

介电式种子分选机电磁场的研究

米双山¹, 吴鹏英², 刘迅芳³

(1. 军械工程学院; 2 河北师范大学; 3 河北省图书馆)

摘要: 针对前人建立的双绕线圈滚筒电磁场模型的不足之处, 将相邻以至远邻电极的影响考虑在内, 建立了双绕线圈滚筒所产生的电磁场模型。并利用它对影响电磁场的各个因素进行了分析, 得出了电磁场随各参数变化的规律, 并提出了改进分选效果、提高分选机性能的措施。结果表明: 新建的模型克服了前人所建模型的缺点, 更符合于实际情况, 它对分析各因素对电磁场的影响规律以及在介电式种子分选机的参数设计时更具有指导意义。

关键词: 介电; 分选机; 双绕线圈滚筒; 电磁场; 种子

中图分类号: S226.5

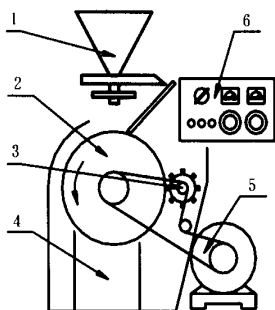
文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)01-0097-05

1 引言

种子的介电分选是种子在由分选装置形成的电磁场中极化后, 受多种力的综合作用产生不同的运动轨迹而实现的, 因而研究及优化分选装置所形成的电磁场是研究介电分选机理的首要问题。

介电式种子分选机大多采用由双绕线圈绕制的分选滚筒对种子进行分选(图 1)。分选滚筒由 2 根互相绝缘的电极导线在滚筒上平行缠绕而成。当电极中通以高压电流后, 在滚筒表面将形成一电磁场。落到分选滚筒上的种子在电场的作用下被极化而产生一电极化力(图 2)。由于好、坏种子的粒重及介电常数不同, 因而所受到的重力及电极化力也不相同, 在滚筒旋转过程中将产生不同的运动轨迹而落入不同的接料斗中, 从而实现种子的分选。

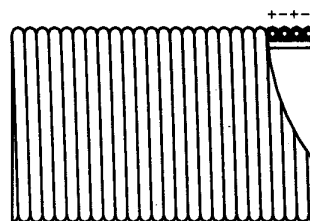


1 喂入机构 2 分选滚筒 3 种刷
4 接料斗 5 传动机构 6 电控箱

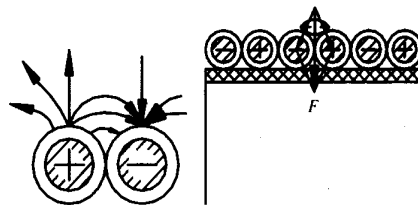
图 1 双绕线圈滚筒式介电分选机
Fig 1 Dielectric seed separator with bifilar winding cylinder

前人^[2-4]在分析分选滚筒所形成的电磁场时, 普遍采用将电极简化为无限长导线的做法, 计算出由单根导线形成的电磁场后, 再将相邻的两根导线形成的电磁场进行叠加来作为滚筒表面的电磁场。实际上, 电场中的任一点(如图 3 中的 P 点)不仅受到相邻两个电极, 而

且还有次邻以及远邻电极形成的电场的作用, 因此, 分析该电磁场时必须考虑这些因素。



a. 双绕线圈式分选滚筒



b. 双绕线圈电场及种子受到的极化力

图 2 双绕线圈式分选滚筒和种子受到的极化力

Fig 2 Bifilar winding cylinder and the polarization force acted on a seed

2 分选滚筒表面的电磁场模型

2.1 无限长导线所产生的电磁场

由高斯定理知, 无限长单根导线在介质 ϵ_1 中某点处的电场强度为

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 r} \quad (1)$$

式中 λ ——导线的电荷线密度, $C \cdot m^{-1}$; r ——导线轴线到该点的矢径, m ; ϵ_0 ——真空中的介电常数, $8.85 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$; ϵ_1 ——介质的相对介电常数。

2.2 双绕线圈表面的电磁场

双绕线圈表面上某点的电磁场可以看作由多根等距排列的无限长直圆形导线在该点所产生的电磁场的叠加。将双绕线圈最左端的电极记为电极序号 0, 则由 n 圈电极所缠绕成的分选滚筒自左至右的电极编号顺序依次为 0, 1, 2, ..., i , ..., $n-1$, 建立如图 3 所示的坐标系。在某一瞬间, 设第 0 个电极为正电荷, 其余为正负交错,

收稿日期: 2002-04-15

作者简介: 米双山, 军械工程学院在读博士后, 副教授, 河北省石家庄市和平西路 97 号 军械工程学院四系, 050003



则由此可推导出双绕线圈表面上任一点 P 的电场强度。

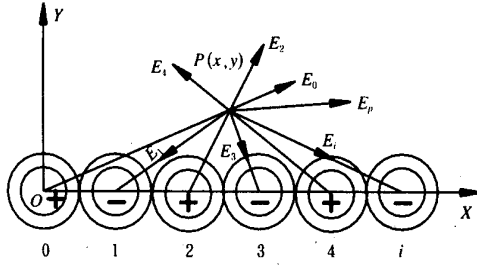


图 3 双绕线圈电场中 P 点的电场强度
Fig 3 Electric field intensity of P position in the bifilar winding electric field

由图可以看出, P 点距离第 $i(i = 0, 1, 2, \dots, n - 1)$ 个电极中心的距离为

$$r = \sqrt{(x - ia)^2 + y^2}$$

式中 a ——相邻两电极的中心距, 在尺寸上它等于电极的外径。

由公式(1), 该电极在 P 点所产生的电场强度为

$$E_i = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon_i \sqrt{(x - ia)^2 + y^2}}$$

由于 $\lambda = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_i V}{\ln \frac{a-R}{R}}$, 代入上式可得

$$E_i = \frac{V}{2\ln \frac{a-R}{R} \sqrt{(x - ia)^2 + y^2}}$$

式中 R ——电极的铝芯半径; V ——加在电极上的电压。

设 P 点与第 i 个电极中心的连线与水平方向形成的夹角为 α , 则

$$\begin{cases} \cos\alpha = \frac{x - ia}{r} = \frac{x - ia}{\sqrt{(x - ia)^2 + y^2}} \\ \sin\alpha = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{(x - ia)^2 + y^2}} \end{cases}$$

则 E_i 在 X 和 Y 方向上的分量分别为

$$\begin{cases} E_{ix} = E_i \cos\alpha = \frac{(-1)^i (x - ia)V}{2\ln \frac{a-R}{R} [(x - ia)^2 + y^2]} \\ E_{iy} = E_i \sin\alpha = \frac{(-1)^i yV}{2\ln \frac{a-R}{R} [(x - ia)^2 + y^2]} \end{cases}$$

由于电场中任一点的电场强度是各电极在该点所产生的电场强度的叠加, 由此可得

$$\begin{cases} E_{px} = \frac{V}{2\ln \frac{a-R}{R}} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(-1)^i (x - ia)}{(x - ia)^2 + y^2} \\ E_{py} = \frac{V}{2\ln \frac{a-R}{R}} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(-1)^i y}{(x - ia)^2 + y^2} \\ \vec{E}_p = \vec{E}_{px} + \vec{E}_{py} \end{cases} \quad (2)$$

式中 E_{px}, E_{py} —— P 点电场强度在 X 和 Y 方向上的分量; E_p —— P 点的合成电场强度; i ——在滚筒的轴向截面上自原点 O 起始的电极序号; n ——分选滚筒电极缠绕的圈数。

3 模型分析

为了验证该模型的正确性, 假设 $V = 1000 \text{ V}$, $a = 3.2 \text{ mm}$, $R = 0.85 \text{ mm}$, $n = 400$, 计算出 P 点的电场强度以及邻近电极对该点电场强度的影响程度, 如表 1 所示(设 P 点至第 2 个电极中心的距离为 2 mm , 其夹角 α 为 60°)。

表 1 各电极产生的电场对 P 点电场的影响程度

Table 1 Effect of electric field produced by different electrodes on the electric field at P position

电极 i	$E_{ix} / \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$\frac{E_{ix}}{E_x} / \%$	$E_{iy} / \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$\frac{E_{iy}}{E_y} / \%$	$E_i / \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$\frac{E_i}{E} / \%$
0	62 991	36.32	14 744	15.21	64 694	32.56
1	- 100 050	- 57.69	- 41 260	- 42.57	108 224	54.47
2	122 919	70.87	212 901	219.67	245 837	123.73
3	137.970	79.55	- 108 623	- 112.08	175 598	88.38
4	- 82 557	- 47.60	26 480	27.32	86 700	43.64
5	54 943	31.68	- 11 066	- 11.42	56 046	28.21
49	3 291	1.89	- 0 038	- 0.04	3 291	1.66
399	0 387	0.23	- 0 001	- 0	0 387	0.19

从表 1 可以看出, 1) 邻近的电极对 P 点的电场强度具有极其显著的影响。如, 第 1 和第 4 个电极在 P 点的电场强度分别占到了该点总电场强度的 54.47% 和 43.64%; 2) 次邻的电极对 P 点的电场具有显著的影响。如, 第 0 和第 5 个电极在 P 点的电场强度也分别占到了该点总电场强度的 32.56% 和 28.21%; 3) 远方的电极在不同程度上对 P 点的电场也具有一定的影响。如,

第 49 个电极在 P 点的电场强度占到了该点总电场强度的 1.66%, 即使最末一个电极(第 399 个电极) 仍然对该点的电场强度具有一些影响。因此, 在计算 P 点的电场时必须将它们考虑在内。

综上所述, 新模型比过去的模型^[2-4] 更精确, 更符合于实际情况。

4 影响电磁场的因素分析

由公式(2)可以看出,影响电场强度的主要因素有:电极的尺寸 a 和 R ,施加在电极上的电压 V ,该点所处的位置和电极的绕线圈数 n 等。

4.1 双绕线圈圈数 n 的影响

假设 $V = 1000 \text{ V}$, $a = 3.2 \text{ mm}$, $R = 0.85 \text{ mm}$,计算出电极表面不同点的电场强度,其结果如图 4 所示。

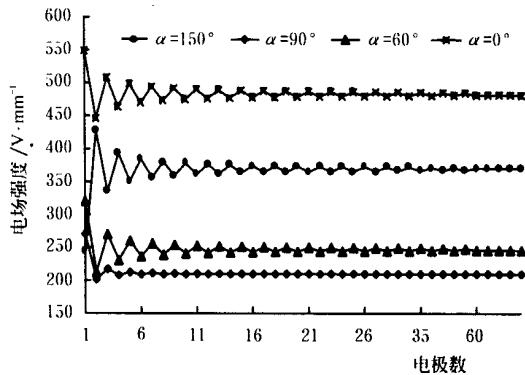


图 4 电场强度沿滚筒长度方向上的变化

Fig 4 Electric field intensity varying with the cylinder length

由图 4 可以看出,滚筒初始几圈电极表面的电场强度波动较大,随着电极数量的增大,波动逐渐减小,在第 30 根之后,电场强度趋于一稳定值。这是由于双绕线圈各电极产生的电场相互叠加的结果。在初始几圈电极上,由于缺少来自左方电极产生的电场的作用,右方电极对它的作用又因距离的增大而减少,因而该电极表面的电场强度主要取决于它本身产生的电场。随着电极数的增大,电极间电场相互作用的影响越来越大,尤其靠近滚筒中间部位,由于对称性,来自左右远方电极电场的相互抵消作用也越来越大,因而,电场强度趋于一稳定值。

4.2 P 点的位置(P 点至电极中心的距离 r) 对电场强度的影响

假设 $V = 1000 \text{ V}$, $a = 3.2 \text{ mm}$, $R = 0.85 \text{ mm}$, $n = 250$,计算出第 125 根电极表面不同点的电场强度,其结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,随 r 的增大电场强度急剧下降,这与前人的分析是一致的。但图中显示当 $\alpha = 20^\circ$ 时,这种下降趋势减缓,并且在局部区域还略为上升。从图 5 的上图可以看出,这种反常现象发生在电极的内部和电极的表面部位,显然,在电极的内部由于距离电极的中心较近,电场强度较大,这与电场强度随距离 r 的增大而急剧下降的结论是相吻合的。

4.3 电极尺寸的影响

电极由铝芯和绝缘层构成,下面分别讨论电极铝芯半径 R 和绝缘层厚度 δ 对电场强度的影响。

1) 电极铝芯半径 R 对电场强度的影响

假设 $V = 1000 \text{ V}$, $\delta = 1.5 \text{ mm}$, $n = 250$, $R = 0.5 \sim 7.5 \text{ mm}$,计算出第 125 根电极表面不同点的电场强

度,其结果如图 6 所示。

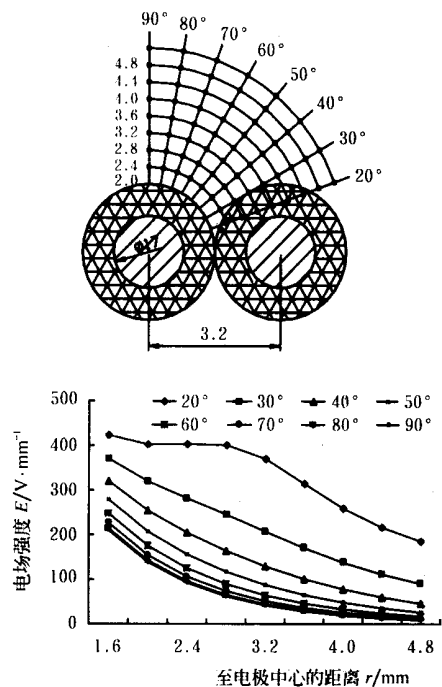


图 5 随 r 的增大电场强度变化图

Fig 5 Electric field intensity varying with the distance r

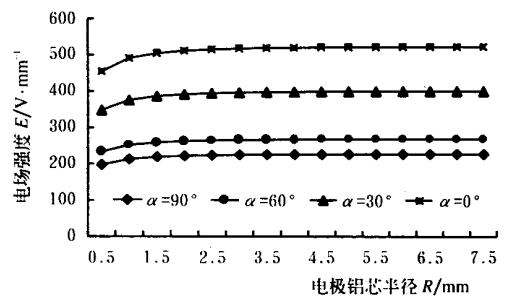


图 6 电场强度随电极铝芯半径 R 变化趋势图

Fig 6 Electric field intensity varying with R (aluminum cord radius of the electrode)

由图 6 可以看出,当 $R < 1.5 \text{ mm}$ 时,电场强度随 R 的增大升高的幅度较大。但当 $R > 2 \text{ mm}$ 时,随 R 的增大电场强度略有升高,但幅度不大。因此,通过增大电极铝芯半径来提高电场强度的做法是行不通的。这与前人^[2~4]的“电极芯径越大,电场强度越高”的分析是不一致的。

2) 绝缘层厚度 δ 对电场强度的影响

假设 $V = 1000 \text{ V}$, $\delta = 1.5 \text{ mm}$, $n = 250$, R 分别为 $1, 2, 3, 4 \text{ mm}$, $\delta = 1 \sim 4 \text{ mm}$,计算出第 125 根电极表面 $\alpha = 60^\circ$ 点的电场强度,其结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,无论 R 如何变化,随 δ 的增加,电场强度大幅度地降低。这是由于 δ 越大,电极表面的点距离电极铝芯越远,从而造成电场强度下降。在此方面,与前人^[2~4]的分析是一致的。另外,该图再次表明,当 δ 保持不变,而 $R > 2 \text{ mm}$ 时,电场强度随 R 的增大变化较为缓慢。

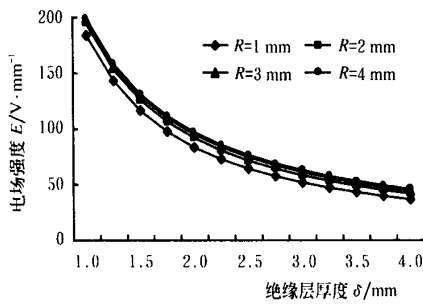


图7 电场强度随电极绝缘层厚度 δ 变化趋势图

Fig 7 Electric field intensity varying with δ (insulation layer thickness of the electrode)

因此,要想增大双绕线圈表面的电场强度,不宜通过增大电极芯径的办法来实现,而必须在保证电极耐压安全性的前提下尽量减小绝缘层的厚度。这一结论将有助于优化电极的结构及尺寸。

4.4 分选电压的影响

由公式(2)可以看出,电场强度与分选电压 V 成正比,即随 V 的增大而增大,随 V 减小而减小,这与前人的分析是一致的。

5 双绕线圈表面的电磁场

由上面的分析知,在滚筒的中部,电场强度趋于一稳定值。为了了解电极表面的电场变化情况,在假设 $V = 1000 \text{ V}$, $a = 3.2 \text{ mm}$, $R = 0.85 \text{ mm}$, $n = 250$ 的情况下,计算出第 120 根和 121 根电极表面不同点的电场强度,其结果如图 8 所示。

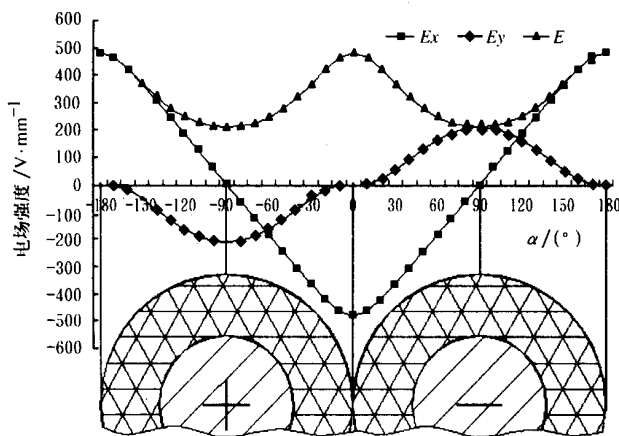


图8 相邻电极表面的电场强度分布

Fig 8 Electric field intensity on the surface of neighbour electrodes

由图 8 可以看出,双绕线圈表面的电场强度分布是不均匀的,其分布曲线近似于正弦曲线,在两电极的接触点取得最大值,在电极中心的正上方 ($\alpha = -90^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 时) 取得最小值。电场的这种不均匀性使得介电分选得以进行,但同时又使得处于电场中不同位置的种子所受到的电极化力不同,从而造成分选效果的不稳定性。因此,要提高分选效果,必须配备相应的改进措施。

6 改进分选效果的措施

如前所述,双绕线圈表面的不均匀电场会带来分选

效果的不稳定性,前人^[10]曾通过改变电极的结构形状或排列形式来克服此缺点,但结构复杂的电极制造工艺性较差,而排列复杂的电极绕线要求也比较苛刻,稍有差错即造成线圈错乱。笔者认为可以通过改变种子在电极表面的分布状况来克服此缺点。如图 9 所示,4 组电极具有同样厚度的绝缘层但铝芯半径不同,种子落在图 9a 电极上要比落在图 9d 电极上的位置变化多。即使物理参数相同的种子用图 9a 所示的电极来分选时,所受到的电极化力也不同,种子 1 受到的电极化力要大于种子 2,更大于种子 3 所受到的电极化力,在分选过程中它们会落入不同级别的出口中。用图 9d 所示的电极分选种子时,类似的问题会得到大大缓解。因此,以小直径的电极分选大粒种子要比用大直径的电极分选小粒种子的效果好。当然,铝芯半径的减小会使电极表面的电场强度有所降低,但这可以通过增大分选电压来弥补。

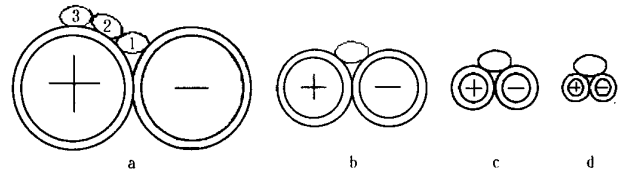


图9 种子在不同线圈上所处位置分布情况图

Fig 9 Positions of seeds on different bifilar winding

综上所述,为了克服因种子在电极表面上所处位置的不同而带来的分选效果不稳定的缺点,在选择电极尺寸时应尽量采用外径与种子尺寸接近的电极或较小点的电极。

7 结论

- 1) 通过将双绕线圈简化成 2 根无限长的平行导线,并将相邻以至远邻电极的影响考虑在内而建立的双绕线圈电磁场模型更符合于实际情况。
- 2) 在滚筒的两端,电场强度处于不稳定状态,在大约 30 圈以后,电场强度趋于一稳定值。
- 3) 不宜通过增大电极铝芯半径的方法来增大滚筒表面的电场强度。
- 4) 在选择电极尺寸时,应该在保证电极耐压安全性的前提下尽量减小绝缘层的厚度,同时,应尽量采用外径与种子尺寸接近的电极或较小点的电极。

[参 考 文 献]

- [1] 米双山 介电式种子分选机理及其设备的研究[D]. 中国农业大学博士学位论文, 2000
- [2] 别传爽 介电式种子分选机理的研究[D]. 北京农业工程大学硕士学位论文, 1986
- [3] B C , , , / , 1980, (11): 28~ 30
- [4] 张敏华, 许乃章, 项士英 种子介电分选的主要参数与工作机理的研究[J]. 农业机械学报, 1989, 3, 44~ 50
- [5] 米双山 5JDF-0.5 型介电式种子分选机组及性能试验[J]. 农业工程学报, 2000, 4, 82~ 84

- [6] 米双山, 齐新, 潘存治 介电式种子分选机理的研究[J] 河北省科学院学报, 1994, 3, 400~406
- [7] 米双山, 曹崇文 带绒棉种介电分选的试验研究[J] 中国农业大学学报, 2000, 6
- [8] 解广润 高压静电场[M] 上海: 上海科学技术出版社, 1987.
- [9] 黄礼镇, 黄椿熙 电工原理与计算方法下册(电磁场部分)[M] 北京: 科学出版社, 1988
- [10] . [J], /, 1979, (7): 31 ~ 32

Electric field of dielectric seed separator

Mi Shuangshan¹, Wu Pengying², Liu Xunfang³

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China; 3. Hebei Provincial Library, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract Taking into account the electric field intensity produced by both the neighboring electrodes and the other electrodes, a new electric field intensity model on the bifilar winding-cylinder was developed. The new model was used to examine the factors affecting the electric field intensity. The relationship between electric field intensity and the parameters of the bifilar winding was established. Measures to improve separating effect and to increase separator performance were presented. Since the model eliminates the weaknesses of the previous models, it is more practical, and more accurate in analyzing the effect of parameters on the intensity of electric field and in designing the dielectric seed separator.

Key words: dielectric; separator; bifilar winding cylinder; electric field; seed