

文章编号:1673-5005(2017)06-0094-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.06.011

# 基于随钻电阻率响应特征的深水钻井 气侵早期监测方法

王金波<sup>1</sup>, 孙宝江<sup>1</sup>, 李昊<sup>1</sup>, 王宁<sup>2</sup>, 王志远<sup>1</sup>, 高永海<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中海油研究总院, 北京 100027)

**摘要:**为了将随钻电阻率测井值的响应特征应用于深水钻井气侵早期监测方法中,对随钻电阻率测井值气侵响应规律进行研究。在分析测井值的环境影响因素基础上,设计一套气侵模拟试验装置,研究随钻电阻率测井值在不同注气量下气体侵入井筒的响应特征。考虑如何排除地层岩性影响随钻电阻率测井值变化并结合钻井液录井资料的基础上,建立基于随钻电阻率测井的深水钻井气侵早期监测方法。试验结果表明:通过瞬时随钻电阻率测井值的脉动特征可进行井底环空流型识别,并拟合出了气体体积分数与无因次随钻电阻率测井值的关系式,拟合公式与试验数据的相对平均误差为5%,吻合程度较高;与常规泥浆池增量法相比,建立的方法可提前10 min监测到气侵发生,比隔水管气侵早期监测方法提前6 min监测到气侵发生。

**关键词:**气侵早期监测; 随钻电阻率; 试验井筒; 响应特征; 气侵程度

**中图分类号:** TE 21      **文献标志码:** A

**引用格式:**王金波,孙宝江,李昊,等. 基于随钻电阻率响应特征的深水钻井气侵早期监测方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(6):94-100.

WANG Jinbo, SUN Baojiang, LI Hao, et al. Early gas kick detection based on the LWD resistivity in deepwater drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6): 94-100.

## Early gas kick detection based on the LWD resistivity in deepwater drilling

WANG Jinbo<sup>1</sup>, SUN Baojiang<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>2</sup>, WANG Zhiyuan<sup>1</sup>, GAO Yonghai<sup>1</sup>

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China,  
2. CNOOC Research Institutes, Beijing 100027, China)

**Abstract:** When applying LWD resistivity for deepwater gas kick detection, it is not clear and difficult to identify the response characters of the LWD resistivity. In this research, a simulated wellbore was built in laboratory to study gas kicks during drilling, and to analyze the response characters of the LWD resistivity under different gas kick rates. A method of early gas kick detection was developed based on the LWD resistivity and drilling fluid log data with considerations of eliminating effects of rock formation. Based on the experimental results, a model correlating the dimensionless resistivity and kicked gas volume was formulated, and the impulse character of instantaneous LWD resistivity was used to identify the flow pattern of multiphase flow in wellbore. The results show that the average error between the experimental data and that predicted by the model is less than 5%. With application of this method for the detection of typical gas kicks in deepwater well, it is 10 minutes earlier than the conventional method of mud pit gain, and 6 minutes earlier than the method of early gas kick detection via bottom riser. The method of the LWD resistivity can detect a gas kick occurring in the wellbore earlier than the conventional overflow detection technique, which can provide useful data for the as kick control.

收稿日期:2017-03-23

基金项目:国家“973”计划项目(2015CB251200);教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1086);国家科技重大专项(2016ZX05028-001-003)

作者简介:王金波(1981-),男,博士研究生,研究方向为海洋钻完井及溢流监测。E-mail:wob516@126.com。

通讯作者:李昊(1978-),男,讲师,博士,研究方向为海洋钻完井及溢流监测。E-mail:lionlihao@alicyun.com。

**Keywords:** early gas kick detection; LWD resistivity; experimental wellbore; response characteristics; gas kick degree

目前海洋深水钻井中面临着高含气井井控风险高、安全密度窗口窄等诸多井控难点,气体侵入井筒后,如果不及时发现并采取相应措施,会造成井涌、井喷等严重钻井事故<sup>[1]</sup>。现场广泛采用钻井液录井对气侵监测,该方法具有一定滞后性<sup>[2]</sup>。常用的气侵早期监测方法中的声波气侵监测技术<sup>[3-4]</sup>和高精度质量流量计溢流监测技术<sup>[5]</sup>容易受井下钻具震动、地面设备噪声、高含气率等因素的干扰,这些因素会影响测量精度和报警准确度,而目前深水钻进采用的隔水管处气侵早期监测技术需要气体进入隔水管后才能发现<sup>[6]</sup>,此时气体进入隔水管后滑脱上升速度加快,气体的存在使隔水管内外压差变大,易发生隔水管压溃失效,也为后期压井施工带来一定难度。随着随钻测井工具的应用日益广泛,井下数据与地面传输之间的速度、带宽日益提高,能够实时获取的井下信息日益增多,由此产生了基于随钻测井值的气侵早期监测新方法<sup>[7]</sup>。目前国内外研究尚未给出各类随钻测井值在气侵发生时的响应特征和变化规律,因此在实际应用中无法定量判断气侵程度。为此,笔者设计气侵后随钻电阻率测井值响应试验,通过试验研究的方法,得到气体侵入井筒后随钻电阻率测井值的响应特征和变化规律,将气侵后随钻电阻率测井值的响应特征与常规气侵监测手段相结合,建立一套深水气侵早期监测方法。

## 1 影响随钻电阻率测井值的因素

目前现场普遍采用的随钻电阻率测井工具的测量原理为感应测井,感应测井是利用发射线圈发射交流电,由此产生的交变磁场在地层中感应出次生电流<sup>[8]</sup>,感应电流环绕井轴在仪器探测范围内穿过环空钻井液、侵入带、地层,如图1所示。随钻电阻率测井值是环空钻井液、钻井液侵入带、地层电阻率的并联值,

$$1/R = (1/R_m + 1/R_a + 1/R_f)^{-1} \quad (1)$$

式中, $R$ 为随钻电阻率测井值, $\Omega \cdot m$ ;  $R_m$ 为环空钻井液电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $R_a$ 为钻井液侵入带电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $R_f$ 为原状地层电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

其中,影响原状地层电阻率 $R_f$ 的主要因素是地层条件,地层的岩性、结构和构造、厚度及流体性质等特性决定了地层电阻率测井值。但随钻电阻率测井仪器在井筒内也受测井环境因素的影响,如钻井液类型、组分、密度、井眼尺寸等<sup>[9]</sup>。

钻井液作为重要的测井环境影响因素,其密度、组分等物性的变化会影响环空钻井液测井值 $R_m$ 的变化规律<sup>[10]</sup>,从而影响整个随钻电阻率的测量值 $R$ 。如果地层中的气体侵入环空,环空气体体积分数、截面含气率发生变化,随钻电阻率测井值会由于环空钻井液电阻率值的改变而在测量结果上体现出来。由此可见,在研究电阻率测井值的环境影响及其校正方法方面,还须考虑气体侵入井筒后,气液两相状态下的环空钻井液对随钻电阻率测井值的影响。

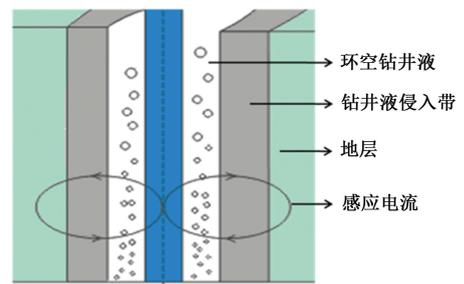


图1 气侵状态下感应电阻率测井原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of induction log while gas kicking

## 2 气侵模拟试验

虽然现有的多相流试验装置可以用于模拟气侵发生的井筒<sup>[11]</sup>,但由于这些试验设备井筒尺寸小,随钻测井工具受周围试验环境的干扰,无法达到模拟地层条件。本文中设计一套气侵模拟试验装置,可以满足随钻电阻率测井环境要求并能模拟地层气体侵入井筒,研究随钻电阻率测井值的气侵响应特征。

### 2.1 试验装置

本试验装置可以通过向试验井筒连续注入气体模拟气侵状态,利用随钻电阻率测井工具记录不同注气量下随钻电阻率测井值的变化规律。试验装置和试验工具主要包括模拟井筒、行吊、气源系统、气泡发生器、随钻电阻率测井仪、随钻数据采集分析系统,见图2。

试验井筒是室外场地实钻的一口浅井,该井有效试验井段长度为7.5 m,井眼直径为0.216 m,分成上部的水泥套管段和下部的裸眼段两部分。试验井筒上部采用预制水泥套管封固住地面疏松地层,可有效防止浅层井壁坍塌,保证试验仪器的安全。试验井筒下部的裸眼段安装有注气管线、气泡发生器等。气源系统可通过高压氮气储气瓶组向井筒内连续注气,注气量为0~5 m<sup>3</sup>/h,气体流量计的误差

为 $\pm 0.01 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

试验采用的随钻电阻率测井仪的测量原理为TRIM感应测井,工具外径为 $0.121 \text{ m}$ ,工作频率为 $20 \text{ Hz}$ ,探测深度为 $2.13 \text{ m}$ ,测量范围为 $0.1 \sim 2000 \Omega \cdot \text{m}$ ,工具测量精度为 $0.001 \Omega \cdot \text{m}$ ,测量值的数据获取率为 $8 \text{ s}/\text{个}$ 。

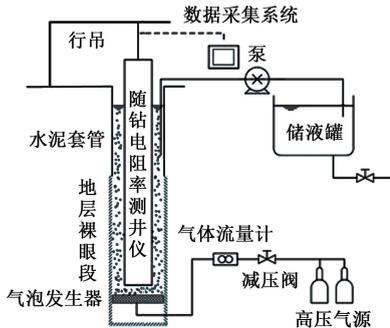


图2 模拟气体侵入井筒的试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment and LWD tools for simulating gas kick

## 2.2 试验方法

影响环空钻井液电阻率值的主要因素为钻井液密度和钻井液氯根含量,试验过程中分别用清水和不同密度、矿化度的水基钻井液作为试验介质进行多组试验,其中水基钻井液的主要成分为氯化钾,通过调整其含量达到配置不同密度、矿化度钻井液的效果。随钻电阻率测井仪工具依靠地面行吊居中悬挂于试验井筒中,高压氮气源通过气体减压阀后经注气管线和井筒底部的气泡发生器后,在试验工具周围形成均匀、分散的微小气泡。电阻率测井值通过钻井液脉冲波每 $8 \text{ s}$ 将一组测量值传到随钻数据采集分析系统,并对电阻率测井值进行数据的记录与分析处理。由于试验井筒较浅,因此试验测得的电阻率测井值可以直接被数据采集系统接收,而现场实际钻井过程中的随钻电阻率测井值要经过井下编码、钻井液脉冲传输、地面解码等步骤才能传输至地面进行采集与分析<sup>[12]</sup>。

## 2.3 试验数据处理

由于随钻测井工具数据获取频率为每 $8 \text{ s}$ 一个数据点,为了能够较为真实地反映某一注气量下随钻电阻率测井值,在同一注气量下记录一组瞬时随钻电阻率测井值,取其平均值作为此注气量下的时均随钻电阻率测井值<sup>[13]</sup>。随钻数据采集分析系统记录某一注气量下瞬时随钻电阻率测井值的波动和不同注气量下随钻电阻率测井值的变化。

气体体积分数根据经验公式计算得到。以泡状流流型为例,试验过程中注气条件下,泡状流在随钻

电阻率测井工具传感器截面的气体体积分数计算式<sup>[14]</sup>为

$$E_g = \frac{v_{sg}}{C_0 v_m + v_{gr}} \quad (2)$$

其中

$$C_0 = 1.2 + 0.371 \frac{D_0}{D_i}, v_{gr} = 1.53 \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G) \sigma}{\rho_L^2} \right]^{0.25}$$

式中, $E_g$ 为气体体积分数; $v_{sg}$ 为气相的折算速度, $\text{m}/\text{s}$ ; $v_m$ 为气液混合物的速度, $\text{m}/\text{s}$ ; $v_{gr}$ 为气泡的漂移速度, $\text{m}/\text{s}$ ; $C_0$ 为速度分布系数; $D_0$ 为工具外径, $\text{m}$ ; $D_i$ 为井筒内径, $\text{m}$ ; $g$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ ; $\rho_L$ 为液相的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\rho_G$ 为气相的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\sigma$ 为表面张力, $\text{N}/\text{m}$ 。

## 3 试验结果分析

### 3.1 不同气侵速率下随钻电阻率测井值变化

选择其中一组钻井液密度为 $1.08 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,氯根含量为 $37255 \text{ mg}/\text{L}$ ,钻井液的电阻率值为 $0.125 \Omega \cdot \text{m}$ 的钻井液试验数据作为研究对象,分析随钻测井值在气侵后的变化。图3为时均随钻电阻率测井值随注气量的变化。根据图3中不同注气量下时均随钻电阻率测井值变化曲线可以看出,时均随钻电阻率值随注气量的增加而增加,这是由于随注气量的增大,环空气相组分升高导致井筒内钻井液的电导性降低、电阻率升高。

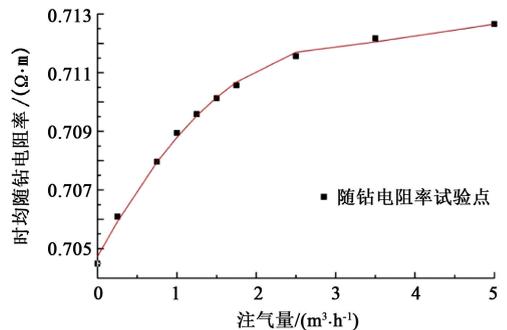


图3 时均随钻电阻率测井值随注气量的变化

Fig. 3 Variation of time-averaged resistivity value with different gas injection rates

由于试验井筒尺寸固定,无法得到不同井眼尺寸下的随钻电阻率测井值气侵响应特征;此外在正常钻井过程中也会遇到各类地层,反映得到的随钻电阻率测井值也会与本试验地层条件下得到的值不同。为了将试验规律适用于各种尺寸的井眼和不同地层,引入无因次参数 $R'$ ,

$$R' = R_i / R_0 \quad (3)$$

式中,  $R_0$  为未发生气侵时的时均随钻电阻率测井值,  $\Omega \cdot m$ ;  $R_i$  为某一气侵速率下的时均随钻电阻率测井值,  $\Omega \cdot m$ ;  $R'$  为无因次随钻电阻率测井值, 可以表征不同地层的时均随钻电阻率测井值在某一气侵速率下相对于气侵前的变化量。

根据试验数据进行非线性数据回归, 得到不同气体体积分数与无因次时均随钻电阻率测井值的函数关系式,

$$E_g = 12.3544R'^{0.491} + 2.651 \times 10^{-5}R'^{705.863} - 12.3534. \quad (4)$$

式中,  $E_g$  为某一气侵速率下随钻电阻率传感器截面处气体体积分数。

图 4 为气体体积分数与无因次时均随钻电阻率测井值的变化曲线。从图 4 中可以看出, 气体体积分数随着无因次时均随钻电阻率测井值呈非线性增加的趋势。

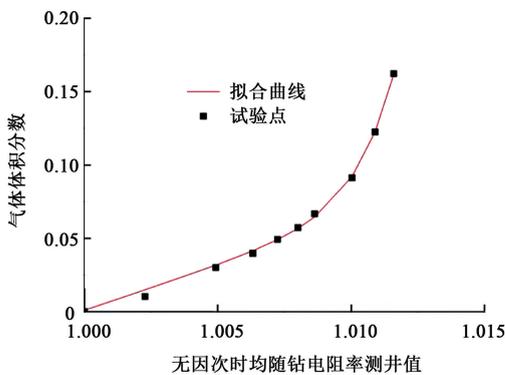
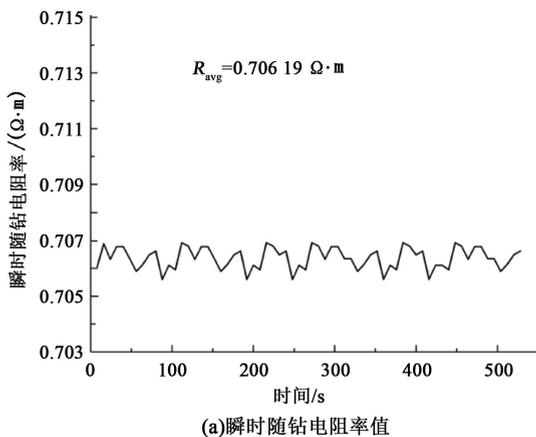


图 4 气体体积分数随无因次时均随钻电阻率测井值的变化

Fig. 4 Variation of gas volume fractions with dimensionless time-averaged resistivity value



通过误差分析, 拟合公式与试验值的相对平均误差为 5%, 拟合公式与试验数据吻合程度较高。拟合公式中的气体体积分数仅与无因次时均随钻电阻率值有关。当发生气侵后可以将时均随钻电阻率测井值的无因次变化量代入式(4), 得到气体体积分数, 结合地面泥浆池增量, 一方面可为气侵的早期监测提供定量依据, 另一方面可以为计算气侵程度和压井施工计算提供技术支持。

### 3.2 不同流型下随钻电阻率测井值的变化

试验过程和实际钻井过程中通过试验井或井筒无法直接观察判断流型, 为了得到流型的判别依据, 还可借助空隙率波曲线及其概率密度函数(PDF)曲线对流型进行识别。由于随钻电阻率测井工具与空隙率计具有相似的测量原理, 本文中主要通过不同注气量下瞬时随钻电阻率测井值的变化特征与空隙率波曲线和 PDF 曲线对比得到不同流型的判别依据。

当井底注气量为  $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 根据式(2)计算得到  $E_g$  为 1.05%, 根据大量气液两相流试验结果和环空气液两相流型的划分准则, 可知此刻环空为泡状流<sup>[15]</sup>。通过图 5(a)可以看出, 瞬时随钻电阻率值  $R$  在时均随钻电阻率值  $R_{\text{avg}}$  上下有微小振幅的随机脉动, 并将图 5(a)和图 5(b)与泡状流的空隙率波图形和空隙率波 PDF 曲线<sup>[16]</sup>对比发现, 瞬时随钻电阻率测井值的变化曲线与用空隙率计测得泡状流的空隙率波曲线波动特征基本一致, 瞬时随钻电阻率值 PDF 曲线与空隙率波 PDF 曲线分布特征相符<sup>[17]</sup>。这是由于当气侵发生井底环空为泡状流时, 在井底的随钻电阻率传感器周围分布的是均匀微小气泡, 因此瞬时随钻电阻率呈现出振幅较小的脉动特征。

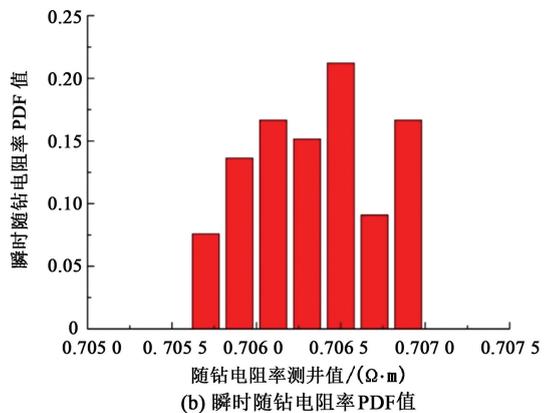


图 5 注气量为  $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$  时瞬时随钻电阻率及其 PDF 值

Fig. 5 Instantaneous LWD resistivity and its PDF value on  $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$  gas injection rate

同样根据式(2)计算得到井底注气量为 $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的 $E_g$ 为12.3%,判断此时环空为弹帽泡状流。

图6为注气量 $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时瞬时随钻电阻率变化和PDF曲线。通过图6(a)也可以看出,瞬时随钻电阻率值 $R$ 在时均随钻电阻率值 $R_{\text{avg}}$ 上下有较大振幅的随机波动,将图6与弹帽泡状流的空隙率波形图和空隙率波PDF曲线对比<sup>[11]</sup>发现,瞬时随钻

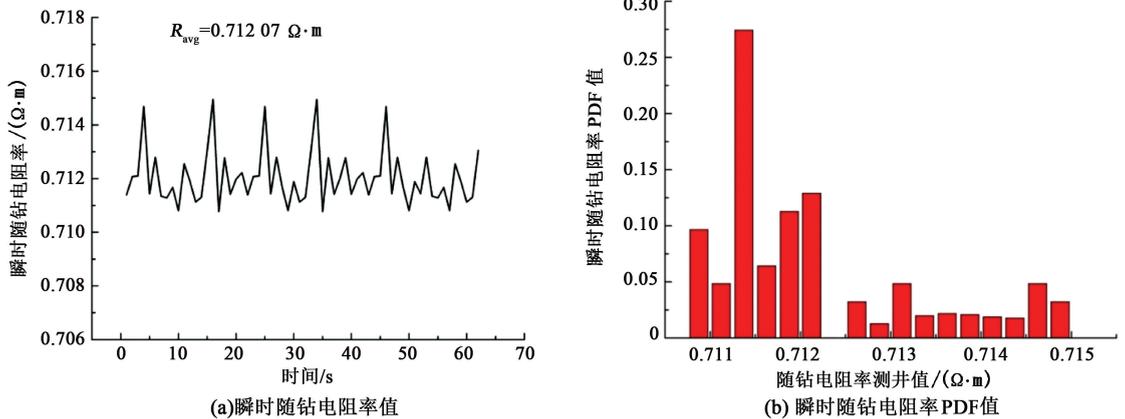


图6 注气量为 $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时瞬时随钻电阻率及其PDF值

Fig. 6 Instantaneous LWD resistivity and its PDF value on  $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$  gas injection rate

通过以上两组注气量下瞬时随钻电阻率值变化曲线和PDF曲线与泡状流、弹帽泡状流的空隙率波的特征曲线对比分析,借助井下随钻电阻率测井工具,分析其瞬时随钻电阻率测井值的脉动和分布特征,为气侵后环空气液两相流的形态判别提供可靠依据。

## 4 基于随钻电阻率测井的气侵早期监测方法

### 4.1 结合随钻电阻率和录井信息的气侵早期监测方法

根据前文理论分析和试验结果可知,地层岩性的改变和气体的侵入都会导致随钻电阻率测量发生变化。利用随钻电阻率进行深水气侵早期监测,须排除地层岩性改变带来的干扰。

钻进过程中,发现随钻电阻率测量值发生变化后,停止钻进,循环观察。如果随钻电阻率的变化是由地层岩性改变,那么随钻电阻率测量值会因其测量的地层位置不变而不再变化;如果电阻率测量值仍然变化,表明随钻电阻率测量值的变化是气侵导致的。此时井底气侵速率的变化导致截面含气率在增大或减小;而在未发生气侵或发生气侵但气侵速率不变的情况下,随钻电阻率测量值会保持稳定不

电阻率测井值的变化曲线和PDF曲线与弹帽泡状流空隙率波曲线和PDF曲线的波动、分布特征基本一致。这是由于当气侵量增大环空为弹帽泡状流时,在井底的随钻电阻率传感器周围会间歇分布直径较大的气泡团,如果传感器采集数据时周围正好没有大气泡团,那么瞬时随钻电阻率测井值为低值,反之瞬时随钻电阻率测井值为高值,因此瞬时随钻电阻率呈现出振幅较大的脉动特征。

变。为对这两种情况进行区分,适当降低钻井液排量。钻井液排量的降低一方面将减小循环摩阻,可能引起气侵速率变大;另一方面液相流速降低,会导致截面含气率变大。此时,如果有气侵发生,随钻电阻率的测量值将增大;如果未发生气侵,流速的变化不会对随钻电阻率产生影响,随钻电阻率测量值将维持不变。

基于以上思路,结合录井信息,利用随钻电阻率测井值的变化进行气侵早期监测的具体步骤为:

(1)根据正钻井的基本参数、钻井液性能参数、钻井参数、地层物性参数等,建立环空多相流动计算模型<sup>[18]</sup>。

(2)在正常钻进工况下当随钻电阻率测井值发生变化时,同时观察综合录井仪各钻井参数是否发生变化,如机械钻速、出口流量、泥浆池增量、气测值等气侵特征参数,如果综合录井仪钻井参数正常,则表明随钻电阻率的变化反映了地层的变化,继续保持正常钻进。

(3)当随钻电阻率测井值发生变化时,如果同时观察到综合录井仪各钻井参数有异常,如泥浆池有增量、出口返出流量增加等现象,停止钻进。

(4)降低钻井液泵排量至原排量的 $2/3$ ,继续循环观察。如果随钻电阻率测量值不再变化,同时检查

地面钻井液泵、循环管汇等设备与工具,排除地面设备故障引起的录井参数异常,表明无气侵发生,将排量恢复到原排量,恢复正常钻进;如果随钻电阻率测量值继续按照原趋势变化,表明井底发生地层流体侵入,转到步骤(5)。

(5)循环观察,如果出口流量和泥浆池量也继续增大,判定气侵发生,记录泥浆池增量,井控报警,并进行相应的压井准备工作。

(6)确认气侵发生后,可根据瞬时随钻电阻率的变化曲线和脉动特征进行气侵后井底气液两相流的流型识别,同时记录随钻电阻率变化值,为压井施工参数计算和优化提供基础数据支持。

#### 4.2 基于随钻电阻率测井的气侵早期监测方法的时效性

以某深水直井为例,对本文中气侵早期监测方法的时效性进行分析,相关参数为:井深 3 000 m,水深 1 500 m,钻井液密度  $1.3 \text{ g/cm}^3$ ,塑性黏度  $15 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,钻井液排量  $30 \text{ L/s}$ ,隔水管内径  $0.480 \text{ m}$ ,井眼直径  $0.216 \text{ m}$ ,钻柱外径  $0.148 \text{ m}$ 。当钻遇某高压气层,气体侵入井筒方式为压差侵入,井涌强度  $0.03 \text{ g/cm}^3$ 。

图 7 为通过计算得到气侵发生后泥浆池增量和气体上升到达位置随气侵时间变化曲线。根据目前现场广泛采用的钻井液录井气侵监测方法和操作规范<sup>[19]</sup>,当泥浆池增量达到  $1 \text{ m}^3$  报警后,检查地面循环系统无误并继续观察钻井液出口流量持续增大和泥浆池增量增大至  $2 \text{ m}^3$  时才确认气侵发生,立即启动井控应急响应预案,进行相应的压井准备和关井操作。此时距离气体侵入井筒已发生 17 min,气体在环空内上升运移至井深 1 285 m 处,此时气体已进入隔水管内。根据图 7 还可以发现,气侵发生 13 min 后,气体上升运移至泥线附近并进入隔水管内,而此时地面泥浆池增量仅为  $0.8 \text{ m}^3$ ,未达到井控要求的报警阶段,未采取及时有效的预警措施,为后期压井作业增大了施工难度。

应用基于随钻电阻率的气侵早期监测方法,当气侵发生 2 min 后,井下数据通过钻井液脉冲传至地面,同时结合地面钻井液录井系统观察钻井液出口流量和泥浆池增量持续保持增大状态 5 min,可确认气侵发生,此时距气体侵入井筒初始时刻 7 min,泥浆池增量  $0.17 \text{ m}^3$ ,气体从井底上升至井深 2 280 m 处,未进入隔水管内。

对于该深水井,通过基于随钻电阻率测井技术的气侵早期监测技术比隔水管气侵早期监测方法可

提早 6 min 判断气侵发生,比钻井液录井气侵监测方法可提早 10 min 准确判断气侵发生,并且在气体进入隔水管之前就可以判断气侵发生,为关井和压井施工赢得了宝贵时间,该方法在时效性上可以达到气侵早期监测的目的,并且技术上也可行。

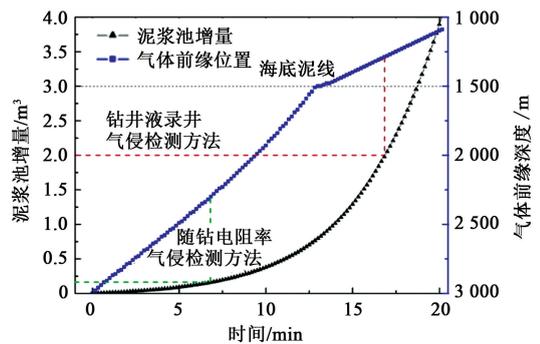


图 7 气侵发生后气体前缘位置及对应泥浆池增量

Fig. 7 Position of gas migration mud pit gain after gas kick

## 5 结论

(1)用于研究随钻电阻率测井值气侵响应特征的模拟试验井筒与装置,可以通过调节注气量模拟不同气侵状态,并满足随钻电阻率测井工具及其测井环境要求,为基于随钻电阻率测井值的气侵早期技术监测研究提供了试验平台。

(2)根据试验结果得到了随钻电阻率测井值的气侵响应特征,并拟合得到了不同气体体积分数与无因次时均随钻电阻率测井值的函数关系式。通过分析瞬时随钻电阻率测井值的脉动和分布特征,可以进行气侵后井底环空气液两相流的流型判别。

(3)建立了基于随钻电阻率测井值的气侵早期监测方法,并论证了应用随钻电阻率测井值进行气侵早期监测的可行性与时效性。在给出实例条件下,与常规泥浆池增量法相比可提前 10 min 监测到气侵发生,比隔水管气侵早期监测方法提前 6 min 监测到气侵发生。

#### 参考文献:

- [1] CHEN W. Status and challenges of Chinese deepwater oil and gas development [J]. *Petroleum Science*, 2011, 8 (4):477-484.
- [2] 陈平,马天寿. 深水钻井溢流早期监测技术研究现状 [J]. *石油学报*, 2014, 35(3):602-612.  
CHEN Ping, MA Tianshou. Research status of early monitoring technology for deepwater drilling overflow [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(3):602-612.

- [3] 隋秀香,许寒冰,李相方,等. 声波随钻气侵检测实验研究与应用评价[J]. 天然气工业, 2007,27(9):37-39.  
SUI Xiuxiang, XU Hanbing, LI Xiangfang, et al. Research and application evaluation on sonic logging-while-drilling gas invasion test experiment[J]. Natural Gas Industry, 2007,27(9):37-39.
- [4] LI Xiangfang, GUAN Congxiao, SUI Xiuxiang, et al. A new approach for early gas kick detection [R]. SPE 50890,1998.
- [5] 姜清兆,王英胜,毛敏,等. 基于科里奥利质量流量计的早期井涌探测系统[J]. 石油天然气学报, 2013,35(4):158-160.  
JIANG Qingzhao, WANG Yingsheng, MAO Min, et al. Early kick detection (EKD) system based on coriolis mass flow meter[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013,35(4):158-160.
- [6] 许玉强,管志川,张会增,等. 深水钻井气侵程度实时定量描述方法[J]. 石油勘探与开发, 2016,43(2):292-296.  
XU Yuqiang, GUAN Zhichuan, ZHANG Huizeng, et al. The quantitative description of gas-cut degree in deepwater drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(2):292-296.
- [7] 卓鲁斌,葛云华,汪海阁. 深水钻井早期井涌检测方法及其未来趋势[J]. 石油钻采工艺, 2009,31(1):22-25.  
ZHUO Lubin, GE Yunhua, WANG Haige. Early kick detection methods for deepwater drilling and its future development[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009,31(1):22-25.
- [8] 雍世和,张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营:石油大学出版社,1996.
- [9] 夏宏泉,刘之的,朱猛,等. 随钻电阻率测井的环境影响校正主次因素分析[J]. 测井技术, 2008,32(2):159-163.  
XIA Hongquan, LIU Zhidi, ZHU Meng, et al. Analysis of the primary and secondary environmental effects correction on LWD resistivity log[J]. Well Logging Technology, 2008,32(2):159-163.
- [10] 杨锦舟. 基于随钻自然伽马、电阻率的地质导向系统及应用[J]. 测井技术, 2005,29(4):285-288.  
YANG Jinzhou. Application of geosteering system based on GR and resistivity LWD[J]. Well Logging Technology, 2005,29(4):285-288.
- [11] 赵欣欣,孙宝江,于世娜,等. 基于空隙率波特性的垂直气液两相流型判别研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005,29(2):65-69.  
ZHAO Xinxin, SUN Baojiang, YU Shina, et al. Study of flow pattern discrimination in vertical gas-liquid two-phase flow based on the characteristics of void fraction waves[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(2):65-69.
- [12] 徐广田,赵秀英. 利用深侧向与深感应电阻率差值识别油水层[J]. 国外测井技术, 2006,30(3):13-15.  
XU Guangtian, ZHAO Xiuying. Using difference of resistivity dual laterolog data with dual induction logging data to detect oil and water zone[J]. World Well Logging Technology, 2006,30(3):13-15.
- [13] 王金波,孙宝江,殷志明,等. 随钻电阻率测井值在气侵条件下响应特征的实验研究:第十三届全国水动力学学术会议论文集[C]. 北京:海洋出版社,2014.
- [14] HASSAN A R, KABIR C S. A study of multiphase flow behavior in vertical wells[J]. SPE Production Engineering, 1988,3(3):263-266.
- [15] 陈家琅,陈涛平. 石油气液两相管流[M]. 北京:石油工业出版社,2009.
- [16] 汪庐山,贾庆升,孙宝江. 垂直气液两相管流中空隙率波及其不稳定性分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001,25(2):79-83.  
WANG Lushan, JIA Qingsheng, SUN Baojiang. Void fraction wave and its instability in vertical gas-liquid two phase pipe flow[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001,25(2):79-83.
- [17] 王志远,孙宝江. 深水司钻压井法安全压力余量及循环流量计算[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008,32(3):71-75.  
WANG Zhiyuan, SUN Baojiang. Calculation of safety pressure margins and circulation rate of well killing by deep water driller's methods[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(3):71-75.
- [18] 高永海,孙宝江,赵欣欣,等. 深水钻井井涌动态模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010,34(6):66-70.  
GAO Yonghai, SUN Baojiang, ZHAO Xinxin, et al. Dynamic simulation of kicks in deepwater drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(6):66-70.
- [19] 董星亮,曹式敬,唐海雄,等. 海洋钻井手册[M]. 北京:石油工业出版社,2011.