

# 钻井过程中呼吸效应类型识别与控制方法

秦旭<sup>1</sup>, 赖秋霞<sup>2</sup>, 黄洪林<sup>3\*</sup>, 安锦涛<sup>4,5</sup>, 张更<sup>5</sup>

(1. 中海油田服务股份有限公司钻井事业部, 海南海口 570311; 2. 中法渤海地质服务有限公司海南分公司, 海南海口 570100; 3. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南海口 570100; 4. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆克拉玛依 834000; 5. 中国石油大学(北京), 北京 102200)

**摘要:**呼吸效应是钻井过程中常见的复杂流体现象, 表现为钻井液的周期性漏失与返流, 易与井涌混淆, 对井控安全构成严重威胁。本文在系统梳理相关研究的基础上, 将地层呼吸效应归纳为井筒弹性变形、钻井液膨胀-收缩、裂缝性呼吸效应和渗透性呼吸效应4种类型, 分别分析其诱发机理、识别特征与适用条件。在识别方面, 综述了随钻压力监测(PWD)、电阻率测井、决策树与事件树分析等典型方法, 并评估其对不同机制的适应性。在控制方面, 总结了控压钻井、连续循环系统、钻井液参数优化等应对策略, 探讨其在不同类型呼吸效应中的实施效果。本研究旨在构建呼吸效应的系统认知框架, 为复杂工况下的准确识别与科学应对提供理论支持与实践指导。

**关键词:** 钻井呼吸效应; 井筒弹性变形; 钻井液膨胀-收缩; 裂缝性呼吸效应; 渗透性呼吸效应

**中图分类号:** TE28 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0037-09

## Identification and control methods for ballooning effect types during drilling

QIN Xu<sup>1</sup>, LAI Qiuxia<sup>2</sup>, HUANG Honglin<sup>3\*</sup>, AN Jintao<sup>4,5</sup>, ZHANG Geng<sup>5</sup>

(1. *Drilling Division of China Oilfield Services Limited, Haikou Hainan 570311, China*; 2. *China France Bohai Geoservices Co., Ltd. Hainan Branch, Haikou Hainan 570100, China*; 3. *CNOOC (China) Co., Ltd. Hainan Branch, Haikou Hainan 570100, China*; 4. *China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay Xinjiang 834000, China*; 5. *China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102200, China*)

**Abstract:** The ballooning effect is a common and complex flow phenomenon during drilling, characterized by periodic loss and backflow of drilling fluid. It is often confused with well influx and poses a significant threat to well control safety. Based on a systematic review of relevant studies, this paper categorizes the formation ballooning effect into four types—borehole elastic deformation, drilling fluid expansion-contraction, fracture-induced breathing, and permeability-induced breathing—and analyzes their triggering mechanisms, identification characteristics, and applicable conditions. For identification, typical methods such as Pressure While Drilling (PWD), resistivity logging, decision tree analysis, and event tree analysis are reviewed, and their adaptability to different mechanisms is assessed. In terms of control, strategies including managed pressure drilling, continuous circulation systems, and drilling fluid parameter optimization are summarized, and their effectiveness across different breathing types is discussed. This study aims to establish a systematic cognitive framework for understanding the ballooning effect, providing theoretical support and practical guidance for accurate identification and scientific response under complex downhole conditions.

**Key words:** drilling ballooning effect; borehole elastic deformation; drilling fluid expansion-contraction; fracture-induced ballooning effect; permeability-induced ballooning effect

收稿日期: 2025-07-03; 修回日期: 2025-08-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.006

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“深层煤岩气水平井井壁失稳机理研究”(编号: 52404015)

第一作者: 秦旭, 男, 汉族, 1986年生, 工程师, 钻井工程专业, 主要从事海洋油气钻完井工程管理方面工作, 海南省海口市秀英区逸海国际广场, sh\_hy981stp@cosl.com.cn。

通信作者: 黄洪林, 男, 汉族, 1994年生, 工程师, 油气井工程专业, 博士, 主要从事海洋油气井钻井技术与理论研究工作, 海南省海口市秀英区长滨三路6号, huanghl\_cup@163.com。

引用格式: 秦旭, 赖秋霞, 黄洪林, 等. 钻井过程中呼吸效应类型识别与控制方法[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 37-45.

QIN Xu, LAI Qiuxia, HUANG Honglin, et al. Identification and control methods for ballooning effect types during drilling [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 37-45.

## 0 引言

呼吸效应是钻井过程中常见且复杂的井筒-地层流体耦合现象,表现为钻井液在循环和停泵阶段交替发生的漏失与返流<sup>[1]</sup>。该现象不仅干扰井控参数识别,还易与井涌、井漏等混淆,导致误判,进而引发井控事故<sup>[2]</sup>。随着钻井向深层/超深层、深水/超深水及复杂构造区域推进,呼吸效应的发生频率和风险持续增加,成为影响井控安全的关键因素之一<sup>[3]</sup>。

研究表明,呼吸效应的机理多样,受地层物性、钻井液性能及井筒状态等多因素影响<sup>[4-5]</sup>。现有研究从井筒弹性变形<sup>[6-7]</sup>、钻井液压缩性变化<sup>[8-12]</sup>、裂缝张开闭合<sup>[13-14]</sup>以及软岩渗流响应<sup>[15-16]</sup>等角度提出了多种模型,但缺乏系统的分类框架与识别技术,控制手段的适应性分析也较为分散,难以满足现场快速识别与精准干预需求。

为此,本文梳理相关研究,对呼吸效应进行分类并分析其形成机理、流体响应与演化规律。同时,总结现有识别技术与控制方法,评估其适用性,旨在构建一套完整的分类识别与控制框架,为高风险井段的井控风险识别与工程应对策略优化提供理论支持。

## 1 呼吸效应机理分类与对比分析

为实现更科学的识别与控制,从成因机理出发,对不同类型呼吸效应进行系统分类与对比分析。通过归纳已有理论与工程实践,将呼吸效应划分为四类:井筒弹性变形型、钻井液膨胀-收缩型、裂缝性呼吸效应型和渗透性呼吸效应型。

### 1.1 呼吸效应机理概述

#### 1.1.1 井筒弹性变形型呼吸效应

该类型呼吸效应主要源于井筒结构的弹性形变。当泵开启时,钻井液的高循环压力作用于井筒,使其在弹性极限范围内膨胀,形成“虚假”钻井液漏失;停泵后,循环压降消失,井筒回弹,引起返排现象<sup>[17]</sup>。这一现象在管柱运动引起的瞬态压力波动和抽汲时也较为明显<sup>[18-19]</sup>。这一过程与地层无直接渗透联系,主要发生在井筒完好、泥饼形成良好的井段,返排量小且响应迅速,是最容易被识别的一类呼吸效应。但值得指出的是,尽管井眼和套管的弹性变形是导致呼吸效应发生的其中一个诱因,但其产生的钻井液损失和增量只占很小的一部

分<sup>[20]</sup>,在深井、超深井中相对占比可能会更大。

#### 1.1.2 钻井液膨胀-收缩型呼吸效应

钻井液膨胀-收缩型呼吸效应主要由钻井液在热力与压力变化下的体积变化引发,表现为由于钻井液的温度梯度、压缩性以及溶解气释放等因素引起的返排现象<sup>[21]</sup>。这类呼吸效应产生的钻井液增量比井筒膨胀要大得多<sup>[6,22]</sup>。在深井或高温井环境中,钻井液在循环过程中吸收井底热量并膨胀,当停泵或流速骤降时,井筒内温度迅速下降,钻井液体积收缩,密度变大,导致地层流体或环空底部钻井液返流至井口,如图1所示。受热力影响的呼吸效应,钻井液的溢出存在滞后性,通常在几小时到十几小时的时间范围内发生,且油基钻井液更明显<sup>[10]</sup>,如图2所示。此外,高压钻井液中溶解气的释放也会加剧体积膨胀,形成类似井涌的返排现象。此类呼吸效应响应速度快,返排量波动大,尤其在井筒气测异常或含气返排情况下,极易与早期井涌混淆,增加误判风险<sup>[23-24]</sup>。因此,在识别过程中需结合返排时间、含气值、循环温差和停泵压力变化等多参数进行综合判断。

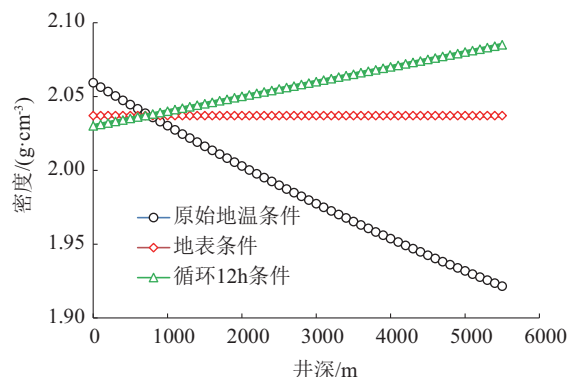


图1 井筒中不同条件下的钻井液密度  
Fig.1 Density of drilling fluid under different conditions in the wellbore

#### 1.1.3 裂缝性呼吸效应

裂缝性呼吸效应主要发生于存在天然裂缝或诱导裂缝的高脆性、低渗透地层中,其本质为裂缝在压力波动下的周期性张闭所引发的钻井液滞留与返排过程<sup>[25-28]</sup>。在钻井液循环过程中,井筒压力高于裂缝孔隙压力,裂缝张开,钻井液渗入地层;当停泵或压力下降时,裂缝闭合,部分已进入裂缝系统的钻井液在挤压作用下返流回井筒,形成返

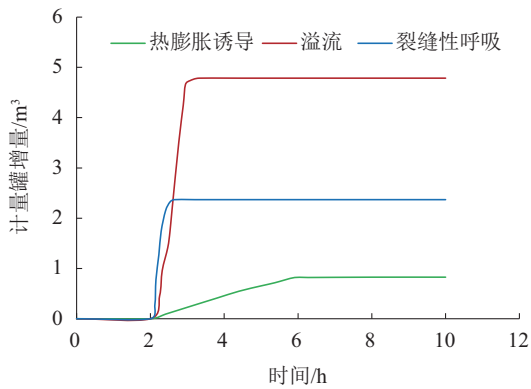


图 2 流量检查期间不同情况计量罐增量  
Fig.2 Increment of measurement tank under different conditions during flow check

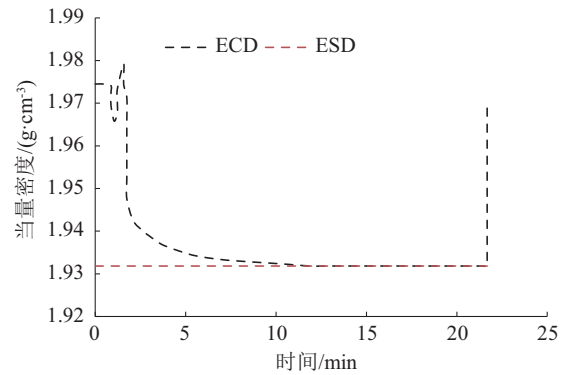


图 4 停泵时裂缝性呼吸效应返排井底 ECD 的滞后现象  
Fig.4 Delayed return of bottomhole ECD during pump shut-off due to fracture-induced ballooning effect

排<sup>[29-31]</sup>,如图 3 所示。该类型呼吸效应具有明显的滞后性和非线性响应特征。在压力曲线中,如 PWD 或等效循环密度(ECD),通常表现为停泵后的缓慢压力衰减与非同步返排,常与微溢流或地层渗透混淆<sup>[22]</sup>,如图 4 所示。裂缝性呼吸效应的发生强度与裂缝的几何参数、封闭能力、张开压力及钻井液滤失性密切相关,识别难度较高,控制不当易引发更严重的井漏、井壁失稳或井涌等复杂工况<sup>[32]</sup>。因此,对该类型效应的有效识别和动态监测对于页岩气、裂缝性碳酸盐岩等特殊地层的安全钻井尤为关键。

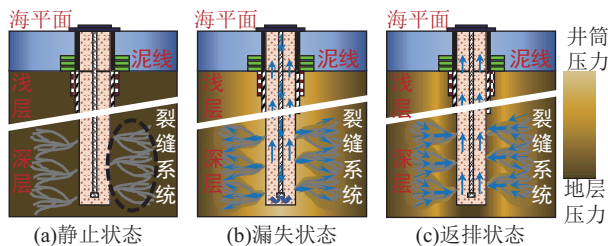


图 3 深水深层高温高压裂缝性呼吸效应示意  
Fig.3 Schematic of fracture-induced ballooning effect in deepwater, deep, high-temperature, high-pressure conditions

压力快速降低,已渗入孔隙的钻井液在压差作用下回流至井筒,形成返排<sup>[15]</sup>,如图 5 所示。由于地层无明显裂缝结构,渗流通道连续性强,返排量不如裂缝性呼吸效应大。该效应在深水钻井中尤为常见,往往与微漏失、钻井液动滤失混淆,易被误判为微井涌或正常液位波动,进而影响井控响应的时效性与准确性<sup>[33]</sup>。识别该类型呼吸效应需结合多物理场数据(如 PWD、温压曲线、溢漏量变化等)与渗流-力学耦合理论模型进行综合分析,强调钻井液流变特性与井筒压力扰动的动态响应规律,是当前深水浅层复杂工况下井控风险辨识的重要研究方向。

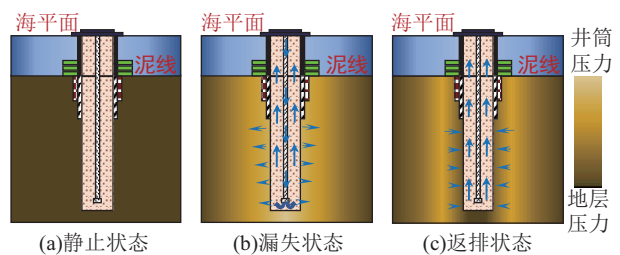


图 5 渗透性呼吸效应示意  
Fig.5 Schematic of permeability-induced ballooning effect

### 1.1.4 渗透性呼吸效应

渗透性呼吸效应主要发生于深水/超深水浅部地层等高孔隙度、高渗透率、无裂缝的弱胶结地层,其本质为多孔介质中钻井液在压力驱动下的可逆渗流过程<sup>[15]</sup>。在钻井液循环过程中,井筒压力高于地层孔隙压力,钻井液持续渗透进入井壁周围地层,形成暂时性储液带;当停泵或压力下降时,井筒

### 1.2 不同类型呼吸效应对比分析

呼吸效应的复杂性不仅体现在其多样化的诱发机理上,更表现为其在井下不同条件下的行为特征、响应规律及识别难度。科学分类的意义在于指导工程识别与应对,而分类后各类型的差异性对钻井安全控制策略提出了针对性的需求。从地质背景、诱发条件、流体行为特征、动态响应特征、识别方法、控制技术 & 工程风险等 7 个维度对 4 类呼吸

效应进行系统性对比分析,详见表1。

表1 呼吸效应类型对比分析  
Table 1 Comparative analysis of ballooning effect types

类型	典型地层	诱发机理	流体行为	动态特征	识别依据	监测手段	控制方式	风险等级
井筒弹性变形型 <sup>[17-20]</sup>	井壁完整、无裂缝段	套管或井壁弹性形变	快速微量返排,无气体参与	停泵即返排,反应快速;返排量有限	环空流量突变+返排时间极短	泵停-返排同步观察	降低泵压梯度、调整井眼结构	低
钻井液膨胀型 <sup>[21-24]</sup>	高温高压井、有溶解气段	溶解气释放/重溶、压缩性变化	钻井液体积变化引发返排,常含少量气体	无溶解气时停泵后长时间返排,有溶解气时钻井液突然外溢(气侵易混淆)	溶解气含量+流量变化	气测仪器、环空质量监控	调整循环节流、使用低压缩钻井液	中
裂缝性呼吸型 <sup>[25-32]</sup>	致密裂缝发育、页岩或砂岩	裂缝开闭循环响应压力变化	裂缝开启漏失、闭合返流	循环停泵后返排延迟、缓慢下降	PWD曲线滞后+裂缝段联动	PWD、ECD监测与拟合	控压钻井、堵漏剂封堵裂缝	高
渗透性呼吸型 <sup>[15-16, 33-35]</sup>	深水浅层、高孔高渗软土层	多孔介质中压力扩散与渗流	漏失持续时间长,返流延迟、量少	停泵数分钟至十余分钟后缓慢返排	返排滞后+漏失量>返排量+渗透率高	实时流量差+地层测试匹配	降滤失材料调控渗透率、提高钻井液黏度	中-高

### 1.2.1 地层与物性条件差异

不同类型的呼吸效应依赖于特定的地质环境与岩石物性。井筒弹性变形型多发生于结构完整、无裂缝、井壁封闭性良好的井段,地层岩性较硬,井筒能够在循环泵压驱动下发生微小形变;钻井液膨胀型主要出现在高温高压区井段,通常伴随溶解气存在,钻井液受热膨胀或气体析出是其主要诱因;裂缝性呼吸效应常见于天然裂缝或诱导裂缝发育的致密砂岩、页岩层段,裂缝在循环与停泵过程中交替张开闭合;而渗透性呼吸效应主要发生于深水浅层软土、弱胶结高孔高渗透地层,裂缝不发育但具备良好的渗流通道,泥饼不易形成,是多孔介质渗流过程的体现。

### 1.2.2 诱发过程的演化路径差异

4类呼吸效应在循环-停泵状态切换下均会出现漏失-返流现象,但其驱动机制存在根本区别。井筒弹性变形型由泵压作用下井壁微形变产生容积变化驱动;钻井液膨胀型则由井筒内钻井液在温压波动下发生体积膨胀与收缩引起;裂缝性呼吸效应主要源于裂缝在压力周期性变化中交替张开与闭合,使钻井液反复进出裂缝系统;而渗透性呼吸

效应的本质是孔隙介质中的压力扩散与应力-渗流耦合过程,当循环停止时,井筒压降驱动已渗透的钻井液回流至井内。不同类型的呼吸效应反映了流体在井筒-地层耦合系统中的不同响应机制。

### 1.2.3 井下响应时间差异

各类呼吸效应在停泵后的响应时间及速率差异显著。井筒弹性变形型响应迅速,通常在停泵后数秒即可观察到返排现象,返排速率高、持续时间短;钻井液膨胀型受受热周期和气体析出时间影响明显,受热膨胀导致的钻井液外溢是长时间持续性外溢;裂缝性呼吸效应由于裂缝闭合存在延迟,返排通常在数十秒后出现,过程缓慢;渗透性呼吸效应表现出显著的滞后性和返排不完全性,返流可能延迟至几分钟后启动,且持续时间较长。这种时间滞后性对识别与判断提出更高要求,容易与井涌混淆。

### 1.2.4 识别复杂性与误判风险

从识别角度看,井筒弹性与钻井液膨胀型因其特征明确、响应快速,相对易于与井涌区分;而裂缝性与渗透性呼吸效应在表现上与早期井涌高度相似,如出现返流延迟、返排量不均、ECD下降滞后

等,极易引发误判。特别是在深水钻井与超深井条件下,由于实时监测难度大、数据传输滞后、含气干扰明显,现场工程师对返排流量的解释存在较大不确定性,易触发不当井控操作,进而造成井漏、井涌等次生事故。因此,提高对呼吸效应识别机制的理解、研究快速准确的判断方法,是保障井控安全的关键<sup>[36]</sup>。

### 1.2.5 控制策略的差异性

由于诱因差异,不同类型呼吸效应的控制策略具有显著差异。针对井筒弹性变形型,可通过优化井眼结构设计、降低泵压幅度等方式减少形变;钻井液膨胀型则需优化钻井液配方,降低其压缩性与溶解气含量;裂缝性呼吸效应控制重点在于封堵裂缝(如使用粒径匹配的封堵剂)与控压钻井,降低压力波动;而渗透性呼吸效应则适宜采用提高钻井液黏度、添加降滤失材料等手段降低渗流速度,同时优化循环排量减少侵入深度。识别类型+匹配控制,是提高现场处置效率、降低复杂井控风险的关键所在。

## 2 呼吸效应的识别与控制方法

呼吸效应对井控识别与钻井安全构成重大挑战,尤其在深水、高温高压(HPHT)井和窄密度窗口地层中表现突出。由于呼吸效应常与井涌、井漏等异常工况交织出现,其精准识别与有效控制对于保障钻井作业连续性与安全性具有重要意义。

### 2.1 呼吸效应识别方法

#### 2.1.1 基于PWD数据的识别技术

随钻压力监测技术通过实时监测ECD与等效静态密度(ESD)变化,成为识别呼吸效应的重要手段<sup>[37-38]</sup>。在停泵过程中,若ECD下降速率减缓、存在明显“平台段”,可能表明钻井液返流(呼吸效应)正在发生。如图4所示,裂缝性呼吸效应导致的返流过程会延迟ECD下降,表现出与正常停泵显著不同的曲线特征<sup>[22]</sup>。然而,PWD数据上传滞后、在超深井中精度下降等问题仍影响其实时性与稳定性。

#### 2.1.2 基于流量和液面变化的监测

呼吸效应通常伴随钻井液流量与液面波动,尤其在停泵初期出现明显返排。通过对钻井液罐液位、泥浆泵进出口流量的高精度监控,可以初步判断返流行为。若返排量远小于前期漏失量,且不伴随含气值上升,可能属于呼吸效应<sup>[39]</sup>。此外,通过

流量趋势图与标准模型对比,可提高识别准确性<sup>[40]</sup>。

### 2.1.3 电测与地层响应法

在油基或合成基钻井液环境中,部分学者尝试使用电阻率测井识别裂缝性呼吸效应,如Bratton等<sup>[41]</sup>将电阻率与裂缝张开/闭合周期对应关联,捕捉流体侵入/返排信号。但该方法对泥饼质量、测井精度和井眼稳定性要求较高,适用范围有限。

### 2.1.4 决策树与事件树模型识别法

通过构建系统性的判断逻辑,如决策树模型和事件树分析方法,可将呼吸效应、溢流与漏失等复杂工况在多维参数空间中分类判定<sup>[42-43]</sup>。林雍森<sup>[44]</sup>提出的三因素决策树模型,结合溢流、漏失、流量变化趋势,已在多个海上井作业中取得良好识别效果。此类模型适合多参数集成的智能化识别平台,便于程序化部署。

## 2.2 呼吸效应的控制策略

### 2.2.1 控压钻井(MPD)技术应用

控压钻井技术通过精确调节井筒压力,实现对呼吸效应的主动控制。尤其在裂缝性或渗透性呼吸效应频发井段,MPD系统可动态调节地层-井筒压差,抑制钻井液过度侵入或返流,如图6所示。该技术适用于窄密度窗口、高渗/高温等高风险井段,已在墨西哥湾、南海等区域取得显著成效<sup>[45-46]</sup>。

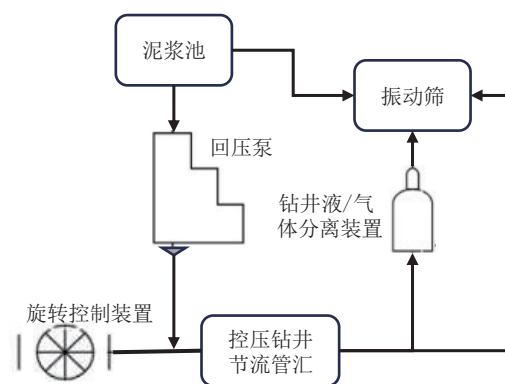


图6 MPD动态调节井筒压力系统示意  
Fig.6 Schematic of the MPD dynamic wellbore pressure control system

### 2.2.2 尾管钻井技术(LD)

LD技术通过在井筒内安装尾管,隔离不稳定地层或高渗透性地层,从而减少钻井液的漏失和返流<sup>[47]</sup>。在发生呼吸效应时,LD技术能够有效减少

地层流体对井筒的干扰,确保井壁稳定,防止不必要的压力波动和井控事件。通过精准的尾管钻进,能最大限度地控制钻井液的循环流量,从而有效缓解呼吸效应造成的风险。在墨西哥湾的作业中,尾管钻井成功应对了呼吸效应问题,尽管未能达到计划的完钻深度,但成功完成了钻井任务<sup>[48]</sup>。

### 2.2.3 连续循环与实时监测系统

连续循环系统(CCS)可避免停泵状态的出现,消除呼吸效应诱发条件,是防控呼吸效应的有效方式。同时结合实时监测(RTM)系统,将PWD、流量、液面、电测信号集成处理,可显著提升对呼吸效应的早期预警能力<sup>[38]</sup>。

### 2.2.4 钻井液参数优化

调节钻井液流变参数,尤其是提高塑性黏度与屈服应力,可降低钻井液的渗流能力与返流速度,从而抑制呼吸效应的强度。在渗透性呼吸效应显著的深水浅层,建议使用高黏度水基钻井液并辅以适量LCM(降滤失剂)颗粒,增强地层封堵效果,延缓渗透进程<sup>[33]</sup>。

### 2.2.5 裂缝封堵与井壁稳定措施

针对裂缝性呼吸效应,可选用匹配粒径的封堵剂,如石墨、纤维或弹性封堵材料等,通过封闭裂缝系统减少返流途径<sup>[49]</sup>。同时对易发生弹性形变的井段,建议优化井径设计、控制泵压强度,减少井筒体积变化对流体的影响。

## 2.3 方法适应性与实施建议

不同类型的呼吸效应在诱发机理、响应特征及现场表现方面存在显著差异,因此其识别与控制策略必须具备针对性与适应性。具体来说,井筒弹性变形型呼吸效应常见于井径变化显著的深井段,适合结合PWD与控压钻井技术联合判断;钻井液膨胀型呼吸效应主要受循环温度波动影响,应结合流体物性模拟与停泵压力响应曲线进行分析;裂缝性呼吸效应特征明显,宜重点采用PWD动态识别与LCM定向封堵技术;渗透性呼吸效应广泛存在于深水浅层高孔高渗地层,适宜采用应力-渗流耦合建模预测,并辅以泥浆体系优化与连续循环系统抑制其发生。在现场实施过程中,必须根据呼吸效应的类型、发生阶段及工程背景,建立“特征识别-技术匹配-动态干预”的闭环响应机制。同时,建议推广基于多源数据(如PWD、流量、电测等)的智能判别模型,结合实时监测和模型预测,提升呼吸效应的

识别精度和干预时效。

在墨西哥区块S井钻进过程中,Ø311 mm井段发生了溢流,并进行了压井。该井钻遇两套盐层包裹的高压砂体,钻进新地层74.7 m,其中盐层30.5 m,盐下泥岩44.2 m,未遇砂岩地层,且钻进过程中未见油气显示。在此过程中,操作员通过事件树分析,结合井下设备、地层因素与管理因素,构建了深水盐下地层呼吸效应层次结构模型,并将钻井液密度、钻井速度、关井立管压力、套管压力、溢流速率等五个参数与溢流情况进行对比分析,如图7所示。结合地层呼吸效应的观察,初步判断此次溢流由呼吸效应引起。

同时,现场采用了环空泄压法进行验证,监测数据如下:第一次泄压,套压从7.9 MPa降至6.3 MPa,后升至7.8 MPa;第二次泄压,套压从8.2 MPa降至6.1 MPa,后升至7.6 MPa;第三次泄压,套压从7.3 MPa降至5.2 MPa,后升至6.5 MPa;第四次泄压,套压从6.5 MPa降至0 MPa,观察到循环池液面稳定,未发生溢流。通过这一过程确认溢流由呼吸效应引起。29日15:30,套压降至0 MPa,但立压仍为6.5 MPa。根据井控检查要求,进一步排除了“井控风险”:首先关闭万能防喷器,进行上下活动钻具操作,观察立压无明显变化;然后关闭闸板防喷器,检查BOP圈闭气,未发现气体;保持万能防喷器关闭,监控计量罐环空,未见溢流;打开万能防喷器,开井观察,未发生溢流;循环一周检查,未见异常。最终,30日11:00排除了井控风险,恢复起钻作业。

后续作业中,类似情况再次发生。通过基于决策树的识别方法,成功识别呼吸效应和溢流,并采取连续钻井与关井压井的处理方法,确保了作业安全性与高效性。

## 3 结论与建议

呼吸效应作为钻井过程中复杂的流体-地层相互作用现象,已在深井、超深井、深水及高风险井段中显现出显著的工程影响。为厘清其多样化的成因与响应特征,本文系统归纳了当前的研究成果,并首次提出了呼吸效应的“类型识别与控制策略框架”,为机理识别与技术应对提供了理论依据和实践指导,主要结论和建议如下:

(1)呼吸效应类型可划分为井筒弹性变形型、钻井液膨胀型、裂缝性呼吸效应型和渗透性呼吸效

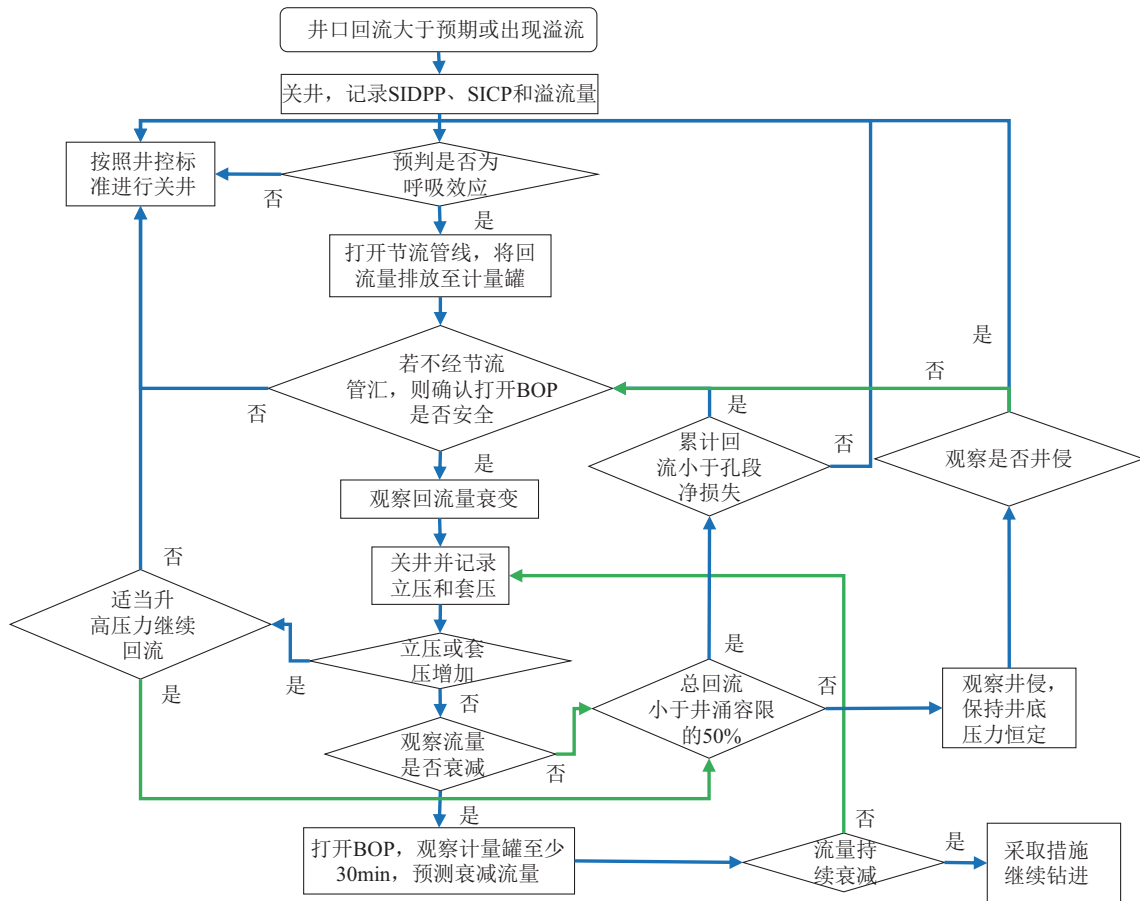


图 7 呼吸效应识别决策树

Fig.7 Decision tree for ballooning effect identification

应型 4 类。4 种类型在诱发条件、演化过程及井下响应特征上具有显著差异,需分类识别、差异应对。

(2)呼吸效应识别技术不断发展,包括PWD曲线监测、ECD 响应分析、返排动态识别、事件树与决策树方法等。结合多源监测与井下数据可实现更精确的类型判定,显著降低与井涌、井漏等工况的误判风险。

(3)针对不同诱因,精准选用相应的控制技术。控压钻井、连续循环系统、钻井液性能优化和封堵材料干预等方法在各类呼吸效应中的适用性不同。合理选择与匹配这些方法,是实现有效控制的关键。

(4)未来应加强智能识别模型的开发,构建“识别-干预-优化”一体化技术体系,推动PWD、有线钻杆和实时压控系统的集成应用,提升井控响应的准确性与时效性,为复杂地质条件下的钻井作业提供技术支撑和安全保障。

参考文献 (References):

- [1] 高热雨. 深水地层呼吸效应形成机理及钻井安全密度窗口优化方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022. GAO Reyu. Study on the formation mechanism of breathing effect in deepwater formations and optimization method for drilling safety density window [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.
- [2] 骆奎栋. 深水钻井地层呼吸效应实验及安全密度窗口分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020. LUO Kuidong. Wellbore breathing experiment and safety density window analysis of deepwater drilling [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [3] 李军, 杨宏伟, 张辉, 等. 深水油气钻采井筒压力预测及其控制研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 973-983. LI Jun, YANG Hongwei, ZHANG Hui, et al. Progress of basic research on wellbore pressure control in deepwater oil and gas drilling and production [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(6): 973-983.
- [4] Baldino S, Meng M, et al. Critical review of wellbore ballooning and breathing literature [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2021, 28: 100252.
- [5] 黄洪林. 考虑底辟构造的海洋地层压力体系形成机制与精确预测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.

- HUANG Honglin. Study on the formation mechanism and accurate prediction method of Marine formation pressure system considering bottomhole structural features[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [6] Gill J A. How borehole ballooning alters drilling responses[J]. *Oil & Gas Journal*, 1989,87(11):43-46,48,52.
- [7] Helstrup O A, Rahman M K, Hossain M M, et al. A practical method for evaluating effects of fracture charging and/or ballooning when drilling high pressure, high temperature(HPHT) wells [C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE/IADC Drilling Conference, 2001:SPE-67780-MS.
- [8] Atkin T. Numerical modelling to estimate the amount of formation deformation and its effect on cement integrity[D]. Leoben: University of Leoben, 2019.
- [9] Elmgerbi A, Thonhauser G, Roohi A, et al. General analytical solution for estimating the elastic deformation of an open borehole wall[J]. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 2016,7(1):1056.
- [10] Ram Babu D. Effect of P- $\rho$ -T behavior of muds on loss/gain during high-temperature deep-well drilling[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1998,20(1/2):49-62.
- [11] Aadnoy B S. *Modern Well Design*[M]. 2nd ed. London: CRC Press, 2010.
- [12] Yuan Z G, Morrell D, Mayans A G, et al. Differentiate drilling fluid thermal expansion, wellbore ballooning and real kick during flow check with an innovative combination of transient simulation and pumps off annular pressure while drilling[C]//IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Fort Worth: Society of Petroleum Engineers, 2016:SPE-178835-MS.
- [13] Lavrov A, Tronvoll J. Mechanics of borehole ballooning in naturally-fractured formations [C]//SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Kingdom of Bahrain: Society of Petroleum Engineers, 2005:SPE-93747-MS.
- [14] Majidi R, Miska S Z, Yu M, et al. Fracture ballooning in naturally fractured formations: mechanism and controlling factors [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: Society of Petroleum Engineers, 2008:SPE-115526-MS.
- [15] Gao R Y, Li J, Yang H W, et al. A novel approach to investigating the mechanism of permeability-induced borehole breathing in deepwater shallow formations[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208:109331.
- [16] Huang H L, Li J, Gao R Y, et al. Investigation of the mechanisms and sensitivity of wellbore breathing effects during drilling in deepwater shallow formations [J]. *Ocean Engineering*, 2023,269:113405.
- [17] Gill J A. Charged shales: self-induced pore pressures [C]//IADC/SPE Drilling Conference. Dallas: IADC/SPE Drilling Conference, 1986:SPE-14788-MS.
- [18] Lubinski A, Hsu F H, Nolte K G. Transient pressure surges due to pipe movement in an oil well[J]. *Oil & Gas Science and Technology—Revue de l'IFP*, 1977,32(3):307-348.
- [19] Mitchell R F. Dynamic surge/swab pressure predictions [J]. *SPE Drilling Engineering*, 1988,3(3):325-333.
- [20] Gill J A. Well logs reveal true pressures where drilling responses fail[J]. *Oil & Gas Journal*, 1987,85:11.
- [21] Dalton C L, Paulk M D, Bittar M, et al. Real-time, time-lapse resistivity logging with a wired composite tubing[C]//SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico. Villahermosa: Society of Petroleum Engineers, 2002: SPE-74380-MS.
- [22] Ashley P R. Well control of an influx from a fracture breathing formation [C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology. Kuala Lumpur: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, 2000:SPE-62770-MS.
- [23] Ridley K, Jurgens M, Billa R J, et al. Eagle ford shale well control: drilling and tripping in unconventional oil and gas plays [C]//SPE Unconventional Gas Conference and Exhibition. Muscat: Society of Petroleum Engineers, 2013:SPE-163984-MS.
- [24] Karstad E. Analysis of ballooning effects during drilling of high pressure high temperature wells [C]//European Petroleum Conference. The Hague: Society of Petroleum Engineers, 1998:SPE-52066-STU.
- [25] Ozdemirtas M, Babadagli T, Kuru E. Effects of fractal fracture surface roughness on borehole ballooning [J]. *Vadose Zone Journal*, 2009,8(1):250-257.
- [26] Wen Z X, Fan H H, Tian D Q, et al. Analysis of fracture ballooning in deep water wells during drilling [C]//The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2021: ISOPE-I-21-1188.
- [27] Wanga H, Chen M, Wei S, et al. Breathing effect of sandstone reservoir formed in barrier coastal sedimentary system [C]//ISRM International Symposium—EUROCK 2020. Online: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020:ISRM-EUROCK-2020-031.
- [28] Dokhani V, Ma Y, Li Z, et al. Transient effects of leak-off and fracture ballooning on mud loss in naturally fractured formations [C]//53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. New York City: American Rock Mechanics Association, 2019:ARMA-2019-1945.
- [29] Gao R Y, Cui Y, Wang G, et al. Dynamic response mechanism of borehole breathing in fractured formations [C]//Computational and Experimental Simulations in Engineering. Cham: Springer, 2025:545-555.
- [30] 代锐, 马传华, 黄洪林, 等. 裂缝性地层呼吸效应特征实验研究 [J]. *钻探工程*, 2025,52(1):93-101.  
DAI Rui, MA Chuanhua, HUANG Honglin, et al. Experimental study on the characteristics of respiration effect in fractured formations [J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52 (1) : 93-101.
- [31] Gao R Y, Li J, Liu G H, et al. Experimental study on typical characteristics of borehole breathing under different pressure and rock type conditions [J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2020,77:103241.
- [32] Zhang G, Li J, Huang H L, et al. Research on response characteristics of breathing effect in deep-water high temperature and high pressure fractured formation [J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2025,246:213646.
- [33] 罗鸣, 高德利, 黄洪林, 等. 深水浅层呼吸效应机理及影响因素

- 分析[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(6): 668-676.
- LUO Ming, GAO Deli, HUANG Honglin, et al. Analyses of the ballooning effect and its affecting factors in drilling shallow formations in deep water[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(6): 668-676.
- [34] 黄洪林, 罗鸣, 吴艳辉, 等. 深水浅层钻井呼吸效应机制及影响因素分析[J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(6): 67-78.
- HUANG Honglin, LUO Ming, WU Yanhui, et al. Analysis of the breathing effect mechanism and influencing factors during drilling in deepwater shallow formations[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023, 47(6): 67-78.
- [35] Huang H L, Li J, Li W T, et al. Numerical simulation of breathing effect induced by drilling in deep-water shallow formations[C]//*Computational and Experimental Simulations in Engineering*. Cham: Springer, 2023: 1243-1256.
- [36] Golwalkar A, Lang C M, Doodraj S, et al. Exploratory drilling in severely ballooning formation—use of best drilling practices and real-time monitoring for low-cost mitigation[C]//*International Petroleum Technology Conference*. Bangkok: International Petroleum Technology Conference, 2016: IPTC-18763-MS.
- [37] Zamora M, Roy S. Using true real-time data interpretation to facilitate deepwater drilling: AADE 01-NC-HO-09[R]. Houston: 2001 AADE National Drilling Technical Conference, 2001.
- [38] 陈彬, 罗俊丰, 叶吉华, 等. 深水井控成功实践与技术分析[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(1): 129-131, 134.
- CHEN Bin, LUO Junfeng, YE Jihua, et al. Successful practices and technical analysis of deepwater well control[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(1): 129-131, 134.
- [39] Allen S, McCartney C, Hernandez M, et al. Step-change improvements with wired-pipe telemetry[C]//*SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Amsterdam: SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 2009: SPE-119570-MS.
- [40] Cayeux E, Daireaux B. Precise gain and loss detection using a transient hydraulic model of the return flow to the pit[C]//*SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition*. Dubai: SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, 2013: SPE-166801-MS.
- [41] Bratton T R, Rezmer-Cooper I M, Desroches J, et al. How to diagnose drilling-induced fractures in wells drilled with oil-based muds with real-time resistivity and pressure measurements [C]//*SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam: SPE/IADC Drilling Conference, 2001: SPE-67742-MS.
- [42] 李成, 吴谦, 苑晓荣. 基于事件树的深水钻井呼吸效应识别研究[J]. 石油工业技术监督, 2016, 32(7): 60-62.
- LI Cheng, WU Qian, YUAN Xiaorong. Research on deepwater drilling breathing effect identification based on event tree [J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2016, 32(7): 60-62.
- [43] 刘海飞, 李成, 覃毅. 深水窄压力窗口钻井井控风险定量评价研究[J]. 石油工业技术监督, 2017, 33(2): 54-59.
- LIU Haifei, LI Cheng, QIN Yi. Quantitative evaluation of well control risk under deepwater and narrow pressure window drilling [J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2017, 33(2): 54-59.
- [44] 林雍森. 深水井控中地层呼吸效应的识别与处理探讨[J]. 海洋石油, 2014, 34(1): 72-76.
- LIN Yongsen. Discussion on identifying and handling of formation ballooning in deep water well control [J]. *Offshore Oil*, 2014, 34(1): 72-76.
- [45] Tirado G R, Lupo C P, Beltran J C, et al. MPD makes possible to drill and trip out of the hole in a gas well with a combination of a narrow mud weight window and a serious ballooning effect[C]//*IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference & Exhibition*. Denver: IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, 2011: SPE-143104-MS.
- [46] Ochoa A, Acevedo O, Nieto L, et al. Successful application of MPD (managed pressure drilling) for prevention, control, and detection of borehole ballooning in tight gas reservoir in Cuervito Field, Mexico [C]//*Canadian Unconventional Resources Conference*. Calgary: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-146529-MS.
- [47] Rosenberg S M, Gala D M. Liner drilling technology as a tool to reduce NPT—gulf of Mexico experiences[C]//*SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-146158-MS.
- [48] Rosenberg M S, Gala D M. Liner drilling technology as a mitigation to wellbore ballooning: a successful case study in the Gulf of Mexico shelf[C]//*SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Amsterdam: SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 2011: SPE-140261-MS.
- [49] 吴艳辉, 黄洪林, 罗鸣, 等. 深水深层高温高压裂缝性呼吸效应动态响应特征[J]. 钻井液与完井液, 2025, 42(2): 167-179.
- WU Yanhui, HUANG Honglin, LUO Ming, et al. The dynamic response characteristics of ballooning effect in deep fractured high temperature high pressure formations in deep water drilling[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2025, 42(2): 167-179.

(编辑 王跃伟)