

天然气储层产能的测井评价与预测*

肖慈珣¹,肖崇礼¹,栗英姿¹,胡华伟²,陈必孝²

(1. 成都理工学院,四川成都 610059,2. 西南石油局测井站,四川资阳 641300)

摘要:通过测井数据标准化、测井曲线自动分层和建立识别模式对可能产层进行识别,求出地层有效孔隙度、气体的绝对渗透率、有效渗透率、产能指数、产能系数和复合指数等6种参数为确定产能评价参数,然后通过聚类分析,就可获得预测产层级别的标准模式,利用分层产能级别,便可与储层产能(测试无阻流量)建立联系,达到评价和预测储层产能的目的。经在川西北地区应用,获得了良好的效果。

关键词:天然气储层;测井评价;产能预测;模糊聚类

第一作者简介:肖慈珣,男,62岁,教授(博士生导师),地球物理测井

中图分类号:P618.130.21

文献标识码:A

油气储层评价一直是测井解释的一项重要任务,然而,仅仅根据目前测井解释所能提供的储层评价结果,尚不足以回答一口井特别是每一储层可能获得的油气产量,而这更是油气田勘探开发工作者迫切关心的问题。

目前,有关产能评价与预测问题,在油气藏工程中已有多种方法^[1],但它们主要是利用油气井系统测试资料,包括地层压力、井底流动压力和测试产量进行计算,得出的仅是一口井或一个产层段的产能。而对于如何利用测井资料评价和预测油气储层,特别是天然气产层的产能,可借鉴的成熟方法还较少见。

本文以川西北地区XC气田碎屑岩气藏为研究对象,提出了一套利用常规测井资料,采用多参数模糊聚类分析方法,对天然气储层进行产能评价及预测的研究思路和方法技术,并在实用中取得了满意的效果。

1 产能概念及评价方法

1.1 产能概念

油气储层的产能是其生产能力的量度。对于油层,常用每米采油指数对其定量描述。它是指厚度为1m的产层,在生产压差为0.1MPa时的产油量,即

$$PI = \frac{Q}{h\Delta P} \quad (1)$$

或

$$PI = \frac{K_0}{\mu_0 \ln \frac{R}{R_0}} \quad (2)$$

式中 PI 为每米采油指数; Q 为原油产量; ΔP 为生产压差; h 为产层厚度; K_0 和 μ_0 为油的有效渗透率和原油粘度,比值 K_0/μ_0 称为流度; R 和 R_0 为泄油半径和井径。

对于气层,评价产能的重要指标是绝对无阻流量,可通过测试产量由下式计算^[1]

$$q_{AOF} = \frac{6q_g}{\sqrt{1 + 48P_D} - 1} \quad (3)$$

式中 q_{AOF} 和 q_g 为天然气绝对无阻流量和产量; P_D 可通过下式求得

$$P_D = 1 - \left[\frac{P_{wf}}{P_R} \right]^2$$

式中 P_{wf} 和 P_R 为流动压力和地层压力。

在实际工作中,人们对产能的认识进一步加以深化,并将其分为三种:一是自然产能,即打开产层之后的自然产出能力;一是改造产能,即采取某种增产措施之后的产出能力;另一称为潜在产能,即产层本身所具有的固有产能。在储层孔渗性较好且未受污染的情况下,自然产能与潜在产能基本相当,但在其他复杂情况下,自然产能将难以反映潜在产能,而改造产能则有可能接近潜在产能,也有可能相差较大。

由于改造产能和潜在产能受的制约因素较多,如地层特性、污染程度、增产措施和施工工艺等,而很难根据上述公式作出正确估价,因此,目前对储

* “九·五”国家重点科技攻关项目专题之一

收稿日期:1999-07-13

层产能的评价主要指的是自然产能,即测试产能。

1.2 产能评价方法

基于上述对产能的分析可以看出,油气储层的产能除了与产量和地层压力有直接关系之外,还与产层的厚度、有效渗透率和含油饱和度等有密切的关系。目前常用的评价储层产能的方法主要有下述4种。

1.2.1 直接测试法

这主要是根据油气井测试获得的产量及有关参数,由式(1)或(2)(对于油层)或式(3)(对于气层)直接计算,但这属于油气藏工程计算方法,无法用于测井评价。

1.2.2 产能指数法

这是根据油气储层产能与其有效渗透率和含水饱和度之间关系,而提出的一种产能评价方法^[2],并定义产能指数 $PDID$ 为

$$PDID = \frac{K}{S_w} \quad (4)$$

式中 K 和 S_w 为产层的有效渗透率和含水饱和度。

1.2.3 产能系数法

产能系数定义为储层有效渗透率与厚度的乘积^[3],即

$$PKH = K h \quad (5)$$

它与储层的产能也有密切的联系。

1.2.4 多参数评价法

本文提出的天然气层多参数评价方法,即利用与天然气储层产能有关的多种地层参数作为产能评价参数,通过模糊聚类分析,首先确定产能级别,然后将其与测试无阻流量建立联系,进而作出对产能的评价及预测。

2 可能产层与产能评价参数

2.1 可能产层识别

产能评价是针对产层而言的,因此测井评价的首要工作是利用测井信息识别可能产层。根据研究地区测井系列情况,通过测井数据的统计分析,我们确定 GR (自然伽马)、 AC (补偿声波)、 CNL (补偿中子)和 $LOGC$ (电导率对数)作为产层识别的主要测井信息,并作以下几项工作。

2.1.1 测井数据标准化

由于产能评价与预测涉及整个研究地区,因此,各井测井数据之间的一致性十分重要。我们采

用正态分布法来对各井测井数据进行标准化,以消除由于仪器刻度、井下条件等非地质因素所造成的井间测井曲线的差异。

2.1.2 测井曲线自动分层

主要采用活度法对测井曲线进行自动分层,目的在于建立各井的分层数据,以便用于模糊聚类分析。

2.1.3 建立识别模式

首先,利用少量井的测井分层数据作因子分析($K-L$ 变换),建立一个地区内可能产层识别参数的因子转换关系,以增强产层与非产层资料点之间的差异。

其次,利用已建的因子转换关系对部分井的测井分层数据进行因子转换,建立识别可能产层的标准数据集。

然后,利用模糊聚类分析方法^[4]对这些数据进行聚类。根据类中心值、类间距和各资料点归类规律,可将井剖面地层分为4个大类和7个小类(表1)。其中第4类为可能产层,它与其他各类之间的差异是明显的,这为研究地区各井可能产层的预测提供了基本模式。

表1 4个大类和7个小类地层的类中心值

Table 1 Class central values of four classes and seven subclasses for formations

分类	CNL	AC	LOGC	GR
1	17.029 2	81.495 1	1.821 0	148.359 9
	19.599 0	80.702 8	1.872 5	107.660 6
2	22.666 2	86.961 9	2.014 8	101.626 2
	17.572 3	73.024 0	1.717 6	95.279 7
3	13.889 1	64.328 8	1.312 7	84.792 0
	16.146 5	71.655 9	1.699 3	82.966 0
4	15.357 1	90.563 7	1.679 8	74.336 0

2.2 确定产能评价参数

对于天然气储层的产能评价,除了储层的静态参数之外,适当增加有关动态参数是有益的。我们通过分析并用最优化测井解释技术的解释结果,求取了如下6种参数作为多参数产能评价的基本信息。

(1) $PORE$ ——地层的有效孔隙度(Φ_e)

(2) $PERM$ ——气体的绝对渗透率(K),由下式计算

$$K^{1/2} = 79 \frac{\Phi_e^{2.8}}{S_{wir}} \quad (6)$$

式中 S_{wir} 为束缚水饱和度,可用下式求得

$$S_{wir} = \frac{\Phi_T - \Phi_e}{\Phi_T} \quad (7)$$

式中 Φ_T 为地层总孔隙度。

(3) *GPER* ——地层中气体的有效渗透率 (K_g),由下式计算求取

$$K_g = K K_{og} \tag{8}$$

式中 K_{og} 为气体的相对渗透率,由下式计算

$$K_{og} = \frac{1 - (S_w - \Phi_{wirr})}{1 - S_{wirr}} \left[\frac{1 - S_w(S_w - S_{wirr})}{(1 - S_{wirr})^{0.025}} \right]^{0.5} \tag{9}$$

式中 S_w 为地层含水饱和度。

(4) *PDID* ——产能指数,前述式(4)。

(5) *PKH* ——产能系数,前述式(5)。

(6) *PDRG* ——复合指数。

$$PDRG = PDID \cdot K_g \tag{10}$$

3 产能评价与预测

3.1 储层产能级别评价与预测

在已识别出的可能产层基础上,按上述算法计算出各产能评价参数,并按一定的标准(如可能产层的隶属度大于50%,层厚大于1 m等)从部分处理井中选取标准层点数据,然后通过模糊聚类分析,获得研究地区预测储层产能级别的标准模式。聚类结果,可将产层分为4类,1~4类分别对应于由低到高4个产能级别。表2和表3示出了模糊聚类得出的4级产能的类间距和类中心。可以看出,4个级别之间的差异是明显的。

表2 储层产能4级分类的类间距

Table 2 Class intervals of four-grade classification for reservoir productivity

产能级别	1	2	3
2	5.227 735	—	—
3	7.500 589	2.296 440	—
4	3.226 540	2.017 118	4.292 617

表3 储层产能4级分类的类中心

Table 3 Class centres for four-grade classification for reservoir productivity

级别	产能评价参数					
	<i>PORE</i>	<i>PERM</i>	<i>GPER</i>	<i>PDID</i>	<i>PKH</i>	<i>PDRG</i>
1	12.321 068	-0.184 765	-0.823 194	0.006 558	-0.439 446	-0.631 878
2	10.342 970	-0.827 236	-1.475 543	-0.662 904	-1.275 377	-1.311 206
3	11.315 319	-0.518 538	-1.119 886	-0.329 805	-0.752 636	-0.931 100
4	14.271 947	0.241 372	-0.319 541	0.468 054	0.111 304	-0.092 866

3.2 单井及单层产能预测

利用分层产能级别,便可与储层产能(测试无阻流量)建立联系,达到预测储层产能的目的。然而,由于研究工区内绝大多数井是多层测试或混合开采,得出的产气量或绝对无阻流量是一口井在该

层段内的总体估价,无法提供单层产能数据。为此,我们采取以下方法:

3.2.1 产能级别由层到井的转换

利用分层产能级别预测结果,通过加权,可以获得各井的单井产能级别——一种产能高低的半定量描述。

3.2.2 求井的综合产能评价指数

主要利用前述6种产能评价参数中的 *PDID*、*PKH* 和 *PDRG* 3种参数,通过主因子分析提取其主因子并在测试井段进行加权作为井的综合产能评价指数,用 *PDVA* 表示。

3.2.3 单井产能预测

利用井的综合产能评价指数 *PDVA* 与已知井的测试无阻流量建立关系,获得定量评价并产能的预测模型。图1是在本研究地区所建立的这种模型的实例,相关系数达0.901 66。图中纵坐标 *QF* 为井的测试无阻流量,单位 $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,圆点下部注

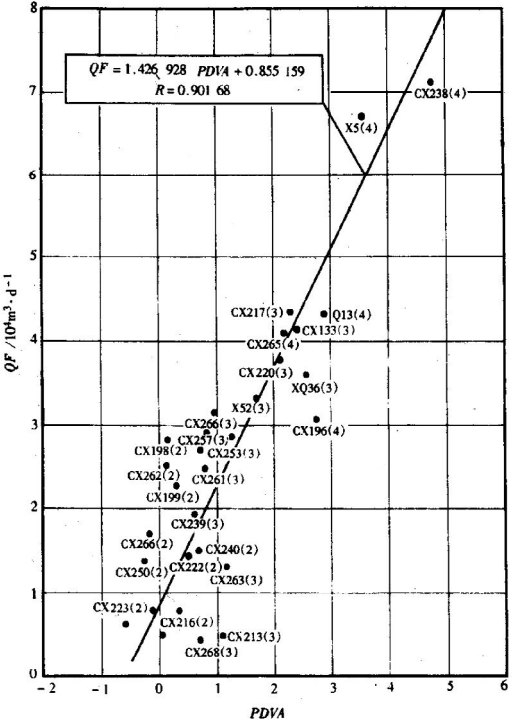


图1 井的综合产能评价指数与无阻流量的相关图

Fig.1 Correlograph between evaluation indexes of comprehensive productivity and nonresistance outflow

释为井名、井号及井产能级别。根据图1的分析,可以总结出研究地区综合产能评价指数与测试无阻流量之间的关系如表4所示。

表 4 不同产能级别对应的天然气无阻流量值
Table 4 Nonresistance corresponding with outflow values of gas different productivity grades

产能级别	1	2	3	4
测试无阻流量 /10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹	<0.5	0.5~2.0	2.0~4.0	>4.0

3.2.4 单层产能预测

为了进一步评价每一产层的单层产能,我们进一步用产层厚度与气体有效渗透率的乘积作为加权因子,把井的测试无阻流量分配到各产层上,以求得各单层的单位厚度产量。图 2 是用综合产能评价指数 PDVA 与分配得到的各单层的单位厚度产量 PDTY 的相关图,相关系数为 0.845 48。图中标注的数字为单层产能级别。可以看出,单层产能与产能级别也有良好的相关关系。利用该图,可以由参数 PDVA 或产能级别预测单层的产气量。

4 实际应用与效果评价

利用本研究的方法技术,在四川 XC 气田实际处理了 40 余口井的测井资料,其中 26 口井为建模

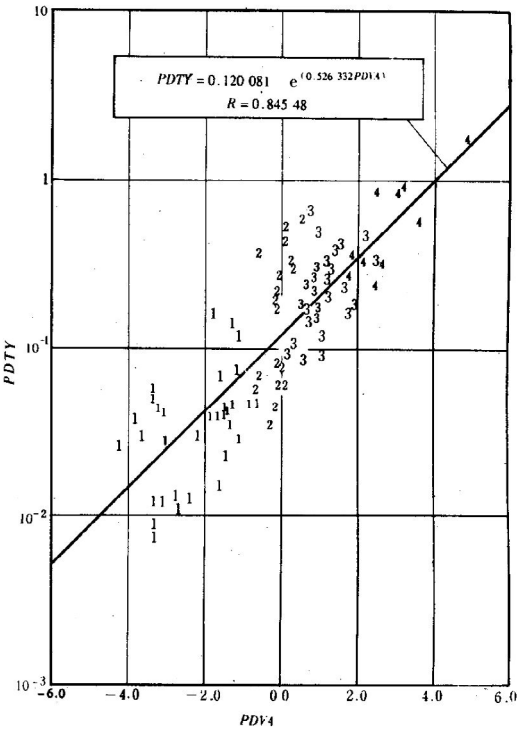


图 2 单层产量与综合产能评价指数及产能级别的相关图
Fig.2 Corretograph of the single-layer production, comprehensive productivity evaluation index and productivity grades

表 5 单井及单层试气井预测产量与测试产量的对比

Table 5 Correlations between predicting production and test production of single-well, single-layer test well

井名	层号	深度/m	层厚/m	预测层产量/10 ⁴ m ³ d ⁻¹	级别	预测井产量/10 ⁴ m ³ d ⁻¹	测试无阻流量/10 ⁴ m ³ d ⁻¹
X5	1	553.20~555.00	1.800	0.664	4	5.958	6.714
	2	605.10~615.90	10.800	8.858	4		
	3	621.30~622.50	1.200	0.028	1		
	4	711.50~712.30	0.800	0.008	1		
X52	1	630.10~631.30	1.200	0.369	4	3.277	3.315
	2	656.50~660.30	1.600	0.272	3		
	3	658.60~660.30	1.700	0.281	3		
	4	734.50~744.20	9.700	3.228	3		
	5	808.20~809.60	1.400	0.73	3		
	6	810.00~815.30	5.300	1.134	3		
239	1	759.10~762.10	3.00	0.127	1	1.714	1.940
	2	783.10~790.90	7.800	1.335	3		
236	1	612.20~614.70	2.600	0.319	2	2.502	1.304
	2	615.90~616.70	0.800	0.060	2		
	3	617.50~618.40	0.900	0.037	1		
	4	618.90~619.90	1.000	0.107	2		
	5	624.50~626.20	1.700	0.244	3		
	6	626.60~628.00	1.400	0.119	2		
	7	629.40~632.60	3.200	0.632	3		
X67	1	640.50~641.40	0.900	0.023	1	0.808	0.444 *
	2	641.80~644.50	2.700	0.387	2		
	3	644.70~646.80	2.100	0.242	2		
	4	647.00~651.00	4.000	0.250	1		
XQ36	1	1 071.30~1 078.10	6.800	3.189	3	4.540	3.595 *
	2	1 090.40~1 091.70	1.300	0.030	1		
XQ40	1	1 136.40~1 137.60	1.200	0.051	1	0.003	0.400 *
	2	1 139.10~1 140.30	1.200	0.088	1		
	3	1 140.60~1 146.70	6.100	0.307	1		
XPI7	1	1 122.70~1 124.20	1.500	0.046	1	0.003	0.262 *

* 单层测试井

井,其余为预测井。预测内容包括层产能级别、井产能级别、井产量(测试无阻流量)和单层产量等。表 5 列举了部分预测井的预测结果与测试无阻流

量的对比。可以看出,预测的单井产量及单层产量与测试结果吻合良好,充分证明了方法的有效性和实用性。
(下转第 289 页)

- 2 于志钧, 赵旭东. 石油数学地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984. 169 ~ 190
- 3 黄智辉. 模糊数学原理及其在测井解释中的应用[M]. 北京: 中

- 国地质大学出版社, 1992. 25 ~ 50
- 4 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 天然气地质学概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989. 2 ~ 50

R-FACTOR ANALYSIS ASSESSMENT OF OIL - GAS ZONES IN QINGTONG

Liu Deliang¹ Tan Ying¹ Yang Xiaoyong¹ Dai Jinxing²

(1. Department of Earth and Space Sciences, Reseach Centre of Oil and Gas, China University of Science and Technology, Hefei, Anhui; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing)

Abstract: Regional tectonic framework of Qingtong Depression consists of fault-depression and fault-uplift. The fault zones trend mainly NEE and EW. Fourteen secondary structural units are divided as sample points in the depression. Fuzzy mathematical method is used to get the values of qualitative geological conditions of the depression, then the sample point data could be converted into zonal score values by weighed mean method, and finally use R-factor analysis method to assess regional oil-gas reservoirs. In order to estimate those samples with poor parameter relativity, fuzzy comprehensive assessment is made for the main components derived from the factor analysis. The concept of blank-value and calibrated-value was introduced to stack vertically multi-sequence assessment results.

Key Words: R-factor analysis; oil-gas zone; assessment; fuzzy comprehensive assessment; blank-value; calibrated-value

(上接第 282 页)

5 结论与认识

本研究开发的测井产能评价与预测技术, 提供了从产层识别、产能评价参数确定、产能级别评价, 以及由层到井和由井到层进行产能估计的一整套研究思路, 它可以在多层测试或混合开采的天然气井中评价和预测井的产能, 也可评价和预测单层的产能, 且有较高的吻合率。这套研究思路, 还为我们开拓了一种气层偷速定量评价方法, 其评价结果, 不仅能较直观地回答勘探开发决策者关心的气

井及气层产出能力和开发前景问题, 还能为单井及分层储量计算、有效射孔层位的选取以及老井挖潜层位的确定等提供直接依据。

参 考 文 献

- 1 陈元千. 油气藏工程计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. 23 ~ 28
- 2 曾文冲. 油气藏储层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 335
- 3 顾国兴, 丁进. 利用测井资料预测油层产能的新方法[J]. 江汉石油学院学报, 1993, 15(1): 43 ~ 48
- 4 王碧泉, 陈祖荫. 模式识别[M]. 北京: 地震出版社, 1989. 69 ~ 78

LOG EVALUATION AND PREDICTION OF GAS RESERVOIR PRODUCTIVITY

Xiao Cixun¹ Xiao Chongli Su Yinzi¹ Hu Huawei² Chen Bixao²

(1, Chengdu College of Technology, Chengdu, Sichuan; 2, Well Logging Station of Southwest Petroleum Bureau)

Abstract: Probable productive formations are recognized by log data standardization, log curve automative layering and establishing recognizing models; the parameters such as effective porosity of the formations, the absolute and effective permeabilities of gas, the index and the coefficient of productivity, and the comprehensive index are calculated. These data are used as evaluation parameters to determine productive formations. The standard model of productivity grade can be obtained by cluster analysis, sublayer productivity grade could be connected to the reservoir productivity (test nonresistance outflow), and then the evaluation and the prediction of reservoir productivity could be realized.

Key words: gas reservoir; log evaluation; productivity prediction; fuzzy cluster