研究论文

DOI：10.11949/0438-1157.

内加热-外循环式流化床中颗粒运动的电磁感应测量方法

严泽凡，田宇，兰蕊，刘荣正，杨旭，刘兵，邵友林，刘马林

（清华大学核能与新能源技术研究院，北京 100084）

摘要： 针对包覆型核燃料颗粒流化床-化学气相沉积制备用多环斜孔式喷动流化床在实践中产生的孔口沉积问题，提出了一种内加热-外循环式流化床改进设计。为了研究该新型流化床中的颗粒流化规律，有必要对流化床中的颗粒运动进行测量。采用电磁感应测量技术，以钕铁硼磁性颗粒作为示踪颗粒，构建多匝紫铜线作为感应线圈，通过在流化床内部署测量系统，可针对颗粒在内筒中的停留时间与循环周期开展测量研究。在入口空气流量220 Nm^3/h工况下，粒径3 mm的密度相近的ZrO_2颗粒可达到稳定流化状态。测量结果表明，单线圈有效信号包含60%的正常通过信号与38%的多峰震荡信号，通过进一步信号处理算法分析，可得到双线圈正常循环信号占比为88%，满足测量需求。统计学分析表明，颗粒在内筒的停留时间中位数为0.094 s，颗粒循环周期中位数为2.565 s，二者均服从对数正态分布，同时具有进一步定量测量颗粒速度的可能性。颗粒运动电磁感应测量方法对该新型流化床的适用性强，也可拓展到常规外循环流化床，可以用于后续的流化床几何设计优化和包覆工艺参数优化。

关键词： 流化床；电磁感应；包覆；停留时间分布；测量方法

中图分类号： TQ016.1　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（XXXX）XX-0001-14

Electromagnetic induction measurement method of particle motion in a fluidized bed with internal heating-external circulating type

YAN Zefan, TIAN Yu, LAN Rui, LIU Rongzheng, YANG Xu, LIU Bing, SHAO Youlin, LIU Malin

(*Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: To overcome the problem of nozzle accretion in the multi-ring inclined-hole spouted fluidized bed used for chemical vapor deposition coating of nuclear fuel particles, an internal heating-external circulating type fluidized bed is proposed. To investigate the hydrodynamics of this new configuration, particle motion is measured using an electromagnetic induction system, employing NdFeB magnetic particles as tracers and multi-turn designed copper coils as sensors. The measurement system is used to determine the residence time in the inner cylinder and circulation period of particles. At an inlet air flow rate of 220 Nm^3/h, stable fluidization can be achieved by ZrO_2 particles with a diameter of 3 mm. It is revealed that single-coil signals are comprised of 60% regular passing signals and 38% multi-peak oscillations, while the proportion of regular circulation signals in dual-coil measurements reaches 88%, by detailed signal analysis. It is indicated that the median residence time in the inner cylinder and the median circulation period are 0.094 s and 2.565 s, respectively, both of which are followed by a

收稿日期： 2026-09-13　　**修回日期：** 2026-10-08

通信作者： 刘马林(1982-)，男，博士，教授，liumalin@tsinghua.edu.cn

第一作者： 严泽凡(1998-)，男，博士研究生，yzf21@tsinghua.org.cn

基金项目： 国家自然科学基金项目(22478220；U2541253)；国家高层次人才计划(青年项目)(20224723061)

引用本文： 严泽凡, 田宇, 兰蕊, 刘荣正, 杨旭, 刘兵, 邵友林, 刘马林. 内加热-外循环式流化床中颗粒运动的电磁感应测量方法[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-14

Citation: YAN Zefan, TIAN Yu, LAN Rui, LIU Rongzheng, YANG Xu, LIU Bing, SHAO Youlin, LIU Malin. Electromagnetic induction measurement method of particle motion in a fluidized bed with internal heating-external circulating type[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-14

log-normal distribution by statistical analysis. The electromagnetic induction measurement method shows great potential for the newly proposed fluidized bed, providing a reliable basis for subsequent geometric design and coating process optimization.

Keywords: fluidized bed; electromagnetic induction; coating; RTD; measurement method

引 言

流化床-化学气相沉积(fluidized bed-chemical vapor deposition,FB-CVD)是包覆型核燃料颗粒的关键制备技术,在弥散型核燃料元件领域中有广泛应用和重要意义。例如,已经成功商用的高温气冷堆球形核燃料元件中的TRISO核燃料颗粒[1]的包覆层是通过FB-CVD技术制备的。高通量研究堆[2]中的板状金属基核燃料元件的核燃料颗粒金属包覆层也可以通过FB-CVD技术制备。目前在核燃料颗粒制备中所广泛使用的流化床是一种多环斜孔式喷动流化床。这种流化床采用壁面加热,前驱体在高温区域发生裂解生成的产物在遇到流化床中被流化的颗粒时会沉积在颗粒表面形成包覆层。

本团队提出了一种新型设计的内加热-外循环式包覆流化床,目前对该新型流化床还缺乏相应的颗粒流化规律实验研究,因此亟需对颗粒在该类型流化床中的运动行为进行测量。在气-固流化床的非侵入式颗粒流化行为测量研究中,已经有大量各类测量方法的文献报道。可以将这些测量方法分为两大类型,即欧拉方法和拉格朗日方法[3]。欧拉方法包括粒子图像测速(particle image velocimetry,PIV)[4, 5]、X射线数字放射成像(X-ray digital radiography,XDR)[6, 7]、X射线计算机断层扫描(X-ray computed tomography,XCT)[8, 9]、电容层析成像(electrical capacitance tomography,ECT)[10, 11]、磁共振成像(Magnetic resonance imaging,MRI)[12, 13]和红外热成像(infra-red thermography,IRT)[14, 15]等。这类技术能够测量速度场、空隙率分布、温度场等宏观量,可以捕捉流化床中的瞬时和全局信息。拉格朗日方法包括正电子发射粒子跟踪(positron emission particle tracking, PEPT)[16, 17]、放射性粒子跟踪(radioactive particle tracking,RPT)[18, 19]、磁性粒子跟踪(magnetic particle tracking,MPT)[20, 21]和粒子跟踪测速(particle tracking velocimetry,PTV)[22, 23]等。这类技术可以通过追踪单个或多个示踪颗粒来获得颗粒轨迹、速度、混合扩散系数等微观信息,并可通过遍历性原理推导欧拉统计量。

其中,MPT方法是一种安全、低成本的测量方法,该方法通常采用磁阻传感器阵列来测量三个空间轴上的局部磁场强度。在采集到足够数量的传感器信号后,可以反算出磁性示踪颗粒的三维空间位置和运动方向。例如,Buist等[24]采用各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistance,AMR)传感器阵列开发了适用于密集气固流化床的改进型磁性粒子跟踪技术,通过三维/二维传感器系统测试了其位置求解精度。Sette等人[25]采用AMR传感器阵列跟踪磁性示踪颗粒,在鼓泡流化床中实现了颗粒三维轨迹的连续跟踪,并可同时获取颗粒的平动与转动信息。Halow等[26]在较高密度颗粒鼓泡流化床中,利用磁场探测器阵列跟踪单个示踪颗粒的实时位置,观测并统计了示踪颗粒的混合行为与停留特征。本课题组[27, 28]采用磁性示踪颗粒与磁阻传感器构建了颗粒示踪测量系统,通过颗粒空间位置搜索算法测量了喷动流化床环隙区高密度颗粒运动循环时间和局部停留时间,获得了单颗粒运行方向、运动速率与循环频率等流化参数。然而,基于磁阻传感器的MPT方法具有数据分析烦琐,实验装置复杂等缺点,从而限制了该方法的应用。

本研究中新型内加热-外循环式流化床具有严格约束颗粒运动轨迹的功能,在良好的流化状态下,颗粒会随气流从内筒中上升后下落入外循环区。这大大简化了颗粒在流化床中的运动轨迹,使颗粒的定向运动行为测量成为可能。可以通过在内筒中嵌入简易的感应线圈来测量磁性示踪颗粒,从而确定通过线圈时的时刻,进而测量颗粒在流化床中的定向运动行为,以评估反应器的包覆能力。目前,已有学者采用同类方法对流化床内的颗粒运动行为开展测量研究。例如,Cheng与Turton[29]通过在Wurster型流化床的导流筒内部嵌入单个感应线圈,通过收集单个磁性示踪颗粒产生的感应电压信号成功实现了颗粒循环时间分布的测量。Guío-Pérez等[30-32]通过在循环流化床的上部环封处安装单个感应线圈,通过收集磁性示踪颗粒群产生的电感信号来检测示踪颗粒浓度,再结合压降测量得到固体循环率,从而定量表征颗粒运动。上述研究结果

验证了电磁感应测量方法的可行性，且体现了该方法具备非侵入性、操作简便等优势。然而，现有研究均采用单个感应线圈进行检测，难以对流化床内颗粒运动行为实现精准表征，且有待对线圈信号特征进行深入细致的分析。以Wurster型流化床为例，仅依靠单个感应线圈难以区分颗粒是完成一次正常循环后回到感应线圈检测位置，还是发生反向回落运动至感应线圈检测位置。

本文针对新型内加热-外循环式流化床中的颗粒运动行为的测量问题，基于流化床功能特性和电磁感应原理，以磁性颗粒作为示踪颗粒，紫铜线圈作为感应线圈设计并搭建了一套流化床颗粒运动测量装置。基于磁性颗粒通过感应线圈产生的感应电流信号详细分析了信号特征，开发了颗粒运动行为测量方法，从而研究了颗粒在流化床中的内筒停留时间和循环时间等颗粒运动参数。本文可以为内加热-外循环式流化床的后续几何设计优化和包覆工艺参数优化奠定基础。

1 实验材料和方法

1.1 流化床设计

以多环斜孔式为代表的传统喷动流化床的高温覆盖区域较大，前驱体裂解产物难以完全定向沉积在颗粒表面，也有可能沉积在流化床壁面或气体入口（即孔口）处，造成孔口沉积影响流化床的长期连续使用。其根本原因是该类型流化床具有颗粒包覆与颗粒运动、循环高度耦合的特性，这不利于深入解耦研究流化床中的颗粒包覆参数和后续的工艺优化。因此，在本团队基于FB-CVD制备核燃料包覆颗粒多年长期研究经验的基础上，引入常用Wurster型喷雾包覆流化床[33]的设计思想，提出了内筒加热、外壁冷却的新型包覆循环流化床设计，如图1所示。在该类型新型流化床中，高温包覆区域严格被控制在距离孔口一定高度的内筒中，从而实现了颗粒包覆区和颗粒外循环区的空间解耦，且有利于避免孔口沉积现象的发生。颗粒包覆区和外循环区的分离设计也有利于FB-CVD单参数影响的定量化研究，为驱动FB-CVD制备创新结构/功能的包覆层材料提供可能。此处需要说明的是，Wurster型流化床通过导流筒实现的是颗粒包覆区与干燥区的功能分区，导流筒内外处于相近温度场，包覆温度与干燥温度不能独立调节。且其包覆物质由底部喷嘴雾化引入、喷动与雾化在同一区域耦合，没有发生化学气相沉积。本文提出的内加热-外循环式流化床则通过内筒加热、外壁冷却实现温度场上的分区。前驱体仅在内筒高温区裂解并沉积在颗粒表面，颗粒在外循环区只完成输送与降温，从而使包覆区温度、外循环区温度、包覆区高度与循环流量等参数可以独立调节，这是二者最本质的区别。

对于本研究中的内加热-外循环式流化床，颗粒具有定向运动的特性。在良好的流化状态下，颗粒会随气流从内筒的颗粒包覆区中上升后下落入外循环区，再从外循环区被吸入内筒形成循环。这种设计将颗粒在流化床中的运动轨迹规则化，因此本文提出通过感应线圈来测量颗粒的定向运动行为。

1.2 实验材料

本文采用ZrO_2颗粒作为流化颗粒（粒径3 mm，密度6.0 g/cm^3，数量12000个），钕铁硼磁性颗粒（粒径3 mm，密度7.6 g/cm^3，数量1个）作为示踪颗粒，二者密度相近。流化床壁面采用透明有机玻璃制作，内筒采用铝合金制作，线圈采用紫铜漆包线绕制，其他相关零件均采用铝合金或树脂等无磁性材质打造。

1.3 仪器设备

1.3.1 测量装置搭建 本研究中的核心测量装置是紫铜线圈，其设计参数如表1所示。关键测量部件的实物图与示意图如图2所示。为了便于将线圈安装在反应器内筒中，线圈采用透明树脂空心骨架线圈设计，其尺寸与内筒颗粒包覆区的孔径相匹配。线圈的高度被设计为3 mm，与待测颗粒直径一致。根据电磁感应原理，感应电流与线圈的匝数和电阻密切相关。增加匝数是提高感应电流的有效策略，但线圈的电阻也会随着匝数的增加而增加。因此，为获取峰值显著的感应信号，本文将线圈匝数设计为250匝。该设计可在匝数与电阻之间实现较好平衡，同时能够满足小型化、易安装的设计要求。线圈两端各预留了1000 mm长的引线，最终实测线圈电阻仅为11 Ω。

与线圈配套的是反应器的内筒，为了便于安装线圈，将内筒设计为带可拆卸盖子的中空形式。内筒的下方设计了四个支脚，支脚可从反应器底部的气体分布板上预留的孔中穿出，并可通过螺栓固定位置，从而便于调整内筒距反应器底部的距离。内

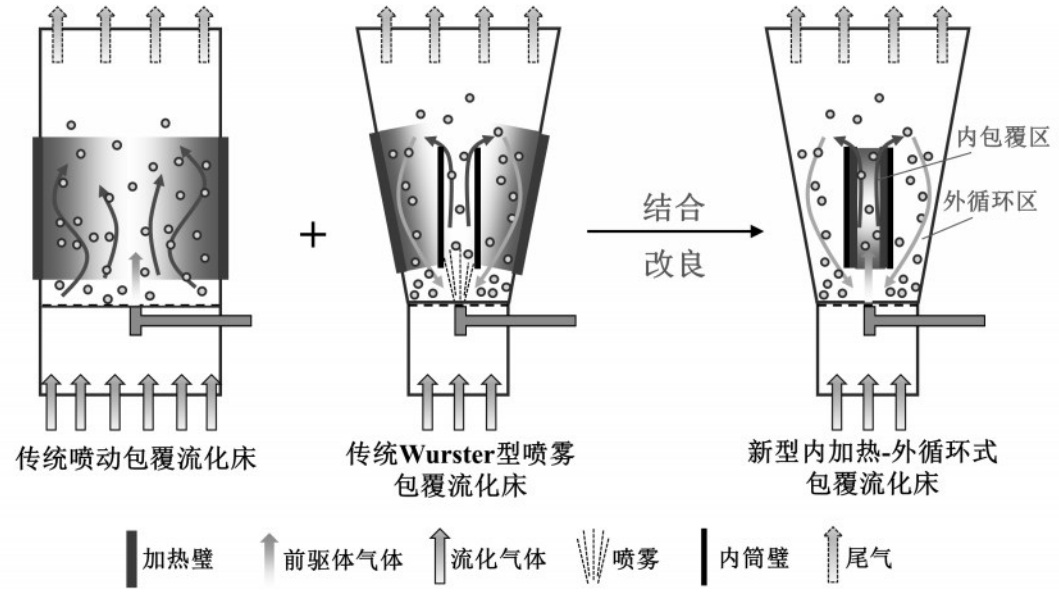


图1　本文中流化床反应器研究背景

Fig.1　Research background of fluidized bed reactor of this study

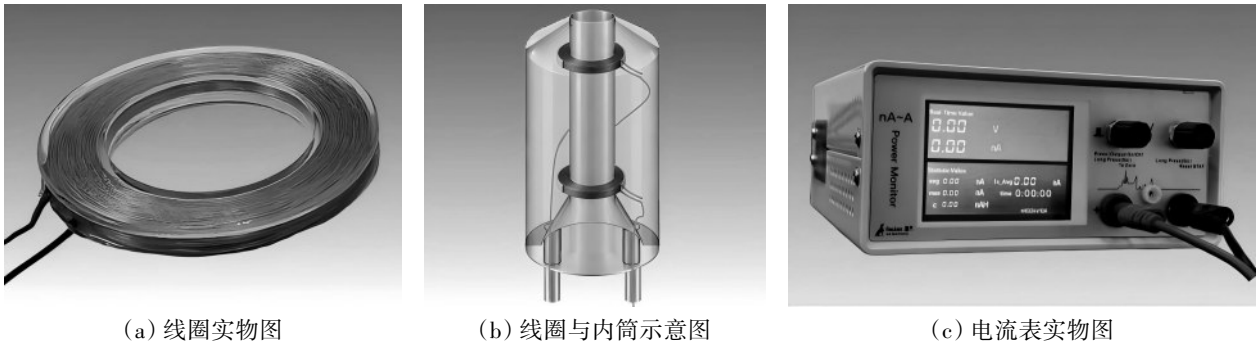
表1　内筒线圈的设计参数

Table 1　Design parameters of inner cylinder coil

材质	线径/mm	线圈直径/mm	线圈高度/mm	匝数	引线长度/mm	电阻/Ω
紫铜	0.3	39(内径)/59(外径)	3	250	1000(每侧)	11

筒支脚中预留了贯穿孔,便于线圈引线穿出。本文将两个线圈分别安装在内筒颗粒喷动区(对应热态实验的包覆区)的上下两端。由于本研究采用的磁性颗粒较小且磁性较弱,因此采用纳安电流表(深圳市瑞乔精密仪器有限公司,型号EMK850)来采集感应电流。

1.3.2　实验装置　本研究搭建好的实验装置示意图如图3所示,实物图如图4所示。流化床底部还放置了用于减少颗粒流化死区的可拆卸60°锥角。两个线圈的引线在从内筒支脚中穿出后,从气体分布板下方的气腔壁上预留的小孔穿出并连接在流化床外部的两台与电脑连接的电流表上。在流化床通入空气和颗粒后,通过电流表配套的采集软件来采集感应电流信号。



(a) 线圈实物图　(b) 线圈与内筒示意图　(c) 电流表实物图

图2　测量关键部件的实物与示意图

Fig.2　Physical diagram and schematic diagram of key components

1.4　测量原理

本研究的测量原理是法拉第电磁感应定律,如式(1)所示[34, 35]。在磁性颗粒通过线圈的过程中会发生磁通量的改变,从而产生感应电流。

$$I = -\frac{N}{r}\frac{d\Phi}{dt} \tag{1}$$

其中I为感应电流,N为线圈匝数,Φ为磁通量,r为线圈电阻,t为时间。

本文的线圈高度与磁性颗粒直径相等。因此,

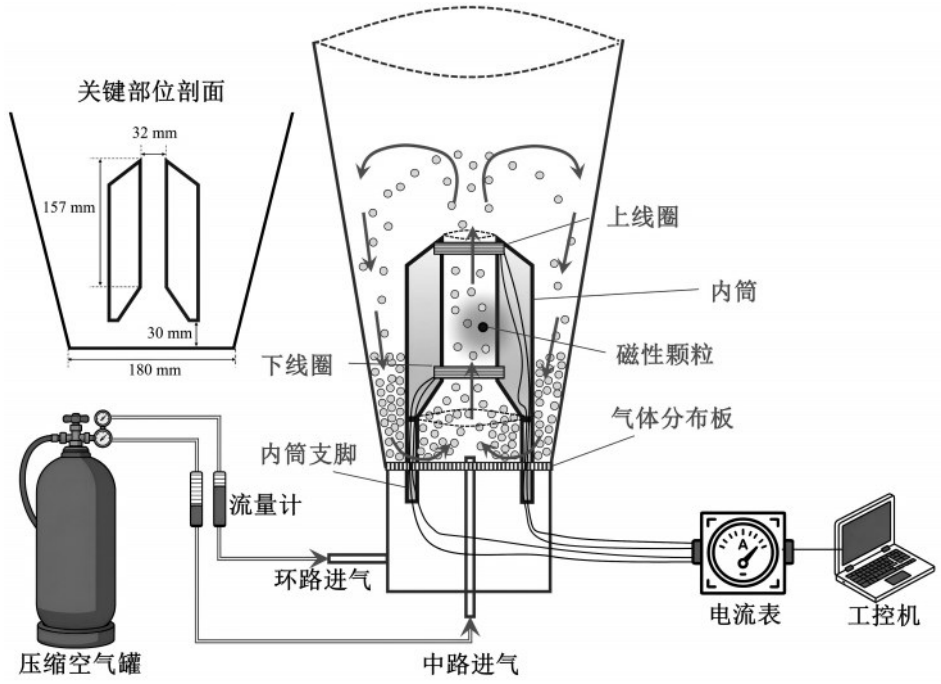


图3 实验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental device

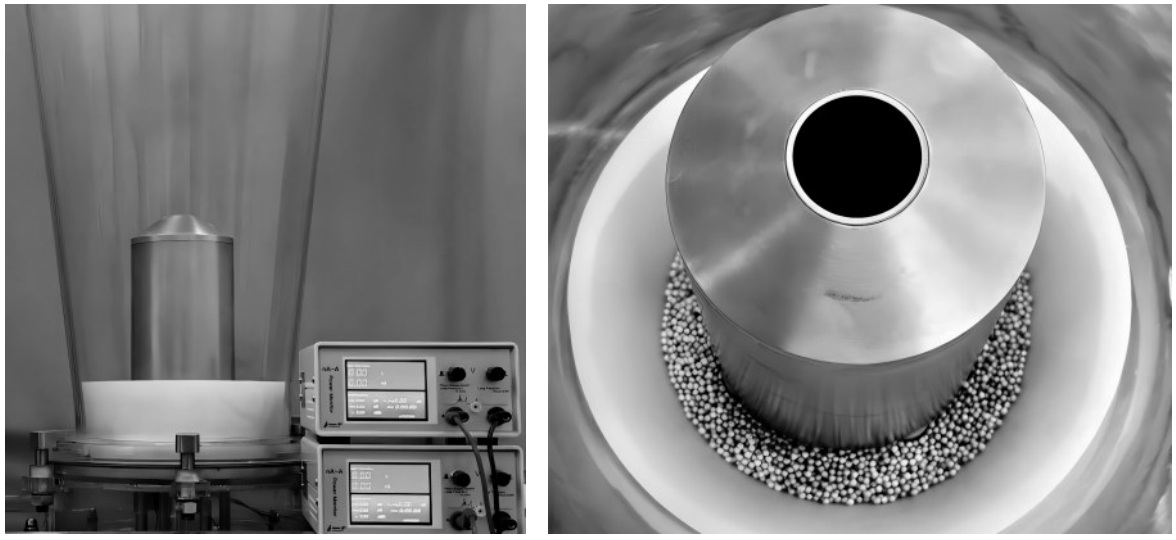


图4 实验装置实物图

Fig.4 Physical diagram of experimental device

从理论上分析,当磁性颗粒以恒定的轴向速度沿线圈轴向中心方向接近线圈某一端时,通过线圈的磁通量开始变大,会产生某个方向的感应电流并逐渐增大。当颗粒运动到磁通量变化率$\frac{d\Phi}{dt}$最大的位置时,会产生一个电流极值。当磁性颗粒通过线圈的轴向几何中心时,磁通量达到最大,但磁通量变化率为0,因此此时的感应电流为0。随后,在磁性颗粒穿出线圈的过程中,通过线圈的磁通量开始减小,会产生与进入线圈相反的感应电流并逐渐增大。当磁性颗粒远离线圈另一端时,通过线圈的磁通量和磁通量变化率均变为0,感应电流也为0。通过以上分析可知,当磁性颗粒通过线圈时,感应电流会产生典型的双峰反对称波形,如图5所示。基于磁性颗粒通过线圈所产生的特征感应电流波形,可以判断颗粒是否正常通过了线圈。在理想状态下,根据内筒中两个线圈所产生的相邻感应电流中心零点时间差,可以计算颗粒通过内筒颗粒喷动区

的停留时间。根据某个线圈所产生的两个相邻感应电流中心零点的时间差，可以计算颗粒在流化床中的运动循环周期。

进一步推导得知，电流信号和颗粒速度相关，如式(2)所示[34, 35]。

$$I=-\frac{N}{r}\frac{d\Phi}{dz}\frac{dz}{dt}=-\frac{N}{r}\frac{d\Phi}{dz}v_z \tag{2}$$

其中z为沿线圈轴向的空间位置，v_z为颗粒沿线圈轴向的速度。据此可以看出，在理想状态下，感应电流极值对应的峰位与磁通量的轴向空间梯度相关。且峰值大小与颗粒的轴向运动速度呈正相关，即颗粒轴向运动速度越大，感应电流峰值越大。因此本测量方法不仅可以测量经过线圈的时刻，还可以通过电流值大小估计颗粒穿越线圈的速度大小。

需要说明的是，本文仅利用感应电流峰值对颗粒速度作定性的趋势判断，尚未用峰值直接反算颗粒的瞬时速度。因为信号峰值同时受到颗粒径向位置、颗粒取向以及颗粒在检测面附近往复运动等因素的影响。其中，感应电流的峰值与颗粒和线圈之间的磁通量轴向梯度有关，颗粒偏离线圈轴线会改变该几何因子，从而改变信号峰值。Zhang等[36]在研究同类感应式传感器中发现，颗粒从感应区中心与从边缘通过时，感应电压峰值之比不超过1.3(对应检测误差不超过10%)。Karlsson等[37]在针对Wurster流化床内颗粒运动测量方法开展研究时，将颗粒速度列为感应信号峰值的首要影响因素。上述文献结果表明，颗粒径向位置对感应电流信号峰值的影响程度有限，并不会干扰基于感应电流峰值开展的颗粒速度定性趋势分析。后续可通过磁性颗粒以已知速度匀速通过线圈的标定实验，建立感应电流峰值与颗粒速度之间的定量关系，进而实现颗粒瞬时速度的测量。

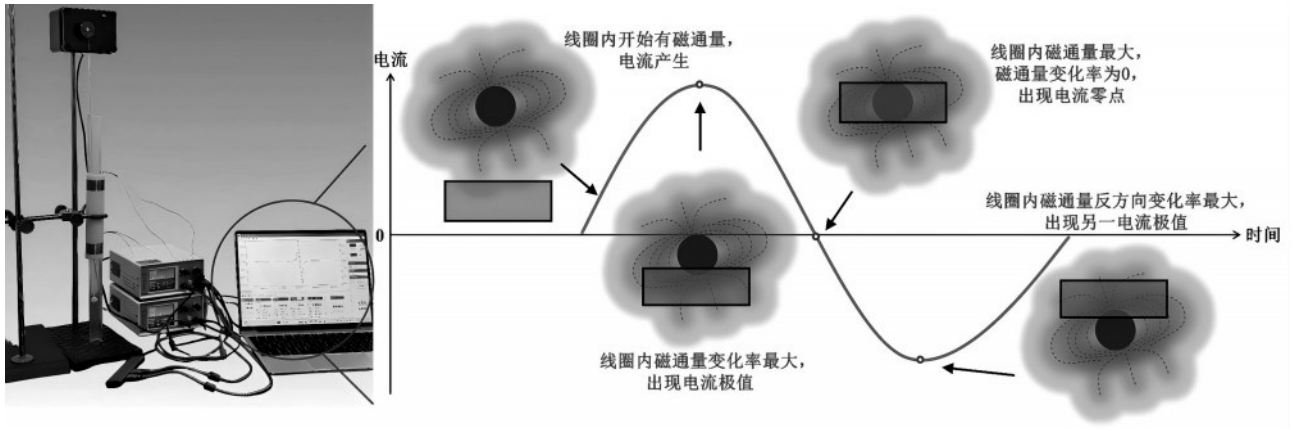


图5　测量原理示意图

Fig.5　Schematic diagram of measurement principle

2　结果与分析

2.1　双线圈测量结果展示

首先在流化床中通入流量为220 Nm³/h的空气(中路100 Nm³/h，环路120 Nm³/h)开展实验，测量得到的原始信号全貌及其部分代表性数据结果如图6所示。为便于观测展示，放大图中上线圈信号的基线已向上平移20 nA。可以发现，实验数据总体上呈现清晰的周期性规律。在出现下线圈感应电流信号后紧接着出现上线圈感应电流信号，然后出现一段时间的信号静默，之后开始重复该过程。该结果说明颗粒先通过内筒下部，然后到达内筒上部，之后经外循环区又返回内筒下部，通过该信号可以完整获得颗粒循环行为。

2.2　测量误差分析

为了进一步研究颗粒通过线圈产生的感应电流信号，此处以下线圈为例对单线圈感应电流信号特征进行了分类识别，如图7所示。可以发现感应电流信号主要可以分为四类。第一类为正常通过信号，该类信号特征为典型的双峰反对称波形，与1.4节中的图5类似。第二类为多峰震荡，即颗粒在通过线圈时产生一系列不规则大幅度电信号，该类信号中的双峰信号之间的间隔通常小于0.15 s，是由磁性示踪颗粒与内筒壁或其他颗粒碰撞引起其在线圈处徘徊运动导致的。第三类为低峰值信号，该类信号通常为小幅度电信号，幅度通常在5~15

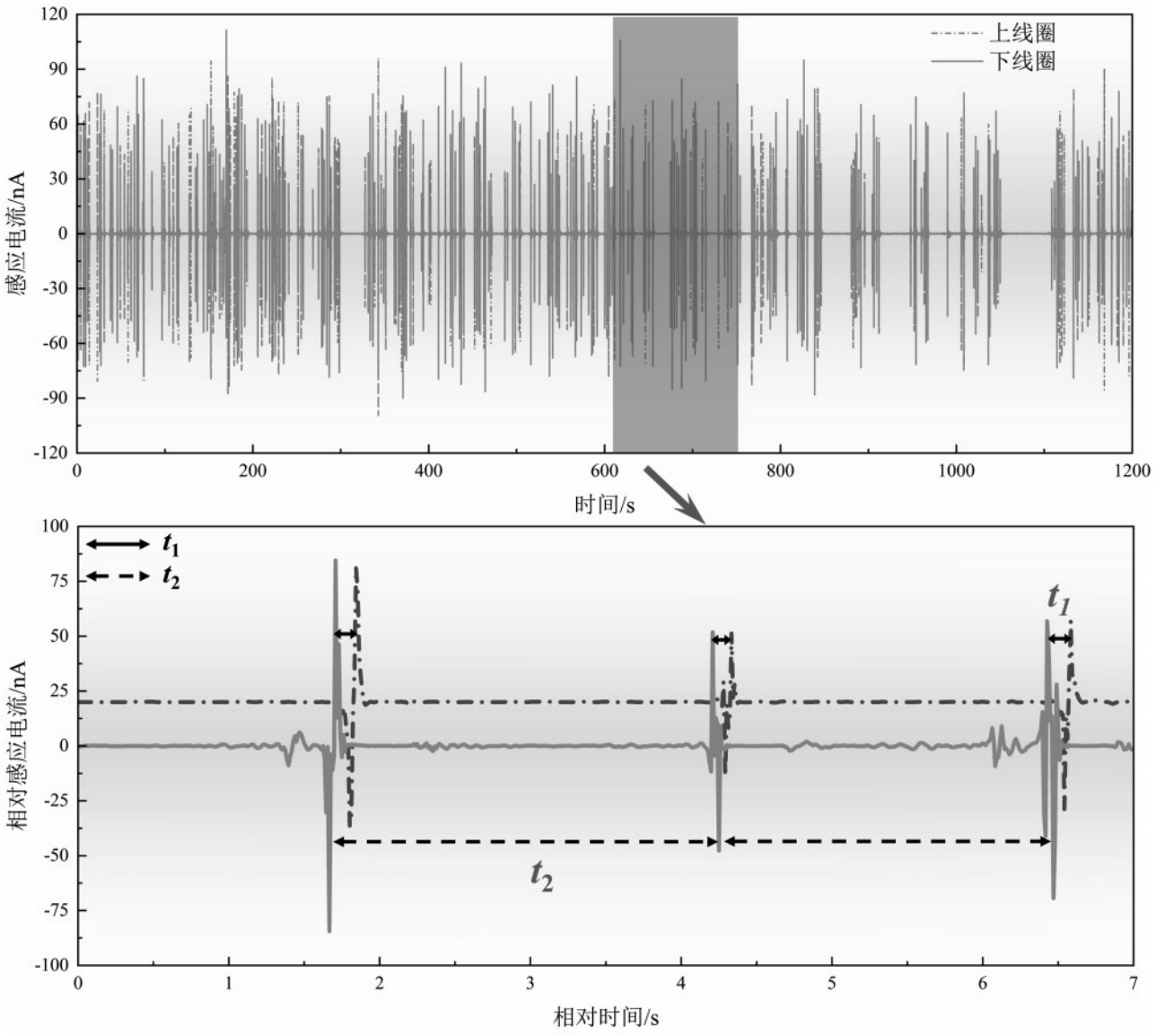


图6 双线圈测量的典型结果

Fig.6 Measurement results of double coils

nA,是由磁性颗粒在距线圈不远处运动导致的磁通量改变,或磁性颗粒以较小的轴向速度通过线圈造成的。第四类信号为噪声信号,该类信号的峰值通常小于5 nA。此处需要说明的是,本文所采用纳安电流表的采样时间分辨率为10 ms(对应采样率100 Hz)。在本文实验条件下,单线圈正常通过信号的典型峰值为70~80 nA,而噪声信号的峰值小于5 nA,系统峰值信噪比约为15(约24 dB),有用信号与判决阈值之间留有约15倍的峰值余量,这为本文按峰值对信号进行分类识别提供了定量依据。在无颗粒通过的时段实测信号本底均方根值小于0.1 nA,说明判决阈值的选取具有充分余量,且在本实验环境下环境电磁干扰对测量结果的影响很小。

进一步地,根据对单线圈感应电流信号的分析,对除了噪声之外的三类信号进行了统计分析,如图8所示。分析结果表明,大多数单线圈信号均为颗粒正常通过产生的信号,同时存在一定占比的多峰振荡信号,而峰值偏低的信号占比极低。其中,多峰震荡信号的物理本质是颗粒在检测面附近发生了多次穿越。颗粒每穿越一次线圈轴向中心即产生一对方向相反的特征峰。因此信号中的峰对数直接对应颗粒的穿越次数。对多峰震荡信号的统计表明,2、3、4、5、6对峰的事件占比分别为53.9%、34.6%、7.8%、2.3%和1.4%,说明颗粒在检测面附近的往复运动以往返1次为主,多次徘徊属于小概率事件。峰对数与信号持续时间呈正相关

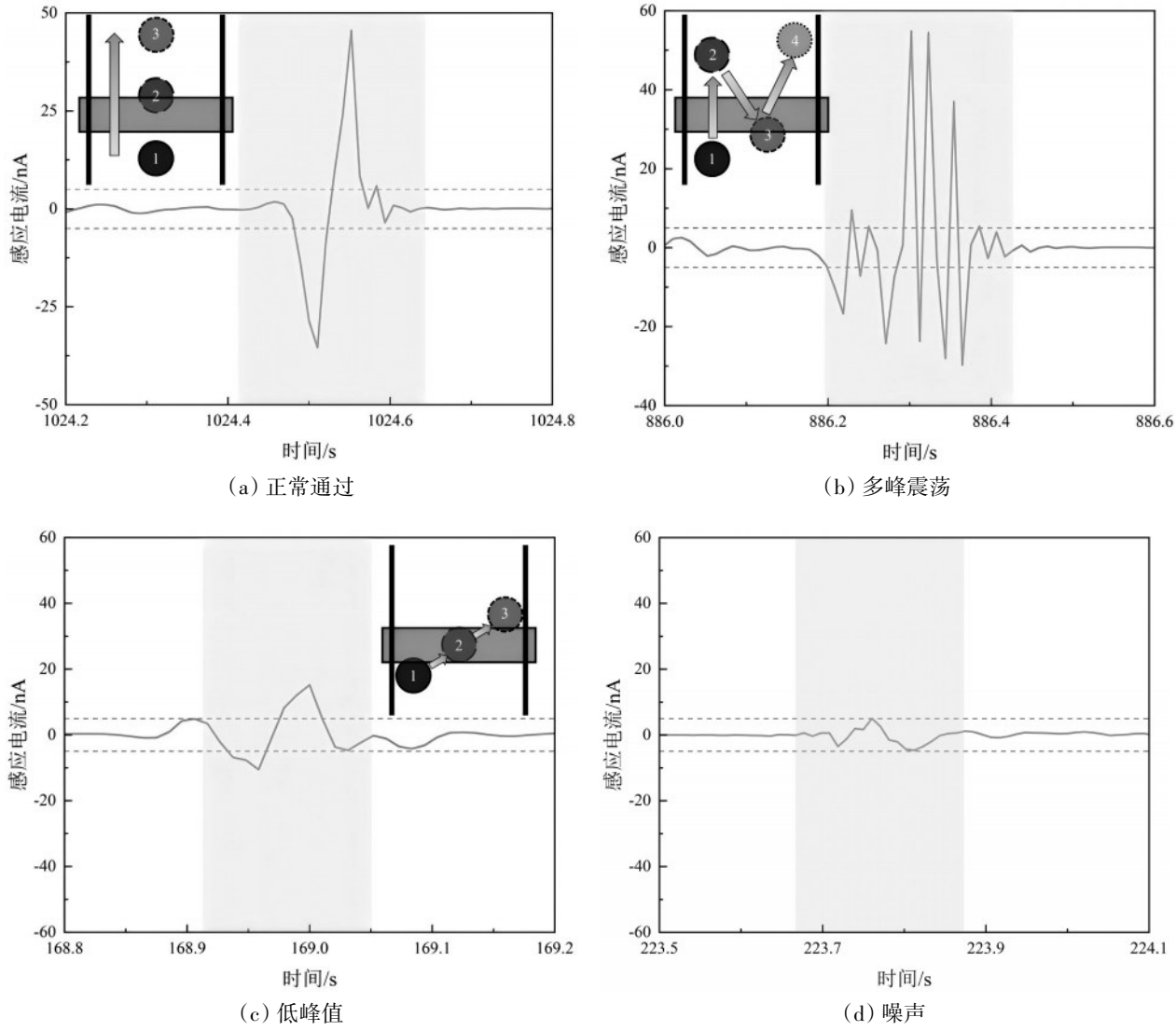


图7　典型单线圈感应电流信号特征

Fig.7　Characteristics of typical single coil induced current signal

(Pearson 相关系数 0.561)，说明持续时间可定量反映颗粒在检测面附近的滞留程度。而相邻零交叉的平均间隔基本恒定(中位 0.019 s)，说明峰对数的增加主要源于往返次数的增加而非往返速度的差异。此外，多峰震荡信号的峰值与正常通过信号的峰值相当，说明其并非远场弱耦合信号，无法仅靠峰值阈值与正常通过信号区分，必须借助波形的时间特征加以识别。

以上结果说明颗粒会以较高概率正常通过内筒中的目标平面，但在气流、内筒壁及其他颗粒的干扰作用下，仍会出现不规则运动。上述结果验证了在内加热-外循环式流化床设计中，内筒对颗粒的运动轨迹具有较强约束作用。

2.3　测量算法分析

基于上节的分析，本研究主要关注正常通过和多峰震荡信号。对于正常通过信号，可以将电流信号双峰之间的电流信号零点对应的时刻作为磁性颗粒通过某个线圈的时刻。然而，这种通过时刻识别方法对多峰震荡信号来说难以处理。因此，为了便于分析，可以将多峰震荡信号的正负极值所对应时间点的中点作为磁性颗粒通过某个线圈的时刻。通过该方法可以较好地识别出磁性颗粒通过线圈的时刻，如图9所示。

进一步地，通过对上下两个线圈的电流信号进行匹配，还可以发现颗粒在循环过程中出现的异常事件，如图10所示。对于该实验来说，识别出了34次异常循环事件(占总循环事件12%)，典型的情况

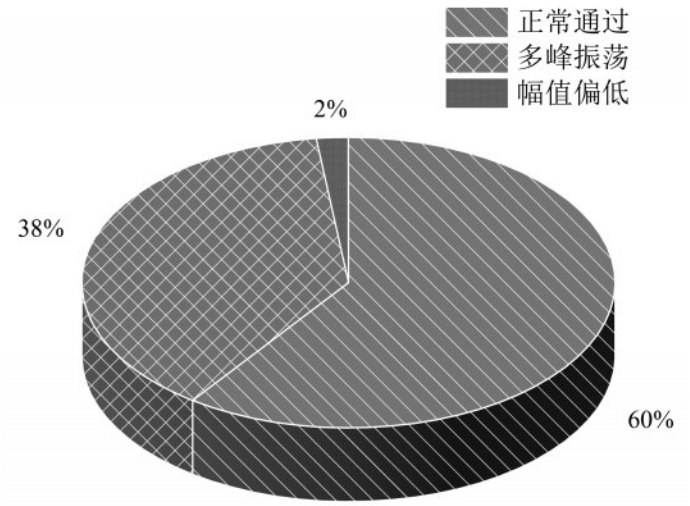
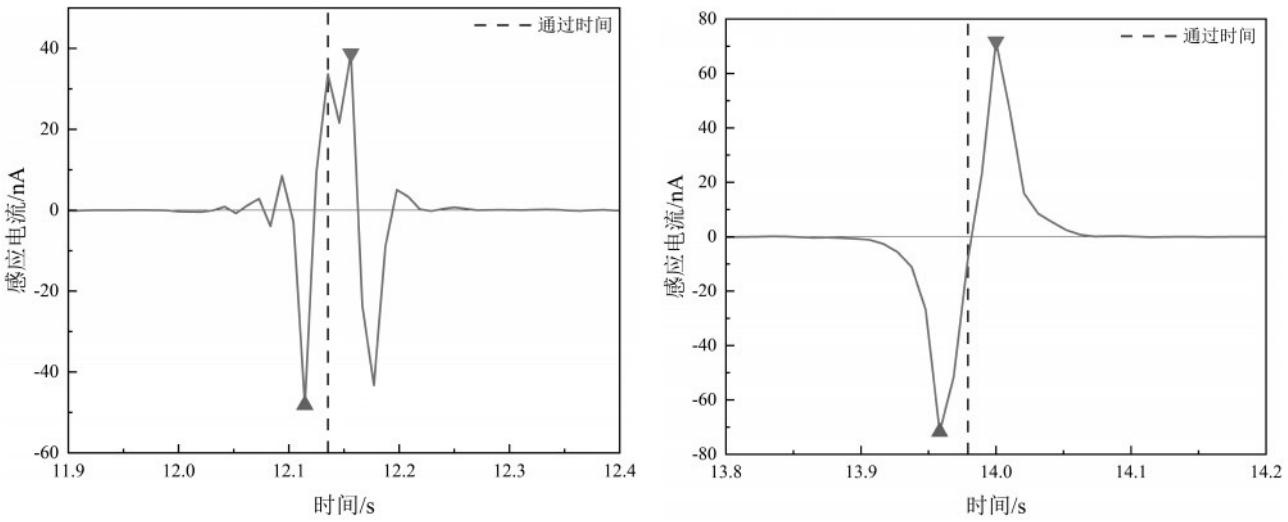


图8 单线圈感应电流信号统计分析

Fig.8 Statistical analysis of single coil induced current signal



(a) 多峰震荡 (b) 正常通过

图9 单线圈感应电流信号处理方法

Fig.9 Processing method of single coil induced current signal

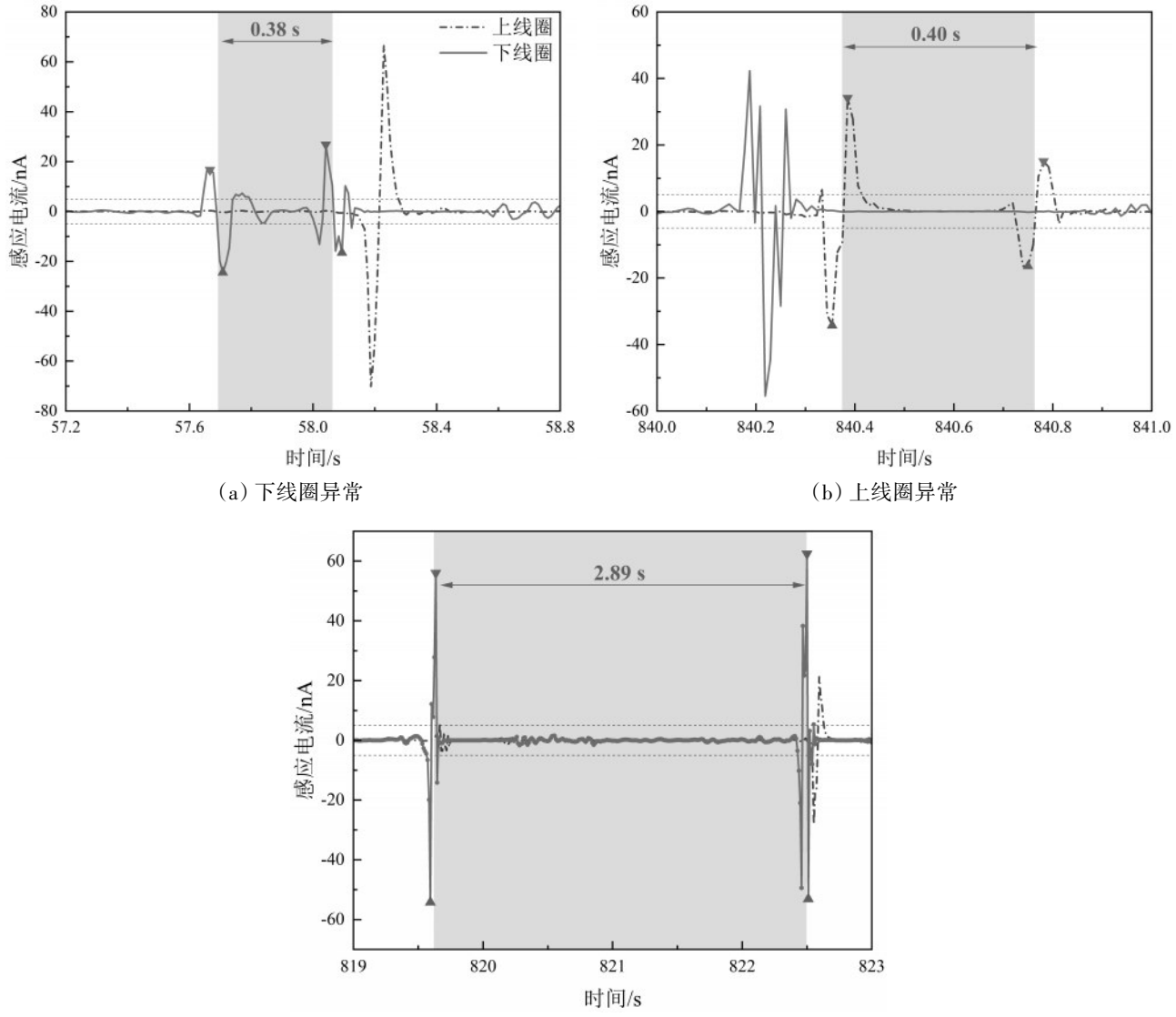
可以分为三类,即上线圈异常(15次,占5%)、下线圈异常(17次,占6%)和协同异常(2次,占1%),如图10所示。

上线圈异常和下线圈异常是类似的,即在紧连着的下线圈→上线圈电流信号外围,还出现了某个线圈的明显双峰或多峰震荡信号。这是由磁性颗粒在先后通过两个线圈时在某个线圈附近徘徊运动造成的。除此之外,还出现了极个别罕见的协同异常电流信号。该类型信号是因为在两个循环周期之间,某个周期的某个线圈因颗粒轴向速度较小,导致出现了接近噪声水平的低峰值信号造成的,这使完整循环周期被识别中断。对于这些少量异常事件,可以通过信号的人工识别和算法校正来判断正确的颗粒通过时刻和循环周期。

2.4 三线圈测量结果分析

上述双线圈测量方法主要针对颗粒在内筒中的运动轨迹,在流化床的颗粒流动结构分类中属于喷动区,还缺乏对环隙区颗粒运动的行为测量。因此,本文在双线圈测量方法的基础上进一步在环隙区放置了感应线圈(图11),采用120 Nm^3/h的入口空气流量(中路40 Nm^3/h,环路80 Nm^3/h)开展了实验。

实验典型结果如图12所示,此处为了便于展示三个线圈信号的规律,将上线圈和环隙线圈的信号



(a) 下线圈异常　(b) 上线圈异常

(c) 协同异常

图10　典型双线圈颗粒循环信号异常

Fig.10　Typical anomalies of double-coil particle cycle signal

基线分别上移、下移了20 nA。由结果可知,三线圈测量的内筒上、下线圈信号规律与双线圈测量结果一致,环隙线圈信号出现在颗粒离开内筒上线圈进入外循环区之后。相较于另外两个线圈的信号,环隙线圈信号较为杂乱,未呈现显著的运动规律特征,这与环隙区颗粒运动速度较慢,堆积碰撞及下落弹跳等因素相关。但三线圈测量结果表明,颗粒在内加热-外循环式流化床中可完成完整的循环运动,同时进一步验证了双线圈测量方法的可行性与准确性。此外,还可以发现,在入口流量降低时,内筒线圈信号的峰值也随之降低,对应颗粒运动速度减小,该结果验证了1.4节测量原理的合理性。

为了进一步分析环隙线圈的信号特征,对图12中的三线圈测量结果进行了小波分析,结果如表2所示。可以发现,环隙线圈信号有51.0%集中在1.56~6.25 Hz的较低频段。而内筒上、下线圈信号在同一频段仅分别占20.9%与11.4%,其信号大多位于6.25 Hz以上的高频段。这说明环隙线圈检测到的主要是环隙区颗粒群的输运与碰撞运动,而内筒线圈检测到的是单颗粒的脉冲型通过,这正是环隙线圈信号在时域上显得杂乱的物理原因。此外,小波分析还能把环隙区单颗粒通过事件(在6.25~50 Hz频段上相对本底高8~18倍)与颗粒群运动的起伏区分开来。

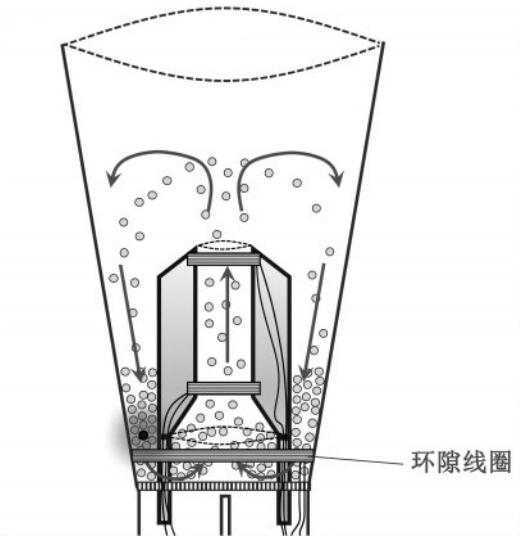


图11 环隙线圈示意图

Fig.11 Schematic diagram of annular coil

3 测量方法的实际应用

表2 三线圈测量的小波分析结果

Table 2 Wavelet analysis results of three-coil measurement

线圈	6.25~50 Hz	1.56~6.25 Hz	0~1.56 Hz
上线圈(内筒)	78.4%	20.9%	0.7%
下线圈(内筒)	88.3%	11.4%	0.3%
环隙线圈	37.6%	51.0%	11.4%

通过上述颗粒测量方法的开发和研究,可以识别颗粒在实验测量时间中的流化行为。在上节的双线圈测量实验中,20分钟内一共检测出278次上线圈通过事件和280次下线圈通过事件,上下线圈通过事件基本一致,说明本文测量方法能较好地检测出颗粒在流化床中的循环运动行为。根据同一周期中颗粒通过下线圈到通过上线圈的时间差,可以计算出颗粒在一个循环周期中的内筒停留时间分布。根据相邻两个周期中颗粒通过某个相同线圈的时间差,可以算出颗粒的循环周期时间分布。

此处分别计算了内筒停留时间分布和循环周期时间分布,如图13所示。具体实验条件为,中路空气流量100 Nm^3/h(中路表观气速34.54 m/s),环路空气流量120 Nm^3/h(环路表观气速1.31 m/s),颗粒数量12000,颗粒直径3 mm。研究发现可以采用式(3)所示的对数正态分布[38]对这些时间分布进行拟合,拟合结果列于表3。由拟合结果可知,无论是颗粒内筒停留时间分布还是循环周期时间分布,均服从对数正态分布,即具有不对称右拖尾特征的正态分布。该结果与Yang等[39]针对内循环流化床中颗粒运动行为的研究结论一致,也验证了本文研究结果的合理性。

对数正态分布具有两个特征值μ和σ,特征值越大代表分布的不对称性和右拖尾特征越强。从两种时间的统计学分布和特征值拟合结果来看,循环周期的分布具有更强的不对称性和右拖尾特征,其分布向较高值处分散更多。这表明循环周期的鲁棒性弱于内筒停留时间。这是因为外循环区的

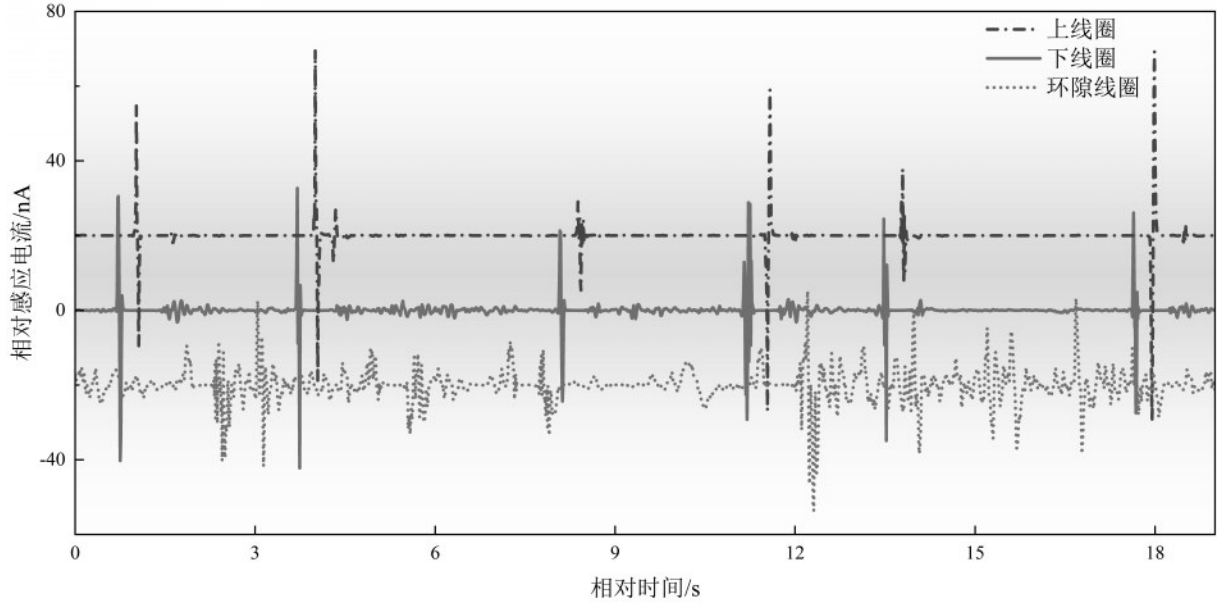


图12 典型三线圈测量结果

Fig.12 Typical three-coil measurement results

空间尺寸远大于内包覆区，颗粒在外循环区（尤其是环隙区域内）的运动路径更为复杂，运动过程中受到的阻碍作用也更多。该结论与三线圈测量得到的颗粒运动规律一致。

$$y = \frac{A}{w \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} exp\left(- \frac{\left(\ln\left(x/x_c\right)\right)^2}{2w^2} \right) \tag{3}$$

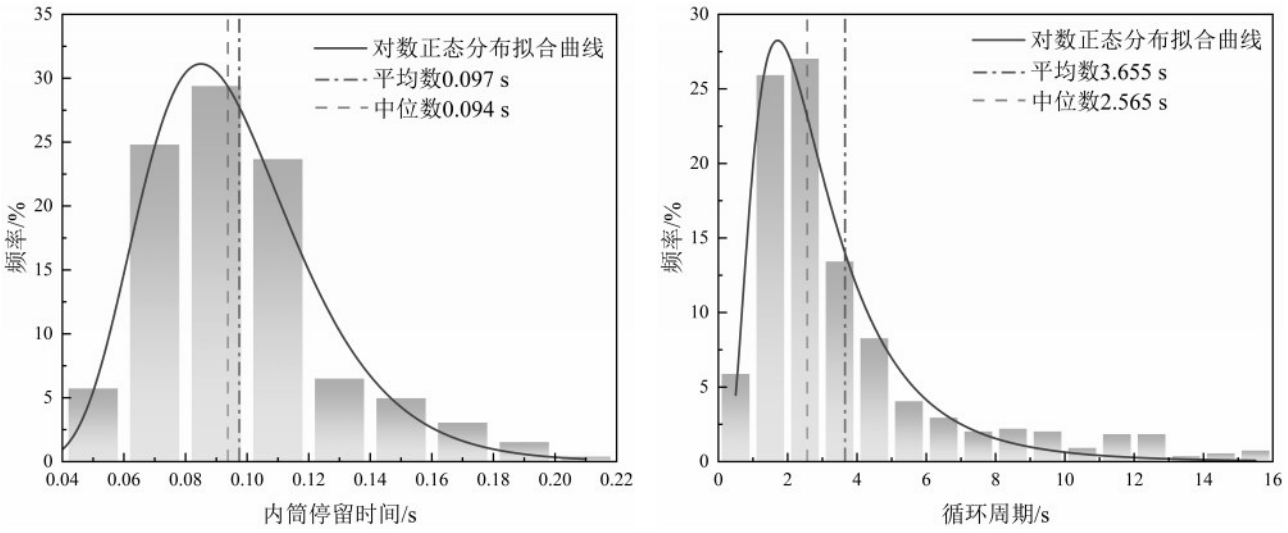
表3 内筒停留时间与循环周期分布拟合结果

Table 3 Fitting results of the distribution of residence time in the inner cylinder and cycle period

		内筒停留时间	循环周期
参数	x_c	0.0922±0.0017	2.5783±0.1001
	w	0.2849±0.0176	0.6405±0.0329
	A	1.9678±0.1047	95.2283±4.2159
特征值	μ	0.0960±0.0019	3.1653±0.1618
	σ	0.0279±0.0021	2.2541±0.2377
拟合程度	R^2	0.96889	0.96923

进一步计算表明，在本文实验条件下，颗粒的内筒停留时间中位数为0.094 s，平均数为0.097 s。颗粒的循环时间中位数为2.565 s，平均数为3.655 s。需要说明的是，本文数据采集系统的采样时间分辨率为10 ms（对应采样率100 Hz），上述中位数和平均数的数值精度来自大样本统计，并不代表单次测量的时间分辨率。在20 min的测量时段内，上线圈与下线圈分别检测到278次和280次颗粒通过事件，两者仅相差2次，相对偏差为0.7%。同时上下线圈信号能够良好配对形成完整循环，正常循环事件占88%，且经过人工校核后能排除所有异常循环事件。两个相互独立的感应线圈可以给出一致的计数结果，表明检测环节不存在系统性的漏检或误检。此外，本文测出的颗粒循环周期与文献[29]中Wurster型流化床中的颗粒循环周期的数量级相符。这些结果进一步验证了本文测量结果的合理性。

此处将颗粒内筒停留时间与颗粒循环时间之比定义为流化床的包覆有效占比，即包覆能力。该值越大代表颗粒在包覆区的停留时间越长，包覆量越大。以中位数来计算，该实验条件下流化床的包覆能力为3.66%，未来可以通过延长内筒高度（包覆区），添加环隙区内构件等方法，提高包覆有效占比，将之提高到10%以上，从而进一步增强新型反应器的经济性。



(a) 内筒停留时间 (b) 循环周期

图13 内筒停留时间分布和循环周期时间分布

Fig.13 Distribution of residence time in inner cylinder and distribution of cycle period

4 结论

本文研究了内加热-外循环式流化床中颗粒运动行为的电磁感应测量方法。利用法拉第电磁感应定律，以磁性颗粒为示踪颗粒、紫铜线圈为感应线圈，成功测量了该新型流化床中颗粒的定向循环运动行为。该技术有望应用于内加热-外循环式流化床的几何设计优化与包覆工艺参数优化，为颗粒包覆区与外循环区解耦设计下的FB-CVD单参数定量研究提供测量支撑。主要研究结论总结如下：

（1）搭建了以紫铜线圈为核心、纳安电流表为采集单元的测量装置，在内筒喷动区上下两端布置双线圈，实现了颗粒定向循环运动的在线测量。感应电流信号呈清晰的周期性规律，与预想的颗粒运动轨迹吻合较好。

（2）单线圈感应电流信号可分为正常通过、多峰震荡、低峰值和噪声四类。典型工况下在非噪声信号中，正常通过（占60%）和多峰震荡（占38%）为主要信号，总占比98%。采用正负极值中点法判定单线圈信号中颗粒的通过时刻，并结合内筒上部与下部线圈的检测信号，进一步计算颗粒的循环运动参数。计算结果显示，颗粒的正常循环事件占比为88%，且剩余的异常循环事件可以通过人工识别校正。

（3）环隙区三线圈测量进一步表明颗粒可在流化床中完成完整循环运动，且线圈信号峰值随入口流量降低而减小（当中路入口流量从100 Nm^3/h降至40 Nm^3/h时，内筒线圈平均峰值由70 nA量级降至30 nA量级），与测量原理相符，有望通过进一步标定对内筒中颗粒速度进行测量，进而用于数值模拟结果的定量化验证。

（4）双线圈测量实验中，颗粒内筒停留时间中位数为0.094 s，循环周期中位数为2.565 s，二者均服从对数正态分布（$R^2\approx0.97$）。循环周期分布的不对称性和右拖尾特征更强，表明外循环区颗粒运动的鲁棒性弱于内筒包覆区，该规律与环隙区测量结果一致。以中位数计，双线圈测量实验条件下流化床的包覆有效占比（内筒停留时间与循环周期之比）为3.66%。该指标可用于定量比较不同流化床几何设计与操作条件下的包覆性能。

（5）小波分析可揭示环隙线圈信号在时域上显得杂乱的物理原因。未来可将小波分析作为本文进一步发展的重要方向，用于区分单颗粒通过与颗粒群运动起伏，并给出环隙区颗粒群活动强度的连续指标。若要提高环隙区颗粒运动的定量测量能力，还需配合硬件改进（提高环隙线圈信噪比、在环隙区布置多个检测点、适当提高采样率）和反应器几何设计与操作条件设计的改进。

为满足包覆颗粒在核燃料元件制备领域的后续需求，从工业化长期应用来看，可将本测量方法推广至不同反应器几何结构乃至包覆工况下，开展包覆能力的定量对比研究。从短期研究发展来看，可在现有研究基础上将冷态实验测得的感应电流峰值与颗粒匀速通过线圈的速度标定实验结果相结合，实现流化床内颗粒在特定位置瞬时速度的测量，从而进一步拓展电磁感应测量方法的适用范围和功能体系。

符号说明

A——对数正态分布函数的参数之一
I——电流，A
N——匝数
r——电阻，Ω
R^2——拟合程度
t——时间，s
v_z——颗粒轴向速度，$m\cdot s^{-1}$
w——对数正态分布函数的参数之一
x_c——对数正态分布函数的参数之一
z——线圈轴向坐标，m
μ——对数正态分布函数的特征值之一
σ——对数正态分布函数的特征值之一
Φ——磁通量，Wb

参考文献

[1] 刘马林. 流化床-化学气相沉积技术在先进核燃料制备中的应用进展[J]. 化工进展, 2019, **38**(4): 1646-1653.
Liu M L. Research activities on FB-CVD technology application in advanced nuclear fuel fabrication[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, **38**(4): 1646-1653.

[2] 李健, 徐伟, 解衡, 等. 中国高通量堆设计研发及应用现状与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2026, **66**(2): 388-397.
Li J, Xu W, Xie H, et al. Current status and prospects of design, development and application of high flux reactors in China[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2026, **66**(2): 388-397.

[3] Errigo M, Windows-Yule C, Materazzi M, et al. Non-invasive and non-intrusive diagnostic techniques for gas-solid fluidized beds - A review[J]. Powder Technology, 2024, **431**: 119098.

[4] Xiao D, Dong X Y, Hu S W, et al. Coupling particle image velocimetry and digital image analysis to characterize cluster dynamics in a fast fluidized bed[J]. Powder Technology, 2024, **434**: 119267.

[5] Neogi A, Mohanta H K, Sande P C. Study of fluidized bed freeboard for effect of Geldart A particles shape using particle image velocimetry (PIV) [J]. Powder Technology, 2024, **433**: 119235.

[6] Errigo M, Sebastiani A, Iannello S, et al. Application of imaging techniques for the characterization of lumps behaviour in gas - solid fluidized-bed reactors[J]. Fuel, 2023, **349**: 128634.

[7] Iannello S, Foscolo P U, Materazzi M. Investigation of single particle devolatilization in fluidized bed reactors by X-ray imaging techniques[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, **431**: 133807.

[8] Graas A B M, Wagner E C, van Leeuwen T, et al. X-ray

tomography for fully-3D time-resolved reconstruction of bubbling fluidized beds[J]. Powder Technology, 2024, **434**: 119269.

[9] Mema I, Wagner E C, van Ommen J R, et al. Fluidization of spherical versus elongated particles – experimental investigation using X-ray tomography[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **397**: 125203.

[10] Che H Q, Liu D, Tian W B, et al. CFD-DEM study of gas-solid flow regimes in a Wurster type fluidized bed with experimental validation by electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **389**: 124280.

[11] Tu Q Y, Ma Z Y, Wang H G. Investigation of wet particle drying process in a fluidized bed dryer by CFD simulation and experimental measurement[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **452**: 139200.

[12] Rennebaum H S, Brummerloh D L, Benders S, et al. The hydrodynamics of pseudo-2D and 3D bubbling fluidized beds: a magnetic resonance imaging study[J]. Chemical Engineering Science, 2026, **322**: 122977.

[13] Xi K N, Guo Q, Boyce C M. Comparison of two-fluid model simulations of freely bubbling three-dimensional gas-fluidized beds with magnetic resonance imaging results[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, **60**(19): 7429-7442.

[14] Milacic E, Manzano M N, Madanikashani S, et al. Experimental study on the temperature distribution in fluidised beds[J]. Chemical Engineering Science, 2022, **248**: 117062.

[15] Jiang S X, Xu L L, Wu K Q, et al. An experimental study of heat transfer in pulsed fluidised beds via infrared thermography[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, **510**: 161548.

[16] Che H Q, Werner D, Seville J, et al. Evaluation of coarse-grained CFD-DEM models with the validation of PEPT measurements[J]. Particuology, 2023, **82**: 48-63.

[17] Zhou M, Kökkılıç O, Boucher D, et al. Investigation of particle motion in a dry separation fluidized bed using PEPT[J]. Minerals, 2023, **13**(2): 254.

[18] Tribedi T, Pillajetti P, Kumari R, et al. Measurements of solid velocity in a pilot-scale geldart's group B circulating fluidized bed using a radioactive particle tracking technique[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, **61**(25): 9110-9121.

[19] Al-Juwaya T, Ali N, Al-Dahhan M. Experimental validation of the mechanistic scale-up methodology of gas – solid spouted beds using radioactive particle tracking (RPT)[J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, **181**: 109559.

[20] Buist K A, Nijssen T M J. Magnetic particle tracking: a semi-algebraic solution[J]. Chemical Engineering Science, 2023, **265**: 118212.

[21] Zhou C G, Jonasson C, Gullberg M, et al. Application of the magnetic tracer-tracking system in solids circulation measurement in a fluidized bed standpipe[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **498**: 155030.

[22] Ma Z Y, Xu Y, Tu Q Y, et al. Particle tracking velocimetry study of wet particle flow in a pseudo two-dimensional fluidized bed[J]. Advanced Powder Technology, 2025, **36**(4): 104819.

[23] Zhu R S, Chen Y P, Wang W. Particle tracking velocimetry study of the nonequilibrium characteristics of a fluidized bed[J]. AIChE Journal, 2023, **69**(4): e18043.

[24] Buist K A, van der Gaag A C, Deen N G, et al. Improved magnetic particle tracking technique in dense gas fluidized beds[J]. AIChE Journal, 2014, **60**(9): 3133-3142.

[25] Sette E, Pallarès D, Johnsson F, et al. Magnetic tracer-particle tracking in a fluid dynamically down-scaled bubbling fluidized bed[J]. Fuel Processing Technology, 2015, **138**: 368-377.

[26] Halow J, Holsopple K, Crawshaw B, et al. Observed mixing behavior of single particles in a bubbling fluidized bed of higher-density particles[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, **51**(44): 14566-14576.

[27] 蒋琳, 张同旺, 刘荣正, 等. 高密度颗粒流化行为测量的磁性颗粒示踪方法[J]. 化工学报, 2024, **75**(12): 4453-4467.
Jiang L, Zhang T W, Liu R Z, et al. Magnetic particle tracing method for measuring fluidization behavior of high-density particles[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(12): 4453-4467.

[28] 蒋琳, 张同旺, 刘荣正, 等. 浅层喷动床中高密度颗粒流化规律的实验和模拟研究[J]. 中国粉体技术, 2025, **31**(2): 1-14.
Jiang L, Zhang T W, Liu R Z, et al. Experimental and simulation study on fluidization behavior of high-density particles in a shallow spouted bed[J]. China Powder Science and Technology, 2025, **31**(2): 1-14.

[29] Cheng X X, Turton R. The prediction of variability occurring in fluidized bed coating equipment. I. the measurement of particle circulation rates in a bottom-spray fluidized bed coater[J]. Pharmaceutical Development and Technology, 2000, **5**(3): 311-322.

[30] Guío-Pérez D C, Pröll T, Hofbauer H. Solids residence time distribution in the secondary reactor of a dual circulating fluidized bed system[J]. Chemical Engineering Science, 2013, **104**: 269-284.

[31] Guío-Pérez D C, Pröll T, Wassermann J, et al. Design of an inductance measurement system for determination of particle residence time in a dual circulating fluidized bed cold flow model [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, **52**(31): 10732-10740.

[32] Guío-Pérez D C, Dietrich F, Ferreira Cala J N, et al. Estimation of solids circulation rate through magnetic tracer tests[J]. Powder Technology, 2017, **316**: 650-657.

[33] Madlmeir S, Forgber T, Trogrlic M, et al. Quantifying the coating yield by modeling heat and mass transfer in a Wurster fluidized bed coater[J]. Chemical Engineering Science, 2022, **252**: 117505.

[34] Li W, Yu S, Zhang H P, et al. Analysis of the effect of velocity on the eddy current effect of metal particles of different materials in inductive bridges[J]. Sensors, 2022, **22**(9): 3406.

[35] Wu Y, Yang C. Ferromagnetic metal particle detection including calculation of particle magnetic permeability based on micro inductive sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, **21**(1): 447-454.

[36] Zhang H P, Li H, Wang C Y, et al. A three-coil wear particle sensor based on radial magnetic field[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, **73**: 9508709.

[37] Karlsson S, Niklasson Björn I, Folestad S, et al. Measurement of the particle movement in the fountain region of a Wurster type bed [J]. Powder Technology, 2006, **165**(1): 22-29.

[38] Limpert E, Stahel W A, Abbt M. Log-normal distributions across the sciences: keys and clues[J]. BioScience, 2001, **51**(5): 341-352.

[39] Yang S L, Luo K, Fang M M, et al. Discrete element study of solid circulating and resident behaviors in an internally circulating fluidized bed[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **248**: 145-157.