

基于声学法的堆积煤粉温度场实时监测

杨 庚, 闫计栋, 沈国清, 安连锁, 李宗金

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要:在煤粉制备、运输及储存过程中,堆积煤粉通常暴露于氧化环境中,当外界温度过高时极易发生自燃。低频声波具有衰减低、传播距离长的特点,以其作为声源的声学测温方式可有效弥补常规热电偶滞后预警的问题,实现实时测量,显著提升发电过程的智能化水平。主要探究了堆积煤粉的声吸收特性以及低频声波(频率在 200~2 000 Hz)在堆积煤粉中的传播特性,试验以福泉煤矿的烟煤为研究对象,制备了 4 种不同粒径的煤样,研究了不同粒径煤粉以及堆积高度下的声吸收特性,发现堆积煤粉的声吸收曲线存在多峰值现象。进行了不同频率下低频声波在堆积煤粉中的传播特性试验,结果表明在 1 000~2 000 Hz 声衰减系数下降趋势明显;在实验室环境温度下,堆积煤粉的声速在 142.261~142.851 m/s,试验标准差约 0.1%,结果较稳定,验证了声学测量堆积煤粉温度分布的可行性。

关键词:声学测温;声吸收系数;声衰减系数;煤粉堆积物

中图分类号:TK311 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2022)04-0059-07

Real time monitoring of accumulated pulverized coal temperature field based on acoustic method

YANG Geng, YAN Jidong, SHEN Guoqing, AN Liansuo, LI Zongjin

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the process of preparation, transportation and storage of pulverized coal, the accumulated pulverized coal is usually exposed to oxidation environment. When the external temperature is too high, it is very easy to spontaneous combustion. The low frequency sound wave has the characteristics of low attenuation and long propagation distance. The acoustic temperature measurement method using low frequency sound wave as sound source can effectively make up for the lag warning of conventional thermocouple and realize real-time measurement, and significantly improve the intelligent level of power generation process. The sound absorption characteristics of the accumulated pulverized coal and the propagation characteristics of low-frequency sound waves (frequency in 200-2 000 Hz) in the accumulated pulverized coal were mainly explored. Four kinds of coal samples with different particle sizes were prepared from the bituminous coal produced by Fuquan coal mine. The sound absorption characteristics of pulverized coal were mainly studied from two aspects of different particle sizes and stacking height. The results show that the sound absorption curve of stacked pulverized coal has multi-peak phenomenon; experiments on the propagation characteristics of low-frequency sound waves in accumulated pulverized coal at different frequencies were carried out. The results show that the acoustic attenuation coefficient has an obvious downward trend in the range of 1 000-2 000 Hz. The velocity measurement results show that the range of sound velocity is 142.261-142.851 m/s, and the standard deviation is about 0.1%. The results are more stable. The feasibility of acoustic measurement of temperature distribution of accumulated pulverized coal is verified.

Key words: acoustic pyrometry; acoustic absorption coefficient; acoustic attenuation coefficient; pulverized coal deposits

0 引 言

煤粉制备、运输及储存过程中,通常以堆积形式

存在,堆积煤粉中空气通过煤粉粒之间的孔隙与煤粉粒表面的活性基团接触,发生氧化放热反应^[1-2]。氧化反应放出的热量会引起煤堆的温度升高,加剧

收稿日期:2021-03-25;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.21130003

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0604305-05)

作者简介:杨 庚(1996—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生。E-mail:2654821940@qq.com

通讯作者:沈国清(1980—),男,江苏海安人,副教授,博士。E-mail:shenguoqing@ncepu.edu.cn

引用格式:杨庚,闫计栋,沈国清,等.基于声学法的堆积煤粉温度场实时监测[J].洁净煤技术,2022,28(4):59-65.

YANG Geng, YAN Jidong, SHEN Guoqing, et al. Real time monitoring of accumulated pulverized coal temperature field based on acoustic method[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(4): 59-65.



移动阅读

氧化放热反应,最终使煤堆温度超过自燃点发生自燃^[3]。郑兰芳^[4]研究发现,煤粉在60~80℃时耗氧速率开始明显升高,煤粉发生局部自燃后扩散速度较快,易造成巨大的安全隐患,故对于堆积煤粉内部温度的实时监测十分重要。测量煤粉堆积温度时,燃煤电厂通常采用在煤粉仓仓顶安装热电偶等方法,具有一定的时间迟延,当热电偶检测温度发生明显变化时煤粉已经自燃一段时间,而声学测温作为一种实时监测的非接触式测量方式^[5]能有效解决延迟预警的问题。

声波测温是一种新兴的测温技术^[6]。目前,声波测温在锅炉炉膛^[7-8]、冶铁锅炉^[9-10]以及生物质堆垛^[11-12]等工程领域测温的应用已较成熟^[13],声波测温技术通过定周期发射特定声波信号对测温物体进行非侵入式测量,能够实现实时连续测量以及远程控制,从而显著提升发电过程控制的智能化程度。

1 堆积煤粉声学测温模型

声波测温系统通常由声源、传感器、数据采集及处理系统组成,通过测量声波经过不同传感器的时间求得声速,考虑到煤粉粒径细小且具有一定的流动性,若声源直接固定于堆积煤粉中,流动煤粉粒会进入声源内部,直接与声源振子接触导致声源损坏,故将声源置于堆积煤粉外部。此时声源发出声波首先需透射进入堆积煤粉内部,之后在煤粉内部传播,故需综合考虑煤粉的声吸收特性以及声波在堆积煤粉中的传播特性。

图1展示了一条声波测温路径上声源以及传感器的布置,其中 L 表示2个传感器之间的距离,声源置于堆积煤粉上方,传感器置于煤粉中。利用时延估算路径上声波的传播时间,再反演相应温度信息。对于离散时延估计模型,2个传感器信号简化数学模型^[14]为

$$x_1(n) = s(n) + n_1(n), \quad (1)$$

$$x_2(n) = \alpha s(n + D) + n_2(n), \quad (2)$$

式中, $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 分别为传感器1、2接收到的声信号; s 为声源信号; $n_1(n)$ 、 $n_2(n)$ 分别为加性噪声信号; α 为声衰减系数; D 为1、2传感器之间的时延; n 为声波采集时间。

实际测量中使用互相关算法计算声波传播时间,互相关算法是一种广泛使用的时延估计算法,通过对传感器1和传感器2接收的信号进行相关性分析,最终得到声波在传感器之间的传播时间,传感器1、2之间的互相关函数 $R_{12}(m)$ ^[15]可以表

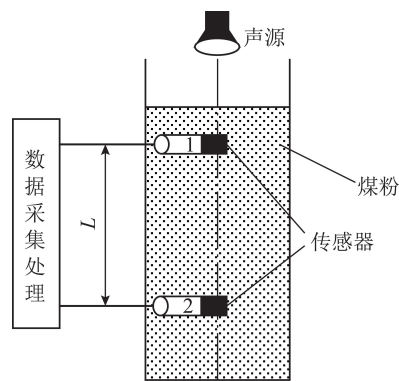


图1 声波测温应用模型

Fig.1 Application model of acoustic thermometry

示为

$$R_{12}(m) = \frac{\sum_{n=1}^{N-M} x_1(n)x_2(n+m)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N-M} x_1^2(n)} \sqrt{\sum_{n=1}^{N-M} x_2^2(n)}}, \quad (3)$$

式中, N 为互相关分析所用信号的长度; m 为延迟采样点数; M 对应延迟采样点数的最大值。

图2为测量过程中接收信号互相关分析的结果。互相关函数峰值对应的点数为算法的时延估计点数,将点数除以采样频率可以得到时延估计。实际测量中使用算法多为建立在单一互相关基础上的二次互相关、广义互相关等算法,根据实际应用情况的不同,每种算法都有其适合的应用场景。

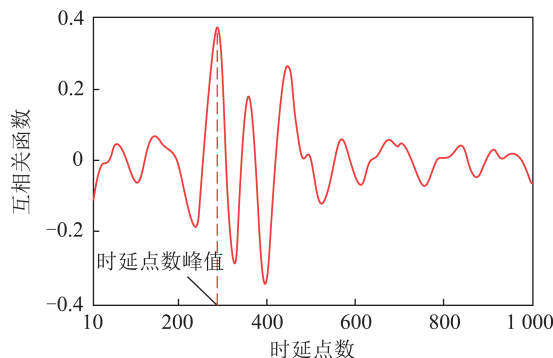


图2 传感器间互相关函数曲线

Fig.2 Cross correlation function curve between sensors

声学测量空间温度场主要是通过测量空间中不同截面温度分布实现。图3为声学测量平面温度场的测温路径。图3中1~8为测温使用的8个测点,两两测点间形成多条声波路径,利用互相关算法求得路径上的声波传递时间进而得到声速,根据声速与温度的关系反演出温度场。笔者主要研究单一路径声传播的特性,以验证声学应用于堆积煤粉内部温度测量的可行性。

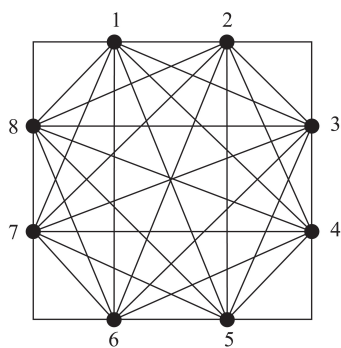


图3 声学测温路径

Fig.3 Path of acoustic temperature measurement

2 煤粉低频声波吸收特性

2.1 试验原理

相对于高频段的声波,低频声波的能量衰减更低,能够在堆积煤粉中传播较远的距离,且低频声波的波长更长,可以减弱煤粉颗粒对声波的散射作用。实际研究中可以将堆积煤粉看作多孔介质,多孔介质对声的吸收能力通常用吸声系数表示,吸声系数由透射进入材料的声能与入射声能比表示,同一材料对于不同频率的声波吸收系数也不同,为了使入射声波更多的透射进入堆积煤粉中,通常选取吸声系数较大的频段作为声源。

材料吸声系数的测量通常有混响室法和驻波管法2种^[16],本文试验采用驻波管法测量不同粒径、堆积高度的煤粉对不同频率声波的吸声系数。驻波管法的主要原理为当声波垂直入射到材料表面时,部分声波发生透射进入材料内部,另一部分被反射,反射波与入射波叠加形成驻波场,通过测量驻波场的极大声压值与极小声压值可得材料的声吸收系数,其计算公式为

$$\alpha = \frac{4k}{(k+1)^2}, \quad (4)$$

其中, α 为材料的声吸收系数; k 为测得驻波场极大声压值与极小声压值的比值。

利用式(1)代入对应声压值可得对应声波频率下的声吸收系数。根据GBJ 88—1985《驻波管法吸声系数与声阻抗率测量规范》,对于圆管,驻波管的频率测量范围上限 f_1 与管直径 D 的关系为

$$f_1 = \frac{1.84c}{\pi D}, \quad (5)$$

其中, c 为空气中声速,m/s。对于空气中的声速,应由式(6)确定:

$$c = 331.3 + 0.6t, \quad (6)$$

其中, t 为室温, $^{\circ}\text{C}$ 。试验时驻波管采用圆管,管直

径为7.6 cm,实验室温度为18.5 $^{\circ}\text{C}$,由式(2)、(3)可以求得此时空气中声速为342.4 m/s,频率测量范围上限为2 639 Hz,试验测试的频率在200~2 000 Hz,故此驻波管满足试验要求。

2.2 试验条件

试验台示意及主要设备如图4所示,驻波管垂直放置在固定支架上,以保证煤粉表面平整。管体分2段,上段管体材料为不锈钢,长度1.2 m;下段管体材料为有机玻璃,长度0.25 m,采用有机玻璃可以清晰观测煤粉堆积的状态,两端之间采用法兰连接。试验时由电脑生成不同频率的正弦声波信号,经功率放大器(MTC-300)放大后由置于驻波管上方的喇叭发出声信号。探针头部安装极化驻极体传声器,传声器接受的声信号经过采集卡(NI USB-4431)实时传到电脑中,试验采样率为65 536次/s,采样点数为65 536。探针从驻波管顶端匀速伸入,同时观测电脑实时显示数据,找到对应的声极值点,最终求得所测煤样在相应频率下的声吸收系数。

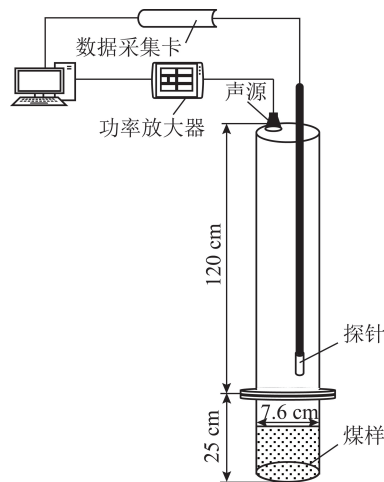


图4 试验台示意

Fig.4 Schematic diagram of experimental platform

试验煤样为福泉煤矿烟煤,烟煤破碎后筛分,将煤粉倒入驻波管下端,采用震荡方式使堆积煤粉表面平整,以保证声波能垂直入射煤粉中。试验煤粉粒径及编号见表1,表1中4号煤粉与1、2、3号煤粉通过2次煤粉筛选得到。

表1 试验煤样粒径分布

Table 1 Particle size distribution of experimental coal sample

煤样编号	粒径范围/mm
1	1.25~2.00
2	0.65~1.25
3	<0.65
4	<0.071

2.3 试验过程及结果分析

为探究声吸收系数与煤粉粒径的关系,选择煤样1、2、3号进行试验,3种煤样的粒径大致相同,依次代表大粒径、中粒径以及小粒径的煤粉。煤粉在驻波管中的堆积高度为10 cm,声源发出单频率正弦声波信号,频率选择以1/3倍频程的中心频率为主,在特征峰值附近增加试验点以精确峰值对应频率。

不同粒径下,煤粉对不同频率声信号的声吸收系数如图5所示。可见煤粉的声吸收曲线存在多峰值现象,煤样1的声吸收曲线的峰值相对明显,吸收峰值发生在500 Hz以及1 600 Hz附近。对于2号及3号煤样,第1特征吸收峰值较明显,分别在480和315 Hz附近,2者的第2峰值并不明显,对应频率在1 800 Hz以及1 900 Hz附近。可以看出,随着粒径的减小,第1特征吸收峰值左移,第2特征吸收峰值右移,第1、2特征吸收峰对应的频带宽度增加。

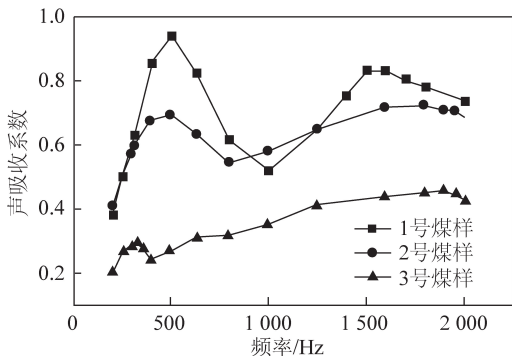


图5 不同粒径范围下声吸收系数变化

Fig.5 Variation of sound absorption coefficient in different particle size ranges

声波在堆积煤粉中传播时,由于低频声波波长较长,可以绕过粒径细小的煤粒,此时声波主要在煤粒间的孔隙中传播。不同孔隙间形成相连的腔体,当特定频率声波经过这些相连的腔体时会发生共振,此时,宏观上表现为堆积煤粉的声吸收系数达到峰值,出现共振吸收峰。在共振吸收峰附近,虽然煤粉的声吸收系数增大,但堆积物内部发生的共振现象会使声波在堆积物中的声衰减较大,故频率选择应避开共振吸收峰值附近对应的频率。

堆积煤粉的声吸收系数随煤粉粒径的减小而减小。相较于3号煤样,1号煤样的煤粒粒径较大,孔隙直径也相应变大,使更多声波透射进入堆积煤粉内部。忽略共振吸收峰对声吸收曲线的影响,可以看出随频率增加,声吸收曲线呈上升趋势。

仓储式制粉系统中经磨煤机后满足要求的煤粉会储存在煤粉仓中。燃煤电厂要求烟煤以粒径 $<0.074\text{ mm}$ 为主,试验中采用4号煤样研究炉前煤粉的声吸收系数,结果如图6所示。结果表明,除去特征吸收峰,4号煤样的声吸收系数在0.108 1~0.218 3。煤粉的吸收峰发生在315 Hz左右,之后再无吸收峰值。

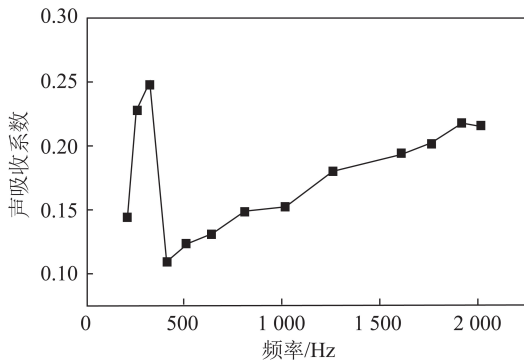


图6 炉前煤粉声吸收系数

Fig.6 Sound absorption coefficient of pulverized coal used for power generation

使用3号煤样探究堆积高度与声吸收系数的关系,频率和声源信号与煤粉粒径与煤粉声吸收系数关系试验相同,同时等区间增加煤粉的堆积高度。

依次以10、15、20 cm 三组堆积高度的煤粉进行试验。在不同堆积高度下,煤粉对不同频率声信号的声吸收系数如图7所示。不同堆积高度下的声吸收系数差异不明显,声吸收系数曲线在经过第1吸收特征峰后随频率上升直至第2个峰值。不同堆积高度的声吸收系数均值在500 Hz时为0.281 3,在1 600 Hz时为0.454,500~1 600 Hz时声吸收系数增长约61.4%。对于不同堆积高度的煤粉,其吸收峰并无明显偏移,说明随着堆积高度的增加,煤粉内部的孔隙结构无明显变化。

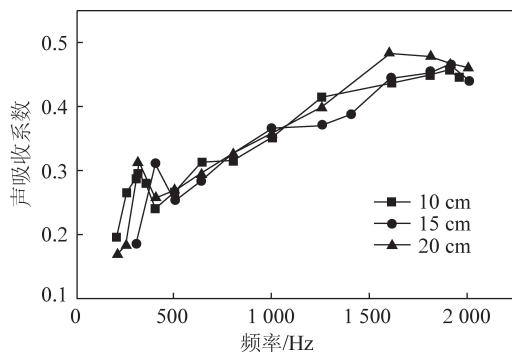


图7 不同堆积高度下声吸收系数变化

Fig.7 Variation of sound absorption curves at different stacking heights

3 煤粉低频声波传播特性

3.1 试验原理

对于一般的均匀粒径颗粒堆积物,低频入射声波可以绕过颗粒向前传播,此时声波主要在颗粒间孔隙的气体介质中传播,对于堆积煤粉这种呈多孔状物质,其内部结构可看作由许多毛细管组成,此时声的传播满足声波在毛细管中声波的传播特性。声波在管中传播时由于细管的黏滞作用、空气与管壁之间的热交换以及细煤粉随声波产生的振动造成声波能量的损失^[17],通常将声波能量随传播距离的增加而逐渐减弱的现象称为声波的衰减。同一温度不同频率下堆积煤粉中声波的衰减程度不同,通过测量声波路径上两测点信号的频谱的主峰值计算声衰减系数 β ,计算式^[18]为

$$\beta = \frac{1}{l} \ln \frac{a_1}{a_2}, \quad (7)$$

式中, a_1 、 a_2 分别为测点接收声信号频谱峰值; l 为两传感器之间的距离,m。

颗粒堆积物对声波传播的影响还体现在传播速度上,低频声波主要在颗粒间孔隙中传播,由于孔隙尺度较小,流体介质黏滞性的影响比较明显,故声波在其中的传播速度发生改变。此外,由于堆积物孔隙分布不规则,实际声传播路径为一条弯折的曲线,导致堆积物测量声速低于自由场中声速^[19-20],用 τ 表示2者的声速比值,表达式为

$$\tau = \frac{c_1}{c_0}, \quad (8)$$

其中, c_1 为试验测得的声速; c_0 为自由场中气体介质的声速。由毛细管中声传播特性相关理论可知,当气体介质状态一定时, τ 主要受颗粒间孔隙尺寸以及声波频率的影响。

3.2 试验步骤

采用图8试验台探究声波在煤粉中的传播特性,箱体尺寸为20 cm×20 cm×120 cm,箱体周围包裹4 cm保温棉层以隔绝声波与振动,在箱体两端内部放置玻璃棉以减弱声波反射对试验结果的影响。声信号由电脑产生并经功率放大器(MTC-300)后由声源发出,声源功率25 W,阻抗4 Ω ,经包覆处理后放入煤粉中。

传感器采用声望公司的MA231型预极化驻极体传声器,传感器的灵敏度50.1 mV/Pa。两传感器分别安装在距声源10 cm以及110 cm处,传感器与声源安装在同一高度的直线上,使用数据采集卡(NI USB-4431)采集两传感器测量到的声信号,采

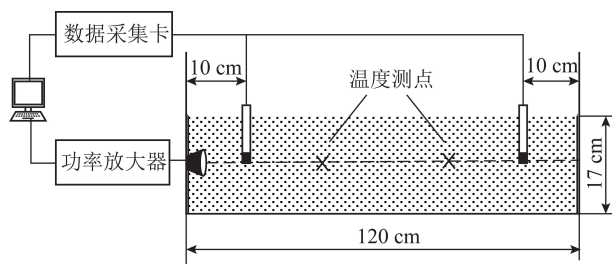


图8 煤粉声传播试验台示意

Fig.8 Schematic diagram of sound propagation lab bench for pulverized coal

样频率为102 400 s⁻¹,单次采样数为65 536。使用K型热电偶(热电偶的测量范围在-50~1 372 $^{\circ}\text{C}$,在-50~100 $^{\circ}\text{C}$ 精度为 ± 1 $^{\circ}\text{C}$)测定箱内煤粉温度,安装在声波传播路径的3等分点上,并与传感器高度相等,煤粉在箱体中的堆积高度为17 cm,箱中煤粉以4号煤粉为主。

3.3 试验结果及讨论

图9为不同频率下声衰减系数变化,为探测不同频率下的声衰减系数,采用扫频信号进行试验,信号周期为0.64 s,频率范围设置从200~300、300~400依次到1 900~2 000 Hz,不同频段下的声衰减系数对应图9中频率范围中值。由声衰减系数的定义可知系数值越大,声波在堆积煤粉中发生的衰减现象越明显,可知声波在200~1 000 Hz频段衰减现象较明显,在1 000~2 000 Hz频段声衰减系数逐渐下降,声衰减系数随频率的变化同样存在多峰值现象,且峰值随频率升高逐渐降低。结合之前对炉前煤粉声吸收系数的研究,200~600 Hz频段的声信号不适用于实际堆积煤粉温度测量中。

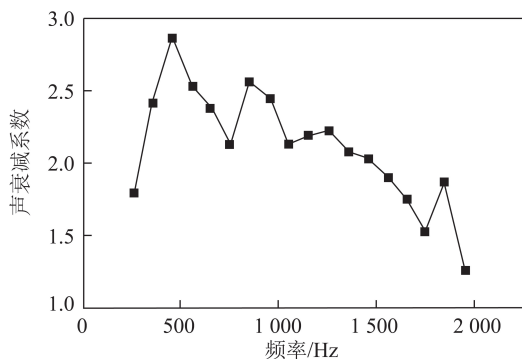


图9 煤粉声衰减系数

Fig.9 Sound attenuation coefficient in pulverized coal

选定堆积煤粉中的声速测量信号时,综合考虑煤粉的声吸收系数以及声衰减系数,选定测量信号频率在800~1 800 Hz,互相关算法为PHAT- β 算法^[21],其中 β 的值设定为0.95。每次测量时,由声

源发出选定范围的线性扫频信号,将传感器接收到的声波经过滤波消去杂音后进行互相关信号处理,

得到稳定的时延估计后最终求得声速。传感器1、2及二者之间的互相关信号如图10所示。

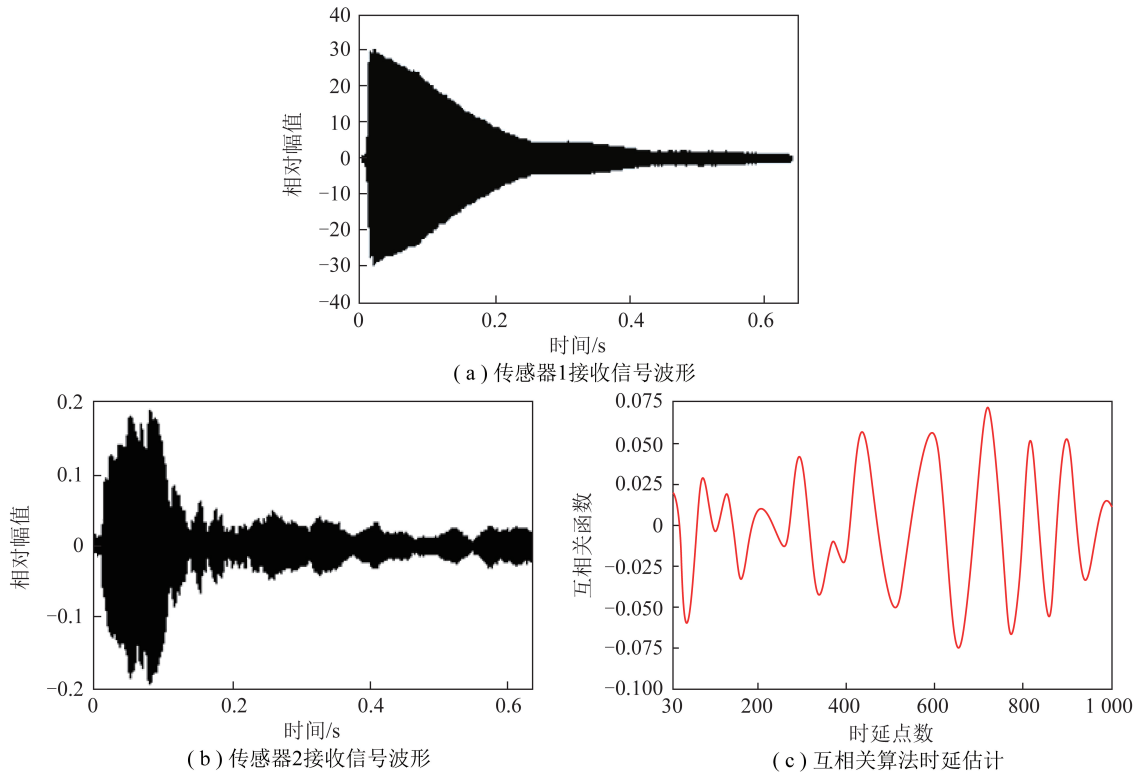


图10 实际信号接收及处理

Fig.10 Actual signal receiving and processing diagram

试验进行了10次测量,进行声速测量时的试验温度为 $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,堆积煤粉中的声速在 $142.261\sim 142.851\text{ m/s}$,由式(8)可知此时空气中声速为 347.32 m/s ,由此可知堆积煤粉中 τ 取值在 $0.410\sim 0.411$ 。声速测量的试验标准差为 0.1672 m/s ,表明声速测量结果稳定。试验结果表明运用扫频信号结合PHAT- β 互相关算法的堆积煤粉声速测量过程能够得到较理想的结果。低频声波可以应用于堆积煤粉的温度场测量中,运用声速与温度之间的函数关系最终可实现对温度场的反演^[22]。

4 结论与展望

1)堆积煤粉对声波的吸收系数存在多峰值现象,且峰值之间的频带宽度随粒径的减小而增大。煤粉的吸声系数与堆积煤粉表面的致密程度有关,粒径越小的煤粉,致密程度越大,声吸收系数越小。

2)堆积高度对煤粉的声吸收系数影响较小,不同高度的声吸收系数差异较小,声吸收曲线在 $500\sim 1\ 600\text{ Hz}$ 时声吸收系数增长 61.4% 。

3)声波在堆积煤粉中的声衰减系数同样存在多峰值现象,且峰值随频率升高逐渐降低。频率小于 $1\ 000\text{ Hz}$ 的声波在煤粉中的衰减现象较明显,在

$1\ 000\sim 2\ 000\text{ Hz}$ 频段声衰减系数逐渐下降。

4)基于堆积煤粉对于低频声波的吸收特性及声传播特性,确定了声速测量的扫频信号频率范围,结果表明,当声源的扫频信号为 $800\sim 1\ 800\text{ Hz}$ 且互相关算法为PHAT- β ($\beta=0.95$)时,测得的声速结果稳定,此种测量方式可以应用于堆积煤粉内部温度测量中。

5)试验主要验证了声学测量煤粉堆积物内部温度场的可行性,但在现场应用时,煤筒仓热量积累可能发生在传热较差的煤粉层深处,而试验设置的煤粉堆积深度较浅,后续试验会探究煤粉堆积深度的影响。

参考文献(References):

- [1] 袁绍.褐煤自燃特性及提质改性处理影响的机理研究[D].杭州:浙江大学,2018:3-6.
- [2] 梁运涛,辛全昊,王树刚,等.煤自然发火过程颗粒堆积体结构形态演化实验研究[J].煤炭学报,2020,45(4):1398-1405.
LIANG Yuntao, XIN Quanhao, WANG Shugang, et al. Structure variation of coal particle packing during the spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1398-1405.
- [3] 张必辉.开式煤粉制备系统运行安全分析与隐患防治[J].洁净

- 煤技术,2012,18(6):80-84.
- ZHANG Bihui. Safety analysis and hidden trouble prevention of open-type pulverized coal preparation system [J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(6): 80-84.
- [4] 郑兰芳.不同温度阶段煤自燃的实验探究[J].武警学院学报, 2010, 26(4): 16-18.
- ZHENG Lanfang. An experimental research on coal spontaneous combustion in different temperature stages [J]. Journal of Chinese People's Armed Police Force Academy, 2010, 26(4): 16-18.
- [5] 沈国清,张世平,安连锁.声学测温在混响和高噪声条件下的时延估计研究[J].动力工程学报, 2014, 34(7): 529-533.
- SHEN Guoqing, ZHANG Shiping, AN Liansuo. Study on time delay estimation in acoustic pyrometry [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(7): 529-533.
- [6] 徐迅,杨晓华.非接触式测温技术[J].应用技术, 2012(5): 159-160.
- XU Xun, YANG Xiaohua. Non-contact temperature measurement technology [J]. Applied Technology, 2012(5): 159-160.
- [7] 安连锁,李庚生,沈国清,等.声学测温系统在200 MW电站锅炉中的应用研究[J].动力工程学报, 2011, 31(12): 928-932.
- AN Liansuo, LI Gengsheng, SHEN Guoqing, et al. Application of acoustic pyrometer in a 200 MW power plant boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(12): 928-932.
- [8] ITO F, SAKAI M. Fundamental studies of acoustic measurement and reconstruction combustion temperature in large boiler [J]. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 1987, 53(489): 1610-1614.
- [9] 周平,刘记平.基于数据驱动多输出 ARMAX 建模的高炉十字测温中心温度在线估计[J].自动化学报, 2018, 44(3): 552-561.
- ZHOU Ping, LIU Jiping. Data-driven multi-output ARMAX modeling for online estimation of central temperatures for cross temperature measuring in blast furnace ironmaking [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(3): 552-561.
- [10] WANG Yi, FAN Xiaohui, CHEN Xuling. Mathematical models and expert system for grate-kiln process of iron ore oxide pellet production (Part I): Mathematical models of grate process [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(4): 1092-1097.
- [11] 陈冠男.声学法仓储粮食温度检测关键技术的研究[D].沈阳:沈阳工业大学, 2012: 18-22.
- [12] GUO Miao, YAN Yong, HU Yonghui, et al. Temperature measurement of stored biomass using low-frequency acoustic waves and correlation signal processing techniques [J]. Fuel, 2018, 227: 89-98.
- [13] KLEPPE J, SANCHEZ J, FRALICK G. The application of acoustic pyrometry to gas turbines and jet engines [C]//34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cleveland: [s.n.]. 1998.
- [14] 沈国清,安连锁,姜根山,等.基于声学 CT 重建炉膛二维温度场的仿真研究[J].中国电机工程学报, 2007, 27(2): 11-14.
- SHEN Guoqing, AN Liansuo, JIANG Genshan, et al. Simulation of two-dimensional temperature field in furnace based on acoustic computer tomography [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 11-14.
- [15] 郭森,闫勇,卢钢,等.基于低频声波的空气温度测量研究[J].仪器仪表学报, 2018, 39(1): 75-83.
- GUO Miao, YAN Yong, LU Gang, et al. Research on air temperature measurement using low frequency sound waves [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 75-83.
- [16] 郭敏.声信号在准多孔介质中的传播及害虫弱声信号特征分析[D].西安:陕西师范大学, 2003: 43-46.
- [17] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础[M].2版.南京:南京大学出版社, 1980: 275-278.
- [18] 郭森.基于声学法的堆积生物质温度测量研究[D].北京:华北电力大学, 2020: 38-42.
- [19] 暨勇策.气体性质及堆积物粒径对声传播特性的影响研究[D].北京:华北电力大学, 2020: 32-35.
- [20] HICKLING R, WEI W, HAGSTRUM D W. Studies of sound transmission in various types of stored grain for acoustic detection of insects [J]. Applied Acoustics, 1995, 50(4): 263-278.
- [21] 沈国清,杨杰栋,陈栋,等.基于二次相关 PHAT- β 算法的锅炉声学测温时延估计研究[J].动力工程学报, 2018, 38(8): 617-623.
- SHEN Guoqing, YANG Jiedong, CHEN Dong, et al. Study on time delay estimation in boiler acoustic temperature measurement based on second correlation PHAT- β algorithm [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(8): 617-623.
- [22] 茹燕丹.声学法重建炉膛三维温度场的算法研究[D].北京:华北电力大学, 2015: 14-20.