

煤层气欠平衡水平井的井眼清洁监测方法

梁海波 徐莎莎 赵万明 张喆

西南石油大学电气信息学院

梁海波等.煤层气欠平衡水平井的井眼清洁监测方法.天然气工业,2013,33(10):85-88.

摘 要 煤层气欠平衡水平井钻井作业时,由于水平井具有水平位移大的特点,极易造成钻井液携岩不畅等问题,易导致井壁不稳定,增加了井壁坍塌及井漏的风险。为此,基于井眼清洁程度与井筒环空循环压力的变化具有相关性这一特点,把 PWD 测量的井底压力用于井眼清洁程度监测。采用 C++ 语言开发出一套煤层气欠平衡水平井井眼清洁监测系统,该系统通过实时采集数据监测井底的环空压力数据,与理论计算的环空压力数据进行对比,寻找井眼清洁程度与环空压力变化规律及组合特征,用专家系统隶属度脉冲曲线判断井眼清洁程度,从而实时诊断井眼清洁度并对井眼不清洁发出预警,实现了对煤层气欠平衡水平井井眼清洁度的实时评价。实际监测应用结果表明,在井下出现煤层垮塌或钻井液性能变化而表现出井眼重度不清洁预警情况下,需要及时改变注气量、钻井液性能等工程措施,进行钻井液循环排除岩屑在环空的滞留,以消除沉砂带来的安全风险。

关键词 煤层气 水平井 井眼不清洁 PWD 专家系统 实时监测 预警

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.10.014

Monitoring methods of borehole cleanliness for underbalanced horizontal CBM gas wells

Liang Haibo, Xu Shasha, Zhao Wanming, Zhang Zhe

(School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 1, pp.85-88, 10/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Since horizontal wells are characterized by large horizontal displacement, many problems easily occur in drilling underbalanced horizontal CBM wells, such as a poor carrying performance of drilling fluid. For this reason, the wellbore is liable to become unstable, increasing the likelihood of caving and lost circulation. In view of this, based on the correlation between borehole cleanliness and circulating pressure variance in the wellbore annulus, the bottomhole pressure measured with PWD was used for monitoring the borehole cleanliness. With the C++ Language used, a borehole cleaning monitoring system was developed for underbalanced horizontal CBM drilling. This system monitors the bottomhole annulus pressure by collecting real-time data. By comparing the measured data with the theoretically calculated data of annulus pressure, we analyzed the change law and combination characteristics of borehole cleanliness and annulus pressure. The borehole cleanliness was then judged according to the membership pulse curve of an expert system. On this basis, the borehole cleanliness was diagnosed in real time for sending out an alarm of borehole uncleanness. In this way, the real-time assessment was realized for borehole cleanliness of underbalanced horizontal CBM wells. Based on the actual monitoring, if an uncleanness alarm is sent out due to the caving or any change in drilling fluid performance down the hole, relevant engineering measures should be taken, including timely adjusting the gas injection volume and drilling fluid, so as to circulate the drilling fluid for cleaning up the debris retained in the annulus, and thereby avoiding the risk of sand setting.

Key words: CBM, horizontal well, borehole uncleanness, PWD, expert system, real-time monitoring

基金项目:“十二五”国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发——山西沁水盆地煤层气水平井开发示范工程(二期)”项目(编号:2011ZX05061)子课题“煤层气水平井欠平衡钻井综合配套技术”的部分研究成果。

作者简介:梁海波,1978年生,讲师,博士;从事油气井开发工程教学与研究工作。地址:(610500)四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学。电话:18681253466。E-mail:secondbo@126.com

煤层气欠平衡水平井钻井技术已成为提高煤层气单井产量的主要技术手段。煤层气开采是解吸煤基质中的气体,然后以扩散和窜流方式进入煤层割理,通过渗透和扩散方式从割理流入生产井筒的过程^[1-3];而煤岩的机械强度低,存在天然裂缝,又存在保护煤岩储层和井壁极不稳定的技术难题;同时,水平井水平位移大,井深长,井斜角大等特点^[3-4],岩屑的沉降方向沿重力方向,钻井液悬浮岩屑的能力就被降低,致使岩屑沉积加快^[5-6],造成携岩不畅,严重时将在环空的下井壁形成岩屑床,进而引起井下遇阻、憋钻等导致井壁失稳、坍塌等钻井复杂事故。所以在煤层气欠平衡水平井钻井过程中,井眼清洁度将直接影响钻井效率和钻井安全。

目前,国内煤层气欠平衡水平井钻井通常采用综合录井仪监测单一钻井参数,或是以静态数据对井眼清洁度进行判断。这些方法都是通过间接的信息反应井下井眼清洁情况。本文针对上述问题,利用PWD实时测量井底环空压力,同时结合欠平衡水平井环空压耗的计算模型、钻井液密度、钻柱旋转速度、钻柱偏心率等参数计算出理论环空压力,通过实时监测井下环空压力曲线与理论计算环空压力曲线,引入专家知识库寻找其变化规律及组合特征,配套井眼清洁的实时分析软件,实现煤层气欠平衡水平井井眼清洁度的实时评价。

1 井眼清洁监测方法研究

在煤层气欠平衡水平井钻井中,岩屑在环空中的滞留将会导致环空钻井液当量密度变化,随着岩屑不断沉积,严重时将会形成岩屑床,造成井眼直径的减小,使井眼恶化,而在这一过程中,都将引起井下环空压力变化^[7-8]。因此,当水平井出现不清洁状况时,对应井下环空压力发生的变化,利用实时监测井下环空压力曲线与理论计算井下环空压力曲线,通过专家知识库寻找其变化规律及组合特征,来判断井眼的清洁度。

煤层气欠平衡水平井井下环空压力主要由静液柱压力和环空压耗组成^[9]:

$$p_a = p_s + p_f + p_b = \rho_s gh + p_f + p_b \quad (1)$$

式中 p_a 为环空压力, Pa; p_s 为静液柱压力, Pa; p_f 为环空压耗, Pa; p_b 为井口回压, Pa; ρ_s 为混合钻屑的钻井液密度, kg/m^3 ; h 为垂直井深, m。

进而,实测钻井液当量密度(ECD)的计算公式为:

$$\rho_{\text{实}} = (p_a - p_b) / (10^8 hg) \quad (2)$$

对某一时刻某一位置理论钻井液当量密度,可通过下式计算:

$$\rho_{\text{理}} = (\rho_s gh + p_f) / (10^8 hg) \quad (3)$$

由于在欠平衡钻水平井过程中,环空为气液两相流动,必须考虑气体滑脱和流速增量等因素对环空压耗的影响,特别是水平井段环空间隙小,钻柱偏心、旋转和钻柱接头对环空压耗有显著影响^[10-12],因此煤层气欠平衡水平井环空压耗(p_f)采用胡军等人提出的欠平衡水平井环空压耗模型计算^[10]:

$$p_f = \frac{0.2 f_D R k \rho_s}{D_o - D_p} \gamma_{sl} \left(1 + \frac{\gamma_{sg}}{\gamma_{sl}} \right) h \quad (4)$$

式中 f_D 为若斯因数,无因次; R 为偏心系数,无因次; k 为旋转系数,无因次; γ_{sl} 为液体折算速度, m/s; γ_{sg} 为气体折算速度, m/s; D_o 为井筒内径, cm; D_p 为钻柱外径, cm。

理论计算的当量密度与钻井液密度、钻柱旋转速度、钻柱偏心率、气体滑脱和流速增量等因素有关。实测当量密度是由PWD实测环空压力转换而来,其变换情况与井眼是否清洁密切相关。因此可以通过实时监测相应的井眼不清洁环空压力曲线,利用专家知识库寻找其变化规律及组合特征,实现对井眼清洁度的实时监测。

煤层气欠平衡水平井井眼清洁监测系统的专家知识库设置了2种不同的知识表达方法。一是经验知识,它是将钻井领域专家的经验知识概念化,并存储在计算机知识库中,它包括多年从事煤层气钻井工作的专家所积累的经验总结;二是面向常规计算和影响井眼不清洁的相关参数,包括钻井液密度、钻柱旋转速度、钻柱偏心率、气体滑脱和流速增量等组成。

煤层气欠平衡水平井井眼清洁监测系统推理机制采用了不确定反推理法。在推理过程中,对假设因素给出一个确定因子,根据2值逻辑计算其最大隶属度,其值在 $[0, 1]$ 之间,按照最大隶属度原则得出结论,专家系统结构框图如图1所示。

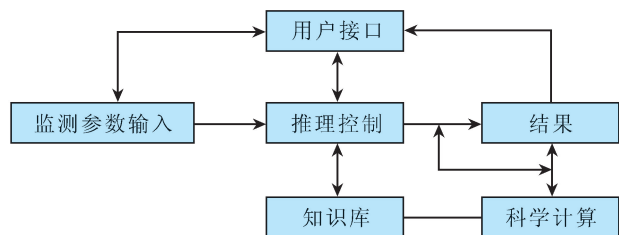


图1 专家系统结构框图

2 软件设计及应用分析

根据上述理论,基于C++语言开发一套煤层气欠平衡水平钻井井眼清洁监测系统,该软件可实现实时

采集数据,实时诊断井眼清洁度并对井眼不清洁预警,及时通过改变注气量、钻井液性能等有效工程措施,消除潜在的风险。该系统以沁水盆地某口井数据对软件进行了现场监测,软件流程图如图 2 所示。

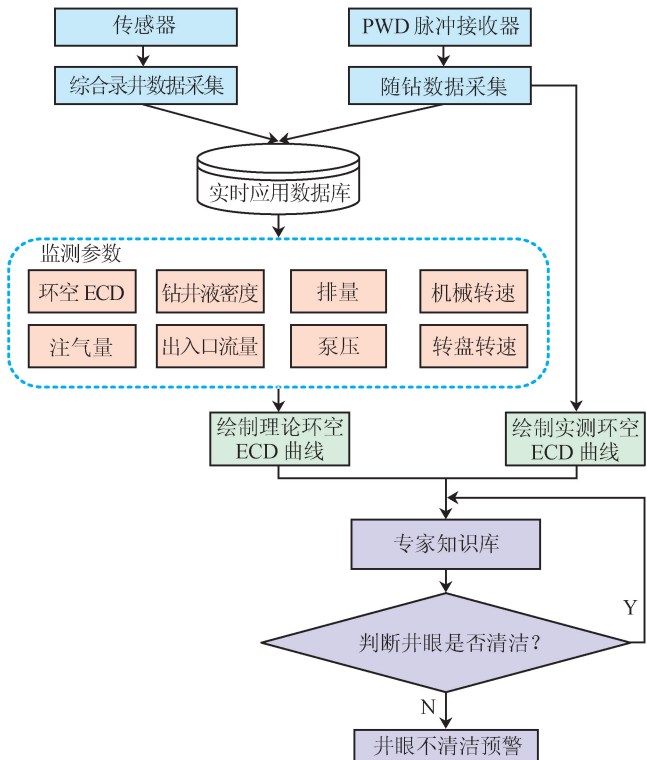


图 2 软件流程图

以沁水盆地某井为例,对煤层气欠平衡水平井井眼清洁监测系统进行现场监测。该系统根据实时采集的井下数据及相应监测参数,计算出相应风险隶属度,根据专家系统隶属度脉冲曲线,对井眼不清洁进行实时预警。如图 3 所示,从井深 2 260~2 350 m,实测当量密度有略微下降趋势,从井深 2 350~2 450 m 实测当量密度从 2 329 m 处的 1.17 g/cm³ 增加至 2 440 m 的 1.20 g/cm³,而理论计算当量密度为 1.14 g/cm³ 基本维持不变。通过对该组数据分析,专家知识库依据其变化规律,判别此处出现大量岩屑在环空滞留的情况,属于重度井眼不清洁,并给出了预警(图 3-d),通过采取相关措施,及时对井眼进行净化,从而降低了钻井风险,提高钻井效率。

3 结论

- 1) 针对煤层气欠平衡水平井井眼不清洁时将引起井下环空压力变化这一特点,通过监测实测环空压力和理论环空压力这一方法,实现井眼清洁度的实时监测。
- 2) 建立专家知识库,寻找井眼不清洁变化规律及组合特征,对井眼清洁风险进行实时评价分析,从而提高钻井效率,降低钻井风险。
- 3) 编制了煤层气欠平衡水平井井眼清洁监测软件,并对沁水盆地某井进行了现场监测,证明系统的可靠性。

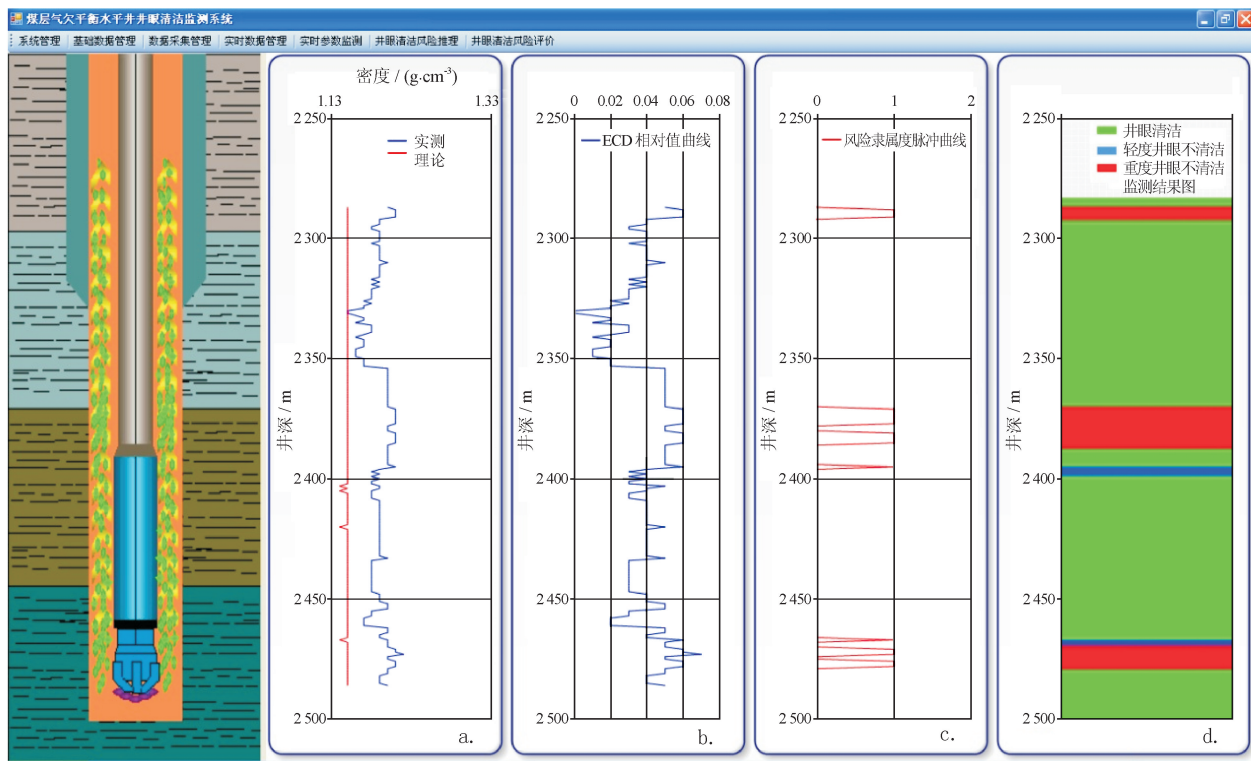


图 3 煤层气欠平衡水平井井眼清洁系统界面图

参 考 文 献

- [1] 倪小明, 苏现波, 张小东, 等. 煤层气开发地质学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 9-10.
NI Xiaoming, SU Xianbo, ZHANG Xiaodong, et al. CBM development geology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 9-10.
- [2] 石丽娜, 杜庆军, 同登科. 煤层气窜流—扩散过程及其对开发效果的影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 137-140.
SHI Lina, DU Qingjun, TONG Dengke. Research on mechanism and sand-carrying performance of the surfactant fracturing fluid[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(3): 137-140.
- [3] 郭大立, 贡玉军, 李曙光, 等. 煤层气排采工艺技术研究和展望[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(2): 91-98.
GUO Dali, GONG Yujun, LI Shuguang, et al. Research and Prospect About the CBM Drainage Technology[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(2): 91-98.
- [4] 费洪明. 大庆油田水平井井眼净化技术[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 21(1): 112-113.
FEI Hongming. The horizontal wellbore purification technology in Daqing Oilfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011, 21(1): 112-113.
- [5] 马明芳. 水平井的环空压耗及井眼净化[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(11): 168-170.
MA Mingfang. Annulus pressure loss and hole cleaning in horizontal wells [J]. Western Exploration Engineering, 2006, 18(11): 168-170.
- [6] 徐坤吉, 熊继有, 陈军, 等. 深井水平井水平段水力延伸能力评价与分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(6): 101-106.
XU Kunji, XIONG Jiyu, CHEN Jun, et al. The evaluation and analysis of hydraulic extensions ability of horizontal section in deep horizontal wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(6): 101-106.
- [7] 李云波, 李相方, 姚约东, 等. 基于 PWD 的大位移井井眼不清洁识别方法[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(1): 1-3.
LI Yunbo, LI Xiangfang, YAO Yuedong, et al. Large displacement wellbore uncleanness recognition based on the PWD[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(1): 1-3.
- [8] 李相方, 隋秀香, 刘举涛, 等. 大位移井井眼清洁监测技术[J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(5): 1-3.
LI Xiangfang, SUI Xiuxiang, LIU Jutao, et al. Monitoring technology of large displacement wellbore cleaning[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 23(5): 1-3.
- [9] 姜智博, 周英操, 刘伟, 等. 精细控压钻井井底压力自动控制技术初探[J]. 天然气工业, 2012, 32(7): 48-51.
JIANG Zhibo, ZHOU Yingcao, LIU Wei, et al. Automatic control of bottomhole pressure during precisely managed pressure drilling[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(7): 48-51.
- [10] 胡军, 姜玲. 欠平衡钻水平井环空压耗模式的建立与探讨[J]. 新疆石油科技, 2004, 14(4): 1-3.
HU Jun, JIANG Ling. Establishment and discussion of annular pressure loss model in underbalanced drilling in horizontal wells[J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2004, 14(4): 1-3.
- [11] 汪海阁, 刘希胜, 丁岗, 等. 水平井水平段环空压耗模式的建立[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1996, 20(2): 30-35.
WANG Haige, LIU Xisheng, DING Gang, et al. The establishment of annulus pressure loss model in horizontal section[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1996, 20(2): 30-35.
- [12] 汪海阁, 白仰民, 高振果, 等. 小井眼环空压耗的室内试验研究[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(4): 9-15.
WANG Haige, BAI Yangmin, GAO Zhenguo, et al. Indoor research on annulus pressure loss of slim hole[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(4): 9-15.

(修改回稿日期 2013-08-13 编辑 凌 忠)