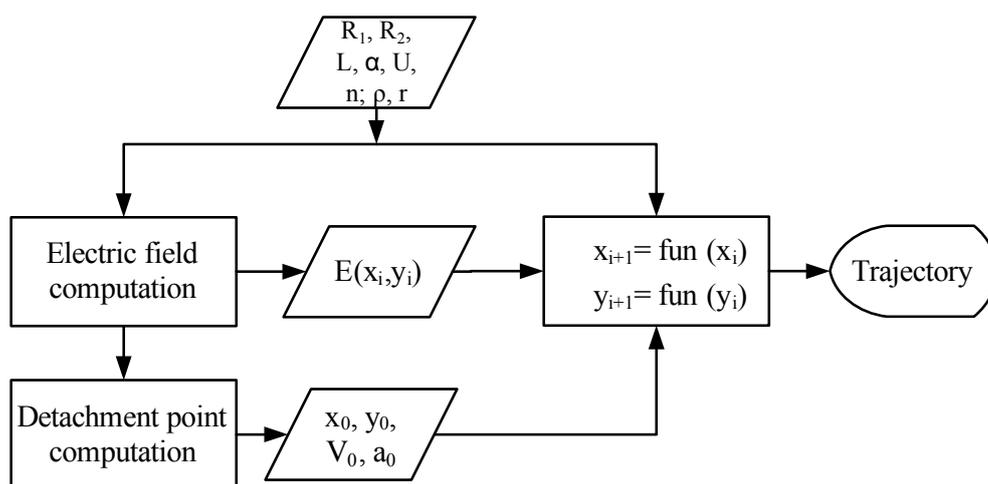


图 6-2 颗粒轨迹模拟计算流程图
Fig. 6-2 Flow chart of the program for computing model

6.2.2 电场计算

高压静电场由圆柱电极形成，圆柱电极的轴向长度比电极的直径及其电极间的距离大很多时，可认为该静电场沿轴向没有变化，简化为二维处理，如图 6-3 所示。由于金属颗粒在高压静电场中感应带电，电场计算时电极结构简化为单静电电极的电场。转辊截面中心设定为二维空间的原点。

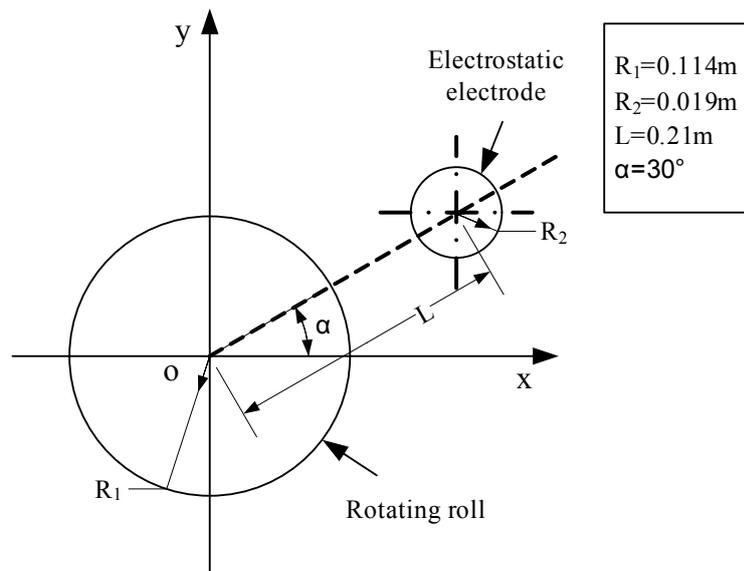


图 6-3 电场计算中电极的几何模型

Fig.6-3 Geometric model used in electrostatic field computation

由文献^[8]计算电场强度的分布，电场强度的计算如下：

$$E_x = \left[\frac{j - h_1 + x_1}{(j - h_1 + x_1)^2 + y_1^2} + \frac{j + h_1 - x_1}{(j + h_1 - x_1)^2 + y_1^2} \right] \times f \quad (6-1a)$$

$$E_y = \left[\frac{y_1}{(j - h_1 + x_1)^2 + y_1^2} - \frac{y_1}{(j + h_1 - x_1)^2 + y_1^2} \right] \times f \quad (6-1b)$$

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2} \quad (6-2)$$

式中，

$$h_1 = (L^2 + R_1^2 - R_2^2) \div (2L);$$

$$h_2 = (L^2 - R_1^2 + R_2^2) \div (2L);$$

$$x_1 = x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha);$$

$$y_1 = y \cos(\alpha) - x \sin(\alpha);$$

$$j = \sqrt{h_1^2 - R_1^2};$$

$$f = U \div \ln \frac{(h_1 + j - R_1)(h_2 + j - R_2)}{(R_1 + j - h_1)(R_2 + j - h_2)}$$

E_x 和 E_y 分别是电场强度的水平和垂直分量。

6.2.3 颗粒脱离点计算

假设：

- 1) 颗粒为球状良导体，半径为 r , 密度为 ρ ;
- 2) 颗粒在静电场中即时产生感应带电，带电量最大；
- 3) 相邻两颗粒间距远大于颗粒尺寸，颗粒被视为单独的质点；
- 4) 分选空间的介电常数为 ϵ ;
- 5) 摩擦起电忽略不计。

以此为前提进行脱落点的计算。

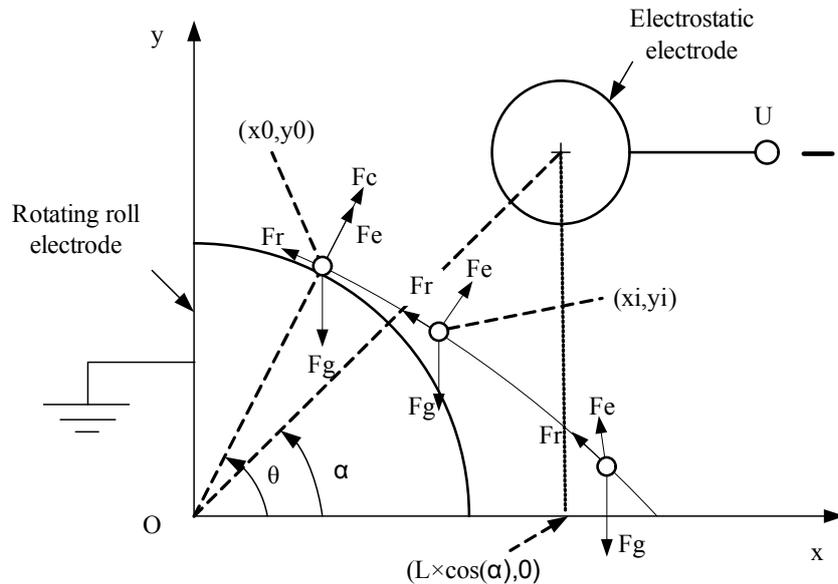


图 6-4 金属颗粒受力模型

Fig. 6-4 Force diagram of metal particles in process of corona electrostatic separating

如图 6-4 所示，金属颗粒在脱离转辊前，受到静电力 F_e ，离心力 F_c ，空气阻力 F_r 重力 F_g 的作用，在脱离转辊后，颗粒受到 F_e ， F_r ， F_g 作用。在脱落前，金属颗粒以速度 v 随着转辊运动：

$$v = \omega R_l \quad (6-3)$$

式中， ω 是转辊转动的角速度， R_l 是转辊半径。

当金属颗粒径向合力满足下列条件时，颗粒从转辊上脱离：

$$F_g \times \sin(\theta) = F_e + F_c \quad (6-4)$$

式中， $F_e = 0.832QE$ 是电场力^[9]； $Q = \frac{2}{3}\pi^3 \epsilon r_0^2 E$ 是颗粒的荷电量^[10]； $F_g = \frac{4}{3}\rho\pi r_0^3 g$ 是颗粒所受重力； $F_c = \frac{4}{3}\rho\pi r_0^3 \omega^2 R_l$ 是离心力。

即当满足如下条件时，颗粒从转辊上脱离：

$$\frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho g \times \sin(\theta) = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho \omega^2 R + 17.2\epsilon r_0^2 E^2 \quad (6-5)$$

可以写成如下形式：

$$z_1 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho g \times \sin(\theta) \quad (6-6)$$

$$z_2 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho \omega^2 R + 17.2\epsilon r_0^2 E^2 \quad (6-7)$$

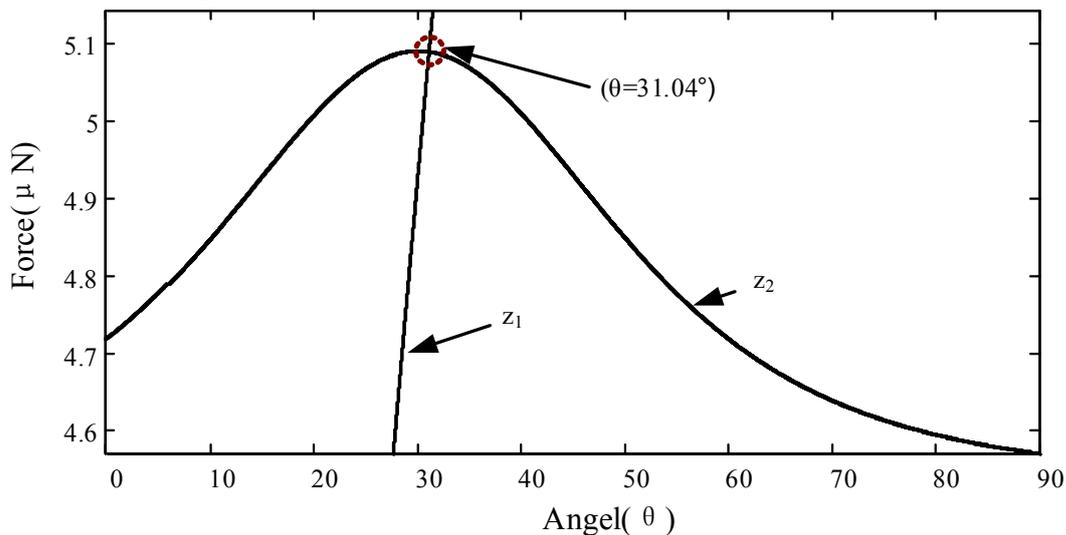


图 6-5 脱离点计算函数图 (参数: $\rho = 8.9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, $r_0 = 0.3 \text{ mm}$, $n = 60 \text{ rpm}$, $U = 25 \text{ kV}$, $\alpha = 30^\circ$)

Fig.6-5 Graphing method for detachment point computation (parameters: $\rho = 8.9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, $r_0 = 0.3 \text{ mm}$, $n = 60 \text{ rpm}$, $U = 25 \text{ kV}$, $\alpha = 30^\circ$)

由式 6-6 和式 6-7 得到以 θ 为变量, z 为函数的两条曲线。两函数曲线的交点: 当 $z_1=z_2$ 时, 颗粒从转辊上脱离, 如图 6-5 所示。将式 6-1、6-2 中的 x_1 、 y_1 用 $x_1 = R_1 \times \cos(\theta - \alpha)$ 和 $y_1 = R_1 \times \sin(\theta - \alpha)$ 代替, 计算出脱落点的电场强度 E 。

6.2.4 颗粒轨迹计算

当颗粒从转辊上脱离时, 颗粒的运动方程表示为:

当 $(x_i < L \times \cos(\alpha))$ 时

$$ma_x(x_i, y_i) = Fe_x(x_i, y_i) + Fr_x(x_i, y_i) \quad (6-8)$$

$$ma_y(x_i, y_i) = Fe_y(x_i, y_i) + Fr_y(x_i, y_i) - Fg \quad (6-9)$$

当 $(x_i > L \times \cos(\alpha))$ 时

$$ma_x(x_i, y_i) = -Fe_x(x_i, y_i) + Fr_x(x_i, y_i) \quad (6-10)$$

$$ma_y(x_i, y_i) = Fe_y(x_i, y_i) + Fr_y(x_i, y_i) - Fg \quad (6-11)$$

式中, 空气阻力 $Fr_x = -6\pi\eta r_0 \frac{dx}{dt}$ 和 $Fr_y = -6\pi\eta r_0 \frac{dy}{dt}$, ($\eta = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Nsm}^{-2}$ 空气阻力系数); 颗粒的质量 $m = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho$ 。

F_e 随颗粒位置而改变, F_r 受颗粒运动速度影响, F_g 是常量。将颗粒运动轨迹微分化, 在 $dt \rightarrow 0$, 则可以认为金属颗粒以初速度 $V(x_i, y_i)$, 加速度 $a(x_i, y_i)$ 经过时间 dt 从 (x_i, y_i) 匀加速运动到了 (x_{i+1}, y_{i+1}) 。

由式 6-1, 6-2, 6-6 和 6-7 所计算得出的脱离点为轨迹的起始点, 则速度和加速度:

$$V_x(x_0, y_0) = \omega R_1 \sin(\theta_d) \quad (6-12)$$

$$V_y(x_0, y_0) = \omega R_1 \cos(\theta_d) \quad (6-13)$$

$$a_x(x_0, y_0) = [-6\pi\eta V_x(x_0, y_0) + Q_d E_x(x_0, y_0)] / m \quad (6-14)$$

$$a_y(x_0, y_0) = [6\pi\eta V_y(x_0, y_0) + Q_d E_y(x_0, y_0)] / m - g \quad (6-15)$$

$$x_0 = R_1 \cos(\theta_d) \quad (6-16)$$

$$y_0 = R_1 \sin(\theta_d) \quad (6-17)$$

式中, $Q_d = \frac{2}{3} \pi^3 \varepsilon r_0^2 E(x_0, y_0)$ 是导体颗粒在脱离点所带电荷。导体颗粒在空中的位置的计算如下:

$$x_{i+1} = x_i + V_x(x_i, y_i)dt + 0.5a_x(x_i, y_i)dt^2 \quad (6-18)$$

$$y_{i+1} = y_i + V_y(x_i, y_i)dt + 0.5a_y(x_i, y_i)dt^2 \quad (6-19)$$

$$V_x(x_i, y_i) = V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_x(x_{i-1}, y_{i-1})dt \quad (6-20)$$

$$V_y(x_i, y_i) = V_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + a_y(x_{i-1}, y_{i-1})dt \quad (6-21)$$

$$a_x(x_i, y_i) = [6\pi\eta V_y(x_{i-1}, y_{i-1}) + Q_d E_x(x_{i-1}, y_{i-1})] / m - g \quad (6-22)$$

当颗粒运动时, F_e 的方向发生了改变, 等式为:

当 $x_i < L \times \cos(\alpha)$ 时

$$a_x(x_i, y_i) = [-6\pi\eta V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) + Q_d E_x(x_{i-1}, y_{i-1})] / m \quad (6-23)$$

当 $x_i > L \times \cos(\alpha)$ 时

$$a_x(x_i, y_i) = [-6\pi\eta V_x(x_{i-1}, y_{i-1}) - Q_d E_x(x_{i-1}, y_{i-1})] / m \quad (6-24)$$

由以上分析, 利用 MATLAB 软件编写程序模拟导体颗粒的运动轨迹, dt 设置为 0.1 ms。通过输入不同的高压静电分选机的工作条件和颗粒的特性参数, 可以模拟不同的轨迹。

6.2.5 模拟轨迹验证

金属颗粒来自经过预处理的废旧印刷电路板, 颗粒主要为铜颗粒, 粒径为 -0.8 +0.6 mm。所用高压静电分选机如图 6-1 所示, 共有 18 个收集槽, 工艺参数与几何模型 (图 6-3) 一致。一台 Kodak Z-750 数码相机用来捕捉颗粒运行轨迹。

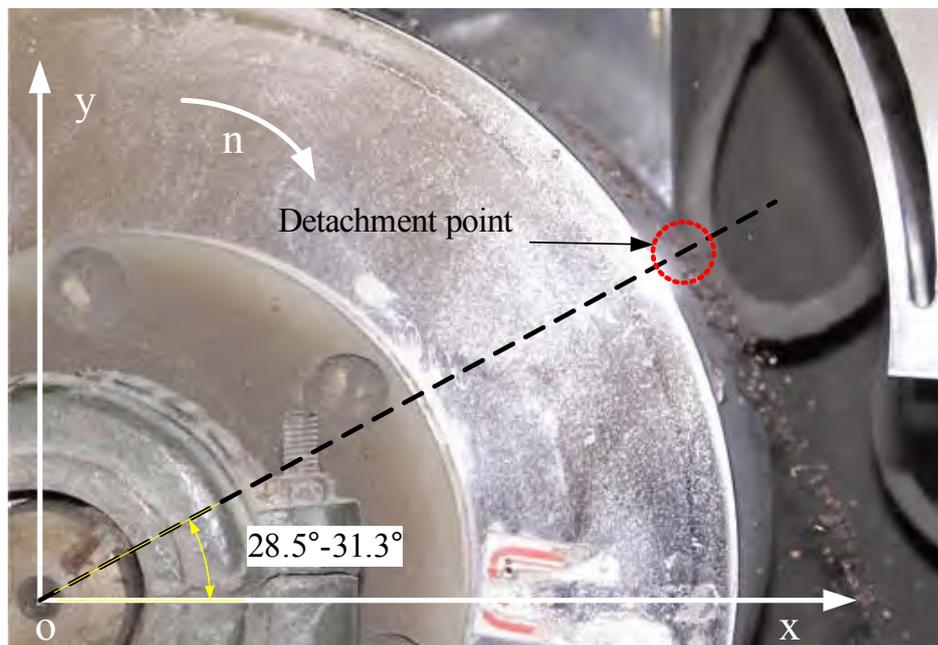


图 6-6 金属颗粒脱离转辊表面照片 (参数: $\rho = 8.9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, $r_0 = 0.3 \text{ mm}$, $n = 60 \text{ rpm}$, $U = 25 \text{ kV}$, $\alpha = 30^\circ$)

Fig.6-6 Photograph of metal particles detaching from the rotating roll (parameters: $\rho = 8.9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, $r_0 = 0.3 \text{ mm}$, $n = 60 \text{ rpm}$, $U = 25 \text{ kV}$, $\alpha = 30^\circ$)

由图 6-5 得到金属铜颗粒脱离点: $\theta_d = 31.04^\circ$ ($r_0 = 0.3 \text{ mm}$)及 $\theta_d = 30.10^\circ$ ($r_0 = 0.4 \text{ mm}$)。如图 6-6 所示, 实验得到的金属颗粒脱离点: $\theta_{d \min} = 28.5^\circ$ 及 $\theta_{d \max} = 31.3^\circ$ 。结果表明, 计算值与实际值具有很好的 consistency。

图 6-7 所示为应用 MATLAB 编程得到的在不同的转辊转速条件下金属颗粒轨迹模拟图。模拟图清晰直观的表示了分选过程中转速对金属颗粒轨迹的影响。与图 6-7 参数一致的实验中, 金属颗粒落入各收集槽的重量如表 6-1 所示。收集槽口表面与转辊中心的高度差为 0.25 m , 颗粒在空中飞行约 0.2 s 落入各收集槽。实验数据表明: $n = 40 \text{ rpm}$ 时, 金属颗粒多集中于 12 号槽; $n = 60 \text{ rpm}$ 时, 金属颗粒多集中于 13 号槽。如图 6-1 所示, 12 号收集槽的位置 $0.01 \text{ m}-0.125 \text{ m}$, 13 号收集槽的位置 $0.125 \text{ m}-0.15 \text{ m}$ 。模拟结果与实验结果基本一致, 误差主要来自:

- 1) 物料颗粒尺寸不均匀, 形状不规则;
- 2) 颗粒感应带电不完全;
- 3) 系统误差。

表 6-1 不同转辊转速下颗粒脱离角及落入各收集槽的重量比例 (参数: $n = 60 \text{ rpm}$, $U = 25 \text{ kV}$, $\alpha = 45^\circ$, $\rho = 8.9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, $r_{o \text{ min}} = 0.3 \text{ mm}$, $r_{o \text{ max}} = 0.4 \text{ mm}$)

Table 6-1 The detachment angle θ_d and horizontal positions ($y = -0.25 \text{ m}$) for different rotational speeds. (parameters: $n = 60 \text{ rpm}$, $U = 25 \text{ kV}$, $\alpha = 45^\circ$, $\rho = 8.9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, $r_{o \text{ min}} = 0.3 \text{ mm}$, $r_{o \text{ max}} = 0.4 \text{ mm}$)

n (rev/min)	θ_d ($^\circ$)	Time cost (s)	Computing value	Weight contents (%) of collecting boxes				
			X (m)	11	12	13	14	15
40	12.3	0.1924	0.132	10	83	6	1	0
50	19.4	0.1902	0.147	5	78	13	4	0
60	28.7	0.1918	0.169	0	4	85	9	2

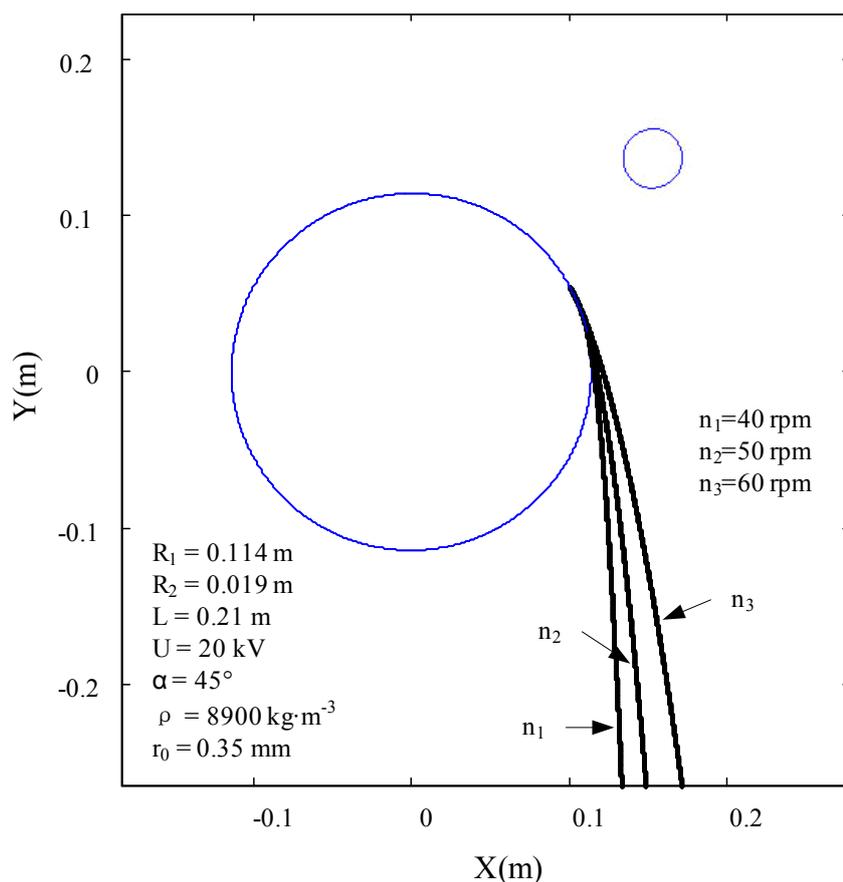


图 6-7 不同转辊转速下金属颗粒模拟轨迹图

Fig.6-7 Diagram of computed trajectories of metal particles for different rotational speeds

该模型各初始赋值都可以改变。以往的高压静电分选设备制造中，为了达到最好的分选效果，频繁的更换设备工艺参数，结果费时费力。该模型可以解决此类问题。

6.3 模型的修正

虽然应用模型模拟的结果与实验结果基本一致，但两者之间仍存在差距。为了缩小差距，使模型更加精确，一些修正方法被应用于模型之中。

6.3.1 小颗粒碰撞修正

实验中发现，当所施加的电压较高、转辊转速较大时，出现金属颗粒碰撞到静电极后反弹的现象。一般颗粒尺寸在 0.1 mm 以下时，由于颗粒本身质量小，重力对颗粒的作用较小，受到静电作用的影响较大，而使得颗粒脱离点偏高，在颗粒脱离之后，沿着轨迹行进的方向很可能与静电极相撞，而改变了原来的轨迹，进而对颗粒落地点和分选机分离效果都产生影响。针对此现象对 MATLAB 程序修正。

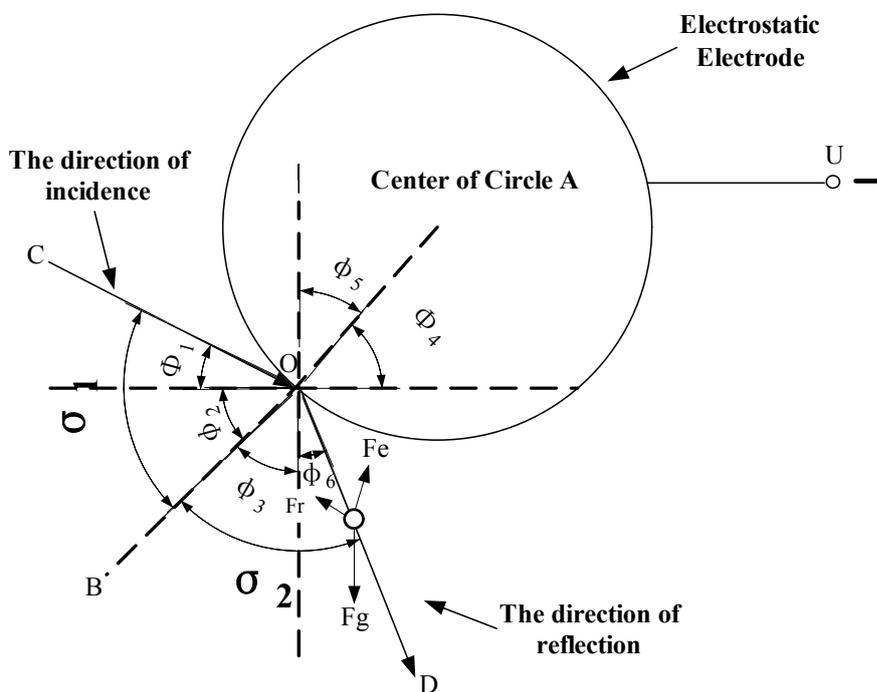


图 6-8 金属颗粒撞上静电极轨迹模型

Fig.6-8 Geometric configuration of particle trajectory for bumping the electrostatic electrode

金属颗粒和静电极都属于刚性物质，假设金属颗粒撞上静电极为完全弹性碰撞，对这个过程的轨迹进行分析。如图 6-8 所示，颗粒撞上静电极的同时，除了速度方向有所变化之外，所受到的力并没有变化，仍然是静电力 F_e ，颗粒所受空气阻力 F_r ，以及重力 F_g ，则颗粒的加速度与速度大小保持不变。当颗粒碰撞静电极之后，将沿着新的速度方向运动。将新的速度方向沿 X 轴和 Y 轴分解，代入原有的轨迹程序，即可得到新的轨迹模拟路线。

由完全弹性碰撞性质，入射角等于反射角，即：

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_2 \\ \phi_1 + \phi_2 &= \phi_3 + \phi_4\end{aligned}\quad (6-25)$$

由点递进的计算方法，相临两点的坐标可知，假设第 $i+1$ 点撞上静电极则

$$\phi_1 = \arctan \frac{y_{i+1} - y_i}{x_i - x_{i+1}} \quad (6-26)$$

式中， x_i, y_i 为第 i 点的坐标， x_{i+1}, y_{i+1} 为第 $i+1$ 点的坐标，对顶角 $\phi_2 = \phi_4$ ，静电极圆心坐标为 j_4, j_5 ，则

$$\phi_4 = \arctan \frac{j_4 - x_{i+1}}{j_5 - y_{i+1}} \quad (6-27)$$

同理， ϕ_3 与 ϕ_2 是互余角，则

$$\phi_3 = \arctan \frac{j_5 - y_{i+1}}{j_4 - x_{i+1}} \quad (6-28)$$

那么，

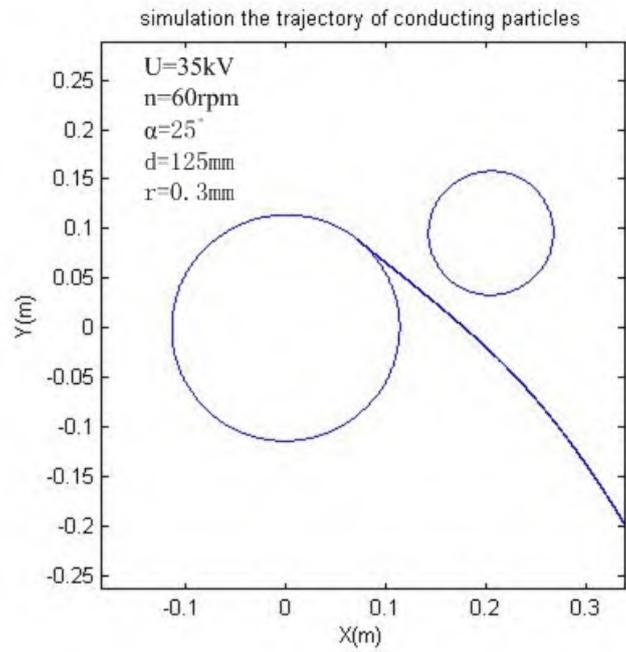
$$\begin{aligned}\phi_6 &= \sigma_2 - \phi_3 = \sigma_1 - \phi_3 = \phi_1 + \phi_2 - \phi_3 \\ &= \arctan \frac{y_{i+1} - y_i}{x_i - x_{i+1}} + \arctan \frac{j_5 - y_{i+1}}{j_4 - x_{i+1}} - \arctan \frac{j_4 - x_{i+1}}{j_5 - y_{i+1}}\end{aligned}\quad (6-29)$$

由 6-29 可得速度大小：

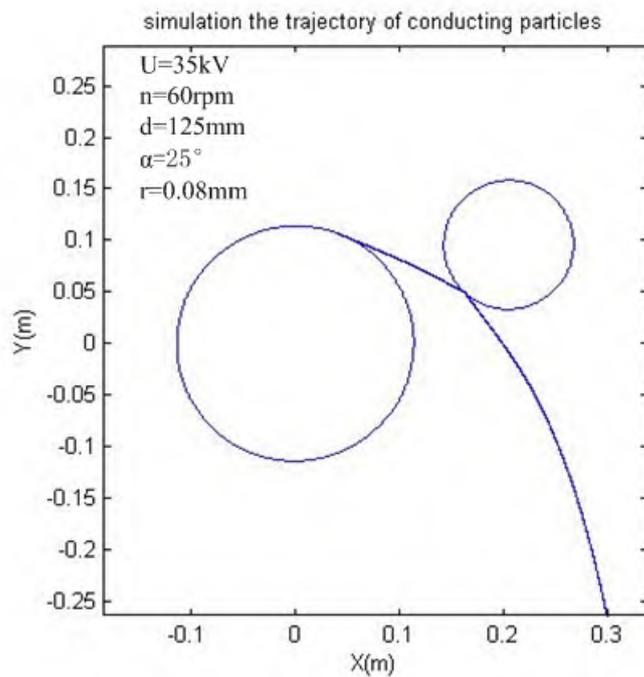
$$V_x(x_{i+1}, y_{i+1}) = \sqrt{V_x^2(x_i, y_i) + V_y^2(x_i, y_i)} \times \sin(\phi_6) \quad (6-30)$$

$$V_y(x_{i+1}, y_{i+1}) = \sqrt{V_x^2(x_i, y_i) + V_y^2(x_i, y_i)} \times \cos(\phi_6) \quad (6-31)$$

图 6-9 模拟了颗粒撞上静电极，以及颗粒正常情况下的状态。



(a)



(b)

图 6-9 金属颗粒轨迹模拟图: (a)正常轨迹; (b)与静电极相撞轨迹图

Fig.6-9 Simulation diagram of metal particle's trajectory: (a) normal, (b) crash with electrostatic electrode

6.3.2 电极修正

模拟程序使用的电场强度分布的计算公式适用于单电极的系统，实际应用中的高压静电分选机多为复合电极结构。如图 6-10 所示，应用第四章中模拟方法模拟本章中单电极与复合电极的电场强度分布。单电极与复合电极结构的差距在角度为 32° 以后较为明显。复合电极的电场分布高于单电极的电场分布。颗粒在角度小于 32° 的位置脱离时电极结构的差异可以忽略。如前所述的金属颗粒脱离角度都小于 32° ，所以模拟程序与实验结果相一致。但如果施加电压过高或者金属颗粒尺寸过小时，个别颗粒脱离位置大于 32° ，应采用可计算多电极结构的电场强度计算公式处理。

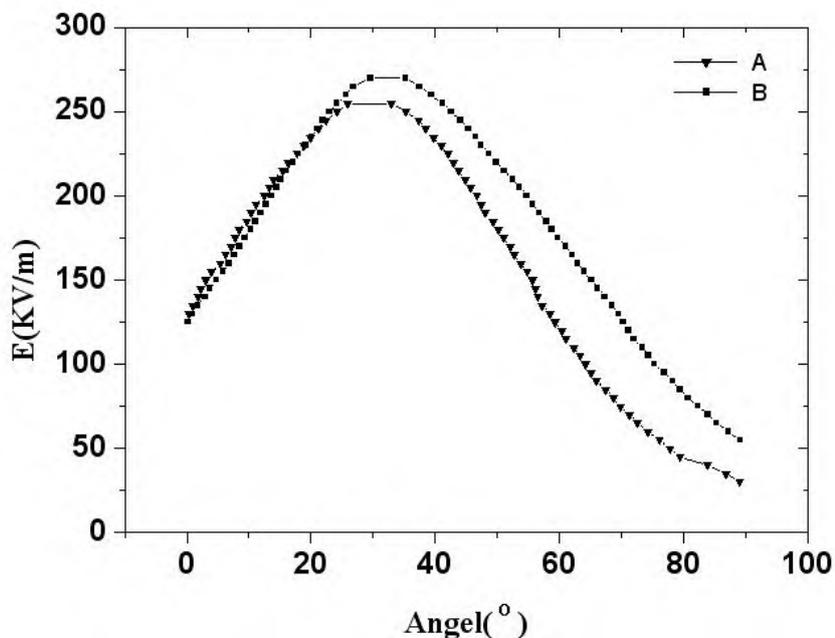


图 6-10 不同电极结构电场强度分布图：(A)单电极 $\alpha = 30^\circ$ ；(B)复合电极，静电极 $\alpha = 30^\circ$ ，电晕极 $\beta = 30^\circ$ 。（模拟参数： $U = 25 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_1 = 0.114 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$ ）

Fig.6-10 Electric-field strength distributions on the rotating-roll under different electrode structures, (A) single electrostatic electrode $\alpha = 30^\circ$, (B) single electrostatic electrode $\alpha = 30^\circ$ + single corona electrode $\beta = 60^\circ$. The parameters of simulation were: $U = 25 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_1 = 0.114 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$.

6.4 模型的扩展应用

该模型中各初始赋值都可以任意改变，使得模型具有广泛扩展应用。通过上文分析发现，微小颗粒在分选过程中往往出现特殊的现象。将颗粒轨迹计算中分量 F_e 、 F_r 与 F_g 提取出来，可清晰，直观的得到各分量对颗粒的影响效果。

如图 6-11 所示，颗粒半径 $r \geq 0.3 \text{ mm}$ 时，电场力不到重力的 15%，颗粒半径 $r \leq 0.1 \text{ mm}$ 时，脱离初期电场力可达到重力的 35% 以上，电场力对颗粒的影响随着颗粒尺寸的减小而增大，所以微小颗粒分选时出现碰撞静电极的现象，而大颗粒一般不会出现碰撞现象。图 6-12 所示为空气阻力随颗粒尺寸的变化对颗粒的影响情况，空气阻力对颗粒的影响随颗粒尺寸的减小而增大，随颗粒运行速度的加大而增大。

将不同的颗粒的密度 ρ 的轨迹程序相结合，模型成为分析混合金属颗粒轨迹的工具，具体的应用在第七章展开。

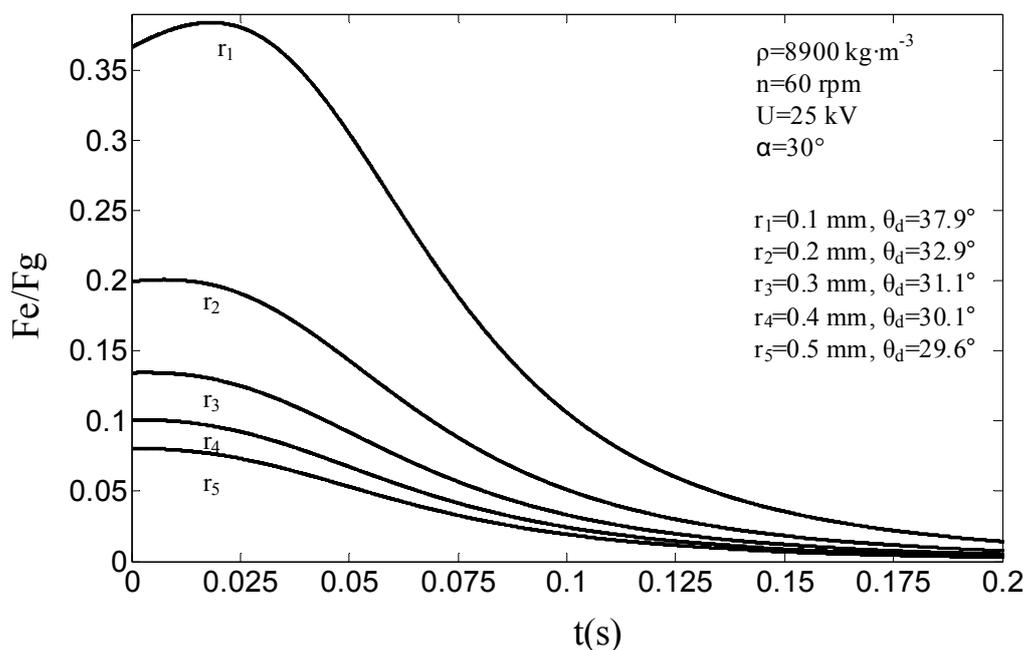


图 6-11 不同金属颗粒尺寸下电场力与重力的关系图

Fig.6-11 Electric forces and gravitation forces exerting on the particles for different radius after detachment

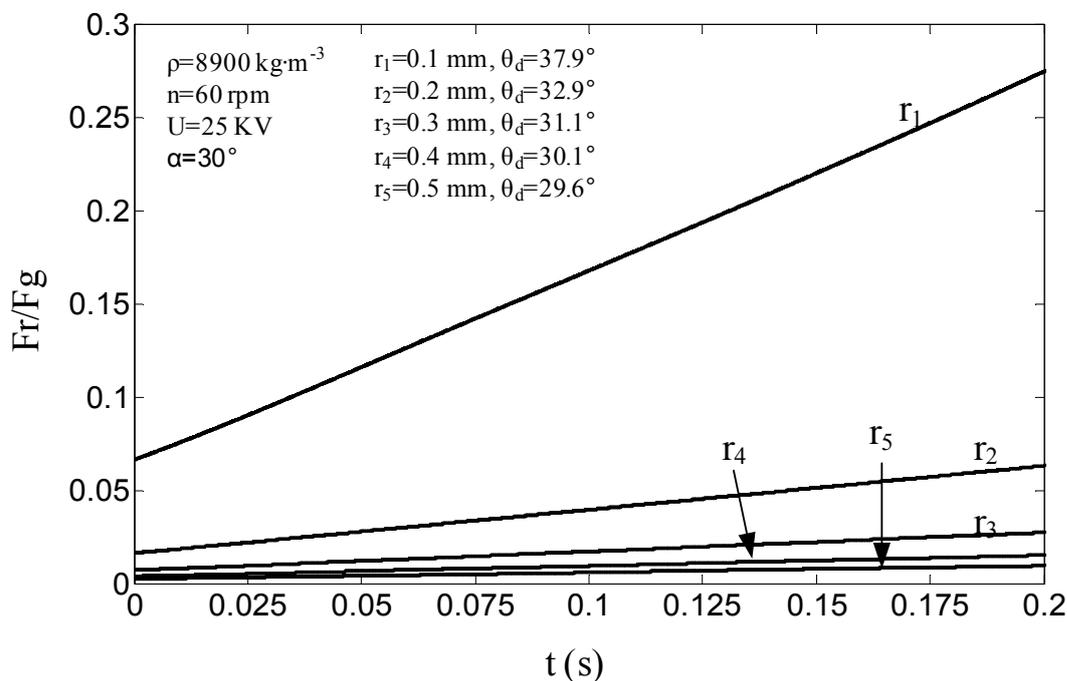


图 6-12 不同金属颗粒尺寸下空气阻力与重力的关系图

Fig.6-12 Air drag forces and gravitation forces exerting on the particles for different radius after detachment

6.5 本章小结

本章利用数学模拟软件 MATLAB 编程，建立了金属颗粒运动轨迹模型，金属颗粒轨迹的模拟结果与实验结果相一致。得出如下结论：

- 1) 该模型可优化高压静电分选机的工艺参数，扩展高压静电分选机的应用领域。
- 2) 应用模型对颗粒尺寸与受力关系的分析得到：小尺寸颗粒($r_0 < 0.1 \text{ mm}$)受到外界因素影响更大，易出现特殊运动轨迹，破坏分选过程，在分选前应调整电选机的工艺参数，避免碰撞现象发生。

参考文献

- [1] T. Lehner, Integrated recycling of non-ferrous metals at Boliden Ltd, Rönnskär Smelter, IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, 1998: 42–47.
- [2] A. Iuga, V. Neamtu, I. Suarasam, R. Morar, L. Dascalescu, Optimal high-voltage energization of corona-electrostatic separators, IEEE T. Ind. Appl. 1998, (34): 286–293.
- [3] R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu, A. Samuila, Factors which influence the insulation-metal electroseparation, Journal of Electrostatics, May 1993, (30): 403–412.
- [4] D. Rafiroiu, C. Munteanu, R. Morar, A. Meroth, P. Atten, L. Dascalescu, Computation of the electric field in wire electrode arrangements for electrostatic processes applications, Journal of Electrostatics, May 2001, (51-52): 571–577.
- [5] D. Rafiroiu, I. Suarasan, R. Morar, P. Atten, L. Dascalescu, Corona inception in typical electrode configurations for electrostatic processes applications. Industry Applications, IEEE Transactions on 2001, 37 (3) : 766–771.
- [6] L. Dascalescu, Mouvements des particules conductrices dans un séparateur à haute tension pour matériaux granulaires, Journal of Electrostatics, 1994, (32) : 305–316.
- [7] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, L. Dascalescu, Numerical Modelling of conductive particle trajectories in roll-type electrostatic separators, Conf. Rec. of IEEE/IAS Annual Meeting, Hong Kong, 2005: 2601–2606.
- [8] Ангелов А И, Верещагин И П, Ершов В С, и др Физические основы элктрической сепарации [М]. Москва Недра, 1983: 160
- [9] N. J. Félici, Forces et charges de petitis objets en contact avec une électrode affectée d'un champ électrique, Rev. Gén. Elect., 1966, (75): 1145–1160.
- [10] S. Vlad, M. Mihailescu, D. Rafiroiu, A. Iuga, L. Dascalescu, Numerical analysis of the electric field in plate-type electrostatic separators, Journal of Electrostatics, 2000, 48 (21): 217–229.

第七章 高压静电分选机转辊临界转速模型

7.1 引言

影响高压静电分选的因素较多，第五章分析了电压及电极特性对分选的影响，第六章建立了金属颗粒运动的轨迹模型。而非金属成分占电路板总量约 70%，在分选过程中非金属的产量及纯度直接影响了金属的品位。由于非金属颗粒导电性差，在高压静电场中受到电晕极的“离子轰击”而带电，并随转辊一起运动。所以转辊转速直接影响非金属颗粒的荷电、受力以及分选的效率、纯度和回收率，是非常重要的参数。本章将对转辊转速对高压静电分选效果的影响进行理论分析，并建立高压静电分选机转辊的临界转速模型。

7.2 模型的建立

转辊转速对高压静电分选效果的影响分析基于以下几点假设：

- 1) 物料颗粒单层均匀分布在转辊表面，并随之一起运动；
- 2) 两相邻颗粒间距足够大，每个颗粒可以看作质点；
- 3) 不考虑颗粒自身产生的电场，以及颗粒间的电荷传递，颗粒间的相互作用被忽略。

如图 7-1 所示，非金属颗粒由电子振动加料器送入转辊表面，与转辊一起运动，颗粒首先在电晕静电场中荷电，电晕荷电方程^[1]如下：

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(Q - Q_s)^2}{\tau Q_s} \quad (7-1)$$

式中， Q_s 为均匀单离子场中电场强度为 E 时颗粒所得的饱和电量。颗粒的初始电荷为：

$$Q(0) = k_Q \cdot Q_m \quad (7-2)$$

式中， k_Q 与电场的均匀程度有关，在电晕电场中 $k_Q \leq 1$ ^[2]。由于电晕荷电过程同时存

在静电感应荷电^[3]，所以存在感应电荷， Q_m 为在匀强电场中，非导体颗粒与电极接触瞬间所获得的最大感应电荷量，球状非金属颗粒通过感应荷电的最大电荷值 Q_m ^[4] 为：

$$Q_m = \frac{0.55d^2\pi E\epsilon_0\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \quad (7-3)$$

式中， ϵ_0 为真空介电常数， ϵ_r 为颗粒的介电常数。对于球状非金属颗粒的电晕荷电的饱和电荷值 Q_s 亦可以计算^[5]：

$$Q_s = \frac{12\pi\epsilon_0 r^2 E_0 \epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \quad (7-4)$$

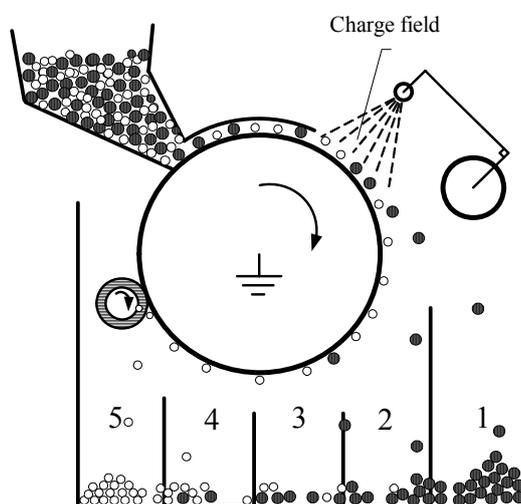


图 7-1 实验室高压静电分选机结构简图

Fig.7-1 The structure representational of laboratory roll-type corona electrostatic separator

由于电晕荷电包括电晕电场感应荷电，电荷中和，电晕荷电三个过程，对于阴极电晕荷电，颗粒先得到荷电量为 Q_m 的正电荷，由于电晕激发的空间电荷作用，颗粒表面的正电荷被中和，颗粒得到负电荷并达到饱和 Q_s 。因此颗粒达到 Q_s 的荷电过程在时间上有一定的延迟，当荷电量达到最大电荷的 95% 时，延迟时间大概为 5 个荷电延迟时间常数^[5]，即

$$t_s = 5\tau = \frac{20\epsilon_0\epsilon_r}{qk} \quad (7-5)$$

式中， q 为空间电荷密度， k 为离子运动（迁移）率，其值为 $k = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2(\text{Vs})$ ，在分

离过程中，转辊转动，根据假设条件，物料颗粒相对转辊表面静止，颗粒在短时间越过电晕区（图 7-1）。由公式 7-5，转辊速度确定颗粒经过荷电区的时间为：

$$t_{gs} = \frac{60 \cdot e}{2\pi Rn} \quad (7-6)$$

式中， e 为转辊表面的电晕荷电区宽度， R 为转辊半径， n 为转辊转速。当 $t_{gs} > t_s$ 时，颗粒电荷可以达到饱和值，此时转辊转速满足条件：

$$n < n^*, \quad n^* < \frac{3qke}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r R} \quad (7-7)$$

式中， n^* 为“临界荷电转速”，荷电密度 q 可由公式 7-8 得到，

$$q = \frac{J}{Ek} \quad (7-8)$$

式中， J 为接地电极表面的电流密度，

$$J = \frac{I}{eL} \quad (7-9)$$

式中， I 为电晕电流， L 为电晕丝长度。不同应用电压及放电距离的平均电流值如图 7-2 曲线，无电晕电荷存在的转辊表面电场强度及其分布如图 7-3 所示。

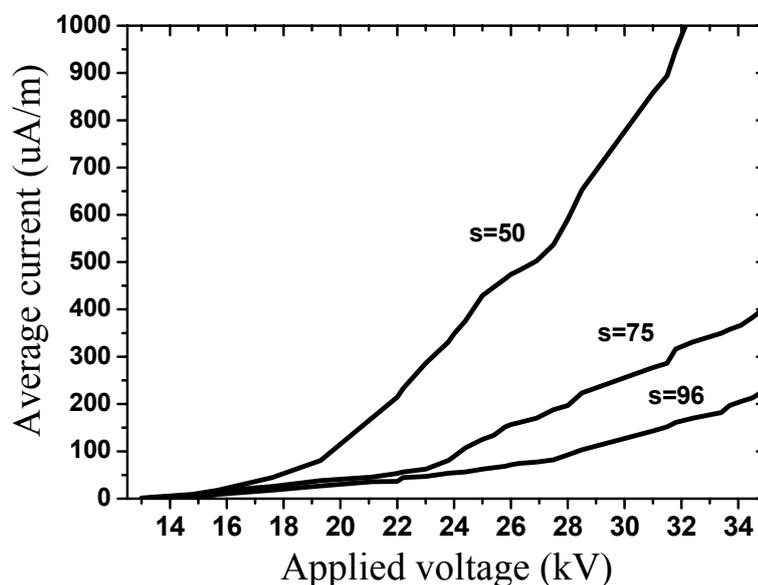


图 7-2 阴极电晕极放电的电流电压特征曲线：极间距 s 分别为 50, 75, 96, 转辊半径 $R = 0.114$ m, 丝状电晕电极，电晕丝截面半径 0.3 mm

Fig.7-2 Current-Voltage characteristics of corona discharge for small gaps at negative polarity, (s was the discharge gaps between corona wire and the surface of rotating roll electrode) $R = 0.114$ m, corona electrode was wire type, the radius of wire was 0.3 mm

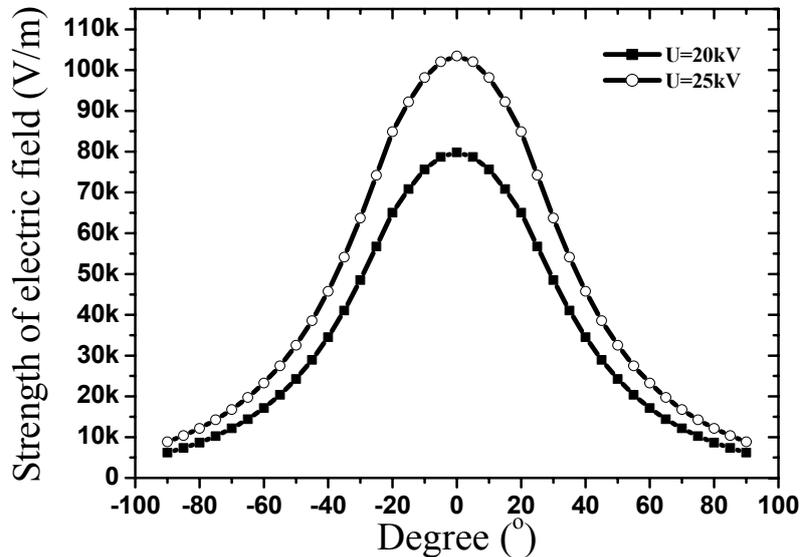


图 7-3 转辊表面的静电场分布：极间距 $s = 96 \text{ mm}$ ，转辊半径 $R = 0.114 \text{ m}$ ，丝状电晕电极，电晕丝截面半径 0.3 mm

Fig.7-3 Distribution of electric field at the surface of rotating roll electrode, for discharge gaps $s = 96 \text{ mm}$ at negative polarity; $R = 0.114 \text{ mm}$, corona electrode was wire type, the radius of wire was 0.3 mm

Jaiswal 的^[6]研究发现，有电晕电荷存在的转辊表面电场强度大约是无电晕电荷存在的转辊表面电场强度的 2-3 倍。本文中，电场修正系数取 2。由公式(7-6)-(7-9)及图 7-2、7-3 中对应的电晕电流和电场强度，计算得到在放电距离为 96 mm ，施加电压分别为 20 kV 和 25 kV 时的颗粒荷电临界转速为 49.3 rpm 和 72.4 rpm 。如转辊实际转速超过计算的荷电临界转速值，则颗粒越过荷电区的时间过短而不能达到饱和荷电。公式 7-7 即“临界荷电转速方程”可以判定颗粒在一定转速条件下，电晕荷电量是否达到饱和。

由于非金属颗粒多为扁平状，而颗粒荷电电量与其表面积相关，故引入表面积当量直径 d_s 的概念：表面积等于实际颗粒表面积 S_p 的球形颗粒的直径定义为非球形颗粒的表面积当量直径。片状颗粒表面当量直径可表示为：

$$d_s = \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} = \sqrt{r^2 + 2rh} \quad (7-10)$$

式中， r 为扁平颗粒大表面半径， h 为颗粒厚度。用扁平状非金属的面积当量直径代

替荷电公式中的球体直径，可以得到扁平状非金属颗粒的饱和电荷方程：

$$Q_s = \frac{3\pi\epsilon_0(r^2 + 2rh)E_0\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \quad (7-11)$$

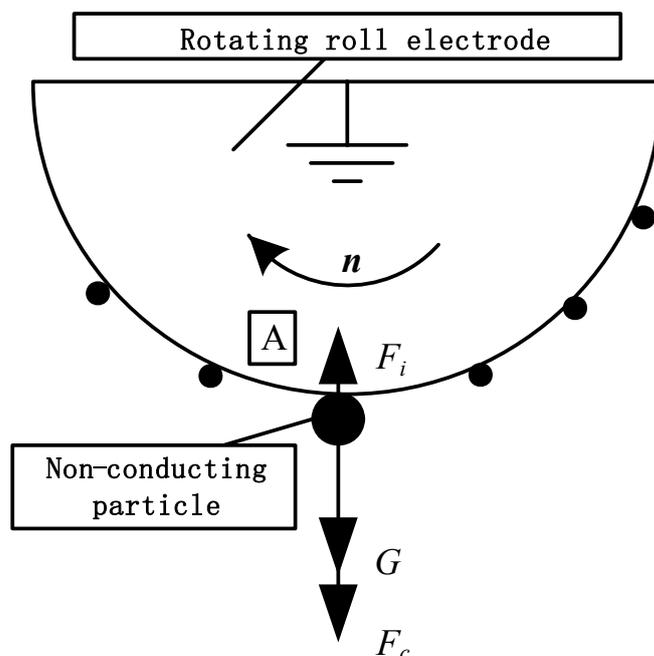


图 7-4 在临界位置的非金属颗粒受力

Fig.7-4 Forces acting on a charged insulating particle at the critical point on the rotating roll electrode

在高压静电分选过程，非金属颗粒受自身重力 G 、离心力 F_c 、以及映像力 F_i 的作用附着在转辊表面，如图 7-4，单体颗粒在图示位置 A 点最易脱离转辊，其受力状况如图，即当转速达到一定值时，当运动到 A 点，非金属颗粒脱离转辊表面，颗粒受力满足：

$$F_c + G = F_i \quad (7-12)$$

假设颗粒达到饱和的电晕荷电，在转辊表面无电荷损失，或损失很小，损失系数为 k_l ， k_l 与颗粒的导电性以及转辊的转速有关，这里假定 k_l 为常数 0.85，则 F_i 与 F_c 为：

$$F_i = \frac{Q_s^2}{4\pi\epsilon_0 h^2} = BC$$

$$B = \frac{9k_1\pi\epsilon_0\epsilon_r^2 E_0^2}{(\epsilon_r + 2)^2} \quad (7-13)$$

$$C = \frac{(r^2 + 2rh)^2}{4h^2}$$

$$F_c = m\left(\frac{n\pi}{30}\right)^2 R \quad (7-14)$$

由公式(7-12)-(7-14)，片状非金属颗粒的“临界脱离转速”为：

$$n' = \left(\frac{BC}{mR} - \frac{g}{R}\right)^{1/2} \frac{30}{\pi} \quad (7-15)$$

如图 7-1 与图 7-4 所示，使非金属颗粒通过 A 点的转辊转速定义为“非金属颗粒临界转速(N)”。在高压静电分选过程中，非金属颗粒的荷电量分为两种情况处理：

- 1) $n = n' \leq n^*$ ，非金属颗粒达到饱和的电晕荷电量，临界转速为：

$$N = n' = \left(\frac{BC}{mR} - \frac{g}{R}\right)^{1/2} \frac{30}{\pi} \quad (7-16)$$

- 2) $n = n' > n^*$ ，由于荷电时间不足，颗粒未能达到饱和电荷而使映像力降低，从而非金属颗粒所受的“别针效应”(pinning effect)削弱，进而使非金属提前脱离转辊表面。非金属颗粒荷电量达不到饱和，电量只有 $\frac{n^*}{n'} Q_s$ 。由公式

(7-12) - (7-16)，得到：

$$F_i' = \frac{Q_s^2}{4\pi\epsilon_0 h^2} \left(\frac{n^*}{n'}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \frac{mRBC(n^*)^2}{BC - mg} \quad (7-17)$$

临界转速为：

$$N = \left(\frac{BC(n^*)^2}{BC - mg} - \frac{g}{R} \left(\frac{30}{\pi}\right)^2\right)^{1/2} \quad (7-18)$$

由公式 7-16 和 7-18 发现，临界转速随着物料性质及设备的参数变化而变化，受颗粒半径、颗粒密度、介电常数、放电距离、施加电压等条件的影响。对于实验物料（已破碎的废旧印刷电路板），形状为扁平状，非金属颗粒厚度 h 与平面半径关系为

$h = (1/3)r$ ，则结合公式 7-16 与 7-18，得到扁平状非金属颗粒脱离转辊的临界转速与颗粒半径的关系，如图 7-5 所示。

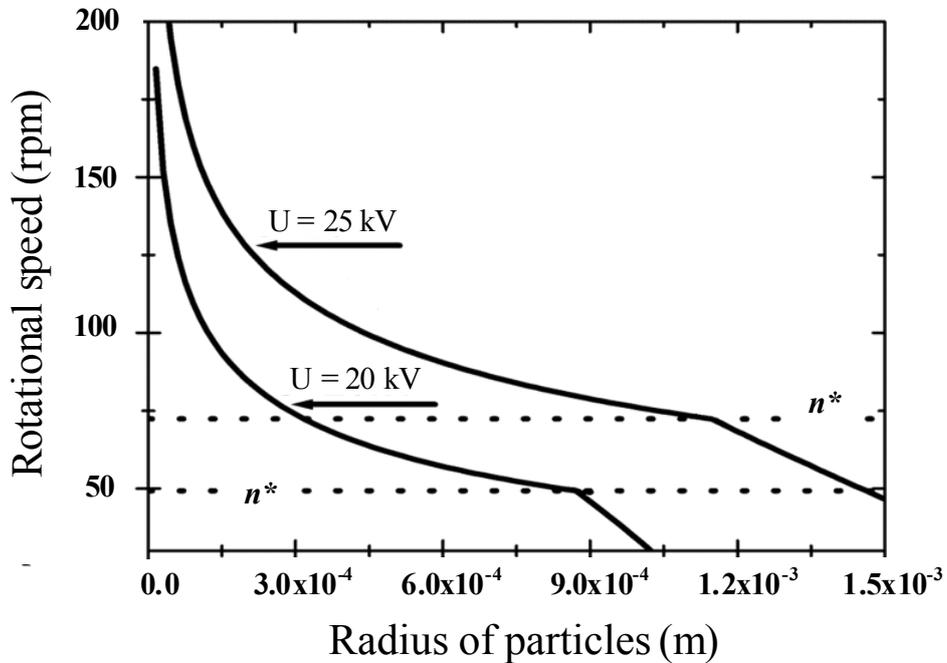


图 7-5 临界转速与颗粒半径的关系曲线

Fig.7-5 Calculation relationship curve of critical roll speed and particle radius

7.3 模型验证

实验用非金属颗粒物料来自破碎后的废旧印刷电路板，如图 7-6 所示。破碎后非金属颗粒质量密度 ρ 约为 2000 kg/m^3 ，相对介电常数 ϵ_r 为 3.0，破碎后粒径为 $-1.0 + 0.075 \text{ mm}$ 。施加电压为 20 kV 及 25 kV，不同转辊转速下进行试验。如图 7-1 所示，1 号收集槽收集金属颗粒，5 号收集槽收集非金属颗粒，其余槽中为中间体，即金属颗粒与非金属颗粒的混合物。中间体混合颗粒经反复分选得到金属与非金属颗粒。金属回收率 r_m 与非金属 r_n 的回收率为：

$$r_m = \frac{Q_1 w_m}{S_m} \tag{7-19}$$

$$r_n = \frac{Q_5 w_n}{S_n}$$

式中， w_m 为 1 号收集槽中金属颗粒纯度， w_n 为 5 号收集槽中非金属颗粒纯度， Q_1 为 1 号收集槽中金属颗粒质量， Q_5 为 5 号收集槽中非金属颗粒质量。 S_m 为金属颗粒总质量， S_n 为非金属颗粒总质量。

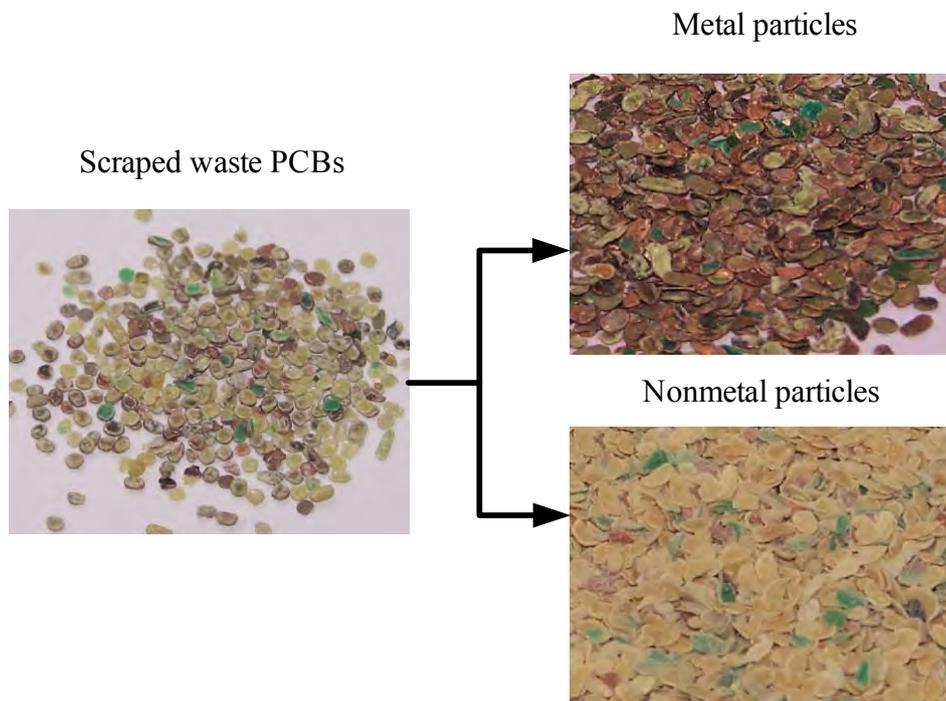


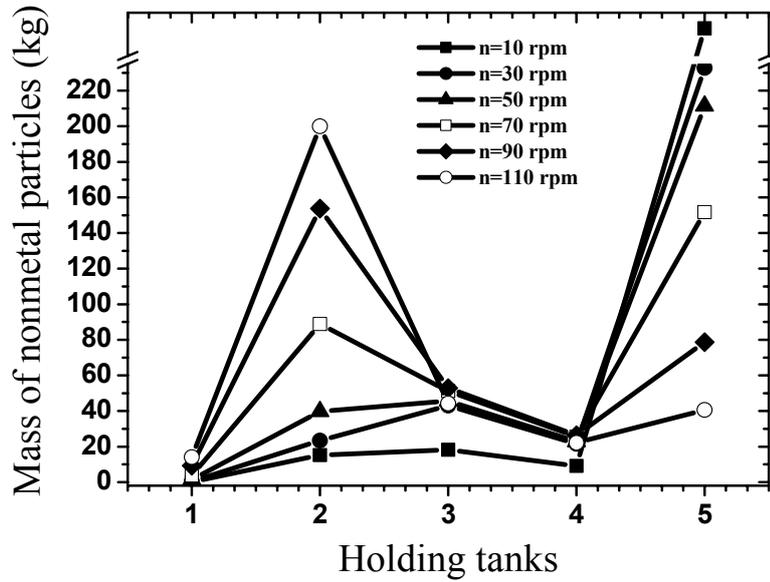
图 7-6 破碎后的印刷电路板

Fig.7-6 The scraped waste printed boards.

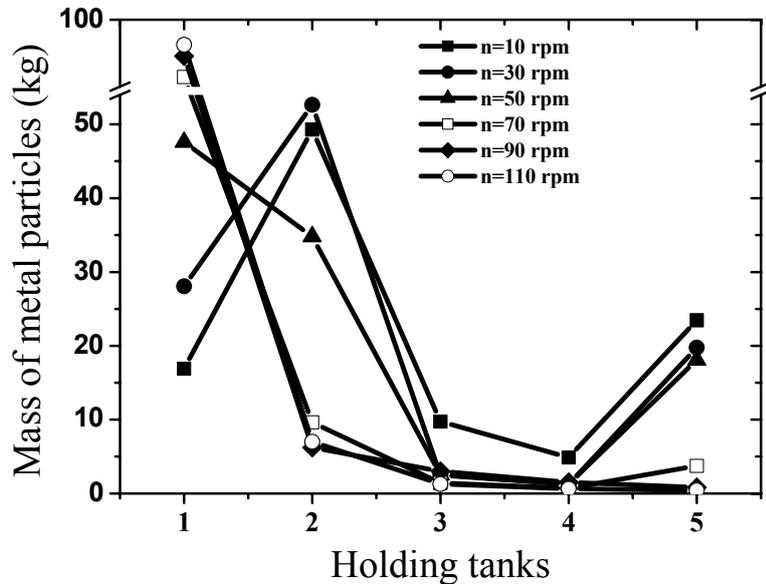
如图 7-7 所示， $-0.4 + 0.3 \text{ mm}$ 粒径的物料颗粒在电压为 20 kV 时的分选结果，非金属颗粒在收集槽中的分布如图 7-7 (a)，金属颗粒在收集槽中的分布如图 7-7 (b)。当转速达到 70 rpm 时，非金属的分布出现了明显的变化，5 号收集槽中的非金属明显减少，减少的大部分非金属被收集到 2 号收集槽中，可见此时非金属物料颗粒不能全部被附着在转辊表面上，相当一部分提前脱落。对金属颗粒而言，当转速达到 70 rpm 时，金属的分布也出现了明显的变化，部分金属被收集到 2 号收集槽中，当转速大于 70 rpm 时，由于 2 号槽中聚集了大量的金属和非金属，所以分离效果明显降低。

图 7-7 (c) 为不同转速下的非金属回收率及纯度变化曲线，图 7-7 (d) 为金属回收率及纯度变化曲线。在施加电压不变的情况下，随着转速的增加，金属的回收率与非金属纯度提高，但同时非金属的回收率与金属纯度降低。在一定范围内提高转速，可提高单次分选中金属回收率与非金属纯度；而如果为了控制金属纯度与非金属的回收率，则转辊转速必须较低。由以上分析，对于 $-0.4 + 0.3 \text{ mm}$ 粒径的物料，非金属脱离接地

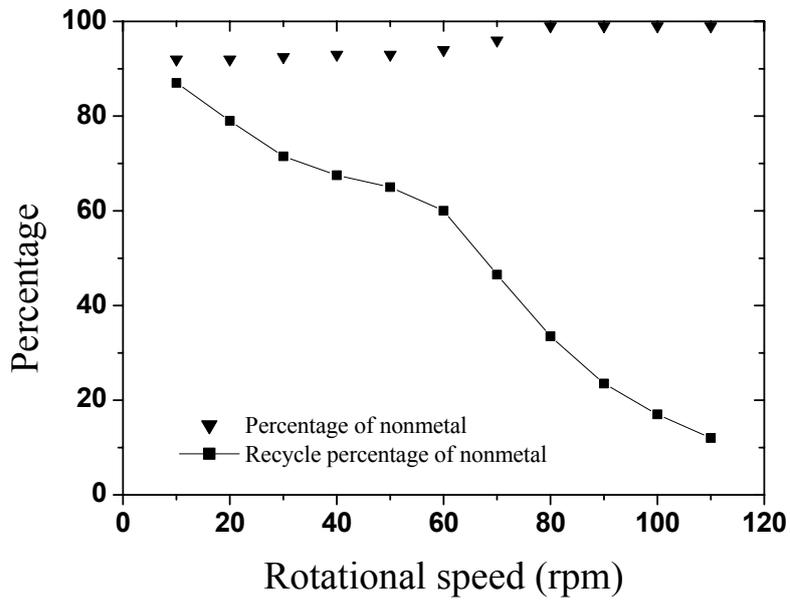
转辊的临界转速为 70-90 rpm 之间。由图 7-7 发现，转速在 70 rpm 左右，-0.4+0.3 mm 粒径的物料金属、非金属的回收率和纯度有一个较好的平衡。



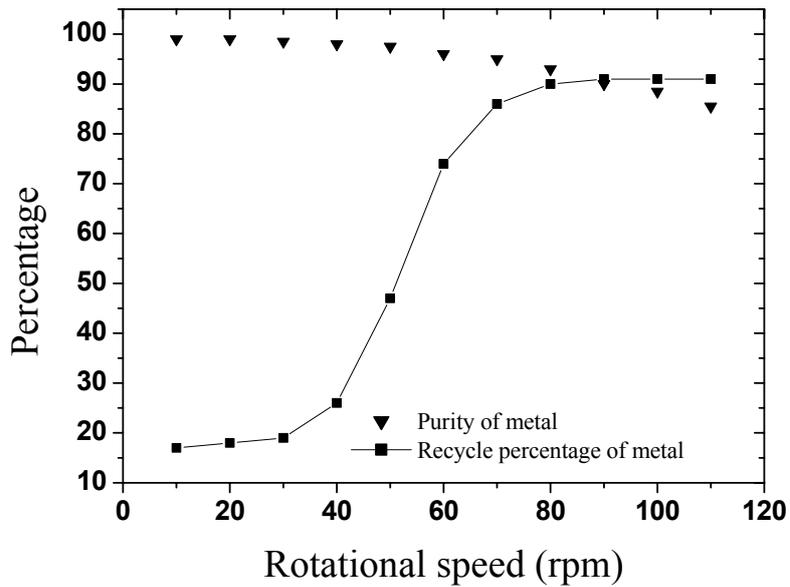
(a)



(b)



(c)

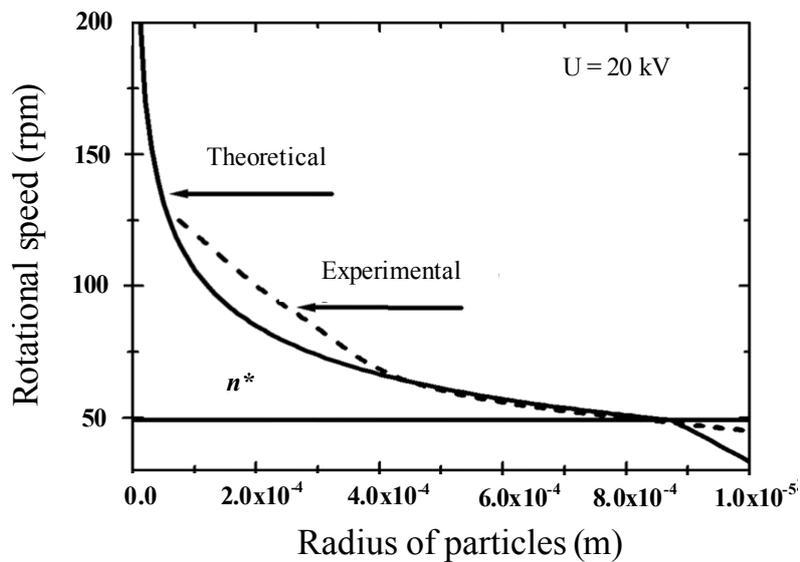


(d)

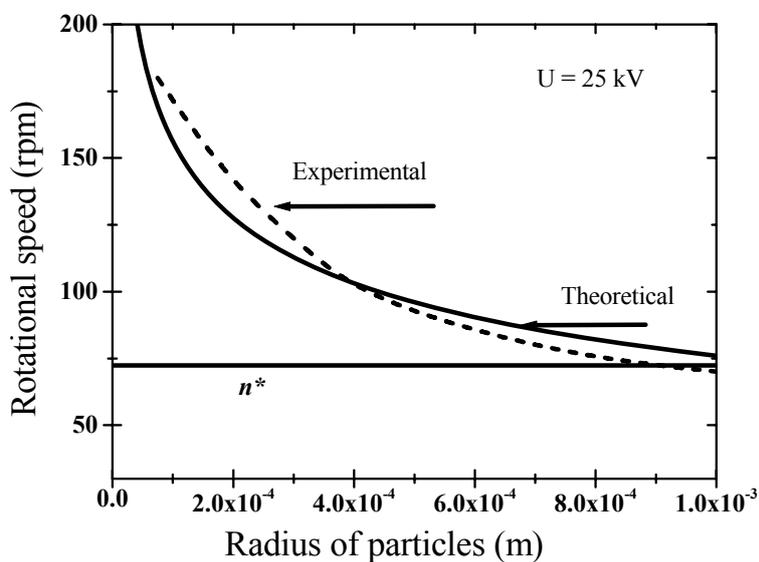
图 7-7 粒径为 $-0.4+0.3$ mm 的物料高压静电分选结果: (a)非金属颗粒分布, (b)金属颗粒分布, (c) 非金属颗粒纯度及回收率, (d)金属颗粒纯度及回收率

Fig.7-7 The separation results for particles $-0.4+0.3$ mm: (a) the distribution of nonmetal particles, (b) the distribution of metal particles, (c) purity and recycle percentage of nonmetal particles, (d) purity and recycle percentage of metal particles

对-1.0+0.075 mm 的物料进行上述分析后,得到了实际的非金属颗粒脱离接地转辊的临界转速曲线,当施加电压为 20 kV 时,其实际转速曲线如图 7-8 (a),当施加电压为 25 kV 时,其实际转速曲线如图 7-8 (b),从图 7-8 可以看出,试验结果与理论值基本一致。对于粒径小的颗粒其临界转速高,对于粒径相对大的颗粒其临界转速较低。



(a)



(b)

图 7-8 不同粒径颗粒的实际临界转速曲线:(a) 施加电压 $U = 20 \text{ kV}$, (b) 施加电压 $U = 25 \text{ kV}$
 Fig.7-8 Experimental relationship curve of critical roll speed and particle radius: (a) $U = 20 \text{ kV}$, (b) $U = 25 \text{ kV}$

小粒径颗粒由于比表面积大, 相对电晕荷电量高。为了提高金属回收率, 使金属颗粒能飞离转辊, 可以提高转速, 尽管此时非金属颗粒荷电量可能未达到饱和电荷值 Q_s , 但由于大的比表面积作用, 非导体颗粒仍然可以附着于转辊表面。对大粒径物料颗粒, 由于颗粒比表面积小, 为了使颗粒附着于转辊表面, 映像力需要达到最大, 即荷电量应该达到饱和 Q_s , 因此转速必须有一定限制。

实验发现, 回收率和纯度不能兼得。如提高转速, 金属的回收率提高, 但纯度降低, 非金属的纯度提高但回收率降低。实际工业应用中, 要求同时提高金属回收率和纯度, 提高临界脱离转速(n')可一定程度上满足要求。临界脱离转速的提高使非金属颗粒能在更大程度上附着在转辊表面上, 从而被收集到非金属收集槽中, 即金属纯度和非金属回收率相对提高。对于同一物料, 提高临界脱离转速的方法有:

- 1) 增加电晕极数量, 增大电晕区宽度和电晕电场强度, 从而提高临界荷电转速(n^*);
- 2) 在避免火花放电的前提下, 提高电压并减少电极之间的距离, 以提高电晕电场强度及颗粒的荷电量;
- 3) 改变转辊的曲率以及电晕极位置, 减少颗粒在转辊表面的电荷损失。

7.4 本章小结

本章提出了一种定量分析转辊转速对高压静电分选效果影响的方法, 文中推导过程适用较为普遍的片状非金属颗粒, 获得结果如下:

1) 提出了“临界荷电转速” n^* 的概念及公式, $n^* = (q_s k e) / (40\pi\epsilon_0\epsilon_r R)$, 此方程可作为判定方程来判定在一定转速条件下, 颗粒荷电是否达到饱和;

2) 通过理论分析得到对于片状非金属颗粒的转辊“临界转速” N , 其值为:

$$(i) \quad n = n' \leq n^*, \quad N = n' = \left(\frac{BC}{mR} - \frac{g}{R} \right)^{1/2} \frac{30}{\pi};$$

$$(ii) \quad n = n' > n^*, \quad N = \left(\frac{BC(n^*)^2}{BC - mg} - \frac{g}{R} \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \right)^{1/2};$$

$$B = \frac{9k_1\pi\epsilon_0\epsilon_r^2 E_0^2}{(\epsilon_r + 2)^2}, \quad C = \frac{(r^2 + 2rh)^2}{4h^2}$$

3) 分析了临界转速与颗粒半径的曲线关系, 发现颗粒半径越小“临界脱离转速(n')”越大, 反之越小, 且实验结果与理论分析吻合。

4) 提高临界脱离转速可一定程度同时提高非金属回收率和金属纯度，对于同一物料，提高临界脱离转速的方法有：

(i) 增加电晕极数量，增大电晕区宽度和电晕电场强度，从而提高临界荷电转速(n^*)；

(ii) 在避免火花放电的前提下，提高电压并减少电极之间的距离，以提高电晕电场强度及颗粒的荷电量；

(iii) 改变转辊的曲率以及电晕极位置，以减少颗粒在转辊表面的电荷损失。

以上结果是相对于单次分选过程而言，在工业应用中，二次分选以及中间体的多次分选都可能被应用，本章的结果对二次分选以及多次分选的参数选择和提高整体（包括多次分选）的分选效率有重要的指导意义。

参考文献

- [1] L. Dascalescu, R. Tobazeon, P. Atten, Behaviour of conductive particles in corona-dominated electric fields, Industry Applications Society Annual Meeting, 1992, (2): 1479–1486.
- [2] L. Dascalescu, R. Tobazeon, P. Atten. Behaviour of conducting particles in corona-dominated electric fields. J. Phys. D: Appl. Phys. 1995, (28): 1611–1618.
- [3] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, I. Suarasan, Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators, J. Phys. D: Appl. Phys. 1994, (27): 1242–1251.
- [4] Y. Wu, G. S. P. Castle, I.I., Inculet, S. Petigny, G. Swei, Induction charge on freely levitating particles, Powder Technol., 2003, (135–136): 59–64.
- [5] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, L. Dascalescu, Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes, Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings, March 2001, 148 (2): 47–54.
- [6] V. Jaiswal, M.J., Thomas, Finite element modelling of ionized field quantities around a monopolar HVDC transmission line. J. Phys. D: Appl. Phys. 2003, (36): 3089–3094.

第八章 高压静电场下混合金属颗粒的运动轨迹模型

8.1 引言

废旧印刷电路板经破碎、高压静电分选后，得到纯度 95%左右以上的金属混合物与非金属物料，其中混合金属包括铜，铝，锡，铁等。通常混合金属被送到冶炼厂精炼金属铜，一些有价值的金属（铝，锡，锌等）在精炼过程中流失造成了资源的浪费。精炼之前回收这些有价值的金属既可简化精炼过程又可减少资源浪费。本章以第六章建立的金属轨迹模型为基础，建立混合金属颗粒轨迹模型，分析高压静电分选机各项工艺参数，证明高压静电分选机可用于分选不同的金属颗粒。提出了利用计算机模拟辅助开发新型分离混合金属颗粒的高压静电分选机。

8.2 混合金属颗粒分离装置

如图 8-1 所示，用于分选混合金属的高压静电分选机中不采用电晕电极，是因为：

- 1)电晕电极的电晕放电对金属颗粒几乎不起作用；
- 2)分选过程中电晕电极易引起火花放电干扰高压静电场，影响分选。

混合金属颗粒由电子振动加料器送入转辊表面。静电力 F_e 、重力 F_g 、离心力 F_c 、空气阻力 F_r 共同作用在金属颗粒上（图 8-2）。金属颗粒随转辊一起运动，当作用在颗粒上的合力满足脱离条件时，颗粒飞出，落入收集槽。不同的金属颗粒密度不同，脱离点及脱离后的运行轨迹也不同。影响颗粒飞行轨迹的因素很多，本章将影响因素分为：高压静电场因素、机械因素、物料因素三大类加以分析。利用金属轨迹模型得到分选混合金属颗粒（铜、铝颗粒）的最优工艺参数组合。

8.3 混合金属颗粒分离模型

金属颗粒轨迹模型已在第六章建立。但金属颗粒中存在非球体颗粒，如针状，片状。而颗粒荷电电量与其表面积相关，故引入表面积当量半径 r_s 到轨迹计算模型中：

$$r_s = \frac{\sqrt{S/\pi}}{2} \quad (8-1)$$

式中, S 为颗粒的表面积。如图 8-3 (a)所示, 针状颗粒被简化为椭圆柱体, 表面积 S 为:

$$\begin{aligned} S &= 2\pi a^2 \times (1 + F \times G) \\ F &= \frac{A}{2\sqrt{A-1}} \\ A &= \frac{c^2}{a^2} \\ G &= \frac{\pi}{2} + \arcsin\left[\frac{A-2}{A}\right] \end{aligned} \quad (8-2)$$

如图 8-3 (b)所示, 片状颗粒被简化为圆柱体, 表面积 S 为:

$$S = 2\pi r^2 + 2\pi r h \quad (8-3)$$

分选空间中各位置的电场强度 E 可以由金属轨迹模型计算:

$$\begin{aligned} E_{(x,y)} &= f_1(U, L, R_1, R_2, x, y) \\ E_{(\alpha)} &= f_2(U, L, R_1, R_2, \alpha) \end{aligned} \quad (8-4)$$

颗粒的脱离点角度由公式 8-4 计算:

$$\begin{aligned} \theta_d &= f_3(E_\theta, r_0, \rho, n) \\ \theta_d &= f_4(U, L, R_1, R_2, r_0, \rho, n) \end{aligned} \quad (8-5)$$

如图 8-2 所示, 颗粒的落地点位置由公式 7-4 与 7-5 计算得到:

$$d = f_5(U, R_2, \alpha, L, R_1, n, H, r_0, \rho) \quad (8-6)$$

式中, 电压 U 、静电极半径 R_2 、静电极角度 α 、电极间距离 L 的改变影响高压静电场的分布, 被归类为高压静电场因素; 转辊半径 R_1 、转辊转速 n 、收集槽高度 H 是高压静电分选机的机械工艺参数, 被归类为机械因素; 颗粒半径 r_0 、颗粒密度 ρ 反映了颗粒特性, 被归类为物料因素。

由公式 8-6, 改进金属颗粒轨迹模拟程序, 使其应用于模拟混合金属颗粒。如图 8-4 所示, 收集槽高度 H 加入程序, 每种金属颗粒的落地点位置 d 不同, 通过位置差 X_d 可以反映出不同金属颗粒的分离状况。模型以工艺参数($U, R_2, \alpha, L, R_1, n, H, r_0, \rho$) 为初始赋值变量, 以颗粒落地位置差 X_d 为输出值。为了达到最好的分离效果可通过改变初始赋值得到最大距离差。

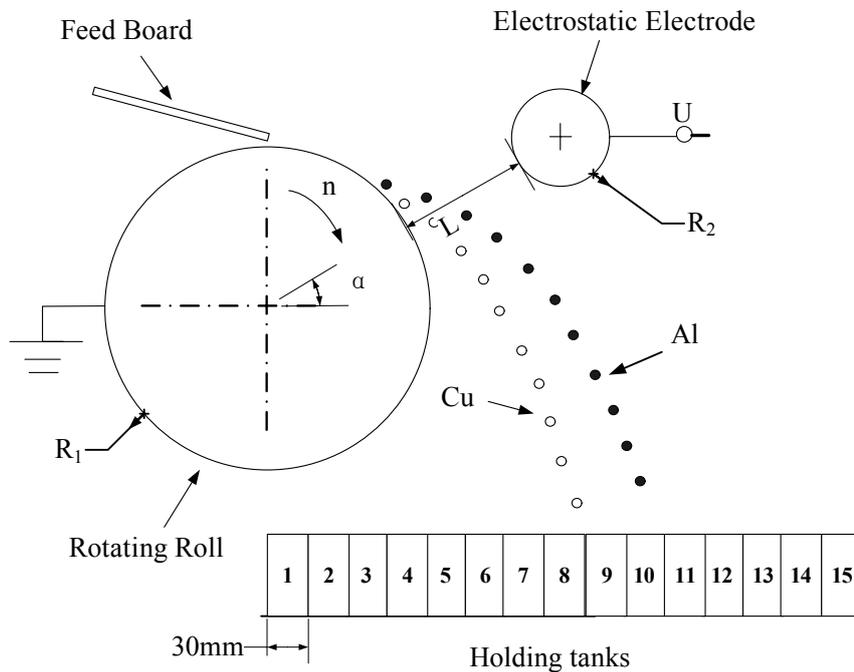


图 8-1 分离混合金属颗粒的高压静电分选机结构图

Fig.8-1 Diagram of roll-type electrostatic separator for separating mixture metal particles

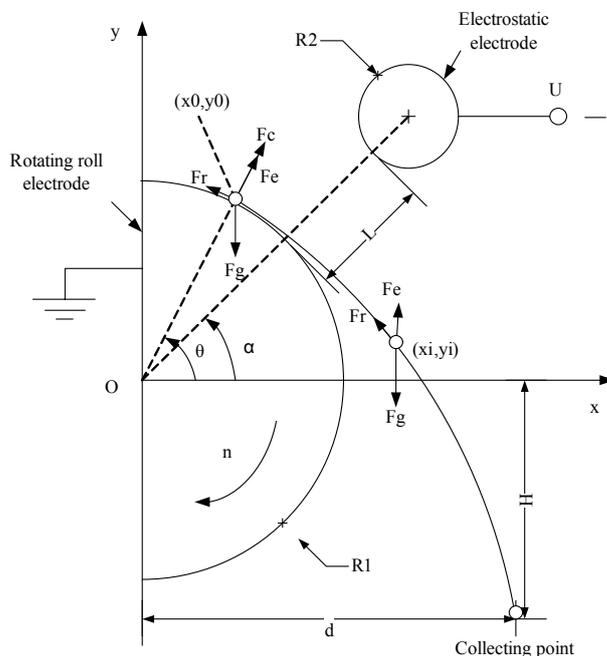


图 8-2 金属颗粒在分选过程中的受力图

Fig.8-2 Co-acting forces on a particle before leaving the rotating roll and after

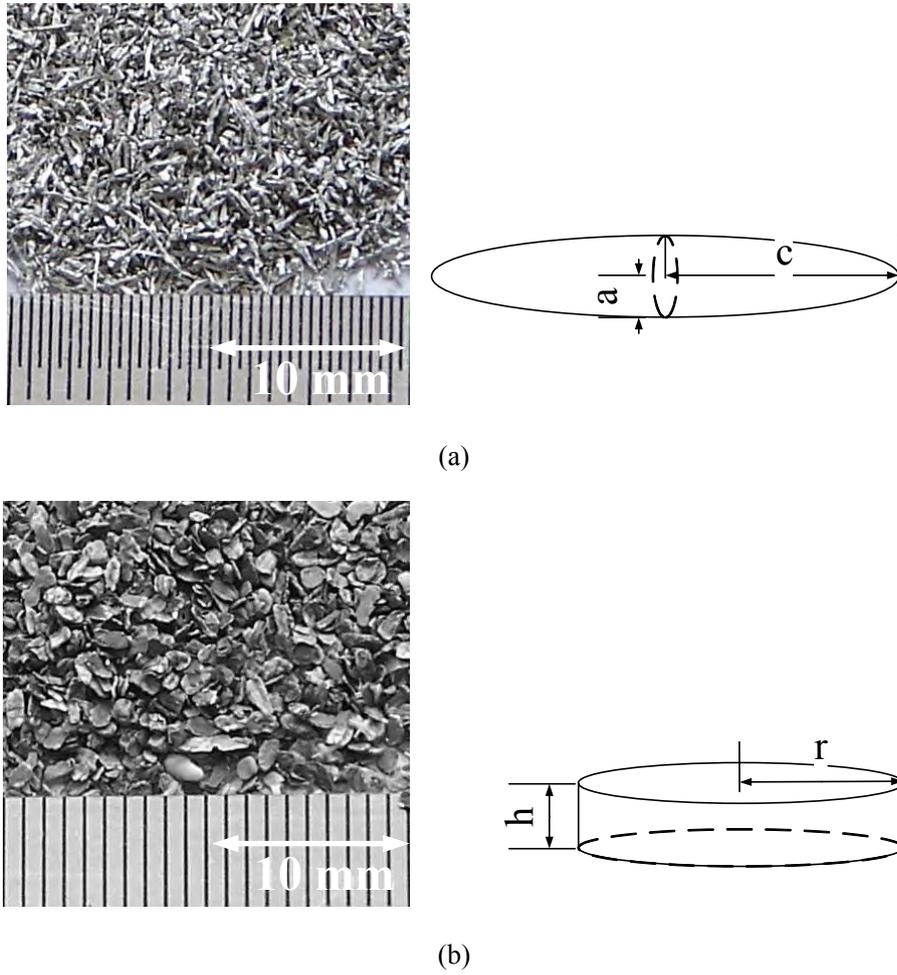


图 8-3 颗粒形状几何模型：(a) 针状（椭圆柱体）；(b) 片状（圆柱体）

Fig.8-3 The geometry model of particles: (a) ellipsoid, (b) cylinder

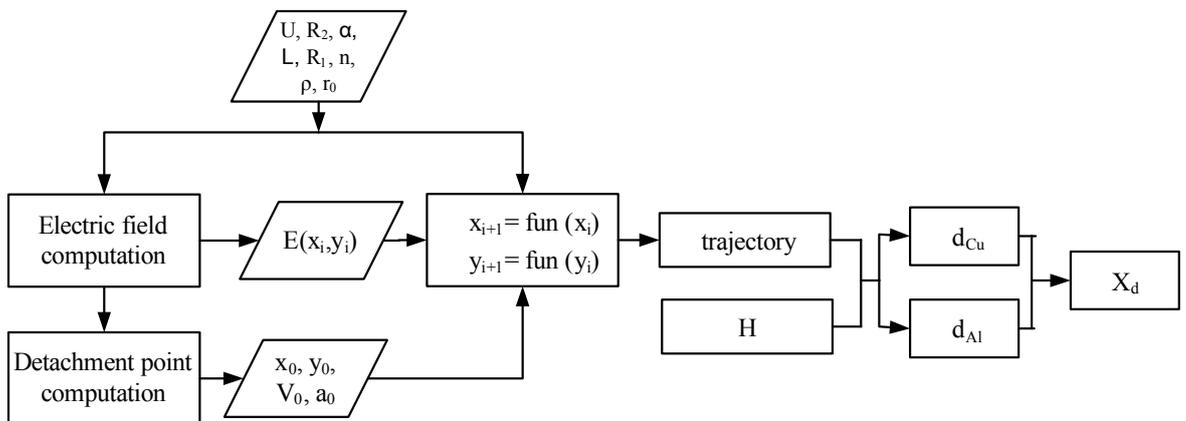


图 8-4 混合金属颗粒轨迹模拟程序流程图

Fig.8-4 Flow chart of the program for computing trajectories of mixture metal particles

8.4 分离模型应用

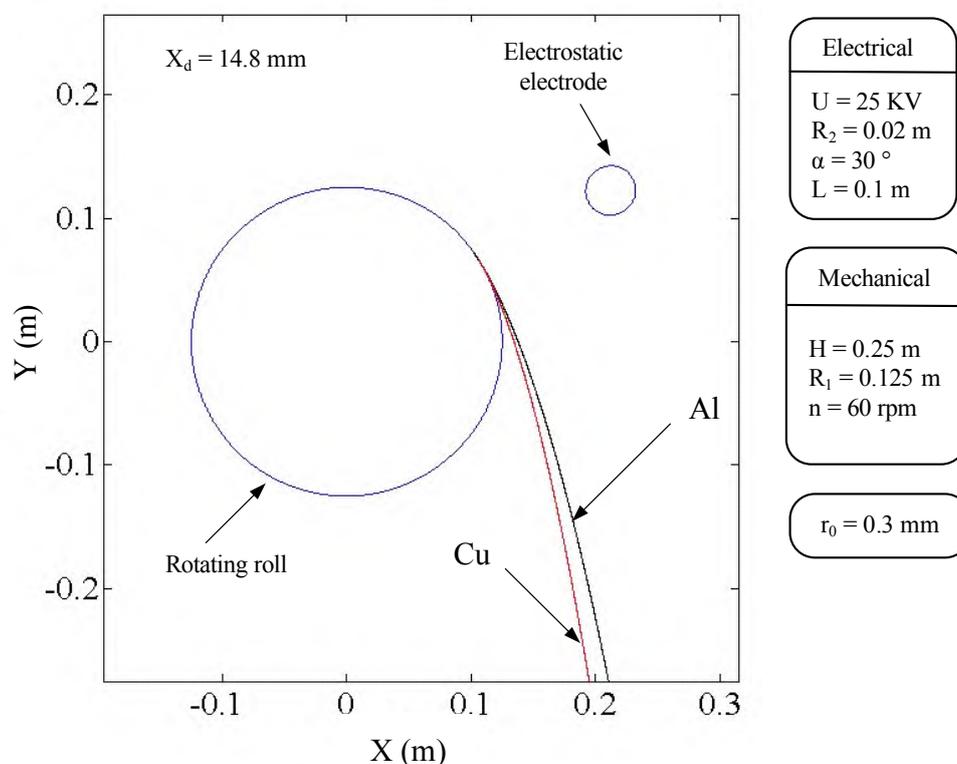


图 8-5 通用工艺参数下模拟高压静电分选机分选混合金属颗粒（铜与铝）

Fig.8-5 Simulation for separating mixture metal particles (copper and aluminum) with roll electrostatic separator (RES) in general operating parameter

图 8-5 所示，在常用的工艺参数下，计算机模拟的利用高压静电分选机分选混合金属颗粒(铜与铝)的结果。在收集槽中，铜颗粒与铝颗粒的落地点之差 X_d 为 14.8 mm，无法满足工业应用的要求。利用单因素分析法可探索得到一组工艺参数适用工业应用。在常用的工艺参数基础上，只改变一种工艺参数，工艺参数的变化范围在设备的机械结构允许的合理区间（表 8-1）。

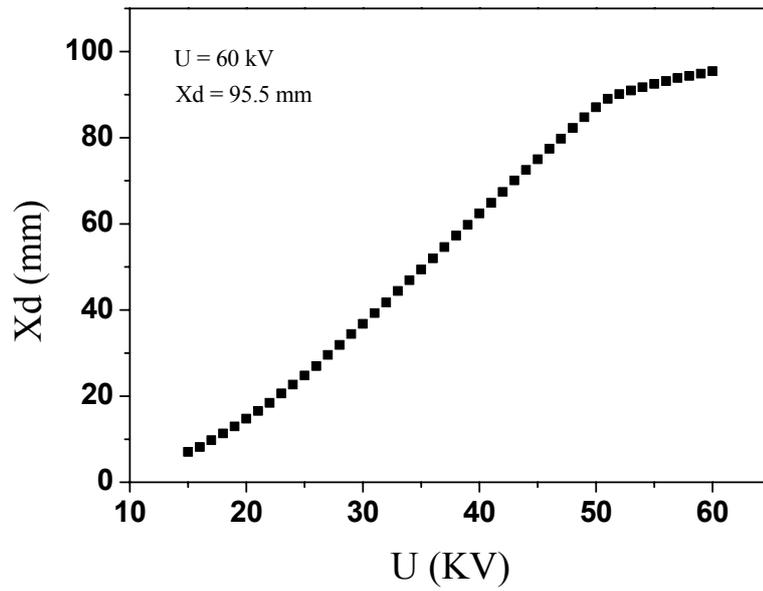
表 8-1 模拟用工艺参数

Table 8-1 Experimental parameters for simulation

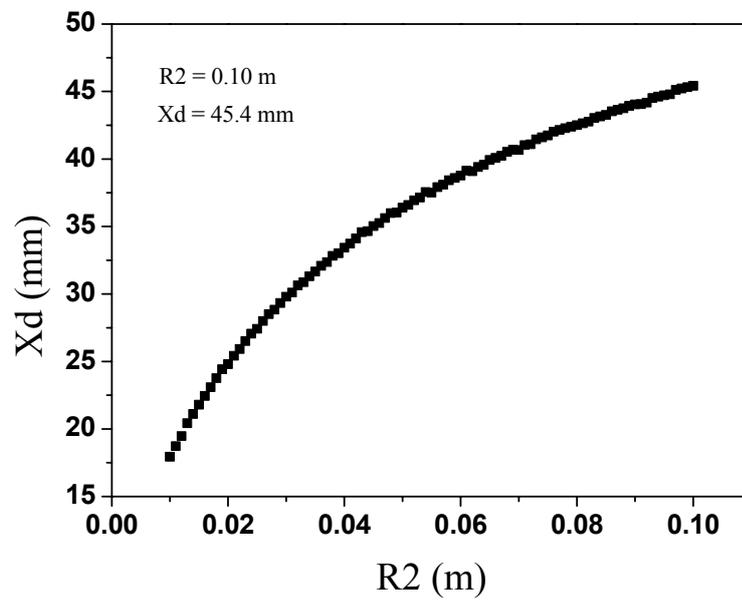
	Electrical factors				Material factor	Mechanical factors		
	U (kV)	R ₂ (m)	α (°)	L (m)	r ₀ (mm)	H (m)	R ₁ (m)	n (rpm)
Min	15	0.01	0	0.05	0.2	0.15	0.1	1
Max	60	0.1	60	0.1	0.5	0.40	0.2	80
Step	1	0.001	1	0.002	0.05	0.01	0.005	1

8.4.1 高压静电场因素

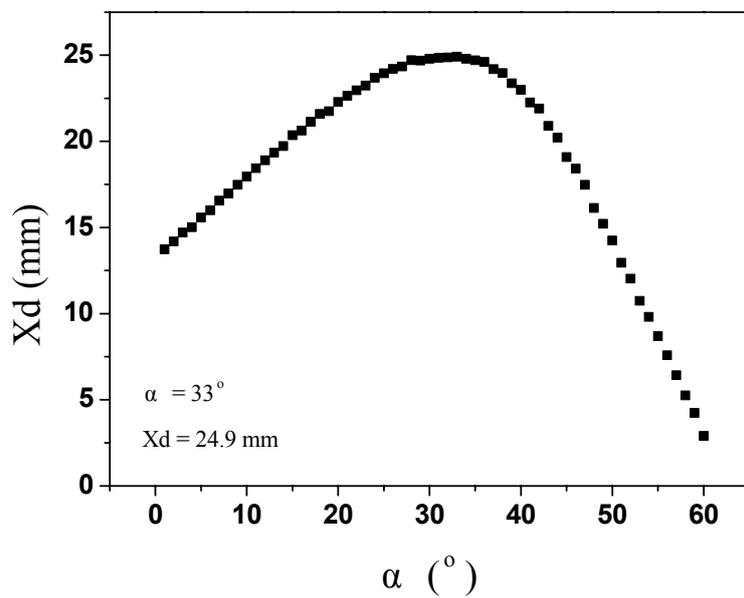
图 8-6 所示, 利用单因素法分析高压静电场因素对铜铝混合颗粒落地点距离差的影响效果。如图 8-6 (a), X_d 随电压 U 的增加而加大, 较高的电压更适合混合金属颗粒的分选。但电压不宜超过直流电源的极限 (60 kV), 否则更换更大的直流电源会大幅的提升设备的制造成本, 降低该技术的经济实用性。如图 8-6 (b)与 8-6 (d) 所示, 大尺寸的静电极(R_2)与小间距(L)的电极结构加强了分选区间的电场强度, 同时增强了作用在颗粒上的电场力, 所以 X_d 也随之增加。然而, 过大的电极尺寸与过小的电极间距, 使颗粒在分选过程中易与电极发生碰撞, 破坏原有的轨迹。 R_2 与 L 应该在合理的范围变化(表 8-1)。如图 8-6(c)所示, 当静电极角度 α 为 33° 时, X_d 达到最大。 α 的变化影响分选空间的电场分布。当 $\alpha < 33^\circ$ 时, 高压静电场的峰值更靠近 x 轴(图 8-2), 由公式 8-5, 颗粒的脱离角 θ 减小, 分离效果被减弱; 当 $\alpha > 33^\circ$ 时, 静电极对颗粒的作用减小, 同样影响了分选效果。



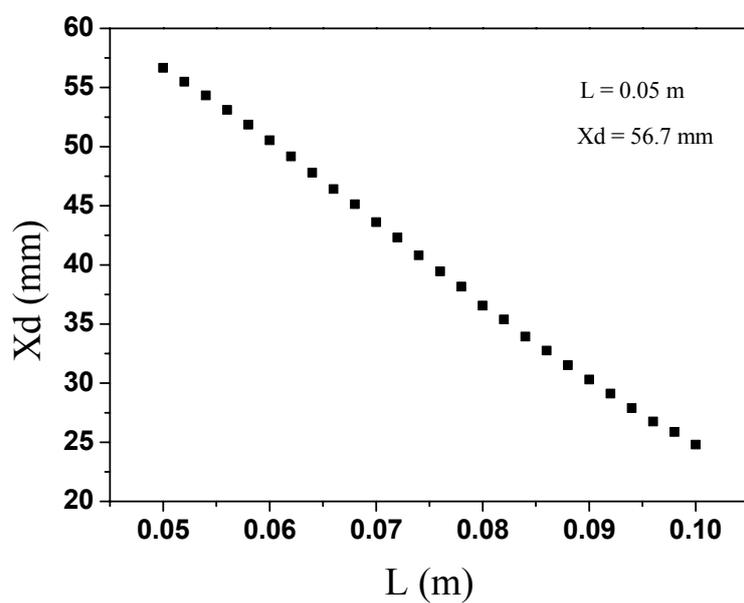
(a)



(b)



(c)

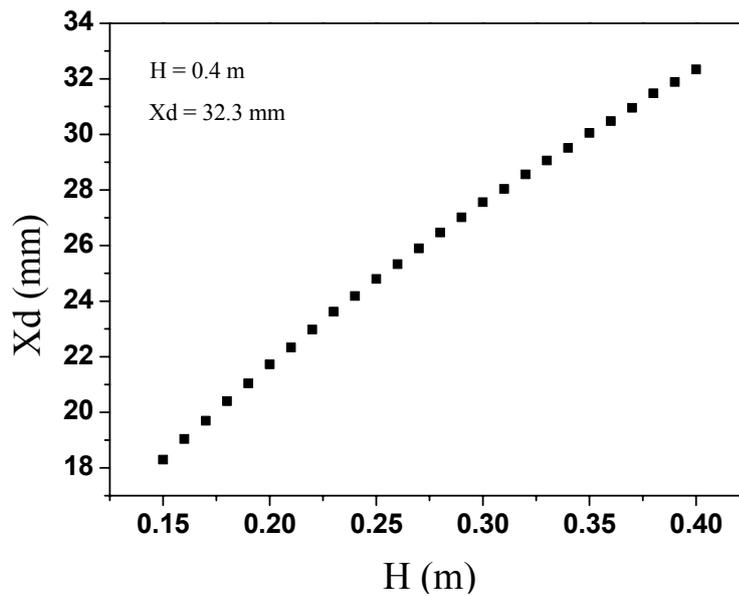


(d)

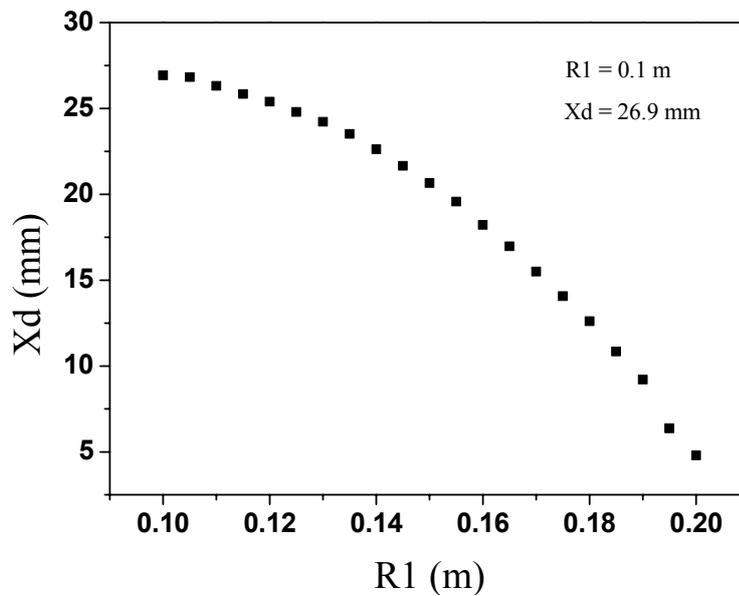
图 8-6 铜铝颗粒距离差 X_d 的高压静电场因素计算结果: (a) $U-X_d$; (b) R_2-X_d ; (c) $\alpha-X_d$; (d) $L-X_d$
 Fig.8-6 Computing results of the X_d variety by the electrical parameters: (a) $U-X_d$, (b) R_2-X_d , (c) $\alpha-X_d$,
 (d) $L-X_d$

8.4.2 机械因素

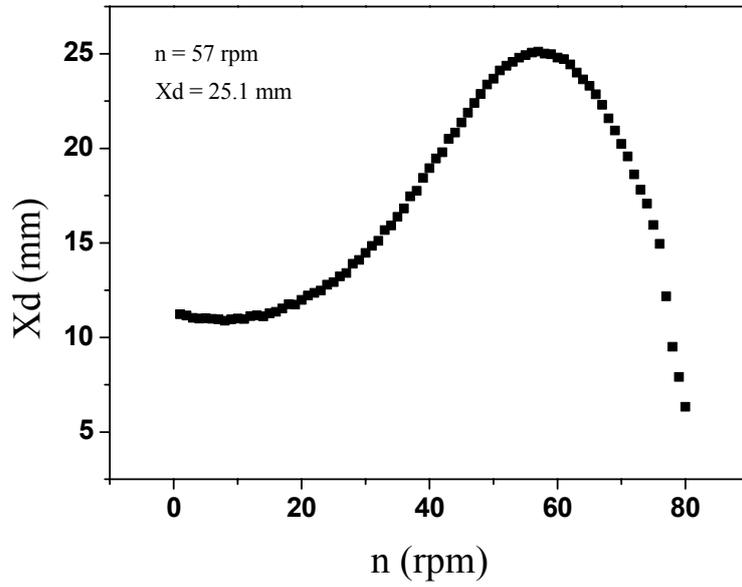
收集槽的高度(H)决定了颗粒的飞行时间,如图 8-7(a)所示, H 的加大有利于加强分选效果。在设备空间允许的条件下,尽量加大收集槽的高度。如图 8-7(b)所示,小尺寸的转辊(R_1)更适合混合金属颗粒的分选。转辊的转速 $n = 57 \text{ rpm}$ 时, X_d 达到最大值。



(a)



(b)



(c)

图 8-7 铜铝颗粒距离差 X_d 的机械因素计算结果: (a) $H-X_d$; (b) R_1-X_d ; (c) $n-X_d$

Fig.8-7 Computing results of the X_d variety by the mechanical parameters: (a) $H-X_d$, (b) R_1-X_d , (c) $n-X_d$

8.4.3 物料因素

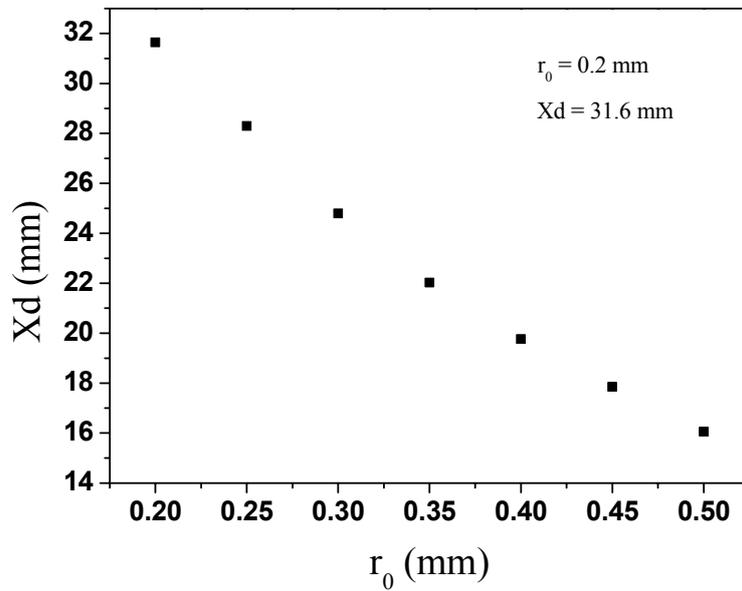


图 8-8 铜铝颗粒距离差 X_d 的物料因素计算结果

Fig.8-8 Computing results of the X_d variety by the material parameters

如图 8-8 所示，小颗粒更适合分选。由第六章分析，静电力(F_e)对小颗粒的影响大于大颗粒。但由实验发现，颗粒与加料器之间的摩擦静电及转辊气流对小颗粒($r_0 < 0.1 \text{ mm}$)的运动轨迹同样有着显著的影响。所以尺寸过小的颗粒不适宜高压静电分选，密度差大的混合颗粒更适宜高压静电分选。

8.4.4 工艺参数的优化

通过单因素分析法，得到适用分离混合金属颗粒的工艺参数。简单组合单因素分析结果得到的工艺参数下，金属颗粒在脱离转辊表面后飞向静电极与静电极碰撞，原有的轨迹被破坏。所以适当的调整一些工艺参数的大小，在避免碰撞发生的前提下，使 X_d 达到最大。如图 8-9 所示，一组优化后的工艺参数在满足设备的机械条件限制的前提下，被用于模拟分选铜铝混合颗粒。与通用参数相比：静电极的大小与位置变化很大；更大的输入电压与更小的入料尺寸被应用；模拟结果距离差 X_d 达到 71.8 mm，是通用参数下的 5 倍。

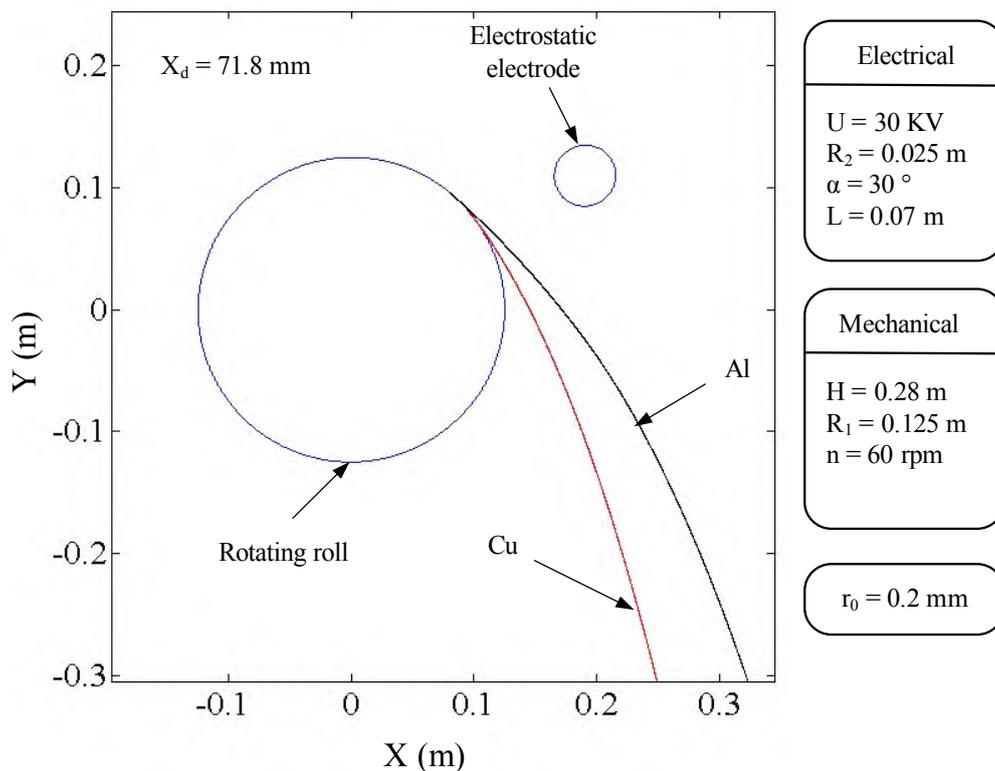


图 8-9 优化工艺参数下模拟高压静电分选机分选混合金属颗粒（铜与铝）

Fig. 8-9 Simulation results of optimized parameters for separating particles of Copper and Aluminum

如图 8-10 所示，在优化工艺参数下利用高压静电分选机（图 8-1）分选铜铝混合金属颗粒的结果。铜铝混合颗粒由电子振动加料器给料。铜颗粒主要集中落在 9 号收集槽，铝颗粒主要落在 11 号收集槽。每个收集槽的宽度为 $30 \pm 2 \text{ mm}$ 。实验结果表明，铜铝颗粒的距离差约为 65 mm ，与模拟结果基本一致。该模型可应用于优化其他混合金属颗粒（锡、锌等）分离的工艺参数并指导设计新型高压静电分选机。

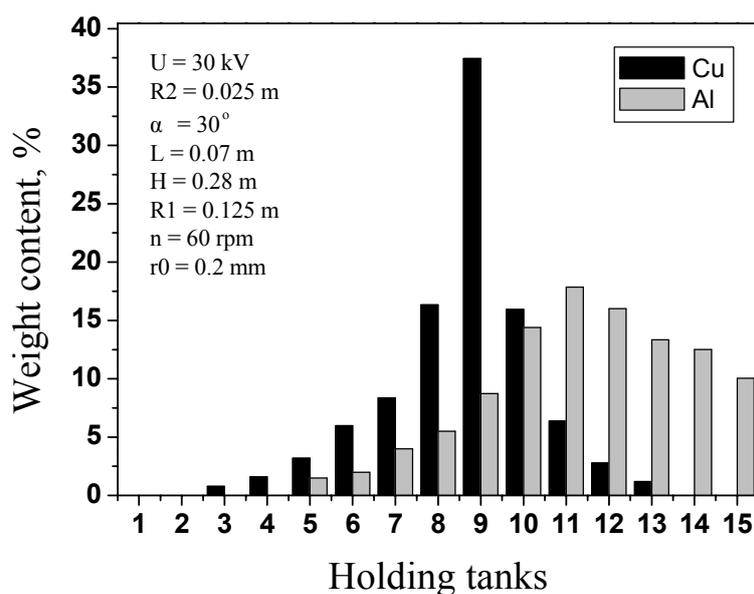


图 8-10 优化工艺参数下高压静电分选机分选混合金属颗粒（铜与铝）结果

Fig. 8-10 Experiment results of optimized parameters for separating particles of Copper and Aluminum

8.5 本章小结

在金属轨迹模型的基础上建立了混合金属轨迹模型。通过分析高压静电因素，机械因素，物料因素对混合金属颗粒分选的影响效果，得到一组优化工艺参数用于分选铜铝混合颗粒($U = 30 \text{ kV}$, $R_2 = 0.025 \text{ m}$, $\alpha = 30^\circ$, $L = 0.07 \text{ m}$, $H = 0.28 \text{ m}$, $R_1 = 0.125 \text{ m}$, $n = 60 \text{ rpm}$, $r_0 = 0.2 \text{ mm}$)。在优化的工艺参数下分离铜铝颗粒结果与由模型模拟的结果基本一致，证明该模型可用于指导设计分选混合金属颗粒的新型高压静电分选机。

第九章 废旧印刷电路板处理生产线成套设备

9.1 引言

随着近几年铜价的飙升,作为电子垃圾的废旧印刷电路板逐渐成为国内回收企业的抢手货。目前国内处理废旧印刷电路板主要存在两种手段:

- 1) 国外进口的处理生产线, 能耗大、回收效果好、造价昂贵;
- 2) 传统的水力摇床处理生产线, 能耗大、回收效果一般、造价低廉、排放废水。

大部分国内的回收企业无法承受国外设备高昂的价格与维修费用, 而采用落后的水力摇床技术。不仅浪费了资源, 而且对周围的环境造成破坏。国内的市场急需一种价格适中, 高效、无污染、无害化处理、可资源化技术和装备。金属铜占电路板中金属含量的 80%以上, 具有很高的回收价值, 尤其由电路板生产厂报废的废板中的金属只含有铜; 结合前几章的工作, 为某企业开发了一套废旧印刷电路板处理生产线。

9.2 设计与制造

9.2.1 全套生产线

如图 9-1 所示, 该套生产线包括: A-粗粉碎系统、B-传送系统 I、C-分料系统、D-二次粉碎系统、E-风力输送系统、F-传送系统 II、G-静电分离系统。图 9-2 为利用生产线处理废旧印刷电路板的效果图。生产线实现:

- 1) 入料为废旧印刷电路板, 出料为金属颗粒与玻璃纤维-树脂粉末;
- 2) 生产过程实现流水线作业, 全自动控制; 生产过程无三废排放, 噪音控制在合理范围。

生产线的基本情况如下:

占地: $6\text{ m} \times 11.6\text{ m} = 69.6\text{ m}^2$; 总功率: $>82.25\text{ kw}$

系统正常运行处理量可达 300 kg/h , 分选效率达到 90%。

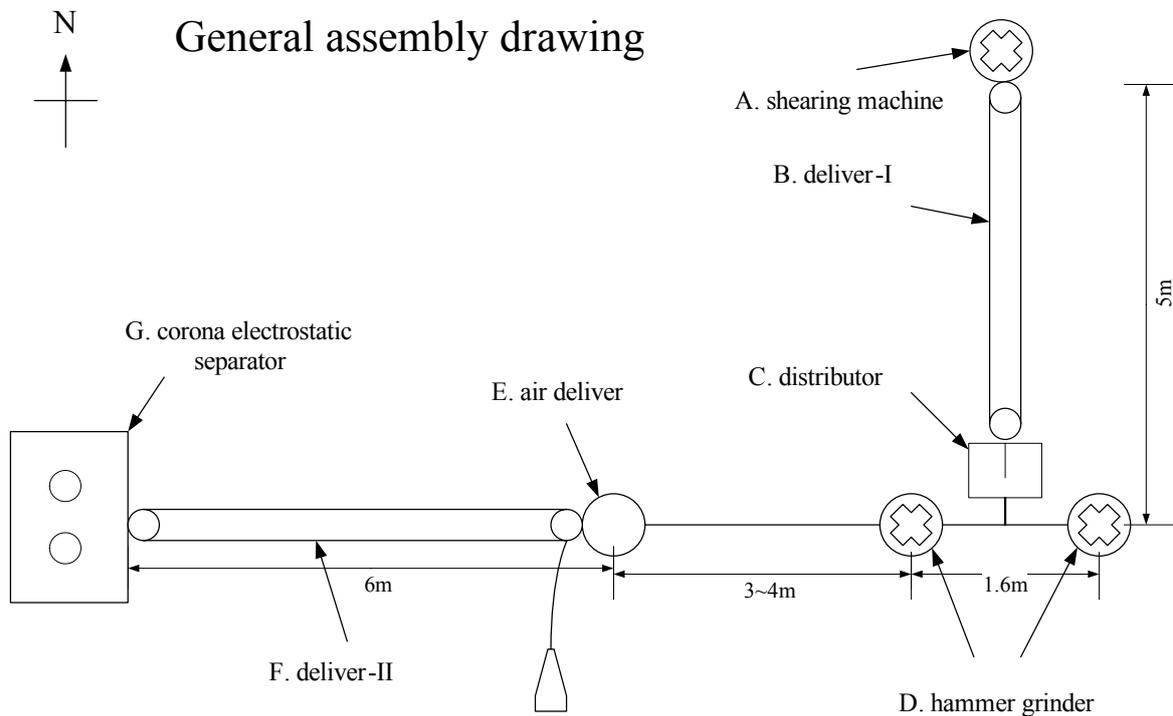


图 9-1 废旧印刷电路板生产线总装图

Fig.9-1 General assembly drawing for recycling waste printed circuit boards

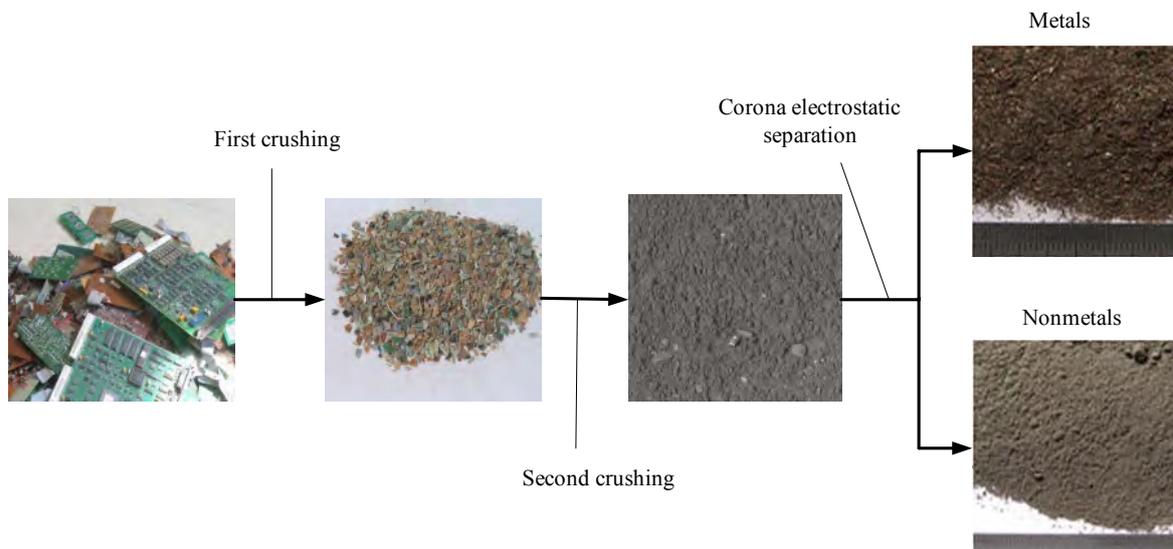


图 9-2 废旧印刷电路板分选结果

Fig.9-2 Results of separating waste PCBs

9.2.2 A-粗粉碎系统

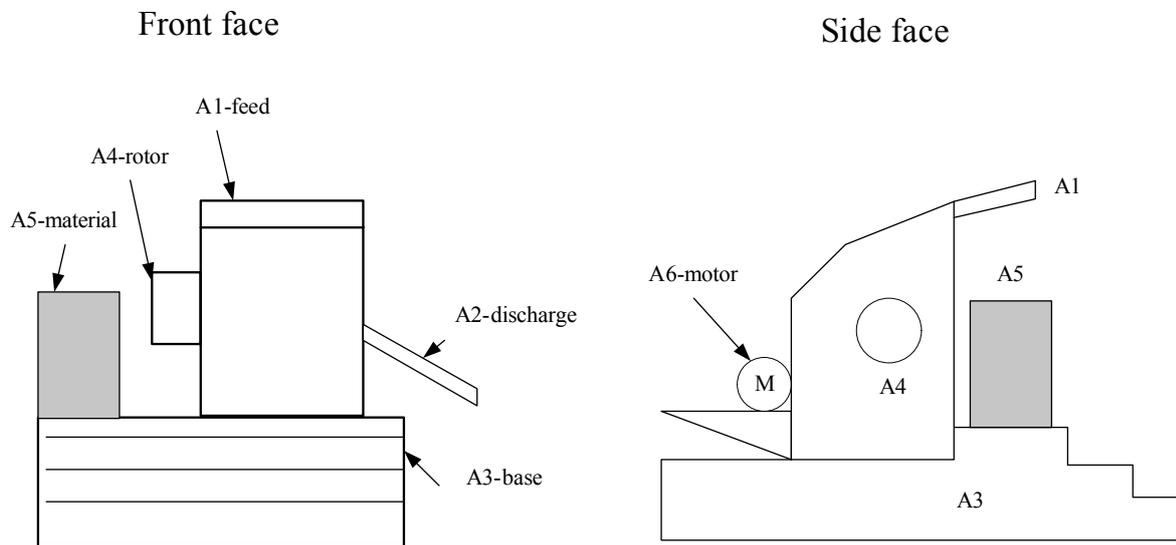


图 9-3 剪切破碎机机结构图

Fig.9-3 Diagram of shearing machine



图 9-4 剪切破碎机机实物图

Fig.9-4 Photograph of shearing machine

由第三章的分析得到剪切式破碎机的转速为 1440 rpm。如图 9-3 所示，粗粉碎系统（A 系统）的结构图，图 9-4 为剪切破碎机的实物图。A 系统由一台旋转式剪切破碎机组成。废旧印刷电路板经一次破碎，成为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的碎片，便于二次破碎。破碎方式为剪切破碎为主，破碎机刀头为易损件，需经常更换。为合理经济的利用刀头，入料要求电路板厚度不超过 3 mm。破碎过程能耗大，需配备大功率电机（最低 22 kw）。由于是高速旋转的剪切破碎，破碎机出料口易产生大量的粉尘，与传送带的连接处的密封至关重要。A 系统正常运行处理量为：300 kg/h，视加料速度，还有上升空间。

9.2.3 B-传送系统 I

如图 9-5 所示，为传送系统 I（B 系统）的结构图，图 9-6 为传送系统的实物图。物料由 A 系统出料后，由 B 系统输送下一工序。加装 B5 与 B3 有效的解决皮带在转到背面时有粉尘从带上滑落导致扬尘的现象。在与 A 系统接口的部位加装 B2 解决了出口扬尘的问题。传送带 B1 的水平角度 α 为 24.5° ，适宜物料传送。

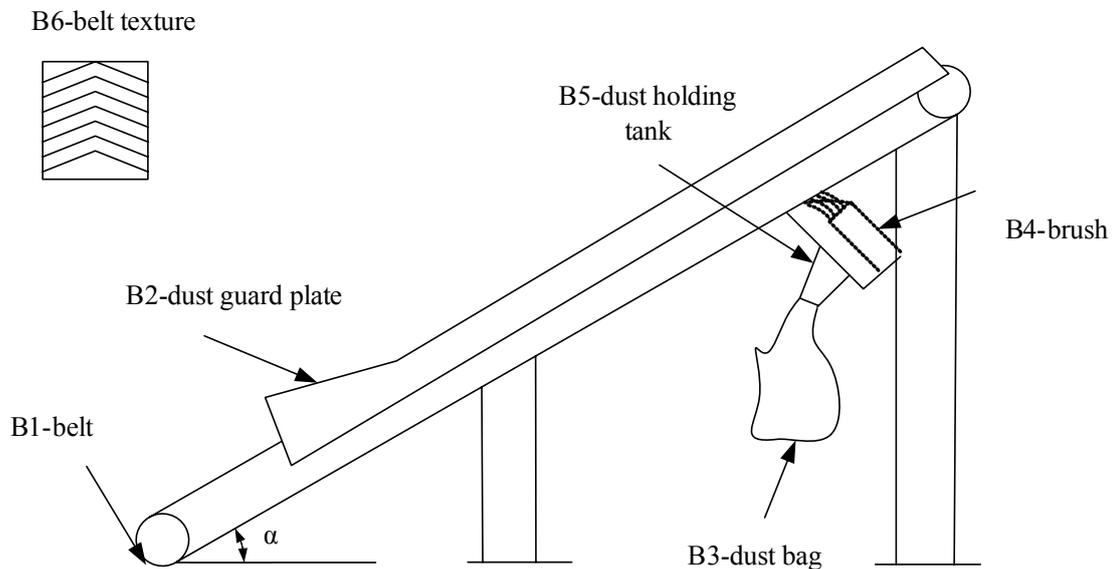


图 9-5 传送系统 I 结构图
Fig.9-5 Diagram of deliver I



图 9-6 传送系统 I 实物图
Fig.9-6 Photograph of deliver I

9.2.4 C-分料系统

由第四章的分析得到，一级破碎的能耗低于二级破碎的能耗。二级破碎是冲击与磨剥相结合的破碎方式，筛网网孔小于剪切破碎机。为了生产线协调稳定生产，一台剪切破碎机搭配两台锤式破碎机。分料系统必不可少。如图 9-7 所示，为分料系统（C 系统）的结构简图，图 9-8 为分料系统的实物图。由于二次分选系统（D 系统）由两台锤式破碎机组成配合 A 系统的生产量，利用 C 系统将物料平均分配到下一工序。C 系统由防尘罩 C1，分料板 C3 和两台电子振动加料器 C4 组成。内部分料板 C3 起到将物料平均分配到 D 系统中的作用。C4 将物料均匀的给入冲击式破碎机。当 A 系统的生产量为 300 kg/h 时，C4 中喂料板的水平角度调整为 5°。

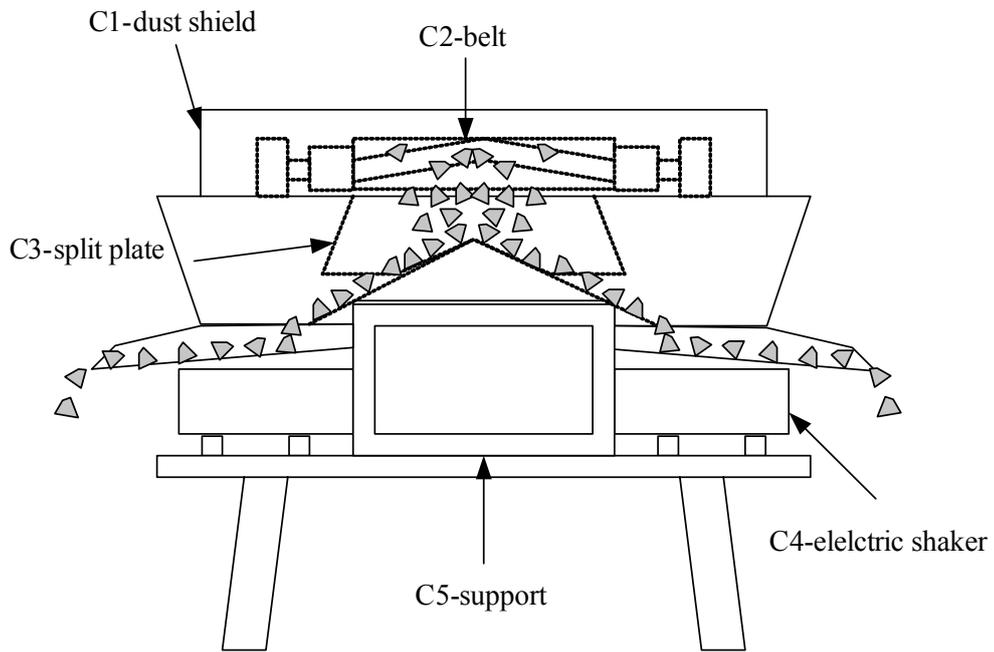


图 9-7 分料系统结构图

Fig.9-7 Diagram of distributor



图 9-8 分料系统实物图

Fig.9-8 Photograph of distributor

9.2.5 D-二次粉碎系统

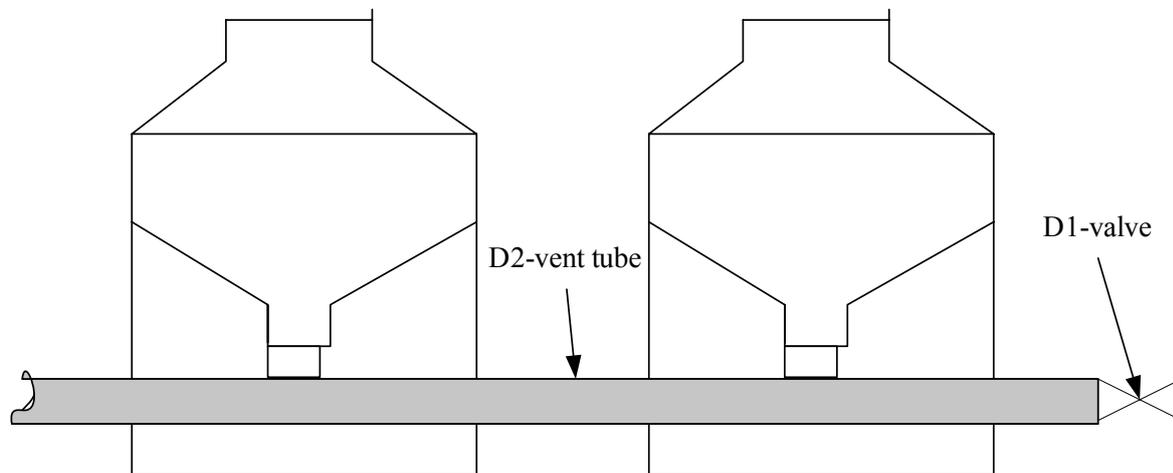


图 9-9 二次粉碎系统结构图

Fig.9-9 Diagram of hammer grinder



图 9-10 冲击式破碎机实物图

Fig.9-10 Photograph of hammer grinder

如图 9-9 所示，为二次粉碎系统（D 系统）的结构图；图 9-10 为锤式破碎机的实物图。D 系统由两台功率为 22 kw 的锤式破碎机串连组成。物料由 C 系统平均的加入到细粉机中。二次粉碎系统采用冲击式破碎，出料为细粉级（物料粒径小于 0.6 mm）。细粉物料受破碎机内部气流影响不易从筛网落下。采用风力输送方式将细粉物料从破碎机内腔中抽出，同时加强破碎机腔内气体流量，降低腔内温度，延长使用寿命。

9.2.6 E-风力输送系统

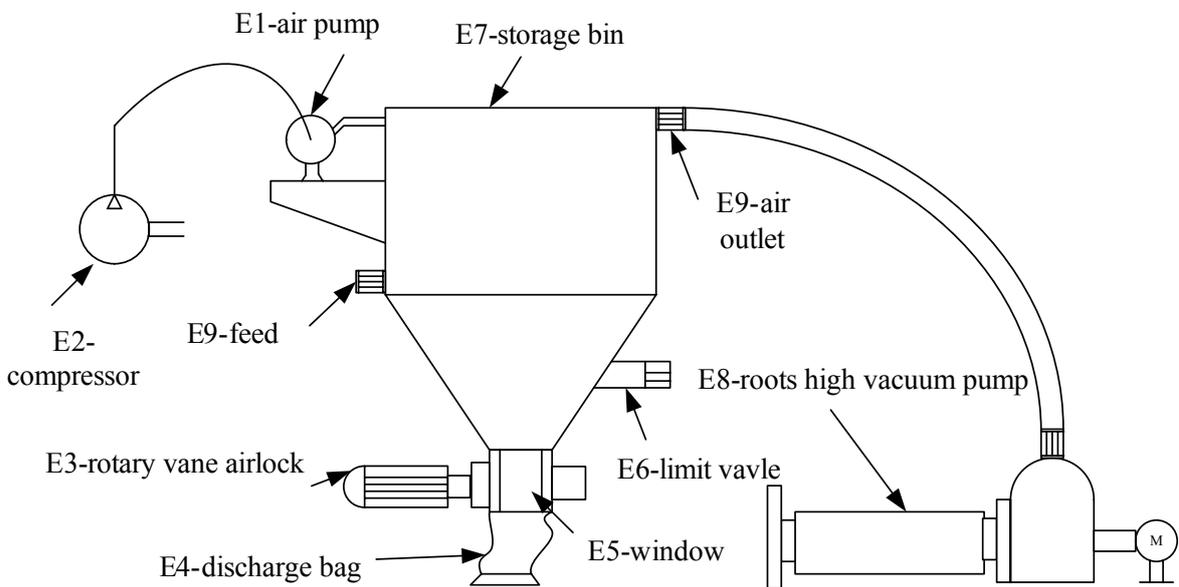


图 9-11 风力输送系统结构图

Fig.9-11Diagram of air deliver



图 9-12 风力输送系统实物图

Fig.9-12 Photograph of air deliver

如图 9-11 所示，为风力输送系统（E 系统）结构图；图 9-12 为风力输送系统的实物图。物料由 E9 进入料仓，较大的颗粒直接的由 E4 落在传送带上，粉尘进入料仓顶部的布袋，由气泵 E1 的脉冲压缩空气再抖落入 E4。E1 空气压缩机为脉冲气体的气源，E8 罗茨真空风机为风力输送的气源。

在试生产过程中，发现 E 系统还有待改进：物料具有一定的温度，致使软管在接口处软化变形，料仓的密封垫圈也受物料温度影响而变形，影响了料仓的密封性。采用耐高温材料的气管与垫圈可解决此类问题。

9.2.7 F-传送系统 II

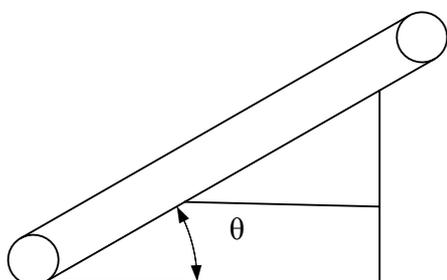


图 9-13 传送系统 II 结构图

Fig.9-13 Diagram of deliver II

如图 9-13 所示，为传送系统 II（F 系统）的结构图。物料经由 F 传送至电选机。传送带的倾斜角度十分关键。角度过小会加大传送带的长度，提高设备的成本；角度大导致一部分大颗粒从传送带上滑落。传送带的倾斜角度设定在 24° - 26° ，对 E 系统的出料输送效果较好。

9.2.8 G-静电分离系统

如图 9-14 所示，为静电分离系统（G 系统）的结构图，图 9-15 为静电分离系统的实物图。该系统采用双辊静电分选机，G2 为振动加料器。物料经 G3 后，中间体与非金属粉末再由 G7 二次分选。通过调节挡料板 G5 与 G8 改变 G10 中的金属纯度。G6 与辊面的距离十分重要，距离过大物料颗粒弹起直接落入金属收集区，降低金属纯度；距离过小，物料颗粒直接落入非金属收集区，减少金属产量。G6 与辊面的间距保持在 3 mm。G 系统为封闭结构，对外部而言几乎没有粉尘，但电选机内部集尘过多对电机以及电极都会产生不利影响。

由第五章、第六章分析得到，一次分选时采用大角度静电极(35°)，低转速(66 rpm)的参数组合，以改善金属的脱离，提高金属的收集产量；二次分选时，入料多为中间体，采用小角度静电极(20°)，高转速(82 rpm)的参数组合，提高金属收集的纯度。此外，分选机采用多电极结构增加电场强度。

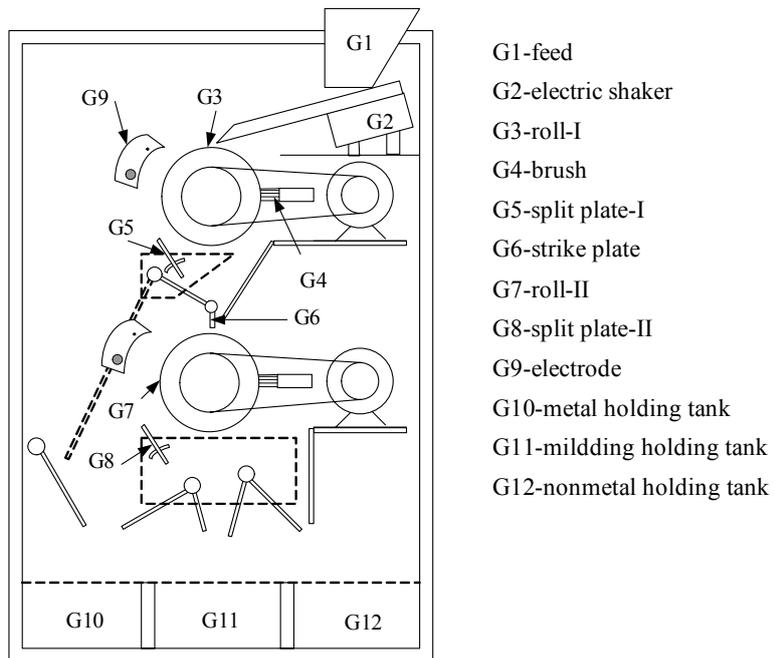


图 9-14 静电分离系统结构图

Fig.9-14 Diagram of corona electrostatic separator



图 9-15 静电分离系统实物图

Fig.9-15 Photograph of corona electrostatic separator

9.3 本章小结

设计制造了一套处理废旧印刷电路板的生产线,生产线占地 69.6 m^2 ,总功率 82.25 kw 。生产过程实现流水线作业,全自动控制;无三废排放,噪音控制在合理范围。生产线入料为废旧印刷电路板,出料为金属颗粒与玻璃纤维-树脂粉末;系统正常运行处理量可达 300 kg/h ,分选效率达到 90% 。一次分选时采用大角度静电极(35°),低转速(66 rpm)的参数组合,以改善金属的脱离,提高金属的产量;二次分选时,入料多为中间体,采用小角度静电极(20°),高转速(82 rpm)的参数组合,提高金属的纯度。

结论与展望

结论

本研究通过理论分析,自主研发破碎机与高压静电分选机并对废旧印刷电路板进行资源化处理。通过分析废旧印刷电路板的破碎过程,揭示了电路板的破碎特性;结合数学模拟软件 MATLAB 模拟了分选空间的电场分布,分析了高压静电分选机中各参数对分选效果的影响,并建立了金属颗粒的运动轨迹模型,依轨迹模型探索了电选机分选混合金属颗粒的可行性;通过对非金属颗粒的动力学分析,提出了一种定量的分析转辊转速对高压静电分选效果影响的方法;最后设计制造了一套处理废旧印刷电路板的生产线。主要结论如下:

1) 自行研制破碎机与高压静电分选机,确定剪切式旋转破碎机和冲击式旋转破碎机相结合的两级破碎方式对废旧印刷电路板进行破碎,使电路板中金属成分和非金属基板有效解离。剪切式旋转破碎机的工作转速为 1440 rpm,转子半径为 0.25 m,冲击式破碎机工作转速为 2000 rpm,转子半径为 0.2 m。高压静电分选机的供电系统最高电压达 30 kV;电极结构为丝状电晕极与柱状静电极相结合的复合电极结构;电极角度范围达到 0-90° 可调,电极与转辊的间距达到 0-500 mm 可调;接地转辊表面镀铬处理,转速可调(10 rpm-1000 rpm)。

2) Type-A (来自废旧电器)物料破碎后颗粒尺寸在 1.2 mm 以下达到完全解离,Type-B (来自电路板厂废料)物料破碎后颗粒尺寸在 0.6 mm 以下完全解离。破碎后电路板物料颗粒形状以球状和片状及多棱角状为主。

3) MATLAB 模拟高压静电分选空间电场强度分布,发现电场强度最大值位置偏向于静电极方向。不同工艺参数下电场强度分布表明,加大电压、采用复合电极结构、减小电极与接地转辊间的距离、增加静电极半径、减小静电极角度、加大电晕电极角度等参数变化可以提高电场强度,改善分选效果。当电选机工艺参数为以下范围时,可以得到较好的分选效果: $U = 20 \text{ kV} - 30 \text{ kV}$, $L = L_1 = L_2 = 0.21 \text{ m}$, $R_1 = 0.114 \text{ m}$, $R_2 = 0.019 \text{ m}$, $\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$ 。

4) 利用 MATLAB 编程,建立了金属颗粒运动轨迹模型。应用模型对颗粒尺寸与受力关系的分析得到:小尺寸颗粒($r_0 < 0.1 \text{ mm}$)受外界因素影响更大,易出现特殊运

动轨迹，破坏分选过程，在分选前应调整电选机的工艺参数，避免碰撞现象发生。金属颗粒轨迹的模拟结果与实验结果相一致，该模型可优化高压静电分选机的工艺参数，扩展高压静电分选机的应用领域。

5) 提出了高压静电分选机的“临界荷电转速”(n^*)的概念及公式， $n^* = (q_s ke) / (40\pi\epsilon_0\epsilon_r R)$ ，此方程可作为判定方程判定在一定转速条件下，颗粒荷电是否达到饱和；通过理论分析得到片状非金属颗粒的“临界转速” N ，其值为：

$$(i) \quad n = n' \leq n^*, \quad N = n' = \left(\frac{BC}{mR} - \frac{g}{R} \right)^{1/2} \frac{30}{\pi};$$

$$(ii) \quad n = n' > n^*, \quad N = \left(\frac{BC(n^*)^2}{BC - mg} - \frac{g}{R} \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \right)^{1/2};$$

$$B = \frac{9k_1\pi\epsilon_0\epsilon_r^2 E_0^2}{(\epsilon_r + 2)^2}, \quad C = \frac{(r^2 + 2rh)^2}{4h^2}$$

6) 提出了同时提高金属纯度和非金属回收率的方法：

- (i) 增加电晕极数量可增大电晕区宽度和电晕电场强度，并提高临界荷电转速(n^*)；
- (ii) 避免火花放电的前提下，提高电压并减小电极之间的距离，以提高电晕电场强度及颗粒的荷电量；
- (iii) 改变转辊的曲率以及电晕极位置，以减少颗粒在转辊表面的电荷损失。

7) 在金属颗粒轨迹模型的基础上，建立了分离混合金属颗粒的轨迹模型。通过分析高压静电因素，机械因素，物料因素对混合金属颗粒分选的影响效果，得到一组优化工艺参数分选铜铝混合颗粒： $U = 30 \text{ kV}$, $R_2 = 0.025 \text{ m}$, $\alpha = 30^\circ$, $L = 0.07 \text{ m}$, $H = 0.28 \text{ m}$, $R_1 = 0.125 \text{ m}$, $n = 60 \text{ rpm}$, $r_0 = 0.2 \text{ mm}$ 。

8) 设计制造了一套处理废旧印刷电路板的生产线。生产线入料为废旧印刷电路板，出料为金属颗粒与玻璃纤维-树脂粉末。系统正常运行处理量可达 300 kg/h ，分选效率达到 90% 。一次分选时采用大角度静电极(35°)，低转速(66 rpm)的参数组合，以改善金属的脱离，提高金属的产量；二次分选时，入料多为中间体，采用小角度静电极(20°)，高转速(82 rpm)的参数组合，提高金属的纯度。

展望

经过几年在此领域的探索，以下工作作者认为有继续开展的价值：

1) 物料颗粒在分选空间的荷电方式，荷电量，尚待深入研究。细粒级物料($r_0 < 0.1$ mm)在分选空间中对其他尺寸物料的影响（团聚现象），尚未揭示。各粒径物料之间的交互作用对分选效果的影响，有待研究。

2) 高压静电分选机的加料量与加料方式对分选效果的影响；分选机适用物料的尺寸范围；多辊高压静电分选机的特点，应用范围，各转辊参数的匹配关系尚待深入探讨。

3) 处理废旧印刷电路板的尾料非金属粉是玻璃纤维-树脂粉末，约占电路板 70% 的重量，目前主要采用焚烧与填埋进行处理，其结果造成环境污染和大量资源浪费。非金属粉作为填料或压制板材变废为宝，既可解决环境污染问题，又有经济效益，具有很广阔的研究价值。

4) 部分废旧印刷电路板处理后的金属富集体内，除金属铜外，还含有锌、镉、铅等有色金属，通常在精炼铜的过程中浪费。真空蒸馏技术利用各种金属蒸气压不同的特性将混合金属在不同的温度下分离，是一种无污染、抗氧化、高效节能的环保工艺，尚待深入研究。

创新点

1) 自行研制出废旧印刷电路板的破碎与高压静电分选实验设备。通过计算机模拟高压静电分选机内分选空间的电场分布,并结合自制设备实验验证,优化了高压静电分选机的工艺参数。进一步通过金属颗粒在分选空间中的受力分析与 MATLAB 编程,建立金属颗粒运动轨迹模型,为提高高压静电分选机的金属回收效率及扩展分选机的应用领域提供理论基础。

2) 在分析颗粒在高压静电分选过程中的带电过程与受力模型的基础上,建立了高压静电分选机转辊的临界转速模型。提出了“临界荷电转速 n^* ”、“临界脱离转速 n' ”与“临界转速 N ”的概念。得到颗粒是否饱和荷电的判定方程,及同时提高非金属回收率与金属纯度的方法,对高压静电分选机参数范围的确定具有指导意义。

3) 开发出新型混合金属颗粒分离的高压静电分选机,并建立分离混合金属颗粒的轨迹模型。该模型可用于分选混合金属颗粒的新型高压静电分选机设计。

4) 基于对破碎与高压静电分选研究的理论基础,自行设计制造了一套处理废旧印刷电路板的生产线。生产过程实现流水线作业,全自动控制;无三废排放。系统正常运行处理量可达 300 kg/h,分选效率达到 90%。为推动废旧印刷电路板无害化、资源化处理技术走向工业应用奠定了基础。

研究成果及获奖情况

发表论文

- [1] **Li, J.**, Lu, H.Z., Guo, J., Xu, Z.M., Zhou, Y.H., Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards, *Environmental Science & Technology*, 2007, 41, pp. 1995-2000, (SCI: 145HE, EI: 071310510530, **IF: 4.040**)
- [2] **Li, J.**, Xu, Z.M., Zhou, Y.H., Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards, *Journal of Electrostatics*, 2007, 65, pp. 233-238. (SCI: 155UH, EI: 070310367659, **IF: 0.467**)
- [3] **Li, J.**, Lu, H.Z., Xu, Z.M., Zhou, Y.H., A Model for computing the trajectories of the conducting particles from waste printed circuit boards in corona electrostatic separators, *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151, pp. 52-57, (SCI: 264XB, **IF: 1.855**)
- [4] **Li, J.**, Lu, H.Z., Liu, S.S., Xu, Z.M., Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field, *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153, pp. 269-275, (SCI: 294PH, **IF: 1.855**)
- [5] **Li, J.**, Xu, Z.M., Zhou, Y.H., Theoretic model and computer simulation of separating mixture metal particles from waste printed circuit board by electrostatic separator, *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153, pp. 1308-1313, (SCI: 296LG, **IF: 1.855**)
- [6] **Li, J.**, Lu, H.Z., Xu, Z.M., Zhou, Y.H., Critical rotational speed model of the rotating roll electrode in corona electrostatic separation for recycling waste printed circuit boards, *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154, pp. 331-336, (SCI: 304LO, **IF: 1.855**)
- [7] Guo, J., **Li, J.**, Rao, Q.L., Xu, Z.M., (2007), Phenolic molding compound filled with nonmetals of waste PCBs, *Environmental Science & Technology*, *in press*. (doi: [10.1021/es0712930](https://doi.org/10.1021/es0712930), **IF: 4.040**)
- [8] Lu, H.Z., **Li, J.**, Guo, J., Xu, Z.M., Electrostatics of spherical metallic particles in cylinder electrostatic separators/sizers, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39, pp. 4111- 4115. (SCI: 101UU, EI: 063710108865, **IF: 2.077**)

- [9] Wu, J., **Li, J.**, Xu, Z.M., Optimization of Key Factors of the Electrostatic Separation for Crushed PCB Wastes Using Roll-Type Separator, Journal of Hazardous Materials, 2007, *in press*. (doi: [10.1016/j.jhazmat.2007.10.018](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.018), **IF: 1.855**)
- [10] Lu, H.Z., **Li, J.**, Xu, Z.M., Dynamics of spherical metallic particles in cylinder electrostatic Separators/Purifiers, Journal of Hazardous Materials, 2007, *in press*. (doi: [10.1016/j.jhazmat.2007.11.109](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.109), **IF: 1.855**)
- [11] Lu, H.Z., **Li, J.**, Xu, Z.M., Movement behavior in electrostatic separation: recycling of metals materials from waste Printed circuit board, Journal of Materials Processing Technology, *in press*. (doi: [10.1016/j.jmatprotec.2007.06.004](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.004), **IF: 0.651**)
- [12] 许振明, **李佳**, 路洪洲, 吴江, 高压耦合电场下导电颗粒和非导电颗粒的动力学研究, 中国科学 E 辑 (接收), (英文版: Dynamics of conductive and nonconductive particles under high-voltage electrostatic coupling field, Science in China: Series E Technological Sciences, accepted)
- [13] 路洪洲, **李佳**, 郭杰, 许振明, 基于可资源化的废弃印刷线路板的破碎及破碎性能, 上海交通大学学报, 2007, 41 (4): 551-556
- [14] 郭杰, **李佳**, 路洪洲, 许振明, 基于循环经济概念下的废弃电路板的再利用, 材料导报, 2006, 20 (11): 25-27

申请专利

- [1] 许振明, **李佳**, 废旧印刷电路板的破碎及高压静电分离方法, 200510023785.5 (已授权)
- [2] **李佳**, 许振明, 废旧印刷电路板破碎颗粒的高压静电分离装置及分离方法, 200510023788.9
- [3] 许振明, **李佳**, 破碎废旧印刷电路板的基板材料颗粒再生板材的制备装置, 200510023787.4
- [4] 许振明, **李佳**, 废旧印刷电路板的基板材料颗粒再生板材的制造方法, 200510023786.X

获奖情况

2007年10月, 国家优秀奖学金

致 谢

本文是在导师周尧和院士和许振明教授悉心指导和严格要求下完成的。周先生开阔的科学视野、渊博知识、严谨的治学态度、务实而又富于创新的开拓精神以及为人正直和宽厚待人的高尚品德对自己的熏陶，将使我在今后工作和生活中受益匪浅。教诲之恩，终生难忘，在论文完成之际，谨向恩师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

在四年半学习与研究过程中，导师许振明教授直接负责学生的课题工作，参与了课题的全过程，从设备的采购、实验的进行、外协、经费等方面给予我大力支持，每到难以继续开展工作时，许老师的鼓励与引导总能使学生渡过难关，继续前进。许老师对科研的热情、富于创新思想、敏锐洞察力和一丝不苟的科学态度，将成为学生终生效仿的楷模。实验中许老师的启发和鼓励，生活上许老师给予的无微不至关怀，得以使论文能够顺利完成，借此机会表示深深的感谢。

本文部分实验是在路洪州硕士、刘舒淑硕士生和张嘉幼本科生等协助下完成的，非常感谢他们对论文实验工作的贡献。衷心感谢课题组郭杰博士生、吴江博士生、黄魁博士生、詹路硕士生、郭久勇硕士生、周全硕士生、秦玉飞硕士生等人几年来的帮助与讨论，以及大家创造的上进、和谐的工作生活环境。借此机会，祝各位都有美好的前程。

本论文的研究工作是在国家高科技计划（863）项目（2006AA06Z364）与高等学校博士点专项科研基金（20060248058）的资助下完成的，在此表示感谢。另外，本文编写过程中，参阅和引用了国内外大量学者的文献，他们的成果为本文提供了丰富的资料和素材，谨向这些学者表示由衷的感谢。

最后，特别感谢我的父母和家人，感谢他们多年如一日的支持和理解，没有他们默默无闻的奉献就不可能有自己的今天。感谢所有支持和鼓励过我的亲朋好友。

李佳

2007年12月 于上海交通大学

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密，在___年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日