

影响回转式干馏炉颗粒混合效果的因素分析

王宁, 王春华

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月24日

摘要

回转式干馏炉是小颗粒油页岩干馏时的重要设备, 内部油页岩与页岩灰颗粒的混合效果极大程度的影响了干馏效果, 因此, 本文采用离散元法对影响油页岩与页岩灰颗粒混合特性和运动特性的四种因素进行了系统的数值研究。包括: 轴向抄板间距、干馏炉转速、油页岩粒径、炉内填充度。通过混合指数、速度分布云图等指标来评价油页岩与页岩灰的混合特性与运动特性。结果表明: 随着轴向抄板间距的减小, 油页岩与页岩灰颗粒混合效果呈现增高趋势, 但是在完全接触时(间距为0)混合效果下降。这是因为闭合减少了油页岩与页岩灰之间的相对位移, 不利于混合。转速和粒径的增加的确会使混合效果与混合速率提高, 但增加的趋势越来越小; 低填充度也会使混合效果提高。

关键词

油页岩混合, 数值模拟, 离散单元法, 颗粒运动, 回转式干馏炉

Analysis of Factors Affecting Pellet Mixing in Rotary Dry Furnaces

Ning Wang, Chunhua Wang

College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: March 24, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 24, 2026

Abstract

The rotary dry distillation furnace is an important equipment in the dry distillation of small-grained oil shale. The mixing of internal oil shale and shale ash greatly affects the dry distillation effect. Therefore, this study adopts the discrete element method to carry out a systematic numerical study

on the four factors affecting the mixing characteristics and kinematic properties of oil shale and shale ash, including axial response spacing, rotational speed of dry distillation furnace, oil shale particle size, and furnace filling degree. The mixing and kinematic properties of oil shale and shale ash were evaluated by mixing index and velocity distribution cloud diagram. The results showed that the mixing effect of oil shale and shale ash showed an increasing trend as the axial plate spacing decreased, but the mixing effect decreased at full contact (spacing of 0). This is because the closure reduces the relative displacement between oil shale and shale ash, which is not conducive to mixing. An increase in rotational speed and particle size does lead to an increase in mixing efficiency and mixing rate, but the trend of increase is getting smaller; low filling degree also leads to an increase in mixing efficiency.

Keywords

Oil Shale Mixing, Numerical Simulation, Discrete Element Method, Particle Motion, Rotary Retort Kilns

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油页岩与常规的石油资源不同,是一种固体的化石燃料,经过炼制后的页岩油同样可以精炼成柴油、煤油、汽油等多种产品,油页岩与常规油气资源的价值一样重要,并且油页岩在世界范围内储量丰富,对其进行合理的利用将会是缓解石油短缺的重要措施[1][2]。油页岩在开采、运输等过程中,会因为震动等因素破碎,合理处理利用这些破碎后的小颗粒油页岩,对能源高效利用有着重要意义。回转式干馏炉的加热方式为固体热载体加热,同时可以将干馏后的页岩灰渣作为固体热载体重新利用,因此对这些小颗粒油页岩的干馏效果极佳。固体热载体的加热方式可以使油页岩与页岩灰直接接触来实现热量的交换和传递,从而使油页岩达到干馏温度来制取页岩油,有产油率高、利用率高的优点,因此回转式固体热载体干馏炉目前是小颗粒油页岩干馏的主要发展方向[3][4]同时也是世界上油页岩干馏过程中应用最为广泛的干馏炉。

目前有关油页岩颗粒混合效果的研究,主要集中在两方面,1) 颗粒自身物性方面:文献[5]研究了半径、密度、质量等物性对于颗粒混合的影响,并说明了这三个参数在颗粒混合情况中占主导地位。文献[6]研究了不同颗粒形状对混合的影响,并证明了动态休止角会受到颗粒形状和球柱方向的影响。2) 混合器结构方面:文献[7]研究了挡板的高度和数量对颗粒混合的影响,结果显示:高挡板颗粒混合效果强于低挡板颗粒混合效果,挡板数量对颗粒混合效果的影响基本没有。同样文献[8]也研究了挡板结构,与文献[7]不同的是挡板位置设定在了混合器中间部分,同样研究了挡板数量对颗粒混合情况的影响。结果显示中间挡板的数量对颗粒混合程度影响很大,这也侧面证明了挡板的位置和结构选取很重要。不同位置和结构对结果的影响各不相同。文献[9]的研究提供了一种新思路。在研究挡板位置与结构时,并没有局限于固定位置,作者设置了一种运动挡板,在混合器内部随混合器进行不规则运动,研究运动挡板的形状对混合效果的影响。结果显示:特定的形状确实可以提高混合效果。混合器结构方面还有诸多研究:如文献[10]混合器形状的研究、文献[11]倾斜混合器的研究、文献[12]分离式混合器研究。这些研究结果在不同方面都说明了混合器结构对颗粒混合效果有着不同程度的影响。

以上有关颗粒混合的研究对油页岩与页岩灰颗粒混合提供了巨大的参考价值,然而,上述研究多集

中在规则的挡板形状与长度较短的混合器。对于不规则挡板形状和长度较长的混合器关注较少, 在本文中, 为了很好的了解油页岩与页岩灰颗粒的混合与运动特性, 需要对干馏段整个水平方向长度进行研究, 这样做是为了确保在研究混合与运动特性时, 不会丢失水平方向上的相关运动状态。本文采用数值模拟方法, 结合单因素模拟分析, 对加装 V 型抄板的较长干馏段进行模拟, 分析油页岩与页岩灰的混合特性与运动特性。分析了抄板间距、转速等因素对混合的影响。并对相应的机理进行了探讨。为回转式干馏炉的应用提供一定的参考价值。

2. 数学模型

2.1. 颗粒运动模型

Cundall 和 Strack [13]提出的离散元法(DEM)是分析和求解离散颗粒材料运动特性的有效方法, 多年以来在各种颗粒物混合建模中有着广泛的应用[14]。在本文工作中, 采用软球模型来模拟回转式干馏炉中油页岩与页岩灰颗粒之间的碰撞, 并基于 Hertz-Mindlin 线性模型计算粒子之间的接触力[15]。结合牛顿运动定律, 粒子 i 的运动可以表示为:

$$m_i \frac{d\bar{v}_i}{dt} = \sum_j \bar{F}_n + \bar{F}_t + m_i \bar{g} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\bar{\omega}_i}{dt} = \sum_j \bar{M}_i \quad (2)$$

其中 m_i 、 \bar{v}_i 、 I_i 和 $\bar{\omega}_i$ 是质点 i 的质量、平移速度、转动惯量和角速度; \bar{g} 是重力加速度常数; \bar{M}_i 是作用在质点上的力矩; \bar{F}_n 和 \bar{F}_t 是粒子 i 和周围粒子 j 的法向力和切向力。

2.2. 颗粒混合指数

采用莱西(Lacey)混合指数[16] M 定量描述二元颗粒在转鼓内的混合程度, 可表示为:

$$M = \frac{\sigma^2 - \sigma_0^2}{\sigma_r^2 - \sigma_0^2} \quad (3)$$

式中 σ^2 为二元粒子的实际混合方差; σ_0^2 是颗粒完全分离的混合方差; σ_r^2 是粒子完全混合的方差。 σ_0^2 和 σ_r^2 分别表示为:

$$\sigma_0^2 = P(1-P) \quad (4)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{P(1-P)}{N} \quad (5)$$

其中 P 和 $1-P$ 分别为两种颗粒的体积分数, N 是粒子的总等效数。在本研究中, 选取直径为 1 mm 的颗粒作为参考颗粒, 然后分别按体积确定直径为 3 mm 和 4 mm 的颗粒的当量数。直径为 3~4 mm 的粒子分别相当于 27 个参考粒子和 64 个参考粒子。本文中模型被分成 $12 \times 20 \times 12$ 个样本, 并采用加权算法计算。对于颗粒数少于 20 的样本进行舍弃来确保结果的准确性, 所以 σ^2 可以由下式得到:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - p)^2 \quad (6)$$

其中, n 为样本总数; p_i 是样本 i 中任一颗粒的体积分数; p 为对应颗粒在样本总量内的体积分数。

Lacey 混合指数[M]值在[0,1]之间变化, 混合指数[M]越大, 表明两种颗粒的混合效果越好。 $M = 0$ 表示两种颗粒完全分离, $M = 1$ 表示两种颗粒完全混合。

3. 结果与讨论

3.1. 模型设置

在本文模拟中, 回转式干馏炉模型采用水平放置的圆筒, 半径为 60 mm; 长为 200 mm; 页岩灰与油页岩颗粒的密度分别为 1600 kg/m³ 和 2000 kg/m³; 两种颗粒在干馏炉内填充的个数比为 3:1。初始状态为页岩灰颗粒平铺在下方, 油页岩颗粒平铺在上方, 如图 1 所示。水平方向相邻抄板间距设为 x 。每一个模拟工况下, 为了保证油页岩与页岩灰颗粒完全混合, 每个模拟时长设定为 300 s, 极大程度上保证了油页岩与页岩灰颗粒处于混合稳定的状态。模拟中各材料物理参数与接触系数由表 1、表 2 给出。

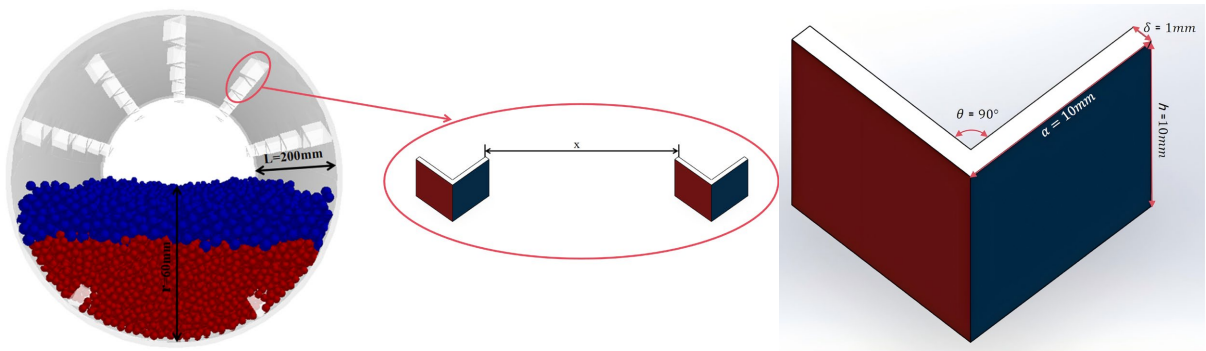


Figure 1. Geometrical model for dry distillation furnace simulation and initial particle state
图 1. 干馏炉模拟几何模型及初始颗粒状态

Table 1. Material characteristic parameter [17]
表 1. 材料特性参数[17]

物理性质	单位	油页岩颗粒	页岩灰颗粒	炉壁(钢)
密度, ρ	Kg/m ³	2000	1600	7800
泊松比, ν		0.3	0.25	0.3
杨氏模量, E	Pa	2.6×10^8	2.5×10^8	1.82×10^{11}

Table 2. Correlation coefficient of material contact [17]
表 2. 材料接触相关系数[17]

	颗粒 - 颗粒	颗粒 - 壁面
恢复系数	0.3	0.1
静摩擦系数	0.7	0.3
动摩擦系数	0.3	0.05

3.2. 模型验证

验证的实验模型来自文献[18]; 通过 EDEM 模拟软件进行验证, 通过对比混合指数来确定结果是否准确。最终得到的结果由表 3 表示, 结果表明: 模型验证结果基本吻合。图 2 是同一时刻下文献与本次模拟的对照图, 效果高度吻合, 为了更加明确比较实验与模拟之间存在的误差, 进行莱西混合指数计算得到结果图 3, 再进行误差分析得到的结果如图 4 所示: 其中平均误差 8.4%。其中最大误差为 15.7%最小误差为 3%, 以上结果都说明模型验证结果良好。

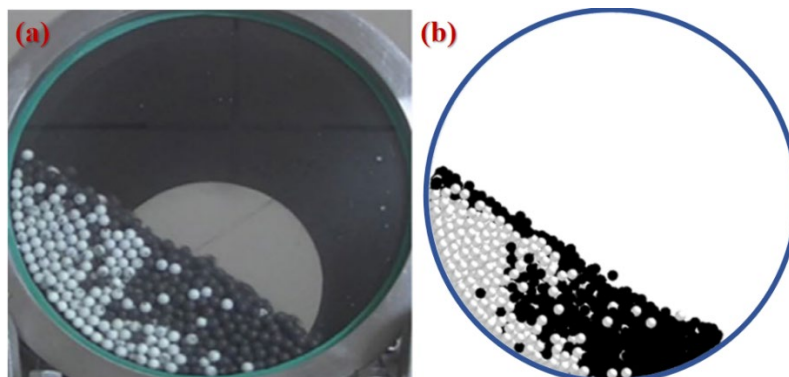


Figure 2. Comparison of the instantaneous flow patterns of the particles in the rotating drum: (a) experiment [18]; (b) simulation

图 2. 干旋转设备内颗粒流动瞬时比较: (a) 实验[18]; (b) 模拟

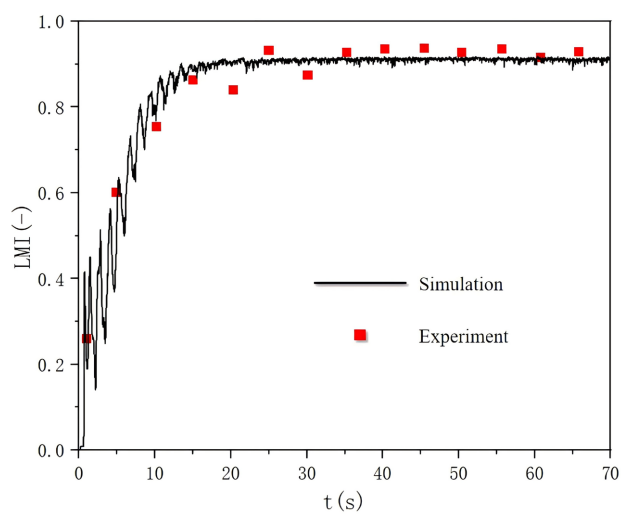


Figure 3. Comparison of Lacey's mixing index: experiment and simulation

图 3. 莱西混合指数比较: 实验和模拟

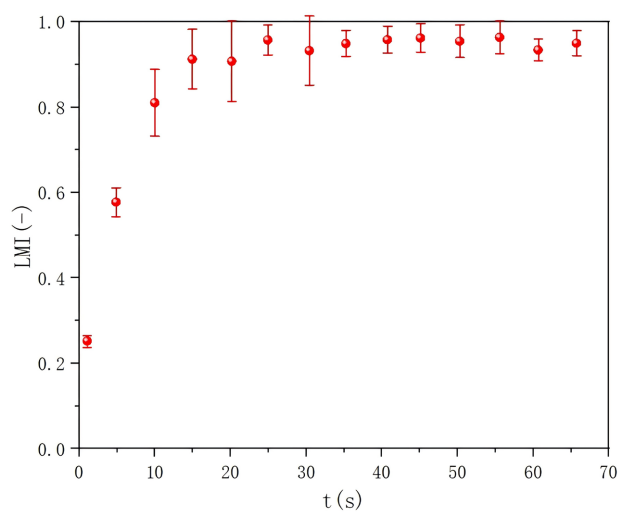


Figure 4. Error analysis

图 4. 误差分析

Table 3. Comparison the predicted repose angle with the corresponding experimental data
表 3. 休止角与实验数据比较

方法	休止角(°)	相对误差(%)
实验	32.91	—
模拟	30.12	8.4

3.3. 水平抄板间距对油页岩与页岩灰颗粒混合效果的影响

为了研究不同抄板间距对油页岩与页岩灰混合的影响, 设置了四种水平抄板间距 $x = 35、25、5、0$ 。图 4 展示了直径为 3 mm 的页岩灰和直径为 4 mm 的油页岩不同时间下在回转式干馏炉内部的颗粒状态。随着干馏炉的旋转, 最初的状态为油页岩颗粒被大量的页岩灰颗粒所覆盖, 经过一定的循环周期后, 页岩灰与油页岩完全混合。

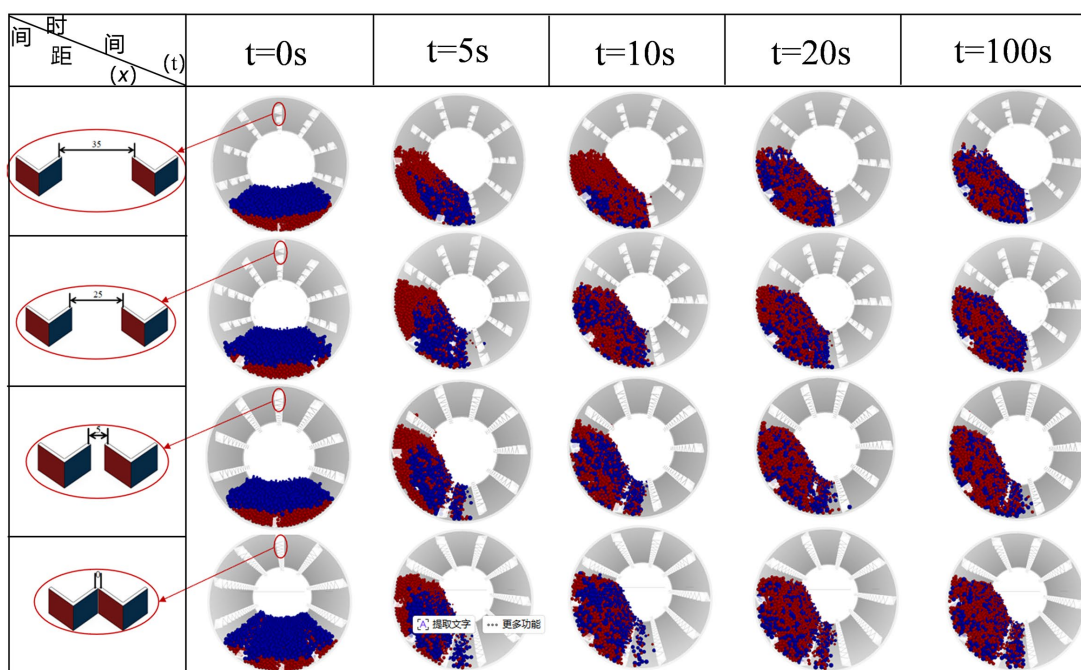


Figure 5. Mixing of granular oil shale and shale ash in the dry distillation furnace with different platen spacing
图 5. 不同抄板间距下干馏炉内颗粒油页岩与页岩灰混合情况

图 5 中可以看到: 随着水平抄板间距的减小, 每一列抄板所带动的颗粒数量增加, 这使得回转式干馏炉内颗粒的运动高度增加, 加速了“页岩灰颗粒覆盖油页岩颗粒”这一现象。图 6 为不同抄板间距下油页岩与页岩灰颗粒的混合指数, 可以看出: 随着水平抄板间距的减小, 混合效果越来越好。但是其中值得注意的是: 在水平抄板间距为 0 时, 混合的现象出现了略微下降。

为了探讨这一现象的发生, 对横截面进行颗粒速度矢量的处理。图 7 左为水平抄板间距不为 0; 回转式干馏炉一个旋转周期的速度矢量分布图, 图 7 右则为水平抄板间距为 0; 回转式干馏炉一个旋转周期的速度矢量分布图。可以看到, 虽然水平抄板间距的减少使得抄板数量得到增加, 每次旋转所带动的颗粒增多; 进而促进了混合, 但是在水平抄板间距小于颗粒粒径的情况下, 每次提料所带来的颗粒间相互运动的情况减少了, 这使得颗粒运动活跃度下降, 减少了混合的发生。这也解释了为什么在轴向抄板间距为 0 时混合指数出现略微下降的情况。

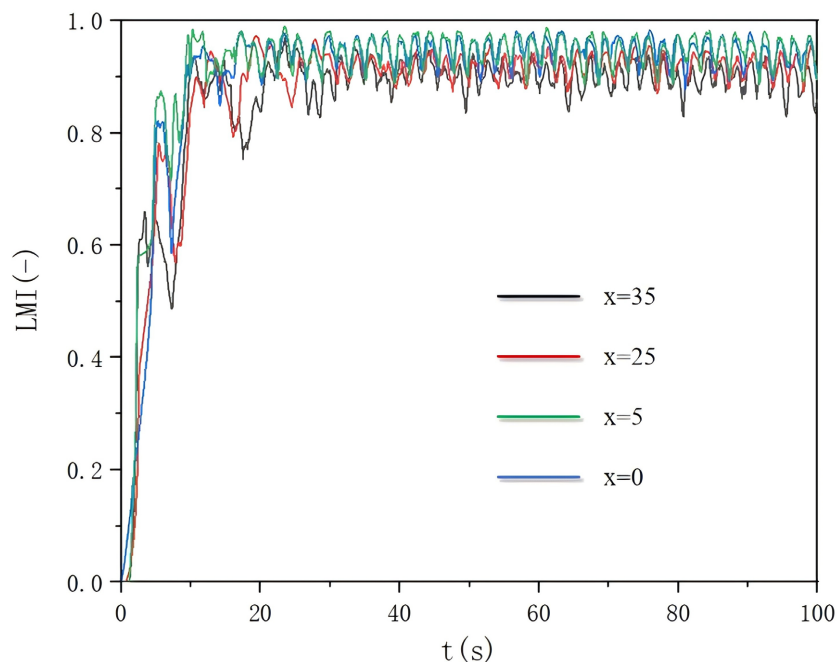


Figure 6. Mixing index of oil shale and shale ash with different platen spacing M
图 6. 不同抄板间距油页岩与页岩灰混合指数 M

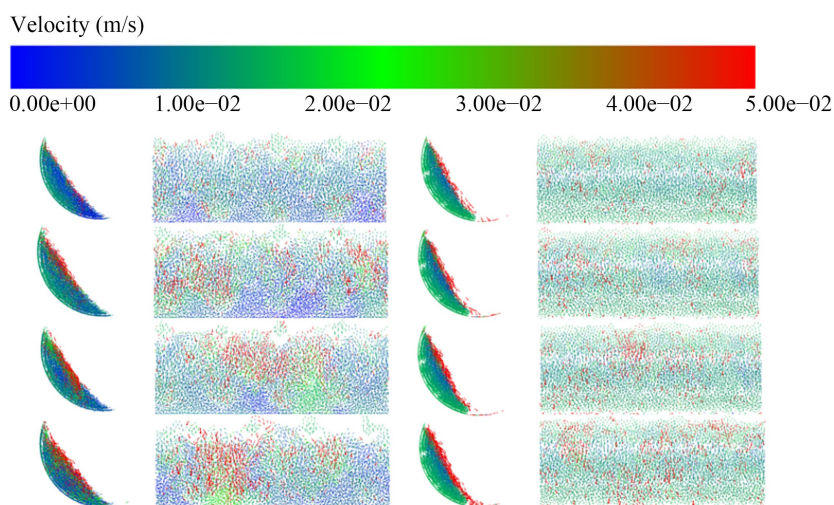


Figure 7. Particle velocity vector cloud plot with no platen spacing (left) and platen spacing of 0 (right)

图 7. 抄板间距不为 0 (左)抄板间距为 0 (右)颗粒速度矢量云图

3.4. 转速对油页岩与页岩灰颗粒混合效果的影响

转速同样会影响油页岩与页岩灰的混合。图 8 为不同转速下的油页岩与页岩灰颗粒在不同时间的混合分布, 可以看出随着转速的增加, 油页岩颗粒与页岩灰颗粒的混合时间明显缩短, 这说明随着回转式干馏炉旋转次数的增加, 颗粒的流动性增加, 从而促进了油页岩与页岩灰的交换循环, 同时也可以看出, 随着转速的增加, 油页岩与页岩灰的运动高度增加, 重力势能增加, 也会使得颗粒的流动性增加, 进而提高混合效果。

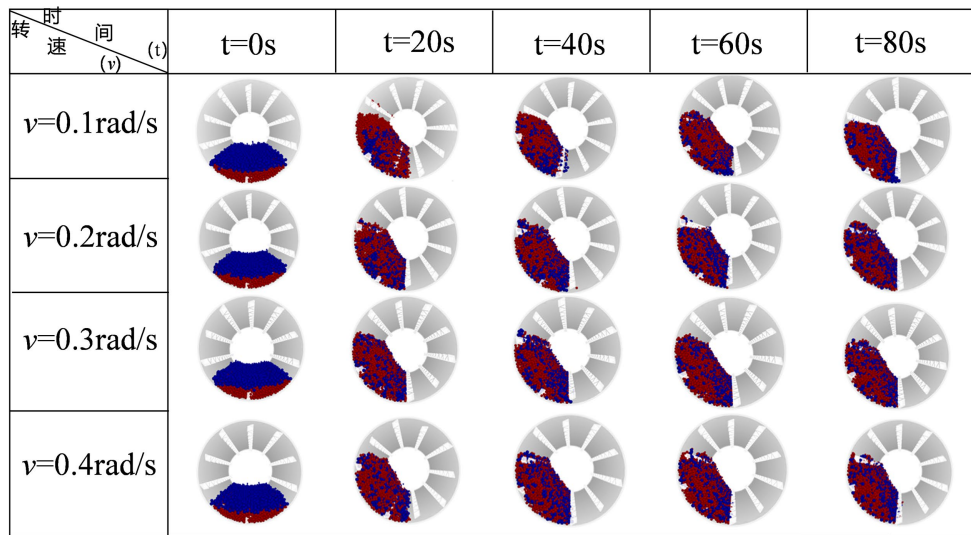


Figure 8. Mixing of oil shale and shale ash at different rotational speeds(rad/s) from 0 s to 80 s
图 8. 不同转速(rad/s)下油页岩与页岩灰在 0~80 s 混合情况

图 9 为各个转速下的混合指数情况，可以看出随着转速的增加，油页岩与页岩灰颗粒的混合效果越来越好，但增加率逐渐降低。增加转速提高混合效果所带来的收益很低，但是油页岩与页岩灰到达稳定混合时间却有很大提升，可以看出如果不限时间最终各个转速下稳定混合指数相差不大。

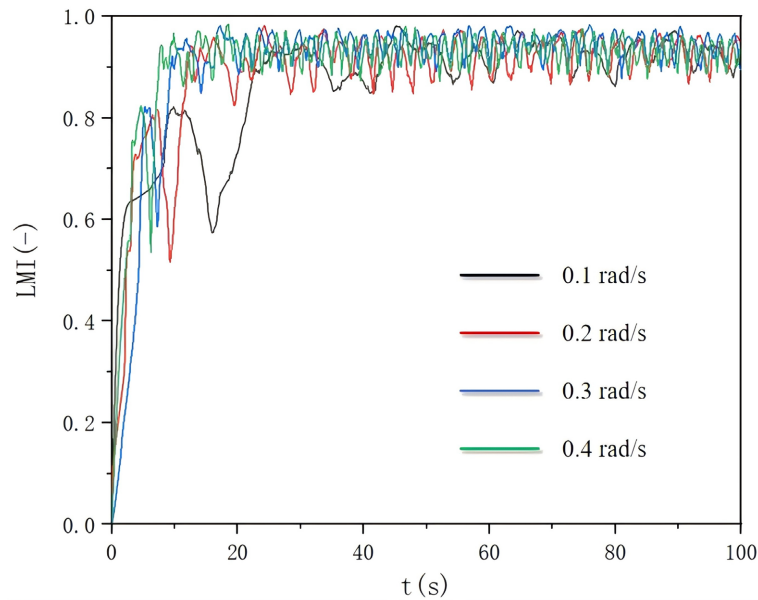


Figure 9. Mixing index of oil shale and shale ash at different rotational speeds M
图 9. 不同转速下油页岩与页岩灰混合指数 M

3.5. 粒径对油页岩与页岩灰颗粒混合效果的影响

粒径对混合效果的影响极大，这是因为不同粒径的油页岩与页岩灰颗粒在混合时出现偏析情况[19]。偏析是指颗粒混合时，一种颗粒群对另一种颗粒群出现“包裹”现象，这种现象会影响颗粒混合的均匀分布。图 10 为 20%填充度下，不同粒径的油页岩与页岩灰颗粒稳定混合时对比图，可以看出不同粒径差

值下油页岩与页岩灰颗粒分布情况不同,这也导致干馏炉在旋转时颗粒流动性不同,偏析效果的增加使混合效果下降,但本研究中由于使用的V型抄板,一定程度上破坏了偏析的形成,并且促进了单个循环周期内颗粒间的流动性,提高了混合效果。

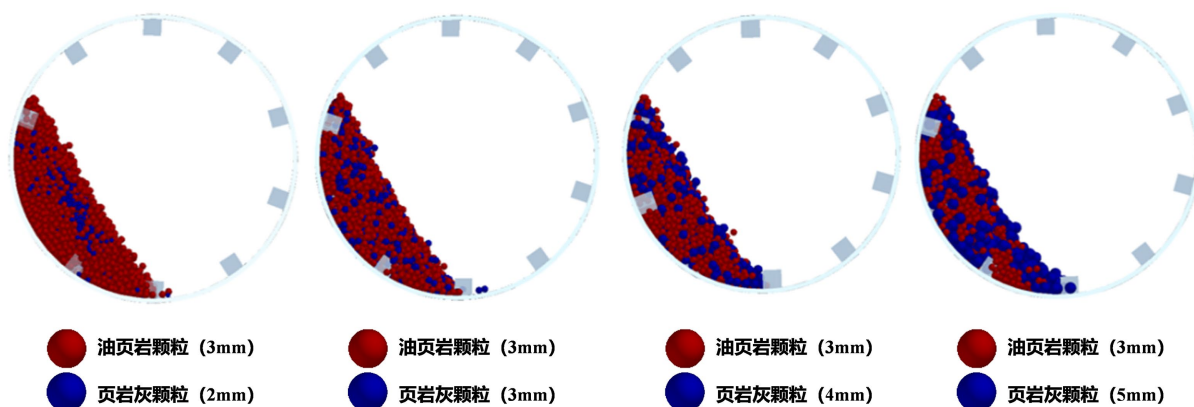


Figure 10. Mixing of oil shale and shale ash at different grain sizes
图 10. 不同粒径下油页岩与页岩灰混合情况

图 11 为混合指数[M],可以看出其中混合效果最好的是油页岩颗粒粒径为 3 mm、页岩灰粒径为 3 mm,随着油页岩与页岩灰颗粒粒径差值的增加,混合效果降低。通过偏析机理分析可知:本研究中的挡板形状确实可以抑制偏析效果,但当粒径之间差值过大时,偏析依旧占主导地位,挡板起到的抑制效果逐渐减弱。

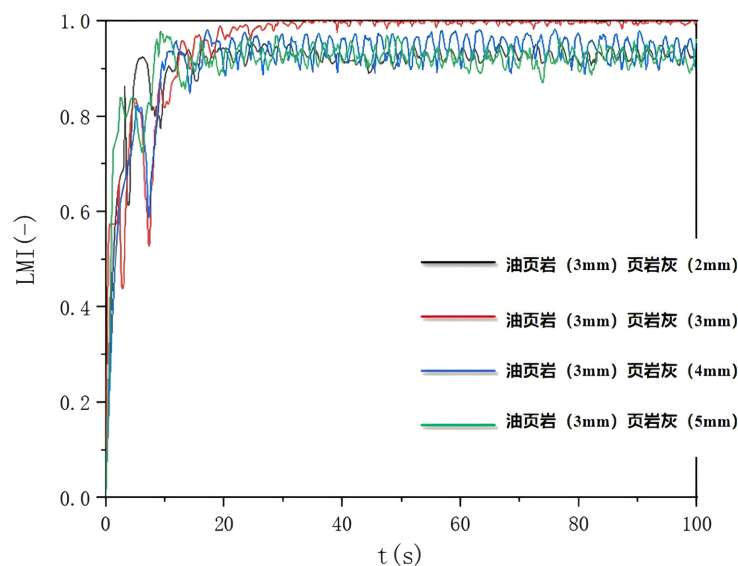


Figure 11. Mixing index of oil shale and shale ash at different grain sizes M
图 11. 不同粒径(mm)下油页岩与页岩灰混合指数 M

3.6. 填充度对油页岩与页岩灰颗粒混合效果的影响

不同填充度对油页岩与页岩灰的混合也具有一定影响。分别对 4 种不同填充度: 20%、30%、40%、50%进行模拟,最终得到的莱西混合指数曲线如图 12 所示。

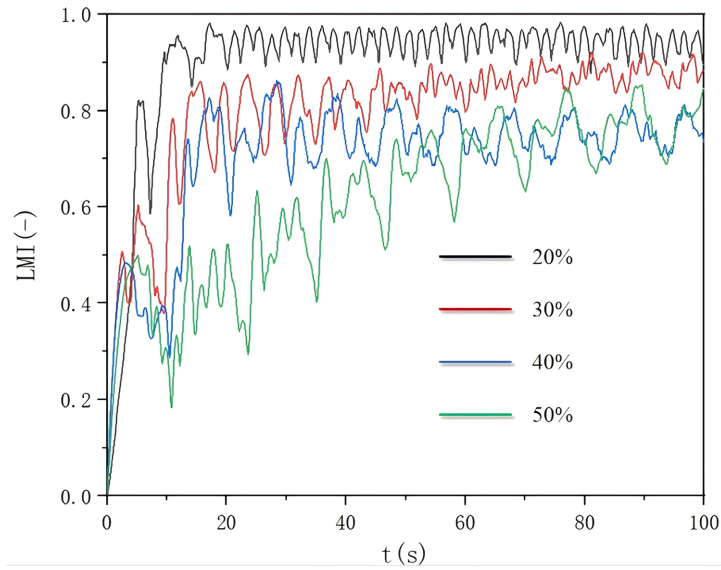


Figure 12. Mixing index of oil shale and shale ash at different filling degrees M
图 12. 不同填充度下油页岩与页岩灰混合指数 M

图 12 可以看出, 随着填充度的增加, 颗粒达到稳定混合所需要的时间变长, 且混合指数随着填充度的增加而降低, 这与无抄板回转式干馏炉的研究结果一致。通过上文中对粒径的研究可知, 低填充度下 V 型抄板对偏析情况有一定的抑制效果, 结合图 13 可知: 高填充度下, 内壁上的 V 型抄板对偏析效果的抑制微乎其微, 偏析依旧存在。通过对比文献[20]可知: 干馏炉内壁的抄板确实对偏析具有一定的抑制作用, 但其作用的大小取决于抄板的形状、高度、位置等。而本文中的抄板高度设置较小, 随着填充度的增加, 抄板对偏析现象的抑制效果逐渐变小。

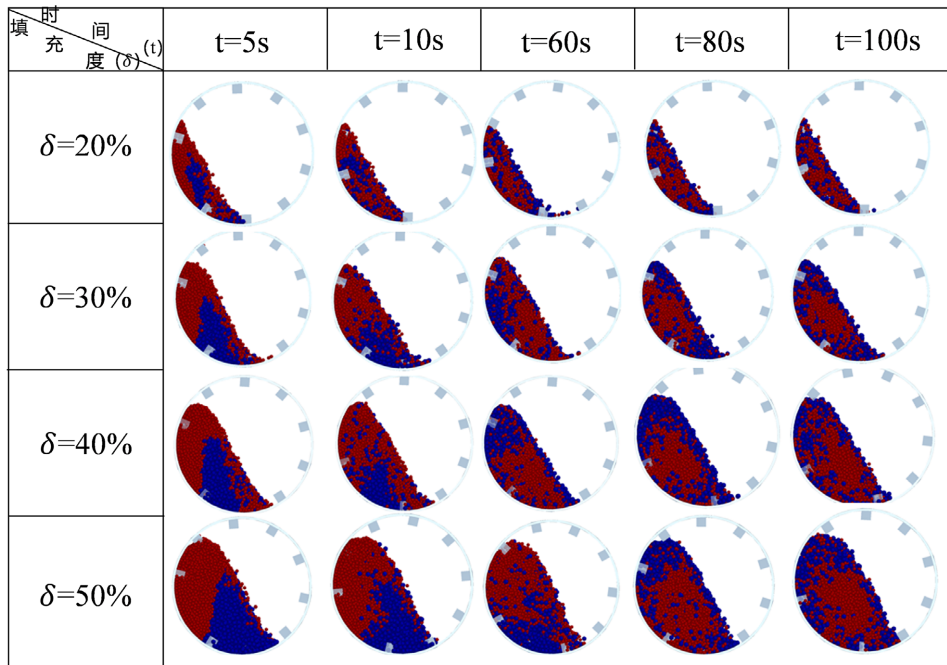


Figure 13. Mixing of different filling degrees 0~100 s
图 13. 不同填充度下 0~100 s 的混合情况

4. 结论

本文通过数值模拟研究了油页岩与页岩灰在回转式干馏炉内的运动与混合特性, 系统的考量了抄板间距、转速、填充度、粒径四种参数对混合过程的影响。结果表明:

1) 在结构方面: 四种抄板间距 $x=35$ 、25、5、0 下随着间距的减小, 混合效果呈提高趋势, 在 $x=5$ 时达到最大, 然后降低。但整体对混合效果的波动影响较小。

2) 在参数方面: 转速的增加的确会使混合效果变好, 这与大多数研究者的研究一致, 对于粒径差值引起的偏析现象, 本研究中挡板的抑制效果随着差值的增加而变小, 粒径差值过大会使得偏析重新占领主导地位。不同填充度对混合效果的影响不同, 本研究中 20%、30%、40%、50% 四种填充度得到的结果表示: 混合效果随填充度的增加而降低。值得注意的是: 高填充度会使得混合时间变长。

3) 内壁上的抄板确实可以提高混合效果, 但是仅在低填充度下适用。高填充度下的偏析情况依然存在。

基金项目

这项工作得到了辽宁省教育厅科学研究项目(项目编号: L2020028)以及辽宁省教育厅公布的地方项目(项目编号: JYTMS20231421)的资金支持。

参考文献

- [1] Liu, Z., Meng, Q., Dong, Q., Zhu, J., Guo, W., Ye, S., *et al.* (2017) Characteristics and Resource Potential of Oil Shale in China. *Oil Shale*, **34**, 15-41. <https://doi.org/10.3176/oil.2017.1.02>
- [2] 孙常龙, 王岳, 邵慧龙, 等. 原位电法开发油页岩的温度场数值分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2015(4): 40-43.
- [3] Nešumajev, D., Pihu, T., Siirde, A., Järvi, O. and Konist, A. (2019) Solid Heat Carrier Oil Shale Retorting Technology with Integrated CFB Technology. *Oil Shale*, **36**, 99-113. <https://doi.org/10.3176/oil.2019.2s.02>
- [4] Gerasimov, G., Khaskhachikh, V. and Potapov, O. (2017) Experimental Study of Kukersite Oil Shale Pyrolysis by Solid Heat Carrier. *Fuel Processing Technology*, **158**, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.016>
- [5] Arntz, M.M.H.D., Beeftink, H.H., den Otter, W.K., Briels, W.J. and Boom, R.M. (2013) Segregation of Granular Particles by Mass, Radius, and Density in a Horizontal Rotating Drum. *AIChE Journal*, **60**, 50-59. <https://doi.org/10.1002/aic.14241>
- [6] Yu, F., Zhang, S., Zhou, G., Zhang, Y. and Ge, W. (2018) Geometrically Exact Discrete-Element-Method (DEM) Simulation on the Flow and Mixing of Sphero-Cylinders in Horizontal Drums. *Powder Technology*, **336**, 415-425. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.05.040>
- [7] Mesnier, A., Peczalski, R., Mollon, G. and Vessot-Crastes, S. (2020) Mixing of Bi-Dispersed Milli-Beads in a Rotary Drum. Mechanical Segregation Analyzed by Lab-Scale Experiments and DEM Simulation. *Processes*, **8**, Article 1166. <https://doi.org/10.3390/pr8091166>
- [8] Garneoui, S., Korzenszky, P. and István, K. (2022) Mixing Enhancement of Mono-Disperse and Bi-Disperse Particles in a Cylindrical Drum Mixer Using Discrete Element Simulations. *Tehnicki vjesnik-Technical Gazette*, **29**, 752-758.
- [9] Zhang, L., Ma, J., Wang, Z., Qin, H., Bai, J. and Wang, Q. (2020) Effect of Moving Baffle on Average Velocity and Mixing of Binary Particles in Rotating Drums. *Journal of Central South University*, **27**, 478-489. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4310-5>
- [10] Li, D., Xu, X., Chen, J., Yang, K., Liu, X. and Yang, L. (2021) Numerical Study on the Effect of Drum on the Flow Behavior of Binary-Size Particles in Rotating Drums. *Powder Technology*, **386**, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.013>
- [11] Widhate, P., Zhu, H., Zeng, Q. and Dong, K. (2020) Mixing of Particles in a Rotating Drum with Inclined Axis of Rotation. *Processes*, **8**, Article 1688. <https://doi.org/10.3390/pr8121688>
- [12] Zuo, Z., Wang, J., Chen, X., Gong, S. and Lu, H. (2022) Numerical Study of Forced Axial Segregation of Binary Density Granular System in a Split Rotary Drum. *Advanced Powder Technology*, **33**, Article 103831. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103831>
- [13] Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. (1979) A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, **29**, 47-

65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- [14] Li, R., Yang, H., Zheng, G., Zhang, B.F., Fei, M.L. and Sun, Q.C. (2016) Double Speckle-Visibility Spectroscopy for the Dynamics of a Passive Layer in a Rotating Drum. *Powder Technology*, **295**, 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.03.031>
- [15] Basinskas, G. and Sakai, M. (2016) Numerical Study of the Mixing Efficiency of a Batch Mixer Using the Discrete Element Method. *Powder Technology*, **301**, 815-829. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.017>
- [16] Lacey, P.M.C. (1954) Developments in the Theory of Particle Mixing. *Journal of Applied Chemistry*, **4**, 257-268. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010040504>
- [17] Wang, C., Sun, Y., Wang, N., Sun, J. and Yue, Y. (2025) Study on the Influence of Baffles on Heat Transfer Characteristics of Particles in an Oil Shale Rotary Kiln. *Applied Thermal Engineering*, **268**, Article 125924. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125924>
- [18] Heilbuth, R.R., Souza, G.M., Santos, D.A., Brandao, R.J., Barrozo, M.A.S. and Duarte, C.R. (2022) Numerical Evaluation of the Granular Mixing Behavior in a Flighted Rotary Drum through the Discrete Element Method. *Powder Technology*, **400**, Article 117251. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117251>
- [19] Xie, L., Wang, S., Shao, B., Chen, X., Ding, N. and Ma, Y. (2023) Radial Mixing and Segregation of Binary Density Ellipsoids in a Rotating Drum. *Chemical Engineering Research and Design*, **197**, 192-210. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.030>
- [20] Liu, B., Wang, Q., Zhou, Z. and Zou, R. (2022) Influence of Baffles on Mixing and Heat Transfer Characteristics in an Internally Heated Rotating Drum. *Powder Technology*, **398**, Article 117129. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117129>