

翅片结构对灰渣颗粒混合效应的影响

何涛, 王佳, 何庆中, 廖伯权

(四川轻化工大学 机械工程学院, 四川 宜宾 644007)

摘要:采用 EDEM 软件,模拟循环流化床锅炉冷渣管分别采用无翅片、直翅片、直角翅片、大弯角翅片时灰渣颗粒的混合效应;对比分析不同时刻灰渣颗粒的混合指数、单个粒子的循环运动特性以及管壁棱角处颗粒的混合状态。结果表明:在快速混合阶段,直角翅片与大弯角翅片的灰渣颗粒混合指数变化更剧烈,混合时间为 20 s 时,无翅片、直翅片、直角翅片、大弯角翅片的灰渣颗粒混合指数依次为 0.38、0.41、0.43、0.46;在稳定混合阶段,管壁棱角处的混合效应按无翅片、直翅片、直角翅片、大弯角翅片顺序依次增大;从单个颗粒的运动轨迹来看,直角翅片对单个运动颗粒的提升高度最高,但大弯角翅片对单个运动颗粒的提升次数最多;改变翅片结构能明显提高灰渣颗粒混合效应,大弯角翅片结构的混合效应最好。

关键词:翅片结构;冷渣管;灰渣颗粒;混合效应;混合指数

中图分类号:TK229.6

文献标志码:A

Influence of fin structures on mixing effect of ash particles

HE Tao, WANG Jia, HE Qingzhong, LIAO Boquan

(College of Machinery Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644007, China)

Abstract: EDEM software was used to simulate the mixing effect of ash particles when the cold slag tube of circulating fluidized bed boiler adopted non-fin, straight fin, right-angle fin and large-angle fin. The mixing index of ash particles at different times, the cyclic movement characteristics of individual particles and the mixing state of particles at the corners of the tube wall were compared and analyzed. The results show that the mixing index of the ash particles of the right-angled fins and the large-angled fins changes more drastically in the rapid mixing stage. When the mixing time is 20 s, the mixing index of ash particles of no fins, straight fins, right-angle fins and large-angle fins are 0.38, 0.41, 0.43 and 0.46 in sequence. In the stable mixing stage, the mixing effect at the edges and corners of the tube wall increases in the order of no fins, straight fins, right-angle fins and large-angled fins. From the point of view of the movement path of a single particle, the right-angled fins has the highest lifting height for a single particle, but the large-angled fins has the most lifting times for a single particle. Changing the fin structure obviously improves the mixing effect of ash particles, and the mixing effect of the large-angle fin structure is the best.

Keywords: fin structure; cooling tube; ash particles; mixing effect; mixed index

目前,循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉正朝着大容量、大型化方向发展,导致锅炉排渣量越来越大,底渣处理成为制约 CFB 锅炉发展的重要因素之一^[1]。滚筒内冷渣管作为 CFB 锅炉系统的重要组成部分,承担着连续排渣、底渣冷却和余热回收的功能,其可靠性是锅炉正常运行的重要保障。滚筒内冷渣管内高温颗粒间的混合过程极其复杂,灰渣颗粒的混合运动过程直接影响颗粒间、颗粒和内渣管内壁间(简称粒壁间)的热量传递。

针对颗粒间混合效应方面的研究主要集中在化工领域。张立栋等^[2]以离散元接触模型与导热模型相结合的方法,研究了抄板对外热式回转设备内单分散颗粒系统的混合及传热特性。侯志超^[3]通过

收稿日期:2021-08-02,修回日期:2021-12-01。

基金项目:四川省科技厅科技成果转化项目,编号:2017CC0046;自贡市科技计划项目,编号:2018GYCX22。

第一作者简介:何涛(1997—),男,硕士研究生,研究方向为余热锅炉及其辅助设备设计。E-mail: 1256530593@qq.com。

通信作者简介:王佳(1980—),副教授,博士,硕士生导师,研究方向为机械优化设计。E-mail: wangjiayuting@163.com。

建立颗粒间、粒壁间的液桥力模型,模拟了螺旋混合机中的颗粒流动与混合过程,经二元颗粒的混合流动实验验证了模型结果。孟京源^[4]以正交实验的方法分析了偏心距、转速、滚筒对回转装置内颗粒体系混合运动的影响,验证了颗粒系统的动态休止角与颗粒所受合力、转速之间的关系。李建^[5]研究了回转干馏炉内油页岩颗粒与高温页岩灰颗粒在不同抄板形式、油页岩粒径、填充率(灰渣颗粒体积与冷轧管体积之比)等工况下的混合特性,得出了影响混合速度与混合效果的原因。Xiao等^[6]研究了小型滚筒内颗粒的混合运动过程,通过对数值结果与物理实验结果的对比分析验证了DEM数值模拟的有效性。

另外,国内外文献大多针对CFB锅炉滚筒内圆柱型冷渣管研究其转速、填充率以及抄板结构等因素对颗粒混合效应的影响,但鲜见针对六棱柱型冷渣管的颗粒混合效应问题的研究。

本文中借助EDEM软件,对灰渣颗粒在CFB锅炉多管组合式滚筒内六棱柱型冷渣管的混合效应进行分析,研究不同翅片结构对冷渣管内灰渣颗粒混合效应的影响规律;搭建实验装置验证EDEM模拟结果;经对比分析确定冷渣管的最优翅片结构,为灰渣颗粒在冷渣管中的传热研究提供参考。

1 EDEM 建模

1.1 几何模型的建立

在EDEM软件中,建立的多管组合式滚筒内六棱柱型冷渣器的三维几何模型如图1所示。由图可见,六棱柱型冷渣管绕圆柱形滚筒中心均匀布置,冷渣管布置分为内、外2层,内层4根、外层8根,内、外层冷渣管绕滚筒中心轴旋转,各冷渣管角速度相同,故将冷渣管截取一小段进行模拟研究。灰渣粒径为4 mm,填充率为30%,滚筒转速为6 r/min。

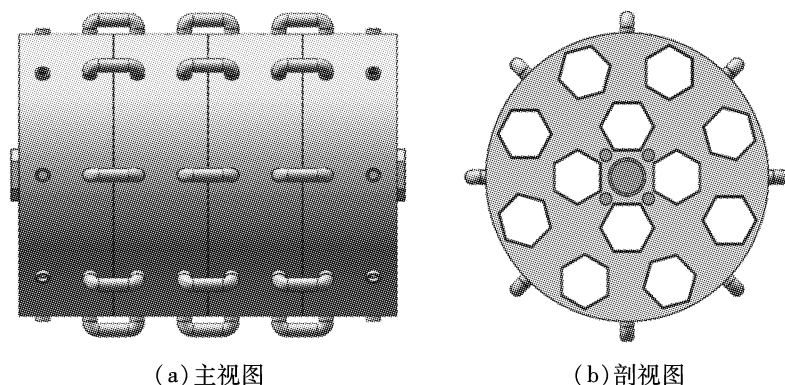


图1 多管组合式滚筒内六棱柱型冷渣器的三维几何模型

Fig.1 Three-dimensional geometric model of hexagonal cold slag tube in multi-tube combined drum

六棱柱型冷渣管内的翅片布局如图2所示。由图可见,在冷渣管中分别设置了无翅片、直翅片、直角翅片、大弯角翅片4种结构形式;渣管壁厚为10 mm;六棱柱冷渣管的边长为200 mm,每条边上均匀布置2个翅片。冷渣管中3种翅片的结构参数如图3所示,翅片厚度均为5 mm。

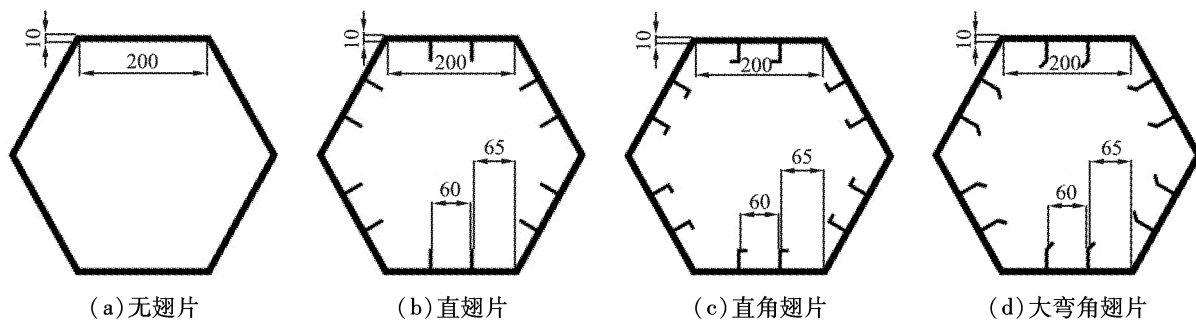


图2 冷渣管的翅片布局

Fig.2 Fin layout of cold slag tube

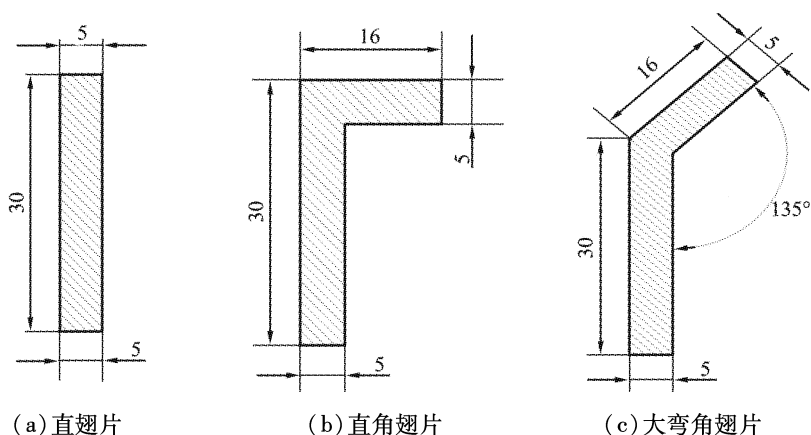


图3 翅片的结构参数

Fig.3 Structure parameters of fins

1.2 物理模型的建立

灰渣颗粒与冷渣管的材料特性参数如表1所示^[7-8],材料接触系数如表2所示^[9]。

表1 材料的特性参数

Tab.1 Characteristic parameters of materials

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	剪切模量/GPa	泊松比
灰渣颗粒	1.98	0.1	0.25
冷渣管(钢)	7.80	80.0	0.30

表2 材料接触参数

Tab.2 Contact parameters of materials

材料	静摩擦系数	动摩擦系数	恢复系数
颗粒-颗粒	0.637	0.04	0.5
颗粒-壁面	0.800	0.04	0.6

1.3 颗粒运动过程分析

灰渣颗粒运动过程示意图如图4所示。由图可见,直线KH代表冷渣管内颗粒料床表面,颗粒集中在黄色活动区和蓝色静止区,2个区域由虚拟边界曲线KPH分隔。当滚筒旋转时,静止区中的颗粒做刚体运动,从左下方H点附近上升至右上方K点附近,在此过程中,颗粒相对静止,没有发生混合过程;在灰渣颗粒与管壁的接触、碰撞作用下,上边界曲线PK附近静止区的颗粒开始进入活动区,进入颗粒混合过程,并平行于料床表面向左下方H点附近运动,这时颗粒具有较高的运动速度;在下边界曲线HP附近,颗粒脱离活动区,重新进入静止区中。周而往复,逐渐完成颗粒间的混合过程。

1.4 颗粒动力学分析

使用 Hertz Mindlin 粒子接触模型来模拟灰渣颗粒间的相互作用,其法向力和切向力都具有阻尼分量,具体描述了阻尼系数和恢复系数的相关性;切向摩擦力遵循库伦摩擦定律,滚动摩擦力通过接触恒定定向恒矩模型来实现^[10-11]。

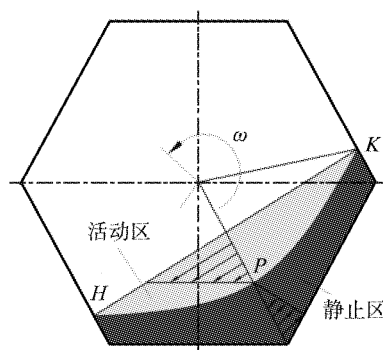


图4 灰渣颗粒运动过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of movement process of ash particles

根据牛顿运动定律来描述每个粒子的运动和受力情况。假设 i 、 j 为 2 个相互接触的颗粒, 颗粒接触模型示意图如图 5 所示。由图可知, r_i 、 r_j 分别为颗粒 i 、 j 的半径, m ; k_n 、 k_t 分别为颗粒间法向、切向弹性系数; η_n 、 η_t 分别为颗粒间法向、切向弹性阻尼系数; δ 为法向位移(δ_n)和切向位移(δ_t)的矢量和。

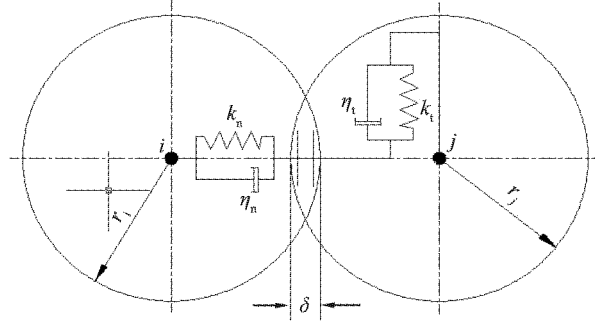


图5 颗粒接触模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of particle contact model

假设 m_i 、 m_j 分别为颗粒 i 、 j 的质量, kg; m^* 为颗粒 i 、 j 的等效质量, kg; r^* 为两接触颗粒的等效半径, m; v_i 、 v_j 分别为颗粒 i 、 j 的泊松比; E_i 、 E_j 分别为颗粒 i 、 j 的杨氏模量, GPa; G_i 、 G_j 分别为颗粒 i 、 j 的剪切模量, GPa; E^* 、 G^* 分别为颗粒与颗粒、颗粒与壁面碰撞时形成的等效杨氏模量和等效剪切模量, GPa。这些物理量之间的关系式为

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{r^*} = \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2(1-v_i)(1+v_i)}{E_i} + \frac{2(1-v_j)(1+v_j)}{E_j}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-v_i^2)}{E_i} + \frac{(1-v_j^2)}{E_j}, \quad (4)$$

$$k_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{r^* \delta_n}, \quad (5)$$

$$k_t = 8 G^* \sqrt{r^* \delta_n}. \quad (6)$$

阻尼比(β)为恢复系数(x)的函数,其关系式为

$$\beta = \frac{\ln x}{\sqrt{\ln^2 x + \pi^2}}, \quad (7)$$

则有

$$\eta_n = \sqrt{\frac{10}{3}} \beta \sqrt{\frac{3}{2} k_n m^*} \geq 0, \quad (8)$$

$$\eta_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{k_t m^*} \geq 0. \quad (9)$$

颗粒间法向阻力($F_{i,j}^n$)、切向阻力($F_{i,j}^t$)的计算表达式分别为

$$F_{i,j}^n = k_n \delta_n - \eta_n V_{i,j}^n, \quad (10)$$

$$F_{i,j}^t = k_t \delta_t - \eta_t V_{i,j}^t, \quad (11)$$

式中 $V_{i,j}^n$ 、 $V_{i,j}^t$ 分别为颗粒 i 、 j 间的法向、切向速度, m/s。

单个颗粒的平移和旋转运动可描述为

$$m_i \frac{dV_i}{dt} = \sum_{j=1}^n (F_{i,j}^n + F_{i,j}^t) + m_i g, \quad (12)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^n (M_{i,j}^n + M_{i,j}^t), \quad (13)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; ω_i 为颗粒 i 的角速度, rad/s ; V_i 为颗粒 i 的线速度, m/s ; I_i 为颗粒 i 所受力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; $M_{i,j}^n$ 、 $M_{i,j}^t$ 分别为颗粒 i 、 j 间的法向、径向扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

1.5 混合效应评价指标

在离散元方法模拟计算过程中,系统可记录所有颗粒的运动过程和运动参数,为评价方法的实现提供了可行性。评价不同时刻滚筒内灰渣颗粒体系的混合情况的混合指数(M)^[12]的计算公式为

$$M = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12} + C_{22}}, \quad (14)$$

式中: 2 种类型颗粒间的有效接触次数为 C_{12} ; 相同类型颗粒间的接触为无效接触,接触次数分别记为 C_{11} 、 C_{22} 。 M 值越大,可混合程度越高,混合越均匀。

另外,滚筒内颗粒运动均具有明显的周期性特征^[13]。基于拉格朗日方法^[14],对单个颗粒 i 的运动轨迹、粒子回转半径(R_i)、线速度(V_i)等运动特征进行分析,来进一步说明单个粒子的循环运动特性。其中, R_i 为粒子距冷渣管回转中心的瞬时距离, V_i 为运动轨迹上的线速度,可用颜色云图表征其大小。因此,本文中采用 M 和单个粒子运动轨迹分析 2 种指标评价混合效应。

2 实验验证

冷渣管颗粒混合效应实验验证装置如图 6 所示。由图可见,图 6(a)—6(d) 分别为单根冷渣管外形以及无翅片、直翅片、大弯角翅片 3 种结构形式的冷渣管。通过对粒径约为 4 mm 的白色灰渣颗粒进行混合实验,采用示踪颗粒观察颗粒的运动轨迹,验证示踪颗粒运动轨迹的观察结果与模拟计算结果是否一致,验证模拟分析冷渣管结构对混合效应影响的有效性。由于滚筒转速一般较低,采用带传动即可满足实验需要。

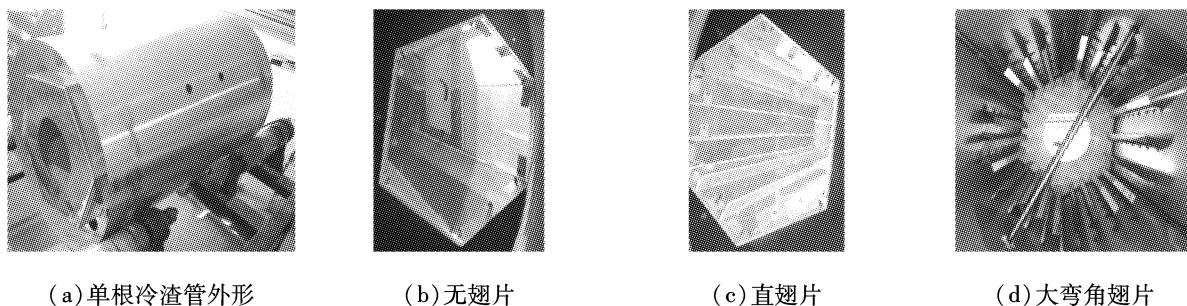


图 6 冷渣管颗粒混合效应实验验证装置

Fig. 6 Experimental verification device for particle mixing effect of cold slag tube

3 结果与讨论

3.1 翅片结构对混合指数的影响

不同翅片结构时颗粒混合指数随混合时间变化的曲线如图 7 所示。由图可以看出,无翅片与直翅

片、直角翅片与大弯角翅片的混合指数曲线几乎重合,即4种冷渣管的混合指数曲线主要表现为2种变化趋势。灰渣颗粒的混合运动过程分为快速混合阶段和稳定混合阶段,在快速混合阶段,4种翅片结构时混合指数均呈线性增长,但增长的幅度有所不同,直角翅片与大弯角翅片的混合指数增长更剧烈,且出现下降的波动较小;20 s时无翅片、直翅片、直角翅片、大弯角翅片的 M 值分别为0.38、0.41、0.43、0.46;4种翅片颗粒体系达到稳定混合阶段的时间不同,其中结构为直角翅片和大弯角翅片时在30 s后颗粒体系达到稳定混合阶段,无翅片和结构为直翅片时需60 s;达到稳定混合阶段后,4种混合指数曲线均在小范围内上下波动, M 值总体稳定在0.45~0.47。综上,直角翅片和大弯角翅片的混合指数高,达到稳定混合时间短。

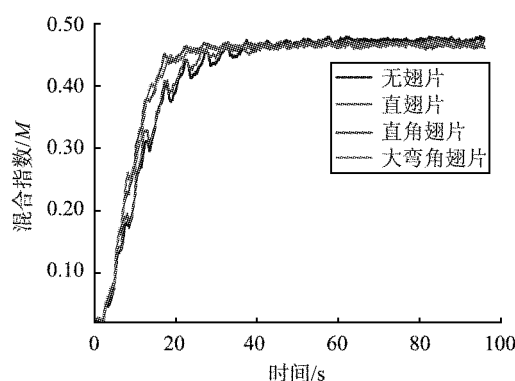


图7 不同翅片结构时颗粒混合指数随混合时间变化的曲线

Fig.7 Curves of particle mixing index with mixing time under different fin structures

3.2 单个灰渣颗粒的运动轨迹分析

采用直角翅片和大弯角翅片结构时冷渣管内的单个取样粒子的运动轨迹如图8所示,图中点A、B、C及D、E、F分别表示某粒子在2种不同结构、不同时刻的不同位置。

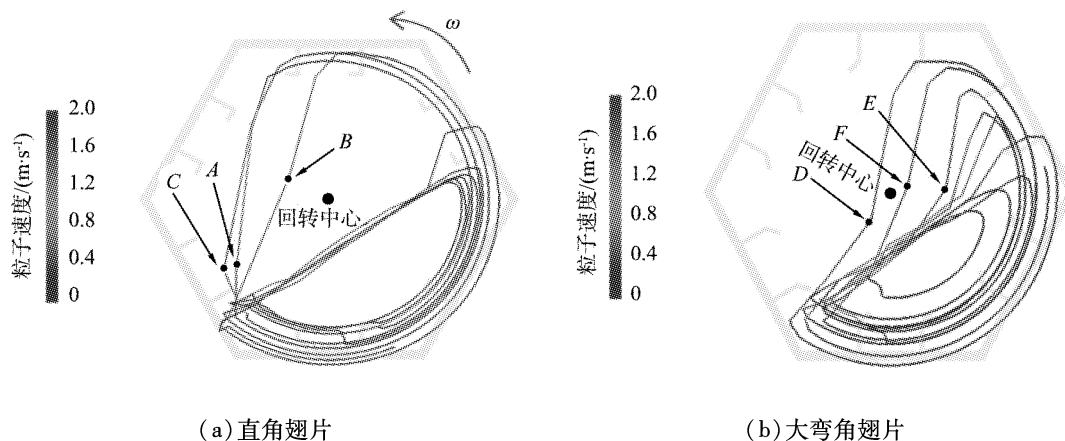


图8 2种不同结构翅片时冷渣管内的单个取样粒子的运动轨迹

Fig.8 Trajectory of a single sample particle in cold slag tube under two kinds of fit structures

由图8可见,逃逸出冷渣管内颗粒料床表面的粒子可增加颗粒间的有效接触数,相应地 M 值会增加,更有利于提高混合效应。这2种翅片在颗粒提升高度和提升次数方面有所不同,直角翅片的颗粒提升高度较大,颗粒能与壁面产生较长时间的接触,在颗粒料床表面外能做更长距离的转移,即颗粒从料床一端跨过回转中心掉落到另一端,以更大速度落回料床,对料床内颗粒形成能量冲击,造成料床局部范围内颗粒的快速混合;大弯角翅片的颗粒提升次数较多,虽然被提升的高度比直角翅片的低,每次被提升时在料床表面外与壁面的接触也更短,颗粒被翅片转移的距离也更小,但相同时间内

直角翅片的颗粒被提升4次时,大弯角翅片的可提升6次,因此大弯角翅片的单个颗粒和翅片接触的累积时间有可能更长。

不同翅片结构时取样粒子回转半径和线速度随时间变化的曲线如图9所示。由图可见,无翅片时取样粒子的最大粒子线速度($V_{\max}$)为0.64 m/s,直翅片的 $V_{\max}$ 提高了79.6%,直角翅片的 $V_{\max}$ 提高了232.81%,大弯角翅片的 $V_{\max}$ 提高了179.68%。这是由于直角翅片弯角更小,在较高位置时仍对颗粒有较好的包裹性,使颗粒能运动到较高的位置,这也使得单个直角翅片所能携带的颗粒量更少。图中点A、B、C、D、E、F分别表示某粒子在不同时刻的最大线速度,直角翅片和大弯角翅片冷渣管内颗粒运动轨迹变化幅度较大,直角翅片时颗粒线速度为0.49~2.1 m/s,最小回转半径为49.4~116.6 mm;大弯角翅片时颗粒线速度为0.39~1.7 m/s,最小回转半径为23.6~61.9 mm。不同翅片时取样粒子回转半径和线速度随时间呈脉冲样波动,但不同翅片的脉冲段波动幅度差异较大,直角翅片和大弯角翅片表现尤为明显。颗粒的线速度越大,动能也就越大,高动能颗粒的冲击作用会增强颗粒活动区的混合效应,因此,就整体颗粒提升效应而言,大弯角翅片结构可以更稳定和均匀地连续提升颗粒。

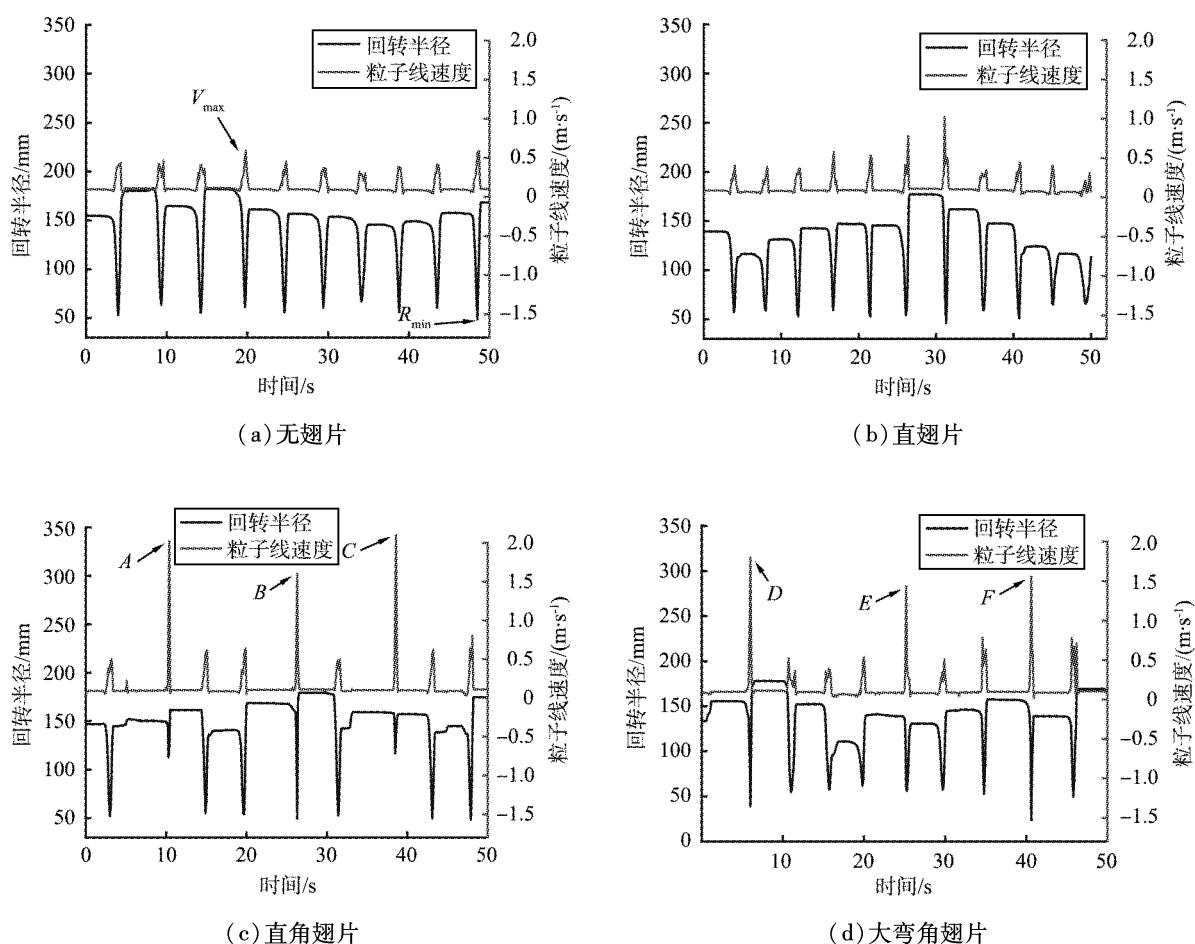


图9 不同翅片结构时取样粒子回转半径和线速度随时间变化的曲线

Fig.9 Curves of gyration radius and linear velocity of sampled particles with different fins as a function of time

3.3 灰渣颗粒的混合状态

在混合时间分别为10、20、40 s时,不同翅片结构的灰渣颗粒混合状态如图10所示。由图可见,随着混合时间的增大,黑色和黄色颗粒的混合效应越来越好;混合时间为40 s时,红圈区域内为颗粒在管壁棱角处的混合状态,黑色颗粒的占有比例按无翅片、直翅片、直角翅片、大弯角翅片顺序依次增大,即局部混合效应逐渐增强,说明大弯角翅片所携带的颗粒量最多,在相同时间内,大弯角翅片结构下颗粒体系的混合效应最强。

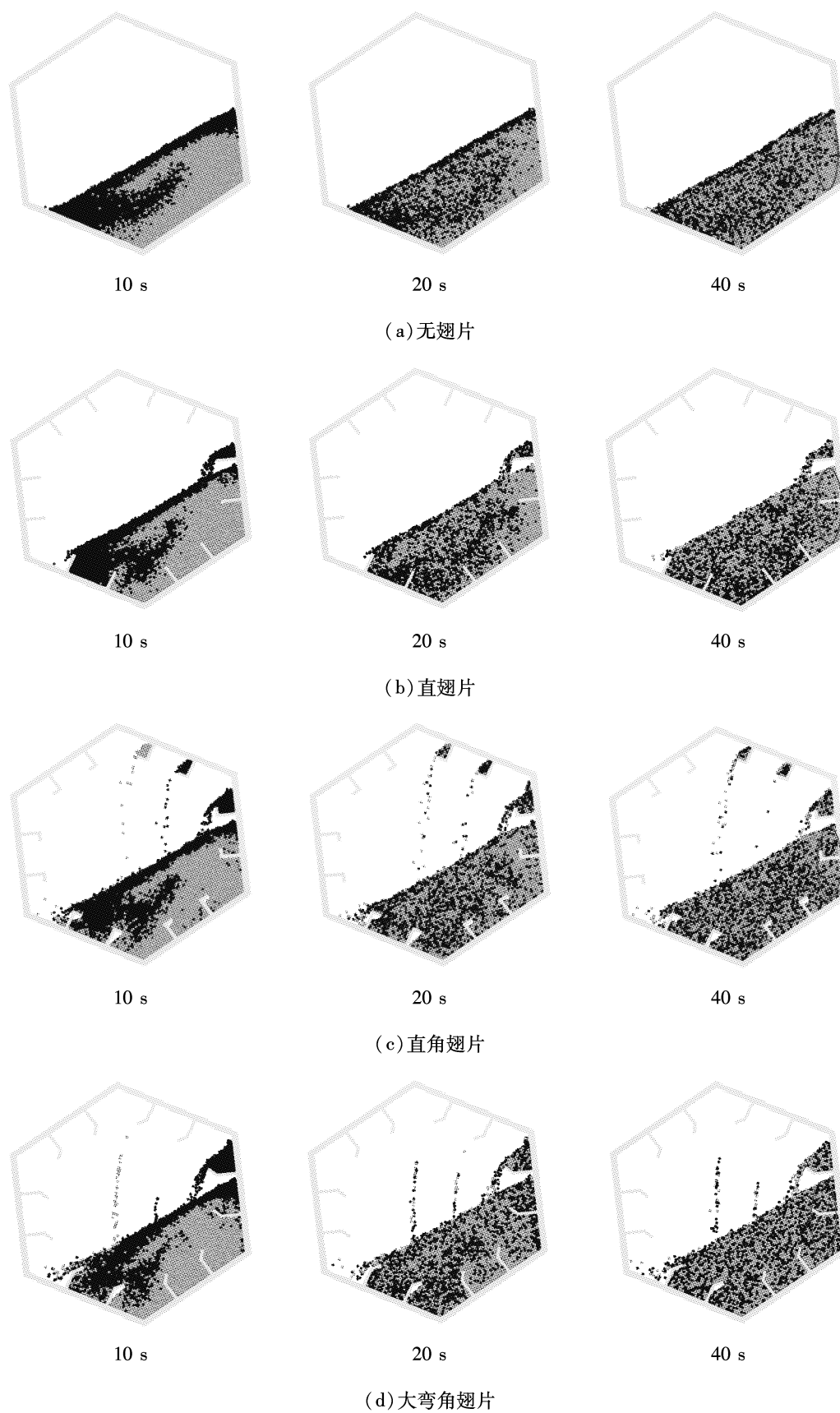


图10 不同翅片结构时的灰渣颗粒混合状态

Fig. 10 Mixed state of ash particles with different fin structures

4 结论

运用 EDEM 软件,对灰渣颗粒在 CFB 锅炉多管组合式滚筒内六棱柱型冷渣管的混合效应进行了分析,研究不同翅片结构对冷渣管内灰渣颗粒混合效应的影响规律,并经过实验验证。

1)翅片可以缩短颗粒体系达到稳定时的混合时间,提高颗粒间的混合效率。在快速混合阶段,无翅片及3种翅片结构的混合指数均呈线性增长。混合时间为20 s时,无翅片、直翅片、直角翅片、大弯角翅片的 M 值分别为0.38、0.41、0.43、0.46;达到稳定混合阶段后,4种翅片状态的 M 值总体稳定在0.45~0.47;直角翅片和大弯角翅片时混合指数高,达到稳定状态的混合时间仅为30 s,比无翅片和直翅片时缩短了50%。

2)直角翅片和大弯角翅片冷渣管内颗粒运动轨迹变化幅度较大,直角翅片时颗粒线速度为0.49~2.1 m/s,最小回转半径为49.4~116.6 mm;大弯角翅片时颗粒线速度为0.39~1.7 m/s,最小回转半径为23.6~61.9 mm。就整体颗粒提升效应而言,大弯角翅片结构可以更稳定和均匀地连续提升颗粒。

3)无翅片、直翅片、直角翅片、大弯角翅片的颗粒混合效应逐渐增强,在相同时间内,大弯角翅片所携带的颗粒量最多,大弯角翅片结构下颗粒体系的混合效应最强。

综上,多管组合式滚筒内六棱柱型冷渣器采用大弯角翅片结构时,灰渣颗粒的混合效应最佳。

参考文献(References):

- [1]程乐鸣,许霖杰,夏云飞,等. 600MW 超临界循环流化床锅炉关键问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5520-5532.
- [2]张立栋,韦庆文,王擎. 回转干馏炉内挡板形状对二元颗粒运动混合的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(8): 1542-1550.
- [3]侯志超. 螺旋混合机中颗粒流动与混合特性的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [4]孟京源. 不同回转装置内颗粒系统运动规律和混合的研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2019.
- [5]李建. 油页岩固体热载体干馏炉内颗粒传热过程模拟研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2018.
- [6]XIAO X W, TAN Y Q, ZHANG H, et al. Experimental and DEM studies on the particle mixing performance in rotating drums: effect of area ratio[J]. Powder Technology, 2017, 314: 182-194.
- [7]XIAO H R, ZHANG M, ZHANG Y, et al. Design and operation of the double-cylinder rotary ash cooler for large CFB boilers[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 1359-4311.
- [8]杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 555-558.
- [9]王擎,李建,王智超,等. 回转干馏炉内颗粒间传热特性的数值模拟[J]. 化工学报, 2017, 68(11): 4137-4146.
- [10]MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact[J]. Journal of Applied Mechanics, 1949, 16: 259-268.
- [11]COOK B K, JENSEN R P. Discrete element methods: numerical modeling of discontinua[M]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2002: 403-408.
- [12]GUPTA A, ANDRÉ K, SOETEMAN B, et al. Discrete element study mixing in an industrial sized mixer[J]. Nürnberg Messe GmbH, 2010, 90(10): 101-109.
- [13]张紫薇,葛良,桂南,等. 转速对三维滚筒内颗粒混合特性的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(2): 218-225.
- [14]AURICCHIO F, BOFFI D, CASTLDI L, et al. On a fictitious domain method with distributed Lagrange multiplier for interface problems[J]. Applied Numerical Mathematics Transactions of Imacs, 2015, 95: 36-50.

(责任编辑:刘鲁宁)