

超声衰减法油水两相流含油率测量规律研究

王高云^{1*}, 高国强², 齐静静¹, 李高峰¹, 王宏伟¹, 孙乐遥¹, 徐东辉¹

¹中国石化胜利油田技术检测中心, 山东 东营

²中国石化胜利油田分公司, 山东 东营

收稿日期: 2025年11月15日; 录用日期: 2025年12月8日; 发布日期: 2025年12月15日

摘要

本文围绕油水两相流中含油率的在线测量难题, 提出并系统研究了基于超声衰减法的检测技术。通过构建COMSOL多物理场耦合的二维有限元模型, 模拟了水包油与油包水两种典型流型下超声传播特性, 重点分析了含油率、流型转变及油相黏度对超声衰减系数的影响规律。结果表明, 在水包油流型中, 衰减系数随含油率升高呈“先增后降”趋势, 拐点出现在35%左右; 而在油包水流型中, 衰减系数在含油率65%附近达到峰值, 反映出流型结构对声能耗散具有决定性作用。此外, 油相黏度的增加会显著增强超声衰减, 主要源于界面散射与黏性耗散的协同效应。静态实验数据与数值模拟结果呈现出良好的一致性, 验证了本文研究方法的有效性和结果的可靠性。研究证实, 超声衰减法具有响应快、无辐射、结构简单等优势, 适用于工业现场油水两相流含油率的在线监测, 为多相流参数检测提供了新的技术路径。

关键词

超声衰减, 油水两相流, 含油率, 数值模拟

Research on the Measurement Law of Oil Volume Fraction in Oil-Water Two-Phase Flow Using Ultrasonic Attenuation Method

Gaoyun Wang^{1*}, Guoqiang Gao², Jingjing Qi¹, Gaofeng Li¹, Hongwei Wang¹, Leyao Sun¹, Donghui Xu¹

¹Technical Inspection Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

²Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

Received: November 15, 2025; accepted: December 8, 2025; published: December 15, 2025

*通讯作者。

文章引用: 王高云, 高国强, 齐静静, 李高峰, 王宏伟, 孙乐遥, 徐东辉. 超声衰减法油水两相流含油率测量规律研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(12): 75-85. DOI: 10.12677/mos.2025.1412660

Abstract

Focusing on the challenge of online measurement of the oil volume fraction in oil-water two-phase flow, this paper proposes and systematically investigates a detection technique based on the ultrasound attenuation method. A two-dimensional finite element model incorporating multiple physical fields was developed using COMSOL to simulate ultrasonic propagation characteristics under two typical flow patterns: oil-in-water and water-in-oil. The effects of oil volume fraction, flow pattern transition, and oil viscosity on the ultrasonic attenuation coefficient were analyzed in detail. Simulation results indicate that in the oil-in-water flow pattern, the attenuation coefficient “initially increases and then decreases” with increasing oil volume fraction, with the transition occurring at approximately 35%. In the water-in-oil flow pattern, the attenuation coefficient peaks near an oil volume fraction of 65%, suggesting that the flow pattern structure plays a decisive role in acoustic energy dissipation. Furthermore, increased oil viscosity significantly enhances ultrasonic attenuation, primarily due to the synergistic effects of interfacial scattering and viscous dissipation. Static experimental data show good agreement with the numerical simulations, confirming the validity of the proposed method and the reliability of the results. This study demonstrates that the ultrasound attenuation method—featuring rapid response, non-radiation, and a simple structure—is suitable for the online monitoring of oil volume fraction in industrial oil-water two-phase flows, offering a new technical approach for multiphase flow parameter detection.

Keywords

Ultrasonic Attenuation, Oil-Water Two-Phase Flow, Oil Volume Fraction, Numerical Simulation

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

面对生产规模扩大与工艺日趋复杂的现代工业背景，多相流参数的精确测量已成为提升整体效能的关键瓶颈，准确获取多相流参数，对于实现生产过程的优化与工艺管理的高效化至关重要[1][2]。从全球能源消费的整体格局来看，石油至今仍是占据核心地位的主导性能源。当前油田开采普遍进入高含水阶段，在此背景下，精准实现油水两相流的计量工作，成为原油产量统计核算、油井生产动态研判及开发方案优化调整的关键前提。这一测量需求同样普遍存在于化工与能源等行业，对其中含油率的有效监测，是实现工艺优化与生产精准管控的重要前提[3]。

当前，油水两相流相含率的在线检测已发展出多种方法，涵盖了基于微波、射线、电学及超声等原理的技术。刘伟信[4]研制了一种用于高含水工况下油水两相流的含水率测量透射式微波谐振传感器，但其对环境噪声的高度敏感性成为制约其走向工业化应用的关键瓶颈。Abbagoni 等[5]提出了一种基于伽马射线衰减原理的方法，用于计算油水两相流相体积分数。Amir Sattari 等[6]为实现相含率的准确预测，将伽马射线吸收技术与人工神经网络结合，尽管该方法展现出良好的预测潜力，但伽马射线技术所固有的系统复杂性、高成本与辐射防护要求，为其实际工程应用带来了挑战。在电导法的应用方面，陈德运等[7]与杜萌等[8]分别采用了不同策略以实现相含率测量：前者基于电导探头响应特性对垂直井中的流型进行了估算；后者则利用了多电极阵列结构进行测量。然而，电导类传感器在实际应用中容易受到流体电

导率波动的影响，导致测量稳定性下降。

在相含率检测的多种技术中，超声法凭借其独特优势获得了广泛研究。其技术性能上表现为快速响应、强穿透性、无辐射、无流场干扰及与电导率无关；应用价值上则体现为结构简单、成本低且操作方便，这些特性共同奠定了其在工业在线检测中的重要地位。本文通过数值模拟和实验研究相结合的方法，重点研究了含油率、流型转变及油相黏度对超声衰减系数的影响规律。分析了不同流型下超声衰减特性及其与含油率之间的映射关系。通过建立精确的数值模型并开展实验验证，同时讨论了油相黏度对超声衰减系数的影响。本文旨在阐明流型转变对超声衰减规律的决定性影响，为基于超声衰减的含油率测量方法提供坚实的理论依据与实验数据支撑。

2. 超声衰减原理与数值仿真方法

2.1. 超声衰减原理

超声在油水两相流中传播的能量衰减，主要归因于黏性与散射两种机理的协同效应。黏性衰减主要取决于流体介质的固有物理属性，研究表明，其衰减程度与油相含率之间呈现出显著的线性关系。相比之下，散射衰减的机理则更为复杂，它受到油滴尺寸、空间分布状态及形态特征等多种因素的影响。在超声波传播过程中，油相会引起复杂的折射、衍射和反射现象，这些物理过程的相互作用使得散射衰减特性变得难以简单描述[9][10]。

基于超声衰减特性的测量技术，其工作原理具体如下：超声发射器先产生具有特定频率与强度的超声波束，当该波束穿透油水两相混合介质的过程中，会因介质的吸收、散射等作用产生衰减现象，导致自身能量出现损耗，最终这一经过衰减的超声波束会被接收装置捕获并完成检测[11]。为量化这种衰减效应，引入超声衰减系数 K 作为关键参数，其定义如式(1)所示：

$$K = -\frac{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{l} \quad (1)$$

式中， P_1 和 P_2 分别为超声波发射与接收端的声压，kPa； l 为发射与接收端的距离，mm。

2.2. 数值仿真方法

在 COMSOL 多物理场平台上，采用有限元策略构建如图 1 所示的二维超声换能器网格模型：管段内径设为 50 mm，激励晶片置于顶部，底部布置接收晶片，实现声场-结构耦合计算。仿真参数见表 1。

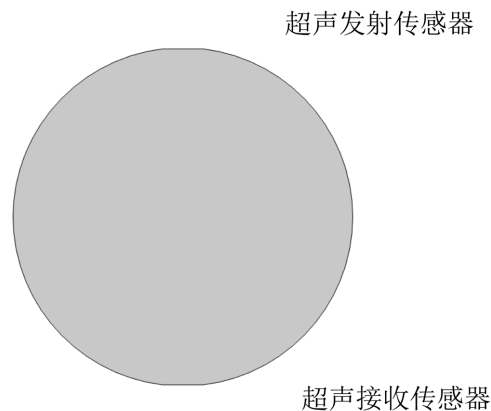


Figure 1. Schematic diagram of the simulation model
图 1. 仿真模型示意图

基于压力声学理论构建数值计算模型，用于分析油水两相体系中不同油相形态(包括尺寸、空间分布及几何形状)对声场分布的影响。针对水包油均匀分布模型，本研究采用自由剖分三角形网格进行离散，并系统开展了网格无关性验证，考察了不同相含率对数值解的影响。以 10%含油率为例，通过监测接收端声压值随网格密度的变化规律，得到如图 2 所示的结果。分析可知，接收声压值随网格数量增加呈现振荡并最终收敛的趋势。当网格数量达到 51,134 个后，接收声压值不再随网格继续加密而发生显著变化，说明此时数值解已具备网格无关性。

Table 1. List of simulation parameters
表 1. 仿真参数表

介质	声速 $c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	动力黏度 $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	本体黏度 $\mu_B/\text{Pa}\cdot\text{s}$	温度 T/K
水	1500	998	1.01×10^{-3}	2.98×10^{-3}	293.15
油	1324	827	0.54	0.029	

注：表中数据取自 COMSOL Multiphysics 6.0 内置材料库，温度为 20℃(293.15 K)，标准大气压下测得。

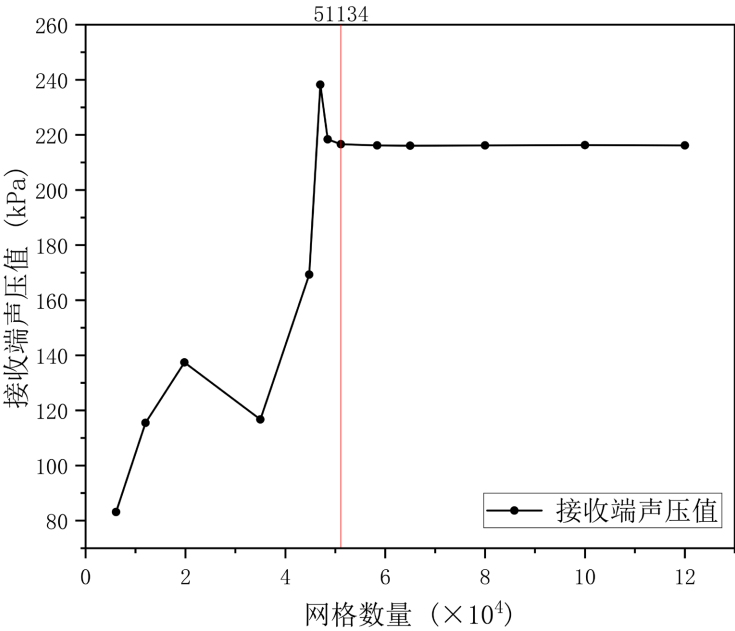


Figure 2. Grid independence verification (Exemplified by 10% oil volume fraction)
图 2. 网格无关性验证(10%含油率举例)

3. 实验结果与讨论

首先利用 COMSOL 开展了含油率对超声衰减系数影响的研究，并采用静态实验验证了本模型的可靠性，随后通过仿真实验探究流型和黏度对超声衰减系数的影响规律，分析了其影响机制。

3.1. 含油率对超声衰减系数的影响

3.1.1. 数值模拟结果

工程现场常见的油水混输工况中，水包油形态占比极高：水构成连续背景，油则被剪切成微米级液滴并均匀悬浮其中。针对上述流型分布特征，本研究建立了与之对应的数值模拟模型。管径固定为 50 mm，

全域以自由三角形网格离散;水 - 油边界由 Bézier 多段线近似,形成可辨界面。探头尺寸 $6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$, 布置为单发单收: 发射侧通过结构 - 声耦合激励, 接收侧沿二维截线提取衰减声压。超声激励幅值和中心频率设置为 10 V 、 1 MHz 。油相以直径 2 mm 的圆形油泡模拟, 通过改变油泡数量实现不同截面含油率, 如图 3 所示。

为模拟不同含油率条件, 在保持油泡大小与分布均匀性不变的前提下, 通过调控油泡数量实现这一目的, 具体对应关系如表 2 所示。本仿真将含油率上限设定为 60% , 主要原因如下: 其一, 受模型本身限制, 含油率与油泡数量成正比, 超过此阈值后, 油泡在管道内的空间排布将面临困难, 且模型计算复杂度会急剧增加; 其二, 在实际流动中, 含油率超过 60% 会引发油滴的显著聚并, 导致流型从根本上发生转变, 不再适用于当前的水包油流型模型进行描述[12][13]。因此, 仿真模型的含油率变化范围在 60% 及以下。不同含油率仿真模型见图 4, 得到不同油相含率的声压分布结果如图 5 所示。

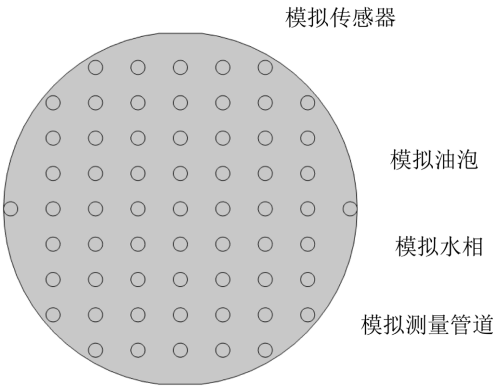


Figure 3. Oil-water two-phase flow simulation model (10% oil volume fraction, O/W with uniform distribution)
图 3. 油水两相流仿真模型(含油率为 10%, 水包油均匀分布)

Table 2. Correspondence table between oil volume fraction and the number of oil bubbles
表 2. 含油率与油泡个数对应关系表

含油率(%)	10	20	30	40	50	60
油泡个数	64	125	188	250	313	375

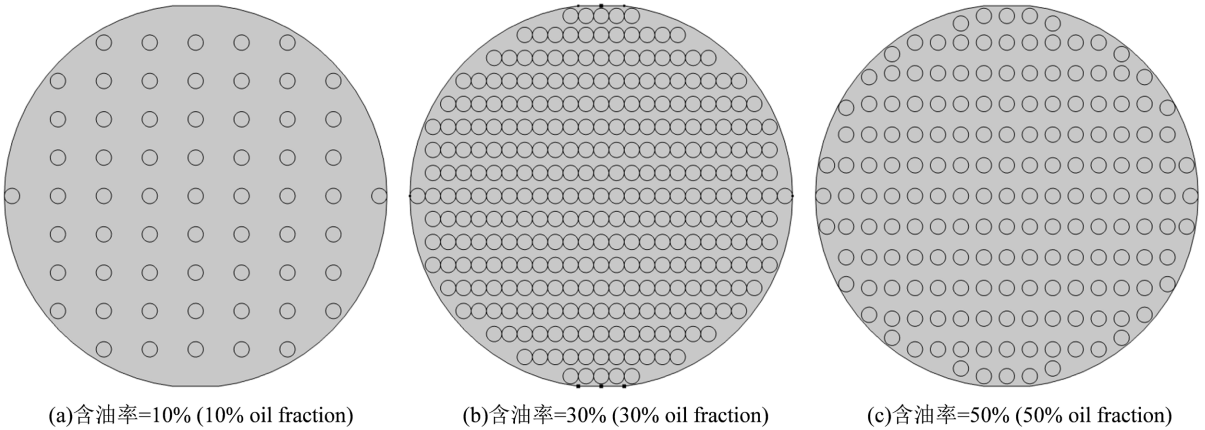


Figure 4. Simulation model
图 4. 仿真模型

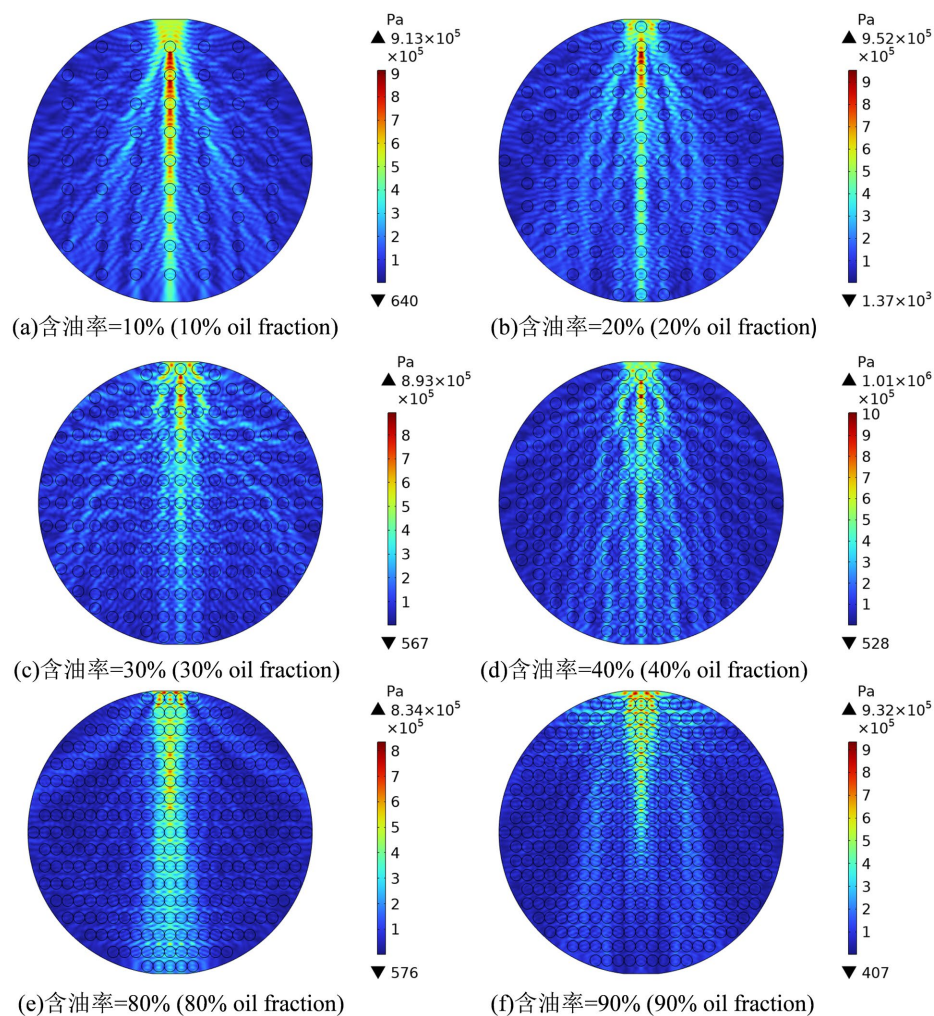


Figure 5. Simulation results of sound pressure for O/W flow pattern

图 5. 水包油流型声压模拟结果

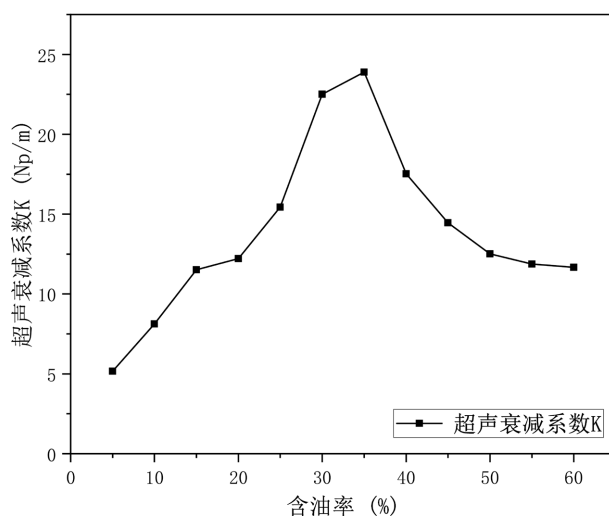


Figure 6. Simulation results of the variation of ultrasonic attenuation coefficient with oil volume fraction

图 6. 超声衰减系数随含油率变化的模拟结果

图 6 显示出了水包油流型下, 接收端超声波衰减系数随含油率变化的仿真结果。可以看出衰减系数随含油率演变呈现三阶段特征: 当含油率低于 35% 时, 衰减系数随含油率的提升呈单调递增态势; 一旦含油率突破该阈值, 衰减系数便快速下滑, 直至含油率处于 45%~60% 区间时, 其下降幅度才明显放缓。对这一变化过程的深入分析可得出如下结论: 含油率低于 35% 时, 体系表现为水包油的流型特征, 此时水相作为连续相存在, 超声波衰减系数会随含油率的升高而同步增大, 二者呈现显著的正相关关系; 当含油率超过 35% 后, 油相占比逐渐上升, 油水两相逐步向均匀混合状态过渡, 超声波的传播特性也随之趋近于单相介质, 此时衰减主要由介质自身的传播损耗主导, 而由散射与反射引发的声能损失则有所减少, 进而导致衰减系数快速下降; 在含油率 45%~60% 的范围内, 由于两相分布的均匀性进一步提升, 衰减系数的下降速率也相应减缓。直至含油率高于 60%, 系统最终过渡为以油为连续相的油包水流型。

3.1.2. 静态实验验证

为验证前述仿真方法的有效性, 实验采用中心频率 1 MHz、直径 6 mm 的超声传感器, 在 10 V 激励电压下进行测量。实验介质选用工业白油(密度 850 kg/m^3)与自来水(密度 998 kg/m^3), 使用带刻度针管准确抽取并混合均匀以配制样品, 并置于内径为 50 mm 的有机玻璃管, 如图 7 所示。



Figure 7. Uniform oil-water mixing state
图 7. 油水混合均匀状态

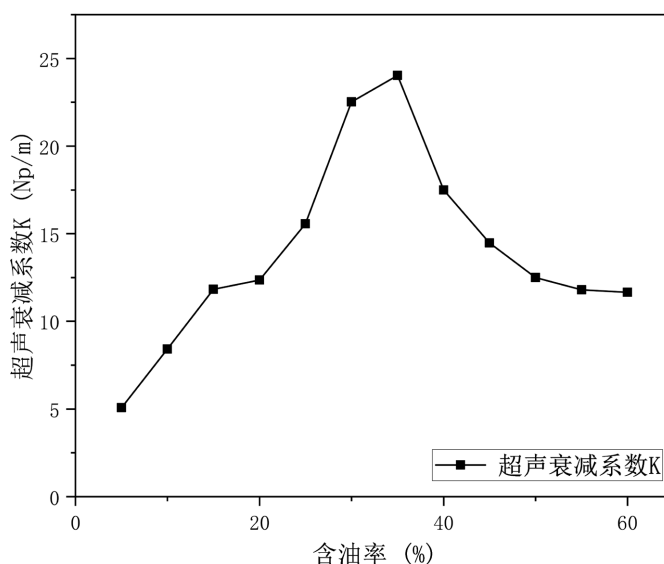


Figure 8. Experimental results of the variation of ultrasonic attenuation coefficient with oil volume fraction
图 8. 超声衰减系数随含油率变化的实验结果

实验对 0%~100%全范围的含油率进行了测量,如图 8 所示。由图可以看出:在 20%~30%含油率区间快速上升,超过 30%后迅速下降,45%之后下降速度减缓。值得注意的趋势拐点差异在于:仿真中衰减系数在含油率 35%时开始下降(图 6),而实验结果显示该拐点出现在 30%(图 8)。该差异归因于仿真中理想的均匀油相分布设定,与实际实验中含油率超过 30%后油相发生聚并、不再保持均匀细小分散状态有关;油相的聚并削弱了由散射与反射造成的超声能量耗散,致使实验测得的衰减系数提前下降。当含油率升至 45%,仿真中油相的高密集度分布与实际均匀混合状态的衰减特性相近。尽管存在上述局部差异,但实验与仿真结果的整体趋势具有较好一致性,这表明所述超声衰减测试方法具备可行性及有效性。

3.2. 流型对超声衰减系数的影响

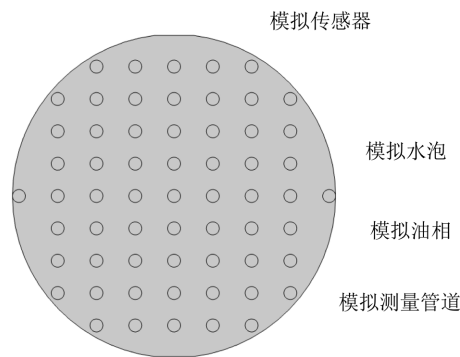


Figure 9. Oil-water two-phase flow simulation model (10% oil volume fraction, O/W with uniform distribution)
图 9. 油水两相流仿真模型(含油率为 90%, 水包油均匀分布)

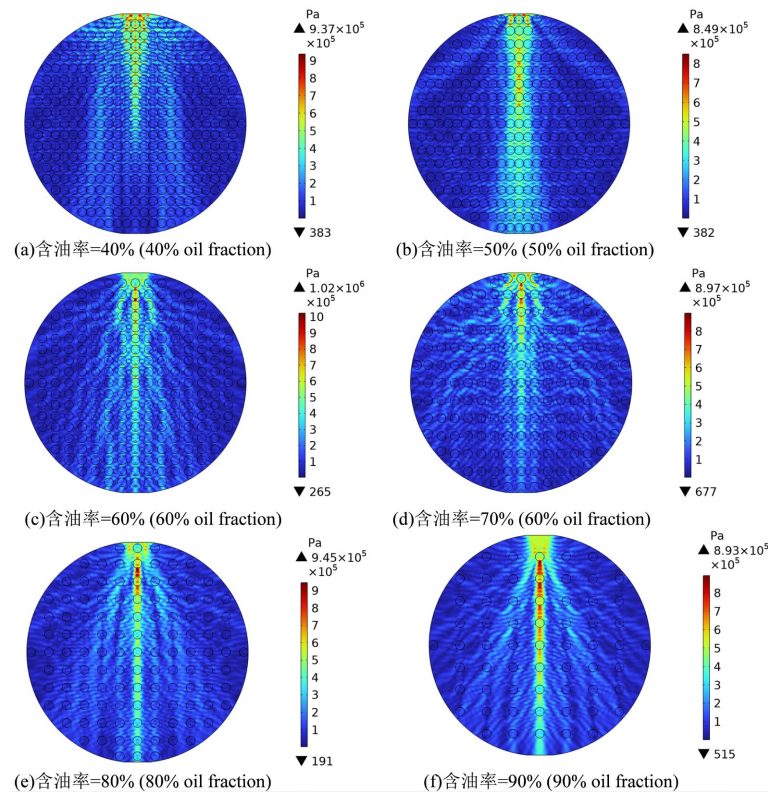


Figure 10. Simulation results of sound pressure for W/O flow type
图 10. 油包水流型声压模拟结果

上述研究明确了水包油流型中超声衰减的典型特征。然而，在多相流研究中，流型的转变意味着介质中连续相与分散相关系的根本性重构，而这通常是决定其物理性质的核心因素。因此，为了获得更全面的认识，本研究将考察对象由“水包油”切换至其镜像体系——“油包水”。建立如上述相同的模型，但全域用油充满，水相以直径 2 mm 的水泡形式均匀分布在油相中(图 9)，模拟得到不同油相含率的声压分布，如图 10 所示。

通过计算得到不同含油率的超声衰减系数，见图 11。由图 11 可知：在油包水均匀分布流型中，超声衰减系数呈现先增后减的趋势。当含油率从 40% 增至 60% 左右时，衰减系数持续上升，这反映了体系正经历从水包油向油包水的流型转变过程。在此过渡区间，油水两相界面面积显著增加，声波在复杂的相界面上发生强烈的散射和反射，导致能量急剧耗散；在含油率达到 60%~70% 区间时，衰减系数达到峰值，这对应着油包水流型形成的关键阶段，此时分散相水滴的浓度和分布状态最有利于声波散射，可能产生了显著的共振散射效应，使声能损耗达到最大；当含油率超过 70% 继续增高时，衰减系数转而缓慢下降，这标志着稳定的油包水流型已经形成，此时油相作为连续相主导了声波传播，随着水滴浓度的降低，散射界面面积减少，声波衰减效应相应减弱。这一完整的变化规律充分证实了流型转变对超声衰减行为起着决定性作用。

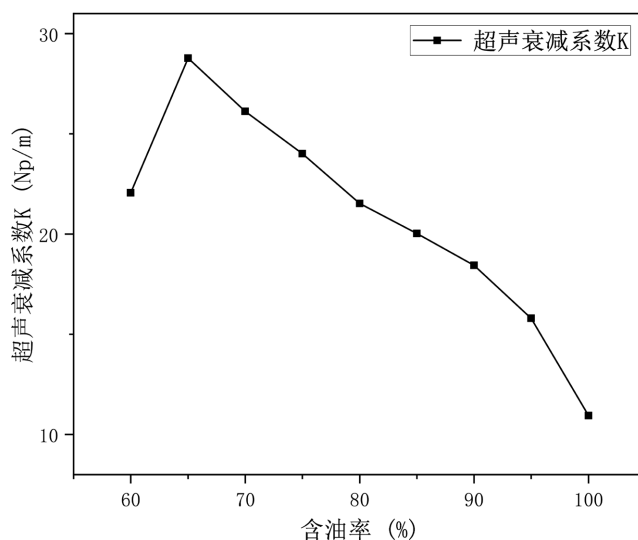


Figure 11. Simulation results of W/O flow type ultrasonic attenuation coefficient variation with oil volume fraction
图 11. 油包水流型超声衰减系数随含油率变化的模拟结果

3.3. 油粘度对超声衰减系数的影响

在油水两相流体系中，油相的动力粘度是决定其流动与传质特性的核心物理参数之一。它不仅直接影响混合流体的整体流变特性与能量耗散，更通过调控液滴在连续相中的变形、振荡及聚并行为，深刻影响着体系的稳定性和输运效率。因此，研究油相粘度对超声衰减的影响具有重要的理论价值与工程意义。为研究这一关键参数，在确保含油率恒定及流型均匀分布的前提下，通过系统改变油相的动力粘度，进行了数值模拟研究，考察了不同动力粘度对数值解的影响。以 20% 含油率、水包油流型为例，模拟动力粘度在 0.2~0.9 Pa·s 之间接收端声压值变化，结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出，超声衰减系数与油相动力粘度之间存在显著的相关性。随着动力粘度的升高，超声衰减系数呈现显著的单调上升趋势。在固定含油率的均匀水包油流型中，粘度的增加主要通过两种机制导致更强的超声衰减：首先，粘度更高的油相其自身内摩擦作用更强，声波在传播过程中会将更多能

量转化为热能；其次，粘度变化会影响油水界面特性，增强声波在界面处的散射与粘性耗散。其综合效应表现为接收探头捕获的声压信号减弱，超声波能量衰减加剧。

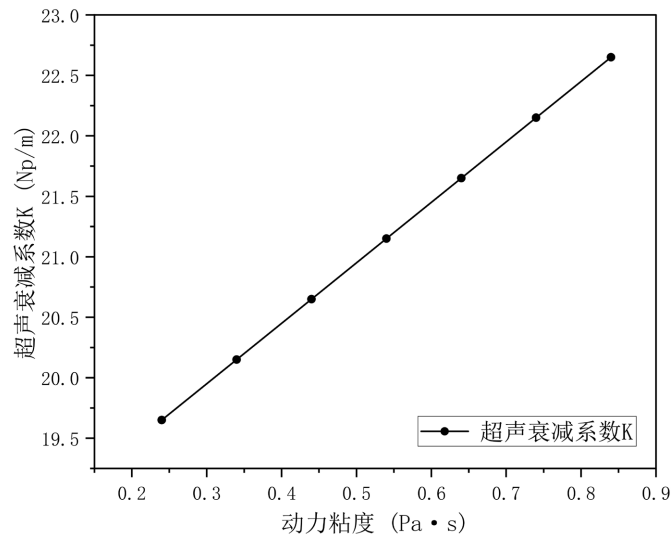


Figure 12. Ultrasonic attenuation coefficients with different dynamic viscosities (20% oil volume fraction)
图 12. 不同动力粘度的超声衰减系数(20%含油率)

4. 结论

1) 不同流型下超声衰减系数与含油率均服从非单调变化规律。水包油流型下的特征峰出现在含油率 35%左右；而在油包水流型中，峰值出现在 65%左右，这种差异为不同流型下的含油率测量提供了特征判据。

2) 流型结构对超声衰减行为起着决定性作用。从水包油到油包水的转变过程中，连续相与分散相关系的重构导致声波散射机制发生根本变化，这是造成不同流型下衰减 - 含油率关系曲线特征差异的根本原因。

3) 在含油率一定条件下，油相动力粘度会对超声衰减系数产生一定影响。随着粘度从 0.2 Pa·s 增加至 0.9 Pa·s，衰减系数呈现单调上升趋势，这主要源于高粘度介质增强的声能吸收和界面耗散效应，表明在实际应用中需考虑油相物性变化对测量结果的影响。

本研究基于二维静态均匀分布模型开展数值模拟与实验验证，有效揭示了超声衰减与含油率、流型及油相黏度的关系。然而二维模型无法充分反映实际管道中三维流动结构对声场分布的复杂影响，而且模型假设油/水相以理想均匀的圆形液滴分布，忽略了实际流动中液滴聚并、破碎、非球形变形等动态行为，因此当前模型更适用于定性趋势分析，而在定量测量精度与动态响应特性方面仍需进一步结合三维动态耦合模型与在线流动实验予以完善。

参考文献

[1] 林宗虎, 王栋, 王树众, 等. 多相流的近期工程应用趋向[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(9): 886-890.
[2] 王新华, 胡东, 孙树文, 等. 多油井自动计量监控系统的设计与开发[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S1): 315-318.
[3] 崔庆保, 高臣, 郭忠懿. 大庆油田产出剖面测井技术与进展[J]. 测井技术, 2007, 31(1): 30-34.
[4] 刘伟信. 高含水油水两相流持水率微波传感器测量方法研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.

-
- [5] Abbagoni, B.M., Yeung, H. and Lao, L. (2022) Non-Invasive Measurement of Oil-Water Two-Phase Flow in Vertical Pipe Using Ultrasonic Doppler Sensor and Gamma Ray Densitometer. *Chemical Engineering Science*, **248**, Article ID: 117218. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117218>
- [6] Amir Sattari, M., Hossein Roshani, G., Hanus, R. and Nazemi, E. (2021) Applicability of Time-Domain Feature Extraction Methods and Artificial Intelligence in Two-Phase Flow Meters Based on Gamma-Ray Absorption Technique. *Measurement*, **168**, Article ID: 108474. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108474>
- [7] 陈德运, 于晓洋, 赵霞, 等. 油水两相流电容层析成像系统电容测量电路的设计[J]. 电路与系统学报, 2004(4): 107-109.
- [8] 杜萌, 金宁德, 高忠科, 等. 油水两相流水包油流型多尺度排列熵分析[J]. 物理学报, 2012, 61(23): 113-121.
- [9] 苏茜, 邓翔天, 刘振兴. 油气水三相流相含率超声测试模型优化[J]. 化工进展, 2024, 43(2): 791-799.
- [10] 苏茜. 油气水多相流相含率超声测量机理与方法[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017.
- [11] O'Neill, K.T., Brancato, L., Stanwix, P.L., Fridjonsson, E.O. and Johns, M.L. (2019) Two-Phase Oil/Water Flow Measurement Using an Earth's Field Nuclear Magnetic Resonance Flow Meter. *Chemical Engineering Science*, **202**, 222-237. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.03.018>
- [12] 邵一哲. 油水两相流含油率超声衰减测试方法[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [13] 邵一哲, 谭超, 董峰. 超声衰减法测量油水分散流中颗粒粒度分布[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(4): 806-810.