

# 含团聚物潮湿细粒煤与弛张筛板耦合振动分析\*

唐 建<sup>1,2</sup>, 熊晓燕<sup>1,2</sup>, 武 兵<sup>1,2</sup>, 曹 荣<sup>3</sup>

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室 太原, 030024)

(2. 太原理工大学机械与运载工程学院 太原, 030024)

(3. 晋西工业集团有限责任公司 太原, 030027)

**摘要** 为了明确筛分过程中含团聚物潮湿细粒煤物料群与弛张筛板间的耦合振动规律,首先,通过理论计算推导了单团聚物或物料颗粒与振动筛板碰撞的抛射速度及最大冲击力表达式;其次,构建了含团聚物潮湿细粒煤物料群-非线性弛张筛板的筛分过程联合仿真模型,并通过试验对其有效性进行了验证;最后,采用联合仿真模拟分析了振动参数对物料群与筛板间耦合动力学特性的影响。结果表明:单团聚物或物料颗粒抛射速度及最大冲击力由弛张筛板恢复系数、安装倾角、振动幅值、振动频率及振动角等参数共同决定;稳定筛分过程中,含团聚物潮湿细粒煤物料群非线性时变激励使弛张筛板产生拍振,物料群平均法向速度随筛板振动幅值及振动频率的增大而增大;适当增大筛板振动频率可提高物料群的筛分效率和生产率。研究结果为弛张筛分性能的优化及最优工作  $g$  值的确定提供了参考。

**关键词** 潮湿细粒煤物料群;团聚物;弛张筛板;耦合振动;筛分过程

**中图分类号** TD452; TH113

## 引 言

潮湿细粒煤物料群在筛分过程中,容易黏附成团、堵塞筛孔<sup>[1]</sup>,导致筛分过程恶化,筛分效率降低<sup>[2]</sup>。采用弛张筛对潮湿细粒煤进行深度筛分时,弹性筛板的抛射加速度达  $30g \sim 50g$ ,有利于单颗粒物料的透筛及团聚物的解聚,具有良好的筛分效果<sup>[3]</sup>,但高  $g$  值带来的结构破坏程度加剧的问题不容忽视。筛分过程中,含团聚物潮湿细粒煤物料群与大变形非线性运动筛板间的耦合动力学特性影响并制约着弛张筛的筛分效果及合理  $g$  值范围。因此,揭示团聚物、物料颗粒及物料群与大变形非线性运动筛板间的耦合作用机理,对弛张筛工作  $g$  值的降低及筛分性能的优化具有重要的意义。

目前,针对颗粒物料振动筛分过程的研究主要是利用离散元与多体动力学双向耦合的数值模拟方法<sup>[4-5]</sup>,分析不同激振及筛板参数下<sup>[5-8]</sup>非线性弹性筛板及其上单颗粒物料群的动力学特性,并基于筛分效果进行单因素及多因素参数优化<sup>[9-10]</sup>。为明确物料群颗粒润湿性对筛分过程的影响,Fernandez 等<sup>[11]</sup>采用光滑粒子流体动力学与离散元耦合方法模拟湿颗粒物料群的透筛行为,分析了湿颗粒物料黏性及

入料速度等对筛分行为的影响。然而,上述研究均未考虑潮湿细粒煤物料群中外在水分的分布状态及细颗粒的团聚行为。

潮湿细粒煤外在水分以物理吸附方式与煤颗粒相结合,当含水量为  $7\% \sim 14\%$  时,水在煤颗粒间以摆状液桥形式存在,颗粒间液桥力是团聚现象产生的主要原因<sup>[12-13]</sup>。筛分过程中,潮湿细粒煤团聚物与筛板发生碰撞,接触颗粒弹塑性变形产生的作用力传递至团聚物内部,打破了团聚物颗粒运动的一致性,使团聚物发生解聚<sup>[14-15]</sup>。现有关于潮湿细粒煤团聚物与筛板碰撞解聚过程的研究,一方面是基于颗粒动力学模拟;另一方面是基于试验方法,结合高速摄像机拍摄的图片,对以大颗粒为载体的潮湿细粒煤团聚体与壁面碰撞后细粒煤从大颗粒煤表面飞离过程进行了分析<sup>[16]</sup>。焦杨等<sup>[17]</sup>采用线性接触模型、库仑滑移接触模型及平行黏结模型组合描述颗粒间液桥力,模拟了包衣结构潮湿细粒煤团聚物与壁面碰撞解聚的物理过程。Chen 等<sup>[18]</sup>采用考虑毛细管力和黏性力的液桥模型描述颗粒间的相互作用,对潮湿细粒团聚体与刚性表面间的碰撞过程进行了数值模拟。翟西湘等<sup>[19]</sup>采用 bonding 模型描述

\* 国家自然科学基金资助项目(51775364)

收稿日期:2021-08-25;修回日期:2021-10-15

颗粒间液桥行为,模拟了潮湿等径细粒团聚物与柔性筛板的碰撞行为。上述研究针对潮湿细粒团聚物与静止壁面或筛板碰撞解聚模式、细颗粒分离过程及碰撞速度、旋转速度和筛板倾角对解聚过程的影响进行了定性分析;但对于实际筛分过程而言,没有考虑筛板运动在团聚物的碰撞解聚过程中的作用。

笔者通过理论计算,推导了筛分过程中单团聚物或物料颗粒与弛张筛大变形非线性运动筛板碰撞的抛射速度及最大冲击力表达式。考虑到含团聚物潮湿细粒煤物料群运动与筛板运动间复杂的耦合关系,采用联合仿真对不同振动参数下物料群与筛板间的耦合振动特性进行了模拟分析。

## 1 单团聚物及物料颗粒碰撞理论分析

单个团聚物或物料颗粒与安装倾角为 $\alpha$ 的弛张筛板非弹性碰撞过程如图1所示。 $\widehat{AB}$ 表示弛张筛板,长度为 $2s$ ,两端 $A, B$ 分别固定在弛张筛浮动筛框及固定筛框上,建立坐标系 $Oxy$ ,则 $A$ 端、 $B$ 端坐标分别为 $(x_A, y_A)$ 和 $(x_B, 0)$ 。 $\widehat{BC}$ 包含 $\widehat{AB}$ 和延长 $\widehat{AC}$ ,关于 $y$ 轴对称,团聚物或物料颗粒与弛张筛板接触碰撞位置坐标为 $(x, y)$ 。

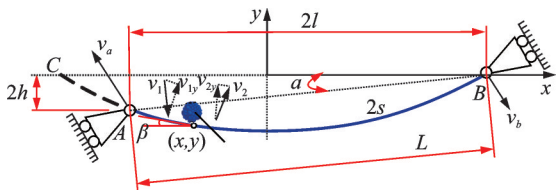


图1 团聚物或物料颗粒与弛张筛板接触碰撞过程示意图  
Fig.1 Contact-collision process diagram of the agglomerate or material particle with the screen panel

筛分过程中,弛张筛板 $(x, y)$ 处的挠度<sup>[20]</sup>可基于悬链线模型表示为

$$y = a \left\{ \cosh\left(\frac{x}{a}\right) - \cosh\left[\frac{l}{a} + \operatorname{arcsinh}\left(\frac{h}{\sqrt{s^2 - h^2}}\right)\right] \right\} \quad (1)$$

其中: $l$ 和 $h$ 分别为 $A, B$ 间沿 $x$ 方向和 $y$ 方向的距离的一半。

$a$ 可通过求解非线性方程(2)得到

$$\sqrt{s^2 - h^2} = a \sinh\left(\frac{l}{a}\right) \quad (2)$$

由图1中筛板变形的几何特征可得 $A, B$ 间的直线距离 $L^2 = (2l)^2 + (2h)^2$ ,且

$$\begin{cases} l = \frac{1}{2}(L \cos \alpha - x_1 + x_2) \\ h = \frac{1}{2}(L \sin \alpha + y_1 - y_2) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\}$ 分别为 $A$ 端、 $B$ 端沿 $x$ 方向和 $y$ 方向的位移,与浮动筛框与固定筛框的运动规律保持一致。

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos \omega t \\ y_1 = B_1 \cos \omega t \\ x_2 = A_2 \cos \omega t \\ y_2 = B_2 \cos \omega t \end{cases} \quad (4)$$

其中: $A_1, A_2$ 分别为浮动筛框与固定筛框沿 $x$ 方向的位移幅值; $B_1, B_2$ 分别为浮动筛框与固定筛框沿 $y$ 方向的位移幅值; $\omega$ 为筛框的振动频率。

由上述可知, $l, h$ 和 $a$ 均为时间 $t$ 的函数。 $l$ 和 $h$ 的1阶导数可表示为

$$\begin{cases} l' = \frac{1}{2}(A_1 - A_2)\omega \sin(\omega t) \\ h' = \frac{1}{2}(B_2 - B_1)\omega \sin(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{令 } Q = \operatorname{arcsinh}\left(\frac{h}{\sqrt{s^2 - h^2}}\right) + \frac{l}{a}, \quad R = ah' \sqrt{\frac{s^2}{s^2 - h^2} +$$

$l' \sqrt{s^2 - h^2}$ ,筛板沿 $y$ 方向的速度可表示为

$$y' = a \left[ \cosh\left(\frac{x}{a}\right) - \cosh Q - \frac{x}{a} \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \right] + \frac{\sinh Q}{a \sqrt{s^2 - h^2}} \left[ la' \sqrt{s^2 - h^2} - aR \right] \quad (6)$$

当团聚物或物料颗粒与筛板发生非弹性碰撞时

$$v_{2y} - v_y = -e_y(v_{1y} - v_y) \quad (7)$$

其中: $v_y$ 为筛板 $(x, y)$ 处的法向速度,且 $v_y = y' \cos \beta$ , $\beta$ 为筛板 $(x, y)$ 处切线与 $x$ 轴间的夹角,由筛板挠度 $y$ 及安装倾角 $\alpha$ 共同决定; $e_y$ 为筛板的法向恢复系数; $v_{1y}$ 为团聚物与筛板发生接触碰撞前沿筛板法向速度分量,且 $v_{1y} = v_1 \cos \beta$ , $v_1$ 为团聚物或物料颗粒与筛板接触碰撞的速度; $v_{2y}$ 为团聚物与筛板发生接触碰撞后沿筛板法向速度分量或物料颗粒碰撞抛射速度沿筛板法向分量。

根据式(7)可得

$$v_{2y} = -e_y v_{1y} + (1 + e_y) v_y = -e_y v_1 \cos \beta + (1 + e_y) y' / \cos \beta \quad (8)$$

实际筛分过程中,团聚物与筛板碰撞发生解聚,而物料颗粒与筛板碰撞被抛射,因此根据式(8),团聚物接触碰撞后的等效速度或物料颗粒的碰撞抛射速度为

$$v_2 = v_{2y}/\cos\beta = -e_y v_1 + (1 + e_y) y' / \cos^2\beta \quad (9)$$

假设团聚物或物料颗粒与弛张筛板在  $t_1$  时刻发生接触碰撞,接触碰撞过程  $\Delta t$  内,团聚体或物料颗粒动量变化受自身重力和冲击力的影响,根据动量定理可得

$$m(v_{2y} - v_{1y}) = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} F(t) dt - \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} mg \cos\beta dt = \bar{F}(t) \Delta t - mg \cos\beta \Delta t \quad (10)$$

其中: $m$ 为团聚物或物料颗粒的质量; $\bar{F}(t)$ 为接触碰撞时间  $\Delta t$  内的平均冲击力。

$\Delta t$  的计算公式<sup>[21]</sup>可通过试验方法获得

$$\Delta t = \frac{1}{100} \left( 0.097mg + 2.21H + \frac{0.09g}{v_{1y}^2} + 1.2 \right) \quad (11)$$

其中: $H$ 为筛板因团聚物或物料颗粒碰撞导致的变形量。

设最大冲击力  $F_{\max} = k\bar{F}(t)$ ,由式(10)和式(11)可知,团聚物或物料颗粒与筛板接触碰撞时间  $\Delta t$  内的最大冲击力可表示为

$$F_{\max} = \frac{100km(1 + e_y)(y' / \cos\beta - v_1 \cos\beta)}{0.097mg + 2.21H + \frac{0.09g}{v_1^2 \cos^2\beta} + 1.2} + kmg \cos\beta \quad (12)$$

筛分过程中,团聚物的解聚程度或物料颗粒在筛板上的运动规律均与碰撞最大冲击力  $F_{\max}$  和抛射速度  $v_2$  有关。结合式(6)、式(9)和式(12)可知,最大冲击力  $F_{\max}$  和抛射速度  $v_2$  受弛张筛板材料、安装倾角、振动幅值、振动频率及振动角等参数的共同影响,可通过调节上述参数,改变单个团聚物或物料颗粒与筛板作用的动力学特性。

## 2 筛分过程联合仿真模型构建

筛分过程中,含团聚物潮湿细粒煤物料群在弛张筛非线性筛板上的运动相当复杂,其中涉及物料颗粒与团聚物相互碰撞及物料群与筛板的非线性耦合运动特性,仅根据单团聚物及物料颗粒碰撞理论分析结果无法充分描述。为此,笔者利用RecurDyn多体动力学软件模拟筛板的复杂非线性运动,利用EDEM离散元软件构建含团聚物潮湿细粒煤物料群离散元模型,将二者优势相结合,通过联合仿真对含团聚物潮湿细粒煤物料群筛分过程进行模拟。

### 2.1 含团聚物潮湿细粒煤物料群离散元模型的建立

潮湿细粒煤物料群离散元模型包括单颗粒物料

群模型和团聚物模型。

单颗粒物料群模型由易筛颗粒、难筛颗粒、阻碍颗粒和筛上颗粒组成,单颗粒物料群的颗粒组成如表1所示,包括粒径范围、与筛孔的相对粒度及初始质量百分比。

表1 单颗粒物料群的颗粒组成

Tab.1 Composition of wet fine coal material group			
颗粒类型	相对粒度	粒径范围/	质量百分比/
		mm	%
易筛颗粒	<0.75	0~4.5	50.5
难筛颗粒	0.75~1.00	4.5~6	15.0
阻碍颗粒	1.00~1.50	6~9	7.5
筛上颗粒	>1.50	9~40	27.0

团聚物模型采用壁面挤压方式构建团聚物多粒度内聚颗粒群,通过颗粒替换方法,赋予团聚物颗粒群初始位置及速度信息。

假设团聚物中各液桥含液量恒定,忽略颗粒间动态液桥力,团聚物离散元模型中颗粒间液桥作用可基于Mikami等<sup>[22]</sup>提出的液桥模型(见图2),通过EDEM二次开发编译Hertz-Mindlin with Liquid Bridge接触模型来描述。当颗粒间距未达到液桥临界断裂距离时,颗粒间无量纲静态液桥力的回归表达式为

$$\hat{F}_c = \exp(A\hat{h} + B) + C \quad (13)$$

参数  $A, B, C$  可分别表示为

$$A = -1.1\hat{V}^{-0.53} \quad (14)$$

$$B = \left( -0.34\ln\hat{V} - 0.96 \right) \theta^2 - 0.019\ln\hat{V} + 0.48 \quad (15)$$

$$C = 0.0042\ln\hat{V} + 0.0078 \quad (16)$$

其中: $\theta$ 为颗粒与填隙液体的固-液接触角; $\hat{h}$ 为颗粒间无量纲分离距离的1/2, $\hat{h} = h/R_{\text{eff}}$ , $R_{\text{eff}}$ 为等效半径; $\hat{V}$ 为无量纲液桥体积, $\hat{V} = V/R_{\text{eff}}^3$ , $V$ 为颗粒间液桥体积,且  $V = V_1 + V_2$ 。

对于颗粒半径分别为  $R_1$  和  $R_2$  的不等径球体,有

$$R_{\text{eff}} = 2R_1R_2/(R_1 + R_2) \quad (17)$$

$$V_1 = \frac{L_1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R_1^2}{(R_1 + R_2)^2}} \right) \quad (18)$$

$$V_2 = \frac{L_2}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R_2^2}{(R_1 + R_2)^2}} \right) \quad (19)$$

其中: $L_1, L_2$ 分别为分布在颗粒1和颗粒2表面的总液体体积<sup>[23]</sup>。





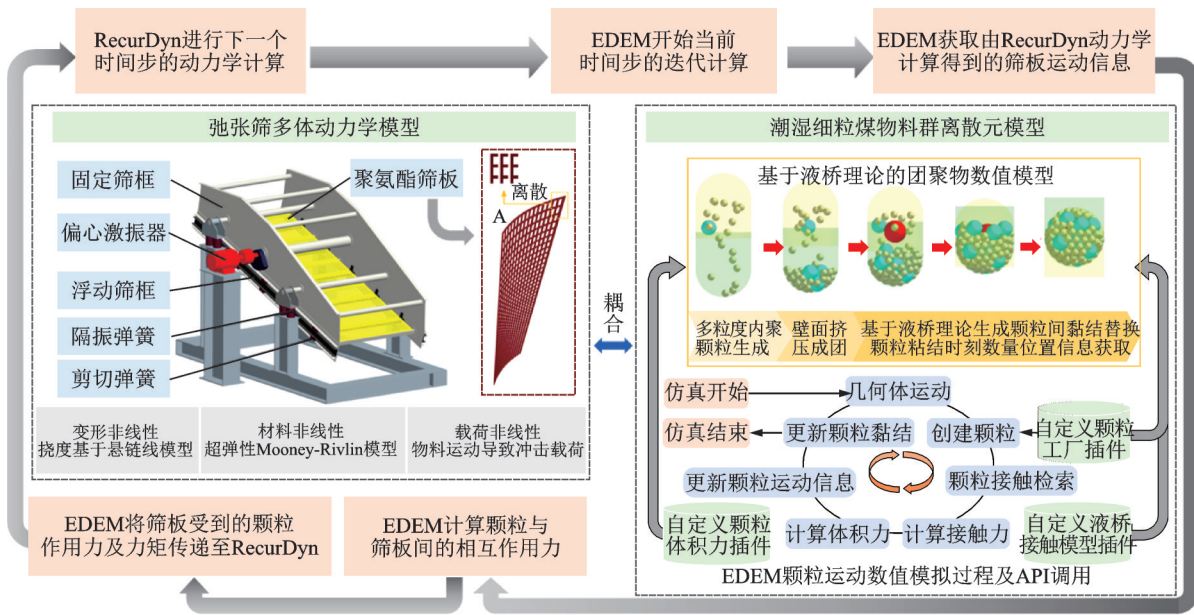


图 3 筛分过程联合仿真模型

Fig.3 Co-simulation model of screening process

### 3 仿真模型试验验证

为了验证图 3 所示含团聚物潮湿细粒煤筛分过程数值模拟的有效性,基于图 4 搭建的弛张筛筛分过程模拟试验台,分别对单颗粒物料群与团聚物筛分过程进行模拟。考虑到筛分过程的随机性,单纯筛分结果数值比较缺乏可靠性,因此针对图 4 所示的筛板 1(表面光滑)和筛板 2(表面有均匀分布的凸起)分别进行筛分过程模拟,从单颗粒物料群筛分效率和团聚物解聚程度两方面,就相同条件下仿真结果趋势与试验结果趋势的一致性进行对比。

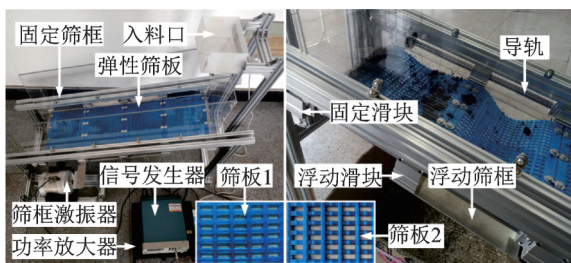


图 4 筛分过程模拟试验台

Fig.4 Experiment platform of the screening process

如图 4 所示,试验台采用滑块-导轨结构,固定筛框、浮动筛框分别与固定滑块、浮动滑块相连。固定滑块固定在导轨上,浮动滑块在激振力作用下沿导轨往复运动,与固定滑块产生相对运动,带动两端分别与固定筛框、浮动筛框相连的弹性筛板作周期性弛张运动。筛板的分级粒度为 6 mm。试验过程

中,浮动滑块在激振力作用下,谐振频率为 13.5 Hz,振幅为 2.9 mm。待筛分物料由筛板上方 500 mm 处入料口下落至筛板入料端进行筛分作业。

#### 3.1 单颗粒物料群筛分效率对比

单颗粒物料群的筛分效率为实际筛下物质量与理论筛下物质量之比,即

$$\eta = \frac{Q_1}{Q - a} \times 100\% = \frac{b100(a - c)}{a(100 - c)} \times 100\% \quad (22)$$

其中: $Q_1$ 为实际筛下物质量; $Q$ 为入筛物料质量; $a$ 为待筛分物料中小于筛孔尺寸的颗粒百分含量; $c$ 为筛上物中小于筛孔尺寸的颗粒百分含量; $b$ 为筛上物与筛下物质量之和与入筛物料质量的比值。

试验中待筛分单颗粒物料群质量为 1 600 g,易筛颗粒、难筛颗粒、阻碍颗粒和筛上颗粒粒径及质量百分比与表 1 相同,质量分别为 808, 240, 120 和 432 g。筛分结束后使用 4.5, 6.0 和 9.0 mm 的标准筛对筛上物和筛下物的粒度组成、质量及质量百分比进行统计,结果如图 5 所示。由于实际筛分过程存在物料颗粒损失,同一粒级颗粒筛上物和筛下物质量百分比之和无法达到 100%。

仿真模拟与试验模拟获得的筛分效率对比如表 5 所示,两者结果一致,即筛板 2 对应的  $c$  值小于筛板 1,  $\eta$  值高于筛板 1。表明采用筛板 2,筛上物中理论筛下物比例更小,错配率更低,筛分效率更高。

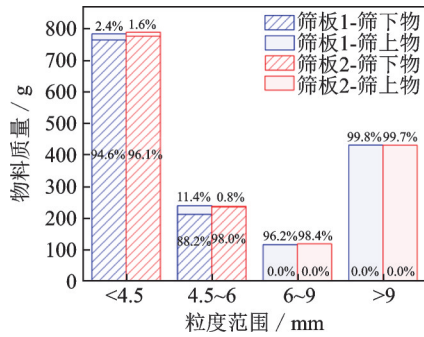


图 5 单颗粒物料群-筛上物、筛下物的统计结果

Fig.5 The statistical results of bulk materials-compositions of screening products

表 5 筛分效率对比

Tab.5 Comparison of screening results

模拟	筛板	a / %	c / %	b	η / %
仿真	1	65.50	16.73	1.000 0	89.42
	2	65.50	2.48	1.000 0	98.66
试验	1	65.50	7.91	0.981 0	93.13
	2	65.50	2.57	0.984 4	96.56

3.2 团聚物解聚程度对比

对于数值模拟,团聚物碰撞解聚程度采用黏结残量  $v$  来描述,即残余黏结键数与初始黏结键数的比值。团聚物的黏结残量与解聚程度呈负相关,黏结残量越小,解聚程度越大。由于试验无法直观获得团聚物内部黏结键的断裂情况,故采用解聚后颗粒的粒度分布规律来表征解聚程度。

考虑到实际团聚物颗粒粒度、含水量及宏观尺寸等在一定范围内存在随机性,试验过程中为保证团聚物的一致性,便于结果统计与对比分析,根据数值模拟中煤颗粒粒度及质量百分比配置试验团聚物煤样,参考表 2 中含水量值,风干后煤样按照 14% 的含水量配入一定体积的纯净水并搅拌均匀,利用球形容器制备直径约为 15 mm 的团聚物。

试验选取团聚物数量为 150,总质量为 286 g。筛分结束后,使用 1,2,4,6 和 9 mm 的标准筛分别对筛上物和筛下物的粒度组成、质量及质量百分比进行统计,结果如图 6 所示。

团聚物碰撞解聚后内聚颗粒粒度分布服从两参数 Weibull 模型,即

$$W = 1 - \exp\left[-\left(d_k/d_0\right)^{m_0}\right] \quad (23)$$

其中: $d_k$ 为颗粒粒度,指颗粒可通过的最小筛孔尺寸; $d_0$ 为 Weibull 分布的尺度参数,用来表示解聚程度, $d_0$ 越大,解聚越困难; $m_0$ 为解聚特性指数,即 Weibull 模量,表示粒度分布的离散程度, $m_0$ 越小,

粒度分布的离散性越高; $W$ 表示筛孔尺寸为  $d_k$  时,筛下物质量与物料总质量的比值,即筛孔尺寸为  $d_k$  时筛下物的累计概率。

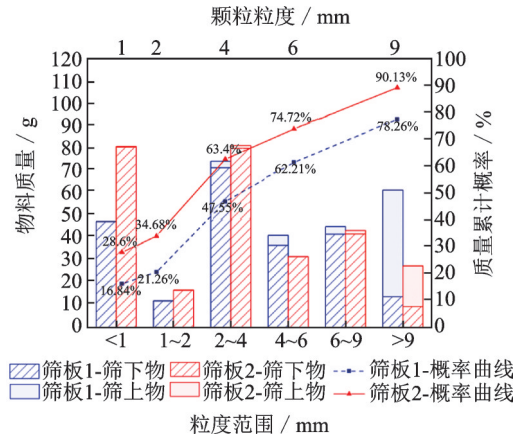


图 6 团聚物-筛上物、筛下物的统计结果

Fig.6 The statistical results of agglomerates-compositions of screening products

对式(23)进行对数变换,得到粒度小于筛孔直径  $d_k$  颗粒的质量累计概率分布函数为

$$F_w(d_k) = m_0 \ln d_k - m_0 \ln d_0 \quad (24)$$

基于图 6 所示的团聚物碰撞解聚质量累计概率曲线,并结合式(24)计算对数累积概率,绘制如图 7 所示的团聚物碰撞解聚粒度分布散点图及拟合曲线。根据拟合曲线方程,获得了筛板 1 和筛板 2 团聚物解聚程度参数  $d_0$  和解聚特性指数  $m_0$ ,其碰撞解聚程度对比如表 6 所示。

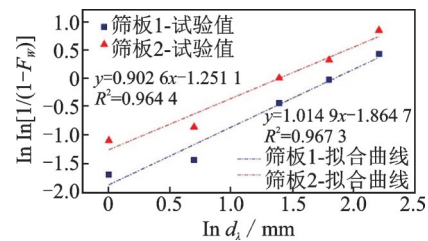


图 7 团聚物碰撞解聚粒度分布及曲线拟合

Fig.7 Size distribution of the disaggregated particles with impacts and the curve fitting

表 6 团聚物碰撞解聚程度对比

Tab.6 Comparison of disaggregated degrees of agglomerates with impacts

筛板	仿真		试验	
	v / %	$m_0$	$m_0$	$d_0$
1	24.06	1.014 9	1.014 9	6.279 7
2	15.94	0.902 6	0.902 6	3.999 2

由表 6 中的仿真模拟结果可知,筛板 2 团聚物的黏结残余值更小,即采用筛板 2 时团聚物的解聚程度更高。对比试验结果,筛板 2 团聚物的解聚程



度参数  $d_0$  和解聚特性指数  $m_0$  均小于筛板1的对应值,即采用筛板2,团聚物在筛分过程中更易解聚,解聚颗粒粒度分布离散程度更高,解聚效果更好。

综上,筛板2的筛分性能优于筛板1,仿真结果趋势在单颗粒物料群筛分效果和团聚物碰撞解聚程度两方面,均与试验结果趋势相吻合,证明了含团聚物潮湿细粒煤筛分过程联合仿真模型的有效性。

### 4 耦合振动特性仿真分析

仿真模拟0.5 s和2.6 s时,含团聚物潮湿细粒煤物料群筛分的状态,如图8所示。

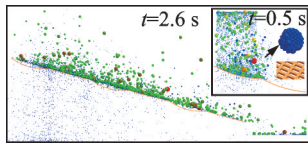


图8 潮湿细粒煤物料群筛分过程的仿真模拟

Fig.8 Screening process simulation of moist fine coal material group

筛分过程中,含团聚物潮湿细粒煤物料群与筛板间的耦合作用决定了最终的筛分效果。对于一个确定的弛张筛,当落料高度、筛板材料及安装倾角等参数一定时,物料群的运动状态受筛板振动强度  $K_v$  的影响,  $K_v$  由振动幅值  $A$  和振动频率  $\omega$  决定,即

$$K_v = A\omega^2/g \quad (25)$$

为了研究筛板振动幅值及振动频率对含团聚物潮湿细粒煤物料群筛分过程动力学特性的影响,基于建立的筛分过程联合仿真模型,模拟分析了不同振动幅值及振动频率下筛板-物料群的耦合运动及筛分效果。

#### 4.1 振动幅值的影响

为了保证筛分过程中筛板具有较大抛射加速度,根据弛张筛振动特性<sup>[20]</sup>,选取筛板振动频率为13 Hz。图9~11为不同振动幅值下,筛板中点法向速度、物料群平均法向速度、筛分效率及生产率,此处振动幅值为筛分过程中筛板中点的最大幅值。

由图9可知,4~4.5 s稳定筛分过程中,物料群颗粒运动产生的时变激励使筛板产生拍振,筛板中点法向速度的最大值及波动程度均随振动幅值的增大而增大。

由图10可知,启动阶段的物料群颗粒平均法向速度与振幅成反比;落料阶段的物料群颗粒运动的复杂性及非线性性增强,物料群颗粒平均法向速度波动随着振动幅度的增大而增大;2.5 s后落料结束,筛板上物料颗粒数量不再增加,由于此时部分物

料颗粒已完成透筛,筛板上颗粒数量及相互间碰撞减少,平均法向速度取决于筛板振动强度,因此随筛板振幅的增大而增大。

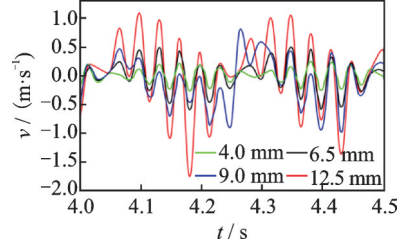


图9 不同振动幅值下筛板中点法向速度

Fig.9 Velocities of the screen panel's midpoint under different vibration amplitudes in the normal direction

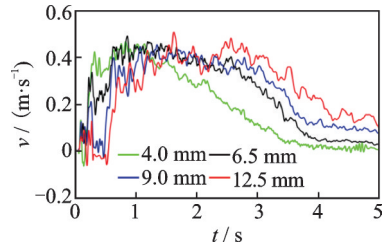


图10 不同振动幅值下物料群平均法向速度

Fig.10 Average velocity of material group under different vibration amplitudes in the normal direction

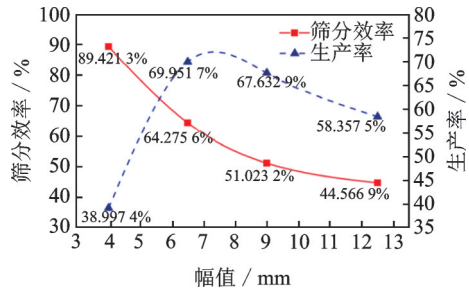


图11 不同振动幅值下物料群的筛分效率及生产率

Fig.11 Screening efficiencies and production ratios of material group under different vibration amplitudes

由图11可知,筛板振幅在6.5~12.5 mm范围内时,物料群的筛分效率和生产率均随筛板振动幅值的增大而减小。这是因为:①筛板振幅越大,稳定筛分阶段物料群颗粒的法向平均速度越大,颗粒在筛板上方停留时间越长,触筛次数越少,透筛概率及筛分效率越低;②物料群颗粒较大的平均法向速度导致其竖直方向较大的抛射行程,单位时间内处理量及生产率较低;③筛板振动幅值的增大会加剧物料群颗粒运动的混乱度,影响筛分效率和生产率。当筛板振幅为4 mm时,物料群筛分效率最高,生产率最低,这是由于物料群颗粒沿筛板排料方向运动速度过小导致的。

## 4.2 振动频率的影响

图12~14为当筛板振动幅值为4 mm时,不同振动频率下,筛板中点法向速度、物料群平均法向速度、筛分效率及生产率。

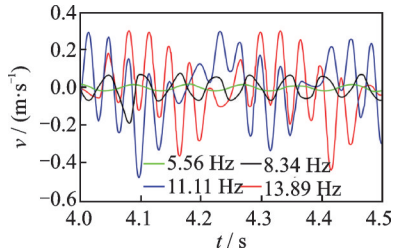


图12 不同振动频率下筛板中点法向速度

Fig.12 Velocities of the screen panel's midpoint under different vibration frequencies in the normal direction

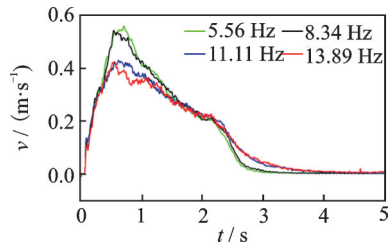


图13 不同振动频率下物料群平均法向速度

Fig.13 Average velocity of material group under different vibration frequencies in the normal direction

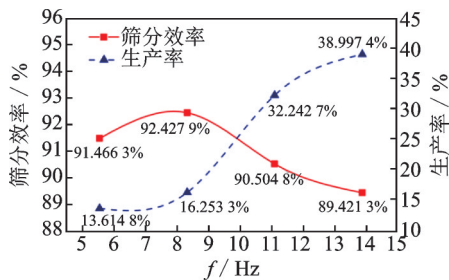


图14 不同振动频率下物料群的筛分效率及生产率

Fig.14 Screening efficiencies and production ratios of material group under different vibration frequencies

由图12可知,4.0~4.5 s稳定筛分过程中,筛板中点法向速度的最大值及波动程度与振动频率成正比。

由图13可知,启动及落料阶段,物料群颗粒的平均法向速度逐渐增大,由于较大的振动频率会增加因物料群颗粒与筛板的接触碰撞运动抵消造成能量损耗的几率,导致物料群颗粒动能减小,因此筛板上物料颗粒平均法向速度的最大值与振动频率成反比;2.5 s后落料结束,筛板上物料颗粒数量不再增加,颗粒运动逐渐趋于一致,物料群平均法向速度取决于筛板提供的振动强度,因此随筛板振动频率的增大而增大。

由图14可知,振动频率在8.34~13.89 Hz范围内时,物料群的筛分效率随振动频率的增大而减小,生产率随振动频率的增大而增大。这是因为较低的振动频率可使物料群颗粒在落料阶段获得较大的平均法向速度,有利于团聚物碰撞解聚,促进易筛颗粒分层透筛。同时,稳定筛分过程中,振动频率越低,物料群颗粒平均法向速度越小,物料群颗粒触筛次数越多,透筛概率越高。当振动频率为5.56 Hz时,物料群颗粒过高的平均法向速度对整个筛分过程的不利影响超过了对落料阶段有利影响,导致最终筛分效率较低。对于整个筛分过程而言,振动频率的增大,有利于加快物料筛分速度,故相同筛分作业时间获得的生产率较大。

## 5 结论

1) 单团聚物或物料颗粒与弛张筛板碰撞抛射速度及最大冲击力受弛张筛板材料、安装倾角、振动幅值、振动频率及振动角等参数的共同影响。

2) 稳定筛分过程中,物料群颗粒运动产生的时变激励使筛板产生拍振,筛板中点的最大法向速度与振动幅值及振动频率均成正比。物料群颗粒运动呈现明显的非线性特性,较大的振动幅值与振动频率会加剧物料群颗粒运动的混乱程度,物料群颗粒的平均法向速度与振动幅值及振动频率均成正比。

3) 在6.5~12.5 mm振动幅值及8.34~13.89 Hz振动频率范围内,物料群的筛分效率与振动幅值与振动频率成反比;生产率与振动幅值成反比,与振动频率成正比。相同振动频率下,振动幅值从6.5 mm增加到12.5 mm,筛分效率减小了19.7087%,生产率减小了11.5942%;相同振动幅值下,振动频率从8.34 Hz增至13.89 Hz,筛分效率减小了3.0066%,生产率增大了22.7441%。

## 参 考 文 献

- [1] 陶秀祥,赵跃民,杨国华,等. 潮湿细粒煤炭筛分过程堵孔机理的研究[J]. 煤炭学报,2000,25(2):196-199. TAO Xiuxiang, ZHAO Yuemin, YANG Guohua, et al. Study on mechanism of aperture blinding in the screening of moist fine coal[J]. Journal of China Coal Society, 2000,25(2):196-199. (in Chinese)
- [2] CLEARY P W, WILSON P, SINNOTT M D. Effect of particle cohesion on flow and separation in industrial vibrating screens[J]. Minerals Engineering, 2018, 119: 191-204.
- [3] ZHENG G F, ZHU J B, XIA W D, et al. Banana flip-



- flow screen benefits coal preparation[J]. *Filtration+Separation*, 2016, 53(4):38-41.
- [4] PENG L P, JIANG H S, CHEN X H, et al. A review on the advanced design techniques and methods of vibrating screen for coal preparation[J]. *Powder Technology*, 2019, 347:136-147.
- [5] 张新. 基于双电机协同驱动弛张筛面的动态特性研究[D]. 太原:太原理工大学, 2019.
- [6] JIANG H S, DUAN C L, WU J D, et al. Kinematics characteristics of the vibrating screen with rigid-flexible screen rod and the behavior of moist coal particles during the dry deep screening process[J]. *Powder Technology*, 2017, 319:92-101.
- [7] ZHOU Z G, HUANG L, JIANG H S, et al. Kinematics of elastic screen surface and elimination mechanism of plugging during dry deep screening of moist coal[J]. *Powder Technology*, 2019, 346:452-461.
- [8] JIANG H S, YU S J, PAN M, et al. Effect of excitation parameters on motion characteristics and classification performance of rigid-flexible coupled elastic screen surface for moist coal[J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31(3):1196-1208.
- [9] PAN M, DUAN C L, TANG L G, et al. Kinematics of a novel screen surface and parameter optimization for steam coal classification[J]. *Powder Technology*, 2020, 364:382-391.
- [10] JIANG H S, WANG W N, ZHOU Z G, et al. Simultaneous multiple parameter optimization of variable-amplitude equal-thickness elastic screening of moist coal[J]. *Powder Technology*, 2019, 346:217-227.
- [11] FERNANDEZ J W, CLEARY P W, SINNOTT M D, et al. Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(8):741-753.
- [12] 赵跃民,陈惜明,朱红,等. 潮湿细粒物料的粘附模型研究[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(4):430-433.  
ZHAO Yuemin, CHEN Ximing, ZHU Hong, et al. Study on moist fine materials' adhering model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(4):430-433. (in Chinese)
- [13] 赵跃民,陈惜明,朱红. 潮湿细粒物料的透筛粘附模型[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(2):120-123.  
ZHAO Yuemin, CHEN Ximing, ZHU Hong. Adhesive model of screening fine moist material[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(2):120-123. (in Chinese)
- [14] THORNTON C, LIU L. How do agglomerates break?[J]. *Powder Technology*, 2004, 143/144:110-116.
- [15] FU J, REYNOLDS G K, ADAMS M J, et al. An experimental study of the impact breakage of wet granules [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(14):4005-4018.
- [16] 焦杨,章新喜,孔凡成. 湿煤聚团碰撞破碎模式及分离机制[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(1):156-163.  
JIAO Yang, ZHANG Xinxi, KONG Fancheng. Impact failure patterns and separation mechanics of the wet coal agglomerates[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2015, 44(1):156-163. (in Chinese)
- [17] 焦杨,章新喜,孔凡成,等. 湿颗粒聚团碰撞解聚过程的离散元法模拟[J]. *物理学报*, 2015, 64(15):320-329.  
JIAO Yang, ZHANG Xinxi, KONG Fancheng, et al. Discrete element simulation of impact disaggregation for wet granule agglomerate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(15):320-329. (in Chinese)
- [18] CHEN H S, LIU W W, ZHENG Z, et al. Impact dynamics of wet agglomerates onto rigid surfaces [J]. *Powder Technology*, 2021, 379:296-306.
- [19] 翟酉湘,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. (in Chinese)
- [20] XIONG X Y, NIU L K, GU C X, et al. Vibration characteristics of an inclined flip-flow screen panel in banana flip-flow screens[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 411:108-128.
- [21] 杨其新,关宝树. 落石冲击力计算方法的试验研究[J]. *铁道学报*, 1996, 1:101-106.  
YANG Qixin, GUAN Baoshu. Test and research on calculating method of falling stone impulsive force[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1996, 1:101-106. (in Chinese)
- [22] MIKAMI T, KAMIYA H, HORIO M. Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed [J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(10):1927-1940.
- [23] SHI D, MCCARTHY J J. Numerical simulation of liquid transfer between particles[J]. *Powder Technology*, 2008, 184(1):64-75.



**第一作者简介:**唐建,女,1993年8月生,博士生。主要研究方向为机械系统动力学。曾发表《Viscoelasticity of rubber springs affects vibration characteristics of a flip-flow screen with the high G value》(《IEEE Access》2020, Vol.8)等论文。  
E-mail: tyuttj@163.com

**通信作者简介:**熊晓燕,女,1970年3月生,教授、博士生导师。主要研究方向为机电系统故障诊断与智能控制。  
E-mail: xiongxy7070@163.com