

深层气井油管柱特殊螺纹泄漏诱导环空带压机理与规律研究

张 策, 高清源, 鲁佳伟

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年8月13日; 录用日期: 2026年9月11日; 发布日期: 2026年9月20日

摘 要

针对深层气井油管特殊螺纹微观泄漏导致油套环空持续带压问题, 基于金属密封面微观接触泄漏理论、气泡受力分析和真实气体状态方程, 建立特殊螺纹泄漏 - 气泡运移 - 井口气体聚集耦合计算模型。模型以螺纹泄漏速率为气泡源项, 按时间步追踪气泡速度、位移和半径, 并根据气泡到达井口后的气体累积量递推环空压力。在明确低含气率、离散球形小气泡及忽略聚并、破碎与溶解等假设的基础上, 以某深层气井为例分析泄漏点井深、油管内压、密封面粗糙度和密封面平均直径的影响, 并构建参数耦合的定性敏感性矩阵。结果表明: 气泡在初始短时内快速加速, 随后趋于稳定滑脱速度; 随着上升过程中外部压力降低, 气泡持续膨胀并在接近液面时加快; 环空带压随气体聚集逐渐升高, 同时泄漏速率受环空反压作用持续降低。油管内压与泄漏点井深、密封面粗糙度与密封长度之间存在明显的耦合制约关系。

关键词

深层气井, 特殊螺纹, 环空带压, 泄漏速率, 气泡运移, 参数耦合

Mechanism and Characteristics of Sustained Casing Pressure Induced by Premium Connection Leakage in Tubing Strings of Deep Gas Wells

Ce Zhang, Qingyuan Gao, Jiawei Lu

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

Received: August 13, 2026; accepted: September 11, 2026; published: September 20, 2026

文章引用: 张策, 高清源, 鲁佳伟. 深层气井油管柱特殊螺纹泄漏诱导环空带压机理与规律研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1365-1373. DOI: 10.12677/me.2026.145135

Abstract

Sustained casing pressure (SCP) in the tubing-casing annulus induced by microscopic leakage from premium tubing connections in deep gas wells is investigated. A coupled computational model integrating metal-to-metal sealing microcontact leakage theory, bubble force balance, and a real-gas equation of state is developed to describe premium-connection leakage, bubble migration, and well-head gas accumulation. The connection leakage rate is used as the bubble source term. Bubble velocity, displacement, and radius are tracked at each time step, and annular pressure is updated from the gas accumulated at the wellhead. The applicability of the model is defined by the assumptions of low gas holdup, discrete spherical small bubbles, and negligible coalescence, breakup, and dissolution. A deep gas well is analyzed to investigate the effects of leakage depth, tubing pressure, sealing-surface roughness, and mean sealing diameter, and a qualitative sensitivity matrix is established for parameter coupling. The results show that bubbles rapidly accelerate over a short initial period and then approach a stable slip velocity. Bubble expansion accelerates near the liquid level as the ambient pressure decreases. SCP increases with gas accumulation, whereas the leakage rate continuously decreases because of annular backpressure. Tubing pressure and leakage depth, as well as sealing-surface roughness and sealing length, exhibit clear coupled constraints on the leakage and pressure-buildup processes.

Keywords

Deep Gas Well, Premium Connection, Sustained Casing Pressure, Leakage Rate, Bubble Migration, Parameter Coupling

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

深层、高温高压气井投产后，油套环空持续带压是井筒完整性异常的重要表现。持续带压不仅增加井口装置和套管承压风险，还可能伴随高压气体持续窜入环空，对井控和长期生产安全造成影响[1]-[3]。油管特殊螺纹是完井管柱的重要密封环节，其金属对金属密封面受加工粗糙度、上扣状态和井下内外压差共同影响，微观泄漏一旦形成，气体可进入环空保护液并逐步向井口运移。

现有环空带压研究主要针对热膨胀、水泥环渗流以及油套管针孔或宏观缺陷泄漏[3]-[7]。其中，宏观小孔模型通常直接给定泄漏通道，对特殊螺纹金属密封面的微观接触特征考虑不足；同时，部分模型侧重井口压力累积，对泄漏气体在环空保护液中的气泡生成、膨胀和滑脱运移描述较为简化。已有气泡运移研究表明，气泡受浮力、重力、流动阻力及附加质量等共同作用，其速度和尺度随局部压力、温度及液体物性发生动态变化[8] [9]。

因此，本文沿用特殊螺纹微观接触泄漏模型，将泄漏速率与气泡动态运移、井口气体聚集过程耦合，形成螺纹微泄漏 - 气泡上升 - 压力积聚的递推计算方法。在明确气泡形态、气含率及相间作用等基本假设和适用边界的基础上，选取影响较明显的螺纹参数与完井参数开展规律分析，并构建参数耦合敏感性矩阵，重点揭示泄漏速率与环空带压的动态耦合机制。

2. 模型建立

2.1. 物理过程

特殊螺纹金属密封面发生微观泄漏后，油管内高压气体经微通道进入油套环空，并在环空保护液中形成离散气泡。气泡在浮力作用下向上运移，随井深减小和外部压力降低逐渐膨胀，最终进入井口环空气室。气体持续聚集使环空压力升高，增加的环空反压又减小特殊螺纹内外压差，使后续泄漏速率衰减，由此构成“泄漏源项 - 气泡运移 - 井口聚集 - 环空反压”的闭环反馈过程。

2.2. 基本假设及适用范围

为保留泄漏速率与环空带压的主导耦合关系并控制计算规模，模型采用表 1 所示假设。已有气泡运移研究表明，在低气含率泡状流且气泡尺寸明显小于环空水力直径时，可将各气泡视为相对独立的离散相[8][9]。当 $Eo = \Delta\rho g d_b^2/\sigma$ 和 $We = \rho_{lu} u_{rel}^2 d_b/\sigma$ 均小于约 1 时，表面张力占主导，球形近似通常具有合理性[10]。

Table 1. Major model assumptions, validity conditions, and out-of-range biases

表 1. 模型主要假设、合理条件及超范围偏差

关键假设	合理条件	超出范围时的主要偏差
泡状流与低气含率	泄漏量小，气泡间距较大，气泡尺寸小于环空水力直径	转变为泡群、段塞流或翻腾流后，相间作用增强，单泡模型可低估流型转换引起的压力波动
气泡近似球形	Eo 和 We 较小，表面张力足以抑制形变	大气泡发生椭球形或帽形变形后，投影面积与阻力系数改变，球形假设通常使上升时间偏短
忽略聚并和破碎	气含率低、湍动弱，气泡碰撞概率较小	忽略聚并可等等效气泡尺寸偏小并延迟预测到达时间；忽略破碎则可能使到达时间偏短
忽略气体在保护液中的溶解	气体溶解度低或运移时间较短	高压、长距离运移或高溶解性气体条件下，会高估到达井口的气体量及环空带压
保护液静止且为牛顿流体	无明显循环、密度分层或强温度对流	井筒对流或非牛顿流变会改变液相阻力与相对速度，使气泡运移时间产生系统偏差
时间步内泄漏速率不变	环空压力的特征变化时间远大于时间步长	压力快速上升时较大步长可高估该步泄漏量；应通过缩小步长检验计算收敛性

2.3. 特殊螺纹泄漏模型

采用轴对称正弦微凸体表征特殊螺纹金属密封面的粗糙接触状态，并结合黏性流体层流理论计算微通道泄漏速率[11]。当螺纹结构参数、气体物性和泄漏点条件确定后，泄漏速率可写成井口环空压力的函数：

$$Q_v = G(P_a) \tag{1}$$

式中： Q_v 为特殊螺纹泄漏速率， m^3/s ； P_a 为井口环空带压，MPa。随着 P_a 升高，泄漏点外部压力增加，螺纹泄漏驱动压差随之减小。

2.4. 泄漏气泡运移模型

设气泡生成时间间隔为 Δt ，第 i 组气泡对应的环空压力为 $P_{a(i-1)}$ 。在 Δt 内泄漏速率近似不变，则单

个气泡初始体积及半径为：

$$V_{i,1} = G \left[P_{a(i-1)} \right] \Delta t, \quad r_{i,1}^0 = \left(\frac{3V_{i,1}}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (2)$$

气泡上升过程中主要受到浮力、重力、黏滞阻力和附加质量力。将各力合并，可写为：

$$F_b - F_g - F_f - F_m = m_{\text{eff}} a \quad (3)$$

根据第 k 个时间步的受力状态计算加速度，并递推更新速度和位移：

$$v^{k+1} = v^k + a^k \Delta t, \quad l^{k+1} = v^k \Delta t + \frac{1}{2} a^k (\Delta t)^2 \quad (4)$$

气泡运移过程中气体质量保持不变。考虑真实气体状态方程及局部温压变化，第 k 时间步气泡半径为：

$$r^k = r^0 \left(\frac{P_0 Z^k T^k}{P^k Z_0 T_0} \right)^{1/3} \quad (5)$$

其中，气体偏差因子 Z 采用 Peng-Robinson 状态方程计算。当累计位移满足下式时，认为气泡到达环空保护液液面：

$$\sum_{k=1}^{k_j} l^k \geq H_1 - H_2 \quad (6)$$

2.5. 井口气体聚集与环空带压

气泡到达液面后进入井口环空气室。根据气室体积、气体物质的量守恒和真实气体状态方程，第 i 组气泡到达井口后的环空压力可表示为：

$$P_{a,i} = \frac{Z_{a,i} R T_m}{V_a} \left(n_0 + \sum_{j=1}^i n_j \right), \quad V_a = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) H_2 \quad (7)$$

将更新后的 $P_{a,i}$ 重新代入泄漏模型计算下一组气泡，实现泄漏速率 - 气泡运移 - 环空压力的递推耦合。当泄漏点处环空压力达到油管内压时停止迭代：

$$P_{a,i} + 10^{-6} \rho_l g (H_1 - H_2) \geq P_m \quad (8)$$

3. 实例参数与气泡运移特征

选取某深层气井进行计算。生产套管规格为 $\phi 139.7 \text{ mm} \times 6.98 \text{ mm}$ P110，下深 4560 m；油管规格为 $\phi 88.9 \text{ mm} \times 9.52 \text{ mm}$ P110，采用锥面对锥面特殊螺纹连接。主要计算参数见表 2。

Table 2. Main calculation parameters
表 2. 主要计算参数

参数	数值	参数	数值
W/mm	107.95	Ra/ μm	0.4
d/mm	69.86	Ds/mm	77.86
Ls/mm	10	I/ μm	10
D1/mm	125.7	D2/mm	88.9

续表

E_p/MPa	2.07×10^5	E^*/MPa	7.55×10^4
$\delta r/\text{mm}$	0.01	$\eta/(\text{MPa} \cdot \text{s})$	4.2×10^{-11}
H_1/m	500	H_2/m	0.1
$\rho l/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1000	P_{in}/MPa	30
P_{a0}/MPa	0.10325	T_m/K	288.15

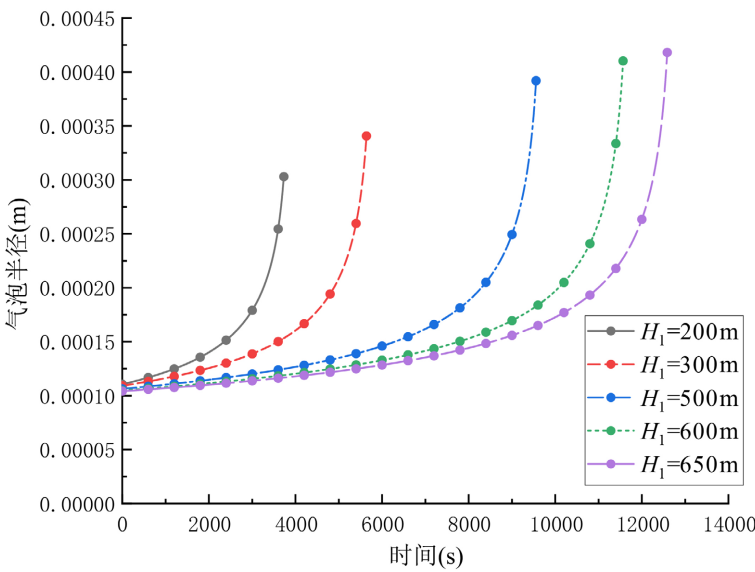


Figure 1. Bubble radius curves at different leakage depths
图 1. 不同泄漏点井深下气泡半径变化曲线

由图 1 可见，气泡半径在上升初期增长缓慢，接近环空保护液液面时增幅明显加快。这是因为气泡上升导致外部静液柱压力逐渐降低，在气体质量近似不变的条件下，真实气体膨胀使半径呈现非线性增长。泄漏点越深，气泡初始处于更高的外部压力下，且上升路径更长，因此到达液面所需时间明显延长，经历的累计减压幅度更大，终端半径也随之增加。

4. 主要参数影响规律

4.1. 油管内压对气泡膨胀的影响

图 2 表明，气泡上升初期半径缓慢增加，接近环空保护液液面时膨胀明显加快。油管内压 P_{in} 增大时，螺纹内外压差增大，微通道中的泄漏速率提高，单个时间步注入环空的气体体积随之增加，形成的气泡初始半径更大。尺寸增大后，浮力的体积尺度效应强于黏滞阻力，气泡滑脱速度上升，使其到达液面的时间整体提前。因此， P_{in} 既直接控制泄漏驱动力，又通过气泡初始尺度间接改变运移时标。

4.2. 密封面粗糙度对气泡速度的影响

随着 Ra 增大，密封面微凸体之间的有效流通间隙增大，微通道水力阻力降低，使单个时间步内进入环空的气体体积增加，形成的初始气泡尺寸更大。由图 3 可见，各工况均经历快速加速并趋于稳定的过程，较大 Ra 对应的稳定速度更高。其物理原因在于气泡尺寸增大使浮力增幅快于阻力增幅，直至两者在

更高的滑脱速度下重新平衡。密封面轴向总长度 L_s 具有相反作用, L_s 增大使流动路径延长、压力损失增加, 因而抑制泄漏量并降低气泡稳定速度。

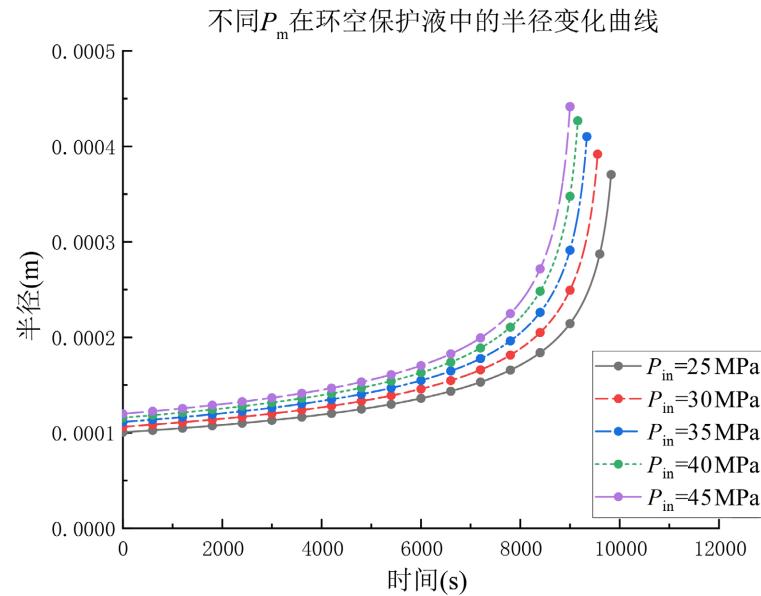


Figure 2. Bubble radius curves at different tubing pressures

图 2. 不同油管内压下气泡半径变化曲线

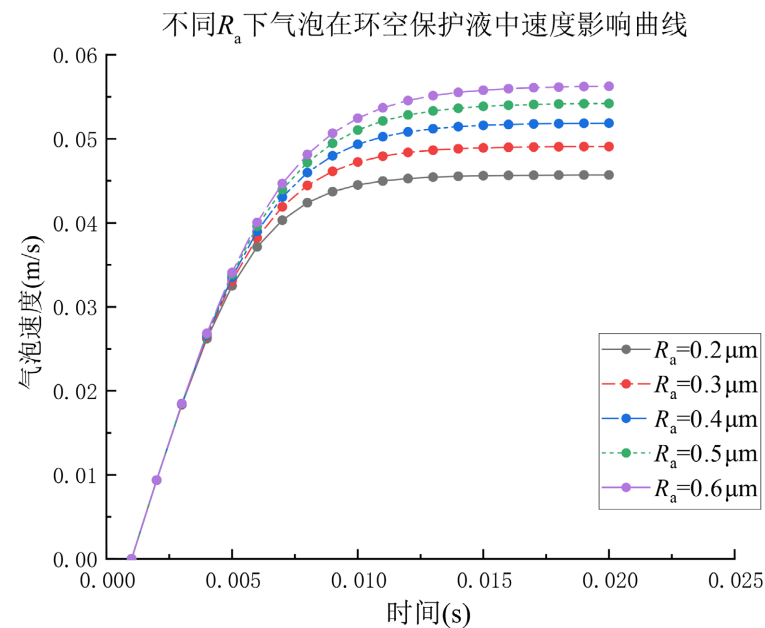


Figure 3. Bubble velocity curves at different sealing-surface roughness values

图 3. 不同密封面粗糙度下气泡速度变化曲线

4.3. 密封面平均直径对环空带压的影响

由图 4 可见, 不同密封面平均直径 D_s 条件下, 环空带压均随时间逐渐增加并最终趋于约 25 MPa, 泄漏速率则由初始值持续降低并逐渐趋近于零。 D_s 增大使密封周向有效泄漏通道尺度增加, 因而略微提

高初期泄漏速率,使环空压力上升时间提前。随着 P_a 增大,泄漏点外压提高,螺纹内外压差被反馈压缩,泄漏速率的衰减速度增大,不同 D_s 工况之间的差异由此逐渐缩小。稳定带压主要由泄漏点处的内外压力平衡决定,因而 D_s 主要改变压力建立的时标,对最终稳定值的影响较弱。

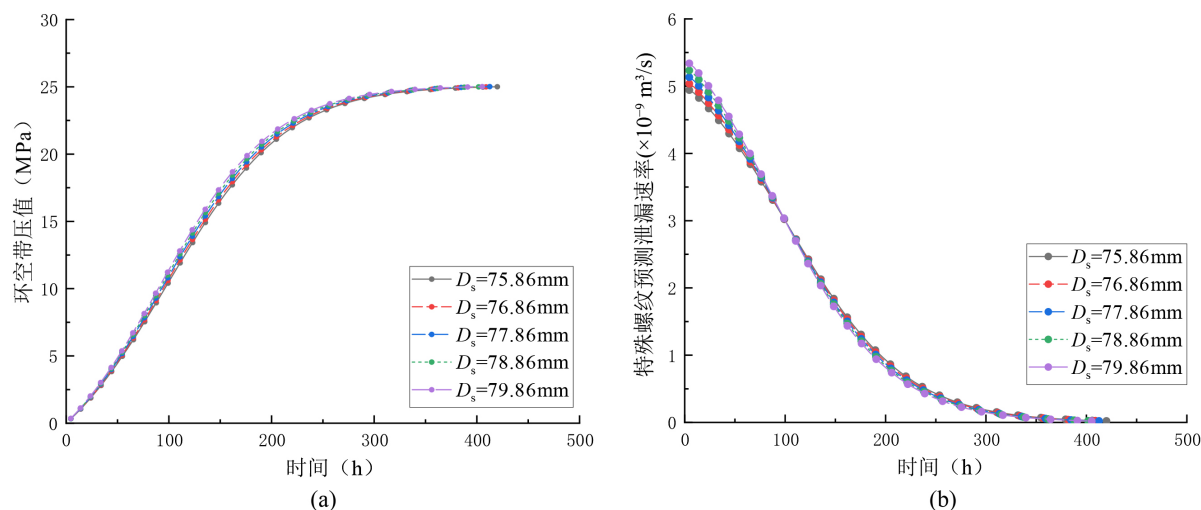


Figure 4. Evolution of SCP and leakage rate at different mean sealing diameters

图 4. 不同密封面平均直径下环空带压与泄漏速率随时间变化

4.4. 泄漏点井深对泄漏 - 带压耦合过程的影响

图 5 显示,泄漏点井深 H_1 增加后,泄漏点处的环空静液柱压力增大,特殊螺纹内外驱动压差减小,因此初始泄漏速率整体降低,井口最终稳定带压也随 H_1 增加而降低。另一方面, H_1 增加使气泡上升路径延长,延迟气体进入井口气室的时刻;同时,更大的沿程减压幅度又会增强气泡膨胀。因此, H_1 通过“静液外压 - 泄漏驱动压差”和“运移距离 - 气泡膨胀”两条路径同时作用,是连接泄漏、运移与带压的关键完井参数。环空保护液密度 ρ_l 与 H_1 在静液外压途径上具有同向作用,但 ρ_l 还会通过改变浮力和阻力影响气泡滑脱速度。

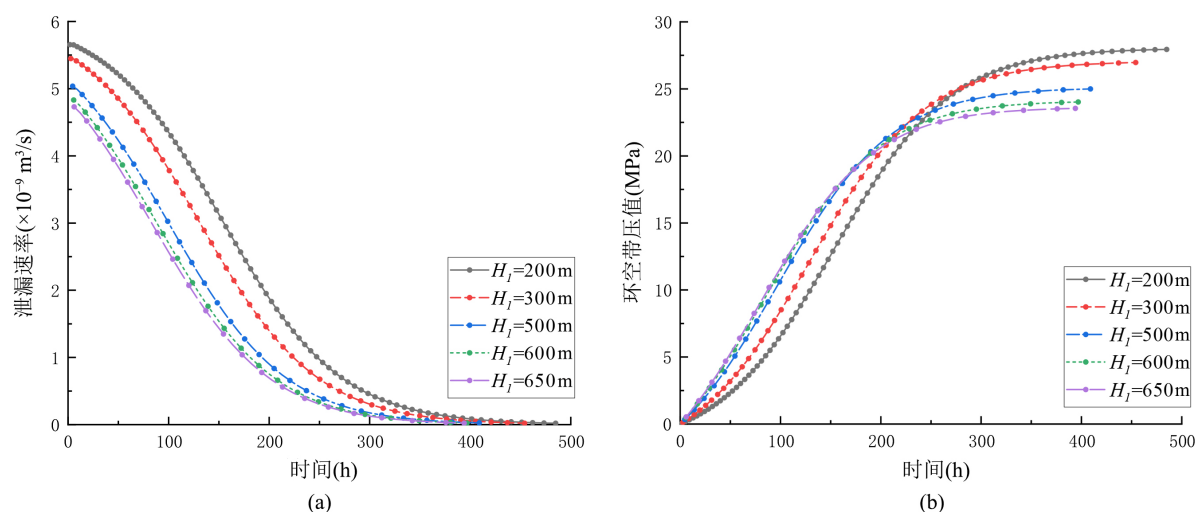


Figure 5. Evolution of leakage rate and SCP at different leakage depths: (a) leakage rate; (b) SCP

图 5. 不同泄漏点井深下泄漏速率与环空带压变化: (a) 泄漏速率; (b) 环空带压

4.5. 参数耦合效应与敏感性矩阵

单因素曲线可识别参数主效应，但实际井筒中各参数通过泄漏压差、微通道阻力、气泡尺度和运移路径共同影响环空带压。为避免将单参数规律简单线性叠加，基于模型控制关系及图 2~5 的计算结果，构建表 3 所示的定性耦合敏感性矩阵。矩阵中的“强、中、弱”用于表征对响应过程的相对控制程度，不代替后续正交试验中的统计交互项系数。

Table 3. Coupling sensitivity matrix for key parameters
表 3. 关键参数耦合敏感性矩阵

参数组合	初始泄漏率	气泡到达时间	带压稳定值	主要耦合机制
Pin-H1	强	强	强	Pin 提高驱动压差，H1 通过静液外压抵消该作用；高压深部泄漏的实际驱动力取决于两者差额
Ra-Ls	强	中	弱	Ra 增大流通能力，Ls 增大流动路径和阻力；两者主要改变泄漏与建压时标，对平衡压力影响较弱
H1- ρl	强	强	强	两者同向增大泄漏点静液外压并降低泄漏量，同时通过运移距离、浮力及膨胀过程形成非线性耦合
Ds-Pin	中	中	弱	Ds 主要改变周向有效流通尺度，Pin 控制驱动压差；耦合效应集中于泄漏初期，随反压增大而减弱

表 3 表明，Pin-H1 和 H1- ρl 对泄漏驱动力及稳定带压具有较强耦合作用，其共同点是直接改变泄漏点处的内外压力平衡。Ra-Ls 对初始泄漏率和带压建立时标更敏感，但不改变最终压力平衡条件；Ds-Pin 的交互作用也主要集中在泄漏初期。这说明“泄漏速率敏感”不等同于“稳定带压敏感”，对参数的工程评价应同时考察幅值和时标。此外，现场泄漏通道与井口气室边界条件也会改变压力响应[12] [13]，在实井定量应用中需结合压力恢复试验或现场监测数据标定。

5. 结论

- (1) 基于特殊螺纹微观泄漏、气泡动态运移和井口气体聚集过程，建立了泄漏速率 - 气泡运移 - 环空带压递推耦合模型。环空压力作为反压实时作用于螺纹泄漏压差，使模型能够连续描述从微观泄漏到井口带压的闭环反馈过程。
- (2) 泄漏气泡在初始短时内快速加速，随后趋于稳定滑脱；随井深减小和局部压力降低，气泡半径持续增大并在接近液面时加快膨胀。Pin、Ra 和 Ls 主要通过改变泄漏量及气泡初始尺度影响运移状态，H1 和 ρl 则同时改变泄漏点静液外压、气泡运移路径及膨胀过程。
- (3) 环空带压随泄漏气体持续聚集而升高，泄漏速率受环空反压作用持续衰减。耦合敏感性矩阵表明，Pin-H1 和 H1- ρl 对泄漏驱动力及稳定带压的耦合作用较强；Ra-Ls 主要控制初始泄漏率和建压时标；Ds-Pin 对泄漏初期有一定影响，但对长期稳定带压的作用较弱。
- (4) 当前模型适用于低气含率、离散球形小气泡在近似静止牛顿保护液中运移，且环空压力相对缓慢变化的工况。对于段塞流或翻腾流、大尺度非球形气泡、显著聚并、破碎或溶解，以及环空液相存在强循环的情形，模型可能低估相间作用和流型转换引起的运移阻力变化，进而使气泡到达时间、气体聚集量与带压速率产生系统偏差。因此，本文结论主要用于解释特殊螺纹微观泄漏诱发环空带压的演化趋势；对流型转换显著或液相强循环的工况，应结合更高阶多相流模型谨慎外推。

6. 展望

后续研究首先应拓展气泡运移与环空流动模型：引入能够描述泡状流 - 段塞流 - 翻腾流转换的多相流框架，采用与气泡形变相适应的非球形气泡阻力关系，并耦合气泡聚并、破碎和溶解传质过程；同时考虑环空液体循环、非牛顿流变特性及温度 - 压力瞬态变化，以提高复杂井况下对气泡到达时间、气体聚集量和带压速率的预测能力。

其次，应在现有定性耦合矩阵基础上开展正交试验、响应面分析或全局敏感性分析，定量识别油管、内压、泄漏点井深、密封面粗糙度、密封长度、平均直径及保护液密度之间的主效应与交互效应。结合现场环空压力恢复 - 泄压试验和长期监测数据对模型进行标定，并在不同井深、井温、流体体系及泄漏位置条件下开展交叉验证，可进一步形成带压风险分级阈值及针对性的泄压、封堵与管柱完整性管理方法。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目，项目批准号：YKJCX2520131。

参考文献

- [1] Jing, Y., Wang, T., Zhang, B., Zheng, Y., Li, X. and Lu, N. (2025) Safety Risk Analysis of Well Control for Wellbore with Sustained Annular Pressure and Prospects for Technological Development. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, **61**, 110-119. <https://doi.org/10.1007/s10553-025-01844-9>
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Yang, S., Fu, J., Zhao, N., Xu, C., Han, L., Wang, J., *et al.* (2024) Comprehensive Analysis of the Annulus Pressure Buildup in Wells with Sustained Gas Leakage Below the Liquid Level. *Processes*, **12**, Article 2631. <https://doi.org/10.3390/pr12122631>
- [5] 赵萌. 井下管柱渗漏导致注采气井 A 环空带压模拟分析研究[J]. 钻采工艺, 2024, 47(5): 81-87.
- [6] Dou, N., Hu, Z., Wang, Z., He, H. and Yang, S. (2023) Risk Assessment of Annular Pressure Caused by Tubing Leakage in Offshore Gas Wells with High CO₂. *Geofluids*, **2023**, Article ID: 9072217. <https://doi.org/10.1155/2023/9072217>
- [7] 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.
- [8] 丁亮亮, 朱海, 陈文康, 等. 气井环空内泄漏气泡瞬态运移特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(11): 89-96.
- [9] Hsu, C.Y. and Ferng, Y.M. (2021) Experimentally Investigating Bubble Dynamics and Pressure Drop for Bubbly Upflow in a Vertical Annular Channel. *Annals of Nuclear Energy*, **164**, Article 108625. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108625>
- [10] Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E. (1978) Bubbles, Drops, and Particles. Academic Press.
- [11] Xu, H., Zhang, Z., Xiang, S., Yang, B. and Shi, T. (2023) Leakage Model of Tubing and Casing Premium Connection Based on Sinusoidal Contact Simulation between Rough Surfaces. *Processes*, **11**, Article 570. <https://doi.org/10.3390/pr11020570>
- [12] Kazemi, M. and Wojtanowicz, A.K. (2022) Improved Method for Testing Integrity Loss of Wells with Sustained Casing Pressure. *Energies*, **15**, Article 3632. <https://doi.org/10.3390/en15103632>
- [13] Zhang, B., Lu, N., Guo, Y., Wang, Q., Cai, M. and Lou, E. (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. <https://doi.org/10.1115/1.4051944>