

# 冷冻破乳法在原油含水化验中的应用与经济效益分析

陈银洞 (胜利油田海洋采油厂, 山东 东营 257000)

**摘要:** 油井含水化验是油田开发决策的核心依据之一。其数据精准度, 会直接影响到产量核定, 以及开发方案的经济效益, 而针对油井乳化问题, 以及其所导致的含水化验失真困境, 本文提出了一种冷冻化冻破乳法, 并进行了验证。实验结果表明, 该方法能显著提高含水检测值的精准率, 可以真实反映油井含水的状况, 系统对比分析其他不同方法后, 发现冷冻法在经济效益方面, 优势更为突出。研究亦为油田优化化验方法, 提高开发效益, 提供了一种可靠的技术, 以及对应的经济效益依据。

**关键词:** 原油乳化; 含水化验失真; 冷冻化冻; 破乳; 经济效益

**中图分类号:** TE622      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0088-03

## Application and Economic Benefit Analysis of Freeze-Thaw Demulsification Method in Crude Oil Water Content Testing

Chen Yindong (Offshore Oil Production Plant, Shengli Oilfield, Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** Water cut analysis of oil wells is one of the core bases for oilfield development decisions. The accuracy of its data will directly affect the determination of production and the economic benefits of the development plan. In response to the emulsification problem of oil wells and the resulting distortion of water cut analysis, this paper proposes a freezing and thawing demulsification method and conducts verification. The experimental results show that this method can significantly improve the accuracy of water cut detection values and truly reflect the water cut status of oil wells. After systematically comparing and analyzing other different methods, it is found that the freezing method has more prominent economic benefits. The research also provides a reliable technology and corresponding economic benefit basis for optimizing the analysis methods of oilfields and improving development efficiency.

**Key words:** Emulsification of crude oil; Water content assay distortion; Freezing and thawing; emulsion breaking; Economic benefits

胜利油田某采油厂某采油管理区通过对油井含水化验工作过程的调查和研究, 发现油井产出液乳化在含水化验中乳化油流失是影响含水误差的最大因素<sup>[1]</sup>, 针对油井产出液乳化致使油水分离难化验失真的难题, 相关技术人员做了大量油样破乳试验, 最终提出针对性解决措施, 保证了化验含水的真实性和经济效益, 为油田开发提供可靠的数据支持。

### 1 油井原油含水化验失真的因素确定

2024年以来, 某采油厂某采油管理区经过多次的原油含水化验普查和含水化验过程调查, 发现化验中乳化油流失严重是导致含水误差波动较大重要因素。为此, 技术人员采用电脱仪加滴破乳剂化验方式和原来正常蒸馏模式对比, 观测电脱后油水界面不清晰, 油水分离不彻底, 与原来蒸馏方式相比, 部分油井含水误差在20%左右。普查出248口井中有50多口油井乳化严重, 油样中水相中存在大量的乳化油。由于无真实化验含水数据支撑, 给油藏开发方案调整和产量带来很大的被动。

### 2 油井原油乳化的原因

根据进一步原油乳化观察以及查阅相关资料, 确定了造成油井原油乳化的2个重要原因。

首先是油井原油的自身乳化原因。埕岛油田开采原油中由于含有沥青质、胶质、蜡、粘土等天然的乳化剂, 导致油井开采中油井含水上升, 由于乳化剂的存在, 形成油包水(W/O)、水包油(O/W)、油包水包油(O/W/O)、水包油包水(W/O/W)几种形式的乳化<sup>[2]</sup>。

再就是由于油藏开发过程中三次采油注入聚合物影响的原油乳化。埕岛油田A区块于2020年11月转入三次采油开发阶段, 开始注入聚合物驱替原油, 对应受效油井的采出液于2022年8月开始化验出聚合物。三次采油阶段, 由于大量的注入聚合物以及表面活性剂来驱油, 让原油的组成变得较为复杂, 这种表面活性剂导致原油乳化, 采出的乳化原油大多都是O/W型乳化原油。

### 3 油样破乳方法实验筛选

为探索原油破乳有效化验方式, 实现油样的精准含水化验, 我们尝试目前常规的化验方式并创新性的尝试冷冻法破乳试验, 通过分析对比化验的结果, 总结出适合乳化严重油样的含水化验方法。

#### 3.1 油样添加破乳剂试验

对已知化验含水波动较大、原油乳化严重的

208A-ZP2、6FA-2、4DB-3 等 3 口油井加 (2 ~ 3)mL 正反相破乳剂 (40 mg/L), 并将其加热 80℃ 左右, 静置 2h 后剥离游离水化验, 游离水中析出部分乳化油。可见破乳剂对乳化油破乳有一定的效果, 但析出乳化油后的游离水仍明显含有较多的乳化油<sup>[3]</sup>, 静置 10 天后样瓶壁仍可见析出较多的乳化油, 可见此种化验方式误差较大。

### 3.2 一次剥离游离水静置试验

对存在乳化现象的 9 口油井采用油样当日剥离游离水, 将一次剥离后的游离水采用 24h 静置方式, 游离水在 24h 后析出较多的乳化油, 但观察二次剥离的游离水仍旧含有少量的乳化油。分析认为这是由于乳化油油滴表面上有一层由乳化剂形成的稳定薄膜, 阻碍油滴合并, 呈乳化状态的、非常细小的油滴, 即使静沉 24h, 甚至 2 天以上, 仍然悬浮在水中 (图 1)。这种状态的油滴不能用静沉法从水相中彻底分离出来。

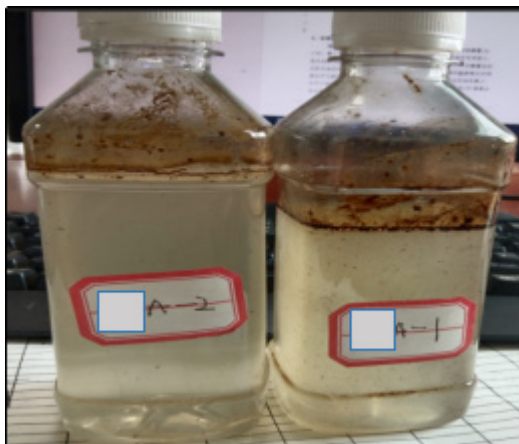


图 1 二次剥离水静置 2 天后有微量乳化油析出照片

### 3.3 离心法化验含水试验

选取不同乳化程度的 13 口油井, 进行离心法含水量化验测试<sup>[4]</sup>, 参数设定为预热温度 50℃, 转速 3500 转/min, 两次离心各 10min, 与常规蒸馏法对比。结

果显示, 离心法整体误差显著, 对乳化严重及无游离水样品, 分离效果较差。如 \*GB-15 井 (无游离水) 离心法含水仅 0.7%, 与常规法相差 23.8%。乳化严重的 \*\*A-ZP2 井, 离心法结果也偏低 5.6%。数据表明, 离心法无法有效破除乳化状态, 尤其, 在处理无游离水或严重乳化油样时, 含水检测值方面, 会严重失真, 满足不了精准化验要求。

### 3.4 冷冻化冻破乳法试验

针对已知乳化严重的油井, 取样进行了冷冻化冻破乳试验, 油样置于 -18℃ 环境, 冷冻 24h 后, 静置自然化冻, 结果显示, 冷冻后油相凝固充分, 游离水剥离时, 几乎无乳化油带出, 剥离水静置 24h, 仅析出微量乳化油。对比数据表明, 冷冻法显著提升了分离效果, 如 \*GA-16 井, 冷冻法含水为 69.5%, 而一次剥离法的话, 就高达 98.6%, 两者相差 29.1%。与二次静置法 (80.2%) 相比, 误差也减少了 10.7%, 对于乳化严重的油井, 冷冻后, 游离水中残余含油量, 仅有 575-2576mg/L, 对最终含水结果的影响, 相对微小。从机理上分析, 冷冻过程中, 水分优先结晶, 乳化剂分子会向冰晶表面或油相, 进一步迁移, 从而, 降低界面膜强度<sup>[5-6]</sup>。同时, 水结冰的体积膨胀效应, 进一步破坏乳化结构, 油水会高效分离, 该物理过程实现了“冷却”与“破乳”结合, 为高乳化原油的含水检测, 提供了可靠手段。

## 4 各类破乳方法的经济效益对比分析

在确定了冷冻破乳法的技术有效性后, 需要对其经济效益, 进行系统评估, 从直接成本、综合效益等方面, 对冷冻法、添加破乳剂法等进行对比分析, 从而, 为方法选择, 提供经济性依据。

### 4.1 各类方法的直接操作成本分析

直接操作成本上, 主要包括设备、物料、能耗和人工等方面的投入, 四种方法都进行了详细的成本核算, 可直观比较其经济效益差异。

表 1 油样一次剥离游离水单独静置 24h 析乳化油试验

| 序号 | 井号      | 一次剥离后含水 (%) | 加游离水析出乳化油重的油井含水 (%) | 含水误差 (%) | 游离水中析出乳化油量 (g) | 措施效果                           |
|----|---------|-------------|---------------------|----------|----------------|--------------------------------|
| 1  | *FB-8   | 96.7        | 96.0                | 0.7      | 8.9            | 静置 24h, 二次撇油之后游离水沉淀 2 天仍有乳化油析出 |
| 2  | *GA-10  | 49.9        | 48.7                | 1.2      | 4.4            |                                |
| 3  | *GA-1   | 93.9        | 83.8                | 10.1     | 54.8           |                                |
| 4  | *GB-8   | 95.2        | 93.9                | 1.3      | 11.0           |                                |
| 5  | *DB-3   | 96.6        | 95.3                | 1.3      | 13.8           |                                |
| 6  | *FA-10  | 96.6        | 94.7                | 1.9      | 9.9            |                                |
| 7  | **A-ZP2 | 91.5        | 67.8                | 23.7     | 71.5           |                                |
| 8  | *FA-2   | 93.4        | 85.9                | 7.5      | 34.0           |                                |
| 9  | *FB-1   | 85.3        | 84.7                | 0.6      | 3.0            |                                |

冷冻破乳法的主要成本构成,有工业冷冻柜的设备折旧(按5年分摊,单样约0.2元)、电力消耗(单样约0.4元)和人工操作成本(单样约40元),合计单样直接成本,约为40.6元,其特点,是设备投资适中,但运行成本较低,且可批量处理样品。规模化效益明显。添加破乳剂法,需要消耗化学药剂(单样0.15元)、加热能耗(单样0.3元)和较高的人工成本(因需多次观察和操作,单样约64元),合计单样成本,约为64.5元,需要持续采购化学药剂,此方法长期运营成本会比较大。静置分离法虽几乎没有物料消耗,但耗时极长,且需技术人员多次观察、记录和操作,人工成本高昂(单样约80元),数据产出周期长,会影响决策时效性。离心法则涉及到了高速离心机的设备折旧和维护(单样约2元)、专用离心管耗材(单样2元)、能耗(单样0.5元)和人工操作(单样约56元)等成本,合计单样成本,约为60.5元,设备上比较精密,维护要求相对更高。从直接成本角度看,冷冻破乳法优势明显,单样成本比添加破乳剂法低约37%,比静置分离法低约49%,比离心法低约33%。

#### 4.2 基于数据准确性的间接经济效益

不同破乳方法,数据准确性的差异,会带来显著的间接经济效益差异,主要集中在产量准确核算、开发方案优化和运营效率提升等方面。其中,最大的间接效益主要是可以减少产量误判损失,乳化严重的油井,传统方法的含水误差就可达20%以上。而一口日产液100方、因含水高估10%,导致日产量低估10方的油井,要是油价在4000元/t的话,每日单井的产量误判就会损失超过3.44万元。而冷冻破乳法,则能将误差降至最低,准确反映真实产量,避免数据失真问题,从而避开误关井、误调参等错误做法。

#### 4.3 长期运营效益评估

从长期运营角度来看,冷冻破乳法在安全性、环保性和可持续性这些方面,优势也更明显一些。冷冻法作为物理破乳方法,完全不使用化学药剂,安全风险会比较低,环保压力也会小一点。而且工业冷冻柜技术相对成熟,维护也简单,故障率低,长期运营的话稳定性更好。

综合来看,虽然冷冻破乳法需要一定的设备初始投资,处理周期也会比较长,但其直接或间接经济效益都比较有优势。对于乳化比较严重的油井,冷冻破乳法还是目前比较适合的水化化验。其在控制操作成本的同时,也能最大化地提升含水数据的应用价值,经济效益会更大。

### 5 结论

从添加破乳剂、剥离水静置、离心法、冷冻化冻

法等多组化验含水破乳实验对比中得出,冷冻化冻法能够最大限度的降低含水化验误差。

①冷冻法是目前最有效的破乳方法:其兼具技术优势与经济效益,实验数据表明,此方法能最大程度地降低原油含水化验误差,显著提高数据精准率,在直接成本控制方面,优势比较突出,其所提供的高精度数据,能从源头上,减少产量误判问题,避免巨大经济损失,具有相对更为优异的综合效益。

②通过过程检测和分析,油样含水化验的最核心是“冷却+破乳”:冷却是为了降低乳化油的流动性,减少剥离游离人工水操作时乳化油流失;破乳是为了将乳化油油水彻底分离,避免水相中含油。冻融法是涵盖“冷却+破乳”的操作过程。

③冷冻时间是破乳的关键因素:通过分析对比,冷冻必须12h以上,(冷冻5h和冷冻12h,破乳效果相差比较大),一般根据油样的原油凝固点最低点(一般-13℃)来调整冰冻温度,将冷冻温度调整至凝固点以下5℃左右(即-18℃),原油破乳效果最佳。

④温度对样品化验有很大影响:a冻冰的样品不能直接加热或加热温度过高(超过50℃),化冻过程必须在18-23℃自然化冻,因加热温度过高乳化剂的溶解度增大或到乳化剂的熔点导致乳化剂发生作用形成油包水,使含水偏低。b有游离水的样品直接加热乳化油流动性增强,导致人工操作剥离游离水时乳化油流失。

总的来说,冷冻破乳法不仅在技术上可靠,在经济效益上,也具有显著优势,是解决乳化原油含水化验失真问题,一种比较合适的优选方案,建议在油田生产实践中予以推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 冯雷雷,张金秋,马天志,杨景辉,马素俊.海上油井乳化堵塞解除技术及其应用[J].钻采工艺,2014,37(4):107-109.
- [2] 林畅.冷冻解冻破除油包水型乳状液的研究[D].大连:大连理工大学,2007.
- [3] 康万利,孙春柳.油田乳化液破乳方法研究进展[J].管道技术与设备,2006,24(4):1-4.
- [4] 周玉红,刘京方,苗迎春.提高原油含水检测准确率的方法与对策[J].石油工业技术监督,2003(23):50-52.
- [5] 刘金河.聚合物驱原油乳状液的稳定性与破乳机理研究[D].青岛:中国石油大学(华东)2012.
- [6] 张建,李雪,王磊.三次采油中聚合物驱对原油乳化稳定性影响机理研究[J].油田化学,2019,36(2):245-250.