

底饲进料循环喷动床内压力脉动信号的 SHANNON 信息熵分析

陶 敏¹, 金保升¹, 杨亚平¹, 薛玉兰²

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 华东电网有限公司, 上海 200002)

摘 要: 为了研究底饲进料循环喷动床内气固两相流的流动特性, 通过冷态实验测量反应塔内轴向不同高度上的压力脉动信号。应用 SHANNON 信息熵分析压力信号, 并比较不同操作条件对塔内气固流动的影响。结果表明: 压力脉动及其功率谱在不同床层高度上表现出不同的特性; SHANNON 信息熵能够很好地反映特征信号的复杂程度和稳定程度; 提高流化速度和循环倍率能够导致塔内轴向向上的颗粒浓度上升, 从而使压力脉动的幅度增加; 提高喷射速度和喷嘴位置, 能使反应塔底部气固湍动更加强烈, SHANNON 信息熵随之上升。

关 键 词: 底饲进料循环喷动床; 气固两相流; 压力脉动; SHANNON 信息熵

中图分类号: X701.3; O273 文献标识码: A

引 言

为了进一步提高脱硫效率, 底饲进料循环喷动床(underfeed circulating spouted bed, UCSB)采用底饲进料的方式, 使新鲜脱硫剂通过底饲喷头从各方向均匀进入塔内, 在反应塔底部形成高湍动度、高颗粒浓度的气固混合, 克服了采用面饲进料方式时脱硫剂颗粒在截面上特别是在底部喷水区域分布不均的问题, 是在常规的循环流化床烟气脱硫装置基础上开发的新型干法脱硫技术。

研究不同操作条件对反应塔内气固流动特性的影响对于优化设计和操作运行具有重要的意义。压力特征信号包含了气固流动特征在时间和空间上的许多动态信息, 是颗粒特性、床的几何特性、气泡运动特性等多种因素的综合反映。应用压力脉动信号研究流化床和喷动床内的动力学行为已被许多研究者采用^[1~6], 通过有效的信息处理手段, 如统计分析、频谱分析和混沌分析等^[7~9], 对压力信号加以分析, 提取重要的特征参数, 可以进一步认识气固流动更为复杂的规律, 并建立这些特征参数与气固流动

特性之间的联系。本研究通过采集不同位置处的压力脉动信号, 通过频谱变化分析了反应塔在轴向上的气固流动特性; 并应用 SHANNON 信息熵对压力信号进行处理, 进一步分析了不同操作条件(包括流化风速、喷射速度、回料量、喷头位置)对反应塔气固流动的影响, 为底饲进料循环喷动床的控制运行和优化操作提供依据。

1 实验装置和研究方法

1.1 实验装置

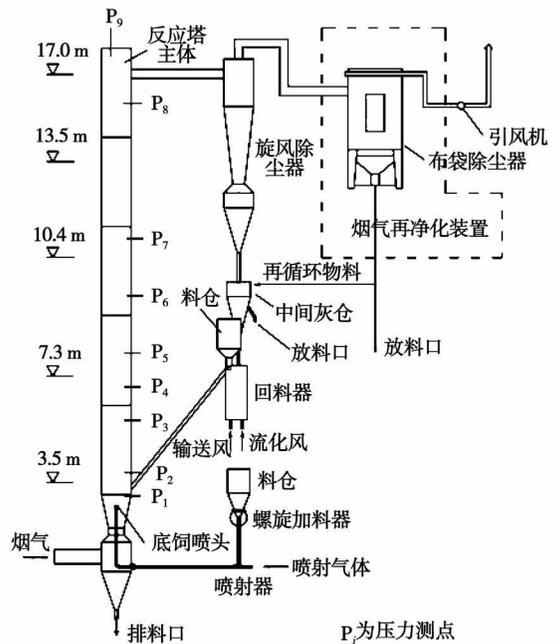


图 1 底饲进料循环喷动床烟气脱硫系统图

底饲进料循环喷动床烟气脱硫模拟中试试验装置的工艺流程如图 1 所示。整个试验装置由脱硫反

应塔主体,雾化增湿系统,气固分离系统,底饲进料系统,回料系统以及测量系统组成。脱硫塔主体直径 0.6 m,总高度 19 m,有效高度为 15 m。烟气从塔底进入经文丘里管均匀布风后进入塔内,新鲜脱硫剂通过底饲进料系统从底部喷水区域加入,在上升过程中与烟气中的二氧化硫进行反应。净化后的烟气由床顶离开,通过旋风和布袋除尘器实现气固分离后进入烟囱排放,部分收集的固体颗粒可再次循环使用。

底饲进料系统主要由螺旋加料器、料仓、立管、喷射器和底饲喷嘴等组成。底饲进料系统及采用的喷头结构如图 2 所示。喷头侧面均匀布置有一定数目的等径圆形喷口,本实验采用的喷嘴形式为四口喷嘴。喷头下端与气力输送管道之间采用焊接式直通管接头进行分段连接,可方便拆卸更换喷头和调整喷头高度。本试验中喷口中心距离文丘里扩张段底部的默认高度为 0.3 m。

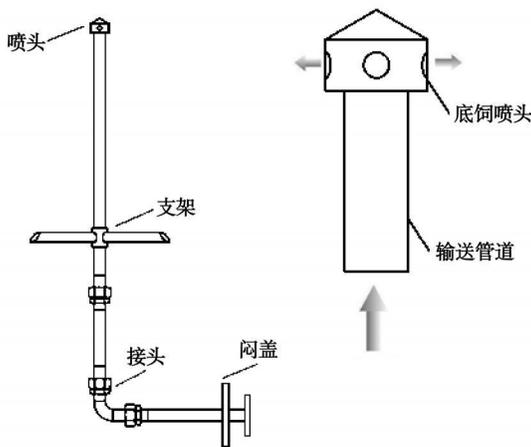


图 2 底饲进料系统及喷头结构

沿提升管轴向布置有 9 个测压孔,测压孔距离文丘里扩张段顶部的高度用 Z 表示,压力信号送入量程为 0~10 kPa 的多通道差压变送器,输出信号进行 A/D 转换后,由计算机采集。其采样频率为 50 Hz,每个测点的采样时间为 30 s。底饲进料采用平均直径为 75 μm 的石英砂作为颗粒相,其密度为 2 600 kg/m^3 ,流化介质为空气。实验均为常温条件。

1.2 分析方法

SHANNON 信息熵是系统信息量大小的量度。床内不同位置的时间序列信号,从不同的时间和空间反映了流型的特征。不同流型所包含的信息量是有差别的。因此,对压力脉动时间序列进行 SHANNON 信息熵分析,可以建立不同操作条件下的气固

流动特性与 SHANNON 信息熵之间的联系^[10]。

对任一组时间序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的 SHANNON 信息熵 (S , 单位为 Hart) 的定义为:

$$S(x) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \lg p(x_i)$$

式中: n —时间序列信号的长度; $p(x_i)$ —每个随机信号发生的概率,满足 $\sum_{i=1}^n p(x_i) = 1$,采用联合概率密度公式进行计算。

基于信息论的观点,系统熵越大,包含的信号越少,系统不稳定;反之,熵越小,包含的信号越大,系统就越稳定。反应塔内压力脉动信号的 SHANNON 信息熵,反映了塔内气固两相流动(如气体的湍动、气泡行为和气固之间的相互作用等)的状态,SHANNON 熵值越大,说明塔内气固运动越剧烈或流动越不稳定^[11]。

2 结果分析

2.1 压力信号随高度的变化

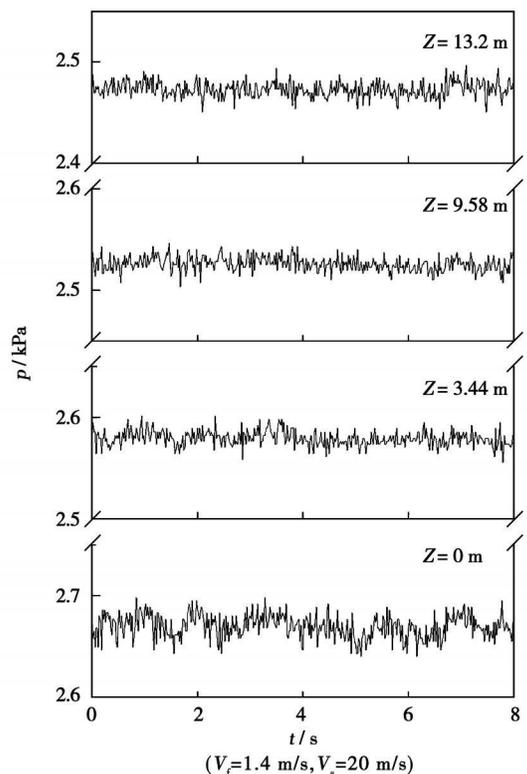


图 3 压力脉动信号随床高的变化

流化速度 V_f 和喷射速度 V_s 分别为 1.4 m/s 和 20.0 m/s 时,反应塔内不同高度处压力脉动信号的截取片段如图 3 所示。从图中可以看到,当高度在 0~9.58 m 之间时,压力脉动的振动幅度随着高度的增加

而降低。这是由于压力脉动受颗粒浓度影响很大。在反应塔底部，颗粒浓度很高，气固之间的混合十分激烈，因此压力信号的脉动十分明显；而在反应塔上部，颗粒浓度明显减小，颗粒碰撞和气泡行为明显减少，表现为压力信号较为平静。当高度进一步到达13.2 m时，压力脉动又明显增强，这是由于出口结构的影响，在反应塔出口附近颗粒不断聚集碰撞，气固之间的湍动比较强烈，因而流动也不稳定^[1]。

不同高度处压力脉动信号的功率谱分析如图4所示。频谱图中较低的幅度说明了塔内处于典型的

低压降/颗粒浓度操作状态。从图中可以看到，频谱图中较高的峰值皆出现在2 Hz以下，其后则为范围较广的低幅区，不同高度处频谱幅度的差异主要表现在0~2 Hz之间。在Z=0 m位置，功率谱幅度最高，说明该处气固运动剧烈，气泡行为明显。随着高度的增加，颗粒浓度不断降低，气固之间的动力学行为不如反应塔底部那样复杂，气泡也明显减少，表现为功率谱幅值逐渐下降。在13.2 m处出口附近颗粒浓度再次增加，功率谱幅值有所上升，这与以上对于压力信号的分析十分吻合。

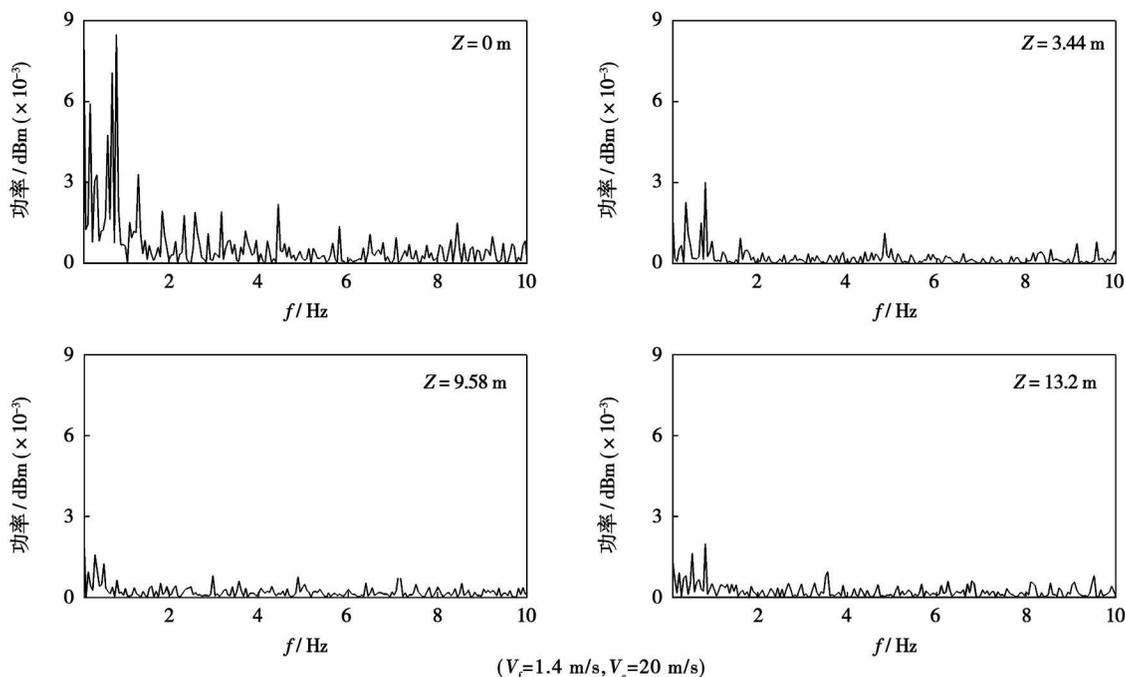


图4 压力脉动信号频谱分析

2.2 流化速度对压力脉动的影响

流化速度分别为0.8 m/s、1.1 m/s和1.4 m/s时，压力信号的SHANNON信息熵随床高的变化如图5所示。在反应塔底部，颗粒浓度较高，气固流动十分复杂，压力脉动较为强烈，SHANNON信息熵值较大；随着高度的增加，气固流动趋于稳定，压力信号的脉动也逐渐降低；直到出口附近，信息熵值出现略微上升。由此可见，SHANNON信息熵随高度的变化趋势能够很好地反映塔内气固流动的轴向变化。

从图中还可以看到，流化气速对压力脉动信息熵的影响十分明显，随着流化速度的提高，在不同高度处的SHANNON熵值都明显上升。这是由于随着流化速度的提高，颗粒的扬析和夹带量不断增加，系统的循环倍率不断提高，使反应塔内的颗粒浓度明显增加，气固湍流和气泡行为明显加强，从而导致压

力脉动幅度增加。

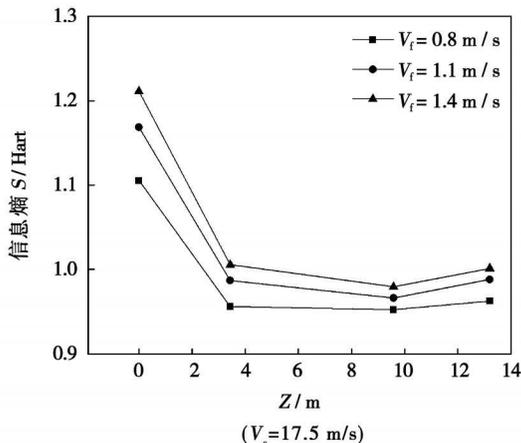


图5 流化速度对压力信号SHANNON熵的影响

2.3 喷射速度对压力脉动的影响

图6为 $V_f = 1.1 \text{ m/s}$ 时,不同喷射速度对塔内压力信号 SHANNON 信息熵的影响。由图可见,喷射速度对压力脉动的影响不如流化气速明显,这是由于实验中喷射气量与流化气量相比份额较低, Q_f/Q_s 约在 22.5~84 之间;同时,SHANNON 熵在塔底的变化比上部更加明显,说明喷射速度对塔内气固流动行为的影响主要表现在反应塔底部区域。

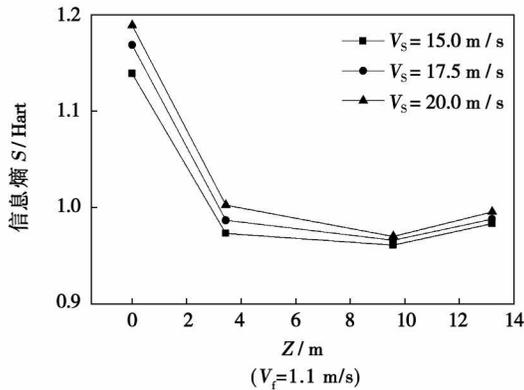


图6 喷射速度对压力信号 SHANNON 熵的影响

Fan 等将流化床分为 3 个区域^[13]。其中塔底区域由于距离布风板和进料装置较近,其流动行为受布风和喷射装置的影响很大,中间区域主要反映气泡行为的变化,而顶部区域则由于气泡破碎和出口结构导致流动的不稳定。底饲进料循环喷动床中,底饲喷嘴附近高速喷射流的存在使塔底形成了高颗粒浓度、高湍动度的气固混合,喷射速度的提高使反应塔底部的气泡行为更加明显,压力脉动也更加强烈。

2.4 回料量对压力脉动的影响

保持流化速度和喷射速度不变,调节放料管阀门的开度,得到不同回料量下的压力脉动信息。从图7中可以看到,回料量对压力脉动的影响十分明显。这是由于回料量的改变直接导致反应塔内颗粒浓度的改变。当流化气速较大且循环倍率很高时,充分发展段达到饱和和夹带并在床层底部形成了浓相段,这时进一步增加回料量主要导致提升管下部浓相段颗粒浓度的增加。而本实验采用的工况范围内颗粒浓度较低,充分发展段的颗粒通量没有达到饱和和携带量,随着循环倍率的提高,反应塔内的颗粒携带量随之增加,导致塔内轴向上的颗粒浓度全面升高,其中反应塔底部的增加速度高于充分发展段。从 SHANNON 信息熵的变化可见,随着回料量的增加,在不同高度上的熵值都出现了增加的趋势,且反

应塔底部的增加幅度大于上部。由此可见,除了喷射速度等因素的影响,SHANNON 信息熵的变化能够很好地反应塔内气固流动复杂程度随颗粒浓度的变化。

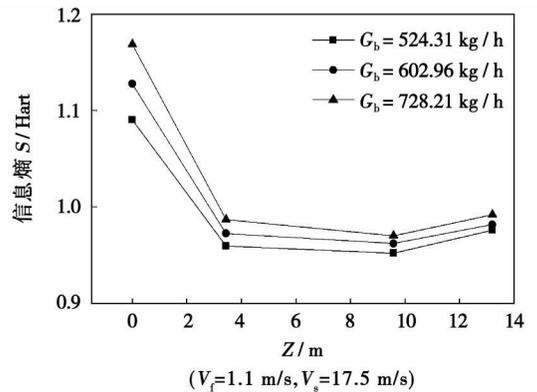


图7 回料量对压力信号 SHANNON 熵的影响

2.5 喷嘴位置对压力脉动的影响

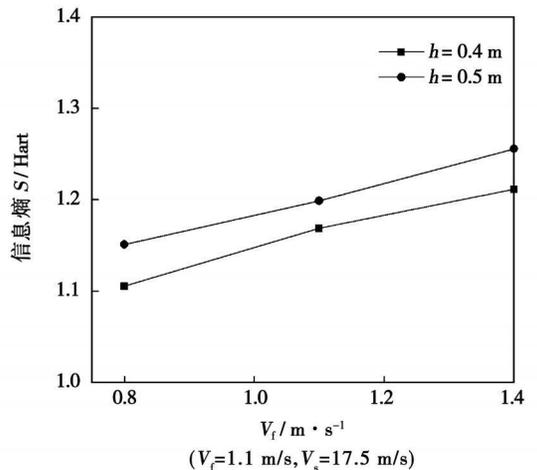


图8 喷嘴位置对塔底($Z=0 \text{ m}$)压力信号 SHANNON 熵的影响

调节喷嘴的高度,使喷嘴中心距离文丘里喉口底端的高度 h 为 0.5 m,得到 $h=0.5 \text{ m}$ 时压力脉动信号随表观速度的变化。喷嘴位置与喷射速度一样,对底饲进料循环喷动床内流场特性的影响主要表现在反应塔底部区域。采用不同喷嘴位置时, $Z=0 \text{ m}$ 处压力信号的 SHANNON 信息熵随表观速度的变化如图8所示。由图可见,喷嘴位置提高时,SHANNON 信息熵在采用不同表观速度时都有明显提高。分析其原因主要有两个方面:当 $h=0.5 \text{ m}$ 时,喷嘴距离回料管更近,因而导致底饲进料与循环物料之间的碰撞和混合更加强烈,气固湍动程度进一步提高,使气固流动更加复杂和不稳定;另一个原

因时喷嘴位置的提高使该处的压力测点距离底饲喷嘴更近,因而受喷射流的影响更加明显。

3 结 论

(1) 压力特征信号是流化床或喷动床内气固流动特征的综合反映, SHANNON 信息熵作为一种混沌分析手段能够很好地反映特征信号的复杂程度和稳定程度。应用 SHANNON 信息熵分析压力脉动的时间序列不仅能够描述和解释气固流动随床层高度的变化趋势,而且对操作参数的改变也比较敏感,为进一步建立特征量与流动特征之间的联系提供了现实基础。

(2) 底饲进料循环喷动床底部的气固流动受喷射装置的影响很大。因此喷射速度和喷嘴位置是影响反应塔底部流场特性的重要因素。提高喷射速度和喷嘴位置,能使反应塔底部气固流动更加强烈,气泡行为更加明显,反映在压力脉动信号上表现为 SHANNON 信息熵的明显提高。

(3) 随着高度的上升,塔内颗粒浓度不断降低,因此压力脉动的幅度随床高逐渐降低。在反应塔顶部,由于受出口结构的影响,颗粒不断聚集碰撞,动力学行为比较复杂,气固流动转为激烈,故 SHANNON 信息熵出现上升趋势。

(4) 颗粒浓度是影响整个反应塔内气固流动特性的重要因素。提高流化速度和循环倍率能够使塔内轴向上的颗粒浓度增加,气固混合更加强烈,从而导致压力脉动的幅度增加。因此流化速度和循环倍率的提高能使整个床层上压力信号的 SHANNON 信息熵明显上升。

参考文献:

[1] MONAZAM E R, SHADCE L J, MEIJ S, et al. Identification and characteristics of different flow regimes in a circulating fluidized bed[J]. Power Technology, 2005, 155(1): 17-25.

[2] BI H T. A critical review of the complex pressure fluctuation phenomenon in gas-solids fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science 2007, 62(13): 3473-3493.

[3] PUNCOCHAR M, DRAHOS J. Origin of pressure fluctuations in fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(5): 1193-1197.

[4] FAN L T, HO T C, HIRAOKA S, et al. Pressure fluctuations in a fluidized bed[J]. AIChE Journal, 1981, 27(3): 388-396.

[5] PISKOVA E, MORL L. Characterization of spouted bed regimes using

pressure fluctuation signals[J]. Chemical Engineering Science 2008, 63(9): 2307-2316.

[6] 张毅, 彭园园. 循环流化床下料立管内气固两相流动状态与压力脉动的关系[J]. 过程工程学报, 2008, 8(1): 23-27.

[7] JOHANSSON F, ZIJERVELD R C, SCHOUTEN J C, et al. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(4): 663-715.

[8] JIAN XU, XIAOJUN BAO, WEISHENG WEI, et al. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds[J]. Power Technology, 2004, 140(1-2): 141-154.

[9] 赵贵兵, 石炎福, 段文锋, 等. 从混沌时间序列同时计算关联维和Kolmogorov熵[J]. 计算物理, 1999, 16(3): 309-315.

[10] 钟文琪, 章名耀. 喷动流化床流动结构的 SHANNON 信息熵模糊聚类分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 13-17.

[11] 黄轶伦, 汪乐宇, 郑燕萍, 等. 气固流化床中信息熵的实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2001, 15(2): 167-173.

[12] ULRIKE LACKERMEIER, JOACHIM WERTHER. Flow phenomena in the exit zone of a circulating fluidized bed[J]. Chemical engineering and Processing 2002, 41(9): 771-783.

[13] HIRAOKA S, SHIN S H, FAN L T, et al. Pressure fluctuations in a gas-solids fluidized bed-effect of external noise and bubble residence time distribution[J]. Powder Technology, 1984, 38(2): 125-143.

(编辑 陈 滨)

· 书 讯 ·

《断裂力学中的数值计算方法及工程应用》

本书系统地介绍了断裂力学中的数值方法以及工程应用背景。全书共分6章,在第一章中全面介绍了断裂力学中的3个主要参数(应力强度因子、J积分和能量释放率)以及相应的数值计算方法。在第二章中,介绍了断裂单元的基本思想,同时给出基于商业有限元软件ABAQUS的子程序,供读者参考使用。在第三、四章中分别介绍了针对线状裂纹和面状裂纹的虚拟裂纹闭合法。第五章通过具体例题着重介绍了虚拟裂纹闭合法在典型断裂分析中的应用。第六章则着重介绍了虚拟裂纹闭合法的工程应用情况。读者对象:机械工程、航空航天、船舶与海洋工程方面工程技术人员和科学研究人员,相关专业研究生、高年级本科生及教师。

2009年8月出版。

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