

双频振动筛动力学特性与筛分性能研究*

陈 兵, 刘 涵, 张晁辉, 张杨坤, 尹忠俊

(北京科技大学机械工程学院 北京, 100080)

摘要 针对传统单频驱动振动筛难以同时兼顾筛分效率与处理量,且筛分含水物料时易发生堵孔、糊筛,导致筛分效率下降、单位物料处理功耗上升的问题,基于倍频自同步原理与动力学-离散元耦合仿真技术,提出了双频振动筛动力学特性与筛分性能的系统分析方法。首先,建立双频振动筛动力学模型,利用拉格朗日方程推导系统运动微分方程并求得稳态解,研究了双电机频率比、初始相位差角及激振力大小对筛体运动轨迹的影响规律;其次,建立多体动力学软件 ADAMS 与离散元软件 EDEM 耦合的“物料-筛机”多物理场仿真模型,对双频振动筛筛分过程进行定量分析;然后,系统研究了激振频率、高/低频端振幅及筛面倾角对物料输送速度、筛分效率和堵孔颗粒数的影响;最后,搭建双频振动筛试验平台对理论与仿真结果进行验证。结果表明:两电机频率比为 1:2 时,筛体可实现内“8”字形运动轨迹,初始相位差角主要改变内“8”字的位置,高频端偏心质量减小至 1.5 kg 时,内“8”字形基本消失;低频频率由 14 Hz 增至 16 Hz 时,筛分效率由 80% 提高到 86%,频率继续增大,筛分效率逐渐降低;高频端振幅由 3 mm 增至 7 mm 时,堵孔颗粒个数由 156 减少至 18;低频端振幅增至 6 mm 时,筛分效率最高达 91.3%;增大筛面倾角可提高物料输送速度并减少堵孔,但筛分效率明显下降。台架试验所得运动轨迹、筛下物料分布及堵孔数量与仿真结果吻合良好,验证了所建模型与仿真方法的有效性,可为双频振动筛的设计与工艺参数优化提供参考。

关键词 振动筛;双频;耦合分析;筛分效率;离散元法
中图分类号 TH113.1;TD452

0 引言

振动筛作为工业现场中的重要设备,其在矿山、石化及冶金等行业中有广泛的应用^[1-3]。随着生产技术迅猛发展与生产效率快速提高,对各类振动筛分装备性能提出了更高的要求,主要集中在对其效率以及设备的使用寿命方面^[4-5]。目前,市场上主要的振动筛主要由单一振动频率驱动,根据其运动轨迹可以分为直线、圆、椭圆等较为标准轨迹,根据不同物料情况可以选择不同轨迹振动筛以达到较优的筛分效果^[6-8]。由于无法同时满足较高筛分效率和较高的筛分量,因此许多学者也致力于研发更高性能的新型振动筛分装备。

为了增强筛分性能,研究人员一般会提高振动筛的振动强度或增大规模,但该措施会引起振动筛寿命降低以及结构强度下降等问题。随着对振动筛筛分性能研究的深入,不同激振器以不同频率运行的多频振动筛受到了广泛关注^[9]。传统的振动筛在筛分一些特定物料(例如含水量较高煤炭)时,容易在筛面上形成颗粒堵孔与粘稠现象^[10],在筛分时进

料端处理量大,出料端较小,导致筛分效率较低。一些学者研究概率筛分和等厚筛分法来改善上述问题,这会使整个筛机结构变复杂,对应成本也上升。近年来提出的一种利用倍频同步原理设计的双频振动筛受到广泛关注,其由两种频率合成驱动,能够较好地与所筛分材料分布特征相适应,且能改善物料堵孔问题。

Modrzewski 等^[11-12]设计了 3 种不同类型的振动筛,并研究矿物废弃物的分离特性。贺朝霞等^[13]建立了振动筛动力学与颗粒动力学的耦合分析模型,提高了仿真模型的精度,研究了物料冲击力随振动筛主要参数的变化规律。闫宏伟等^[14]分析了振动频率、振动幅度和筛面倾角对筛分性能的影响,得到最佳振动参数组,并搭建试验平台进行验证。王立军等^[15]对平面往复、三移动一摆动、三移动两转动筛面筛分性能和颗粒分散程度进行分析,证明了用振动平板对颗粒群分散度研究的可行性。孟彩茹^[16]对于所设计的双频振动筛样机进行了质心运动轨迹的仿真,并完成了筛分效率相关影响因素的正交试验,得出了采用双频激振的振动筛可以有效地提高筛分效率和生产效率的

* 国家重点研发计划资助项目(2023YFB4706905)

收稿日期:2024-01-11;修回日期:2024-03-02

结论。Hou等^[17]对三励磁电机激振的双频振动筛筛面轨迹进行了研究,发现偏心质量矩比和初始相位角差对筛面运动轨迹和振动幅度的影响较大,而高频励磁电机的安装位置对筛箱表面轨迹的影响较小。Zou等^[18]提出了倍频激励双转子自同步振动系统,通过数值计算发现系统的倍频同步能力指数随安装距离的增加而接近于零值附近。姚运仕等^[19]提出了由两个或多个合成器组成的多频合成振动筛选方法,对多频复合振动筛进行了理论分析和现场试验,并设计了正交试验和对比试验,发现双频相位差是影响筛分效率的最显著因素。李江^[20]利用多物理场耦合研究了低碳合金钢齿轮渗碳淬火过程,对渗碳层性能进行了有效预测。陈兵等^[21]采用离散元、多体动力学和有限元耦合方法,研究了物料冲击下椭圆振动筛的筛分性能及结构响应,说明振动参数会同时影响筛分效率、物料运输和筛体受力。

上述研究得出双频振动筛运行轨迹与同步机理等重要结论,但在物料筛分过程方面研究不足。本研究基于以上研究成果及离散元方法的快速发展,通过动力学与离散元耦合方法进行双频振动筛筛分过程性能研究,对双频振动筛设计具有指导意义,也将推动双频振动筛在工业中广泛使用。

1 双频振动筛力学建模与求解

双频振动筛力学模型如图1所示,由筛箱、支撑弹簧及两组激振装置组成。筛箱与支撑底座之间通过弹簧连接,筛箱质量为 m_0 ,4个弹簧沿3个自由度的刚度系数分别为 k_x, k_y, k_ψ ,该系数为弹簧在受力时抵抗弹性变形的能力;阻尼系数分别为 c_x, c_y, c_ψ ,该系数为弹簧在拉伸、压缩过程中在各自自由度产生的能量消耗。两激振系统分别安装在筛箱两侧,其中一个激振系统为高频电机带动偏心质量块以较高转速转动,另一激振系统为低频电机带动偏心块以较低转速转动,其转速分别为 $\dot{\varphi}_i (i=1, 2)$,偏心质量为 m_i ,偏心距均为 r ,当偏心块转动时即可产生绕转动轴旋转的激振力矢量。设箱体运动的摆动角为 ψ ,第 i 个激振电机轴心到筛箱质心的距离为 $l_i (i=1, 2)$,该轴心与质心连线相对动坐标系 x 轴正向的夹角为 β_i 。坐标变换如图2所示。激振系统在动坐标系 $x'O'y'$ 中的位置可通过坐标变换得到其在固定坐标系 xOy 中的位置。

固定在筛箱上的动坐标系为 $x''O''y''$,筛箱上的移动坐标系 $x'O'y'$ 通过绕质心转动动坐标系获得。第 i 个转子的固定坐标系 Φ_i 与第 i 个转子的动坐标

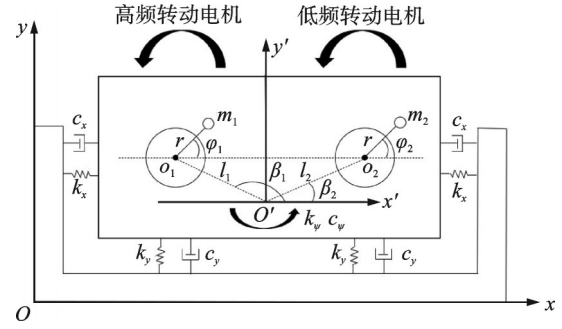


图1 双频振动筛力学模型

Fig.1 Mechanical model of dual frequency vibrating screen

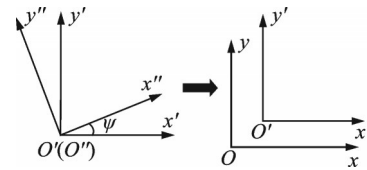


图2 坐标变换

Fig.2 Coordinate transformation

系 Φ_i'' 之间可通过矩阵转换方程得到。矩阵转换方程为

$$\begin{cases} \Phi_i = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + K \Phi_i'' \\ K = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T$ 为质心在 x 与 y 方向的位移幅值矩阵; K 为变换矩阵。

系统运动时,高频转子和低频转子在动坐标系 $x''O''y''$ 中的表达式为

$$\begin{cases} \Phi_1'' = \begin{bmatrix} l_1 \cos \beta_1 + r \cos \varphi_1 \\ l_1 \sin \beta_1 + r \sin \varphi_1 \end{bmatrix} \\ \Phi_2'' = \begin{bmatrix} l_2 \cos \beta_2 + r \cos \varphi_2 \\ l_2 \sin \beta_2 + r \sin \varphi_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)和(2)计算得到两个转子在 xOy 中的固定坐标为

$$\begin{cases} \Phi_1 = \begin{bmatrix} x + l_1 \cos(\beta_1 + \psi) + r \cos(\varphi_1 + \psi) \\ y + l_1 \sin(\beta_1 + \psi) + r \sin(\varphi_1 + \psi) \end{bmatrix} \\ \Phi_2 = \begin{bmatrix} x + l_2 \cos(\beta_2 + \psi) + r \cos(\varphi_2 + \psi) \\ y + l_2 \sin(\beta_2 + \psi) + r \sin(\varphi_2 + \psi) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

整个系统的动能为

$$E = \frac{1}{2} m_0 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_0 \dot{y}^2 + \frac{1}{2} J_m \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 J_i \dot{\varphi}_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 m_i \dot{\Phi}_i^T \dot{\Phi}_i \quad (4)$$

其中: J_m 为整个筛箱的转动惯量。

如果筛箱在一个平衡位置作周期性同步振动,且在该位置下重力与弹簧的作用力处于平衡状态,则将重力势能的影响忽略。系统总势能 U 可表示为弹性势能,即

$$U = \frac{1}{2} k_x x^2 + \frac{1}{2} k_y y^2 + \frac{1}{2} k_\psi \psi^2 \quad (5)$$

电机在转动过程中会产生摩擦损耗,设其摩擦因数为 f_1, f_2 , 则系统总耗散能 D 为弹簧与电机在工作过程中产生的损耗,即

$$D = \frac{1}{2} f_x \dot{x}^2 + \frac{1}{2} f_y \dot{y}^2 + \frac{1}{2} f_\psi \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} f_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} f_2 \dot{\varphi}_2^2 \quad (6)$$

其中: f_x, f_y, f_ψ 分别为筛箱在 x, y 和 ψ 自由度上的等效阻尼系数, 支承弹簧系统在各自自由度上存在等效黏性阻尼。

双频振动筛作为一个完善的系统, 设其坐标矩阵 $p = [x \ y \ \psi \ \varphi_1 \ \varphi_2]$, 其力矩阵 $P = [0 \ 0 \ 0 \ M_{e1} - R_{e1} \ M_{e2} - R_{e2}]$, 其中, $M_{ei} - R_{ei}$ 为电机 i 的电磁转矩减去其阻尼转矩。使用广义拉格朗日方程对系统进行力学建模^[22], 即

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{p}} \right) - \frac{\partial (E - U)}{\partial p} + \frac{\partial D}{\partial \dot{p}} = P \quad (7)$$

在实际的振动筛分设备中, 由于偏心块质量相较于筛箱很小, 筛箱的摆角 $\psi \ll 1$, 因此由于电机安装误差产生的耦合惯性矩忽略不计, 整个系统看作多自由度系统。整个系统的质量 $M = m_0 + m_1 + m_2$, 将式(4)~(6)代入式(7), 得到双频振动筛的运动微分方程为

$$\begin{cases} M\ddot{x} + f_x \dot{x} + k_x x = \sum_{i=1}^2 m_i r (\dot{\varphi}_i^2 \cos \varphi_i + \ddot{\varphi}_i \sin \varphi_i) \\ M\ddot{y} + f_y \dot{y} + k_y y = \sum_{i=1}^2 m_i r (\dot{\varphi}_i^2 \sin \varphi_i + \ddot{\varphi}_i \cos \varphi_i) \\ J_m \ddot{\psi} + f_\psi \dot{\psi} + k_\psi \psi = \sum_{i=1}^2 m_i r l_i [\dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_i - \beta_i) - \ddot{\varphi}_i \cos(\varphi_i - \beta_i)] \\ J_1 \ddot{\varphi}_1 = M_{e1} - R_{e1} + m_1 r [\ddot{x} \sin \varphi_1 - \ddot{y} \cos \varphi_1 - l_1 \ddot{\psi} \cos(\varphi_1 - \beta_1) - l_1 \dot{\psi}^2 \sin(\varphi_1 - \beta_1)] \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = M_{e2} - R_{e2} + m_2 r [\ddot{x} \sin \varphi_2 - \ddot{y} \cos \varphi_2 - l_2 \ddot{\psi} \cos(\varphi_2 - \beta_2) - l_2 \dot{\psi}^2 \sin(\varphi_2 - \beta_2)] \end{cases} \quad (8)$$

式(8)为双频振动筛分系统各参数的动力学耦合方程, 当两偏心块以各自的额定转速同步转动时,

激励电机作为振动系统驱动源也分别以角速度 $\dot{\varphi}_1$ 和 $\dot{\varphi}_2$ 运行。在这种情况下, 电机转动的角速度在很小的范围内波动, 可以忽略对运动微分方程中角加速度的影响。在 x, y 和 ψ 自由度上, 系统振动微分方程为

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\xi_x \omega_x \dot{x} + \omega_x^2 x = \eta_2 \eta_{12} r \dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1 + \eta_2 r \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2 \\ \ddot{y} + 2\xi_y \omega_y \dot{y} + \omega_y^2 y = \eta_2 \eta_{12} r \dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1 + \eta_2 r \dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2 \\ \ddot{\psi} + 2\xi_\psi \omega_\psi \dot{\psi} + \omega_\psi^2 \psi = \eta_2 \eta_{12} r_0 r_{l1} \dot{\varphi}_1^2 \times \\ \sin(\varphi_1 - \beta_1) + \eta_2 r_0 r_{l2} \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_2 - \beta_2) \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\xi_x = f_x / (2\sqrt{k_x M})$, $\xi_y = f_y / (2\sqrt{k_y M})$, $\xi_\psi = f_\psi / (2\sqrt{k_\psi J_m})$ 为系统黏性阻尼系数; $\omega_x = \sqrt{k_x / M}$, $\omega_y = \sqrt{k_y / M}$, $\omega_\psi = \sqrt{k_\psi / J_m}$ 为系统固有频率; $\eta_{12} = m_1 / m_2$; $\eta_2 = m_2 / M$; $\lambda_x = \omega_x / \omega_m$; $\lambda_y = \omega_y / \omega_m$; $\lambda_\psi = \omega_\psi / \omega_m$; ω_m 为低频频率。

求得振动方程的解为

$$\begin{cases} x = -\eta_2 \eta_{12} r \rho_{x1} \cos(\varphi_1 + \gamma_{x1}) - \eta_2 r \rho_{x2} \cos(\varphi_2 + \gamma_{x2}) \\ y = -\eta_2 \eta_{12} r \rho_{y1} \sin(\varphi_1 + \gamma_{y1}) - \eta_2 r \rho_{y2} \sin(\varphi_2 + \gamma_{y2}) \\ \psi = -\eta_2 \eta_{12} r_0 \rho_{\psi 1} \sin(\varphi_1 - \beta_1 + \gamma_{\psi 1}) - \eta_2 r_0 r_{l2} \rho_{\psi 2} \sin(\varphi_2 - \beta_2 + \gamma_{\psi 2}) \\ \rho_{c1} = 1 / \sqrt{(1 - \lambda_c^2 / 4)^2 + (\xi_c \lambda_c)^2} \\ \rho_{c2} = 1 / \sqrt{(1 - \lambda_c^2)^2 + (2\xi_c \lambda_c)^2} \\ \gamma_{c1} = \arctan \frac{\xi_c \lambda_c}{1 - \lambda_c^2 / 4} \\ \gamma_{c2} = \arctan \frac{2\xi_c \lambda_c}{1 - \lambda_c^2} \end{cases} \quad (10)$$

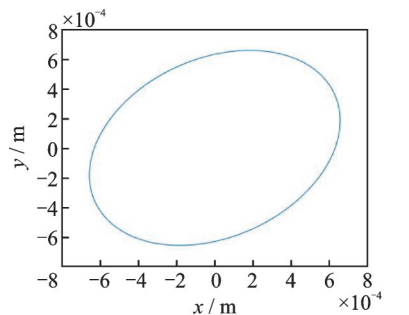
其中: ρ_{c1}, ρ_{c2} 分别为2个激振器沿不同方向的振幅系数; γ_{c1}, γ_{c2} 分别为2个激振器沿不同方向的滞后相位角。

对振动系统参数进行选取, 筛机相关参数如下: 筛箱质量 $m_0 = 50 \text{ kg}$, 两偏心块质量 $m_1 = 3 \text{ kg}$, $m_2 = 3 \text{ kg}$, 偏心距 $r = 0.15 \text{ m}$, $k_x = 2500 \text{ N/m}$, $k_y = 8000 \text{ N/m}$, 筛箱绕质心转动的等效转动刚度 $k_\psi = 200 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$, $c_x = 200 \text{ N/(m}\cdot\text{s}^{-1})$, $c_y = 200 \text{ N/(m}\cdot\text{s}^{-1})$, 转动方向的等效阻尼 $c_\psi = 300 \text{ N/(m}\cdot\text{s}^{-1})$, 两组偏心块之间初始相位差均为 0° 。

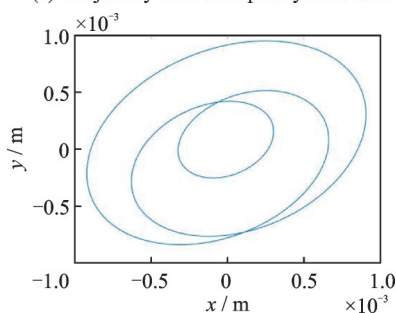
1.1 电机频率比对轨迹影响

分析不同频率比对筛体质心轨迹的影响。频率

比为1:1和1:1.5轨迹如图3所示。2台电机转动频率均设为14 Hz(频率比为1:1),将上述参数代入式(10),得到筛体质心轨迹如图3(a)所示。由于两激振力的合力作用线与筛箱质心不重合,故筛体质心轨迹呈椭圆形。当2台电机旋转方向相同时,转动频率为14 Hz与21 Hz(频率比为1:1.5),其运动轨迹如图3(b)所示。



(a) 频率比为1:1轨迹
(a) Trajectory with a frequency ratio of 1:1



(b) 频率比为1:1.5轨迹
(b) Trajectory with a frequency ratio of 1:1.5

图3 频率比为1:1和1:1.5轨迹

Fig.3 Trajectories with frequency ratios of 1:1 and 1:1.5

当2台电机旋转方向相同且转动频率为14 Hz与28 Hz时,其频率比为1:2轨迹如图4所示。频率比为1:3和1:4轨迹如图5所示。

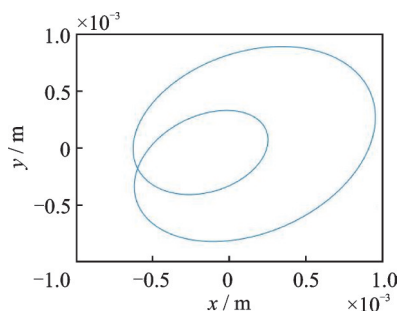
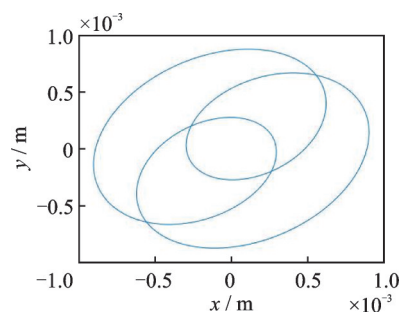


图4 频率比为1:2轨迹

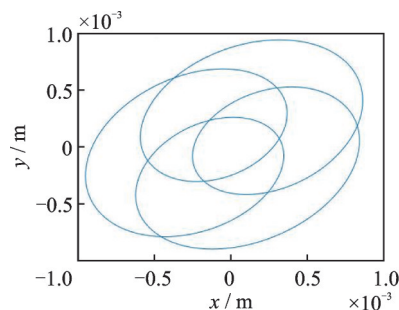
Fig.4 Trajectory with a frequency ratio of 1:2

从图3~5可以看出,2台电机在不同频率比下筛体质心轨迹不同,当频率比为1:1.5、1:2、1:3时,筛体实现的轨迹较为复杂,在实际工作过程中对筛体和弹簧系统强度要求较高,实现较为困难。当频率比为1:2时,可以实现内“8”形轨迹,能实现双频振



(a) 频率比为1:3轨迹

(a) Trajectory with a frequency ratio of 1:3



(b) 频率比为1:4轨迹

(b) Trajectory with a frequency ratio of 1:4

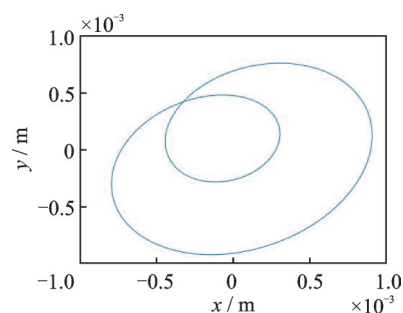
图5 频率比为1:3和1:4轨迹

Fig.5 Trajectories with frequency ratios of 1:3 and 1:4

动特殊运动,因此重点研究频率比为1:2时的轨迹。

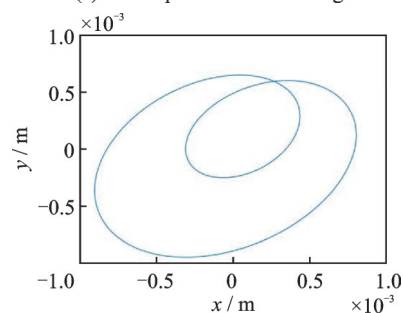
1.2 初始相位差角对轨迹影响

在激振频率比为1:2时,不同初始相位对轨迹的影响如图6所示。可以看出,在不同初始相位差角下,筛体有不同的运动轨迹,主要会对内“8”位置产生影响。



(a) 初始相位差角为30°

(a) Initial phase difference angle 30°



(b) 初始相位差角为60°

(b) Initial phase difference angle 60°

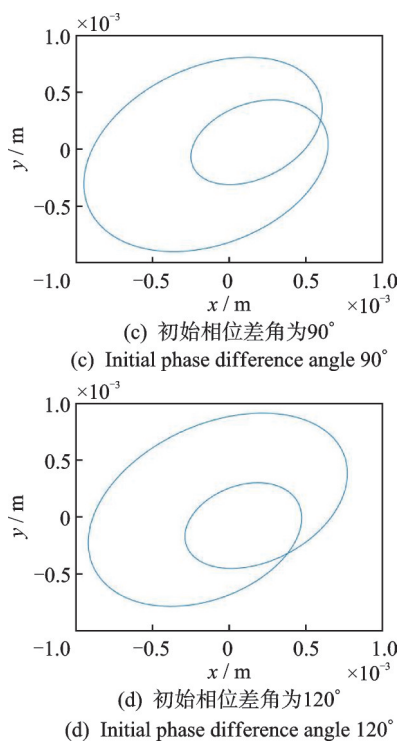


图6 不同初始相位对轨迹影响

Fig.6 Influence of different initial phases on trajectory

1.3 激振力大小对轨迹影响

激振力大小与偏心块质量和转速呈正相关,偏心质量和转速越大,则激振力越大。不同偏心质量对轨迹影响如图7所示。图7(a)为两个偏心质量均为3 kg的运动轨迹;减小 m_1 的质量至2.5 kg,保持 m_2 质量不变,其轨迹如图7(b)所示;减小 m_1 质量至2 kg,保持 m_2 质量不变,其轨迹如图7(c)所示;继续

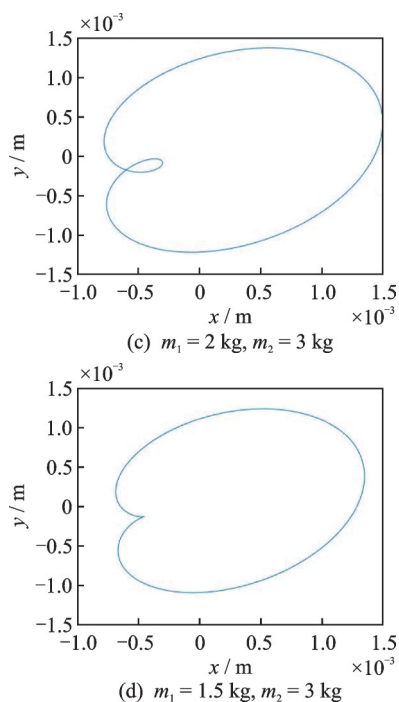
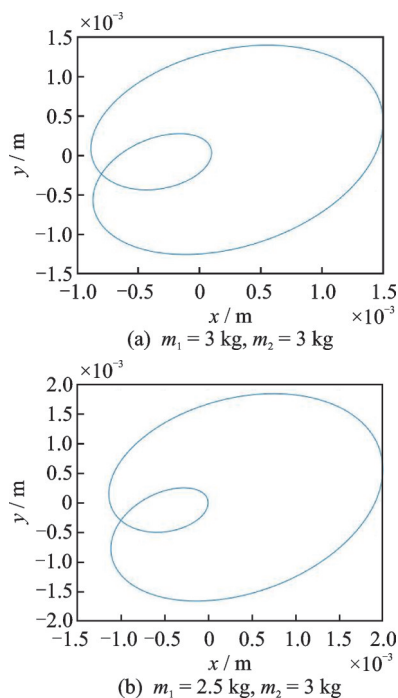


图7 不同偏心质量对轨迹影响

Fig.7 The influence of different eccentric masses on trajectory

减小 m_1 质量至1.5 kg,保持 m_2 质量不变,其轨迹如图7(d)所示。可以看出,随着高频端偏心质量 m_1 减小,其轨迹中内“8”形逐渐减小,当质量减小到1.5 kg时,内“8”形状已不太明显。

2 双频振动筛筛分模拟分析

双频振动筛三维模型如图8所示。将筛箱模型进行简化,两激振电机连接偏心块安置在筛箱上,激振电机通过直角架承载。将三维模型分别导入软件ADAMS与EDEM中,得到双频振动筛离散元模型如图9所示。

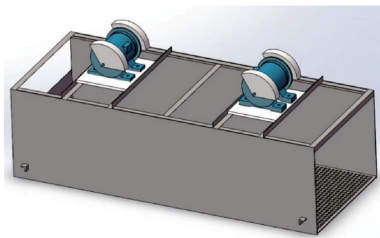


图8 双频振动筛三维模型

Fig.8 3D model of dual frequency vibrating screen

研究双频振动筛在不同振动参数下筛箱运行状态,以及不同物料颗粒在筛分过程中分层透筛情况和运动规律,以分析各因素对筛分过程的影响规律。由于理论计算难以实现该目的,因此通过动力学与离散元仿真耦合的方法对筛分过程进行仿真计算。仿真中筛分物料的粒径分布如表1所示。

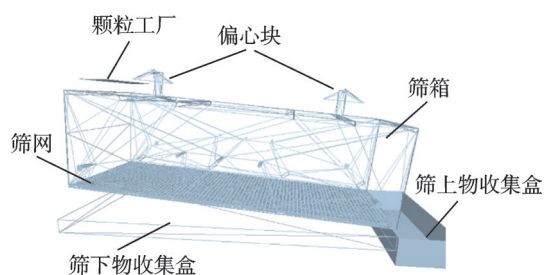


图9 双频振动筛离散元模型

Fig.9 Discrete element model of dual frequency vibrating screen

表1 物料的粒径分布

Tab.1 Particle size distribution

粒径/mm	入料速度/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	颗粒占比/%
4	0.5	9.0
6	0.6	11.0
8	0.7	12.6
10	0.9	16.2
10.2	1.0	18.0
12	1.1	19.8
14	1.2	21.6

筛分完成后保持筛箱继续运动一段时间,待物料颗粒与筛面之间不存在相对运动后,筛分完成后筛面颗粒堵孔如图10所示。颗粒堵住筛孔将无法实现透筛,导致筛分效率下降;当堵孔严重时,筛上物质量会增加,这会对筛体强度及筛体寿命造成不利影响;当堵筛严重时需要停机进行人工清理,加大工人劳动强度。由于颗粒堵孔不利于筛分过程,因此需要对颗粒堵孔行为进行研究。

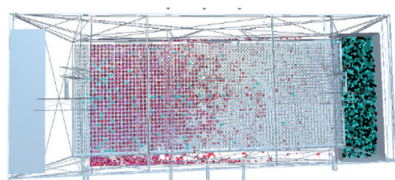


图10 筛分完成后筛面颗粒堵孔

Fig.10 Screen surface blockage diagram after screening

2.1 频率对筛分过程影响

频率作为振动筛的关键参数之一。频率不同,颗粒在筛面上的运动状态各不相同,频率越快,物料跳动次数越多,与筛面接触的机会就越大,频率与筛分效果有着密切联系。为探究双频振动筛频率大小对筛分过程的影响,设置两电机端振幅均为4 mm、倾角为 6° ,取低频频率分别为14、16、18、20和22 Hz,频率比为2(高频频率为低频频率的2倍),提

取各项指标。频率对运输速度的影响如图11所示。频率对筛分效率和堵孔数的影响如图12所示。

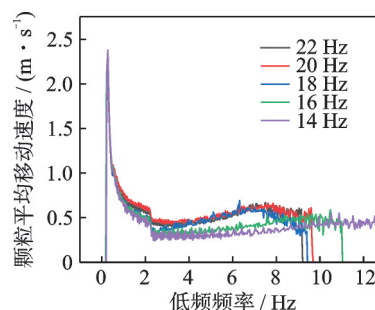


图11 频率对运输速度的影响

Fig.11 The impact of frequency transportation speed

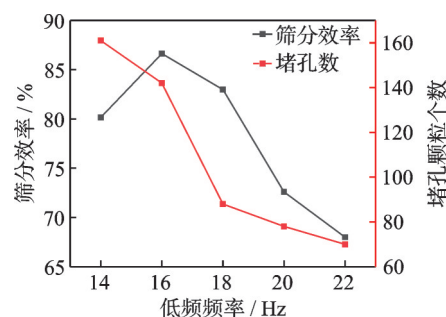


图12 频率对筛分效率和堵孔数的影响

Fig.12 Effect of frequency on screening efficiency and number of blocked holes

从图11可以看出,开始时物料速度急剧增大,最大速度约为2.3 m/s,2 s时颗粒全部落入筛网,这时颗粒速度不包含颗粒入料到筛网之间的速度,之后物料速度明显减小。随着频率增加,物料输送速度随之增加,当频率继续增加到22 Hz时,颗粒的平均移动速度增大较小。因此,适当增大振动频率有助于提高物料颗粒移动速度,能提高振动筛单位时间处理量。

从图12可以看出,当频率从14 Hz提高到16 Hz时,筛分效率从80%增加到86%,频率继续增大,筛分效率逐渐降低。这是由于当频率较低时,增加频率会使颗粒运动更加活跃,颗粒与筛面之间接触概率更高,有利于提高筛分效率,但是频率继续增大,颗粒将获得更高的能量,颗粒与筛面接触次数减少,因此筛分效率逐渐降低,颗粒的堵孔数量随着频率增加而逐渐减小。

2.2 振幅对筛分过程影响

双频振动筛由两个电机分别带动偏心块旋转提供激振力,而高频电机与低频电机驱动偏心块可通过调节其夹角以产生不同振幅。笔者保持其余参数不变,分析高频与低频端振幅对筛分的影响规律。

高、低频振幅对物料平均移动速度的影响分别如

图 13、14 所示。可以看出,随着高频振幅及物料输送速度的增加,物料颗粒完成筛分的时间从振幅为 3 mm 时的 13.6 s 减小至振幅为 7 mm 时的 7.7 s,提高高频振幅有助于提高振动筛单位时间处理量。随着低频振幅增加,颗粒完成筛分时间从 13.5 s 减小到 10.6 s,相较于高频振幅增加物料移动速度效果不太显著。

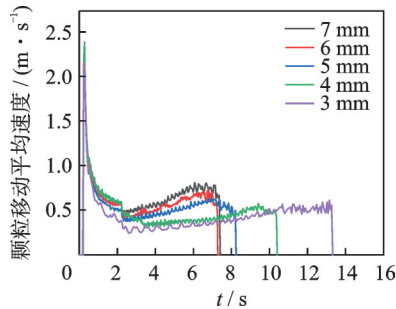


图 13 高频振幅对物料平均移动速度的影响

Fig.13 The influence of high frequency amplitude on the average moving speed of materials

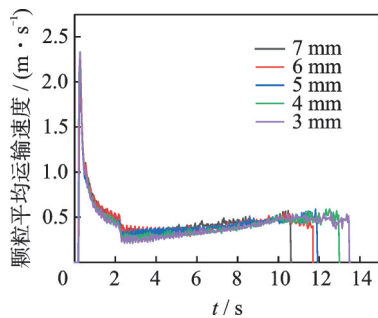


图 14 低频振幅对物料平均移动速度的影响

Fig.14 The influence of low frequency amplitude on the average moving speed of materials

振幅对筛分效率的影响如图 15 所示。可以看出:高频振幅由 3 mm 增至 4 mm 时,筛分效率由 77.3% 增加到 84.0%;振幅由 4 mm 逐渐增加至 7 mm 时,筛分效率减小至 63.5%;振幅较大时,颗粒被抛掷的幅度较大,颗粒较活跃,颗粒与筛面接触次数减少,导致筛分效率下降;低频振幅从 3 mm 增至 6 mm 时,筛分效率从 75.2% 增加到 91.3%,之后筛分效率降低至 84.3%;低频振幅增加,入料端颗粒被抛掷的程度增大,物料运动更活跃,易于实现颗粒之间的分层,入料端颗粒透筛增加,筛分效率提升;当低频振幅继续增加至 7 mm 时,物料颗粒更活跃,抛掷幅度也越大,但颗粒与筛网接触会减少,筛分效率会有一定的降低。可见,适当提高低频振幅能提高筛分效率。

振幅对堵孔数量的影响如图 16 所示。提高振幅可减少堵孔颗粒个数,高频振幅增加,堵孔颗粒个数从 156 减小到 18,低频振幅增加,堵孔颗粒个数下降效果不如高频振幅。可见,增加高频振幅对减少

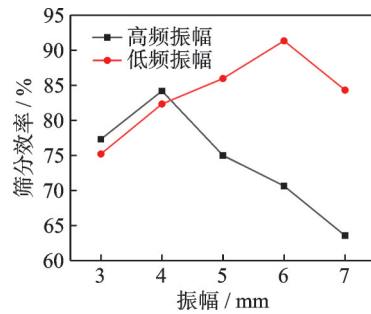


图 15 振幅对筛分效率的影响

Fig.15 The effect of amplitude on screening efficiency and number of blocking holes

颗粒堵筛效果较为明显。通过观察仿真颗粒的运动过程可知:在较大的高频振幅下,部分堵孔颗粒会脱离筛孔;振幅越大,这种脱离现象越明显。

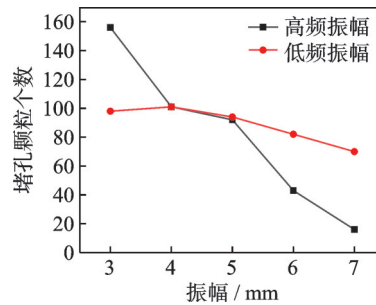


图 16 振幅对堵孔数量的影响

Fig.16 The effect of amplitude on screening efficiency and number of blocking holes

2.3 筛面倾角对筛分过程影响

在振动筛安装使用中,筛面倾角对筛分过程存在较大影响。增加筛面倾角,颗粒群平均移动速度随之增加,筛分完成时间缩短。

筛面倾角对运输速度与物料移动速度的影响分别如图 17、18 所示。由图可知,增加筛面倾角会降低筛分效率和堵孔数量。其原因为颗粒沿着筛面方向的重力分量增加,物料颗粒的移动速度迅速增加,但因筛板长度有限,颗粒与筛面接触次数相对减少,

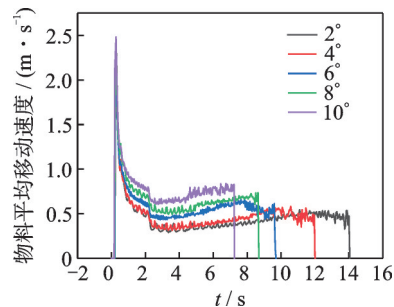


图 17 筛面倾角对运输速度的影响

Fig.17 The influence of screen surface inclination angle on transportation speed

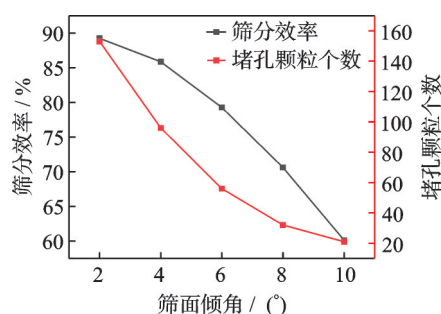


图18 筛面倾角对物料移动速度的影响

Fig.18 The influence of screen surface inclination angle on material movement speed

筛分效率下降明显。倾角增加,颗粒沿着筛网方向的重力分量增加,不易形成堵筛。

3 双频振动筛台架试验

搭建的双频振动筛试验平台如图19所示。试验平台由变频器、激振电机、偏心块、弹簧、筛箱、支撑底座、加速度传感器、振动采集系统与分析系统等组成。

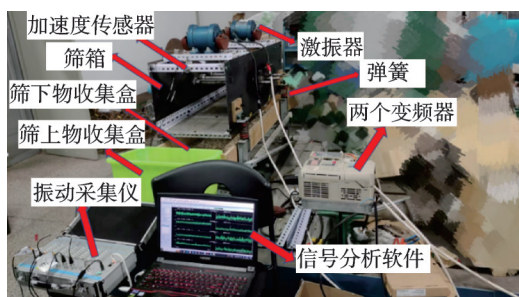


图19 双频振动筛试验平台

Fig.19 Dual frequency vibrating screen test platform

为了进行轨迹验证,设置两电机频率分别为16 Hz与32 Hz,测量筛箱质心处振动筛 x 和 y 方向的加速度信号如图20所示。最终质心处轨迹如图21所示。其中,横、纵坐标分别表示在 x 和 y 方向的振幅,与理论计算结果一致。

进行物料筛分的验证时,通过标准套筛筛选不同粒径的颗粒,得到与仿真一致的入料颗粒,将所有物料混合均匀后从左端筛箱上方匀速倒入,入料端颗粒经过短暂的堆叠后在筛板的作用下开始分层透筛与输送。筛分完成后的筛下物收集盒中颗粒分布如图22所示,与仿真结果一致。

保持振幅、筛面倾角以及物料入料速度等参数不变,调节变频器频率值以改变激振器的激振频率。对每次试验进行5次分试验,取平均值避免产生偶然误差,得到不同筛分效率下试验值。试验与仿真筛分效率对比如图23所示。可以看出:当频率从14 Hz增加到18 Hz时,仿真与试验的筛分效

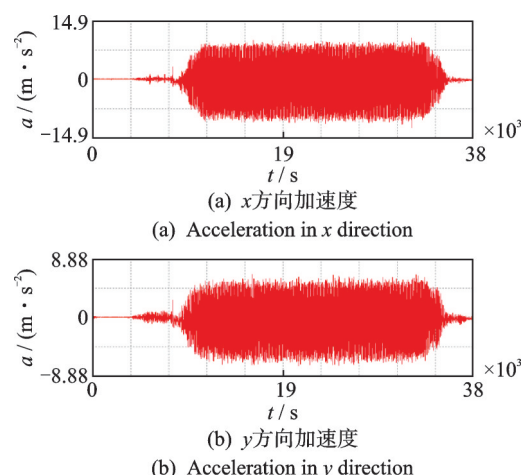
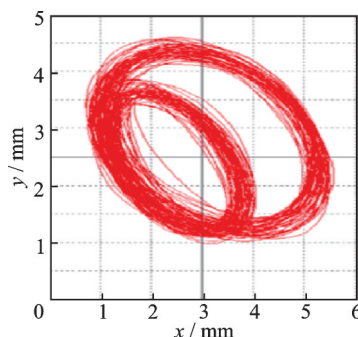
图20 振动筛 x 和 y 方向的加速度信号Fig.20 Acceleration in the x and y directions of the vibrating screen

图21 质心处轨迹

Fig.21 Trajectory at the center of mass



(a) 试验结果

(a) Experimental result



(b) 仿真结果

(b) Simulation result

图22 筛下物收集盒中颗粒分布

Fig.22 Particle distribution in the sieve collection box

率值均为增加趋势;当频率继续增加,筛分效率减小。试验值相较于仿真中筛分效率偏小,这是由于试验中所用的物料不是标准球形颗粒,在筛分时较大粒径颗粒不易透筛,因此筛分效率更低。

下面进行颗粒堵筛试验,待筛分完成后统计筛面上堵孔颗粒数。低频频率16 Hz下筛网3个位置堵孔图如图24所示。可以看出,入料端与中部堵孔颗粒数较多,出料端堵孔颗粒数较少。

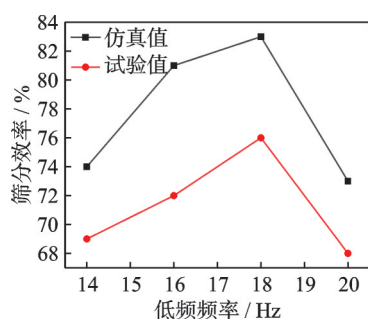


图 23 试验与仿真筛分效率对比

Fig.23 Comparison of test with simulation screening efficiency

(a) 入料端 (b) 中部 (c) 出料端
(a) Feed inlet (b) Central section (c) Outlet

图 24 低频频率 16 Hz 下筛网 3 个位置堵孔图

Fig.24 Hole blockage diagram at low frequency 16 Hz

图 25 为仿真堵孔颗粒图。在仿真中堵孔的颗粒为浅蓝色,大部分颗粒分布于筛网前半部分与中部,后端较少,与试验结果对比一致。

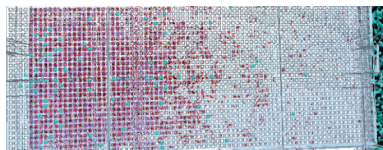


图 25 仿真堵孔颗粒图

Fig.25 Blocking particle diagram in simulation

通过多次试验得到不同频率下堵孔数量,试验与仿真堵孔数量对比如图 26 所示。试验中的堵孔数量多于仿真,这是由于试验所用颗粒多为非球形颗粒,在筛分时更易堵孔。

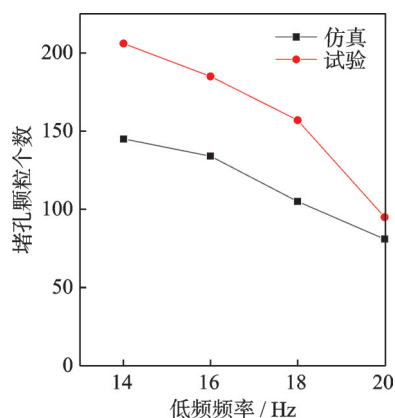


图 26 试验与仿真堵孔数量对比

Fig.26 Comparison of the number of blocked holes in test and simulations

4 结 论

1) 两电机频率比为 1:2 时,筛机运行轨迹为内“8”型,电机初始相位差会影响轨迹中内“8”位置。保证低频电机偏心质量不变,减小高频电机偏心质量,发现内“8”轨迹逐渐不明显。

2) 适当增大振动频率有助于提高物料颗粒移动速度,以及振动筛单位时间内的处理量与筛分效率。相较于低频振幅,提高高频振幅更有助于提高物料平均移动速度并减缓堵孔数量。随着筛面倾角增加,筛分效率和堵孔数量逐渐降低。

3) 与传统振动筛进行对比,双频振动筛在物料运输速度、筛分效率及降低堵孔方面具有一定优势。

4) 搭建双频振动筛试验台进行筛分试验,发现试验结果中的运动轨迹、物料分布及筛面堵孔数等参数与仿真结果高度吻合。

参 考 文 献

- [1] 夏绪辉,荆为民,张泽琳,等. 振动筛仿真研究、应用现状及发展趋势[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2689-2706.
XIA Xuhui, JING Weimin, ZHANG Zelin, et al. Simulation research, application status and development trend of vibrating screen [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2689-2706. (in Chinese)
- [2] 王正浩,王国业,刘维伟. 振动筛的研究现状与发展趋势[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 1999, 15(1): 77-81.
WANG Zhenghao, WANG Guoye, LIU Weiwei. Present status and developing tendency of vibration screen [J]. Journal of Shenyang Arch. and Civ. Eng. Inst. (Natural Science), 1999, 15(1): 77-81. (in Chinese)
- [3] 赵环帅,王振年. 国内外高频振动筛的现状与发展趋势[J]. 金属矿山, 2009(11): 105-107.
ZHAO Huanshuai, WANG Zhennian. Current status and development trends of the high-frequency vibrating screen both in domestic and overseas [J]. Metal Mine, 2009(11): 105-107. (in Chinese)
- [4] 亢伟. 多层直线振动筛的动态仿真与系统参数优化方法探究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [5] 闻邦椿,刘树英. 现代振动筛分技术及设备设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 1-60.
- [6] 陈兵,莫威,许传磊,等. 双机振动系统振动方向角动态调节仿真及实验[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(4): 838-844.
CHEN Bing, MO Wei, XU Chuanlei, et al. Dynamic adjust of vibration angle for dual-drive vibrating system

- [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(4): 838-844. (in Chinese)
- [7] 许传磊. 双轴自同步椭圆振动筛动力学特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [8] 姜娇, 陈长征, 薄磊, 等. 反向转动双机驱动振动筛同步控制[J]. 振动与冲击, 2019, 38(8): 126-132. JIANG Jiao, CHEN Changzheng, BO Lei, et al. Controlled synchronization of vibrating screen driven by two exciters rotating in the opposite direction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(8): 126-132. (in Chinese)
- [9] 王志辉. 双机及多机驱动机械系统的倍频同步[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [10] 李成. 基于 EDEM 的振动筛筛分堵孔问题研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- [11] MODRZEWSKI R, WODZINSKI P. Screens for segregation of mineral waste[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2011, 47: 267-274.
- [12] MODRZEWSKI R, WODZINSKI P. Grained material classification on a double frequency screen[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2011, 46: 5-12.
- [13] 贺朝霞, 王星哲, 邢增飞, 等. 基于系统动力学与颗粒动力学耦合的振动筛动态特性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 41-50. HE Zhaoxia, WANG Xingzhe, XING Zengfei, et al. Dynamic characteristics analysis of vibrating screen based on system and particle coupling dynamics[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 41-50. (in Chinese)
- [14] 闫宏伟, 刘翼, 李健, 等. 基于 EDEM 的煤粉制样装置筛分性能仿真与试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(7): 658-667. YAN Hongwei, LIU Yi, LI Jian, et al. Simulation and experiment of screening performance of pulverized coal sample device based on EDEM[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(7): 658-667. (in Chinese)
- [15] 王立军, 崔友强, 郑招辉, 等. 振动筛不同运动形式对颗粒群筛分的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 119-129. WANG Lijun, CUI Youqiang, ZHENG Zhaohui, et al. Effect of different motion forms of vibrating screen on screening of particle group[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 119-129. (in Chinese)
- [16] 孟彩茹. 沥青混合料搅拌设备振动筛关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [17] HOU Y J, FANG P, LIU Q Y, et al. Motion simulation of dual-frequency vibrating screen[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(204/208): 4916-4921.
- [18] ZOU M, FANG P, PENG H, et al. Study on synchronization characteristics for self-synchronous vibration system with dual-frequency and dual-motor excitation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(3): 1065-1078.
- [19] 姚运仕, 宋红年, 冯忠绪. 双频合成振动筛试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 122-126. YAO Yunshi, SONG Hongnian, FENG Zhongxu. Experiment on double-frequency composed vibrating screen[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 122-126. (in Chinese)
- [20] 李江. 齿轮渗碳淬火热处理的多物理场耦合及性能预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [21] 陈兵, 刘涵, 任江, 等. 物料冲击对椭圆振动筛筛分性能的动态影响[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(5): 907-915. CHEN Bing, LIU Han, REN Jiang, et al. Dynamic effect of material impact on screening performance of elliptical vibrating screen[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(5): 907-915. (in Chinese)
- [22] ZHANG X L, WEN B C, ZHAO C Y. Vibratory synchronization transmission of a cylindrical roller in a vibrating mechanical system excited by two exciters[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 96: 88-103.



第一作者简介:陈兵,男,1976年4月生,博士、教授,博士生导师。主要研究方向为振动筛筛分性能与结构优化。曾发表《DEM simulation and experimental study on the screening process of elliptical vibration mechanical systems》(《Journal of Vibroengineering》2019, Vol. 21, No. 8)等论文。

E-mail: bingchen9803@ustb.edu.cn