文章编号:1001-2060(2009)05-0623-07

球磨机中颗粒混合运动的数值模拟

耿 凡1,袁竹林1,孟德才1,李善莲2

(1 东南大学 能源与环境学院,江苏南京 210096;2 郑州烟草研究院烟草行业烟草工艺重点实验室,河南郑州 450001)

摘 要: 针对球磨机在火电厂应用广泛而对其内部颗粒混合 运动的信息了解甚少的现状,采用离散元法直接跟踪球磨机 内的每一个颗粒,考虑其所受重力、摩擦力和碰撞阻力的联 合作用,建立了颗粒的三维动力学模型,对球磨机中颗粒复 杂混合运动的全过程进行了数值模拟,并着重探讨了颗粒大 小、颗粒密度及颗粒粒度不均等关键参数对球磨机中颗粒混 合运动特性的影响。结果表明,随着球磨机的转动,球磨机 内各区域的颗粒均逐渐混合均匀,但球磨机内不同区域颗粒 混合的均匀程度不同。相同填充率条件下,小颗粒混合达到 均匀的时间较长;相同粒径条件下,密度较大的颗粒其混合 达到均匀的时间也较长。颗粒粒度不均时,随着球磨机的转动,颗粒出现分层现象。

关 键 词:球磨机;离散元法;混合运动;数值模拟
 中图分类号:TK229:TB115
 文献标识码:A

引 言

球磨机是当代最广泛粉磨混合机械,是我国火 电厂制粉系统中使用最多的磨煤设备,且广泛应用 于其它行业。球磨机的研究在国内外一直受到广泛 关注和高度重视^[1~3]。目前对球磨机的研究已经取 得了许多成果,但对其内部物料的运动信息知之甚 少^[4~6]。由球磨机磨料原理可知:球磨机的磨料效 率取决于磨料介质与颗粒物料之间的接触效率。而 颗粒物料的混合均匀程度直接反映了颗粒之间的接 触效率:颗粒接触率越高,其混合程度就越好^[7]。颗 粒物料在球磨机内的混合运动十分复杂,同时受到 重力、离心力、摩擦力和机械阻力的联合作用,其运 动的机理取决于一系列的状态因素和物料本身的特性(如颗粒密度、粒度等)^[6,8]。

因此,定量分析球磨机中颗粒物质的混合运动 特性,对深入研究球磨机磨料技术有重要的指导意 义。本研究采用离散元方法,对球磨机内部颗粒的 混合运动过程进行数值模拟:跟踪球磨机内的每一 个颗粒,考虑其重力、摩擦力和碰撞力,建立了三维 数学模型;着重探讨了颗粒大小、颗粒密度以及颗粒 粒度不均等因素对球磨机中颗粒混合特性的影响, 揭示了球磨机内部复杂的颗粒混合运动规律。

1 数学模型的建立

1.1 物理模型

球磨机的主体是水平并能回转的圆筒,其内壁 衬有波浪型锰钢护甲,可将其近似为半圆柱形,其圆 心均匀镶在球磨机的内边壁上,如图 1 和图 2 所示。 当球磨机以一定的速度作旋转运动时,紧贴筒壁的 底层的颗粒在筒体护甲、颗粒间的摩擦力和自身的 重力以及由于磨机旋转而产生的离心力的作用下, 将随着筒体作旋转上升运动,被提升到一定的高度, 当颗粒的重力(实际上是重力的径向分力)大于或等 于离心力时,就开始脱离筒体内壁,按照某一轨迹降 落。这种周而复始的运动就产生了连续的冲击和研 磨作用,从而达到粉碎的目的,并呈现出复杂的颗粒 混合运动⁹,不同时刻球磨机中颗粒的混合情况,如 图 1 所示。



图1 不同时刻球磨机中颗粒的混合运动情况

收稿日期: 2008-07-15; 修订日期: 2008-12-22

作者简为4败0 K 19% ma 在 远荡徐州人。东南木学博志研究却 ublishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2 数学模型

1.2.1 颗粒的运动

颗粒为均质球形颗粒,其运动满足牛顿第二运动定律,建立其平动和转动的运动方程为^{10~11}:

$$\mathbf{v} = \mathbf{F}/m \tag{1}$$

ω= T/I
 式中:ν-加速度;ω-角加速度;F-合力由重力、
 碰撞力(已考虑摩擦力)构成,使颗粒发生平动;T-

合力矩使颗粒发生转动:1一颗粒的转动惯量。

1.2.2 颗粒间碰撞

通过跟踪离散颗粒场中每一个颗粒判断颗粒是 否发生碰撞。当颗粒 *i* 与颗粒 *j* 的中心间距小于两 颗粒半径之和时,则发生碰撞。对于更一般的情况 是两颗粒发生偏心碰撞,在碰撞点处产生力的作用, 记为颗粒间碰撞力 *f*_C,该力可分为法向分力 *f*_{Cn}和 切向分力 *f*_{Ci},即为:

 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{C}ij} = \boldsymbol{f}_{\mathrm{C}n} \, ij + \boldsymbol{f}_{\mathrm{C}i} \, ij \tag{3}$

式中: 下标 n、t一法相和切向; i、j一颗粒。

法向分力的作用结果如同对心碰撞使颗粒发生 平动,切向分力的作用结果是对颗粒产生一个矩,该 矩使颗粒发生转动,由该矩和颗粒的转动惯量可求 出所产生的角加速度。二分力分别由法向变形位移 \hat{q} 和切向变形位移 \hat{q} 与其各自的刚度 *k*,以及法向 动能损失和切向动能损失进行计算。而法向动能损 失和切向动能损失的大小分别与碰撞时的相对速度 *v*_r和接触点滑移速度 *v*_s,以及相应的阻尼系数 η 有 关,该阻尼系数 η 可由恢复系数 *e* 等确定^[13]。上述 物理模型表达为:

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{Cn}\ ij} = (-k_{\mathrm{n}}\ \delta_{\mathrm{n}ij} - \eta_{\mathrm{n}}\boldsymbol{v}_{\mathrm{r}ij} \circ \boldsymbol{n}_{ij})\boldsymbol{n}_{ij}$$
(4)

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{Ct,}\ ij} = -\boldsymbol{k}_{\mathrm{t}} \, \delta_{ij} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{t}} \boldsymbol{\nu}_{\mathrm{s}\ j} \tag{5}$$

式中:n一单位法向向量;r一颗粒半径; ω 一颗粒角 速度。其中:

$$\mathbf{v}_{\mathrm{r}j} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j \tag{6}$$

$$\mathbf{v}_{sij} = \mathbf{v}_{rij} - (\mathbf{v}_{rij} \circ \mathbf{n}) \mathbf{n} + r(\omega_{i} + \omega_{j}) \times \mathbf{n}$$
(7)

而切向分力的极值受到颗粒表面摩擦系数与法 向分力乘积的限制,当计算出的切向分力大于该乘 积时,即 $|f_{Ch,j}| > \mu_{f} | f_{Ch,j}|$,两颗粒在接触表面将发 生滑动,则:

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{Cb}\ ij} = -\mu_{\mathrm{f}} | \boldsymbol{f}_{\mathrm{Cb}\ jj} | \boldsymbol{t}_{jj}$$
(8)

式中: μ_{f} 一颗粒间摩擦系数; t一单位切向向量, 且: $t_{ij} = v_{sij} / |v_{sij}|$ (9)

当一个颗粒同时与几个颗粒相碰撞时,通过矢 量叠加可算出该颗粒所受到的合力与合力 矩^{12~13} 1.2.3 颗粒与壁面碰撞

当颗粒中心与球磨机壁面的距离小于该颗粒半 径时,则发生碰撞。碰撞时,只需把边壁上的碰撞点 视为一个大"颗粒"来代替颗粒 *j*,该"颗粒"的速度 为碰撞点处的速度,该速度由球磨机旋转产生,记为 $v=\omega \times r$,其中 ω 为球磨机转速,r/s。其转动惯量 为零,其余同颗粒间碰撞模型^[12]。

1.2.4 颗粒与壁面护甲碰撞

当颗粒中心与护甲的距离小于该颗粒半径时, 则发生碰撞。碰撞时,同样把护甲上的碰撞点视为 一个大"颗粒"来代替颗粒 *j*,该"颗粒"的速度为碰 撞点处的速度也为 *v*= ω× *r*,转动惯量为零,其余 同颗粒间碰撞模型。

2 计算参数及数据处理方法

2.1 计算参数

利用 C 语言编程模拟上述过程。颗粒密度分 别取 300 kg/m³(近似为木质颗粒)、1 160 kg/m³(近 似为塑料颗粒)和 2 700 kg/m³(近似三氧化二铝颗 粒)^[13];颗粒填充密度统一取 10%;颗粒直径分别为 3、4 和 5 mm 3 种。表 1 给出了数值计算的其它条 件,在根据球磨机中颗粒物受力与运动方程建立的 数值实验平台上,探讨颗粒大小、颗粒密度以及颗粒 粒度不均条件下颗粒混合运动的规律。

参数	数值	参数	数值
球磨机直径/ m	0. 25	颗粒填充率/%	10
球磨机长度/m	0. 12	│ 弹性系数/N°m ⁻¹	800
球磨机转速∕ r°s ^{−1}	1. 5	恢复系数	0.9
护甲半径/m	0.003	摩擦系数	0.3
护甲个数	6	时间步长/s	1×10^{-5}

表1 计算参数

2.2 数据处理方法



图 2 球磨机分区结构图

为定量分析球磨机内不同区域颗粒的混合情况,采用3个采样区域,如图2所示,内部区域(1)、 中间区域2和近壁区域3,且内部区域、中间区域的 区域半径的划分要保证初始时各区域的颗粒个数基 本相同,以避免个别区域颗粒太少造成统计结果不 稳定。

同时,为观察颗粒混合的均匀程度,尤其是初始 时处于不同区域的颗粒最终的混合情况,也为了方 便统计,本研究把颗粒按照初始时刻颗粒加入的先 后顺序分为3类:其中前1/3部分颗粒记为P1类颗 粒(初始时多处于近壁区域),后1/3记为P3类颗 粒(初始时多处于内部区域),其余为记P2类颗粒。 转动滚筒,跟踪每一个颗粒,计算得到的各时刻每个 颗粒的空间位置,分别统计3个分区的3类颗粒的 数量,求出各个时刻各类颗粒分别在3个分区中的 数量百分比,从而得到各区域各类颗粒数量百分比 随球磨机转数的变化曲线,记为混合曲线。当各区 域、各类颗粒的数量百分比接近于1/3时,即表明各 区域中不同颗粒的混合趋于均匀。

另外,统计表层颗粒和底层颗粒的碰撞次数,并 研究碰撞次数随滚筒转动时间的变化规律,得碰撞 曲线,为研究颗粒混合提供了更多的信息,也便于与 前人的实验数据进行比较^[14]。

3 数值模拟结果分析

3.1 颗粒大小对混合特性的影响

在球磨机转速为 1.5 r/s,填充率均为 10%情况 下,分别计算半径为 5、4 和 3 mm 的颗粒在球磨机中 的混合运动的全过程,计算结果如图 3 所示。





由图 3 可见, 各混合曲线均随球磨机转动周期 性变化, 曲线波动幅度逐渐衰减, 且波形及其相似, 均向数量百分比为 1/3 处收敛, 说明了随着球磨机 转数的增加, 各区域的颗粒逐渐混合均匀。

横向比较,同一计算条件下,如图 3(a)所示,内 部区域1 和近壁区域3 的混合曲线较中间区域2 更 具规律性。这是因为近壁区域的颗粒直接受到球磨 机壁面的影响,在离心力和摩擦力的作用下,由护甲 将颗粒提升至一定的高度,然后颗粒重力作用下自 由抛落,下落碰击在下面的颗粒上,多停留在料层表 面(内部区域)。与此同时,内部区域颗粒随着球磨 机的转动当料层倾角等于或大于其自然倾角时开始 作泻落运动,刚好滚落至近壁区域与壁面直接接触。 如此周而复始,形成了内部区域和近壁区域的颗粒 交换,颗粒混合运动剧烈。在图 3 中均表现为 *P*1 类颗粒的混合曲线与 *P*3 类颗粒的混合曲线波动明 显,且呈互补关系,即 *P*3 曲线处于波谷时,*P*1 曲线 刚好在波峰的位置,反之亦然。也说明了表层颗粒 和底层颗粒受边壁影响大。

而处于中间区域的颗粒,不直接受边壁作用,因 此其混合曲线周期性不明显,仅在重力和颗粒间碰 撞摩擦的作用下,与近壁区域和内部区域有少量的 颗粒交换,颗粒混合运动不剧烈。因此,球磨机内部 不同区域颗粒混合运动的剧烈程度不同,从而导致 近壁区域颗粒的混合均匀程度要比其内部区域好。 由图 3(b)和(c)同样可以得到上述结论。因此,无 论大小,颗粒在球磨机中混合运动的所具有的一些 共同规律是不变的。

纵向比较,随着颗粒半径的减小,混合曲线的波 动幅度稍有增大,尤其是中间区域,说明不同区域间 颗粒交换作用增强,混合运也剧烈。这有利于内部 区域颗粒突破上下颗粒的阻碍,达到整体混合的均 匀。另外,随着颗粒半径的减小,混合曲线波动衰减 缓慢,直到周期性不明显时所对应转数相应增加,说 明了相同填充率条件下,小颗粒混合达到均匀的时 间更长。

从颗粒碰撞的角度进行分析:初始状态,球磨机 未转动时,表层颗粒和底层颗粒受中间颗粒阻碍,难 有接触,但随着球磨机的转动,颗粒运动中逐渐掺 混,碰撞次数逐渐增加,但由于颗粒数目的限制,碰 撞次数不会无限制增长下去,一旦颗粒混合达到均 匀,碰撞次数达到极值后停止增长,然后围绕该值上 下波动。 颗粒在球磨机中的混合运动的过程中表层颗粒与底 层颗粒的碰撞次数,得,碰撞曲线均先上升,然后趋 干水平,并最终保持不变,如图4所示。曲线由上升 段到水平段的过度时刻记为混合达到均匀的时间, 即混合时间。由图可见, r=5 mm 时对应的混合时 间约为 2.0 s, 碰撞曲线最终稳定在 60 次; r=4 mm 的混合时间约为 3.0 s,碰撞曲线最终稳定在 350 次: 而 r=3 mm 的混合时间约为 4.0 s, 碰撞曲线最 终稳定值高达在1050次。这说明:一方面从混合 时间的角度看,相同填充率条件下,颗粒越小,其混 合达到均匀的时间就越长。这与上述混合曲线分析 所得结论一致。另一方面从碰撞次数的角度看,相 同填充率条件下,颗粒半径越小颗粒数目越多,从而 最终碰撞次数也多,不仅如此,小颗粒更易被护甲携 带做抛落运动,形成更强烈的混合运动,也使得颗粒 间碰撞作用更为剧烈。



图4 模拟得不同大小颗粒的碰撞曲线





将上述结论与文献[14]的实验结果进行对比如 图 5 所示。从图中可以看出,由于数值实验条件与实 际实验条件存在差别,计算结果与实验结果有一定差 异,在定量上将二者进行对比还很困难,但是在定性 上数值模拟反映出和实验结果相同的规律:颗粒的碰 撞次数随转动时间的变化均先上升,然后趋于水平, 并最终保持不变;且随着颗粒半径的减小,混合时间

 增长而最终混合均匀对应的碰撞次数也增加。这说 明模拟结果是可信的,证明了颗粒运动模型的正确 性。与实验研究相比,数值模拟能够对颗粒运动进行 深层次地分析和研究,成为实验的有力补充。

3.2 颗粒密度对混合特性的影响

图6给出了球磨机转速为1.5 r/s,颗粒半径均 为4 mm,填充率为10%,而颗粒密度分别为300、 1160和2700 kg/m³时各区域的混合曲线。该组混 合曲线除具有上述一些共同规律外,主要反应了颗 粒密度对混合特性的影响:随着颗粒密度的增加,混 合曲线的波动周期稍有增大,波动幅度随着球磨机 的转动逐渐衰减,向数量百分比为1/3处收敛,且曲 线周期性不明显时所对应转数相应增加,说明颗粒 密度增大时,颗粒的重量相应增加,惯性也增大,因 此在相同的外在条件下改变其运动状态需要更长的 时间,从而混合达到均匀的时间更长。





3.3 颗粒粒度不均对混合特性的影响

文献[15] 在 E. W. Davis, F. Fisher 和 R. V. Steiger 提出的关于球磨过程中介质运动的理论的基础上,根据颗粒运动方程,从力学角度对单个颗粒的运动进行理论分析,得单个颗粒的运动轨迹,并分析得:颗粒粒度不均时,随着球磨机的转动,小颗粒较 大颗粒上升容易且更高,多做抛落运动,水平运动距 离更远,而大颗粒多做泻落运动,水平运动距离近。 因此颗粒在下降过程中分层,最终小颗粒多在外层 而大颗粒多在内层。

本研究运用针对较大规模颗粒量所建立的运动 模型进行计算:球磨机转速为 1.5 r/s,颗粒密度均

为1 160 kg/m³,填充率约为 10%。在同一个球磨机 内依次加入半径为 5、4 和3 mm 的颗粒,其数目各占 总数的 1/3,计算各区域的混合曲线,如图 7(a)所 示;然后计算相同条件下依次加入半径为 3、4 和 5 mm 的颗粒各 1/3,得其混合曲线,如图 7(b)所示;最 后将上述两组混组混合曲线与相同计算条件下颗粒 粒径均为 4 mm 的混合曲线,进行比较,如图 7(c)所 示,得该三组混合曲线除具有上述一些共同规律外, 主要表现了颗粒粒度不均对混合特性的影响。如图 7(a)所示,初始时刻大颗粒处在外层而小颗粒处在 内层。随着球磨机转动, 混合曲线波动幅度较大, 颗 粒混合运动相对剧烈。与图 7(c)相比, 其内部区域 1 曲线波动明显。主要是底层大颗粒和表层小颗粒 交换作用强烈。最终大颗粒数量百分比曲线(*P*1) 高于其它两种颗粒的曲线的几率最多, 表明内部区 域大颗粒占多数。与此同时, 近壁区域 3 小颗粒数 量百分比曲线(*P*3)高于其它两种颗粒的曲线的几 率最多, 表明近壁区域小颗粒占多数。说明球磨机 内颗粒粒度不均时, 混合过程出现颗粒分层, 最终小 颗粒多在近壁区域而大颗粒多在内部区域。



图 7 颗粒粒度条件下颗粒的混合曲线

而图 7(b)中,初始时刻小颗粒处在外层而大颗 粒处在内层,其分布恰好与(a)相反。初始的颗粒分 布趋势接近最终状态,其内部区域曲线波动幅度不 大,混合运动相会缓和。从内部区域1中大颗粒数 量百分比曲线(P3)高于其它两种颗粒的曲线的几 率最多,也表明内部区域大颗粒占多数。而其近壁 区域3,由于小颗粒占多数,易于被抄起,因此 P1 曲 线波动周期明显,且其值往往高于另外两条曲线,同

样也说明了近壁区域小颗粒占多数。

综上所述,针对较大规模颗粒量所建立的颗粒 运动模型所得结论与文献[15]的理论分析结果相吻 合。另外,对于磨料介质,小颗粒对球磨机内物料主 要起冲击作用,因其体积小、个数多、面积大,因此比 大颗粒球磨作用强烈。说明在球磨过程中,大小不 同的磨料介质颗粒所产生的球磨效果是不同的。因 此,应确定合理的大小颗粒比例,以提高球磨效率。

4 结 论

通过离散元法模拟计算球磨机内颗粒物料混合 运动的情况,对颗粒物料的大小、密度以及粒度不均 条件下的球磨机内不同区域颗粒的混合特性进行了 探讨,得到结论如下:

(1)随着球磨机的转动,球磨机内不同区域的 颗粒均逐渐混合均匀。

(2)球磨机内不同区域颗粒混合运动的剧烈程 度不同,表层颗粒和底层颗粒受边壁影响大,最终近 壁区域颗粒的混合均匀程度要比其内部区域好。

(3)相同填充率条件下,小颗粒混合达到均匀的时间较长。

(4)相同粒径条件下,密度较大的颗粒由于惯 性较大,其混合达到均匀的时间也较长。

(5)颗粒粒度不均时,随着球磨机的转动,颗粒 出现分层现象:大颗粒多处在内层而小颗粒多处在 外层。

参考文献:

[1] 马永光, 郝 娜, 李鹏飞, 等. 基于自抗扰的多变量解耦控制在 球磨机的应用[J]. 热能动力工程, 2007, 22(3): 297-300.

- [2] 程启明,郑 勇. 球磨机多模型 PID 型神经元网络控制系统 [J].中国电机工程学报, 2008, 28(2): 103-109.
- [3] 李文亮,杨 涛,于向军,等.国外大型球磨机发展现状[J].矿 山机械,2007,35(1):13-15.
- [4] 王继杰. 球磨机的研究进展及实用技术综述[J]. 中国陶瓷工 业, 2007, 14(5): 32-35.
- [5] GOVENDER I, POWELL M S, NURICK G N. 3D particle tracking in a mill; a rigorous technique for verifying DEM predictions[J]. Minerals Engineering, 2001, 14(10): 1329–1340.
- [6] 罗中平,姚亚林,夏志华,等.实验室高效磨矿设备及实验方法研究[J].非金属矿,2006,29(4):57-59.
- [7] CHIBWANA C, MOYS MH. Radial mixing of particles in a dry batch ball mill[J]. Powder Technology, 2006, 163(3): 139-144.
- [8] 黄志刚,朱清萍,朱 慧,等.转筒干燥器内颗粒物料运动的模 拟与试验研究[J].粮油加工与食品机械.2004,11:65-66.
- [9] 孙利波. 球磨过程的数学模型及其试验研究[D]. 济南: 山东大 学, 2006.
- [10] 贾启芬, 刘习军, 王春敏. 理论力学[M]. 天津. 天津大学出版 社, 2003.
- [11] 费迪南德比尔, 罗素约翰斯顿. 工程矢量力学[M]. 北京: 机械 工业出版社, 2003.
- [12] 袁竹林,徐益谦. 从软硬球模型探讨颗粒自转对流化状态的影响[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 363-366.
- [13] TSUJI Y, KAWAGUCHI T, TANAKA T. Discrete particle simulation of two— dimensional fluidized bed[J]. Powder Technology, 1993, 77 (1): 79-87.
- [14] VAN PUYVELDE D R YOUNG B R WILSON M A, et al. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis[J]. Powder Technology, 1999, 106(3): 183–191.
- [15] 张彩霞,刘维平.球磨过程中钢球运动规律的研究[J].南方冶金学院学报,2000,21(2):99-103.

新技术、新工艺

GE 和 MHI 合作开发新一代汽轮机装置

据《Gas Turbine World》2009 年 1-2 月 号报道, 电力设备主要制造者 GE Energy(通用 电气能源)和 MHI(三 菱重 工)已 签订 一项初步 协议, 针对联合循环应用 合作设计并开发世界最先进的 汽轮机装置。

两个公司计划使它们的工程技术和运行经验相结合,用来产生经过专门设计并优化新一代汽轮机装置, 以便为高效率燃气轮机联合循环装置提供最好的性能。

目前,汽轮机提供了超过80%的世界电力生产量。但是,近年来对燃料成本和环境关切的要求已推动 人们对更清洁、更有效的联合循环生产方案的兴趣。

两个公司也讨论了针对核电站应用的改进型汽轮机联合研制的问题。

mogorov entropy being 0.297 bits/s. Finally, it should be noted that during a practical boiler operation, various indexes featuring chaotic characteristics can be used to further depict an in-furnace system, thus offering further guidance for the optimized operation of a utility boiler. **Key words**: pulverized coal-fired boiler, furnace pressure, chaotic characteristics

底饲进料循环喷动床内压力脉动信号的 SHANNON 信息熵分析= A Shannon Information Entropy Analysis of Pressure Fluctuation Signals From an Underfed Circulating Spouted Bed[刊,汉]/ TAO Min, JIN Bao-sheng, YANG Ya-ping (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), XUE Yu-lan (East China Electric Grid Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200002)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 618~622

To study the gas-solid two phase flow characteristics of an underfed circulating spouted bed, the authors have measured the pressure fluctuation signals at various heights in the axial direction of a reaction tower through a cold-state test, analyzed the pressure signals by using Shannon information entropy and compared the influence of different operating conditions on the gas-solid two-phase flow in the tower. It has been found that the pressure fluctuation and its power spectrum display different characteristics at different heights of bed layers and Shannon information entropy can reflect very well the complexity and stability degree of the characteristic signals. Enhancing the fluidized velocity and circulation ratio can lead to an increase of particle concentration in the axial direction of the tower, thus enhancing the amplitude of the pressure fluctuation. To increase the jet flow velocity and heighten the nozzle location can intensify the gas-solid turbulent flow at the bottom of the tower and Shannon information entropy can be increased accordingly. **Key words:** underfed circulating spouted bed, gas-solid two-phase flow, pressure fluctuation, Shannon information entropy

球磨机中颗粒混合运动的数值模拟=Numerical Simulation of Particle Mixing Movement in a Ball Mill[刊, 汉] / GENG Fan, YUAN Zhu-lin, MENG De-cai (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), LI Shan-lian (Key Laboratory on Tobacco Processing Technologies for Tobacco Processing Industry, Zhengzhou Academy of Tobacco, Zhengzhou, China, Post Code: 450001)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(5). -623~629

In view of the current situation that ball mills are widely used in thermal power plants and very little information about their inner particle mixing movements is known to us, a discrete elementary method is used to directly track every particle in a ball mill. By considering the joint action of gravity force, friction and collision resistance received by these particles, established was a three-dimensional dynamic model for the particles and numerically simulated was the whole process of their mixing movement in the ball mill. The influence of the key parameters, such as particle diameter, density and granularity unevenness etc. on the characteristics controlling the complex movement of particles in the ball mill was emphatically studied. The research results show that with the turning of the ball mill, all the particles in every area of the ball mill are gradually well mixed. The uniformity of such mixing in the ball mill at various places, however, is different. In the case of an identical filling rate, the time required by the small particles to mix uniformly is relatively long. In the event of an identical particle diameter, the time required by the particles with a higher density to mix uniformly is also relatively long. When the particle diameters are not uniform, with the turning of the ball mill, a layer-separation phenomenon will occur to the particles. **Key words**; ball mill, discrete elementary method, mixing movement, numerical simulation

火电厂钢球磨煤机负荷的灰色 PID 控制系统研究= Study of a Grey PID (Proportional, Integral and Differential) Control System for Ball Mill Load in a Thermal Power Plant[刊,汉] / CHENG Qi-ming, MIN Le-cong, LI Qin, et al (College of Electric Power and Automation, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(5). -630~634. http://www.cnki.net