

# 刚柔耦合弹性筛分机理与动力煤 3 mm 分级试验

潘 森<sup>1</sup>,段晨龙<sup>1</sup>,石 巍<sup>1,2</sup>,周治国<sup>1</sup>,江海深<sup>1</sup>,赵跃民<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学,江苏 徐州 221116;2. 江苏亿亿和华筛分设备有限公司,江苏 徐州 221003)

**摘要:**动力煤广泛应用于电力、冶金、建材以及化工等领域,筛分是动力煤加工利用的关键环节。随着采煤机械化的发展,其细粒含量逐渐增加,当物料水分较高时易造成颗粒团聚,筛分作业难以进行,因此开展黏湿动力煤高效干法深度筛分至关重要。传统干法筛分过程多为 6 mm 分级、甚至 13 mm 以上分级,原煤入选比例低,造成资源浪费和环境污染等问题,降低其分级下限是目前亟待解决的技术难题。传统筛面为刚性筛面和弹性筛面,前者容易造成物料卡堵,后者在筛分过程中筛面局部易发热老化,大大降低筛分效率和筛机处理能力。为提高黏湿动力煤 3 mm 干法高效筛分效果,笔者提出了刚柔耦合弹性筛分方法。采用振动测试手段研究了刚柔耦合弹性筛面运动学特性,阐明了筛面的运动行为与弹性区域形变规律,揭示了刚柔耦合弹性筛分机理。采用多因素逐项试验方法,探究了处理能力与外水含量对动力煤 3 mm 刚柔耦合弹性筛分过程的影响规律与机制。结果表明:弹性区域较刚性区域位移幅值增加 87.69%,加速度幅值增加 98.08%;随处理能力的增加,综合分离指数呈先升高后降低的趋势,处理能力为 2.00 kg/s、物料外水含量为 6.13% 时,综合分离指数在 89.00% 以上;外水含量的增加导致综合分离指数降低,外水含量升至 11.01% 时,综合分离指数达 78.92%,表明刚柔耦合弹性筛面可实现黏湿动力煤 3 mm 的干法高效筛分。

**关键词:**刚柔耦合;弹性筛分;动力煤;综合分离指数;运动学

中图分类号:TD94

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)03-0043-06

## Mechanism of rigid-flexible coupling elastic screening and 3 mm classification test of steam coal

PAN Miao<sup>1</sup>, DUAN Chenlong<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhiguo<sup>1</sup>, JIANG Haishen<sup>1</sup>, ZHAO Yuemin<sup>1</sup>

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Hewa Screening product Co., Ltd., Xuzhou 221003, China)

**Abstract:** Steam coal is widely used in electric power, metallurgy, building materials, chemical engineering and other fields. Screening is the key link of steam coal processing and utilization. With the development of coal mining mechanization, the content of fine particles gradually increases, when the moisture content of materials is high, it is easy to cause particles agglomeration, screening becomes difficult. Therefore, it is important to carry out efficient dry deep screening of viscous-moist steam coal. The traditional dry screening process mainly is classified by 6 mm, or even more than 13 mm, and the beneficiation proportion of raw coal is low, resulting in resources waste and environmental pollution. Reducing the lower limit of classification is a technical problem to be solved urgently at present. The traditional screen surfaces are rigid screen surface and elastic screen surface, the former is easy to cause aperture blockage, the latter is prone to local fever and aging during screening, greatly reducing the screening efficiency and the processing capacity of screen machine. In order to improve the efficiency of 3 mm dry screening of viscous-moist steam coal, the rigid-flexible coupling elastic screening method was proposed. The kinematics characteristics of rigid-flexible coupling elastic screen surface were studied by means of vibration test, motion behavior of sieve surface and the change rule of flexible region were clarified, and the mechanism of rigid-flexible coupling elastic screening was revealed. The

收稿日期:2019-04-24;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19042402

基金项目:NSFC-辽宁联合基金重点资助项目(U1508210);江苏省优秀青年基金资助项目(BK20160055);江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20180650)

作者简介:潘 森(1996—),男,吉林白城人,硕士研究生,从事高效筛分研究。E-mail:cumt\_pm1996@163.com。通讯作者:段晨龙(1978—),男,江苏徐州人,教授,博士,从事高效筛分、干法分选及二次资源循环利用研究。E-mail:clduan@cumt.edu.cn

引用格式:潘森,段晨龙,石巍,等.刚柔耦合弹性筛分机理与动力煤 3 mm 分级试验[J].洁净煤技术,2019,25(3):43-48.

PAN Miao, DUAN Chenlong, SHI Wei, et al. Mechanism of rigid-flexible coupling elastic screening and 3 mm classification test of steam coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3): 43-48.



移动阅读

influences of treatment capacity and external water content on 3 mm rigid-flexible coupling elastic screening process of steam coal were investigated by multi-factor successive terms test. The results show that the displacement amplitude and acceleration amplitude in elastic region increased by 87.69% and 98.08% respectively compared with that in rigid region; With the increase of treatment capacity, the comprehensive separation index increases first and then decreases, when the treatment capacity is 2.00 kg/s and the external water content of materials is 6.13%, the comprehensive separation index is above 89.00%. The increase of external water content leads to the decrease of comprehensive separation index, while the external water content rises to 11.01%, the comprehensive separation index is up to 78.92%, it is indicated that the rigid-flexible elastic screen surface can realize the high efficiency of 3 mm dry screening of viscous-moist steam coal.

**Key words:** rigid-flexible coupling; elastic screening; steam coal; comprehensive separation index; kinematics

## 0 引言

动力煤广泛应用于电力、冶金、建材及化工等行业,具有粒度越小灰分越低的特点<sup>[1]</sup>。随着采煤机械化的发展,原煤中细粒物料含量逐渐升高,该部分原煤进入分选系统,严重影响主选设备的分选精度,且增加煤泥含量,末煤产品外水含量升高,发热量降低<sup>[2-3]</sup>。为降低选煤成本、实现煤泥减量、节能环保、优化产品结构,对动力煤进行选前干法深度筛分具有重要意义,其分选过程宜采用原煤筛分-块煤入选-末煤不分选工艺<sup>[4]</sup>。

传统刚性6、13 mm干法筛分过程,因采煤过程井下防尘喷水以及煤层渗水,原煤外水含量较高,与细粒煤炭接触形成大量细泥,筛面糊堵及卡堵现象严重,恶化筛分效果<sup>[5-6]</sup>。为解决上述问题,弛张筛广泛用于动力煤干法深度筛分过程,通过筛面的弛张运动产生较大的抛射强度,促进物料松散、分层及透筛,但筛面作业时易发热老化,导致局部区域破损,且弛张筛具有结构复杂、安装空间要求高、同等筛长处理能力低以及价格昂贵等问题,限制了其发展<sup>[7-8]</sup>。同时,采用6、13 mm分级时,原煤入选比例低,精煤产率小,造成资源浪费与环境污染。据此,研究筛分效果好、处理能力大的动力煤3 mm干法筛分方法,对实现动力煤的清洁高效利用具有重要意义<sup>[9]</sup>。

相关学者从物料特性、设备性能以及操作参数等方面开展了研究,陈惜明等<sup>[10-11]</sup>分析了潮湿煤炭表界面化学性质,矿物质的存在提高了潮湿细粒煤的黏聚强度,指出颗粒间液桥力是造成其黏附的主要因素。赵啦啦等<sup>[12-13]</sup>采用DEM仿真模拟研究了物料形状以及外水含量对筛分效果的影响规律。徐文彬等<sup>[14]</sup>研制了筛分原理更加先进的振动筛——抛射筛,其结构简单、紧凑、筛板调整与维护方便,物料抛射强度可达80g~100g,颗粒垂直筛面抛射透筛,解决筛面卡堵,提高筛分效率。Jiang等<sup>[15-16]</sup>进行了潮湿煤炭6 mm多自由度弹性筛分,揭示了多自由度弹性筛面克服堵孔机理,探究了筛体激振力、

频率等参数的协同作用机制。

动力煤3 mm干法筛分有效增加了原煤入选比例,提高了精煤产率,降低了选煤厂煤泥含量,但筛分过程中,外在水分过高将造成颗粒团聚,导致筛分效果变差、处理能力降低。本文基于刚柔耦合弹性筛分方法,开展刚柔耦合弹性筛面运动学特性研究,探究筛面时域响应特征,揭示刚柔耦合弹性筛分机理;开展动力煤3 mm筛分试验,优化筛分过程操作参数,为动力煤3 mm筛分应用提供技术支持。

## 1 试验

### 1.1 物料特性

试验煤样选取某矿井动力煤,其 $M_{ad} = 5.69\%$ ,  $A_d = 15.88\%$ ,  $V_{daf} = 29.50\%$ ,  $Q_{net,d} = 22.25 \text{ MJ/kg}$ 。根据GB/T 15224.1—2010可知,该煤样属于低灰分、中高挥发分、中低发热量煤。其粒度组成测试分析结果见表1,物料的主导粒级为50~13 mm,产率为47.37%, <3 mm细粒物料含量较高,为23.29%,筛分过程易受外水含量影响。

表1 煤样粒度组成

Table 1 Gradation composition of coal sample

| 粒级/mm | 产率/%  | 正累积产率/% | 负累积产率/% |
|-------|-------|---------|---------|
| 50~25 | 25.78 | 25.78   | 100     |
| 25~13 | 21.59 | 47.37   | 74.23   |
| 13~6  | 17.60 | 64.97   | 52.64   |
| 6~3   | 11.75 | 76.72   | 35.04   |
| 3~1   | 11.94 | 88.66   | 23.29   |
| 1~0   | 11.35 | 100     | 11.35   |
| 合计    | 100   |         |         |

根据颗粒与分级尺寸的相对粒度分为非阻碍颗粒、阻碍颗粒、难筛颗粒、易筛颗粒,相对粒度为>1.50、1.50~1.00、1.00~0.75、<0.75,试验规定的分级尺寸为3 mm,上述颗粒类型粒度区间分别为50.00~4.50、4.50~3.00、3.00~2.25、2.25~0 mm;其中阻碍颗粒与难筛颗粒的粒径同筛孔尺寸相近,易发生筛孔卡堵,且影响料群的分层与透筛。

根据表 1 绘制的累积粒度特性曲线如图 1 所示,可以确定 4 种类型颗粒的产率(表 2),其中阻碍颗粒与难筛颗粒含量为 10.15%,非阻碍颗粒含量达 70.94%,其余为易筛颗粒。

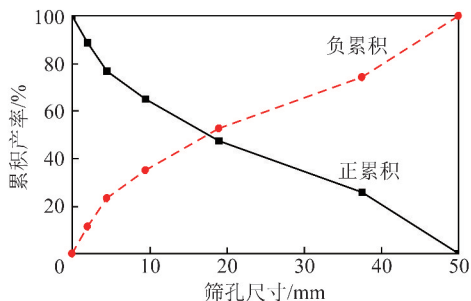


图 1 累积粒度特性曲线

Fig. 1 Cumulative grain size characteristic curves

表 2 煤样颗粒特性和产率分布

Table 2 Particle characteristic and yield distribution of coal samples

| 颗粒   | 相对粒度        | 粒级/mm        | 产率/%  |
|------|-------------|--------------|-------|
| 非阻碍粒 | >1.50       | 50.00 ~ 4.50 | 70.94 |
| 阻碍粒  | 1.50 ~ 1.00 | 4.50 ~ 3.00  | 5.86  |
| 难筛粒  | 1.00 ~ 0.75 | 3.00 ~ 2.25  | 4.39  |
| 易筛粒  | <0.75       | 2.25 ~ 0     | 18.81 |
| 合计   |             |              | 100   |

## 1.2 试验系统

试验系统如图 2 所示,试验样机为双电机自同步振动筛,长×宽×高=1 200 mm×600 mm×800 mm,筛面倾角 8°,激振电机分散布置,避免应力集中损害激振梁结构,电机反向运动产生 2 个大小相同的激振力,通过自同步原理实现筛体的稳定运行,其激振力沿筛面长度方向的作用力抵消,垂直筛面方向的激振力相互叠加,通过调整电机的位置使激振力不通过筛体质心,从而实现筛体沿料流方向的椭圆运动;基于中国矿业大学提出的刚柔耦合弹性筛分方法,由江苏亿亿和华筛分设备有限公司研制了筛孔为 3 mm 的刚柔耦合弹性筛面;振动测试系统由北京东方振动研究所开发的 DASP 系列信号分析软件振动、振动测试采集仪与三向加速度传感器组成,图中 1、2 分别代表刚性区域与弹性区域三向加速度传感器布置测点。

刚柔耦合弹性筛面包括刚性区域与弹性区域,筛面尺寸为 1 200 mm×300 mm×90 mm(长×宽×厚),矩形筛孔尺寸为 2.5 mm×13 mm。刚性区域由钢板外侧包裹聚氨酯材料组成,增加筛面整体强度,弹性区域为聚氨酯材料构成的筛孔区域,二者邵氏硬度分别为 75、50 HA。

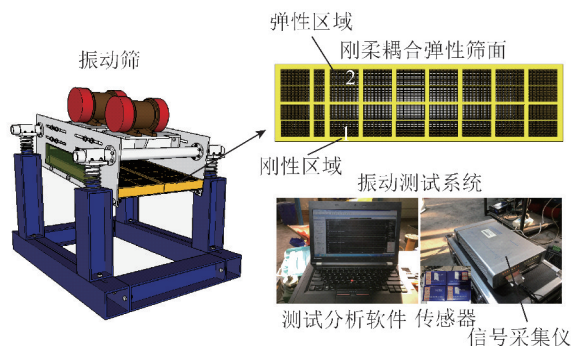


图 2 筛分试验系统

Fig. 2 Screening experiment system

## 1.3 试验评价指标

理想筛分过程,粒群严格按照筛孔尺度进行粒度离析,综合分离指数为 100%,由于物料特性、筛机及操作参数等因素,导致部分物料出现错配现象。因此选取综合分离指数与错配物含量评价动力煤 3 mm 筛分效果(式(1)、(2))。

$$S_i = E_c + E_f - 100$$

$$E_c = \frac{\gamma_c - M_c}{\gamma_{c,t}} \times 100$$

$$E_f = \frac{\gamma_f - M_f}{\gamma_{f,t}} \times 100 \quad (1)$$

$$M_o = M_c + M_f$$

$$M_c = 100 \times \gamma_c O_f$$

$$M_f = 100 \times \gamma_f U_c \quad (2)$$

式中,  $S_i$  为综合分离指数,%;  $M_o$  为错配物总量,%;  $M_c$  为粗颗粒错配物含量,%;  $M_f$  为细颗粒错配物含量,%;  $\gamma_c$  为粗颗粒实际产率,%;  $O_f$  为细颗粒实际产率,%;  $\gamma_f$  为粗颗粒中的细颗粒含量,%;  $U_c$  为细颗粒中的粗颗粒含量,%;  $E_c$  为粗颗粒的正配率,%;  $E_f$  为细颗粒的正配率,%;  $\gamma_{c,t}$  为粗颗粒产品理论产率,%;  $\gamma_{f,t}$  为细颗粒产品理论产率,%。

## 2 刚柔耦合弹性筛面运动学特性

筛面运动行为影响物料运动特征,明晰筛分过程筛面运动学特性是揭示刚柔耦合弹性筛分机理的前提,试验过程采用振动测试分析筛面刚性区域与弹性区域运动学特性差异。以筛面为基准面建立 xyz 空间直角坐标系,  $x$  为筛面长度方向、 $y$  为垂直筛面方向、 $z$  为垂直侧板方向。筛面不同区域各测点时域响应特征曲线如图 3 所示,其中测点 1 为筛面刚性区域,测点 2 为筛面弹性区域,  $y_1$  和  $y_2$  分别为测试点的位移,  $a_{y1}$  和  $a_{y2}$  分别为测试点的加速度,当激振合力为 6.50 kN、激振电机转速为 920 r/min 时,筛面弹性区域位移幅值达 6.10 mm,刚性区域为

3.25 mm,前者加速度幅值达  $65.01 \text{ m/s}^2$ ,后者仅为  $32.82 \text{ m/s}^2$ ,弹性区域较刚性区域位移幅值增加 87.69%,加速度幅值增加 98.08%。

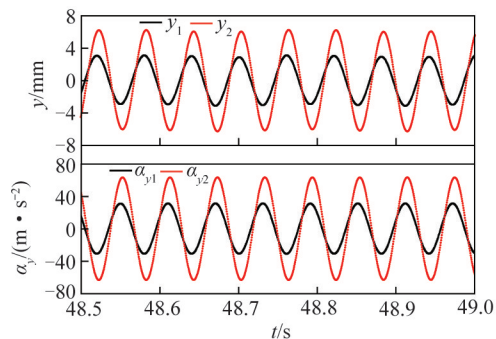


图3 筛面不同区域各测点时域响应特征曲线

Fig. 3 Time domain response characteristic curves of various measure points in different screen surface regions

刚柔耦合弹性筛面运动行为及筛孔变化如图4所示,其中  $\Delta H$  表示筛面弹性形变高度,  $\Delta l$  为筛孔的形变尺寸。在激振合力作用下,激振能量由筛体传递给筛面,转化为筛面的弹性势能而产生形变,同时在颗粒的撞击过程中也导致筛孔形变,避免物料卡堵。弹性区域运动形式为筛体刚性运动与筛面弹性形变叠加,筛上料群获得较大动能,增加其运动加速度和抛射强度,促进物料的松散、分层与透筛。

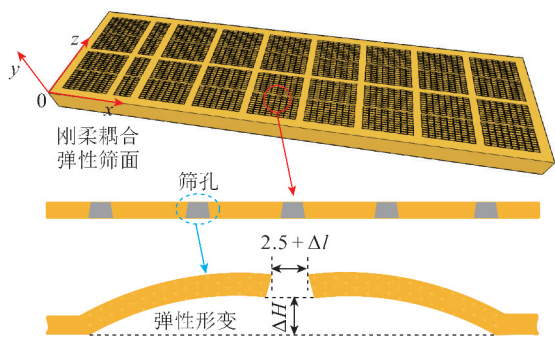


图4 刚柔耦合弹性筛面运动行为及筛孔变化

Fig. 4 Motion behavior of rigid-flexible coupling elastic screen surface and apertures variation

### 3 给料特性对筛分效果的影响机制

#### 3.1 处理能力对筛分效果的影响

处理能力决定振动筛筛上料层厚度,是振动筛的重要操作参数,是研究人员关注的重点技术问题,当处理能力增加时,料层厚度随之增大。据此,开展处理能力对筛分效果的影响,其试验条件为:激振合力  $6.50 \text{ kN}$ ,激振电机转速  $920 \text{ r/min}$ ,煤样外水含量  $6.13\%$ ,处理能力分别为  $1.00$ 、 $1.50$ 、 $2.00$ 、 $2.50$ 、 $3.00 \text{ kg/s}$ 。

图5为不同处理能力下筛分过程综合分离指数

与错配物含量,可知,随着处理能力增加,筛分过程综合分离指数呈先升高后降低的变化趋势,变化区间为  $84.89\% \sim 89.26\%$ ,总错配物含量先降低后增加,变化区间为  $5.92\% \sim 7.32\%$ 。其中,细颗粒物正配率逐渐降低,粗颗粒物正配率升高;筛上产品的错配物含量升高,筛下产品的错配物含量降低。

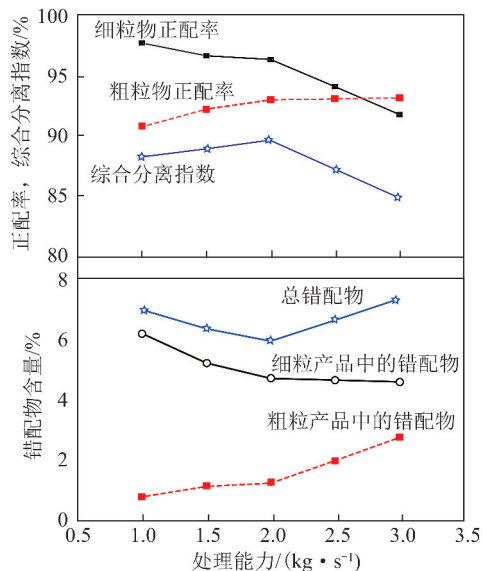


图5 不同处理能力下筛分过程综合分离指数与错配物含量

Fig. 5 Comprehensive separation index and mismatch content under different treatment capacities

由于物料形状及粒度的差异,使料群具有一定松散度,颗粒间形成不同尺度的通道,细颗粒因渗漏作用向下移动,与大颗粒体系形成鲜明的整体对流效应,发生几何重组,实现物料的分层。筛分过程中,施加振动力场迫使颗粒间相对运动,实现料群多维度松散,分层效果更好。在不改变振动力大小的情况下,处理能力较低时,筛上料层较薄,物料透筛量多,部分粗颗粒透过筛孔,此时粗颗粒正配率低、细颗粒正配率高,筛上产品错配物含量低、筛下产品错配物含量高;随着处理能力的增加,筛上料层变厚,粗颗粒透筛量减少幅度大,细颗粒透筛量也随之减少,但幅度小,综合分离指数升高、总错配物含量降低;当处理能力超过一定范围时,筛上料层过厚,颗粒渗漏距离变长,增加了颗粒运动的随机性,产生渗漏阻滞效应,料群的分层效果变差,细颗粒难以接触筛面,无法实现透筛,综合分离指数降低,总错配物含量升高。

#### 3.2 外水含量对筛分效果的影响

外水含量严重影响筛分过程的综合分离指数与错配物含量,当细粒含量较大时,物料之间易黏结成团,形成覆盖膜,糊堵筛孔,物料冲击作用下出现较厚的煤泥层,筛分过程无法进行。试验条件:激振合

力 6.50 kN、激振电机转速 920 r/min、处理能力 2.00 kg/s,物料外水含量分别为 6.13%、7.31%、8.52%、9.75%、11.01%。

不同外水含量下筛分过程综合分离指数与错配物含量如图 6 所示,随着外水含量的增加,综合分离指数由 89.27% 降至 78.92%,总错配物含量由 5.92% 升至 7.99%。其中,细颗粒物正配率降低,粗颗粒物正配率略升高;筛上产品错配物含量升高,筛下产品错配物含量减少。

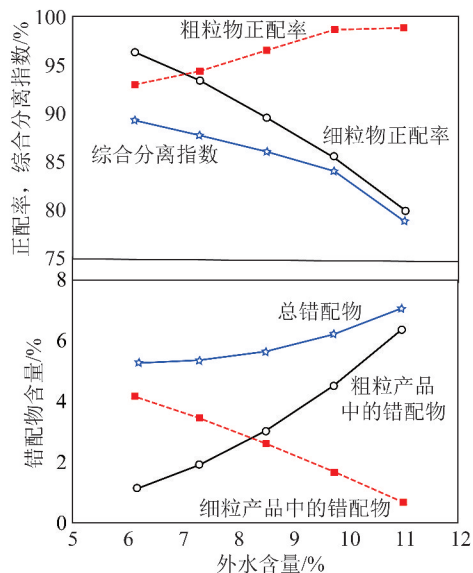


图 6 不同外水含量下筛分过程综合分离指数与错配物含量

Fig. 6 Comprehensive separation index and mismatch content under different external water contents

外水分在颗粒表面形成水化膜,当颗粒间距很近时,由于水分自身存在内聚力及固液界面之间的黏附作用,产生液桥,在其作用下颗粒-液体系统趋于连续运动。当物料中细颗粒含量增加时,物料平均加权粒度减小,比表面积增加,表面自由能升高,而任何系统都具有趋于稳定状态的特性,分子热运动混乱程度增加,自发向熵增方向进行,以降低系统的表面能,从而导致颗粒间出现黏附成团现象。黏附现象表现为细颗粒间的团聚和细颗粒黏贴在大颗粒表面 2 种状态,黏湿颗粒黏附与筛分过程如图 7 所示,黏附现象使料群平均加权粒度变大,细粒物料及部分难筛颗粒粒径变大而无法透筛,细颗粒正配率减小,粗颗粒错配物含量升高;部分阻碍颗粒尺寸增加,该部分物料含量较少,水分低时可能会进入筛下产品,但水分含量升高后因黏贴效应,粒径变大无法透筛,降低其对筛下物料的污染,表现为粗颗粒正配率升高,细颗粒的错配物含量降低。综上,在本试验物料粒度组成的条件下,水分增加时,细粒物料含量显著影响综合分离指数与错配物含量。传统

3 mm 筛分过程中,水分超过 10.00% 时,筛分效果明显下降;刚柔耦合弹性筛面处理 3 mm 动力煤时,水分为 11.01% 时,综合分离指数接近 80.00%,错配物含量仅为 7.99%,说明刚柔耦合弹性筛面更适应水分变化,可保证筛分过程顺利进行。

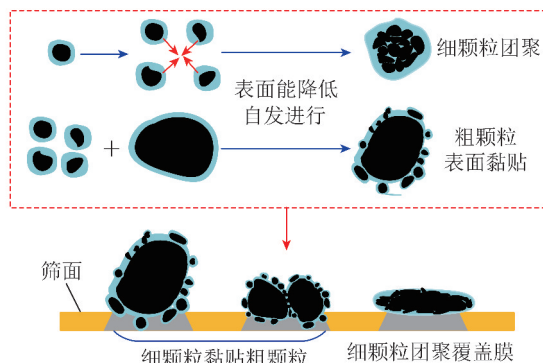


图 7 黏湿颗粒黏附与筛分过程

Fig. 7 Adhesion and screening process of moist particle

## 4 结 论

1) 刚柔耦合弹性筛面其弹性区域位移幅值达 6.10 mm,刚性区域为 3.25 mm,前者加速度幅值达 65.01 m/s<sup>2</sup>,后者仅为 32.82 m/s<sup>2</sup>,弹性区域运动为筛体刚性运动与筛面弹性形变的叠加,振动强度大,有利于黏湿动力煤的松散、分层与透筛,筛孔变形可有效解决粗颗粒及细粒团聚体卡堵。

2) 随处理能力的增加,动力煤 3 mm 干法筛分综合分离指数呈先升高后降低的趋势,错配物含量的变化规律与之相反,当处理能力为 2.00 kg/s 时,筛分效果最佳,综合分离指数与错配物含量分别为 89.27% 与 5.92%;随外水含量的升高,3 mm 干法筛分的综合分离指数逐渐降低,外水含量在 6.13% ~ 11.01% 时,综合分离指数变化范围为 89.27% ~ 78.92%,错配物总量变化范围为 5.92% ~ 7.99%。

## 参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2018 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2019.
- [2] 李明辉. 煤炭洗选加工 60 年回顾[J]. 煤炭工程, 2014, 46(10): 24-29.  
LI Minghui. A review on 60 years of coal preparation in China[J]. Coal Engineering, 2014, 46(10): 24-29.
- [3] 于凤芹. 动力煤深度筛分设备的选择[J]. 选煤技术, 2018(2): 54-57.  
YUFengqin. Selection of the power coal intensive screening equipment[J]. Coal Preparation Technology, 2018(2): 54-57.

- [4] 周志坚. 选煤厂工艺设计中的节能措施[J]. 煤炭加工与综合利用, 2013(4):23-25.
- [5] 包小燕, 李宏静, 鲁和德. 香蕉型弛张筛3 mm干法脱粉在寺河矿选煤厂的应用[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(3):5-7.  
BAO Xiaoyan, LI Hongjing, LU Hede. Application of banana flip-flow screen on 3 mm dry fines removal in Sihe mine [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(3):5-7.
- [6] 张建勋, 宋彦, 白书亚. 弹性振杆筛在粘湿物料深度筛分中的应用[J]. 选煤技术, 2002(5):8-10.
- [7] 邹梦麒, 刘初升, 武继达, 等. 张紧量对单边驱动式弛张筛筛面动力学参数的影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2):571-577.  
ZOU Mengqi, LIU Chusheng, WU Jida, et al. Influence of tensional amount on dynamic parameters of unilateral driven flip-flow screen surface [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2):571-577.
- [8] 刘文统. 弛张筛在动力煤深度分级中的应用[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3):18-20.  
LIU Wentong. Application of flip flow screen in deep classification of steam coal [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3):18-20.
- [9] 王娜, 赵俊凯, 李孟红. 振动筛筛分效率的影响因素研究[J]. 粮食加工, 2018, 43(2):59-62.  
WANG Na, ZHAO Junkai, LI Menghong. Study on influence factors of sieving efficiency of vibrating screen [J]. Grain Processing, 2018, 43(2):59-62.
- [10] 陈惜明, 赵跃民, 朱红, 等. 潮湿细粒物料筛分过程中粘附理论的研究[J]. 江苏煤炭, 2003(4):31-33.  
CHEN Ximing, ZHAO Yuejin, ZHU Hong, et al. Study on adhesive mechanism in screening fine moist material [J]. Jiangsu Coal, 2003(4):31-33.
- [11] 陈惜明, 赵跃民, 朱红, 等. 潮湿细粒物料的筛分粘附模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5):407-410.  
CHEN Ximing, ZHAO Yuejin, ZHU Hong, et al. Adhesive model of moist fine material [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5):407-410.
- [12] 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[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2):307-311.  
ZHAO Lala, LIU Chusheng, YAN Junxia, et al. Numerical simulation of particle screening process based on 3D discrete element method [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2):307-311.
- [13] ZHAO L, ZHAO Y, BAO C, et al. Laboratory-scale validation of a DEM model of screening processes with circular vibration [J]. Powder Technology, 2016, 303:269-277.
- [14] 徐文彬, 李素妍, 徐浩博, 等. 粘湿煤炭干法深度筛分关键技术研究及抛射筛的研制[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(9):13-20, 8.  
XU Wenbin, LI Suyan, XU Haobo, et al. Study on the key technology on dry deep screening of wet coal and the manufacture of projectile screen [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2017(9):13-20, 8.
- [15] JIANG H, DUAN C, WU J, 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.
- [16] 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.