

双层等厚筛性能研究及振动参数优化

李占福^{1,2}, 胡云霄¹, 童昕¹

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118

2. 中建海峡建设发展有限公司 福建 福州 350000)

摘要: 为研究振动参数对双层等厚筛筛分效率的影响, 采用离散单元法 (DEM) 模拟 5 种不同粒径的颗粒在不同振幅、筛面倾角、振动频率下的筛分过程。运用多项式逼近方法对仿真结果进行曲线拟合, 得到拟合度最好时的筛分效率与振动参数关系图。最后, 选出最好筛分效率下的振动参数进行正交试验。结果表明: 双层等厚筛筛分效率最优的参数组合为振动幅度 7 mm、振动频率 14 Hz、筛面倾角 17°。

关键词: 双层等厚筛; DEM; 筛分效率; 振动参数

中图分类号: TD452

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)06-0555-05

Study on the performance of double-layer equal-thickness screen and its vibration parameter optimization

LI Zhanfu^{1,2}, HU Yunxiao¹, TONG Xin¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. CSCEC Strait Construction and Development Co. Ltd, Fuzhou 350000, China)

Abstract: In order to study the influence of vibration parameters on the screening efficiency of double-layer equal-thickness screen, the screening process of 5 kinds of particles with different particle sizes was simulated with the discrete element method (DEM) at different amplitudes, inclination angles and vibration frequencies. The curve fitting of the simulation results was carried out by using the polynomial approximation method, and the relationship between the screening efficiency and the vibration parameters was obtained when the fitting degree was the best. Finally, the vibration parameters at the best screening efficiency were selected for orthogonal test. Results show the optimal parameter combination of screening efficiency of double-layer equal-thickness screen is when the vibration amplitude is 7 mm, the vibration frequency is 14 Hz, and the inclination is 17 degrees.

Keywords: double-layer equal-thickness screen; DEM; screening rate; vibration variables

振动筛通过振子激振所产生的往复旋型振动使得物料松散、分层、触筛和透筛, 完成对物料的输送和筛分, 形成筛上物和筛下物, 从而达到物料分离分级的目的^[1-4], 被广泛应用于矿业、化工、建材、食品等行业, 其工作性能主要体现在筛分效率上。马学东等^[5]针对物料在振动筛上的筛分

机理, 模拟了不同振动参数对物料运动规律及筛分效率的影响, 为研究筛分机理提供了有益的参考。刘义伦等^[6]研究了在不同振动参数下对双层直线振动筛的物料运动规律的影响。王娜等^[7]研究了振动筛的结构参数和振动参数对筛分效率的影响规律。ALKHALDI H 等^[8]提出了两

收稿日期: 2019-09-16

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (2017J01675)

第一作者简介: 李占福 (1987-), 男, 河北衡水人, 副教授, 博士, 研究方向: 计算机辅助设计与工程。

种不同的网格建模方法,用于粒子筛选过程的模拟。王桂峰等^[9]研究了单参数条件下,筛面长度对物料筛分效率的影响。王晓月等^[10]研究了颗粒形状对筛分效率的影响,得到单位时间内不同形状颗粒筛分效率的变化趋势基本一致。

上述研究提供了振动筛振动参数优化的理论依据和方向,然而振动筛筛分过程是复杂的,完整的筛分过程无法模拟。本文基于 EDEM 模拟了双层等厚筛分过程振动参数对筛分效率的影响,并运用正交试验寻找振动参数组合的优方案。

1 数值模拟

采用 SolidWorks 软件建立双层等厚筛的三维模型,为简化问题,建立基于 DEM 软件的振动筛简化模型如图 1 所示。A 区域得到第一层筛上物,B 区域得到第二层筛上物,C 区域得到筛下物。为更好地模拟现实工况,设置 5 种不同的粒径,选取粒径分布设置为:5.0、4.0、2.8、2.0、1.6 mm。采取质量输入分别为:0.043、0.050、0.050、0.105、0.105 g,总颗粒数目约为 20 000 颗,下落速度 0.5 m/s。将 A、B、C 区域所有不同粒径分布的质量统计用于数据分析。颗粒模型物理属性^[11]如表 1 和表 2 所示。

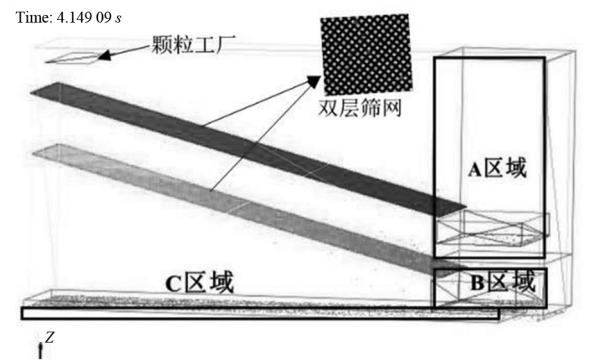


图 1 EDEM 振动筛简化仿真模型

Fig.1 Simplified simulation model of EDEM vibration screen

表 1 颗粒模型物理属性

Tab.1 Physical properties of particle models			
材料属性	泊松比	剪切模量/ Pa	密度/(kg · m ⁻³)
颗粒	0.30	2.300E+07	2 678
筛网	0.29	7.992E+10	7 861

表 2 颗粒模型碰撞特性

Tab.2 Collision characteristics of particle models			
碰撞特性	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
颗粒之间	0.1	0.545	0.01
颗粒与筛网	0.2	0.500	0.01

2 仿真结果

本研究的振动筛为双层筛,其中第一层筛网筛孔为 4.57 mm,第二层筛网筛孔为 2.36 mm,筛网如图 1 所示。模拟中存在不同的粒径分布的颗粒,同时以颗粒在筛下物的物料为主要产物,其筛分效果直接影响其筛分性能。故筛分效率^[12]可以表示为:

筛分效率 =

$$\left(\frac{\text{筛下物中 1.6 mm 颗粒的总重量}}{\text{筛分物料中所有 1.6 mm 的总质量}} - \frac{\text{筛下物中大于 1.6 mm 颗粒的总重量}}{\text{筛分物料中所有大于 1.6 mm 的总质量}} \right) \times 100\%$$

(1)

为研究不同振动幅度、振动频率、筛面倾角分别对筛分效率的影响,设置单因素仿真试验,探索振动参数与筛分效率的规律关系。仿真试验参数组合如表 3 所示。

表 3 仿真试验参数组合

Tab.3 Combination of simulation test parameters			
组别	振动频率/Hz	振幅/mm	筛面倾角/(°)
第一组	12、14、16、18、 20、22、24	4	15
第二组	14	4、6、8、10、12	15
第三组	14	6	15、17、19、21、23

2.1 振动频率

振动频率大小在一定范围内影响着物料在筛面上的分散、分层和透筛,适当的振动频率对筛分效率的提高有着重要作用。因此,为研究振动频率与筛分效率的变化规律,选取振动频率为 12、14、16、18、20、22、24 Hz,根据筛分效率计算公式得出结果如表 4 所示。多项式函数如式(2)所示。

$$F = a x^6 + b x^5 + c x^4 + d x^3 + e x^2 + f x^1 + g$$

(2)

表 4 不同振动频率下的筛分效率

Tab.4 Screening efficiency at different vibration frequencies

振动频率/Hz	筛分效率/%
12	16.488 92
14	18.090 37
16	17.069 23
18	14.935 20
20	14.714 60
22	16.964 97
24	11.493 61

由表 4 通过多项式曲线拟合的相关系数、方差和各项系数如表 5 所示。由表 5 可知,最终的拟合函数为式(3)所示,其中方差 $SSE = 3.597 \times 10^{-28}$ 、相关系数 $R - square = 1$,说明拟合结果很好。

$$F = -0.6065x^6 - 2.405x^5 - 1.59x^4 + 5.587x^3 + 4.833x^2 - 3.63x^1 + 14.94 \quad (3)$$

当振动频率在[12,24] Hz 时,筛分效率随着振动频率的增大先后出现两个极大值,观察筛分效率的增长趋势可知当振动频率为 22 Hz 时的筛分效率应当舍去,即振动频率为 14 Hz 时筛分效率达到最大值,其值为 18.090 37%。在大于 14 Hz 且随着振动频率增大,1.6 mm 颗粒透筛效果明显降低,造成堵孔严重。

表 5 振动频率-筛分效率-曲线拟合结果表

Tab.5 Curve fitting results of vibration frequency and screening efficiency

各项系数	各项系数值	方差	相关系数
a	-0.606 5	SSE = 3.597 × 10 ⁻²⁸	R - square = 1
b	-2.405 0		
c	-1.590 0		
d	5.587 0		
e	4.833 0		
f	-3.630 0		
g	14.940 0		

2.2 筛面倾角

随着筛面倾角减小,筛上物料的抛掷强度就减小,物料的运动速度也减小,但物料在筛面停留

时间增长,就会增大颗粒的透筛概率,从而使筛分效率增大;反之就会使处理量减小,从而降低筛分效率^[13]。筛面倾角值取 15°、17°、19°、21°、23°,研究筛面倾角与筛分效率的变化规律,根据公式(1)得出结果如表 6 所示。多项式函数为 4 项函数其表达式如式(4)所示。

$$F = cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx^1 + g \quad (4)$$

表 6 不同筛面倾角下的筛分效率

Tab.6 Screening efficiency at different inclination angles

筛面倾角/(°)	筛分效率/%
15	13.679 72
17	10.886 95
19	11.114 65
21	9.586 92
23	10.087 56

通过对表 6 数据进行多项式曲线拟合得出如表 7 所示的相关系数、方差和各项系数。由表 7 可知,最终拟合的 F 关于 x 的函数如式(5)所示,其中方差 $SSE = 1.795 \times 10^{-24}$ 、相关系数 $R - square = 1$,说明拟合结果很好。

$$F = -0.06037x^4 + 1.996x^3 - 23.7x^2 + 117.8x^1 - 185 \quad (5)$$

表 7 筛面倾角-筛分效率-曲线拟合结果表

Tab.7 Curve fitting results of inclination and screening efficiency

各项系数	各项系数值	方差	相关系数
c	-0.060 37	SSE = 1.795 × 10 ⁻²⁴	R - square = 1
d	1.996 00		
e	-23.700 00		
f	117.800 00		
g	-185.000 00		

当筛面倾角在 15° ~ 23° 之间时,筛面倾角为 15° 时筛分效率达到最大值,其值为 13.679 72%。随着筛面倾角增大,筛分效率总体上呈下降趋势,在 23° 左右筛分效率有波动,其具体原因还需进一步验证。

2.3 振动幅度

振动幅度的大小决定物料的运动状态,振动

幅度越大,对颗粒输送的能量就越大,越有利于物料的松散分层,本文中振动幅度取 4、6、8、10、12 mm,研究振动幅度与透筛率的变化规律,由筛分效率公式(1)得出结果如表 8 所示。多项式函数其表达形式与函数(4)相同。

表 8 不同振动幅度下的筛分效率

Tab.8 Screening efficiency at different vibration amplitudes

振动幅度/mm	筛分效率/%
4	19.268 65
6	21.382 58
8	14.974 09
10	14.692 73
12	12.006 30

通过对表 8 数据进行多项式曲线拟合得出如表 9 所示的相关系数、方差和各项系数。由表 9 可知,最终拟合得到筛分效率 F 关于振动参数 x 的函数为式(6)所示,其中方差 $SSE = 7.352 \times 10^{-23}$ 、相关系数 $R - square = 1$,结果表明,该函数具有良好的曲线拟合特性,计算结果与实测值基本吻合。

$$F = 0.022\ 29\ x^4 - 1.704\ x^3 + 48.56\ x^2 - 611.3\ x^1 + 2\ 881$$

(6)

表 9 振动幅度-筛分效率-曲线拟合结果表

Tab.9 Curve fitting results of vibration amplitude and screening rate

各项系数	各项系数值	方差	相关系数
c	0.022 29	SSE = 7.352×10^{-23} $R - square = 1$	
d	-1.704		
e	48.560		
f	-611.300		
g	2 881.000		

当振动幅度在[4,12] mm 之间时,振动幅度随着强度增加,筛分效率总体上先上升再逐渐降低。在振动幅度为 6 mm 时达到最大值 21.382 58%,在 [10,12] mm 时,筛分效率出现小的波动与总体趋势相比可忽略。

3 正交实验对筛分效率的分析

3.1 正交试验表设计

为了更好的模拟实际工况且进一步优化不同振动参数下的筛分效率,获取不同振动参数的最优组合,建立正交试验^[14],试验因素为振动幅度(A)、振动频率(B)、筛面倾角(C),正交试验表头设计如表 10 所示。根据上述单因素仿真试验的结果,在最优值附近选取正交试验因素的水平,试验水平设为 2 个,正交试验因素水平表如表 11 所示,选用 $L_4(2^3)$ 正交表,如表 12 所示。

表 10 正交试验表头设计

Tab.10 Header design of the orthogonal test

因素	振动幅度 (A) / mm	振动频率 (B)/Hz	筛面倾角 (C) /(°)
列号	1	2	3

表 11 正交试验因素水平表

Tab.11 Factor levels of the orthogonal test

水平	振动幅度 (A) / mm	振动频率 (B) /Hz	筛面倾角 (C)/(°)
1	6	14	16
2	7	15	17

表 12 $L_4(2^3)$ 正交表

Tab.12 Orthogonal table of $L_4(2^3)$

试验号	振动幅度 (A) /mm	振动频率 (B) /Hz	筛面倾角 (C) /(°)
1	6	14	16
2	6	15	17
3	7	14	17
4	7	15	16

3.2 试验结果与分析

将表 12 所列参数组合分别带入到所建立的 DEM 模型中仿真,得到正交试验设计结果如表 13 所示,从表 14 中可以得到,各因素的极差大小,从而可以得到振动参数对筛分效率影响程度的大小排序,即因素主次为振动频率(B)>振动幅度(A)>筛面倾角(C)。从表中均值可以看出,最优参数组合为 A2B1C2,即振动幅度 7 mm、振动频率 14 Hz、筛面倾角 17°。

表 13 正交试验结果
Tab.13 Orthogonal test results

试验号	振动幅度 (A) /mm	振动频率 (B) /Hz	筛面倾角 (C) /(°)	试验结果/ %
1	6	14	16	21.14
2	6	15	17	20.13
3	7	14	17	21.48
4	7	15	16	20.37

表 14 各因素极差表
Tab.14 Range table of the factors

算术平均值	振动幅度 (A) /mm	振动频率 (B) /Hz	筛面倾角 (C)/(°)
K1	41.270	42.62	41.510
K2	41.850	40.50	41.610
k1	20.635	21.31	20.755
k2	20.925	20.25	20.805
极差 R	0.580	2.12	0.100

4 结论

1)在单因素优选试验中,采用多项式曲线拟合方法,绘制最好拟合度下筛分效率与各振动参数关系曲线图,其关系式分别如式(2)、(5)、(6)所列,得到振动幅度在 6 mm、振动频率在 14 Hz、筛面倾角在 15° 时,筛分效率最好,但仿真时间较长,物料处理能力较低。

2)通过正交试验设计,对振动幅度、振动频率、筛面倾角 3 个振动参数作进一步的优化组合,得到最优参数组合为振动幅度 7 mm、振动频率 14 Hz、筛面倾角 17°。

3)研究结果为双层等厚筛筛面结构参数的设计和双层筛中单个筛面不同倾角的选取研究有着重要的参考意义。

参考文献:

[1] 彭利平,赵跃民,王宏,等. 大型振动筛研究的现状与展望[C]//第十二届全国振动理论及应用学术会议论文集. 南宁, 2017: 219-228.

[2] 陆信,张德生,周峰,等. 筛分机械的新发展[C]//筛分技术交流会论文集. 沈阳, 2010: 43-50.

[3] 李素妍,徐文彬,张宝田. 国产大型直线振动筛技术现状及研发思路[J]. 矿业装备, 2013(6): 58-61.

[4] 石秀东,赵魏维,赵加洋,等. 振动筛工作参数对筛分效率影响的有限元分析[J]. 金属矿山, 2012(2): 132-134, 168.

[5] 马学东,张艳兵,王克非,等. 基于三维离散元法的筛分效率研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 841-844.

[6] 刘义伦,苏家辉,赵先琼,等. 基于离散元法的振动筛的筛分效率研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2018, 50(4): 78-83.

[7] 王娜,赵俊凯,李孟红. 振动筛筛分效率的影响因素研究[J]. 粮食加工, 2018, 43(2): 59-62.

[8] ALKHALDI H, ERGENZINGER C, FLEINER F, et al. Comparison between two different mesh descriptions used for simulation of sieving processes [J]. Granular Matter, 2008, 10(3): 223-229.

[9] WANG GUIFENG, TONG XIN. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation [J]. Mining Science and Technology (China), 2011(3): 451-455.

[10] WANG X Y, LI Z F, TONG X, et al. The influence of particle shape on screening: case studies regarding DEM simulations[J]. Engineering Computations, 2018, 35(3): 1512-1527.

[11] 王晓月. 颗粒形状对振动筛数值模拟影响规律的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2017.

[12] 沈国浪,童昕,李占福. 基于离散单元法对振动筛仿真实验次数分析[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(2): 110-112, 116.

[13] 刘东坡,尹志新,李福斌. 振动筛筛分效率的研究[J]. 装备制造技术, 2014(5): 169-171, 186.

[14] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

(责任编辑: 方素华)