

# 碳封存CO<sub>2</sub>注入井持续环空压力预测研究

饶瀚博, 张伟豪, 高 昊, 谢斐霖

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月6日; 录用日期: 2026年6月12日; 发布日期: 2026年7月16日

## 摘 要

为了准确预测碳封存CO<sub>2</sub>注入井的持续环空压力, 针对井下油管柱漏点引发的CO<sub>2</sub>泄漏问题, 在考虑压力-体积-温度状态方程和环空保护液压缩性的基础上, 进一步引入CO<sub>2</sub>相态变化产生的体积膨胀效应, 建立适用于CO<sub>2</sub>注入井的持续环空压力预测模型, 研究持续环空压力、泄漏速率和环空CO<sub>2</sub>相态的变化规律。研究表明, CO<sub>2</sub>注入实例井的持续环空压力呈快速上升、增速放缓并最终趋于平稳的变化规律, 泄漏速率小幅升高后快速衰减, 最终缓慢趋于平衡。环空温压变化会显著影响沿井深CO<sub>2</sub>的相态分布, 使其由气态、超临界态逐步转向气-液-超临界态, 最终转变为液态、超临界态。漏点当量直径、漏点深度及初始环空压力越大, 持续环空压力达到稳定值的时间越短, 漏点深度显著影响持续环空压力稳定值。研究结果对保障碳封存CO<sub>2</sub>注入井的管柱、井筒屏障安全性及其长周期安全运行具有重要意义。

## 关键词

二氧化碳注入井, 漏点泄漏, 持续环空压力, 变化规律

# Study on Prediction of Sustained Annular Pressure in CO<sub>2</sub> Injection Wells during the Carbon Storage Process

Hanbo Rao, Weihao Zhang, Hao Gao, Feilin Xie

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 6, 2026; accepted: June 12, 2026; published: July 16, 2026

## Abstract

To accurately predict the sustained annular pressure of CO<sub>2</sub> injection wells during the carbon storage process, aiming at the CO<sub>2</sub> leakage caused by leakage points in tubing strings, this paper takes

into account the pressure-volume-temperature equation of state and the compressibility of annular protective fluid. Fully considering the significant volume expansion difference induced by CO<sub>2</sub> phase change, a prediction model for sustained annular pressure applicable to CO<sub>2</sub> injection wells is established, and the variation laws of sustained annular pressure, leakage rate, and annular CO<sub>2</sub> phase state are investigated. The sustained annular pressure of the field CO<sub>2</sub> injection well rises rapidly at first, then increases slowly, and eventually tends to be stable. The leakage rate rises slightly, followed by a rapid attenuation, and finally gradually reaches equilibrium. Changes in annular temperature and pressure significantly affect the phase distribution of CO<sub>2</sub> along the depth, making CO<sub>2</sub> evolve gradually from a gaseous state and supercritical state to a gas-liquid-supercritical state, and finally transform into a liquid state and supercritical state. Larger equivalent diameter of leakage point, deeper leakage depth, and higher initial annular pressure shorten the time for sustained annular pressure to reach a stable value, and the leakage depth exerts a remarkable influence on the stable value of sustained annular pressure. The research results are of great significance for ensuring the integrity of tubing strings and wellbore barrier safety, as well as the long-term safe operation of CO<sub>2</sub> injection wells during the carbon storage process.

## Keywords

CO<sub>2</sub> Injection Well, Leakage from Tubing Leak Point, Sustained Annular Pressure, Variation Law

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

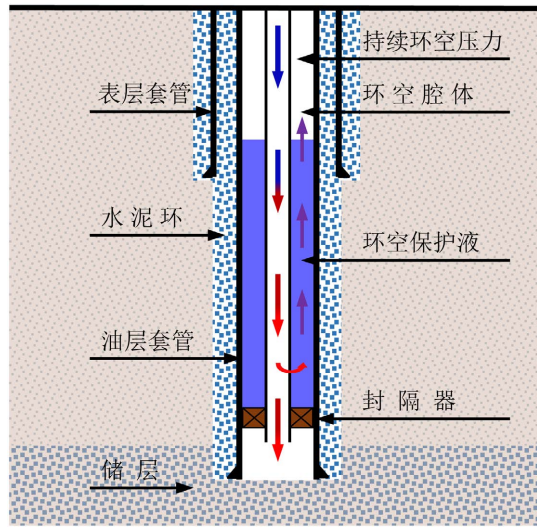
随着“双碳”战略与可持续发展目标的不断推进,我国实现碳达峰、碳中和将更加深度依赖碳封存等负碳技术[1]。向油井中注二氧化碳不仅可以提高油气的采收率,还能实现二氧化碳的地下封存,但二氧化碳具有强腐蚀、易穿透等特点,极易微泄漏至油套环空而导致环空异常带压,严重威胁 CO<sub>2</sub> 注入井管柱及井筒屏障的安全[2]-[4]。

Xu 等[5]结合渗流理论与压力-体积-温度状态方程建立气窜下环空带压预测模型,研究了持续环空压力的变化情况。Zhang 等[6]建立了基于能量守恒定律、状态方程和多环空耦合特性,研究了油管泄漏引起的持续环空压力。丁亮亮等[7]建立了考虑环空液体热力学特征的持续环空带压预测模型。王捷力等[8]针对超深气井环空带压问题,系统总结了国内外专家学者相关研究成果和进展。张阳杰等[9]建立了一种基于时序数据的环空带压预测混合模型,并利用包含特征捕捉的数据集,对实例井的环空带压值预测进行了深入研究。

国内外相关学者对持续环空压力的研究对象多为常规油气井,但由于碳封存 CO<sub>2</sub> 注入井的特殊性,未充分考虑泄漏 CO<sub>2</sub> 在环空中相变的影响,相变前后产生的巨大体积膨胀差对持续环空压力的影响不可忽视。因此,研究碳封存 CO<sub>2</sub> 注入井持续环空压力的变化规律,对保障碳封存 CO<sub>2</sub> 注入井的长周期运行具有重要意义。

## 2. 持续环空压力模型

在碳封存 CO<sub>2</sub> 注入井中,随着 CO<sub>2</sub> 的注入,其腐蚀特性易引起井下油管柱发生微泄漏,在内外压力差下,CO<sub>2</sub> 易穿透至油套环空中,而造成持续环空压力。CO<sub>2</sub> 注入井持续环空压力示意图如图 1 所示。



**Figure 1.** Schematic diagram of sustained annular pressure in CO<sub>2</sub> injection well  
**图 1.** CO<sub>2</sub>注入井持续环空压力示意图

## 2.1. 环空泄漏速率计算

根据小孔模型, 可根据泄漏点处压力差计算出泄漏速率。泄漏点处泄漏速率的计算式为[10]:

$$q_c = \begin{cases} \frac{4080 p_{ti} d_{ch}^2}{\sqrt{\gamma T_l Z}} \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} - \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]}, & \frac{p_{to}}{p_{ti}} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \\ \frac{4080 p_{ti} d_{ch}^2}{\sqrt{\gamma T_l Z}} \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_{to}}{p_{ti}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{to}}{p_{ti}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & \frac{p_{to}}{p_{ti}} \geq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $p_{to}$  为泄漏点处油套环空内的压力, MPa;  $p_{ti}$  为泄漏点处油管内的压力, MPa;  $q_c$  为标准状况下气体泄漏速率, m<sup>3</sup>/d;  $d_{ch}$  为泄漏小孔的当量直径, mm;  $T_l$  为泄漏点处的温度, K;  $\gamma$  为相对密度, 无量纲;  $Z$  为偏差因子, 无量纲;  $k$  为绝热指数, 无量纲。

随着持续环空压力的增加, CO<sub>2</sub> 相变将引起其密度增大, 此时环空压力可通过下式计算:

$$p_l = p_A + 10^{-6} \rho_l g (h_l - h_g) + \rho_{CO_2} g h_g \quad (2)$$

式中:  $p_l$  为泄漏处的环空压力, MPa;  $p_A$  为井口处的持续环空压力, MPa;  $\rho_l$  为环空保护液密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_l$  为 CO<sub>2</sub> 流体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $h_l$  为泄漏处的位置, m;  $h_g$  为油套环空内气柱的高度, m。

根据第  $i$  个时间段内增加的二氧化碳体积, 可得第  $n$  时刻的二氧化碳总物质量为:

$$n_g^n = \sum_{i=1}^n \Delta n_g^i = \sum_{i=1}^n \frac{p_{sc} q_c^i \Delta t}{Z^i R T_{sc}} \quad (3)$$

式中:  $n_g$  为二氧化碳总物质的量, mol;  $\Delta n_g$  为增加的二氧化碳物质的量, mol;  $\Delta t$  为时间步长, s;  $p_{sc}$  为标况条件下的压力, MPa;  $T_{sc}$  为标况条件下的温度, K;  $R$  为通用气体常数, J/(mol·K)。

## 2.2. 二氧化碳物性参数计算

根据温度和压力的不同, CO<sub>2</sub> 能以气、液、固和超临界的四种状态存在。随着持续环空压力的变化,

环空内 CO<sub>2</sub> 存在相态的转变, 相变前后会产生巨大的体积膨胀差, 预测 CO<sub>2</sub> 注入井持续环空压力需准确计算二氧化碳物性参数。PR-TWU 状态方程能够准确预测 CO<sub>2</sub> 流体的物性参数, 其表达式为[11]:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \tag{4}$$

式中:  $p$  为 CO<sub>2</sub> 流体的压力, Pa;  $T$  为 CO<sub>2</sub> 流体的温度, °C;  $V$  为 CO<sub>2</sub> 流体的摩尔体积, m<sup>3</sup>;  $\alpha(T)$ 、 $a$  和  $b$  为计算参数。

PR-TWU 状态方程的压缩因子  $Z$  可以表达为三次方程, 为:

$$Z^3 + (B-1)Z^2 + (A-3B^2-2B)Z + (B^3+B^2-AB) = 0 \tag{5}$$

式中:  $A$  为吸引力参数,  $A = ap/(R^2T^2)$ , 无量纲;  $B$  为协体积参数,  $B = bp/(RT)$ , 无量纲。

应用式(5)中的 PR-TWU 方程进行不同温度、压力下 CO<sub>2</sub> 流体的相态判别。当式(5)求解为一实根两虚根, 表示 CO<sub>2</sub> 流体为单一气相或单一液相; 为三个不同实根, 说明 CO<sub>2</sub> 流体为气液两相共存; 若为三个相等实根, 则表示 CO<sub>2</sub> 流体为超临界状态。

2.3. 持续环空压力计算

第  $n$  时刻的压力 - 体积 - 温度状态方程为:

$$p_A^n (V_g^{n-1} + \Delta V_g^n) = n_g^n Z^n RT_{wh}^n \tag{6}$$

式中:  $V_g$  为油套环空中二氧化碳的体积, m<sup>3</sup>;  $T_{wh}$  为井口温度, K。

环空保护液为可压缩的粘性流体, 环空压力为  $p_A$  时环空保护液的压缩体积为[12]:

$$\Delta V_l^n = C_l V_l (p_A^n - p_A^{n-1}) \tag{7}$$

式中:  $\Delta V_l$  为环空保护液的压缩体积, m<sup>3</sup>;  $C_l$  为环空保护液压缩系数, Pa<sup>-1</sup>;  $V_l$  为环空保护液的体积, m<sup>3</sup>。

气顶处环空体积增量与环空保护液段液体压缩量相同, 由此可推得持续环空压力计算式为:

$$p_A^n = \frac{1}{2} \left[ p_A^{n-1} - \frac{V_g^{n-1}}{C_l V_l^{n-1}} + \sqrt{\left( p_A^{n-1} - \frac{V_g^{n-1}}{C_l V_l^{n-1}} \right)^2 + \frac{4T_{wh}^n \sum_{i=1}^n p_{sc} q_c^i \cdot \Delta t}{T_{sc} C_l V_l^{n-1}}} \right] \tag{8}$$

3. 结果分析

3.1. 基础数据

Table 1. Basic data of CO<sub>2</sub> injection well A  
表 1. 二氧化碳注入 A 井的基础数据

| 名称     | 数值     | 单位   | 名称        | 数值       |                   |
|--------|--------|------|-----------|----------|-------------------|
| 井深     | 2165.0 | m    | 油管漏点位置    | 1000.0   | m                 |
| 油层套管外径 | 139.7  | mm   | 漏点当量直径    | 0.60     | mm                |
| 油层套管下深 | 2165.0 | m    | 漏点内壁压力    | 14.0     | MPa               |
| 油管外径   | 73.02  | mm   | 初始气柱高度    | 200.0    | m                 |
| 油管下深   | 2143.0 | m    | 初始环空持续压力  | 0.10     | MPa               |
| 封隔器下深  | 1980.0 | m    | 环空保护液密度   | 1100     | kg/m <sup>3</sup> |
| 地温梯度   | 0.026  | °C/m | 环空保护液压缩系数 | 0.000475 | MPa <sup>-1</sup> |

以 D 油田的二氧化碳注入 A 井为实例井进行持续环空压力结果分析, A 井井深为 2165.0 m, 其井身结构及持续环空压力计算的基础数据如表 1 所示。

### 3.2. 持续环空压力预测结果

二氧化碳注入井持续环空压力及泄漏速率预测结果如图 2 所示。当时间为 18.5 h 时, 持续环空压力达到 15.9 MPa, 泄漏速率为 115.9 m<sup>3</sup>/d; 最后持续环空压力随着时间稳定在 16.1 MPa, 泄漏速率为 16.9 m<sup>3</sup>/d。随着时间的增大, 持续环空压力经历了快速上升、逐渐减缓和趋于平稳的变化特征, 而泄漏速率经历了小幅度增加、迅速降低和最后缓慢趋于平衡的特征。

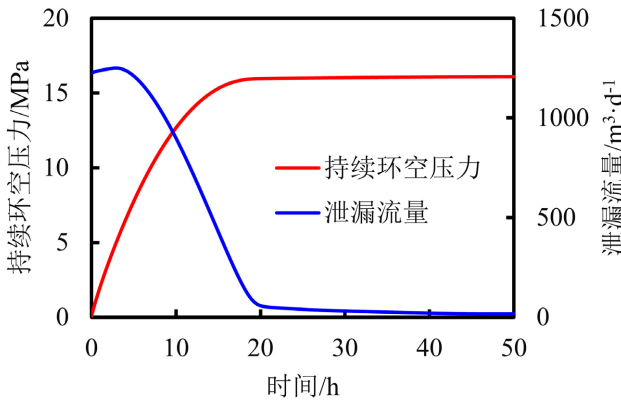


Figure 2. Prediction results of sustained annular pressure and leakage rate  
图 2. 持续环空压力及泄漏速率预测结果

环空 CO<sub>2</sub> 相态分布如图 3 所示。可以看出, 初始时间较小时, 环空 CO<sub>2</sub> 相态为气态和超临界态。随着持续环空压力的增加和环空温度的变化, 环空 CO<sub>2</sub> 相态为气态、液态和超临界态, 这是由于环空不同井深处的温度和压力处于 CO<sub>2</sub> 三相临界点(31.04°C, 7.38 MPa)周围。随着持续环空压力和环空温度的持续增大, 超过临界压力 7.38 MPa 后, 环空 CO<sub>2</sub> 相态为液态和超临界态。

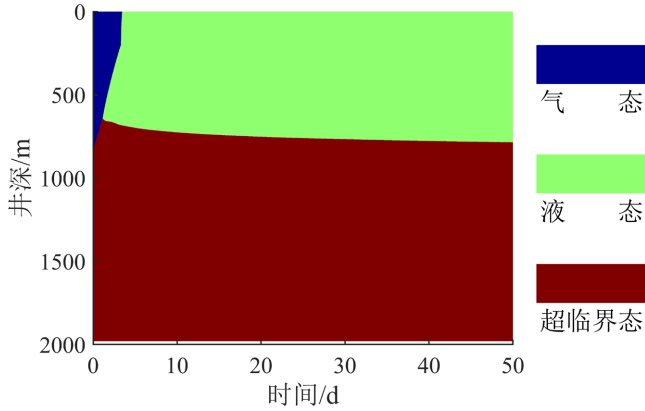


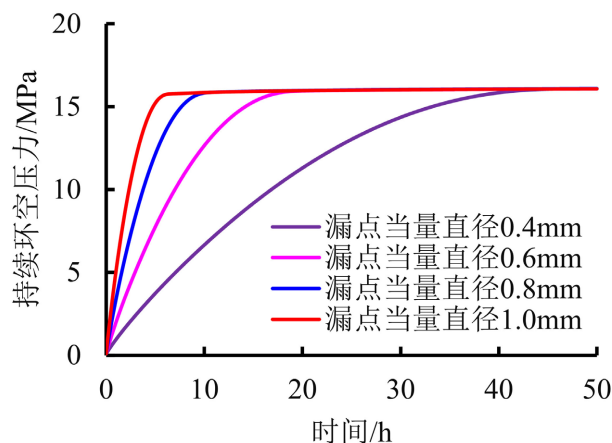
Figure 3. Phase distribution of CO<sub>2</sub> in the annulus  
图 3. 环空 CO<sub>2</sub> 相态分布

### 3.3. 不同影响因素分析

计算不同敏感性因素对 CO<sub>2</sub> 封存注入井环空带压的影响:

### 1) 不同漏点当量直径的影响

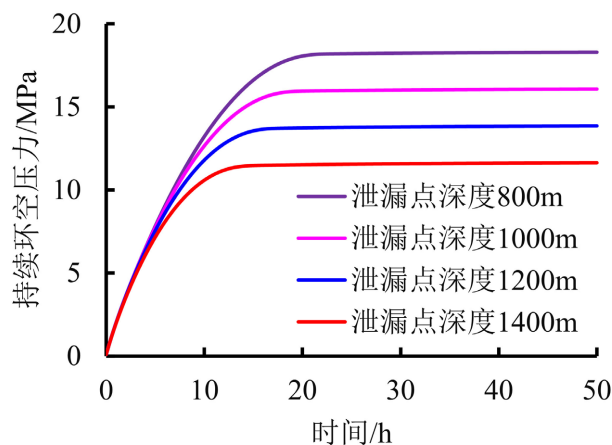
不同漏点当量直径对持续环空压力的影响如图 4 所示。当漏点当量直径为 0.4 mm、时间为 18.5 h 时，持续环空压力为 10.7 MPa。随漏点当量直径的增加，持续环空压力快速上升的速率越快，持续环空压力达到稳定的时间越短，漏点当量直径不影响持续环空压力稳定值，这是由漏点处内外压差决定的。



**Figure 4.** Effect of different equivalent diameters of leakage points on sustained annular pressure  
**图 4.** 不同漏点当量直径对持续环空压力的影响

### 2) 不同泄漏点深度的影响

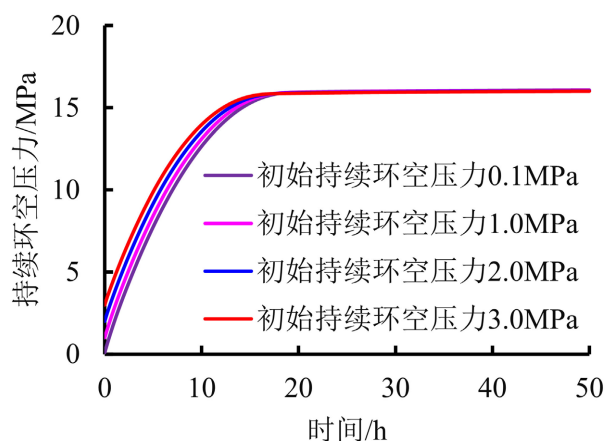
不同泄漏点深度对持续环空压力的影响如图 5 所示。当泄漏点深度为 800 m、时间为 18.5 h 时，持续环空压力为 17.8 MPa。随泄漏点深度的增加，持续环空压力达到稳定的时间越快；泄漏点深度越大，泄漏点处压差越小引起的持续环空压力稳定压力值也越大。



**Figure 5.** Effect of different leak point depths on sustained annular pressure  
**图 5.** 不同泄漏点深度对持续环空压力的影响

### 3) 不同初始持续环空压力的影响

不同初始持续环空压力对持续环空压力的影响如图 6 所示。当初始持续环空压力为 2.0 MPa、时间为 18.5 h 时，持续环空压力为 15.9 MPa。随初始持续环空压力的增加，持续环空压力稳定时间越快，对持续环空压力稳定值的影响很小。



**Figure 6.** Effect of different initial sustained annular pressures on sustained annular pressure

**图 6.** 不同初始持续环空压力对持续环空压力的影响

#### 4. 结论

1) 实例 CO<sub>2</sub> 注入井的持续环空压力呈快速上升、逐渐减缓和趋于平稳的变化规律, 泄漏速率呈小幅度增加、迅速降低和最后缓慢趋于平衡的特征。

2) 随着持续环空压力的增加和环空温度的变化, 环空沿井深分布的 CO<sub>2</sub> 将由气态 - 超临界态, 转换为气态 - 液态 - 超临界态, 最后转换为液态 - 超临界态。这主要归因于环空不同井深处的温度和压力处于 CO<sub>2</sub> 三相临界点(31.04°C, 7.38 MPa)周围。

3) 随着漏点当量直径、泄漏点深度和初始持续环空压力的增加, 持续环空压力达到稳定的时间越快。其中, 泄漏点深度显著影响持续环空压力稳定值, 而漏点当量直径和初始持续环空压力对持续环空压力稳定值的影响很小。

#### 基金项目

重庆科技大学大学生科技创新训练计划项目(项目编号: 2025006)。

#### 参考文献

- [1] 杨勇. 中国碳捕集、驱油与封存技术进展及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 325-338.
- [2] 时维才. CO<sub>2</sub> 驱井口压力释放与管柱失效关联性研究[J]. 复杂油气藏, 2026, 19(1): 24-31.
- [3] 郑昕, 马建杰, 姚峰, 等. 基于热力耦合的 CO<sub>2</sub> 注入井管柱失效研究[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(2): 97-100+113.
- [4] 时维才, 姚峰, 金勇, 等. 二氧化碳驱注采井管柱失效原因分析及防护对策[J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(6): 74-78+83.
- [5] Xu, R. and Wojtanowicz, A.K. (2001) Diagnosis of Sustained Casing Pressure from Bleed-Off/Buildup Testing Patterns. *SPE Production and Operations Symposium*, Oklahoma City, 24-27 March 2001, SPE-67194-MS. <https://doi.org/10.2118/67194-ms>
- [6] Zhang, B., Lu, N., Guo, Y., et al. (2022) Modeling and Analysis of Sustained Annular Pressure and Gas Accumulation Caused by Tubing Integrity Failure in the Production Process of Deep Natural Gas Wells. *Journal of Energy Resources Technology*, **144**, Article 063005.
- [7] 丁亮亮, 代先涛, 李帅, 等. 考虑环空液体热力学特征的持续环空带压预测模型研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8642-8649.
- [8] 王捷力, 董雪林, 高德利. 超深气井环空带压分析与控制研究[J]. 钻采工艺, 2024, 47(4): 65-73+6.
- [9] 张阳杰, 张智, 王杨, 等. 基于时序数据的环空带压预测混合模型[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(5): 1870-1877.

- [10] 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.
- [11] 李凯旋, 刘斌, 尚文博, 等. 管道输送含杂质 CO<sub>2</sub> 的影响因素分析[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2022, 47(3): 94-100.
- [12] 练章华, 李帅, 丁亮亮, 等. 高压气井油套环空带压模拟及对井筒完整性影响研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(2): 749-755.