

# 基于三维离散元法的等厚筛虚拟筛分

王宏<sup>1)✉</sup>, 李珺<sup>1)</sup>, 江海深<sup>2)</sup>, 赵杰<sup>2)</sup>, 彭利平<sup>1)</sup>

1) 中国矿业大学机电工程学院, 徐州 221116 2) 中国矿业大学化工学院, 徐州 221116

✉ 通信作者, E-mail: plpcomeon@cumt.edu.cn

**摘要** 基于三维离散元法,建立了等厚筛离散元模型.对于粒度为 0.8 倍筛孔直径的难筛颗粒进行了虚拟实验研究,得到了颗粒分层和透筛状态下的颗粒群分布状态.在此基础上分别研究了等厚筛筛面倾角、振动方向角和振动强度对于该模型筛分效果的影响规律.实验结果表明:总体上随振动强度的增大,筛分效果降低,筛分完成时间缩短.当筛面倾角为 0.5°、振动方向角为 45°以及振动强度为 3.5 时,该等厚筛具有最佳的筛分效果,筛分效率为 92.2%,筛分完成时间为 9.95 s.

**关键词** 等厚筛; 虚拟实验; 筛分; 离散元

**分类号** TD452

## Virtual screening of a banana screen based on the 3D discrete element method

WANG Hong<sup>1)✉</sup>, LI Jun<sup>1)</sup>, JIANG Hai-shen<sup>2)</sup>, ZHAO Jie<sup>2)</sup>, PENG Li-ping<sup>1)</sup>

1) School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2) School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China

✉ Corresponding author, E-mail: plpcomeon@cumt.edu.cn

**ABSTRACT** A discrete element model of a banana screen was established based on the 3D discrete element method. Virtual experiments were performed on difficult-screening particles with 0.8 times the diameter of the screen aperture, and the particle distribution under the state of particle stratification and penetration was obtained. The dependences of the screening effect of the model upon the screen inclination angle, vibrating angle and vibrating intensity were also discussed. As the vibrating intensity increases, the screening efficiency and the screening completion time decrease. When the screen inclination angle is 0.5°, the vibrating angle is 45° and the vibrating intensity is 3.5, the screen has the best screening effect, in which the screening efficiency is 92.2% and the screening complete time is 9.95 s.

**KEY WORDS** banana screens; virtual testing; screening; discrete element method

筛分作业是选煤的关键环节,广泛应用于煤炭的分级、脱水、脱介、脱泥等.据有关统计,各类筛分设备占选煤厂设备总量的 25%~33%.近年来,随着重介质选煤工艺的推广与大型化选煤厂的建设,等厚筛(香蕉筛)以其处理量大、效率高、性能稳定可靠等诸多优点,逐渐成为最受欢迎的一种筛分方式<sup>[1]</sup>.等厚筛分技术是指在筛分过程中,使得物料在筛面上呈等厚度分布的一种筛分方法,具有较好的筛分效果和较高的筛分效率<sup>[2-4]</sup>.

离散元法是一种用于颗粒物料运动行为仿真的

数值方法,在采矿、矿物加工、物料筛分等工程领域得到了广泛的应用.利用离散元法进行颗粒物料运动过程的虚拟实验可以替代部分实验室实验并为工业应用提供理论参考,从而降低成本,提高效率.目前,国内外已有学者利用离散元法对颗粒物料的筛分过程进行了仿真研究<sup>[5-8]</sup>.在等厚筛离散元法仿真研究方面,Cleary 等<sup>[9-10]</sup>利用三维离散元模型模拟了双层香蕉筛工业产品,得到了振动强度为 5、6 和 14 时的颗粒流分布状态;Fernandez 等<sup>[11]</sup>利用离散元-光滑粒子流体动力学耦合模型研究了双层香

收稿日期: 2013-09-17

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(博士生导师类)资助项目(20120095110001)

DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2014.12.003; http://journals.ustb.edu.cn

蕉筛对于潮湿颗粒的筛分过程,获得了床层厚度和密度对颗粒流动形态的影响。

由于筛面倾角及振动参数对筛分过程都具有显著影响,本文通过采用三维离散元法建立难筛颗粒的离散元模型进行虚拟实验研究。在不同的筛面倾角、振动方向角和振动强度的筛分条件下,进行多次虚拟实验。根据颗粒物料的筛分效果和筛分完成时间来综合评价整体筛分效果,并获得最优的筛面倾角和振动参数。

### 1 难筛颗粒透筛模型

对于粒度为  $d$  的球形颗粒和边长为  $L$  的方形筛孔,建立筛面倾角为  $\alpha$ ,颗粒初速度为  $v$  的透筛模型,如图 1 所示。

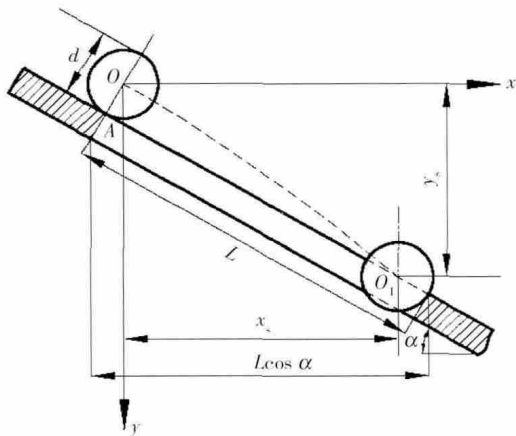


图 1 颗粒透筛模型

Fig.1 Penetration model of particles

当颗粒运动到筛孔边缘 A 点后,颗粒沿着图 1 中的抛物线运动。当颗粒落在筛面上  $O_1$  点的左侧时,颗粒才会透过筛孔。当颗粒的运动速度较大,颗粒被抛掷到  $O_1$  点的上方时,颗粒将无法透筛。颗粒运动轨迹的方程为<sup>[12]</sup>

$$y = x \tan \alpha + \frac{g x^2}{2 v^2 \cos^2 \alpha} \quad (1)$$

建立平面内颗粒运动的广义坐标  $(x_s, y_s)$ , 那么

$$\begin{cases} x_s = L \cos \alpha - \frac{d}{2} (\cos \alpha + \sin \alpha) \\ y_s = L \sin \alpha + \frac{d}{2} (\cos \alpha - \sin \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可得:

$$v = \left[ L - \frac{d}{2} (1 + \tan \alpha) \right] \sqrt{\frac{g}{d (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \alpha)}} \quad (3)$$

式中  $g$  为重力加速度。式(3)为颗粒透筛的极限速度  $v$  关于筛面倾角  $\alpha$ 、颗粒直径  $d$  和方形筛孔的边界尺寸  $L$  的显性表达式。当颗粒速度大于极限速度时,颗粒将无法透筛。

### 2 虚拟实验

#### 2.1 实验模型

建立离散元模型如图 2 所示。采用两种粒度的球形颗粒进行仿真,直径分别为 10.4 mm 和 15.6 mm,密度均为  $1300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。颗粒和筛面的模型参数如表 1 所示。两种颗粒分别在颗粒工厂以  $2000 \text{ 个} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度生成,运动初速度均为零。颗粒工厂的位置设置在入料端的上方,颗粒在重力的作用下自由下落进入筛分区。颗粒生成时间为 5 s,仿真时间为 15 s。在振动作用下,物料向出料端运动并按粒度分层和透筛。

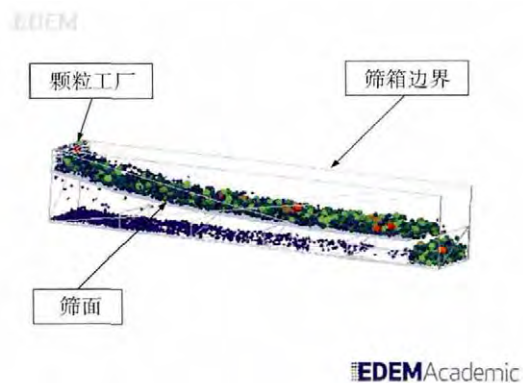


图 2 等厚筛离散元模型

Fig.2 DEM model of a banana screen

表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of the simulation model

材料	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比	剪切模量/GPa	弹性恢复系数	静摩擦因数	滑动摩擦因数
颗粒	1300	0.30	1.00	0.5	0.6	0.05
筛面	7861	0.29	79.92	0.5	0.4	0.05

筛面结构如图 3 所示。筛面宽度为 152 mm;筛面长度方向分为五段,每段长度 180 mm,各段筛面倾角等差排布;筛孔为长 13 mm 的方形孔,开孔率 30%。通过调整振动方向角、振动强度和筛面倾角

三组参数来优化模型的分选效率和筛分完成时间。选取振动方向角分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ ,振动强度分别为 2.5、3.0、3.5 和 4.0,筛面倾角分别为  $0.5^\circ$ 、 $1.0^\circ$ 、 $1.5^\circ$  和  $2.0^\circ$  进行虚拟实验。振动强度的计算

公式为

$$K = \frac{A\omega^2}{g} \quad (4)$$

式中:  $K$  为振动强度;  $A$  为振幅, mm;  $\omega$  为工作频率, Hz. 确定振幅为 4 mm, 通过调整工作频率来控制振动强度. 振动强度 2.5、3.0、3.5 和 4.0 对应的工作频率分别是 12.34、13.65、14.75 和 15.76 Hz.

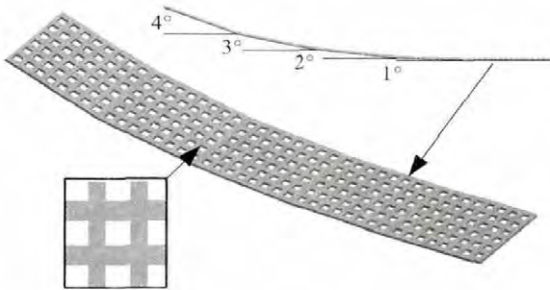


图 3 筛面结构

Fig. 3 Structure of screen surface

## 2.2 筛分过程

颗粒群运动状态受颗粒之间的碰撞和外部机械力的共同影响. 在筛分过程中, 颗粒以一定的初始状态进入筛分区域, 在筛面对颗粒群的作用力下分层、透筛和输送. 虽然颗粒间的碰撞使颗粒物料的运动具有很强的随机性, 但在强大的外部机械力的作用下却呈现出一定的规律性. 筛分时, 这种规律性主要表现为分层和透筛. 在往复的振动力作用下, 颗粒物料周期的积蓄能量, 并以投掷运动的形式释放能量. 颗粒在多次抛投之后, 大颗粒被抛至料层的上方, 小颗粒落在料层的下方, 颗粒按粒度进行分层. 分层后, 颗粒与筛面发生碰撞, 小于筛孔的颗粒透过筛面落入筛面下方.

筛分过程的三维离散元模拟过程如图 4 所示.  $t=0$  s 时, 颗粒物料开始进入筛分区域, 大颗粒和小颗粒处于混合状态. 在振动作用下, 大小颗粒发生碰撞并向排料端输送.  $t=2.05$  s 时, 大部分小颗粒透过筛面, 但仍有部分大颗粒和小颗粒混合, 处于未分层的状态, 如图 4(a) 所示.  $t=6.18$  s 时, 随着颗粒的增多和筛分过程的进行, 大小颗粒不断的分层, 小颗粒与筛面的接触机会也随之增多, 大部分小颗粒进入颗粒物料的底层并透过筛面, 如图 4(b) 所示. 这时筛分过程达到一种相对稳定的状态, 颗粒物料沿筛面长度方向呈等厚度分布, 筛分效率也相对较高.

## 2.3 筛分效果评价

筛分过程中, 理想的筛分效果是比筛孔小的颗粒全部透过筛孔到达筛面下方, 比筛孔大的颗粒全

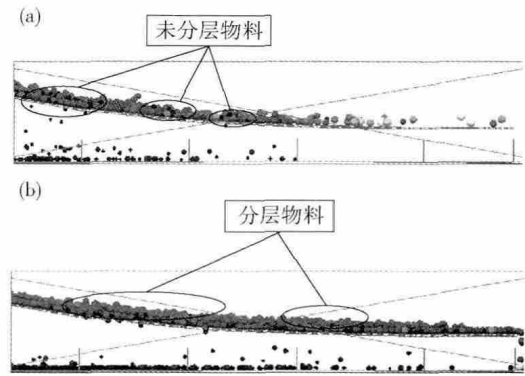


图 4 筛分过程. (a)  $t=2.05$  s; (b)  $t=6.18$  s

Fig. 4 Screening process: (a)  $t=2.05$  s; (b)  $t=6.18$  s

部在筛面上方, 这时的筛分效率是 100%. 实际上并不是所有小于筛孔的颗粒都能够透过筛孔, 而是在大颗粒的阻力作用下和筛面开孔率的影响下停留在筛面上方. 为了评价筛分效果, 引入了筛分效率的概念. 筛分效率受到颗粒的材料特性、粒度分布、颗粒形状、筛面结构、筛孔大小、开孔率、振动参数等诸多因素的影响, 所以实际筛分效率不可能达到 100%. 筛分效率计算公式如下:

$$\eta = 1 - e^{-kt^n} \quad (5)$$

式中,  $\eta$  为筛分效率,  $k$  和  $n$  为与颗粒性质和筛分条件有关的参数,  $t$  为筛分时间. 在虚拟实验中, 分别研究了不同筛面倾角、振动方向角和振动强度下的筛分效果和筛分完成时间, 统计结果如表 2 所示.

## 3 结果与讨论

根据表 2 的虚拟实验结果可以绘制得到不同筛面倾角和振动方向角下筛分效果和筛分完成时间随振动强度的变化规律曲线, 如图 5 和图 6 所示. 由于颗粒运动具有较大的随机性, 所以图中曲线不具备线性关系, 但从中可以发现一定的变化趋势.

从图 5 中可以发现: 当筛面倾角为  $0.5^\circ$  时, 筛分效果随着振动强度的增大而提高; 而当筛面倾角为  $1.0^\circ$ 、 $1.5^\circ$  和  $2.0^\circ$  时, 筛分效果随着振动强度的增大而降低. 这说明等厚筛的筛分效率受筛面倾角和振动强度共同作用的影响.

从图 6 可以发现, 筛分完成时间会随着振动强度的增大而缩短. 只有筛面倾角为  $2.0^\circ$  和振动方向角为  $60^\circ$  时, 筛分完成时间会随振动强度的增大而增加. 振动方向角为  $60^\circ$  时, 具有较高的筛分效果, 但筛分完成时间较长; 振动方向角为  $30^\circ$  和  $45^\circ$  时, 具有较好的筛分效果和较短的完成时间.

从表 2 中可以得到: 筛面倾角为  $0.5^\circ$  和  $1^\circ$  时具有较好的筛分效果, 大多在 85% 以上, 但筛分完成

表 2 不同筛面倾角、振动方向角和振动强度下的筛分效率和筛分完成时间

Table 2 Changes in screening efficiency and screening completion time with screen inclination angle, vibrating angle and the vibrating intensity

实验序号	筛面倾角/(°)	振动方向角/(°)	振动强度	筛分效率/%	筛分完成时间/s	实验序号	筛面倾角/(°)	振动方向角/(°)	振动强度	筛分效率/%	筛分完成时间/s
1	0.5	30	2.5	85.8	12.49	25	1.5	30	2.5	87.2	12.15
2	0.5	30	3.0	87.4	12.00	26	1.5	30	3.0	80.0	10.01
3	0.5	30	3.5	88.6	10.73	27	1.5	30	3.5	81.2	9.17
4	0.5	30	4.0	90.0	10.57	28	1.5	30	4.0	79.2	8.39
5	0.5	45	2.5	83.6	14.86	29	1.5	45	2.5	82.6	10.57
6	0.5	45	3.0	89.4	11.59	30	1.5	45	3.0	82.2	10.13
7	0.5	45	3.5	92.2	9.95	31	1.5	45	3.5	79.0	9.59
8	0.5	45	4.0	88.0	10.08	32	1.5	45	4.0	72.6	9.16
9	0.5	60	2.5	87.6	14.91	33	1.5	60	2.5	84.2	13.12
10	0.5	60	3.0	92.0	14.79	34	1.5	60	3.0	83.8	11.47
11	0.5	60	3.5	92.8	13.89	35	1.5	60	3.5	84.2	11.21
12	0.5	60	4.0	94.4	14.02	36	1.5	60	4.0	79.4	11.11
13	1.0	30	2.5	86.4	12.98	37	2.0	30	2.5	78.8	11.75
14	1.0	30	3.0	89.0	10.51	38	2.0	30	3.0	77.0	9.32
15	1.0	30	3.5	85.6	9.42	39	2.0	30	3.5	74.6	8.56
16	1.0	30	4.0	84.8	8.86	40	2.0	30	4.0	71.6	8.30
17	1.0	45	2.5	88.2	11.73	41	2.0	45	2.5	79.6	10.66
18	1.0	45	3.0	86.8	10.58	42	2.0	45	3.0	75.0	9.29
19	1.0	45	3.5	88.8	9.97	43	2.0	45	3.5	71.6	8.81
20	1.0	45	4.0	82.4	9.38	44	2.0	45	4.0	69.8	8.80
21	1.0	60	2.5	89.6	13.68	45	2.0	60	2.5	82.6	10.81
22	1.0	60	3.0	90.4	12.98	46	2.0	60	3.0	82.2	9.56
23	1.0	60	3.5	88.6	12.26	47	2.0	60	3.5	77.4	10.90
24	1.0	60	4.0	83.4	11.69	48	2.0	60	4.0	65.4	10.60

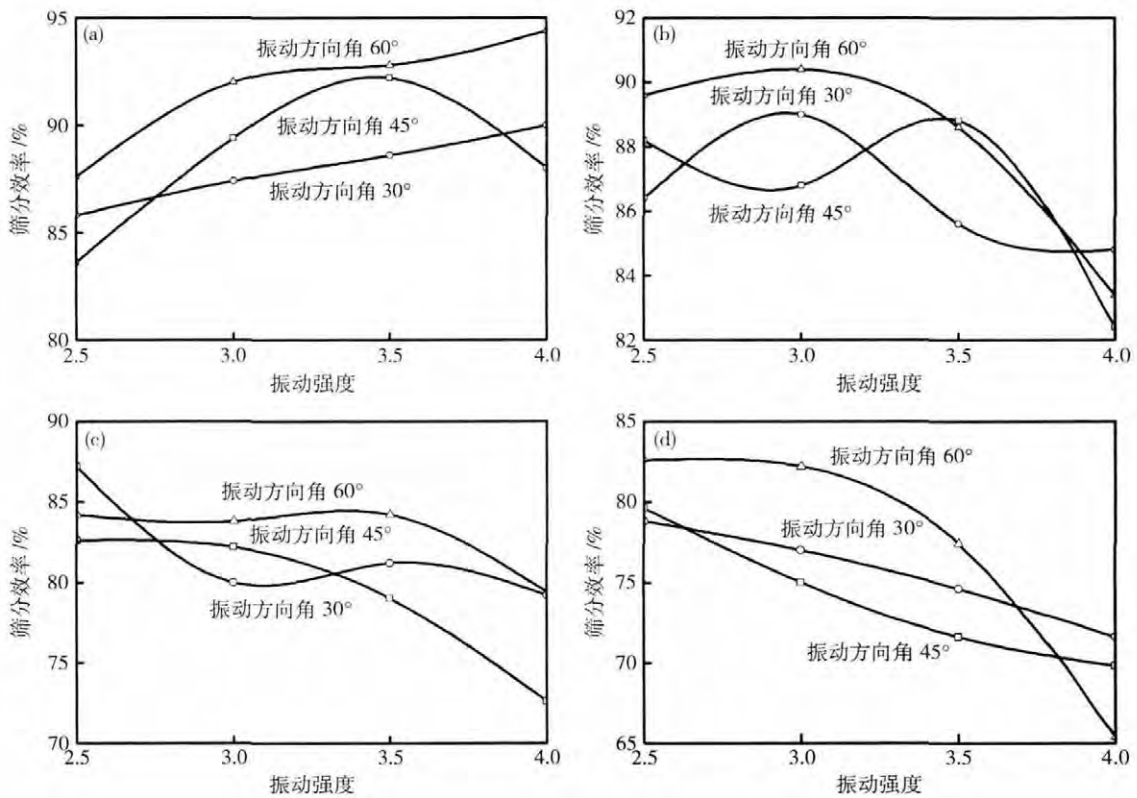


图 5 不同筛面倾角下筛分效果随振动强度的变化。(a) 0.5°; (b) 1.0°; (c) 1.5°; (d) 2.0°

Fig. 5 Change of screening efficiency with vibrating intensity at different screen inclination angles: (a) 0.5°; (b) 1.0°; (c) 1.5°; (d) 2.0°

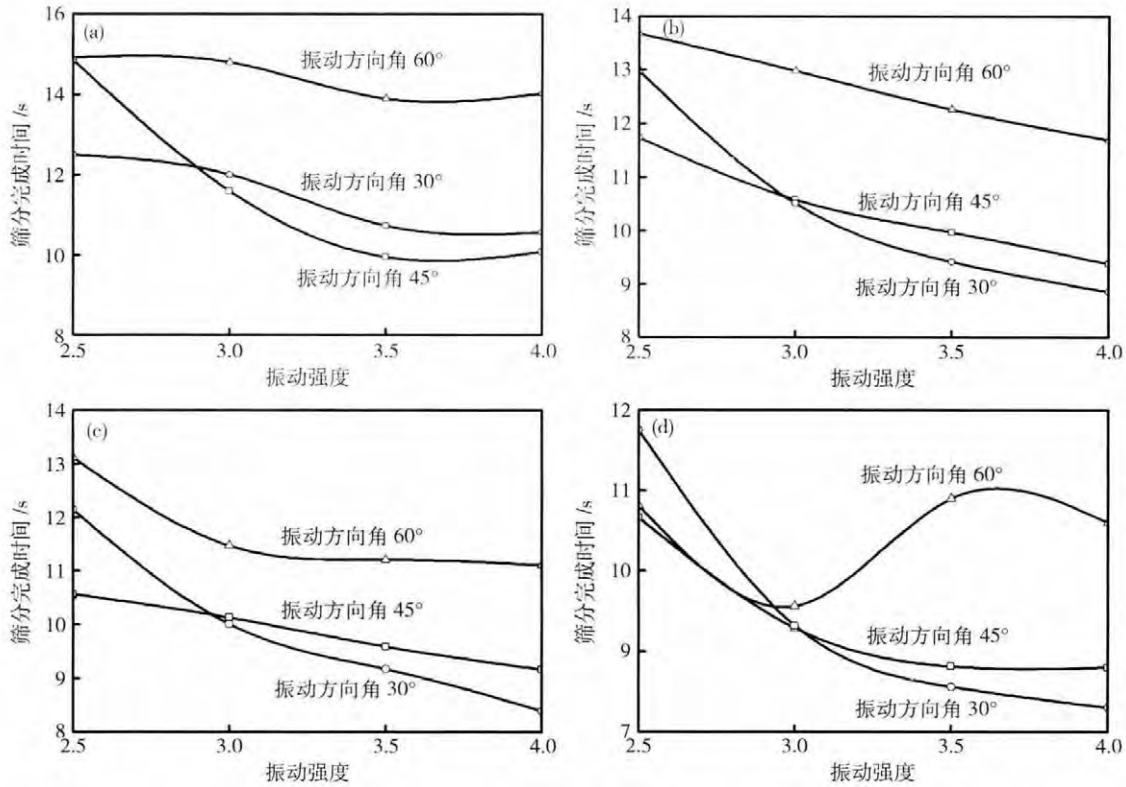


图 6 不同筛面倾角下筛分完成时间随振动强度的变化. (a) 0.5°; (b) 1.0°; (c) 1.5°; (d) 2.0°

Fig. 6 Changes of screening completion time with vibrating intensity at different screen inclination angles: (a) 0.5°; (b) 1.0°; (c) 1.5°; (d) 2.0°

时间较长;而当筛面倾角为 1.5°和 2.0°时,筛分效率多低于 85% ,但筛分完成时间较短. 综合考虑筛分效果和筛分完成时间,筛分效果在 85% 以上且筛分完成时间在 10 s 以内的参数具有较好的筛分效率,如表 3 所示. 可以发现筛面倾角 0.5°、振动方向角 45°及振动强度 3.5 时其对应的筛分效果最佳,为最佳的结构参数和振动参数.

表 3 最优结构及振动参数

Table 3 Optimal structural and vibrating parameters

筛面倾角/(°)	振动方向角/(°)	振动强度	筛分效果/%	筛分完成时间/s
0.5	45	3.5	92.2	9.95
1.0	30	3.5	85.6	9.42
1.0	45	3.5	88.8	9.97

### 4 结论

(1) 颗粒物料在振动的作用下,在筛面上实现分层和透筛. 利用三维离散元软件得到了等厚筛上颗粒群分层和透筛时的颗粒分布状态. 第 6.18 秒小颗粒运动到物料下层,颗粒物料运动基本稳定,达到分层状态. 颗粒物料沿筛面长度方向呈等厚度分布.

(2) 等厚筛的筛面结构参数和振动参数对筛分效果具有显著影响. 筛面倾角为 0.5°和 1.0°时,筛分效率较高,筛分完成时间较长;筛面倾角为 1.5°和 2.0°时,筛分效率较低,筛分完成时间较短. 振动方向角为 60°时,具有较高的筛分效率,但筛分完成时间较长;振动方向角为 30°和 45°时,具有较好的筛分效率和较短的完成时间. 总体上随着振动强度的增大,筛分效率降低、筛分完成时间缩短.

(3) 当筛面倾角为 0.5°、振动方向角为 45°以及振动强度为 3.5 时,该等厚筛具有最佳的筛分效果. 对应的筛分效果为 92.2% ,筛分完成时间为 9.95 s.

### 参 考 文 献

[1] Zhao H S, Hou L. Researchful status of the domestic and overseas banana screens and major researchful directions in China in future. *Min Process Equip*, 2010(5): 85  
(赵环帅,侯磊. 国内外香蕉筛的研究现状及今后我国重点研究方向. *矿山机械*, 2010(5): 85)

[2] He X M, Chen G, Liu C S. Dynamic optimization of new type banana vibrating screen based on finite element method. *Min Process Equip*, 2010(9): 89  
(贺孝梅,陈功,刘初升. 基于有限元法的新型香蕉筛结构动态优化. *矿山机械*, 2010(9): 89)

- [3] Liu C S, Jiang X W, Zhang S M, et al. Calculation and experimental verification of vibrating direction angle of varying trajectory banana screen. *J China Univ Min Technol*, 2011, 40(5): 737  
(刘初升, 蒋小伟, 张士民, 等. 变轨迹等厚筛振动方向角的计算及实验验证. 中国矿业大学学报, 2011, 40(5): 737)
- [4] Zhao L L, Liu C S, Yan J X, et al. Numerical simulation of particle segregation behavior in different vibration modes. *Acta Phys Sin*, 2010, 59(4): 2582  
(赵啦啦, 刘初升, 闫俊霞, 等. 不同振动模式下颗粒分离行为的数值模拟. 物理学报, 2010, 59(4): 2582)
- [5] Li J, Webb C, Pandiella S S, et al. Discrete particle motion on sieves: a numerical study using the DEM simulation. *Powder Technol*, 2003, 133(1-3): 190
- [6] Zhao L, Zhao Y, Liu C, et al. Simulation of the screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM. *Min Sci Technol China*, 2011, 21(5): 677
- [7] Jiao H G, Zhao Y M. Screen simulation using a particle discrete element method. *J China Univ Min Technol*, 2007, 36(2): 232  
(焦红光, 赵跃民. 用颗粒离散元法模拟筛分过程. 中国矿业大学学报, 2007, 36(2): 232)
- [8] Zhao L L, Liu C S, Yan J X, et al. Numerical simulation of particle screening process based on 3D discrete element method. *J China Coal Soc*, 2010, 35(2): 307  
(赵啦啦, 刘初升, 闫俊霞, 等. 颗粒筛分过程的三维离散元法模拟. 煤炭学报, 2010, 35(2): 307)
- [9] Cleary P W, Sinnott M D, Morrison R D. Separation performance of double deck banana screens: Part 2. Quantitative predictions. *Miner Eng*, 2009, 22(14): 1230
- [10] Cleary P W, Sinnott M D, Morrison R D. Separation performance of double deck banana screens: Part 1. Flow and separation for different accelerations. *Miner Eng*, 2009, 22(14): 1218
- [11] Fernandez J W, Cleary P W, Sinnott M D, et al. Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens. *Miner Eng*, 2011, 24(8): 741
- [12] Zhao Y M, Chen Q R. Mathematical modelling on coal probability sizing screen. *J China Univ Min Technol*, 1992, 21(2): 21  
(赵跃民, 陈清如. 煤用概率分级筛数学模型的建立. 中国矿业大学学报, 1992, 21(2): 21)