

基于油水相指数时变的相对渗透率计算方法

翟上奇 雷 源 孙广义 张言辉 常会江

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459

摘 要:非稳态实验法获取的相对渗透率数据点主要集中在高含水饱和度处,水驱前缘数据点较少,直接应用到中轻质油田生产动态分析及数模拟合中易导致早期开发规律难以准确认识,不能完整反应整个开发历程。利用广适水驱曲线进行中低含水期含水饱和度计算,并将传统相对渗透率计算模型进行改进,创新性提出基于油水相指数时变的相对渗透率计算方法,实现低含水期相对渗透率数据加密。结果证明,该方法与稳态实验法测得数据吻合度较高,能够反应低含水期渗流规律,对于中轻质油田相对渗透率的获取具有借鉴意义。

关键词:中轻质油田;低含水期;相对渗透率;非稳态法;油相指数;水相指数

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.04.013

A Method for Calculating Relative Permeability Based on Time-Varying of Oil-Water Phase Index

Zhai Shangqi, Lei Yuan, Sun Guangyi, Zhang Yanhui, Chang Huijiang

Bohai Oil Research Institute, CNOOC China Limited Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China

Abstract: Since the experimental points of non-steady state method are often concentrated after oil and water both coming out, resulting in insufficient data of the oil-water front. The application of non-steady state method to medium-light oilfield may cause deviation, resulting in difficulties to accurately understand the law of water rising. In this paper, the traditional relative permeability model is improved, and the relative permeability calculation is carried out by using the oilfield production data to realize the encryption of the relative permeability in the low water cut period. The results show that the method is consistent with the experimentally measured data and can reflect the seepage law in low water cut period and is of strong guiding significance for obtaining relative permeability in medium-light oilfield.

Keywords: Medium-light oilfield; Low water cut period; Relative permeability; Non-steady state method; Oil phase index; Water phase index

收稿日期:2019-02-27

基金项目:中海石油(中国)有限公司综合科研项目“渤海双高油田挖潜关键技术研究”(YXKY-2018-TJ-04)

作者简介:翟上奇(1988-),女,黑龙江大庆人,工程师,硕士,从事油藏工程及数值模拟相关研究工作。

0 前言

相对渗透率曲线是研究储层岩石两相渗流的基础^[1-4],是油田数值模拟及动态分析不可缺少的重要资料。目前国内外对于相对渗透率的研究主要集中在相对渗透率数据的处理以及相对渗透率规律的应用,对于数据获取方法的研究相对较少,且大部分研究以稠油为主^[5-10]。目前获取相对渗透率数据主要是通过非稳态法实验方法^[11-14],这种方法操作简便、用时较短,具有普遍适用性,但非稳态实验中油水计量点往往从油水同出点后开始,使得数据点在中高含水饱和度处较为集中,不能完整地反应整个开发历程。

渤南区域油田,主力油层黏度基本在 $0.35 \sim 34.9 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,7 成比例油田黏度甚至小于 $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,密度 $0.831 \sim 0.928 \text{ g/cm}^3$,形成了属中轻质黏度范畴的油田群。在其他物性条件及开发方式相近的情况下,水油黏度比越高,分流率曲线的凹形就越强,该类油田相对稠油油田具有较长的无水采油期或低含水期。在应用非稳态法获取相对渗透率曲线时发现,水驱前缘数据点较少易造成研究人员对初期开发规律认识不清,数值模拟历史拟合误差较大,这些因素都严重制约了相对渗透率曲线的应用。

文章以渤南区域 A 油田为例,利用广适水驱曲线进行中低含水期含水饱和度计算,并将传统相对渗透率计算模型进行改进,创新性地提出基于油水相指数时变的相对渗透率计算方法,实现低含水期相对渗透率数据加密。

1 中低含水期含水饱和度 S_w 计算

$$R = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (1)$$

式中: R 为采出程度,%; S_w 为含水饱和度; S_{wi} 为束缚水饱和度。

由式(1)可知,已知不同时刻的采出程度可以计算相应的含水饱和度 S_w 。对于人工水驱开发的油藏,水驱曲线法可以很好地表达不同时刻采出程度与含水率的关系^[15-17]。我国石油天然气行业标准推荐使用甲型、乙型、丙型、丁型等 4 种水驱曲线,不同的水驱曲线对于地层原油黏度有不同的适应条件,含水上升规律不尽相同。其中,甲型、丙型适用于地层原油黏度 $3 \sim 30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的中等黏度油田,乙型适用于地层原油黏度大于 $30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 黏度较大的油田,丁型水驱曲线适用于黏度较小的稀油油田。但是甲、乙、丙、丁四种水驱曲线的适用条件均为含水率达到 50% 以上的油田,增加了中低含水期数据获取的困难。

针对这一问题,本文采用广适水驱曲线对该油田数

据进行处理,研究表明,广适水驱曲线可以表征各类型含水上 升规律,对于油田的非均质性有更强的适应性,最重要的是,广适水驱曲线在中低含水阶段就会出现直线段,出现的时机要远早于甲型、丙型的直线段出现时机,因此采用该方法计算中低含水期含水饱和度更为准确可靠。

广适水驱曲线的表达式为:

$$N_p = N_R - a \frac{N_p^2}{W_p^q} \quad (2)$$

式中: N_p 为累产油量, 10^4 m^3 ; N_R 为技术可采储量, 10^4 m^3 ; W_p 为累产水量, 10^4 m^3 ; q 的取值为 $0 \sim 2$ 。本文采用试凑法,通过 $\frac{N_p^2}{W_p^q}$ 与 N_p 之间的线性关系,求取 N_R 及 a 值。

最后,根据油田实际含水率及含水上升率的拟合精度判断取值是否合理。

A 油田实际生产数据处理后结果见图 1,当 $q = 0.9 \sim 1.2$ 时, $\frac{N_p^2}{W_p^q}$ 与 N_p 之间的线性关系拟合程度较高,截至 2018 年 12 月底,油田累积产油量为 $1\,112.49 \times 10^4 \text{ m}^3$,通过拟合各 q 值下 N_R 值,其中 $q = 0.9、1.0$, N_R 值 $1\,460 \times 10^4 \sim 1\,580 \times 10^4 \text{ m}^3$ 与油田目前生产情况更相符。对上述两种情况进行含水上升率变化分析,见图 2,油田实际含水变化与 $q = 0.9$ 时更为符合,此时, $N_R = 1\,460 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

由式(2)可得:

$$W_p = \left(\frac{aN_p^2}{N_R - N_p} \right)^{1/q} \quad (3)$$

$$\frac{\left(\frac{aN_p^2}{N_R - N_p} \right)^{1/q}}{\left(\frac{aN_p^2}{N_R - N_p} \right)^{1/q} + N_p} = f_w \quad (4)$$

式中: f_w 为含水率。

由式(1)可知,

$$N_p = NR = N \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (5)$$

将式(5)带入式(4):

$$\frac{\left(\frac{a \left(N \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right)^2}{N_R - N_p} \right)^{1/q}}{\left(\frac{a \left(N \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right)^2}{N_R - N_p} \right)^{1/q} + N_p} = f_w \quad (6)$$

由岩心实验获取的相渗曲线可知束缚水饱和度 S_{wi} ,已知油田地质储量 N ,技术可采储量 N_R 、累产油量 N_p ,待定常数 $q、a$,不同时刻的含水饱和度 S_w 可根据式(6)计算。

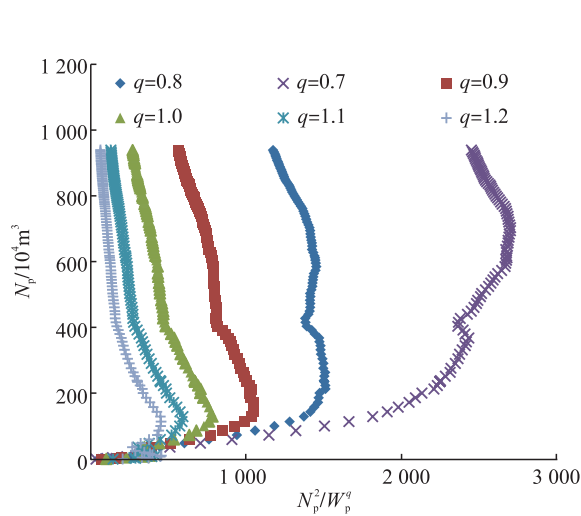


图 1 广适水驱曲线 $\frac{N_p^2}{W_p^q} \sim N_p$ 线性拟合程度图

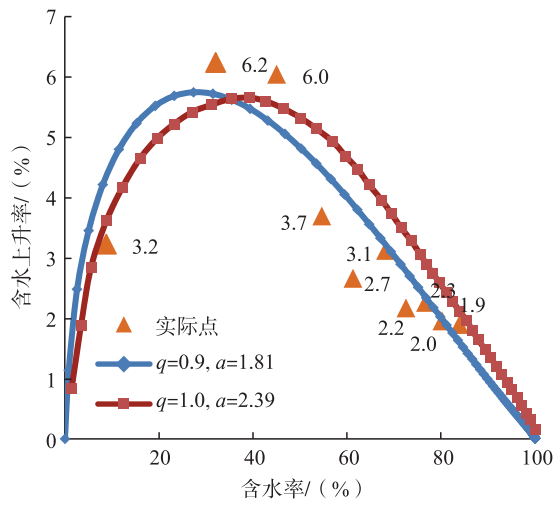


图 2 广适水驱曲线含水上升率与含水率关系图

2 油水相对渗透率计算

据笔者调研,近年来常用的相对渗透率计算模型见表 1。由表 1 可看出,不同的模型表达方式多样,但 K_{ro} 与 K_{rw} 基本与含水饱和度 S_w 成幂函数关系,经过调研及实际论

证^[18-20],其中 Willhite 方程可靠性更高,表 1 中, S_{wi} 为束缚水饱和度; S_{or} 为残余油饱和度; m 、 n 分别为油、水相指数; K_{rw} 为水相相对渗透率; K_{ro} 为油相相对渗透率; S_o 为含油饱和度; ϕ 为孔隙度; $K_w(S_{or})$ 为残余油下水相渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; $K_o(S_{wi})$ 为束缚水下油相渗透率, $10^{-3} \mu m^2$ 。

表 1 常用的油水相对渗透率模型

提出者	提出时间	相对渗透率计算模型
Pirson	1958	$K_{ro} = (1 - S_w)^2$; $K_{rw} = \frac{(S_w - S_{wi})^2}{(1 - S_{wi})^2} S_w^4$
Brooks-corey	1966	$K_{ro} = (1 - S_w)^2 [1 - S_w^{(2+a)/a}]$; $K_{rw} = S_w^{(2+3a)/a}$
Honarpour	1982	$K_{ro} = 0.760\ 67 \left[\frac{S_o}{1 - S_{wi}} - S_{or} \right]^{1.8} (1 - S_w)^2 + 2.631\ 8 \phi (1 - S_{or}) (S_o - S_{or})$ $K_{rw} = (S_w - S_{wi}) \left[1.581\ 4 \frac{(S_w - S_{wi})^{0.91}}{(1 - S_{wi})^{0.91}} - 0.581\ 7 (1 - S_w) - 1.248\ 4 \phi (1 - S_{wi}) \right]$
陈元千	1984	$K_{ro} = (1 - S_w)^3$; $K_{rw} = K_w(S_{or}) S_w^3$
Willhite	1986	$K_{ro} = K_o(S_{wi}) (1 - S_w)^n$; $K_{rw} = K_w(S_{or}) S_w^m$
李克文	1989	$K_{ro} = K_o(S_{wi}) \frac{(1 - S_w)^n + a(1 - S_w)}{1 + a}$ $K_{rw} = K_w(S_{or}) \frac{S_w^m + b S_w}{1 + b}$
张继成	2007	$K_{ro} = 10^{aS_w + b} - C_o$; $K_{rw} = 10^{cS_w + d} - C_w$

由水油比的定义可知,

$$WOR = \frac{Q_w}{Q_o} = \frac{\rho_w \mu_o B_o K_{rw}}{\rho_o \mu_w B_w K_{ro}} \tag{7}$$

令 $D = \frac{\rho_w \mu_o B_o}{\rho_o \mu_w B_w}$,

$$\frac{WOR}{D} = \frac{K_{rw}}{K_{ro}} \tag{8}$$

式中: ρ_w 为地层水密度, g/cm^3 ; ρ_o 为地层原油密度, g/cm^3 ; μ_o 为地层原油黏度, $mPa \cdot s$; μ_w 为地层水黏度, $mPa \cdot s$; B_o 为地层压力下原油体积系数; B_w 为地层水体

积系数; WOR 为水油比, 无量纲; Q_w 为日产水量, m^3 ; Q_o 为日产油量, m^3 。

根据式(8)通过油田实际生产数据可计算 $\frac{K_{rw}}{K_{ro}}$, 结合相对渗透率计算模型可得到 K_{ro} 与 K_{rw} 值。计算结果见图3, 其中 K_r 为相对渗透率。

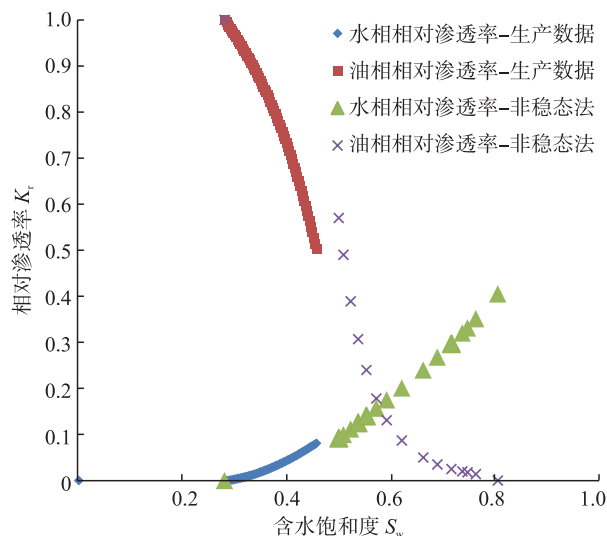


图3 A油田修正前油水相对渗透率曲线图
(生产数据计算 vs 非稳态法)

由图3可以看出, 模型计算结果与实验数据吻合程度不高, 油相、水相数据与实验数据拟合均有偏差, 尤其是含水饱和度越低, 拟合油相数据点误差越大。油、水相指数直接决定相对渗透率曲线的陡峭程度, 因此, 拟合效果较差与油水相指数有较大关系, 这些现象表明, 油相、水相指数并不是常数, 可能与含水饱和度相关。由于 K_{ro} 与 K_{rw} 基本与含水饱和度 S_w 成幂函数关系, 在本文中, 假设 m 、 n 也与 S_w 成幂指数关系。将相对渗透率计算模型进行修正:

$$K_{ro} = K_{ro}(S_{wi}) \left(\frac{1 - S_{or} - S_w}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right)^{m+aS_w^b} \quad (9)$$

$$K_{rw} = K_{rw}(S_{or}) \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right)^{n+cS_w^d} \quad (10)$$

根据A油田实际参数对式(9)、(10)计算, 得到各个参数如下: $a = -1.30$, $b = 2.87$, $c = 0.005$, $d = -5.76$, $m = 2.11$, $n = 1.20$ 。利用新模型进行计算, 结果见图4。由图4可以看出, 该模型与实验数据吻合程度较高, 假设可靠。

3 稳态实验法验证

相对渗透率实验方法主要包括稳态法及非稳态法两种, 稳态法中流体饱和度可以直接测量计算, 原理基于达西定律, 但由于该方法耗时较长, 操作不便, 因此常采用非稳态法代替, 非稳态法忽略毛管压力及重力影

响, 为了消除末端效应要求高速驱替。为了验证非稳态法及生产数据计算得到的相渗曲线是否合理, 本文开展稳态法对其进行验证, 实验结果见图5。在一定条件下, 三种方法相渗曲线形态较为一致, 尤其是中低含水饱和度下符合程度更高, 证明该计算方法能够反映地下流体的渗流规律, 对于中轻质油田中低含水期相渗数据的获取具有推广及指导意义。

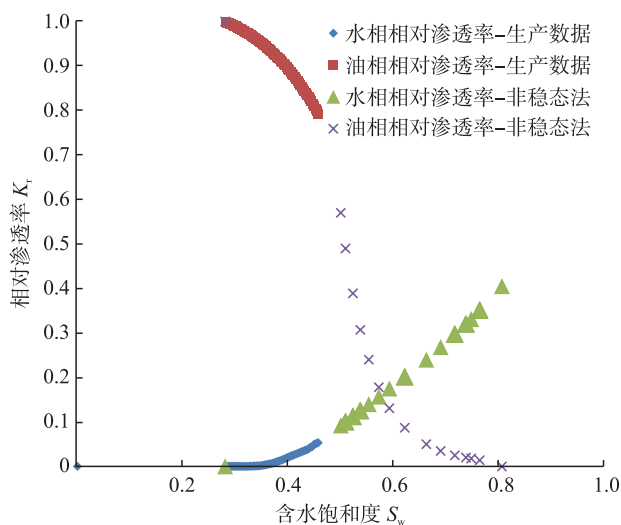


图4 A油田修正后油水相对渗透率曲线图
(模型计算 vs 实验)

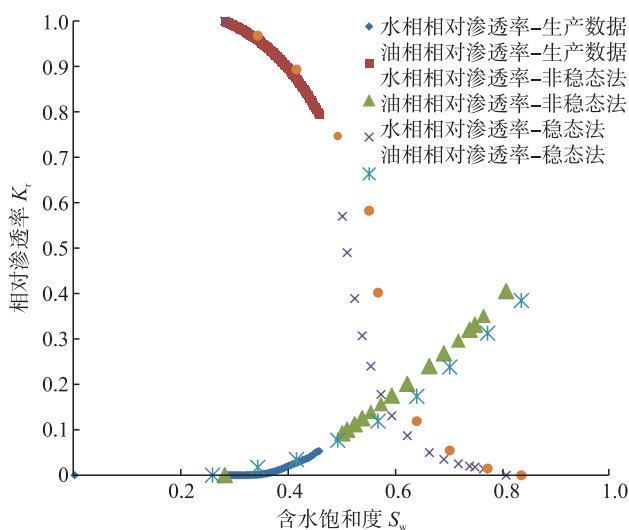


图5 A油田油水相对渗透率曲线图
(生产数据计算 vs 非稳态法 vs 稳态法)

4 结论

本文以渤海A油田为例, 针对非稳态实验法测得的相渗数据不能准确反映中轻质油田早期的开发特征问题, 采用广适水驱曲线进行中低含水期含水饱和度计算, 并将传统相对渗透率计算模型进行改进, 创新性地提出基于油水相指数时变的相对渗透率计算方法, 实现低含水期相渗数据加密, 得到如下结论:

1) 对于中轻质油田, 当非稳态实验法不能获取理想的低含水期相渗数据时, 可以采用合理的相对渗透率模型进行计算, 本文采用的计算模型相比其他模型精度更高。

2) 广适水驱曲线在中低含水阶段就会出现直线段, 对于中轻质油田低含水期数据的获取推荐使用广适水驱曲线。

3) 油相与水相指数并非常数, 是与含水饱和度有关的函数, 考虑油水相指数时变后, 相对渗透率曲线的计算更为准确。

参考文献:

- [1] Hu Wei, Yang Shenglai, Liu Guangfeng, et al. A New Correction Method for Oil-Water Relative Permeability Curve on the Basis of Resistivity and Water Saturation Relationship [J]. *Transport in Porous Media*, 2015, 109 (3): 527 - 540.
- [2] Krause M H, Benson S M. Accurate Determination of Characteristic Relative Permeability Curves [J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 83: 376 - 388.
- [3] 高文君, 姚江荣, 公学成, 等. 水驱油田油水相对渗透率曲线研究[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35 (5): 552 - 557.
Gao Wenjun, Yao Jiangrong, Gong Xuecheng, et al. Study on Oil-Water Relative Permeability Curves in Water Flooding Oilfields [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35 (5): 552 - 557.
- [4] 张继成, 宋考平. 相对渗透率特征曲线及其应用[J]. *石油学报*, 2007, 28 (4): 104 - 107.
Zhang Jicheng, Song Kaoping. Eigen Curve of Relative Permeability and Its Application [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28 (4): 104 - 107.
- [5] 李金宜, 陈丹蓉, 朱文森, 等. 海上疏松砂岩油藏相对渗透率曲线影响因素实验分析[J]. *石油地质与工程*, 2016, 30 (5): 78 - 80.
Li Jinyi, Chen Danrong, Zhu Wensen, et al. Experimental Influencing Factors Analysis of the Relative Permeability Curves for Marine Loose Water Reservoir [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2016, 30 (5): 78 - 80.
- [6] 刘吉余, 徐浩, 刘曼玉. 根据相渗曲线研究不同砂体水淹层解释标准方法[J]. *西部探矿工程*, 2010, 22 (2): 64 - 65.
Liu Jiyu, Xu Hao, Liu Manyu. Study on Method of Different Sand Body Water-Flooded Layers Interpretation Criterion Based on Relative Permeability Curve [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2010, 22 (2): 64 - 65.
- [7] 王守龙, 李爱芬, 彭锐翌, 等. 黏度比对稠油-水相对渗透率曲线的影响[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17 (33): 92 - 96.
Wang Shoulong, Li Aifen, Peng Ruigang, et al. Effect of Oil-Water Viscosity Ratio on Heavy Oil-Water Relative Permeability Curve [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17 (33): 92 - 96.
- [8] 吕成远. 油藏条件下油水相对渗透率实验研究[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30 (4): 102 - 104.
Lü Chengyuan. Experimental Study on Oil-Water Relative Permeability Under Natural Reservoir Conditions [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30 (4): 102 - 104.
- [9] 王东琪, 殷代印. 水驱油藏相对渗透率曲线经验公式研究[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29 (3): 159 - 164.
Wang Dongqi, Yin Daiyin. Empirical Formulas of Relative Permeability Curve of Water Drive Reservoirs [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29 (3): 159 - 164.
- [10] 张顺康, 徐建军. 基于油水相渗数据的驱油效率计算方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36 (3): 70 - 72.
Zhang Shunkang, Xu Jianjun. Calculating Method of the Oil Displaced Efficiency Based on the Oil and Water Relative Permeability Data [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2017, 36 (3): 70 - 72.
- [11] 陈忠, 殷宜平, 陈浩. 非稳态法计算油水相对渗透率的方法探讨[J]. *断块油气田*, 2005, 12 (1): 41 - 43.
Chen Zhong, Yin Yiping, Chen Hao. The Calculation Method of Oil-Water Relative Permeability by Unsteady-State [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2005, 12 (1): 41 - 43.
- [12] 董大鹏. 非稳态相渗实验数据的处理方法[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 36 (6): 110 - 116.
Dong Dapeng. Processing Method to the Data of Relative Permeability in Unsteady State Displacement [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2014, 36 (6): 110 - 116.
- [13] 彭彩珍, 薛晓宁, 王凤兰, 等. 非稳态法油水相对渗透率实验数据处理方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37 (2): 74 - 78.
Peng Caizhen, Xue Xiaoning, Wang Fenglan, et al. Experimental Data Processing Method of the Oil-Water Relative Permeabilities by Unsteady State Method [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37 (2): 74 - 78.
- [14] 张星星, 杜竞, 白磊, 等. 非稳态法优化校正油水相对渗透率曲线的新方法[J]. *断块油气田*, 2016, 23 (2): 185 - 188.
Zhang Xingxing, Du Jing, Bai Lei, et al. New Calibration Method for Oil-Water Relative Permeability Curves Based on Unsteady State Method [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2016, 23 (2): 185 - 188.
- [15] 张金庆, 孙福街, 安桂荣. 水驱油田含水上升规律和递减规律研究[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18 (6): 82 - 85.

(下转第 94 页)

- [11] 李海坤, 谢涛, 王颖, 等. 区域阴极保护实践与分析[J]. 天然气与石油, 2013, 31(2): 73-75.
Li Haikun, Xie Tao, Wang Ying, et al. Practice and Analysis of Regional Cathodic Protection [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(2): 73-75.
- [12] 陈波, 李果, 林涛, 等. 提高站场区域阴极保护效果实践与认知[J]. 天然气与石油, 2018, 36(3): 87-91.
Chen Bo, Li Guo, Lin Tao, et al. Practice and Cognition of Improving Regional Cathodic Protection Effective in Oil & Gas Station [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36(3): 87-91.
- [13] 吴玲, 兰翔, 刘军. 长输管道阴极保护电位的自动检测技术研究[J]. 天然气与石油, 2005, 23(5): 17-19.
Wu Ling, Lan Xiang, Liu Jun. Research on Automatic Testing Technology for Cathodic Protection Potential in Long Distance Pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2005, 23(5): 17-19.
- [14] 董龙伟, 廖柯熹. 相邻储罐底板阴极保护电位的分布[J]. 材料保护, 2016, 49(3): 64-67.
Dong longwei, Liao Kexi. Cathodic Protection Potential Distribution of Adjacent Tank Bottom [J]. Journal Materials Protection, 2016, 49(3): 64-67.
- [15] 夏定健. 外加电流阴极保护辅助阳极[J]. 全面腐蚀控制, 2005, 19(2): 38-41.
Xia Dingjian. Impressed Current Cathodic Protection Anodes [J]. Total Corrosion Control, 2005, 19(2): 38-40.
- [16] 杜艳霞, 张国忠, 刘刚, 等. 储罐底板外侧阴极保护电位分布的数值模拟[J]. 金属学报, 2007, 43(3): 297-302.
Du Yanxia, Zhang Guozhong, Liu Gang, et al. Simulation of Cathodic Protection Potential Distribution on the Exterior of Storage Tank Bottom [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(3): 297-302.
- [17] 付晓芬. 大型航煤储罐罐底板阴极保护及 MMO 柔性阳极的应用[J]. 机场建设, 2011, 20(3): 33-38.
Fu Xiaofen. Application of Cathodic Protection and MMO Flexible Anode of Large Aviation Coal Storage Tank Bottom [J]. Airport Construction, 2011, 20(3): 33-38.
- [18] 胡学文, 吴丽蓉, 许崇武, 等. 外加电流阴极保护用辅助阳极的研究现状及发展趋势[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(12): 546-549.
Hu Xuewen, Wu Lirong, Xu Chongwu, et al. Situation & Development Tendency of Research on Anodes for Applied-Current Cathodic Protection [J]. Corrosion & Protection, 2000, 21(12): 546-549.
- [19] 范亚卓, 鞠鹤, 蔡天晓, 等. 柔性阳极在大型储油罐底上的应用[J]. 石油化工腐蚀与控制, 2010, 27(4): 44-46.
Fan Yazhuo, Ju He, Cai Tianxiao, et al. Application of Anodeflex in Large Oil Tank Bottom [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2010, 27(4): 44-46.
- [20] 崔淦, 李自力, 卫续, 等. 基于边界元法的站场区域阴极保护设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 161-166.
Cui Gan, Li Zili, Wei Xu, et al. Cathodic Protection Design of Station Area Based on Boundary Element Method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 161-166.

(上接第 77 页)

- Zhang Jinqing, Sun Fujie, An Guirong. Study on Incremental Law of Water Cut and Decline Law in Water Drive Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6): 82-85.
- [16] 张金庆, 孙福街. 相渗曲线和水驱曲线与水驱储量的关系[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(6): 629-631.
Zhang Jinqing, Sun Fujie. Quantitative Relationship Between Relative Permeability Curve, Water Drive Curve and Waterflood Reserve [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(6): 629-631.
- [17] 马艳丽, 赵忠军, 张振红, 等. 低渗低黏度油藏相渗曲线计算方法——丁型水驱特征曲线法[J]. 油气藏评价与开发, 2012(6): 28-31.
Ma Yanli, Zhao Zhongjun, Zhang Zhenhong, et al. Relative Permeability Curve Computing Method in Low Permeability and Viscosity Reservoirs—Type IV Water Drive Characteristic Curve Method [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2012(6): 28-31.
- [18] 雷霄, 查玉强, 姜平, 等. 一种改进的油水相渗实验末端效应校正方法[J]. 中国海上油气, 2016, 28(5): 49-53.
Lei Xiao, Zha Yuqiang, Jiang Ping, et al. An Improved Correction Method for End-Effect in Oil-Water Relative Permeability Experiment [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(5): 49-53.
- [19] 陈丹磬. 基于常规孔渗定量预判束缚水饱和度合理值范围[J]. 断块油气田, 2016, 23(1): 77-80.
Chen Danqing. Reasonable Value Estimation of Irreducible Water Saturation by Porosity and Permeability Characteristics [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(1): 77-80.
- [20] 李金宜, 陈丹磬, 朱文森, 等. 一种对残余油饱和度合理值范围的预判方法[J]. 断块油气田, 2016, 23(3): 386-389.
Li Jinyi, Chen Danqing, Zhu Wensen, et al. A Prejudge Way for Reasonable Value Range of Irreducible Oil Saturation [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(3): 386-389.