

煤层气排采参数实时探测系统研制

任建超,孙立强,白荣财,高卫卫,肖 琪

(陕西陕煤曹家滩矿业有限公司,陕西 榆林 719100)

摘要:针对煤层气排采参数实时探测的需求,设计了一套煤层气排采参数实时探测系统,该系统由井下探头和上位机软件两部分组成,可实现井筒环空流速、压力及温度的实时采集。文中对传感器、电路及软件编程进行了详细的设计,并在加工完成后利用实验井进行了验证,结果显示探测系统测量压力、流量及温度的量程分别为 0~10 MPa,0~5.8 m/s 及 -55~125 ℃,所对应的测量误差分别为 0.5%,3% 及 0.5 ℃。论文的研究内容可同步采集井下的多个两相流相关参数,以便进行多参数的融合分析,从而为排采工艺的制定提供必要的数据支撑。

关键词:煤层气;合层排采;流速传感器;实时探测

中图分类号:TD41

文章编号:1000-0682(2024)06-0034-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.007

Development of real-time monitoring system for coalbed methane exploitation parameters

REN Jianchao, SUN Liqiang, BAI Rongcai, GAO Weiwei, XIAO Qi

(Shaanxi Coal Caojiatan Mining Co., LTD., Shaanxi Yulin 719100, China)

Abstract: In order to meet the demand of real-time monitoring of coalbed methane exploitation parameters, a real-time monitoring system for coalbed methane exploitation parameters was designed. The system consists of downhole probe and software, which can realize real-time acquisition of velocity, pressure and temperature of wellbore annulus. The sensors, circuits and software programming are designed in detail in this paper. After the design and processing, the experimental well was used for experimental verification. The results show that the measuring ranges of pressure, flow rate and temperature are 0~10 MPa, 0~5.8 m/s and -55~125 ℃ respectively, and the corresponding measurement errors are 0.5%, 3% and 0.5 ℃ respectively. The research of this paper can synchronously collect multiple two-phase flow-related parameters underground, in order to conduct a combined analysis of multiple parameters and provide necessary data support for the formulation of exploitation technology.

Keywords: coalbed methane; co-layer exploitation; flow velocity sensor; real-time detection

0 引言

煤层气是一种与煤伴生、共生的烃类气体资源,其主要成分为甲烷,是一种非常规天然气资源。煤层气的开发利用具有减少甲烷气体排放,保护环境^[1];降低煤矿瓦斯含量,保障煤矿安全生产^[2];提升煤矿资源综合利用率,增加煤矿经济效益^[3];以及减少我国天然气对外依存度,保障国家能源安全^[4]等诸多优点。因此,近年来我国政府加大了对

煤层气勘探开发的支持力度,相关学者在煤层气的探测装备^[5]、产出机理^[6]、影响因素^[7]、层间干扰^[8]及排采工艺^[9]等多个方面展开了系列研究,取得了显著的进步,促进了行业的发展。

然而由于技术的限制,我国多数地区的煤层气开采仍采用垂直井技术^[10-11]。对于煤层气垂直抽采井,尤其是煤层气合层排采井而言,煤层气井筒环空两相流的体特征参数(譬如流速、压力及温度等),是制定排采工艺的客观依据^[12-13],非常有必要进行实时监测。然而现有的监测系统监测参数过于单一,没有涉及到流速、压力及温度等多数据参数的联合采集及融合分析。基于此,该文设计了一套煤层气排采参数实时探测系统,可实现井筒环空流

收稿日期:2024-04-15

第一作者:任建超(1989—),男,汉族,陕西榆林人,工程师,学士,现主要从事煤矿采掘技术研究工作。

速、压力及温度的实时采集,从而为排采工艺的制定提供必要及全面的数据支撑。

1 工作原理

如图 1 所示,煤层气排采参数实时探测系统由井下探头和上位机软件两部分构成。井下探头与油管相连接,安装在煤层上方,用于实时探测所在位置的两相流速、温度及压力,测量数据经电缆线实时传输到上位机软件。软件用于对采集到的数据进行实时处理、显示及存储。

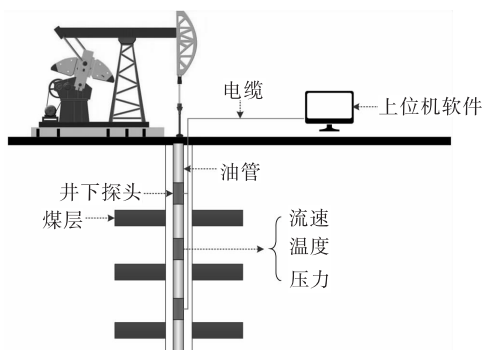


图 1 系统组成及工作原理示意图

探测系统通过传感器实现对井下参数的采集。排采设备下井时,将安装有传感器的井下探头分别安装于各个煤层上方,利用相应传感器对所处煤层的流速、温度及压力进行采集,并通过处理电路将传感器输出的模拟信号转换为数字信号,随后将电路输出的 TTL 电平转化为 RS485 电平,从而实现信号的远距离传输。地表的信号接收端通过电路将 RS485 电平还原为 RS232 电平,随后直接接入上位机软件进行数据的处理及显示。

2 传感器选择及设计

压力传感器和温度传感器技术都较为成熟,因此可直接选用满足量程范围及分辨率要求的传感器。传统的井下流速传感器因安装体积、安装精度及密封条件的限制,在井下使用受限,基于此实际情况,该文自研了流速传感器。

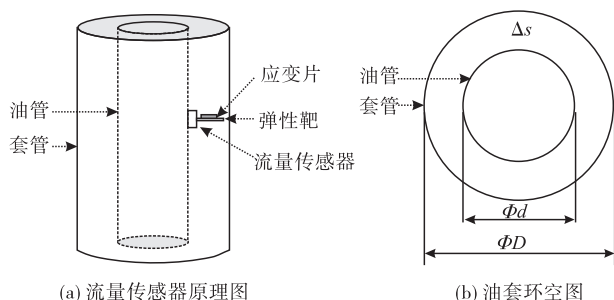


图 2 流速传感器组成及工作原理示意图

图 2 所示为设计的流速传感器组成及工作原理示意图,由图 2(a) 可知,传感器主要由弹性靶和应变片组成,当井筒环空两相流体冲击弹性靶时,弹性靶受力产生微弱变形,该变形信号由粘贴于弹性靶上的应变片测量得到,进而输出与变形量成正比的电压信号,由此实现井筒环空流速的测量。假设煤层气井筒环空流速为 v ,应变片输出电压信号为 U ,则:

$$v = kU \quad (1)$$

式中: k 为变形系数,该数值是一个与弹性靶尺寸及材料特性有关的常量。

由于应变片的输出信号存在范围值,若弹性靶刚度太大,则可导致应变片变形太小,由此测量到的流速值分辨率较低,反之则可能导致应变片变形太大,超出测量范围,因此必须根据抽采井的日产气量确定应变片电压值的测量范围,进而对弹性靶的刚度及尺寸进行设计。

图 2(b) 所示为油套环空尺寸图,假设煤层气抽采井的套管直径为 D ,油管直径为 d ,油套环空面积为 Δs ,该生产井的产气量为每天 n 立方米,井筒环空流量为 Q ,则可得到如下公式:

$$Q \times 24 \times 60 \times 60 = n \quad (2)$$

$$v \cdot \Delta s = Q \quad (3)$$

$$\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \Delta s \quad (4)$$

联合公式(1)到公式(4)可得:

$$U = \frac{n}{21 \ 600 k \pi (D^2 - d^2)} \quad (5)$$

将实际应用时的煤层气抽采井油管尺寸、套管尺寸、日产气量范围及应变片变形系数代入公式(5),便可计算得到所需的电压变化范围,进而据此范围确定弹性靶的材料及尺寸。

3 电路设计

压力传感器的输出为模拟信号,需转化为数字信号才能被单片机处理,因此选用了自带 AD 转换功能的单片机 STC15F2K32S2,无需单独设计压力传感器的转换电路便可工作。流速传感器采用应变片设计,其输出信号为 mV 级别的微弱差分信号,需要进行差分转单端及放大处理后才能被单片机所采集,此外,应变片的残余变形将导致传感器的零点漂移,因此需设计零点漂移处理电路。该文采用 AD823 芯片处理流速传感器的输出信号,设计的电路图如图 3 所示。

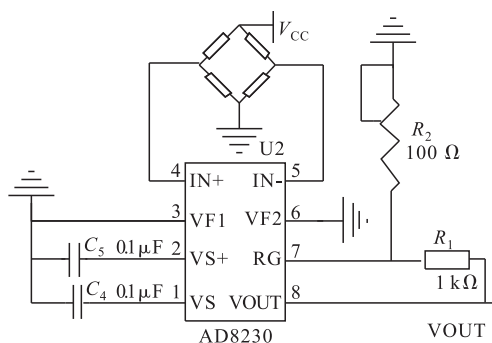


图3 流速传感器处理电路图

由图3可知,流速输出的放大增益是通过外部电阻与温度系数的匹配实现的。通过改变 R_2 的阻值,可得到不同放大倍数的电压值。前置放大器及增益放大器组成芯片内部电路,两个放大器都可以实现自稳零的功能,同时也使得温漂和零漂情况减到最小。电路循环过程中,在时钟的上半周期,电路采用电容对输入微弱信号进行采样及存储,在此过程中抑制了共模电压;在时钟的下半周期,电路将采集的信号进行放大及动态校零,并将共模输入电压下拉到参考电位,从而得到相同的共模电压。

温度传感器采用 DS1624S 芯片,所设计的电路如图4所示,芯片通过内置的计数电路,计算固定计数周期内累加器的计数值,并与预置的数值进行对比得到差值,进而根据相关算法计算得到测量温度,并通过芯片的 SDA 及 SCL 引脚将测量结果输入单片机。

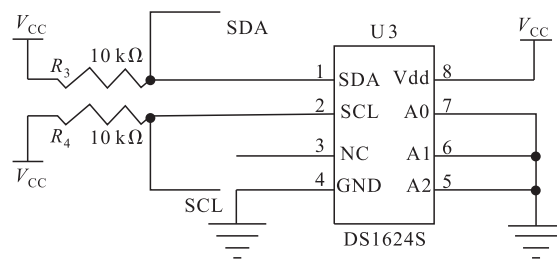


图4 温度传感器电路图

4 软件设计

根据实际需求所开发的软件界面如图5所示。软件主要由参数配置模块、功能按钮模块及数据显示模块构成,其中参数配置模块用于配置串口通信及滤波等相关参数,功能按钮模块用于实现软件的操作及保存功能,而数据显示模块则用于探测数据的实时显示。

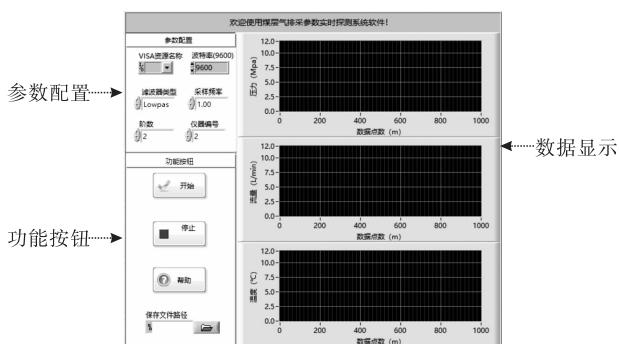


图5 软件界面

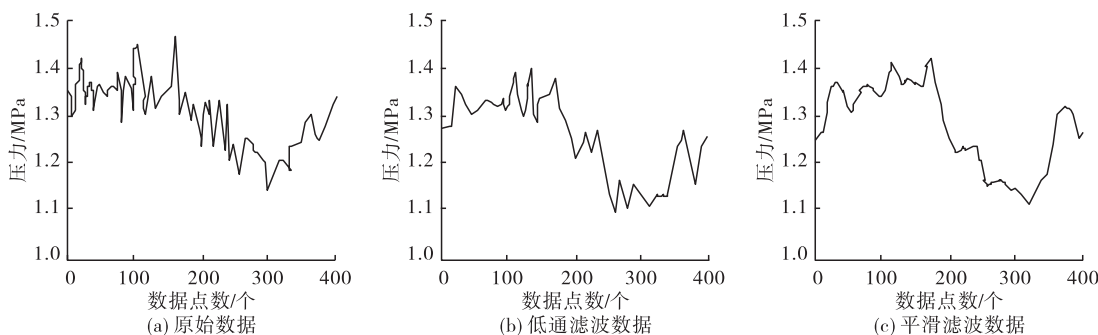


图6 现场实测数据滤波效果图

软件采用 LabVIEW 图形化编程语言开发。对于串口通信模块,主要涉及串口初始化、串口读取以及串口关闭三个子 VI,其中串口初始化根据实际需求显示了 VISA 资源名称及通信波特率的设置按钮,其他参数则采用子 VI 的默认设置。串口配置完成后,利用读取缓冲区子函数对接收数据缓冲区进行读取,随后采用循环结构进行判断,即,当缓冲区数据不为 0 时则进行后续的滤波及显示操作。当软

件运行完毕后,利用关闭串口子 VI 对串口资源进行释放,否则串口将持续被占用。

井下探测工况环境复杂,所采集到的数据中夹杂了大量噪声信号,需要进行滤波。LabVIEW 软件提供了多种滤波函数子 VI,包括低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器及平滑滤波器等。为满足实际排采现场的滤波需求,文中将不同类型的滤波器对煤层气排采现场实测压力数据进行了滤

波分析,由图 6 所示实际滤波效果可知,由于现场存在多种频率的噪声干扰,因此采用平滑滤波器进行滤波后所取得的效果最佳。

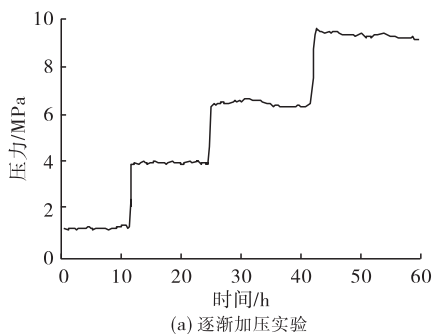
5 实验验证

系统加工调试完成后,利用实验井进行了实际验证试验,其中电路板及井下探头的实物图如图 7 所示。实验井可调整井筒内的压力及流速值,并可设定相应参数的保持时间,因此实验时通过调整实验井的实验参数,便可对所设计探测系统测量压力、流速及温度等参数的性能进行验证,具体如下。



图 7 实验现场

压力试验时分两种情况进行测试,一是分时段逐渐加压测试,二是直接将压力提升到测量范围上限进行测试。通过两种实验方式,可验证井下探头对压力的动态监测能力及探头的密封性能。某次实验井下探头所测量到的数据如图 8 所示,通过大量实验将测量值与实验井标准值进行对比后,得到井下探头测量压力的范围为 $0 \sim 10$ MPa,测量误差为 0.5% 。



(a) 逐渐加压实验

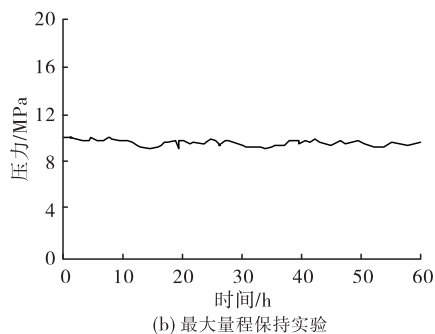
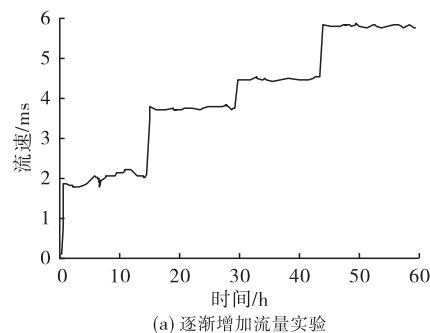
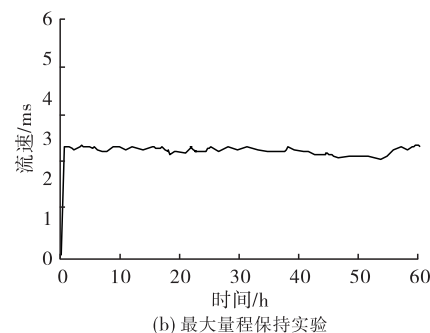


图 8 压力测试实验

进一步对流速测量功能进行了验证实验。流速测试实验同样进行了上述两种模式的实验,即逐步增加流速实验及最大流速保持实验。某次实验井下探头所测量到的数据如图 9 所示,通过大量实验将测量值与实验井标准值进行对比后,得到井下探头测量流速的范围为 $0 \sim 5.8$ m/s,测量误差为 3% 。



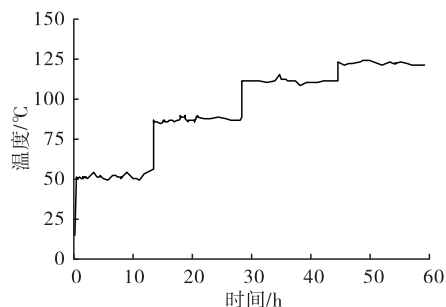
(a) 逐渐增加流量实验



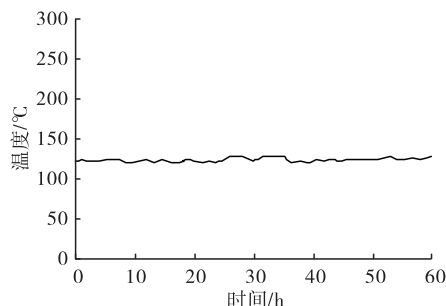
(b) 最大量程保持实验

图 9 流速测试实验

实验井没有加温功能,因此温度测试时采用了两种方式,一是直接将井下探头放置到实验井内一段时间,测量井筒温度随气温的变化情况;二是将井下探头的电路板单独取出(温度传感器焊接在电路板上),密封后放置到可调温的加热炉内进行增温实验。某次实验的实验结果如图 10 所示,通过实验验证了井下探测的测量范围与误差与温度传感器芯片的相关数据保持一致,即温度测量范围为 $-55 \sim 125$ $^{\circ}\text{C}$,测量误差为 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 。



(a) 逐渐增加温度实验



(b) 最大量程保持实验

图 10 温度测试实验

6 结论

该文设计了一套煤层气排采参数实时探测系统,该系统由井下探头和上位机软件两部分组成,其中井下探头所采集的井筒环空流速、压力及温度数据,经电缆线实时传输到上位机软件进行显示及存储。探测系统设计及加工完成后进行了实验验证,结果显示探测压力、流量及温度的量程分别为 0 ~ 10 MPa, 0 ~ 5.8 m/s 及 -55 ~ 125 °C,所对应的测量误差分别为 0.5%、3% 及 0.5 °C。煤层气排采参数实时探测系统的研制,为煤层气排采工艺的制定提供了必要的支撑及科学依据,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨方亮,许红娜.“十四五”煤炭行业生态环境保护与资源综合利用发展路径分析[J].中国煤炭,2021,47

(05): 73-82.

- [2] 丁远.一种便携式瓦斯抽采管道多参数测定仪研制[J].煤矿安全,2023,54(12):199-203.
- [3] 袁亮.我国煤层气开发利用的科学思考与对策[J].科技导报,2011,29(22):3.
- [4] 徐凤银.“深部煤层气勘探开发理论与技术论文专辑”特约主编寄语[J].石油学报,2023,44(11):1750-1751.
- [5] 田忠斌,马玉龙,李貅,等.煤层采空区内煤层气储气构造半航空瞬变电磁探测——以沁水煤田为例[J].地球物理学报,2022,65(11):4495-4503.
- [6] 张松航,唐书恒,孟尚志,等.煤储层含水性及其对煤层气产出的控制机理[J].煤炭学报,2023,48(S1):171-184.
- [7] 韦波,马君慧,胡永,等.大倾角储层煤层气多层合采产量控制地质与工程因素[J].科学技术与工程,2023,23(31):13350-13360.
- [8] 郭晨,秦勇,易同生,等.基于生产特征曲线的煤层气合采干扰辨识方法——以黔西地区织金区块为例[J].石油勘探与开发,2022,49(05):977-986.
- [9] 丁聪聪,苏生,方晓蕾,等.祁东井田 W 型煤层气井排采特征及排采工艺优化研究[J].中国煤炭地质,2023,35(10):23-27.
- [10] 李林,张培河,武英俊,等.沁北盆地太原组煤层地面垂直井抽采储层改造技术研究[J].煤炭技术,2023,42(06):88-91.
- [11] 张芬娜,宋云飞,朱洪迎,等.深部煤层气直井井筒液携煤粉颗粒特性分析[J].中国矿业大学学报,2021,50(06):1060-1066.
- [12] 刘谨嘉,冯堃,祝捷,等.压裂煤储层气水两相流模型及煤层气产量分析[J].中国煤炭地质,2023,35(06):9-13.
- [13] 熊至宜,张云,张丽稳,等.煤层气井筒气液两相流数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(02):153-159.

(上接第 17 页)

- [12] 钱琳琳,张福贵,王德政.基于 PCS7 的蒸发器控制优化和抗干扰策略设计[J].实验室研究与探索,2021,40(08):52-56+189.
- [13] 梁豪杰,赵翠莲.基于标准金属量器建模的液位控制方法[J].电子测量技术,2021,44(16):31-36.
- [14] 李磊,李俊红,顾菊平,等.双容水箱基于 QPSO 算法

的 PID 控制研究[J].控制工程,2021,28(08):1553-1558.

- [15] 李红旗.多槽浮选机液位差研究与液位调整机构设计[J].煤炭工程,2022,54(10):22-25.
- [16] 李捷,王毫旗.基于遗传萤火虫算法的液压挖掘机铲斗控制研究[J].计算机仿真,2022,39(8):262-267+290.