

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.12412434

基于静电与声发射传感器的气送颗粒截面分布测量*

钱相臣, 鲁云龙, 孙林锋

(华北电力大学控制与计算机工程学院 北京 102206)

摘要:通过气力管道输送固相物料颗粒的方式广泛存在于工业生产过程中。在大尺度气力输送管道中,颗粒流动状态复杂且分布不均,为精确表征管道内颗粒的流动状态,提出一种融合静电传感器和声发射传感器信息的气送颗粒参数分布测量方法。为了获得颗粒在管道横截面上局部参数信息,将边长为200 mm的方形管道横截面均分为16个静电测量区域和4个声发射测量区域。在30组不同的输送速度和质量流量条件下开展实验研究。结果表明,大尺度方形管道横截面上固相颗粒参数分布不均匀,速度分布情况符合渐扩管道流动规律。结合局部颗粒速度分析质量流量分布的测量结果,发现静电信号与声发射信号的均方根值所表征的颗粒相对质量流量分布变化趋势相同。

关键词:气固两相流;颗粒分布;静电传感器;声发射传感器;方形管道

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Cross-sectional distribution measurement of pneumatically conveyed particles using electrostatic and acoustic emission sensors

Qian Xiangchen, Lu Yunlong, Sun Linfeng

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Conveying solid particles through pneumatic pipes is widely used in various industrial processes. In large-scale pneumatic conveying pipelines, the particles are unevenly distributed in the pipeline and the particle flow state is complex. To accurately characterize the flow parameters of the particles in the pipeline, this article proposes a measurement method integrating the electrostatic and acoustic emission sensors. To obtain the velocity and relative volumetric distribution of particles in localized areas on the pipe cross-section, the cross-section of the square-shaped pipe with a side width of 200 mm is divided into 16 electrostatic signal sensing zones and 4 acoustic emission signal measurement areas. Experimental tests are conducted under 30 different conditions with various particle velocities and mass flow rates. Experimental results show that the particle distribution is inhomogeneous in the large-scale square pipe cross-section, and the velocity distribution is consistent with the characteristics of the asymptotic pipeline flow. Based on the analysis of mass flow rate distribution considering the local particle velocities, the relative mass flow rate distributions of the particles represented by the RMS values of electrostatic and acoustic emission signals vary in the same trend.

Keywords: gas-solid two-phase flow; particle distribution; electrostatic sensor; acoustic emission sensor; square-shaped pipes

0 引言

利用大尺度管道气力输送固相颗粒具有高效率、低成本、管道网络布置灵活等优点,在电力、化工、食品等工业现场被广泛使用^[1]。准确测量流体中固相颗粒的速度、浓度和流量等过程参数,能够为控制系统的优化、能

源的高效利用提供重要依据^[2]。气固两相流在管道中流动时,会形成诸如层状流、绳状流、均匀流等不同流型^[3],流动速度变化范围大、运动规律复杂^[4],使得管道截面上固相颗粒参数分布不均匀且多变。因此,对其截面参数进行全面准确测量从而得到精确的固相质量流量等参数一直是国际公认的难题。

20世纪70年代以来,国内外众多学者在测量粉体

收稿日期:2024-01-24 Received Date: 2024-01-24

* 基金项目:北京市自然科学基金(3232038)、国家自然科学基金(62273143)项目资助

流动参数方面开展了大量研究,提出了多种基于不同原理的在线测量方法。基于光衰减规律的散射法虽然测量灵敏度高、响应速度快,但当颗粒粒径、密度等参数波动较大时,测量误差较大;基于光学原理的相位多普勒测速(phase Doppler anemometry, PDA)^[5]和粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)^[6]等常用的高精度测速方法可以获得测量平面上的颗粒速度分布信息,但对观测设备的透光性要求较高,不适用于环境恶劣的工业现场。微波法^[7]可以用于测量颗粒速度、质量流量等参数,但容易受到固体颗粒的化学成分和湿度等性质的影响,在管道内堆积的固体颗粒也会造成系统误差,同时无法实现点对点测量,只能测量整个截面的平均参数。此外,还有声学法^[8-9]、电容法^[10]等测量方法,这些方法在测量方式、测量范围、测量条件和测量精度等方面各具优点,但在原理上存在的缺陷使得它们对工业条件下的高速高温气固两相流的测量均具有较大的局限性^[11]。具有造价低廉、系统结构简单、测量范围广及性能稳定等方面的优点的静电传感器^[12-15]被认为最有可能应用于工业现场气送颗粒管道中固相颗粒动态参数的在线检测。吴诗彤等^[15]将方形管道横截面划分为3×3的网格,使用侵入式静电电极阵列和非侵入式静电电极阵列进行固相颗粒参数分布测量并对比两者测量结果,结果表明侵入式电极优于非侵入式电极。Coombes等^[16]使用侵入式静电电极阵列测量管道横截面直径方向的固体颗粒速度与体积浓度分布。Wang等^[17]利用侵入式静电传感器获得管道内部的颗粒流动速度,为基于非侵入式静电传感器阵列的测量装置提供训练数据集,在得到相应训练参数后,仅利用非侵入式静电传感器阵列便可准确获得管道内部区域的流动参数,同时克服了侵入式传感器阵列的扰流问题。

工业现场中物料储存条件难以严格控制,含水量波动很大,颗粒的带电参数不同,这给静电传感器测量带来了极大的困难。基于声发射原理的固体颗粒粒径测量技术可以测量颗粒粒径和数量且不受颗粒含水率等环境因素的影响。在气固两相流中固相颗粒参数测量领域,声发射测量技术通过探测运动颗粒与波导元件的碰撞信号,分析信号特征获得固相颗粒的粒径信息^[18-19]。Droubi等^[20]探究了固体颗粒与碳钢碰撞过程中的声发射信号能量与颗粒粒径及单颗粒与多颗粒碰撞声发射信号能量的关系。研究表明,声发射信号的能量与颗粒的速度二次方成正比。Zheng等^[21-22]使用声发射传感器和静电传感器混合测量的方式对圆形气力输送管道中固相颗粒的质量流量进行了测量,表明该测量系统可以测量垂直管道中颗粒的粒径分布和质量流量,但其仅针对截面的平均水平进行了测量,没有对测量截面上颗粒参数的分布情况进行讨论。

本文基于静电测量技术和声发射测量技术,互补二者优势,设计了大尺度方形测试管道,并根据该管道设计了一种可以测量大尺度方形管道中气固两相流固相颗粒流动参数(速度、质量流量)的静电与声发射融合的传感器阵列,设计并搭建了实验平台进行气固两相流固相颗粒参数测量,并用该装置对方形管道内不同区域在不同实验条件下的颗粒速度、相对体积浓度和相对质量流量的测量。

1 测量原理

1.1 静电与声发射测量原理

在管道内流动的气固两相流中,固相颗粒会发生颗粒与颗粒之间、颗粒与管壁之间的摩擦及碰撞,根据摩擦起电原理,这种方式会使固相颗粒带电。静电法基于电荷感应现象,通过静电电极感应带电颗粒引起的静电场变化形成感应电流,其大小与感应电荷量成正比,与感应时间成反比^[23]。感应电流通过调理电路进行电流/电压变换、放大和滤波后转变成易于测量的电压信号。

根据凝固流态^[24]理论,运动的颗粒在经过两个完全相同的传感器时会产生相似的信号,根据互相关测速法,局部区域中固相颗粒的速度^[4,25] v_i 为:

$$v_i = \frac{L}{\tau} \quad (1)$$

式中: L 表示上下游传感器之间的间距; τ 为渡越时间。局部区域中固相颗粒的平均速度为:

$$\bar{v}_i = \frac{\sum_{j=1}^n R_{i,j} v_{i,j}}{\sum_{j=1}^n R_{i,j}} \quad (2)$$

式中: $R_{i,j}$ 为各组对应的互相关系数; $v_{i,j}$ 为每组采样点对应时间段内的颗粒速度; $\bar{v}_i$ 表示在采样时间内局部区域颗粒的平均速度。

已有研究表明静电信号的均方根(root mean square, RMS)值可以作为局部区域内颗粒相对浓度 β_i 的度量,计算公式^[25-26]为:

$$\beta_i = c A_{RMS} = c \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N S_n^2}{N}} \quad (3)$$

式中: c 为比例系数,主要与固相颗粒的类型、湿度和大小等性质有关; N 表示采样值数量; S_n 为 S_n 各采样点的信号值。根据式(1)可知, S_n 会受到颗粒运动速度的影响,当固相颗粒的含水量不均匀或速度变化剧烈时,在大尺度管道截面方向颗粒流动极不规则,此时 A_{RMS} 存在误差增大。

使用声发射传感器测量固相颗粒的质量流量时,颗粒与波导元件的碰撞过程可以看作是能量交换的过程^[27],通常用其输出电压信号的 RMS 值来表示声发射信号的能量^[21] E_s , 计算公式为:

$$E_s = E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt} \quad (4)$$

式中: $V(t)$ 表示声发射信号在时间 t 处的电压值。声发射信号能量与颗粒质量流量之间的拟合关系^[21] 为:

$$E_s = k_s q_m v_i^2 \quad (5)$$

式中: k_s 为比例系数, 可以通过实验来标定; q_m 为颗粒的质量流量; v_i 通过静电传感器测量得到。

在同一速度下, 分析并对比验证静电与声发射信号分别得到的相对浓度和相对质量流量结果, 最后根据局部的颗粒参数得到横截面上固相颗粒参数的分布情况。

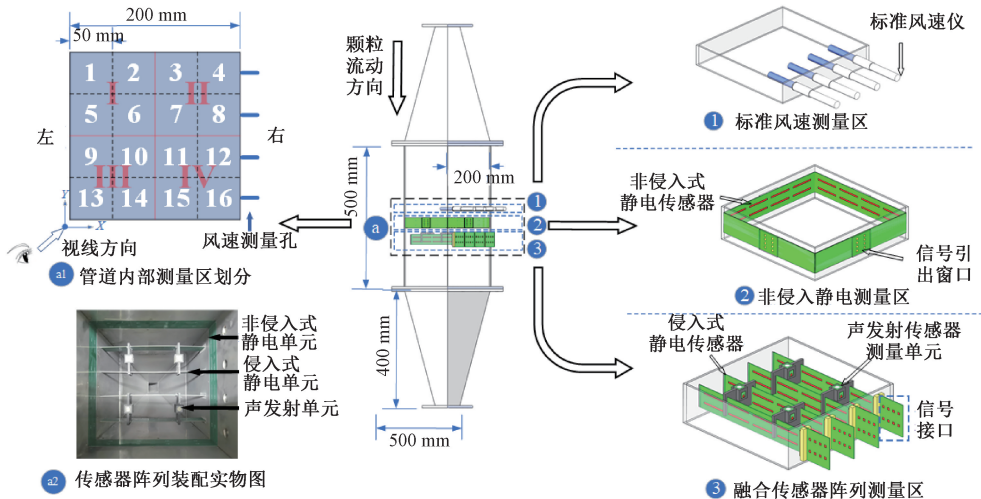


图1 多传感器测量探头结构及测量区域划分

Fig. 1 Structure of the multi-sensor measurement head and the division of the measurement area

由于管道内的颗粒流动状态复杂和静电传感器的空间灵敏度分布不均匀, 为了达到方形气力输送管道的内粉体颗粒流动状态精细化表征需求, 获得气力输送管道内颗粒截面的参数分布。本文将方形管道截面等量划分成边长为 50 mm 的 16 个方形区域, 分别记作区域 1~16, 如图 1(a1) 所示。其中视线方向为颗粒流动方向 (竖直向下), 相对角度参照风速测量孔位置, 即俯视管道方向且风速测量孔在右侧, 视线原点为区域 13 的位置。利用 16 对静电电极分别测量 16 个区域中颗粒流动的静电信号, 4 个声发射传感器分别测量区域 I (由 1、2、5、6 四个方形区域组成)、区域 II (3、4、7、8)、区域 III (9、10、13、14) 和区域 IV (11、12、15、16) 中心部位颗粒的声发射信号。

将测量装置按照颗粒流动方向从上游到下游划分为

2 融合多传感器测量系统设计与实现

2.1 大尺度实验管道及传感器结构设计

本文设计了一种 200 mm×200 mm 的方形测试管道, 如图 1 所示。为防止在管径变化时流体产生湍流区域, 将实验管道的前端和后端设计为扩张管道和收缩管道, 以此来配合原有实验台上 54 mm×54 mm 的方形管道。为了使气流能够充分扩散分布至大尺度截面, 将扩散管道轴向长度设置为 400 mm。测试管道管壁四周设置了侵入式静电传感器和标准风速仪测量口。管道内壁四周开槽供非侵入式传感器安装, 深度与传感器厚度相同, 并设置信号引出窗口。侵入式传感器阵列迎流侧位置与大尺度管道上游入口处距离设为 310 mm, 按照管道横截面四等分将侵入式电极垂直插入管道, 对应位置开槽将电极进一步固定。

标准风速测量区、非侵入静电测量区、融合传感器阵列测量区 3 部分, 分别记作测量 1、2、3 区。由于侵入式测量会对流体流动状态产生影响, 将测量 3 区设置在最下游位置。测量 1 区使用标准风速仪测量 16 个测量区域在不同实验条件下的区域内标准风速。在进行气力输送实验时, 标准风速仪被拆除以防止对气固两相流体的扰动。此时测量 2 区将处在流体流动方向的最上游。测量 2 区和 3 区中, 厚度为 1.6 mm 侵入式电极用于测量下游管道内 16 个测量区域的颗粒速度和相对浓度分布, 使用 16 组非侵入式电极嵌入管壁内, 测量对应管壁附近颗粒的速度和相对体积浓度。所有静电电极均匀分布在截面尺寸为 200 mm×200 mm 的方管内 16 个区域中, 侵入式电极与非侵入式电极沿颗粒流动方向距离为 57.5 mm。4 个相同的声发射传感单元均匀布置在测量 3 区测量

4个区域内颗粒的声发射信号,由夹具固定在侵入式静电传感器上。

静电电极实物如图2所示。将静电传感单元设计为双电极结构,第1个传感单元U1中U1-1、U1-2分别表示上、下游电极,对应的同轴线接口为P1-1、P1-2,为了合理利用接口处的空间,信号由IPEX接口引出。侵入式与非侵入式静电传感器长度为200 mm,厚度为1.2 mm,宽度为35 mm,每个电极板包含4组电极,电极长度为40 mm,宽3 mm,组间横向间隙为8 mm,组内上下游电极的中心距为15 mm。

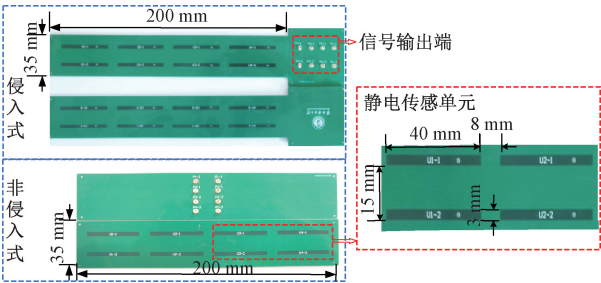


图2 侵入式与非侵入式静电电极阵列

Fig. 2 Intrusive and non-intrusive electrostatic sensors

根据静电传感单元的设计,将声发射传感单元设计成支架形式,如图3所示。支架插槽的中心距离设为50 mm,宽度设为3 mm,总长度设为60 mm,总高度为35 mm。传感器安装区域为边长16 mm的正方体,居中挖空12 mm×12 mm×14 mm的长方体空间,除迎流面外其余面的厚度都是2 mm,侧面开8 mm×8 mm的方孔,用来安装声发射传感器和引出信号线,其余空间使用定制硅胶垫密封,用于隔离结构振动等外界干扰因素。声发射传感器上方为波导元件,为使用304不锈钢制作而成的一个底面直径8 mm,高5 mm的圆柱体。

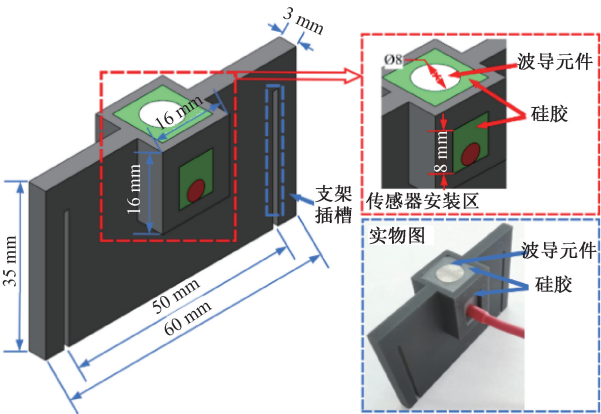


图3 声发射传感单元结构示意图

Fig. 3 Diagram of acoustic emission sensing unit

2.2 实验装置与实验条件

静电与声发射传感器大尺度方形管道中气固两相流固相颗粒截面参数分布检测实验平台如图4所示。测试管道内部结构如图1(a2)所示。该平台由双螺旋精密给料机、方形气力输送管道和负压生成装置组成,总长度为5 100 mm,高2 200 mm,其中小尺度管道内腔截面为边长54 mm的正方形,测量系统管道底部位于竖直管段距离地面500 mm处,管壁厚度均为2 mm。

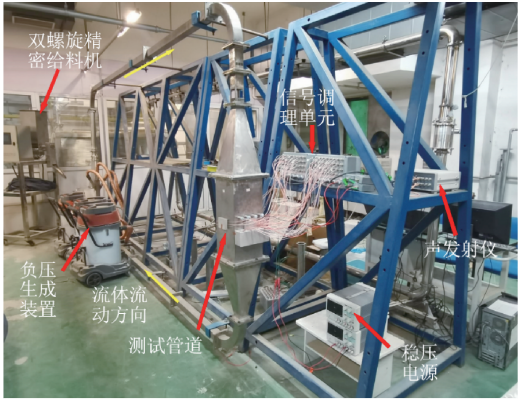


图4 实验装置

Fig. 4 Experimental test rig

稳压电源为静电调理单元提供 $\pm 2.5\text{ V}$ 的工作电压,信号调理单元将静电信号放大、滤波后送往静电上位机进行数据存储与处理。声发射信号经过前置放大器送往声发射仪,之后送往上位机使用上位机软件AE_DS2进行信号采集。该软件使用门限值触发采集,实时显示声发射信号的峰值电压、上升时间、持续时间、振铃计数、RMS值等参数以便观察分析。负压装置在100、125、150、175、200 V的工作电压下产生的负压水平分别对应P1~P5,将质量流量设定值4、8、12、16、20、24 kg/h分别记作M1~M6。将不同的实验条件组合为30组,每组实验条件进行3次重复试验,实验室的室温为19.7℃,相对湿度为69%,不同实验条件分组如表1所示。实验过程中,静电信号采样率设置为20 kHz,每1 000个采样点计算1次颗粒速度,声发射信号采样率为3 MHz,各组试验均取10 s数据进行分析。

3 融合多传感器测量系统测试

3.1 原始信号分析

静电信号的波动情况反映了测量区域中固相颗粒参数的波动水平,本质上是区域中带电颗粒产生的电场变化的剧烈程度。选取P1M1、P3M3、P5M5实验条件下,由侵入式静电传感器在4个角区域(区域1、4、13、16)与中

心区域(区域 6、7、10、11)测得的 150 ms 内原始静电信号如图 5 所示。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

给料量 ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	负压生成装置工作电压/V				
	P1=100	P2=125	P3=150	P4=175	P5=200
M1=4	P1M1	P2M1	P3M1	P4M1	P5M1
M2=8	P1M2	P2M2	P3M2	P4M2	P5M2
M3=12	P1M3	P2M3	P3M3	P4M3	P5M3
M4=16	P1M4	P2M4	P3M4	P4M4	P5M4
M5=20	P1M5	P2M5	P3M5	P4M5	P5M5
M6=24	P1M6	P2M6	P3M6	P4M6	P5M6

从图 5 可以看出,随着管道内负压水平和质量流量的增加,信号的波动水平逐渐加剧,并且不同区域静电信号的波动水平不同。角区域中,静电信号的波动程度区域 1 最弱,区域 16 最剧烈。表明在大尺度管道的同一截面中,管壁附近的区域颗粒运动状态差异较大。中心区域的静电信号波动程度区域 6 最弱,区域 11 波动最剧烈。表明在相邻区域内,固相颗粒之间会相互影响,其运动状态具有一定的相似性。对比图 5(a)和(b)可以发现,在相同条件下,中心区域的信号波动水平弱于 4 个角区域,表明在该截面管壁附近区域流体的运动情况更加复杂,中心区域的流体相对比较平缓。

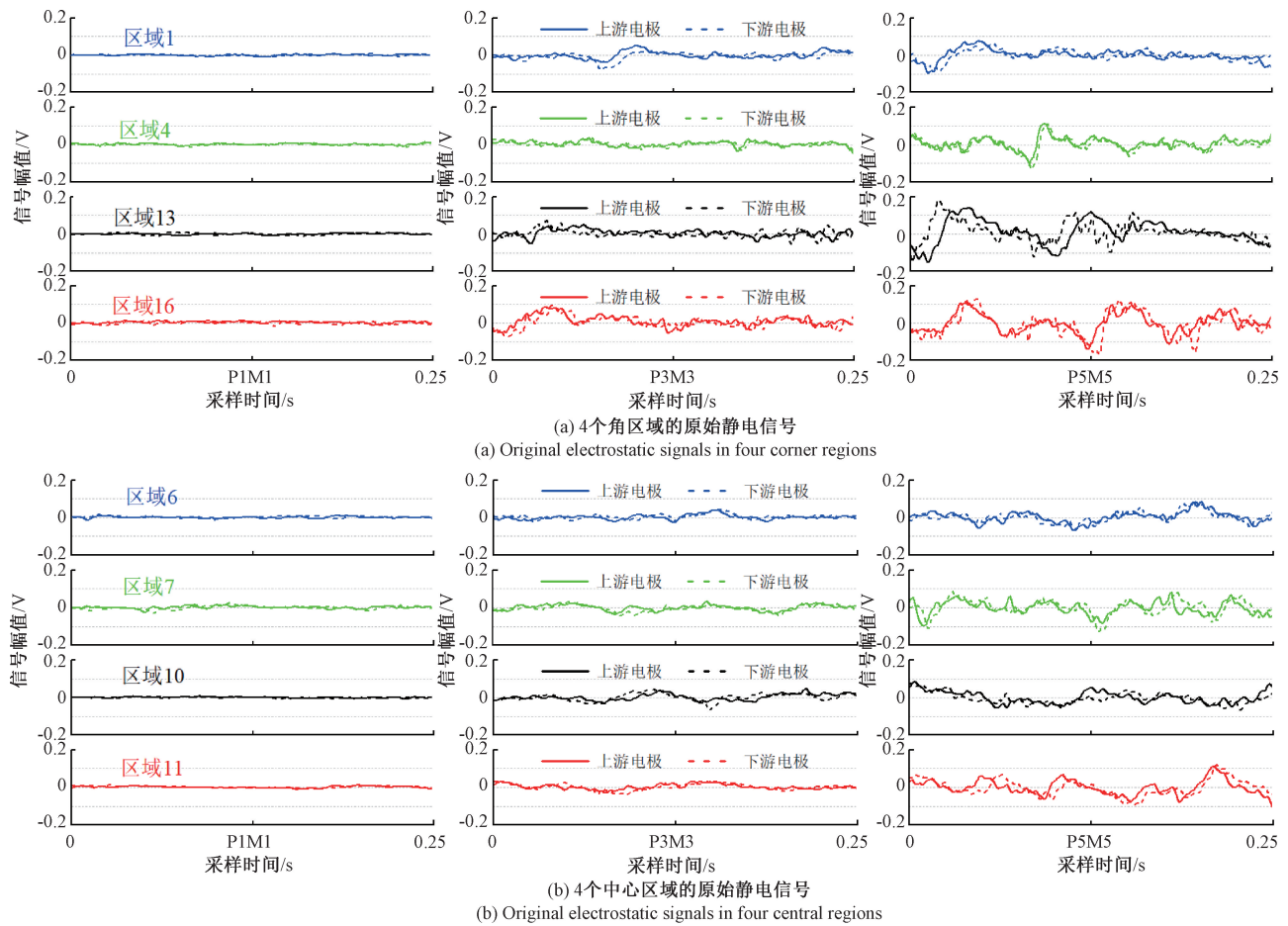


图 5 不同实验条件下侵入式静电传感器在 4 个中心区域的原始静电信号

Fig. 5 Original electrostatic signals of the intrusive electrostatic sensors in four central regions under different experimental conditions

在 P3M3 条件下测量得到各区域 1 s 内的声发射信号波形如图 6 所示。从图 6 可以看出,测量区域 II 的声发射信号峰-峰值最大且撞击频率最为密集。管道截面右侧区域(区域 II、IV)的信号强度明显强于左侧区域的信号强度。说明管道内右侧区域的固相颗粒质量流量大

于左侧区域,且区域 II 的质量流量最大。
截面上固相颗粒质量流量分布呈右上角向左下角递减趋势。和静电信号相比,声发射信号不同区域之间的波动水平相差较大,表明使用单一信号去表征某个参数是不准确的,需要联合进行分析。

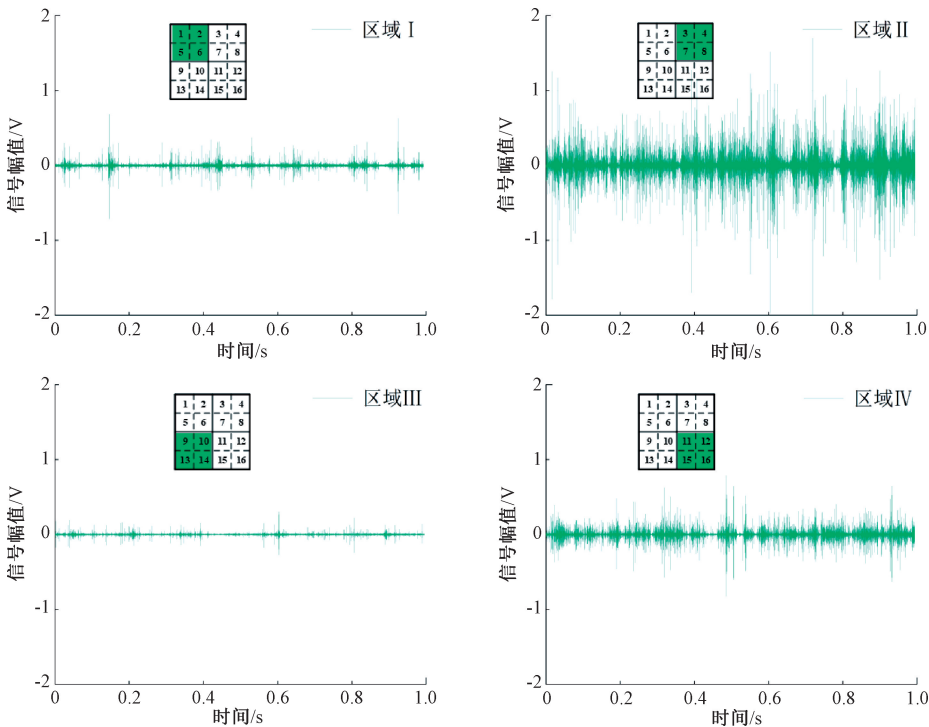


图 6 P3M3 条件下声发射传感器在区域 I ~ IV 测量得到的原始信号

Fig. 6 Original signal measured by the acoustic emission sensor in region I ~ IV under the condition of P3M3

3.2 空气速度分布

在进行气力输送实验前,使用标准风速仪标定不同工况下管道内截面上的空气速度分布如图 7 所示,视角原点为区域 13 的位置(图 1(a1)),后文三维视图的视角方向均为此方向。从图 7 可以看出,随着管道内负压水平增加,截面内各区域的速度均有所增加。流体在经过弯管时受到离心力的影响,导致右侧气体流动速度较快,流体在“转弯”进入扩张管道后,未充分扩散被就被标准风速仪测量,使得测试管道截面右侧区域空气流速高于

左侧区域空气流速。管道截面内管壁附近区域速度均高于其相邻的内侧区域,整体呈现为一种不对称的“盆地”廓形,这是因为流体在角度较小的渐扩管道中扩散流动时,流体先沿着管壁运动。

3.3 颗粒速度分布

根据式(2)计算得到负压生成装置在不同工作电压和双螺旋精密给料机给定的不同质量流量情况下,由侵入式静电传感器(侵入式电极)和非侵入式静电传感器(管壁电极)测得各区域 10 s 内的平均速度如图 8 所示。曲面部分由 3 次样条插值法处理侵入式电极测得的平均速度得到,表示固相颗粒在截面上的速度廓形,周围柱状图为管壁电极测得的管壁附近区域的颗粒速度。

从图 8 中可以看出,在大尺度方形管道中,固相颗粒的速度分布十分不均匀且没有规律性,右上角部分(区域 4 及其周围区域)的速度最大。随着管道内负压水平与质量流量的增加,其截面速度分布整体上逐渐增加,但是右上角区域与左下角区域(区域 13 及其周围区域)的速度差值逐渐增大,速度分布更加不均匀。侵入式与非侵入式静电传感器测量得到的结果趋势相同,前者测得的速度略微偏高,但相差不大,表明本文设计的侵入式传感器阵列对流体速度的影响不大,可以在线测量颗粒的流动速度。

整体来看,管道内速度分布总体呈现为管壁周围的颗粒流动速度快,中心区域流速较慢,与纯空气流动时的速度分布情况相似,均为一种不对称的“盆地”廓形。在

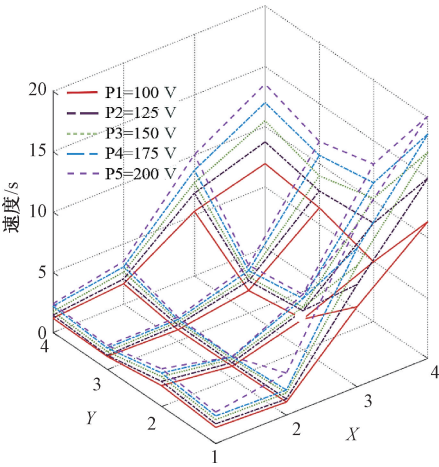


图 7 不同负压水平下管道截面纯空气的速度分布

Fig. 7 Velocity distribution of pure air in pipeline section under different negative pressure levels

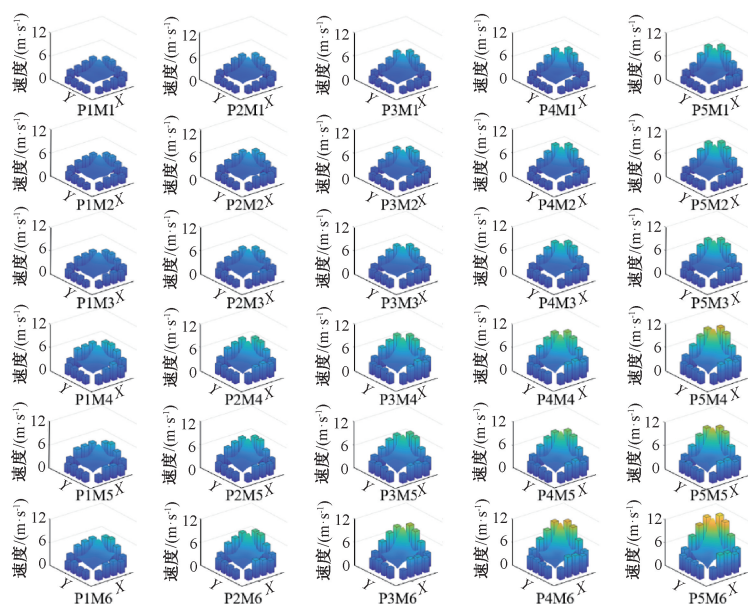


图8 不同实验条件下颗粒速度截面分布廓形

Fig. 8 Profiles of particle velocity obtained under different experimental conditions

负压生成装置中,随着颗粒质量流量增加,管壁附近颗粒速度变化不大,但中心区域颗粒流速逐渐增加,在截面上的速度分布逐渐平缓。这说明随着固相颗粒浓度增加,颗粒受气流驱动力逐渐减小。在进入扩张管道时,管道中心区域颗粒浓度较大,颗粒下落过程中重力和粘滞力增加,速度差距逐渐减小。在颗粒质量流量不变的情况下,随负压水平增加,管壁附近颗粒流动速度和截面整体速度增加,速度分布更为不均匀。管壁周围区域速度增加高于管道中心区域,廓形图凹陷更深,表明随着负压水平增加,气流对固相颗粒的驱动力增加,随扩张管道运动的使流体受影响更多,流体内部粘滞力对速度分布差异的影响降低,中心区域颗粒流速相对减小。

3.4 相对浓度分布

根据式(3)计算 10 s 采样时间内各测量区域静电信号的 RMS 值,由 RMS 值的分布定性分析在大尺度管道截面上的颗粒相对浓度分布情况。如图 9 所示为全截面固相颗粒 RMS 值分布廓形。曲面为侵入式电极测得的 RMS 值,并使用 3 次样条插值法绘制得到,周围柱状图为管壁电极测得的上游管壁附近区域的 RMS 值。从图 9 可以看出,随着管道内负压水平与总体质量流量的增加,浓度整体分布情况有着相似的变化趋势,分布趋势与速度分布相似。侵入式电极测量得到的管壁周围区域颗粒浓度分布与管壁电极测量结果较为相近,而管道中心的相对浓度较低。

在负压水平相同的情况下,随着颗粒质量流量的增加,管壁附近区域静电信号的 RMS 值整体增加,其中右上角区域增加更加明显,管道截面 RMS 值分布不均匀程

度逐渐增加,中心区域的 RMS 值增加程度小于管壁区域,表明随着浓度的增加,更多的颗粒会受到气流影响在扩张管道向管壁四周运动,管道中气送颗粒的流动状态更加不稳定。在颗粒质量流量不变的情况下,随着负压水平升高,各静电传感器的 RMS 值均有不同程度的增加,高质量流量情况下增加更多,表明静电信号的 RMS 值受到颗粒运动速度和浓度的共同影响,速度浓度越高,信号波动更加剧烈。在低负压水平下,非侵入式电极(上游)测得的 RMS 值整体较为平缓,左侧区域较高于侵入式电极(下游) RMS 值,右侧区域上游较低于下游的 RMS 值。在高负压水平下,侵入式电极与非侵入式电极的 RMS 值差值更大,左侧区域上游比下游更高,右侧区域上游比下游更低,表明随着负压水平的增加,在测试管道中固相颗粒会被右侧的高速流体“吸引”,导致颗粒向管道右侧发生偏移。

在大部分工况下,截面右下角区域(区域 16 及其附近区域)的 RMS 值略高于右上角区域,表明该区域颗粒的相对浓度较高,图 8 中右下角区域的速度明显低于右上角区域,而根据图 7 所示,管道截面上右侧区域的速度分布是大致相等的,甚至右下角区域要高于右上角区域,综合分析表明,气固两相流中固相颗粒的浓度会影响流体的流速,并且影响程度较重。

3.5 质量流量分布

根据式(4)计算 10 s 采样时间内各测量区域的声发射信号的能量值 E_s ,由能量分布可以分析在大尺度管道截面上的颗粒质量流量相对分布情况,4 个区域的信号 RMS 值如图 10 所示。

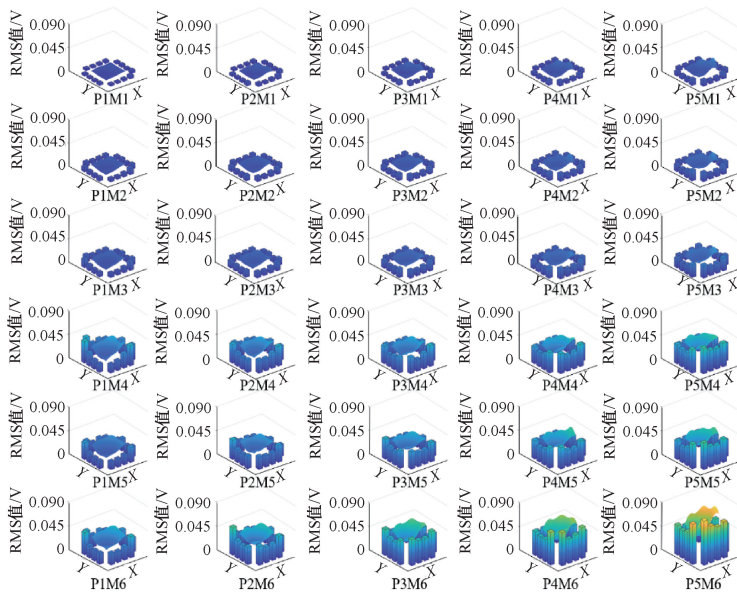


图9 不同实验条件下静电信号 RMS 值截面分布廓形

Fig. 9 Profile of RMS of electrostatic signals at cross-section obtained under different experimental conditions

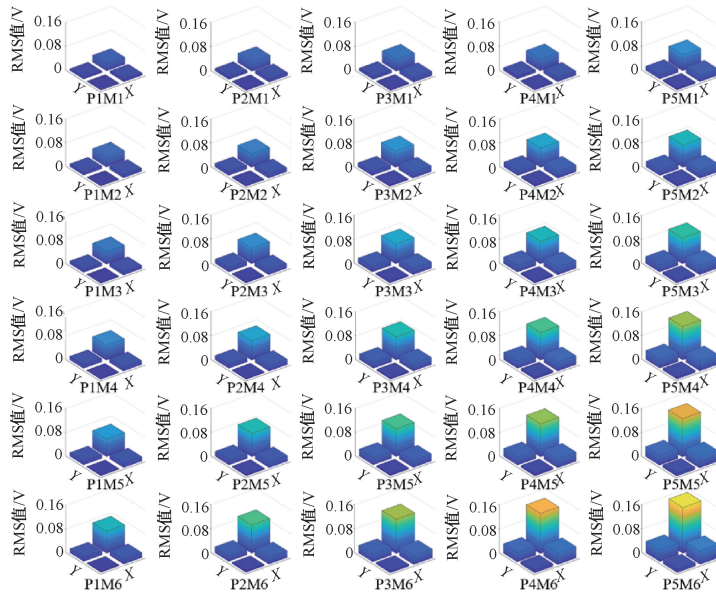


图10 不同实验条件下声发射信号 RMS 值截面分布廓形

Fig. 10 RMS distribution of acoustic emission signals at cross section obtained under different experimental conditions

图10为不同实验条件下利用声发射传感器测得的气固两相流中固相颗粒的声发射信号RMS值在管道截面上的分布情况,各立方柱高度表征区域内平均质量流量水平。从图10可以看出,在多个实验条件下区域Ⅱ的质量流量最高,区域Ⅲ的质量流量最低,区域Ⅰ与区域Ⅳ的质量流量水平相近。随着管道内负压水平与总体质量流量的增加,各区域的质量流量都增加,其中区域Ⅱ的增加幅度最大,区域Ⅲ的增加幅度最小。根据式(5)并结

合图8、9进行分析。在各实验条件下,区域Ⅱ的速度值和浓度值均高于其他区域,区域Ⅲ的速度值和浓度值均低于其他区域。在颗粒质量流量不变的情况下,低负压水平(P1、P2)下区域Ⅰ与区域Ⅳ的速度、浓度分布情况相同,两区域的值基本接近,对应到图10中声发射信号能量大致相近,而在高负压水平(P3、P4、P5)下,区域Ⅰ浓度值低于区域Ⅳ的浓度值,对应到图10中区域Ⅰ声发射信号能量低于区域Ⅳ。

上述规律均符合式(5)的表述及过往的研究规律结果,表明本文设计的融合传感器阵列可以用于测量气固两相流固相颗粒参数在大尺度方形管道截面上分布情况。

4 结 论

本文设计了一套融合静电传感器与声发射传感器侵入式测量系统,对融合传感器在不同实验条件下进行实验,根据结果定性分析了大尺度方形管道中固相颗粒的分布情况,得出如下结论。

1) 定性分析结果表明声发射信号能量值与静电传感器测量得到的速度和相对浓度分布情况相吻合。

2) 在大尺度管道中固相颗粒参数在截面上的分布极不均匀。在 P3M3 实验条件下区域 1、4、13、16 由侵入式静电传感器测得的颗粒速度为 1.91、3.3、2.38 和 5.74 m/s,静电信号 RMS 值分别为 14、20、12 和 16 mV,声发射传感器测量区域 1~4 内声发射信号 RMS 值分别为 4.9、21.2、18.3 和 66.3 mV。由此可见在同一工况下大尺度管道内部颗粒的流动状况具有较大的不均匀性,因此仅使用非侵入式测量方法无法准确测量颗粒具体的分布情况。

3) 侵入式静电传感器阵列与非侵入式静电传感器测量结果对比分析表明侵入式传感器阵列对流体的扰动影响较小,可以用来实时测量管道内部颗粒的分布情况,不再局限于其他测量方法的小区域或单点测量。

参考文献

[1] ZHAO J, HU S, ZHANG X, et al. On line control of a dense phase pneumatic conveying system [C]. Proceedings of International Conference on Energy and Environment, 2003: 1360-1364.

[2] MADEJSKI P. Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 145: 352-363.

[3] CUI H, GRACE J R. Pneumatic conveying of biomass particles: A review [J]. China Particuology, 2006, 4(3-4): 183-188.

[4] YAN Y. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines [J]. Measurement Science and

Technology, 1996, 7(12): 1687-1706.

[5] LU Y, GLASS D H, EASSON W J. An investigation of particle behavior in gas-solid horizontal pipe flow by an extended LDA technique [J]. Fuel, 2009, 88(12): 2520-2531.

[6] ZHANG W, TAINAKA K, AHN S, et al. Experimental and numerical investigation of effects of particle shape and size distribution on particles' dispersion in a coaxial jet flow [J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(10): 2322-2330.

[7] PENIRSCHKE A, JAKOBY R. Microwave mass flow detector for particulate solids based on spatial filtering velocimetry [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(12): 3193-3199.

[8] 田昌, 苏明旭, 顾建飞. 气固两相流超声过程层析成像系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 586-592.

TIAN CH, CAI M X, GU J F. Ultrasonic process tomography system for gas-solid two-phase flow measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 586-592.

[9] FIGUEIREDO M M F, GONCALVES J L, NAKASHIMA A M V, et al. The use of an ultrasonic technique and neural networks for identification of the flow pattern and measurement of the gas volume fraction in multiphase flows [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 70: 29-50.

[10] 王胜南, 许传龙, 李健, 等. 阵列式静电-电容传感器灵敏度特性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2122-2132.

WANG SH N, XU CH L, LI J, et al. Spatial sensitivity of electrostatic-capacitance sensor array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2122-2132.

[11] ZHENG Y, LIU Q. Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids [J]. Measurement, 2011, 44(4): 589-604.

[12] YAN Y, BYRNE B, WOODHEAD S, et al. Velocity measurement of pneumatically conveyed solids using electrodynamic sensors [J]. Measurement Science and Technology, 1995, 6(5): 515-537.

- [13] 张文彪, 杨彬彬, 钱相臣, 等. 网状静电传感器弯管处颗粒速度与浓度的测量[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2790-2796.
- ZHANG W B, YANG B B, QIAN X CH, et al. Measurement of solids velocity and concentration at an elbow using wire-mesh electrostatic sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2790-2796.
- [14] 钟志荣, 左洪福, 郭家琛, 等. 基于阵列式静电传感器的颗粒带电量估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 80-90.
- ZHONG ZH R, ZUO H F, GUO J CH, et al. An estimation method of particle charge based on array electrostatic sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 80-90.
- [15] 吴诗彤, 闫勇, 钱相臣. 静电传感器测量固体颗粒质量流量实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(8): 1575-1581.
- WU SH T, YAN Y, QIAN X CH. Experimental study on mass flow measurement of solid particles using electrostatic sensors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(8): 1575-1581.
- [16] COOMBES J R, YAN Y. Measurement of velocity and concentration profiles of pneumatically conveyed particles using an electrostatic sensor array[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(5): 1139-1148.
- [17] WANG Y, QIAN X, WANG L, et al. Measurement of cross-sectional velocity distribution of pneumatically conveyed particles in a square-shaped pipe through gaussian process regression-assisted nonrestrictive electrostatic sensing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 2504411.
- [18] 张国强, 闫勇, 胡永辉, 等. 颗粒密度对声发射法粒径测量的影响[J]. 仪表技术与传感器, 2020(4): 98-101.
- ZHANG G Q, YAN Y, HU Y H, et al. Effects of Particle Density on Particle Sizing by Acoustic Emission Methods. Instrument Technique and Sensor, 2020(4): 98-101.
- [19] HU Y, WANG L, HUANG X, et al. On-line sizing of pneumatically conveyed particles through acoustic emission detection and signal analysis [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2014, 64(5): 1100-1109.
- [20] DROUBI M G, REUBEN R L, WHITE G, et al. Statistical distribution models for monitoring acoustic emission (AE) energy of abrasive particle impacts on carbonsteel [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 30: 356-372.
- [21] ZHENG G, YAN Y, HU Y, et al. Mass-flow-rate measurement of pneumatically conveyed particles through acoustic emission detection and electrostatic sensing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 9502413.
- [22] ZHENG G, YAN Y, HU Y, et al. Online measurement of the size distribution of pneumatically conveyed particles through acoustic emission detection and triboelectric sensing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9506717.
- [23] PENG L, ZHANG Y, YAN Y. Characterization of electrostatic sensors for flow measurement of particulate solids in square-shaped pneumatic conveying pipelines[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 141(1): 59-67.
- [24] 徐苓安. 相关流量测量技术的现状与发展趋势[J]. 自动化仪表, 1988, 9(3): 1-4, 43, 45-46.
- XU L AN. Current situation and development trend of related flow measurement technology [J]. Process Automation Instrumentation, 1988, 9(3): 1-4, 43, 45-46.
- [25] QIAN X, YAN Y, SHAO J, et al. Quantitative characterization of pulverized coal and biomass-coal blends in pneumatic conveying pipelines using electrostatic sensor arrays and data fusion techniques[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(8): 085307.
- [26] QIAN X, SHI D, YAN Y, et al. Effects of moisture content on electrostatic sensing based mass flow measurement of pneumatically conveyed particles [J]. Powder Technology, 2017, 311: 579-588.

[27] HUTCHINGS I M. Energy absorbed by elastic waves during plastic impact[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1979, 12(11): 1819-1824.

作者简介



钱相臣(通信作者),2004 年于天津理工大学获得学士学位,2007 年于天津大学获得硕士学位,2013 年于英国肯特大学获得博士学位,现为华北电力大学副教授,主要研究方向为气固两相流测量技术和先进仪器系统。

E-mail: xqian@ncepu.edu.cn

Qian Xiangchen (Corresponding author) received the B. Sc. degree from the Tianjin University of Technology in 2004, M. Sc. degree from Tianjin University in 2007, and Ph. D. degree from the University of Kent, Canterbury, U. K. in 2013. He is currently an associate professor at North China Electric Power University. His main research interests include gas-solid two-phase flow measurement techniques, and advanced instrumentation systems.



鲁云龙,2022 年于山东理工大学获得学士学位,现为华北电力大学硕士研究生,主要研究方向为气固两相流测量技术。

E-mail:

Lu Yunlong received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2022. He is currently a M. Sc. candidate at North China Electric Power University. His main research interest is gas-solid two-phase flow measurement technique.



孙林锋,2019 年于山西大学获得学士学位,2023 年于华北电力大学获得硕士学位,主要研究方向为气固两相流测量技术。

E-mail:

Sun Linfeng received his B. Sc. degree from the Shanxi University in 2019, and M. Sc. degree from North China Electric Power University in 2023. His main research interest is gas-solid two-phase flow measurement techniques.