



煤矸石香蕉型等厚筛粒群时空透筛分布规律及适配特性研究

石耀龙

引用本文：

石耀龙. 煤矸石香蕉型等厚筛粒群时空透筛分布规律及适配特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 344–354.
SHI Yaolong. Research on the distribution law of spatio-temporal permeability screening and adaptation characteristics of banana-type equal-thickness classification of coal gangues[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 344–354.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0405>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湿黏细粒煤干法筛分理论及交叉筛技术发展现状

Review of dry screening theory and cross screening technology for wet cohesive fine coal
煤炭科学技术. 2022, 50(10): 251–258 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/96747613-d881-4d4c-bad8-9786e07d66c7>

煤矸石山斜坡面矸石散体的空气渗透特性研究

Study on the air permeability characteristics of coal gangue dump slope gangue particles
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 139–151 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0831>

弛张筛分效率与筛面磨损的匹配优化研究

Study on matching optimization of screening efficiency and screen surface wear of flip screen
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 202–213 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2136>

采空区冒落矸石承压变形特征及侧向压力分布规律研究

Study on bearing deformation characteristics and lateral pressure distribution law of caved gangue in gob
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 20–29 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0223>

特厚煤层分层开采下伏煤层应力分布及破坏特征研究

Study on underlying coal seam stress distribution and failure characteristics in slicing mining of extra-thick coal seams
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 19–26 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1195a2e5-f259-488b-93ef-553b5d820b8e>

粒径对煤矸石污染物溶解释放规律影响研究

Study on effects of particle size on dissolution and release law of pollutants in gangue
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2be0bb8b-c870-48f2-8606-368682d5c981>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

石耀龙. 煤矸石香蕉型等厚筛粒群时空透筛分布规律及适配特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 344–354.
SHI Yaolong. Research on the distribution law of spatio-temporal permeability screening and adaptation characteristics of banana-type equal-thickness classification of coal gangues[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 344–354.

煤矸石香蕉型等厚筛粒群时空透筛分布规律及适配特性研究

石 耀 龙

(国家能源集团新疆能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 筛分是减少环境污染和资源浪费, 促进煤矸石固废资源综合利用的一项重要技术。单一倾角振动筛在煤矸石分级过程中, 容易导致物料在入料端集中堆积, 松散和分层困难, 分级效果恶化。利用变倾角筛面代替单一倾角筛面, 用于研究煤矸石的分级。采用高速动态测试分析系统及 Image-Pro Plus(IPP) 图像分析系统研究变倾角和单一倾角筛面的料群时空透筛分布特征, 发现变倾角筛面给料端与排料端位移与运动速度幅值差值大于单一倾角, 变倾角筛上煤矸石的吸光度是单一倾角的 1.5 倍, 筛下吸光度是相对应数值的 2.5 倍, 说明变倾角筛面更利于煤矸石的松散分层, 且物料分布更加均匀。采用多段采样多层次分级法对筛分产品进行分析, 将筛面从入料端至排料端划分为 I、II、III、IV、V 段, 发现颗粒在单一倾角与变倾角筛面上的透筛位置均居于中部, 但变倾角筛面透筛量更大; 筛下各段产品主导粒级为 6~3 mm 和 -3 mm, -3 mm 粒级的煤矸石占产品产率在单一倾角和变倾角筛分过程中的顺序依次为 II>I>III>IV>V, II>III>I>IV>V, 透筛率均依次为 II>III>I>IV>V。再者, 与单一倾角相比, 变倾角的筛分效率和总错配物百分比分别提高 2.24% 与 1.74%, 分配粒度更接近 6 mm。此外探索了煤矸石处理能力与筛面倾角的适配特性及对筛分效果的影响规律。当 >6 mm 的粗颗粒占比 55% 时, 应选择较小的筛面倾角梯度, 比如 3° 和 4°, 相应的生产能力为 18 t/h, 此时能保证获得最佳的筛分性能与处理能力。本研究将提高煤矸石的分级效果和固废资源的综合利用率, 为煤矸石的定向转化与固废资源的高附加值综合利用提供新途径和技术支撑。

关键词: 变倾角等厚筛分; 时空分布特征; 透筛分布规律; 煤矸石; 适配特性

中图分类号: TD94 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)S2-0344-11

Research on the distribution law of spatio-temporal permeability screening and adaptation characteristics of banana-type equal-thickness classification of coal gangues

SHI Yaolong

(National Energy Group Xinjiang Energy Company Limited, Urumqi 830000, China)

Abstract: Screening is an important technological challenge to alleviate environmental contamination and resource waste and enhance the large-scale synthesis of coal gangue solid waste resources. Single inclination vibrating screen for coal gangue grading process can easily cause concentrated accumulation of materials at the infeed end, loosening and stratification difficulties, and deterioration of grading effect. A single inclination screen surface is replaced by a variable inclination (banana-type) for coal gangues classification and separation. High-speed camera testing and IPP image analysis system was used to study the spatio-temporal permeability distribution characteristics of material groups on the screen surface with variable and single inclination. It is found that the difference in displacement and motion velocity

收稿日期: 2023-03-23 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2023-0405

基金项目: 新疆公司屯宝煤矿分选工艺系统优化与提质技术研究与应用资助项目 (CEZB220403857); 国家重点研发计划青年科学家资助项目 (2022YFC2905900)

作者简介: 石耀龙(1977—), 男, 山东潍坊人, 工程师, 本科。E-mail: 2383813705@qq.com

amplitudes between the feeding end and the discharging end of the variable inclination is greater than that of single inclination. The integrated optical density (IOD) of gangue on the screen surface with variable inclination is 1.5 times that of single inclination, and the gangue under the screen with variable inclination is 2.5 times that of single inclination. It indicates that the inclined screen surface is more conducive to the loosening and stratification of the coal gangue, where the material distribution is more uniform. Multi-stage sampling and multi-layer classification method was adopted to analyze the screened products. It shows that the penetration position of particles on single and variable inclination screen surfaces are both located in the middle, while the penetration amount of the latter is more significant. The dominant particle sizes of the undersized products are 6–3 mm and -3 mm, and the order of the proportion of coal gangue of -3mm in the product yield during the single and variable inclination screening processes is II>I>III>IV>V and II>III>I>IV>V, and the penetration rate are both II>III>I>IV>V. Moreover, the screening efficiency and the whole misplaced content are increased by 2.24% and 1.74% compared with the single inclination, respectively. At the same time, the distribution size is closer to 6 mm. Besides, the gangue and screen inclination angle adaptation characteristics are studied. When the coal gangue >6 mm accounts for 55%, a smaller screen inclination gradient should be selected, such as 3° and 4°, matching the productivity of 18 t/h, achieving the best screening performance and processing capacity. This study will improve the classification effect of coal gangue and the comprehensive utilization rate of solid waste resources, providing new ways and technical support for the directional transformation of coal gangue and the high value-added comprehensive utilization of solid waste resources.

Key words: variable inclination equal thickness screening; spatio-temporal distribution characteristics; penetration distribution law; coal gangue; adaptation features

0 引言

煤矿企业在开采和洗选过程中会产生大量煤矸石, 我国的煤矸石累积存储达70亿t, 以15亿t/a的速度增长。作为我国排放量最大的工业固废之一, 现有无害化处置与资源化综合利用的能力无法满足“双碳”目标的相关要求^[1-2], 因此加强对煤矸石分级分选利用的研究很重要。煤矸石一般经过环保和低成本的物理加工方法进行分级^[3-5], 以作为低热值燃料和砂石骨料使用, 这对于煤矸石固废资源回收利用至关重要^[6-7]。

工业生产采用破碎、煅烧、分选等技术手段, 将煤矸石转化为可单独利用的煤、砂石、铁矿石、粘性矿物等组分^[8-9]。姚永建等^[10]基于煤矸石的物化性质差异, 采用分选技术将其分成不同组分, 使之合理有效地应用于能源、农业、新材料等领域。周楠等^[11]发现煤矸石在地面集中处理后, 进行粒径级配, 可作为发电、铺路材料。赵宝龙等^[12]对不同硫分的矸石进行预筛分处理, 减少其自燃倾向, 从源头对矸石山的自燃进行治理和预防。许泽胜等^[13]发现煤矸石经过多重破碎和筛分后, 分级分质效果显著, 可制备出高位热值及高灰分的电厂燃料和砂石骨料, 对于煤矸石建材化的大宗利用和解决煤矸石的排放具有重要意义。陈岩^[14]针对煤矸石循环利用过程中存在的问题, 采用破碎-筛分工艺, 将物料筛分成具有不同粒度、不同热值的产品, 为煤矸石的综合利用提供全面的技术支持。已有70%~95%的固体废弃物资

源被直接大宗利用, 但工业固废高值化利用的占比并不高^[15], 因此开发煤矸石固废资源的高值化利用技术迫在眉睫。

常见的煤矸分离技术有重介分选、跳汰分选、井下煤矸分选技术^[16-18]等, 对于煤矸石的分选有效适用率低。传统的直线振动筛在煤矸石分级过程中会增加生产负荷, 入料端物料易堆积, 且难以透筛, 无法满足企业的标准要求。20世纪60年代, BURSTLEIN^[19]根据料群运动理论提出了等厚筛分理论, 在筛分过程中, 筛上的料层厚度保持不变^[20]。LI等^[21-22]研究了香蕉筛每层筛板对筛分效率的影响, 比较了5种不同Fibonacci numbers香蕉筛和细颗粒占比的变化情况。ASBJÖRNSSON等^[23]建立了基于离散元(Discrete Element Method, DEM)的模型以优化筛板, 在不同给料条件下通过调整筛面可获得最佳筛分效率。CLEARY等^[24-25]利用DEM模拟了工业双层香蕉筛, 验证了不同加速度条件下筛上料群的运动规律。JAHANI等^[26]利用LIGGHTS求解器模拟了工业双层香蕉筛和实验室单层香蕉筛的筛分过程, 验证了不同倾角、振幅和频率条件下筛分性能的变化规律。黄龙等^[27-28]采用高速动态法研究了筛面的运动位移和速度的变化规律, 建立了颗粒与多段变倾角筛面之间的碰撞力学模型, 发现最大碰撞力与振幅、频率、筛面倾角和段数之间存在密切关系。DONG等^[29-30]采用三维离散元法对三段和五段筛面的香蕉筛筛分过程进行数值模拟, 揭示了颗粒运动和激振力对各级筛面的振幅、频率、振

动模型、倾角的影响规律及不同物料的粒度分布规律。

许多学者对煤矸石的分级进行了探索,通过分质资源化利用,实现煤矸石的高效能源转化;也对香蕉筛等厚筛分和颗粒的分离进行了研究。目前,他们通过数值模拟探索了各种结构参数对香蕉筛筛面分级性能的影响规律,研究了筛面上颗粒的运动特征,提出了新的设计方法和模型,然而,煤矸石颗粒在香蕉筛筛面上的时空分布特征和透筛分布规律尚未阐明,物料的处理能力与筛面倾角之间的适配机制尚不清楚。

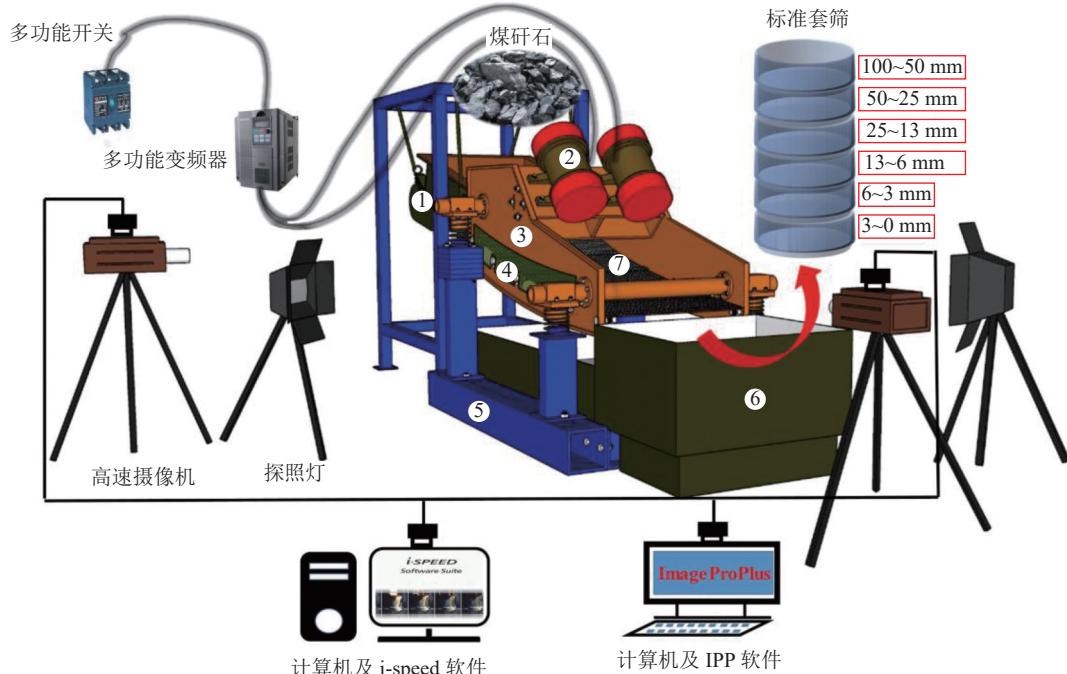
因此,本研究利用香蕉筛等厚筛筛分技术对煤矸石的分级过程进行分析,旨在提高煤矸石的分级效果和固废资源的综合利用率。结合高速动态和IPP图像分析系统,验证了香蕉筛上料群的时空分布

特征及透筛分布规律,并探索了煤矸石处理能力和筛面倾角的适配机制,研究成果可为煤矸石的定向转化与固废资源的高附加值综合利用提供新途径和技术支撑。

1 试验

1.1 试验系统

图1为多段变倾角等厚筛分试验系统,系统主要由控制开关、料仓、变频器、筛机、标准套筛和高速动态测试分析系统组成。如图1所示,筛网尺寸为600 mm×1 200 mm,筛孔直径为6 mm。高速摄像和图像分析模块包括高速摄像机、控制显示单元操作面板(Control Display Unit, CDU)、计算机及多通道信号采集和实时分析软件(Data Acquisition and Signals Processing, DASP)。



1—电磁给料机; 2—激振电机; 3—可调节倾角侧板; 4—观察窗; 5—支撑架; 6—接料装置; 7—筛面

图1 多段变倾角等厚筛试验装置及分析系统

Fig.1 Experimental device and analysis system for multi-stage variable inclination equal-thickness screen

1.2 高速摄像测试分析系统

高速摄像测试分析系统主要由高速摄像机、泛光灯、CDU控制面板、高性能计算机DASP软件等构成,如图2a所示。图像分析软件Image-Pro Plus(IPP)可以直接从相机上获取图像数据。表1给出了该系统的基本技术指标。

待振动筛稳态运行后,通过CDU面板观察被拍物体的清晰度,调节高速摄像机,检查和回放试验录

像。i-SPEED软件操作界面如图2b所示。

如图2c所示,进行吸光度的校准和测量,图像分析系统计算筛面的平均吸光度和颗粒的积分光密度(Integral Optical Density,IOD)。蓝色、灰色、红色的密度分别表示对应通道的平均灰度值,密度(std.dev)表示对象内部吸光度值的标准差,也可选择表示吸光度之和的IOD,该数值等于区域乘以平均(密度)强度。

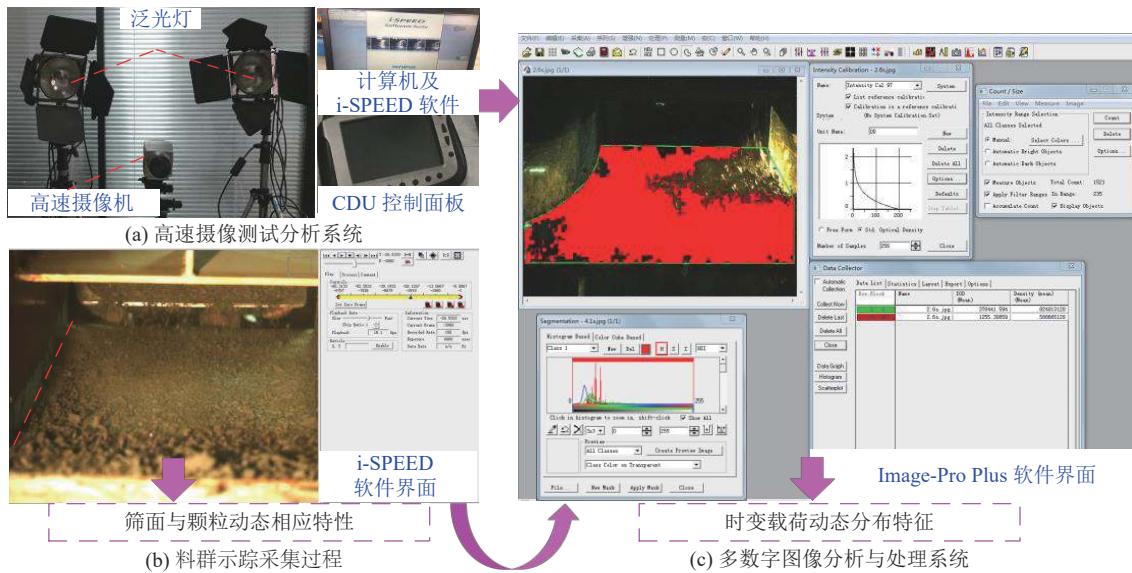


图 2 高速摄像测试分析系统及 i-SPEED 软件界面

Fig.2 High speed camera testing and analysis system and i-SPEED software interface

表 1 高速摄像测试分析系统主要技术指标

Table 1 Key technical indexes of high speed camera testing and analysis system

技术参数	技术指标
镜头分辨率	1 280 × 1 024
帧速率量程/(帧·s ⁻¹)	0 ~ 150 000
快门	1 ~ 2 ms
触发模式	ROC, BROC 视频触发, 0 ~ 5 V TTL
同步过程	相位锁功能可实现多台摄像机同步拍摄, 精确度 1 ms
测量内容	运移距离、线速度、线加速度、角速度和角加速度

1.3 物料特性与评价指标

试验样品来自金鸡矿, 采用标准筛析仪进行筛分试验, 得到不同粒级的煤矸石的灰分含量及粒度组成情况。如图 3a 所示, 金鸡矿占全样产率的主导粒级为 100~50 mm、50~25 mm、3~1 mm, 3 种粒级总质量分数为 51.13%。灰分主导粒级为 >100 mm、100~50 mm, 占比分别为 25.74% 和 23.4%。

根据图 3a 绘制相应的累积粒度曲线, 如图 3b 所示, 可以快速求出 100~0 mm 间任意粒级的对应产率, 可知不同粒级颗粒的产率分布基本一致, 非阻碍粒产率为 60.69%, 难筛粒产率为 9.37%, 细颗粒产率为 9.37%, 阻碍粒产率为 13.61%。

采用筛分效率、总错配物含量(质量分数)、分离

精度等指标来评价筛分效果, 具体表达式为式(1)和式(2)。

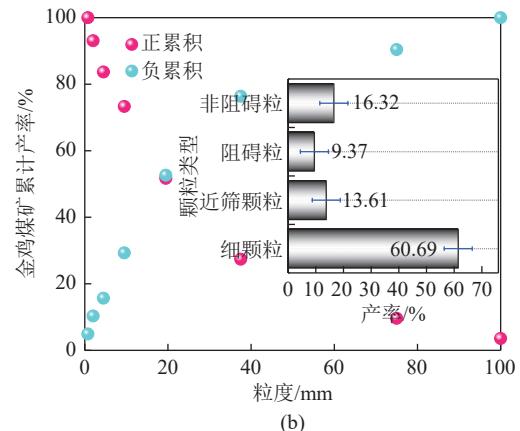
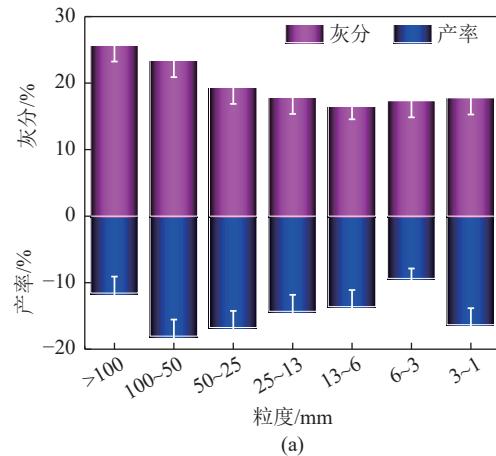


图 3 煤矸石粒度组成与累积粒度特征曲线

Fig.3 Particle size composition and cumulative particle size characteristic curve of coal gangue

$$\begin{cases} \eta = E_c + E_f - 100 \\ E_c = \frac{\gamma_o U_c}{F_c} \times 100 \\ E_f = \frac{F_f - \gamma_o O_f}{F_f} \times 100 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_o = M_c + M_f \\ M_c = 100\gamma_u U_c \\ M_f = 100\gamma_o O_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: η 为筛分效率, %; E_c 为粗颗粒的正配率, %; E_f 为细颗粒的正配率, %; γ_o 为筛上产品产率, %; U_c 为筛下产品中粗颗粒含量, %; F_c 为入料中粗颗粒含量, %; F_f 为入料中细颗粒含量, %; O_f 为筛上产品中细颗粒含量, %; M_o 为总错配物含量, %; M_c 粗颗粒错配物质量分数, %; M_f 细颗粒错配物质量分数, %; γ_u 为筛下产品产率, %。

2 结果与讨论

2.1 单一倾角和变倾角筛分过程中料群的时空分布特征

利用高速摄像分析系统和 IPP 图像分析软件, 研究煤矸石在变倾角筛面上的时空分布规律和透筛分布机制。图 4 给出了在单一倾角和变倾角筛分过程中, 给料端和排料端测点的布置方式。图 5 为单一倾角和变倾角筛分过程中给料端和排料端筛面运动的速度和位移振幅。如图 5a 所示, 在筛面与颗粒的碰撞下, 变倾角筛面给料端的最小位移值 520 mm 远大于单一倾角筛面的最大位移值, 排料端的最大位移值远小于单一倾角的最小位移值 495 mm。如图 5b 所示, 相同时刻, 变倾角给料端筛面运动速度幅值远大于单一倾角, 最大运动速度幅值相差 110 mm/s, 排料端筛面运动速度基本低于单一倾角, 最大运动速度幅值相差 20 mm/s。

图 6 为不同时间筛面物料的铺展面积和吸光度的变化规律, IPP 图像可自动实现轮廓校准和面积测量。如图 6a 所示, 变倾角筛面上物料的动态面积均值约为 400 000 mm², 远大于单一倾角, 说明变倾角筛面上煤矸石的有效筛分面积显著优于单一倾角。如图 6b 所示, 变倾角筛上物料的动态吸光度平均值均在 60.98 以上, 显著高于单一倾角, 其中, 4~6 s 内, 吸光度的动态波动范围为 64.04~66.34。

IOD 表示筛上煤矸石的空间分布特征与松散分层效果。图 7 为变倾角和单一倾角筛上煤矸石的 IOD 及吸光度变化。由图可知, 变倾角筛上煤矸石的 IOD 动态波动值在 275 000 以上, 积分均值为

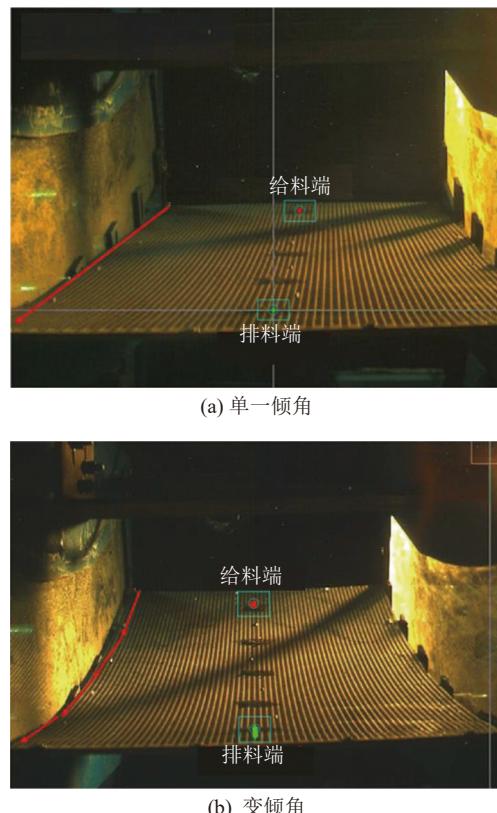


图 4 单一倾角和变倾角筛面给料端和排料端测点布置示意
Fig.4 Schematic diagram of the layout of measuring points at the feeding and discharging ends of single and variable inclination screen surfaces

306 269; 相反, 单一倾角的相应值均较小, 这表明变倾角筛上煤矸石的空间分布更加均匀致密, 无堆积现象, 且松散分层效果好。变倾角下煤矸石的吸光度为单一倾角下的 1.5 倍, 积分均值为 2.5 倍, 这意味着变倾角下煤矸石的透筛量大于单一倾角, 筛下物料分布更均匀分散。

2.2 筛分过程中料群的透筛分布特征

为探索煤矸石在变倾角等厚筛分过程中的空间分布特征和透筛规律, 设置相应的试验条件为激振合力 8.66 kN、激振频率 11.84 Hz、处理能力 21.6 t/h、倾角梯度 4°, 采用多段采样多层次分级的方法对单一倾角和变倾角二段筛分产品进行分析。由于变倾角筛分过程采用五段筛面, 将筛下产品沿料流方向分成 5 段区域, 分别为 I、II、III、IV 和 V, 每一段筛长均为 240 mm, 筛上产品为 VI。

图 8 为单一倾角和变倾角筛分过程中筛面不同区域筛上和筛下产品的产率。由图可知, 筛上产率均先减后增, 筛下产率相反。煤矸石均集中在第 II、III 段, 且在第 II 段, 筛下产率均达到最大值, 变倾角筛分过程中透筛量相对较高。

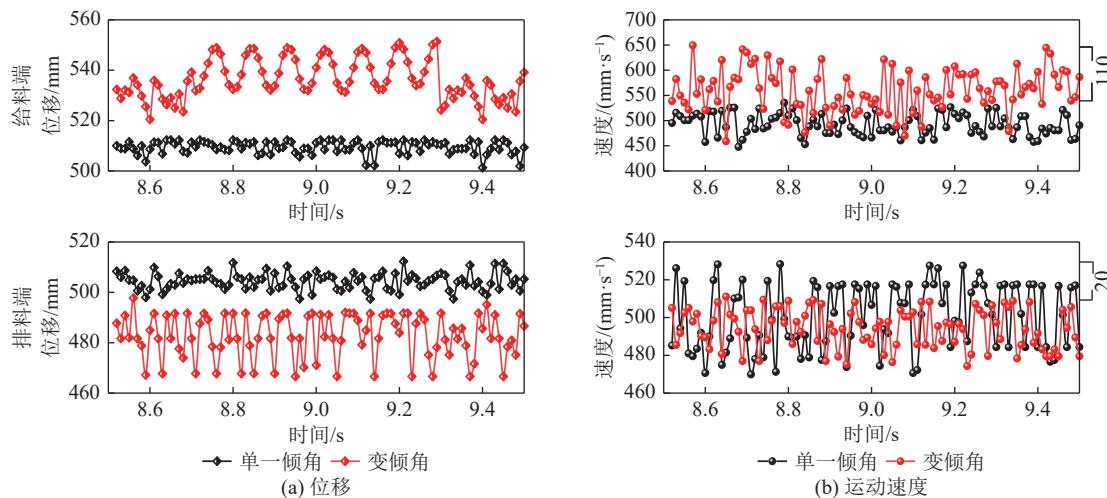


图 5 单一倾角和变倾角等厚筛分过程中给料端和排料端筛面的位移和运动速度

Fig.5 Displacement and motion velocity of the feeding end and discharge end during the thick screening process with single and variable inclination angle

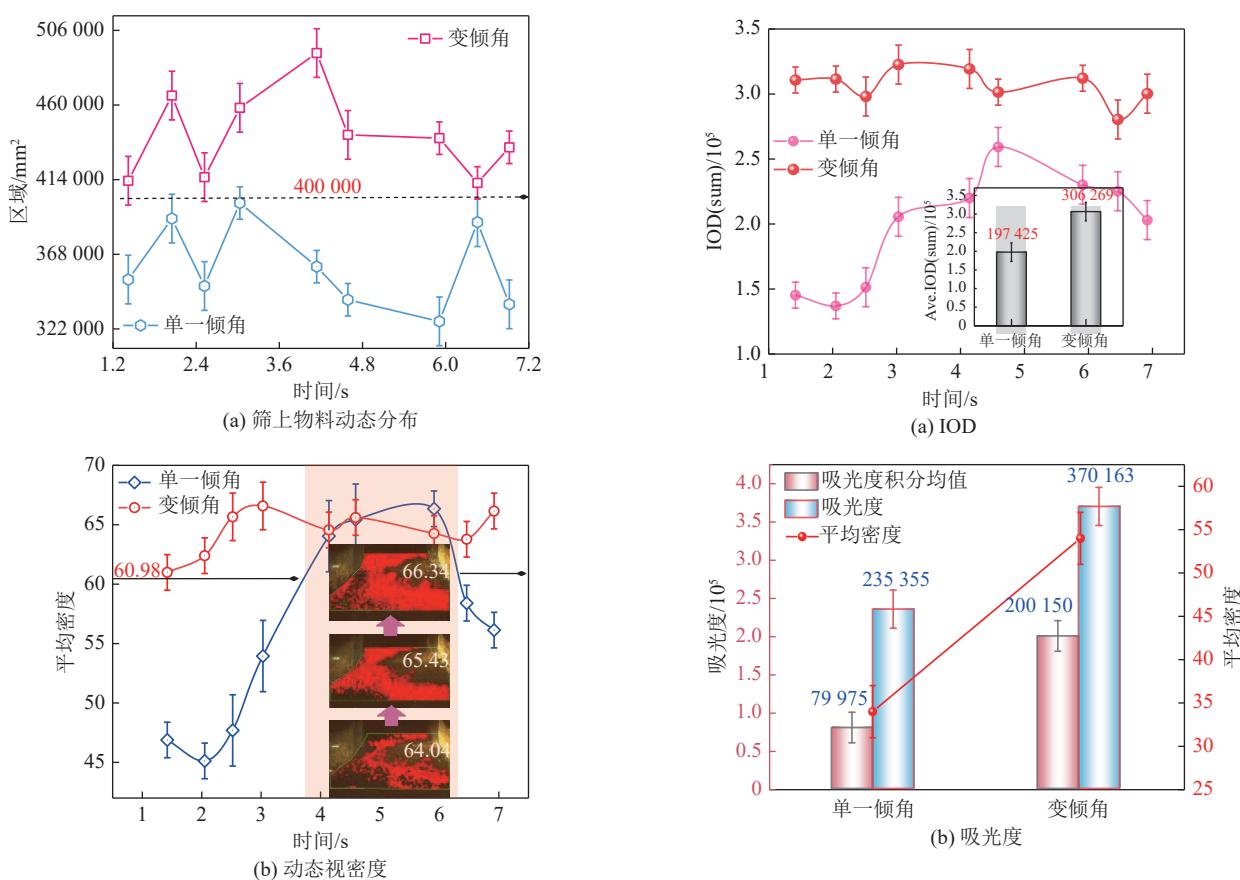


图 6 单一倾角和变倾角筛上煤矸石动态区域吸光度变化
Fig.6 Dynamic regional absorbance changes of coal gangue on single inclination and variable inclination screens

单一倾角和变倾角筛分过程中筛面不同区域各粒级煤矸石的产率及透筛量,如图 9 所示。从图 9a 和 9d 可知,在筛分过程中,+13 mm 粒级的煤矸石在

图 7 单一倾角和变倾角筛上煤矸石的 IOD 与吸光度变化
Fig.7 IOD and absorbance changes of coal gangue on single angle and variable angle screens

筛下各段中产率基本为 0,但存在少量 13~6 mm 的产品。筛下各段产品的主导粒级分别为 6~3 mm 和 -3 mm,其中在第Ⅱ段透筛量最大,在第Ⅴ段透筛量最小。变倾角和单一倾角 I 段至 V 段煤矸石占本段

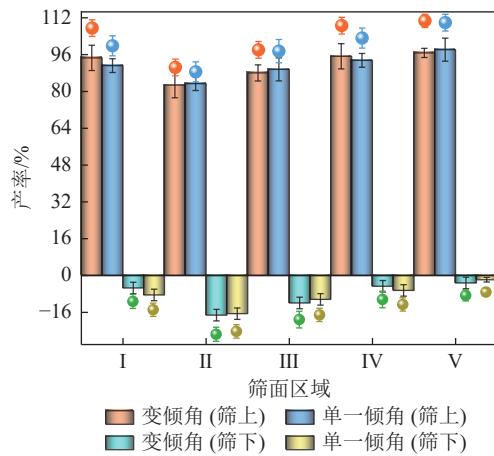


图 8 单一倾角和变倾角筛分过程中筛面不同区域筛上和筛下产率

Fig.8 Yields of oversized and undersized in different areas of the screen surface in the process of single and variable angle screening

的产率顺序均依次为: II>I>III>IV>V, 但变倾角整体的透筛量高于单一倾角。

从图 9b 和 9e 可知, -3 mm 粒级的煤矸石占产

品产率在单一倾角和变倾角筛分过程中的顺序依次为 II>I>III>IV>V, II>III>I>IV>V。如图 9c 和 9f 所示, 单一倾角和变倾角筛分过程中的+13 mm 粒级的煤矸石在筛面各段的透筛率为 0, 13~6 mm 粒级在筛面各段的透筛率较小且不为 0, 其他粒级的透筛率逐渐增大, 单一倾角和变倾角筛分过程中 I 段至 V 段粒级为-3 mm 的煤矸石透筛率依次为 II>III>I>IV>V。

单一倾角和变倾角筛分过程中筛面不同区域煤矸石的筛分效率及总错配物含量, 如图 10 所示。由图 10 可知, 单一倾角和变倾角筛分过程中煤矸石的筛分效率在筛面不同区域内逐渐增大, 总错配物含量逐渐减小。在变倾角筛分过程中, 限上率先缓降后骤升, 限下率则逐渐降低; 在单一倾角筛分过程中, 限上率先缓增后骤增, 限下率逐渐减小。单一倾角和变倾角筛分过程中筛面不同区域煤矸石的分配率如图 11 所示。由图可知, 沿着料群运移的方向, 单一倾角和变倾角的分配率随着粒度的增大而逐渐增大, 分配曲线向左移动; 其中变倾角等厚筛分过程中,

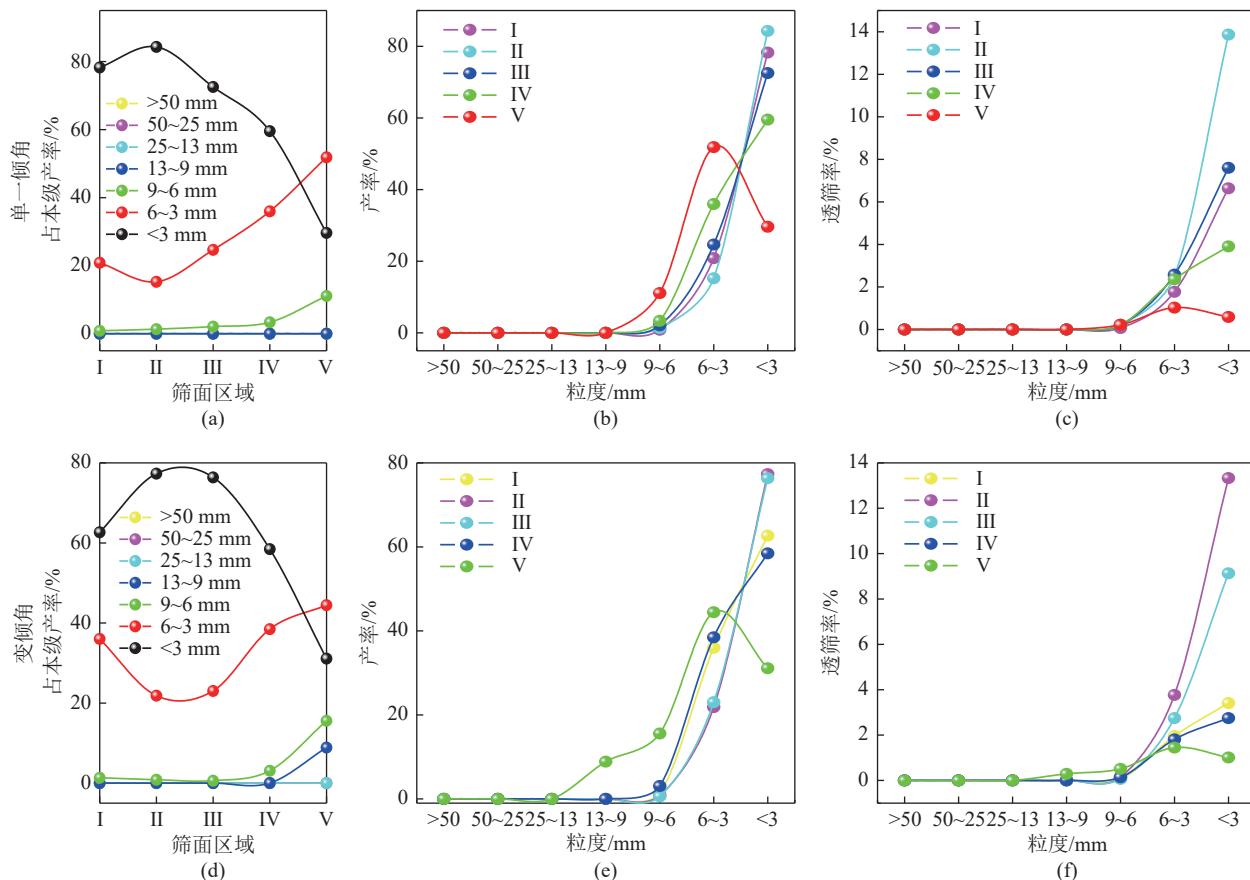


图 9 单一倾角和变倾角筛分过程中筛面不同区域各粒级煤矸石的产率及透筛率曲线

Fig.9 Curves of productivity and filtering ratio of each size fraction coal gangue on different area of screen surface in the process of single and variable angle screening

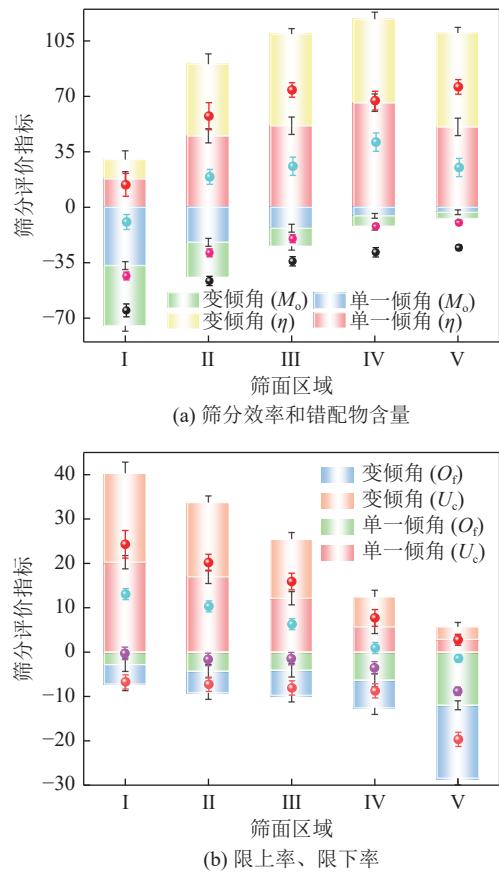


图 10 单一倾角和变倾角筛选过程中筛面不同区域煤矸石的筛选效率、总错配物含量及限上、限下率曲线

Fig.10 Curves of screening efficiency, total misplaced material, oversize fraction and undersize fraction of coal gangue on different area of screen surface in the process of single and variable angle screening

粒级 -4.5 mm 的煤矸石在第 I 段的分配率逐渐增大，这是因为筛面倾角梯度导致了煤矸石粒度的分配差异。

对比分析单一倾角和变倾角筛选过程中料群在不同区域的空间分布规律及筛选效果，发现单一倾角筛选过程中煤矸石在入料端集中透筛，变倾角筛选过程中煤矸石在筛面中部区域集中透筛，且透筛量更多，分配粒度更接近目标尺寸 6 mm ，分配粒度和分离精度较好，筛选效率提高 2.24% ，总错配物含量降低 1.74% 。

2.3 筛分过程煤矸石与不同筛面倾角的适配特性

为探究不同物料特性与筛面倾角梯度的匹配规律，选取 $>6\text{ mm}$ 占比 55% 的煤矸石进行筛选试验，同时保证其他操作参数条件不变，探究处理能力和倾角梯度对筛选效果的影响规律，寻找最佳匹配参数条件。

由图 12 和图 13 可知，处理能力的变化范围为

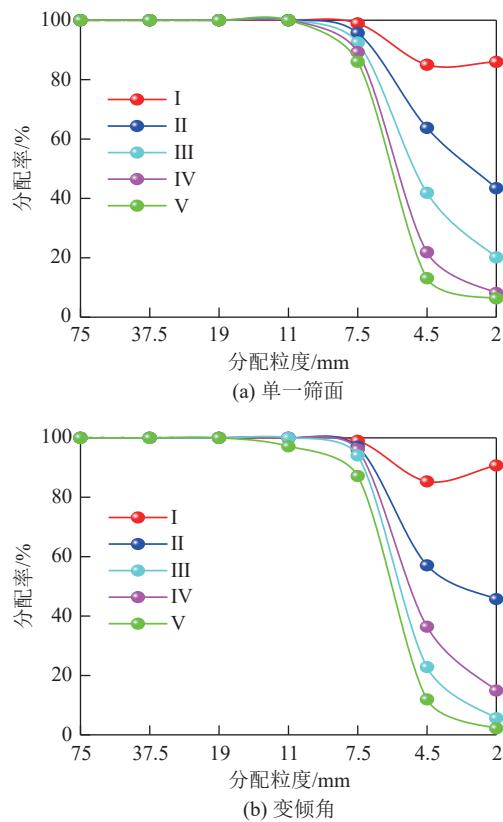


图 11 单一倾角和变倾角筛选过程中筛面不同区域煤矸石的分配率曲线

Fig.11 Curves of distribution ratio of coal gangue on different area of screen surface in the process of single and variable angle screening

$10.8 \sim 25.2\text{ t/h}$ ，倾角梯度变化范围为 $3^\circ \sim 6^\circ$ ，随着处理能力的逐渐增大，不同倾角梯度对应的筛选效率先增后减，总错配物含量先减后增；限下率先减后增，限上率逐渐增大；筛下和筛上产品占入料的产率变化趋势分别为先逐渐升高后降低和先逐渐降低后升高。此外，不同倾角梯度对应的最大处理能力有所不同。

其中，当倾角梯度 $\Delta\theta=3^\circ$ 时，最佳处理能力为 18 t/h ，筛选效率为 95.68% ，总错配物含量为 2.23% ，筛下产率达到最大值 45.78% ；当倾角梯度 $\Delta\theta=4^\circ$ 时，最佳处理能力为 18 t/h ，筛选效率为 93.98% ，总错配物含量为 2.67% ，筛下产率达到最大值 44.78% ；当倾角梯度 $\Delta\theta=5^\circ$ 时，最佳处理能力为 14.4 t/h ，筛选效率为 92.88% ，总错配物含量为 3.18% ，筛下产率达到最大值 45.5% ；当倾角梯度 $\Delta\theta=6^\circ$ 时，最佳处理能力为 14.4 t/h ，筛选效率为 92.35% ，总错配物含量为 3.24% ，筛下产率达到最大值 42.84% 。因此，当煤矸石中粗颗粒占比为 55% 时，应选取较小的倾角梯度如 3° 和 4° ，此时筛选效果和处理能力均最佳。

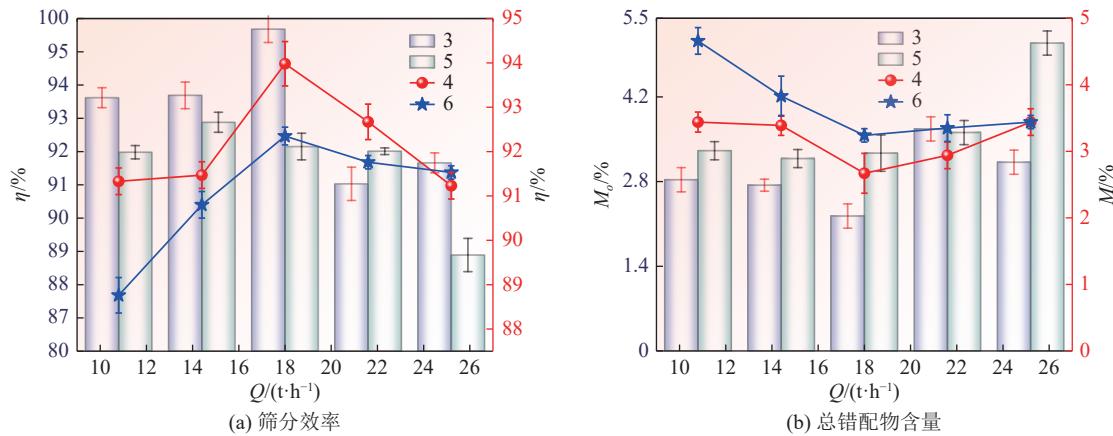


图 12 不同处理能力和倾角梯度条件下的筛分效率和总错配物含量曲线

Fig.12 Curves of screening efficiency and total misplaced material under different handling capacity and inclination gradient of screen surface

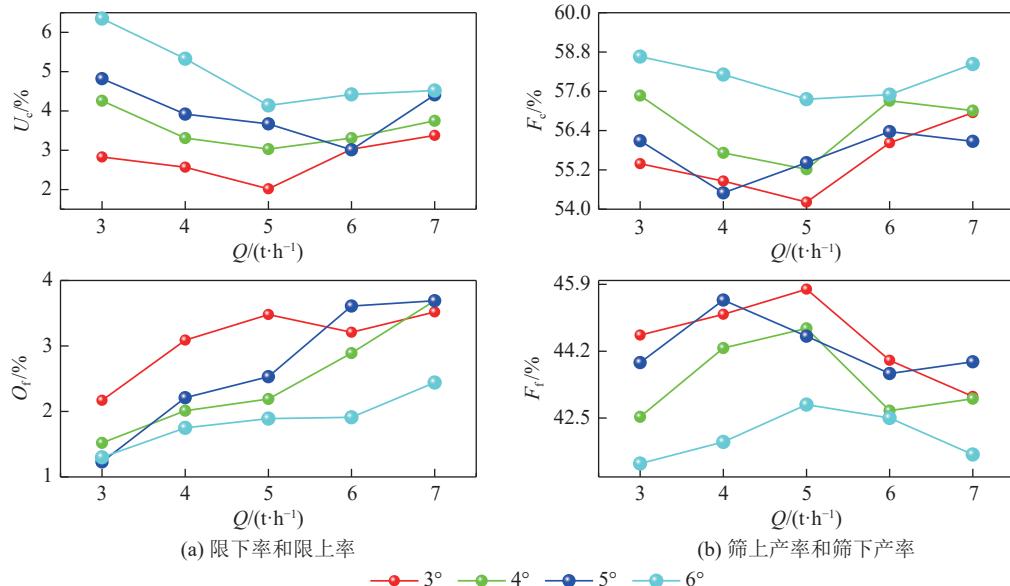


图 13 不同处理能力和倾角梯度条件下的限上、限下率和入料产率的曲线

Fig.13 Curves of undersize fraction, oversize fraction and feeding productivity under different handling capacity and inclination gradient of screen surface

3 结 论

1) 变倾角筛上煤矸石的吸光度是单一倾角的1.5倍, 筛下是相应的2.5倍。和单一倾角相比, 变倾角筛上从给料端到排料端煤矸石的空间分布更加均匀松散。此外, 有效利用面积更大, 筛下呈现薄层透筛分布规律, 且无物料堆积现象。

2) 通过对对比分析单一倾角和变倾角筛下不同区域煤矸石的分布规律, 发现单一倾角下的煤矸石在给料端集中透筛。反之, 变倾角的煤矸石集中在中部区域, 透筛率更高, 分配粒度更接近于目标尺寸6 mm, 分离精度较好, 筛分效率提高2.24%, 总错配物含量降低1.74%。

3) 当 $> 6 \text{ mm}$ 的粗颗粒占比55%时, 倾角梯度3°和4°选取的最佳处理能力为18 t/h, 此时能保证最佳筛分效率和处理能力。研究结果将为不同物料特性的煤矸石和倾角梯度的设计提供技术参考, 可以对煤矸石固废资源进行高效筛分。

参考文献(References):

- [1] 曹永新, 尹育华. 煤矸石综合利用技术[J]. 露天采矿技术, 2007(4): 65–66.
CAO Yongxin, YIN Yuhua. Comprehensive utilization technology of coal gangue[J]. Opencast Mining Technology, 2007(4): 65–66.
- [2] 黄龙. 多段变倾角等厚筛运动学特性及筛分过程协同优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. HUANG Long. Kinematic Char-

- acteristics of multi stage equal thickness screen with variable inclination and co-optimization of screening process[D]. Xuzhou: China University of Mining Science and Technology, 2020.
- [3] 王世林,牛文静,张攀,等.煤矸石的研究现状与应用[J].江西化工,2019(5): 69–71.
WANG Shilin, NIU Wenjing, ZHANG Pan, *et al.* Research status and application of coal gangue[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2019(5): 69–71.
- [4] 王玉涛.煤矸石固废无害化处置与资源化综合利用展望[J].煤炭地质与勘探,2022, 50(10): 54–66.
WANG Yutao. Status and prospect of harmless disposal and resource comprehensive utilization of solid waste of coal gangue[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 54–66.
- [5] 许文娇,成怀刚,程芳琴.煤基产业的资源循环利用与低碳流程再造[J].过程工程学报,2022, 23(3): 1–14.
XU Wenjiao, CHENG Huaiyang, CHENG Fangqin. Resource recycling and lowcarbon process reengineering in coalbased industry[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 23(3): 1–14.
- [6] 顾成,李宇.煤基固废物综合利用研究进展[J].煤炭与化工,2020, 43(9): 98–101, 106.
GU Cheng, LI Yu. Study on progress in comprehensive utilization of coal based solid waste[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(9): 98–101, 106.
- [7] 黄鹏宇.固废粉碎及其分级现状及发展趋势[J].科技风,2014(11): 150.
HUANG Pengyu. Current situation and development trend of solid waste crushing and classification[J]. Kejifeng, 2014(11): 150.
- [8] 李鹏,夏元鹏,张立魁,等.煤矸石综合利用产业政策和发展方向[J].陕西地质,2021, 39(2): 96–101.
LI Peng, XIA Yuanpeng, ZHANG Likui, *et al.* Industrial policy and development direction of the comprehensive utilization of coal gangue[J]. Geology of Shaanxi, 2021, 39(2): 96–101.
- [9] 任艳萍.煤矸石综合利用存在的问题及对策分析[J].中国新技术新产品,2019(15): 109–110.
REN Yanping. Analysis of the problems and countermeasures in the comprehensive utilization of coal gangue[J]. New Technology & New Products of China, 2019(15): 109–110.
- [10] 姚永建,张辉,黄建军,等.煤矸石的分级分质技术研究[J].煤炭加工与综合利用,2018(12): 38–41.
YAO Yongjian, ZHANG Hui, HUANG Jianjun, *et al.* Classification and quality separation technology of coal gangue[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2018(12): 38–41.
- [11] 周楠,姚依南,宋卫剑,等.煤矿矸石处理技术现状与展望[J].采矿与安全工程学报,2020, 37(1): 136–146.
ZHOU Nan, YAO Yinan, SONG Weijian, *et al.* Present situation and prospect of coal gangue treatment technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 136–146.
- [12] 赵宝龙.通过分级预处理降低煤矸石山自然的技术研究[J].应用能源技术,2022(3): 1–4.
ZHAO Baolong. Technical research on reducing the spontaneous combustion of coal gangue pile by hierarchical pretreatment[J]. Applied Energy Technology, 2022(3): 1–4.
- [13] 许泽胜,陈佳蕊,王森彪,等.煤矸石分级分质加工与利用的研究[J].中国煤炭,2021, 47(11): 61–68.
XU Zesheng, CHEN Jiarui, WANG Senbiao, *et al.* Study on the grading and quality-separating processing and utilization of coal gangue[J]. China Coal, 2021, 47(11): 61–68.
- [14] 陈岩.基于多元化应用的煤矸石高效破碎分选技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.
CHEN Yan. Research on Efficient crushing and separating technology of coal gangue based on diversified application[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [15] JIANG H, WANG W, ZHOU Z, *et al.* Simultaneous multiple parameter optimization of variable-amplitude equal-thickness elastic screening of moist coal[J]. Powder Technology, 2019, 346: 217–227.
- [16] LI H, FENG Z, JING W, *et al.* Facile preparation of zeolite-activated carbon composite from coal gangue with enhanced adsorption performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 390: 124513.
- [17] BU N, LIU X, SONG S, *et al.* Synthesis of NaY zeolite from coal gangue and its characterization for lead removal from aqueous solution[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(7): 2699–2710.
- [18] HUANG L, LIU Y, LU J, *et al.* Research of the Collision mechanics model and time-frequency characteristics during the multistage variable-inclination screening process for clean coal[J]. ACS Omega, 2022, 7(6): 13963–13975.
- [19] BURSTLEIN J. Bewegungsvorgänge auf siebmaschinen[J]. Aufbereitungs-Technik 7.1972: 401–409.
- [20] HUANG L, YUAN J, SHI C, *et al.* Spatial-temporal evolution characteristics of surface and particles regulated by operating parameters during multi-stage variable inclination equal-thickness screening[J]. Separation Science and Technology, 2021, 57(8): 1337–1350.
- [21] LI Z, TONG X, ZHOU B, *et al.* Modeling and parameter optimization for the design of vibrating screens[J]. Minerals Engineering, 2015, 83: 149–155.
- [22] LI Z, TONG X. Applications of the discrete element method and Fibonacci sequence on a banana screen[J]. Journal of Engineering, Design and Technology, 2017, 15(1): 2–12.
- [23] ASBJORNSSON G, BENGTSSON M, HULTHEN E, *et al.* Model of banana screen for robust performance[J]. Minerals Engineering, 2016, 91(15): 66–73.
- [24] 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): 1218–29.
- [25] CLEARY P W, SINNOTT M D, MORRISON R D. Separation performance of double deck banana screens-Part 2: Quantitative predictions[J]. Minerals Engineering, 2009b, 22 (14): 1230–44.
- [26] JAHANI M, A FARZANEHAN, M NOAPARAS. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver[J]. Powder Technology, 2015, 283: 32–47.
- [27] 黄龙,潘森,江海深,等.变振幅等厚筛分过程中生产率对

- 粒群时空分布与分级效果的影响研究[J].选煤技术,2019(3):23-29.
- HUANG Long, PAN Miao, JIANG Haishen, *et al.* A study of the effects on temporal and spatial distribution of particle groups and sizing effect produced by productivity in variable-amplitude equal bed-thickness screening process[J]. Coal Preparation Technology, 2019(3): 23-29.
- [28] 黄龙,乔金鹏,董良,等.基于DEM的变振幅等厚筛分粒群运动学特性及参数作用机制[J].中国粉体技术,2019,25(2):25-30.
- HUANG Long, QIAO Jinpeng, DONG Liang, *et al.* Particle movement characteristic and parametric influence on screening process of variable amplitude equal thickness screening based on DEM[J]. China Powder Science and Technology, 2019, 25(2): 25-30.
- [29] DONG K, YU A. Numerical simulation of the particle flow and sieving behavior on sieve bend/low head screen combination[J]. Minerals Engineering, 2012, 31: 2-9.
- [30] DONG K, WANG B, YU A. Modeling of particle flow and sieving behavior on a vibrating screen: from discrete particle simulation to process performance prediction[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(33): 11333-11343.