



基于DEM的高频振网筛多参数优化

陈兵 燕纪威 尹忠俊 孙志辉 肖有鹏

Multi-parameter optimization of high-frequency vibrating screen based on DEM

CHEN Bing, YAN Ji-wei, YIN Zhong-jun, SUN Zhi-hui, XIAO You-peng

引用本文:

陈兵, 燕纪威, 尹忠俊, 孙志辉, 肖有鹏. 基于DEM的高频振网筛多参数优化[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 852–861. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.16.005

CHEN Bing, YAN Ji-wei, YIN Zhong-jun, SUN Zhi-hui, XIAO You-peng. Multi-parameter optimization of high-frequency vibrating screen based on DEM[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(6): 852–861. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.16.005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.16.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

移动床固体颗粒绕流顺排圆管的过程

Particles flowing process across aligned tubes in a moving bed

工程科学学报. 2018, 40(6): 735 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.06.012>

铝合金管材6061自由弯曲成形工艺仿真及优化

Simulation and optimization of the free bending process of aluminum alloy 6061 pipe

工程科学学报. 2020, 42(6): 769 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.06.21.001>

无数学模型的非线性约束单目标系统优化方法改进

Optimization method improvement for nonlinear constrained single objective system without mathematical models

工程科学学报. 2018, 40(11): 1402 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.11.014>

基于全局优化支持向量机的多类别高炉故障诊断

Multi-class fault diagnosis of BF based on global optimization LS-SVM

工程科学学报. 2017, 39(1): 39 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.01.005>

椭圆螺旋微管束反应器参数优化与性能评价

Parameter optimization and performance evaluation of elliptical spiral mini-tube bundle reactor

工程科学学报. 2019, 41(5): 672 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.05.014>

偏心框架结构采用扭转调谐液柱阻尼器的设计方法

Design method for torsional tuned liquid column damper for eccentric frame structure

工程科学学报. 2017, 39(5): 802 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.05.020>

基于 DEM 的高频振网筛多参数优化

陈 兵^{1)✉}, 燕纪威¹⁾, 尹忠俊¹⁾, 孙志辉¹⁾, 肖有鹏²⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 南通联源机电科技股份有限公司, 海安 226600

✉通信作者, E-mail: bingchen9803@ustb.edu.cn

摘 要 利用离散单元法(Discrete element method, DEM)对球形颗粒群以及非球形颗粒群的筛分过程进行了仿真并开展了实验研究, 结果表明球形和非球形颗粒的仿真与实验中筛分效率的变化是一致的, 但非球形颗粒的仿真结果与实验结果更接近。正交设计多组模拟试验, 分析了各振动参数(振动频率、振幅以及筛面倾角)对颗粒分布曲线、筛分效率以及物料平均运输速度的影响规律。对正交试验表中的数据进行多元非线性拟合, 得到筛分效率与振动参数间的关系式; 并在此关系式的基础上, 对振动参数进行优化设计, 得到了最优振动参数且在仿真中得到了验证。研究内容不但为高频振网筛振动参数的设计提供了理论依据, 而且为研究高频振动系统的筛分机理提供了实验和仿真数据支持。

关键词 高频振网筛; 离散单元法; 筛分效率; 多元非线性拟合; 参数优化

分类号 TH113.1

Multi-parameter optimization of high-frequency vibrating screen based on DEM

CHEN Bing^{1)✉}, YAN Ji-wei¹⁾, YIN Zhong-jun¹⁾, SUN Zhi-hui¹⁾, XIAO You-peng²⁾

1) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Nantong Lianyuan Electromechanical Technology Co., Ltd., Haian 226600, China

✉ Corresponding author, E-mail: bingchen9803@ustb.edu.cn

ABSTRACT The screening efficiency and average transport speed of materials are important indicators for measuring the performance of screening machinery. In recent years, few breakthroughs have been made in traditional screening machinery. As high-efficiency vibration machinery, high-frequency vibrating screens have become widely used in recent years, but the operational methods of high-frequency vibrating mesh screens are relatively unique: the screen box is fixed and the screen is vibrated at a high frequency. Despite its wide use, there are relatively few studies about the materials movement law and screening characteristics of high-frequency vibrating screen. In this study, a discrete element method (DEM) was used in a simulation of the screening process of the spherical and nonspherical particle groups, and an experimental study was also conducted. The results show that changes in the screening efficiency in the simulation of spherical and nonspherical particles are consistent with those observed experimentally, but the simulation results for the nonspherical particles were closer to those obtained in the experiments. Orthogonal designs and multiple sets of simulation tests were conducted to analyze the influence of each vibration parameter (vibration frequency, amplitude and mesh inclination) on the particle distribution curve, screening efficiency, and average transport speed of the materials. Multivariate nonlinear fitting was performed on the data using the orthogonal test table, and the relationship between the screening efficiency and the vibration parameters was obtained. Based on this relationship, the optimal vibration parameters were obtained and verified in the simulation. The results obtained in this research provide a theoretical basis for the design of the vibration parameters of the high-frequency vibrating screen, and the experimental and simulation data provide support for the investigation of the screening mechanism of the high-frequency vibration system.

收稿日期: 2020-04-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(FRF-GF-19-009B)

KEY WORDS high-frequency vibrating screen; discrete element method; screening efficiency; multivariate nonlinear regression; parameter optimization

振动筛是一种广泛应用于矿山、煤炭、化工、食品等行业的利用振动原理实现物料筛分和分级的机械装备^[1-2]。随着科技的进步、我国各行业工艺水平的提升以及对高效能生产技术的迫切需求,研发具有处理量大、筛分效率高、安全可靠等特点的振动筛分机械显得尤为重要。高频振网筛的结构独特,在工作时,筛箱固定,分段布置的轻质筛网以小振幅高频率运动,相比中低频筛机具有产量大、输送能力强、筛分效率高和节能环保等优点^[3]。近年来其在工矿企业中得到较为广泛的应用,作为一种新型振动筛分装备,其结构和工作方式较为特殊,目前国内外对高频振网筛筛分特性的研究甚少。

离散单元法(Discrete element method, DEM)是20世纪70年代发展起来的用于计算散体力学行为的数值方法^[4-5],采用DEM方法研究物料筛分特性是国内外物料筛分机筛分机理领域的研究热点,有研究学者采用此理论研究振动筛的筛分特性,得到了筛分效率与振幅、筛面倾角、筛面长度等参数的规律,证明了离散单元法在模拟颗粒运动方面具有很大优势^[6-7]。Cleary对双层五段香蕉筛进行了较为系统的研究,发现了筛面几何参数对两层筛网下物料的筛分效率的影响规律,也得到了筛面加速度与筛面颗粒流流动速度之间的定量关系,为筛机结构及工艺参数优化提供了计算依据^[8]。刘义伦等研究了直线振动筛的振幅、振动方向角以及筛面倾角的单因素变化对烟花亮珠颗粒筛分效率的影响,并根据筛分效率的变化曲线对各筛分参数进行了优选^[9]。王中营等利用三维离散元软件PFC3D研究往复振动筛的各筛分参数变化时对筛分效率和筛上物的输送量的影响,并得到了相应的优化参数^[10]。王宏等基于三维离散元法建立了等厚筛离散元模型,得到了颗粒分层和透筛状态下的颗粒群分布状态^[11]。Harzanagh等研究了进料速率和孔径大小等因素对筛分过程的影响,并将非球形颗粒与球形颗粒仿真结果相比较,证明了使用非球形颗粒仿真更加符合实际情况^[12]。Elskamp等利用多球体颗粒来模拟非球形颗粒,并研究了筛丝形状和颗粒粒径分布对筛分过程的影响,发现了在宽粒度分布的情况下球形颗粒会产生“堵孔”效应,因此非球形颗粒的筛分效率要高

于球形颗粒的筛分效率^[13]。Silva等利用EDEM建立了具有JKR内聚力的Hertz-Mindlin的接触模型,并通过模拟实验证明该种接触模型可以有效地模拟具有黏性物料的筛分行为^[14]。Wang和Tong建立了筛分效率与筛面长度之间的关系式,并证明了两者之间存在着复杂的指数关系^[15]。

高频振网筛与一般的振动筛相比具有高频、小振幅以及大倾角的工作特点,但很少有文献对此种工作方式下的物料颗粒的运动展开研究。本文在颗粒动力学建模的基础上采用三维离散元软件EDEM模拟分析了高频振网筛的振动频率、振幅、筛面倾角对颗粒分布曲线、筛分效率以及筛上物料平均运输速度的影响规律,详细研究了各种粒径大小颗粒的透筛规律,并对实验结果进行多元线性拟合及参数优化,为合理配置高频筛工艺参数、完善高频细物料颗粒筛分理论和研制新型筛分设备提供数值模拟依据。

1 振网筛物料 DEM 建模

DEM的基本思想是把离散介质划分为有限个离散单元的集合,使每个离散单元满足运动方程,采用动态或静态松弛迭代方法求解每个离散单元的运动方程,最终得到整个颗粒系统的运动规律。根据研究对象的不同特质,离散单元几何形态可为少数颗粒元或由若干个颗粒元组成的高维复杂单元^[16-17]。

1.1 DEM 颗粒接触模型理论

DEM中颗粒接触采用Hertz-Midlin(no slip)软球干接触模型模拟振网筛颗粒之间的碰撞力学特性,其力学模型如图1所示。

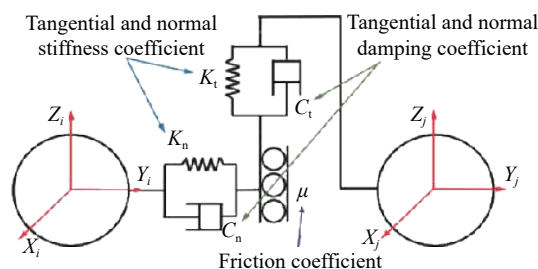


图1 软球干接触模型颗粒间受力示意图

Fig.1 Diagram of force between particles in soft ball dry contact model

由牛顿第二定律可建立相邻颗粒间的运动方程,即在任意时刻每个离散单元的线运动和转动

满足以下动力学方程:

$$\begin{cases} m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} F_{ji} + F_i + F'_i \\ I_i \frac{dw_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} \times F_{ji}) + M_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, m_i 是单元 i 的质量; v_i 是单元 i 的运动速度矢量; F_{ji} 是单元 i 与单元 j 间的接触力(方向由 j 指向 i); n_i 为与单元 i 接触的其他单元数; F_i 是单元 i 所受外力; F'_i 是单元 i 所受重力; I_i 为单元 i 的转动惯量; w_i 是单元 i 的角速度; r_{ij} 是由单元 i 的形心指向单元 j 的接触点向量; M_i 是单元所受外力矩。

1.2 高频振网筛仿真模型的建立

为研究各振动参数对高频振网筛筛分物料运动特性的影响,用 EDEM 软件建立了如图 2 所示的高频振网筛筛分模型,并对筛上物料在筛分过程中的运动状态进行模拟。为降低计算规模,提高计算效率,去除了不必要的部分并以单张筛网为例建立高频振网筛仿真模型。

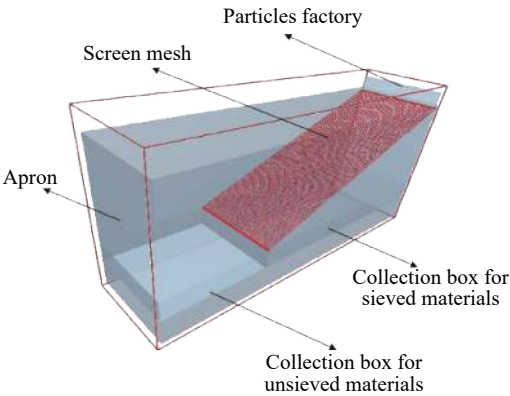


图 2 EDEM 中的筛分模型
Fig.2 Screening model in EDEM

- (1)考虑物料颗粒大小与整体模型的关系,建立 1 : 8 等比例缩小的单个筛网筛分单元模型,筛面选择钢丝编织筛网,正方形筛孔尺寸为 5 mm× 5 mm(与实验台实际尺寸相匹配),并直接建立集料器,所建筛分物料及振网筛模型的几何、运动参数如表 1 所示。
- (2)筛网两端为固定张紧约束,中部由激振横梁支撑,筛网运动轨迹为直线运动,在筛网有效筛分面积内,直接施加垂向简谐作用力于筛网上。如图 3 所示,在 EDEM 中可以通过设置筛网 x 和 y 方向运动的位移和振动频率以及调整筛面倾角 α 来使筛网实现所要求的运动。
- (3)在筛网宽度方向,假设颗粒流的运动特性

表 1 仿真条件与物料参数

Table 1 Simulation conditions and material parameters

Parameter name	Parameter value
Mesh size (length × width)/mm	450 × 225
Particle shape	Spherical/Nonspherical
Density/(kg·m ⁻³)	Particle: 2800; Steel: 7800
Poisson's ratio	Particle: 0.25; Steel: 0.3
Shear modulus/Pa	Particle: 5 × 10 ⁷ ; Steel: 8 × 10 ¹⁰
Coefficient of Restitution	Particle – Particle: 0.2; Particle – Steel: 0.3
Coefficient of Static Friction	Particle – Particle: 0.6; Particle – Steel: 0.4
Coefficient of Rolling Friction	Particle – Particle: 0.01; Particle – Steel: 0.01

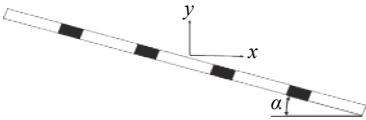


图 3 EDEM 中筛网的运动参数
Fig.3 Motion parameters of the screen mesh in EDEM

- 一致,筛分仿真参数按照实际工况设置。
- (4)筛网材质为不锈钢、筛分物料为高标号混凝土的骨料细颗粒,按照实际物料参数设置系统接触参数。实际生产中,筛分前砂石骨料颗粒表面含水量极低,故本文所研究的高频振网筛属于干法筛分,采用 Hertz–Midlin (no slip) 软球干接触模型模拟物料碰撞过程,此碰撞模型的可靠性已得到业界研究人员的验证并将其应用在振动筛分计算中^[18]。
- (5)仿真物料组成及配比设置。
- 球形颗粒:筛分砂石骨料根据干式筛分法中砂石的实际配比尺寸构成,在球形颗粒的仿真中颗粒由 0.3 ~ 1.8 倍筛孔尺寸的多系列球形颗粒组成,球形颗粒粒径分布参数如表 2 所示。
- 非球形颗粒:对于非球形颗粒的建模采用多球组合的方式来模拟非球形颗粒的特征,对于每种粒径的球形颗粒分别采用三种等质量的长条形、三角形以及正方形颗粒来代替,如图 4 所示。

2 筛分实验平台搭建及仿真模型验证

根据高频振网筛的工作原理及结构特点,搭建了小型高频振网筛实验系统以及相关的控制和测试系统,搭建的高频振网筛试验系统如图 5 所示。振网筛分工作系统由激振横梁、筛网、橡胶底座复合弹簧和机架等构成,通过调节激振横梁的布置位置、基座的高度与倾角、偏心块的交叉角

表 2 不同粒径尺寸的颗粒性质

Particle size/mm	Property	Generation speed/(kg·s ⁻¹)	Particle distribution/%
1.5	Easy-to-sieve	0.015	10
2.0	Easy-to-sieve	0.015	10
2.5	Easy-to-sieve	0.015	10
3.5	Difficult-to-sieve	0.025	10
4.5	Difficult-to-sieve	0.025	10
5.0	Obstructed-to-sieve	0.01	10
6.0	Obstructed-to-sieve	0.01	10
7.0	Obstructed-to-sieve	0.01	10
8.0	Obstructed-to-sieve	0.015	10
9.0	Obstructed-to-sieve	0.015	10

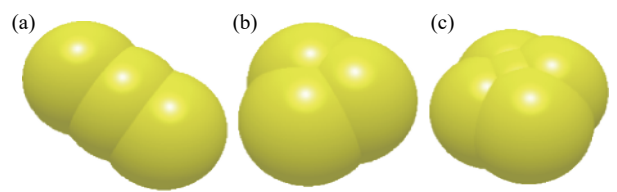


图 4 不同类型的非球形颗粒。(a)长条形颗粒;(b)三角形颗粒;(c)正方形颗粒

Fig.4 Different types of nonspherical particles: (a) strip particle; (b) triangle particle; (c) square particle

度和变频器的输入频率,可以实现调节实验筛机振动频率和激振力的目的。

筛分效果的主要工艺指标为筛分效率和生产率^[19]。一般采用总体筛分效率来定义筛分质量的优劣,并将筛分效率定义为筛下物料质量与入料中粒径小于筛孔尺寸的物料总质量的比值。

为了证明仿真结果的可信度,利用所搭建的样机测试系统展开验证实验,并将实验结果与仿真结果进行比较。对实验所用不同粒径的筛分物



图 5 高频振网筛分实验系统照片

Fig.5 Photograph of screening experiment system with high-frequency mesh-vibrating screen

料进行染色处理(图中数值表示粒径大小),如图 6 所示。四种颗粒占比与仿真模型一致,分别为 30%、30%、20% 和 20%,按照实际工业生产要求,将实验颗粒充分混合,实验和仿真得到的筛分效率对比与筛下物料对比如图 7 所示。其中实验与仿真的参数如下设置:振动频率为 30~50 Hz,振幅为 1.5 mm,筛面倾角为 30°。在实验中,尽可能保证实验条件和仿真条件一致。

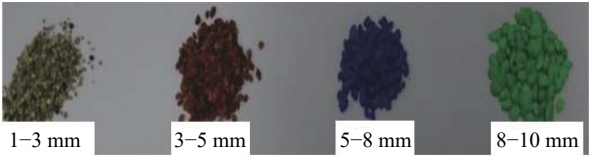


图 6 实验物料

Fig.6 Sieving experimental materials

图 7(a)为实验和仿真的筛分效率对比,由图 7(a)可知,不论是球形颗粒还是非球形颗粒,实验与仿真模拟结果筛分效率总体变化趋势一致,但非球形颗粒的仿真与实验结果更加接近。这是由于非球形颗粒特别是长条形颗粒的尺寸一般分为长轴尺寸和短轴尺寸,而长轴尺寸是大于该非球形颗粒对应的球形颗粒的粒径大小,沿着筛面的流动

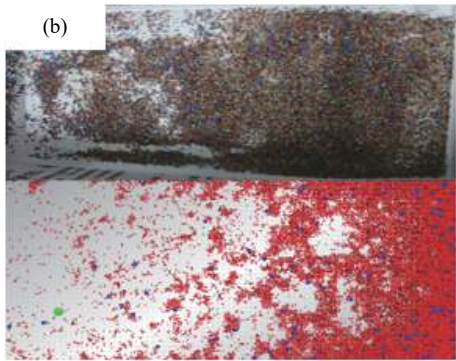
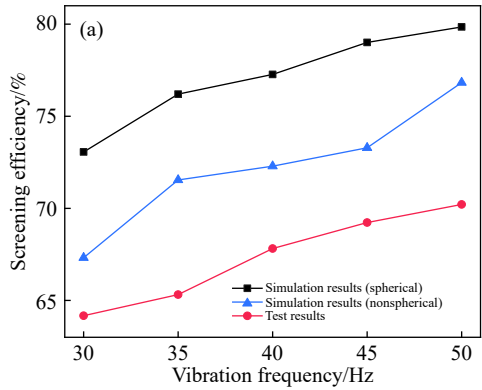


图 7 实验和仿真的筛分效率与筛下物料对比

Fig.7 Comparison of experimental and simulated materials

会使非球形颗粒的长轴方向倾向于与筛面平行, 而只有当非球形颗粒的长轴方向指向筛孔的方向才能被透筛, 因此长条形颗粒被透筛的几率要比其对应的球形颗粒的透筛几率小. 并且由于实验中这种长条形的颗粒占比相对较多, 且多球模型并不能完全模拟实际颗粒的真实特征, 因此也导致了实验筛分效率要低于球形和非球形颗粒的仿真结果. 图 7(b) 为实验和球形颗粒仿真的筛下物料对比, 对比物料筛分仿真和实验结果可发现, 透筛物料均呈现梯度分布特点: 在入料侧, 易透筛颗粒容易穿过筛网, 迅速完成透筛作业, 出料侧的易透筛颗粒明显减少.

使用三维离散元法对筛分过程进行研究具有较高的可信度且能够较准确地反映实际筛分规律. 在虚拟模型中准确覆盖所有的实际物理因素十分困难, 虽然实验结果与仿真结果的筛分效率略有差距, 但是两者的筛分原理一致, 充分证明了使用数值模拟进行进一步筛选研究的可行性^[20-23].

3 振动参数对筛分效果的影响

3.1 正交试验设计

物料筛分过程受到振动频率、振幅和筛面倾角多因素的影响, 为了更好地研究各振动参数对高频振网筛筛分过程中物料的运动及透筛行为的影响, 按照正交试验原理^[24]来设计试验, 所设计工况如表 3 所示, 其中各参数的取值均在对象筛机

可以使用的振动参数和工艺参数取值范围内. 各个振动参数均有 5 个水平值, 正交试验的振动参数是通过三因素五水平的正交表来设计试验分析的, 共产生 25 组数据. 选择三因素对应的五水平的值如表 3 所示.

表 3 水平与因素对应表

Table 3 Correspondence of levels and factors

Level	Vibration frequency/Hz	Amplitude/mm	Mesh inclination/(°)
1	30	0.5	20
2	35	1.0	25
3	40	1.5	30
4	50	2.0	35
5	70	2.5	40

对不同种工况进行仿真模拟后, 在 EDEM 后处理模块对已经处于稳定运输状态的物料的筛分效率以及平均运输速度进行统计, 所得 25 组试验结果如表 4 所示.

3.2 正交试验结果分析

振动参数的不同组合直接影响了颗粒与颗粒以及颗粒和筛面之间的碰撞效果. 在 25 组试验中, 对每个因素的每个水平值求平均值, 得到每个因素的每个水平值对应的筛分效率和物料平均运输速度, 并对每种工况筛上物各种粒径大小的颗粒进行统计, 可以得出在不同振动参数下的颗粒分布曲线.

表 4 正交试验结果

Table 4 Results of orthogonal tests

Group	Vibration frequency/Hz	Amplitude/mm	Mesh inclination/(°)	Screening efficiency/%	Average transport speed/(m·s ⁻¹)	Group	Vibration frequency/Hz	Amplitude/mm	Mesh inclination/(°)	Screening efficiency/%	Average transport speed/(m·s ⁻¹)
1	30	0.5	20	78.13	0.412	14	40	2.0	20	77.55	0.621
2	30	1.0	25	74.56	0.483	15	40	2.5	25	74.95	0.801
3	30	1.5	30	72.94	0.623	16	50	0.5	35	76.23	0.822
4	30	2.0	35	70.31	0.809	17	50	1.0	40	72.81	0.927
5	30	2.5	40	67.19	0.843	18	50	1.5	20	80.65	0.643
6	35	0.5	25	78.85	0.472	19	50	2.0	25	77.89	0.725
7	35	1.0	30	76.20	0.637	20	50	2.5	30	72.33	0.869
8	35	1.5	35	74.37	0.819	21	70	0.5	40	62.79	0.915
9	35	2.0	40	68.50	0.872	22	70	1.0	20	70.62	0.639
10	35	2.5	20	75.21	0.603	23	70	1.5	25	67.78	0.755
11	40	0.5	30	80.32	0.631	24	70	2.0	30	63.93	0.859
12	40	1.0	35	76.29	0.759	25	70	2.5	35	57.99	1.082
13	40	1.5	40	70.20	0.872						

3.2.1 振动频率对筛分效果的影响

图 8 所示为不同振动频率下的颗粒分布曲线, 揭示了在未透筛的物料中各种不同颗粒粒径的颗粒质量占该种颗粒粒径原始总质量的比值. 将颗粒曲线占比 50% 所对应的颗粒尺寸定义为分离尺寸, 其值越大, 筛分效果越好. 由 $d=1.5\text{ mm}$ 粒径界限、 $d=5.0\text{ mm}$ 粒径界限与每条颗粒分布曲线和水平坐标轴所围成的封闭区域 A 的大小代表不匹配物料的含量, 其区域越小, 则筛分效果越好.

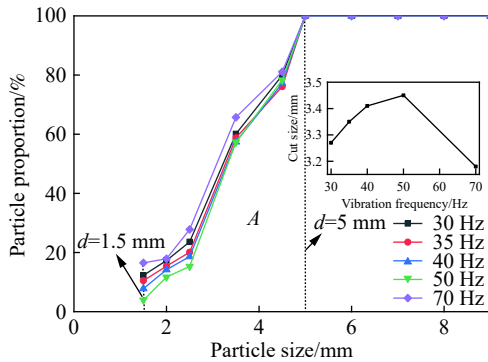


图 8 不同振动频率下颗粒分布曲线
Fig.8 Particle distribution curves at different vibration frequencies

由图 8 可以看出, 易透颗粒(粒径为 1.5、2.0 和 2.5 mm)相比于难透颗粒(粒径为 3.5 mm 和 4.5 mm)更容易透筛, 难透颗粒的含量相比易透颗粒的含量高得多. 而易透颗粒含量随振动频率的变化相比于难透颗粒随振动频率的变化更加明显, 当颗粒粒径达到 4.5 mm 时, 颗粒含量几乎不随振动频率的变化而变化, 因此可以通过改变振动频率降低易透颗粒含量, 但对于近筛网尺寸的颗粒含量几乎不起作用. 当振动频率在 30~50 Hz 时, 分布曲线右移, 分离尺寸变大且区域 A 逐渐减小, 当振动频率为 50 Hz 时, 区域 A 最小, 分离尺寸最大为 3.18 mm, 因此在该振动频率下筛分效果较好. 而当振动频率为 70 Hz 时, 区域 A 最大, 分离尺寸最小为 3.45 mm, 证明在该振动频率下筛分效果较差.

图 9 所示为振动频率对筛分效率和物料平均运输速度的影响, 由该图可以看出, 物料平均运输速度随着振动频率的增加而增加; 而筛分效率在振动频率处于 30~50 Hz 内, 随着振动频率的增加而增大, 而在 50~70 Hz 内, 随着振动频率的增加而急剧降低. 推测其可能的原因是振动频率在 30~50 Hz 时, 振动频率的增大可以增加物料在筛面上的跳动次数, 增加物料与筛面的接触机会, 使得物料的透筛概率增加, 并加快了物料的运输速度. 而振动频率继续增加, 使得物料获得的能量过

大, 物料过分活跃, 颗粒运输速度继续增加, 而颗粒振动变得比较混乱, 在仿真过程中可以看到在 70 Hz 仿真条件下大量颗粒过度飞扬, 充满整个筛箱, 这反而不利于物料的筛分, 导致了筛分效率的下降.

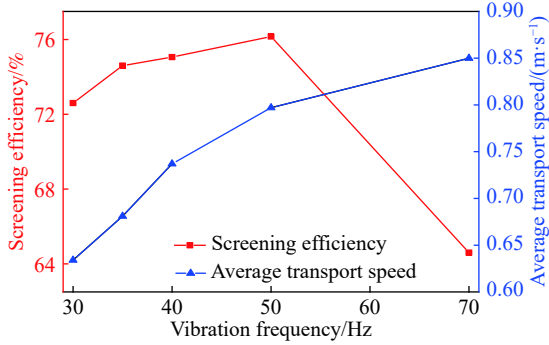


图 9 振动频率对筛分效率和物料平均运输速度的影响
Fig.9 Influence of vibration frequency on screening efficiency and average transport speed of materials

3.2.2 振幅对筛分效果的影响

图 10 所示为在不同振幅下的颗粒分布曲线, 可以发现, 1.5 mm 颗粒的含量几乎不随振幅的变化而变化, 而难筛颗粒的含量随振幅变化较明显, 表明较小的振幅对难筛颗粒有较好的筛分效果. 随着振幅的增加, 分布曲线左移, 区域 A 逐渐增加且分离尺寸变小, 当振幅为 2.5 mm 时筛分效果最差, 此时分离尺寸仅为 3.03 mm.

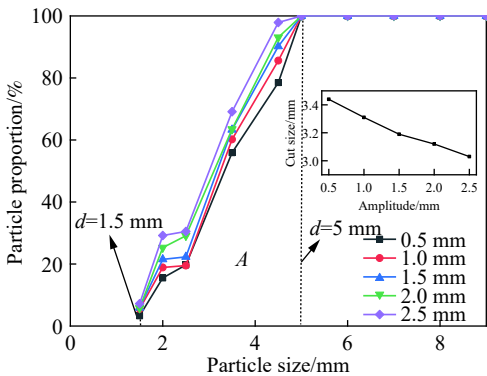


图 10 不同振幅下颗粒分布曲线
Fig.10 Particle distribution curves at different amplitudes

图 11 为振幅对筛分效率以及物料平均运输速度的影响, 由图中可知, 物料的筛分效率随着振幅的增加呈下降趋势, 而物料平均运输速度随着振幅的增加而增大, 其原因是由于随着振幅的增加, 筛面对物料的作用力变大, 物料的抛掷作用越来越明显, 物料在筛面上跳动的剧烈程度增加并且跳动幅度增大, 物料在空中的时间远大于筛面的

振动周期,筛分过程中物料与筛面接触时间减少,从而导致物料筛分效率下降而物料平均运输速度增加.

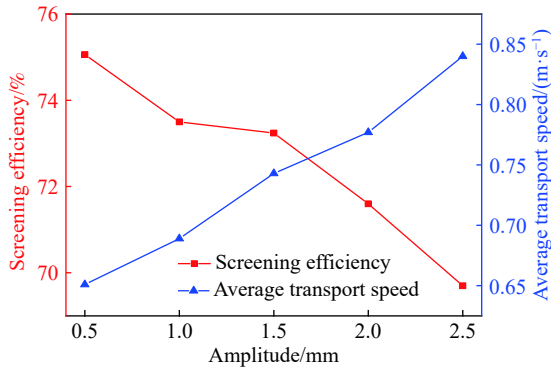


图 11 振幅对筛分效率以及物料平均运输速度的影响

Fig.11 Influence of amplitude on screening efficiency and average transport speed of materials

3.2.3 筛面倾角对筛分效果的影响

图 12 为在不同筛面倾角下的颗粒分布曲线,从该图可以看出筛面倾角对于易筛颗粒和难筛颗粒都具有较为明显的作用. 随着筛面倾角的增大,分布曲线左移,区域 A 逐渐增大且分离尺寸逐渐减小,筛分效果逐渐变差. 当筛面倾角为 20°时,筛分效果最好,此时分离尺寸为 3.45 mm.

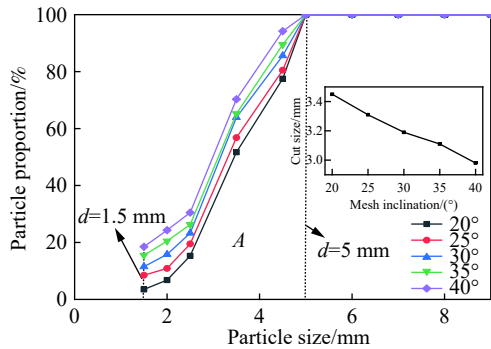


图 12 不同筛面倾角下的颗粒分布曲线

Fig.12 Particle distribution curves at different mesh inclinations

图 13 为筛面倾角对筛分效率以及物料平均运输速度的影响,由该图曲线变化规律可以看出,筛分效率随着筛面倾角的增大逐渐减小,而物料平均运输速度随着筛面倾角的增大而增加. 这是由于随着筛面倾角的增大,物料沿筛面长度方向的重力分量和抛掷强度随之增加,筛上物料能够快速流向筛面末端. 但筛面倾角的增大使得颗粒沿筛面长度的下滑速度过大并且筛孔的有效面积减少,物料在筛面上运动速度增大,降低了颗粒的透筛概率,从而使筛分效率降低.

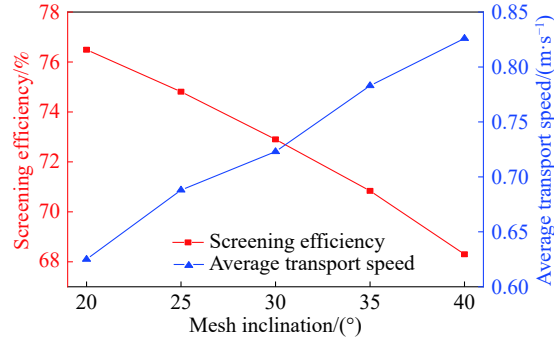


图 13 筛面倾角对筛分效率以及物料平均运输速度的影响

Fig.13 Influence of mesh inclination on screening efficiency and average transport speed of materials

通过正交试验的结果得到振动参数对筛分效率影响的显著性排名为: 振动频率>筛面倾角>振幅,而对物料平均运输速度影响的显著性排名为: 筛面倾角>振动频率>振幅.

4 振动参数的优化设计

筛分效率作为一种筛分效果的评定方法,应用简便,评定效果好,在业界得到了广泛使用. 影响筛分效率的因素很多,包括振动频率、振幅和筛面倾角等参数. 而这些参数的变化,对筛分效率的影响是一个复杂的过程^[25]. 如何配置这些参数使得筛分效率满足生产要求就显得重要且实用,因此可以考虑对正交试验表中数据进行多元非线性回归分析,以建立筛分效率与振动参数之间的数学模型,利用这个数学模型就可以对振动参数进行优化.

振动筛筛分效率与振动参数(振动频率、振幅和筛面倾角)存在明显的非线性函数关系,将筛分效率用 S 表示,振动频率、振幅和筛面倾角分别用 s_1, s_2, s_3 表示. 为了提高方程的拟合精度采用二次多项式,并考虑振动参数之间的组合也会对振动筛的筛分效率产生影响,则假设拟合方程为:

$$S = a_0 + a_1 s_1 + a_2 s_2 + a_3 s_3 + a_4 s_1 s_2 + a_5 s_1 s_3 + a_6 s_2 s_3 + a_7 s_1^2 + a_8 s_2^2 + a_9 s_3^2 \quad (2)$$

对正交试验表中的数据进行多元非线性拟合,最后得到的评价结果如表 5 所示.

表 5 回归系数评价表

Table 5 Regression coefficient evaluations			
Correlation coefficient, r^2	F value	Probability corresponding to F value, P	Variance of residuals
0.9841	102.8610	7.7×10^{-11}	0.8132

从表 5 可知, $r^2=0.9841$ 与 1 非常接近,说明回归方程显著;且 P 值远小于显著性水平($\alpha=0.05$),说

明回归模型成立.

因此振动参数与振动筛筛分效率的拟合函数表达式为:

$$\begin{aligned} S = & 37.19654 + 1.89509s_1 + 0.36239s_2 + 0.39388s_3 - \\ & 0.07703s_1s_2 - 0.00115s_1s_3 + 0.08572s_2s_3 - \\ & 0.01933s_1^2 - 0.73533s_2^2 - 0.01495s_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

并将第 i 项数据的拟合误差定义为:

$$\varepsilon_i = \frac{S_i - \eta_i}{\eta_i}, i = 1, 2, \dots, 25 \quad (4)$$

其中, ε_i 为第 i 项数据的拟合误差; S_i 为第 i 项数据的拟合函数值; η_i 为第 i 项数据的仿真值. 得到 25 组数据的误差如图 14 所示.

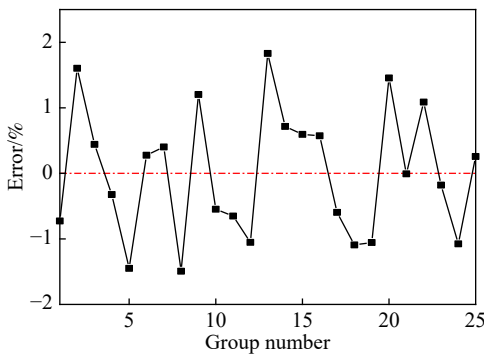


图 14 各项数据的拟合误差

Fig.14 Fitting error of each group of data

从图 14 可以看出, 最大拟合误差值不超过 2%, 仅为 1.83%, 说明各组数据的拟合精确度较高, 得到的筛分效率拟合函数表达式可以准确地预测该筛分模型的筛分效率.

图 15 为在不同的振动参数组合下筛分效率的响应面, 从图 15 可以看出各个振动参数之间存在不同程度的相互作用. 图 15(a) 为振动频率和筛面倾角对筛分效率的响应图, 可以看出振动频率相对于筛面倾角对筛分效率的影响更加明显. 与此类似, 从图 15(b) 可以看出振动频率比振幅对筛分效率的影响更大, 图 15(c) 表明筛面倾角相比于振幅对筛分效率影响程度更大, 这与正交试验的分析结果是一致的, 也验证了该拟合模型能够较好地反映各振动参数对筛分效率的影响.

根据筛分效率的数学模型, 对振动参数进行了优化模拟试验. 由之前正交试验分析可知, 提高振动频率、振幅和筛面倾角均可提高物料的平均运输速度, 进而提高处理量. 因此, 为了同时保证较高的筛分效率和一定的运输速度, 利用遍历法得到所有筛分效率大于 81% 的振动参数组合然后依次选取筛面倾角、振动频率和振幅中最大一组为最优参数. 最终得到的优化结果如表 6 所示.

针对于所研究的高频振网筛筛分干燥物料时, 由优化结果可知, 为了达到良好的筛分效果,

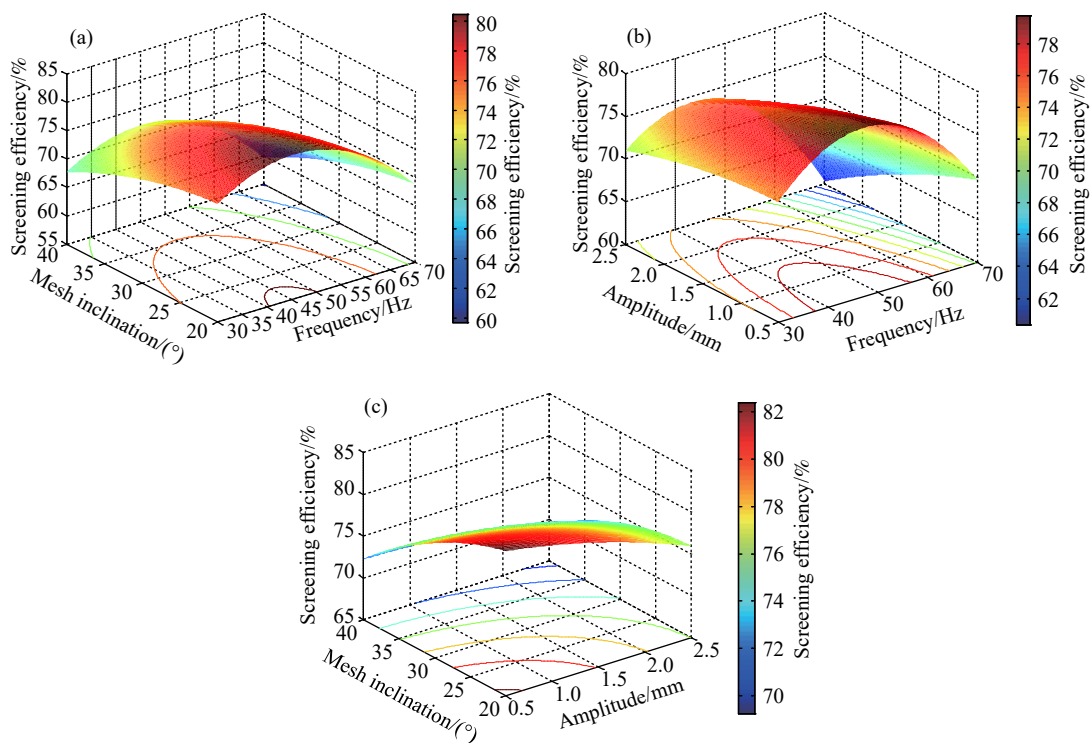


图 15 不同振动参数组合下的筛分效率响应面

Fig.15 Response surfaces of screening efficiencies for different combinations of vibration parameters

表 6 参数优化结果

Table 6 Parameter optimization results

Vibration frequency/Hz	Amplitude/mm	Mesh inclination/(°)	Theoretical screening efficiency/%	Screening efficiency in simulation/%	Average transport speed in simulation/(m·s ⁻¹)
51	0.6	27	81.01	81.49	0.732

当要求筛分效率大于 81% 并且保证一定的物料平均运输速度时, 较为理想的振动参数设置如下: 振动频率为 51 Hz, 振幅为 0.6 mm, 筛面倾角为 27°.

5 结论

(1)对于高频振网筛, 用仿真和实验相结合的方法验证了三维离散单元法能够较为准确地反映其筛分规律, 证明了“高频+小振幅”筛分模式在处理细物料上更具优势, 为研究高频振网筛物料的运动特性提供了方便、可信赖的研究方法.

(2)用正交试验设计理论分析了振动参数对颗粒分区曲线、筛分效率和物料平均运输速度的影响, 揭示了振动参数对筛分效果的影响规律及其原因.

(3)对振动筛筛分效率与振动参数之间的关系进行多元非线性回归, 拟合出了振动筛筛分效率与振动参数之间的关系式, 并分析了不同的振动参数对筛分效率的影响优先级.

(4)针对高频振网筛进行了参数优化, 在满足筛分效率大于 81% 并且保证一定的物料平均运输速度时比较理想的优化参数是: 振动频率为 51 Hz, 振幅为 0.6 mm, 筛面倾角为 27°.

参 考 文 献

[1] Zhao H S, Wang Z N. Current status and development trend of high frequency vibrating screen at home and abroad. *Metal Mine*, 2009, 44(11): 105
(赵环帅, 王振年. 国内外高频振动筛的现状与发展趋势. *金属矿山*, 2009, 44(11): 105)

[2] Wang X W. Simulation of single-shaft vibrating screen and movement of particle on the screen surface. *J China Coal Soc*, 2013, 38(11): 2067
(王新文. 单轴振动筛运动模拟及筛面上颗粒的运动. *煤炭学报*, 2013, 38(11): 2067)

[3] Fraige F Y, Langston P A, Chen G Z. Distinct element modelling of cubic particle packing and flow. *Powder Technol*, 2008, 186(3): 224

[4] Guo Y X, Li H Y, Huang J H, et al. Effects of the key-factors on vibratory screening in asphalt mixing plants. *Constr Mach Equip*, 2017, 48(10): 13
(郭英训, 李怀勇, 黄建华, 等. 沥青拌和站振动筛分关键因子影响规律研究. *工程机械*, 2017, 48(10): 13)

[5] 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)

[6] 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

[7] Zhao L L, Zhao Y M, Liu C S, et al. Simulation of the screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM. *Min Sci Technol*, 2011, 21(5): 677

[8] Cleary P W. The effect of particle shape on simple shear flows. *Powder Technol*, 2008, 179(3): 144

[9] Liu Y L, Su J H, Zhao X Q, et al. The study of vibrating screen efficiency based on discrete element method. *J Northeast Norm Univ*, 2018, 50(4): 78
(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. *东北师大学报*, 2018, 50(4): 78)

[10] Wang Z Y, Ren N, Wu W B, et al. Research on screening results of reciprocating vibration screen based on discrete element method. *Agric Mech Res*, 2016(1): 33
(王中营, 任宁, 武文斌, 等. 基于离散元法的往复振动筛筛分效果研究. *农机化研究*, 2016(1): 33)

[11] Wang H, Li J, Jiang H S, et al. Virtual screening of a banana screen based on the 3D discrete element method. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 36(12): 1583
(王宏, 李珺, 江海深, 等. 基于三维离散元法的等厚筛虚拟筛分. *北京科技大学学报*, 2014, 36(12): 1583)

[12] Harzanagh A A, Orhan E C, Ergun S L. Discrete element modelling of vibrating screens. *Miner Eng*, 2018, 121: 107

[13] Elskamp F, Emden H K, Henning M, et al. Benchmarking of process models for continuous screening based on discrete element simulations. *Miner Eng*, 2015, 83: 78

[14] Silva B Be, Cunha E R da, Carvalho R M de, et al. Modeling and simulation of green iron ore pellet classification in a single deck roller screen using the discrete element method. *Powder Technol*, 2018, 332: 359

[15] Wang G F, Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Min Sci Technol (China)*, 2011, 21(3): 451

[16] Wang N, Zhao J K, Li M H. Study on influence factors of sieving efficiency of vibrating screen. *Food Process*, 2018, 43(2): 59
(王娜, 赵俊凯, 李孟红. 振动筛筛分效率的影响因素研究. *粮食加工*, 2018, 43(2): 59)

[17] Liu C S, Wang H, Zhao Y M, et al. DEM simulation of particle

- flow on a single deck banana screen. *Int J Min Sci Technol*, 2013, 23(2): 273
- [18] 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
- [19] Zhang X, Wu B, Niu L K, et al. Dynamic characteristics of two-way coupling between flip-flow screen and particles based on DEM. *J China Coal Soc*, 2019, 44(6): 1930
(张新, 武兵, 牛荫楷, 等. 基于DEM弛张筛面与颗粒群双向耦合的动态特性. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1930)
- [20] Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: a review of major applications and findings. *Chem Eng Sci*, 2008, 63(23): 5728
- [21] Zhu H P, Zhou Y, Yang R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments. *Chem Eng Sci*, 2007, 62(13): 3378
- [22] Zhong W Q, Yu A B, Liu X J, et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications. *Powder Technol*, 2016, 302: 108
- [23] Majid M, Walzel P. Convection and segregation in vertically vibrated granular beds. *Powder Technol*, 2009, 192(3): 311
- [24] Qiao J P, Duan C L, Jiang H S, et al. Study on 6 mm screening of thickness screen with variable amplitude. *Coal Technol*, 2017, 36(3): 251
(乔金鹏, 段晨龙, 江海深, 等. 变振幅等厚筛6 mm筛分试验研究. 煤炭技术, 2017, 36(3): 251)
- [25] Wang C Q, Ran L H. Some major parameters effecting on performance of linear screen. *Coal Pre Technol*, 2006(2): 13
(王翠青, 冉隆河. 影响直线振动筛筛分效果的几个重要参数. 选煤技术, 2006(2): 13)