

魏淑慧,马学东,张月,等.四轴惯性复合激振模型及湿煤颗粒筛分研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):340-347.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240188
WEI Shuhui,MA Xuedong,ZHANG Yue,et al.Four-axis inertial composite excitation model and screening of wet coal particles[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(3):340-347.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240188

四轴惯性复合激振模型及湿煤颗粒筛分研究

魏淑慧,马学东*,张月,杨华瑞

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院,辽宁鞍山 114051)

摘要:针对传统振动筛在筛分难筛物料和湿物料时物料松散度低、筛面利用率有限,以及透筛率难以得到有效提高的问题,基于李萨如振动合成原理和力学分析,构建四轴惯性复合激振模型。通过强制齿轮传动控制激振模型的频率比和相位差,精确实现多种李萨如复合振动模式。将四轴惯性复合激振模型置于振动筛中,构建复合振动筛,并采用离散元法模拟振动筛面上物料群的筛分过程。搭建实验台,开展不同粒径、不同含水质量分数物料的筛分实验。研究结果表明:该复合振动筛可给筛上物料施加一个沿筛面宽度方向上的激振力,有效增加物料的往复运动,使物料更加松散,显著提高筛分效率。

关键词:四轴惯性复合振动;李萨如振动合成;力学分析;强制齿轮传动;湿煤;离散元法;筛分效率

中图分类号:TD452

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)03-0340-08

Four-axis inertial composite excitation model and screening of wet coal particles

WEI Shuhui, MA Xuedong*, ZHANG Yue, YANG Huarui

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Aiming at the problems of low material looseness, limited utilization rate of screen surface and difficult to effectively improve the screening rate of traditional vibrating screen when screening difficult-to-screen materials and wet materials, a four-axis inertial composite excitation model is constructed based on Lissajous vibration synthesis principle and mechanical analysis. By forcing the gear transmission to control the frequency ratio and phase difference of the excitation model, a variety of Lissajous composite vibration modes are accurately realized. The four-axis inertial composite excitation model is placed in the vibrating screen to construct a composite vibrating screen, and the discrete element method is used to simulate the screening process of the material group on the surface of the vibrating screen. An experimental platform was built to carry out screening experiments of materials with different particle sizes and different water mass fractions. The results show that the composite vibrating screen can apply an exciting force along the width direction of the screen surface to the material on the screen, effectively increase the reciprocating motion of the material, make the material more loose, and significantly improve the screening efficiency.

Keywords: four-axis inertial composite vibration; Lissajous vibration synthesis; mechanical analysis; forced gear transmission; wet coal; discrete element method; screening efficiency

0 引言

为了提高煤炭利用效率,国家通过技术创新

和设备升级,鼓励煤炭企业采用先进的清洁利用技术,以降低能耗和污染物排放,实现煤炭资源的高效利用^[1]。筛分是选煤过程中的关键工序,广

收稿日期:2024-07-09 修回日期:2024-08-08 接受日期:2024-08-15 责任编辑:焦丽

基金项目:国家自然科学基金项目(52305111)

作者简介:魏淑慧(1997-),女,山东济南人,硕士研究生,主要从事颗粒物动力学方面的研究。Email: 362961303@qq.com

通信作者:马学东(1965-),男,内蒙古赤峰人,博士,教授,主要从事颗粒物动力学方面的研究。E-mail: madong912@126.com

泛应用于选煤过程中的分级、脱水等^[2-3]。振动筛作为一种颗粒物料的分选设备,其构造简易、分选可靠,被广泛应用于矿山、煤炭等行业^[4-6]。实际生产中,传统振动筛在处理高湿度、黏性煤炭时,存在着筛分效率低、筛孔易堵塞等问题。

离散元法(discrete element method, DEM)是用于分析颗粒运动行为及力学特性的数值模拟计算方法,是基于牛顿第二定律计算离散颗粒运动行为的有效数值模拟技术,在离散颗粒物质领域应用广泛,如煤炭工程^[7-8]、农业工程^[9]、化学工程^[10]等。许多学者采用仿真技术对振动筛设备进行研究。胡国玉等^[11]基于离散元法对核桃壳仁混合物的振动筛分工艺进行研究,确定了透筛率最高时的最佳工艺参数组合。陈智权^[12]使用DEM-FEM耦合方法研究模拟椭圆振动筛筛分煤炭的过程,研究了椭圆长轴和短轴比、振动频率、振动方向等因素对筛分效率的影响。唐弦等^[13]通过EDEM-Recur Dyn联合仿真研究了湿煤聚团与弛张筛筛板碰撞解聚机理及影响因素。张昊晨^[14]研究组合清理筛的工艺参数对其筛分性能的影响,并探究颗粒在筛分过程中的运动规律。

上述研究多偏重传统振动筛的数值模拟和振动参数的优化研究,对惯性复合振动筛的振动力学机理方面的研究较少。针对这一现状,本研究首先分析了传统惯性振动激振原理,发现能够合成的振动模式有限,然后根据李萨如振动合成原理^[15]构建平面的无质心力矩四轴惯性复合激振模型。通过调节模型中的齿轮齿数比和偏心转子的初始位置,实现频率比和相位差的调节,以此为基础合成多种复合振动模式。选取频率比为2:1、相位差为0°的四轴惯性复合激振模型置于振动筛中,构建新型复合振动筛模型,并对该模型筛面上物料群的筛分过程进行了模拟研究和实验验证。本研究以期对未来新型惯性复合振动筛的开发和应用提供理论参考。

1 四轴惯性复合振动筛

1.1 常见激振器工作原理

目前常见的振动筛有单轴圆振动筛、双轴直线振动筛、双轴椭圆振动筛和三轴椭圆振动筛,这些振动筛的激振工作原理见图1。

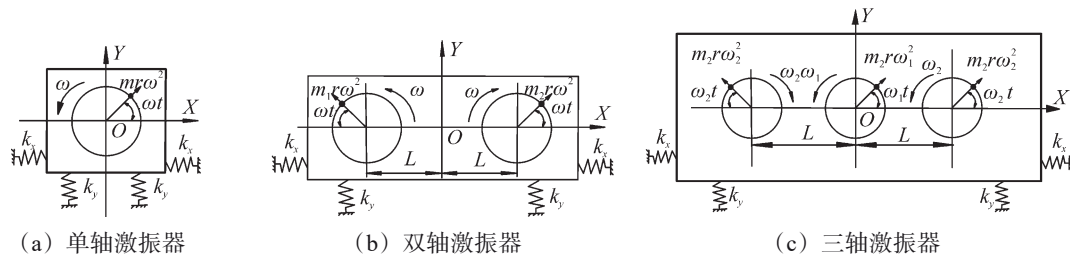


图1 单轴、双轴及三轴激振器工作原理

Fig.1 working principle diagram of single axis, double axis, and three-axis exciters

图1(a)为单轴圆振动激振工作原理^[16]。惯性单振子 m 绕振动体质心 O 转动,产生离心力,带动振动体产生圆振动。图1(b)为双轴直线^[17]、椭圆振动原理。质量为 m_1 、 m_2 的两个振子关于振动体质心 O 对称布置,转动半径均为 r ,且以相同角速度 ω 等速反向转动。 $m_1=m_2$ 时,2个偏心振子的激振力沿 X 方向的分力相互抵消,仅合成沿 Y 方向的简谐直线振动; $m_1 \neq m_2$ 时,在 X 、 Y 方向各存在一个简谐直线振动,且会绕质心 O 发生摆振,两者可合成近似椭圆的振动。图1(c)为三轴椭圆振动激振原理^[18-19]。3个偏心振子运动半径均为 r ,1个质量为 m_1 的振子处于振动体质心 O 处,2个质量为 m_2 的振子关于质心 O 对称布置,两侧振子旋转角速度均为 ω_2 ,转向相反。 $m_1=m_2$ 、 $\omega_1=\omega_2$ 时,3个偏心振子在 X 、 Y 方向均产生一个合成的简谐直线振动,三者可合成椭圆振动; $m_1=m_2$ 、 $\omega_2=2\omega_1$

时,3个偏心振子亦可在 X 、 Y 方向各产生一个合成的简谐直线振动,三者可合成相位差为0°的双椭圆振动。

上述激振器都是利用质量不均匀的偏心振子做周期性转动,在特定方向合成周期性的简谐激振力,带动筛体振动,完成筛分工作^[20-23]。但对于较难筛分的黏性物料^[24],传统振动筛的筛分能力明显不足,而复合振动筛在处理此类物料时具有较大优势,筛分效率明显提升^[25-28]。工业水平的不断发展,对振动筛的筛分效果和筛分效率的要求越来越高,因此新型惯性复合振动筛的研究与开发具有更为广阔的发展前景和实用价值。

1.2 李萨如振动合成原理

根据李萨如振动合成效应,2个相互垂直的不同相位、不同频率、不同振幅的简谐直线振动,可以合成直线振动、圆振动、椭圆振动、双椭圆

振动以及振动轨迹更加复杂的振动模式, 见表 1。

表 1 李萨如振动合成效应

Tab.1 Lissajous vibration synthesis effect

频率比	不同相位差的李萨如振动合成效应		
	0°	45°	90°
1:1			
1:2			
1:3			

前文提到的单轴、双轴、三轴激振器仅能实现直线、圆和椭圆振动, 难以实现表 1 中频率比为 2:1 或 3:1、相位差为 45° 或 90° 的振动合成, 即复合振动模式不能涵盖表 1 中所有的振动模式。由此本文提出四轴惯性复合激振模型, 可合成表 1 中的 9 种振动模式。

1.3 四轴惯性复合激振模型

(1) 激振模型

根据李萨如振动合成原理可知, 通过调节 2 个相互垂直的简谐直线振动的频率比和相位差, 可以实现多种复杂运动轨迹的复合振动。基于此, 提出了四轴复合激振模型, 其工作原理见图 2。

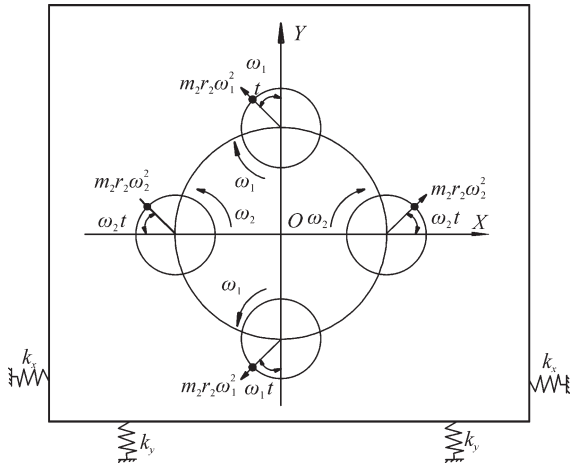


图 2 四轴惯性复合激振原理

Fig.2 four-axis inertial composite excitation principle

图 2 中, 4 根轴均装有偏心振子, 且绕质心 O 呈圆周对称布置。该振动系统 X 向、 Y 向支撑弹性元件的刚度分别为 k_x 、 k_y 。左右一对频率为 ω_2 、质量为 m_2 振子在 X 方向的激振力相互抵消, 合成 Y 方向的简谐直线振动, 上下一对频率为 ω_1 、质量 m_1 振子在 Y 方向的激振力相互抵消, 合成 X 方向的简

谐直线振动, 然后 X 、 Y 方向的简谐直线振动将合成李萨如复合振动, 此合成不会在质心 O 处出现摆振力矩。

(2) 强制齿轮传动

四轴惯性复合激振可产生 2 个相互垂直的简谐直线振动, 但仅满足表 1 中李萨如振动合成的基础条件, 要完全合成表 1 中的 9 种振动模式, 需要保证频率比和相位差。为有效地控制频率比和相位差, 本文提出强制齿轮传动方案, 齿轮的传动结构见图 3。

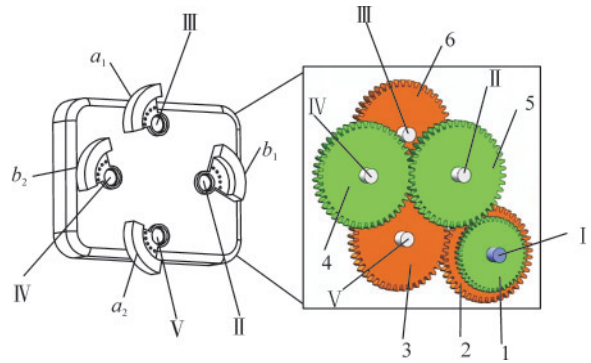


图 3 强制齿轮传动结构

Fig.3 forced gear transmission structure

传动结构由 5 根轴组成, 其中轴 I 为主动轴, 其余 4 轴为从动轴, 各轴通过齿轮传动。轴 I 上有齿数不同的传动齿轮 1、齿轮 2, 4 根从动轴上各有 1 个齿轮。齿轮 4 与齿轮 5 啮合, 齿数相同, 保证轴 II 和轴 IV 转速相同, 转向相反。齿轮 3 与齿轮 6 啮合, 齿数相同, 保证轴 III 和轴 V 转速相同, 转向相反。齿轮 4、齿轮 5 和齿轮 3、齿轮 6 不在一个平面内, 互不干扰。齿轮 1 与齿轮 5 啮合, 传动比为 $i_1=Z_5/Z_1$; 齿轮 2 与齿轮 3 啮合, 传动比为 $i_2=Z_3/Z_2$ 。通过齿轮齿数控制 i_1 、 i_2 , 上下振子 a_1 、 a_2 的转速、左右振子 b_1 、 b_2 的转速, 通过改变上下两轴和左右两轴的转速比, 控制上下两轴偏心振子、左右两轴的偏心振子的频率比。

4 根从动轴均装有偏心振子。4 个偏心振子安装在同一个平面, 同时每根轴上的偏心振子角度可以调整。各轴之间通过齿轮啮合强制转动, 各轴偏心振子的相对位置始终固定, 由此便可在 X 、 Y 向合成出具有不同相位差的简谐直线振动, 合成为李萨如复合振动。

改变 4 根轴上偏心振子的初始位置, 便可使 X 向和 Y 向的简谐直线振动产生相位差。频率比、相位差、偏心振子初始位置与李萨如振动曲线的对应关系见表 2。

表2 李萨如复合振动频率与相位对应关系

Tab.2 corresponding relationship between Lissajous composite vibration frequency and phase

频率比 ω_1/ω_2	相位差 $\varphi_1-\varphi_2(^{\circ})$	李萨如振动图形	偏心块位置
2:1	0		
	45		
	90		
3:1	0		
	45		
	90		

1.4 复合振动筛运动原理分析

基于李萨如振动合成原理,以表2中频率比为2:1、相位差为0°的四轴惯性复合激振模型为例进行研究。如图4所示,该四轴惯性复合激振模型振动平面与筛面成夹角 δ 放置在振动体质心处。 S_1 沿Z轴方向, S_2 与X轴夹角为 δ ,则筛体在振动平面内按照复合振动曲线S运动。

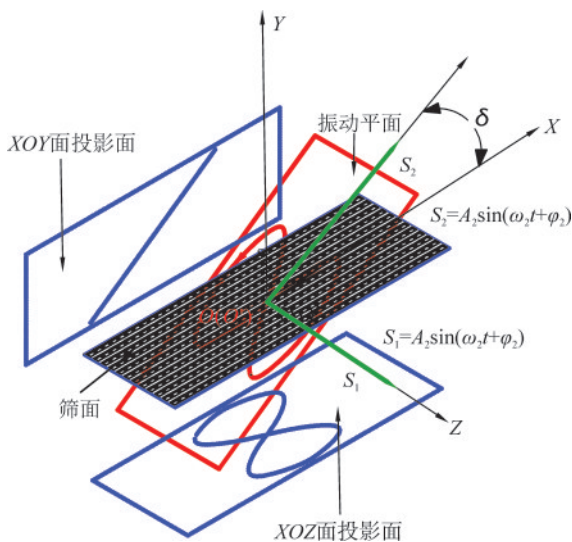


图4 复合振动与筛面相对位置

Fig.4 composite vibration and relative position of screen surface

振动平面原点O与筛体质心O'重合,筛体按照振动平面上的双椭圆轨迹运动。该振动在筛面(XOZ平面)的投影为双椭圆形振动,负责筛面物料的松散,在竖直平面(XOY平面)的投影为简谐直线振动,负责筛面物料的抛掷和输送。由此可知,双椭圆振动在筛体的X向、Y向、Z向分解为3个简谐直线振动,X向的简谐直线振动负责输送,Y向的简谐直线振动负责抛掷和物料松散,Z向的简谐直线振动负责物料的强化松散。与传统振动筛相比,该四轴惯性复合激振器可通过调节频率比和相位差合成多种李萨如复合振动模式,每种模式均可给振动筛提供沿筛面横向的激振力,强化了物料在筛面上的进一步松散,有效提高了物料的透筛率。

2 离散元数值模拟验证分析

2.1 仿真参数设置

使用含水质量分数为5%的湿煤颗粒作为研究对象,按粒度级别分为易筛颗粒、难筛颗粒和不透筛颗粒^[29]。其中,易筛颗粒相对粒度为0.2~0.7(相对粒度为颗粒粒径与筛网的筛孔尺寸之比),生成颗粒数占50%,难筛颗粒相对粒度为0.7~1,生成颗粒数占30%,不透筛颗粒相对粒度大于1,生成颗粒数占20%。按照相对粒度等级随机生成,每秒生成2000个颗粒。根据翟酉湘等^[30]的研究,利用GEMM(generic EDEM material model)颗粒通用材料数据库,设置湿煤颗粒间的表面能、材料物理,以及接触参数。设置图6中S1向的频率、振幅分别为10 Hz、2 mm,S2向的频率、振幅分别为20 Hz、2 mm,瑞丽时间步长为 3×10^{-5} s,仿真时长为15 s。在相同实验条件下,保证振动筛能耗相同,设置无横向力振动筛(直线振动筛)频率和振幅分别为20.8 Hz、2 mm。

2.2 仿真结果分析

对比筛分稳定时的筛分状况,仿真结果见图5,其中,红色颗粒为不透筛颗粒,绿色颗粒为难筛颗粒,黄色颗粒为易筛颗粒。如图5(a)所示,直线振动筛筛分湿煤颗粒时,料层堆积厚度明显增加,与筛分干煤颗粒相比,出料端的可透筛颗粒也显著增多,导致筛分效果变差。直线振动筛、复合振动筛在筛分湿煤颗粒时的筛分效果见图5(b),对比可见复合振动筛在筛分湿煤颗粒时,料层厚度较小,表明复合振动筛能够有效提高物料的分散程度。观察出料端颗粒的透筛情况发现,直线振动筛出料端含有较多的可透筛颗粒,复合

振动筛的出料端可透筛颗粒较少,透筛效果良好。图 5 (b) 黑色框 1 中,筛上颗粒在直线振动模式和复合振动模式下的力链分布情况见图 5 (c)。从图 5 (c) 可以看出,复合振动筛面上的料层力链分布相对松散且均匀,表明颗粒间的力链结构被打破,相互作用力较弱。直线振动筛面上的料层力链分

布较为密集,颗粒间的稳定性较强,内部力链结构难以打破,进而影响物料的分散度。分析上述筛分效果出现的原因是在复合振动作用下,颗粒受力多样化,相较于直线振动仅受到 X 向、Y 向的激振力,复合振动增加了 Z 向(筛面横向)的激振力,使颗粒群充分松散。

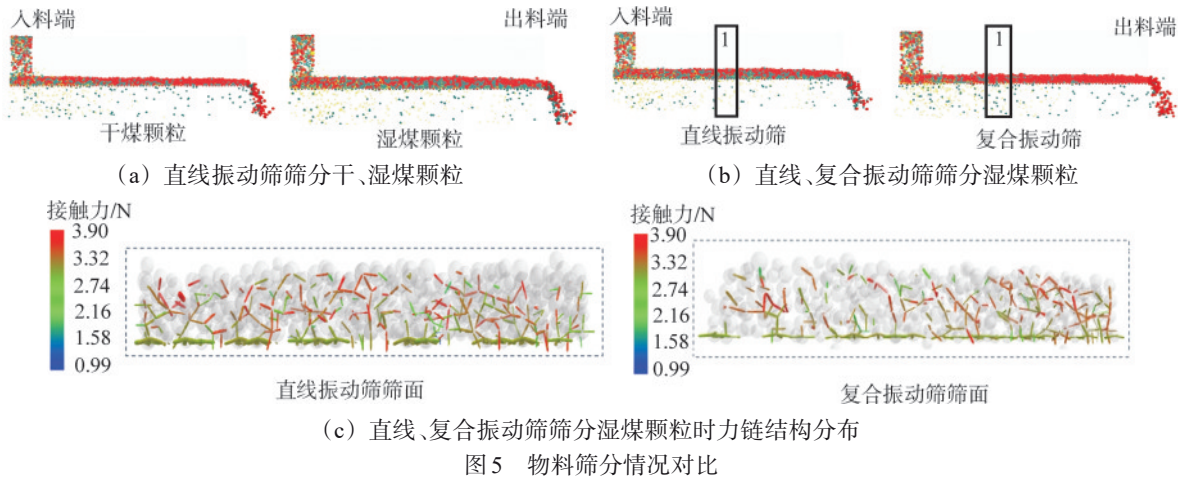


图 5 物料筛分情况对比

Fig.5 comparison chart of material screening situation

两种振动模式下,筛面颗粒沿横向的受力见图 6。复合振动下,颗粒在横向受力较大,平均受力为直线振动的 9.11 倍,证明颗粒在筛面宽度方向上的运动趋势更大,增强了颗粒在横向的流动性,有效打破了物料堆积产生的强力链结构,增加了颗粒体系内部的松散程度。

度的细粒质量占比, %

筛分效率对比见图 7。统计筛分稳定时筛上物(图 7 黑色框 1)和筛下物(图 7 黑色框 2)的颗粒个数,再根据式(1)计算振动筛的筛分效率。

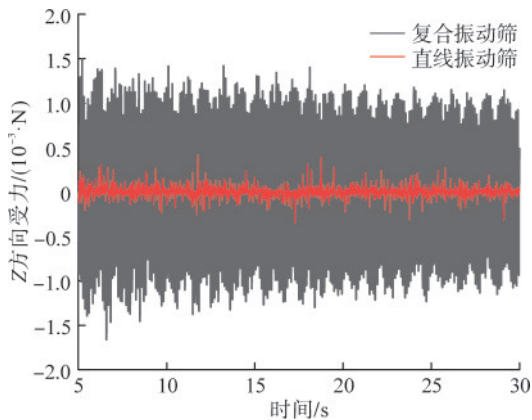


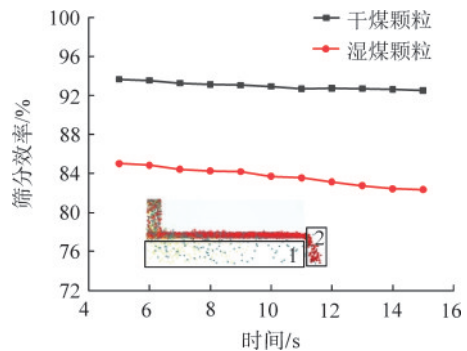
图 6 振动筛的 Z 向受力

Fig.6 Z-direction force of vibrating screen

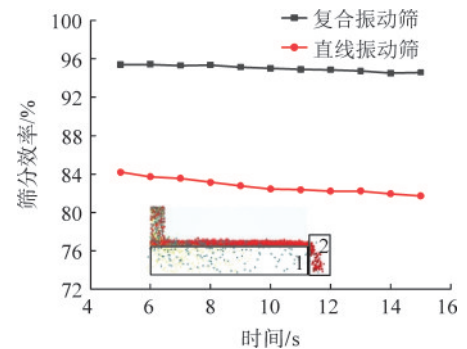
筛分效率是衡量振动筛筛分能力的重要指标,对比振动筛筛分效率可直接反映筛分性能的优劣。筛分效率^[5]的计算公式为

$$\eta = \frac{(\alpha - \theta)(\beta - \alpha) \times 100}{\alpha(\beta - \theta)(100 - \alpha)} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: α 为入料中小于规定粒度的细粒质量占比, %; θ 、 β 分别为筛上物、筛下物中小于规定粒



(a) 直线振动筛在筛分干煤、湿煤颗粒



(b) 复合、直线振动筛在筛分湿煤颗粒

图 7 筛分效率对比

Fig.7 comparison chart of screening efficiency

5~15 s内直线振动筛筛分干、湿煤颗粒的筛分效率见图7(a)。可知,直线振动筛在筛分干煤颗粒时,平均筛分效率为93.0%,在筛分湿煤颗粒时,平均筛分效率仅为84.0%。由此看出,直线振动筛在筛分湿煤颗粒时的筛分效率明显降低,筛分能力欠佳。5~15 s内直线振动筛、复合振动筛筛分湿煤颗粒的效率对比见图7(b),可知,复合振动筛筛分湿煤颗粒的平均筛分效率为95.4%,比直线振动筛高11.4%,这说明复合振动筛筛分湿物的效率较高,优势明显。

3 实验验证

3.1 振动筛实验平台搭建

为验证复合振动筛的筛分效果,探究添加横向力后,筛分效果是否提高,制作了简易复合振动筛实验平台,见图8。根据设计尺寸,采用4 mm厚的亚克力板切割出筛体的左、右侧挡板及上下横梁,2 mm厚的亚克力板切割出后侧挡板和接料板,选定激振电机及其固定器。减振弹簧的尺寸为 $\Phi 1.5 \text{ mm} \times 22 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,筛网材料为钢,筛孔尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$,筛丝直径为0.5 mm。使用热熔胶粘接筛体的挡板和接料板,使用螺栓和角码连接横梁与筛体,并固定激振电机和减振弹簧。

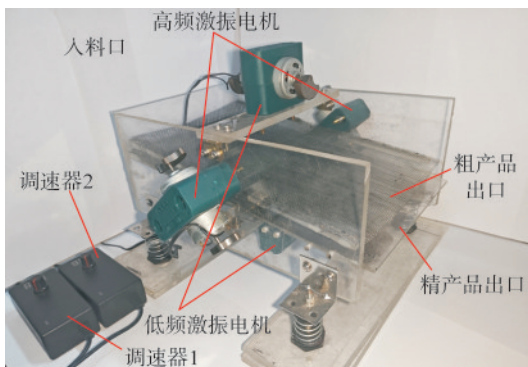


图8 复合振动筛实验台

Fig.8 composite vibrating screen test bench

2个高频激振电机在筛箱前、后对称布置,由1个调速器控制,以保证上下两个激振电机的频率相同,形成图4中沿 S_1 方向的激振力。2个低频激振电机在筛箱上、下对称布置,由1个调速器控制,以保证左右2个激振电机的频率相同,形成图4中沿 S_2 方向的激振力。通过调节2个调速器调节上下和左右两组激振电机的频率,给筛体施加横向振动。当4个激振电机同时工作时,可形成2个相互垂直的简谐直线振动,合成李萨如复合振动,当只有2个高频激振电机工作时,该实验装置相当于直线振动筛,无横向力的作用。

3.2 试验用煤颗粒的制备

经过初筛,得到不透筛颗粒和透筛颗粒,其中透筛颗粒包括难筛颗粒和易筛颗粒。仿真中,设置不透筛颗粒占比20%、难筛颗粒占比30%、易筛颗粒占比50%,筛孔尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 。实验中,选取的煤炭颗粒见图9,不同粒度的颗粒质量如下:不透筛颗粒40 g(粒径为 $2.5 \sim 3.5 \text{ mm}$);难筛颗粒100 g(粒径为 $1.8 \sim 2.5 \text{ mm}$);易筛颗粒60 g(粒径为 $1 \sim 1.8 \text{ mm}$)。

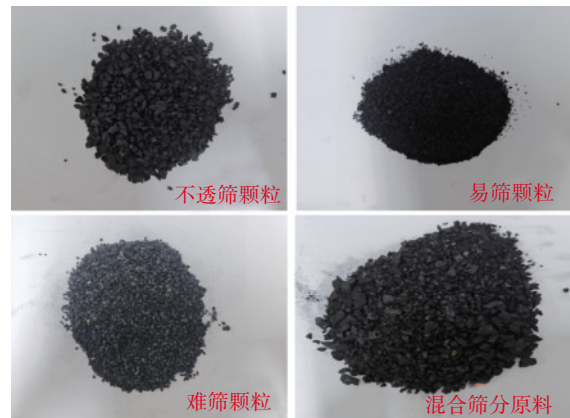


图9 煤炭颗粒

Fig.9 coal particles

根据廖文等^[31]的研究,可在干煤颗粒中加入适量水以作湿煤颗粒使用,湿煤颗粒的含水质量分数为

$$w = \frac{m_w}{m_2} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: m_w 为干煤中加入水的质量,kg; m_2 为干煤的质量,kg。

按照以上方法,制成含水质量分数为5%的湿煤物料用于本实验。将混合后的湿煤物料均匀地从筛体入料端倒入,经振动筛分后,收集筛下物料颗粒和筛尾物料颗粒,并称取颗粒质量。

3.3 实验筛分结果

根据振动筛工作原理,调整两对调速器的转速,可以改变两组激振器的频率。关闭低频激振电机,仅开启高频激振电机,可进行无横向力(直线振动)的筛分实验。同时开启低频、高频激振电机,可进行有横向力(复合振动)的筛分实验,设定高、低频电机的转速比分别为2:1或3:1,以确保左右和上下两组激振电机的频率比为2:1或3:1。为确保试验结果的准确性,在相同实验条件下,分别进行直线振动筛分与复合振动筛分,每种筛分方法做5组实验,再由式(1)计算筛分效率,结果见图10。

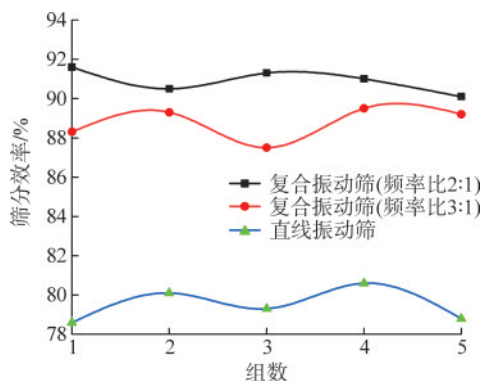


图10 试验结果

Fig.10 experimental results

由图10可见,5组直线振动筛的筛分效率分别为78.6%、80.1%、79.3%、80.6%和78.8%,平均筛分效率为79.5%。试验得到平均筛分效率与仿真模拟得到的结果相比,两者相差4.52个百分点。频率比为2:1的复合振动筛的筛分效率分别为91.6%、90.5%、91.3%、91.0%和90.1%,平均筛分效率为90.9%,相较于直线振动筛分,平均筛分效率提高了11.4个百分点。与仿真模拟得到的筛分效率95.4%相比,试验结果低了4.5个百分点。为继续验证添加横向力后的筛分效率是否有效提高,设定高频电机与低频电机的转速比为3:1,以确保其频率比为3:1,计算筛分效率分别为88.3%、90.3%、91.5%、89.5%和89.2%,平均筛分效率为89.8%,相较于直线振动的平均筛分效率提高了10.3个百分点。

对于干物料,添加沿Z轴的激振力,更容易破坏物料因堆积而产生的力链结构,使物料内部更松散,促进物料在筛面上形成分层,由此粒径小的物料更容易穿透筛网,透筛率更高。对于含液体的黏性物料,更容易促使固相物料摆脱液体液桥力的束缚,完成筛分。因此,四轴惯性复合振动筛在湿物料领域具有广泛的应用前景。

4 结论

依据李萨如振动合成原理,构建四轴惯性复合激振模型,并将该复合激振模型置于振动筛中,构建了复合振动筛。对四轴惯性复合激振模型和复合振动筛进行研究,得出以下结论。

(1) 提出的四轴惯性复合激振模型,无质心力矩,可合成2个相互垂直的简谐直线振动,能精确地李萨如复合振动。通过强制齿轮传动,控制四轴惯性复合激振模型的频率比和相位差,可精确实现直线、圆、椭圆、双椭圆等多种复合振动模式。

(2) 将频率比为2:1、相位差为 0° 的四轴惯

性复合激振模型置于振动筛中,构建复合振动筛。基于离散元法对该复合振动筛与直线振动筛筛面物料进行仿真,结果表明:复合振动筛可给筛上物料施加沿筛面宽度方向的激振力,使物料更加松散,分层效果更加显著,筛分湿颗粒时,筛分效率明显提高。

(3) 通过简易复合振动筛实验台开展湿煤颗粒筛分实验,结果表明与直线振动筛相比,复合振动方式的筛分效率提高10%~12%。

参考文献(References):

- [1] 祖秉辉,李长松.“双碳”背景下煤炭生产企业碳减排路径研究[J]. 矿业科学学报,2024,9(3): 464-474.
ZU Binghui, LI Changsong. Research on carbon emission reduction pathways for coal production enterprises to meet the “dual carbon” targets[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(3): 464-474.
- [2] 乔金鹏. 粒群振动离析动力学及变轨迹筛分过程研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2021:1-2.
- [3] 马砺,马武阳,姚刚,等. 洗选煤堆自燃特性及危险区域演化判定[J]. 西安科技大学学报,2023,43(2):228-235.
MA Li, MA Wuyang, YAO Gang, et al. Determination of spontaneous combustion characteristics and dangerous zone evolution of washing-processing coal pile[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(2): 228-235.
- [4] 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.
- [5] 闻邦椿.“振动利用工程”学科近期的发展[J]. 振动工程学报,2007, 20(5): 427-434.
WEN Bangchun. Recent development of the course “vibratory utilization engineering” [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(5): 427-434.
- [6] 陈凡,王斌. 选煤用振动筛动态仿真分析及优化[J]. 洁净煤技术, 2024,30(增刊2):1-5.
CHEN Fan, WANG Bin. Dynamic simulation analysis and optimization of vibrating screen for coal preparation [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(Suppl.2): 1-5.
- [7] 谢存黎,田小松,王飞旺,等. 离散元法在矿石破碎中的应用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2024,44(1): 126-134.
XIE Cunli, TIAN Xiaosong, WANG Feiwan, et al. Application research status of discrete element method in ore crushing[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(1): 126-134.
- [8] 国宏臣,肖庆飞,李云啸,等. 基于离散元法的多级配球提高半自磨机磨矿效率研究[J]. 矿产保护与利用,2023,43(4): 60-67.
GUO Hongchen, XIAO Qingfei, LI Yunxiao, et al. Comparative experimental study of multi-stage ball distribution to improve the efficiency of semi-autogenous grinding[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 60-67.

- [9] 刘垒雷,邓刚,李维朝,等.不同细粒含量与间断比下不连续级配砂砾土渗蚀的CFD-DEM数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(7):2677-2689.
LIU Leilei, DENG Gang, LI Weichao, et al. Numerical simulations of erosion of gap-graded sandy gravel soil with different fines contents and gap ratios using CFD-DEM[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2024,55(7):2677-2689.
- [10] 方潘,陆小刚,石双全,等.固液混合物振动筛分机理研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2024,46(2):164-175.
FANG Pan, LU Xiaogang, SHI Shuangquan, et al. Screening mechanism of the solid-liquid mixture vibration screen [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024,46(2):164-175.
- [11] 胡国玉,陈旭东,赵腾飞,等.基于EDEM的核桃壳仁混合物振动筛分工艺优化[J].中国油脂,2024,49(2):95-100.
HU Guoyu, CHEN Xudong, ZHAO Tengfei, et al. Optimization of grading process of walnut shell and kernel mixture by vibrating screen based on EDEM[J]. China Oils and Fats, 2024,49(2):95-100.
- [12] 陈智权.椭圆振动筛的数值模拟研究与筛分性能优化[D].泉州:华侨大学,2020:35-56.
- [13] 唐弦,熊晓燕,唐建.湿煤聚团与弛张筛筛板碰撞解聚的离散元模拟[J].机械设计与制造,2024(1):1-5.
TANG Xian, XIONG Xiaoyan, TANG Jian. Impact disaggregation simulation of wet coal agglomerate and sieve plate of flip-flow screen using discrete element method[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1):1-5.
- [14] 张晨昊.组合回转筛的筛理过程研究[D].郑州:河南工业大学,2023:14-71.
- [15] KARACOR D, NAZLIBILEK S, SAZLI M H, et al. Discrete Lissajous figures and applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(12): 2963-2972.
- [16] 徐文彬,杨永柱,李素妍.圆振动筛的发展及其技术分析[J].矿山机械,2016,44(4):47-53.
XU Wenbin, YANG Yongzhu, LI Suyan. Development and technical analysis of circular vibrating screen[J]. Mining & Processing Equipment, 2016,44(4):47-53.
- [17] 周扬,黄波,屈阳,等.直线振动筛筛面颗粒运动特性分析[J].煤炭工程,2023,55(11):173-178.
ZHOU Yang, HUANG Bo, QU Yang, et al. Analysis of particle motion characteristics on the screen surface of linear vibrating screen[J]. Coal Engineering, 2023,55(11):173-178.
- [18] 张士民,刘初升,周海沛,等.三轴变椭圆轨迹等厚振动筛动力学研究[J].煤矿机械,2011,32(6):75-76.
ZHANG Shimin, LIU Chusheng, ZHOU Haipei, et al. Dynamic study on constant thickness vibrating screen of variable elliptical trajectory with three axes[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(6): 75-76.
- [19] 秦双迎.新型高效三轴椭圆振动筛分设备[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(5):103-107.
QIN Shuangying. New efficient triaxial elliptical vibration screening equipment[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017,34(5):103-107.
- [20] 李战,包建东.单轴圆振动筛系统动力学仿真分析[J].工程机械,2021,52(11):19-24,8.
LI Zhan, BAO Jiandong. Dynamic simulation analysis of single shaft circular vibrating screen system [J]. Construction Machinery and Equipment, 2021,52(11):19-24,8.
- [21] 黄志洋,王婷,管玉君,等.高频双激振直线型振动筛研究[J].农业装备技术,2022,48(5):11-13.
HUANG Zhiyang, WANG Ting, GUAN Yujun, et al. A study of high frequency double excitation linear shakers[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2022,48(5):11-13.
- [22] 韩庆锋,吕志鹏,闵庆新,等.变椭圆振动筛筛分性能的数值模拟研究[J].石油机械,2024,52(4):62-70.
HAN Qingfeng, LYU Zhipeng, Min Qingxin, et al. Numerical simulation on sieving performance of variable-ellipse shale shaker [J]. China Petroleum Machinery, 2024,52(4):62-70.
- [23] 李源霜.大型椭圆式振动筛空心转轴动力学特性[D].上海:上海交通大学,2016:11-28.
- [24] 张永利,刘婷,马玉林,等.微波辐射煤体孔裂隙结构与渗流特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2022,41(6):481-489.
ZHANG Yongli, LIU Ting, MA Yulin, et al. Coal pore and fissure structure and permeability under microwave radiation[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2022, 41(6): 481-489.
- [25] 杨华瑞,马学东,赵轩瑾,等.基于DEM的复合振动筛矿物筛分机制模拟研究[J/OL].矿产综合利用,1-9[2024-07-08]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20231120.1538.012>.
YANG Huarui, MA Xuedong, ZHAO Xuanjin, et al. Simulation study of mineral screening mechanism of composite vibrating screen based on DEM [J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources: 1-9[2024-07-08]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20231120.1538.012>.
- [26] 王晓川,杨华瑞,马学东,等.复合振动筛筛分性能的离散元模拟研究[J/OL].应用力学学报,1-7[2024-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20230720.1044.006.html>.
WANG Xiaochua, YANG Huarui, MA Xuedong, et al. Discrete element simulation study of composite vibrating screen screening performance[J/OL]. Chinese Journal of Applied Mechanics: 1-7 [2024-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1112.O3.20230720.1044.006.html>.
- [27] 吴宝康.负压振动筛复合筛网结构优化设计与力学分析[D].北京:北京化工大学,2023:1-8.
- [28] 赵环帅,尹德夺.F系列复合振动筛技术研究与工业应用[J].中国煤炭,2019,45(8):91-95,115.
ZHAO Huanshuai, YIN Deduo. Research and industrial application of F-series composite vibration screen[J]. China Coal, 2019,45(8):91-95,115.
- [29] 李铁军.煤颗粒离散元模型宏观参数标定及其关系[D].太原:太原理工大学,2019:83-89.
- [30] 翟西湘,熊晓燕,唐建.湿煤颗粒聚团碰撞解聚的离散元模拟研究[J].煤炭工程,2019,51(12):167-171.
ZHAI Youxiang, XIONG Xiaoyan, TANG Jian. Impact disaggregation simulation of wet coal agglomerate using discrete element method [J]. Coal Engineering, 2019,51(12):167-171.
- [31] 廖贵文,姜永正,胡亚凡,等.基于表面能的湿煤颗粒含水率表征方法[J].中国粉体技术,2021,27(1):71-79.
LIAO Guiwen, JIANG Yongzheng, HU Yafan, et al. Methods for characterizing moisture content of wet coal particles based on surface energy[J]. China Powder Science and Technology, 2021, 27(1):71-79.