破碎电路板高压静电分选电场分布的计算机模拟[1]

刘淑舒，李佳，许振明*
上海交通大学环境科学与工程学院，上海（200240）
E-mail: lss-l@sjtu.edu.cn

摘　要：为了开发破碎电路板的无污染、高效的高压静电分选技术，本文根据高压静电理论，利用 MATLAB 软件模拟了高压静电分选机内的电场分布，并通过实验验证高压电场的分布对分选结果的影响规律。结果表明：增大电压、减小电极与转辊轴心距可以改善分选效果；当电晕电极和转辊轴心连线与水平面的夹角 α 恒定，静电极和转辊轴心连线与水平面的夹角 β 减小时，可以提高电场强度，优化电场分布，金属回收率降低，但纯度提高；当 β 不变时，随着 α 的减小，金属收集纯度降低。模拟结果与实验结果吻合，采用电场模拟方法可以用来指导破碎电路板高压静电分选技术中的工艺参数优化和电选机的结构设计。

关键词：电路板，高压静电分选，MATLAB，电场分布
中图分类号：TD457；X705

1. 引言

随着经济的不断发展，作为电子工业的基础，同时也是各种电子产品的核心部件，印刷电路板也以惊人的速度增加。印刷电路板中含有多种贵重金属(金、银和钯等) 、稀有金属(铌和钽等)和大量的基本金属(铜、铁和铝等)[1]，是重要的资源。此外，废弃电路板中也含有大量能够对环境造成严重危害的物质[2]（如多氯联苯），这些物质也严重的危害了人们的健康。因此，对印刷电路板进行回收利用，不仅仅是有限资源的再生利用的需要，更是保护环境，防治污染的必然要求。

废弃印刷电路板的回收处理技术主要有火法、湿法、机械处理及生物处理等。机械处理中的高压静电分选曾广泛应用于选矿工业中，与目前应用分离破碎电路板中金属和非金属颗粒的气流风选和湿法重力分选比，具有成本低、高效、结构简单、无污染等特点[3]。研究发现，废弃电路板破碎到0.6mm以下时金属基体基本上达到100%的解离[4,5]。而在此粒径范围内静电分选[6,7]是最有效的。高压静电分选的基础是被分选物料导电性差异，导致受力不同而引起的颗粒的运动轨迹的差异，而决定被分选物料的受力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。其中，空间电场强度是十分关键的因素，而高压电极位置及电压强度是决定空间电场强度的两个重要的参数。由于印刷线路板颗粒性质与矿物有显著差异，分离的影响因素复杂，因此，利用计算机软件模拟分离过程简单方便，直观形象。目前关于利用计算机软件来模拟印刷线路板的静电分离的研究并未见报道。为此，本文利用MATLAB软件模拟了高压静电分选机中的空间电场分布，研究了高压静电分选时电场分布规律、物料颗粒的受力和运动规律，并通过实验验证，优化实验参数，为破碎废弃电路板中金属与基板材料非金属的高压静电分离提供理论依据。

2. 实验材料和方法

废弃印刷线路板经两级破碎得到金属、非金属混合颗粒，从中筛分出粒径为 0.6～0.8mm 的颗粒作为实验材料[8]。

高压静电分离的原理如图 1[9]所示。本实验通过电子振动加料器实现加料，其振幅可

[1]本课题得到教育部“新世纪优秀人才支持计划”；十一五国家高科技计划（863）专题”（2006AA06Z364）和教育部博士点基金 (20060248058)的资助。

调，保证了单层加料。金属和非金属混合颗粒通过加料器进入旋转的接地转辊表面，受到电晕电极所产生的负离子轰击而带电，金属颗粒通过接地转辊迅速失去负电荷，在静电极吸引及在重力作用下金属颗粒飞离转辊表面，落入金属收集槽 a 中；而非金属颗粒则保持所带负电荷，在电场力作用下紧贴在转辊表面，随转辊一起转动至后方，被毛刷刷下，落入非金属收集槽 e 中；中间体则落入 b～d 槽中，从而实现分离。

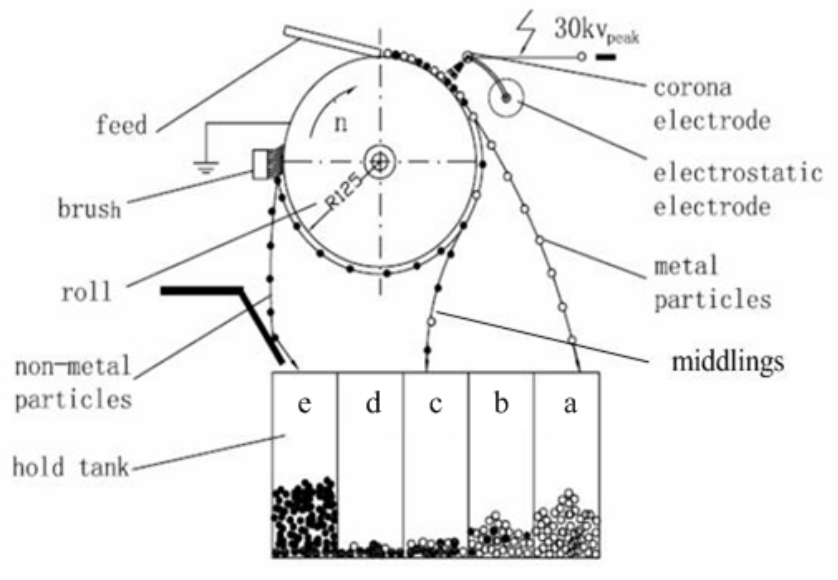


图1　静电分选的实验装置图

Fig.1　Corona electrostatic separator

如图 2 所示，α、β 分别是电晕电极、静电极和转辊轴心连线与水平面的夹角，L 是静电极与转辊轴心距，即中心距离；D 是电晕电极与转辊轴心距。本实验中只考虑 L 与 D 相等的情况。各电极简化成曲率不同的圆柱，利用 MATLAB 的电磁场模拟工具对电晕电极与接地电极间的电场、静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，电晕电极和静电极的电势为施加电压值，四周为屏蔽。根据以下假设条件：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。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 $\nabla \cdot D = \rho$ 和关系式 $D = \varepsilon E$ 得到泊松方程

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V) = \rho \tag{1}$$

式中 ε 为界电系数，ρ 为空间电荷密度。利用 MATLAB 定性模拟不同状况下的耦合电场分布。

在电场分布模拟中，接地电极半径 R_1=114mm，电晕电极半径 R_2=0.15mm，静电极半径 R_3=19mm，相邻电场线的间距为 5000V/m 。

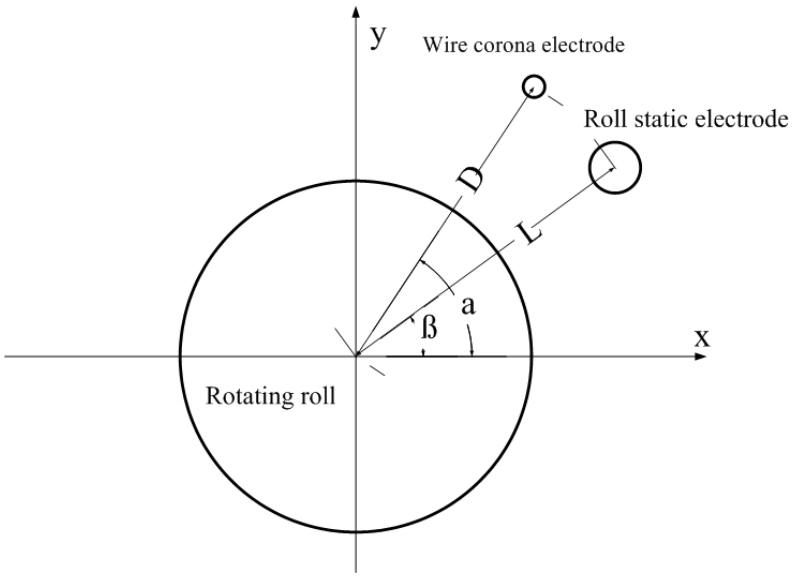


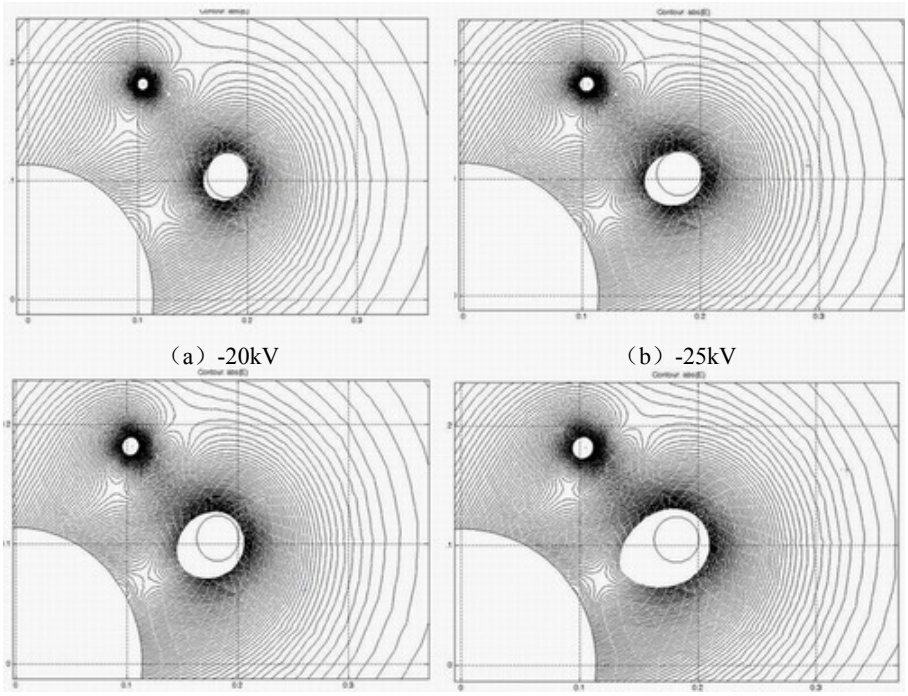
图 2　电极结构示意图

Fig.2　Electrode configuration

3. 结果分析与讨论

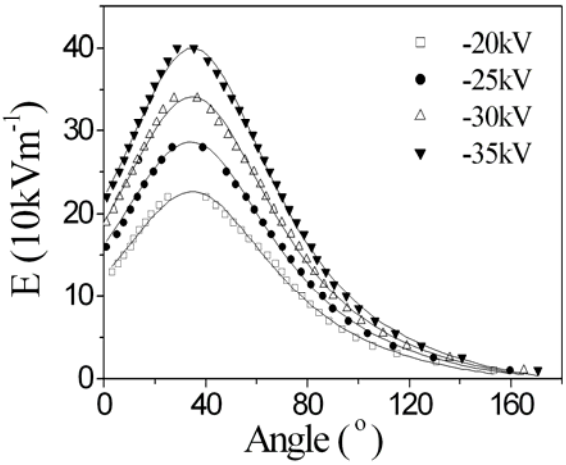
3.1 电场分布模拟

3.1.1 不同电压



（a）-20kV　（b）-25kV

（c）-30kV　（d）-35kV



（e）转辊表面电场分布曲线

模拟参数：中心距离 L=210mm，α=60°，β=30°

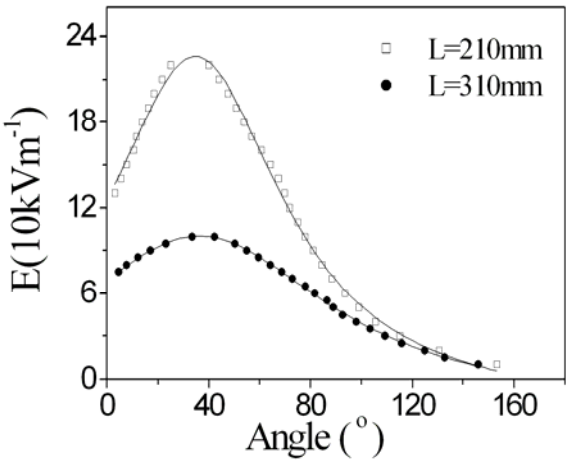
图 3　不同电压下的电场分布

Fig.3　Electric-field strength distributions on the rotating roll under different voltages

用Adobe Photoshop CS中的角度测量工具以通过转辊轴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，电场强度为纵坐标就得出不同电压下电场分布情况（图3）。由图3可知：随着电压的增大，电场强度的峰值相应增大，但角度不变。因为随着电压的增大，电晕放电加剧，产生的空间负电荷数量增加，待选颗粒带电充足，从而可以提高分选效率，使分选效果明显。因此，通过提高电极电压改变电场的分布可以提高分选效率，改善分选结果。

但是，,实际应用中不能无限提高电压。保持其它条件不变，提高电压到一定值会发生火花放电，破坏分选过程。

3.1.2 不同中心距离



模拟参数：电压-20kV，α=60°，β=30°

图 4　不同中心距离下的电场分布

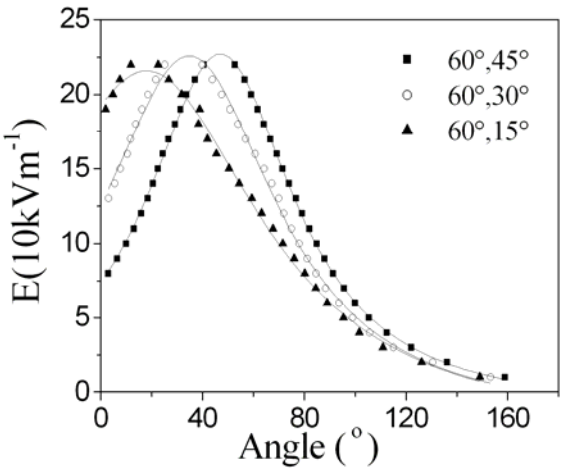
Fig.4　Electric-field strength distributions on the rotating roll of different distances

静电极轴心与接地转辊轴心之间的距离对分选空间的电场分布有很大影响。如图4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，场强峰值减小，但角度不变。因此，减小中心距离也可以提高场强，改善分选效果，其结果与增大电压相同。但实际上,中心距离过小容易在起始电晕放电时发生火花放电，破坏分选过程。因此为了弥补增大中心距离使场强减小，可以提高电压。

综上所述，提高电压、减小静电极中心距离都可以提高电场强度，改善分选结果。实际应用中一般采用高电压、大中心距离的操作参数。

3.1.3 不同电极位置

3.1.3.1 α不变，β减小



模拟参数：电压-20kV，中心距离 210mm

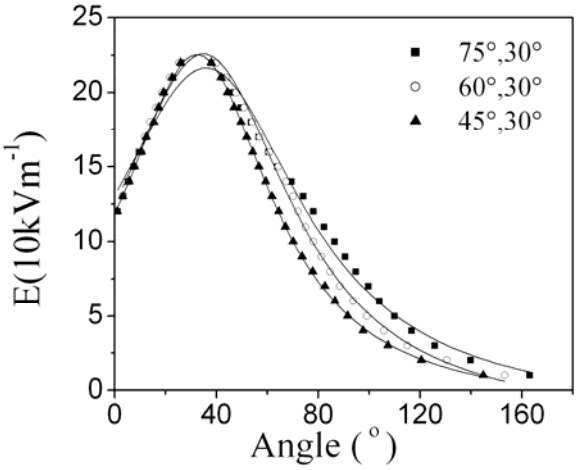
图 5　α 不变，β 减小时的电场分布

Fig.5　Electric-field strength distributions on the rotating roll

图 5 为 α 不变，β 减小时圆辊表面电场分布。由图 5 可知：α 不变时，随着 β 减小，电场峰值大小不变，但角度随静电极相应旋转。所以，α 不变 β 减小时，金属的脱离受到影响，导致金属回收率降低，但非金属所受排斥作用更加明显，更紧的附着于转辊上，使金属的收集纯度提高。

3.1.3.2 β不变，α减小

图 6 为 β 不变，α 减小时圆辊表面电场分布。由图 6 可知：β 不变时，随着 α 减小，电场分布基本没有变化。所以，电晕电极位置的变化对电场分布无明显改善。但是，β 不变 α 减小时，颗粒带电过程逐渐缩短，导致带电不充分，使 a 槽中回收量提高，但纯度降低。

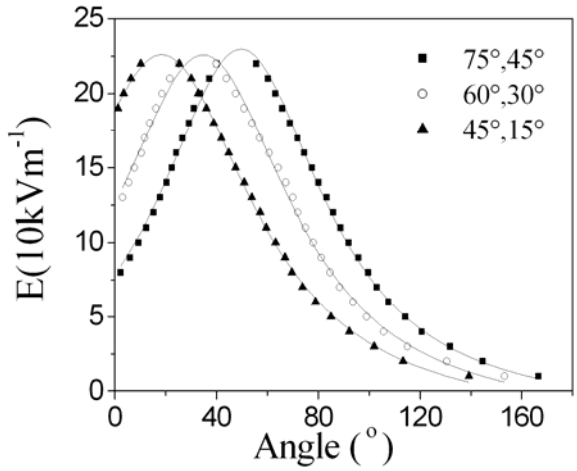


模拟参数：电压-20kV，中心距离 210mm

图 6　β 不变，α 减小时的电场分布

Fig.6　Electric-field strength distributions on the rotating

3.1.3.3 α、β同时减小相同值



模拟参数：电压-20kV，中心距离 210mm

图 7　α、β 同时减小相同值时的电场分布

Fig.7　Electric-field strength distributions on the rotating roll

图 7 是 α、β 同时减小相同值转辊表面电场分布的变化。由图 7 可知：电场峰值大小不变，但随静电极旋转相应角度，造成了整体电场的偏转。

综合以上分析，在工业应用中应采用高电压、大中心距离的操作参数。而由于其多采用二级或多级分选，即两个或多个一次分选的跌价，由一次分选所得规律仍然适用，所以在第一次分选时，应该增大静电极的角度，以提高回收率，使尽可能多的金属进入金属收集槽，增大二次分选的入料量；二次分选时，应减小静电极的角度，提高金属收集的纯度。

3.2 实验验证

高压静电分选机中，在不同的实验条件下，进行物料的分选，将分选结果与模拟结果相比较。

3.2.1 不同电压

表 1 不同电压下的各收集槽的物料质量百分比

Tab.1 the mass percentage of particles in different collectors under different voltages （%）

收集槽	电压(kV)									
	0	-5	-10	-15	-17.5	-20	-22.5	-25	-27.5	-30
a	77.90	60.12	52.64	33.35	28.31	25.41	21.34	19.44	16.95	17.17
b	18.73	35.22	38.68	29.24	21.82	19.54	20.76	21.10	21.55	19.93
c	0.94	1.87	3.71	7.82	6.58	4.86	4.48	3.95	4.14	4.14
d	0.45	0.37	0.76	2.39	3.16	3.33	3.06	3.05	2.95	2.90
e	1.97	2.41	4.22	27.19	40.13	46.87	50.35	52.45	54.41	55.87

实验条件：电晕电极半径 0.15mm，圆形静电极半径 19mm，转辊半径 114mm，中心距离 210mm，α=60°，β=30°

表 1 为不同电压下的高压静电分选结果。由表可以看出：

(1) 15kV 是一个转折，各收集槽都出现了明显的变化。因为从 15kV 开始电晕放电现象才开始明显，使非金属能带足量电荷，从而紧紧依附在转辊上，随着转辊转动至非导体收集区才开始掉落或被刷子刷落，这与理论计算出的电晕开始放电电压 12.31kV[10]吻合。

(2) b 在 15kV 时明显减小。在 15～20kV 时，b 中物料的质量减小，可能因为 b 中的非金属被排斥到其它收集槽中，20～30kV 基本保持不变，20kV 时的电场对 0.6-0.8mm 的非金属物料已经具有了很好的分选效果。

(3) e 在 15kV 之后不断的上升。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，这与模拟结果图 3 得出的结论一致。

3.2.2 不同电极位置

表 2 不同电极位置下的各收集槽的物料质量百分比

Tab.2 the mass percentage of particles in collectors under electrodes of different locations %

收集槽	电极位置(α,β)					
	52°,40°	52°,30°	52°,20°	45°,32°	45°,20°	32°,20°
a	24.96	21.28	18.18	27.9	20.26	28.38
b	23.65	11.49	10.09	35.34	14.39	39.17
c	16.77	10.1	6.74	17.43	7.51	11.32
d	5.97	7.24	6.2	4.94	5.28	4.15
e	28.64	49.88	58.79	14.38	52.56	16.98

实验条件：电晕电极半径 0.15mm，圆形静电极半径 19mm，转辊半径 114mm，中心距离 210mm，电压-20kV

表 2 为不同电极位置下的静电分选结果，由表所示：

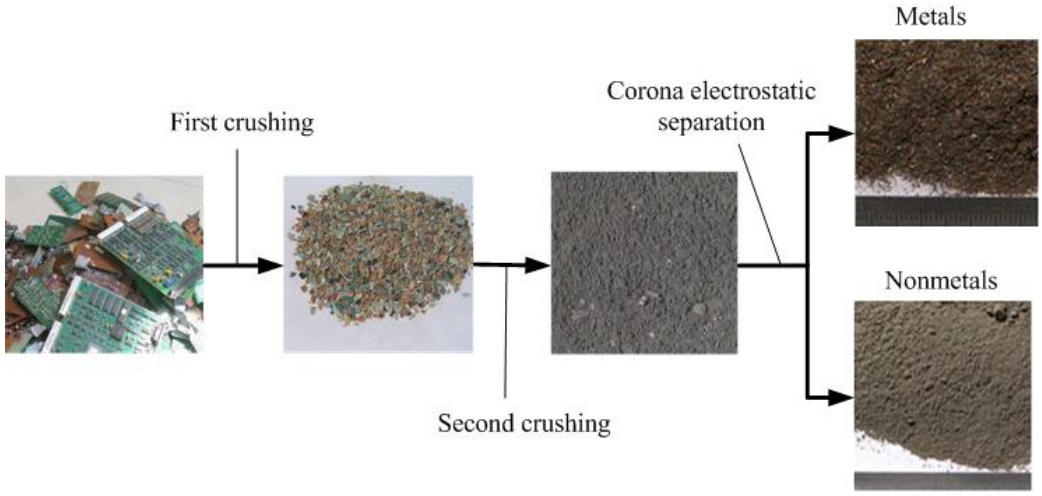
(1) 当 α 不变，β 减小时（52°,40°；52°,30°；52°,20°），a、b、c 中物料含量都不断减小，d 基本保持不变，e 中含量增加，而据观察，a 中非金属明显减少，说明非金属受到映像力的

影响显著，而提高了金属的收集纯度，这与模拟结果图 5 所得结论一致：金属回收量降低，但收集纯度提高。

(2) 当 β 不变，α 减小时（52°,20°；45°,20°；32°,20°），a、b、c 中物料含量都增加，d 保持不变，e 含量减少，特别是（32°,20°）处，可能由于两电极距离太近且角度偏下，导致颗粒带电不充分，大量非金属落入 a、b 槽，致使其质量剧增，同时 e 中含量减少。所以，β 不变，α 减小时，分选效果变差，金属的收集纯度降低，回收量增加。这与模拟结果图 6 所得结果一致。

(3) 当 α、β 同时减小相同值时（52°,40°；45°,32°；32°,20°），a、b、c 中物料含量增加，d 中减少，e 中含量先减小后略增大。这与模拟结果图 7 有所不同，这是因为实验过程中还受到其它因素的影响，相应的研究将进一步进行。

由实验结果可以看出，应用电压和电极位置的改变可以影响电场分布，从而影响分离效果。所以，对电场分布的模拟可以实现工艺参数的优化。分离结果如图 8 所示。



实验条件：电压-20-30kV，中心距离 L=210mm，接地电极半径 R_1=114mm，电晕电极半径 R_2=0.15mm，静电极半径 R_3=19mm，α=60°，β=20°

图 8　α、β 同时减小相同值时的电场分布

Fig.8　Results of separating waste PCBs

4. 结论

(1) 通过计算机模拟和实验得出，提升电压、减小电极与转辊轴心距可以提高电场强度，优化电场分布，可改善分选结果。

(2) 当 α 不变时，随着 β 的减小，金属回收率降低，但纯度提高；当 β 不变时，随着 α 的减小，金属收集纯度降低。

(3) 计算机模拟结果与实验结果吻合。当电压 U=-20-30kV，中心距离 L=210mm，接地电极半径 R_1=114mm，电晕电极半径 R_2=0.15mm，静电极半径 R_3=19mm，α=60°，β=20°时，分离效果最好。因此，可以采用计算机模拟来指导破碎电路板的高压静电分选技术中的工艺参数优化和电选机的结构设计。

参考文献

[1] ehner Theo. Integrated recycling of non-ferrous metals at Boliden Ltd. IEEE international symposium on Electronics and the Environment, 1998:42-47
[2] Jirang Cui, Eric Forssberg, Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review [J], Journal of Hazardous Materials, B99 2003:243-263
[3] Jia Li, Hongzhou Lu, Jie guo, Zhenming Xu, Yaohe Zhou, Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards [J], Environ. Sci. Technol. 2007, 41: 1995-2000
[4] Zhang Shunli, Forssberg, Eric, Menad Nourredine, Bjorkman Bo. Metals recycling from electronic scrap by air table separation - theory and application[C]. *TMS Annual Meeting*, *EPD Congress*, 1998: 497-515
[5] Shunli Zhang, Eric Forssberg. Intelligent liberation and classfication of electronic scrap[J]. Powder Technology, 1999,105: 295-301
[6] H.R.马诺切赫里等. 电选法应用实践评述(Ⅱ)[J]. 国外金属矿选矿,2002,11:4-12
[7] R.科恩勒彻, M.博茨. 静电分选极其在处理各种再生物料混合物的工业应用[J]. 国外金属矿选矿, 1998, 9:22-25
[8] 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[J]. 上海交通大学学报, 2007,41(4):551-556
[9] Jia Li, Zhenming Xu, Yaohe Zhou. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards[J]. Journal of Electrostatics. 2007, 65 : 233-238
[10]路洪洲. 破碎废弃电路板的高压静电分离的理论分析[D]. 上海:上海交通大学,2006

Computer simulation of electric field distributions of corona electrostatic separation for recycling printed circuit boards

Liu Shushu，Li Jia，Xu Zhenming[+]
School of Environment Science and Engineering，Shanghai Jiaotong University，Shanghai (200240)

Abstract
To develop the corona electrostatic separation technology which is non-contaminated and high efficient, distributions of electric field are simulated with MATLAB software based on the theory of corona electrostatic separation. Results of simulation show that, upgrade supplied voltage, shorten the distance between electrostatic electrode and rotating roll can improve the efficiency of separation; when the angle between horizon and the axes' line of corona electrode and roll (α) does not change but the angle between horizon and the axes' line of electrostatic electrode and roll (β) decreases, the purity of collected metal is enhanced while the recovery is reduced; when β does not change but α decreases, the recovery percentage of collected metal is enhanced while the purity is reduced. The results of simulation are in good agreement with the experiment results. Therefore, computer simulation could be used for design of corona electrostatic separator and optimization of technique parameters in this separation technology.
Keywords：PCB；corona electrostatic separation；MATLAB；corona electrostatic field

作者简介：刘淑舒（1985-），女，硕士研究生，主要研究方向为高压静电回收技术的研究。