

团聚物与凸起结构柔性振动筛板碰撞解聚特性*

牛雪梅¹, 唐建², 张志宏², 熊晓燕²

(1. 太原科技大学机械工程学院 太原, 030024)

(2. 太原理工大学机械与运载工程学院 太原, 030024)

摘要 为了促进潮湿细粒煤团聚物的解聚, 提出将凸起结构筛板用于物料的筛分。首先, 采用挤压壁面法构建了潮湿细粒团聚物模型, 仿真分析了团聚物在不同筛板上的碰撞解聚过程及解聚程度; 其次, 通过单因素和响应面分析法研究了凸起结构参数对团聚物碰撞解聚程度的影响性能, 对凸起结构参数进行了优化; 最后, 通过筛分试验对比了物料在普通筛板和凸起结构筛板的解聚性能。结果表明: 凸起结构能提高潮湿细粒团聚物的解聚程度, 其参数对团聚物的解聚性能有显著影响; 平均垂直应力 σ_{yy} 、液桥断裂百分比 D_R 、平均偏心距离 A_d 和膨胀速度 U 随凸起结构下底 a 、上底 b 的增加呈非单调变化, 与高 h 的变化呈正比; 响应面分析得到凸起结构各参数对解聚程度的影响显著性依次为 $h > b/a > a$; 通过对凸起结构参数优化, 团聚物的解聚程度最高可提升13.4%。

关键词 潮湿细粒团聚物; 碰撞解聚; 凸起结构筛板; 离散元仿真; 响应面分析

中图分类号 TD452; TH113

引言

潮湿细粒团聚物的碰撞解聚在颗粒加工、输送、搅拌和混合等过程中起着重要作用, 对物料的流动性和可加工性影响很大^[1]。碰撞过程中, 团聚物中的液桥暴露在快速和不稳定的环境中^[2], 团聚物颗粒相互作用时除弹性和摩擦接触外, 还存在填隙液体内聚作用, 导致了复杂的物理变化和随机的解聚行为^[3-4]。团聚物的碰撞通常会引起其自身形状、形态及机械强度等方面的变化^[5]。根据碰撞条件和颗粒相互作用的不同^[6-8], 团聚物在撞击后会发生变形^[9-10]、解聚或反弹。Khalilitehrani等^[2]提出, 湿团聚物冲击碰撞后的行为可分为轻微变形、大变形/小破碎、严重变形/大破碎和崩解4种状态。文献^[11]提出了另一种撞击后的行为, 即湿团聚物在撞击后会反弹, 这种情况发生在非常小的Stokes数下。Fu等^[12]研究发现, 当撞击速度较小时, 湿团聚物可以观察到均匀的弹性、弹塑性和塑性变形, 随着冲击速度的增加, 破碎程度更严重。

团聚物的解聚常常应用于工业中。Chen等^[8]研究了潮湿细粒团聚物的碰撞行为后发现, 由于液桥的作用, 内聚颗粒碰撞后呈链状结构, 膨胀半径与时间呈指数相关, 团聚物碎片数量随碰撞速度呈幂

律变化。文献^[2, 13]指出, 碰撞冲击能量增大会加剧内聚颗粒间液桥断裂, 促进团聚物解聚。Vo等^[6, 14-15]研究了湿团聚体与平面碰撞时的力传递、机械强度和变形, 提出湿团聚物的早期强度是毛细数和Stokes数结合的函数。

现有物料颗粒处理设备通过改变筛板表面形貌提高筛分效率。李菊等^[16]提出凸柱形筛板用于物料筛分, 研究了凸柱率对物料筛分效率的影响, 结果表明, 凸柱筛面有利于提高物料筛分效率, 但凸柱率不易过大。文献^[17]将锯齿形筛板用于物料筛分, 发现该筛板有利于增大筛面的有效面积, 使物料充分接触筛面, 提高了筛分效率, 并考虑凸起结构可以为碰撞物料颗粒提供较大的法向和剪切应力, 提出采用凸起结构筛板促进碰撞潮湿细粒煤团聚物的解聚。

笔者对潮湿细粒煤团聚物与凸起结构柔性振动筛板碰撞解聚机制进行了研究, 通过单因素及多因素分析, 对筛板凸起结构参数进行了优化, 有效提高了潮湿细粒团聚物的解聚程度。

1 潮湿细粒煤团聚物碰撞解聚试验

为了对比普通筛板与凹凸结构筛板上潮湿细粒煤团聚物的碰撞解聚程度, 试验采用3D打印技术制

* 国家自然科学基金面上资助项目(51775364)

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-03-07

备普通筛板与凸起结构筛板,材料为热塑性聚氨酯,尺寸为 235 mm×300 mm×3 mm。试验采用的潮湿细粒煤团聚物,原煤样本来自于古东煤矿,通过分选、干燥、润湿、黏附和挤压制备得到。潮湿细粒煤团聚物平均直径为 15 mm,含水率约为 14%,由 6, 4 和 2 mm 的颗粒组成,且质量百分比分别为 5.9%, 23.5% 和 70.6%。试验采用潮湿细粒煤团聚物总质量约为 286 g。

为了模拟柔性筛板的弛张运动,搭建如图 1 所示的试验平台。柔性筛板一端固定,另一端与滑杆结构相连。试验平台利用滑杆结构与激振器、功率放大器和信号发生器依次相连,工作时在激振器驱动下,滑杆结构沿滑道往复运动,并带动柔性筛板周期性松弛与张紧。

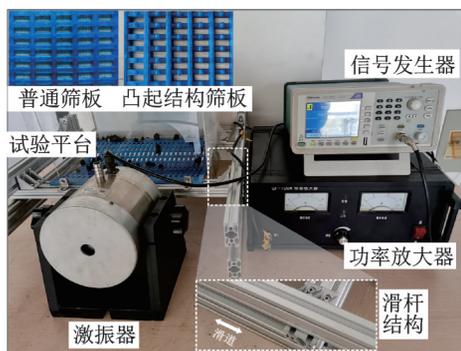


图1 试验平台

Fig.1 Experiment scheme

试验过程中,通过信号发生器与功率放大器调节激振器激振力,在激振力作用下,滑杆结构往复运动幅值为 2.9 mm,频率为 13.5 Hz。当试验平台运行至稳定状态时,制备好的团聚物从筛板上落下进行碰撞解聚及筛分作业。待筛分结束后,分别使用 1, 2, 4, 6 和 9 mm 的标准筛分别对筛上物及筛下物的粒径组成和质量百分比进行统计。采用普通筛板和凸起结构筛板筛分后,解聚颗粒组成如图 2 所示。

解聚颗粒的粒度分布遵循双参数威布尔分布模型,即

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

其中: d_k 为颗粒粒度; d_0 为威布尔分布的尺度参数, d_0 越大,解聚越困难; m_0 为威布尔模量, m_0 越小,粒度分布的离散性越高; W 为筛下物的累计概率。

对式(1)进行对数变换,得到小于 d_k 颗粒质量累计概率分布函数为

$$F_w(d_k) = m_0 \ln d_k - m_0 \ln d_0 \quad (2)$$

根据图 2 中筛下物粒径及质量分布,获得小于不同 d_k 颗粒累计质量概率。结合式(2)拟合得到:普

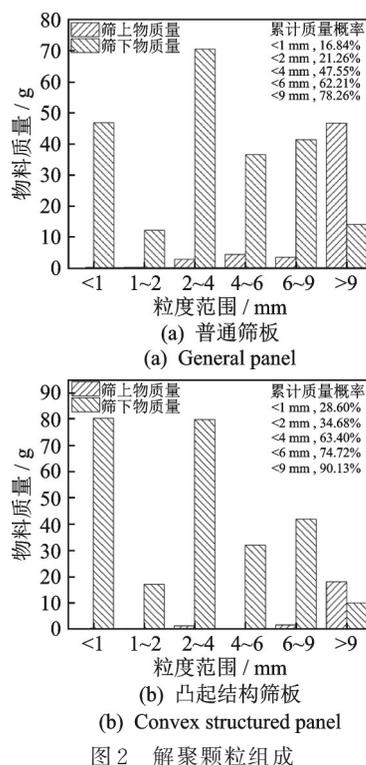


图2 解聚颗粒组成

Fig.2 Compositions of disaggregated particles

通筛板的 m_0 为 1.014 9, d_0 为 6.279 7,相关系数 R^2 为 0.967 3;凸起结构筛板的 m_0 为 0.902 6, d_0 为 3.999 2, R^2 为 0.964 4。

综上所述,与普通筛板相比,潮湿细粒煤团聚物与凸起结构筛板碰撞解聚,统计计算得到的解聚程度参数 m_0 和解聚特性指数 d_0 更小。这表明采用凸起结构筛板,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,具有更好的解聚性能。

2 潮湿细粒煤团聚物碰撞解聚模拟

2.1 筛板参数化建模

筛板凸起结构参数如图 3 所示。凸起结构的形状由下底 a 、上底 b 和高 h 决定,定义上底与下底的比值为 b/a ,其值应小于 1。

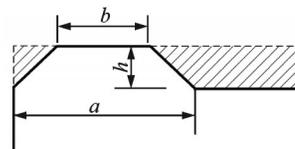


图3 筛板凸起结构参数

Fig.3 Parametrs of convex structure on panel

2.2 潮湿细粒煤团聚物碰撞解聚数值模拟方法

2.2.1 离散元理论

离散元(discrete element method,简称 DEM)模

拟中,颗粒的运动行为由初始条件和相邻粒子之间的作用力决定,其平移和旋转控制方程分别为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{ij}^N + F_{ij}^T) + F_{ij}^c + m_i g \quad (3)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_i F_{ij}^T) + \tau_{rij} \quad (4)$$

其中: m_i, R_i, I_i, v_i 及 ω_i 分别为颗粒 i 的质量、半径、转动惯量、线速度及角速度; g 为重力加速度; F_{ij}^c 为颗粒 i 与颗粒 j 间液桥黏附力; F_{ij}^N, F_{ij}^T 分别为颗粒 i 与颗粒 j 接触作用力的法向分量及切向分量; τ_{rij} 为颗粒 i 与颗粒 j 间的扭矩。

液桥力作用在临界断裂距离内,两相邻颗粒间无量纲临界液桥断裂距为

$$\tilde{D}_{\text{rupt}} = (1 + 0.5\theta) \tilde{V}_L^{1/3} \quad (5)$$

其中: θ 为接触角; \tilde{V}_L 为无量纲液桥体积。

忽略重力对液桥的影响,小含水率条件下,无量纲液桥力可表示为

$$\tilde{F}_{\text{cap}} = \frac{F_{\text{cap}}}{\gamma R_{\text{eff}}} 2\pi \cos \theta \left[1 - \left(1 + \frac{2\tilde{V}_L}{\pi \tilde{D}^2} \right)^{-1/2} \right] \quad (6)$$

其中: F_{cap} 为静态液桥力; \tilde{D} 为无量纲颗粒间距; R_{eff} 为基于Derjaguin近似的等效粒子半径。

$$R_{\text{eff}} = \frac{2R_i R_j}{R_i + R_j} \quad (7)$$

其中: R_i, R_j 分别为相邻颗粒 i 和颗粒 j 的半径。

假设颗粒为表面无缝隙的球体,且外在水分在颗粒间均匀分布,则液桥的含液量 V_L 为

$$V_L = \frac{M_f \rho_s}{\rho_w} \frac{4\pi}{3} R_{\text{eff}}^3 (1 - \sqrt{0.75}) \quad (8)$$

其中: M_f 为外在水分含量; ρ_s, ρ_w 分别为散状物料及水的密度。

无量纲液桥体积可表示为

$$\tilde{V}_L = \frac{V_L}{R_{\text{eff}}^3} = \frac{M_f \rho_s}{\rho_w} \frac{4\pi}{3} (1 - \sqrt{0.75}) \quad (9)$$

当颗粒间距 $D < 0$ 时,相邻颗粒发生碰撞。考虑粒子间的弹性力和阻尼力,恢复系数为 e 的两球形颗粒发生接触碰撞,产生法向重叠量 α_n 及切向重叠量 α_t 时,式(3)、式(4)中的 F^N 和 F^T 可表示为

$$\begin{cases} F^N = F^n + F_d^n = \frac{4}{3} E^* (R_{\text{eff}})^{\frac{1}{2}} \alpha_n^{\frac{3}{2}} - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta_v \sqrt{S_n m^*} v_n^{\text{rel}} \\ F^T = F^t + F_d^t = -8G^* \sqrt{R_{\text{eff}} \alpha_n} \alpha_t - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta_v \sqrt{S_t m^*} v_t^{\text{rel}} \end{cases} \quad (10)$$

其中: F^n, F^t 分别为颗粒间弹性力沿法向和切向的分量; F_d^n, F_d^t 分别为颗粒间阻尼力沿法向和切向的分

量; E^* 为等效弹性模量; G^* 为等效剪切模量; β_v 为颗粒间的黏性系数; S_n, S_t 分别为颗粒的法向刚度及切向刚度; m^* 为颗粒的等效质量; $v_n^{\text{rel}}, v_t^{\text{rel}}$ 分别为颗粒相对运动的法向分量及切向分量。

当 $D > D_{\text{rupt}}$ 时,颗粒间不产生新的液桥力及接触力,并延续之前的运动。

2.2.2 团聚物离散元模型的构建

为了构建一对多壁面结构的潮湿细粒煤团聚物离散元模型,首先,在颗粒工厂中央采用镶嵌颗粒模型构建多壁面中心颗粒;其次,在颗粒工厂内随机生成球形细颗粒;最后,采用挤压壁面法将所有颗粒挤压成大小为 $14 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、总质量为 $6.224 \times 10^{-4} \text{ kg}$ 的椭球团聚物。团聚物颗粒组成如表1所示。

表1 团聚物颗粒组成

Tab.1 Compositions of aggregated particles

参数	中心颗粒	细颗粒1	细颗粒2
尺寸/mm	6.059	1.2	0.6
质量/kg	5.51×10^{-5}	1.18×10^{-6}	1.47×10^{-7}
数量	1	100	3 058
质量百分比/%	8.85	18.90	72.25

仿真模拟中,基于离散元理论和方法,编译液桥的Hertz-Mindlin接触模型来描述内聚颗粒间的相互作用力。液桥的Hertz-Mindlin模型参数如表2所示。此外,未形成液桥接触颗粒-颗粒以及颗粒-筛板的接触力均采用Hertz接触理论进行计算。筛板和物料参数、接触参数分别如表3,4^[18]所示。

表2 液桥的Hertz-Mindlin模型参数

Tab.2 Parameters of Hertz-Mindlin with liquid bridge model

参数	数值
液体表面张力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.073
液体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 000
外含水量/%	14
接触角/($^\circ$)	60
恢复系数	0.35
静摩擦因数	1.16
滚动摩擦因数	0.1

表3 筛板和物料参数

Tab.3 Panel and material property

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/Pa
聚氨酯	1 320	0.499	1.157×10^6
煤	1 300	0.300	1.0×10^9

表 4 接触参数

Tab.4 Contact property

接触方式	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
颗粒-颗粒	0.35	1.16	0.10
筛板-颗粒	0.40	0.50	0.01

在模拟中,筛板作周期性弛张运动,筛板边界振动频率为 16 Hz,振幅为 10 mm,方向角与安装倾角一致。筛板的几何尺寸如表 5 所示。潮湿细粒团聚物从筛板上方 56.74 mm 处以 3.94 m/s 的速度下落并与筛板碰撞。考虑到计算成本,模拟时间设置为 0.125 s(约 2 个振动周期)。在此时间内,所有内聚颗粒已经抛离筛板,完成第 1 次碰撞。

表 5 筛板的几何尺寸

Tab.5 Geometric dimensions of panel

参数	安装 倾角/(°)	尺寸/mm	凸起个数	凸起间距/ mm
数值	10	235×310×3	10×26	19×11

2.2.3 评价指标

冲击特性和膨胀特性是影响潮湿细粒煤团聚物碰撞解聚的重要因素。笔者提出了平均垂直应力 σ_{yy} 、平均偏心距离 A_d 、膨胀速度 U_e 和液桥断裂的百分比 D_R 等 4 个评价指标来研究潮湿细粒煤团聚物与不同尺寸凸起结构筛板之间的动态碰撞解聚过程。

σ_{yy} 为描述团聚物冲击特性的评价指标,其计算公式为

$$\sigma_{yy} = \frac{1}{V_a} \sum_{c=1}^{N_c} F_y^c l_y^c = n_c \langle F_y^c l_y^c \rangle_c \quad (11)$$

其中: V_a 为团聚物体积; N_c 为某一时步液桥接触的数量; F_y^c, l_y^c 分别为液桥接触力向量及方向向量的 y 分量; $n_c = N_c / V_a$ 为液桥接触的数量密度; $\langle \dots \rangle$ 表示对团聚物体积内所有液桥接触求平均。

A_d 和 U_e 为描述膨胀特性的评价指标。 A_d 可表示为

$$A_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i' - x_0'| \quad (12)$$

其中: N 为总内聚颗粒数; x_i' 为颗粒 i 在 Oxz 平面上投影的 x 坐标; x_0' 为团聚物中心在 Oxz 平面上投影的 x 坐标。

U_e 为团聚物的膨胀速度,可由 A_d 对时间 t 的一阶导数确定。此外,采用液桥断裂的百分比 D_R 来描述团聚物的碰撞解聚程度。

3 结果与讨论

3.1 碰撞解聚过程比较

潮湿细粒煤团聚物的碰撞解聚程度受其解聚机制制约,为了明确潮湿细粒煤团聚物在凸起结构筛板和普通筛板上的碰撞解聚模式,数值模拟得到 2 种筛板上潮湿细粒煤团聚物碰撞解聚过程液桥分布和颗粒运动,分别如图 4,5 所示。

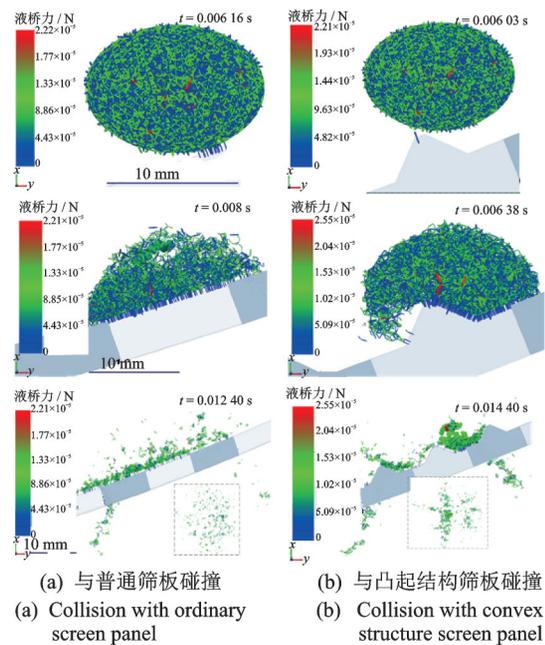


图 4 潮湿细粒煤团聚物碰撞解聚过程液桥分布
Fig.4 Liquid bridge distribution in collision depolymerization process of moist fine coal agglomerate

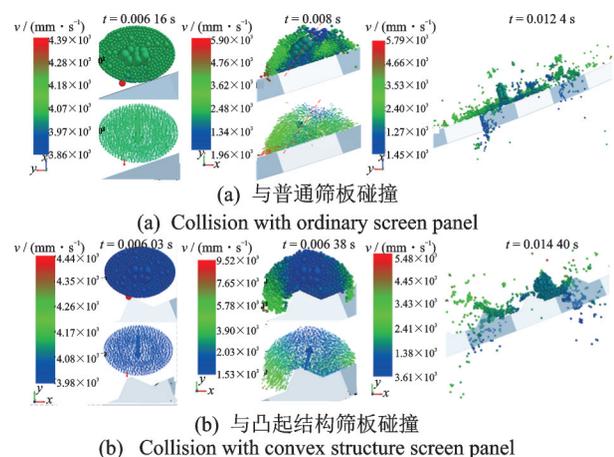


图 5 潮湿细粒煤团聚物碰撞解聚过程颗粒运动
Fig.5 Particle movements in collision depolymerization process of moist fine coal agglomerate

由图 4,5 可知,潮湿细粒煤团聚物颗粒与筛板间形成液桥标志着碰撞解聚的开始,此时由于团聚物与筛板间尚存在一定距离,颗粒速度未发生变

化。当团聚物与筛板发生接触碰撞后,在柔性筛板碰撞冲击及抛射作用下,团聚物被压缩为球冠状,颗粒间液桥断裂,颗粒速度呈现明显分化。除红色虚线标注的团聚物截面附近外,其余内聚颗粒速度明显增大,这可能是由于团聚物中心颗粒旋转运动所造成。随着碰撞解聚过程的进行,团聚物结构被完全破坏,解聚碎片呈带状或链状结构,被抛离筛板,并远离碰撞中心。

相比于普通筛板,潮湿细粒煤团聚物与凸起结构筛板碰撞解聚开始时间更早。发生碰撞后,颗粒间液桥力下降和颗粒速度增大都更快,速度分化更明显。潮湿细粒煤团聚物解聚后,残留解聚碎片在普通筛板上呈层状分布;凸起结构筛板上,解聚碎片积聚在相邻的2个凸起之间,且在凸起结构两侧不均匀分布,这也说明凸起结构使得团聚物膨胀的主要影响因素(解聚颗粒沿筛板的滚动与滑动)发生了改变。因此,筛板的凸起结构对潮湿细粒团聚物的解聚过程有显著影响。

不同筛板的微观碰撞解聚动力学如图6所示。图6(a)为凸起结构筛板上潮湿细粒团聚物的平均垂直应力 σ_{yy} 随时间 t 的关系。由图可知:在下落阶段,内聚颗粒相对稳定, σ_{yy} 近似为0;在碰撞时刻, σ_{yy} 迅速增大到早期阈值,这是因为团聚物与柔性筛板碰撞瞬间,冲击力突然增大,加之抛射作用影响,内聚颗粒无法获得足够的运动响应时间将势能转化为动能;凸起结构筛板上碰撞团聚物早期阈值更大,说明凸起结构筛板可使碰撞团聚物获得更大的冲击应力;碰撞后, σ_{yy} 迅速下降,标志着团聚物因内聚颗粒相对运动及液桥拉伸发生塑性变形;随着解聚碎片陆续被抛离柔性筛板, σ_{yy} 阈值不断出现,这是由解聚碎片的二次碰撞所引起。

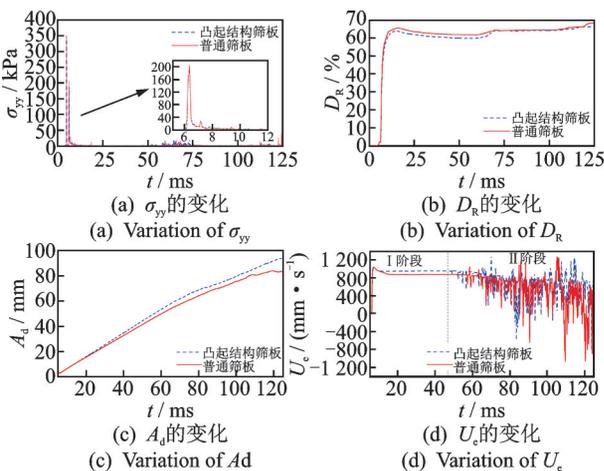


图6 不同筛板的微观碰撞解聚动力学
Fig.6 Collision depolymerization dynamics of panel

图6(b)为液桥断裂百分比 D_R 与时间 t 的关系。由图可知:2种筛板上团聚物碰撞解聚过程中 D_R 的变化趋势相似;凸起结构筛板上团聚物 D_R 的最大值和最终稳定值更大,表明筛板凸起结构有利于液桥断裂和内聚颗粒分离。

图6(c,d)为2种筛板上团聚物碰撞解聚过程中内聚颗粒平均偏心距离 A_d 和膨胀速度 U_e 随时间 t 的关系。对于最大 A_d 值及其增幅,普通筛板均大于凸起结构筛板,说明普通筛板上团聚物碰撞解聚后膨胀更快,解聚碎片的空间分布更稀疏。同时,对于 U_e 最大值,2种筛板基本相同,但普通筛板对应 U_e 稳定值略大,说明筛板凸起结构会阻碍解聚碎片分散。此外,第II阶段凸起结构筛板对应的 U_e 波动更大,这也表明在筛板凸起结构阻碍作用下,解聚颗粒的分散运动更为复杂。

综上所述,对于碰撞解聚过程,筛板上的凸起结构可以提高潮湿细粒煤团聚物的早期阈值和液桥的断裂百分比,有利于促进团聚物内聚颗粒分离。团聚物碰撞解聚试验结果与仿真分析表明,与普通筛板相比,团聚物与凸起结构筛板碰撞可获得更高的解聚程度,具有更好的解聚性能;但凸起结构对解聚碎片分散存在一定阻碍作用,在一定程度上影响潮湿细粒煤团聚物的碰撞解聚性能。

3.2 单因素分析

根据表5,凸起结构参数的初始值为 $a=8\text{ mm}$, $b/a=0.5$, $h=1.8\text{ mm}$ 。基于单因素分析准则,调整分析参数水平,取 a 为2,4,8,12和14 mm; b/a 为0,0.175,0.5,0.825和1; h 为0.58,1,1.8,2.6和3 mm。

a , b/a 和 h 对碰撞解聚的影响分别如图7~9所示。可以看出,随着 a 和 b/a 的增大,碰撞时 σ_{yy} , D_R

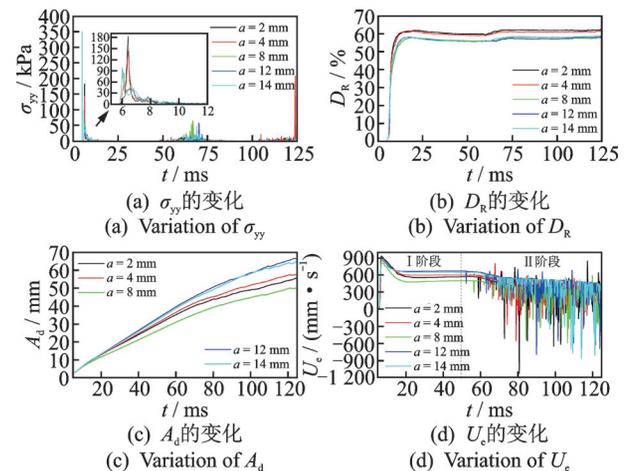


图7 a对碰撞解聚的影响
Fig.7 Effects of a on collision depolymerization

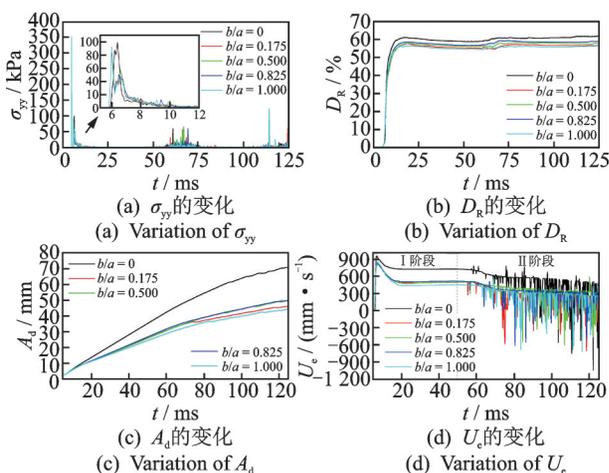


图 8 b/a 对碰撞解聚的影响

Fig.8 Effects of b/a on collision depolymerization

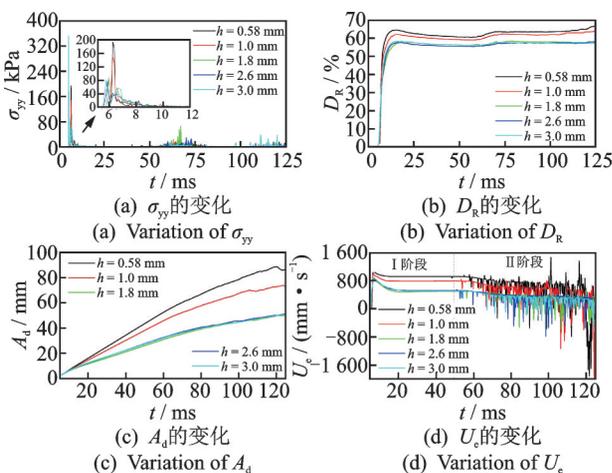


图 9 h 对碰撞解聚的影响

Fig.9 Effects of h on collision depolymerization

和 U_e 的早期阈值以及 $t=0.125$ s 时的 A_d 值均呈非单调变化。当 $a=2$ mm 或 $b/a=0$ 时, 4 项评价指标均可获得最大值。当 $b/a=0$ 或 $a=2$ mm (即 $b=0$) 时, 筛板上的凸起结构为团聚物提供了最小的初始接触区域, 为解聚碎片提供了最小阻碍区域。因此, 团聚物在碰撞开始时的最大冲击应力下解聚, 解聚碎片在最小的阻碍作用下迁移, 有利于解聚颗粒的分散和液桥断裂。当 $a=14$ mm 时, 解聚颗粒获得的 D_R , A_d 和 U_e 值相对于 $a=8$ mm 时更高, 这是由于前者的小梯度 (即小底角) 带来的阻碍作用较小。两种情况的 σ_{yy} 早期阈值基本相同, 可以反映出膨胀特性对 D_R 的重要性。此外, 由于碰撞解聚模式不同, 当 $b/a=1$ 时, σ_{yy} 早期阈值较高, 与 $b/a=0$ 时存在差异。结果表明, 冲击行为和膨胀行为共同影响潮湿细粒团聚物在凸起结构筛板上的碰撞解聚程度。

由图 9 可以看出, 随着 h 的增大, σ_{yy} 早期阈值、碰撞时刻最大 D_R 和 U_e 以及 $t=0.125$ s 时的 A_d 均减

小。这是因为 h 越高, 凸起结构的梯度越大, 阻力效应越显著。由于阻碍作用的实质是降低内聚颗粒的抛射速度, 因此呈现出较低的 A_d 和 U_e 。 h 对 σ_{yy} , D_R , A_d 和 U_e 变化的影响程度随着 h 的增大而逐渐降低。

3.3 多因素分析

虽然单因素分析可以得到凸起结构各参数对评价指标的影响, 但无法确定各因素对解聚的影响程度。为研究凸起结构参数间的耦合效应, 利用中心复合设计 (central composite design, 简称 CCD) 进行了响应面分析。通过研究凸起结构参数组合来获得最大和最小 D_R 值。响应面分析中的因素和水平如表 6 所示。

表 6 响应面分析中的因素和水平

Tab.6 Factors and levels of the response surface analysis

符号-因素	水平		
	-1	0	1
A-a/mm	4.000	8.0	12.000
B-b/a	0.175	0.5	0.825
C-h/mm	1.000	1.8	2.600

中心复合设计结果如表 7 所示。为了进一步修正模型, 使预测数据更符合实际数据, 在表 7 中根据原设计数据再增加 6 个点 (标注**的点)。

简化三次回归模型的方差分析 (analysis of variance, 简称 ANOVA) 结果如表 8 所示。为了研究多因素对 D_R 的影响, 根据表 8 建立了简化三次回归模型, 即

$$D_R = 121.89539 - 10.78404A - 121.56959B - 18.18068C + 13.84960AB + 0.459934AC + 3.96058BC + 0.846329A^2 + 141.52263B^2 + 2.94370C^2 - 0.429087ABC - 0.477596A^2B - 5.58225AB^2 - 0.022765A^3 - 62.08930B^3 \quad (13)$$

由表 8 可知, 由于模型的 p 值小于 0.000 1, 说明该模型因素与响应之间的关系非常显著, D_R 可以通过该模型进行预测。同时, 系数 R^2 为 0.971 4, 表明模型拟合程度较高, 精度达到 14.317 4, 具有良好的可预测性。此外, 因素 C (高度 h) 对 D_R 的影响极为显著, 而且 A^2 , C^2 , A^2B , AB^2 和 B^3 对 D_R 也有明显影响, 说明 D_R 不仅由独立的 a , b/a 和 h 决定, 而且由其耦合关系决定。凸起参数对 D_R 的影响显著性依次为: $h > b/a > a$ 。

响应面分析如图 10 所示。可以看出 a , b/a 和 h 对 D_R 的耦合影响。根据式 (13), 采用爬山优化算法

表7 中心复合设计结果

Tab.7 Result of CCD

试验编号	A-a/mm	B-b/a	C-h/mm	D_R /mm
1	4	0.175	1.0	67.998
2	4	0.825	2.6	58.423
3	12	0.175	2.6	59.170
4	14.098 6	0.500	1.8	58.831
5	8	0.500	3.019 72	57.181
6	4	0.825	1.0	64.423
7	1.901 4	0.500	1.8	62.613
8	4	0.175	2.6	59.664
9	12	0.825	2.6	55.382
10	12	0.825	1.0	60.026
11	12	0.175	1.0	62.578
12	8	0.500	0.580 281	66.636
13	8	0.004 489	1.8	61.808
14	8	0.995 511	1.8	56.520
15	8	0.500	1.8	57.739
16	4	0.500	1.8	57.193**
17	12	0.500	1.8	58.572**
18	8	0.175	1.8	56.670**
19	8	0.825	1.8	58.848**
20	8	0.500	1.0	63.848**
21	8	0.500	2.6	57.992**

表8 简化三次回归模型的方差分析结果

Tab.8 ANOVA for reduced cubic regression model

因素	平方和	自由度	均方	F值	p值
模型	229.66	14	16.40	14.56	0.001 7
A-a	2.77	1	2.77	2.46	0.167 8
B-b/a	6.24	1	6.24	5.54	0.056 8
C-h	124.22	1	124.22	110.26	<0.000 1***
AB	0.290 3	1	0.290 3	0.257 7	0.629 8
AC	4.93	1	4.93	4.38	0.081 3
BC	0.150 7	1	0.150 7	0.133 8	0.727 1
A ²	9.02	1	9.02	8.01	0.030 0*
B ²	1.46	1	1.46	1.30	0.298 1
C ²	33.41	1	33.41	29.65	0.001 6*
ABC	1.59	1	1.59	1.41	0.279 3
A ² B	9.87	1	9.87	8.76	0.025 3*
AB ²	8.90	1	8.90	7.90	0.030 7*
A ³	5.21	1	5.21	4.62	0.075 1
B ³	11.15	1	11.15	9.89	0.019 9*
残差	6.76	6	1.13	—	—
总和	236.42	20	—	—	—

*表示该因素影响显著;***表示该因素影响极为显著

进行分析。结果表明,当 $a=4$ mm, $b/a=0.175$, $h=1$ mm时, D_R 值最大(68.239%);当 $a=6.413$ mm,

$b/a=0.328$, $h=2.520$ mm时, D_R 值最小(54.848%);最大与最小值相差约13.4%。通过优化凸起结构参数,可以有效提高潮湿细粒煤团聚物与凸起结构筛板碰撞解聚的 D_R 值。

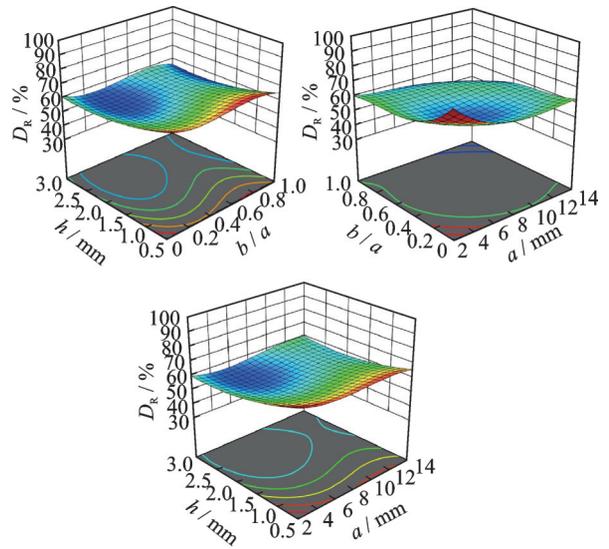


图10 响应面分析

Fig.10 Response surface analysis

4 结 论

1) 潮湿细粒团聚物与凸起结构筛板、普通筛板碰撞解聚机理的差异体现在碰撞解聚模式、冲击力行为和膨胀行为上,从而导致解聚程度不同。当团聚物与凸起结构筛板发生碰撞时,可以实现较高的液桥断裂的百分比,凸起结构可以促进团聚物的碰撞解聚。

2) 当筛板凸起结构的参数 a , b/a 和 h 不同时,潮湿细粒团聚物碰撞解聚程度评价指标的最大值 σ_{yy} , D_R , A_d , U_c 随 a 和 b/a 值的增加呈非单调变化,与 h 值的变化呈正比关系。

3) 团聚物解聚程度 D_R 不仅由 a , b/a 和 h 的独立作用决定,而且由其耦合关系决定。凸起结构各参数及耦合关系对 D_R 的影响大小依次为 $h > b/a > a$ 。通过优化凸起结构参数,可使 D_R 值最大提升13.4%,有效提高了潮湿细粒煤团聚物在凸起结构筛板的碰撞解聚程度。

参 考 文 献

[1] KHALILITEHRAN M, OLSSON J, DARYOSH F, et al. The morphology of the deposited particles after a wet agglomerate normal surface impact[J]. Powder Technology, 2019, 345: 796-803.

- [2] KHALILITEHRANI M, OLSSON J, RASMUSON A, et al. A regime map for the normal surface impact of wet and dry agglomerates[J]. *AICHE Journal*, 2018, 64(6): 1975-1985.
- [3] VO T T, MUTABARUKA P, NEZAMABADI S, et al. Evolution of wet agglomerates inside inertial shear flow of dry granular materials[J]. *Physical Review E*, 2020, 101: 032906.
- [4] VO T T, NEZAMABADI S, MUTABARUKA P, et al. Additive rheology of complex granular flows[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1476.
- [5] 唐建,熊晓燕.潮湿细粒煤团聚物与柔性弛张筛板碰撞解聚特性研究[J]. *太原理工大学学报*, 2022, 53(6): 1168-1175.
TANG Jian, XIONG Xiaoyan. Research on collision depolymerization of moist fine coal agglomerate onto flexible flip-flow screen panel [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2022, 53(6): 1168-1175. (in Chinese)
- [6] VO T T. Scaling behavior of the tensile strength of viscohesive granular aggregates[J]. *Physical Review E*, 2021, 103: 042902.
- [7] ZHANG L, WU C Y. Discrete element analysis of normal elastic impact of wet particles[J]. *Powder Technology*, 2020, 362: 628-634.
- [8] 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.
- [9] AZEMA E, SANCHEZ P, SCHEERES D. Scaling behavior of cohesive self-gravitating aggregates[J]. *Physical Review E*, 2018, 98: 030901.
- [10] VO T T. Erosion dynamics of wet particle agglomerates [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2021, 8(3): 601-612.
- [11] KLEIN-SCHAARSBERG M H, PETERS I R, STERN M, et al. From splashing to bouncing: the influence of viscosity on the impact of suspension droplets on a solid surface[J]. *Physical Review E*, 2016, 93: 062609.
- [12] FU J S, 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.
- [13] NGUYEN D, RASMUSON A, THALBERG K, et al. A breakage and adhesion regime map for the normal impact of loose agglomerates with a spherical target[J]. *AICHE Journal*, 2015, 61(12): 4059-4068.
- [14] VO T T, NGUYEN C T, NGUYEN T K, et al. Impact dynamics and power-law scaling behavior of wet agglomerates[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2022, 9(3): 537-550.
- [15] VO T T, NGUYEN C T. Characteristics of force transmission in cohesive agglomerates impacting a rigid surface [J]. *Mechanics Research Communications*, 2021, 117: 103773.
- [16] 李菊,王增彪,沈惠平,等.凸柱筛面并联振动筛的谷物筛分试验与分析[J]. *机械设计与研究*, 2016, 32(1): 150-154, 158.
LI Ju, WANG Zengbiao, SHEN Huiping, et al. Experiment and analysis of parallel vibrating sieve with convex column screen surface on grain screening [J]. *Machine Design & Research*, 2016, 32(1): 150-154, 158. (in Chinese)
- [17] 鞍山重型矿山机器股份有限公司.锯齿形筛面振动筛:中国,CN201721718632.7[P]. 2018-09-14.
- [18] 唐建,熊晓燕,武兵,等.含团聚物潮湿细粒煤与弛张筛板耦合振动分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2022, 42(6): 1099-1107.
TANG Jian, XIONG Xiaoyan, WU Bing, et al. Coupling vibration analysis between flip-flow screen panels and moist fine coal material containing agglomerates[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(6): 1099-1107. (in Chinese)



第一作者简介:牛雪梅,女,1971年3月生,博士、副教授。主要研究方向为装备智能化。曾发表《Optimization of cryogenic treatment parameters for the minimum residual stress》(《*Journal of Materials Engineering and Performance*》2021, Vol.30)等论文。

E-mail: nxmlpc@126.com

通信作者简介:熊晓燕,女,1970年3月生,博士、教授。主要研究方向为机电系统故障诊断与智能控制。

E-mail: xiongy7070@163.com