选矿与原料预处理

铁矿烧结原料在高剪切制粒中的碰撞行为模拟

简林飞[1]，黄青云[1]，游 洋[2]，吕学伟[2]，何建生[1]
（1. 重庆科技大学 冶金与动力工程学院，重庆 401331；2. 重庆大学 材料科学与工程学院，重庆 400044）

摘要：在烧结前需要对原料进行制粒处理，以提高原料颗粒的粒度和成分均匀性，进而提高烧结料层的透气性及烧结效率。本文以离散单元法中的 Linear Cohesion 颗粒接触模型为基础，并采用 API 定义湿颗粒含水量的能量密度 K，模拟湿颗粒在高剪切制粒中的运动行为。结果表明：K 对于颗粒的碰撞和接触起着关键作用。当 K 取值在 1 ~ 6 MJ/m^3 范围内时，随着 K 值的增加，高剪切制粒机中润湿颗粒的平均速度也随之增加。K 较小的湿颗粒之间接触较少，不利于准颗粒的形成。当 K 取值在 5 ~ 6 MJ/m^3 时，颗粒之间接触数量较为稳定且达到最大值，有利于原料的均匀和碰撞长大。此外，旋转叶片的转速与颗粒平均速度及碰撞次数成正比，在转速为 90 r/min 时颗粒的平均速度最大且碰撞次数最多，有利于颗粒的快速聚结生长。

关键词：烧结原料；高剪切制粒；湿颗粒；离散单元方法（DEM）
中图分类号：TF04；TP399 **文献标识码**：A **文章编号**：1000 - 8764(2024)05 - 0063 - 07
doi：10. 13403/j. sjqt. 2024. 05. 076

Collision behavior simulation for sinterfeed in high shear granulation

JIAN Linfei[1], HUANG Qingyun[1], YOU yang[2], LÜ Xuewei[2], HE Jiansheng[1]
(1. School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, Sichuan, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, Sichuan, China)

Abstract: Before sintering, it is necessary to granulate the raw materials to improve the particle size and composition uniformity of the raw material particles, and then improve the air permeability of the sinterbed and sintering efficiency. Based on the Linear Cohesion particle contact model in the DEM, the API is used to define the energy density K of the water content of wet particles, and the motion behavior of wet particles in high-shear granulation is simulated. The results show that the K plays a key role in the collision and contact of particles. When the K value is in the range of 1 ~ 6 MJ/m^3, the average velocity of wet particles in the high shear granulator also increases with the increase of K value. Smaller wet particles have less contact with each other, which is not conducive to the formation of quasi-particles. When the K value is 5 ~ 6 MJ/m^3, the contact number between particles is relatively stable and reaches the maximum value, which is conducive to the uniformity and collision growth of raw materials. In addition, the rotation speed of the rotating blade is proportional to the average velocity of the particles and the number of collisions, and the average velocity of the particles is the largest and the number of collisions is the largest when the rotation speed is 90 r/min, which is conducive to the rapid coalescence and growth of the particles.

Key words: sinterfeed; high shear granulation; wet particles; discrete element method (DEM)

收稿日期：2023 - 09 - 14；**修回日期**：2023 - 11 - 05
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51974053)；重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0882)；重庆科技大学硕士研究生创新计划资助项目(YKJCX2220212)
作者简介：简林飞(1998—)，男，硕士研究生，从事铁矿烧结制粒工艺的数值模拟研究。
通信作者：黄青云(1982—)，女，副研究员，从事冶金物理化学及烧结技术方面的研究。

烧结矿是高炉炼铁的主要原料之一，其是指将铁矿粉、焦炭和熔剂混合后，加入适量水分制粒，进而通过高温反应造块获得的产物。烧结混合料通过制粒可提高烧结料层的透气性及烧结效率[1-2]。目前，圆筒混合制粒机被广泛使用于烧结制粒工序中，具有设备结构简单、成本低等优点[3-5]。然而，该设备在大负荷生产以及处理细粒度精矿时存在准颗粒粒度分布不均匀、组分偏析严重等缺点[6-8]。因此，一种新型的高剪切制粒工艺被提出用于铁矿烧结制粒。高剪切造粒设备由一个圆筒和数个搅拌叶片组成。高速旋转的搅拌叶片与颗粒碰撞，为颗粒运动提供动力，从而促进颗粒的混合和碰撞聚结。

铁矿粉颗粒的制粒过程主要由湿润和成核、生长和固结、磨损和破碎三种机制的相互作用实现[9-11]。研究人员对高剪切制粒开展了大量研究[12-14]。MIRZA 等[15]通过物理试验得出了叶轮的设计影响着颗粒粒度分布及强度。YOU 等[16]建立了 DEM 模型，研究了传统圆筒制粒机与高剪切制粒的混合效果，并采取变异系数来表征混合效果，发现高剪切制粒机的混合效果优于传统圆筒制粒机。RAHMANIAN 等[17]为了获得造粒机内部的微观信息，研究了高剪切制粒机中叶轮转速、造粒时间和黏结剂黏度对颗粒强度和性能的影响，并采用离散元法(DEM)对造粒机内部的颗粒流动进行模拟，发现颗粒具有更高的强度和更致密的结构。事实上，铁矿粉造粒工序通常存在水分对颗粒的润湿作用，这与干颗粒的运动状态截然不同。目前，在高剪切制粒模拟过程中考虑水分作用下颗粒的接触长大的相关研究还少有涉及。

因此，本文采用离散元数值模拟方法，在传统颗粒碰撞 Hertz-Mindlin 接触模型的基础上，提出采用 Linear Cohesion 接触模型模拟高剪切制粒机中湿润状态下铁矿石细微颗粒的运动状态，并详细讨论能量密度 K 与含水量之间的关系。

1 颗粒接触模型

离散单元法(DEM)是 20 世纪由 CUNDALL 等[18]提出的非连续介质力学行为数值方法。该方法能够从颗粒尺度追踪物料的运动状态以及速度等信息。本文主要研究烧结原料在高速剪切状态下湿颗粒的运动行为及颗粒－颗粒、颗粒－旋转叶片的动量与能量的传递规律。

在高剪切制粒机中模拟烧结原料湿润状态下的制粒过程，采用线性黏结(Linear Cohesion)接触模型，其黏结力 F_{coh}(J/m)定义如下[19]。

$$F_{coh} = KA \tag{1}$$

式中：K 为颗粒－颗粒间的黏结能量密度，J/m^3；A 为颗粒－颗粒间的接触面积，m^2。

此模型是在常规颗粒接触模型(Hertz-Mindlin)的基础上添加了一个法向黏聚力。颗粒 i 的运动方程[20-22]如下式所示。

$$m_i \frac{\mathrm{d}V_i}{\mathrm{d}t} = m_i g + \sum_j \left(F_{ij}^{\mathrm{n}} + F_{ij}^{\mathrm{t}} + F_{ij}^{\mathrm{cap}} + F_{ij}^{\mathrm{v,n}} + F_{ij}^{\mathrm{v,t}}\right) \tag{2}$$

$$I_i \frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t} = \sum_j \left[R_i n \times F_{ij}^{\mathrm{t}} - \mu_{\mathrm{r}} \left| F_{ij}^{\mathrm{n}} \right| R_i \omega_{\mathrm{t},ij} / \left| \omega_{\mathrm{t},ij} \right|\right] \tag{3}$$

式中：m_i 为颗粒 i 的质量，kg；V_i 为颗粒 i 的平移速度，m/s；t 为时间，s；g 为重力加速度，取 9.80 m/s^2；j 为除颗粒 i 外的第二个颗粒；F_{ij}^{n}、F_{ij}^{t}、F_{ij}^{cap}、$F_{ij}^{\mathrm{v,n}}$、$F_{ij}^{\mathrm{v,t}}$分别为质点间法向接触力、切向接触力、毛细管力、法向黏性力和切向黏性力，N；I_i 为颗粒 i 的转动惯量，kg·m^2；ω_i 为颗粒 i 的旋转角速度，rad/s；R_i 为颗粒 i 的半径，m；μ_{r} 为滑动摩擦系数；n 为与小球 i 接触的颗粒总数量；$\omega_{\mathrm{t},ij}$为颗粒间的切向旋转角速度，rad/s。式中相关力的具体表达式[20,23-24]如下所示。

$$F_{ij}^{\mathrm{n}} = -4/3E^* \sqrt{R^*}\delta_{\mathrm{n}}^{3/2} \tag{4}$$

式中：E^* 为等效杨氏模量，Pa；R^* 为颗粒等效半径，mm；δ_{n} 为法向重叠量，m。

$$F_{ij}^{\mathrm{t}} = -8G^* \sqrt{R^* \left|\delta_{\mathrm{n}}\right|}\delta_{\mathrm{t}} \tag{5}$$

式中：G^* 为等效剪切模量，Pa；δ_{t} 为切向重叠量，m。

$$F_{ij}^{\mathrm{v,n}} = 6\pi\mu R^* V_{\mathrm{n},ij} \frac{\mathrm{R}^*}{\mathrm{H}} \tag{6}$$

式中：μ 为液体黏度，Pa·s；H 为颗粒表面间距离，mm；$V_{\mathrm{n},ij}$为法向相对速度，m/s。

$$F_{ij}^{\mathrm{v,t}} = 6\pi R^* \mu V_{\mathrm{t},ij}\left[8/15\ln(R^*/d) + 0.958\right] \tag{7}$$

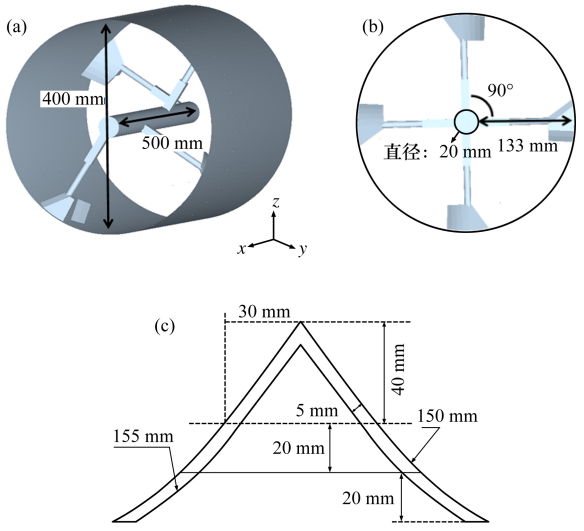
式中：d 为液体浸入高度，mm；$V_{t,ij}$为相对切向速度，m/s。

$$F_{ij}^{\text{cap}}=\frac{2\pi R^{*}\ \gamma\cos\theta}{1+\dfrac{H}{2d}}-2\pi R^{*}\ \gamma\sin\varphi\sin(\varphi+\theta) \tag{8}$$

式中：γ 为液体表面张力，N/m；θ 为接触角，(°)；φ 为半填充角，(°)。

2　模型建立与计算条件

图 1 是高剪切制粒机的几何模型及尺寸，其直径为 400 mm、长度为 500 mm，主要由中心转动轴、旋转叶片、圆筒壁面等组成，其中，中心转动轴直径为 20 mm，旋转叶片的数量为 4 个，相邻两个叶片间角度为 90°，叶片轴长为 133 mm。设计旋转叶片的目的：在叶片的作用下，将物料颗粒提升至一定高度后向两侧运动，使得颗粒间更好地发生接触碰撞并聚结在一起；此外，旋转叶片将颗粒分成部分，使得相邻叶片之间的颗粒流相互冲击，从而产生更好的混合和碰撞效果。



（a）立体模型；（b）轴向示意图；（c）剪切刀结构

图 1　高剪切制粒机模型及结构

Fig. 1　High shear granulator model and structure diagram

本文采用离散单元法的仿真软件 EDEM 进行模拟，选择铁矿粉作为研究对象。因烧结原料粒径大约在 0.075 ~ 10.000 mm 范围内[25]，如果考虑较宽的粒度范围，则会造成计算量成倍增加。为了降低计算负荷，本文在仿真过程中选取粒径为 3 mm 的球形颗粒，如图 2 所示。

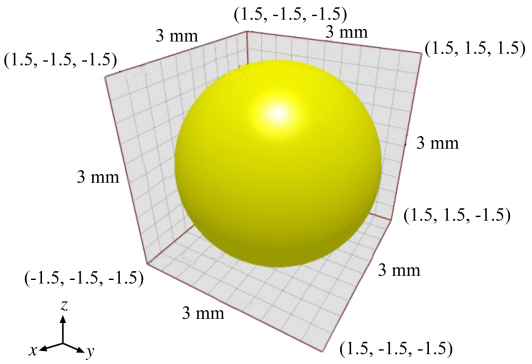


图 2　高剪切制粒机中 3 mm 颗粒单元

Fig. 2　3 mm granule unit in high shear granulator

颗粒总质量为 12.5 kg，填充率约为 10%，旋转叶片转速为 90 r/min。其中，DEM 模拟所需的颗粒本征参数以及颗粒 - 颗粒、颗粒 - 壁面的接触参数[20]如表 2 所示。

表 2　离散元模型相关参数

Table 2　Discrete element model related parameters

项目	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	剪切模量/Pa	静摩擦系数	滑动摩擦系数	恢复系数
颗粒	2 900	0.3	6.7×10^{8}	0.5	0.01	0.1
壁面	7 800	0.3	7.0×10^{10}	0.5	0.01	0.2

此外，采用 Linear Cohesion 颗粒接触模型模拟制粒机中含水颗粒运动时，为了讨论不同 K 值对烧结原料制粒含水量的关系，最终选取 K 值范围为 1 ~ 6 MJ/m^3。

图 3 为高剪切制粒设备中烧结原料运动的模拟过程。根据目前的计算机处理能力和颗粒在制粒机内聚并运动的状况，设置总的仿真时间为 6.0 s。在设备开始运转之前，按照指定的产生速率在预设的虚拟几何面上创建颗粒，并且设置生成的颗粒逐渐在重力的作用下落到制粒机的底部，设定此阶段的时间为 0 ~ 0.5 s。由于刚落到制粒机底部的颗粒仍有一部分动能，为了消除初始动能，设置颗粒在 0.5 ~ 0.9 s 处于静止状态，直至整个系统动能接近于 0。0.9 s 后，设备中的搅拌叶片开始转动，这时粒子开始运动和聚结，颗粒在高剪切制粒机内的运动时间为 5.1 s，最后到 6.0 s，整个模拟过程结束，其中瑞利时间步长(理想时间前后两个时间点之间的差值)为 5.9×10^{-5} s。

在数值模拟中，主要考察无水分烧结原料与含水润湿烧结原料的运动过程，以及能量密度 K 值对含水量的影响，分别计算 K 值取 0（无水状态）、1、2、3、4、5、6 MJ/m^3 等 7 种情况；其次为研究旋转叶片的不同转速对制粒的影响，依次模拟在转速在 50、70 r/min 和 90 r/min 时颗粒的运动状态并进行分析。

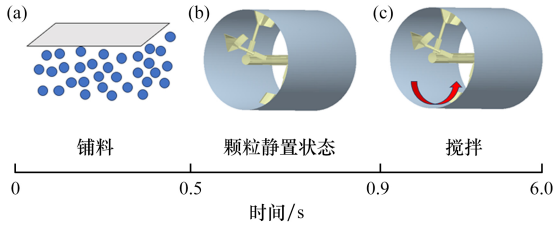


图 3 粒子在高剪切制粒中的仿真过程

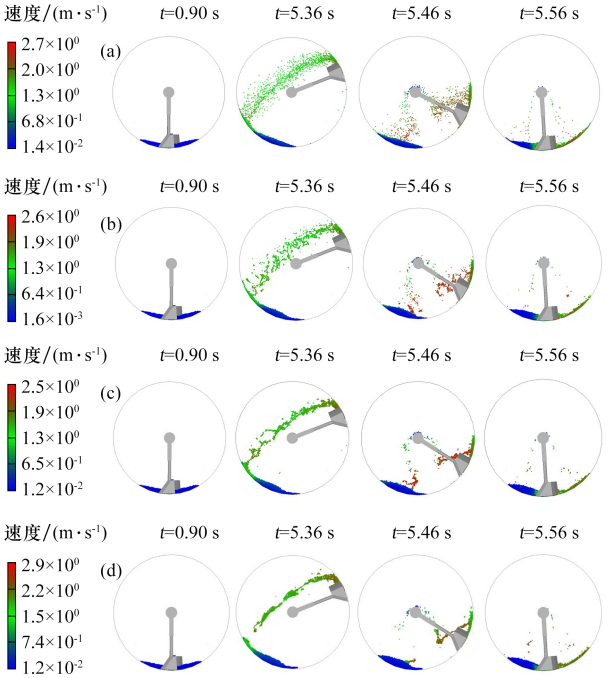
Fig. 3 Simulation process of particle in high shear granulation

3 结果与讨论

3.1 能量密度对颗粒速度的影响

为便于分析观察，截取旋转叶片截面呈现高剪切制粒运动状态下不同时刻颗粒的速度分布云图，如图 4 所示。由图 4 可以看出，当 K 值为 0 MJ/m^3 时，即高剪切制粒中颗粒为干燥状态，此时颗粒呈现瀑布形状，分布散乱运动[图 4(a)]。在 0.90 ~ 5.36 s 时，在旋转叶片的作用下颗粒由下向上运动，颗粒之间的碰撞增加，颗粒逐渐扩散；至 5.36 s 时，颗粒扩散达到最高点，此时颗粒的最大速度为 2.56 m/s；在 5.56 s 时颗粒落下，此时颗粒的最大速度为 2.22 m/s。随着 K 值的增加，在下落至 5.56 s 时，颗粒的平均速度减小，由颗粒速度与动能之间的关系（$E_k = 0.5mv^2$）可知，颗粒动能相对减少，其在高剪切制粒中趋于稳定。当 K 值取 0 MJ/m^3 时，颗粒平均速度为 0.44 m/s；当 K 值取 3 MJ/m^3 时，颗粒平均速度为 0.32 m/s；当 K 值取 4 MJ/m^3 时，颗粒平均速度为 0.30 m/s。这说明高剪切制粒中颗粒的速度与 K 值呈负相关。

此外，随着 K 值的增加，颗粒之间的黏性逐渐增强。当 K 值为 3 MJ/m^3 时，颗粒在旋转叶片的作用由下向上运动，此时颗粒之间相较于 K = 0 MJ/m^3 时已有明显的小部分聚结现象，并且随



能量密度/(MJ·m^{-3})：(a) 0；(b) 3；(c) 4；(d) 6

图 4 高剪切制粒运动状态下不同时刻颗粒的润湿速度

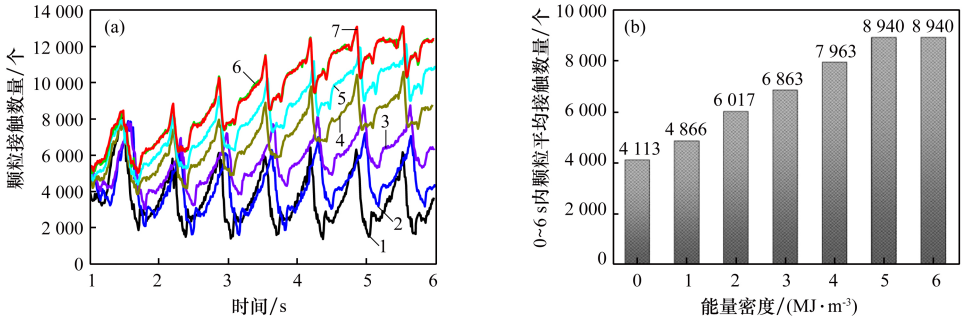
Fig. 4 Wetting velocity at different times during particle movement of high shear granulation

着 K 值的增加颗粒之间的聚结效果更加明显。当 K = 6 MJ/m^3 时，颗粒之间聚结紧密，这是由于充分的能量密度加大了颗粒之间的黏结力，该黏结力能够让众多颗粒黏结在一起，只有足够的外部作用力才能使其分开，这表明制粒效果的好坏需要足够的水分。

以上分析说明，当 K 值在 1 ~ 6 MJ/m^3 范围内时，随着 K 值的增加，高剪切制粒中颗粒的平均动能 E_k 减小，颗粒黏性增强，制粒效果更佳。

3.2 能量密度对颗粒之间接触数量的影响

图 5 为 0 ~ 6 s 时不同 K 值下颗粒之间的接触数量及平均接触数。结合图 4、5 可知，当 K 值为 0 时，即颗粒为干燥状态，此时颗粒在运动过程中呈散乱、无规则运动，出现间歇性接触，因而颗粒接触数量少，该状态下颗粒之间的平均接触数为 4 113 个。当取 K 为 1 MJ/m^3 时，颗粒在黏结力的作用下黏附在一起，但因此时的黏结力不大，导致许多原本已经相互黏结的颗粒在外部作用力下脱落，但相较于 K 值为 0 MJ/m^3 时，颗粒之间的平均接触数量有所提升，此时的接触数量为



（a）接触数量；（b）平均接触数变化

能量密度/（MJ·m^{-3}）：1—0；2—1；3—2；4—3；5—4；6（绿色线）—5；7（红色线）—6。

图 5　不同 *K* 值颗粒之间的接触数量及平均接触数变化

Fig. 5　Number of contacts between particles with different *K* values and change in average contacts

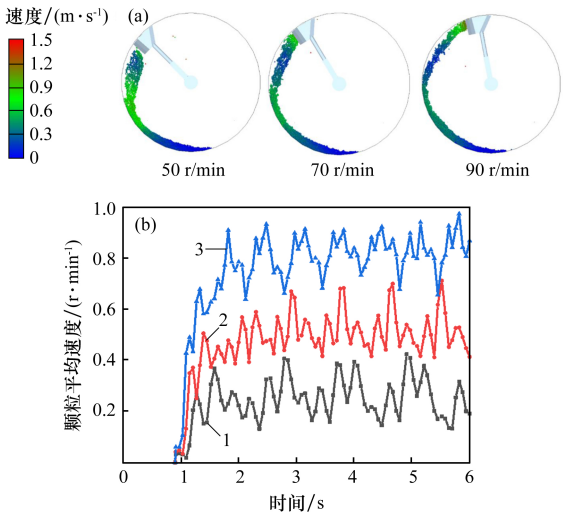
4 886 个。随着 *K* 值从1 MJ/m^3 增加至 5 MJ/m^3，颗粒之间的平均接触数量也随之增加至 8 940 个，但 *K* 值为 6 MJ/m^3 时，相较于 *K* 值为 5 MJ/m^3 时颗粒的接触数量变化不大，说明颗粒的聚结达到了相对稳定的状态。

以上结果表明，能量密度对颗粒之间的接触数量有重要影响。在能量密度较大时，颗粒之间的接触数量增多，有利于实际高剪切烧结原料制粒过程中颗粒之间的碰撞聚结，从而提高制粒效果。

3.3　不同转速下颗粒平均速度及碰撞次数的变化

高剪切制粒机内高速旋转的叶片为颗粒的碰撞、摩擦、挤压和生长提供能量[25]，因此，旋转叶片转速对颗粒的生长速度和强度至关重要。为研究转速对颗粒流动及制粒的影响，本文在不同转速（50、70、90 r/min）下模拟颗粒运动过程，发现 *K* 为 6 MJ/m^3 时制粒效果最佳，因此不同转速条件下设置 *K* 值为 6 MJ/m^3。

图 6 为旋转叶片在不同转速下颗粒稳定后的运动形态（约 5.5 s），即速度变化情况。由图 6（a）可以看出，随着叶片转速的增加，更多的颗粒被提升至制粒机顶部的位置。此外，随着叶片转速的提高，颗粒的速度显著增加。在叶片转速为 50 r/min 时，颗粒的最大速度约为 0.45 m/s，在叶片转速分别为 70、90 r/min 时，颗粒的最大速度分别逐渐增加到 0.8 m/s 和 1.0 m/s。由图 6（b）可知，颗粒的平均瞬时速度随着叶片转速的增加逐渐升高，并且在大约 2 s 时达到相对稳定的状态。此时颗粒的平均瞬时速度随叶片的转动呈周期性的波动。此外，颗粒的平均瞬时速度还随叶片转速的增加而逐渐增大，这是因为转速越大，叶片与颗粒碰撞时传递给颗粒的能量越多，获得能量后颗粒速度显著提升。



（a）颗粒流动状态；（b）平均速度分布

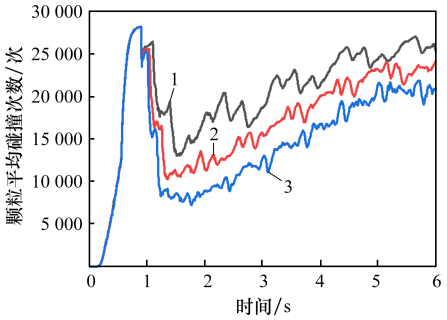
转速/（r·min^{-1}）：1—50；2—70；3—90。

图 6　不同旋转叶片转速下的颗粒流动状态和平均速度分布

Fig. 6　Particle flow state and average velocity distribution at different rotating blade speeds

制粒过程中，颗粒之间的相互碰撞是颗粒聚结的必备条件，通常认为更多的碰撞有助于制粒过程中的聚结。图 7 显示了不同转速下颗粒的碰撞次数变化。由图 7 可见：随着转速的增加，颗粒的碰撞次数越多，在 90 r/min 转速下的颗粒碰撞次数明显高于 50 r/min 和 70 r/min，且碰撞次数在 90 r/min 时显著增加。这主要有两方面的原

因：① 当转速增大时，叶轮对颗粒的作用力也相应增大，导致颗粒的速度和动能增大，颗粒之间碰撞的机会增加；② 转速增加后，单位时间内叶片与颗粒之间的碰撞次数增加，从而导致颗粒之间的碰撞频率升高。此外，3 种转速条件下，随着旋转时间的增加，颗粒碰撞次数先达到一个峰值，随后显著降低后再逐渐上升。这是因为在叶片开始旋转的初期，颗粒都堆积在制粒机底部，叶片的旋转导致堆积相对紧密的颗粒很容易产生接触碰撞，因而产生第一个碰撞次数的峰值；随着叶片的旋转，大量颗粒被携带至制粒机内部上方空间，颗粒的分布较初期更为分散，颗粒之间接触碰撞的概率降低，因此碰撞次数减少。



转速/(r·min^{-1})：1—50；2—70；3—90。

图 7 不同转速下颗粒碰撞次数变化

Fig. 7 Particle collision times change under different rotational speeds

4 结 论

本文以传统 Hertz-Mindlin 颗粒接触模型为基础，采用 API 自定义接口添加 Linear Cohesion 颗粒接触模型模拟烧结原料湿颗粒在高剪切制粒机中的运动行为，并引入能量密度 K 来表征相互接触颗粒之间的液桥力，研究不同能量密度值以及叶片转速对高剪切制粒过程颗粒运动特征的影响，结论如下。

（1）随着制粒过程中颗粒之间能量密度的逐渐增大，高剪切制粒机内颗粒的平均速度减小，其颗粒自身动能也随之减小，加之旋转叶片为其提供稳定的外作用力使颗粒变得更加稳定，越有利于准颗粒的形成。

（2）在制粒过程中较小能量密度颗粒的接触较少，现实中会导致准颗粒粒径减小，不易达到烧结工序对颗粒粒径的条件。在模拟条件下，当能量密度为 5 ~ 6 MJ/m^3 时，制粒效果最佳。

（3）转速越高，颗粒在旋转叶片的作用下被提升得越高，颗粒的平均速度也越大，且颗粒碰撞次数越多。在一定程度上提高叶片转速能够促进颗粒的聚结长大效率。

参考文献：

[1] PAN J, ZHU D Q, PIMENTA H, et al. Improving granulating and sintering performance by pretreating specularite concentrates through mechanical activation [J]. ISIJ International, 2013, 53(12): 2013 – 2017.

[2] XU J N, ZHOU H, ZHOU M X, et al. Taguchi orthogonal test on granule properties and porosity distribution in sintering bed using high-resolution X-ray computed tomography[J]. ISIJ International, 2020, 60(6): 1149 – 1158.

[3] 赵士奇，王春来，欧书海，等. 基于离散元的烧结圆筒混合机仿真模拟[J]. 烧结球团，2019，44(5)：18 – 22.
ZHAO Shiqi, WANG Chunlai, OU Shuhai, et al. Simulation of sintering drum mixer based on discrete element method [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(5): 18 – 22.

[4] 程峥明，潘文，安钢，等. 铁矿粉制粒黏结特性的研究与生产应用[J]. 烧结球团，2019，44(6)：12 – 16.
CHENG Zhengming, PAN Wen, AN Gang, et al. Research and production application of bonding characteristics for iron ore fines granulation[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(6): 12 – 16.

[5] 石玥，潘建，朱德庆，等. 圆筒混合机制粒性能优化研究[J]. 烧结球团，2019，44(4)：1 – 6；17.
SHI Yue, PAN Jian, ZHU Deqing, et al. Research on improvement of granulating effect of drum mixer[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4): 1 – 6; 17.

[6] LÜ X W, BAI C G, ZHOU C Q, et al. New method to determine optimum water content for iron ore granulation [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2010, 37(6): 407 – 413.

[7] 欧阳鸿武，何世文，廖奇音，等. 圆筒型混合器中颗粒混合运动的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2004，35(1)：26 – 30.
OUYANG Hongwu, HE Shiwen, LIAO Qiyin, et al.

Research on granular mixing in rotating drum blender [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science),2004,35(1):26 – 30.

[8] 王素平,杨福,毕学工. 烧结混合料制粒过程的数值模拟[J]. 烧结球团,2015,40(2):7 – 10;19.
WANG Suping, YANG FU, BI Xuegong. Numerical simulation of sintering mixture granulating process[J]. Sintering and pelletizing,2015,40(2):7 – 10;19.

[9] 黄小波. 铁矿粉制粒过程颗粒粒级演变规律与工艺优化[D]. 重庆:重庆大学,2015.
HUANG Xiaobo. Evolution of particle size grading and process optimization in granulation of iron ore fines[D]. Chongqing:Chongqing University,2015.

[10] POHLMAN D A, LITSTER J D. Coalescence model for induction growth behavior in high shear granulation[J]. Powder Technology,2015,270:435 – 444.

[11] 吴胜利,王跃飞,朱娟. 铁矿粉颗粒特性对其烧结制粒性的影响[J]. 钢铁,2015,50(5):19 – 25.
WU Shengli, WANG Yuefei, ZHU Juan. Influence of particle characteristics on the granulation of iron ores in sintering process[J]. Iron & Steel,2015,50(5):19 – 25.

[12] HASSANPOUR A,KWAN C C,NG B H,et al. Effect of granulation scale-up on the strength of granules[J]. Powder Technology,2009,189(2):304 – 312.

[13] NILPAWAR A M, REYNOLDS G K, SALMAN A D, et al. Surface velocity measurement in a high shear mixer [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(13): 4172 – 4178.

[14] TAMRAKAR A, CHEN S W, RAMACHANDRAN R. A DEM model-based study to quantitatively compare the effect of wet and dry binder addition in high-shear wet granulation processes[J]. Chemical Engineering Research and Design,2019,142:307 – 326.

[15] MIRZA Z, LIU J T, GLOCHEUX Y, et al. Effect of impeller design on homogeneity, size and strength of pharmaceutical granules produced by high-shear wet granulation[J]. Particuology,2015,23:31 – 39.

[16] YOU Y,GUO J B,LÜ X W,et al. Numerical simulation of particle mixing behavior in high speed shear mixer and cylinder mixer [J]. ISIJ International, 2021, 61 (7): 2059 – 2065.

[17] RAHMANIAN N, NAJI A, GHADIRI M. Effects of process parameters on granules properties produced in a high shear granulator[J]. Chemical Engineering Research and Design,2011,89(5):512 – 518.

[18] CUNDALL P A,STRACK O D L. Discussion:A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique,1980,30(3):331 – 336.

[19] NALAWADE R D, SINGH K P, ROUL A K, et al. Parametric study and calibration of hysteretic spring and linear cohesion contact models for cohesive soils using definitive screening design [J]. Computational Particle Mechanics,2023,10(4):707 – 728.

[20] YOU Y,LUO Z G,ZOU Z S,et al. Numerical study on mixed charging process and gas-solid flow in COREX melter gasifier[J]. Powder Technology,2020,361:274 – 282.

[21] RABINOVICH Y I, ESAYANUR M S, MOUDGIL B M. Capillary forces between two spheres with a fixed volume liquid bridge: Theory and experiment[J]. Langmuir,2005,21(24):10992 – 10997.

[22] GOLDMAN A J,COX R G,BRENNER H. Slow viscous motion of a sphere parallel to a plane wall:II couette flow [J]. Chemical Engineering Science, 1967, 22: 653 – 660.

[23] LIU P Y, YANG R Y, YU A B. Self-diffusion of wet particles in rotating drums[J]. Physics of Fluids,2013,25(6):063301.

[24] LIU P Y, YANG R Y, YU A B. DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums[J]. Chemical Engineering Science,2013,86:99 – 107.

[25] YOU Y,GUO J,LI G,et al. Investigation the iron ore fine granulation effects and particle adhesion behavior in a horizontal high-shear granulator[J]. Powder Technology,2021,394:162 – 170.