光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023010601

用于油井相含率测量的光纤探针传感器研究

王　蒙*，赵庆超，张绪成，吕京生，吕　蕾

（齐鲁工业大学（山东省科学院）激光研究所，济南 250104）

摘　要： 针对地面成熟三相流相含率测量传感器无法适应井下高温高压腐蚀的复杂环境，现有井下测量设备复杂，需要多种传感器和探头联合才能实现三相流相含率测量的问题，设计了一种光纤探针传感器。以蓝宝石作为光纤探针的前端敏感材料，利用气相和液相对光的折射率不同，通过检测探针反射光的光强来分辨光纤探针处于气相还是液相。通过检测经探针耦合进光纤的荧光光强分辨水相还是油相，从而实现单一探针传感器对油井内油相、水相、气相三相相含率的测量。

关键词： 光纤传感；光纤探针；三相流；相含率

中图分类号： TP212.14　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0467－04

Study on Optical Fiber Probe Sensor for Oil Well Phase Holdup Measurement

WANG Meng, ZHAO Qingchao, ZHANG Xucheng, LV Jingsheng, LV Lei

(Laser Institute, Qilu University of Technology(Shandong Academy of Sciences), Ji'nan 250104, CHN)

Abstract: The mature three-phase flow phase holdup measurement sensor on the ground cannot adapt to the complex environment of high-temperature and high-pressure corrosion, and the existing downhole measuring equipment is complex. A fiber optic probe sensor was designed to solve the above problems. Sapphire was used as the front sensing material of the optical fiber probe. Due to the difference in refractive index of light between the gas phase and the liquid phase, the light intensity of the reflected light from the probe was detected to distinguish whether the optical fiber probe was in the gas phase or the liquid phase. By detecting the fluorescent light intensity coupled to the optical fiber through the optical fiber probe to distinguish the water phase or the oil phase, the measurement of the three-phase phase holdup of oil, water and gas in the oil well can be realized with a single probe sensor.

Key words: optical sensing and sensors; optical fiber probe; three-phase flow; phase holdup

0　引言

在油气井开采的过程中，井中深储藏区的天然气伴随着原油相一起向上流动，在上升的过程中压力减小，天然气逐渐析出，加上油井中大量的地层水形成了油气井中复杂的多相流流动特性[1-3]。主要包括油相、气相和水相三相，三种介质互相混合构成多相流中的一种流动形式。为提高采收效率，持续的注水导致油气井的开发中后期井内含水率较高，开采出来的大部分成分为水、原油和天然气的混合物。由于石油的流动特性，在开采过程中油气藏会不断地发生变化，因此需要在开采过程中对油气井进行不断地了解和改进，其中最重要的手段之一是对油气井内的三相流截面积相含率进行测量[4]。

油气井内三相流流动特性复杂，且井下空间狭小、温度压力较高、环境恶劣复杂，常规地面检测设

收稿日期：2023－01－06.

基金项目：山东省自然基金项目(ZR2020LLZ010)；山东省高等学校“青创科技支持计划”项目(2021KJ049).

* **通信作者：**王　蒙　**E-mail：**meng_w@buaa.edu.cn

备已无法应用于油气井内，为尽可能准确地测量出井中三相流的相含率，需研制出新型适应上述恶劣环境的检测系统。光纤传感器作为新型传感技术，具有抗电磁干扰、耐压耐温耐腐蚀且测量可靠性较高等特点。光纤传感器在三相流测量方面的应用逐渐成为国内外相关领域研究的热点[5-9]。

1 光纤传感器油井三相流相含率测量机理

在光纤探针传感器中，光源发出的光经过导光光纤传播到探针前端的敏感头上。在待检测介质和探针敏感头的分界面上，一部分光经折射进入待检测物质，一部分光经反射经过传导光纤传到探测器端，不同介质对光线的折射率不同，反射光线的强度不同[10]。原油中不饱和烃及其衍生物在紫外光照射下，会发生能量跃迁而呈现出一种光亮的特征[11]。当光纤探针敏感头接触三相流体中的气体时，光在光纤探针敏感探头大部分发生全反射，只有少部分折射光；但当光纤探针敏感头接触到油气井中三相流中的液体时，折射率增大，全反射的临界角增大，更多的光折射入液体中。当介质是原油时，原油经折射光的照射会激发出不同波长的荧光。通过检测光纤探针敏感头反射光光强的强弱来分辨光纤探针敏感头处于气相还是液相，通过检测敏感头耦合进来的荧光光强分辨探针敏感探头处于水相还是油相。如图 1 所示，单一探针实现对油井三相流油相、水相、气相相含率的测量。

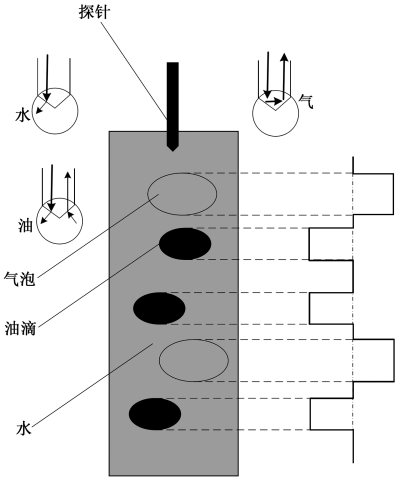


图 1 光纤探针传感原理示意图

2 光纤探针敏感头材料选择和结构设计

光纤探针的敏感头是整个传感器的敏感部分，对整个传感器的敏感性和检测的可靠性极其重要。理论上塑料光纤、玻璃光纤、石英光纤和蓝宝石光纤等都能作为探针敏感头材料，实现对三相流相含量的识别和检测。探针敏感头必须适应油井的特殊环境同时须保证反射光能量值较大，除了物理特性还需考虑化学特性问题，因为原油中的一部分物质为酸碱性，而此类酸碱物质会腐蚀石英等介质，石英光纤工作一段时间后由于探针尖端被腐蚀会导致光纤敏感头不能正常工作。另外还需考虑材料的易加工性等特点。经研究，蓝宝石材质透光性好、硬度高且化学特性稳定、耐高温腐蚀，是光纤探针敏感材料的理想材料[12-14]。

光纤探针传感器的敏感头是影响传感器灵敏度和工作稳定性的关键因素。敏感头的直径越大，敏感头的液膜相比越小，另一方面敏感头的直径越小，传感器对流体的扰动越小。敏感头的直径和形状设计是提高传感器灵敏度的关键。通过仿真手段对探头的结构进行调整，观察回光功率的变化，得到探针敏感头的最优结构为直径 0.1 mm 的 350 的圆锥形[15-17]，如图 2 所示。

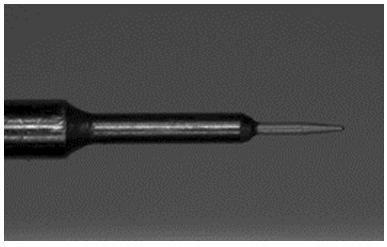


图 2 蓝宝石探针结构

这种结构刺入气泡或油泡的能力强，能够更有效地识别油气水三相。蓝宝石探针与过渡管通过玻璃焊料焊接密封。玻璃焊料焊接密封具有良好的密封性和稳定性。过渡管的使用是为消除释放焊接过程中产生应力，其管材质为 TA18。保护套管的材质为 Incone1718，具有高强度、耐腐蚀及良好的焊接性能等优点。

3 光纤探针传感器组成和测量试验

光源采用 470 nm 波长的激光，激光器和光电接收器件通过光纤与敏感蓝宝石探针连接。光纤探针的原理结构如图 3 所示。

激光器 LD 发出激光经传导光纤传输到蓝宝石探头，光纤与蓝宝石的耦合方式采用耐高温的光学胶粘接。对蓝宝石探针反射和耦合回来的光进行解

调，对于耦合回来的荧光需经 WDM 进行光学滤波，消除反射光对荧光检测的影响。通过对反射光和耦合荧光的强度进行解调来识别探针的蓝宝石敏感头部处于油、气、水三相中的某一相。通过检测探头处于三相中的时间计算三相的相含率。三联光纤探针实物照片如图 4 所示。

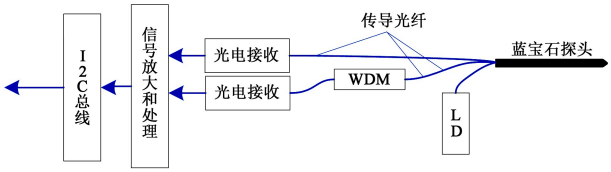


图 3　光纤探针传感器原理结构图

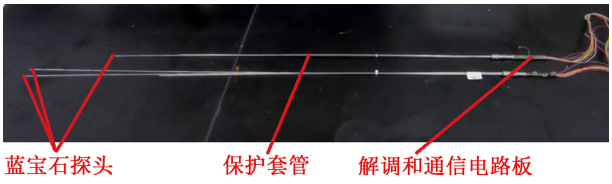


图 4　三联光纤探针实物照片

将探针敏感区域放置于油水混合物中，油水混合物底部放置吐泡器，通过吐泡器产生向上流动的气泡。测试结构原理图如图 5 所示。

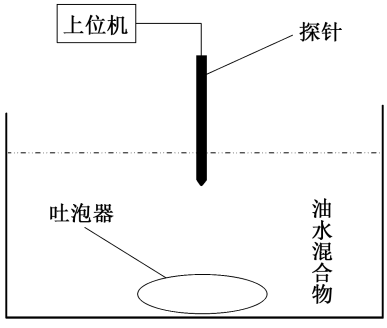


图 5　三相流测试结构原理图

通过 I2C 总线协议将探针信号上传至上位机，上传时钟频率为 800 kHz，得到实时显示结果如图 6 所示，可以正确地显示蓝宝石探针头部处于油、气、水三相中的哪种状态。

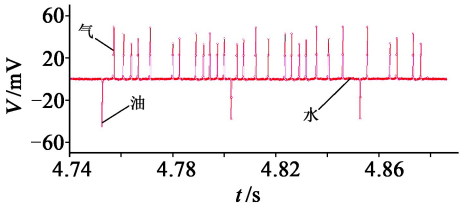


图 6　光纤探针测试信号

4　高温、高压密封性和稳定试验

为测试探针在高温高压环境下的密封能力，对光纤探针传感器的耐压结构进行高温打压试验。将探针传感器的前端耐压结构通过金属卡套密封并放置于加压筒中，并将加压筒和整个光纤探针传感器放在烘箱内，连接结构图如图 7 所示。

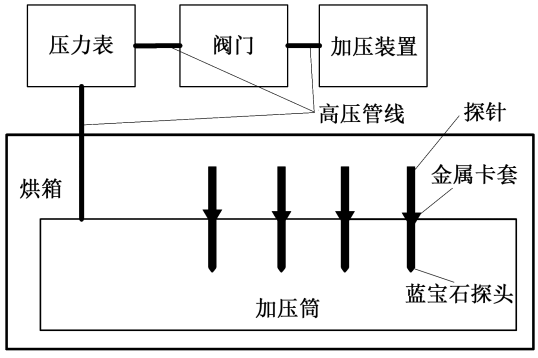


图 7　探针耐压测试装置示意图

将烘箱温度设为 155 ℃，加压装置通过液压油打压加压筒，逐步加压并进行保持。经多次循环打压测试完成后观察，均未发现探针保护套管后端有液压油泄露现象。经多次重复试验表明探针的密封结构可承受高温（150 ℃）、高压（103 MPa），可适应恶劣的测试环境要求。

5　结论

研制出一种低功耗、耐高温、耐高压、检测相对范围角不小于 60°，最小可测气泡不大于 1 mm 的三联光纤探针传感器。良好的密封耐压结构和工艺，保证探针承压结构的可靠性和稳定性。经试验验证，光纤探针在 150 ℃，103 MPa 的环境下可以稳定可靠地工作。利用该光纤探针传感器可以开展井下三相流的相含量测量，为准确确定高产液层，提高油气井产量提供技术支撑。

参考文献：

[1]　金宁德，任卫凯，陈　选，等. 油-气-水三相流超声传感器持气率测量[J]. 应用声学，2020，39(1)：36-44.
Jin Ningde，Ren Weikai，Chen Xuan，et al. Measurement of gas holdup in three phase flow using ultrasonic sensor[J]. J. of Appl. Acoustics，2020，39(1)：36-44.

[2]　徐　林，胡金海，杨长河，等. 光纤探针-阻抗三相流测井仪在三相流中的试验及分析[J]. 石油管材与仪器，2022，8(3)：60-65.
Xu Lin，Hu Jinhai，Yang Changhe，et al. Experiment and analysis of fiber optical probe impedance three-phase flow logger in three-phase flow [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments，2022，8(3)：60-65.

[3]　Wegmann A，Melke J，Rohr P R. Three phase liquid-liquid-

gas flows in 5.6 mm and 7 mm inner diameter pipes[J]. Inter. J. of Multiphase Flow, 2017, 33(5): 484-497.

[4] 姜勐栋，王 蒙，赵庆超，等. 一种用于油气井持气率测量的高可靠性光纤探针[J]. 半导体光电，2020，41(5)：673-675，723.

Jiang Shaodong, Wang Meng, Zhao Qingchao, et al. A high-reliability optical fiber probe for void fraction measurement of oil and gas wells[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(5): 673-675, 723.

[5] 陈基亮，孔德明，郝 虎，等. 石油生产光纤-电导组合探针阵列多分相测井仪研究[J]. 仪器仪表学报，2022，43(1)：239-252.

Chen Jiliang, Kong Deming, Hao Hu, et al. Research on a fiber-conductance combined probe array multi-phase logging tool in petroleum productions[J]. 2022, 43(1): 239-252.

[6] Wang Dayang, Jin Ningde, Han Yunfeng, et al. Measurement of gas phase characteristics in vertical oil-gas-water slug and churn flows[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 177: 53-73.

[7] 赵孝民. 基于DSP的油井井下光纤探针系统设计与实现[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2017：1-2.

Zhao Xiaomin. Design and implementation of optical fiber probe system under oil well based on DSP[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017: 1-2.

[8] 胡金海，黄春辉，刘晓磊，等. 光纤探针阻抗传感器涡轮组合测井仪三相流解释方法[J]. 测井技术，2021，45(3)：311-316.

Hu Jinhai, Huang Chunhui, Liu Xiaolei, et al. Interpretation method of three-phase flow based on the commination of optical fiber probe impendence sensor and turbine flowmeter[J]. Well Logging Techology, 2021, 45(3): 311-316.

[9] 杭天渊，刘 凤，王晓蕾，等. 蓝宝石光纤探针传感器探针研制工艺及传光测试[J]. 光学与光电技术，2017，15(4)：26-32，37.

Hang Tianyuan, Liu Feng, Wang Xiaolei, et al. Development of sapphire fiber probe sensor probe and measurement of light transmission[J]. Optics & Optoelectronics Technology, 2017, 15(4): 26-32, 37.

[10] 王 杨. 一种新型产出剖面三相流组合测井仪的研制[J]. 石油管材与仪器，2017，3(1)：22-25，28.

Wang Yang. Development of a three-phase flow combined logging instrument with production profile[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2017, 3(1): 22-25, 28.

[11] 任伟伟. 原油荧光光谱特性及分析技术研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2010：87.

Ren Weiwei. Crude oil fluorescence spectral characteristics and analysis[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 87.

[12] Orlando A E, Barca L F, Heindel T J, et al. Gas holdup and flow regime in a bubble column that includes enhanced oil recovery chemicals[J]. J. of Petroleum Science and Engin., 2021, 204: 108675.

[13] Lefebvre A, Mezui Y, Obligado M, et al. A new, optimized Doppler optical probe for phase detection, bubble velocity and size measurements: Investigation of a bubble column operated in the heterogeneous regime[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 250: 117359.

[14] 王彤彤，刘军锋，李秉科，等. 基于阵列光纤探针的水平井气水两相持率数据分析[J]. 云南化工，2020，47(5)：60-61.

Wang Tongtong, Liu Junfeng, Li Bingke, et al. Analysis of gas-water two-phase holdup of horizontal well based on array fiber probe[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(5): 60-61.

[15] 张 勇，李英伟，刘兴斌，等. 持气率测量光纤探针敏感头仿真及形状优化[J]. 石油管材与仪器，2015，1(2)：82-84，88.

Zhang Yong, Li Yingwei, Liu Xingbin, et al. Optimized measurement of gas holdup of the optical fiber probe sensitive head structure[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015, 1(2): 82-84, 88.

[16] Cartellier A. Measurement of gas phase characteristics using new monofiber optical probes and real-time signal processing [J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 184(2): 393-408.

[17] 郝志远. 油气水三相流持气率测量光纤探针传感器结构优化设计[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017：3-4.

Hao Zhiyuan. Optimum design of fiber optic probe sensor structure for measurement of gas holdup in oil-gas-water three-phase flow[D]. Qin Huangdao: Yanshan University, 2017: 3-4.

作者简介：

王 蒙(1986—)，男，山东省临沂市人，硕士，副研究员，主要从事光纤传感和光电检测方面的研究。