

井下试油检测中的流体动态监测技术

王 磊 段军平 张言玉

青海油田井下作业公司试油测试大队 青海 茫崖 736202

摘 要：随着油田勘探开发的不断深入，井下试油检测技术在提高油气田采收率中发挥着关键作用。流体动态监测技术作为井下试油检测的核心组成部分，通过实时、连续、定量、定性地监测油气储层中的流体动态变化，为油田生产管理和开发方案提供重要数据支持。本文系统综述了井下试油检测中流体动态监测技术的研究现状、技术原理、应用方法以及发展趋势，旨在为该领域的研究与应用提供理论参考和实践指导。

关键词：井下试油检测；流体动态；监测技术

引言

油田开发过程中，掌握油气储层中的物理、化学、流体等参数的动态变化至关重要。流体动态监测技术通过对地下储层进行实时、连续的监测和分析，能够准确反映储层内流体分布、流动状态以及压力、温度等参数的动态变化，为油田开发方案的优化和生产效率的提升提供科学依据。本文将从流体动态监测技术的原理、应用方法以及发展趋势三个方面进行深入探讨。

1 流体动态监测技术原理

1.1 基本概念

流体动态监测是一种高度专业化的技术，其核心在于对地下油气储层中的流体状态进行实时、连续、定量且定性的监测与分析。这一技术不仅关注流体本身（如油、气、水）的特性，还深入探究这些流体在储层中的动态行为及其与储层岩石的相互作用。关键参数涵盖流量、流体密度、持水率（或含水饱和度）、温度、压力等，这些参数共同构成了描述井下流体状态的多维度信息体系。掌握这些参数的动态变化，对于准确识别井内流体类型、揭示流体流动规律、评估储层性能以及优化开采策略具有至关重要的意义。

1.2 技术原理

流体动态监测技术的实现，根本上依赖于先进的传感器技术和高效的数据处理技术。具体而言：（1）传感器技术：这是流体动态监测的“眼睛”和“耳朵”。通过在井内或井口附近精心布置各类高精度传感器，如温度传感器（利用电阻、热电偶或光学原理测量温度）、压力传感器（如石英压力计，利用压电效应测量压力）、流量计等，实现对地下流体参数的直接感知。这些传感器能够耐受高温、高压、腐蚀等极端环境，确保数据的准确性和可靠性。（2）数据处理技术：采集到的原始数据需经过一系列复杂的处理流程，包括数据

清洗、校准、滤波、特征提取等，以消除噪声、提高数据质量。随后，利用统计学、机器学习、物理建模等方法，对处理后的数据进行深入分析，揭示流体动态变化的内在规律和趋势。这一过程不仅涉及大量数学运算，还需要结合地质学、流体力学等多学科知识，以确保分析结果的准确性和实用性。此外，流体动态监测技术还融合了远程通信、自动化控制等现代信息技术，实现了数据的实时传输、远程监控和智能预警，极大地提高了油田管理的效率和响应速度^[1]。例如，通过无线传输技术，井下的监测数据可以即时发送至地面控制中心，便于工程师迅速做出决策；而基于人工智能的预警系统，则能在流体状态出现异常时自动报警，预防潜在的安全风险。

2 井下试油检测中流体动态监测技术应用方法

2.1 PLT测试技术

PLT测试（Production Logging Test）是井下试油检测中流体动态监测的一项关键技术，它通过在井筒内精确安装一套高度集成的测井仪器，实现对井内流体全方位、多参数的动态监测。这项技术以其高效、准确的特点，在油气田勘探与开发中扮演着至关重要的角色。

2.1.1 测试原理

PLT测试技术基于核物理、电磁学、热力学等原理，利用测井仪器中的各类传感器，如流量传感器、密度传感器、持水率传感器、温度传感器、压力传感器以及自然伽马探测器和磁定位器等，对井内流体进行实时测量。这些传感器能够精确捕捉流体在流动过程中的各种物理特性变化，从而提供详尽的流体动态信息。

2.1.2 参数获取

（1）流量：通过测量流体流经特定装置（如涡轮）时产生的转速变化，结合流体动力学原理，计算出流体的流量。（2）流体密度：利用密度传感器，如放射性同

位素密度计,根据流体对射线的吸收或散射程度,推算出流体的密度。(3)持水率:通过电容法、电阻法或微波法等,测量流体中水的含量,进而确定持水率或含水饱和度。(4)温度:采用电阻温度计、热电偶等,根据温度对材料电阻或热电势的影响,间接求出井内流体的温度。(5)压力:利用石英压力计、应变片压力计等,根据压力引起的物理效应(如石英的压电效应、应变片的形变),精确测量井底压力。(6)自然伽马和磁定位:自然伽马探测器用于识别地层中的放射性元素,辅助地层划分;磁定位器则通过检测地球磁场的变化,确定测井仪器的位置,确保测量的准确性。

2.1.3 意义与应用

PLT测试技术获取的丰富参数信息,对于深入理解井内流体的类型(如油、气、水及其混合物)、流动状态(如层流、湍流)、相态分布(如气液比、油水比)以及井下的环境条件(如温度、压力梯度)具有极其重要的意义。这些信息不仅有助于评估储层的产能和流体性质,还为后续的油气田开发方案设计、生产优化和动态管理提供了坚实的数据支撑。此外,PLT测试还可用于监测井筒状况、检测流体泄漏、评估完井效果等,是油气田勘探与开发中不可或缺的一环。

2.2 示踪剂法

示踪剂法是一种在井下试油检测中广泛应用的流体动态监测技术,尤其适用于评估剩余油饱和度、识别地下流体扩散通道以及研究储层连通性。该方法以其成本低廉、操作简便、效果显著的特点,在油气田勘探与开发领域占据了重要地位。

2.2.1 基本原理

示踪剂法的核心在于利用放射性同位素作为标记物,通过将其溶解在载体液体中,并注入到目标油井中。这些放射性同位素(如碘-131、溴-82等)具有特定的半衰期和辐射特性,能够在地下被追踪和检测。注入的示踪剂液体会随着地下流体一起流动,并沿着一定的通道(如裂缝、孔隙等)扩散。

2.2.2 实施步骤

(1)示踪剂选择与制备:根据监测目的和地下条件,选择合适的放射性同位素,并将其与载体液体混合,制备成示踪剂溶液。(2)注入示踪剂:在严格的安全措施下,将示踪剂溶液注入到目标油井中。注入量需根据井筒尺寸、储层特性和监测需求进行精确计算^[2]。(3)监测与采样:经过一段时间(通常是几天到几周)后,在相邻的连通井或观测井中采集流体样本,并使用放射性检测仪器(如盖革计数器、闪烁计数器等)测量

样本中的放射性强度。(4)数据分析:根据检测到的放射性强度数据,结合示踪剂的扩散模型和地下流体的流动规律,推断剩余油饱和度、地下流体的扩散通道以及储层的连通性。

2.2.3 优势与局限性

示踪剂法成本相对较低,且操作简便易行。它能够提供关于地下流体动态和储层连通性的直接证据,有助于优化开发方案和提高采收率。然而该方法要求两口井之间必须是连通的,且示踪剂的扩散速度可能受到地下条件(如渗透率、孔隙度等)的影响。此外,放射性同位素的使用需要严格遵守相关的安全规定和环保标准。

2.2.4 应用分析

示踪剂法在油气田勘探与开发中得到了广泛应用。例如,在注水开发油田中,可以利用示踪剂法监测注入水的流向和分布,评估注水效果;在裂缝性油藏中,可以通过示踪剂法识别裂缝的走向和连通性,为裂缝性油藏的开发提供重要依据。

2.3 试井技术

试井技术是油气田勘探与开发中一项至关重要的流体动态监测技术,它基于渗流力学理论,通过精心设计和实施一系列井筒工作制度的改变,如调整产量、开关井等,来系统地观察和测量井筒及储层中的压力、流量等关键参数。这一技术的核心目的是深入研究储层特性,准确评估油、气、水井的生产能力,从而为油田开发提供坚实的数据支持和科学指导。

2.3.1 技术原理

试井技术的基本原理在于,当井筒工作制度发生改变时,井筒与储层之间的流体流动状态会随之变化,这种变化会导致井筒内压力、流量等参数的动态响应。通过高精度的仪器设备(如机械压力计、存储式电子压力计、直读式电子压力计、温度计等)对这些参数进行实时监测和记录,可以捕捉到流体流动过程中的细微变化,进而揭示储层的渗流特性和生产能力。

2.3.2 主要仪器设备

(1)机械压力计:这是一种传统的压力测量仪器,通过机械结构将压力转换为可读的数值,具有结构简单、可靠耐用的特点。(2)存储式电子压力计:这种压力计内置有电子传感器和存储器,能够实时测量和记录压力数据,并在需要时通过特定方式(如无线传输)将数据导出。(3)直读式电子压力计:与存储式电子压力计类似,但具有即时显示压力值的功能,便于现场实时观测。(4)温度计:用于测量井筒内流体的温度,以辅助分析流体性质和储层条件。

2.3.3 试井分析

试井分析是试井技术的关键环节，它通过对实测数据进行处理和解释，来求解储层参数（如渗透率、流动系数、导压系数等）。这些参数是描述储层渗流特性和生产能力的重要指标，对于制定合理的开发方案、优化生产策略以及预测油田未来动态具有至关重要的意义。

渗透率：反映了储层岩石对流体的渗透能力，是评价储层好坏的重要指标之一^[3]。流动系数：综合了储层的渗透率和流体性质，用于描述流体在储层中的流动难易程度。导压系数：反映了储层中压力传播的速度和范围，对于理解储层的动态响应特性具有重要意义。

2.3.4 应用意义

试井技术不仅在新油田的勘探和开发阶段发挥着重要作用，还在老油田的增产挖潜、提高采收率等方面具有广泛的应用前景。通过试井测试，可以准确评估储层的生产潜力，为制定科学合理的开发方案提供重要依据；同时，还可以监测油田生产过程中的动态变化，及时发现和解决潜在问题，确保油田生产的稳定和高效。

3 井下试油检测中流体动态监测技术发展趋势

3.1 高精度监测仪器的发展

随着电子技术和传感器技术的飞速进步，井下流体动态监测仪器正经历着前所未有的革新。具体而言，以下几个方面将成为发展的重点：一是高精度传感器：利用先进的材料科学和微纳加工技术，开发出具有更高灵敏度、更低噪声和更宽测量范围的传感器。这些传感器将能够捕捉到流体动态中的微小变化，提供更为精确的数据支持。二是实时数据处理与分析：未来的监测仪器将内置强大的数据处理和分析模块，能够实时对采集到的数据进行初步处理，提取有用信息，并及时将处理结果传输至地面控制中心。这将大大缩短数据处理的周期，提高监测的实时性。三是自校准与自诊断功能：为了确保监测数据的准确性，未来的仪器将具备自校准和自诊断功能。通过定期自动校准，可以消除仪器因长时间使用而产生的漂移和误差；而自诊断功能则能及时发现并报告仪器的潜在故障，确保监测工作的连续性和可靠性。

3.2 多参数综合监测技术的应用

随着油气田勘探与开发的深入，单一参数的监测已难以满足复杂储层的动态监测需求。因此，多参数综合监测技术将成为未来的发展趋势。通过同时监测流量、

压力、温度、流体密度等多个参数，可以实现对储层动态变化的全面、准确掌握。未来的监测仪器将集成多个不同类型的传感器，以实现多个参数的同步监测。这些传感器将通过精心的设计和布局，确保数据的准确性和一致性^[4]。多参数监测将产生大量的数据，如何有效地融合这些数据并提取有用信息将成为关键。因此，需要开发先进的数据融合和解析算法，以实现储层动态变化的深入理解和准确预测。

3.3 智能化监测系统的建设

随着物联网、大数据和人工智能技术的快速发展，井下流体动态监测正向着智能化方向迈进。通过建立智能化的监测系统，可以实现数据的自动采集、处理和分析，以及异常情况的自动预警和处置。通过物联网技术，可以将井下的监测仪器与地面控制中心实时连接起来。这使得数据能够即时传输和分析，为决策提供更为及时的支持。利用大数据技术和人工智能算法，可以对海量监测数据进行深入挖掘和分析。通过机器学习、深度学习等方法，可以揭示数据中的隐藏规律和趋势，为油气田开发提供更为精准的预测和指导。智能化的监测系统还将具备自动预警和处置功能。当监测到异常情况时，系统能够自动触发预警机制，并及时采取相应的处置措施。这将有助于防止潜在的安全风险和生产事故，确保油气田的安全、高效开发。

结语

井下试油检测中的流体动态监测技术是油田开发过程中不可或缺的重要组成部分。通过实时、连续、定量、定性地监测油气储层中的流体动态变化，为油田生产管理和开发方案提供科学依据。未来，随着技术的不断进步和创新，流体动态监测技术将在提高油气勘探效率、优化油田开发方案和保障油气田安全等方面发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]陈立森,孙辰,孙涛,等.井下作业试油新技术研究[J].中国科技投资,2021,(20):123+156.
- [2]向荣鹏,蒋恩平.井下作业试油测试技术现状与发展探究[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(13):255-256.
- [3]刘喆.井下作业试油测试技术方案分析[J].化学工程与装备,2020,(03):233-234.
- [4]李盼.钻完井及试油液面监测系统与应用研究[D].西安石油大学,2023.