

测井信息在前陆挤压区地应力分析中的应用

赵 军¹, 蒲万丽¹, 王贵文², 李 军³

(1. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000;

2. 石油大学地球科学系, 北京 102249; 3. 江汉石油学院地球物理系, 湖北 荆州 434102)

摘 要: 中国西部前陆盆地主要以挤压构造应力为主, 地表与地下构造异常复杂。在油气的勘探与开发过程中既需要精细的地应力研究与预测, 也需要简单易行、经济实用的近似方法。本文通过对稳定构造地区与挤压构造区地球物理测井信息的深度域特征进行分析和对比, 提出了一种基于测井信息来计算最大岩石主应力的统计模型法。应用该方法对塔里木盆地库车山前挤压应力区进行了实际计算, 其结果与实验结果相符。在此基础上对山前挤压区地应力与油气藏分布的关系进行了探索。

关键词: 测井信息; 挤压构造; 地应力; 统计模型; 油气藏

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

0 引言

中国西部前陆盆地主要以挤压构造应力为主, 地表与地下构造异常复杂。随着油气勘探重点向西部的转移, 油气勘探与开发过程中迫切需要精细的地应力研究与预测。近年来, 普遍采用在假设的边界条件下建立以弹性力学理论为基础的地应力数学模型, 再应用地球物理测井信息(包括声波全波列、密度等)确定模型参数, 对地下地应力进行连续计算与分析^[1]。该方法的缺点在于模型选择中科学依据不充分, 且模型的简化条件导致计算误差较大。本文根据新的方法和思路, 借助地球物理测井资料所提供的大量地质信息来确定前陆挤压构造应力区最大主应力大小, 取得了很好的应用效果。该方法的优点是快捷方便、成本低、计算精度高。

1 基于弹性力学的测井地应力分析

以弹性力学理论为基础, 经过一定的假设条件和边界条件可以推演出用于计算地下原地应力的数学模型, 用地球物理测井信息(包括声波全波列、密度等)确定模型参数, 对地应力进行连续计算与分析。不同的研究者根据不同的条件提出了众多的地应力模型, 石油大学

收稿日期: 2004-04-09

基金项目: 本文为国家科技攻关项目专题《塔里木盆地库车坳陷山前构造油气藏测井地应力分析研究》(99-111-01-01-02)的部分研究成果。

作者简介: 赵 军(1970-), 男, 工学博士, 高级工程师, 地球物理勘探专业。

黄荣尊教授的黄氏模型在油田得到较广泛的应用^[2]。其模型如下：

$$\sigma_v = \int_0^H \rho(h) g dh$$

$$\sigma_H = \left(\frac{u_s}{1 - u_s} + str_1 \right) (\sigma_v - aP_p) + aP_p$$

$$\sigma_h = \left(\frac{u_s}{1 - u_s} + str_2 \right) (\sigma_v - aP_p) + aP_p$$

式中 σ_v , σ_H , σ_h , 分别为垂向、水平最大、水平最小地应力，单位 MPa； ρ 为密度，单位 g/cm^3 ； H 为深度，单位 m； a 为有效应力系数； P_p 孔隙压力，单位 MPa； u_s 为静泊松比； h 为地层厚度，单位 m； g 为重力加速度，单位 N/s^2 ； str_1 , str_2 为构造校正量（必须分段考虑）。

可用依据阵列声波测井得到的纵、横波速度确定模型力学参数：

$$U_d = \frac{0.5(V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1}$$

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \times 10^3$$

式中， U_d 为动态泊松比； E_d 为动态弹性模量，单位 MPa； V_p 为纵波速度，单位 m/s； V_s 为横波速度，单位 m/s。

该方法由于模型选择中科学依据不充分，且模型的简化条件导致计算误差较大。

2 新方法的基本原理

泥岩压实实验研究表明，在正常压实条件下，泥岩孔隙度随上覆压力（或埋深）呈指数递减规律^[3]，即有：

$$\phi = \phi_0 e^{-cz}$$

式中， ϕ 为任意深度处的泥岩孔隙度，单位 %； ϕ_0 为泥岩初始孔隙度，单位 %； z 为埋藏深度，单位 m； c 为地区常数。反映在单对数坐标图上为一条直线（图 1），这就是通常的埋藏压实曲线。注意这里条件是正常压实条件，受均匀的随深度呈线性增大的重力作用。

当岩石受到额外的侧向构造挤压应力的作用时，泥岩的孔隙度会进一步减小，使得泥岩孔隙度偏离正常压实趋势线（图 1）。这就是所谓的超压实作用。这种额外的附加

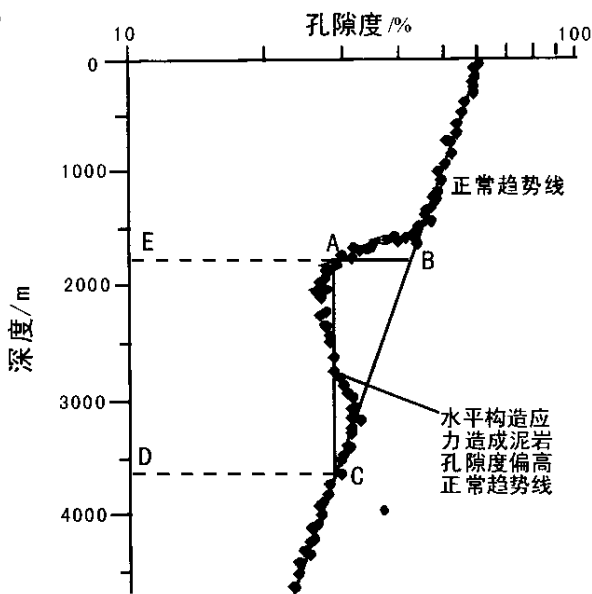


图 1 计算附加构造挤压力原理

Fig.1 Principle of determining additional structural compressive stress.

构造地应力可以通过偏移量的大小来估算。图1中A点的孔隙度值明显偏离正常趋势线，A点在趋势线上的水平、垂直交点分别为B、C两点。利用B、C两点与纵坐标的交点E、D之差（即 ΔED ）可以估算附加构造应力大小（即深度差与岩石平均密度之积）。因此，可以通过正常趋势线方程与偏移量来求取附加构造应力。

3 模型的建立

3.1 基本思路

测井信息（电阻率、声波测井等）可以很好地反映地层孔隙度的大小，因此在实际研究过程中，并不直接用孔隙度来建立模型，而是用测井电阻率（ R_t ）和声波时差（ D_t ）来建立模型。对山前构造区地应力进行定量计算的基本思路是：①在稳定构造地区（即构造挤压应力较弱的地区，如前陆盆地隆起过渡带等）选取厚层泥岩段，之所以选取泥岩是因为泥岩沉积相对稳定，且易于压实，对地应力反映敏感^[4]。统计该泥岩段的测井信息（ R_t ， D_t 等）与最大地应力（压力）之间的关系，建立估算地应力的定量数学模型。②利用模型对山前构造带的地应力进行估算，并与实验结果对比、修正模型。

3.2 模型的建立

统计模型的建立是从分析稳定区测井信息深度域特征开始的。轮南地区是库车前陆挤压型盆地的隆起过渡带，构造较稳定，侧向挤压应力较弱，可以认为轮南稳定区地应力主要来源于地层自身重力，该力近似为垂向地应力，也是最大地应力。

统计轮南地区测井电阻率、声波时差随深度规律性变化，这种规律性变化实际上反映了电阻率、声波时差与地应力之间的关系。稳定构造地区垂向地应力可采用下式来计算：

$$\sigma_v = \int_0^H \rho(h) g dh$$

式中， σ_v 为垂向地应力，单位MPa； ρ 为密度，单位 g/cm^3 ； g 为重力加速度，单位 N/s^2 ； h 为深度，单位m。

在有连续的密度测井资料情况下，可以很方便地求得垂向地应力，在没有密度测井资料情况下，则分段利用砂、泥岩密度及其比例计算垂向地应力。将地应力与测井数据作交会图，建立地应力与电阻率、声波时差的关系（图2）。

在大量数据统计的基础上，针对不同实际情况，统计轮南地区实验分析最大主应力与声波时差和电阻率（该测井数据来源于轮南油田

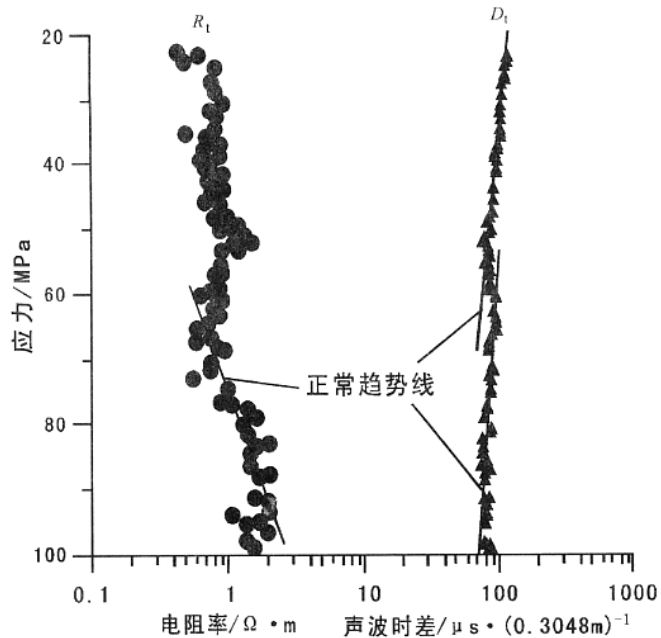


图2 稳定区最大主应力与电阻率、声波时差的关系

Fig.2 Relationships of the maximum principal stress to resistivity and acoustic slowness-time in the structurally stable field.

LN4、LG1 井，测井仪器均为 CSU 的声感系列。其仪器的稳定性、技术指标及误差范围均能满足本次研究的精度要求)的关系，使用常规的统计软件(如 Excell)可得到地应力模型：

$$\sigma_{\max} = -86.8556 \times \log(D_t) + 437.279$$

($D_t < 260 \mu s/m$)

$$\sigma_{\max} = -172.874 \times \log(D_t) + 837.938$$

($D_t \geq 260 \mu s/m$)

$$\sigma_{\max} = 26.3337 \times \log(R_t) + 71.7665$$

($R_t < 5 \Omega \cdot m$)

$$\sigma_{\max} = 13.4411 \times \log(R_t) + 82.6613$$

($R_t \geq 5 \Omega \cdot m$)

式中， σ_{\max} 为最大地应力，单位 MPa； R_t 为电阻率，单位 $\Omega \cdot m$ ； D_t 为声波时差，单位 $\mu s/m$ 。

3.3 电阻率、声波时差对地应力的敏感性

研究发现，电阻率、声波时差对地应力的敏感性有不同特征。

当岩石承受的总地应力较弱时，岩石保持较高孔隙，电阻率对地应力响应不灵敏(图 3)但声波时差能有效地反映地应力，因此只能采用声波时差建立地应力模型。

在岩石受到强地应力作用下，岩石致密，声波时差对地应力反映不灵敏，而电阻率能灵敏地反映地应力存在(图 3)，此时，应当采用电阻率建立地应力模型。

在中等地应力作用区，既可用声波时差建立模型，也可用电阻率建模型。

4 计算结果与实验对比

利用应力模型对山前挤压带的 KL2 井地应力进行计算(所使用的测井数据来源于 CSU 测井系列，采集的数据达到了评价要求)，确定应力在垂向上的分布规律(图 4)。将计算结果与声发射实验(该实验数据由石油大学(北京)岩石力学实验室提供。该实验室为国家“211”工程重点建设实验室和 CNPC 重点实验室。该

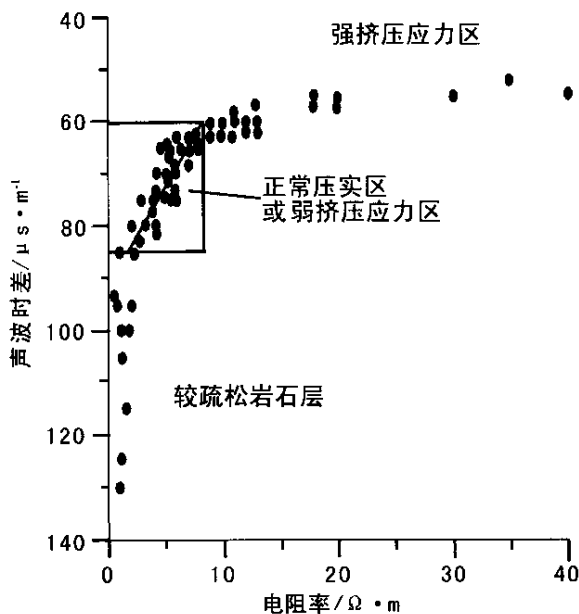


图 3 不同应力条件下声波时差和电阻率交会特征

Fig.3 Characteristics of crossing of acoustic slowness-time and resistivity under different stresses

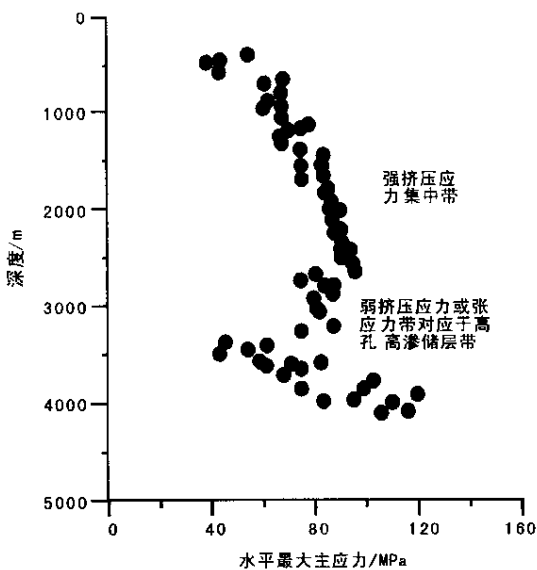


图 4 KL2 井最大地应力随深度变化图

Fig.4 Maximum principal stress of well KL 2 as the function of the depth.

实验数据由美国著名的 PAC 公司 LOCAN - AT 声发射仪完成) 确定的地应力进行对比, 相互检验。

稳定区的计算地应力与实验结果非常接近 (表 1), 挤压构造区计算地应力与实验结果相比较, 误差较稳定区误差大, 但仍具有较好的一致性 (表 1), 表明模型是可靠的。

表 1 测井地应力计算结果与实验分析结果对比

Table 1 Correlation of the calculated stresses from logging with the measured results from lab.

参 数 地 区	深 度 /m	电 阻 率 / $\Omega \cdot m$	声 波 时 差 / $\mu s \cdot m^{-1}$	测井计算 最大主应力 /MPa	实验分析 最大主应力 /MPa	相对 误差 /%
稳定 构造区	3860	1.4	266	85.95	86.0	0.058
	4020	2.0	266	85.95	88.0	2.33
	4045	1.3	256	90.36	88.0	2.68
	4175	2.6	246	74.94	90.0	5.48
	4275	2.7	246	94.94	92.0	3.2
	4500	3.5	240	98.09	95.0	4.1
	4550	3.5	236	99.71	96.0	3.85
	4630	3.5	230	102.9	97.0	6.08
	4750	3.6	249	93.4	98.0	4.69
	4850	3.3	253	91.09	100.0	0.91
	4960	3.2	230	102.9	101.0	1.88
	4980	3.0	246	94.9	98.0	3.16
挤压 构造区	3626	3.2	263	87.4	92.3	5.3
	3629	3.2	263	86.8	89.7	3.2
	3855	6	246	103.0	94.6	8.6
	3933	6	230	111.6	104.8	6.5
	3988	6	220	108.1	105.3	2.6
	4358	10	207	115.3	112.3	2.68

5 地应力与油气分布的关系

确定地应力分布状况可以很好地指导我们在山前构造挤压区寻找保存良好的油气藏。研究发现, 强烈的地应力作用并不意味着在所有地区都是均匀的等同作用。在局部构造环境和地质环境的影响下, 局部挤压应力较弱甚至应力性质发生变化, 由压性应力变为张性应力, 这时, 在这些地带可以形成高孔高渗的储集条件, 与其它石油地质条件结合可以形成大型的油气藏^[5]。

山前地区的地应力分布形式是很复杂的, 即所谓压中有张, 张中有压。这种应力的非均质性导致了储层的非均一性。

山前构造带由于区域滑脱面的存在 (古近系膏泥岩、侏罗系中煤系地层) 在区域挤压应力作用下形成了特殊的构造样式和构造的多层次性, 一般浅层为高陡复杂构造, 深部为宽缓背斜构造 (图 5)。与此相对应, 局部应力场性质是不相同的。浅部高陡构造带表现为挤压

应力, 深部宽缓构造为弱挤压应力或张性应力, 这种环境则有利于储层保持较高的孔渗条件^[6]。西气东输主力气田克拉 2 气田就是在这样的背景下形成的^[7]。总之, 在山前强挤压背景下, 局部构造的弱应力区十分有利于油气的储集与保存, 是形成大油气田的有利区带。

6 结论

本文介绍的方法既适用于地应力较弱的构造稳定区, 也适用于强烈挤压的构造变形区, 模型的适应性较广。但该统计模型是基于泥岩的地球物理测井参数建立的, 在某些泥岩不发育的地区应用会受到一些限制。该方法的特定条件是沉积过程中没有受到构造作用, 这与实际地质情况有一定距离, 故只是一种近似的方法, 但不失为一种简单易行、经济实用的方法。

通过新方法估算的地应力值, 可以反求基于弹性模型的参数, 这样可充分发挥 2 种方法各自的优势。该方法可以在井筒建立连续的地应力剖面, 从而可以有效地分析地应力在垂向上的分布与变化, 通过多井剖面的建立, 可以从平面上分析地应力的变化, 为寻找可能的油气藏提供依据。

将此方法计算的地应力与实验测量地应力的结果进行对比分析, 将进一步提高模型预测的精度, 增加其计算的可信度。

参 考 文 献

- [1] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 146 ~ 156.
- [2] 黄荣尊. 泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究 [J]. 钻井液与完井液, 1995, 12 (3): 56 ~ 61.
- [3] 真柄钦茨. 压实与流体运移 [M]. 陈荷立, 邱世祥, 汤锡元译. 北京: 石油工业出版社, 1981. 43 ~ 49.
- [4] 谭成轩, 孙 叶, 王连捷. 地应力测量值得注意的若干问题 [J]. 地质力学学报. 2003, 9 (3): 275 ~ 280.
- [5] 严 伦, 等. 构造与油气圈闭 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995. 121 ~ 125.
- [6] 袁嘉音, 周新桂, 肖玉茹. 塔里木盆地油气勘探与潜力分析 [J]. 地质力学学报. 2002, 8 (3): 248 ~ 257.
- [7] 朱中谦, 王振彪, 李汝勇, 等. 异常高压气藏岩石变形特征及其对开发的影响——以克拉 2 气田为例 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14 (1): 60 ~ 64.

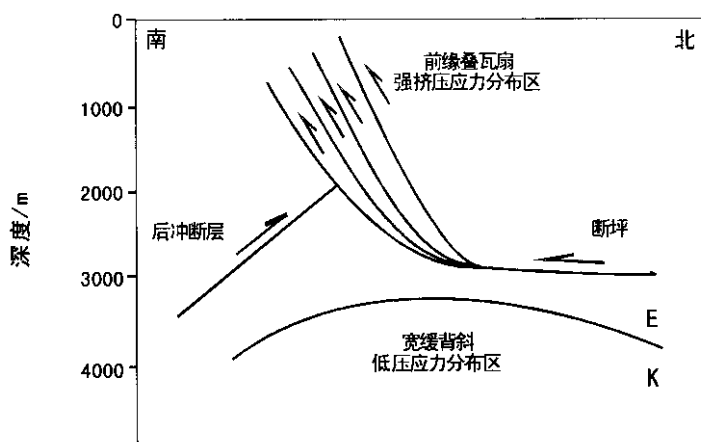


图 5 地应力分布与构造样式关系

Fig.5 Relationship between stress distribution and structural style

APPLICATION OF LOGGING INFORMATION IN THE ANALYSIS OF THE GROUND STRESS IN THE FORELAND COMPRESSIVE AREA

ZHAO Jun¹ , PU Wan-li¹ , WANG Gui-wen² , LI Jun³

(1. *Tarim Oil Company , Petrochina , Korla Xinjiang 841000 , China* ; 2. *Department of Earth Sciences , University of Petroleum , Beijing 102249 , China* ; 3. *Department of Geophysics , Jiangnan Petroleum Institute , Jingzhou 434102 , Hubei*)

Abstract : Compressive tectonic stress is the main stress in foreland basins in western China , where surface and subsurface structures are very complicated . Petroleum exploration and development call for not only the intensive study and prediction of ground stresses but also simple , economical and practical approximate methods . Through a comparative study of the distribution characteristics of the geophysical logging information in the structurally stable field and those in the structural compressive field , a statistical model for determining the maximum principal in-situ stress based on the logging information is proposed . This method is applied in the calculation of the stress in the Kuqa piedmont compressive area of the Tarim basin . The calculated result coincides with the result of the acoustic experiment . On that basis , the relationship between the ground stress distribution and the distribution of petroleum accumulations in piedmont compressive areas is studied .

Key words : logging information ; compressive structure ; in-situ stress ; statistical model ; oil-gas

(上接 24 页)

FAULT SEAL MODEL OF THE CENTRAL UPLIFT , DONGYING DEPRESSION

XU Shou-yu , LI Xue-yan

(*College of Geo-resources and Information , University of Petroleum , Shandong Dongying 257061 , China*)

Abstract : Fault systems in the Central uplift of the Dongying depression are complex . The fault sealing properties directly control the formation and distribution of the oil/gas accumulation as well as its size and type . Large oil/gas accumulations may form near a fault with good sealing properties , while small accumulations or even no accumulations occur near a fault with poor sealing properties . Take for example the lithological combination seal model , principal stress seal model and shale smear zone seal model , a fault seal model is established and fault sealing properties are quantitatively analyzed and evaluated in the Central uplift of the Dongying depression . The optimal normal stress of the sealing fault in the study area is about 40 to 50 MPa and the shale smear factors for the sealing fault is commonly < 2.6 . To judge whether a particular fault has sealing properties requires an integrated analysis , and one must not make single-factor analysis simply .

Key words : fault seal ; sealing model ; lithological distribution ; shale smear zone ; normal stress ; Dongying depression ; Central uplift