

文章编号: 1001-1986(2015)06-0049-05

煤层气井排采自动化监测与控制关键仪器设计

邹宇清¹, 赵凤坤¹, 黄 勇², 王 波²

(1. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028;

2. 中石油煤层气有限责任公司韩城分公司, 陕西 韩城 715409)

摘要: 在煤层气井排采自动化推进过程中, 存在动液面不能精确测量、产气量精细控制难度大、间歇产水且含煤粉测量误差大等问题。为解决上述问题, 设计了新型自动液面测试仪, 显著提高了煤层气井动液面的测量精度, 经现场验证测量误差在 2 m 以内; 结合煤层气产量低现象, 改进了小阀芯气体调节阀, 实现了产气量的精细控制; 参照人工计量方式, 设计了煤层气水计量装置, 经现场验证误差小于 3%。排采自动化关键仪器的设计和现场验证, 满足煤层气现场生产需求, 为实现煤层气井排采自动化提供了基础保障。

关键词: 煤层气; 自动化; 仪器; 设计; 验证

中图分类号: **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2015.06.010

Design of the key instruments for automatic monitoring and control of production in CBM well

ZOU Yuqing¹, ZHAO Fengkun¹, HUANG Yong², WANG Bo²

(1. Petrochina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China;

2. Hancheng Branch, Petrochina Coalbed Methane Co., Ltd, Hancheng 715409, China)

Abstract: In the process of promoting automatic production of CBM(coalbed methane) well, dynamic liquid level, gas production rate and water production rate are difficult to measure accurately. In order to solve these problems, the automatic liquid level tester is designed, improving significantly the measurement precision of the dynamic fluid level in CBM wells. Field verification showed that the deviation was less than 2 meters. In combination with the low gas production, the regulating valve with small plug was improved, and the fine control of gas production was realized. The device for CBM well water metering is designed referring to the manual measurement method, and the error is less than 3 percent. This equipment meets the demand of production site, provides the basic guarantee for automatic production of CBM well.

Key words: coalbed methane; automatic; instrument; design; verification

动液面作为油气井生产的主要参数, 其测量的准确性非常重要, 近年来随着自动化技术在油气田现场的应用, 动液面的自动测试和远程控制成为发展的趋势, 许多学者对此做了大量的研究工作^[1-5]。关彬^[3]对常规油气田高压氮气气枪和无声弹次声波技术测试动液面进行了对比分析, 万晓凤等^[4]对油井动液面的远程自动测量进行了研究。不同于常规油气井, 煤层气的采出机理和排采工艺具有其特殊性, 产气量、产水量、套压、动液面(井底压力)是排采的关键参数, 煤层气井浅液面、低产气、低产

水且含煤粉的特征, 对动液面和产水量测量的准确性提出了更高的要求。任源峰^[6]、景宁波^[7]等在改进和设计适用于煤层气动液面测量的仪器方面进行了研究, 岳强^[8]、陈秀萍^[9]等对新的测量方法进行了探索。目前对煤层气现场产水量计量装置、产气量精细化控制的研究相对较少, 因此设计适用于煤层气井的动液面测试仪、水计量装置和气体调节阀, 实现关键参数精确计量和远程控制, 促进煤层气井的参数采集和控制一体化, 有利于提高煤层气井排采自动化技术水平和煤层气开发经济效益。

收稿日期: 2015-01-13

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05038)

作者简介: 邹宇清(1967—), 女, 山东威海人, 工程师, 从事煤层气开发与研究工作. E-mail: zouyq@petrochina.com.cn

引用格式: 邹宇清, 赵凤坤, 黄勇, 等. 煤层气井排采自动化监测与控制关键仪器设计[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 49-53.

1 煤层气生产参数及采集仪器需求

煤层气井采集参数主要分为生产运行参数和排采控制参数两类，参数采集需要配置的仪器仪表如表 1 所示。相对于常规油气井，煤层气井具有埋深浅、低产气、间歇产水且含煤粉等特点，对动液面(井底流压)、产气量、产水量等参数的采集准确性提出了更高的要求，因此需要对动液面测试仪、气体调节阀、水计量装置三类关键仪器进行设计和验证。

表 1 煤层气井排采自动化参数和仪器对照表
Table1 Parameters and equipment for automatic production of CBM well

项目	生产运行参数	仪器仪表与设备
采集	气体流量	气体流量计
	液体流量	水计量装置
	套压	数字压力变送器
	动液面	自动液面测试仪
	冲次、示功图	功图测试仪
	电流、电压、频率	变频器
	电压、电流、开关状态	发电机
项目	排采控制参数	仪器仪表与设备
控制	气体流量	气体调节阀
	井底流压(动液面)	变频器

2 自动液面测试仪

2.1 功能需求

常规油井生产过程动液面波动相对较小，对动液面准确性要求相对较低，常规天然气井生产过程都有套压，通过液面测试仪释放套压气产生声波脉冲，获取液面值。与常规油气井不同，煤层气井动液面波动大，且生产过程套压变化复杂，在排水降压、修井作业、二次压裂等多个阶段油套环空无套压，直到产气稳定后，井内套压才相对稳定，要求动液面测试仪必须能够自动适应多种井况，从无套压到 5 MPa 压力，都能实现动液面的准确测试。

煤层气井通常井深小于 2 000 m，套压小于 5 MPa；结合煤层气井精细化排采需求，自动液面测试仪应满足以下性能要求(表 2)。

表 2 自动液面测试仪满足性能指标统计表
Table2 Statistics of automatic liquid level tester in meeting performance index

技术指标	参数	技术指标	参数
工作套压/ MPa	0~5	重复性误差/ m	≤1
液面测量精度/‰	3	传输方式	GPRS、RS485
液面测量范围/m	0~2 000	工作温度/℃	-20~50
	(量程可设置)	供电方式	220VAC/24VDC

2.2 设计选型

2.2.1 测试方式及原理

采用回声反射法，通过产生一个声脉冲波，对反射声波的数据进行采集处理分析，计算出井下音标及液面位置。

2.2.2 结构设计

常规油气井在无压、低压井进行液面测试时，通常采用高压氮气测试，成本较高，并且不能实现自动运行。针对煤层气井生产特征和远程自动控制的要求，在结构设计方面对液面测试仪进行了改进，使液面测试仪能够同时满足有套压和无套压两种情况，对于无压井，通过设计的脉冲声波发声器产生次声声源，可以自动连续工作，安全可靠，使用方便。内部结构示意图如图 1。

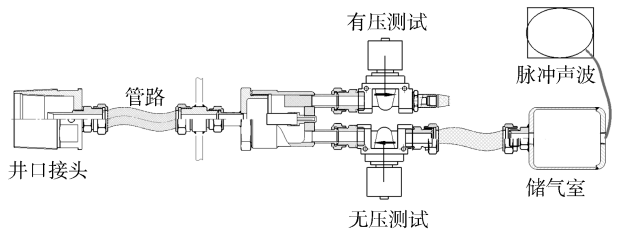


图 1 自动液面测试仪内部结构示意图

Fig.1 Internal structural diagram of automatic liquid level tester

2.2.3 波形数据处理

为进一步提高煤层气井液面测量精度，在常规数据处理方法基础上，加入了数字滤波及频谱分析算法等技术。当煤层射孔段流态为气水两相流时，由于受到煤层射孔段位置声阻抗和反射系数^[10]的影响，声波传输到煤层位置时会产生相反的液面波形，新设计的液面测试仪可进行反液面波形数据处理分析，可识别煤层射孔段位置(图 2)。

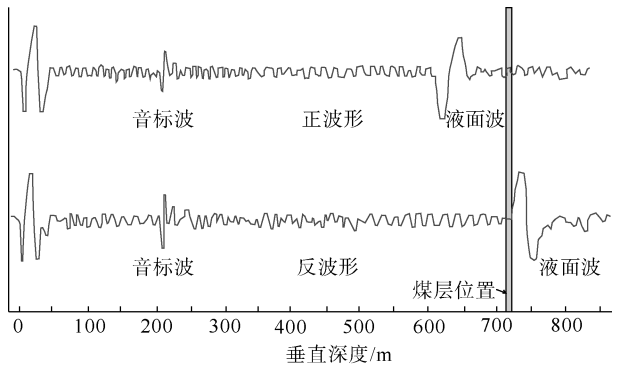


图 2 韩城 1 井动液面波形图

Fig.2 Dynamic liquid level of well No.1 in Hancheng

对于没有音标的煤层气井，提出了动液面数据频谱确定节箍波频率的方法，具体方法为：根据系统采样频率确定范围后，采用复变函数方法求取功

率频谱数据, 然后通过加权平均的方法计算出音速, 根据音速计算液面深度。

这种计算方法最大限度的排除了手动计算的误差和实际平均管长和理论平均管长之间的差别, 给用户提供了一种近似傻瓜式的计算方法。

2.3 现场试验及效果评价

为验证自动液面测试仪的适用性, 在煤层气生产现场进行了新设计自动液面测试仪重复性和长期稳定性测试试验, 并与井下压力计折算的液面值进行了对比(图 3), 其中重复性试验要求测试间隔 3 min, 连续测试不小于 3 h; 长期稳定性测试周期不短于 6 个月。测试结果表明: 自动液面测试仪测试液面数据与井下压力计测试数据符合度较高, 且液面测试仪自身重复性测试误差可以控制在 0.5 m 以内, 长期稳定性测试误差基本可以控制在 2 m 以内, 准确性和稳定性较高, 符合煤层气井排采自动化的生产需求。

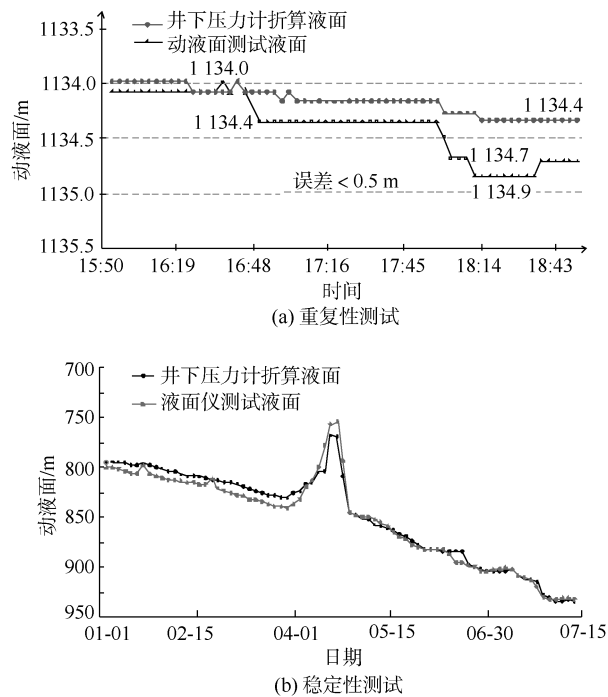


图 3 自动液面测试仪重复性与长期稳定性测试
Fig.3 Repeatability and stability verification of the automatic liquid level tester

3 气体调节阀

3.1 功能需求

气体调节阀的类型、阀芯尺寸和生产压差是影响气量调节精度的关键指标, 根据煤层气井产气量低的特点, 本文对气体调节阀的阀芯尺寸进行了设计改进, 使其能够满足煤层气井在不同排采阶段、不同生产条件下产气量调节要求, 实现煤层气井产

气量的精细化控制。根据煤层气井生产特点, 气体调节阀应满足以下性能要求(表 3)。

表 3 气体调节阀满足性能指标统计表
Table.3 Statistics of gas-regulating valve in meeting performance index

技术指标	参数
工作压力/ MPa	0~5
控制精度/%	±1
防护等级	IP65以上
传输方式	4-20mA、RS485
工作温度/℃	-40~150
供电方式	220VAC/24VDC

3.2 设计选型

3.2.1 调节阀类型

调节阀通常分为直线型、抛物线型、等百分比型和快开型四种(图 4), 根据煤层气连续、稳定、缓慢的排采原则, 结合煤层气井初始产气阶段产气量相对较低、控制难度较大的特点, 快开型调节阀不符合生产需求, 考虑等百分比型调节阀小开度时高精度和直线型调节阀单位行程等流量变化的特点, 对比分析这两种类型调节阀对煤层气井产气量控制的适用性。

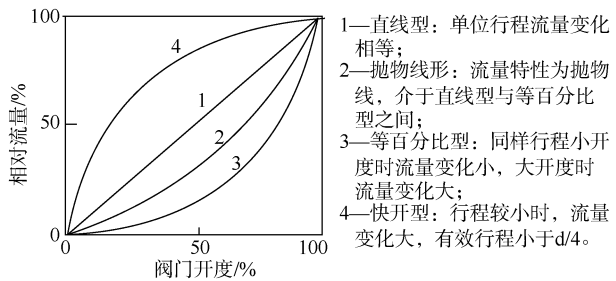


图 4 阀门理想流量特性曲线

Fig.4 The characteristic curves of the ideal flow of the valve

3.2.2 调节阀阀芯设计

根据煤层气井产气量较低的特点, 结合韩城地区煤层气井产气量情况, 初步设计了 3 mm、4 mm、5 mm、10 mm 等几种小口径阀芯的调节阀, 用于进行煤层气现场的产气量精细化控制试验。

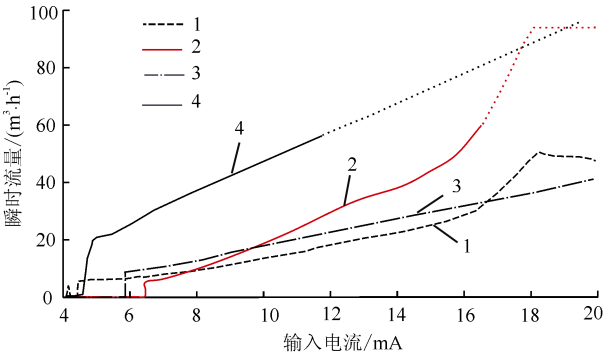
3.3 现场试验及效果评价

选取等百分比型和直线型小阀芯尺寸(3 mm、5 mm)调节阀, 在煤层气生产现场进行了气体调节阀的控制试验, 对不同类型、尺寸与生产压差组合情况下的调节阀流量特性曲线进行了对比测试(图 5)。

韩城 5 井流量特性曲线表明: 等百分比型调节阀基本满足煤层气井对产气量的控制要求, 输入电流小于 16 mA 时流量特性曲线与直线型类似, 线性

度好且调节幅度不高于 1 m³/次,但输入电流信号大于 16 mA 时控制精度大幅降低,有效行程相对较小。

韩城 6 井流量特性曲线表明:直线型调节阀满



序号	井号	测试日期	调节阀类型	阀芯尺寸/mm	测试套压/MPa	产气量/(m ³ ·d ⁻¹)
1	韩城5井	2013-08-07	等百分比	3	0.7	180
2	韩城5井	2013-10-19	等百分比	3	1.74	550
3	韩城6井	2013-11-04	直线型	3	1.6	480
4	韩城6井	2013-11-20	直线型	5	1.6	520

图 5 调节阀流量特性曲线对比分析

Fig.5 Comparison of the flow characteristics of control valve

足煤层气井对产气量的控制要求,单位行程流量变化相同且调节幅度不高于 1 m³/次,有效行程最大。

韩城 5 井 3 mm 等百分比型和韩城 6 井 5 mm 直线型调节阀流量特性曲线对比分析:韩城 5 井套压 1.74 MPa,产气量 550 m³/d,韩城 6 井套压 1.6 MPa,产气量 520 m³/d,两口井生产条件相似,调节阀满量程时产气量为 2 200~2 400 m³/d。为避免对煤层气井造成伤害,同时能得到调节阀的流量特性曲线特征,现场测试时瞬时产气量上限为 60 m³/h。试验表明:相同阀芯尺寸的调节阀,等百分比型的测量范围更大,但直线型调节阀测量精度更高,有效行程更大,且单位行程流量变化相同,更有利于实现自动化控制要求。

建议选用直线型气体调节阀用于煤层气井的自动化排采。参照调节阀室内实验数据及现场试验测试数据,初步得到了直线型调节阀不同阀芯尺寸、不同生产压差下的产气量控制范围,用于指导煤层气现场排采自动化过程中调节阀的选型(表 4)。

表 4 调节阀流量选型表

Table 4 Selection of control valve of flow

套压/MPa		阀芯/mm							
		3	4	5	8	10	12	15	20
0.2	最大流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	—	—	—	18.5	27.8	46.3	74	116
	分辨率/%	—	—	—	0.19	0.28	0.46	0.74	1.16
0.4	最大流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	11.7	18.1	25.2	49.5	74.2	124	198	309
	分辨率/%	0.12	0.19	0.26	0.50	0.75	1.24	1.98	3.10
0.8	最大流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	23.5	36.2	50.4	99	149	—	—	—
	分辨率/%	0.24	0.37	0.51	0.99	1.49	—	—	—
1.6	最大流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	47.0	72.3	101	198	297	—	—	—
	分辨率/%	0.47	0.73	1	1.98	2.97	—	—	—
2.5	最大流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	73.5	113	156	—	—	—	—	—
	分辨率/%	0.74	1.13	1.56	—	—	—	—/	—
4.0	最大流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	118	181	252	—	—	—	—/	—
	分辨率/%	1.18	1.81	2.52	—	—	—	—	—

4 水计量装置

4.1 功能需求

煤层气井产水量变化较大,且存在间歇性产水、含煤粉等问题,因此要求水计量装置具有良好的测量精度和防煤粉能力,并且便于安装和维护,水计量装置应满足的性能要求见表 5。

4.2 设计选型

韩城地区煤层气井采出水水量较小,因存在间歇出水、含煤粉等特点,常规油井使用的产出液计量装

表 5 水计量装置满足性能指标统计表

Table 5 Statistics of water metering device in meeting performance index

技术指标	参数
测量范围/(m ³ ·d ⁻¹)	0.1~30
测量精度/%	±3
防护等级	IP65
传输方式	232/485/zigbee 标准 MODBUS 协议
环境温度/℃	-30~+70
介质温度/℃	+1~+70
适用条件	间歇出液、非满管、含煤粉、具有腐蚀性气液两相流中的液体流量

置不适用,本文从测量原理、计量方式等方面对水计量装置进行了研究,设计出了煤层气水计量装置。

4.2.1 工作原理

模拟当前人工计量产水量模式,计量一定时间内桶内液面上升的高度变化,计算出液体流量。利用筒式结构将气液分离、煤粉与产出液分离完成后,通过电控阀门与液位检测器件配合,实现计量煤层气井产液量功能。

4.2.2 结构设计

利用筒式结构先将气体、液体和固体分离,为了能够使仪器长时间免维护,对于含有的大量煤粉,必须采取疏导的方法,利用锥形沙漏结构,使煤粉与产出液一起排出,通过电控阀门与液位检测器件配合,实现计量产液量功能,装置直接卡装在水管线上,不需改动现场管线流程,安装、操作、使用和维护都非常简便,最大限度的保证装置的测量精度和使用寿命。

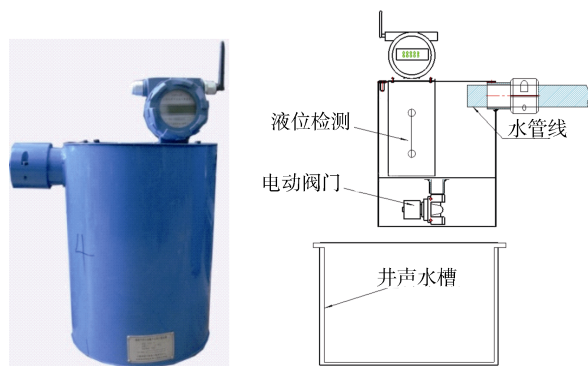


图6 煤层气水计量装置结构示意图

Fig.6 Internal structure diagram of water metering device

仪器安装到煤层气井后,软件自动识别该井的实际出水情况,例如连续产水、间歇出水和微小水量等不同井况,从而使各种井况都能达到较高的计量精度。

4.3 现场试验及效果评价

现场水计量装置自动测量与人工测量对比表

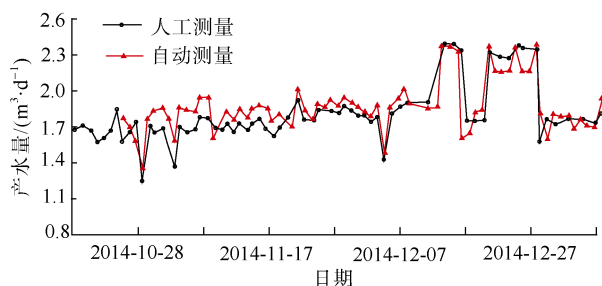


图7 韩城7井水计量装置现场对比验证图

Fig.7 Verification of water metering device for well No.7 in Hancheng

明,自动测量装置准确性好,可靠性高,与人工测量相比,相对误差小于 $0.08 \text{ m}^3/\text{d}$,满足煤层气现场采出水计量精度要求,建议用于煤层气井自动化排采。

5 结论

a. 设计的新型自动液面测试仪,提高了煤层气井动液面测量精度和稳定性,现场测量误差在 2 m 以内,符合韩城地区煤层气现场数据采集需求。

b. 结合煤层气井低产气量特点,设计了小阀芯尺寸气体调节阀,实现了低产气量条件下的精细化控制,并初步得到调节阀选型表,为煤层气井排采自动化提供了参考依据。

c. 模拟人工测量产水模式设计的煤层气水计量装置,解决了煤层气井产水量小、间歇出水、含煤粉等问题,现场应用与人工测量对比误差小于 3% ,建议进一步推广应用。

d. 笔者对直线型和等百分比型气体调节阀进行了初步设计优选,建议进行不同压差、不同温度等多种生产条件下调节阀的现场试验,进一步验证和完善煤层气井排采调节阀选型标准。

参考文献

- [1] 张朝晖,弓志谦,迟健男,等. 采油井动态液面测量技术研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 1180-1183.
- [2] 王海文,林立星,杜中卫,等. 基于谱减算法的声波法测油井动液面的信号处理[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(1): 118-122.
- [3] 关彬. 新型液面测试技术[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(8): 105-106.
- [4] 万晓凤,易其军,雷继棠. 动液面远程自动连续测量装置实现[J]. 工程设计学报, 2013, 20(3): 260-264.
- [5] 刘少军,王瑜瑜. 油井动态液面测量系统设计与实现[J]. 测控技术, 2012, 31(1): 45-47.
- [6] 任源峰,罗毅. 煤层气井液面测试仪的研制与应用[J]. 油气井测试, 2008, 17(3): 70-71.
- [7] 景宁波. 煤层气井液面测试仪的设计[J]. 科技信息, 2012(20): 133-134.
- [8] 岳强,贾旭龙,李国峰. 煤层气井液面连续监测的新方法[J]. 中国煤层气, 2011, 8(5): 37-39.
- [9] 陈秀萍,梅永贵,郭简,等. 煤层气井液面自动监控系统的设计及应用[C]//2014 油气藏监测与管理国际会议. 出版地不详:出版社不详, 2014.
- [10] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 东营:石油大学出版社, 2011.