

松辽盆地深层孔隙流体压力预测

刘文龙¹ 李思田¹ 孙德君¹ 柴文华² 郑建东²

(1. 中国地质大学能源地质系, 北京 100083; 2. 大庆石油管理局研究院, 大庆 163712)

摘要: 孔隙流体压力属于流体状态参量, 它是进行盆地动力学分析、油气成藏动力学分析以及油气预测的重要因素之一. 孔隙流体压力的预测模式应尽量将各种地质作用对其的贡献考虑进去, 并且, 利用大量的实际地层测试参数与各种地球物理参数之间的相互关系来选择适当的数学模型. 选用神经网络计算技术对松辽盆地深层孔隙流体压力进行了预测, 并对孔隙流体压力的可能成因进行了分析.

关键词: 孔隙流体压力; 神经网络; 油气运移.

中图分类号: P618.130.2; TE122.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)02-0137-06

作者简介: 刘文龙, 男, 工程师, 1965年生, 1988年毕业于中国地质大学(武汉), 现供职于大庆石油管理局研究院, 主要从事含油气盆地动力学分析、油气地质勘探等方面的研究工作.

0 引言

地壳上发育有各种成因类型的沉积盆地, 它们由于不同的动力地质演化过程, 而呈现出各自不同的地层压力类型及其形态各异的三维压力展布特征. 地层压力是指作用于地层孔隙空间里的流体(地层水、油、气)上的压力. 地层压力是地下流体动力场的核心, 油气的生、排、运、聚、散等油气地质过程就是随着流体动力场的演化而进行的, 因此, 弄清盆地孔隙流体压力特征, 对于含油气盆地勘探开发的整个过程都是非常重要的.

松辽盆地深层指泉二段及以下地层, 自上而下为泉二段、泉一段、登四段(K_1d_4)、登三段(K_1d_3)、登二段(K_1d_2)、登一段(K_1d_1)、侏罗系(J)及基岩, 平均深度大于2500m, 总厚度5500m以上; 包含了冲积扇、河流、滨浅湖、三角洲、半深湖、深湖以及火山岩喷发相等多种沉积相, 大部分属裂谷期产物, 构造活跃, 断裂发育. 在大庆长垣东部三肇凹陷的3个层位(登三段、登四段, 登一段、侏罗系, 基岩)上发现了3个工业气藏(汪家屯、升平、昌德), 储集层以砂砾岩、砾岩、火山岩、基岩风化壳为主. 从储层地层测试资料可以看出(表1), 地层压力的类型从低压到超高压都有分布, 但基本以常压为主, 而地温梯度基

表1 松辽盆地深层孔隙流体压力测试资料

Table 1 Data of deep-seated pore-fluid pressure in Songliao basin

井号	层位	h/m	$t/^\circ C$	p/MPa	地温梯度/ ($^\circ C \cdot 100 m^{-1}$)	压力 系数
升深2	K_1d_2	2879.77	118.9	32.25	4.129	1.126
升深1	K_1d_3	2769.08	118.3	27.58	4.272	0.996
升深4	Jy	3013.46	119.4	30.49	3.960	1.012
	Jy	3052.73	122.2	32.31	4.003	1.050
升深101	Jh	2812.43	116.7	28.21	4.150	1.000
	Jh	2867.80	116.1	27.34	4.050	0.950
	Jh	2941.06	122.2	29.53	4.150	1.040
汪901	K_1d_3	2597.24	110.6	26.41	4.260	1.020
	K_1d_{3+2}	2699.63	114.0	26.16	4.200	0.970
	K_1d_2	2719.23	115.5	26.95	4.250	0.991
	K_1d_4	2601.10	111.1	25.71	4.271	0.988
汪902	K_1d_3	2677.53	112.2	25.33	4.190	0.946
	K_1d_3	2764.58	115.6	27.77	4.181	1.004
	K_1d_2	2813.77	116.1	26.15	4.126	0.929
汪903	K_1d_1	2846.11	117.8	28.99	4.139	1.019
	K_1d_4	2659.32	115.6	26.15	4.350	0.983
	K_1d_3	2697.20	117.2	26.34	4.350	0.977

本在 $4^\circ C/100m$ 以上, 属高地温梯度. 地层测试资料精度较高, 是验证预测的重要依据, 但其只是储层中的某些局部点段数据. 对整个地层的全面认识, 需要结合地质规律, 综合利用地层测试资料、测井资料、地震资料、重磁电资料, 运用适当的方法进行压力预测.

1 地层压力分类

描述地层压力的展布特征,有必要首先对其进行恰当的分类.国内外关于地层压力的分类一般都是以压力系数进行的,A. A. 奥尔格夫等人提出了地层压力的分类方案(据文献[1]),这种分类方案(表 2),异常高压范围很宽,适合于快速沉积的年轻盆地.国内一些学者根据众多的含油气盆地资料总结了地层压力的分类,这种分类方案常压至超低压部分过分平均,而高压至超高压又过分集中,也不能反映松辽盆地深层这样有特色的地层压力特征.为了充分体现本区成岩作用强,构造运动剧烈,火山岩分布面积广等特点,本次研究采用如下分类方案(表 2).

表 2 松辽盆地深层压力分类方案及与国内外分类对比

Table 2 Deep pressure classifications and correlations of Songliao basin and home and abroad sedimentary basins

	压力系数	压力分类	压力系数	压力分类
松辽盆地	<0.90	超低压	1.02~1.12	高压
	0.90~0.98	低压	>1.12	超高压
	0.98~1.02	常压		
国外	<0.96	低压异常	1.08~1.20	高压异常
	0.96~1.08	常压	>1.20	异常高压
国内	<0.75	超低压	1.10~1.50	高压
	0.75~0.90	低压	>1.50	超高压
	0.90~1.10	常压		

2 地层压力预测

2.1 预测方法选择

地层压力预测方法传统上一般分两类:一是通过总结地质作用对孔隙体积、孔隙流体温度、孔隙流体特征参量等与孔隙流体压力相关参数的影响规律,结合孔隙流体压力的基本概念,提出相应数学模型,进而对流体动力学参数进行预测;二是通过寻找流体动力学参数与各种地球物理参数间的经验关系进行预测,常用的预测方法有如下几种,即等效深度法^[2]、改进的等效深度法^[3]、直接预测法^[4]、迭代模拟法、比值预测法、图板预测法、利用地震振幅资料预测地层压力^①等方法.从理论上讲它们都可以求得纵、横向地层压力的特征.但是也存在两个明显的缺陷:(1)理论模式都是基于沉积压实理论建立起来

的,而实际上几乎所有的地质作用都要影响到地层压力的稳定;(2)经验方法一般都是通过单一的地层测试参数与单一的地球物理参数建立起来的,没有考虑不同因素间的相互制约.

松辽盆地深层具有构造运动期次多、构造活动强烈、埋藏深、火山岩分布广、岩性复杂等特点,由于火山岩的压实作用不同于常规的沉积岩,并且成岩的后期改造作用强烈,在压实曲线中,剥蚀面的影响、断层的影响、不同沉积沉降速率的影响、火山岩的影响等很难准确剔除,以它为基准求取的地层压力也只能是近似的.综合考虑,应从两方面入手:一是用于计算的函数映射关系式不可以人为规定,而是要根据实际数据的对应关系来确定;二是要尽可能采用可靠的、多类型的参数确定这种对应关系.实际上,这种思想就是神经网络系统用于计算的思想,利用人工神经网络建立异常地层压力与地层速度之间复杂的非线性关系.

本次研究即采用了改进的有序 BP 算法^[5].该算法每个变量受它序号前面的变量的影响,由此得出的模型为有序 BP 模型,即:

$$\frac{\partial^+ E}{\partial x_i} = \frac{\partial E}{\partial x_i} + \sum_{j>i} \left(\frac{\partial^+ E}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial x_j}{\partial x_i} \right).$$

其中:“+”表示有序微分.对于一般多层前向网络,先对其节点进行编号,以构成一有序系统.

2.2 计算参数选择

根据计算方法的需要,选择提取的参数共有三大类,它们是:钻井实测类参数,包括“D”指数、压力梯度、地层温度;声波时差测井曲线数据;地震层速度数据,由读取的速度谱换算而来.

2.3 计算过程

计算过程分为 4 个步骤:第一步为网络样本的输入(或特征量参数的输入).本次计算选用对地层压力特征反映最敏感的 3 个钻井实测参数即“D”指数、地层温度梯度、地层压力系数以及地震层速度参数.第二步称为地震层速度校正,用声波测井数据去校正地震数据,以期使地震速度数据尽量准确.第三步称为网络的学习过程,网络的学习过程由正向传播信息与反向传播信息两个过程组成.在信息正向传播过程中输出信息由输入层经隐含层逐层变换处理,并传向输出层,而且每一层神经元的状态只影响下一层神经元的工作状态.如果在输出层得不到期望输出,则转入信息反向传播过程,即将误差信号沿原来的连结通路返回,通过修改各层神经元之间的

①高章伟.用地震资料预测地层压力.物探局物探地质研究院(内部资料),1990.

连接强度和阈值,以便使期望输出与实际输出之间误差达到最小,最后可求得一组固定的连接链,到此完成学习过程.第四步称为工作过程,即利用已经训练好的压力系数网络和地震层速度网络外推,计算全区的地层压力系数.每一个层位都这样做,即可以得出各个层位的压力系数.

3 孔隙流体压力特征及成因分析

3.1 特征分析

(1)研究区断陷位置上压力类型自上而下的顺序为低压、正常、高压、正常、低压、超低压.正向局部构造部位压力类型自上而下的顺序为低压、正常、高压.(2)压力囊分三类:超高压囊、高压囊、低到超低压囊.其中登娄库组内为高压,侏罗系下部的沙河子组、火石岭组内为低压至超低压囊,而在营城子组的断坡、断坪一侧也有超高压囊.(3)压力囊在登娄库组内一般为扁圆形,而侏罗系内一般为半圆形或不规则形.

3.2 异常压力的成因

目前人们侧重于对异常高压的研究,因为异常高压较异常低压更为常见,所以对异常高压的产生原因研究较为深入.实际上异常低压在世界许多盆地中均有分布,随着勘探工作的深入,异常低压的发现逐渐增多,对油气勘探的影响也越来越大.美国东南部得克萨斯 100 多个油气田(藏)中,属于常压的占 51%,属于高压或超高压的占 30.5%,属于低压或超低压的占 18.5%.据对世界 160 余个知名油气藏的统计,属于常压的占 37.5%,属高压或超高压的占 47.7%,属低压或超低压的占 14.8%.

3.2.1 异常高压的影响因素 (1)压实作用.主要是欠压实作用,多数学者认为是在沉积过程中压实与排水作用不平衡的结果.(2)构造作用.包括区域性抬升、褶皱、断层、滑坡、崩塌、刺穿(盐岩或泥、页岩)等.区域性抬升、隆起是造成异常压力的重要因素,当某一深度下的正常压力系统整体抬升,而压力保持状况不变,则在浅层形成超压系统.(3)烃的生成.在逐渐埋藏过程中有机质转变成烃也引起流体体积的增加,并最终导致形成异常压力封隔体.(4)



图1 松辽盆地徐家围子断陷压力系数剖面

Fig. 1 Pressure coefficient section of Xujiaweizi fault basin in Songliao basin

水热增压. 随埋藏深度的增加而温度升高, 孔隙水的膨胀速率大于岩石的膨胀速率. 如果孔隙水的排出受阻, 那么孔隙压力就会增大. (5) 蒙脱石向伊利石转变. 大约在 $90 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$, 蒙脱石开始向伊利石转变, 并排出大量水. 如果岩石是封闭的, 那么所释放出的水伴随孔隙流体的热膨胀, 将导致地层压力高于正常值. (6) 渗透作用. 指浓度低的水体经过半渗透层向浓度高的水体进行物质传递的过程. 在隔离带中, 渗透流也可产生高压异常. (7) 浮力作用. 烃类 (特别是天然气) 和水之间的密度差异可以在烃聚集层的顶部产生异常压力. 烃类聚集时间越长, 烃与周围水的密度差异越大, 异常超压越大.

3.2.2 异常低压的影响因素 除了因开采油气、水而导致的低压外, 国内外对低压的成因认识主要有以下几点: (1) 抬升和剥蚀. 地下孤立的岩石被抬升后, 地层温度降低, 水体积也就相应下降, 从而引起孔隙压力的减小. 由于基质膨胀而导致的孔隙度增大, 也会引起孔隙压力的降低. (2) 饱和和天然气藏的埋深. 低压可以出现在天然气饱和的岩石或非压实性的岩石 (如白垩) 中. 天然气的热压力随埋深增长的速率小于静水压力的增长, 并且天然气可溶于任何水中, 所以才产生低压异常. (3) 非均衡流. 在承压含水层被低渗透带与补给区隔离的条件下, 由于排出量大于补给量, 所以产生低压异常. 通过含水层内水头的精确分析可以确定等势面的斜率. (4) 封闭层泄漏. 如果超压的、饱和和天然气藏的封闭层泄漏, 那么只有在压力产生速率大于损失速率的情况下才能维持超压状态. 当压力的损失速率超过生成速率时, 压力便会逐渐减至正常, 甚至出现低压异常. 由于相对渗透率的原因, 水不能流入饱和天然气的岩石, 即使水饱和带的压力大于天然气饱和带的压力. 这种机制可以解释欠压实沉积物中的低压异常现象. (5) 渗透作用. 如果隔离带中水的浓度较低, 那么水就会通过半渗透性层向外渗流, 从而导致在隔离带中形成低压异常. (6) 流体的排出. 地下流体 (油、天然气、水等) 从储集体中排出后, 会导致地层压力的减小, 从而形成低压异常. (7) 水平面降低. 正常静水压力的计算都基于水柱到达地表这样一个假设, 当水平面显著低于地表 (例如在中东地区) 时, 就会显示为低压异常. 异常压力的成因有多种, 一种异常压力现象可能由多种影响因素所致, 其中包括地质、物理、地球化学以及动力学因素. 所以对某一特定研究区而言, 应该具体问题具体分析, 找出产生异常压力的

主要因素. 在对含油气盆地的压力场进行研究时, 要从动态观点出发, 分析压力场的形成、演化过程.

3.3 本区异常压力的成因

如前所述, 本区深层既有异常高压, 也有异常低压, 前者主要出现在登二段和营城组, 后者主要出现在登四段和火石岭组.

3.3.1 异常高压的成因 (1) 天然气的生成作用. 本区深层有两套主要烃源岩发育, 一套为登二段, 另一段为沙河子组. 其他层位虽然也有一些生烃潜能, 但因源岩数量少, 所以不能作为主力烃源岩. 登二段烃源岩为灰、灰绿、褐灰色泥岩, 有机碳质量分数为 0.740% , 氯仿沥青“*A*”质量分数为 0.088% , 总烃质量分数为 0.0213% , 干酪根类型为 II—III 型. 沙河子组烃源岩为黑色泥岩和煤层, 有机碳质量分数为 1.216% , 氯仿沥青“*A*”质量分数为 0.0043% , 总烃质量分数为 0.0157% , 干酪根类型为 II—III 型. 登二段的埋深为 $2700 \sim 3500 \text{ m}$, R_o 值一般在 $1.8\% \sim 2.2\%$ 之间. 因此, 登二段目前主要处于干气生成阶段. 随温度的增高, 热裂解作用使烃的 C—C 链不断断裂, 甲烷的生成量越来越多. 干酪根在热降解生成石油和甲烷气体等烃类的同时, 也产生大量水和非烃气体 (主要为 CO_2), 这些流体的体积比原来有机物质的体积大约增加了 $2 \sim 3$ 倍, 因此引起泥岩中孔隙流体压力的大幅度提高, 尤其是烃类和非烃类气体的生成, 它们先在水中饱和而后又形成大量游离气体, 这些气体不仅堵塞孔隙通道, 而且当温度升高时还进一步膨胀, 从而促使烃源岩层中的异常高压进一步提高. 而沙河子组除在边缘地带埋深为 $3000 \sim 3500 \text{ m}$, 大范围内埋深大于 3500 m , 烃的生成能力明显降低, 甚至消失, 因而除边缘地带存在异常高压外, 本组地层中孔隙流体压力变化不显著. (2) 差异压实作用. 泥岩的压实系数与岩石中粘土矿物成分、颗粒大小、沉积速率、地温及构造应力等因素有关. 登二段泥岩累计厚度为 $50 \sim 100 \text{ m}$, 占地层厚度的 50% . 沙河子组湖相泥岩的厚度一般在 $200 \sim 500 \text{ m}$, 厚者可达 1000 m 以上. 在上覆岩层的负荷压力下, 随埋藏深度的增加, 泥岩孔隙度有逐渐减小的趋势, 在 1200 m 深处, 泥岩孔隙度为 8% , 之后逐渐降低; 但大约在 $2600 \sim 3000 \text{ m}$ 处, 孔隙度明显偏向高值一方, 表明此带存在欠压实现象. 从沉积学角度看, 三角洲前缘和中深湖环境中容易出现欠压实作用. 因为在三角洲和湖泊转换地带存在地形坡度的突然变化, 而由于沉积物供给充分, 沉积速率高, 致



图2 昌德东地区营城组沉积相与压力系数叠合图

Fig. 2 Overlay map of sedimentary facies and pressure coefficient of Yingcheng Formation in the eastern Changde

使下覆泥岩中的水不能及时排出.中深湖环境中以泥岩沉积为主,粗碎屑物质甚少,随泥岩的厚度的积累,深部泥岩的孔隙度也会偏离正常压实曲线.在昌德东地区营城组上部沉积相与压力系数叠合图中(图2)可以看出,在三角洲或扇三角洲前缘地带压力系数存在明显高异常,随湖泊泥岩厚度的增大,压力系数值也逐渐增高.

综上所述,本区异常高压是由烃的生成、差异压实共同作用而导致.

3.3.2 异常低压的成因 异常低压产生的各种原因可归纳为三个方面:承压系统的等高位置变化、孔隙空间体积增大或地下流体体积的减小.本区实际情况对低压异常产生的因素主要表现在岩层抬升,以及流体的运移方面.

(1)抬升剥蚀.沙河子组二段沉积末期,本区开始出现抬升,断陷萎缩,湖区缩小.沙三段沉积末期,抬升加剧,地层遭受剥蚀,形成区域性不整合面.营城组沉积初期,盆地再次发生裂陷作用,并伴随强烈的火山喷发作用.营城组沉积末期,盆地再次大规模

抬升并遭受剥蚀,结束了断陷的历史.登一段是在区域构造抬升之后开始沉降并接受沉积的,沉积范围较小;登二段时期湖泊扩张,形成一套非补偿沉积;登三段沉积时,碎屑供应充分,河流体系发育;登四段末期盆地抬升并遭受剥蚀.所以,本区深层地层曾多次抬升并被剥蚀.并非所有的地层抬升剥蚀都可造成孔隙流体压力的降低.根据定量计算的模拟试验,有两种情况可导致两种不同的结果.一种情况是,地层抬升剥蚀后,由于岩石的弹性回升效应和温度降低,造成孔隙体积增加和孔隙压力降低;之后,盆地沉降并沉积致密封闭层;这样剥蚀面上下就成为两个相互独立的系统,流体不能进行交换和流动,因而在遭受剥蚀的地层中出现低压异常.另一种情况与之相反,如果剥蚀面之上沉积了渗透性储集岩,那么因剥蚀而造成的孔隙压力减小的状况不能长久维持,随着沉降压实和流体的流入,低压异常会逐渐消失.登娄库组顶部剥蚀面之上沉积了巨厚泥岩夹薄层砂岩的区域性盖层,可作为封闭层,因此在登四段地层中存在低压异常.同理,火石岭组上部为沙河子组巨厚泥岩盖层,也为火石岭组中的低压异常的保存起了积极作用.(2)流体的运移.由于流体运移或散失而导致孔隙压力降低的问题容易理解.既然流体的生成、流入可以导致孔隙压力增高,那么当流体运移别处或通过通道散失也就相应导致压力下降.本区沙河子组泥岩为主力烃源岩,但该组地层下部已过成熟并不再生烃,它原已生成的油气已经向上运移或散失,所以造成孔隙压力出现一些低压异常.

4 结论

松辽盆地深层所具有的火山岩分布面积广,构造运动期次多,沉积压实作用强烈等特点,决定其孔隙流体压力的组成与分布必然十分复杂,因此,孔隙流体压力的预测不能简单地套用前人的方法,神经网络计算技术不失为一种可行方案.

参考文献:

- [1] 崔宝琛,李思田.沉积盆地中的异常压力及其与油气运聚的关系[J].长春地质学院学报,1997,10(增刊):152~159.
- [2] 真柄钦次.压实与流体运移[M].陈荷立译.北京:石油工业出版社,1981.34~35.
- [3] 刘天佑,李思田.地层压力预测方法及其在南海北部构

- 造 - 热体制分析中的应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(1): 84~88.
- [4] 徐怀大. 地震地层学解释基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990. 124~125.
- [5] 王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1995. 279~302.

PREDICTION OF PORE-FLUID PRESSURE IN DEEP STRATA OF SONGLIAO BASIN

Liu Wenlong¹ Li Sitian¹ Sun Dejun¹ Chai Wenhua² Zheng Jiandong²

- (1. *Department of Energy Geology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*;
2. *Research Institute of Daqing Oil Administration, Daqing 163712, China*)

Abstract: Pore-fluid pressure, a fluid state parameter, is one of important factors for the analysis of basin dynamics, hydrocarbon reservoir and the prediction of oil and gas. The forecasting model of pore-fluid pressure should include various geological effects. At the same time, the relationship between numerous real stratigraphic testing parameters and various geophysical parameters is employed to choose an appropriate mathematical model. The present paper is focused on the prediction of oil and gas by means of neural network computing technique, and on the analysis of possible origins of pore-fluid pressure.

Key words: pore-fluid pressure; neural network; oil and gas migration.

* * * * *

(上接 136 页)

- [7] 赫英. 济阳盆地(胜利油田)内外找寻新的金资源的可能性[J]. 矿床地质, 1998, 17(增刊): 925~928.
- [8] 张义纲. 天然气的生成聚集和保存[M]. 南京: 河海大学出版社, 1991. 141~148.

THERMAL FLUID ACTIVITIES AND THEIR EFFECTS ON WATER-ROCK INTERACTION IN DONGYING SAG

Zeng Jianhui

(*Basin & Reservoir Research Center, Petroleum University, Beijing 102200, China*)

Abstract: A large number of thermal fluid activities that occurred in Dongying sag can be proved in terms of gas geochemistry, organic matter thermal metamorphism, homogeneous temperature in fluid inclusions, palaeotemperature gradient, diagenetic mineral, heavy metal element and magmatic activity. The thermal fluids migrate along the deep and large faults whose activities are relatively strong to the shallow parts, and at the same time the corresponding migration pattern centers on the lateral forced convection. In addition, the thermal fluids in the Dongying sag are characterized by the multi-phase activities. The changes in temperature field and geothermal gradient and the mixture of some inorganic matters into the thermal fluids both result in the differences in water-rock interaction intensities and types.

Key words: thermal fluid activity; water-rock interaction; Dongying sag.