

# 滚筒冷渣机中的颗粒径向扩散运动研究

吕春旺, 谭培来, 刘柏谦, 朱晓龙  
( 北京科技大学 机械工程学院 北京 100083)

**摘 要:** 在滚筒冷渣机灰渣回转冷却运动中引入扩散系数的概念并探讨了颗粒物料扩散的规律及径向扩散对传热的影响。采用 DEM ( 离散元法) 建立颗粒运动模型, 对扩散运动进行研究得出以下结论: 颗粒在主动层滑落过程中相互碰撞、相互作用导致进入被动层后相对位置的重新组合是径向扩散的根本原因; 不同料层区域颗粒的径向扩散强度不同; 颗粒扩散可以加速料床内部传热, 扩散系数大的部位内部温差小, 扩散系数小的地方内部温差较大。

**关 键 词:** 径向扩散; 颗粒运动; 滚筒冷渣机; 离散单元法  
中图分类号: TK284. 6 文献标识码: A

## 引 言

滚筒冷渣机是循环流化床锅炉灰渣余热回收的辅机, 冷渣机的有效利用不仅可以提高锅炉效率, 更能改善锅炉的操作环境并提高锅炉运行的安全性<sup>[1-4]</sup>。当前对滚筒冷渣机内部灰渣的运动特性和传热特性的研究甚少<sup>[5]</sup>。滚筒冷渣机中传热的动力是料床内部及料床与筒壁间的传热温差, 而由于贴近壁面处的灰渣颗粒冷却的较快, 核心区域处的灰渣颗粒冷却较慢, 因而料床内部温差成为阻碍传热的主要因素。颗粒的径向运动增强了冷热颗粒的混合, 是决定料层内部温差变化的重要原因, 所以滚筒中颗粒的径向运动对料层整体的传热有着重要影响。

以往对回转设备包括滚筒冷渣机的研究大部分都侧重于颗粒的混合现象。例如混合器, 干馏炉, 搅拌机, 滚筒发酵机等<sup>[6-9]</sup>, 主要探索如何将容器中的物质混合均匀或者能更迅速的发生化学反应以达到各种各样的目的, 而冷渣机侧重于如何有效地将灰渣的热量从内部传递至冷却介质。混合的强弱并不能真正意义上阐明颗粒的微观运动, 也不能更深入的揭示颗粒运动与传热的内在联系。以上混合的概念常常忽略了时间的因素, 而扩散系数考虑了这一影响, 能够描述颗粒间混合的剧烈程度。

鉴于此, 本研究对滚筒冷渣机中颗粒径向扩散运动进行了深入探究, 在对其内部颗粒运动的研究中首次引入了颗粒扩散系数这一衡量料层内部颗粒无规则运动强弱的概念, 采用 DEM( 离散元方法) 对滚筒内颗粒流动过程进行数值仿真与分析, 探究颗粒在滚筒料床不同分区内的运动规律及扩散在径向上的分布。

## 1 离散元模型建立

### 1.1 颗粒接触模型

离散元方法把研究对象看作由一系列离散的独立运动的颗粒所组成, 单元本身具有一定的特性。单元的尺寸是微观的, 只与其相邻的单元作用, 其运动受经典运动方程控制。整个研究对象的变形和演化由各单元的运动和相互位置来描述。

由于对灰渣运动的模拟不考虑颗粒内聚力, 也不考虑颗粒接触后的热量传递, 只是从物料中单个颗粒的运动轨迹中寻找颗粒扩散的原因。因此本研究使用经典的无滑移接触模型<sup>[10]</sup>, 颗粒的接触基于软球模型, 把颗粒-颗粒以及颗粒-壁面的接触过程简化为弹簧振子阻尼振动。颗粒-颗粒以及颗粒-壁面间接触力分为法向接触力和切向接触力, 每个颗粒只能在法向力和切向力作用下与周边颗粒或边壁接触。

### 1.2 颗粒运动方程

由动力学理论可知, 颗粒  $i$  在运动过程中主要受两种力作用, 即自身重力  $m_i g$  和碰撞接触力( 颗粒-颗粒或颗粒-壁面)<sup>[11]</sup>。碰撞接触力分为法向接触力  $F_{n_{ij}}$  和切向接触力  $F_{\tau_{ij}}$ , 则每个颗粒的平动运动方程为:

$$m_i \frac{dV_i}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^{n_j} (F_{n_{ij}} + F_{\tau_{ij}}) \quad (1)$$

式中:  $m$ —颗粒质量, kg;  $V$ —运动速度, m/s;  $t$ —运动

收稿日期: 2014 - 02 - 24

作者简介: 吕春旺( 1989 - ), 男, 河南驻马店人, 北京科技大学硕士研究生。

时间  $s$ ;  $n_i$ —与颗粒  $i$  接触的颗粒总数;  $g$ —重力加速度  $m^2/s$ ;  $F_{n_{ij}}$ —法向接触力  $N$ ;  $F_{t_{ij}}$ —切向接触力  $N$ 。

此外 颗粒还受到两种力矩的作用 即切向力造成的力矩  $T_{t_{ij}}$  和滚动摩擦力矩  $T_{r_{ij}}$  则每个颗粒的旋转运动方程为:

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_j} (T_{t_{ij}} + T_{r_{ij}}) \quad (2)$$

式中:  $I$ —转动惯量  $kg \cdot m^2$ ;  $\omega$ —颗粒旋转角速度  $rad/s$ ;  $t$ —运动时间  $s$ ;  $g$ —重力加速度  $m^2/s$ ;  $T_{t_{ij}}$ —切向力矩  $N \cdot m$ ;  $T_{r_{ij}}$ —滚动摩擦力矩  $N \cdot m$ 。

在力和力矩的作用下 颗粒的速度、旋转速度及位置变化可由下列公式表示:

$$\omega_{i,t} = \omega_{i,t-1} + \frac{d\omega_{i,t}}{dt} \Delta t \quad (3)$$

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + \frac{dV_{i,t}}{dt} \Delta t \quad (4)$$

$$(xyz)_{i,t} = (xyz)_{i,t-1} + V_{i,t} \Delta t \quad (5)$$

式中:  $\omega$ —颗粒旋转角速度  $rad/s$ ;  $V$ —运动速度  $m/s$ ;  $t$ —运动时间  $s$ ;  $\Delta t$ —时间间隔  $s$ ;  $x$ 、 $y$ 、 $z$ —空间坐标。

### 1.3 模型参数的设定

对滚筒进行三维建模 将滚筒模型作为壁面导入离散元模型中。对模拟参数进行设定 如表 1 所示 时间步长为 0.000 114。

表 1 模拟参数设定

Tab.1 Simulation parameter setting

模拟参数	灰渣颗粒	滚筒材料
泊松比	0.25	0.25
密度/ $kg \cdot m^{-3}$	1 988	7 500
恢复系数	0.9	0.9
静摩擦系数	0.1	0.637
滚动摩擦系数	0.04	0.04
形状	球型	筒形
厚度/mm		10
直径/mm	1.5	200

在软球模型中 计算时的时间步长  $\Delta t$  一般要小于一个临界时间步长  $\Delta t_{cr}$  通常取安全的临界时间步长  $\Delta t_{cr}$  为弹性碰撞周期的十分之一:

$$\Delta t_{cr} = 0.2 \sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2} \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (6)$$

式中:  $m$  和  $k$ —颗粒系统的有效质量和刚度  $\mu g$ 。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 颗粒在料层中的运动

根据滚筒转动速度的大小 可将滚筒运动情形分为六种状态 如图 1 从前至后 转动速度由小到大分别为滑移、滑动、滚落、泻落、抛落、离心<sup>[14]</sup>。一般工业运行中 在滚筒冷渣机所处的正常转速下 其内部的灰渣运动主要为滚落状态。

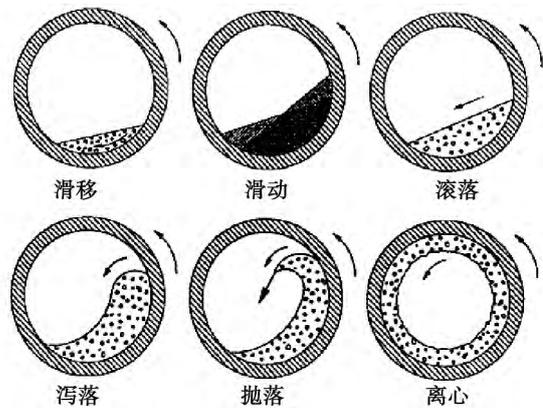


图 1 物料在滚筒横截面上的 6 种运动形态

Fig.1 Six movement morphologies of the material in the cross section of the roller

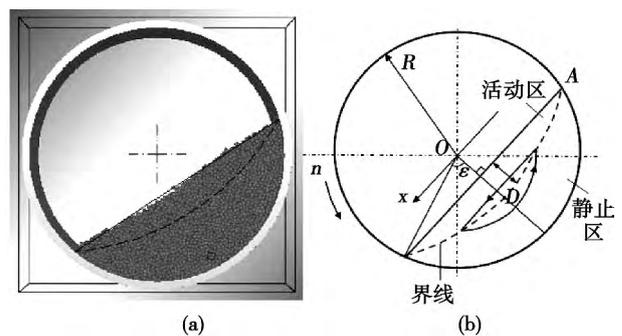


图 2 料层区域划分

Fig.2 Material bed regional division

图 2 中 (a) 为滚落状态某时刻料床的横截面, (b) 为料床区域划分示意图。从图片上可以看到在此状态下料层分为两个截然不同的区域: 位于上方的滑动区域 称为主动层(活动区) 由靠近料层表面向下运动的颗粒组成; 位于下方随滚筒做圆周运动的颗粒区域称为被动层(静止区) 其颗粒间的相对运动速率几乎为零。另外 在主动层与被动层交界面(图 2 中的虚线界线) 中心附近区域 料层中的颗粒运动围绕其中心旋转 这个区域称之为核心区,

物料的运动核心为其中心。

在滚筒中,颗粒围绕核心运动,在被动层中颗粒绕筒体几何中心随筒体向上做圆周运动,在主动层中颗粒斜向滑落直至进入被动层。颗粒由被动层提升至主动层,斜向滑落到再次进入被动层,这一过程为颗粒运动的一个周期。

### 2.2 径向扩散的描述

颗粒扩散的概念以分子扩散的相关理论为基础,是对料床物料中颗粒的无规则运动及碰撞产生扩散现象的描述。对滚筒冷渣机中颗粒流动及传热具有较大影响的颗粒扩散,主要为颗粒的轴向扩散和径向扩散:轴向扩散描述颗粒沿滚筒轴线方向上的扩散现象;径向扩散描述颗粒在垂直于滚筒轴向的横截面上,沿滚筒半径方向的扩散现象。由于滚筒冷渣机主要通过水冷壁面对灰渣进行冷却进而实现余热回收,灰渣料层内的温度梯度在径向上最大,因而径向扩散对传热影响较大。本文主要研究颗粒在横截面上的运动,对扩散现象的研究只针对径向扩散。

Savage 和 Dai 以及 Campbell 曾经采用计算机模拟对颗粒流中的扩散行为进行研究<sup>[13-15]</sup>,借鉴了 Einstein 用来分析液体中悬浮颗粒布朗运动的方法<sup>[16]</sup>,并将颗粒剪切流中的自扩散系数的定义如下:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \langle \Delta x_i \Delta x_j \rangle = 2D_{ij}t \quad (7)$$

式中:  $D_{ij}$ —自扩散系数,  $m^2/s$ ;  $\Delta x_i$ — $i$  方向上的运动位移  $m$ ;  $\Delta x_j$ — $j$  方向上的运动位移  $m$ 。

借鉴自扩散系数的定义对滚筒料床中颗粒的扩散现象进行研究。对于滚筒径向上颗粒的扩散现象,引入滚筒料床中颗粒的径向扩散系数  $D_n$ ,它代表颗粒在横截面上沿半径方向扩散的强弱。滚筒内单颗粒的径向扩散系数  $D_n$ 可以采用以下公式<sup>[18]</sup>:

$$D_n = \frac{(\Delta r_n)^2}{2\Delta t} \quad (8)$$

式中:  $D_n$ —单颗粒的径向扩散系数,  $m^2/s$ ;  $\Delta r_n$ —颗粒径向运动位移,  $m$ ;  $\Delta t$ —滚筒旋转时间,  $s$ 。

运用 DEM(离散元法)可以计算出旋转滚筒中每个颗粒的速度、位移及颗粒间的相互作用等运动相关物理量。通过对计算后的数据进行后处理,可以得出滚筒运行中每个颗粒的位移随时间的变化。根据单个颗粒运动的时间-位置坐标,可以计算出单个颗粒的径向扩散系数。

在所取区域内,颗粒的径向扩散系数为该区域所有颗粒径向扩散系数的平均值:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(\Delta r_n)^2}{2\Delta t} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

式中:  $D$ —径向扩散系数,  $m^2/s$ ;  $D_n$ —单个颗粒径向扩散系数,  $m^2/s$ ;  $N$ —计算区域颗粒数目,个;

如前所述,滚筒冷渣机中传热的动力是灰渣与壁面之间的传热温差。贴近壁面处的灰渣冷却较快,核心区域处的灰渣冷却较慢,料层内部的温差对壁面与颗粒间的传热是不利的,即当物料的扩散程度越大时,壁面与近壁层颗粒的温差越大,越有利于传热。料层内颗粒的扩散促进了质量的扩散,对传质的促进进而强化了传热。由于滚筒料层内部的温差主要为径向分布,因而滚筒内颗粒径向扩散的研究对滚筒余热回收具有重要意义。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 颗粒在主动层及被动层中的扩散

在滚落运动状态下的滚筒料层中,颗粒运动的每个循环都要经过主动层与被动层;在主动层和被动层中,颗粒的运动方式是完全不同的,其径向扩散规律亦不同。通过数值模拟来分析颗粒在主动层和被动层中的扩散现象。如图 3 为滚筒中滚落物料的模拟,图中通过颜色的深浅可看出不同区域颗粒的速度分布,主动层的颗粒速度最大,被动层颗粒越靠近壁面速度越大。由于滚筒冷渣机壁面布满了用来冷却高温灰渣的水冷管,所以滚筒边壁并不是光滑的壁面,为了更真实准确地模拟颗粒运动,本研究在建模滚筒边壁处也加入水冷管如图 4 所示,使得壁面凹凸不平。

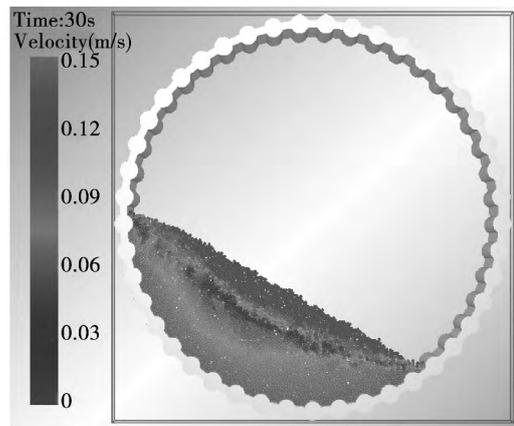


图 3 滚筒中滚落物料的模拟

Fig. 3 Simulation of the material rolled and fell down from the roller

设置颗粒直径为 1.5 mm、滚筒转速为 10 r/min、填充率为 27% ( $m = 0.0253 \text{ kg}$ ) 在滚筒旋转一周(6 s) 过程中对颗粒的径向位置进行追踪; 如图 4 所示 横轴为颗粒运动时间 纵轴为颗粒距滚筒几何中心的距离, 设其为颗粒的径向位置。其中图 (a) 为单个颗粒的径向位置随时间的变化曲线, 图 (b) 为不同区域 4 个颗粒的径向位置变化曲线。

对比图中不同颗粒一周期内的径向位置变化可以看出: 颗粒在被动层中停留时间较长, 其径向位置几乎不变; 在停留时间较短的主动层, 颗粒所处径向

位置先变小后变大, 这主要是由于颗粒在主动层中不再随滚筒做圆周运动, 而是沿着料层斜向滑落。由于颗粒在主动层滑落过程中颗粒相互碰撞, 颗粒间存在相对运动, 因而在进入下一个循环的被动层时, 颗粒所处径向位置会发生变化。

因此式(8) 中径向位置变化 ( $\Delta r_n$ ) 是由主动层中颗粒相互作用、相互碰撞, 在进入被动层后相对位置重新组合所引起的。颗粒在被动层中滚筒旋转一周前后在被动层相对径向位置变化的大小直接反映了颗粒径向扩散的强弱。

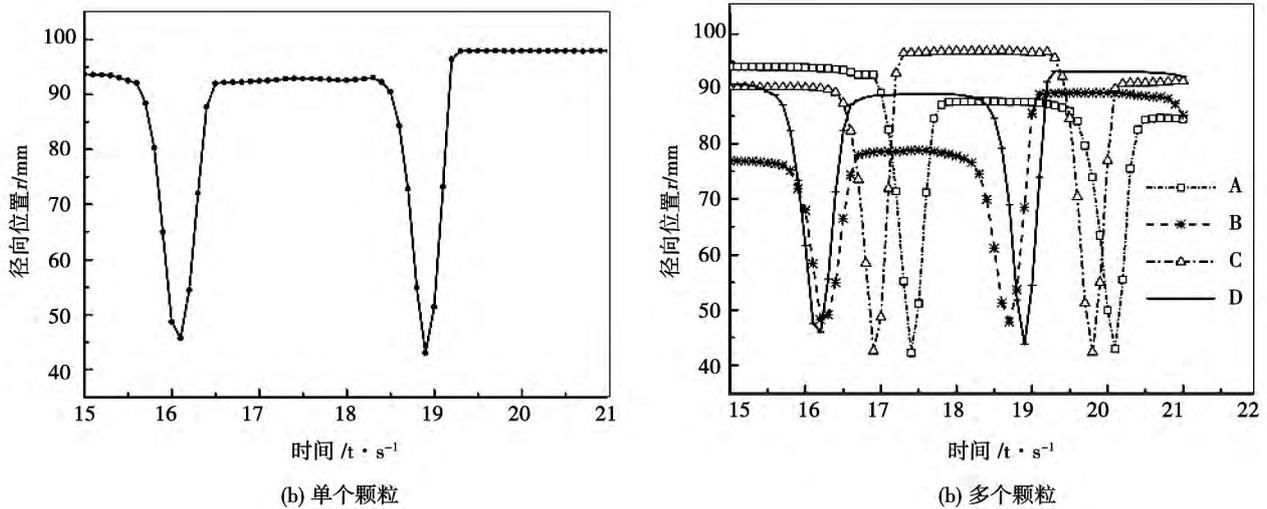


图 4 颗粒随时间变化径向位置追踪

Fig. 4 Tracking of the radial location of particles with time

### 3.2 颗粒在料层不同区域中的扩散

料层中不同位置的颗粒绕核心运动, 靠近边壁的颗粒易于被壁面冷却, 而料层内部颗粒需通过与其相靠近的外层颗粒进行冷却, 越靠近核心区, 颗粒的温度越高。对于料层内部的传热来说, 颗粒径向扩散越强, 冷热颗粒之间相互接触的概率及频率越大, 则冷热颗粒间的相互混合越剧烈, 对传热的促进作用越强。基于此, 研究不同区域颗粒径向扩散强度的分布就显得非常重要。

数值模拟过程中如图 5 所示, 当料层上表面角度趋于稳定时, 随着滚筒模型的旋转(转速不变), 颗粒群位置随时间的变化。取料层中核心区域、中部区域、近壁面区域的部分相邻颗粒作为 3 个示踪颗粒群, 用来观察随着滚筒的旋转不同颗粒群内颗粒相对位置的变化。

从图 5 可以看出, 每个颗粒群内的颗粒都有相对位置变化, 可以分为径向和周向上的变化, 分别代

表了颗粒在径向和周向的扩散。

对径向上颗粒的相对位置变化进行观察, 可以发现: (1) 3 个区域的颗粒群运动周期不同, 越接近壁面的颗粒群旋转周期越长。如图 5 所示, 随着滚筒旋转, 中部区域的颗粒群在 1.2 s 时刻已基本旋转一周; 而近壁面区域的颗粒群在 1.5 s 时刻才基本旋转一周; (2) 滚筒旋转一段时间后, 核心区颗粒群内的大部分颗粒仍处于核心区域地带, 这些颗粒径向扩散并不明显; 而中部区域颗粒在运动相同时间后, 聚集的颗粒在径向上发生明显的扩散; 另外近壁面处的颗粒在相同时间后径向上的位移也存在变化, 但并没有中部区域颗粒群的扩散那么明显。

按照被动层离壁面的距离及颗粒的运动规律, 将主动层和被动层分为若干个不同的半径带如图 6 所示, 然后在被动层中分层分别提取颗粒在一定时间间隔(本研究为滚筒旋转一周) 起始及结束时的坐标, 由式(8) 及式(9) 计算不同半径带中颗粒群的

扩散系数 通过比较扩散系数的大小 来体现料层内 部各个区域扩散的强弱。

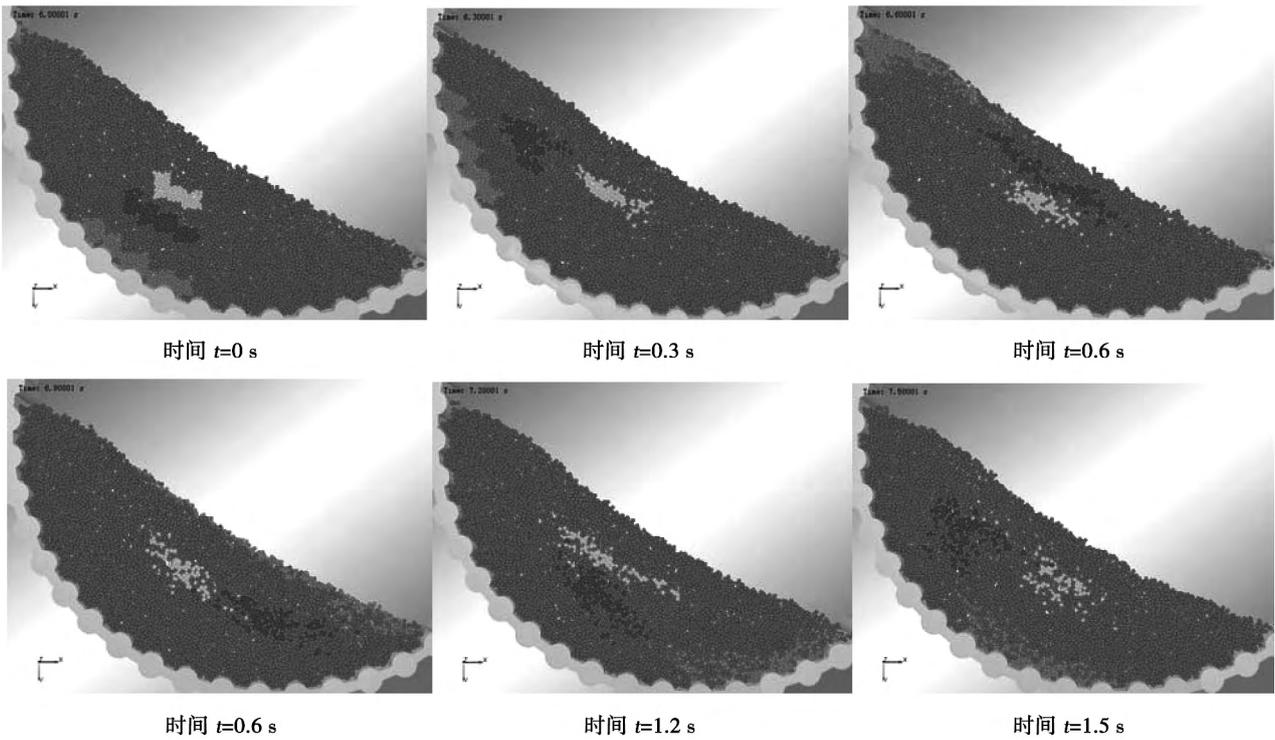


图 5 不同区域的颗粒随时间的位置变化

Fig. 5 Changes of the location of particles in various regions with time

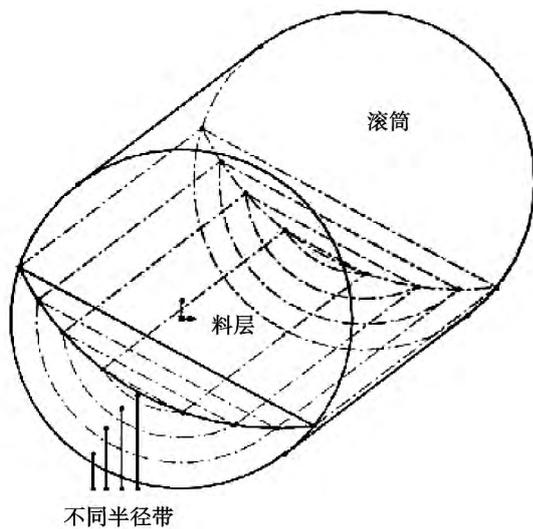


图 6 料层不同半径带的划分

Fig. 6 Radius band division of the material bed

图 7 为粒径 1.5 mm 的颗粒 在填充率为 27% ( $m = 0.0253 \text{ kg}$ ) 转速为 2、4、6 和 10 r/min 情况下 不同半径带内颗粒的扩散系数的变化。图中横轴  $r/R$  为半径带被动区中心线距滚筒圆心的距离与滚筒几何半径之比 代表了颗粒所处半径带的位置，

纵轴是此半径带下颗粒的扩散系数。

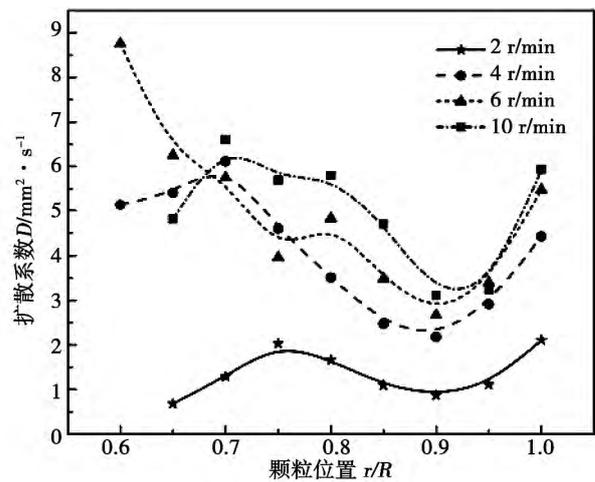


图 7 不同半径带中颗粒的扩散系数

Fig. 7 Diffusion coefficient of particles in various radius bands

观察图 7 4 种转速下扩散系数的变化趋势可以看出 从核心区半径带至靠近壁面的半径带的颗粒，扩散系数几乎都呈现先短暂上升后开始下降的趋势 (2、4 和 10 r/min) 此外 每种转速在近壁面处 ( $r/R$

为 0.9 - 1.0 处), 扩散系数都会出现一个突然的增加。

对上述结果进行分析, 考虑影响扩散系数变化趋势的因素有:

(1) 越靠近壁面的半径带, 在主动层颗粒的速度及单周期在主动层中的位移越大。颗粒速度大, 其无规则运动导致的扩散应该越强;

(2) 越靠近核心区的颗粒旋转周期越短, 一定时间内其经历主动层的次数就越多, 另外越靠近核心区, 颗粒的速度越小。扩散主要发生在主动层, 颗粒在主动层与被动层停留时间的分配及颗粒在主动层速度的大小, 是影响核心区至近壁面区域扩散系数的主要原因;

(3) 对于靠近边壁的颗粒, 在主动层中主要在料层表面运动, 缺少上部颗粒对表面颗粒运动的约束, 因而导致近壁面半径带颗粒扩散系数的增大; 壁面的凹凸不平的因素会导致近壁面半径带颗粒扩散系数的进一步增大;

(4) 核心区位置的不稳定会影响核心区颗粒扩散系数的大小。

对图 7 中的结果进行综合分析: (1) 因为核心区位置不稳定, 扩散系数也不是非常稳定, 但随着核心区往外, 颗粒的速度逐渐增大, 扩散系数会逐渐增大; (2) 从核心区到料层的中部区域, 当扩散系数增大到一定值后, 虽然颗粒在主动层的速度仍然在增加, 但其转动周期越来越长, 颗粒在相对静止的被动层停留时间也越长, 被动层与主动层停留时间的分配也是影响扩散系数的一个主要因素, 此后再往外的区域, 扩散系数开始下降; (3) 壁面处会有一个突然增强, 这是因为在建模滚筒中, 壁面处是凹凸不平的模式水冷壁, 壁面效应导致了颗粒正常轨迹运动的一个改变, 同时主动层表面一定深度颗粒的低约束也是扩散系数增大的原因之一。

### 3.3 径向扩散与料床内部传热温差的关系

通过在实验滚筒内部径向上布置热电偶来分析滚筒内部的温度分布如图 8 所示。实验滚筒为内径 200 mm, 长 80 mm 的钢质圆筒, 由调速电机带动并采用恒温水喷淋冷却, 热电偶汇集至数据采集模块并将得到的数据输入计算机中。实验用电炉加热灰渣至 950 °C 后倾倒入至滚筒中, 待料层内部温度稳定后进行数据采集。

采取转速为 8 r/min, 填充率 30%, 宽筛分灰渣为例, 对料床内部温差进行分析。图 8 为料床内部分层示意图。图 9 为料床内部层与层之间的温差随

时间的变化曲线, 图 10 为料床内的平均温差分布曲线。

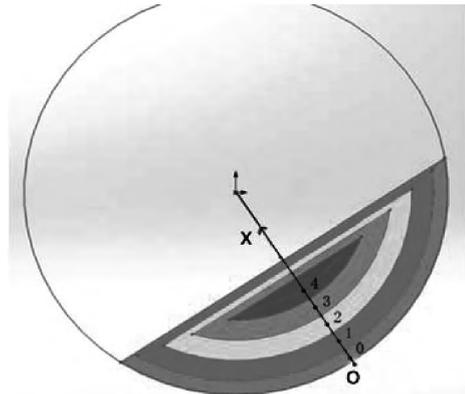


图 8 料床分层示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the stratification of the material bed

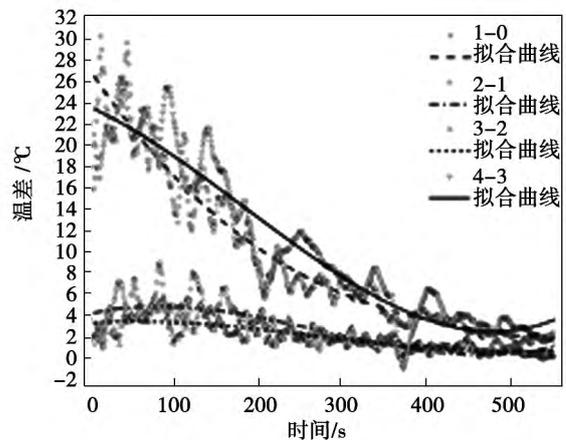


图 9 料床内部温差随时间的变化

Fig. 9 Changes in the temperature difference inside the material bed with time

由图 9 与图 10 可知, 靠近中间区域的层: 即第 1 层至第 3 层, 相邻层之间的温差较小, 约为 5 °C。靠近边壁处及靠近核心区相邻层, 即第 1 层与第 0 层及第 4 层与第 3 层之间的温差较大, 随着时间的推移逐渐减小。

将图 10 与图 8 对比可知扩散系数大的区域其温差较小, 而扩散系数小的区域( 近边壁及核心区) 则温差较大。

料层内部扩散系数与相邻层温差之间的这种对应关系说明, 扩散是决定料床内部传热温差的一个重要因素。扩散对传热的实质影响是缩短了料层冷热颗粒间的传热时间, 强化了料层内部的传热。高

温段料床内部辐射传热较强,扩散加剧了层之间温度的差异。颗粒扩散作为颗粒群运动产生的物理现象,始终存在于料层的整个传热过程中。因此在低温段,颗粒间的辐射较弱时,料层中颗粒扩散结合导热及对流等传热方式,对传热仍有重要影响(不同转速下,传热差异较大)。

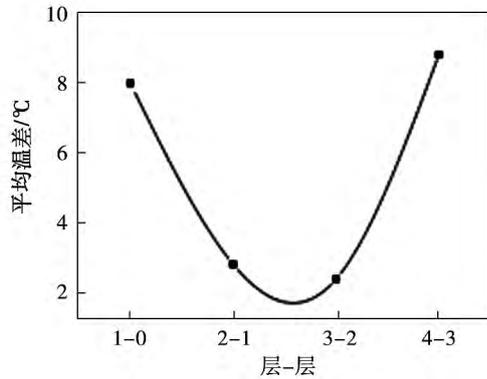


图 10 料床内部的平均温差分布

Fig. 10 Distribution of the average temperature inside the material bed

总之,料床内部的温差可以通过增强颗粒扩散逐渐减小,颗粒扩散可以很大程度上加快料床的内部传热速率。

#### 4 结 论

(1) 颗粒在被动层的运动中径向位置几乎不变,在主动层滑落过程中颗粒相互碰撞、相互作用导致被动层后相对位置重新组合是引起颗粒径向扩散的原因。颗粒在滚筒被动层中旋转一周前后其相对径向位置变化的大小直接反映了颗粒径向扩散的强弱。

(2) 滚筒中的物料从核心区至料层的中部区域,扩散系数出现先增大再减少的趋势,在到达凹凸不平的壁面附近,会再有一个突然的增大。

(3) 颗粒扩散可以加速料床内部的传热过程,扩散系数大的地方内部温差小,扩散系数小处内部温差较大。

#### 参考文献:

[1] 刘柏谦, 滚筒式高温粉体冷却装置 [P], 中国, CN201120005407, 2011.08.17.  
LIU Bai-qian. Rotary roller type high-temperature powder cooling device [P]. China, CN201120005407, 2011.08.17.

[2] 刘柏谦, 王立刚. 大型循环流化床锅炉及其化石燃料燃烧 [M], 冶金工业出版社, 2009.01.

LIU Bai-qian, WANG Li-gang. Large-sized circulating fluidized bed boilers and their fossil fuel combustion [M], Metallurgical Industry Press, 2009.01.

[3] 陈伟, 陈一平. 循环流化床锅炉特点及其发展现状 [J]. 湖南电力, 2005, 01: 59-62.  
CHEN Wei, CHEN Yi-ping. Specific features and status quo of the development of circulating fluidized bed boilers [J]. Hunan Electric Power, 2005, 01: 59-62.

[4] 刘柏谦, 谭培来, 刘怀伟等. 滚筒冷渣机和滚筒机械 [A], 鄂尔多斯, 全国电力行业 CFB 机组技术交流协作网技术交流文集, 第 39-80 页, 2012.11.  
LIU Bai-qian, TAN Pei-lai, LIU Huai-wei, et al. Roller slag coolers and roller machinery [A]. Ordos, National Electric Power Industry CFB unit technology exchange and collaboration network technical exchange paper collection, page No.: 39-80, 2012.11.

[5] 刘柏谦, 连续雪崩式对流冲刷传热滚筒冷渣器 [P], 中国, CN201120493763, 2012.10.10.  
LIU Bai-qian. Continuous snowslide type convection sweeping heat transfer roller cooler [P]. China, CN201120493763, 2012.10.10.

[6] 江茂强. 双锥型混合器内颗粒混合及增混机理研究 [D]. 浙江大学, 2010.  
JIANG Mao-qiang. Study of the mechanism governing the mixing and its enhancement of particles in a double cone type mixer [D]. Zhejiang University, 2010.

[7] 张立栋, 朱明亮, 李少华, 等. 回转干馏炉内二组元颗粒混合机理及混合度分析 [J]. 化工进展, 2011, 30(11): 2382-2387.  
ZHANG Yu-dong, ZHU Ming-liang, LI Shao-hua, et al. Analysis of the mechanism governing the mixing of two-component particles and mixing degree in a rotary dry distillation furnace [J]. Chemical Industry Progress, 2011, 30(11): 2382-2387.

[8] 李少华, 张立栋, 张轩, 等. 回转式干馏炉内影响颗粒混合运动因素的数值分析 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2): 32-38.  
LI Shao-hua, ZHANG Yu-dong, ZHANG Xuan, et al. Numerical analysis of the factors influencing the mixing movement in a rotary type dry distillation furnace [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2011, 31(2): 32-38.

[9] 耿凡, 徐大勇, 袁竹林, 等. 滚筒干燥器中杆状颗粒混合特性的三维数值模拟 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(1): 116-122.  
GENG Fan, XU Da-yong, YUAN Zhu-lin, et al. Three dimensional numerical simulation of the mixing characteristics of rod-shaped particles in a roller dryer [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(1): 116-122.

[10] Zhang W, Montgomery D R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations [J]. Water resources research, 1994, 30(4): 1019-1028.

[11] 赵永志, 程易, 郑津洋. 三方线性弹性-阻尼 DEM 模型及碰撞参数确定 [J]. 计算力学学报, 2009, 26(2): 239-244.  
ZHAO Yong-zhi, CHENG Yi, ZHENG Jin-yang. Three-equation linear elastic-damping DEM model and determination of the collision parameters [J]. Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(2): 239-244.

[12] Peray K E, Waddell J J. The rotary cement kiln [M]. Chemical Publishing Company, 1986.

[13] Savage S B, Dai R. Studies of granular shear flows: Wall slip velocities, layering and self-diffusion [J]. Mechanics of Materials, 1993, 16(1): 225-238.

[14] Oger L, Annic C, Bideau D, et al. Diffusion of two-dimensional particles on an air table [J]. Journal of statistical physics, 1996, 82(3-4): 1047-1061.

(陈滨 编辑)

ation time of a carbon nano-tube pile-up bed within its temperature range ( 120K-370K) . The measurement data show that the heat conduction coefficient of the bed in question is extremely low. Its temperature rise in the low temperature section assumes a linear increase and that in the temperature range above the room temperature tends to be constant. During the measurement ,the carbon nano-tube bed indicated an evident heat transfer relaxation time , which was bigger than by a magnitude that of maximal carbon nano-tube bed reported by literatures currently available. On the basis of this datum and in combination with the classic Cattaneo-Vermotte ( CV) model ,the transient heat conduction and thermoelectric characteristics of a single carbon nano-tube in the contact node was analyzed. The research results show that by utilizing the heat conduction retarding characteristics of nano porous materials ,the transient thermoelectric conversion efficiency can be enhanced. **Key Words:** nano-composite material ,carbon nano-tube bed ,relaxation time ,heat conduction coefficient ,thermal power

300 MW 循环流化床锅炉动态特性的试验研究 = **Experimental Study of the Dynamic Characteristics of a 300 MW Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊 ,汉] LI Peng-fei ,Ding Chang-fu ( College of Energy Source and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Baoding ,China ,Post Code: 071003) ,ZHAO Ming ,SAI Jun-cong ( Yunnan Electric Power Experiment Research Institute ( Group) Co. Ltd. ,Electric Power Academy ,Kunming ,China ,Post Code: 650217) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014 ,29 ( 5) . - 526 - 531

On the basis of the on-the-spot test of a 300 MW circulating fluidized bed boiler ,studied were the stepped response to the bed temperature and pressure of the circulating fluidized bed boiler with primary air quantity ,secondary air quantity ,coal feeding quantity and the opening degree of the material returning valve as well as the stepped response to the load of the boiler. By utilizing the particle swarm optimization algorithm-based intelligent identification ,a model for stepped response to the bed temperature ,bed pressure and boiler load under various operating conditions was established. The analytic results were kept in agreement with the theoretical simulation results studied previously by scholars ,thus offering reference and an underlying basis for optimization of the control tactics for the combustion systems of 300 MW circulating fluidized bed boilers and their operation at various loads. **Key Words:** circulating fluidized bed boiler ,bed temperature ,bed pressure ,dynamic characteristics

滚筒冷渣机中的颗粒径向扩散运动研究 = **Study of the Radial Diffusion Movement of Particles in a Roller Type Slag Cooler** [刊 ,汉] LU Chun-wang ,TAN Pei-lai ,LIU Bai-qian ,ZHU Xiao-long ( College of Mechanical Engineering ,Beijing University of Science and Technology ,Beijing ,China ,Post Code: 100083) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014 ,29( 5) . - 532 - 538

During the rotating and cooling movement of ash and slag in a roller type slag cooler, introduced was a concept of the diffusion coefficient, investigated were the law governing the diffusion of granular materials and the influence of the radial diffusion on the heat transfer. By using the discrete element method, a model for the movement of particles was established and the diffusion movement was studied. The authors had arrived at the conclusion as follows: the mutual collision and action of particles during the process of their sliding down from the active layer result in a recombination of their relative positions after entering into the inactive layer are regarded as the root cause for radial diffusion. The radial diffusion intensities in various material layer zones are different. The diffusion of particles can speed up the heat transfer inside the material bed and the locations, where the diffusion coefficient is bigger, have a smaller inner temperature difference and vice versa. **Key Words:** radial diffusion, particle movement, roller type slag cooler, discrete element method

基于激光扫描的离心泵封闭式叶轮反求技术 = **Technology for Seeking Solutions Reversely to the Closed Impellers of a Centrifugal Pump Based on the Laser Scanning** [刊, 汉] ZHANG Wei, LAI Xi-de, SONG Wei, LEI Ming-chuan ( College of Energy Source and Environment, West China University, Chengdu, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(5). - 539 - 543

In the light of the problem that the laser scanning cannot detect the flow passages inside a closed type impeller, by using a flow passage filled with oil sludge, obtained was an oil sludge model. The sectional characteristics restriction technology was used to restructure the axisymmetric characteristic curves of the covers and obtain a three-dimensional model for the covers in the axisymmetrical way. Based on the multi-view-angle putting-together technology for scattered point-cloud data, the oil sludge model and the covers were made flush as a whole. With the rotating shaft center serving as the center, the shaft plane groups were established to intersect with the oil sludge model and obtain the point cloud data of the contour of the working surface and back surface of the blades. From the point cloud data obtained after the oil sludge model and the covers had been made flush as a whole, the point cloud data of the intersectional lines of the oil sludge model and the upper and lower end surface of the covers were extracted. The contours of the blades and the intersectional lines of the oil sludge model and covers were fitted and their spline curves were obtained. Finally, the curved surfaces of the blades were obtained through a lay-off. The precision of the restructuring model indicates that the restructuring technology based on the restriction and fitting of the intersectional line data combined with the restriction of the sectional characteristic curves can meet the precision requirements of engineering projects for parts of pumps and the same kind, thus offering an accurate and quick solution reverse seeking method for restructuring closed type impellers based on the data scanned by use of laser. **Key Words:** closed type impeller, laser scanning, reverse restructuring, multi-view-angle putting-together