

低渗透储集层类型的测井识别模型

汪中浩¹ 章成广¹ 柴春艳¹ 肖承文² 刘兴礼² 李进福² 闫爽²

(1. 长江大学地球物理与石油资源学院 2. 中国石油塔里木油田分公司研究院)

汪中浩等. 低渗透储集层类型的测井识别模型. 天然气工业, 2004; 24(9): 36~38

摘要 目前低渗透储层测井评价结果与试油效益并不令人满意, 其原因是低渗透储集层类型的差异导致其导电性和测井响应特征不同, 而测井解释大多数还是沿用中高孔渗油气藏的解释方法。因此, 低渗透储集层的测井解释模型要针对不同的储集层类型建立模型, 其核心问题是利用测井资料进行低渗透储集层类型的识别。文章首先应用毛细管压力曲线、岩电实验数据、物性分析数据和相对渗透率曲线等实验资料, 结合实际测井和测试资料, 采用地质储层分类标准和储层的分形特征对塔中志留系储层进行分类研究, 建立了适应井区的测井分类标准; 然后, 采用 BP 神经网络方法建立了识别储层类型的测井分类模型; 最后应用该方法处理该层系低孔低渗储层的实际测井资料。其处理解释结果与岩心分析结论比较, 符合率高达 91.89%, 试油结果也验证了该方法的实用性、准确性。

关键词 低渗透油气藏 毛细管压力 测井解释 神经网络 塔里木盆地

储层分类研究主要集中在岩石孔隙结构特征研究方面, 一般采用岩心压汞资料研究表征孔喉微观结构的特征参数^[1], Katz 等^[2]、Krohn^[3,4]等学者也提出利用分形几何理论分析岩心扫描电镜实验资料来研究岩石孔隙结构, 从而评价储层储集性能好坏。为达到利用测井曲线直接识别储层类型的目的, 提取不同储层类型对应的自然电位、自然伽马、密度、声波时差等曲线值, 能够较好地反映储层特征, 但其范围有交叉, 不能单独描述。同样, 通过对压汞实验和岩电实验资料的分析, 单一特征很难区分不同类型的储层。笔者考察并借鉴国内低孔低渗储层分类经验, 利用神经网络方法^[5], 结合物性、压汞毛细管曲线、岩电、测井曲线等资料, 对储层作分类研究, 总结出一套分类方法和测井识别方法。

一、低渗透储层分类方法

从孔隙结构观点看, 毛细管压力曲线可以反映岩石的孔隙喉道分布, 从而可以确定储集层类型及评价储集性能。毛细管压力曲线的形态主要受孔隙喉道的分选性和喉道大小所控制。分选越好, 毛细管压力曲线中间的平缓段越长, 越接近与横坐标平行。喉道越大, 大喉道越多, 则曲线越向坐标的左下

方凸出; 相反, 喉道越小, 越凸向右上方。孔隙结构的宏观特征参数之一渗透率也与储层性能有关, 毛细管压力曲线的特征参数与渗透率密切相关, 因此, 结合我国低渗透率砂岩储层压汞资料统计结果^[6], 可将研究工区砂岩储层分成 5 类, 分别是: $K > 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为第 1 类, $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K < 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为第 2 类, $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K < 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为第 3 类, $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K < 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为第 4 类, $K < 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为第 5 类。但是, 在实际测井解释应用时, 要考虑不同储层类型的电导率变化规律, 根据 Katz 和 Krohn 等研究发现: 储层岩石粒径在 $0.2 \sim 50 \mu\text{m}$ 范围内具有良好的分形特征, 其分维数在 $2.27 \sim 2.89$ 间变化, 储层的电导率又与孔隙分维数密切相关。因此, 分析储层的分形特征, 就可确定储层分类界限。

利用毛细管压力曲线求取不同类型储层的孔隙分维数, 其分形几何公式如下:

$$\lg S_w = (3 - D) \lg p_{\text{min}} + (D - 3) \lg p_c \quad (1)$$

式中: S_w 为含水饱和度, %; p_c 为测量毛细管压力值, mPa; p_{min} 为最小毛细管压力值, mPa; D 为孔隙分维数。

求取不同类型储层的孔隙分维数的方法是采用

作者简介:汪中浩, 1966年生, 博士, 副教授; 1987年毕业于原江汉石油学院测井专业, 曾主持或参与 10 余项国家级、省(部)级科研项目, 多项研究成果获省(部)级科技进步一、二、三等奖, 在国内外期刊上发表学术论文 20 多篇; 现主要从事地球物理测井方面的科学研究与教学工作。地址: (434023) 湖北省荆州市。电话: 13593841799。E-mail: wangzhonghao@263.net

式(1),作 $\lg S_w$ 与 $\lg p_c$ 线性交绘,直线斜率加 3 就是储层岩石孔隙分维数。选择研究区 34 块岩样计算的孔隙分维数如图 1 所示,从中可发现岩样孔隙分维数反映出不同类型的储层具有不同变化规律,因而对测井测量储层的电导率有不同的影响,以孔隙度等于 10%、渗透率等于 $10 \times 10^{-3} \mu m^2$ 为界限, m 、 n 所反映的规律有差异,应作相应的储层分类。结合试油结论和实际的储量计算要求可知,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 时,一般情况下测试结果很少有产能,认为是非储层。因此,实际测井解释中,将按压汞毛细管资料分成的五类储层合并成测井定量解释的三类储层类型,即:当孔隙度大于 10%,渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu m^2$ 时为好储层;当孔隙度小于 10%,渗透率在 $10 \times 10^{-3} \mu m^2$ 与 $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 之间时为中储层;而当渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 时则为差储层。

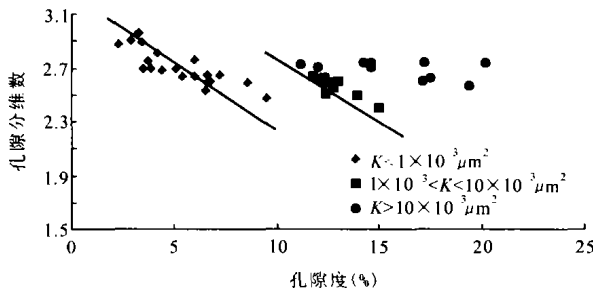


图 1 岩样毛细管压力实验计算的孔隙分维数变化规律图

二、低渗透储层类型的测井识别

在储层评价方面,一般采用岩心压汞资料研究表征孔喉微观结构的特征参数^[1],进而对储层作出定性评价,不能满足测井定量解释的需要。为达到利用测井曲线直接识别储层类型的目的,笔者利用岩心的各类分析资料和测井响应值,提取神经网络训练样品,经网络设计、网络学习、训练得到识别储层的神经网络模型^[5]。其网络模型的输出层和隐层单元的权值(W)调整公式分别为:

输出层单元

$$\Delta_p W_{kj} = \eta \cdot (t_{pk} - O_{pk}) \cdot \delta_{pk} (1 - O_{pk}) \cdot O_{pj} \quad (2)$$

隐层单元

$$\Delta_p W_{ji} = \eta \cdot O_{pj} \cdot O_{pi} (1 - O_{pi}) \cdot \sum \delta_{pk} \cdot W_{kj} \quad (3)$$

式中: η 为学习因子; δ_{pk} 为 k 节点 p 模式的误差项; t_{pk} 为 p 模式输入到网络节点 k 所产生的响应; O_{pk} 为 p 模式网络节点 k 所期望产生的响应。

若用 δ 值分别代表式(1)、(2)的某一部分,则输出层单元

$$\delta_{pk} = (t_{pk} - O_{pk}) \cdot O_{pk} \cdot (1 - O_{pk}) \quad (4)$$

隐层单元

$$\delta_{pj} = O_{pj} \cdot (1 - O_{pj}) \cdot \sum \delta_{pk} \cdot W_{kj} \quad (5)$$

即为广义 δ 学习规则。

则 BP 网络统一权值调整公式为:

$$\Delta_p W_{ij}(t+1) = \eta \cdot \delta_{pj} \cdot O_{pi} + \alpha \cdot \Delta_p W_{ij}(t) \quad (6)$$

式中: α 为动量因子。

储层类型与泥质含量、孔隙度、渗透率有密切的关系,因此,在塔中志留系油藏选择自然电位、自然伽马、密度三个参数作为输入神经元,以储层类型为决策属性,作为输出神经元。选取测井资料和实验分析结果作为神经网络训练样本进行建模,通过图 2 的三层网络训练。在训练过程中,取网络动量因子 $\alpha = 0.7$,学习因子 $\eta = 0.9$,误差 $\xi = 0.0001$,网络需迭代 3015 次,系统误差达到万分之一以下,这时得到储层类型识别模型的连接权值和阈值,其中输入层到隐含层的权值和阈值为: $[-51.821, 2.265, -27.420, -65.099]$, $[-21.879, -69.436, 19.848, -21.278]$, $[4.224, 9.148, 19.848, -21.278]$, $[20.519, 90.624, -2.182, -13.403]$, $[-0.291, -39.410, -4.271, -1.018]$, $[6.854, -10.785, -2.651, 14.233]$, $[-11.947, 0.271, -7.756, -2.569]$, $[2.185, 0.083, 1.674, -6.179]$, $[7.197, 0.456, -1.021, 2.043]$, $[-25.225, -30.127, -0.520, -1.816]$, $[-6.964, 2.149, -6.836, -1.073]$, $[3.978, 45.497, 1.761, -0.830]$, $[-27.515, -23.985, -1.603, -3.511]$, $[-37.901, -10.509, -0.705, 0.778]$, $[39.741, -7.996, 1.893, -3.304]$ 。隐含层到输出层的权值和阈值为 $[-24.562, -2.116, -3.379, 22.653, -23.136, -4.673, 6.582, -8.838, -1.680, -2.879, -2.743, 13.058, -3.695, -2.538, 1.274, 1.487]$ 。网络训练精度

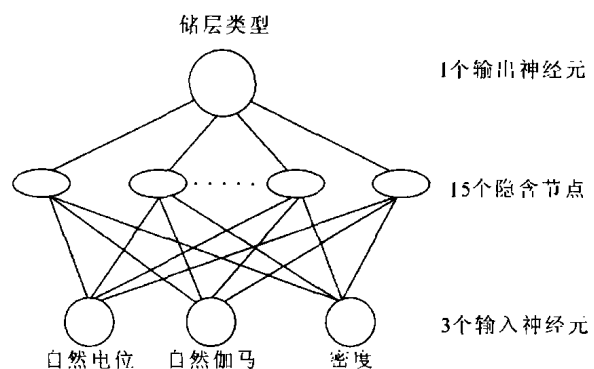


图 2 识别储层类型的网络拓扑结构

高,其网络训练计算值与岩心分类符合。因此,建立了精度可以满足塔中47油田志留系油藏的储层识别实用模型。

三、模型的应用效果分析

利用神经网络方法,结合物性、压汞毛细管曲

线、岩电、测井曲线等资料,建立了对储层作分类研究的测井识别模型。选择塔中志留系低孔低渗储层的实际测井资料,利用上述建立的实用模型进行处理,其解释结果如表1所示。表中的储层类型是岩心分析结果,识别结果是本文方法预测的结论,可见测井解释的符合率达91.89%。另一方面,塔中A

表1 储层类型测井识别的实际资料处理结果表

井名	层号	层段(m)	渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙度(%)	储层类型	识别结果	效果
塔中 A	1	4980.5~4982.5	0.403	4.39	差储层	差储层	符合
	2	4985.5~4986.5	0.704	10.8	差储层	差储层	符合
	3	4989.0~4990.4	3.18	12.7	中等储层	中等储层	符合
	4	4992.9~4994.0	155.26	13.8	好储层	中储层	不符合
	5	4997.5~4998.8	99.12	16	好储层	好储层	符合
塔中 B	1	4411.0~4412.0	0.678	5	差储层	差储层	符合
	2	4417.5~4420	22.4	12.1	好储层	好储层	符合
	3	4424.5~4425.2	1.29	8.07	差储层	中等储层	不符合
	4	4427~4431.5	20	12	好储层	好储层	符合
	5	4437~4440.6	0.77	8.44	差储层	差储层	符合
	6	4443.5~4444.3	2.47	10	中等储层	中等储层	符合
	7	4445~4445.4	0.55	7.59	差储层	差储层	符合
	8	4451~4451.5	0.75	8.23	差储层	差储层	符合
	9	4457~4459	6.13	9.63	中等储层	中等储层	符合
塔中 C	1	4470.0~4472.0	1.35	14	中等储层	好储层	不符合
	2	4474.7~4475.5	50	15.27	好储层	好储层	符合
	3	4476.4~4477.5	3.02	11.39	中等储层	中等储层	符合
	4	4480.5~4481.8	2	12.69	中等储层	中等储层	符合
	5	4484.5~4485.5	12	14	好储层	好储层	符合
	6	4488~4489.5	56	14.7	好储层	好储层	符合
	7	4493.2~4494	0.95	10.1	中等储层	中等储层	符合

井在4978.5~4986 m井段用 $\varnothing 8$ mm油嘴,流压26.93 MPa,静压60.37 MPa进行试油,产油32.2 m^3/d ,产气2822 m^3/d ,而4995~4996 m井段在同样工作制度下,产水255 m^3/d 。下面井段层薄,折算成产油^[7]也比上面厚井段的生产能力强,其原因主要在于下面储层条件比上面好,这正好验证了笔者提出的解释结果的正确性。同样,在塔中B井4417~4435 m井段用 $\varnothing 4.76$ mm油嘴、流压31.5 MPa、静压51.81 MPa进行试油作业,产油16.3 m^3/d 。而在塔中C井4452.87~4478.17 m井段裸眼试油,流压32.926 MPa,静压51.839 MPa,产油9.58 m^3/d 。塔中B井和C井在同一构造上,将产量折算成产能^[7],B井大于C井,其原因在于所在试油井段内B井储层条件比C井好,模型解释B井有2.5 m好储层,C井只有0.8 m好储层,模型解释结果与实际试油结果吻合。

参 考 文 献

- 1 周丽梅,李德发等. 大丘构造S组储层孔隙结构特征及储层评价. 矿物岩石,1999;19(2):47~51
- 2 Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and formation. Phys Rev Lett, 1985;54(3):1325-1328
- 3 Krohn C E. Sandstone fractal and euclidean pore volume distributions. Geophys Res, 1988;93(B4):3286-3296
- 4 Krohn C E. Fractal measurements of sandstone, shales and carbonates. Geophys Res, 1988;93(B4):3297-3305
- 5 汪中浩,尉中良等. 神经网络模型研究多油层剩余油饱和度变化规律. 同位素,2002;15:44~47
- 6 罗蛰潭,王允诚. 油气储集层的孔隙结构,北京:科学教育出版社,1986
- 7 汪中浩,章成广,肖承文等. 低渗透储集层产能预测模型. 江汉石油学院学报,2003;25(4):23~25

(收稿日期 2004-03-02 编辑 韩晓渝)