

渤海稠油储层产能主控因素分析及应用

赵洪涛, 于 喜, 于伟强, 房鑫磊

(中法渤海地质服务有限公司, 天津 300457)

摘要:比采油指数作为评价储层产能的重要指标,在稠油勘探、开发中具有重要意义。通过总结渤海油田明化镇组、馆陶组稠油储层以往的试油成果,利用灰色关联分析方法分析地化、测井及它们的组合参数与比采油指数的相关性,选取关联度最高的两个参数“测井渗透率/地面 50 °C 原油黏度(K_m/μ_o)”和“孔隙度/重质组分指数(φ/HI)”作为主控因素,通过回归分析建立了比采油指数预测模型,经最新探井试油结果验证,比采油指数预测相对误差率介于 5.68%~10.41%。研究结果对区域稠油储层探井测试前的产能预测具有一定指导意义。

关键词:稠油;比采油指数;灰色关联;地化热解;主控因素

中图分类号:TE132 文献标志码:A

Analysis and application of main controlling factors of productivity of heavy oil reservoir in Bohai Sea

ZHAO Hongtao, YU Xi, YU Weiqiang, FANG Xinlei

(China France Bohai Geoservices Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract: In heavy oil exploration and development, the specific oil recovery index (J_{os}) is a critical metric for evaluating reservoir productivity. After summarizing the previous testing results of heavy oil reservoirs in Minghuazhen and Guantao Formations in Bohai Oilfield, the grey relational analysis method was used to analyze the correlation between geochemical, well logging and their combined parameters and the specific oil recovery index, and the two parameters with the highest correlation, “logging permeability/ crude oil viscosity at surface 50 °C (K_m/μ_o)” and “porosity/heavy component index (φ/HI)” were selected to use as the main control factor. And then regression analysis was used to establish a specific oil production index prediction model. The relative error rate of the oil production index prediction was between 5.68% and 10.41%, according to the latest exploratory well test data. The research results have a certain guiding significance for predicting productivity in regional heavy oil reservoirs before exploratory well testing.

Key words: heavy oil; specific oil recovery index; grey relational analysis; geochemical pyrolysis; main controlling factors

稠油油藏具有原油密度大、黏度高、流动性差、生产过程易出砂等特点,在探井测试中,随着开井时间延长及生产压差的增大,井筒附近常常由于砂粒的产出而形成“蚯蚓洞”网络^[1],使得井筒附近渗流能力逐步增强。储层的物性变化造成利用“系统试井”方法建立的产能方程异常,无法有效求取极限产量,对于这类储层,油田多将比采油指数作为评价储层产能的重要指标。在油田投产后,以探井测试比采油指数为基础,通过经验校正系数进行相关校正,指导合理生产压差的制订^[2],所以,对稠油储层产能评价工作可以将比采油指数作为研究目标进行间接分析。

前人针对稠油储层产能影响因素及产能预测

做过相关研究,孙恩慧等^[3]建立了利用泥质含量和电阻率校正水平井比采油指数的方法。候连华等^[4]利用录井地化热解资料求取原油黏度和含油饱和度,建立油相渗透率与含油饱和度的关系,结合流体渗流理论,预测比采油指数。董红等^[5]利用岩心分析资料、试油资料和测井资料,建立测井储层参数及油相渗透率的解释模型,通过解释的油相渗透率计算比采油指数。本文在前人研究认识的基础上,结合渤海油田近两年稠油储层的试油成果,将

收稿日期:2021-10-11; 改回日期:2021-12-15。

第一作者简介:赵洪涛(1987—),工程师,现从事油气井测试资料的解释研究工作。E-mail: zhaoh@cfbgc.com。

探井测试前可以获取的测井、地化分析成果作为研究对象,选取影响比采油指数的测井、地化参数及它们的组合参数,利用灰色关联法分析各参数与比采油指数的关联度,确定主控因素并建立比采油指数的预测模型,以期为区域稠油储层探井测试层位的优选及测试前的产能预估提供一定指导依据。

1 产能主控因素分析

当油井生产达到拟稳定流后,产量与压差之间的关系可以用裘比依公式表示,即:

$$Q_o = \frac{0.5358K_o h}{B\mu_o \ln(\frac{r_e}{r_w} + S)} (p_e - p_{wf}) \quad (1)$$

式中: Q_o 为油产量, m^3/d ; K_o 为油相渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h 为储层厚度, m ; p_e 为供给压力, MPa ; p_{wf} 为井底流压, MPa ; r_e 为供油半径, m ; r_w 为井眼半径, m ; B 为原油体积系数, 1 ; μ_o 为 $50^\circ C$ 原油黏度, $mPa \cdot s$; S 为表皮系数, 1 。

比采油指数定义为单位生产压差下单位厚度油层的产量,结合裘比依公式,表达式可以写为:

$$J_{os} = \frac{Q_o}{(p_e - p_{wf})h} = 0.5358 \frac{K_o}{\mu_o} \frac{1}{B \ln(\frac{r_e}{r_w} + S)} \quad (2)$$

式中: J_{os} 为比采油指数, $(m^3/d)/(MPa \cdot m)$ 。公式表明,比采油指数与流度(K_o/μ_o)成正比,同时受体积系数、供油半径、表皮系数等因素影响。由于

渤海油田稠油储层均采用TCP、PCP电加热与APR三联作测试工艺,测试时间相近,原油体积系数、表皮系数和 r_e/r_w 值相差不大,油相渗透率(K_o)及原油黏度(μ_o)是区域稠油储层比采油指数的主要影响因素。渗透率是反映储集层物性的重要参数,公式(1)中的油相渗透率(K_o)指油层有效渗透率,代表单相原油在岩石中通过能力的大小,而测井解释渗透率是通过测量储层地球物理特性,利用相关经验公式计算获得,代表井筒附近(一般在 $1 m$ 以内)储层的绝对渗透率,二者数值通常差异较大,但对于均质性较好的砂岩储层,二者线性相关性较强^[6],可以使用测井解释空气渗透率代替油相渗透率进行比采油指数的相关性分析。同时,一些学者的统计分析显示,稠油储层渗透率与孔隙度一般具有较好正相关性^[7-9],地面原油黏度及密度的大小则与原油中胶质、沥青质含量等重质组分含量密切相关,二者具有较好的一致性^[10]。基于前人关于比采油指数影响因素的认识,结合探井测试前获取的测井、地化分析成果,本文选取测井解释渗透率(K_m)、孔隙度(φ)、 $20^\circ C$ 原油密度(ρ_o)、 $50^\circ C$ 原油黏度(μ_o)、地化热解烃含量(S_2)、重质组分指数(HI)等参数,以及依据它们与流度(K_o/μ_o)的相关性建立的组合参数作为比较序列,比采油指数作为参考序列(详见表1),利用灰色关联分析方法进行比采油指数影响因素分析,对关联度进行排序,找出区域稠油储层产能的主控因素。

表1 渤海稠油储层测试参数数据

层号	$J_{os}/$ ($m^3 \cdot d^{-1} \cdot MPa^{-1} \cdot m^{-1}$)	$K_m/$ ($10^{-3} \mu m^2$)	$\varphi/$ %	$\rho_o/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	$\mu_o/$ ($mPa \cdot s$)	$S_2/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	HI	$(K_m/\mu_o)/$ ($10^{-3} \mu m^2 \cdot (mPa \cdot s)^{-1}$)	(φ/HI)
1	1.971	989.6	30.8	0.962	1 755	5.96	4.880	0.56	6.31
2	2.543	989.6	28.7	0.964	1 733	7.26	4.535	0.57	6.33
3	1.187	2 019.2	34.5	0.973	1 862	8.73	4.548	1.08	7.59
4	2.573	555.7	28.6	0.979	2 745	30.62	5.420	0.20	5.27
5	0.310	2 239.6	37.0	0.993	7 026	41.96	5.274	0.32	7.02
6	0.861	239.1	22.4	0.971	2 056	7.80	4.401	0.12	5.10
7	0.159	2 053.0	30.2	0.989	3 552	7.70	5.010	0.58	6.03
8	0.769	2 085.4	36.4	0.959	532	3.08	3.632	3.92	10.02
9	7.968	809.5	29.4	0.972	2 023	19.27	4.906	0.40	5.99

灰色关联分析法是通过分析参考序列与比较序列的相似或相异程度,来衡量并描述其间的关联程度^[11],主要分析步骤包括比较序列的确定、比较

序列数据无量纲化处理、灰色关联系数的计算及关联度的计算和排序等,最核心的部分是关联系数的计算,相关计算公式如下:

$$\zeta_{oi}(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

式中, x_0 为参考序列; $x_i (i=1, 2, 3 \dots)$ 为比较序列; $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为序列 x_0 与 x_i 在第 k 点的绝对值; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为两序列的两极最小绝对值; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为两序列的两极最小绝对值; ρ 为分辨系数, 通常取 0.5。

利用表 1 的数据进行灰色关联系数的计算, 计

算结果如表 2 所示, 将关联系数求平均即为各影响因素与比采油指数的关联度。分析结果显示, 与比采油指数的关联度由高到低依次为 K_m/μ_o 、 ϕ/HI 、 ϕ 、 ρ_o 、 K_m 、 HI 、 μ_o 、 S_2 。可以看出, 依据流度 (K_o/μ_o) 建立的组合参数相较于单一影响参数关联度明显提高, 可采用相关度较高的参数组合表征流度 (K_o/μ_o), 建立比采油指数预测模型。

表 2 产能各影响因素灰色关联分析结果

影响因素	层号	K_m/μ_o ($10^{-3} \mu m^2$)	ϕ %	ρ_o ($g \cdot cm^{-3}$)	μ_o ($mPa \cdot s$)	S_2 ($mg \cdot g^{-1}$)	HI	$(K_m/\mu_o)/$ ($10^{-3} \mu m^2 \cdot (mPa \cdot s)^{-1}$)	(ϕ/HI)
关联系数	1	0.928	0.974	0.986	0.848	0.766	0.977	0.811	0.926
	2	0.805	0.798	0.765	0.881	0.924	0.763	0.916	0.805
	3	0.683	0.977	0.986	0.863	0.857	0.985	0.907	0.991
	4	0.819	0.683	0.655	0.623	0.397	0.608	0.947	0.732
	5	0.498	0.670	0.711	0.394	0.336	0.672	1.000	0.725
	6	0.922	0.723	0.639	0.681	0.734	0.648	0.968	0.720
	7	0.519	0.723	0.701	0.591	0.828	0.677	0.834	0.758
	8	0.553	0.444	0.426	0.355	0.359	0.406	0.583	0.477
	9	0.846	0.767	0.741	0.803	0.572	0.716	0.987	0.800
关联度		0.730	0.751	0.734	0.671	0.641	0.717	0.884	0.770

2 产能预测模型

基于前文研究认识, 分别建立了测井渗透率/地面 50℃原油黏度 (K_m/μ_o)、孔隙度/重质组分指数 (ϕ/HI) 与比采油指数 (J_{os}) 的相关性模型, 相关回归结果分别如图 1、图 2 所示, 相关性方程及相关系数见表 3:

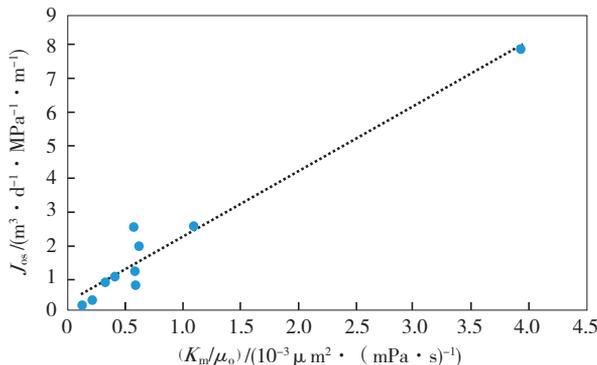


图 1 测井渗透率/地面 50℃原油黏度与比采油指数相关性

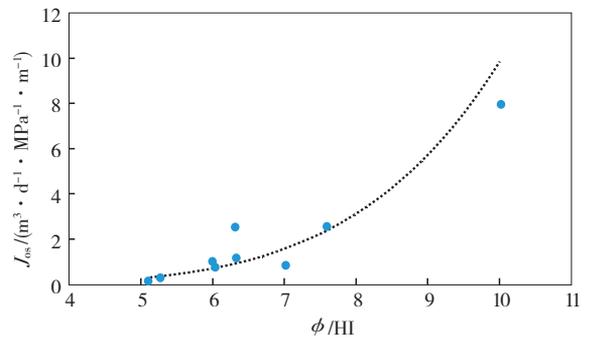


图 2 孔隙度/重质组分指数与比采油指数相关性

表 3 比采油指数预测公式及相关系数

模型	影响因素	相关性方程	相关系数 R
A	K_m/μ_o	$J_{os} = 1.9931 \frac{K_m}{\mu_o} + 0.2706$	0.9749
B	ϕ/HI	$J_{os} = 0.00007 \left(\frac{\phi}{HI}\right)^{5.1206}$	0.9657

相关性分析结果证实, 上述两组参数与比采油指数相关度较高, 相关系数分别达到了 0.9749 和 0.9657。利用渤海最新的稠油储层探井 X 井实测结果对两种预测模型的效果进行验证, 该井分别对

明化镇组和馆陶组稠油储层进行测试,测前已知的测井解释渗透率(K_m)、孔隙度(φ)及相关地化热解参数见表4,其中,黏度数据(μ_o)参考区域地化黏度预测模型的预测结果。将两种预测模型的预测结果与X井的实测结果进行对比,结果如表5所示,模型A对明化镇组、馆陶组的稠油储层比采油指数预测相对误差分别为10.41%和10.37%,模型B则分别

为5.68%和9.72%,预测误差在可接受范围内,对区域稠油储层测前产能预测具有一定指导意义。

表4 探井X测试层测井解释结果及地化热解参数

层位	HI	μ_o /(mPa·s)	$K_m/(10^{-3}\mu m^2)$	φ %
明化镇组	8.514	836.94	1 668.29	33.9
馆陶组	7.737	1 161.72	1 025.23	34.62

表5 预测结果与实测结果对比(J_{os} 单位为($m^3\cdot d^{-1}\cdot MPa^{-1}\cdot m^{-1}$))

层位	产量/ ($m^3\cdot d^{-1}$)	生产 压差/MPa	储层 厚度/m	J_{os} 实测值	模型A		模型B	
					J_{os} 预测值	相对误差/%	J_{os} 预测值	相对误差/%
明化镇组	25.32	1.028	5.2	4.737	4.244	10.41	4.468	5.68
馆陶组	27.80	2.274	5.4	2.264	2.029	10.37	2.484	9.72

3 结论

(1)应用灰色关联法分析渤海稠油储层比采油指数的主控因素,依据流度进行参数组合较单一参数关联度明显提升, K_m/μ_o 、 φ/HI 两组参数与比采油指数关联度最高。

(2)利用 K_m/μ_o 、 φ/HI 参数建立了两种比采油指数预测模型,经实例验证预测误差介于5.68%~10.41%,相对误差较小,可用于渤海地区稠油储层探井测试前的产能预测。

参考文献:

- [1] 田红,邓金根,孟艳山,等.渤海稠油油藏出砂规律室内模拟实验研究[J].石油学报,2005,4(26):85-87.
- [2] 李波,罗宪波,刘英,等.海上稠油油田合理单井产能预测新方法[J].中国海上油气,2008,4(20):243-245.
- [3] 孙恩慧,杨东东,彭琴,等.低阻油层水平井比采油指数预测方法及应用[J].新疆石油天然气,2020,1(16):30-33.
- [4] 候连华,林承焰,王京红,等.含油层早期产能预测方法

- [J].石油大学学报(自然科学版),2003,1(27):11-13.
- [5] 董红,董丽丽,于希南,等.基于测井资料的早期单井产能预测方法[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2015,4(17):73-76.
- [6] 罗万静,王晓东,李义娟.渗透率的常用确定方法及其相互关系[J].西部探矿工程,2006(1):63-66.
- [7] 全杰.河南油田泌阳凹陷稠油地化录井评价方法[J].录井工程,2006,1(17):12-14.
- [8] 程晓波,孙金浩,牟笨,等.辽河油田超稠油储层精细测井评价[J].测井技术,2015,6(39):715-719.
- [9] 赵永强,申辉林,张园园.泌阳凹陷栗园浅层砂砾岩稠油储层四性关系研究[J].地球物理学进展,2011,2(26):588-595.
- [10] 候连华,林承焰,王京红,等.原油密度、黏度的地化热解评价方法[J].石油勘探与开发,2002,2(29):74-76.
- [11] 连承波,钟建华,蔡福龙,等.油田产量影响因素的灰色关联分析[J].天然气地球科学,2006,17(6):851-853.

(编辑 刘义梅)