doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.008

引用格式：陈淑云，姜坤坤，范增伟，田彦生，程根，葛咸浩，董良. 气固流化床中加重质聚团流化与煤炭分选特性[J]. 矿冶，2026，35(2)：229-239.

CHEN Shuyun, JIANG Kunkun, FAN Zengwei, TIAN Yansheng, CHENG Gen, GE Xianhao, DONG Liang. Characteristics of dense medium agglomerate fluidization and coal separation in gas-solid fluidized beds[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 229-239.

气固流化床中加重质聚团流化与煤炭分选特性

陈淑云[1] 姜坤坤[2] 范增伟[1] 田彦生[2] 程 根[1] 葛咸浩[2] 董 良[3]

（1. 国电建投内蒙古能源有限公司，内蒙古 鄂尔多斯 017209；
2. 大地工程开发集团有限公司，北京 100102；
3. 中国矿业大学 化工学院，江苏 徐州 221116）

摘 要：流态化分选技术是气固流化床在分选领域的拓展，可实现煤炭的有效分选。将磁铁矿粉与煤粉作为加重质，在上升气流的作用下，流化形成具有一定密度的床层，低于床层密度的精煤上升到流化床顶部，而高密度矸石则下降到流化床底部。但若入选煤炭水分较高，煤炭—加重质以及加重质—加重质间易形成颗粒聚团，致使床层密度分布不均，不利于煤炭的高效分选。本文研究了在不同煤炭外水含量下煤炭及聚团在床层中的含量及其分布特征，探究了煤炭外水含量对床层密度变化的作用规律，对潮湿煤炭进行了分选试验，探索了煤炭外水含量对分选效果的影响。结果表明，外水含量的增加对煤炭及其聚团的分布规律产生了显著影响。低密度煤及其聚团主要集中于床层的上部，而随着外水含量增加，部分聚团会下沉。高密度煤矸石则主要分布于床层的下部，随着外水含量的提高，床中聚团数量增加并逐渐下沉至更深层次，但由于床层下部密度随煤炭水分升高而增大，因此部分聚团又会出现上浮现象。且由于黏附力的影响，外水含量越高，煤炭越容易与加重质颗粒形成聚团，从而导致床层难以完全膨胀，则床层密度较高，其标准差也随之增加。在外水含量为0的条件下，可能偏差为0.082 $g \cdot cm^{-3}$，分选密度为1.844 $g \cdot cm^{-3}$。本研究可为气固分选流化床中颗粒聚团的调控与抑制，实现潮湿煤炭的有效分选奠定理论基础。

关键词：干法选煤；颗粒聚团；床层密度；煤炭水分

中图分类号：TD94 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854(2026)02-0229-11

Characteristics of dense medium agglomerate fluidization and coal separation in gas-solid fluidized beds

CHEN Shuyun[1] JIANG Kunkun[2] FAN Zengwei[1] TIAN Yansheng[2]
CHENG Gen[1] GE Xianhao[2] DONG Liang[3]

(1. State Power Construction Investment Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Ordos 017209, Inner Mongolia, China;
2. Dadi Engineering Devel-opment Group Co., Ltd., Beijing 100102, China;
3. School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: The fluidized separation technology is an extension of gas-solid fluidized beds in the field of separation, enabling effective separation of coal. By utilizing magnetite powder and coal powder as dense medium, a bed with a certain density is formed under the influence of upward airflow. Low-density clean coal rises to the top of the fluidized bed, while high-density gangue settles at the bottom. However, if the moisture content of the selected coal is relatively high, particle agglomeration may occur between coal-dense medium agent and dense medium-dense medium interactions. This results in an uneven distribution of bed density that hinders efficient separation of coal. This study investigates the content and distribution characteristics of both coal and agglomerates within the

收稿日期：2025-03-24 **修回日期：**2025-06-23 **录用日期：**2025-10-24

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52274275)

第一作者：陈淑云，学士，工程师，主要从事煤炭洗选加工管理研究。E-mail：739857997@qq.com

通信作者：董良，博士，教授；E-mail：dongl@cumt.edu.cn

©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

bed under varying external moisture contents in coal. It explores how external moisture content affects changes in bed density and conducts separation experiments on moist coals to examine its impact on sorting outcomes. The results indicate that increasing external moisture significantly influences the distribution patterns of both coal and its agglomerates. Low-density coals and their agglomerates are primarily concentrated in the upper part of the bed; however, as external moisture increases, some agglomerates tend to sink. High-density gangue mainly accumulates at lower sections of the bed; with rising external moisture levels, both quantity and depth placement of agglomerates increase progressively deeper into layers. Nonetheless, due to increased density at lower layers caused by higher water content in coals, some agglomerates exhibit buoyancy effects as well. Additionally, because adhesive forces play a role here—higher external water content facilitates easier formation of aggregates between coals and dense medium particles—this leads to challenges for complete expansion within beds characterized by higher densities accompanied by greater standard deviations. Under conditions where external water content is zero, potential deviation measures 0.082 $g \cdot cm^{-3}$ while separating density registers at 1.844 $g \cdot cm^{-3}$. This research lays a theoretical foundation for regulating and inhibiting particle agglomeration within gas-solid separation fluidized beds aimed at achieving effective sorting for moist coals.

Key words: dry coal separation; particle agglomeration; bed density; coal moisture

煤炭是我国的主体能源[1,2]，发展清洁高效的洁净煤技术对保护环境、保障国民经济健康发展起着至关重要的作用。选煤是洁净煤技术的源头技术，可为煤炭资源分选提质，促进煤炭行业的可持续发展[3,4]。流态化干法选煤技术可实现煤炭的有效分选，该方法以磁铁矿粉颗粒与煤粉颗粒组成二元复合加重质，在流化气体作用下形成具有一定密度的流化床层，入选煤炭颗粒在床层中按照阿基米德原理进行分层，实现精煤与矸石的有效分离[5-7]。在实际的分选过程中，由于环境条件的复杂性，煤炭表面及其裂隙中可能会吸附水分，称为外在水分。这部分水分常常会直接或间接地引入床层中，随着气流流动裹挟、颗粒附着运移等作用，水分也逐渐在床层中扩散，并在颗粒之间形成液桥[8-10]。在水分的黏性作用下，颗粒间碰撞结合，从而形成颗粒聚团[11]。因此，外水含量是影响颗粒聚团特性的重要因素。

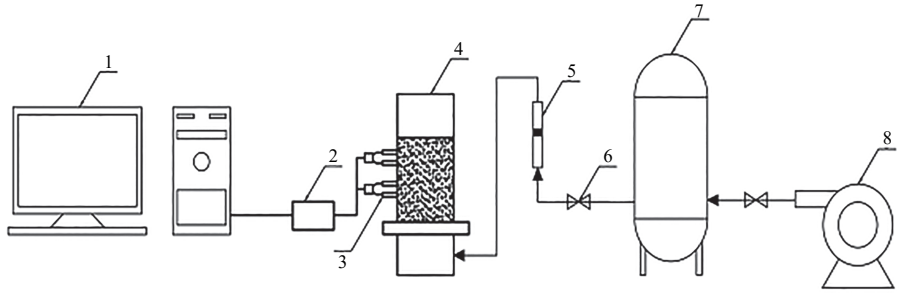
已有研究对颗粒聚团进行详细概述[12-15]。ZHOU等[16]在研究黏性颗粒聚团流化时，采用力平衡分析法建立了细颗粒的聚团模型。表明团聚力为颗粒间黏性力，破碎力为颗粒所受的浮力与碰撞力。KUWAGI等[17]利用数值模拟的方法研究了黏性颗粒流化时聚团机理，并考察了气泡周围颗粒的聚团行为，发现气泡尾涡处易有颗粒聚团形成。ENNIS等[18]提出当毛细管数大于1时，液桥力主要为动态液桥力。而当毛细管数小于1时，静态液桥力则占主导作用。MCDOUGALL等[19]考察了液体的黏度、表面张力等液体的性质对流化质量及颗粒聚团的影响，发现液体的黏度和接触角是影响颗粒粘结聚团的重要因素。然而，颗粒聚团会对流化床中的气固接触特性以及床层流化特性造成影响，导致气流倾向于从边壁死角喷出，使床层出现沟流、死区、喷涌等现象，床层密度不稳定，恶化流化床分选效果[20-23]。因此，研究颗粒聚团对床层密度及分选效果的影响规律有助于减少颗粒聚团的形成，提高流化床的分选效率，而水分则是其中的关键影响因素。

本文研究了煤炭外水含量对颗粒聚团分布规律的影响，探索了在不同煤炭外水含量下床层的纵向密度、径向密度与平均密度的变化。在此基础上，对潮湿煤炭的分选展开了研究，分析了不同因素对分选效果与分选特性的影响，为进一步提高煤炭分选精度奠定了理论基础。

1 试验装置与材料

1.1 试验系统

气固分选流化床试验系统如图1所示，主要包括供风装置、调节装置、流化床分选装置和测试装置。供风装置包括罗茨鼓风机、稳压罐等，可为流化床提供动能。调节装置为流量调节阀与转子流量计，可实时测量经过流化床层的气体流量。流化床床体结构为圆柱体，床体边壁为10 mm，尺寸为Φ200 mm × 1 000 mm，布风板为钢制材料的多孔板，圆孔直径为3 mm。流化床由有机玻璃制成，透明可视。测试装置包括微压差传感器和测压管，微压差传感器可以安装在流化床的边壁上，通过不同的床层位置可测得床层不同区域的压力信号，最下层的测压点位于布风板上方30 mm处，测压点之间距离为30 mm。



1—计算机处理系统；2—数据采集卡；3—微差压传感器；4—流化床；5—转子流量计；6—蝶阀；7—稳压罐；8—罗茨鼓风机

图1　气固流化床试验系统

Fig. 1　Experimental system for gas-solid fluidized bed

1.2　试验材料

本试验选取粒度范围为−1+0.5 mm的煤粉与−0.3+0.074 mm的磁铁矿粉混合后作为加重质，煤粉与磁铁矿粉的质量之比为1∶9，其试验材料颗粒基本特性如表1所示。

表1　磁铁矿粉与煤粉的物理特性

Table 1　Physical properties of magnetite powder and coal powder

材料	粒级/mm	平均粒度/mm	含量/%	堆密度/(g·cm^{-3})
磁铁矿粉	−0.15	0.207	100	2.43
	−0.3+0.15	0.247	80	2.44
	−0.15+0.074	0.147	15	2.35
	−0.074	0.068	5	2.05
煤粉	−1+0.5	0.947	100	0.97

采取粒度为−25+6 mm的煤炭进行分选试验，入选煤炭来自于察哈素选煤厂，其基本性质如表2所示，属于低中灰低硫的不黏煤。

表2　入选煤炭基本性质

Table 2　Properties of coal

粒级/mm	水分/%	灰分/%	挥发分/%	全硫/%
−25+6	6.13	15.18	36.34	0.71

通过对入选煤炭的浮沉试验，绘制出相应的可选性曲线，如图2所示。由图2可知，当要求精煤灰分为5%时，理论精煤产率82%，理论分选密度为1.40 g·cm^{-3}，扣除沉矸后δ±0.1含量为5.5%，其可选性等级为易选。

1.3　试验方法

流化床由加重质与入选煤炭构成，床层高度为流化床中该混合物从底部到顶部的垂直距离，为120 mm。

首先进行分选试验，控制入选煤炭其外水含量分别为0、1%、2%、3%、4%和5%，外水含量按照《煤的工业分析方法》（GB/T 212—2008）进行测定。待

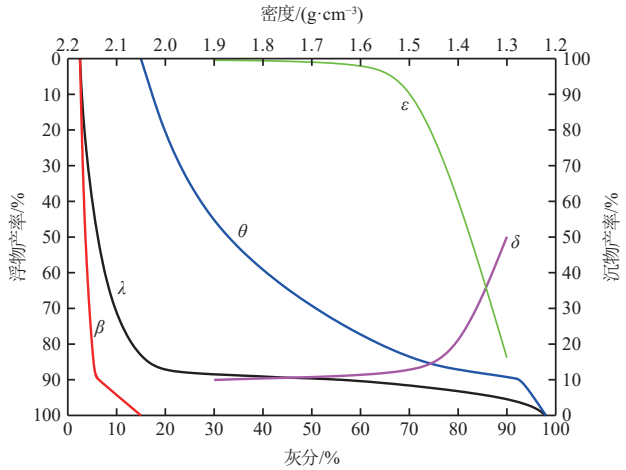


图2　可选性曲线

Fig. 2　Washability curves

流化床层在某一操作条件下进行流化后，将不同水分的煤炭投掷入流化床中进行分选，待分选时间达到1分钟后停止流化。在纵向方向上将流化床层划分为H1、H2、H3、H4四层。H1层（床层上部区域）位于床高90~120 mm区域，H2层位于床高60~90 mm区域，H3层位于床高30~60 mm区域，H4层位于床高0~30 mm区域。基于分层取样的方式测定在不同煤炭外水含量下煤炭及聚团在不同床层中的质量，每次需进行三次平行试验。

在分选过程中，采取微差压传感器来测量分选过程中床层的压降数据，如图3所示。纵向选取H1、H2、H3、H4四层，在每一层的径向方向上设定17个数据测量点，其中17#测量点位于床层的中心位置，1~16#测量点则均匀地分布在床层同一平面内不同位置。床层密度计算方法如公式（1）所示。

$$\Delta P=\rho_{\mathrm{bed}}gL \tag{1}$$

式中，ρ_{bed}为床层密度，kg·m^{-3}；ΔP为不同高度的压力差，Pa；L为不同压力测量点的高度差，m。

在分选完成后，通过分层取样的方法采集精煤

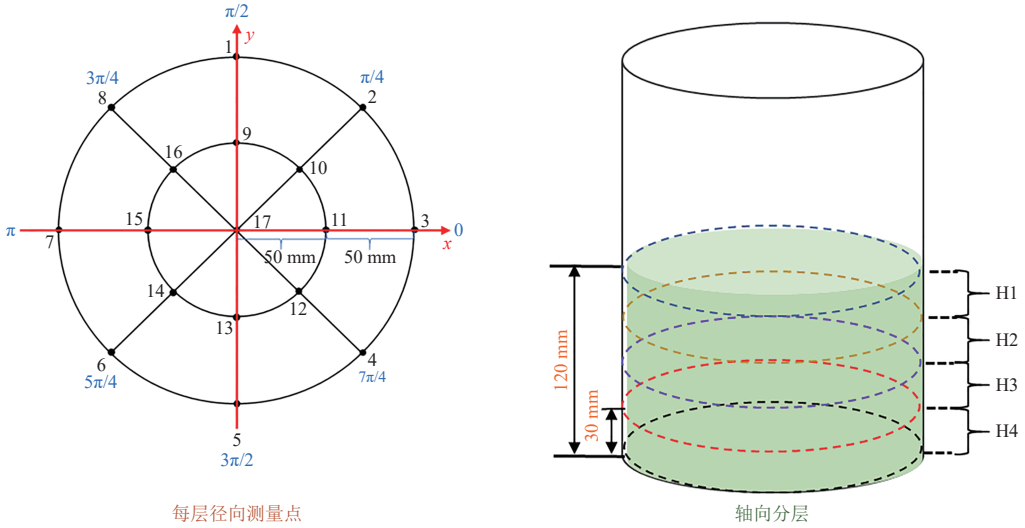


图3 流化床密度测量示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of the measurement of bed density in a fluidized bed

与矸石产品的样品，测定分选后产品的灰分及产率。并分别对所得的精煤与矸石进行浮沉试验。根据精煤与矸石的浮沉组成，绘制出相应的分配曲线，读取分配率为50%处的密度值为分选密度δ_p，同时可根据式(2)计算出可能偏差E值。

$$E=\frac{\delta_{75}-\delta_{25}}{2} \tag{2}$$

式中，δ_{75}为分配率为75%时的密度值，g·cm^{-3}；δ_{25}为分配率为25%时的密度值，g·cm^{-3}。

2 试验结果及分析

2.1 煤炭外水含量对煤炭及聚团分布规律影响

煤炭颗粒可根据密度差异在流化床层中进行分层，在实际分选过程中，煤炭中水分致使其进入流化床后，在水分的作用下与加重质颗粒相互黏结形成聚团，严重扰乱原本稳定平衡的流化环境，使床层密度分布不均，则煤炭在流化床中的分层状况变得更为复杂。

对不同密度的煤炭进行分选，低密度煤与聚团的分层规律如图4所示，其中，图4(a)为低密度煤分布特征，低密度煤主要分布于H1床层，即流化床的上部区域，且低密度煤质量随着煤炭外水含量的提高呈下降趋势，但变化幅度较小；同时，H2床层的低密度煤质量随着煤炭外水含量的提高而略有增加，表明水分的增加恶化了流化床的流化效果，不利于煤炭的分层。煤炭外水含量对聚团的分布也有一定的影响，图4(b)为聚团生成与分布规律，当煤炭外水含量ω=1%时，各床层中均无聚团的产生；当煤炭外水含量ω=1%~2%时，H1床层开始产生聚团，但是含量较小；当煤炭外水含量较高，即$\omega\geqslant$3%时，会产生数量

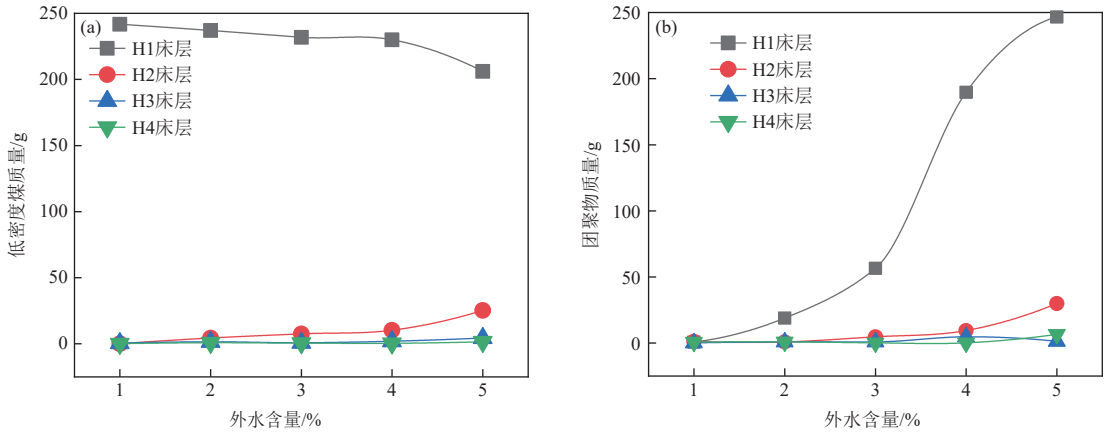


图4 低密度煤与聚团分层规律：(a)低密度煤分布特征；(b)聚团生成与分布规律

Fig. 4 Stratification patterns of low-density coal and particle aggregation: (a) Low-density coal distribution; (b) Particle aggregation distribution

极多的聚团浮于床层上部区域，同时，H2床层的聚团质量也会随着煤炭外水含量的提高而略有提升。当煤炭的外水含量较低时，水分形成的液桥作用减弱，进而减少了颗粒间的黏附力。在这种情况下，煤炭吸附加重质颗粒的能力减弱，从而聚团的形成数量较少。且聚团由于以低密度煤为核心，其密度较小，只能浮于床层的上部区域，而当其外水含量增加后，黏附的磁铁矿粉含量随之增加，部分聚团下沉至H2床层区域。

高密度煤矸石与聚团的分层规律如图5所示，煤矸石主要分布于H3和H4床层区域，H1床层与H2床层的煤矸石含量较小且其变化趋势较小，但H3床层与H4床层的煤矸石含量随着外水含量的增加变化趋势相反，这是由于煤矸石自身密度较大，只能下沉于床层下部区域，但床层的下部区域床层密度随着外水含量的提高呈上升趋势，导致H4床层的煤矸石会逐渐上浮于H3床层。以煤矸石为核心的聚团质量随外水含量的提高存在一定的变化，当外水含量ω=1%时，各床层中也均无聚团的产生；当外水含量$\omega\leqslant$2%时，床中聚团质量较小，只分布于H3床层与H4床层；当外水含量$\omega\geqslant$3%时，各床层中均存在部分聚团，但大部分聚团都分布于H3床层中，H1床层、H2床层与H4床层中聚团质量较小。随着外水含量的提高，颗粒间黏附作用增强，煤矸石表面粘附的磁铁矿粉含量呈上升趋势，床中聚团质量也随之增加并下沉于床层的下部区域，但由于床层的下部区域的床层密度随着外水含量的提高而增大，导致部分聚团上浮于床层上部区域。

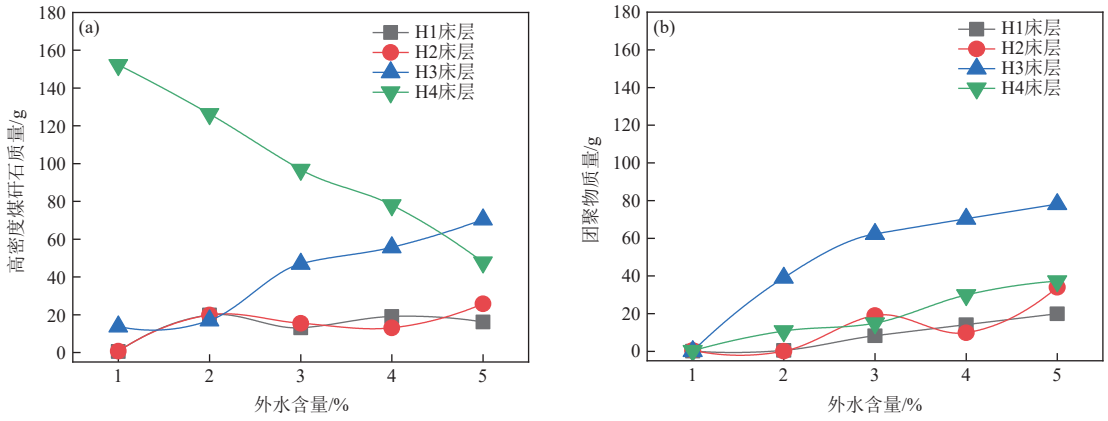


图5　高密度煤矸石与聚团分层规律：(a)煤矸石分布特征；(b)聚团分层规律

Fig. 5　Stratification patterns of high-density gangue and particle aggregation: (a) distribution characteristics of coal gangue; (b) agglomeration and stratification rules

2.2　床层密度分布

床层密度的均匀稳定性可决定煤炭可否在床层中按密度沉降，若床层各处密度的差异较为明显，会导致煤炭的分选精度变差，尤其是潮湿煤炭进入床层后，会形成聚团影响着床层密度的稳定性，使得煤炭的分选环境变得更为复杂，因此需要对潮湿煤炭进入流化床后床层密度分布进行分析。

煤炭外水含量对床层纵向密度及其标准差的影响情况如图6~7所示，随着煤炭外水含量的增加，床层纵向密度呈现增长的趋势。同时由于潮湿煤炭的

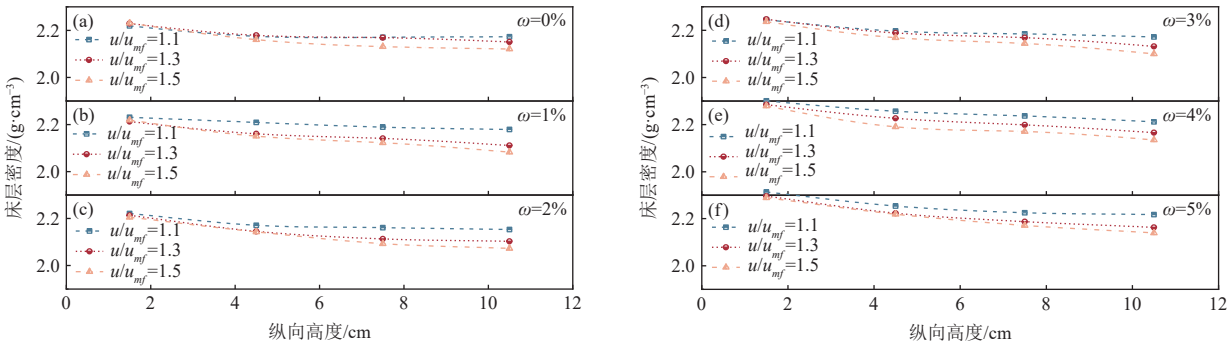


图6　煤炭外水含量对纵向床层密度的影响

Fig. 6　The effects of external moisture content in coal on the longitudinal bed density

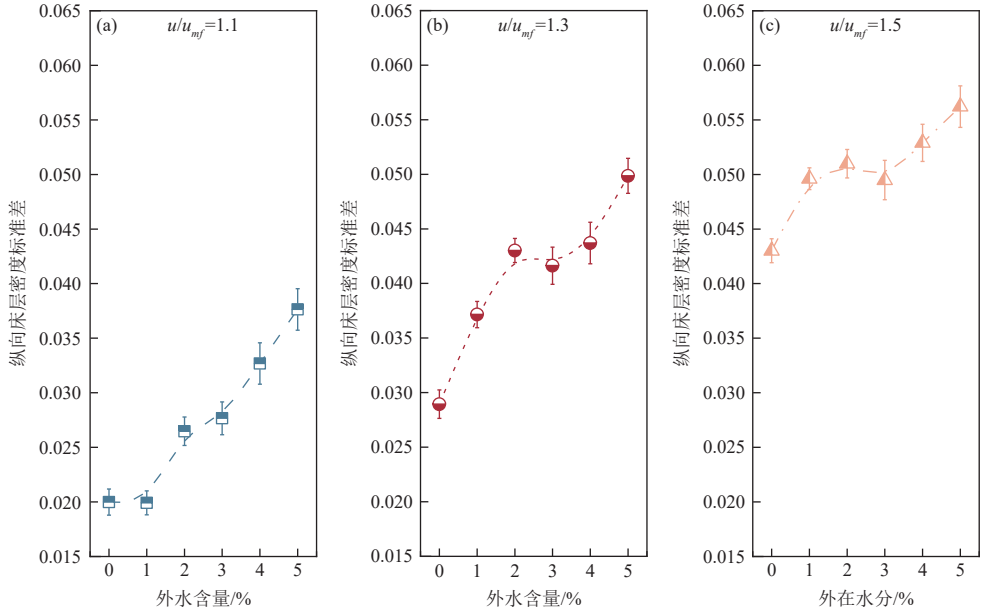


图7　煤炭外水含量对纵向床层密度标准差的影响

Fig. 7　The effects of external moisture content in coal on the standard deviation of longitudinal bed density

表面更易吸附加重质颗粒，潮湿的加重质颗粒从煤炭表面掉落后也能与其他加重质颗粒相互黏结形成颗粒聚团。尤其是当煤炭外水含量较高（ω≥3%）时，颗粒间由液桥力主导的黏附作用大，聚团的结构更为稳固，难以被解聚，颗粒间黏结得更为紧密，床层膨胀较小，床层的纵向密度也进一步升高。此外，水分的增长加剧了颗粒聚团的扰乱作用，床层纵向密度标准差随之增加，恶化了床层密度的均匀稳定。

煤炭外水含量对床层径向密度及其标准差的影响如图8~9所示，床层径向密度随着煤炭外水含量的增加而上升。当床层中不存在外水，即ω=0%时，床层径向密度分布呈现出床层边壁密度较低、床层中心密度较高的趋势；当煤炭外水含量较低，即ω=1%~2%时，床层间由水分引起的液桥作用较弱，聚团尺寸相对较小，能够较为容易地迁移至床层边壁处，并在水分的作用下吸附于床层边壁上，从而导致床层边壁密度较高、床层中心密度较低；当煤炭外水含量较高，即ω≥3%时，磁铁矿粉颗粒间水分液桥作用则较强，颗粒聚团

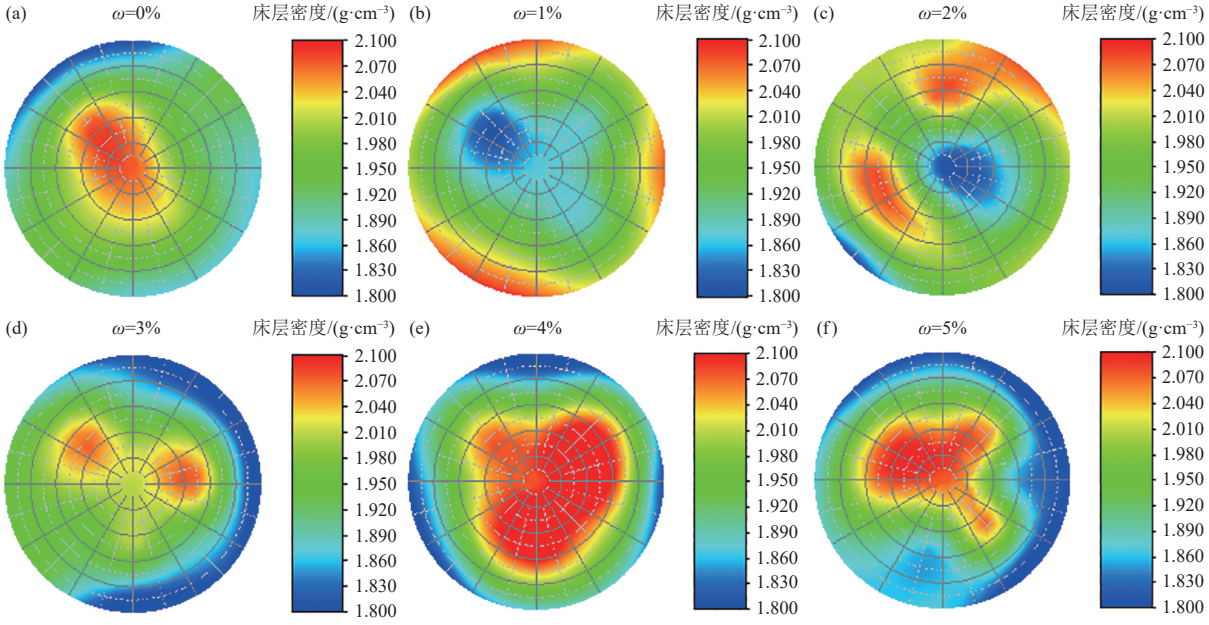


图8　不同煤炭外水含量下径向床层密度分布云图

Fig. 8　Contour maps of radial bed density distributions under varying external moisture content of coal

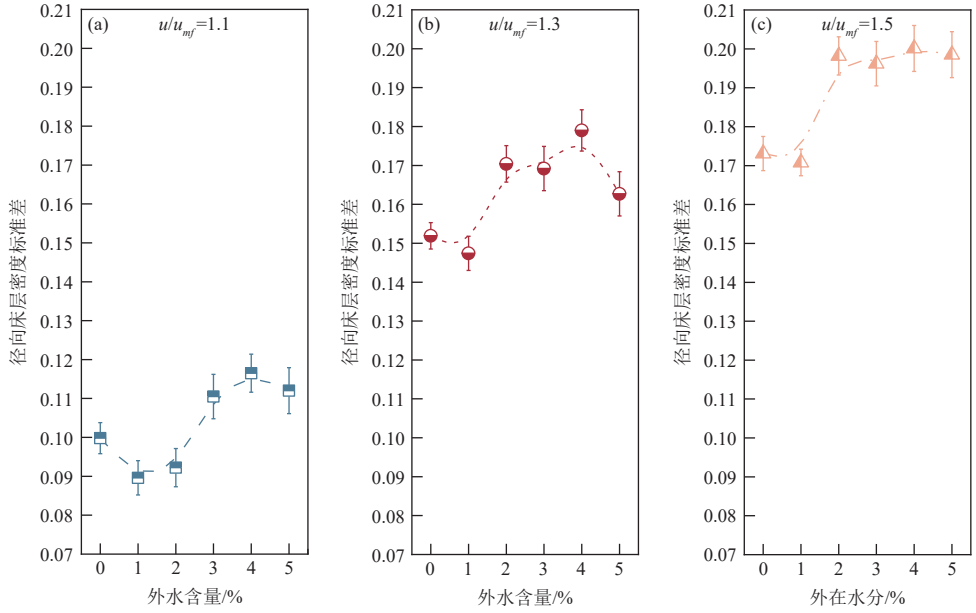


图9　煤炭外水含量对径向床层密度标准差的影响

Fig. 9　The effects of external moisture content in coal on the standard deviation of radial bed density

难以移动，不易分散，易在床层中心区域堆积生长，则又导致床层边壁密度较低、床层中心密度较高。同时，由于床层中水分含量的增加，易出现死区和沟流等情况。在径向平面中，不同位置的气泡在床层中所占体积分数差异较大，进而致使床层密度分布不均，径向床层密度标准差显著增大。

煤炭外水含量同样影响着潮湿床层平均密度的变化，如图10所示，床层的平均密度随着煤炭外水含量的提高而不断增大，呈现由急到缓再到急的趋势。当煤炭外水含量较低，即ω≤2%时，床层中生成的聚团由少变多，变化较大，对于床层平均密度变化趋势也影响较大。当ω=2%~3%时，床层中形成的聚团数量较多但生长趋势较为缓慢，导致床层平均密度的上升趋势变缓。当煤炭外水含量较高，即ω≥3%后，床层平均密度增幅加剧，此时形成的聚团在液桥作用下，颗粒之间黏结的更为紧密，不易发生解聚，且床层含湿量越高越不利于水分的蒸发，床层平均密度的上升趋势也较为剧烈。

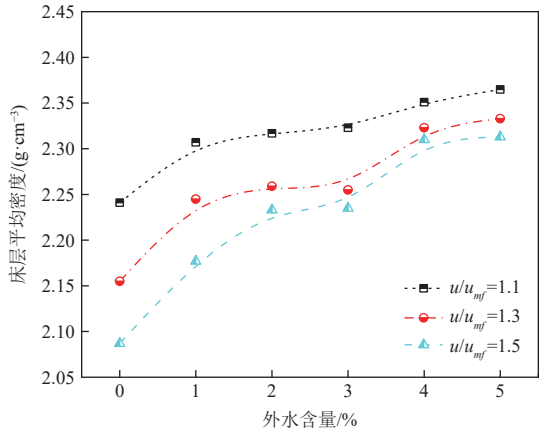


图10　不同煤炭外水含量下床层平均密度

Fig. 10　Average bed densities under varying external moisture content of coal

2.3　煤炭分选试验

煤炭外水含量影响着床层中水分含量，进而引起床层密度发生变化，改变煤炭的分选效果。煤炭外水含量对分选后产品灰分的影响如图11所示。随着煤炭外水含量的增加，H1床层产品灰分上升，而H4床层产品灰分下降。当煤炭外水含量从ω=0%时提高至ω=5%时，H1床层产品灰分可从5.16%上升至5.45%，H4床层产品灰分则从43.66%下降至38.73%。煤炭外水含量的提高导致床层中颗粒间液桥作用的增加，床层膨胀率减小，床层密度逐渐增加，致使部分高密度矸石上浮至床层上部区域，上部区域产品灰分增加，而下部灰分减少。

在不同煤炭外水含量条件下−25+6 mm粒径煤炭分选分配曲线及可能偏差结果如图12所示，随着煤炭外水含量的提高，分选密度δ_p增长趋势较为平缓，当煤炭外水含量从0%提升至5%时，分选密度δ_p仅从1.84 g·cm^{-3}增长到1.88 g·cm^{-3}，表明水分对分选密度的影响较小。与此同时，可能偏差E值随着煤炭外水含量的提高而迅速上升，在无水分的条件下，

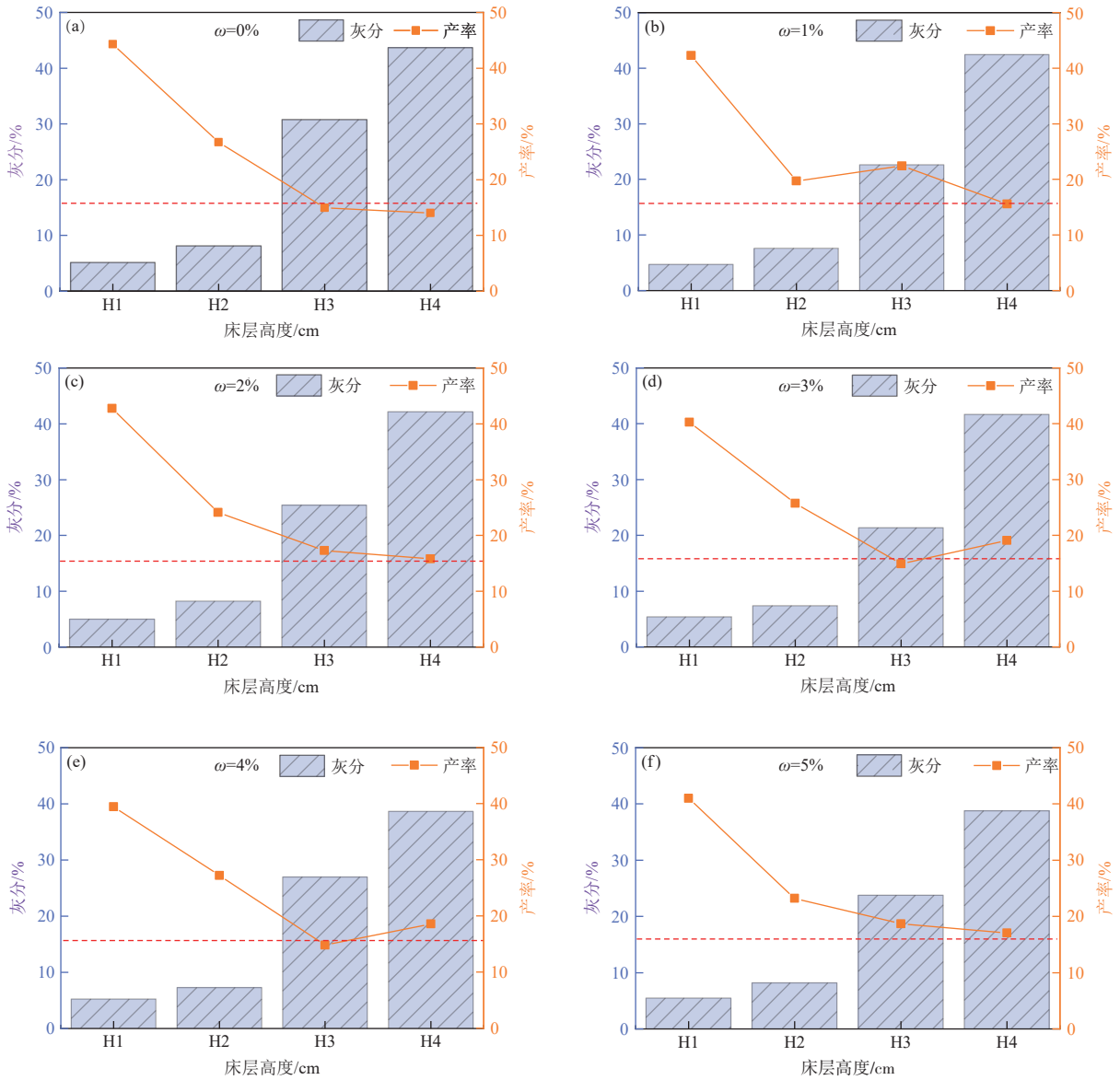


图 11　煤炭外水含量对分选后产品灰分影响

Fig. 11　The effects of external moisture in coal on the ash content of separated products

可能偏差E值为0.082 g·cm^{-3}；当煤炭外水含量ω达到5%时，可能偏差E值随之提高至0.138 g·cm^{-3}，可能偏差E值的相对增幅达68.3%。在此过程中，ω=0%上升至ω=1%时，可能偏差E值变化较小，而超过ω=1%后E值又急速上升，表明当煤炭中的外水含量较高时，会伴随着自由水分转移到床层中，煤炭与加重质颗粒间、加重质与加重质颗粒间将由于颗粒间的黏附作用，形成数量较多的聚团，扰乱流化环境，致使床层密度分布不均，煤炭难以得到有效的分选，则分选精度较差。

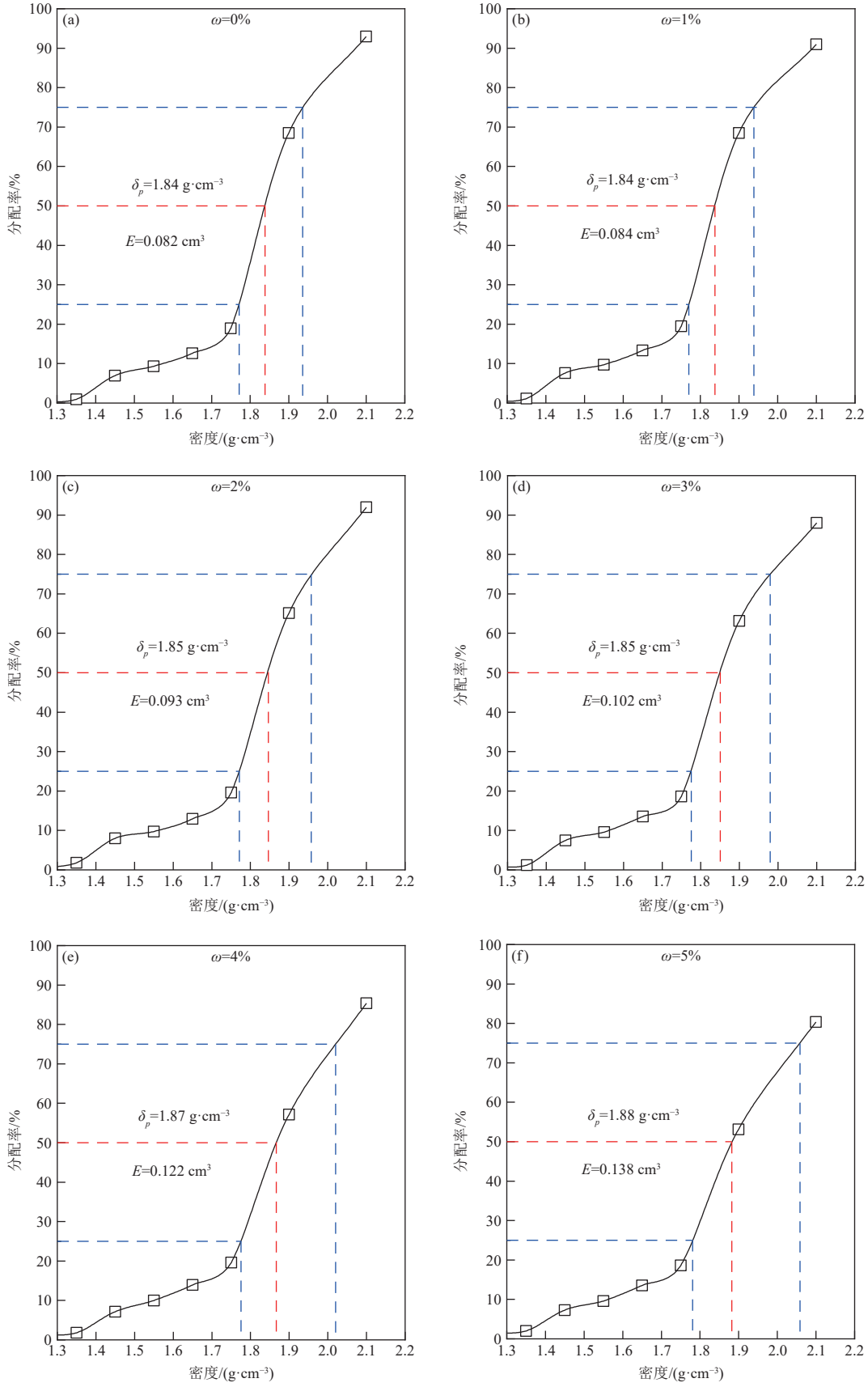


图 12　不同煤炭水分下的分配曲线

Fig. 12　Distribution curves at various moisture contents of coal

3 结论

1）煤炭外水含量的提高对煤炭及聚团的分布规律产生影响。低密度煤及其聚团主要位于床层的上部，而当其外水含量增加后，部分聚团下沉。高密度煤矸石主要分布于床层的下部。随外水含量的提高，床中聚团含量增加并下沉，但由于床层下部密度随着外水含量的提高而增大，则部分聚团上浮。

2）随着煤炭外水含量的增大，煤炭在黏附力的作用下易与加重质颗粒形成聚团，床层难以完全膨胀，床层密度较高，密度标准差随之增加，床层密度波动剧烈，影响了床层的流化效果。

3）随煤炭外水含量的增加，部分高密度矸石上浮至床层上部区域，导致此区域内产品灰分上升，床层下部区域产品灰分下降。煤炭外水含量的增加导致分选密度略有提升，可能偏差则迅速上升。在煤炭外水含量为0的条件下，可能偏差为0.082 $g \cdot cm^{-3}$，分选密度为1.844 $g \cdot cm^{-3}$。建议入选原煤外水含量控制阈值≤3%，此时可能偏差E值在0.102 $g \cdot cm^{-3}$以内。

参考文献

[1] 杨方亮. 新型能源体系建设背景下煤炭产业发展前景分析[J]. 中国煤炭, 2024, 50(12): 11-24.
YANG F L. Analysis of the development prospects of coal industry in the context of new energy system construction[J]. China Coal, 2024, 50(12): 11-24.

[2] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
WANG G F, REN S H, PANG Y H, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five. Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.

[3] 于跃先, 刘帆, 石伟, 等. 我国智能浮选核心感知技术研究与应用进展[J]. 煤炭工程, 2025, 57(1): 8-17.
YU Y X, LIU F, SHI W, et al. Research and application progress of core sensing technology for intelligent flotation in China[J]. Coal Engineering, 2025, 57(1): 8-17.

[4] 郭富强, 丁建伟, 刘昆仑, 等. 煤炭清洁高效利用发展现状及趋势展望[J]. 煤炭加工与综合利用, 2019(12): 55-60.
GUO F Q, DING J W, LIU K L, et al. Combined support technology of bolt-mesh-cable-beam in the three-soft thick coal seam[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2019(12): 55-60.

[5] 陈清如, 杨玉芬. 21世纪高效干法选煤技术的发展[J]. 中国矿业大学学报, 2001(6): 1-4.
CHEN Q R, YANG Y F. Development of High Effective Dry Coal Beneficiation Technology in 21st Century[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001(6): 1-4.

[6] 焦杨, 章新喜, 孔凡成. 潮湿细粒煤聚团碰撞分离的物理过程和微观力学机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2092-2099.
JIAO Y, ZHANG X X, KONG F C. Impact breakage process and micro-mechanics of the wet fine coal agglomerates[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 2092-2099.

[7] 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(4): 430-433.
ZHAO Y M, CHEN X M, ZHU H, et al. Study on moist fine materials adhering model[J]. Journal of China Coal Society, 2000 (4): 430-433.

[8] 马永丽, 安澍, 杨捷, 等. 气液固流化床直接数值模拟研究进展[J]. 化工学报, 2025, 76(8): 3772-3788.
GMA Y L, AN S, TANG J, et al. Progress on direct numerical simulation of gas-liquid-solid fluidization[J]. CIESC Journal, 2025, 76(8): 3772-3788.

[9] ZIMON A D. Adhesion of dust and powder[M]. New York: Plenum Press, 1982.

[10] 王维, 洪坤, 鲁波娜, 等. 流态化模拟：基于介尺度结构的多尺度CFD[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 91206.
WANG W, HONG K, LU B N, et al. Combined support technology of bolt-mesh-cable-beam in the three-soft thick coal seam[J]. CIESC Journal, 2013, 64(01): 91206.

[11] 蒋鸣, 周强. 气固流化床介尺度结构形成机制及过滤曳力模型研究进展[J]. 化工学报, 2022, 73(6): 2468-2485.
JIANG M, ZHOU Q. Progress on mechanisms of mesoscale structures and mesoscale dragmodel in gas-solid fluidized beds[J]. CIESC Journal, 2022, 73(6): 2468-2485.

[12] MAKKAWI Y T, WRIGHT P C. Tomographic analysis of dry and semi-wet bed fluidization: the effect of small liquid loading and particle size on the bubbling behaviour[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 59(1): 201-213.

[13] MOLERUS O. Interpretation of Geldart's type A, B, C and D powders by taking into account interparticle cohesion forces[J]. Powder Technology, 1982, 33(1): 81-87.

[14] WANG Z L, LI H Z, KWAUK M. Fluidization of fine particles[J]. Chemical Engineering Science, 1998(3): 53.

[15] CHAOUKI J, CHAVARIE C, KLVANA. D. Effect of interparticle forces on the hydrodynamic behavior of fluidized aerogels[J]. Powder Technology, 1985, 43(2): 117-125.

[16] ZHOU T, LI H Z. Force balance modelling for agglomerating fluidization of cohesive particles[J]. Powder Technology, 2000, 111(1): 60-65.

[17] KUWAGI K, HORIO M. A numerical study on agglomerate formation in a fluidized bed of fine cohesive particles[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(22): 4737-4744.

[18] ENNIS B J, LI J, TARDOS G I, et al. The influence of

viscosity on the strength of an axially strained pendular liquid bridge[J]. Chemical Engineering Science, 1990, 45(10): 3071-3088.

[19] MCDOUGALL S, SABERIAN M, BRIENS C, et al. Effect of liquid properties on the agglomerating tendency of a wet gas-solid fluidized bed[J]. Powder Technology, 2005, 149(2/3): 61-67.

[20] VELDEN M V D, BAEYENS J, SEVILLE J P K, et al. The solids flow in the riser of a Circulating Fluidised Bed(CFB) viewed by Positron Emission Particle Tracking(PEPT)[J]. Powder Technology, 2007, 183(2): 290-296.

[21] FIRUZIAN N, SOTUDEH-GHAREBAGH R, MOSTOUFI N. Experimental investigation of cluster properties in dense gas-solid fluidized beds of different diameters[J]. Particuology, 2014, 16(5): 69-74.

[22] CAHYADI A, NEUMAYER A H, HRENYA C M, et al. Comparative study of Transport Disengaging Height(TDH) correlations in gas-solid fluidization[J]. Powder Technology, 2015, 275: 220-238.

[23] CHEW J W, CAHYADI A, HRENYA C M, et al. Review of entrainment correlations in gas-solid fluidization[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 260: 152-171.

（上接第 228 页）

150(2): 106-115.

[13] 霍强, 刘晰, 谢建平, 等. 低品位高铁铝土矿浮选脱硅试验研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(6): 51-54.
HUO Q, LIU X, XIE J P, et al. Experimental study on flotation desilication of low-grade high-iron bauxite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(6): 51-54.

[14] 尹海军. 铝土矿正浮选精矿过滤助滤剂的研究及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2013, 65(4): 76-78.
YIN H J.Research and application of filtration aids for concentrate in direct flotation of bauxite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013, 65(4): 76-78.

[15] 肖婉琴, 程新朝, 杨慧芬. 铝土矿反浮选脱硅研究的进展[J]. 国外金属矿选矿, 2005, 42(12): 16-19.
XIAO W Q, CHENG X C, YANG H F.Research progress on reverse flotation desilication of bauxite[J]. Overseas Processing of Metal Ores, 2005, 42(12): 16-19.