

煤层气井毛细管测压技术研究

刘永茜, 刘曰武, 苏中良, 欧阳伟平, 万义钊
(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 介绍了毛细管测压的基本原理、技术现状以及煤层气井毛细管测压的关键问题, 分析了煤层气井测试中可能遇到的问题及解决办法, 探讨提高煤层气井毛细管测试技术的发展方向。针对煤层气井设计了环空移动型和同心固定型 2 种传压筒及测压系统, 并给出了测压方案, 从根本上解决了煤层气井流压变化测试难题, 该测压系统在 2.0 m 高水柱压力下综合精度可达 0.06%, 较其他技术测压精度有显著提高。

关键词: 煤层气井; 渗流; 毛细管; 测压技术; 传压筒; 流压变化

中图分类号: TD844 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336 (2012) 10-0030-04

Study on Capillary Pressure Measuring Technology of Coal Bed Methane Well

LIU Yong-Qian, LIU Yue-wu, SU Zhong-liang, OUYANG Wei-ping, WAN Yi-zhao
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The paper introduced the basic principle and technical status of the capillary measurement and the key problems of the coal bed methane well capillary pressure measuring, analyzed the problems possibly occurred in the coal bed methane well measurement and solutions and discussed the development orientation to improve the capillary measuring technology of the coal bed methane well. According to the coal bed methane well, a circular space moving type and a concentric fixed type pressure transmission cylinders and the pressure measuring system were designed. A pressure measuring plan was provided to fundamentally solve the difficult problems of the flowing pressure variation measurement in the coal bed methane well. The pressure measuring system could have a comprehensive accuracy up to 0.06% under the 2 m water column pressure, which was obviously improved than the pressure measuring accuracies of other technologies.

Key words: coal bed methane well; seepage; capillary; pressure transmission cylinder; flowing pressure variation

目前对于油藏工程和油气井数值模拟的压力数据的获取手段主要有: ①进行井底压力计实测, 通过井口压力数据折算; ②直接通过油层压力传感, 在地面将测点传感信号转换为压力数据。煤层气开发过程中的气井压力计算也是通过上述方法。比较而言, 后者在数据精度方面存在较大优势, 并且数据读取直观、连续。毛细管压力测试系统正是该技术实现的载体。毛细管测压技术在 20 世纪 80 年代初国外就已开展^[1], 我国从 1994 年开始从美国引进新一代压力试井技术, 首先应用于石油工业, 先后在塔里木、辽河、大港、长庆、胜利浅海、渤海等油田投入应用, 取得良好的应用效果。与传统测

试技术相比, 该技术具有测压精度高、稳定性强、结构简单、操作简便、易于检修等特点^[2-7]。随着煤层气等非常规天然气开发需求, 尚未针对煤层气井的特点开发出经济高效的压力测试设备, 研发适合煤层气井的毛细管测压系统就显得尤为重要。

1 毛细管测压原理及技术现状

1) 毛细管测压原理。毛细管压力监测系统如图 1 所示。整个系统可以分为地面部分和井下部分。地面部分主要由气源、动力设备、过滤设备、控制单元以及数据采集系统组成; 井下部分由毛细管、安全保护装置、封隔器和传压筒组成。毛细管

收稿日期: 2012-09-08; 责任编辑: 张 扬

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (2011ZX05038003)

作者简介: 刘永茜 (1984—), 男, 河南南阳人, 博士, 博士后。联系人: 刘曰武, Tel: 010-82544205, E-mail: lywu@imech.ac.cn

网络出版时间: 2012-10-18 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20121018.0932.007.html>

引用格式: 刘永茜, 刘曰武, 苏中良, 等. 煤层气井毛细管测压技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (10): 30-33.

测压系统的基本原理是帕斯卡定理:加在密闭液体上的压强,能够大小不变地由液体向各个方向传递。高压气体通过毛细管注入传压筒,将内部气体置换成均一的气体,在传压孔处与井底液体形成一个气-水等势面,该等势面的流压 P 就是测试所求。如果设定传压筒距离地面高度为 H ,气体密度为 ρ ,传感器压力示数为 P' ,则 $P=P'+\rho gH$ 。改变传压筒的位置,可以测量井筒任意位置的壓力。

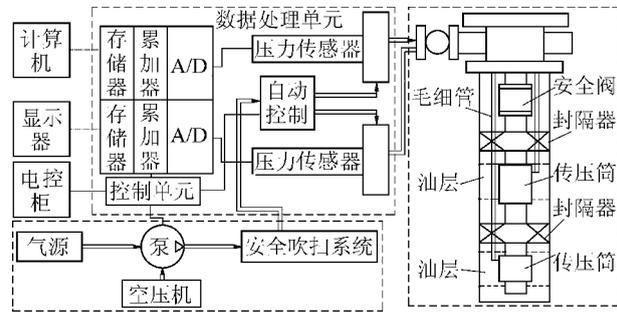


图1 油气井中的毛细管测压系统

2) 毛细管测压系统技术现状。毛细管测压技术的核心主要包括系统封闭性连接技术、压力传感技术、数据采集及控制技术。系统的封闭技术是实现毛细管压力测试高精度的前提。系统密闭性要求主要体现在毛细管与穿越器、封隔器和传压筒的衔接。胜利油田研究院针对毛细管测压系统开发了封闭性毛细管穿越器;毛细管与封隔器密闭连接主要指毛细管穿过封隔器上面设置的毛细管专用通道,实现二者密闭衔接;毛细管与传压筒的连接包括毛细管定压定向打开装置与传压筒的可靠连接,通过专用插孔将毛细管引入,采用 Swagelok 接头锁定毛细管,实现密封连接。

压力传感器(变送器)是实现高精度测试的关键。在石油工业早期,大多采用比较成熟的电子设备进行永久监测,也就是直接测试技术。20世纪60年代末,世界第一个用于永久监测井底压力的压力计问世^[8],1973年斯伦贝谢公司也第1次在北非油田安装了永久井下压力计^[8],随后不断改进该系统,并于1993年推出了新一代石英和蓝宝石永久压力测试系统,该系统的基本组成包括用于测量压力和温度的传感器、电子元件和壳体。这种直接测试然后通过井口压力进行折算的方法,存在着信号传输错码、易损坏、占用井孔体积大等缺点,并给工程预测带来较大的误差。毛细管测压系统通过压力传感器(变送器)测得地面端内毛细

管的气体压力后,将信号传递到地面数据采集器,数据采集器将压力数据显示并存储,记录井下实测压力数据,根据测压井位深度、气体性质的计算,最终得到测压点的真实压力。因此在测试过程中压力传感器(变送器)的技术参数(量程、精度、分辨率、非线性等)是关键,目前实验室使用的高精度压力变送器采用超级扩散硅传感技术,其智能化的高分辨率、高精度、高稳定性和温度补偿功能,使得其综合测试精度超过0.05%,重复误差小于0.02%,完全满足煤层气井压力测试的需要。

数据采集系统是毛细管测压结果的记录和存储工具,也是信息反馈的数据库。数据采集系统通过计算机与控制系统连接,更加有效地控制系统气体注入与吹扫,实现安全测试。目前国内外有许多企业针对不同的毛细管测压设备开发相关的数据采集系统,1998年中国石油大学与胜利油田对毛细管测压系统展开联合科技攻关,随后开发出PS-60毛细管测压系统,并开发针对该系统的数据采集系统;为实现智能化压力测试,联合数据采集系统的反馈数据,通过计算机远程控制,实现毛细管补气 and 定期吹扫;为实现分层测试,开发出针对集群式毛细管测压系统的数据采集系统和控制系统,降低了测试成本,提高了测试效率。

2 煤层气井毛细管测压的关键问题

2.1 煤层气测压精度与测压范围

与常规油气田开发比较,煤层气井的开发有自身特点。煤层赋存层位较油层浅(我国绝大多数开采煤层的埋深在1500m以浅),地层压力相对油层较小,区域地质构造相对发育^[9]。与常规油气储层相比,煤层自身对压力变化更为敏感,各向异性渗透特征更为明显^[10],尤其在构造煤(软煤)发育区,高精度要求将会给传统测压技术带来更大挑战。煤层气井中气体组分相对单一,在理想封闭条件下气体参数可按照完全甲烷计算。在不同的煤层气井中,测压系统的测压装置的性能参数选取也很关键,与油气井相比,压力传感器(变送器)的量程选取较小,分辨率较高,对其非线性、温度补偿指标和测压精度提出更高的要求,这样更适合对压力敏感的煤层渗流能力动态监测。

2.2 井底压力远程监测

现有毛细管测压装置都存在数据实时性差、数

据取回困难,另外在煤层气田中各压力监测点分布比较分散、距离远、多点集中监控和综合化管理困难等问题,因此实现井底压力压力测试集群化、远程监测是重要的技术攻关方向。目前,中国石油大学(华东)、渤海油田和胜利油田研究院等多家单位正在研究井底压力远程检测技术,将为煤层气开发提供新的技术支持。

2.3 安全测压技术

1) 毛细管安全安装。在毛细管安装前,首先通过注入一定压力的氮气检验(约20 MPa),然后进行气密性检查;在毛细管通过封隔器连接传压筒后,再次注入氮气检测其密闭性,并确保系统无堵塞。毛细管下井过程中,每隔一段距离安装毛细管保护器;并保证毛细管始终保持一定的拉应力状态,避免毛细管与其他设备产生缠绕;每次增加一毛细管保护器,顺便读取传压筒的回压数据,如果为零及时补气吹扫,读数不为零则证明已经到达并进入井底液面;如果遇到压力迅速下降为零,则毛细管泄露,需要重新安装。毛细管下入完毕,在井口切断毛细管,切断时注意毛细管朝向,防止高压气体伤人;切断毛细管后做油管挂及采油树密封毛细管的穿透密封,连接地面毛细管测压系统。

2) 安全监测。传压筒的传压孔进入井底液面下以后要根据井深和压力条件及时补充氮气^[3],不同井深、传压筒有效容积和压力条件补给气体时间有差异,一般3~5 min;每次补充气体前,进行回压记录;在开井之前,需进行放气曲线测试,曲线合格则证明系统稳定可靠,可以开始吹扫补气、测压,毛细管测压系统开始整体运转。

3 新测压系统设计

3.1 传压筒结构设计

毛细管测压系统的设计与传统的油气井毛细管测压系统相似,其压力监测系统的差异在于传感器精度和量程的不同,而系统的关键差异在于传压筒的结构设计与优化,因此,测压系统的设计关键是传压筒的结构与布置方式。

本试验设计2套测压系统:固定式定点测压系统和移动式测压系统。固定式测压系统原理与油井测压气筒结构相似(图1),该系统的特点在前文已描述,与移动式测压系统相比其特点是成本高、灵敏度高。本系统对传压筒结构进行了简化(图

2),完善了定向阀门(活塞)驱动控制元件,C形弹簧环的使用更加节约成本(弹簧圈可以重复利用)。固定式测压装置可以串联工作,实现多点同时测试,也就是群集式定点测压系统,这与传统的同心型毛细管测压系统类似,将多点压力通过毛细管内气体传给地面压力传感器,通过数据采集系统入库,通过控制系统调节,定时补气吹扫。

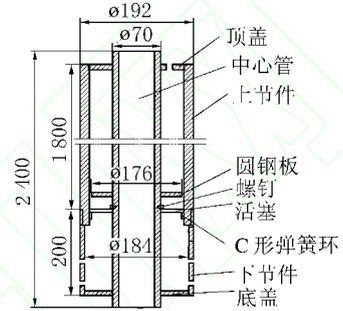
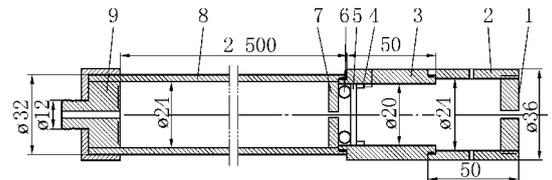


图2 固定式传压筒剖面

移动式测压系统是本设计的重点,该系统从传压筒设计到系统移动侧压实现了根本性变革,使得毛细管测压系统可以进入煤层气的斜井测试。

传压筒的核心功能就是提供测压所需的气-液等势面的环境,保证压力测试的安全、稳定进行。从结构上分为3段:上节件、过渡段和下节件。①上节件主要为测试储备足够的高压气体,未测试保证足够的驱动能量,其容积大小决定了后期的压力补给时间;②过渡段主要是活塞定向提供空间环境,是测试进行的关键部分,也是传压筒优化改造的核心;③下节件是气-液等势面的发生部位,上节件和过渡段的功能都服务于下节件,传压孔位置就是测试位置。整个传压筒的有效体积保证要大于毛细管体积的10倍以上,才能实现高效测试和准确信息反馈。移动式传压筒设计如图3所示,从根本上实现了型式修长,元件小巧化。



1—底盖; 2—下节件; 3—过渡件; 4—C形弹簧环; 5—活塞;
6—橡胶圈; 7—空心钢板; 8—上节件; 9—顶盖

图3 移动式传压筒剖面

移动式测压系统要实现直井、斜井压力动态测压,必须保证传压筒能够顺利进入测试位置,为此本设计针对传压筒定向、定点移动尝试采用导线牵

引装置实现井下传压筒定位。通过井口和井下定点引导, 毛细管测压系统可以在井下随时随地测压, 实验室毛细管测压系统整体设计(移动式)如图4所示。右侧的空气压缩机和高压气瓶模拟井筒压力条件变化, 其余部分与井筒结构相同。高压气体通过毛细管穿越器连接井口法兰进入井下传压筒, 形成一个连通体。井底泵上安装一个定滑轮, 井口再固定一个定滑轮, 引导线连接传压筒绕行定滑轮, 通过地面引导线(带刻度)收放可以定位传压筒位置, 在斜井中也可以通过倾斜角度计算, 准确定位测压位置。通过定位以后, 小体积的传压筒在斜井的任何位置都可以实现安全测压。

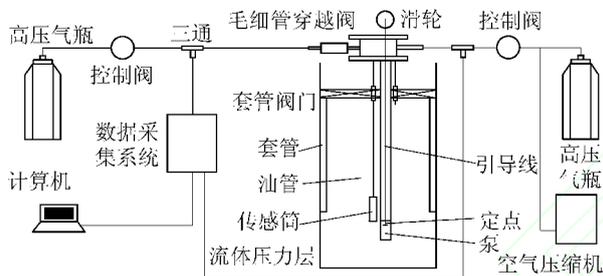


图4 实验室毛细管测压系统整体设计(移动式)

3.2 系统设计特点

1) 传压筒结构改进。本设计对同心固定式传压筒的定向开启装置(活塞)控制装置进行了改进, 将传统的楔钉高压切断原理改变为C形弹簧环增强摩擦滑动原理, 既简化了内部传压结构, 又实现了安全测压、循环利用的效果。

2) 移动式测压引导系统。为了保证移动侧压的安全性和准确确定, 降低传压筒井下扰动和缠绕风险, 实现斜井压力测试, 设计了定滑轮引线引导方案, 从根本上实现了煤层气井(包括斜井在内)任意位置的流压测试, 是经济高效的测试技术。

3) 毛细管穿越技术。毛细管与高压气体导管连接, 并通过法兰进入井下, 实现密闭连接是一项难题, 毛细管穿越器的使用解决了该难题。

通过进行实验室模拟试验, 移动式毛细管测压系统在2.0 m高水柱压力下系统的测压精度较机械式测压系统显著提高, 根据实验室20℃条件下的22次静压测试(无补气吹扫)统计, 试验综合误差在0.06%以内(图5), 而目前常规的油气井测压系统综合误差通常在0.10%~0.25%, 毛细管测压方案对压力变化响应敏感, 测试效果满意。新

的毛细管测压系统不但测压精度高, 并且克服了机械式测压难移动、故障率高的缺点和电子测压计难以固定、不耐高温及不能持久稳定监测的不足, 因此, 在煤层气井测试中有很好的推广前景。

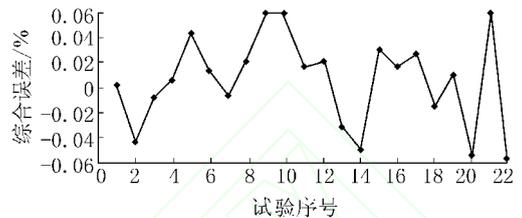


图5 测试误差统计(无补气测压)

4 结 语

毛细管测压是一项经济高效的测试技术。与常规油气相比, 毛细管测压系统有对压力传感器精度的选择、井筒结构等特点, 这对煤层气井毛细管测压系统开发提出了新的要求。设计的新毛细管测压系统, 实现了传压筒结构的优化改造和移动式压力测试系统定向、定压引导技术, 从而保证了移动侧压的安全性和准确性, 降低了传压筒井下扰动和缠绕风险。新的压力测试系统实现斜井压力测试, 拓宽了其应用范围, 具有一定的工程意义。

参考文献:

- [1] 付建伟, 肖立志, 张元中. 油气井永久性光纤传感器的应用及其进展[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 515-523.
- [2] 杨明杰, 齐景顺. 一种应用于岩石渗透率测试的气体流量计量方法: 节流毛细管法[J]. 现代测量与实验室管理, 2005(2): 5-7.
- [3] 王省德, 李文彬, PRUETT. 7000型毛细钢管试井测压装置在塔里木油田的应用[J]. 油气井测试, 1995(7): 62-67.
- [4] 张 鹏, 党瑞荣. 毛细管油井测压的理论研究[J]. 石油仪器, 2008(4): 22-26.
- [5] 宫恒心, 饶文艺, 朱 欢. 毛细管测压系统简介[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(1): 94-97.
- [6] 王志愿, 黄淑荣, 芦 梅, 等. 毛细管测压技术在大港油田的应用[J]. 油气井测试, 2005, 14(1): 65-70.
- [7] 王民轩, 王世杰, 刘殷韬, 等. 毛细管测压技术及应用[J]. 石油钻采工艺, 2008, 20(2): 72-7.
- [8] Mohammad Al-Asimi, George Butler, George Brown, et al. Advances in Well and Reservoir Surveillance [J]. Oilfield Review Winter, 2002/2003, 14(4): 14-35.
- [9] 张子敏. 瓦斯地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [10] 张新民, 庄 军. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2000.