

油气井多相流环空压力预测及泄放规律研究

万浩东, 毛炼, 罗文伟, 王林霄, 詹广贤

中海油安全技术服务有限公司湛江分公司 广东湛江 524057

通讯作者: Email: wanhd@cnoc.com.cn

项目支持: 中海油安全技术服务有限公司合作研发科技重大项目“油气井智能完整性管理技术研究”(ZX2023ZCSTF7206)

引用: 万浩东, 毛炼, 罗文伟, 等. 油气井多相流环空压力预测及泄放规律研究[J]. 油气井测试, 2024, 33(6): 54-59.

Cite: WAN Haodong, MAO Lian, LUO Wenwei, et al. Study on prediction of annular pressure and release pattern in oil and gas wells under multiphase flow conditions[J]. Well Testing, 2024, 33(6): 54-59.

摘要 油气井环空带压对油田安全生产造成严重威胁, 井完整性智能化管理技术对油气井的稳定生产具有重要意义。以油气井多相流环空压力监测为重点, 根据压力平衡原理, 建立泄压和压力恢复过程中油管和环空内温度、压力分布模型以及小孔泄流模型, 给出模型求解方法, 提供了一种考虑多相流体存在的油气井环空压力预测方法, 可定量计算泄漏点位置、泄漏率和泄漏量。仿真和室内试验结果表明, 多相流条件下的油气井环空带压泄放规律与室内测试一致, 累计误差均小于 $1 \text{ m}^3/\text{d}$, 证实了多相流泄压模型的实用性, 为实现油气井环空带压自动化监测、控制提供了有效的方法和手段。

关键词 多相流; 环空压力; 数学模型; 泄放规律; 智能化管理; 仿真模拟; 自动化监测

中图分类号: TE53 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.06.009

Study on prediction of annular pressure and release pattern in oil and gas wells under multiphase flow conditions

WAN Haodong, MAO Lian, LUO Wenwei, WANG Linxiao, ZHAN Guangxian

CNOOC Security Technology Service Co., Ltd. Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524057, China

Abstract: The annular pressure in oil and gas wells poses a significant threat to the safety of oilfield production. Intelligent well integrity management technology is crucial for the stable production of oil and gas wells. Focusing on monitoring annular pressure within oil and gas wells under multiphase flow conditions, and based on the principle of pressure balance, models for temperature and pressure distribution during pressure relief and recovery in tubing and annulus, as well as a small orifice discharge model, were established. Furthermore, a solution method for these models was provided, offering a method for predicting annular pressure in oil and gas wells considering the presence of multiphase fluids. This method can quantitatively calculate the location, rate, and volume of leaks. Simulation and laboratory test results show that the pressure release patterns of annular pressure under multiphase flow conditions align with laboratory tests, with a cumulative error of less than $1 \text{ m}^3/\text{d}$. This confirms the practicality of the multiphase flow pressure release model, providing effective methods and means for automated monitoring and control of annular pressure in oil and gas wells.

Keywords: multiphase flow; annular pressure; mathematical model; release pattern; intelligent management; simulation; automated monitoring

随着油田开发进入中后期, 由于井下完整性屏障腐蚀、老化等因素, 造成 A 环空带压现象频繁发生, 进而导致油气井安全隐患风险不断凸显, 对油气井安全生产构成严重威胁^[1]。在我国南海西部, 油气井环空带压比例已经超过 10%。油气井本质化安全管理的前提之一是做好监测预防工作^[2-3]。南海西部油田未实现完全的智能化改造, 监测和泄放依旧依靠人工进行, 无法及时有效的监测环空压

力, 判断井下完整性状态, 进而无法及时对环空压力进行泄放处理。目前, 对油气井环空压力监测的研究大都集中在预测气相导致的环空带压预测, 然而油气井生产管柱内的成分复杂, 常为油、气、水三相流体, 因此, 研究油气井多相流条件下的环空压力预测及其泄放规律, 实现对油气井环空带压的自动化监测、控制, 对保障油气田安全稳定生产具有重要意义。

1 油气井多相流监测难点

由于现场工况条件和流体物理参数的多样性,以及流体力学和传热学的复杂性,油气井多相流体环空压力的预测研究存在难以攻克的问题。首先,油气井环空带压模型的导出需要油管内温度压力、温度分布模型、小孔泄流模型等模型^[4-6]的支持,对于油井,可能存在油、气、水三相流体同时泄漏的情况,目前没有成熟的研究可供参考;其次,油气井环空带压地面测量手段无法获得环空中的液面高度、气柱高度、环空压力、温度等直接信息^[7],而通过间接数据预测井下泄漏关键参数容易造成较大偏差,要想预测泄漏参数,则需要掌握环空泄压、压力恢复的全过程,才能对井下泄漏情况进行预测和判断。

针对上述难点,考虑到液相大量产出时意味着A环空严重漏失的极端情况,将无需继续测试,因此常规状况下应当只有少量液体产出,故采用以气相计量为主,多种多相流计量手段综合使用的策略。对于油气井环空带压地面测量手段无法获得的信息,采用质量流量、流速、液体组分、压力、温度等多传感器融合技术与深度学习算法以实现井下泄漏参数的准确预估^[8-9]。在环空泄压和压力恢复过程测试测量时,考虑通过调节电磁阀门的开度观测压力的释放和压力的恢复过程,及时判决井下的异常状况,实现多流量模式下的测量。

2 油气井多相流环空压力预测

井下管柱泄漏情况预测的关键在于通过井口检测数据和井身信息找到相邻两个管柱内压力的平衡点。依据压力平衡原理,需要建立油气井多相流环空带压模型,包括压力梯度模型、温度分布模型,以及泄漏点泄流模型。

2.1 泄压过程模型建立

2.1.1 井筒压力和温度梯度模型

油管内的气、液混合物是改变井筒温度和压力分布的源头。在一个长度为 dz 的井筒微单元中,油管中的流体遵循动量守恒和能量守恒定律^[10]。动量包括摩擦力、加速度和重力,能量包括动能、内能、势能、压力能和热损失^[11]。两个守恒定律可以用以下方程表示

$$\begin{cases} \frac{dP}{dz} + \rho_{\text{混}} g \sin\theta + \frac{f \rho_{\text{混}} v_{\text{混}}^2}{d} + \rho_{\text{混}} v_{\text{混}} \frac{dv_{\text{混}}}{dz} = 0 \\ C_p \frac{dT_f}{dz} + v \frac{dv}{dz} + \frac{1}{\rho_{\text{混}}} \frac{dP}{dz} + g \sin\theta + \frac{1}{w_f} \frac{dQ}{dz} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 是压力,MPa; $\rho_{\text{混}}$ 油管内油、气、水三相混合流体的平均密度, kg/m^3 ; g 是重力加速度, m/s^2 ; θ 是井斜角, $^\circ$; f 是摩擦系数,无量纲; $v_{\text{混}}$ 是油管内混合流体的速度, m/s ; d 是油管的内径, m ; z 是井的垂直深度, m ; C_p 是井筒流体的平均比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T_f 是流体温度, K ; v 是气体的流速, m/s ; w_f 是气体质量流量, kg/s ; Q 是单位质量的热交换量, J/kg 。

深度为 Δz 时,不同井段的油管内压力为

$$\Delta P = 10^{-6} \left[\Delta z \left(\rho_{\text{混}} g + \frac{f Q_1 M^2}{9.21 \times 10^9 \rho_{\text{混}} d^5} \right) + \rho_{\text{混}} \Delta \left(\frac{v_{\text{混}}^2}{2} \right) \right] \quad (2)$$

式中: Q_1 为总产液率, m^3/d ; M 为一立方米液体对应的流体总质量, kg/m^3 。

环空压力对泄漏位置的定位起着至关重要的作用,气体在密封环空长度内的环空压力分布计算为

$$\frac{dP_c}{dz} = \rho_g g \quad (3)$$

式中: ρ_g 为环空气体密度, kg/m^3 ,可由下式计算得到

$$\rho_g = \frac{PM_g}{ZRT} \quad (4)$$

式中: M_g 是气体相对分子质量。

总的A环空压力必须考虑混合液体重力压力的叠加,计算公式为

$$P_c = P_{cl} + \rho_l g(z \cos\theta - z_1) \quad (5)$$

式中: P_{cl} 是液面处的气柱压力,MPa; ρ_l 是混合液体密度, kg/m^3 ; z_1 是液面深度, m 。

对油管和环空的温度分布进行分析,在长度为 dz 的井筒微单元中,油管内的流动处于一维稳态,且热交换仅在井筒和周围地层之间的径向方向上发生,油管内流体的温度梯度可以表示为

$$T_{fo} = T_{ho} + A(1 - e^{\Delta z/A}) \left(-\frac{g}{C_p} + \varphi + g_T \right) + e^{\Delta z/A} (T_{fi} - T_{hi}) \quad (6)$$

式中: T_h 为地层温度,单位 K ; $A = \frac{C_p G_t (k_{cem} + R_1 U_0 T)}{2\pi R_1 U_0 k_{cem}}$, R_1 为油管的外径,单位 m ; U_0 为总换热系数; G_t 为总质量流量,单位为 kg/s ; k_{cem} 为水泥的导热系数。

在一定深度,环空温度 T_c 可表示为^[12]

$$T_c = T_h + \frac{R_1 U_0 \ln(R_2/R_3) (T_f - T_h)}{k_{cem}} \quad (7)$$

式中: R_2 为水泥环外径, m; R_3 为套管外径, m。

2.1.2 泄漏点泄流模型

一般情况,泄漏点的等效直径与油管直径相比非常小^[13],因此,可以通过建立小孔泄流模型来计算油、气、水混合流体泄漏率 Q_L ,如下式(8)和(9)所示

$$Q_L = \begin{cases} C_o \frac{p_{\Pi} A_L}{\rho_g} \sqrt{\frac{2k_g M_g}{k_g - 1 Z_g R T_{\Pi}} \left[\left(\frac{p_{aL}}{p_{\Pi}} \right)^{\frac{2}{k_g}} - \left(\frac{p_{aL}}{p_{\Pi}} \right)^{\frac{k_g+1}{k_g}} \right]}, & CRE < \frac{p_{aL}}{p_{\Pi}} \\ C_o \frac{p_{\Pi} A_L}{\rho_g} \sqrt{\frac{M_g k_g}{Z_g R T_{\Pi}} \left(\frac{2}{k_g + 1} \right)^{\frac{k_g+1}{k_g-1}}}, & CRE \geq \frac{p_{aL}}{p_{\Pi}} \end{cases} \quad (8)$$

$$CRE = \left(\frac{2}{k_g + 1} \right) \frac{k_g}{k_g - 1} \quad (9)$$

式中, Q_L 是多相混合流体泄漏率,单位 m^3/s ; C_o 是流量系数,无量纲; p_{Π} 是泄漏点入口处的压力,单位 Pa; A_L 是泄漏点面积,单位 m^2 ; ρ_g 是气体密度,单位 kg/m^3 ; k_g 是气体绝热指数,无量纲; p_{aL} 是泄漏点出口处的压力,单位 Pa; T_{Π} 是泄漏点入口处的温度,单位 K; CRE 是临界压力比,无量纲。

泄漏点出口处压力 p_{aL} 由持续环空压力和环空流体柱压力组成,如下式所示

$$p_{aL} = \begin{cases} p_{an} + \rho_{ga} g h_L, & h_L \leq h_g \\ p_{an} + \rho_{ga} g h_L + \rho_L g (h_L - h_g), & h_L > h_g \end{cases} \quad (10)$$

式中: p_{an} 是持续环空压力,单位 Pa; ρ_{ga} 是环空气体密度,单位 kg/m^3 ; ρ_L 是环空混合液体密度,单位 kg/m^3 ; h_L 是泄漏点深度,单位 m; h_g 是液面深度,单位 m。

2.2 油气井多相流泄放规律

根据大部分油气井的井筒环空压力数据,在泄压过程中,压力泄放主要存在以下三种情况:

(1) 压力泄为 0 MPa,这种情况几乎很难遇到,如图 1 中蓝色曲线所示。

(2) 压力泄放到几 MPa,此时可视为平衡,当监测到该压力状态时,即可停止泄放,恢复压力,如图 1 中黑色曲线所示。

(3) 压力几乎无法泄放,此时需在上位软件上进行预警提醒,如图 1 中红色曲线所示。

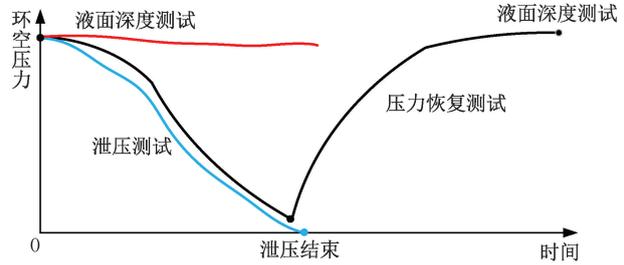


图 1 环空压力泄放和恢复过程

Fig. 1 Annulus pressure relief and recovery process

当油套环空带压值趋于稳定且油气井处于稳定生产状态时,应用油管和环空压力平衡原理即可计算泄漏点深度,通过对应的深度确定泄漏点位置。井筒温度和压力沿井深是非线性分布的,采用迭代计算方法,即沿垂直方向将井筒分为 n 个长度相同的 Δz 单元,当 Δz 取值大小适当,可以假设每个 Δz 单元内压力、温度、流量等参数是恒定的,第一个单元的压力和温度与海上平台井口测量的压力和温度相等,为初始输入,根据式(6)、式(7)和式(10)可以计算出每个单元内油管和环空底部的压力和温度,然后依次反复迭代计算每个单元内油管和环空底部的压力和温度,即可以计算出整个井筒压力和温度分布。

3 环空泄压模型仿真

模拟油气井油、气、水三相泄漏情况,通过 MATLAB 软件进行仿真实现。包括计算油管内和环空内的压力和温度分布,随时间模拟泄漏率、泄漏量和环空井口的压力变化,并绘制相关的图形。如图 2 所示,蓝线为油管内油、气、水三相流体的压力梯度,红线为环空中油、气、水三相流体的压力梯度,压力梯度随井深成线性变化。

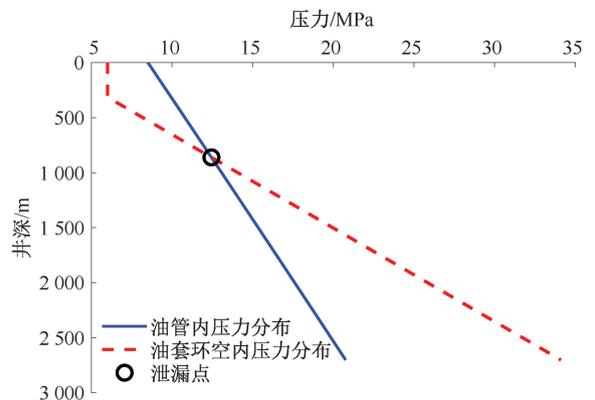


图 2 油管和环空内轴向压力分布

Fig. 2 Axial pressure distribution in tubing and annulus

从图中可以看出,压力梯度随井深成线性变化,根据压力平衡原理,在稳定情况下两者的交点即为泄漏点位置。

根据小孔泄漏模型,如式(8)和式(9),可以计算出油、气、水三相混合流体的泄漏率和泄漏量。同时,绘制出环空泄漏率随时间变化曲线、环空泄漏量随时间变化曲线和环空压力恢复曲线,如图3和图4所示。

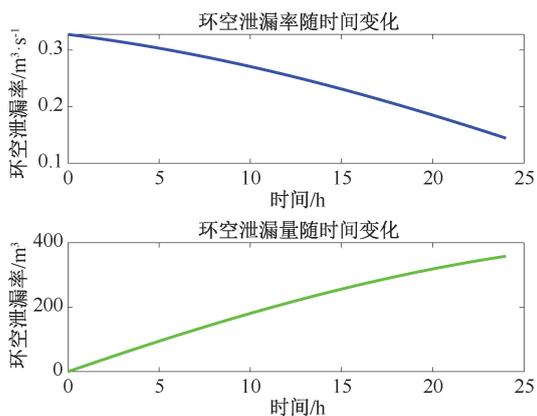


图3 环空泄漏率、泄漏量随时间变化图
Fig. 3 Annular leakage rate and leakage quantity change with time

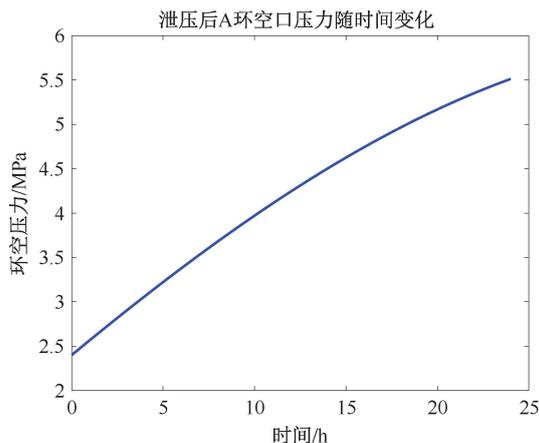


图4 环空压力恢复曲线
Fig. 4 Annular pressure recovery curve

从图中可以看出,环空泄露率随时间的增加逐渐减小,而泄漏量逐渐增多,是非线性的,泄压后的压力随时间变化也是非线性的。

4 模拟试验及结果分析

在理论模型建立、环空压力分布特性、传感器试制、电路设计的基础上,采用了自制的试验系统^[14-15],对环空带压泄压和压力恢复过程开展了室内模拟试验^[16]。

4.1 室内模拟试验

油气井多相流环空压力检测系统如图5所示,系统采用压力测量模块、温度测量模块和超声流量测量模块采集井口环空泄压管线中的实时压力、温度和流量等数据,并将采集到的4~20 mA模拟信号送至数据采集模块,数据采集卡通过无线传输方式与上位机进行数据传输,完成油气井环空带压情况的实时监测、数据分析与处理以及井异常情况分类等。

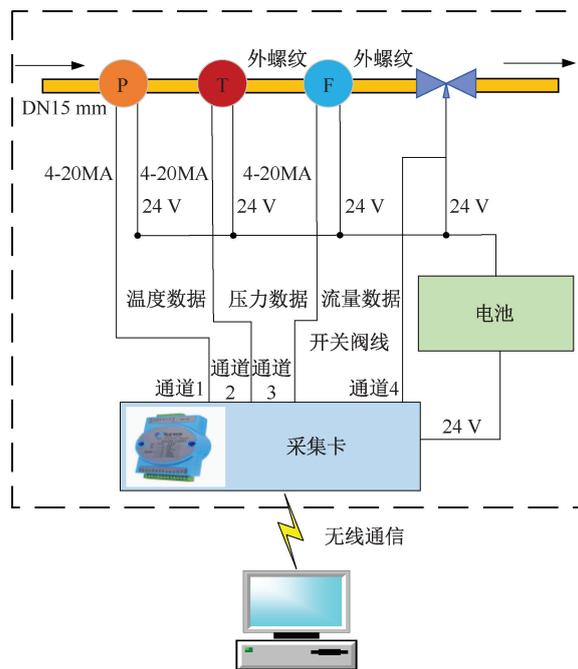


图5 多相流环空压力检测系统
Fig. 5 Detection system of annulus pressure for multiphase flow

设备段管道为DN15 mm,泵的两个档位分别为低流速与高流速^[17],采用超声波流量计,进行了6组不同流速、不同时段段的测量试验,根据大量试验数据,得到如图6所示的流量随时间变化的曲线。

6组测量试验的数据及误差分析如表1所示。

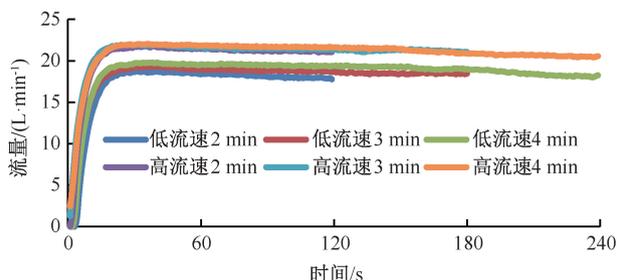


图6 不同流速不同时段段的流量随时间变化曲线
Fig. 6 Velocity curves of different flow rates and different periods with time

表1 试验数据及误差分析表
Table 1 Test data and error analysis

泵流速	时间/min	瞬时流量/(L·min ⁻¹)	累积流量/L	实际流量/(L·min ⁻¹)	平均误差/%	累计误差/(m ³ ·d ⁻¹)
低流速	2	17.96	35.25	17.625	1.88	0.482 4
	3	18.73	56.0	18.667	0.32	0.090 72
	4	18.62	74.85	18.713	0.50	0.133 92
高流速	2	21.31	43.95	21.975	3.07	0.957 6
	3	21.44	63.3	21.10	1.60	0.489 6
	4	21.34	83.8	20.95	1.84	0.561 6

由表1可知,在低流速条件下,测量2 min时计算得到的平均误差为1.88%,累计误差为0.482 4 m³/d。随着时间延长到3 min和4 min,瞬时流量逐渐增加,误差则显著下降至0.32%和0.497%。这一趋势表明,低流速条件下,初始阶段的误差较大,随着测量时间的增加和流速的稳定,误差逐渐减小。

在高流速条件下,测量2 min时的平均误差为3.07%,在3 min和4 min时,误差分别减小至1.6%和1.84%。高流速条件下的误差较低流速情况下更为显著,但随着时间的推移,误差仍有下降趋势。

4.2 结果分析

室内模拟试验数据显示,在低流速条件下(类似于多相流中较稠密油液的低流速情况),流体可能尚未达到完全稳定的流动状态,导致瞬时流量的测量值波动较大,这些扰动在随着时间的推移逐渐平息后,能够精确测量出流体的瞬时流量,且误差极小。

在高流速条件下,由于刚开始流速较高和流动的不稳定性增加,超声波信号的传播速度可能受到湍流效应或其他流体动力学现象的影响,导致瞬时流量的波动幅度较大,因此导致瞬时流量误差偏大,但仍保持在非常低的范围内。

5 结论

(1)针对油气井多相流体环空压力和泄漏点预测的难点,研究了一种考虑多相流体的环空压力预测方法,可定量计算泄漏点位置、泄漏率和泄漏量。

(2)多次泄放测试试验结果表明,多相流体条件下的油气井环空带压泄放规律与室内测试一致,且累计误差均小于1 m³/d,方法可靠准确。

(3)该方法可用于气油比较高或者泄漏点处压力在泡点压力以下的油气井A环空压力监测,及时泄压以保障油气井安全生产。

致谢:感谢中海油安全技术服务有限公司湛江分公司同意本文公开发表。

参考文献

- [1] 朱达江. 气井环空带压机理研究[D]. 成都:西南石油大学,2014:1-30.
ZHU Dajiang. Research on mechanism of sustained casing pressure in gas wells[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014:1-30.
- [2] 周宇. 气井环空带压机理及特征研究[D]. 武汉:长江大学,2020:1-37.
ZHOU Yu. Research on mechanism and characteristics of sustained casing pressure in gas well[D]. Wuhan: Yangtze University, 2020:1-37.
- [3] 张喜明,樊建春,刘迪,等. 海上气井环空带压地面检测诊断技术[J]. 石油科学通报,2018,3(1):83-96.
ZHANG Ximing, FAN Jianchun, LIU Di, et al. Diagnostic testing of sustained casing pressure for an offshore gas well[J]. Petroleum Science Bulletin, 2018,3(1):83-96.
- [4] 冯定,周宇,张红,等. 套管环空压力恢复与泄压预测模型研究[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(8):101-105.
FENG Ding, ZHOU Yu, ZHANG Hong, et al. Research on prediction models of casing annular pressure recovery and pressure relief[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019,15(8):101-105.
- [5] 马永乾. 深水井筒气液两相流传热规律研究[D]. 青岛:中国石油大学,2010:1-45.
MA Yongqian. Study on law of gas-liquid two-phase flow heat transfer in deep-water wellbore[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010:1-45.
- [6] 郭宗禄,幸雪松,范白涛. 气井油套环空井下泄漏量计算方法研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2022,24(1):40-45.
GUO Zonglu, XING Xuesong, FAN Baitao. Research on calculation method of downhole leakage in oil jacket annulus of gas well[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,24(1):40-45.
- [7] 张波,胥志雄,高文祥,等. 深层气井生产管柱完整性检测技术总结及评价[J]. 天然气与石油,2020,38(5):49-57.
ZHANG Bo, XU Zhixiong, GAO Wenxiang, et al. Summary and evaluation of integrity detection technology for production

- string in deep gas well [J]. *Oil & Gas Exploration and Development*, 2020, 38(5):49-57.
- [8] 朱达江,李玉飞,卞维娣,等. 超声波成像法在多层环空井下漏点检测技术中的应用[J]. *测井技术*, 2021, 45(2):201-206.
ZHU Dajiang, LI Yufei, BIAN Weidi, et al. Application of ultrasonic imaging technology in multi-annuli downhole leakage detection [J]. *Well Logging Technology*, 2021, 45(2):201-206.
- [9] 舒刚,陈浩,马辉运,等. 油套环空带压气井漏点位置放压诊断研究[J]. *钻采工艺*, 2021, 44(4):43-46.
SHU Gang, CHEN Hao, MA Huiyun, et al. Study on the pressure relief diagnosis of leakage location in gas well with sustained production casing pressure [J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(4):43-46.
- [10] 赵孝保. 工程流体力学(第3版)[M]. 南京:东南大学出版社, 2012:20-151.
- [11] 鄢田华,王晓墨,许国良,等. 工程传热学[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2011:1-266.
- [12] WU Shengnan, ZHANG Laibin, FAN Jianchun, et al. A leakage diagnosis testing model for gas wells with sustained casing pressure from offshore platform [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 55:276-287.
- [13] ZHANG Bo, XU Zhixiong, LU Nu, et al. Characteristics of sustained annular pressure and fluid distribution in high pressure and high temperature gas wells considering multiple leakage of tubing string [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196:1-17.
- [14] 杨周,樊建春,张喜明,等. 环空带压气井地面监测诊断系统研究[J]. *石油机械*, 2016, 44(1):75-78.
YANG Zhou, FAN Jianchun, ZHANG Ximing, et al. The ground monitoring and diagnosis system for the pressurized annulus gas well [J]. *China Petroleum Machinery*, 2016, 44(1):75-78.
- [15] 杨顺辉,何汉平,张智,等. 多功能环空带压地面诊断方法及装置研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(5):131-139.
YANG Shunhui, HE Hanping, ZHANG Zhi, et al. Multi-functional sustained annulus pressure ground diagnosis method and device [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(5):131-139.
- [16] 张波. 深水油气井套管环空压力预测及其调控机制 [D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2018:1-70.
ZHANG Bo. Prediction and mitigation mechanism of casing annular pressure in deepwater wells [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018:1-70.
- [17] 朱红钧,唐有波,李珍明,等. 气井 A 环空压力恢复与泄压实验[J]. *石油学报*, 2016, 37(9):1171-1178.
ZHU Hongjun, TANG Youbo, LI Zhenming, et al. Experiment on pressure recovery and relief in the annulus space of gas well [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(9):1171-1178.

编辑 方志慧

第一作者简介:万浩东,男,1994年出生,工程师,硕士研究生,2019年毕业于西南石油大学油气井工程,现主要从事海洋石油修井工作。电话:17761274265, Email:wanhhd@cnooc.com.cn,通信地址:广东省湛江市坡头区南油三区湛江安全环保公司大院307室,邮政编码:524057。