

物料冲击对椭圆振动筛筛分性能的动态影响*

陈兵¹, 刘涵¹, 任江¹, 王彪¹, 尹忠俊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)

摘要 为了研究物料冲击对振动筛动态特性的影响,加工了某型三轴椭圆振动筛样机。首先,建立简化后的筛机模型,采用离散元法与多体动力学相结合的方法对椭圆振动筛的筛分过程进行数值模拟;其次,引入有限元法对物料冲击下的筛面进行分析,以筛分效率、物料运输速度、筛上物质量和最大冲击力为筛分性能的评价指标;最后,通过试验对其不同工况下的结构振动和应变信号进行了测试和分析,研究了振幅、振频、筛面倾角以及入料速度对筛分性能的影响,揭示了常规筛机评价指标与振动参数之间的关系,为多目标评价和振动筛机优化设计提供了参考。

关键词 椭圆振动筛;冲击;离散元法;筛分性能;多因素分析

中图分类号 TD452

引言

振动筛分是一种有效的颗粒分级工艺,广泛应用于各个行业^[1-2]。振动筛大型化有利于提高筛选效率,但是大型振动筛也会承受较大的物料冲击,从而对振动筛的动态特性造成较大影响^[3-5]。横梁、侧板等核心结构承受的复杂激励会限制振动筛的实际使用寿命^[6]。因此,提高筛分性能尤其是筛分效率成为振动筛分机械的主要发展趋势^[7]。

筛分过程中颗粒间复杂的力学行为是筛分领域的研究难点。离散元法(discrete element method, 简称DEM)经过多年的发展,逐渐成为模拟颗粒群力学行为的重要研究工具^[8],其理论被引入到筛分过程数值模拟中。Cleary等^[9-10]利用DEM模拟香蕉筛机的筛选过程,为探究颗粒筛选机理提供了新思路。Zhao等^[11]以田口正交试验方法为基础,分析了振幅、振频和筛板倾角对循环筛分过程的综合影响。陈兵等^[12]基于DEM研究了高频振网筛的多参数优化。Chen等^[13]采用DEM探讨了各参数对破碎腔性能的影响。Qiao等^[14]采用数值模拟的方法,研究了一种等厚筛机的筛分机理。现有的离散元法模拟主要侧重于消除振动参数对筛分性能的单向影响,但是筛上物的运动也会影响筛体的动力学特性,应当结合多体动力学(multi-body dynamics, 简称MBD)分析物料冲击对振动筛筛分性能的影响。

笔者采用DEM-MBD软件耦合的方法,对三轴椭圆振动筛不同振动参数下的筛分过程进行了数值模拟。筛网在筛分过程中受到物料的连续冲击,极易产生塑性变形和破坏,将DEM与有限元方法(finite element method, 简称FEM)进行耦合,进一步对筛网在筛分过程中所受冲击进行研究,引入冲击系数,通过单因素和正交试验探讨了振动参数对筛分性能和冲击性能的影响。

1 三轴椭圆振动筛机仿真模型

以某型号三轴椭圆振动筛为参考,按照1:10的比例建立三轴椭圆振动筛机仿真模型,如图1所示。图1(a)为三轴椭圆振动筛的完整模型,由于其结构复杂,难以直接用DEM软件进行分析,故笔者在以下几方面进行了模型简化:①忽略非承载零件的影响;②忽略较小的孔结构;③简化螺栓连接。简化后的模型如图1(b)所示。振动筛结构参数如表1所示。

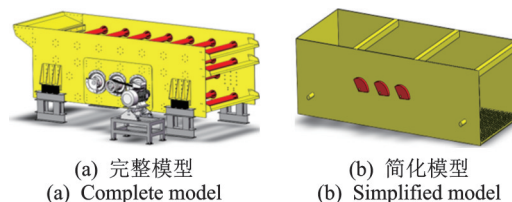


图1 三轴椭圆振动筛机仿真模型
Fig.1 Simulation model of triaxial elliptical vibrating screen machine

* 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2023YFB4706905)

收稿日期:2022-06-19;修回日期:2022-09-10

表 1 振动筛结构参数

Tab.1 Structural parameters of the vibrating screen

参数	数值
筛面长度/mm	1 200
筛面宽度/mm	480
筛面厚度/mm	3
筛孔尺寸/mm	10×10
开孔率/%	39.77

三轴椭圆振动筛振动原理如图 2 所示。3 根激振轴位于同一水平线上,主动轴 2 的轴线和筛机的质心重合,从动轴 1 和轴 3 等间距分布于主动轴 2 两侧,且轴上所安装偏心块初始角度相同。每根激振轴上装有 1 组相同配置的偏心块,主动轴 2 通过同步齿轮驱动从动轴 1 和 3,以相同的角速度 ω 做反向旋转,主动轴与从动轴之间相差一个相位角 Δ 。从动轴 1 和轴 3 产生的激振力 F_1 和 F_3 相对于质心的力偶矩相互抵消,故仅考虑质心受力。激振轴产生的激振力 F_1, F_2 和 F_3 ,按照 x, y 轴方向分解,可以得到作用于质心的激振力 F_x 和 F_y ,即

$$\begin{cases} F_x = (2F_1 - F_2 \cos \Delta) \cos(\omega t) + F_2 \sin \Delta \sin(\omega t) \\ F_y = (2F_1 + F_2 \cos \Delta) \sin(\omega t) + F_2 \sin \Delta \cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

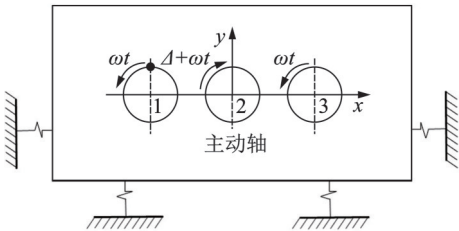


图 2 三轴椭圆振动筛振动原理

Fig.2 Vibration principle of triaxial elliptical vibrating screen

由于振动筛阻尼力远小于弹性力,整理得到振动方程为

$$\begin{cases} M\ddot{x} + k_x x = (2F_1 - F_2 \cos \Delta) \cos(\omega t) + F_2 \sin \Delta \sin(\omega t) \\ M\ddot{y} + k_y y = (2F_1 + F_2 \cos \Delta) \sin(\omega t) + F_2 \sin \Delta \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

其中: M 为筛机等效质量; k_x, k_y 分别为 x, y 方向的等效弹簧刚度。

对上述微分方程求解并进行坐标变换和整理,得到筛体质心轨迹方程为

$$\frac{X_1}{\left(\frac{2F_1 + F_2}{-M\omega^2}\right)^2} + \frac{Y_1}{\left(\frac{2F_1 - F_2}{-M\omega^2}\right)^2} = 1 \quad (3)$$

筛面上颗粒的动力学分析如图 3 所示。筛面上任意点的位移为

$$\begin{cases} x = A \cos \beta \sin \omega t \\ y = A \sin \beta \sin \omega t \end{cases} \quad (4)$$

其中: A 为振幅; β 为振动方向角。

对式(4)进行微分,得到筛面的加速度方程为

$$\begin{cases} a_x = \ddot{x} = -A\omega^2 \cos \beta \sin \omega t \\ a_y = \ddot{y} = -A\omega^2 \sin \beta \sin \omega t \end{cases} \quad (5)$$

筛面作用在颗粒的力沿筛面 x 方向和垂直筛面 y 方向的平衡方程为

$$\begin{cases} ma_x = F_f + mg \sin \alpha \\ ma_y = F_n - mg \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

其中: α 为筛面倾角; g 为重力加速度。

颗粒被筛面抛起的临界条件是筛面对颗粒的支持力 $F_n=0$,垂直于筛面的方程可以简化为

$$A\omega^2 \sin \beta \sin \varphi_d = g \cos \alpha \quad (7)$$

椭圆振动筛的振动强度是影响筛板性能的关键参数,可以用振动频率 f 、振幅 A 和筛板的倾角 α 来表征,即

$$K_v = \frac{4\pi^2 f^2 A}{g \cos \alpha} \quad (8)$$

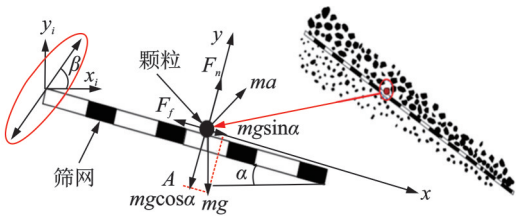


图 3 筛面上颗粒的动力学分析

Fig.3 Dynamics analysis of particles on sieve surface

2 联合仿真模型

利用离散元法计算筛分过程中颗粒的位置、位移和速度。在筛分过程中,当颗粒下落到筛面上,会对筛面产生作用力,进而影响振动筛的运动特性及物料的运动规律。因此,笔者结合多体动力学仿真软件 ADAMS 和散体力学仿真软件 EDEM 各自的优点,利用 ADAMS 软件完成三轴椭圆振动筛运动学仿真,模拟其在物料加载工况下的真实运动特性;使用 EDEM 软件生成筛分物料,模拟三轴椭圆振动筛在筛分过程中物料的筛分运动特征。有限元法是

工程中常用的数值计算方法,用于分析筛面的应力分布和筛网在筛分过程中的变形情况。将 EDEM 与 ADAMS 联合仿真过程中颗粒对筛面的作用力导入到 ANSYS 中,在确定边界条件后得到预期效果。离散元耦合流程如图 4 所示。

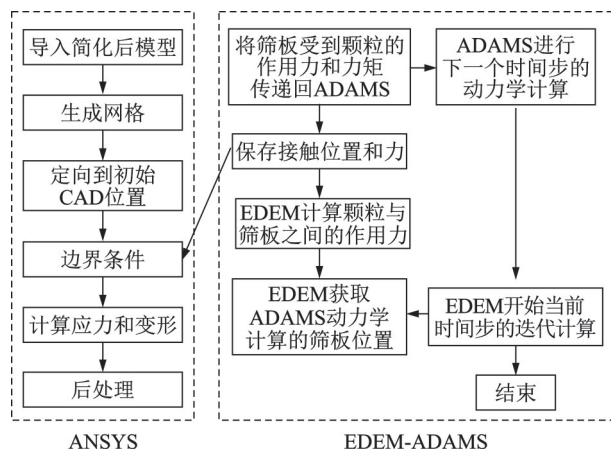


图4 离散元耦合流程

Fig.4 Principle of discrete element coupling process

在每个时间步内,首先,ADAMS 将几何体在 x, y, z 三方向的平动和转动信息发送到 EDEM 中相对应的几何体,几何体位置的更新会引起物料受到几何体作用力的不同;其次, EDEM 得到该时间步内物料对几何体的作用力以及力矩信息,将这些信息发送到 ADAMS 中;最后,在下个时间步长的初始时刻, ADAMS 根据接收到的物料载荷信息及自身的约束和驱动信息,得到几何体新的运动信息,再发送至 EDEM,从而完成双向耦合计算。EDEM 可以计算得到每个时间步内物料和筛体接触位置和接触力信息,通过 EDEM add-in for ANSYS/Workbench 接口将数据传输到 ANSYS 中,经过后处理即可得到筛体实时受物料冲击情况。

DEM-MBD 耦合示意图如图 5 所示。将简化模型导入 ADAMS 及 EDEM 软件中,设置边界条件等参数,通过 Co-simulation 服务器将几何体运动以及颗粒作用信息在二者之间相互传递。在筛分过程中,待筛分物料颗粒从颗粒工厂进入筛箱,物料与筛面相互作用,沿着红色箭头向排料端移动,小于筛孔尺寸的颗粒透过筛面进入筛下物收集盒中,大于筛孔尺寸的颗粒沿着筛面进入筛上物收集盒中。颗粒形状是物料的固有特性之一,对筛分效果有一定的影响。Wu 等^[15]对不同的颗粒形状进行检验,证明了球形和非球形颗粒对筛分过程的影响趋势是相似的。本研究仿真过程中使用的是球形颗粒,颗粒粒径分布如表 2 所示。

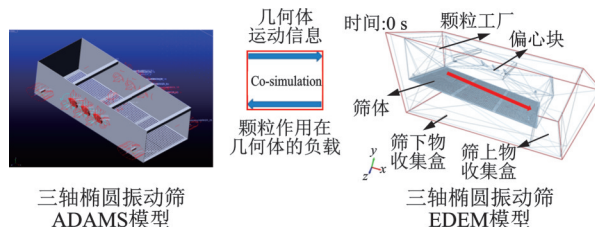


图5 DEM-MBD耦合示意图

Fig.5 Schematic diagram of DEM-MBD coupling

表2 颗粒粒径分布

Tab.2 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	12.7
10	0.9	16.4
12	1.5	22.7
14	1.8	28.2

本试验采用连续进料的方式,颗粒与筛箱的接触模型为 Hertz-Mindlin,筛体和筛面均使用 Q235B 钢板,物料颗粒为花岗岩球形鹅卵石,入料时间为 5 s,网格大小为 5 mm。相关材料参数及仿真条件如表 3 所示。

表3 相关材料参数及仿真条件

Tab.3 Related material parameters and simulation conditions

材料属性	泊松比	材料密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切模量/ Pa
筛体	0.29	7 801	8.023×10^{10}
颗粒	0.30	2 600	1×10^8
碰撞属性	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
颗粒-颗粒	0.2	0.50	0.02
颗粒-筛体	0.3	0.45	0.02

3 实验平台搭建及仿真模型验证

三轴椭圆振动筛筛分试验及测试分析系统如图 6 所示。该平台主要包括支撑底座、驱动电机、方孔筛网以及控制振动频率的变频器等。筛上物收集盒置于筛网末端,筛下物收集盒置于筛网下方。筛机驱动电机通过万向节联轴器驱动激振轴两端的偏心块旋转,产生激振力。8 个加速度传感器分别布置在横梁两端,以测量筛网不同位置在筛分过程中的动态响应。2 个加速度传感器布置在主动轴正上方横梁上,用于测量筛体轨迹。选用 BX120-5AA

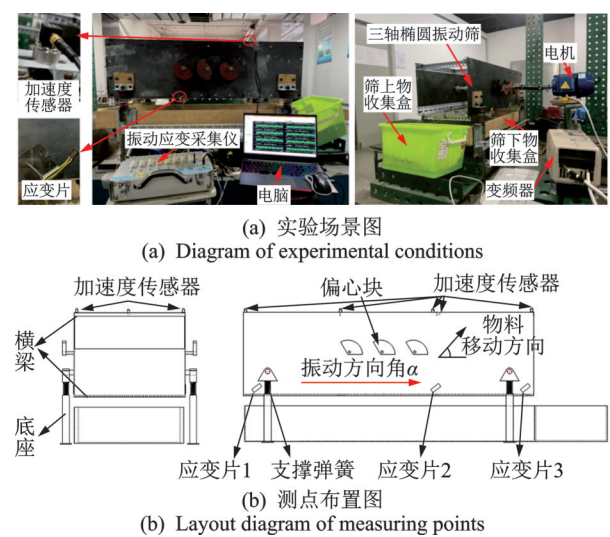


图 6 三轴椭圆振动筛筛分试验及测试分析系统

Fig.6 Triaxial elliptical vibration screening experiment and test analysis system schematic diagram

型应变片布置在筛网支撑梁左右两侧,编号分别为

Ls1/Rs1,Ls2/Rs2 和 Ls3/Rs3,对两侧的加速度传感器及应变片测量数值取平均值。在本研究中,加速度信号及应变信号由多通道数据采集仪以 1 024 Hz 采样频率进行参数采集,并由电脑进行数据保存,以便对实测筛机运动及结构受力参数进行数据分析。

筛分过程及应变如图 7 所示。待筛分物料经历入料、全料及排料 3 个过程。为了准确分析物料对结构的影响,采用 DEM-MBD 耦合的方法对筛分过程进行模拟,并采用 DEM-FEM 方法研究筛分中物料动态冲击特性对筛机结构部件应力应变的影响。加载工况下,筛机质心加速度信号如图 8 所示。其中:红色实线为试验数据,由主动轴正上方的 2 个加速度传感器所测数据合成得到;黑色虚线为仿真数据,从 ADAMS 后处理模块中导出。2 条曲线的主峰位置和幅值基本吻合,说明所设计的 EDEM-ADAMS 联合仿真可以模拟实际工况。

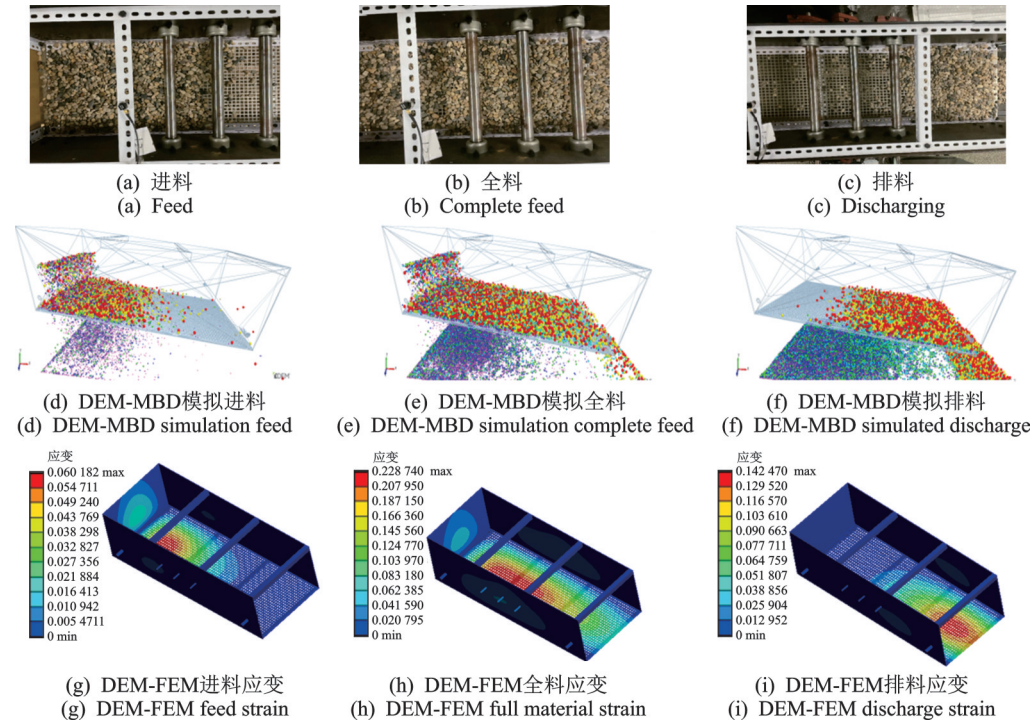


图 7 筛分过程及应变

Fig.7 Screening process and strain

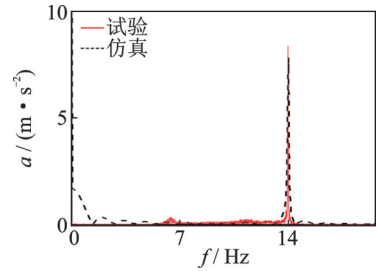


图 8 筛机质心处加速度信号

Fig.8 Acceleration signal at the center of mass

由图 7(g,h,i)可以看出:当物料进入筛面,应变最大值位于筛面中部,且侧板也有小幅度应变;随着物料铺满筛面,筛面及侧板应变上升最大;随着物料退出筛面,筛面及侧板所受应变随之降低。

图 9 为不同时段下的筛网应力与变形。由图可以看出,应力与变形的峰值位置逐渐向排料端移动,变形主要集中在筛网中间对称轴附近,应力集中在

筛网与侧板连接的两侧以及筛网中间对称轴附近。0~2 s内物料、应力与变形主要分布在入料段;随着物料逐渐铺满筛网,应力与变形的峰值位置逐渐向排料端移动;当筛上物质量达到最大时,应力与变形也达到最大;随着物料逐渐退出筛面,筛网的应力与变形的峰值位置逐渐向排料端移动。从8~10 s可以看出,随着颗粒的退出,入料端不再受颗粒的冲击影响,冲击主要集中在排料端。

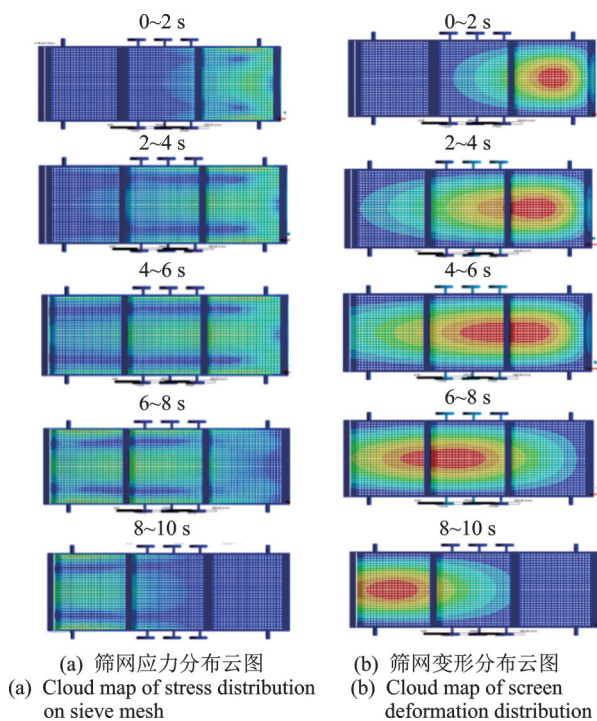


图9 不同时间段下的筛网应力与变形

Fig.9 Screen stress and deformation in different time periods

空载和加载工况下加速度信号比较如图10所示。可以看出,空载情况下筛体整体运行平稳,入料到排料的4个测点的加速度信号频率主峰及幅值基本一致。加载情况下,加速度整体先随着筛上物质量的增加逐渐减小,筛上物质量达到最大时加速度也降到最低,随着筛上物逐渐退出筛面,加速度逐渐恢复到空载状态下数值。相较于空载工况,加载工况下的筛体加速度峰值减少了约12%。在入料时,排料端的加速度要比空载时稍大一些;在排料时,入料端的加速度要比空载时稍大一些。在空载和加载筛分过程中,横梁中心处的轨迹如图11所示。空载下轨迹运行稳定,加载下随着物料的增加轨迹逐渐缩小,当物料退出筛面时恢复到空载下轨迹状态。

空载和加载运行时的侧板应变如图12所示。由图12(a)可以看出,空载工况下入料端与出料端应变几乎相同,但筛体中间部位的应变要小于两端

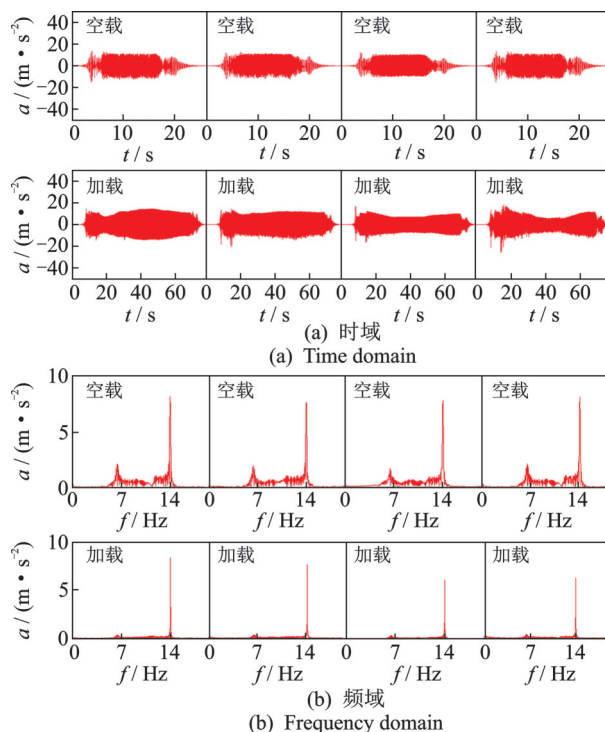


图10 空载和加载工况下加速度信号比较

Fig.10 Comparison of acceleration signals under no-load and loading conditions

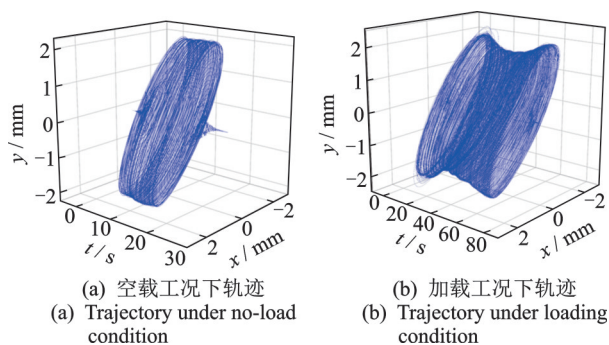


图11 横梁中心处的轨迹

Fig.11 Trajectory at the center of the crossbeam

的应变。文献[16]指出,在筛分作业中,轴承梁振动主要受筛体刚性平移运动惯性载荷的影响,侧板激发弯曲振动引起的弯矩可以忽略不计。加载工况时,筛网结构平移运动的加速度增加,使承载梁振动更快,因此相应位置的应变值也增加。这是由于样机的制造精度不能保证筛体做平面椭圆运动,附加的摆动振动导致筛体两端的运动比中心激振位置更强。由图12(b)可以看出,加载工况下各个测点的应变相对于空载工况下增加了约7%,且入料段由于受到持续影响而高于排料端。结合图12(a,b)可知,当考虑筛分过程的影响时,筛网结构平移运动的加速度增加,使承载梁振动增强,相应位置的应变值也增加。

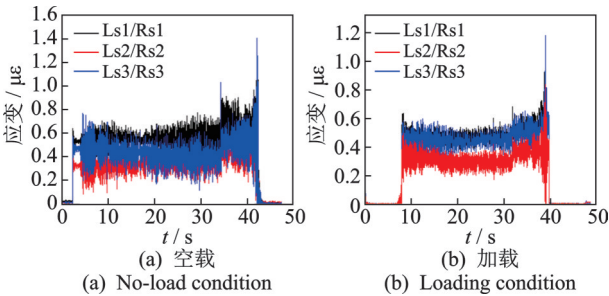


图 12 空载和加载运行时的侧板应变

Fig.12 Side plate strain under unloaded and on-load operation

4 振动参数对筛分过程的影响

仿真完成后,得到单位时间内颗粒对筛面的冲击情况。冲击力变化曲线如图 13 所示。由图 13(a)可知:0~0.5 s内筛体自然静置;0.5~5.5 s内冲击力随着物料逐渐铺满筛面而急剧增加;当入料结束时,物料逐渐退出筛面,冲击力逐渐减小。整个冲击力的变化趋势与筛分过程中筛上物质量的变化趋势相近。由图 13(b)可知,颗粒与筛面冲击力峰值的主频率为 14 Hz,与偏心块旋转的频率 14 Hz 相同。

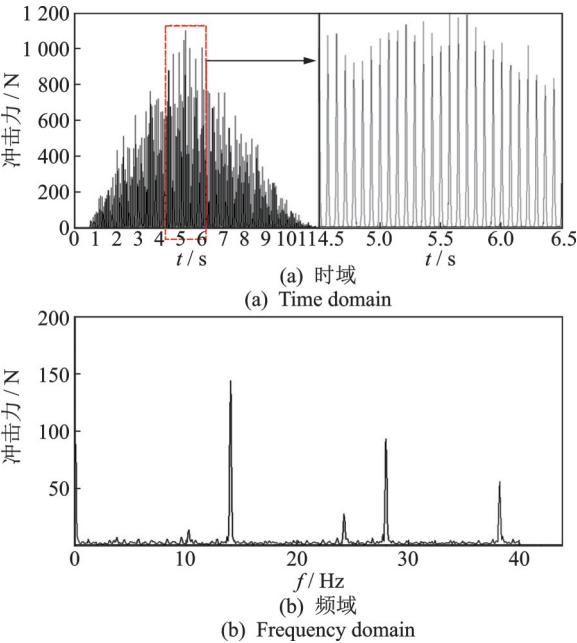


图 13 冲击力变化曲线

Fig.13 Impacting force curve

筛分过程如图 14 所示。在排料端设置计算域,计算物料颗粒通过该计算域的平均速度,得到物料运输速度曲线。由图 14(b)可以看出:开始阶段,筛面上物料颗粒较少,颗粒间碰撞较少,物料以较快的速度离开筛板;稳定运输阶段(6~10 s),随着物料逐渐铺满筛板,颗粒间相互作用逐渐增多并趋于稳

定,使得物料运输速度逐渐下降并趋于稳定。

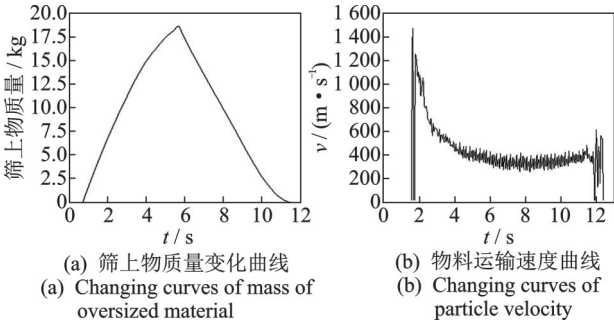


图 14 筛分过程

Fig.14 Screening process

为了研究筛分参数对筛分性能的影响,笔者在物料成分以及颗粒组成不变的情况下,以控制变量法分别研究了入料速度、振频、振幅以及筛板倾角变化对筛分性能的影响。筛分性能包括筛分效率、物料运输速度、筛上物质量以及物料最大冲击力。由于仿真中可以直接提取筛下物质量,所以筛分效率定义为

$$\eta = \frac{m_{sp}}{m_{st}} \times 100\%$$

(9)

其中: m_{sp} 为筛下物质量; m_{st} 为入料颗粒里小于筛孔尺寸的物料质量。

为了研究各振动参数的综合效应,在田口法的基础上,设计了 4 个因素、5 种水平的正交试验。正交试验因素与水平如表 4 所示。根据所设计的正交表进行了筛分试验,多因素分析结果如表 5 所示。其中:括号内的数字代表具体水平;速度为稳定筛分阶段物料运输速度平均值;冲击力为稳定运输阶段筛面受颗粒冲击力的平均值。

表 4 正交试验因素与水平

Tab.4 Orthogonal test factors and levels

因素符号	水平				
	1	2	3	4	5
入料速度/(kg•s ⁻¹)	4	5	6	7	8
振幅/mm	3	4	5	6	7
f/Hz	10	12	14	16	18
α/(°)	2	4	6	8	10

极差分析是一种广泛应用于正交试验的分析方法,根据各因素范围值的大小对其进行排序,范围值较大表明该因素对结果指标的影响较大。极差分析结果如图 15 所示。

由图 15(a)可以看出,不同参数对筛分效率的影响并不一样。在水平范围内,筛分效率随入料速

表 5 多因素分析结果
Tab.5 Results of multivariate analysis

组号	入料速度/(kg•s ⁻¹)	振幅/mm	f/Hz	α/(°)	筛分效率/%	运输速度/(mm•s ⁻¹)	冲击力/N	质量/kg
1	1(4)	1(3)	1(10)	1(2)	80.44	77.50	223.50	17.06
2	1	2(4)	2(12)	2(4)	87.88	219.50	806.10	14.54
3	1	3(5)	3(14)	3(6)	73.31	300.00	485.20	12.14
4	1	4(6)	4(16)	4(8)	48.11	660.15	376.50	7.51
5	1	5(7)	5(18)	5(10)	83.67	1 001.40	306.10	5.75
6	2(5)	1	2	3	95.60	125.70	1 063.20	19.63
7	2	2	3	4	79.00	340.60	906.50	14.92
8	2	3	4	5	55.82	564.70	420.00	9.47
9	2	4	5	1	56.73	482.50	649.90	14.08
10	2	5	1	2	87.18	303.15	829.30	17.33
11	3(6)	1	3	5	78.52	244.90	1 429.10	20.30
12	3	2	4	1	76.07	334.45	829.90	23.20
13	3	3	5	2	60.59	430.50	1 007.60	16.88
14	3	4	1	3	80.26	231.10	2647.70	21.90
15	3	5	2	4	56.30	564.35	589.90	12.69
16	4(7)	1	4	2	74.78	247.75	2 103.00	28.20
17	4	2	5	3	63.69	413.55	946.40	20.40
18	4	3	1	4	85.10	147.30	1 282.30	27.70
19	4	4	2	5	60.70	434.10	680.50	15.52
20	4	5	3	1	63.18	382.45	777.30	22.70
21	5(8)	1	5	4	65.33	414.50	1 232.50	23.60
22	5	2	1	5	94.31	156.30	621.40	30.90
23	5	3	2	1	78.67	193.15	2 493.00	32.60
24	5	4	3	2	64.39	410.20	916.00	24.90
25	5	5	4	3	61.72	457.15	1 058.30	20.00

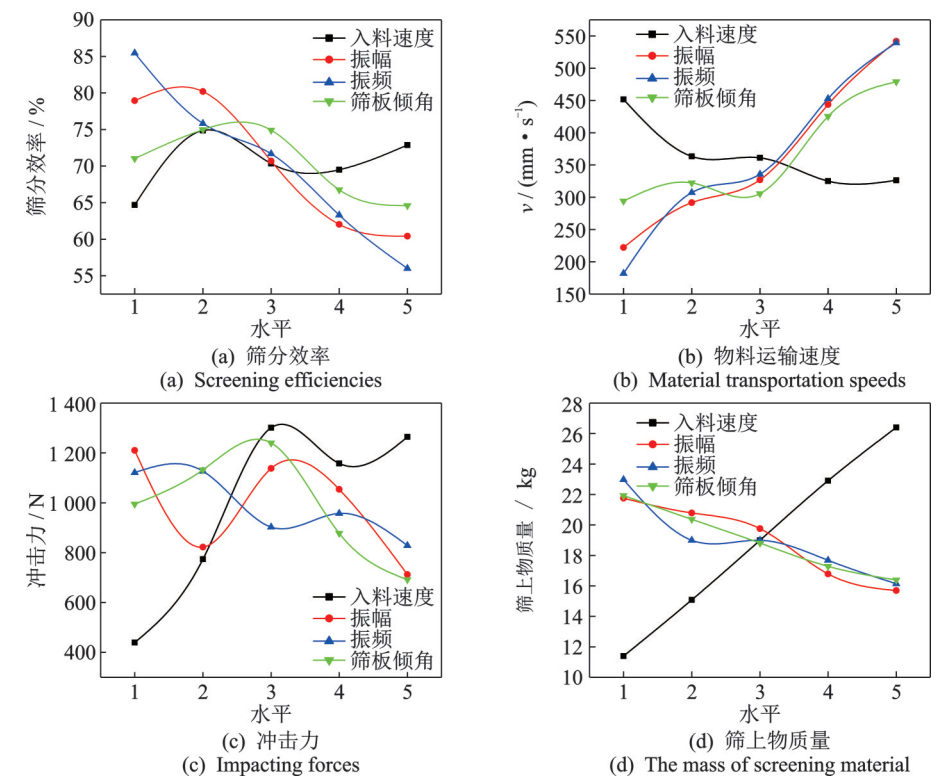


图 15 极差分析结果

Fig.15 Range analysis results

度、振幅、振动频率及筛板倾角的增大呈降低的趋势,但入料速度、振幅及筛板倾角随着振动频率的增大呈先增大后减小的变化。4个因素对筛分效率的影响程度从大到小依次为($f>A>\alpha>v$)。振动频率对筛分效率的影响最大,入料速度对筛分效率的影响最小。因此,为提高筛分效率,建议采用的优化方案为: $v=5\text{ kg/s}$, $A=4\text{ mm}$, $f=10\text{ Hz}$, $\alpha=4^\circ$ 。

由图 15(b)可以看出,不同参数对物料运输速度的影响不同。在水平范围内,物料运输速度随振幅、振动频率和筛板倾角的增大而增大,物料运输速度随着入料速度的增大而减小。各因素对物料运输速度的影响程度从大到小依次为($f>A>\alpha>v$)。振动频率对物料运输速度的影响最大,入料速度对物料运输速度的影响最小。因此,为了提高处理能力,建议采用的优化方案为: $v=4\text{ kg/s}$, $A=7\text{ mm}$, $f=18\text{ Hz}$, $\alpha=10^\circ$ 。

由图 15(c)可以看出,不同参数对最大冲击力的影响不同且相对复杂。在水平范围内,最大冲击力随入料速度的增大先增大后减小再增大,随振幅的增大先减小后增大再减小,随振动频率的增大先降低后增大,随筛板倾角的增大先增大后减小。各因素对最大冲击力的影响程度从大到小依次为($v>\alpha>A>f$)。入料速度对最大冲击力的影响最大,振动频率对最大冲击力的影响最小。因此,为了降低筛箱的负荷,建议采用的优化方案为: $v=4\text{ kg/s}$,

$A=7\text{ mm}$, $f=18\text{ Hz}$, $\alpha=10^\circ$ 。

由图 15(d)可以看出,不同参数对筛上物质量的影响不同。在水平范围内,筛上物质量随入料速度的增大而增大,随着振幅、振动频率和筛板倾角的降低而降低。各因素对筛上物质量的影响程度从大到小依次为($v>f>A>\alpha$)。入料速度对筛上物质量的影响最大,筛板倾角对筛上物质量的影响最小。因此,为了降低筛上物质量,建议采用的优化方案为: $v=4\text{ kg/s}$, $A=7\text{ mm}$, $f=18\text{ Hz}$, $\alpha=10^\circ$ 。

为了证明极差分析的准确性,将优化方案的最佳振动参数组合重新进行模拟验证。方案优化结果如表 6 所示。方案 1 为筛分效率的优化结果,筛分效率的优化值为 96.36%,高于正交试验得出的最大值 95.6%。方案 2,3,4 为物料运输速度最大、物料对筛面冲击力和筛上物质量最小的优化方案,结果表明,最优方案的物料运输速度为正交试验中最大值 1 001.4 mm/s,筛上物质量为正交试验中最小值 5.75 kg,物料对筛面冲击力为 306.1 N,仅大于正交试验组 1 所对应的最小值 223.5 N。优选目标为物料运输速度、冲击力以及筛上物质量 3 个目标所得到的最优参数组合相同,这是因为物料运输速度决定了筛上物质量,而物料对筛面的冲击力主要受被抛起质量(筛上物质量)和抛起高度(振幅)的影响,三者有着高度的相关性,且冲击力同时受振幅影响较大。

表 6 方案优化结果
Tab.6 Scheme optimization results

方案	入料速度/(kg•s ⁻¹)	振幅/mm	f/Hz	筛面倾角/(°)	运输速度/(mm•s ⁻¹)	冲击力/N	筛分效率/%
1	5	4	10	6	114.2	663.0	96.36
2	4	7	18	10	1 001.4	306.1	83.67
3	4	7	18	10	1 001.4	306.1	83.67
4	4	7	18	10	1 001.4	306.1	83.67

5 结 论

- 1) 通过实验发现,相较于空载工况,加载工况下筛体加速度减小 12%,筛体结构应变也随着筛上物质量的增加逐渐增加,增大约 7%。这说明物料的加入使得振动筛的实际响应同理论设计响应有明显差距。
- 2) 将离散元与多体动力学耦合以模拟物料群筛分规律,比单独使用离散元法更加准确有效。研究结果表明,筛面的相对位置随着筛上物质量的变

- 化而变化,物料运输速度随着筛面相对位置的变化而变化,物料与筛机之间相互作用,影响了筛机整体的动态特性。
- 3) 将离散元法与有限元法相结合,可定量研究筛面不同工况下的应力和应变分布规律。结果表明,筛面的应力主要集中在两端和中部,应变主要集中在筛面的中部,这为进一步改善筛机应力集中情况提供了参考。
- 4) 设计田口正交试验,通过多因素分析,证明了筛分参数的相对重要性以及各性能指标的最佳参

数方案。本研究的筛机4项性能指标存在耦合特性,筛分效率与物料运输速度变化趋势相反,而筛上物质量与冲击力呈相同趋势,且筛分效率与物料运输速度直接影响筛上物质量,说明各个指标同时优化存在矛盾。因此,需要综合考虑多个目标的优化方案。

参 考 文 献

- [1] 徐立章,李洋,李耀明,等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1-16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1-16. (in Chinese)
- [2] JIANG Y Z, HE K F, DONG Y L, et al. Influence of load weight on dynamic response of vibrating screen[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 4232730.
- [3] PENG L P, WANG Z Q, MA W D, et al. Dynamic influence of screening coals on a vibrating screen[J]. Fuel, 2018, 216: 484-493.
- [4] 孙旂. 大型振动筛的可靠性研究与应用[J]. 矿山机械, 2016, 44(11): 54-58.
SUN Yi. Reliability study and application of large-scale vibrating screen[J]. Mining & Processing Equipment, 2016, 44(11): 54-58. (in Chinese)
- [5] YANG X D, WU J D, JIANG H S, et al. Dynamic modeling and parameters optimization of large vibrating screen with full degree of freedom[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1915708.
- [6] 王秋实,周劲松,肖忠民,等. 电机牵引振动对地铁转向架构架疲劳的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(2): 365-371.
WANG Qiushi, ZHOU Jinsong, XIAO Zhongmin, et al. Influence of motor traction vibration on fatigue of subway bogie frame[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(2): 365-371. (in Chinese)
- [7] 王现成,郭蓬勃,张益民,等. 用吸振器消除框架梁横向振动的可行性[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14): 179-182.
WANG Xiancheng, GUO Pengbo, ZHANG Yimin, et al. Feasibility of absorbing the transverse vibration of a frame-beam induced by attached oscillating equipment by using a vibrational absorber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(14): 179-182. (in Chinese)
- [8] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [9] CLEARY P W, SINNOTT M D, MORRISON R D. Separation performance of double deck banana screens-part 1: flow and separation for different accelerations[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(14): 1218-1229.
- [10] CLEARY P W, SINNOTT M D, MORRISON R D. Separation performance of double deck banana screens-part 2: quantitative predictions[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(14): 1230-1244.
- [11] ZHAO L L, ZHAO Y M, BAO C Y, et al. Optimisation of a circularly vibrating screen based on DEM simulation and taguchi orthogonal experimental design[J]. Powder Technology, 2017, 310: 307-317.
- [12] 陈兵,燕纪威,尹忠俊,等. 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.
CHEN Bing, YAN Jiwei, YIN Zhongjun, et al. Multi-parameter optimization of high-frequency vibrating screen based on DEM[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 852-861. (in Chinese)
- [13] CHEN Z R, WANG G Q, XUE D M, et al. Simulation and optimization of crushing chamber of gyratory crusher based on the DEM and GA[J]. Powder Technology, 2021, 384: 36-50.
- [14] QIAO J P, DUAN C L, JIANG H S, et al. Research on screening mechanism and parameters optimization of equal thickness screen with variable amplitude based on DEM simulation[J]. Powder Technology, 2018, 331: 296-309.
- [15] WU X, LI Z, XIA H, et al. Vibration parameter optimization of a linear vibrating banana screen using DEM 3D simulation[J]. Journal of Engineering and Technological Sciences, 2018, 50(3): 346-363.
- [16] PENG L P, LIU C S, SONG B C, et al. Improvement for design of beam structures in large vibrating screen considering bending and random vibration[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(9): 3380-3388.



第一作者简介:陈兵,男,1976年4月生,博士、副教授。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