

气体示踪技术研究进展

乐佳琦, 李科星

西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年12月3日; 录用日期: 2025年2月24日; 发布日期: 2025年3月11日

摘要

气体示踪剂在油田的应用主要是用于监测和追踪油气开采过程中的一些关键参数和信息。通过向地下注入带有示踪剂的气体, 可以在地下水或天然气中标记气体、水或油, 并通过监测地面或井下的传感器来对其进行跟踪。这种技术可以帮助油田工程师和地质学家更好地了解地下油气的流动性、地层渗透性、油藏压力及渗透率等参数, 从而优化油气开采方案, 提高油气勘探和生产效率。此外, 气体示踪剂技术还可以用于监测地下水污染情况、井下管道泄漏等环境保护和安全方面的应用。液体示踪剂的研究已经非常深入, 但目前对气体示踪剂的认识相对较少。本文对其类型、选用条件、运移机理、解释方法等方面进行了调研, 揭示了气体示踪剂的一些基本特性, 希望可以为提高油田采收量提供良好的指导。

关键词

气体示踪剂, 运移机理, 解释

Research Progress on Gas Tracer Technology

Jiaqi Le, Kexing Li

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Received: Dec. 3rd, 2024; accepted: Feb. 24th, 2025; published: Mar. 11th, 2025

Abstract

The application of gas tracers in oil fields is primarily used to monitor and track key parameters and information during the oil and gas extraction process. By injecting gas with tracers into the subsurface, gases, water, or oil can be marked in the underground reservoir, and tracking is done through sensors on the surface or downhole. This technology helps oil field engineers and geologists better understand the mobility of subsurface oil and gas, formation permeability, reservoir pressure, and permeability, thus optimizing oil and gas extraction plans and improving exploration and

文章引用: 乐佳琦, 李科星. 气体示踪技术研究进展[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(1): 56-65.

DOI: 10.12677/jogt.2025.471007

production efficiency. In addition, gas tracer technology can also be applied to monitor groundwater contamination, leakage in downhole pipelines, and other environmental protection and safety concerns. While research on liquid tracers has been quite advanced, there is still limited understanding of gas tracers. This paper surveys the types, selection criteria, migration mechanisms, and interpretation methods of gas tracers, revealing some of their basic characteristics, with the aim of providing valuable guidance for enhancing oil recovery.

Keywords

Gas Tracer, Transport Mechanism, Interpretation

Copyright © 2025 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

现阶段,我国对石油需求量非常大,但对外依存度仍居高不下,这是由于油藏采收率不尽人意[1]。在提高采收率的过程中,了解油藏的信息尤为关键,例如进行气驱时,需要把握注入气体对油藏的驱油情况、主渗通道数量、气体的波及区域及流向[2][3]。为应对上述情形,井间示踪技术应运而生,通过跟踪井下注入的示踪剂并分析其在生产井中的浓度变化,可用于解析油藏的地质特征和开发情况,为油气田开发提供技术支撑[4]-[6]。

2. 气体示踪剂的国内外研究现状

气体示踪剂是指在油藏开发过程中,注入的气体或气态物质,用于追踪流体的流动路径、分布和波及范围[7],其主要用于注气混相驱、非混相驱和蒸汽驱等过程[8]。气体示踪技术作为油田现场动态监测的重要一环,最早在国外开始研究。Dugstad [9]等证明了气体示踪剂的早期适应性,以监测注入的碳氢化合物气体。Kleven [10]等通过非放射性示踪技术在挪威北海的 Gullfaks 和 Sleipner 两个海上油田中的应用,得出其可以有效地跟踪注气过程,为油田储层描述和生产优化提供关键信息。Huseby [11]等展示了气体示踪剂的应用,以研究其对地下气体运动的影响,包括气体和液体示踪剂的 4D 地震比较。而在北马来盆地(NMB)气田,也通过进行气体示踪剂注入试验,成功解决了 HESS 的生产运营和监测挑战[12]。

我国虽起步较晚,但也取得了许多突出的进展。梁开芳[13]等将硝酸铵及硫氰酸铵应用于胜坨油田封堵大孔道的投放和检测中,对油藏的性质有了更清晰的认识。杨林等[14]通过示踪剂在河南稀油田的应用,提出选择示踪剂时,需要考虑其与地层水之间的配伍性和生物稳定性,同时要注意示踪剂之间相互影响作用,为多类示踪剂联合使用提供了理论指导。李补鱼[15]等通过在中原油气藏监测试验,建立了气体示踪剂分析检测方法并研制了一套气体示踪剂注入装置。崔洁[16]等通过检验注入水和化学添加剂的影响,优选出更适合胜坨油田的示踪剂,提高了示踪剂检测的准确性。但是目前针对气体示踪解释方面的内容涉及较少,且没有系统地整理。本文基于气体示踪技术基础理论,结合过往研究进展,从气体示踪剂的分类、性质、用量确定以及气体示踪技术解释几个方面展开介绍。

3. 气体示踪剂的分类

由于现场使用的气体示踪剂通常不溶于水,并在油气两相中均有分配,因此可根据类别进一步分为化学气体示踪剂和放射性气体示踪剂[17][18],见表 1。放射性示踪剂常用闪烁计数器进行检测,见图 1,

但因为其环境问题逐渐退出应用, 而化学气体示踪剂随着检测仪器精度的提高开始广泛应用于油田现场 [19]-[21], 常用气相色谱仪进行检测, 见图 2。基本原理是基于不同物质在固定相和流动相中的分配系数差异来实现混合物的分离和检测。仪器检测结果的准确性主要受以下几个因素影响:

- (1) 载气因素: 气体纯度不够, 会引入杂质峰, 而当气体流速过高或过低时也会影响分离效率;
- (2) 环境条件: 高湿度环境会导致仪器的绝缘性能下降;
- (3) 进样系统: 过多的样品量可能导致峰拖尾或色谱柱过载;
- (4) 色谱柱因素: 柱长越长, 分离效果越好; 内径越小, 柱效越好。

Table 1. Common types and characteristics of different gas tracers
表 1. 不同气体示踪剂常用种类及特点

气体示踪剂分类	常用	优点	缺点	检测方法
放射性气体示踪剂	氚、氚化氢、氚化烷烃等	用量少, 易于检测, 应用范围广	成本高, 操作复杂	闪烁计数器
化学气体示踪剂	氟环烷烃类、六氟化硫及氟利昂等	无腐蚀性、能检出浓度低, 储层岩石表面吸附性低, 水中溶解度低, 易被注射	性质不稳定	气相色谱仪

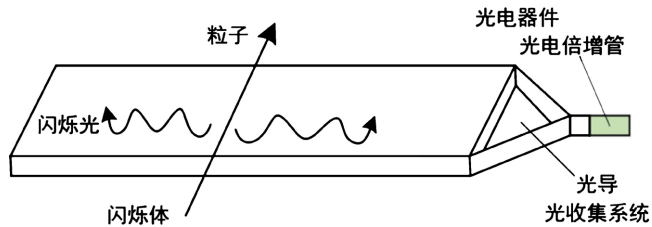


Figure 1. Schematic diagram of the basic principle of a scintillation counter
图 1. 闪烁计数器基本原理示意图

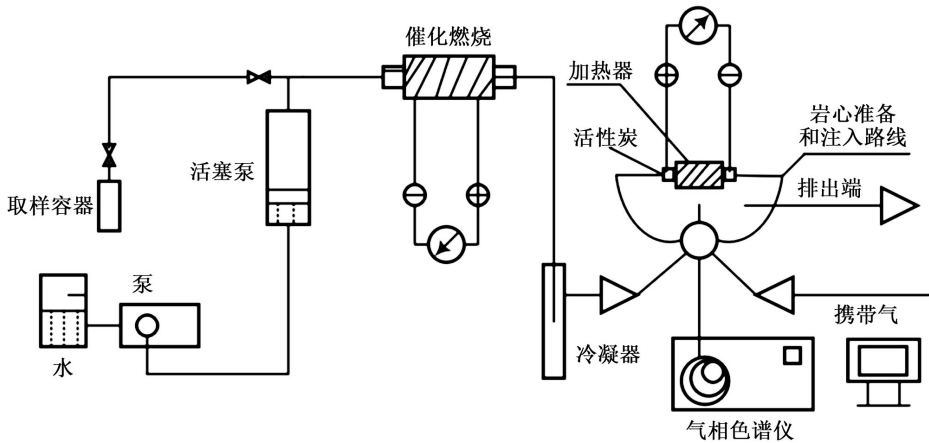


Figure 2. Chemical gas tracer detection system
图 2. 化学气体示踪剂检测系统

4. 气体示踪剂的性质

4.1. 气体示踪剂的适用性

气体示踪剂通常指的是气态的示踪物质, 如氮气、氦气、二氧化碳等。气体示踪剂由于具有低密度、

易扩散等特点, 常用于需要穿越油气井、油层或水层的场景, 尤其适用于需要监测气体驱动、气水交替流动等情况的气驱井组[22]。

水溶性示踪剂是指可溶于水中的化学物质, 如染料、盐类化合物、放射性同位素、荧光染料等。水溶性示踪剂在油田监测中主要用于水驱、注水和水合物注入等与水流动相关的水驱井组[23]。

4.2. 气体示踪剂的运移机理

在地下多孔介质中, 示踪剂注入流体, 受对流和水动力弥散(机械弥散、分子扩散)的控制[24] [25], 见表 2。对于气体示踪剂而言, 分子扩散是其在原油中迁移的关键机制[26]。郑子荷[27]通过压力脉冲实验记录扩散管中气体示踪剂向油样中扩散过程的压力变化, 然后根据 Fick 第二定律和油气界面的动态边界数学模型进行求解, 得到气体示踪剂在油样中的扩散系数。

气体示踪剂运移机理示意图, 见图 3~6。

Table 2. Different migration mechanisms and characteristics
表 2. 不同运移机理及特性

运移机理	特性
对流	注采井之间的压差和流体密度的差异
机械弥散	使得示踪气体在流动相中逐渐扩散, 扩散量的大小取决于多孔介质的非均质性和流动系统的几何形状
分子扩散	气体扩散性能由扩散系数表征, 其大小不仅与自身特性有关, 还与地层流体物性及地层温压有关

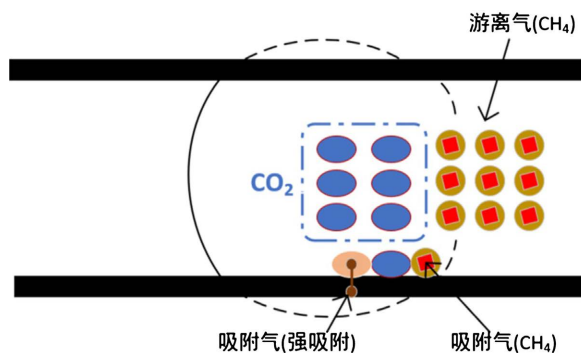


Figure 3. Schematic diagram of CO₂ convection displacing CH₄ in connected pores
图 3. 连通孔隙中 CO₂ 对流驱替 CH₄ 示意图

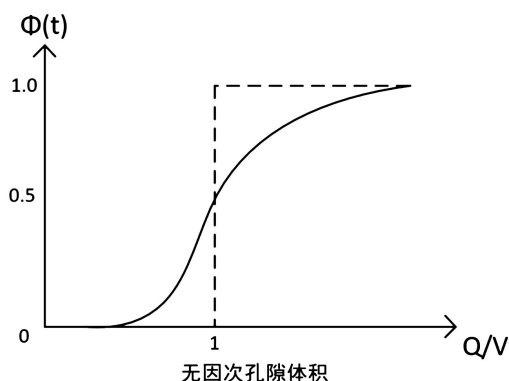


Figure 4. Schematic diagram of longitudinal dispersion
图 4. 纵向弥散示意图

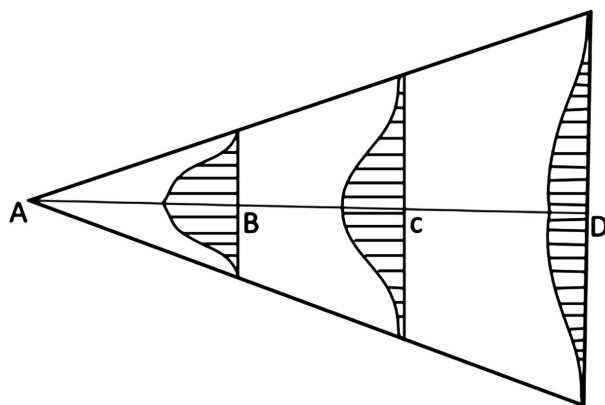


Figure 5. Schematic diagram of lateral dispersion
图 5. 横向弥散示意图

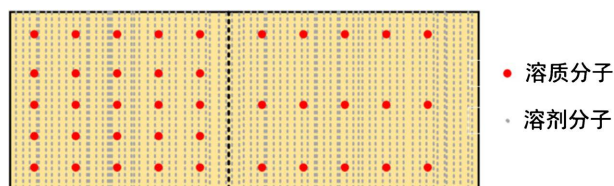


Figure 6. Schematic of molecular diffusion
图 6. 分子扩散示意图

4.3. 气体示踪剂在油藏流体中的分配

理想的水示踪剂仅在水相中存在, 沿水流路径迁移, 反映注入水在油藏中的流动过程。而气体示踪剂在油田井间监测和多相流动的情况下, 通常涉及气相或油相之间的分配, 影响其在油田中的传播速度和分布[28]。鲜波[29]等通过滞留实验研究了泥岩含量、温度和压力对气体示踪剂滞留的影响, 提出了一种基于分配系数和原油饱和度的特征速度方程, 结果表明, 分配系数越大, 气体示踪剂的运移速度越慢, 滞流程度越大。

4.4. 气体示踪剂的热力学性质

气体示踪剂相较于水溶性示踪剂受温度和压力的影响更大, 而其不同压力下相态的变化也会使得驱替过程中出现混相与非混相两种方式。同时气体示踪剂从地下产出时也会因会膨胀而导致计量体积显著增大, 这也是分析示踪剂产出曲线时不可忽视的一点。

5. 气体示踪剂的用量确定

示踪剂的注入量与地层含油气体体积成正比, 与检测仪器的灵敏度成反比, 即含油气面积越大, 注入量越大, 而检测灵敏度越高, 注入量越少。目前对示踪剂的注入量还没有一种准确的确定方法, 一般采用估算的方法来计算。Brigham-Smith 基于五点法井网的计算公式和最大稀释体积法计算公式是当前油田现场主要应用的两种方法[30]。

Brigham[31]等在假设按五点法布井、均质地层、注采比为 1:1, 在注入流体与地层流体流度比为 1 的条件下, 结合面积波及影响、示踪剂段塞前后的稀释作用以及现场突破和弥散数据, 利用 Fick 扩散方程推导出水示踪剂用量的预测计算公式。该方法还可用于估计气体示踪剂的体积分数, 但是弥散常数需要通过试验重新确定。

对于化学气体示踪剂, Brigham-Smith 计算公式为:

$$G_c = 1.44h\phi S_g C_p L^{1.735} \alpha^{0.265} \quad (1)$$

式中: G_c 为化学示踪剂用量, kg; h 为地层厚度, m; ϕ 为地层孔隙度; S_g 为含气饱和度; C_p 为从油井采出示踪剂的峰值浓度, mg/L; L 为井距, 102 m; α 为弥散常数, m, 一般, 气体示踪剂为 0.31 m。

对于放射性气体示踪剂, Brigham-Smith 计算公式为:

$$G_r = 1.44 \times 10^7 h\phi S_g C_p L^{1.735} \alpha^{0.265} \quad (2)$$

式中: G_r 为放射性示踪剂用量, Bq; C_p 为从油井采出示踪剂的峰值浓度, Bq/L。

最大稀释体积法计算公式考虑了示踪剂在能够被稀释到最大程度时, 采出气体仍然能检测到示踪剂时的用量。但是用该公式计算得出的示踪剂用量往往会多很多, 这对于成本会是一个非常大的提高, 同时过量的示踪剂将会影响后续注入的示踪剂的选择以及用量。

一般来说, 氟类放射性物质用量为 $3.7 \times 10^{11} \sim 3.7 \times 10^{12}$ Bq; 化学示踪剂用量: 全氟环烷烃为 10~100 kg; 氟利昂类为 50~200 kg; SF_6 为 50~150 kg。

6. 气体示踪技术解释

气体示踪技术解释指的是通过分析生产井气体示踪剂的产出曲线, 反演储层地质参数并计算开发指标。例如, 当示踪剂产出曲线为单峰时, 注采井之间存在一条主渗通道, 而多峰时则可能存在多条主渗通道。同时示踪剂产出曲线峰值越高, 则表明示踪剂推进的主渗通道厚度、示踪剂波及体积和波及面积较大; 示踪剂产出曲线峰值越低, 则表明示踪剂推进的主渗通道厚度、示踪剂波及体积和波及面积较小 [32]-[34], 见图 7、图 8。

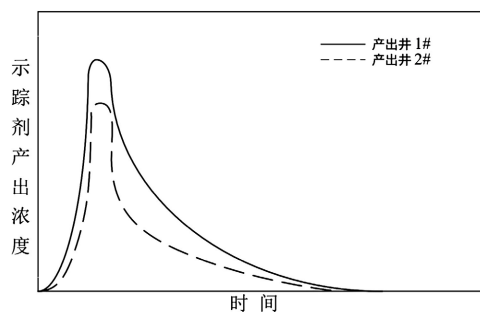


Figure 7. Tracer return curve, single peak
图 7. 示踪剂返排曲线——单峰

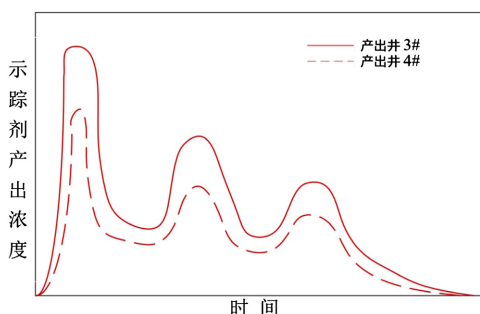


Figure 8. Tracer return curve, multiple peak
图 8. 示踪剂返排曲线——多峰

气体示踪技术解释的主要内容为通过建立气体示踪剂在储层中的流动模型, 并利用生产井处其产出浓度曲线与地层参数的关系改变参数, 使模型计算曲线与实际测试曲线拟合, 来反演地层参数[35] [36]。现如今示踪技术的主要解释方法有三种: 解析法、半解析法和数值法。它们的特点见表 3 [37]-[40]。

Table 3. Comparison of different methods of interpretation
表 3. 不同解释方法对比

解释方法	定义	应用	优点	缺点
解析法	通过求解油藏流体流动的数学方程, 得出示踪剂在油藏中的分布与运移规律的精确解	简单、均质油藏模型	计算简便, 解答明确, 适用于较为理想化的油藏条件	对于复杂油藏(如非均质、裂隙型等)或复杂流体流动, 解析法的适用性较差
半解析法	通过对复杂油藏流动过程的简化和假设, 得到近似的解析解, 并通过数值方法修正或逼近实际解	中等复杂度的油藏模型, 尤其在油藏非均质性较高, 但又不复杂到完全需要数值模拟时	比解析法更适应复杂油藏, 计算过程较数值法简单, 能够在一定程度上平衡精度与计算复杂性	精度可能不如数值法, 且依赖于近似模型, 适用范围有限
数值法	通过计算机模拟和数值解法, 离散化油藏的流动方程, 模拟示踪剂在油藏中的实际运移过程	复杂的油藏模型	高精度, 能够模拟复杂的油藏结构和流动条件, 适用于各种油田开发情境	计算量大、时间长, 需要较强的计算能力和较高的技术要求, 且依赖于准确的输入参数和模型设定

气体示踪技术解释作为井间示踪技术重要的一环, 仍在不断的精确及完善。Huseby [41]等通过对油气藏多相流分布规律的研究, 推导出油气两相分布的数学表达式, 并构建了油气两相运移的数学模型。Moral [42]等阐述了如何将气体示踪剂的井间流动整合进油田数值模拟模型, 通过气体示踪剂的解释分析, 从而改善储层表征。周丽梅[43]等根据示踪剂曲线特征来判别油藏井间的连通方式。Mulkem [37]等在缝洞储层中, 采用化学气体示踪法对邻近井的大裂缝连通度进行了评价。李牧[44]针对缝洞碳酸盐岩储层的连通性特征, 建立了连续和段塞两种不同注入方式下的井间串并联示踪剂流动模型。刘学利[45]等建立缝洞型油藏注采井间气体示踪解释物理和数学模型, 并分析了各个参数对体积分数曲线峰值的影响。张雅玲[46]通过研究气体示踪剂在油藏中的分配与滞流机理对其流动的影响, 构建了混相驱气体示踪剂流动模型, 并运用非线性最优化技术定量解释了生产井的示踪剂浓度剖面。建立物理模型和数字模型是对气体示踪剂进行解释的有效手段, 而模拟是示踪剂研究建模的关键, 动态模拟监测示踪项目尤为重要。任何实地发生的任何变化都应定期反应在模型, 以衡量示踪剂在储层中的实际移动情况[47]。

目前现场通过气体示踪技术解释得到的最主要的参数包括波及体积、井间气窜速度、回采率等, 以下给出波及体积和回采率的计算公式。

示踪剂间波及体积指的是在油藏中, 示踪剂从注入井传播到生产井所波及的油藏体积。它反映了示踪剂通过地层的扩散、流动和迁移所影响的区域大小, 通常用于评估流体在油藏中的流动路径和波及范围。

$$V_p = \eta \left(\int C(m) m dm \right) / \int C(m) dm \tag{3}$$

式中: V_p 为示踪剂波及体积, m^3 ; C 为产出浓度, Bq/L 或 Ng/L ; η 为回采率; m 为示踪剂注入后累计注入流体(气/水)量, m^3 。

示踪剂回采率是评价气窜强度和储层非均质程度的重要标志, 指的是在生产井中回收的示踪剂量与注入井中注入的示踪剂量之间的比例, 它的大小在一定程度上能够说明井间动态连通的情况[48]。对于气

驱油藏, 若无气窜且储层均质, 短期内回采率应接近 0; 若气窜达到极限且储层非均质较强, 回采率可能接近 1。对于常规储层, 短期内示踪剂回采率通常小于 50%~60%。

$$\eta = \int C(p) p dp / A \quad (4)$$

式中: p 为生产井产气(水)量, m^3 ; A 为示踪剂注入量, kg 或 ci 。

7. 总结与展望

井间示踪技术通过监测示踪剂在井间的流动, 帮助评估油藏流体动态、注采效果和油藏连通性, 从而优化油田开发策略和提高采收率。通过调研分析国内外相关研究领域研究进展得到以下四点结论:

(1) 随着检测仪器精度的提高, 化学气体示踪剂逐步代替放射性气体示踪剂在油田广泛应用。

(2) 气体示踪剂与水溶性示踪剂具有不同的流动机制和监测要求, 在使用时需要根据实际油田条件、设备和目标进行合理选择, 在解释的过程中也要考虑其不同的性质。

(3) 示踪剂的用量确定目前没有精确的计算公式, 这也导致成本提高和检测灵敏度降低, 同时过量的示踪剂将会影响后续注入的示踪剂的选择以及用量。

(4) 气体示踪技术解释可以得到波及体积、井间气窜速度、回采率以及主渗通道个数等信息, 为油田提供实时数据, 帮助开发团队动态监控油田的生产状况, 通过分析井间流体的流动特征、评估气体驱替效果和优化注气作业, 从而提升采收率和管理效率。

随着油藏条件的复杂性和开发需求的提升, 气体示踪技术将继续发展。特别是在多相流动、非均质油藏等复杂场景下, 如何进一步提高示踪剂的分辨率和监测精度仍是研究的重点。此外, 随着数据分析技术的进步, 如机器学习与大数据分析的结合, 气体示踪剂的应用有望实现更精细化、实时化的监测与优化, 对油田的开发决策提供更加准确的支持。

参考文献

- [1] Li, R., Hu, Y. and Zhang, H.X. (2023) China's Oil Market Review and Outlook. *China Oil & Gas*, **30**, 41-48.
- [2] 艾庆祥, 王崔, 高郎. 注水油田高含水后期开发技术方针的调整分析[J]. 石化技术, 2024, 31(6): 298-300.
- [3] 武波. 示踪剂技术在油田开发中的应用研究[J]. 化学工程师, 2018, 32(11): 62-64.
- [4] Cubillos, H., Torgersen, H., Chatzichristos, C. and Rodriguez, R. (2011) Measuring Partitioning Coefficients for Gas Tracer Mass Balance and Gas Injection Allocation. *SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*, Vienna, May 2011, SPE-143557-MS. <https://doi.org/10.2118/143557-ms>
- [5] Al-Qasim, A., Kokal, S., Hartvig, S. and Huseby, O. (2020) Subsurface Monitoring and Surveillance Using Inter-Well Gas Tracers. *Upstream Oil and Gas Technology*, **3**, Article ID: 100006. <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2020.100006>
- [6] Al-Mayyan, H., Pradhan, A., Ziyab, K., Wurtz, M., Huseby, O., Nurafza, P., et al. (2023) Gas Tracer Technology to Improve Reservoir Understanding and Evaluate EOR Strategy, a Pilot Study in Kuwait. *Middle East Oil, Gas and Geo-sciences Show*, Manama, February 2023, SPE-213475-MS. <https://doi.org/10.2118/213475-ms>
- [7] Carpenter, C. (2017) Gas Tracers: A Decade of Learning and Experience. *Journal of Petroleum Technology*, **69**, 62-66. <https://doi.org/10.2118/0917-0062-jpt>
- [8] 孟令韬, 鲍文辉, 郭布民, 等. 示踪剂技术在压裂效果评价中的研究进展[J]. 石油化工应用, 2022, 41(3): 1-4+23.
- [9] Dugstad, O., Bjornstad, T. and Hundere, I. (1992) Measurements and Application of Partition Coefficients of Compounds Suitable for Tracing Gas Injected into Oil Reservoirs. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, **47**, 205-215. <https://doi.org/10.2516/ogst:1992012>
- [10] Kleven, R., Hovring, O., Opdal, S.T., Bjornstad, T., Dugstad, O. and Hundere, I.A. (1996) Non-Radioactive Tracing of Injection Gas in Reservoirs. *SPE Gas Technology Symposium*, Calgary, April 1996, SPE-35651-MS. <https://doi.org/10.2118/35651-ms>
- [11] Huseby, O., Andersen, M., Svorstøl, I. and Dugstad, Ø. (2008) Improved Understanding of Reservoir Fluid Dynamics in the North Sea Snorre Field by Combining Tracers, 4D Seismic, and Production Data. *SPE Reservoir Evaluation &*

- Engineering*, **11**, 768-777. <https://doi.org/10.2118/105288-pa>
- [12] Abdul Aziz, K.F., Mustafa, A., Wong, P., Wurtz, M., Leung, E., Overby Landrø, S., *et al.* (2021) World First Commercial Application of Permanent Interventionless Monitoring Using Intelligent Inflow Gas Tracer Technology. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dubai, September 2021, SPE-206326-MS. <https://doi.org/10.2118/206326-ms>
- [13] 梁开芳, 解通成, 安炳生, 等. 示踪剂在胜坨油田封堵大孔道中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1993(1): 100-104.
- [14] 杨林, 袁光喜, 李新华, 等. 化学示踪剂在河南稀油田的应用研究[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(4): 470-471.
- [15] 李补鱼, 褚万泉, 龚山华, 等. 气体示踪剂在中原油田油气藏监测中的应用[C]//2012 油气藏监测与管理国际会议暨展览会论文集. 2012: 291-298.
- [16] 崔洁. 提高化学示踪剂检测准确度实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(1): 91-94.
- [17] 杜殿发, 张耀祖, 张莉娜, 等. 新型稠油油藏气体示踪剂筛选评价方法[C]//2021 油气田勘探与开发国际会议论文集(上册). 北京: 中国学术期刊(光盘版), 2021: 566-575.
- [18] 王嘉文, 李璐, 吴凯, 等. 分段压裂示踪剂在油田中的应用[J]. 石油化工应用, 2023, 42(2): 11-14, 20.
- [19] 张建坤, 高军锋, 王飞航, 等. 气体示踪技术在鄯善油田氮气驱并组中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(17): 190-192.
- [20] 金显杭, 方佳伟, 王永胜, 等. 咸水层 CO₂ 地质封存泄漏监测的示踪剂优选[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2020, 45(5): 72-76.
- [21] Patidar, A.K., Joshi, D., Dristant, U. and Choudhury, T. (2022) A Review of Tracer Testing Techniques in Porous Media Specially Attributed to the Oil and Gas Industry. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **12**, 3339-3356. <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01526-w>
- [22] 杨阳. 油田气体示踪剂的筛选及其评价[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
- [23] 李华洋, 邓金根, 冯永存, 等. 油田示踪剂技术的研究现状及发展趋势[J]. 应用化工, 2023, 52(11): 3163-3168+3174.
- [24] 王高峰, 廖广志, 李宏斌, 等. CO₂ 驱气机理与提高采收率评价模型[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(5): 734-740.
- [25] 李凡. 气体示踪剂监测技术的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015.
- [26] 李传亮, 朱苏阳. 扩散不是页岩气的开采机理[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 719-723.
- [27] 郑子荷. 气体示踪剂在原油中扩散机理实验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [28] 姜汉桥, 刘同敬. 示踪剂测试原理与矿场实践[M]. 北京: 石油大学出版社, 2001.
- [29] 鲜波, 熊钰, 孙良田, 等. 油藏多孔介质中气体示踪剂运移特征研究[J]. 海洋石油, 2006(4): 52-55.
- [30] 张翼飞, 唐武艺. 气体示踪技术在油田中的应用和研究现状[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(5): 188-189, 84.
- [31] Brigham, W.E. and Smith, D.H. (1965) Prediction of Tracer Behavior in Five-Spot Flow. *Conference on Production Research and Engineering*, Tulsa, May 1965, SPE-1130-MS. <https://doi.org/10.2118/1130-ms>
- [32] 郑力文, 敖科, 袁琴, 等. 六氟化硫(SF₆)标准物质的研制及其在油气田示踪剂定量分析中的应用[J]. 中国测试, 2022, 48(3): 66-71.
- [33] 张伟. 基于流线模拟法的示踪剂解释方法研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2018.
- [34] 李翀. 井间示踪剂监测解释方法研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2015.
- [35] 陈耀武, 冯其红, 陈月明, 等. 井组示踪剂产出曲线组合解释方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(4): 74-77.
- [36] Yang, D., Cui, H., Zhang, Q., Li, L. and Wu, Z. (2000) Tracer Technology for Water-Alternating-Gas Miscible Flooding in Pubei Oil Field. *SPE/AAPG Western Regional Meeting*, Long Beach, June 2000, SPE-62847-MS. <https://doi.org/10.2118/62847-ms>
- [37] Mulkern, M., Asadi, M. and McCallum, S. (2010) Fracture Extent and Zonal Communication Evaluation Using Chemical Gas Tracers. *SPE Eastern Regional Meeting*, West Virginia, October 2010, SPE-138877-MS. <https://doi.org/10.2118/138877-ms>
- [38] 乔曦. 井间示踪解释方法研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 延安: 延安大学, 2023.
- [39] Tayyib, D., Al-Qasim, A., Kokal, S. and Huseby, O. (2019) Overview of Tracer Applications in Oil and Gas Industry. *SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference*, Mishref, October 2019, SPE-198157-MS. <https://doi.org/10.2118/198157-ms>

-
- [40] Sanni, M.L., Al-Abbad, M.A., Kokal, S.L., Hartvig, S., Olaf, H. and Jevanord, K. (2015) A Field Case Study of Inter-Well Chemical Tracer Test. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, The Woodlands, April 2015, SPE-173760-MS. <https://doi.org/10.2118/173760-ms>
- [41] Huseby, O., Sagen, J. and Dugstad, Ø. (2011) Gas Tracer Transport—Correct Formulation and Fast Post-Processing Simulation Technique. *SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*, Vienna, May 2011, SPE-142991-MS. <https://doi.org/10.2118/142991-ms>
- [42] Del Moral, J., Abad, B., Panadero, A. and Sendín, R. (2019) Numerical Simulation of Gas Tracers for Reservoir Characterization, a Case Study. *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, September 2019, SPE-196624-MS. <https://doi.org/10.2118/196624-ms>
- [43] 周丽梅, 郭平, 刘洁, 等. 利用示踪剂资料讨论塔河缝洞性油藏井间连通方式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 56(2): 212-217.
- [44] 李牧. 缝洞型油藏注气示踪剂解释方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [45] 刘学利, 邹宁, 刘建仪, 等. 缝洞型油藏井组注气体示踪剂解释模型研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(1): 81-88.
- [46] 张雅玲. 混相驱气体示踪剂产出曲线解释方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油学院, 2004.
- [47] Ovchinnikov, K., Malyavko, E., Husein, N. and Gorbokonenko, O. (2020) Gas Breakthrough Identification in ERD Wells Using Gas Tracers with Quantum Dots. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, November 2020, SPE-203060-MS. <https://doi.org/10.2118/203060-ms>
- [48] Ren, B., Ren, S., Zhang, L., Huang, H., Chen, G. and Zhang, H. (2015) Monitoring on CO₂ Migration in a Tight Oil Reservoir during CO₂-EOR Process. *Carbon Management Technology Conference*, Sugar Land, November 2015, CMTC-439492-MS. <https://doi.org/10.7122/439492-ms>